

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Sabrina Soares

Um curso de Mecânica Quântica
para professores de Física do Ensino Médio

Dissertação realizada sob orientação do
Dr. Marco Antonio Moreira, apresentada ao
Instituto de Física da UFRGS, em preenchi-
mento parcial dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Ensino de Física.

Porto Alegre

2009

AGRADECIMENTOS

Este trabalho proporcionou uma experiência desafiadora, que foi encarada com muita dedicação e possibilitou um engrandecimento pessoal e profissional. Tive o apoio de muitas pessoas, mas gostaria de agradecer em especial a meu marido, Marco, que sempre esteve disposto a me ajudar e pela enorme paciência com que acompanhou este processo. Agradeço à Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) e ao coordenador do curso de Licenciatura de Física da Unisinos, professor Carmo Heinemann, por terem possibilitado a aplicação desta proposta.

Não poderia deixar de agradecer ao meu orientador, professor Marco Antonio Moreira, que colaborou muito para a realização deste trabalho. Agradeço também à professora Victória Elnecave Herscovitz, que me atendeu várias vezes para discutirmos algumas dúvidas e à colega Iramaia Jorge Cabral, que leu esta dissertação com paciência e colaborou com ótimas sugestões.

RESUMO

No Ensino Médio a maioria dos professores de Física se prende aos conteúdos de Mecânica Clássica. Preferem aprofundar assuntos como cinemática e plano inclinado do que discutir um pouco de Física Moderna. Entretanto, os avanços tecnológicos estão fundamentados em conceitos da Física Moderna, como por exemplo, a evolução da computação quântica, transmissão e processamento de dados, todos os tipos de sensores utilizados hoje em dia. Isto torna com certeza este assunto motivador e de interesse dos alunos no Ensino Médio, além de importante para sua formação. Por isso, é relevante que se discuta com alunos da educação básica tópicos mais importantes da Física Moderna, entre eles a Mecânica Quântica. Nosso trabalho apresentará um curso sobre este assunto com a finalidade de dar suporte aos professores para tal discussão. Muitas vezes a Mecânica Quântica não é abordada porque os professores não têm conhecimento suficiente, sentem-se inseguros para desenvolver o assunto, devido ao fato de em algumas licenciaturas este tópico de Física Moderna ser pouco trabalhado ou à falta de materiais didáticos disponíveis. Assim sendo, este curso tem como objetivo fornecer uma base teórica aos professores sobre conceitos de Mecânica Quântica, além de uma proposta pedagógica e metodológica para trabalhar o tema no Ensino Médio. Foram elaborados textos de apoio ao professor, incluindo simulações e modelagens, que possibilitam a participação do professor como aluno, de forma a tornar mais eficiente o processo de ensino-aprendizagem e permitir a transposição didática. Durante as discussões sobre os conceitos de Mecânica Quântica serão sugeridas formas de se tratar o assunto no Ensino Médio. Na proposta metodológica procurou-se contextualizar o assunto, de forma potencialmente significativa, despertando o interesse do professor-aluno para tratar o assunto no nível Médio.

ABSTRACT

At secondary school level most physics teachers bind to the content of classical mechanics. They prefer to deepen in subjects such as kinematics and sloping ramps rather than discussing a little of modern physics. However, technological advances such as the evolution of quantum computation, transmission and processing of data, and all kinds of sensors used nowadays are founded on concepts of modern physics. This fact makes this subject motivating and of interest to secondary school student. Because of that, it is relevant that we discuss with basic education students important topics of modern physics, among them, quantum mechanics. This study presents a course on the subject aiming at providing support to physics teachers on such topic. Many times quantum mechanics is not approached because teachers do not know enough about it; they feel insecure to teach this subject, even if only conceptually, due to the fact that in many teacher preparation courses modern physics is worked little, either that or there is a shortage of didactic materials. So, the objective of the course was to provide a theoretical basis to teachers on quantum mechanics, besides a pedagogical and methodological proposal to work on this subject at the secondary level. We prepared texts to serve as support to teachers. Simulations and modeling were used to enable the participation of teachers as students in such a way to make the process of teaching-learning more efficient and allow for didactic transposition. During the discussions about the concepts of quantum mechanics, suggestions on ways of working with it in the secondary level were made. In the methodological proposal we tried to contextualize the subject in a potentially meaningful way, awakening the interest of the student-teacher to deal with it at high school level.

SUMÁRIO

Agradecimentos	
Resumo	
Abstract	
Cap 1: Introdução	7
Cap 2: Fundamentação teórica	10
2.1. Introdução	10
2.2. A aprendizagem significativa de Ausubel	10
2.3. O interacionismo social de Vygotsky	13
2.3.1. A zona de desenvolvimento proximal	14
Cap 3: Breve revisão da literatura	16
Cap 4: Metodologia aplicada	25
4.1. Local e aplicação do curso	25
4.2. A proposta de trabalho	25
4.3. Primeiro encontro	26
4.4. Segundo encontro	30
4.5. Terceiro encontro	35
4.6. Quarto encontro	45
4.7. Quinto encontro	60
Cap 5: Resultados	66
5.1. Análise do Mapa Conceitual da figura 64	66
5.2. Análise do Mapa Conceitual da figura 65	67
5.3. Análise do Mapa Conceitual da figura 66	68
5.4. Análise do Mapa Conceitual da figura 67	70
5.5. Análise do Mapa Conceitual da figura 68	71
5.6. Análise do Mapa conceitual da figura 69	72
5.7. Análise do Mapa Conceitual da figura 70	73
5.8. Análise do Mapa Conceitual da figura 71	74
5.9. Síntese	75
5.10. Resultados do pré e pós-teste	75
5.11. Opinião dos alunos	80
Cap 6: Conclusão	81
Referências	83
Apêndices	
APÊNDICE 1	86

APÊNDICE 2.....	90
APÊNDICE 3.....	96
APÊNDICE 4.....	97
APÊNDICE 5.....	99

Anexo

Texto de Apoio Ao Professor de Física.....	103
---	------------

Capítulo 1

Introdução

No Ensino Médio, a maioria dos professores de Física se prende aos conteúdos de Mecânica Clássica, que correspondem à física do século XVIII. Preferem aprofundar assuntos como cinemática e plano inclinado do que discutir um pouco de Física Moderna.

Entretanto, a tecnologia atual, à qual os alunos de Ensino Médio têm grande acesso, avança e é explicada a partir de conceitos da Física Moderna como, por exemplo, a evolução da computação quântica, transmissão e processamento de dados, todos os tipos de sensores utilizados hoje em dia. Isso tudo torna, com certeza, esse assunto motivador e de interesse dos alunos no Ensino Médio. Por isso a importância da inserção deste assunto no ensino básico. Segundo a LDBEN (Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional) os conteúdos, as metodologias e as formas de avaliação devem possibilitar ao aluno que, ao final do Ensino Médio, seja capaz de compreender os princípios científicos e tecnológicos que presidem a produção moderna. Por esse motivo, é relevante que se discuta com alunos da Educação Básica tópicos mais importantes da Física Moderna, entre eles a Mecânica Quântica. Portanto, é fundamental que professores de Física do Ensino Médio trabalhem tópicos de Mecânica Quântica, de modo que os alunos tenham acesso a um conhecimento sobre a Física mais atual e interessante.

Porém, são raros os docentes que incluem algum tópico de Física Moderna no conteúdo desenvolvido na Educação Básica. Certamente existem muitos fatores para que isso aconteça como, por exemplo, o reduzido número de aulas de Física por semana e extenso programa a cumprir, mas dentre eles está a insegurança dos professores em relação a conteúdos como Mecânica Quântica, Física de Partículas e Relatividade, mesmo em nível introdutório.

Nessa perspectiva, o trabalho a seguir apresentará um curso que foi desenvolvido e colocado em prática com a finalidade de dar suporte a professores de Física para abordagem de Mecânica Quântica no Ensino Médio. Este curso fornece um embasamento teórico ao professor, para que este aproveite a proposta pedagógica e metodológica de ensino de Mecânica Quântica no Ensino Médio.

Como foi dito, muitas vezes a Mecânica Quântica não é abordada porque os professores não têm conhecimento suficiente, sentem-se inseguros para desenvolver o assunto, devido ao fato de que muitos cursos de graduação não preparam os graduandos adequadamente para a abordagem da Mecânica Quântica no Ensino Médio. Além disso, poucos livros tratam a Física Moderna de maneira didática, isto é, que consiga abordar os fenômenos de forma clara, com a atratividade que a complexidade deste conteúdo exige, para aproximá-lo do aluno. É necessário criar alternativas para que os professores consigam suprir estas deficiências e, portanto, contem com recursos instrucionais que possibilitem a inclusão da Física Moderna no Ensino Médio a partir de uma linguagem que

aproxime o aluno do fenômeno físico envolvido, proporcionando a ele a capacidade de interpretar e compreender as conseqüências de tais fenômenos.

A Mecânica Quântica é uma teoria física que descreve o mundo microscópico (escala atômica e subatômica). É a física dos componentes da matéria, átomos, moléculas e núcleos. Seus princípios fogem da visão clássica de mundo que geralmente, as pessoas possuem.

Em nosso dia-a-dia, estamos acostumados a lidar com coisas que se comportam como ondas (em um lago, por exemplo) ou como partículas (de um pó, por exemplo), sem confundir uma coisa com outra. Os objetos materiais clássicos possuem quantidades de movimento e trajetórias bem definidas. Contudo, não é possível localizar uma onda sonora em determinado ponto do espaço, já que ela se espalha por todo o espaço. As ondas não transportam matéria, apenas energia, desta forma, em vez de colidirem elas contornam obstáculos.

No mundo microscópico, partículas se movimentam sem descrever trajetórias precisas e ondas colidem como se fossem corpúsculos. A teoria quântica atribui para uma partícula aspectos ondulatórios e para a radiação aspectos corpusculares proporcionando uma visão unificada destes dois tipos de sistemas físicos.

O estado de um sistema é relacionado a uma distribuição de probabilidades, isto é, no mundo microscópico fala-se em probabilidades: probabilidade de a partícula ser encontrada em determinada posição, probabilidade de ter certo momentum, etc.

Segundo a Mecânica Quântica, é impossível determinar-se com precisão absoluta posição e momentum de partículas atômicas e subatômicas que se encontrem em um mesmo estado. Se for possível conhecer com precisão o momentum de um elétron, a indeterminação que afeta o conhecimento de sua posição o transformaria em uma “partícula não-localizada”. Na Mecânica Quântica na forma ondulatória, a posição da partícula é estudada recorrendo-se a uma função de onda.

A Física Quântica estabelece que microscopicamente a quantidade de energia de muitos sistemas é quantizada, isto é, que para estes nem todos os valores de energia são possíveis. Isso ocorre em certas situações também macroscopicamente, mas pode ser irrelevante. A própria matéria é quantizada: a massa de um objeto, por exemplo, é aproximadamente igual a um número inteiro de vezes a massa dos átomos que o compõem.

Pode-se dizer que a Teoria Quântica nasceu em 14 de dezembro de 1900. Esta data corresponde à de uma reunião da Sociedade Alemã de Física, quando Max Planck explicou a distribuição da radiação de corpo negro de acordo com a hipótese de que a emissão e a absorção de energia eletromagnética pelos átomos do corpo se dão, não de forma contínua, mas de forma discreta, descontínua. Começa então a idéia de quantização: a energia é quantizada.

Com a finalidade de desenvolver o tópico Mecânica Quântica, elaborou-se um texto de apoio ao professor e o utilizamos em um curso no qual trabalhou-se também com simulações e

modelagens que possibilitaram uma maior participação do professor–aluno de forma a tornar mais eficiente o processo de ensino-aprendizagem e permitir a transposição didática. Durante as discussões sobre os conceitos de Mecânica Quântica foram sugeridas formas de tratar o assunto no Ensino Médio.

Na proposta metodológica procurou-se contextualizar o assunto, de forma potencialmente significativa, buscando despertar o interesse do professor-aluno para tratar o assunto no nível médio.

O trabalho desenvolvido seguiu algumas concepções pedagógicas embasadas nos preceitos da aprendizagem significativa de Ausubel(1976) e do interacionismo social de Vygotsky(1988).

Segundo Ausubel, *“a aprendizagem significativa é um processo por meio do qual uma nova informação se relaciona, de maneira substantiva e não-arbitrária, a um aspecto relevante da estrutura cognitiva do indivíduo. Isto é, nesse processo a nova informação interage com uma estrutura de conhecimento específica, a qual chama de subsunçor, existente na estrutura cognitiva de quem aprende”* (Moreira, 1999, p.153).

Para Vygotsky, *“o desenvolvimento cognitivo não pode ser entendido sem referência ao contexto social, histórico e cultural em que ocorre”* e *“a internalização de significados depende da interação social, o indivíduo não tem de descobrir o que significam os signos. Ele se apropria (reconstrói internamente) dessas construções via interação social”* (op. cit., p. 109).

A aprendizagem significativa resulta então da interação dos novos conceitos com a bagagem cognitiva do aluno, mas é necessário analisar o contexto desse aluno para que o assunto abordado seja significativo para ele.

Este trabalho tem como produto final um Texto de Apoio Ao Professor de Física, que é apresentado em anexo a esta dissertação.

O curso no qual foi utilizado teve como objetivo principal fornecer uma base teórica potencialmente significativa aos professores sobre conceitos de Mecânica Quântica, além de discutir propostas pedagógicas e metodológicas para trabalhar o tema no Ensino Médio.

Nos próximos capítulos serão apresentados: a fundamentação teórica, uma breve revisão da literatura, relacionada ao tema abordado, toda a metodologia aplicada, assim como os resultados obtidos e, para finalizar, conforme já mencionado, o Texto de Apoio Ao Professor de Física.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1. Introdução

O trabalho desenvolvido seguiu algumas concepções pedagógicas embasadas nos conceitos e princípios da teoria da aprendizagem significativa de Ausubel(1976) e da teoria sócio-interacionista de Vygotsky(1988).

A teoria de Ausubel focaliza a aprendizagem cognitiva ou, mais especificamente, a aprendizagem significativa. De maneira ainda mais específica, poder-se-ia dizer aprendizagem verbal significativa receptiva. Verbal, porque Ausubel considera a linguagem como importante facilitador da aprendizagem significativa. A linguagem clarifica os significados, tornando-os mais precisos e transferíveis. Receptiva, porque embora sem negar o valor da descoberta, Ausubel argumenta que a aprendizagem significativa receptiva é o mecanismo humano por excelência, para adquirir e armazenar a vasta quantidade de idéias e informações de qualquer campo de conhecimentos. Argumenta, também, que o ensino em sala de aula é predominantemente organizado em termos de aprendizagem receptiva e o ser que aprende não precisa descobrir princípios, conceitos e proposições, a fim de aprendê-los e usá-los significativamente. (Moreira, 1999, p. 163).

A teoria de Vygotsky enfoca a interação social. Sua unidade de análise não é nem o indivíduo nem o contexto, mas a interação entre eles. A interação social é, portanto, na perspectiva vygotskyana, o veículo fundamental para transmissão dinâmica do conhecimento social, histórica e culturalmente construído. (op. cit., p.112).

2.2. A aprendizagem significativa de Ausubel

A teoria de Ausubel (2000) focaliza a aprendizagem cognitiva, aquela que resulta no armazenamento organizado de informações na mente do aluno, e esse complexo organizado é conhecido como estrutura cognitiva. Para Ausubel, aprendizagem significa organização e integração do material na estrutura cognitiva; para ele, o que mais influencia a aprendizagem é aquilo que o aluno já sabe e cabe ao professor identificar isso e ensinar de acordo. Em suas palavras, *se eu tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um único princípio, diria isto: o fator isolado mais importante que influencia a aprendizagem significativa é aquilo que o aprendiz já conhece. Descubra o que ele sabe e baseie nisso os seus ensinamentos. (Ausubel, 1980, p. VIII).*

O conceito central da teoria de Ausubel é o de aprendizagem significativa, que é um processo por meio do qual uma nova informação relaciona-se com um aspecto especificamente relevante da estrutura de conhecimento do aluno, isto é, este processo envolve a interação da nova

informação com uma estrutura de conhecimento específica, a qual Ausubel define como subsunção (um determinado conhecimento prévio). A aprendizagem significativa ocorre quando a nova informação ancora-se interativamente em conceitos ou proposições relevantes, preexistentes na estrutura cognitiva do aluno. Ausubel analisa o armazenamento de informações no cérebro humano como sendo organizado, formando uma hierarquia conceitual, na qual conceitos mais específicos de conhecimento são ligados a conceitos mais gerais. Assim, a aprendizagem significativa está na conexão interativa dos novos conceitos com a bagagem cognitiva do aluno e é necessário analisar o contexto do aluno para possibilitar que o assunto abordado seja significativo para ele.

Ao definir o problema da pesquisa, a proposta ausubeliana de hierarquizar os conceitos e proposições, começando pelos mais gerais e inclusivos, visando facilitar a aprendizagem significativa, foi objeto de reflexão e estudo. Não há dúvida de que começar pelo mais geral, em áreas de fronteiras, como Mecânica Quântica, é tarefa complicada. Mesmo assim, definiu-se começar com as idéias mais inclusivas possíveis como, por exemplo, iniciarmos o curso de Mecânica Quântica para professores de Física com o conceito de quantização, porque cremos que sem esse conceito a própria Mecânica Quântica não existiria. É nesse sentido que o consideramos mais inclusivo.

Por outro lado, Ausubel traz a idéia de aprendizagem mecânica, contrastando com aprendizagem significativa, como sendo a aprendizagem de novas informações com pouca ou nenhuma interação com conceitos relevantes existentes na estrutura cognitiva. Não há interação entre a nova informação e aquela já armazenada. O conhecimento adquirido fica distribuído arbitrariamente na estrutura cognitiva sem ligar-se a conceitos subsunções específicos.

Ausubel recomenda o uso de *organizadores prévios* que sirvam de âncora provisória para a nova aprendizagem e levem ao desenvolvimento de conceitos subsunções, quando estes não existem, a fim de facilitar a aprendizagem posterior. A utilização de organizadores prévios é uma estratégia para manipular a estrutura cognitiva, facilitando a aprendizagem significativa. Organizadores prévios são materiais introdutórios apresentados antes do material a ser aprendido em si. A principal função do organizador prévio é a de servir de ponte entre o que o aluno já sabe e o que ele deveria saber, com a finalidade de que o material possa ser aprendido de forma significativa. Isto é, organizadores prévios são úteis para facilitar a aprendizagem na medida em que funcionam como “pontes cognitivas”.

Para Ausubel, existem algumas condições necessárias para a ocorrência de aprendizagem significativa: a existência de um material potencialmente significativo, isto é, um material didático capaz de facilitar a captação de significados, a disponibilidade de uma estrutura cognitiva adequada que permita a subsunção, a disposição do aluno para aprender e um professor que mostre satisfação em ensinar.

Durante o curso a utilização de imagens e simulações teve a função de tornar o objeto de estudo potencialmente significativo ao aluno, de modo que ele se sentisse motivado à aprendizagem. Segundo Ausubel, para que se facilite a aprendizagem significativa pode-se também considerar a opção de aulas expositivas participativas, ou seja, a interação social e a linguagem são um importante facilitador da aprendizagem significativa. É relevante observar que a aprendizagem receptiva verbal não deve ser associada a aulas não participativas e passivas. Durante o curso, a exposição do professor era seguida de discussões e participação do grupo de alunos. Logo, do ponto de vista ausubeliano não há contra-indicação de aulas expositivas para aprendizagem significativa do material apresentado na sua forma final.

Para tornar mais claro e preciso o processo de aquisição e organização de significados na estrutura cognitiva, Ausubel propõe a “teoria da assimilação”. A assimilação ocorre quando um conceito, potencialmente significativo, é subsumido sob uma idéia ou conceito mais inclusivo, já existente na estrutura cognitiva como extensão ou qualificação do mesmo. A nova informação e o conceito subsunçor com o qual ela se relaciona são transformados, modificados pela interação, o produto final dessa interação é o subsunçor modificado. Normalmente, a assimilação, é o mecanismo humano para dar significado a novos conhecimentos, mas pode também impedir ou bloquear a atribuição de significados em certos casos. Este processo, segundo o qual a nova informação adquire significado por meio da interação com subsunçores, reflete uma relação de subordinação do novo material em relação à estrutura cognitiva preexistente. Esse tipo de aprendizagem é chamada de aprendizagem subordinada.

A aprendizagem significativa não é estática e está, continuamente, em processo de mudança pelos sujeitos na construção do conhecimento.

Assim, do que foi apresentado, para facilitar a ocorrência da aprendizagem significativa devemos levar em conta quatro tarefas fundamentais do professor, propostas por Moreira (1999, p. 162):

1. *Identificar a estrutura conceitual e proposicional da matéria de ensino, isto é, identificar os conceitos e princípios unificadores, inclusivos, com maior poder explanatório e propriedades integradoras, e organizá-los hierarquicamente de modo que, progressivamente, abranjam os menos inclusivos até chegar aos exemplos e dados específicos.*
2. *Identificar quais subsunçores (conceitos, proposições, idéias claras, precisas, estáveis) relevantes à aprendizagem do conteúdo a ser ensinado, que o aluno deveria ter em sua estrutura cognitiva para poder aprender significativamente este conteúdo.*
3. *Diagnosticar aquilo que o aluno já sabe, determinar, dentre os subsunçores especificamente relevantes (previamente identificados ao “mapear” e organizar a*

matéria de ensino), quais os que estão disponíveis na estrutura cognitiva do aluno.

4. *Ensinar utilizando recursos e princípios que facilitem a aquisição da estrutura conceitual da matéria de ensino de uma maneira significativa. A tarefa do professor é a de auxiliar o aluno assimilar a estrutura da matéria e organizar sua própria estrutura cognitiva nessa área de conhecimento, por meio da aquisição de significados claros, estáveis e transferíveis.*

2.3. O interacionismo social de Vygotsky

Para Lev Vygotsky (1896-1934) o desenvolvimento cognitivo não ocorre independente do contexto social, histórico e cultural. A asserção de que os processos mentais superiores do indivíduo têm origem em processos sociais é um dos pilares da teoria de Vygotsky. Outro é a idéia de que esses processos mentais só podem ser entendidos se entendermos os instrumentos e signos que os mediam. (Moreira, 1999, p.109).

Segundo Vygotsky, os processos mentais superiores (pensamento, linguagem, representação) têm origem em processos sociais. Para ele, desenvolvimento cognitivo é a conversão de relações sociais em funções mentais. Não é por meio do desenvolvimento cognitivo que o indivíduo se torna capaz de socializar, é na socialização que se dá o desenvolvimento dos processos mentais superiores. (ibid)

A conversão de relações sociais em funções mentais superiores não é direta, é mediada. Na teoria de Vygotsky [3], o eixo central de sua teoria é a mediação. O ser humano não tem acesso direto aos objetos, o acesso é mediado através das ferramentas psicológicas de que dispõe, o conhecimento se adquire, se constrói, através da interação com os outros, mediada pela cultura, desenvolvida histórica e socialmente. Durante a mediação é necessária a utilização de *instrumentos* e *signos*. Um instrumento é algo que pode ser usado para fazer alguma coisa, como por exemplo, um cronômetro, um computador; um signo é algo que significa alguma coisa, como por exemplo, as palavras, que são signos lingüísticos, ou os números, que são signos matemáticos. Para Vygotsky, é com a interiorização de instrumentos e signos, produzidos culturalmente que se dá o desenvolvimento cognitivo. Logo, instrumentos e signos são construções sócio-históricas e culturais; é através da apropriação ou internalização destas construções, via interação social, que o indivíduo se desenvolve cognitivamente. Em todo esse processo a linguagem é fundamental.

Um pouco diferente de Ausubel, que focaliza no indivíduo sua análise, Vygotsky enfoca a interação social, que é o veículo fundamental para a transmissão dinâmica do conhecimento social, histórica e culturalmente construído.

Segundo Garton (1992, p.11): “Uma definição de interação social implica um mínimo de duas pessoas intercambiando informações. Implica também um certo grau de reciprocidade e

bidirecionalidade entre os participantes, ou seja, a interação social supõe envolvimento ativo de ambos os participantes deste intercâmbio, trazendo diferentes experiências e conhecimentos, tanto em termos qualitativos como quantitativos.” (apud Moreira, 1999, p. 112)

Durante o curso, as atividades com simulações sempre foram desenvolvidas em duplas, a fim de proporcionar a socialização do conhecimento. Nas aulas expositivas o professor sempre instigava discussões e troca de conhecimento entre os alunos, proporcionando uma interação social.

O professor tem papel fundamental, na teoria de Vygotsky, como mediador na aquisição de significados contextualmente aceitos. No ensino, ele é o participante que já internalizou significados socialmente compartilhados para os materiais educativos do currículo e procura fazer com que o aluno capte esses significados e venha a compartilhá-los também. No decorrer do curso, foram apresentados aos alunos significados socialmente aceitos no contexto da Mecânica Quântica, utilizando a linguagem (exposição oral) e signos como imagens, simulações e símbolos matemáticos.

Para internalizar signos e conceitos, o indivíduo tem que captar os significados já compartilhados com outras pessoas, isto é, tem que passar a compartilhar significados já aceitos no meio onde vive. Observa-se a relevância da interação social, pois é por meio dela que o indivíduo pode captar significados e certificar-se de que os significados captados são corretos ou não. Podemos dizer que a interação social é um intercâmbio de significados. Na sala de aula o professor é responsável por verificar se o significado que o aluno captou é aceito e compartilhado socialmente. Há ensino quando aluno e professor compartilham significados.

2.3.1. A zona de desenvolvimento proximal

A zona de desenvolvimento proximal é definida por Vygotsky como a distância entre o nível de desenvolvimento cognitivo real do indivíduo, tal como medido por sua capacidade de resolver problemas independentemente, e o seu nível de desenvolvimento potencial, tal como medido através da solução de problemas sob orientação de um professor, por exemplo, ou de companheiros mais capazes (Moreira, 1999, p.116). Tal zona de desenvolvimento proximal representa a possibilidade de os indivíduos aprenderem em um ambiente social, na interação com os demais indivíduos.

Esta zona representa a região onde o desenvolvimento cognitivo ocorre, está constantemente mudando. É dentro da zona de desenvolvimento proximal que deve ocorrer a interação social que provoca a aprendizagem.

Essa troca de conhecimentos e experiências com outras pessoas é que possibilita aprendizagem; e assim, quanto mais freqüentes são as interações com os demais, mais rico e amplo será o conhecimento. A zona de desenvolvimento proximal está determinada socialmente, pois aprendemos com a ajuda dos outros.

O papel fundamental do professor como mediador na aquisição de significados conceitualmente aceitos, o intercâmbio de significados entre professor e aluno dentro da zona de desenvolvimento proximal do aluno, a linguagem, como o mais importante sistema de signos para o desenvolvimento cognitivo, são extremamente importantes para serem levados em conta no ensino.

Nessa ótica, sem interação social ou sem troca de significados dentro da zona de desenvolvimento proximal do aprendiz, não há ensino, não há aprendizagem e desenvolvimento cognitivo. A interação social implica a necessidade de que todos os envolvidos no processo ensino-aprendizagem devam e tenham oportunidade de falar.

No próximo capítulo será apresentada uma breve revisão da literatura relativa a tópicos de Mecânica Quântica no Ensino Médio.

Capítulo 3

Breve revisão da literatura

Os artigos de Greca e Moreira (1999) e de Ostermann e Moreira (1999) foram muito relevantes para este trabalho.

No artigo de Greca e Moreira foram consultadas a partir de 1970, as seguintes revistas: *International Journal of Science Education*, *Journal of Research on Science Teaching*, *European Journal of Science Education*, *Science Education*, *American Journal of Physics*, *Contemporary Physics*, *Physics Teacher*, *Physics Education*, *Cognition and Instruction*, *Learning and Instruction*, *Enseñanza de las Ciencias*, *Revista de Enseñanza de la Física*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* e *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Além disto, foram também utilizados o sistema ERIC (Educational Resources Information Center), o mais importante sistema de informações na área de educação, e as bases de dados disponíveis nas redes WEBOFSCIENCE e PROQUEST 5000.

Os artigos pesquisados foram classificados em três grupos: *artigos sobre concepções dos estudantes a respeito de conteúdos de Mecânica Quântica*, *trabalhos com críticas aos cursos introdutórios de Mecânica Quântica* e *estudos contendo propostas de novas estratégias didáticas*. Diante disso, faz-se necessário dizer que o presente trabalho vai ater-se ao terceiro grupo.

Nesse grupo os artigos se preocupam em discutir propostas didáticas para melhorar o ensino da Mecânica Quântica no nível médio e no universitário. E este trabalho se enquadra nas propostas para o nível universitário, com implicações para o nível médio.

As propostas para o ensino de Mecânica Quântica em nível universitário são classificadas em:

1) Abordagem histórica.

De acordo com essa proposta se considera que, embora existam abordagens logicamente satisfatórias como, por exemplo, a das *Feynman's Lectures on Physics*, do curso de Física do MIT, ou a de Gil e Solbes (1993) que propõem um modelo construtivista em que os estudantes se envolvam em atividades e situações problemáticas que lhes permitam questionar as formas de pensar clássicas, facilitando-se, assim, a aceitação das novas hipóteses, para a introdução dos conceitos quânticos fundamentais, elas não são as psicologicamente mais acessíveis. Por isso, propõe que o salto seja dividido em pequenos passos que permitam ao estudante a transição, estabelecendo ao mesmo tempo as ligações fundamentais com a Física Clássica. Isto implicaria repassar por alguns dos estágios que historicamente foram considerados, enfatizando o Princípio de Correspondência e centrando a Mecânica Quântica na Mecânica Matricial e não na Ondulatória. Considera que a crítica a esta proposta, no que se refere a que não é necessário hoje que os estudantes percorram o caminho que deu origem à Mecânica Quântica, não é cabível, pois se esses

estágios foram importantes conceitual e psicologicamente, os estudantes necessariamente terão que percorrê-los. Embora esta seja, segundo seu autor, uma proposta válida para um curso de Introdução à Mecânica Quântica de um semestre de duração, foi implementada em uma disciplina de Mecânica Quântica de pós-graduação, com 16 estudantes, metade dos quais já haviam cursado esta disciplina no curso de graduação. Ao finalizar o curso a maioria dos estudantes, apesar de o considerarem difícil, expressaram haver compreendido porque certos conceitos tinham aparecido e o método teórico da Mecânica Quântica.

2) Visão filosófica.

Em consonância com as críticas filosóficas, os artigos desta corrente apresentam como alternativa a apresentação de outras interpretações, além da interpretação ortodoxa, ou adotar a postura de que não há ainda uma interpretação definida. Santos (1976, apud op. cit) propõe considerar-se a Mecânica Quântica meramente como um conjunto de regras de cálculo muito acuradas, mas cuja interpretação física profunda ainda não está completamente compreendida. Considera ainda pedagogicamente útil apresentar-se tais regras de cálculo a partir de uma abordagem probabilística, onde as probabilidades quânticas sejam tratadas em pé de igualdade com as clássicas. Introduce assim uma formulação do espaço de Hilbert para teorias probabilísticas e a partir daí constrói alguns dos postulados da Mecânica Quântica.

Para Pessoa (1997, apud op. cit), um curso introdutório possível pode apresentar desde o início diferentes interpretações do formalismo quântico (interpretação ondulatória -- Schrödinger, da dupla solução -- De Broglie, e da complementaridade -- Bohr) a fim de que os estudantes desenvolvam "*sua própria interpretação privada*". Considerando como conceito essencial da Mecânica Quântica a dualidade onda-partícula, são apresentadas distintas experiências com o interferômetro de Mach-Zehnder para um único fóton, salientando-se os aspectos conceituais (dualidade onda-partícula, redução de estado e colapso da função de onda, não-localidade, Princípio de Incerteza e indeterminismo) com o objetivo de permitir que o estudante adquira uma intuição sobre diferentes situações experimentais. Os resultados das experiências são explicados segundo as diferentes interpretações. Esta proposta foi implementada como um curso de extensão universitária, ministrado na Estação Ciência, em São Paulo, em 1996. Os resultados desta implementação não são discutidos pelo autor.

3) Abordagem "particulista".

Nessa abordagem o autor (Hood, 1993) propõe os seguintes estágios:

a) introduzir a descrição quântica antes de qualquer discussão sobre ótica ou movimento ondulatório, de modo a que os modelos clássicos sejam facilmente visualizados como aproximação em grande escala desta descrição;

b) destacar o caráter corpuscular da radiação e da matéria, incluindo o spin entre suas propriedades;

c) enfatizar que toda classe de movimento implica uma dinâmica subjacente, que no caso microscópico é a teoria quântica.

A partir deste ponto podem ser introduzidos os conceitos quânticos, começando-se pelo experimento da fenda dupla para fótons e matéria, obviamente sem a tônica da dualidade.

4) Abordagens sobre tópicos específicos.

Nesta abordagem Greca e Moreira destacam que o volume especial da *Revista Brasileira de Ensino de Física* (1997, V. 19, n^o. 1) traz vários exemplos a este respeito. Gomes et al. (p. 4) descrevem uma série de experiências (com ênfase em espalhamento e teoria da perturbação) que podem ser incluídas nas disciplinas de Introdução à Mecânica Quântica de modo a facilitar a mudança do enfoque, de teórico a experimental, nestas disciplinas. Bassalo e Cattani (p. 49) indicam como seria possível aos estudantes acompanhar trabalhos de pesquisas atuais, com conhecimentos básicos de Mecânica Quântica. Machado, Osório e Borges (p. 102) apresentam a solução da equação de Schrödinger independente do tempo para um poço quadrado assimétrico, que tem interesse prático em técnicas de crescimento de cristais e que pode ser resolvida com ferramentas quânticas básicas. Donoso e Barberis (p. 125) fazem uma exposição didática da descrição quântica de espectros de Ressonância Paramagnética Eletrônica, técnica amplamente utilizada em Física, Química e Biofísica. Mokross (p. 136) discute a questão da não-localidade na Mecânica Quântica.

Redish, Lei & Jolly (1997, apud op. cit) desenvolveram uma unidade introdutória (5 semanas) partindo do pressuposto de que há uma nova audiência para os tópicos de Mecânica Quântica e de que é possível desenvolver recursos computacionais (simulações e *aplicativos*) que permitam apresentar tais tópicos com uma matemática menos abstrata. Tendo em consideração os resultados de pesquisas anteriores (Bao, Jolly & Redish, 1996, apud op. cit), foram desenvolvidas durante o curso atividades específicas com revisões sobre os diagramas de energia e as probabilidades clássicas e foram enfatizadas, com a utilização de *aplicativos* especialmente projetados, a interpretação dos poços de potencial, a compreensão dos autovalores de energia e a relação entre a energia cinética local e a curvatura da função de onda. Os resultados mostram que, ao final da unidade, os estudantes conseguiram resolver problemas relativamente difíceis sobre tais pontos, mas isso não significaria necessariamente que tivessem compreendido os conceitos fundamentais ou criado um modelo quântico coerente, segundo se depreende das entrevistas realizadas com esses mesmos estudantes.

5) Utilização de recursos computacionais.

Assim como em outras áreas das Ciências, a utilização de recursos computacionais no ensino de conteúdos introdutórios sobre Mecânica Quântica é uma tendência que vem crescendo rapidamente nos últimos anos. Existem hoje, disponíveis na Internet, vários programas cujo objetivo é auxiliar os estudantes a visualizar aspectos centrais do mundo microscópico. Rebello e

Zollman (1999, apud op. cit), da Universidade de Kansas, desenvolveram um projeto denominado "Visual Quantum Mechanics", cujo objetivo é introduzir tópicos de Mecânica Quântica, com a ajuda de simulações, de atividades interativas e de laboratórios, utilizando o mínimo possível de ferramentas matemáticas. O material está organizado em unidades temáticas, cada uma delas com uma duração de 6 a 12 horas-aula.

6) Utilização de resultados de pesquisa sobre fundamentos da Mecânica Quântica.

Greca & Herscovitz (2000, apud op. cit.) destacam que, dada a importância da introdução de conteúdos quânticos a estudantes de cursos de Engenharia e as dificuldades envolvidas no ensino do tema, é necessária uma ação educativa forte que priorize exemplos baseados em experimentos recentes e discussões que apontem para características propriamente quânticas, em oposição às abordagens que buscam semelhanças com sistemas clássicos ou que só oferecem uma visão instrumentalista. Consideram que isto pode tornar as noções sobre o tema um pouco mais "intuitivas". Scarani & Suarez (1998, apud op. cit.) propõem aprimorar os esforços didáticos de Feynman para tornar compreensível a superposição de estados, com a sua consequência mais simples que é a presença de efeitos de interferência, mesmo para uma partícula, como o experimento proposto por Elitzur & Vaidmann em 1993 e concretizado poucos anos depois. Gerry & Knight (1997, apud op. cit.) propõem deixar de tratar o famoso "gato de Schrödinger" como um paradoxo, mas sim tratá-lo como um fenômeno que pode ser observado experimentalmente.

É destacado por Greca e Moreira que a maioria destas propostas não explicita qual o seu referencial de ensino-aprendizagem, muitas delas parecendo reflexões sobre a experiência de aprendizagem e de ensino dos seus autores, ou sobre as preferências pessoais para determinado enfoque. Várias destas propostas não foram implementadas e para aquelas que o foram, as avaliações não parecem ter sido feitas de forma rigorosa. É interessante destacar que cada uma das propostas salienta aquilo que cada físico considera como a essência da Mecânica Quântica: para alguns é a presença de quantidades discretas ou de processos descontínuos; para outros, é o papel que as probabilidades cumprem na descrição do mundo microscópico; outros ainda consideram como essencial o Princípio de Incerteza e há os que consideram central a dualidade onda-partícula, assim como existem os que acham que o eixo da revolução quântica é a possibilidade de coexistência simultânea de estados. Apesar das diferenças, duas tendências parecem notar-se para as disciplinas introdutórias: a importância da discussão conceitual dos princípios quânticos e a incorporação de resultados de pesquisa sobre os fundamentos da Mecânica Quântica. Outro ponto que surge em mais de uma proposta é a necessidade do abandono de uma visão ondulatória da Mecânica Quântica. A utilização de recursos computacionais, em particular de simulações, é uma tendência em crescimento, embora sejam poucas as pesquisas que têm estudado seus efeitos ou os aspectos da aprendizagem que tais recursos facilitarão.

O artigo de Ostermann e Moreira (1999) que foi analisado apresenta uma revisão da literatura sobre a linha de pesquisa "Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio" realizada com consulta a artigos em revistas, livros didáticos, dissertações, teses, projetos e navegações pela internet, que abordam essa questão. A pesquisa concentrou-se em publicações direcionadas ao ensino da Física e engloba os primeiros trabalhos publicados nessa linha (final da década de 70). Os trabalhos encontrados foram classificados em seis grandes grupos. Foi possível verificar, por exemplo, que há uma grande concentração de publicações que apresentam temas de FMC em forma de divulgação ou como bibliografia de consulta para professores do Ensino Médio. Por outro lado, existe uma escassez de trabalhos sobre concepções alternativas de estudantes acerca de tópicos de FMC, bem como pesquisas que relatem propostas testadas em sala de aula com apresentação de resultados de aprendizagem.

Os seguintes aspectos foram destacados nas referências consultadas:

- justificativas para a inserção de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio;
- questões metodológicas, epistemológicas, históricas referentes ao ensino de FMC; estratégias de ensino e currículos;
- concepções alternativas dos estudantes acerca de tópicos de FMC;
- temas de FMC apresentados como divulgação ou como bibliografia de consulta para professores de nível médio;
- propostas testadas em sala de aula com apresentação de resultados de aprendizagem;
- livros didáticos de nível médio que inserem temas de FMC.

De acordo com o artigo, na III Conferência Interamericana sobre Educação em Física (Barojas, 1988), foi organizado um grupo de trabalho para discutir o ensino de Física Moderna. Na discussão, foram levantadas inúmeras razões para a introdução de tópicos contemporâneos na escola média. Dentre elas destacam-se:

- despertar a curiosidade dos estudantes e ajudá-los a reconhecer a Física como um empreendimento humano e, portanto, mais próxima a eles;
- os estudantes não têm contato com o excitante mundo da pesquisa atual em Física, pois não vêem nenhuma Física além de 1900. Esta situação é inaceitável em um século no qual idéias revolucionárias mudaram a ciência totalmente;
- é do maior interesse atrair jovens para a carreira científica. Serão eles os futuros pesquisadores e professores de Física;
- é mais divertido para o professor ensinar tópicos que são novos. O entusiasmo pelo ensino deriva do entusiasmo que se tem em relação ao material didático utilizado e de mudanças estimulantes no conteúdo do curso. É importante não desprezar os efeitos que o entusiasmo tem sobre o bom ensino;

- Física Moderna é considerada conceitualmente difícil e abstrata; mas, resultados de pesquisa em ensino de Física têm mostrado que, além da Física Clássica ser também abstrata, os estudantes apresentam sérias dificuldades conceituais para compreendê-la.

Stannard (1990) justifica a atualização curricular ao relatar um levantamento feito com estudantes universitários que mostrou que é a Física Moderna - relatividade restrita, partículas elementares, teoria quântica, astrofísica - que mais os influencia na decisão de escolher Física como carreira.

Torre (1998a) enuncia várias razões para justificar a necessidade de ensinar FMC na escola:

- conectar o estudante com sua própria história;
- protegê-lo do obscurantismo, das pseudociências e das charlatanias pós-modernas;
- que o aluno possa localizar corretamente o ser humano na escala temporal e espacial da natureza;
- FMC possui múltiplas e evidentes conseqüências tecnológicas;
- por sua beleza, pelo prazer do conhecimento, porque é uma parte inseparável da cultura, porque o saber nos faz livres e valoriza a humanidade.

Paulo (1997) considera pertinente a introdução de FMC no Ensino Médio, visto que esta faz parte do cotidiano da sociedade contemporânea. Ao ter noções de tópicos de FMC, o aluno dará sentido à Física, fazendo relações com o mundo que o cerca. Acredita, também, que a introdução da FMC no currículo das escolas pode proporcionar a superação de certas barreiras epistemológicas fundamentais para o conhecimento do indivíduo sobre a natureza. Para essa autora, o entendimento de FMC fará o indivíduo ter uma capacidade cognitiva maior.

Aubrecht (ibid.) também comenta que a introdução de aspectos de FMC nos cursos de Física pode servir para renovar o ensino. O uso de tópicos de FMC pode permitir que o professor mantenha ou até mesmo desperte o interesse pelas ciências que as crianças trazem para a escola.

Kalmus (1992) relata um levantamento feito, no ano de 1984, junto a calouros de Física. Através de um questionário (enviado a todos os departamentos de Física do Reino Unido) os estudantes foram solicitados a listar, em ordem de preferência, três tópicos que mais os influenciaram na escolha pela carreira de físico. Os três tópicos mais listados foram: relatividade, astronomia e partículas elementares, isto é, temas de FMC.

Valadares e Moreira (1998) também concordam que é imprescindível que o estudante do ensino médio conheça os fundamentos da tecnologia atual, já que ela atua diretamente em sua vida e pode definir seu futuro profissional. É importante a introdução de conceitos básicos de FMC e, em especial, fazer a ponte entre a física da sala de aula e a física do cotidiano.

A partir deste artigo podemos observar que há muitas justificativas na literatura que nos permitem lançar uma hipótese: há uma tendência nacional e internacional de atualização dos currículos de Física e muitas justificativas para tal. Entretanto, ainda é reduzido o número de

trabalhos publicados que encaram a problemática sob a óptica do ensino e, mais ainda, os que buscam colocar, em sala de aula, propostas de atualização.

No artigo analisado foram consideradas três vertentes representativas de abordagens metodológicas para a introdução de FMC no Ensino Médio: exploração dos limites dos modelos clássicos; não utilização de referências aos modelos clássicos; escolha de tópicos essenciais.

Nosso trabalho está relacionado a segunda vertente: *não utilização de referências aos modelos clássicos* – que é atribuída às pesquisas de Fischler e Lichtfeldt da Universidade Livre de Berlim, Alemanha, que consideram que a aprendizagem de Física Moderna é dificultada porque o ensino, freqüentemente, usa analogias clássicas. Por exemplo, o modelo de átomo de Bohr, uma vez aprendido, passa a ser um obstáculo epistemológico para o entendimento de idéias modernas. Uma nova concepção de abordagem da Mecânica Quântica para o nível secundário é sugerida, a partir de cinco premissas básicas:

- referências à Física Clássica devem ser evitadas;
- introdução do efeito fotoelétrico a partir das características dos elétrons e não das dos fótons;
- interpretação estatística do fenômeno deve ser usada e descrições dualistas devem ser evitadas;
- relação de incerteza de Heisenberg deve ser introduzida no começo (e formulada para objeto quânticos);
- exclusão do modelo de Bohr no tratamento do átomo de hidrogênio.

Além dessas três idéias temos outras propostas metodológicas citadas no artigo de Ostermann e Moreira como:

Aubrecht (1989), ao criticar que a inserção de tópicos de FMC seja feita apenas nos últimos capítulos de alguns livros-texto dos cursos universitários, sugere que novos livros sejam escritos para que se possa "salpicar" temas contemporâneos na Física Clássica. Ou, melhor, "salpicar" temas clássicos na Física Contemporânea. Além de sugerir que alguns tópicos clássicos sejam eliminados, Aubrecht (1989) afirma que uma abordagem profunda e rigorosa de um número limitado de tópicos é mais eficiente do que uma introdução enciclopédica de um assunto amplo.

Uma experiência de três anos de testagem de uma proposta didática de introdução de tópicos de Física Quântica nos cursos superiores de nível médio na Itália, em particular, no 5º ano do "Liceo Scientifico Statale", é relatada por Stefanel (1998). A abordagem desenvolvida tem uma estrutura que pode ser esquematizada em quatro níveis de intervenção:

1. experiências introdutórias e apresentação de um cronograma de referência sobre o nascimento da teoria quântica (5-6 horas);
2. aprofundamento quantitativo sobre efeito fotoelétrico, efeito Compton, fóton, experiência de Frank-Hertz e os modelos atômicos, princípio da incerteza (5-6 horas);

3. princípios básicos de teoria quântica: interpretação probabilística da função de onda e do princípio de superposição (5-7 horas);

4. aplicações dos conceitos de Física Quântica para explicar as propriedades da matéria (6-8 horas).

A avaliação dos alunos sugeriu que os resultados de aprendizagem foram satisfatórios. No entanto, Stefanel (1998) concluiu que, entre outros aspectos, é preciso mais pesquisas acerca do ensino de FMC para verificar, por exemplo, se a utilização de modelos clássicos está ou não relacionada à formação de erros conceituais e se é possível analisá-los para construir uma eficiente abordagem didática.

Veit et al. (1987) apresentam um programa - aula para o nível médio sobre efeito fotoelétrico via computador. A motivação para utilizar-se o computador no ensino deste tema, segundo os autores, centra-se na pouca tradição didática da área de FMC e carência de equipamentos e outros materiais instrucionais como, por exemplo, textos adequados. Os autores colocam que o uso do computador para o ensino de FMC justifica-se plenamente pois, ao contrário de vários temas clássicos, diversas experiências de FMC não podem ser realizadas em "situação real de laboratório".

Através da chamada "física do cotidiano", Valadares e Moreira (1998) apresentam sugestões conceituais e práticas, de como introduzir no Ensino Médio tópicos de FMC relacionados com o cotidiano dos alunos. São considerados três tópicos: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro, enfatizando-se algumas de suas aplicações através de experiências simples e acessíveis a escolas com modestos recursos financeiros. Também nesta linha Laburú et al. (1998) descrevem o funcionamento dos mostradores de cristais líquidos, empregados na maioria dos "displays" de relógios, calculadoras, mostrando que, com alguns conceitos já trabalhados na escola (como eletricidade e polarização), é possível introduzir um assunto contemporâneo nas aulas de nível médio.

De acordo com o artigo pode-se verificar que, além de ser um tanto escassa a literatura a respeito de questões metodológicas sobre o ensino da FMC nas escolas, há várias divergências a respeito de que caminho deve ser seguido. Em particular, o papel das analogias clássicas para o entendimento dos conceitos modernos, a ênfase ou não em pré-requisitos, a abordagem histórica ou "lógica" são pontos que geram muitas discordâncias. Como bem sugere Stefanel (1998), este movimento de reformulação curricular apenas se inicia e muitas pesquisas serão necessárias ainda para que possamos entender melhor esta complexa problemática.

Também analisamos vários livros de Ensino Médio, a fim de verificarmos como é apresentado o assunto Mecânica Quântica. Os livros mais utilizados, isso quando nos referimos à rede escolar, são os chamados livros de volume único. Um dos livros mais usados nas escolas, por ser um dos mais baratos, é o livro "Física Completa" de Regina Bonjorno *et al.* da Editora FTP. A

Física Moderna está excluída dos conteúdos abordados, sonhando informação aos alunos, pois nesse mundo de tecnologias avançadas a Física tratada em sala de aula é a do século XVIII e muitas vezes mal alcança o século XX.

Outro livro muito utilizado é o livro “Física”, volume único, de Djalma Nunes da Silva (Paraná) da Editora Ática. Aqui temos um pequeno texto sobre o que é Mecânica Quântica falando sobre o quantum de energia. Após, são explicados rapidamente o efeito fotoelétrico, a dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza.

No livro “Física – de olho no mercado do trabalho” de Antônio Máximo e Beatriz Alvarenga, da Editora Scipione, ao final do volume, há um capítulo sobre conceitos gerais da Física Moderna, explicando certas formas de radiação: luz visível, raios – X, raios gama, radiação alfa, beta, etc. Mas não há referência a outros conceitos como: efeito fotoelétrico, princípio da incerteza.

Diferentemente, o livro “Física” de Alberto Gaspar, da Editora Ática, apesar de tratar-se de um livro volume único, traz uma abordagem bem abrangente quanto aos conceitos inerentes ao estudo das radiações, dando uma boa base qualitativa ao aluno do Ensino Médio. Faz uma análise da dualidade onda – partícula, do efeito Compton, níveis de absorção e emissão de energia dos diferentes elementos químicos, Lei de Planck, radiação de corpo negro, além de dar uma boa introdução à Relatividade Restrita e à Mecânica Quântica.

Já no livro “Física Conceitual” de Hewitt, P., da editora Addison-Wesley Bookman, percebe-se que tópicos de FMC estão integrados ao longo dos capítulos e não todos concentrados ao final dos mesmos ou ao final do livro. Os três capítulos da última unidade (Física Atômica e Nuclear) trazem conceitos básicos de Mecânica Quântica, radioatividade, fissão e fusão nucleares.

Assim, analisando a bibliografia disponível aos alunos da disciplina de Física no Ensino Médio do Brasil, notamos que, em sua maioria, o tratamento de assuntos relativos ao estudo de Mecânica Quântica é, de maneira geral, muito pobre. Não que se deseje uma Física no Ensino Médio avançada, mas sim uma Física que atraia o aluno, mostrando a realidade do seu cotidiano. Ou seja, é necessário mostrar que os benefícios, e também os problemas gerados pela tecnologia atual estão embasados em uma pesquisa que se utiliza de conceitos avançados, sendo que estes podem ser compreendidos de forma qualitativa, sem o exercício de cálculos carregados que levem os alunos ao desespero e ao desânimo toda vez que o professor de Física entra na sala de aula.

Capítulo 4

Metodologia Aplicada

4.1. Local e aplicação do curso

A proposta foi aplicada na Universidade do Vale do Rio dos Sinos-UNISINOS, localizada na cidade de São Leopoldo, no Vale do Rio dos Sinos, Região Metropolitana de Porto Alegre-RS.

O curso, caracterizado como curso de extensão oferecido pela Universidade, foi aplicado em duas turmas com 16 alunos cada. As aulas ocorreram nas quintas-feiras à noite e aos sábados pela manhã, durante cinco encontros.

A Universidade dispõe de laboratório de informática com 20 computadores com acesso à internet, biblioteca, além de sala com projetor multimídia.

4.2. A proposta de trabalho: visão geral

Em primeiro lugar destaca-se que usamos a teoria da aprendizagem significativa como referencial, visto que foi realizada a apresentação oral do conteúdo, procurando promover a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora, e proporcionadas discussões com os alunos, aproveitando-se da linguagem como importante facilitador da aprendizagem significativa. Também se utilizou essa teoria como referente quando se procurou identificar os subsunçores dos alunos, aplicando um pré-teste.

A teoria do interacionismo social de Vygotsky também foi utilizada, como marco teórico, durante o curso quando as atividades com simulações eram desenvolvidas em duplas, a fim de proporcionar a socialização do conhecimento. Nas aulas expositivas a professora sempre instigava discussões e a troca de conhecimentos entre os alunos, buscando uma maior interação social.

Este trabalho foi desenvolvido durante 15 horas-aula, em cinco semanas, sendo 3 horas-aula por semana, durante os meses de outubro e novembro de 2006, nas quintas-feiras à noite e aos sábados pela manhã nos dias 21/09, 28/09, 05/10, 19/10 e 26/10 para a turma das quintas-feiras e nos dias 23/09, 30/09, 14/10, 21/10 e 28/10 aos sábados pela manhã para a outra turma.

Utilizou-se a projeção de imagens, a simulação computacional e a apresentação de um vídeo como recursos didáticos, voltados ao papel de transformação social e à inclusão tecnológica, salientando a importância desses recursos quanto ao seu alcance como recurso pedagógico.

Os alunos que participaram do curso freqüentavam o curso de Licenciatura em Física da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Havia alunos de início de curso (1º semestre) até final de curso, isto é, eram turmas bem heterogêneas. Não foram estipulados pré-requisitos para a realização do curso de Mecânica Quântica.

A grande maioria dos alunos já lecionava a disciplina de Física no Ensino Médio.

A proposta de trabalho teve como início uma apresentação, através de um projetor de multimídia, sobre o objetivo do curso e o que seria abordado. Após, foi aplicado um pré-teste, com a finalidade de verificar os conhecimentos (subsunçores) que os alunos tinham sobre Mecânica Quântica.

A partir daí, os alunos realizaram práticas em “laboratório virtual”, aproveitando-se de simulações a partir de aplicativos livres disponíveis na internet como, por exemplo, uma simulação de dupla fenda que pode ser encontrada em www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html; intercaladas com explicações e apresentação com o projetor multimídia. Foi também usado um vídeo (David Chamberlain para Northey Productions for TV Ontário, Canadá, 1985) onde é apresentado o primeiro modelo de partícula da luz proposto por Newton no século XVIII, o modelo ondulatório proposto por Huygens no século XIX, o modelo eletromagnético de Maxwell, a idéia do quantum de Planck retomando o modelo de partícula e também a concepção de De Broglie de que partículas podem apresentar características ondulatórias e vice-versa. No vídeo fica claro que as teorias sobre a natureza da luz evoluíram de uma teoria corpuscular, capaz de explicar leis básicas da ótica geométrica a uma teoria ondulatória, que explica os fenômenos de interferência e difração da luz e posteriormente, as teorias do efeito fotoelétrico e Compton voltaram a apontar para características corpusculares da luz, levando à introdução dos fótons como “partículas de luz”.

Com o objetivo de possibilitar esta proposta de trabalho a outros professores foi elaborado um texto de apoio com subsídios para a utilização do material. Esse texto consta como anexo desta dissertação.

A avaliação da proposta foi baseada em observações dos participantes, opiniões dos alunos, elaboração de mapas conceituais e comparação entre o pré e pós-teste (aplicado ao final do curso).

4.3.Primeiro encontro

Na primeira semana de aula foi apresentada uma projeção em Power Point (PPT), com um canhão multimídia, onde procurou-se mostrar a justificativa do curso, o objetivo do mesmo, a metodologia que seria utilizada, os tópicos que seriam trabalhados, através de uma pequena introdução a fim de despertar o interesse dos alunos pela aprendizagem. A seguir, nas Figuras 1 a 4, são apresentadas as lâminas utilizadas como introdução ao curso.

Justificativa

- A tecnologia atual é explicada a partir de conceitos da Física Moderna.
- A maioria dos professores de Física se prende aos conteúdos de Mecânica Clássica.
- Em muitas licenciaturas este tópico de Física Moderna é pouco trabalhado.
- É necessário criar alternativas para que os professores consigam suprir estas deficiências construindo meios que possibilitem a inclusão da Física Moderna no Ensino Médio.

Figura 1. Lâmina nº 1.

Objetivos

- Desenvolver e implementar um curso que dará suporte a professores de Física de Ensino Médio.
- Fornecer uma base teórica aos professores de Ensino Médio sobre conceitos de Mecânica Quântica.
- Contextualizar o assunto, de forma potencialmente significativa, despertando o interesse do professor-aluno para tratar o assunto no nível Médio.

Figura 2. Lâmina nº 2.

Estratégias de Ensino

- Pré-teste e pós-teste.
- Aulas expositivas, com recursos de projeção multimídia.
- Vídeo sobre a evolução das teorias da natureza da luz.
- Práticas em “laboratório virtual”, aproveitando-se de simulações através de aplicativos disponíveis na internet.
- Evitar analogias com a Mecânica Clássica.
- Mapas conceituais.

Figura 3. Lâmina nº 3.

Conteúdos abordados

- **As interpretações da Mecânica Quântica** (interpretação da complementaridade ou de Copenhagen).
- **Conceito de quantização.**
- **Objeto quântico.**
- **Dualidade onda-partícula.**
- **Função de onda.**
- **Superposição de estados.**
- **Princípio da Incerteza.**

Figura 4. Lâmina nº 4 .

Logo após esta introdução foi aplicado o pré-teste que é encontrado no Apêndice 1 e no Texto de Apoio ao Professor de Física (Anexo). Explicou-se que era necessário que respondessem apenas as questões das quais julgavam que tinham algum conhecimento e que não “chutassem” as respostas relativas àquelas questões de que não tivessem nenhuma idéia de resposta.

Terminada a aplicação do pré-teste, apresentou-se uma projeção sobre as diversas formas de interpretar a teoria quântica, os defensores das principais interpretações e a interpretação utilizada na elaboração do curso, que é a interpretação de Copenhagen, defendida principalmente por Bohr. Trabalhou-se e discutiu-se o texto sobre as interpretações da Mecânica Quântica extraído da tese de doutorado de Iramaia Jorge Cabral de Paulo (2006), que se encontra no Texto de Apoio ao Professor de Física e no Apêndice 2.

Na discussão foi indagado aos alunos por que no mundo científico a interpretação de Copenhagen é a mais aceita e foi solicitado um esquema das diferentes interpretações que apareciam no texto.

A seguir, nas figuras 5 a 8 encontram-se, as apresentações utilizadas em PPT sobre algumas interpretações.

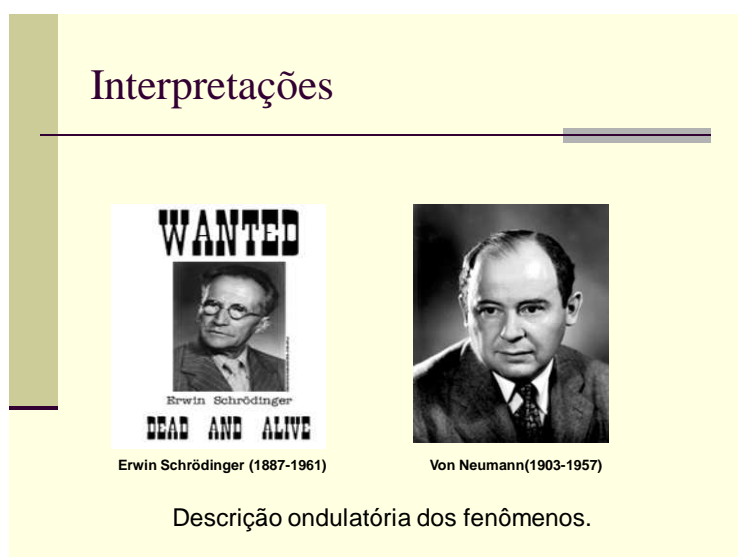


Figura 5. Lâmina nº 5.

Interpretações



Ballentine

Coletivos estatísticos:
busca uma teoria
determinista e considera o
fóton e o elétron como
partículas.

Figura 6. Lâmina nº 6.

Interpretações

■ Interpretação dualista realista



de Broglie(1892-1987)



David Bohm(1917-1992)

Interpreta os fenômenos quânticos como sendo resultado de os sistemas observados se comportarem como onda e partícula.

Figura 7. Lâmina nº 7.

Interpretações



Niels Bohr(1885-1962)

Interpretação da
complementaridade de Bohr:
explica que os objetos
quânticos apresentam
comportamento ondulatório e
corpuscular, dependendo do
experimento realizado.

Figura 8. Lâmina nº 8.

Foi comentado que, conforme mencionado por Osvaldo Pessoa Jr. (2003), uma característica da Mecânica Quântica é que pode ser interpretada de diferentes maneiras, sendo que cada uma dessas interpretações é consistente e, de modo geral, coerente com experimentos quânticos. As teses agregadas pela interpretação fazem afirmações sobre a realidade existente por trás dos fenômenos observados, ou ditam normas sobre a inadequação de se fazerem tais afirmações.

Existem várias interpretações diferentes da teoria quântica que podem ser agrupadas em quatro grandes grupos (Pessoa Jr., 2003):

- 1) Interpretação ondulatória (Schrödinger e Von Neumann);
- 2) Interpretação corpuscular (Landé e Ballentine);
- 3) Interpretação dualista realista (Louis de Broglie e David Bohm);
- 4) Interpretação dualista positivista (interpretação da complementaridade de Bohr ou interpretação de Copenhague, ortodoxa).

Cada uma dessas teses interpreta os conceitos da Mecânica Quântica de forma diferente; por exemplo, a interpretação ondulatória aceita uma descrição ondulatória dos fenômenos, a dualista realista interpreta os fenômenos quânticos como sendo resultado de os sistemas observados se comportarem como onda e partícula ao mesmo tempo, a corpuscular busca uma teoria determinista e considera o fóton e o elétron como partículas e a dualista positivista não se preocupa com o processo, mas sim com as medidas, e explica que os objetos quânticos apresentam comportamento de onda e de partícula, dependendo do experimento realizado.

Neste trabalho foi utilizada a interpretação da complementaridade ou de Copenhague, isto é, os conceitos abordados foram explicados de acordo com esta interpretação, que no momento é a mais aceita no meio científico, segundo alguns autores, como Iramaia C. de Paulo (2006).

4.4.Segundo encontro

Esta aula foi realizada no laboratório de informática. Primeiramente realizou-se uma apresentação com projetor multimídia sobre quantização.

Nessa apresentação em PPT introduziu-se o conceito de quantização, inicialmente questionando o aluno sobre o que significa dizer que uma determinada quantidade ou grandeza é quantizada (Figura 9).

Quantização

- O que significa dizer que uma determinada grandeza física está quantizada?
- Significa dizer que esta grandeza pode apresentar certos valores relacionados de forma discreta com uma unidade mínima e não valores contínuos.

Figura 9. Lâmina nº 9.

Explicou-se então (Figura 10), que significa dizer que esta quantidade pode ter certos valores discretos e não apenas valores contínuos. Por exemplo, as pessoas fazem pagamentos em dinheiro com valores múltiplos de centavos, não existe uma moeda correspondente a meio centavo, apenas os múltiplos do centavo.

Outro exemplo é o da carga elétrica, dada por $Q = n.e$, ou seja, ela é sempre um número inteiro multiplicado pela carga de um único elétron. Não encontramos uma carga elétrica que corresponda à de um elétron e meio. Existem somente valores discretos (quantizados) possíveis, múltiplos da carga do elétron.

Exemplos

- Fazemos pagamentos em dinheiro com valores múltiplos do centavo.
- Na natureza, a carga elétrica é dada por $Q=n.e$, um número inteiro multiplicado pela carga de um único elétron. Não encontramos uma carga elétrica que corresponda à carga de um elétron e meio. Existem somente valores discretos(quantizados) possíveis.

Figura 10. Lâmina nº 10.

Após, com o auxílio das figuras 11 e 12, foi comentado que em 1900, Max Planck supôs que a energia eletromagnética não é distribuída continuamente, mas em “pacotes” ou quanta de energia,

a fim de explicar a radiação do corpo negro. É chamado corpo negro aquele que absorve toda a radiação eletromagnética incidente sobre ele, isto é, não reflete, e conseqüentemente é um corpo que emite em forma de radiação eletromagnética toda a energia fornecida a ele. A quantidade mínima de energia ou quantum de energia é proporcional à frequência da radiação: $\Delta E = hf$, onde h é a constante de proporcionalidade conhecida como constante de Planck cujo valor é aproximadamente $6,626 \cdot 10^{-34} \text{Js}$.

Max Planck

- Em 1900 Max Planck postulou que a energia eletromagnética, no caso da radiação do corpo negro não fosse distribuída continuamente, mas em “pacotes” ou quanta de energia.
- Corpo negro: absorve toda radiação eletromagnética incidente sobre ele e emite em forma de radiação eletromagnética toda a energia fornecida a ele.

Figura 11. Lâmina nº 11.

Energia

- A energia mínima ou quantum de energia é proporcional à frequência da radiação:
$$\Delta E = hf,$$
onde h é a constante de proporcionalidade entre energia e frequência, conhecida como constante de Planck, cujo valor é de aproximadamente $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.
- Para Planck a energia só varia em saltos como ΔE , $2 \Delta E$, $3 \Delta E, \dots$, com ΔE dependendo da frequência de radiação.

Figura 12. Lâmina nº 12.

Para Planck a energia dos elétrons no fenômeno da radiação do corpo negro é quantizada, ou seja, a energia dos elétrons só varia em saltos. Os elétrons só podem adotar alguns valores de

energia, como ΔE , $2\Delta E$, $3\Delta E$,..., e que, esse salto de energia ΔE depende da frequência de oscilação do elétron.

Nesse momento (Figuras 13 e 14) explicou-se que Einstein aproveitou o conceito introduzido por Planck para explicar o efeito fotoelétrico. Nesse efeito, a energia da onda é quantizada, como se a onda eletromagnética fosse composta por partículas de energia, que são os fótons.

Einstein

- Aproveitou o conceito introduzido por Planck para explicar o efeito fotoelétrico. Neste efeito quando raios de luz incidem sobre a superfície de certos metais, alguns elétrons são emitidos. A energia da luz que incide sobre um metal é quantizada, como se a onda eletromagnética(luz) fosse composta por partículas de energia, que são os fótons.

Figura 13. Lâmina nº 13.

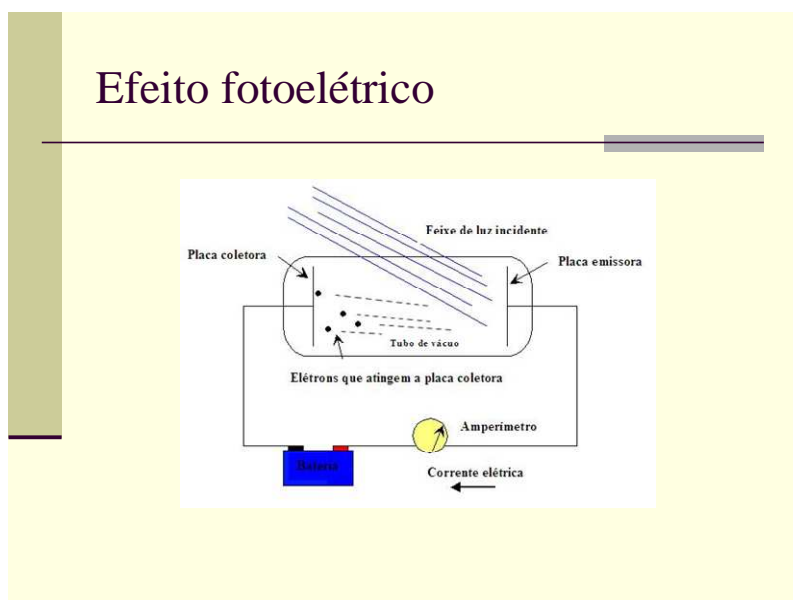


Figura 14. Lâmina nº 14.

Para introduzir o conceito de efeito fotoelétrico os alunos realizaram uma simulação fotoelétrico, que é encontrada no sítio:

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/fotoelectrico/fotoelectrico.htm> e cujo roteiro encontra-se no Apêndice 3 e no Texto de Apoio ao Professor de Física. Com a simulação os alunos perceberam que a energia do elétron que foi arrancado do metal independe da intensidade da luz incidente, mas que existe uma dependência dessa energia com a frequência da radiação incidente.

Neste ponto, teve-se a oportunidade de explicar que a energia da luz emitida por uma lâmpada percorre o espaço concentrada em pacotes, os fótons, que apresentam certos valores de energia, os quanta. Portanto, a energia luminosa está quantizada. Cada fóton comporta-se como uma partícula que ao colidir com o átomo de um metal tem sua energia totalmente absorvida. Essa energia é utilizada em parte para vencer a força de ligação do elétron com o átomo e o restante transforma-se em energia cinética desse elétron emitido.

Como foi possível observar, o valor de um quantum de energia depende da frequência da radiação emitida; para a luz vermelha de $4,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, o quantum de energia ou um fóton tem $E = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \times 4,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz} = 2,97 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Outra unidade de medida bastante utilizada em Mecânica Quântica é o elétron-volt(eV), que corresponde à energia adquirida por um elétron acelerado por uma ddp e vale $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Assim a energia da luz vermelha vale em elétron-volt $1,86 \text{ eV}$ (elétron volt).

Finalizada a simulação, foi realizada uma discussão em grande grupo e concluído que a luz é formada por fótons.

Nesta etapa de aplicação do projeto iniciou-se a discussão do que seria o fóton, uma partícula ou uma onda. Introduziu-se, então, a idéia de objeto quântico através de apresentações com o projetor multimídia (Figura15).

Objeto quântico

- São sistemas como elétrons, prótons, nêutrons, fótons, átomos, etc.; pertencentes ao mundo microscópico. Obedecem as leis da Mecânica Quântica.
- Nem sempre se pode atribuir, simultaneamente, aos objetos quânticos, um conjunto de propriedades dinâmicas bem definidas, como por exemplo posição e momentum ou energia e posição.

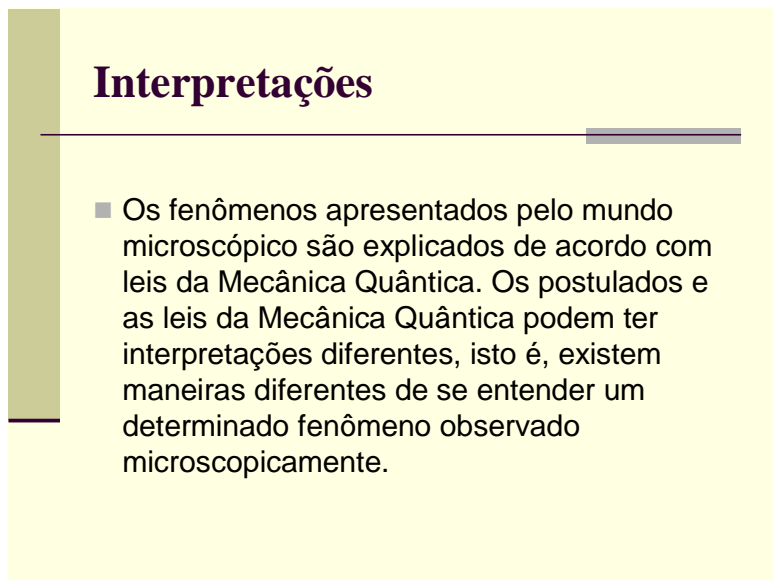
Figura 15. Lâmina nº 15.

Explicou-se que os elétrons, os prótons, os nêutrons, os fótons, o átomo, etc., pertencem ao mundo microscópico. Não obedecem as leis da Física Clássica. Dessas partículas podemos observar características ondulatórias ou corpusculares, isto é, a dualidade onda-partícula.

Comentou-se que uma característica da Mecânica Quântica é que ela trata com objetos quânticos aos quais nem sempre se pode atribuir, simultaneamente, um conjunto de propriedades dinâmicas, por exemplo, posição e momentum linear bem definidas.

4.5. Terceiro encontro

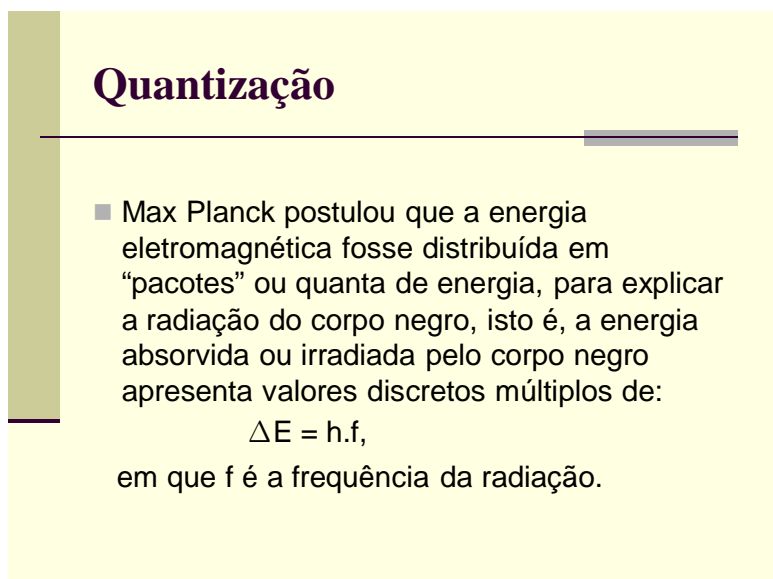
Na ocasião, foi retomado (buscando a diferenciação progressiva) o que foi tratado nas duas primeiras aulas através de apresentação em PPT no projetor multimídia, conforme ilustrado nas Figuras 16 a 19.



Interpretações

- Os fenômenos apresentados pelo mundo microscópico são explicados de acordo com leis da Mecânica Quântica. Os postulados e as leis da Mecânica Quântica podem ter interpretações diferentes, isto é, existem maneiras diferentes de se entender um determinado fenômeno observado microscopicamente.

Figura 16. Lâmina nº 16.



Quantização

- Max Planck postulou que a energia eletromagnética fosse distribuída em “pacotes” ou quanta de energia, para explicar a radiação do corpo negro, isto é, a energia absorvida ou irradiada pelo corpo negro apresenta valores discretos múltiplos de:
$$\Delta E = h.f,$$
em que f é a frequência da radiação.

Figura 17. Lâmina nº 17.

Efeito fotoelétrico

- Quando incide luz de determinada faixa de frequência sobre um metal, observamos que elétrons são arrancados do metal. Neste efeito observa-se o comportamento corpuscular da luz.
- Na simulação trabalhada observou-se que a energia da luz incidente sobre o metal para a ocorrência do efeito fotoelétrico independe de sua intensidade. Entretanto existe uma dependência dessa energia com a frequência da radiação incidente: $E = h.f$.

Figura 18. Lâmina nº 18.

Fótons

- Vimos na última aula que a luz é composta por fótons, que são “pacotes” de energia, cuja energia é dada por $\Delta E = h.f$.
- Mas afinal o fóton é uma onda ou é uma partícula?

Figura 19. Lâmina nº 19.

Também inseriu-se nesta aula o conceito de dualidade através de uma apresentação em PPT, iniciando o assunto com os conceitos de partícula e de onda clássica explicando aos alunos que uma partícula é um objeto bem pequeno que se move pelo espaço e que consideramos que não se divide. Outra característica relevante da partícula clássica é a de ter sempre uma posição bem definida e com uma velocidade precisa. Com o passar do tempo uma trajetória bem definida é descrita. Por outro lado uma onda é uma excitação que se propaga em um meio e que se espalha no espaço. A energia se propaga com a onda, que não descreve uma trajetória bem definida. As ondas são espalhadas no espaço, sem se localizarem em um ponto definido. Elas ainda apresentam alguns fenômenos típicos, como a interferência e a difração.

A seguir, nas figuras 20 a 24, a apresentação realizada.

Dualidade onda-partícula

- Conceito de partícula clássica:
uma partícula é um objeto que se move pelo espaço tendo uma posição central bem definida e uma velocidade precisa.

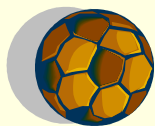
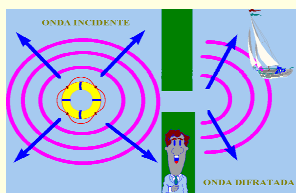


Figura 20. Lâmina nº 20.

Dualidade onda-partícula

- Conceito de onda clássica:
uma onda é uma excitação que se propaga em um meio e que se espalha no espaço. A energia se propaga com a onda, que não tem uma trajetória bem definida e não se localiza em um ponto. Uma onda apresenta alguns fenômenos típicos como interferência e difração.



Fonte: www.if.ufrj.br/teaching/fis2/ondas2/difr2.gif

Figura 21. Lâmina nº 21.

Já no domínio atômico o confronto entre onda e matéria (partícula) deixa de existir, com momentum e comprimento de onda sendo associados tanto a radiações como a partículas.

Explicou-se que todo objeto quântico apresenta um caráter ondulatório, podendo produzir efeitos de difração e interferência, e um caráter corpuscular que é observado no efeito fotoelétrico ou no efeito Compton, onde um fóton de raios-X, por exemplo, de frequência f , atinge um elétron em repouso, resultando na emissão de outro fóton, de frequência $f' < f$, e no deslocamento do elétron. Juntos, o elétron em movimento e o fóton de menor frequência têm o mesmo momentum linear do fóton original. Como conciliar estas duas idéias distintas?

A dualidade onda-partícula

- No domínio atômico deixa de existir o confronto entre onda e partícula, com momentum(partícula) e comprimento de onda(onda) sendo associados tanto a radiações como a partículas.
Todo objeto quântico apresenta um caráter ondulatório(difração e interferência) e um corpuscular(Efeito Fotoelétrico).
- Como conciliar estas duas idéias distintas?

Figura 22. Lâmina nº 22.

Nesse momento foi lembrado aos alunos que a interpretação ortodoxa (Copenhaga) da Mecânica Quântica atribui a qualquer sistema microscópico aspectos ondulatórios e corpusculares, isto é, fótons (luz) apresentam comportamento de ondas ou partículas assim como elétrons, prótons, nêutrons ou até mesmo objetos mais massivos apresentam propriedades de ondas com uma determinada frequência e energia.

Dualidade

- A Interpretação de Copenhaga da Mecânica Quântica atribui a qualquer partícula aspectos ondulatórios e corpusculares, isto é, fótons apresentam comportamento de onda e partícula, assim como elétrons, prótons, nêutrons ou até mesmo objetos mais massivos também. De acordo com a observação realizada, isto é, conforme o experimento proposto pode-se enfatizar a verificação da característica de onda ou da de partícula . Mas não ambas ao mesmo tempo no mesmo experimento.

Figura 23. Lâmina nº 23.

Exemplos

- Um fenômeno corpuscular(partícula):
Efeito fotoelétrico: neste experimento é demonstrado o aspecto corpuscular da radiação(luz-fótons).
- Um fenômeno ondulatório:
Interferência: em um experimento de dupla fenda é demonstrado o aspecto ondulatório do objeto quântico(fótons, elétrons).

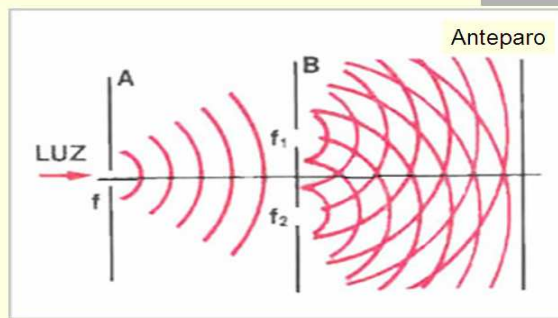
Figura 24. Lâmina nº 24.

Neste encontro foi explicada também aos alunos a experiência de dupla-fenda de Young. Young (1773 - 1829) fez seu experimento entre os anos de 1800 e 1804, usando 2 anteparos, um dos quais possuía 2 fendas estreitas por onde a luz era difratada. Se a luz fosse constituída de partículas que viajassem sempre em linha reta, uma fonte que estivesse de um lado do primeiro anteparo com as fendas, deveria produzir faixas luminosas muito finas no segundo anteparo, do outro lado.

De outra forma, se a luz fosse composta por ondas, a figura no anteparo deveria ser diferente. A partir das duas fendas, teríamos duas frentes de ondas esféricas, cuja origem, era a onda originada na fenda pela qual passara. Essas ondas propagar-se-iam independentemente uma da outra e interfeririam entre si. No segundo anteparo, onde as ondas encontravam-se crista com crista, ou vale com vale, elas somariam luminosidade formando interferência construtiva, gerando uma faixa clara e onde as ondas se encontravam crista com vale, elas provocariam uma interferência destrutiva, resultando uma faixa escura no anteparo.

Young foi quem, pela primeira vez, comprovou que há interferência da luz quando dois feixes luminosos se cruzam. O esquema utilizado por Young está apresentado nas figuras 25 e 26.

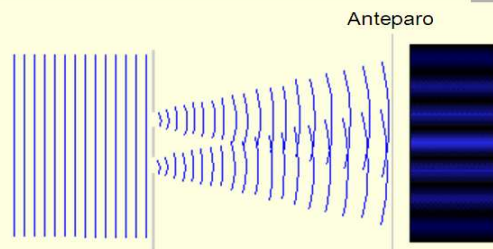
Experiência de Young(1804)



Esquema de montagem de Young para interferência.
Fonte: http://profs.ccems.pt/PauloPortugal/CFQ/Fsica_Moderna/Onda_Corpsculo.htm

Figura 25. Lâmina nº 25.

Experiência de Young(1804)



Esquema de montagem de Young para interferência da luz.
Fonte: <http://br.geocities.com/saladefisica9/biografias/young.htm>

Figura 26. Lâmina nº 26.

Na Figura 25, a luz emitida por uma fonte atravessa um pequeno orifício de um anteparo, difratando-se (na linguagem ondulatória clássica). Na frente desta onda há outro anteparo com dois orifícios F_1 e F_2 fazendo com que as duas ondas geradas novamente sejam difratadas. As ondas luminosas assim obtidas se superpõem, originando uma figura de interferência.

No anteparo obtêm-se regiões claras e escuras. As regiões claras são aquelas em que dois vales ou duas cristas se superpõem. Há neste caso uma *interferência construtiva*. As regiões escuras são aquelas em que um vale e uma crista se superpõem. Neste caso tem-se uma *interferência destrutiva*.

Para os elétrons, sempre considerados partículas, o experimento demonstrou efeitos de difração e interferência, características ondulatórias.

Depois dessa introdução os alunos realizaram uma simulação que é encontrada no sítio: www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html. De acordo com a observação realizada, isto é, conforme o experimento proposto pode-se verificar a característica de

onda ou de partícula, mas nunca ambas ao mesmo tempo. O roteiro da atividade pode ser encontrado no Apêndice 4 e no Texto de Apoio ao Professor.

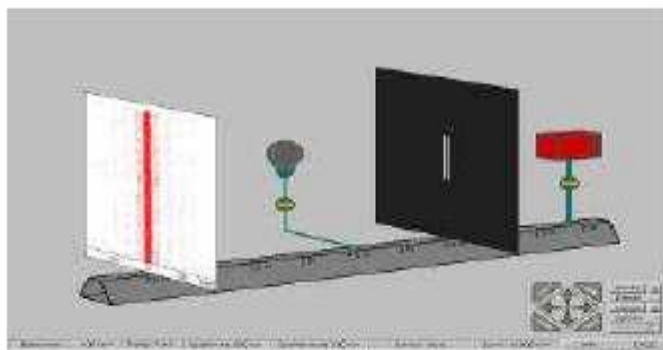


Figura 27. Tela do programa Doppelspalt .

Na simulação os alunos utilizaram um simulador de canhão de partículas (elétrons, fótons, bolinhas), onde os mesmos deveriam reconhecer o comportamento dual dos elétrons e fótons. Inicialmente, os alunos utilizaram um canhão de partículas clássicas; a partir da simulação na tela, eles deveriam reconhecer os padrões que caracterizam o comportamento corpuscular destas partículas. Em seguida, os alunos realizaram o experimento trocando de partículas, utilizando um canhão de elétrons monoenergéticos direcionados a uma fenda dupla e depois de fótons, simulando a experiência de Young. Neste momento, foram incentivados a identificar os comportamentos corpusculares e ondulatórios dos objetos quânticos, a partir do que aparecia na tela.

Foi comentado que (Menezes, 2005) o caráter ondulatório da luz persiste na maneira com que ela se propaga, realizando difração, ou seja, espalhando-se ao passar por uma fenda ou transpor obstáculos, e realizando interferência. Não é muito fácil entender uma entidade que se propaga como onda, mas atinge a matéria como partícula, no entanto, de certa forma, percebe-se cotidianamente esse caráter dual da luz, que projeta penumbra atrás de um anteparo em cujas bordas se difrata, mostrando que tem comportamento ondulatório, ao passo que, ao provocar emissão de um elétron de uma placa metálica, deixa marca granular no ponto onde toca, revelando ser partícula.

A primeira grande unificação conceitual quântica foi mostrar que algumas ondas como os raios X e os raios gama atingem a matéria como se fossem partículas e as partículas se propagam como se fossem ondas. O infravermelho, a luz visível, o ultravioleta e as demais radiações eletromagnéticas revelam seu caráter granular mais nitidamente quanto mais alta for sua frequência.

Os fótons deslocam-se como ondas e elétrons, após terem atravessado um cristal, projetam um padrão de difração típico de um comportamento ondulatório. Assim como nêutrons, prótons e demais objetos quânticos também se propagam como ondas. A rede cristalina é capaz de difratar o elétron porque as distâncias entre as moléculas do cristal têm valor próximo ao seu comprimento de onda.

Em princípio, uma pedra em movimento tem, associado a ela, um comprimento de onda, só que de valor tão pequeno, que jamais ela poderia passar por um vão tão estreito para, difratando, mostrar seu caráter ondulatório.

Faz-se aqui necessário retomar o exemplo de fenômeno corpuscular lembrando o efeito fotoelétrico. Quando raios de luz visível incidem sobre a superfície de certos metais, alguns elétrons são emitidos, são arrancados desta superfície. A luz de alta energia é capaz de arrancar elétrons ao incidir sobre uma placa metálica, fenômeno conhecido como efeito fotoelétrico.

A luz incidente é formada por “pacotes” ou quanta de energia igual a $E=h.f$, ou seja, é constituída por “corpúsculos” ou partículas de luz que são os fótons. O momentum transferido a um elétron só depende da frequência da luz e não da intensidade do feixe, isto é, ao atingir um elétron, a luz se comporta como se fosse constituída de partículas colidindo com ele. A energia revela um caráter granular ao interagir com a matéria. Com esse experimento observa-se que a luz é formada por partículas.

Por outro lado um fenômeno ondulatório é observado na interferência, quando duas ondas ocupam a mesma região do espaço. O resultado da interferência entre duas ondas depende da diferença de fase entre elas. A interferência é um fenômeno típico das ondas clássicas. Pode-se observá-la, por exemplo, num recipiente de água em que se produzem ondas por meio de dois lápis que tocam periódica e sincronizadamente a superfície da água. Como resultado, forma-se na superfície um padrão característico, que denomina-se figura de interferência.

A fim de demonstrar melhor o contraste entre “comportamento ondulatório” e “comportamento corpuscular” foi analisado o experimento de Young de dupla fenda em relação aos conceitos clássicos de onda e de partícula.

Quando ondas passam por um par de fendas e são detectadas sobre um anteparo de observação, observa-se no anteparo interferência (franjas de interferência).

Consideremos uma metralhadora giratória como, por exemplo, na simulação que dispara balas varrendo direções ao acaso, que irão passar pelas duas fendas do experimento; um detector varre o anteparo de observação e registra a probabilidade de encontrar-se uma bala em determinado ponto do anteparo. Observa-se no anteparo uma distribuição de probabilidade (normal). Na simulação foi possível observar este fenômeno.

Ao fazer passar elétrons ou outro objeto quântico pela dupla fenda constatou-se que se registra sempre um número inteiro de elétrons no 2º anteparo, como as partículas clássicas. No anteparo de observação, a distribuição de probabilidades, depois de um período de tempo, não é igual à distribuição de probabilidades como do caso das partículas clássicas, senão que aparece uma figura de interferência como no caso da experiência com ondas. Isto é, os elétrons chegam ao anteparo inteiros, como partículas clássicas, mas a distribuição de posição é similar às franjas de interferência das ondas. Também observou-se isso durante a simulação virtual.

Segundo Bohr, se em um experimento o caráter de partícula é manifesto, como no efeito fotoelétrico ou no efeito Compton, não se observa simultaneamente seu caráter ondulatório e vice-versa, através do mesmo experimento. O que possibilita a observação de um caráter ou outro é a natureza do experimento. Ao fazer um experimento de difração ou interferência, o caráter ondulatório se manifesta. Aspectos ondulatórios e corpusculares dos sistemas físicos são aspectos excludentes classicamente, mas complementares no mundo microscópico.

Complementaridade

- Segundo Bohr, aspectos de partícula e de onda em sistemas físicos são complementares. Se em um experimento o caráter de partícula se manifesta, não se registra, com o mesmo experimento, o seu caráter ondulatório e vice-versa. Se fizermos um experimento de difração ou interferência, o comportamento ondulatório é manifesto.
- O comportamento de um objeto quântico pode ser ou de partícula ou de onda, dependendo da situação experimental. As informações sobre o objeto quântico são obtidas após o resultado experimental.

Figura 28. Lâmina nº 27.

Foi explicado que De Broglie foi o primeiro a compartilhar esta idéia, concebendo a hipótese de que partículas, como elétrons, não seriam tão diferentes de ondas, como a luz. Se a luz podia colidir com elétrons (efeito fotoelétrico), como se fosse partícula, então elétrons deveriam difratar-se ao passar por fendas, orifícios e outros obstáculos, como ondas. Sugeriu que o momentum p de um objeto quântico pode ser determinado por $p = h/\lambda$, onde λ é o comprimento de onda associado à partícula. Nesta equação consegue-se observar que o momentum p corresponde à característica corpuscular e λ corresponde ao seu caráter ondulatório.

Em processos no domínio atômico a distinção entre onda e matéria deixa de existir, com momentum linear e comprimentos de onda sendo associados tanto a radiações como a partículas.

De Broglie

- Propôs a hipótese de que partículas quânticas, como elétrons, não seriam tão diferentes das constituintes da luz. Se a luz pode colidir com elétrons, como se composta por partículas, então elétrons devem difratar-se ao passar por fendas, como ocorre com ondas. De Broglie sugeriu que o módulo do momentum $|p|$ de um objeto quântico possa ser determinado por $|p| = h/\lambda$.

Figura 29. Lâmina nº28.

Quanto maior a frequência de radiação, mais perceptível será seu caráter granular e maior sua capacidade de colidir com a matéria, pois os fótons colidirão com maior energia contra átomos do material atingido. As “pancadas” do raio X, por exemplo, são capazes de quebrar ligações químicas da informação genética das células vivas, podendo causar câncer.

Experimentos foram realizados para comprovar as idéias de De Broglie; em 1927 G.P. Thompson mostrou que os elétrons sofrem difração; com o padrão de difração ele mediu o λ e estava de acordo com $\lambda=h/p$. Não somente os elétrons, mas qualquer objeto material possui uma onda “associada”. Ao tomar como exemplo uma bala, por que não se consegue observar interferência em um experimento de dupla fenda? Porque o tamanho das balas é muito grande e seria necessária uma fenda muito pequena para se observar a interferência. Ao associar um comprimento de onda à bala tem-se, da relação $\lambda=h/p$, onde p é o momentum da bala, que o comprimento de onda seria da ordem de 10^{-30} m. Para detectar aspectos ondulatórios no movimento da matéria precisa-se de fendas de dimensões pequenas, neste caso a bala nem passaria pela fenda. Os aspectos ondulatórios tornam-se dificilmente observáveis quando se tem λ muito pequeno. Como o valor da constante de Planck(h) é muito pequeno, isto faz com que a existência de ondas de matéria no mundo macroscópico seja insignificante. Para partículas macroscópicas a massa é grande e, conseqüentemente, o momentum será alto, portanto, o comprimento de onda associado à matéria será imperceptível. No mundo microscópico as massas das partículas são muito pequenas, logo λ será grande o suficiente para as propriedades ondulatórias serem observadas experimentalmente.

Assim como fótons colidem como se fossem partículas muito pequenas, elétrons se difratam como ondas, cujo comprimento de onda é muito pequeno, por isso só difratam no domínio atômico, como no interior de cristais. Para objetos maiores como balas ou bolas, o caráter ondulatório é

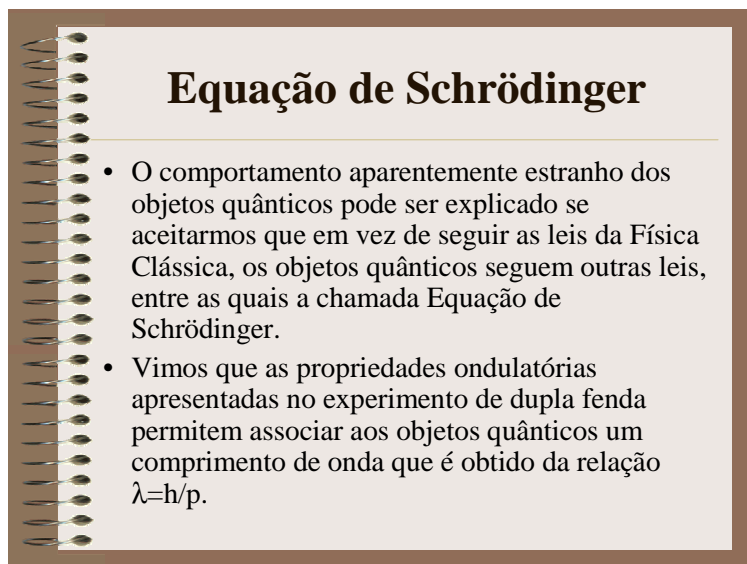
menos perceptível, uma vez que seu comprimento de onda e a fenda por onde teriam de passar para se observar sua difração seriam muito menores que os objetos.

Entretanto, este caráter da matéria só é manifesto se o comprimento de onda é comparável às dimensões envolvidas no experimento.

4.6. Quarto encontro

Neste encontro inicialmente foi apresentado um vídeo produzido por David Chamberlain para *Northey Productions* for TV Ontário, Canadá, 1985, que exhibe o modelo de partícula de Newton para a luz, o modelo ondulatório de Huygens para a luz, a experiência de dupla-fenda de Young, o modelo eletromagnético da luz de Maxwell, a idéia do quantum de Planck, o efeito fotoelétrico e a explicação para o fenômeno apresentada por Einstein através do fóton, o efeito Compton e as ondas de matéria de De Broglie. Foi também trabalhado o conceito de função de onda, analisada a equação de Schrödinger unidimensional dependente do tempo, o caráter probabilístico da Mecânica Quântica, a superposição de estados, o paradoxo do Gato de Schrödinger e o Princípio da Incerteza proposto por Heisenberg.

Foi explicado aos alunos que a função $\Psi(x,t)$ de onda descreve as ondas de matéria. $\Psi(x,t)$ é a solução da equação de Schrödinger dependente do tempo e é uma função complexa, contendo uma parte real e outra imaginária. O módulo ao quadrado da função de onda pode ser comparado aos campos elétrico e magnético originados da radiação eletromagnética.



Equação de Schrödinger

- O comportamento aparentemente estranho dos objetos quânticos pode ser explicado se aceitarmos que em vez de seguir as leis da Física Clássica, os objetos quânticos seguem outras leis, entre as quais a chamada Equação de Schrödinger.
- Vimos que as propriedades ondulatórias apresentadas no experimento de dupla fenda permitem associar aos objetos quânticos um comprimento de onda que é obtido da relação $\lambda=h/p$.

Figura 30. Lâmina n° 29.

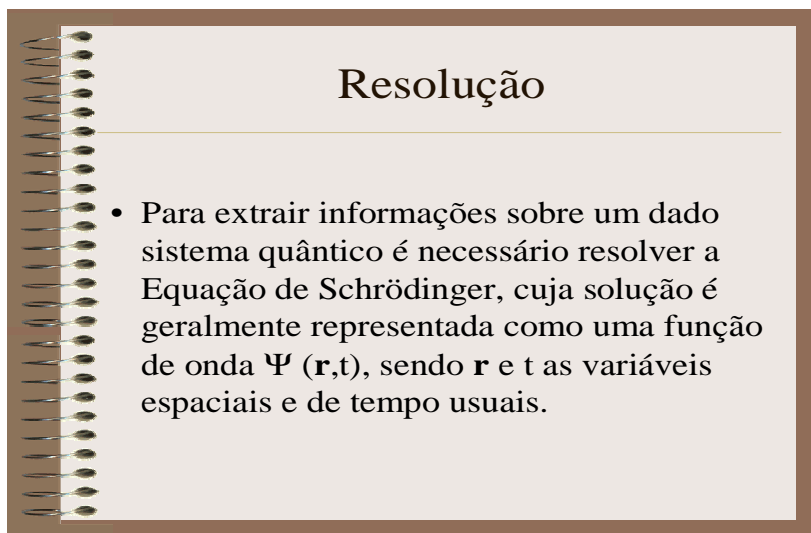


Figura 31. Lâmina nº 30.

Segundo Born, físico alemão, que ganhou o Prêmio Nobel da Física em 1954 por seu trabalho sobre Teoria Quântica, a conexão entre as propriedades ondulatórias da função de onda e as propriedades mecânicas de uma partícula associada estava não na função em si, mas no seu módulo ao quadrado. Born interpretou $|\Psi(x,t)|^2$ como uma densidade de probabilidades, isto é, no mundo microscópico deve-se falar em probabilidades de a partícula estar em determinada posição, probabilidade de ter um certo momentum, etc. Então, $|\Psi(x,t)|^2 = \Psi(dx,t)^* \Psi(dx,t)$ representa a probabilidade de a partícula ser encontrada no intervalo $(x+dx)$ no instante t . Probabilidades e valores médios são as informações obtidas a partir do conhecimento da função de onda do elétron.

Nesse momento, foi ressaltado aos alunos que Erwin Schrödinger desenvolveu um formalismo que se propunha a descrever a característica ondulatória da matéria. Ele procurou estabelecer uma equação diferencial que expressasse o comportamento das partículas; sabe-se que na Mecânica Quântica partículas podem ter aspectos ondulatórios e que ondas podem ter aspectos corpusculares.

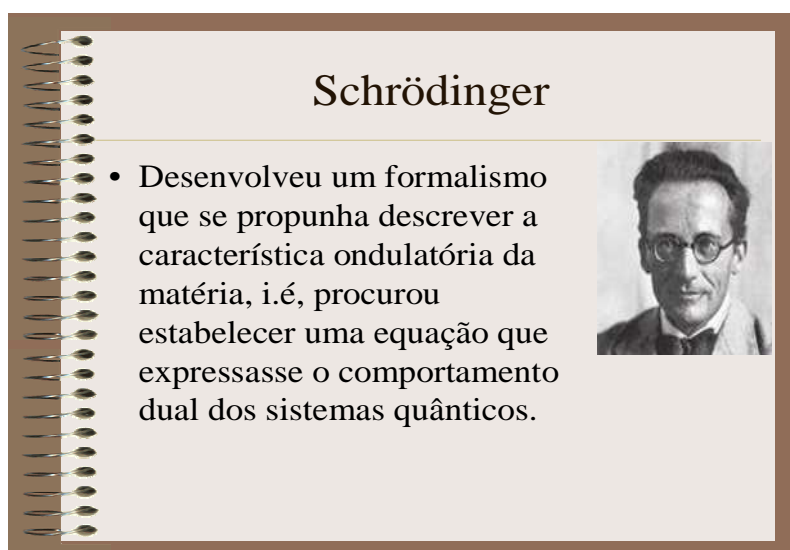


Figura 32. Lâmina nº 31.

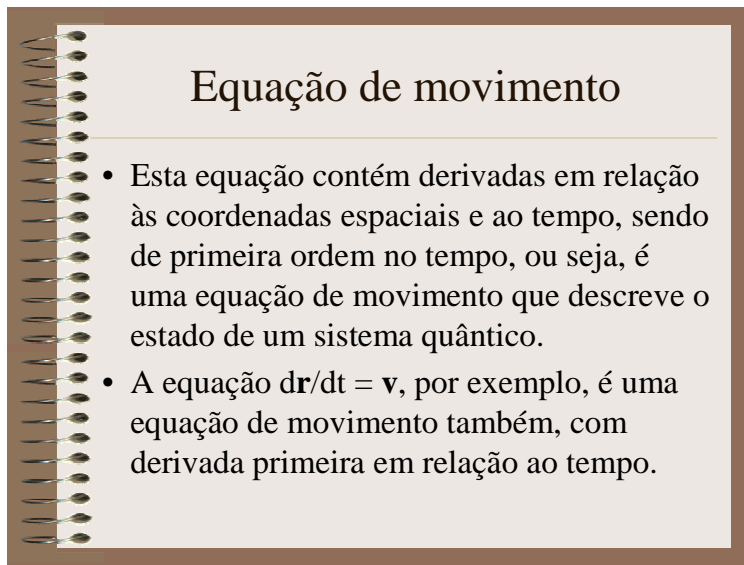


Figura 33. Lâmina nº 32.

Sabe-se também que a energia correspondente a uma partícula livre é sua energia cinética

dada por $E_c = \frac{1}{2} m v^2$, que pode ser escrita em função do momentum linear (caso não relativístico):

$$E_c = \frac{1}{2} m v v \quad \Rightarrow \quad E_c = \frac{1}{2} \frac{(m) m v v}{(m)} \Rightarrow E_c = \frac{p^2}{2m}.$$

A expressão de uma onda livre é dada por:

$$A e^{\pm i(kx - \omega t)} \quad (\text{caso unidimensional})$$

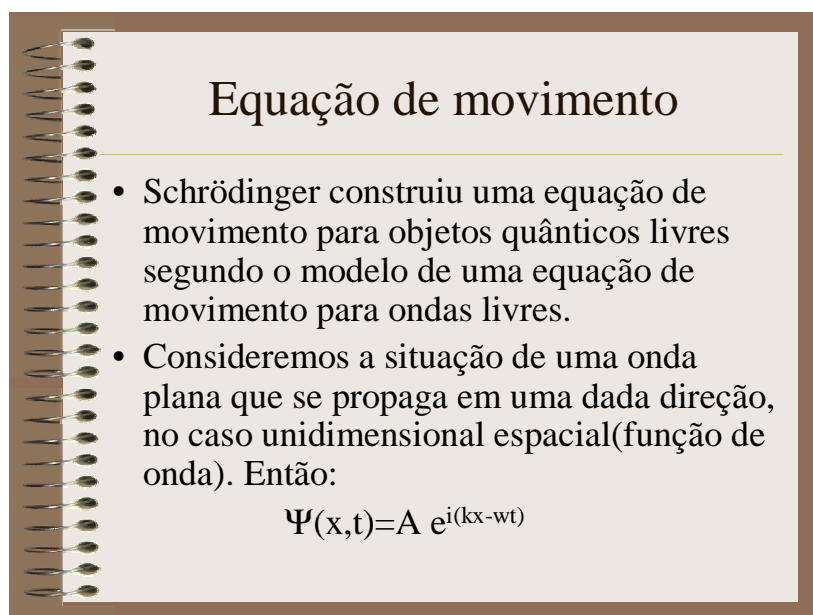


Figura 34. Lâmina nº 33.

Era necessário encontrar uma equação que descrevesse a energia total do elétron e do fóton, que tivesse características de partícula e de onda. Para tanto recorreu-se às relações:

$$E = \hbar\omega \Rightarrow \omega = \frac{E}{\hbar} \quad (\text{Einstein})$$

$$p = \hbar k \Rightarrow k = \frac{p}{\hbar} \quad (\text{De Broglie})$$

Einstein e de Broglie

- Schrödinger recorreu às relações propostas por Einstein e de Broglie :
 $E=h.f$ e $\lambda=h/p$,
 que podem ser reescritas como $E=\hbar.\omega$ e $p=\hbar.k$. Onde $\hbar = h/2\pi$, obtendo:
 $\Psi (x,t)=A e^{i/h(px-Et)}$

Figura 35. Lâmina nº 34.

Função de onda

- Verifica-se que, para a situação da partícula livre, a função de onda satisfaz a equação:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2}$$
 se a relação entre energia (E) e momentum linear (p) para uma partícula clássica livre, de massa m, for adotada:

$$E = \frac{p^2}{2m}$$

Figura 36. Lâmina nº 35.

Substituindo estas duas relações em $e^{i(kx-wt)}$, tem-se ainda:

$$\psi(x, t) = Ae^{\pm i\left(\frac{px}{\hbar} - \frac{Et}{\hbar}\right)} \Rightarrow \psi(x, t) = Ae^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)} \quad (1)$$

Derivando a equação (1) em função do tempo, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} Ae^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)} = -\frac{i}{\hbar}E Ae^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)}$$

Multiplicando-se os dois lados por $i\hbar$, tem-se:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} Ae^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)} = i\hbar \left(-\frac{i}{\hbar}E\right) Ae^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)}$$

,simplificando \hbar , sabendo que $i^2 = -1$

tem-se:
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} Ae^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)} = EA e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)}$$

Isso significa que a operação matemática $i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ (derivar em relação ao tempo e multiplicar por $i\hbar$), aplicada à função de onda de um objeto quântico livre $\Psi(x, t)$, explicita o valor da energia mecânica, E, do sistema físico descrito por ψ .

$$\Rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = E\Psi$$

Da dedução acima, decorre que:

$i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ é o operador que revela a energia, quando é aplicado à função $e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)}$ pois

obtém-se a função novamente multiplicada por um valor, que é chamado de “autovalor”. No caso é a energia E.

Derivando a equação (1) em função de x duas vezes obtém-se:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)} = \frac{i^2}{\hbar^2} p^2 e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)}$$

Multiplicam-se os dois lados da igualdade por $-\frac{\hbar^2}{2m}$ para se obter $\frac{p^2}{2m}$:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} A e^{\frac{i}{\hbar}(px-Et)} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{i^2}{\hbar^2} p^2 A e^{\frac{i}{\hbar}(px-Et)}, \text{ simplificando } \hbar^2 \text{ e } i^2 = -1$$

tem-se:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} A e^{\frac{i}{\hbar}(px-Et)} = \frac{p^2}{2m} A e^{\frac{i}{\hbar}(px-Et)},$$

$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$ é outro operador, o operador energia cinética, que quando aplicado na função (1) obtém-se a função novamente multiplicada pelo autovalor $\frac{p^2}{2m}$.

Como pode ser observado, esta relação supõe que existe proporcionalidade entre momentum e número de onda ($p = \hbar \cdot k$), bem como entre energia e frequência ($E = \hbar \cdot \omega$).

Tem-se, então, as expressões em termos de operadores. O valor das grandezas físicas que tenham valores definidos num estado quântico, como energia e momentum, é obtido a partir da função de onda, por meio de operadores aplicados a ela.

Schrödinger tinha a intenção de escrever uma equação similar à equação da onda, o formalismo de operadores diferenciais na Mecânica Quântica. Os operadores diferenciais introduzidos por ele são os operadores energia e momentum.

Retomando a Equação de Schrödinger e generalizando, ao considerar a energia total como a soma das energias cinética e potencial, na analogia clássica:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{cin}} + E_{\text{pot}} = \frac{p^2}{2m} + V$$

A Equação de Schrödinger será:

$$E_{\text{total}} \psi(x,t) = E_{\text{c}} \psi(x,t) + E_{\text{pot}} \psi(x,t)$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(x,t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x,t) + V(r)\psi(x,t)$$

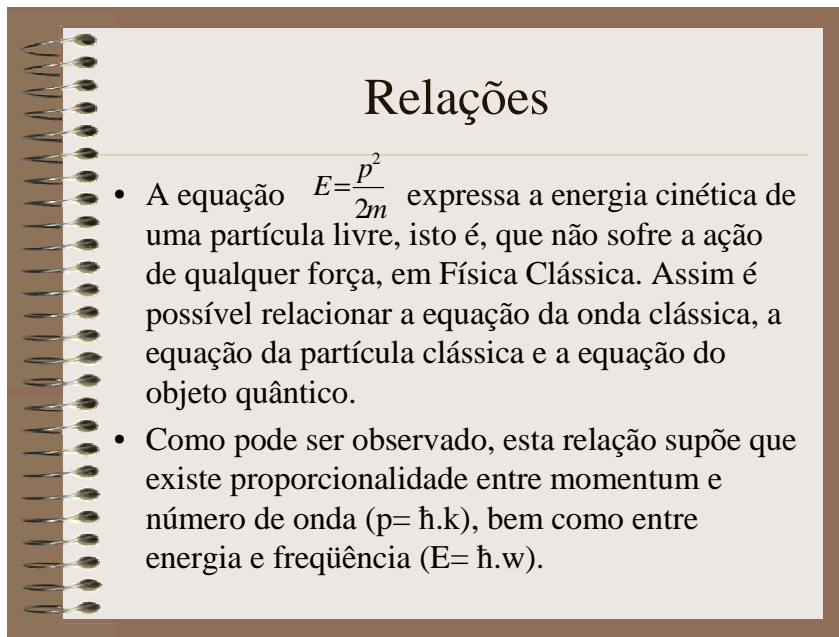


Figura 37. Lâmina nº 36.

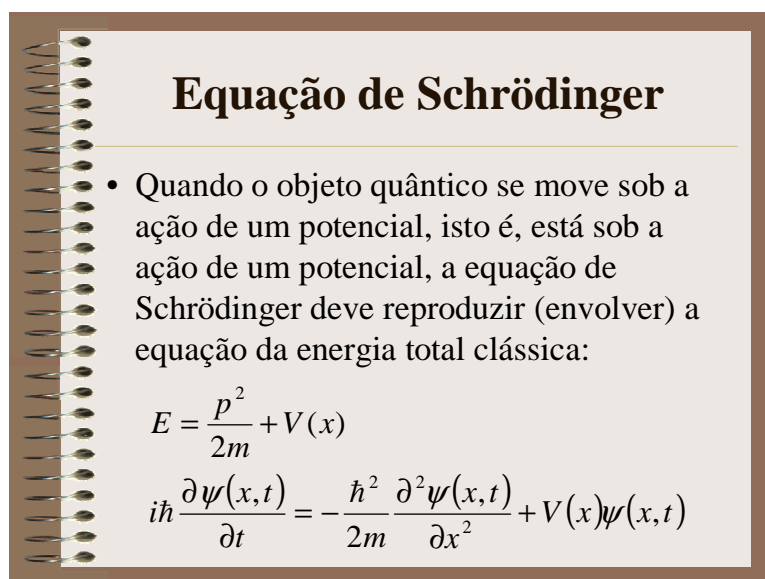


Figura 38. Lâmina nº 37.

Essa equação é unidimensional, válida apenas quando os problemas podem ser reduzidos a uma dimensão, como é o caso de um objeto quântico movendo-se ao longo do eixo x.

Dadas as condições de contorno do problema particular a resolver, esta equação dá os únicos valores que a energia pode adotar em um problema particular.

Neste ponto foi destacado que a equação de Schrödinger é uma equação postulada, de derivadas parciais, relativas ao tempo e posição, descreve a evolução de um estado quântico, é escrita em termos de operadores, é uma equação de movimento. Sua solução Ψ é uma função

complexa das variáveis posição e tempo e compreende uma parte real e imaginária. Isto não é problema para a interpretação, pois o quadrado do seu módulo, um número real, corresponde a uma probabilidade.

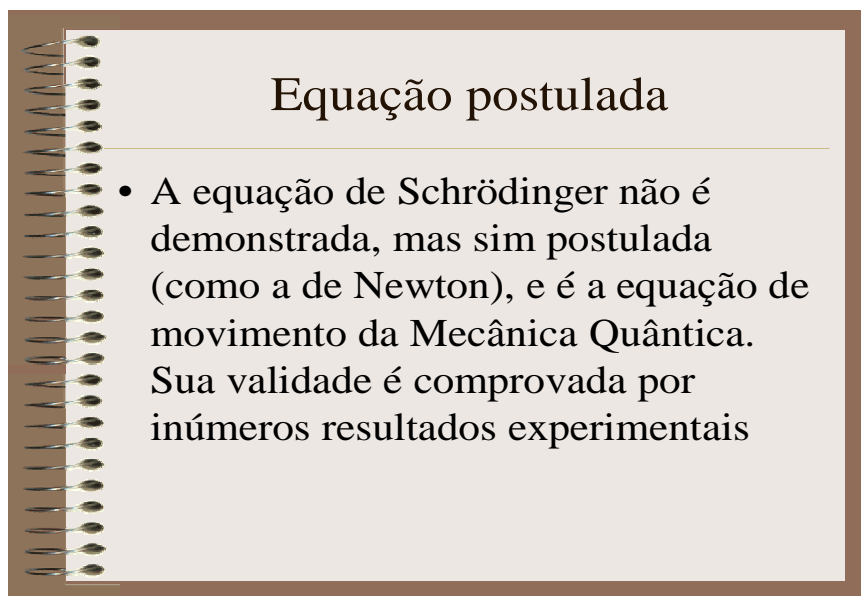


Figura 39. Lâmina n° 38.

Em relação ao caráter probabilístico da Mecânica Quântica foi explicado aos alunos que o quadrado da função de onda de uma partícula ($|\Psi|^2$) é interpretado como a probabilidade de se encontrar o objeto quântico em uma determinada região do espaço ($x, x+dx$) em certo instante de tempo. A função de onda é complexa, em geral, anulando-se nos pontos onde a probabilidade de encontrar a partícula é nula.

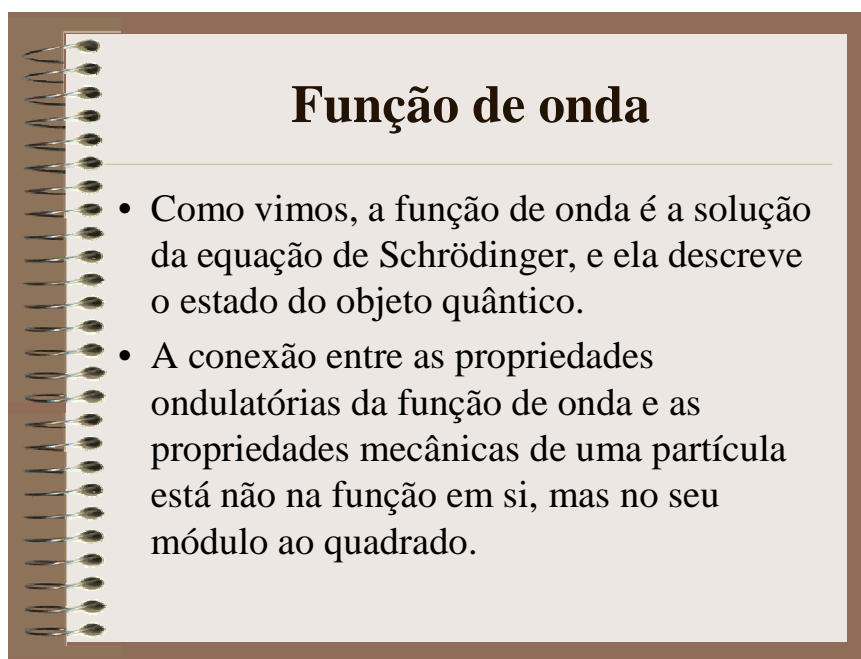


Figura 40. Lâmina n° 39.

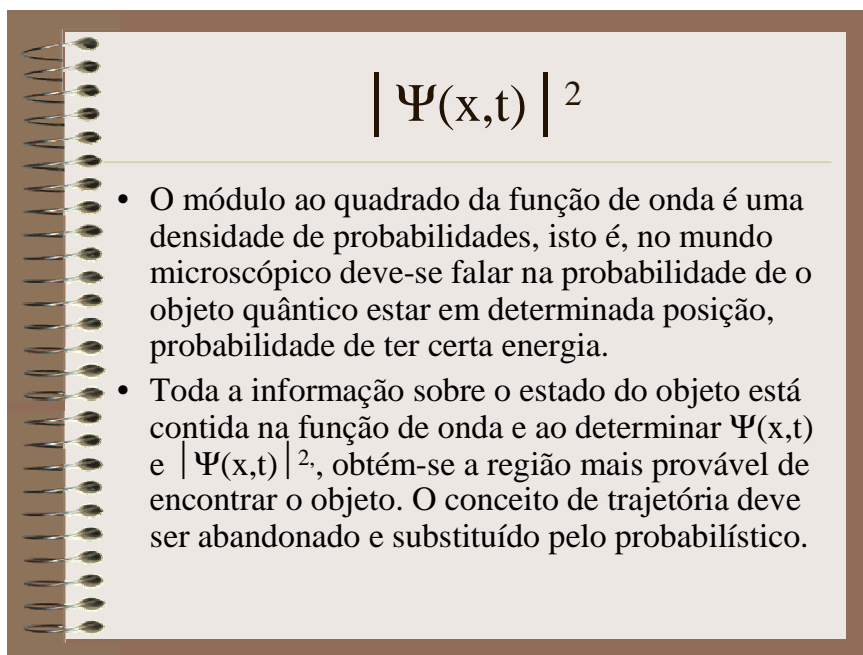


Figura 41. Lâmina nº 40.

A partir da equação de Schrödinger não é possível determinar a trajetória do elétron em torno do núcleo mas, a uma dada energia do sistema, obtém-se então a região mais provável de encontrá-lo, como sugere a Figura 42.

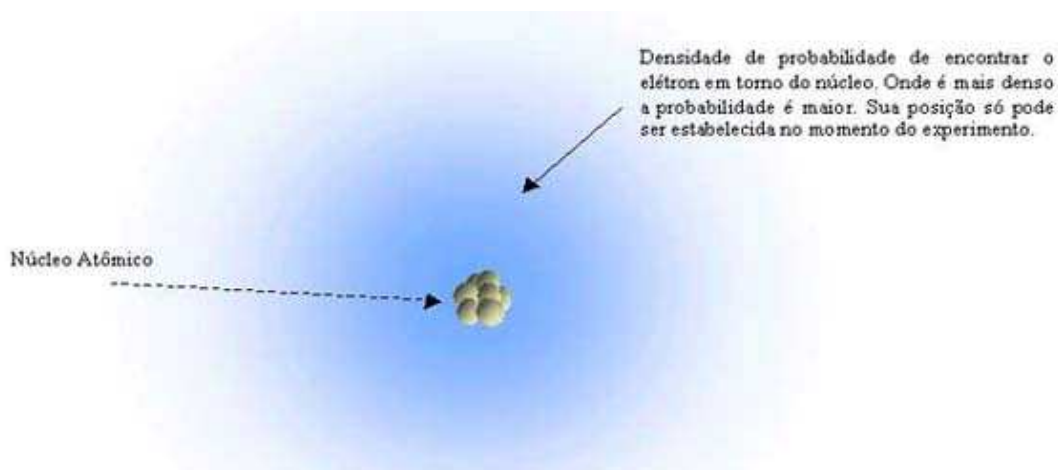


Figura 42. Densidade de probabilidade.

Fonte: www.comciencia.br

Probabilidade no sentido quântico

- No experimento de dupla fenda o padrão observado são faixas claras e escuras. Estas regiões se referem a fótons que estão incidindo ou não estão incidindo sobre o anteparo, isto é, na faixa escura temos probabilidade zero (ou quase) de o fóton incidir naquela região e na faixa clara temos o maior valor da probabilidade de encontrarmos o fóton. A responsável pelos valores dessas probabilidades é a função de onda.

Figura 43. Lâmina nº 41.

Orbitais

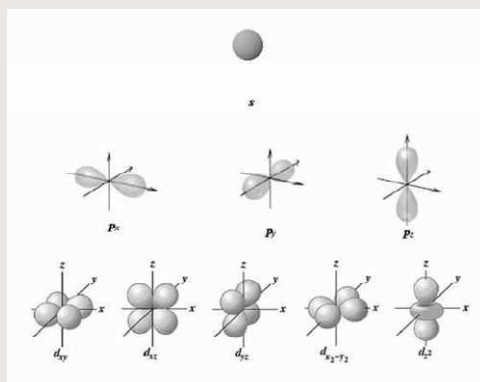


Figura 44. Lâmina nº 42.

Nesse ponto, foi oportuno introduzir o conceito de superposição de estados, onde um sistema quântico pode existir em uma combinação de múltiplos estados, cada um com características físicas bem definidas, a chamada superposição de estados.

Superposição de estados

- Um sistema quântico pode existir em uma combinação de múltiplos estados, cada um com características físicas bem definidas.
- Princípio da Superposição Linear de estados: dados dois possíveis estados de um objeto ou sistema quântico, então a combinação linear deles também é um estado possível para o objeto ou sistema.

Figura 45. Lâmina nº 43.

O paradoxo do Gato de Schrödinger foi tratado através de um texto que é encontrado no Texto de Apoio ao Professor de Física.

Paradoxo do Gato de Schrödinger



Figura 46. Lâmina nº 44.

Neste paradoxo se evidencia como a superposição linear de estados pode gerar uma conclusão absurda quando levada ao nível macroscópico.

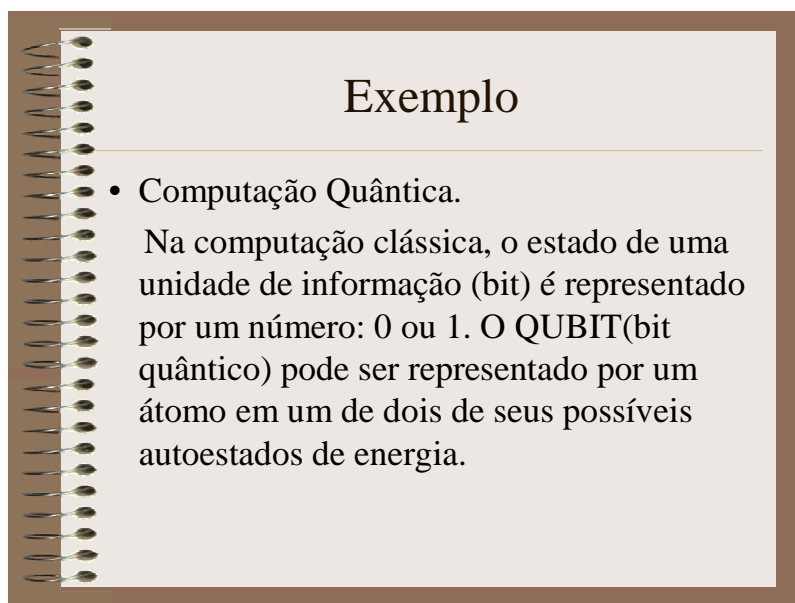
Para ressaltar o que significaria a superposição de estados para objetos macroscópicos e o absurdo a que isso, mal interpretado levaria, Schrödinger em 1935 formulou seu famoso paradoxo, abaixo exposto.

Um gato é fechado dentro de uma câmara de aço junto com um pouco de uma substância radioativa, que tem uma probabilidade de 50% de decair e de acionar um detector, em certo intervalo de tempo. Ligado a este detector há um dispositivo que funciona de tal maneira que, se o detector for disparado, o gato morre, enquanto ele permanece vivo se nenhuma radiação for detectada no intervalo de tempo. A Mecânica Quântica descreve o estado do elemento radioativo como uma superposição de estados de decaimento e não decaimento do material radioativo. Qual será o estado do sistema macroscópico, como um todo, ao final do intervalo de tempo?

Não existe apenas um estado em que o gato esteja vivo e um estado que o gato esteja morto, senão que as duas situações (ambos estados) coexistem. O paradoxo diz que, ao abrir-se a câmara, será encontrado aleatoriamente um gato vivo ou um gato morto, pois apenas um dos estados é registrado na medida.

Supõe-se que se faça uma medida da energia de um sistema, encontrando um valor E . Isso quer dizer que logo após a medida, o sistema está descrito pela autofunção Φ_E correspondente a E . Antes da medida o sistema não se encontrava em qualquer autoestado de energia particular, isto é, não possuía uma energia definida, diz-se então, que ele se encontrava em uma superposição de autoestados (de energia, no caso). Born afirmava que o indeterminismo na mecânica quântica é intrínseco ao problema, em nível microscópico. Não há como, antes da medida para um estado qualquer do sistema, saber que resultado ocorrerá, ou seja, antes da medida o sistema se encontra no estado geral. Após a medição a função de onda será um dos autoestados possíveis. Isto é o colapso da função de onda.

Como exemplo de uma superposição de estados, pode ser encontrado na computação quântica, cuja apresentação encontra-se nas Figuras 47 a 49:



Exemplo

- Computação Quântica.
Na computação clássica, o estado de uma unidade de informação (bit) é representado por um número: 0 ou 1. O QUBIT (bit quântico) pode ser representado por um átomo em um de dois de seus possíveis autoestados de energia.

Figura 47. Lâmina nº 45.

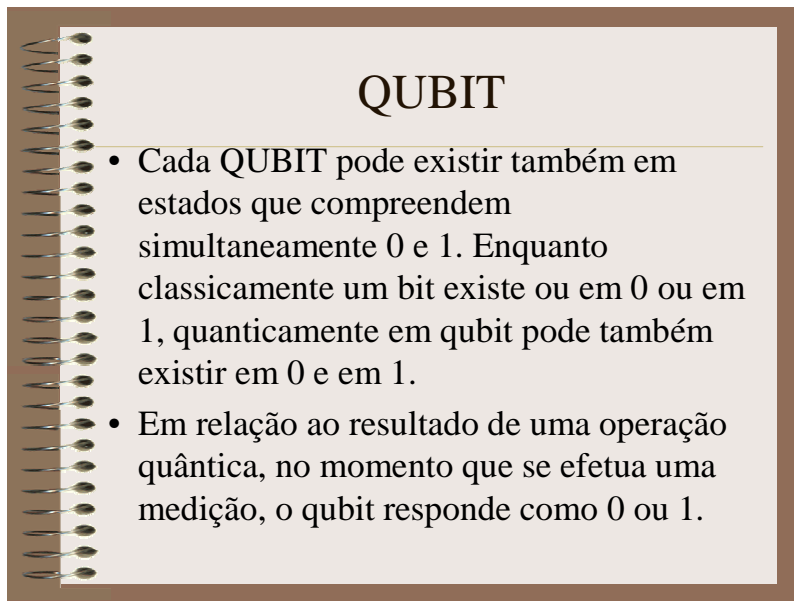


Figura 48. Lâmina n° 46.

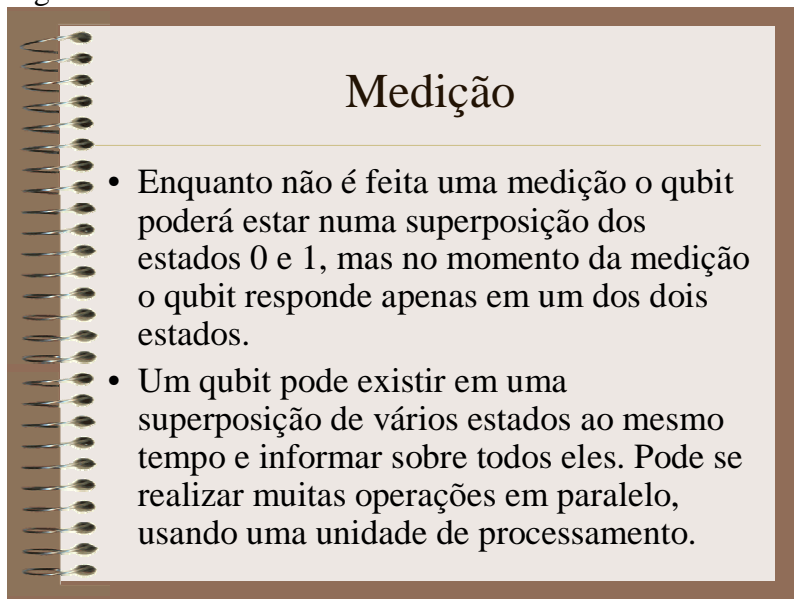
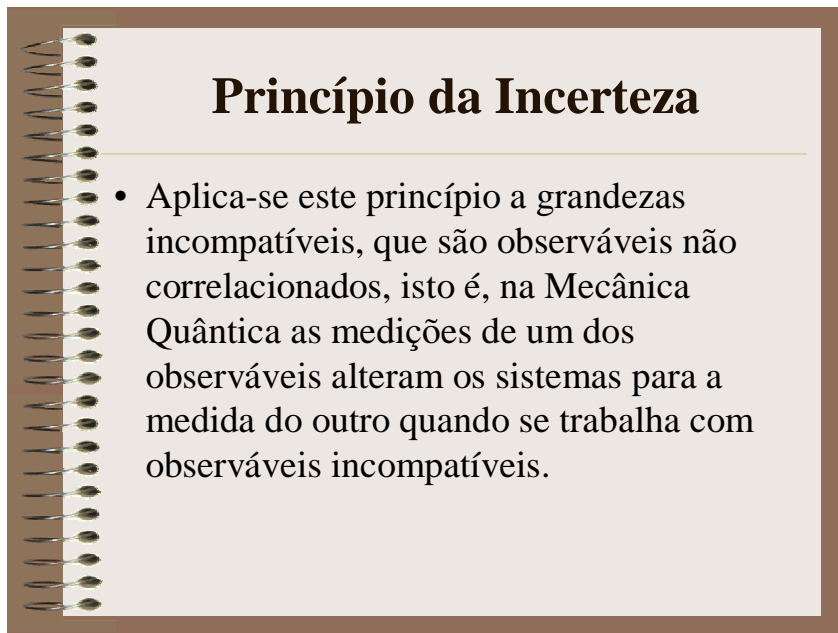


Figura 49. Lâmina n° 47.

Antes do término desse encontro foi discutido o Princípio da Incerteza; vale lembrar que se aplica este princípio a grandezas incompatíveis, que são observáveis não correlacionados, pois que, na Mecânica Quântica as medições em geral alteram os resultados quando se trabalha com observáveis incompatíveis.



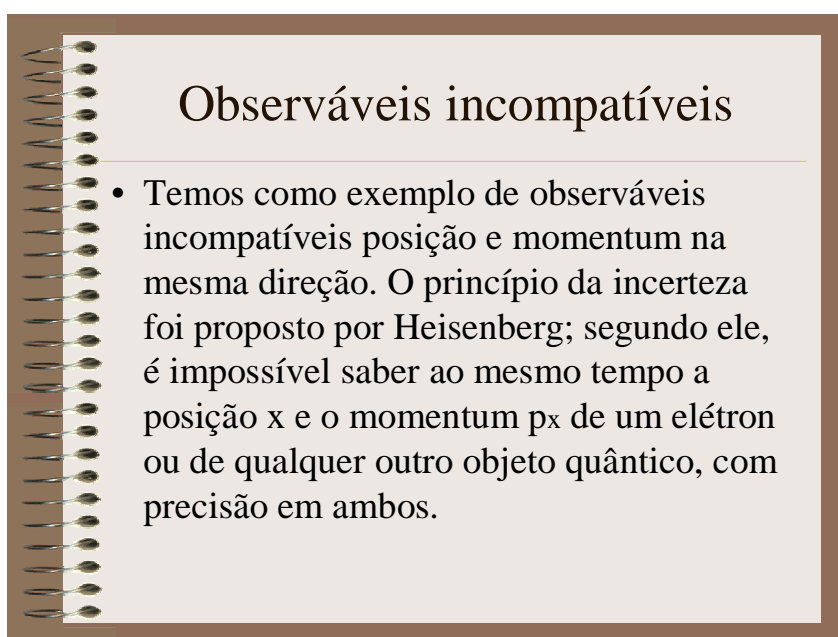
Príncipe da Incerteza

- Aplica-se este princípio a grandezas incompatíveis, que são observáveis não correlacionados, isto é, na Mecânica Quântica as medições de um dos observáveis alteram os sistemas para a medida do outro quando se trabalha com observáveis incompatíveis.

Figura 50. Lâmina n° 48.

Temos como exemplo de observáveis incompatíveis posição e momentum na mesma direção. O Príncipe da Incerteza foi proposto por Heisenberg (1927), segundo ele é impossível encontrar o sistema em um autoestado tanto de posição como momentum na mesma direção, quer para um elétron ou qualquer outro objeto quântico. Se uma medição sobre um objeto quântico pode determinar a componente p_x com uma incerteza Δp_x , não se pode, simultaneamente, conhecer a componente x da posição com incerteza Δx tal que o produto das duas incertezas seja menor que $\hbar/2$, sendo h a constante de Planck; a saber/:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2$$



Observáveis incompatíveis

- Temos como exemplo de observáveis incompatíveis posição e momentum na mesma direção. O princípio da incerteza foi proposto por Heisenberg; segundo ele, é impossível saber ao mesmo tempo a posição x e o momentum p_x de um elétron ou de qualquer outro objeto quântico, com precisão em ambos.

Figura 51. Lâmina n° 49.

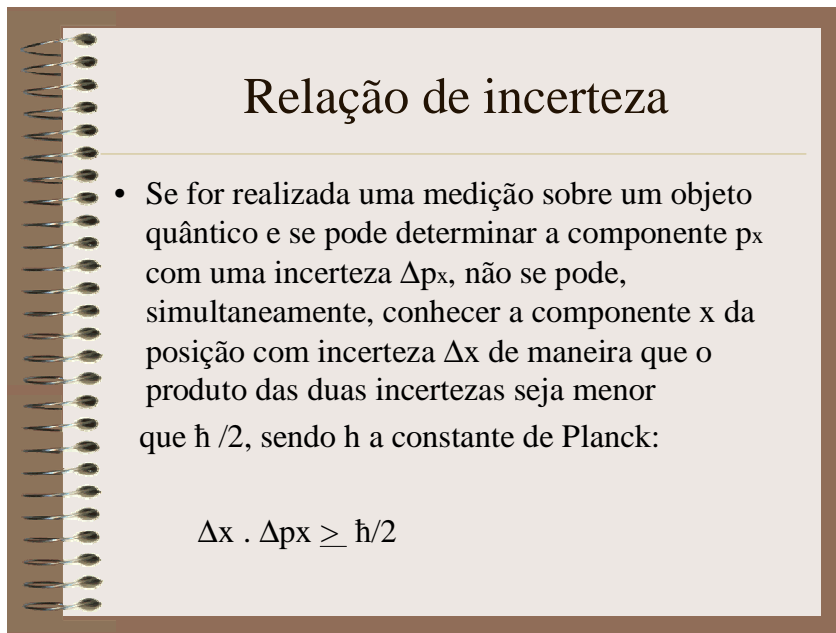


Figura 52. Lâmina nº 50.

Foi explicado que este fenômeno é independente da precisão dos sistemas de medição, isto é, esta é uma impossibilidade imposta pela própria natureza dos sistemas quânticos.

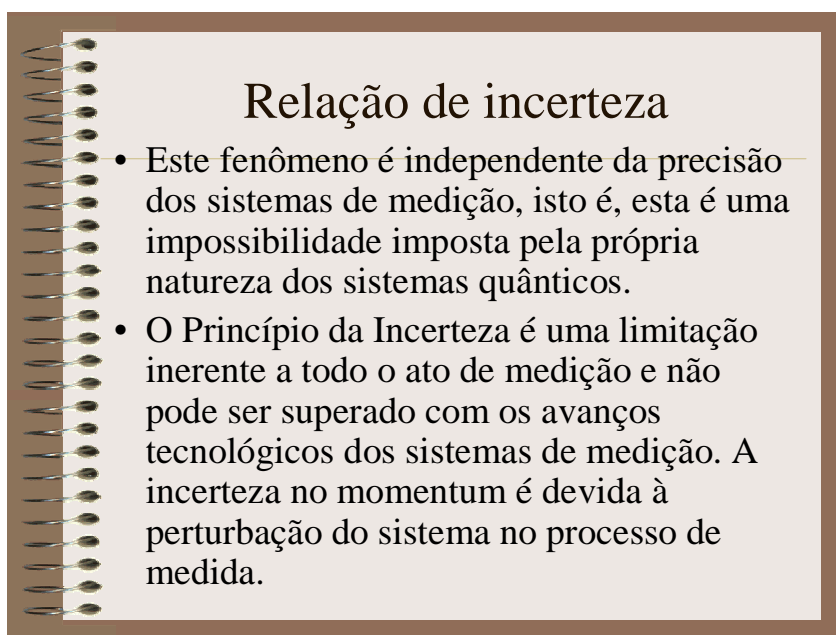


Figura 53. Lâmina nº 51.

O Princípio da Incerteza é uma limitação inerente a todo o ato de medição e não pode ser superado com os avanços tecnológicos dos sistemas de medição. A incerteza no momentum (ou outra grandeza física) é devida à perturbação do sistema no processo de medida.

Quanto mais preciso for o conhecimento de “por onde anda” um objeto quântico, menos preciso é o conhecimento de “em que direção ele vai”. A impossibilidade de se observar sem

interferir corresponde à inexistência de trajetórias quânticas (definidas). O princípio da incerteza expressa a impossibilidade de uma partícula quântica percorrer uma trajetória (definida), o que implicaria seguir uma linha de posições, com momentos na direção dessa linha.

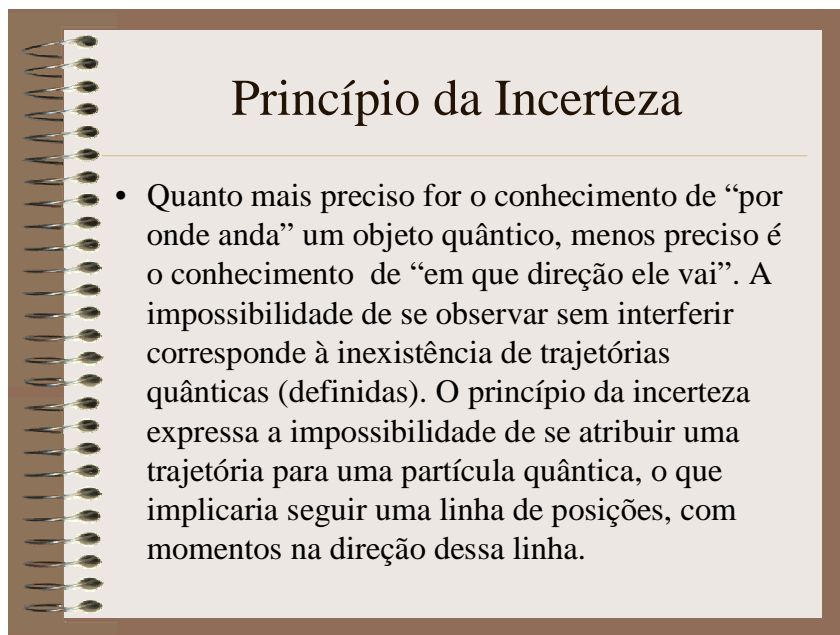


Figura 54. Lâmina n° 52.

O Princípio da Incerteza também é válido para outros pares de grandezas físicas, como energia cinética e energia potencial, semelhante ao que foi apresentado para a posição e momentum

Para se ter precisão na determinação da energia potencial do elétron, seria preciso abdicar da precisão no valor da energia cinética.

4.7. Quinto encontro

No último encontro foi pedido aos alunos que em grupo montassem um esquema de como poderiam trabalhar com alunos do Ensino Médio os conceitos tratados no curso. Os esquemas são apresentados no Apêndice 5. Após, cada grupo apresentou seus esquemas e ocorreu troca de idéias no grande grupo.

Logo em seguida, foram trabalhados com os alunos os mapas conceituais (Moreira, 2006, p.9), visto que estes seriam utilizados como recurso de avaliação da aprendizagem.

Primeiramente, foi explicado e apresentado o que é um mapa conceitual, sua função no processo ensino-aprendizagem através de uma apresentação em PPT com o projetor multimídia.

Mapa conceitual

- De um modo geral, mapas conceituais, ou mapas de conceitos, são diagramas indicando relações entre conceitos, ou entre palavras que usamos para representar conceitos. São diagramas de significados, de relações significativas; de hierarquias conceituais. (Moreira, 2006, p. 9)

Figura 55. Lâmina nº 53.

Mapas conceituais

- Muitas vezes utiliza-se figuras geométricas -- elipses, retângulos, círculos -- ao traçar mapas de conceitos. O fato de dois conceitos estarem unidos por uma linha é importante porque significa que há, no entendimento de quem fez o mapa, uma relação entre esses conceitos. (ibid.)

Figura 56. Lâmina nº 54.

- Sempre deve ficar claro no mapa quais os conceitos contextualmente mais importantes e quais os secundários ou específicos. Setas podem ser utilizadas para dar um sentido de direção a determinadas relações conceituais, mas não obrigatoriamente. Se o indivíduo que faz um mapa, une dois conceitos, através de uma linha, ele deve ser capaz de explicar o significado da relação que vê entre esses conceitos. (ibid)

Figura 57. Lâmina nº 55.

- Uma ou duas palavras-chave escritas sobre essa linha podem ser suficientes para explicitar a natureza dessa relação. Os dois conceitos mais as palavras-chave formam uma proposição e esta evidencia o significado da relação conceitual. Por esta razão, o uso de palavras-chave sobre as linhas conectando conceitos é importante, mas esse recurso não os torna auto-explicativos. Mapas conceituais devem ser explicados por quem os faz; ao explicá-lo, a pessoa externaliza significados. Reside aí o maior valor de um mapa conceitual.(ibid)

Figura 58. Lâmina nº 56.

Como construir um mapa conceitual

1. Identifique os conceitos-chave do conteúdo que vai mapear e ponha-os em uma lista. Limite entre 6 e 10 o número de conceitos.
2. Ordene os conceitos, colocando o(s) mais geral(is), mais inclusivo(s), no topo do mapa e, gradualmente, vá agregando os demais até completar o diagrama.(ibid)

Figura 59. Lâmina nº 57.

3. Se o mapa se refere, por exemplo, a um parágrafo de um texto, o número de conceitos fica limitado pelo próprio parágrafo. Se o mapa incorpora também o seu conhecimento sobre o assunto, além do contido no texto, conceitos mais específicos podem ser incluídos no mapa.
4. Conecte os conceitos com linhas e rotule essas linhas com uma ou mais palavras-chave que explicitem a relação entre os conceitos. Os conceitos e as palavras-chave devem sugerir uma proposição que expresse o significado da relação.(ibid)

Figura 60. Lâmina nº 58.

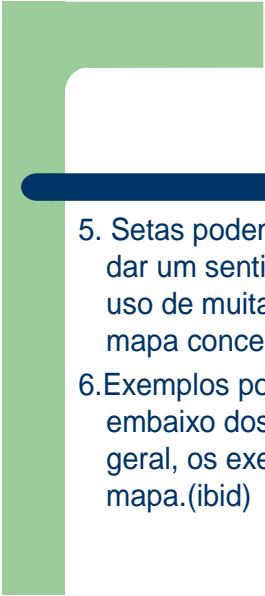
- 
5. Setas podem ser usadas quando se quer dar um sentido a uma relação. No entanto, o uso de muitas setas acaba por transformar o mapa conceitual em um diagrama de fluxo.
6. Exemplos podem ser agregados ao mapa, embaixo dos conceitos correspondentes. Em geral, os exemplos ficam na parte inferior do mapa. (ibid)

Figura 61. Lâmina nº 59.

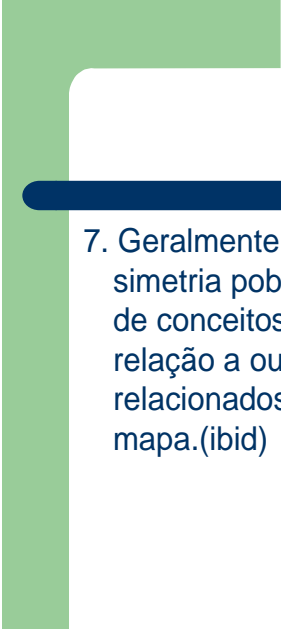
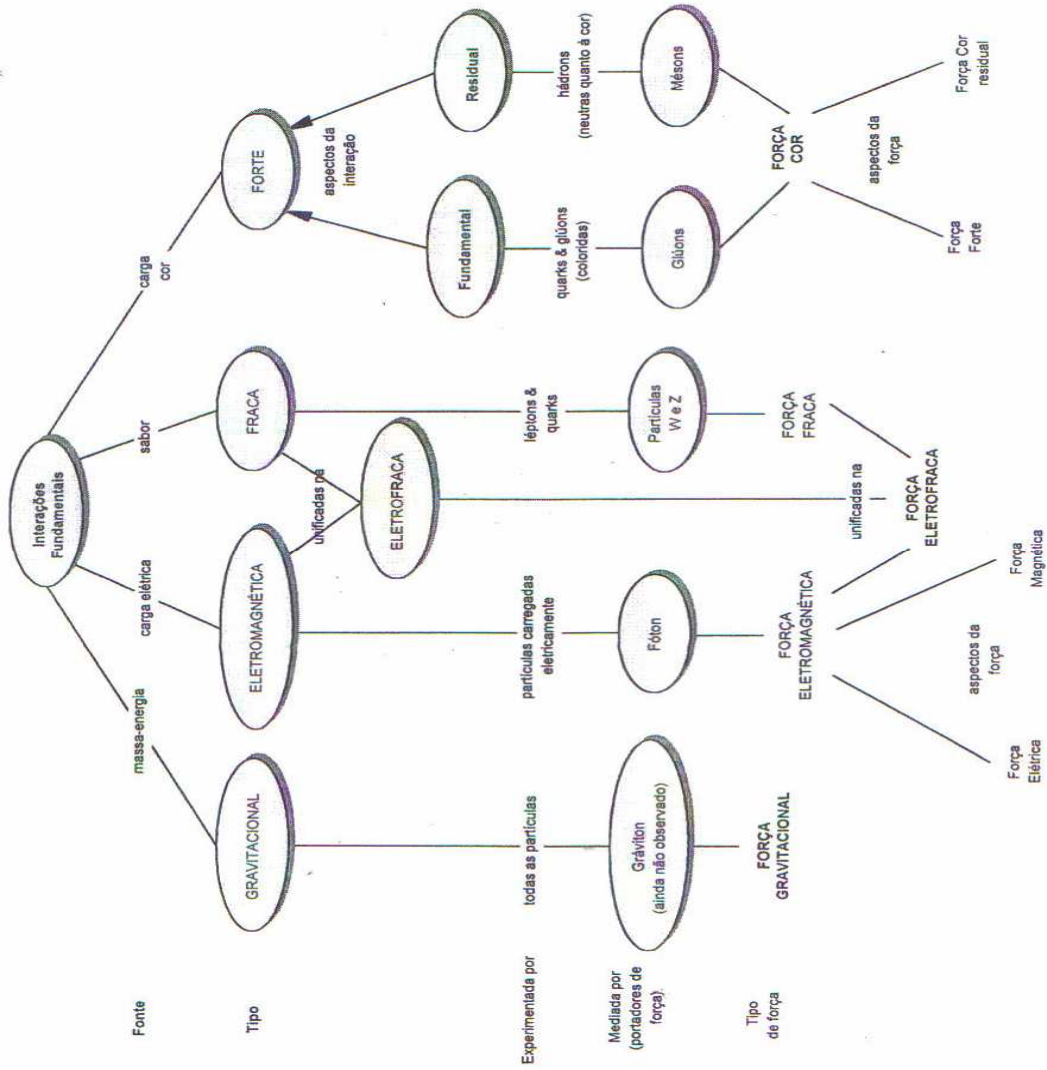
- 
7. Geralmente, o primeiro intento de mapa tem simetria pobre e alguns conceitos ou grupos de conceitos acabam mal situados em relação a outros que estão mais relacionados. Nesse caso, é útil reconstruir o mapa. (ibid)

Figura 62. Lâmina nº 60.

A figura 63 mostra o exemplo de mapa conceitual apresentado aos alunos em transparência de retroprojeter.



Um mapa conceitual para interações fundamentais (M.A. Moreira, 1990, revisado em 2004)

Figura 63: Mapa conceitual Interações Fundamentais.

Após, os alunos se reuniram em grupos de quatro alunos cada para montar seus mapas conceituais a partir do que foi discutido no curso. Os alunos podiam consultar suas anotações e o material que era fornecido durante o curso, textos e cópias das apresentações utilizadas. Os mapas conceituais estão no capítulo 5, onde são analisados os resultados obtidos com a realização do curso. Concluída a elaboração dos mapas cada grupo apresentou ao grande grupo seus mapas, através de transparências de retro projetor para apreciação e sugestões de melhorias dos mapas.

Para finalizar o curso e a avaliação foi aplicado o pós-teste, o qual é encontrado no Apêndice 1.

Passemos agora aos resultados.

Capítulo 5

Resultados

Como forma de buscar evidências qualitativas de se os alunos atingiram pelo menos um nível inicial de aprendizagem significativa em relação a conceitos inerentes à Mecânica Quântica, foi pedido aos mesmos que realizassem em grupo, um mapa conceitual sobre o assunto abordado. Foram assim confeccionados oito mapas conceituais, quatro da turma de quinta-feira à noite e quatro da turma de sábado de manhã.

Segundo Novak (2000), os mapas conceituais podem funcionar como uma estratégia facilitadora da aprendizagem significativa e também como instrumento de avaliação da aprendizagem. O mapa serve como um resumo do que foi aprendido e pode ser uma conclusão de uma fase de aprendizagem; nele estão representadas as relações hierárquicas entre idéias, conceitos e concepções do aluno. Os mapas conceituais ajudam, a quem aprende, a tornar mais evidentes os conceitos-chave que vão sendo aprendidos, uma vez que sugerem conexões entre os novos conhecimentos e aquilo que o aluno já conhece. Assim, o professor pode utilizar os mapas conceituais para decidir que caminhos se percorre para organizar os significados e negociá-los com os alunos, bem como localizar e assinalar as idéias errôneas que possam ter.

É importante dizer que tais mapas foram construídos depois de finalizado o presente curso de Mecânica Quântica e cada grupo pôde consultar o material distribuído durante as aulas (apresentações, textos discutidos) e anotações realizadas individualmente.

Os oito mapas conceituais estão apresentados nas figuras 64 a 71.

5.1. Análise do Mapa Conceitual da Figura 64.

Observa-se neste mapa que o conceito Mecânica Quântica está no topo do mapa e nele estão ligados conceitos intermediários relacionados à Mecânica Quântica, como quantização, objetos quânticos, interpretações e, por fim, os conceitos poucos inclusivos com os respectivos exemplos. O aluno parece ter conseguido perceber que, segundo a Interpretação da Complementaridade, o comportamento da matéria pode ser ou de onda ou de partícula dependendo do experimento, que elétrons, prótons, nêutrons, fótons são objetos quânticos e obedecem as leis da Mecânica Quântica, que existem várias relações matemáticas na Mecânica Quântica como a da energia, do momentum e a Equação de Schrödinger. Não ficou claro no mapa a relação entre dualidade e interpretações. Talvez quisessem representar que dependendo da interpretação o objeto quântico se comporta ou como onda ou como partícula.

Nota-se ainda neste mapa uma estrutura que lembra um diagrama de chaves, o que é compreensível, pois, provavelmente, foi sua primeira experiência com mapas conceituais.

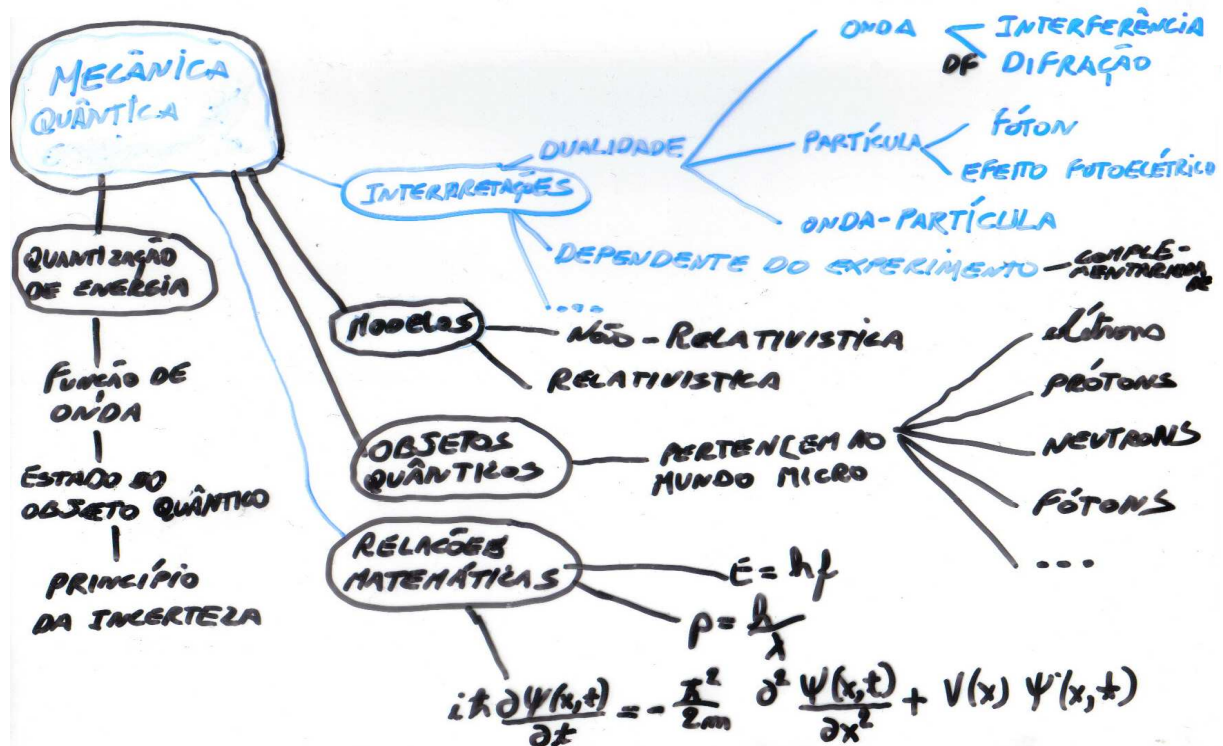


Figura 64. Mapa conceitual feito pelo grupo 1 da turma de quinta-feira à noite

5.2. Análise do Mapa Conceitual da Figura 65.

Neste mapa, o conceito geral de Mecânica Quântica também está no topo do mapa. Conceitos como interpretações, quantização, dualidade e objeto quântico foram considerados pelo grupo como conceitos intermediários. O grupo destacou as interpretações estudadas, apresentando a descrição de cada uma delas. Observou que a quantização de energia explica o efeito fotoelétrico, que demonstra o caráter corpuscular da luz. Destacou que a dualidade existe no mundo micro e macroscópico; no entanto, no mundo microscópico pode ser observado o comportamento corpuscular através do efeito fotoelétrico e o comportamento ondulatório através da dupla fenda em função da interferência e difração que ocorre, enquanto que no mundo macroscópico a dualidade não é observada.

Este mapa, diferentemente do da figura 64, apresenta uma estrutura claramente hierárquica, porém tem a mesma característica classificatória do primeiro e não apresenta relações cruzadas, o que também é natural em um primeiro mapa conceitual.



Figura 65. Mapa conceitual do grupo 2 da turma de quinta-feira à noite.

5.3. Análise do Mapa Conceitual da Figura 66.

O mapa apresenta uma estrutura hierárquica. Novamente, o conceito mais inclusivo Mecânica Quântica está no topo do mapa. O grupo conseguiu estabelecer relações cruzadas. Seus integrantes destacaram que a Mecânica Quântica estuda os objetos quânticos que têm comportamento de onda e de partícula (dualidade) de acordo com a Interpretação de Copenhague que é a mais aceita. Observaram que os objetos quânticos obedecem ao Princípio da Incerteza e que sua energia é quantizada.

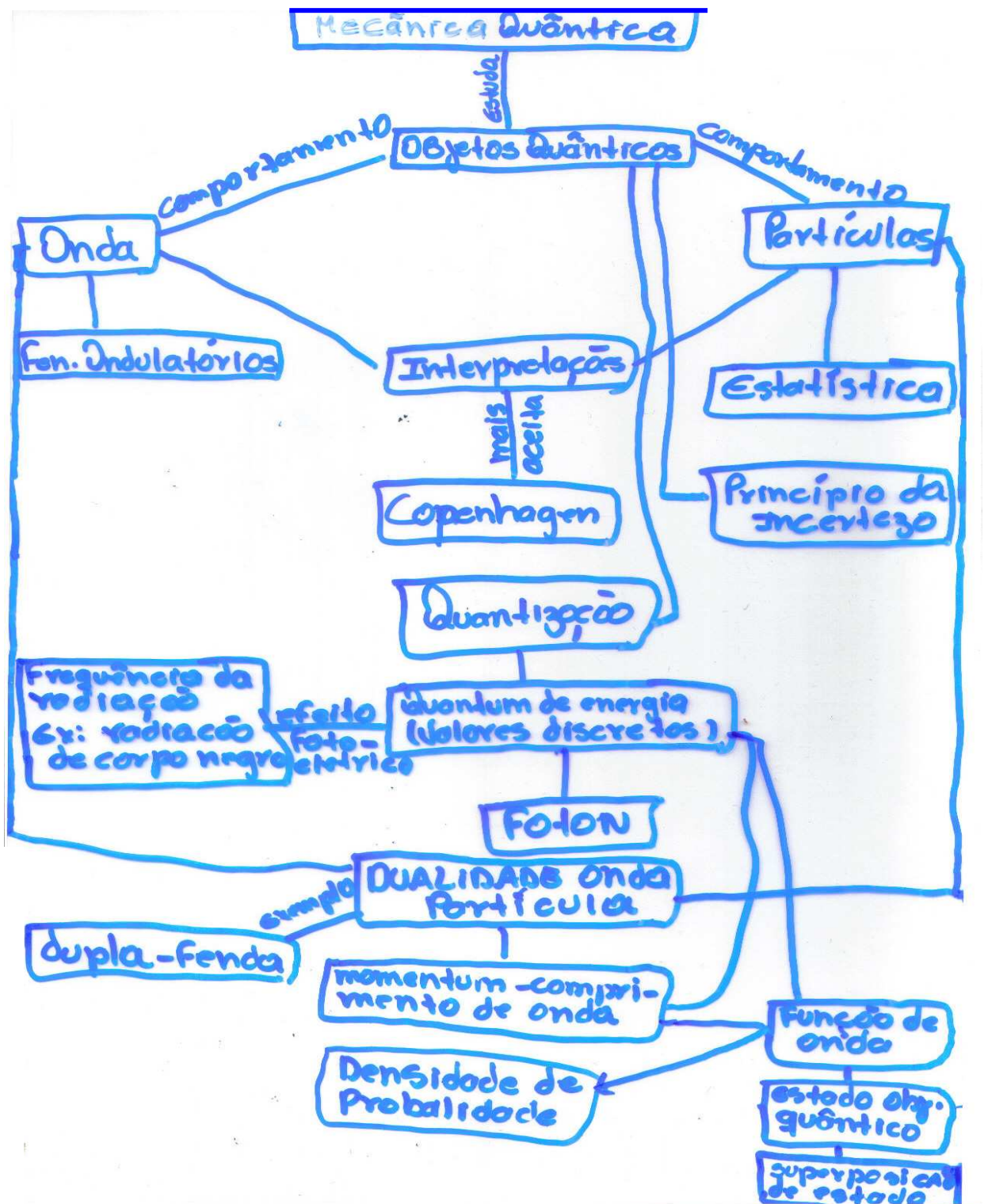


Figura 66. Mapa conceitual do grupo 3 de quinta-feira à noite.

5.4. Análise do Mapa Conceitual da Figura 67.

Este mapa, no qual o conceito escolhido como mais inclusivo foi a luz, tem uma estrutura hierárquica e apresenta relações cruzadas como, por exemplo, o conceito de quantização que está relacionado com fóton, partícula e efeito fotoelétrico, indicando que a energia é quantizada.



Figura 67. Mapa conceitual do grupo 4 da turma de quinta-feira à noite.

5.5. Análise do Mapa Conceitual da Figura 68.

No mapa, o conceito principal é Mecânica Quântica, ligado à conceitos intermediários como quantização, efeito fotoelétrico e dualidade. O grupo destaca que a energia é quantizada, os objetos quânticos têm a característica dualidade onda-partícula e que os fótons estão relacionados com o efeito fotoelétrico. São encontradas neste mapa várias relações cruzadas.

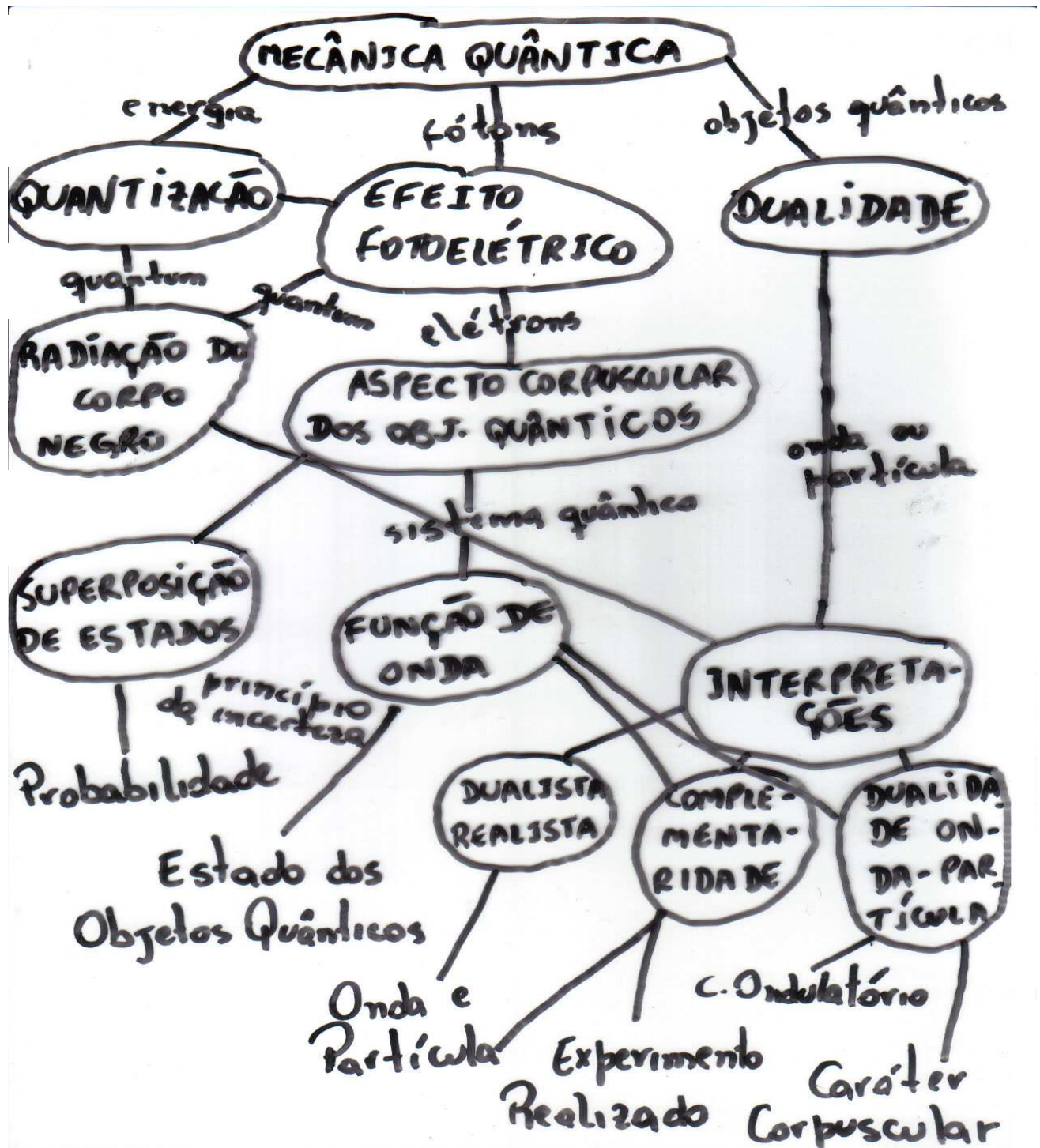


Figura 68. Mapa conceitual do grupo 1 da turma de sábado.

5.6. Análise do Mapa conceitual da Figura 69.

O mapa apresenta como conceito chave a quantização ligada a conceitos considerados intermediários pelo grupo como, por exemplo, o conceito de Mecânica Quântica. Não foram utilizadas figuras geométricas para envolver os conceitos, o que não deixou o mapa tão claro.

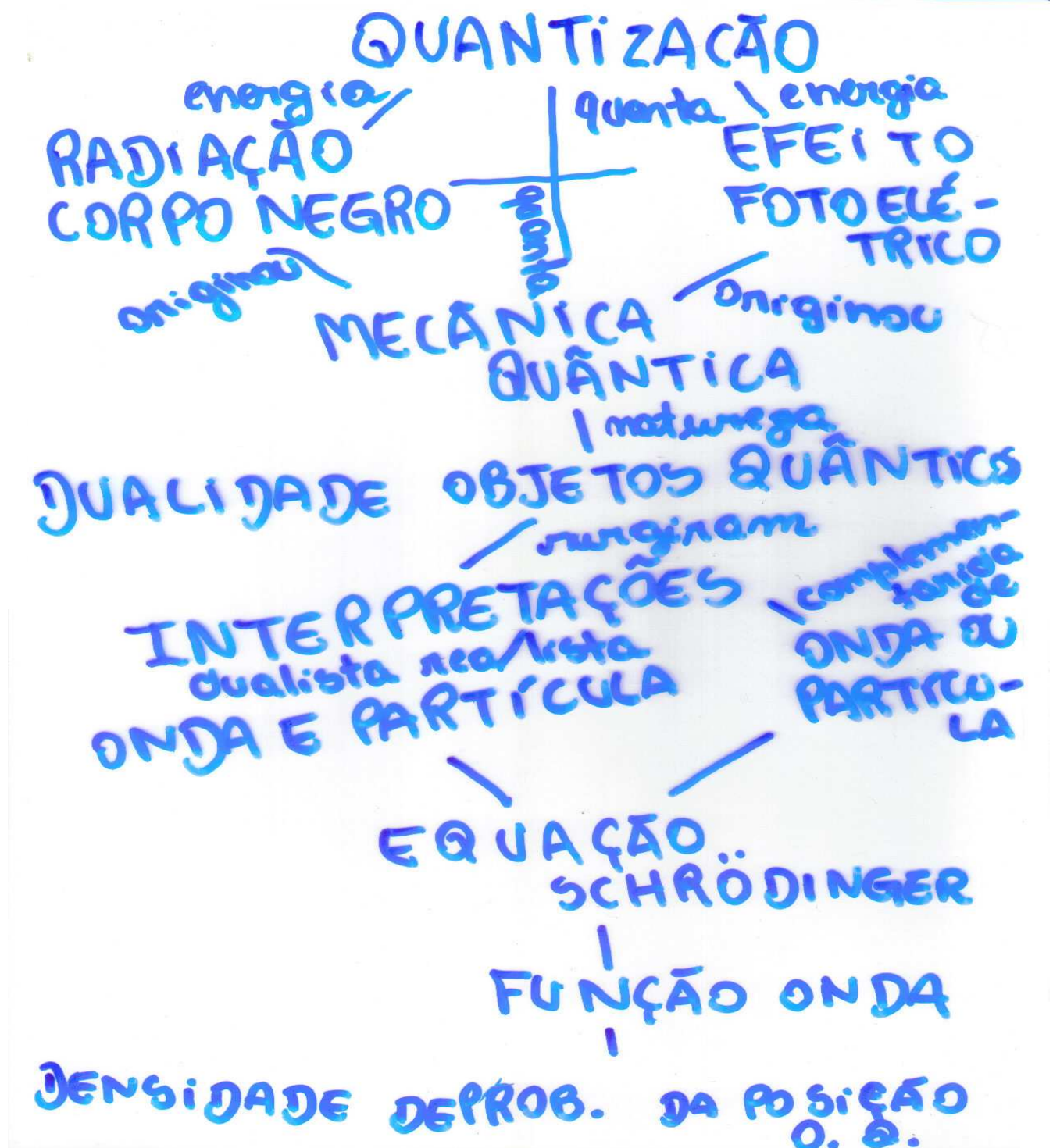


Figura 69. Mapa conceitual do grupo 2 da turma de sábado.

5.7. Análise do Mapa Conceitual da Figura 70.

Este mapa apresenta uma estrutura hierárquica bem organizada. O conceito Mecânica Quântica está no topo ligado ao de radiação de corpo negro que é um conceito relevante para o início da Mecânica Quântica. O grupo conseguiu observar que no efeito fotoelétrico é evidenciado o comportamento de partícula da matéria e na dupla fenda o comportamento de onda. Na parte inferior encontram-se os exemplos das interpretações.

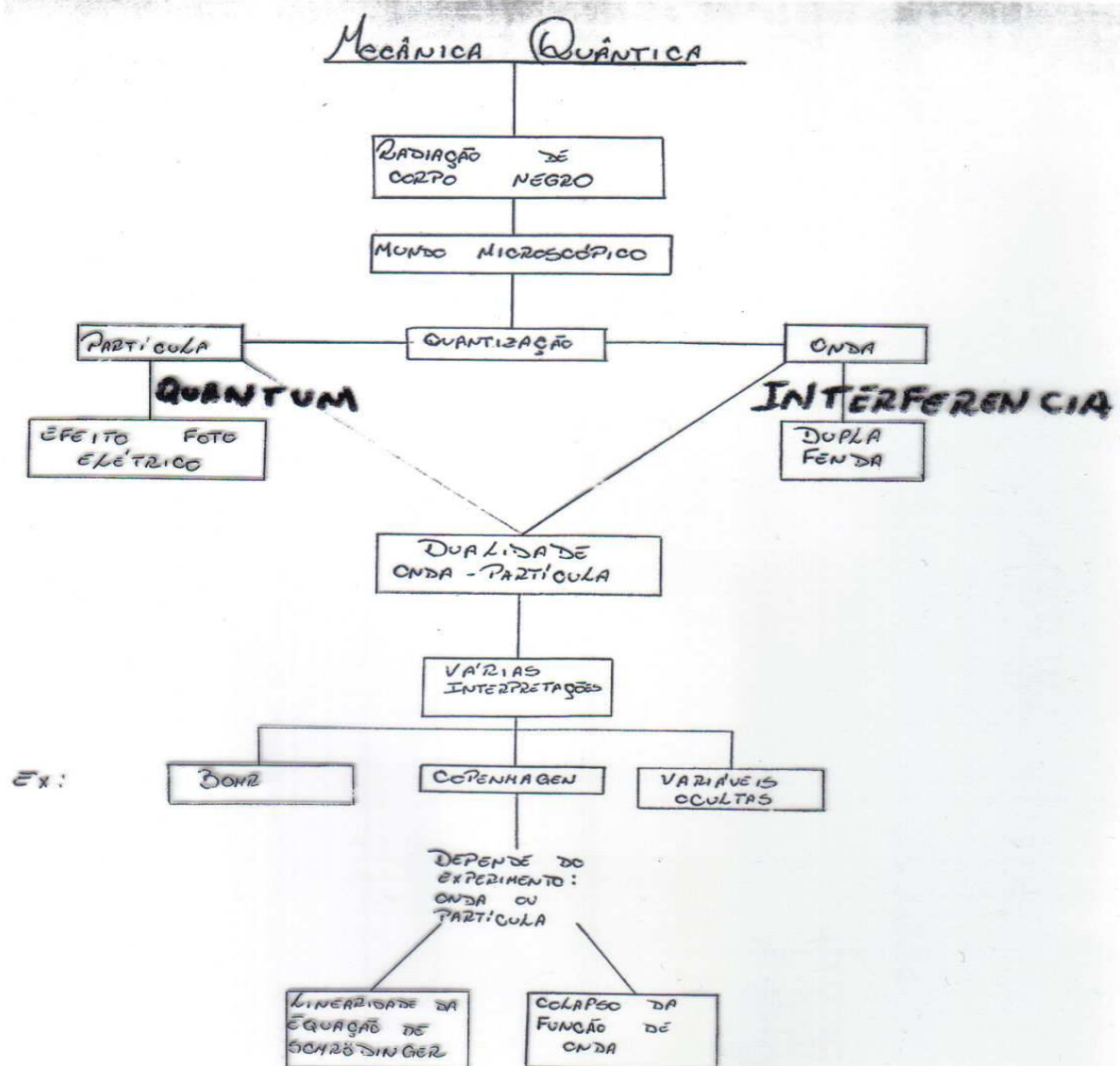


Figura 70. Mapa conceitual do grupo 3 da turma de sábado.

5.8. Análise do Mapa Conceitual da Figura 71.

O mapa confeccionado é bem simples lembrando um diagrama classificatório. O conceito Mecânica Quântica foi considerado o principal ligado a conceitos intermediários, como interpretações e seus exemplos. A quantização de energia está ligada aos objetos quânticos e ao efeito fotoelétrico.

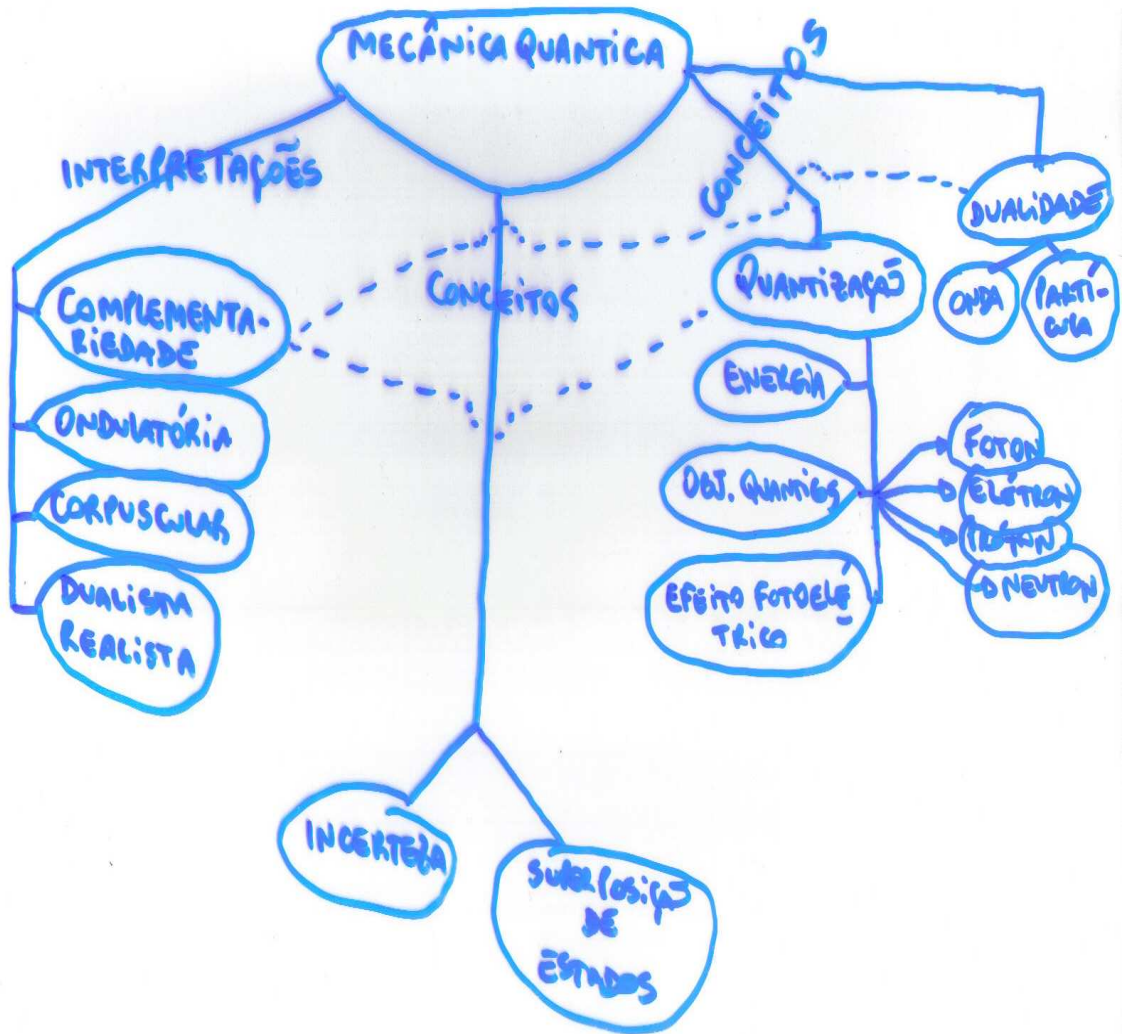


Figura 71. Mapa conceitual do grupo 4 da turma de sábado.

5.9. Síntese

Tentando sintetizar o observado nos oito mapas conceituais construídos pelos alunos pode-se dizer que, embora alguns se aproximem de outros tipos de diagramas, o que se evidencia neles é uma captação, ao menos inicial, adequada de significados aceitos cientificamente na Interpretação de Copenhagen. Naturalmente, se houvesse mais tempo, esses mapas deveriam ser modificados pelos alunos em função das sugestões e críticas recebidas dos colegas e da professora na apresentação e explicação ao grande grupo. O maior potencial dos mapas conceituais como recurso de ensino e aprendizagem está no processo de construí-los, apresentá-los, discutí-los, refazê-los.

5.10. Resultados dos pré e pós-teste.

Para efeitos de uma avaliação quantitativa da aprendizagem, foi proposta a realização de um pré-teste e de um pós-teste (APÊNDICE 1), onde a confrontação dos resultados pudesse dar um indicativo da aprendizagem de cada aluno, mesmo levando-se em conta que a aprendizagem é um processo individualizado e que a aplicação de um teste não garante a expressão exata do nível dessa aprendizagem. Esses testes consistiram de um questionário com vinte questões, as quais foram aplicadas antes e depois da implementação desta proposta de trabalho. Os resultados estão nas tabelas 1 e 2; o escore máximo previsto sendo 20.

Tabela 1. Número de acertos dos alunos nos pré e pós-teste da turma de quinta feira à noite.

Aluno	Acertos no pré-teste	Acertos no pós-teste
1	12	16
2	1	8
3	1	11
4	2	9
5	1	4
6	2	14
7	1	Não compareceu
8	6	10
9	4	Não compareceu
10	Não compareceu	16
11	15	17
12	14	15
13	4	12
14	10	13
15	18	19
16	15	18
Média aproximada	7	13

Tabela 2. Número de acertos dos alunos no pré e pós-teste da turma de sábado pela manhã.

Aluno	Acertos no pré-teste	Acertos no pós-teste
1	8	9
2	5	13
3	2	11
4	3	13
6	7	12
7	5	11
8	3	9
9	6	10
10	12	17
11	Não compareceu	13
12	3	12
13	6	11
14	9	13
15	7	17
Média aproximada	6	12

Observando os números apresentados nas tabelas 1 e 2 e os gráficos 1 e 2 a que a seguem, é facilmente possível notar um crescimento do número de acertos que consideramos como evidência de aprendizagem, cientes de que nenhum tratamento estatístico foi feito e que os instrumentos (testes) não foram validados. O objetivo aqui é apenas o de fazer um relato de uma experiência.

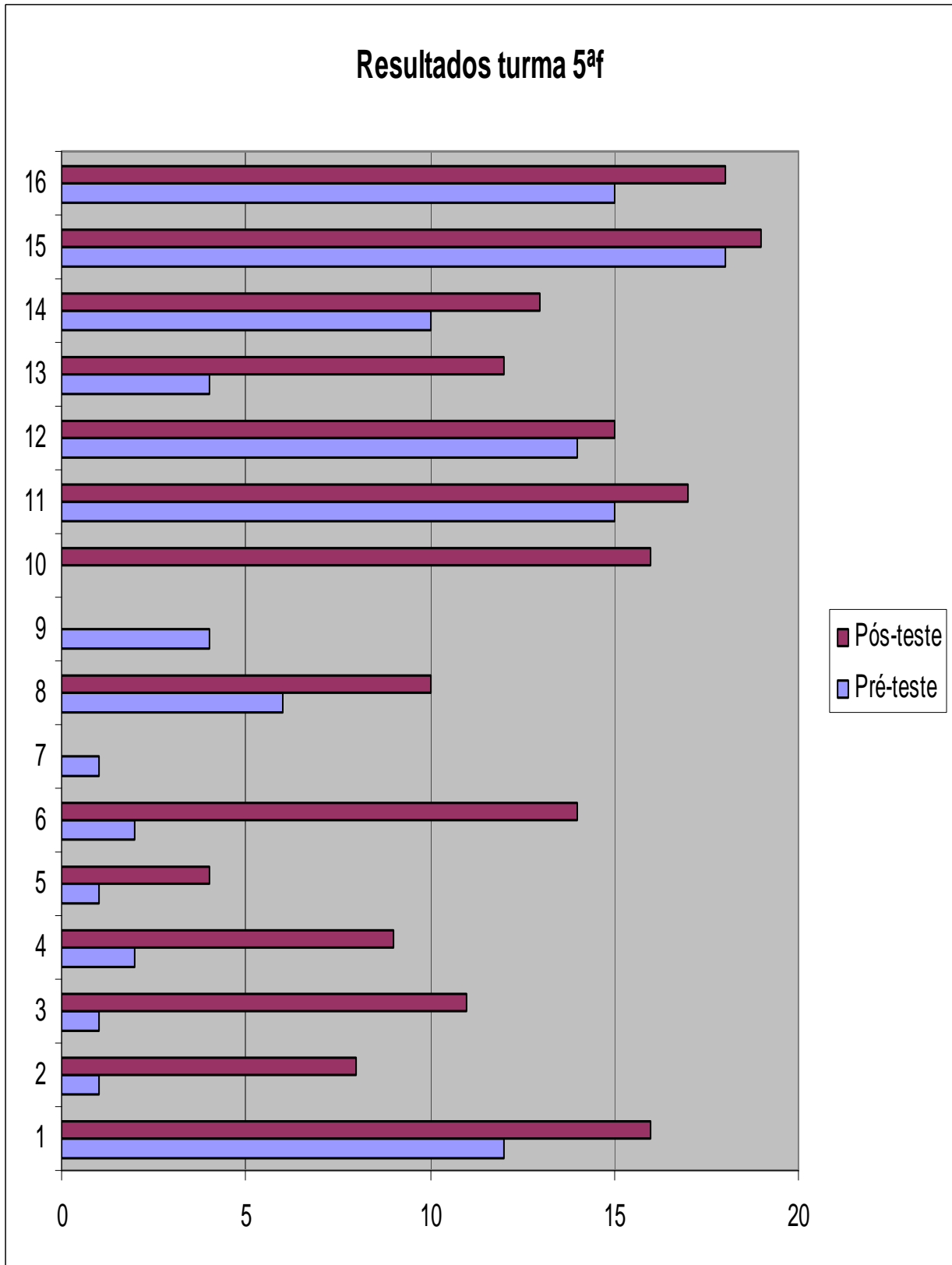


Gráfico 1. Resultados dos pré e pós-testes.

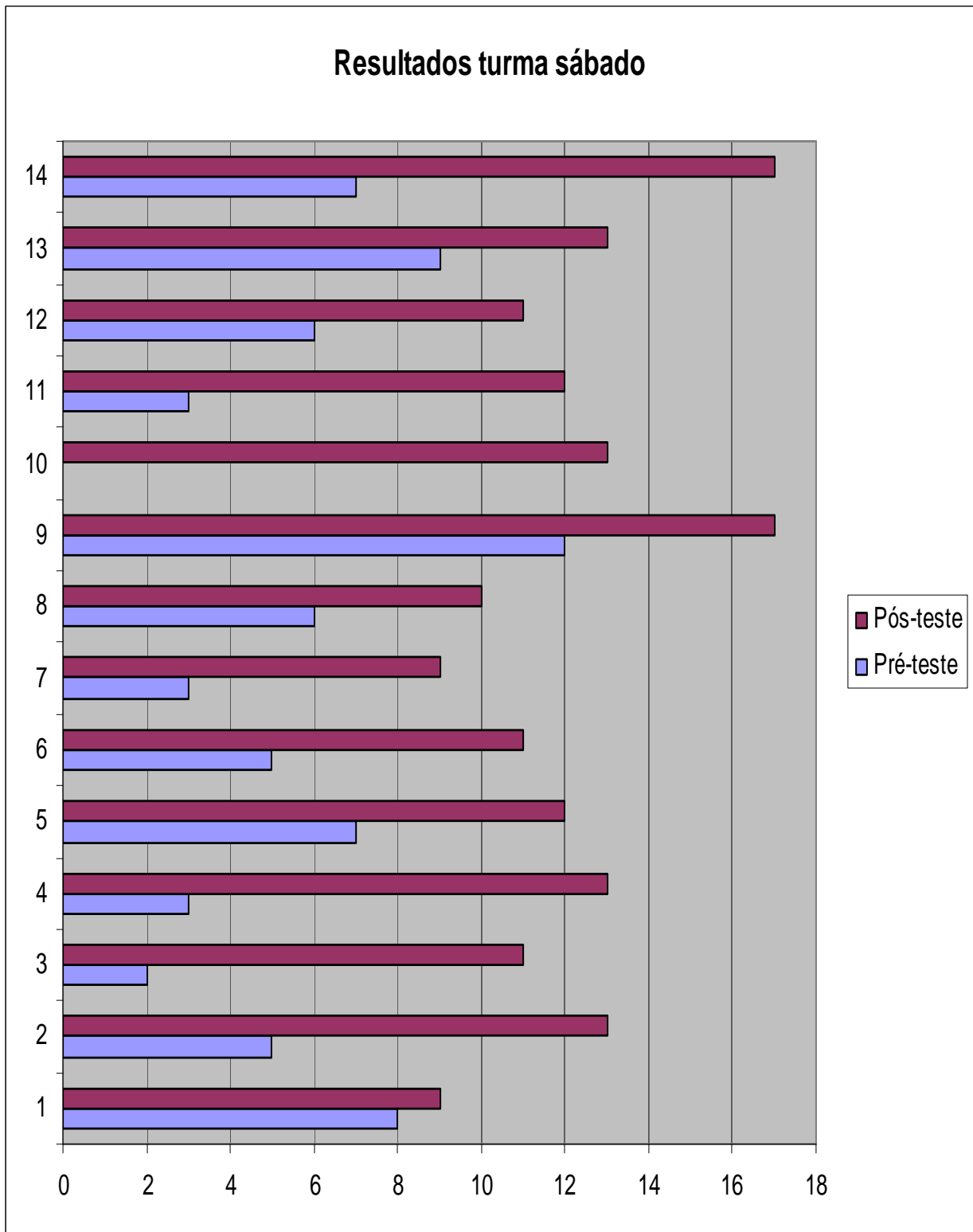


Gráfico 2. Resultados dos pré e pós-testes.

5.11.Opinião dos alunos.

Acredita-se que houve uma boa receptividade dos alunos em relação ao curso, como pode ser observado em alguns relatos espontâneos apresentados a seguir:

Aluno 1: *Acredito que será de grande valia o que aprendi no curso, pois ainda não fiz a disciplina de Mecânica Quântica e agora terei uma base para cursá-la.*

Aluno 2: *Nunca tinha visto nada sobre Mecânica Quântica, achei muito interessante o curso principalmente a questão das interpretações da Mecânica Quântica, onde dependendo da visão os resultados são interpretados de formas diferentes.*

Aluno 3: *Achei muito interessante o curso, principalmente as aulas práticas, o que me motivava e acredito que também motive os alunos de Ensino Médio, visto que ocorriam bastante atividades variadas.*

Aluno 4: *Gostei muito de como foi abordada a Equação de Schrödinger, consegui compreender que representa a energia de um sistema quântico e os cálculos que foram realizados para chegar na equação são simples.*

Aluno 5: *As atividades em laboratório virtual foram muito ilustrativas e podem ser utilizadas com os alunos de Ensino Médio, pois são de fácil manipulação.*

Aluno 6: *Pretendo trabalhar o assunto Mecânica Quântica com meus alunos do Ensino Médio utilizando o material que obtive no curso, visto que foi bem ilustrativo e de fácil compreensão.*

Aluno 7: *Estou começando o curso de física, então teve alguns tópicos que não compreendi muito bem porque não tinha aprendido alguns conteúdos necessários.*

Aluno 8: *Achei bom o curso devido a atividades variadas, com exposição oral, leituras, discussões, prática no laboratório de informática, que não tornam as aulas tão cansativas.*

Aluno 9: *Gostei das discussões através das confecções dos mapas conceituais, troquei idéias com os demais colegas e consegui esclarecer algumas dúvidas que ainda tinha.*

Aluno 10: *Não conhecia mapas conceituais e achei muito interessante como forma de analisar o que se entendeu do conteúdo e trocar idéias com os colegas quando foi feito em grupo.*

Capítulo 6

Conclusão

De uma maneira geral, os alunos de Ensino Médio têm acesso a vários tipos de equipamentos eletrônicos como TV, computador, vídeo-games, máquinas digitais, etc., que utilizam cada vez mais tecnologias avançadas; já estamos chegando à era da computação quântica. Como toda esta tecnologia está no cotidiano destes alunos e está relacionada a conceitos de Mecânica Quântica é relevante, então, que algumas leis e princípios físicos da Física Moderna sejam discutidos no Ensino Médio. Por isso, a importância da aplicação desse curso de Mecânica Quântica para professores de Física que trabalham com alunos de Ensino Médio.

O ensino de Física no Ensino Médio não tem sido uma tarefa muito fácil, em parte pela dificuldade de os alunos compreenderem as leis e as teorias da Física, as quais envolvem raciocínio lógico, capacidade de interpretação e abstração. O professor de Física, atualmente, para ter sucesso, deve ter conhecimento do conteúdo e ser alguém capaz de motivar o seu aluno para a aprendizagem e, nesse sentido, acredita-se ser oportuna a proposta de oferecer um curso com os principais conceitos de Mecânica Quântica para professores de Física e discutir com esses professores formas de trabalhar esses conceitos com seus alunos de forma interessante e potencialmente significativa.

Na aplicação desta proposta em duas turmas em um Curso de Extensão oferecido na Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, teve-se condições de avaliar de forma satisfatória tal proposta, pois a grande maioria dos alunos apresentou evidências de compreensão dos conceitos apresentados no curso, além de se mostrarem confiantes em abordar estes conceitos com os alunos do Ensino Médio, visto pelos esquemas de como abordar o conteúdo de Mecânica Quântica em suas aulas, apresentados por cada grupo,

Esta dedução pode ser tirada tanto dos mapas conceituais apresentados pelos alunos, em que se percebe construção do conhecimento relacionado a conceitos de Mecânica Quântica, como dos resultados apresentados em relação à mudança nas respostas dos alunos do pré-teste para o pós-teste realizado após a conclusão do curso.

Ao todo foram utilizadas quinze horas-aula, suficientes para trabalhar os conceitos pretendidos como quantização, efeito fotoelétrico, dualidade onda-partícula, superposição de estados e Princípio da Incerteza.

Todos os materiais apresentados durante as aulas expositivas, como as apresentações em Power Point, as simulações e o vídeo foram bem aceitos pelos alunos conforme observou-se nas aulas.

A aula inicial - através da projeção de uma apresentação em que os conteúdos a serem abordados foram introduzidos de maneira que os alunos pudessem recebê-los de forma contextualizada - criou neles uma expectativa positiva, além de servir como um organizador prévio, onde tiveram uma idéia geral do que seria ensinado.

A fundamentação teórica utilizada – a da aprendizagem significativa e o interacionismo – onde foram levados em conta os conhecimentos prévios e a interação entre alunos e professor, mostrou-se correta para os tópicos escolhidos de Mecânica Quântica, o que pareceu evidente durante o curso nas discussões entre alunos e entre professor e alunos, assim como na avaliação do pós-teste e nos mapas conceituais confeccionados.

As aulas no laboratório de informática tiveram uma função fundamental no processo de ensino-aprendizagem, pois a utilização de simulações em computadores propiciou aos alunos a possibilidade de vivenciar experiências de modo virtual, algumas das quais são impossíveis de se realizar em laboratórios comuns.

O vídeo e simulações apresentadas foram instrumentos acertadamente escolhidos que despertaram o interesse dos alunos e recomendam a sua utilização com alunos do Ensino Médio.

Por tudo o que foi constatado, acredita-se ter alcançado o objetivo na aplicação desta proposta de ensino, uma vez que se espera ter conseguido abordar assuntos de Mecânica Quântica de forma criativa e motivadora para a aprendizagem, tornando tal assunto mais atraente para os alunos.

Espera-se que os professores de Física do Ensino Médio que participaram do curso aproveitem os conhecimentos adquiridos e espalhem esses conhecimentos entre os seus alunos, procurando inserir conceitos de Física Quântica no currículo das escolas de Ensino Médio onde trabalham, motivando seus alunos, despertando um interesse pela disciplina de Física, a qual, como se sabe, não é a disciplina favorita de nossos alunos da Educação Básica. Espera-se também que o Texto de Apoio ao Professor de Física produzido neste trabalho contribua nesse sentido.

Referências

1. BRASIL. Lei n. 9394, de 20 de dezembro de 1996. *Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional*. Brasília, MEC, 1996.
2. BRASIL. Ministério da Educação. *Parâmetros Curriculares Nacionais: ensino médio: ciências da natureza, matemática e suas tecnologias*. Brasília: Secretaria de Educação Média e Tecnológica, 1999.
3. VYGOTSKY, L. S. *A Formação Social da Mente*. 4. ed. São Paulo: Martins Fontes, 1991.
4. MOREIRA, M. A. *Teorias de Aprendizagem*. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 1999.
5. MOREIRA, M. A. *Mapas Conceituais no Ensino da Física*. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, 2006.
6. MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. S. *Aprendizagem Significativa: a teoria de David Ausubel*. São Paulo: Moraes, 1982.
7. PENTEADO, P. C. P. *Física: conceitos e aplicações*. São Paulo: Moderna, 1998 v. 2-3.
8. RAMALHO JUNIOR, F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. de T. *Os Fundamentos da Física*. São Paulo: Moderna, 2000. v. 2.
9. BONJORNO, R. A. et al. *Física Fundamental: 2º grau: volume único*. São Paulo: FTD, 1993.
10. PARANÁ, D. N. S. *Física*. São Paulo: Ática, 2002.
11. GASPAR, A. *Física*. São Paulo: Ática, 2004.
12. GRECA, I. M. R. *Construindo Significados em Mecânica Quântica*:

- resultados de uma proposta didática aplicada a estudantes de física geral. 2000. 284 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
13. GRECA, I. M. R.; HERSCOVITZ, V. E. *Introdução à Mecânica Quântica*. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, 2002. 73 p. (Textos de Apoio ao Professor de Física, n. 13).
 14. GRECA, I. M. R.; MOREIRA, M. A. Uma Revisão de Literatura sobre Estudos Relativos ao Ensino de Mecânica Quântica Introdutória. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 29-56, jan./abr. 2001.
 15. NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica*. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. v. 4.
 16. OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa, “Física Moderna e contemporânea no Ensino Médio”. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 23-48, jan./abr. 2000.
 17. PAULO, I. J. C. de. *A Aprendizagem Significativa Crítica de Conceitos da Mecânica Quântica Segundo a Interpretação de Copenhague e o Problema da Diversidade de Propostas de Inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio*. 2006. 219 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Programa Internacional de Doctorado, Enseñanza de las Ciencias, Departamento de Didácticas Específicas. Universidade de Burgos, Burgos, 2006.
 18. PESSOA JUNIOR, O. *Conceitos de Física Quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2003.
 19. RICCI, T.; OSTERMANN, F. *Uma Introdução Conceitual à Mecânica Quântica para Professores do Ensino Médio*. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, 2003. (Textos de Apoio ao Professor de Física, n. 14).
 20. MENEZES, L. C. de. *A Matéria: uma aventura do espírito*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

APÊNDICES

APÊNDICE 1

Pré-teste e pós-teste*

Nome:

Semestre:

Leciona: () Sim () Não

Prezado participante do curso.

Este teste é apenas uma sondagem sobre seus conhecimentos iniciais de Mecânica Quântica a fim de levá-los em conta no desenvolvimento do curso. Não é uma avaliação formal. Por fim, evite respostas aleatórias. Deixe em branco quando julgar adequado.

Obrigada.

1- (ITA- 2002) Um trecho da música Quanta, de Gilberto Gil, é reproduzido a seguir:

“Fragmento infinitesimal,
Quase que apenas mental,
Quantum granulado no mel,
Quantum ondulado do sal,
Mel de urânio, sal de rádio
Qualquer coisa quase ideal.”

As frases “Quantum granulado no mel” e “Quantum ondulado do sal” relacionam-se na física com:

- a) conservação de energia.
- b) conservação do momentum linear.
- c) dualidade onda-partícula.
- d) princípio da causalidade.
- e) conservação do momentum angular.

2- (PUC-RS c/ modificações-1997) O Efeito Fotoelétrico demonstra que:

- a) a radiação tem comportamento corpuscular.
- b) a luz se propaga com velocidade de 3×10^8 m/s.
- c) o elétron tem comportamento ondulatório.
- d) a luz se propaga em ondas transversais.
- e) existem os níveis de energia no átomo.

3- (UFRGS-1994) “De acordo com a teoria formulada em 1900, pelo físico Max Planck, a matéria emite ou absorve energia eletromagnética de maneira _____, emitindo ou absorvendo _____, cuja energia é proporcional à _____ da radiação eletromagnética envolvida nessa troca de energia.”

Assinale a alternativa que, pela ordem, preenche corretamente as lacunas:

- a) contínua – quanta – amplitude
- b) discreta – prótons – frequência
- c) discreta – fótons – frequência
- d) contínua – elétrons – intensidade
- e) contínua – nêutrons – amplitude

***No pós-teste a apresentação foi devidamente modificada.**

4- (PUCMG-1998) Complete as lacunas do trecho com as palavras que, na mesma ordem, estão relacionadas nas opções a seguir:

“A luz, quando atravessa uma fenda muito estreita, apresenta um fenômeno chamado de _____ e isto é interpretado como resultado do comportamento _____ da luz. Porém quando a luz incide sobre uma superfície metálica, elétrons podem ser emitidos da superfície sendo este fenômeno chamado _____, que é interpretado como resultado do comportamento _____ da luz.

Assinale a opção CORRETA encontrada:

- a) difração, ondulatório, efeito fotoelétrico, corpuscular.
- b) difração, corpuscular, efeito fotoelétrico, ondulatório.
- c) interferência, ondulatório, efeito Compton, corpuscular.
- d) efeito fotoelétrico, corpuscular, difração, ondulatório.
- e) ondas, magnético, fótons, elétrico.

5- (PUCMG-2000) Escolha a opção que se refira àquela onda eletromagnética que estiver associada a fótons de maior energia:

- a) onda longa de rádio.
- b) ondas de TV.
- c) microondas.
- d) raios-X.
- e) raio gama.

6- (UFRGS – 1987) A tabela mostra as frequências de três ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo. Comparando-se essas três ondas, verifica-se que:

Ondas	f(Hz)
X	3×10^{17}
Y	6×10^{14}
Z	3×10^{14}

- a) a energia de um fóton associado à onda X é maior do que a energia de um fóton associado à onda Y.
- b) o comprimento de onda de Y é igual ao dobro do da onda Z.
- c) à onda Z estão associados os fótons de maior energia e de menor quantidade de movimento.
- d) a energia do fóton associado à onda X é igual à associada à onda Y.
- e) as três ondas possuem o mesmo comprimento de onda.

7- (PUC -1973) A energia portada por um fóton de luz de frequência 5×10^{14} Hz é de aproximadamente:

(Dado: $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s)

- a) $2,30 \times 10^{-18}$ J
- b) $3,31 \times 10^{-19}$ J
- c) $6,62 \times 10^{-18}$ J
- d) $5,32 \times 10^{-15}$ J
- e) $8,42 \times 10^{-18}$ J

8- (Montenegro e Pessoa Jr. Investigações em Ensino de Ciências, vol 7, nº2-2002) Um feixe de elétrons passa por duas fendas e forma um padrão de interferência em uma tela cintiladora. O que acontece quando apenas 1(um) elétron passa pelas fendas?

- a) Forma-se um padrão de interferência bem fraco na tela.
- b) Se o elétron for muito energético forma-se um padrão de interferência bastante nítido.
- c) Não haverá qualquer registro na tela cintiladora.
- d) O elétron incide em apenas um ponto da tela, gerando uma cintilação pontual.
- e) Pedacos do elétron são detectados na tela, nas mesmas proporções que os elétrons do feixe.

9- Considere um átomo inicialmente isolado. Medimos sua posição com excelente resolução ($\Delta x \sim 0$). Levando em conta o princípio de incerteza, o que podemos dizer sobre o momento do átomo (logo após a medição da posição)?

- a) O átomo tem um momento bem definido, mas ignoramos qual é o seu valor. Este valor pode ser revelado por uma medição subsequente à da posição.
- b) O átomo tem um momento bem definido, mas ignoramos qual é o seu valor. Uma medição subsequente à da posição não revela este valor porque o ato da medição da posição altera o valor do momento.
- c) O átomo não tem um valor bem definido de momento.
- d) Não faz sentido falar de um valor para o momento. Só podemos falar sobre isso após uma medição de momento.
- e) Não faz sentido falar em valor para o momento, pois ao medir essa grandeza em seqüência à posição não é possível obter qualquer valor numérico para o momento.

10- Dentre as afirmações apresentadas, qual é correta?

- a) A energia de um elétron ligado ao átomo não pode apresentar um valor qualquer.
- b) A carga do elétron depende da órbita em que ele se encontra.
- c) As órbitas ocupadas pelos elétrons são as mesmas em todos os átomos.
- d) O núcleo de um átomo é composto de prótons, nêutrons e elétrons.
- e) Em todos os átomos o número de elétrons é igual à soma dos prótons e dos nêutrons

11- (UFJF 1998) Assinale, dentre os itens abaixo, o CORRETO

- a) A teoria da relatividade de Einstein diz ser possível acelerar partículas massivas, a partir do repouso, até velocidades superiores à velocidade da luz.
- b) A energia de um fóton aumenta conforme aumenta seu comprimento de onda.
- c) Um elétron, ao ser freado bruscamente, pode emitir raios-X.
- d) Um corpo negro, por ser negro, nunca emite radiação eletromagnética.
- e) Segundo de Broglie, a luz sempre se comporta como uma onda, e o elétron sempre se comporta como uma partícula.

12- (UFRGS 2001). Assinale a alternativa que preenche corretamente a lacuna do parágrafo abaixo. O ano de 1900 pode ser considerado o marco inicial de uma revolução ocorrida na Física do século XX. Naquele ano, Max Planck apresentou um artigo à Sociedade Alemã de Física, introduzindo a idéia da da energia, da qual Einstein se valeu para, em 1905, desenvolver sua teoria sobre o efeito fotoelétrico.

- a) conservação.
- b) quantização.
- c) transformação.
- d) conversão.
- e) propagação.

13- O que você entende pela expressão “Interpretação da Mecânica Quântica”?

- a) Uma maneira única de construir corretamente a Mecânica Quântica e seus resultados.
- b) Uma das possíveis maneiras de entender os postulados da Mecânica Quântica e suas conseqüências, sem alterar ambos.
- c) Uma das possíveis maneiras de entender os postulados da Mecânica Quântica alterando suas conseqüências.
- d) Não tenho informação sobre esta expressão.

14-(PUC-RS) A energia de um fóton é diretamente proporcional a sua frequência, com a constante de Planck, h , sendo o fator de proporcionalidade. Por outro lado, pode-se associar massa a um fóton, uma vez que ele apresenta energia ($E=m.c^2$) e momentum. Assim, o momentum de um fóton de frequência f propagando-se com velocidade c se expressa como:

- a) $c^2/h.f$.
- b) $h.f/c^2$.
- c) $h.f/c$.
- d) $c/h.f$
- e) $c.f/h$

15- A idéia de observáveis incompatíveis em Física Quântica implica em:

- a) uma limitação na nossa habilidade em medir propriedades dos sistemas físicos;
- b) a Física Clássica repousar sobre princípios mais claramente elaborados do que a Física Quântica;
- c) ser uma característica intrínseca da natureza, independente da precisão dos sistemas de medição;
- d) não ser possível definir valores para estes observáveis.

As questões a seguir são discursivas. Responda-as com suas próprias palavras, procurando evidenciar o que você sabe sobre o assunto.

16- Você acredita que a Física Clássica é mais completa que a Física Quântica? Comente:

17- Um elétron é uma partícula? É uma onda? Explique:

18- O que você entende por densidade de probabilidade?

19- O que a Equação de Schrödinger descreve?

20- Por que a natureza ondulatória da matéria não é aparente em nossas observações diárias?

APÊNDICE 2

Texto de apoio

***Texto extraído da Tese de Doutorado de Iramaia Jorge Cabral. A aprendizagem significativa crítica de conceitos da mecânica Quântica segundo a interpretação de Copenhagen e o problema da diversidade de propostas de inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Espanha:Universidade de Burgos,2006.**

AS DIVERSAS INTERPRETAÇÕES DA MECÂNICA QUÂNTICA*

Mesmo tendo sido estabelecida há cerca de 80 anos, a Mecânica Quântica ainda é palco de intensos debates sobre os seus fundamentos e sobre diferentes interpretações possíveis baseadas em diferentes filosofias. Diversos autores têm identificado diferentes maneiras de se interpretar os fundamentos da Mecânica Quântica, havendo diferenças bastante profundas entre elas. Uma das obras mais bem construídas versando sobre tais interpretações é o artigo publicado no *American Journal of Physics*, em 2001, por F. Laloe. Apesar de se estender por 47 páginas da revista, este artigo representa uma síntese bastante concisa de uma análise de 182 obras importantes publicadas na área dos fundamentos da Mecânica Quântica.

Após uma descrição da edificação histórica da Mecânica Quântica, o autor se propõe a mostrar que, longe de uma construção unânime, esta área da ciência foi marcada por um espectro bastante amplo de interpretações constituído por muitos pontos de vista diferenciados. Assim sendo, não se pode afirmar que a MQ tenha um número definido de interpretações cujas fronteiras sejam bem definidas. Desta forma, o autor tenta identificar algumas das principais tendências interpretativas tendo como referencia alguns pontos filosóficos principais: o determinismo, a localidade, a complementaridade e a realidade.

A existência de diferentes interpretações viria do fato de que assim chamada Interpretação Ortodoxa ou Interpretação de Copenhagen, apesar de ter se mostrado coerente com todos os resultados experimentais até hoje obtidos – mesmo aqueles especialmente construídos para derrubá-la - e ter se mostrado resistente frente a outras construções teóricas, implica conseqüências de difícil aceitação ou compreensão.

Para levar o leitor a compreender tais dificuldades, o autor faz uma breve descrição dos dois princípios da interpretação de Copenhagen que levariam a essas dificuldades: a linearidade da Equação de Schrödinger e o colapso da função de onda.

A realização de medidas e o próprio desenrolar dos acontecimentos seriam governados por esses dois princípios. A Equação de Schrödinger descreve a evolução temporal das funções de

onda (ou vetores de estado) que, por sua vez, contêm todas as informações sobre as coisas (objetos), os observadores e os aparelhos de medida. A Eq. de Schrödinger é determinista e prevê que o “estado das coisas” pode ser constituído por uma superposição de diferentes soluções, ou diferentes “estado das coisas”. Por exemplo, no célebre experimento mental do gato de Schrödinger, o gato pode estar vivo e morto ao mesmo tempo (ou seja, uma superposição, ou soma, de dois estados diferentes). Contudo, o princípio do colapso da função de onda (chamado “decoerência”), estabelece que, uma vez que se faz uma medida sobre o sistema, ou alguém simplesmente observa ou interage com um sistema, a superposição abruptamente se desfaz, permanecendo apenas umas das soluções possíveis.

Assim, ao observarmos o gato, o veremos somente vivo ou somente morto. O princípio da decoerência torna a Interpretação de Copenhague compatível com os resultados experimentais, mas o motivo dela ser necessária se constitui, segundo Laloe, na principal dificuldade da MQ, na qual se debruçam os especialistas na atualidade.

O colapso da função de onda, de certa forma, estabelece uma estreita relação entre o observador e o objeto observado, ou seja, entre o sujeito e objeto (o que é um dos pontos principais focado neste trabalho). De acordo com a Interpretação de Copenhague, é como se a realidade dependesse de como ela é observada. Uma das dificuldades quase imediatas do princípio da decoerência advém de quando um fenômeno é observado por mais de um sujeito. Vamos supor que um observador A verifique o estado do gato de Schrödinger e constate que ele está vivo, sem que um outro observador B saiba disso. Se o observador B, depois de certo tempo, averiguar o estado do gato, deve necessariamente obter também que o gato está vivo, do contrário, pessoas diferentes experimentaríamos realidades incompatíveis. Isso implica em dizer que o fato do observador A saber ou não o estado do gato influencia o que o observador B experimenta ou vivencia. O problema é que tal processo, na teoria quântica, independe, por exemplo, da posição em que os observadores se encontram o que torna a Interpretação de Copenhague não local: ou seja, haveria uma espécie de acoplamento entre todas as coisas do universo, independentemente da distância em que se encontrassem uma das outras.

Tais dificuldades levaram diversos autores a propor interpretações alternativas à de Copenhague. Algumas dessas interpretações procuraram resgatar o caráter local da teoria, outras se apoiaram na manutenção do determinismo. Contudo, é importante frisar que nenhuma delas resultou em uma teoria completamente coerente e condizente com os resultados experimentais, exceto a Interpretação de Copenhague, a qual é incoerente com o senso comum, mas que, como ressalta Laloe, pode não ser necessariamente a interpretação definitiva (Laloe, 2001).

O número de interpretações diferentes existentes não é bem definido. Diferentes autores as classificam de formas diferenciadas. Por exemplo, Schreiber (1994), em sua dissertação de mestrado, identifica nove diferentes interpretações, identificando-as por meio dos seguintes nomes:

- 1) Interpretação Ortodoxa;
- 2) Interpretação de Bohr;
- 3) Colapso Provocado pela Mente;
- 4) Variáveis Ocultas;
- 5) Interpretação de Muitos-Mundos;
- 6) Interpretação de Muitas-Mentes;
- 7) Interpretação de Bohm;
- 8) Histórias Decoerentes (Ontologia);
- 9) Histórias Decoerentes (Epistemologia).

A interpretação Ortodoxa é aquela que estabelece as bases acadêmicas do formalismo quântico. Nessa interpretação, as funções de onda correspondem de fato aos estados de um sistema e o colapso da função de onda é um fenômeno que ocorre no sistema, inerentemente não determinístico. Já na interpretação de Bohr (ou Interpretação de Copenhague), as funções de onda não descrevem simplesmente um sistema, mas o conjunto formado pelo sistema, pelo(s) observador (es) e pelo(s) instrumento(s) de observação. O colapso da função de onda nesse caso representaria os estados possíveis que esse conjunto pode assumir. Assim, a Mecânica Quântica não descreveria como as coisas, em si, seriam, mas a interação sujeito/objeto. A Mecânica Quântica seria, portanto, uma teoria não-realista.

A interpretação de Copenhague, aliada a alguns resultados experimentais, abre caminho para a constatação da existência de uma relação entre a mente humana e a realidade física, uma vez que um ato investigativo que leva a um resultado experimental – e conseqüentemente a ampliação da consciência humana – têm implicações sobre a própria realidade física. Tal relação, contudo, é considerada de uma forma diferente dependendo da interpretação da teoria quântica. A mais extrema delas, proposta por Von Neumann e defendida por Wigner, corresponde à terceira interpretação (colapso provocado pela mente). Nessa interpretação, a mente teria um papel ativo no estabelecimento do estado quântico de um sistema. De certa forma, é como se a mente humana tivesse algum poder sobre o estado das coisas.

Já a quarta interpretação (variáveis ocultas) segue um caminho completamente diferente. Tendo uma perspectiva realista, sugere que o estado quântico dos objetos é bem definido, por si mesmo, independentemente do observador. Contudo, os objetos quânticos seriam multidimensionais no sentido de que os processos de observação conhecidos somente teriam capacidade de vislumbrar parte da realidade de um sistema. Ato de observação diferentes revelariam apenas aspectos específicos da realidade multidimensional, daí o grau de incerteza a respeito dos objetos. A sétima interpretação, proposta por Davis Bohm segue essa linha, dedicando especial atenção à dualidade onda/partícula. Bohm argumenta que as atividades seriam ondas e partículas juntas, ou seja, como uma partícula que viajaria imersa em uma espécie de campo ondulatório.

A quinta interpretação (muitos-mundos) argumenta que não haveria propriamente um colapso da função da onda devido ao ato de observação, mas que os estados possíveis passariam a existir em universos diferentes. Por exemplo, no caso do gato de Schrödinger, haveria um universo em que o gato estaria vivo e outro que o gato estaria morto. A sexta interpretação (muitas – mentes) é similar, contudo, ao invés de invocar, muitos universos paralelos, sustenta a existência de mentes diferenciadas, cada uma delas percebendo a realidade de uma maneira diferente.

Finalmente, as duas últimas interpretações elencadas se baseiam na argumentação que um conjunto de histórias (conjunto de soluções da equação de Schrödinger dependente do tempo) suficientemente consistente poderia ser utilizado para manter uma interpretação realista para a mecânica quântica. Isso poderia ser feito imaginando-se um conjunto de histórias que descreveria todo o universo – escrevendo-se a equação de Schrödinger para todo o universo – sendo que os resultados das medidas e o (s) processo (s) de medição como um todo estariam embutidos nesse conjunto de histórias. Desta forma, poder-se-ia ainda falar em sistemas existindo por si, independentemente do observador. Não haveria colapso da função de onda, pois o processo de medir estaria já embutido no conjunto de histórias. Contudo, tal interpretação teria que abrir mão da localidade e do determinismo.

Pode-se ver, portanto, que a mecânica quântica possui um largo espectro de interpretações diferentes, as quais estão estabelecidas em fases filosóficas diferentes. O tema é complexo, uma vez que, mesmo os participantes de uma corrente interpretativa eventualmente trazem visões que se diferenciam em alguns aspectos. Para ilustrar essa dificuldade, Laloe (2001), por exemplo, traz uma lista de visões diferentes a respeito do papel do observador e do colapso da função de onda, por parte de importantes especialistas:

* Bohr: “não há mundo quântico... é errado pensar que o objetivo dos físicos é encontrar como a natureza é. A Física diz respeito ao que nós podemos dizer sobre a natureza”.

* Heisenberg: “mas os átomos ou as partículas elementares não são reais; eles formam um mundo de potencialidades ou possibilidades no lugar das coisas e fatos”.

* Jordan: “observações não apenas perturbam o que está para ser medido, elas as produzem. Em uma medida de posição, o elétron é forçado a uma decisão sobre uma posição definida...”.

* Mermin: “o resultado de uma medida está relacionado com o próprio ato de medida, é, portanto, uma manifestação conjunta do sistema observado e do aparato de medida”.

* Bell: “(a interpretação de Copenhague) nunca diz respeito a eventos no sistema, mas, apenas a resultados de observações sobre o sistema, implicando a existência do equipamento externo”.

* Stapp: A interpretação da teoria quântica se baseia nos seguintes pontos: 1) conceitos clássicos inválidos; 2) o processo de medida não é descritível no âmbito da teoria; 3) a distinção entre o sujeito e objeto é invalidada; 4) o sistema de observação deve ser isolado para ser definido, ainda que, para ser observado, deva interagir.

Uma questão que naturalmente pode ser levantada da complexidade da interpretação da mecânica quântica é qual interpretação é mais adequada ao Ensino Médio.

Por que a Interpretação de Copenhague?

Apesar dos intensos debates em torno da melhor forma de interpretar a mecânica quântica, historicamente aquela que permeia a comunidade científica há 100 anos é a interpretação de Copenhague, no sentido em que seus procedimentos metodológicos e desdobramentos conceituais desde então tem como base elementos dessa interpretação. Apesar de uma quantidade significativa de pensadores e pesquisadores (como Popper, 1992 e Bohm, 1983) não se sentirem confortáveis com a base não-realista dessa interpretação, ela jamais foi colocada em xeque por algum resultado experimental, tendo se mantido consistente até os dias de hoje. O argumento utilizado na atualidade para a existência de pesquisa sobre outras interpretações é que, embora a consistência da interpretação de Copenhague/Bohr, vale a pena investigar a possibilidade da construção de uma outra interpretação, pois ainda não está esgotada a possibilidade de organizar outra interpretação consistente fundamentada em outras bases filosóficas (Laloe, 2001). Contudo, resultados experimentais recentes, tal como os de

interferometria com nêutrons, são condizentes com essa interpretação. Assim, o primeiro argumento para a utilização de interpretação de Copenhagen é a sua consistência conceitual.

O segundo argumento em prol da utilização dessa interpretação em iniciativas de Ensino Médio é o fato de que nela é enfatizado o papel do observador no processo de obtenção de medidas e interação com outros sistemas, já que é a interação que mais enfatiza a relação sujeito/objeto (Heisenberg, 1995; Bohr, 1995). Assim sendo, a Interpretação de Copenhagen leva à discussão do papel das nossas ações e nossa consciência no mundo que nos cerca. Considerando-se que vivemos atualmente em um mundo em que processos complexos (tais como problemas econômicos, as questões ecológicas e de mudanças climáticas globais, a violência urbana e o terrorismo) influenciam nossas vidas, é importante a discussão de nosso papel na sociedade e no mundo e de que forma nossas ações repercutem nas coisas e nas vidas de outras pessoas, ou seja, na discussão de questões morais do mundo contemporâneo. A Interpretação de Copenhagen/Bohr explicita tais questões, pois, uma vez que o observador (sujeito) perturba aquilo (objeto) que está para ser medido, cada pessoa tem um papel ativo na percepção e construção de realidade.

APÊNDICE 3

Roteiro simulação efeito fotoelétrico:

A simulação utilizada foi retirada de:

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/fotoelectrico/fotoelectrico.htm>

Procedimentos:

1- Clique no ícone fóton e observe o que ocorre. Varie o comprimento de onda e observe o que ocorre. Quando o amperímetro registra passagem de corrente elétrica?

Varie também a intensidade da luz e observe. Quando o amperímetro registra passagem de corrente elétrica?

2- Preencha a tabela abaixo variando a intensidade da luz de 0 a 5 fótons e os comprimentos de ondas sugeridos, anotando se há ou não emissão de elétrons para cada caso:

Intensidade	$\lambda(7000\text{Å})$	$\lambda(6000\text{Å})$	$\lambda(4500\text{Å})$	$\lambda(3000\text{Å})$
0				
1				
2				
3				
4				
5				

O que você observou em relação ao início da ocorrência do efeito fotoelétrico?

Chega-se a que conclusão com os dados acima em relação à intensidade da luz e a emissão de elétrons do metal? O que se pode dizer do comprimento de onda e a emissão de elétrons? Relacione a energia do fóton e sua frequência, indicando em qual faixa de frequência se inicia o efeito fotoelétrico.

3- Qual a condição básica para ocorrer o efeito fotoelétrico?

4- Procure determinar o valor dos quanta de energia das seguintes radiações:

Luz infravermelha de $1,5 \cdot 10^{14}$ Hz

Luz ultravioleta de $2,5 \cdot 10^{15}$ Hz

Raio X de $4 \cdot 10^{18}$ Hz

Raio γ de $2 \cdot 10^{20}$ Hz

APÊNDICE 4

Roteiro simulação Dupla Fenda:

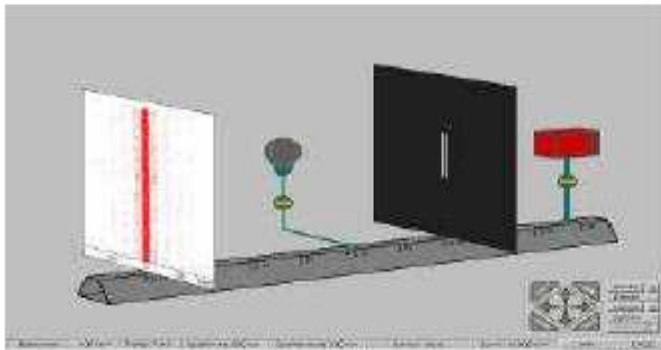


Figura 1. Tela do programa Doppelspalt.

Procedimentos:

1- Escolha um feixe de partículas clássicas para o experimento de dupla fenda e inicie o experimento. Para isso clique em *source* à direita e escolha a primeira opção que corresponde a um feixe de balas clássicas. Primeiro faça o experimento com apenas uma fenda aberta. Para isso, clique em cima das fendas com o *mouse* e selecione na janela que abrirá 1 fenda. Clique no botão ao lado do botão *source*.

O que se observa no anteparo depois de certo tempo? Como se pode explicar o que foi observado?

Agora clique sobre as fendas e selecione as duas fendas. Reinicie o experimento.

O que se observa no anteparo depois de certo tempo? Como se pode explicar o que foi observado?

2- Observe no vídeo novamente o que ocorre quando ondas clássicas são submetidas ao experimento de dupla fenda.

O que se observa no anteparo depois de certo tempo? Como se pode explicar o que foi observado?

3- Escolha um feixe de objetos quânticos para o experimento. Para isso clique em *source* à direita e escolha um feixe de objetos quânticos. Para os valores da largura das fendas (*slit-width*) use 120nm e para a distância entre elas (*slit-distance*) use 700nm. Clique no botão ao lado do botão *source*.

O que se observa no anteparo depois de um tempo?

Compare com os padrões observados com partículas clássicas e os observados com ondas clássicas? Qual o comportamento (corpúscular ou ondulatório) apresentado pelo objeto quântico?

Quando o objeto quântico é detectado, qual comportamento é apresentado?

Podem ser identificados o comportamento corpúscular ou o comportamento ondulatório a partir do que se observa na tela? Explique:

APÊNDICE 5

ESQUEMAS DOS ALUNOS PARA O CONTEÚDO NO ENSINO MÉDIO

Grupos da turma de quinta-feira à noite.

Grupo 1:

Percebemos que o efeito fotoelétrico pode ser inserido no início da matéria de carga elétrica (3º ano do Ensino Médio) podendo ser usada a simulação vista no curso. A partir daí, relatar a questão histórica dos físicos e suas descobertas no início da Física Quântica.

Nas leis de Newton pode ser introduzida a idéia que a luz apresenta momentum.

Apresentar também a questão da dualidade onda-partícula e os diversos pontos de vistas (interpretações) entre os físicos.

Uma outra possibilidade também abordaria o estudo de assuntos relacionados a eventos históricos como a construção da bomba atômica, de reatores, da fusão e fissão, que inevitavelmente levaria o aluno ao questionamento das leis que regem este novo contexto.

Grupo 2:

Probabilidade: fazendo um trabalho interdisciplinar com a matemática do 3º ano do Ensino Médio.

Junto com a ótica trabalhar o efeito fotoelétrico utilizando a simulação do efeito fotoelétrico e o vídeo apresentado.

Ondulatória: trabalhar a dualidade-onda partícula da luz utilizando o vídeo e a simulação de dupla fenda.

Pensar em um projeto interdisciplinar com química, discutindo as interpretações e quantização.

Grupo 3.

Interpretações: é importante trabalhar a questão das interpretações para inovar os conceitos a respeito do átomo, especialmente na disciplina de Química.

Quantização: uma pequena abordagem qualitativa pode ser feita no curso de Mecânica, por exemplo, na conservação de energia, transformação da energia cinética em térmica devido ao atrito. Pode-se falar sucintamente que no mundo microscópico essa

transformação (excitação e relaxação do átomo) se dá de forma quantizada, em “pacotes” de energia.

Dualidade: em Ótica, utilizando o conceito de fóton. A simulação computacional é muito ilustrativa

Superposição de estados: o exemplo do gato de Schrödinger pode ser usado.

Grupo 4:

Em Ótica, é muito proveitoso abordar o conceito de fóton, cuja quantização de energia é mais fácil de entender.

O efeito fotoelétrico pode ser discutido em Eletricidade, mais para o fim do 3º ano do Ensino Médio. A simulação do efeito fotoelétrico seria um bom exemplo, ou até mesmo um experimento real.

Grupos da turma de sábado.

Grupo 1:

Química 1º ano: Números quânticos - mencionar a probabilidade de um elétron estar em um determinado orbital, eventualmente não se comportando exatamente como no modelo das camadas K, L, M, N, O, P e Q.

Dualidade onda-partícula: utilizar a simulação e o vídeo no conteúdo de Ótica do 3º ano.

Efeito fotoelétrico: trabalhar a simulação no conteúdo de eletricidade do 3º ano.

Grupo 2:

Dualidade onda-partícula: no conteúdo de eletricidade quando se fala em carga elétrica. Utilizar o vídeo para discussão, realização de seminários e feira de iniciação científica.

Função de onda, equação de Schrödinger, superposição de estados e princípio da incerteza deveriam ser trabalhados um a um, separadamente.

Grupo 3:

Interpretações: trabalhar paralelamente com Filosofia.

Quantização: trabalhar em Química (quantização da carga elétrica).

Efeito fotoelétrico: citar no conteúdo de eletricidade

Probabilidade: Matemática e Química.

Dualidade onda-partícula: utilizar a simulação e o vídeo. Pode ser inserido em conteúdos de Ótica e também no estudo da distribuição eletrônica, não limitando o comportamento do elétron como partícula.

Grupo 4:

Interpretações: as interpretações podem ser inseridas na Filosofia, Física (em todos os conteúdos), e nas demais disciplinas ditas exatas.

Quantização: a quantização pode ser inserida na Eletricidade, quando se trata das questões sobre condutores e isolantes e também na Química quando se estuda a estrutura do átomo.

Efeito fotoelétrico: pode-se introduzir este conteúdo quando se fala dos meios alternativos de fonte de energia. Exemplo: energia solar, que pode ser abordada também, quando se trata das questões ambientais (fontes limpas).

ANEXO

TEXTOS DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA

v. 19 n. 4 2008

ISSN 1807-2763

**SUGESTÕES AO PROFESSOR DE FÍSICA PARA ABORDAR TÓPICOS DE
MECÂNICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO**

SABRINA SOARES

IRAMAIA CABRAL DE PAULO

MARCO ANTONIO MOREIRA

Textos de Apoio ao Professor de Física, v. 19, n. 4 2008
Instituto de Física – UFRGS
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Editores: Marco Antonio Moreira
Eliane Angela Veit

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Bibliotecária

CRB



Impresão:
Intercalação:

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	5
2.	A PROPOSTA DE TRABALHO	7
2.1.	<u>Pré-teste</u>	7
3.	AS INTERPRETAÇÕES DA MECÂNICA QUÂNTICA	13
3.1.	<u>As diversas interpretações da Mecânica Quântica</u>	13
3.1.1.	Por que a Interpretação de Copenhagen?	16
3.2.	<u>Resumo das interpretações</u>	17
3.3.	<u>Questões para discussão</u>	21
4.	QUANTIZAÇÃO	23
5.	EFEITO FOTOELÉTRICO	25
5.1.	<u>Roteiro: simulação do Efeito Fotoelétrico</u>	25
6.	OBJETO QUÂNTICO	29
7.	DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA	31
7.1.	<u>O conceito de partícula clássica</u>	31
7.2.	<u>O conceito de onda clássica</u>	31
7.3.	<u>Dualidade</u>	32
7.4.	<u>A experiência de Young (dupla-fenda)</u>	32
7.5.	<u>Roteiro: simulação Dupla-Fenda</u>	34
7.6.	<u>Explicação para a dualidade</u>	35
8.	FUNÇÃO DE ONDA	39
9.	SUPERPOSIÇÃO DE ESTADOS	47
9.1.	<u>O gato de Schrödinger</u>	47
9.2.	<u>A computação quântica</u>	48
10.	PRINCÍPIO DA INCERTEZA	51
11.	ATIVIDADE PARA AVALIAÇÃO DE APRENDIZAGEM	53
12.	RESPOSTAS DO PRÉ-TESTE	59
13.	CONCLUSÃO	61
14.	REFERÊNCIAS	63

1. INTRODUÇÃO

A Mecânica Quântica é uma teoria física que descreve o mundo microscópico (escala atômica e subatômica). É a física dos componentes da matéria, átomos, moléculas e núcleos. Seus princípios fogem da visão clássica de mundo que se possui.

No dia-a-dia, estamos acostumados a lidar com sistemas físicos que se comportam como ondas, as de rádio, por exemplo, ou como partículas, uma bolinha, por exemplo, sem confundir uma coisa com outra. Os objetos materiais clássicos possuem quantidade de movimento e trajetória bem definidas e não é possível localizar uma onda sonora em determinado ponto do espaço, já que ela se espalha pelo espaço. As ondas não transportam matéria, apenas energia, em vez de colidirem elas contornam obstáculos.

No mundo microscópico, partículas se movimentam sem descrever trajetórias precisas e ondas colidem como se fossem corpúsculos. A teoria quântica atribui a uma partícula aspectos ondulatórios e à radiação aspectos corpusculares.

O estado de um sistema quântico relaciona-se a uma distribuição de probabilidades, isto é, no mundo microscópico deve-se falar em probabilidades: probabilidade de a partícula ser encontrada em determinada posição, probabilidade de ter certo momentum, etc.

Segundo a Mecânica Quântica, é impossível se determinar com precisão absoluta posição e momentum de partículas atômicas e subatômicas. Se fosse possível conhecer com precisão o momentum de um elétron, o conhecimento de sua posição ficaria completamente prejudicado.

A Física Quântica estabelece que microscopicamente a quantidade de energia de alguns sistemas é quantizada, isto é, em certas situações nem todos os valores de energia do sistema são possíveis. A própria matéria é quantizada, a massa de um objeto, por exemplo, é aproximadamente igual a um número inteiro da massa dos átomos que o compõem.

Pode-se dizer que a teoria quântica nasceu em 14 de dezembro de 1900. Esta data corresponde à da reunião da Sociedade Alemã de Física, quando Max Planck explicou a distribuição da radiação de corpo negro de acordo com a hipótese de que a emissão e a absorção de energia eletromagnética se dão não de forma contínua, mas de forma discreta. Começa então a idéia de quantização.

Com a finalidade de introduzir o tema Mecânica Quântica, elaborou-se este Texto de Apoio ao Professor, onde se pode encontrar sugestões de como trabalhá-lo com simulações e modelagens, onde os alunos podem realizar práticas em “laboratório virtual”, aproveitando simulações através de aplicativos livres disponíveis na Internet, que possibilitem um eficiente processo de ensino-aprendizagem e permitam a transposição didática. Este texto é resultado de um curso introdutório de Mecânica Quântica para professores de Física do Ensino Médio (Soares, 2008).

Na proposta metodológica procurou-se contextualizar o assunto, de forma potencialmente significativa, a fim de despertar o interesse do professor.

Assim sendo, o presente Texto de Apoio ao Professor de Física tem como objetivo principal fornecer uma base inicial potencialmente significativa a professores de Física sobre conceitos de Mecânica Quântica, além de discutir propostas pedagógicas e metodológicas para trabalhar o tema no Ensino Médio.

Este Texto de Apoio pode ser considerado importante pelas seguintes razões:

- a tecnologia atual é explicada a partir de conceitos da Física Moderna;
- a maioria dos professores de Física do Ensino Médio enfatiza apenas os conteúdos de Mecânica Clássica;
- em várias licenciaturas os tópicos de Física Moderna e Contemporânea são pouco trabalhados;
- é necessário criar alternativas para que os professores consigam suprir deficiências construindo meios que possibilitem a inclusão da Física Moderna no Ensino Médio.

Os seguintes conteúdos são abordados:

- as interpretações da Mecânica Quântica (com opção pela Interpretação da Complementaridade ou de Copenhagen);
- quantização;
- objeto quântico;
- dualidade onda-partícula;
- função de onda;
- superposição de estados;
- Princípio da Incerteza.

2. A PROPOSTA DE TRABALHO

Sugerimos inicialmente a aplicação de um pré-teste para a verificação do nível de conhecimento dos alunos, em relação aos conceitos que serão tratados no texto. É importante que respondam apenas as questões sobre as quais tenham algum conhecimento, ou seja, que não “chutem” as respostas às questões em que não tenham qualquer idéia de resposta. Após a abordagem do conteúdo, é interessante novamente a aplicação do teste – como pós-teste – para buscar evidências sobre a aprendizagem.

2.1. Pré-teste/Pós-Teste

Nome:

Prezado(a) aluno(a)

Este teste é apenas uma sondagem sobre seus conhecimentos iniciais de Mecânica Quântica a fim de levá-los em conta no desenvolvimento do curso. Não é uma avaliação formal. Por favor, evite respostas aleatórias. Deixe em branco quando julgar adequado.

Obrigado.

1-(ITA- 2002). Um trecho da música Quanta, de Gilberto Gil, é reproduzido a seguir:

“Fragmento infinitesimal,
Quase que apenas mental,
Quantum granulado no mel,
Quantum ondulado do sal,
Mel de urânio, sal de rádio
Qualquer coisa quase ideal.”

As frases “Quantum granulado no mel” e “Quantum ondulado do sal” relacionam-se em Física com:

- a) conservação da energia.
- b) conservação do momentum linear.
- c) dualidade onda-partícula.
- d) princípio da causalidade.
- e) conservação do momentum angular.

2- (PUC-RS c/ modificações-1997). O Efeito Fotoelétrico demonstra que:

- a) a radiação tem comportamento corpuscular.
- b) a luz se propaga com velocidade aproximada de 3×10^8 m/s.
- c) o elétron tem comportamento ondulatorio.
- d) a luz se propaga em ondas transversais.
- e) existem níveis de energia no átomo.

3- (UFRGS- 1994). “De acordo com a teoria formulada em 1900, pelo físico Max Planck, a matéria emite ou absorve energia eletromagnética de maneira _____, emitindo ou absorvendo _____, cuja energia é proporcional à _____ da radiação eletromagnética envolvida nessa troca de energia.”

Assinale a alternativa que, pela ordem, preenche corretamente as lacunas:

- a) contínua – quanta – amplitude.
- b) discreta – prótons – frequência.
- c) discreta – fótons – frequência.
- d) contínua – elétrons – intensidade.
- e) contínua – nêutrons – amplitude.

4- (PUCMG-1998). Complete as lacunas do trecho com as palavras que, na mesma ordem, estão relacionadas nas opções a seguir.

“A luz, quando atravessa uma fenda muito estreita, apresenta um fenômeno chamado de _____ e isto é interpretado como resultado do comportamento _____ da luz. Porém, quando a luz incide sobre uma superfície metálica, elétrons podem ser emitidos da superfície sendo este fenômeno chamado _____, que é interpretado como resultado do comportamento _____ da luz.”

Assinale a opção CORRETA encontrada:

- a) difração, ondulatório, efeito fotoelétrico, corpuscular.
- b) difração, corpuscular, efeito fotoelétrico, ondulatório.
- c) interferência, ondulatório, efeito Compton, corpuscular.
- d) efeito fotoelétrico, corpuscular, difração, ondulatório.
- e) ondas, magnético, fótons, elétrico.

5- (PUCMG-2000). Escolha a opção que se refira àquela onda eletromagnética que estiver associada a fótons de maior energia:

- a) onda longa de rádio.
- b) ondas de TV.
- c) microondas.
- d) raios-X.
- e) raios gama.

6- (UFRGS – 1987). A tabela mostra as frequências de três ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo. Comparando-se essas três ondas, verifica-se que:

Ondas	f(Hz)
X	3×10^{17}
Y	6×10^{14}
Z	3×10^{14}

- a) a energia de um fóton associado à onda X é maior do que a energia de um fóton associado à onda Y.
- b) o comprimento de onda de Y é igual ao dobro do da onda Z.
- c) à onda Z estão associados os fótons de maior energia e de menor quantidade de movimento.
- d) a energia do fóton associado à onda X é igual à associada à onda Y.
- e) as três ondas possuem o mesmo comprimento de onda.

7- (PUC-1973). A energia portada por um fóton de luz de frequência 5×10^{14} Hz é de aproximadamente:

(Dado: $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s)

- a) $2,30 \times 10^{-18}$ J.
- b) $3,31 \times 10^{-19}$ J.
- c) $6,62 \times 10^{-18}$ J.
- d) $5,32 \times 10^{-15}$ J.
- e) $8,42 \times 10^{-18}$ J.

8- (Montenegro e Pessoa Jr., Investigações em Ensino de Ciências, vol 7, nº2, 2002). Um feixe de elétrons passa por duas fendas e forma um padrão de interferência em uma tela cintiladora. O que acontece quando apenas 1 (um) elétron passa pelas fendas?

- f) Forma-se um padrão de interferência bem fraco na tela.
- g) Se o elétron for muito energético forma-se um padrão de interferência bastante nítido.
- h) Não haverá qualquer registro na tela cintiladora.
- i) O elétron incide em apenas um ponto da tela, gerando uma cintilação pontual.
- j) Pedacos do elétron são detectados na tela, nas mesmas proporções que os elétrons do feixe.

9- Considere um átomo inicialmente isolado. Medimos sua posição com excelente resolução ($\Delta x \sim 0$). Levando em conta o Princípio de Incerteza, o que podemos dizer sobre o momento do átomo (logo após a medição da posição)?

- a) O átomo tem um momento bem definido, mas ignoramos qual é o seu valor. Este valor pode ser revelado por uma medição subsequente à da posição.
- b) O átomo tem um momento bem definido, mas ignoramos qual é o seu valor. Uma medição subsequente à da posição não revela este valor porque o ato da medição da posição altera o valor do momento.

- c) O átomo não tem um valor bem definido de momento.
- d) Não faz sentido falar de um valor para o momento. Só podemos falar sobre isso após uma medição de momento.
- e) Não faz sentido falar em valor para o momento, pois ao medir essa grandeza em seqüência à posição não é possível obter qualquer valor numérico para o momento.

10 - Dentre as afirmações apresentadas, qual é correta?

- f) A energia de um elétron ligado ao átomo não pode apresentar um valor qualquer.
- g) A carga do elétron depende da órbita em que ele se encontra.
- h) As órbitas ocupadas pelos elétrons são as mesmas em todos os átomos.
- i) O núcleo de um átomo é composto de prótons, nêutrons e elétrons.
- j) Em todos os átomos o número de elétrons é igual à soma dos prótons e dos nêutrons

11- (UFJF-1998). Assinale, dentre os itens abaixo, o CORRETO.

- f) A teoria da relatividade de Einstein diz ser possível acelerar partículas massivas, a partir do repouso, até velocidades superiores à velocidade da luz.
- g) A energia de um fóton aumenta conforme aumenta seu comprimento de onda.
- h) Um elétron, ao ser freado bruscamente, pode emitir raios-X.
- i) Um corpo negro, por ser negro, nunca emite radiação eletromagnética.
- j) Segundo de Broglie, a luz sempre se comporta como uma onda, e o elétron sempre se comporta como uma partícula.

12- (UFRGS 2001). Assinale a alternativa que preenche corretamente a lacuna do parágrafo abaixo. O ano de 1900 pode ser considerado o marco inicial de uma revolução ocorrida na Física do século XX. Naquele ano, Max Planck apresentou um artigo à Sociedade Alemã de Física, introduzindo a idéia da da energia, da qual Einstein se valeu para, em 1905, desenvolver sua teoria sobre o efeito fotoelétrico.

- f) conservação.
- g) quantização.
- h) transformação.
- i) conversão.
- j) propagação.

13- O que você entende pela expressão “Interpretação da Mecânica Quântica”?

- a) Uma maneira única de construir corretamente a Mecânica Quântica e seus resultados.
- b) Uma das possíveis maneiras de entender os postulados da Mecânica Quântica e suas conseqüências, sem alterar ambos.
- c) Uma das possíveis maneiras de entender os postulados da Mecânica Quântica alterando suas conseqüências.

d) Não tenho informação sobre esta expressão.

14-(PUC-RS). A energia de um fóton é diretamente proporcional a sua frequência, com a constante de Planck, h , sendo o fator de proporcionalidade. Por outro lado, pode-se associar massa a um fóton, uma vez que ele apresenta energia ($E=m.c^2$) e momentum. Assim, o momentum de um fóton de frequência f propagando-se com velocidade c se expressa como:

- a) $c^2/h.f$.
- b) $h.f/c^2$.
- c) $h.f/c$.
- d) $c/h.f$.
- e) $c.f/h$.

15- A idéia de observáveis incompatíveis em Física Quântica implica:

- a) uma limitação na nossa habilidade em medir propriedades dos sistemas físicos.
- b) a Física Clássica repousar sobre princípios mais claramente elaborados do que a Física Quântica.
- c) ser uma característica intrínseca da natureza, independente da precisão dos sistemas de medição.
- d) não ser possível definir valores para estes observáveis.

Questões discursivas:

16- Você acredita que a Física Clássica é mais completa que a Física Quântica? Comente:

17- Um elétron é uma partícula? É uma onda? Explique:

18- O que você entende por densidade de probabilidade?

19- O que a Equação de Schrödinger descreve?

20- Por que a natureza ondulatória da matéria não é aparente em nossas observações diárias?

3. AS INTERPRETAÇÕES DA MECÂNICA QUÂNTICA

Há diversas formas de interpretar a teoria quântica. Os fenômenos apresentados pelo mundo microscópico são explicados de acordo com postulados e leis da Mecânica Quântica, mas estes podem ter interpretações diferentes, isto é, existem maneiras diferentes de se entender um determinado fenômeno observado microscopicamente.

Nesta seção serão conhecidos os defensores das principais interpretações e da interpretação utilizada na elaboração do texto de apoio, que é a interpretação de Copenhague, defendida principalmente por Bohr. A seguir é apresentado um texto sobre as interpretações da Mecânica Quântica extraído da tese de doutorado de Iramaia Jorge Cabral de Paulo (2006).

3.1. As diversas interpretações da Mecânica Quântica

Mesmo tendo sido estabelecida há cerca de 80 anos, a Mecânica Quântica ainda é palco de intensos debates sobre os seus fundamentos e sobre diferentes interpretações possíveis baseadas em diferentes filosofias. Diversos autores têm identificado diferentes maneiras de se interpretar os fundamentos da Mecânica Quântica, havendo diferenças bastante profundas entre elas. Uma das obras mais bem construídas versando sobre tais interpretações é o artigo publicado no *American Journal of Physics*, em 2001, por F. Laloe. Apesar de se estender por 47 páginas da revista, este artigo representa uma síntese bastante concisa de uma análise de 182 obras importantes publicadas na área dos fundamentos da Mecânica Quântica.

Após uma descrição da edificação histórica da Mecânica Quântica, o autor se propõe a mostrar que, longe de uma construção unânime, esta área da ciência foi marcada por um espectro bastante amplo de interpretações constituído por muitos pontos de vista diferenciados. Assim sendo, não se pode afirmar que a MQ tenha um número definido de interpretações cujas fronteiras sejam bem definidas. Desta forma, o autor tenta identificar algumas das principais tendências interpretativas tendo como referência alguns pontos filosóficos principais: o determinismo, a localidade, a complementaridade e a realidade.

A existência de diferentes interpretações viria do fato de que a assim chamada Interpretação Ortodoxa ou Interpretação de Copenhague, apesar de ter se mostrado coerente com todos os resultados experimentais até hoje obtidos – mesmo aqueles especialmente construídos para derrubá-la – e ter se mostrado resistente frente a outras construções teóricas, implica conseqüências de difícil aceitação ou compreensão.

Para levar o leitor a compreender tais dificuldades, o autor faz uma breve descrição dos dois princípios da interpretação de Copenhague que levariam a essas dificuldades: a linearidade da Equação de Schrödinger e o colapso da função de onda. A realização de medidas e o próprio desenrolar dos acontecimentos seriam governados por esses dois princípios. A Equação de Schrödinger descreve a evolução temporal das funções de onda (ou vetores de estado) que, por sua vez, contêm todas as informações sobre as coisas (objetos), os observadores e os aparelhos de medida. A Eq. de Schrödinger é determinista e prevê que o “estado das coisas” pode ser constituído por uma superposição de diferentes soluções, ou diferentes “estados das coisas”. Por exemplo, no

célebre experimento mental do Gato de Schrödinger, o gato pode estar vivo e morto ao mesmo tempo (ou seja, uma superposição, ou soma, de dois estados diferentes). Contudo, o princípio do colapso da função de onda (chamado “decoerência”), estabelece que, uma vez que se faz uma medida sobre o sistema, ou alguém simplesmente observa ou interage com um sistema, a superposição abruptamente se desfaz, permanecendo apenas umas das soluções possíveis.

Assim, ao se observar o gato, vê-se somente vivo ou somente morto. O princípio da decoerência torna a Interpretação de Copenhague compatível com os resultados experimentais, mas o motivo dela ser necessária se constitui, segundo Laloe, na principal dificuldade da MQ, na qual se debruçam os especialistas na atualidade.

O colapso da função de onda, de certa forma, estabelece uma estreita relação entre o observador e o objeto observado, ou seja, entre sujeito e objeto (o que é um dos pontos principais enfocados neste trabalho). De acordo com a Interpretação de Copenhague, é como se a realidade dependesse de como ela é observada. Uma das dificuldades quase imediatas do princípio da decoerência advém de quando um fenômeno é observado por mais de um sujeito. Supõe-se que um observador A verifique o estado do Gato de Schrödinger, e constate que ele está vivo, sem que um outro observador B saiba disso. Se o observador B, depois de certo tempo, averiguar o estado do gato, deve necessariamente obter também que o gato está vivo, do contrário, pessoas diferentes experimentariam realidades incompatíveis. Isso implica dizer que o fato de o observador A saber, ou não, o estado do gato influencia o que o observador B experimenta ou vivencia. O problema é que tal processo, na teoria quântica, independe, por exemplo, da posição em que os observadores se encontram o que torna a Interpretação de Copenhague não local: ou seja, haveria uma espécie de acoplamento entre todas as coisas do universo, independentemente da distância em que se encontrassem uma das outras.

Tais dificuldades levaram diversos autores a propor interpretações alternativas à de Copenhague. Algumas dessas interpretações procuraram resgatar o caráter local da teoria, outras se apoiaram na manutenção do determinismo. Contudo, é importante frisar que nenhuma delas resultou em uma teoria completamente coerente e condizente com os resultados experimentais, exceto Interpretação de Copenhague, a qual é incoerente com o senso comum, mas que, como ressalta Laloe, pode não ser necessariamente a interpretação definitiva (Laloe, 2001).

O número de interpretações diferentes existentes não é bem definido. Distintos autores as classificam de formas diferenciadas. Por exemplo, Schreiber (1994), em sua dissertação de mestrado, identifica nove diferentes interpretações, identificando-as por meio dos seguintes nomes:

- 1) Interpretação Ortodoxa;
- 2) Interpretação de Bohr;
- 3) Colapso Provocado pela Mente;
- 4) Variáveis Ocultas;
- 5) Interpretação de Muitos-Mundos;
- 6) Interpretação de Muitas-Mentes;
- 7) Interpretação de Bohm;
- 8) Histórias Decoerentes (Ontologia) ;
- 9) Histórias Decoerentes (Epistemologia).

A Interpretação Ortodoxa é aquela que estabelece as bases acadêmicas do formalismo quântico. Nessa interpretação, as funções de onda correspondem de fato aos estados de um sistema e o colapso da função de onda é um fenômeno que ocorre no sistema, inerentemente não determinístico. Já na Interpretação de Bohr (ou Interpretação de Copenhague), as funções de onda não descrevem simplesmente um sistema, mas o conjunto formado pelo sistema, pelo(s) observador(es) e pelo(s) instrumento(s) de observação. O colapso da função de onda nesse caso representaria os estados possíveis que esse conjunto pode assumir. Assim, a Mecânica Quântica não descreveria como as coisas, em si, seriam, mas a interação sujeito/objeto. A Mecânica Quântica seria, portanto, uma teoria não-realista.

A Interpretação de Copenhague, aliada a alguns resultados experimentais, abre caminho para a constatação da existência de uma relação entre a mente humana e a realidade física, uma vez que um ato investigativo que leva a um resultado experimental – e conseqüentemente à ampliação da consciência humana – tem implicações sobre a própria realidade física. Tal relação, contudo, é considerada de uma forma diferente dependendo da interpretação da teoria quântica. A mais extrema delas, proposta por Von Neumann e defendida por Wigner, corresponde à terceira interpretação (colapso provocado pela mente). Nessa interpretação, a mente teria um papel ativo no estabelecimento do estado quântico de um sistema. De certa forma, é como se a mente humana tivesse algum poder sobre o estado das coisas.

Já a quarta interpretação (Variáveis Ocultas) segue um caminho completamente diferente. Tendo uma perspectiva realista, sugere que o estado quântico dos objetos é bem definido, por si mesmo, independentemente do observador. Contudo, os objetos quânticos seriam multidimensionais no sentido de que os processos de observação conhecidos somente teriam capacidade de vislumbrar parte da realidade de um sistema. Ato de observação diferentes revelariam apenas aspectos específicos da realidade multidimensional, daí o grau de incerteza a respeito dos objetos. A sétima interpretação, proposta por David Bohm, segue essa linha, dedicando especial atenção à dualidade onda/partícula. Bohm argumenta que as atividades seriam ondas e partículas juntas, ou seja, como uma partícula que viajaria imersa em uma espécie de campo ondulatório.

A quinta interpretação (Muitos-Mundos) argumenta que não haveria propriamente um colapso da função da onda devido ao ato de observação, mas que os estados possíveis passariam a existir em universos diferentes. Por exemplo, no caso do Gato de Schrödinger, haveria um universo em que o gato estaria vivo e outro que o gato estaria morto. A sexta interpretação (Muitas – Mentes) é similar, contudo, ao invés de invocar, muitos universos paralelos, sustenta a existência de mentes diferenciadas, cada uma delas percebendo a realidade de uma maneira diferente.

Finalmente, as duas últimas interpretações elencadas se baseiam na argumentação que um conjunto de histórias (conjunto de soluções da Equação de Schrödinger dependente do tempo) suficientemente consistente poderia ser utilizado para manter uma interpretação realista para a Mecânica Quântica. Isso poderia ser feito imaginando-se um conjunto de histórias que descreveria todo o universo – escrevendo-se a Equação de Schrödinger para todo o universo – sendo que os resultados das medidas e o (s) processo (s) de medição como um todo estariam embutidos nesse conjunto de histórias. Desta forma, poder-se-ia ainda falar em sistemas existindo por si,

independentemente do observador. Não haveria colapso da função de onda, pois o processo de medir estaria já embutido no conjunto de histórias. Contudo, tal interpretação teria que abrir mão da localidade e do determinismo.

Pode-se ver, portanto, que a Mecânica Quântica possui um largo espectro de interpretações diferentes, as quais estão estabelecidas em fases filosóficas diferentes. O tema é complexo, uma vez que mesmo os participantes de uma corrente interpretativa eventualmente trazem visões que se diferenciam em alguns aspectos. Para ilustrar essa dificuldade, Laloe (2001), por exemplo, traz uma lista de visões diferentes a respeito do papel do observador e do colapso da função de onda, por parte de importantes especialistas:

* Bohr: “Não há mundo quântico... é errado pensar que o objetivo dos físicos é encontrar como a natureza é. A Física diz respeito ao que nos podemos dizer sobre a natureza.”

* Heisenberg: “Mas os átomos ou as partículas elementares não são reais; eles formam um mundo de potencialidades ou possibilidades no lugar das coisas e fatos.”

* Jordan: “Observações não apenas perturbam o que está para ser medido, elas as produzem. Em uma medida de posição, o elétron é forçado a uma decisão sobre uma posição definida...”

* Mermin: “O resultado de uma medida está relacionado com o próprio ato de medida, é, portanto, uma manifestação conjunta do sistema observado e do aparato de medida.”

* Bell: “(A Interpretação de Copenhague) nunca diz respeito a eventos no sistema, mas, apenas a resultados de observações sobre o sistema, implicando a existência do equipamento externo.”

* Stapp: “A interpretação da teoria quântica se baseia nos seguintes pontos: 1) conceitos clássicos inválidos; 2) o processo de medida não é descritível no âmbito da teoria; 3) a distinção entre o sujeito e objeto é invalidada; 4) o sistema de observação deve ser isolado para ser definido, ainda que, para ser observado, deva interagir.”

Uma questão que naturalmente pode ser levantada da complexidade da interpretação da Mecânica Quântica é qual interpretação é mais adequada ao Ensino Médio.

3.1.1. Por que a Interpretação de Copenhague?

Apesar dos intensos debates em torno da melhor forma de interpretar a Mecânica Quântica, historicamente aquela que permeia a comunidade científica há 100 anos é a Interpretação de

Copenhagen, no sentido em que seus procedimentos metodológicos e desdobramentos conceituais desde então têm como base elementos dessa interpretação. Apesar de uma quantidade significativa de pensadores e pesquisadores (como Popper, 1992 e Bohm 1983) não se sentirem confortáveis com a base não-realista dessa interpretação, ela jamais foi colocada em xeque por algum resultado experimental, tendo se mantido consistente até os dias de hoje. O argumento utilizado na atualidade para a existência de pesquisa sobre outras interpretações é que, embora a consistência da interpretação de Copenhagen/Bohr, vale a pena investigar a possibilidade da construção de uma outra interpretação, pois ainda não está esgotada a possibilidade de organizar outra interpretação consistente fundamentada em outras bases filosóficas (Laloe, 2001). Contudo, resultados experimentais recentes, tal como os de interferometria com nêutrons, são condizentes com essa interpretação. Assim, o primeiro argumento para a utilização de Interpretação de Copenhagen é a sua consistência conceitual.

O segundo argumento em prol da utilização dessa interpretação em iniciativas de Ensino Médio é o fato de que, nela, é enfatizado o papel do observador no processo de obtenção de medidas e interação com outros sistemas, já que é a interação que mais enfatiza a relação sujeito/objeto (Heisenberg, 1995; Bohr, 1995). Assim, a Interpretação de Copenhagen leva à discussão do papel de nossas ações e nossa consciência do mundo que nos cerca. Considerando-se que vivemos atualmente em um mundo em que processos complexos (tais como problemas econômicos, as questões ecológicas e de mudanças climáticas globais, a violência urbana e o terrorismo) influenciam nossas vidas, é importante a discussão de nosso papel na sociedade e no mundo e de que forma nossas ações repercutem nas coisas e nas vidas de outras pessoas, ou seja, na discussão de questões morais do mundo contemporâneo. A Interpretação de Copenhagen/Bohr explicita tais questões, pois, uma vez que o observador (sujeito) perturba aquilo (objeto) que é medido, cada pessoa tem um papel ativo na percepção e construção de realidade.

3.2. Resumo das interpretações

A Mecânica Quântica, como menciona Osvaldo Pessoa Jr. (2003), pode ser interpretada de diferentes modos, sendo que cada interpretação é consistente e, de modo geral, coerente com experimentos quânticos. As teses agregadas pela interpretação fazem afirmações sobre a realidade existente por trás dos fenômenos observados, ou ditam normas sobre a inadequação de se fazerem tais afirmações.

Como já foi dito, há muitas interpretações diferentes da teoria quântica, as quais, segundo Pessoa Jr., podem ser classificadas em quatro grandes grupos:

- 5) **Interpretação Ondulatória**, defendida principalmente por Schrödinger e Von Neumann; apresenta uma descrição ondulatória dos fenômenos.

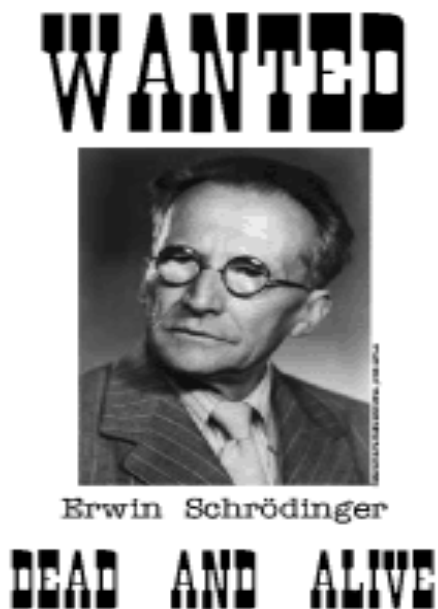


Figura 1. Erwin Schrödinger (1887-1961)
Fonte: www.jamesphogan.com/images/schroedinger.gif



Figura 2. Von Neumann(1903-1957)
Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Von_Neumann

- 6) **Interpretação Corpuscular**, defendida por Landé e Ballentine; busca uma teoria determinista e considera o fóton e o elétron como partículas.



Figura 3. Ballentine

Fonte: www.fyslab.hut.fi/.../Tfy-44.194/ballentine.jpg

- 7) **Interpretação Dualista Realista** amparada por Louis de Broglie e David Bohm; interpreta os fenômenos quânticos como sendo resultado de os objetos quânticos serem onda e partícula.



Figura 4. De Broglie(1892-1987)

Fonte: nobelprize.org



Figura 5. David Bohm(1917-1992)

Fonte:<http://img.photobucket.com/albums/v103/timetravel/davidbohm.jpg>

- 8) **Interpretação Dualista Positivista**, Interpretação da Complementaridade de Bohr ou Interpretação de Copenhagen, ortodoxa. Explica que os objetos quânticos apresentam comportamento de onda e de partícula, dependendo do experimento realizado.



Figura 6. Niels Bohr(1885-1962)

Fonte: reich-chemistry.wikispaces.com/file/view/hgdh

Cada uma dessas teses interpreta os conceitos da Mecânica Quântica de forma diferente, por exemplo, a interpretação ondulatória aceita uma descrição ondulatória dos fenômenos, a dualista realista interpreta os fenômenos quânticos como sendo resultado de os objetos quânticos serem onda

e partículas ao mesmo tempo, a corpuscular busca uma teoria determinista e considera o fóton e o elétron como partículas e a dualista positivista não se preocupa com o processo, e sim com as medidas, explica que os objetos quânticos apresentam comportamento de onda e de partícula, dependendo do experimento realizado.

Neste Texto de Apoio é utilizada a Interpretação da Complementaridade ou de Copenhagen, isto é, os conceitos abordados são explicados de acordo com esta interpretação que, no momento, é ainda a mais aceita no meio científico.

3.3. Questões para discussão

1. Faça um esquema das diferentes Interpretações, classificadas em quatro grandes grupos, que aparecem no texto indicando seus argumentos para a interpretação dos fenômenos citados.
2. Por que no mundo científico a interpretação mais aceita é a de Copenhagen ?

4. QUANTIZAÇÃO

O que significa dizer que uma determinada grandeza física está quantizada?

Significa dizer que esta grandeza pode apresentar certos valores inter-relacionados, de forma discreta (e não apenas valores contínuos). Por exemplo, faz-se pagamentos em dinheiro com valores múltiplos de centavos, não existe uma moeda correspondente a meio centavo, apenas os múltiplos do centavo.

Em eletricidade, a carga elétrica é dada por $Q = n.e$, onde e é a carga do elétron ou seja, ela é sempre um número inteiro multiplicado pela carga de um único elétron. Não se encontra uma carga elétrica livre que corresponda a um elétron e meio. Existem somente valores discretos (quantizados) possíveis, múltiplos da carga do elétron.

Em 1900, Max Planck supôs que a energia eletromagnética não é distribuída continuamente, mas em “pacotes” ou quanta de energia, a fim de explicar a radiação do corpo negro. É chamado corpo negro aquele que absorve toda a radiação eletromagnética que incide sobre ele, isto é, não reflete, e por outro lado é um corpo que emite em forma de radiação eletromagnética toda a energia fornecida a ele. A quantidade mínima de energia ou quantum de energia é proporcional à frequência da radiação: $\Delta E = hf$, onde h é a constante de proporcionalidade conhecida como constante de Planck cujo valor é aproximadamente $6,63 \cdot 10^{-34}$ Js.

Para Planck, a energia dos elétrons oscilantes, dos átomos do corpo negro, é quantizada, ou seja, a energia destes elétrons só varia em saltos. A energia que eles emitem só pode assumir alguns valores, como $0, \Delta E, 2\Delta E, 3\Delta E, \dots$, e esses saltos de energia dependem da frequência de oscilação do elétron.

5. EFEITO FOTOELÉTRICO

Einstein aproveitou o conceito introduzido por Planck para explicar o efeito fotoelétrico. Neste efeito quando feixes de luz incidem sobre a superfície de certos metais, elétrons são emitidos. O fenômeno é entendido se se supõe que o feixe de luz é composto por partículas de energia, que são os fótons.

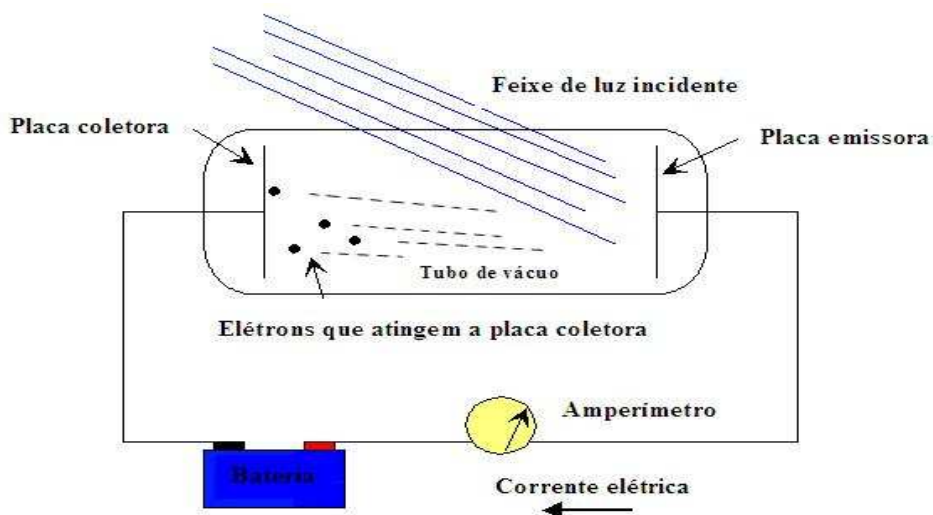


Figura 7. Efeito fotoelétrico.

Fonte: www.if.ufrgs.br

Para introduzir esse conceito pode-se realizar uma simulação sobre o efeito fotoelétrico, por exemplo a encontrada no sítio: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/fotoelectrico/fotoelectrico.htm>, cujo roteiro é apresentado a seguir.

5.1. Roteiro: Simulação efeito fotoelétrico

Procedimentos:

1- Clique no ícone fóton e observe o que ocorre. Varie o comprimento de onda e observe o que ocorre. Quando o amperímetro registra passagem de corrente elétrica?

Varie também a intensidade da luz (número de fótons) e observe. Quando o amperímetro registra passagem de corrente elétrica?

2- Preencha a tabela seguinte variando a intensidade da luz de 0 a 5 fótons e os comprimentos de onda sugeridos, anotando se há ou não emissão de elétrons para cada caso.

Intensidade

(Nº de fótons) Energia $\lambda(7000\text{Å})$ Energia $\lambda(6000\text{Å})$ Energia $\lambda(4500\text{Å})$ Energia $\lambda(3000\text{Å})$

0								
1								
2								
3								
4								
5								

O que você observou em relação ao início do efeito fotoelétrico?

Chega-se a que conclusão com os dados acima em relação à intensidade da luz e a emissão de elétrons do metal? O que se pode dizer do comprimento de onda e a emissão de elétrons? Relacione a energia do fóton e sua frequência, indicando em qual faixa de frequência se inicia o efeito fotoelétrico.

3- Qual a condição básica para ocorrer o efeito fotoelétrico?

4- Procure determinar o valor dos quanta de energia das seguintes radiações ($h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{J}$):

Luz infravermelha de $1,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

Luz ultravioleta de $2,5 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$

Raio X de $4 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$

Raio γ de $2 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$

A partir dos dados acima, analise as consequências da incidência destes tipos de radiações sobre os seres vivos.

Com a simulação pode-se perceber que a energia do elétron que foi arrancado do metal independe da intensidade da luz incidente, mas que existe uma dependência dessa energia com a frequência da radiação incidente.

A energia da luz emitida por uma lâmpada percorre o espaço concentrada em pacotes de energia, os fótons, que podem ter certos valores de energia proporcionais à frequência, múltiplos de uma quantidade mínima, o quantum. Cada fóton comporta-se como uma partícula, que ao colidir com o átomo de um metal, como por exemplo, no efeito fotoelétrico, tem sua energia totalmente absorvida. Essa energia é utilizada em parte para vencer a força de ligação do elétron com o átomo e o restante transforma-se em energia cinética do elétron emitido.

Como se pode observar, o valor de um quantum de energia depende da frequência da radiação emitida; para a luz vermelha de $4,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, o quantum de energia ou fóton tem $E = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \times 4,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz} = 2,97 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Outra unidade de energia bastante utilizada em Mecânica Quântica é o elétron-volt (eV), que corresponde à energia adquirida por um elétron acelerado por uma diferença de potencial de um volt e vale $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Assim a energia de um fóton da luz vermelha vale 1,86 eV.

6. OBJETO QUÂNTICO

Conforme já visto, a luz é composta por fótons, que são “pacotes” de energia, cujo valor é dado por $E=h.f$.

Mas afinal o fóton é uma onda ou é uma partícula? Uma partícula ou uma onda?

Os elétrons, os prótons, os nêutrons, os fótons, os átomos, etc., pertencem ao mundo microscópico. Não obedecem as leis da Física Clássica, mas outras, as da Mecânica Quântica, hoje em dia bem conhecidas. Podemos observar nessas partículas características ondulatórias e/ou corpusculares, isto é, ocorre a dualidade onda-partícula, caracterizando-os como objetos quânticos aos quais não se pode atribuir, simultaneamente, certos conjuntos de propriedades dinâmicas (posição, momentum linear) bem definidas.

7. DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Para o entendimento adequado da dualidade devemos entender com clareza os conceitos de partícula e de onda e também os fenômenos de interferência e difração, que caracterizam um comportamento ondulatório.

7.1. Conceito de partícula clássica

Uma partícula é um objeto bem pequeno que se move pelo espaço e que normalmente não se divide. Outra característica relevante da partícula é a de ter sempre posição bem definida e velocidade precisa. Com o passar do tempo uma trajetória bem definida é por ela descrita.



Figura 8. Representação da partícula clássica.

7.2. Conceito de onda clássica

Uma onda é uma excitação que se propaga em um meio e que se espalha no espaço. A energia se propaga com a onda, que não descreve uma trajetória bem definida; as outras são espalhadas no espaço, sem se localizarem em um ponto. As ondas ainda apresentam alguns fenômenos típicos, como a interferência e a difração.

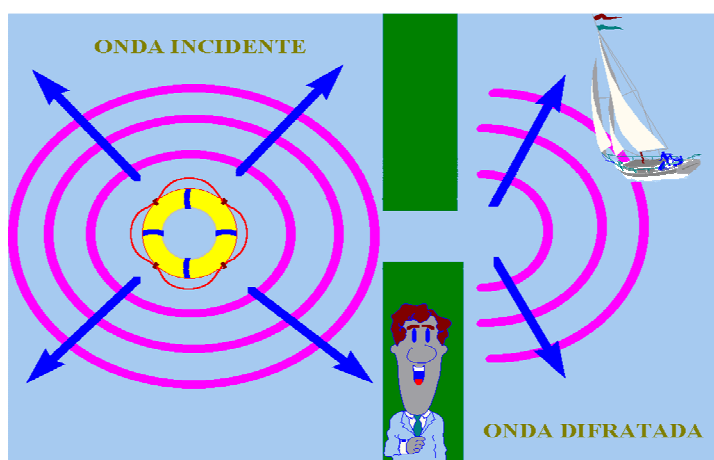


Figura 9. Difração de uma onda.

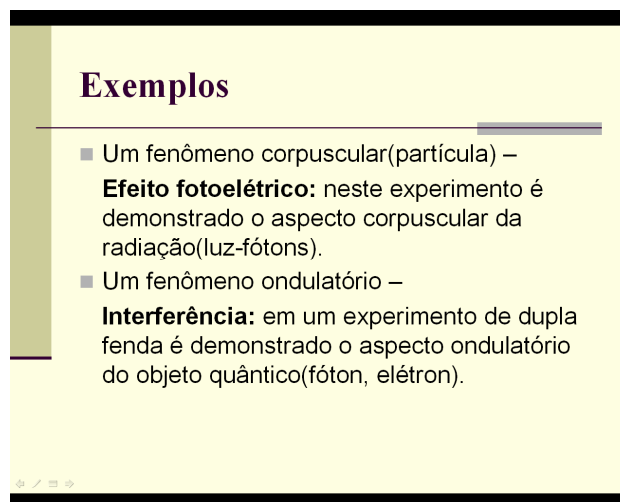
Fonte: www.if.ufrj.br

7.3. Dualidade

Já no domínio atômico a distinção entre onda e partícula deixa de existir, com momentum e comprimento de onda sendo associados tanto a radiações como a partículas.

Todo objeto quântico apresenta um caráter ondulatório – pode sofrer difração e interferência – e um caráter corpuscular que é observado no efeito fotoelétrico ou no efeito Compton, onde um fóton de raios-X, por exemplo, de frequência f , atinge um elétron em repouso, resultando na emissão de outro fóton, de frequência $f' < f$, e no deslocamento do elétron. Juntos, o elétron em movimento e o fóton de menor frequência têm o mesmo momentum linear do fóton original ou seja, há conservação de momentum entre os estados inicial e final dos sistema fóton-elétron. Como conciliar estas duas idéias, classicamente distintas?

A interpretação ortodoxa (Copenhaga) da Mecânica Quântica atribui a qualquer partícula aspectos ondulatórios e corpusculares, isto é, fótons (luz) se comportam como ondas ou partículas assim como elétrons, prótons, nêutrons, ou até mesmo objetos mais massivos.



Exemplos

- Um fenômeno corpuscular (partícula) –
Efeito fotoelétrico: neste experimento é demonstrado o aspecto corpuscular da radiação (luz-fótons).
- Um fenômeno ondulatório –
Interferência: em um experimento de dupla fenda é demonstrado o aspecto ondulatório do objeto quântico (fóton, elétron).

Figura 10. Exemplos de fenômenos corpuscular e ondulatório.

7.4. Experiência de Young (dupla fenda)

A experiência de dupla fenda de Young foi realizada entre os anos de 1800 e 1804, usando 2 anteparos em paralelo, um dos quais possuía 2 fendas estreitas por onde a luz era difratada, o segundo anteparo registrando os eventos. Se a luz fosse feita de partículas que viajassem sempre em linha reta, uma fonte que estivesse de um lado do primeiro anteparo com as fendas, deveria produzir faixas luminosas muito finas no segundo anteparo, situado do outro lado.

Ao contrário, se a luz fosse composta por ondas, a figura no segundo anteparo deveria ser diferente. A partir das duas fendas, teríamos duas frentes de ondas esféricas, com origem nas fendas pelas quais passaram. Essas ondas propagar-se-iam independentemente uma da outra e interfeririam entre si. No segundo anteparo, onde as ondas encontravam-se crista com crista, ou vale com vale, elas somariam luminosidade formando interferência construtiva, gerando uma faixa clara, e onde as

ondas se encontravam crista com vale, ocorreria uma interferência destrutiva, resultando uma faixa escura no anteparo.

Young foi quem, pela primeira vez, comprovou o fenômeno de interferência da luz quando dois feixes luminosos se cruzam. O esquema utilizado por Young está no *slide* a seguir.

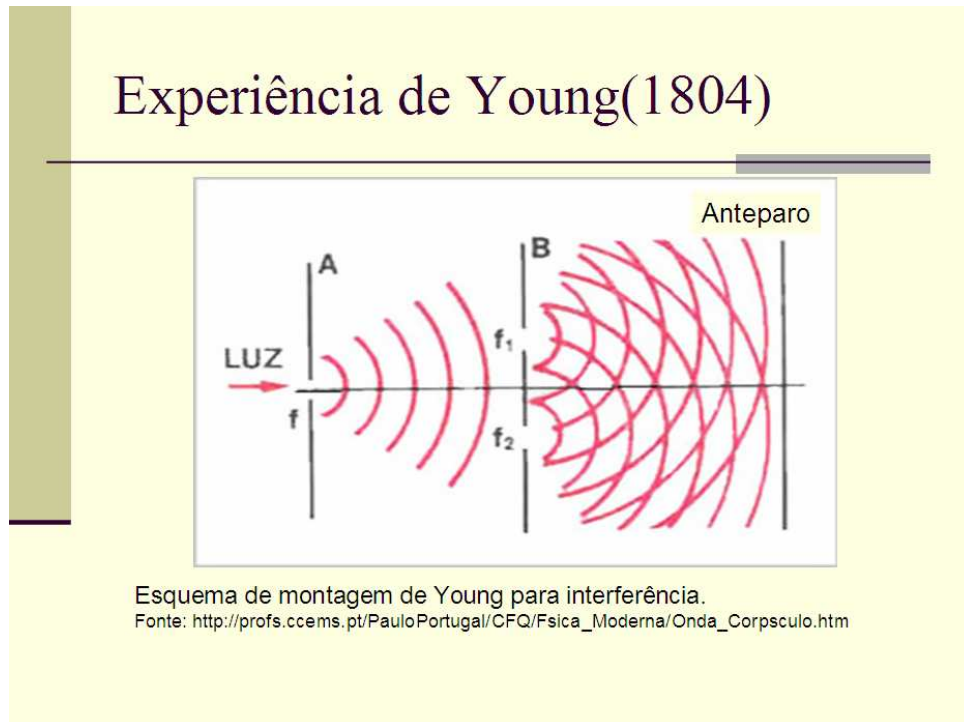


Figura 11. Experiência de Young



Figura 12. Interferência da luz

Na figura 11, a luz emitida por uma fonte de luz atravessa um pequeno orifício, difratando. Na frente desta onda há um anteparo com dois orifícios (F_1 e F_2) fazendo com que a onda novamente seja difratada. As ondas luminosas assim obtidas se superpõem, originando uma figura de interferência.

No anteparo final (filme) obtêm-se regiões claras e escuras. As regiões claras são aquelas em que dois vales ou duas cristas se superpõem. Tem-se neste caso uma *interferência construtiva*. As regiões escuras são aquelas em que um vale e uma crista se superpõem. Neste caso temos uma *interferência destrutiva*.

Para os elétrons, considerados partículas, o experimento demonstrou efeitos de difração e interferência, características ondulatórias.

Depois dessa introdução, pode-se realizar uma simulação que é encontrada no sítio: www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html. De acordo com a observação realizada, no experimento proposto, pode-se verificar a característica de onda ou de partícula, mas nunca ambas ao mesmo tempo.

O roteiro da atividade é apresentado a seguir.

7.5. Roteiro simulação Dupla Fenda

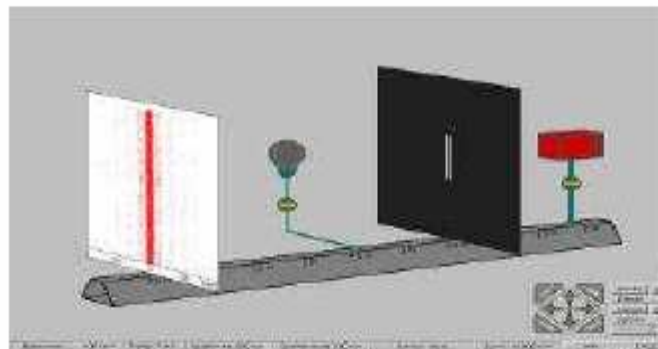


Figura 13. Tela do programa.

Fonte: www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html

Procedimentos:

1- Escolha um feixe de partículas clássicas para o experimento de dupla fenda e inicie o experimento. Para isso clique em *source* à direita e escolha a primeira opção que corresponde a um feixe de balas clássicas. Primeiro faça o experimento com apenas uma fenda aberta; para isso, clique em cima das fendas com o *mouse* e selecione a janela que abrirá uma fenda. Clique no botão ao lado do botão *source*.

O que se observa no anteparo depois de certo tempo? Como se pode explicar o que foi observado?

Agora clique sobre as fendas e selecione as duas. Reinicie o experimento.

O que se observa no anteparo depois de certo tempo? Como se pode explicar o que foi observado?

2- Observe o vídeo novamente e verifique o que ocorre quando ondas clássicas são submetidas ao experimento de dupla fenda.

O que se observa no anteparo depois de certo tempo? Como podemos explicar o que foi observado?

3- Escolha um feixe de objetos quânticos para o experimento. Para isso, clique em *source* à direita e escolha o feixe. Para os valores da largura das fendas (*slit-width*) use 120nm e para a distância entre elas (*slit-distance*) use 700nm. Clique no botão ao lado do botão *source*.

O que se observa no anteparo depois de um tempo?

Compare com os padrões observados com partículas clássicas e os observados com ondas clássicas. Qual o comportamento (corpuscular ou ondulatório) apresentado pelo objeto quântico?

Quando o objeto quântico é detectado, qual comportamento é apresentado?

Pode ser identificado o comportamento corpuscular ou o comportamento ondulatório, a partir do que se observa na tela? Explique:

7.6. Explicação para a dualidade

Na simulação os alunos utilizam um simulador de canhão de partículas (elétrons, fótons, bolinhas), devendo reconhecer o comportamento dual dos elétrons e fótons. Inicialmente, os alunos utilizam um canhão de partículas clássicas (pequenas bolas). A partir da simulação na tela, os alunos deverão reconhecer os padrões que caracterizam o comportamento corpuscular destas partículas. Em seguida, os alunos realizarão o experimento trocando de partículas, utilizando um canhão de elétrons monoenergéticos direcionados a uma fenda dupla e depois, usando fótons, simulando a experiência de Young. Neste momento, os alunos podem ser incentivados a identificar os comportamentos corpusculares e ondulatórios dos objetos quânticos, a partir do que aparece na tela.

Segundo o autor Luis Carlos de Menezes (2005) o caráter ondulatório da luz persiste na maneira com que ela se propaga, realizando difração, ou seja, espalhando-se ao passar por uma fenda ou transpor obstáculos, e realizando interferência. A luz, enfim, continua apresentando comportamento de onda eletromagnética. Não é muito fácil entender uma entidade que se propaga como onda, mas atinge a matéria como partícula; no entanto, de certa forma, percebe-se cotidianamente esse caráter dual da luz, que projeta penumbra atrás de um anteparo em cujas

bordas se difrata (onda), ao passo que, ao provocar a emissão um elétron de uma placa metálica, deixa marca granular no ponto onde toca (partícula).

A primeira grande unificação conceitual quântica foi mostrar que algumas ondas como os raios X e os raios gama atingem a matéria como se fossem partículas e as partículas se propagam como se fossem ondas. O infravermelho, a luz visível, o ultravioleta e as demais radiações eletromagnéticas revelam seu caráter granular mais nitidamente quanto mais alta for a frequência que as caracteriza.

Os fótons deslocam-se como ondas e elétrons, após terem atravessado um cristal, projetam um padrão de difração típico de um comportamento ondulatório, assim como nêutrons, prótons e demais objetos quânticos também se propagam como ondas. A rede cristalina é capaz de difratar o elétron porque as distâncias entre as moléculas do cristal têm valor próximo ao seu comprimento de onda do elétron.

Em princípio, uma pedra em movimento tem, associado a ela, um comprimento de onda, só que de valor tão pequeno, que não conseguiria revelar seu caráter ondulatório.

Relembrando o exemplo de fenômeno corpuscular, há o efeito fotoelétrico: quando feixes de luz de alta frequência incidem sobre a superfície de certos metais, alguns elétrons são emitidos, são arrancados desta superfície. A luz de alta frequência é capaz de arrancar elétrons ao incidir sobre uma placa metálica, fenômeno conhecido como efeito fotoelétrico.

Os feixes de luz são formados por “pacotes” ou quanta de energia $E=h.f$, isto é, a luz é formada por “corpúsculos” que são os fótons. O momentum transferido a um elétron só depende da frequência da luz e não da intensidade do feixe, isto é, ao atingir um elétron, a luz se comporta como constituída de partículas, uma delas colidindo com o elétron. A energia revela um caráter granular ao interagir com a matéria. Com esse experimento observa-se que a luz é formada por partículas.

Por outro lado, um fenômeno ondulatório é observado na interferência de elétrons. Quando duas ondas ocupam a mesma região do espaço dá-se o que se chama de interferência. O resultado da interferência entre duas ondas depende da diferença de fase entre elas. É possível observá-lo, por exemplo, num tanque de água em que se produzem ondas por meio de duas pontas que tocam periodicamente e sincronizadas à superfície da água. Como resultado, forma-se na superfície um padrão característico, que denominamos figura de interferência.

A fim de demonstrar melhor o contraste entre “comportamento ondulatório” e “comportamento corpuscular” será analisado o experimento de Young de dupla fenda em relação aos conceitos clássicos de onda e de partícula.

Quando uma frente de onda passa por um par de fendas gerando duas novas ondas e estas são detectadas sobre um anteparo de observação, observa-se no anteparo interferência (franjas de interferência).

Considere-se uma metralhadora giratória, como por exemplo na simulação, que dispara balas varrendo direções ao acaso, balas estas que irão passar pelas duas fendas do experimento. Um detector varre o anteparo de observação e registra a probabilidade de encontra-se uma bala em determinado ponto do anteparo. Observa-se no anteparo uma distribuição de balas. Na simulação se consegue observar este fenômeno.

Ao fazer passar elétrons (ou outro objeto quântico) pela dupla fenda observamos que se registra em anteparo sempre um número inteiro de elétrons, como as partículas clássicas elementares. No anteparo de observação a distribuição de partículas, depois de um período de tempo, não é igual à distribuição no caso das partículas clássicas, senão que aparece distribuição similar à de uma figura de interferência da experiência com ondas. Isto é, os elétrons chegam ao anteparo inteiros, como as partículas clássicas, mas a distribuição dos mesmos nas diversas posições é similar às franjas de interferência de ondas. Observa-se isso na simulação virtual.

A explicação para esse fenômeno, segundo Bohr, é que partículas e ondas são conceitos complementares. Se em um experimento o caráter de partícula é manifesto, como no efeito fotoelétrico ou efeito Compton, não se observa, através do mesmo experimento, seu caráter ondulatório e vice-versa. O que determina a observação de um caráter ou outro é a natureza do experimento. Se for realizado um experimento de difração ou interferência, o caráter ondulatório se manifesta. Aspectos de onda e partícula são excludentes, mas complementares da natureza. Isto é, para representar um objeto quântico, como um elétron, por exemplo, pode-se salientar ou aspectos da partícula ou aspectos de onda, dependendo da situação experimental. Só se dirá algo sobre as propriedades do objeto quântico após obter um resultado experimental.

De Broglie foi o primeiro a defender esta idéia, concebendo a hipótese de que partículas, como elétrons, não seriam tão diferentes de ondas, como a luz. Se a luz podia colidir com elétrons (efeito fotoelétrico), como se fosse partícula, então elétrons deveriam difratar-se ao passar por fendas, orifícios e outros obstáculos, como ondas. Sugeriu ele que o momentum de um objeto quântico pode ser determinado (em módulo) por $p = h/\lambda$, onde λ é o comprimento de onda associado à partícula. Nesta relação consegue-se observar que o momentum p corresponde à característica corpuscular e λ corresponde ao caráter ondulatório do objeto quântico.

Em processos no domínio atômico a distinção entre onda e matéria deixa de existir, com momentum linear e comprimento de onda sendo associados tanto a radiações como a partículas.

Quanto maior a frequência da radiação, maior será sua capacidade de interagir com a matéria, pois os fótons colidirão com maior energia contra átomos do material atingido. As “pancadas” do raio X, por exemplo, são capazes de quebrar ligações químicas da informação genética das células vivas, podendo causar câncer ou outras alterações celulares.

Experimentos foram realizados para comprovar as idéias de de Broglie. Em 1927 G.P. Thompson mostrou que os elétrons sofrem difração; com o padrão de difração ele mediu o comprimento de onda e verificou que estava de acordo com $\lambda=h/p$. Não somente os elétrons, mas qualquer objeto material apresenta característica de onda. Se tomamos como exemplo uma bala, por que não se consegue observar interferência em um experimento de dupla fenda? Porque as balas são muito grandes, muito massivas e se fossemos associar um comprimento de onda à bala ($\lambda=h/p$), o comprimento de onda seria da ordem de 10^{-30} m. Para detectar aspectos ondulatórios no movimento da matéria precisamos de fendas de dimensões pequenas; neste caso a bala nem passaria pela fenda. Os aspectos ondulatórios tornam-se dificilmente observáveis quando se tem λ muito pequeno. Como o valor da constante de Planck (h) é muito pequeno comparado aos do mundo macroscópico, isto faz com que os efeitos de ondas de matéria no mundo macroscópico sejam insignificantes. Para partículas macroscópicas a massa é grande e conseqüentemente o momentum em geral será alto,

portanto o comprimento de onda associado será imperceptível. No mundo microscópico as massas das partículas são muito pequenas mesmo com altas velocidades, logo λ será grande o suficiente para as propriedades ondulatórias serem observadas experimentalmente.

Assim, como ondas de alta frequência colidem como se fossem partículas muito pequenas, elétrons difratam como ondas, cujo comprimento de onda é muito pequeno, por isso só se percebe a difração no domínio atômico, como no interior de cristais. Para objetos maiores, como balas ou bolas, o caráter ondulatório é menos perceptível, uma vez que seu comprimento de onda e a fenda por onde teriam de passar para se observar sua difração seriam muito menores que os objetos.

Este caráter da matéria só é manifesto, então, se o comprimento de onda é comparável às dimensões envolvidas no experimento.

8. FUNÇÃO DE ONDA

O comportamento aparentemente estranho dos objetos quânticos pode ser explicado se for aceito que em vez de seguir as leis da Física Clássica, os objetos quânticos seguem outras leis, entre as quais a chamada Equação de Schrödinger. As soluções desta equação, quando expressas como dependentes de coordenadas espaciais e do tempo são denominadas funções de onda.

A função de onda $\Psi(\vec{r}, t)$ descreve as ondas de matéria e é uma função complexa, contendo uma parte real e outra imaginária. A função de onda está para as ondas de matéria assim como os campos elétrico e magnético estão para a radiação eletromagnética.

Percebe-se que as propriedades ondulatórias apresentadas no experimento de dupla fenda permitem associar aos objetos quânticos um comprimento de onda que é obtido da relação $\lambda=h/p$.

Para extrair informações sobre um dado sistema quântico é necessário resolver a Equação de Schrödinger, cuja solução é usualmente representada como uma função de onda $\Psi(\vec{r}, t)$, sendo \vec{r} e t as variáveis espaciais e de tempo usuais.

Segundo Born, a conexão entre as propriedades ondulatórias da função de onda e as propriedades mecânicas de uma partícula associada estava não na função em si, mas no seu módulo ao quadrado. Born interpretou $|\Psi(\vec{r}, t)|^2$ como uma densidade de probabilidade, isto é, no mundo microscópico deve-se falar em probabilidade de a partícula estar em determinada posição, probabilidade de ter um certo momento, etc. Então $|\Psi(\vec{r}, t)|^2 d\vec{r} = \Psi(\vec{r}, t)^* \Psi(\vec{r}, t) d\vec{r}$ representa a probabilidade de a partícula ser encontrada no intervalo de $\vec{r} + d\vec{r}$, posição (\vec{r}) , no instante t . Probabilidades e valores médios são as informações obtidas a partir do conhecimento da função de onda de tais partículas.

Erwin Schrödinger desenvolveu um formalismo que se propunha a descrever a característica ondulatória da matéria. Ele procurou estabelecer uma equação diferencial que expressasse o comportamento das ondas de matéria, visto que partículas podem ter aspectos ondulatórios e ondas podem ter aspectos corpusculares.



Figura 14. Formalismo de Schrödinger

Esta equação contém derivadas em relação às coordenadas espaciais e ao tempo, sendo de primeira ordem no tempo, ou seja, é uma equação de movimento que descreve o estado de um sistema quântico.

A equação $d\vec{r}/dt = \vec{v}$, da Mecânica Clássica, por exemplo, é uma equação de movimento também, com derivada primeira em relação ao tempo.

Sabemos também que a energia correspondente a uma partícula clássica livre é sua energia cinética dada, não relativisticamente, por: $E_c = \frac{1}{2}mv^2$, que pode ser escrita em função do

momentum linear $\vec{p} = m\vec{v}$: $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ $E_c = \frac{1}{2} \frac{(m)mv^2}{(m)} \Rightarrow E_c = \frac{p^2}{2m}$.

A expressão de uma onda simples que se propaga em uma única dimensão pode ser dada por:

$$\Psi(x,t) = A \cos(kx - \omega t) \text{ ou}$$

$$\Psi(x,t) = A \sin(kx - \omega t) \text{ ou}$$

$$\Psi(x,t) = A e^{\pm i(kx - \omega t)}$$

Equação de movimento

- Schrödinger construiu uma equação de movimento para objetos quânticos livres segundo o modelo de uma equação de movimento para ondas livres.
- Consideremos a situação de uma onda plana que se propaga em uma dada direção, no caso unidimensional espacial (função de onda),

$$\Psi(x,t) = A e^{i(kx - \omega t)}$$

Figura 15. Função de onda.

Era necessário encontrar uma equação que descrevesse a energia total do elétron, que tivesse características de partícula e de onda.

Consideremos as relações:

$$E = \hbar\omega \Rightarrow \omega = \frac{E}{\hbar} \quad (\text{Einstein}) \text{ e}$$

$$p = \hbar k \Rightarrow k = \frac{p}{\hbar} \quad (\text{De Broglie}).$$

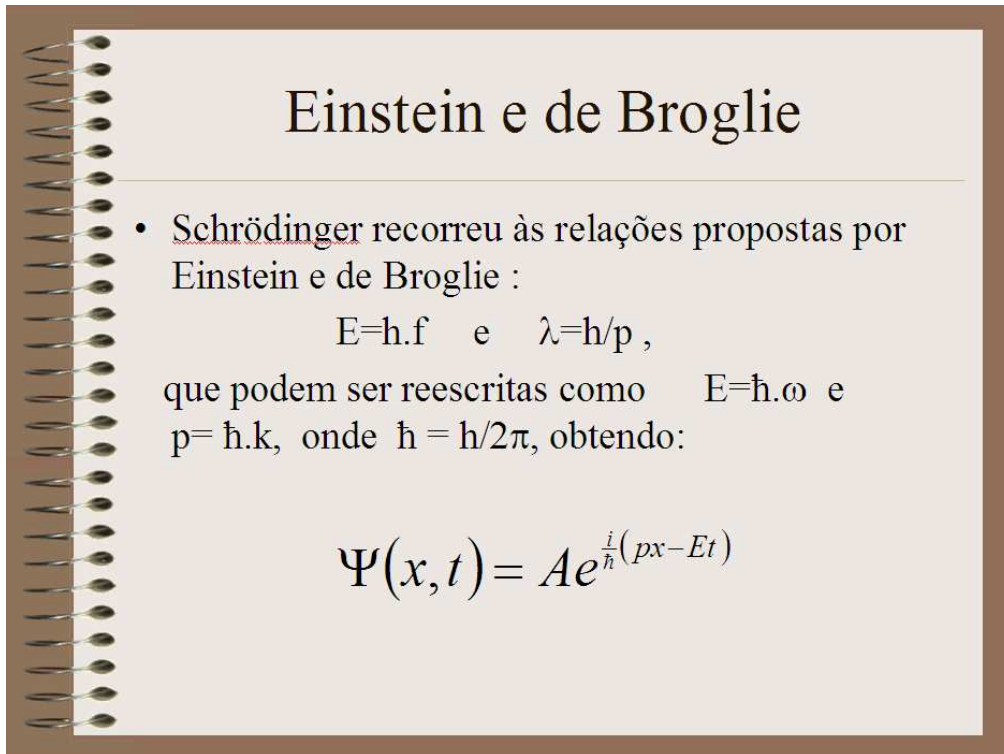


Figura 16. Relações de Einstein e de Broglie .

Substituindo estas duas relações em $e^{i(kx - \omega t)}$, tem-se:

$$\psi(x, t) = A e^{i\left(\frac{px}{\hbar} - \frac{Et}{\hbar}\right)} \Rightarrow \psi(x, t) = A e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)} \quad (1)$$

Derivando a expressão (1) em relação ao tempo, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[A e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)} \right] = -\frac{i}{\hbar} E \left[A e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)} \right]$$

Multiplicando os dois lados por $i\hbar$, tem-se:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} A e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)} = i\hbar \left(-\frac{i}{\hbar} E \right) A e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)}$$

• Simplificando \hbar e sabendo que $i^2 = -1$ tem-se:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \left[A e^{\frac{i}{\hbar}(px-Et)} \right] = E A e^{\frac{i}{\hbar}(px-Et)}$$

Isso significa que a operação matemática $i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ (derivar em relação ao tempo e multiplicar por $i\hbar$), aplicada à função de onda de um objeto quântico livre $\Psi(x,t)$, explicita o valor da energia mecânica, E, do sistema físico descrito por ψ .

$$\Rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = E\Psi$$

Da dedução acima, decorre que:

$i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ é o operador que revela a energia, quando é aplicado à função $e^{\frac{i}{\hbar}(px-Et)}$ pois

obtem-se a função novamente multiplicada por um valor, que é chamado de "autovalor". No caso é a energia E.

Derivando a função (1) em relação a x duas vezes obtém-se:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} A e^{\frac{i}{\hbar}(px-Et)} = \frac{i^2}{\hbar^2} p^2 A e^{\frac{i}{\hbar}(px-Et)}$$

Multiplicam-se os dois lados da igualdade acima por $-\frac{\hbar^2}{2m}$ para obter $\frac{p^2}{2m}$:

$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} A e^{\frac{i}{\hbar}(px-Et)} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{i^2}{\hbar^2} p^2 A e^{\frac{i}{\hbar}(px-Et)}$. Simplificando \hbar^2 e considerando que $i^2 = -1$, tem-se:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} A e^{\frac{i}{\hbar}(px-Et)} = \frac{p^2}{2m} A e^{\frac{i}{\hbar}(px-Et)}$$

$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$ é, pois, o operador energia cinética que, quando aplicado à função (1) gera a

função novamente, multiplicada pelo autovalor $\frac{p^2}{2m}$.

Como pode ser observado, esta relação supõe que existe proporcionalidade entre momentum e número de onda ($p = \hbar \cdot k$), bem como entre energia e freqüência ($E = \hbar \cdot \omega$).

Tem-se, então, as expressões em termos de operadores. O valor das grandezas físicas que tenham valores definidos num estado quântico, como energia e momentum, é obtido a partir da função de onda, por meio de operadores aplicados a ela.

Schrödinger tinha a intenção de escrever uma equação similar à equação da onda, o formalismo de operadores diferenciais na Mecânica Quântica. Os operadores diferenciais introduzidos por ele são os operadores energia e momentum.

Retomando a Equação de Schrödinger e generalizando, ao considerar a energia total como a soma das energias cinética e potencial, na analogia clássica:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{cin}} + E_{\text{pot}} = \frac{p^2}{2m} + V,$$

A Equação de Schrödinger passa a ser:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x,t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi(x,t) + V(x)\Psi(x,t).$$

$$E_{\text{total}} = E_{\text{c}} + E_{\text{pot.}}$$

Equação de Schrödinger

- Quando o objeto quântico se move sob a ação de forças, isto é, está sob a ação de um potencial, a equação de Schrödinger fica, por analogia à equação da energia total clássica:
 $E = \frac{p^2}{2m} + V(x)$, para potencial função de posição:
 $i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x)\Psi(x,t)$

Figura 17. Equação de Schrödinger.

Essa equação é, no exemplo, unidimensional, válida quando os problemas podem ser reduzidos a uma dimensão espacial, como é o caso de uma onda-partícula movendo-se ao longo do eixo x .

Dadas as condições de contorno de um problema particular a resolver, a equação pode gerar os únicos valores que a energia pode ter no problema.

É relevante destacar que a Equação de Schrödinger não é demonstrada, mas sim postulada (como a de Newton), e é a equação de movimento da Mecânica Quântica (a uma dimensão espacial). Sua validade é comprovada em inúmeros resultados experimentais descritos com o auxílio da mesma.

Como se observa, é uma equação a derivadas parciais, relativas ao tempo e posição, descreve a evolução de um estado quântico, é escrita em termos de operadores, é uma equação de movimento e também a expressão da conservação de energia. Sua solução $\Psi(x, t)$ é uma função de variáveis complexas, isto é, de números reais e imaginários combinados. Isto não é problema para a interpretação, contudo, pois o quadrado do módulo de Ψ , um número real, corresponde a uma probabilidade.

Em relação ao caráter probabilístico da Mecânica Quântica, sabe-se que o quadrado da função de onda de uma partícula ($|\Psi|^2$) é interpretado como a densidade de probabilidade de se encontrar o objeto quântico em um determinado ponto do espaço em certo instante de tempo. A função de onda é complexa, anulando-se nos pontos onde a partícula não pode estar.

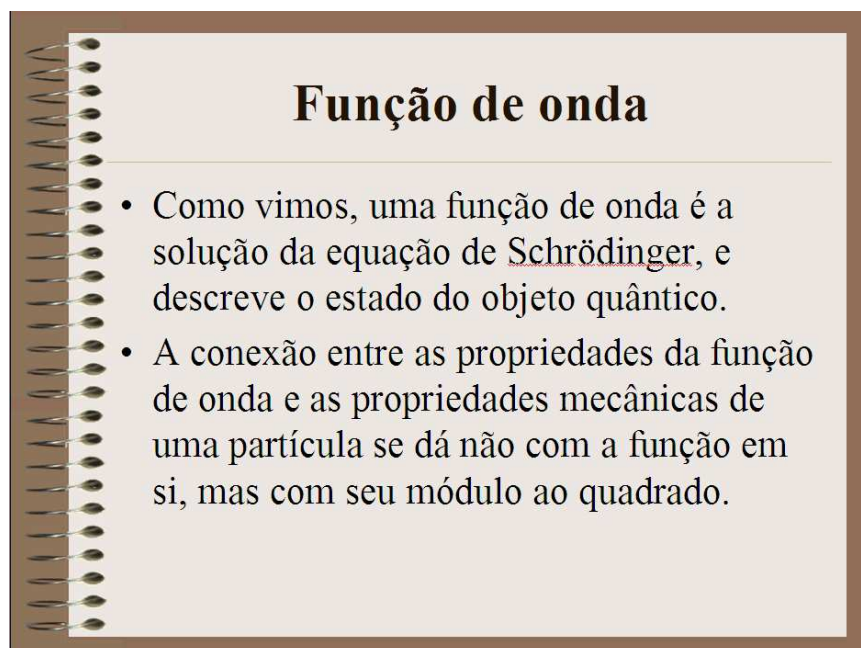


Figura 18. Função de onda

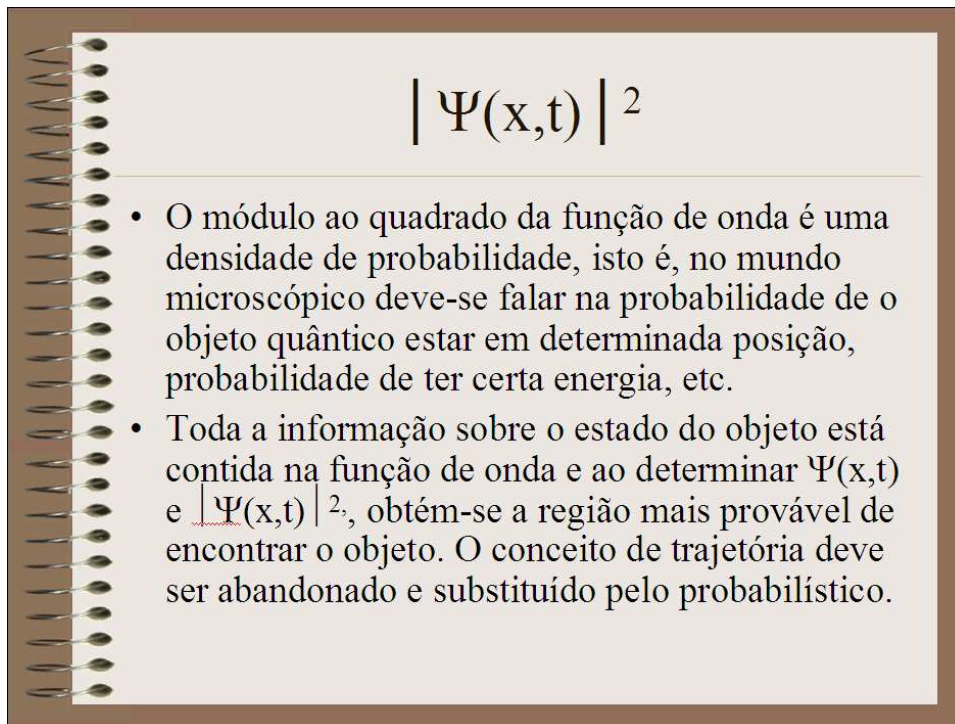


Figura 19. Probabilidade.

A partir da Equação de Schrödinger não é possível determinar a trajetória do elétron em torno do núcleo, mas, a uma dada energia do sistema, obtém-se a região mais provável de encontrá-lo. O modelo atômico abaixo, parece ser o mais adequado para demonstrar essa região.

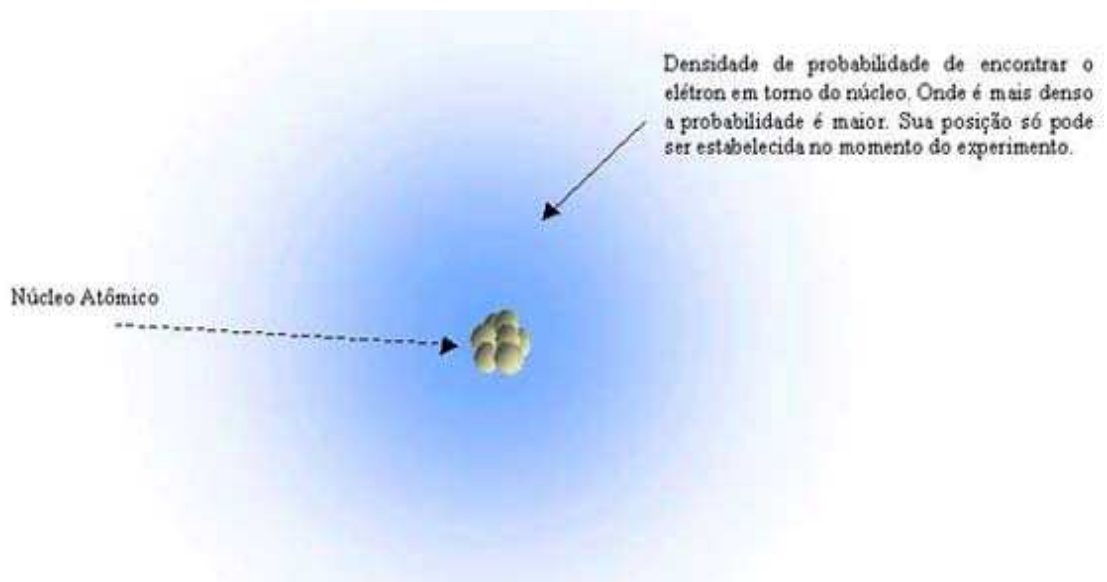


Figura 20. Densidade de probabilidade.

Fonte: www.comciencia.br

No experimento de dupla fenda com luz o padrão observado são faixas claras e escuras. Estas regiões se referem aos fótons que estão incidindo ou não estão incidindo sobre o anteparo, isto é, na faixa escura tem-se probabilidade zero (ou quase) de o fóton incidir e na faixa clara do experimento tem-se o maior valor da probabilidade de se encontrar o fóton. Os orbitais representam a probabilidade de se encontrar o elétron com certo valor de momentum angular em uma determinada região. A responsável pelos valores dessas probabilidades é a função de onda.

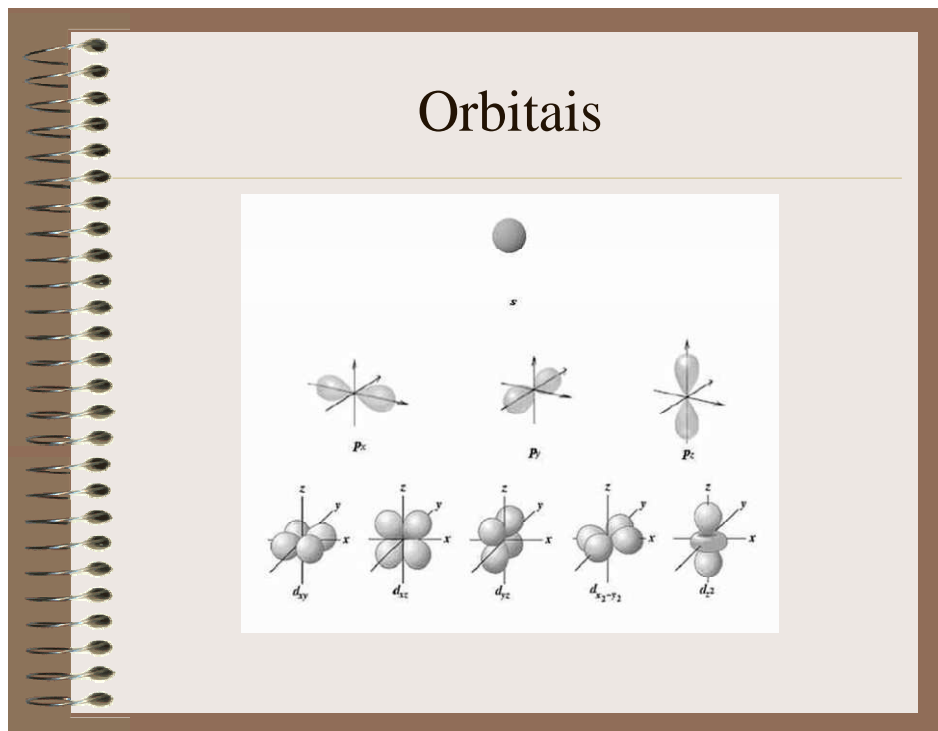


Figura 21. Orbitais.

9. SUPERPOSIÇÃO DE ESTADOS

Um sistema quântico pode existir em uma combinação de múltiplos estados, cada um com certas características físicas bem definidas (simultaneamente), a chamada superposição de estados.

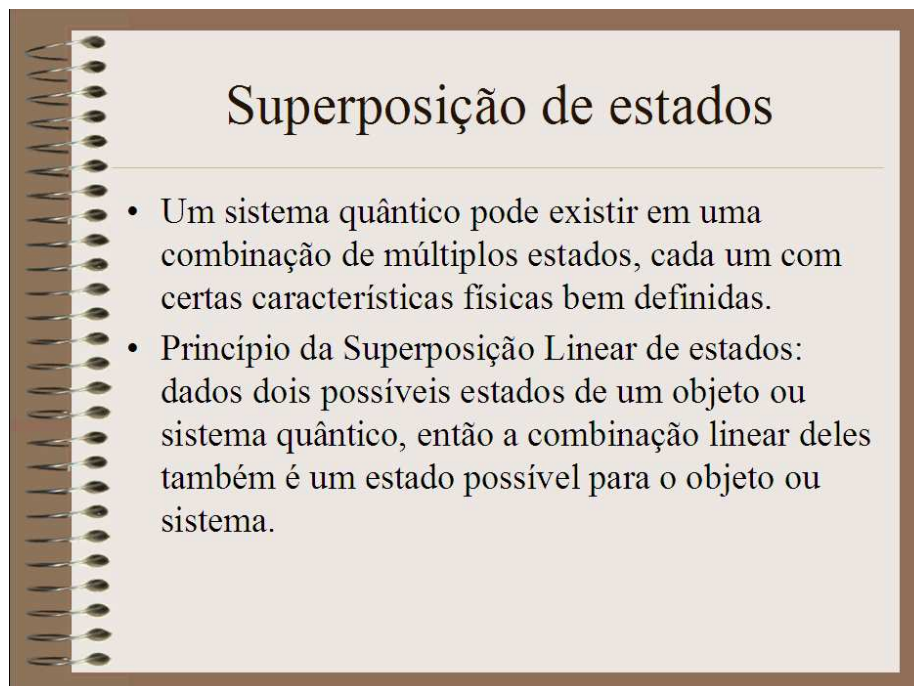


Figura 22. Superposição de estados .

9.1. Gato de Schrödinger



Figura 23. Gato de Schrödinger

Fonte: www.uces.br/.../textos_interativos_04/cat2.gif

Neste paradoxo se evidencia como a superposição linear de estados pode gerar uma conclusão absurda quando levada ao nível macroscópico.

Para ressaltar o que significaria a superposição de estados para objetos macroscópicos e o absurdo a que isso, mal interpretado levaria, Schrödinger em 1935 formulou o seu famoso paradoxo. Trata-se de um gato que é encerrado em de uma câmara junto com um pouco de uma substância radioativa que tem uma probabilidade de 50% de decair e, em conseqüência, de acionar um detector, em certo intervalo de tempo. Ligado a este detector há um dispositivo tal que, se o detector for disparado, o gato morre, enquanto ele permanece vivo se nenhuma radiação for detectada no intervalo de tempo. A Mecânica Quântica descreve o estado do elemento radioativo como uma superposição de estados de decaimento e não decaimento do material radioativo. Qual será o estado do sistema macroscópico (gato), como um todo, ao final do intervalo de tempo?

Não existem apenas um estado em que o gato esteja vivo e um estado em que o gato esteja morto, senão que as duas situações (ambos estados) coexistem. O paradoxo diz que, se abrirmos a câmara, encontraremos aleatoriamente o gato vivo ou o gato morto, pois apenas um dos estados é registrado.

Supõe-se que se faça uma medida da energia de um sistema, encontrando um valor E . Isso quer dizer que logo após a medida o sistema está descrito pela autofunção Φ_E correspondente a E . Antes da medida, por hipótese, o sistema não se encontrava em qualquer autoestado de energia particular, isto é, não possuía uma energia definida. Dizemos que ele se encontrava em uma superposição de auto-estados de energia. Bohr afirmava que o indeterminismo na Mecânica Quântica é intrínseco ao problema, em nível microscópico. Não há como, antes da medida, saber qual resultado ocorrerá, ou seja, antes da medida o sistema se encontra no estado (geral) Ψ . Após a medição a função de onda será um dos autoestados possíveis. Isto é o denominado colapso da função de onda.

Como exemplo para o aproveitamento da superposição de estados, cita-se a computação quântica.

9.2. Computação Quântica

Na computação clássica, o estado de uma unidade de informação (bit) é representado por um número: zero ou um. O qubit (bit quântico) pode ser representado por um átomo em um de dois de seus possíveis autoestados de energia.

Cada qubit pode existir também em estados que compreendem simultaneamente 0 e 1. Enquanto classicamente um bit existe ou em 0 ou em 1, quanticamente um qubit pode também existir em 0 e em 1.

Em relação ao resultado de uma operação quântica, no momento que se efetua uma medição, o qubit responde como 0 ou 1.

Medição

- Enquanto não é feita uma medição o qubit poderá estar numa superposição dos estados 0 e 1, mas no momento da medição o qubit responde apenas em um dos estados.
- Um qubit pode existir em vários estados ao mesmo tempo e informar sobre todos eles. Pode se realizar muitas operações em paralelo, usando uma unidade de processamento.

Figura 24. Medição e superposição de estados

10. PRINCÍPIO DA INCERTEZA

Aplica-se este princípio a grandezas incompatíveis, que são observáveis não correlacionados, isto é, as medições sobre sistemas microscópicos alteram os resultados quando se trabalha com observáveis incompatíveis.

Tem-se como exemplo de observáveis incompatíveis posição e momentum na mesma direção. O Princípio da Incerteza foi proposto por Heisenberg. Segundo ele, é impossível estabelecer ao mesmo tempo a posição x e o momentum p_x de um elétron ou de qualquer objeto quântico com precisão em ambos. Se for realizada uma medição sobre um objeto quântico e se puder determinar a componente p_x com uma incerteza Δp_x , não se poderá, simultaneamente, conhecer a componente x da posição com incerteza Δx de maneira a que o produto da incerteza no conhecimento da posição pela incerteza no conhecimento da correspondente quantidade de movimento seja menor que $\hbar/2$, sendo h a constante de Planck, ou seja, sempre se terá

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2$$

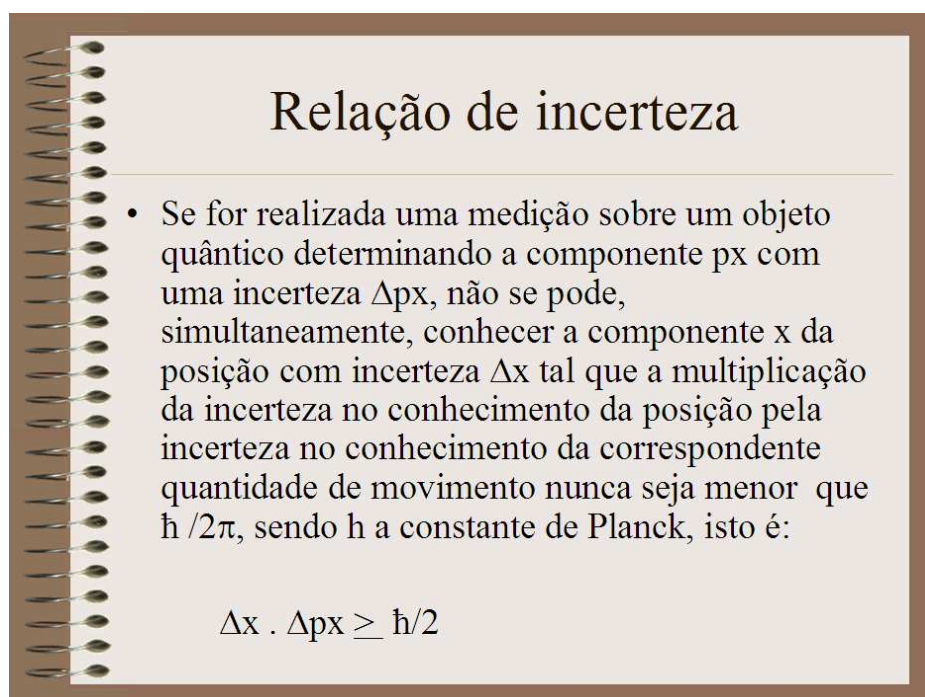


Figura 25. Relação de Incerteza

Este fenômeno é independente da precisão fornecida pelos sistemas de medição, isto é, esta é uma impossibilidade imposta pela própria natureza dos sistemas quânticos.

O princípio foi proposto por Heisenberg em 1927. Segundo esta idéia, a posição e o momentum de uma partícula não podem ser determinadas simultaneamente. O Princípio da Incerteza é uma limitação inerente a todo o ato de medição e não pode ser superado com os avanços tecnológicos dos sistemas de medição. A incerteza no momentum é devida à perturbação do sistema no processo de medida da posição.

A impossibilidade de se observar sem interferir corresponde à inexistência de trajetórias quânticas. O Princípio da Incerteza expressa a impossibilidade de uma partícula quântica percorrer uma trajetória, o que implicaria seguir uma linha de posições, com velocidades na direção dessa linha.

O Princípio da Incerteza também é válido para outros pares de grandezas físicas, como tempo e energia, semelhante ao que foi apresentado para a posição e momentum: o produto da incerteza na determinação do intervalo de tempo pela incerteza no valor da energia é expresso por

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2.$$

Isto é, para se ter maior precisão na determinação da energia de um sistema, seria preciso observá-lo por um tempo muito longo.

11. ATIVIDADE PARA AVALIAÇÃO DE APRENDIZAGEM

Como atividade final para avaliação da aprendizagem pode-se aplicar um pós-teste que pode ser o mesmo do pré-teste e trabalhar com mapas conceituais (Moreira, 2007), que são diagramas indicando relações entre conceitos, ou entre palavras que usamos para representar conceitos. São diagramas de significados, de relações significativas, de hierarquias conceituais.

Na figura 26 mostra-se um mapa conceitual para Mecânica Quântica. Como se pode observar são utilizadas figuras geométricas – elipses, retângulos, círculos – ao traçar o mapa conceitual, mas tais figuras, em princípio, nada significam.

O fato de dois conceitos estarem unidos por uma linha é importante porque significa que há, no entendimento de quem fez o mapa, uma relação entre esses conceitos.

Sempre deve ficar claro no mapa quais os conceitos contextualmente mais importantes e quais os secundários ou específicos. Setas podem ser utilizadas para dar um sentido de direção a determinadas relações conceituais, mas não obrigatoriamente. Se o indivíduo que faz um mapa, une dois conceitos, através de uma linha, ele deve ser capaz de explicar o significado da relação que vê entre esses conceitos (op. cit.).

Uma ou duas palavras-chave escritas sobre essa linha podem ser suficientes para explicitar a natureza dessa relação. Os dois conceitos mais as palavras-chave formam uma proposição e esta evidencia o significado da relação conceitual. Por esta razão, o uso de palavras-chave sobre as linhas conectando conceitos é importante, mas esse recurso não os torna auto-explicativos. Mapas conceituais devem ser explicados por quem os faz; ao explicá-lo, a pessoa externaliza significados. Reside aí o maior valor de um mapa conceitual (op cit.). Nessa explicação deve ficar claro se as figuras ao redor dos conceitos significam alguma coisa.

Além disto, deve-se mostrar ao aluno como se constrói um mapa conceitual, identificando os conceitos-chave do conteúdo que vai mapear, no caso Mecânica Quântica, colocando-os em uma lista, limitando entre 6 e 10 o número de conceitos.

Depois pede-se ao aluno que ordene os conceitos, colocando o(s) mais geral (is), mais inclusivo(s), no topo do mapa e, gradualmente, agregando os demais até completar o diagrama. Após, solicita-se que conecte os conceitos com linhas, rotulando essas linhas com uma ou mais palavras-chave que explicitem a relação entre os conceitos. Como foi dito, os conceitos e as palavras-chave devem sugerir uma proposição que expresse o significado da relação.

O mapa conceitual pode ser construído em dupla ou em grupo para haver troca de conhecimentos e significados entre os alunos. Depois de construído ele pode ser apresentado à turma para apreciação e sugestões de modificações.

Através do mapa conceitual o professor poderá ter evidências sobre o que foi aprendido conceitualmente e decidir que caminhos deve percorrer para representar os significados e negociá-los com os alunos, pois no mapa estão representadas as relações de idéias, conceitos e concepções do aluno.

Nas figuras 27 a 30 são apresentados e comentados quatro exemplos de mapas conceituais feitos por alunos de curso de Licenciatura de Física em um curso de extensão sobre tópicos de Mecânica Quântica.

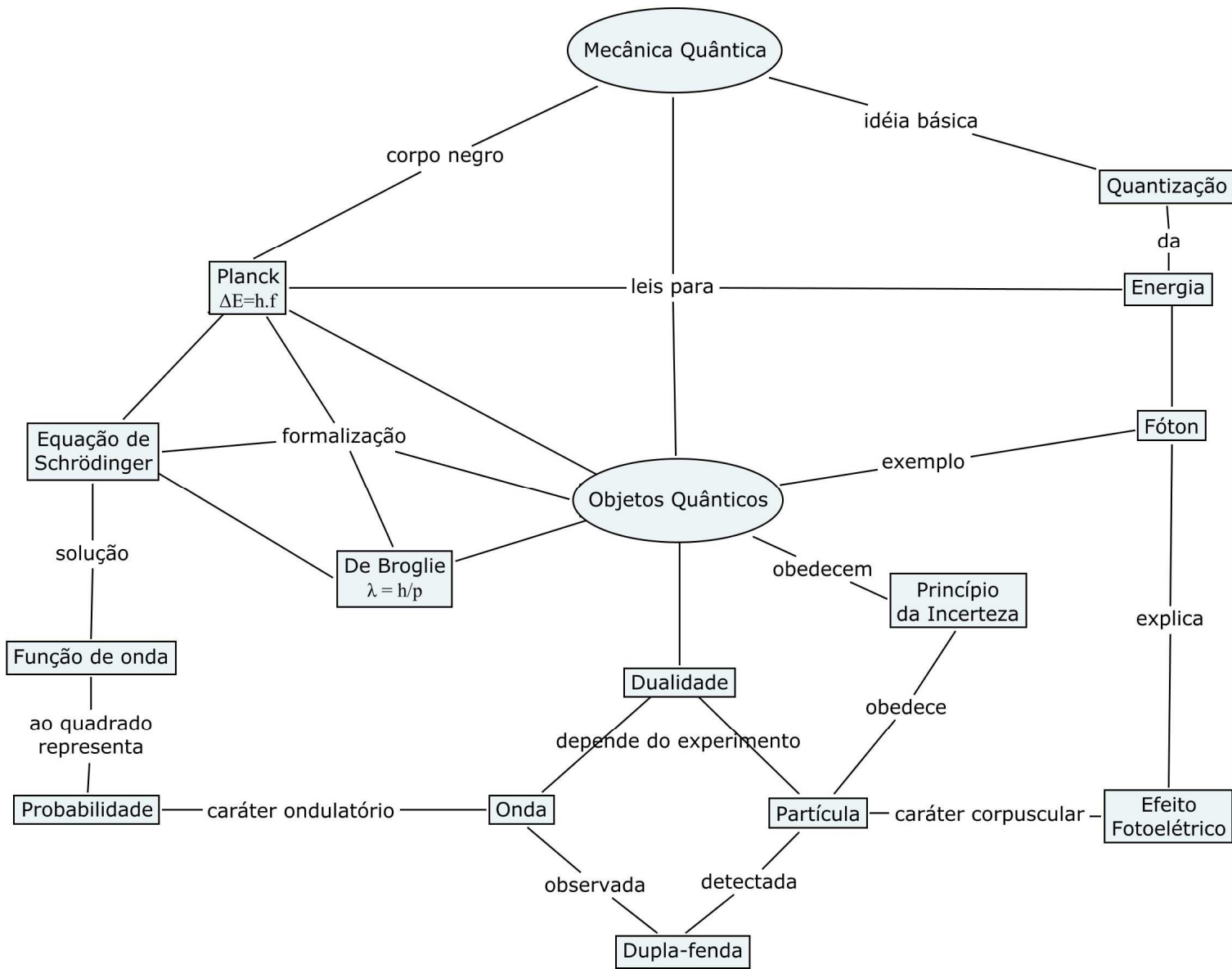


Figura 26. Um Mapa Conceitual para a Mecânica Quântica.

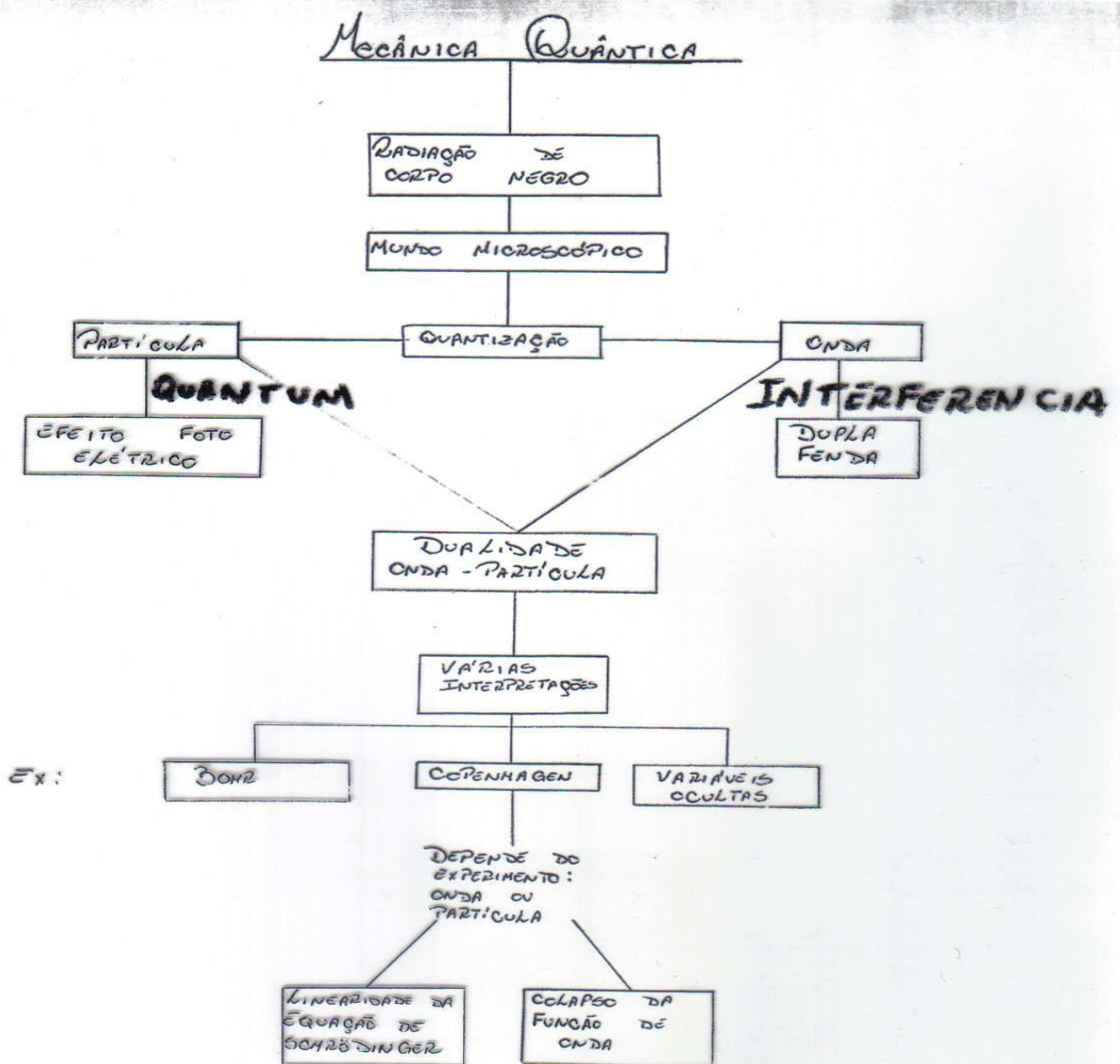


Figura 27. Mapa conceitual Mecânica Quântica.

Este mapa apresenta uma estrutura hierárquica bem organizada. O conceito Mecânica Quântica está no topo ligado à radiação de corpo negro que é um conceito relevante para o início da Mecânica Quântica. O grupo conseguiu observar que no efeito fotoelétrico é evidenciado o comportamento corpuscular da matéria e na dupla fenda o comportamento ondulatório. Na parte inferior do mapa encontram-se os exemplos das interpretações.

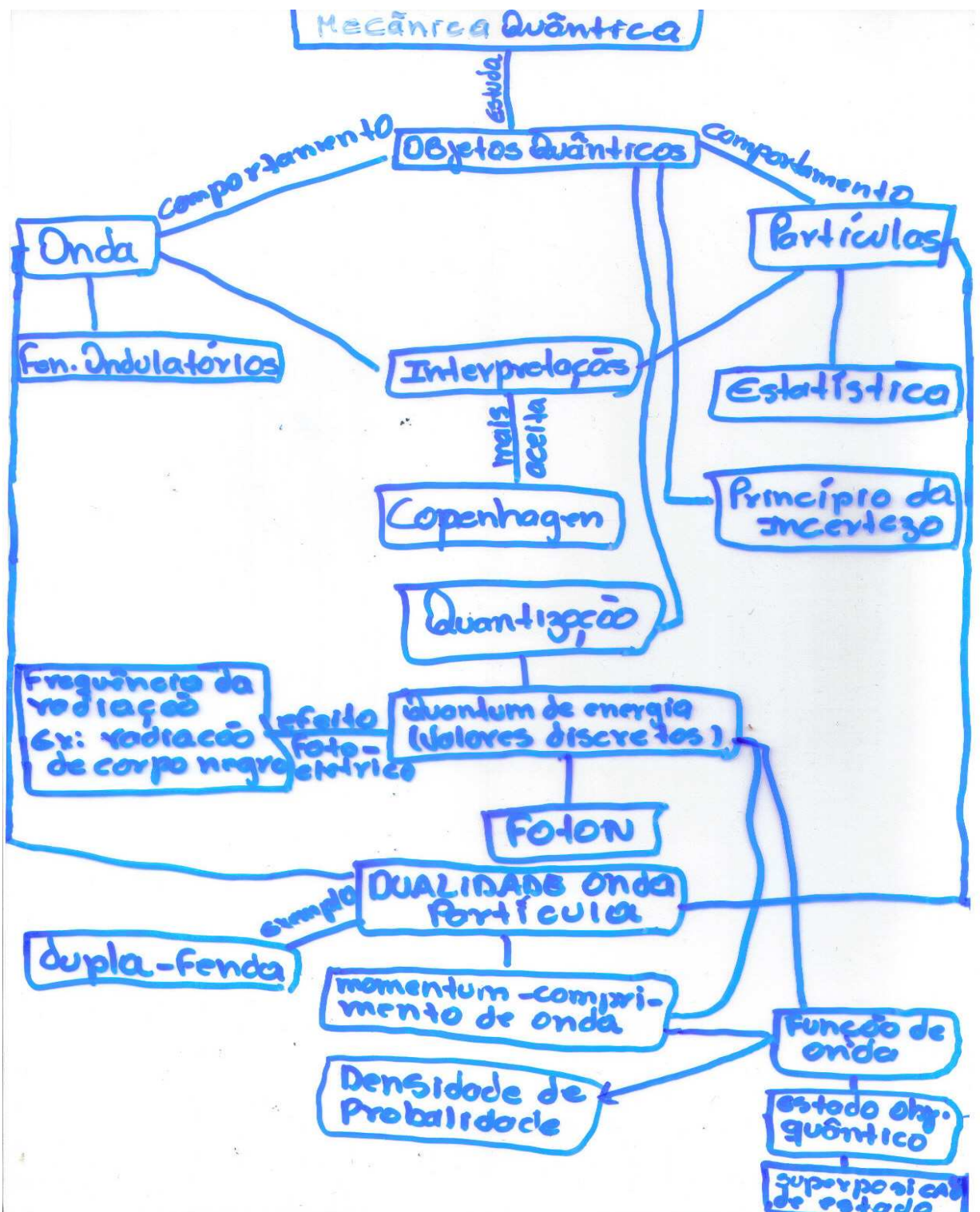


Figura 28. Mapa Conceitual Mecânica Quântica.

O mapa da figura 28 apresenta uma estrutura hierárquica. Novamente, o conceito mais inclusivo Mecânica Quântica está no topo do mapa. O grupo conseguiu estabelecer relações cruzadas. Seus integrantes destacaram que a Mecânica Quântica estuda os objetos quânticos que têm comportamento de onda e de partícula (dualidade) de acordo com a Interpretação de Copenhagen que é a mais aceita. Observaram que os objetos quânticos obedecem ao Princípio da Incerteza e que sua energia pode ser quantizada.

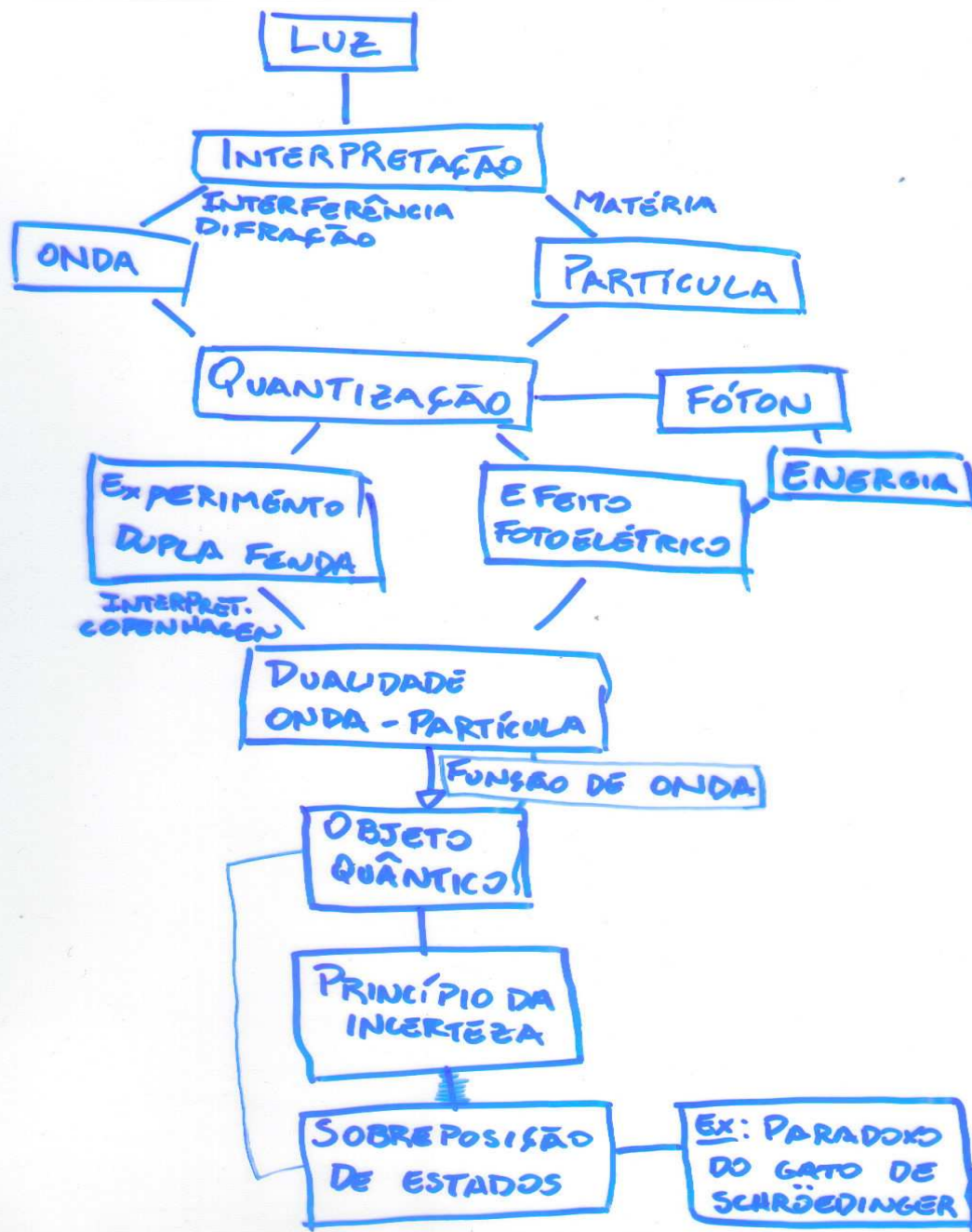


Figura 29. Mapa Conceitual Mecânica Quântica.

Este mapa, no qual o conceito escolhido como mais inclusivo foi luz, tem uma estrutura hierárquica e apresenta relações cruzadas como, por exemplo, o conceito de quantização que está relacionado com fóton, partícula e efeito fotoelétrico, indicando que a energia pode ser quantizada.

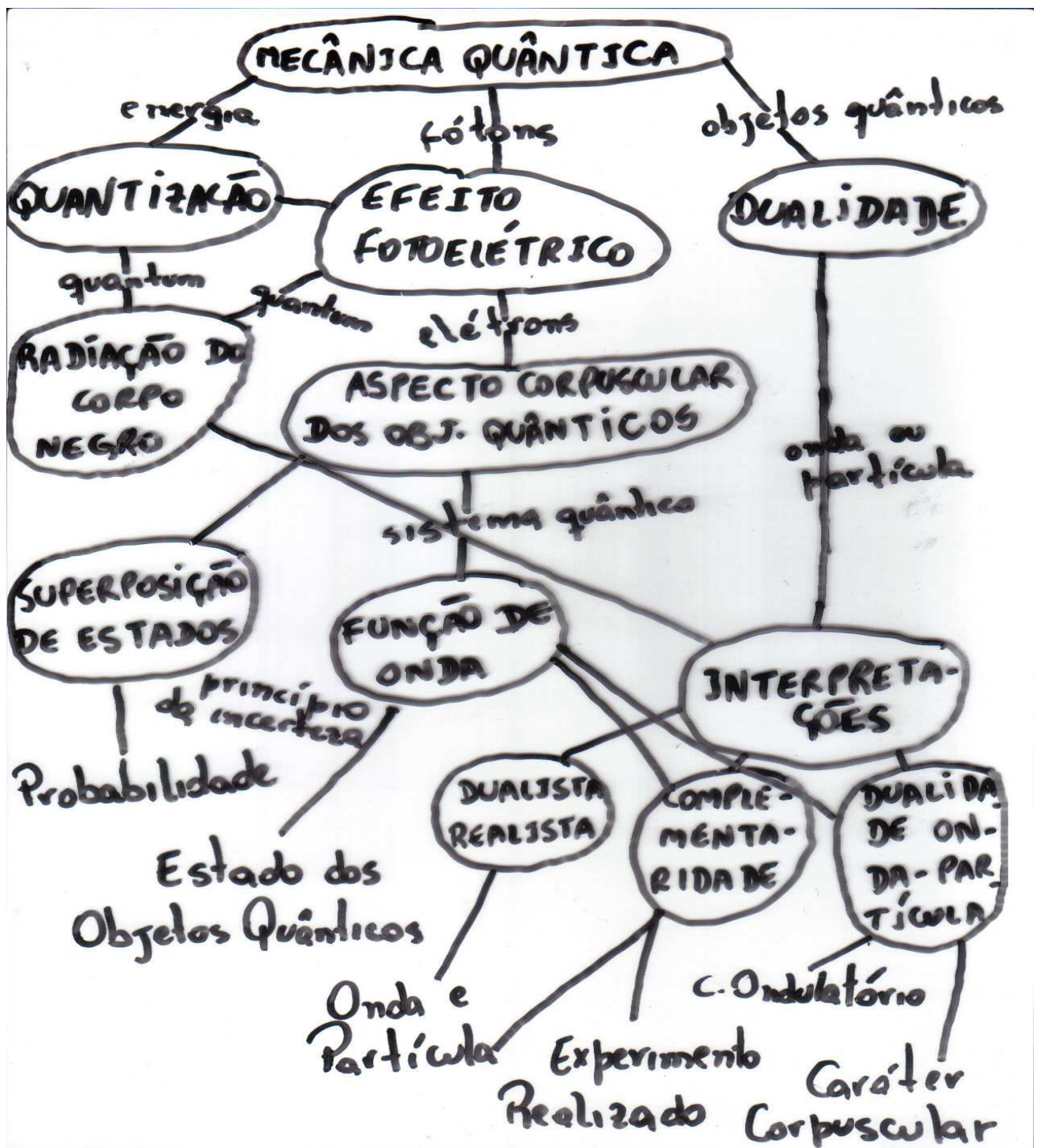


Figura 30. Mapa Conceitual Mecânica Quântica

No mapa da figura 30, o conceito principal é Mecânica Quântica, ligado a conceitos intermediários como quantização, efeito fotoelétrico e dualidade. O grupo destaca que a energia pode ser quantizada, que os objetos quânticos têm a característica da dualidade onda-partícula e que os fótons estão relacionados com o efeito fotoelétrico. São encontradas neste mapa várias relações cruzadas.

12. RESPOSTAS DO PRÉ-TESTE

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
c	a	c	a	e	a	b	d	c	a	c	b	c	c	c

Questões discursivas:

16. Espera-se que os alunos entendam que as teorias da Física Clássica não são mais completas que as da Mecânica Quântica, que as teorias da Física Clássica explicam os fenômenos que ocorrem no mundo macroscópico, mas não descrevem os fenômenos que ocorrem no mundo microscópico.

17. Dependendo do experimento que é realizado com o elétron ele é observado comportando-se como partícula, no efeito fotoelétrico, por exemplo, ou como onda, nas experiências de difração por cristais.

18. Significa densidade de probabilidade de encontrar um elétron em um ponto do espaço.

19. A Equação de Schrödinger descreve a evolução temporal de um estado quântico. Erwin Schrödinger desenvolveu um formalismo que se propunha a descrever a característica ondulatória da matéria. Ele procurou estabelecer uma equação diferencial que expressasse o comportamento das ondas de matéria; visto que se sabe que em nível microscópico partículas podem apresentar aspectos ondulatórios e ondas podem apresentar aspectos corpusculares.

20. Existe um comprimento de onda associado à matéria com valores muito pequenos. Uma pedra em movimento tem, também, associado a ela, um comprimento de onda, só que de valor tão pequeno que não se percebe o mesmo face aos valores característicos do objeto.

CONCLUSÃO

De uma maneira geral, os alunos de Ensino Médio têm acesso a vários tipos de equipamentos eletrônicos como TV, computador, vídeo-games e máquinas digitais, que utilizam cada vez mais tecnologias avançadas. Já estamos chegando à era da computação quântica. Como toda esta tecnologia está no cotidiano destes alunos e está relacionada a conceitos de Mecânica Quântica é relevante, então, que algumas leis e princípios físicos da Física Moderna sejam discutidos no Ensino Médio. Por isso, a importância desse Texto de Apoio sobre tópicos de Mecânica Quântica para professores de Física que trabalham com alunos de Ensino Médio.

O ensino de Física no Ensino Médio não tem sido uma tarefa muito fácil, em parte pela dificuldade de os alunos compreenderem as leis e as teorias da Física, as quais envolvem raciocínio lógico, capacidade de interpretação e abstração. O professor de Física, atualmente, para ter sucesso, deve ter conhecimento do conteúdo e ser alguém capaz de motivar o seu aluno para a aprendizagem e, nesse sentido, acredita-se ser oportuna a proposta de oferecer um texto de apoio que contenha conceitos de Mecânica Quântica para professores de Física e oferecer aos professores formas de trabalhar esses conceitos com seus alunos de modo interessante e potencialmente significativo.

A fundamentação teórica utilizada no texto de apoio é a da aprendizagem significativa e o interacionismo social, onde são considerados os conhecimentos prévios e a interação entre alunos e professor.

As aulas em que utilizam simulações têm uma função fundamental no processo de ensino-aprendizagem, pois a utilização de simulações em computadores propicia aos alunos a possibilidade de vivenciar experiências de modo virtual, algumas das quais são impossíveis de se realizar em laboratórios comuns.

As simulações despertam o interesse dos alunos estimulam a utilização destes instrumentos com alunos do Ensino Médio.

Espera-se com esse Texto de Apoio auxiliar os professores de Física do Ensino Médio a aproveitar os conhecimentos adquiridos e a espalhar esses conhecimentos entre os seus alunos, procurando inserir conceitos de Física Quântica no currículo das escolas de Ensino Médio onde trabalham, motivando seus alunos, despertando interesse pela disciplina de Física, a qual, como se sabe, não tem sido a disciplina favorita dos alunos da Educação Básica.

REFERÊNCIAS

- GRECA, I. M. R. *Construindo significados em Mecânica Quântica: resultados de uma proposta didática aplicada a estudantes de Física Geral*. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, 2000. (Tese de Doutorado).
- GRECA, I. M. R.; HERSCOVITZ, V.E. *Introdução à Mecânica Quântica*. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, Textos de Apoio ao Professor de Física. Nº 13, 2002.
- GRECA, I. M. R.; MOREIRA, M. A. Uma revisão de literatura sobre estudos relativos ao ensino de mecânica quântica introdutória. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 6, n. 1, 2001.
- MENEZES, L. C., *A Matéria: uma aventura do espírito*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.
- MOREIRA, M. A. *Mapas conceituais e diagramas V*. Porto Alegre: Ed. do Autor, 2007.
- MOREIRA, M. A. *Teorias de aprendizagem*. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 1999.
- MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. S. *Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel*. São Paulo: Moraes, 1982.
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica*. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. v. 4.
- OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa, “Física Moderna e contemporânea no Ensino Médio”. Porto Alegre, *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 5, n. 1, 2000.
- PAULO, I. J. C. de. *A aprendizagem significativa crítica de conceitos da Mecânica Quântica segundo a Interpretação de Copenhague e o problema da diversidade de propostas de inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio*. Espanha: Universidade de Burgos, 2006. (Tese de doutorado).
- PENTEADO, P. C. P. *Física: conceitos e aplicações*. São Paulo: Moderna, 1998. V. 2-3.
- PESSOA JR., O. *Conceitos de Física Quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2003.
- RICCI, T.; OSTERMANN, F. *Uma introdução conceitual à Mecânica Quântica para professores do Ensino Médio*. Instituto de Física da UFRGS, Textos de Apoio ao Professor de Física. Nº14, 2003.
- SOARES, S. Um curso de Mecânica Quântica para professores de Física do Ensino Médio. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, 2008. (Dissertação de Mestrado).
- VYGOTSKY, L. S. *A formação social da mente*. 4. ed. São Paulo: Martins Fontes, 1991

Instituto de Física – UFRGS
MPEF – Mestrado Profissional em Ensino de Física
TEXTOS DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA

- nº 1 Um Programa de Atividades sobre Tópicos de Física para a 8ª Série do 1º Grau
Axt., R., Steffani, M. H. e Guimarães, V. H., 1990.
- nº 2 Radioatividade
Brückmann, M. E. e Fries, S. G., 1991.
- nº 3 Mapas Conceituais no Ensino de Física
Moreira, M. A., 1992.
- nº 4 Um Laboratório de Física para Ensino Médio
Axt, R. e Brückmann, M. E., 1993.
- nº 5 Física para Secundaristas – Fenômenos Mecânicos e Térmicos
Axt, R. e Alves, V. M., 1994.
- nº 6 Física para Secundaristas – Eletromagnetismo e Óptica
Axt, R. e Alves, V. M., 1995.
- nº 7 Diagramas V no Ensino de Física
Moreira, M. A., 1996.
- nº 8 Supercondutividade – Uma proposta de inserção no Ensino Médio
Ostermann, F., Ferreira, L. M. e Cavalcanti, C. H., 1997.
- nº 9 Energia, entropia e irreversibilidade
Moreira, M. A., 1998.
- nº 10 Teorias construtivistas
Moreira, M. A. e Ostermann, F., 1999.
- nº 11 Teoria da relatividade especial
Ricci, T. F., 2000.
- nº 12 Partículas elementares e interações fundamentais
Ostermann, F., 2001.
- nº 13 Introdução à Mecânica Quântica. Notas de curso
Greca, I. M. e Herscovitz, V. E., 2002.
- nº 14 Uma introdução conceitual à Mecânica Quântica para professores do Ensino Médio
Ricci, T. F. e Ostermann, F., 2003.
- nº 15 O quarto estado da matéria
Ziebell, L. F., 2004.
- v.16, n.1 Atividades experimentais de Física para crianças de 7 a 10 anos de idade
Schroeder, C., 2005.
- v.16, n.2 O microcomputador como instrumento de medida no laboratório didático de Física
Silva, L. F. da e Veit, E. A., 2005.
- v.16, n.3 Epistemologias do Século XX
Massoni, N. T., 2005.
- v.16, n.4 Atividades de Ciências para a 8ª série do Ensino Fundamental: Astronomia, luz e cores
Mees, A. A.; Andrade, C. T. J. de e Steffani, M. H., 2005.

- v.16, n.5 Relatividade: a passagem do enfoque galileano para a visão de Einstein
Wolff, J. F. de S. e Mors, P. M., 2005.
- v.16, n.6 Trabalhos trimestrais: pequenos projetos de pesquisa no ensino de Física
Mützenber, L. A., 2005.
- v.17, n.1 Circuitos elétricos: novas e velhas tecnologias como facilitadoras de uma
aprendizagem significativa no nível médio
Moraes, M. B. dos S. A., Ribeiro-Teixeira, R. M., 2006.
- v.17, n.2 A estratégia dos projetos didáticos no ensino de física na educação de jovens e
adultos (EJA)
Espindola, K. e Moreira, M. A., 2006.
- v.17, n.3 Introdução ao conceito de energia
Bucussi, A., 2006.
- v.17, n.4 Roteiros para atividades experimentais de Física para crianças de seis anos de
idade
Grala, R. M., 2006.
- v.17, n.5 Inserção de Mecânica Quântica no Ensino Médio: uma proposta para
professores
Webber, M. C. M. e Ricci, T. F., 2006.
- v.17, n.6 Unidades didáticas para a formação de docentes das séries iniciais do ensino
fundamental
Machado, M. A. e Ostermann, F., 2006.
- v.18, n.1 A Física na audição humana
Rui, L. R., 2007.
- v.18, n.2 Concepções alternativas em Óptica
Almeida, V. O.; Cruz, C. A. da e Soave, P. A., 2007.
- v.18, n.3 A inserção de tópicos de Astronomia no estudo da Mecânica em uma
abordagem epistemológica
Kemper, E., 2007.
- v.18, n.4 O Sistema Solar – Um Programa de Astronomia para o Ensino Médio
Uhr, A. P., 2007.
- v.18 n.5 Material de apoio didático para o primeiro contato formal com Física; Fluidos
Damasio, F. e Steffani, M. H., 2007.
- v.18 n.6 Utilizando um forno de microondas e um disco rígido de um computador como
laboratório de Física
Mai, I., Balzaret, N. M. e Schmidt, J. E., 2007.
- v.19 n.1 Ensino de Física Térmica na escola de nível médio: aquisição automática de
dados como elemento motivador de discussões conceituais
Sias, D. B. e Ribeiro-Teixeira, R. M., 2008.
- v.19 n.2 Uma introdução ao processo da medição no ensino médio
Steffens, C. A.; Veit, E. A. e Silveira, F. L. da, 2008.
- v.19 n.3 Um curso introdutório à astronomia para a formação inicial de professores de
ensino fundamental, em nível médio
Gonzatti, S. E. M.; Ricci, T. F. dos S. e Saraiva, M. F. O., 2008.
- v.19 n.4 Sugestões ao professor de Física para abordar tópicos de Mecânica Quântica no
Ensino Médio
Soares, S.; Paulo, I. C. de Paulo e Moreira, M. A., 2008.

