

**ROGÉRIO AVILA CHIARELLI**

**FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NO ENSINO MÉDIO: É  
POSSÍVEL ABORDAR CONCEITOS DE MECÂNICA QUÂNTICA?**

**Dissertação apresentada como requisito à  
obtenção de Grau de Mestre em Física,  
Curso de Pós-Graduação em Física,  
Instituto de Física, Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul.**

**Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio  
Moreira**

**PORTO ALEGRE  
2006**

Este trabalho é dedicado à minha mãe (in memoriam) ao meu pai e aos meus filhos.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus colegas Ives Solano Araújo, Iramaia Jorge Cabral, Mauro Borges e Pedro Dorneles por terem me ajudado nesta importante caminhada.

À Direção e colegas do Colégio Estadual Inácio Montanha pelo incentivo dado.

À minha irmã e à Carmen por terem me ajudado na correção.

A todos os professores e funcionários do Instituto de Física pela sua colaboração na apresentação do trabalho.

A todos os doadores de sangue, médicos e enfermeiras.

“Por isso, eu digo, o ser humano é observador na experiência, ou no suceder do viver na linguagem. Porque se alguém não diz nada, não diz nada. A explicação se dá na linguagem. O discurso que explica algo dá-se na linguagem.... Assim espero poder lhes mostrar que nós, seres humanos, existimos na linguagem”

*Humberto Maturana*

## ÍNDICE

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO II – REVISÃO DA LITERATURA .....	10
CAPÍTULO III – A ESTRUTURA ATÔMICA DA MATÉRIA E DISCUSSÕES SOBRE INTERPRETAÇÕES DA MECÂNICA QUÂNTICA.....	38
CAPÍTULO IV – APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E MAPAS CONCEITUAIS.....	61
CAPÍTULO V – CONSTITUIÇÃO DE DADOS .....	66
CAPÍTULO VI – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	99
VI.1 – ANÁLISE QUANTITATIVA .....	99
VI.2 – ANÁLISE DOS ESQUEMAS CONCEITUAIS .....	108
VI.3 – ANÁLISE DE RESPOSTAS DE PROFESSORES E ALUNOS SOBRE A INCLUSÃO DE FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO .....	117
CAPÍTULO VII – CONCLUSÃO.....	143
REFERÊNCIAS.....	146
APÊNDICE .....	151

## RESUMO

*Este trabalho tem o objetivo de mostrar que é possível inserir um tema de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, a saber, algumas noções de Mecânica Quântica. O estudo foi realizado com alunos de 3º ano do Ensino Médio de uma escola pública estadual de Porto Alegre, Brasil; foram abordados somente conceitos de Mecânica Quântica, usando poucas fórmulas matemáticas de fácil assimilação. Conceitos da aprendizagem significativa de Ausubel e Novak foram usados como referencial teórico deste estudo e a noção de Perfil Epistemológico, de Gaston Bachelard, como referencial epistêmico. Foi feita uma análise quantitativa e qualitativa das respostas desses alunos usando testes e esquemas conceituais. Não houve grupo de controle, pois este assunto não é trabalhado, em qualquer período do ano letivo, em nenhuma turma da escola. Os resultados dessa análise sugerem que é, de fato, possível abordar tópicos de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio.*

## ABSTRACT

*This work aims to show that is possible to insert a topic of modern and contemporary physics at high school level, specifically some notions of quantum mechanics. The study was carried out with third grade high school students from a public state school at Porto Alegre, Brazil, using just a few mathematical equations quite easy to assimilate. Concepts from the meaningful learning theory of Ausubel and Novak were used as theoretical framework whereas Bachelard's notion of epistemological profile was used as epistemological reference. A quantitative and qualitative analysis of students' answers to written quizzes and conceptual schemes was done. There was no control group since this subject is not approached with any other group of students in this school. Research findings presented at the end suggest that, indeed, it is possible to deal with notions of modern and contemporary physics at high school level.*

## CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

A proposta deste trabalho é o ensino de conceitos de Mecânica Quântica no Ensino Médio. Em termos de interpretação filosófica da Mecânica Quântica, a posição adotada é a da Interpretação de Copenhague, defendida por físicos como Richard Feynman e pesquisadores da área de ensino de ciências como, por exemplo, Pessoa Jr. (2003). Por que a escolha dessa interpretação? Porque é uma interpretação que se mantém – apesar de existirem outras, com distintas bases filosóficas – desde os tempos de Niels Bohr, e não tem sido colocada em dúvida por resultados experimentais. Os procedimentos metodológicos e desdobramentos conceituais da proposta têm como base elementos dessa interpretação.

Outra justificativa para o fato de a proposta estar fundamentada na Interpretação de Copenhague é que ela privilegia o papel do observador no processo de medida interagindo com outros sistemas. Ou seja, a proposta leva, então, ao Ensino Médio a discussão de nossa intromissão no mundo físico com ações e pensamentos que influenciam nossas vidas, uma vez que essa interpretação enfatiza a relação sujeito-objeto.

Por outro lado, a proposta também leva em consideração a “filosofia do não” de Bachelard (1991), tendo em vista que esse filósofo da ciência argumenta que a evolução da ciência é dificultada por obstáculos epistemológicos entre os quais estão os da ciência vigente. É por isso, por exemplo, que o homem levou séculos para trocar o sistema geocêntrico pelo heliocêntrico. Isso aparece também no conceito de massa como será visto mais adiante neste trabalho.

Do ponto de vista das teorias de aprendizagem, a proposta está baseada na da aprendizagem significativa de Ausubel (2002). Nessa teoria, o conhecimento prévio é a variável mais importante para a aprendizagem de novos conhecimentos. Tão importante que pode até mesmo funcionar como obstáculo epistemológico, ao qual se refere Bachelard. A concepção clássica de átomo que o aluno traz para a sala de aula quando torna contato com conceitos quânticos é um exemplo disso. Assim, procurou-se, na pesquisa, ter uma idéia da percepção de mundo (animista, realista, racionalista, na Física Clássica e ultra-racionalista, na Física Moderna), segundo o perfil epistemológico de Bachelard, e sua possível mudança em função da proposta, pelo menos tal como evidenciada pelo pós-teste.

A Física que vem sendo desenvolvida atualmente nas escolas está sofrendo um desgaste muito grande devido a diversos fatores. Nos vários anos de sala de aula do Ensino Médio (15 anos, em escola pública e alguns na particular) pudemos constatar, devido a esta vivência, diversas dificuldades encontradas junto aos alunos. Desde as experiências com alunos, do 1º ano até o 3º ano, a conversas com professores durante os períodos letivos (e que também veremos em algumas respostas dadas ao questionário entregue aos professores sobre sua avaliação espontânea de sala de aula) constatamos os pontos a seguir apresentados.

- Excesso de fórmulas apresentadas nas aulas sem levar muito em conta a compreensão da parte teórica do conteúdo desenvolvido. Isso não significa dizer que a Matemática não é uma ferramenta necessária na abordagem da Física. Como muitos professores estão habituados a adotar livros didáticos, chamados por diversos pesquisadores de manuais, os quais privilegiam essencialmente problemas com resolução matemática. Isso provoca no aluno uma espécie de estímulo-resposta em que ele procura resolver os problemas de maneira mecânica sem levar em conta o entendimento real do problema. Por exemplo, o aluno aprende a identificar quais são as variáveis do



problema (o que não é errado), mas depois se preocupa apenas em aplicar a fórmula adequada na sua resolução. Isso é constatado nos testes aplicados ou na intervenção do aluno em sala de aula. O que se critica aqui é a maneira mecânica como o aluno está acostumado a resolver a situação sem preocupar-se com o entendimento real do problema, sem que haja uma aprendizagem significativa sobre a questão. Esse tipo de aprendizagem só leva à memorização de fórmulas e faz com que o aluno perca o interesse nos fenômenos físicos envolvidos, desestimulando assim seu interesse pela Física. Em geral, o que ocorre é a facilidade de entendimento daqueles alunos que têm mais facilidade de entender Matemática o que não deveria ocorrer porque a Física está além da compreensão matemática. O que se quer dizer também é que não se deve privilegiar somente os aspectos quantitativos, mas também os qualitativos no ensino de Física, pois em certas situações os aspectos qualitativos podem também realçar os quantitativos.

- Falta de equipamento necessário para a maioria das escolas públicas do Ensino Médio, como laboratórios atualizados, que funcionem, e computadores. Apesar de a maioria das escolas estarem equipadas com aparelhos de televisão, vídeos e retroprojetores esse material didático nem sempre fica disponível ao professor, ou por falta de interesse ou por estar estragado. Existem muitas fitas de vídeo para serem utilizadas na escola, que geralmente estão disponíveis na Secretaria de Educação. Porém, normalmente este material é anacrônico no sentido de não ter à disposição conteúdos mais modernos de Física que tratem de Física Moderna e Contemporânea. Geralmente, o que se consegue é fora do âmbito escolar do Ensino Médio.
- Outro fator também é a pouca carga horária que é utilizada para as aulas de Física. Em geral, as escolas públicas e particulares têm uma carga horária distribuída da seguinte maneira: 1<sup>o</sup>s anos – de duas horas a três horas semanais, que se torna prejudicial ao ensino de Física quando a carga é de duas horas semanais, pois é difícil fazer o aluno se interessar pela matéria quando ela fica bastante pulverizada; 2<sup>o</sup>s e 3<sup>o</sup>s anos – três horas semanais, apesar de ainda serem poucas (pois antigamente estas cargas horárias eram maiores nos três anos do Ensino Médio) é melhor do que somente duas horas semanais. Além disso, estas cargas horárias devem esgotar toda a Física vista nos três anos, o que se torna praticamente inviável obrigando o professor a reduzir os conteúdos da matéria significativamente. Porém, fica a questão de por que certas disciplinas como Línguas e Matemática, por exemplo, possuem maior carga horária (5 a 4 aulas semanais) e outras possuem, em contrapartida, pouca carga horária, como História, Artes (2 a 1 aulas semanais) ? Qual é o critério adotado para esta diferenciação de cargas horárias? Esta pouca carga horária, ou tamanha discrepância entre cargas horárias em cada disciplina, não desperta interesse do aluno pois o seu contato com a Física é pequeno e provoca muita desmotivação por parte dele. Se se tirasse esse critério de maior carga horária para determinadas disciplinas não se resolveria um dos problemas de *status* dado pelo aluno (e pelo professor também) na sua valorização e, com isto, a valorização da Física? Talvez.
- A rejeição dos alunos pelas aulas de Física não está somente nas metodologias desenvolvidas pelo professor, mas também porque não trazem nenhum interesse imediato às curiosidades dos alunos atuais. Velhos temas desenvolvidos trazem uma monotonia aos alunos, que os afasta da sala de aula. Diante de apelos tecnológicos tão evidentes, como os *video games* e os computadores, que fazem parte da sua vida diária. Os professores não conseguem competir ensinando apenas a Física do penúltimo século sem apelos tecnológicos que a tornariam mais interessante aos alunos (daí a importância dos computadores e laboratórios nas escolas, que são mais frequentes nas escolas particulares do Ensino Médio e, às vezes, até do Ensino

Fundamental). Os computadores são uma forma de dar mais agilidade ao ensino de Física.

- A desatualização do currículo, em relação ao desenvolvimento científico tecnológico, também é um outro fator que não provoca motivação no aluno para estudar/interessar por Física. Enquanto o nosso mundo moderno lida com aparelhos que exigem desenvolvimento tecnológico – marca do século XX – como televisão, raios-X, tomógrafos, portas que se abrem automaticamente, computadores, DVDs, CDs, laser, viagens espaciais, câmaras digitais, celulares... a Física ensinada em sala de aula contempla somente o conteúdo e o desenvolvimento tecnológico realizado até o final do século XIX.

A presente proposta é de que a Física seja desenvolvida não como uma mera curiosidade mas sim como uma maneira de ajudar a construir a cidadania do aluno no sentido de ele estar mais apto para enfrentar os novos desenvolvimentos tecnológicos atuais. Devemos lembrar que as novas necessidades que surgem no nosso dia-a-dia, como também no trabalho, são cada vez mais básicas para o homem atual, ou seja, moderno. Isso influencia, de certa forma, outras formas do saber humano, pois abre horizontes de exploração científica jamais imaginados pelos físicos do século XIX. Contudo, devemos lembrar que a Física tradicional também trouxe contribuições para o homem moderno, mas ela não supre totalmente o desenvolvimento das novas tecnologias aplicadas à nossa vida diária. Mesmo em escolas particulares também não há preocupação na atualização do currículo visando à abordagem da Física Moderna e Contemporânea, estando aquelas mais preocupadas com a quantidade de matéria desenvolvida, prevista pelos currículos, para privilegiar os vestibulares do que com a qualidade de ensino. Por outro lado, há o incentivo de adequação da Física à nova realidade, conforme os PCN's (Parâmetros Curriculares Educacionais)\* que a sugerem, de uma forma branda (pág. 26, parte III, Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias: “*Essas e outras necessárias atualizações dos conteúdos apontam uma ênfase à Física Contemporânea ao longo do curso, em cada tópico, com um desdobramento de outros conhecimentos ...*”)

O desenvolvimento da Física Moderna e Contemporânea mostra-se necessário porque muitas interpretações atuais que temos do mundo microscópico (ou macroscópico no sentido de observações estelares) não podem ser meramente explicadas através da Física Clássica. Por exemplo, dentro da Relatividade consegue-se explicar como sabemos que as galáxias estão se afastando ou aproximando de nós, entre outros diversos assuntos, e ainda utilizarmos leis de gravitação universal prevista na Física de Newton. Entretanto, freqüentemente só a Relatividade Geral é que consegue explicar os movimentos de alguns planetas do nosso sistema solar. Na Mecânica Quântica, o mundo microscópico só pode ser explicado através dela. O *comportamento dual da onda-partícula*, o que é *quantum*, o *fóton*, o *efeito fotoelétrico*, a *superposição de estados*, o *Princípio de Incerteza*, implicam uma visão radicalmente oposta da Mecânica Clássica. Infelizmente, ela não é abordada nas escolas, talvez porque sejam poucos os livros didáticos que exploram este assunto, talvez seja por preocupação em vencer os conteúdos que são mais questionados nos vestibulares, talvez por falta de preparo até do próprio professor, além, de como já foi dito, não ser muito privilegiada pelos currículos escolares.

Obviamente existem várias dificuldades para a introdução da Mecânica Quântica no Ensino Médio. Por exemplo, o formalismo matemático que é próprio à descrição da

---

\* Para maiores informações dos PCN's foi consultada na Internet a página:

<<http://www.conteudoescola.com.br/site/content/view/142/29/>> acessado em 26/12/2005

Mecânica Quântica, as novidades conceituais que a separam da Física Clássica, que são muito mais profundas do que esta para o senso comum, e o tratamento experimental dos tópicos quânticos. Desta forma, devemos buscar formas alternativas e novas tentativas de abordá-la procurando trazê-la ao nível do aluno do Ensino Médio, para que se torne significativa e compreensiva.

Aqui, procuraremos utilizar uma forma muito simples de aplicação usando uma introdução histórica para situar o aluno, principalmente conceitos e quase nenhum formalismo matemático (exceto poucas equações para ilustrar alguns exemplos). Esta abordagem de incluir um fundo histórico é útil para mostrar que o conhecimento não é construído por uma única pessoa numa época própria, mas uma construção que é feita ao longo do tempo por diversas pessoas, segundo Popper (1982). Ou seja, que o conhecimento é provisório, inconstante no tempo e raramente é acumulativo, no dizer de Kuhn (1978).

Proposta no início do século XX, a MQ teve um longo e tortuoso desenvolvimento ao longo desse século. Inicialmente concebida com uma visão clássica de partícula e ganhando novos significados propostos ainda naquele século, começou a separar-se da Mecânica Clássica e da Ondulatória à medida em que seu comportamento não poderia ser mais descrito por elas, ou seja, as duas mecânicas seriam incomensuráveis, segundo Kuhn (1978), pois são regidas por paradigmas diferentes. Apesar de ser uma teoria física de quase um século de existência, ela é dificilmente tratada em Física em escolas ao nível de Ensino Médio, sendo que os livros didáticos do Ensino Médio não dão uma maior abordagem a esse assunto. A MQ é introduzida apenas em pequenos intervalos onde há coincidência entre a MQ e a Mecânica Clássica (MC) e a teoria ondulatória.

Procurando dar uma visão menos tradicional da Física até então presente no Ensino Médio e introduzindo o aluno a uma parte de um novo paradigma da Física Moderna, esta pesquisa objetiva discutir como introduzir o ensino da Mecânica Quântica no currículo do Ensino Médio, considerando que o desenvolvimento da MQ deva preencher em parte a Física Moderna e Contemporânea nesse nível de ensino.

Este estudo justifica-se pelo fato de que, na atualidade, muitas novas tecnologias se desenvolvem no campo da MQ (televisão, tomógrafos, aparelhos de raios X, átomo de hidrogênio, “impressões digitais” dos átomos, microscópio eletrônico de varredura por tunelamento, teleportação, proposta de novos computadores quânticos – Greca e Herscovitz, 2003). Assim, no século XX, inúmeras realizações tecnológicas foram concebidas utilizando-se a MQ. Deste modo, foi possível construir, desde a bomba atômica, até os modernos geradores nucleares para a produção de energia utilizável em larga escala. Além disso, a aplicação dos processos de radioatividade na medicina, como a radioterapia e a utilização de isótopos radioativos, têm contribuído na cura de algumas doenças fatais, como o câncer. Enquanto isso está ocorrendo observa-se que não há quase nenhuma informação sobre MQ na disciplina de Física no Ensino Médio. Quando muito, é apresentada na disciplina de Química como introdução aos números quânticos sem muito aprofundamento. Salvo também, com algumas exceções na Física, como número atômico, no papel de perda ou ganho de elétrons nos processos de eletrização, da corrente elétrica e do eletromagnetismo, muito pouco, além disso, é visto.

Procurando dar uma idéia radicalmente oposta à da Física Clássica, serão vistos aqui alguns conceitos da MQ como, por exemplo, *dualidade onda-partícula* (efeito fotoelétrico, experiência da dupla-fenda), *Princípio de Incerteza*, *caráter probabilístico de resultados de medida*, *superposição linear de estados* (Gato de Schrödinger). Sem preocupar-se com relações matemáticas, mas sim com que os estudantes consigam

perceber uma outra realidade Física e não procurando analogias com o mundo clássico, como às vezes ocorre em algumas interpretações de textos de Física. Desse modo, esta investigação irá trabalhar com exemplos bastante concretos que busquem esclarecer características da MQ a alunos de Ensino Médio.

A idéia do átomo, primeiramente pensado como uma partícula sem divisão, foi lentamente destruída à medida que partículas mais elementares que ela foram descobertas como o próton, o nêutron, o elétron e muitas outras partículas elementares.

Terrazzan (1992, 1994, apud Ostermann e Moreira, 2000) afirma que se deve atualizar o currículo de Física tendo como justificativa o grande alcance dos atuais conteúdos, no sentido de se preparar os alunos para novos paradigmas do mundo atual (pelo menos do início da revolução científica que ocorreu no século XX) e para formá-los para serem cidadãos conscientes e participativos. Considera que diversos pontos foram levantados na III Conferência Interamericana sobre Educação em Física (Barojas, 1988), destacando:

- o despertar da curiosidade dos estudantes a compreender a Física enquanto uma iniciativa do ser humano;
- o currículo atual da disciplina a partir de conteúdos da Física Clássica, isto é, conteúdos desenvolvidos até 1900 (o que é inadmissível já que novas idéias revolucionaram a ciência de forma radical);
- tópicos novos e atualizados despertam mais atenção dos professores e alunos, entre outros.

Para Pereira (1997), é função da escola introduzir em seu currículo a Física Moderna e Contemporânea, a fim de que tenhamos a formação de pessoas informadas sobre as coisas que as cercam.

Outros, como Fischler e Lichtfeldt (1992), afirmam que ensinar o átomo de Bohr, com uma visão clássica, da forma como tem sido difundida, torna-se um obstáculo para a compreensão de idéias modernas, acrescentando que é necessária uma nova abordagem da MQ ao nível do Ensino Médio.

Greca, Moreira e Herscovitz (2001), consideram que a MQ e a Relatividade são as grandes estrelas do século XX, em termos de Ciências, pois observam que as mesmas formam a base da Física Nuclear, Atômica, Molecular e do Estado Sólido, da Física das Partículas Elementares e da Luz, cuja força revela-se em diversas aplicações desde a Engenharia até às Ciências de Saúde, assim como a ocorrência da miniaturização eletrônica e da nanotecnologia que só podem ser desenvolvidas através da MQ.

Bergström, Johansson e Nilsson (2001) relatam que o advento da MQ mudou drasticamente o mundo contemporâneo, alterando nossos conceitos físicos clássicos de partículas, trajetórias, spin e energia. Para eles, a revolução conceitual implicada pela “nova Física” (desenvolvida nos anos de 1920) foi tão profunda que ainda não penetrou na percepção da maioria das pessoas, além dos físicos profissionais. Os autores relatam que o assunto se popularizou, de certa forma, quando foi apresentado no Departamento de Física na Universidade de Copenhague para um público leigo (que foi convidado através da imprensa) a comparecer a uma apresentação, realizada em Estocolmo (Suécia). O tema havia sido desenvolvido antes em *Copenhague* quando ocorreu a discussão entre os físicos Bohr e Heisenberg. Foram desenvolvidos os seguintes pontos na apresentação: visão teórica das *ondas mecânicas*, experimentos com *ondas padrão*, *luz como partículas e ondas* – a *dualidade onda-partícula* –, o *estudo dos átomos*, a *teoria de Heisenberg da relação de incerteza*, *relação de incerteza de Heisenberg* em experimentos de laboratório e perspectiva cósmica – as *flutuações quânticas do vácuo*.

Os novos currículos das escolas da Suécia (aproximadamente desde 1990, segundo o próprio autor respondeu a uma correspondência dirigida a ele) incluem uma

indicação ou projeto especial em que se espera que os alunos possam executar autonomamente. O tempo gasto sobre estes projetos, aproximadamente, corresponde à metade do curso de Física dos últimos três anos da escola secundária. Temas como “The Physics of Copenhagen” são bem adequados para o tipo deste projeto.

Já para Cavalcante e Benedetto (1999, pág. 437), a introdução da Física Moderna no Ensino Médio, entre elas a MQ, torna-se

*uma necessidade diante do exercício da cidadania, visto que este exercício baseia-se em conhecimento mínimo das formas contemporâneas de linguagem e dos princípios científicos e tecnológicos que atuam na produção moderna.*

Em julho de 1997, Cavalcante e Tavolaro (2001), realizaram uma oficina pedagógica na qual fizeram experiências sobre *interferência e difração* (utilizaram lanternas, cílios postiços e CDs como instrumentos de decomposição da luz) durante a 5ª SBPC Jovem, em Belo Horizonte, para um público composto por professores do Ensino Médio e alunos do Ensino Fundamental e Médio. E naquele mesmo ano apresentaram essa oficina também na 3ª Mostra de Material de Divulgação e Ensino das Ciências, em agosto em São Paulo, bem como na IX Semana de Física, realizada pelo Departamento de Física do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Juiz de Fora em outubro. Como essa atividade teve uma ótima receptividade ela tem sido oferecida sistematicamente pela Escola do Futuro, da USP. Nesta oficina preocupam-se em abordar o estudo do *Comportamento Dual*, aparecendo a Física Contemporânea como suplementação à Física Clássica no limite entre Ótica Geométrica e Ótica Física. Um dos objetivos da mesma é o de mostrar que a Mecânica Quântica é importante na compreensão do mundo moderno e a postura do homem moderno frente a ela.

Em outra obra Cavalcante, Tavolaro e Haag (2005, pág. 75) afirmam que a introdução da Física Moderna

*...no Ensino Médio é um consenso entre os professores de Física, já que o seu entendimento é visto como uma necessidade para a compreensão de fenômenos ligados a situações vividas pelos estudantes, sejam de origem natural ou tecnológica.*

Assim, esse trabalho que é para ser utilizado no Ensino Médio, consiste de um experimento em que o professor poderá discutir o conceito de quantum de energia, além de poder determinar a constante de Planck por meio de métodos distintos. O material a ser utilizado é de baixo custo e de fácil reprodutibilidade.

Para Perez, Senent e Solbes (1986), o desenvolvimento da ciência atual determina a inclusão da Física e da Química nos currículos do Ensino Médio e universitário, prevendo temas como os da Física Moderna, principalmente os que exijam a interpretação da Física Relativística e Quântica. No entanto, os autores questionam-se se as abordagens que introduzem as idéias e os conceitos básicos da Física Moderna no Ensino Médio são corretas e se os alunos poderão alcançar uma compreensão aceitável de tais idéias e conceitos.

Olsen (2002), do Departamento de Formação de Professores da Universidade de Oslo, Noruega, fez um estudo com 236 estudantes de 18-19 anos, na “upper secondary school” sobre a implantação da MQ. Critica os cursos de Física ao nível pré-universitário de todo o mundo que incluem apenas tópicos voltados para a Física

Clássica, como Mecânica Newtoniana, Eletricidade e Eletromagnetismo e Termodinâmica. Os cursos de Física da Noruega têm, desde os primeiros anos de 1970, incluído a Física Moderna. Mesmo considerando que o currículo tenha sido freqüentemente reformulado nas décadas seguintes, o conteúdo da Física Quântica nestes cursos têm-se mantido inalterado. Assim, os estudantes são introduzidos nos estudos referentes aos raios-X, ao efeito fotoelétrico, aos modelos simples para estes fenômenos. A dualidade onda-partícula também é introduzida com uma breve discussão dos experimentos de dupla fenda para os elétrons.

Em “La crisis de la Física Clásica y el surgimiento de la Moderna en la Investigación Didáctica”, Solbes (1990) adverte que este tema não constitui uma das grandes linhas da investigação, apesar de interessar aos professores de Física e Química e o público em geral. Isto está no manifesto dos últimos Congressos de Ensino da Física, como a 173ª Conferência do American Institute of Physics – 1988 – ou o Congresso Nacional de la Associazione per l’Insegnamento della Fisica – 1988. Ainda salienta o fato de existir um amplo consenso na literatura didática sobre a introdução da Física Moderna nos últimos cursos dos ensinos secundários e nos primeiros anos universitários. Isto está presente em muitos países como: Estados Unidos, Haber-Schaim 1981; Reino Unido, Ogborn 1981; França, Balibar y Lévy-Leblon 1984; Itália, Fabri 1988; Holanda, Lijnse 1981; Hungria, Marx 1981; Japão, Konuma 1988; América Latina, Klapp 1988, Solbes (apud Marx 1988), Aubrecht 1988, Gil et al. 1986. Acredita que a escola precisa preparar os alunos para o século XXI e destaca que a aplicação da Física Moderna em nossa sociedade vem crescendo de importância, despertando o interesse de alunos e professores, onde se inclui o campo da teoria.

Greca e Freire Jr. (2003) condenam a forma como a MQ é ensinada em nível universitário e no Ensino Médio utilizando a analogia clássica. Ao mesmo tempo, destacam a necessidade de se ensinar esses conteúdos, num modelo mais realista da MQ, o que é necessário para o entendimento do mundo moderno. Ainda defendem que uma estratégia didática deve privilegiar a abordagem fenomenológica conceitual, com ênfase sobre a característica quântica do sistema opondo-se, então, a analogias clássicas. Deste modo, defendem o ensinamento da MQ da forma ortodoxa, ainda que realista. Consideram o estado quântico como chave da MQ que representa a realidade Física de um sistema, independente do processo de medida.

Em uma obra de Greca (2000), salienta-se que a necessidade de introdução da MQ nos currículos de Ciências tem se convertido em uma afirmação praticamente unânime nos últimos anos. A autora exemplifica com as reformas curriculares realizadas em diversos países, como na Espanha e Argentina, que vêm incluindo tópicos da Física Moderna na escola secundária. Nos Estados Unidos a discussão está centralizada no *como fazê-lo* e não se *devem* ser ensinados.

Para Silva (1997), “a necessidade da Mecânica Quântica” tem origem na incapacidade da Mecânica Clássica de explicar uma série de dados experimentais sobre os objetos microscópicos, como átomos e partículas elementares. Para ele, a falta de rigorosidade da mecânica newtoniana explica os limites de sua aplicação e seria uma maneira de introduzir a MQ. A Física Clássica, embasada na mecânica newtoniana, esclarece com correção os problemas de dimensão humana e astronômica e até alguns problemas microscópicos como a teoria cinética dos gases. Desse modo, a sua falha em elucidar o resultado de certas experiências no final do século XIX indicava os limites da Física Clássica. Assim, *continuidade*, *determinismo* (que veremos no capítulo IV, com mais detalhes) e *método analítico* são necessários na filosofia clássica, relacionando-se de maneira interdependente. O método analítico no estudo da estrutura da matéria é o que o autor chama de *atomismo*. A divisibilidade infinita da matéria levaria a uma

impossibilidade de resolver o problema de conhecer a estrutura da matéria. Quando a MQ surgiu pode resolver o problema da divisibilidade da matéria construindo um sentido absoluto para o tamanho, que era antes relativo, rompendo a série infinita do pequeno ao grande. Define-se grande aquilo que pode ser observado sem perturbar e pequeno aquilo que não pode ser observado sem perturbar. Só a MQ consegue descrever o mundo pequeno, definindo, assim, um limite inferior para o tamanho das perturbações provocadas, quando se faz uma medida ou observação.

Mokross (1998, pág. 380) considera habitual estudar a mecânica em função das dimensões do objeto, como: no caso de objetos microscópicos (atômicos) são as leis da MQ que resolvem o problema; para objetos macroscópicos (como grãos de areia até o sistema solar) a Mecânica Clássica de Newton é suficiente. Para dimensões interestelares e intergaláticas a Mecânica Clássica não consegue explicar tudo e então são utilizadas as leis da Mecânica Relativista de Einstein. Assim, pode-se concluir que a escolha por esta ou aquela mecânica deve ser feita em função das dimensões do sistema considerado.

Por isso mesmo, pela questão das dimensões do objeto é necessário introduzir a MQ no Ensino Médio para que o aluno diferencie o microcosmo do macrocosmo e saiba corretamente aplicar um ou outro conceito para o seu estudo.

Neste capítulo, procuramos situar, com base na literatura encontrada em periódicos e revistas nacionais e internacionais da bibliografia pesquisada (ver Capítulo II para referência à bibliografia usada), como diversos autores se posicionam quanto à introdução da MQ no currículo de Ensino Médio.

Alguns países como Suécia, Dinamarca, Itália, Espanha, Estados Unidos e Argentina já possuem nos seus currículos do respectivo Ensino Médio a inclusão da Mecânica Quântica como um tópico regular de ensino.

Alguns autores fazem críticas sobre como temas da MQ são ensinados. Para eles, é discutível a idéia de utilizar analogias com a Física Clássica, como, por exemplo, explicar o átomo de hidrogênio usando a Mecânica Newtoniana ou outras semelhanças clássicas. Esses autores concordam que deve haver uma estratégia didática para abordar esses conteúdos de um modo fenomenológico conceitual, privilegiando os paradigmas quânticos em oposição a analogias clássicas. A maioria também concorda que somente a inclusão da mecânica desenvolvida até o final do século XIX é um contra-senso, pois novas idéias revolucionaram a Ciência de forma radical. Este novo desenvolvimento é tarefa crucial da escola sendo que a Física Moderna deve estar presente no seu currículo. Outros autores destacam que este estudo faz parte do exercício da cidadania, pois esta se baseia em conhecimento mínimo das formas contemporâneas de linguagem e dos princípios científicos e tecnológicos que estão presentes na produção moderna.

Para encerrar esta Introdução, vamos tentar identificar mais claramente qual é o problema de pesquisa e o que se pretende fazer para contribuir com a sua solução.

O que se busca é uma metodologia para ensinar alunos do Ensino Médio a conhecer mais sobre Física Moderna e Contemporânea para que esta sirva para acrescentar a sua cidadania, uma vez que a maioria dos alunos terminarão esta fase de ensino e não mais verão Física, ou por concluírem a sua formação escolar ou por seguir algum curso superior que não tenha como pré-requisito alguma disciplina da Física Moderna. Neste caso específico, trabalha-se com noções de Física Quântica principalmente na sua parte conceitual. A pergunta que fazemos é: *Pode-se ensinar conceitos de Mecânica Quântica aos alunos do Ensino Médio, mesmo que eles não tenham formação adequada para que se possa abordar matematicamente este tópico, utilizando somente as noções básicas da Física do Ensino Médio?* Pode-se ensinar o

que é *quantum*, *fóton*, *efeito fotoelétrico*, *interferência*, *experimento de dupla fenda*, *Princípio de Incerteza* e *Princípio de Superposição de estados*? Ou seja, mais sucintamente, é possível abordar noções básicas de Mecânica Quântica para alunos do Ensino Médio no contexto de uma escola pública brasileira?

O que se pretende demonstrar é que os alunos do Ensino Médio têm potencialidade de compreender a Física Moderna e Contemporânea e que ela pode ser introduzida no currículo das escolas, da forma como está privilegiada nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) ou qualquer outro documento que permita a sua inserção plena no mesmo.

Neste sentido, procurou-se ministrar aulas utilizando o referencial da aprendizagem significativa de Ausubel e Novak, que abordaremos mais adiante, no Capítulo IV. Especificamente, utilizou-se aulas expositivas com ajuda de aparelhos como retroprojetor e vídeo próprios da escola, sua biblioteca e programas de *softwares* de interação que estavam disponíveis no Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), uma vez que a escola não possuía computadores suficientes e nem um *data show* para fazer uma apresentação coletiva. Também foi utilizado, como veremos adiante, um texto produzido pelo autor deste trabalho, abordando estes conceitos, que foi validado por três professores de Física.

No capítulo seguinte será apresentada uma revisão mais extensa da literatura sobre o tema Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Em continuidade, nos capítulos III e IV, abordaremos a fundamentação teórica em Física e em aprendizagem. No capítulo V serão trabalhadas as constituições de dados. Os resultados serão apresentados e discutidos no capítulo VI. Finalmente, no capítulo VII, procurar-se-á sintetizar o trabalho feito.



## CAPÍTULO II – REVISÃO DA LITERATURA

Para fins desse estudo optamos por fazer a revisão de literatura examinando as principais revistas de ensino de Física ou de Ciências, por serem essas publicações as referências mais dinâmicas do desenvolvimento do ensino dessas disciplinas. Portanto, foram pesquisadas: *Revista Brasileira do Ensino de Física*, *Caderno Brasileiro* (antigo *Caderno Catarinense*) *de Ensino de Física*, *Enseñanza de las Ciencias*, *Enseñanza de la Física*, *Investigações em Ensino em Ciências*, *Ciências e Educação*, *International Journal of Science Education*, *Science Education*, *Journal of Research in Science Teaching*, *Physics Education*, *Physics Education Research* (suplementos). Foram pesquisadas as coleções completas das revistas de língua portuguesa ou espanhola. As de língua inglesa foram examinadas somente as dos últimos 10 anos.

No Capítulo I, referimo-nos à introdução da MQ nas escolas da Suécia estudadas por Bergström et al. (2001), numa interpretação de um tema desenvolvido em Copenhague, por Bohr e Heisenberg. Através dos assuntos que estavam ligados à visão teórica das ondas mecânicas, experimentos com ondas mecânicas, luz como partículas e onda, o estudo dos átomos, a relação de incerteza de Heisenberg e perspectiva cósmica. Este curso, como vimos, foi aplicado nos últimos três anos da escola secundária.

Também, naquele capítulo vimos a pesquisa desenvolvida por Olsen (2002), Noruega, que fez um estudo com alunos entre 18-19 anos, da “upper secondary school” com a introdução da MQ, criticando os cursos de nível médio que usam somente temas como a Mecânica Clássica. Lá, desde 1970, está incluída a Física Moderna com os tópicos de raios-X, efeito fotoelétrico, dualidade de onda-partícula e experimentos de dupla-fenda para os elétrons.

Perez et al. (1986), da Universidade de Valência, (Espanha), fizeram um estudo que lida com a introdução da Física Moderna nos currículos das escolas secundárias. Tentaram responder questões do tipo como os conceitos da Física Moderna são introduzidos no Ensino Médio e se os alunos têm um correto entendimento destes conceitos. O desenvolvimento científico contemporâneo implica temas que supõem o manejo de idéias e conceitos próprios do que se conhece em Física Moderna, como a Física Relativista e/ou Quântica. As pesquisas foram feitas em uma amostra de 42 textos de Física e Química de 2º e 3º de *Bachillerato Unificado Polivalente* – BUP – (de 14 a 17 anos) e *Curso de Orientación Universitaria* – COU – (de 17 a 18 anos). Um dos objetivos desta investigação foi também constatar até que ponto o professorado apresenta uma introdução da Física Moderna como ruptura com a Física Clássica. Neste trabalho chegam as seguintes conclusões:

- tanto o professorado como os livros de texto realizam uma introdução desestruturada da Física Moderna, que não se manifesta em ruptura com a Física Clássica e a existência de diferenças entre ambas e que introduz erros conceituais nas idéias básicas da Física Moderna e
- esta conduta provoca que os alunos alcancem uma escassa compreensão da Física Moderna e também da Física Clássica, ao não ter claros seus limites ou as diferenças entre ambos paradigmas.

Os autores sugerem que a Física Moderna parta da crise das concepções clássicas e mostre qualitativamente as características do novo paradigma. Afirmam que estão tentando produzir materiais didáticos com este fim em uma perspectiva de aprendizagem como mudança conceitual e metodológica.

Já Solbes et al. (1987) analisando os cursos 8º de EGB (equivale ao ensino fundamental), 2º e 3º de BUP (ensino médio) e COU (curso de orientação universitária) (Espanha) afirmam que umas das causas principais da persistência dos erros conceituais,

é o fato que os modelos didáticos utilizados geralmente pelo professorado não levam em conta as estruturas conceituais prévias dos alunos, nas quais os novos conhecimentos devem integrar-se e nem tampouco suas tendências metodológicas habituais. Eles chegam à conclusão que os textos apresentam idéias quânticas do átomo de um modo satisfatório, porém existem demasiados erros conceituais nesses documentos. A introdução dos conceitos quânticos é desestruturada e confusa, pelo fato de justapor concepções clássicas, pré-quânticas e quânticas acerca da estrutura atômica, que é uma fonte de erros conceituais. No intuito de tentar simplificar (sem ter que usar a Matemática que está geralmente fora do alcance dos alunos) esses textos baseiam-se em conceitos clássicos, para explicar fenômenos que já abandonaram as concepções clássicas. Na maioria dos casos, os novos aspectos se apresentam sem deixar de dar como “real” e correta a imagem clássica, ignorando que todo o modelo tem suas limitações e que só é útil se se é consciente delas. Segundo os autores citados, limitar a descrição da estrutura do átomo ao modelo de Bohr nos níveis elementares de ensino é algo válido, sempre que se insista simultaneamente nas próprias inconsistências do modelo.

A inclusão da MQ nos currículos de Ciência, conforme Greca (2000), foi feita nas reformas curriculares realizadas em diversos países, como na Espanha e Argentina, com a introdução da MQ. Nos Estados Unidos a discussão está mais avançada pois já tem incluído esse tópico no seu currículo do Ensino Médio e, por isso, preocupam-se no *como* fazê-lo e não se *deve* ser ensinado. O IUPP (*Introductory University Physics Project*) considera que os conceitos principais da MQ não devem ser simplesmente “somados” ao curso tradicional, em que se discute basicamente a Mecânica Clássica e o Eletromagnetismo. O IUPP avalia que esse conteúdo deve permear naturalmente todo o curso introdutório, permitindo aos estudantes familiarizarem-se com “a gramática elementar e o vocabulário da MQ” (Merzbacher, 1990, apud Greca, 2000). Hobson (1996, apud Greca, 2000), indica que esta necessidade surge do fato que a MQ tem impactos práticos que afetam a maior parte das tecnologias da informação e da comunicação. As disciplinas de Introdução à MQ começam com uma “perspectiva histórica” continuando com os distintos modelos atômicos, enfatizando principalmente o modelo do átomo de Bohr, superado há mais de 70 anos.

Já Kragh (1992) chama estas versões standardizadas de “*casi-historia*” pois fortalecem concepções da Física Clássica, dificultando a compreensão da MQ.

Greca e Moreira (2001) sugerem para o Ensino Médio, quatro propostas de abordagens bem diferenciadas:

- histórico-filosófica (Pinto e Zanetic, 1999, aplicaram esta proposta em aulas da segunda série do Ensino Médio, em Guarulhos, SP, baseados em perfis epistemológicos, sobre o conceito de luz, enfatizando a narração histórica, o aspecto filosófico e as atividades experimentais e lúdicas);

- estabelecimento de elos com a Física Clássica (foi aplicado em um curso de Ensino Médio, em Torino, Itália, e foi sugerido por Jones, 1991, a começar a partir da teoria clássica ondulatória e da discussão dos modos de oscilação e das ondas estacionárias, para introduzir a noção de difração dos elétrons);

- apresentação da MQ sem elos com os conceitos clássicos (defendida pelo grupo da Universidade Livre de Berlim, Fischler e Lichtfeldt que para isso deve-se: evitar as referências à Física Clássica, evitar o modelo do átomo de Bohr, explicar os fenômenos observados a partir da interpretação estatística e evitar as descrições dualísticas, evitar iniciar a unidade com fótons e começá-la a unidade com elétrons quando se apresenta o efeito fotoelétrico e introduzir o Princípio de Incerteza) e

- abordagem experimental (a aplicação desta proposta foi feita em Udine, Itália, durante 3 anos, em cursos da última série do Ensino Médio italiano, que consiste na apresentação das experiências de difração e interferência da luz; discussão de aspectos implícitos à descrição da Física Clássica, como causalidade e determinismo; aprofundamento quantitativo sobre efeito fotoelétrico, efeito Compton, experiência de Franck-Hertz e modelos atômicos; interpretação probabilística da função de onda e do Princípio de Superposição; e aplicações destes conceitos para explicar propriedades da matéria como o átomo, o tunelamento e as propriedades elétricas dos sólidos).

Calvacante e Tavolaro (2001) utilizaram a experiência numa oficina pedagógica voltada ao Ensino Médio (conforme já relatada no capítulo I) para apresentar fenômenos sobre interferência e difração. Posteriormente, Cavalcante, Tavolaro e Haag (2005), realizaram outro trabalho com um experimento sobre o quantum de energia e determinação da constante de Planck usando LED's e CD's.

Unal e Zollman (2005) fizeram um estudo investigando a idéia dos estudantes sobre o átomo perguntando individualmente num questionário como descrevê-lo. Nesse questionário foi testado o entendimento dos estudantes sobre a estrutura, seus constituintes e suas localizações aproximadas, o tamanho do átomo, e a energia liberada por um átomo. O estudo categoriza a descrição dos estudantes de um átomo procurando por diferenças estruturalmente significativas que clarificavam como o estudante o descreve. A análise das respostas foi baseada no método fenomenográfico<sup>1</sup> desenvolvido por Marton (1986). Neste estudo não se procurou criar um catálogo de “erros” dos estudantes sobre átomos. Estavam interessados em aprender como estudantes descrevem átomos quando são apresentados diante de questões abertas. Puderam aprender quais idéias principais estão presentes nas crenças dos estudantes quando eles pensam sobre átomos. Portanto, o estudo deles pode servir de base para o desenvolvimento de material instrucional ou estudar o processo pelo qual os estudantes vêm a entender modelos abstratos em Física. Os estudantes envolvidos neste estudo foram escolhidos em cinco diferentes escolas do Ensino Médio. Três destas escolas estavam localizadas em áreas rurais, uma em uma cidade média e outra numa cidade pequena. Questionários foram entregues a estudantes nos graus 9-12, no fim do Semestre da Primavera do ano acadêmico 1995-96, no estado de Kansas (EUA). Foram envolvidos nos testes 239 estudantes. Chegaram à conclusão que maioria dos estudantes não incluíram um modelo em suas descrições. Estudantes que incluíram um modelo nas suas descrições usaram modelos mecânicos, enquanto apenas 3% deles mencionaram alguma coisa sobre conceitos de MQ.

Pinto e Zanetic (1999) fizeram um “mini curso” que foi realizado nas aulas regulares de Física de duas classes do segundo ano colegial, no período noturno, da escola *E. E. P. S. G. “Prof. Roberto Alves dos Santos”*, na cidade de Guarulhos, SP. Essas aulas foram ministradas por um dos autores (A. C. Pinto), professor regular dessas duas classes no ano de 1997. Os dois preocuparam-se em aplicar um pré-teste de avaliação tanto conceitual sobre MQ, descrição da luz, como também uma análise do perfil epistemológico do aluno. Trabalharam durante um período de 12 aulas (sendo elaborado um relatório após cada aula) com um pré-teste, aula expositiva e de laboratório e atividades lúdicas. Em todas as aulas, perguntavam aos alunos antes da exposição ou da experiência o que imaginavam que deveria ocorrer ou qual seria a interpretação possível de cada assunto. As notas de aula foram criadas durante o primeiro semestre de 1997, produto de uma longa pesquisa bibliográfica. Utilizaram

---

<sup>1</sup> Fenomenografia é um “método de pesquisa para mapear os modos diferentes qualitativos no qual as pessoas experimentam, conceitualizam e entendem vários aspectos do mundo ao redor deles”, Marton, 1986.

principalmente o material desenvolvido por Osvaldo Pessoa Júnior (1997), juntamente com os professores de Física da *Estação Ciência* e a dissertação de mestrado de Maria Beatriz Fagundes (1997). Obtiveram deste trabalho uma série de reflexões sobre a possibilidade de introdução da MQ no Ensino Médio. Desenvolveram nesse mini-curso a natureza dual da luz embasados na história e na filosofia da ciência, bem como no conteúdo específico quanto uma estratégia educacional. Nesta experiência educacional procuraram uma aproximação entre o conhecimento da Física Moderna e a Física dos alunos do Ensino Médio, acreditando que a maioria dos alunos aprendeu um pouco sobre Física Quântica.

Num outro texto, falando sobre introdução da MQ no currículo do Ensino Médio, Cuppari et al. (1997) afirmam que os conceitos básicos da MQ podem ser implantados considerando a *ação* da Mecânica Clássica e a introdução da constante de Planck como a granularidade daquela ação. Um exemplo prático do movimento periódico de uma mola permite aos estudantes investigarem os limites da Mecânica Clássica e conceitos tais como o Princípio de Incerteza. Portanto, o principal objetivo da sua abordagem é a introdução da constante de Planck em um estágio inicial no curso de Física. A proposta deles é baseada em quatro pontos:

- usar exemplos clássicos de movimentos periódicos, introduzindo a *ação*, tanto como a área no espaço de fase quanto como produto da energia total e o período;
- a constante de Planck  $h$  é introduzida como *quantum* da ação;
- os limites entre a Mecânica Clássica e *Quântica* são discutidos em termos de taxa entre a ação e movimento e
- a *ação quântica*  $h$  (a ação de movimentos típicos do sistema microscópico é calculada) e a energia de quantização no sistema microscópico são abordados em um nível qualitativo.

Um teste parcial desta representação foi feito em classes de Ensino Médio em Torino, Itália, com alunos do terceiro ano do ‘Liceo Scientifico’. A atividade inicial com laboratório relacionava-se com os diferentes tipos de movimento que foram estudados (uniforme, queda livre, plano inclinado, etc.). Os estudantes foram convidados a representar seus dados usando não somente os diagramas usuais, mas também com as coordenadas do espaço de fase. Os movimentos foram estudados teoricamente, incluindo a análise da energia (cinética, potencial e total). Depois, definiu-se *ação*, entendendo sua dimensão e ordem de magnitude nos diferentes movimentos macroscópicos. Finalmente, a constante de Planck foi introduzida e seu significado discutido em modo muito qualitativo. O tempo total necessário foi de 12 horas, incluindo o teste baseado em questões de múltipla escolha na qual os estudantes foram perguntados e justificaram suas respostas. Segundo os autores, embora parcial, esse teste mostrou que não há nenhuma dificuldade particular em entender a incomum representação de movimentos com as variáveis do espaço de fase, aceitando a *ação* como uma quantidade útil para suas descrições e apreciação, em um nível qualitativo, a ordem de magnitude da constante de Planck.

O trabalho de Stefanel (1998) resume uma experiência de ensino sobre a introdução da Física Quântica no ciclo superior do ensino secundário. Seu objetivo era prover os estudantes de um marco organizado da Física Quântica seguindo as linhas indicadas por dois projetos, Brocca e PNI. Apesar de existirem numerosas propostas sobre o tema, este não pertencia ao currículo da escola secundária. Foi implantado durante três períodos escolares, 1991/92 até 1993/94, com 25-27 alunos de um quinto ano não experimental do “Liceo Scientifico Statale G. Marinelli”, de Udine, Itália. Durante o terceiro ano, a proposta foi enriquecida com as discussões sobre a introdução da Física Moderna na escola, levadas a cabo na “Unidade de Investigación sobre

Didáctica de la Física de la Universidad de Udine”. Além disso, ocorreram as contribuições de A. Sconza e G. Torzo, sobre condução elétrica em sólidos, no âmbito da linha de investigação didática “Física Moderna”, do “Grupo Nacional de Didáctica de la Física”. O rumo didático, que constituiu o eixo da experiência do autor, estava organizado em três partes:

- a primeira, sobre a introdução da *fenomenologia quântica*, foi implantada fazendo uma reelaboração dos temas mais difusos que são encontrados ainda nos textos do nível médio;
- a segunda, dedicada aos fundamentos da Física Quântica, aborda-os segundo a linha proposta por Dirac;
- a última, trabalha aqueles contextos nos quais a quântica pode dar um marco mais completo, como por exemplo, a condução elétrica nos sólidos no enfoque da Física dos semicondutores.

Uma rota didática foi desenvolvida com uma estrutura que se pode sintetizar esquematicamente em quatro níveis de intervenção:

- experiências introdutórias e apresentação de um cronograma de referência sobre o nascimento da teoria dos quântas (5 a 6 horas – são atividades experimentais desenvolvidas que têm servido de base para o processo);
- aprofundamento quantitativo sobre o efeito fotoelétrico e o efeito Compton e o fóton, a experiência de Frank e Hertz e os modelos atômicos e o Princípio de Incerteza (5 a 6 horas – onde são enfocados a introdução das problemáticas não resolvidas pela Física Clássica e o aprofundamento das primeiras hipóteses de quantificação);
- princípios básicos da teoria quântica: interpretação probabilística da função de onda e do Princípio de Superposição (5 a 7 horas – onde são abordados temas próprios da quântica como o princípio da superposição) e
- aplicações dos conceitos da Física Quântica para explicar as propriedades da matéria (6 a 8 horas – refere-se ao emprego de alguns descritivos quânticos e algumas discussões em nível fenomenológico que são relevantes também no plano das aplicações e da tecnologia, como as propriedades elétricas dos materiais).

Esse curso avalia que a aprendizagem e alcance dos objetivos formativos se têm efetuado de maneira diferenciada. Utilizando exposição oral do tipo tradicional sobre a totalidade do curso de Física do quinto ano, incluindo deste modo também os elementos de Física Quântica introduzidos no curso. Foram realizados também seminários conduzidos pelos alunos que se aprofundaram sobre o tema. O debate em classe foi utilizado sempre com a intenção de ser um momento de aprofundamento. A exercitação escrita efetuada forneceu elementos ulteriores de valorização de temas específicos. A maioria (mais de 60 % dos estudantes) teve condições de desenvolver corretamente exercícios numéricos simples (por exemplo, estimativas baseadas na relação de indeterminação) e questões interpretativas (por exemplo, individualizar as hipóteses não quânticas do modelo de Bohr). Um grupo limitado de alunos (ao redor de 20 %) manifestou domínio dos conceitos-chave da Física Quântica quando lhes foram propostas perguntas que exigiam uma elaboração mais profunda desta temática (por exemplo: reconhecimento das órbitas de Bohr em termos de valores esperados da variável posição).

O texto de Terrazzan (1992) comenta que os currículos de 2º grau são todos muitos semelhantes e ainda são pobres. A divisão da Física em nossas escolas é feita com programas de Mecânica, Física Térmica, Ondas, Óptica e Eletromagnetismo e que essa programação não é cumprida totalmente. Muitas vezes, este currículo resume-se em Cinemática, Leis de Newton, Termologia, Óptica Geométrica, Eletricidade e Circuito simples. O autor também não encontra justificativas para essa divisão, dizendo

que muitas vezes são feitas cópias dos manuais estrangeiros do século XVIII, privilegiando, assim, a Física desenvolvida somente entre 1600 e 1850 (apud Terrazzan, 1992, pág. 209). Desse modo, os conteúdos da Física Moderna não chegam aos alunos do Ensino Médio. Terrazzan defende que os conteúdos da Física Moderna e Contemporânea sejam incluídos no currículo do Ensino Médio, pois o entendimento do mundo realizado pelo homem atual é uma forma de abordá-lo como ação participativa e modificadora deste novo mundo. Considera necessário que façam parte deste debate os professores de Física do Ensino Médio. Lembra que para a maioria de alunos a Física escolar do Ensino Médio será o único contato, na sua escolarização formal, com a ciência Física, mesmo para aqueles que seguem o curso universitário na área das ciências humanas.

O texto de Müller et al. (2002, pág. 200) diz que para eles o início do século XX marca não somente a descoberta de uma simples nova teoria como a MQ ou a Relatividade, mas também uma estrutura inteiramente nova para todos os físicos. A Relatividade muda nossas idéias sobre espaço e tempo, e a MQ introduz indeterminismo, probabilidade e não-localidade nas bases da Física. Cidadãos educados teriam de ter, pelo menos, a possibilidade de tornarem-se familiarizados com os estranhos e belos fenômenos quânticos. Porém, a maioria dos estudantes nunca teve a chance de aprender sobre as questões conceituais da MQ. Por exemplo, no “Gymnasium German” (que seria equivalente ao final do nosso Ensino Médio – Alemanha), átomos e quanta são partes padrões do currículo. Contudo, a ênfase está sobre os aspectos tais como efeito fotoelétrico ou modelo atômico de Bohr, que na verdade não testam as concepções clássicas prevalentes na mente dos estudantes. Este novo curso de MQ lida com questões conceituais da mesma e é oferecido principalmente para não-físicos. Os físicos podem confiar nos seus conhecimentos do formalismo da MQ para superar dificuldades conceituais, mas não-físicos não possuem uma tal base como apoio. Assim, o fenômeno estranho e contratuitivo da MQ não pode ser incorporado num quadro de conhecimento coerente sem o cuidado adicional de escolher um conceito básico que ajude a organizá-lo. A estratégia deles é deixar os estudantes descobrirem alguns dos excitantes e bizarros fenômenos quânticos que se afastam dos experimentos clássicos diários. Ao mesmo tempo, podem fornecer uma estrutura conceitual dentro da qual uma compreensão sólida pode ser construída. Dessa forma, utilizaram os capítulos do experimento da dupla fenda abordado por Feynman nas suas famosas *lectures* entre os muitos livros escolhidos. Os estudantes mostram um julgamento errado e confuso sobre as noções clássicas e quânticas para as concepções que os mesmos têm sobre MQ. Para evitar as falsas concepções contraintuitivas da MQ, é preciso conhecer os julgamentos comuns falsos que a instrução tradicional provavelmente promove. Segundo Müller et al. (op. cit.), isto aparece em trabalhos de pesquisa de diversos autores como Masshadi, Styer, Johnston, Crawford e Fletcher, Bao, Redish e Steinberg e Ireson. Desse modo, reportam sobre os resultados de suas próprias investigações que até agora têm sido publicadas somente na literatura germânica. No seu projeto de pesquisa, 523 estudantes do “Gymnasium” responderam um questionário sobre suas concepções da Física Quântica antes de sua introdução. Também foram entrevistados oralmente 27 estudantes. A questão desenvolveu-se desde o fato da questão da medição (“How would you measure an atomic spectrum” – Como você mediria um espectro atômico) para tais interpretações até a sua visão de determinismo/indeterminismo. Também foram entrevistados estudantes universitários (futuros professores de Física) de maneira semelhante. Foi encontrado que 52% deles teriam já ouvido falar sobre MQ na escola, 79% prestaram atenção em alguma leitura de MQ. É considerável que ambos os grupos tenham fornecido respostas similares. Em seguida, tiveram uma visão geral dos

principais juízos falsos encontrados na sua investigação, como, por exemplo, as propriedades dos objetos clássicos, dos objetos quânticos, diferenças entre um objeto clássico e quântico, o que era um “fóton”, como se concebe o elétron num átomo (embora não seja compatível com a concepção da MQ, o modelo de Bohr poderia ser um passo inevitável e intermediário), se podiam ser localizados e o Princípio de Incerteza de Heisenberg. Os resultados obtidos formaram uma base empírica para o desenvolvimento do curso. Para ajudar seus estudantes a construir entendimento correto da MQ usaram, por isso, aquelas características da MQ que são radicalmente diferentes em comparação à Mecânica Clássica. Abordaram os seguintes aspectos: interpretação de probabilidade de Born, o problema clássico da posição, momento ou energia que não podem ser bem definidos e o processo de medida. O curso consistiu de duas partes com objetivos diferentes: 1º) o *curso básico* fez uso de um raciocínio puramente qualitativo; os estudantes exploraram as bases da MQ sem as dificuldades introduzidas pelo formalismo. Laboratórios simulados forneceram um ambiente para as suas experiências, sendo comparados com o estranho comportamento dos quanta e aspectos centrais da interpretação foram discutidos. A estrutura do curso básico era composta pelos fótons (usando o interferômetro de Mach-Zehnder) e elétrons (experimento de dupla fenda) como centrais; 2º) no *curso avançado* é feita uma introdução do formalismo matemático da MQ. Está intimamente unido com a discussão da interpretação da MQ dada no curso básico. A avaliação do curso foi feita em cinco outras escolas do *Gymnasium* com aproximadamente 60 estudantes. Os estudantes foram instruídos pelos seus professores regulares. Em vez do livro didático foram providos com um texto (aproximadamente 100 páginas) contendo os tópicos do curso. Os programas de simulação desenvolvidos no curso foram usados em parte nas salas de aula e também em casa. Foram utilizados diversos instrumentos de medida para avaliar o sucesso do curso:

- questionário sobre a concepção do estudante – o que são átomos, propriedades da MQ, determinismo/indeterminismo e relação de incerteza;
- entrevista com estudantes – entrevistas semiestruturadas foram conduzidas, gravadas, transcritas e analisadas;
- questionário sobre o interesse físico – em ondas e MQ;

Foi feita uma comparação, utilizando-se o índice estatístico C, que permitiu concluir que o grupo experimental teria desenvolvido as concepções mais pronunciadas da MQ que o grupo de controle. As comparações entre os dois grupos sobre as seguintes questões: “Um átomo tem uma estrutura similar ao sistema solar (planetas que orbitam o sol)”, “Se conhecemos as condições iniciais de modo suficientemente preciso, poderíamos prever onde o próximo elétron é encontrado na tela” e “Em princípio, objetos quânticos podem possuir simultaneamente posição e momentum”, mostram que o grupo experimental respondeu adequadamente rejeitando as questões em desacordo com a MQ e melhor que o grupo de controle.

Devemos observar que a maioria dos autores aqui citados que pregam o ensino da MQ consideram não ser necessário uma interpretação junto à Física Clássica, ou seja, defendem que a Física Quântica deve ser ensinada com os seus próprios conceitos procurando mostrar onde a Física Clássica falha na descrição do mundo atômico. Todos são unânimes em afirmar que o ensino da Física Quântica deva ser feito no Ensino Médio (ou no seu equivalente conforme os países).

Além disso, os testes feitos com os alunos mostraram um bom rendimento de aprendizagem da MQ, indicando assim que esta disciplina é aceita como se fosse algum tópico da Física Clássica, ou seja, aparenta apresentar o mesmo grau de dificuldade de um tópico qualquer da Física Clássica.

Perez et al. (1986) dizem: a introdução da Física Moderna deva ser ensinada sob o ponto de vista de ser uma ruptura com a Física Clássica, apontando as diferenças que existem entre elas, ou, em outras palavras, destacar que o surgimento da Física Moderna ocorreu quando a Física Clássica entrou em crise.

A participação de professores do Ensino Médio nesse debate parece ser uma premissa indispensável para a consolidação da inclusão desses conteúdos nos currículos.

Autores como Cavalcante e Benedetto (1999) afirmam que a introdução de Física Moderna no Ensino Médio é um exercício da cidadania pois se relaciona ao conhecimento mínimo das formas contemporâneas de linguagem e dos princípios científicos e tecnológicos atuantes na produção moderna.

Para outros autores não basta só a introdução de conceitos da Física Moderna no Ensino Médio, mas que eles sejam inseridos de forma correta para que os alunos consigam atingir uma compreensão adequada das idéias e conceitos.

Vamos apresentar a seguir, a pesquisa sobre autores de livros de texto que se dedicam ao ensino de Física no Ensino Médio, abordando alguns tópicos de Física Moderna e Contemporânea. A escolha de apresentação dos autores desses livros obedeceu a uma ordem de há mais tempo trabalharem com este assunto, ou seja, de estarem à disposição do aluno há bastante tempo e serem os mais usuais nas livrarias. Não se fez pesquisa daqueles livros que são mais utilizados em sala de aula. Os três últimos livros são mais recentes e por isso foram colocados no fim. Desses do final da lista, foram deixados por último aqueles mais completos em relação à FMC. Em geral, os livros didáticos de nível médio não tratam desse assunto, por esse motivo são relativamente poucos os autores aqui mencionados. Será apresentado um resumo dos tópicos trabalhados pelos seguintes autores: Beatriz Alvarenga e Antônio Máximo, GREF (Grupo de Reelaboração do Ensino de Física que envolve diversos professores da USP – Universidade de São Paulo), Ugo Amaldi, Alberto Gaspar e Paul G. Hewitt.

## ALVARENGA e MÁXIMO

A coletânea de livros do Curso de Física, de Beatriz Alvarenga e Antônio Máximo, apresenta conteúdos de Física Moderna e Contemporânea distribuídos em seus três livros de Ensino Médio. Em geral, no final de cada capítulo usando o título “Um tópico especial – Para você aprender um pouco mais” aborda temas diversos desde desenvolvimento histórico até temas que são de interesse da Física Moderna e Contemporânea. Devemos considerar aqui que Física Moderna e Contemporânea (FMC) leva em conta a Física desenvolvida desde o início do século XX. Finalmente, na edição de 1997, foi reservado no final do 3º volume um apêndice privilegiando desde o microcosmo, macrocosmo até estruturas complexas\*.

Na abordagem feita nos três volumes percebe-se que os textos sobre FMC levam em consideração a compreensão e o desenvolvimento dos temas que estão em perfeita harmonia ao nível do Ensino Médio em que os mesmos estão inseridos.

O primeiro volume destes autores, no capítulo 6, sob o título “Segunda Lei de Newton”, em “Limitações da Mecânica Newtoniana”, assegura que a massa de repouso não é mais constante de movimento como determina a 2ª lei de Newton quando um corpo aproxima-se da velocidade da luz, segundo a Teoria de Relatividade de Einstein. Einstein ainda afirma que a velocidade da luz é o limite de velocidade de um corpo e tem mesmo valor em qualquer sistema de referência.

---

\* que inicia na página 1359 até 1370, o que dá 11 páginas a mais sobre Física Moderna além daquelas já distribuídas pelos diversos volumes.



No segundo volume aparecem diversos tópicos de FMC. No capítulo 9, em “Conservação da Energia”, trata da “Relação massa-energia” da Teoria da Relatividade. Em “O significado da equação  $E_c = \Delta m \cdot c^2$ ”, comenta como um corpo que varia a energia cinética também varia a massa. No item “A redução de massa na fissão nuclear”, fala sobre o funcionamento de uma bomba atômica através da desintegração do urânio. Em “Aniquilação de um par”, de um elétron e de um pósitron, diz que a produção de energia é igual a massa de ambos dada por  $E_c = \Delta m \cdot c^2$ . Em “Potência irradiada pelo Sol”, diz que no seu interior ocorre a  *fusão nuclear*, na qual partículas se fundem para formar átomos liberando uma grande quantidade de energia.

O capítulo 10, sob o título “Conservação da Quantidade de Movimento”, em “A descoberta do nêutron”, fala da aplicação do Princípio de Conservação da Quantidade de Movimento na descoberta do nêutron por Chadwick em 1932. Em “Rutherford e a existência do nêutron”, explica a dedução sobre a existência desta partícula sem carga. Em “A experiência de Chadwick”, mostra como o nêutron foi descoberto, e na “Determinação da massa do nêutron” mostra os cálculos utilizados por ele para determinar a sua massa. Chadwick recebeu Prêmio Nobel de Física, em 1935.

O capítulo 12, no título “Comportamento dos Gases”, temos a “A evolução do modelo molecular da matéria”, seguido por “As primeiras idéias” onde é feito um breve histórico iniciando com o filósofo grego Demócrito (V a.C.) propondo que a matéria é constituída de pequenas partículas – os “átomos”. No Renascimento, os físicos como Galileu, Newton, Boyle, Huyghens, Hooke, admitem o atomismo. Em “Daniel Bernoulli e a Teoria Cinética”, explica como ocorre a pressão em um gás (lei de Boyle). No século XIX, no item “Um valor numérico para a velocidade de uma molécula” conta que Herapath determinou a velocidade média das moléculas de um gás; em “A teoria cinética adquire sua estrutura definitiva”, Clausius apresenta uma Teoria Cinética dos gases que é aceita atualmente e Maxwell e Boltzmann apresentam trabalhos com desenvolvimentos matemáticos. Em “O movimento browniano”, observado por Brown, descreve o movimento de partículas em suspensão num líquido cuja explicação foi dada por Einstein em 1905. Em “Confirmação experimental das idéias de Einstein”, desenvolve equações matemáticas que depois foram confirmadas pelos cientistas da época. Perrin, em 1908, usando as equações de Einstein consegue determinar o número de Avogadro.

O capítulo 15, no título “Reflexão da Luz”, em “A velocidade da luz”, mostra a primeira tentativa frustrada de medi-la feita por Galileu. Em “A velocidade da luz não é infinita”, Roemer, anos mais tarde, mede a velocidade da luz igual a 200 000 km/s, provando que esta não é infinita. Em “A experiência do físico francês L. Fizeau”, realizada no século XIX, consegue-se medir a velocidade da luz com bastante precisão. Em “Os trabalhos de Foucault e Michelson”, em 1862, esses cientistas conseguem um valor da velocidade da luz bastante próximo daquele que conhecemos hoje e em outros meios, como dentro da água. Michelson, americano, em 1932, obteve a velocidade da luz com uma enorme precisão. Em “As enormes dimensões do Universo” define-se o ano-luz e relata-se que os astrônomos verificaram que as estrelas encontram-se agrupadas formando as *galáxias* e que o nosso sistema solar pertence a uma galáxia, a Via-Láctea. Há galáxias perto e muito distantes de nós chegando a centenas de milhões de anos-luz.

O capítulo 16, no título “Refração da Luz”, é dedicado “As idéias de Newton sobre a natureza da luz e as cores dos corpos”, e que o texto da FMC “A fibra ótica” descreve como a luz é refletida através de um material, em geral quartzo. Relaciona os principais usos da fibra no emprego da medicina e da comunicação, como também

transmite informações com eficiência e economia maior que os fios de cobre. É empregada em alguns telescópios para construir um mapa do Universo.

O capítulo 17, sob o título “Movimento Ondulatório” em “O Efeito Doppler”, “O que é efeito Doppler” e “Fonte em movimento e observador em repouso” conta como o físico austríaco Doppler descreve como a frequência do som varia com a aproximação ou afastamento do observador ou da fonte. Em “O efeito Doppler ocorre também com a luz”, relata como ocorre a mudança na frequência da luz do corpo ou/observador em movimento. Em “A expansão do Universo” os astrônomos identificam as substâncias que fazem parte das estrelas quando analisam o seu espectro de luz emitida e concluem que “o Universo está em expansão”.

O volume 3, no capítulo 20, sob o título “Potencial Elétrico”, em “O gerador de Van de Graaff”, em “Altas voltagens necessárias na Física Moderna”, em “Princípio de funcionamento do gerador de Van de Graaff” e em “Como funciona o gerador de Van de Graaff” descreve como obter altas voltagens através deste gerador que é usado para acelerar partículas carregadas para atingirem núcleos e produzirem reações nucleares para serem estudadas pelos físicos. Em “O gerador de Van de Graaff nos laboratórios de ensino”, afirma que o mesmo pode ser utilizado com fins didáticos. Em “A carga elétrica é ‘quantizada’”, diz que os cientistas concluíram que a eletrização é devida ao fato de um corpo ganhar ou perder elétrons, concluindo que a carga elétrica é *quantizada*. Em “A experiência de Millikan” e em “Millikan determina o valor da carga do elétron” descreve a experiência e como ele mediu o valor da carga elétrica, entre 1906 a 1913.

O capítulo 21, no título “Corrente Elétrica”, no subtítulo “Variação da resistência com a temperatura” em “O valor da resistência elétrica de um condutor depende de sua temperatura”, em “A resistência elétrica pode aumentar ou diminuir quando a temperatura aumenta” e em “Por que a resistência elétrica dos metais aumenta quando a temperatura aumenta”, mostra a dependência da temperatura e do material que ela é feita, o coeficiente do material e explica a resistência através da Física Moderna, usando o modelo de elétrons livres na rede cristalina. Em “Por que a resistência elétrica dos semicondutores diminui quando a temperatura aumenta” relata que há algumas substâncias que apresentam maior número de elétrons livres quando sua temperatura aumenta (possuem maior condutividade) e são conhecidas como semicondutores. Em “O que é supercondutividade” menciona como o físico holandês K. Onnes observou que substâncias próximas do zero absoluto tinham resistência praticamente nula, o que foi chamado de *supercondutividade* e neste estado o material é um *supercondutor*. Em “Os supercondutores e a transmissão de energia elétrica”, prevê-se sua aplicação para transmissão de energia elétrica, pois há uma enorme perda de energia através dos fios comuns. Em “Supercondutividade a altas temperaturas”, relata como os cientistas conseguiram, em 1986, novos materiais supercondutores como a *cerâmica* composta por óxidos de cobre. O Brasil também faz pesquisa neste campo. O objetivo é obter materiais supercondutores a temperaturas próximas à ambiente, que possam ser alcançadas pelos processos comuns de refrigeração. Também podem ter emprego como ímã repelente de outro ímã na levitação de trens sobre trilhos supercondutores.

O capítulo 23, sob o título “O Campo Magnético (1ª Parte)”, descreve em “O cíclotron”, em “Partículas com alta energia são necessárias na Física Moderna”, em “Princípio de funcionamento do cíclotron” e em “Como funciona um cíclotron”, como este foi construído pelo físico americano Lawrence, em 1931, com o objetivo de obter partículas com mais energia para as reações nucleares. Em “O que é um sincrocíclotron”, explica que é um aparelho que compensa a massa relativística de partículas. Em “Modernos aceleradores de partículas”, fala do CERN (Conseil Européen

des Recherches Nucléaires – em Genebra) e para pesquisas no campo da Física Nuclear de Altas Energias diz que foi construído o *supersíncrotron de prótons* (SPS), obtendo-se prótons com energia de 50 BeV. No CERN foi colocado em funcionamento o LEP (Large Elétron Positron Collider). Em fase de planejamento encontra-se um acelerador maior: “Superconducting Supercollider” (SSC).

O capítulo 24, no título “O Campo Magnético (2ª parte)” em “A descoberta do elétron” descreve o trabalho que foi desenvolvido pelo físico inglês J. J. Thomson, final do século XIX, quando pesquisava a natureza e as propriedades da radiação, conhecida naquela época por *raios catódicos*. Em “A descoberta dos raios catódicos”, mostra como ela ocorre quando vários físicos estudavam a condução de eletricidade através de gases rarefeitos em um tubo de vidro composto pelo *cátodo* e o *ânodo*, aplicando-se uma alta voltagem entre eles. Sir W. Crookes, em 1875, usando um tubo curvo observa uma luminescência esverdeada na curva, chamando de *raios catódicos*, pois eram produzidos pelo cátodo. Em “Propriedades dos raios catódicos”, coloca um obstáculo em frente ao cátodo e verifica a produção de uma sombra na parede de vidro. Esses raios eram desviados por um campo magnético, portanto não eram ondas luminosas. Em “As experiências de J. J. Thomson”, em 1897, conta como ele mostrou que os raios catódicos também eram desviados por campos elétricos concluindo que eram partículas carregadas negativamente que foram chamadas de *elétrons*. Em “Uma experiência simples que permite obter a razão carga/massa do elétron”, mostra como ele obteve a relação carga por massa em função da voltagem, campo magnético e o raio do aparelho. Em “O elétron está presente no átomo de qualquer substância”, ele consegue sempre o mesmo resultado da relação de carga por massa para o elétron de qualquer substância, concluindo que todos os materiais possuem elétrons. Percebeu, então, que o átomo não seria indivisível, mas constituído de partículas, no caso, o elétron. Mais tarde Millikan conseguiu determinar a carga do elétron com sua experiência da gota de óleo e então pode encontrar a massa do elétron:  $0,91 \times 10^{-30}$  kg.

O capítulo 25, em “Indução Eletromagnética – Ondas eletromagnéticas”, traz na metade do capítulo “As unificações das teorias Físicas” que relata o fato que Ótica e Eletricidade passaram a ser estudadas por meio de uma única teoria, o Eletromagnetismo, unificada pelas Equações de Maxwell e comprovada por Oersted, Ampère e Faraday. Relata que Einstein tentou e não conseguiu unificar as forças gravitacional e eletromagnética. O desenvolvimento da Física Nuclear proporcionou a descoberta das forças: “a nuclear fraca” menos intensa que a força eletromagnética e alcance pequeno (cerca de  $10^{-16}$  cm) e “a nuclear forte” que se manifesta em algumas partículas nucleares com um alcance de cerca  $10^{-13}$  cm. O físico paquistanês Abdus Salam conseguiu fazer a síntese entre as forças eletromagnética e a nuclear fraca. Diversas tentativas estão sendo realizadas para unificar as forças da natureza e esta teoria é chamada “Theory of Everything” (TOE), isto é, “Teoria de Todas as Coisas”. Também aborda “Amplificação da luz por emissão estimulada de radiação – Laser” e no subtítulo “O que é um ‘raio laser’” descreve-o como um tipo de radiação eletromagnética visível, cujo feixe possui intensidade muito alta, a sua luz é monocromática e a luz de um feixe é *coerente* (os feixes de laser estão em fase). Em “Aplicação do laser” apresenta: leitura do código universal de produtos; em telecomunicações; para soldar e cortar metais; para medir, com precisão, distâncias muito grandes; para furar orifícios muito pequenos, com precisão, em substâncias duras; em discos (CD) e vídeo-discos; na holografia e na medicina. Temos “Questões de Interpretação de Textos” como “Microscopia Moderna” que estabelece o comprimento de onda mínimo para enxergar-se um corpo e comenta sobre os microscópicos eletrônicos. Em “A descoberta do Neutrino”, em 1956, comenta a hipótese de Pauli e

Fermi para salvar a lei de conservação de energia, em “O carbono-14 e a idade dos materiais”, descreve o processo do seu decaimento na obtenção da idade dos materiais. Relaciona, no “Efeito Fotoelétrico”, comportamentos da luz sobre a superfície de um metal na obtenção de corrente elétrica, em “Antimatéria” fala de ‘antipartícula’ com propriedade simétrica à partícula e de seu aniquilamento (partícula + antipartícula) e descreve em “Buraco Negro” o processo de sua formação quando a força gravitacional rompe o equilíbrio entre as reações nucleares que ocorrem entre os átomos das estrelas.

Na parte final do livro, temos um Apêndice, sob o título de “A nova Física” e o subtítulo “Uma visão panorâmica”, onde é dada uma pequena visão da Física que se desenvolveu no final do século XX. Em “O que é a Nova Física” afirma que as idéias da *Teoria da Relatividade* e da *Teoria Quântica* pertencem geralmente à *Física Moderna*. Nesta “Nova Física” existem vários ramos como a Cosmologia (enormes conjuntos de galáxias), a Física de Partículas (os fragmentos menores de matéria), Física dos Materiais (estendendo-se aos estranhos comportamentos inclusive de células vivas) etc.. Em “O mundo do muito pequeno – Quais são as partículas elementares” questiona a palavra *átomo* já que ele é constituído de inúmeras partículas (próton, nêutron, elétron, entre outras). O cientista japonês H. Yukawa prevê a partícula *méson* que descreve a força que mantém unidos os prótons e nêutrons, cuja existência foi comprovada pelo físico brasileiro César Lattes, em 1947. Outras partículas foram previstas e detectadas como os neutrinos, os pósitrons, outros mésons e antipartículas. Verifica-se, nos aceleradores de partículas, que muitas daquelas partículas primitivas são compostas por outras. As partículas pesadas, como nêutrons, chamadas atualmente de *hádrons*, apresentam estrutura interna compostas de partículas mais leves e realmente elementares denominadas *quarks*. Os *léptons*, que são partículas leves, tais como o elétron, o pósitron, o neutrino e outras, não possuem estrutura e por isso são indivisíveis. Em “No interior dos hádrons” o físico americano Murray Gell-Mann propôs uma teoria em que os hádrons seriam compostos de partículas, chamando-as de quarks, com carga elétrica fracionária do elétron ou do próton. Algumas previsões de Gell-Mann foram confirmadas e em 1969 recebeu o prêmio Nobel da Física. Doze quarks diferentes tiveram que ser previstos para que fosse possível montar a estrutura interna dos hádrons. Por exemplo, sendo o quark *u* (*up*: igual a 2/3 da carga do próton) e quark *d* (*down*: igual a 1/3 da carga do elétron), chega-se à estrutura do próton com a presença de dois quarks *u* e um quark *d* originando uma carga elétrica igual a 1 e o nêutron seria formado de um quark *u* dois quarks *d* com carga total 0. Apesar de ainda não ser possível obter isoladamente um quark há várias evidências diretas de sua existência. No subtítulo “O mundo do muito grande”, em “A nova teoria gravitacional”, a teoria de Newton apresenta-se bastante modificada e ampliada pela teoria da gravitação ou pela Relatividade Geral de Einstein (em 1915), que é usada atualmente para os cientistas interpretarem os fenômenos do Universo. O novo “laboratório” astronômico envolve novos objetos, tais como buracos negros, estrelas de nêutrons, galáxias e quasares, a enormes distâncias. Neste novo campo, a busca de uma *radiação gravitacional* que seria emitida pela matéria é um dos principais objetivos da pesquisa no campo da “Nova Física”, do século XXI. Em “O desenvolvimento da Cosmologia” comenta a constatação do astrônomo E. Hubble, que observa que o universo está em expansão, surgindo teorias sobre a origem do universo, como o “Big-Bang”. Em 1965, outra descoberta feita pelos cientistas R. Wilson e A. Penzias verificaram a existência de uma radiação cósmica, que parecia circundar o universo desde a sua criação com o Big-Bang. Em “Origem do universo – Big-Bang” descreve o que teria ocorrido com o universo antes e logo após o Big-Bang. Estima-se que a idade do universo seja de 20 bilhões de anos. No subtítulo “O mundo das estruturas complexas”, em “Outra direção

no campo de estudo da Física”, relata sobre os sistemas complexos que começaram ser analisados pelos físicos recentemente, devido ao desenvolvimento dos computadores eletrônicos. Os físicos acreditam que o comportamento dos sistemas complexos, tais como flocos de neve, organismos vivos em geral, condições atmosféricas e do tempo, como aqueles que ocorrem na natureza podem ser explicados com o uso das leis da Física, desde que conhecidas as suas condições iniciais e de contorno. Em “A tendência à auto-organização dos sistemas complexos”, discute alguns exemplos que podem apresentar comportamentos coerentes (como as funções exercidas pelos órgãos do corpo humano), realizando atividades altamente cooperativas. A equipe de Ilya Prigogine estudou o comportamento de sistemas afastados do equilíbrio termodinâmico. Os fenômenos biológicos, os mais auto-organizados, já eram estudados pelos biólogos quando os físicos começaram a pesquisá-los, dando origem a um ramo da “Nova Física”. Em “O hélio tomado como modelo para o estudo de materiais complexos e superfluidez do hélio líquido” descreve como vem sendo estudado o seu comportamento há mais de 50 anos, permitindo estudar melhor a Física dos líquidos e dos sólidos. O estudo do hélio líquido tem colaborado para o desenvolvimento da “Física da Matéria Condensada”. Os prêmios Nobel da Física foram concedidos aos físicos russos P. Kapitza, em 1978, pela descoberta da superfluidez e, em 1962, a L. Landau por explicar este fenômeno sob a visão da Física Quântica. Em “Comportamento caótico da natureza” analisa o sistema de  $10^{23}$  átomos, embora seja complicado, ele pode se auto-organizar tendendo para uma situação na qual um grande número de átomos movem-se conjuntamente. Às vezes, sistemas mais simples, com um ou dois graus de liberdade, podem comportar-se de maneira mais complexa. Alterando um pouco suas condições de força ou movimento num objeto de comportamento previsível, ele deixa de ser determinístico e atinge um comportamento caótico. Isto tem sido encontrado em diversos sistemas, como: fluidos em escoamento turbulento, condições atmosféricas, fibrilação cardíaca, população de insetos, reações químicas etc.. Porém, dentro do *caos* pode-se encontrar uma certa ordem matemática. Caos e auto-organização estão relacionados, pois, se um sistema passa de uma transição de auto-organização tende a evidenciar transições que conduzem a um comportamento caótico.

A idéia geral no desenvolvimento da FMC destes livros reúne experiências e teorias feitas ao longo do século passado para o desenvolvimento tanto da Teoria da Relatividade Restrita como a nova teoria do átomo, visto de uma forma puramente clássica da partícula sem entrar em interpretações ondulatória. A Mecânica Quântica aparece mais como um nome próprio (ela é citada poucas vezes nos livros) de uma nova disciplina do que propriamente uma explicação da natureza. Talvez seja uma falha fundamental nesta coleção, apesar do interesse de ser introduzida a FMC, que se manifeste só falando da Mecânica Clássica.

Portanto, nesta trilogia da Física Clássica é possível encontrar diversos tópicos sobre Física Moderna e Contemporânea. Os textos são bem escritos e perfeitamente articulados, apresentando relativa facilidade de interpretação, mantendo a fidedignidade da Física, como fica evidente no resumo apresentado aqui. Apesar de ser descrita em textos a partir da Física Clássica, o que se pode prever é que a Física Moderna e Contemporânea aí concebida, só terá atenção especial se o professor da disciplina interessar-se pelo tema e não se preocupar apenas com conteúdos voltados ao currículo do Ensino Médio ou para provas de Vestibular. Porém, se fôssemos considerar as provas do vestibular veríamos que alguns destes conteúdos são abordados nelas, principalmente nas Universidades Federais.

Uma outra coleção de Física, editada pela EDUSP (Editora da Universidade de São Paulo), conhecida pela sigla GREF (Grupo de Reelaboração do Ensino de Física) foi elaborada por professores universitários e por professores da Escola Pública do Estado de São Paulo. A coleção é voltada para o Ensino Médio e inclui textos de FMC que estão apresentados principalmente no volume de Física 3 – Eletromagnetismo.

Na seção 3.3.6, em “A interação elétrica no átomo e na matéria”, descreve como o átomo está organizado em seus principais componentes mais elementares, o próton, o nêutron e o elétron. Salienta que as cargas negativas “ficam movendo-se em torno do núcleo” devido à força elétrica que existe entre elas. Fala da formação das moléculas, propriedades elásticas dos sólidos, propriedades dos líquidos (tais como viscosidade e tensão superficial), e dos gases e dos plasmas devido a essas forças elétricas.

Na seção 5.3, em “Modelo de Átomo: Caracterização e Pressupostos”, descreve o que ficou conhecido na Física por “átomo de Bohr”, com os elétrons se movimentando ao redor do núcleo em suas órbitas, “formando uma espécie de nuvem”. Nesta abordagem afirma que na eletrosfera “há regiões onde existe maior *probabilidade* de se encontrar um elétron”. Chama essas regiões de *camadas* onde cada uma deve obedecer ao Princípio de Exclusão de Pauli quanto ao número de elétrons (ou seja, não pode ter dois elétrons com os quatro números quânticos iguais para um mesmo átomo), em órbitas determinadas, correspondendo a um nível de energia do átomo relacionando-se com a distância ao núcleo. Descreve níveis de energia do átomo de hidrogênio e que no modelo quântico o elétron de um átomo é representado por quatro números quânticos, que indicam distância ao núcleo, a forma da órbita, o momento magnético e o spin.

Na seção 5.4, em “Os Diferentes Comportamentos Elétricos dos Materiais quanto à Condução Elétrica: Um modelo baseado na Física Quântica”, observa que nos sólidos e líquidos a medida em que os átomos se aproximam, os níveis energéticos se superpõem, gerando uma quantidade maior de níveis permitidos para serem ocupados por elétrons formando a *banda de energia* desses materiais. Nelas os saltos quânticos correspondem a fótons de baixa energia que podem ser assumidos como valores contínuos. Comenta sobre a banda de valência, a banda livre (a banda de condução) e com base na separação entre estas bandas, classifica os materiais em isolantes, condutores e semicondutores.

Apesar de esta coleção abordar menos FMC em temas específicos, principalmente quando fala em campos elétricos, o seu comentário está bem na esfera da compreensão do Ensino Médio. Apesar de só considerar o modelo de átomo de Bohr, dá uma descrição sobre os quatro números quânticos, probabilidade de localização do elétron, órbitas como uma espécie de nuvem, nível e banda de energia, o Princípio de Exclusão de Pauli, superposição de níveis energéticos, saltos quânticos banda de valência e de condução, entre outros. Estes textos procuram aproximar-se mais do modelo quântico do que do clássico. Contudo, também não aprofundam a diferença entre o modelo atômico ondulatório, particulista ou outros modelos. Não comentam nada sobre a Teoria da Relatividade ou sobre Sistemas Complexos e também não se preocupam em fazer um desenvolvimento das principais experiências e suas idéias do século XX que vieram fundar a nova FMC.

UGO AMALDI

O livro a seguir a ser examinado é o de Ugo Amaldi, “Imagens da Física – As Idéias e as Experiências, do Pêndulo aos Quarks”, que é um livro didático do Ensino

Médio. Apesar de não abordar FMC ao longo do volume, no seu final dedica dois capítulos: “A Relatividade e os Quanta” e “Radiatividade, Fissão e Fusão Nuclear”.

No Capítulo “A Relatividade e os Quanta”, aborda seis tópicos diferentes. O primeiro, “A invariância da velocidade da luz”, comenta que ela é sempre a mesma independente do referencial estar em repouso ou em movimento.

O tópico “A teoria da Relatividade Restrita” argumenta que Einstein parte da observação experimental de que a velocidade das ondas eletromagnéticas é a mesma em todos os sistemas de referência. Fala sobre o tempo *absoluto* proposto por Galileu em que seria possível sincronizar relógios em qualquer parte do universo, desde de que os sinais viajassem instantaneamente. Porém, a teoria da Relatividade tornou “relativos” os conceitos de tempo e simultaneidade. Acrescenta ainda a questão da equivalência massa e energia.

O tópico “Os quanta de luz” interpreta a radiação emitida pelos corpos quentes, como surgiu a constante  $h$ , a constante de Planck, introduzida por este como conceito de *energia quantizada* para explicar esta radiação. Segundo essa teoria, a luz emitida pelo Sol ou por uma lâmpada não consiste de um fluxo contínuo de ondas eletromagnéticas (como afirma a teoria clássica) porém da emissão de um enorme número de pacotes de energia, os *quanta de luz*. Einstein, em 1905, retoma essa idéia para explicar o *efeito fotoelétrico*, não explicado pela Física Clássica.

Em “Propriedades Corpusculares da luz”, diz que os fótons (que define como os quanta do campo eletromagnético) têm propriedades semelhantes às de um corpúsculo e por outro lado têm propriedades semelhantes a uma onda (frequência bem-definida).

O tópico “O modelo de átomo de Bohr” discute a teoria da Física Clássica de Maxwell que afirma que as cargas aceleradas irradiam ondas eletromagnéticas (energia) e, assim, os elétrons orbitais deveriam irradiar ondas eletromagnéticas, colapsando com o núcleo. Como não há perda de energia, o físico dinamarquês Bohr propõe, em 1913, um modelo atômico que afirma que um elétron pode estar apenas em órbitas determinadas, podendo mover-se nelas no máximo dois elétrons (segundo o Princípio de Exclusão de Pauli). Descreve os níveis do átomo de hidrogênio e que os elétrons só são promovidos de uma órbita à outra em determinados níveis de energia.

O tópico “Física Moderna e Física Clássica” comenta sobre o surgimento de uma nova Física a partir da teoria de Bohr: a Mecânica Quântica. Esta teoria consegue explicar as propriedades dos átomos e moléculas e não faz mais sentido falar na trajetória de uma partícula, mas na *probabilidade* da sua localização. Fala sobre os limites da Física Clássica frente a Relatividade Restrita e a Mecânica Quântica.

O outro capítulo, “Radiatividade, fissão e fusão nuclear”, fala sobre as propriedades do núcleo atômico que constituem um enorme setor da FMC.

O tópico “Os núcleos dos átomos” comenta o que há dentro do núcleo e quais são as suas dimensões. Em 1925, Rutherford e Chadwick utilizaram o choque das partículas alfas em núcleos para fazer observações sobre colisões e deduzir o seu tamanho, chegando à conclusão que os núcleos eram formados por prótons. Em 1932, encontraram uma nova partícula presente no núcleo: o nêutron. Assim, fica esclarecida a estrutura do núcleo constatando um novo tipo de força atrativa entre as partículas do mesmo, a força nuclear, que mantém o núcleo coeso. Os núcleos emitem radiação eletromagnética de altíssima energia recebendo o nome de fóton gama, assim como os elétrons em níveis excitados irradiam quando decaem para órbitas menores.

O tópico “Radiatividade Natural” interpreta o fato que existem na natureza elementos químicos cujos núcleos são *instáveis*, emitindo espontaneamente uma partícula. Os núcleos radiativos podem decair de dois modos: emitindo uma *partícula alfa* (2 prótons e 2 nêutrons) ou uma *partícula beta* (um elétron), acompanhados da

emissão de fótons gamas. Toda substância radiativa se transmuta, com o passar do tempo, em outra, quando acontece a radiatividade. Essa transformação define o que é meia-vida.

O tópico “Interação fraca e os quarks” aborda de que no decaimento beta há emissão de um elétron mas ele não existe dentro do núcleo. Assim, considera-se que o nêutron é instável, desintegrando-se espontaneamente e *transformando-se* num próton, elétron e um neutrino do elétron. Em 1933, o físico italiano Fermi explica o fato de que um par *elétron + neutrino* é criado pela ação da força chamada de *interação fraca*. O decaimento pode ser também explicado através da transformação de um quark *down* em *up* pois há três quarks no próton (dois *up* e um *down*) e no nêutron (um *up* e dois *down*).

O tópico “Aplicações dos radioisótopos” descreve as aplicações dos mesmos: os traçadores radiativos, a terapia de tumores e a produção de energia. Como *traçadores radiativos* têm aplicações em diagnósticos médicos. Em *terapia de tumores*, utiliza-se a energia emitida por uma fonte de isótopos radiativos para destruir células cancerosas. Na *produção de energia* obtém-se uma fonte de calor quando reunimos uma porção de isótopos radiativos. Dispositivos deste tipo são usados nos satélites que têm missões distantes do Sol, pois não podem converter a luz solar em energia.

Em “Reatores a Fissão”, define energia de reação (Q) para reações nucleares. Explica que nas reações nucleares, os *núcleos* e os *corpúsculos* (próton, nêutron, partícula alfa,...) se combinam originando outros núcleos e outros corpúsculos produzindo energias da ordem de *alguns milhões* de elétron-volts, muito maiores que nas ligações químicas. As reações nucleares são aquelas que liberam energia (há aquelas que absorvem energia) e podemos encontrar de dois tipos de reações:  *fusão* e *fissão*. Na fusão, quatro núcleons se *fundem* originando o átomo de hélio e isto ocorre principalmente no interior do Sol e das estrelas. A *fissão de elementos pesados* é provocada pelo nêutron que atinge um núcleo, por exemplo, de urânio. Este se divide em dois fragmentos atômicos intermediários, três nêutrons e são liberados 200 Mev de energia, aproximadamente. Isto foi descoberto pelos alemães O. Hahn e F. Strassmann, em 1939. A liberação destes nêutrons provoca os mesmos efeitos em outros núcleos de urânio circundantes. Descreve o processo de como utilizar esta energia liberada em energia útil. Fala do *núcleo reator* e as *barras de controle* que são usadas para absorver os nêutrons excedentes e controlar o processo de reação em cadeia (a fissão nuclear).

Em “Opção Nuclear”, descreve os tipos de reatores nucleares para produção de energia elétrica que chegam a produzir uma potência de 1000 MW. Os problemas básicos na adoção de reatores à fissão em sua produção energética são: o armazenamento dos radioisótopos de longa vida (o chamado ‘lixo atômico’), a possível utilização do plutônio na construção das bombas nucleares e os acidentes nucleares (já ocorreram acidentes graves em reatores como em Chernobyl, na Ucrânia). Discute-se também a utilização de reatores de diferentes tipos, como os da França e da Itália. Pesquisa-se reatores de “segurança intrínseca” que, uma vez desligados, consomem o calor produzido pelo decaimento dos radioisótopos obtidos na fissão, impossibilitando os acidentes nucleares, porém são mais caros e menos potentes.

O último tópico “Reatores a Fusão” prevê que no século XXI uma parte da produção de energia elétrica será produzida por reatores à fissão. Porém, prevê também que uma parte da energia será substituída por fontes renováveis e segura, como a energia solar (que produzem até alguns megawatts), a energia eólica e, talvez, a fusão nuclear. Esta é uma fonte renovável, pois os elementos usados neste processo são leves e muito abundantes na Terra, ao contrário dos usados nos reatores à fissão. Descreve o plasma atômico como sendo um gás eletricamente neutro em seu conjunto, constituído de íons de cargas positivas e elétrons. Encontramos o plasma em estrelas, no vento solar



e na ionosfera terrestre. Para produzir um plasma aqui na Terra é preciso conseguir altas temperaturas para que ionize o gás e que vença a repulsão coulombiana que as partículas exercem entre si. Assim, é necessário levar a massa reagente a uma temperatura muito alta e mantê-la nessas condições por um certo tempo. Porém, um dos problemas mais difíceis nesse processo é o do *confinamento do plasma*, pois este jamais pode entrar em contato com as paredes, pois se resfriaria imediatamente. Um processo de fusão conhecido é do *confinamento inercial*; outro processo de fusão idealizado por uma equipe de Moscou chefiada por L. A. Artsimovitch é o *tokamak*. A Comunidade Européia estuda o confinamento pela ação de campos magnéticos, além de outro construído na Grã-Bretanha, o JET (*Joint European Torus*), o NET (*Next European Torus*) que deverá atingir altas temperaturas e produzir energia no início do século XXI.

Com menos tópicos sobre FMC do que o livro de Alvarenga e Máximo, relaciona algumas diferenças fundamentais entre a Relatividade e Mecânica Quântica e a Clássica. Dá importância ao conceito de fóton e procura estabelecer uma diferença entre onda e corpúsculo. Fala sobre o quantum de ação de Planck descoberto com a radiação emitida pelos corpos quentes e a explicação do efeito fotoelétrico feita por Einstein. Contrapõe a trajetória da partícula com a probabilidade de sua localização. Comenta sobre o desenvolvimento da Mecânica Quântica feita por Bohr e sobre as órbitas localizadas com seus níveis de energia bem definidos. Relaciona as experiências de Chadwick com o descobrimento do próton e nêutron e a revelação da força nuclear e a liberação do fóton gama no processo da radiação nuclear. Comenta sobre os elementos químicos instáveis, a transmutação das substâncias, a meia-vida, a interação fraca e os quarks. A liberação de energia produzida pelos reatores a fissão e a fusão nuclear.

Observa-se que nestes livros apresentados, a maioria deles fala sobre Mecânica Quântica, porém, da maneira como é apresentada, confunde-se esta Mecânica com a Mecânica Clássica, não fazendo distinção entre uma e outra, como se as duas não tivessem diferenças fundamentais de princípios. Como dizem Greca, Moreira e Herscovitz (2001) “...ensinar Mecânica Quântica não é uma tarefa fácil. Seus princípios fogem da visão clássica do mundo que possuímos, fazendo que a maioria deles leve a conseqüências ‘antituitivas’.” Por exemplo, quando os livros falam do átomo dão somente a interpretação clássica do átomo de Bohr, dando a entender que algum princípio novo que não está previsto na Mecânica Clássica é para salvá-la, e não é visto como um fenômeno fundamental da Mecânica Quântica. Talvez fosse esperar muito que esses livros didáticos que falam sobre Física Moderna e Contemporânea entrassem nesta questão com mais aprofundamento, como perceber se haveria diferenças entre o paradigma da Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica. Percebemos que a maioria dos livros didáticos que são mais popularmente adotados não abordam nenhum tipo de material relacionado à Física do século XX. Na verdade, a principal preocupação que a maioria das pesquisas aponta, está relacionada com a aplicação de princípios de FMC ao nível de Ensino Médio nas escolas brasileiras, enquanto, em outros países como na Europa e nos Estados Unidos, a preocupação já passa a ser *o quê* ensinar ao nível de Ensino Médio (Greca e Moreira, 1999).

ALBERTO GASPAR

Um pouco diferente da situação das obras anteriormente analisadas é a de Alberto Gaspar que se divide em três volumes, onde distribui a FMC em quadrinhos (azul ou preto, dependendo se é História – H –, Cotidiano – C –, Física moderna – Fm –, Gramática da Física – Gf –, Tecnologia – T –, Nota – N – ou Ensaio – E – Discussão – D – e Aprofundamento – A) distribuídos pelos volumes. No volume 3 –

Eletrromagnetismo e Física Moderna – dedica quatro capítulos específicos à Física Moderna: fótons, relatividade, raios X e quarks. É uma das obras mais completas sobre este tema ao nível de Ensino Médio. Nestes capítulos faz um estudo mais aprofundado sobre os conceitos de partículas e ondas e é discutido em “Onda x partícula” o seu caráter dual mostrando que partículas podem comportar-se como ondas e vice-versa. Na Relatividade, além de apresentar certas equações procura esclarecê-las com exemplos e expõe o espaço-tempo de Einstein. Na explicação dos raios X, constata a sua descoberta, classifica-os como onda e apresenta sua aplicação na medicina. Fala também na proposta das partículas quarks como realmente elementares para substituir a vasta coleção de partículas descobertas pelos físicos ao longo do século XX. Há uma preocupação em acrescentar os quatro tipos de interações que estão presentes na natureza. Sua primeira edição é de 2000, por isso deve ser um livro ainda pouco conhecido pelos professores de Física.

O volume 1 – Mecânica – capítulo 1, título “Introdução”, temos “Einstein e o eclipse solar de Sobral em 1919” (C) na qual é testada a Teoria da Relatividade Geral usando o eclipse solar para mostrar que a luz sofre a ação gravitacional e que o espaço é curvo. No tópico “Aplicações tecnológicas” fala do uso dos raios X na medicina, da bomba atômica e da pesquisa tecnológica utilizando aceleradores nucleares como o *superproton synchroton* entre outros.

O capítulo 8, título “Movimentos sob a ação da gravidade – II” em “A descoberta do elétron” (Fm) menciona a experiência de J. J. Thomson usando os raios catódicos no interior de um tubo de vidro cheio de gás rarefeito.

O capítulo 9, em “As leis de Newton” em “As quatro interações fundamentais da natureza” (Fm), comenta que a *Interação gravitacional* é devida à massa, atrativa e de longo alcance; a *Interação eletromagnética* é devida à carga, atrativa ou repulsiva e de longo alcance e mais intensa que a gravitacional; a *Interação forte* que mantém o núcleo coeso e estável, é a mais intensa das interações de alcance  $10^{-15}$  m e devida à propriedade semelhante à carga elétrica, chamada “cor”, comenta sobre as cores que compõem os prótons e nêutrons (os hádrons), descrita pela teoria da *cromodinâmica quântica* e a *interação fraca* que é responsável pela radioatividade natural, pelo brilho das estrelas (e do Sol), e um alcance quase nulo mas  $10^{10}$  vezes mais intensa que a interação gravitacional. Os físicos procuram fazer a “grande unificação” de todas as teorias em uma única teoria de interação. Em “A relatividade da massa” (Fm) afirma que quanto maior a velocidade de um corpo maior a sua massa, segundo a Teoria da Relatividade.

O capítulo 15, título “Energia”, em “Formas de energia” (Fm) relaciona a massa de repouso  $m_0$  e energia através da famosa fórmula de Einstein:  $E = m_0c^2$ .

O capítulo 17, “Impulso e quantidade de movimento” menciona no subtítulo “As colisões no mundo subatômico”, as colisões quase sempre elásticas (para estudar a estrutura dessas partículas) e “superelásticas” com o aumento da energia cinética.

O capítulo 18, “Gravitação”, em “Einstein, a gravitação e a Teoria da Relatividade Geral” introduz o *Princípio da Equivalência* que afirma que a atração gravitacional e a aceleração são equivalentes que é o conceito fundamental desta Teoria.

O volume 2 – Ondas, Óptica e Termodinâmica – no capítulo 2, em “Ondas” em “Onda x partícula” (Fm) constata-se que ondas, às vezes, comportam-se como partículas e vice-versa, como é o caso do elétron comporta-se como onda, pois também sofre o fenômeno de difração, como as ondas. Em 1923, o físico francês de Broglie propõe que todo corpo microscópico fosse, a um só tempo, onda e partícula, como é o caso do elétron. Bohr formula o *Princípio da Complementaridade* que a luz pode ter caráter

corpuscular ou ondulatório, dependendo do experimento. Em “O átomo de Bohr e as ondas estacionárias” (Fm) os átomos se constituíam de elétrons que giram em torno do núcleo e segundo a Física Clássica estes “cairiam” em direção ao núcleo. Bohr, em 1913, sugere a existência de órbitas permitidas e de Broglie propõe que o elétron em torno do núcleo estivesse associado a uma onda estacionária o que foi comprovado pelo comprimento de onda associado ao elétron é exatamente o mesmo ao comprimento da primeira órbita circular modelo do átomo de Bohr.

O capítulo 4, “Som e música”, em “Christian Johann Doppler” (H), descreve o deslocamento Doppler no espectro luminoso das estrelas, e Huggins notou que as estrelas tinham um desvio para o vermelho que indica que o universo está em expansão.

No capítulo 5, “Ondas e luz” em “Fontes de radiações eletromagnéticas” (A) expõe a transição dos elétrons entre camadas mais externas do átomo, produzindo o raio X.

O capítulo 7, “Refração da luz – I”, em “A velocidade da luz e o espelho de Einstein” (Fm) relata um experimento de pensamento no caso de um espelho viajar à velocidade da luz, não seria possível ver nada refletido pois esta não atingiria o espelho. Resolve o problema propondo que a velocidade da luz seja inatingível, e que ela não pode ser ultrapassada.

O capítulo 8, “Refração da luz – II”, em “Aplicações em fibras ópticas” (T) e a sua praticidade na substituição de fios de cobre e a segurança de informação de dados.

O capítulo 11, “Óptica ondulatória”, em “Os fótons – natureza corpuscular da luz” (Fm) comenta que a luz tem comportamento corpuscular: os fótons. Têm massa de repouso nula e só existem em movimento sendo que a radiação eletromagnética é constituída de fótons. Em “O laser – luz coerente” (A), em 1917, Einstein sugeriu que fossem produzidos fótons em fase pela *emissão estimulada* de elétrons excitados. Em “A medida da velocidade da luz” descreve os processos da sua medição, em 1675, feitos pelo astrônomo dinamarquês Römer, através dos satélites de Júpiter, após o de Fizeau, com sua roda dentada, depois pelo físico francês Dominique Arago, com seus espelhos girantes, depois Foucault que também a mediu dentro d’água, com Michelson, que realizou experiências, entre 1878 e 1932, com espelho girante de oito faces e o físico escocês John Kerr, em 1929, com o auxílio das *células Kerr*.

O capítulo 16, “As leis da termodinâmica – II”, em “A Terceira Lei da Termodinâmica” (Fm) discute a possibilidade de todos os corpos estarem em repouso absoluto, no zero absoluto, o que não é permitido pela quântica e que o zero absoluto, segundo Nernst, em 1906, seria um estado de ordem absoluta das partículas.

O volume 3 – Eletromagnetismo e Física Moderna, – no capítulo 1, “Introdução à eletricidade”, em “Partículas elementares” (Gf) critica o seu significado considerando que não havia mais sentido em falar de átomo ou das outras quase 200 partículas descobertas até que surgiu a proposta dos *quarks* em 1966. Em “As colisões e a Física Moderna” (Fm) onde as colisões entre partículas são utilizadas para estudar a estrutura delas, descreve o princípio de funcionamento da *câmara de bolhas*, com a formação de rastros que permitem estudar as partículas do mundo subatômico. Como os quarks *up* e *down* formam “A carga elétrica do próton” (N).

O capítulo 3, “Potencial elétrico”, descreve “Elétron-volt” (Fm) e seus múltiplos.

O capítulo 5, “Corrente elétrica”, em “Camadas eletrônicas” (Fm) refere-se a elas como uma idéia do físico N. Bohr, em 1913, que são regiões onde a probabilidade de se encontrar um elétron é maior, pois nunca será possível determinar onde ele está.

O capítulo 6, “Resistividade e geradores químicos”, em “Camadas eletrônicas” (Fm) aponta como os físicos desvendaram o comportamento dos gases nobres através de estudos da Mecânica Quântica.

O capítulo 8, “Campo magnético”, em “Rastros e propriedades de partículas elementares” (Fm) explica que, se conhecendo o raio da trajetória, a velocidade e a carga da partícula pode-se calcular sua massa. Em “O ciclotron” (Fm), descreve o funcionamento destes aceleradores para estudar partículas. Em “O espectrógrafo de massa” (Fm), diz como determinar a massa de uma partícula usando um campo elétrico e magnético.

A partir dos capítulos seguintes, em quase todos os capítulos referentes à FMC são apresentados “Exercício(s) resolvido(s)” (Er(s)) que ajudam sua compreensão.

Capítulo 11, “Das ondas eletromagnéticas aos fótons”, no subtítulo “A natureza corpuscular das ondas eletromagnéticas”, no tópico “O efeito fotoelétrico”, descreve o modelo clássico desenvolvido por Hertz, em 1887, e Phillip Lenard sobre seu comportamento e o desenvolvimento dado por Einstein, em 1905, relacionando a constante de Planck ( $h$ ) com a fórmula da energia cinética máxima. Em “Quanta” (Gf) (plural) e o quantum (singular) termo que surgiu no início do século XX a partir dos trabalhos de Max Planck sobre a emissão da radiação dos corpos aquecidos. Também tem “Aplicações do efeito fotoelétrico e semelhantes” (T). O caráter corpuscular da luz é discutido no tópico “A experiência de Mayer e Gerlach” que é uma associação da “A experiência de Millikan” (H) onde mostra o dispositivo da experiência. No tópico “A dualidade onda-partícula” expõe sobre o comportamento ondulatório na experiência da dupla fenda tanto para ondas como para partículas (mostra figura de interferência). Em “O comportamento individual dos fótons” (A) comenta a primeira tentativa, em 1920, do físico britânico Taylor, de observá-lo sozinho. No tópico “O eletromagnetismo, a óptica e os fótons” (Fm) explica que é mais fácil aceitar que existam partículas portadoras, que se propagam pelo espaço, como os fótons, transportando energia e viabilizando essas interações; em fios elétricos têm os portadores de carga, os elétrons, e os portadores de energia, os fótons, e explica a refração de luz através dos fótons.

O capítulo 12, “Relatividade”, nos tópicos “Os postulados da Teoria da Relatividade Restrita”, afirma que as leis da Física são as mesmas em qualquer sistema de referência e a velocidade da luz é invariante; em “A impossibilidade da simultaneidade” discute se podemos ter dois eventos simultâneos; em “A dilatação do tempo” discute a relação entre o tempo próprio,  $\Delta t_0$ , e o intervalo de tempo,  $\Delta t$ , (Ers); em “A relatividade das velocidades” apresenta a soma das velocidades com a correção relativística, diferente das *transformações galileanas* (Er). Em “Quantidade de movimento e massa relativística”, “Energia relativística”, “Energia e quantidade de movimento relativísticos” e “Conclusão” relata uma breve discussão de cada assunto apresentando suas equações e no último tópico conclui que: a simultaneidade não existe; o tempo não transcorre da mesma maneira em referenciais inerciais móveis; há redução de comprimento e a massa do corpo tende ao infinito próximo à velocidade da luz e há partículas sem massa. Em “A longa vida do múon” (A) discute a dilatação temporal sofrida por ele. Em “A Teoria da Relatividade Geral” (E), discute a questão de se em um elevador acelerado pode existir uma experiência em que um observador saiba se está sob a ação de um campo gravitacional uniforme ou se é um referencial uniformemente acelerado, a *curvatura do espaço-tempo* e a igualdade da massa inercial e gravitacional.

O capítulo 13, “Dos raios X aos quarks – I”, nos tópicos “Os raios X e a radioatividade”, em 1895, mostra como Röntgen descobriu os raios X usando um sal de bário que impressionava uma chapa fotográfica, um trabalho de Becquerel usando urânio com uma emissão espontânea de radiação e as pesquisas de Marie Curie com outros elementos mostraram que emitiam três radiações distintas, além do raios-X, alfa, beta e gama. Em “Raios catódicos, raios beta, elétron” relata a descoberta e a relação entre os raios catódicos e o elétron e como Thomson obteve a razão entre a carga e

massa do mesmo. Em “Radiação térmica” relata as primeiras experiências com um *corpo negro* (Ers). Em “O enigma do espectro da radiação térmica” descreve o desenvolvimento da lei de Wien, em 1896 (Er). Em “O quanta de ação” fala de como Planck descobriu a sua famosa constante “h”. Em “O átomo de Rutherford” discorre como ele obteve a primeira evidência experimental da estrutura do átomo bombardeando um fina lâmina metálica com partículas alfa. Em “O espectro do átomo de hidrogênio”, explica como, em 1884, o matemático e professor secundário sueco J. J. Balmer obtém a expressão empírica dos comprimentos de onda das raias visíveis do espectro de hidrogênio (Er) e apresenta a “Constante de Rydberg” (N). Em “O átomo de Bohr” (1913) usando o quantum de ação de Planck consegue decifrar a descontinuidade da fórmula de Balmer. Afirma que as órbitas dos elétrons seriam estáveis, chamando de *órbitas estacionárias*, o que contraria a Mecânica Clássica ao afirmar que elas seriam instáveis. Explica o *espectro de emissão e absorção* dos elétrons (Ers). Em “A experiência de Frank-Hertz” comprova a teoria de Bohr quanto aos saltos quânticos serem permitidos somente para determinados níveis de energia. Em “A difração dos raios X”, obtida, em 1912, por Max von Laue, sugere que é um fenômeno ondulatório comprovando a sua natureza eletromagnética.

O capítulo 14, “Dos raios X aos quarks – II”, nos tópicos “O spin do elétron” relata a experiência de Stern-Gerlach, em 1921, para sua descoberta. Em “Pauli e o princípio de exclusão”, em 1925, afirma a proibição de dois elétrons com os quatro números quânticos iguais em um mesmo átomo. Em “As ondas de matéria” de Broglie, atribui propriedades ondulatórias à matéria, tendo-se “Onda x partícula” (A) (Er). Em “A mecânica ondulatória” de Broglie atribui às ondas estacionárias o comprimento da órbita de um elétron de determinado raio deveria conter um número inteiro de comprimento de onda. Em “As mecânicas quânticas de Heisenberg e Dirac” (H), mostra que Heisenberg trabalhou com matrizes diferentemente de Dirac, e em “Deus joga dados?” (D) Einstein rejeita a idéia estatística do comportamento dos átomos. Em “O Princípio da Incerteza”, relata que é impossível obter com exatidão o momento e a posição ou a energia e o tempo de uma partícula. Em “O efeito Compton” (A) realça o caráter corpuscular da luz e como a observação altera o objeto observado (Ers). Em “O nêutron e o pósitron” relata a descoberta da *antimatéria*, em 1932, pelo físico Carl Anderson. Em “O neutrino e a conservação da energia”, fala sobre a formulação da hipótese de uma partícula sem massa (o neutrino) para salvar a lei da conservação de energia no *decaimento beta*; “O novo modelo atômico e o núcleo” relaciona a analogia entre o comportamento dos prótons com os elétrons. Em “Camadas e números mágicos do núcleo” (A), relaciona a estabilidade com certos números de núcleons e em “O spin dos núcleos e a ressonância magnética nuclear” (T) comenta a alteração do spin devido a um campo magnético oscilante e sua aplicação na medicina. Em “Energia nuclear”, comenta sobre a energia obtida na fusão dos átomos, explica o *defeito de massa* (Er), mostra um gráfico da razão da energia de ligação de um núcleo pelo número de núcleons em função do número de massa. Explica a fusão nuclear em “Fusão nuclear: origem da vida” (A) descrevendo a fusão de átomos de hidrogênio e a formação do hélio com liberação de energia e também a *fissão nuclear* (Er). Em “Um novo tipo de partícula” comenta sobre a possibilidade de partículas no interior do núcleo, feita por Yukawa, para mediar a interação entre os núcleons e a sua descoberta do *múon* em 1947 pelo físico brasileiro César Lattes, e comenta a “Interação e troca de partículas” (D). Em “A Física de partículas”, no item “A busca da ordem no caos”, os físicos americano Gell-Man e alemão Zweig, em 1964, afirmam que as partículas consideradas como elementares, tais como os prótons e nêutrons, eram compostas por outras que seriam verdadeiramente elementares. Em “Hádrons e quarks”, comenta a descoberta dos *quarks*

por Gell-Man, a *carga de cor*, a composição dos prótons e nêutrons com quarks *up* e *down* e os *antiquarks*. Em “Léptons” que são partículas fundamentais e não participam da interação forte. Em “Bósons e as quatro interações fundamentais”, comenta sobre partículas do grupo *férmions* – que obedecem à estatística proposta por Fermi – e das suas partículas mediadoras, aquelas que tornam possível a interação entre os férmions que são os *bósons* – obedecem ao tratamento proposto por Bose-Einstein – e as quatro interações: forte, eletromagnética, fraca e gravitacional descrevendo as partículas responsáveis por cada interação. Em “Conclusão” fala sobre as novas concepções da Física para explicar o que a Física Clássica não pode mais fazer.

PAUL G. HEWITT

A seguir analisaremos outro livro de volume único, “Física Conceitual”, de Paul G. Hewitt, cuja primeira tradução em português ocorreu, em 2002, feita por Trieste Freire Ricci (do Instituto de Física da UFRGS) e por Maria Helena Gravina e revisão técnica por José de Holanda Calvacanti. Neste livro, há sete capítulos que estão voltados especificamente para a Física Moderna sendo que seis deles localizam-se no final do volume. Devemos notar que de todas as obras citadas esta é a única que comenta sobre a Teoria da Relatividade Geral de Einstein com mais profundidade, encontrando-se no último capítulo. Faz parte da apresentação do livro a exposição de pequenos quadros “Teste a si mesmo”, com perguntas teóricas sobre cada um dos tópicos desenvolvidos e com suas respectivas respostas em outro quadro “Verifique suas respostas”. O livro é bastante ilustrado de forma que ajuda na compreensão dos textos. Em geral, no final de cada capítulo aparece uma relação bibliográfica, dada pelo autor, para maior aprofundamento do leitor.

O capítulo 9, em “Gravidade”, nos tópicos “A teoria de Einstein da Gravitação”, “Buracos Negros” e “Gravitação universal” discorre sobre a formulação de Einstein para um modelo gravitacional, diferente da de Newton, admitindo um campo gravitacional como uma curvatura geométrica no espaço-tempo tetradimensional, uma vez que os corpos produzem deformações no espaço-tempo. Com este modelo explica os buracos negros comentando que nenhum corpo, nem a luz, poderia sair dele uma vez que entrasse em queda livre. Explica o buraco de minhoca, *Big Bang* e *Big Crunch*.

O capítulo 11, “A natureza atômica da matéria”, inclui os tópicos seguintes: Em “A hipótese atômica”, faz um breve histórico sobre a idéia do átomo a partir dos gregos no século V a.C., das idéias do químico inglês, John Dalton, do desenvolvimento do botânico escocês Robert Brown, e da explicação dada por Einstein ao *movimento browniano*. Em “Os elementos atômicos”, menciona os diversos e numerosos elementos que compõem a natureza, e um modelo clássico atômico proposto por Rutherford, em 1911, e aperfeiçoado por Bohr. Em “Imagens atômicas”, apesar de não podermos vê-los individualmente usando microscópio comum e potente, em 1970, foi obtida uma cadeia de átomos individuais de tório (não foi obtido com luz comum) e um recente microscópio de varredura eletrônica obteve a imagem de 48 átomos de ferro. Em “O elétron”, fala do desenvolvimento da descoberta do elétron, do tubo de Crookes, que era um tubo fechado contendo gás a baixa pressão com eletrodos em seu interior por onde passava corrente elétrica. Isto fazia o gás brilhar e foram chamados de raios catódicos. Em 1897, o físico inglês J. J. Thomson mostrou que os raios eram formados por partículas muito menores que o átomo, que foram chamadas de elétrons, determinando também da razão carga por massa do elétron, Na experiência do físico neozelandês Rutherford, em 1909, que utilizou partículas alfas golpeando um fina lâmina de ouro para medir o tamanho do núcleo atômico. Em “O próton”, os cientistas concluíram que

o núcleo do átomo neutro era composto por prótons com igual número de elétrons, que estão em camadas esféricas. Os elementos são classificados pelos números de prótons definindo assim o *número atômico* e descreve a *tabela periódica dos elementos*. Compara-se a razão da massa pela carga de diferentes núcleos e verifica-se que eles não são formados por somente prótons, portanto a massa adicional se deve a uma outra partícula, o *nêutron*, que não tem carga mas tem massa aproximadamente igual ao do próton. Define *unidade de massa atômica (u)* e *número de massa atômica*. Em “Quarks”, aparece uma nova partícula mais fundamental que os prótons e os nêutrons, os *quarks*. Em “Antimatéria”, descreve-a como sendo composta por átomos com núcleos negativos e elétrons positivos, ou *pósitrons*, respectivamente com a mesma massa e o encontro da matéria e antimatéria provoca o seu aniquilamento emitindo luz. Em “Matéria escura”, finalmente, explica que a matéria que conhecemos aqui na Terra também está presente em todo o universo (estrelas, planetas), porém existe uma quantidade de massa apreciável que não podemos ver diretamente e foram chamadas de *matéria escura*, mas que atrai estrelas e galáxias que podemos ver e estima-se que ela componha 90% da massa do universo.

O capítulo 14, em “Gases e Plasmas”, no tópico “Plasmas” e subtópicos “Plasmas no mundo cotidiano” e “Energia do plasma”, descreve o plasma como um gás eletrizado contendo íons e elétrons livres, sendo que a maior parte do universo se encontra na fase do plasma.

O capítulo 19, em “Vibrações e Ondas”, no tópico “Efeito Doppler” afirma que a luz sofre também este efeito como acontece em galáxias que apresentam um deslocamento para o vermelho, ou seja, estão se afastando de nós, e isto permite o cálculo de suas velocidades.

O capítulo 30, em “Emissão da luz”, no tópico “Excitação”, define o estado *excitado* do elétron que é quando ele está num nível mais alto de energia e ao retornar ao seu estado de mais baixa energia emite um pulso oscilante de radiação eletromagnética, chamada de *fóton* (pensando ele como sendo um corpúsculo de pura energia – uma “partícula” de luz). Define a constante de Planck,  $h$ , e a frequência do fóton sendo diretamente proporcional à energia dividido por  $h$ .

O capítulo 31 ressalta, em “Os quanta de luz”, os tópicos seguintes: Em “O nascimento da teoria quântica”, descreve a teoria feita pelo físico alemão Max Planck afirmando que os corpos aquecidos emitiam energia radiante em “pacotes” discretos que ele chamou de *quanta*. Com esta teoria revolucionou a idéia de como pensamos sobre o mundo físico, surgindo então a *teoria quântica*. Em “A quantização e a constante de Planck”, a energia de um fóton é dada por  $E = hf$ , sendo  $f$  a frequência da radiação e  $h$  a constante de Planck e esta equação expressa a menor quantidade de energia que pode ser convertida em luz de frequência  $f$ , contrapondo o mundo granulado e grosseiro da Física Quântica ao invés do suave e contínuo do mundo clássico. Em “O efeito fotoelétrico”, os pesquisadores, no final do século XIX, notaram que a luz podia ejetar elétrons de várias superfícies metálicas e a teoria ondulatória clássica não explicava corretamente tal fato, sendo que o esclarecimento do *efeito fotoelétrico* foi dado por Einstein em 1905, argumentando que a luz possui propriedades corpusculares, que também foi comprovada experimentalmente por Millikan. Do ponto de vista quântico, a luz possui propriedades que lembram ser partículas ou ondas, dependendo do experimento realizado. Em “Dualidade onda-partícula”, compara a granulação de uma fotografia lentamente revelada com poucos fótons ativando grãos de cristais de prata formando granulações. Em “O experimento da fenda dupla”, de Young, obtém-se um padrão de interferência comum mesmo que a fonte emita um fóton por vez durante um longo tempo de exposição, semelhante ao padrão de interferência provocado por ondas

e quando se cobre uma fenda espalham-se em leque para gerar um padrão de difração de fenda única. Ou seja, cada fóton individual possui propriedades ondulatórias bem como corpusculares. Em “Partículas como ondas: difração de elétrons”, comenta que o físico francês Louis de Broglie mostrou que uma partícula material e massiva pode possuir propriedades corpusculares e ondulatórias, pois o experimento de fenda dupla com elétrons produz o mesmo caráter de interferência como ondas. Em “O Princípio da Incerteza”, destaca que interação de fótons usados para medir a velocidade de coisas microscópicas altera o movimento deles produzindo uma incerteza ou em sua posição, ou em seu momento, ou entre sua energia e a duração da medição da energia. Em “Complementaridade”, relata que Niels Bohr observou que tanto a luz como os elétrons exibem características de onda e partícula, sendo que os fenômenos quânticos exibem propriedades complementares (mutuamente exclusivas), pois as propriedades ondulatórias e corpusculares da luz complementam-se, uma vez que ambas são necessárias para a compreensão da luz (chamou de *complementaridade*). Em “Previsibilidade e Caos”, há a explicação sobre a previsibilidade de sistemas ordenados – tanto quânticos como newtonianos – os quais dependem de nosso conhecimento das condições iniciais e estes sistemas podem não estar ordenados e são chamados de “sistemas caóticos” (como o fluxo de água, o clima).

O capítulo 32, “O átomo e o quantum” registra os tópicos seguintes: Em “A descoberta do núcleo atômico”, apresenta novamente o experimento de Rutherford. Em “Os espectros atômicos: pistas da estrutura atômica”, descreve a descoberta das linhas espectrais pelo professor suíço J. J. Balmer para o átomo de hidrogênio e a regularidade encontrada por Rydberg na soma das frequências. Em “O modelo atômico de Bohr”, apresenta o modelo planetário adaptado ao átomo idealizado por Bohr desde que os elétrons “ocupassem” estados “estacionários”. Os elétrons só podem realizar “saltos quânticos” com determinadas energias. Dá uma explicação para os raios X. Em “Os tamanhos relativos dos átomos”, argumenta que os átomos são aproximadamente iguais, pois quando se acrescentam prótons nos núcleos eles diminuem a distância dos elétrons em relação ao núcleo. Em “A explicação para os níveis de energia quantizado: ondas de elétron”, de Broglie, usando o fato que uma onda está associada com a partícula, ou seja, *ondas de matéria*, explica que há uma órbita de Bohr onde uma onda eletrônica fecha-se sobre si mesma, com interferência construtiva consigo mesma, e assim o elétron seria como se sua massa e carga estivessem espalhadas em torno do núcleo. Para a primeira órbita teria um comprimento de onda, para a segunda órbita dois comprimentos de onda e assim por diante, e que no modelo atômico mais moderno, a onda eletrônica espalha-se tridimensionalmente (como uma espécie de “nuvem”). Em “A mecânica quântica”, conta como o físico austro-alemão Schrödinger, usando as ondas de matéria de de Broglie, formula uma equação análoga a da equação de Newton (aceleração = força/massa), sendo o que chama de “onda” é a *amplitude de onda* que é imaterial – uma entidade matemática chamada de função de onda representada pela letra grega psi ( $\Psi$ ) – que representa as possibilidades do que pode acontecer a um determinado sistema. Por exemplo, a localização de uma partícula pode ser calculada quando se eleva ao quadrado o módulo da função de onda ( $|\Psi|^2$ ), originando a *função densidade de probabilidade* que representa um “orbital” atômico. Em “O princípio da correspondência”, articulado por Bohr, afirma que para uma nova teoria seja válida, ela deve explicar os resultados comprovados da teoria antiga.

O capítulo 33, em “Núcleo atômico e radiatividade” apresenta os tópicos seguintes: Em “Raios X e radioatividade”, relata como Roentgen descobriu os raios X, no início do século XX, que são ondas eletromagnéticas de alta frequência emitidas pelo decaimento de elétrons mais internos, e os trabalhos de Becquerel e Curie que podiam



produzir imagens sobre um filme. Os elementos radioativos emitem radiações que foram chamadas de “Radiações alfa, beta e gama”, (2 prótons e 2 nêutrons, elétron e radiação eletromagnética oriunda do núcleo atômico, respectivamente) que podem ser separados por campos magnéticos. Em “O núcleo”, dá o tamanho, a carga, os níveis de energia, a forma dos núcleos e a composição (mais de 200 partículas) com a descrição dos *quarks*. Explica o que são “Isótopos”. Em “Por que os átomos são radiativos”, explica que os prótons não são expulsos do núcleo por causa da presença da força nuclear de curto alcance que é a *interação forte*, que atua entre os prótons, nêutrons e os *mésons* (todas eles chamados de *hádrons*), sendo que devido ao aumento de número de prótons, aumenta a repulsão e ocorrem emissões de partículas alfa e beta. Em “Meia-vida”, define como sendo o tempo para que decaia metade da quantidade original de um determinado isótopo radioativo. Alguns tem meia-vida curta ( $10^{-6}$  s) e outros de até longos 4,5 bilhões de anos e descreve “Detectores de radiação”. Em “Transmutação natural de elementos”, apresenta a transformação de um determinado elemento químico em outro pela radiação da partícula alfa ou beta. Em “Transmutação artificial de elementos”, relata que, em 1919, foi obtida por Rutherford a primeira transmutação artificial quando bombardeou núcleos de nitrogênio com partículas alfa liberando um oxigênio e um próton. Em “Isótopos radioativos”, informa que todos os elementos tornam-se radioativos quando bombardeados por nêutrons ou outras partículas. Eles são muito utilizados na indústria (como em “Irradiação de alimentos”) e medicina. Em “Datação pelo carbono”, salienta que tanto o carbono-12 como o carbono-14 existentes na atmosfera é retirado do ar pelas plantas que são consumidas pelos animais. O carbono-14 emite uma partícula beta e decai para o nitrogênio e quando a planta morre a substituição cessa. Uma percentagem de carbono passa a diminuir a uma taxa constante, dada pela sua meia-vida radioativa. Em “Datação pelo urânio”, o destaque é no emprego de isótopos U-238 e U-235 usados para a datação de coisas inanimadas. Em “Efeitos da radiação sobre seres humanos”, analisa a radioatividade natural e artificial, buscando acabar com o mito da radiação artificial, falando ainda da unidade da energia de radiação ionizante absorvida.

O capítulo 34, em “Fissão e fusão nucleares” há os tópicos seguintes: Em “Fissão nuclear”, expõe o delicado equilíbrio entre a atração nuclear e a repulsão elétrica entre os prótons do núcleo influenciando no formato do núcleo até que ele se rompe. Isto acontece com o U-235 quando ele absorve um nêutron liberando duas outras partículas, grande quantidade de energia e três outros nêutrons que poderão dar prosseguimento ao processo (isto é, a reação em cadeia). Discorre a respeito da massa mínima necessária para que ocorra o processo de fissão (*massa crítica*) e da bomba atômica que destruiu Hiroshima, no Japão, em 1945. Em “Reatores de fissão nuclear”, explica a primeira pesquisa de um *reator nuclear*, conduzida, em 1945, nos Estados Unidos, pelo físico italiano Enrico Fermi. Em “O plutônio”, fala como o U-235 sofre fissão quando captura um nêutron. É uma substância tóxica também, mas seu maior benefício potencial está na sua utilização em reatores regeneradores. O reator regenerador, tem o objetivo de gerar mais combustível nuclear do que lhe foi fornecido, mas a desvantagem é a enorme complexidade exigida para o funcionamento bem sucedido e seguro. Em “Energia de fissão”, apresenta as desvantagens da energia nuclear que são a produção de lixo nuclear radioativo, a produção de plutônio e a proliferação de armas nucleares, mas os benefícios são a produção de eletricidade, a conservação de carvão mineral, petróleo e gás. Em “Equivalência massa-energia”, afirma que a massa do núcleo não é a soma simplesmente dos núcleons individuais que o compõem sendo que a diferença de massa está relacionada com a “energia de ligação” do núcleo (ou seja, igual a  $E = mc^2$ ). Exibe um gráfico de massa média por núcleon

versus número atômico, revelando que o átomo de ferro tem a menor massa média por núcleon o que significa que ele é o átomo mais estável. Em “Fusão nuclear” mostra que, conforme o gráfico, a energia é ganha quando os núcleos leves se fundem o que é chamado de *fusão nuclear*. Isto ocorre no interior do Sol (os átomos de hidrogênio se fundem formando o átomo de hélio e liberando energia). Em “Fusão controlada”, esclarece que poderá ser construído um reator nuclear a fusão desde que se consiga altas temperaturas e que serão usadas “paredes magnéticas” para prender os gases quentes que formarão o plasma, confiná-los e fundi-los. Descreve outros tipos de confinamento do plasma usando *lasers* de alta energia.

O capítulo 35, em “A teoria especial da relatividade”, apresenta nos tópicos seguintes: Em “O movimento é relativo”, compara os movimentos de corpos. Em “O experimento de Michelson-Morley”, mostra que onde este pretendia medir a diferença dos tempos do percurso da luz que ia a favor e contra o movimento orbital da Terra, mas não foi observada nenhuma alteração. Isto foi interpretado pelo físico irlandês FitzGerald como sendo um encurtamento no aparelho por um fator  $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$  para compensar a presumida variação da velocidade da luz. A explicação veio, em 1905, dada por Einstein. Em “Os postulados da Teoria Especial da Relatividade”, afirma ser a luz invariante para qualquer sistema de referência em que esteja o observador. Todas as leis da natureza são as mesmas em todos os sistemas de referência que se movimentem em movimento uniforme. Em “Simultaneidade”, descreve um observador e uma lâmpada acesa no interior de uma nave que se move e observa eventos simultâneos que ocorrem aí, mas um outro observador fora dela e em repouso não verá esta simultaneidade. Em “O espaço-tempo”, afirma que as coisas existem não só por estarem no espaço, mas também elas existem no espaço-tempo, cuja razão entre espaço e tempo estão relacionados pela velocidade da luz,  $c$ , que é a constante unificadora entre diferentes regiões entre espaço-tempo. Esta é a essência do postulado de Einstein. Em “Dilatação temporal”, descreve que no interior de uma nave estão dois espelhos paralelos, uma fonte de luz entre eles e um observador que mede um tempo para o deslocamento da luz entre um espelho e outro. Para um outro observador, que vê a nave viajando a metade da velocidade da luz, observará o tempo de ida e volta da luz entre os espelhos dilatado por um fator  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ ; portanto, quanto mais rápido viaja um relógio mais lentamente parece ele funcionar. Em “A viagem do gêmeo”, discute o paradoxo dos gêmeos no qual aquele que viaja próximo a velocidade da luz não envelheceu o mesmo tempo do outro que ficou na Terra. Em “Adição de velocidades”, mostra que a adição de velocidades próxima a da velocidade da luz não é a mesma do que aquela do nosso cotidiano. Em “Viagens espaciais”, fala da impossibilidade de alcançarmos enormes distâncias (milhares de anos-luz) com a tecnologia atual e o que podemos enxergar das estrelas é o seu passado. Em “Contração do comprimento”, explica que um objeto contrai seu comprimento quando viaja próximo à velocidade da luz. Em “Momentum relativístico”, interpreta o fato de que quanto maior a velocidade de um corpo maior o momentum de uma partícula. Uma interpretação clássica é que a massa aumenta com a velocidade, que para Einstein estaria errado pois é o fator  $\gamma$  que se altera com a velocidade mantendo a massa como uma constante. Concluiu que uma partícula jamais poderá ser impulsionada à velocidade da luz e a luz jamais poderá ser trazida ao repouso. Em “Massa, energia e  $E=mc^2$ ”, Einstein ainda afirma que um pedaço de matéria em repouso possui “energia de existência” ou *energia de repouso*, ou seja, é necessário que exista energia para existir massa. Para  $E = m c^2$ , o fator  $c^2$  seria um “fator de conversão”, convertendo a medição da massa em medição de energia equivalente, ou seja, massa e energia são a mesma coisa. Obtemos as mesmas equações

de Newton quando usamos para  $v \rightarrow 0$  nas equações de Einstein, então elas obedecem “O princípio da correspondência”.

O capítulo 36, “Teoria geral da relatividade”, apresenta os seguintes tópicos: Em “Princípio de equivalência”, observa que segundo Einstein é impossível distinguir aceleração (quando isolado de um sistema de forças) de gravitação estabelecendo o *princípio de equivalência*. Em “Desvio da luz pela gravidade”, argumenta que observamos uma bola arremessada lateralmente dentro de uma nave, a bola “cairá” no seu piso com uma trajetória curva e para um observador fora dela verá a trajetória em linha reta. O mesmo valerá para um feixe de luz, pois segundo a teoria de Einstein a gravidade puxa a luz, do mesmo modo que a mecânica newtoniana faz com os corpos massivos, porque energia e massa são equivalentes. Mais tarde postula que a luz se curva porque ela se propaga no espaço-tempo com geometria curva, o que foi comprovado durante o eclipse solar, em 1919. Em “Gravidade e tempo: o desvio para o vermelho gravitacional”, na relatividade geral, o desvio para o vermelho (diminuição da frequência devido a aceleração) depende da *localização* de um ponto em relação ao outro no campo gravitacional. Ou melhor, sob o ponto de vista de um fóton que sai de uma estrela, ele é “retardado” pela sua gravidade, perdendo energia (mas não velocidade), sua frequência diminuindo ( $E = hf$ ) e no caso do buraco negro ele perde toda sua energia, a frequência vai a zero, e ele não pode escapar. Assim, a taxa com o qual o tempo passa na estrela colapsante se aproxima de zero. Em “Gravidade e espaço: o movimento de Mercúrio”, descreve que da teoria especial da relatividade sabemos que as medidas do espaço e tempo sofrem variações quando a velocidade está envolvida, e na teoria geral da relatividade as medidas do espaço diferem entre si em diferentes campos gravitacionais (próximo ou longe do Sol, por exemplo). Os planetas que orbitam ao redor do Sol *precessionam*, e esta precessão seria mais forte quanto mais perto estivesse do Sol (como o Mercúrio) segundo Einstein. Este fato fez com que a sua teoria fosse reconhecida como uma nova teoria da gravidade. Em “Gravidade, espaço e uma nova geometria”, considera um sistema acelerado como um disco em rotação numa vitrola. Uma régua no centro do disco não sofrerá contração, uma régua na borda sofrerá contração conforme a relatividade geral, o perímetro da circunferência diminui porque  $\pi$  não é mais o mesmo. Uma régua perpendicularmente colocada sobre o disco também não sofrerá contração. Com estas considerações observa-se que as distâncias do espaço dependerão da intensidade do campo gravitacional, onde a geometria euclidiana não poderá ser mais usada (a soma dos ângulos de um triângulo retângulo não é mais  $180^\circ$ ), se o espaço for curvo positivamente (maior que  $180^\circ$ ) ou curvado negativamente (menor que  $180^\circ$ ) o que implica uma nova geometria. Assim, pode-se dizer que a presença da massa resulta na curvatura ou dobra do espaço-tempo e, ao mesmo tempo, uma curvatura no espaço-tempo revela-se como massa (não se fala mais em força de ação à distância). Em “Ondas gravitacionais” descreve que qualquer objeto massivo produz onda gravitacional, quanto mais massivo o objeto em movimento e quanto mais forte sua aceleração, mais forte é a onda gravitacional produzida. Em “Gravitação newtoniana e gravitação einsteniana” ressalta que, quando Einstein formulou a sua nova teoria de gravitação, suas equações deveriam reduzir-se às equações newtonianas para a gravitação, no limite dos campos mais fracos, pois a lei de Newton de gravitação é uma descrição ainda cuidadosa da maioria das interações fracas entre corpos no sistema solar e além, e elas ainda são utilizadas na interação entre planetas, asteróides e órbitas de cometas.

Nestas obras apresentadas e resumidas constatou-se que os princípios da Física Moderna e Contemporânea estão sendo cada vez mais estudados. Na coleção de

Alvarenga e Máximo, precursores da Física Moderna e Contemporânea em livros didáticos observa-se que nas primeiras edições eles se preocupavam principalmente com a Relatividade Restrita e na última edição abordam outros tópicos, como o microcosmo, macrocosmo e estruturas complexas. Já a coleção do GREF aborda os componentes elementares do átomo, um pouco da Mecânica Quântica usando o modelo de Bohr que se justifica naquele contexto e quando descreve certos materiais elétricas que são baseados na Mecânica Quântica. O volume único de Ugo Amaldi privilegia “A Relatividade e os Quanta” e “Radiatividade, Fissão e Fusão Nuclear” no final do volume. Alberto Gaspar além de distribuir a Física Moderna ao longo dos 3 volumes, no volume 3 – Eletromagnetismo e Física Moderna – dedica quatro capítulos específicos à Física Moderna: fótons, relatividade, raios X e quarks. Finalmente, Paul G. Hewitt dedica sete capítulos para a Física Moderna desenvolvendo desde “A teoria de Einstein da Gravitação”, “Buracos Negros”, “Gravitação universal”, o buraco de minhoca, *Big Bang*, *Big Crunch*, “A natureza atômica da Matéria”, “Gases e Plasma”, “Excitação dos elétrons”, “Quanta de luz”. Esta é a única que obra comenta sobre a Teoria da Relatividade Geral de Einstein.

O que podemos destacar é que nos últimos anos têm aparecido coletâneas de Física abordando a Física Moderna e Contemporânea que influenciarão, sem dúvida, as demais obras tradicionais sobre este assunto, facilitando a inclusão destes temas no Ensino Médio.

### CAPÍTULO III – ESTRUTURA ATÔMICA DA MATÉRIA E DISCUSSÕES SOBRE INTERPRETAÇÃO DA MECÂNICA QUÂNTICA

O critério utilizado na escolha dos conteúdos desenvolvidos foi o de trabalhar aqueles que o autor achou com maior potencial de se ter uma aprendizagem significativa (segundo Ausubel e seu seguidor Novak, que veremos no capítulo IV). Nesta apresentação de um breve histórico, interpretações da MQ, contradição entre onda e partícula, versão fraca, complementaridade e descontinuidade essencial, medida, Princípio de Incerteza, versão forte e a dupla fenda, princípio da superposição linear, “Gato de Schrödinger” e principais teses da interpretação ortodoxa, procurou-se passar desde a “construção” do átomo ao longo da história abrangendo as diversas teorias com suas bases filosóficas, o problema de determinar o que é (partícula) e não é localizado (onda), as duas versões que mais contribuíram para o desenvolvimento do objeto quântico e a visão de que onda e partícula se complementam no sentido de não se poder interpretar uma sem levar em conta a possibilidade de a outra estar presente, mas não ao mesmo tempo. Ao lidar com o Princípio de Incerteza mostramos que o determinismo – presente na Mecânica Clássica – dá lugar a possibilidades e não mais certezas absolutas, assim como lidar com a dupla-fenda traz incerteza se teremos onda ou partícula (dependendo do experimento que se realiza), como a construção de estado de onda (Gato de Schrödinger) e as teses da interpretação como Postulado Quântico, superposição de estados, entre outros.

Considerando que o desenvolvimento histórico da dualidade da partícula microscópica e de uma onda fazem parte da concepção da MQ, iniciaremos com uma breve abordagem histórica.

A suposição de que a matéria tivesse uma unidade fundamental preocupava, na antigüidade, os gregos. O conceito de átomo (que significa algo indivisível) foi introduzido por Leucipo e elaborado por Demócrito, em 585 a.C. Para Demócrito, átomo significava coisas extremamente pequenas e que são impossíveis de serem divididas.

No final do século XIX, a Teoria Cinética dos Gases consegue provar que as propriedades físicas dos gases são explicadas supondo que estes são formados por um grande número de átomos e moléculas em movimento sob a interação, entre si, de forças newtonianas.

Graças ao trabalho do químico inglês Dalton, em 1808, descobriu-se que diversas variedades de substâncias podiam ser formadas ao se combinarem certas quantidades de alguns elementos. Assim, supôs-se que a combinação desses elementos – que se chamou de átomo em homenagem a Demócrito – formam as moléculas de diversas substâncias.

J. J. Thomson (1856-1940), em 1897, consegue provar experimentalmente que os elétrons fazem parte do átomo. Usando os dados experimentais da época, Ernest Rutherford (1871-1937) sugere, em 1911, um átomo neutro, composto por um núcleo extremamente pequeno rodeado por elétrons carregados e muito leves. Em 1920, ele descobre o próton como constituinte do núcleo. Rutherford supõe que a estrutura atômica seja semelhante ao sistema solar, sendo que os planetas seriam os elétrons em órbitas circulares e o Sol o núcleo e em vez da força gravitacional a atração seria eletromagnética. Porém, tal átomo de Rutherford não podia ocorrer, como se imaginava. Sabe-se que pelas leis da Física, da Mecânica Newtoniana e do Eletromagnetismo, que cargas elétricas, os elétrons, em órbitas circulares emitem grande quantidade de energia e fariam um movimento espiralado até colapsar com o núcleo em menos de um segundo. Deste modo, a Física Clássica não consegue explicar a estabilidade do átomo e

por isso foi necessário criar uma nova Física para explicar este fenômeno: a Mecânica Quântica.

Diversas outras experiências surgiram para alicerçar melhor a MQ, como o efeito fotoelétrico, que não pode ser explicado pela teoria eletromagnética, exigindo novas hipóteses sobre a natureza da radiação que rompem com a Física Clássica, abordando, em continuação, o efeito Compton só de forma qualitativa.

Para explicar o problema de radiação dos fornos – a radiação do corpo-negro (1900) – Max Planck (1858-1947) sugeriu que as paredes deles seriam constituídas de átomos que funcionam como osciladores e que tanto a emissão e a absorção da energia seriam dadas por  $E = h.f$  onde “E” é a energia de um quantum, “f” é a frequência natural dos osciladores e “h”<sup>2</sup> uma constante física introduzida pelo próprio Planck. Isto significa que nessa nova proposta a grandeza física “energia” variava em pequenos saltos, de forma descontínua. No seu trabalho, Planck ainda afirma que cada átomo (oscilador) só podia absorver ou emitir uma determinada frequência natural, ou seja, a energia é quantizada (Braz, 2002).

Albert Einstein (1879-1955), ao estudar o “efeito fotoelétrico” (1905) – que consiste na propriedade de um metal emitir elétrons quando sobre ele incidem partículas de luz, ou *quanta* de luz, ou fótons, – propôs que a energia dos elétrons emitidos era proporcional à frequência (suficientemente alta) de luz incidente. Isto contradizia a Teoria do Eletromagnetismo que afirmava ser proporcional à intensidade da luz incidente. Partindo da idéia de quantum de Planck, Einstein supôs que a luz se propagaria como pacotes, ou fótons de energia,  $E = h.f$ . Quando a placa é atingida por fótons de energia, a luz arranca elétrons instantaneamente. Assim, a luz considerada como onda, pode também ter comportamento de partículas ou grãos, que podem colidir com elétrons e arrancá-los do material.

Para poder explicar a constituição do átomo, Niels Bohr (1885-1962), na década de 10, usa os conceitos de Planck e a idéia de Albert Einstein (1879-1955). De Planck usou a sua famosa constante “h” – da radiação do corpo negro (1900) e de Einstein a emissão de luz em “pacotes” (aos quais chamou de *quanta*,) e, em 1905, propôs que a energia dos elétrons no átomo fosse também quantizada. Para Bohr, os elétrons só poderiam ter energias bem definidas, que eram os estados de energia permitida, não poderiam irradiar energia e assim não espiralariam e não poderiam cair dentro do núcleo (Nussenzweig, 1998). Os elétrons só poderiam ser promovidos a determinadas órbitas desde que tivessem uma certa energia definida, ou seja, só poderiam saltar de uma órbita a outra emitindo ou absorvendo certa quantidade de energia, conforme  $E = h.f$ .

Em 1932, o *nêutron* é descoberto por Chadwick (1891-1974), que é uma partícula sem carga que compõe o núcleo juntamente com o próton. Esta partícula ajuda a explicar porque o núcleo atômico não se rompe já que há uma grande concentração de partículas positivas: os prótons. Descobre-se também a existência de uma nova interação, chamada nuclear ou forte, entre os prótons e os nêutrons, impedindo que o núcleo se divida. A interação forte é atrativa e de curto alcance (intensidade da ordem do tamanho do núcleo) e supera a repulsão coulombiana entre os prótons.

Pauli (1900-1958), em 1930, supõe a existência de uma partícula sem carga e praticamente sem massa, chamada por Fermi (1901-1954) de *neutrino*, que explica como os núcleos instáveis de certos átomos decaem através de emissão de partículas, conhecidos como núcleos radioativos.

---

<sup>2</sup> h é aproximadamente igual a  $6,6 \times 10^{-34}$  J.s.

Entretanto, a partir de 1928, surge a chamada Mecânica Quântica Moderna, desenvolvida em outras bases por Erwin Schrödinger (1887-1961), Werner Heisenberg (1901-1976), Louis de Broglie (1892-1987) e Niels Bohr (1885-1962), entre outros.

## Interpretações da Mecânica Quântica

Diversas foram as tentativas, no início do século passado, de tentar explicar o mundo extremamente pequeno dos átomos e das partículas que naquela época eram chamadas de elementares. A não explicação da estabilidade do elétron ao redor do núcleo por meio da Mecânica Clássica, por exemplo, levaria ao colapso toda a matéria que conhecemos, ou seja, o Universo não poderia existir do modo que conhecemos. O surgimento da MQ, estava em contradição de diversas maneiras, com as idéias da mecânica newtoniana e também em grande contradição com nosso senso comum. Porém, o sucesso com que esta teoria se desenvolveu e explicou o comportamento do sistema microscópico físico fez com que ela suplantasse e substituísse a tradicional Mecânica Clássica. Robert Gilmore (1998, pág. 7) afirma:

*Por mais absurda que MQ possa nos parecer, esse parece ser o caminho que a Natureza escolheu – logo, temos que nos conformar.*

Pessoa (2003), preocupado em saber qual a essência da Mecânica Quântica e quais são os princípios gerais que caracterizam esta teoria, distinguindo-a da Física Clássica e outras teorias, lista respostas para estas perguntas pois considera que há diversas respostas possíveis para os físicos:

- a palavra “quântica” relaciona-se a coisas *discretas* (como os “pacotes” de energia), ou de processos descontínuos;
- a *probabilidade* serve para descrever essencialmente um mundo “indeterminista”;
- o *Princípio de Incerteza* diz que a posição e a velocidade não podem mais ser determinados ao mesmo tempo;
- o *observador* não pode ser separado do que está sendo observado;
- o tratamento matemático é o essencial da MQ, que é o uso de grandezas que *não comutam*, ou ainda a utilização dos números complexos;
- o teorema de Bell é a grande novidade na MQ e a sua particular *não-localidade*;
- a constante de Planck  $h$  dá uma “escala” na natureza diferenciando o mundo microscópico do macroscópico;
- paradoxo do “Gato de Schrödinger” é o traço mais marcante para o *princípio quântico de superposição*.

Considera que a “dualidade onda-partícula” é um princípio da versão ortodoxa da Física Quântica. Ainda diz que o que caracteriza a MQ é que ela é a teoria que (op. cit. pág. 1):

*atribui, para qualquer partícula individual, aspectos ondulatórios, e para qualquer forma de radiação, aspectos corpusculares.*

Para esse autor, essa é uma versão “geral” da dualidade onda-partícula. Para entender melhor esta colocação devemos lembrar que muitos físicos interpretam o próton, o nêutron, o elétron, o neutrino como se fossem somente partículas com comportamentos bem próximos da Física Clássica e que a luz é uma onda eletromagnética obedecendo aos princípios de onda. Veja o quadro a seguir:

Interpretação Ondulatória (realista)	Considera que a função de onda quântica corresponde a uma realidade, uma realidade ondulatória ou talvez uma “potencialidade”. A visão ondulatória era defendida por E. Schrödinger, mas ele encontrou extrema dificuldade em dar conta dos fenômenos sem a noção de “colapso”. Na versão ingênua da interpretação ondulatória, a realidade que corresponde à função de onda sofreria colapsos toda vez que ela interagisse com um aparelho de medição.
Interpretação Corpuscular (realista)	Considera que as entidades microscópicas (ou pelo menos as possuidoras de massa de repouso) são partículas, sem uma onda associada. Esta posição foi defendida por Alfred Landé, dentro da interpretação dos <i>ensembles</i> (coletivos) estatísticos. A grande dificuldade da abordagem corpuscular é explicar os padrões de interferência obtidos em experimentos com elétrons.
Interpretação Dualista (realista)	Esta interpretação foi formulada originalmente por Louis de Broglie, em sua teoria de “onda piloto”, e ampliada por David Bohm (1952) para incluir o aparelho de medição. O objeto quântico se divide em duas partes: uma partícula com trajetória bem definida (mas em geral desconhecida), e uma onda associada. A probabilidade de uma partícula se propagar em uma certa direção depende da amplitude de onda associada, de forma que em regiões onde as ondas se cancelam, não há partícula. Tem uma dificuldade conceitual a existência de “ondas vazias”, que não carregam energia.
Interpretação da Complementaridade <sup>3</sup> ou Ortodoxa <sup>4</sup>	Esta expressão designa especialmente a interpretação da complementaridade de Niels Bohr (1928), que reconhece uma limitação em nossa capacidade de representar a realidade microscópica. Conforme o experimento, podemos usar uma descrição corpuscular, ou uma ondulatória, mas nunca ambas ao mesmo tempo. Isto não significa, porém, que o objeto quântico seja um corpúsculo ou uma onda. Segundo qualquer abordagem mais idealista <sup>5</sup> (no contexto da Física), só podemos afirmar a existência das entidades observadas. Afirar, por exemplo, que “um elétron não-observado pode sofrer colapso” carece de sentido. Um fenômeno ondulatório se caracteriza pela medição de um padrão de interferência, e um corpuscular pela possibilidade de inferir uma trajetória bem definida. O aspecto pontual de toda detecção (considerada pela segunda interpretação como a maior evidência da natureza corpuscular dos objetos quânticos), que ocorre mesmo em fenômenos ondulatórios, é considerado o princípio fundamental da teoria quântica, e chamado por Bohr de “postulado quântico”. Há diversas variações desta abordagem, constituindo as chamadas interpretações “ortodoxas”.

<sup>3</sup> Complementaridade: é o aspecto de um experimento ser ondulatório ou corpuscular, dependendo da experiência que se realiza, e as duas descrições “esgotam” a descrição do objeto.

<sup>4</sup> Ortodoxa: conformidade com essa doutrina, teoria.

<sup>5</sup> Idealista: na filosofia é alguma teoria postulando primazia do espírito, mente ou linguagem sobre a matéria. Inclui a reivindicação que o pensamento tem algum papel crucial fazendo o mundo do modo que ele é – que o pensamento e o mundo são feitos ou fazem de um outro.



Acima adaptamos um quadro proposto por Montenegro e Pessoa (2002, pág. 108) para esclarecer melhor esta visão. Uma das características da MQ é que ela pode ser interpretada de diversos modos sem que com isso perca sua consistência interna.

Aqui se deve “evitar referências à Física Clássica e o modelo atômico de Bohr e explicar os fenômenos observados a partir da interpretação estatística e evitar as descrições dualísticas”. Estes são alguns pontos defendidos pelo grupo da Universidade Livre de Berlim (Fischler & Lichtfeldt 1991, 1992, apud Greca e Moreira, 2001). Ainda afirmam que não se deve fazer interpretação dos fenômenos quânticos a partir da Física Clássica. Deve-se destacar os aspectos singulares da descrição quântica. Estas diversas interpretações foram agrupadas em quatro grandes grupos considerando três como ontológicas<sup>6</sup> (corpuscular, ondulatória e dualista onda-partícula) e duas como atitudes epistemológicas<sup>7</sup> (realismo<sup>8</sup> e positivismo<sup>9</sup>).

É com a proposta da interpretação de complementaridade ou ortodoxa (interpretação dualista positivista<sup>10</sup>) que será desenvolvida esta dissertação pois é geralmente a mais aceita pela comunidade científica e, além disso, parece a que menos provoca confusão na sua interpretação e, possivelmente, por ser a idéia mais facilmente compreendida pelos alunos do Ensino Médio, por não apresentar grandes dilemas na sua interpretação.

Devemos procurar diferenciar objetos clássicos e objetos quânticos, procurando atribuir *propriedades dinâmicas* bem definidas aos objetos físicos (Ricci et al., 2003). Por definição temos que propriedades dinâmicas são atributos físicos que evoluem com o tempo, assim como *posição, velocidade, momentum linear, energia, polarização* que são contrários às propriedades “estáticas” ou não-dinâmicas, assim como massa (não considerando a relatividade) e carga elétrica.

Os objetos clássicos são aqueles que se comportam de acordo com as leis da Física Clássica e utilizam-se dois tipos de entidades dinâmicas: partículas e campos. Partícula possui massa e evolui com o tempo conforme as leis da *Mecânica Clássica* e ocupa uma posição bem definida no espaço em um dado instante. Campo, entidade não massiva, refere-se à radiação que se comporta segundo as leis do *eletromagnetismo* e da *gravitação* e ele existe em vários lugares do espaço em cada instante. Os objetos clássicos fazem parte do nosso mundo *macroscópico*.

Os objetos quânticos não se comportam de acordo com as leis da Física Clássica e diferem daqueles do nosso mundo macroscópico, fazendo parte do mundo microscópico. Por exemplo, “partículas” (elementares ou não, com ou sem massa) de mesmo tipo, como elétrons, fótons, prótons, núcleos atômicos, átomos ou mesmo moléculas inteiras, são objetos quânticos (não-clássicos).

Enquanto que nos objetos clássicos, com ou sem massa, é possível atribuir-lhes uma série de propriedades dinâmicas (ou *observáveis*) bem definidas em cada instante do tempo, para os objetos quânticos *nem sempre é possível atribuir um conjunto qualquer de propriedades dinâmicas bem definidas*. Por exemplo, um elétron num orbital atômico representa um estado quântico de um elétron ligado em que os atributos de energia mecânica e momentum angular estão bem definidos, mas o atributo *posição*

---

<sup>6</sup> Ontológica: refere-se a um conhecimento geral e abstrato.

<sup>7</sup> Epistemológica: teoria do conhecimento sobre o objeto quântico.

<sup>8</sup> Realismo: a realidade existe independente do conhecimento que se pode ter sobre ela.

<sup>9</sup> Positivismo: a realidade só existe nos fatos e na experiência, ou seja, é dependente do sujeito, o observador.

<sup>10</sup> Dualista positivista: no sentido que deve ser interpretado ou somente como onda ou somente como partícula no sentido positivista, ou seja, impossível um fenômeno ser totalmente corpuscular e totalmente ondulatório ao mesmo tempo.

*não está bem definido* e o que podemos conhecer dele é sua *probabilidade de ser encontrado*, numa medição, numa determinada região do espaço (numa “nuvem de probabilidade” de ser encontrado). Não se pode encontrar o elétron num auto-estado de posição em um orbital.

Quando Freire Jr. et al. (1997), voltam a falar da mecânica newtoniana, dizem que ela tinha uma confiança nos seus esquemas explicativos que foi durante muito tempo um fator que alimentou o desenvolvimento da ciência, criando nos cientistas uma nova concepção de mundo que foi chamado de mecanicismo. O mecanicismo representou uma generalização de certas características desta mecânica, como, por exemplo, a previsibilidade implícita no seu determinismo (com Descartes, no século XVII).

Para a concepção mecanicista ficava evidente que o determinismo presente na mecânica newtoniana era aplicável a quaisquer outros fenômenos da natureza. O físico e matemático francês Pierre Laplace (1749-1827), sobre a mecânica newtoniana, chegou a afirmar que se fosse possível submeter todos os dados à análise Matemática os movimentos do macro e micro objetos na mesma fórmula, nada seria incerto para o conhecimento do futuro e passado. A visão de que todos os fenômenos naturais (físicos, químicos, biológicos, psíquicos, sociais) podiam ser previstos pela mecânica newtoniana possui uma dimensão filosófica fatalista de mundo: todo o movimento futuro do universo já está determinado previamente, seja por Deus, seja pela própria natureza, ao que os humanos deveriam se resignar. Segundo Freire Jr. et al. (1997, pág. 21), duas idéias estão implícitas no determinismo:

- *a descrição exata do movimento de um corpo (em termos de posição e velocidade) é possível desde que conheçamos as condições iniciais do movimento (posição e velocidades iniciais), as forças em todos os instantes e a massa do corpo em estudo;*
- *a posição e a velocidade estão, simultaneamente, definidas, mesmo que os valores correspondentes a essas grandezas não sejam conhecidos.*

Lorde Kelvin e outros cientistas chegaram a acreditar, ao final do século XIX, que o problema da Física Clássica já estava concluído, com apenas alguns problemas a serem resolvidos. Surgiram, no entanto, dois especificamente que revolucionaram a Física newtoniana: a Mecânica Relativista devida a Einstein e a MQ que durou os primeiros 25 anos do século XX (foi então reformulada dando origem a chamada Nova Mecânica Quântica).

### **Contradição entre onda e partícula**

Vamos agora analisar a contradição entre onda e partícula na Física Clássica, na visão de Pessoa (2003). A partícula clássica seria uma pequena bolinha, impondo que seja indivisível, que se move pelo espaço, possuindo posição bem definida e com velocidade conhecida. Esta partícula descreve uma trajetória, no decorrer do tempo. Já a onda, na Física Clássica, é uma perturbação que se propaga num meio, como a superfície da água ou através do ar, e que se espalha no espaço. Ela não transporta matéria e o que se propaga no meio é a energia, que é o movimento oscilatório das partículas no meio. Como se pode fazer o movimento destas partículas ser quase imperceptível, como as ondas podem ser divisíveis, então são *contínuas*. Além disso,

apresentam fenômenos próprios como a *interferência*. As ondas circulares provocadas na superfície da água não descrevem “trajetória” como os das partículas, pois são *espalhadas* pelo espaço não estando localizadas num ponto bem definido.

Assim, afirmar que uma coisa é indivisível e divisível, que ela pode seguir uma trajetória ou ser espalhada é uma *contradição lógica* para os fundamentos de uma teoria Física. Neste caso, a Teoria Quântica é obrigada a conciliar de alguma maneira “onda” e “partícula” sem entrar nessa contradição lógica.

Podemos dizer que existem duas versões diferentes para a dualidade onda-partícula: a *versão fraca* que tenta conciliar a *interferência* (típico de uma onda) com a *deteção pontual* de um quantum (a indivisibilidade típica de um corpúsculo; pág. 2) e a *versão forte* desenvolvida por Niels Bohr referente à existência de *interferência* e de *trajetórias* (um fenômeno é corpuscular quando podemos deduzir qual foi a trajetória do quantum detectado depois de completada a medição, pág. 17).

### Versão Fraca

A *versão fraca* da dualidade onda-partícula pode ser ilustrada por meio de um experimento feito com luz com uma fonte bastante tênue (por exemplo, um fóton por segundo), ou elétrons, prótons, nêutrons, átomos (pág. 3). O experimento é o da dupla fenda. Acompanhando a formação do padrão de interferência em telas fosforescentes, veríamos pontos aparecendo um após o outro, correspondendo a cada fóton detectado de maneira localizada, se agrupando em bandas, conforme o padrão de intensidade típico da interferência (ver a Figura 1). Filmes mostram a formação de tal padrão, ponto por ponto, para elétrons. Casimir (1986, pág. 16) interpreta que a onda emerge de duas fendas e numa tela distante observa que ela se reforçará ou se aniquilará reciprocamente, dependendo de sua diferença de fase entre duas ondas ( $\Delta = \varphi_1 - \varphi_2$ ): caminho  $L_1$  (traço negrito superior), caminho  $L_2$  (traço negrito inferior) e destruição [quando  $|L_1 - L_2| = \Delta = (n + \frac{1}{2})\lambda$ ] ou reforço (quando  $n\lambda$ , sendo  $n$  um número inteiro e  $\lambda$  comprimento de onda resultante no ponto R) da Figura 1. De forma semelhante ocorre também para fótons (ou elétrons) este padrão de interferência quando apenas um fóton (ou elétron) incida por vez, por exemplo a cada segundo (ver a Figura 2). Paul Dirac afirmou (apud Pessoa, 2003), em 1930, que: “Cada fóton só interfere consigo mesmo.”

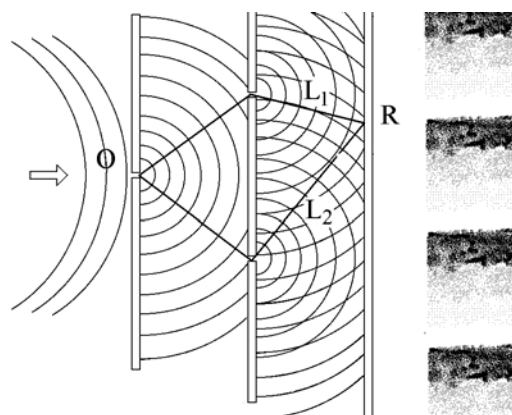


FIGURA 1 – *Experimento de dupla fenda para a luz, com as duas fendas abertas. O padrão de interferência se forma por mais tênue que seja o feixe de luz, se transcorrer um tempo longo.*

Pessoa (2003, pág. 3 e 1997, pág. 29) faz uma afirmação sobre a versão fraca da dualidade onda-partícula:

*Para qualquer objeto microscópico, pode-se realizar um experimento tipicamente ondulatório (como um de interferência), mas a detecção sempre se dá através de uma troca pontual de um pacote mínimo de energia.*

Ou,

*Qualquer radiação ondulatória é detectada em pacotes mínimos de energia ou massa, e qualquer partícula individual pode exibir fenômenos tipicamente ondulatórios, como a interferência.*

Quando fótons ou elétrons são detectados aparecem de maneira indivisível e pontual, mas não podemos afirmar que eles são sempre indivisíveis ou pontuais durante sua propagação. Observe-se que estes pontos não necessariamente precisam se propagar como partículas clássicas (leis de Newton) e que se pode chamá-los de “quanta”. Dependendo do experimento que se realiza, o objeto quântico pode se comportar como uma onda, ou seja, *pode* apresentar interferência. Desta forma, nesta experiência tivemos o comportamento ondulatório da *interferência* (ver Figura 2) e o comportamento corpuscular pois a *partícula* foi detectada ponto a ponto (bem localizada) dos quanta. Portanto, como é possível que esse fenômeno possua ambas características, ondulatório e corpuscular?

### **Complementaridade e Descontinuidade Essencial**

Na *Interpretação da Complementaridade* (Pessoa, 2003, pág. 13) temos a seguinte afirmação:

*um fenômeno pode ser corpuscular ou ondulatório, nunca os dois ao mesmo tempo.*

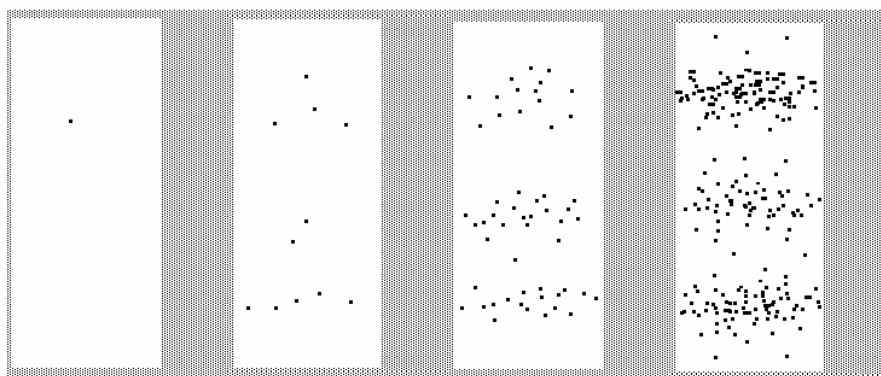


FIGURA 2 – *Formação pontual e do padrão de interferência para elétrons.*

Portanto, respondendo à pergunta, numa visão da *Interpretação da Complementaridade*, o “fenômeno” descrito é *ondulatório*, e não corpuscular pois não podemos deduzir sobre a trajetória passada do quantum detectado.

Neste sentido, Bohr diz que arranjos de experimentos são chamados de *Complementar* embora *mutuamente exclusivos*, eles são associados necessariamente – ou complemento recíproco – para uma descrição completa da situação Física, segundo Jammer (1974 pág. 87).

Conforme Heisenberg (1958, pág. 42), explicando a Complementaridade de Bohr, diz que *as duas descrições são mutuamente exclusivas*, pois uma coisa não pode ser ao mesmo tempo partícula (ou seja, substância confinada a um volume muito pequeno) e uma onda (ou seja, substância espalhada sobre uma região de dimensões muito grandes), mas se complementam uma a outra. O conhecimento da posição de uma partícula é complementar ao conhecimento do seu momento linear, no sentido que ambos não podem ser conhecidos exatamente ao mesmo tempo, devido ao princípio da incerteza. Só se conhecem ambas com uma certa precisão, mas mesmo assim necessitaremos conhecer ambas as imprecisões a fim de determinar o comportamento do sistema.

Niels Bohr (Pessoa, 2003) dá sua *Interpretação de Complementaridade* afirmando que é ondulatório quando não se pode deduzir a trajetória passada do quantum detectado. O aspecto corpuscular, observado na detecção, é devido ao “postulado quântico” proposto por Max Planck o qual afirma que há uma *descontinuidade essencial* em qualquer processo atômico, como na ionização de átomos de prata na chapa fotográfica devido à ação da luz. Conforme Oliveira (ver “índice por autor”, 2005), o postulado quântico desenvolvido por Planck diz que “a emissão e absorção de energia eletromagnética se dá não de forma contínua (*há uma descontinuidade essencial na absorção e emissão de radiação pela matéria*), como exige o eletromagnetismo clássico, mas em unidades discretas de uma quantidade mínima de energia  $\Delta E$ , ou seja,  $E = \Delta E, 2\Delta E, 3\Delta E \dots$ ”.

Jammer (1974, pág. 90), diz que, na conferência de Como, Bohr, afirmou que:

*a essência [da teoria quântica] pode ser expressa no suposto postulado quântico que atribui para algum processo atômico uma descontinuidade essencial, ou de preferência, individualidade, completamente estranho para as teorias clássicas e simbolizadas pelo quantum de ação.*

Portanto, de acordo com este postulado, a troca de energia procede somente em discretos pacotes de dimensões definidas, o postulado da indivisibilidade do quantum de ação, exige:

*não somente uma interação finita entre o objeto e o instrumento de medida mas até mesmo uma definida latitude (definite latitude) em nossa consideração desta ação recíproca*

Pois, desde que a interação entre o objeto e o instrumento, contrariamente à Física Clássica, não pode ser negligenciada,

*uma realidade independente no sentido ordinário físico nem pode ser atribuída para o fenômeno nem para agentes de observação.*

## Medida

Na apreciação de Home (1997, pág. 67), o termo medida em geral *significa* um modo de determinação ou leitura do valor de uma propriedade particular associado com um sistema individual. Na Física Clássica, a perturbação induzida pela interação entre um sistema de medida e um aparelho de medida pode ser feita tão pequena como desejado. Dessa forma, o princípio da Física Clássica permite-nos conhecer o estado corrente de um sistema com uma perturbação arbitrariamente pequena. Contudo, isto não é verdadeiro na Física Quântica, essencialmente por causa da seguinte característica genérica: se dois sistemas temporariamente interagem, mesmo antes da interação estar finalizada, o sistema composto descrito quantum-mecanicamente é inevitavelmente deixado em um *estado embaralhado/misturado*. Isso significa que a função de onda unida não é exatamente um produto das funções de onda associadas com cada sistema. Isso é verdadeiro qualquer que seja a intensidade e duração da interação em questão – mesmo se um dos sistemas envolvido é macroscópico. Portanto, nesta característica encontra-se o incômodo central do problema fundamental de uma tentativa de fornecer uma completa e coerente avaliação da MQ de um processo de medida.

À não-classificação clássica de atributos de micro-objetos, segundo Bohr (na Conferência de Como, em 1927), envolve uma certa ambigüidade, como ilustrado, por exemplo, pelo bem conhecido dilema referente às propriedades ondulatória e corpuscular da luz ou de elétrons (apud Jammer, 1974, pág.92):

*As duas visões da natureza da luz, são [na verdade] para ser consideradas como diferentes tentativas em uma interpretação de evidência experimental na qual a limitação dos conceitos clássicos é expressa em modos complementares.*

Além disso, Bohr compreendeu que sua interpretação de complementaridade pressupõe o uso da terminologia clássica (Jammer, 1974, pág. 100):

*Somente com a ajuda das idéias clássicas é possível atribuir um não ambíguo significado aos resultados da observação, e encontra-se na natureza da observação Física, e essa toda experiência deve essencialmente ser expressa em termos de conceitos clássicos.*

Bohr reconheceu que se o dispositivo de medida fosse descrito quantum-mecanicamente sua interação com o sistema medido estenderia meramente a uma cadeia de inferências sem conduzir a um resultado definitivo, conforme afirma Home (1997, pág. 78). Afirma que a interação entre um objeto e um aparelho é um analisador e o aparelho deve ser descrito em termos clássicos. Estes pontos são o centro do tema recorrente no escrito de Bohr, que enriquece nas seguintes afirmações (ibid.):

*O elemento de totalidade, simbolizado pelo quantum de ação e completamente estranho aos princípios da Física Clássica, tem ... a consequência que no estudo do processo quântico e alguma pesquisa experimental implica em uma interação entre o objeto atômico e as ferramentas de medida que, embora essencial para a caracterização do fenômeno, escapam de uma análise separada se o experimento serve seu propósito de produzir respostas não ambíguas para nossas questões.*

*... não importa quão distante dos efeitos quânticos transcende a competência de análise da Física Clássica, a consideração dos arranjos experimentais e o registro das observações devem ser sempre expressos na linguagem comum suplementada com a terminologia da Física Clássica. Esta é uma exigência lógica simples ... a impossibilidade de separar um comportamento dos objetos atômicos da interação destes objetos com instrumentos de medida que servem para especificar as condições sob quais o fenômeno aparece.*

Schrödinger preocupou-se com questões do tipo se é possível dentro da estrutura da Mecânica Quântica determinar uma descrição clássica do aparelho de medida. Escreveu (outubro 1935) para Bohr advertindo-o para explicar mais claramente sua convicção, frequentemente expressada, que as medidas devessem ser descritas através “do uso indispensável de conceitos clássicos”. Bohr respondeu brevemente (Home, 1974, pág 79):

*Minha ênfase sobre a inevitabilidade da descrição clássica do experimento refere-se no fim para mais nada do que o fato aparentemente óbvio que a descrição de cada aparelho de medida basicamente deve conter o arranjo do aparelho no espaço e em função do tempo, se somos capazes de dizer alguma coisa sobre todo o fenômeno ... O argumento é assim sobretudo que os instrumentos de medição, se eles servem como tais, não podem ser incluídos no real alcance de aplicabilidade da mecânica quântica.*

A necessidade de usar a linguagem da Física Clássica quando discutindo fatos observacionais partiu de Bohr, devido à nossa inabilidade de renunciar a formas usuais de percepção; também é improvável que as noções fundamentais da Física Clássica possam ser abandonadas na descrição da experiência física.

Para Heisenberg (1958, pág. 47), os conceitos da Física Clássica fazem parte da linguagem da vida cotidiana e são partes da linguagem que propicia a base da ciência natural. Ou seja, nós usamos *de fato* os conceitos clássicos para descrever as experiências e isto se tornou um desafio à teoria quântica, no sentido se ela é realmente capaz de exibir interpretação teórica dessas experiências com base naqueles conceitos.

Ainda Heisenberg (1958, pág. 39) afirma que qualquer experiência física, seja ela referente ao dia-a-dia ou à Física Atômica, deve ser sempre expressa através da Física Clássica, pois é através dela que divulgamos os seus resultados. Deste modo, não temos e não podemos substituí-los por outros, e a aplicação desses conceitos produz limitações governadas pelo princípio da indeterminação.

Por exemplo, uma experiência newtoniana funciona muito bem em grandes escalas e podemos prever com antecedência a velocidade e a posição dos planetas com grande precisão. Em outras palavras, o estado de um sistema macroscópico fica completamente determinado se conhecemos os valores das coordenadas de posição e da velocidade em um certo instante. Entretanto, na Física Quântica, este procedimento é um pouco diferente. Poderíamos observar o movimento de um elétron dentro de uma câmara de Wilson, estudando a posição e velocidades iniciais do elétron. Porém, esta determinação não seria precisa devido trazer consigo o Princípio de Incerteza.

## Princípio de Incerteza

Vamos abordar agora, superficialmente, o *Princípio de Incerteza* para sistemas unidimensionais tratado por Heisenberg (apud Pessoa, 2003, pág. 31). Este princípio afirma que a determinação exata de um valor observável, como a posição  $x$  de um elétron, implica numa falta de exatidão na definição do valor da *grandeza conjugada* que é o momento  $p_x$  do elétron (e vice-versa). Ou seja, a falta de exatidão no resultado de medição de um observável indica que também há uma falta de exatidão no resultado ou medida do outro observável. Se estas “inexatidões” são representadas, numa aproximação, por  $\Delta x$  e  $\Delta p_x$ , a relação de incerteza afirma que seu produto tem um limite inferior da ordem da *constante de Planck*  $h$ .

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi}$$

A Interpretação Dualista Positivista (defendida por Bohr) da Mecânica Quântica afirma que é impossível um fenômeno ser totalmente corpuscular e totalmente ondulatório ao mesmo tempo, como vimos antes.

Uma outra maneira de interpretar a relação entre  $\Delta x$  e  $\Delta p_x$  é dizer que  $\Delta p_x$  é o momento que um determinado sistema possui que não é absolutamente definido, mas oscila para mais e para menos, e quanto menor for a posição  $\Delta x$  em que examinamos, maior será sua variação.

No entanto, precisamos dessas imprecisões para traduzir o resultado da observação na linguagem matemática da teoria quântica. Temos, a partir daí, uma função de probabilidade que representa a situação experimental, no instante inicial em que a observação foi feita. Essa função de probabilidade nos diz respeito em relação a um fato e nosso conhecimento sobre esse fato. Ela representa uma certeza absoluta (então significa uma medida de probabilidade igual a 1 atribuída à condição inicial do sistema): o elétron movendo-se com a velocidade observada, na posição observada dentro da precisão do experimento. O erro experimental que possa aparecer não representa uma propriedade do elétron, mas o conhecimento deficiente que temos sobre o elétron. A deficiência desse conhecimento está presente na função da probabilidade. No instante inicial (Heisenberg, 1958), depois das observações feitas, pode-se determinar a função de probabilidade através das leis da MQ em qualquer instante futuro e encontrar a medida de probabilidade de uma certa ocorrência, de um certo valor da grandeza observada. Portanto, a função de probabilidade representa uma *tendência* para ocorrência de eventos e nosso conhecimento desses eventos e *não representa um curso de eventos*, no decorrer do tempo. Desse modo, entendemos que a função de probabilidade nos dirá qual será o resultado provável da nova medida, sendo esse resultado expresso em termos da Física Clássica.

Veremos, na experiência da fenda dupla, que quando observamos por qual fenda passou o objeto quântico, destruimos o padrão de interferência de onda que aparece quando não sabemos por qual fenda ele passou. A afirmação, portanto, de que qualquer quantum de luz passou ou pelo primeiro ou pelo segundo furo, é problemática e conduz a contradições, uma vez que uma tal descrição traz essa contradição, o que “acontece” está limitado à observação experimental, conforme Heisenberg (1958). Este exemplo mostra que o conceito de função de probabilidade não permite uma descrição do que ocorre entre duas observações consecutivas.



Dessa forma, a observação experimental é oportuna no acontecimento sendo que a realidade varia dependendo se a observamos ou não. Portanto, devemos analisar o processo experimental mais cuidadosamente. Vamos nos preocupar que uma boa porção do Universo, nós incluídos, não faça parte do objeto em sua observação experimental.

Inicialmente, temos que descrever o programa da experiência, combinando-o com uma primeira observação, primeira em termos de Física Clássica, e logo depois transcrevê-la em função de probabilidade. A função de probabilidade está sujeita às leis da MQ e sua variação é contínua no decorrer do tempo. A função de probabilidade nos diz sobre as *possibilidades* ou as *tendências* mais favoráveis.

Quando realizamos a próxima observação experimental, cujo resultado deveria ser predito pela teoria, devemos notar que o objeto de pesquisa está em contato com o programa experimental, a régua de medida, etc., ou seja, a outra parte do mundo. Portanto, a equação de movimento que satisfaz a função de probabilidade possui agora a influência da interação com o instrumento de medida, que introduz um novo elemento de incerteza, pois o aparelho de medida é descrito na linguagem da Física Clássica. Essa descrição possui todas as incertezas presentes à estrutura microscópica do instrumento de medida (que são conhecidas da Termodinâmica) e, como esse instrumento está unido ao resto do mundo, essa descrição terá as incertezas da estrutura microscópica do mundo todo. Podemos chamar estas incertezas de *objetivas*, como sendo uma simples consequência da descrição em termos da Física Clássica e por serem independentes do observador. Também podem ser consideradas *subjetivas* por se tratar de nosso conhecimento incompleto do mundo.

Após a ocorrência dessa interação, a função de probabilidade passa a conter o elemento *objetivo de tendência* e, também, o elemento *subjetivo do conhecimento incompleto* (mesmo que não difiram de um experimentador ao outro), antes da interação. Assim, o resultado da observação não pode, de maneira geral, ser *predito* com certeza e o que podemos predizer é a probabilidade de que um certo resultado poderá ser verificado quando se repete a experiência um grande número de vezes. Contrariamente à Física Clássica, a função de probabilidade não descreve um certo evento, durante o processo de observação, mas todo um conjunto de conhecimentos possíveis.

O ato de observação, por si mesmo, muda a função de probabilidade de maneira descontínua. Lembrando que nesta [interpretação da Física Clássica e da Física Quântica](#) que está sujeita ao postulado quântico, cada processo atômico está caracterizado por uma descontinuidade essencial (ou individualidade, como chamou Bohr), como vimos antes. Este ato seleciona entre todos os eventos possíveis, o evento real que aconteceu. Desse modo, a transição do “possível” ao “real” ocorre durante a observação. Portanto, o termo “ocorre” pode somente ser aplicado à observação e não ao estado de coisas entre duas observações sucessivas. A transição do “possível” ao “real” ocorre tão logo que a interação do objeto com o instrumento de medida (com o resto do mundo) tenha se realizado, e ela nada tem a ver com o ato de registrar o resultado por parte da mente do observador. Vale lembrar que sua representação matemática também sofre essa descontinuidade conforme ocorre a descontinuidade de função de probabilidade.

Na Conferência de Solvay (1927), pela primeira vez houve uma reivindicação bem definida sobre a “completicidade” da MQ que serviu com uma provocação intelectual para Einstein, conforme nos relata Home (1997, págs. 353 – 355). Depois de apresentar seus trabalhos de mecânica matricial da MQ, Born e Heisenberg concluíram acreditar que “a MQ é uma teoria completa” afirmando ainda que “suas hipóteses Física

e Matemática não são mais suscetíveis a novas modificações”. Contudo, Einstein a fez algumas considerações gerais na sessão de conclusão da conferência.

Partindo de uma situação teórica onde um elétron passa através de uma fenda e marca um ponto sobre uma tela de cintilação colocada além da fenda, conforme Figura 3, Einstein sugeriu uma análise baseada em uma das duas interpretações:

1. “A teoria quântica não fornece informação sobre eventos individuais; em substituição, ela lida com um coletivo (*ensemble*) de grande número de processos elementares.”
2. “A teoria tem a pretensão de ser uma teoria completa de processos individuais.”

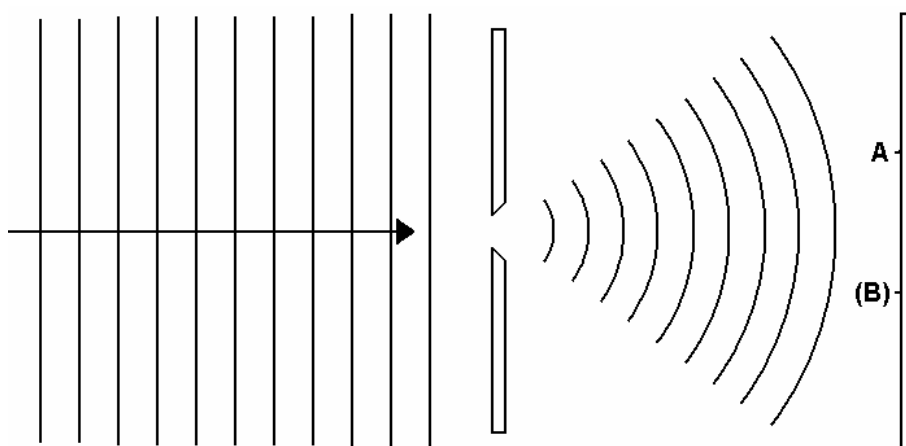


FIGURA 3 – Para Einstein, se o elétron for registrado no experimento num ponto A da chapa, não poderá ser observado um efeito num outro ponto (B).

De acordo com Einstein, na Interpretação 2, se a largura da fenda é bastante pequena, a função de onda representa um simples elétron ou fóton emergindo da fenda. Portanto, a probabilidade de detectar o elétron sobre qualquer lugar da tela é a mesma. Porém, quando há a detecção, um *flash* de cintilação sobre a tela aparece somente em um ponto. Einstein então “propõe um mecanismo muito peculiar de ação à distância que poderia evitar a função de onda continuamente distribuída no espaço agindo em dois lugares da tela simultaneamente”. Isto permite Einstein concluir que “se trabalhamos exclusivamente com as ondas de Schrödinger, Interpretação 2 de  $\psi$  (função de onda), em minha opinião, implica uma contradição com o princípio de relatividade.” Este princípio afirma que nenhum sinal pode viajar mais rápido que a velocidade da luz, o que estaria implícito neste experimento-de-pensamento de um fóton ou elétron partindo da fenda.

Assim, pela primeira vez, Einstein argüiu contra o colapso da função de onda usando a relatividade.

Desta forma, Einstein considerava a Interpretação 2 inaceitável, optando a Interpretação 1, onde há uma probabilidade de encontrar qualquer partícula do *ensemble* (coletivo) em um ponto, não exigindo um tipo de ação à distância.

A publicação de Einstein comentada nos Anais da Conferência de Solvay de 1927 não deu muita atenção à consideração bem conhecida de Bohr. Há somente uma superficial menção do problema considerando o colapso da função de onda levantado

por Einstein. Ou como Bohr considera (conforme o artigo escrito por ele e publicado por Schilpp – 1949, pág. 213):

*A aparente dificuldade, nesta descrição, que Einstein sentiu bem agudamente, é o fato que, se no experimento o elétron é registrado em um ponto A da placa, então está fora de questão de sempre observar um efeito deste elétron em um ponto (B), embora as leis das ondas de propagação ordinária não ofereçam nenhuma liberdade de correlação entre dois eventos semelhantes.*

### **Versão Forte e a Dupla Fenda**

Vamos agora analisar o caso da experiência da dupla fenda.

Seja  $P$  a “probabilidade” de designarmos a chance de as partículas chegarem ao detector, num certo tempo. Então, probabilidade é a taxa desse número *total* de partículas que atingem um detector num intervalo de tempo. Chamaremos  $P_{12}$  a probabilidade de que as partículas possam ter vindo através da fenda 1 ou através da fenda 2 e  $P_1$  ( $P_2$ ) a probabilidade de vir pela fenda 1 (2).

Vamos descrever a seguinte experiência para entender a “versão forte” tal como apresentada por Pessoa (2003). Esta experiência pode ser realizada com fótons ou elétrons, como antes. Consideremos uma fonte emite partículas (fótons ou elétrons) de intensidade extremamente baixa de modo a emitir uma partícula por vez, sendo que existe um filtro que seleciona as partículas para que tenham (aproximadamente) a mesma energia. Estas passam pelo painel onde está a dupla fenda através das quais podem passar. Depois temos um detector de partículas sobre um plano que pode ser localizado em diversas posições, por exemplo,  $x$  (ver Figura 4 (a)). Todas as partículas chegam uma de cada vez neste plano e se existissem vários detectores cobrindo o painel observaríamos que para cada partícula haveria resposta de apenas um detector. Mokross (1996, pág. 139) sugere que esse detector pode ser uma célula fotoelétrica ou um contador Geiger. O detector não acusa meias respostas, ou seja, o que é detectado é uma partícula inteira por vez, portanto não há detecção de meias partículas e também não aparecerão respostas simultâneas em dois detectores. Desta forma, cada partícula que sai da fonte deve passar pela primeira ou segunda fenda. Vamos chamar isto de Proposição A (Feynman, 1965, pág 1-5):

*Proposição A: cada elétron ou vai através da fenda 1 ou através da fenda 2.*

Se as duas fendas estão abertas ao chegar ao painel com detectores há interferência conforme vimos na Figura 2, ou como mostra a Figura 4 (c). Assim, verifica-se um padrão de interferência típica do comportamento ondulatório, indicado por  $P_{12} = |\phi_1 + \phi_2|^2$  ( $\phi$  é a amplitude da onda), ou seja, é o quadrado absoluto da soma de duas amplitudes. Porém, se apenas a fenda 1 estiver aberta, conseqüentemente a fenda 2 está fechada, teremos então  $P_1$  conforme Figura 4 (b). (Se tivermos preparado apenas um quantum – fóton ou elétron – a probabilidade de detectá-lo em uma certa região será proporcional ao quadrado da amplitude  $\phi$  da onda associada àquela região:  $P \propto |\phi|^2$ .)

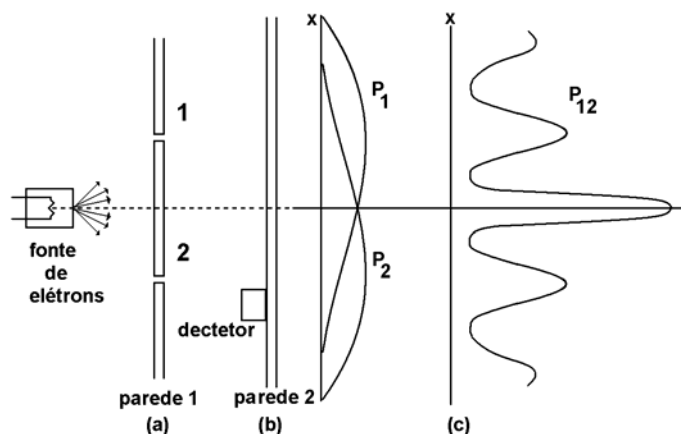


FIGURA 4 – Outra maneira de esboçar o experimento de dupla fenda para a luz. As partes claras da figura 1 são os picos de máximo e as partes escuras são os picos de mínimo, neste esboço. Em (a) está a dupla fenda; em (b) estão representadas a parede com seu detector e as distribuições de probabilidade  $P_1$  (se a fenda 2 estiver fechada) e  $P_2$  (se a fenda 1 estiver fechada); em (c) está representado o padrão de interferência das duas ondas quando ambas as fendas estão abertas, ou seja, a probabilidade  $P_{12}$  de a partícula ter vindo através da fenda 1 ou fenda 2.

Agora, se fechamos a fenda 1 e deixamos as partículas passarem pela fenda 2, teremos então  $P_2$  conforme a Figura 4 (b) (Feynman, 1965, pág. 154). Devemos chamar a atenção para o fato que a Figura 4 é semelhante como aquela produzida por ondas numa superfície de água para um experimento de dupla fenda. A fonte de elétrons seria substituída por uma fonte pontual de ondas na superfície da água as quais passam por uma dupla fenda e uma parede com um detector que mede a “intensidade” do movimento. Deste modo produzem-se as figuras semelhantes como 4 (b) com uma fenda aberta e 4 (c) para as duas fendas abertas.

Vamos verificar se há algum modo de se saber por qual fenda passou a partícula. Feynman et al. (1965) sugerem o seguinte experimento. Para nosso aparelho de elétrons adicionamos uma fonte de luz muito forte, colocada entre a parede e as duas fendas, como mostrado na Figura 5.

Sabemos que cargas elétricas espalham luz. Então, quando um elétron passa, em seu caminho para o detector, ele espalhará alguma luz para nosso olho, e podemos *ver* para onde o elétron foi. Se, por exemplo, um elétron foi pelo caminho via fenda 2 que está esboçado na Figura 5 (a), poderíamos ver um *flash* de luz chegando da vizinhança do lugar marcado A na figura. Se um elétron passa através da fenda 1, deveríamos ver um *flash* da vizinhança superior da fenda. Se pudesse acontecer que tivéssemos luz de ambos lugares ao mesmo tempo, então o elétron dividir-se-ia na metade... Façamos o experimento.

Aqui está o que constatamos: *cada vez* que ouvimos um “click” de nosso detector de elétron (no anteparo), *também vemos* um *flash* de luz *ou* perto da fenda 1 *ou* perto da fenda 2, mas *nunca* ambos de uma vez. E observamos, ainda, que o mesmo resultado é obtido onde quer que seja colocado o detector. Desta observação concluímos que quando olhamos os elétrons, encontramos, que eles ou vão através de uma fenda ou de outra. Experimentalmente, a Proposição A é necessariamente verdadeira.

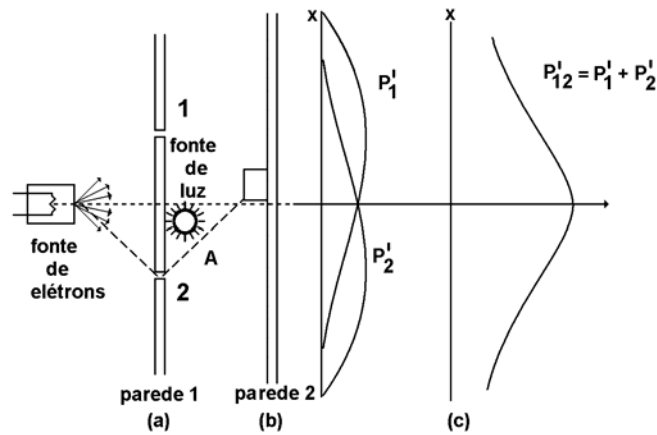


FIGURA 5 – No esboço (a) temos a dupla fenda em presença de uma lâmpada acesa A; em (b) um padrão de distribuição se forma quando sabemos por qual fenda passou cada elétron; em (c) temos a soma dos padrões de distribuição mostrados em (b).

Qual é, então, o erro com o nosso argumento *contra* a Proposição A? Por que  $P_{12}$  não é exatamente igual a  $P_1 + P_2$ ? Voltemos ao experimento. Não percamos de vista os elétrons e busquemos descobrir o que eles fazem. Para cada posição (localização  $x$ ) do detector contaremos os elétrons que chegam e *além disso* não percamos de vista através de qual fenda eles passaram, olhando para os *flashes*. Deste modo, quando ouvirmos um “click” colocaremos uma contagem na Coluna 1 se vemos o *flash* perto da fenda 1, e se vemos o *flash* perto da fenda 2 gravaremos uma contagem na Coluna 2. Cada elétron que chega é gravado em uma das duas classes: aqueles que vêm através da fenda 1 e aqueles que vêm através da fenda 2. Do número gravado na Coluna 1 nós temos a probabilidade  $P'_1$  que um elétron chegará ao detector via fenda 1; e do número gravado na Coluna 2 temos  $P'_2$ , a probabilidade que um elétron chegará ao detector via fenda 2. Se repetirmos tais medidas para muitos valores de  $x$ , temos as curvas para  $P'_1$  e para  $P'_2$  mostradas na parte (b) da Figura 5.

Segundo Feynman (op. cit.), isto não é surpreendente.  $P'_1$  é muito similar ao que tínhamos antes para  $P_1$  ao bloquear a fenda 2; e  $P'_2$  muito similar a  $P_2$  quando bloqueávamos a fenda 1 (Figura 4 (b)). Apesar de termos sucesso em olhar por qual fenda nossos elétrons passaram,  $P'_{12} = P'_1 + P'_2$ , não mostram nenhuma interferência, Figura 5 (c). Entretanto, se desligamos a luz,  $P_{12}$  é restaurada, conforme Figura 4 (c).

Podemos concluir que *quando olhamos na direção dos elétrons* a distribuição deles sobre a tela é diferente quando não olhamos.

Convém notar que a situação apresentada na Figura 5 (com ou sem luz) é semelhante à situação de uma metralhadora giratória disparando ao acaso contra as fendas do anteparo em que só passa uma bala inteira de cada vez em cada fenda (as balas da metralhadora são indestrutíveis). Temos o mesmo caso quando tapamos a fenda 1 (2) então temos a Figura 5 (b) para  $P_2'$  ( $P_1'$ ) e quando ambas estão abertas temos a probabilidade  $P_{12}'$  como aparece na Figura 5 (c) (ou seja,  $P_1' + P_2' = P_{12}'$ ).

Se for verdade que quando “vemos” o elétron vemos um *flash* de mesmo tamanho, então estes elétrons que vemos são *sempre* os perturbados. Tentemos o experimento com luz mais fraca. Agora quando ouvimos um “click” no detector contaremos em três colunas: na Coluna (1) aqueles elétrons vistos na fenda 1, na Coluna

(2) aqueles elétrons vistos na fenda 2 e na Coluna (3) aqueles elétrons não são vistos de modo algum. Quando levantamos nossos dados (computando as probabilidades) encontramos estes resultados: aqueles “vistos pela fenda 1” têm uma distribuição como  $P'_1$ ; aqueles “vistos pela fenda 2” têm uma distribuição como  $P'_2$  (assim aqueles “vistos pela fenda 1 e 2” têm uma distribuição como  $P'_{12}$  como o da Figura 5 (c)) e aqueles “não vistos de modo algum” têm uma distribuição de “onda” exatamente como  $P_{12}$  da Figura 4 (c). Isto ocorre por causa do efeito fotoelétrico que assegura quando a frequência da luz incidente é menor que um dado valor crítico, nenhum elétron é detectado. *Se os elétrons não são vistos, temos o padrão de interferência!*

Assim, quando não vemos o elétron, nenhum fóton perturba-o, e quando o vemos, um fóton o perturbou. Há sempre a mesma quantidade de perturbação porque todos os fótons de luz produzem o efeito de mesmo tamanho e o efeito dos fótons sendo espalhados é suficiente para borrar algum efeito de interferência.

Para a *versão forte* dizemos que um fenômeno é *corpuscular* quando podemos concluir qual foi a trajetória do quantum detectado, depois de termos completado a medição, se soubermos por qual fenda passou o objeto quântico. Pessoa (2003) diz que um experimento não pode ser ao mesmo tempo ondulatório e corpuscular na visão clássica, sendo que chamou de “versão forte” (ou “complementaridade de arranjos experimentais”) o que Bohr defendeu para a *dualidade onda-partícula*, sendo que esse autor (op. cit., pág. 18) afirma:

*Um sistema quântico ou exhibe aspectos corpusculares (seguindo trajetórias bem definidas), ou aspectos ondulatórios (como a formação de um padrão de interferência), dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo.*

Na verdade, o que Bohr quis dizer é que a noção de onda e partícula são aspectos mutuamente excludentes, mas *complementares*, da natureza. Assim, para certos tipos de experiências podemos encarar o objeto quântico (como um elétron ou fóton) como partícula, ou como onda em outros tipos de experiências. Mas não se pode montar uma experiência que apresente simultaneamente aspectos ondulatórios ou de partículas, por isso é que são *mutuamente excludentes*. Assim, só compreendemos um objeto quântico de maneira completa, segundo Bohr, quando são considerados esses dois aspectos complementares.

Bohr afirma que a nossa linguagem é limitada para representar pictoricamente o mundo quântico. Com ela, podemos descrever o mundo macroscópico, com um aparelho de medição, e podemos nos comunicar com outras pessoas para informarmos que obtivemos determinado resultado experimental. Porém, a nossa linguagem não nos permite representar um objeto quântico em um “quadro único” e precisamos de descrições complementares.

Ainda falando sobre *complementaridade* é que introduzimos um trecho do livro “Alice no País do Quantum”, de Robert Gilmore (1998, pág. 51), quando o personagem Mecânico Quântico, fala à Alice:

*“É assim: quando há interferência, parece que cada elétron está atravessando ambas as fendas. Se tentar averiguar, verá que cada um dos elétrons está só passando por uma fenda, mas então o efeito de interferência desaparece. Não há como escapar disso!”*

*Alice dedicou um pouco de reflexão ao assunto. “Isso é totalmente ridículo!”, concluiu.*

“Certamente”, respondeu o Mecânico Quântico com um sorriso satisfeito. “Totalmente ridículo, eu concordo, mas é assim que a Natureza funciona e nós temos de acompanhá-la. Complementaridade, é o que digo!”

“Poderia me dizer o quer dizer complementaridade?”, Alice perguntou.

“Claro. Complementaridade quer dizer que há certas coisas que não se pode saber. Não ao mesmo tempo, pelo menos.”

“Não é isso que complementaridade quer dizer”, ela protestou.

“Quando eu digo, é isso que quer dizer”, respondeu o Mecânico.

“As palavras significam aquilo que eu quiser. É tudo uma questão de quem é o mestre. Complementaridade, é o que eu digo.”

“Você já disse isso”, disse Alice, sem se deixar convencer totalmente pela última afirmação do Mecânico.

“Não, não disse”, respondeu o Mecânico. “Desta vez quero dizer que há perguntas que não se pode fazer a uma partícula, tais como onde ela está e a que velocidade se move. Na verdade, não significa muita coisa falar de um elétron ocupando uma determinada posição.”

Talvez a idéia que mais esclareça o que é complementaridade é o que diz Charles Alfred Coulson (apud Jammer, 1974, pág. 89), professor de Matemática em Oxford, considerando religião e ciência como duas abordagens alternativas que, embora aparentemente irreconciliáveis, são ambas verdadeiras, sendo complementares reciprocamente.

Para Gilmore (1998, pág. 57) as relações de incerteza de Heisenberg impedem que nós possamos medir a posição e o momentum de uma partícula ao mesmo tempo com exatidão, proibidos pela própria natureza das partículas. A teoria nos diz ainda que estamos fazendo as *perguntas erradas* para as quais não temos respostas viáveis. Por isso, Bohr usou o termo *complementaridade* para expressar o fato de que é possível haver conceitos que não podem ser precisamente definidos ao mesmo tempo: pares de conceitos tais como justiça e legalidade, emoção e racionalidade.

## Princípio de Superposição Linear – Gato de Schrödinger

Vamos ver, superficialmente, como o *formalismo* da Teoria Quântica descreve o experimento de dupla fenda com uma lâmpada acesa (ver Figura 5, pág. 52) para um fóton único.

Se a fonte de luz estiver acesa e ouvirmos um “click” em A então sabemos que o elétron passou pela fenda 2. Podemos atribuir um *estado* de nosso sistema quântico, em um certo instante, que indicaremos por  $|\phi_2\rangle$ . Este estado afirma que o elétron será detectado com certeza pelo caminho que passou pela fenda 2 e devido à *certeza* este estado é chamado de *auto-estado* associado ao valor 2 para a posição do elétron. Da mesma forma podemos definir o auto-estado  $|\phi_1\rangle$ . Assim, para um sistema neste estado um detector no caminho que passa pela fenda 1 registrará um elétron. Lembrando ainda que cada um destes estados é análogo a uma amplitude de onda clássica.

Assim, se o estado for  $|\phi_1\rangle$ , um detector no caminho que passa pela fenda 2 não registrará nenhum elétron e se o estado for  $|\phi_2\rangle$ , nada poderá ser detectado no caminho que passa pela fenda 1. Dizemos nesse caso que esses estados são *ortogonais*.

Vamos agora enunciar o Princípio de Superposição Linear que é um dos princípios fundamentais da MQ (Pessoa, 2003, pág. 23):

*Dados dois estados admissíveis de um sistema quântico, então a soma desses dois estados também é um estado admissível do sistema.*

Em decorrência deste princípio, o seguinte estado descreve também uma situação possível (função de onda normalizada):

$$|\phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\phi_1\rangle + i\frac{1}{\sqrt{2}}|\phi_2\rangle$$

Esta soma envolve certos coeficientes necessários para manter os estados “normalizados” que pode assumir valores “complexos” (envolvendo  $i = \sqrt{-1}$ ). Este estado não diz que o elétron está em dois lugares ao mesmo tempo. A Teoria Quântica fornece apenas *previsões* sobre o resultado de medições realizadas em diferentes situações experimentais. Desta forma a *Interpretação de Complementaridade* responde ao seu próprio modo: o estado  $|\phi\rangle$  é meramente um instrumento matemático para realizar *cálculos* e obter *previsões*. A interpretação da complementaridade considera que o estado quântico seja a descrição mais “completa” de um objeto quântico individual. Considera ainda que é uma realidade intermediária, uma *potencialidade*, que estabelece apenas probabilidades. Esta visão é analisada como *positivista*, pois avalia que a teoria só consegue descrever aquilo que é observável.

Uma interpretação é dada por Gilmore (1998, pág. 59), em seu “Alice no país do quantum”, da qual é feita aqui uma simplificação. Interpreta-se neste texto somente com dois caminhos em vez de quatro como aborda o livro, pois a discussão posterior não altera a interpretação da idéia da superposição de estados.

Estava Alice caminhando num bosque seguindo por um caminho que serpenteava entre as árvores até chegar a uma bifurcação. Havia uma placa, que não ajudava muito, pois tinha uma seta que estava indicada pela letra “A” e apontava para a direita e uma seta “B” que apontava para esquerda. Alice falou irritada:

*“Puxa vida. Essa é a placa mais inútil que já vi.”*

Não havia nenhuma pista para onde iam dar os caminhos. Perto dela, em cima de uma árvore, ela enxergou o Gato de Schrödinger (provavelmente o autor da história quis homenagear Schrödinger ao referir-se ao gato do seu experimento). Perguntou ao gato onde ia dar cada um dos caminhos. O Gato respondeu:

*“Isso depende muito de onde você quer chegar.”(...)*

*“Então, não importa por onde você fôr”, interrompeu o Gato.*

*“Mas eu preciso decidir entre os dois caminhos”, disse Alice.(...)*

*“Você não tem que decidir, você pode tomar todos os caminhos. (...) Os gatos vasculham qualquer lugar, quando não estão sendo observados.”*

*(...) “Acho que estou preste a ser obs...”*

Desse modo, o gato desapareceu imediatamente.

Neste ponto, Alice virou à direita tomando o Caminho A – pode-se dizer *estado* Alice (A) – entrando num túnel. No final do túnel havia um subterrâneo.

Assim, Alice virou à esquerda, indo pelo Caminho B sinuoso – que chamaremos agora de *estado* Alice (B) – encontrando uma clareira.



*“Ah, minha cara, entre!” disse uma voz mansa, e Alice percebeu que estava sendo observada.*

Passou pela porta e entrou na sala.

*“Receio não saber como vim parar aqui”, disse Alice. “Eu achava que estava em vários lugares agorinha mesmo, e não tenho a menor idéia de por que vim parar aqui e não nos outros lugares”.*

*“Isso é porque nós observamos você aqui, é claro. Você estava numa superposição de estados quânticos, mas como foi observada estando aqui, é porque era aqui que estava naturalmente. Obviamente, você não foi observada em nenhum dos outros lugares.”*

Alice perguntou o que teria acontecido se ela tivesse sido observada em algum outro lugar. O Mecânico Quântico retruca dizendo que ela teria colapsado para esse novo lugar. Ainda o Mecânico Quântico diz que não se pode afirmar nada sobre os outros sistemas. No máximo poderia ser dito que haveria uma probabilidade de estar acontecendo alguma coisa, ou seja, estaria numa mistura de estado das coisas que poderiam estar ocorrendo.

*“E o que acontece com todas as outras coisas que estavam acontecendo nele?” perguntou Alice. “Simplesmente desaparecem?”*

*(...) “Os outros estados simplesmente se anulam. (...) Nessa hora, todos os outros estados deixam de ser reais, de qualquer modo. Eles se tornam, digamos, apenas sonhos e fantasias, e o estado observado é o único real. Isso é o que chamamos de redução dos estados quânticos.”*

A superposição de estados pode ser entendida se há alguma possibilidade de saber o que uma partícula está fazendo sem observá-la. Uma nova interpretação pode ser dada quando afirma-se ser impossível isto quando não consideramos aquilo que observamos possa acontecer de várias maneiras diferentes. Isto é, tendo uma amplitude para cada maneira possível e quando adicionamos todas elas obtemos a amplitude geral. Portanto, obtemos uma *superposição de estados*. Ou seja, a partícula está fazendo tudo que é possível a ela, apesar de não *sabermos* o que a partícula está fazendo. A interferência mostra que as probabilidades estão todas presentes e influenciam umas as outras.

*“(...) De certa forma, são todas igualmente reais. Tudo o que não é proibido é compulsório.”*

Disse o Mecânico Quântico, ao responder a pergunta da Alice.

Um exemplo para explicar isso foi dado por Schrödinger para o “caso do Gato de Schrödinger”, Jammer (1974, pág. 217). Ele imaginou uma câmara de aço fechada contendo um gato e uma pequena quantidade de elemento radioativo. A probabilidade de desintegração de um átomo por hora é exatamente 0,5. A desintegração, se ocorrer, ativa um contador Geiger e fecha um circuito, desse modo eletrocutando o gato.



FIGURA 6 – O paradoxo do Gato de Schrödinger. A figura representa o estado do gato vivo e do gato morto ao mesmo tempo.

*Alice olhou para onde o Mecânico apontava e viu um grande gato listrado que dormia numa cesta num dos cantos da sala.(...) Alice viu que, além da figura levemente difusa do gato de costas arqueadas, havia também um gato idêntico, que ainda dormia no fundo da cesta.(...)*

*“Schrödinger desenvolveu um experiment gedanken<sup>11</sup> (...). Tal decaimento é definitivamente um processo quântico. O material pode ou não decair e então, de acordo com as regras da Física Quântica, haveria uma superposição de estados, onde em alguns o decaimento teria ocorrido e em outro, não. É claro que, naqueles estados em que o decaimento ocorresse, o gato morreria, e nós então teríamos uma superposição de estados de gato, alguns mortos e alguns vivos. Quando a caixa fosse aberta, alguém observaria o gato e dali em diante ele estaria morto ou vivo. A questão proposta por Schrödinger era: ‘Qual o estado do gato antes de a caixa ser aberta?’”*

Se o sistema inteiro está representado por uma função de onda  $\psi_{vivo}$  indicando o estado “gato vivo” e  $\psi_{morto}$  o estado “gato morto”, então o estado do sistema ao fim de uma hora é descrito, de acordo com a MQ, pela função de onda (normalizada)

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_{vivo} + \psi_{morto})$$

uma superposição no qual os dos estados “gato vivo” e “gato morto” estão “misturados ou borrados juntamente por uma igual quantidade”. Somente através do próprio ato de observação, isto é, olhando o gato, é que o sistema se decide para um definido estado. Seria “ingenuidade”, diz Schrödinger, considerar a função  $\psi$  acima como descrevendo a realidade.

A situação descrita neste exemplo não tem nada de excepcional nele. De fato, ele descreve uma característica de cada medida da MQ. Somente caracteriza o que

<sup>11</sup> *experiment gedanken: experimento de pensamento*

distingue “o caso do Gato de Schrödinger” da maioria das medidas da MQ é o fato que neste caso “a redução do pacote de onda”, determinada pelo processo de observação, estabelece a seleção entre somente dois estados (alternativos) mutuamente exclusivos e propriedades contraditórias (vida e morte):  $\psi \rightarrow \psi_{vivo}$  ou  $\psi \rightarrow \psi_{morto}$ .

Para o nosso dia-a-dia, isto nos parece absurdo, pois a nossa noção intuitiva de um objeto clássico é que ele não pode existir numa superposição de estados (gato morto/gato vivo) e que seu estado macroscópico não é afetado pelo ato de observação, segundo Pessoa (2003, pág. 62).

### **Principais Teses da Interpretação Ortodoxa**

Podemos dizer que na seção anterior foram expostas algumas das principais Teses da Interpretação Ortodoxa. Entre elas destacamos:

- *Postulado Quântico*: há uma descontinuidade essencial na absorção e emissão de radiação pela matéria, sendo feita através de processos de quanta de energia.

- *Complementaridade*: é o aspecto de um experimento ser ondulatório ou corpuscular, dependendo da experiência que se realiza, e as duas descrições “esgotam” a descrição do objeto.

- *Linguagem Clássica*: o mundo microscópico só é percebido através de aparelhos macroscópicos e o resultado da medição só pode ser feito na Física Clássica,

- *Totalidade*: o fenômeno quântico só é descrito completamente se no experimento, além de considerar o objeto quântico, incluímos também todo o aparelho experimental.

- *Distúrbio Interacional*: não é possível controlar os distúrbios provocados nos objetos microscópicos quando interagem com o aparelho de medição.

- *Positivismo*: a teoria quântica só trata de observações ou medições de objetos microscópicos, portanto a realidade existe desde que seja dependente do sujeito, o observador.

- *Grandezas Incompatíveis*: não é possível medir simultaneamente posição e momento ao mesmo tempo pois são grandezas incompatíveis.

- *Quebra do determinismo*: está relacionado com o fato de não falarmos mais em certezas mas de probabilidades de medição de um evento.

- *Superposição de estados*: atribuímos a cada possibilidade de um evento ocorrer um estado e a soma dos diversos estados também é um estado desse sistema.

Neste capítulo procuramos fundamentar fisicamente nosso trabalho destacando as principais Teses da Interpretação Ortodoxa. No próximo buscaremos fundamentá-la em termos de aprendizagem.

## CAPÍTULO IV – APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E MAPAS CONCEITUAIS

Neste capítulo faremos uma breve descrição da teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel (1980, 2002; Moreira, 1996) e abordaremos, também brevemente, a técnica dos mapas conceituais. A teoria de Ausubel fundamentou as aulas expositivas e o texto sobre a dualidade onda-partícula preparado para os alunos, particularmente através dos princípios da diferenciação progressiva e da reconciliação integradora. Os mapas conceituais, por sua vez, foram usados tanto como instrumentos para obter informação sobre a estrutura cognitiva dos alunos como para facilitar a aprendizagem significativa dos conceitos quânticos trabalhados.

### **Aprendizagem Significativa**

As essências do pensamento de Ausubel (2002, pág. 71) podem ser inseridas da seguinte citação dele:

*A essência do processo de Aprendizagem Significativa (...) consiste no fato de que novas idéias expressas de forma simbólica (a tarefa de aprendizagem) se relacionam àquilo que o aprendiz já sabe (a estrutura cognitiva deste numa determinada área de conhecimento), de forma não-arbitrária e não-litera, e que o produto desta interação ativa e integradora é o surgimento de um novo significado, que reflete a natureza substantiva e denotativa deste produto interativo. Ou seja, o material de instrução relaciona-se quer a algum aspecto ou conteúdo existente especificamente relevante da estrutura cognitiva do aprendiz, i.e., a uma imagem, um símbolo já significativo, um conceito ou uma proposição, quer a algumas idéias anteriores, de caráter menos específico, mas geralmente relevantes, existentes na estrutura de conhecimentos do mesmo.*

Usamos a técnica da *diferenciação progressiva e reconciliação integrativa*, como os princípios de Ausubel. O primeiro deles, conforme Moreira (1996, pág. 146), é “um princípio programático da matéria de ensino, segundo o qual as idéias mais gerais e inclusivas do conteúdo devem ser apresentadas no início da instrução e, progressivamente, diferenciadas em termos de detalhe e especificidade”. Dentro desta visão, Ausubel sugere duas hipóteses, apud Moreira (ibid): 1) existe menor dificuldade para captarmos aspectos diferenciados de um todo mais inclusivo já aprendido do que chegar ao todo a partir de suas partes diferenciadas previamente aprendidas; 2) quando um indivíduo organiza em sua mente certa disciplina existe uma estrutura hierárquica na qual as idéias mais inclusivas estão no topo da estrutura e, progressivamente, incorporam proposições, conceitos e fatos menos inclusivos e mais diferenciados. Além disso, os *organizadores prévios* (que servem de âncora provisória para a nova aprendizagem e levam ao desenvolvimento de conceitos subsunçores<sup>12</sup> que facilitem a aprendizagem imediata) podem ser utilizados para promover tanto a diferenciação progressiva como a reconciliação integrativa. Este é o princípio segundo o qual a instrução procura a relação entre as idéias na busca de similaridade e diferenças que são importantes e da reconciliação entre discrepâncias reais ou aparentes.

---

<sup>12</sup> subsunçores são conceitos, proposições, idéias claras, precisas, estáveis, já existentes na estrutura cognitiva do indivíduo.

Assim, as unidades de estudo, quando programadas de acordo com o princípio da diferenciação progressiva, devem estar numa hierarquia que obedeça a uma ordem descendente de inclusividade. Os organizadores iniciais devem fornecer um ancoradouro global (um subsunçor generalizado) para todo o material subsequente, enquanto os demais organizadores em ordem descendente de inclusividade, vão sendo usados como ancoradouro para materiais cada vez mais detalhados e diferenciados. Portanto, as próprias unidades iniciais funcionariam como *organizadores prévios* para todas as demais de modo que estas sejam planejadas para que cada uma sirva de organizador para a seguinte.

Enquanto a *diferenciação progressiva* parte das idéias mais gerais e inclusivas da matéria e estas devem ser apresentadas no início da instrução e progressivamente diferenciadas ao longo dela, a *reconciliação integrativa* parte do princípio que se deve explorar as relações entre as idéias, apontando similaridades e diferenças importantes e reconciliar discrepâncias reais ou aparentes. Portanto, diferenciação progressiva deve procurar chamar atenção para as diferenças e similaridades relevantes entre conceitos e proposições e a reconciliação integrativa deve reconciliar inconsistências reais ou aparentes. A reconciliação integrativa é o resultado de dois ou mais conceitos que são relacionados em termos de novos significados proposicionais, quase sempre pode ser melhorada a medida que o aluno reconhece novas relações conceituais.

A Figura 1 mostra uma representação esquemática dos princípios da diferenciação progressiva e reconciliação integrativa. As linhas cheias mostram a direção para diferenciação progressiva, enquanto as tracejadas mostram a reconciliação integrativa. Por isso, deve existir um “vaivém” nas hierarquias conceituais (Moreira, 1996, pág. 153).

Conceitos e proposições mais gerais e inclusivos

Conceitos e proposições intermediários, subordinados aos gerais e inclusivos

Conceitos e proposições específicos, pouco inclusivos, subordinados aos demais

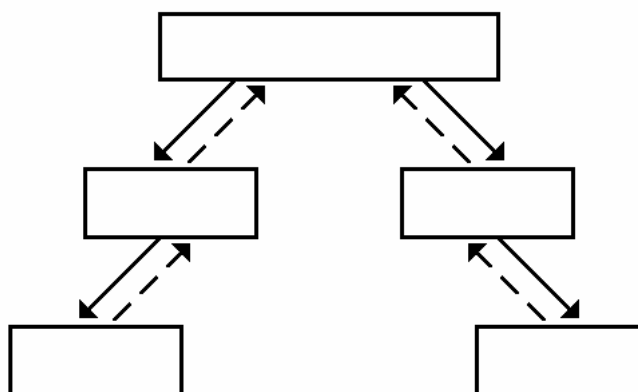


FIGURA 1 – A diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa, esquematicamente.

Não se deve pensar que este processo é simplesmente unidirecional, “de cima para baixo” e começar do “geral” para chegar progressivamente ao “particular”, mas deve-se também pensar em referências ao geral para não perder a visão do todo no sentido de elaborar cada vez mais o “geral”. Esta é a base da diferenciação progressiva e da reconciliação integrativa.

A seguir abordaremos mais dois princípios desenvolvidos por Ausubel que são a *organização seqüencial* e a *consolidação* adotados nas metodologia do ensino deste estudo.

A *organização seqüencial* consiste em seqüenciar tópicos, ou unidades de estudo, de maneira tão coerente quanto possível com as relações de dependência

naturalmente existente entre eles na matéria de ensino – desde que observados os princípios de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa. Ausubel defende que a disponibilidade de idéias-âncoras relevantes, para o uso na aprendizagem significativa e na retenção, pode ser maximizada quando se tira partido das dependências seqüenciais naturais existentes na matéria de ensino e do fato de que a compreensão de um tópico pressupõe o entendimento prévio de algum tópico relacionado. Para que ocorra a *consolidação* (domínio) do que está sendo estudado deve-se assegurar contínua prontidão na matéria de ensino e sucesso na aprendizagem seqüencialmente organizada. Para que isso ocorra é necessário que o tópico precedente seja aprendido de maneira clara, estável e organizada. Se este domínio do aluno não ocorrer não deverá se passar para o tópico seguinte, até que ele seja dominado. Portanto, a estabilidade e clareza da estrutura cognitiva pré-existente do aluno são importantes tanto para a ancoragem como para seu efeito na discriminabilidade dessas novas tarefas.

Assim, para a facilitação da aprendizagem significativa devemos levar em conta quatro tarefas fundamentais, 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 os 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 aqui é a de auxiliar o aluno a assimilar a estrutura da matéria de ensino e organizar sua própria estrutura cognitiva nessa área de conhecimentos, por meio da aquisição de significados claros, estáveis e transferíveis.*

## **Mapas Conceituais**

Novak (Novak, 2000) acredita que os mapas conceituais podem funcionar como uma estratégia facilitadora da aprendizagem significativa ou mesmo como instrumento de avaliação.

“Os mapas conceituais são uma ferramenta de representação do conhecimento”, segundo Novak. “Os mapas conceituais devem ser lidos de cima para baixo, começando-se pelos conceitos de nível superior – mais gerais – no topo, passando-se para os conceitos de nível inferior – mais específicos – na base. Os mapas conceituais também têm linhas que representam as relações entre as idéias dos diferentes segmentos do mapa.” (Novak, 2000)

A seguir, vamos explorar os mapas conceituais mais detalhadamente. Novak e Gowin (Paulo, I. J. C. et al. 2005) associam um mapa conceitual com um mapa rodoviário visual, onde os trajetos representam os significados de conceitos que

resultam em proposições. Dentro deste contexto, o mapa conceitual serve como um resumo do que foi aprendido e pode também ser uma conclusão de uma fase de aprendizagem.

Num mapa conceitual estão representadas as relações entre idéias, conceitos e concepções do aluno. Em geral apresentam uma relação hierárquica entre conceitos dentro de uma disciplina, de modo que as palavras em evidência e as relações das linhas que ligam estas palavras sejam uma representação externa de representações internas do aluno aprendiz, sem reproduzir todo o entendimento do mesmo.

Podemos resumir dizendo que o mapa conceitual é uma representação de diversas relações entre conceitos. Os mapas conceituais podem ser utilizados como instrumentos de avaliação da aprendizagem.

Podemos organizar os mapas conceituais de maneira que a *organização hierárquica* esteja presente de tal modo que os conceitos mais abrangentes estejam acima e os menos inclusivos (apresentando uma boa organização e hierarquização que facilitará ao professor uma avaliação e quantificação) abaixo. Poderão também mostrar a *diferenciação progressiva* (descer no mapa conceitual, ver Figura 2 – linhas cheias – o que significa o grau de diferenciação dos conceitos que representam ligações proposicionais específicas mostrando uma hierarquização entre conceitos) e *reconciliação integrativa* (subir no mapa – quando dois ou mais conceitos estão relacionados em termos de novos significados de proposições, o que pode ser vantajoso pois estas relações podem ser melhoradas à medida que o aluno reconhece novas relações conceituais) de Ausubel, (apud Paulo et al., 2005, pág. 54).

Os mapas conceituais são adequados para serem utilizados como ferramentas de planejamento, ferramentas de diagnósticos de concepções e como recursos instrucionais. Novak e Gowin (ibid.), afirmam que os mapas conceituais podem, também, ser utilizados como recursos tanto para o ensino de tópicos como para a avaliação dos alunos.

Novak apresenta critérios para a pontuação de mapas conceituais que foram adaptados e aqui apresentamos como sugestões. As pontuações sugeridas por Novak serviram como proposta nesta dissertação, como veremos na seção VI.2.

### **Proposições:**

A relação de significados entre dois conceitos deve ser indicada pela linha que os une e pelas palavras de ligação. Atribui-se 1 ponto para cada “proposição válida e significativa”.

### **Hierarquia:**

Cada conceito subordinado deve ser mais específico e menos geral que o conceito escrito acima dele, considerando o ponto de vista sob o qual se constrói o mapa. Atribui-se 5 pontos para cada nível hierárquico válido.

### **Ligações cruzadas:**

O mapa conceitual deve apresentar ligações significativas entre um segmento da hierarquia conceitual e outro segmento. Essa relação de ser “válida e significativa”, para cada ligação atribui-se 10 pontos e soma-se nesta etapa, mais 2 pontos para cada ligação cruzada que seja válida mas não traduza qualquer síntese entre grupos de proposições ou conceitos relacionados.

Como descrito antes, os mapas conceituais foram feitos pelos alunos das turmas 301 e 302 em sala de aula e permitiu-se que alguns fossem concluídos em casa. Os mapas trabalhados por eles foram sobre o “Princípio de Incerteza” e o “Gato de Schrödinger”. Em geral, foram feitos individualmente, poucos em grupos. Mapas

conceituais foram dados, anteriormente, a eles como parte da matéria e explicado como construir estes mapas.

Ou seja, foi apresentado um mapa conceitual para os alunos sobre o experimento de dupla fenda, esperava-se que eles entendessem a idéia principal do instrumento que era a de trabalhar com os conceitos e fazer as interligações entre eles, quando fosse possível. A seguir, foi dada aos alunos a tarefa de fazer um mapa conceitual sobre o “Princípio da Incerteza” e o “Princípio de Superposição – Gato de Schrödinger”. Eles então apresentaram sua versão dos mapas conceituais evidenciando os conceitos, colocaram suas definições e fizeram algumas ligações.

Eles então apresentaram a sua versão, que ficou mais semelhante a esquemas conceituais, mas nem por isso eles perderam a sua validade para a compreensão da matéria, uma vez que além de colocarem os conceitos, colocaram também suas definições, mas foram raros os alunos que interligaram os conceitos entre si.

A concepção adotada nesta proposta é a da aprendizagem significativa proposta por Ausubel e Novak, uma vez que tal princípio fornece um “fundamento lógico” aos professores, para que estejam aptos a fazer uma melhor escolha entre os vários métodos existentes de trabalho. Dentro destas perspectivas de Ausubel e Novak, fizemos o desenvolvimento dos tópicos para o modelo quântico sobre o “Princípio da Incerteza” e o “Princípio de Superposição – Gato de Schrödinger” que será visto no seção VI.2.



## CAPÍTULO V – CONSTITUIÇÃO DE DADOS

O Colégio Estadual Inácio Montanha é uma escola pública; ela, como usualmente ocorre nesse tipo de escola, não possui muitos recursos materiais. No entanto, podemos destacar que se encontram na escola funcionando dois aparelhos de vídeo, duas televisões, dois retroprojetores, uma biblioteca razoavelmente boa e quatro computadores, dos quais três os alunos têm acesso, pois estão localizados na biblioteca. O outro encontra-se na sala dos professores e, em geral, é do uso dos mesmos. Os computadores não têm acesso à Internet.

Foi utilizada a apresentação de um vídeo (produzido por David Chamberlain para Northey Productions for TV Ontário, Canadá, 1985) onde os seguintes tópicos são desenvolvidos:

- Dualidade onda-partícula.
- O modelo de partícula.
- O modelo de onda.
- O modelo eletromagnético.
- A idéia do quantum.
- Fótons.
- Ondas de matéria.

Durante a abordagem deste tópico também ocorreu a utilização de um retroprojetor da escola para apresentar o conjunto de diapositivos “A matéria é feita de átomos!” (que está no Apêndice, pág. 151). O problema da “Dupla Fenda” e do “Gato de Schrödinger” foram apresentados no PowerPoint com um *datashow* do Instituto de Física da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), já que a escola não dispunha desse recurso.

Foi também utilizado um polígrafo desenvolvido pelo professor especialmente para os alunos acompanharem as propostas da introdução à Mecânica Quântica: **Notas de aula sobre o átomo e a Mecânica Quântica**, apresentado, na íntegra, nas páginas 85 a 98 cujos tópicos abordados foram:

- Quantum! – o que é isso?
- Efeito fotoelétrico.
- Dualidade onda-partícula.
- Um experimento para onda-partícula – “Dualidade”.
- Princípio de Incerteza.
- Princípio da Superposição – Gato de Schrödinger.

Uma das maneiras de verificar a compreensão dos alunos sobre o assunto é utilizando a técnica dos “mapas conceituais” que também vai ser usada, então, como um modo adicional de avaliar o aluno, conforme proposto por Novak (2000, pág. 192), em um desses tópicos, além dos testes aplicados.

### **Desenvolvimento didático com perfil epistemológico**

O que estamos procurando aqui é também tentar obter indicadores do perfil epistemológico dos alunos, o qual pode ser interpretado sob vários pontos de vista. Podemos relacioná-lo com o animismo, o realismo, o positivismo, o racionalismo, o racionalismo complexo e o racionalismo dialético, sendo que estes dois últimos podem ser agrupados no ultra-racionalismo. Esta proposta está fundamentada nos diversos

significados dos conceitos filosóficos que estão presentes no dia-a-dia do pensamento humano. Ou seja, vamos considerar que o nosso perfil epistemológico se dá no sentido do progresso intelectual desde o animismo passando pelo realismo, positivismo, racionalismo simples (segundo Bachelard, 1991, pág. 21) até o ultra-racionalismo (racionalismo complexo e racionalismo dialético). Esta perspectiva está baseada na “Filosofia do não” de Bachelard (1991). Assim, o pensamento científico fornece pois um referencial para a classificação das filosofias e para o estudo do progresso da razão.

Para exemplificarmos este estudo, vamos usar o conceito científico de *massa* para fazer uma demonstração filosófica de Bachelard (ibid.) do pensamento científico.

#### a) *Princípio Animista*

A noção de massa mais grosseira corresponde a uma realidade mais primitiva. Portanto, massa, para uma criança, corresponde o fruto maior é o melhor, aquele que define ou traz mais claramente o desejo. Esta noção de massa torna mais presente a vontade de comer. Este é o primeiro conhecimento. Daí surge o conceito mais enraizado e primitivo do ser humano que chamamos de animista. Porém, este conceito bloqueia o conhecimento, ou seja, é um obstáculo epistemológico para um conceito mais abrangente e um pouco mais completo. Convém lembrar que um sintoma muito comum de que um conceito animista é aprendido é sua rapidez com que o entendemos. Isto acaba sendo um mau sinal porque tudo que é fácil de entender é inexato, pois deixamos de lado a aritmética e a geometria, na visão de Bachelard.

#### b) *Princípio Realista*

Uma outra noção de massa corresponde a um emprego empírico, sendo este conceito ligado à utilização de uma balança. Isto está ligado a uma objetividade instrumental. Por isso, podemos dizer que o instrumento precede a sua teoria. Esta máquina é governada de um modo *simples*, com um conjunto de *conceitos empíricos* mas mal concebidos e mal articulados, porém reunidos de uma forma pragmaticamente segura. Sendo assim, um pensamento empírico associado a uma experiência tão decisiva, simples, recebe o nome de pensamento realista.

#### c) *Princípio Racionalista (Física Clássica)*

Um terceiro aspecto sobre o pensamento de massa, surge nos anos de 1670 quando nasce, com Newton, a mecânica racional. A noção de massa aparece como um corpo de noções e não mais como elemento primitivo de uma experiência imediata e direta. Assim, a massa passa a ser definida, conforme Newton, como o quociente entre força e aceleração. Dessa forma surge uma noção claramente racional de força, aceleração e massa, que está relacionada perfeitamente pelas leis racionais da aritmética. Essas três noções, massa, força e aceleração, são as mais diversas possíveis para a visão realista e reuni-las numa mesma fórmula parecia quase impossível. Porém, ao fazermos uma correlação entre os três pode-se deduzir uma das noções, seja ela qual for, a partir das outras duas.

#### d) *Princípio Ultra-racionalista (Física Moderna)*

Porém, com a Relatividade, o racionalismo newtoniano (e também kantiano) fechado deve ser mais ampliado. Chega-se à conclusão que a noção de massa só é simples em primeira aproximação. Com a Relatividade descobre-se que a massa passa a ser dependente da velocidade, o que antes não era, e absoluta no espaço e no tempo. O que antes se imaginava que era o repouso absoluto agora não tem mais significado, assim como a noção de *massa absoluta*. A Relatividade além de afetar a noção de massa

também afeta as noções do espaço-tempo. Passa ser impossível definir a massa de forma tão simples como na noção newtoniana e não se pode mais separar massa de energia. Desse modo, a noção complexa, é substituída por outra de base mais complexa.

Portanto, a ciência só avança quando diz não à ciência já estabelecida mudando sua constituição.

A massa na mecânica de Dirac (apud Custódio e J. Zanetic, 1999, pág. 11 e Bachelard, 1991, pág. 136) será o elemento do ultra-racionalismo dialético, que é o quinto nível da filosofia. Passemos, agora, a noção de massa quando pesquisamos uma noção estranhamente dialetizada, onde aparecem duas massas para um só objeto. Uma das massas está dentro das quatro filosofias já estudadas: realismo ingênuo, empirismo, racionalismo newtoniano, racionalismo completo eisteniano. Porém, a outra massa, dialética da primeira, é uma *massa negativa* (relativa à anti-matéria), que é um conceito totalmente inadmissível nas quatro outras filosofias estudadas. Portanto, uma metade da mecânica de Dirac continua a Mecânica Clássica e a Relativista e a outra metade aparece numa noção fundamental. De fato, essa massa nunca teria sido encontrada se fosse meditado sobre a essência do conceito dela quando se aprofunda a noção newtoniana e relativista de massa. Bachelard (1991, pág. 36) admite não saber solucionar este problema como matemático, dizendo que devemos acumular as interrogações vagas e filosóficas que vêm ao espírito. Depois conclui que “o átomo é uma sociedade matemática que ainda não nos revelou o seu segredo;...” e que não pode ser simplesmente respondido por uma aritmética simples.

A Figura 2 resume o que Bachelard propõe, o conceito de massa e suas diferentes interpretações, relacionando as teorias com cada visão filosófica. (Gráfico reproduzido de A. Custódio Pinto e J. Zanetic, do texto “É possível levar a Física Quântica para o Ensino Médio?” Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis vol.16, abril, 1999).

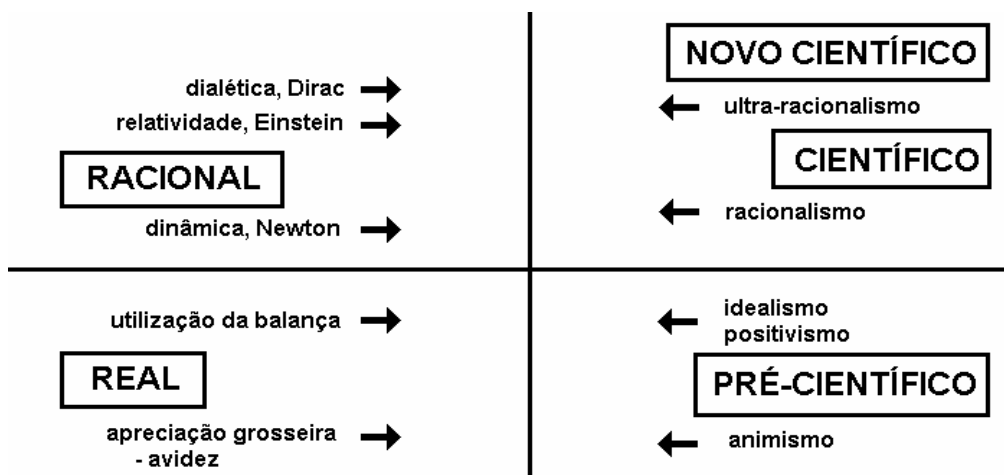


Figura 2 – Gráfico relacionando o conceito de massa com as diferentes concepções filosóficas (animismo, realismo, racionalismo, ultra-racionalismo – complexa e dialética)

Observando a Figura 2, e sob o ponto de vista de Bachelard, reconhece-se a importância racionalista de massa, noção que adquirimos com a nossa educação clássica, e que, para nós, a noção de massa é uma noção racional. Devemos ter cuidado pois o nosso racionalismo newtoniano e kantiano obstrui o racionalismo completo e dialético, atrapalhando o progresso da cultura científica individual.

Resumindo: em qualquer atitude filosófica geral pode existir um perfil epistemológico que revela um pluralismo filosófico. Portanto, observamos que há uma escassez de conhecimento quando lidamos com uma só filosofia.

Em continuidade, mostramos o cronograma das aulas desenvolvidas e logo após as questões utilizadas para a elaboração do pré e pós-teste. Em cada questão pode-se escolher a alternativa que melhor a responde, segundo um perfil epistemológico elaborado a seguir. Neste perfil tenta-se levantar as “tendências filosóficas” dos alunos. É necessário dizer que os quadros avaliativos que aparecem após cada questão não constaram no pré-teste e pós-teste dos alunos. A pontuação é dada em ordem decrescente, de 4 a 0 (valor zero é quando o aluno não respondeu a questão) cujo valor máximo corresponde à visão daquele conceito que está presente no quadro. Atribuiu-se o valor 4 para Ultra-racionalista, 3 para o Racionalista, 2 para o Realista e 1 para o Animista. No final desta seção onde estão somente as questões que foram apresentadas aos alunos com seu respectivo gabarito.

### **Cronograma das aulas desenvolvidas**

**1ª aula: Realização do Pré-teste e entrega do texto básico** – dia 15/08 turmas 301 e 302.

Exposição da proposta de trabalho, justificando, em primeiro lugar, porque aprender Mecânica Quântica (MQ) ao nível de Ensino Médio. Apresentação do trabalho, em linhas gerais, a ser desenvolvido durante o curso. Estabeleceu-se diálogo com os alunos a fim de verificar se conheciam algo a aplicação e exploração das novas conquistas modernas através da MQ.

28 alunos da turma 301 e 21 alunos da turma 302 num total de 49 alunos realizaram o pré-teste, elaborado a fim de saber o que os alunos já conheciam dos conceitos de mecânica quântica (MQ), ou seja, dentro da visão de “conhecer aquilo que o aluno já sabe para trabalhar os novos conceitos”. Explicou-se que o pré-teste não tinha intuito de ser avaliativo para contar como nota e sim verificar o que eles já sabiam sobre MQ. Como esperado, o pré-teste não revelou nenhum resultado positivo, pois os alunos jamais tinham trabalhado com a noção da MQ sobre ondas e partículas.

Neste dia também foi entregue a todos os alunos o texto **Notas de aula sobre o átomo e a Mecânica Quântica** elaborado pelo professor.

**2ª aula: A importância da Mecânica Quântica e apresentação do diapositivo “A matéria é feita de Átomos”** (ver Apêndice, pág. 152) – dia 16/08 turma 302 e dia 18/08 turma 301.

Foi desenvolvida uma explicação sobre a importância da Mecânica Quântica e a sua utilização no mundo atual e no século passado. Logo após foi realizada uma leitura do texto elaborado pelo autor sobre um pequeno histórico do desenvolvimento da Mecânica Quântica. Foi efetuada uma exposição de transparências no auditório da escola sobre o desenvolvimento histórico dos modelos atômicos “pudim de passas” X “planetário”, primeira parte do trabalho desenvolvido pelo autor das transparências do “A Matéria é feita de átomos!” (o que correspondeu até a página 5 – “O modelo do Atomismo”, pág. 156).

**3ª aula: Continuação da apresentação dos diapositivos “A matéria é feita de Átomos” – dia 19/08 turma 302 e dia 22/08 turma 301.**

A segunda parte do desenvolvimento histórico dos dois modelos atômicos (desde “A descoberta do elétron”) continuou (até “Hipótese de Bohr”) no auditório com a exposição de lâminas no retroprojektor. Apresentação de um breve histórico sobre o desenvolvimento da MQ ocorrido no início do século passado. Desenvolvimento de alguns modelos atômicos surgidos no início dos anos de 1900, mostrando o modelo de Thomson, Rutherford e Bohr e o seu modelo de onda. Em ambas as turmas foram feitas leituras do texto-base. Quando perguntados como eles avaliavam esse procedimento didático, manifestaram-se positivamente.

**4ª aula: Continuação da apresentação dos diapositivos “A matéria é feita de Átomos” – dia 22/08 turma 301 e 23/08 turma 302.**

Continuação, para ambas as turmas, do desenvolvimento histórico dos dois modelos e a determinação da escolha de um dos modelos. Para a turma 302 falou-se sobre a interpretação do modelo atômico na visão da Mecânica Quântica, explicação do sucesso do modelo quântico para o átomo e como suplantou os conceitos da Mecânica Clássica. Em ambas as situações também se utilizaram lâminas e o retroprojektor do auditório (foram apresentados “Modelo quântico I” e “Modelo quântico II”).

**5ª aula: Continuação da apresentação dos diapositivos “A matéria é feita de Átomos” – dia 25/08 turma 301 e dia 26/08 turma 302.**

Com a turma 301 foi desenvolvido o modelo atômico na visão da Mecânica Quântica e na turma 302 apresentou-se o “efeito fotoelétrico” com a utilização do texto-base, em ambos os casos utilizou-se as lâminas (“Efeito fotoelétrico”) e o retroprojektor da escola. A ilustração do “Efeito Fotoelétrico” como precursor dos pacotes (quanta) de energia capazes de arrancar elétrons de uma placa metálica. Foram citados exemplos de sua utilização na nossa vida diária, como nas portas dos elevadores, lojas, supermercados. Abordou-se o modelo atômico concebido por Bohr de tal modo que os elétrons permaneçam estáveis em sua órbita desde que estejam num determinado nível de energia. Explicação de como ocorrem os saltos quânticos de uma órbita para outra. Apresentação da equação de energia e mostrar que energia varia em saltos descontínuos, isto é, a relação Matemática de Planck que empregou primeiramente na radiação do corpo negro.

**6ª aula: Continuação da apresentação dos diapositivos “A matéria é feita de Átomos” e pesquisa sobre ondas eletromagnéticas – dia 29/08 ambas as turmas 301 e 302.**

A turma 301 trabalhou inicialmente o “efeito fotoelétrico” com a exposição de lâminas no auditório e na leitura do texto-base adotando-se o mesmo procedimento empregado na 5ª aula na turma 302. A turma 302 realizou na biblioteca uma pesquisa, com trabalho em grupo, sobre ondas eletromagnéticas evidenciando, principalmente o comportamento delas, e

sobre o seu espectro eletromagnético. Ficaram de apresentar o trabalho na próxima aula.

**7ª aula: Pesquisa sobre ondas eletromagnéticas e continuação da apresentação dos diapositivos “A matéria é feita de Átomos” – 29/08 turma 301 e 30/08 turma 302.**

A turma 301 realizou na biblioteca uma pesquisa, um trabalho semelhante ao da 302 sobre ondas eletromagnéticas, evidenciando principalmente o comportamento delas, e sobre o seu espectro eletromagnético. A turma 302 foi ao auditório para uma exposição das lâminas (“Dualidade onda-partícula I”) sobre a dualidade onda-partícula e leitura sobre o texto-base.

A apresentação de grupo sobre onda eletromagnética, a pedido dos alunos, foi transferida para a próxima aula.

**8ª aula: Abordagem da Dualidade onda-partícula – 01/09 turma 301 e 02/09 turma 302.**

Trabalhou-se novamente com a dualidade onda-partícula com as duas turmas com a utilização do texto-base, tópico “Dualidade onda-partícula”. Explicação do sucesso do modelo quântico para o átomo e como suplantou os conceitos da Mecânica Clássica. Utilização do polígrafo (“Dualidade onda-partícula”) para acrescentar novos conceitos e a realização de novo debate. Apresentação do exemplo comparativo da bola de futebol e de um elétron passando por uma fenda. Usou-se também apresentação de lâminas (“Dualidade onda-partícula II”) no auditório.

**9ª aula: As ondas eletromagnéticas – 05/09 turmas 301 e 302.**

Apresentação pelos alunos sobre o comportamento e o espectro das ondas eletromagnéticas, os quais utilizaram cartazes e quadro negro para explicação. Em geral, eram cinco alunos por cada grupo mas caso em que os alunos (na 301) não tinham vindo na aula do trabalho em que se admitiu apenas dois alunos no grupo.

**10ª aula: As ondas eletromagnéticas – 05/09 turma 301 e 06/09 turma 302.**

Continuação da apresentação do trabalho em grupo nas duas turmas.

**11ª aula: As ondas eletromagnéticas – 06/09 turma 302 e 08/09 turma 301.**

Continuação da apresentação do trabalho em grupo nas duas turmas.

**12ª aula: As ondas eletromagnéticas – 12/09 ambas as turmas 301 e 302.**

Encerramento da apresentação do trabalho em grupo nas duas turmas. Em geral, a apresentação do trabalho da turma 301 foi ligeiramente superior ao da outra turma, pois houve mais explicação, cartazes maiores e melhor desenhados.

**13ª aula: Apresentação do vídeo sobre Mecânica Quântica e Interferência** – 12/09 turma 301 e 13/09 turma 302.

Apresentação do vídeo sobre Mecânica Quântica no auditório para ambas as turmas em momentos diferentes, com o conteúdo

- Dualidade onda-partícula.
- O modelo de partícula.
- O modelo de onda.
- O modelo eletromagnético.
- A idéia do quantum.
- Fótons.
- Ondas de matéria.

Comentário do efeito onda-partícula passando por duas fendas usando também o texto “Um experimento para onda-partícula – ‘Dualidade’”. Apresentação do exemplo de ondas construtivas e destrutivas conforme aparece no texto, usando lâminas (“Interferências construtiva e destrutiva”), também no auditório. Também se descreveu o que era probabilidade que aparece mais adiante no texto-base.

**14ª aula: Apresentação sobre a interferência de partículas e ondas – comportamento dual da matéria** – 15/09 turmas 301 e 302.

Os alunos foram convidados a participar de uma simulação, em PowerPoint, sobre um experimento de dupla fenda que está na página <http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/computer/doppelspalt/dslit.html>.

Nesta oportunidade fez-se a simulação de fótons, elétrons e prótons passarem por uma dupla fenda mostrando o padrão de interferência produzido por eles numa tela. O que acontece com o padrão da densidade de probabilidade quando se procura saber por qual fenda passou o objeto quântico.

Depois se fez a apresentação de *slides* sobre o Gato de Schrödinger em PowerPoint. Neste assunto, alguns alunos preocuparam-se com o bem estar do gato. O problema desapareceu quando se frisou que era um experimento de pensamento. Estiveram presentes nesta apresentação 15 alunos da turma 301 e 8 alunos da turma 302.

**15ª aula: Dualidade onda-partícula** – 16/09 turma 302 e 03/10 turma 301.

Fez-se nova revisão do experimento onda-partícula para a turma 302.

Na 301, fez-se um mapa conceitual sobre “O modelo Atômico” que abrangia os modelos de “pudim de passas” de Thomson e “planetário” de Rutherford e o modelo desenvolvido por Bohr. Ainda estava presente neste mapa conceitual o “quantum”, o “efeito fotoelétrico” a “dualidade onda-partícula”. Na apresentação do quantum de energia, uma aluna colocou dúvidas na sua interpretação, gerando a necessidade de uma explicação mais alongada sobre o assunto.

**16ª aula: O Princípio de Incerteza e o Gato de Schrödinger – Princípio de Superposição – e construção de mapa conceitual – 03/10 turma 301 e 04/10 turma 302.**

Na turma 301 foram dadas as explicações dos assuntos “Princípio de Incerteza” e o “Gato de Schrödinger” salientando novamente que era um experimento de pensamento para apaziguar a reação dos alunos. Houve dúvidas sobre o assunto do “Princípio de Incerteza” quanto à questão de localização (posição  $x$ ) da partícula e do momento (velocidade) da partícula. Logo após, foi pedido que eles construíssem, individualmente, um mapa conceitual sobre esses dois tópicos. Como não haviam terminado, ficaram de entregar o trabalho completo na próxima aula. A aula foi interrompida para os alunos fazerem votação para o Grêmio da escola.

Na turma 302, além de trabalhar com o “Princípio de Incerteza” e o “Gato de Schrödinger” também foi realizada uma explicação sobre o mapa conceitual envolvendo aqueles assuntos desenvolvidos na aula anterior da turma 301.

**17ª aula: Trabalho com mapa conceitual do Princípio de Incerteza e Gato de Schrödinger – 07/10 turma 302 e 10/10 turma 301.**

Para os alunos da turma 302 foi solicitado que eles fizessem o mapa conceitual do “Princípio de Incerteza” e do “Gato de Schrödinger” para eles entregarem na próxima aula. Observou-se como deveriam ser feitos e foi dada uma sugestão aos alunos na construção do mapa. Os mapas conceituais dos alunos encontram-se na seção VI.2 (pág. 108). Também foi apresentado um mapa conceitual sobre assuntos do texto já trabalhado:

- Objetivo
- Introdução
- Quantum! – o que é isso?
- Efeito fotoelétrico
- Dualidade onda-partícula
- Um experimento para onda-partícula – “Dualidade”

**18ª aula: Realização de pós-teste – 18/10 turmas 301 e 302.**

Foi aplicado o pós-teste em ambas as turmas, sendo este o encerramento da aplicação do material sobre a Mecânica Quântica para alunos do Ensino Médio. Também havia um questionário solicitando que dessem opinião sobre o curso (ver seção VI.3, pág. 123).

**Considerações Sobre as Aulas Dadas nas Turmas 301 e 302**

Considerando que as aulas tiveram um tempo de aplicação adequado e apesar dos percalços que ocorreram durante o curso que aqui são relacionados, deve-se também levar em conta as dificuldades próprias das novidades conceituais e do texto utilizado como subsídio das aulas. Entretanto, o desenvolvimento das aulas utilizando os diapositivos ilustrativos, vídeo e um programa da Internet sobre o assunto ajudaram a



facilitar a compreensão dos alunos e fazer com que eles se interessassem mais pelo assunto.

Em ambas as turmas, o pré-teste revelou o mesmo desconhecimento inicial dos alunos sobre o assunto.

Em geral, em todas as aulas houve pouca participação dos alunos, em ambas as turmas, tanto nas aulas expositivas, como nas de *diapositivos*, vídeo e televisão e com apresentação do *data show* na universidade (na verdade, quando se apresentou o “Gato de Schrödinger” esta foi a situação que trouxe um certo espanto ao se falar de um gato preso o qual estaria sujeito à morte). Em uma das aulas uma dúvida foi manifestada por uma aluna sobre a quantização de energia. Surgiu dúvida também no “Princípio de Incerteza” levantada por um aluno. Em ambas as situações foram feitas novas explicações sobre o assunto, o que contentou os referidos alunos.

Nas primeiras aulas, as turmas prestaram atenção apesar de não fazerem perguntas (aulas expositivas com *diapositivos*, *data show*, vídeo), mas à medida que estas eram desenvolvidas percebeu-se um aumento da conversa entre os alunos, não significando que estivessem desinteressados. Também se deve acrescentar que a presença dos alunos girava sempre, em cada aula, em torno dos 90%, o que deve ter afetado um pouco o resultado do pós-teste.

Uma dificuldade detectada pelo professor é que os alunos tinham pouco hábito de leitura e provavelmente não se preparam para o pós-teste, uma vez que o texto tinha em torno de 11 páginas apesar de ter muitas figuras ilustrativas. Outra característica do texto é que havia somente duas equações matemáticas, o que significa que o autor priorizou, na maior parte do tempo, as explicações e conceitos novos sobre a MQ.

Por outro lado, podemos dizer a favor da nova abordagem sobre o comportamento do átomo é que em geral os alunos, que não se interessavam por Física de um modo geral, tiveram seu interesse aumentado o que despertou grande expectativa no professor para os resultados obtidos.

Na avaliação do pós-teste também devemos considerar que os alunos passaram quase 10 dias sem aula, devido a uma gincana realizada na escola, o que deve ter prejudicado seu desempenho no pós-teste.

### **Análise do alcance dos objetivos no desenvolvimento das aulas sobre Mecânica Quântica**

Vamos fazer aqui uma avaliação de cada questão do pós-teste para ver que objetivos foram propostos, tendo em vista saber quais desses foram alcançados pelos alunos de um modo quantitativo. Devemos considerar que foram excluídas certas questões para melhor o coeficiente de Cronbach e por isto a numeração das questões não é corrida. Assim, após cada questão ser examinada obteremos um percentual de acertos feitos pelos alunos. Nesta mesma análise também indicaremos qual a filosofia ou princípio envolvido em cada questão conforme o texto “Desenvolvimento didático com perfil epistemológico” (Pinto e Zanetic, 1999). Com isto pretende-se averiguar muito tentativamente, não como definitiva e absoluta, a tendência do perfil epistemológico de cada aluno baseado nas suas respostas. Usando-se o referencial de Bachelard vamos analisar tudo isso:

**Questão 1:** A palavra átomo, o último elemento ..... da matéria (Bachelard, 1971, pág. 61), surgiu como uma tentativa de explicar do que ela é feita.

- a) divisível
- b) indivisível
- c) destrutível
- d) indestrutível
- e) invisível

Resposta certa letra B: o aluno deve identificar o significado da palavra átomo. Esta é uma indicadora de visão ANIMISTA, pois este significado é o mais primitivo da concepção do átomo.

**Questão 3:** Rutherford supõe que a estrutura atômica seja semelhante ao .....

- a) da matéria indivisível e indestrutível em constante movimento.
- b) átomo divisível com diferentes partículas no seu interior.
- c) pudim de passas com partículas positivas e negativas inseridas numa massa.
- d) sistema solar sendo que os planetas seriam os elétrons em órbita circular ao redor do Sol.
- e) de uma série de ondas estacionárias ao redor do núcleo.

Resposta certa letra D: o aluno deve entender a evolução histórica da compreensão de átomo. Indicadora de visão RACIONALISTA, pois ainda possui uma noção clássica de átomo.

**Questão 4:** A MQ, atualmente, descreve o átomo como sendo composto .....

- a) de matéria indivisível e indestrutível em constante movimento.
- b) com diferentes partículas espalhadas no seu interior.
- c) como pudim de passas com partículas positivas e negativas inseridas numa massa.
- d) por uma série de ondas estacionárias circundando o núcleo.
- e) como o sistema solar sendo que os planetas seriam os elétrons em órbita circular ao redor do Sol.

Resposta certa letra D: o aluno deve entender que existe uma onda associada ao movimento da partícula. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, pois está presente o conceito de dualidade onda-partícula.

**Questão 5:** Einstein, no efeito fotoelétrico, partindo da idéia de quantum de Planck, supôs que a luz se propagaria como pacotes, ou fótons de energia,.....

- a)  $E = mc^2$
- b)  $E = hf$
- c)  $E = mv$
- d)  $p = h/\lambda$

e)  $p = hc$

Resposta certa letra B: o aluno deve associar corretamente o conceito com sua equação. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, pois está relacionado com conceitos modernos da Física, o que não pode ser explicado através da Física Clássica.

**Questão 6:** Os elétrons só podem saltar de uma órbita a outra ..... quantidade de energia.

- a) sem emitir ou sem absorver qualquer
- b) emitindo ou absorvendo qualquer
- c) emitindo ou absorvendo uma definida
- d) emitindo uma definida
- e) absorvendo qualquer

Resposta certa letra C: o aluno deve compreender como se comportam objetos quânticos. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, pois somente a Física Moderna explica adequadamente este fenômeno.

**Questão 7:** Muitos físicos ainda interpretam as partículas elementares como se comportassem..... e que a luz é só ..... obedecendo exclusivamente os princípios de onda.

- a) somente como partículas – uma onda eletromagnética
- b) somente como partículas – uma partícula
- c) como ondas eletromagnéticas – um quantum
- d) somente como partículas – um quantum
- e) como quanta – uma onda eletromagnética

Resposta certa letra A: o aluno deve entender os conceitos que dominaram por muito tempo a Física Clássica. Indicadora de visão RACIONALISTA, pois é uma noção clássica de luz.

**Questão 8:** Para duas ondas contínuas de mesmo comprimento de onda propagando-se na mesma direção e sentido a superposição pode ser construtiva com .....ou destrutiva com .....

- a) cristas coincidindo com vales – cristas coincidindo com cristas
- b) vales coincidindo com cristas – vales coincidindo com cristas
- c) cristas coincidindo com cristas – vales coincidindo com vales
- d) vales coincidindo com vales – cristas coincidindo com cristas
- e) cristas coincidindo com cristas – cristas coincidindo com vales

Resposta certa letra C: o aluno deve entender os conceitos de Física Clássica. Indicadora de visão RACIONALISTA, pois são conceitos de Física Clássica.

**Questão 10:** Dependendo do experimento que se realiza .....  
(fóton, elétron, nêutron, próton, molécula) pode se comportar como  
.....

- a) o objeto quântico – uma onda, ou seja, pode apresentar interferência.
- b) a partícula – uma partícula, ou seja, pode apresentar distribuição clássica.
- c) a bala de uma metralhadora – uma onda, ou seja, pode apresentar interferência.
- d) a bala de uma metralhadora – uma partícula, ou seja, pode apresentar distribuição clássica.
- e) o objeto quântico – uma bala de metralhadora, ou seja, pode apresentar distribuição clássica.

Resposta certa letra A: o aluno deve diferenciar concepção de Física Clássica da Física Quântica. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, porque somente na Física Quântica é que os objetos quânticos podem ter comportamento de onda.

**Questão 14:** No experimento da dupla-fenda quando não vemos os elétrons, nenhum fóton perturba-o,....., e quando o vemos, um fóton perturba-o destruindo.....

- a) temos o padrão de interferência – o padrão clássico de distribuição
- b) temos o padrão de interferência – o padrão de interferência
- c) não temos o padrão de interferência – o padrão de interferência
- d) não a temos o padrão de interferência – o padrão clássico de distribuição
- e) temos o padrão de distribuição clássica – o padrão de interferência

Resposta certa letra B: o aluno deve diferenciar um fenômeno quântico de um clássico. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, pois o fenômeno também tem que ser interpretado sob a visão da Quântica.

**Questão 15:** Segundo Bohr um experimento não pode ser ao mesmo tempo ondulatório ou corpuscular, na sua versão forte, ou seja,  
*Um sistema quântico ou exhibe aspectos corpusculares, .....bem definidas, ou aspectos ondulatórios como a formação de um padrão....., dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo.*

- a) seguindo trajetórias – de interferência
- b) não seguindo trajetórias – de interferência
- c) seguindo trajetórias – clássico de distribuição
- d) não seguindo trajetórias – de interferência e clássico de distribuição
- e) seguindo trajetórias – de interferência e clássico de distribuição

Resposta certa letra A: o aluno deve diferenciar entre os dois fenômenos, clássico ou quântico. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, pois é uma visão quântica do fato.

**Questão 16:** O experimento de dupla fenda não permite determinar por qual fenda passou o elétron sem destruímos a ..... e isto se relaciona com uma dificuldade própria da Mecânica Quântica que está presente .....

- a) interferência – na superposição de estados
- b) distribuição clássica – no Princípio de Incerteza
- c) interferência – no efeito fotoelétrico
- d) distribuição clássica – na superposição de estados
- e) interferência – no Princípio de Incerteza

Resposta certa letra E: o aluno deve identificar conceitos da Física Quântica. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, porque se relaciona a um conceito quântico.

**Questão 17:** Como a desintegração de uma partícula é um processo.....o material .....decair nesta uma hora.

- a) clássico – tem que
- b) quântico – tem que
- c) clássico – pode ou não pode
- d) quântico – pode ou não pode
- e) clássico – não pode

Resposta certa letra D: o aluno deve identificar conceitos da Física Quântica. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, porque se relaciona a um conceito quântico.

**Questão 18:** A questão proposta por Schrödinger era: “Qual o estado do gato antes de a caixa ser aberta?” Se o sistema inteiro está representado por uma função de onda  $\psi_{vivo}$  indicando o estado “gato vivo” e  $\psi_{morto}$  o estado “gato morto”, então a função pode ser apresentada como:

- a)  $\psi \rightarrow \psi_{vivo}$
- b)  $\psi \rightarrow \psi_{morto}$
- c)  $\psi \rightarrow \psi_{vivo} + \psi_{morto}$
- d)  $\psi \rightarrow sem\ gato$
- e)  $\psi \rightarrow com\ gato$

Resposta certa letra C: o aluno deve identificar conceitos da Física Quântica. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, porque se relaciona a um conceito quântico.

**Questão 19:** A palavra átomo quer dizer “indivisível” e surgiu com Demócrito, na Grécia, como uma tentativa de explicar o que é

- a) matéria
- b) espaço
- c) tempo

- d) difração
- e) interferência

Resposta certa letra A: o aluno deve identificar o conceito de átomo de modo primitivo. Indicadora de visão ANIMISTA, pois está relacionado à noção mais grosseira de átomo que corresponde a uma realidade mais primitiva.

**Questão 20:** Em 1897, J. J. Thomson imagina um modelo para o átomo afirmando que o átomo contém partículas de carga negativa, os....., imaginado-os inseridos numa “massa” de carga .....

- a) nêutrons – positiva
- b) nêutrons – negativa
- c) prótons – negativos
- d) elétrons – positivos
- e) elétrons – negativos

Resposta certa letra D: o aluno deve identificar conceitos primitivos como uma tentativa para explicar o que é átomo. Indicadora de visão REALISTA, pois se relaciona à tentativa de explicar o átomo de um modo clássico.

**Questão 22:** A Física Clássica não conseguiu explicar a estabilidade do átomo porque o elétron não colapsava em direção .....

- a) ao espaço
- b) à Terra
- c) ao núcleo
- d) ao mar
- e) à Lua

Resposta certa letra C: o aluno deve entender onde a Física Clássica falha ao tentar explicar o átomo. Indicadora de visão RACIONALISTA, porque envolve um conceito clássico de órbita eletrônica.

**Questão 26:** O efeito fotoelétrico mostra que um feixe de luz é um feixe de partículas, isto é, um feixe de.....

- a) prótons
- b) nêutrons
- c) elétrons
- d) fótons
- e) neutrinos

Resposta certa letra D: o aluno deve identificar um fato quântico. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, pois só pode ser explicado quanticamente.

**Questão 27:** Na Teoria Eletromagnética Clássica a luz é vista como onda, em geral, mas na Mecânica Quântica apresenta também dualidade.....

- a) onda-partícula
- b) onda-onda
- c) partícula-partícula
- d) matéria-partícula
- e) água-terra

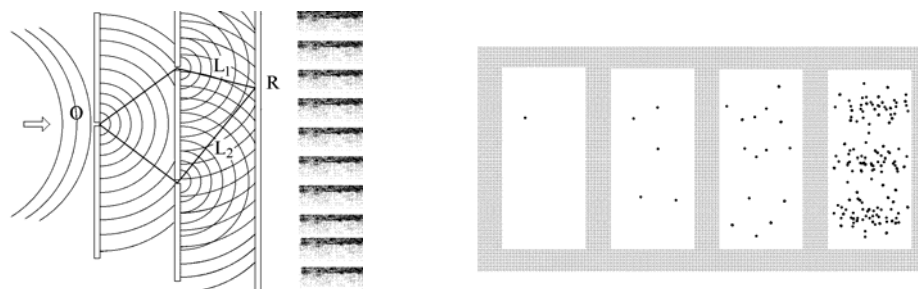
Resposta certa letra A: o aluno deve diferenciar um fenômeno clássico de um quântico. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, pois é um fenômeno só encontrado na Física Quântica.

**Questão 29:** Quando examinamos o comportamento ondulatório e corpuscular, constatamos que no efeito fotoelétrico a luz tem comportamento preferencialmente ..... e na experiência da dupla fenda tem comportamento preferencialmente .....

- a) corpuscular – corpuscular
- b) corpuscular – ondulatório
- c) ondulatório – corpuscular
- d) ondulatório – ondulatório
- e) corpuscular – ondulatório e corpuscular

Resposta certa letra B: o aluno deve diferenciar fatos clássicos dos quânticos. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, pois o comportamento de corpúsculo que a luz tem só encontra explicação na Física Quântica.

**Questão 30:** Observe as duas figuras abaixo da experiência da dupla fenda e responda sobre o caráter ondulatório e corpuscular dos quanta:



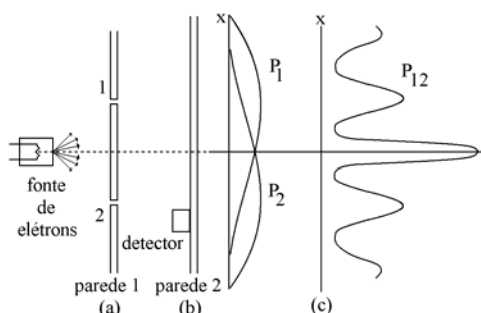
Nesta experiência, a figura da esquerda apresenta o caráter ..... da interferência e a figura da direita apresenta o

comportamento ..... dos quanta pois a partícula foi detectada ponto a ponto.

- a) corpuscular – corpuscular
- b) ondulatório – corpuscular
- c) ondulatório – ondulatório
- d) corpuscular – ondulatório
- e) corpuscular – ondulatório e corpuscular

Resposta certa letra B: o aluno deve compreender o comportamento quântico ondulatório e corpuscular. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, pois a sua explicação só pode ser encontrada na Quântica.

**Questão 31:** Observe a figura a seguir:



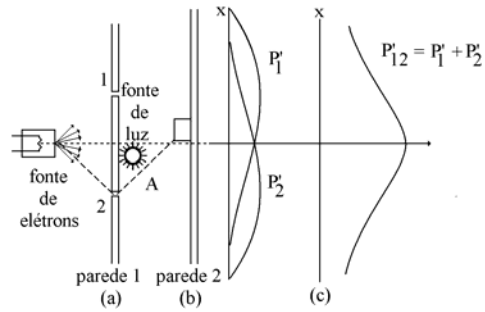
Nesta experiência da dupla fenda se as duas fendas estão abertas, os elétrons (prótons, nêutrons, átomos...) ao chegarem nos detectores exibem o padrão ..... como mostra esta Figura (c), pois não sabemos por qual fenda os elétrons (prótons, nêutrons, átomos...) passaram.

- a) de interferência
- b) do movimento
- c) de distribuição
- d) do potencial
- e) da densidade

Resposta certa letra A: o aluno deve entender o fenômeno quântico envolvido no esquema. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, pois é explicado como um fato quântico.

**Questão 32:** Observe a figura abaixo:





Adicionamos na experiência da dupla fenda uma fonte de luz muito forte como mostra esta figura. Portanto, quando sabemos por qual fenda passou o elétron (próton, nêutron, átomo...) não se forma mais o padrão ..... conforme mostra a Figura (c) desta questão e concluímos que a distribuição deles sobre a fenda é diferente de quando não sabemos por qual fenda passou.

- a) da distribuição
- b) do movimento
- c) da interferência
- d) do potencial
- e) da densidade

Resposta certa letra C: o aluno deve entender e diferenciar um comportamento clássico do quântico. Indicadora de visão RACIONALISTA, pois isto pode ser explicado através da Física Clássica.

**Questão 33:** Relativo a onda e partícula podemos afirmar que no experimento da dupla fenda o detector não acusa meia resposta de ....., ou seja, o que se detecta é ..... inteira e também não aparecerão respostas simultâneas em dois detectores.

- a) partícula – uma onda e partícula
- b) partícula – uma onda
- c) onda – uma onda
- d) onda e partícula – uma onda e uma partícula
- e) partícula – uma partícula

Resposta certa letra E: o aluno deve entender um fenômeno quântico. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, porque esta explicação ocorre na Física Quântica.

**Questão 34:** O Princípio da Incerteza afirma que a determinação exata da posição  $x$  de um elétron implica na falta absoluta da exatidão do .....do elétron.

- a) energia  $E$
- b) trabalho  $\tau$
- c) tempo  $t$
- d) momento  $p$

e) força  $F$

Resposta certa letra D: o aluno deve identificar um fenômeno quântico. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, pois este fato só existe na Física Quântica.

**Questão 35:** A probabilidade de desintegração de um átomo por hora é, por exemplo, exatamente 0,5. Isto significa que em .....há probabilidade de metade da amostra se desintegrar, não significando que obrigatoriamente ela se desintegre.

- a) cinco horas
- b) uma hora
- c) duas horas
- d) três horas
- e) quatro horas

Resposta certa letra B: o aluno deve identificar um fenômeno Quântico. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, pois se trata de um fato que só ocorre na Física Quântica.

**Questão 36:** O.....diz que é impossível conhecer a posição e o momento simultaneamente.

- a) efeito fotoelétrico
- b) experimento da dupla-fenda
- c) princípio da incerteza
- d) quantum de energia
- e) experimento do Gato de Schrödinger

Resposta certa letra C: o aluno deve identificar um fato quântico. Indicadora de visão ULTRA-RACIONALISTA, pois só encontra explicação na quântica.

Na tabela 1 apresentamos a conotação epistemológica de cada questão dando os seguintes valores para cada um deles: 4 para o Ultra-racionalista (18 questões), 3 para o Racionalista (5), 2 para o Realista (1) e 1 para o Animista (2). Estes valores foram utilizados na tabela de avaliação da posição epistemológica ao final da instrução, tal como indicado no fim da seção VI.1 de cada aluno.

Tabela 1 – *Da esquerda para direita: número das questões, respostas certas, perfil epistemológico e o seu respectivo valor.*

1	B	Animista	1
3	D	Racionalista	3
4	D	Ultra-racionalista	4
5	B	Ultra-racionalista	4
6	C	Ultra-racionalista	4
7	A	Racionalista	3
8	E	Racionalista	3

10	A	Ultra-racionalista	4
14	B	Ultra-racionalista	4
15	A	Ultra-racionalista	4
16	E	Ultra-racionalista	4
17	D	Ultra-racionalista	4
18	C	Ultra-racionalista	4
19	A	Animista	1
20	D	Realista	2
22	C	Racionalista	3
26	D	Ultra-racionalista	4
27	A	Ultra-racionalista	4
29	B	Ultra-racionalista	4
30	B	Ultra-racionalista	4
31	A	Ultra-racionalista	4
32	C	Racionalista	3
33	E	Ultra-racionalista	4
34	D	Ultra-racionalista	4
35	B	Ultra-racionalista	4
36	C	Ultra-racionalista	4

A seguir, apresentaremos o texto desenvolvido por nós e utilizado pelos alunos durante as aulas expositivas.

# NOTAS DE AULA SOBRE O ÁTOMO E A MECÂNICA QUÂNTICA<sup>1</sup>

## Objetivo

Estas notas de aula têm por objetivo subsidiar a abordagem de tópicos de Mecânica Quântica no Ensino Médio. Não dispensam explicações do professor e devem ser encaradas como um recurso a mais no tratamento deste tema. Outros materiais, tais como aplicativos, pôsteres, vídeos e, naturalmente, outros textos, devem ser usados ao se trabalhar este assunto em sala de aula.

## Introdução

A Mecânica Quântica (MQ) nos traz uma nova forma de perceber certos fenômenos físicos, nos permite compreender um mundo que existe, muitas vezes, aquém de nossas percepções cotidianas, o mundo do muito pequeno, do invisível aos olhos – os átomos, as partículas que o constituem, bem como moléculas, que são agrupamentos de átomos.

Mas o que são átomos? De que são formados? Como se comportam?

A palavra átomo é de origem grega e quer dizer “indivisível”. A idéia surgiu com Demócrito, na Grécia, aproximadamente 600 a.C., como uma tentativa de explicar de que é feita a matéria.

Os filósofos da antigüidade preocupavam-se com esta questão. Por exemplo, ao partirmos uma barra de giz, obteremos pedaços de giz e prosseguindo com este processo chegaremos ao pó de giz. Se continuarmos a dividir este pó de giz chegaremos a uma unidade deste material composto, que poderá parecer não mais divisível e que os gregos acreditavam ser um átomo do material.

Com o passar do tempo e com o desenvolvimento de melhores técnicas de observação detectaram-se unidades menores de matéria, chegando-se à molécula e ao átomo, como constituinte da molécula, não mais indivisível.

Em 1897, J.J. Thomson (1856-1940) consegue elaborar um modelo para o átomo, corroborando experimentalmente que o átomo contém elétrons (partículas de carga negativa) e imagina-os inseridos numa “massa” de carga positiva, formando uma estrutura parecida com a de um pudim de passas (tridimensional) de carga total nula (Figura 1).

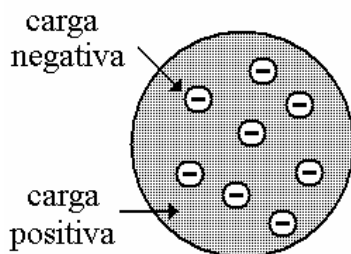


Figura 1 – A proposta de J. J. Thomson para o modelo atômico como um “pudim de passas” em que as partículas negativas – as passas – estão inseridas numa massa com carga positiva, de modo que a carga total seja nula.

---

1) Texto de apoio elaborado por Rogério Avila Chiarelli para a disciplina de Física no Colégio Estadual Inácio Montanha, Porto Alegre, RS.

Em 1909, a partir de dados experimentais, Ernest Rutherford (1871-1937) sugere um átomo neutro, como J. J. Thomson, porém composto por um núcleo extremamente pequeno carregado positivamente e massivo, rodeado por elétrons carregados negativamente e muito leves. No ano de 1920, Rutherford “batiza” o próton e prediz a existência do nêutron, ambos como constituintes do núcleo. Rutherford supõe que a estrutura atômica seja semelhante à do sistema solar, em que os planetas seriam substituídos pelos elétrons em órbitas circulares e o Sol seria substituído pelo núcleo, e em vez da força gravitacional a atração seria de origem eletromagnética (Figura 2). Observe-se, no entanto, que se trata apenas de uma analogia.

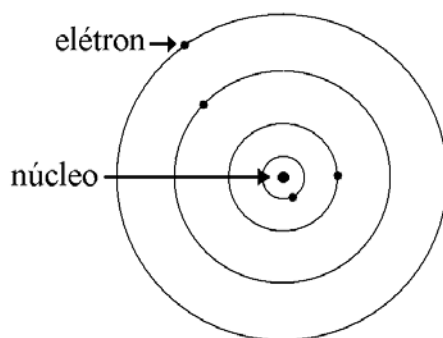


Figura 2 – Modelo do átomo de Rutherford, composto por um núcleo extremamente pequeno e massivo rodeado por elétrons leves, semelhante ao sistema solar, sendo que o núcleo faz o papel de Sol.

No entanto, a concepção do átomo de Rutherford não poderia ocorrer como se imagina classicamente. Sabe-se que pelas leis clássicas da Física, da Mecânica Newtoniana e do Eletromagnetismo, cargas elétricas – os elétrons – em órbitas circulares emitem energia e que, conseqüentemente, fariam um movimento espiralado até colapsar junto ao núcleo em pouco tempo (ver Figura 3). A Física Clássica, então, não conseguiu explicar a estabilidade do átomo e tornou-se necessário criar uma nova Mecânica para descrever este fenômeno: a Mecânica Quântica (MQ).

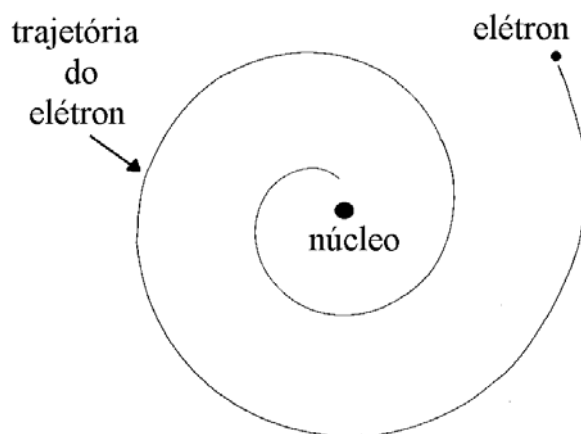


Figura 3 – O modelo do “sistema solar” da Mecânica Clássica prevê que o elétron colapsaria junto ao núcleo.

A MQ descreve o átomo e outros objetos microscópicos e permite compreender e prever fenômenos da escala atômica, alguns dos quais são destacados neste texto.

## Quantum! – o que é isso?

Ao final do século XIX, por interesses práticos da metalurgia, discutia-se o problema de conhecer a temperatura dos fornos aquecidos com exatidão, por meio da luz que emanava do seu interior. Para reproduzir medidas feitas, Max Planck (1858-1947) sugeriu, em 1900, uma hipótese muito estranha: a energia da luz emitida pelo interior dos fornos (corpo negro) só poderia apresentar certos valores, múltiplos de uma unidade mínima de energia (“quantum”)  $hf$ , sendo  $f$  a frequência da radiação emitida e  $h$ , a **constante de Planck**<sup>(1)</sup>, da radiação do corpo negro (o fator resultante da razão entre a energia e a frequência da radiação). Fazendo uma analogia com laranjas numa feira, que só pudessem ser vendidas por um múltiplo inteiro de laranjas, não havendo meias laranjas para serem vendidas, somente poderiam ocorrer emissões de energia com valores  $hf, 2 hf, 3 hf \dots$

Podemos então caracterizar um quantum como a menor unidade elementar de uma determinada quantidade de energia. Por exemplo, a energia radiante é formada por vários quanta de energia, cada um deles chamado de fóton. Desta forma quanto maior for o número de fótons de uma dada frequência presente num feixe luminoso, mais energético é o feixe.

Planck considerou que as paredes internas dos fornos seriam constituídas de átomos (grãos) que funcionariam como osciladores e a emissão de energia seria caracterizada por

$$E = hf \quad \text{sendo}$$

$E$  = a quantidade de energia de cada grão

$f$  = a frequência da radiação

$h$  = constante física introduzida por Planck, cujo valor é  $6,6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ <sup>(2)</sup>

Pela proposta de Planck, posteriormente generalizada por Einstein, então, a grandeza física “energia” emitidas pela cavidade varia em pequenos saltos, de forma descontínua, cada átomo só podendo absorver ou emitir em determinadas frequências, ou seja, a energia envolvida neste processo é quantizada. Então, podemos definir o “quantum de energia” como sendo um pacote de energia  $E = hf$ . O nome Mecânica Quântica provém justamente dos pacotes de energia ou quanta.

Mais tarde, Niels Bohr (1885-1962), ao tentar explicar por que os elétrons dos átomos não colapsam para dentro do núcleo, impõe que eles só podem encontrar-se em órbitas bem definidas (estados de energia permitidos), não podendo irradiar energia enquanto estiverem nestas órbitas<sup>(3)</sup>. Para Bohr tais elétrons só podem “saltar” de uma órbita a outra emitindo ou absorvendo uma certa quantidade de energia. A diferença de energia entre duas órbitas<sup>(4)</sup> seria igual ao quantum  $hf$  emitido; quando os elétrons pulam de uma órbita para outra, se o salto ocorrer (ver Figura 4) entre órbitas mais distantes, a radiação emitida correspondente terá maior frequência.

A partir de 1925 surge finalmente a Mecânica Quântica, uma teoria física desenvolvida por Erwin Schrödinger (1887-1961), Werner Heisenberg (1901-1976) e Louis de Broglie (1892-1987) <sup>(5)</sup>, entre outros.

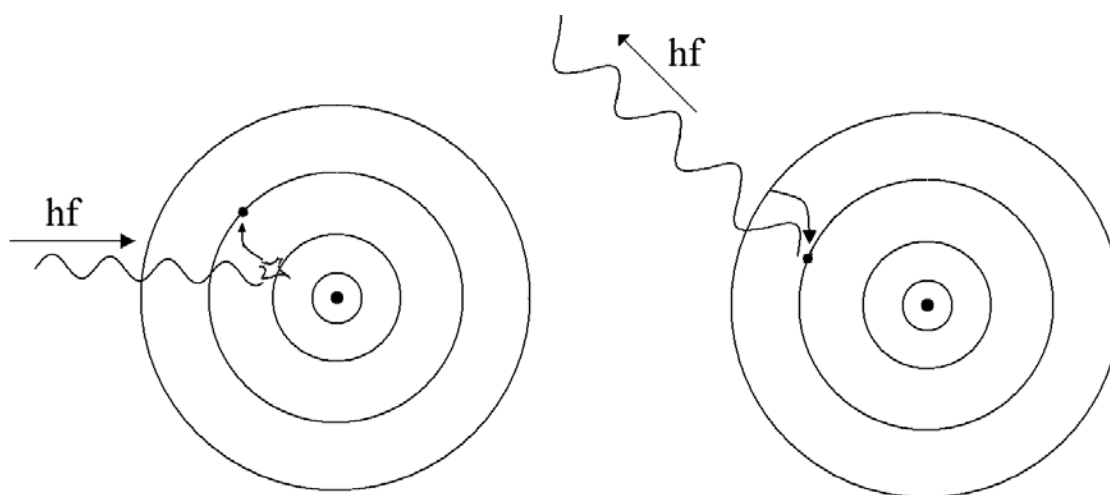


Figura 4 – Com seu modelo, Bohr supõe que os átomos se mantêm estáveis, nas órbitas irradiando ou absorvendo somente valores de energia bem definidos, para alterar o estado de energia dos elétrons, alterando suas órbitas.

### Efeito fotoelétrico

Em 1905, Albert Einstein (1879-1955), ao estudar o “efeito fotoelétrico” – que consiste na propriedade de um metal emitir elétrons quando sobre ele incide luz (fótons)<sup>(4)</sup> – estabelece que a energia dos elétrons emitidos é proporcional à frequência (suficientemente alta) da luz incidente em vez de ser proporcional à sua intensidade<sup>(6)</sup>, como esperado pela Teoria Eletromagnética Clássica<sup>(\*)</sup>. Partindo da idéia de quantum de Planck, Einstein supõe que a luz se propaga como pacotes (como *partículas* de luz) ou fótons, de energia  $E = hf$ . Assim a luz, considerada usualmente como onda eletromagnética, pode apresentar também comportamento de partícula ou grão, podendo colidir com elétrons e arrancá-los do material. Na experiência esquematizada na Figura 5 os elétrons que alcançam o pólo negativo originam uma corrente que é medida pelo amperímetro (A). Um potencial regulável é introduzido para controlar a corrente e é tal que quando aumentamos o potencial de retardamento<sup>(7)</sup> menos elétrons chegam ao pólo negativo e a corrente cai. A corrente cessa quando a voltagem  $V$  excede um determinado valor.

Neste efeito, quanto maior a frequência  $f$  da radiação (ou seja, menor o comprimento de onda,  $\lambda$ ), maior a energia cinética dos elétrons arrancados ao contrário do previsto pela teoria clássica.

O efeito fotoelétrico indica que um feixe de luz é um feixe de partículas, isto é, um feixe de *fótons*. A dualidade surge em relação ao comportamento coletivo desse feixe, que é ondulatório<sup>(4)</sup>.

O efeito fotoelétrico é usado em células fotoelétricas, fotômetros fotográficos e na reprodução da trilha sonora de filmes, entre outras aplicações.

(\*) Na Teoria Eletromagnética, a luz é formada por ondas eletromagnéticas, campos elétricos e magnéticos se propagando no espaço.

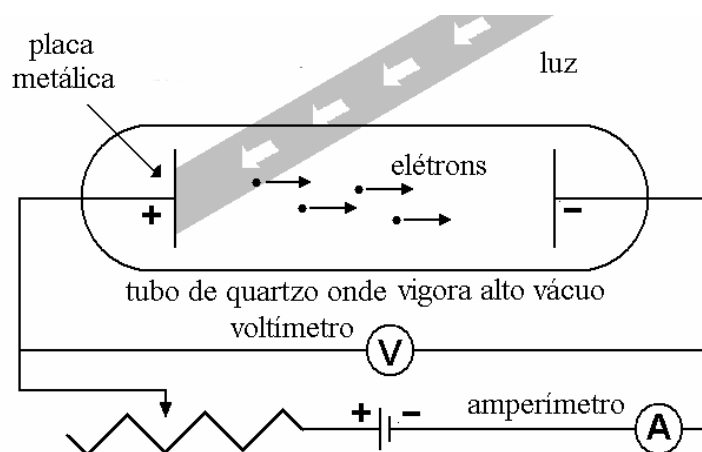


Figura 5 - Esboço representando o efeito fotoelétrico para luz de determinada frequência incidindo sobre uma placa metálica e arrancando elétrons.

### Dualidade onda-partícula

No nosso cotidiano (clássico) *partículas* são objetos muito pequenos semelhantes a projéteis. Elas possuem massa e obedecem as leis de Newton – e se deslocam no espaço em *trajetórias* bem definidas. De modo análogo e conforme nossa experiência diária, *ondas* (como as ondas do oceano) se *espalham* no espaço, sem serem, pois, localizadas em um ponto bem definido. Ondas podem sofrer *difração* ao passar através de uma fenda ou ao circundar uma barreira e podem provocar o fenômeno de *interferência*. Desse modo, podemos distinguir partículas clássicas de ondas clássicas<sup>(7)</sup>.

O surgimento da MQ contradiz, de diversas maneiras, as idéias da Mecânica Newtoniana e também o nosso senso comum. Porém, o sucesso com que esta teoria se desenvolveu, explicando o comportamento dos sistemas microscópicos físicos fez com que ela substituísse a tradicional Mecânica Clássica na explicação de tais fenômenos.

Em condições adequadas, os resultados da Física Clássica, no seu âmbito de validade, podem ser entendidos como decorrentes dos da Mecânica Quântica.

Examinemos alguns aspectos da dicotomia *luz = onda x partícula*. Consideremos a expressão

$$p = h/\lambda$$

onde  $p$  é a quantidade de movimento ou momento linear (que para partículas massivas é o produto da massa  $m$  pela velocidade  $v$  da partícula;  $p = m.v$  e para os fótons é  $p = E/c$ ) e  $\lambda$  é comprimento de onda.

De Broglie considerou que a expressão acima relaciona propriedades corpusculares (quantidade de movimento  $p$ ) e ondulatórias (comprimento de onda  $\lambda$ ) de um mesmo objeto quântico.

A dimensão da constante de Plank justifica porque podemos observar a difração<sup>(8)</sup> e portanto o caráter ondulatório dos elétrons mas não observamos o caráter ondulatório de uma pedra ou bolo de gude. Na Figura 6 são comparadas algumas propriedades de um elétron e de uma bola de gude.



elétron	bola de gude
$m = 9 \times 10^{-31} \text{ kg}$ $v = 2 \times 10^6 \text{ m/s}$ (para uma velocidade de elétron muito pequena) $p = 18 \times 10^{-25} \text{ kg.m/s}$	$m = 4 \times 10^{-3} \text{ kg}$ $v = 2 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ $p = 8 \times 10^{-5} \text{ kg.m/s}$
$\lambda = 3,7 \times 10^{-10} \text{ m}$	$\lambda = 8,3 \times 10^{-30} \text{ m}$
<i>elétron:</i> o comprimento de onda é da mesma ordem de grandeza que o diâmetro de um átomo, por isso ocorre difração quando o elétron passa entre átomos de um cristal.	<i>bola de gude:</i> o comprimento de onda é muito pequeno face às dimensões da bola (diâmetro cerca de $1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$ ) (9).

Figura 6 – Na comparação entre o comprimento de onda de um elétron e o comprimento de onda de uma bola de gude observamos que o efeito de difração é mensurável para o elétron, mas não para a bola de gude.

A luz (assim como os elétrons) sofre difração comportando-se como onda. Ou seja, na Teoria Eletromagnética Clássica a luz é vista como onda, em geral, mas na Mecânica Quântica apresenta também aspectos corpusculares. Pode-se dizer que para todas as partículas quânticas há uma dualidade onda-partícula.

Exploremos um pouco mais esta questão.

### Um experimento para onda-partícula

A dualidade onda-partícula pode ser observada por meio de um experimento feito com luz de uma fonte bastante tênue, por exemplo, um fóton por segundo (ou elétron, próton, nêutron...).

O experimento é o da dupla fenda (Figura 7). Acompanhando a formação do padrão de interferência em telas fosforescentes, percebemos pontos aparecendo um após o outro, correspondendo a cada fóton detectado, e se agrupando em bandas, conforme o padrão de intensidade típico da interferência. Filmes mostram a formação deste padrão, ponto por ponto, também para elétrons (Figura 8).

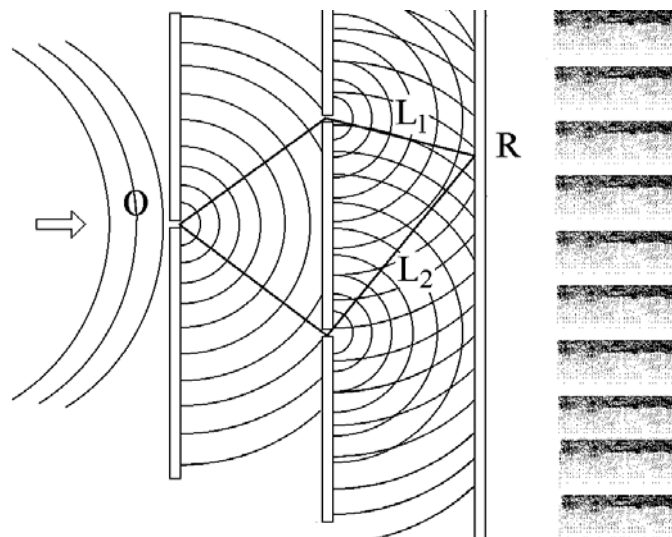


Figura 7 – Experimento de dupla fenda para a luz, com as duas fendas abertas. O padrão de interferência se forma por mais tênue que seja o feixe de luz, se transcorrer um tempo longo no experimento.

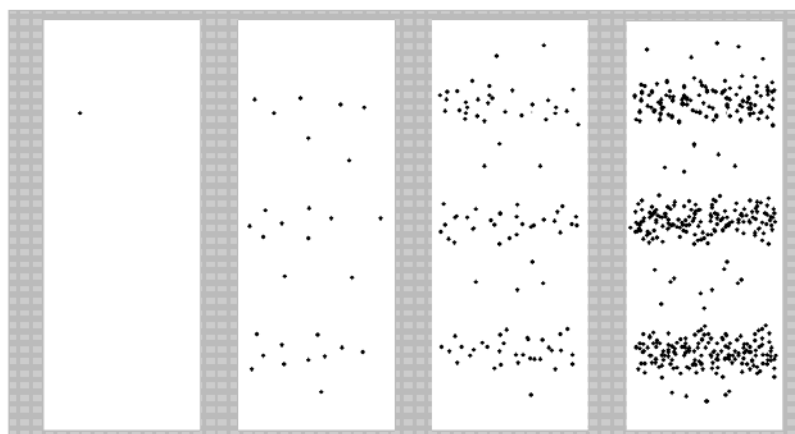


Figura 8 – Formação pontual e do padrão de interferência para elétrons.

A descrição ondulatória estabelece que a onda que emerge de O na Figura 7, origina duas outras que emergem das duas fendas e numa tela distante observa-se que elas se reforçarão ou aniquilarão reciprocamente, dependendo da diferença de fase entre as duas ondas: caminho  $L_1$  (traço negrito superior) e caminho  $L_2$  (traço negrito inferior) da Figura 7(7). Como ocorre esta interferência construtiva (reforço) e destrutiva (aniquilação) em termos de soma de ondas?

Para duas ondas de mesmo comprimento de onda propagando-se na mesma direção e sentido, a superposição (extrema) pode ser (a) construtiva (ondas em fase: cristas coincidindo com cristas), ou (b) destrutiva (ondas fora de fase: vales coincidindo com cristas), conforme mostra a Figura 9.

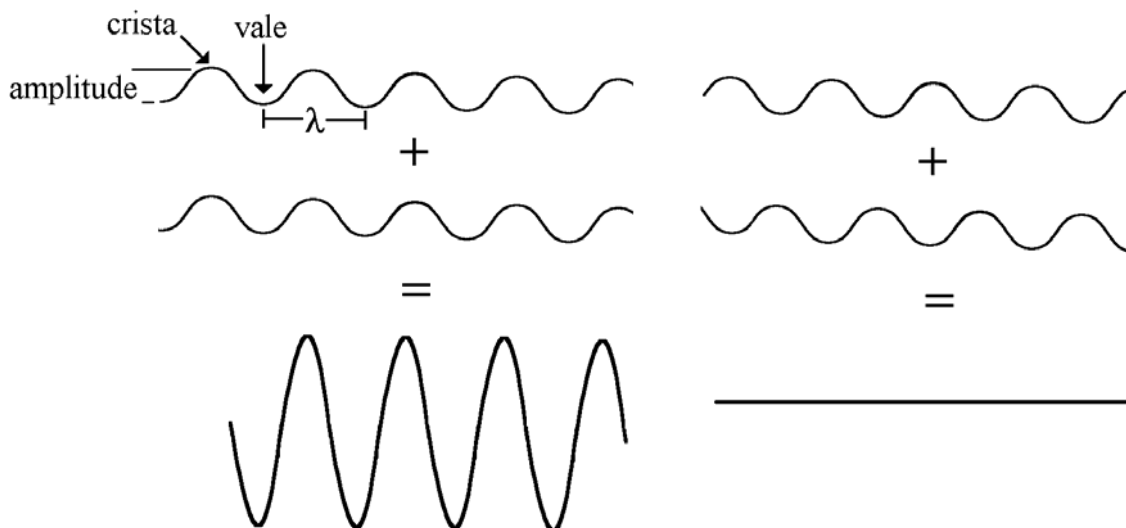


Figura 9 – *Superposições de ondas: (a) construtiva (ondas em fase); (b) destrutiva (ondas fora de fase). Também estão representados na figura o comprimento de onda ( $\lambda$ ), a amplitude da onda, sua crista e seu vale.*

Este padrão de interferência ocorre também para fótons (assim como para elétrons, prótons, nêutrons, moléculas) quer vários fótons sejam lançados simultaneamente, quer vários fótons seja lançados paulatinamente, ou seja, idealmente um único fóton incide na tela a cada segundo, por exemplo. Paul Dirac (1902-1984) afirmou<sup>(10)</sup>, por isto, em 1930, que: “Cada fóton só interfere consigo mesmo.”

Já vimos no efeito fotoelétrico que a luz (o fóton) tem comportamento de caráter corpuscular e vemos na experiência da dupla fenda que também tem comportamento de caráter ondulatório, pois apresenta *difração e interferência*.

Quando fótons ou elétrons são detectados, aparecem de maneira indivisível e pontual. Dependendo do experimento que se realiza, contudo, o sistema quântico (fótons, elétrons, prótons, nêutrons) pode revelar comportamento ondulatório, ou seja, pode apresentar difração e interferência. Na experiência de dupla fenda, apresenta-se o comportamento ondulatório da *interferência* e também o comportamento corpuscular dos quanta pois a partícula foi detectada ponto a ponto (bem localizada). Como é possível, porém, que esse fenômeno possua tanto características ondulatórias como corpusculares?

O experimento da dupla fenda nos ajuda a entender a dualidade. Não estamos afirmando que os fótons ou elétrons se propagam como partículas clássicas (leis de Newton) pontuais, mas que quando são detectados se comportam de maneira indivisível e pontual<sup>(10)</sup>.

Vamos analisar novamente a experiência da dupla fenda. Mas antes definamos o que seja probabilidade. Considere que cem projéteis são atirados contra um alvo e que somente trinta atinjam o alvo. Então a probabilidade  $P$  dos projéteis atingirem o alvo é  $30/100$ , ou seja, 30% dos projéteis atingirão o alvo (quer dizer, a probabilidade  $P$  é a razão entre o número de projéteis que atingem o alvo e o número de projéteis que são atirados contra o alvo). Seja  $P_{12}$  a probabilidade de que as partículas possam ter vindo quer através da fenda 1, quer através da fenda 2, com ambas abertas e  $P_1$  ( $P_2$ ) a probabilidade de a partícula vir apenas pela fenda 1 (2) (só uma aberta).

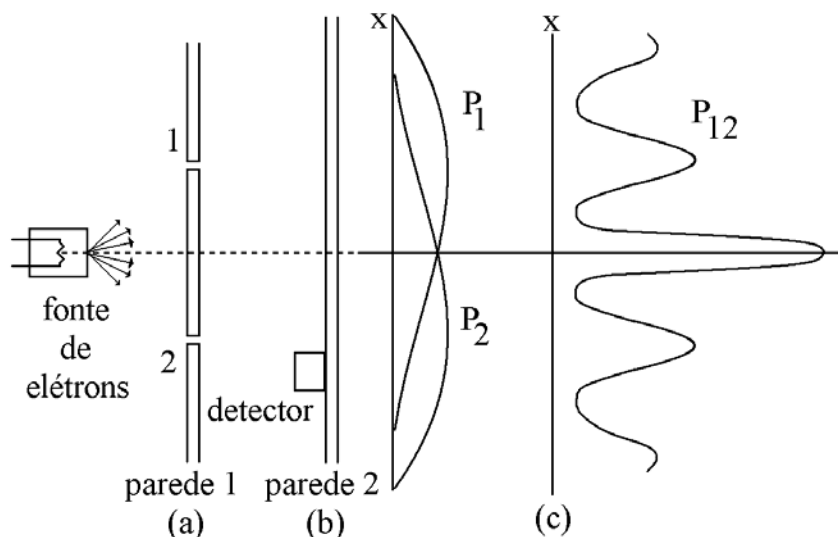


Figura 10 – Outra maneira de esboçar o experimento de duas fendas para a luz. As partes claras da figura 7 são os picos de máximo e as partes escuras são os picos de mínimo, neste esboço. Em (a) está a dupla fenda; em (b) estão representadas a parede com seu detector e as distribuições de probabilidade  $P_1$  (se a fenda 2 estiver fechada) e  $P_2$  (se a fenda 1 estiver fechada); em (c) está representada a distribuição  $P_{12}$  que revela a interferência das duas ondas quando ambas as fendas estão abertas.

Consideremos uma fonte que emite partículas (fótons ou elétrons) de intensidade extremamente baixa de modo a emitir uma partícula por vez. As partículas passam pela parede onde está a dupla fenda (ver Figura 10 (a)) e são registradas por detectores de partículas sobre uma segunda parede que podem ser localizadas em diversas posições (ver Figura 10 (b)). As partículas chegam, uma de cada vez, nesta parede e se existissem vários detectores cobrindo a parede observaríamos que para cada partícula haveria resposta de apenas um detector, que pode ser uma célula fotoelétrica ou um contador Geiger<sup>(11)</sup>.

O detector não acusa meias respostas, ou seja, o que é detectado é uma partícula inteira por vez, portanto não há detecção de meias partículas e também não aparecem respostas simultâneas em dois detectores. Desta forma, diríamos que cada partícula que sai da fonte deve passar pela primeira ou pela segunda fenda. Se as duas fendas estão abertas, as partículas, ao chegarem à parede com detectores, exibem no número de contagens, o fenômeno de interferência, conforme a Figura 8, ou como mostra a Figura 10 (c). Assim, verifica-se para o número de contagens de partículas uma curva de interferência típica do comportamento ondulatório, indicado por  $P_{12}$ <sup>(12)</sup>. Porém, se apenas a fenda 1 estiver aberta (e conseqüentemente a fenda 2 fechada), teremos  $P_1$  conforme Figura 10 (b). Se fecharmos a fenda 1 e deixarmos as partículas passarem pela fenda 2, temos  $P_2$  conforme a Figura 10 (b).

Devemos observar que a Figura 10 acima é semelhante àquela produzida por ondas numa superfície de água para um experimento de dupla fenda. A fonte de elétrons é substituída por uma fonte pontual de ondas na superfície de água, as quais passam por uma dupla fenda e chegam a uma parede com um detector que mede a “intensidade” do movimento. Deste modo produzem-se figuras semelhantes à Figura 10 (b) com uma fenda aberta, e à Figura 10 (c) para as duas fendas abertas, que é um comportamento clássico ondulatório.

Convém verificar, quando as duas fendas estão abertas, se há algum modo de se saber por qual fenda passou a partícula. Para tal constatação, à fonte de elétrons<sup>(12)</sup> adicionamos uma fonte de luz muito forte, colocada entre a parede e as duas fendas, como mostrado na Figura 11.

Sabemos que cargas elétricas espalham luz. Então, quando um elétron passa, em seu caminho para o detector ele espalha alguma luz para o nosso olho e podemos *ver* por onde o elétron vai. Se, por exemplo, um elétron segue pelo caminho via fenda 2, que está esboçado na Figura 11 (a) percebe-se um *flash* de luz chegando da vizinhança do lugar marcado A na Figura. Se o elétron passa através da fenda 1, devemos ver um *flash* oriundo da vizinhança superior da fenda.

Desta observação, com lâmpada acesa, concluímos que quando olhamos os elétrons constatamos que o gráfico de probabilidades não é mais o de interferência, ou seja, eles ou vão através de uma fenda ou de outra, mas *nunca* por ambas ao mesmo tempo.

Apesar de termos sucesso ao olhar por qual fenda cada elétron passou, verificamos que não há mais interferência e sim que  $P'_{12} = P'_1 + P'_2$ , Figura 11 (c)! Entretanto, se desligamos a luz, a interferência  $P_{12}$  é restaurada, conforme Figura 10 (c).

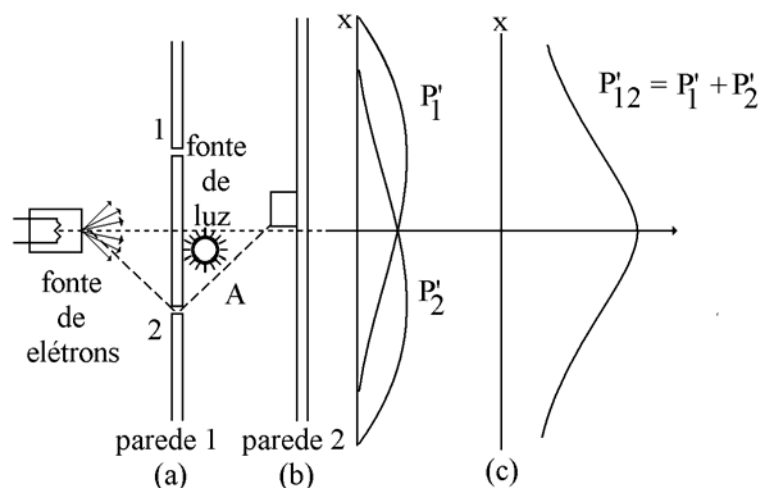


Figura 11 – No esboço (a) temos a dupla fenda em presença de uma lâmpada acesa A; em (b) um padrão de distribuição se forma quando sabemos por qual fenda passou cada elétron; em (c) temos a soma dos padrões de distribuição mostrados em (b).

Podemos concluir que *quando vemos (com luz) os elétrons* a distribuição deles sobre a tela é *diferente de quando não vemos*.

Assim, quando não olhamos o elétron (nenhum fóton o perturba), temos o padrão de interferência e quando o olhamos, um fóton o perturba destruindo a interferência.

Dizemos que um fenômeno é *corpuscular* quando podemos concluir qual foi a *trajetória* do objeto detectado, depois de termos completado a medição. (No exemplo acima, se soubermos por qual fenda passou o objeto quântico.) Portanto, a situação de quando vemos qual caminho (trajetória) foi seguido pelo elétron, corresponde a um fenômeno corpuscular. Observa-se que no primeiro quadro da esquerda da Figura 8, não

podemos afirmar que o experimento é corpuscular, pois não sabemos por qual fenda (qual foi a trajetória) passou o elétron.

Um resultado na visão clássica do experimento não pode ser ao mesmo tempo ondulatório e corpuscular<sup>(10)</sup>, sendo que Bohr defende para a *dualidade onda-partícula*:

*Um sistema quântico ou exibe aspectos corpusculares (seguindo trajetórias bem definidas), ou aspectos ondulatórios (como a formação de um padrão de interferência) dependendo do arranjo experimental, mas nunca ambos ao mesmo tempo.*

Na verdade, Bohr quis dizer que as noções clássicas de onda e partícula são mutuamente excludentes, mas correspondem a aspectos *complementares* da natureza<sup>(13)</sup>. Portanto, para certos tipos de experiências podemos encarar o objeto quântico (como um elétron ou fóton) como partícula, e para outros tipos de experiências, como ondas. Deste modo, segundo Bohr<sup>(10)</sup>:

*só compreendemos um objeto quântico de maneira completa quando são considerados esses dois aspectos complementares.*

### Princípio de Incerteza

Quando descrevemos o experimento da dupla fenda acima, não foi possível determinar por qual fenda passou o elétron sem destruirmos o padrão de interferência. Isto está relacionado com uma dificuldade própria da MQ presente no Princípio de Incerteza, enunciado por Werner Heisenberg (1901-1976)<sup>(14)</sup>. Esta proposta pode ser apresentada de um outro modo: É possível medir simultaneamente observáveis como posição e momento?

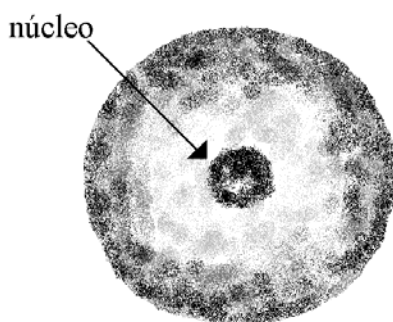


Figura 12 – *Modelo do átomo de hidrogênio em que a região mais escura externa representa a região onde existe maior probabilidade de se encontrar o elétron (ao redor do núcleo).*

Este princípio afirma que a determinação exata de um valor observável (ou com muita exatidão), como a posição  $x$  de um elétron, implica numa falta absoluta de exatidão (ou pouca exatidão) na definição do valor da grandeza conjugada a  $x$ , no caso o momento  $p_x$  do elétron. Considere que estas “inexatidões” são representadas por  $\Delta x$  e  $\Delta p_x$ . O símbolo  $\Delta$  aqui significa “incerteza” ou “inexatidão”:  $\Delta p_x$  é a incerteza no momento e  $\Delta x$  é a incerteza na posição.

O princípio da incerteza para sistemas unidimensionais ( $\Delta x \Delta p_x \geq h/4\pi$ ) expressa a idéia de que no mundo quântico (das ondas-partículas), uma maior previsibilidade nos resultados da medição de um dos observáveis (posição ou momento), implica em uma menor previsibilidade nos resultados de medida do outro.

A incerteza está, então, associada a uma previsibilidade menor do que 1 nos resultados de medida do observável.

**A interpretação defendida por Bohr é a de que é impossível um fenômeno ser totalmente corpuscular e totalmente ondulatório no sentido clássico ao mesmo tempo, como vimos antes. Também é impossível medir com exatidão simultaneamente  $x$  e  $p_x$ .** Desse modo, como mostra a Figura 12, no átomo de hidrogênio a região mais escura representa zonas onde há maior probabilidade de localização do elétron mais ligado.

Então, na experiência da dupla fenda não podemos saber simultaneamente por qual fenda o objeto quântico passa e também qual o seu momento. Ou seja, “é impossível determinar simultaneamente, e com exatidão ou certeza, a posição e o momento de um elétron”.

De fato, precisamos dessas incertezas para traduzir o resultado da observação na linguagem matemática da teoria quântica. Portanto, *a incerteza é inerente à natureza da partícula quântica e não é só uma consequência do processo de medição*<sup>(15)</sup>.

### Princípio de Superposição Linear – Gato de Schrödinger

Um experimento imaginado por Erwin Schrödinger (1887-1961) serve para descrever o que os físicos chamam de “Princípio de Superposição Linear de estados”. Trata-se de um *gedanken experiment* (experimento de pensamento, ou seja, imaginário). Um estado do sistema quântico está definido em um certo instante do tempo. Por exemplo, o estado de energia de um dado elétron é a energia sem o elétron num determinado instante de tempo.

Schrödinger imaginou uma câmara de aço fechada contendo um gato e uma pequena quantidade de elemento radioativo<sup>(16)</sup>. A *probabilidade de desintegração* de um átomo do elemento radioativo por hora é, por hipótese, 0,5. Isto significa que em uma hora há *probabilidade* de metade da amostra se desintegrar, não significando que obrigatoriamente ela se desintegre. A desintegração, se ocorrer, ativa um contador Geiger e fecha um circuito, eletrocutando o gato.



Figura 13 – O paradoxo do Gato de Schrödinger. A figura representa o estado do gato vivo e do gato morto ao mesmo tempo.<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Figura elaborada pelo aluno Giancarlo Cabreira Silva, aluno do Inácio Montanha, 2005.

Então, a pergunta é a seguinte: o gato dentro da caixa está vivo ou morto? Em que estado estará o gato antes de abrirmos a caixa?

Como o decaimento radioativo é um processo quântico probabilístico, o material pode ou não decair em uma hora. De acordo com as regras da Física Quântica, haveria uma superposição de estados, dos quais em um o decaimento poderia ocorrer e em outro, não. Quando o decaimento ocorre o gato morre, mas em geral, temos uma superposição de estados do gato vivo e morto. Só poderemos descobrir em que estado o gato se encontra quando abrirmos a caixa e observarmos que o gato (dali em diante) está morto ou vivo. A questão proposta por Schrödinger é: “Qual o estado do gato antes de a caixa ser aberta?”

Se o sistema inteiro está representado por uma expressão matemática chamada *função de onda*  $\psi_{vivo}$  indicando o estado “gato vivo”, e  $\psi_{morto}$ , o estado “gato morto” (ver Figura 13), então o estado do sistema ao fim de uma hora é descrito, de acordo com a MQ, por uma superposição na qual os dois estados “gato vivo” e “gato morto” contribuem. Somente através do próprio ato de observação, isto é, olhando o gato, é que o sistema apresenta-se em um estado definido.

$$\psi = \psi_{vivo} + \psi_{morto}$$

A situação descrita neste exemplo pode parecer-nos estranha, mas no mundo microscópico ela descreve uma característica de cada medida da MQ. Assim, há uma superposição de estados, onde em alguns o decaimento teria ocorrido e em outros, não. Naqueles estados em que o decaimento ocorresse, o gato morreria. Quando abrissemos a caixa, observaríamos o gato e dali em diante o gato estaria morto,  $\psi \rightarrow \psi_{morto}$ . Ou se o decaimento não ocorresse, o gato estaria vivo,  $\psi \rightarrow \psi_{vivo}$ .

Como brincadeira, pode-se citar Gilmore<sup>(17)</sup>: “Então, o gato estava morto ou vivo quando abriram a caixa? Ninguém sabe, pois todos ficaram empolgados discutindo a questão e ninguém abriu a caixa e o gato ficou assim.”

Para o nosso dia-a-dia isto parece absurdo, pois a noção intuitiva de um objeto clássico é que ele não pode existir numa superposição de estados (gato morto/gato vivo) e que seu estado macroscópico não é afetado pelo ato de observação<sup>(10)</sup>.

A interpretação quântica do processo é que existe uma probabilidade finita de encontrar o gato vivo (morto).

Não sendo possível, sem o ato de observação, definir se o gato está vivo, ou morto.

## BIBLIOGRAFIA

(1) PLEITEZ, V., Resenha do Livro “Bohr: O Arquiteto do Átomo”, por M. C. Abdalla, Odysseus, São Paulo, 2003, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 25, no. 2, Junho, 2003

(2) GARCIA, J. E., Una alternativa para la introducción de los conceptos de cuantización y orbital en la enseñanza secundaria, **Enseñanza de las Ciencias**, vol. 11(4), 1993

(3) NUSSENZVEIG, H. M., **Curso de Física Básica**, vol. 4, Edgar Blücher, São Paulo, SP, 1998

(4) GASPAS, A., **Física, volume único**, Editora Ática, São Paulo, SP, 2003



- (5) OSTERMANN, F., Um Texto para Professores do Ensino Médio sobre Partículas Elementares, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 21, no. 3, setembro, 1999
- (6) FREIRE JR., O e NETO, R. A. C., **O Universo dos Quanta – Uma breve história da Física Moderna**, Editora FTD S. A., São Paulo, SP, 1997
- (7) HEWITT, P., **Física Conceitual**, Bookman Ed, Porto Alegre, RS, 2002
- (8) GREF: GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA, Leituras de Física, < [www.if.usp.br/gref/optica/optica2.pdf](http://www.if.usp.br/gref/optica/optica2.pdf) > acesso em: 08 setembro 2006
- (9) WICHMANN, E. H., **Quantum Physics, preliminary edition**, Berkeley Physics Course, vol. 4, McGraw-Hill Book Company, New York, 1967
- (10) PESSOA JR., O., **Conceitos de Física Quântica**, Editora Livraria da Física, São Paulo, SP 2003
- (11) MOKROSS, B. J., Não Localidade na Mecânica Quântica, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 19, no. 1, março, 1997
- (12) FEYNMAN, R.P., LEIGHTON, R.B. e SANDS, M. **The Feynman Lectures on Physics, vol. 1**, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts, 1965
- (13) HEISENBERG, W., **Física e Filosofia**, Título original: Physics and philosophy: the revolution in modern science (1958), Editora Universidade de Brasília, 3ª ed., 1995
- (14) GRECA, I. M. E HERSCOVITZ, V. E., **Introdução à Mecânica Quântica, notas de curso**, Instituto de Física – UFRGS, Textos de Apoio ao Professor de Física, no. 13, 2003
- (15) VIEYRA J. C. L., **Curso de Introducción a la Mecánica Cuántica** [www.nuclecu.unam.mx/~vieyra/node21.html](http://www.nuclecu.unam.mx/~vieyra/node21.html) acessado em 12/07/05
- (16) JAMMER, M., **The Philosophy of Quantum Mechanics**, John Wiley, New York, 1974
- (17) GILMORE, R., **Alice no País do Quantum**, Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, RJ 1998

Agradecimento: o autor agradece à Professora Victoria E. Herscovitz por sugestões na redação deste texto.

## CAPÍTULO VI – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### VI.1 – ANÁLISE QUANTITATIVA

Para análise de dados usou-se o pacote estatístico *SSPS for Windows – Release 13.0*.

Aplicamos o teste a um grupo (as turmas 301 e 302) com o objetivo de estimar a fidedignidade dos instrumentos.

Esta fidedignidade do instrumento relaciona-se à estabilidade, à reproducibilidade, à precisão de medidas com os dados obtidos, ou seja, ao grau de consistência dos valores medidos, recorrendo-se a procedimentos estatísticos. Estes permitem fazer uma estimação da fidedignidade do instrumento a partir dos dados de um certo número de indivíduos.

Com estes dados obtidos após aplicação dos testes realizamos uma Análise de Consistência Interna (ACI). Conforme Cronbach (1967, apud Moreira e Silveira, 1993), podemos decompor a variância do escore total em uma parcela imposta ao que há de comum entre os escores parciais e uma outra parte ao erro de medida. A estimativa desta parcela de fidedignidade comum aos itens do teste pode ser quantificada pelo coeficiente de Cronbach. O coeficiente que podemos aceitar é da ordem 0,7 ao se buscar os escores obtidos pelos instrumentos para comparar as médias (Moreira e Silveira, 1993, pág. 83).

Com base neste critério é que se eliminou as questões 2, 9, 11, 12 e 13 para alcançar este coeficiente, chegando a um índice muito perto desse valor com as 13 questões restantes.

Trabalhou-se com os seguintes objetivos em cada questão que está numerada abaixo:

Tabela 2 – Indica os objetivos desenvolvidos em cada questão selecionada

Questões	Objetivo	
1.1	1,3	Histórico do átomo
2.1	4	Composição do átomo
2.2	5	Efeito fotoelétrico
2.3	6	Quantum
2.4	7	Quantum e a interpretação de onda
2.5	8,10	Superposição de ondas – Interferência construtiva e destrutiva
3.1	14	Experimento de dupla fenda
3.2	15,16	Dualidade onda-partícula
3.3	17	Processo quântico e processo clássico
3.4	18	Princípio de Superposição

O resultado é sobre o escore de 13 questões, pois o pré-teste era constituído de somente 13 questões das quais foram selecionadas as que forneceram maior  $\alpha$  (coeficiente de fidedignidade) como veremos mais adiante.

Com o objetivo de melhorar ainda mais o coeficiente elaborou-se mais 18 questões eliminando-se as perguntas 21, 23, 24, 25 e 28, chegando-se a 26 questões, que serão apresentados nas Tabelas 3 (para 13 questões) e na Tabela 4 (para 26 questões).

Cálculo do coeficiente alfa com **13 questões** selecionadas apresentadas na Tabela 3:

**Tabela 3 – Case Processing Summary**

		N	%
Casos	Validade	48	100,0
	Excluída(s)	0	,0
	Total	48	100,0

**Reliability Statistics**

Cronbach's Alpha	N de Itens
,601	13

Cálculo do coeficiente alfa com **26 questões** selecionadas na Tabela 4:

**Tabela 4 – Case Processing Summary**

		N	%
Casos	Validade	48	100,0
	Excluída(s)	0	,0
	Total	48	100,0

**Reliability Statistics**

Cronbach's Alpha	N de Itens
,746	26

Observamos que o coeficiente alfa aumentou significativamente, passando de 0,7 com o acréscimo de mais 13 questões, cujos objetivos são semelhantes aos de 13 questões que mostraremos agora. Na Tabela 5 serão apresentados os respectivos objetivos de todas as 26 questões consideradas para o coeficiente de fidedignidade.

Tabela 5 – Semelhante à Tabela 2, só que para 26 questões e, além disso, adicionando o Princípio de Incerteza

Questões		Objetivo
1.1	1,3,19,20	Histórico do átomo
2.1	4,22	Composição do átomo
2.2	5,26,29	Efeito fotoelétrico
2.3	6	Quantum
2.4	7	Quantum e a interpretação de onda
2.5	8,10	Superposição de ondas – Interferência construtiva e destrutiva
3.1	14,30,31,32,33	Experimento de dupla fenda
3.2	15,16,27	Dualidade onda-partícula
3.3	17	Processo quântico e processo clássico
3.4	18	Princípio de Superposição
3.5	34,35,36	Princípio de Incerteza

Devemos chamar atenção que nas 13 questões selecionadas antes não estava presente o objetivo Princípio de Incerteza, que agora foi inserido entre as 26 questões selecionadas.

Depois de verificarmos as médias entre os teste iniciais e finais, observamos que ocorreu uma diferença entre elas e aplicamos o teste *t de Student* para dados pareados. Com isto, verifica-se se este aumento não é devido a fatores casuais. Este teste é útil para comparar dois conjuntos de dados quantitativos, em relação a valores médios (Barbetta, 2003) que se baseia na diferença estatística das médias do pré e pós-teste. O fato de ser em função de *n* dados implica que quanto maior o tamanho da amostra teremos mais conhecimento sobre o fenômeno de estudo. Em relação ao desvio padrão, que é uma medida da disparidade do efeito do que estamos estudando, quanto maior a sua disparidade maior deverão ser as diferenças observadas entre duas medidas, o que demonstrará uma diferença significativa entre as médias.

A Tabela 6 apresenta a razão do *t de Student* (através do qual é obtido o nível de significância) para a diferença entre as duas médias e o nível de significância estatística desta diferença.

Tabela 6 – Análise do “teste t” pareado com 13 questões selecionadas:

**Estatística de Amostra Pareada**

		Média	N	Desvio Padrão	Média do Erro padrão
Par 1	PÓS	6,8222	45	2,51621	,37509
	PRÉ	2,7333	45	1,52852	,22786

**Correlação de Amostra Pareada**

		N	Correlação	Sig.
Par 1	PÓS & PRÉ	45	-,125	,414

**Teste de Amostra Pareada**

	Diferenças Pareadas					t	df	Sig. (2-tailed)
	Média	Desvio padrão	Média do Erro Padrão	95% Intervalo de Confiança da diferença				
				Inferior	Superior			
PÓS - PRÉ	4,08889	3,10295	,46256	3,15666	5,02112	8,840	44	,000

Isto significa que a diferença de médias é estatisticamente significativa, sendo praticamente nula a probabilidade de que sejam estatisticamente iguais.

A seguir são apresentadas duas tabelas, uma de pré-teste, Tabela 7, e outra de pós-teste, Tabela 8.

Tabela 7 – Diferenciação das escolhas realizadas pelos alunos ao responderem o pré-teste. Os escores das alternativas corretas estão em negrito.

PRÉ-TESTE									
Item	Objetivo	A	B	C	D	E	Branco	PERC. DE ACERTOS POR ALUNO	Nº DE ACERTOS P/ LETRA POR ALUNO
1	1.1	9	<b>2</b>	0	18	20	0	<b>4,08%</b>	2
3	1.1	0	3	6	<b>32</b>	7	1	<b>65,31%</b>	32
4	2.1	14	8	11	<b>12</b>	3	1	<b>24,49%</b>	12
5	2.2	6	<b>3</b>	8	28	4	0	<b>6,12%</b>	3
6	2.3	21	4	<b>8</b>	1	14	1	<b>16,33%</b>	8
7	2.4	<b>9</b>	6	13	1	20	0	<b>18,37%</b>	9
8	2.5	12	8	9	12	<b>8</b>	0	<b>16,33%</b>	8
10	2.5	<b>8</b>	4	12	9	16	0	<b>16,33%</b>	8
14	3.1	5	<b>11</b>	10	11	12	0	<b>22,45%</b>	11
15	3.2	<b>15</b>	4	16	6	8	0	<b>30,61%</b>	15
16	3.2	17	9	10	6	<b>7</b>	0	<b>14,29%</b>	7
17	3.3	16	11	6	<b>11</b>	5	0	<b>22,45%</b>	11
18	3.4	9	4	<b>6</b>	7	23	0	<b>12,24%</b>	6

Devemos observar que a questão 3, com o objetivo de Histórico do átomo, foi a que obteve maior número de acertos (65,31%) e a menor número de acertos foi a 1, com objetivo Histórico do átomo também, e a 5, com o objetivo Efeito fotoelétrico. Isso de um lado, revela um certo conhecimento histórico, mas, por outro, não revela algum conhecimento sobre espalhamento de partículas pela luz.

Tabela 8 – Diferenciação das escolhas realizadas pelos alunos ao responderem o pós-teste. Os escores das alternativas corretas estão em negrito. O resultado é também calculado em 13 questões.

PÓS-TESTE									
Item	Objetivo	A	B	C	D	E	Branco	PERC. DE ACERTOS POR ALUNO	Nº DE ACERTOS P/ LETRA POR ALUNO
1	1.1	10	<b>35</b>	1	2	0	0	<b>72,92%</b>	35
3	1.1	0	2	19	<b>27</b>	0	0	<b>56,25%</b>	27
4	2.1	6	6	10	<b>13</b>	13	0	<b>27,08%</b>	13
5	2.2	8	<b>25</b>	0	15	0	0	<b>52,08%</b>	25
6	2.3	3	12	<b>28</b>	4	1	0	<b>58,33%</b>	28
7	2.4	<b>31</b>	5	5	6	1	0	<b>64,58%</b>	31
8	2.5	13	5	9	4	<b>17</b>	0	<b>35,42%</b>	17
10	2.5	<b>15</b>	11	7	2	13	0	<b>31,25%</b>	15
14	3.1	7	<b>16</b>	11	8	6	0	<b>33,33%</b>	16
15	3.2	<b>27</b>	0	12	1	8	0	<b>56,25%</b>	27
16	3.2	0	10	12	0	<b>26</b>	0	<b>54,17%</b>	26
17	3.3	4	6	9	<b>27</b>	2	0	<b>56,25%</b>	27
18	3.4	0	0	<b>44</b>	2	2	0	<b>89,58%</b>	43

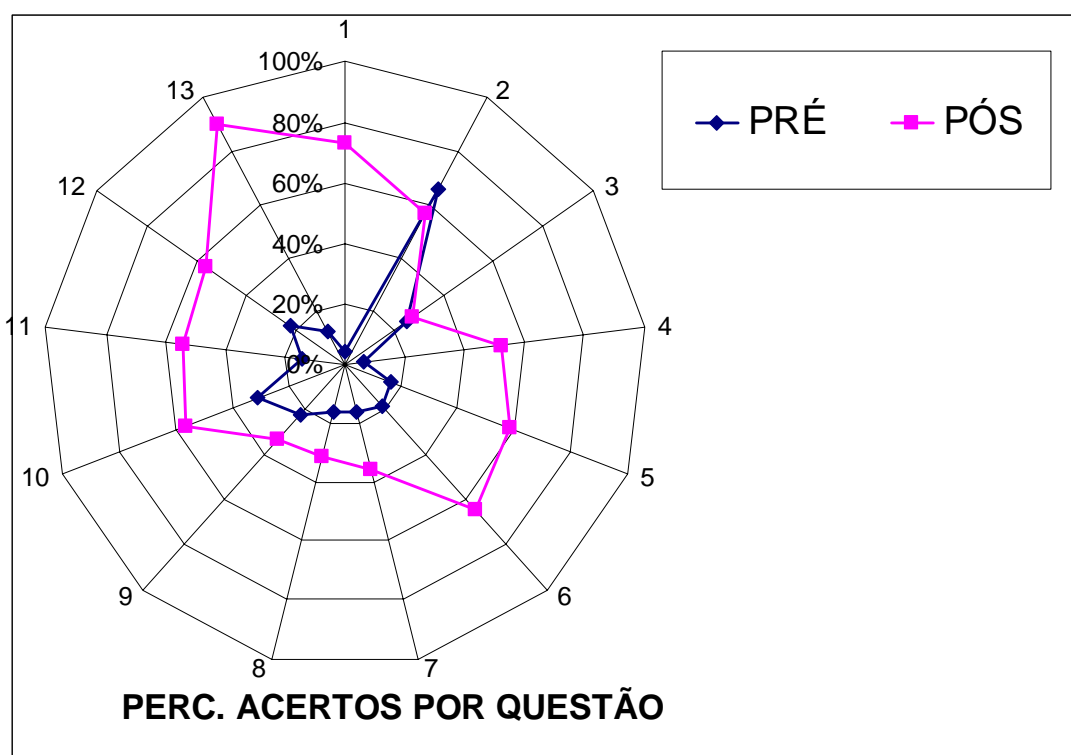
Não houve grupo de controle, pois o tópico de Mecânica Quântica não é trabalhado em qualquer outro período do ano letivo.

Observando a Tabela 8 o item 18, objetivo Princípio de Superposição, foi a que obteve maior número de acertos e em seguida foi o item 1, objetivo Histórico do átomo. Só 4 itens, 4, 8,10 e 14, com os objetivos, respectivamente, Composição do Átomo,

Superposição de Ondas – Interferência Construtiva e Destrutiva e Experimento de dupla fenda, tiveram o número de acertos inferiores a 50%. Os demais itens tiveram o número de acertos superiores a 50%.

No gráfico 1, podemos fazer uma comparação de acertos entre o pré e pós-teste. Devemos ter cuidado que a numeração do Gráfico 1 é dada em seqüência (pois não permite fazer nova numeração). Notamos que somente a questão 3, que no gráfico equivale a 2, teve o percentual de acertos do pós-teste diminuído em relação ao pré-teste e a questão 4, equivalente a 3 no gráfico, manteve-se igual. Neste gráfico percebe-se claramente o crescimento de acertos por questões dos alunos após as aulas de Mecânica Quântica terem sido ministradas. A linha em preto forte é a avaliação dos alunos de acerto por questão no pré-teste e a linha mais clara é no pós-teste.

Gráfico 1 – Comparativo entre pré e pós-teste por percentual de acertos por questão, considerando somente 13 questões, das tabelas 10 e 11. As questões do gráfico estão com numeração corrida embora tenha sido apresentadas somente as questões validadas.



A Tabela 9 apresenta uma comparação entre o percentual de acertos entre os alunos que realizaram o pré-teste e o pós-teste, na qual observamos um crescimento de acertos no pós-teste.

Tabela 9 - Percentual de acertos por aluno no pré e pós-teste

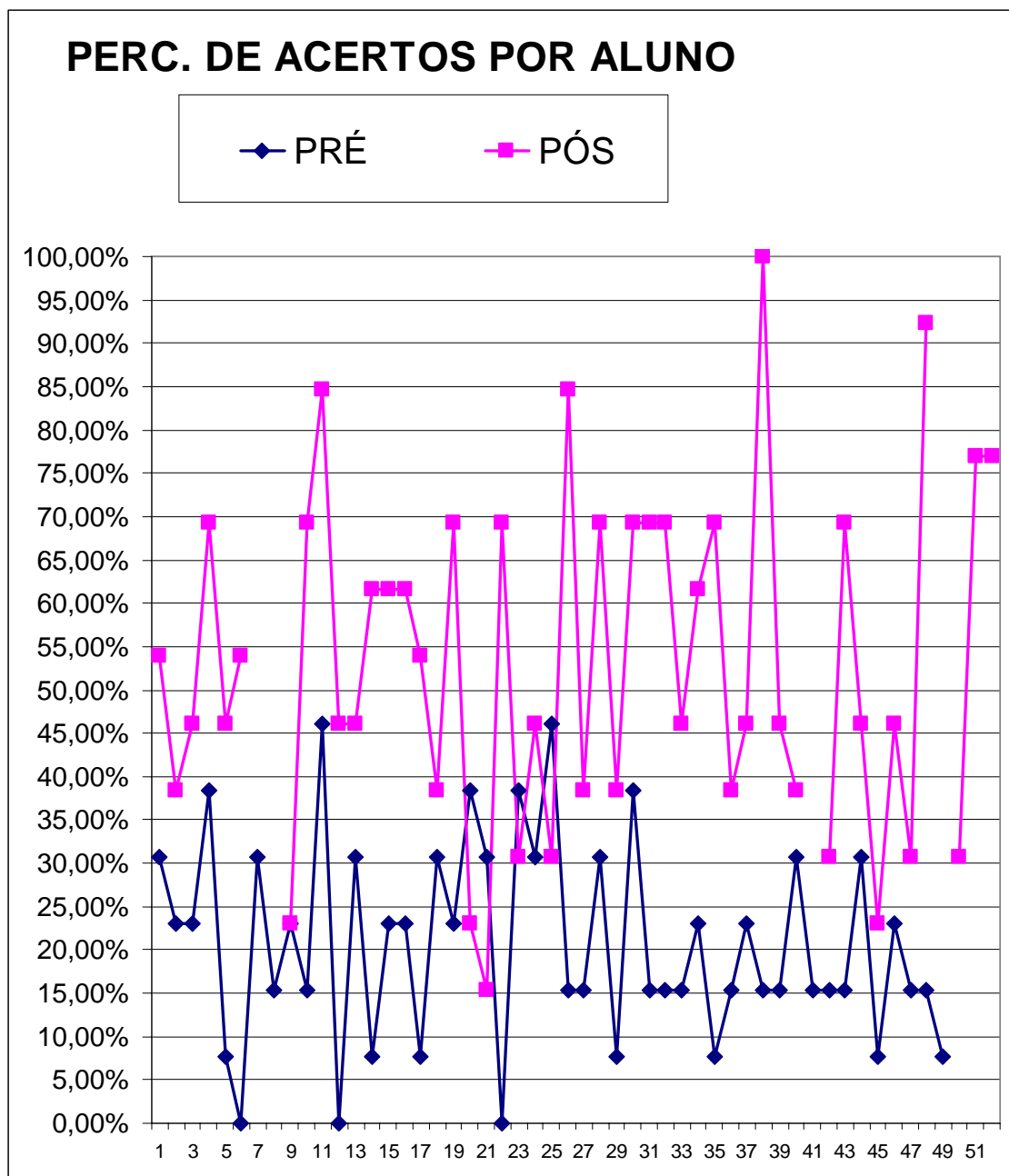
ALUNO	PRÉ	PÓS
A1	30,77%	53,85%
A2	23,08%	38,46%
A3	23,08%	46,15%
A4	38,46%	69,23%
A5	7,69%	46,15%
A6	0,00%	53,85%
A7*	30,77%	
A8*	15,38%	
A9	23,08%	23,08%
A10	15,38%	69,23%
A11	46,15%	84,62%
A12	0,00%	46,15%
A13	30,77%	46,15%
A14	7,69%	61,54%
A15	23,08%	61,54%
A16	23,08%	61,54%
A17	7,69%	53,85%
A18	30,77%	38,46%
A19	23,08%	69,23%
A20	38,46%	23,08%
A21	30,77%	15,38%
A22	0,00%	69,23%
A23	38,46%	30,77%
A24	30,77%	46,15%
A25	46,15%	30,77%
A26	15,38%	84,62%
A27	15,38%	38,46%
A28	30,77%	69,23%
A29	7,69%	38,46%
A30	38,46%	69,23%
A31	15,38%	69,23%
A32	15,38%	69,23%
A33	15,38%	46,15%
A34	23,08%	61,54%
A35	7,69%	69,23%
A36	15,38%	38,46%
A37	23,08%	46,15%
A38	15,38%	100,00%
A39	15,38%	46,15%
A40	30,77%	38,46%
A41*	15,38%	
A42	15,38%	30,77%
A43	15,38%	69,23%
A44	30,77%	46,15%
A45	7,69%	23,08%
A46*	23,08%	
A47	15,38%	46,15%
A48	15,38%	30,77%
A49	7,69%	92,31%
A50**		30,77%
A51**		76,92%
A52**		76,92%

\* Aluno que não realizou o Pós-teste

\*\* Aluno que não realizou o Pré-teste

A seguir apresentamos o Gráfico 2 comparando o percentual de acertos nas 13 questões entre o pré-teste e o pós-teste. A falta de um ponto no Gráfico 2 significa que o aluno não estava presente no dia da realização do pré ou pós-teste.

Gráfico 2 – Percentual de acertos por aluno entre o pré e o pós-teste com 13 questões. O ponto ausente significa que o aluno não esteve presente na avaliação.



No gráfico 2 observa-se o crescimento individual das notas de cada aluno, onde a linha inferior é do pré-teste e a superior corresponde ao pós-teste. O aluno A38 acertou toda a prova. Este aluno apresenta médias boas na disciplina de Física mas não obtendo nenhum dez durante o ano em algum teste ou prova. Observamos também os crescimentos individuais como o do aluno A49 de 7,69% de acertos no pré-teste passando a 92,31% no pós-teste, entre outros. Houve um crescimento em geral do percentual de acertos dos alunos, exceto os alunos A21, A23 e A25 que decresceram seu



percentual de acertos no pós-teste em comparação com o pré-teste. Esse fato deve ter ocorrido porque os alunos não se adaptaram à nova metodologia apresentada em sala de aula, ou porque se sabiam alguma coisa anteriormente sobre o Modelo Atômico que lhes fora apresentada classicamente tenham ficado mais confusos com a introdução de novos conceitos como da Mecânica Quântica.

A média de acertos do grupo foi de 6,89 o que dá, em percentagem, aproximadamente 53% de acertos. No pré-teste essa média foi de 2,57 o que equivale a 14% de acertos.

Agora, vamos verificar tentativamente o possível perfil epistemológico de cada aluno por acertos de questões, considerando agora as 26 questões do pós-teste.

Tabela 10 – Avaliação do perfil epistemológico de cada aluno para 26 questões do pós-teste.

ALUNOS	Ultra-racionalista	Racionalista	Realista	Animista
A1	11	3	1	1
A2	9	2	1	2
A3	11	2	1	2
A4	11	3	0	2
A5	9	1	1	2
A6	9	3	1	2
A7*				
A8*				
A9	6	2	1	0
A10	12	3	1	2
A11	13	5	1	2
A12	7	2	0	2
A13	9	3	1	2
A14	10	2	1	2
A15	12	2	1	2
A16	11	3	1	2
A17	6	4	0	2
A18	7	2	1	2
A19	13	3	0	2
A20	8	0	1	2
A21	5	0	1	2
A22	12	2	1	2
A23	5	2	0	2
A24	9	1	0	0
A25	6	2	0	1
A26	17	3	1	2
A27	9	4	1	1
A28	12	4	1	1
A29	9	2	1	2
A30	8	2	0	2
A31	12	4	1	2
A32	12	4	1	1
A33	8	5	1	1
A34	9	4	1	2
A35	13	4	1	2
A36	9	4	0	0
A37	8	3	1	1
A38	18	5	1	2

(continua)

(continuação)

<b>ALUNOS</b>	<b>Ultra-racionalista</b>	<b>Racionalista</b>	<b>Realista</b>	<b>Animista</b>
<b>A39*</b>				
<b>A40</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>A41</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>A42</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1</b>
<b>A43</b>	<b>13</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>A44</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>A45</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>2</b>
<b>A46*</b>				
<b>A47</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>A48</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>A49</b>	<b>15</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>A50</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>A51</b>	<b>14</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>A52</b>	<b>15</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>2</b>

Podemos supor que havia 18 questões Ultra-racionalistas, 5, Racionalistas, 1, Realista e 2 Animistas, totalizando as 26 questões do pós-teste.

Destacamos que 2 alunos se sobressaíram neste tipo de avaliação: o aluno A38 que acertou todas as questões que podemos interpretar que ele talvez possua um entendimento maior de todo o perfil epistemológico que é o ideal para a compreensão da matéria (desde o Animista até o Ultra-racionalista), pois revela mais aptidão para sua aprendizagem significativa. O aluno A45 que praticamente não possui noção Ultra-racionalista pois só acertou uma entre todas (e eram 18 questões!) e sua compreensão está mais no nível Racionalista pois acertou 3 entre 5 questões. Podemos dizer que estes dois alunos estão nos extremos da compreensão das noções de Mecânica Quântica.

Passemos agora à análise dos esquemas conceituais.

---

\* Responderam ao Pré-teste mas não o Pós-teste

## VI.2 – ANÁLISE DOS ESQUEMAS CONCEITUAIS

Iniciando a análise dos dados qualitativos obtidos com os alunos começamos com a avaliação da tentativa de esboçar um mapa conceitual que na verdade tornou-se um “esquema conceitual”<sup>14</sup>, pois os alunos colocaram junto com a palavra-chave uma frase explicativa. Apesar disso, ainda podemos tentar analisar os seus esquemas conceituais, o que faremos aluno por aluno dos que entregaram o trabalho. Foi permitido que fizessem o trabalho em dupla e que consultassem o texto básico: “Notas de aula sobre o átomo e a Mecânica Quântica”. Os tópicos para os quais foram pedidos que elaborassem os mapas conceituais eram sobre o “Princípio da Incerteza” e o “Princípio de Superposição – Gato de Schrödinger”. Para avaliar estes esquemas fez-se uma pontuação de 1 a 4 que corresponde a fraco, regular, bom e muito bom, respectivamente. Para a pontuação 4 (o que corresponde a muito bom) adotou-se a situação em que o aluno tivesse relacionado todas as palavras-chave com seus respectivos conceitos que ele encontrou no texto, sem que houvesse alguma dúvida de interpretação. Na pontuação 3 (bom) o aluno deveria ser capaz de ter relacionado a palavra-chave com os conceitos admitindo que houvesse falha num ponto ou outro que não corresponderia à totalidade do conceito por ele proposto. Na pontuação 2 (regular) o aluno não teria sido capaz de identificar a palavra-chave com sua respectiva explicação ou por ter sido pouco completo. Na menor pontuação 1 (insuficiente) o aluno não teria conseguido associar frases explicativas corretamente com as suas respectivas palavras-chaves, não havendo nenhuma relação entre elas ou por apresentar insuficiência de dados.

Da turma 301, 14 alunos fizeram os seus esquemas sendo que um deles não esteve presente no pré-teste e no pós-teste e na turma 302, 16 fizeram os seus esquemas, mas dois não realizaram o pós-teste. Deste modo, 30 esquemas foram feitos pelos alunos pois, não havia obrigatoriedade (como por exemplo, que valesse nota) na realização do trabalho, embora fosse solicitado que elaborassem os seus mapas conceituais.

Em geral, os alunos conseguiram fazer uma boa relação entre os significados dos conceitos com as frases explicativas.

Vamos passar agora à análise dos esquemas conceituais, considerando que a enumeração de cada aluno foi a mesma do pré e pós-testes:

Aluno A3 apresenta o “Princípio de Incerteza” (Figura 1a) no seu esquema experimento de dupla fenda, a incerteza na posição e momento e a fórmula do princípio e corpuscular com ondulatório. Existe uma relação entre conceitos como apresentados na estruturação da Mecânica Quântica. Qualitativamente, interpreta a indeterminação no momento e localização. No “Princípio de Superposição” (Figura 1b) delineia sobre o experimento de pensamento, probabilidade de desintegração, superposição de estado, estado de sistema e instante de tempo. Todas as relações entre os conceitos e/ou frases aparecem numa construção hierárquica de importância. Obedece também a ordem de inclusividade dos mais aos menos abrangentes. Em geral, essa hierarquização vertical e inclusividade está presente em todos os demais esquemas conceituais apresentados pelos alunos. Também aparecem presentes relações de diferenciação progressiva em todos os conceitos ou frases explicativas, embora, tenha faltado para a maioria a reconciliação integradora. Porque os esquemas conceituais apresentaram muita semelhança na sua elaboração, foram escolhidos apenas alguns desses esquemas (sobre

---

<sup>14</sup> Segundo Moreira (2006), mapas conceituais são mapas de conceitos, ou seja, incluem apenas conceitos e relações entre eles. Diagramas que incluem também definições, informações, processos, são por ele chamados de esquemas conceituais.

“Princípio de Incerteza” e “Princípio de Superposição”) para serem apresentados neste trabalho.

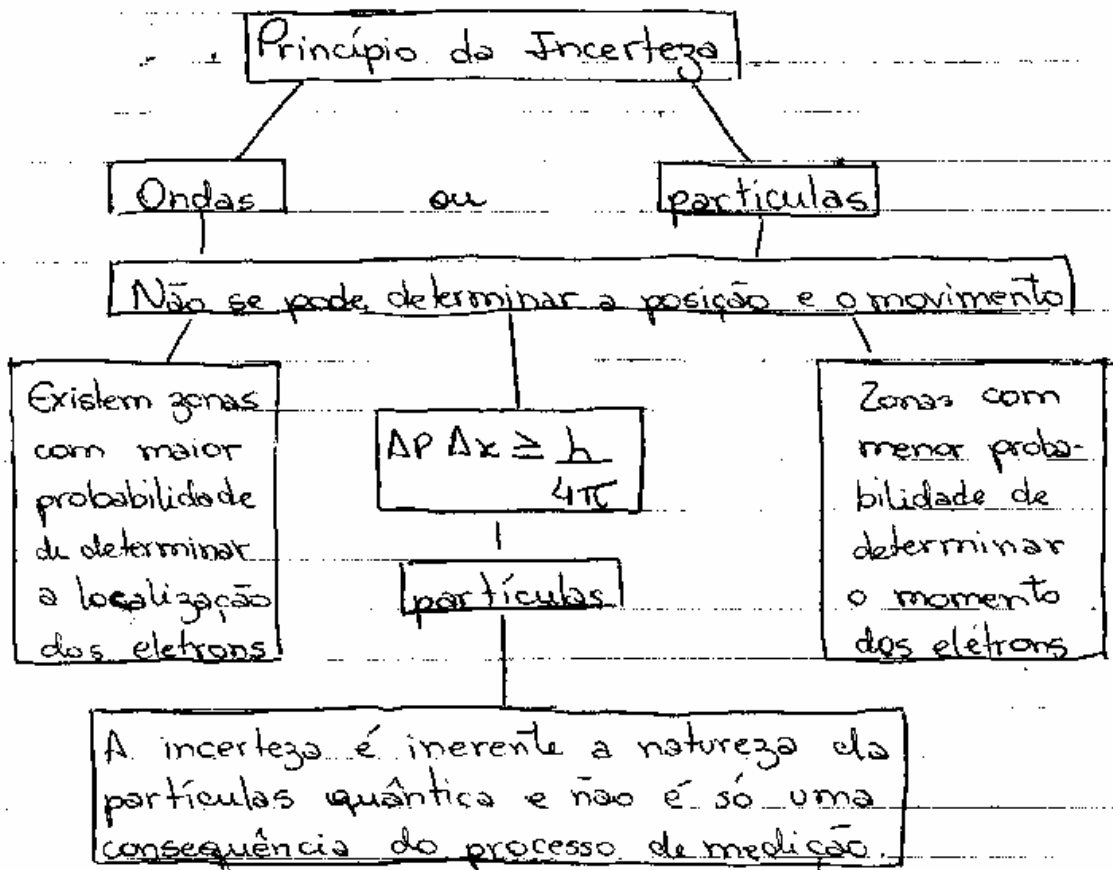


Figura 1a – Esquema conceitual do aluno A3 para o “Princípio de Incerteza”

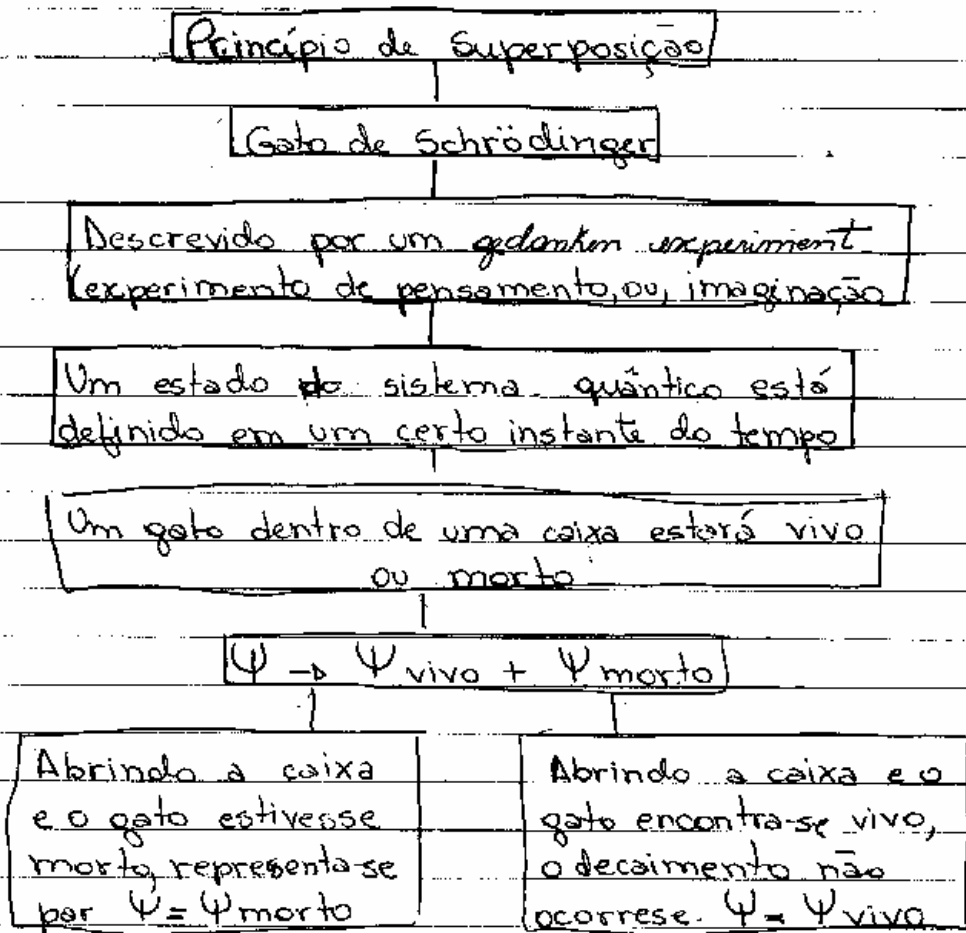
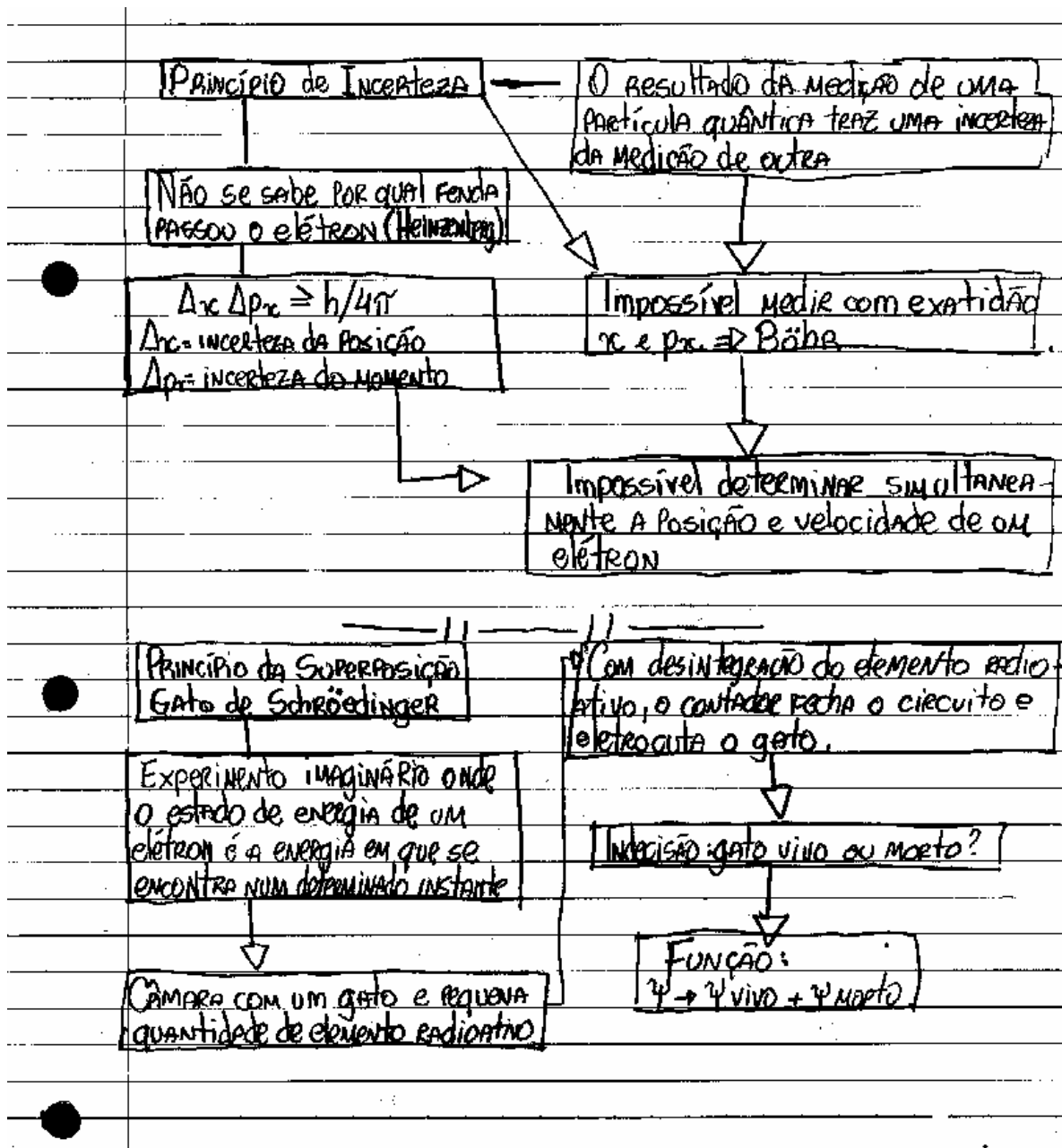


Figura 1b – Esquema conceitual do “Princípio de Superposição – Gato de Schrödinger” elaborado pelo aluno A3.

Na Figura 1b percebemos que o aluno A3 entendeu que este era um experimento imaginário e que os estados do gato se superpõem entre uma mistura de gato vivo e morto e que só se pode saber qual o seu estado final se abirmos a caixa com a ocorrência ou não do decaimento radioativo. A nota do aluno A3 foi 4 (muito bom).



Figuras 2a e 2b - Esquemas conceituais do “Princípio de Incerteza” (2a) e do “Princípio de Superposição – Gato de Schrödinger” (2b) apresentados pelo Aluno A11.

Aluno A11, (Figura 2a) no “Princípio de Incerteza”, relaciona falta de informação por qual fenda passou o elétron, incerteza na posição e no momento com a sua fórmula, o que evidencia a quais as informações que o sistema pode fornecer. No “Princípio de Superposição” (Figura 2b) relaciona experimento imaginário e função de estado e superposição de estados demonstrando o entendimento sobre a necessidade de representar um fenômeno ainda não acontecido com uma função de onda. Nota 4 (muito bom). Demonstra clareza ao relacionar desintegração com partículas somente radioativas.

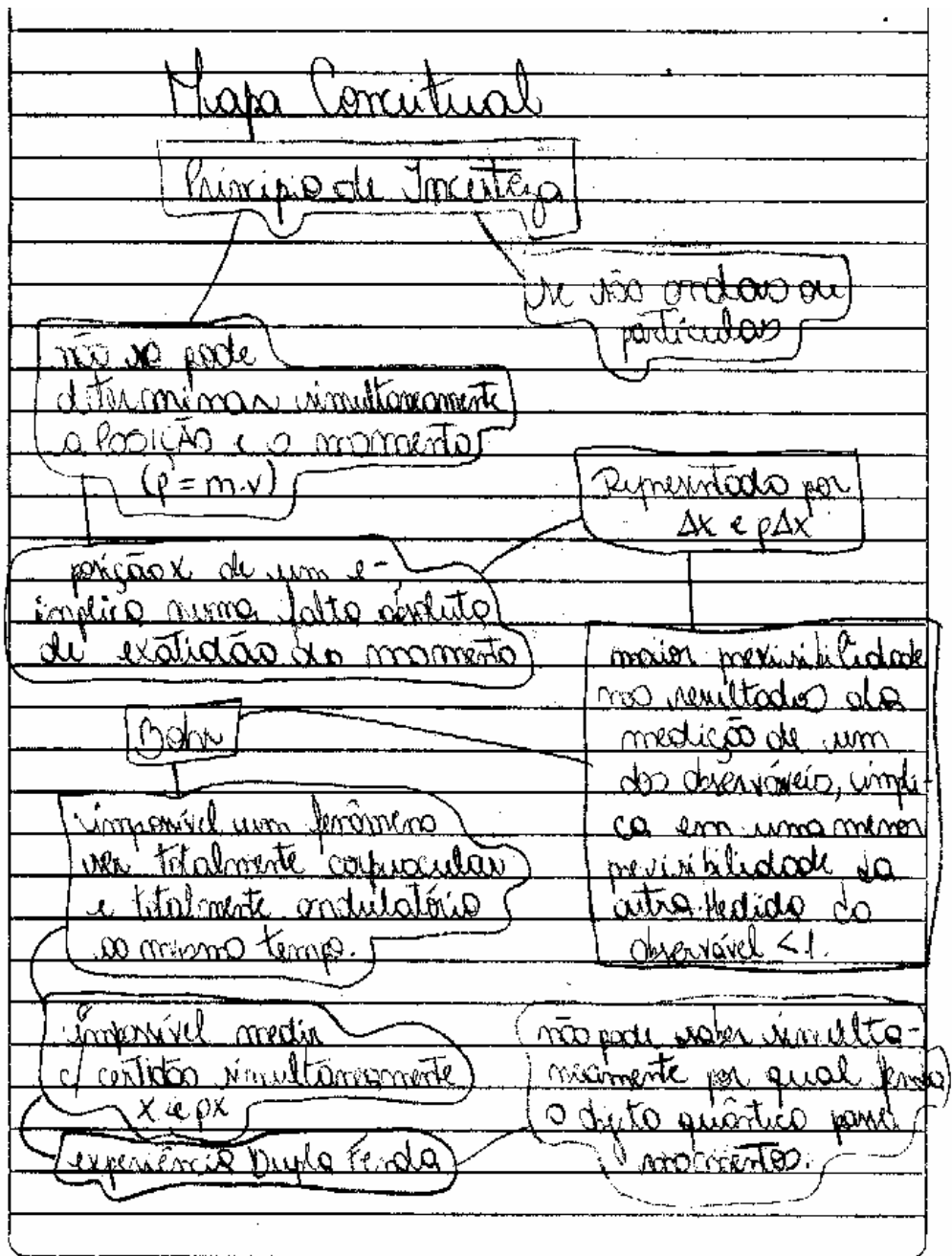


Figura 3a – Esquema conceitual do “Princípio de Incerteza” (Aluno A14).

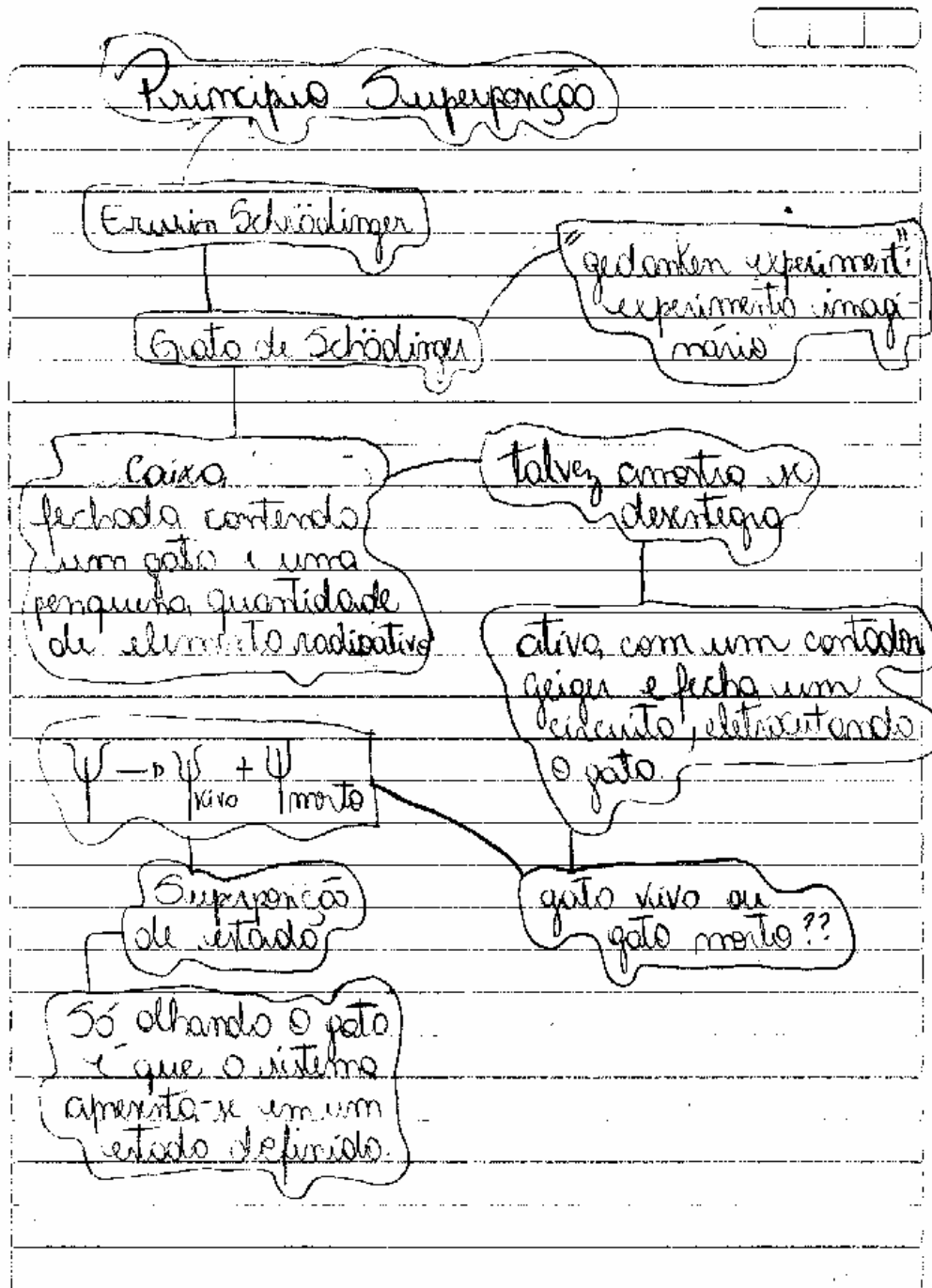


Figura 3b – Esquema conceitual do “Princípio de Superposição – Gato de Schrödinger” (Aluno A14).

Aluno A14 relaciona ondas e partículas indicando a compreensão deste princípio; inexactidão no momento e na posição entendendo que é impossível determinar ambos ao mesmo tempo com precisão; indeterminação por qual fenda passou o elétron demonstrando seu entendimento na impossibilidade de saber a sua localização (Figura 3a). Bohr é o principal físico envolvido no desenvolvimento da Mecânica Quântica; e conclui sobre a relação de incerteza entre momento e posição. No “Princípio de



Superposição” (Figura 3b) preocupa-se em indicar o autor da idéia. Como os alunos anteriores, descreve a experiência do “Gato de Schrödinger” indicando que o estado do gato pode ser representado por uma função de onda. Nota 4 (muito bom).

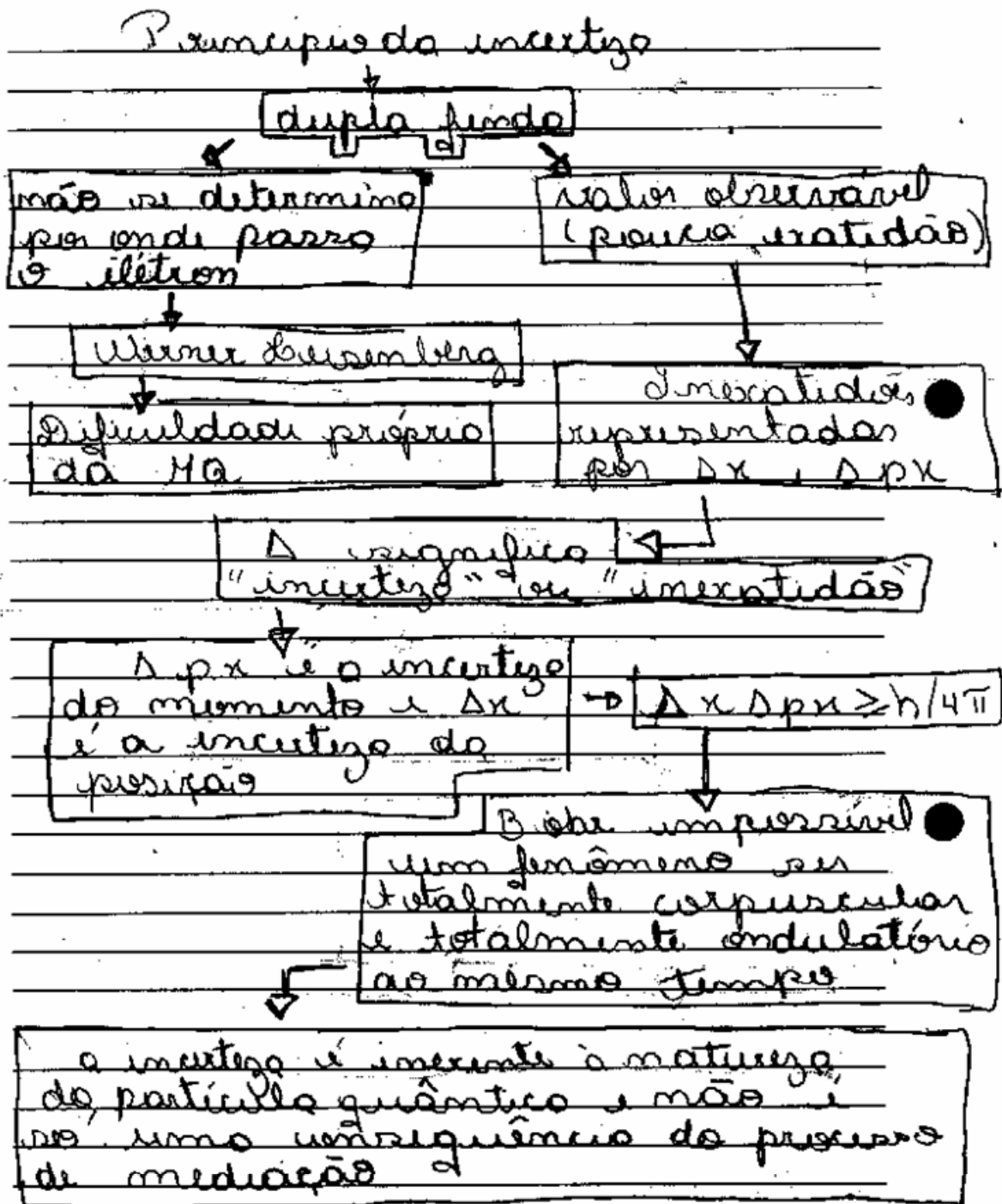


Figura 4a – Esquema conceitual do “Princípio de Incerteza” (Aluno A41).

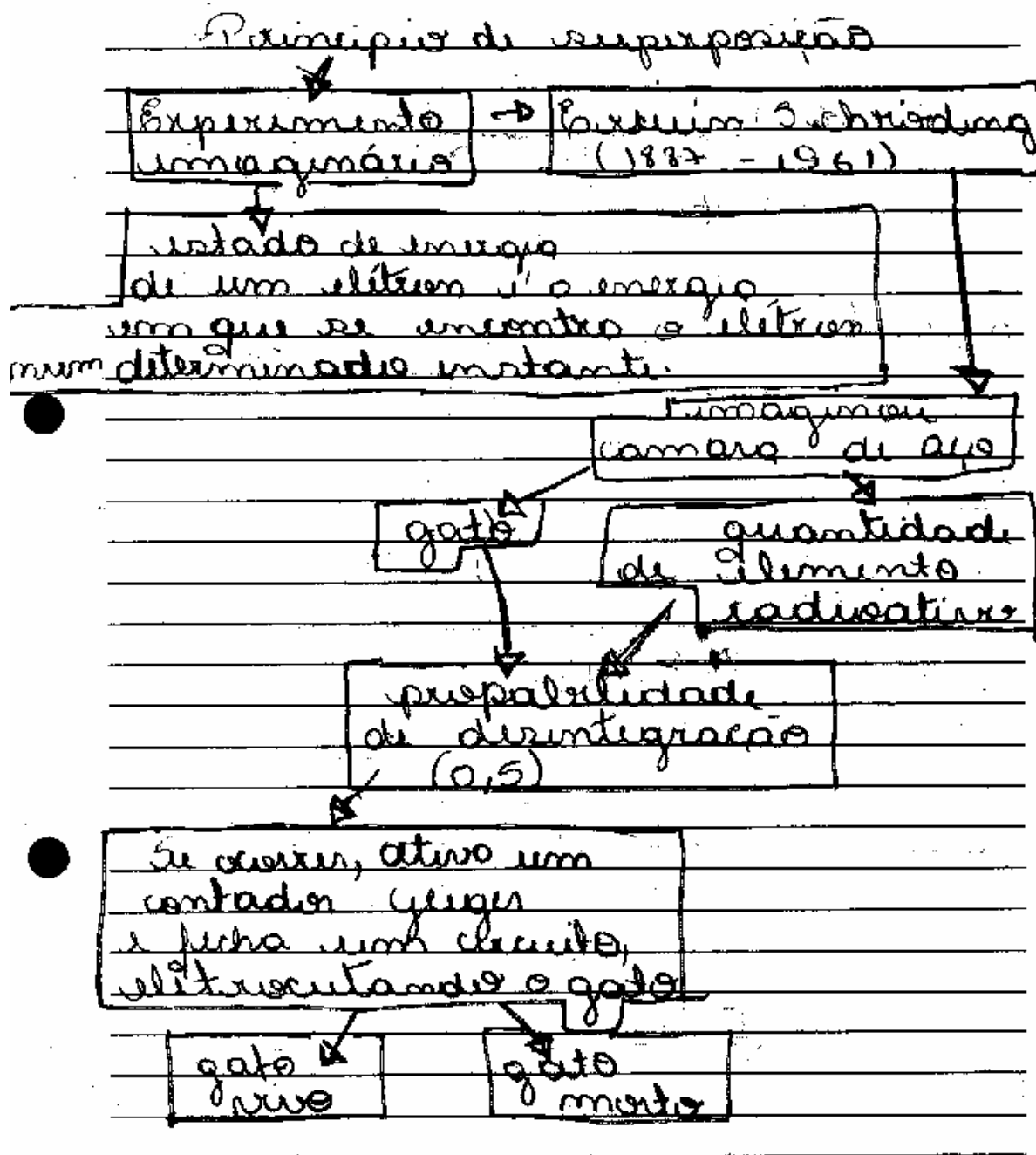


Figura 4b – Esquema conceitual do “Princípio de Incerteza – Gato de Schrödinger” (Aluno A41).

Como era de se esperar, todos os esquemas conceituais apresentaram um núcleo comum com algumas particularidades, colocadas, por poucos alunos, que podiam diferenciar um esquema de outro. Em geral, percebe-se que o desempenho de 15 alunos foi bom, 8 foi muito bom, 4 regulares e um insuficiente.

A Tabela 11 apresenta as notas atribuídas aos alunos que entregaram o esquema conceitual do “Princípio de Incerteza” e “Superposição de Estados – Gato de Schrödinger”.

Aluno	Nota
A3	4 (MB)
A6	3 (B)
A10	2 (R)
A11	4 (MB)
A13	3 (B)
A14	4 (MB)
A15	4 (MB)
A18	3 (B)
A19	4 (MB)
A20	3 (B)
A21	2 (R)
A25	2 (R)
A26	3 (B)
A28	3 (B)
A29	2 (R)
A30	3 (B)
A32	1 (I)
A33	3 (B)
A36	3 (B)
A37	3 (B)
A40	3 (B)
A41	4 (MB)
A42	2 (R)
A43	3 (B)
A44	3 (B)

Tabela 11 – Relação de notas dos alunos que realizaram os esquemas conceituais e que fizeram o pré-teste e/ou o pós-teste.

## VI.3 – ANÁLISE DE RESPOSTAS DE PROFESSORES E ALUNOS SOBRE A INCLUSÃO DE FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO

### **Análise do questionário dos professores**

O questionário foi entregue em três escolas de nível médio, inclusive aquela na qual leciona o autor, e para professores de Física colegas de Universidade. Um destes colegas distribuiu este questionário nas duas outras escolas. O número total de professores que responderam o questionário foi 13. As respostas e algumas características desses professores estão resumidas na Tabela 12.

Quando foi solicitado que respondessem livremente sobre os aspectos atuais da Física do Ensino Médio, somente seis professores o fizeram. Aqui colocaremos as respostas dos professores, mesmo os que não responderam explicitamente a esta pergunta que estava implícita na penúltima e procuramos tirar algumas conclusões das suas respostas em geral.

O professor P1 acha

*importante a adoção de novas metodologias e o uso de novas tecnologias no ensino da Física*

Este professor cursou o Mestrado do Ensino Profissionalizante em Ensino de Física e já trabalhou com Física Moderna (FM) de 2 a 4 horas-aula em todo o curso. O tópico abordado por ele foi Relatividade e Dualidade Onda-partícula.

O professor P2 disse que

*faltam aplicativos em Física que tornariam as aulas mais atrativas, interessantes e agradáveis.*

Afirmou ainda que quadro-negro e giz não prendem mais os alunos de hoje às aulas tradicionais. Percebe-se neste discurso que o professor reconhece que estamos perdendo o interesse dos nossos alunos em sala de aula para a mídia tecnológica moderna ao reconhecer que “...quadro e giz não cativam a atenção dos alunos nos dias de hoje”. Apesar de ele ter cursado a disciplina de Mecânica Quântica não trabalhou com os alunos algum tópico de Física Moderna, alegando a pouca carga horária até para desenvolver os conteúdos da Física Clássica. Mais dois outros professores (P3 e P10) alegaram também este motivo para não desenvolver a Física Moderna. Apesar disso, o professor número P4 considera que podemos desenvolver a dualidade Onda-partícula quando trabalhamos com Óptica e Ondas, o que sugere que temos espaço para trabalhar a Física Moderna mesmo dentro das aulas tradicionais de Física, sem fazer grandes modificações no currículo atual.

O professor P6 diz ser necessário

*...haver um aumento da carga horária da disciplina*

e solicita também

*...congressos e seminários para ... (ter) ... debate sobre a Física.*

Tabela 12 – Respostas do questionário dos professores

Número do professor	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
Leciona em escola	pública	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	particular		X				X	X	X		X		
Universidade que freqüentou	U F R G S	U F R G S	U F R G S	U F R G S	U F R G S	U F P E L	U U C R S	P U C R S	P U C R S	P U C R S	F A P A	U L B R A	U R C A M P
Cursos que freqüentou	Lic. Fis.	Lic. Fis. <sup>15</sup>	Lic. Fis.	Lic. Fis.	Ciências Fis. e Bio.	Lic. Fis.	Fis. <sup>16</sup>	Lic. Fis. <sup>17</sup>	Lic. Fis.	Lic. Fis.	Lic. Mat.	Mat. <sup>18</sup>	Ciên. Bio.
Fez curso de pós-graduação?	Mest. Profis sional Ens. Fis.	Tecn. em Construção	Não	Não	Não	Ens. de Fis.	Folclo-re	Mest. (não informou a área)	Não	Mest. e Dout. em Edu.	Espec. em Ciências Fís.	Não	Zool. de Vert. e Eco.
Há quanto tempo leciona Fís. no Ensino Médio?	5 anos	15 anos	30 anos	1 ano	2 anos	5 anos	37 anos	5 anos	10 anos	30 anos	24 anos	9 anos	15 anos
Em qual turno leciona?	manhã e tarde	manhã	manhã tarde noite	manhã e noite	manhã	manhã tarde noite	manhã e noite	manhã e noite	manhã e tarde	manhã e tarde	manhã e tarde	manhã e tarde	manhã e tarde
Conteúdos do Ens. Médio	1°	em geral: Mecânica											
	2°	em geral: Termologia, Ondas, Hidrostática											
	3°	em geral: Eletromagnetismo; profs. P8 – Fis. Moderna e P10 – Radiatividade											

(continua)

Lic. = Licenciatura; Fis. = Física; Mat. = Matemática; Bio. = Biologia; Ens. = Ensino; Mest. = Mestrado; Dout. = Doutorado; Tecn. = Tecnologia; espec. = especialização; Ciên. = Ciências; Zool. = Zoologia; Vert. = Vertebrados; Eco. = Ecologia

<sup>15</sup> Além disso, Engenharia Civil

<sup>16</sup> Além disso, Ciências Exatas (Cachoeira do Sul), Biologia (Bagé), Curso de Especialização em Química (Santa Cruz)

<sup>17</sup> Além disso, Bacharelado em Física Médica

<sup>18</sup> Em andamento

(continuação)

Número do professor	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
Na graduação, teve Física Moderna? Qual?	MQ	MQ	MQ	Introd. a MQ	Fís. Quânt. oferecido pelo Estado	Relat. e MQ	Relat. e MQ	Relat., MQ, Fís. Nucl.	MQ	Não	Não	Tópicos de MQ	Não
Já trabalhou com Física Moderna (FM) no Ensino Médio?	Relat.; Dual. Onda-Part. (3 ha)	Não	Não	Não	Não	Relat. Restrita (8 ha)	Não	Relat., Fis. Atom.; Nucl. (6 ha)	Relat.	Não	Não	Não	Não
Qual sua opinião sobre inclusão de Física Moderna (FM) no Ensino Médio? Explique. Argumente.	Importante na produção tecnológica; é “Ciência em Construção”; tópicos de FM	Pouca carga horária; não consegue terminar conteúdo proposto	Importante à bagagem cultural do aluno; há deficiência na Esc. Públ.; idem ao P2	Importante desde que contextualizada; incluir em todos anos; trabalhar junto a ondas e óptica	Devido à tecnologia é interessante e necessário trabalhar com átomo e part. e luz (onda/part.)	Discussão e pesquisas da inserção de novos tópicos.	Acha bom	A FM deve ser trabalhada ao longo dos 3 anos; fazer uma síntese no 3º ano	Importante; Relat. e FM; temos que ser os “teríveis”; mais ágil e prática	De modo geral é inviável a MQ e Relat.; dificuldade entender aceleração; idem ao P2	Interessante e importante; acesso a material didático	Necessário pois estamos baseados em modelos ultrapassados	Necessário devido aos avanços tecnológicos e para alunos que não farão universidade

MQ = Mecânica Quântica; Relat. = Relatividade; Dual. = dualidade; part. = partícula; Atom. = Atômica; ha = horas-aula;

Este professor trabalhou com Relatividade Restrita durante 8 horas-aula com seus alunos como sendo uma experiência didática de introdução de Física Moderna no Ensino Médio (na verdade como uma proposta de dissertação de Mestrado em Física), mas pede maior carga horária de Física para poder trabalhar em Física Moderna com seus alunos.

O professor P9 comenta que

*...está cada vez mais difícil, complicado... Não conseguimos desmistificar este monstro, chamado FÍSICA nas escolas. Entramos na sala de aula mascarados com o “Boi da cara preta”. O conteúdo é extremamente difícil, a reprovação em massa e a aprendizagem e o gosto pela ciência é ZERO. Isto é assim porque os professores adoram explicar como funciona (erradamente)\* o mundo “fora” das Leis de Newton.*

Este professor que comentou, na pergunta anterior, que os alunos devem saber

*...tudo o que a Física Moderna abrange. Temos que ser os terríveis. O que devemos tentar fazer é repensar em alguns conteúdos; fazer a Física mais ágil, prática... Ter a formação continuada de professores (e nós monstros...). Apesar de que a escola (como um todo!) está oferecendo alunos para a Física sem base, sem conhecimento e colaboração efetiva. Precisamos mudar muito a nossa educação!!!*

Parece contraditório o que ele afirma, pois, ora afirma que a Física é um monstro que “os professores adoram ser terríveis”, ora afirma que os professores têm que ser terríveis, para então afirmar desejar repensar os conteúdos para a Física ser mais ágil e prática sem dar a entender o que isto significa. O que fica claro nas suas afirmações que existe problemas no ensino de Física e que temos que acabar com este mito de “Boi da cara preta”, isto é, de ela ser assustadora. Ao mesmo tempo admite que devemos ser “terríveis”, que significa dizer que devemos ser *poderosos* e que a educação deve ser mudada para produzirmos mais estes “monstros”. Para este professor o mundo é explicado somente através das Leis de Newton e fora dele não há compreensão.

O professor P10 leciona nos primeiros anos da escola e percebe uma enorme deficiência nos conceitos básicos da Matemática, pois existem alunos que não conseguem diferenciar

*...0,5 de 0,05” e alunos nas Engenharias muitos não conseguem isolar uma incógnita!!! E também não sabem o que significa uma aceleração ...*

Este professor é aquele que achou, na penúltima questão, ser “inviável abordar a MQ e a Relatividade” no Ensino Médio pois os alunos não conseguem entender “o conceito de aceleração”. Apesar disso, acha que em alguns casos “seja possível abordar conceitos mais complexos” e que depende da “clientela” que se está lidando. Critica a falta de interesse dos alunos até para resolver os problemas de Física mais corriqueiros e que são capazes de tirar notas piores quando fazem recuperação. Questiona ainda como

---

\* Palavra acrescentada pelo autor pois está em mais acordo com o texto.

um aluno pode entender o paradoxo dos gêmeos, a dilatação temporal ou a contração dos comprimentos se eles não são capazes de entender um simples problema de queda livre. Porém concorda que se houver interesse dos alunos por esses novos conceitos de Física Moderna não se deve perder a oportunidade de ensinar este “algo mais”. O que estará por trás desta falta de interesse dos alunos pela Física que não se consegue mais motivá-los? Talvez não seja adequado o modo que nós estejamos trabalhando em sala de aula com os alunos somente com giz e quadro-negro? Será que não falta mais envolvimento do professor em pesquisar novas alternativas didáticas de aula? Se nas escolas existir computador, há alguns aplicativos que trabalham em modelagem computacional (por exemplo; Modellus, ver Araújo e Veit em 2004 e Araújo Dornelles e Veit em 2005) que podem ser empregados em sala de aula, mas vídeos didáticos são vários e até gratuitos como os que estão disponíveis na Secretaria de Educação do nosso Estado. Temos que nos lembrar que estamos competindo com a mídia e computadores que possuem diversos jogos que chamam mais atenção para os adolescentes.

Finalmente, o professor P12 que respondeu a penúltima questão afirmando que

*é uma necessidade imediata trabalhar com Física Moderna no Ensino Médio, pois estamos baseados em modelos ultrapassados.*

Sobre os aspectos atuais da Física no Ensino Médio declara que precisamos de uma

*...reforma educacional urgente e delimitações de pré-requisitos...*

pois critica a falta de pré-requisitos da escola ciclada, no seu ponto de vista. Fala ainda que os

*...PCN's existem somente em regimentos escolares, mas sem aplicação efetiva.*

Se por um lado criticamos a falta de flexibilização do currículo atual em Física no Ensino Médio também somos incapazes de cumprir um currículo mínimo (devido à falta de carga horária) conforme relatam os professores P2, P3, P10 e P12.

Olhando a Tabela 12, observamos em primeiro lugar que oito professores (a maioria) têm Licenciatura em Física, um tem Licenciatura em Matemática, e quatro têm Bacharelado, um em Física, um em Matemática, um tem em Ciências Físicas e Biológicas (professor P5) e outro em Ciências Biológicas (professor P13) em Universidades reconhecidas. Observamos que o professor P10 tem Doutorado em Educação e é o mais crítico em relação à inserção da Física Moderna e Contemporânea, como foi visto. Em geral, os professores tiveram aula de Mecânica Quântica (exceto os professores P13, P5 o qual teve um curso de Física Quântica oferecido pelo Estado e o P12 que teve apenas tópicos de Mecânica Quântica) e alguns deles, Relatividade. Então, por que será que poucos professores (números P1, P6, P8 e P9) ministraram alguma noção de Mecânica Quântica? Alguns alegam falta de carga horária (P2, P3, P6 e P10) mas cremos que este não é o motivo principal da não inserção da FMC, pois os currículos das escolas públicas são bastante flexíveis.

Deste modo, observando a tabela 12, vemos que todos os professores concordam (apesar de alguns fazerem alguma restrição) com a inclusão da Física Moderna no Ensino Médio, pois acham importante e interessante e, portanto, podemos inferir que é por causa da sua plena aplicação no mundo moderno.



Vemos que a Física moderna está contextualizada no mundo atual que está repleto de muita tecnologia desenvolvida no último século (como raios-X, tomografia computadorizada, computadores, televisão, sistemas de abrir portas automaticamente tão comuns em supermercados, lojas, shoppings, tratamento médico por radiações). Além disso, está até presente em vestibulares de algumas Universidades, o que pode ser considerado mais um motivo de inclusão de tópicos de Mecânica Quântica no Ensino Médio.

### **Análise do questionário dos alunos no pré-teste**

Foram distribuídos inicialmente questionários aos 49 alunos das duas turmas de 3º ano do Ensino Médio. Foram feitas três questões abertas para que respondessem sobre a necessidade de estudar Física no Ensino Médio, sua opinião sobre como deveria ser a Física no Ensino Médio e se a Física deveria tratar de Física Moderna e Contemporânea.

Tabela 13 – Questão 1: Escreva livremente sua opinião sobre a necessidade, ou não, de estudar Física no Ensino Médio.

Respostas	Número de respostas
Necessário para entender fenômenos que acontecem na natureza (nosso dia-a-dia)	12
É importante como qualquer outra disciplina/para conclusão do Ensino Médio	11
Para o vestibular	10
Base para a faculdade	1
Desenvolver o raciocínio lógico	4
É necessário e básico/importante	4
Não vê necessidade, a não ser que deseje ser um profissional da área	2
Importante para aqueles que querem fazer Física, Engenharia e outras profissões	1
Futuramente precisaremos da Física	1
Noção básica do que é Física e para que ela serve	1
As coisas que temos hoje existem graças à Física	1
Maior interação do professor com a classe	1
Tem muitos cálculos e teorias que não precisamos estudar	1
Aprender coisas novas/é interessante mas também é complicada	1
Importante para tirar dúvidas freqüentes	1
Ter de decifrar a fórmula para resolver um problema	1
É importante para todas as disciplinas	1
É interessante como, por exemplo, a teoria de Einstein	1
Ter idéia do que é matéria e energia	1
Não responderam	2

O “número de respostas” significa quantos responderam daquela forma aquela questão, ou seja, um mesmo aluno pode ter dado diferentes respostas à mesma.

Consultando a Tabela 13, podemos ver que a “necessidade de entender a aplicação da Física no nosso dia-a-dia” (12 alunos), “ser importante para o currículo do

Ensino Médio” (11 alunos) e a “preocupação com o vestibular” (10 alunos) são os principais itens que orientam os alunos, ou seja, o que são mais significativos para ele. Observa-se que nesta questão da aplicação da Física no dia-a-dia que a Física precisa ter um significado para ela ter validade para os alunos. Se os professores dessem mais atenção a este ponto provavelmente teriam mais facilidade de ensinar os alunos levando-os a uma aprendizagem mais significativa. Apesar de se interessarem pela aprovação no vestibular cremos que isto facilita mais a aprendizagem mecânica do que propriamente a aprendizagem significativa, pois a assimilação da disciplina só será útil para aquele fim e logo após o aluno poderá vir a esquecer o que havia simplesmente memorizado.

Aproximadamente, o grupo de respostas “desenvolver o raciocínio lógico”, “ser necessário e básico/importante” e “não vê necessidade”, a não ser que deseje ser um profissional da área e “importante para aqueles que querem fazer Física, Engenharia e outras profissões” tiveram uma resposta baixa (em torno de 4) o que sugere que estes alunos não têm interesse para a Física e não a consideram importante a não ser para situações particulares como descreveram.

Por outro lado, 23 alunos consideraram a Física importante sob outra perspectiva, o que pode ser observado em respostas do tipo: “ela será necessária no futuro, reconhece que as coisas que temos hoje existem graças à Física” e que devemos ter uma noção básica dela e para que serve, é importante para as outras disciplinas, aprender coisas novas é interessante, mas também é complicado e interessante como, por exemplo, a teoria de Einstein, o que revela um interesse pela Física Moderna.

Um aluno reclamou da maior interação do professor com a classe, outro disse que tinha muitos cálculos e teorias que não são necessárias para estudar e ainda outro preocupou-se na aplicação de fórmulas para resolver problemas.

Pode-se analisar as respostas também individualmente de cada aluno como, por exemplo, o aluno A1 que diz que

*A Física é tão importante quanto qualquer disciplina, pois ela explica muitas coisas do nosso dia-a-dia (natureza, formação do mundo...).*

demonstrando um desejo de conhecer mais o nosso mundo e colocando-a como tão importante quanto qualquer outra disciplina. Comparando com a resposta do aluno A3 vemos que elas são muito semelhantes:

*A Física é real, acontece, faz parte de nosso dia-a-dia, é interessante sabê-la, ter uma explicação comprovada. Julgo importante aprendermos Física para ter uma idéia do que acontece à nossa volta.*

O aluno A5 dá, em parte, uma resposta também semelhante ao dizer que:

*Eu acho todas as matérias muito importantes, assim como a Física, todas desempenham um papel..., o de nos transmitir o conhecimento necessário! É no Ensino Médio que muitas pessoas escolhem se querem ser físicos ou não.*

Ele atribui uma importância relevante sobre o desenvolvimento do interesse do aluno pela Física. O aluno A7 dá também uma resposta parecida ao dizer que

*A Física é importante pois estuda os fenômenos que ocorrem em nosso dia-a-dia, ...*

O aluno A8, por sua vez, diz, numa linha muito próxima aos anteriores, que:

*É necessário para termos uma noção básica do que é a Física e para que ela serve.*

Outro aluno, A17, externaliza que:

*Eu acho que nós temos que estudar Física até para nós entendermos o espaço em que a gente vive.*

O aluno A18 afirma que quanto mais se conhece melhor para compreendermos o mundo moderno:

*É necessário estudar tudo, quanto mais conhecimento melhor para (a) mente humana, inclusive Física, pois muitas coisas que temos hoje foi através da Física, ...*

O aluno A19 vai mais longe sobre a importância da Física ao afirmar que:

*Há necessidade, pois a Física é usada por todos a toda hora mesmo não percebendo.*

*É muito importante, pois conseguimos aprender sobre coisas que usamos ou vamos usar no nosso dia-a-dia, afirma aluno A30.*

O aluno A33 faz uma afirmação:

*A minha opinião é que às vezes penso que não vai me servir “prá” nada, mas depois quando entendo a matéria e descubro para que ela serve ... e vejo como a Física é importante para o nosso aprendizado e para saber, aprender várias coisas.*

Ou seja, quando a Física apresenta algum significado para ele, ela se torna relevante.

O aluno A36, se confunde sobre a importância da Física:

*A Física é importante para quase todas as áreas, mas que não é importante, não é mesmo. Mas acho importante e interessante a mesma.*

O aluno A37 a considera importante para a nossa vida diária:

*...para mostrar como as leis da Física funcionam e até mesmo para incentivar adolescentes que venham a ser futuros físicos, porque a Física está no nosso dia-a-dia.*

O aluno A38 também considera importante dizendo que:

*Tem coisas bem interessantes, coisas que fazem parte do nosso dia-a-dia, então devemos sim ter aulas de Física.*

Este aluno, depois veremos, acertou todas as questões do pós-teste enquanto que no pré-teste tinha acertado um pouco menos de um quarto da prova.

Para o aluno A41 a importância da Física está em que:

*...pode me servir para ativar mais o pensamento.*

Mesmo entre aqueles que não gostam, alguns acham a Física importante, como o aluno A42:

*A Física é importante para todas as matérias, mesmo eu não gostando e não precisando da matéria, eu acho importante.*

Também é importante para o mundo a nossa volta para o aluno A44:

*Estudando a Física, percebemos que ela “está” em nossa volta. É fundamental sim estudarmos os princípios da Física. Comecei a me interessar por Física no 2º ano, e ainda me interessa. É bem interessante estudarmos elétrons, Joule,...*

Para o A45 é importante por causa do raciocínio:

*Física na verdade é uma matéria que tem que ter raciocínio, porque se você não pára para pensar você terá uma dificuldade muito grande. Então a dificuldade está no raciocínio de cada um (o modo de pensar sobre a matéria Física).*

O aluno A48 diz que:

*Embora algumas partes da Física seja monótonas existem nela outras bem interessantes como a teoria de Einstein.*

Observamos que alguns dão importância à Física quanto qualquer outra matéria, pois demonstram que ela é de interesse para a faculdade (1 aluno) ou de seu ingresso através do vestibular (10 alunos) como afirmam os alunos:

*É necessário estudar Física no Ensino Médio para nos prepararmos para o vestibular e termos uma base quando entrarmos na Faculdade. (A15)*

*Estudar a matéria do vestibular. (A9)*

*É necessário para no vestibular nós nos sairmos bem. (A6)*

*Não só a Física...é bom estudar pois teremos que entrar para uma Faculdade... (A20)*

*Eu acho que é muito necessário, pois a maioria dos alunos vão prestar vestibular e Física é necessário. (A23)*

*...Temos a necessidade de estudar Física no Ensino Médio pois é importante para as provas de vestibular. (A25)*

*Deveria ser mais visado o conteúdo que cairá no vestibular,.. (A34)*

*A Física é importante no Ensino Médio pelo simples fato de que será necessário ter este conhecimento no vestibular ou em outras provas de seleção. (A43)*

*É necessário para os que querem prestar vestibular para arquitetura, por exemplo. (A46)*

*A Física é importante, não só por causa do vestibular, mas principalmente porque não é uma “ciência intocável” (...) pelo contrário, ela está muito presente no nosso “dia-a-dia”. (A49)*

Este último aluno, além de mostrar uma certa preocupação com o vestibular também atribui uma importância da Física na nossa vida diária.

Tabela 14 – Questão 2: Como você acha que deveria se a Física no Ensino Médio?

Respostas	Número de respostas
Mais aulas práticas/experimentos e teóricas	12
Mais aulas práticas que teóricas	1
Laboratórios para os alunos pesquisarem	1
Falar mais dos experimentos atuais	1
Explicar como tudo começou	1
Mais conversa sobre a matéria	1
Mais matérias (provavelmente conceitos) e menos cálculos	1
Trabalhos de pesquisa	1
Mais demonstrações	1
Não só de cálculo mas também da parte histórica	1
Mais interessante/mais dinâmica	7
Melhor explicada	1
Novos métodos de aprendizagem	1
Professor pode melhorar suas aulas	1
Bem explicada e bem detalhada	1
Mais fácil	3
Mais específica possível	1
Assim como está	11

(continua)

(continuação)

Mais básica para aqueles que queiram futuramente estudá-la	1
Não sei	3
Provas com consulta	1
Seguindo os padrões da matéria	1
Não responderam	2

Dois alunos não responderam a esta questão. O “número de respostas” significa quantos responderam daquela forma aquela questão, ou seja, um mesmo aluno pode ter dado diferentes à mesma.

Notamos que em torno de 15 das respostas – se considerarmos as somas das repostas semelhantes que aparecem nas 4 primeiras linhas – manifestaram-se por mudanças principalmente inserindo mais laboratórios, pesquisas, explicações, novos métodos de aprendizagem (também podemos ler “como melhorar as aulas”), menos cálculos, o que demonstra que as aulas expositivas de quadro negro e giz estão desgastadas. Também nestas respostas reafirma-se em parte um mito, que as aulas de laboratório e experimentais seriam mais dinâmicas, mas ao menos revelou que existe um interesse por outro “tipo” de aula. Entretanto, temos que notar que um certo número de respostas, 11, concordaram como as aulas tal como estavam sendo exploradas eram interessantes, não desejando nenhuma modificação. Desse modo, observa-se que há um lado crítico dos alunos muito bom, concordando ou não com a didática do professor. Porém, isto em certa parte ficou resolvido quando foi feita a introdução do estudo da Mecânica Quântica neste projeto, onde foram desenvolvidas aulas com recursos mais visuais (como os diapositivos, o filme) e laboratório virtual (com a ida de alunos a uma demonstração do experimento de dupla fenda de um aplicativo no Instituto de Física da UFRGS). Isto comentaremos mais adiante com detalhe. Por outro lado, 3 respostas (e podemos dizer 3 alunos) não tinham opinião formada sobre como as aulas deveriam ser desenvolvidas.

Analisando individualmente cada aluno, vemos o interesse que a Física desperta neles. Como as respostas dos alunos A1 e A7:

*Falar mais dos experimentos atuais e explicar melhor como tudo começou. (A1)*

*Deveríamos ter maior interação com o professor, fazendo experiências fora de aula para vermos que toda aquela teoria que estudamos é também o que vemos todos os dias. (A7)*

Este aluno já havia expressado esta opinião na questão 1, como podemos ver da avaliação que fizemos naquele questionário, e A22 pede prova com consulta achando que as provas seriam mais fáceis dizendo:

*Provas com consulta e ter um laboratório para nós pesquisar.*

Outros pedem mais aulas práticas e experiências, como o aluno A2 dizendo:

*Com um pouco mais de aulas práticas e teóricas para fazer certas experiências. (A2)*

Mas também manifestou interesse por mais aulas teóricas. Outros disseram:

*Do modo que é, temos que estudá-la do jeito que foi formulada, mas com aulas práticas também. (A3)*

*Com experimentos práticos. (A9)*

*Mais prática do que teórica. (A10)*

Outros estes alunos acharam que o interesse melhorará se tiverem mais aulas práticas

*Dinâmica, com experimentos sendo feitos diante de nossos olhos. (A18)*

*Deveria ter trabalhos de pesquisa e experimentos e não só provas. E deveria ter mais exercícios teóricos como os apresentados neste teste. (A25)*

*Com mais aulas práticas, que vendo a gente aprende mais. (A26)*

*Eu acho que deveria ser com mais conversa sobre a matéria e aulas práticas no laboratório. (A28)*

*A Física no Ensino Médio deveria ter aulas práticas, para os alunos entenderem melhor a matéria e se interessarem mais. (A32)*

*Isso depende muito, numa escola pública a Física é só dada de uma maneira, não há aulas práticas, acho que isso as torna uma matéria chata, porque se tivéssemos mais contatos seria mais legal. (A37)*

*Deveria ter aula teórica e prática (laboratório). (A38)*

*Deveríamos fazer mais aulas práticas, para chamar mais a atenção do aluno. Ou até mesmo ensinar ao aluno onde ele usa a Física diariamente. (A44)*

Outros pedem aulas que despertem mais interesse:

*Menos cansativa, novos métodos de aprendizagem fazem o aluno voltar a ter interesse pelo conteúdo. (A4)*

*Deveria ser dada de uma forma mais interessante. (A5)*

*Um pouco mais dinâmica. (A8)*

*Deveria ser bem analisada, bem explicada, bem detalhada. Pois vamos sempre precisar da Física em nossas vidas. (A19)*

*Um pouco mais dinâmica, até para os alunos poderem aprender mais facilmente. De alguma forma elas teriam que prender a atenção do aluno. Explicando de um jeito diferente, dando demonstrações visuais, interagindo com os alunos, fazendo com que eles gostem da aula. (A30)*

*Deveria ser uma matéria mais interessante, porque muitas pessoas estudam Física sem saber que a Física está no nosso dia-a-dia. E também poderia nos mostrar que a matéria poderia ser fácil de se aprender. (A45)*

Outros solicitam aulas mais resumidas, como os seguintes alunos:

*O mais específico possível. (A6)*

*Muito básica, para dar um chão àqueles que queiram futuramente estudá-la. (A16)*

*Eu acho que deveria ser com aulas mais específicas ... (A20)*

Alguns pediram que se utilize menos cálculo e, provavelmente, o seu desejo é de que a matéria de ensino seja mais teórica e explicativa, quando dizem:

*Acho que deveria ter mais matéria e menos cálculos. (A13)*

*A Física não deveria tratar só de cálculos mas também da história de como foram feitas essas descobertas. (A48)*

Há também alunos para os quais assim como estavam sendo desenvolvidas as aulas estava bom, sendo que alguns teceram comentários adicionais como os seguintes:

*Ela pode continuar como está, só o professor pode melhorar suas aulas. (A14)*

*O conteúdo está bom, mas a Física é um pouco complicada, então deveria ser melhor explicada. (A15)*

*Acho que assim como está, está bom. (A27)*

*Na minha opinião, não precisa mudar nada, pois ela já é muito bem desenvolvida. (A29)*

*Acho a matéria bastante interessante, porém um pouco repetitiva. Tenho alguma dificuldade, mas me esforço. (A31)*

*A Física do Ensino Médio é bem legal a matéria, é fácil e interessante ... não deveria mudar, a não ser ter matérias que dêem para fazer experiências. (A33)*



*Acho que está bom. (A35)*

*Não precisa mudar nada, “tá” bom assim. (A36)*

*Assim está boa, mas poderia ter aulas com experiências, uma aula prática, criando aparelhos e afins. (A40)*

*Não imagino muito numa outra forma para ela ser apresentada, acho que assim está sendo a forma “certa”. Pelo modo como sempre me foi apresentada já me acostumei como é. (A41)*

*Seguindo padrões comprovados da matéria. (A46)*

*Como está agora está bom. (A47)*

Os alunos A17, A24 e A43 disseram que:

*Não sei*

mas antes, na questão 1, o A17 tinha dito:

*... para nós entendermos o espaço que a gente vive.*

o que de certa forma ele está concordando da maneira como as aulas de Física estão sendo ministradas, o A24 já tinha se manifestado na questão 1:

*...eu não gosto (da Física)...*

e concluiu afirmando depois

*Eu acredito que não estou apto a responder esta pergunta.*

Outros alunos pediram aulas de tipo:

*Fácil. (A21)*

*Um pouco mais fácil. (A23)*

*Mais dinâmica. (A34)*

*Um pouco mais fácil. (A39)*

*Dinâmica e interessante. (A49)*

sem especificarem o que isto significa.

O aluno A42 lembrou que a Física só é útil para o vestibular

*Eu acho que a Física deveria ser dada para quem vai usar isso no futuro, assim como a Matemática e a Química. No meu caso, eu*

*nem vou passar perto de Química, Física ou Matemática na minha profissão, mas eu preciso dessas matérias para passar no vestibular.*

Tabela 15 – Questão 3: Você acha que a Física do Ensino Médio deveria tratar também de assuntos de Física Moderna e Contemporânea? Por que?

Respostas		Número de respostas
Sim	Para ficarmos mais atualizados	12
Sim	É necessário saber a Física completa/atual	2
Sim	É importante para o nosso dia-a-dia	1
Sim	Para ter uma idéia mais completa da Física	3
Sim	A Física é importante não só para aqueles que se interessam por ela	1
Sim	Porque é importante	1
Sim	Só a introdução da Física Moderna e Contemporânea	1
Sim	Analisar o antigo e o atual	1
Sim	Pois tudo o que aprendemos é válido	1
Sim	Porque também cai no vestibular	1
Sim	Para esclarecer dúvidas	1
Sim	Despertaria mais interesse nos alunos	2
Sim	(sem justificativa)	5
Não	(sem justificativa)	5
Não	Ficaria muito confuso/mais complicado	2
Não	Só para quem vai estudar Física	1
Não	Devemos tratar de assuntos e experimentos “corretos”	1
Não sei o que se refere a Física Moderna e Contemporânea		1
Não sei porque não entendo nada de Física		1
Não sei		2
Não responderam		4

Quatro alunos não responderam a esta questão. Surpreendentemente 32 alunos manifestaram-se favoráveis a inclusão de Física Moderna e Contemporânea na disciplina da Física apesar de terem demonstrado, no início, pouco interesse sobre este assunto. Talvez tenham percebido que este assunto transcende as salas de aula. Sabemos que a Física Moderna e Contemporânea está presente em quase todas as aplicações do mundo moderno, como por exemplo, a televisão, os raios X da utilização na Medicina e na Engenharia, portas de elevadores, computadores de diversos tipos até aqueles que usamos em casa ou no trabalho, e assim por diante. Talvez boa parte dos alunos tenha se dado da conta disso.

Dos 19 alunos que responderam sim ao afirmarem que queriam estar atualizados, conhecer a Física completa, para a nossa vida diária e para termos uma idéia mais completa da Física, vejamos as respostas individuais de cada um deles:

*Assim nós entenderíamos tudo desde o princípio e a Física Moderna, nós ficaríamos mais atualizados sobre novos experimentos.*  
(A1)

*É necessário saber a Física completa. (A3)*

*Deveria tratar todos os “momentos” da Física, pois é importante para aprendermos e até usar no dia-a-dia. (A6)*

*Para se atualizar. (A9)*

*Para ter uma idéia maior sobre a Física. (A10)*

Tais respostas podem ser interpretadas como desejo de atualização, bem como as que seguem:

*Para aprimorarmos mais a Física. (A13)*

*Acho que sim, porque a Física vem de tempos antigos e deixa algo a ver com a antigüidade. (A14)*

*Pois sempre é bom analisar as coisas de todos os pontos de vista, o antigo e também o atual. (A16)*

*Física Moderna, pois não adianta aprender “teses incompletas” o que deve significar conteúdos incompletos. (A17)*

*Tudo que envolve a matéria é necessário, assim também ficamos informados de tudo. (A18)*

*Porque tudo que aprendemos é válido e sempre precisamos estudar. (A19)*

*Por que assim nós saberíamos mais coisas. (A20)*

*Para poder ter mais atualizações. (A21)*

*Porque aprenderíamos mais coisas, ... (A33)*

*Porque assim se tornaria mais interessante, coisas mais modernas, atuais. (A37)*

*Porque a Física Moderna especialmente vem apresentando estudos muito interessantes e é importante para os jovens se manter atualizados sobre tais assuntos. (A43)*

*... para podermos ficar atualizados pelo menos no básico. (A45)*

*Pois seria interessante sabermos sobre as descobertas mais recentes... (A49)*

Contudo, devemos notar que o aluno A47 não tem idéia do papel da Física nas inovações tecnológicas ao responder que:

*Não sabe a diferença entre as duas.*

Observamos que 9 alunos são contrários à inserção da Física Moderna e Contemporânea na disciplina de Física, sendo que 5 não souberam argumentar por que. Duas destas respostas negativas mostram um receio que a introdução deste tópico seja um elemento complicador (aluno A28) para compreensão da Física, respondendo a questão 3. Mas respostas semelhantes foram dadas na questão 1 em que o aluno A26 respondeu, ao menos contrariamente a esta questão:

*É sempre complicado aprender coisas novas, a Física é muito interessante, mas também é complicada. (A26)*

O aluno A29 concorda, na questão 1, que a Física é muito importante, mas não reconhece qual a Física que está contida no mundo atual. O aluno A32 afirmou na questão 1 que:

*A Física é muito importante, principalmente para aquelas pessoas que no futuro pretendem se formar em Física, Engenharia, ... (A32)*

portanto, ele não está motivado de modo algum para aprender Física (nem para o vestibular). O aluno A35 revelou na questão 1 que:

*Acho que é necessário o básico, não precisa aprofundar muito. (A35)*

Mostrando assim sua falta de interesse pela Física.

O aluno A42 já tinha respondido de um modo semelhante à questão 2 e na questão 1 disse que:

*...mesmo eu não gostando e não precisando da matéria... (A42)*

O aluno A46 entende que a Física Moderna e Contemporânea ainda não está comprovada ao afirmar que:

*... acho que se deve tratar de assuntos e experimentos reconhecidamente "corretos" (A46) (as aspas acrescentadas pelo autor).*

Nas respostas individuais em que os alunos concordaram com a introdução da Física Moderna e Contemporânea vemos que há razões para esta inclusão, pois como diz o aluno A8:

*Só a introdução já estaria bem. (A8)*

o aluno A15 também disse:

*...porque assim teríamos uma noção de toda a Física. (A15)*

o A25 afirmou:

*... cai no vestibular, então seria importantíssimo.(A25)*

e como o A30 porque achou que poderia facilitar o aprendizado ao dizer:

*Com certeza, até porque isso poderia facilitar o aprendizado, ficando mais fácil do aluno entender, já que é moderno e contemporâneo.*

Dois alunos afirmaram que esta inclusão poderia despertar o interesse dos alunos, como o A41:

*Acho que podemos diversificar, assim mudaria um pouco o conteúdo, talvez estas despertassem mais o interesse de alguns alunos.(A41)*

*... se mostrássemos onde usamos a Física prenderíamos a atenção do aluno,... (A44)*

### **Análise do questionário dos alunos no pós-teste**

No questionário feito no pós-teste tínhamos somente 48 alunos e nem todos eram os mesmos do pré-teste. Não participaram do pós-teste os alunos A7, A8, A39 e A46 e foram incluídos mais três alunos que não participaram do pré-teste: A50, A51 e A52.

As questões eram as seguintes:

1) Como te manifestarias sobre as aulas que foram desenvolvidas com o conteúdo da Mecânica Quântica?

Sete alunos manifestaram como “Ótimas”, vinte e nove como “Boas” e doze como “Regulares”. Nenhum aluno manifestou-se como “Ruim”, portanto somando as “Ótimas” com as “Boas” temos trinta e seis alunos que acharam bastante satisfatório o desenvolvimento dos conteúdos, entre quarenta e oito alunos. Ou seja, 75% aprovaram as aulas.

2) Achas que o conteúdo foi suficiente para entender um pouco da Mecânica Quântica?

Trinta e quatro responderam que “Sim”, os quais se manifestaram anteriormente entre “Ótimas”, “Boas” e “Regulares” (3 alunos). Dos quatro alunos que responderam “Não” dois tinham respondido anteriormente como “Boas” e dois como “Regulares”. Cinco responderam “Não sei responder”, mas três destes assinalaram anteriormente “Boas” e dois, “Regulares”. Então, podemos concluir destes que responderam “Não” e “Não sei responder” e tinham assinalado anteriormente “Boas” que estão, de certa forma, em contradição nas duas perguntas. Os que responderam “Outros” e explicaram foram cinco, com as seguintes respostas:

*De minha parte faltou mais dedicação. (A4)*

*Deu para entender muito pouco.* (A17)

*Um pouco.* (A18)

*Mais ou menos.* (A19)

*Acho a matéria em si bastante complicada, por isso tive bastante dificuldade.* (A31)

Apesar dessa contestação por esses alunos, observamos, na Tabela 10 (pág. 106), o aluno A4 acertou 9 questões (quase 70%) da prova, o aluno A17, 7 questões (quase 55%), o aluno A18, 5 questões (quase 39%) – foi o que menos acertou – o A19, 9 questões (quase 70%) e o A31, 9 questões (aproximadamente 70%) que significa que não foram maus índices.

3) Entre zero e dez, que nota darias para o conteúdo da matéria desenvolvida?

Fizemos uma avaliação geral das notas atribuídas por cada aluno feita uma média geral como apresentado na Tabela 16 e na Tabela 17.

A média atingida foi de 7,56 (para esta questão) com desvio padrão de, aproximadamente 1,15, conforme mostram as duas Tabelas 16 e 17:

Tabela 16: Com o número total de alunos (N = 48), Média e Desvio Padrão

Estatística	
VAR00001	
Validade	N 48
Média	7,5625
Desvio padrão	1,14680

Tabela 17: Onde alunos são os que responderam o teste, Validade é a nota atribuída pelo aluno, Freqüência é o número de vezes que aparece cada nota e Percentual é a percentagem de aparição desta Freqüência.

VAR00001

Alunos	Validade	Freqüência	Percentual
A2, A24, A50	5,00	3	6,3
A6, A15, A17, A47	6,00	4	8,3
A3, A10, A11, A12, A16, A18, A19, A25, A31, A32, A34, A35, A36, A38, A51	7,00	15	31,3
A42	7,50	1	2,1
A9, A13, A22, A23, A26, A27, A37, A43, A44, A45, A48, A49	8,00	12	25,0
A1, A14, A20, A29, A33, A52	8,50	6	12,5
A4, A5, A28, A30, A40	9,00	5	10,4
A21	9,50	1	2,1
A41	10,00	1	2,1
Total		48	100,0

Apesar de o aluno A2 ter dado nota baixa ele manifestou na questão 5 que gostou muito da Mecânica Quântica enquanto que o aluno A24 lamentou dizendo que não entende de Física e o aluno A50 achou que o conteúdo desenvolvido não foi adequado, conforme respondeu na questão 2.

O aluno A4, que atribui nota 9 ao conteúdo desenvolvido, achou muito bom conforme respondeu a questão 5, o aluno A30 que também atribuiu nota 9,0 achou que é interessante para o nosso dia-a-dia e o aluno A40 afirmou que é bom (questão 5) para se ter noção de Física Quântica.

O aluno A21 (questão 5) achou muito interessante e sua nota dada foi 9,5 segundo mostra a Tabela 6.

O aluno A41 afirmou que o projeto é agradável de se aprender (questão 5) e deu a nota máxima 10,0.

4) Assinala com um X o(s) tópico(s) que mais gostaste da matéria:

Estavam relacionados (na ordem apresentada conforme o texto distribuído aos alunos e desenvolvido na sala de aula): Introdução (o modelo atômico “pudim de passas” X “planetário”), Quantum! – o que é isso?, Efeito Fotoelétrico, Dualidade onda-partícula, Um experimento para onda-partícula, Princípio de Incerteza, Princípio de Superposição – Gato de Schrödinger e Outra resposta, na qual o aluno poderia indicar por livre escolha.

Três tópicos aparecem na preferência dos alunos: “Introdução”, (que é um breve histórico sobre a descoberta dos constituintes do átomo) escolhida por 30 alunos, seguido pelo “Princípio de Superposição – Gato de Schrödinger” escolhido por 29 alunos e “Princípio de Incerteza” estando na preferência de 21 alunos.

Observa-se que as grandes “estrelas” foram a “Introdução” porque continha um histórico e supõe-se que seja mais fácil de compreender o desenvolvimento e também porque foram utilizados diapositivos para sua ilustração. De perto, quase empatando com a “Introdução”, temos o “Princípio de Superposição – Gato de Schrödinger” que durante sua demonstração, que foi feita também com diapositivos, despertou interesse dos alunos. Um aluno chegou a perguntar, durante a apresentação do Gato de Schrödinger, se havia buraco para o pobre animal respirar. Obviamente não tinha entendido que era um experimento de pensamento. Dois outros manifestaram preocupação com o “estado” de saúde do gato. A escolha do “Princípio de Incerteza” pelos alunos. Talvez tenha contribuído para esta escolha o fato de os alunos terem feito um esquema conceitual desses dois tópicos, o qual revelou, por parte da maioria dos alunos que elaboraram o esquema, uma compreensão correta conforme o texto e a explicação.

Depois, com preferência secundária apareceram os outros quatro tópicos: “Quantum – o que é isso!” com 15 escolhas, “Efeito fotoelétrico” com 14, “Dualidade onda-partícula” com 12 e finalmente “Um experimento para onda-partícula” com 8. Foi apresentado um vídeo com os seguintes tópicos relevantes: “Dualidade onda-partícula”, “O modelo de partícula”, “O modelo de onda”, “O modelo eletromagnético”, “A idéia do quantum”, “Fótons” e “Ondas de matéria” que contemplava os itens escolhidos neste segundo grupo.

Um aluno (A50), que não participou do pré-teste, não escolheu algum destes tópicos e outro aluno respondeu em “Outra resposta” escrevendo a seguinte frase:

*Eu não gosto muito de Física porque eu não entendo. (A24)*

Este mesmo aluno já tinha respondido no pré-teste o seu desgosto com a Física, dizendo:

*...eu não gosto (da Física)... Eu acredito que não estou apto a responder esta pergunta.*

5) Dá a tua opinião ou sugestões sobre este projeto de abordar tópicos de Mecânica Quântica em nível de Ensino Médio.

Analisando de um modo geral todas as respostas, observa-se que 41 alunos foram favoráveis ao projeto da inserção do ensino de Mecânica Quântica, com algumas restrições como solicitando mais aulas práticas e laboratórios (6 alunos). Não responderam a este item os alunos A9, A43 e A50.

Pode se perceber que a aceitação dos alunos foi em geral ótima, conforme veremos as respostas da maioria dos alunos abaixo. Não se manifestaram, como geralmente ocorre, contra a matéria. Até solicitações de mais aulas sobre o assunto foram feitas, assim como também consideraram importante para a compreensão do nosso dia-a-dia. A dinâmica da apresentação das aulas também foi elogiada pelos alunos, reivindicando, além disso, mais apresentações neste estilo. Podemos ver como acharam importante pelo falar do aluno seguinte (e os demais, também):

*Esse conteúdo deveria ser incluído obrigatoriamente no Ensino Médio, pois tem grande importância para nossos conhecimentos. (A1)*

Este aluno já tinha respondido no pré-teste que:

*A Física é tão importante quanto qualquer disciplina, pois ela explica muitas coisas do nosso dia-a-dia (natureza, formação do mundo...)*

*Falar mais dos experimentos atuais e explicar melhor como tudo começou.*

*Muito bom, aprender coisas novas, apesar da Física ser difícil, esse projeto de Mecânica Quântica foi legal, gostei. (A2)*

*Foi interessante, poderia ter sido mais desenvolvida, se não fossem os alunos. (A3)*

Este aluno já tinha respondido no pré-teste que:

*A Física é real, acontece, faz parte de nosso dia-a-dia, é interessante sabê-la, ter uma explicação comprovada. Julgo importante aprendermos Física para ter uma idéia do que acontece à nossa volta.*

E também havia solicitado mais aulas práticas:

*Do modo que é, temos que estudá-la do jeito que foi formulada, mas com aulas práticas também.*



*Muitas aulas foram interessantes. Achei legal porque é uma experiência diferente. A matéria também foi explicada de outra maneira. Muito Bom. (A4)*

Este aluno tinha obtido nota 9,0 para o conteúdo desenvolvido, acertando quase 70% da prova. No pré-teste tinha dito que:

*Menos cansativa, novos métodos de aprendizagem fazem o aluno voltar a ter interesse pelo conteúdo...  
De minha parte faltou mais dedicação.*

Manifestação de apoio à metodologia houve como a do aluno A5 ao dizer:

*Gostei bastante das aulas, foram bem interessantes. O professor soube aproveitar bem e passar o melhor para os alunos.*

O aluno A12 concorda com esta observação dizendo:

*Está ótima, mas não deve complicar mais pois senão os alunos não entenderão a matéria.*

Outros, simplesmente disseram:

*Bom,... (A13)*

*Foi interessante, pois acho que assim (como as aulas foram dadas) prestamos mais atenção... (A14)*

*Acho que o conteúdo é bom... (A15)*

*Bem legal, mas podia ter havido mais trabalhos. (A16)*

*Eu acho que os professores deveriam ir mais a fundo nessa matéria, pois explica muita coisa até que a gente usa e não sabe do que é feita mas está no nosso dia-a-dia. (A17)*

O aluno anterior teve uma média de acertos de 70%, aproximadamente.

*Onde se pode entender melhor a matéria, foi com os filmes e a visita ao campus, com aulas mais dinâmicas fica mais fácil entender e acho que uma visita aos museus pode ajudar, como o da PUC. (A18)*

*Gosto muito da matéria de Física, então para mim toda a matéria é válida. (A19)*

Média de acertos do aluno anterior foi de 70% no pós-teste.

*Eu achei muito interessante, porque eu não sabia o que era Mecânica Quântica... (A20)*

Que é praticamente o que os alunos A21, A31 e A33 disseram:

*Este projeto é muito bom para o Ensino Médio...Foi muito legal. (A23)*

*Na minha opinião foi interessante... (A25)*

*Acho bom pois assim aprendemos outras coisas além de nossa própria matéria. (A26)*

*Este teste foi muito bem elaborado... (A27)*

O aluno A28 achou este projeto muito importante para o Ensino Médio e o A29 gostaria que fosse mais explorado nas aulas de Física.

*A Mecânica Quântica é uma matéria boa... estudei a matéria e é interessante. (A32)*

*Acho ótima, pois esclarece algumas dúvidas e levantam outras. (A36)*

*Acho que este projeto foi bem desenvolvido, com aulas bastante interessantes e que pode se tirar bem do conteúdo. As aulas de multimídia ajudaram bastante. (A37)*

*Bom, deu para ter uma boa noção do que é e como utilizá-la. (A40)*

*Bom, achei bem interessante o modo como me foi apresentada e a matéria não é tão complicada... O projeto sem dúvida foi agradável de se trabalhar. (A41)*

*Acho que foi legal, é sempre bom aprender coisas novas, mesmo não gostando muito da matéria. (A42)*

O aluno A44 gostou da matéria e principalmente da explicação do Gato de Schrödinger dizendo:

*Gostei bastante do desenvolvimento da matéria neste trimestre... principalmente do “Princípio de Superposição – Gato de Schrödinger”. Achei interessante sua forma de chamar a atenção dos alunos, logicamente, a minha.*

O aluno A48 fez uma ressalva sobre o Princípio de Superposição:

*Os conteúdos estão bem em geral, porém o “Princípio de Superposição” deveria ser estudado com um cuidado maior para que não haja confusão.*

*Acho isto muito bom para os alunos, gostei muito do ensino. Achei a matéria meio complicada... (A45)*

*Está bom assim. (A47)*

*Penso que foi um bom projeto, pois a maioria dos alunos sai do Ensino Médio sabendo apenas o básico da Física. (A49)*

*O desenvolvimento da matéria para mim foi bom, pois teve bom aprofundamento. (A51)*

Outro se queixou da pouca quantidade de aula:

*As aulas foram boas, apesar de terem sido poucas. (A35)*

O uso de questões do dia-a-dia também foi defendido pelo aluno A30 que disse:

*Achei bom, pois pude entender melhor as questões até mesmo do meu dia-a-dia.*

Outros pediram aulas mais dinâmicas, como foi o caso do aluno A6:

*Foi pouco interessante, podia ser mais dinâmica.*

Os que pediram com laboratório foram os seguintes alunos:

*Acho que deveria ser mais prática, tipo laboratório. (A10)*

Este aluno já tinha pedido no pré-teste que as aulas fossem *Mais práticas do que teóricas.*

*Acho que deveria ter tido mais aulas em laboratório com todos os equipamentos...para sabermos mais Mecânica Quântica. (A22)*

*Acho que as aulas com laboratório seria legal e ajudaria muito. (A38)*

*O projeto é bom, mas seria necessário mais aula prática em laboratórios. (A52)*

Outro revelou sua importância para o vestibular

*Um projeto básico e provável para um futuro de vestibular de 2006 na UFRGS. Quem realmente levou-as (as aulas) a sério sairá do colégio com alguma vantagem. (A11)*

O aluno A 24 novamente se queixou que acha difícil a compreensão da Física, como já tinha afirmado anteriormente no pré-teste:

*Eu não entendo muito dessa matéria, mas não é tão complicada como... as outras.*

Na Tabela 18 apresentamos dados quantitativos do pós-teste, com o percentual de acertos de cada aluno, o número de questões acertadas por aluno em 13 questões e o aluno correspondente. As linhas vazias são dos alunos que não compareceram ao pós-teste.

Tabela 18 – *Percentual de acertos de cada aluno, o número de questões acertadas e o respectivo aluno.*

<b>Perc. de acertos</b>	<b>Número de acertos</b>	<b>Aluno</b>
53,85%	7	A1
38,46%	5	A2
46,15%	6	A3
69,23%	9	A4
46,15%	6	A5
53,85%	7	A6
		A7
		A8
23,08%	3	A9
69,23%	9	A10
84,62%	11	A11
46,15%	6	A12
46,15%	6	A13
61,54%	8	A14
61,54%	8	A15
61,54%	8	A16
53,85%	7	A17
38,46%	5	A18
69,23%	9	A19
23,08%	3	A20
15,38%	2	A21
69,23%	9	A22
30,77%	4	A23
46,15%	6	A24
30,77%	4	A25
84,62%	11	A26
38,46%	5	A27
69,23%	9	A28
38,46%	5	A29
69,23%	9	A30
69,23%	9	A31
69,23%	9	A32
46,15%	6	A33

(continua)

(continuação)

<b>Perc. de acertos</b>	<b>Número de acertos</b>	<b>Aluno</b>
<b>61,54%</b>	<b>8</b>	<b>A34</b>
<b>69,23%</b>	<b>9</b>	<b>A35</b>
<b>38,46%</b>	<b>5</b>	<b>A36</b>
<b>38,46%</b>	<b>5</b>	<b>A37</b>
<b>100,0%</b>	<b>13</b>	<b>A38</b>
		<b>A39</b>
<b>46,15%</b>	<b>6</b>	<b>A40</b>
<b>38,46%</b>	<b>5</b>	<b>A41</b>
<b>30,77%</b>	<b>4</b>	<b>A42</b>
<b>69,23%</b>	<b>9</b>	<b>A43</b>
<b>46,15%</b>	<b>6</b>	<b>A44</b>
<b>23,08%</b>	<b>3</b>	<b>A45</b>
		<b>A46</b>
<b>46,15%</b>	<b>6</b>	<b>A47</b>
<b>30,77%</b>	<b>4</b>	<b>A48</b>
<b>92,31%</b>	<b>12</b>	<b>A49</b>
<b>30,77%</b>	<b>4</b>	<b>A50</b>
<b>76,92%</b>	<b>10</b>	<b>A51</b>
<b>76,92%</b>	<b>10</b>	<b>A52</b>

Na Tabela 18 observa-se que apenas 4 alunos, A9, A20, A21 e A45, tiveram um rendimento bastante baixo no pós-teste. De um modo geral, os alunos saíram-se bem no pós-teste.

Conforme vimos na tabela 12, a maioria dos professores concordam com a inclusão da Física Moderna no Ensino Médio, pois acham importante e interessante por ela ser contemporânea.

Aqui observamos, na Tabela 17, que os alunos concordam que a Física é importante para entender os fenômenos da natureza, que acham melhor associar as aulas teóricas com as práticas de laboratório e que a introdução da Física Moderna e Contemporânea é fundamental para se manterem atualizados.

Os alunos acharam interessante o desenvolvimento da Mecânica Quântica no nível de Ensino Médio e que as aulas foram suficientes para entender o tema abordado. Escolheram tópicos que mais gostaram como o histórico do desenvolvimento da descoberta do átomo, o “Princípio de Superposição – Gato de Schrödinger” e o “Princípio de Incerteza”. Em resumo, a maioria dos alunos mostrou-se favorável à introdução da Mecânica Quântica no Ensino Médio, bem como os professores.

## CAPÍTULO VII – CONCLUSÃO

A pergunta principal desta pesquisa era: Pode-se ensinar Mecânica Quântica aos alunos do Ensino Médio? Ou melhor, pode-se ensinar conceitos de Mecânica Quântica aos alunos do Ensino Médio, mesmo que eles não tenham formação adequada para que se possa abordar matematicamente este tópico utilizando somente as noções básicas da Física do Ensino Médio? Ou ainda, pode-se ensinar o que é *quantum*, *fóton*, *efeito fotoelétrico*, *interferência*, *experimento de dupla fenda*, *Princípio de Incerteza* e *Princípio de Superposição de Estados*, nesse nível de ensino?

Esta pesquisa desenvolvida para a dissertação de Mestrado, mostrou que é possível introduzir noções de Física Moderna e Contemporânea, mais precisamente de Mecânica Quântica, no Ensino Médio em uma escola sem grandes recursos, e apresentou resultados animadores.

Esta dedução pode ser tirada dos vários esquemas conceituais apresentados pelos alunos em que se percebe a construção das idéias básicas que estão presentes neles. Apesar de eles terem consultado o seu texto de Mecânica Quântica para montar estes esquemas, percebe-se que não houve omissão dos principais conceitos e que todos eles foram considerados relevantes pelos alunos.

No todo foram utilizadas dezoito horas-aula, suficientes para trabalhar os conceitos pretendidos como *quantum*, *fóton*, *efeito fotoelétrico*, *interferência*, *dualidade onda-partícula*, *Princípio de Incerteza* e *Princípio de Superposição de Estados*.

Isto também pode ser observado na mudança nas respostas dos alunos do pré-teste para o pós-teste realizado depois da abordagem dos conceitos, bem como nas respostas qualitativas dadas pelos alunos que estão no Capítulo VI.1. A média de acertos dos alunos foi em torno de 53%, em média 7 questões acertadas em 13. Este número sobe um pouco quando se consideram as 26 questões aplicadas no total do pós-teste: 15 questões, em média, acertadas, o que equivale a 58% de acertos. O coeficiente alfa medindo a consistência interna entre as questões, em primeiro lugar com 13 questões que eram as mesmas do pré-teste, foi de 0,601 e depois com a inclusão de outras 13 questões foi 0,746, que é valor bastante razoável.

A manifestação destes alunos no questionário distribuído a eles após o pós-teste demonstrou que o tópico desenvolvido com eles foi bem recebido, o que podemos constatar nas diversas respostas que deram, as quais estão reproduzidas, algumas delas, no Capítulo VI.3. Manifestaram ainda uma boa aprovação com relação à metodologia utilizada em aula. Foi solicitado que atribuíssem uma nota ao desenvolvimento do assunto, a qual alcançou 7,56. Outra preocupação que os alunos tiveram ao responder o questionário foi a da utilização dos novos conceitos para a sua vida diária, uma preocupação também revelada em relação à Física Clássica. A procura destes alunos pela atualização, não só por sua utilização num futuro, mas também a sua conscientização de que esta matéria será tema de vestibular, também motivou seu interesse pela mesma.

Quanto ao possível perfil epistemológico dos alunos, seria pouco provável esperar alguma mudança significativa com somente 18 horas-aula sobre conceitos de Mecânica Quântica. Porém, observou-se que boa parte dos alunos deu evidências de

compreensão, pelo menos inicial, desses conceitos, no pós-teste e nos esquemas conceituais. Tal compreensão poderia explicar um “avanço” nesse perfil, tal como sugere a análise feita no capítulo VI. Contudo, sem dúvida, seriam necessários mais dados, e provavelmente mais aulas, para chegar-se a uma melhor resposta sobre se houve, de fato, uma mudança no perfil epistemológico.

Todos os materiais apresentados durante as aulas expositivas (como diapositivos, vídeos e aplicativos) foram bem aceitos conforme verificamos no questionário respondido por eles.

A abordagem utilizada – a da aprendizagem significativa – levando em conta o conhecimento prévio e os mapas (esquemas) conceituais como estratégia facilitadora, mostrou-se correta para o desenvolvimento dos tópicos de Mecânica Quântica, o que ficou evidente quando se fazia a apresentação e utilizavam-se fatos da vida diária e experimentos em que os resultados podiam ser evidenciados. A apresentação de diapositivos, vídeos e aplicativos foi um instrumento corretamente utilizado que despertou interesse dos alunos e isto ficava evidenciado na atitude que eles passaram a ter nesta nova metodologia aplicada pelo professor.

Talvez um fato negativo neste trabalho é que não tenha existido um grupo de controle que se mostraria um meio mais eficaz na avaliação dos alunos ao realizarem o pré-teste e o pós-teste. Este grupo de controle não foi possível pois a abordagem utilizada não é aplicada em qualquer outro ano do Ensino Médio na escola. Provavelmente outras escolas também não abordem a Física Moderna e Contemporânea, como pudemos constatar no questionário respondido pelos professores do Ensino Médio de algumas escolas.

Um outro ponto a ser considerado é a escolha do tópico de Mecânica Quântica para ser abordado. Por que não escolher um outro tópico como Relatividade ou Física Nuclear, por exemplo? Devemos lembrar que a Física Moderna e Contemporânea não é só composta apenas por Mecânica Quântica mas também de outros assuntos que são tão atuais no mundo para a nossa vida diária. Percebe-se que o mundo atual está repleto de novidades científicas que não estão sendo exploradas nas escolas brasileiras, ou poucas as exploram. Deve-se perceber que é urgente uma reforma no currículo do Ensino Médio, para que seja introduzido o conhecimento sobre estas novidades tecnológicas.

Além disso, como vimos no início desta dissertação (Capítulo II), há vários manuais de Física do Ensino Médio e extensa literatura que já abordam os conceitos de Física Moderna e Contemporânea de um modo bem acessível tanto para os professores de Física do Ensino Médio como para seus alunos. Naquele capítulo observamos que diversos países já estão trabalhando com esse material, principalmente em Mecânica Quântica, com alunos que são equivalentes ao do nosso Ensino Médio nos Estados Unidos, Espanha, Suécia, Dinamarca, Argentina, Itália, Noruega entre outros, fazendo parte em alguns deles do seu currículo escolar. No Brasil, existem diversas universidades (como, por exemplo, as de São Paulo, Bahia, Rio Grande do Sul, Goiás, Minas Gerais) que fizeram experiências em projetos pilotos em diversas escolas do Ensino Médio.

Poder-se-ia pensar que este trabalho não apresentou grandes problemas, mas ocorreram alguns. Por exemplo, o texto elaborado e aplicado deve ser reformulado para torná-lo mais simples e de mais fácil compreensão, ou seja, colocá-lo numa linguagem,

ainda científica, mas de um modo mais simples. Talvez o próprio conceito de quantum de energia tenha que ser reelaborado pois causou um pouco de confusão nos alunos e isto está previsto para ser revisto na próxima aplicação.

Trabalhar, no futuro, com mais mapas conceituais para que os alunos aprendam corretamente a elaborá-los. Quando trabalhar com os mapas conceituais com os alunos, fazê-los sem ser em parceria, como aqui foi adotado, para fazer uma melhor avaliação individual do aluno. Ou seja, saber o que realmente cada aluno aprendeu do desenvolvimento deste tópico da Mecânica Quântica.

O material de pesquisa da biblioteca, utilizado no presente trabalho, não foi suficiente e não se pode contar somente com os livros disponíveis, pois a maioria deles, apesar de serem utilizados no 3º ano, não trabalham com o modelo ondulatório da luz.

Algumas dificuldades adicionais surgiram na aplicação desta abordagem da Mecânica Quântica. Uma delas foi a dinâmica da própria escola que contou com vários dias de conselho de classe e gincana, períodos em que não houve aula. Isto fez que se perdesse a continuidade do assunto e talvez isto tenha comprometido um pouco o trabalho. Uma outra dificuldade foi a grande agitação dos alunos por ser final de 3º ano e, portanto, perto da formatura, o que em geral atrapalhou um pouco as aulas. Neste período, ocorreram muitas faltas dos alunos, o que às vezes prejudicava o andamento normal de aula, tendo-se que retomá-lo mais de uma vez. Talvez fosse mais adequado realizar a experiência ainda no primeiro semestre do ano letivo.

O trabalho de análise dos dados em geral se desenvolveu bem, havendo uma pequena dificuldade em acertar o coeficiente alfa, resultante de um erro devido a digitação feito no *excel*. Este erro proporcionou um coeficiente negativo, o que não era previsto. Mas depois da correção conseguiu-se um coeficiente alfa razoável (em torno de 0,601). Este erro provocou muito atraso no trabalho com consultas desnecessárias a professores mas que, por outro lado, foram bem encaminhadas por eles e, por isso, agradecemos.

O mestrando deseja prosseguir seus estudos no Doutorado visando trabalhar com a Introdução à Mecânica Quântica em nível Universitário.



## REFERÊNCIAS

AMALDI, U. **Imagens da Física – As idéias e as Experiências do Pêndulo aos Quarks**, São Paulo, v. único, Editora Scipione, 1995

ALVARENGA, B. e MÁXIMO, A. **Curso de Física, volume 1** São Paulo, v. 1, Editora Scipione, 1997

---

**Curso de Física, volume 2** São Paulo, v. 2, Editora Scipione, 1997

---

**Curso de Física, volume 3** São Paulo, 3, Editora Scipione, 1997

AUSUBEL, D. P., **Aquisição e Retenção de Conhecimentos: Uma Perspectiva Cognitiva**, Lisboa, Paralelo Editora Lda, pág. 71, 2002

BACHELARD, G., **A Filosofia do Não – Filosofia do Novo Espírito Científico**, Empresa Gráfica Feirense, Lda, 5ª edição, Lisboa, 1991

BERGSTRÖM, L.; JOHANSSON, K. E. e CH NILSSON, **The Physics of Copenhagen for Students and the General Public**, Physics Education, pág. 388-393 Janeiro, 2001

BOHR, N, **Física Atômica e Conhecimento Humano**, Contraponto, Rio de Janeiro, pág. 43, 1995

BRAZ JR., D., **Física Moderna – Tópicos para o Ensino Médio**, Ed. Companhia da Escola, Campinas, São Paulo, pág. 42, 2002

CAVALCANTE, M. A. e DI BENDETTO A., **Instrumentação em Física Moderna para o Ensino Médio: uma Nova Técnica para a Análise Quantitativa de Espectros**, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 21, no. 3, pág. 437-446, Setembro, 1999

CAVALCANTE, M. A. e TAVOLARO, C. R. C., **Uma Oficina de Física Moderna que Vise a sua Inserção no Ensino Médio**, Caderno Catarinense de Ensino de Física, vol. 18, no. 3, pág. 298-316, Dezembro, 2001

CAVALCANTE, M. A., TAVOLARO, C. R. C. e HAAG, R, **Experiências em Física Moderna**, Física na Escola, vol. 6, no. 1, pág. 75-82, Maio, 2005

CASIMIR, H. G. B., **The Lesson of Quantum Theory**, North-Holland Physics Publishing, Holanda, 1986

CUPPARI, A.; RINAUDO, G.; ROBUTTI, O. e VIOLINO, P, **Gradual Introduction of Some Aspects of Quantum Mechanics in High School Curriculum**, Physics Education, Bristol, v. 32, n5, pág. 302-308, September, 1997

FEYNMAN, R.P., LEIGHTON, R.B. e SANDS, M. **The Feynman Lectures on Physics**, vol. 1, pág. 3, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts, 1965

\_\_\_\_\_. **The Feynman Lectures on Physics**, vol. 3, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts, 1965

FREIRE JR., O e NETO, R. A. C., **O Universo dos Quanta – Uma breve história da Física Moderna**, Editora FTD S. A., São Paulo, SP, 1997

GARCIA, J. E., **Una Alternativa para la Introducción de los Conceptos de Cuantización y Orbital en la Enseñanza Secundaria**, Enseñanza de las Ciencias, 11(3), pág. 362-363, 1993

GASPAR, A. **Física**, volumes 1, São Paulo, v. 1, Editora Ática, 2000

\_\_\_\_\_. **Física**, volumes 2, São Paulo, v. 2, Editora Ática, 2000

\_\_\_\_\_. **Física**, volumes 3, São Paulo, v. 3, Editora Ática, 2000

GILMORE, R., **Alice no País do Quantum**, Jorge Zahar Editor, 1998

GRECA, I. M., **Es Posible Hacer Comprensible la Mecánica Cuántica?**, Revista de Enseñanza de la Física, Vol. 13, no. 2, pág. 13-19, 2000

GRECA, I. M. e FREIRE JR., O., **Does an Emphasis on the Concept of Quantum States Enhance Student's Understanding of Quantum Mechanics?**, Science & Education, 12, pág. 541-557, 2003

GRECA, I. M. E HERSCOVITZ, V. E., **Introdução à Mecânica Quântica, Notas de Curso**, Instituto de Física – UFRGS, Textos de Apoio ao Professor de Física, no. 13, 2003

GRECA, I. M. e MOREIRA, M. A., **Uma Revisão da Literatura sobre Estudos Relativos ao Ensino da Mecânica Quântica Introdutória**, Rio Grande do Sul, vol 6, n.1, pág. 29-56, 2001 Disponível em: <[www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol6/n1/v6\\_n1\\_a1.htm](http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol6/n1/v6_n1_a1.htm)> Acesso em: 11 dez 2004

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. e HERSCOVITZ, V. E. **Uma Proposta Para O Ensino De Mecânica Quântica**, Revista Brasileira De Ensino De Física, São Paulo, vol. 23. nº 4, dezembro de 2001

REF, **Eletromagnetismo**, São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, v. 3, 1993

REF, **As Cores da Luz e sua Complicação**, < [www.if.usp.br/gref/optica/optica2.pdf](http://www.if.usp.br/gref/optica/optica2.pdf)> acesso em: 08 set. 2006, **Leituras de Física**, Óptica, p. 51

HEISENBERG, W., **Física e Filosofia**, Editora Universidade de Brasília, 1995

- HEWITT, PAUL G. **Física Conceitual**, Porto Alegre, Bookman, 2002
- HOME, D., **Conceptual Foundations of Quantum Mechanics: an overview from Modern Perspectives**, Plenum Press, New York, A Division of Plenum Publishing Corporation, New York, p.67, 78-83, 1997
- PAULO, I., J., C., **Um Caminho para a Formação de Conceitos Fundamentais da Mecânica Quântica no Nível Médio**, Programa Internacional de Doctorado Enseñanza de las Ciencias, p.13 e 15, 2004
- JAMMER, M., **The Philosophy of Quantum Mechanics**, New York, John Wiley, 1974.
- KUHN, T. S., **A Estrutura das Revoluções Científicas**, São Paulo, Perspectiva, 1978
- MOKROSS, B. J., **Não Localidade na Mecânica Quântica**, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 19, no. 1, março, 1997
- \_\_\_\_\_, **Fundamentação Clássica de Alfred Landé para a Mecânica Quântica**, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 21, no. 3, setembro, 1999
- MONTENEGRO, L. R. e PESSOA JR., O., **Interpretações da Teoria Quântica e as Concepções dos Alunos do Curso de Física**, Investigação em Ensino de Ciências, Rio Grande do Sul, vol. 7, n 2, 2002 Disponível em: <[http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol7/n2/v7\\_n2\\_a1.html](http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol7/n2/v7_n2_a1.html)> Acesso em: 12 março 2006
- MOREIRA, M. A. e GUERRA, W. A., **Mapas Conceptuales en la Investigación de las Estructuras Conceptuales de Conocimiento de los Estudiantes de Física**, Revista Enseñanza de la Física, 1988, Vol. 2, no.2, pág. 65
- MOREIRA, M. A. e SILVEIRA, F. L., **Instrumentos de Pesquisa em Ensino e Aprendizagem: a Entrevista Clínica e a Validação de Testes de Papel e Lápis**, Porto Alegre, EDIPUCRS, 1993, pág. 101
- MOREIRA, M. A., **Teorias de Aprendizagem**, Câmara Brasileira do Livro, São Paulo, Brasil, Editora Pedagógica e Universitária Ltda., pág. 160, 1999
- \_\_\_\_\_, **Monografias do Grupo de Ensino**, Série Enfoques didáticos, nº 6, Porto Alegre, IFUFRGS, pág. 146, 1996
- \_\_\_\_\_, **Mapas Conceituais e Diagramas V**, Porto Alegre, Ed. do Autor, 2006
- MÜLLER, R. e WIESNER, H., **Teaching Quantum Mechanics on an Introductory Level**, American Journal of Physics, 70 (3), Março, 2002
- NOVAK, J.D., **Aprender, Criar e Utilizar o Conhecimento – Mapas Concetuais como Ferramentas de Facilitação nas Escolas e Empresas**, Paralelo Editora, Lda, Lisboa, Portugal, 2000

NUSSENZVEIG, H. M., **Curso de Física Básica**, vol. 4, Edgar Blücher, São Paulo, SP 1998

OLIVEIRA, I. S., **Física Moderna – para Iniciados, Interessados e Aficionados**, Departamento de Matéria Condensada e Física Estatística, Centro Brasileiro de Pesquisa Física Disponível em: <<http://www.cbpf.br/~labmag/Cap3.pdf>> Acesso em: 31 março 2005

OLSEN, R. V., **Introducing Quantum Mechanics in the Upper Secondary School: a Study in Norway**, International Journal of Science Education, vol. 24, no. 6, pág. 565-574, 2002

OSTERMANN, F., **Um Texto para Professores do Ensino Médio sobre Partículas Elementares**, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 21, no. 3, pág. 415-436, setembro, 1999

OSTERMANN, F. e MOREIRA, M. A. **Uma Revisão Bibliográfica Sobre a Área de Pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”**, Rio Grande do Sul, Investigações em Ensino de Ciências, Investigaciones en Enseñanza de las Ciencias; Investigations in Science Education, vol 5, n 1, março 2000 Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/ienci/>> volume 5(1) (2000) Acesso em: 14 fevereiro 2005

PAULO, I. J. C. E MOREIRA, M. A. **Um Estudo Sobre a Utilização dos Mapas Conceituais como Avaliação Quantitativa**, caderno de resumos do I ENAS - Encontro Nacional de Aprendizagem Significativa, Campo Grande-MS, 2005, pág. 54.

PEREZ, D. G.; SENENT, F. e SOLBES, J., **Análisis Crítico de la Introducción de La Física Moderna en la Enseñanza Media**, Revista de enseñanza de la Física, vol. 21, 1986

PESSOA JR., O., **Interferometria, Interpretação e Intuição: uma Introdução Conceitual à Física Quântica**, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 19, no. 1, março, 1997

PESSOA JR., O., **Conceitos de Física Quântica**, São Paulo, SP, 2003

PINTO, A. C. e ZANETIC, J., **É possível Levar a Física Quântica para o Ensino Médio?** Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis vol.16, abril, 1999

PLEITEZ, V., **Resenha do Livro Bohr: O Arquiteto do Átomo, por M. C. Abdalla, Odysseus, São Paulo, 2003**, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 25, no. 2, pág. 250-255, Junho, 2003

POPPER, K. **Conjecturas e Refutações**, Brasília. Editora UNB, 1982

RODRIGUES, R. L., **Mecânica Quântica na Descrição de Schrödinger**, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 19, no 1, pág. 68-83, março, 1997

RICCI, T. F. e OSTERMANN, F., **Uma Introdução Conceitual à Mecânica Quântica para Professores do Ensino Médio**, Texto de Apoio ao Professor de Física, no. 14, 2003

SCHILPP, P. A., **Albert Einstein: Philosopher-Scientist**, The Library of Living Philosophers, Inc., Evanston, Illions, 1949

SILVA, E. A. A., **A Divisibilidade da Matéria e a Necessidade da Mecânica Quântica**, pág. 1-3, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 19, no. 1, março, 1997

SOLBES, M. J., **La Crisis de la Física Clásica y el Surgimiento de la Moderna en la Investigación Didáctica**, Enseñanza de las Ciencias, 8, (2), pág. 179-181,1990

SOLBES, J.; CALATAYUD, M.; CLIMENT J. e NAVARRO, J, **Errores Conceptuales en los Modelos Atómicos Cuánticos**, Enseñanza de las Ciencias, 5(3), p.189-195, 1987

STEFANEL, A., **Una Experiencia en el Marco de la Introducción de la Física Cuántica en la Escuela Secundaria**, Revista de Enseñanza de la Física, vol. 11, no 2, pág. 35-44, 1998

UNAL, R. e ZOLLMAN, D., **Student Description of an Atom: a Phenomenographic Analysis**, Disponível na Internet: <[www.phys.ksu.edu/perg/papers/](http://www.phys.ksu.edu/perg/papers/)> Acesso em: 22 fevereiro 2005

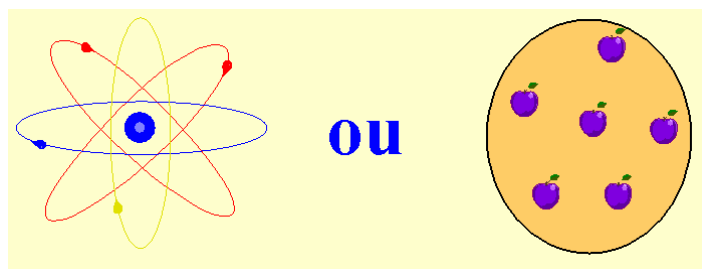
TERRAZZAN, E. A., **Inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na Escola de 2º Grau**, Caderno Catarinense do Ensino de Física, Florianópolis, v.9, n.3 pág. 209-214, dezembro, 1992

# A Matéria é feita de átomos!

Primeiro capítulo da Teoria Atômica –  
Dos Gregos Primitivos aos anos de 1800

O átomo é indivisível?

Descoberta do elétron e do núcleo



adaptado da página (consultada em 07/07/05)

<http://wug.physics.uiuc.edu/courses/phys150/fall02/slides/lect19/sld001.htm>

[http://images.google.com.br/imgres?imgurl=http://tonydude.net/physics180/physics180B/p180b\\_images/bohr\\_model\\_1.gif&imgrefurl=http://tonydude.net/physics180/physics180B/Chapters/phys180Bch30.html&h=389&w=444&sz=7&tbnid=3NBjH5DuFYcJ:&tbnh=108&tbnw=124&hl=pt-BR&start=1&prev=/images%3Fq%3Datomic%2Bmodels%2Bbohr%26svnum%3D10%26hl%3Dpt-BR%26lr%3D%26sa%3DN](http://images.google.com.br/imgres?imgurl=http://tonydude.net/physics180/physics180B/p180b_images/bohr_model_1.gif&imgrefurl=http://tonydude.net/physics180/physics180B/Chapters/phys180Bch30.html&h=389&w=444&sz=7&tbnid=3NBjH5DuFYcJ:&tbnh=108&tbnw=124&hl=pt-BR&start=1&prev=/images%3Fq%3Datomic%2Bmodels%2Bbohr%26svnum%3D10%26hl%3Dpt-BR%26lr%3D%26sa%3DN)

# Introdução – I

- Hoje começamos nosso estudo da construção de blocos da matéria (“o estudo do muito pequeno”).

- Entendimento da construção dos blocos de matéria:

- O trabalho de muitas pessoas

- Experimentos desafiantes: nenhuma teoria completa inicialmente. Respostas a experimentos realizados.

Nossa abordagem: descrição histórica, idéias qualitativas. Discutiremos os fatos que foram confusos (eles ainda são!) e conseqüências filosóficas das últimas teorias.

# Introdução – II

- Hoje: Introdução ao Estudo da Matéria
  - Atomismo...a versão clássica
  - A teoria atômica ganha suporte durante os anos 1700 - 1800
- O átomo é indivisível?
  - radioatividade natural
- Quais são os constituintes do átomo e como eles estão arranjados?
  - Descoberta do elétron
  - Modelos Atômicos: pudim de passas ou planetário?
- A Física Clássica aplica-se aos níveis atômicos? Status perto do fim dos anos de 1800



# Comentário Geral

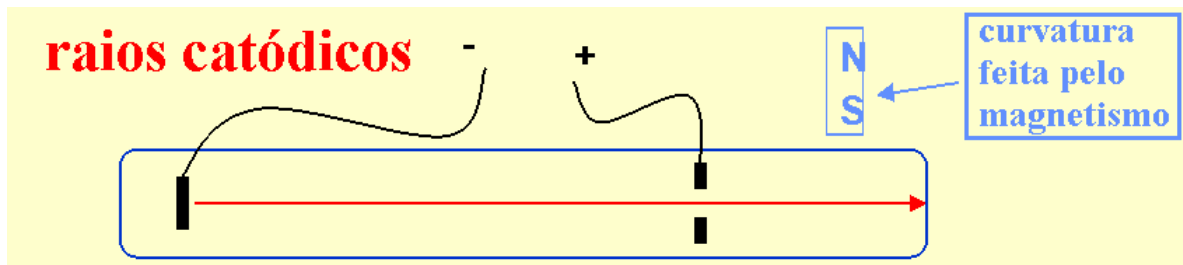
- Citação de um famoso Físico moderno, Richard Feynman:
- Se fôssemos capazes de passar somente um pouco de conhecimento científico para as gerações futuras, o que poderia ser mais importante para se escolher?
- Resposta de Feynman: **Que a matéria é feita de átomos**
- O que isto significa? Como este fato poderia ser tão importante?

# O Modelo do Atomismo

- É natural tentar explicar a vasta diversidade que vemos em termos de arranjos e interações de um pequeno número de blocos de construção fundamental: **átomos!**
- O Atomismo na Grécia Antiga:
  - Demócrito: há somente átomos e vazio (vácuo). Qualidades aparentes são o resultado de forma, arranjo e posição dos átomos. Átomos permanecem inalterados.  
**Nos dá o nome: átomo – “indivisível”**
- Explica as propriedades básicas da matéria.
  - Mudanças há, mas nunca é criada nem destruída (em nossa experiência diária)

# Descoberta do Elétron

- J. J. Thomson (outubro de 1897) estuda condução elétrica em gases.
- Eletricidade foi encontrada por fluir do eletrodo negativo para o eletrodo positivo na forma de “Raios Catódicos”.



“Átomo” de eletricidade?

Um componente dos próprios átomos?

Presente em todos átomos?

# Raios Catódicos: o que são?

Experimentos de Thomson apoiaram a teoria da partícula carregada dos raios catódicos. Por quê?

Medidas da deflexão dos raios catódicos pelos Campos Elétricos e Magnéticos foram consistentes com o que se esperaria se os raios fossem realmente **partículas carregadas** com uma definida taxa de carga elétrica e massa.

- Medindo as deflexões magnéticas & elétricas permitiu-se a determinação da taxa de carga-massa.

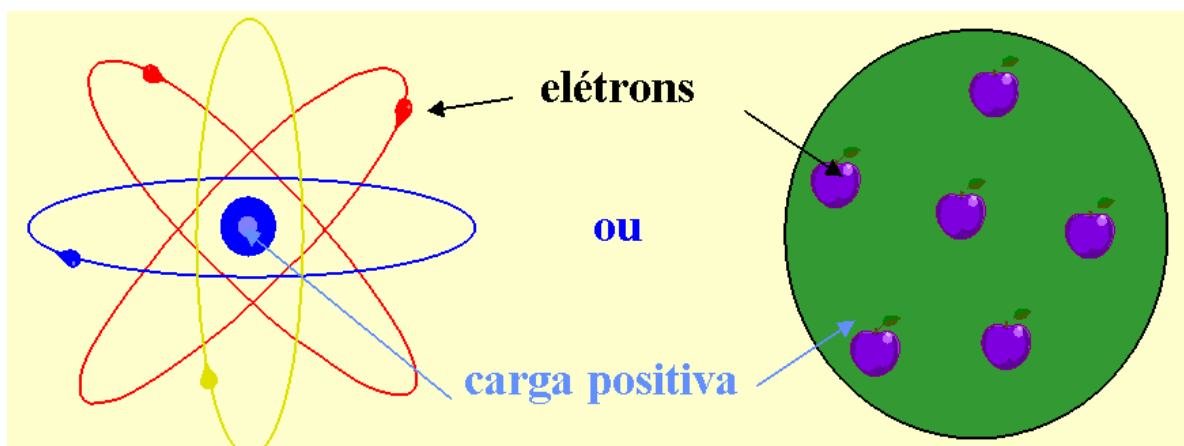
# Elétrons: Unidade Fundamental da Matéria?

- Interpretação corajosa de Thomson deste experimento (que resultou estar correto)
- Elétrons são partículas carregadas
  - Carga negativa
  - Massa muito menor que um íon previamente conhecido (aproximadamente 2000 vezes menor que o átomo de hidrogênio)

**Conclusão:** Thomson descobriu um novo tipo de matéria – chamamos de elétron

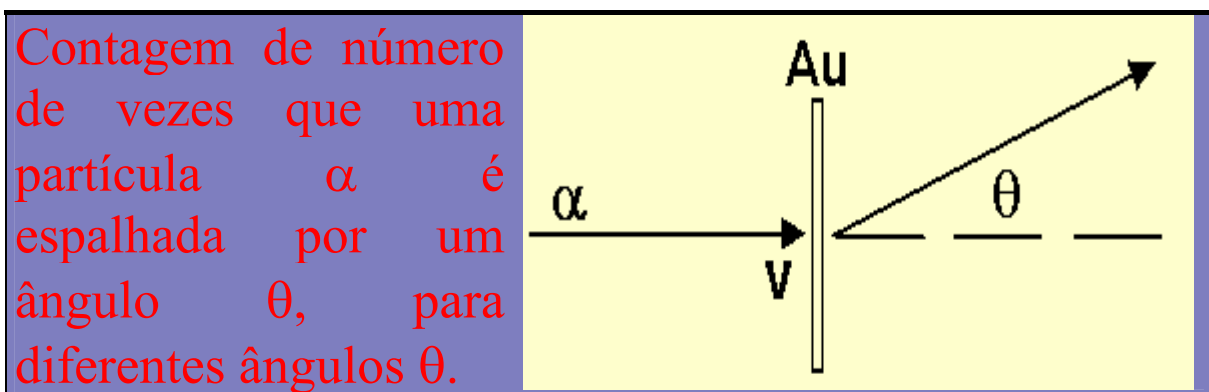
# Modelos Atômicos

- Conclusão: **Átomos contêm elétrons.**  
Questões: **Como eles estão arranjados? Desde que átomos são neutros, onde está a carga positiva?**
- Dois modelos:
  - “**Pudim de passas**”: Elétrons estão entranhados numa carga elétrica contínua positiva como num pudim de passas.
  - “**Modelo planetário**”: Elétrons orbitam um pequeno núcleo de carga positiva como planetas orbitam o Sol.



# Modelos Atômicos

- Como distinguir entre estes dois modelos?
- Ernest Rutherford teria descoberto que certos raios obtidos do material seriam “raios  $\alpha$ ” - partículas positivas (íons) com a massa do núcleo do átomo de He (hélio – duas cargas positivas).
- Usou para estudar seus átomos! Observe como as partícula  $\alpha$  (íons de hélio) são espalhadas por uma folha de ouro (Au).

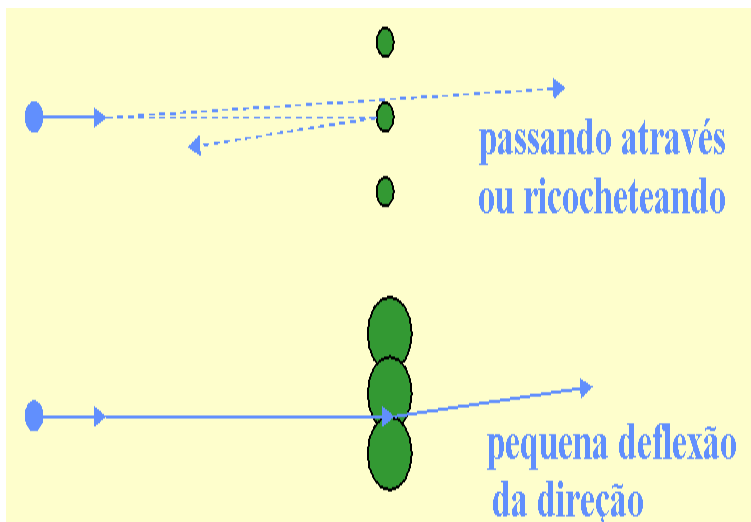


O que você espera?

- Pudim de passas: somente pequenas deflexões desde que partículas  $\alpha$  são muito mais pesadas que os elétrons.
- Planetário: pode ocasionalmente ter grandes deflexões se a maior quantidade de massa está presente nos núcleos.

# Demonstração

- Distinguindo entre estes modelos!
- Maioria da massa está associada com a carga positiva (elétrons são muito leves).
- Os núcleos são pequenos ou grandes espalhadores de objetos?
- Alguns efeitos no experimento de Rutherford podem ser demonstrados por bolas que ricocheteiam em um “alvo”:

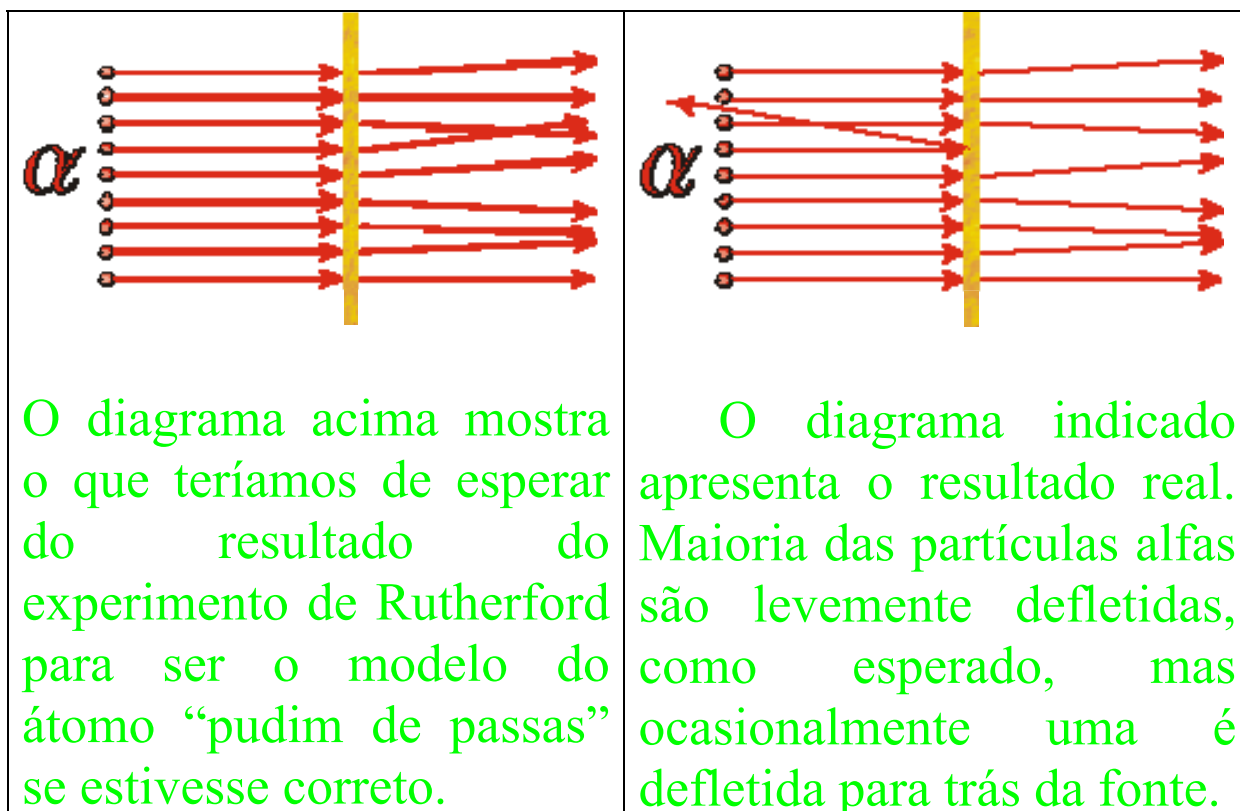


Passando através ou ricocheteando

pequena deflexão da direção



# Experimento Geiger Marsden (Rutherford) – 1911

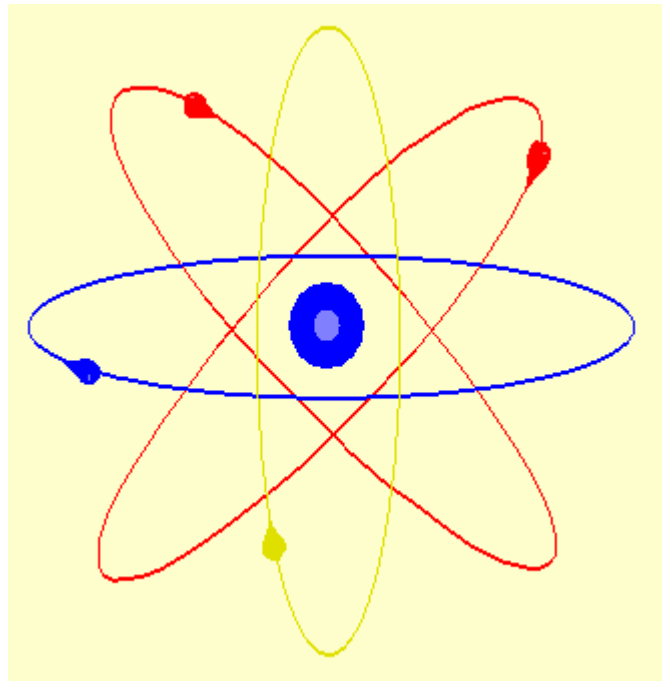


- Resultados estão em concordância com o **Modelo Planetário** com um **núcleo massivo ao centro**. MUITO mais partículas são espalhadas em grande ângulos que o esperado para o modelo de “Pudim de Passas”.

# Natureza dos átomos

- Átomos são feitos de núcleos massivos carregados positivamente e elétrons negativos e leves

- Praticamente toda a massa está concentrada no núcleo muito pequeno!



- Modelo Planetário

- Mas como isto ocorre? O que evita os elétrons de caírem dentro do núcleo? Mais tarde!

# Definindo Quantum

- Max Planck (1900) sugere que a luz emitida por fornos só poderia ocorrer em múltiplos inteiros de uma unidade mínima de energia – *quantum*:  $E = hf$ .

$E$  é o “pacote” de energia

$h$  é a constante de Planck ( $6,6 \times 10^{-34}$  J.s)

$f$  é a frequência da onda estacionária

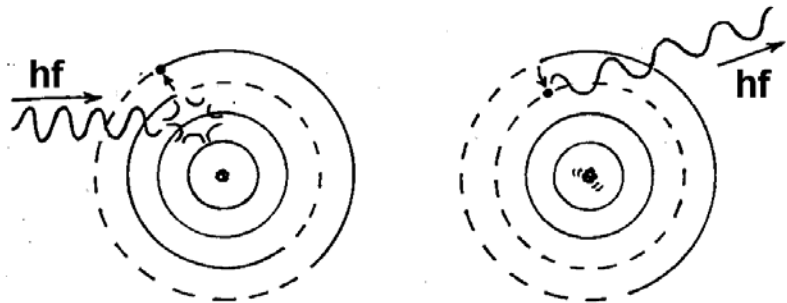
- Do mesmo modo que compramos laranjas em unidades inteiras (e não aos pedaços) é assim que temos os **quanta**, em múltiplos de uma unidade de energia.
- A energia variaria em pequenos saltos de forma descontínua; a energia seria **quantizada**.
- O **quantum** é um pacote de energia  $E = hf$ .

# Hipótese de Bohr

Niels Bohr afirma:

- os elétrons têm estados de energia definida, não podendo irradiar energia nesses estados, por isso não caem dentro do núcleo.
- os elétrons só podem saltar de uma órbita a outra **emitindo ou absorvendo** certa quantidade de energia.

A diferença de energia entre duas órbitas é igual ao quantum  $hf$  da luz emitida ou absorvida.

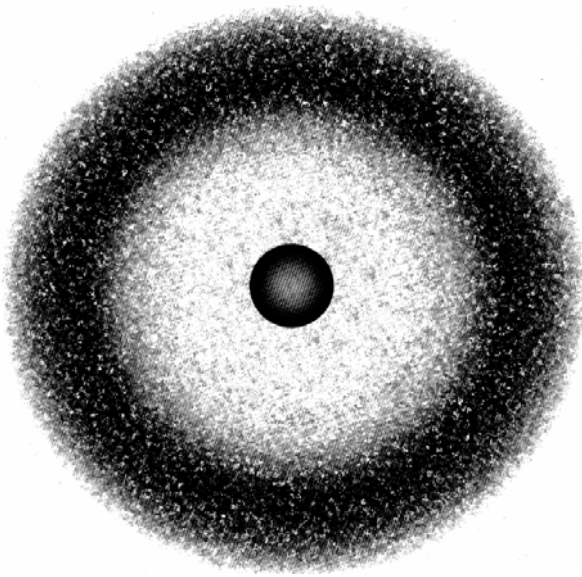


# Modelo Quântico I

- Atualmente admite-se que o átomo é formado por um núcleo rodeado por **elétrons**.
- O **elétron** ocupa apenas **níveis discretos de energia**.
- O **elétron** não é mais considerado como uma **partícula localizada** no átomo. Por exemplo, a localização de um **elétron** num átomo pode estar em qualquer lugar (desde o seu centro até uma distância radial muito afastada).
- Existe uma **posição provável** para o **elétron** num dado instante.

# O modelo Quântico II

- Um particular **elétron** pode ser detectado, em diversas tentativas, dentro de uma **nuvem de probabilidade**.

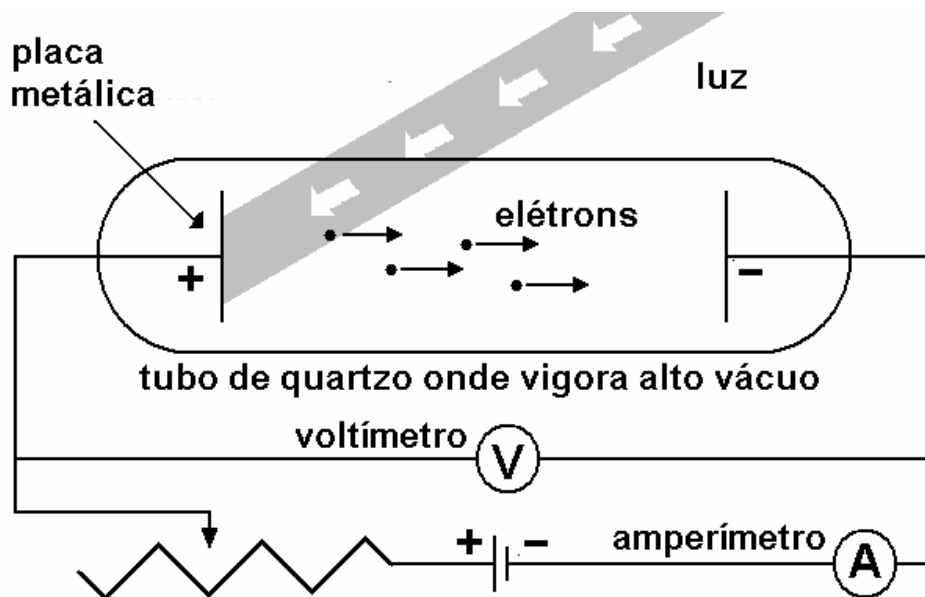


A região mais escura representa onde existe maior probabilidade de se encontrar o elétron ao redor do núcleo.

- Esta é uma **probabilidade**, não formada por um elétron pulverizado, espalhado pelo espaço.
- Quando o elétron é detectado aparece mostrando-se como uma **partícula pontual**.

# Efeito fotoelétrico

- Einstein (1905) estuda o efeito fotoelétrico, que é a emissão de elétrons quando incidem fótons (partículas de luz) sobre um metal.



- Tendo em vista a idéia de quantum de Planck, Einstein supõe que a luz se propaga como pacotes (partículas de luz) ou fótons, de energia  $E = hf$ .
- O comportamento coletivo desse feixe de fótons que é um fenômeno ondulatório mostra um comportamento dual da luz.

# Dualidade onda-partícula I

Classicamente distinguimos:

- *partículas* possuem massa e trajetória bem definidas e obedecem as leis de Newton.

- *ondas* se espalham no espaço (sem serem localizadas) e podem sofrer difração e interferência ao passar por um fenda ou circundar uma barreira.

- dicotomia de *luz = onda X partícula*

De Broglie relaciona propriedades *corpusculares* (quantidade de movimento  $p = mv$ ) e propriedades *ondulatórias* (comprimento de onda  $\lambda$ ) usando a expressão:

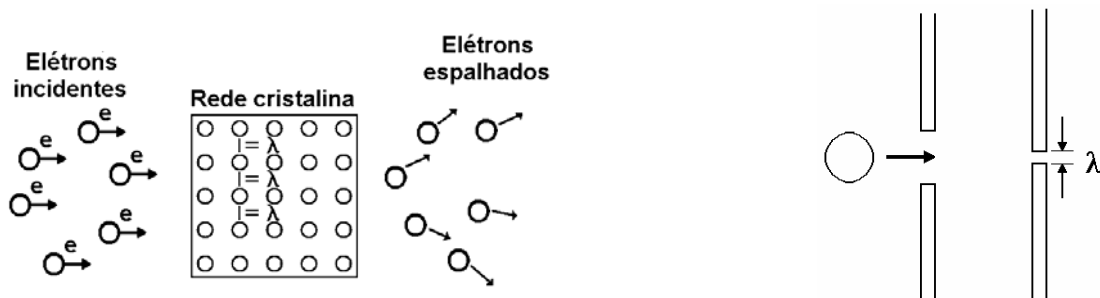
$$p = h/\lambda$$

$p$  = quantidade de movimento (produto da massa  $m$  da partícula pela velocidade  $v$  ;  $p = mv$ )

$\lambda$  = comprimento de onda



# Dualidade onda-partícula II



$$\lambda_{\text{elétron}} = 3,7 \times 10^{-10} \text{ m} \quad \text{e} \quad \lambda_{\text{bola de gude}} = 8,3 \times 10^{-30} \text{ m}$$

<p><i>elétron</i>: o comprimento de onda é da mesma ordem de grandeza que o diâmetro de um átomo, por isso ocorre <i>difração</i> quando o elétron passa entre os átomos de um cristal.</p>	<p><i>bola de gude</i>: o comprimento de onda é muito pequeno em relação a bola de gude (diâmetro cerca de 1 cm)</p>
---	--

- Os elétrons (e a luz) sofrem difração que é um comportamento típico de onda.
- Classicamente, a luz é vista como onda, mas na Mecânica Quântica há dualidade onda-partícula.
- Podemos afirmar que todas as partículas quânticas apresentam uma dualidade onda-partícula.

# Interferências construtiva e destrutiva

- Mecânica Clássica (MC) prevê para a **adição de ondas** interferências construtiva e destrutiva:

**Construtiva (reforço)**  
(cristas coincidindo com cristas)

**Destrutiva (aniquilação)**  
(vales coincidindo com cristas)

