

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA – UFBA  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA – UEFS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO, FILOSOFIA E  
HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS**



**ASPECTO PREDITIVO DA MECÂNICA CLÁSSICA E DA  
MECÂNICA QUÂNTICA: UMA PROPOSTA TEÓRICO-  
METODOLÓGICA PARA ALUNOS DO ENSINO MÉDIO**

**RODOLFO ALVES DE CARVALHO NETO**

**Orientador:**

**Prof. Dr. OLIVAL FREIRE JÚNIOR**

**Co-orientadores:**

**Prof. Dr. STEFANO OSNAGHI**

**Prof. Dr. JOSÉ LUÍS DE PAULA BARROS SILVA**

**Salvador  
2006**

# **ASPECTO PREDITIVO DA MECÂNICA CLÁSSICA E DA MECÂNICA QUÂNTICA: UMA PROPOSTA TEÓRICO- METODOLÓGICA PARA ALUNOS DO ENSINO MÉDIO**

**RODOLFO ALVES DE CARVALHO NETO**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências da Universidade Federal da Bahia (UFBA) e da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre.

**Orientador:**

**Prof. Dr. OLIVAL FREIRE JÚNIOR**

**Co-orientadores:**

**Prof. Dr. STEFANO OSNAGHI**

**Prof. Dr. JOSÉ LUÍS DE PAULA BARROS SILVA**

**Salvador**

**2006**

530.145

C331

Carvalho Neto, Rodolfo Alves de.

Aspecto preditivo da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica: uma proposta teórico-metodológica para alunos do Ensino Médio/Rodolfo Alves de Carvalho Neto. – Salvador: R. A. de Carvalho Neto, 2006.

137 f.

Orientador: Olival Freire Junior.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Física, 2006.

1. Mecânica Quântica. 2. Mecânica Clássica 3. Colégio Antonio Vieira. I. Título.

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	7
AGRADECIMENTOS.....	8
RESUMO.....	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUÇÃO.....	12
CAPÍTULO 1 DISCUSSÃO TEÓRICA.....	19
1.1. Objetivos.....	20
1.2. Uma breve história da Mecânica Quântica.....	20
1.2.1. Justificativa da interpretação escolhida.....	22
1.2.2. Mecânica Quântica e Filosofia.....	24
1.2.3. O argumento EPR e a resposta de Bohr.....	26
1.2.4. A complementaridade sob uma perspectiva realista e não positivista.....	27
1.3. Revisão da literatura.....	28
1.4. Propostas didáticas para o Ensino Médio.....	31
1.4.1. Histórico-filosóficas.....	31
1.4.2. Estabelecimento de elos com a Física Clássica.....	32
1.4.3. Apresentação da Mecânica Quântica sem elos com os conceitos clássicos.....	33
1.5.1 O referencial teórico: a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel....	34
1.5.1. A estrutura cognitiva.....	36
1.5.2. Aprendizagem significativa.....	38
1.5.3. Condições para a ocorrência da Aprendizagem Significativa.....	39
1.5.4. Significados compartilhados.....	39
1.6. Desenho do estudo, material e métodos.....	40
CAPÍTULO 2 FASE EXPLORATÓRIA: ANÁLISE, DISCUSSÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS.....	45
2.1. Considerações sobre o curso de Física do CAV/3ºano do ensino médio.....	46
2.2. Procedimentos da pesquisa exploratória: do conhecimento prévio em Física e sobre Física .....	48
2.2.1. Pré-Teste – sua organização e aplicação.....	48
2.2.2. Entrevistas prévias.....	48
2.2.3. Mini-Curso.....	48

2.2.4. Pós-Teste .....	52
2.2.5. Entrevistas .....	52
2.3. Análise, discussão e interpretação dos dados .....	54
2.3.1. O determinismo clássico implícito na segunda lei de Newton e o conceito de trajetória .....	54
2.3.2. O uso das probabilidades em Física .....	57
2.3.3. O aspecto preditivo das teorias físicas.....	59
2.3.4. Pós-testes .....	59
2.3.5. Análise das Entrevistas.....	60
2.4. Conclusão sobre a análise dos resultados da fase exploratória.....	76
<b>CAPÍTULO 3 UMA PROPOSTA DE ENSINO DE MECÂNICA CLÁSSICA E DE</b>	
<b>MECÂNICA QUÂNTICA.....</b>	<b>78</b>
3.1. Considerações introdutórias .....	79
3.2. Pré-Testes – Sua organização e aplicação .....	80
3.3. Entrevistas prévias.....	80
3.4. Uma nova abordagem da Mecânica Clássica .....	80
3.4.1. A descoberta de Netuno.....	83
3.4.2. Lei e Conceitos implícitos no aspecto preditivo da Mecânica Clássica.....	83
3.4.3. Mapa conceitual do aspecto preditivo da Mecânica Clássica.....	84
3.4.4. Um exemplo: o oscilador harmônico simples (movimento unidimensional).....	86
3.4.5. Limites da Mecânica Clássica .....	86
3.5. Mini-curso: uma nova abordagem de Mecânica Quântica .....	87
3.5.1. Filme exibido em sala de aula .....	88
3.6. Pós-Teste .....	89
3.7. Análise, discussão e interpretação de dados no pré-teste .....	90
3.7.1. O determinismo clássico implícito na segunda lei de Newton e o conceito de trajetória .....	90
3.7.2. O uso de probabilidades em Física.....	93
3.7.3 O aspecto preditivo das teorias físicas.....	96
3.8. Análise, discussão e interpretação de dados: resultados obtidos após a nova abordagem do curso de Mecânica Clássica.....	97
3.8.1. O aspecto preditivo da Mecânica Clássica e o determinismo implícito nesta teoria científica.....	102

3.9. Análise, discussão, interpretação de dados: resultados obtidos após a nova abordagem do curso de Mecânica Quântica.....	104
3.9.1. Análise, discussão e interpretação da entrevista do aluno A5-2005-p .....	105
3.9.2. Análise discussão e interpretação da entrevista do aluno A8-2005-p .....	117
3.9.3. Análise, discussão e interpretação da entrevista do aluno A3-2005-p .....	122
3.9.3. Análise, discussão e interpretação da entrevista A4-2005-p .....	125
3.10. Conclusão das análises e interpretações .....	130
4. Conclusões.....	132
REFERÊNCIAS .....	133

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Edilberto e Lucinha, por continuarem prestigiando as coisas da vida que julgo possuírem valor.

Aos meus irmãos, Duda e Carolina, amigos de sempre e para sempre.

Ao meu orientador, Olival Freire Júnior, amigo honesto, inteligente e competente, que criou perspectivas para o meu convívio com talentosos pesquisadores e propiciou-me maior vivência no meio acadêmico universitário.

Ao meu tio Alberto Alencar, querido padrinho, expressão inconfundível de espontaneidade e solidariedade.

Ao meu amigo Carlos Alberto Kruschewsky, sábio e notável leitor da vida, que ocupa um lugar especial no meu coração e que sempre me impressionou pela notável formação humanística, ética e profissional, além da sua especialidade maior, a de ouvir os amigos.

Ao meu amigo dileto Rodolfo Teixeira, a quem tenho a mais pura e profunda admiração humanística, ética e profissional, pela arte que dignifica a Medicina da Bahia e do Brasil.

Aos amigos Hans Dieter Schleu e Cristina Ferrari Schleu, que tanto me incentivaram nesta aventura e que acompanharam, em muitos momentos, a gestação desta dissertação de mestrado.

À minha mulher Minna, linda e companheira, amor da minha vida, que não poupa esforços para multiplicar as alegrias do dia a dia.

Ao meu filho, Felipe, meu grande amor, que deu um novo sentido à minha vida, companheiro de “redação desta dissertação” ao longo das madrugadas.

## AGRADECIMENTOS

Aos amigos, Diretor Pe. Domingos Mianulli, Lenice Sento Sé Leite, Vice-Diretora, Yara Cristina Ponchio Baruque, Coordenadora Geral do Ensino Médio, Janeide Medrado (Jane) e José Teixeira Neto (Zelão), Coordenadores Pedagógicos do Ensino Médio, por terem criado condições favoráveis para a realização desta pesquisa e, de modo especial, pelo ambiente de paz.

Ao sensível e criativo amigo Zelão, educador de “mão cheia”, pela oportunidade de interagir com sua postura de respeito à diversidade cultural fundada em uma autêntica ética planetária.

À professora Lícia Regina Carvalho Moreira de Souza, educadora notável, pela postura crítica e, de modo particular, pelas preciosas e encantadoras correções e sugestões lingüísticas que transcenderam a um competente trabalho de revisão.

À professora Joésia Ilka, amiga especial, pela referência de dignidade humana e firmeza nas suas competentes ações pedagógicas que, seguramente, contribuíram para consolidar o meu caráter.

Ao co-orientador, professor José Luís Silva, pela atenção e colaboração com esta pesquisa e, de modo especial, pelas discussões sobre a Teoria da Aprendizagem Significativa.

Ao co-orientador, professor Stefano Osnaghi, pelo curso ministrado de Mecânica Quântica e conversas diversas sobre o aspecto preditivo da Física.

Ao professor Edvaldo Nogueira Júnior, pelo estímulo e franqueza de sempre.

Ao professor Raimundo Muniz, pelo curso ministrado de Mecânica Quântica e sua atenção de sempre.

Ao professor Sérgio Espiridião, (in memoriam), ex-chefe do departamento onde trabalhei e agreguei grandes recordações, o meu reconhecimento e muita saudade das inúmeras conversas referentes ao ensino da Física tanto no Ensino Médio como na graduação.

Ao professor Hélio Campos, pela sua atenção de sempre, e, de modo especial, pela admiração ao seu caráter.

Ao amigo leal e otimista, Leonardo Kruschewsky, pelo seu incentivo e, de modo especial, por ter me apresentado à professora Lícia.

Ao amigo e incentivador Professor Murilo Miranda, pelo estímulo advindo da sua paixão pelas conversas diversas sobre a ciência e, de modo particular, pelas reflexões acerca do princípio da incerteza.



Ao professor João Salles, pelas inesquecíveis aulas de Epistemologia, que de tão profundas, tornaram-se suficientemente claras e instigantes.

Ao colega Fábio Henrique de Alencar Freitas, que teve a gentileza de acessar um vídeo utilizado por mim, em sala de aula, além do seminário que fez sobre este experimento de fronteira.

Ao CETED, do CAV, pelo apoio na gravação de vídeos.

Ao amigo Sidney Bispo da Silva, pelo competente trabalho de transcrição e pelo zelo que teve para com este trabalho.

A Nilson Antônio Alves dos Santos, chefe do serviço de mecanografia e digitação do CAV, amigo que me recomendou, acertadamente, o trabalho de Sidney.

À querida Norma Rocha Nascimento dos Santos, que manteve contato com os pais dos alunos do CAV para autorizar as entrevistas.

À professora Maria Cristina Mesquita Martins, pela atenção de sempre e suas preocupações com as questões da aprendizagem.

Ao professor Charbel El-Hani, pelas “dicas” nas entrevistas e atenção de sempre.

À Orlando de Souza Lima, incrível criatura, prestativo e sempre atencioso.

À Iramaia Ferreira, pelas orientações referentes à ficha catalográfica e às Referências Bibliográficas.

À Cláudio Santana, pelas sugestões informáticas.

Ao professor Osman, pelo estímulo de sempre.

## RESUMO

Esta pesquisa avalia os resultados de aprendizagem significativa acerca do aspecto preditivo da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica. Estes resultados foram obtidos com alunos do terceiro ano do Ensino Médio do Colégio Antônio Vieira, em 2004 e 2005. Os dados da fase exploratória (2004) indicaram a necessidade de uma nova abordagem da MQ e da MC. Assim, em 2005, formulou-se esta nova abordagem que enfatizou o aspecto fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica implícito no Princípio da Incerteza, contrastando com o determinismo clássico implícito na Segunda Lei de Newton. O conceito de estado quântico foi introduzido de maneira qualitativa, acentuando-se a diferença, ao invés de analogias com o estado clássico, na tentativa de aproximar os alunos de uma fenomenologia propriamente quântica. Nessa perspectiva, foi discutido o padrão de interferência, observado com elétrons, mesmo para eventos individuais, tomando como base a interpretação da complementaridade de Niels Bohr. Trata-se de uma pesquisa qualitativa, caracterizada como pesquisa-ação, apoiada na etnometodologia e na teoria cognitiva de David Ausubel, que buscou ancorar o aspecto preditivo das teorias físicas no subsunçor previsão, já existente na estrutura cognitiva dos alunos pesquisados.

Palavras chaves: Mecânica Quântica, Mecânica Clássica, Aprendizagem Significativa, determinismo, probabilístico e preditivo.

## **ABSTRACT**

This research evaluates the results of the meaningful learning process on the predictive aspect of Classical Mechanics and Quantum Mechanics. These results were obtained with senior high school students from Colégio Antonio Vieira in 2004 and 2005. The exploratory stage data (2004) indicated the need of a new QM and CM approach. Thus, in 2005 a new approach was formulated, emphasizing the basic probabilistic aspect of Quantum Mechanics implicit in the Uncertainty Principle, contrasting with the classical determinism implicit in Newton's Second Law. The concept of quantum state was introduced in a qualitative way, highlighting the difference rather than the analogies with the classic state, in the attempt of getting the students closer to the quantum phenomenology. Under this perspective, the interference pattern observed with electrons was discussed, even with individual events used as the basis for interpretation of the Niels Bohr's complementarity. This is a qualitative research, characterized as an action research based on the ethnomethodology and on David Ausubel's cognitive theory, which aimed at anchoring the predictive aspect of the physical theories in the predicted subsumer already present in the cognitive structure of the researched students.

Key words: Quantum Mechanics, Classical Mechanics, Meaningful Learning, Determinism, probabilistic and predictive.

## INTRODUÇÃO

A formulação do problema de pesquisa que originou esta dissertação de mestrado é indissociável da minha paixão pelo ensino da Física e da preocupação com as questões de aprendizagem desta ciência, em especial, dos alunos do Ensino Médio. O entusiasmo advindo desse sentimento permitiu uma reflexão e análise, ao longo de mais de uma década, sobre o ensino tanto de Física Clássica (FC) quanto de Física Quântica (FQ). Seguramente as principais inovações conceituais da Física Quântica não têm sido adequadamente abordadas, discutidas e muito menos compreendidas, tanto no Ensino Médio como nos cursos de graduação, em geral. A percepção dessa realidade, acumulada ao longo dos anos, converge para os resultados de pesquisa, conforme será abordado na revisão da literatura, e aponta para uma percepção estéril e superficial dos alunos acerca de idéias fundamentalmente quânticas.

Considera-se, antes de mais nada, indispensável a apresentação da Física Quântica no Ensino Médio, pelo seu impacto científico, tecnológico e filosófico na cultura dos séculos XX e XXI. É inconcebível omitir ou distorcer, mesmo para os jovens, uma teoria já elaborada há quase um século. Acredita-se, por todas essas razões, que o cidadão contemporâneo, especialmente o aluno do Ensino Médio, deva ter uma compreensão qualitativa mínima da Mecânica Quântica. Como o contato de boa parte dos alunos com a Física esgota-se, formalmente, no Ensino Médio, provavelmente é a única oportunidade, para muitos, de estudar a Física Quântica. Enquanto no Brasil ainda se continua discutindo a introdução de Mecânica Quântica no Ensino Médio, os EUA e muitos países da Europa já relatam inúmeras experiências didáticas, publicadas em periódicos. Análise da inserção de conteúdos de Teoria Quântica nos currículos de física do Ensino Médio é tema de alcance mundial (Lobato e Greca, 2005) e já faz parte de discussões curriculares em países como Portugal, Espanha, França, Reino Unido, Dinamarca, Suécia, Canadá e Austrália. No Brasil já faz parte dos Parâmetros Curriculares Nacionais.

O aspecto fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica (MQ), por exemplo, tem sido, equivocadamente, atribuído à ignorância humana acerca dos sistemas quânticos, por parte de muitos de alunos do Ensino Médio do Colégio Antônio Vieira, onde, atualmente, atuo como professor e coordenador do Departamento de Física. Muitos, antes de estudarem a MQ, chegam a confundir os sistemas quânticos com os sistemas dinâmicos caóticos, de grande sensibilidade às condições iniciais, conforme revelaram as várias entrevistas feitas com esses alunos, em 2004 e 2005.

É importante assinalar que o determinismo clássico, por sua vez, pareceu também, para este mesmo público, não estar suficientemente esclarecido. Então foi elaborada uma proposta didática, visando apresentar o aspecto preditivo das teorias físicas para os alunos do terceiro ano do Ensino Médio do CAV. Pretendia-se, portanto, com esta nova abordagem, explicitar uma característica central das teorias da Física (a predição) que expressa a possibilidade de prever resultados de uma medida em um contexto experimental bem definido.

A idéia de contrastar as predições da Mecânica Quântica com as predições da Mecânica Clássica desencadeou a formulação do problema desta pesquisa. O problema que se coloca é: Que estratégia didática poderia possibilitar ao aluno do último ano do Ensino Médio compreender as diferenças conceituais entre as predições da Mecânica Clássica e as predições fundamentalmente probabilísticas da Mecânica Quântica?

Justifica-se a relevância desta questão, considerando a possibilidade concreta de facilitar, para os alunos, a aquisição de significados de conceitos da ciência e sobre ciência capazes de oferecer uma adequada e fecunda dimensão do impacto científico, tecnológico e filosófico que a Física Quântica trouxe para a cultura dos séculos XX e XXI.

É muito importante que se perceba que o problema desta pesquisa envolve tanto o conhecimento de conceitos da Física como o conhecimento sobre a natureza desta ciência. Isso porque a predição física é um conceito que está além das teorias físicas. É impossível, contudo, operacionalizar predições físicas sem os conceitos próprios desta ciência. Sucessivas reflexões sobre o aspecto preditivo das teorias físicas levaram em conta o importante trabalho de Osnaghi (2005).

As predições da Mecânica Clássica e suas descrições determinísticas podem remeter ao conceito de estado clássico e de sua evolução temporal, provenientes da Segunda Lei de Newton. As predições quânticas, por sua vez, podem remeter a uma análise do postulado quântico e do significado do estado fornecido pela equação de Schrödinger. Por essa razão, os conceitos que asseguram as predições da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica estão imbricados, de algum modo, no problema proposto para esta pesquisa. É importante destacar que a ausência de um conhecimento de Cálculo Diferencial e Integral e de Álgebra de Espaços Vetoriais Complexos, por parte dos alunos do Ensino Médio, não inviabiliza uma compreensão qualitativa dos conceitos que garantem a predição dessas teorias. A abordagem desses conceitos, tal como foi feito em sala de aula, em condições reais, aparece de forma explícita nos anexos E e F.

Deve-se ainda registrar que a aquisição de significados referentes aos conceitos da Física não garante a aprendizagem significativa do aspecto preditivo desta ciência, traço este que parece ser a principal característica das teorias físicas. É também necessário que se aprenda, de maneira significativa, o conceito de predição física. Nesse sentido, desde o início do terceiro ano de 2005, no CAV, foi abordada a idéia de predição física, por acreditar no pressuposto ausubeliano de que um curso deve começar tratando das idéias mais inclusivas possíveis, obedecendo a uma hierarquia conceitual (Ausubel, 1980).

As terminologias “conhecimento em ciência” e “conhecimento sobre ciência” utilizadas nesta pesquisa, aparecem no livro “Science Teaching”, de Michael Matthews, com quem compartilho a idéia de que a educação científica deve promover os dois tipos de conhecimento (Matthews, 1994).

Seguiremos, agora, uma descrição de uma trajetória pessoal que consideramos relevante para melhor contextualizar esta pesquisa. As reflexões a esse respeito têm uma história e foram legitimadas a partir de 1994, quando conheci o professor Olival Freire Júnior, no Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia. Neste mesmo ano, o professor Olival convidou-me para participar de um projeto de Iniciação Científica, sob sua orientação, intitulado “Estudo da Conveniência e da Viabilidade de Introduzir a Física Moderna no Ensino Médio”.

Em 1995, o projeto original evoluiu para a idéia de inserção de tópicos de Física Moderna no Ensino Médio, intitulado “Introduzindo Física Quântica na Escola Secundária”, sob a orientação do próprio professor Olival. A partir deste momento, comecei, sistematicamente, a tomar o Ensino de Física como objeto de questionamento e reflexão, transformado em ações pedagógicas em escolas particulares de Salvador.

O trabalho com o professor Olival criou perspectivas para o convívio com talentosos pesquisadores e propiciou maior vivência no meio acadêmico universitário. Em 1995, como participante do XI Simpósio Nacional de Ensino de Física (SNEF), em Niterói, RJ, e do curso ministrado pelo professor Olival, sobre a “Controvérsia dos Quanta”, o interesse particular e muito especial, existente anteriormente, foi se delineando, desde então, até chegar ao objeto da pesquisa atual. Pouco tempo depois, a leitura dos originais da sua tese de doutorado sobre a controvérsia dos Quanta (A emergência da totalidade, David Bohm e a controvérsia dos Quanta, Freire Jr., 1995) foi motivo de aumentar o interesse para esse trabalho. A oportunidade de fazer a resenha, recentemente, de seu livro “David Bohm e a controvérsia dos quanta” (Freire, 1999), originado de sua tese, muito contribuiu para este estudo.

Não há dúvida que a leitura dos originais referidos foi crucial para que uma visão particular fosse formulada acerca da interpretação da complementaridade, elaborada por Niels Bohr, além de compartilhar da fundamentação epistemológica necessária para refletir sobre as questões de fundamentos da Mecânica Quântica. Este interesse sobre a controvérsia dos quanta foi fator relevante para este estudo, embora este apaixonante tema extrapole os objetivos desta pesquisa.

Em 1995, em Congresso Internacional, em parceria com o professor Olival, apresentamos o trabalho intitulado “Introducing Quantum Physics In Secondary School” (Freire et al, 1995), no Third International History, Philosophy and Science Teaching Conference, na Universidade de Minneapolis. Nesta comunicação, foi apresentada a idéia de que introduzir a Mecânica Quântica no Ensino Médio implica rever a apresentação da Mecânica Clássica e de seus limites.

No ano de 1995, foi introduzido no Ensino Secundário, nos Colégios Módulo e São Paulo, o Princípio de Heisenberg, conforme relatado no XIII “Encontro de Físicos do Norte e Nordeste”, realizado em Salvador. (Carvalho Neto, 1995).

Em 1996, a convite do professor Olival, escrevemos o livro “O universo dos quanta – uma breve história da Física Moderna”, publicado em 1997, pela Editora FTD. Nessa ocasião, foi ministrado um mini-curso para professores do Ensino Médio, tanto da rede particular quanto da rede pública, visando divulgar a proposta de incluir o ensino de Mecânica Quântica nos currículos das diversas escolas de Salvador. A acolhida dos colegas foi razão que estimulou a continuação da pesquisa e sua divulgação.

Em 1999, foi publicado o artigo intitulado “Revelando o caráter determinístico da Mecânica Newtoniana – Uma ponte para o Ensino de Física Moderna no Ensino Médio”, na revista Ideação de Feira de Santana (Carvalho Neto, Freire, Rocha, 1999). O comunicado relata resultados importantes, embora não conclusivos, acerca da compreensão dos alunos sobre a limitação das descrições determinísticas em escala atômica e sub-atômica.

Após a graduação em Engenharia Civil, pela UFBA, em 2002, ao ingressar no Instituto de Física da UFBA como professor substituto do Departamento de Física Geral, lecionei por três semestres consecutivos a disciplina Física II (parte teórica), em turmas para alunos de Física e de Engenharia, entre 2003 e 2004. Foi mais uma oportunidade de perceber que os alunos não dominavam de forma consciente o aspecto preditivo da segunda lei de Newton, apesar do bom manejo deste princípio, resolvendo de modo automático problemas padrões estudados em Física I. Em pouco mais de dois anos de atuação, o pressuposto anteriormente referido, confirmava-se. Isso não decorria simplesmente da falta de estudo de

Cálculo Diferencial e Integral. Alguns alunos bem treinados, nesse particular, não associavam, por exemplo, que a lei que prediz o estado clássico de um oscilador massa-mola, num dado instante, (Segunda Lei de Newton) é a mesma lei que prediz a órbita elíptica dos planetas, levando em conta, é claro, as particularidades dessas forças ( $F=-Kx$  e  $F=-GMm/r^2$ ), respectivamente. Esta deficiência apresentou-se inclusive de forma qualitativa.

Parece haver, a esse respeito, uma infrutífera semente já presente em muitos cursos do Ensino Médio, onde os alunos não associam, mesmo de modo qualitativo, a segunda lei de Newton à obtenção de uma trajetória, a partir das condições iniciais. Acrescente-se, ainda, que as “máquinas de Atwood”, “planos inclinados”, “elevadores”, aparecem, numa abordagem tradicional, como se fossem “assuntos” reduzidos a uma cinemática, desconectados de qualquer reflexão em torno do princípio fundamental da dinâmica e do determinismo clássico implícito nesta lei. O hábito, por parte dos alunos do Ensino Médio, de tratar de fenômenos físicos envolvendo partículas sob a ação de uma força resultante constante, costuma provocar uma “cinematização” da Dinâmica. É muito comum, por exemplo, o aluno do Ensino Médio não fazer qualquer associação, mesmo qualitativa, entre a segunda lei de Newton e as trajetórias que são próprias da Física Clássica. Os assuntos aparecem e são tratados como “blocos fragmentados” que, via de regra, são memorizados. É provável que uma fragmentação de mesma natureza venha caracterizando também o Ensino de Mecânica Quântica. Lobato e Greca (2005) chegam ao ponto de defender a necessidade de apresentar não apenas a equação de movimento da Mecânica Clássica, no Ensino Médio, mas também a equação de movimento da Mecânica Quântica, que é a equação de Schrödinger, e, referindo-se à forma tradicional de ensino de Mecânica Quântica, dizem: “cabe perguntar se esta forma de apresentar explicações isoladas de fenômenos que pertencem ao âmbito da TQ será a melhor forma de contribuir para que os alunos a entendam como um conjunto completo e coerente de modelos científicos”.

Como a equação de Schrödinger envolve conhecimentos matemáticos muito avançados, para o Ensino Médio, foram construídas estratégias, visando um entendimento qualitativo do aspecto preditivo da Mecânica Quântica, tendo sempre em mente a idéia de contrastar as predições da Mecânica Clássica com as predições oferecidas pela Mecânica Quântica, aspecto que será ainda discutido neste estudo.

Todos os antecedentes relatados construíram as condições para que o desafio fosse assumido de forma conseqüente, enquanto instrumento para conhecimento, que, numa investigação qualitativa, não pode prescindir da observação participante, coleta, análise e interpretação de informações.



Nesse sentido, o apoio do Colégio Antônio Vieira foi decisivo, viabilizando um curso de Mecânica Quântica com carga horária de vinte horas para o terceiro ano do Ensino Médio. Este apoio, seguramente, foi influenciado pela Pedagogia Inaciana que norteia as práticas educativas reflexivas e críticas, voltadas para a excelência acadêmica e para formação integral do ser humano. Nesse espaço, onde os alunos participantes foram reconhecidos como sujeitos que elaboram conhecimentos, foi possível observar a percepção e a compreensão acerca do aspecto fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica.

É importante registrar que os exames de vestibular da UFBA, embora já incluam no seu programa a Física Quântica, desde 1999, na tentativa de aproximar o alunado das principais inovações conceituais advindas da Mecânica Quântica, privilegiam as representações referentes ao estudo histórico do átomo de Bohr e do efeito fotoelétrico.

Nesta pesquisa, optou-se por uma discussão conceitual sobre o aspecto probabilístico da Mecânica Quântica, realçando este aspecto para eventos individuais, a fim de evitar uma interpretação estatística clássica da teoria. Um filme japonês, com filmagem em tempo real do experimento de Young com elétrons, lançados um a um, foi utilizado, em sala de aula, para ilustrar o aspecto fundamentalmente probabilístico das previsões quânticas (Tonomura et al, 1989). O resultado foi uma discussão que mobilizou os alunos participantes na busca de compreender o significado fundamentalmente probabilístico da função  $\psi$ , da dualidade onda-partícula, do Princípio da Incerteza e do Princípio da Superposição. Esta experiência levou em conta o livro dos autores Richard P. Feynman, Robert B. Leighton e Matthew Sands (Lectures on Physics-Richard Feymann, vol. 3, 1963), cujo capítulo “comportamento quântico”, traduzido para a língua portuguesa (parte integrante do livro “A Física em seis lições” (Feynman, 2001)), foi reproduzido e discutido na íntegra ao longo do curso. A contribuição do colega Fábio Henrique de Alencar Freitas foi importante não somente na gravação do filme, feita através da Internet, mas também na discussão, em Seminário, dos aspectos conceituais envolvidos neste experimento.

Nesse percurso, que buscava definir melhor o objeto deste estudo, foi relevante a leitura da tese de doutorado de Greca, pesquisadora gaúcha, orientada pelo professor Marco Antônio Moreira. Confirmava-se, no seu estudo, a suposição feita anteriormente de que é possível o Ensino de Mecânica Quântica no Ensino Médio, preenchendo lacunas relevantes para o desenvolvimento do conhecimento científico. São palavras da própria Greca:

Scarani e Suarez (1998) propuseram aprimorar os esforços didáticos de Feymann para tornar compreensível a superposição de estados, com a sua consequência mais

simples que é a presença de efeitos de interferência, mesmo para uma partícula, como o experimento proposto por Elitzur e Vaidmann em 1993 e concretizado poucos anos depois. Gerry e Knight (1997) propõem deixar de tratar o famoso ‘gato de Schrödinger’ como um paradoxo, mas sim como um fenômeno que pode ser observado experimentalmente. Adams (1998) sugere, ademais, que algumas destas experiências sejam discutidas ainda no ensino médio, colocando os estudantes verdadeiramente em contato com conhecimentos de fronteira.

(GRECA, 2000, p. 42).

Considerando a aplicabilidade de suas idéias, no ensino de Graduação, Greca e Herscovitz (2001) sugerem

uma ação educativa forte, que priorize exemplos baseados em experimentos recentes e discussões que apontem para características propriamente quânticas, tornando as noções da Física Quântica um pouco mais ‘intuitivas’. Isto se oporia às abordagens que buscam semelhanças com sistemas clássicos ou que só ofereçam uma visão instrumentalista.

(GRECA e HERSCOVITZ, 2001, p. 81).

Nesse contexto, iniciado em 1994, as idéias sobre o ensino da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica foram se organizando, tomando forma, avançando na formação e na ativação de novos conceitos até chegar ao objeto desta pesquisa. Registre-se, finalmente, que esta pesquisa foi enriquecida pelas diversas e fecundas discussões partilhadas com os co-orientadores, professor Stefano Osnagui e professor José Luís Silva, especialmente no período entre 2004 e 2005, quando o professor Olival, encontrava-se nos EUA. Essas discussões ocorreram em torno do aspecto preditivo da Física e da teoria cognitiva de Ausubel.

No capítulo 1, será feita uma discussão teórica em torno da interpretação da Mecânica Quântica adotada, da revisão da literatura, da teoria cognitiva de David Ausubel e da metodologia. Aí foram incluídos os objetivos da dissertação e uma breve história da Mecânica Quântica e sua ligação com outras áreas do conhecimento humano. No capítulo 2, serão analisadas as concepções prévias dos alunos acerca da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica, além da abordagem didática aplicada nas aulas de Mecânica Quântica, em 2004, e resultados parciais de aprendizagem significativa. No capítulo 3, será apresentada a análise dos resultados de aprendizagem significativa do aspecto preditivo da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica em 2005.

**CAPÍTULO 1**  
**DISCUSSÃO TEÓRICA**

## ***1.1. Objetivos***

### **OBJETIVO GERAL**

Avaliar a possibilidade de inserir, no Ensino Médio, um estudo que aponte as diferenças entre a predição oferecida pela Mecânica Clássica da predição fundamentalmente probabilística da Mecânica Quântica.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Descrever a estrutura cognitiva de alunos do terceiro ano do CAV em torno do significado das predições da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica, mediante pré-testes e entrevistas semi-estruturadas.

Elaborar, implementar e avaliar uma estratégia didática para abordagem de Mecânica Clássica e Mecânica Quântica, a partir da aprendizagem significativa dos alunos pesquisados, sobre conceitos do aspecto preditivo destas teorias científicas.

## ***1.2. Uma breve história da Mecânica Quântica***

O êxito preditivo e descritivo da Mecânica de Newton, da Termodinâmica e do Eletromagnetismo, gerou, entre o século XVII e o século XX, a expectativa do homem de poder reduzir todas as predições e explicações dos fenômenos físicos do universo ao que hoje se denomina de Física Clássica.

A concepção determinística extremada (o mecanicismo), em particular, foi tomada como modelo para as ciências sociais. O matemático e astrônomo Laplace foi o porta voz mais destacado daqueles que tentaram universalizar o esquema preditivo e descritivo da Mecânica Clássica. Uma expectativa, como se sabe hoje, não concretizada, levando em conta que esta teoria científica nem sequer dá conta do movimento dos átomos de uma molécula do cérebro de um ser humano. (Freire e Carvalho, 1997, p.20)

Uma das mais radicais crises na História da Ciência, contudo, tomou conta da comunidade dos físicos nos primeiros anos do século XX e desfez, de maneira contundente, a idéia de uma Física concluída, finalizada e acabada. Nos anos de 1905 e 1916, Albert Einstein publicou as Teorias da Relatividade Especial e Geral respectivamente, imaginando conceitos de espaço, tempo e gravitação de forma muito diferente dos concebidos pela Mecânica de

Newton, ainda que a gênese da teoria da relatividade restrita tenha suas raízes no Eletromagnetismo.

Entre 1900 e 1927, outra invenção científica, conhecida como Mecânica Quântica, introduziu idéias ainda mais radicais do que as da Teoria da Relatividade, especialmente no período entre 1925 e 1927. Neste intervalo de tempo de dois anos, Werner Heisenberg (1901-1976), Max Born (1882-1970) e Pascual Jordan (1902-1980) formularam a Mecânica Quântica, representando-a em forma de matrizes. P.A. Dirac (1902-1984), através de uma outra representação, formulou, de forma independente, a nova teoria. Schrödinger, também de forma independente, obteve a equação que leva seu nome e que constitui um dos postulados da Mecânica Quântica, fornecendo a função do estado  $\psi$  em função do tempo. Outros físicos de destaque do século XX, entre os quais Planck, Einstein, De Broglie, Pauli, e Feynman, têm o nome, de algum modo, associado à Mecânica Quântica (Freire e Carvalho, 1997).

Trata-se da teoria física mais bem sucedida e a mais fundamental entre as criadas pelo homem. Dentre as inovações conceituais, incluem-se a dualidade onda-partícula, o princípio da incerteza, o princípio da superposição, além da propriedade conhecida como não-localidade. Todas essas mudanças, de algum modo, implicaram outra visão de mundo acerca da objetividade da Física.

O impacto científico e tecnológico que a Mecânica Quântica trouxe para a cultura do século XX pode ser bem avaliado através da sintética e acertada apreciação do historiador:

Desde 1927, o desenvolvimento da Mecânica Quântica e suas aplicações à Física Molecular, ao estado sólido, aos líquidos e aos gases, à Mecânica Estatística, bem como à Física Nuclear demonstraram a impressionante generalidade de seus métodos e resultados. Efetivamente nunca antes uma teoria física tinha fornecido a chave para a explicação e cálculo de um grupo tão heterogêneo de fenômenos e atingido uma concordância tão perfeita com a experiência.

(MAX JAMMER, 1966, p. 65).

Mesmo no domínio macroscópico é preciso recorrer à Mecânica Quântica para compreender certas propriedades, a exemplo da estabilidade da matéria. A interação da radiação eletromagnética com a matéria é fenômeno que remete, em geral, à Mecânica Quântica. O efeito fotoelétrico, explicado em 1905, ilustra esta afirmação, quando Einstein propõe os quanta de luz, uma hipótese considerada por ele como revolucionária.

A Medicina e a Engenharia foram áreas, dentre outras, que muito se beneficiaram das aquisições da nanotecnologia, que, em última análise, remete à Mecânica Quântica. No

terreno da informática, as perspectivas são promissoras, com a idéia de criptografia e emaranhamento quânticos.

Acrescente-se, ainda, que essa teoria tem sido utilizada para descrição do desenvolvimento do universo em larga escala, auxiliando, assim, a Cosmologia. Basta imaginar as reduzidas dimensões iniciais do Big-Bang para as quais as predições clássicas seriam inadequadas.

Há ainda que se registrar a influência da Mecânica Quântica na Filosofia, e, em particular, na Epistemologia. Filósofos da ciência como Popper, Kuhn, Feyerabend, Bachelard, dentre outros, dedicaram-se às questões suscitadas por esta teoria.

### ***1.2.1. Justificativa da interpretação escolhida***

Desde 1927, com o advento da MQ, um grande consenso quanto ao formalismo mínimo desta nova Física coexiste, ainda hoje, com uma grande divergência de interpretação de seus fundamentos. Essa controvérsia continua envolvendo cientistas e filósofos tendo atingido seu ápice em 1935, quando Einstein e Bohr polemizaram sobre a questão da completude dessa nova teoria científica.

Embora a controvérsia sobre as diversas interpretações dos fundamentos da MQ não seja objeto principal desta pesquisa, é indispensável explicitar e justificar a interpretação adotada.

Optou-se por ensinar Mecânica Quântica sob o “ponto de vista” da “Complementaridade”, elaborado por Niels Bohr, tratando-se, ainda hoje, de uma interpretação hegemônica, denominada de “Ortodoxa”, “Copenhagen”, ou ainda interpretação “usual”. Seus principais partidários, entretanto, revelaram pressupostos filosóficos e epistemológicos distintos a respeito dos quanta, incluindo-se entre eles Heisenberg, Jordan, Max Born, Dirac e Pauli, dentre outros.

É importante enfatizar que, na escola ortodoxa, há diferenças relevantes de pensamentos, dificultando a compreensão do pensamento de Bohr, conforme alertou Catherine Chevalley, ao declarar:

Durante muito tempo a compreensão dos problemas filosóficos levantados pela MQ foi entravada pela representação petrificada que se fazia da interpretação dita ‘de Copenhagen’ ou ‘ortodoxa’ (...) esta interpretação foi correntemente considerada seja como uma interpretação instrumentalista influenciada pelo positivismo lógico,

seja como reflexo das tendências acausais dominantes na Alemanha de Weimar. Nenhuma destas duas análises opostas permite, contudo, fazer justiça à complexidade da reflexão filosófica dos fundadores da MQ, sobre a qual N. R. Hanson, E. Sheibe, C.A Hooker e outros chamaram atenção desde os anos 70. É possível, hoje, graças aos numerosos trabalhos sobre Bohr publicados na última década, um certo número de análises de casos precisos, adotar uma perspectiva diferente....

(CHEVALLEY, 1993 apud FREIRE 1995, p. 23-24).

A análise de algumas das diferenças filosóficas e epistemológicas da escola “ortodoxa” é importante para esclarecer o ponto de vista deste estudo acerca do pensamento de Bohr. Uma análise dessa natureza, no Ensino Médio, extrapolaria, seguramente, os objetivos desta pesquisa, porém, o curso de Mecânica Quântica ministrado esteve atrelado à interpretação da complementaridade, cujo conteúdo não está isento de controvérsia, sobretudo por razões filosóficas.

Esse esclarecimento é necessário por se tratar ainda hoje de uma controvérsia inconclusa, circunstância que parece prescrever a mesma conduta de esclarecimento da escolha, independentemente da interpretação adotada. Esta condição de contemporaneidade tem, inevitavelmente, reflexos para o ensino de Mecânica Quântica exceto quando se opta por abordagem puramente instrumental que parece não provocar discussões conceituais, fundamentais para o estudo da ciência com maior criticidade.

A escolha pela interpretação da complementaridade no ensino de Mecânica Quântica decorreu, primariamente, de razões históricas. Essa interpretação ganhou sustentação tanto no domínio não relativístico como relativístico, tendo sobrevivido à tentativa de ser substituída pela teoria das variáveis escondidas, de David Bohm, proposta na década de 1950. Estudos históricos apontam que razões estritamente científicas levaram à não aceitação do programa de Bohm (Freire Jr., 1995).

A coerência da interpretação da complementaridade foi reconhecida até mesmo pelo brilhante crítico Albert Einstein, o físico mais influente do século XX. Em 1936, referindo-se à complementaridade, sustentou: “Acreditar nisso é possível, sem contradição lógica; mas é tão contrário ao meu instinto científico que eu não posso abandonar a procura de uma concepção mais completa” (Einstein, 1936, in EINSTEIN, 1973, p. 310 apud. FREIRE Jr., 1991, p.53).

Mesmo considerando que a controvérsia dos quanta fuja aos objetivos de um curso da Mecânica Quântica, supõe-se que a apropriação das idéias “ortodoxas” são suficientes para, havendo interesse, desencadear o eventual estudo de outras interpretações e/ou teorias

alternativas. O prêmio Nobel Cohen-Tannoudji (1977, p. 5) refere-se a essa questão, logo no prefácio do seu livro, *Quantum Mechanics*, com as seguintes palavras: “Nós sentimos que essas questões podem ser consideradas de maneira fecunda somente depois de apresentar a interpretação ortodoxa da Mecânica Quântica que impressiona pelo sucesso tanto no campo da Química como no campo da Física”.

Esse contexto, descrito aqui em síntese, foi decisivo para a escolha da interpretação da complementaridade nas reflexões, análises e discussões desta pesquisa, mediadas pela articulação entre ciência e filosofia, através de abordagem histórica.

### ***1.2.2. Mecânica Quântica e Filosofia***

A recusa de atribuir ao pensamento de Bohr um aspecto positivista e anti-realista é a peça fundamental para esclarecer o que está sendo denominado neste estudo de “visão própria da complementaridade”. Esta recusa esteve também presente em Popper (1989, p. 30), Folse (1985, p. 222) e Fock (1957) apud Freire (1991).

Parece não ser razoável aceitar que os “não observáveis”, por exemplo, devam ser eliminados do objeto de pesquisa da Física. Também não parece adequado tomar como “princípio” ou “metodologia” resultados colhidos do experimento. Nesse sentido específico, compartilha-se com a idéia de Einstein e Popper de que “a teoria não pode ser fabricada a partir de resultados de observação, mas há de ser inventada”. (Einstein em carta a Popper – POPPER, 1975).

O pensamento de Bohr, tal como parece se configurar, contrapõe-se a uma filosofia positivista, pois transcende a um simples “apego aos observáveis”. Foram grandes, a propósito, os esforços de Bohr para sustentar um posicionamento racional. Ele enfatizou haver uma limitação fundamental na utilização simultânea de uma descrição espaço-temporal juntamente com as leis de conservação de energia e de momento, como consequência do postulado quântico, a expressão primeira de uma descontinuidade fundamental.

O físico dinamarquês introduziu uma nova forma de conceber a objetividade da Física, introduzindo a idéia de que o aparato experimental, preparado pelo observador, juntamente com os sistemas atômicos em estudo, devessem ser pensados como “um todo”, por ele denominado “wholeness”. Essa idéia de objetividade continua compatível com a capacidade de transmitir resultados empíricos sem ambigüidades, dentro das limitações provenientes do quantum de ação.



As limitações de uso simultâneo de posição e momento ou de energia e tempo são, então, expressões fundamentais da complementaridade, bem como a dualidade onda-partícula, segundo Bohr. Foi dentro desse contexto que ele referiu-se ao “fenômeno”. Uma descrição exhaustiva, tanto da radiação eletromagnética como da matéria, remete, de acordo com a complementaridade, à utilização tanto do modelo de onda como de partícula, de forma necessariamente excludente e complementar. Um fenômeno envolvendo fótons, elétrons, etc., ou é ondulatório ou é corpuscular, embora os fótons e os elétrons não sejam, segundo esta interpretação, nem ondas clássicas e nem partículas clássicas. Mas, afinal, o que é o “fenômeno”? O sistema em estudo mais as condições de observação.

Vale ressaltar que é o uso simultâneo de uma descrição espaço-temporal juntamente com as leis de conservação que asseguram o determinismo próprio da Física Clássica. A descrição determinística, conseqüentemente, permite sempre associar, simultaneamente, uma posição e uma velocidade, a um objeto macroscópico, independente do pesquisador conhecer ou não os valores correspondentes a essas grandezas.

Utilizando o formalismo da Mecânica Clássica, pode-se dizer que o estado de uma partícula macroscópica (definida através de uma posição e uma velocidade) fica determinado de maneira única através do estado inicial, também conhecido como condições iniciais (definidas através de posição e velocidade), além da necessidade de conhecer a massa inercial e as forças, a cada instante. A evolução temporal do estado, por sua vez, é regida pela Segunda Lei de Newton mais a expressão particular das forças. Convém lembrar também que o conjunto de todos os estados sucessivos de uma partícula macroscópica define uma trajetória. Do mesmo modo que a segunda lei de Newton fornece o estado de uma partícula macroscópica, a equação de Schrödinger fornece o estado de uma partícula quântica.

Em virtude de princípios fundamentais, há uma renúncia, no universo dos quanta, à definição de espaço e velocidade, e de trajetória, de acordo com a interpretação da complementaridade, de Bohr. Não se trata, portanto, de uma ignorância, e/ou insuficiência de informações e/ou imperfeições tecnológicas. Bohr assume tais limitações como princípios. Assim, com a complementaridade, há uma indeterminação fundamental na Física, expressa pela limitação de uso simultâneo de certos conceitos clássicos, imposta pelo quantum de ação.

### ***1.2.3. O argumento EPR e a resposta de Bohr***

O período de maior adesão à complementaridade ocorreu entre 1927 e 1935. O ápice da polêmica, dentro deste período, ocorreu em 1935, com crítica de Einstein, juntamente com seus colaboradores Podolsky e Rosen, num artigo intitulado “A descrição da realidade física fornecida pela Mecânica Quântica pode ser considerada completa?”.

É preciso analisar esse argumento, bem como a resposta de Bohr, no mesmo ano, para compreender que certos aspectos da controvérsia podem ser muito fecundos como estratégias de ensino acerca de conceitos que carecem de trivialidades.

Descrito sumariamente, o experimento pensado por Einstein consistia em um sistema composto de duas partículas que interagem e, em seguida, separam-se. Mede-se, então, a posição de uma das partículas e, com essa informação mais o formalismo matemático da própria Mecânica Quântica que descreve o sistema das duas partículas, pode-se prever o valor da mesma grandeza (posição) para a outra partícula, que não foi objeto de medição. Pode-se, contudo, optar por medir a quantidade de movimento da primeira partícula e, por um procedimento análogo ao anterior, seria obtida a quantidade de movimento da segunda partícula.

Note-se que nenhuma medida seria realizada na segunda partícula, de modo que ela não seria perturbada por nenhum processo de medição e, também, que a segunda partícula teria valores precisos para a posição e quantidade de movimento, algo proibitivo dentro da Física Quântica. Conclusão formulada por Einstein: “a Mecânica Quântica seria uma teoria incompleta, porque não incorporava, em seu formalismo, todas as propriedades existentes na realidade física” (Freire e Carvalho, 1997).

Bohr (1935) argumenta que a medição de uma das grandezas numa partícula não é um procedimento compatível à idéia de não perturbar o sistema, uma vez que, segundo seu ponto de vista, tais partículas formam um todo emaranhado não redutível a duas partículas independentes. Esta idéia irá definir uma propriedade denominada “ não localidade”, seguramente, uma das idéias fundamentais da Mecânica Quântica e que é conflitante com a idéia de uma realidade objetiva, independente das condições de observação. Para Bohr, portanto, a idéia de “sem perturbar o sistema”, como proposta de EPR, não levava em conta este emaranhamento. É dentro deste contexto que Bohr esclarece mais a expressão complementaridade, conforme aparece no artigo que ele escreveu em 1935, em resposta ao artigo EPR:

Na verdade, é apenas a exclusão mútua de dois procedimentos experimentais quaisquer, permitindo a definição inequívoca de quantidades físicas complementares, que fornece espaço para novas leis físicas, cuja coexistência poderia, à primeira vista, parecer irreconciliável com os princípios básicos da ciência. É precisamente essa situação, inteiramente nova à descrição de fenômenos físicos, que a noção de complementaridade tem por fim caracterizar.

(BOHR, 1935).

O argumento de Bohr, segundo vários historiadores, foi obtendo maior clareza, com o passar do tempo. Importantes comentários foram feitos por ele, a fim de esclarecer a questão:

Quanto mais claramente percebemos que é impossível formular o conteúdo da teoria quântica com a ajuda de um único tipo de representação clássica, mais admiramos a feliz intuição de Planck ao cunhar o termo ‘Quantum de ação’ que de modo tão direto indica a insuficiência do princípio de mínima ação, princípio cuja posição central na descrição clássica da natureza ele mesmo sublinhou mais de uma vez. Este princípio simboliza, por assim dizer, a peculiar relação de simetria recíproca que se dá entre a descrição espaço-temporal e as leis de conservação da energia e da quantidade de movimento...

(BOHR, 1961, p. 93 apud FREIRE Jr., 1995, p. 27).

A esse respeito ele declarou:

... nossa descrição usual dos fenômenos físicos se baseia por inteiro na idéia de que os fenômenos podem ser observados sem perturbá-los de forma apreciável... agora, o postulado quântico implica que toda observação dos fenômenos atômicos leva junto uma interação com o aparato de observação que não pode ser desprezada. Por conseguinte não se pode considerar como realidade independente, no sentido físico ordinário, nem os fenômenos nem os agentes de observação.

(BOHR, 1961, p. 53 apud FREIRE Jr., 1995, p. 28).

#### ***1.2.4. A complementaridade sob uma perspectiva realista e não positivista***

As argumentações anteriores encorajam-nos a “definir” como “visão própria da complementaridade” o reconhecimento do postulado quântico, como característica irreduzível da Física, inserido, portanto dentro de uma perspectiva filosófica que se opõe ao positivismo e

ao anti-realismo. Estamos, a propósito, em plena sintonia com o pensamento de Fock, sobre Bohr, quando, após refinar algumas idéias básicas, declara:

Conversações pessoais com Niels Bohr levaram-me à firme convicção que em realidade sua posição está muito mais próxima da materialista do que pareceria da leitura de seus artigos sobre questões gnoseológicas da Mecânica Quântica. Primeiro e principalmente, Bohr é de opinião que a natureza deva ser tomada como ela é; que nós estamos estudando a natureza e suas leis. Ele decisivamente expressa sua discordância com o ponto de vista positivista e admite plenamente a objetividade das propriedades dos objetos atômicos. No que se refere à terminologia Bohr está preparado para renunciar ao uso do termo 'interação incontrolável' que ele considera inadequado. Bohr também concorda com o fato que o princípio geral da causalidade deva ser distinguido do determinismo laplaciano, e que somente o último está em conflito com as leis da física atômica.

(FOCK, 1957. p 646 apud Freire Jr., 1999).

Apenas para contrastar o pensamento de Bohr com o pensamento tipicamente positivista de Max Born registre-se que este último declarou:

A Física Moderna tem atingido seus maiores sucessos pela aplicação do princípio metodológico segundo o qual conceitos que se referem a distinções fora do alcance de experiências possíveis não têm significado físico e devem ser eliminados.

(BORN, 1955, p. 4 apud FREIRE, 1995, p. 48-49).

“O que é ou não observável só se resolve historicamente”, registra Freire Jr. (1991). Prossegue dizendo: “Ernesto Hamburger, por exemplo, considera que, se a idéia do abandono dos não observáveis prevalecesse na orientação do desenvolvimento da física, hoje não se trabalharia com conceitos como o dos quarks” (1991).

### ***1.3. Revisão da literatura***

Os estudos e pesquisas realizados por Greca (2000) em sua tese de doutorado em Ensino de Ciências muito contribuíram para a reflexão em torno das questões de Ensino e Aprendizagem da Mecânica Quântica. Os artigos de Greca e Moreira (1999) e de Ostermann e Moreira (1999) foram também muito relevantes para esta pesquisa.

Pesquisando o conhecimento disponível na literatura científica, Greca analisando os artigos publicados, classifica-os em três grupos:

Grupo 1) concepções dos estudantes acerca de conteúdos da Mecânica Quântica;

Grupo 2) críticas aos cursos introdutórios de Mecânica Quântica;

Grupo 3) propostas de implementações didáticas.

No grupo 1, os artigos não são numerosos e aparecem principalmente em revistas da área de Ensino de Ciências. Os do grupo 2 referem-se tanto aos cursos que são ministrados no Ensino Médio como aos ministrados nos cursos universitários. Quanto às propostas de implementações didáticas, propõe a divisão em três categorias. Na primeira estão os artigos que tratam da inclusão de tópicos específicos; na segunda, os que propõem mudanças de enfoque e, por último, os que apresentam sugestões de alterações curriculares e inclusão de novas tecnologias, em particular, dos microcomputadores. As propostas de implementações didáticas, por sua vez, dividem-se em três categorias. Na primeira, propõe-se a inclusão de tópicos específicos; na segunda, mudanças de enfoque e, por último, alterações curriculares e inclusão de novas tecnologias, em particular, dos microcomputadores.

Na sua análise, Greca registra que poucas propostas foram testadas, tanto no Ensino Médio como no Universitário.

Na sua tese refere-se às pesquisas da Universidade Livre de Berlim, na Alemanha, que têm sistematicamente investigado concepções do aluno sobre Mecânica Quântica. Refere-se também aos estudos de Niedderer, em 1987.

Segundo Niedderer, os alunos usam três estratégias para entender o conceito de dualidade onda-partícula aplicado aos elétrons:

- a) consideram que os elétrons são partículas andando em linha reta;
- b) consideram os elétrons como partícula que se movimentariam numa onda, como se fossem osciladores da onda;
- c) entendem o comportamento dos elétrons a partir de uma concepção ondulatória formal.

Inclui também no seu estudo resultados de pesquisas com alunos da última série do Ensino Médio descritas por Niedderer, Bethge e Cossens. Segundo estes autores, os alunos:

- a) possuem uma imagem concreta do átomo;
- b) associam ao movimento do elétron a idéia de trajetória, a qual é definida como caminho;

c) utilizam os conceitos de conservação de energia e massa, mas não explicam a quantização da energia;

d) tendem a utilizar o conceito de trajetória no contexto da ignorância acerca de como são, exatamente, os sistemas quânticos.

Greca também descreve os estudos de Fischler e Lichtfeldt (1992) que pesquisaram sobre concepções referentes à estabilidade do átomo. O público alvo consistia de 240 alunos de cursos básicos e intensivos da última série do ensino secundário alemão.

Neste estudo, os pesquisadores registraram que os alunos acreditavam que os elétrons estivessem em órbitas fixas e circulares e que a força centrífuga e a força coulombiana estão em equilíbrio (63% dos alunos evidenciaram esta concepção).

Além disso, os alunos revelaram que a distância dos elétrons aos prótons eram atribuídas a repulsão entre cargas (23%) e mais, uma parcela dos alunos acreditava que os elétrons se encontram fixos ou em movimento numa casca firme (8%).

Um outro estudo referenciado por Greca é o de Petri e Needderd (1998) que implementaram um curso de 80 aulas, tomando por base a proposta didática de Fischler e Lichtfeldt (1992).

Ao iniciar o curso, o alunado associava o modelo atômico ao modelo planetário. Após cinco semanas, depois de estudar o efeito fotoelétrico, a difração de elétrons e o princípio da Incerteza, prevalecia, ainda, a idéia de elétrons como partículas clássicas. Entretanto mais adiante, o estudante deixa de pensar no elétron como partícula com órbitas, e passa a falar em estado do elétron. Finalmente, utilizando-se de um software que permitia calcular configurações eletrônicas, o estudante passou a desenvolver a concepção de nuvem eletrônica, mas em entrevistas fica registrado que persiste a visão determinista de mundo.

Uma outra experiência relatada por Greca foi a de Unal e Zollman (2001) que analisaram respostas de estudantes norte-americanos solicitados para descrever, por escrito, o átomo. Estes alunos já tinham tido algum contato com a Física e apenas 3% fizeram referência a modelos verdadeiramente quânticos.

Diferentemente das pesquisas mencionadas, Gil Perez, por sua vez, também referenciado por Greca, buscou evidências de haver ou não consciência dos alunos acerca de diferenças mais fundamentais entre a Física Clássica e a Física Moderna (Gil Perez, et al. Física Moderna em la enseñanza secundaria: una propuesta fundamentada Y unos resultados, Revista Española de Física, v.3, n.1, p.53-58, 1989). Em 1993, aplicaram questionários, nas últimas séries do Ensino Médio, a 536 estudantes espanhóis. Registrou-se que 85% a 93% desconhecem as diferenças fundamentais entre a Física Clássica e a Física Moderna.

Merece referência a crítica de Kragh aos cursos introdutórios de Mecânica Quântica, quanto ao papel da história da ciência no ensino de ciências. Na sua interessante reflexão a esse respeito, Kragh sustenta que o impacto da ciência só pode ser compreendido através de uma contextualização histórica. Além disso, defende que é necessário que se conheça a natureza da ciência, acreditando que, por um viés histórico, torna-se possível compreender como avançam os conhecimentos científicos. Faz, porém, a ressalva de que muitas vezes procura-se realizar uma abordagem histórica como forma de atenuar o “peso” das chamadas “ciências duras”. Ele próprio declarou que: “por razões práticas, não é possível (nem desejável) ensinar um tópico científico exclusivamente através de uma perspectiva histórica” (apud Greca, 2000). Kragh critica também as distorções que uma abordagem histórica podem propiciar. Registra que em muitos livros didáticos a história é colocada de modo “a convencer os estudantes de que a conclusão a que chegaram os físicos no passado é a única racional e a única que os estudantes modernos devem aceitar”. Esta história é descrita na literatura como quase-história. Tomando as devidas precauções implícitas na crítica de Kragh, ainda assim, segundo sua própria visão, é conveniente apresentar a dimensão histórica da ciência.

Além de todas as observações apresentadas, convém lembrar que há críticas de dimensão científica e filosófica que insinuaram a existência de um ensino tendencioso para afirmar a interpretação ortodoxa como a única, ou mesmo como a mais coerente. Cushing (1998), por exemplo, sustenta não haver razão para preferir a interpretação ortodoxa em relação ao programa de variáveis escondidas, tendo em vista que ambas prevêem os mesmos resultados no domínio não relativístico. Bastos Filho é um outro exemplo (1994) de pesquisador que critica o ensino de Mecânica Quântica embasado na interpretação ortodoxa.

#### ***1.4. Propostas didáticas para o Ensino Médio***

Greca (2000) na sua tese classifica as propostas didáticas do Ensino Médio em quatro categorias. Acredita-se, contudo, que tais propostas não são necessariamente excludentes, embora em alguns casos elas possam ser conflitantes, uma com as outras.

##### ***1.4.1. Histórico-filosóficas***

Incluem-se nessa categoria todos aqueles que desejam, através de uma abordagem histórica e epistemológica, destacar o impacto cultural advindo das inovações científicas

trazidas pela Mecânica Quântica. Gil Perez (1989) e sua equipe, por exemplo, rejeitam a idéia de apresentar tópicos da Física Moderna, sem estabelecer, criticamente, a existência de uma ruptura entre os conceitos clássicos e modernos. Destaca que “a introdução da Física Moderna pode contribuir para fornecer uma imagem mais correta de toda a Física e da própria natureza do trabalho científico”. As pesquisas de Perez já assumiam anteriormente a premissa de que

As dificuldades de aprendizagem da Física Moderna não são de natureza diferente da aprendizagem da Física em geral e uma didática que coloque o aprendizado com uma orientação construtivista traduzirá uma sensível melhora do aprendizado, tanto da Física Clássica como da Física Moderna.

(CARVALHO NETO, R.A., FREIRE Jr. O. e MOURA ROCHA. J. F., 1999, p. 59).

Gil Perez e Solbes realizaram atividades com 180 alunos da Espanha e relataram que somente um terço dos estudantes apresentaram uma compreensão errada acerca da dualidade onda partícula e do princípio da incerteza.

Freire et al (1995) sustentam a introdução da Física Clássica e da Física Moderna como parte da cultura humana, um “produto histórico da nossa civilização e não como uma disciplina que só tem expressões com significado matemático”. Carvalho et al (1995), em continuação, relatam experiência didática, alterando a abordagem tradicional da Mecânica Clássica, introduzindo, para tanto, a idéia de determinismo implícita na Segunda Lei de Newton, além de levantar concepções alternativas acerca do significado da probabilidade, ao introduzir o princípio de Heisenberg, de modo qualitativo.

Apoiados no pressuposto de que as ações de intervenção devem adequar-se às possibilidades concretas das pessoas e que os significados são construídos pelos sujeitos, decidiu-se continuar com a introdução de conceitos quânticos no ensino da Física no Ensino Médio, apesar da existência de dificuldades de aprendizagem. E é esta experiência de ensino, gestada em muitas microdecisões, que será relatada com o objetivo de responder ao problema formulado nesta pesquisa.

#### ***1.4.2. Estabelecimento de elos com a Física Clássica***

O essencial dessa segunda classe de propostas é a idéia de apresentar, o quanto antes, aspectos comuns entre a Física Clássica e a Física Moderna. Cuppari, Robutti e Violino (1997) sugerem, por exemplo, utilizar o espaço de fase para chegar ao quantum elementar  $h$ ,



para, em seguida, evoluir para a aprendizagem do Princípio da Incerteza. Ao avaliarem resultados parciais da proposta, em curso oferecido para alunos do Ensino Médio em Torino, Itália, os referidos autores sustentam que os alunos não apresentavam dificuldades para compreender, de modo qualitativo, o movimento no espaço de fase. Disso resultou a aceitação de granularidade. Jones (1991) se contrapõe a uma abordagem histórica em detrimento da lógica. Propõe o estudo dos modos de oscilação e das ondas estacionárias como ponte didática para o estudo da difração de elétrons.

### ***1.4.3. Apresentação da Mecânica Quântica sem elos com os conceitos clássicos***

A essência dessa proposta, de acordo com a interpretação atribuída nessa pesquisa, consiste na idéia de que a incorporação de uma percepção da fenomenologia quântica requer, de maneira drástica, o afastamento de analogias clássicas, tendo em vista que ambas as teorias estão situadas num quadro conceitual radicalmente diferente, apesar de haver, em alguns assuntos, uma terminologia similar. Os elétrons, por exemplo, não são ondas clássicas. Apesar disso se fala em Mecânica Ondulatória, referindo-se ao formalismo de Schrödinger. O grupo da Universidade Livre de Berlim (Fischler & Lichtfeldt, 1991, 1992) será o nosso primeiro exemplo dos adeptos dessa proposta. Em particular, eles propõem que sejam evitadas as referências clássicas e sugerem que se inicie o estudo do efeito fotoelétrico, tratando do comportamento dos elétrons ejetados, e não dos fótons. Sugerem que, o quanto antes, apresente-se o princípio da Incerteza, além de propor que não sejam feitas referências ao átomo de Bohr e que, neste momento, se fale do emaranhamento quântico.

A proposta de Niedderer & Deylitz (1999) situa-se nessa mesma classificação, de oposição às analogias clássicas. Tal proposta foi implementada, durante 10 anos, para 26 alunos que cursavam o último ano do ensino secundário alemão, numa disciplina de Física atômica e nuclear. A proposta inclui um estudo qualitativo da equação de Schrödinger através de recursos computacionais. Além disso, pavimentam caminho para, de posse dos modelos quânticos examinados, viabilizar o estudo de fenômenos usualmente tratados na Física do estado sólido e na Química.

O curso abordou as idéias de átomo, função de onda, noção de estado, equação de Schrödinger, transferência do conteúdo teórico da equação de Schrödinger para a compreensão dos resultados de medição e átomos superiores. A escala de pontuação foi de 0 até 2. Os autores relataram que, somente em um dos tópicos, os alunos conseguiram um bom

rendimento. O entendimento dos aspectos matemáticos mostrou-se, segundo os próprios autores, insatisfatório. A média nas avaliações referentes à compreensão de algumas relações entre o modelo teórico e suas aplicações foi de 0.7.

Os autores, finalmente, concluíram que a maioria dos estudantes não obteve uma satisfatória compreensão da descrição teórica posta em prática, mas ressaltam que muitos deles obtiveram um bom entendimento de importantes conceitos quânticos.

Tais classificações não são necessariamente excludentes. Uma proposta de ensino, por exemplo, que aborde a Mecânica Quântica com ênfase nos conceitos essencialmente quânticos (sem elos com a Física Clássica), pode ser facilitada quando se opta, também, por uma abordagem histórico-filosófica. Evidentemente que, neste exemplo dado, a abordagem histórica não seria aquela tradicional, que enfatiza a velha teoria quântica. Em sintonia com a proposta de privilegiar idéias essencialmente quânticas, por exemplo, seria o caso de examinar as inovações conceituais advindas do período 1925-1927 e outros momentos posteriores. A fim de evitar confusões e distorções, é preciso esclarecer ainda que abordar a Mecânica Quântica sem elos com a Física Clássica, nada tem a ver com evitar que se mostre as limitações conceituais da Física Clássica no domínio atômico e sub-atômico. A esse respeito, aliás, parece razoável acreditar que enfatizar fecundamente as idéias essencialmente quânticas, tais como o Princípio da Incerteza, o Princípio da Superposição, e a dualidade onda partícula, é também, num certo sentido, evidenciar as limitações da Física Clássica no domínio atômico e sub-atômico.

Parece, finalmente, que a abordagem conceitual das idéias essencialmente quânticas devam fazer parte de um contexto educacional que permita ao aluno perceber a influência do impacto científico, tecnológico e filosófico da Física Quântica para a cultura do século XX. Registre-se ainda que esta dimensão cultural, dificilmente seria compreendida, desvinculada de um estudo conceitual. Parece, portanto, que a idéia de reduzir o estudo da Mecânica Quântica ao tradicional ensino histórico desta teoria, tão presente nos livros didáticos, em quase nada contribui para a alfabetização científica do cidadão.

### ***1.5.1 O referencial teórico: a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel***

Neste tópico serão apresentados e discutidos alguns conceitos fundamentais da teoria da aprendizagem significativa, de David Ausubel, considerando que o objeto principal desta pesquisa dialoga com esse referencial teórico.

A Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS), na construção do seu quadro teórico, pressupõe que o conhecimento prévio existente na estrutura cognitiva exerce, necessariamente, papel crucial na retenção de novos significados. A possibilidade de aprender um conceito, de maneira significativa, remete a uma possibilidade de interação da nova informação com aspectos específicos da estrutura cognitiva do aprendiz.

A essência do processo de aprendizagem significativa é que idéias simbolicamente expressas sejam relacionadas de maneira substantiva (não literal) e não arbitrária ao que o aprendiz já sabe, ou seja, a algum aspecto de sua estrutura cognitiva especificamente relevante (um subsunçor) que pode ser, por exemplo, uma imagem, um símbolo, um conceito ou uma proposição já significativos.

(AUSUBEL 1980, p. 34, MOREIRA, 1983, p. 25).

Trata-se de uma teoria cognitiva de aprendizagem verbal com fortes implicações para o ensino, apesar de aprendizagem e ensino constituírem campos de investigações que guardam uma certa independência entre si, conforme já alertava o próprio Ausubel, ao retomar a idéia de que a aprendizagem e o ensino são fenômenos identificáveis separadamente (Ausubel 1980). É possível aprender, por exemplo, sem haver ensino. A afirmação anterior, porém, não é conflitante com a idéia que usualmente se defende de que o ensino pode facilitar a aprendizagem.

Sabe-se que os referenciais teóricos de aprendizagem apresentam níveis diferenciados de complexidade, mas o que influencia a escolha do pesquisador é a consciência de suas motivações, o conhecimento da teoria e a suposição de que sua aplicabilidade poderá ser confirmada no contexto da pesquisa. Além disso, três fatores, basicamente, articulados entre si, contribuíram para a escolha:

a) a concordância com a idéia ausubeliana de que a estrutura cognitiva do aprendiz tem papel fundamental na retenção de novos significados (supondo que as idéias presentes na estrutura cognitiva tenham sido aprendidas de maneira significativa);

b) no CAV predominam aulas expositivas, como em nosso país, de modo geral. Ausubel sustenta que quando o objetivo é ensinar para que se facilite a aprendizagem significativa deve-se considerar interessante a opção de aulas expositivas, embora a aprendizagem significativa também possa ocorrer por aprendizagem por descoberta, não sendo este o caso. Registre-se que a aprendizagem receptiva verbal não deve ser associada a aulas não participativas e passivas, considerando que do ponto de vista ausubeliano não há contra indicação de aulas expositivas para aprendizagem significativa do material apresentado na sua forma final.

Ao definir o problema da pesquisa, a proposta ausubeliana de hierarquizar os conceitos, começando pelo mais geral e inclusivo, visando facilitar a aprendizagem significativa, através de uma dinâmica que possa promover tanto a diferenciação progressiva como a reconciliação integrativa, foi objeto de reflexão e estudo. As experiências vivenciadas anteriormente em escolas de ensino médio sinalizavam que a aprendizagem significativa de Ausubel poderia ser útil para responder ao problema de pesquisa. Tendo como suporte a teoria cognitiva de Ausubel, foram realizadas algumas experiências em sala de aula. Ao tratar das leis de Newton, o determinismo clássico implícito nesta Mecânica foi o enfoque inicial, para, em seguida, tratar de descrições particulares (Carvalho Neto et al, 1995).

Não há dúvida de que começar pelo mais geral, em áreas de fronteiras, como Mecânica Quântica, é tarefa complicada. Mesmo assim, definiu-se começar com as idéias mais inclusivas possíveis. No primeiro dia de aula, foi abordado o contraste das previsões clássicas com as previsões fundamentalmente probabilísticas da Mecânica Quântica, assinalando ou enfatizando que na primeira teoria o uso de probabilidade pode ser eliminado, enquanto que na segunda não. Trata-se de uma fase laboriosa e complexa que exige tempo, porém mais adiante este tempo é recuperado com o domínio de conceitos básicos pelo aluno, permitindo-lhe avançar nos conteúdos e, principalmente, na capacidade de estabelecer diferenciações. Os mapas conceituais desenvolvidos posteriormente surgiram dentro de um contexto ausubeliano, onde Joseph D. Novak e David B. Gowin, apoiados na Teoria da Aprendizagem Significativa, propõem uma hierarquia conceitual com os conceitos mais inclusivos no topo desta hierarquia. Silva (1999) faz uma adaptação de um roteiro do Moreira (1992) e propõe identificar e listar os principais conceitos que irão compor o mapa, ordená-los por grau de generalidade, interligar os conceitos através de linhas utilizando conectivos que interliguem tais conceitos, para, em seguida, examinar o resultado (isso quando o mapa é feito pelo aluno, para fins de avaliação).

### ***1.5.1. A estrutura cognitiva***

Retomando a importância atribuída ao papel da estrutura cognitiva em relação à aprendizagem de uma nova informação, cabe lembrar o mais importante comentário de Ausubel, no prefácio da obra *Psicologia Educacional*, quando afirma:

Se eu tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um único princípio, diria isto: o fator isolado mais importante que influencia a aprendizagem significativa é

aquilo que o aprendiz já conhece. Descubra o que ele sabe e basei nisso os seus ensinamentos.

(AUSUBEL, 1980, p. VIII).

Saber “o que o aluno conhece” corresponde a conhecer a sua “estrutura cognitiva”, o que está muito longe de ser simples. A aplicação de pré-testes, isoladamente, dificilmente permite o acesso à “estrutura cognitiva do aprendiz”, apesar da difusão de ingênuas crenças de se poder “fotografar” o que se passa na mente dos estudantes.

Nesse contexto, convém analisar se há necessidade de conhecer a estrutura cognitiva do aprendiz a fim de viabilizar um ensino fecundo. O bom senso e o domínio de conteúdo não seriam suficientes para oferecer um ensino adequado? Não seria, no limite, um modismo, ou uma atitude impensada a de reproduzir uma prescrição ausubeliana?

É por acreditar nos princípios propostos por Ausubel que foi tomada a decisão de aplicá-los em sala de aula, observando e analisando os resultados de aprendizagem dos alunos constituintes desta pesquisa.

Segundo Ausubel,

A aquisição, pelo aprendiz, de um corpo de conhecimento claro, estável e organizado constitui mais do que apenas o principal objetivo a longo prazo da atividade de aprendizagem na sala de aula ou a principal variável dependente (ou critério) a ser usada na avaliação do impacto de todos os fatores que influenciam a aprendizagem e a retenção. Este conhecimento (estrutura cognitiva), uma vez adquirido, é também, por direito nato, a variável independente mais significativa que influencia a capacidade do aprendiz em adquirir mais conhecimentos novos no mesmo campo.

(AUSUBEL, 1980).

Aplicar na prática pedagógica o referido princípio é tarefa complexa, exigindo reflexão e ações contínuas de reestruturação do corpo de conhecimento, além do acolhimento das observações e comentários críticos dos alunos, para que o professor possa identificar e organizar os conceitos novos, numa tal seqüência (que não é única), que facilite a aprendizagem significativa. O próprio Ausubel declara:

Uma vez que o problema organizacional substantivo (identificação dos conceitos organizadores básicos de uma dada disciplina) está resolvido, a atenção pode ser dirigida aos problemas organizacionais programáticos envolvidos na apresentação e no arranjo seqüencial das unidades componentes. Aqui, hipotetiza-se, vários

princípios relativos à programação eficiente do conteúdo são aplicáveis, independentemente da área de conhecimentos.

(AUSUBEL, 1980, MOREIRA, 1983, p. 19).

### ***1.5.2. Aprendizagem significativa***

Quando uma nova informação ancora-se de forma não arbitrária e substantiva (não literal) a um aspecto relevante da estrutura cognitiva, ocorre, então, a chamada aprendizagem significativa. A ocorrência desta aprendizagem pressupõe uma interação (e não simplesmente uma associação arbitrária) entre um ou mais aspectos relevantes da estrutura cognitiva (Ausubel chama de subsunçor) com a nova informação. Os aspectos relevantes da estrutura cognitiva do aprendiz podem ser imagens, símbolos, conceitos ou proposições.

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

No processo de aprendizagem significativa ocorre uma modificação tanto do significado atribuído à nova informação como também da própria estrutura cognitiva do aprendiz, tendendo, esta última, a ficar cada vez mais inclusiva, na medida em que novas interações ocorrem, do mesmo modo que a nova informação é modificada. Assim, por exemplo, só é possível aprender de maneira significativa que a Mecânica Clássica é preditiva quando se sabe, previamente, o que é a predição física. Quando ocorre esse aprendizado a idéia de predição, por sua vez, se torna mais inclusiva. Ainda como exemplo convém registrar que apresentar, nesta seqüência, o aspecto preditivo da Mecânica Quântica implica nova alteração do subsunçor predição, tornando-o ainda mais inclusivo.

Apoiado na idéia de desenvolvimento cognitivo de Ausubel, Moreira sustenta que

um processo dinâmico no qual novos e velhos significados estão constantemente interagindo e resultando em uma estrutura cognitiva mais diferenciada que tende a uma organização hierárquica, na qual os conceitos e proposições mais gerais ocupam o ápice da estrutura e abrangem, progressivamente, proposições e conceitos menos inclusivos, assim como dados factuais e exemplos específicos.

(MOREIRA, 1983, p. 51).

Quando a nova informação associa-se de forma arbitrária e literal, sem haver interação com conceitos relevantes existentes na estrutura cognitiva, fala-se em aprendizagem mecânica ou automática.

### ***1.5.3. Condições para a ocorrência da Aprendizagem Significativa***

Existem duas condições necessárias para a ocorrência de aprendizagem significativa: a existência de um material potencialmente significativo e a disponibilidade de uma estrutura cognitiva adequada que permitia a subsunção. Segundo Ausubel

a aquisição de significados enquanto fenômeno natural ocorre em seres humanos particulares – não na espécie humana de uma maneira mais geral. Portanto, para que aprendizagem significativa ocorra de fato, não é suficiente que as informações sejam simplesmente relacionadas (de forma não arbitrária e substantiva) a idéias correspondentemente relevantes no sentido abstrato do termo (a idéias correspondentemente relevantes que alguns seres humanos estão aptos a aprender sob circunstâncias apropriadas); é também necessário que o conteúdo ideacional relevante esteja disponível na estrutura cognitiva de um determinado aluno. Parece-nos, claro, portanto, que, na medida em que são de nosso interesse os produtos da aprendizagem significativa em sala de aula, a disponibilidade e outras propriedades importantes, de conteúdo relevante para diferentes estruturas cognitivas dos alunos, constituem os determinantes e as variáveis mais decisivas do potencial significativo.

(AUSUBEL, 1980, p. 37).

Em continuação, Ausubel frisa que os critérios para configurar o material como logicamente significativo resume-se, basicamente, à relação não arbitrária e à relação não substantiva.

### ***1.5.4. Significados compartilhados***

Para ocorrer a aprendizagem significativa é necessário que o significado lógico do material se converta em significado psicológico, que é idiossincrático. Seria coerente, então, do ponto de vista teórico-metodológico, supor que possam existir significados compartilhados? Afinal, ao longo desses dois anos de pesquisa, houve também uma tentativa de “negociar” significados em um universo de 300 alunos. Ao longo do estudo da teoria cognitiva, foi compartilhado e integrado neste estudo o pressuposto de Ausubel que diz:

Quando um indivíduo aprende proposições logicamente significativas, essas perdem automaticamente seu sabor não idiossincrático. O sentido psicológico é sempre um

fenômeno idiossincrático. Todavia, sua natureza idiossincrática não exclui a possibilidade da existência de significados sociais ou daqueles que são compartilhados por diferentes indivíduos. Os diversos significados que diferentes membros de uma dada cultura atribuem aos mesmos conceitos e proposições são, de uma maneira geral, suficientemente semelhantes para permitirem a compreensão e comunicação interpessoal. Como pôde ser observado anteriormente, essa homogeneidade de significados compartilhados dentro de uma determinada cultura, e mesmo entre culturas afins, reflete o mesmo significado lógico inerente aos conceitos e proposições dotados de logicidade e os diversos aspectos da experiência ideacional, comum a diferentes estruturas cognitivas.

(AUSUBEL 1980, p. 42).

Assim, considerou-se, em termos teóricos-metodológicos, a possibilidade fecunda de estender para um grupo de características sócio-culturais e econômicas similares a idéia de que o subsunçor “predição” encontra-se disponível de forma razoavelmente estável na estrutura dos entrevistados.

### ***1.6. Desenho do estudo, material e métodos***

Trata-se de uma pesquisa qualitativa de caráter descritivo-analítico que visa à utilização dos conhecimentos produzidos com a finalidade de intervir em situações percebidas passíveis de evolução conceitual (Moreira, 1983), onde pesquisador e pesquisados assumem voluntariamente uma posição reativa. São também chamados de pesquisa-ação-intervenção os estudos assim caracterizados.

Por outro lado, é necessário destacar o aspecto etnográfico da pesquisa, pois as entrevistas foram analisadas e interpretadas. Bogdan e Biklen esclarecem que a etnografia consiste numa descrição profunda e destacam que

os objetivos do etnógrafo são os de apreender os significados que os membros da cultura têm como dados adquiridos, e, posteriormente, apresentar o novo significado às pessoas exteriores à cultura. O etnógrafo preocupa-se essencialmente com as representações.

(Bogdan e Biklen, 1994, p. 59).

Uma descrição bastante razoável como ilustrativa da nossa prática etnográfica pode ser avaliada pelas palavras de André (2003):



O texto base não é mais a vinheta narrativa, mas a transcrição do vídeo. A possibilidade de ver e rever o vídeo, discutir e confrontar diferentes interpretações vai tornando a análise cada vez mais refinada, até atingir uma aproximação mais precisa ao objeto pesquisado, conforme aconteceu nesta pesquisa. A combinação das tomadas de vídeo com as anotações de campo aperfeiçoa ainda mais o trabalho, favorecendo análises e interpretações mais consistentes. O vídeo por si só é documento vivo de uma situação e como tal pode ser visto, analisado, discutido, tornando-se mais público que as anotações de campo.

(ANDRÉ, 2003, p. 119).

O plano de estudo e pesquisa foi assim organizado:

**FASE 1** Seleção do assunto, definição e formulação do problema, objetivos e população alvo;

**FASE 2** Revisão da literatura, acervo de conhecimentos atualizados sobre o problema, seleção e organização de material didático e utilização de mapa conceitual como estratégia de ensino;

**FASE 3** Definição da metodologia e técnicas de coleta e tratamento de dados;

**FASE 4** Análise, discussão e interpretação dos resultados;

**FASE 5** Conclusões.

As Fases 1 e 2 estão descritas na Introdução e no capítulo 1. Entretanto é importante acrescentar algumas informações sobre a população-alvo, alunos do 3º ano do Ensino Médio do CAV, e o protocolo de pesquisa firmado, considerando-se como critério de inclusão o consentimento do colégio, da família, e do próprio aluno.

A condição de professor do CAV, há cerca de dez anos, participando dos acontecimentos diários, facilitou o planejamento e a execução desta pesquisa. Por outro lado, o pesquisador tem de estar atento, para assumir uma atitude aberta às manifestações dos pesquisados, não como o sujeito que sabe, mas o que busca compreender a cultura, as práticas e experiências pesquisadas.

A confiança entre escola, aluno e família foi fundamental neste processo. Foi firmado um protocolo de pesquisa, garantindo aos alunos que seus nomes não seriam, sob nenhuma hipótese, citados na dissertação, por razões éticas, da mesma forma, que as imagens feitas estariam restritas ao uso do pesquisador em suas análises.

Esses alunos, fonte direta dos dados, bem como seus pais, foram devidamente esclarecidos sobre os objetivos da pesquisa e instrumentos, conscientizando-os da importância

de sua participação como sujeitos que elaboram conhecimento, identificam seus problemas e necessidades.

### FASE 3 – Métodos e técnicas de coleta e tratamento de dados

Foram adotados os seguintes procedimentos metodológicos: pré-testes, entrevistas prévias, pós-testes e entrevistas.

Os pré-testes e pós-testes aplicados revelaram informações importantes, porém insuficientes para apreender os significados prévios atribuídos às predições da Mecânica Clássica e às predições da Mecânica Quântica, considerados como conceitos alternativos e, por isso mesmo, muito resistentes às mudanças. Em nenhum momento, cogitou-se apagar esses significados ou substituí-los, arbitrariamente, por novos e “adequados”, mas interagir de modo substantivo e não literal para experimentar novas situações que possibilitassem vivenciar outros significados, sua aquisição e evolução conceitual, conforme assinalado anteriormente.

Quanto às entrevistas, o objetivo inicial foi pesquisar “o que o aluno já sabia” sobre o aspecto preditivo da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica, em sintonia com o referencial teórico da aprendizagem significativa de Ausubel. Embora não se tenha partido da observação de casos singulares, objetivando uma generalização tipicamente positivista e imprópria, foi atribuído um peso crucial e essencial na questão da observação e da conversação. Os dados foram, portanto, tratados de maneira indutiva. Não foi assumida uma hipótese de pesquisa a ser confirmada, partilhando-se da proposição Bogdan e Bicklen que a “preocupação central não é a de se os resultados são susceptíveis da generalização, mas sim a de que outros contextos e sujeitos a eles podem ser generalizados”.

A necessidade de uma atenção e concentração especiais exigiu que o número de entrevistados fosse limitado para dois alunos por turno, em média. Na entrevista, procurou-se criar uma atmosfera de confiança, respeitando-se as limitações do entrevistado, tentando-se aproveitar ao máximo as referências relatadas e as representações dos conceitos, a fala e o silêncio. Thiollent (1980) refere-se a uma “atenção flutuante” e a descreve enfatizando que

o entrevistador precisa estar atento não apenas (e não rigidamente, sobretudo) ao roteiro preestabelecido e às respostas verbais que vai obtendo ao longo da interação. Há toda uma gama de gestos, expressões, e entonações, sinais não verbais, hesitações, alterações de ritmo, enfim, toda uma comunicação não verbal cuja

captação é muito importante para a compreensão e a validação do que foi efetivamente visto.

(THIOLLENT, 1980 apud ALVES-MAZZOTI, 2004).

Na sala de vídeo não foi permitida a presença de colegas, a fim de evitar perturbações na entrevista, desviando o foco e concentração do entrevistado.

No que se refere ao tratamento dos dados coletados durante o processo de pesquisa, conjunto de operações distintas e sucessivas para a compreensão do problema, objeto desta investigação, alguns resultados de desempenhos que aparecem em apêndices, conforme serão citados, foram importantes apenas como índices que, em alguns momentos, foram balizadores nas entrevistas, como fontes fundamentais da pesquisa qualitativa. Moreira (1988), inclusive, já alertava sobre um erro metodológico quando disse:

Na verdade, é um erro metodológico querer analisar dados qualitativos sob um referencial estritamente quantitativo. No caso da validade e da fidedignidade das entrevistas clínicas é preciso desprender-se dos significados quantitativos desses conceitos e procurar, como fazem Lecopte e Goetz, os significados que tais conceitos têm no contexto da investigação qualitativa. Significados são sempre contextuais.

(MOREIRA e DOMINGUEZ, 1989).

Procurou-se minimizar as perturbações que pudessem introduzir vieses na pesquisa. Os técnicos presentes não pareciam a meu ver interferir nas respostas, uma vez que tão logo ligavam o equipamento se retiravam do local, de maneira bastante natural.

O processo de escolha foi, inicialmente, aleatório. Uma vez aceito, o contato seguinte passava a ser entre a escola (através da vice-diretoria) e pais ou responsáveis. Todas as famílias consultadas autorizaram seus filhos e filhas a ceder entrevistas em turno oposto ao do ensino.

Do ponto de vista teórico-metodológico, foi bastante significativo o tempo dedicado à preparação do material didático, discutido em caráter obrigatório com os alunos, para buscar dar estabilidade aos conceitos mais inclusivos já mencionados.

#### FASE 4 – Análise, discussão e interpretação dos resultados

Considerando que se trata de pesquisa qualitativa, os acontecimentos não são fatos isolados, fixos, analisados e interpretados em um momento da observação. Nesse processo, o sujeito observador analisa e compreende os sentidos das comunicações, os conteúdos

explícitos ou subtendidos, com o objetivo de ampliar a compreensão das representações dos alunos sobre o aspecto preditivo da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica.

Pode-se também perceber que esta pesquisa enquadra-se em todas as características que Bogdan e Bicklen consideram como marcantes em uma pesquisa qualitativa:

1. na investigação qualitativa a fonte direta de dados é o ambiente natural, constituindo o investigador o instrumento principal;

2. a investigação qualitativa é descritiva;

3. os investigadores qualitativos interessam-se mais pelo processo do que simplesmente pelos resultados ou produtos. Os investigadores qualitativos tendem a analisar os seus dados de forma indutiva;

4. o significado é de importância vital na abordagem qualitativa.

#### FASE 5 – Conclusões

Devem incluir uma síntese das discussões desenvolvidas no corpo do trabalho e a avaliação dos resultados obtidos em relação ao problema proposto como objeto de estudo, além de recomendações sobre a possibilidade de transferibilidade das conclusões a outros contextos.

**CAPÍTULO 2**  
**FASE EXPLORATÓRIA: ANÁLISE, DISCUSSÃO**  
**E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS**

## CAPÍTULO 2

### *Fase exploratória: análise, discussão e interpretação dos dados.*

Considerando que o processo de pesquisa qualitativa pressupõe que há diferentes possibilidades de programar sua execução, foram planejados dois momentos de trabalho distintos, mas correlacionados internamente. Neste capítulo, será descrito e analisado o primeiro momento realizado em 2004, que pode ser definido como pesquisa exploratória, porque teve como finalidade identificar idéias pré-existentes na estrutura cognitiva dos alunos, conforme a teoria de Ausubel, sobre o aspecto preditivo da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica. Este inventário – síntese do conhecimento prévio dos alunos sobre o assunto foi fundamental para definição das estratégias escolhidas para o segundo momento, tendo em vista a busca de resposta para o problema formulado nesta pesquisa.

#### ***2.1. Considerações sobre o curso de Física do CAV/3ºano do ensino médio***

É importante registrar que os conteúdos de Física, no terceiro ano do CAV, têm sido ensinados por dois professores que dividem suas atribuições. No ano de 2004, ficou sob minha responsabilidade o ensino de Mecânica Clássica, das Oscilações, da Ondulatória, da Óptica e da Mecânica Quântica. A Termodinâmica, o Eletromagnetismo, noções da teoria da Relatividade Restrita, e da Teoria da Relatividade Geral, por sua vez, são ensinadas por outro professor. Registre-se ainda que a Mecânica Clássica e a Termodinâmica são teorias abordadas sob a forma de revisão, tendo em vista que já foram ensinadas no primeiro e no segundo ano do Ensino Médio. O mesmo acontece com parte significativa da Mecânica dos Fluidos.

Esta divisão de conteúdos, no terceiro ano, entretanto, não pode e nem deve ser rígida, tendo em vista que à medida que o curso vai avançando, as fronteiras entre os conteúdos diminuem e, em determinados momentos, praticamente desaparecem. À medida que o tempo passa, as reflexões e as resoluções de problemas mais gerais vão requerendo, naturalmente, uma estreita articulação entre as diversas teorias físicas. Registre-se, ainda, que o CAV vem realizando, inclusive ao longo de séries anteriores ao Ensino Médio, um trabalho envolvendo os professores dentro de uma perspectiva interdisciplinar. As revisões integradas, por exemplo, que são feitas no terceiro ano do Ensino Médio do CAV, culminam, no caso

específico das Ciências Naturais, com a entrada simultânea dos professores de Física, Química e Biologia, numa mesma sala de aula.

Um outro aspecto que merece referência diz respeito à realidade do 3º ano do Ensino Médio, especialmente, alunos de escolas particulares de classe média e média alta que aspiram a uma vaga nos cursos da UFBA.

A primeira etapa do Vestibular da UFBA é de conhecimentos gerais com enfoque interdisciplinar e a segunda etapa com provas mais específicas, com enfoque, via de regra, puramente disciplinar. O candidato que opta por inscrever-se para o curso de Medicina ou de Engenharia, por exemplo, uma vez selecionado na primeira etapa terá, necessariamente, que fazer prova de Física na segunda, para ingressar na universidade. Esta peculiaridade implicou dividir os alunos por área, segundo critérios definidos pelo CAV.

Considerando que o pressuposto deste estudo é construir estratégias didáticas que modifiquem a abordagem tradicional de Mecânica Clássica, visando a aprendizagem significativa das previsões quânticas, distinguindo-as das oferecidas pela Mecânica Clássica, é importante registrar que foram identificados os alunos que assistiram ao curso de Mecânica Clássica e ao de Mecânica Quântica, tendo em vista a coleta coerente de dados. Vale acrescentar que os dados colhidos de alunos que não fizeram o curso de Mecânica Quântica também foram considerados, pois a pesquisa trata, também, da Mecânica Clássica.

Convém lembrar que o Vestibular da UFBA, na segunda etapa, tem, no campo da Física Quântica, priorizado conhecimentos referentes ao átomo de Bohr e ao efeito fotoelétrico. Esta foi uma realidade inquietante, considerados os propósitos desta pesquisa, mas era imperativo preparar os alunos para as provas de Física do Vestibular da UFBA. Estava posto um grande desafio: cumprir as exigências do vestibular, ensinando as idéias semi-clássicas da velha Mecânica Quântica, e criar estratégias de ensino para abordar os conceitos e princípios essencialmente quânticos, como o princípio da incerteza e da superposição. Nesse contexto, percebeu-se a necessidade de refletir para construir um conjunto de estratégias de ação e instrumentos que possibilitassem obter as principais informações e indicadores para se organizar o desenvolvimento da pesquisa, suas etapas de trabalho, na busca de resposta para o problema formulado. Os alunos pesquisados, em 2004, inscreveram-se em Engenharia Civil, Engenharia Elétrica, Física e Medicina.

## ***2.2. Procedimentos da pesquisa exploratória: do conhecimento prévio em Física e sobre Física***

Considerando a necessidade de reunir um *corpus* qualitativo de informações no contexto escolar, foram adotados, nesta fase, os seguintes procedimentos: pré-teste, entrevistas prévias, mini-curso de Mecânica Quântica, pós-teste e entrevistas.

### ***2.2.1. Pré-Teste – sua organização e aplicação***

Aplicado a um universo de quarenta alunos, aproximadamente, foi organizado com o objetivo de interagir com os pesquisados para recolher informações prévias dos alunos, sua compreensão e significados atribuídos ao determinismo implícito na Segunda Lei de Newton e ao conceito de trajetória, ao papel das probabilidades em Mecânica Clássica e Mecânica Quântica e, conseqüentemente, às diferenças entre as predições da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica. O pré-teste encontra-se no APÊNDICE A.

A escolha dos pré-testes para análise correspondeu a 50% dos pré-testes respondidos. O critério de escolha dos pré-testes foi definido considerando os alunos que assistiram tanto às aulas de Mecânica Clássica quanto ao Mini-Curso de Mecânica Quântica.

### ***2.2.2. Entrevistas prévias***

As entrevistas realizadas antes do mini-curso tiveram como questões as mesmas aplicadas no pré-teste, visando coletar informações mais significativas, baseadas nos discursos dos entrevistados, pressupondo que poderiam comunicar representações e análises sobre as questões formuladas no pré-teste, que foram utilizadas como roteiro das entrevistas, manifestando concepções e idéias que pudessem revelar, na interação verbal, novos significados para a compreensão dos conhecimentos prévios em Física das temáticas constituintes desta investigação. Tais questões constam do APÊNDICE A.

### ***2.2.3. Mini-Curso***

O programa do curso de Mecânica Quântica, oferecido em dezembro de 2004, abordou o efeito fotoelétrico, átomo de Bohr, efeito Compton e dualidade onda-partícula. Além disso, incluiu o ensino do princípio da incerteza e do significado fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica, sob o ponto de vista da interpretação da complementaridade, de Niels Bohr.



As principais inovações conceituais advindas da Mecânica Quântica, ocorridas no período entre 1925 e 1927, a exemplo da quebra do determinismo e do uso não eliminável das probabilidades nas previsões quânticas, foram feitas apoiadas na História da Ciência. Em síntese, serão apresentados os assuntos das aulas ministradas, em dezembro de 2004.

### ***2.2.3.1. Einstein e o efeito fotoelétrico***

No início do curso foi retomado o conceito de radiação eletromagnética na perspectiva da concepção clássica, lembrando para os alunos que a difração e interferência da luz são fenômenos tipicamente ondulatórios. Em seguida, discutiu-se interação da radiação eletromagnética com a matéria, enfatizando a inadequação do modelo ondulatório na descrição dos fenômenos de emissão. Para tanto, foram registrados, de modo qualitativo e quantitativo, os resultados de uma experiência típica, envolvendo a interação da luz ultravioleta com uma célula fotoelétrica de metal, no vácuo. Foram analisados os gráficos de intensidade de corrente coletada pelo circuito em função da diferença de potencial entre estas placas, dando destaque ao fato da tensão de corte não variar com a intensidade da luz monocromática utilizada no experimento (algo inexplicável do ponto de vista da teoria eletromagnética). Também foram analisados os gráficos de intensidade de corrente em função da tensão de corte, considerando luzes de frequências diferentes, amarela, violeta e ultravioleta, dando destaque ao fato das tensões de cortes variarem com a frequência, algo também inexplicável do ponto de vista do Eletromagnetismo, que, aliás, também não previa uma emissão quase que instantânea dos fotoelétrons. Este foi o fio condutor que deu o suporte teórico para destacar os três problemas sem solução, até o início do século XX.

A emissão dos elétrons da placa iluminada, quando acontece, se dá de maneira praticamente imediata. Por que? A intensidade de luz não interfere na energia cinética de salto dos elétrons. Por que? A frequência da luz incidente interfere na energia cinética de salto dos elétrons. Qual a razão?

Foi nesse contexto que foi introduzido o ensino dos quanta de luz propostos por Albert Einstein, como solução para os três problemas. Não foram discutidas as origens históricas do trabalho precursor de Einstein, que o levou à formulação do artigo (1905), intitulado “Sobre um ponto de vista heurístico referente à produção e conversão da luz”.

Segundo o físico alemão, o princípio heurístico consiste em considerar que a quantização de energia dos osciladores “sugere que se investigue se as leis da produção e

conversão da luz também são estabelecidas como se a luz consistisse em quanta de energia deste tipo.” (Freire Jr. e Carvalho Neto, 1997). Ao mostrar a dependência linear entre frequência e tensão de corte, analisou-se o significado físico da função trabalho.

Ao tratar deste assunto, buscou-se um cuidado especial de esclarecer aos alunos que os fótons não são partículas clássicas de luz, visando facilitar, ulteriormente, uma apropriação adequada de idéias essencialmente quânticas. Como referência para o ensino do efeito fotoelétrico foi utilizado o texto do Moysés Nussenzveig (Física Básica, vol. 4. p. 249 a 254).

### ***2.2.3.2. O átomo de Bohr***

A idéia de que cargas elétricas aceleradas irradiam foi o ponto de partida para apontar as inconsistências entre o modelo atômico de Rutherford, devidamente respaldado pelos resultados experimentais, e o Eletromagnetismo clássico. Foi dentro desse contexto de fracasso da Física Clássica para compreender a estabilidade atômica, que foram introduzidos os postulados de Bohr e as suas conseqüências. Foi também mostrado que a quantização do momento angular, aplicada ao átomo de Hidrogênio, considerando uma força coulombiana e a lei de conservação de energia, levava a energias também quantizadas, dadas pela expressão  $E = -13,6 \text{ eV} / n^2$ .

A idéia de que os elétrons poderiam mudar de “órbita”, emitindo ou absorvendo quantidades discretas de energia, foi também registrada. Todos os cálculos feitos, referentes ao átomo de Bohr, encontram-se no ANEXO A. O efeito Compton, por sua vez, não foi discutido em termos quantitativos. Apenas foi comentado que o cientista norte americano propôs atribuir ao fóton um momento linear, além de uma energia  $E = hf$  e que, desta forma, consagrou a idéia de que a radiação poderia, em alguns experimentos, manifestar propriedades corpusculares, a exemplo do que acontece no espalhamento dos Raios X no Grafite.

### ***2.2.3.3. A dualidade onda-partícula***

A idéia de que a matéria pode exibir propriedades ondulatórias, conforme propôs De Broglie, estendeu a dualidade onda-partícula da radiação eletromagnética para a matéria. Isso fez compreender que a descrição dos fenômenos, envolvendo tanto a radiação quanto a matéria, somente estará completa se forem utilizados, de forma complementar e excludente, os modelos de onda e de partícula (isto se levada em conta a interpretação da complementaridade). Os entes

microscópicos, a exemplo dos fótons e elétrons, contudo, não são nem ondas clássicas e nem partículas clássicas e este é um ponto que necessita ser esclarecido. O fóton de luz, por exemplo, ao interagir com uma célula fotoelétrica, não tem posição e quantidade de movimento, simultaneamente, bem definidos. Apesar disso, o fenômeno é considerado corpuscular. Do mesmo modo, um fenômeno, envolvendo um único elétron passando por fendas, será ondulatório, pois não se sabe por qual das fendas ele passou. O texto de referência inicialmente utilizado para tratar da dualidade onda-partícula foi o de Eisberg (Física Quântica, 1994, p. 94 a 95), que consta no ANEXO B. Alguns problemas foram resolvidos para mostrar que o valor diminuto da constante de Planck impedia de perceber os aspectos ondulatórios da matéria macroscópica, tendo em vista que o comprimento de onda  $\lambda = h/p$ , onde “h” é a constante de Planck e “p” é o momento linear. A aplicação desta inovação conceitual na construção da microscopia eletrônica foi discutida em sala, comparando o comprimento de onda associado à luz visível com o comprimento de onda associado a um elétron, relacionando a grandeza comprimento de onda com poder de resolução.

#### ***2.2.3.4. A Mecânica Quântica, de 1925 a 1927***

Em 2004, completando as 20 horas de curso, foram reservadas três horas-aula para discutir as inovações conceituais que edificaram, entre 1925 e 1927, a Mecânica Quântica. Como suporte teórico foi utilizado, na íntegra, o capítulo “Enfim a Física Quântica”, do livro “O universo dos quanta” (Freire e Carvalho, 1997).

A discussão iniciou-se a partir do êxito preditivo desta nova teoria científica em escala atômica e sub-atômica. Foi examinado, com enfoque histórico, o papel da equação de Schrödinger e a interpretação probabilística dada à função  $\psi$ , proposta por Max Born, como uma renúncia ao determinismo no domínio atômico e subatômico. O significado das probabilidades em Mecânica Quântica foi discutido, enfatizando-se a diferença entre o aspecto estatístico da Mecânica Clássica e o uso não eliminável da probabilidade nas previsões quânticas, de acordo com a interpretação da complementaridade. Foi também apresentado o princípio de Heisenberg, analisado o seu significado sobre a óptica da complementaridade, centrando-se a argumentação no significado do postulado quântico, dentro da visão bohriana. A dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza foram apresentados, em sintonia com a interpretação de Bohr, como expressões da complementaridade. Após a abordagem e discussão dos assuntos referidos, foi posta em

destaque para os alunos a falta de consenso quanto à aceitação da interpretação da complementaridade, apesar do reconhecimento consensual da comunidade científica quanto à correção desta teoria científica.

O curso foi concluído com o registro de que somos contemporâneos de uma controvérsia inconclusa, expressão esta usada por Freire Jr. (David Bohm e a controvérsia dos quanta, 1999). De modo especial, foi registrada a crítica de Einstein quanto à falta de completude da teoria quântica, dentro da sua ótica. Além disso, foi mencionada a proposta alternativa de David Bohm, de recuperar o determinismo em escala atômica. Foi registrado, também, com abordagem estritamente histórica, que o programa bohmiano obteve um tratamento relativístico insatisfatório. O capítulo “Enfim a Física Quântica”, já citado, encontra-se, na íntegra, no APÊNDICE D.

#### ***2.2.4. Pós-Teste***

O pós-teste, aplicado após o mini-curso, constou das mesmas questões do pré-teste, e foi aplicado a 26 alunos para análise preliminar com o objetivo de investigar se houve ou não avanços de aprendizagem significativas em relação aos conhecimentos prévios revelados no pré-teste, consideradas as temáticas da Mecânica Clássica e Mecânica Quântica, descritas no item 2.2.1. Em seguida aprofundou-se a análise referente a 5 alunos, que assistiram ao curso de Mecânica Clássica e de Mecânica Quântica.

#### ***2.2.5. Entrevistas***

As entrevistas foram gravadas em vídeo e o critério para seleção dos alunos foi sorteio. Alguns sorteados não se dispuseram a prestá-las. Alguns desses alunos declararam não ficar à vontade diante de câmeras. Foi mantido o protocolo de pesquisa, já referido na metodologia, em que um dos critérios de inclusão era a concordância em participar. Os seis alunos que concederam entrevistas, em 2004, mantiveram-se calmos e descontraídos durante o procedimento. O compromisso com o sigilo dos nomes bem como os objetivos da pesquisa eram sempre lembrados antes do início da gravação. Registre-se que quatro destes seis alunos foram entrevistados antes e depois do curso de Mecânica Quântica. Os outros dois, um cedeu entrevista somente antes do Mini-Curso e o outro somente após o Mini-Curso, em virtude de suas disponibilidades pessoais.

Cada entrevista durou o mínimo de 30 min até o máximo de 60 min., aproximadamente. A conversação gravada em vídeo tomou como base as perguntas formuladas no pré-teste e pós-teste, e constam do APÊNDICE A.

As entrevistas prévias, diálogos entre professor e pesquisados, foram numeradas de 1 a 6, e os discursos orais dos alunos foram codificados como A1, A2 e assim sucessivamente, seguidos de 2004, ano da coleta do material lingüístico.

Houve, entretanto, muita flexibilidade no sentido de permitir que o aluno se expressasse de maneira livre, mesmo distanciando-se, em alguns momentos, das perguntas formuladas. O tempo disponibilizado para as respostas foi longo, partindo-se do pressuposto de que tudo o que fosse dito seria importante para a pesquisa.

O levantamento do conhecimento prévio, ao longo das entrevistas, desencadeou reflexões, por parte dos alunos, que muito auxiliaram na percepção de como ou não eram aprendidos de maneira significativa os conceitos e leis da Física. Essa investigação foi muito importante para fins de planejamento das aulas do Mini-Curso. O referencial cognitivo adotado, de David Ausubel, serviu de alerta permanente, no sentido de perseguir o objetivo principal, que consiste em identificar idéias estáveis, claras e organizadas, pré-existentes na estrutura cognitiva do aprendiz, que possam servir como idéias âncoras para a interação com uma nova informação. Saber o que o aluno já sabe é, do ponto de vista ausubeliano, mais fundamental do que saber aquilo que o aluno não sabe (ou que aprendeu de forma automática).

O mapeamento de uma estrutura cognitiva é um procedimento de acesso a conceitos, imagens e idéias pré-existentes na mente de uma pessoa. As idiossincrasias não impedem de falar de significados partilhados por um grupo num dado contexto (Ausubel, 1980).

O foco das entrevistas, considerando o problema desta pesquisa, tinha como objetivo central tentar compreender, sob que ótica, o aluno interpreta o aspecto preditivo fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica. Como uma abordagem de ensino acerca das predições quânticas é também, inevitavelmente, uma atitude de reflexão, sobre as limitações do aspecto preditivo da Mecânica Clássica, as entrevistas estão permeadas tanto de “perguntas clássicas” quanto de “perguntas quânticas”. Foi neste contexto de confronto entre as predições da Mecânica Quântica e as predições da Mecânica Clássica que ocorreram as entrevistas, procurando identificar se o alunado tinha uma “intuição quântica”, expressão esta cunhada por Greca (2000). Por esta razão, muito pouco foi abordado, nas entrevistas, sobre o período entre 1900 e 1925, apesar de sua relevância histórica.

### ***2.3. Análise, discussão e interpretação dos dados***

A análise e interpretação das informações, colhidas por meio dos instrumentos e técnicas descritas no item 2.2, têm como objetivo compreender criticamente as concepções prévias dos alunos em torno de três eixos temáticos:

- o determinismo clássico implícito na Segunda Lei de Newton e o conceito de trajetória;
- o uso de probabilidades na Mecânica Clássica e na Mecânica Quântica;
- a característica preditiva das teorias físicas e, de modo particular, da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica.

O processo de análise e interpretação dos dados, nas diversas etapas, será apresentado a partir de cada um dos eixos temáticos referidos, considerando-se também os procedimentos adotados. Entretanto é importante ressaltar que os dados coletados não são fatos isolados, fixos, captados em um determinado momento, eles ocorrem em um contexto de relações e as percepções e representações que formam os conceitos manifestos não se apresentam de forma linear, mas cumulativa. Por estas razões, as análises e interpretações, que buscam compreender os significados das comunicações dos pesquisados, apresentam, em determinadas situações, interações e cruzamentos das informações relevantes obtidas, através dos diferentes procedimentos.

Outro esclarecimento que se impõe é a delimitação dos conhecimentos prévios que se pretendia investigar em relação aos três eixos temáticos já referidos. Nesse sentido, as análises e interpretações serão precedidas das delimitações teóricas que constituíram as questões elaboradas e formuladas nas interações não-verbais e verbais, considerando-se os três eixos temáticos.

#### ***2.3.1. O determinismo clássico implícito na segunda lei de Newton e o conceito de trajetória***

Tratar da interligação entre a Segunda Lei de Newton e a obtenção das trajetórias, parece ser o problema central da Mecânica Clássica. Esta teoria científica é capaz de descrever a evolução temporal do estado clássico de uma partícula macroscópica. Para isso, é necessário que se conheçam as condições iniciais (ou estado inicial), a massa inercial e as forças que agem na partícula em estudo a cada instante ou em cada posição. Tendo em vista que a trajetória é definida como o conjunto de todos os estados sucessivos de uma partícula

macroscópica, pode-se também dizer que a Segunda Lei de Newton mais expressão da força mais condições iniciais pode descrever a trajetória dessa partícula. Convém destacar que a Mecânica Clássica permite prever também algumas propriedades de um sistema físico antes mesmo de prepará-lo, e que tais propriedades independem das condições iniciais. É o que acontece, por exemplo, quando se calcula a frequência natural de um oscilador harmônico simples.

Cabe, aqui, destacar as principais informações colhidas através dos pré-testes e das entrevistas prévias acerca do que os alunos pensam sobre a Segunda Lei de Newton.

Os alunos, de um modo geral, não se apropriam do significado da proporcionalidade direta que há entre força resultante e aceleração resultante. Observou-se, de modo quase generalizado, uma aprendizagem automática da Segunda lei de Newton. Este princípio é “compreendido”, de um modo geral, como se fosse uma “regra”, pura e simplesmente, para cálculo de acelerações de forças ou de massa inercial. O aluno A5-2004-a, na entrevista prévia, por exemplo, radicalizou esta idéia, afirmando que a Segunda Lei de Newton só é aplicável aos movimentos uniformemente variados. Esta informação foi colhida com base na explicação oral e escrita que foi dada durante a entrevista. Este aluno, de modo explícito, afirmou não reconhecer ligação entre o princípio fundamental da Dinâmica e a descrição do movimento do cometa Halley. Este resultado contempla uma parcela razoável dos alunos pesquisados, que não se apropriam de que é através da Segunda Lei de Newton que se pode descrever a evolução temporal do estado de uma partícula macroscópica, seja ela uma partícula numa máquina de Atwood, seja um planeta ou um cometa. Esta falta de entendimento revelou-se, inclusive, de forma qualitativa.

Em situações como a descrita, costuma-se chamar de “cinematização da Dinâmica”. É uma expressão cunhada para descrever o estudo descritivo do movimento (cinemática) sem a compreensão do aspecto preditivo da Segunda Lei de Newton. Representa uma manipulação da segunda lei de Newton juntamente com as equações da cinemática, desconectada do saber de que as funções da cinemática advêm de uma equação fundamental do movimento que é a Segunda Lei de Newton (Carvalho Neto, et al, 1999).

O aluno A3-2004-a, a exemplo de outros alunos pesquisados, destaca apenas a idéia de que a força é o agente físico que produz variação de velocidade no tempo, sendo diretamente proporcional à aceleração. Reconhece, de certo modo, haver uma interligação entre a Segunda Lei de Newton e o conceito de trajetória dizendo que

**A:** ...trajetória depende da direção e sentido do movimento e o vetor força resultante pode nos ajudar a saber isto. Admita que um corpo descreve uma trajetória circular. Certamente que existe uma força centrípeta e aceleração centrípeta que são cruciais para manter o corpo na trajetória e impedi-lo de sair pela tangente, o que alteraria a trajetória. Portanto, a Segunda Lei de Newton tem grande relação com o conceito de trajetória.

Note-se que embora esta resposta seja correta, o aluno não explicita que as trajetórias podem ser obtidas a partir da segunda lei de Newton. O A5-2004-a, por sua vez, referindo-se equivocadamente à equação fundamental da Dinâmica, afirma que "... com essa lei, a trajetória do objeto não pode ser calculada".

De modo também equivocado o aluno A4-2004-a declarou não haver ligação do conceito de trajetória com a segunda lei de Newton. Um outro aluno perguntou: "qual é o conceito de trajetória?". De modo similar o aluno A4-2004-a declarou: "... a interligação de trajetória existe, apesar de eu não saber explicá-la". Registre-se ainda que, esse aluno, não se refere, em momento algum, que uma trajetória bem definida pressupõe uma definição simultânea das grandezas posição e velocidade. Ele abstrai o conceito de velocidade e declara que uma posição bem definida é suficiente para legitimar o conceito de trajetória.

Este é um resultado que tem um significado importante: compreender as relações de incerteza, ulteriormente, como ruptura com o conceito de trajetória é algo que exige uma abordagem da Mecânica Clássica que evidencie que a definição isolada de posição não garante uma trajetória bem definida. Quando se prepara um sistema quântico para medir a sua posição, por exemplo, perde-se a definição da velocidade, limitando, neste suposto fenômeno, o uso do conceito de trajetória. Há, finalmente, uma concepção prévia praticamente consensual, por parte dos alunos, de que as trajetórias dos elétrons estão bem definidas e desconhecidas. O aluno A3-2004-a, por exemplo, ao ser perguntado se o elétron pode ser descrito como bolinha em miniatura, declara que sim. O mesmo aluno, anteriormente, ao ser perguntado se a posição e velocidade de um elétron estão, simultaneamente, bem definidas, afirma que sim.

A análise prévia dessa temática será concluída através da seguinte pergunta, feita no pré-teste: "quando formularam a Física Quântica, os seus criadores anunciaram rupturas



drásticas com a Física Clássica. Uma delas foi a renúncia às descrições determinísticas em escala atômica. O que significou essa renúncia?”

Como se sabe, significou não se poder mais associar o conceito de trajetória ao movimento de átomos, elétrons, prótons e quaisquer outras partículas sub-atômicas. Isso equivale a falar em uma limitação quanto à utilização simultânea de grandezas tais como posição e quantidade de movimento, por exemplo, ou energia e tempo. Como a evolução temporal do estado de uma partícula clássica é dada pela Segunda Lei de Newton, a renúncia ao determinismo, em escala atômica e sub-atômica, significa também renunciar ao uso do princípio fundamental da Dinâmica Clássica, neste domínio.

Na investigação não há relatos de alunos, na fase do levantamento do conhecimento prévio, que dissesse algo esclarecedor sobre o determinismo do ponto de vista da Mecânica Clássica. Este resultado parcial foi significativo e muito importante, indicando a necessidade urgente de apresentar uma nova abordagem da Mecânica Clássica, que explicitasse o determinismo clássico implícito na Segunda Lei de Newton. Se esses alunos não assimilaram bem a relação entre a Segunda Lei de Newton, determinismo e trajetória, também não poderiam expressar o significado das limitações desses conceitos no âmbito da Mecânica Quântica.

### ***2.3.2. O uso das probabilidades em Física***

Utilizam-se as “probabilidades” para prever os movimentos tanto em escala macroscópica como microscópica, por razões de natureza distinta. O uso de probabilidade para prever movimentos macroscópicos é, em princípio, eliminável. Apresenta-se como recurso prático a fim de contornar a insuficiência de informações. Seu uso pode estar também associado a fenômenos complexos que envolvem muitos corpos, ou mesmo problemas de poucos corpos. De modo análogo, as probabilidades são usadas para descrever o “caos determinístico”, de enorme sensibilidade às condições iniciais. Em todas essas situações citadas, os observáveis, posição e quantidade de movimento, estão, simultaneamente, bem definidos, mesmo que as trajetórias associadas a tais movimentos não sejam bem conhecidas.

No universo microscópico (em escala atômica e sub-atômica), porém, o uso de probabilidades não pode ser eliminado, independente de como se preparam os sistemas quânticos que estão sendo observados. Este uso, neste contexto, não reflete insuficiência de informações ou insuficiência tecnológica, mas sim uma característica da teoria quântica, de acordo com a interpretação da complementaridade.

Com relação ao conhecimento prévio, registre-se que estes alunos associavam, equivocadamente, o uso da probabilidade em Mecânica Quântica, como insuficiência de informações, desvinculados da idéia do aspecto fundamentalmente probabilístico desta teoria científica. Uma parcela significativa associava, por exemplo, os fenômenos quânticos com os fenômenos macroscópicos caóticos. Acreditavam, também, equivocadamente, na adequação do conceito de trajetória para descrição de fenômenos atômicos e sub-atômicos.

Nas entrevistas prévias, todos os cinco alunos não fizeram distinção entre o significado da probabilidade no domínio macroscópico do domínio microscópico.

O aluno A2-2004-a, por exemplo, disse que acreditava que o uso de probabilidades ocorria tanto no domínio macroscópico quanto no domínio microscópico, mas não analisa as diferenças epistemológicas. Ele argumentou que

**A:** ...uma bola lançada do alto de um prédio pode descrever trajetórias diferentes a depender de como seja lançada, da velocidade inicial e de seus obstáculos. No ‘micro’, um elétron pode também receber influências do meio (forças elétricas ou eletromagnéticas) e cair no mundo da incerteza. Logo, as probabilidades se aplicam em vários contextos microscópicos e macroscópicos.

Como se vê este aluno não faz distinção alguma entre uma “incerteza clássica” e uma “incerteza quântica”.

De forma similar, o aluno A1-2004-a declara que: “a probabilidade é usada na Física Clássica para todo fenômeno que não é descrito de forma ideal. Eu acho que na Mecânica Quântica ela é mais comumente usada”. Note-se, no entanto, que o aluno não explicita uma diferença essencial entre o uso de probabilidade nos domínios macroscópico e microscópico.

Outro aluno, em argumento similar, sustenta que “existem sistemas físicos que não apresentam condições ideais que se ajustem às fórmulas e teorias. Logo algumas aproximações são feitas e utilizam-se as probabilidades”.

Um outro aluno assinala que usamos as probabilidades “quando algum corpo está sujeito a forças diversas que não são constantes, obrigando o cientista a calcular a probabilidade”. Esta argumentação traz à tona uma idéia equivocada de que a Segunda Lei de Newton só é aplicável a movimentos de partículas submetidas a uma resultante de forças constante.

O aluno A4-2004-a, por sua vez, associa, de maneira equivocada, o uso de probabilidade com a ausência da característica preditiva das teorias físicas. Ele justifica que “as probabilidades em Física só são aplicadas quando não é possível determinar, antecipadamente, através de cálculos, se um fenômeno físico pode ocorrer”.

Um outro aluno declara que usamos as probabilidades “quando não podemos comprovar a realização da experiência ou quando não temos certeza do resultado”, reforçando, mais uma vez, a idéia, mesmo posta de maneira implícita, de que a probabilidade é expressão da falta de conhecimento exato. Num caminho similar, um outro aluno expressa a mesma idéia dizendo que usamos probabilidade “em casos de movimentos que não podem ser precisamente previstos. Dessa forma, leva-se em conta movimentos descritos pela Física Quântica, que não é totalmente exata”. Esta argumentação equivocada, constatada em outras respostas, ratifica a idéia de que parcela significativa dos alunos associa a idéia de probabilidade com a ausência da característica preditiva no contexto da Mecânica Quântica. Não há nas comunicações dos alunos, nesta fase prévia à intervenção didática, informações que revelem significações explícitas ou latentes do uso de probabilidade em Mecânica Quântica como expressão de uma característica intrínseca à teoria quântica, mesmo para eventos individuais.

### ***2.3.3. O aspecto preditivo das teorias físicas***

A predição das teorias físicas é a característica que permite prever, antecipadamente, resultados de uma medida em um contexto experimental bem definido. A análise do pré-teste e das entrevistas sugeriu-me a idéia de que praticamente nenhum dos alunos evidenciou conhecer a característica preditiva das teorias físicas.

A análise do pré-teste deu importantes informações acerca do conhecimento prévio desse grupo tanto da Mecânica Clássica quanto da Mecânica Quântica. Embora os alunos tenham na sua estrutura cognitiva a idéia estável, clara e organizada de previsão, a exemplo de que é possível prever se amanhã vai chover, não estavam conscientes de que a predição é uma característica das teorias físicas.

### ***2.3.4. Pós-testes***

A resposta dos alunos que concederam os pós-testes encontram-se no APÊNDICE E, e essas respostas foram retomadas nas entrevistas que serão descritas a seguir.

### **2.3.5. Análise das Entrevistas**

Esta seção visa interpretar e analisar os significados construídos por um universo de cinco alunos, que concederam entrevistas no período posterior à realização do Mini-Curso, e do Pós-Teste, em 2004. Pretende-se, ao final dessa análise, agrupar esses significados por categorias, a depender das semelhanças e diferenças dos significados construídos pelos alunos, tendo em vista que cada categoria irá abarcar significados semelhantes entre si. Essa categorização irá emergir de reflexão, análise, e interpretação em torno das três temáticas já explicitadas no item 2.3.

Registre-se que a discussão desse conjunto de eixos temáticos fez emergir uma concepção prévia, imbricada nas três idéias, de que haverá, num futuro próximo ou distante, uma recuperação das descrições determinísticas em escala atômica e sub-atômica.

O processo para agrupar os significados por categorias desenvolveu-se, observando os seguintes critérios:

- a) descrição, análise e interpretação de uma única entrevista, valorizando e “recortando” cada trecho relevante da fala, tal como aparece no diálogo transcrito, entre entrevistador e o aluno A5-2004-p;
- b) análise e interpretação dos significados revelados nas falas dos demais entrevistados, registrando as semelhanças e diferenças entre os significados compartilhados, objetivando definir categorias que incluam os diversos significados construídos pelos alunos;
- c) a síntese dos significados compartilhados, agrupando-os em categorias bem mais abrangentes.

As análises aqui apresentadas adotaram essa orientação, buscando respostas para o problema, objeto deste estudo, através da compreensão dos significados que os alunos atribuem, em seu contexto social, aos conhecimentos prévios de Mecânica Clássica e Quântica, definidos nos eixos temáticos, consideradas as delimitações já explicitadas no item 2.3.

#### **2.3.5.1. Entrevista A5-2004-p**

A entrevista A5-2004-p foi desencadeada a partir da solicitação do entrevistador de que o aluno descrevesse, de modo crítico, as principais inovações conceituais advindas da

Mecânica Quântica. Muito rapidamente ele responde com segurança que: “a Mecânica Quântica descarta o conceito de trajetória e usa a probabilidade como fator obrigatório”.

Em continuação, registra o princípio da incerteza como inovação conceitual advinda desta teoria científica e argumenta que Heisenberg “fala, em seu princípio, que ou você sabe qual é a velocidade do elétron, ou você consegue determinar a posição. Se você souber um desses elementos você vai ter incerteza do outro. Você não conseguiria saber a velocidade e a posição do elétron, simultaneamente”.

Esta resposta de A5-2004-p, após a análise dos dados da entrevista, provocou alguns questionamentos:

a) houve uma aprendizagem significativa acerca do conceito de trajetória e da inadequação deste conceito na descrição do mundo atômico e sub-atômico? Ou a resposta foi fruto de uma aprendizagem automática?

b) Qual o significado que o princípio da incerteza tem para o aluno? Terá o aluno, associado de modo consciente e não arbitrário que a idéia de trajetória é incompatível com o princípio de Heisenberg?

A hipótese de que a primeira resposta dada pelo aluno não é resultante de uma aprendizagem automática, configura-se quando vincula o conceito de trajetória às idéias de posição e velocidade, existentes previamente em sua estrutura cognitiva. No transcorrer da entrevista as informações e representações conceituais parecem confirmar a aprendizagem significativa do conceito de trajetória e sua incompatibilidade com o princípio de Heisenberg.

Como se pode observar, esta leitura interpretativa é reforçada no recorte da entrevista apresentado a seguir, cujo diálogo é iniciado pelo professor, que pergunta:

**P:** (...) quando um elétron faz uma transição de um estado energético para um outro estágio energético... há uma trajetória bem definida que “ligue” o elétron de um local ao outro... ou a trajetória não aparece definida?

**A:** não aparece definida

**P:** mas isso... na sua opinião... ilustra uma insuficiência de informação nossa?

**A:** não... não... simplesmente não é definida.

A inadequação do conceito de trajetória, evidenciada através do princípio da incerteza, parece que foi aprendido de maneira significativa, uma vez que o aluno correlaciona a idéia

de trajetória com os conceitos de posição e velocidade. E são justamente esses dois conceitos que não podem ter definição simultânea, de acordo com o princípio da incerteza.

Prosseguindo a entrevista, buscou-se compreender o significado atribuído pelo aluno ao uso de probabilidades em Mecânica Quântica. A discussão foi dirigida para o domínio macroscópico, visando apreender se o aluno percebia semelhanças ou diferenças entre “as incertezas clássicas” e “as incertezas quânticas”. Como procedimento, recorreu-se à descrição de um lançamento de moedas, para cima, registrando as probabilidades iguais a 50% de dar cara ou coroa.

Prosseguindo foi, perguntado:

**P:** a trajetória dessa moeda... ao longo do vôo dela... é bem definida?

**A:** é... é bem definida

**P:** você acha que... Eh... em princípio... é fácil ou é complicado fazer esse cálculo?

**A:** depende... se você considerar situações ideais é bem fácil...

**P:** e o que seria uma situação ideal? Me dê um exemplo de uma situação que você acha que seria difícil de descrever

**A:** por exemplo da... da... de uma pena, ao vento ou, vamos dizer, uma partícula da Tsu-nami... da Tsu-nami... você calcular onde é que ela vai parar.

Parece sugestivo, diante da interpretação deste recorte, que o aluno A5-2004-p associa o uso de probabilidade no mundo macroscópico, de modo correto, à insuficiência de informações. Chamou-me a atenção, a propósito, o aluno ter utilizado um exemplo de um sistema complexo macroscópico, com consciência de que não há uma analogia desses sistemas com os sistemas quânticos, revelando uma evolução conceitual, se comparada à interpretação do significado das probabilidades em Mecânica Quântica apresentada nos pré-testes. O uso de probabilidade como reflexo da ignorância humana foi a idéia predominante nas respostas do pré-teste. Na entrevista em análise, o aluno ainda se refere ao uso de uma probabilidade como algo intrínseco à Mecânica Quântica. Entretanto, como veremos, as respostas transcritas não sinalizam para a ocorrência de uma percepção inteiramente satisfatória acerca de uma fenomenologia propriamente quântica.

Em dado momento da entrevista o diálogo foi marcado pela associação correta entre os movimentos macroscópicos com a idéia de descrição determinística, como se pode observar no trecho transcrito a seguir.

**P:** você falou em Tsu-nami... se você pegar uma bolinha e deixar ela num redemoinho... bem turbulento... você acha que é possível dar um tratamento determinístico pra essa bolinha?

**A:** é... é possível.

**P:** nesse sentido... você acha que há uma semelhança ou uma diferença entre uma bolinha num fluido turbulento... se você compará-la com um elétron transitando de uma camada para outra? você está vendo que há mais semelhança... nesses fenômenos... ou você está vendo mais diferenças?

**A:** diferenças.

**P:** qual é... na essência... a diferença?

**A:** por que um elétron não percorre uma trajetória... e a bolinha percorre.

É importante observar que embora o aluno enquadre as descrições do universo macroscópico como descrições determinísticas não explicita o vínculo que há entre o determinismo e a segunda lei de Newton. Note-se que o aluno não diz, de modo concreto, de que forma é possível descrever a evolução temporal da posição e da velocidade através do princípio fundamental da dinâmica, ao ser perguntado sobre o significado do determinismo.

Continuando a análise da entrevista A5-2004-p, o diálogo que se segue tem como foco a característica preditiva das teorias científicas.

**P:** (...) você já ouviu falar na expressão predição? tem idéia do que seja?

**A:** seria prever alguma coisa?

**P:** é... Eu vou ler... antes de lhe perguntar algo mais específico... o que é que o Aurélio diz que é a predição... “Ato ou efeito de anunciar por antecipação; prever o que há de vir; anúncio de acontecimentos futuros”... certo? é como

tá lá no dicionário... a pergunta que eu faço é... a Mecânica Quântica é uma teoria científica preditiva?

**A:** a Mecânica Quântica? não sei. é?

**P:** vamos lá, vamos raciocinar juntos... eu vou tentar lhe ajudar não respondendo a pergunta... mas lhe ajudando a... a você próprio raciocinar.

**A:** posso dar um chute?

**P:** pode sim... diga lá

**A:** eu acho que a Mecânica Quântica não é preditiva... porque a partir do momento que ela está trabalhando com probabilidades... ela está querendo dar uma probabilidade... não uma certeza... logo ela não pode prever.

Convém registrar que na entrevista o aluno (A5-2004-p) não foi capaz de listar um único exemplo, de predição quântica, e nem consegue “enxergar” êxito da Mecânica Quântica. Para ele é como se a Mecânica Quântica apenas evidenciasse os problemas da Mecânica Clássica. As rupturas introduzidas e as inovações advindas não vieram, em 2004, acompanhadas de um sentido prático da teoria.

Insistindo na idéia de investigar o processo de conhecimento e a atribuição de significados ao aspecto preditivo das teorias físicas, partilhando do processo de formação e experiências dos pesquisados, as perguntas e respostas a seguir versaram sobre a Mecânica Clássica.

**P:** e a Mecânica de Newton, você acha que é uma teoria preditiva?

**A:** é... ela é preditiva... ele tenta prever o mov/ os movimentos dos... dos objetos... em geral.

**P:** hum... e a Mecânica Quântica não tenta prever o movimento dos elétrons?

**A:** pode ser que tente... mas como ela trabalha com probabilidade ela não pode ter esse tipo de certeza... logo ela não vai conseguir prever... ela pode prever a possibilidade, ela não estaria prevendo...



**P:** ham... então você acha que prever probabilidade não é prever? é isso? mas o que eu estou querendo entender é o seguinte... essa falta de predição que você está dizendo aí é decorrente de uma fraqueza da teoria...

**A:** não... é a teoria...

**P:** é decorrente de quê?

**A:** não... eh... faz parte da teoria... que você iria prever a probabilidade... não é uma falha da teoria... porque é inerente à teoria.

**P:** porque eu acho que ela não é preditiva?

**A:** é isso... se ela tá... trabalhando em cima de... de probabilidade... ela não iria conseguir prever com eficiência.

É importante registrar que o cuidado de não induzir as respostas existiu com o propósito de compreender o significado “real” que um dado conceito tem para o aluno. Por isso, mesmo deixando-o à vontade, tentou-se, às vezes insistentemente, superar a barreira que existe entre o entrevistador (professor) e o entrevistado (aluno) que tem origem na diferença de *status*, de papel e de formação, além da presença do gravador e vídeo que também criam um artificialismo que não existe numa conversa espontânea. Um aspecto a considerar é a auto-imagem positiva do entrevistado (aluno) que se vê potencialmente ameaçada na interação face a face. Esta postura de preservação da face positiva cria processos de figuração para neutralizar a ameaça, gerando conceitos imprecisos para diminuir os riscos de uma atitude assertiva. Por isso, sempre que possível, tentou-se, através de outras perguntas, respostas que pudessem revelar os significados atribuídos aos conceitos, objetos da investigação. Muitas vezes era necessário “idas e voltas” para que o aluno se sentisse à vontade para dizer o que pensava. A incursão do observador foi, dentro do possível, minimizada. O aluno A5-2004-p, por exemplo, em pleno curso da entrevista, altera o seu ponto de vista acerca da preditividade da Mecânica Quântica. Vejamos:

**P:** você acha que o fato da Teoria Quântica ser uma teoria probabilística e essa probabilidade não ser eliminável da teoria... isso significa dizer que ela não possa prever nada?

**A:** não... ela pode prever a probabilidade

**P:** então... ela... afinal de contas... é ou não é uma teoria preditiva?

**A:** é.

**P:** mas você tinha falado que não... antes

**A:** você queria saber se ela conseguia pre/ predizer o... o... a causa, tipo...

**P:** não... eu lhe perguntei...

**A:** eu entendi isso... eu falei... em todo momento... que ela conseguia predizer a probabilidade... ela não conseguiria ter certeza do... do local... ela só conseguiria ter certeza da... da pro... probabilidade... entendeu? ela daria a probabilidade desse objeto estar ou não num lugar ou... então... a velocidade.

Para encerrar a análise da entrevista com o aluno A5-2004-p, convém destacar a tendência instrumentalista que foi percebida, como se pode observar na descrição e análise do recorte que segue.

**P:** do jeito que você compreendeu a Teoria Quântica, você acha que os formuladores da Teoria deixaram uma brecha para isso ser uma coisa possível... no futuro... ou eles trataram dessa questão afirmando essa indeterminação como uma coisa de princípio?

**A:** eu acredito que eles colocaram isso como um princípio

**P:** e como é que você vê isso? você a... você acha isso uma coisa... eh... isso de alguma maneira lhe causa algum incômodo?

**A:** de certa forma... eh... eu tento não me incomodar... eu tento aceitar esse fato

**P:** tenta aceitar... Por quê?

**A:** Por exemplo... eh... a relatividade... fala que a velocidade da luz é constante de qualquer jeito... se você for pra um lado ou se você for contra... ela continua sendo constante... e

isso é uma coisa meio difícil de aceitar... então o que é que você faz... você simplesmente tem que aceitar e ver o que é que você pode tirar proveito disso... como Einstein... aí eu tento que fazer a mesma coisa... é ir me acostumando e seguir as outras pessoas... é claro... aí, eu tento aceitar a Física Quântica sem tentar questionar muito por que senão eu não conseguiria nem entender

### **2.3.5.2. Entrevistas A1-2004-p a A4-2004-p**

Neste tópico, serão analisados e interpretados os significados construídos pelos alunos, nas entrevistas A1-2004-p, A2-2004-p, A3-2004-p e A4-2004-p. Estas entrevistas, versando sobre os mesmos temas abordados na entrevista A5-2004-p, tinham como objetivo ampliar a compreensão das percepções e significados revelados na análise apresentada no tópico anterior, possibilitando interpretações mais globais, por comparações aproximativas, para garantir a confiabilidade e pertinência dos dados, eliminando impressões e inferências subjetivas.

Todos os alunos compartilharam, em certa medida, dos significados atribuídos ao conceito de trajetória. Vincularam a obtenção das trajetórias à utilização da segunda lei de Newton, entretanto nem todos explicitaram com detalhes quais conceitos estão envolvidos neste cálculo de trajetória e de que forma esses conceitos garantem sua obtenção, nem sequer de modo qualitativo. Foi considerada satisfatória a resposta contemplada pelo mapa conceitual que consta do APÊNDICE N.

O aluno A3-2004-p, por exemplo, apresentou uma explicação satisfatória a esse respeito, enfatizando que a obtenção da trajetória remete ao conhecimento das condições iniciais, mas não disse que os conceitos devem ser levados em conta para o cálculo do estado clássico num instante qualquer. Este mesmo aluno, também deu uma resposta significativa acerca da inadequação entre o conceito de trajetória e o princípio de Heisenberg. Referindo-se às descrições em escala atômica e sub-atômica, declara que

“... não é coerente nem você falar em condições iniciais, porque as condições iniciais são velocidade inicial e espaço inicial. Só que se você tiver, no caso o elétron, posse do espaço inicial você

vai ter uma incerteza infinita da velocidade, nesse momento, e vice-versa. Então, por isso é descartável o conceito de trajetória.”

Procurando compreender melhor as representações de sua comunicação, foi perguntado:

**P:** só pra ficar claro isso... eh... você está dizendo que as condições iniciais elas estão definidas e nós não conhecemos?

**A:** não...

**P:** ou elas não estão definidas?

**A:** não estão definidas

**P:** simultaneamente?

**A:** simultaneamente... não estão definidas

**P:** certo... agora... isso que você está colocando aí... é um reflexo da nossa ignorância? Do desconhecimento acerca dessas grandezas... no caso... que você citou... espaço e velocidade? é um problema de ignorância? é um problema tecnológico... essa impossibilidade de medição?

**A:** não... é porque ele não apresenta mesmo

Os alunos A1-2004-p e A2-2004-p, por sua vez, indicam que conceitos estão envolvidos no cálculo de trajetória e de que forma eles garantem este cálculo. Os alunos A4-2004-p e A5-2004-p reconhecem haver uma ligação entre a obtenção de trajetória com a segunda lei de Newton, mas não apresentam justificativa teórica adequada, embora não tenham cometido erros conceituais, considerou-se como uma resposta incompleta.

Parece ter existido uma unanimidade de compreensão por parte dos cinco alunos acerca da incompatibilidade entre o conceito de trajetória e o princípio da incerteza. Todos reconheceram que a Mecânica Quântica não proíbe a medição da posição ou da quantidade de movimento, isoladamente, mas a medição simultânea de ambas. Parece que houve uma aprendizagem significativa acerca do princípio da incerteza, uma vez que as idéias de posição e momento linear, preexistentes na estrutura cognitiva desses alunos, interagiu de maneira

substantiva e não arbitrária, com a nova informação, a de não ser possível haver uma medição simultânea dessas duas grandezas. Esta análise decorre também da interpretação de que os alunos entenderam o significado da constante de Planck como a expressão de uma descontinuidade fundamental presente na Mecânica Quântica. Os cinco alunos explicitam “a incerteza quântica” não como reflexo de ignorância ou de insuficiência tecnológica, mas sim como um traço irreduzível da Mecânica Quântica. Apesar disso, mesmo compreendendo a natureza de uma estatística não clássica, alguns “apostaram” no caráter provisório da teoria quântica, conforme será relatado aqui. Embora as perguntas e respostas das entrevistas tenham versado sobre o período entre 1925 e 1927, o aluno A3-2004-p, ao ser perguntado pelas inovações conceituais advindas da Mecânica Quântica, destacou também aspectos da velha Mecânica Quântica. A sua resposta será transcrita a seguir.

**A:** é... sobre inovações... que a... conceituais que a Física Quântica trouxe... né... temos... eh... o... o átomo... né... que, segundo a Física Clássica... os elétrons... eles irradiavam... por isso que... sendo dessa... pensando dessa forma... eh... eles iriam perden/ perdendo a energia potencial... e iria colidir com o núcleo... se fosse assim... então a Física Quântica trouxe... né... Bohr... com o átomo de Bohr ele disse que existiam órbitas que o elétron poderia girar que não fosse radi/ irradiar... né isso? também trouxe inovações sobre que... como pensávamos antes que a... a intensidade da luz implicaria no... ne tirar elétrons numa placa que seria atingida por essa luz... e Albert Einstein mostrou que não... a intensidade não interfere... apenas ela pode fazer com que sejam arrancados mais elétrons... mas que a velocidade com que esse elétrons vão sair depende mesmo da frequência... e que efeito fotoelétrico também acontece na hora que... se o elétron for de ser arrancado, vai ser arrancado na hora e não depende de ficar certo tempo...

Um outro aspecto importante da análise foi avaliar em que medida os alunos entrevistados (A1-2004-p a A4-2004-p) corroboram ou não com as idéias do aluno A5-2004-

p, no que se refere ao significado fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica. Será apresentado um recorte da entrevista do aluno A4-2004-p, em que se obtém dados relevantes sobre o significado da probabilidade.

**A:** eu falei da... sobre Física Clássica... agora eu vou falar sobre a Física Quântica... bem, a probabilidade... eu acredito... né... eu... eu... eu penso dessa forma que a probabilidade na... no campo da Física Quântica...ela tá... ela... ela tá inerente ao... a... a... ao seu estudo... porque quando você usa a probabilidade pra... pra... pra dizer... por exemplo... a posição de um elétron... você... não é que você tenha insuficiência de informações... é que... eh... ele tem um... a posição dele é... já é... já... é... verdadeiramente... não bem definida... tá entendendo? então... não é porque tá faltando informações... já é uma coisa que... já... já... é inerente... por isso que eu usei esta palavra... é uma coisa inerente... ao... ao...

**P:** em que contexto utilizamos probabilidades em Física?

**A:** as probabilidades no mundo atômico não é?

**P:** no mundo macroscópico... não? ...a probabilidade de cair cara é de 50%... você também não usa?

**A:** sim... mas... essa probabilidade aí você usa porque você não dá conta do... do que possa interagir com... com essa moeda lá... mas se você tiver tudo... posse de tudo o que possa interferir na trajetória da moeda você não precisa usar probabilidade... entendeu?

**P:** Mas não tem como? Por uma questão de ignorância? Ou não tem por um problema de indeterminação?

**A:** por um problema de indeterminação

**P:** quem é que expressa essa indeterminação?

**A:** o princípio de Heisenberg

Note-se que para esse aluno, as probabilidades, no campo da Física Clássica são usadas quando há insuficiência de informações, enquanto que, no campo da Física Quântica, elas são inerentes ao estudo dos fenômenos.

O aluno A3-2004-p, por sua vez, registra que na Mecânica Quântica a probabilidade refere-se à incerteza de um procedimento, tendo em vista o comportamento dual das partículas atômicas e sub-atômicas, argumentando que “probabilidades podem ser usadas para o mundo macroscópico e microscópico, só que usam enfoques diferentes”.

A seguir serão analisadas ocorrências das entrevistas referentes à predição física. Comparando a assertiva do aluno A5-2004-p, de que uma teoria fundamentalmente probabilística não pode ser considerada preditiva, com a manifestação do entrevistado A2-2004-p, pode-se observar que a mesma expressa um saber pré-configurado, chegando a afirmar que a Mecânica Quântica não deveria ser chamada de Mecânica, uma vez que não oferece predições de trajetória, ou melhor, não utiliza o conceito de trajetória por uma questão de inadequação.

O recorte da entrevista (A2-2004-p) que se segue pode fundamentar a interpretação apresentada e ampliar a compreensão dos conteúdos manifestos.

**A:** um conflito?... um desconforto? porque... como você acabou de dizer... uma teoria prediz e se não prediz... eh... isso... essa minha dúvida... essa minha... esse conflito vem de uma mente carregada de Mecânica newtoniana... porque se você descarta trajetória... vai prever o quê? se não prevê velocidade e... e espaço ao mesmo tempo? vai prever o quê?

Nova pergunta: e a Teoria Quântica prediz o quê?

**A:** é isso... essa é a pergunta que não quer calar... se ela não prediz... rapaz... a trajetória... foi aquela pergunta que eu lhe fiz... desesperado... da última vez... então... pra quê que serve essa teoria? eh... eu não... eu não sei dizer

É importante destacar que este aluno teve um contato com as aulas ministradas que trataram do período entre 1925 e 1927, e conseguiu uma compreensão satisfatória das limitações da Mecânica Clássica no domínio atômico e sub-atômico. Entretanto, na sua

comunicação percebe-se uma posição reativa e conflituosa, sinalizando sua dúvida, sua incerteza, quanto à predição da Teoria Quântica, revelando a não integração de aprendizagens significativas à sua estrutura cognitiva. Isso poderia, num primeiro momento, levar a um questionamento acerca da viabilidade de introduzir a Mecânica Quântica no Ensino Médio: um aluno que não resolve a equação de Schrödinger pode adquirir uma percepção quântica minimamente satisfatória da teoria? Provavelmente sim. Tem-se tido notícia, através do trabalho de Greca (2000), aliás, de algo diferente, em muitos cursos de graduação. O manuseio com o formalismo não garante uma adequada intuição quântica.

É importante destacar que este aluno não consegue identificar aplicações práticas da Mecânica Quântica. Este recorte ilustra a afirmação.

**A:** outra dúvida é... aplicações práticas da Física Quântica...

**P:** sim...

**A:** aplicações práticas... por exemplo... eles dizem que têm usado muito isso em tecnologia... mas eu não consigo imaginar como... exatamente... por exemplo... tem computadores aí que estão sendo feitos com nano... eu não sei direito o termo que se usa... mas... eu acho que essas seriam as maiores dúvidas... e quando você vai perguntando vão surgindo novas... também... não é?

Por outro lado, alunos, a exemplo de A3-2004-p, reconhecem na Mecânica Quântica um traço preditivo e seu caráter intrinsecamente probabilístico, mas referem-se às suas aplicações na Física Nuclear de maneira muito vaga. O recorte que se segue dá uma adequada dimensão desta questão. O diálogo foi desencadeado a partir da pergunta ao aluno (A3-2004-p), sobre o que ele entende por predição física.

**A:** predi/ pre/ predizer?

**P:** sim

**A:** já

**P:** tá. o... inclusive o dicionário... o Aurélio diz que a predição... “Ato ou efeito de anunciar com antecipação... prever o que há de vir... anúncio de acontecimentos



futuros”... aí a pergunta é... você acha que a Teoria Quântica é uma teoria preditiva? há um aspecto... um poder preditivo inerente a ela?

**A:** rapaz, eu não... não tô muito... tô muito... muito, sabe... eu não consegui captar muito bem

**P:** bom... você entendeu o significado da palavra predição? “ato ou efeito de anunciar por antecipação... prever o que há de vir... anúncio de acontecimentos futuros”. você acha... vamos falar de um... de modo mais geral... que as teorias científicas... elas tem um poder preditivo?

**A:** têm.

**P:** você está dizendo que a Mecânica Quântica... ela tem um poder preditivo...

**A:** poder preditivo...

**P:** ... ou não?

**A:** com certeza...

**P:** ela prediz o quê? a Teoria Quântica prediz o quê... nessa escala? (...) essa incerteza reflete que a Teoria Quântica é incompleta?

**A:** não, rapaz... não é que a Teoria Quântica seja incompleta... mas que a coisa... não é... não é por falta de... de... de dados... de avanço tecnológico como acontece no caso da moeda se você não saber se vai cair cara ou coroa... mas é porque não existe mesmo

Note-se que este aluno apropriou-se da idéia de inadequação do conceito de trajetória no domínio atômico e sub-atômico, tendo compreendido que o princípio da incerteza não reflete falta de informações, ao contrário, está de acordo com a teoria da Mecânica Quântica, na ótica da interpretação da complementaridade. Ao falar que a falta de dados pode dificultar a descrição do movimento de uma moeda lançada para o alto, este aluno revela compreender as diferenças entre as predições clássicas e as predições quânticas.

Retomando a questão da predição, observou-se que o aluno A4-2004 diz não saber do que se trata. Este mesmo aluno associa o uso de probabilidade, no mundo dos átomos, como

expressão de algo que não se conhece bem, compatível com a idéia de uma teoria com fraquezas, uma teoria incompleta.

O recorte a seguir remete ao quadro cognitivo que revela sua compreensão sobre a Teoria Quântica. O aluno A4-2004-p declara que:

**A:** aí... é um coisa que, ao meu ver, que a/... até agora é impossível determinar as duas ao mesmo tempo... mas pode ser que um dia... quem sabe... talvez... tenh/ tenhamos tecnologia de ciência suficiente para pre/ determinar as duas ao mesmo tempo... quem sabe? eu acho que seria uma insuficiência tecnológica e científica.

**P:** por uma fraqueza da teoria?

**A:** foi... sabe? pode ser por uma fraqueza da teoria... mas eu acredito que seja por ineficiência tecnológica e científica... porque eu acho que pode ser que daqui a n anos... não sei quantos anos, um trilhão de anos... vai ser... vai ser dessa forma... pra mim vai ser assim.

**P:** ok... entendi agora o seu... seu ponto de vista... portanto... você acha que a Teoria Quântica... ela é uma teoria completa ou incompleta?

**A:** incompleta... eh... em desenvolvimento... pode ser aperfeiçoada.

O que fica evidente, por parte do aluno, é que a falta de informações é um traço característico da Mecânica Quântica, não compreendendo, portanto, o significado da incerteza nos marcos da complementaridade.

Na expectativa de recolher mais informações relevantes que ampliassem a compreensão das representações que formam os conceitos, objetivando estabelecer as questões prioritárias e os encaminhamentos necessários para definição da segunda etapa da pesquisa, foram estimulados depoimentos sobre suas experiências de predição no dia-a-dia e suas relações com predição física.

O depoimento do aluno A1-2004-p também revela uma Mecânica Quântica provisória. Assim argumenta:

**A:** eh... antes de... de estudar... antes de... de entrar em contato com a Física Quântica... eu pensava que tudo... não houvesse nada que não pudesse ser calculado... certo? mas... de/ depois eu... eu mudei um pouco esse pensamento... porque eu acho que é... esse pensamento é muito... digamos assim... muito... não sei a palavra... muito... sabe... eu... eu... eu tô... eu... eu... tipo... eu... eh... eu seria arbitrário demais pra afirmar... assim... que não existe nada que não pode ser calculado... entendeu? até porque eu... o que eu sei sobre o mesmo é muito pouco... entendeu? pode ser... assim... que... que exista algo que não... que não pode ser calculado... como... por exemplo... eh... talvez essa... essa... essa... teoria ainda passe por mudanças... porque... o próprio Einstein... ele num... ele morreu sem... sem aceitar essa idéia... essa... esse... essa... esse... essa vinculação com o determinismo... eh... tem até uma... um diálogo que eu li... bem interessante... numa revista dele com o Bohr... falando que... eh... ele falava... Einstein falava que...

**P:** que revista?

**A:** Galileu... aquela que eu trouxe naquele dia... Einstein falava assim... “Deus não joga dados”... aí Bohr falava... “Pare de dizer a Deus o que ele deve fazer”... quer dizer ele... ele não... ele acreditava que... ele não... não... não... não queria se desligar... eh... desse... desse... desse determinismo... entendeu?!... que marca a Física Clássica... entendeu? eu acho uma coisa bem polêmica... até porque pelo que eu pude ler a Física provavelmente... ela vive em parte e tem vários livros pesquisando mais sobre... sobre este assunto, tentan/ que eles tentam... que eles estão tentando... pelo que eu... pelo que eu pude entender... eh... unificar as teorias... a da... a Quântica e a da Relatividade

**A:** eu entendo assim... né?... que ele... ele diz que é correta porque...  
eh... até agora ela não foi... eh... digamos assim... todas as  
experiências feitas deram certo...

#### ***2.4. Conclusão sobre a análise dos resultados da fase exploratória***

A análise e interpretação das observações feitas através dos diferentes instrumentos e técnicas aplicados nesta fase exploratória, buscando compreender o conhecimento prévio dos pesquisados sobre os eixos temáticos explicitados neste capítulo, foram de fundamental importância para orientação e definição do segundo momento da pesquisa. Os resultados convergiram para um conjunto de microdecisões sistematizadas, buscando-se organizar, avaliar e modificar as ações consideradas insatisfatórias, observadas no processo da fase exploratória.

Considerando a compreensão crítica do sentido das comunicações verbais e não-verbais dos alunos pesquisados, foi decodificada a primeira grande lição: a discussão das limitações conceituais da Mecânica Clássica, a exemplo, da inadequação da segunda lei de Newton para prever resultados de medidas em escala atômica e sub-atômica, bem como o enunciado do princípio da incerteza que constituem, sem dúvida, a dimensão do impacto conceitual advindo da Mecânica Quântica. Entretanto, a discussão do aspecto preditivo da Mecânica Quântica requer, do meu ponto de vista, a apresentação de experimentos de fronteira ou experimentos de imaginação, que possam trazer à tona de que modo princípios quânticos predizem resultados já corroborados experimentalmente. Não se trata de conduta positivista. O que está em pauta é a estratégia didática, quando se trata do ensino da Mecânica Quântica, fundamentalmente probabilística, que é mais adequada para construir conhecimentos e aprendizagens significativas de como funcionam, na prática, as previsões quânticas. Além disso, os resultados possibilitaram identificar quatro grupos de categorias distintas, que foram utilizadas como balizador para o curso de 2005:

1) a maioria dos alunos afirma que a Mecânica Clássica é uma teoria preditiva, mas não explicita que conceitos são necessários para operacionalizar tais previsões. O determinismo clássico implícito na Segunda lei de Newton não é adequadamente relacionado à idéia de obtenção de uma trajetória;

2) alguns alunos vêem no uso não eliminável das probabilidades a idéia de que a Mecânica Quântica não é uma teoria preditiva;

3) a maioria dos alunos compreende a Mecânica Quântica como teoria científica que oferece previsões fundamentalmente probabilísticas;

4) a maioria dos alunos, embora compreenda as limitações da Mecânica Clássica no domínio atômico e do aspecto preditivo fundamentalmente probabilístico, não consegue se apropriar de uma percepção quântica.

O curso de 2005 visou preencher essa lacuna, tratando das previsões quânticas com a devida percepção de uma fenomenologia quântica.

A estratégia traçada para implementar uma proposta que permita o aluno a se apropriar de modo concreto, das previsões quânticas, é a essência do meu problema de pesquisa e será examinada no capítulo 3.

**CAPÍTULO 3**  
**UMA PROPOSTA DE ENSINO DE MECÂNICA CLÁSSICA**  
**E DE MECÂNICA QUÂNTICA**

## CAPÍTULO 3

### *Uma proposta de ensino de Mecânica Clássica e de Mecânica Quântica*

#### *3.1. Considerações introdutórias*

O conjunto de procedimentos exploratórios adotados ao longo de 2004, que incluiu pré-testes, entrevistas prévias, Mini-Curso, pós-testes e entrevistas possibilitou validar técnicas de acesso aos significados apreendidos pelos alunos, acerca do aspecto preditivo da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica. Tomou-se como evidência dessa validação e confiabilidade os depoimentos de alunos que, durante as etapas da pesquisa, foram sendo analisados, interpretados e agrupados em categorias bem definidas, conforme registrado na conclusão do capítulo 2. Interpretou-se o aparecimento de tais categorias como tendências próprias de um contexto.

Considerando que o processo de pesquisa qualifica as técnicas e procedimentos adequados à compreensão de um determinado problema, decidiu-se, em 2005, ampliar a variabilidade dos dados obtidos, em 2004, para situar o objeto de estudo em um contexto mais abrangente, possibilitando questionar e explorar os conceitos e representações dos alunos e investigar sobre outros ângulos as categorias propostas. Dessa forma, buscou-se superar a dificuldade de interpretação das aprendizagens significativas, nas correlações internas, e de integração de dados qualitativos.

Foi, nessa perspectiva, que o observador participante lançou-se ao trabalho de campo, em 2005, na mesma instituição, após o processo de coleta, análise e avaliação dos dados de 2004. Os resultados convergiram para validar o conjunto de procedimentos da fase exploratória da pesquisa, relatada no capítulo 2, acerca do conhecimento prévio em Física e sobre Física já descritos na seção 2.2 do referido capítulo. Visava-se, especificamente em 2005, compreender, de modo mais abrangente, os significados construídos pelos alunos sobre o aspecto preditivo das teorias físicas. Esta compreensão foi condição necessária para uma intervenção posterior, visando à evolução conceitual rumo a uma visão científica do aspecto preditivo da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica.

Os problemas identificados na pesquisa de campo exploratória, sua avaliação e elaboração de hipóteses explicativas foram determinantes para definir os ajustes e adotar diretrizes e estratégias de ação que respondessem ao problema de pesquisa através de nova

abordagem tanto de Mecânica Clássica como de Mecânica Quântica. Os dois pilares deste capítulo, por isso mesmo, são os resultados da aprendizagem significativa da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica, provavelmente proporcionadas pelas novas abordagens destas teorias científicas. As cinco categorias descritas na seção 2.4 do capítulo 2, foram levadas em conta na elaboração e seleção de material didático. A existência bem definida de uma categoria que confundia os sistemas quânticos com os sistemas complexos foi tomada como evidência de uma necessidade premente de evolução conceitual. De modo muito especial, foi levada em conta a idéia de aproximar o aluno de uma fenomenologia quântica, através da aprendizagem significativa, do aspecto preditivo fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica, atrelado à discussão do experimento de fronteira feito na década 1980, no Japão (Tonomura, 1989). Esse enfoque permitiu apresentar as diferenças radicais entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica, sendo necessário apresentar uma nova abordagem tanto da Mecânica Clássica quanto da Mecânica Quântica.

### ***3.2. Pré-Testes – Sua organização e aplicação***

Aplicado a um universo de quarenta alunos, aproximadamente, foi organizado com o mesmo objetivo já descrito na seção 2.2.1, do capítulo 2. Foram acrescentadas, contudo, algumas questões conforme aparece no APÊNDICE G.

### ***3.3. Entrevistas prévias***

Foram realizadas com o mesmo objetivo descrito na seção 2.2.2 do capítulo 2, e atingiu alunos de diversas áreas: Direito, Jornalismo, Matemática, e foi ampliada, nas entrevistas posteriores (realizadas após a intervenção de Mecânica Clássica e/ou de Mecânica Quântica), para alunos também que iam prestar exames de Vestibular para Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, além das escolhas já citadas.

### ***3.4. Uma nova abordagem da Mecânica Clássica***

Esta seção visa mostrar os pressupostos da nova abordagem de Mecânica Clássica e as idéias fundamentais que a caracterizaram, em 2005, nas ações pedagógicas do terceiro ano do



Ensino Médio do CAV. Nesta ocasião já estava em curso, a revisão de Mecânica Clássica oferecida ao terceiro ano.

Iniciou-se com a idéia de que a Física pode prever resultados de medidas em um contexto experimental bem definido, princípio este comum a todas as teorias físicas, sendo, portanto, uma idéia bastante inclusiva, considerando-se os pressupostos teóricos da aprendizagem significativa de Ausubel.

A necessidade de explicitar o aspecto preditivo desta teoria científica, de modo particular, exigiu planejamento pedagógico e a elaboração de material didático para todos os alunos de terceiro ano do CAV de 2005. A finalidade deste material, portanto, foi a de facilitar a aprendizagem significativa em torno do aspecto preditivo da Mecânica Clássica. Além disso, foi implementada uma estratégia para o ensino do determinismo clássico implícito na segunda lei de Newton. Esta visão do determinismo aparece, no século XVIII, como símbolo máximo do determinismo, através do matemático Laplace, quando declarou:

Devemos, portanto, ver o estado presente do universo como o efeito do seu estado anterior e como a causa daquele que virá. Uma inteligência que, em qualquer instante dado, conhecesse todas as forças pelas quais o mundo se move e a posição de cada uma de suas partes componentes, e que tivesse também a capacidade de submeter todos estes dados à análise matemática, poderia enquadrar na mesma fórmula os movimentos dos maiores objetos do universo e aqueles dos menores átomos. Nada seria incorreto para ela, e o futuro, assim como o passado, estaria presente e diante dos seus olhos. (...)

(apud FREIRE e CARVALHO, 1997, p. 20).

As entrevistas prévias revelaram a falta de compreensão do alunado do determinismo clássico, conforme será visto mais adiante. Era necessária uma estratégia específica para ensinar de que forma os conceitos da Mecânica de Newton asseguram o determinismo. O texto elaborado e utilizado em sala representou um convite para a construção de uma ponte cognitiva que interligasse o que o aluno já sabia e o que precisava saber para construir, no contexto científico, significados acerca do aspecto preditivo da Mecânica de Newton e do determinismo clássico implícito nesta teoria.

Examinou-se o significado do termo predição tal como aparece nos dicionários Aurélio e Houaiss. Nestes se informa que predição é o “ato ou efeito de anunciar por antecipação, de afirmar o que vai acontecer no futuro”, “de prever o que há de vir; anúncio de acontecimentos futuros”.

Procurou-se criar um texto que pudesse tornar ainda mais estável a idéia de previsão, embora se tratasse de uma idéia previamente existente na estrutura cognitiva do aluno (subsunçor), conforme atestaram as entrevistas prévias. A previsão do tempo – bom, nublado, chuvoso etc., foi idéia âncora à idéia mais geral de previsão. Enfatizou-se que os serviços meteorológicos empregam a Física em suas previsões, destacando-se que a atmosfera é um sistema demasiadamente complexo para que as predições sejam muito precisas. Foi também abordado que insuficiência de informações, e/ou sensibilidade às condições iniciais, e/ou limitações nos recursos computacionais, e/ou erros de medidas e suas propagações não retiram das teorias físicas o seu aspecto intrinsecamente preditivo.

Registrou-se, também, com base em exemplos de previsões, elaborados pelos alunos nas entrevistas, o recente e trágico Tsunami que abalou o sudeste asiático, como fenômeno cuja predição está no domínio da Física, em parceria com a Geologia, embora tenha surpreendido os que estudam fenômenos com este nível de complexidade, onde estão presentes o movimento das massas tectônicas.

Tendo em vista uma hierarquia conceitual, onde se coloca as predições mais gerais no topo da pirâmide, foram incluídas, desde o início, as predições da Física Quântica e seus desdobramentos. Mencionou-se a síntese de novas drogas, no campo da Medicina, ou novos materiais, no campo da Engenharia, como exemplos de predições quânticas. Entende-se que o significado da predição, no âmbito da Física deva ser tratado de modo mais específico, tendo em vista que as predições oferecidas pelas teorias científicas não abarcam, como se sabe, todos os níveis de realidade. Não podem, por exemplo, ser utilizadas para predizer os rumos da economia ou resultado de uma partida de futebol. Há, portanto, diferença entre a predição Física e as do senso comum, onde se inserem aspectos psicológicos de convicção.

Ao falar em predição, no terreno da Física, procurou-se refletir sobre uma pergunta mais geral: o que prevêm as teorias físicas?

As teorias físicas prevêm resultados de medidas em um contexto experimental bem definido.

Qual a questão central da Mecânica Clássica?

Vejamos, então, o desenvolvimento deste texto culminando com a resposta para esta questão.

### **3.4.1. A descoberta de Netuno**

Tomou-se como exemplo de êxito da Mecânica Newtoniana a sua característica preditiva e, de modo particular, a possibilidade de antever a descoberta de novos planetas. Quando Urano foi descoberto pelo astrônomo William Herschel, notou-se que sua órbita não convergia com as previsões da Física Newtoniana. A confiança na Mecânica era tão forte que os cientistas não submeteram ao controle de verificações empíricas o conhecimento teórico sobre o fenômeno, para estabelecer correlações entre os efeitos e suas causas, colhendo evidências para legitimar ou não o conhecimento elaborado e considerado como conceitualmente preciso. Ao contrário, formularam a hipótese de que um novo planeta, até então não observado, deveria perturbar a órbita de Urano com o seu campo gravitacional. Entre 1842 e 1846, o astrônomo e matemático francês Urbain Le Verrier e o inglês John Adams usaram a Física Newtoniana para calcular a órbita do planeta hipotético. Reforçando a imensa convicção naquela teoria científica, logo depois, Netuno foi descoberto pela equipe do Observatório de Berlim, dirigida por Johann Galle, na região prevista pelos cálculos de Le Verrier e Adams (Freire e Carvalho, 1997).

### **3.4.2. Lei e Conceitos implícitos no aspecto preditivo da Mecânica Clássica**

Considerando que o problema central da Mecânica Clássica é a obtenção das trajetórias, a partir das condições iniciais, de que forma, explicitamente, o conjunto de todos os estados de uma partícula clássica (trajetória) podem ser preditos a partir do estado inicial (ou condições iniciais)?

Essa busca de resposta para compreender, de modo quantitativo, o aspecto preditivo da Mecânica Clássica, equivale a compreender o significado físico da Segunda Lei de Newton. Isso permitirá compreender de que forma os estados da partícula macroscópica (trajetória) podem ser previstos a partir do estado inicial, ou seja, a partir das condições iniciais.

Um outro aspecto essencial da Mecânica Clássica é: de que forma passa-se do conhecimento do estado inicial para o conhecimento do estado seguinte, infinitamente próximo, e assim sucessivamente?

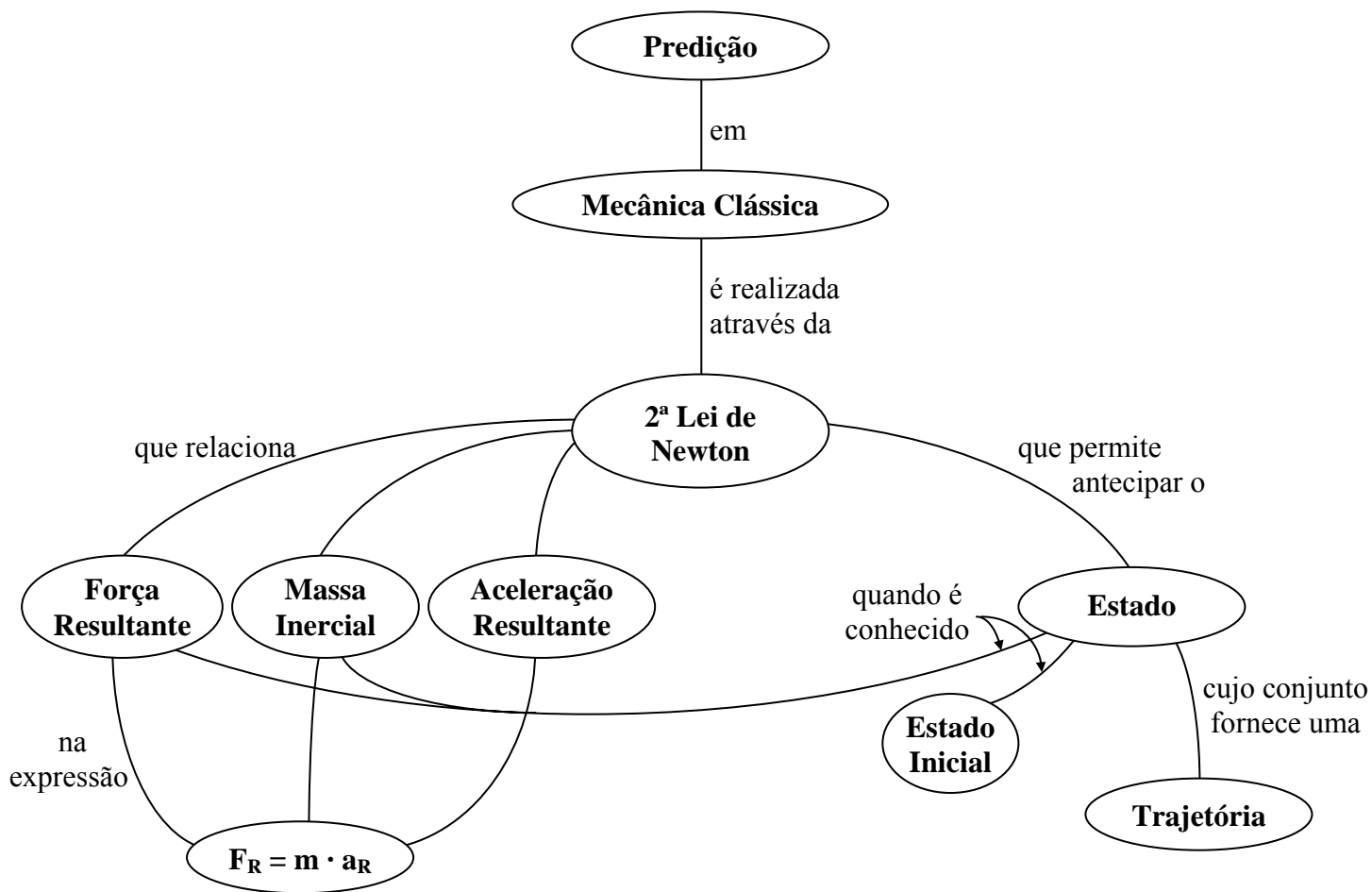
A resposta para a questão formulada está na utilização e aplicação da segunda lei de Newton:  $\vec{F}_r = m \cdot \vec{a}$ . Ao determinar o vetor aceleração média para um curtíssimo intervalo de tempo, nas proximidades de um dado instante, considerado  $\vec{a}_m = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ , será obtida a variação

do vetor velocidade (módulo, direção e sentido), que somada ao vetor velocidade inicial, dá o vetor velocidade pretendido.

Da mesma forma o conhecimento do vetor velocidade, ao final do intervalo de tempo considerado, permitirá o conhecimento do vetor posição, ao final deste mesmo intervalo de tempo, a partir da equação  $\vec{v}_m = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$ . E assim sucessivamente pode-se prever toda a trajetória. Quanto menor o intervalo de tempo decorrido entre a medição de um estado e do próximo, mais preciso será o cálculo, pois mais próximos estarão os valores médios dos valores instantâneos das referidas grandezas. A rigor, contudo, somente o cálculo de diferencial e integral permite operacionalizar os conceitos de aceleração instantânea e velocidade instantânea, o que não impediu a abordagem qualitativa já descrita anteriormente.

### ***3.4.3. Mapa conceitual do aspecto preditivo da Mecânica Clássica***

A relação entre conceitos, que asseguram o aspecto preditivo e descritivo da Mecânica de Newton, aparece no mapa conceitual apresentado a seguir, como síntese das idéias expostas no texto. Este mapa foi utilizado antes do curso de Mecânica Quântica, visando antecipar a sua inadequação para prever fenômenos no domínio atômico e sub-atômico.



#### ***3.4.4. Um exemplo: o oscilador harmônico simples (movimento unidimensional)***

O problema proposto no texto consta no APÊNDICE K e solicita o cálculo do estado de um oscilador massa-mola para um dado instante. Enfatiza-se, neste cálculo, que fixadas as condições iniciais,  $x(0)$  e  $v(0)$ , obtêm-se funções únicas,  $x(t)$  e  $v(t)$ , que fornecem o estado da partícula num instante qualquer. Aproveitou-se o momento para explicitar que a Mecânica de Newton prevê, também, propriedades de um sistema físico antes mesmo de prepará-lo. É o que acontece, por exemplo, quando se deseja mostrar que a frequência natural de um movimento harmônico simples depende exclusivamente da rigidez do sistema e da sua massa inercial, sendo uma característica que independe das condições iniciais. A resolução do problema proposto encontra-se também no APÊNDICE K. Aproveitou-se ainda para destacar que não existem energias proibidas para este sistema e que os instrumentos de observação, que envolvem a luz em particular, não perturbam significativamente os sistemas macroscópicos.

Ainda em tom ilustrativo, enfatizou-se que os modos de vibração de uma ponte, por exemplo, que dependem da rigidez e da inércia dessa estrutura, são propriedades físicas que podem ser previamente conhecidas. Essas informações, juntamente com um levantamento estatístico do comportamento dos ventos de uma dada área geográfica, permitem ao engenheiro projetar estruturas dotadas de baixíssima probabilidade de entrar em ressonância. É possível, então, predizer quais rigidezes e inércias tornarão pouco provável a coincidência entre frequência dos ventos (em média) e as frequências naturais da ponte, ou de outra estrutura qualquer. Aproveitou-se este momento para dizer que os cálculos da órbita de Netuno, embora mais complexos do que os exemplos tradicionais da Mecânica, são passíveis de descrições determinísticas, que advêm da segunda lei de Newton, procurando, desta forma, conectar o estudo crítico da cinemática à Dinâmica.

#### ***3.4.5. Limites da Mecânica Clássica***

Para compreender o alcance e os limites da Mecânica Clássica, antes mesmo de estudar a Mecânica Quântica, foram propostos os seguintes experimentos de imaginação, por mais estranhos que pudessem parecer:

- 1) um ente que num dado instante esteja em uma posição bem definida (não importando se o observador conhece ou não essa posição);
- 2) o ente imaginado não presente, nesse instante, uma velocidade bem definida.

O elétron e o fóton, individualmente, têm um comportamento deste tipo.

Nessa oportunidade, frisou-se que o elétron não é uma partícula clássica e nem uma onda clássica. A Segunda Lei de Newton, portanto, foi apresentada como não dando conta em fazer previsões para o elétron e o fóton. Foi possível, com as atividades propostas, que os alunos inferissem, neste estágio, que o estado quântico não é definido através de uma posição e de uma velocidade. Diferentemente do que ocorria na Física Clássica, não há como prever trajetórias na escala atômica, pois os entes quânticos não descrevem trajetórias, isto é, não possuem simultaneamente posição e velocidade bem definidas a cada instante. Ao analisar a Mecânica de Newton como uma teoria que não responde questões no domínio atômico e sub-atômico, pretende-se mostrar que é impossível submeter os fenômenos da natureza a leis invariáveis e constantes, considerando a variação livre de fatores, circunstâncias e características do contexto. Por essa razão, os conceitos criados pelo homem, para prever e descrever os fenômenos do mundo macroscópico, sofrem limitações de uso simultâneo na escala atômica e sub-atômica. Não se trata de desconhecimento de medidas individuais de grandezas, como medida de posição e de velocidade, mas de uma inadequação de uso simultâneo desses conceitos.

Então como prever o comportamento de um elétron? Como descrever o estado quântico de um “objeto” do mundo atômico e sub-atômico como o elétron?

Em síntese, será descrita a organização e intervenção feita no Mini-curso de Mecânica Quântica, ministrado em 2005, considerando os dados obtidos na fase exploratória.

### ***3.5. Mini-curso: uma nova abordagem de Mecânica Quântica***

O Mini-Curso de Mecânica Quântica, de 2005, foi planejado de modo a permitir uma resposta para o problema desta pesquisa. A avaliação dos resultados, especificamente das aprendizagens significativas dos alunos, foram fundamentais na reelaboração do programa de ensino e das práticas pedagógicas selecionadas, com o objetivo de superar os problemas identificados e propor ações mais eficazes. Assim, ao invés de apresentar a velha Mecânica Quântica como uma nova teoria científica, como a abordagem histórica tradicional usualmente faz, procurou-se, desde o início, representá-la como um conjunto de idéias “engessadas”, ainda que revolucionárias que careciam de um aspecto preditivo mais geral. A metáfora aqui utilizada visa enfatizar que o conjunto de descobertas feitas entre 1900 e 1925, no domínio atômico, não contemplava uma Dinâmica Quântica que possibilitasse outras

experiências que conduzissem a novas previsões e generalizações mais abrangentes. Basta lembrar que o trabalho de Bohr, publicado em 1913, não explicava, por exemplo, o espectro do gás Hélio, um dos enigmas da velha Mecânica Quântica. As hipóteses *ad hoc*, introduzidas neste primeiro quarto de século, careciam de postulados mais fundamentais.

Os diversos formalismos (matricial, algébrico e ondulatório, já descritos) evoluem para uma síntese na forma de postulados. É o conjunto destes postulados, que inclui a evolução temporal do estado descrito pela função  $\psi$ , que se conhece como Mecânica Quântica e que serve de base para a previsão no domínio atômico e sub-atômico. Esta teoria prediz, de maneira correta, todos os resultados “engessados” oriundos da velha Mecânica Quântica. A reflexão em torno desse argumento delineou o caminho adotado para, simultaneamente, abordar o que tem sido objeto da prova de vestibular da UFBA e explicar, para os alunos, o porquê de tais conteúdos não expressarem adequadamente idéias essencialmente quânticas. Não se trata, como alguns podem pensar, de querer aprofundar o ensino de Mecânica Quântica no Ensino Médio, até porque se considera essa tarefa completamente incompatível com as necessidades e possibilidades dos alunos dessa faixa etária. O que se deseja, realmente, é aproximar o aluno do conhecimento qualitativo da Mecânica Quântica, sem elos de analogia com a Física Clássica, para por em evidência as diferenças substantivas entre as previsões da Mecânica Clássica e as previsões da Mecânica Quântica. A abordagem proposta por Feynman foi o fio condutor do curso, conforme material no ANEXO E.

Vale registrar que o Mini-curso 2005 foi ministrado com a mesma carga horária do realizado em 2004, reduzindo-se o tempo dado aos alunos, em sala de aula, para resolução das questões, em relação a 2004.

### ***3.5.1. Filme exibido em sala de aula***

Como parte integrante do curso foi exibida e analisada uma filmagem, em tempo real, de um experimento realizado no Japão (Tonomura, et al, 1989), onde aparece um padrão de interferência, mesmo com a chegada de elétrons, um por um. O experimento visou facilitar uma aproximação com a fenomenologia quântica, com ênfase no aspecto preditivo fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica, na busca da resposta para o problema de pesquisa formulado.



### 3.6. Pós-Teste

Os objetivos dos pós-testes, em 2005, diferentemente de 2004, foram objetivo de avaliação da aprendizagem significativa acerca de idéias essencialmente quânticas, e não mais de caráter exploratório. Isso porque as entrevistas de avaliação tiveram como fio condutor as questões do pós-teste. Analisou-se e avaliou-se o desempenho dos alunos em 8 questões relacionadas ao problema desta pesquisa.

Buscou-se, logo de início, observar se havia um entendimento do aluno sobre a idéia de *fenômeno*, dentro da interpretação da complementaridade. Tentou-se, neste momento, investigar se o aluno reconhecia as propriedades ondulatórias dos elétrons, mesmo para eventos individuais. Foi verificado, ainda, se havia o reconhecimento de que “partículas” como os fótons também exibiam, como os elétrons, propriedades ondulatórias, mesmos jogados individualmente (quando não se sabe por qual das fendas ele passou).

Em seguida procurou-se investigar se existia uma percepção dos alunos, quanto à possibilidade de prever a curva de probabilidade ( $p$ ) em função da posição ( $x$ ), considerando um contexto experimental bem definido (fendas abertas e sem perturbação ou fendas abertas com a detecção de por qual das fendas passou). De modo especial, procurou-se investigar, visando à resposta do problema formulado, se esta predição correta é compatível com uma descrição completa do sistema quântico em estudo. Foi nesse contexto que se procurou observar se o aluno distinguia as predições quânticas das clássicas, confrontando-se, em termos qualitativos, o significado do estado de uma partícula clássica com o estado  $\psi$  de uma partícula quântica. O átomo de Bohr também foi objeto de avaliação, não para fazer analogias clássicas, mas, ao contrário, visando perceber se havia um reconhecimento do quanto este modelo é distante do implícito na equação de Schrödinger.

Este conjunto de investigações culminou com a avaliação sobre o significado que o aluno atribui ao princípio da incerteza, dentro da interpretação da complementaridade. Buscou-se, visando também responder ao problema proposto, saber se os alunos reconheciam as predições da Mecânica Quântica como predições fundamentalmente probabilísticas. Ainda, foi investigado se houve compreensão acerca de se uma teoria, ao incluir o princípio da superposição, passaria a ser necessariamente probabilística.

Como se pode observar, o planejamento do pós-teste representa uma ruptura, em termo de analogia, entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica.

### ***3.7. Análise, discussão e interpretação de dados no pré-teste***

A análise e interpretação das informações, anteriores aos cursos de Mecânica Clássica e de Mecânica Quântica, por meio dos instrumentos e técnicas descritas, tiveram como objetivo identificar, compreender e interpretar as concepções dos alunos em relação ao determinismo clássico implícito da Segunda Lei de Newton e o conceito de trajetória. Pretendeu-se ampliar e tornar mais abrangente a compreensão sobre o uso de probabilidades na Mecânica Clássica e a característica preditiva da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica.

#### ***3.7.1. O determinismo clássico implícito na segunda lei de Newton e o conceito de trajetória***

Como ocorreu em 2004, os relatos não evidenciaram, nesta fase da pesquisa em 2005, anterior às intervenções, uma compreensão acerca do determinismo clássico implícito na segunda lei de Newton. Todos os resultados descritos na seção 2.3.1 do capítulo 2, se repetiram. Considerou-se importante registrar fragmentos de recortes que ilustram tais repetições, especialmente, quando são mais ricas em detalhes do que as registradas no capítulo anterior.

Alguns alunos, por exemplo, exibem clara concepção de que os fenômenos caóticos são objetos de estudo da Mecânica Quântica e não os incluem num quadro teórico determinístico. A indeterminação, para esses alunos, é sinônimo de desconhecimento, associando, de modo equivocado, os fenômenos quânticos à falta de informação e à imprevisibilidade do tipo clássica. Um recorte típico que traduz esta idéia aparece na fala do entrevistado A5-2005. Após registrar a influência do determinismo e do mecanicismo no modo de pensar do homem do século XVII, associa os sistemas dinâmicos caóticos com a Física Quântica. Esta associação aparece explícita no recorte que se segue, desencadeada a partir de uma pergunta feita pelo próprio entrevistado:

**A:** O caos tem a ver com a Física Quântica?

**P:** Eu repasso a pergunta...

**A:** Exatamente, o efeito borboleta. Que você tem que o bater de asas de uma borboleta de um lado do mundo pode gerar um... como é que se diz?!... um furacão, um tornado do outro lado. Aí eu achei isso curioso... não posso conceber como uma questão determinística... então por isso que sempre que

alguém fala Física Quântica eu associo Teoria do Caos. É a única coisa que me vem assim, de fato, vem logo à cabeça, que eu associei logo. Então... E lá explicava a questão do pêndulo. Então, quando eu vou observar o movimento desse pêndulo, de acordo... explicando a teoria do Caos, eu penso, gente é um movimento bastante complexo, tem vá... tem variações. Por isso que eu falei que eu acho que a análise de uma... de um... uma questão envolvendo Física Quântica, uma análise de um problema, uma equação, deve ser uma coisa um pouco mais, digamos assim, que exija um pouco mais de cuidado. Porque na Física Determinística você tem lá os dados. Você pega esses dados, você aplica... na minha concepção, na Física Quântica você não pode ser tão direto. Deve ter alguma influência, deve ter algum fator externo que faça você refletir um pouco mais diante desse problema. Porque a teoria do Caos, ao meu ver, é... é complexa. Você tem várias... tem várias probabilidades.”

Ainda o entrevistado A5-2005 revela, de modo equivocado, a idéia de que o elétron descreve uma trajetória bem definida em redor do núcleo.

Um recorte com idéias similares aparece em outra entrevista, onde este mesmo aluno sustenta que a teoria do caos é estudada pela Física Quântica. Este acrescenta, ainda, que aquilo que não é determinístico não é racional e verdadeiro.

Antes de prosseguir é importante observar que a idéia de racionalidade e de verdade têm uma dimensão muito ampla, mas não é o foco dessa investigação.

É importante destacar uma idéia nova que aparece acerca do determinismo, como característica de teorias sociais. Um dos alunos reconhece, diferentemente dos dois alunos anteriores, que o caos é, por princípio, regido por uma teoria determinística. Apesar disso, não explicita quais conceitos da Mecânica Clássica asseguram o determinismo clássico. O aluno busca tratar do determinismo no contexto das humanidades e, apesar de entrar na questão do ponto de vista da Física, não explicita de que modo a Mecânica Clássica fornece uma descrição temporal de posição e velocidade, nem sequer de modo qualitativo. O recorte a seguir é pertinente a esse respeito e servirá de ilustração.

**P:** ... Eh... eu queria que você me dissesse o que é que você entende por determinismo e por uma coisa não determinística. Vamos começar por o que é que você entende por uma descrição determinística?

**A:** determinismo são teorias sociais.

**P:** você estudou aonde?

**A:** em Geografia.

**A:** ... é produto do meio em que ele vive. Ele é condicionado a ser uma coisa que ele não pode mudar.

**P:** e, no contexto da Física, o que é que você imagina ser o determinismo?... A Física de Newton é uma Física determinística? Justifique sua resposta.

**A:** sim. Porque num... num dado sistema estudado, o que se pode extrair dele em termos de... de teorias de estudo não pode ser modificado naquele sistema.

**P:** como assim? Me dê um exemplo.

**A:** se um corpo, em certas condições, realiza um certo movimento, sempre que houver essas condições...

**P:** hum?!

**A:** ... esse corpo realizará esse mesmo movimento.

**P:** interessante seu comentário. E o não determinismo seria o quê? Quer dizer o que seria uma física não determinística?

**A:** seria interferência de outros fatores desconhecidos... Não sei... ou não. Que interferissem em cada caso de modo particular.

**P:** me dê um exemplo.

**A:** não sei.

**P:** você acha que, por exemplo, uma bolinha sendo jogada num vendaval (um negócio bem caótico), é um movimento regido por uma lei determinística?

**A:** é.

**P:** é, por quê?

**A:** porque existem forças atuando nessa bolinha...

**P:** hum?!

**A:** ... que... que se podem atuar nas... da mesma forma...

**P:** hum?!

**A:** ... na mesma bolinha...

**P:** hum?!

**A:** ... vão ... vão provocar um efeito... o mesmo efeito.

O que se percebe, portanto, é a idéia de causalidade presente na fala do aluno sem referência conceitual adequada acerca da descrição determinística.

Finalmente, cabe ainda acrescentar a compreensão de outro aluno que, como muitos, conhece o significado de massa inercial, de força e de aceleração, mas não interiorizou a idéia de uma segunda lei de Newton preditiva... O aluno sabe os conceitos que aparecem na segunda lei de Newton, mas não é capaz de vincular a idéia deste princípio com a obtenção de trajetórias. Eis o recorte selecionado:

**A:** bom, massa inercial como a gente já bem aprendeu é a capacidade de oferecer resistência a mudar o movimento.  
A... a aceleração é... pra mim é a variação da velocidade num determinado espaço de tempo. E qual foi a outra?

**P:** força.

**A:** força? Bom, força eu sei lhe dizer que é a resultante da massa vezes a aceleração, mas (como eu já falei), o significado pra isso, eu não sei lhe dizer.

Diante das respostas dos alunos, evidenciando que não haviam feito aprendizagens significativas dos conceitos abordados, era necessário criar uma estratégia capaz de promover uma reflexão em torno do aspecto preditivo da Mecânica de Newton e do determinismo clássico.

### ***3.7.2. O uso de probabilidades em Física.***

Com relação ao conhecimento prévio, registre-se que estes alunos de 2005 também associaram, equivocadamente, o uso da probabilidade em Mecânica Quântica, como

insuficiência de informações, desvinculando-o da idéia do aspecto fundamentalmente probabilístico desta teoria científica. Relatos de que os sistemas dinâmicos complexos são objetos de estudo da Física Quântica aparecem no grupo das idéias equivocadas. A probabilidade, para esses alunos, é apenas um recurso usado para simplificar as predições. Não foi observada, do mesmo modo que em 2004, nenhuma distinção entre o uso de probabilidade no domínio macroscópico e no domínio atômico e sub-atômico.

O aluno A5-2005-a, por exemplo, referindo-se às condições ideais freqüentemente presentes nos exercícios desta disciplina sustenta que, em virtude disto "... algumas aproximações são feitas e utilizam-se as probabilidades". Este mesmo aluno argumenta, equivocadamente, que uma teoria probabilística não pode ser preditiva. Atribuiu uma necessidade de uso da probabilidade em virtude do conhecimento humano acerca dos sistemas atômicos e sub-atômicos. Para exprimir essa idéia argumenta que "... realmente é difícil, é trabalhoso você prever, mas você enxerga... você... se parar pra analisar assim dá pra entender mais ou menos como é que a coisa funciona", referindo-se a fenômenos no domínio macroscópico", completando "mas no âmbito sub-atômico nós não temos conhecimento... Então, se eu uso probabilidade já facilita o meu trabalho". Registre-se ainda que o mesmo aluno enquadra os fenômenos caóticos, equivocadamente, como fenômenos que são objeto de estudo da Física Quântica. Declara que: "... Então quando eu falo... eh... Como eu tava falando da teoria do Caos, eu penso nas probabilidades... Entendeu?!... Que, por sinal, são várias e que é meio difícil de definir, exatamente, o que é que vai acontecer."

Cabe, ainda, destacar um recorte ilustrativo do pensamento de um aluno que vincula o uso de probabilidade às relações de Heisenberg, antes do ensino de Mecânica Quântica. Contudo interpreta a impossibilidade de medição simultânea de posição e velocidade como a expressão do desconhecimento acerca de grandezas simultaneamente, como posição e velocidade. O recorte que segue é ilustrativo de sua compreensão:

**P:** qual é o papel da... da probabilidade dentro da Física? Por que é que nós utilizamos probabilidades dentro em Física?

**A:** bom, na Mecânica Quântica, a probabilidade é muito importante, porque tem aquela... aquele princípio que diz que você não vai saber exatamente aonde o elétron está e com que velocidade num determinado tempo. Então você... Eh... quantifica a probabilidade de ele estar em determinado

lugar ou em outro determinado lugar. Em outros campos da Física talvez porque a gente calcule... Eh... que o que a gente calcule são situações ideais. Quando a gente vai passar por experimento você não vai ter certeza você vai... é provável que aconteça aquilo com algum... alguma margem de erro.

**P:** venha cá, você fala que é impossível você medir, simultaneamente, a posição e a velocidade de um elétron num determinado instante... Eh... Voc/... Isso significa dizer, pra você, o quê? É impossível? Por quê que é impossível? Explique isso melhor.

**A:** bom, certa vez eu li que a impossibilidade vem do fato de que quando... que você não consegue ver o elétron. Quando você vai tentar ver é como se ele fugisse assim, entre aspas...

Ao ser perguntado sobre o significado das relações de Heisenberg o aluno mostra não ter compreendido o aspecto fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica.

**A:** bom, você perguntando agora, eu acho que sim. Eu acho que é... a incerteza é da impossibilidade de a gente calcular essas grandezas ao mesmo tempo.

Registre-se, finalmente, que para um outro aluno (A1-2005-a), o uso de probabilidade reflete o fato de, nos exercícios de Física, trabalhar-se unicamente com condições ideais.

**A:** eh... Então, eu acho que a Física usa muito a probabilidade porque... não a Física que a gente estuda no colégio. Eu acho que a... a Física que a gente estuda no colégio, pelo menos o que eu tenho feito até agora... Eh... a gente não... a gente não considera atrito, força do ar, resistência... Eh... e aí você tem... você tem um resultado. Mas na realidade você não... na... na prática você tem uma outra... uma outra visão, você tem que usar todos os fatores que... que tão...

Eh... que podem modificar, você...o que você está pensando em fazer. E você tem a probabilidade de... você... você faz uma... uma análise de que... Eh... poderá acontecer se você um material, uma determinada força, então você tem...

### **3.7.3 O aspecto preditivo das teorias físicas**

A análise do pré-teste e das entrevistas prévias evidenciou que os alunos pesquisados, do mesmo modo que em 2004, não haviam aprendido a idéia de predição como característica das teorias físicas. Não haviam, portanto, incorporado a idéia de que a Física pudesse antever resultados de uma medida em um contexto experimental bem definido.

Finalmente, serão apresentadas as falas de dois alunos que evidenciaram ter aprendido de modo significativo a idéia de previsão. O recorte escolhido revela que o conceito de previsão está assimilado na sua estrutura cognitiva.

**P:** você lembra de alguma coisa do dia-a dia que a gente recorre à probabilidade?

**A:** Fora... pode ser fora da Física, assim?

**P:** pode.

**A:** se você olhar pro céu vai dizer se tiver de chover ou não. Qual a probabilidade de chuva.

Esta informação foi de grande importância, norteando e orientando os percursos em busca da resposta ao problema desta pesquisa. A presença da idéia de previsão não é sinônimo de que a idéia de predição física esteja presente na estrutura cognitiva. Como forma de ilustrar esta situação, será apresentado o depoimento do aluno A1-2005-a, que, embora tenha o subsunçor previsão, não possui a idéia de que a predição seja uma característica física.

**P:** aproveitando, você acha que a ciência, me refiro à Física em particular, ela lida somente em explicar as coisas que estão ocorrendo ou ela é capaz também de antever alguma coisa que há de vir no futuro?



**A:** em alguns casos ela pode prever... Eh... possíveis acontecimentos no futuro. Como exemplo tem o... o efeito estufa...

**A:** ah, que eles... eles prevêem que... que o Sol vai acontecer alguma coisa. A Terra vai ficar quente ou fria. Então, a Ciência ela estuda e... Eh... vê o que pode... o que esses efeitos podem ocasionar no futuro.

Após estas respostas, insistiu-se em observar a idéia de predição no contexto das teorias físicas.

**P:** quer dizer, qual é a teoria que nos permite prever informações ligadas ao cometa Halley?

**A:** então, teoria?! Eu não sei dizer... Ah... eu não sei assim, o que é que os astrônomos, os físicos fazem pra... pra perceber o quanto a perióci/... a periodicidade e... não sei como eles sabem que vai acontecer... como... como sabem onde vai passar. Eu não sei. Esses detalhes eu não sei.

Considerando as análises do pré-teste e das entrevistas prévias, pode-se observar que contribuíram com informações significativas acerca do conhecimento prévio do grupo pesquisado, tanto da Mecânica Clássica quanto da Mecânica Quântica. Embora os alunos tenham na sua estrutura cognitiva a idéia estável, clara e organizada, de previsão, a exemplo de que é possível prever se amanhã vai chover, não manifestaram nos seus discursos relacionar o conceito de “predição”, atribuído a situações do cotidiano, ao conceito de “predição” como uma característica das teorias físicas.

### ***3.8. Análise, discussão e interpretação de dados: resultados obtidos após a nova abordagem do curso de Mecânica Clássica***

A consciência da possibilidade de prever o estado clássico de uma partícula macroscópica, a partir do estado inicial (condições iniciais), mediante a Segunda Lei de Newton, é um resultado que apareceu nas entrevistas de dois dos três alunos entrevistados imediatamente

após a nova abordagem de Mecânica Clássica. Como evidência desta aprendizagem significativa, um recorte da entrevista concedida pelo aluno A4-2005-p será apresentado a seguir. Convém observar que este aluno explicita de que forma a Segunda Lei de Newton e conceitos desta teoria científica são utilizados na operacionalização das predições da Mecânica Clássica. Vejamos:

**P:** Vamos voltar um pouquinho agora, e falar da... da... da Mecânica de Newton. Eu queria que você me dissesse de que forma é que você pode, através da Mecânica de Newton. Eh!... predizer estados clássicos?... Como é que funciona esse esquema preditivo da Mecânica Clássica?

**A:** Bom, em relação às forças que atuam no corpo, força... Eh!... a Segunda Lei de Newton, que diz que força é o produto da massa vezes pela aceleração, eu acho que através dessa expressão, você pode prever todas... e através... da posição e da velocidade inicial, você pode prever os estados da partícula em determinado instante. Porque a aceleração tá relacionada com a variação da velocidade em relação ao tempo e a velocidade com a variação do espaço em relação ao tempo. Então você pode relacionar a Segunda Lei de Newton com a posição e o tem... e o tempo e a... o... e a velocidade.

Uma integração qualitativa de dados levou em conta ainda que o aluno A4-2005-p e os outros dois (A2-2005-p e A5-2005-p) reconheceram, mediante as avaliações que constam dos APÊNDICES L e M, que o determinismo sempre associa, para um corpo macroscópico, uma posição e velocidade bem definidas, mesmo que os valores correspondentes a essas grandezas não sejam conhecidos. Reconheceram, como consequência, que o caos macroscópico é descrito de modo determinístico, ainda que seja extremamente sensível às condições iniciais. Reconheceram, finalmente, haver uma limitação de uso simultâneo das grandezas posição e velocidades simultaneamente no domínio atômico e sub-atômico, ou seja, uma limitação ao conceito de trajetória na descrição de fenômenos atômicos e sub-atômicos. A esse respeito e referindo-se ao material didático que aparece no APÊNDICE K o aluno dialoga com o entrevistador da seguinte forma:

**A:** Certo. Ham, ham. Algu/... algumas coisas que eu... que o material trata eu já tinha alguma... uma certa noção. Não bem esclarecida na minha cabeça, mas meio confuso, mas eu já tinha certa noção. E o material serviu pra... pra esclarecer isto... algumas coisas... sistematizar... Eh... ti... preencher as lacunas que haviam. Como, por exemplo, a... o caos determinístico, não ser uma... uma limitação propriamente da Física, mas sim dos recursos tecnológicos do homem, da falta de informação. E eu tinha uma certa noção disso, mas não sistematizado como foi apresentado na lista. E outras coisas, também, como o movimento do elétron, eu não tinha conhecimento nenhum. Pra mim o movimento do elétron era aquele movimento clássico do núcleo no meio e a trajetória bem definida e orbitais em volta... a trajetória bem definida era um conceito que eu tinha antes do material. O material serviu pra desconstruir essa idéia. O elétron não tem a trajetória bem definida.

Este mesmo aluno, A2-2005-p, do mesmo modo que o A4-2005-p, ao ser perguntado sobre como prever o estado de uma partícula, a partir do estado inicial, consegue, ao longo do diálogo, explicitar uma resposta adequada. Segue-se o recorte que ilustra esta situação.

**P:** Bom, então me diga assim de uma maneira, agora, mais enxuta, como é que você prevê o estado de uma partícula a partir de um estado inicial?

**A:** A partir das forças que você conhece a cada instante...

**P:** Hum?!

**A:** ... atuando na partícula. Usando a Segunda Lei você obtém as acelerações...

**P:** Pra isso você precisa saber o quê? Antes... Na hora de fazer esta conta? Na hora de você usar a Segunda Lei de Newton?

**A:** A massa inercial. Com as forças e a massa inercial você obtém as acelerações instantâneas a cada instante. E com as acelerações você obtém a variação da velocidade naquele

instante. E com a variação da velocidade você calcula o estado... o estado da partícula.

O recorte a seguir trata da entrevista do aluno A5-2005-p que, apesar das considerações adequadas, não explicita, com o mesmo grau de detalhamento dos demais alunos entrevistados, como se pode antever um estado clássico a partir das condições iniciais, mediante a Segunda Lei de Newton.

**P:** O estado de um elétron fica definido, de maneira completa, por uma posição e por uma velocidade?

**A:** Não.

**P:** Certo. Entendo o que você fala. Vamos adiante. O que é que você entende por Determinismo Clássico que está implícito na Mecânica de Newton?

**A:** Determinismo Clássico?! É que todos os fenômenos macroscópicos são regidos pela Segunda Lei de Newton.

**P:** Considere como situação problema, um pêndulo P, oscilando com grandes amplitudes, não mais em regime de MHS. Não há atrito nem com o ar nem com o suporte. Com base no que foi discutido em sala de aula, comente o seguinte: a predição da posição do pêndulo P, num dado instante, só pode ser feita com recurso à probabilidade. Em tal predição o uso de probabilidade torna-se fundamentalmente não eliminável? Justifique.

**A:** Falso. Porque sendo uma partícula macroscópica...

**P:** Hum?!

**A:** ... sendo uma partícula macroscópica, a... não existe, ou seja, a probabilidade... calcular os estados da partícula. Não é necessário você usar a probabilidade.

**P:** Por que quando você pega várias moedas e joga pra cima, você usa a probabilidade, já que é macroscópico?

**A:** Porque você não tem conhecimento das forças que atuam em cada moeda, a cada instante. A probabilidade é só um recurso que você dispõe pra chegar mais perto.

Este mesmo aluno A5-2005-p, mostra uma evolução conceitual satisfatória sobre o significado de sistemas dinâmicos caóticos como passíveis de descrições determinísticas, ainda que demasiadamente complexos, tendo em vista que este aluno, na fase prévia de investigações de 2005, revelou, inadequadamente, a idéia de que o caos era o objeto da Mecânica Quântica. O recorte que segue ilustra esta situação.

**A:** ... o estado clássico ele é bem definido quando você tem uma posição e uma velocidade definidas pra um dado instante.

**P:** Certo.

**A:** Isso aí é um estado clássico.

**P:** Compreendo.

**A:** É, já ficou claro pra mim que a Teoria do Caos se trata de um fenômeno macroscópico que se encaixa na Mecânica Clássica e não tem, digamos assim, sendo um pouco radical, nada a ver com a Mecânica Quântica. Já ficou claro isso.

Embora esta pesquisa não tenha tido como foco os conceitos de massa inercial, força e aceleração, considerou-se indispensável, antes da nova abordagem de Mecânica Clássica, que incluiu o seu aspecto preditivo, perceber os significados construídos sobre estas grandezas, registrando-se o desempenho desses alunos acerca destes conceitos, conforme aparece no APÊNDICE I.

### ***3.8.1. O aspecto preditivo da Mecânica Clássica e o determinismo implícito nesta teoria científica.***

Percebeu-se uma adequada compreensão acerca deste item no universo dos alunos pesquisados. Uma conseqüência desta aprendizagem significativa foi a tomada de consciência de que o caos determinístico, como o próprio nome sugere, é em princípio redutível ao esquema de previsibilidade oferecida pela Mecânica Clássica. Acrescente-se, ainda, a compreensão adequada de que as limitações das descrições determinísticas em escala atômica e sub-atômica são incompatíveis com os conceitos de trajetória.

Vejamos um caso em que o aluno A2-2005-p reconhece que o estado quântico não é descrito do mesmo modo que o estado clássico e que não tem sentido algum atribuir, simultaneamente, uma posição e uma velocidade para um elétron.

**P:** O estado de um elétron fica definido, de maneira completa, por uma posição e por uma velocidade?

**A:** Não.

**P:** Certo. Entendo o que você fala. Vamos adiante. O que é que você entende por Determinismo Clássico que está implícito na Mecânica de Newton?

**A:** Determinismo Clássico?! É que todos os fenômenos macroscópicos são regidos pela Segunda Lei de Newton.

**P:** Considere como situação problema, um pêndulo P, oscilando com grandes amplitudes, não mais em regime de MHS. Não há atrito nem com o ar nem com o suporte. Com base no que foi discutido em sala de aula, comente o seguinte: a predição da posição do pêndulo P, num dado instante, só pode ser feita com recurso à probabilidade. Em tal predição o uso de probabilidade torna-se fundamentalmente não eliminável? Justifique.

**A:** Falso. Porque sendo uma partícula macroscópica...

**P:** Hum?!

**A:** ... sendo uma partícula macroscópica, a... não existe, ou seja, a probabilidade... calcular os estados da partícula.

**A:** Não é necessário você usar a probabilidade.

**P:** Por que quando você pega várias moedas e joga pra cima, você usa a probabilidade, já que é macroscópico?

**A:** Porque você não tem conhecimento das forças que atuam em cada moeda, a cada instante. A probabilidade é só um recurso que você dispõe pra chegar mais perto.

Já o aluno A -2005-p mostra uma evolução satisfatória sobre o significado de sistemas dinâmicos caóticos como passíveis de descrições determinísticas, ainda que demasiadamente complexos.

**A:** É preditíveis. É isso. Pela Mecânica Clássica, devi... devido a dificuldade. Então a gente viu que não, que por mais difícil que seja, há uma forma, que nosso aparato matemático, digamos assim, ainda não possi/... ainda não nos possibilitou chegar lá, mas há uma forma de predizer. É possível. Só que na Mecânica Quântica, não. Não é por ignorância. É que na questão de que a gente usa a probabilidade é intrínseco. Inclusive um fato que eu achei interessante trazer aqui é a discussão entre Einstein e Bohr...

**P:** Hum?!

**A:** ... porque Einstein considerava uma fraqueza da Mecânica Quântica a questão da probabilidade.

Este mesmo aluno, como vemos, tem consciência das limitações do determinismo em escala atômica e sub atômica.

**A:** ... o estado clássico ele é bem definido quando você tem uma posição e uma velocidade definidas pra um dado instante.

**P:** Certo.

**A:** Isso aí é um estado clássico.

**P:** Compreendo.

A: É, já ficou claro pra mim que a Teoria do Caos se trata de um fenômeno macroscópico que se encaixa na Mecânica Clássica e não tem, digamos assim, sendo um pouco radical, nada a ver com a Mecânica Quântica. Já ficou claro isso.

Cabe finalmente registrar que o desempenho destes alunos em questões de provas encontram-se nos APÊNDICES L e M.

### ***3.9. Análise, discussão, interpretação de dados: resultados obtidos após a nova abordagem do curso de Mecânica Quântica***

Antes de iniciar a descrição, análise, interpretação e discussão dos significados das predições fundamentalmente probabilísticas da Mecânica Quântica, construídas pelos alunos que assistiram ao Mini-Curso de Mecânica Quântica de 2005, é importante salientar que o conhecimento produzido como desdobramento do problema, objeto desta pesquisa, exigiu respostas e tomadas de posições teóricas e pedagógicas. Nesse contexto, entrelaçaram-se o fazer da ciência e o fazer pedagógico como base orientadora da produção do conhecimento, a partir de sucessivas produções do real, na busca de pensar uma prática interrelacional de ensino de Física, especificamente, da teoria dos quanta ou Mecânica Quântica. As análises e interpretações dos dados e os resultados que serão apresentados constituem conhecimentos aproximados, relativos, não absolutos. Precisa ficar claro que a construção do discurso da ciência só tem sentido e se amplia à medida que reconhece os seus limites.

É nessa perspectiva que foi pensada a descrição das análises, interpretações e resultados, como processos de construção de saberes científicos e pedagógicos, considerando-se o desafio que isso significa e as dificuldades a superar.

Assim ao empreender a última fase da pesquisa, buscou-se avaliar a aprendizagem significativa da predição fundamentalmente probabilística da Mecânica Quântica e enfatizar que tal predição pode ser testada empiricamente, visando o conhecimento aproximado de uma fenomenologia propriamente quântica. Foi retomada a idéia proposta pelo físico Richard Feynman (1963) de que o “mistério” da Mecânica Quântica pode ser compreendido (no sentido de como funciona), através do experimento da dupla fenda com “partículas” subatômicas (elétrons, fótons, etc), jogadas uma de cada vez. O filme japonês, já citado, foi escolhido para ser discutido com os alunos justamente por tratar de eventos individuais (no



caso, elétrons jogados um a um, produzindo um padrão típico de interferência). Isso permitiu compreender que o aspecto probabilístico da Mecânica Quântica não pode ser eliminado nem mesmo quando se faz previsões acerca do comportamento de um único elétron num dado contexto experimental. Permitiu-se compreender, portanto, que a probabilidade, no domínio atômico e sub-atômico, não expressa insuficiência de informações, mas, ao contrário, preenche todos os requisitos racionais para a elaboração de uma teoria completa, do ponto de vista da complementaridade, de Bohr.

Através desta estratégia didática foi-se agregando o referencial teórico para provocar respostas para o problema desta pesquisa, permitindo reflexões críticas que resultassem na percepção das diferenças entre as previsões fundamentalmente probabilísticas da Mecânica Quântica e as previsões estatísticas da Mecânica Clássica, tomando por base o experimento de fronteira já descrito.

O aspecto preditivo das teorias físicas foi o eixo temático que desencadeou todas as questões das entrevistas, desde as mais gerais até as mais específicas. Procurou-se começar sempre por investigar se o aluno havia se apropriado dos significados mais inclusivos e gerais, para, em seguida, abordar as questões mais específicas. (Ausubel,1980). A dinâmica das entrevistas suscitou questões que extrapolam a discussão proposta. Conforme pode-se observar, alguns “desvios” do foco da investigação culminavam por revelar sutilezas que vinham ao encontro do problema de pesquisa.

A primeira entrevista analisada é do aluno A1-2005-p. Em seguida, serão destacadas semelhanças e diferenças desta entrevista com as demais, tomando como referência os três eixos temáticos descritos no capítulo 2. Ao final deste capítulo, estes significados serão agrupados em categorias que expressem as semelhanças e diferenças de significados compartilhados.

### ***3.9.1. Análise, discussão e interpretação da entrevista do aluno A5-2005-p***

A resposta, objeto da análise, foi desencadeada a partir da seguinte pergunta: Qual a característica comum às teorias físicas?

Após listar a Mecânica Clássica, a Termodinâmica, o Eletromagnetismo, a Mecânica Quântica e a Relatividade como exemplos de teorias físicas, ele sustenta que a previsão é uma característica central das teorias físicas. Explica que “previsão física é a antecipação de certos fenômenos baseada na teoria correspondente”. Refere-se à Mecânica Clássica como teoria

capaz de antever a posição e a velocidade de uma partícula, via segunda lei de Newton, e refere-se à Mecânica Quântica como teoria capaz de antever a probabilidade de um elétron estar num certo sub-nível de um átomo. Registra também que a predição física é expressa através de uma linguagem matemática, dizendo que “sem linguagem matemática não tem como prever as situações”. Logo em seguida estabelece uma distinção entre o mundo material e os conceitos que são usados para descrevê-lo, argumentando que “...O fenômeno acontece, mas pra você descrever ele você precisa de uma linguagem matemática. Pra você dizer, por exemplo, que um corpo vai ultrapassar o outro, você precisa de alguns conceitos matemáticos”.

Acreditando na importância de captar o significado que o aluno atribui à linguagem matemática no processo de predição, o entrevistador aproveitou a oportunidade e perguntou: “Me faz, então, um vínculo entre a Matemática e esse aspecto preditivo. Como é que seria isso?” O recorte apresentado visa ilustrar a questão.

**A:** Digamos assim, a partir da observação de certos fenômenos, aí monta-se uma... uma teoria física baseada em algumas linguagens matemáticas e cria-se algumas funções matemáticas pra... como se estivesse assim, modelando o fenômeno. Pra você prever, você tem que colocar certas variáveis nessa função. Por exemplo, a Mecânica de Newton com a Segunda Lei, a força resultante igual a massa vezes a aceleração.

**P:** Você falou aí que primeiro a gente observa algum fenômeno, e depois vai dar um tratamento a ele matemático... Eh!... Isso, via de regra, é assim ou você pode inventar uma formulação matemática antes mesmo de observar alguma coisa?

**A:** É, na maioria das vezes é assim, mas, por exemplo, na Relatividade, Einstein não... não fez assim, ele criou a teoria antes de... de observar algum fenômeno, aí depois, através do experimento, descobriu que a teoria dele estava correta.

Antes de prosseguir convém refletir sobre a interrelação dos saberes científicos feita pelo entrevistado que caracteriza a postura relacional do homem com o mundo, com os outros homens e com a ciência. Esta postura é uma forma de racionalidade, é também pedagógica porque construtiva, realizando-se no sujeito.

Este trabalho não investiga aprendizagem significativa sobre a teoria da relatividade. Entretanto as considerações feitas pelo entrevistado interessaram ao entrevistador na medida em que o aluno reconhece que a corroboração experimental desta teoria física validou as previsões teóricas relativísticas. Isso revelou, portanto, uma compreensão adequada do que seja uma previsão física, independentemente do conhecimento do aluno acerca dos conceitos da teoria da relatividade. Conforme já registrado, a idéia de previsão tanto da Mecânica Clássica quanto da Mecânica Quântica foi ancorada numa idéia mais geral: a previsão física. Esta ancoragem foi possível porque a idéia de previsão pré-existia na estrutura cognitiva desse aprendiz.

O aluno inicia sua resposta assinalando que

**A:** o que rompeu exatamente com a Mecânica Clássica foi descobrir que as partículas sub-atômicas não seguem certas leis, não seguem o conceito de trajetória e inserir as probabilidades como uma... uma característica inerente à... à teoria... uma característica indispensável da teoria, ... Entendeu?!”.

O próprio aluno, ainda, encarregou-se de frisar que sua resposta tomou por base a interpretação de Bohr.

A partir deste momento, a entrevista começa a se desenvolver através da negociação de significados sobre conceitos chaves da pesquisa. O entrevistador buscou, então, evidências de aprendizagem significativa em torno do aspecto preditivo da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica. Foram feitas perguntas referentes a estas teorias, visando verificar eventuais aprendizagens automáticas, dadas para “agradar” ao professor, ou algo similar. A estratégia foi “cruzar” respostas e refletir sobre a sua consistência ou inconsistências.

Tanto o conceito de trajetória como o princípio de Heisenberg podem remeter, por exemplo, aos conceitos de posição e velocidade. Isso porque a trajetória pressupõe a definição simultânea de ambas as grandezas (posição e velocidade), o princípio da incerteza impõe a

impossibilidade de definição simultânea dessas mesmas grandezas. Um aluno, portanto, que tenha aprendido de modo significativo o princípio de Heisenberg não pode, a rigor, ignorar o conceito de trajetória clássica e o limite de aplicabilidade deste conceito no domínio atômico e sub-atômico. Foi nesse contexto que foram avaliadas as respostas, integrando os dados qualitativos, de forma que fosse ampliada a possibilidade de apreender os significados construídos pelos alunos.

A aprendizagem significativa do aluno A1-2005-p foi proporcionada a partir do seu “desconforto” diante da limitação do uso simultâneo das grandezas posição e velocidade no domínio atômico e sub-atômico. Este desconforto, aliás, não é exclusividade dos alunos aprendizes. É também de muitos cientistas que compreenderam e não aceitaram a interpretação fundamentalmente probabilística da Mecânica Quântica, como foi o caso de Einstein, por um descontentamento de uma natureza peculiar: a crença de uma recuperação determinística local a partir da unificação do Eletromagnetismo com a Gravitação (Freire, 1999).

Prosseguindo, foi selecionado um recorte ilustrativo da aprendizagem significativa acerca do conceito de trajetória. O aluno, referindo-se a uma “partícula” quântica, argumenta que

**A:** ... imaginar alguma partícula que não tenha trajetória é muito desconfortável assim, isso... isso tá relacionado muito com a ruptura com a Mecânica Clássica que a gente vem pensando... que a gente foi ensinado a pensar de acordo com a Mecânica Clássica. Aí quando a gente começa a aprender a Mecânica Quântica a gente... pô como é que existe alguma coisa que não tem posição e velocidade, que é mais ou menos o conceito de trajetória. Quer dizer que é o conceito de trajetória.

### ***3.9.1.1. O aspecto fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica***

O contraste entre as previsões quânticas fundamentalmente probabilísticas e as previsões clássicas (estas últimas compatíveis com o conceito de trajetória) aparece, de modo explícito. O entrevistado A1-2005-p, argumenta que

**A:** É porque quando você aprende que a trajetória... que não existe a trajetória pra o elétron você... todos os seus conceitos caem por terra... Mas eu comecei a, digamos assim, a acreditar na... na interpretação probabilística com... com aquele experimento, com o filme daquele experimento da... das duas fendas que eram jogado/... que eram jogados vários elétrons e aí surgia, realmente, um padrão de interferências pra os elétrons.

**P:** Bom, aí você tocou num ponto que a gente precisa agora... Eh!... a gente precisa se concentrar nesse ponto. Me diga de que forma é que o experimento, que nós passamos em sala,... Eh!... lhe ajudou a compreender esse traço probabilístico da Teoria Quântica? Me descreva o... o... Eh!... o experimento, dentro da ótica da... da complementaridade.

**A:** Bom, o... o experimento mostra exatamente que... quer dizer serve pra...

**P:** Descreva o experimento.

**A:** Eh!... o experimento consiste em jogar elétrons um por um, e aí vão... vão surgindo um padrão de interferência no anteparo, exatamente depois das duas fendas. E esse experimento serve... na... de acordo com a interpretação da complementaridade pra mostrar exatamente a dualidade onda-partícula. Porque o elétron... aquela... aquela interpretação ondulatória independe se forem um... se for um elétron ou se foram vários elétrons. Ou seja, é impossível saber por qual das duas fendas o elétron passou, porque se ele tivesse passado por uma só fenda é impossível ele interferir. Então... Eh!... ou ele passou pelas duas?! É algo até... é algo desconfortável em relação a isto.

O diálogo prossegue argumentando que o uso de probabilidade no domínio atômico e sub-atômico expressa a ignorância humana acerca dos sistemas quânticos. O recorte que segue sem interrupções ilustra esta situação com o objetivo de tentar compreender de que

forma o aluno percebe o princípio da incerteza e a dualidade onda-partícula como expressões da complementaridade. Para tanto, discutiu-se o experimento feito no Japão, propondo uma reflexão conceitual sobre o *fenômeno*, considerando os eventos individuais.

**P:** Com relação ao experimento da dupla-fenda com elétrons é correto afirmar que quando não se observa por qual das fendas o elétron passou o fenômeno é ondulatório. Isso é verdadeiro?

**A:** É verdadeiro.

**P:** Por quê?

**A:** Hram, digamos assim, se você não... não observa por qual das duas fendas ele passou, você pode admitir (eu não sei se é exatamente essa a linguagem mais didática pra usar) mas você pode admitir que ele passou com... por... Eh!... pelas duas fendas e por isso gerou um padrão de interferência de... você perguntou se eu posso dizer se ele passou ou por uma ou por outra. Eu acho que se ele tivesse passado por uma das fendas só, não geraria interferência. E é por isso que...

**P:** E o fenômeno seria o quê?

**A:** Seria corpuscular.

**P:** Tá, você falou aí em dualidade onda-corpúsculo... Eh!... deixe-me perguntar o seguinte: se eu fizer esse experimento (das fendas), e você tiver lá a tela detectando a chegada de três elétrons. Chegou um, chegou o outro, chegou o terceiro. Esse fenômeno, ele é ondulatório? Ele é corpuscular? Ou ele é as duas coisas? De acordo com a interpretação ortodoxa da... de... de Bohr.

**A:** Ah!... Eh!... As duas coisas é... Hram... é impossível, de acordo com essa interpretação. Porque os dois eventos são excludentes... Foi até uma dúvida que eu tive quando eu vi o filme. Porque quando você jogava um elétron só, não tem como você observar um padrão de interferência pra um

elétron só. Mas conceitualmente, assim, eu... eu acho que, conceitualmente, ele é um fenômeno ondulatório.

**P:** Venha cá se você tiver um número suficientemente de elétrons que você possa jogar, com certeza, em algum momento você vai ter uma... um padrão de interferência formado?

**A:** Se você não souber por qual das fendas ele passou, eu acho que sim. Hrum.

A discussão do experimento não ficou restrita a análise do comportamento quântico dos elétrons. Considerou-se essencial problematizar a idéia de que tanto a matéria como a radiação podem exibir propriedades corpusculares ou ondulatórias, a depender das condições experimentais impostas por um observador que preparou um dado sistema. Visando, novamente, uma resposta para o problema de pesquisa, abordou-se o aspecto fundamentalmente probabilístico, tomando como exemplo os fótons, jogados, um a um, nas mesmas circunstâncias do elétron. Para tanto foi proposto um experimento de imaginação com eventos individuais, envolvendo fótons. Para ilustrar a aprendizagem significativa das previsões quânticas, será apresentado um outro recorte que descreve uma luz muito fraca, enviando um fóton de cada vez.

**P:** Vamos fazer o seguinte, vamos repetir esse experimento que a gente tá discutindo aqui, só que com luz bem fraquinha, ao ponto de eu poder jogar fóton por fóton. Vamos começar por aí... Não é?!... esse fenômeno seria... seria ondulatório ou corpuscular?

O aluno recorre ao argumento de De Broglie. Explicita, referindo-se a questão de De Broglie, que

**A:** ... por aquele argumento de De Broglie, que a qualquer corpo pode ser... Eh!... associar um comprimento de onda, o fenômeno seria ondulatório, também. Eu acho que esse aí seria análogo ao fenômeno dos elétrons.

Fortalecendo a idéia da aprendizagem significativa do aspecto preditivo da Mecânica Quântica, o aluno relacionou as probabilidades com o princípio da incerteza, aplicado a eventos individuais. A seguir o recorte ilustrativo desta situação:

**P:** Agora, voltando à questão da probabilidade, onde é que está o... o aspecto, inerentemente probabilístico da Teoria Quântica, se... tomando por base esses experimentos, seja com elétron, seja com fóton? Vamos pensar em um,... como você falou, com um elétron...

**A:** Hum?!

**P:** ... Onde é que entra aí a probabilidade intrínseca? E aproveite, e contraste isto com o uso de probabilidade que a gente faz em física, em estatística...

Note-se que o aluno tem clareza da idéia de que as probabilidades no mundo quântico não refletem a nossa ignorância.

**A:** Bom, o aspecto probabilístico, neste caso, eu acho que tá relacionado a posi/... às relações de incerteza de Heisenberg, de não saber exatamente o par, posição e velocidade...

**P:** Por ignorância?

**A:** Não. Quer dizer, é... não... se... Eh!... intrinsecamente, ele não... não existe esse par, você sempre vai ter uma incerteza de... entre posição... a posição e a velocidade. E, em relação a... as probabilidades que a gente usa na Mecânica Clássica é, exatamente, por ignorância, por desconhecer, ou por ser muito difícil você dizer, exatamente, onde... qual é esse... quais são essas características do... do corpo.

Note-se, portanto, que o aluno compreende que um fenômeno envolvendo fótons, ao invés de elétrons, nas mesmas condições experimentais já descritas, é também ondulatório. Ele associa que as predições que dão conta do padrão de interferências são intrinsecamente probabilísticas, não tendo correlação com insuficiência de informações, dando evidência clara



de aprendizagem significativa acerca do aspecto fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica.

### ***3.9.1.2. Evolução conceitual acerca do aspecto preditivo da Mecânica Quântica***

Embora já houvesse informações suficientes para concluir-se que o aluno aprendeu de forma significativa o aspecto fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica, é oportuno analisar de que forma esse aluno evoluiu até compreender o aspecto preditivo da teoria quântica. Na verdade, não há uma simples mudança na estrutura cognitiva do aprendiz. Moreira (1992) (apud Peduzzi 1999), embasando-se nas teorias de Ausubel, Novak e Gowin, já alertava que a mudança conceitual é muito difícil, uma vez que as concepções alternativas também são frutos de aprendizagem significativa e, por isso mesmo, resistentes à mudança. Em sintonia com este pensamento o que se buscou foram estratégias para aprendizagem de significados compartilhados no contexto científico, e não o “abandono de significados alternativos, mas o de adquirir consciência de que tais significados são errôneos no contexto científico”. O recorte que segue mostra a evolução conceitual.

**P:** Bom, diante de tudo o que a gente tá conversando me diga se... Eh!... Hram... a Teoria Quântica, se ela é uma teoria preditiva. Justifique sua resposta.

**A:** Hrum! Bom, eu vou começar dizendo que, antes... antes do curso, antes da... de tomar as aulas, eu achava que a Teoria Quântica, exatamente, não era uma teoria preditiva por não dizer exatamente aonde... qual a posição e qual a velocidade. Eu achava que a probabilidade seria algo contrário de... de uma teoria preditiva. Mas como eu já... já respondi anteriormente que uma das características inerentes de todas as teorias físicas é a característica preditiva, eu acho que a... a Teoria Quântica também é preditiva por prever as probabilidades do... do fenômeno. Por exemplo, no padrão de interferência, as probabilidades de o... de se... Eh!... as probabilidades de você encontrar o elétron em certa posição”.

Conforme já explicitado na revisão da literatura, foi utilizada a estratégia de não fazer analogias entre Mecânica Clássica e Mecânica Quântica. Foi dessa forma que procuramos evitar as interferências que idéias semi-clássicas poderiam ter na compreensão de idéias essencialmente quânticas. Assim, ao ser introduzido o átomo de Bohr, neste mini-curso, procurou-se evidenciar que o conceito de estado clássico continua sendo utilizado, constituindo uma inconsistência desse modelo. Ao que parece o aluno compreendeu adequadamente a incompatibilidade, a rigor, entre o átomo de Bohr e Mecânica Quântica formulada entre 1925 e 1927. O recorte que segue é uma evidência disto.

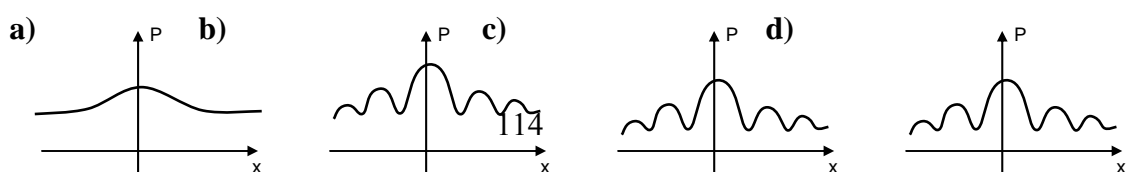
**P:** Baseado no conceito de estado clássico e estado quântico, avalie em que medida o modelo atômico proposto por Bohr, em 1913, se afasta da teoria quântica formulada entre 1925 e 1927.

**A:** Bom, essa foi exatamente... foi exatamente algumas dúvidas que a gente teve quanto a... ao modelo de Bohr, mas ele veio antes da Física Quântica. É por isso ele tem algumas características que se afastam. Por exemplo, quando você começa a calcular, você usa a força resultante como força elétrica, ou seja você usa a Segunda Lei de Newton pra descrever a... a trajetória como circular, aí você associa a ele um par de velocidade e... e posição bem definidas.

**P:** Você tocou num ponto su... sutil, a... a proibição que a Mecânica Quântica impõe é quanto a definição simultânea de espaço e velocidade ou somente de uma dessas grandezas?

**A:** Ah, acho que é quanto a... a definição simultânea. Exatamente por aquela equação de Heisenberg, que relaciona o produto das duas.

Os gráficos que seguem foram, corretamente, feitos pelo aluno para representar a distribuição de probabilidade nos casos balas de revólver, ondas clássicas, elétrons e fótons, lançados um a um, com as duas fendas abertas.



**A:** Eh!... A curva da... de probabilidade em relação a... ao X (X, a posição), no... com... com elétrons é bem parecida, quer dizer, é a mesma, eu diria é a mesma curva que... quando... como se o fenômeno fosse ondulatório. Ou seja, como se você jogasse uma onda clássica naquele experimen/... co/... como se você realizasse aquele experimento das duas fendas com uma onda. Você teria aquele mesmo padrão. Isso só reforça a idéia de que o fenômeno é ondulatório.

**P:** por que é que você não pode chamar o elétron de uma partícula clássica?

**A:** Por conta da... da indefinição de você saber a posição e a velocidade em um determinado instante.

### ***3.9.1.3. Comentários finais sobre a interpretação da complementaridade – Entrevista A4-2005-p***

Como muitos alunos manifestaram uma concepção prévia de que a Mecânica Quântica pode um dia recuperar o determinismo, considerou-se conveniente avaliar o posicionamento do aluno face a esta idéia. Essa foi, aliás, uma estratégia utilizada para perceber, em que medida, o aluno compreendeu e interpretou adequadamente a complementaridade. Este recorte ilustra esta situação.

**P:** Eh!... de acordo com a interpretação da complementaridade, você acha que é correto dizer que a relação de incerteza é a expressão de uma teoria quântica incompleta?

**A:** Ah, eu acho que não. Eu acho que é exatamente o contrário. É a partir das relações de incerteza e... (hram)... e da função... e

da função  $\psi$ , que você vai poder prever os estados quânticos de uma partícula. Digamos assim, prever as probabilidades. Eu acho que as relações de incerteza ajudam a... a tornar uma teoria quântica completa. Ajuda nas suas predições.

É importante destacar que embora o aluno tenha compreendido que o estado quântico descrito pela função  $\psi$  seja diferente do estado clássico, compreendendo de modo qualitativo o aspecto preditivo da Mecânica Quântica, ele reclama não saber operar com a função  $\psi$ , como se pode observar no recorte apresentado.

**P:** tá. Você falou aí em função  $\psi$ , e eu estou vendo aqui, também, que você construiu um mapa conceitual,... Eh!... envolvendo aqui Mecânica Quântica. Eu queria que cê falasse do que é que você entendeu de função  $\psi$  e finalizasse essa entrevista comentando aqui o seu mapa conceitual. ... Certo?!... O que é que você entendeu como função  $\psi$ ?

**A:** Bom, primeiro... Eh!... eu não tenho conhecimento pra dizer, exatamente, qual a função  $\psi$ , como manipular ela matematicamente com... com propriedade. Mas pelo que eu entendi de função  $\psi$ , ela é uma função que fornece as probabilidades de... (Hram)... as probabilidades de uma partícula quântica, digamos assim, o estado quântico de uma partícula. E é a partir dela que cê... que você faz a predição na Mecânica Quântica. E aqui no meu mapa conceitual eu falei exatamente isso...

O aluno finaliza suas considerações, manifestando uma compreensão do aspecto probabilístico da Mecânica Quântica e, por isso mesmo, foi possível manifestar-se à vontade sobre o incomodo que sentia. Esta construção de conhecimento que exige articular “saberes”, revelando uma compreensão adequada da complementaridade, considerando as limitações próprias da idade, e conseqüentemente das experiências vivenciadas, foi muito importante para desencadear outras reflexões posteriores no processo de interpretação.

O recorte que segue ilustra esta situação.

**A:** “E, sobre alguma dúvida que eu ainda tenho. Não é exatamente uma dúvida, mas é um desconforto que eu ainda tenho em relação às probabilidades serem intrínsecas à Mecânica Quântica. Eu ainda... Eh!... ainda estou... pendo pro lado de analisar a... a... ou... outras interpretações com... digamos assim, com dois olhos. Porque é... é um apoio que você tem, pra você que sempre aprendeu conceitos determinísticos, de repente ver uma teoria que é totalmente probabilística é... é um bom apoio pra você se basear, por exemplo, na... em Einstein ou em algumas teorias por aí que querem derrubar este conceito de probabilidade intrínseca.

Registre-se que este aluno revela ainda uma concepção alternativa de que o aspecto probabilístico da teoria quântica pode, no futuro, refletir um quadro conceitual incompleto, algo que remete a uma reflexão acerca do aspecto preditivo das teorias físicas.

### ***3.9.2. Análise discussão e interpretação da entrevista do aluno A8-2005-p***

A aprendizagem significativa do aspecto preditivo das teorias físicas revelou-se satisfatória também na entrevista do aluno A8-2005-p. De modo particular, o aluno reconhece que as previsões quânticas, mesmo para eventos individuais, são fundamentalmente probabilísticas, distinguindo-as das previsões da Mecânica Clássica. Os argumentos apresentados evidenciam significados, em geral, muito similares àqueles construídos pelo aluno A4-2005-p. Antecipa-se, por isso, o bom desempenho do aluno A2-2005-p, tendo em vista que tais significados são aqueles compartilhados no contexto da ciência. No universo de quatro alunos entrevistados, percebeu-se um argumento singular que reforça o pressuposto da conveniência de ensinar a Mecânica Quântica sem analogias com a Mecânica Clássica, conforme foi descrito na revisão da literatura.

Portanto o ponto de partida será a análise do argumento deste aluno, que aparece logo no início da entrevista, quando é solicitado a explicitar as diferenças das previsões clássicas e previsões quânticas.

Referindo-se a estas diferenças, ele argumenta que

**A:** ... na Mecânica Quântica, você não tem a mesma... você não pode falar em trajetória, como você fala na Mecânica Clássica, de Newton. É essa pra mim é a... é a diferença fundamental que existe entre a Mecânica Quântica e a Mecânica Clássica. E tem,... é uma série de... é... é totalmente diferente... a Mecânica Quântica não há nada que se pareça com... Eh!... eu cheguei a... a falar isso pra alguém, eu disse assim: uma pessoa pode não ter aprendido nada de Mecânica Clássica, mas se... se chegarem pra essa pessoa e ensinarem a Mecânica Quântica e disserem é isso aqui, não... não faz tanta diferença.

Esta afirmação tem importância fundamental para esta pesquisa, uma vez que ela pode ajudar a elucidar de que forma o ensino praticado contribuiu para a aprendizagem significativa de conceitos essencialmente quânticos, a exemplo do princípio da incerteza ou do princípio da superposição. Cabe então perguntar: quais razões teriam levado o aluno a elaborar uma frase radical e, a princípio, tão incisiva?

Far-se-á, de início, uma conjectura pautada nas respostas que serão, mais adiante, analisadas: o princípio da incerteza e o princípio da superposição não se reduzem, em princípio, a nenhuma idéia clássica e a compreensão disso, por parte do aluno, pode ter levado a um posicionamento daquela natureza. Desde muito cedo, quando da formulação do problema dessa pesquisa, já havíamos decidido abordar a Mecânica Quântica sem elos de analogia com a Mecânica Clássica, apoiados na revisão da literatura.

Ao pedir maiores esclarecimentos ao aluno, ele prossegue dizendo:

**A:** ... o choque da Mecânica Quântica é exatamente porque a gente sabe o que é a Mecânica Clássica. Se nós não soubéssemos o que é a Mecânica Clássica e só existisse a Mecânica Quântica pra ser ensinada (claro que isso é irreal, não é?!), mas se fosse assim, eu acredito que seria possível ensinar a Mecânica Quântica sem ter esse choque que você tem de você pensar que o elétron não tem uma trajetória.

- P:** Me fala mais sobre essa... essa ruptura que a Mecânica Quântica introduziu, do ponto de vista conceitual, na Física.
- A:** Bom, na Mecânica Quântica... na Mecânica Clássica você pode determinar a posição e a velocidade inicial de uma partícula, enquanto na Mecânica Quântica você é incapaz de fazer isto.
- P:** Você é incapaz de fazer isso por que você ignora, não tem como ter acesso a essas informações ou porque elas não estão bem definidas? Me explique como é que é isso.
- A:** Bom, o elétron, como o fóton, como qualquer outra partícula sub-atômica não tem posição e velocidade bem definidas em instante algum. É assim que eu compreendo. E essa incapacidade não é uma falha, é uma característica da Mecânica Quântica. Essas velocidades e essas posições não estão bem definidas.

Em seguida, tentou-se compreender o significado que o aluno construiu acerca da dualidade onda-partícula e sua interligação com o princípio da incerteza, mediante análise do experimento de pensamento de Feynman, já descrito anteriormente. De modo específico, interessa a análise de todos estes princípios sob o ponto de vista da complementaridade. O recorte que segue poderá ilustrar a compreensão.

- P:** Hrum... Eh!... Vamos falar, agora, do experimento de Young com elétrons... Certo?!... quando eu jogo elétrons por fendas e não observo por qual das fendas o elétron passa, eu tenho um fenômeno ondulatório ou corpuscular?
- A:** O fenômeno vai ser ondulatório, se as duas fendas estiverem abertas.
- P:** E se eu jogar três elétrons somente?
- A:** O fenômeno continua sendo ondulatório, com as duas fendas abertas.
- P:** Por que?
- A:** Porque eu não observei por onde o elétron passou.

A conversa prossegue, agora já de forma mais delimitada acerca do problema de pesquisa:

**P:** Outra coisa, você pode se servir desse experimento para...  
Eh!... falar do caráter, essencialmente probabilístico da Teoria Quântica?... você usa a probabilidade em Mecânica Quântica porque você está lidando com muitos elétrons e aí são muitos, e a coisa fica difícil de tratar, ou mesmo que você jogue um por um, a descrição continua sendo inerentemente probabilística?

Referindo-se ao experimento de Young, o entrevistador solicita ainda que o aluno fale, livremente, sobre o que ele aprendeu ali.

**A:** Bom, uma série de coisa... Não é?!... Eh!... primeiro que essa dualidade onda-partícula, foi uma idéia que adveio da... após da Mecânica Quântica. Antes se achava que ou era onda ou era partícula. Isso é muito claro. Depois que... o fato da montagem do experimento determinar um tipo de fenômeno também é uma coisa que a Mecânica Quântica é que trouxe, que... Isso é chocante, sem dúvida. Sim... Eh!... o... o experimento de Young ele... claro que com ele eu posso visualizar o aspecto probabilístico da Me... da Mecânica Quântica, porque afinal esse é o intuito da Teoria Quântica. É predizer, como qualquer outra teoria científica... no campo da Física.

**P:** Mas o que é que você está predizendo nesse experimento?

**A:** Eu posso predizer o... o comportamento do elétron, sendo corpuscular ou ondulatório, de acordo com a forma como eu mudo. Se eu boto apenas uma fenda aberta o fenômeno vai ser corpuscular... É com certeza. Entendi. ... Eh!... de que eu pensa... Eu pensava assim que... como se o elétron ele pudesse se comportar de duas maneiras, como uma partícula



e como uma onda. E depois, graças ao experimento de Young, eu pude compreender que o elétron ou ele é uma onda ou ele é uma partícula, de acordo com o experimento.

**P:** Agora, quando você fala assim, ou é onda ou é partícula,... Hram... você está dizendo que ou é onda clássica ou é partícula clássica? Me explique aí essa diferença?

**A:** Bom é aquela que, pra... para um elétron, eu não possa determinar uma velocidade e uma posição.

**P:** Por ignorância ou por princípio?

**A:** Por princípio.

**P:** Que princípio... que princípio é que proíbe essa medição simultânea de... de momento e de posição?

**A:** O Princípio da Incerteza de Heisenberg.

**P:** Você pode me falar sobre ele?

**A:** Hum, hum (sorriso).  $\Delta X$  vezes  $\Delta P$ , maior ou igual que  $\hbar$  sobre dois  $\pi$ . Ou é  $\hbar$  cortado, sei lá.

### ***3.9.2.1. O Princípio da Superposição***

Este momento da entrevista suscitou uma reflexão que tem origem em uma idéia de Dirac, que considera o princípio da superposição como sendo a maior diferença entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica. Ao ser argüido sobre este princípio, o aluno considerou verdadeira a idéia que “uma teoria que inclua este princípio (princípio da incerteza) deve ser inerentemente probabilística” e que “uma tal teoria permite que as probabilidades de resultados sejam diferentes de 0 e 1”. (Greca, 2000). Registre-se, então, um recorte que ilustra esta situação.

**A:** Eh!... O princípio da superposição, eu entendi que é como se o elétron, no caso o elétron pudesse estar... não fosse uma... não sendo uma partícula clássica ele pudesse estar em vários lugares ao mesmo tempo, ou não estar em nenhum deles.

**P:** Sim, mas me comente... Venha cá, você ... você quer fazer alguma... Eh!... al... alguma referência a esse princípio da superposição no contexto do experimento de Young. Por exemplo, o fenômeno é ondulatório se a gente não sabe por qual delas passou. Isso significa dizer que o elétron ou passou por uma ou passou por outra?

**A:** Segundo o princípio da superposição o elétron pode ter passado ou pelas duas fendas ou pode não ter passado por nenhuma.

A entrevista é finalizada quando o entrevistador solicita ao entrevistado que diga, de que forma, o modelo de Bohr, em 1913, se afasta de uma fenomenologia quântica. Este mesmo aluno sustenta que:

**A:** Bom, eu acho que a... o maior afastamento que existe aí, é porque Bohr começou... pra ele chegar nessa equação final ele começou... ele partiu de um... como se o elétron fosse uma partícula clássica que estivesse girando em um movimento circular perfeito em torno do... do núcleo. O que não ocorre, o elétron ele... ele gira como se fosse uma onda estacionária. Não é? Ou não?

**P:** Vá lá. Eu quero saber em que medida é que se afasta.

**A:** Bom, como ele partiu de uma coisa clássica,... de qualquer forma eu já me... eu já pensei nisso assim, de uma coisa conflituosa assim que é comum na Física (principalmente quando você vai começando a compreender alguma coisa) ... Eh!... e eu pensava assim: bom ele partiu de uma coisa clássica mas chegou num resultado verdadeiro.

É importante registrar que este depoimento sinalizou a distância entre a Teoria Quântica e o aparato teórico formulado entre 1900 e 1925.

### ***3.9.3. Análise, discussão e interpretação da entrevista do aluno A3-2005-p***

A entrevista do aluno A3-2005-p está centrada, desde o início, numa recusa radical a pensar a Física sem imagens, idéia esta que conta com adeptos e não adeptos no meio

científico. A posição inflexível do aluno foi de extrema importância por trazer à tona uma questão presente, desde o ano de 1927, quando o físico Lorentz declarou não poder fazer uma idéia da Física sem imagens, ao dizer que: “Nós sempre quisemos, até aqui, formar estas imagens por meio das noções ordinárias de espaço e tempo. Estas noções são talvez inatas” (apud Freire e Carvalho, 1997).

Prioritariamente, deseja-se analisar a relevância do pensamento do aluno na resposta para o problema de pesquisa, mas para tanto considerou-se indispensável analisar uma questão: a recusa do aluno a fazer uma Física sem imagem vem atrelada à aprendizagem significativa dos conceitos e leis que expressam uma limitação ao conceito de trajetória no domínio atômico e sub-atômico? É indispensável esclarecer esta questão, pois se a resposta fosse negativa, não haveria razão para incluir nesta pesquisa comentários que não fossem pertinentes à Física.

Apesar de o aluno registrar, em vários momentos, sua falta de compreensão da Física, de um modo geral, dispõe-se também de evidência de um entendimento acerca da idéia que causou incômodo. Como expressão maior dessa compreensão que gerou incômodo, registre-se o reconhecimento da falta de aceitação de o elétron interferir com ele próprio, ou seja, de eventos individuais, um por um, gerando um padrão típico de interferência. Quando este aluno aceita isto, reconhece que teria que aceitar também que o elétron não passa nem por uma fenda nem pela outra. São indícios que o aluno compreendeu as limitações clássicas nas previsões quânticas, mas recusa-se a aceitar uma Física sem o conceito de trajetória, a realidade quântica. Alguns trechos são importantes. O primeiro deles reflete o inconformismo do aluno de não se poder falar em onda clássica sobre um fenômeno quântico com características ondulatórias.

**A:** ... Tem um problema. Eu sou uma pessoa que eu preciso ver o que é que tá acontecendo. Jogar um monte de números na minha frente, não adianta nada. Eu preciso ver. Eu preciso, sei lá, pegar... Eu preciso saber que aquilo vai acontecer. Então... eu até posso pensar, sei lá, tipo se fosse uma onda clássica passando, quando batesse ia cada... cada ponto seria uma nova frente de onda e seria... é justamente aí que tá o problema. Ele não é uma... ele, digamos assim... não é uma onda clássica, que quando chega lá ele bate e passa a ser uma bolinha. Eu não... eu não consigo entender. É uma coisa... é

como se tivessem dizendo duas coisas que seriam contrárias.  
Não... não consigo entender. Não... não consigo... não vai.

O mesmo aluno radicaliza quanto à questão da imagem e sustenta que:

**A:** ... você disse que a... a preocupação da Física não é em estabelecer imagens, é de você conseguir fazer as coisas. Deu certo ótimo, não deu, vamos tentar de novo, a teoria está errada. Mas e as imagens? Pra mim é necessário uma imagem. Eu preciso conhecer algo palpável pra mim. Eu não consigo acreditar nessas coisas que eu simplesmente não consigo ver. É muito difícil.

Em busca de mais informações, o entrevistador prossegue:

**P:** Venha cá, e o fato de os resultados experimentais serem concordantes com a teoria, isso não... pra você não... não é uma coisa suficiente não?

O aluno responde:

**A:** Não. Porque, é o que eu digo, eu preciso entender aquilo.

Registre-se ainda que, ao referir-se às curvas de probabilidade tal como aparecem no Lectures, de Feynman, o aluno revela que os resultados experimentais são conflitantes com sua intuição. Ele diz:

**A:** o gráfico de probabilidade do... do... com bala de revólver, eu consigo entender. Tudo bem. Agora e o gráfico com elétrons? Eu sei que aquilo acontece. Eu sei que eles fizeram experimento que acabou dando certo, mas se... se alguém...

Registre-se, agora, um fragmento que ilustra esta situação:

**P:** Mas, o que é... o que é que lhe agride naquele experimento? Especificamente...

**A:** Tudo.

**P:** ... qual é o resultado experimental... Aquela curva de interferência?...

**A:** Hum?!

**P:** ... jogando um a um, o que é que lhe incomoda naquele experimento?

Agora, finalmente, o aluno dá uma resposta que, definitivamente, pode ser compreendida como uma resposta de natureza científica que é compatível com sua aprendizagem significativa e com seu inconformismo com as idéias essencialmente quânticas, a exemplo de uma interferência ser gerada a partir de elétrons jogados um a um. O aluno argumenta que:

**A:** Primeiro é que um elétron consegue se interferir com ele mesmo. Como é que ele vai conseguir fazer isso? Se alguém... eu tenho certeza se eu fosse explicar aquilo dali, aquele gráfico pra qualquer outra pessoa, eu... eu iria me fazer a mesma pergunta. Eu iria perguntar como é que ela não passa por nenhuma das duas fendas, mas chega lá...

### ***3.9.3. Análise, discussão e interpretação da entrevista A4-2005-p***

O aluno A4-2005-p, do mesmo modo que os demais, compreende de maneira significativa o aspecto preditivo das teorias físicas, e, de modo especial, o aspecto fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica. Referindo-se à situação em que a luz é utilizada para detectar por qual das fendas o elétron passou, este aluno argumenta que, ao fixar o contexto experimental, é possível prever se haverá ou não interferência do elétron em eventos individuais. Distinguindo as previsões da Mecânica Clássica das previsões da Mecânica Quântica, ele exemplifica, de modo particular, o aspecto não eliminável da probabilidade nas previsões quânticas. Para ilustrar o seu raciocínio, exemplifica falando da curva de probabilidade e de pontos onde a probabilidade de se detectar elétrons é quase nula, tendo o cuidado de registrar que o fenômeno só será ondulatório, com o padrão típico de

interferência, quando a luz (eventualmente utilizada para detectar por qual das fendas o elétron passou) está apagada, e que esta predição será confirmada independentemente de quantos elétrons são lançados. Registre-se, ainda, que tem consciência de que as predições discutidas por Feynman, no Lectures, só foram validadas empiricamente posteriormente. A idéia de que a observação pode ser precedida de uma teoria foi adequadamente percebida. Antes de prosseguir, é conveniente observar de que forma ele expressa tais conhecimentos aprendidos de modo significativo, na medida em que não os reproduz, de maneira automática, mas reflete de maneira substantiva e não arbitrária, na medida em que reconhece que o entendimento de todas as questões postas só podem ser compreendidas se abandonarmos o conceito de estado clássico. O aluno tem plena consciência de que a Física utilizada para compreender o “átomo de Bohr” mostrou-se, a propósito, insatisfatória para prever, de modo mais geral, os fenômenos quânticos. Como uma das consequências das limitações clássicas na descrição dos fenômenos atômicos e sub-atômicos, o aluno registra a inadequação do conceito de trajetória. Mais uma vez o aluno evidencia aprendizagem significativa na medida em que esta compreensão é relacionável com as idéias de posição e velocidade. Reconhece também que a renúncia à definição simultânea de ambas é incompatível com a idéia de trajetória.

Para justificar as considerações anteriores foram feitos alguns recortes, começando pela análise da idéia de predição, onde o aluno recorre ao experimento mostrado em vídeo na sala de aula.

**P:** Eh!... Me dê um exemplo concreto que você mostre predições quânticas sendo confirmadas experimentalmente.

**A:** A que eu sei é que o elétron quando passa pela fenda com a luz apagada ele mostra a franja de interferência. E sei que eles fizeram isto antes do experimento. Porque o experimento só veio vinte ou trinta anos depois. Não foi?

**P:** Compreendo. E onde é que tá a predição nisto aí?

**A:** Quando a pessoa que fez a teoria disse que ia acontecer tal coisa.

**P:** Tá. Vamos passar, então, pras diferenças conceituais de Mecânica Clássica pra Mecânica Quântica.

O aluno utiliza a probabilidade para se referir às previsões quânticas. Observe-se, agora, o recorte que ilustra o aluno utilizando a probabilidade para se referir às previsões quânticas.

**A:** A diferença é que a Mecânica Quântica tem que usar a probabilidade nos cálculos. E o de Newton dá o resultado tipo único. Você sabendo a condição inicial, aí cê faz os cálculos e tá lá por mais difícil que seja. E a Mecânica Quântica não, você tem que usar a probabilidade pra saber o que é que vai acontecer.

**P:** Tá. Agora, veja bem, eu queria que você me... me... me falasse, com mais detalhes, de um experimento que mostrasse o... o aspecto, fundamentalmente, probabilístico da Teoria Quântica.

**A:** O movimento dos elétrons que... o... o... ... que você não sabe onde é que ele vai bater no anteparo. Mas cê sabe que existe a probabilidade maior dele bater em... em tal lugar, e em outras ele não vai bater quando a curva dá zero.

**P:** essa probabilidade aí que você tá usando, é por que você jogou muitos elétrons?

**A:** Não...

**P:** Ou, mesmo que você jogasse um, seria uma coisa de previsão... Eh!... fundamentalmente probabilística?

**A:** Seria probabilística... Não importa se você jogar mil ou um, vai ser a mesma coisa. ... Não é?!...

**P:** Jogando um ou mil, vai ser a mesma coisa, como? O fenômeno aí é ondulatório ou corpuscular?

**A:** Depende da condição... Não é?!...

**P:** Sim, a condição é: você jogou um por um e não está... cê tá jogando um por um e não tá observando por qual fenda ele passou.

**A:** Ondulatório.

Dando continuidade às análises, observou-se o reconhecimento explícito, por parte do aluno, de que não é adequado utilizar o conceito de estado clássico no domínio atômico e sub-atômico. É dentro deste contexto que argumenta sobre o aspecto fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica, dizendo que “O modelo de Bohr se afasta porque... da Mecânica Quântica, porque ele ainda fala em trajetória do elétron, as... a trajetória circular que ele dá. Ele define até um estado pro elétron. E na Mecânica Quântica isso é...”

Visando saber de qual estado ele está falando (se é o estado clássico ou quântico) o entrevistador pergunta:

**P:** Defina o estado de... esse estado seria definido através de... através de que grandezas?

**A:** Posição e velocidade. Não. É, sim, posição e velocidade.

**P:** E o que é que tem a ver posição e velocidade com trajetória?

**A:** Se você tiver as duas simultaneamente, você vai ter uma trajetória.

**P:** E, se você não conhecer as duas, mas elas estiverem bem definidas, a trajetória aparece bem definida?

**A:** Se você não conhecer as ...

**P:** É...

**A:** ... como assim?

**P:** ... É. Se você não... por exemplo você jogou uma bola numa... na fumaça. Tá difícil de você saber como é que a coisa vai acontecer. Uma bolinha de ping-pong. O estado da partícula, num determinado instante, a gente pode associar... Eh!... aquele... a gente pode dizer que ele tem um estado bem definido através de uma posição e uma velocidade, mesmo que a gente não conheça?

**A:** Pode.

**P:** Hum. E... e a definição de estado clássico é aplicável ao mundo atômico?

**A:** Não.



**P:** E esse estado quântico teria a ver com quê? Se o estado de um elétron não é mais um estado tal como é o estado de uma bola de bilhar, num determinado instante, então esse estado... Eh!... quântico tá associado com o quê?

**A:** Ha, ha. A probabilidade?... Não é?!...

Esta primeira parte da entrevista finaliza-se com o aluno explicando como compreende o princípio da incerteza. Sustenta que:

**A:** O Princípio da Incerteza diz que você não pode determinar, simultaneamente, a posição e a quantidade de movimento de um elétron.

**P:** Só um instante, por favor. Isso é porque a gente ignora-os. Quer dizer... Eh!... o espaço e a quantidade de movimento estão bem definidos, mas de maneira oculta, que a gente não conhece? É isso? O problema... é um problema de ignorância?

**A:** Não. Não. O problema é que não existe. Que, quando você determina um, você altera... você acaba alterando a... o elétron, aí não vai conseguir deter...

**P:** Então, eu queria, agora, que você me... me falasse, na essência, o que é que difere a Mecânica Quântica da... da... da Física Clássica, da Mecânica Clássica. Quer dizer, conceitualmente, essas teorias diferem em quê? Que novidades conceituais vieram da... da Mecânica Quântica?

**A:** Confesso que, quando eu vi pela primeira vez, eu achei estranho essa idéia de você não poder deter...

**P:** Quais das idéias? E porque que achou?

**A:** Principalmente de você não poder determinar o estado de um elétron. Que você sempre pensa que ele tá lá. Que ele existe. Então, se ele existe, pra... tudo o que você sabe... ele vai ter um... ele vai está em algum lugar com tal velocidade ou então parado, mas...

**P:** Mas você acabou de dizer que essa... essa definição de estado clássico pra um elétron não é mais possível.

**A:** Mas, antes de saber a teoria, pra mim servia.

### ***3.10. Conclusão das análises e interpretações***

A resposta ao problema desta pesquisa, obtida especialmente mediante análise das entrevistas, aponta para a possibilidade de aprendizagem significativa do aspecto preditivo fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica. Tomou-se como evidência desta aprendizagem o reconhecimento, por parte dos alunos, da possibilidade de prever resultados de medida em um contexto experimental bem definido, no domínio atômico. Esses alunos reconheceram, por exemplo, que o ato de preparar e de observar um dado sistema quântico, num dada circunstância, define o fenômeno como ondulatório ou corpuscular, do ponto de vista da interpretação da complementaridade, de Niels Bohr, e que os elétrons e fótons não são nem partículas clássicas e nem ondas clássicas. De modo particular, ao assistirem ao filme do experimento da dupla fenda com elétrons, feito no Japão, (Tonomura, et al, 1989) perceberam que a falta de definição por qual das fendas os elétrons passam é compatível com a idéia de uma interferência, mesmo para eventos individuais e que a definição de por qual das fendas passou é compatível com a idéia de um fenômeno corpuscular. Há também, em sintonia com tais resultados, a percepção de que o elétron não é uma partícula clássica nem uma onda clássica. Ao esboçarem a curva de probabilidade em função da posição, para o mesmo experimento, na maioria, reconheceram que essas predições não representavam as predições estatísticas clássicas, mas sim probabilidades irreduzíveis e não elimináveis, que, por princípio, expressavam uma realidade descrita pela teoria quântica. É dentro deste contexto que esses alunos perceberam, de modo qualitativo, uma diferença entre o estado quântico descrito pela função  $\psi$  e o estado clássico definido pela posição e velocidade. A percepção dessa diferença foi facilitada, possivelmente, pelo nosso empenho em acentuar as diferenças entre as duas teorias, ao invés de apontar inadequadas semelhanças. Ademais, os alunos reconheceram, coerentemente, de acordo com a interpretação da complementaridade, a incompatibilidade entre as trajetórias advindas da segunda lei de Newton e o aspecto fundamentalmente probabilístico advindo do Princípio da Incerteza. Possivelmente, por tudo isso, a nova abordagem ao ensino da Mecânica Quântica em cursos de nível médio aproximou os alunos de uma fenomenologia propriamente quântica, o que parece bastante adequado ao

cidadão que necessita compreender o impacto científico, tecnológico e filosófico da Mecânica Quântica, na cultura dos séculos XX e XXI e contrastar os fundamentos da Física Clássica com os da Física Quântica. A aprendizagem significativa do aspecto preditivo destas teorias científicas só foi possível por haver, previamente, uma idéia estável de predição física, ancorada numa idéia anteriormente existente na estrutura cognitiva do aluno, a de previsão derivada do “senso comum”. Além disso, foram avaliadas as aprendizagens significativas acerca de conceitos físicos, já previamente mencionados, que garantem as predições destas teorias científicas. Registre-se, finalmente, que a interpretação adotada, complementaridade, não pareceu exercer influência determinante na interpretação do aluno. A maioria desses alunos, por exemplo, embora tenha evidenciado compreender o traço probabilístico da Mecânica Quântica, dentro dos marcos dessa interpretação, manifestou uma nítida tendência de considerar este posicionamento como provisório. Isso reforçou um pressuposto do pesquisador de que apresentar a interpretação da complementaridade, longe de estimular para eventuais preferências pessoais, contribui para aguçar o senso crítico do aluno que, ao entender a interpretação hegemônica estará mais seguro para posicionar-se contra ou a favor, dentro das limitações cognitivas provenientes de uma faixa etária dos 16 a 18 anos, embora não se reconheça aqui que a controvérsia de interpretação dos quanta deve, simplesmente, se resumir em interpretação da complementaridade X interpretação contrária. Existem, como já foi dito, uma controvérsia inconclusa com diversas vertentes. Este tema, porém, conforme já foi dito, extrapola aos objetivos desta pesquisa.

#### ***4. Conclusões***

A investigação buscou esclarecer, como resposta para o problema formulado, a possibilidade de introduzir, no Ensino Médio, o aspecto preditivo da Mecânica Clássica e o aspecto preditivo fundamentalmente probabilístico da Mecânica Quântica, conforme descrito na introdução.

Sumarizando as conclusões já descritas anteriormente destaca-se como resultado principal da pesquisa a aprendizagem significativa acerca do aspecto preditivo intrinsecamente probabilístico da Mecânica Quântica, mesmo para eventos individuais, como na interferência dos elétrons, jogados um a um, no experimento da dupla fenda, realizada no Japão (Tonomura, et al, 1989). Isso expressou, a nosso ver, um importante avanço na percepção de uma fenomenologia propriamente quântica e uma reflexão mais crítica acerca das limitações do determinismo clássico implícito na segunda lei de Newton. Considera-se, contudo, que este é apenas um resultado parcial que necessita de outras investigações para ser aperfeiçoado e, eventualmente, levado para outros contextos.

## REFERÊNCIAS

1. ALVES-MAZZOTTI, Judith; GEWANDSZNAJDER, Fernando. **O método nas ciências naturais e sociais: pesquisa quantitativa e qualitativa**. 2. ed. São Paulo: Pioneira, 2004.
2. ANDRÉ, Marli Elisa Dalmazo Afonso de. **Etnografia escolar**. 10. ed. Campinas, SP: Papirus, 2003. 128 p. (Série Prática Pedagógica). ISBN 85-308-376-0.
3. AUSUBEL, D. P.; NOVACK, Joseph Donald; HANSEN, Helen. **Psicologia educacional**. Tradução Eva Nick.: Interamericana, 1980.
4. BOGDAN, R. C.; BIKLEN, S. K. **Investigação qualitativa em educação: uma introdução à teoria e aos métodos**. Tradução Maria João Alvarez. Portugal: Porto Editora, 1994. (Coleção ciência da educação). ISBN 972-0-34112-2.
5. BOHR, Niels. Can Quantum – Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? Tradução C. Abramo. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, Campinas-SP, n. 2, p, 97-106, 1981.
6. \_\_\_\_\_. **Física Atômica e conhecimento humano-ensaios 1932-1957**. Rio de Janeiro: Contra Ponto, 1995.
7. CARVALHO NETO, Rodolfo Alves; FREIRE JR. Olival; ROCHA, José Fernando Moura. Revelando o caráter determinístico da Mecânica Newtoniana: Uma ponte para o Ensino da Física Moderna no Ensino Médio. **Ideação**, Feira de Santana, n. 3, p. 51-68, jan./jun. 1999.
8. \_\_\_\_\_. O princípio de Heisenberg na escola secundária. In: XIII Encontro de Físicos do Norte e Nordeste, 13, 1995, Salvador. **Resumos...** Salvador, 1995. p. 54.
9. COHEN-TANNOUDJI, Claude; DIU, Bernard; LALOË, Franck. **Quantum Mechanics**. New York: John Wiley; Paris: Hermann, 1977. 387 p. v. 1.
10. CUSHING, J. T.; PESSOA JR., O. (org.). A Visão de Mundo da Mecânica Quântica: Determinista ou Indeterminista? In: **Fundamentos da Física 1: Simpósio David Bohm**. São Paulo: Livraria da Física, 2000. p. 1-18.

11. DEMO, Pedro. **A nova LDB: ranços e avanços**. 14. ed. São Paulo: Papirus, 2002. 111 p. (Coleção magistério, formação e trabalho pedagógico). ISBN 85-308-0448-1.
12. \_\_\_\_\_. **Metodologia do conhecimento científico**. São Paulo: Atlas, 2000. 216 p. ISBN 85-224-264-73.
13. EINSTEIN, A.; PODOLSKY; ROSEN. Can Quantum – Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?. Tradução C. Abramo. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência** 2, p. 90-96, 1981.
14. FEYNMAN, Richard Phillips. **Seis lições sobre os fundamentos da física**. Tradução Maria Tereza Escoval. Lisboa: Editorial Presença, 2000. ISBN 972-23-2595-7.
15. \_\_\_\_\_. **Física em seis lições**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ediouro, 2001.
16. FEYNMAN, Richard Phillips; LEIGHTON, Robert B.; SANDS, Matthew. **The Feynman lectures on physics quantum mechanics**. E.U.A.: Addison-Wesley Publishing Company, 1966.
17. FREIRE JR., Olival. **A Emergência da Totalidade: David Bohm e a controvérsia dos quanta**. São Paulo: USP, 1995. (Tese de Doutorado).
18. \_\_\_\_\_. As Desigualdades de Bell. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Revista da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992.
19. \_\_\_\_\_. **David Bohm e a controvérsia dos Quanta**. São Paulo: UNICAMP, 1999. 244 p. (Coleção CLE).
20. \_\_\_\_\_. **Estudo sobre interpretações (1927-1949) da teoria quântica: epistemologia e física**. São Paulo: USP, 1991. 111 p. (Dissertação de mestrado).
21. FREIRE JR., Olival; CARVALHO NETO, Rodolfo Alves de. **O universo dos quanta: uma breve história da Física Moderna**. São Paulo: FTD, 1997. 95 p. ISBN 85-322-3545-X.
22. FREIRE JR, Olival et al. “Introducing Quantum Physics in Secondary School, proceedings of third international history, philosophy and science Teaching Conference”, Minneapolis, v. 1, p. 412- 419, 1995.

23. GIL-PÉREZ, D.; SENENT, F. D.; SOLBES, J. Física Moderna en la enseñanza secundaria: una propuesta fundamentada y unos resultados, **Revista Española de Física**, [Espanha], v.3, n.1, p. 53-58, 1989.
24. GRECA, Ileana Maria Rosa. **Construindo Significados em Mecânica Quântica: Resultados de Uma Proposta Didática Aplicada a Estudantes de Física Geral**. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, 2000. 284 p. (Tese de Doutorado).
25. GRECA, Ileana Maria Rosa; HERCOVITZ, V. E. Mecânica Quântica e Intuição. In: PESSOA, Oswaldo (org.). **Fundamentos de Física 2: Simpósio David Bohm**. São Paulo: Livraria da Física. p. 81-98.
26. \_\_\_\_\_. **Introdução à Mecânica Quântica: textos de apoio ao professor de Física**. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, 2002. 73 p. (Textos de apoio ao professor de física, n. 13).
27. GRECA, Ileana Maria Rosa; MOREIRA, Marco A. Uma revisão de literatura sobre estudos relativos ao ensino de mecânica quântica introdutória. **Investigação em ensino e ciência da UFRGS**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, 2001.
28. HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física**. Rio de Janeiro: LTC, 2003. v. 4.
29. HUGHES, R. I. G. **The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics**. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1989.
30. JAMMER, Max. **The conceptual development of quantum mechanics**. New York: McGraw-Hill, 1966.
31. LOPES, José Lopes. **A Estrutura quântica da matéria: do átomo pré-socrático às partículas elementares**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1992. 800 p.
32. LOBATO, T. E.; GRECA, Ileana Maria. Análise da inserção de conteúdos de Teoria Quântica nos currículos de física do ensino médio. **Ciência e Educação**, v. 11, n. 1, p. 119-132, 2005.
33. MATTHEWS, Michael R. **Science Teaching: The role of history and philosophy of science**, New York: Rontledge, 1994, 287 p.
34. MARCUSCHI, Luiz Antonio. **Análise da conversação**. 2. ed. São Paulo: Ática, 1991. p. 9-13.

35. MOREIRA, Marco Antonio. **Uma abordagem cognitivista ao ensino da Física**. Porto Alegre: EDUFRGS, 1983.
36. \_\_\_\_\_. **Aprendizagem significativa**: Brasília: UNB, 1999. 129 p. (Série publicações acadêmicas do CESPE/UNB).
37. \_\_\_\_\_. **Mapas conceituais no ensino da física**. Porto Alegre: Instituto de Física da UFRGS, 1992.
38. MOREIRA, Marco Antonio; DOMINGUEZ, M. E. **A entrevista clínica como técnica de pesquisa em ensino**. Porto Alegre: 1989. Mimeografado.
39. NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. v. 4.
40. O'HEAR, Anthony; POPPER, Karl (org.). **Filosofia e Problemas**. São Paulo: UNESP, 1997. 352 p. ISBN 85-713-915-99.
41. OSNAGHI, Stefano. A Dissolução Pragmático-transcendental do “Problema da Medição” em Física Quântica. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, série 3, v. 15, n. 1, p. 79-125, jan-jun. 2005.
42. OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antonio. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa, “Física Moderna e contemporânea no Ensino Médio”. Porto Alegre, **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 1, mar. 2000.
43. PAULO, Iramaia Jorge Cabral de. **A aprendizagem significativa crítica de conceitos da mecânica quântica segundo a interpretação de Copenhagen e o problema da diversidade de propostas de inserção da física moderna e contemporânea no ensino médio**. Espanha: Universidade de Burgos, 2006. (tese de doutorado).
44. PEDUZZI, Sônia S. Concepções alternativas em Mecânica. In: PIETROCOLA, Maurício (org.). **Ensino de Física**: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora. Florianópolis: UFSC, 2001.
45. PESSOA JR., Osvaldo. **Conceitos de Física Quântica**. São Paulo: Livraria da Física, 2003. ISBN 85-88325-17-9.



46. \_\_\_\_\_. **Fundamentos da física 1**: Simpósio David Bohm. São Paulo: Livraria da Física, 2000. 164 p.
47. \_\_\_\_\_. **Fundamentos da física 2**: Simpósio David Bohm. São Paulo: Livraria da Física, 2001. 177 p.
48. PIETROCOLA, Maurício (org.). **Ensino de física**: Conteúdo, Metodologia e Epistemologia numa concepção integradora. Florianópolis: UFSC, 2001. 236 p.
49. POPPER, Karl Raymund. **A lógica da pesquisa científica**. São Paulo: Cultrix, 2001. 567 p.
50. RUDIO, Franz Victor. **Introdução ao Projeto de Pesquisa Científica**. 31. ed. Petrópolis: Vozes, 2003. 144 p. ISBN 85-326-0027-1.
51. SILVA, J. L. P. B. **Um ensino facilitador da aprendizagem significativa da termodinâmica básica**. Salvador: Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia, 1999. (Tese de Mestrado).
52. TIPLER, Paul A. **Física**: para cientistas e engenheiros. Tradução Ronaldo Sérgio de Biasi. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 187 p. v. 3.
53. TONOMURA, A. et al. Demonstration of Single-Electron Buildup of Interference Pattern. **American Journal Physics**, Japão, v. 57, p. 117-120, fev. 1989. Disponível em: <[www.hqrd.hitachi.co.jp/em/doubleslit.ctm](http://www.hqrd.hitachi.co.jp/em/doubleslit.ctm)> Acesso em: 25 out. 2006.