
É POSSÍVEL LEVAR A FÍSICA QUÂNTICA PARA O ENSINO MÉDIO?¹

*A. Custódio Pinto*²
J. Zanetic
Instituto de Física - USP
São Paulo - SP

Resumo

Visando refletir sobre a inserção da Física Quântica no ensino médio, este trabalho apresenta uma experiência educacional desenvolvida em uma escola da rede pública de ensino. A noção de Perfil Epistemológico, de Gaston Bachelard, é utilizada como referencial filosófico. Diferentes formas de expressão humana como a arte, a música e a pintura compõem uma estratégia de ensino que permite apresentar a Física como cultura, procurando despertar o interesse de um número maior de estudantes.

I. Introdução

Estamos nos aproximando do final do século XX e a Física nele desenvolvida está longe de comparecer às aulas de nossas escolas. É preciso transformar o ensino de Física tradicionalmente oferecido por nossas escolas em um ensino que contemple o desenvolvimento da Física Moderna, não como uma mera curiosidade, mas como uma Física que surge para explicar fenômenos que a Física Clássica não explica, constituindo uma nova visão de mundo. Uma Física que hoje é responsável pelo atendimento de novas necessidades que surgem a cada dia, tornando-se cada vez mais básicas para o homem contemporâneo, um conjunto de conhecimentos que extrapola os limites da ciência e da tecnologia, influenciando outras formas do saber humano. Portanto, os vários campos abertos pela física deste século devem ter sua presença garantida nos currículos de nossas escolas médias, particularmente a Física

¹ Projeto financiado pelo PIBIC: USP/CNPq.

² Bolsista PIBIC: USP/CNPq.

Quântica e a Física Relativística que abriram novos horizontes de exploração científica inimagináveis aos olhos dos cientistas clássicos.

Esses novos conteúdos não podem ser simplesmente acrescentados aos temas tradicionalmente presentes no ensino médio e no modo como estes são aí trabalhados. Diversos projetos de ensino de Física no Brasil têm se preocupado com a inserção da Física Moderna e contemporânea no ensino. Alguns parâmetros para o desenvolvimento de atividades dirigidas à inserção da Física Quântica no Ensino médio são sugeridos por Terrazan (Terrazan, 1992): a especificação do currículo, a necessidade de se privilegiar leis gerais e conceitos fundamentais exigindo pouca matematização, a compatibilidade do estudo da Física Clássica e da Física Quântica dentro da mesma programação e a falta de professores preparados para o ensino da Física Moderna são alguns dos aspectos mais relevantes que devem ser considerados ao se discutir esta temática.

Grande parte dos projetos que vêm sendo desenvolvidos em nosso país com o intuito de inserir a Física Moderna no ensino médio limitam-se basicamente à discussão dos aspectos apontados por Terrazan. Uma outra tentativa concentra-se na elaboração de materiais de divulgação, didáticos e de atividades experimentais. Um projeto interessante de construção de “softwares” educacionais na área da Física Moderna, para alunos do ensino médio, foi desenvolvido no departamento de Física da UFRGS, explorando programas que simulam experiências relevantes para a compreensão da Física Moderna como, por exemplo, o efeito fotoelétrico (Veit, 1987).

Uma idéia subjacente a este trabalho é a crítica ao modo atualmente dominante de ensino de física . Assim, tanto no que se refere ao ensino da Física Clássica quanto ao da Física Quântica, partimos do pressuposto de que os aspectos a serem considerados no ensino médio devem ser os mais diversos possíveis, a Física a ser ensinada deve ter uma abordagem ampla. O formalismo matemático, a observação, a experimentação, os conceitos, as leis, as teorias, a filosofia, a história, a epistemologia, a tecnologia, são exemplos de formas do conhecimento físico que podem possuir afinidades com diferentes alunos. Isto porque os alunos que chegam ao ensino médio já têm uma longa história de vida, a vida escolar aí incluída, trazendo para a sala de aula diferentes aptidões e vocações. O ensino de Física, ou de qualquer outra área do conhecimento, que seja oferecido segundo uma única perspectiva, por exemplo, o formalismo (ou "formulismo"?) conceitual e a solução de problemas, corre o risco de não conseguir estabelecer um diálogo profícuo com boa parte dos alunos. O conhecimento físico deve ser considerado uma construção humana, pois a *Física Também é Cultura* (Zanetic,1989).

Destacamos várias dificuldades que devem ser enfrentadas na introdução da Física Quântica no ensino médio. A primeira refere-se ao formalismo matemático inerente à descrição quântica; outra, diz respeito às novidades conceituais que se distanciam da Física Clássica de forma ainda mais acentuada do que esta da Física do senso comum; a terceira dificuldade está relacionada com o tratamento experimental dos temas quânticos. Assim, temos que ir em busca de formas alternativas e tentativas.

Uma abordagem possível é a utilização de *diferentes interpretações do formalismo quântico* (Pessoa Júnior, 1997), permitindo que o aluno possa desenvolver sua própria interpretação privada. Outra contribuição pode ser obtida com a utilização da História e da Filosofia da Ciência como estratégia de ensino, *rompendo com a estrutura curricular e metodológica das abordagens tradicionais no ensino de Física* (Fagundes, 1997).

Neste trabalho apresentamos algumas reflexões sobre uma experiência educacional desenvolvida em uma escola da rede pública de ensino do estado de São Paulo, com o intuito de investigar a possibilidade de inserção de tópicos de Física Quântica no ensino médio, analisando a utilização de diferentes interpretações e da História e Filosofia da ciência como estratégia de ensino.

Desta forma, procuramos, ao mesmo tempo, realizar uma experiência de introdução cultural e conceitual do tema escolhido a alunos reais do ensino médio e esboçar uma análise preliminar de investigação de *perfis epistemológicos* com base no estudo da filosofia da ciência de Gaston Bachelard. A utilização recente da epistemologia de Gaston Bachelard em pesquisa sobre ensino de Ciências comparece em alguns trabalhos brasileiros (Mortimer, 1995 e Barbosa Lima, 1996). Desenvolvemos neste trabalho uma aplicação ao ensino de Física enfatizando aspectos da Física Quântica.

II. O Perfil Epistemológico

Uma parte significativa da filosofia da ciência desenvolvida a partir da década de trinta foi diretamente influenciada pela Física Contemporânea. Bachelard, Popper, Kuhn e Feyerabend, entre outros menos citados na literatura, apresentaram diferentes análises e propostas visando compreender a evolução das teorias Físicas. Bachelard, provocado pelo advento da Relatividade e da Física Quântica, em todos os seus trabalhos apresenta reflexões pedagógicas que se mostraram extremamente relevantes ao desafio de introduzirmos esses temas no ensino médio, contemplando diferentes formas de pensar e de lidar com os obstáculos epistemológicos enfrentados pelo estudante. Exemplificando, Bachelard assim se referia aos professores de ciências do final da década de trinta:

“Acho surpreendente que os professores de Ciências, mais do que os outros se possível fosse, não compreendam que alguém não compreenda. (...) Não levem em conta que o adolescente entra na aula de Física com conhecimentos empíricos já constituídos; não se trata, portanto de adquirir uma cultura experimental, mas sim de mudar de cultura experimental, de derrubar os obstáculos já sedimentados pela vida cotidiana.”

(Bachelard, 1996, pág. 23)

Parecem reflexões escritas para os dias de hoje! Assim, buscamos em Gaston Bachelard, em particular no seu livro “A filosofia do não” (Bachelard, 1972), um referencial epistemológico/ filosófico capaz de ajudar-nos em nossa empreitada.

Bachelard indica em sua obra que a intersecção entre os pensamentos científico e filosófico deve se dar através de uma filosofia aberta (menos geral) e de uma ciência racional (menos imediata). Com base neste procedimento, ele propõe um referencial que considera um caminho que vai do pensamento mais primitivo, o animismo, ao pensamento mais sofisticado, o ultra-racionalismo, como uma espécie de evolução.

É a possibilidade de considerar que uma pessoa pode usar diferentes formas de pensar em diferentes domínios e que a compreensão de uma idéia pode impor obstáculo à compreensão de uma outra que nos fornece a possibilidade de situar as idéias dos estudantes num contexto mais amplo, admitindo a presença de diferentes formas do saber físico. A idéia da *coexistência de diferentes formas de pensar, não necessariamente ligadas por uma acomodação de estruturas conceituais*, consiste em uma crítica a alguns aspectos do construtivismo e das estratégias propostas nas teses de mudança conceitual (como indica Mortimer, 1997).

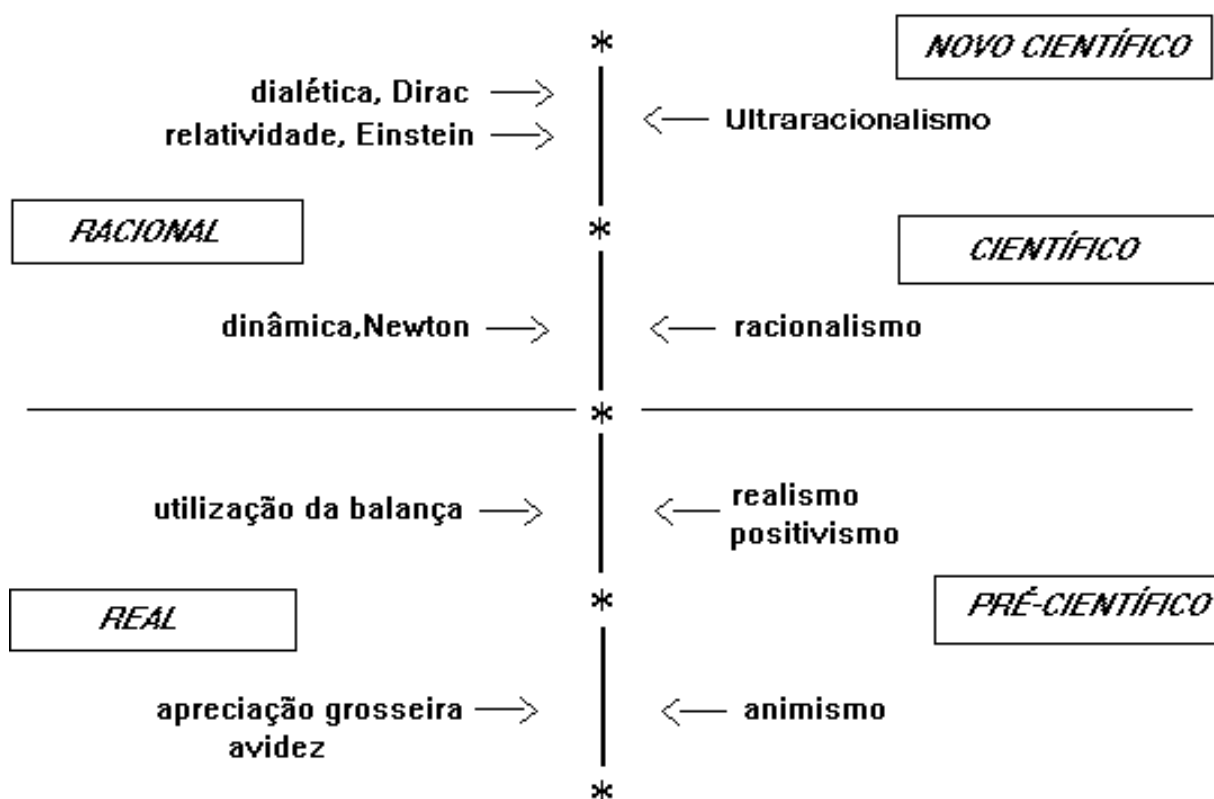
A concepção norteadora da *Filosofia do Não* consiste em uma síntese dialética que, segundo Bachelard, permite negar uma visão de mundo e ascender a outra, por um caminho que contém diversas explicações metafísicas: animismo, realismo e positivismo, racionalismo, racionalismo completo e racionalismo dialético, ou seja “...a evolução filosófica de um conhecimento científico particular é um movimento que atravessa todas estas doutrinas na ordem indicada.” (Bachelard, 1972, pág.26)

Como exemplo deste movimento, Bachelard analisa o conceito de massa e suas diferentes interpretações, explicitando as teorias que explicam a massa e relacionado-as com cada visão filosófica mencionada. O esquema na página seguinte resume este movimento:

Vejamos, sucintamente, como Bachelard descreve a transição de uma forma de pensar a outra. No animismo a noção de massa está ligada a uma apreciação quantitativa grosseira que se concretiza no desejo de comer. O fruto maior para uma criança é o melhor, e, portanto, tem mais massa.

O primeiro obstáculo é superado quando compreendemos a diferença entre o grande e o pesado. Quando isto ocorre o conceito de massa se interioriza passando a significar uma *riqueza íntima* que pode ser medida pela balança. Esta visão representa o espírito realista e constitui um obstáculo ao racionalismo.

O terceiro aspecto torna-se claro com a mecânica de Newton, em que a massa é definida como o quociente da força pela aceleração. O aspecto dinâmico substitui o estático, e a metafísica de Kant instala-se na mecânica newtoniana “...é a necessidade de compreender o devir que racionaliza o realismo do ser.”(Bachelard, 1972, pág.38)



Com a teoria da relatividade percebe-se que a noção de massa tida como absoluta possui uma *estrutura funcional interna*. A noção de massa passa a depender da velocidade e associa-se com a energia como função da matéria. O racionalismo se enriquece com esta abertura e complicação das noções de base (racionalismo completo).

Um novo aspecto filosófico para o conceito de massa surge na interpretação de Bachelard da mecânica de Dirac complicando ainda mais a estrutura interna da noção de massa, passando a distinguir duas massas, uma “positiva” (relativa à matéria), e outra “negativa” (relativa à anti-matéria) chegando assim à dialetização do conceito (racionalismo discursivo).³

Estes dois últimos aspectos filosóficos do conhecimento físico, racionalismo completo e discursivo, constituem a essência do *novo espírito científico* e podem ser reunidos compondo o que Bachelard chama de ultra-racionalismo. O estudo

³ Alguns autores criticavam a interpretação dada por Bachelard à mecânica de Dirac e à descoberta do pósitron (anti-elétron) que é semelhante ao elétron, exceto na sua carga, que tem sinal contrário, mas não representa uma partícula com energia negativa. Bachelard foi influenciado pelo livro ‘L’*électron magnétique*’, de Louis de Broglie, publicado alguns anos antes (1934) de seu livro ‘A Filosofia do Não’. Uma discussão desta história é apresentada por Olival Freire Júnior na revista “Reflexão”, [Depto. Filosofia - PUCCAMP], 62,38-57,1995.

do ultra-racionalismo permite “captar o pensamento científico contemporâneo e mostrar a novidade essencial que lhe é própria.” (Bachelard, 1978, pág.158)

Para medir a ação psicológica das filosofias na obra do conhecimento, Bachelard desenvolve a noção de perfil epistemológico que, segundo ele, é “uma escala polêmica suficiente para localizar os diversos debates da filosofia da Ciência, para impedir a confusão dos argumentos.” (Bachelard, 1972, pág.55)

Bachelard elabora, como exemplo, uma construção gráfica permitindo obter seu perfil epistemológico para o conceito de massa.



Perfil epistemológico da noção de massa, Bachelard, 1972 p25

Na abcissa são indicadas as filosofias sucessivas e na ordenada um valor que corresponde à importância relativa das visões de mundo ou a frequência de utilização efetiva da noção de massa. A visão racional da mecânica clássica é destacada por Bachelard por constituir um forte obstáculo ao ultra-racionalismo. “O nosso racionalismo simples entrava o nosso racionalismo completo e sobretudo o nosso racionalismo dialético. Eis uma prova de como as filosofias mais sãs como o racionalismo newtoniano e kantiano podem, em determinadas circunstâncias, constituir um obstáculo ao progresso da cultura.”

(Bachelard, 1972, pág.59)

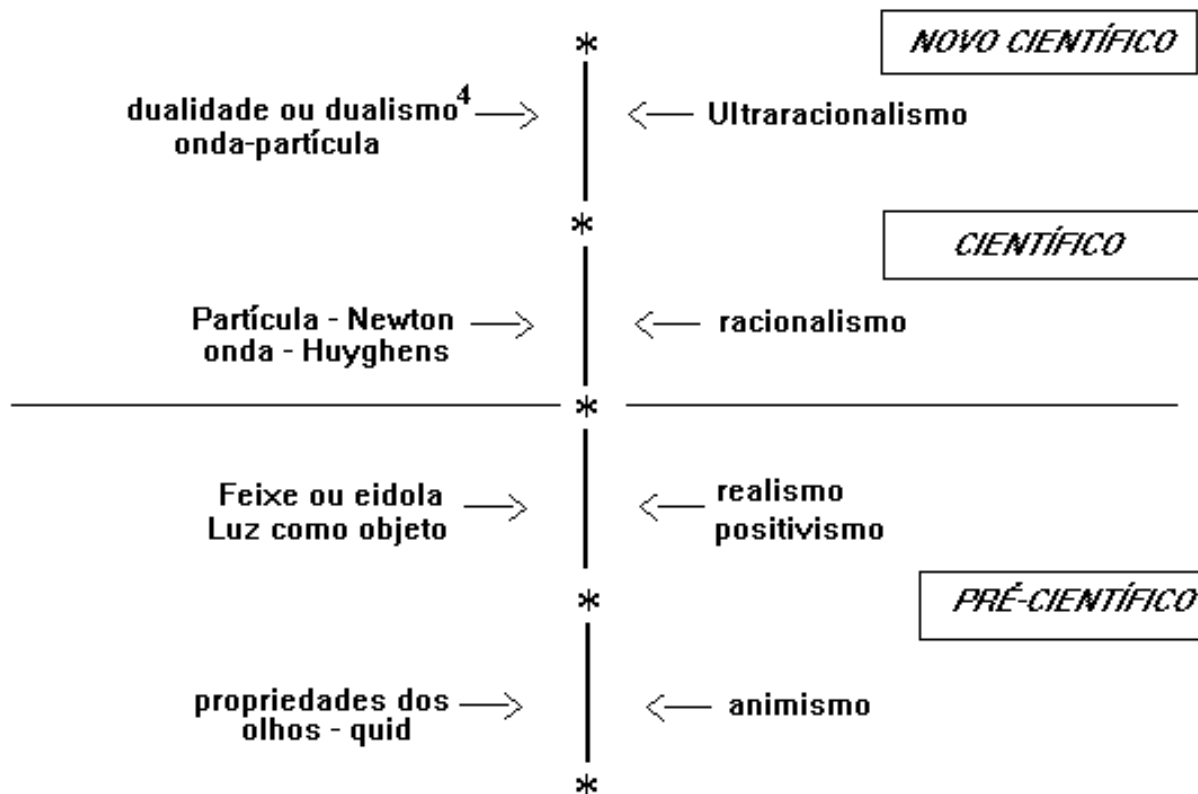
A construção de gráficos, como o mostrado acima, pode fornecer um modelo de *análise filosófica espectral* que permite determinar a forma como as diversas filosofias (explícita ou implicitamente) relacionam-se com um conceito particular. É preciso perceber que não se pode fixar um conceito a uma filosofia, mas sim numa diversidade de aspectos filosóficos que definem uma evolução temporal do conceito.

Para decompor a luz de um determinado conceito é preciso realizar saltos que vão além do conhecimento unicamente científico, necessitando de um *prisma* que apresenta uma dispersão filosófica. Nas palavras de Bachelard: “Cada filosofia fornece apenas uma banda do espectro nocional, e é necessário agrupar todas as filosofias para termos o espectro nocional completo de um conhecimento particular.”

(Bachelard, 1972, pág.66)

II 1. À Luz das Naturezas da Luz

Através do estudo da evolução histórica da noção de luz procuramos criar um primeiro esquema que relaciona teorias da Física da luz e visões filosóficas:⁴



Como animista consideramos as noções primitivas da natureza da luz, aquelas que estão relacionadas ingenuamente com o sentido da visão, que definem a luz segundo uma propriedade dos olhos, como a que foi proposta pelos pitagóricos e, mais tarde, defendida por Euclides em que “*a luz seria algo emanado pelos olhos, o ‘quid’ proveniente do fogo interior dos seres vivos...*” (Franco, 1997) ou qualquer outra forma não empírica, ou teórica, de entender a natureza da luz.

Para a visão realista tomamos qualquer explicação apoiada em fatos empíricos, que faça uso da noção de *feixe de luz*, por exemplo, baseada na observação da luz passando pelas frestas de uma janela, ou explicações como as emanações de *eidola (simulacros)* dos atomistas gregos, que atribuíam à luz propriedades

⁴ Embora no contexto da Física, os físicos em geral utilizem os termos dualismo e dualidade como sinônimos, no contexto de nosso trabalho seguimos a sugestão de Fagundes (1997) distinguindo esses termos, o *dualismo*: referindo-se a dois opostos separados, entre os quais há resistência; e a *dualidade*: referindo-se a dois opostos que se complementam.

corpúsculares realistas: “*assim como a fumaça se desprende da lenha queimando, supunha-se haver outras emanações de partículas mais sutis. Tais partículas poderiam desprender-se dos corpos e se introduzir em nosso organismo produzindo sensações, como o odor, por exemplo. Tais partículas se desprenderiam da superfície dos corpos preservando suas formas e penetrariam nos olhos reproduzindo os objetos exteriores em proporções reduzidas.*” (Franco,1997)

Para a visão racional tomaremos os modelos com *fundamentação teórico-matemática*, como o modelo corpuscular de Newton, ou o modelo ondulatório de Huygens.

E, para o ultra-racionalismo consideramos qualquer explicação que refira-se às modernas interpretações da Física Quântica para a natureza da luz, tanto para a dualidade nas interpretações ondulatória de Schrödinger e causal de De Broglie e Einstein (racionalismo completo), como para a dualidade na interpretação da complementaridade de Bohr (racionalismo discursivo).

II 2. Esboçando o Perfil Epistemológico

Bachelard, ao apresentar o gráfico para seu perfil epistemológico do conceito de massa, não explica como obteve os valores para a frequência de utilização pessoal de cada noção. Aponta a dificuldade de estabelecer estes valores: “*tentaremos então pôr grosseiramente em evidência a sua importância relativa colocando em abcissas as filosofias sucessivas e em ordenadas um valor que - se pudesse ser exato - mediria a frequência de utilização efetiva da noção, a importância relativa de nossas convicções. Com uma certa reserva relativamente a esta medida muito grosseira, obtemos então o nosso perfil epistemológico...*” (Bachelard, 1972, pág.57)

Elaboramos um teste (apresentado no Apêndice A) para tentar esboçar o perfil epistemológico dos alunos com o objetivo de levantar suas tendências filosóficas. É importante percebermos que não esperamos com isto encontrar alunos do ensino médio que saibam Física moderna intuitivamente, mas verificar algumas pré tendências para certas formas de ver a natureza da luz, em particular, e o mundo físico como um todo⁵.

O teste é composto de 12 questões alternativas conforme distribuição abaixo:

⁵ Sugerimos que os leitores leiam e respondam o teste (Apêndice A) deste artigo antes de prosseguir a leitura, uma vez que o estudo do perfil, como indica o próprio Bachelard, deve “*ser válido apenas para um espírito particular que se examina num estágio particular da sua cultura*” Bachelard, 1972.

FILOSOFIA	QUESTÕES	HISTÓRIA
Animismo	01, 05, 09	quids
Realismo	02, 06, 10	eidola
Racionalismo	03, 07, 11	Física Clássica
Ultra-racionalismo	04, 08, 12	Física Moderna

As questões foram elaboradas a partir da *inspiração histórica*. A primeira questão busca verificar se o aluno relaciona a luz com o sentido da visão, definindo-a como uma propriedade dos olhos. As cinco alternativas de “a” a “e” consistem em uma escala gradual com diferentes relações entre a noção de luz e o sentido da visão:

Alternativa	Noção Animista	
a) a luz é produzida pelo olho	valor extremo	16
b) os olhos guardam a luz	valor alto	09
c) os olhos não utilizam luz	valor médio	04
d) não associa diretamente à visão	valor baixo	01
e) Distingue a luz da visão	valor nulo	00

relações semelhantes constituem as questões 05 e 09.

A segunda questão busca verificar se o aluno prende-se a uma noção empírica, atribuindo à luz propriedades realistas:

Alternativa	Noção realista	
a) o experimento é impossível	valor nulo	00
b) o experimento cria uma ilusão	valor baixo	01
c) o experimento mostra o real	valor extremo	16
d) o experimento muda o real	valor alto	09
e) os sentidos mudam o real	valor médio	04

relações semelhantes constituem as questões 06 e 10.

A terceira questão busca verificar se o aluno utiliza a representação racional da luz através de sua descrição pela noção de feixe de luz ou por suas relações matemáticas:

Alternativa		Noção Racionalista	
a)	sem conservação do feixe	valor médio	04
b)	representação Clássica	valor extremo	16
c)	representação com erro angular	valor alto	09
d)	representação sem reflexão	valor nulo	00
e)	representação unidimensional	valor baixo	01

relações semelhantes constituem as questões 07 e 11.

A quarta questão busca verificar se o aluno aceita o comportamento dialético da luz, seja na interferência ou na dualidade onda-partícula:

	Alternativa	Noção ultra-racionalista	
a)	não aceita nenhum dos aspectos	valor médio	04
b)	não distingue os dois aspectos	valor baixo	01
c)	não aceita a dualidade	valor nulo	00
d)	aceita a dualidade	valor extremo	16
e)	aceita o dualismo	valor alto	09

relações semelhantes constituem as questões 08 e 12.

Atribuímos valores para cada item (de “a” a “e”) para cada questão do teste, considerando uma escala em que as respostas estão mais ou menos próximas da visão filosófica daquele grupo de questões. Efetuamos um longo processo de reflexão e calibração destes valores, aplicamos o teste a jovens e velhos, a instruídos e leigos, e a nossos familiares dos quais conhecemos as *filosofias* com as quais enxergam o mundo. Para cada questão não existe uma resposta absolutamente correta, nem uma resposta absolutamente errada, existem diferentes formas de ver o problema. Optamos por uma escala quadrática para ressaltar a diferença entre as diversas posições. A tabela a seguir indica o valor de cada alternativa em cada questão:

Questão	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	16	0	4	4	4	1	4	0	4	16	4	1
B	9	1	16	1	1	16	9	1	0	4	0	9
C	4	16	9	0	16	9	1	4	9	9	9	16
D	1	9	0	16	0	4	0	9	1	1	16	4
E	0	4	1	9	9	0	16	16	16	0	1	0

O gráfico do perfil epistemológico de cada aluno foi construído somando-se os pontos obtidos para cada filosofia.

Esboçamos, então, para cada aluno o seu perfil epistemológico, de caráter bem tentativo, conforme a sugestão de Bachelard, indicando na abcissa as filosofias sucessivas e na ordenada o valor obtido com a soma dos pontos do teste.

Estes gráficos foram utilizados pelos alunos no decorrer das aulas e acreditamos fornecerem um referencial filosófico que permite a cada aluno, frente a uma nova concepção, trabalhar o conflito conceitual e reconhecer os diferentes aspectos de um conceito, aplicando cada faceta do conceito no contexto apropriado. Neste sentido, o perfil epistemológico foi usado muito mais como um recurso didático do que como um instrumento de pesquisa educacional, por isto, optamos por omitir resultados individuais que poderíamos considerar representativos, porque a análise do perfil epistemológico, como destacamos anteriormente, destina-se apenas para o auto exame.⁶

III. O Curso

Para a intervenção em sala de aula preparamos um *mini curso* que teve sua realização nas aulas regulares de Física de duas classes do segundo ano colegial, no período noturno, da escola *E. E. P. S. G. "Prof. Roberto Alves dos Santos"*, na cidade de Guarulhos - SP, e foi ministrado por um dos autores (ACP) deste artigo, professor regular dessas duas classes no ano de 1997.

As notas de aulas foram elaboradas ao longo do primeiro semestre de 1997 e são produto de uma longa pesquisa bibliográfica da qual ressaltamos o trabalho de Osvaldo Pessoa Júnior com professores de Física na *Estação Ciência* e a dissertação de mestrado de Maria Beatriz Fagundes. As notas de aula foram escritas exclusivamente para as aulas e a participação dos alunos nas demais atividades propostas foi indispensável.

O mini curso foi desenvolvido em doze aulas e após cada aula foi elaborado um breve relatório (diário do professor ACP, do qual algumas observações são relatadas no Apêndice B).

As aulas abordaram diversas formas do conhecimento físico, entre elas destacamos a descrição histórica da luz, o aspecto filosófico (Perfil Epistemológico), as atividades experimentais e as atividades lúdicas.

Apesar do *diário das aulas* estar situado num apêndice deste artigo, chamamos a atenção para sua leitura, pois ele registra algumas situações de sala de aula que podem ser do interesse de diferentes tipos de leitores. Estão registrados nesses relatos momentos de alegria, de tristeza e desânimo, o surgimento de *conceitos espontâneos* e de *obstáculos epistemológicos* (3ª aula), a dificuldade de aceitar que

⁶ Algumas considerações individuais sobre o resultado do perfil epistemológico foram realizadas pelos próprios alunos e são relatadas no Apêndice B - Diário da Aulas.

cientistas tenham diferentes concepções (10^a aula) e o incômodo com situações e explicações aparentemente contraditórias (7^a aula).

III 1. A avaliação

Considerando a ampla diversidade de atividades e aspectos metodológicos envolvidos nas aulas do mini-curso de Física Quântica, optamos por um sistema de avaliação mais aberto, constituindo-se de três momentos:

1. O Perfil Epistemológico

Na primeira aula os alunos responderam o teste que foi devolvido e comentado juntamente com o gráfico do Perfil Epistemológico na penúltima aula, possibilitando aos alunos uma auto-avaliação, não só da sua aprendizagem da Física como sobre um esboço de sua possível estrutura filosófica de observação do mundo.

2. Trabalhos Culturais

A segunda forma de avaliação consistiu na elaboração de trabalhos de divulgação, sobre Física Quântica, para a comunidade, que seriam apresentados pelos alunos em uma feira de Ciência (Semana Cultural). Estes trabalhos foram desenvolvidos no decorrer do mini-curso e contaram com a orientação e supervisão do professor (ACP). A originalidade foi estimulada buscando formas de expressar os conceitos físicos estudados diferentes das formas tradicionais. Durante a elaboração dos trabalhos os alunos apresentaram dúvidas que deram à atividade um aspecto de avaliação do aprendizado, possibilitando também uma nova oportunidade de aprendizagem, além de proporcionar a interação entre as diversas formas de expressão utilizadas pelos alunos.

Dentre os trabalhos apresentados encontramos músicas, histórias em quadrinhos, poesias, seminários, maquetes, bordados, painéis e cartazes, explicando, segundo as diferentes interpretações dos alunos, a sua compreensão sobre a natureza da luz. Era a oportunidade de combinar a aprendizagem cultural de um tema de Física com as diferenças individuais presentes na classe.

3. Relatório do Curso

A terceira forma de avaliação consistiu na redação de um *relatório final*. Cada aluno deixou registradas suas impressões, comentários e críticas ao mini-curso como um todo. A partir da análise dos relatórios pode-se avaliar tanto o aprendizado de cada aluno como o mini-curso em seu aspecto global.

Apesar da curta duração do mini-curso e das novidades conceituais, metodológicas e pedagógicas, além das dificuldades intrínsecas do texto utilizado como base das aulas, os relatórios dos alunos permitiram o levantamento de uma série de comentários e sugestões interessantes. Destacamos os seguintes:

- ☐ a dificuldade de leitura e a conseqüente necessidade de melhorar as notas de aulas. Percebemos que a maioria dos alunos encontrou grande dificuldade na leitura das notas de aula, isto talvez se justifique pela falta do hábito de leitura. Faz-se necessário (re)elaborar textos com uma linguagem adequada a esta realidade, não só para a introdução da Física Quântica mas para todas as disciplinas do Ensino médio;
- ☐ a necessidade de indicar, aos alunos, referências bibliográficas comentadas para um estudo posterior e de (re)equipar as bibliotecas para que os alunos possam não se limitar aos conteúdos tratados em aula;
- ☐ a importância de enfatizar a atividade experimental para a confrontação com o conhecimento teórico, ligando o empírico ao racional sem uma supervalorização de uma única forma de ver o conceito. Ao introduzirmos atividades experimentais no ensino de Física devemos explicitar as relações entre os aspectos racional (da teoria) e empírico (do experimento) evitando transmitir subjetivamente uma falsa idéia da epistemologia da Física;
- ☐ a (re)valorização do formalismo da Física e da descrição matemática. Procuramos nas aulas do mini-curso não utilizar nada ligado à excessiva matematização da Física, porém alguns alunos viram isto como um ataque à matemática, como se sua utilização fosse pouco importante. Percebemos da análise dos relatórios a necessidade de enfatizar também a importância fundamental da descrição matemática para a Física, dando a ela seu verdadeiro significado, sem contudo aceitar o formulismo tradicionalmente presente na Física do Ensino médio;
- ☐ que a utilização de diferentes interpretações pode proporcionar diferentes compreensões, permitindo a cada aluno desenvolver sua própria interpretação da natureza da luz, em especial e, da Física, como um todo. De fato, ao final do mini-curso encontramos nos relatórios dos alunos diferentes compreensões para a natureza da luz. Isto poderia incentivar o debate entre diferentes concepções;

- ☐ a possibilidade de atingir através de atividades diversificadas aqueles alunos que não se interessavam pela Física quando seu ensino excluía seu aspecto cultural. Percebemos um grande envolvimento de alunos que antes demonstravam pouco interesse pelo estudo da Física. A diversidade de formas de expressão presentes nos trabalhos culturais parece indicar uma maior aproximação do conhecimento Físico das atividades de interesse dos alunos.

IV. Conclusão

Neste trabalho apresentamos uma série de reflexões sobre a possibilidade de introdução da Física Quântica no ensino médio, exemplificada por um mini-curso sobre a natureza dual da luz embasado na história e na filosofia da ciência tanto como conteúdo específico quanto como estratégia educacional. Assim, além de propiciar o estudo de conceitos da Física moderna, esta experiência permite que os alunos interajam com uma Física associada a outras formas da produção cultural contemporânea.

O esboço do perfil epistemológico, mais do que desvelar a presença de diferentes concepções filosóficas, permite apresentar aos alunos um referencial histórico e filosófico como suporte para as novas concepções da natureza da luz, trabalhando o conflito conceitual entre as concepções espontâneas e as diversas interpretações do formalismo presente nas Físicas Clássica e Moderna.

Percebemos muitas falhas no instrumento (o teste) utilizado para traçar o perfil epistemológico. Verificamos que algumas das alternativas a questões do teste refletem pouco do que o aluno realmente pensa a respeito do tema tratado, principalmente no que se refere às questões do ultra-racionalismo (04,08 e12). A questão 04 analisa o fenômeno da interferência carecendo de uma ênfase ao aspecto corpuscular, e portanto, da natureza dual da luz. Já as questões 08 e 12 não definem claramente uma situação experimental. Ressaltamos que este trabalho refere-se a uma primeira tentativa e corresponde a uma proposta a ser aperfeiçoada no futuro. A elaboração de problemas mais abertos, dissertativos, que permitam identificar na mesma questão características das diferentes visões filosóficas, e a utilização de entrevistas podem tornar mais significativa a construção do perfil epistemológico dos alunos. Pensamos também na possibilidade de traçar tais perfis antes e depois da ocorrência do curso, o que permitiria ampliar as contribuições dessa estratégia de ensino com a possibilidade de análise do *processo de evolução conceitual e filosófica* em sala de aula.

Embora sem a mesma profundidade empírica, este trabalho reforça conclusão de pesquisa recente que mostrou o importante papel desempenhado pelos *originais da história da Física no diálogo entre diferentes concepções* (Dion, 1998). A história e a filosofia da ciência, indo muito além da mera ilustração ou motivação para o estudo, podem facilitar a construção conceitual e cultural da Física a ser trabalhada no ensino médio. Os obstáculos epistemológicos, que separam as diversas colunas que

constituem o perfil epistemológico, podem ser melhor trabalhados em sala de aula com o uso desse conteúdo e estratégia educacional.

A experiência educacional descrita neste trabalho buscou principalmente aproximar o conhecimento da Física Moderna dos alunos do ensino médio. A produção de trabalhos culturais para a divulgação da Física Quântica por estes alunos mostrou-se, apesar das dificuldades, uma forma de resgatar o interesse do estudo da Física para um grande número de alunos, rompendo com o modo atualmente dominante de ensino de Física.

Acreditamos que a maioria dos alunos aprendeu pouca Física Quântica, mas eles não terminaram o século sem terem pelo menos sido apresentados à Física nele desenvolvida. Alias, quantos alunos que passam por um curso de “Mecânica Clássica” entendem realmente as leis de Newton? Nossa experiência mostrou que temos ainda muitas questões a responder, mas agora acreditamos ainda mais que *é possível levar a Física Quântica para o ensino médio*.

A ampliação desse estudo a outros conceitos e em outros domínios pode mostrar a significativa contribuição da História e da Filosofia da ciência para a constituição de um moderno ensino de Física para o Ensino médio e para mostrar que *“a Física Quântica também é Cultura”*.

V. Referências Bibliográficas

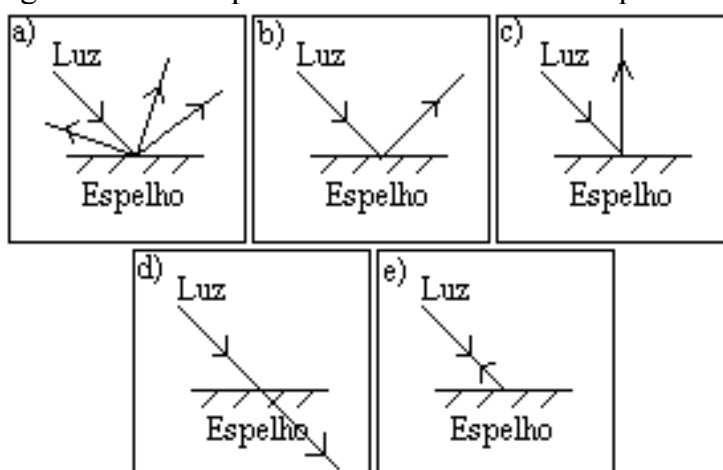
- BACHELARD, G. (1972) **A Filosofia do não** (Filosofia do Novo Espírito Científico - Título da tradução portuguesa); Editorial Presença, Lisboa.
- BACHELARD, G. (1978) **O novo espírito científico**. Coleção os pensadores, Abril Cultural, Rio de Janeiro.
- BACHELARD, G. (1996) **A formação do Espírito Científico**. Trad. E. S. Abreu. Ed. Contraponto, Rio de Janeiro.
- BARBOSA LIMA, L.C. & LINS DE BARROS, M. (1996) **Calor e Temperatura à Luz de Bachelard**, Caderno de Resumos do V EPEF: 7, Águas de Lindóia, São Paulo.
- DION, S. N. (1998) **O diálogo com documentos originais da ciência em sala de aula: uma proposta**, tese de doutoramento em ensino de Física, Faculdade de Educação, USP, São Paulo.
- EINSTEIN, A. & INFELD, L. (1966) **A evolução da Física**, Rio de Janeiro, ZAHAR.
- FAGUNDES, M. B. (1997) **Ensinando a dualidade onda-partícula sob uma nova óptica**, Dissertação de Mestrado FEUSP/IFUSP, São Paulo.

- FEYERABEND, P. (1975) **Contra o Método**, Tradução de Octanny S. da Mota e Leonidas Hegenberg, ed. Francisco Alves, Rio de Janeiro.
- FRANCO, H. (1997) **Notas de Aulas de Evolução**, da disciplina Evolução dos Conceitos da Física, Instituto de Física, USP, São Paulo.
- FREIRE Jr., O. (1990) **Estudo Sobre interpretações da Teoria Quântica (1927 - 1949) Epistemologia e Física**, Dissertação de Mestrado FEUSP/IFUSP, São Paulo.
- FREIRE Jr., O.(1995) et al - **Introducing Quantum Physics in Secondary School**, Proceedings of Third International History, Philosophy and Science Teaching Conference, Minneapolis, Vol. 1, 412-419.
- MORTIMER, E. F. (1995) **Conceptual Change or Conceptual Profile Change?**, Science & Education, 4(3), 267-285.
- MORTIMER, E.F. (1997) **Construtivismo, Mudança Conceitual e Ensino de Ciências: Para Onde Vamos?**
In: <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/N1/2artigo.htm>
- PESSOA, O. J.(1996) **Introdução conceitual à Física Quântica**, Notas de aula de um curso de 30 horas dado na Estação Ciência, São Paulo.
- PESSOA, O. J. (1997) **Interferometria**, Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol. 19(1) Março de 1997, São Paulo.
- PINTO A. C. & ZANETIC J. (1997) **A Física Quântica no/do Ensino Médio**; Monografia de Fim de Curso, Instituto de Física, USP, São Paulo.
- PINTO A. C. & ZANETIC J. (1997) **É Possível Levar a Física Quântica para o 2º Grau?** Trabalho apresentado no V Simpósio de Iniciação Científica da USP, Pró-Reitoria de Pesquisa, Volume 2, Exatas e Engenharia, Pág. 171.
- TERRAZAN, E. A. (1992) **A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de Ensino médio**, Caderno Catarinense de Ensino de Física, 9(3): 209-214, Santa Catarina - RS.
- VEIT, E. A. & THOMAS, G. & FRIES, S. G. & AXT, R. & SELISTRE, L. F. (1987) **O efeito fotoelétrico no Ensino médio via microcomputador**, Caderno Catarinense de Ensino de Física, 4(2): 68-88, Santa Catarina - RS.
- ZANETIC, J. (1989) **Física Também é Cultura**, Tese de doutorado, FEUSP, São Paulo.
- ZANETIC, J. (1995) **Textos de evolução**, da disciplina Evolução dos Conceitos da Física, Instituto de Física, USP, São Paulo.

APÊNDICE A: TESTE DO PERFIL EPISTEMOLÓGICO

Neste Apêndice indicamos as questões utilizadas para o levantamento preliminar e tentativo do Perfil Epistemológico dos alunos do Ensino médio que participaram do curso. Em cada questão pode-se escolher a alternativa que melhor se ajusta a cada um dos problemas.

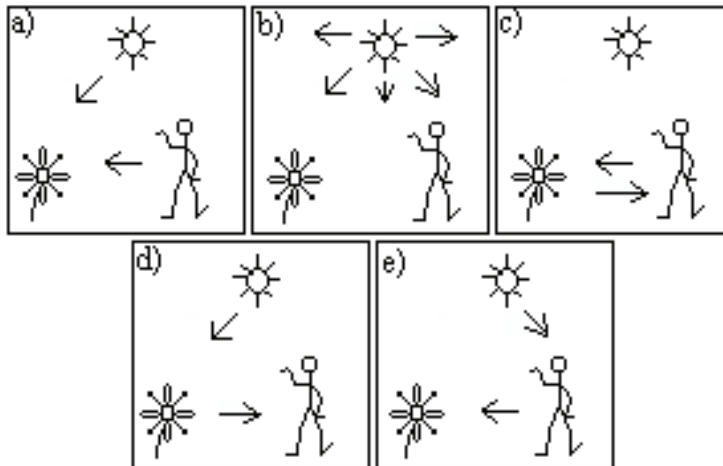
1. Dizem que os gatos podem enxergar no escuro. Isto acontece porque:
 - (a) os gatos possuem olhos que brilham no escuro como os vaga-lumes;
 - (b) os olhos dos gatos guardam luz de dia e usam de noite;
 - (c) os olhos dos gatos não precisam de luz para funcionar;
 - (d) os gatos enxergam outro tipo de luz;
 - (e) os gatos enxergam em lugares pouco iluminados, mas não podem enxergar no escuro.
2. Quando colocamos um lápis em um copo com água enxergamos o lápis quebrado. Esta experiência nos mostra:
 - (a) um absurdo, se colocamos um lápis no copo com água não o enxergaremos quebrado !
 - (b) uma ilusão, causada pela passagem da luz através da água;
 - (c) uma realidade, o lápis realmente está quebrado quando está debaixo da água;
 - (d) uma realidade, a luz que sai do lápis é desviada pela água;
 - (e) uma ilusão que ocorre em nossos olhos.
3. Na teoria corpuscular a luz é constituída de pequenas partículas, como bolinhas. Indique qual das figuras abaixo representa melhor uma "luz" que encontra um espelho:



4. Quando juntamos luz com luz em uma região podemos obter:
 - (a) nada, não é possível fazer duas luzes se juntarem;
 - (b) sempre uma região clara;

- (c) sempre uma região escura;
- (d) uma região que pode ser clara ou escura;
- (e) uma região que muda de clara para escura e de escura para clara ao longo do tempo.

5. As figuras abaixo representam o Sol, uma Flor, um Menino e as setas representam a luz. Qual delas indica melhor o modo pelo qual podemos enxergar um objeto:



6. Imagine que estamos em um quarto escuro e observamos a luz que entra no quarto através das frestas de uma janela. Nesta situação estamos vendo:

- (a) uma imagem da luz ;
- (b) a própria luz;
- (c) a poeira suspensa no ar iluminada pela luz;
- (d) uma imagem da poeira suspensa no ar;
- (e) não vemos nada pois nossos olhos estão no escuro.

7. Existem notas musicais que, quando tocadas juntas, criam um som agradável aos ouvidos; da mesma forma, algumas tonalidades de cores combinadas parecem alegrar mais a vista. Desta semelhança, podemos afirmar que:

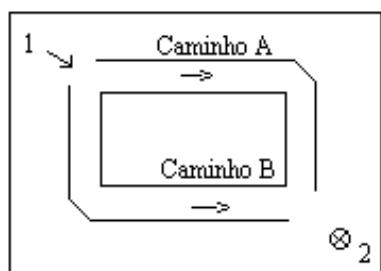
- (a) o som possui cores;
- (b) a luz e o som obedecem a uma mesma lei de combinação;
- (c) não existe nenhuma relação entre a luz e o som;
- (d) é necessário uma experiência que permita comparar o som com a luz;
- (e) existe algo que liga as notas aos sons da mesma forma que liga as cores

à luz.

8. O esquema abaixo representa um arranjo experimental para estudar a natureza da luz. Com um conjunto de espelhos podemos fazer a luz seguir dois caminhos: um A e outro B. Se apenas a menor porção de luz possível sair do ponto 1 em direção ao ponto 2, então:

- (a) a luz sempre vai por um único caminho A ou B;

(b) a luz vai pelos dois caminhos ao mesmo tempo;



(c) não é possível determinar por qual caminho a luz vai;

(d) a luz pode tanto ir pelo caminho A, pelo caminho B, ou dividir-se indo por A e B ao mesmo tempo;

(e) a luz pode ir por qualquer caminho A, B, ambos A e B, ou ainda por um outro caminho oculto.

9. Com qual sentido a luz se parece mais:

- (a) olfato, a luz é como um cheiro indo da fonte até nosso nariz;
- (b) não dá para comparar a visão com os outros sentidos;
- (c) tato, a luz é como um toque, por isto é que esquentam;
- (d) audição, a luz é como o som que entra por nossos ouvidos;
- (e) paladar, a luz é como um gosto, por isto que cada um prefere uma cor.

10. Quando utilizamos uma lente de aumento para ver um inseto muito pequeno, enxergamos:

- (a) o inseto;
- (b) uma imagem do inseto;
- (c) a luz que vem do inseto;
- (d) uma ilusão formada pela lente;
- (e) uma distorção da imagem do inseto na lente.

11. A velocidade da luz depende do meio em que ela está. Matematicamente temos:

$$V = C / N$$

onde V representa a velocidade da luz em um meio qualquer,

C representa a velocidade da luz no vácuo, e

N representa o índice de refração, que está associado ao meio.

Sabendo que o índice de refração da água é maior que o do ar podemos afirmar que :

- (a) a velocidade da luz é a mesma no ar ou na água;
- (b) é preciso medir a velocidade da luz no ar e na água para saber qual é maior;
- (c) a velocidade da luz na água é maior que no ar;
- (d) a velocidade da luz no ar é maior que na água;
- (e) a velocidade da luz é infinita.

12. Existe uma longa discussão sobre a natureza da luz que aponta duas respostas:

- i) a luz é uma partícula (como uma bolinha);

ii) a luz é uma onda (como uma vibração).
Sobre a natureza da luz é correto afirmar que:

- (a) a luz ou é uma onda, ou é uma partícula;
- (b) a luz é uma partícula com uma onda, juntos;
- (c) a luz é ora uma onda, ora uma partícula;
- (d) a luz não é nem uma onda, nem uma partícula;
- (e) a luz é um mistério de Deus que ao homem não é dado compreender.

APÊNDICE B: DIÁRIO DA AULAS

Neste apêndice descrevemos as atividades desenvolvidas no mini curso de Física Quântica para o ensino médio. Estas aulas foram inseridas em um curso regular de Física de uma classe do 2º ano colegial, no período noturno. As aulas tinham a duração de 40 minutos e faziam parte do último bimestre do ano de 1997. No diário indicamos algumas das observações do professor (ACP) feitas ao final de cada aula.

1ª Aula: Levantando o Perfil Epistemológico

Na primeira aula foi aplicado o teste para levantamento preliminar do Perfil Epistemológico dos alunos. Para evitar que o teste fosse visto como uma avaliação, explicamos os objetivos e relacionamos o teste com os conhecidos testes de personalidade encontrados em revistas femininas. Houve uma resistência inicial, pois os alunos suspeitavam que o teste fosse uma avaliação disfarçada; a resistência foi vencida e vários alunos esboçaram expressões de humor ao lerem as primeiras questões.

Houve um interesse grande na resolução das questões e o fato da maioria dos alunos estar familiarizada com testes de revistinhas deu à atividade um aspecto lúdico. O tempo médio gasto na resolução do teste foi de 25 minutos e a maioria dos alunos ficou bem próxima deste valor.

Muitas dúvidas de interpretação dos enunciados foram respondidas individualmente aos alunos, buscando não interferir na resposta. Por exemplo, uma estudante afirmou que nunca tinha visto um lápis em um copo com água, pedimos que ela imaginasse então uma colher.

Conforme os alunos iam terminando o teste recebiam as notas de aula, “Física Quântica no ensino médio”. O texto foi bem recebido, os alunos gostaram da leitura do prefácio.

Foi indicado que as questões do teste seriam discutidas ao longo das aulas e que algumas poderiam ser “resolvidas” com a leitura do texto.

Ao fim da aula pedimos que os alunos lessem em casa o texto que receberam.

Observação: os alunos que faltaram receberam na aula seguinte o teste para responderem em casa e na outra aula receberam o texto assim que entregaram o teste respondido.

2ª Aula: Introdução ao mini curso

Na segunda aula realizamos a apresentação do projeto “É Possível Levar a Física Quântica para o Ensino Médio?”, com maiores detalhes para os alunos, procurando ressaltar a importância da inserção da Física Moderna no ensino médio. Indicamos em linhas gerais quais seriam as atividades a serem desenvolvidas nas aulas até o final do ano letivo.

Explicamos exaustivamente que os alunos deveriam produzir um “trabalho cultural” e que este trabalho seria a atividade mais importante a ser realizada por eles. Detalhamos o que se pretendia com o trabalho: promover diversas formas de expressão humana sobre um mesmo conceito. Indicamos que o objeto de estudo principal seria a natureza da luz e enfatizamos a busca de diferentes formas de interpretação desse fenômeno.

A maior parte da aula foi gasta com exemplos de como poderia ser o trabalho cultural, explorando as diversas dimensões culturais: pintura, grafite, música, história em quadrinhos, maquete, experimento, poesia, peça de teatro, dança, pesquisa teórica, estudo tecnológico, atividade lúdica, enfim qualquer forma de expressão humana que pudesse ajudar a divulgar o que estávamos abordando nas aulas.

3ª Aula: Introdução às ondas; experiência com molas

Na terceira aula realizamos a experiência de introdução às ondas. Os alunos sentaram-se em duas filas de cadeiras formando um “corredor” onde esticamos duas molas de densidades diferentes. Foram realizadas demonstrações seguindo, mais ou menos, o projeto de ensino de Física PSSC. Antes de cada demonstração foram formuladas perguntas para que os alunos tentassem prever o comportamento das molas.

As previsões dos diferentes alunos para o comportamento das molas eram diversas, isto enriqueceu bastante as demonstrações. Alguns “conceitos espontâneos esperados” foram observados, como pensar que um pedaço da mola caminha de uma extremidade à outra da mola. Isto foi resolvido enrolando uma parte da mola com papel alumínio e mostrando que o papel não é levado pela passagem da onda. Foi necessário prender o papel alumínio de diversas formas para convencer alguns alunos. Outra previsão contestada pela demonstração se refere à superposição. Os alunos se dividiram em dois grupos: os que pensavam que ao se encontrarem dois pulsos vindos de sentidos opostos sempre se destruíam e os que pensavam que se “refletiam” mutuamente. As observações dos alunos pareciam associar aos pulsos propriedades corpusculares (se

destróem = colisão inelástica, são refletidos = colisão elástica). As demonstrações de superposição e interferências construtiva e destrutiva surpreenderam a todos.

A reflexão, a divisão do pulso em duas componentes, refletida e transmitida (na mudança de meio, com duas molas de densidades diferentes) e a interferência foram os conceitos mais enfatizados, pois mais tarde seriam fundamentais para a compreensão do interferômetro de Mach-Zehnder.

Ao final da aula pedimos para que um aluno fizesse um resumo dos conceitos aprendidos. Conseguimos um voluntário que, felizmente, deixou vários intervalos em sua fala, permitindo que os próprios colegas completassem com os pensamentos necessários.

4ª Aula: O nascimento da Física Quântica

Na quarta aula estudamos o nascimento da Física Quântica. A aula foi essencialmente expositiva abordando os conceitos de matéria, campo, radiação do corpo negro e quanta elementar, procurando identificar a ruptura entre o pensamento clássico e o quântico. A importância do estudo da história da ciência foi mostrada aos alunos através do estudo dos trabalhos de Planck e Einstein. Deixamos como atividade para casa a leitura das notas de aula, e entregamos um guia de leitura com algumas questões. Indicamos ainda para os alunos que quisessem se aprofundar no tema a leitura do livro “A Evolução da Física”, de Einstein e Infeld.

Guia de Leitura: O nascimento da Física Quântica.

1) Issac Newton e James Clerk Maxwell elaboraram as duas grandes sínteses teóricas da Física Clássica. Quais foram estas sínteses e em que entidades físicas elas se baseavam?

2) Como o trabalho de Planck contraria as leis da Física Clássica?

3) Planck, ao explicar a radiação do corpo negro, estava consciente do caráter revolucionário de sua obra?

4) Em seu livro “A Evolução da Física” Einstein e Infeld indicam vários exemplos que permitem explicar a noção de quantum. Indique um exemplo diferente daqueles dados no livro e identifique os aspectos contínuos e quânticos.

5ª Aula: Newton x Huygens

Na quinta aula, após uma breve exposição histórica sobre a busca humana da compreensão da natureza da luz, desde as teorias gregas até os trabalhos de Newton

e Huygens, dois alunos, previamente determinados na aula anterior, apresentaram um “jogral” através da encenação da discussão fictícia entre Newton e Huygens em que aparece o duelo entre as visões das teorias corpuscular e ondulatória. Esta discussão termina em uma experiência capaz de por fim ao duelo, permitindo mostrar que a luz pode se curvar ao passar por um obstáculo muito pequeno. Ao final do jogral voltamos a falar do significado, em cada uma das teorias (ondulatória e corpuscular), da velocidade da luz, do éter, das gotas de luz, das sombras e da trajetória retilínea da luz, ressaltando a importância da experiência na decisão entre uma teoria e outra.

6ª Aula: Experiência com Laser: a luz é uma onda?

Na sexta aula realizamos a experiência com o Laser para verificar se a luz ao passar por obstáculos pequenos se curva demonstrando caráter ondulatório. Antes da experiência apresentamos uma breve descrição do Laser e das propriedades do seu feixe. Indicamos as utilizações do Laser em miras de armas, cirurgias médicas, entre outras. Para mostrar que não vemos a luz em sua trajetória, como é comum aparecer em filmes de ficção científica, mas através de reflexões, jogamos giz em pó entre a fonte Laser e o anteparo (parede do fundo da sala de aula) produzindo a “visualização” do feixe em sua trajetória.

A experiência consistiu em colocar entre a fonte Laser e o anteparo diferentes objetos, observando a sombra obtida. Sempre antes da observação os alunos procuravam fazer hipóteses tentando prever o resultado da experiência. Após a colocação de cada objeto dávamos uma explicação baseada na teoria corpuscular da Luz. O feixe de Luz foi visualizado como uma chuva de corpúsculos e os objetos representavam “guarda-chuvas” que impediam a luz de “molhar” a parede.

Começamos com um apagador, depois um giz. Um aluno sugeriu a colocação de uma folha de papel, obtivemos uma situação curiosa, com o feixe incidindo no papel: era possível ver a luz do outro lado do papel, porém o ponto luminoso da parede no fundo da sala desapareceu. Uma aluna disse que isto significava a prova definitiva para a teoria corpuscular, pois, assim como os pingos da chuva molham uma folha de papel mas perdem sua trajetória retilínea, também a luz “molha” o papel e é absorvida por ele.

Utilizamos também como obstáculo uma régua plástica, obtendo a divisão do feixe em duas componentes, uma refletida e outra transmitida. Uma questão interessante que surgiu é a de como a luz é capaz de atravessar o vidro. Explicamos de improviso *o vidro* como uma estrutura com “buracos”, visando manter o modelo corpuscular. Muitos alunos não compreendiam como uma partícula pode atravessar o vidro. Para trabalhar a situação utilizamos uma idéia parecida com a minhoca atravessando a terra (uma investigação mais cuidadosa da obra de Newton poderia fornecer-nos uma resposta mais conveniente de como a teoria corpuscular resolve este

problema). Assim, parte da luz passa através do vidro abrindo pequenos furos, como uma pedra caindo na água e parte é refletida pelas moléculas do vidro.

Por fim colocamos no caminho do feixe um fio de cabelo gentilmente cedido por uma aluna. Antes da realização do experimento todos os alunos concordavam que a imagem obtida seria a de um pequeno círculo (projeção resultado da abertura do feixe Laser:) com a sombra do cabelo dividindo duas regiões de luz. A observação do padrão de difração foi emocionante e entre muitas exclamações os alunos diziam um após o outro que a luz estava fazendo curva, saindo do seu caminho reto, que a luz é uma onda. Utilizamos ainda como obstáculo para o feixe laser um C.D., emprestado por um aluno, do qual obtivemos também padrões de difração.

7ª Aula: O efeito fotoelétrico: A luz é uma partícula?

Na sétima aula mencionamos aos alunos os três temas fundamentais abordados por Einstein em três artigos publicados em 1905: a teoria da relatividade, que abalou nossa concepção do espaço e do tempo; o movimento browniano, uma observação fundamental para resolver a discussão da existência real dos átomos; e, o efeito fotoelétrico, que faz renascer a discussão sobre a natureza da luz. A explicação do efeito fotoelétrico foi feita seguindo basicamente o texto apresentado nas notas de aula, em que Einstein, usando a hipótese de Planck, conseguiu explicar como a energia dos elétrons arrancados independe da luz incidente, dependendo contudo da frequência.

A grande maioria dos alunos não entendeu claramente a explicação do efeito fotoelétrico, porém enfatizamos a utilização da hipótese quântica por Einstein e a conseqüente volta à questão sobre qual é a natureza da luz.

Ao se dar conta do significado do efeito fotoelétrico uma aluna começou a gritar e acusar o professor de estar confundindo profundamente “sua cabeça”, disse mais ou menos o seguinte:

“professor não entendo mais nada, um dia você me convence de que a luz é uma partícula, depois que é uma onda, e agora, que é uma partícula de novo. Estou ficando louca, fala logo o final”.

ao que respondemos que isto era apenas o começo do princípio da incerteza (nos dois sentidos).

Terminamos a aula comentando o trabalho de De Broglie sobre a natureza ondulatória da matéria e a aparente concretização do sonho grego em explicar todo o mundo como uma só substância.

8ª Aula: Dualidade onda-partícula

Na oitava aula fizemos uma revisão dos conceitos apresentados com as molas e as diferentes teorias para explicar a natureza da luz: Newton (corpúscular),

Huygens (ondulatória) e Einstein (Quântica). Indicamos a importância de estudar arranjos experimentais em que coexistissem os aspectos ondulatório e de partícula da luz. Pensamos em como se dá a formação ponto a ponto do padrão de interferência na experiência de Young se considerarmos a luz constituída de fótons (experiência de Taylor - 1909).

Começamos a explicar o experimento a ser montado na próxima aula, o interferômetro de Mach-Zehnder, sempre fazendo menção à experiência com molas.

Esta aula parece ter sido difícil, um aluno dormiu durante a aula, outros ficaram olhando para a janela, poucos mostraram interesse pela explicação do interferômetro.

Ao final desta aula ficamos bastante tristes, parecia que tínhamos fracassado, a maioria dos alunos apresentava uma expressão de dor e insatisfação. Apesar da importância de um bom planejamento das aulas, percebemos que o ato de ensinar possui algumas variáveis, ligadas a aspectos subjetivos, que não podemos e não devemos tentar controlar.

9ª Aula: O experimento com o interferômetro de Mach-Zehnder

Para esta aula chegamos antes do início da aula, preparamos o arranjo experimental do interferômetro de Mach-Zehnder (veja Pessoa, 1997 ou Fagundes, 1997) e após calibrar o sistema mantivemos o laser desligado.

No início da aula usamos a lousa para explicar o arranjo experimental, identificamos os componentes materiais (Laser, espelhos, anteparos, etc.) com suas representações desenhadas na lousa e representadas nas notas de aula. É interessante notar que a mesma explicação que havia sido dada na aula anterior causou uma reação totalmente diferente, mesmo com o laser ainda desligado, os alunos fizeram perguntas e procuraram entender cada trecho da explicação.

Durante a explicação clássica do interferômetro buscamos referir-nos aos conceitos de semi reflexão, onda, interferências construtiva e destrutiva, sempre lembrando o estudo das molas.

Após ligado o laser os alunos em pequenos grupos, uns após outros, dirigiram-se até os anteparos (detetores D1 e D2) para observar o padrão de interferência obtido. Na verdade há uma diferença entre a descrição teórica e a experimental, para o caso de um interferômetro didático, associada à calibração dos ângulos e das distâncias, ao invés de obtermos a interferência construtiva em D1 e destrutiva em D2 (veja Pessoa, 1997) obtemos um padrão de interferência em ambos os anteparos D1 e D2.

Ao final das observações desmontamos o equipamento, ressaltamos o aspecto ondulatório da luz e passamos a expor as dificuldades da montagem experimental de forma a obter a geometria desejada. Durante uma exposição rápida dos cuidados para montar o interferômetro usando frases como “deveríamos medir esta

distância, deveríamos calibrar este ângulo, esta altura”, incidentalmente obtivemos um padrão de interferência magnífico, estando muito próximo da condição limite, em que há interferência construtiva somente em D_1 e destrutiva somente em D_2 (veja Pessoa, 1997). Alguns alunos então puderam rever a figura de interferência bem mais nítida.

10ª Aula: Interpretações quânticas

Na décima aula discutimos o interferômetro para um único fóton de forma a conseguir a condição quântica. Quando perguntamos aos alunos qual o caminho que deveria ser seguido pelo fóton, esperávamos que todos os alunos concordassem com a idéia de que a interferência deixaria de existir, mas alguns alunos parece que não “caíam” mais nas induções do professor e olhavam cada resposta com desconfiança de que poderiam estar sendo enganados. Acreditamos que isto se deu pelas situações anteriores (com a difração, por exemplo) em que as previsões dos alunos foram desconfirmadas pela experiência. Não podemos esquecer contudo que alguns deles leram as notas de aula antes da aula. Ficamos assim com a classe dividida em dois grupos, os que concordaram com o professor e os que pensavam (ou sabiam) que o padrão de interferência deveria ser mantido, com cada fóton interferindo consigo mesmo.

Infelizmente para a definição do impasse não dispomos de uma experiência que possa ser realizada em sala de aula. Havíamos preparado um programa em Visual Basic para mostrar a trajetória do fóton, porém a sala com os computadores da escola estava sendo utilizada pela delegacia de ensino para ministrar cursos de introdução à informática aos professores da escola e de escolas vizinhas, ocupando a sala o ano todo.

Tivemos que ler as notas de aulas e pedir para os alunos confiarem no que elas diziam. Para explicar por qual caminho rumou o fóton utilizamos as três interpretações, de Schrödinger, de De Broglie e de Bohr. Cada aluno parece ter gostado mais dessa do que daquela interpretação, a maioria demonstrou interesse maior pela interpretação da Dupla Solução de De Broglie (preferida do professor) que talvez tenha sido mais enfatizada inconscientemente, apesar do esforço de mantermos uma neutralidade subjetiva e enfatizarmos que todas eram equivalentes para este experimento.

Um grupo de alunos parece não ter aceito a possibilidade de existirem diferentes interpretações para um mesmo fenômeno, principalmente por possuírem aspectos contrários. Com ar de desconfiança, um aluno perguntou: *“como duas pessoas podem dizer coisas contrárias e as duas estarem certas?”*

11ª Aula: Analisando o perfil epistemológico

Na décima primeira aula foram entregues para os alunos os gráficos dos Perfis Epistemológicos de cada um. Desenhamos um modelo na lousa explicando o significado de cada uma das filosofias: animismo, realismo, racionalismo e ultra-racionalismo. Ressaltamos que não há superioridade, nem qualquer “vantagem” em possuir um perfil específico, mas que cada pessoa possui uma tendência a pensar à luz de determinada maneira.

Os alunos receberam de volta o teste que realizaram antes das aulas de física Quântica e puderam rever suas respostas e o resultado do teste. Mostramos que nosso estudo possui diferentes formas de ver a luz e que a própria Física Quântica possui diferentes interpretações como havíamos estudado com o interferômetro.

Enquanto os alunos reviam suas respostas para o teste, andamos pela classe e perguntamos para alguns dos alunos se concordavam com o resultado do Perfil Epistemológico.

Alguns alunos parecem ter ficado alegres olhando para seus gráficos como que para um espelho. Outros reclamaram dizendo que o teste estava errado, que não concordavam. Para uma aluna que obteve o máximo no animismo, por exemplo, perguntamos se gostava de desenhos animados, contos de fada ou algo deste tipo, ao que ela respondeu afirmativamente, mas disse que o que ela gosta de fazer não deve estar associado à escola. Parece que alguns alunos acreditavam numa diferença entre o conhecimento escolar e o não escolar como se eles fossem separáveis. Esperamos que este teste tenha contribuído para começar a romper esta diferença. Outro aluno que obteve o máximo no racionalismo perguntou como um teste sem contas poderia estar indicando que ele é bom em matemática.

Um fato interessante foi um aluno perguntar como seria o Perfil Epistemológico de Einstein e do poeta Tagore. Devolvemos a pergunta, ao que ele respondeu que Einstein deveria ser mais ultra-racionalista enquanto Tagore seria mais realista. Disse a ele que era uma boa interpretação, mas que talvez Einstein fosse mais realista e Tagore ultra-racionalista.

Alguns cientistas mais famosos, como Albert Einstein, são associados a gênios, à perfeição. Acreditamos que por isto a maioria dos alunos atribuiria a Einstein uma visão mais moderna, apesar de sabermos, e ter sido dito também em aula, que ele não aceitava algumas interpretações da mecânica quântica como as ligadas a descrições estatísticas.

Ao final da aula solicitamos como tarefa que os alunos escrevessem um *relatório final* com suas impressões sobre o curso como um todo, ressaltando o que gostaram e o que não gostaram das aulas de Física Quântica.

12ª Aula: Apresentação dos trabalhos culturais

Nesta aula realizamos a apresentação dos trabalhos culturais. Como não teríamos outras aulas, os trabalhos não puderam ser apresentados um a um e optamos por uma “exposição anárquica”. Os alunos mostraram seus trabalhos aos outros, todos ao mesmo tempo. Andamos pela sala e visitamos cada um dos trabalhos. Ninguém permaneceu sentado, as carteiras e cadeiras foram desarrumadas. Quem olhasse de fora veria uma aparente “bagunça”, uns cantando, outros lendo, outros mostrando maquetes, peças de um computador, cartazes. Parecia uma feira livre, uma verdadeira bagunça. Um bom “*carnaval quântico*”.