

## ENSINANDO A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA SOB UMA NOVA ÓPTICA

Maria Beatriz Fagundes, Osvaldo Pessoa Jr.  
João Zanetic, Mikiya Muramatsu  
Instituto de Física - Universidade de São Paulo

### Resumo

Como inserir tópicos de Física Moderna no segundo grau? Neste trabalho, sugerimos uma abordagem introdutória à Física Quântica, a partir do estudo de um experimento em óptica, o interferômetro de Mach-Zehnder. Exploramos a dualidade onda-partícula segundo a concepção da complementaridade de Niels Bohr. Examinamos este tema sob a óptica epistemológica de Gaston Bachelard.<sup>81</sup>

### 1. O Ensino de Física Quântica sob a Perspectiva de Bachelard

Apoiados no referencial epistemológico de Gaston Bachelard, buscamos no *novo espírito científico*<sup>82</sup> decorrente da ciência moderna, e em particular da Física Quântica, uma possibilidade de ruptura curricular e metodológica, com a perspectiva de atualizar e adaptar os conteúdos de Física abordados no segundo grau e de aproximar a Física contemporânea da realidade escolar.

A epistemologia de Bachelard nos coloca frente ao rompimento com o real imediato e nos fornece os moldes convenientes para construirmos nosso referencial teórico, uma vez que a realidade quântica só nos é visível por intermédio de instrumentos contruídos para a sua observação.

*É preciso portanto que a epistemologia dê conta da síntese mais ou menos móvel da razão e da experiência...*<sup>83</sup>

É possível traçar paralelos entre a epistemologia de Bachelard e a proposta de Thomas Kuhn, no sentido de que, para ambos, o desenvolvimento do conhecimento científico não ocorre por simples acumulação: há ruptura, há a revolução científica. Para ambos as formulações teóricas orientam a percepção.

Apoiados nessa epistemologia, esperamos com a nossa proposta fortalecer a tese de que *a Física também é Cultura*<sup>84</sup>, e de que a Física

---

<sup>81</sup> Este trabalho foi apresentado como painel no V Encontro de Pesquisadores em Ensino de Física, e teve considerações que vêm sendo desenvolvidas na dissertação de mestrado de M.B.F., cujo tema central é a inserção de tópicos de Física Quântica no segundo grau. Agradecemos o apoio financeiro da CAPES (M.B.F.) e CNPq (O.P.J.).

<sup>82</sup> Bachelard utiliza o conceito de *novo espírito científico* para sintetizar as epistemologias não-cartesianas e as teorias científicas da Física Contemporânea como, a relatividade e a quântica, que caracterizam a ciência do século XX. BACHELARD, G. *O Novo Espírito Científico*. Ed. Tempo Brasileiro, Rio de Janeiro, 1985. Original francês de 1934.

<sup>83</sup> BACHELARD, ref. 2, p. 22.

Quântica, enquanto produção cultural deste século, deve ser oferecida na escola, principalmente para contemplar aqueles alunos que finalizam no segundo grau seus contatos com a disciplina de Física.

Nesse sentido procuramos, num primeiro momento, focalizar nossos esforços na figura do professor e, posteriormente, adaptar essa abordagem para o aluno. Foi então elaborado e realizado, no primeiro semestre de 1996, no período de 24 de fevereiro a 30 de março, um curso de extensão universitária de *Introdução Conceitual à Física Quântica*<sup>85</sup>. Esse curso foi oferecido a 33 professores de primeiro e de segundo graus das áreas de Ciência e de Física da rede pública, totalizando uma carga de trinta horas-aula.

A estrutura básica do curso foi construída sobre o conceito de “dualidade onda-partícula”, que adotamos como a característica essencial da Física Quântica. A dualidade no comportamento da luz foi abordada principalmente através do experimento da dupla fenda e das analogias desse experimento com experimentos de interferômetria óptica demonstrados durante o curso.

Queremos contextualizar a característica dual da luz e contrapor as concepções clássicas dos modelos ondulatório e corpuscular. Fazemos um paralelo entre as concepções clássica e quântica, de modo a enfatizar os conflitos decorrentes da utilização de concepções clássicas na explicação de fenômenos quânticos. Essa situação promove, ainda fazendo referência a Bachelard, uma ruptura com a concepção usual de realidade.

*É talvez a propósito do dualismo das ondas e dos corpúsculos que as observações psicológicas às quais consagramos esta obra se nos revelem como as mais bem fundamentadas. É aí mais do que noutra parte, com efeito, que se pode sentir quão mal instruídos somos pela experiência imediata...*<sup>86</sup>

Para compor o curso selecionamos os tópicos apresentados a seguir, que constituem a Teoria Quântica, através dos quais oferecemos um panorama amplo das diferentes visões de mundo construídas a partir das concepções clássica e quântica.

Estrutura geral do curso: *Introdução Conceitual à Física Quântica*

Introdução Histórica	A velha Mecânica Quântica
	Mecânica Matricial
	Mecânica Ondulatória
A Essência da Física Quântica	Luz como onda
	Luz como partícula
	Dualidade onda-partícula

<sup>84</sup> ZANETIC, J. *Física Também é Cultura*. Tese submetida à Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, 1989.

<sup>85</sup> PESSOA JR., O. *Introdução Conceitual à Física Quântica*. Estação Ciência e Instituto de Física da Universidade de São Paulo, fevereiro / março 1996.

<sup>86</sup> BACHELARD, ref.2, p. 79.

Visões de Mundo	Realismo
	Positivismo
Dualidade Onda-Partícula	Probabilidades
	Princípio de Incerteza
Efeito Fotoelétrico	Um modelo simples
Ondas	Amplitude, fase, intensidade
	Superposição de ondas
	Reflexão e ondas estacionárias
Interferômetro de Mach-Zehnder	Interferômetro de Mach-Zehnder
	Determinação de trajetória
	Princípio de superposição quântico
	Variação de fase e superposição
Interpretações da dualidade	Bohr : Complementaridade
	De Broglie : dupla solução
	Schroedinger : ondulatória
Experimento da dupla fenda	Um paralelo com o interferômetro
Interferômetro de Mach-Zehnder	Prática de Física experimental
Experimento de Stern-Gerlach	Spin do elétron
Ondas em duas e três dimensões	Polarização, superposição
	Estados estacionários
Átomo de Bohr	Quantização de energia

Partindo dessa experiência particular estendemos nossa proposta para inserir a Física Quântica no segundo grau a partir da Física Ondulatória. Nessa abordagem apontamos, através de discussões presentes na análise do interferômetro de Mach-Zehnder, fenômenos que caracterizam a dualidade do comportamento da luz e os contrapomos aos fenômenos clássicos de corpúsculos e de ondas.

Existe uma discussão na literatura sobre se os conteúdos de Física Quântica devem ou não ser dados a partir de teorias semi-clássicas, como o átomo de Bohr (1913). Tendemos a concordar com o grupo de Fischler, de Berlim<sup>87</sup>, que defende que não: o átomo, por exemplo, deve ser apresentado já a partir da Mecânica Quântica desenvolvida em 1926.

Nessa linha, uma idéia a ser explorada é aproveitar as concepções dos alunos antes delas serem formatadas nos moldes da Física Clássica. Neste caso, inverter-se-ia o sentido comumente descrito nas abordagens tradicionais, partindo dos conteúdos quânticos e indo para os conteúdos clássicos.

*...os hábitos psicológicos antigos roubam a flexibilidade necessária a um pensamento em acordo absoluto com a ciência contemporânea...*

<sup>87</sup> FISCHLER, H; LICHTFELDT, M. *Research in Physical Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*. Proceedings of an Internacional Workshop held the University of Bremen, march 4-8, 1991.

Nossa discordância com este grupo é com a interpretação adotada para a Teoria Quântica. Enquanto eles se posicionam (talvez sem perceber) na interpretação dos coletivos estatísticos, nossa abordagem é mais próxima a uma interpretação ondulatória, sem contudo desprezar as outras interpretações.

*É no momento em que um conceito muda de sentido que ele tem mais sentido...*<sup>88</sup>

Nessa abordagem a dualidade onda-partícula é explorada essencialmente através do experimento de Mach-Zehnder (MZ) e através do conceito de onda-partícula é que olhamos os conceitos de onda e de partícula.

## 2. Explorando o Interferômetro de Mach-Zehnder

Para utilizarmos o interferômetro de MZ como ferramenta de ensino de Mecânica Quântica é preciso antes familiarizar o aluno com a “dualidade onda-partícula”. Uma maneira de fazer isso é examinando o comportamento da luz. Inicialmente, pode-se apresentar o experimento das duas fendas (Young). O resultado de tal experimento só pode ser entendido supondo que a luz se propaga como *onda*. O conceito de “interferência” da luz pode ser trabalhado por meio de filmes<sup>89</sup> ou de uma cuba de ondas. Apresenta-se então uma discussão do efeito fotoelétrico, no qual o aluno é convencido que a absorção da radiação luminosa se dá em pacotes com energia bem definida, chamados fótons. Pode-se argumentar também que tais fótons são indivisíveis, o que os caracteriza como *partículas*.

Feito isso, o aluno se depara com o que podemos chamar de “versão fraca” da dualidade onda-partícula. No experimento das duas fendas, se a intensidade do feixe for baixíssima, as ionizações que ocorrem em uma chapa fotográfica (que serve como detector) aparecem uma a uma, correspondendo à detecção de cada fóton individual. Só com o acúmulo desses pontos é que surge o padrão de interferência. Temos assim, simultaneamente, o aspecto corpuscular (absorções individuais de quanta localizados) e o ondulatório (o padrão de interferência, que se forma paulatinamente).

Com esse pano de fundo, estamos prontos para explorar a Física Quântica a partir do interferômetro de Mach-Zehnder. Em primeiro lugar, é preciso entender o funcionamento do interferômetro de acordo com a Física Ondulatória Clássica. Um feixe de luz de amplitude  $\Psi$ , provindo de uma fonte F, é dividido em duas partes (A e B) com amplitudes  $\Psi/\sqrt{2}$  no semi-espelho S1 (ver figura 1). O componente refletido sofre um deslocamento de fase de  $\frac{1}{4}$  de comprimento de onda em relação ao componente transmitido. O feixe A reflete em E1 e cai sobre o semi-espelho S2, dividindo-se em duas partes, com amplitudes  $\Psi/2$ . O feixe B também se divide em S2, resultando em duas partes com amplitudes  $\Psi/2$ . Um exame das fases mostra que os componentes rumando para D1 se superpõem construtivamente, e os rumando para

<sup>88</sup> BACHELARD, ref.2, pp. 83, 51.

<sup>89</sup> Um bom exemplo são os filmes produzidos na série *The Mechanical Universe*, de R. P. Olenick, T. M. Apostol & D. L. Goodstein.

D2 se superpõem destrutivamente. Todo o feixe inicial termina então em D1.

O exame do comportamento do interferômetro de MZ, resumido no parágrafo anterior, é uma ótima aula de física ondulatória clássica para os alunos de segundo grau. O regime *quântico* surge ao se diminuir a intensidade do feixe, a tal ponto que os fótons entrem um por um no interferômetro. Mesmo neste caso, ocorre interferência após S2, e todos os fótons serão detectados em D1.

### Interferômetro de Mach-Zehnder

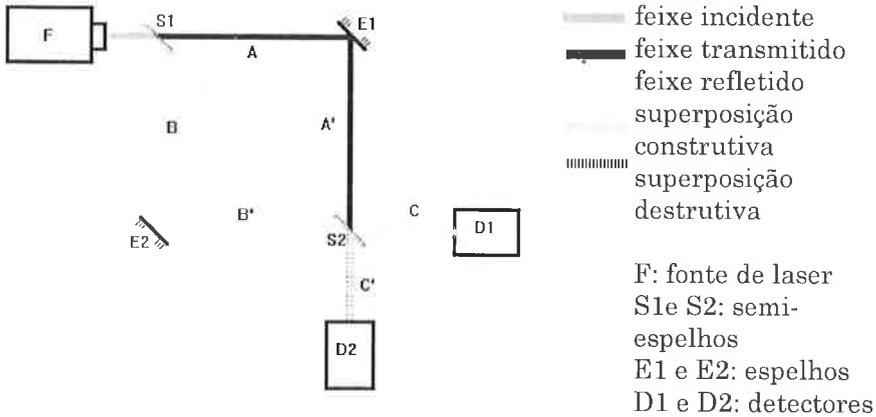


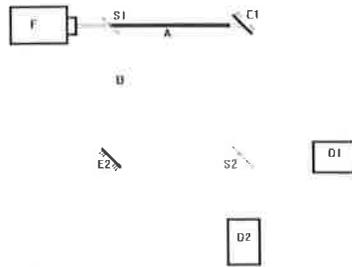
Figura 1

Por qual caminho rumou o fóton? Como todos os fótons terminam em D1, não podemos discernir por qual caminho um certo fóton seguiu. Mas poderíamos dizer que ele rumou *ou* pelo caminho A, *ou* pelo caminho B?

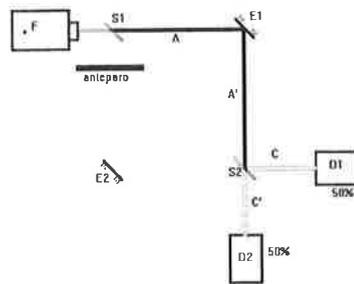
Nossa intuição “clássica” diria que sim. Mas vejamos: se o fóton seguir pelo caminho A (por exemplo, bloqueando-se o caminho B por meio de um anteparo, como esquematizado na figura 2b), a probabilidade do fóton ser detectado em D2 será de 50% (em relação ao número total de fótons detectados), ao invés de 0%, como no caso sem anteparos. Analogamente, se o caminho A for bloqueado por um anteparo (ver figura 2c), os fótons detectados certamente terão rumado pelo caminho B. Mas novamente, neste caso, há uma probabilidade de 50% dos fótons caírem em D2.

Ora, no caso sem anteparos, se o fóton rumou *ou* pelo caminho A, *ou* pelo caminho B, as chances de ele cair em D2 também seriam 50%. Mas não é isso que observamos! Assim, não podemos imaginar que o fóton escolhe um caminho bem definido e nada vai pelo outro caminho!

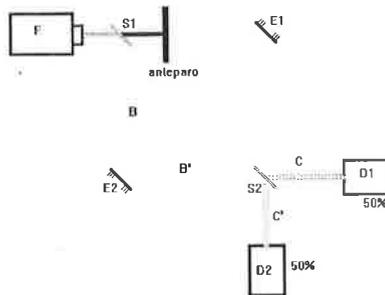
Explorando o interferômetro de Mach-Zehnder



Fenômeno Ondulatório  
**Figura 2a**



Fenômeno Corpuscular  
**Figura 2b**



Fenômeno Corpuscular  
**Figura 2c**

Como explicar isso? Existe um punhado de interpretações diferentes para esta situação<sup>90</sup>. Contentemo-nos, por hora, com a seguinte explicação, desenvolvida por Niels Bohr. Um “fenômeno” quântico consiste no objeto quântico mais a aparelhagem experimental, e ele só se

<sup>90</sup> Podemos imaginar que o fóton se divide em duas partes, mas que na hora que ocorrer uma detecção, ele sofra um colapso e se constitua em um único fóton (interpretação ondulatória). Podemos imaginar que haja uma onda e uma partícula, e que a onda se divide em duas enquanto a partícula, que só pode rumar por onde existe onda, escolhe um dos caminhos (interpretação da dupla solução). Ou podemos adotar a estratégia “anti-realista” da interpretação da complementaridade, conforme fazemos no texto.

realiza quando uma detecção ocorre. Enquanto não houver uma detecção, nada podemos falar sobre o fenômeno. Pois bem, um fenômeno pode ser ou ondulatório, ou corpuscular, mas a ocorrência simultânea dos dois é excluída (este é o princípio da complementaridade). Se o fenômeno for ondulatório, como no interferômetro de MZ para fótons individuais, não podemos pensar em uma partícula seguindo uma trajetória bem definida. O que chamamos de “fóton”, neste caso, não é algo que se propaga como uma partícula, mas sim algo que é detectado de maneira bem localizada como um pacote de energia (devido ao que Bohr chama de “postulado quântico”).

Por outro lado, se pudermos afirmar qual foi a trajetória de um fóton detectado (por exemplo, se retirarmos S2 do interferômetro de MZ), o fenômeno é corpuscular. Mas neste caso, não ocorre interferência. Enunciamos novamente o princípio da complementaridade para arranjos experimentais, que também chamamos de “versão forte” da *dualidade onda-partícula*: dado o arranjo experimental, ou ocorre interferência (fenômeno ondulatório) ou podemos determinar as trajetórias dos quanta (fenômeno corpuscular)<sup>91</sup>.

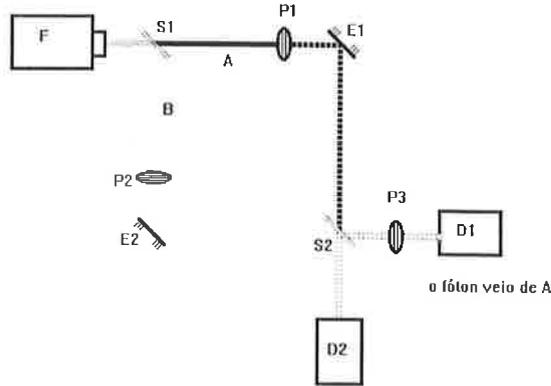
A montagem do interferômetro de MZ que apresentamos no Encontro foi construída por nós, e custou em torno de R\$ 700 (excluindo o laser). O procedimento de alinhamento do interferômetro é razoavelmente simples, e mesmo sem conseguir caminhos ópticos iguais para os caminhos A e B, observam-se claramente franjas de interferência em D1 e em D2 quando o fenômeno é ondulatório.

Com esse equipamento é possível realizar uma atividade com polarizadores, que ilustra o princípio de complementaridade. Inserindo-se polarizadores P1 e P2 nos caminhos A e B, se estes polarizadores estiverem alinhados a 0° e a 90° (portanto ortogonalmente), não se observam as franjas de interferência em D1. Pensando em termos de física ondulatória clássica, isso ocorre porque componentes ortogonais não se superpõem. Em termos quânticos, segundo a interpretação da complementaridade, temos um fenômeno corpuscular, pois podemos analisar a polarização do fóton e inferir por onde ele veio. Por exemplo, na figura 3a, se um fóton passar por um terceiro polarizador P3, orientado a 0°, e incidir em D1, sabemos que ele veio por A (pois se viesse de B ele não conseguiria passar pelo terceiro polarizador). Por outro lado, se P3 for colocado a 45°, o padrão de interferência voltará a ser observado. O fenômeno será então ondulatório! De fato, poderíamos (em princípio) retardar a decisão de colocar o terceiro polarizador a 0° ou a 45° para depois do fóton passar por S2!

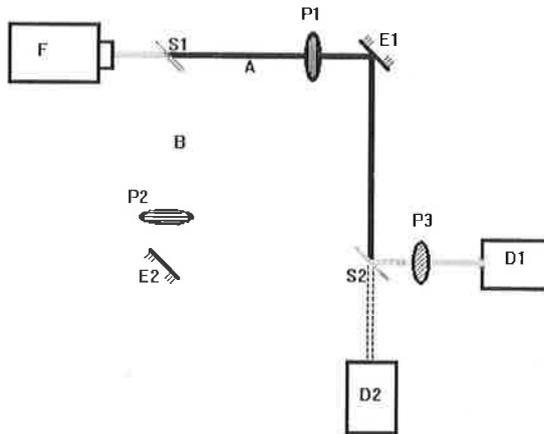
---

<sup>91</sup> Esta definição precisaria ser qualificada, tendo em vista os chamados “fenômenos intermediários” entre onda e partícula. A dualidade, porém, não é violada pois tal fenômeno tem sempre um par complementar.

## Interferômetro de Mach-Zehnder com polarizadores



Fenômeno Corpuscular  
Figura 3a



Fenômeno Ondulatório  
Figura 3b

Se o leitor se sentir perplexo, sugerimos que ele tente entender o que está acontecendo por meio da Física Ondulatória Clássica. A perplexidade desaparecerá, assim como ocorre se ele adotar uma interpretação da Física Quântica. Mas, infelizmente, todas as interpretações desenvolvidas até hoje têm seus problemas!

### 3. Implicações para o Ensino de Física

Podemos agora apontar, de forma geral, algumas implicações dessa proposta para o ensino da Física escolar.

1) Possibilidade de revisitar conceitos da Óptica Clássica. Estudar a Física Quântica a partir das propriedades da luz é uma forma de estimular e reforçar o estudo da Óptica Clássica, muitas vezes negligenciado nos currículos escolares tradicionais.

2) Reconstrução da Física Clássica a partir da Física Quântica.

Dentro da concepção bachelardiana, de que “um conceito ganha mais sentido quando ele muda de sentido”, entendemos que olhar o universo da Física Clássica a partir de um referencial da Física Quântica pode proporcionar ao estudante uma melhor compreensão da própria Física Clássica, além oferecer a esse estudante a possibilidade de contemplar a Física deste século inserida no contexto geral da Física.

3) Uma nova visão da História da Ciência. A Física moderna encontra-se num momento de consolidação de suas bases e de ampliação dos domínios do paradigma que a caracteriza. Explorar, através da história da ciência, esse momento de síntese de um novo paradigma pode contribuir para o entendimento de paradigmas anteriores mostrando a articulação desses paradigmas no processo de construção do conhecimento científico. Isso oferece inclusive elementos para que sejam estabelecidos paralelos entre a construção do conhecimento científico e o processo de ensino e aprendizagem da ciência. Para julgar o passado da ciência é preciso conhecer seu presente. “É o presente que ilumina o passado e lhe dá sentido, permitindo-lhe reviver.”

4) Ruptura curricular e metodológica no Ensino. Os obstáculos epistemológicos são encontrados tanto na história do pensamento científico quanto na prática educacional. Há todo um passado cultural: é preciso lutar contra as experiências primeiras, romper com a evidência imediata, com as idéias claras. A Física Quântica nos remete às relações entre os objetos de estudo, os instrumentos utilizados nas observações e a relação do observador com esses elementos. Nos leva a racionalização do real imediato. Para se observar é necessário construir o instrumento de observação e à construção desse instrumento pressupõe uma teoria.

5) Uma visão da Ciência como processo. Através da análise dos dilemas presentes na Física contemporânea, e das propostas de solução desses problemas, se evidenciam as dinâmicas interna e social do pensamento científico. Transparecem as constantes transformações pelas quais a ciência passa nas bases conceituais e metodológicas. O conhecimento ocorre de forma espacial e não linear, portanto aprender não é um processo de acumulação sucessiva de conteúdos, é um processo dialético e recorrente, no qual as partes dão sentido ao todo e a partir do todo as partes se solidificam. Esse processo exige o constante diálogo entre os conceitos e o contexto e entre o contexto e os conceitos.

6) Coexistência de interpretações conflitantes. Na Física Clássica dois modelos já eram objetos de investigação, Huygens investiga a luz como onda e Newton a luz como partícula. Com a Física Contemporânea consolida-se um modelo dual: luz como onda-partícula. A coexistência de dois modelos conflitantes permite a coexistência de interpretações conflitantes, a proliferação de paradigmas. Devemos encarar a evolução do conhecimento como busca da verdade ou como forma de *salvar as aparências*?

7) A construção racional da realidade. Para Bachelard o corpúsculo e a onda não são ligados por mecanismos, sua associação é de origem matemática. É a Matemática que nos conduz à realidade, e é nesse sentido que o vetor epistemológico vai do racional ao real. Surgem assim os vários tipos de real: o real macro, percebido pelos sentidos; o real micro, percebido indiretamente através de instrumentos e o real construído: a ciência contemporânea cria o ultra-objeto, por exemplo, o fóton. A física é então uma forma de diálogo com a natureza que vai além da descrição imediata, é preciso também contemplar o “racionalismo aplicado” sobre o real.

8) Proximidade entre o Ensino de Física e a Pesquisa em Física. Uma concepção de ciência mais humana torna mais próximo o conhecimento produzido pela ciência da aprendizagem e do ensino da ciência. Há que se procurar resolver as dificuldades inerentes à difusão do conhecimento contemporâneo, inclusive daquele que ainda guarda uma certa provisoriade ou que ainda está num estágio meramente especulativo.

9) Incorporação da Física moderna na visão de mundo contemporânea. Um indivíduo, no final do século XX, que ainda não foi apresentado pelo menos aos rudimentos introdutórios da Física Quântica e da Relatividade, pode ser comparado a um indivíduo de meados do século XVIII que ainda não conhecia nada sobre a Física Newtoniana.

10) A Física Moderna como elemento da Cultura. A inserção da Física Moderna não se justifica somente dentro da perspectiva de atualização curricular mas se justifica também porque entendemos que a Física é parte da cultura contemporânea. A Física Moderna não traz em seu âmbito apenas o conteúdo de Física ou de mais uma disciplina componente do currículo escolar. Ela carrega em sua essência, assim como qualquer outra área do conhecimento humano, as características de um momento histórico e social que permeia toda forma de manifestação cultural.