

<i>Alunos</i>	<i>Nº USP</i>
Deyvid José Souza Santos	7993533
Marcos de Lima Leite	7993411

*Disciplina*  
Metodologia do Ensino de Física I (EDM0425)

*Professor*  
Maurício Pietrocola

---

### **Módulo de Ensino Inovador:**

## **“Uma coisa pode ser duas ao mesmo tempo? A dualidade onda-partícula”**

### ***Apresentação***

Com o presente *Módulo de Ensino Inovador*, procuraremos formalizar uma proposta de sequência didática que aborde a *dualidade onda-partícula da matéria e da radiação* segundo uma perspectiva histórica que enfatiza a construção conceitual dos postulados e teorias que precederam a formulação da mecânica quântica.

### ***Justificativa***

Numa realidade escolar que tradicionalmente despreza, no ensino de física, os temas de Física Moderna (e que apela apenas para a inclusão curricular da mecânica, termodinâmica e eletromagnetismo clássicos), idealizamos uma sequência didática que aborda a *dualidade onda-partícula da matéria e da radiação*, um dos pressupostos para a primeira formulação da mecânica quântica no começo do século XX por Erwin Schrödinger.

Com a quantização da energia, Planck e Einstein passaram a tratar a radiação como corpúsculo, assim como com um argumento de simetria, de Broglie passou a associar ondas às partículas. Diante do fato de a teoria quântica não só corroborar a *dualidade onda-partícula da matéria e da radiação*, mas também tê-la como pressuposto para ser formalizada, a dualidade aparece como tema relevante tanto em sua construção histórica e em seus aparentes buracos epistemológicos, quanto na evolução do conhecimento físico que promoveu e nas aplicações tecnológicas cujos caminhos ela permitiu que fossem abertos e traçados.

No presente módulo de ensino será apresentada uma proposta de sequência didática temática para os professores de física que desejarem ampliar seu repertório de experiências em sala de aula. Esperamos que a partir do tema desta proposta os professores que por ela se interessarem tenham o engajamento de abordar mais temas de Física Moderna em seus cursos, e também que a partir da estrutura desta sequência didática, os mesmos sejam motivados a modificarem suas práticas na direção da *inovação* - entendendo inovação a partir de uma abordagem temática de temas de física, da inclusão de etapas de problematização, modelização e contextualização em sua *praxis* e da valorização da natureza da ciência na ocasião de se ensinar os caminhos científicos das construções conceituais.

## **Objetivo Geral**

O objetivo geral deste M.E.I. é conferir aos alunos a compreensão a respeito do *conceito de dualidade onda-partícula*, seus *pressupostos* e suas *implicações*. No que concerne aos *pressupostos* e à *formulação*, espera-se que os alunos compreendam os caminhos da construção conceitual envolvida e que disto induzam que a construção da ciência não se pauta no trabalho de cientistas gênios, mas em sucessivas tentativas, com fracassos, contradições, sucessos e reformulações. Já com relação ao *estabelecimento* e às *implicações*, espera-se que os alunos percebam tanto a distância entre o conhecimento científico e os problemas existencialistas decorrentes da dualidade quanto a importância que a física e seu desenvolvimento, por exemplo no século XX, teve diante dos contextos tecnológico e social.

## **Público-Alvo**

Esta sequência didática é recomendada para alunos de 3º Ano do Ensino Médio, ou para alunos que já tenham visitado em seus cursos de física a mecânica clássica, a ondulatória, a óptica geométrica e o eletromagnetismo clássico.

## **Número de Aulas**

A sequência envolve um conjunto básico de 4 aulas, sendo que cada uma requer para as atividades propostas aproximadamente 1h30min, totalizando 6h de curso. Apesar desta recomendação de carga horária das aulas, cabe ao professor enxugá-las ou expandi-las de acordo com suas intenções didáticas, que naturalmente podem diferir das intenções aqui implícitas.

## **Conteúdo Físico**

Basicamente, as aulas se resumem em quatro temas:

- **Aula 1:** Comportamento Ondulatório da Radiação
- **Aula 2:** Comportamento Corpuscular da Radiação
- **Aula 3:** Comportamento Ondulatório da Matéria
- **Aula 4:** Implicações da Dualidade Onda-Partícula

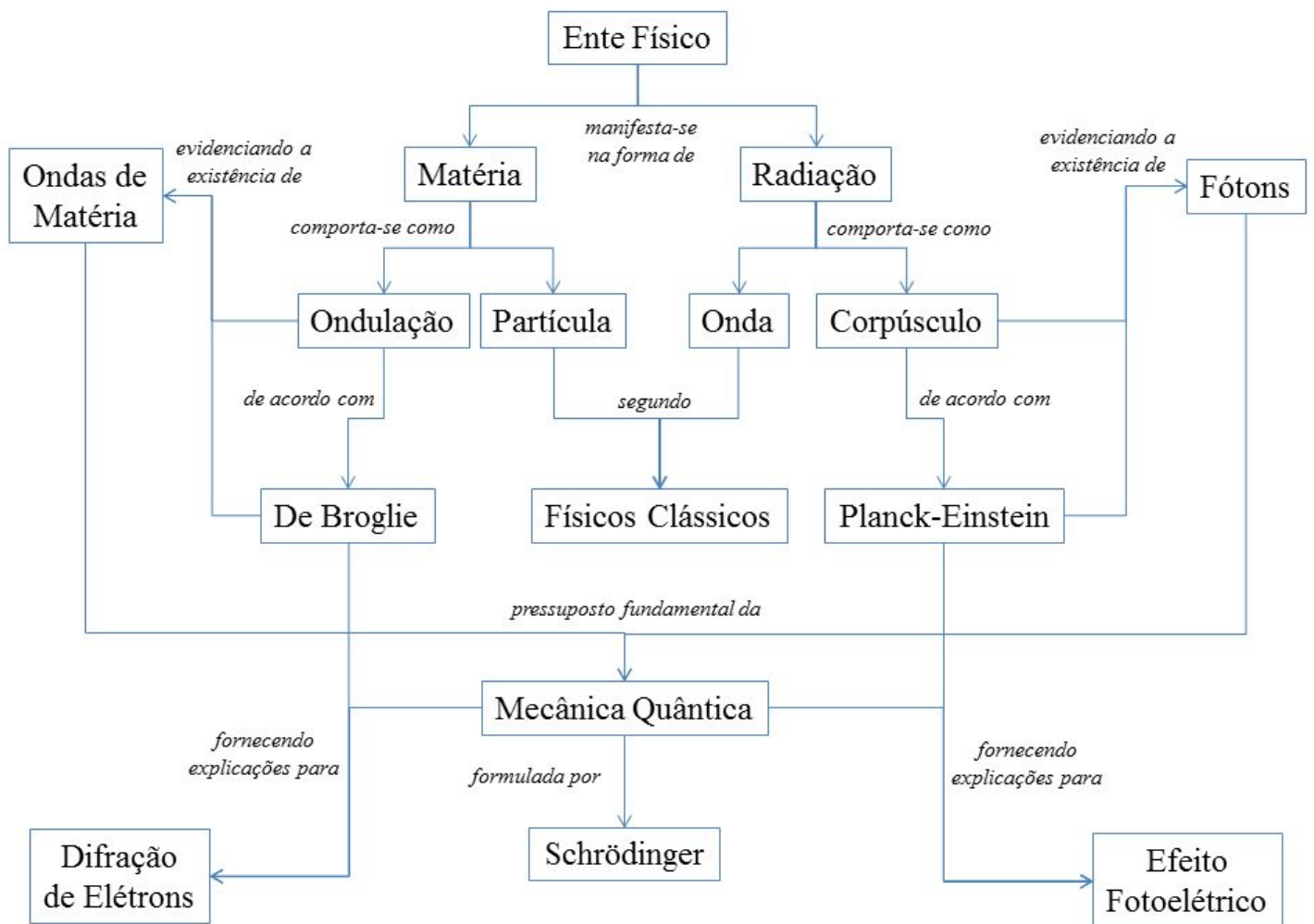
Não foi idealizada uma aula para abordagem do *comportamento corpuscular da matéria*, uma vez que ele é intuitivo e está explícito na abordagem padrão dos cursos de mecânica clássica.

O *comportamento ondulatório da radiação*, apesar de também ser intuitivo sob muitos pontos de vista, foi incluso como tema da primeira aula pelo fato de não necessariamente as particularidades (de interesse do curso) das ondas eletromagnéticas (EM) serem previamente conhecidas pelos alunos a partir do curso padrão de Óptica Geométrica.

Com relação aos conteúdos físicos presentes em cada proposta de aula, podemos destacar:

- **Aula 1:** Conceituação de onda, caracterização das ondas EM segundo o a óptica física e o eletromagnetismo clássico (*Young, Faraday Hertz, Maxwell*), reconhecimento dos fenômenos ondulatórios (reflexão, refração, interferência e difração) inerentes às ondas EM;
- **Aula 2:** Postulado de *Planck* (quantização da energia), modelo de *Einstein* para o efeito fotoelétrico, aplicações práticas do efeito fotoelétrico;
- **Aula 3:** Postulado de *de Broglie* e ondas de matéria, difração de elétrons em arranjos cristalinos, difração de elétrons na dupla fenda (comportamento dúbio), aplicações da difração de raios-X e elétrons;
- **Aula 4:** Debates clássicos sobre a natureza da luz (*Newton, Poisson, Huygens, Fresnel*), impacto da dualidade onda-partícula na formulação da mecânica quântica, importância e utilidade da Equação de Schrödinger, interpretação probabilística de Max Born a respeito das funções de onda.

A respeito destes temas, incluímos a seguir um *mapa conceitual básico* referente a tais conteúdos físicos pretendidos:



### **Temática de Interesse**

Com a complexificação do conhecimento científico, cada vez mais os conhecimentos de senso comum dele se distanciam, ampliando o diâmetro e a profundidade do buraco que os separam. O desenvolvimento tecnológico propiciado pelo avanço dos conhecimentos em física no decorrer do século XX são um exemplo direto deste tipo de distanciamento. Uma vez que uma sociedade permanece mergulhada em crenças, achismos e tradições, sem ter o mínimo de contato com as ciências naturais - que consistem basicamente em tentativas racionais de explicação dos fenômenos da natureza -, ela fica fadada a um futuro de constância, que, numa perspectiva global de competição (onde as forças econômicas e diplomáticas falam mais alto que as forças culturais), isto representa seu fracasso e reflete seu subdesenvolvimento.

Apesar de possíveis posturas de resistência com relação a uma realidade capitalista (muitas vezes caracterizada como selvagem), a mesma não deixa de ser realidade. Neste cenário, cabe às nações não apenas oferecer à sua população oportunidades de entrarem em contato com o conhecimento e a prática científica, como investir massivamente em pesquisa e desenvolvimento. Isto tanto é uma situação vigente, como os conhecimentos inerentes às ciências naturais acabam por ser valorizados em âmbito nacional:

"(...) o aprendizado da Física promove a articulação de toda uma visão de mundo, de uma compreensão dinâmica do universo, mais ampla do que nosso entorno material imediato, capaz portanto de transcender nossos limites temporais e espaciais. Assim, ao lado de um caráter mais prático, a Física revela também uma dimensão filosófica, com uma beleza e importância que não devem ser subestimadas no processo educativo. Para que esses objetivos se transformem em linhas orientadoras para a organização do ensino de Física no Ensino Médio, é indispensável traduzi-los em termos de competências e habilidades, superando a prática tradicional". (Parâmetros Curriculares Nacionais de Física - Ensino Médio)

A transcendência dos limites temporais e espaciais, a beleza filosófica, e também as diversas aplicações tecnológicas são as mais diretas motivações para o estudo da mecânica quântica no Ensino Médio. Diante da perspectiva apresentada e das motivações enunciadas, a abordagem de um tema que aparece como um pressuposto fundamental da mecânica quântica por si só revela-se fundamental.

Na sequência didática aqui tratada, cujo detalhamento está incluso na seção seguinte deste módulo, mostra-se inovadora a partir de aspectos como: abordagem temática da física (tratamento de conteúdos inerentes a um tema, e não de temas inerentes a um conteúdo), momentos pedagógicos das aulas pautados em problematização, modelização e contextualização, utilização de material experimental de demonstração e de recursos multimídia, proposição de discussões e debates com os alunos, e edificação didática da proposta a partir de uma construção conceitual lógica e coesa (sem desconsiderar a cronologia histórica envolvida no período em questão).

## **Quadro Sintético**

### **Aula 1**

**Tema da Aula:** Natureza ondulatória da luz.

**Objetivo da Aula:** Discutir o conceito de onda e o comportamento ondulatório da radiação.

**Motivação:** Propor as perguntas “Uma coisa pode ser duas ao mesmo tempo?”, “O que é a luz?” e “Existe luz invisível?” no início da aula para saber o que os alunos pensam a respeito.

**Conteúdo físico focado nesta aula:** Reconhecimento da luz como onda eletromagnética.

**Recursos Instrucionais a serem utilizados:** *Datashow*, computador, lousa, giz, *laser pointer* e fendas e redes de difração.

**Momentos da Aula:** Inicialmente serão propostas aos alunos as perguntas mencionadas na motivação, com vistas a ouvir a opinião dos mesmos sobre esses questionamentos. Em seguida a aula será encaminhada para o estudo de alguns fenômenos ondulatórios (reflexão, refração, interferência e difração), de modo que através do reconhecimento da ocorrência desses fenômenos para a luz possamos caracterizá-la como uma onda eletromagnética.

**Comentários Finais:** Essa primeira aula consiste em uma introdução de conceitos de ondulatória para ressaltar o comportamento ondulatório da luz e a apresentação do espectro eletromagnético. Entretanto, a escolha em dedicar uma aula inteira para o estudo desses assuntos foi feita levando em conta que os alunos não estudaram com profundidade necessária os conteúdos de ondulatória, óptica física e eletromagnetismo. O *laser pointer* deve ser utilizado para demonstrar a ocorrência de difração e/ou interferência da luz ao incidir nos diferentes arranjos de fendas e redes de difração.

### **Aula 2**

**Tema da Aula:** Natureza corpuscular da luz.

**Objetivo da Aula:** Discutir o caráter corpuscular da radiação a partir do estudo do postulado de *Planck* e do modelo de *Einstein* para o efeito fotoelétrico.

**Motivação:** Apresentar o fenômeno conhecido por efeito fotoelétrico e ressaltar a impossibilidade de interpretá-lo/descrevê-lo com precisão se utilizando apenas da teoria eletromagnética clássica.

**Conteúdo físico focado nesta aula:** Modelo de *Einstein* para o efeito fotoelétrico.

**Recursos Instrucionais a serem utilizados:** *Datashow*, computador, lousa e giz.

**Momentos da Aula:** Inicialmente será apresentado o fenômeno do efeito fotoelétrico enfatizando as limitações da teoria eletromagnética clássica para

explicar porque a energia cinética máxima dos elétrons ejetados do metal não depende da intensidade da luz utilizada, mas apenas da sua frequência. Após discutir as dificuldades inerentes à compreensão desse fenômeno a partir da teoria clássica, serão apresentados o postulado de *Planck* com relação à quantização da energia e o modelo de *Einstein* para o efeito fotoelétrico, o qual consegue explicar bem todas as peculiaridades desse fenômeno (frequência mínima necessária para ejetar os elétrons do metal, ocorrência praticamente instantânea do fenômeno ao se incidir luz no metal e relação de proporcionalidade direta entre a energia cinética máxima dos elétrons ejetados e a frequência da luz utilizada). Por fim, serão discutidas algumas aplicações tecnológicas baseadas no fenômeno do efeito fotoelétrico, tais como o funcionamento de alguns dispositivos responsáveis pela abertura automática de portas em lojas, pela geração de energia elétrica via células fotovoltaicas e pela fabricação de aparelhos de visão noturna.

**Comentários Finais:** Nessa aula é possível enfatizar tanto o desenvolvimento histórico ocorrido como a importância de propor ideias originais que possam ser traduzidas em uma modelagem matemática que explique/descreva bem os fenômenos em estudo. Além disso, é possível que se destaque, por exemplo, a importância do ano de 1905 para a emergência de *Albert Einstein* nos cenários acadêmico e científico. Aliada a isto, a redefinição de paradigmas que suas teorias sugeriam, explicitada por exemplo a partir do grande intervalo de tempo entre a publicação dos trabalhos de *Planck* e de *Einstein* e da premiação destes cientistas com o Prêmio Nobel.

### **Aula 3**

**Tema da Aula:** Natureza ondulatória da matéria.

**Objetivo da Aula:** Apresentar e discutir o postulado de *Louis de Broglie* e usar a difração de elétrons como exemplo de caso do comportamento ondulatório da matéria.

**Motivação:** Na apresentação do postulado de *de Broglie*, incitar o questionamento: "se a luz tem um comportamento dual, por que não a matéria?".

**Conteúdo físico focado nesta aula:** Reconhecimento do comportamento ondulatório dos elétrons a partir do postulado de *de Broglie* e da difração de elétrons.

**Recursos Instrucionais a serem utilizados:** Datashow, computador, lousa e giz.

**Momentos da Aula:** Inicialmente será apresentado o postulado de *de Broglie* para questionar a possibilidade da matéria também se comportar de forma dual, enfatizando o trabalho teórico desse físico no sentido de se utilizar dos conhecimentos da época sobre a luz e os átomos (dualidade da luz e modelo de Bohr) para propor o conceito de ondas de matéria e a equação que relaciona o momento linear de um corpo com o seu comprimento de onda. Em seguida, será apresentado e discutido o fenômeno da difração de elétrons em redes cristalinas e em uma fenda dupla, com vistas a confirmar a validade da proposta de *de Broglie* e destacar algumas aplicações tecnológicas da difração de raios-X e de elétrons.

**Comentários Finais:** Nessa aula é possível destacar algumas características do trabalho de físicos teóricos fazendo uma comparação entre a formulação de *Einstein* para o efeito fotoelétrico (que conseguiu explicar um fenômeno já conhecido experimentalmente a partir de uma modelagem matemática) e a formulação de *de Broglie* com relação às ondas de matéria (que partiu de considerações teóricas para propor uma conceituação e relação matemática que só pôde ser verificada experimentalmente depois).

Para discutir o experimento da difração de elétrons por uma fenda dupla pode-se partir da apresentação do vídeo "Universo Microscópico", episódio 76 da série O Universo (7ª temporada), do The History Channel.

## **Aula 4**

**Tema da Aula:** Consequências, implicações e importância da dualidade onda-partícula.

**Objetivo da Aula:** Discutir a relação entre a dualidade da matéria e da radiação e as formulações de *Erwin Schrödinger* e de *Max Born* para a mecânica quântica (funções de onda e probabilidade). Explorar através de discussões e debates as implicações filosóficas da dualidade onda-partícula à existência e à realidade.

**Motivação:** Apresentar os debates clássicos sobre a natureza da luz (envolvendo *Newton*, *Poisson*, *Huygens* e *Fresnel*) e em seguida propor a pergunta "Os elétrons são ondas do quê?" para retomar o assunto anterior e encaminhar a aula para a discussão da equação de *Schrödinger* e suas consequências para a mecânica quântica.

**Conteúdo físico focado nesta aula:** Equação de *Schrödinger* e sua interpretação probabilística por *Born*.

**Recursos Instrucionais a serem utilizados:** Datashow, computador, lousa e giz.

**Momentos da Aula:** Inicialmente será feita uma discussão sobre os debates clássicos relativos à natureza da luz. Em seguida, a partir da pergunta mencionada na motivação será discutido o trabalho de *Schrödinger*, a sua formulação da equação de onda do elétron e a interpretação probabilística das funções de onda do elétron, proposta por *Born*. A partir disso será possível discutir as diferenças entre o modelo atômico de *Bohr* e o modelo atômico baseado na mecânica quântica, que se baseia nas ideias de densidade de probabilidade e implica na ideia de orbital.

**Comentários Finais:** A discussão da equação de *Schrödinger* e da interpretação probabilística de *Born* implicam inevitavelmente na necessidade de ressaltar o caráter abstrato das formulações matemáticas inerentes à mecânica quântica. Nessa aula, a ideia é que os assuntos anteriormente discutidos possam ser sintetizados e que seja feito um retorno à pergunta formulada na primeira aula: "Uma coisa pode ser duas ao mesmo tempo?". Acreditamos que nesse momento tal pergunta possa ser colocada para evidenciar que, embora a mecânica quântica tenha se desenvolvido e consolidado após sua formulação no século passado, não temos quaisquer condições de afirmar hoje se uma coisa pode ser duas ao mesmo tempo, ou mesmo o que acontece com o elétron ao passar por uma fenda dupla (ele passa pelas duas fendas ou apenas por uma? Ele interfere consigo mesmo? Bate na borda da fenda e é desviado?). Nesse sentido, podemos discutir o Princípio da Incerteza de Heisenberg, o Princípio da Complementaridade de Bohr ou até que ponto as teorias físicas se aproximam da realidade ou são capazes de explicá-la. Além disso, podemos aprofundar o tema via questões exploradoras da epistemologia da dualidade, discutindo por exemplo questões sobre a rigidez da matéria, as possibilidades de desmaterialização-rematerialização e de teletransporte, entre outras. Acreditamos que tais discussões podem levar os estudantes a compreender que a ciência não é um "projeto acabado" e também despertar-lhes a curiosidade e vontade necessária para se aprofundarem no assunto.

**Critérios**

**Escala 1 a 4**

Organização geral e fluxo 3

Clareza e detalhamento das orientações 3

Qualidade das atividades 4

Diversidade das atividades 3

Apoio ao professor 3

Qualidade do texto 4

Estimativa temporal 3

total - 23 pt - 8,2