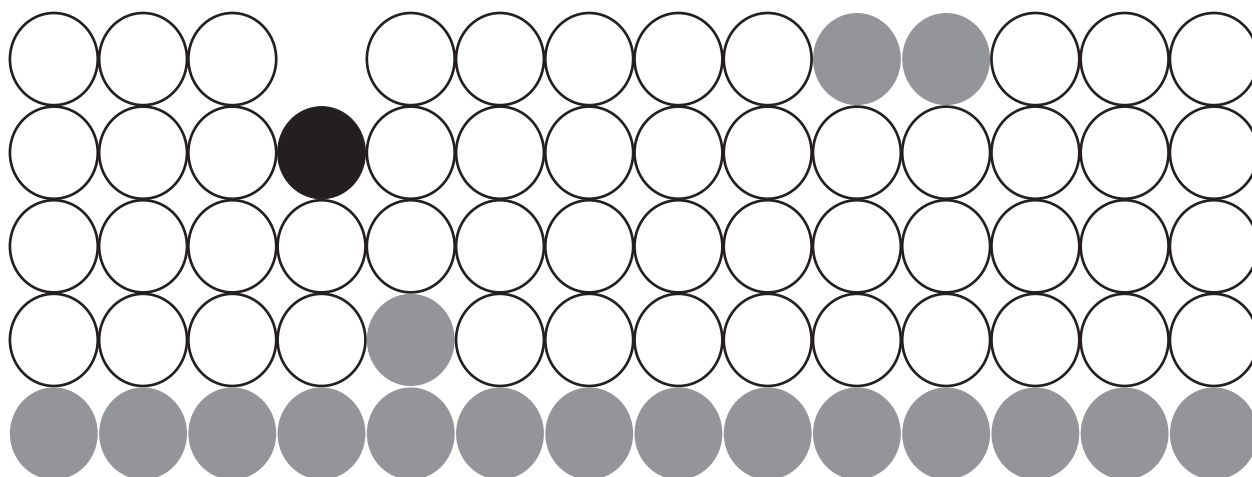


# TEXTOS DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA

v.17 n.5

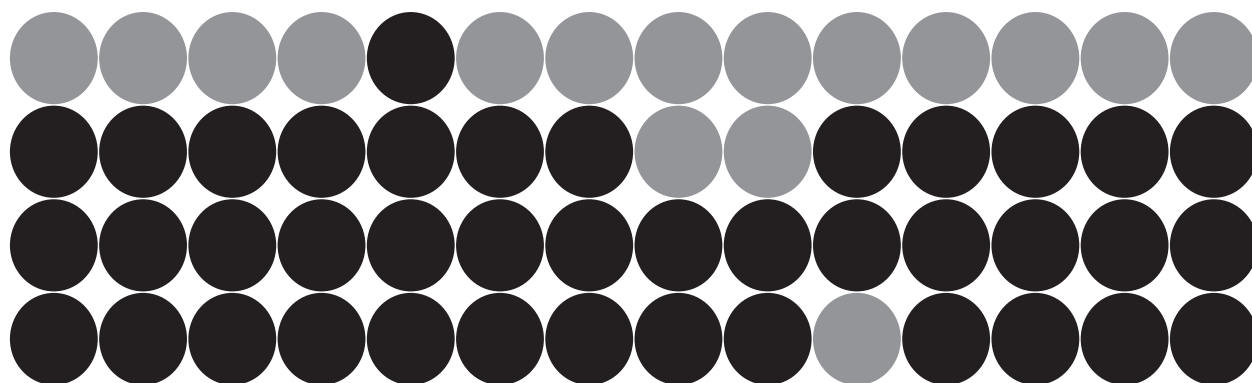
2006

ISSN 1807-2763



## INSERÇÃO DE MECÂNICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO: UMA PROPOSTA PARA PROFESSORES

Marcia Cândida Montano Webber  
Trieste F. Ricci



Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Textos de Apoio ao Professor de Física, v.17 n.5, 2006.  
Instituto de Física – UFRGS  
Programa de Pós – Graduação em Ensino de Física  
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Editores: Marco Antonio Moreira  
Eliane Angela Veit

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecária Carla Flores Torres CRB 10/1600)

W371i Webber, Márcia Cândida Montano.

Inserção de mecânica quântica no ensino médio : uma proposta para professores / Márcia Cândida Montano Webber, Trieste Freire Ricci. – Porto Alegre : UFRGS, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2007.

63p. : il. (Textos de apoio ao professor de física / Marco Antonio Moreira, Eliane Angela Veit, ISSN 1807-2763; v. 17, n. 5)

Produto do trabalho de conclusão do Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

1. Ensino de Física. 2. Formação de Professores 3. Mecânica Quântica  
I. Webber, Márcia Cândida Montano. II. Ricci, Trieste Freire III. Título. IV. Série.

CDU 53:37  
PACS 01.40.J

Impressão: Waldomiro da Silva Olivo  
Intercalação: João Batista C. da Silva

## INDICE

1. O mundo microscópico e o mundo macroscópico .....	5
2. Objetos clássicos e objetos quânticos .....	13
3. Elétrons e fótons.....	17
4. Revisando a ótica ondulatória.....	19
4.1. Propriedades fundamentais de uma onda.....	19
4.2. Princípio de Huygens.....	19
4.3. Difração .....	20
4.4. Superposição linear .....	21
4.5. Interferência .....	22
4.6. Polarização.....	22
5. A experiência da dupla fenda e a natureza ondulatória da luz .....	25
5.1. Um pouco da história da luz .....	25
5.2. O experimento de Young.....	25
6. A experiência da dupla fenda e a natureza corpuscular da luz .....	29
7. Dualidade onda-partícula para luz: onda eletromagnética x feixe de fótons .....	33
8. A experiência da fenda dupla com feixe de elétrons .....	37
9. A função de onda e a natureza probabilística da teoria quântica .....	43
Obras consultadas.....	47
Apêndices .....	49

<b>Apêndice A - Roteiro para atividade virtual - parte I.....</b>	<b>49</b>
<b>Apêndice B - Roteiro para atividade virtual – parte II.....</b>	<b>55</b>
<b>Apêndice C - Lista de exercícios de revisão .....</b>	<b>59</b>
<b>Textos de apoio ao professor de física .....</b>	<b>61</b>

## CURSO INTRODUTÓRIO DE MECÂNICA QUÂNTICA

### 1. O mundo microscópico e o mundo macroscópico

Sabemos que a matéria é formada por átomos – ou moléculas formadas por átomos – e estes, por sua vez, são formados por componentes ainda menores.

É muito difícil conseguir uma imagem de átomo ou molécula. Para um objeto ser visível (em bons microscópios), deve ser maior do que o comprimento de onda da luz utilizada para iluminá-lo. Uma vez que o espectro da luz visível pelos olhos humanos está, aproximadamente, na faixa que vai de 4.000 Å a 7.000 Å (1 Å, ou um angström, corresponde a  $10^{-10}$  m), conforme pode ser visualizado no espectro magnético da Figura 1 (a escala usada para o espectro de luz visível da figura está em nanômetros, e  $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ), os comprimentos de onda típicos da luz visível têm ordem de grandeza de alguns décimos de micrômetros ( $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$ ). Já o tamanho característico de um átomo é da ordem de alguns angströms, o que é centenas de vezes menor, portanto, que o comprimento de onda da luz visível. Por isso, um átomo não pode ser “visto” por meio de qualquer instrumento ótico.

Entretanto, podemos visualizar átomos não como fotografias obtidas com luz, mas como imagens obtidas por meio de microscópios eletrônicos de varredura, que produzem uma imagem aumentada do objeto (cerca de quinhentas vezes mais ampliada que a fornecida por um bom microscópio ótico). Tais instrumentos utilizam feixes de elétrons para obter essas imagens, o que é possível porque o comprimento de onda dos elétrons que formam o feixe utilizado é bem menor do que o comprimento de onda da luz visível e, portanto, da mesma ordem de grandeza do objeto de interesse. Também podemos capturar imagens de átomos com outro tipo de microscópio eletrônico, o microscópio de varredura por tunelamento (STM–*Scanning Tunneling Microscope*), no qual uma agulha microscópica vasculha a superfície, medindo, ao mesmo tempo, a corrente de tunelamento em cada ponto da varredura, resultando numa descrição minuciosa da superfície através da variação sofrida por essa corrente.

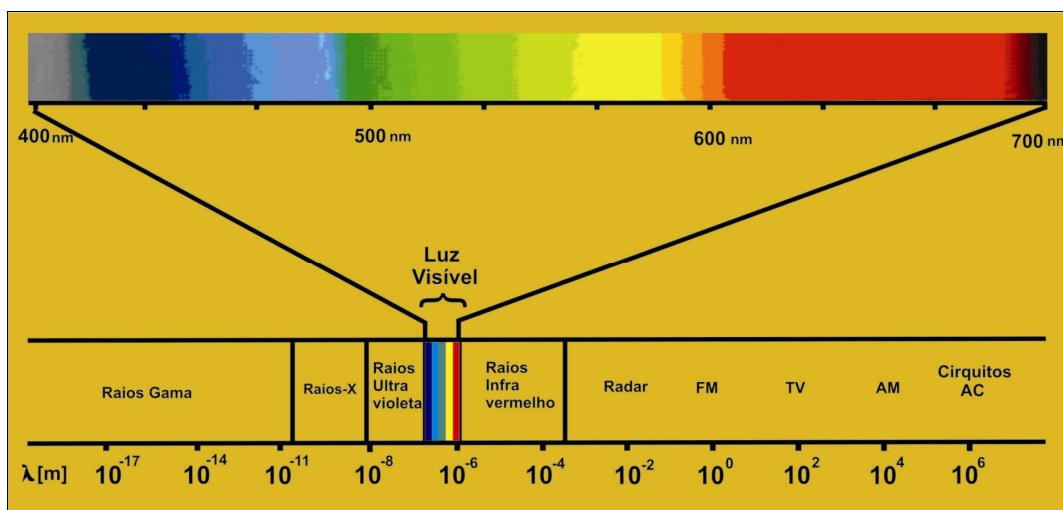


Figura 1 – O espectro eletromagnético

A Tabela 1 mostra algumas ordens de grandezas que podem ser comparadas com o tamanho típico de um átomo, ilustrando o que queremos dizer sempre que nos referirmos a um objeto como sendo “microscópico”.

Tabela 1 – Ordens de grandezas

<b>Grandezas</b>	<b>Ordem de grandeza (em metros)</b>
Raio do Universo	$10^{25}$
Distância da Terra ao Sol	$10^{11}$
Raio da Terra	$10^6$
Altura do homem	$10^0$
Espessura de um cabelo	$10^{-4}$
Bactérias	$10^{-6}$
Vírus	$10^{-7}$
Diâmetro atômico	$10^{-10}$
Raio nuclear	$10^{-15}$

Para nós, um objeto será considerado macroscópico quando for formado por um número muito grande (muito maior do que um trilhão, por exemplo) de átomos ou de moléculas. Podemos fazer algumas comparações entre o diâmetro de um átomo com os tamanhos dos objetos apresentados na Tabela 1. Iniciamos pelo diâmetro de um fio de cabelo, por ser, entre os objetos citados, o menor que ainda é visível a olho nu. Comparando-o com o diâmetro de um átomo, observamos que cerca de  $1.000.000 = 10^6$  deles cabem no diâmetro de um fio de cabelo típico. Todavia, um pedacinho de fio de cabelo contém muito mais átomos do que isso, pois é um objeto tridimensional, com espessura e comprimento, além de largura. Por exemplo, se um fio de cabelo como este tivesse um comprimento igual à sua largura, teria um número de átomos com ordem de grandeza de  $10^{18}$ , ou seja, um número impronunciável. Trata-se, por exemplo, de um número maior do que o número de segundos da idade do universo (cerca de 15 bilhões de anos)! Analogamente, numa dimensão linear (largura, por exemplo) de uma bactéria cabem cerca de 10.000 átomos, e, num vírus cerca de 1.000 átomos, numa dimensão linear de um vírus típico. Como esses são objetos tridimensionais, o número de átomos que cabem dentro de uma bactéria ou de um vírus é muitas ordens de grandeza maior do que 10.000 ou 1.000.

Um outro exemplo ainda mais expressivo da ordem de grandeza de uma simples célula orgânica em relação à ordem de grandeza dos nossos objetos microscópicos – os átomos – é o da molécula de DNA (ácido desoxirribonucléico) humano, ilustrado esquematicamente nas Figuras 2. Tal molécula fica localizada no núcleo de uma célula. Elas falam por si só!

Podemos ainda observar que a ordem de grandeza do tamanho de uma bactéria está na faixa da ordem do comprimento de onda da luz visível, de modo que, ao contrário de um átomo, pode ser “vista” ou fotografada por meio de algum instrumento óptico de aumento que utilize a luz comum, tal como um microscópio ótico.

Como realçado por Hewitt (2002), além de incrivelmente pequenos, os átomos são extremamente numerosos. Existem cerca de 1.000.000.000.000.000.000.000 =  $10^{24}$  átomos em apenas 1 grama de água! Esse número, por exemplo, é maior do que o número de gotas de todos os lagos e rios do mundo inteiro. Além disso, os átomos são quase tão antigos quanto o próprio universo.

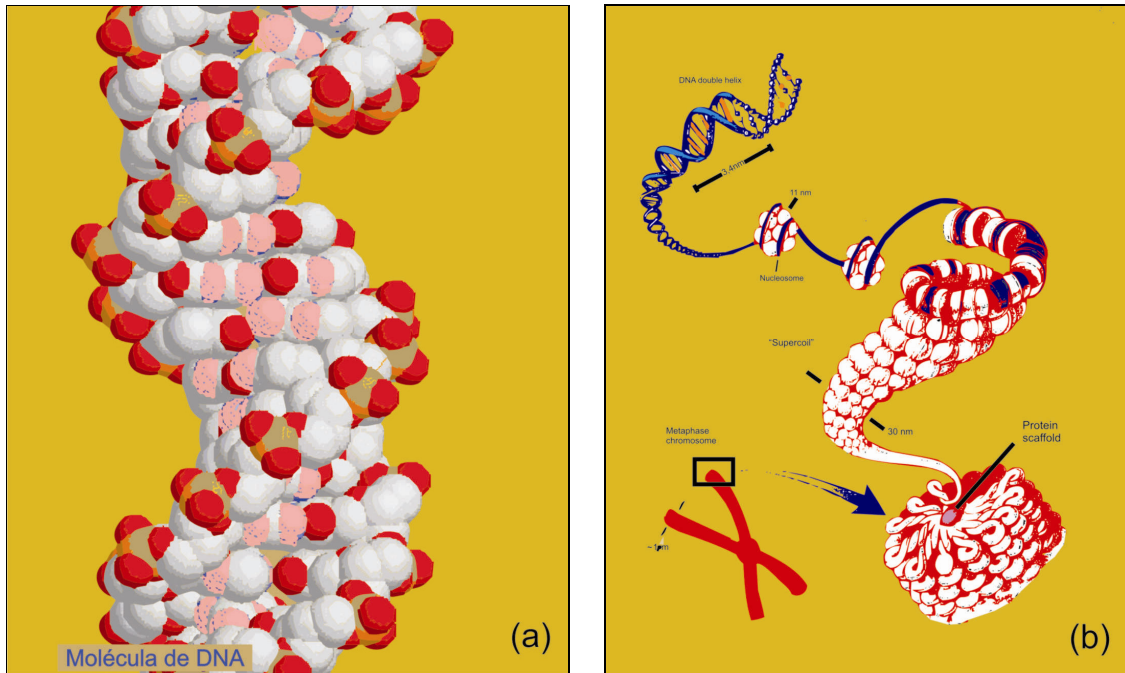


Figura 2 – Representação da molécula de DNA

2(a) Representação de um trecho de uma molécula de DNA humano: cada átomo de determinado elemento químico é representado simbolicamente por uma “bola” de uma mesma cor. Nessa representação, comum para os químicos, as esferas se interpenetram para simbolizar ligações químicas. 2(b) Como o DNA humano “se enrola” para formar cada um dos 23 pares de cromossomos contidos apenas no núcleo de uma célula humana

Em contraste, um objeto será considerado como microscópico quando for constituído por um número relativamente pequeno de átomos ou moléculas. Mais tarde, quando estivermos abordando a mecânica quântica de Schrödinger, trataremos de dar uma definição mais precisa do significado dos termos macroscópico e microscópico. Por ora, e neste contexto, os átomos serão nossos constituintes microscópicos básicos e paradigmáticos, que servirão de comparação, em tamanho e massa, para outros objetos, maiores ou menores.

Assim, temos basicamente duas escalas de tamanho com as quais podemos analisar o comportamento da matéria: a escala macroscópica e a escala microscópica. A escala macroscópica é a dos fenômenos que envolvem objetos (inclusive bactérias!) ditos macroscópicos.

Os fenômenos que ocorrem no mundo microscópico são analisados de maneira diferente daqueles que ocorrem no mundo macroscópico. O mundo macroscópico é descrito pela física clássica (formada pela mecânica newtoniana, termodinâmica e o eletromagnetismo de Maxwell), que

trabalha com duas categorias de fenômenos: as partículas que possuem massa e evoluem no tempo de acordo com as leis de Newton, e as ondas eletromagnéticas, entidades sem massa que se propagam através do espaço, evoluindo no tempo de acordo com as leis de Maxwell do eletromagnetismo.

O mundo microscópico, entretanto, não obedece às leis da física clássica, e, sim, às leis da física quântica. Os constituintes do mundo atômico e subatômico, átomos, moléculas e partículas subatômicas, possuem massa e são os componentes microscópicos da matéria. Quanto à radiação, como veremos adiante, também é formada por partículas microscópicas, porém não dotadas de massa.

A estrutura atômica foi objeto de estudo sistemático no começo do século XX, quando os cientistas estudaram detalhadamente vários fenômenos, tais como os raios-X, a radioatividade e o efeito fotoelétrico. As pesquisas sobre o efeito fotoelétrico, por exemplo, mostraram, conclusivamente, que a luz possui também um caráter tipicamente corpuscular e que não pode ser concebida só em termos de uma onda. Do ponto de vista clássico, isso parecia contraditório porque o fenômeno de interferência da luz parecia comprovar, em definitivo, que a luz possui caráter ondulatório.

As explorações realizadas do mundo microscópico trouxeram resultados inesperados, revelando *anomalias* que os cientistas não conseguiam explicar com base em noções clássicas. Aos poucos, os físicos foram tomando consciência de que as noções da física clássica não eram suficientes para se compreender o mundo microscópico. Em busca de respostas, foi sendo formulada uma nova física, a *física quântica*, com alterações radicais em relação à física clássica que trata de fenômenos macroscópicos.

A física quântica é todo um corpo de conhecimentos desenvolvido a partir do início do século XX, com o qual se procura descrever um mundo fantástico e muito diferente daquilo a que estamos acostumados – o mundo microscópico. Trata principalmente dos fenômenos que ocorrem nessa escala de tamanho e do modo como esses fenômenos refletem o que acontece na escala macroscópica. A física clássica é todo um corpo de conhecimentos desenvolvidos até o fim do século XIX, o qual parecia ser completo porque explicava praticamente todos os fenômenos observados até então. Conta-se que o físico alemão Max Planck, um dos responsáveis pelo surgimento da física quântica, teria sido aconselhado por um de seus mestres a desistir de seus estudos científicos e escolher a carreira de pianista, assim, os cientistas da época estavam condenados a ficar sem ter o que fazer! Afinal, estava quase tudo pronto, faltavam apenas dois pequenos detalhes. Os dois detalhes que os físicos não conseguiam explicar estão representados pelos “tijolos que faltam” na Figura 3.



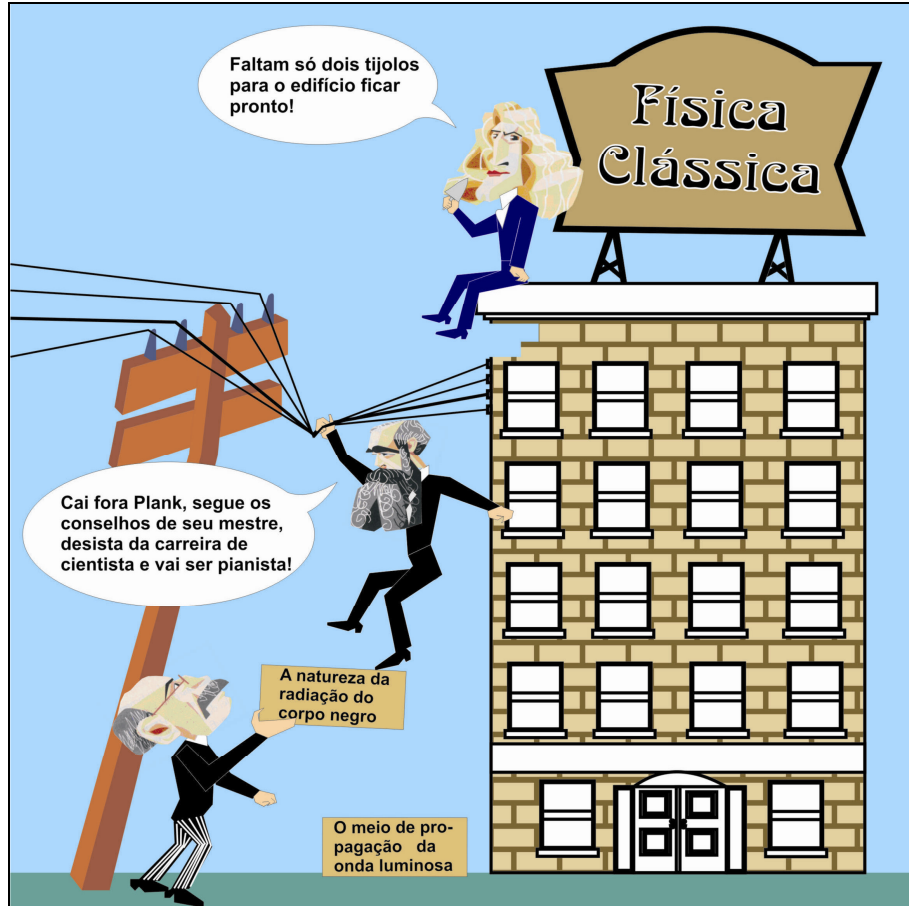


Figura 3 – O edifício da física clássica

Um tanto arbitrariamente, podemos situar o nascimento da física quântica em 14 de dezembro de 1900, quando, numa reunião da Sociedade Alemã de Física, o físico alemão Max Planck (1858-1947) apresentou seu artigo “sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal”, que se constituiu num verdadeiro marco de uma revolução na física. O artigo de Planck propunha uma explicação para o problema do espectro de emissão da chamada “radiação do corpo negro”, radiação eletromagnética que é emitida por um corpo negro em equilíbrio térmico a uma dada temperatura. Conhecer o espectro de emissão de um objeto macroscópico qualquer é, basicamente, saber quanta energia radiante é emitida pelo objeto em cada faixa de comprimento de onda ou de frequência. Essa informação está contida na curva de um gráfico em que o eixo vertical corresponde à intensidade luminosa emitida (a quantidade de energia emitida por unidade de superfície e por unidade de tempo, medida em  $\text{Watt/m}^2$  em unidades do SI) e, o eixo horizontal, ao comprimento de onda ou à frequência da radiação emitida. A curva obtida, em função da frequência da radiação emitida pelo corpo, para diferentes temperaturas, está ilustrada na Figura 4.

No final do século XIX, os físicos experimentais já conseguiam realizar medidas muito precisas do espectro de emissão de um corpo negro, com base nas quais eles obtiveram *empiricamente* a curva do espectro de radiação do corpo negro com grande precisão.

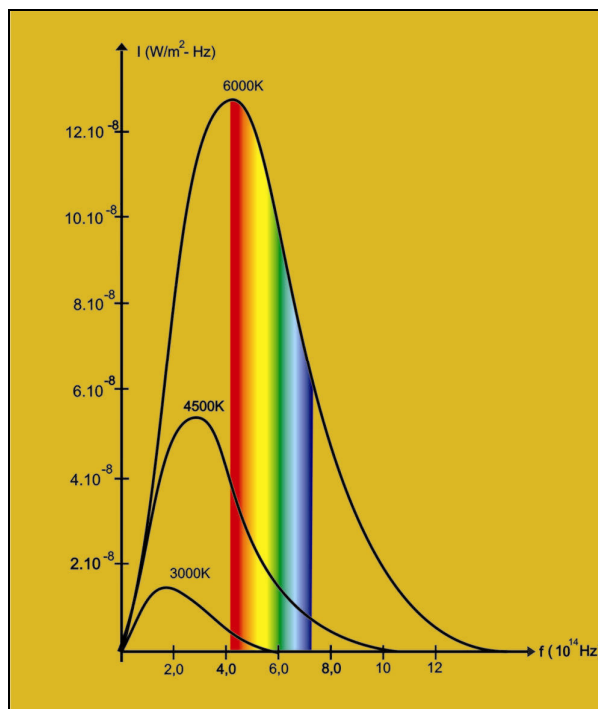


Figura 4 – Espectro de emissão de um corpo negro

Entretanto, faltava ainda, deduzir essa curva teoricamente, a partir das leis mais fundamentais da física. Esse era o objetivo de Planck naquele final de ano de 1900. Ele conseguiu fornecer uma solução para o problema teórico da radiação de corpo negro, obtendo a curva correta que os experimentais já haviam obtido empiricamente, porém, para isso, Planck foi forçado a atribuir propriedades quânticas à luz. Mais especificamente, Planck foi forçado a usar um modelo em que a radiação eletromagnética só trocava energia com a matéria em quantidades *quantizadas*, isto é, quantidades de energia que são *múltiplas inteiras* de uma quantidade *mínima* de energia, que ele denominou de *quantum* (plural *quanta*).

Cinco anos depois, em 1905, Einstein usaria a proposta de Planck para explicar convincentemente o efeito fotoelétrico. Contudo, a hipótese de Planck foi usada por Einstein com uma interpretação radicalmente diferente daquela dada por Planck: para Einstein, não apenas as trocas de energia entre a radiação e a matéria são quantizadas, mas a própria luz o é! Noutras palavras, Einstein propôs um novo modelo corpuscular para a luz ou a radiação eletromagnética em geral, no qual a radiação é considerada discreta, formada por um número inteiro de entidades microscópicas sem massa, mas dotadas de energia e de *momentum* linear. Einstein denominou-as “quanta de luz” (plural de “quantum de luz”). Hoje chamamos de *fóton* ao que Einstein denominava “quantum de luz”. Assim, de acordo com Einstein, podemos considerar a luz e a radiação eletromagnética em geral como um feixe de fótons.

Em 1911, o físico britânico Ernest Rutherford (1871-1937) descobriu a existência do núcleo atômico. A partir das observações realizadas por ele e por sua equipe, Rutherford propôs um modelo atômico no qual o átomo era quase que totalmente vazio, com um minúsculo *núcleo* extremamente denso, constituído por partículas positivas – os prótons – e uma região externa, a *eletrosfera*,

formada por partículas negativas – os elétrons –, que giram em torno do núcleo descrevendo órbitas circulares. Este modelo “planetário” do átomo, entretanto, tinha, do ponto de vista teórico-clássico um sério ponto fraco. De acordo com a teoria eletromagnética, qualquer carga em movimento acelerado deve emitir radiação e, portanto, perder continuamente energia em forma de ondas eletromagnéticas. No caso do modelo de Rutherford, elétrons negativamente carregados descreveriam movimentos circulares em torno do núcleo e, portanto, teriam uma aceleração (centrípeta). Isso significa que, no modelo atômico de Rutherford, o elétron em órbita acabaria por perder toda a sua energia e colapsar para o núcleo. Além disso, um núcleo formado apenas por partículas positivas deveria se desintegrar, pois as cargas elétricas de mesmo sinal se repelem mutuamente. Portanto, o modelo atômico proposto por Rutherford era instável do ponto de vista teórico e não explicava convincentemente a existência duradoura dos átomos.

O físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962), que fizera seu doutorado em física teórica com Rutherford na Universidade de Manchester, começou a procurar uma solução que apoiasse a estrutura atômica “impossível” de Rutherford. Então, em 1913, Bohr aplicou a teoria quântica de Planck e de Einstein na estrutura atômica de Rutherford e formulou o primeiro modelo *quantizado* do átomo (mais tarde este modelo seria revisado por conter ainda graves defeitos).

O corpo de leis e modelos desenvolvido durante os primeiros 25 anos do século XX (1900-1925) ficou conhecido como a “velha física quântica”, por contraste com as descobertas teóricas e experimentais que se sucederiam rapidamente a partir de 1925 e que gerariam um novo corpo de conhecimentos, ainda maior e mais preciso, hoje conhecido como “mecânica quântica”.

A partir dos trabalhos pioneiros de Planck e de Einstein no início do século XX, gradativamente os físicos foram aceitando o fato de que as anomalias com as quais se deparavam eram inerentes ao mundo microscópico e não podiam ser explicadas com base na física do mundo macroscópico, ou seja, a física clássica.

Assim como para a mecânica clássica existem várias versões ou formulações matemáticas fisicamente equivalentes (a mecânica vetorial newtoniana, a mecânica lagrangeana, a mecânica hamiltoniana etc.), a mecânica quântica também pode ser apresentada em várias versões, todas fisicamente equivalentes. Esses desenvolvimentos constituem uma etapa crucial no desenvolvimento da física moderna. Pela primeira vez, os resultados físicos não eram derivados a partir de um modelo concreto do universo, mas de uma construção matemática abstrata.

A primeira versão da mecânica quântica chama-se “mecânica matricial” e foi formulada em 1925 pelo físico alemão Werner Heisenberg (1901-1976). Esta teoria recebeu tal nome por se utilizar de matrizes para representar grandezas físicas. A segunda versão da mecânica quântica apareceu no início de 1926, quando o físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) formulou a chamada “mecânica ondulatória”. Teoria que é uma generalização do postulado de Broglie e recebeu esse nome por possuir fortes analogias com a teoria clássica da luz, a óptica ondulatória; é a versão mais utilizada pelos físicos em geral. Ainda no ano de 1926, o inglês Paul Dirac (1902-1984) desenvolveu uma terceira versão da mecânica quântica.

O sucesso da mecânica quântica foi uma grande conquista científica do século XX pelo fato de prever o comportamento observado dos sistemas físicos microscópicos, isto é, desenvolve

conceitos consistentes e adequados para descrever o mundo em escala microscópica e para fazer previsões a respeito, confirmando-as ou não em experimentos de grande precisão.

## 2. Objetos clássicos e objetos quânticos

Os sistemas físicos são caracterizados pelo seu *estado*, o qual é definido pelos valores assumidos por um conjunto mínimo de *grandezas físicas*, que são *propriedades mensuráveis* dos objetos. As propriedades de um sistema são quaisquer características avaliáveis do mesmo, cujos valores revelam as condições em que se encontra o sistema.

Portanto, existe um *conjunto mínimo* de grandezas físicas que define o *estado* de um sistema físico qualquer. Podemos exemplificar o *estado mecânico* de um sistema macroscópico usando como exemplo o mais simples de todos os sistemas deste tipo, ou seja, aquele constituído por uma única partícula clássica de massa  $m$ . Associando a essa partícula uma representação matemática, o seu estado será representado por um conjunto de seis números  $(x, y, z, p_x, p_y, p_z)$ , onde  $x, y$  e  $z$  são as coordenadas cartesianas que informam sobre a posição da partícula e  $p_x, p_y$  e  $p_z$  são as componentes cartesianas do vetor *momentum* linear (ou quantidade de movimento de translação, definida como  $p = m.v$ ) da partícula. Usando notação vetorial, mais condensada, podemos denotar o estado desse sistema muito simples pelo ordenado de vetores  $(r, p)$ . Tacitamente, na física clássica se assume que esses dois observáveis vetoriais (ou seis observáveis escalares) sejam compatíveis entre si (o que é experimentalmente comprovado para objetos macroscópicos deste tipo). Se o sistema for uma onda eletromagnética, o seu estado clássico será especificado pela quantidade de energia (ou o *momentum* linear) que ela transporta consigo, sua frequência (ou seu comprimento de onda), sua polarização e sua direção e sentido de propagação.

O estado termodinâmico de um objeto macroscópico qualquer é definido por conjunto mínimo (ou seja, de menor número possível) de propriedades termodinâmicas do sistema. As propriedades termodinâmicas fundamentais que variam com o transcorrer do tempo são denominadas de *propriedades dinâmicas*, de que são exemplos a posição, a velocidade e a energia. As propriedades não fundamentais do sistema são aquelas que podem ser expressas como combinações das propriedades fundamentais. As propriedades também podem ser classificadas como *internas*, as quais são intrínsecas ao sistema, ou *externas*, aquelas que dependem dos movimentos ou das posições das partes que formam o sistema em relação a corpos externos a este, ou seja, que não pertencem ao sistema considerado.

As propriedades dinâmicas de um sistema são também muitas vezes denominadas *variáveis de estado* ou *observáveis*. Na física clássica, para sistemas formados por objetos macroscópicos, os observáveis são grandezas que podem sempre ser medidas *simultaneamente*, ou seja, ao medirmos o valor de uma determinada grandeza, não alteraremos os valores das outras; e se forem medidas em seqüência, uma após a outra, a ordem em que dois observáveis quaisquer serão medidos não influenciará os resultados obtidos para as duas. E mais, abstraindo-se o ato de medir, podemos dizer que, para os objetos clássicos ou macroscópicos, essas variáveis de estado estão bem definidas *simultaneamente* em todos os instantes de tempo, mesmo quando não estamos realizando qualquer medição das mesmas. Vamos denominar este tipo de observáveis – que podem ser medidos simultaneamente e que estão simultaneamente bem definidos – de *observáveis compatíveis*. Além disso, podemos atribuir uma série de propriedades dinâmicas *bem definidas* em cada instante de tempo aos objetos e sistemas clássicos; a partir delas, usando as leis da física clássica, somos

capazes de explicar racionalmente os resultados e fazer previsões precisas sobre o comportamento futuro dos objetos clássicos.

Podemos também preparar um *estado clássico* o que significa estabelecer condições iniciais para o sistema, essas definidas pelos valores iniciais (em  $t = 0$ ) daquelas grandezas que definem de maneira completa o estado do sistema clássico. A evolução temporal de um estado clássico é regida pela segunda lei de Newton e é determinista, isto é, dado um estado inicial qualquer e as forças que agem sobre o objeto, os estados futuros estarão determinados.

A mecânica quântica trabalha com sistemas formados por *objetos quânticos*, que, como referimos anteriormente, são objetos microscópicos. Podemos citar como modelos de objetos quânticos elétrons, prótons, nêutrons, núcleos atômicos ou moléculas, todos eles sendo objetos físicos dotados de massa. Contudo, também podemos citar como exemplos de objetos quânticos os *fótons* que formam a luz e que não possuem massa.

O sucesso da mecânica quântica está além do limite macroscópico, uma vez que ela se adapta aos resultados da mecânica clássica para objetos macroscópicos, isto é, a mecânica quântica aplicada a objetos macroscópicos fornece resultados iguais aos obtidos pela mecânica clássica. A recíproca não é verdadeira. Os objetos macroscópicos são formados por inúmeros objetos quânticos (os átomos). Portanto, qualquer sistema quântico formado por  $N$  objetos quânticos menores necessariamente tende a ser um objeto clássico quando  $N$  tende ao infinito, ou seja, no limite de  $N$  muito grande, a física quântica deve tender e se reduzir à física clássica. Chamamos a isso de *Princípio da Correspondência*, que foi postulado por Bohr em 1923. Basicamente, o princípio da correspondência nos diz que, para uma nova teoria ser validada ou corroborada, deve prever os mesmos resultados válidos que já eram previstos pela teoria antiga.

A diferença fundamental entre os objetos quânticos e os objetos clássicos é que nem sempre podemos atribuir aos objetos quânticos propriedades dinâmicas simultaneamente bem definidas, ou seja, na mecânica quântica nem todos os observáveis são compatíveis entre si. (Por exemplo, não podemos determinar simultaneamente a posição e o *momentum* linear de um elétron. Isso não é decorrência de não possuímos aparelhos suficientemente precisos para realizar as medições necessárias, mas constitui uma limitação intrínseca à natureza dos objetos quânticos.)

Em virtude dessas diferenças, a maneira como são definidos os estados de objetos quânticos é inteiramente diversa da maneira como isso é feito na física clássica. O movimento de objetos macroscópicos é regido por equações diferenciais, ou seja, equações cujas soluções não são números, mas, sim, *funções reais* das coordenadas espaciais e do tempo. Fisicamente, as grandezas descritas por essas equações nos fornecem valores que normalmente são alterados a cada instante. Por exemplo, para o caso em que a força resultante exercida sobre um corpo de massa  $m$  for nula, a segunda lei de Newton  $F_R = m.a$  (uma equação diferencial) tem como solução a função horária  $r = r_0 + v.t$ , que descreve a posição  $r$  de uma partícula clássica num instante  $t$  qualquer.

Analogamente, o movimento de objetos na escala microscópica é regido pela equação de Schrödinger, proposta em 1926 pelo físico austríaco Erwin Schrödinger e que pode ser escrita na forma sintética:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H \cdot \Psi$$

Onde H é um operador diferencial (ou seja, que contém derivadas em sua definição) chamado *Hamiltoniano*. Esta entidade matemática representa o observável energia total do sistema (e  $\hbar$  é a constante de Planck normalizada, definida como  $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \times 10^{-34}$  J.s). A equação de Schrödinger também é uma equação diferencial, mas descreve as variações em *ondas de probabilidade* associadas a uma partícula quântica (o elétron, por exemplo) sob a ação de forças externas, bem diferente, portanto, do que é descrito pelas equações newtonianas da mecânica clássica.

A entidade matemática que descreve o estado de um sistema quântico é sua *função de onda*, representada pela letra grega (maiúscula)  $\Psi$ , que é solução da equação de Schrödinger. A função de onda contém todas as informações físicas a respeito do estado do sistema que descreve, ou seja, ela é o próprio estado do sistema quântico. A equação de Schrödinger foi apenas apresentada, entretanto a sua solução, a função de onda, precisa ser compreendida mais detalhadamente, de modo que voltaremos a falar da  $\Psi$  mais detalhadamente no tópico 9.





### 3. Elétrons e fótons

Foi o físico britânico Joseph John Thomson (1856-1940) quem descobriu os *elétrons* em 1897, através da confirmação de que os raios catódicos são formados por feixes de minúsculas partículas com cargas elétricas negativas (e de mesmo valor), mais tarde chamadas de elétrons. Thomson descobriu que os elétrons possuem carga elétrica ao comprovar que eles eram desviados na presença de um campo elétrico e/ou de um campo magnético. Por meio da direção e do sentido em que essas partículas eram desviadas, Thomson concluiu que suas cargas elétricas são negativas e chamou-os de *elétrons*.

Os elétrons são completamente todos idênticos entre si. Entre outras propriedades físicas, eles possuem o mesmo tamanho (um raio menor que  $10^{-18}$  m), a mesma massa (aproximadamente igual a  $9,11 \cdot 10^{-31}$  kg) e a mesma carga elétrica (aproximadamente  $-1,6022 \cdot 10^{-19}$  C). Às vezes, quando ligados em átomo, os elétrons são comparados aos planetas do sistema solar. Essa analogia é imprecisa em vários aspectos, como já mencionamos anteriormente a respeito do modelo atômico de Rutherford. Uma das razões é que os movimentos dos elétrons são diferentes do movimento dos planetas em torno do Sol porque os elétrons não obedecem às leis da física clássica, e, sim, às leis da mecânica quântica.

Não é inteiramente correto conceber os elétrons como “bolinhas em rotação”, embora essa imagem nos seja a mais familiar e “confortável” para a nossa maneira de pensar, baseada no mundo macroscópico a que temos acesso pelos nossos sentidos. Embora os elétrons não sejam como as bolinhas do mundo clássico, realmente possuem um tipo de rotação que é uma característica intrínseca dos mesmos, isto é, todos os elétrons giram da mesma forma, sem importar a direção em que tal rotação é medida, e o valor de sua quantidade de movimento de rotação é sempre o mesmo para todos os elétrons encontrados na natureza. O *spin* ou *momentum angular intrínseco* está relacionado com a rotação dos elétrons em torno de si mesmos e tem o mesmo valor para todos os elétrons. Dependendo do sentido de rotação, um elétron tem *spin up* (para cima) ou *spin down* (para baixo).

Os *fótons* não foram inicialmente descobertos experimentalmente pelos físicos, e, sim, *propostos*. Em seu artigo de 1905 sobre o efeito fotoelétrico, do qual falaremos posteriormente, Einstein propôs pela primeira vez a existência do fóton (que ele chamava então de “quantum de luz”), quando postulou que a luz pode ser encarada como sendo formada por corpúsculos ou partículas de luz sem massa e sem carga elétrica, através dos quais a luz interage com a matéria como se fosse formada por minúsculos corpúsculos ou “pacotes” de energia eletromagnética. Estes foram originalmente chamados por Einstein de *quanta de luz* (*quanta* é plural de *quantum*, palavra que vem do latim e significa “quantidade”). Um *fóton*, portanto, é um *quantum* de luz. O nome fóton foi cunhado somente em 1926 pelo físico Gilbert Newton Lewis (1875-1946).

Uma diferença notável entre fótons e outras partículas é que eles podem ser facilmente criados e destruídos. A interação de fótons com outras partículas eletricamente carregadas resulta na força eletromagnética, isto é, o fóton é a partícula mediadora da interação eletromagnética. A energia de um fóton formador de radiação eletromagnética de frequência  $f$  é dada pela relação de Planck,  $E = h \cdot f$ . É a energia dos fótons que determina se são fótons de luz visível, de raios X, de ondas de

rádio etc. E como qualquer objeto de massa nula, os fótons propagam-se sempre com a velocidade da luz, quaisquer que sejam suas energias e em relação a qualquer observador. Assim como os elétrons, os fótons também possuem *spin*, mas o valor do *spin* do fóton é um, ao passo que do elétron é 1/2.

A confirmação experimental dos fótons aconteceu pela primeira vez em 1923 com os experimentos de Arthur Holly Compton (1892-1962) e sua equipe, ao constatarem que raios X espalhados por superfícies metálicas polidas apresentam alteração de sua frequência em razão do espalhamento. (De acordo com a física clássica, os raios X espalhados deviam possuir a mesma frequência que a dos raios X incidentes.). O *Efeito Compton*, como é hoje conhecido (ou seja, a alteração das frequências dos raios X espalhados), evidenciou que a frequência da luz diminui em quantidade dependendo do ângulo em que for espalhada.

Em nosso curso, os elétrons e os fótons serão usados como modelo de objetos quânticos elementares, ou seja, sem estrutura interna.

#### 4. Revisando a ótica ondulatória

Antes de seguirmos adiante com o curso, faremos uma breve revisão de alguns conceitos referentes à ótica ondulatória que são muito importantes para o seu seguimento.

##### 4.1. Propriedades fundamentais de uma onda

O termo “onda” está presente em muitas situações e é usado com muita freqüência no nosso dia-a-dia. Ouvimos falar em ondas de rádio, ondas de televisão, microondas ou mesmo as ondas do mar, todas com a mesma função: transmitir energia. Uma onda é uma perturbação que se propaga no espaço, transmitindo energia, sem que haja, entretanto, transporte de matéria junto com a onda.

A representação gráfica de uma onda qualquer é feita através de uma função de coordenadas e do tempo, denominada genericamente de *função de onda*. Para um tipo de ondas muito especiais, denominadas *harmônicas*, a função de onda é uma função senoidal (*seno* ou *coseno* ou uma combinação linear das duas). A Figura 5 mostra a representação gráfica de uma onda deste tipo com os seus principais elementos.

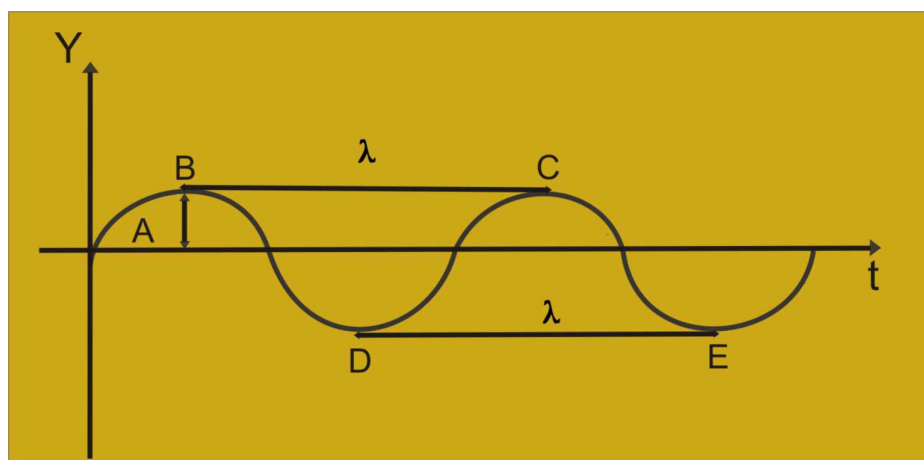


Figura 5 – Representação gráfica de uma onda

onde:

A = amplitude da onda, que representa o máximo afastamento em relação ao ponto de equilíbrio;

B, C = cristas ou picos, que representam o ponto mais alto da onda;

D, E = vales ou depressões, que representam o ponto mais baixo da onda;

$\lambda$  = comprimento de onda, que é a distância entre duas cristas ou vales sucessivos.

##### 4.2. Princípio de Huygens

Imaginemos que, ao jogar uma pedra em águas calmas, produzamos ondas na superfície da água, semelhantes às ondas mostradas na Figura 6. Imaginemos também que as cristas de ondas mostradas na figura formem círculos que tenham o mesmo centro (concêntricos). Esses círculos concêntricos são chamados de *frentes de onda*.

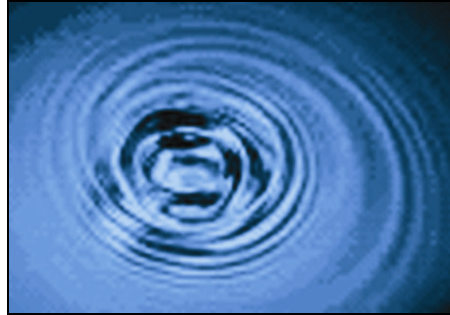


Figura 6 – Ondas formadas na água

O físico holandês Christian Huygens (1629-1695) propôs que cada ponto de uma frente de onda qualquer, produzida por uma fonte qualquer, comporta-se como uma *fonte puntiforme* para novas *ondas secundárias*, que se propagam a partir deste ponto. Em outras palavras, as frentes de onda que se propagam a partir de uma fonte qualquer podem ser consideradas como a superposição das cristas de pequenas ondas secundárias, cada qual tendo sido emitida a partir de um ponto da frente de onda num instante anterior; após um intervalo de tempo, todas se somam, produzindo, assim, uma nova frente de onda resultante, em outra posição do espaço e correspondente a um instante de tempo posterior. Quando as ondas formadas estão a uma distância muito grande da fonte, podemos considerá-las como formando uma superfície aproximadamente plana (frente de onda plana). As ondas planas podem ser geradas, por exemplo, dentro de uma cuba retangular contendo água, onde é produzido um movimento de vai-e-vem de uma régua. Observamos na Figura 7 (a) o princípio de Huygens ilustrado para uma frente de onda plana e, na Figura 7 (b), ilustrado para uma frente de onda esférica.

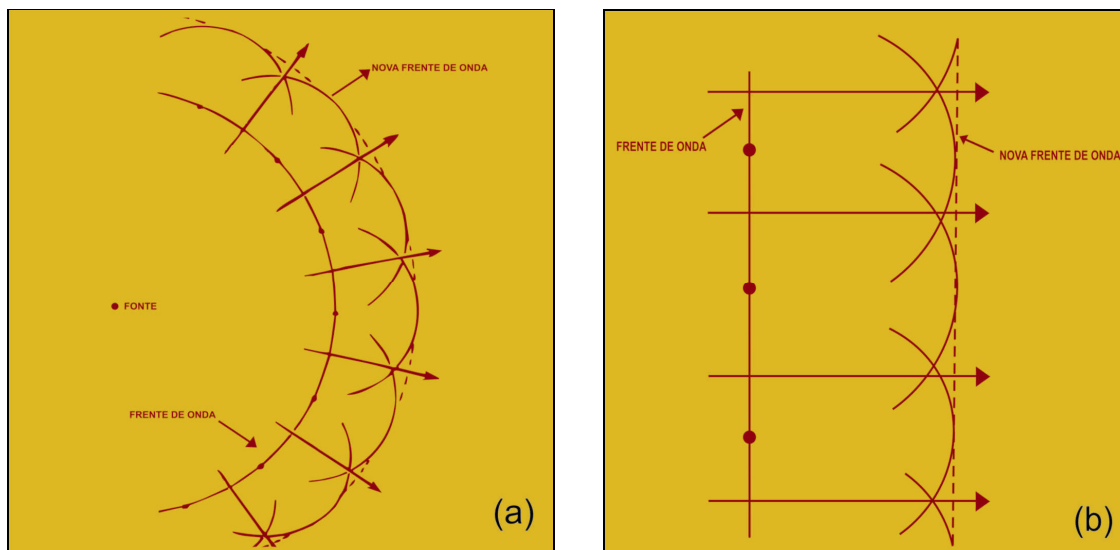


Figura 7 – Princípio de Huygens aplicado a frentes de ondas.

### 4.3. Difração

A *difração* pode ser explicada pelo princípio de Huygens. O fenômeno da difração ocorre quando uma frente de onda encontra um obstáculo ou uma fenda, passa por ele/ela e se espalha

lateralmente (ou se difrata) do outro lado do obstáculo ou da fenda, com cada um de seus pontos constituindo uma fonte puntiforme de uma onda secundária. Para que o fenômeno da difração seja observado nitidamente, é necessário que as dimensões do obstáculo ou da abertura sejam da ordem de grandeza do comprimento da onda incidente. A difração ocorre para qualquer tipo de onda e, através dela, por exemplo, um obstáculo pode ser contornado. Nas ondas sonoras, por exemplo, é o fato de a onda poder contornar um obstáculo que nos permite escutar a voz de uma pessoa que nos chama, mesmo quando essa pessoa se encontra atrás de um obstáculo. A Figura 8 ilustra ondas planas atravessando aberturas de diversos tamanhos.

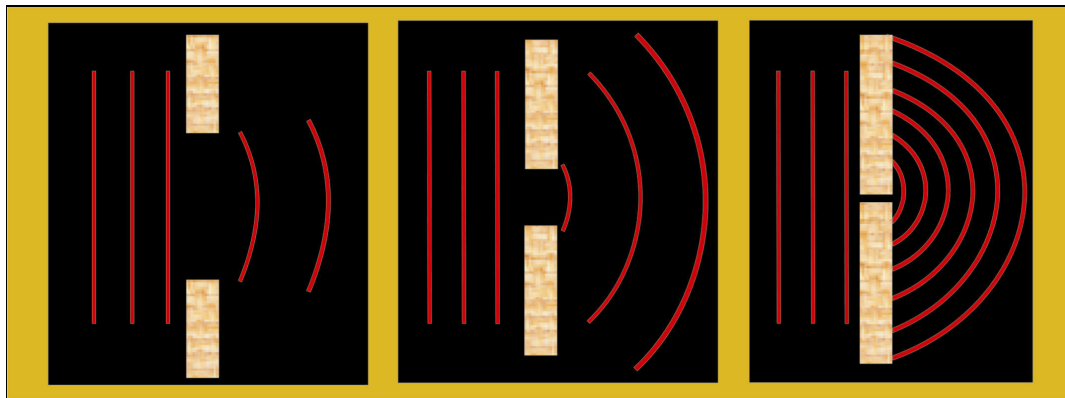


Figura 8 – Ondas planas atravessando fendas de diferentes larguras

A difração também ocorre com a luz, porém é mais difícil percebermos a difração de ondas luminosas porque os obstáculos ou as aberturas em que a luz incide são normalmente bastante grandes em relação ao comprimento de onda da luz usada. Entretanto, se fizermos a luz passar por orifícios cada vez menores, passaremos a observar com facilidade cada vez maior os efeitos da difração (sempre) existente. Podemos comprovar isso fazendo uma simulação computacional num *applet*<sup>1</sup>. Com o simulador, pode-se realizar uma demonstração virtual da difração da luz através de uma fenda única. O *applet* possibilita trabalhar com diferentes tamanhos para a abertura do obstáculo (fenda) e, também, a troca de cores (alterações do comprimento de onda) da luz. Outro recurso muito importante proporcionado pelo simulador é a visualização do gráfico da distribuição da luz difratada através da fenda única.

#### 4.4. Superposição linear

Sabemos que um corpo material não pode ocupar simultaneamente a mesma região do espaço que outro. Quanto às ondas, uma onda pode ocupar a mesma região no espaço que outra no mesmo instante? E, se ocuparem a mesma região no espaço, uma não acabaria interferindo na propagação da outra? Como podemos explicar isso?

<sup>1</sup>O *applet* está disponível em <http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/difracao/difracao.htm>

Duas ou mais ondas podem passar, sim, simultaneamente pela mesma região do espaço. Quando isso acontece, as ondas se *superpõem*, isto é, se somam algebricamente, ponto a ponto no espaço, para produzir uma onda resultante. A superposição de ondas não altera a propagação de cada onda; apenas seus efeitos se somam, acentuando-se ou reduzindo-se, quando estão passando simultaneamente pelo mesmo lugar do espaço, *dependendo da diferença entre suas fases individuais*.

Duas ondas de mesmo comprimento de onda estão *em fase* se a diferença de fase entre elas for nula ou igual a um número inteiro qualquer de comprimentos de onda. Se as ondas estão em fase, combinam-se *umentando* sua amplitude; se estiverem *fora de fase*, combinam-se *reduzindo* sua amplitude. Novamente podemos comprovar virtualmente esse fenômeno fazendo uma simulação computacional com outro *applet*<sup>2</sup>. Essa simulação computacional demonstra o princípio da superposição para dois pulsos que se cruzam, em fase ou fora de fase, e de maneira completa ou parcial. Através de sua manipulação, podemos comprovar que, após os pulsos de onda se encontrarem na mesma região do espaço e se combinarem, voltam a se propagar como se nada tivesse acontecido.

#### 4.5. Interferência

O fenômeno da combinação de ondas que acabamos de abordar é o da *interferência*, e se refere apenas à amplitude da onda, não a sua propagação. A superposição de pulsos de onda em fase, portanto, é denominada *interferência construtiva*, e a superposição de pulsos de onda totalmente fora de fase, *interferência destrutiva*. Em outras palavras, se duas ondas chegarem a um anteparo qualquer em fase, a combinação (soma algébrica) das duas somará seus efeitos; se duas ondas chegarem a um anteparo qualquer completamente fora de fase, a combinação reduzirá o efeito final em relação aos efeitos que seriam provocados individualmente por cada uma das ondas sozinha. A interferência é uma característica típica de *qualquer* movimento ondulatório e pode ser notada em muitos fenômenos do nosso dia-a-dia. Sugerimos que sejam realizadas no mínimo duas experiências reais onde podemos observar a interferência da luz que passa por uma fenda dupla<sup>3</sup> e a interferência da luz que passa por um fio de cabelo<sup>4</sup>, antes de seguirmos com essa revisão<sup>5</sup>.

Um aspecto bastante importante referente às fontes das ondas é a questão de sua *coerência*. Duas fontes de onda são consideradas coerentes se a diferença entre suas fases individuais (diferença de fase) não mudar com o tempo quando essas ondas se encontram. Em outras palavras, é preciso que as fontes mantenham constante sua diferença de fase, mesmo quando cada fase individual varia com o tempo.

#### 4.6. Polarização

---

<sup>2</sup> O *applet* esta disponível em <http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/superposicao/superposicao.htm>

<sup>3</sup> Disponível em: [http://educar.sc.usp.br/experimentoteca/fisica/kit6\\_otica\\_fisica/exp2\\_otica\\_fisica.pdf](http://educar.sc.usp.br/experimentoteca/fisica/kit6_otica_fisica/exp2_otica_fisica.pdf)

<sup>4</sup> Disponível em: [http://educar.sc.usp.br/experimentoteca/fisica/kit6\\_otica\\_fisica/exp3\\_otica\\_fisica.pdf](http://educar.sc.usp.br/experimentoteca/fisica/kit6_otica_fisica/exp3_otica_fisica.pdf)

<sup>5</sup> Os endereços são apenas sugestões pois existem vários experimentos reais que demonstram o fenômeno da interferência que podem ser utilizados.

Como acabamos de ver, a difração e a interferência aplicam-se a qualquer tipo de movimento ondulatório. Em contrapartida, a *polarização*, fenômeno que passaremos a abordar, é uma propriedade exclusiva das ondas *transversais*.

Ondas transversais são aquelas em que a direção de propagação e a direção de vibração da onda são transversais, isto é, mutuamente perpendiculares. Como exemplos, podemos citar o movimento vibratório para cima e para baixo, produzindo uma onda numa corda, ou o movimento, oscilatório do campo elétrico da luz, se considerarmos o modelo ondulatório clássico da mesma. Ondas longitudinais, ao contrário das transversais, são aquelas em que a direção de propagação e a direção de vibração são coincidentes. As ondas sonoras são os exemplos mais familiares de ondas longitudinais.

Como referimos anteriormente, somente as ondas transversais podem ter polarização. Vamos usar o exemplo da luz para explicar o fenômeno da polarização. Polarizar *linearmente* a luz significa fazer o campo elétrico da luz oscilar num mesmo plano enquanto ela se propaga; polarizar *circularmente* a luz significa fazer o campo elétrico da onda luminosa da luz girar em torno de um eixo, mantendo sua amplitude constante, ou seja, a direção de polarização da onda é, por definição, a direção de oscilação de seu *campo elétrico*. Portanto, a luz pode ser polarizada. A luz emitida pelo Sol ou por lâmpadas comuns, ou a luz refletida pelos objetos, é não-polarizada ou apenas parcialmente polarizada (no caso da luz refletida por objetos). Contudo, como já mencionamos, podem vir a ser polarizadas se as fizermos atravessar *filtros polarizadores* de luz (filtros polaróides).





## **5. A experiência da dupla fenda e a natureza ondulatória da luz**

### **5.1. Um pouco da história da luz**

Uma das questões mais cruciais da história da ciência sempre foi a de descobrir se a luz é constituída por partículas ou por ondas. Essa é a questão da *natureza* da luz e tem-se notícia de que intrigou os homens desde a época dos gregos antigos.

Os gregos antigos acreditavam que a luz fosse formada por minúsculos grãos de algum tipo de matéria, certamente diferente da matéria ordinária. Alguns deles afirmavam que a luz estava presente nos nossos olhos, na forma de pequenas partículas emitidas, que, ao atingirem um objeto, tornavam-no visível. Essa idéia começou a ser questionada no início do século XVII e, em 1678, o astrônomo e físico holandês Christian Huygens (1629-1695) propôs que a luz seria composta por ondas. Segundo Huygens, a luz podia se propagar no vácuo (entre o Sol e a Terra, por exemplo) por existir uma substância invisível nessa região, uma substância sem massa, difusa e estática, chamada *éter luminífero*, que permearia todo o universo e os poros da matéria e que constituiria o meio de propagação das ondas luminosas.

Em 1704, em sua obra *Óptica*, Isaac Newton (1642-1727) descreveu todas as formas de comportamento e qualidades da luz, propondo também uma *teoria corpuscular da luz*, na qual a luz seria constituída por partículas ou corpúsculos de luz. Newton precisou valer-se de algumas hipóteses adicionais para conseguir explicar corretamente as leis da reflexão e refração, já então conhecidas. Entre as hipóteses auxiliares, Newton admitiu (erroneamente, hoje sabemos) que a velocidade de propagação da luz fosse maior na água, ou no vidro, do que no ar. Dada a grande influência de Newton durante os séculos XVIII e XIX, a teoria corpuscular da luz foi aceita sem grandes questionamentos a partir de então, sobrepujando largamente a teoria rival proposta por Huygens. Além de Christian Huygens, o físico inglês Robert Hooke (1635-1703) contrapunha-se à teoria de Newton para a luz, ao explicar a refração da luz com uma teoria ondulatória antiga, considerando que a luz se propagasse com velocidade menor na água, ou no vidro, do que no ar. Foram eles os principais defensores da teoria ondulatória da luz na época. Nessa época ainda não tinha sido observado o fenômeno de difração e acreditava-se então, que a luz se propagasse sempre em linha reta. Esse foi um dos motivos que levaram Newton a rejeitar a teoria ondulatória da luz.

Essa situação perdurou até o início do século XIX. Em 1801, o médico Thomas Young (1773-1829) corroborou a teoria da natureza ondulatória da luz com seu famoso experimento da fenda dupla.

### **5.2. O experimento de Young**

Nesse experimento, Young demonstrou que a luz sofre interferência, um fenômeno comum a todos os tipos de onda. O esquema do experimento de Young está mostrado, esquematicamente, na Figura 9.

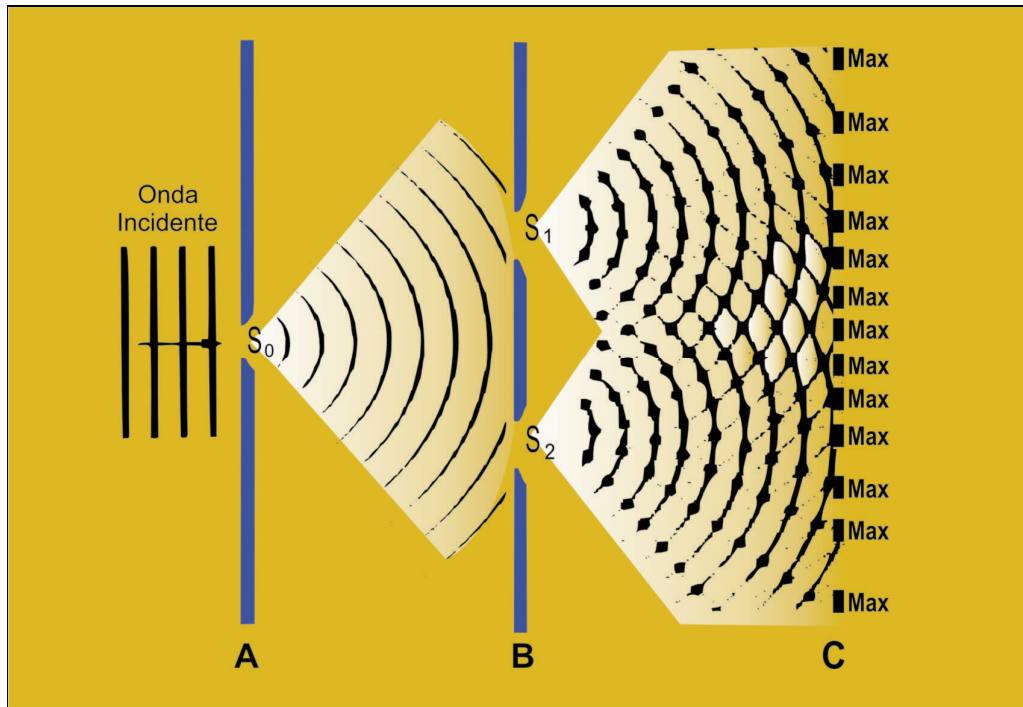


Figura 9 – Esquema experimental de Young

Uma fonte de luz monocromática incidente ilumina a fenda  $S_0$  do anteparo A, onde é difratada pela fenda, espalhando-se em várias direções; ao chegar ao anteparo B, a luz é dividida em dois feixes e novamente difratada pelas fendas  $S_1$  e  $S_2$ ; daí eles seguem, então, para uma tela branca, C, onde se combinam ponto a ponto e dão origem a um padrão de franjas claras e escuras alternadas, típico de interferência ondulatória. Esse padrão característico é conhecido pelo nome de *padrão de interferência*. No anteparo C, os pontos claros são aqueles onde as ondas sofrem interferência *construtiva*, o que ocorre quando as ondas provenientes das duas fendas chegam ao anteparo com fases iguais (em fase). O conjunto desses pontos constitui uma *franja clara*. Em outros pontos, as ondas sofrem interferência totalmente *destrutiva*, o que ocorre quando as ondas ali incidentes estão completamente fora de fase (ou seja, com uma diferença de fase igual a  $\pi$  radianos). O conjunto desses pontos forma uma *franja escura*.

O padrão de intensidade produzido em razão da interferência tem o aspecto mostrado na Figura 10(a), não o da Figura 10(b), o que mostra que o padrão resultante da iluminação produzida pelas duas fendas não é, simplesmente, a soma dos dois padrões obtidos com cada uma das fendas quando a outra está bloqueada. Se isso ocorresse, a intensidade luminosa na tela seria dada pela curva mostrada em azul na figura da direita, quando o que se vê, de fato, é o padrão de intensidade mostrado na figura da esquerda.

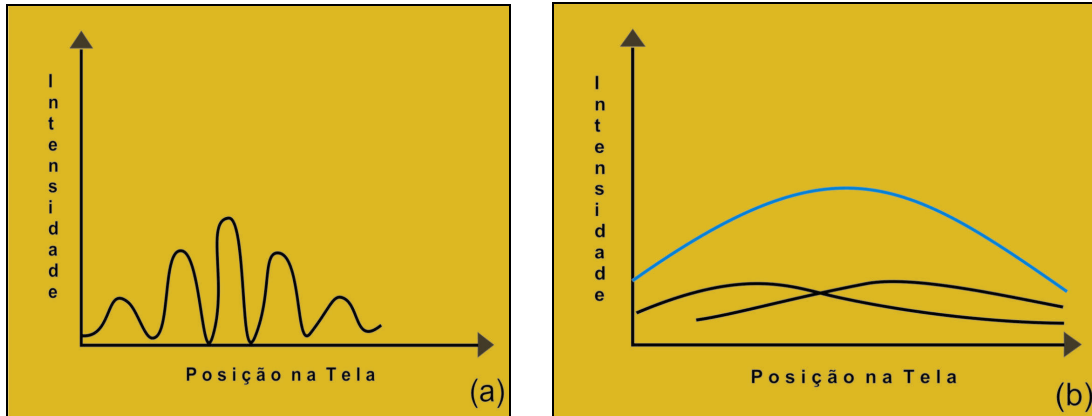


Figura 10 – Gráfico intensidade versus posição na tela

Na Figura 11 (a), a intensidade luminosa em cada ponto do anteparo  $C$  depende da diferença de distâncias percorridas pela luz nos caminhos seguidos pelos raios  $r_1$  e  $r_2$ , que chegam ao ponto  $P$ . Na Figura 11 (b), supondo que  $D \gg d$ , (onde  $D$  é a distância do anteparo  $B$  até a tela  $C$  e  $d$ , a distância entre as duas fendas) e que  $S_1$ ,  $S_2$  e  $b$  constituam um triângulo retângulo com ângulo interno  $\theta$ , pode-se mostrar que a diferença entre as distâncias percorridas é dada por:

$$\Delta L = d \cdot \text{sen} \theta$$

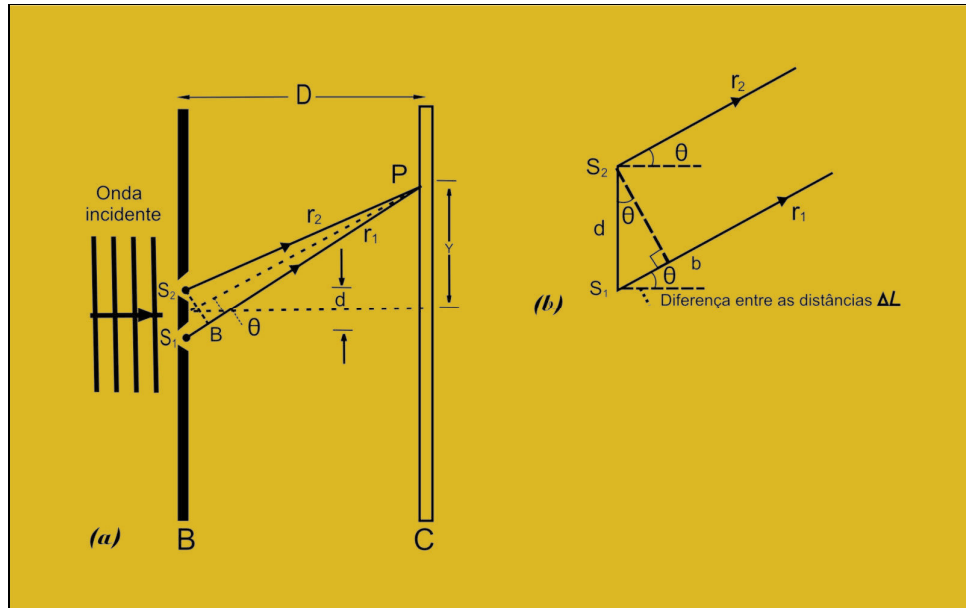


Figura 11 – Esquema de representação do arranjo experimental de Young.

Para haver uma franja clara,  $\Delta L$  deve ser igual a zero ou a um número inteiro de comprimento de onda, isto é:

$$d \cdot \text{sen} \theta = n \cdot \lambda$$

onde  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

No caso de uma franja escura, portanto,  $\Delta L$  deve ser igual a um múltiplo ímpar de meios comprimentos de onda, ou seja:

$$d \cdot \sin \theta = \left( n + \frac{1}{2} \right) \cdot \lambda \quad \text{onde } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

O padrão de interferência observado na experiência de Young também pode ser observado nas Figuras 12 (a) e 12 (b), que mostram a tela do *software* Doppelspalt, cujo *download* pode ser feito gratuitamente a partir do endereço <http://www.physik.uni-uenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html>, com o qual passaremos a trabalhar a partir de agora.

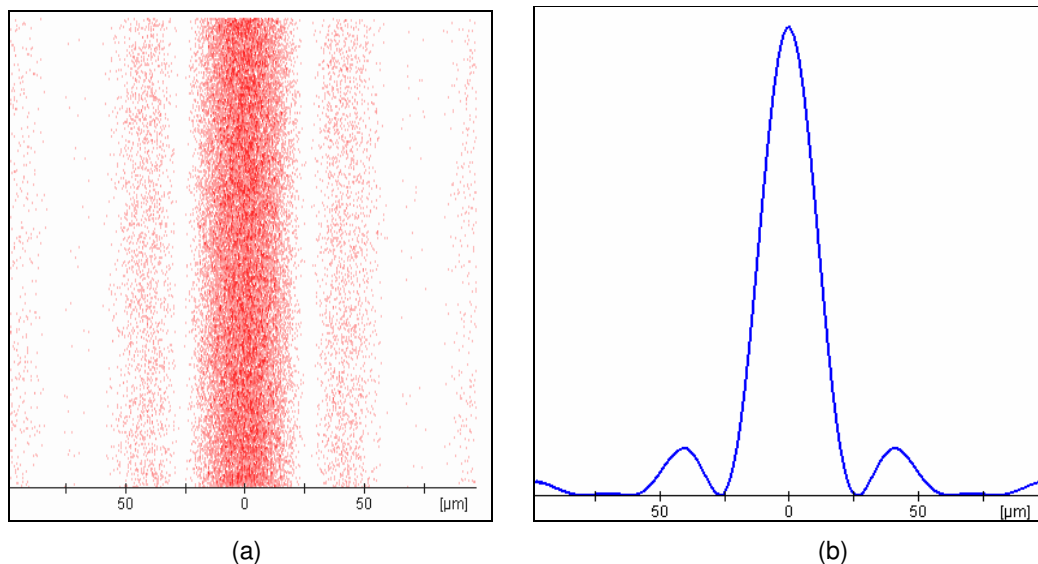


Figura 12 – Padrão de interferência visualizado na tela do *software* Doppelspalt.

A partir desse experimento, a *teoria ondulatória* da luz passou a predominar sobre a *teoria corpuscular* de Newton, tornando-se o alicerce teórico para a óptica ondulatória desenvolvida a partir de então e alcançando sua formulação físico-matemática definitiva na década de 1860, com o término da formulação do eletromagnetismo pelo físico inglês James Clerk Maxwell (1831-1879).

## 6. A experiência da dupla fenda e a natureza corpuscular da luz

O experimento de Thomas Young foi abordado em termos ondulatórios, quando uma luz monocromática é usada como fonte e atravessa duas fendas estreitas e próximas, produzindo numa tela um padrão de interferência semelhante ao que é mostrado na Figura 13.

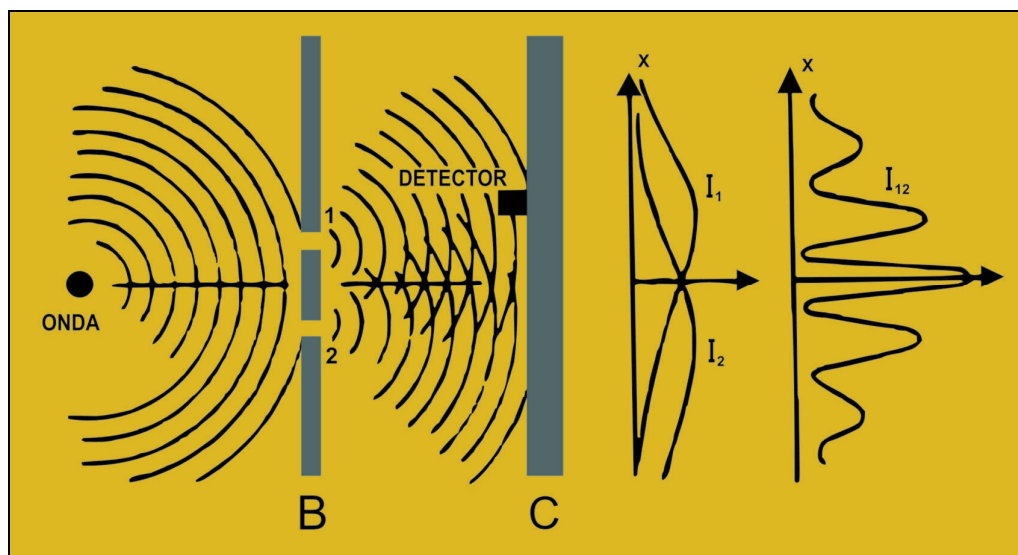


Figura 13 – Vista lateral do arranjo do experimento de Young

Vamos ver, agora, como o resultado observado na tela do arranjo de Young pode ser explicado pela teoria quântica da luz, ou seja, usaremos um outro modelo para a luz, não o modelo ondulatório clássico, em que a luz é considerada uma onda eletromagnética, mas um modelo corpuscular da luz, considerada como um feixe ou uma corrente de “partículas de luz”, chamadas de *fótons*. Como havíamos feito antes quando explicamos o experimento de Young com base na teoria ondulatória, vamos considerar que a fonte emite luz *monocromática*, ou seja, luz de uma única frequência (ou cor). Em termos da teoria quântica da luz, isso significa que todos os fótons emitidos pela fonte têm a mesma energia (lembre-se da relação de Planck,  $E_{\text{fóton}} = h.f$ ). O número desses fótons *monoenergéticos* emitidos por segundo pela fonte é proporcional à grandeza que chamamos de intensidade luminosa na teoria ondulatória da luz.

A intensidade da onda, denotada pela letra  $I$ , representa a taxa média por unidade de área com a qual a energia é transportada, isto é, é a energia transportada por unidade de tempo e de área:

$$I = \frac{E/t}{A}$$

No modelo ondulatório, a intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude do campo elétrico da onda:  $I \propto E^2$ . No modelo corpuscular, a intensidade, é proporcional à energia transportada, a qual é, por sua vez, proporcional ao número de fótons incidentes,  $I \propto N.h.f$ , onde  $N$  é o número de fótons incidentes por unidade de tempo. De acordo com a mecânica quântica, essa grandeza, por sua vez, é diretamente proporcional à probabilidade de encontrá-los numa determinada

região, ou seja, é proporcional ao quadrado da amplitude da função de onda. Portanto, se considerarmos conjuntamente os dois modelos para a luz, chegaremos à conclusão de que

$$E^2 \propto |\Psi^2|.$$

Se diminuirmos a intensidade da fonte até que os fótons cheguem ao detector da tela C praticamente um a um, num intervalo de tempo de observação muito curto, obteremos a imagem registrada na Figura 14 (a), onde os pontos aparecem aleatoriamente um após o outro, cada qual correspondendo a cada fóton detectado na tela de maneira localizada. Ainda assim, quando apenas um fóton incide de cada vez, se esperarmos um tempo suficientemente longo para que muitos pontos se acumulem na tela, observaremos o gradual surgimento de um padrão de interferência. Isso nos leva a concluir que cada fóton deve ter interferido *consigo mesmo* após ter ultrapassado a fenda dupla, como se tivesse passado simultaneamente pelas duas fendas! (essa situação será ilustrada com o uso do *software* da fenda dupla)

Quando o número  $N$  de fótons incidentes por unidade de tempo aumenta muito, aproximando-se dos valores da ordem daqueles que ocorrem normalmente em situações encontradas no nosso dia-a-dia, a distribuição dos impactos na tela começa a revelar um padrão não aleatório de pontos, como o mostrado na Figura 14 (b). Quando o valor de  $N$  aumenta ainda mais, o padrão delineado torna-se mais nítido, como o ilustrado na Figura 14(c).

Se a observação se estender por um tempo mais longo, aumentando, com isso, o número total,  $N$ , de fótons que já atingiram a tela, os pontos impressos passam a se agrupar em faixas bem definidas, dando origem ao padrão mostrado nas Figuras 14(b) e 14(c).

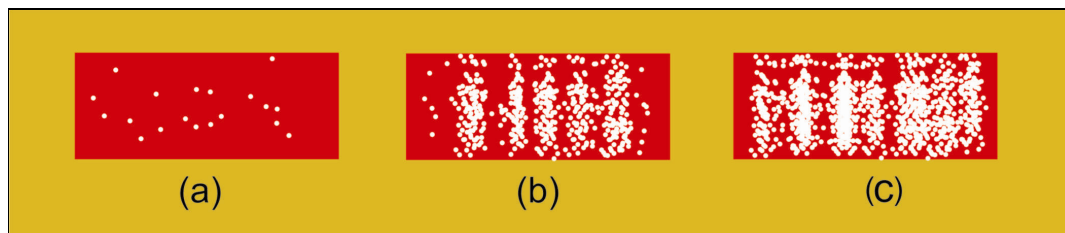


Figura 14 – Estágios da formação de um padrão de interferência produzido por dupla fenda.

Através do exemplo numérico, vamos verificar a relação entre o valor da intensidade luminosa e o número de fótons emitidos num determinado instante.

Exemplo 1: A mínima intensidade luminosa que o olho humano médio pode perceber é de aproximadamente  $10^{-10} \text{ W/m}^2$ . Se a radiação incidente possui comprimento de onda de 5.600 Angstroms, quantos fótons entram por segundo na pupila do olho sob essa intensidade? Pode-se tomar a área de uma pupila típica como sendo igual a  $0,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ .

Solução:

Sendo  $I = \frac{E/t}{A}$ , então:  $E = (10^{-10} \text{ w/m}^2) \times (0,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \times (1 \text{ s})$

$$E = 5.10^{-15} \text{ J}$$

Sendo  $E = N.h.f$ , então  $N = 1,4075.10^4 \text{ fótons/s}$

Se uma das fendas for coberta, impedindo-se a passagem de fótons através dela, observaremos na tela um padrão de difração de fenda única parecido com o que é mostrado na Figura 15. Agora os fótons incidem em pontos da tela que antes não atingiam quando as duas fendas estavam abertas.



Figura 15 – Padrão de difração produzido por fenda única

Isso acontece porque o fóton que incide na tela comporta-se agora como uma partícula clássica, bem localizada e que passa por apenas uma das fendas, sem revelar qualquer sombra de um comportamento tipicamente ondulatório, ou seja, concluímos que um fóton pode apresentar tanto propriedades corpusculares quanto ondulatórias, dependendo do arranjo experimental que se utiliza para efetuar o experimento com ele! Em contrapartida, admitindo que um objeto quântico tenha também um caráter ondulatório, podemos usar as propriedades ondulatórias associadas a comprimento de onda, entre essas a relação de Broglie ( $\lambda = \frac{h}{p}$ ).





## 7. Dualidade onda-partícula para luz: onda eletromagnética x feixe de fótons

Sob determinadas condições, a radiação eletromagnética apresenta propriedades *tipicamente ondulatórias*, tais como *difração*, *interferência* e *polarização* (o experimento de Young constituiu uma manifestação basicamente da interferência). Sob outras condições, porém, a radiação eletromagnética comporta-se como se fosse constituída por um *feixe de partículas*. Esses aspectos corpusculares da luz só foram revelados pela primeira vez em experimentos realizados nas primeiras décadas do século XX, embora o efeito fotoelétrico, de 1887 constitua de fato uma manifestação desse caráter. Nesse modelo corpuscular a radiação eletromagnética é considerada como sendo um feixe ou uma corrente de *partículas de luz*, ou quanta de luz, chamadas atualmente de *fótons*.

Dessa forma, a radiação revela um “duplo caráter” físico, o que significa dizer que se comporta como onda sob determinadas circunstâncias e como partículas sob outras. Nenhuma das teorias – ondulatória e corpuscular – explica sozinha todos os aspectos e comportamentos da radiação observados na natureza. Não faz sentido dizer que a radiação “é” uma onda eletromagnética, ou “é” um feixe de fótons, mas, sim, que é descrita pela física com dois modelos matemáticos concorrentes – o modelo ondulatório e o modelo corpuscular. Portanto, as ondas eletromagnéticas não são fenômenos puramente ondulatórios nem puramente corpusculares.

O fato de a natureza da luz deixar de poder ser considerada somente como ondulatória foi inicialmente revelado, como afirmamos, no efeito *fotoelétrico*, que não podia ser explicado corretamente com base na teoria ondulatória da luz. Foi Einstein quem, em seu artigo de 1905 sobre o efeito fotoelétrico, propôs o novo modelo corpuscular da luz, juntamente com o conceito de *quantum de luz*. Outros experimentos, porém, especialmente concebidos para testar a hipótese de Einstein, revelaram que, sob determinadas condições (ou seja, para determinados arranjos experimentais), a radiação realmente se comporta como se fosse formada por um feixe de fótons. Um desses experimentos cruciais foi o de espalhamento de raios X em superfícies metálicas, realizado repetidas vezes e com muita precisão por Compton e sua equipe nos primeiros anos da década de 1920. A partir dele, a comunidade dos físicos começou a, gradualmente aceitar a validade da hipótese de Einstein para explicar o comportamento observado da radiação.

Paradoxalmente, a observação do efeito fotoelétrico aconteceu quando Heinrich Hertz realizava experiências para confirmar a existência das ondas eletromagnéticas, em 1887. Hertz observou que, quando a radiação luminosa ultravioleta incidia sobre um eletrodo negativamente carregado e feito de um metal alcalino, promovia uma descarga elétrica (corrente elétrica) entre esse eletrodo e o outro (carregado positivamente). Isso constituía uma indicação de que os elétrons conseguiam sair da superfície do metal do eletrodo negativamente carregado pela absorção de energia a partir da luz incidente. Nos anos que se seguiram a sua descoberta, o efeito fotoelétrico passou a ser estudado detalhadamente com arranjos experimentais que consistiam, basicamente, numa câmara lacrada onde era feito vácuo, contendo numa das extremidades uma placa de metal alcalino ligada ao pólo negativo de uma bateria, um coletor metálico do lado oposto ao da câmara, ligado ao pólo positivo da bateria, uma fonte de tensão contínua, um voltímetro e um amperímetro, conforme mostrado na Figura 16.

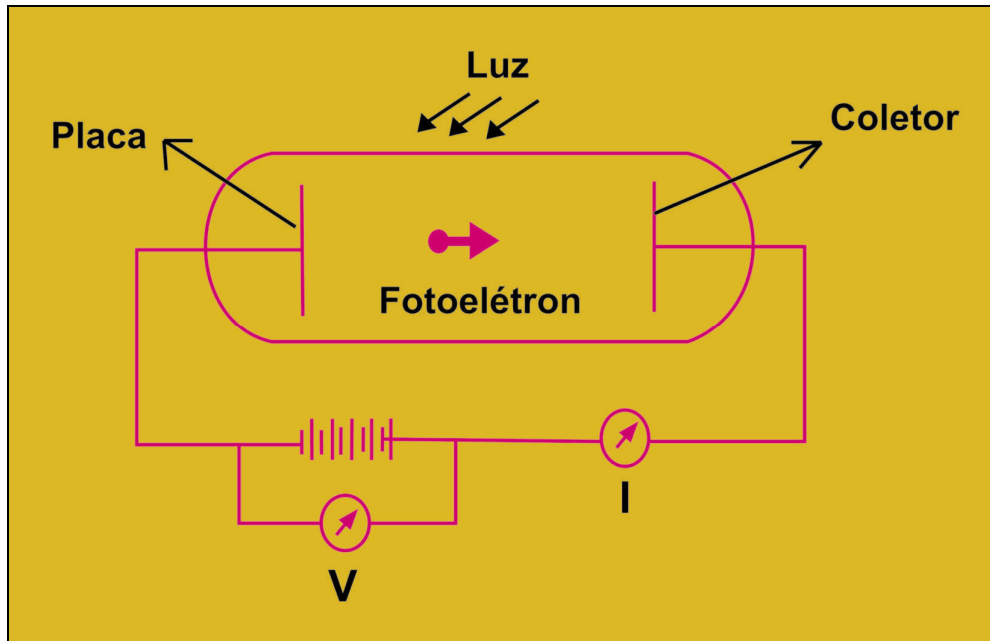


Figura 16 – Arranjo experimental do efeito fotoelétrico

Entre os dois eletrodos é mantida pela bateria uma diferença de potencial cuja polaridade podia ser invertida, de modo que os elétrons ejetados do metal (chamados de fotoelétrons) pudessem ser tanto acelerados quanto freados em seu caminho em direção à outra placa. Quando a luz bate na placa, vários de seus elétrons superficiais adquirem energia da radiação incidente suficiente para que se libertem do campo eletrostático, que os atrai de volta para a placa alcalina, e abandonam o metal com uma determinada quantidade de energia cinética. Esses elétrons, portanto, passam a contribuir para a corrente elétrica entre as duas placas, que podia ser medida através do amperímetro. Para o caso em que a diferença de potencial entre as placas está com polaridade invertida em relação à da figura mostrada acima, um aumento do valor absoluto dessa voltagem provoca portanto, uma diminuição da corrente elétrica da descarga. O valor mínimo de potencial de freamento para o qual a corrente cessa totalmente é chamado de *potencial de corte*. Neste caso, todos os fotoelétrons provenientes da placa emissora são freados o suficiente para que nenhum deles, nem mesmo os mais energéticos, alcance a placa coletora. Isso significa, então, que a energia cinética dos fotoelétrons mais energéticos é toda convertida em energia potencial elétrica no momento em que o elétron pára e começa a inverter seu movimento. Assim, medindo-se o valor do *potencial de corte* podia-se determinar a energia cinética máxima dos fotoelétrons emitidos, com velocidade máxima, a partir da placa alcalina.

Entretanto, o comportamento observado nesses experimentos não podia ser explicado de acordo com algumas considerações da teoria ondulatória clássica da luz. Havia, basicamente, três resultados experimentais que não podiam ser explicados pela física clássica:

1<sup>o</sup> - Como mostrado na Figura 17, a corrente elétrica fluía somente para valores de potencial de freamento superiores ao do potencial de corte ( $V_F$  na figura). Este comportamento era idêntico

para várias intensidades de luz ultravioleta incidente, embora o valor do potencial de corte fosse sempre o mesmo, ou seja, a energia cinética máxima dos fotoelétrons independe da intensidade da luz, ao passo que a física clássica prediz que a energia cinética dos fotoelétrons deveria aumentar sempre que a intensidade da luz aumentasse!

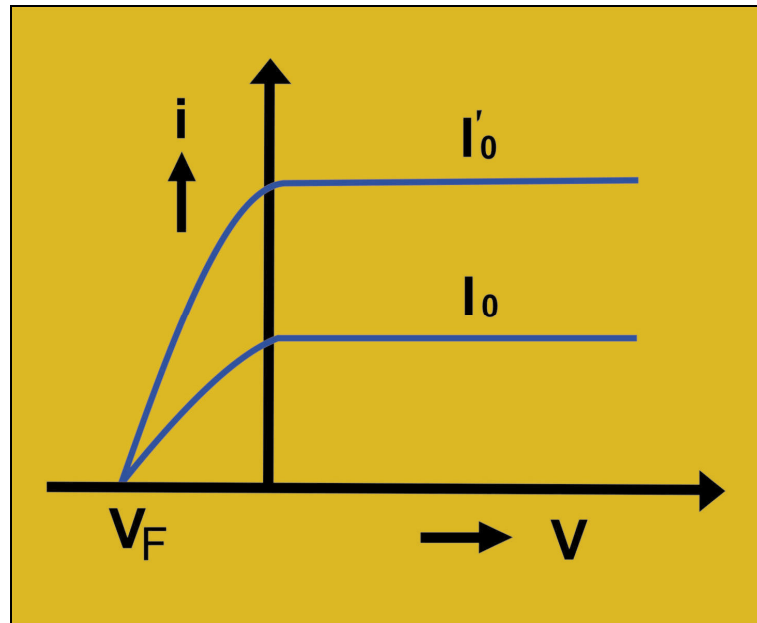


Figura 17 – Gráfico da corrente  $i$  em função do potencial  $V$ . Os dados foram obtidos com o aparelho da Figura 16.

2<sup>o</sup> – Para *qualquer* que fosse o valor da intensidade de iluminação, existia um valor mínimo de frequência da luz abaixo do qual o efeito fotoelétrico não ocorria. Isso indicava que a energia cinética dos fotoelétrons dependia da frequência da luz usada, mas não de sua intensidade. Entretanto, de acordo com a teoria eletromagnética de Maxwell, a energia cinética dos fotoelétrons deveria depender da frequência da luz, mas ser dependente da intensidade luminosa!

3<sup>o</sup> – Não parecia haver um intervalo de tempo de retardo detectável entre o instante em que a luz incidia sobre a placa e o instante em que surgia a corrente de descarga. Mas a teoria clássica da luz exigia que, a fim de acumular energia suficiente para sair do metal, os elétrons deveriam ficar absorvendo energia a partir da radiação durante certo intervalo mínimo de tempo, que corresponderia ao *tempo de retardo* esperado entre a incidência da luz e o aparecimento da corrente elétrica.

Einstein explicou o efeito fotoelétrico propondo uma nova versão da velha teoria ondulatória clássica da luz, qual seja, a hipótese de que a luz é formada por pacotes concentrados de energia ou *quanta* de luz, chamados atualmente de *fótons*. Com essa hipótese, ele conseguiu explicar com simplicidade as três anomalias descritas acima:

1<sup>o</sup> – No primeiro caso, no qual a energia cinética não depende de intensidade da luz, a teoria dos quanta admite que, ao aumentar a intensidade da luz, é o número de fótons incidentes que aumenta e, conseqüentemente, a corrente fotoelétrica também, mas não a energia cinética máxima desses elétrons, pois tal energia viria da absorção de um fóton, cuja energia depende da freqüência, não da intensidade da luz.

2<sup>o</sup> – No segundo caso, no qual a freqüência da luz incidente deveria ter um valor mínimo ( $f_0$ ), Einstein argumentou que, quando a energia cinética do fotoelétron é nula, o fóton doador deve possuir uma energia exatamente necessária para ejetar os elétrons; e que, quando a freqüência é menor do que  $f_0$ , os fótons incidentes não possuem a energia suficiente para doar aos elétrons e, assim, conseguir fazer com que vençam a atração eletrostática da placa emissora e saiam dela para formar a corrente de descarga. Enquanto os elétrons se afastam da superfície da placa emissora, o campo elétrico produzido por esta realiza um trabalho negativo (correspondente ao freamento dos elétrons) de valor absoluto igual a  $w_0$ , que Einstein denominou função-trabalho do metal, ou seja, do total de energia que o elétron absorve ao absorver um fóton ( $h.f$ ), uma parte fica com o metal ( $w_0$ ) e o restante, com o fotoelétron, na forma de energia cinética. Isso que expressamos com palavras pode ser simbolicamente expresso pela equação (Einstein, 1905).

$$K = hf - w_0$$

$$K = 0 \quad \rightarrow \quad hf = w_0$$

3<sup>o</sup> – No terceiro caso, a ausência de retardamento é automaticamente explicada, pois a energia é absorvida pelos elétrons da placa emissora de uma só vez, em “pacotes” inteiros (fótons), não de forma gradual, a partir do campo elétrico de uma onda eletromagnética, como pensavam os físicos clássicos.

São indiscutíveis as contribuições que Einstein nos trouxe com seus trabalhos, especialmente para a natureza da luz. Nos dias de hoje evidenciamos o efeito fotoelétrico em muitas aplicações do ponto de vista tecnológico, tais como visores noturnos, fotômetros, dispositivos eletrônicos que controlam as portas de elevadores etc.

A partir daí, a radiação eletromagnética, até então explicada apenas como sendo uma onda eletromagnética, passou a ter também um caráter corpuscular. Do ponto de vista filosófico, a descoberta do comportamento dual da onda-partícula representou um marco do pensamento racional.

## 8. A experiência da fenda dupla com feixe de elétrons

O experimento de fenda dupla também pode ser realizado com feixes de objetos microscópicos, idênticos e dotados de massa. Nosso protótipo desse tipo de objeto microscópico será o *elétron*. O que podemos esperar como resultado desse experimento levado a cabo com um feixe de elétrons, em vez de luz (que é um feixe de fótons sem massa)? De acordo com tudo que aprendemos em toda a nossa experiência de vida e de nossa relação com o mundo material a este respeito, se os elétrons são partículas massivas, então deveriam se comportar como bolinhas muito pequenas (dotadas de carga elétrica, além de massa), mas essencialmente bolinhas, nada mais que isso.

A partir daí, a experiência cotidiana nos sugere que tal experimento seria muito parecido com uma brincadeira que consiste em atirar um feixe de bolas – bolas de tênis, digamos – em alta velocidade e uma de cada vez (imagine-se uma grande máquina construída para essa finalidade, uma espécie de “metralhadora de bolas de tênis”) contra uma parede de cimento onde existissem duas janelas (as “fendas”). As janelas têm seus centros separados por uma determinada distância  $d$ . Uma vez que as bolas são de grande velocidade, todas conseguiriam chegar à parede e algumas conseguiriam entrar na sala que existe após a parede, atravessando-a em alta velocidade e atingindo uma parede que se encontra do lado oposto da sala. Para melhorar ainda mais a analogia com a situação da experiência de fenda dupla com elétrons, poderíamos imaginar também que as bolas de tênis atiradas pela máquina saíssem todas pintadas com uma leve camada de tinta vermelha e que as paredes da sala após a parede de porta dupla fossem pintadas de branco e, inicialmente, sem nenhuma marca.

Se a finalidade da nossa máquina não fosse a de atirar bolas de tênis, mas, sim, de produzir ondas na água, observaríamos que as ondas se espalhariam por toda a parede além da janela. E com as bola de tênis, o efeito observado seria o mesmo? Como você, leitor, acha que seria a aparência da parede oposta da sala após termos esperado tempo suficiente para que um número muito grande de bolas de tênis tenha sido arremessado pela máquina?

Diferentemente das ondas produzidas na água, cada bola atingirá a parede em apenas uma posição. Vamos imaginar, inicialmente, que apenas uma das janelas está aberta. Embora algumas das bolas ricocheteiem nas bordas da janela, a probabilidade de uma bola passar pela janela é muito maior do que a de ela bater na borda da janela e ser desviada lateralmente. Se esperarmos por algum tempo, vamos verificar que as marcas deixadas na parede oposta vão gradualmente revelando um padrão. A maior parte das bolas incide na parede oposta numa região situada aproximadamente entre as duas linhas perpendiculares à parede e que passam pelas bordas laterais da mesma. Fora dessa região, o número de marcas diminui rapidamente, tanto para um lado como para outro. Podemos visualizar o padrão resultante na Figura 18, onde usamos o *software* Doppelspalt para uma fonte de balas de espingarda na mesma situação descrita acima (somente uma fenda aberta). Um padrão semelhante é observado quando for a outra janela que estiver aberta, apenas com um pequeno deslocamento para o lado da nova janela aberta. Essa distribuição resultante de marcas corresponde à densidade de probabilidade de uma bola atravessar a sala e colidir com a parede oposta na vizinhança de um determinado ponto quando apenas uma das janelas está aberta.

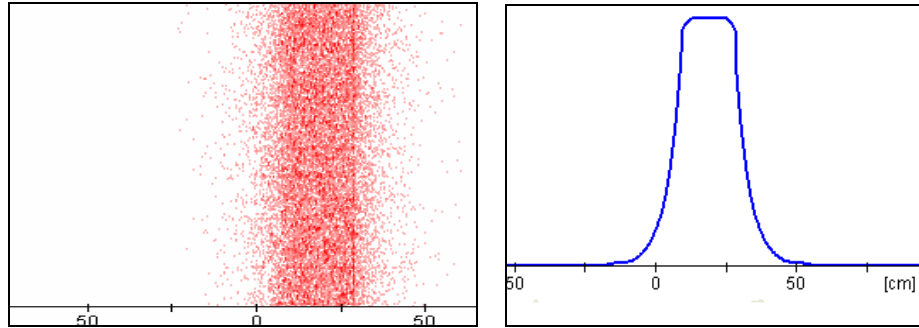


Figura 18 – Lado esquerdo: Padrão observado no *software* Doppelspalt quando a fonte é uma metralhadora e apenas uma das fendas está aberta. Lado Direito: Gráfico do número de impactos na tela em função da posição na mesma. O centro do gráfico é um ponto da tela diretamente à frente do centro da fenda.

Continuando com nossa brincadeira, vamos agora imaginar que as duas janelas estejam abertas. Neste caso, o que você imagina que acontece com as marcas de bolas na parede oposta à medida que o número de impactos vai se tornando muito grande? A distribuição das marcas que as bolas deixam na parede oposta da sala, isto é, sua distribuição, será parecida com a do caso anterior?

Certamente, com as duas janelas abertas aumenta o número total de bolas que incidem na parede oposta da sala. Com o decorrer do tempo, observamos que vai surgindo gradualmente um padrão na distribuição das marcas, com duas regiões onde existem altas concentrações de marcas de impacto, centradas em pontos separados por uma distância aproximadamente igual à que existe entre os centros das janelas ( $d$ ). Essa distribuição resultante, na verdade, nada mais é do que a soma de duas distribuições, como a da Figura 18, mas deslocadas por uma distância aproximadamente igual a  $d$ , como podemos observar na Figura 19. Essa distribuição resultante de marcas corresponde à densidade de probabilidade de uma bola atravessar a sala e colidir com a parede oposta na vizinhança de um determinado ponto quando ambas as janelas estão abertas.

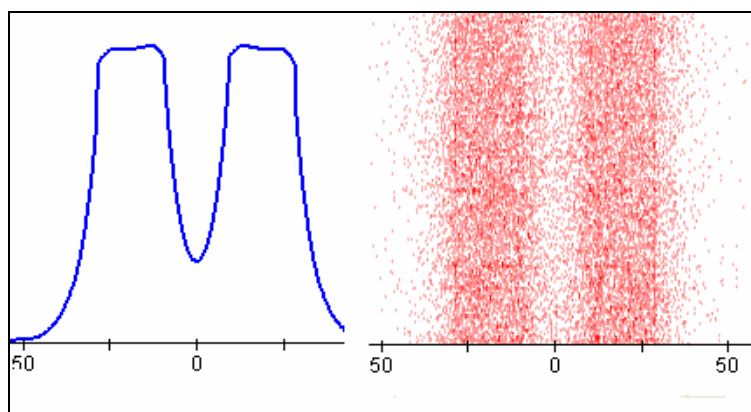


FIGURA 19: Padrão observado no *software* Doppelspalt quando a fonte são balas de metralhadora e as duas fendas estão abertas. A distância aproximada  $d$  entre os centros dos dois picos do gráfico é de 50 unidades.

Entretanto, o que nos garante que as bolas não interferem entre si, como ocorre com as ondas no experimento de Young, quando foi comprovada a interferência da luz que passa por duas fendas? Ou as bolas não poderiam ricochetear umas contra as outras, desviando-se por todos os lados? Isso não seria um tipo de interferência? Sim, seria, mas, para que isso ocorra, as bolas deveriam ter saído da máquina ao mesmo tempo, o que não acontece. (Imagine-se a situação ilustrada na Figura 20, em que nossa máquina fosse semelhante a uma metralhadora. Suas balas não sairiam ao mesmo tempo da metralhadora, mas uma de cada vez, embora com alta frequência.) Ou seja, cada bola deve ter passado por uma ou por outra janela, mas não por ambas ao mesmo tempo!

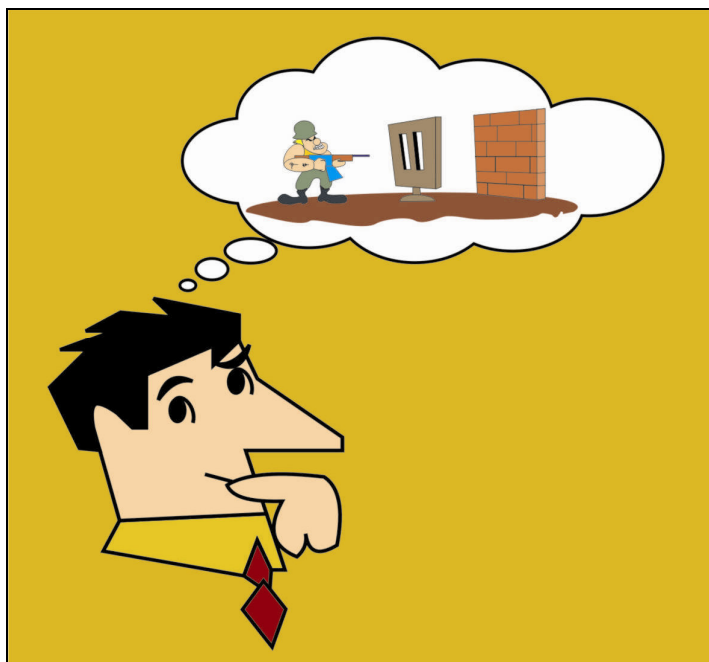


Figura 20 – Balas de metralhadora incidindo em duas fendas

E se usarmos elétrons no lugar de bolas? Vamos deixar de lado a nossa metralhadora de bolas de tênis e imaginar agora que a fonte seja um filamento aquecido capaz de emitir elétrons, os quais são colimados na saída da fonte, formando um feixe direcionado (como se fosse um canhão de elétrons). Que padrão você acha que será agora observado na tela (semelhante à nossa “parede do lado oposto da sala” da analogia anterior)? Como você acha que o resultado do experimento de duas fendas poderia ser interpretado neste caso? O padrão observado na parede, que agora será representado por pontos causados pelos impactos dos elétrons numa tela pintada com tinta sensível aos impactos. O padrão de impactos que vai se formando à medida que o tempo passa será o mesmo observado com as bolas de tênis?

Para quantificar a distribuição dos elétrons na tela, podemos usar um contador de Geiger, posicionado em cada posição da mesma, o qual nos permite realizar uma contagem cumulativa dos impactos numa vizinhança daquele ponto. A Figura 21 é uma representação esquemática de como fica o arranjo experimental de Young quando a fonte passa a ser de elétrons. O padrão de impactos

das bolas de tênis e o padrão resultante dos impactos eletrônicos estão mostrados juntos, para comparação, no lado direito da figura. O padrão mostrado mais à direita corresponde ao dos impactos de elétrons na tela.

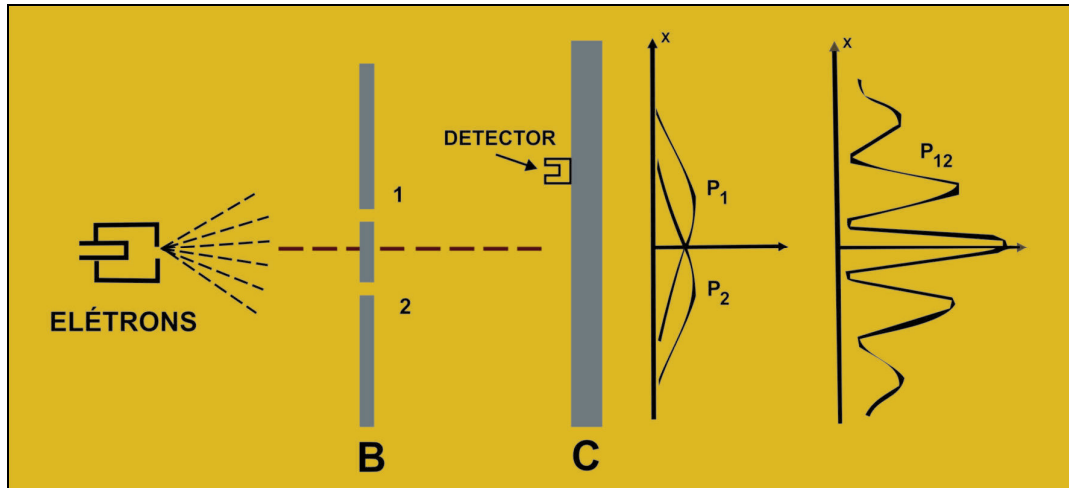


Figura 21 – Arranjo experimental de Young com elétrons. O padrão mostrado mais à direita corresponde ao dos impactos de elétrons na tela.

Assim que o filamento aquece bastante e começa a emitir elétrons, observamos na tela C que um padrão começa a se formar e fica evidente que a distribuição é muito diferente daquela obtida com as bolas de tênis da experiência imaginária anterior, pois os elétrons detectados na tela não diminuem tanto para um lado como para outro, mas, sim, distribuem-se em bandas, com espaços negros entre elas, em regiões onde poucos elétrons ou nenhum elétron chega, exatamente como no caso do experimento de Young para a radiação eletromagnética. O padrão observado é o mesmo da interferência com luz! Ou seja, neste experimento, os elétrons estão se comportando como se fossem ondas. Será que isso está acontecendo porque o número de elétrons emitidos é muito grande? O que observaríamos se fosse emitido apenas um elétron de cada vez, de maneira que apenas um deles incide no anteparo de fenda dupla e também na tela de cada vez? Antes de ler as observações registradas abaixo, use o *software* Doppelspalt e verifique por sua conta.

As observações registradas são as seguintes:

1. O detector só registra números inteiros de elétrons, pois nunca chegam até ele elétrons fracionados (podemos comparar essa característica para partículas clássicas como balas de metralhadoras ou *sprays*);

2. Se a fonte de elétrons for muito fraca, eles chegarão ao detector ao acaso e praticamente *um a um*. Podemos medir a distribuição de probabilidade correspondente a ter uma só fenda aberta (que é igual a  $P_1$  ou  $P_2$ ), ou a duas fendas abertas ( $P_{1,2} \neq P_1 + P_2$ ). Mesmo com a intensidade da fonte muito fraca, se esperarmos por um tempo suficientemente longo, obteremos uma figura de interferência tal qual a obtida com as ondas luminosas;

3. Se uma das fendas for fechada, os elétrons detectados na tela acumulam-se formando um típico padrão de difração de fenda única, com franjas brilhantes laterais a uma central. Isso é bem



diferente do caso das bolas de tênis atiradas contra uma única fenda (janela), que não formam um padrão como esse, pois seu comprimento de onda é muito pequeno em relação à largura das fendas. Isso faz com que as franjas de difração fiquem tão juntas que se superpõem, resultando numa região com iluminação mais ou menos uniforme, sem franjas. Por isso não as notamos no caso de objetos macroscópicos dotados de massa.

As observações destacadas nesse experimento distribuem-se da seguinte maneira: as observações 1 e 2 são características de partículas clássicas, mas a observação 3 tem característica de ondas! Como conciliar isso? Como podemos aceitar esse comportamento aparentemente contraditório e muito estranho? Só temos uma conclusão plausível:

Os elétrons (ou outras partículas quânticas) não se comportam *nem como partículas clássicas nem como ondas clássicas*, embora, dependendo do experimento que se realize, revelem possuir propriedades de *ambas*.

Esse experimento nos mostra que elétrons e outras partículas quânticas compartilham do caráter ondulatório com o eletromagnetismo clássico, assim como as radiações eletromagnéticas compartilham com as partículas clássicas um caráter corpuscular da forma como Einstein postulou: pacotes de energia para a radiação.

Se partículas quânticas, tais como elétrons e fótons, possuem tanto propriedades corpusculares quanto ondulatórias, o que você pensa a respeito das partículas macroscópicas? Elas não poderiam também apresentar esse comportamento *dual*, ou seja, apresentar ora um comportamento tipicamente corpuscular, ora um tipicamente ondulatório?

Essa questão foi abordada em 1923-1924 pelo físico francês Louis de Broglie quando desenvolvia sua tese de doutoramento em física teórica. Ele, então, propôs que aquilo que chamamos de partículas ou corpos, por serem feitos de matéria, seriam, na verdade, *ondas de matéria*, de maneira que o comportamento dual (isto é, ora de onda, ora de partícula ou corpúsculo), até então apenas associado à radiação eletromagnética, também se aplicaria à matéria. Assim, para a matéria também a energia está relacionada com a frequência de uma onda associada, como no caso da radiação:  $E = h.f$ . De acordo com De Broglie, todos os corpos – elétrons, fótons, átomos, balas de metralhadoras, pessoas, animais ou planetas – possuem um comprimento de onda dado por uma relação que já foi vista no tópico 5:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \text{ onde } p = m.v .$$

Na relação de De Broglie (como é chamada a equação acima), grandezas características de partículas (energia e *momentum*) estão agora associados a grandezas características de ondas (frequência e comprimento de onda), através da constante de Planck ( $h$ ).

Se todos os corpos apresentam, além de propriedades corpusculares, também propriedades ondulatórias, por que não evidenciamos isso no nosso cotidiano? Se isso acontece, não poderíamos dizer, por exemplo, que as balas que saem de uma metralhadora, ao invés de seguirem em linha reta, deveriam apresentar efeitos típicos de difração e de interferência, como padrões de franjas obtidos com feixes de metralhadora.

Os efeitos ondulatórios não são observados em objetos macroscópicos porque os comprimentos de onda desses corpos são muito pequenos, de tal modo que a interferência e a difração são desprezíveis. Já com objetos quânticos, dotados de quantidades de movimento muito menores e que correspondem a comprimentos de onda muito maiores, a difração pode ser apreciável. Da mesma forma, não evidenciamos a natureza ondulatória da propagação da luz em ótica geométrica porque as dimensões dos equipamentos utilizados (como lentes, espelhos ou fendas) são bastante grandes quando comparados com o comprimento de onda da luz.

## 9. A função de onda e a natureza probabilística da teoria quântica

Agora que confirmamos em nossas atividades virtuais o caráter ondulatório das partículas, que confirma a hipótese de De Broglie, vamos verificar qual grandeza física explica a natureza dessas ondas. Como podemos associar uma função ao movimento de uma partícula microscópica? Qual o tipo de descrição que temos para os movimentos em escala microscópica?

As respostas às nossas questões foram objetos de estudo de muitos físicos e, depois de várias tentativas sem nenhum sucesso, verificou-se que nenhuma grandeza física até então conhecida explicava a natureza dessas ondas. Para tentar solucionar essa questão, foi proposta uma função de Onda, a função psi ( $\Psi$ ), da qual tratamos, juntamente com uma interpretação física para a mesma.

O destaque histórico da época foi para dois grandes nomes: Edwin Schrödinger, em 1926, e Max Born, em 1927. Schrödinger destacou-se pela descoberta da equação que leva o seu nome, a qual determina a evolução temporal da função de onda  $\Psi$  associada a objetos microscópicos. Como mencionamos no tópico 2, a entidade matemática que descreve o estado de um sistema quântico é sua função de onda  $\Psi$ , que é uma solução da equação de Schrödinger. A função de onda contém todas as informações físicas a respeito do estado do sistema que descreve, ou seja, podemos identificá-la como o próprio estado do sistema quântico, pois é ela que define completamente o estado do sistema quântico correspondente. Contudo, mesmo fornecendo todas as informações de que se pode dispor sobre o estado quântico do sistema, o número dessas informações é limitado, e essas limitações são inerentes à natureza, não se trata de limitações tecnológicas. Por exemplo, para um elétron, é uma função de posição e do tempo, mas não do *momentum*. Isso tem íntima relação com o princípio da incerteza de Heisenberg (1927), mas, mesmo sendo limitadas, de forma alguma essas informações podem ser consideradas incompletas. A versão de Schrödinger da teoria quântica, através de sua equação de onda, foi denominada *mecânica ondulatória*.

A função de onda  $\Psi$ , entretanto, não é uma função real. Trata-se de uma função *complexa*. Como o próprio nome sugere, uma função complexa por si mesma não pode representar uma grandeza física, mensurável, pois possui uma parte imaginária. A própria  $\Psi$ , portanto, não possui um significado físico direto. Somente grandezas ou observáveis reais possuem um significado físico direto e podem ser medidas através de experimentos e instrumentos. Matematicamente, isso significa que a  $\Psi$  possui uma parte real e uma parte imaginária e que deve ser escrita na forma geral  $a + bi$ , onde  $a$  e  $b$  são funções reais e  $i$  é a unidade imaginária, definida como  $i = \sqrt{-1}$ .

Como a função de onda  $\Psi$  é complexa, usando um pouco de álgebra, depois de multiplicá-la pelo seu complexo conjugado, obtém-se o resultado  $|\Psi|^2$ , que é o *módulo* (valor absoluto) da *função ao quadrado*, que é uma função *real*, não complexa. Essa função, sim, possui um significado físico direto e fornece a probabilidade, por unidade de volume, de se encontrar a partícula na vizinhança de um ponto do espaço e num determinado instante de tempo; por isso, seu significado físico é o de uma *densidade de probabilidade*. Foi o físico alemão Max Born (1882-1970) quem, em 1927, propôs essa interpretação para o módulo ao quadrado da função de onda, razão por que ganhou o prêmio Nobel em 1954.

No caso muito simples de um sistema quântico formado por uma única partícula microscópica, a função de onda depende do parâmetro  $t$  e da posição espacial da partícula, ou seja, de suas três coordenadas espaciais. Contudo, no caso de sistemas quânticos mais complexos, ela deverá ser função de vários observáveis físicos, não apenas da posição de uma só partícula. Entretanto, como comentamos antes, nem todos os observáveis são compatíveis para um dado sistema quântico. Isso significa que, como argumentos da função de onda, só podem comparecer observáveis compatíveis entre si. Portanto, para conhecer a  $\Psi$  e o estado quântico de um sistema é necessário determinar um conjunto mínimo de observáveis *compatíveis* associados ao sistema.

Com sua interpretação, Born conseguiu relacionar a função de onda  $\Psi$  com a probabilidade de localização dos objetos microscópicos. Isso significa que as soluções da equação de Schrödinger não fornecem trajetórias nem descrevem a propagação de algo material (como é o caso das funções de onda que descrevem a propagação de ondas sonoras, ondas mecânicas em geral ou ondas eletromagnéticas), mas somente probabilidades de localização das partículas! (Por meio de seu módulo ao quadrado.) Essa interpretação causou grande desconforto na época, traduzindo-se num problema conceitual e filosófico, pois, dessa maneira, no mundo atômico o determinismo deveria ser abandonado!

Para compreendermos o sentido do determinismo na física clássica e, então, podermos compará-lo com a descrição probabilística, devemos salientar que, na descrição determinista, se conhecermos as *condições iniciais* do movimento de uma partícula macroscópica (ou seja, sua posição inicial e sua velocidade, ou *momentum* linear, inicial), poderemos determinar, a partir das leis de Newton, a descrição do movimento em termos da posição e da velocidade (ou *momentum* linear) em *qualquer* instante. Em outras palavras, conhecendo o “presente” (condições iniciais), poderemos determinar (daí o termo “determinismo”) o “futuro”. Na mecânica quântica isso não é verdadeiro.

De acordo com tal interpretação, a equação de onda de Schrödinger constitui, portanto, um *modelo estatístico*, incapaz de nos fornecer o valor que uma grandeza específica terá num instante específico, ou seja, o modelo quântico é capaz de nos fornecer a probabilidade de cada valor esperado vir a ser observado naquele determinado instante.

O fato de a teoria quântica não fornecer um valor específico, mas apenas relacionar possíveis valores e a probabilidade de ocorrência de cada um, resultou num famoso (e muito respeitoso) “duelo” intelectual entre Einstein e Bohr (Figura 22).



Figura 22 – Einstein e Bohr

Voltando às nossas atividades virtuais e às conclusões a que chegamos, quando as partículas usadas são microscópicas: como podemos verificar a existência da função de onda a partir dos padrões visualizados? Como podemos interpretar o caráter estatístico ou probabilístico nesses padrões?

No experimento de Young da fenda dupla, vimos que uma frente de onda luminosa divide-se ao passar pelas duas fendas. Cada nova frente de onda assim produzida propaga-se, a partir de cada fenda até a tela e, nesta, superpõem-se, interferindo entre si. Quando o experimento de Young é refeito com partículas microscópicas, o que acontece? Podemos dizer que as partículas microscópicas, ao chegarem à fenda dupla, dividem-se? O que faz com que uma partícula microscópica possa interferir consigo mesma?

Da mesma forma que uma onda luminosa divide-se em duas na dupla fenda, são as funções de onda associadas a partículas microscópicas que incidem na dupla fenda (mesmo sendo uma de cada vez! ) que se dividem (não as partículas!), propagando-se depois disso até a tela, onde irão se superpor e interferir. O módulo ao quadrado da função de onda resultante na tela representa a densidade de probabilidade de encontrar uma partícula microscópica do feixe atingindo a tela num dado ponto e num dado instante. Os lugares mais prováveis de a partícula microscópica atingir a tela são aqueles onde é maior o valor do módulo ao quadrado de sua função de onda (franjas claras) e os lugares menos prováveis de encontrar uma partícula microscópica são aqueles onde são menores os valores do módulo ao quadrado da função de onda (franjas escuras), ou seja, não podemos dizer exatamente onde uma partícula microscópica está ou estará, mas, quando temos um número muito grande de partículas, podemos dizer, com muita precisão, o lugar mais provável de onde elas

poderão ser encontradas; também, podemos dizer com certeza o lugar onde as partículas *não estarão* – ou seja, onde a probabilidade é zero.

Como vimos na experiência de Young para partículas microscópicas, o padrão de impactos observado é um padrão característico de interferência, o qual deriva do princípio da superposição linear. Este princípio se refere aos possíveis estados de um sistema quântico. Se dois estados quânticos são possíveis, então também é possível existir a soma dos dois estados, ou seja, um terceiro estado, que é a combinação dos dois primeiros. Isso significa que um objeto quântico pode existir simultaneamente em *mais de um estado*, ao contrário do que é assumido como válido na física clássica. Conseqüentemente, a *superposição de estados* leva a uma *teoria probabilística*.

Essa é uma das conseqüências da descoberta de Born: o fato de a física quântica nos mostrar que a natureza pode ser descrita em termos de probabilidade e que a teoria possui, essencialmente, um caráter probabilístico ou estatístico, não determinístico.

## Obras consultadas

ALVES, R. *Filosofia da Ciência*. 16. ed. São Paulo: Brasiliense, 1992

ARRUDA, S.M.;VILLANI, Alberto. Mudança Conceitual no Ensino da Ciência. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v.11 n.2, ago. 1994.

EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física Quântica: átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Rio de Janeiro: Campus, 1979.

FREIRE JÚNIOR, O.; CARVALHO NETO. *O universo dos quanta: uma breve história da física moderna*. São Paulo: FTD, 1997.

FREIRE JÚNIOR., O. *et al.* Introducing quantum physics in secondary school. In: International History, Philosophy and Science Teaching Conference, 3, 1995, Minneapolis. Proceedings. Minneapolis: University of Minnesota, 1995. v. I. p. 412-419.

GILMORE, R. *Alice no país do quantum*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1998.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Cambio Conceptual: Análisis Crítico y Propuestas a la Luz de la Teoria del Aprendizaje Significativo. *Ciência & Educação*, v.9, n.2, p.301-315, 2003.

GRECA, I. M; HERSCOVITZ, V. E. *Introdução à mecânica quântica*. Porto Alegre: Instituto de Física – UFRGS, 2003. (Textos de apoio ao professor de Física, n.13).

GRECA. I. M., MOREIRA, M. A., HERSCOVITZ, V. Uma proposta para o Ensino de Mecânica Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 23, n. 4, dez. 2001.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de física*. Rio de Janeiro: LTC, 1995. V. 4.

HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Porto Alegre: Bookman, 2002.

KRAGH, H. A sense of history: history of science and the teaching of introductory quantum theory. *Science & Education* p. 1.349-363, 1992.

PESSOA JÚNIOR; O. *Conceitos de física quântica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.

PIAGET, J. *Para onde vai a educação?* 5. ed. Rio de Janeiro: José Olympio, 1973.

\_\_\_\_\_. *Biologia e Conhecimento*. 2. ed. Petrópolis: Editora Vozes, 1996.

\_\_\_\_\_. *Seis estudos de psicologia*. 24. ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2004.

OSTERMANN, F; RICCI, T. *Uma introdução conceitual à mecânica quântica para professores do ensino médio*. Porto Alegre: Instituto de Física – UFRGS, 2003. (Textos de apoio ao professor de Física, n.14).

SOUSA SANTOS, B. de. *Introdução a uma ciência pós-moderna*. Rio de Janeiro: Graal, 1989.

STRATHERN, P. *Bohr e a teoria quântica em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1998.

\_\_\_\_\_. *Einstein e a relatividade em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1998.



## Apêndices

### Apêndice A - Roteiro para atividade virtual - parte I

#### Experimento da fenda dupla

Instruções gerais: Suas observações, descrições, explicações, opiniões ou dúvidas devem ser anotadas na mesma ordem em que as diversas etapas vão sendo realizadas. Não serão aceitas atividades sem desenvolvimentos ou com respostas do tipo “não sei”. O resultado final deverá ser entregue à professora para avaliação.

#### I – Aprendendo a usar o simulador

- O *software* DoppelSpalt (Fenda Dupla) pode ser baixado livremente do endereço [www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html](http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html).
- Depois de instalado (o que é muito fácil de fazer), o programa abrirá uma janela onde você deverá clicar na opção *ignorieren*. Então se abrirá a janela mostrada na Figura 1, onde aparecem figuras dos principais formuladores da mecânica quântica (quem são?). Você poderá saber o nome de cada um deles posicionando o *mouse* em cima da correspondente figura. Ainda nessa tela, escolha a língua que deseja usar e clique OK para entrar no programa (nesse roteiro a língua utilizada foi o Inglês).

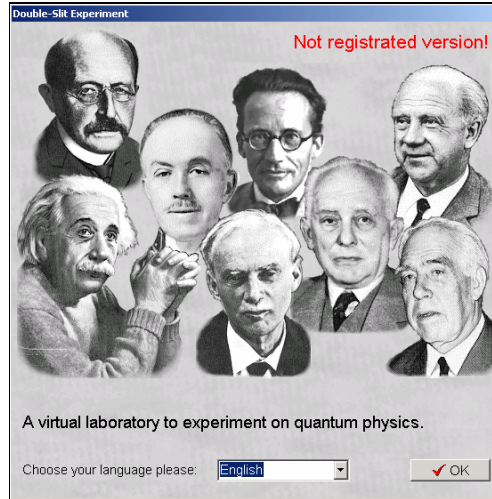


Figura 1 – Tela de abertura do *software*

- Em seguida, aparecerá a tela principal do *software* (Figura 2), onde você poderá clicar em cima dos botões virtuais para escolher a combinação de alternativas e de parâmetros que usará em sua simulação. A Figura 3 mostra os botões da tela principal ampliados.

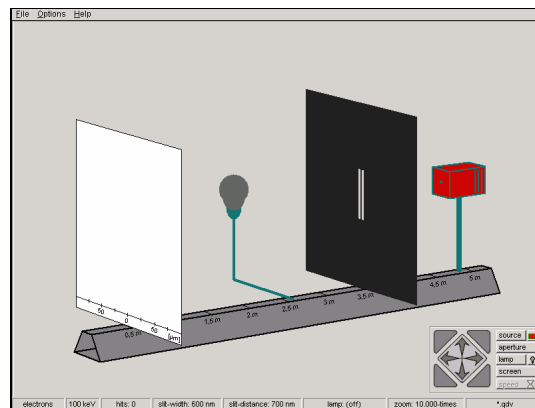


Figura 2 – Tela principal do *software*



Figura 3 – Botões da tela principal

- Clicando com o botão esquerdo do *mouse* em fonte, você poderá escolher qual o tipo de fonte de emissão que usará tais como, feixes de balas de metralhadora, de elétrons, de prótons, de átomos inteiros ou de moléculas inteiras e, também, de fótons – ou seja, luz (radiação

eletromagnética, segundo a física clássica). A grande diferença entre os fótons e as outras partículas citadas é que estas são todas dotadas de massa, enquanto nenhum fóton possui massa.

- Clicando com o botão esquerdo do *mouse* em cima do anteparo da fenda dupla, poderá escolher a distância de separação entre os centros das mesmas e, também, qual será a largura de cada fenda.
- Clicando em cima da tela com o botão esquerdo do *mouse* você poderá “fotografar”, isto é, gravar os padrões obtidos com o simulador, e também obter gráficos e histogramas dos mesmos.
- Para iniciar/parar uma simulação, clique com o botão esquerdo do *mouse* no botão virtual da Figura 4.



Figura 4 – Botão iniciar

- Você pode aumentar a frequência de emissão da fonte – o que simula a passagem mais rápida do tempo – clicando no botão virtual da Figura 5.



Figura 5 – Utilizado para aumentar a frequência de emissão

- Você pode visualizar o arranjo do interferômetro sob diferentes ângulos de perspectiva clicando nas setas contidas no botão virtual (Figura 6). E ainda, clicando nos triângulos exteriores desse botão virtual, nos quatro cantos do quadrado que sua forma define, podem-se adotar quatro perspectivas radicalmente diferentes do arranjo de fenda dupla, cada qual tendo suas vantagens em relação aos demais, mas todos se complementando.



Figura 6 – Utilizado para visualização de diferentes ângulos

## II - Atividades

### Atividade 1

1-1. Clique em *source* (fonte) e escolha a opção *gunballs* (balas de metralhadora). Ligue a fonte e observe o padrão que vai se formando na tela. Para acelerar o transcorrer do tempo, aumente a frequência de emissão da fonte, clicando no botão *speed*. Quando um padrão bem definido e estável estiver disponível na tela, passe a descrever detalhadamente o mesmo, e anote suas observações. Tente se concentrar nos aspectos que, em sua opinião, são os mais relevantes e/ou característicos.

1-2. Feche uma das fendas clicando na opção *aperture* ou sobre o anteparo onde se encontram as fendas. Anote o que você observa na tela, usando um feixe de balas. Há alguma(s) diferença(s) em relação ao que você observou na etapa 1-1?

1-3. Feche a fenda que havia aberto antes e abra a que estava fechada. O que você observa agora? Houve alguma(s) mudança(s) significativa(s)? Registre suas observações sucintamente.

1-4. Abra novamente as duas fendas. Descreva detalhadamente o que você observa na tela e compare com o que observou nos itens anteriores. Verifique os gráficos correspondentes a esse padrão clicando em cima da tela e escolhendo as opções *theo result* (resultado teórico) e *evaluation* (avaliação). Faça um esboço desses gráficos em seu trabalho.

1-5. Que conclusão geral você tira a partir dessas comparações? Tente explicar (a descrição você já fez!) fisicamente o que se observa na tela.

1-6. No experimento virtual que você acabou de realizar, foi usado um feixe de balas de metralhadora, formado, portanto, por partículas clássicas. Quais são as características que você considera mais importantes de uma partícula que obedece às leis da física clássica?

1-7. Vamos comprovar o que você observou nos itens acima com um exemplo numérico. Considere que cada bala da metralhadora tem uma massa de 5mg e que sua velocidade seja de 100 m/s. Utilizando a relação de De Broglie  $\lambda = h/p$  com  $p = m \cdot v$  calcule o comprimento de onda para as balas e, depois de obter a resposta, verifique o porquê as balas não podem apresentar um padrão de difração.

## Atividade 2

2-1. Clique em fonte e escolha a opção *colorspray* (*spray* colorido). Trata-se ou não de um feixe de partículas clássicas? O que você acha? Por quê?

2-2. Ligue a fonte com as duas fendas abertas e observe o padrão que vai se formando na tela. Descreva sucintamente suas características mais relevantes e compare-o com o padrão que foi observado na etapa 1-1 da Atividade 1.

2-3. Feche uma das fendas, clicando na opção *aperture* ou sobre o anteparo. Verifique quais são os gráficos correspondentes a esse padrão, clicando em cima da tela e escolhendo as opções *theo result* e/ou *evaluation*. Registre suas observações do padrão formado na tela, junto com esboços dos gráficos correspondentes ao padrão.

2-4. Em seguida, feche a fenda que havia aberto e abra a que estava fechada. Observe o padrão que surge na tela. Houve alguma alteração significativa em relação ao padrão anterior? Verifique quais são os gráficos correspondentes a esse padrão, clicando em cima da tela e escolhendo a opção *theo result* ou *evaluation*.

2-5. Depois abra novamente as duas, observe o padrão que se forma na tela e verifique quais são os gráficos correspondentes a esse padrão, clicando em cima da tela e escolhendo a opção *theo result* ou *evaluation*. Anote sucintamente o que você observou na tela e compare com o que observou antes, com apenas uma das fendas aberta. Verifique quais são os gráficos correspondentes a esse padrão, clicando em cima da tela e escolhendo a opção *theo result* ou *evaluation*. Que conclusão geral você tira dessas comparações?

2-6. Nas atividades 1 e 2 você observou algum padrão parecido com o que se observa no experimento de Young feito com ondas? Ou seja, você observou algum padrão que seja típico de interferência? Justifique sua resposta. Por que não se observa padrões de interferência nas atividades 1 e 2, se a mecânica quântica descreve toda a matéria? (você pode usar o valor encontrado no item 1.7 para justificar sua resposta).

2-7. Calcule o comprimento de onda de De Broglie para um elétron na velocidade de 4 cm/s e para uma bolinha de aço de 2 g com a mesma velocidade. Imagine que se queira observar a difração e a interferência da bolinha e do elétron e que para isso vamos fazer com que vários deles passem por uma fenda de 1 cm, conseguiremos observar esses fenômenos em ambos os casos? Use a relação de De Broglie para justificar sua resposta



## Apêndice B - Roteiro para atividade virtual – parte II

### Atividade 1

1-1. Clique em fonte e escolha a opção fótons, feche uma das fendas e escolha a largura mínima para a fenda que ficou aberta. Altere também o valor do *zoom* para 1000x. O *software* simula a emissão de um feixe luminoso monofotônico, ou seja, um feixe luminoso de intensidade tão fraca que apenas um fóton incide no anteparo da fenda dupla de cada vez (todos dotados de mesma energia, de maneira que o feixe também é monoenergético). Ligue a fonte e observe a chegada de cada fóton na tela. Observe os padrões formados, depois que um grande número de fótons já atingiu a tela, quando apenas uma das fendas fica aberta, e, depois, a outra (pode usar a opção *Speed* para aumentar a frequência de emissão dos fótons e simular o transcorrer mais rápido do tempo). Descreva o que você observou.

1-2. O padrão que você observa agora é o mesmo que aquele observado nas atividades em que trabalhamos com partículas macroscópicas, quando tínhamos apenas uma fenda aberta? Por quê? Em sua opinião, quais são as diferenças mais notáveis e relevantes?

1-3. Repita o experimento agora com as duas fendas abertas (com a mesma largura de antes). Se quiser poderá usar os diferentes *zoom* e clicar nas opções resultado teórico e avaliação. Procure descrever como acontece a chegada dos fótons no anteparo. E agora, o padrão que você observa é o mesmo que aquele observado nas atividades em que trabalhamos com partículas macroscópicas, quando também tínhamos as duas fendas abertas? Tente dar explicação para o que você observa na tela, tendo como base o que aprendeu sobre interferência de ondas.

1-4. A partir do que observa na tela, após um padrão bem definido ter surgido na mesma, de que maneira você identifica o comportamento corpuscular e o comportamento ondulatório dos fótons?

1-5. É comum ler-se que uma característica fundamental da mecânica quântica é a dualidade onda-partícula. Analise essa afirmativa com base no que você observou na atividade anterior.

1-6. Que conclusão geral você tira dessa atividade? Responda, comparando com a conclusão geral que você tirou das atividades realizadas com partículas macroscópicas.

### Atividade 2

Os fenômenos da difração e da interferência não podem realmente ser separados de forma completa. Franjas de difração são originadas da interferência entre raios de luz provenientes de lugares diferentes de uma mesma fenda; franjas de interferência são originadas da interferência entre

os raios luminosos provenientes de fendas diferentes. Quando duas fendas estão abertas, esses dois tipos de franjas ocorrem simultaneamente e não podem ser separados de forma completa. Vamos confirmar essa afirmação nas próximas atividades com o *software*.

2-1. Escolha a opção elétrons e mantenha somente a fenda 1 aberta na largura de fenda 100nm e energia de cada elétron igual a 100KeV, o que corresponde (pela relação de De Broglie) a um comprimento de onda de 4pm ( $1 \text{ p} = 10^{-12} \text{ m}$ ). para os elétrons do feixe. Quando estiver se formando um padrão na tela, pare e observe. Escreva o que você observou. Grave este padrão como a Foto 1, clicando no anteparo da tela e escolhendo a opção Cinta de Fotos (espanhol) ou *Photos* (inglês).

2.2. Agora abra as duas fendas e mantenha os mesmos valores do item anterior, verifique a distância entre os centros das fendas que deve ser 700nm. Clique no botão *reset* e inicie. O padrão que você observou é o mesmo que foi observado na atividade 2.1? Justifique sua resposta. Grave este padrão como a Foto 2 da cinta de fotos.

2.3. Agora mude apenas a distância entre os centros das fendas (clicando sobre o anteparo das mesmas), de 700 nm para 2000 nm. Quando a distância das fendas aumenta, o que acontece com o padrão de franjas observado? Grave este padrão como a Foto 3 da cinta de fotos.

2.4. Ainda com as duas fendas abertas e, com a largura das fendas 100nm diminua a distância entre as fendas para 100nm. O que acontece com o padrão apresentado na tela? Esse padrão não poderá ser gravado, mas ele ficará logo abaixo dos outros 3 que já estão gravados, então, compare o novo padrão de franjas obtido com aqueles das Fotos 1,2 e 3.

2-5. Agora mantenha apenas a fenda 1 aberta, variando a largura da mesma para 600nm. Explique o padrão que você está visualizando na tela.

### Atividade 3 - Exercício Interativo

3.1. Clicando em fonte, vamos escolher elétrons com energia de 1 kev e *zoom* 1000 x. Elétrons com esse valor de energia cinética têm velocidades não-relativísticas, de modo que seu *momentum* linear (quantidade de movimento) é dado pela definição newtoniana, ou seja,  $p = m.v$ . O *software* nos informa também que elétrons com essa energia têm comprimento de onda  $\lambda = 39 \text{ pm}$ . Tente obter este valor de comprimento de onda, considerando que se tratem de elétrons não-relativísticos. Ou seja, considere que o *momentum* linear de cada elétron é dada pela relação clássica,  $p = m.v$  e que a energia cinética é dada pela relação  $E = \frac{1}{2}m.v^2$ .

Dados: a massa do elétron é  $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  e  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ .



3-2. Vamos checar a validade da fórmula da condição de máximos de interferência ( $d \cdot \text{sen } \theta_n = n \cdot \lambda$ , onde  $n = 0, 1, 2, \dots$ ). Para isso, vamos usar os dados que o *software* nos fornece. Depois de decorrido algum tempo, pare a simulação que estava fazendo anteriormente e, anote os seguintes valores:  $D$  (distância entre a tela e o anteparo onde estão as fendas),  $d$  (distância entre os centros das fendas) e  $Y_n$  (distância do centro da tela ao  $n$ -ésimo máximo lateral; o máximo central corresponde a  $n = 0$ ). Nossa sugestão é que seja usado o segundo máximo lateral, correspondente a  $n = 2$ . Para tal, use a escala do *software*. A Figura 1 ilustra o ângulo  $\theta_2$ . Como o ângulo usado é muito pequeno comparado a 1 radiano, (que é equivalente a aproximadamente  $57^\circ$ ), pode-se usar a seguinte aproximação: substituir o *seno* pela tangente de  $\theta_n$ , obtendo:

$$d \cdot \text{sen } \theta_n \cong d \cdot \text{tg } \theta_n = n \cdot \lambda.$$

Além disso, da Figura 1, obtemos que  $\text{tg } \theta_n = Y_n / D$ . Em seguida, isole o valor de  $Y_n$  e compare com o valor correspondente determinado a partir da tela do *software*.

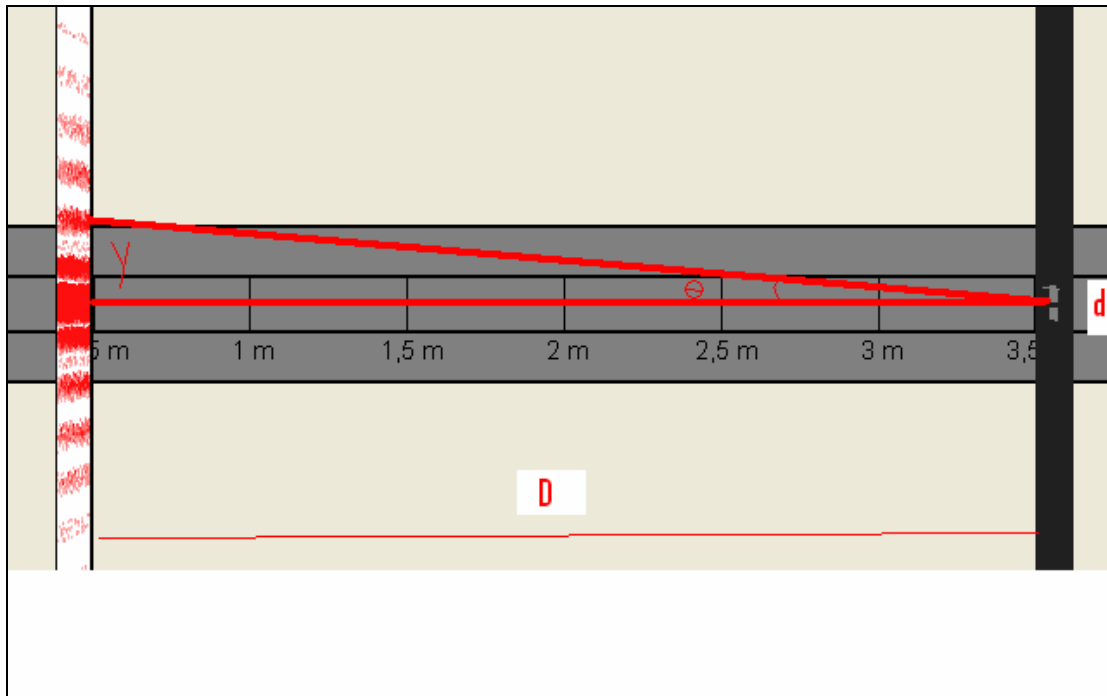


Figura 1 – Ilustra o ângulo  $\theta_2$  que localiza o segundo máximo lateral ( $n = 2$ ). Note também que o suporte do arranjo do simulador possui uma escala facilmente utilizável pelo usuário.

Qual o valor encontrado para a distância do  $n$ -ésimo máximo lateral e o ponto central da tela ( $Y_n$ )? Compare esse valor com aquele que se pode ler na escala da tela virtual do *software*, basta clicar com o *mouse* direito em cima do segundo máximo.

Sugestão para parâmetros a serem usados no exercício interativo:

$$d = 700\text{nm} \quad D = 3\text{m} \quad n = 2 \quad \lambda = 39\text{pm}$$

3-3. Na atividade anterior, fizemos uma aproximação para os valores de seno, substituindo-os pelos das tangentes dos ângulos correspondentes. Temos como provar que esses valores são realmente muito próximos, e também como conferir se o ângulo  $\theta$  realmente tem um valor bastante pequeno. Para isso, use os valores fornecidos pelo *software* e calcule primeiramente o valor de  $\theta$  usando a condição de máximos de interferência. Em seguida, use a fórmula da tangente, determine o valor do  $\theta$  e compare os dois resultados encontrados. Você saberia explicar, geometricamente, o porquê o valor de  $\theta$  é tão pequeno?

## Apêndice C - Lista de exercícios de revisão

1. Uma das características importantes de uma onda eletromagnética é a polarização. Em que consiste a polarização da luz?
2. Explique sucintamente o fenômeno da difração de ondas, considerando que a fenda ou a fonte de luz não seja puntiforme.
3. Baseando-se na relação de De Broglie, explique por que não observamos as características de difração (um padrão de franjas claras escuras) com feixes de balas de metralhadora, cada qual com 10 mg de massa e velocidade de 100m/s?
4. A interferência luminosa representa uma constatação de que a luz possui características típicas de um fenômeno ondulatório. Baseado nessa afirmação, explique o fenômeno da interferência.
5. Faça um esboço dos padrões gráficos de interferência e de difração e explique a(s) diferença(s) entre um padrão de franjas de difração e um de franjas de interferência.
6. Não podemos visualizar átomos através de fotografias obtidas com a luz. Por quê? De que forma, então, são obtidas as imagens de átomos que vemos reproduzidas em muitos livros?
7. Em sua opinião, quais as diferenças mais relevantes entre objetos clássicos e objetos quânticos? Dê exemplos que justifiquem sua resposta
8. A Energia de um átomo não pode assumir qualquer valor. Essa afirmação está intimamente ligada ao fato de que a energia, no caso de um sistema ligado, não é contínua, mas sim, quantizada. Explique o que significa dizer que a energia é quantizada, citando também alguns exemplos de grandezas quantizadas.
9. Na questão anterior você explicou o significado do termo “quantizada” aplicado à energia de um átomo. O que significa esse termo quando aplicado à luz? Justifique sua resposta usando o modelo proposto por Einstein para a luz.
10. Em que consistia o problema do espectro de emissão do corpo negro? Qual foi a hipótese de Planck para resolver o problema?

11. Einstein usou a hipótese de Planck para explicar convincentemente o efeito fotoelétrico. Esse efeito comprovava conclusivamente que tipo de comportamento por parte da luz?
12. Na famosa experiência de Young da fenda dupla, a fonte utilizada emitia luz (aproximadamente) monocromática. Por quê? Qual a conclusão a que Young chegou depois de realizar o experimento?
13. A experiência de Young da fenda dupla foi virtualmente refeita em sala de aula, usando-se como fonte um feixe de elétrons monoenergéticos. A conclusão obtida da experiência foi a mesma que Young obteve?
14. Uma característica fundamental da mecânica quântica é a chamada dualidade onda-partícula. Analise essa noção através do que você concluiu no exercício anterior.
15. A luz se propaga de um lugar para outro como uma onda ou como uma partícula?
16. A luz interage com um detector qualquer (tela, sensor luminoso, célula fotoelétrica, célula da retina etc.) como se fosse uma onda ou uma partícula?
17. Em sua opinião, quais são as diferenças mais relevantes entre física clássica e física quântica?
18. As Leis da mecânica clássica são válidas para todos os corpos, sejam eles microscópicos ou macroscópicos? Explique sua resposta, citando exemplos.
19. A analogia entre os elétrons de um átomo e os planetas do sistema solar é muito imperfeita. Cite pelo menos uma razão para justificar essa afirmação.
20. O que é um fóton? Qual sua massa? Qual a sua velocidade de propagação no vácuo?
21. O que é o *spin* de um elétron? Tente explicar com suas próprias palavras do que se trata.
22. Qual a diferença mais relevante entre elétrons e fótons?

## **Textos de apoio ao professor de física**

n° 1 Um Programa de Atividades sobre Tópicos de Física para a 8ª Série do 1º Grau.

Axt., R., Steffani, M. H. e Guimarães, V. H., 1990.

n° 2 Radioatividade.

Brückmann, M. E. e Fries, S. G., 1991.

n° 3 Mapas Conceituais no Ensino de Física

Moreira, M. A., 1992.

n° 4 Um Laboratório de Física para Ensino Médio

Axt, R e Brückmann, M. E., 1993.

n° 5 Física para Secundaristas – Fenômenos Mecânicos e Térmicos.

Axt, R. e Alves, V. M., 1994.

n° 6 Física para Secundaristas – Eletromagnetismo e Óptica.

Axt, R e Alves, V. M., 1995.

n° 7 Diagramas V no Ensino de Física.

Moreira, M. A., 1996.

n° 8 Supercondutividade – Uma proposta de inserção no Ensino Médio.

Ostermann, F., Ferreira, L. M. e Cavalcanti, C. H., 1997.

n° 9 Energia, entropia e irreversibilidade.

Moreira, M. A.. 1998.

n°10 Teorias construtivistas.

Moreira, M. A., e Ostermann, F., 1999.

n°11 Teoria da relatividade especial.

Ricci, T. F., 2000.

n°12 Partículas elementares e interações fundamentais.

Ostermann, F., 2001.

nº13 Introdução à Mecânica Quântica. Notas de curso.

Greca, I. M. e Herscovitz, V. E., 2002.

nº14 Uma introdução conceitual à Mecânica Quântica para professores do ensino médio.

Ricci, T. F. e Ostermann, F., 2003.

nº15 O quarto estado da matéria.

Ziebell, L. F. 2004.

v.16, n.1 Atividades experimentais de Física para crianças de 7 a 10 anos de idade.

Schroeder, C., 2005.

v.16, n.2 O microcomputador como instrumento de medida no laboratório didático de Física.

Silva, L. F. da e Veit, E. A., 2005

v.16 n.3 Epistemologias do Século XX

Massoni, N. T., 2005.

v.16 n.4 Atividades de Ciências para a 8ª série do Ensino Fundamental: Astronomia, luz e cores

Mees, A. A.; Andrade, C. T. J. de e Steffani, M. H., 2005.

v.16 n.5 Relatividade: a passagem do enfoque galileano para a visão de Einstein

Wolff, J. F. de S. e Mors, P. M., 2005.

v.17 n.1 Circuitos elétricos: novas e velhas tecnologias como facilitadoras de uma aprendizagem significativa no nível médio . Moraes, M. B. dos S. A., Ribeiro-Teixeira, R. M.

v.17 n.2 A estratégia dos projetos didáticos no ensino de física na educação de jovens e adultos (EJA)

Espindola, K e Moreira, M. A.

v.17 n.3 Introdução ao conceito de energia

Bucussi, Av.

v.17 n.4 Roteiros para atividades experimentais de Física para crianças de seis anos de idade

Grala, R. M.

v.17 n.5 Inserção de mecânica quântica no ensino médio: uma proposta para professores.

Webber, M.C.M.