



## SEQUÊNCIA DIDÁTICA SOBRE MECÂNICA QUÂNTICA PARA O ENSINO MÉDIO

Eduardo Alexandrino Ávila

Produto Educacional da Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF).

Orientador:  
Dr. Luciano Gonsalves Costa

Maringá, PR  
Dezembro de 2016

## Apresentação

Caro(a) professor(a),

Este Apêndice reproduz o Produto Educacional da pesquisa desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Estadual de Maringá (UEM), no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF). Este produto é uma sequência didática sobre tópicos de Mecânica Quântica aplicada no 3º ano do Ensino Médio.

Todas as atividades destinadas aos estudantes acompanham esse material e os recursos computacionais utilizados na sistematização do conteúdo estão disponíveis na internet.

## Sumário

Os Desafios na Elaboração da Sequência Didática de Mecânica Quântica para o Ensino Médio .....	29
Objetivo Geral .....	30
Objetivos Específicos .....	30
Difusão do curso .....	30
Roteiro da Sequência Didática .....	30
Planejamento das aulas e avaliações .....	56
Conclusão .....	58

## **Os Desafios na Elaboração da Sequência Didática de Mecânica Quântica para o Ensino Médio**

A escolha mais óbvia da sequência dos conteúdos, seria a histórica. Tentamos fazer isso, sem perder o “fio da meada”, tentando uma sequência que não fizesse o aluno se perder. Caso a sequência histórica e lógica entrasse em conflito, buscaríamos inserir algumas revisões resumidas para ajudar o aluno. Observamos que a maioria dos alunos estudava somente em véspera de prova (DOS REIS SILVA, 2013).

Nosso desafio foi conciliar uma formação em Mecânica Quântica (provavelmente a primeira e a última do público alvo) que fosse ao mesmo tempo abrangente e resumida, com noções da importância da matemática e simples; visualmente atraente e que não se perdesse na superficialidade.

Os conteúdos norteadores de Mecânica Quântica foram:

- i. Radiação de Corpo Negro e a Equação de Planck;
- ii. A Dualidade onda-partícula e o Efeito Fotoelétrico;
- iii. Movimento Browniano e a Estrutura da Matéria;
- iv. Postulados de Borh;
- v. Hipótese de De Broglie;
- vi. Princípio da Incerteza de Heisenberg.

Elaboramos uma sequência do que julgamos ser essencial. Ao observar outros livros usados no Ensino Médio, comparando-os com os famosos livros de Física do Ensino Médio de Alberto Gaspar e Maurício Pietrocola, mas devido à falta de tempo foi necessário não abordar todos os conteúdos, como, por exemplo: antimatéria, Física de Partículas, spin do elétron, princípio de exclusão e as forças fundamentais. Em relação a outros autores citados por Ostermann e Moreira (2000), temos: laser, radioatividade, supercondutores, semicondutores, fissão e fusão nuclear.

Pontuamos que estes autores costumam trabalhar Mecânica Quântica e Relatividade em um mesmo capítulo, e trabalham a Física Moderna de uma maneira geral. Não foi nosso objetivo “misturar” os dois conteúdos, acreditamos que mesmo historicamente contemporâneos esses assuntos devem ser trabalhados separadamente.

Destacamos que esse curso foi pensado para ter a duração de um bimestre usual da rede pública, que costuma abranger 20 aulas (2 aulas por semana), sem contar com

algum imprevisto ou com feriados, semanas de jogos, palestras.... É normal acontecer de um professor com a mesma carga horária dar mais aula em uma mesma turma que outro professor. O número de aulas do primeiro bimestre também costuma ser maior.

## **Objetivo Geral**

Promover uma visão geral e introdutória sobre a Mecânica Quântica e suas aplicações em ferramentas tecnológicas.

## **Objetivos Específicos**

Ao final do curso, esperamos que o aluno desenvolva uma nova interpretação sobre:

- i. Explicações para o comportamento da energia;
- ii. A falibilidade da ciência em propor ideias absolutas para explicar a natureza;
- iii. Questões aparentemente ilógicas da Mecânica Quântica;
- iv. Tenha contato com um conhecimento desafiador, mas que pode ser abordado com uma linguagem mais acessível.

## **Difusão do curso**

A exposição desse curso também pode ser encontrada no link:  
<http://mecquant.blogspot.com.br>.

## **Roteiro da Sequência Didática**

### **Atividade 1: Pré-teste**

A atividade se encontra no Anexo B.

### **Atividade 2: Discussão**

“De onde e para que surgiu a Mecânica Quântica?”. O professor dialoga com os alunos para verificar quais as suas concepções sobre o átomo e qual a necessidade de explicar o seu comportamento.

Sugestão de perguntas:

- O que vem à cabeça de vocês quando se fala em “Mecânica Quântica”?
- O que é o átomo?
- Como se comporta o elétron?
- O que o comportamento dos elétrons pode criar?
- Quais tecnologias do dia-a-dia vocês acreditam que estejam relacionadas com a Mecânica Quântica?
- Vocês se consideram conhecedores da tecnologia que manuseiam?
- Gostariam de conhecer mais sobre o mundo quântico?

### **Atividade 3:** Pesquisa de conceitos básicos da Física

Os alunos terão à disposição um dicionário e/ou um computador com acesso à internet, que os ajudarão a enriquecer o vocabulário e refletir entre os diferentes usos de um mesmo conceito, dando oportunidade do avanço independente do aluno em buscar o conhecimento e rever seus conhecimentos.

Lista de conceitos propostos para serem pesquisados pelos alunos

- Massa (m);
- Velocidade (v);
- Momento (p);
- Período (T);
- Frequência (f);
- Comprimento de onda ( $\lambda$ );
- Energia (E);
- Temperatura (t).

### **Atividade 4:** Tabela de grandezas de medidas

Os alunos constroem uma tabela com grandezas, unidades padrões e símbolos para as medidas.

Tabela 1. Grandezas, unidades padrões e símbolos para as medidas que os alunos devem preencher<sup>12</sup>

Grandezas de medida	Símbolo	Unidades de medida	Símbolo
Massa	m	Quilograma	kg
Velocidade	v	metro por segundo	m/s
Momento	p	quilograma vezes metro por segundo	kg.m /s
Período	T	segundo	s
Frequência	f	hertz	Hz
Comprimento de onda	$\lambda$	metros	m
Energia	E	joule	j
Temperatura	t	kelvin	K

**Atividade 5:** Relações matemáticas de alguns conceitos da ondulatória

Usando símbolos para os conceitos, os alunos pesquisam relações matemáticas entre:

- Momento, massa e velocidade;
- Período e frequência;
- Velocidade, comprimento de onda e frequência.

**Atividade 6:** Pesquisa de conceitos da Mecânica Quântica

Os alunos terão à disposição um dicionário e/ou um computador com acesso à internet, que os ajudarão a enriquecer o vocabulário e refletir entre os diferentes usos de um mesmo conceito, dando oportunidade do avanço independente do aluno em buscar o conhecimento e rever seus conhecimentos.

Lista de conceitos relacionados com a Mecânica Quântica para serem pesquisados pelos alunos:

---

<sup>12</sup>Fonte: elaborada pelo autor.

- Voltagem;
- Fóton;
- Ondas eletromagnéticas;
- Radiação;
- Luz;
- Difração;
- Interferência;
- Átomo;
- Elétron;
- Contínuo;
- Quantizado;
- Partícula;
- Infravermelho;
- Fotoelétrico;
- Quântico;
- Contínuo;
- Aleatório;
- Emissão;
- Absorção.

#### **Atividade 7:** Relatórios de simulações computacionais

Usando computadores, os alunos terão a oportunidade de realizar simulações de experimentos virtuais de Mecânica Quântica.

As simulações são na maioria aplicações em java<sup>13</sup>, produzidas pela Universidade do Colorado em Boulder – USA – Projeto *PhET*<sup>14</sup>. (*Physics EducationTechnology*). As simulações são de livre distribuição.

Link para download das simulações em java usadas no curso:

<https://sites.google.com/site/galileueinstein/home/Simula%C3%A7%C3%B5es%20em%20java.rar?attredirects=0&d=1>

Comentários sobre as simulações utilizadas:

---

<sup>13</sup>Disponíveis no endereço eletrônico: <https://phet.colorado.edu>.

<sup>14</sup> O nome PhET é marca registrada, Copyright © 2016 The Regents of the University of Colorado. All rights reserved



- Espectro do corpo negro: A frequência da radiação emitida depende da temperatura do corpo negro;
- Interferência Quântica: A luz possui um comportamento ondulatório, quando se realiza um experimento em que ela possa se interferir;
- Moléculas e Luz: Ondas eletromagnéticas são capazes de fazer com que moléculas se agitem e emitam outras ondas;
- Lâmpadas de descarga: Uma corrente elétrica é capaz de excitar os átomos de um gás, fazendo-o emitir luz, essa luz ocorre a partir de uma determinada voltagem;
- Fotoelétrico: A luz é capaz de criar a emissão de elétrons num metal, essa emissão não ocorre para qualquer cor (frequência) de luz.

**Atividade 8:** Aulas expositivas sobre Mecânica Quântica

Aulas montadas em slides e com uso de vídeos online.

Links dos vídeos usados entre os slides estão hospedados na internet em um site de hospedagem de vídeos gratuitos:

Vídeo 1: <https://youtu.be/4t1C6T9LNCY>

Vídeo 2: <https://youtu.be/fdQaJQaMm6k>

Vídeo 3: <https://youtu.be/dEwRG9EpWzY>

Vídeo 4: <https://youtu.be/ovZkFMuxZNC>

Vídeo 5: <https://youtu.be/ZXyxnxnWAAQ>

Vídeo 6: <https://youtu.be/2Vdjin734gE>

Vídeo 7: <https://youtu.be/pNg-R7k3Kh0>

Vídeo 8: [https://youtu.be/63gBrFI\\_hM](https://youtu.be/63gBrFI_hM)


Vídeo 9: <https://youtu.be/UTdy1Yp1h5A>

Vídeo 10: <https://youtu.be/wIEhSIt1oEI>

Vídeo 11: <https://youtu.be/2NuLa29WKnI>

Cada Slide escuro e sem texto a seguir é o espaço destinado a cada um dos vídeos “linkados”, a identificação de cada vídeo também se encontra em cada slide anterior:

### Mecânica Quântica



Portrait of the American Institute of Physics
  
FIG. 37-1 Einstein posando para uma fotografia quando estava começando a ficar conhecido. (Corbis Images)

### Problema que antecedeu a Mecânica Quântica:

**-Radiação de Corpo Negro**



Infravermelho



Vídeo: infrared camera for building and home inspection



### Energia e frequência de uma onda



### Energia interna de um Gás ideal monoatômico

$$U = \frac{3}{2} \cdot n \cdot R \cdot T$$

Para a Física antes de 1900, a energia média de uma onda eletromagnética à temperatura **T** seria simplesmente dada por **E = kT**.

Figura 1. Slides de 1 a 6: apresentação do problema inicial da Mecânica Quântica, a radiação de corpo negro e as ideias clássicas sobre a energia<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

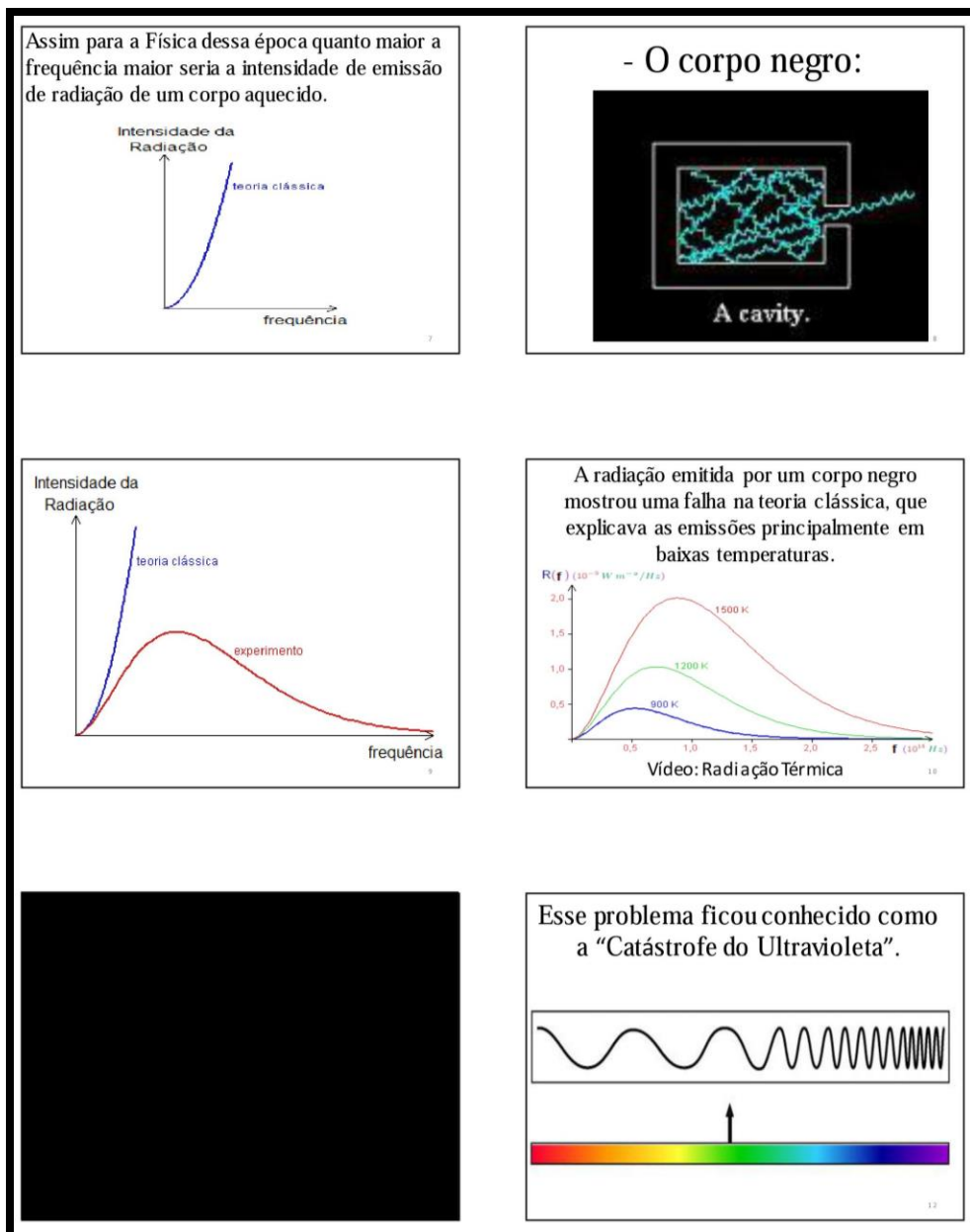


Figura 2. Slides de 7 a 12: visões da teoria clássica e do experimento sobre a radiação de corpo negro, como resultado da “Catástrofe do Ultravioleta”<sup>16</sup>.

<sup>16</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

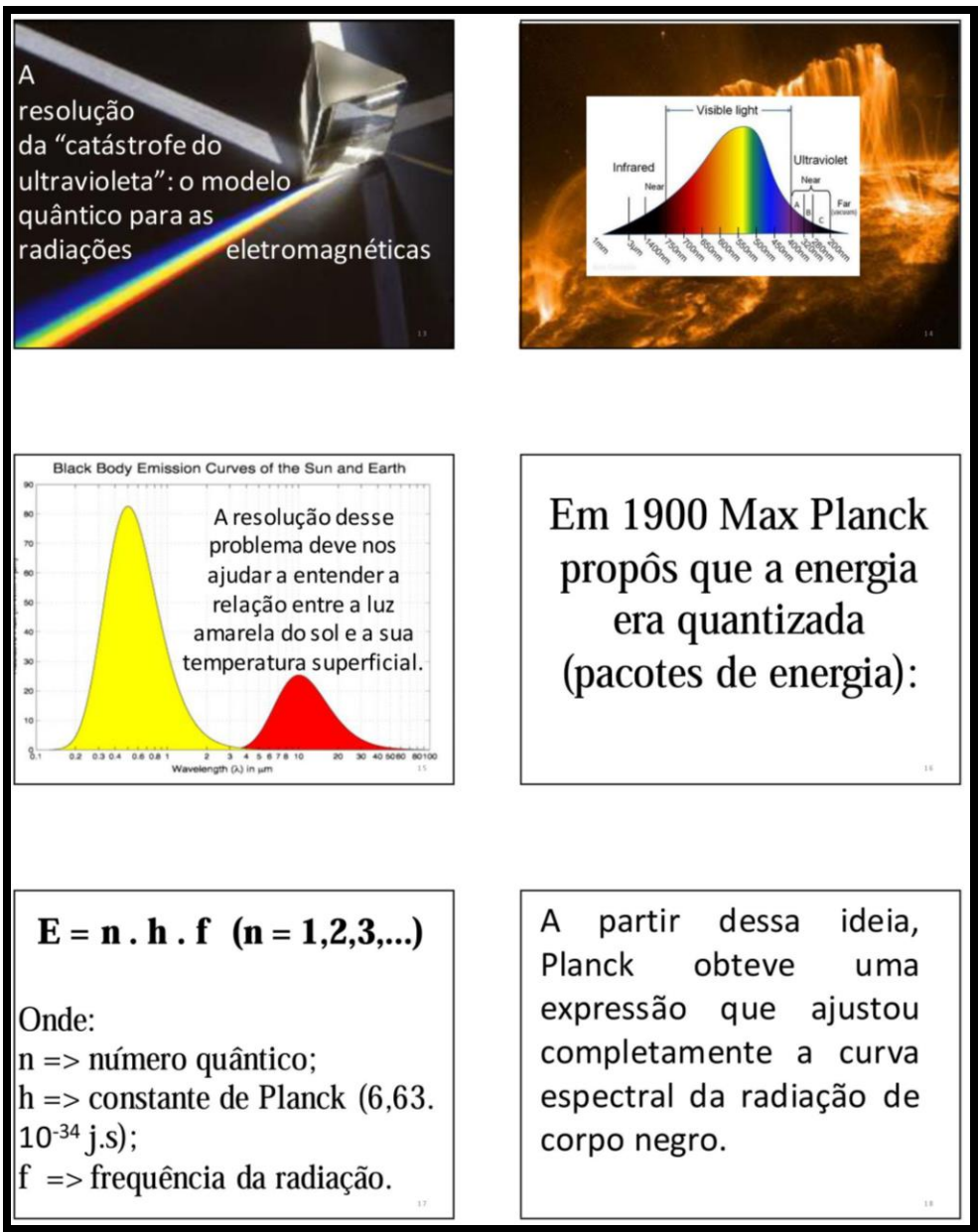


Figura 3. Slides de 13 a 18: a importância de se entender a radiação do corpo negro e a ideia da energia quantizada que poderia resolver esse problema<sup>17</sup>.

<sup>17</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

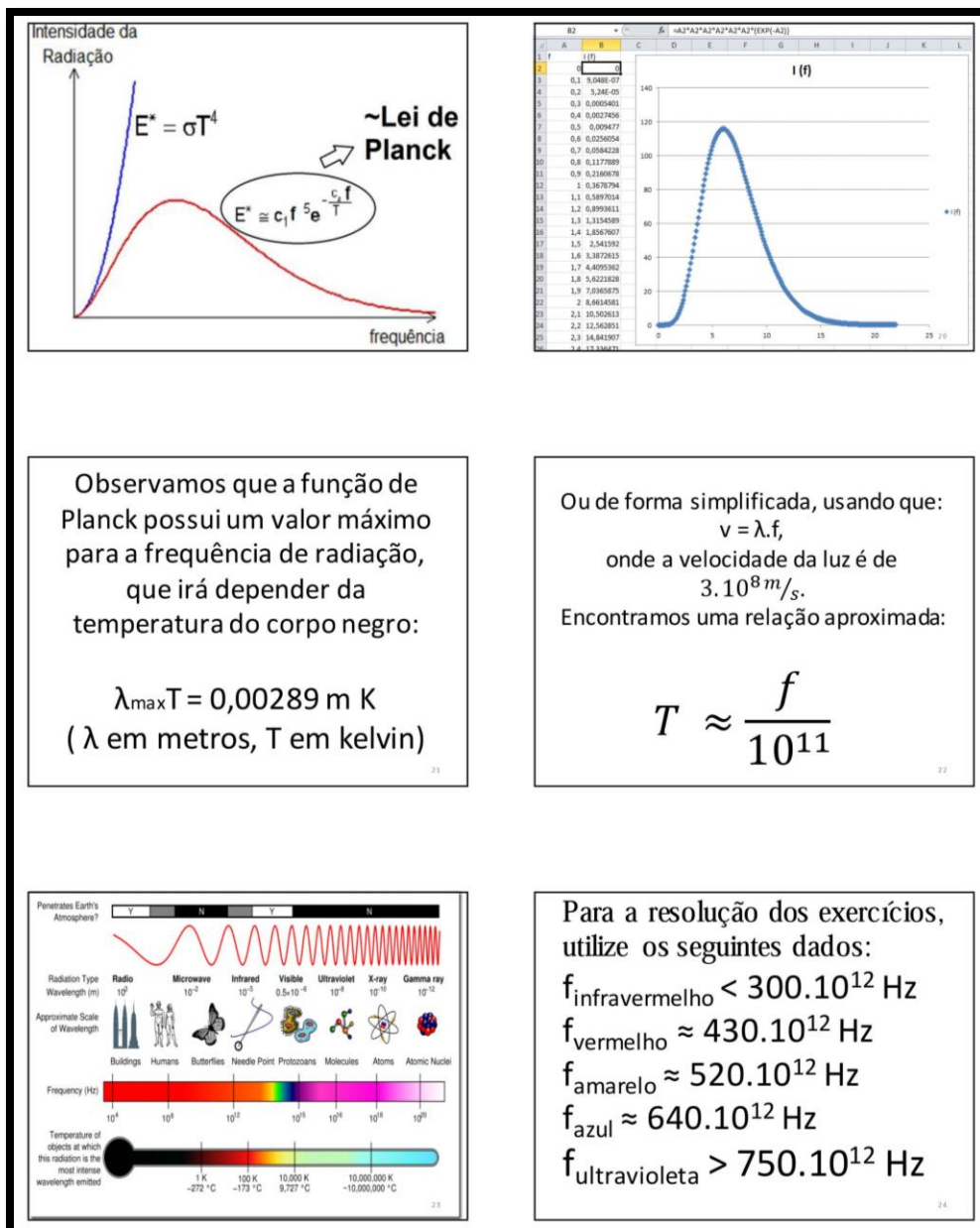


Figura 4. Slides de 19 a 24: a proposta da energia quantizada se ajusta ao experimento e também permite perceber que para cada frequência máxima de radiação deve existir uma temperatura associada<sup>18</sup>.

<sup>18</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

1. Qual deve ser a temperatura aproximada do sol (superfície)?


2. Qual deve ser o tipo de radiação emitida pelo corpo humano?

25

3. Como ocorre a emissão de luz ao nível atômico?

4. Qual foi o “constrangimento” que a teoria da energia quantizada daria à física clássica?

26



**Como os Átomos Emitem Luz**

1. Uma colisão com uma partícula em movimento excita o átomo.  
 2. Isso faz com que o elétron passe para um nível mais alto de energia.  
 3. O elétron retorna ao seu nível de energia inicial, liberando a energia excedente na forma de um fóton de luz.

©2002 HowStuffWorks

Fóton de Luz

Vídeo: Lâmpada s Fluorescentes

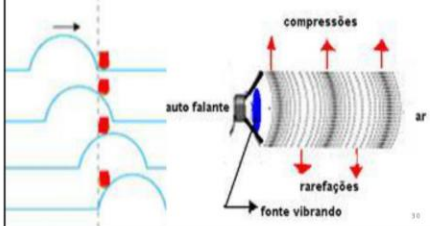
27

Refletindo

A Energia se propaga através de ondas (luz, som...), se a energia for quantizada então ela se comporta como uma partícula?

28

Mas até onde sabemos ondas não transportam matéria.



compressões  
rarefações  
auto falante  
fonte vibrando  
ar

29

Figura 5. Slides de 25 a 30: exercícios propostos para a energia quantizada e a reflexão de como poderia a energia se comportar como partícula<sup>19</sup>.

<sup>19</sup> Fonte: elaborado pelo autor.



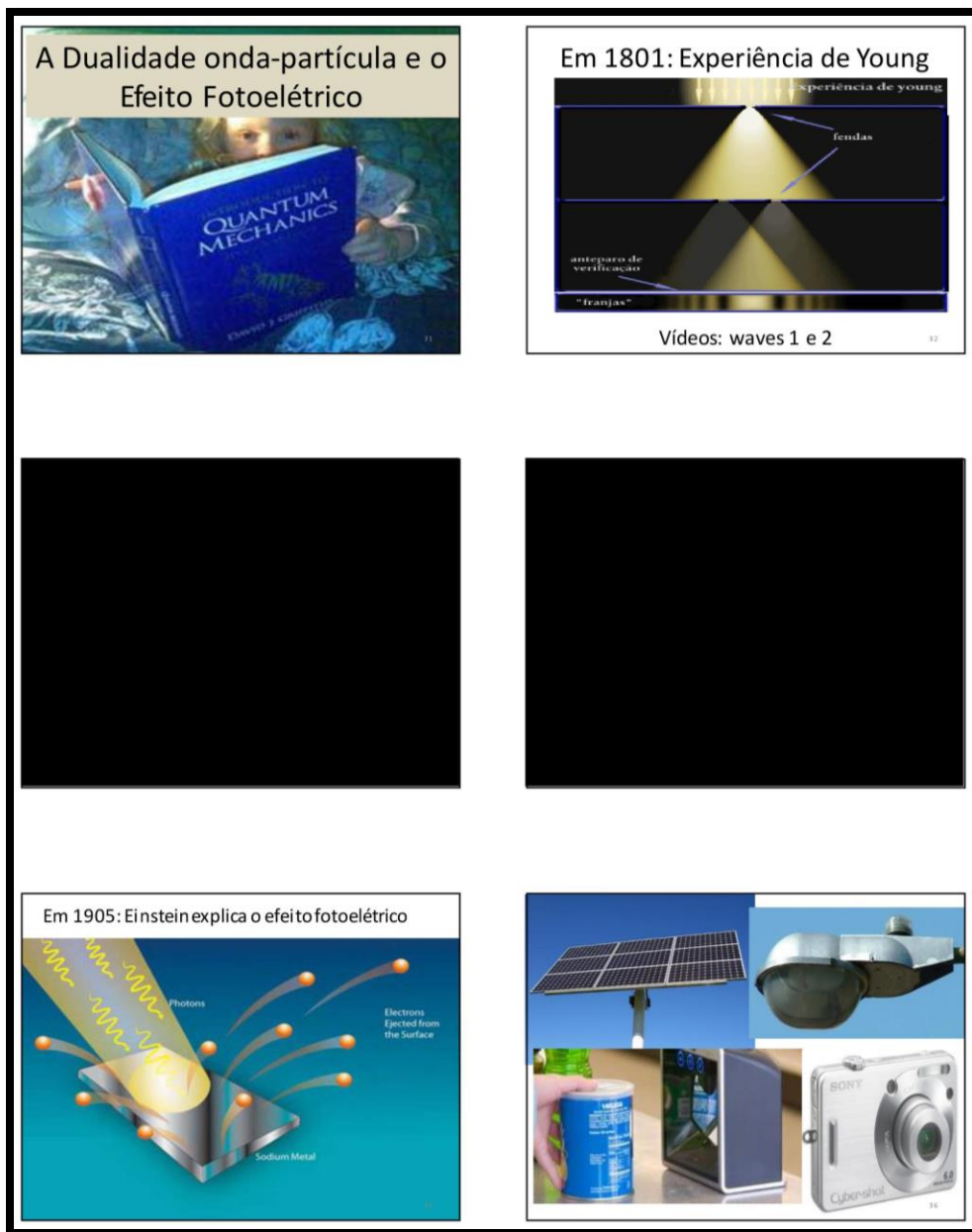


Figura 6. Slides de 25 a 30: apresentação ao comportamento dual da energia, citando dois exemplos de comportamentos, a fenda dupla e o efeito fotoelétrico<sup>20</sup>.

<sup>20</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

O efeito não acontece para qualquer frequência de radiação

Apenas a partir de certa frequência existe emissão de elétrons, não importando a intensidade de energia emitida.

Essa energia mínima para remover o elétron (energia de corte) é chamada de função trabalho:

$$W = h \cdot f_0$$

onde  $f_0$  é a frequência de corte, que depende de cada material.

Assim, a energia do fóton será convertida em:

$$E_{\text{fóton}} = W + E_{\text{cinética do elétron}}$$

Exercícios

5. (ITA) Incide-se luz num material fotoelétrico e não se observa a emissão de elétrons. Para que ocorra a emissão de elétrons do mesmo material basta que aumente(m):

- a intensidade de luz
- a frequência da luz
- o comprimento de onda da luz
- a intensidade e a frequência da luz
- a intensidade e o comprimento de onda da luz

Figura 7. Slides de 31 a 36: verificação de que o efeito fotoelétrico deve ser entendido com a quantização da energia, devido a frequência de corte<sup>21</sup>.

<sup>21</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

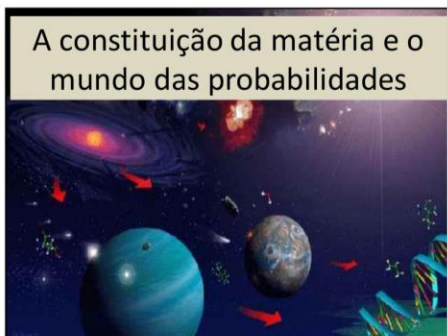


6. Qual é o valor da razão entre a função trabalho e a frequência de corte do efeito fotoelétrico?

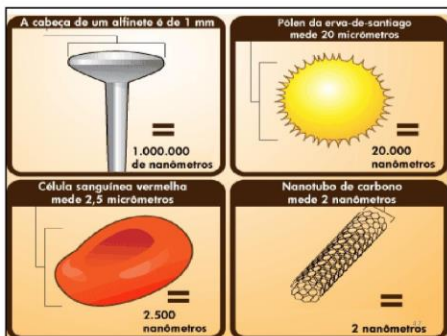
7. Para uma frequência fixa de luz incidente num metal, observou-se que não importa quão intensa fosse a radiação incidente, a energia cinética dos elétrons emitidos era sempre a mesma. Qual a medida deveria variar com o aumento da intensidade de radiação?

8. Dois feixes de raios X, I e II, incidem sobre uma placa de chumbo e são totalmente absorvidos por ela. O comprimento de onda do feixe II é três vezes maior que o comprimento de onda do feixe I. Ao serem absorvidos, um fóton do feixe I transfere à placa de chumbo uma energia  $E_1$  e um fóton do feixe II, uma energia  $E_2$ . Considerando-se essas informações, é correto afirmar que:

- a)  $E_2 = 9E_1$
- b)  $E_2 = 3E_1$
- c)  $E_2 = E_1$
- d)  $E_2 = \frac{1}{3} E_1$



Existe limite em se dividir uma folha de papel? Chegaríamos em algo indivisível?



Como comprovar a existência de partículas subatômicas sem vê-las?

Figura 8. Slides de 37 a 42: exercícios sobre o efeito fotoelétrico e reflexão sobre o mundo do indivisível<sup>22</sup>.

<sup>22</sup> Fonte: elaborado pelo autor.



Figura 9. Slides de 43 a 48: como o efeito browniano ajudou à compreender a existência das moléculas da água, e revisão histórica da visão atômica<sup>23</sup>.

<sup>23</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

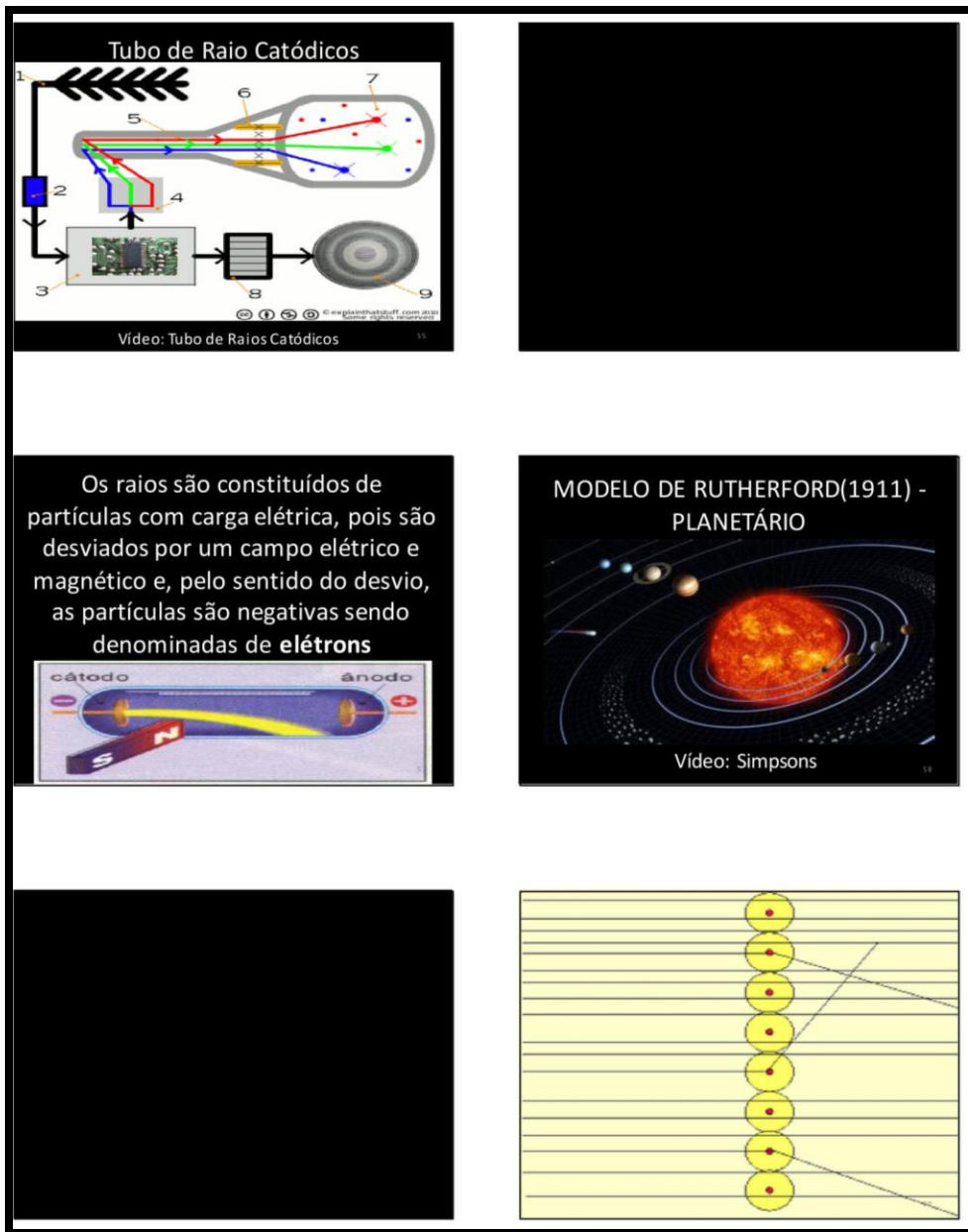


Figura 10. Slides de 49 a 60: descoberta do elétron e de que o átomo deveria ser um “grande vazio”<sup>24</sup>.

<sup>24</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

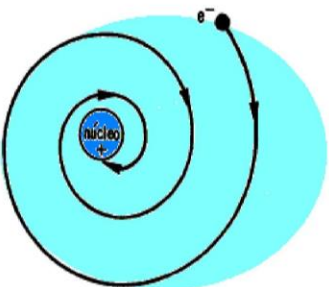
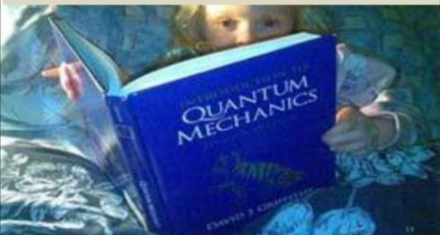
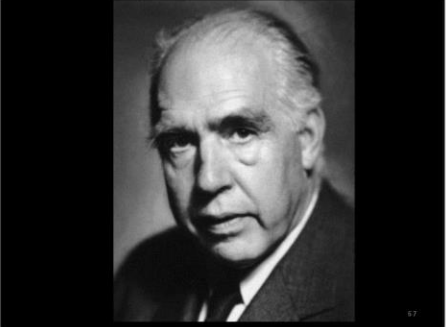
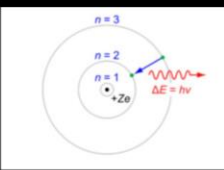
<p><u>Exercícios</u></p> <p>9. O que é um movimento browniano? Dê exemplos.</p> <p style="text-align: right;">61</p>	<p>10. Como o movimento browniano pode ser útil no entendimento da constituição da matéria?</p> <p style="text-align: right;">62</p>
<p>11. Durante os experimentos com raios catódicos, Thomson observou que os raios eram atraídos para o polo positivo. Como ele explicou esse fato?</p> <p style="text-align: right;">63</p>	<p>12. O átomo de Rutherford era inconsistente com o eletromagnetismo, que dizia que o elétron terminaria precipitando-se sobre o núcleo. Por quê?</p> <p style="text-align: right;">64</p>
 <p style="text-align: right;">65</p>	<p>Os Postulados de Bohr</p>  <p style="text-align: right;">66</p>

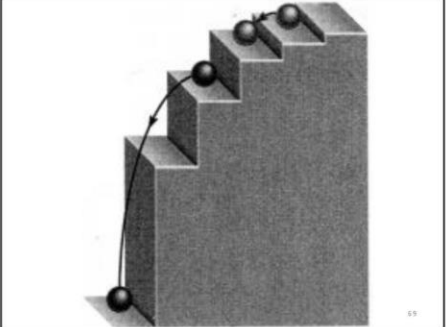
Figura 11. Slides de 61 a 66: exercícios sobre os modelos atômicos<sup>25</sup>.

<sup>25</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

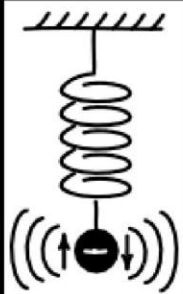


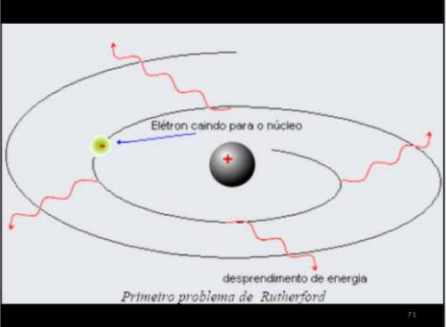
Revisando:  
De acordo com o átomo de Rutherford, não havia impedimentos para que os elétrons orbitassem o núcleo a qualquer distância.





A eletrodinâmica clássica (que trata do movimento dos elétrons) explica que, tais elétrons que mudam constantemente sua direção, seu sentido, sua velocidade ou ambos, devem continuamente emitir radiação.





O que fazer?


- O eletromagnetismo está errado?
- Não existe quantização de energia?
- O elétron não é uma partícula, então ele não gira em torno do átomo, assim não perde energia?

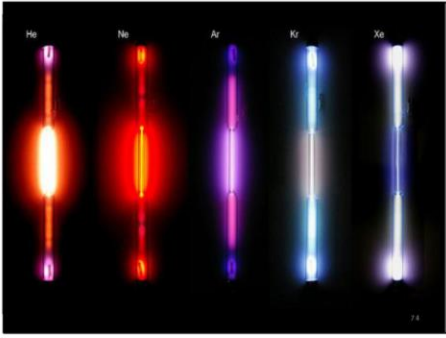
Figura 12. Slides de 67 a 72: revisões de quantização e eletromagnetismo, reflexão sobre a instabilidade no modelo de Rutherford, para melhor apresentar o contexto por trás dos postulados de Bohr<sup>26</sup>.

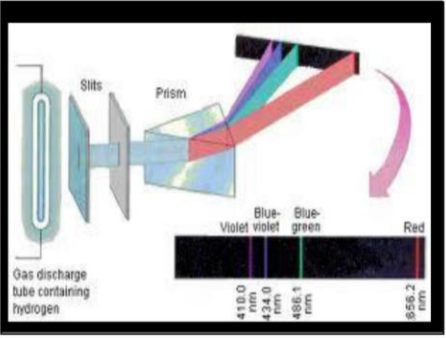
<sup>26</sup> Fonte: elaborado pelo autor.



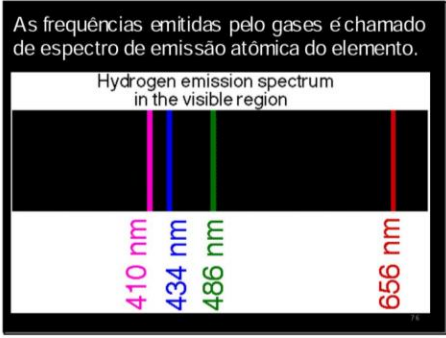
Voltando para o efeito fotoelétrico



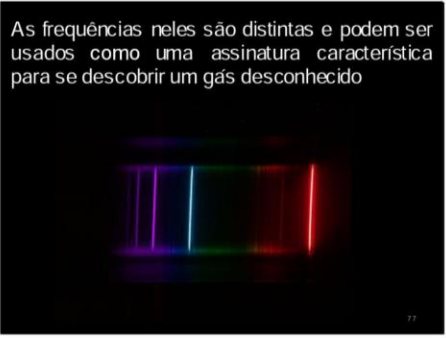




As frequências emitidas pelo gases é chamado de espectro de emissão atômica do elemento.



As frequências neles são distintas e podem ser usados como uma assinatura característica para se descobrir um gás desconhecido

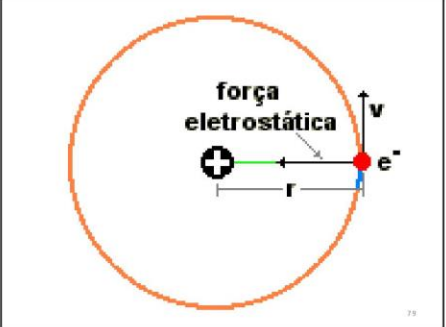


Baseado em resultados empíricos para a emissão e fótons pelos gases, Bohr postulou:

1- O elétron se move numa órbita circular em torno de um núcleo sob ação da força elétrica como força centrípeta.

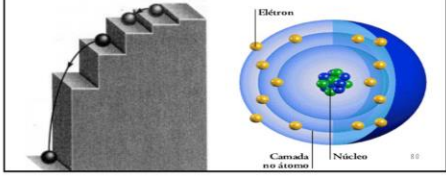
Figura 13. Slides de 73 a 78: como a luz emitida por gases e suas faixas que as identificavam, ajudaram Bohr nos seus postulados<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> Fonte: elaborado pelo autor.



79

2- As órbitas do elétron são restritas, isto é, nem todas órbitas são permitidas, devido a quantização de energia.



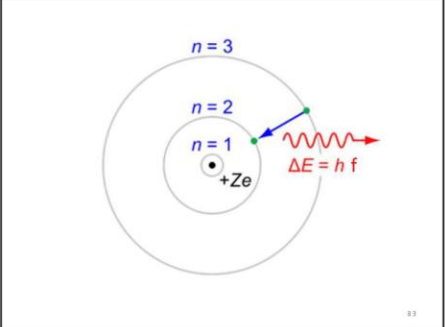
80

3- Os elétrons em órbita não emitem energia eletromagnética, e com isso não perdem energia. A emissão de energia (ou absorção) só ocorre na passagem de níveis (quando um elétron muda de um nível para outro).

81

4- Cada órbita tem uma energia associada, e a diferença de energia entre dois níveis é igual à energia emitida (ou absorvida) na mudança.

82



83

### Exercício

13. A tabela abaixo mostra os níveis de energia de um átomo do elemento X que se encontra no estado gasoso.

$E_0$	0
$E_1$	7,0 eV
$E_2$	13,0 eV
$E_3$	17,4 eV
Ionização	21,4 eV

84

Figura 14. Slides de 79 a 84: Postulados de Bohr<sup>28</sup>.

<sup>28</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

Dentro das possibilidades abaixo, a energia que poderia restar a um elétron com energia de 15,0 eV, após colidir com um átomo de X, seria de:

a) 0 eV  
b) 4,4 eV  
c) 16 eV  
d) 2,0 eV  
e) 14,0 eV

85

Einstein em 1905: **A**  
**Equivalência massa-energia**


Qualquer massa possui uma energia associada e vice-versa.

Energia = Massa × (velocidade da luz no vácuo)<sup>2</sup>

↓  
3. 10<sup>8</sup> m/s


86

$E = mc^2$

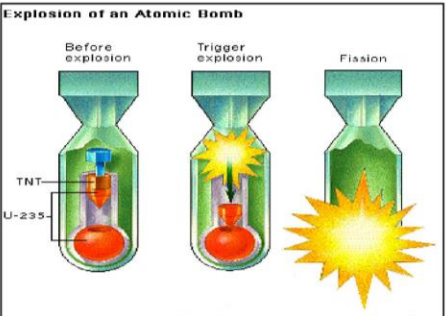


Vídeo: Urânio Jornal Nacional

87




**Explosion of an Atomic Bomb**



© Grolier, Inc.

88

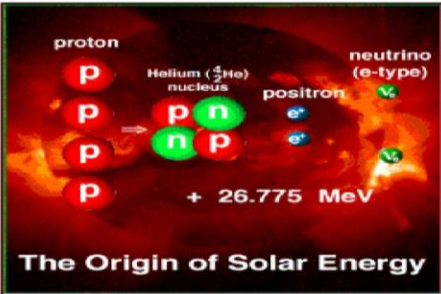


*Vídeo: Atomic Bomb Test*<sup>29</sup>

Figura 15. Slides de 85 a 90: equivalência massa-energia proposta por Einstein e suas terríveis consequências<sup>29</sup>.

<sup>29</sup> Fonte: elaborado pelo autor.





+ 26.775 MeV

**The Origin of Solar Energy**

Vídeo: Rockstar e a origem do metal 92

Exemplo

1 kg de matéria totalmente convertida em energia equivale a:

$$E = mc^2$$

$$E = 1. \text{kg} \cdot (3.10^8 \text{m/s})^2$$

$$E = 9.10^{16} \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 9.10^{16} \text{j.}$$

94

Revisão

A luz pode agir como uma corrente de partículas cuja energia é proporcional à frequência: fóton de luz

$$E = h \cdot f$$

©2003 HowStuffWorks 95

Dúvida do caráter ora ondulatório e ora de partícula das emissões eletromagnética.

96

Figura 16. Slides de 91 a 96: exemplo de fusão nuclear ocorrida no Sol, exercícios de equivalência massa-energia e revisão sobre a dualidade onda-partícula<sup>30</sup>.

<sup>30</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

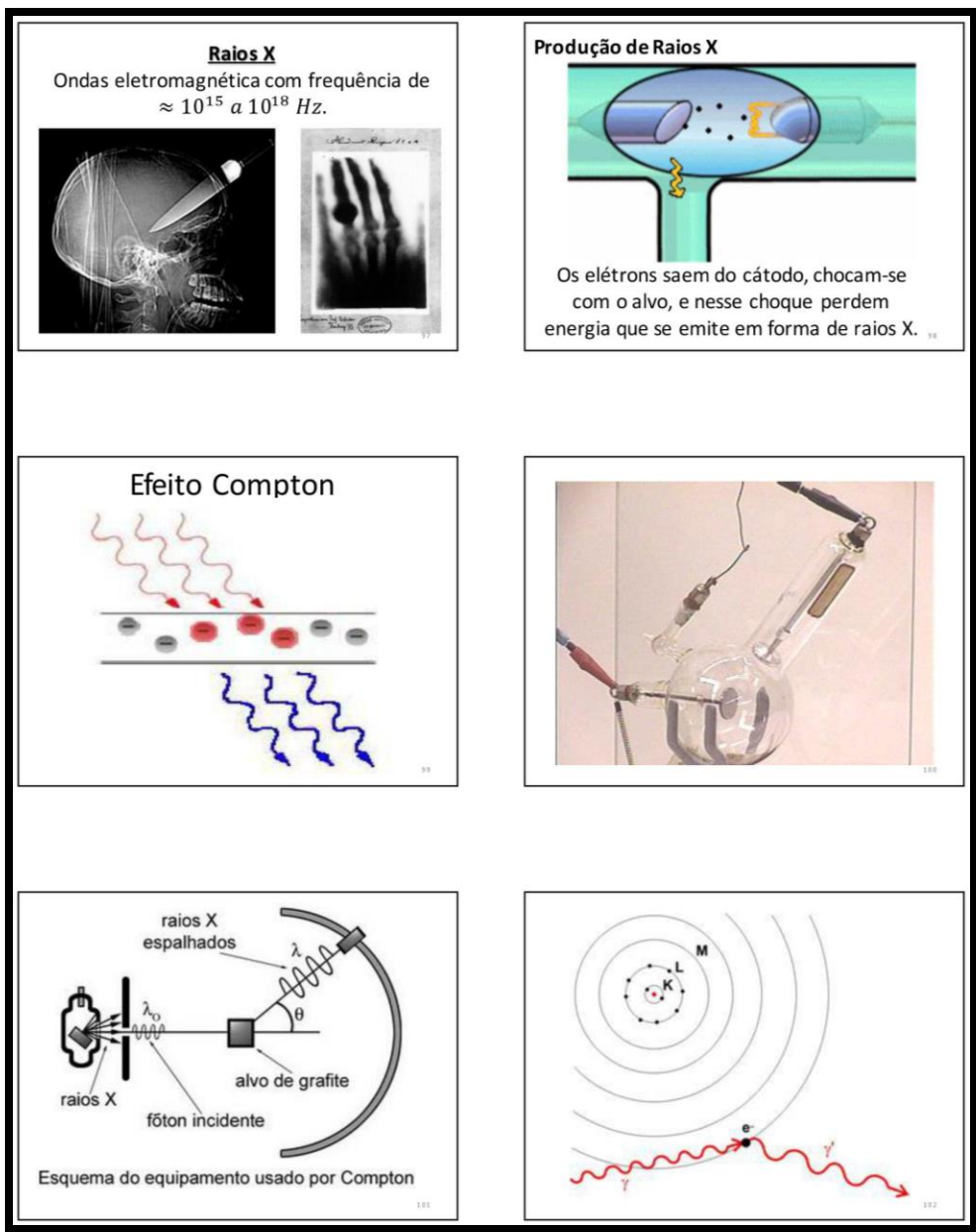


Figura 17. Slides de 97 a 102: caracterização e produção do Raio X e Efeito Compton<sup>31</sup>.

<sup>31</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

**Exercícios**

14. O que é o Efeito Compton?


103

15. Usando  $P = m.c$ ;  $E = h.f$ ;  $E=m.c^2$  e  $c = \lambda.f$ . Encontre uma função do momento linear (P) de um fóton em relação ao seu comprimento de onda ( $\lambda$ ) e independente da sua massa (m).

104

**Hipótese de De Broglie:**  
**Elétrons podem se comportar como ondas**



AIP

A Teoria Eletromagnética de Maxwell também conhecida como Eletromagnetismo Clássico estabeleceu que a luz era uma onda eletromagnética. Então, em 1905, Einstein “vê” a luz composta por grãos de luz (fótons) para explicar o Efeito Fotoelétrico e, em 1923, Compton “visualiza” os fótons em um jogo de bilhar usando raios-X (ondas eletromagnéticas) e uma amostra de grafite.

106

A dualidade onda-partícula foi a saída encontrada. Se a luz, até então tida como onda, se comportava como partícula em certas situações, por que não o elétron, tido como partícula, não poderia se comportar também como uma onda dependendo da experiência? Segundo de Broglie, a matéria também poderia apresentar tal comportamento dual.

107

Considering the energy of a particle (in this case, a photon), from Einstein:

$$e = mc^2$$

$$= (mc).c$$

$$= p.c \quad (\text{where } p = \text{momentum, mass} \times \text{velocity})$$

$$= p.f\lambda \quad (\text{treating the particle like a wave, } c=f\lambda)$$

From the previous result of Planck:

$$e = hf = p.f\lambda$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

108

Figura 18. Slides de 103 a 108: Exercícios e a Hipótese de De Broglie<sup>32</sup>.

<sup>32</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

$$\lambda_{\text{materia}} = \frac{h}{mv}$$

**\*só seria perceptível para massas extremamente pequenas.**

109

Vídeo: Dualidade Onda-Partícula

110

**Exercício 16:** Calcule o comprimento de onda de De Broglie associado a uma bola de futebol, com massa de 400 g que se desloca a uma velocidade de 10 m/s. (Use  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$ )

112

De Broglie sustenta os Postulados de Bohr, ao dizer que o movimento elétrons é guiado por uma onda, assim ele não emitiria energia eletromagnética.

113

Também reafirma os níveis quantizados de energia nas camadas eletrônicas:


$$\underbrace{2\pi r}_{\text{comprimento da órbita circular}} = n\lambda \quad n \in \mathbb{Z}$$

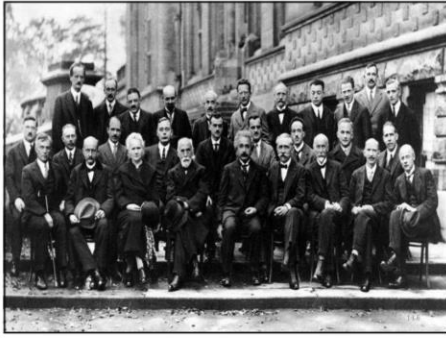
114

Figura 19. Slides de 109 a 114: Novas reflexões sobre a dualidade onda-partícula e consequências da Hipótese de De Broglie para um novo modelo atômico<sup>33</sup>.

<sup>33</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

**Princípio de Incerteza de Heisenberg**





Outra questão rapidamente seguiu a ideia de De Broglie. Se um elétron viajava como uma onda, seria possível localizar a posição exata de um elétron dentro dessa onda? Um físico alemão, Werner Heisenberg, respondeu que não, com o que chamou de princípio da incerteza.

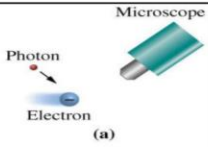
117

- Para ver um elétron em sua órbita, é preciso iluminá-lo com um comprimento de onda menor do que o comprimento de onda do elétron em si;
- Esse pequeno comprimento de onda de luz possui energia alta;
- O elétron irá absorver essa energia;
- A energia absorvida irá mudar a posição do elétron.

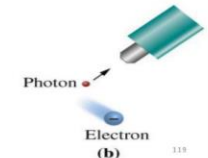
118

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

$\Delta x =$  Uncertainty of Position  
 $\Delta p =$  Uncertainty of Momentum



(a)



(b)

119

**Respostas dos Exercícios**

1.  $T \approx \frac{f}{10^{11}} \approx \frac{520 \cdot 10^{12}}{10^{11}} \approx 5200 \text{ K}$

2.  $T = ^\circ\text{C} + 273 = 37 + 273 = 310$

Se:  $T \approx \frac{f}{10^{11}}$ , temos:

$$310 \approx \frac{f}{10^{11}}$$

120

Figura 20. Slides de 115 a 120: Princípio de Incerteza de Heisenberg, concluindo a impossibilidade de se conhecer a natureza de forma exata e de como a Mecânica Quântica é desafiadora<sup>34</sup>.

<sup>34</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

<p>Então:  <math>f \approx 310.10^{11} \text{ Hz} \Rightarrow \text{Infravermelho}</math></p> <p>3. a emissão de luz por um átomo ocorre quando um elétron sofre transição do nível de energia superior para o inferior.</p> <p>4. Que a energia (luz) que se propaga como ondas não deveria</p>	<p>5. B</p> <p>6. Se: <math>W = h. f_0</math>, então:  <math display="block">\frac{W}{f_0} = \frac{h. f_0}{f_0} = h</math></p> <p>7. O que se observa é um aumento da quantidade de elétrons que são ejetados da placa, ou seja, um aumento da corrente elétrica.</p>
<p>8.</p> <p style="text-align: center;"><math>E = hf</math></p> <p>utilizando a equação da onda,  <math>v = \lambda f</math>,</p> <p>com <math>v = c</math> (velocidade da luz),  logo  <math>E = hc / \lambda</math></p> <p>se o feixe 2 tem o triplo do comprimento de onda, terá também 1/3 da energia, pois, como se vê, são inversamente proporcionais. Resposta: letra d.</p>	<p>9. Movimento browniano é um deslocamento aleatório, caótico. Exemplos: fumaça do cigarro, andar de um bêbado, o índice da bolsa de valores...</p> <p>10. No movimento browniano tornam-se visíveis no microscópio as flutuações das partículas bem maiores em suspensão, que devem estar sendo incessantemente bombardeadas pelas partículas microscopicamente menores do fluido (moléculas de água).</p>
<p>11. Thomson propôs que os raios tinham carga negativa, pois cargas opostas se atraem. Por este experimento, Thomson descobriu que os átomos possuíam partículas negativas, que hoje são conhecidas como elétrons.</p> <p>12. Pois ao vibrar o elétrons emite ondas eletromagnéticas, perdendo energia ele terminaria sendo atraído pelo núcleo positivo.</p>	<p>15. Se:</p> <p style="text-align: center;"><math>E = E,</math>  <math>h. f = m. c^2.</math></p> <p>Como: <math>f = c/\lambda</math> e <math>P = m. c</math>, então:</p> <p style="text-align: center;"><math>\frac{h. c}{\lambda} = P. c</math></p> <p>Assim:</p> <p style="text-align: center;"><math>P = \frac{h}{\lambda}</math></p>

Figura 21. Slides de 121 a 126: gabarito numerado das questões propostas durante o curso<sup>35</sup>.

<sup>35</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

16.

$$\lambda_{matéria} = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$\lambda_{matéria} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{0,4} = 2,652 \cdot 10^{-34} m.$$

Que se trata de um comprimento de onda imperceptível.

Figura 22. Slides de 127: continuação do gabarito numerado das questões propostas durante o curso<sup>36</sup>.

**Atividade 9: Pós-teste.**

A atividade se encontra no Anexo B.

**Planejamento das aulas e avaliações**

A dificuldade de se fazer um planejamento fixo conta o problema recorrente de termos colégios que criam turmas homogêneas. Isso não é abertamente admitido, mas costuma-se ter turmas em que os alunos com dificuldades de aprendizagem ou repetentes costumam ficar na mesma sala. Além destes, outros fatos como a última aula da sexta-feira também faz diferença no cumprimento do planejado.

A Tabela 2 se refere ao caso em que o curso-piloto foi realizado:

Tabela 2. Registro das aulas feitos de acordo com o livro de chamada<sup>37</sup>

Aula	Conteúdo da aula
1.	Realização do “pré-teste” para verificação dos conhecimentos prévios sobre mecânica quântica.
2.	Introdução, com diálogo, com os alunos para discutir sobre as concepções da Mecânica Quântica e revisão de grandezas de medidas usadas na Física.
3.	Atividade de pesquisa sobre conceitos usados pela

<sup>36</sup> Fonte: elaborado pelo autor.

<sup>37</sup>Fonte: elaborada pelo autor.

	Física e que são usados pela Mecânica Quântica.
4.	Revisão das relações matemáticas de alguns conceitos da ondulatória, pesquisa de conceitos da Mecânica Quântica e Experimentos Virtuais de Mecânica Quântica.
5.	Introdução da Mecânica Quântica com problemas em aberto da Mecânica Quântica.
6.	A resolução da “catástrofe do ultravioleta”: modelo quântico para as radiações eletromagnéticas.
7.	A dualidade onda-partícula e o efeito-fotoelétrico.
8.	Função trabalho.
9.	A constituição da matéria e o mundo das probabilidades.
10.	Movimento browniano.
11.	Exercícios teóricos sobre mecânica quântica.
13.	Postulados de Bohr.
14.	Efeito Compton.
15.	Hipótese de De Broglie
16.	Princípio da Incerteza de Heisenberg.
17.	Exercícios de dualidade onda-partícula.
18.	Revisão de conteúdo.
19.	Pós-teste.
20.	Entrega e correção do pós-teste.

Como o Conselho Estadual de Educação do Estado do Paraná exige que “o aluno cujo aproveitamento escolar for insuficiente poderá obter a aprovação mediante recuperação de estudos, proporcionados obrigatoriamente pelo estabelecimento” (PARANÁ, 1999), o tempo de uma aula do pré-teste pode ser substituído no final pela avaliação paralela. Outra exigência “é vedada a avaliação em que os alunos são submetidos a uma só oportunidade de aferição” (PARANÁ, 1999), uma prova e um trabalho por exemplo, nós realizamos dois trabalhos de pesquisa (3ª e 4ª aula), completando assim todas as exigências no prazo das 20 aulas (Tabela 3).



Tabela 3. Distribuição dos instrumentos de avaliação<sup>38</sup>

Instrumentos de Avaliação	Valor
Trabalhos individuais	3,0
Avaliação individual escrita	7,0
Total	10,0

## Conclusão

Esperamos ter contribuído para a consolidação do ensino de uma Física mais abrangente na rede pública de ensino. Apontamos um caminho em que o aluno se torne interessado por uma linguagem mais acessível, matematicamente simples, constituindo ser um conhecimento apropriado que faça sentido em seu dia a dia.

Este curso levanta um desafio em aberto, ensinar no 3º ano do Ensino Médio Eletricidade, Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade<sup>39</sup>. Mostramos aqui apenas que é possível ensinar um desses três em um bimestre, de forma resumida.

De qualquer forma, nosso curso foca na explicação da dualidade onda-partícula e fornece a quebra de paradigma para que o aluno perceba a não linearidade na construção do conhecimento científico.

---

<sup>38</sup>Fonte: elaborada pelo autor.

<sup>39</sup> Usamos aqui a organização clássica dos conteúdos de Física do ensino médio, sem considerar as novas discussões promovidas dentro da Base Nacional Comum Curricular pelo Ministério da Educação nos últimos anos.

## Anexo A

### Conteúdo Auxiliar de Mecânica Quântica

#### Radiação de Corpo Negro

Um corpo negro é um corpo hipotético que emite (ou absorve) radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda de forma que:

- toda a radiação incidente é completamente absorvida, e
- em todos os comprimentos de onda e em todas as direções a máxima radiação possível para a temperatura do corpo é emitida.

A radiação do corpo negro é isotrópica, isto é, não depende da direção.

O Sol e a Terra irradiam aproximadamente como corpos negros. Portanto, as leis de radiação dos corpos negros podem ser aplicadas à radiação solar e terrestre com algumas restrições.

A irradiância monocromática emitida por um corpo negro é determinada por sua temperatura e pelo comprimento de onda considerado, conforme descrito pela Lei de Planck.

$$E_{\lambda}^* = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)}$$

em que:  $c_1 = 3,74, 10^{-16} \text{ Wm}^2 \text{ e } c_2 = 1,44, 10^{-2} \text{ mK}$ . Gráficos de  $E_{\lambda}^*$  em função de  $\lambda$  para algumas temperaturas são mostrados na irradiância monocromática para corpo negro para várias temperaturas:

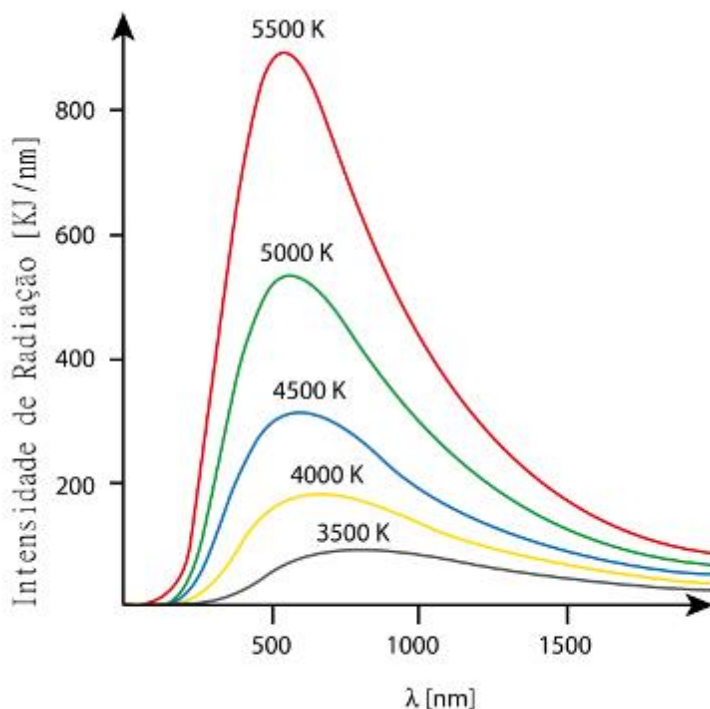


Figura 1. Gráfico da intensidade de radiação em função do comprimento de onda em diferentes temperaturas<sup>40</sup>.

A equação pode ser simplificada para<sup>41</sup>:

$$E_{\lambda}^* \cong c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$$

Usando a aproximação é possível mostrar que o comprimento de onda do pico de emissão para um corpo negro com temperatura T é dado por

$$\lambda_m = \frac{2897}{T}$$

em que  $\lambda_m$  é expresso em micra ( $10^{-6}$ ) e T em Kelvin.

Essa é a lei de deslocamento de Wien. Com ela, é possível estimar a temperatura de uma fonte a partir do conhecimento de seu espectro de emissão. Por exemplo, sabendo-se que a máxima emissão solar ocorre em  $\sim 0,475 \mu$ , deduz-se que sua

<sup>40</sup>

Disponível

em:

[http://alunosonline.uol.com.br/upload/conteudo\\_legenda/53c2dd620221488cdccb5a82e94e4a26.jpg](http://alunosonline.uol.com.br/upload/conteudo_legenda/53c2dd620221488cdccb5a82e94e4a26.jpg).

Acesso em: 11 nov. 2016.

<sup>41</sup> Exceto para grandes comprimentos de onda.

temperatura equivalente de corpo negro é 6100 K. A Terra, com  $T \sim 288$  K, tem máxima emissão em  $\lambda_m \sim 10 \mu$ .

Da lei de Wien decorre que a radiação solar é concentrada nas partes visíveis e infravermelho próximo, enquanto a radiação emitida pela Terra e sua atmosfera é principalmente confinada ao infravermelho. Quanto mais quente o corpo radiante, menor é o comprimento de onda da máxima radiação.

### Dualidade Onda Partícula

Thomas Young foi quem demonstrou inicialmente a natureza ondulatória da luz quando observou o padrão de interferência de duas fontes de luz coerentes produzido pela iluminação de um par de fendas estreitas paralelas através de uma única fonte. Mas foi em 1860 que a teoria ondulatória da luz culminou com as pesquisas de Maxwell das ondas eletromagnéticas.

A proposta da luz como partícula foi inicialmente feita por Albert Einstein em 1905, quando tratava do efeito fotoelétrico. Ele a explicou de maneira bem sucedida, como parte de um artigo, no qual ele supôs que a luz ou qualquer outra onda eletromagnética de frequência  $f$  pode ser considerada como um feixe de quanta (fótons = pacotes de energia), ou seja, a luz não é distribuída de forma uniforme ao longo da frente da onda clássica, mas está concentrada em “pacotes”, e independente da fonte de radiação, cada fóton contém uma energia  $E$  dada pela equação  $E = hf$ . Estes fótons fornecem toda sua energia para um único elétron no metal.

Pela equação de Planck:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

em que:

$c$  = Velocidade da luz =  $3.10^8$  m/s

$h$  = Constante de Planck =  $6,626 \times 10^{-34}$  J.s =  $4,136 \times 10^{-15}$  eV.s

$f$  = frequência

$\lambda$  = comprimento de onda

A propagação da luz tem comportamento ondulatório, enquanto a troca de energia entre a luz e a matéria tem comportamento de partículas, como no Efeito Fotoelétrico e no Efeito Compton.

Compton evidência que a radiação ora se comporta como onda ora como partícula ao realizar experimentos com um espectrômetro de cristal para medir os comprimentos de ondas de raios X, cujas medidas são analisadas por meio da teoria ondulatória da difração. Por outro lado, o espalhamento afeta o comprimento de onda, sendo necessário tratar os raios X como partícula.

Um experimento que pode mostrar o comportamento dual do elétron é o experimento da fenda dupla:

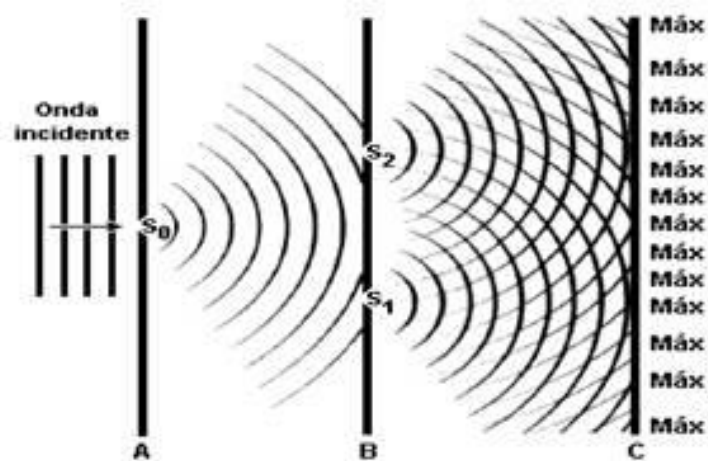


Figura 2. Experimento da fenda dupla<sup>42</sup>.

## O Experimento da Difração de Elétrons

---

<sup>42</sup> Disponível em: <http://fisicaestibular.com.br/images/ondulatoria6/image018.jpg> Acesso em: 11 nov. 2016.

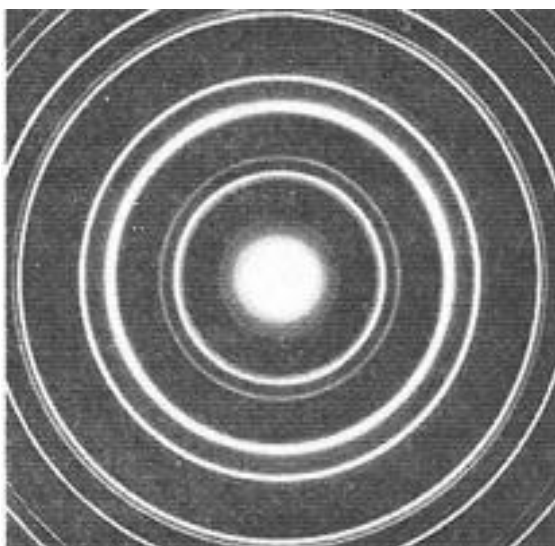


Figura 3. Experimento da Difração de Elétons<sup>43</sup>.

Os elétrons (massa  $m$  e carga  $e$ ) são emitidos de um cátodo incandescente e acelerados por intermédio da aplicação de um potencial  $V$ , de onde é possível determinar sua velocidade  $v$  a partir do princípio de conservação de energia.

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

O tubo utilizado é evacuado e os elétrons saem do filamento pelo efeito termo-iônico quando este é submetido a uma corrente da ordem de 300 mA. O cátodo e o ânodo estão a uma ddp da ordem de kV, que acelera os elétrons até o alvo composto por cristal de grafite. Esses elétrons então sofrem difração e produzem um padrão luminoso num anteparo de sulfato de zinco (ZnS).

O padrão luminoso é formado por anéis circulares, já que o feixe de elétrons que incide sobre o cristal (grafite) é circular. Visualizam-se nesse caso dois anéis circulares simultaneamente, e cada anel é produzido pela refração dos elétrons em cada um dos planos de Bragg. Existe uma separação  $d$  distinta, os dois anéis vistos são produzidos pelos planos com maior separação já que os demais, por terem separação menor espalham os elétrons que não chegam a atingir o anteparo.

---

<sup>43</sup>

Disponível

em: <http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/19195/imagens/image031.png>. Acesso em: 11 nov. 2016.

O caráter corpuscular do elétron é confirmado nesse experimento de difração de elétrons e posteriormente também em experimentos realizados com nêutrons e átomos leves.

### **O Elétron como uma Onda**

Em 1924, de Broglie sugeriu a hipótese de que os elétrons poderiam apresentar propriedades ondulatórias além das suas propriedades corpusculares já bem conhecidas. Essa hipótese se justificava por uma questão de simetria, já que a radiação eletromagnética apresentava, em certos fenômenos, propriedades ondulatórias e, em outros fenômenos, propriedades corpusculares. Se a hipótese de De Broglie fosse verdadeira, experimentos de interferência e difração poderiam ser realizados com elétrons. Em 1927, Davisson e Germer mostraram experimentalmente que a intensidade de um feixe de elétrons espalhados apresentava o padrão de máximos e mínimos típico do fenômeno da difração. Os resultados conhecidos apontavam que para ondas vale:

$$E = hf = pc$$

$$\frac{hc}{\lambda} = pc$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

De Broglie propôs então que a matéria teria um comprimento de onda associado a ela, dado pela expressão:

$$\lambda_{matéria} = \frac{h}{m \cdot v}$$

Tal como a óptica geométrica é uma boa aproximação da óptica ondulatória quando o comprimento de onda é muito menor que as dimensões dos obstáculos ou aberturas que a radiação encontra, também a mecânica clássica é uma boa aproximação da mecânica quântica sempre que o comprimento de onda de De Broglie da partícula em causa seja muito menor do que as dimensões dos obstáculos ou aberturas que a partícula encontra.

Como o valor da constante de Planck é muito pequeno, o comprimento de onda de De Broglie é extraordinariamente pequeno para qualquer corpo macroscópico, não

sendo, por isso, de notar fenômenos de difração com os corpos que utilizamos no dia-a-dia, podendo mesmo aplicar-se aos elétrons, em certas condições, as leis da mecânica clássica.

A hipótese de De Broglie fornecia uma explicação confortável para a pergunta que intrigava os físicos: por que os elétrons podiam ocupar apenas determinados níveis de energia no átomo de Bohr? Se o elétron pode ser pensado como uma onda, ele se comporta, quando confinado no interior do átomo, como uma onda estacionária, isto é, que se propaga num meio limitado, como ocorre com as ondas produzidas na água de um tanque quando atiramos nela uma pedra.

Essa onda se propaga até as bordas do tanque e então, ao ser refletida, volta sobre si mesma. Se os picos da onda inicial e da onda refletida coincidem, eles se reforçam; porém, se os picos da onda inicial coincidem com os vales da onda refletida, eles se anulam. O mesmo ocorreria com o elétron confinado, pensou De Broglie: os níveis de energia permitidos no modelo de Bohr correspondem às regiões em que os picos se somam. Essas regiões ocorrem sempre em distâncias que correspondem a um número inteiro de vezes o comprimento de onda.

O que De Broglie formulou como pura hipótese matemática teve importantes consequências na investigação da estrutura do átomo. O físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961) deduziu, a partir da hipótese de De Broglie, uma equação de onda que logo se transformaria em uma das fórmulas mais usadas em toda a Física. Schrödinger estava firmemente convencido de que a onda proposta por De Broglie para explicar o elétron não era apenas uma simples analogia matemática, mas uma realidade física.



O elétron só pode ocupar órbitas cujo perímetro coincida com o comprimento de onda de De Broglie!

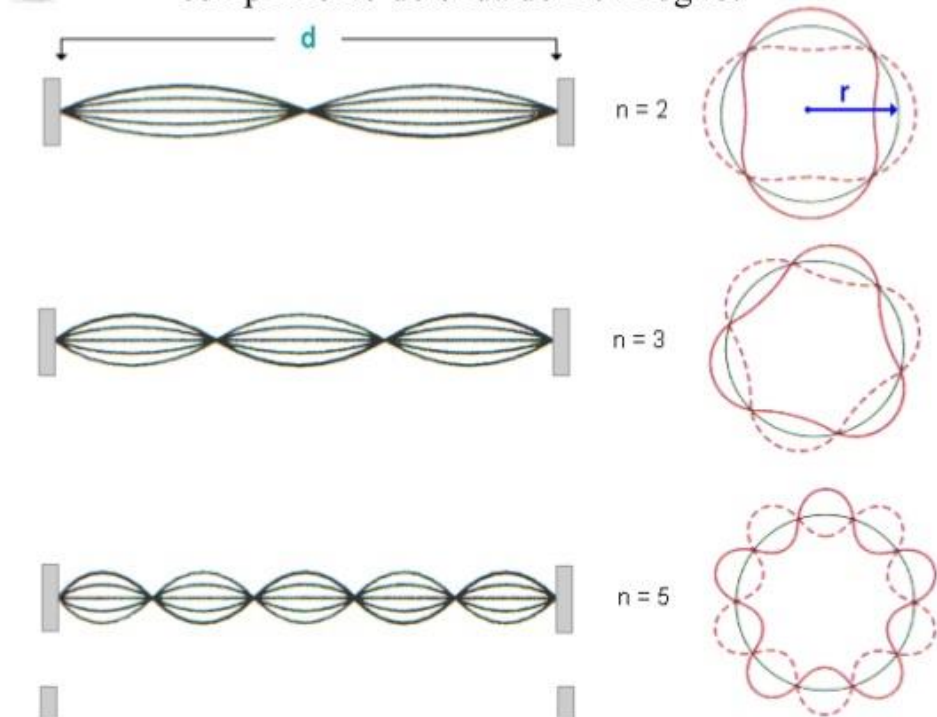


Figura 4. De Broglie e as ondas de matéria<sup>44</sup>.

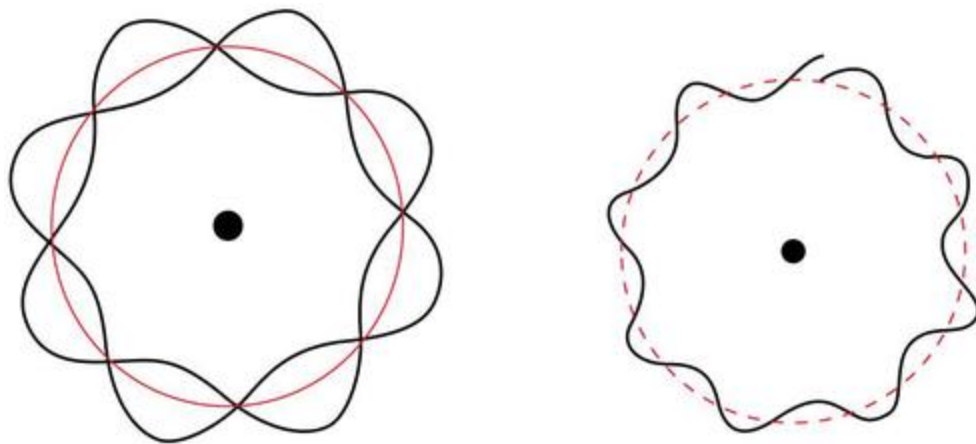


Figura 5. Um modelo quantizado possível e um modelo impossível<sup>45</sup>.

<sup>44</sup> Disponível em: <http://image.slidesharecdn.com/debroglieeasondasdemateria-101108111845-phpapp01/95/de-broglie-e-as-ondas-de-materia-13-638.jpg?cb=1422659245>. Acesso em: 11 nov. 2016.

<sup>45</sup> Disponível em: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/00/Standing\\_wave\\_electron\\_cloud.png/500px-Standing\\_wave\\_electron\\_cloud.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/00/Standing_wave_electron_cloud.png/500px-Standing_wave_electron_cloud.png). Acesso em: 11 nov. 2016.

Outra questão rapidamente seguiu a ideia de De Broglie. Se um elétron viajava como uma onda, seria possível localizar a posição exata de um elétron dentro dessa onda? Um físico alemão, Werner Heisenberg, respondeu que não, com o que chamou de princípio da incerteza:

- Para ver um elétron em sua órbita, é preciso iluminá-lo com um comprimento de onda menor do que o comprimento de onda do elétron em si;
- Esse pequeno comprimento de onda de luz possui energia alta;
- O elétron irá absorver essa energia;
- A energia absorvida irá mudar a posição do elétron;

E nós nunca conseguiremos saber o momento e a posição de um elétron no átomo. Por isso, Heisenberg disse que não devemos imaginar os elétrons como se estivessem se movendo em órbitas bem definidas ao redor do núcleo.

Com a hipótese de Broglie e o princípio da incerteza de Heisenberg em mente, em 1926, um físico austríaco chamado Erwin Schrodinger criou uma série de equações ou funções de onda para os elétrons.

### **Equação de Schrodinger: analogia com a onda clássica**

A natureza dual da matéria pode ser expressa matematicamente por meio de uma equação de onda. Erwin Schrödinger, em 1926, desenvolveu a Mecânica Quântica, cujo resultado principal é a equação que descreve o elétron por uma função de onda  $\Psi$  ocupando as órbitas estacionárias. A frequência e o comprimento de onda das ondas de elétrons estão relacionados com a energia e o momento linear dos elétrons. Dessa forma, Schrödinger conseguiu calcular os níveis de energia do átomo de Hidrogênio e os resultados são os mesmos previstos por Bohr, e que, por sua vez, coincidem com os resultados experimentais.

A equação de onda que representa ondas estacionárias de comprimento de onda  $\lambda$  associadas a partículas de massa  $m$  confinadas em uma região unidimensional na qual existe um potencial  $V(\mathbf{x})$ , tal qual um elétron confinado numa órbita atômica, é dada por:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V(x) \Psi = E \Psi$$

em que  $\Psi(\mathbf{x})$  é a amplitude da onda associada ao movimento do elétron com massa  $m$  e energia  $E$ , e  $h$  cortado representa  $h/2\pi$  ( $h=6,6.10^{-34}$  m<sup>2</sup>.kg/s).

Ao analisarmos a Equação de Schrödinger, verificamos que as soluções dessa equação são funções complexas. Funções reais, como as soluções da equação de onda clássica, são possíveis apenas para potenciais muito particulares. Consequentemente, não há como dar às soluções da Equação de Schrödinger uma existência física, assim como fazemos com as ondas na superfície da água, ou em uma corda, ou mesmo com as ondas de luz. Nesses casos, a amplitude da onda está associada a um deslocamento (no caso das ondas mecânicas) ou ao campo elétrico (no caso da luz, ondas eletromagnéticas).

As propriedades matemáticas indispensáveis à função de onda já haviam sido bem determinadas pelo próprio Schrödinger: ela deve ser univocamente definida, contínua e finita em todo o espaço e tempo. Born, então, inspirado pelas ideias de Einstein para os fótons, supôs que o quadrado da função de onda do elétron deveria fornecer uma densidade de probabilidade para o elétron.

Heisenberg, no artigo em que introduzia o Princípio da Incerteza, mostrou que não somente o caráter determinístico da física clássica deveria ser abandonado, mas também o conceito ingênuo de realidade que enxerga as partículas atômicas como se elas fossem minúsculos grãos de areia. Born, em seu discurso na entrega do prêmio Nobel de 1954, assinalou que “Grãos de areia têm, em cada instante, posição e velocidade bem definidas. Com o elétron, a situação é bem diferente. Se a sua posição é medida com acurácia crescente, a possibilidade de se determinar a sua velocidade diminui e vice-versa”.

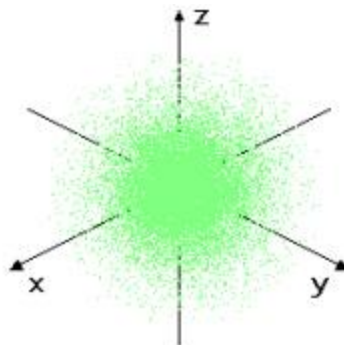


Figura 6. Densidade de probabilidade de encontrar o elétron em torno do núcleo no estado fundamental do átomo de hidrogênio<sup>46</sup>.

<sup>46</sup> Disponível em: <http://www.passo-a-passo.com/mec/7.3.9/imagens/fig30.jpg>. Acesso em: 11 nov. 2016.

Ao mesmo tempo em que muitos se puseram a buscar soluções da Equação de Schrödinger para sistemas sujeitos a diferentes potenciais, outros procuravam desenvolver uma compreensão física adequada para essas soluções. Como exemplo, temos o problema de uma partícula presa dentro de uma caixa de largura  $L$ , associada classicamente às ondas estacionárias (Figura 7).

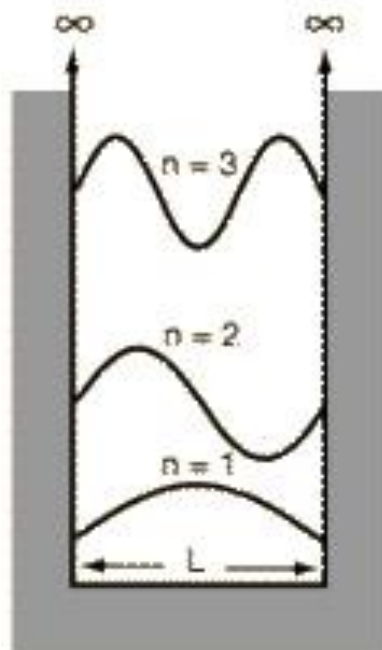


Figura 7. Ondas estacionárias associadas a uma partícula presa dentro de uma caixa de largura  $L$ <sup>47</sup>.

---

<sup>47</sup> Disponível em: <http://www.passo-a-passo.com/mec/7.3.9/imagens/fig13.jpg>. Acesso em: 11 nov. 2016.

## Referências Bibliográficas

DANTE, Luiz Roberto. Matemática: contexto e aplicações, vol. 3. São Paulo: Ática, 2010.

EISBERG R., RESNICK R., Física Quântica, 3ª edição, Rio de Janeiro: Editora Campus, 1985.

GASPAR, Alberto. Compreendendo a Física: Ensino Médio. São Paulo: Ática, 2010.

GRIMM, Alice Marlene. Notas de aula. Disponível em: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-5.html>. Acesso em: 10 ago. 2016.

HALLIDAY, D. Fundamentos de Física: Mecânica, voll. 7ª ed. LTC, 2006.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R; WALKER, J. Fundamentos de Física 4 – Ótica e Física Moderna. Tradução de Denise Helena da Silva Sotero, Gerson Bazo Costamilan, Luciano Videira Monteiro e Ronaldo Sérgio de Biasi. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1995. 355p. Título original: Fundamentals of Physics, 4th edition, Extended Version.

INSTITUTO GALILEO GALILEI PARA A EDUCAÇÃO. Um Mundo de Incertezas. Disponível em: [http://www.passo-a-passo.com/mec/7.3.9/05\\_teoriam.htm](http://www.passo-a-passo.com/mec/7.3.9/05_teoriam.htm). Acesso em: 10 ago. 2016.

LABORATÓRIO AVANÇADO DE FÍSICA: Difração de elétrons. Instituto de Física de São Carlos – IFSC/USP. Disponível em: [http://www.ifsc.usp.br/~lavfis/images/BDApostilas/ApDifraEletron/DifracaoEletrons\\_1.pdf](http://www.ifsc.usp.br/~lavfis/images/BDApostilas/ApDifraEletron/DifracaoEletrons_1.pdf). Acesso em: 10 ago. 2016.

POLYCARPO, Érica; BARROSO, Marta F. Uma breve história do mundo dos quanta. Disponível em: <http://www.ifufrj.br/~marta/cederj/quanta/mq-unidade5.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2016.

STEWART, James. Cálculo, vol. 1. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

TIPLER, Paul Allan; MOSCA, Gene. Eletricidade e magnetismo, ótica. V2; Trad. Fernando Ribeiro da Silva, Mauro Speranza Neto. – Rio de Janeiro: LTC, 2006.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Relação de ondas e mecânica quântica: interpretação de funções de onda. Disponível

em: <http://euclides.if.usp.br/~ewout/ensino/fap0184/000091.html>. Acesso em: 10 ago. 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. O Elétron como Onda. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/gef/Moderna/moderna06.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2016.

## Anexo B

### Pré-teste e Pós-teste aplicado ao Ensino Médio

Prezado(a) aluno(a)

Este teste é apenas uma sondagem sobre seus conhecimentos iniciais de Mecânica Quântica a fim de levá-los em conta no desenvolvimento do curso. Não é uma avaliação formal. Por favor, evite respostas aleatórias. Deixe em branco quando julgar adequado.

Obrigado.

1. Um elétron é uma partícula? É uma onda? Explique:

---

2.



A obra Molhe Espiral (acima) faz lembrar o modelo atômico “planetário”, proposto por Ernest Rutherford (Figura 1). Esse modelo satisfaz as observações experimentais de desvio de partículas alfa ao bombardearem folhas de ouro. Entretanto, falha quando se leva em conta a teoria do eletromagnetismo, segundo a qual cargas aceleradas emitem radiação eletromagnética. Assim, o elétron perde energia executando uma trajetória em espiral e colapsando no núcleo (Figura 2).

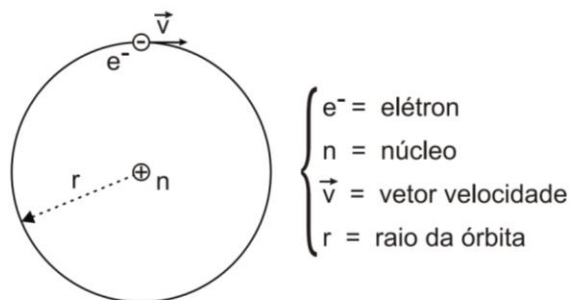


Fig. 1: Modelo atômico “planetário”

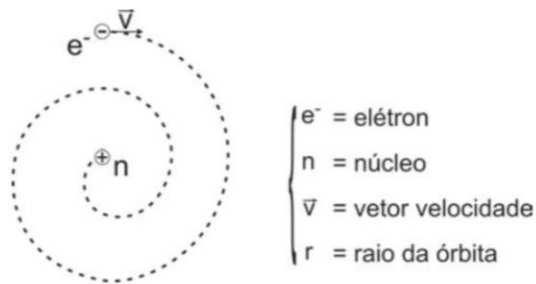


Figura 2 : Colapso do elétron no núcleo

Com base no enunciado, nas figuras e nos conhecimentos sobre mecânica e eletromagnetismo, considere as afirmativas a seguir.

- I. A variação do vetor velocidade do elétron evidencia que seu movimento é acelerado.
- II. Se o módulo da velocidade linear do elétron é constante em toda a trajetória da Figura 2, a sua velocidade angular aumentará até o colapso com o núcleo.
- III. O átomo de Rutherford poderia ser estável se o elétron possuísse carga positiva.
- IV. Na segunda figura, o elétron está desacelerando, uma vez que a força de repulsão eletrostática diminui com o decréscimo do raio da órbita.

Assinale a alternativa correta.

- a) Somente as afirmativas I e II são corretas.
- b) Somente as afirmativas II e IV são corretas.
- c) Somente as afirmativas III e IV são corretas.
- d) Somente as afirmativas I, II e III são corretas.
- e) Somente as afirmativas I, III e IV são corretas.

3. Analise as afirmativas abaixo, relativas à explicação do efeito fotoelétrico, tendo como base o modelo corpuscular da luz.

- I. A energia dos fótons da luz incidente é transferida para os elétrons no metal de forma quantizada.
- II. A energia cinética máxima dos elétrons emitidos de uma superfície metálica depende apenas da frequência da luz incidente e da função trabalho do metal.



III. Em uma superfície metálica, elétrons devem ser ejetados independentemente da frequência da luz incidente, desde que a intensidade seja alta o suficiente, pois está sendo transferida energia ao metal.

Assinale a alternativa correta.

- a) Somente a afirmativa II é verdadeira.
- b) Somente as afirmativas I e III são verdadeiras.
- c) Somente as afirmativas I e II são verdadeiras.
- d) Somente a afirmativa III é verdadeira.
- e) Todas as afirmativas são verdadeiras.

4. Um átomo excitado emite energia, muitas vezes em forma de luz visível, porque:

- a) um dos elétrons decai para níveis de energia mais baixos, aproximando-se do núcleo.
- b) um dos elétrons foi arrancado do átomo.
- c) um dos elétrons desloca-se para níveis de energia mais altos, afastando-se do núcleo.
- d) os elétrons permanecem estacionários em seus níveis de energia.

5. Ao observarmos o espectro de radiação eletromagnética visível, podemos encontrar fótons de mais alta energia como sendo os:

- a) luz azul;
- b) luz amarela;
- c) luz vermelha;
- d) Infravermelho;
- e) luz verde;

6. Escolha, entre os modelos atômicos citados nas opções, aquele (aqueles) que, na sua descrição, incluiu (incluíram) o conceito de fóton:

- a) Modelo atômico de Thomson.
- b) Modelo atômico de Rutherford.
- c) Modelo atômico de Bohr.
- d) Modelos atômicos de Rutherford e de Bohr.
- e) Modelos atômicos de Thomson e de Rutherford

7. O efeito fotoelétrico consiste:

a) na existência de elétrons em uma onda eletromagnética que se propaga em um meio uniforme e contínuo.

b) na possibilidade de se obter uma foto do campo elétrico quando esse campo interage com a matéria.

c) na emissão de elétrons quando uma onda eletromagnética incide em certas superfícies.

d) no fato de que a corrente elétrica em metais é formada por fótons de determinada energia.

e) na ideia de que a matéria é uma forma de energia, podendo se transformar em fótons ou em calor.

8. No início do século XX, novas teorias provocaram uma surpreendente revolução conceitual na Física. Um exemplo interessante dessas novas ideias está associado às teorias sobre a estrutura da matéria, mais especificamente àquelas que descrevem a estrutura dos átomos. Dois modelos atômicos propostos nos primeiros anos do século XX foram o de Thomson e o de Rutherford. Sobre esses modelos, assinale a alternativa correta.

a) No modelo de Thomson, os elétrons estão localizados em uma pequena região central do átomo, denominada núcleo, e estão cercados por uma carga positiva, de igual intensidade, que está distribuída em torno do núcleo.

b) No modelo de Rutherford, os elétrons são localizados em uma pequena região central do átomo e estão cercados por uma carga positiva, de igual intensidade, que está distribuída em torno do núcleo.

c) No modelo de Thomson, a carga positiva do átomo encontra-se uniformemente distribuída em um volume esférico, ao passo que os elétrons estão localizados na superfície da esfera de carga positiva.

d) No modelo de Rutherford, os elétrons movem-se em torno da carga positiva, que está localizada em uma pequena região central do átomo, denominada núcleo.

e) O modelo de Thomson e o modelo de Rutherford consideram a quantização da energia.

9. No modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio neutro, a energia do elétron:

- a) pode ter qualquer valor.
- b) tem um único valor fixo.
- c) independe da órbita do elétron.
- d) tem alguns valores possíveis.
- e) depende da temperatura do átomo.

10. No início do século XX, as teorias clássicas da Física – como o eletromagnetismo, de Maxwell, e a mecânica, de Newton – não conduziam a uma explicação satisfatória para a dinâmica do átomo. Nessa época, duas descobertas históricas tiveram lugar: o experimento de Rutherford demonstrou a existência do núcleo atômico e a interpretação de Einstein para o efeito fotoelétrico revelou a natureza corpuscular da interação da luz com a matéria. Em 1913, incorporando o resultado dessas descobertas, Bohr propôs um modelo atômico que obteve grande sucesso, embora não respeitasse as leis da física clássica.

Considere as seguintes afirmações sobre a dinâmica do átomo.

I. No átomo, os raios das órbitas dos elétrons podem assumir um conjunto contínuo de valores, tal como os raios das órbitas dos planetas em torno do Sol.

II. O átomo pode existir, sem emitir radiação, em estados estacionários cujas energias só podem assumir um conjunto discreto de valores.

III. O átomo absorve ou emite radiação somente ao passar de um estado estacionário para outro.

Quais dessas afirmações foram adotadas por Bohr como postulados para o seu modelo atômico?

- a) Apenas I.
- b) Apenas II.
- c) Apenas III.
- d) Apenas II e III.
- e) I, II e III.

11. Considere as duas colunas a seguir, colocando no espaço entre parênteses o número do enunciado da coluna A que mais relação tem com o da coluna B.

Coluna A

- 1. Existência do núcleo atômico

2. Imprecisão de medidas simultâneas
3. Caráter corpuscular da luz
4. Caráter ondulatório das partículas

Coluna B

- ( ) Hipótese de de Broglie
- ( ) Efeito fotoelétrico
- ( ) Princípio da incerteza de Heisenberg
- ( ) Experimento de Rutherford

A relação numérica correta, de cima para baixo, na coluna B, que estabelece a associação proposta, é:

- a) 4 - 3 - 2 - 1.
- b) 1 - 3 - 2 - 4.
- c) 4 - 2 - 3 - 1.
- d) 4 - 3 - 1 - 2.
- e) 4 - 1 - 2 - 3.

12. O modelo atômico de Bohr prevê órbitas para os elétrons em torno do núcleo, como em um sistema planetário. A afirmação "um elétron encontra-se exatamente na posição de menor distância ao núcleo (periélio) com velocidade exatamente igual a  $10^7$  m/s" é correta do ponto de vista do modelo de Bohr, mas viola o princípio:

- a) da quantização da energia.
- b) da conservação da energia.
- c) de Pascal.
- d) da incerteza de Heisenberg.
- e) da conservação de momento linear.

## Referências Bibliográficas

- ABRIL, Mídia. A revolução da Teoria Quântica. Disponível em: <http://super.abril.com.br/ciencia/a-revolucao-da-teoria-quantica>. Acesso em: 10 ago. 2016.
- CANATO JUNIOR, Osvaldo. Física quântica e formação docente: confluência de várias redes. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- GASPAR, Alberto. Compreendendo a Física: Ensino Médio. São Paulo: Ática, 2010.
- GLOBO, Comunicação e Participações. Modelos atômicos. Disponível em: <http://educacao.globo.com/quimica/assunto/estrutura-atmica/modelos-atomicos.html>. Acesso em: 10 ago. 2016.
- GROSSO, Mato. Secretaria de Estado de educação. Área de Ciências da Natureza e Matemática. Disponível em: <http://www.seduc.mt.gov.br/educadores/Documents/Políticas%20Educativas/orientações%20curriculares%20Educação%20Básica/LIVRO%20CIENCIAS%20DA%20NATUREZA%20E%20MATEMÁTICA%20com%20ficha%20catalografica.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2016.
- LIMA, Danilo José de. Física Moderna. Disponível em: [http://professordanilo.com/teoria/Downloads/2016/listas/FISICA\\_MODERNA.pdf](http://professordanilo.com/teoria/Downloads/2016/listas/FISICA_MODERNA.pdf). Acesso em: 10 ago. 2016.
- MORTIMER, Eduardo Fleury. Coleção Explorando o Ensino - Química, Brasília: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, 2006
- PENNA, Rodrigo. Questões corrigidas Física Moderna. Disponível em: <https://souvestibulando.files.wordpress.com/2012/03/fc3adsica-moderna.doc>. Acesso em: 10 ago. 2016.
- RIO VERDE, Cooperativa de Ensino. Lista de Exercícios. Disponível em: [http://www.colegiodna.com.br/exercicios/1940/lista\\_de\\_exercicios\\_pvs\\_05\\_12\\_2014.doc](http://www.colegiodna.com.br/exercicios/1940/lista_de_exercicios_pvs_05_12_2014.doc). Acesso em: 10 ago. 2016.

RIO VERDE, Cooperativa de Ensino. Lista de Exercícios. Disponível em:  
[http://www.colegiodna.com.br/exercicios/1940/lista\\_de\\_exercicios\\_pvs\\_10\\_04\\_2014.doc](http://www.colegiodna.com.br/exercicios/1940/lista_de_exercicios_pvs_10_04_2014.doc)  
. Acesso em: 10 ago. 2016.

VALENTIM, Fernando. Exercícios de Física. Disponível em:  
[http://www.futuromilitar.com.br/portal/attachments/article/122/fisica\\_moderna\\_lista\\_exercicios\\_futuro\\_militar.pdf](http://www.futuromilitar.com.br/portal/attachments/article/122/fisica_moderna_lista_exercicios_futuro_militar.pdf). Acesso em: 10 ago. 2016.