

DISCIPLINA

Arquitetura Atômica e Molecular

Natureza ondulatória da matéria

Autores

Ótom Anselmo de Oliveira
Joana D'Arc Gomes Fernandes

Data: / / Nome:

Material APROVADO (conteúdo e imagens)



aula

03



Programa Universidade a Distância
UNIDIS
Grad

Governo Federal

Presidente da República

Luiz Inácio Lula da Silva

Ministro da Educação

Fernando Haddad

Secretário de Educação a Distância – SEED

Ronaldo Motta

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Reitor

José Ivonildo do Rêgo

Vice-Reitor

Nilsen Carvalho Fernandes de Oliveira Filho

Secretária de Educação a Distância

Vera Lúcia do Amaral

Secretaria de Educação a Distância- SEDIS

Coordenadora da Produção dos Materiais

Célia Maria de Araújo

Coordenador de Edição

Ary Sergio Braga Olinisky

Projeto Gráfico

Ivana Lima

Revisores de Estrutura e Linguagem

Eugenio Tavares Borges

Marcos Aurélio Felipe

Pedro Daniel Meirelles Ferreira

Revisoras de Língua Portuguesa

Janaina Tomaz Capistrano

Sandra Cristinne Xavier da Câmara

Ilustradora

Carolina Costa

Editoração de Imagens

Adauto Harley

Carolina Costa

Diagramadores

Mariana Araújo Brito

Adaptação para Módulo Matemático

Thaís Maria Simplicio Lemos

Imagens Utilizadas

Banco de Imagens Sedis (Secretaria de Educação a Distância) - UFRN

Fotografias - Adauto Harley

MasterClips IMSI MasterClips Collection, 1895 Francisco Blvd,

East, San Rafael, CA 94901, USA.

MasterFile – www.masterfile.com

MorgueFile – www.morguefile.com

Pixel Perfect Digital – www.pixelperfectdigital.com

FreeImages – www.freeimages.co.uk

FreeFoto.com – www.freefoto.com

Free Pictures Photos – www.free-pictures-photos.com

BigFoto – www.bigfoto.com

FreeStockPhotos.com – www.freestockphotos.com

OneOddDude.net – www.oneodddude.net

Stock.XCHG - www.sxc.hu

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da publicação na Fonte. UFRN/Biblioteca Central “Zila Mamede”

Oliveira, Ótom Anselmo de

Arquitetura atômica e molecular / Ótom Anselmo de Oliveira, Joana D’arc Gomes
Fernandes – Natal (RN) : EDUFRN – Editora da UFRN, 2006.
280 p.

ISBN 85-7273-278-0

1. Ligações químicas. 2. Modelos atômicos. 3. Tabela periódica. I. Fernandes, Joana
D’arc Gomes. II. Título.

RN/UFR/BCZM 2006/18

CDU 541

CDD 541.5

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte deste material pode ser utilizada ou reproduzida sem a autorização expressa da UFRN - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Apresentação



Hidrogenóides

Hidrogenóides são íons que possuem apenas um elétron, tais como He^+ , Li^{2+} , Be^{3+} .

Na aula passada, você estudou a hipótese de Planck de quantização da energia radiante, a natureza dualística da luz e o modelo atômico de Bohr. Como vimos, esse modelo não foi capaz de explicar algumas particularidades dos espectros atômicos, ainda que fossem espécies químicas simples, como o átomo de hidrogênio ou **hidrogenóides**. Portanto, eram necessários novos esforços para solucionar tais problemas, bem como esclarecer questões relativas às propriedades físicas e químicas dos elementos. A elucidação dessas indagações surgiu com o desenvolvimento da mecânica quântica, ramo da física que estuda os movimentos das partículas microscópicas.

Nesta aula, estudaremos a proposta de De Broglie para o comportamento das partículas em movimento, e o princípio da incerteza de Heisenberg, que serviram de base para o desenvolvimento da equação de onda sugerida por Schrödinger para explicar o átomo de hidrogênio.

Objetivo

Compreender as bases conceituais relativas ao modelo atômico fundamentado na mecânica quântica.



Data: ___/___/___ Nome: _____

Material **APROVADO** (conteúdo e imagens)

A necessidade de uma nova teoria



Átomos multieletrônicos

Átomos com dois ou mais elétrons.

Louis de Broglie

Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie – físico francês, nascido em 1892. Recebeu o Prêmio Nobel de Física, em 1929, pelo seu trabalho que revelou o caráter ondulatório dos elétrons.

Ondas estacionárias

são aquelas que têm as extremidades fixas e os ventres e os nós não se deslocam.

O modelo proposto por Bohr não esclarecia como os elétrons estavam organizados nos átomos e também não explicava completamente seus espectros, mesmo para o caso do hidrogênio, que é a espécie química mais simples da natureza. Portanto, estava claro que, através dos princípios da física clássica, não era possível desenvolver uma teoria que explicasse fatos experimentais relevantes observados nos espectros atômicos.

Mesmo após a introdução de correções, o modelo de Bohr não era capaz de explicar detalhes dos espectros de **átomos multieletrônicos**. Essa e outras falhas indicavam que esse modelo era mais uma etapa na busca de uma teoria atômica geral que explicasse não só os espectros atômicos, como também as ligações químicas e outras propriedades inerentes aos átomos. Portanto, era necessário o desenvolvimento de novos modelos que explicassem esses fatos.

O comportamento ondulatório da matéria

Um passo importante para o desenvolvimento de uma nova teoria atômica foi a concepção de **Louis de Broglie**, a respeito do comportamento dos elétrons nos átomos. Em 1924, ele propôs que a matéria em movimento apresentava comportamento corpuscular e ondulatório, ou seja, tinha comportamento **dualístico, onda-partícula**.

Nesse período, a dupla natureza da energia radiante proposta por Einstein já era um fato reconhecido na comunidade científica. Entretanto, a ideia de De Broglie sobre a dupla natureza da matéria era revolucionária e, por isso, criticada por muitos. Nesse contexto, uma pergunta era crucial: se as partículas em movimento apresentam propriedades ondulatórias, que tipo de ondas estariam associadas a elas? De Broglie então sugeriu que o movimento das partículas estava associado a uma **onda estacionária** denominada **onda piloto**, cujas características são ilustradas na **Figura 1**.

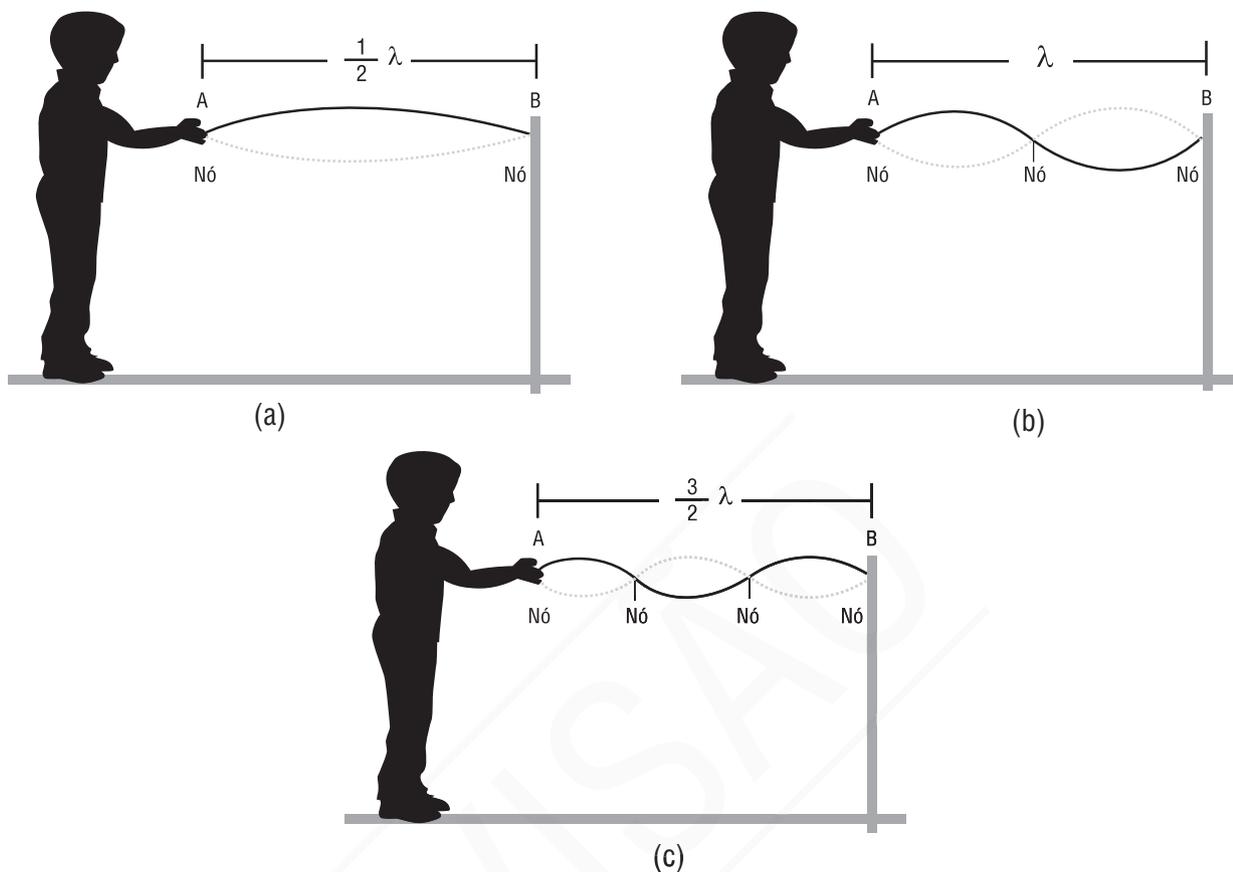


Figura 1 – Onda estacionária – Na onda (a) a distância entre os pontos A e B é $\frac{1}{2} \lambda$; na (b) de $\frac{1}{2} (2\lambda)$, que é igual a λ ; e na onda (c) de $\frac{1}{2} (3\lambda) = \frac{3}{2} \lambda$.

Ele também estabeleceu que a quantidade de movimento (p), ou **momento**, da partícula e o comprimento de onda, λ , da **onda piloto** estariam relacionados pela equação:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p} \text{ (equação denominada relação de De Broglie)}$$

na qual, h é a constante de Planck, igual a $6,6261 \times 10^{-34}$ J s.

Em 1927, Clinton Davisson e Lester Germer comprovaram através de experimentos o caráter ondulatório dos elétrons, observando a difração de elétrons, confirmando assim a hipótese de De Broglie sobre a dualidade da matéria.

Atualmente, a difração de elétrons é usada como fundamento de uma importante técnica de análise, utilizada para estudo de sólidos e de moléculas gasosas, e na investigação de superfícies dos sólidos.

Vamos agora refletir um pouco sobre a idéia de De Broglie.



Momento

O momento, p , de uma partícula é dado pelo produto da massa (m) da partícula pela velocidade (v), $p = mv$.

Onda piloto

Onda estacionária associada ao estado de energia de um elétron.

Nome: _____

Data: ____/____/____

Material **APROVADO** (conteúdo e imagens)

Exemplo 1

(a) Um jogador de futebol tem um chute muito forte, capaz de projetar uma bola de futebol, com massa de 800 g, a uma velocidade de 140 km h⁻¹. Qual o comprimento de onda associada ao movimento da bola?

(b) Um elétron, cuja massa é 9,1 x 10⁻³¹ kg, desloca-se a uma velocidade igual a 3,19 x 10⁶ m s⁻¹. Qual o comprimento de onda associado ao elétron?

Resolvendo o Exemplo 1



(a) Como vimos, o movimento de um corpo é descrito pela equação:

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

Para que você possa substituir os valores nessa equação, todas as unidades devem estar no mesmo sistema de medidas. Por isso, vamos convertê-las para o sistema internacional de medidas (**SI**), ou seja: as grandezas, **g** em **kg** e **km h⁻¹** em **m s⁻¹**.

SI

O sistema SI é o sistema métrico mais usado atualmente, foi aprovado em 1960 na XI Conferência Internacional de Pesos e Medidas. É o sistema de medidas reconhecido pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC).

Medidas	Unidades	Símbolos	
Comprimento	metro	m	
Massa	quilograma	kg	
Tempo	segundo	s	
Temperatura	Kelvin	K	
Energia	Joule	J	kg m ² s ⁻²
Quantidade de matéria	Mol	mol	
Frequência	Hetz	hz	s ⁻¹

Quadro 1 – Unidades básicas de sistema SI

Fazendo a conversão de g em kg e km h⁻¹ em m s⁻¹, teremos a massa *m*, de 800 g igual a

$$m = \frac{1,0 \text{ kg} \times 800 \text{ g}}{1000 \text{ g}} = 0,8 \text{ kg}$$

a velocidade *v* é de 140 km h⁻¹, então:

$$v = 140 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{10^3 \text{ m}}{1 \text{ km}} = 38,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

O próximo passo é substituir as grandezas com as unidades transformadas na equação

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

$$m = 0,8 \text{ kg}$$

$$v = 38,98 \text{ m s}^{-1}$$

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s e } J = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ s}}{0,8 \text{ kg} \times 38,98 \text{ m s}^{-1}} = 2,13 \times 10^{-35} \text{ m}$$

O comprimento de onda associado à bola de futebol é $2,13 \times 10^{-35} \text{ m}$.

(b) Vamos calcular agora o comprimento de onda associado a um elétron que se desloca a uma velocidade de $3,19 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$. A massa do elétron $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

Como todas as grandezas encontram-se em unidades do **SI**, não é necessária nenhuma transformação de unidades. Vamos, então, substituí-las diretamente na equação de De Broglie.

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

$$m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$v = 3,19 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$$

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ s}}{9,1 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 3,19 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}} = 2,28 \times 10^{-10} \text{ m}$$

Portanto, o **comprimento de onda** associado ao elétron é $2,28 \times 10^{-10} \text{ m}$ que corresponde a $0,228 \text{ nm}$.

Discutindo os resultados do Exemplo 1

O comprimento de onda associado à bola de futebol é da ordem de 10^{-31} m , valor tão pequeno em relação à massa da bola que não pode ser medido pelos instrumentos de medição disponíveis atualmente. Portanto, não podemos detectar fenômenos característicos de ondas, como difração, em uma bola de futebol ou em qualquer outro objeto macroscópico. Por outro lado, o comprimento de onda associado ao elétron é da ordem de 10^{-10} m , valor semelhante aos espaçamentos interatômicos nos sólidos cristalinos, por isso, é possível determinarmos o comprimento de onda associado ao elétron usando instrumentos de medidas.

Podemos concluir, portanto, que a proposição de De Broglie é válida para partículas subatômicas, como elétrons, prótons, nêutrons, entre outras, mas não para corpos macroscópicos.



Comprimento de onda

Geralmente, o comprimento de onda de partículas muito pequenas, como o elétron, é expresso em nm ou Å.

Nome: _____

Data: _____

Material **APROVADO** (conteúdo e imagens)



Atividade 1

Para responder as questões propostas nesta atividade, pesquise nas referências citadas no final da aula e na *Internet*.

- 1 Qual a diferença entre uma onda progressiva e uma onda estacionária?
- 2 Descreva como ocorre o fenômeno da difração de ondas.
- 3 Descreva sucintamente a experiência feita por Clinton Davisson e Lester Germer, a qual comprovou o comportamento ondulatório dos elétrons.

O princípio da incerteza de Heisenberg

É verdade que se pode medir ao mesmo tempo e com exatidão a posição e a velocidade de um corpo macroscópico, tal como um carro em movimento, pois o mesmo tem trajetória definida e, conseqüentemente, o momento linear e a posição podem ser especificados a cada instante. Mas, será possível medir com exatidão e simultaneamente a velocidade e a posição de partículas muito pequenas, como prótons, nêutrons e elétrons? Como essas partículas são subatômicas, não podemos enxergá-las nem mesmo com auxílio de um microscópio. Então, para se determinar a posição de um elétron, seria necessário fazer incidir sobre ele uma radiação de pequeno comprimento de onda. Porém, quando uma radiação interage com um elétron, suas velocidade e posição são alteradas, introduzindo uma “incerteza” na medida de velocidade e na posição do elétron no instante da colisão. Nessas condições, a precisão máxima na posição do elétron seria da ordem de um comprimento de onda da radiação utilizada.



Δx

Δ – letra grega delta. Δx lê-se delta x.

Heisenberg, entendendo que haveria restrições na exatidão das medidas feitas em sistemas subatômicos, estabeleceu que é impossível conhecer simultaneamente e com precisão a posição e o momento de partículas subatômicas. Para ele, o produto da incerteza na posição da partícula (Δx) pela incerteza na sua quantidade de movimento ($m\Delta v$) era sempre maior ou igual a $\frac{h}{4\pi}$. Essa relação ficou conhecida como **princípio da incerteza de Heisenberg**, e é expressa pela equação:

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

em que Δx é a incerteza na posição e Δp é a incerteza no momento da partícula.

Vamos agora aplicar o princípio da incerteza.

Exemplo 2

(a) Uma pedra com 1,0 g de massa foi jogada, atingindo a velocidade de 5,0 m s⁻¹. A velocidade da pedra foi determinada com a incerteza de 0,002 m s⁻¹. Calcule a incerteza mínima na posição da pedra.

(b) Calcule a incerteza mínima na posição de um elétron, se a sua velocidade é conhecida com uma incerteza de 2,0 x 10⁻³ m s⁻¹. A massa do elétron é 9,1 x 10⁻³¹ kg.

Resolvendo o Exemplo 2

(a) Dados: $m_{\text{pedra}} = 1,0 \text{ g}$

$$\Delta v = 0,002 \text{ m s}^{-1}$$

A massa não está dada do sistema **SI**. Precisamos transformar g para kg.

$$\begin{aligned} 1 \text{ kg} & \text{-----} 1000 \text{ g} \\ m & \text{-----} 1,0 \text{ g} \\ m & = \frac{1,0 \text{ kg} \times 1,0 \text{ g}}{1000 \text{ g}} \\ m & = 1,0 \times 10^{-3} \text{ kg} \end{aligned}$$

Usando a expressão de Heisenberg, calculamos a incerteza na posição da pedra.

$$\Delta x \cdot m\Delta v \geq \frac{h}{4\pi}$$
$$\Delta x \geq \frac{h}{4\pi m\Delta v}$$

$$\Delta x \geq \frac{6,623 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ s}}{4 \times 3,14 \times (1,0 \times 10^{-3} \text{ kg}) \times (2,0 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1})}$$

$$\Delta x \geq 2,64 \times 10^{-29} \text{ m}$$

(b) Dados: $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$

$$\Delta v = 0,002 \text{ m s}^{-1}$$

A incerteza na posição do elétron é determinada pela equação

$$\Delta x \geq \frac{h}{4\pi m \Delta v}$$

$$\Delta x \geq \frac{6,623 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ s}}{4 \times 3,14 \times (9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}) \times (2,0 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1})}$$

$$\Delta x \geq 2,9 \times 10^{-4} \text{ m}$$

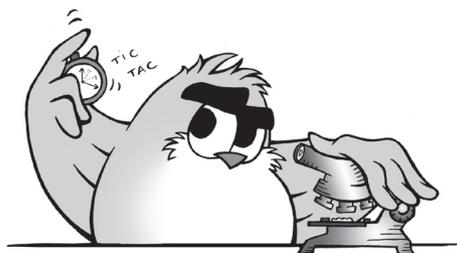
Discutindo os resultados do Exemplo 2

A incerteza na posição da pedra é tão pequena, da ordem de 10^{-29} m , que não pode ser percebida pelos instrumentos de medidas disponíveis atualmente. Assim, para fins práticos, a incerteza de corpos macroscópicos é totalmente desprezível. Já para o elétron, a incerteza é $2,9 \times 10^{-4} \text{ m}$, o que corresponde a $2,9 \times 10^5 \text{ nm}$, valor muito elevado quando se consideram as dimensões atômicas. Diante desse resultado, fica demonstrado ser impossível se determinar com precisão a posição de um elétron num átomo. Portanto, falar de trajetória de um elétron realmente não tem nenhum sentido.



Atividade 2

Por que o modelo atômico de Bohr, que você estudou na aula passada, é incompatível com o princípio da incerteza de Heisenberg?



Resumo

Como a física clássica não explicava satisfatoriamente o comportamento de sistemas microscópicos, era necessário buscar uma nova teoria capaz de explicar esses sistemas. De Broglie, fazendo a correlação do comportamento da luz com o da matéria, estabeleceu que a quantidade de movimento, mv , e o comprimento de onda, de uma onda piloto associada a uma partícula, estariam relacionados pela equação $\lambda = h/mv$. Na mesma época, Heisenberg enunciou o princípio da incerteza, estabelecendo que é impossível expressar com exatidão a **posição** e a **quantidade de movimento** de um elétron num átomo, com precisão menor que $h/4\pi$. Essas idéias levaram ao desenvolvimento de uma nova mecânica, denominada de mecânica quântica, na qual todos esses fenômenos são considerados.

Auto- Avaliação

- 1** Descreva as correlações existentes entre o comportamento dualístico proposto por Einstein, para os fótons, e por De Broglie, para as partículas.
- 2** A energia cinética ($E_c = \frac{1}{2} mv^2$) de uma partícula de massa $2,0 \times 10^{-31}$ kg é $3,6 \times 10^{-18}$ J. Calcule a velocidade e o comprimento de onda associado à partícula.
- 3** Calcule o comprimento de onda (em nanômetros) associado a um elétron ($m = 9,1 \times 10^{-31}$ kg) que se desloca com a velocidade de $2,7 \times 10^8$ m s⁻¹.
- 4** A velocidade de uma bala de rifle, de massa 1,5 g, é conhecida com uma precisão de $1,0 \times 10^{-5}$ m s⁻¹. Calcule a incerteza mínima na posição do projétil. Comente o resultado encontrado em termos da validade do princípio da incerteza para esse projétil.

Referências

ATKINS, P. W.; JONES, L. **Princípio de química**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

BRADY, J. E.; RUSSEL, J. E.; HOLUM, J. R. **Química: a matéria e suas transformações**. 3.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. v. 1 e 2.

GARRITZ, A.; CHAMIZO, J. A. **Química**. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

J. D. LEE. **Química inorgânica não tão concisa**. 5.ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1999.

KOTZ, J. C.; TREICHEL JR, P. **Química e reações químicas**. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. v. 1 e 2.

MAHAN, B. M.; MYERS, R. J. **Química: um curso universitário**. 4.ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1993.

SHRIVER, D. F.; ATKINS, P. W. **Química inorgânica**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

Secretaria de
Educação a Distância

Ministério
da Educação

