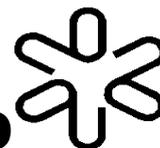




UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA



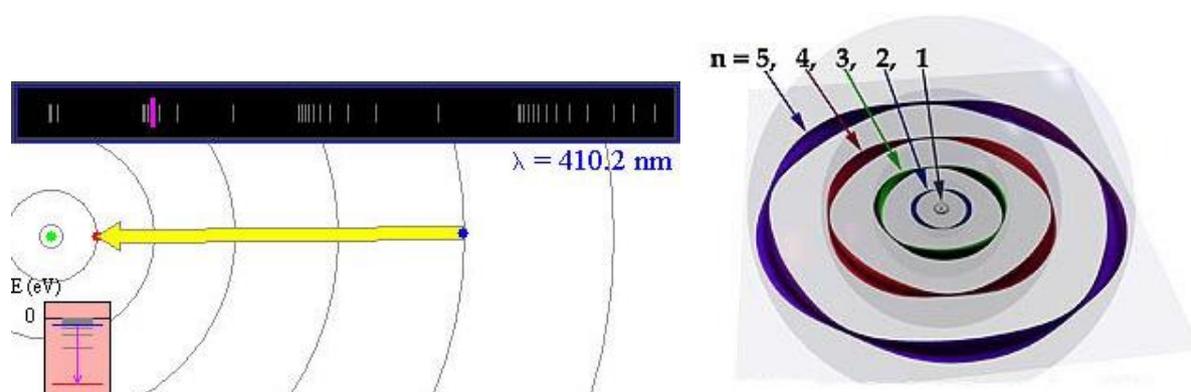
Física V - 4300311

2º SEMESTRE de 2012

Período: noturno

GUIA DE TRABALHO

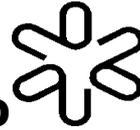
TÓPICO III – Modelos atômicos, as primeiras regras de quantização e o caráter dual da matéria: partícula-onda



Profª. Maria José (Mazé) Bechara



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA



Física V – 4300311 - período noturno
2º semestre de 2012
Profa. Maria José (Mazé) Bechara

Guia de trabalho

TÓPICO III – Modelos atômicos, as primeiras regras de quantização e o caráter dual da matéria: partícula-onda

Tempo previsto: ~11 aulas

Apresentação do Tópico:

O Tópico I apresentou, de forma simplificada, modelos de matéria e de seus constituintes, assim como aspectos da mecânica estatística (clássica) de Maxwell-Boltzmann, do final do século XIX, que descreve estatisticamente o sistema de muitos constituintes, cada qual com movimentos determinísticos.

O Tópico II se iniciou com o fenômeno da radiação do corpo negro, que é essencialmente a emissão por efeito de temperatura, que acontece porque os constituintes da matéria têm cargas elétricas constantemente aceleradas e desaceleradas. Para a descrição teórica da radiação emitida, foi necessária a primeira quantização com Planck, em 1900. Em seguida se discutiu o caráter dual da radiação eletromagnética, introduzido na Física por Einstein em 1905, e foram tratados alguns fenômenos que motivaram e confirmaram a existência de um caráter corpuscular, os fótons, no que se pensava ser apenas onda de natureza eletromagnética.

O Tópico III volta a tratar dos constituintes básicos da matéria no universo físico: os átomos, mas agora tentando revelar sua estrutura interna.

O tópico se inicia com os espectros experimentais de emissão de vapor de diversos elementos químicos, que mostram “linhas” de emissão (ou absorção). Estas foram as primeiras indicações experimentais da existência de algum tipo de estrutura nos átomos. Estes espectros do vapor de gás, associados aos picos característicos observados na produção de raios-X, indicavam uma estrutura com algum comportamento “quantizado”. **Ora, se os átomos têm estrutura não deveriam ser assim chamados pois a palavra átomo em grego significa indivisível. Mas o nome foi mantido por razões históricas.**

O tópico segue com a discussão de como os experimentos de **espalhamento elástico de partículas alfa por finas folhas de materiais sólidos, os experimentos de Rutherford, realizados em 1911, levaram à proposta de uma estrutura nucleada nos átomos.** Os resultados do experimento podem ser cálculos com a hipótese de que há um núcleo no qual há

carga positiva $+Ze$, e nele está a maior parte da massa atômica, e este núcleo tem um raio 100.000 vezes menor que o raio do átomo, definido pelos Z elétrons ao redor deste núcleo.

Mas este modelo de estrutura foi estabelecido em detalhes, como será visto, por **Bohr, em 1913, juntamente com proposta sobre as possíveis transições de um átomo. Ele propõe um modelo para a estrutura e as transições atômicas.** O modelo será trabalhado desde as hipóteses, algumas contrariando a Física Clássica, até as consequências do modelo, que adota na dinâmica das partículas, a mecânica newtoniana. *A quantização da energia decorrente no modelo, e a adoção da hipótese de emissão/absorção de um fóton em cada transição atômica possível, permitem prever o espectro de linhas observado experimentalmente.*

Depois do modelo de Bohr o tópico III trata da introdução de outras regras semi-clássicas de quantização para sistemas periódicos em geral, devidas a Wilson e Sommerfeld. Em seguida será apresentada a **proposta do físico Louis de Broglie (1924)**, com base na do universo físico, constituído de radiação eletromagnética e de partículas materiais de **caráter dual também para as partículas materiais: partícula-onda.**

O tópico III segue com a apresentação de **evidências experimentais do caráter ondulatório da matéria**, como a difração de feixe de partículas por cristais, e discute a **interpretação das relações de dispersão do espaço-momento e da energia-tempo de um pacote de onda de uma partícula material, conhecido como o princípio de incerteza de Heisenberg.**

O **caráter ondulatório da partícula na forma proposta por de Broglie foi a maneira escolhida nessa disciplina para introduzir a mecânica quântica.**

Mas esta é outra história que fica para um próximo (último) tópico...

Conteúdo detalhado

III.1 modelos atômicos e as primeiras regras de quantização

III.1.1 **Os espectros discretos de radiação emitida e absorvida por substâncias gasosas** indicando quantizações nos átomos – o que são, como são e como se observa. **O modelo de J.J. Thomson para o átomo:** descrição do estado fundamental e a possibilidade de emissão quantizada no átomo de hidrogênio. Os acertos e dificuldades do modelo.

III.1.2. **Os resultados do experimento de Rutherford que levam à proposta de átomo nucleado.** A estimativa do tamanho do núcleo a partir da comparação dos resultados experimentais da seção de choque diferencial versus energia incidente com os previstos no modelo do átomo nucleado de Rutherford.

III.1.3. **O modelo de Bohr para a estrutura e as transições no átomo de hidrogênio** e seu acordo com os espectros de emissão e absorção de experimentais de radiação eletromagnética. Os picos característicos dos espectros de produção de Raios-X e o modelo de camadas para os elétrons dos átomos (discussão qualitativa). **O experimento de Frank-Hertz.**

III.1.4 **A regra de quantização de Bohr-Sommerfeld.** Aplicações. Comparação com os resultados do modelo de Bohr para o átomo de H e da quantização de Planck para as oscilações harmônicas.

III.1.5. **A estrutura fina do espectro do átomo de hidrogênio e o efeito relativístico** na dinâmica dos constituintes do átomo de H.

III.2 O caráter dual das partículas materiais

III.2.1 **A proposta (teórica) de de Broglie do caráter dual das partículas materiais:** razões físicas e as relações que vinculam o caráter ondulatório ao corpuscular na radiação eletromagnética e nas ondas de partículas materiais.

III.2.2 **Possíveis ondas de partículas** materiais com módulo de velocidade constante (partícula presa em uma caixa e o átomo de H) na proposta de de Broglie. Quantizações decorrentes.

III.2.3 **A realidade do caráter ondulatório das partículas** revelado pioneiramente no **experimento de Davisson e Germer**. Outros experimentos que revelam o caráter ondulatório das partículas materiais.

III.2.4 **Os pacotes de onda na física ondulatória clássica** – velocidade de fase e da onda, e as relações de dispersão que vinculam posição e número de onda, tempo e frequência da onda. **Uma interpretação das relações do pacote de onda de partículas - o princípio de incerteza de Heisenberg** para a posição-momento linear e para a energia e tempo. A energia mínima das partículas segundo o princípio de incerteza. Relação entre o tempo característico de um estado não estável e a indeterminação na energia do estado.

Livros Textos - leia pelo menos um!

1. **Física Quântica** - Eisberg e Resnick; Editora Campus Capítulo 4 (tópico III.1) e Cap.3 (III.2).
2. **Notas de aulas de Roberto V. Ribas** - endereço na Internet: <http://www.dfn.if.usp.br/~ribas/arquivos.html>; Caps.4 e 5
3. **Modern Physics for scientists and engineers** de Thornton & Rex; Copyright © 2000 by Saunders College Publishing; Cap 4 (III.1) e Cap. 5 (III.2).

Outras referências

4. **Introduction to Atomic Physics** - Enge, Wehr e Richards; Copyright © 1972 by Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Cap.4 (tópico III.1) e Cap.5 (III.2).
5. **Física Moderna** - Paul A. Tipler e Ralph A. Llewellyn, terceira edição - traduzido para o português pela editora LTC, Caps. 4 e 5;
6. **Física Moderna – origens clássicas e fundamentos quânticos** – Francisco Caruso e Vitor Oguri; Editora Campus, Copyright © 2006 Elsevier Editora Ltda; Caps. 7.2.1,11, 12, 14.1 e 14.2.

Seguem questões para serem efetivamente trabalhadas para se chegar ao aprendizado. Há muitas mais no final dos textos sugeridos. As muitas questões do guia, algumas qualitativas e outras quantitativas, tratam dos diversos fenômenos e concepções próprios do tema. **Use os horários de atendimento para tornar mais eficiente o seu aprendizado.**

QUESTÕES REFERENTES AO TÓPICO III

modelo de Thomson para o átomo

1. (a) Em que o átomo de Thomson difere de uma distribuição aleatória de prótons e elétrons em uma região esférica? Justifique.
(b) Faça uma lista de objeções ao modelo atômico de Thomson.

2. A intensidade do campo elétrico a uma distância r do centro de uma esfera uniformemente carregada de raio R e carga total Q é $\vec{E} = \frac{Q\hat{r}}{4\pi\epsilon_0 R^3}$ quando $r < R$ e \hat{r} é o versor na região radial. Tal esfera corresponde à distribuição de cargas positivas no modelo de Thomson para o átomo de hidrogênio.
- (a) Mostre que um elétron nessa esfera executa um movimento harmônico simples em torno de seu centro. A partir de leis fundamentais da Física derive uma expressão matemática para a frequência deste movimento.
- (b) Calcule a frequência de oscilação do elétron para o caso do átomo de hidrogênio e compare com as frequências das linhas espectrais do átomo de hidrogênio.
3. Qual deve ser no modelo atômico de Thomson o raio de um átomo de um elétron para que ele irradie uma linha espectral de comprimento de onda $\lambda = 6000 \text{ \AA}$? Comente tal resultado diante do que se sabe sobre a emissão do átomo de H.

O experimento de Rutherford e interpretações de seus resultados - o átomo nucleado.

4. O chamado espalhamento de Rutherford é o espalhamento de um feixe de partículas alfa por uma folha sólida (alvo).
- a) Segundo a interpretação de Rutherford, qual é a interação relevante entre as partículas alfa e uma folha de ouro, por exemplo, no seu experimento? Dê os argumentos físicos qualitativos que dão sustentação a esta interpretação.
- b) Escreva a relação entre o número de partículas alfa que, desviados pelo alvo, entra em um detector colocado num dado ângulo θ em relação à direção do feixe incidente com:
- b.1) a energia cinética da partícula alfa;
- b.2) o ângulo do detector em relação à direção de incidência e os valores que tal ângulo pode ter;
- b.3) a carga da partícula alfa e do núcleo do alvo.
- Dê argumentos qualitativos para esta forma de dependência.
5. Mostre que o número de partículas alfa espalhadas em um ângulo θ ou maior, no espalhamento de Rutherford é:

$$N(\text{angulo} > \theta) = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \pi I \rho t \left(\frac{zZe^2}{mv^2}\right)^2 \cot^2 g^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

I = intensidade do feixe incidente de alfa;

ρ = densidade de partículas do "alvo";

t = espessura da folha;

v = velocidade das alfas incidentes

m = massa da partícula alfas

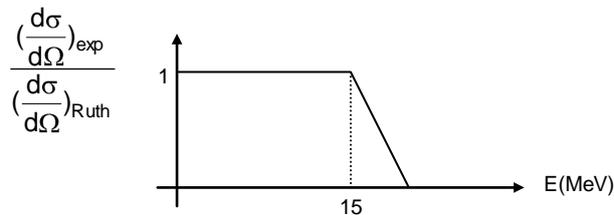
z = número de cargas elementares da partícula incidente (alfa)

Z = número de cargas elementares das partículas do alvo

6. Um feixe fino de partículas alfa de 4,8 MeV de energia cinética incide normalmente em um alvo de cobre de 10^{-4} cm de espessura. A intensidade do feixe é de 10^6 partículas por segundo e a densidade do cobre é $8,9 \text{ g.cm}^{-3}$. Quantas cintilações por minuto serão produzidas pelas partículas espalhadas numa tela fluorescente de $2 \times 2 \text{ mm}$, colocada a 5 cm do centro do alvo e numa direção de 60° com feixe incidente? Obs. Esta situação foi estudada no experimento pioneiro de Geiger e Marsden, colaboradores de Rutherford.

7. A fração de prótons com 6MeV espalhados por uma folha fina de ouro, cuja densidade é $19,3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, a partir de um feixe incidente em uma região onde os ângulos de espalhamento são maiores que 60° é igual a 2×10^{-5} . Calcule a espessura da folha de ouro..

- 8.
- Calcule o número de átomos por unidade de volume (n) para o ouro e para o alumínio, sabendo que a densidade do Au vale $19,3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ e a do Al vale $2,7\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.
 - Quando um feixe fino de partículas alfa de $4,8\text{MeV}$ incide normalmente sobre uma folha fina de Au de espessura $4 \times 10^{-5}\text{cm}$, um detector, colocado num ângulo de 20° em relação ao feixe incidente, recebe 2×10^4 partículas por segundo. Quantas partículas alfa serão detectadas no ângulo de 60° ?
 - Se a folha de Au for trocada por uma de Al, quantas partículas serão detectadas a 20° em um segundo, caso a nova folha tenha $6 \times 10^{-5}\text{cm}$ de espessura?
9. Um feixe de partículas alfa de energia E incide sobre um alvo fino de ouro e as partículas espalhadas são detectadas por um contador de partículas alfa.
- Quando o ângulo de detecção é de aproximadamente 180° em relação ao feixe incidente, variando-se a energia das partículas alfa incidentes verifica-se que a razão entre a seção de choque experimental $(d\sigma/d\Omega)_{\text{exp}}$ e a seção de choque prevista por Rutherford $(d\sigma/d\Omega)_{\text{Ruth}}$ apresenta o seguinte comportamento (de forma esquemática) :



O que significa $[(d\sigma/d\Omega)_{\text{exp}}/(d\sigma/d\Omega)_{\text{Ruth}}]=1$? E o decréscimo desta razão para energias acima de 15MeV ? Justifique.

- Usando o gráfico acima estime o raio nuclear.
 - Usando o gráfico acima determine o número de partículas que serão detectadas à 90° quando a folha de ouro tem 10^{-4}cm de espessura e o feixe 5MeV de energia incidente com 10^6 partículas por unidade de área e de tempo. O detector está colocado a 5cm do centro do alvo e tem uma área de 4mm^2 . A densidade do ouro é de $19,28\text{g}/\text{cm}^3$.
10. **Revisão de Mecânica I.** Uma bola de raio desprezível atinge uma esfera dura e lisa de raio R e sofre deflexão. Quando o choque é elástico, o ângulo β de incidência é igual ao de emergência, com relação à normal a esfera no ponto de contato.
- Mostre que o parâmetro de impacto b e o ângulo de espalhamento θ estão relacionados pela seguinte expressão: $b=R\cos(\theta/2)$.
 - Se a intensidade do feixe incidente é I_0 quantas partículas são espalhadas em ângulos maiores do que θ ? Justifique.
 - Determine a seção de choque diferencial do espalhamento e comente o significado físico dela não depender dos ângulos θ e ϕ das coordenadas esféricas.
 - Mostre que a seção de choque total σ é igual a πR^2 .

modelo de Bohr para a estrutura e transições atômicas e a regra de quantização de Wilson-Sommerfeld

11. Usando a fórmula de Bohr para a energia dos estados do átomo de hidrogênio, calcule os três maiores comprimentos de onda da série de Balmer. Entre que limites de comprimento de onda está a série de Balmer?

12. Usando a fórmula de Bohr para a energia dos estados do átomo de hidrogênio calcule o menor comprimento de onda da série de Lyman, da série de Paschen e da série de Pfund para o hidrogênio. Em qual região do espectro eletromagnético está cada uma das referidas séries?
13. O que diz o “princípio da correspondência” de Bohr?
14. Um núcleo de tungstênio ($Z=74$) tem um elétron em órbita circular.
- Com base no modelo de Bohr determine a mais baixa energia do sistema elétron + núcleo de tungstênio a partir da energia do estado fundamental do hidrogênio. Justifique.
 - Calcule o comprimento de onda que deve ter um feixe de radiação eletromagnética para que, incidindo sobre o sistema elétron+núcleo de tungstênio, promova uma transição no tungstênio para o estado de energia mais próximo da energia mínima. Onde se localiza esse fóton no espectro eletromagnético?
 - O fato de o tungstênio na natureza ter 74 elétrons faz com que a energia mínima de um elétron seja maior, menor ou igual aquela calculado no item (a)? Justifique.
15. Adotando o modelo atômico de Bohr:
- Calcule a energia total do estado fundamental do átomo de He admitindo que os dois elétrons estejam na órbita $n=1$ e desprezando todas as interações entre eles.
 - Considerando agora a repulsão mútua devido às cargas dos elétrons, e supondo que eles mantenham entre si a distância máxima na órbita com $n=1$ (velocidade relativa nula) calcule a energia elétrica de interação entre eles.
 - Com base nos cálculos acima, estime a energia de ionização do átomo de He. Compare o resultado com o valor experimental 24,6eV , e comente.
16. Os estados excitados de um átomo hipotético de um elétron (**não é o átomo de hidrogênio**) têm as seguintes energias de excitação (energias acima do estado fundamental): 5,0; 7,0; 8,0 e 8,5eV. Um feixe de radiação contendo fótons de 8,0; 6,0; 5,0; 3,0; e 0,5eV atravessa uma amostra desses átomos hipotéticos.
- Determine os comprimentos de onda que existem no feixe. Faça um gráfico da intensidade versus a frequência do feixe, supondo que há igual número de fótons com as energias dadas acima.
 - Faça um diagrama dos níveis de energia deste átomo.
 - Quais fótons do feixe são absorvidos se todos os átomos estão no estado fundamental?
 - Quais fótons dos feixes são absorvidos se há átomos na amostra tanto no estado fundamental como em todos os estados excitados acima citados?
 - Qual a quantidade de movimento de recuo do átomo no decaimento do terceiro estado excitado para o primeiro estado excitado? Justifique.
17. Utilize o modelo de Bohr do átomo de hidrogênio para mostrar que durante a transição do estado com número quântico n para o estado de $n-1$, a frequência ν da radiação luz emitida é dada pela relação:

$$\nu = \left(\frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^3} \right) \frac{2n-1}{(n-1)^2 n^2}$$

- Mostre que quando $n \rightarrow \infty$ a expressão acima varia com $\frac{1}{n^3}$.
- Obtenha classicamente a frequência de revolução de um elétron na órbita circular, e mostre que esta frequência coincide com o seu resultado ao item (a) obedecendo ao princípio da correspondência.
- Como fica o princípio de correspondência para transição entre estados não sucessivos em n (ainda para $n \rightarrow \infty$). Justifique.

18. Uma partícula de massa m se move em uma órbita circular de raio r sob a ação de uma força $F = -kr$ ($k > 0$). Admitindo que os postulados de Bohr se apliquem a esse sistema:
- Determine os raios das órbitas permitidas e as energias dessas órbitas em função do número quântico n .
 - Mostre que a frequência da radiação emitida, quando uma partícula faz uma transição de uma órbita para outra adjacente, é igual a frequência de seu movimento circular.
 - Como você explica a validade do princípio de correspondência neste sistema?
19. (a) Mostre, usando o resultado do eletromagnetismo clássico e a quantização de Bohr, que o momento magnético de uma órbita circular no átomo de hidrogênio é dado por

$$\mu = \frac{n h e}{4 \pi m_e}$$

(b) Calcule o momento magnético da órbita do hidrogênio para $n=1$. (Obs. Esse é chamado de magnéton de Bohr μ_B .)

- 20.
- Determine o momento angular da Terra (massa 6×10^{24} kg) em seu movimento em torno do Sol (admita órbita circular de raio $= 1,5 \times 10^{11}$ m).
 - Determine o momento angular de uma pessoa de 50 kg em órbita circular de raio $r=1$ m e velocidade constante de 5 m/s.
 - Adotando a quantização de Bohr determine o valor do número quântico n associado aos momentos angulares dos sistemas acima.
 - Segundo o entendimento atual da Física, a quantização existe nestes sistemas? É possível de ser observada? Justifique.
21. Em uma experiência de Franck-Hertz bombardeia-se uma amostra de gás de hidrogênio atômico com elétrons livres acelerados por diferenças de potenciais e são obtidos os chamados potenciais de excitação em 10,21 V e 12,01 V.
- O que você entende por potenciais de excitação no experimento de Frank - Hertz? Justifique.
 - Explique a observação de três linhas diferentes de emissão espectral que acompanham esse experimento com os potenciais de excitação dados.
 - Adotando o processo de transição entre níveis atômicos como proposto por Bohr determine os valores das diferentes frequências ν emitidas pela amostra gasosa de hidrogênio atômico.
22. Usando a regra de quantização de Wilson-Sommerfeld determine os níveis de energia de um oscilador harmônico simples unidimensional.

23. (a) Usando a regra de quantização de Wilson-Sommerfeld mostre que as energias de uma partícula de massa m , em movimento unidimensional livre de forças, entre duas paredes distantes L com as quais sofre colisões elásticas ("partícula dentro da caixa"), são dadas por:

$$E_n = \frac{n^2 (hc)^2}{8mc^2 L^2}$$

- Esboce o diagrama de níveis de energia (em eV) de elétrons dentro de uma caixa de 1 \AA de largura.
- Calcule os comprimentos de onda (em angstroms) dos fótons nas transições dos estados com $n=2$, $n=3$, $n=4$ para o estado fundamental neste sistema.
- Você conhece algum sistema físico que possa ser representado por uma caixa desta dimensão? E algum processo como o descrito no item (c)? Justifique.

O caráter dual: ondulatório-corpúscular das partículas materiais, proposto por de Broglie

24. Calcule o comprimento de onda de de Broglie de:

- a) elétron com energia cinética de 50eV.
- b) elétron com energia total de 10MeV.
- c) nêutron em equilíbrio térmico com T=500K (nêutron térmico).
- d) partícula alfa com energia cinética de 60MeV.
- e) grão de poeira de 1×10^{-6} g em equilíbrio térmico na temperatura ambiente (T=300K).
- f) bolinha de 1g com velocidade de 1 mm/s.

Para cada caso encontre um exemplo de sistema físico na natureza real com o qual a partícula deve interagir para mostrar seu caráter ondulatório.

25. Um microscópio eletrônico usa as ondas de de Broglie para “ver” objetos muito pequenos (dimensão da ordem de angstroms). Qual a diferença de potencial acelerador que deve ser usado para acelerar elétrons, a partir do repouso, de modo a obter um comprimento de onda de $0,5\text{Å}$?
26. Qual deve ser a energia cinética de um elétron para que seu comprimento de onda de de Broglie seja igual ao comprimento de onda da luz azul? Justifique.
- 27.
- (a) Calcule o comprimento de onda de de Broglie de um elétron com energia cinética de 13,6eV (energia de ionização do átomo de hidrogênio).
 - (b) Qual é a razão entre este comprimento de onda e o raio da primeira órbita de Bohr no átomo de hidrogênio?
28. Que tamanho deve ter um corpo para exibir efeitos de difração ao ser bombardeado com nêutrons de 10MeV? Existe algum sistema na natureza com dimensões desta ordem de grandeza? Justifique.

As relações de dispersão de uma onda e o princípio de incerteza de Heisenberg para a onda de partículas materiais

29. Em uma caixa unidimensional de largura $0,2\text{nm}$ ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$) há partículas com energia cinética constante.
- a) Determine a mais baixa energia possível um próton dentro desta caixa, segundo o princípio de incerteza.
 - b) Idem para um elétron.
 - c) Explique a diferença entre os resultados encontrados.
 - d) Que sistema físico tem a dimensão desta caixa?
30. Uma partícula de massa m oscila sujeita ao potencial $v(x) = \frac{1}{2} kx^2$. Use o princípio da incerteza para calcular a energia mínima de oscilação da partícula em termos da frequência angular $\omega = (k/m)^{1/2}$.
31. O elétron de um átomo de hidrogênio transita do estado fundamental para o estado $n=2$ e aí permanece por 10^{-8}s antes de decair de volta para o estado fundamental.
- (a) Calcule a largura natural em eV da energia do estado $n=2$.
 - (b) Determine a razão entre o seu resultado do item anterior com a energia deste nível segundo o modelo de Bohr: $-3,39\text{eV}$. Comente.
32. Se uma linha telefônica pode transmitir uma faixa de frequências $\Delta f = 5000\text{ Hz}$, qual é a duração aproximada do pulso mais curto que a linha é capaz de transmitir? Justifique

33. Escreva todas as relações de incerteza para uma partícula em movimento **tridimensional**. Diga em palavras o seu entendimento do significado do princípio de incerteza para esta partícula.
34. A energia de um estado nuclear pode ser medida com uma indeterminação de 1eV. Qual é o tempo de vida mínimo deste estado, segundo o princípio de incerteza? Compare o tempo do decaimento atômico (questão 31) com o nuclear.
35. Se um estado excitado de um átomo tem um tempo de vida de 10^{-7} s, qual é a indeterminação na energia dos fótons emitidos por este átomo em uma transição espontânea para o estado fundamental, segundo o princípio de incerteza? E no comprimento de onda emitido? Faça um esboço da intensidade dos fótons emitidos versus a frequência, mostrando no gráfico a largura natural (associada a esta indeterminação) da linha de emissão; e outro da intensidade versus o comprimento de onda. Comente.
36. Um próton e uma bala de revólver de 10g se movem com uma velocidade de 500m/s, medida com uma precisão de 0,01%. Se as posições dos dois objetos são medidas ao mesmo tempo em que as respectivas velocidades, qual é a maior precisão possível das medidas de posição, segundo o princípio de incerteza? Justifique.