Institute of Physics

Fundamentals of Chemistry

for Physics

L. R. Ximenes

2023

Guia de estudos

2

Lucas R. Ximenes dos Santos - 11917239

Para resolver os exercícios, utilizei alguns livros/artigos para solução dos problemas. Para cada exercício, colocarei referências que utilizei e que podem complementar a pergunta. As referências estarão abaixo das soluções. No final do documento constam todas elas em ordem alfabética.

Exercício 1

Defina onda eletromagnética. Qual é a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas

Solução:

Uma onda eletromagnética é uma perturbação oscilatória que se propaga através do espaço, composta por campos elétricos e magnéticos que oscilam perpendicularmente entre si e à direção de propagação da onda. As ondas eletromagnéticas são descritas pela equação de onda eletromagnética, que relaciona a variação dos campos elétricos e magnéticos com a variação do tempo e do espaço.

A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas é constante e igual a velocidade da luz no vácuo, aproximadamente 299792458 m/s. Essa constância da velocidade é uma das principais características das ondas eletromagnéticas e é fundamentada na teoria da relatividade de Einstein. Além disso, a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas pode variar em meios materiais, sendo dependente das propriedades elétricas e magnéticas do material.

Referências: P. Atkins (2002), Maxwell (1865) e McQuarrie (1997)

Exercício 2

(i) Defina espectro eletromagnético/região espectral.

(ii) Monte uma Tabela indicando as regiões do espectro eletromagnético em uma das colunas e nas outras duas colunas a faixa de frequência (Hz) e comprimentos de onda (m), respectivamente.

(iii) Compare a ordem de grandeza entre os extremos da região do espectro eletromagnético.

Solução:

(i) Espectro eletromagnético/região espectral se refere à faixa contínua de frequências e comprimentos de onda de todas as ondas eletromagnéticas possíveis.

Referências: Griffiths (2013) e Rybicki e Lightman (2004)

(ii) Tabela com as respectivas regiões do espectro eletromagnético:

Região Espectral	**Frequência (Hz)**	**Comprimento de Onda (m)**
Raios Gama	$> 10^{19}$	$< 10^{-11}$
Raios X	$10^{16} \sim 10^{19}$	$10^{-11} \sim 10^{-8}$
Ultravioleta	$10^{15} \sim 10^{16}$	$10^{-8} \sim 10^{-7}$
Visível	$4 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14}$	$4 \times 10^{-7} \sim 7.5 \times 10^{-7}$
Infravermelho	$10^{12} \sim 10^{14}$	$10^{-5} \sim 10^{-8}$
Micro-ondas	$10^{9} \sim 10^{12}$	$10^{-2} \sim 10^{-5}$
Ondas de rádio	$< 10^{9}$	$> 10^{-2}$

Referências: Trelles (2013)

(iii) A diferença entre os extremos do espectro eletromagnético é de cerca de 27 ordens de magnitude em frequência e 23 ordens de magnitude em comprimento de onda. Os comprimentos de onda diminuem à medida que as frequências aumentam, o que implica que as energias das ondas também aumentam. Os extremos do espectro eletromagnético, portanto, representam faixas de energia muito diferentes, desde a alta energia dos raios gama até a baixa energia das ondas de rádio.

Referências: Mori (2009) e Stacey (2016)

Exercício 3

Calcule a velocidade da luz amarela padrão ($\lambda = 589$ nm) nos seguintes meios:

Meio	Índice de Refração (n)
Água	1.33
Glicerina	1.47
Diamante	2.42

Solução:

A velocidade da luz em um meio é dada pela relação:

$$v = \frac{c}{n}$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo e n o índice de refração do meio. Para a luz amarela padrão ($\lambda = 589$ nm), temos portanto que:

$$c = 299792458 \text{ m/s}$$

Para a água, temos:

$$v_{\text{água}} = \frac{c}{n} = \frac{299792458}{1.33} = 225428258.6 \text{ m/s}$$

Para a glicerina:

$$v_{\text{glicerina}} = \frac{c}{n} = \frac{299792458}{1.47} = 203712079.5 \text{ m/s}$$

Por fim, para o diamante, temos:

$$v_{\text{diamante}} = \frac{c}{n} = \frac{299792458}{2.42} = 123846863.6 \text{ m/s}$$

Resumindo, a velocidade da luz amarela padrão em cada um dos materiais é:

$$\boxed{v_{\text{água}} = 2254282458.6 \text{ m/s} \approx 0.75c} \tag{1.1}$$

$$\boxed{v_{\text{glicerina}} = 203712079.5 \text{ m/s} \approx 0.68c} \tag{1.2}$$

$$\boxed{v_{\text{diamante}} = 123846863.6 \text{ m/s} \approx 0.41c} \tag{1.3}$$

Referências: Born e Wolf (1999), Hecht (2017) e Saleh e Teich (2019)

Exercício 4

Explique e defina:

(i) Em física o que é “corpo negro”?

(ii) Qual é o comportamento da luz emitida de um corpo negro em função da temperatura (vide por exemplo, slide 12 da aula 02)?

(iii) O que deveria ser observado na radiação de um corpo negro segundo a física clássica, também conhecido como "catástrofe do ultravioleta"?

Solução:

(i) Em física, um "corpo negro" é um objeto ideal que absorve completamente toda a radiação eletromagnética que incide sobre ele, sem refletir ou transmitir qualquer energia. Ou seja, é um objeto que não apresenta nenhuma perda de energia por radiação ou por outras formas de transferência de energia.

Referências: Kirchhoff (1860) e Planck (1900, 1914)

(ii) A luz emitida por um corpo negro depende diretamente da sua temperatura. À medida que a temperatura do corpo negro aumenta, ele emite radiação eletromagnética em uma ampla gama de comprimentos de onda, com maior intensidade em comprimentos de onda mais curtos. À temperatura ambiente, o corpo negro emite principalmente radiação infravermelha, que é invisível aos nossos olhos.

Referências: Planck (1914) e Ryder (2019)

(iii) De acordo com a física clássica, um corpo negro deveria emitir uma quantidade infinita de radiação de alta frequência (como a luz ultravioleta), o que não é observado na prática. Esse problema é conhecido como "catástrofe do ultravioleta". Esse problema ocorreu porque a física clássica assumia que a energia dos osciladores elétricos nos corpos negros aumentaria infinitamente com a frequência da radiação eletromagnética, o que é claramente uma violação das leis da termodinâmica. A solução para este problema veio com a teoria quântica, que descreve a radiação eletromagnética como uma coleção de fótons, cuja energia está quantizada.

Referências: Born (1999) e Rayleigh (1900)

Exercício 5

Quando se aquece um objeto metálico este emite luz (exemplo: uma resistência de churrasqueira elétrica ou filamento de uma lâmpada). O aumento da temperatura aumenta as vibrações dos átomos do metal. A uma dada temperatura, entretanto, não temos todos os átomos do metal vibrando em uma mesma frequência, mas sim, uma distribuição de frequências de vibração no metal.

(i) Utilizando a argumentação acima, descreva como Planck explicou o comportamento da radiação do corpo negro em função da temperatura.

(ii) O que é a equação de Planck e como ela se correlaciona com o comportamento da radiação do corpo negro.

(iii) Defina “quanta” de energia.

(iv) Calcule a energia (J) de um quanta de radiação na região do micro-ondas de frequência $5 * 10^9$ Hz.

Solução:

(i) Planck propôs que a energia radiante não era contínua, mas sim quantizada, ou seja, emitida e absorvida em pacotes discretos denominados “quanta”. Ele sugeriu que a energia dos quanta radiantes era diretamente proporcional à frequência da radiação e que os átomos do metal só poderiam vibrar com frequências múltiplas desses quanta.

(ii) A equação de Planck relaciona a energia de um quantum de radiação com sua frequência por meio da constante de Planck, h:

$$E = h\nu$$

Essa equação descreve a energia da radiação eletromagnética em termos de “quanta” de energia.

(iii) “Quanta” de energia são pacotes discretos de energia emitidos ou absorvidos por átomos e moléculas quando ocorrem transições de um estado de energia para outro. A energia em um quantum é proporcional à frequência da radiação.

(iv) Para calcular a energia de um quanta de radiação com frequência $\nu = 5 * 10^9$ Hz, podemos usar a equação de Planck:

$$E = h\nu = 6.626 * 10^{-34} * 5 * 10^9$$

$$\boxed{E = 3.31 * 10^{-24} \text{ J}} \tag{1.4}$$

Referências: Eisberg e Resnick (1985), Griffiths (2005) e Planck (1900)

Exercício 6

Einstein comprovou que a “quantização” da energia proposta por Planck para explicar o comportamento do corpo negro era um fenômeno mais geral ao estudar o efeito fotoelétrico.

(i) Descreva o efeito fotoelétrico. A equação de Einstein para descrever o efeito fotoelétrico é:

$$E = E_0 + E_c$$

ou em termos quantizados:

$$h\nu = h\nu_0 + \frac{mV^2}{2}$$

(ii) Qual o significado dos termos E, E^0 e E_c?

(iii) Em relação ao comportamento fotoelétrico assinale verdadeiro (V) ou falso (F):

(a) A frequência inicial (ν_0) a partir da qual se observa o efeito fotoelétrico é a mesma para qualquer material constituinte do foto-ânodo, e não varia com a temperatura ( )

(b) A incidência no foto-ânodo de radiação eletromagnética de frequência $\nu > \nu_0$ resulta em um aumento da intensidade de corrente e numa diminuição na velocidade dos elétrons que são retirados do foto-ânodo ( )

(c) A incidência no foto-ânodo de radiação eletromagnética de frequência $\nu > \nu_0$ resulta em um aumento da velocidade dos elétrons ejetados e a intensidade de corrente permanece constante ( )

(d) Conhecendo ν_0 e ν é possível determinar a velocidade dos elétrons ejetados ( )

(e) Quanto maior a intensidade da radiação incidente de frequência $\nu > \nu_0$ maior será a intensidade de corrente, porém não ocorre aumento na velocidade dos elétrons ejetados ( )

Solução:

(i) O efeito fotoelétrico é o fenômeno no qual elétrons são ejetados de um material quando este é iluminado por radiação eletromagnética. A equação de Einstein para descrever o efeito fotoelétrico estabelece que a energia (E) dos elétrons ejetados é igual à energia de um fóton incidente (E^0) mais uma energia cinética mínima (E_c) necessária para retirar o elétron do material. De forma quantizada, essa equação pode ser escrita como $h\nu = h\nu_0 + \frac{mV^2}{2}$, onde h é a constante de Planck, ν é a frequência da radiação incidente, ν_0 é a frequência mínima necessária para ejetar elétrons do material, m é a massa do elétron e V é sua velocidade.

(ii) Os termos da equação de Einstein são:

- E: energia dos elétrons ejetados do material;
- E^0: energia do fóton incidente;
- E_c: energia cinética mínima necessária para retirar o elétron do material.

(iii) (a) (F) A frequência mínima necessária para ejetar elétrons varia com o material constituinte do foto-ânodo e com a temperatura.

(b) (F) A intensidade de corrente aumenta com a frequência da radiação incidente, e a velocidade dos elétrons ejetados aumenta com a frequência da radiação incidente.

(c) (V) A intensidade de corrente permanece constante, e a velocidade dos elétrons ejetados aumenta com a frequência da radiação incidente.

(d) (V) A partir das frequências conhecidas, é possível determinar a energia cinética mínima dos elétrons ejetados e, consequentemente, sua velocidade.

(e) (F) A intensidade de corrente aumenta com a intensidade da radiação incidente, e a velocidade dos elétrons ejetados aumenta com a frequência da radiação incidente.

Referências: Einstein (1905) e Millikan (1916)

Exercício 7

(i) Explique conceitualmente qual é a diferença de uma onda de luz verde e um fóton verde.

(ii) Segundo a assunção de Einstein um fóton é uma onda ou uma partícula? Justifique.

(iii) Uma luz verde ao apresentar refração é onda ou fóton? Ao incidir em um dispositivo fotoelétrico e gerar uma corrente é onda ou fóton? Justifique.

Solução:

(i) Uma onda de luz verde é uma onda eletromagnética que possui uma frequência específica correspondente à cor verde. Já um fóton verde é uma partícula elementar da luz, que possui uma energia específica correspondente à frequência da luz verde.

Referências: Feynman, Leighton e Sands (2011) e Hecht (2017)

(ii) Segundo a assunção de Einstein, um fóton é uma partícula. Ele propôs que a luz é composta por partículas de energia, chamadas de fótons, que possuem características tanto de onda quanto de partícula.

Referências: Einstein (1905)

(iii) Quando a luz verde se propaga no ar e passa para outro meio, como o vidro, ela sofre refração, o que é um comportamento típico de uma onda. Já quando a luz verde incide em um dispositivo fotoelétrico e gera uma corrente elétrica, esse comportamento é típico de um fóton. Isso porque o efeito fotoelétrico ocorre quando um fóton interage com um elétron no dispositivo, transferindo sua energia e liberando o elétron. Portanto, a luz pode se comportar tanto como onda quanto como partícula, dependendo do contexto em que ela é observada.

Referências: Eisberg e Resnick (1985) e Griffiths (2013)

Exercício 8

Assista a algum vídeo que trata do tema do efeito fotoelétrico e coloque o endereço do link.

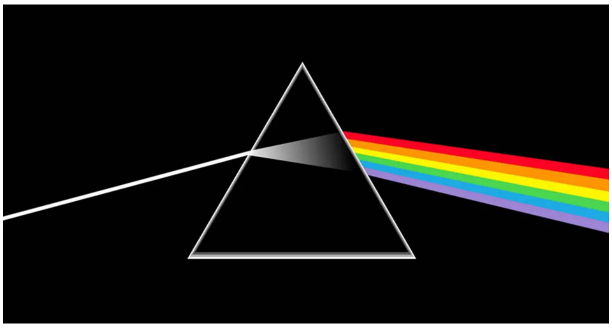
Solução:

Um vídeo no YouTube que aborda o efeito fotoelétrico é **Albert Einstein and The Photoelectric Effect | AMS OpenMind** produzido pelo canal **OpenMind**. O vídeo apresenta uma discussão sobre a história da descoberta do efeito fotoelétrico e como isso levou à teoria quântica, além de uma breve análise um pouco mais profunda da equação de Einstein para o efeito fotoelétrico. O vídeo está em inglês. Aqui está o link:

https://www.youtube.com/watch?v=0b0axfyJ4oo (1.5)

Exercício 9

Abaixo temos representada a capa do LP "**The Dark Side of The Moon**" do grupo inglês **Pink Floyd**, lançado em 1973.



(i) A luz que emerge do prisma é característica de um espectro contínuo ou de um espectro de linhas? Justifique.

(ii) O que você entende por um espectro de linhas?

Solução:

(i) A luz que emerge do prisma na capa do LP "**The Dark Side of The Moon**" é característica de um espectro de linhas. Isso pode ser observado pelas bandas de cores distintas presentes no espectro, cada uma delas representando uma determinada frequência de luz. Esse padrão é típico de um espectro de linhas, que é gerado pela emissão ou absorção de luz por átomos em um gás ou sólido.

Referências: P. W. Atkins e Jones (2012) e Bowen et al. (1996)

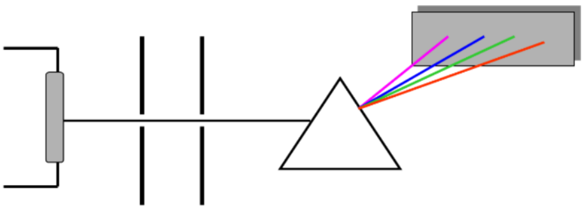
(ii) Um espectro de linhas é um padrão de frequências de luz que aparecem como linhas brilhantes ou escuras em um espectro. Essas linhas são geradas pela emissão ou absorção de luz por átomos em um gás ou sólido, e cada linha representa uma determinada frequência de luz associada a uma transição eletrônica específica. Espectros de linhas são úteis para identificar os elementos químicos presentes em uma amostra, uma vez que cada elemento tem um padrão de linhas de emissão e absorção característico.

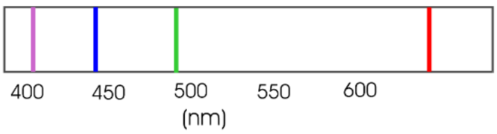
Referências: Brown et al. (2010) e Pimentel e McClellan (1960)

Exercício 10

Quando gás hidrogênio a baixa pressão contido em uma ampola de Crookes é submetido a uma descarga elétrica este gás emite luz rosa-avermelhada, como pode ser observado abaixo:

Incidindo esta luz em um prisma ou rede de difração se observa a existência de quatro linhas correspondentes a quatro comprimentos de onda distintos na região visível do espectro eletromagnético. (vide esquema na sequência)





(i) Quais são os comprimentos de onda em nanômetros destas quatro linhas?

Ao analisar o espectro de linhas da emissão do hidrogênio o matemático suíço Johan J. Balmer formulou em 1848 uma expressão matemática que correlaciona os comprimentos de onda (λ) destas linhas de emissão com números inteiros (n) segundo:

$$\frac{1}{\lambda} = \overline{\nu} = R\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

Para estes quatro comprimentos de onda Balmer observou que $n_f = 2$. Logo, n_i assumirá valores inteiros > 2. Essa série de linhas (comprimentos de onda) na região do visível é denominada série de Balmer. A análise do espectro de emissão do hidrogênio mostrou que além da série de Balmer, existem outros conjuntos de linhas em outras regiões do espectro eletromagnético (ultravioleta, infravermelho). Estes conjuntos de linhas também obedecem a expressão de Balmer, contudo, para outros valores de n_f (por exemplo: a série de Lyman $n_f = 1$, e obviamente $n_i > 1$). Portanto, a emissão do hidrogênio pode ser descrita matematicamente assumindo-se simplesmente dois números inteiros, sendo cada série determinada por um n_f característico.

(ii) Calcule os comprimentos de onda na série de Balmer em m (metros) e nm (nanômetros), e compare com os valores que você respondeu em (i). Lembre-se de usar ao menos quatro algarismos significativos ao longo dos cálculos.

(iii) A equação de Balmer também pode ser reformulada de tal forma que seja feita a correlação com a frequência (ν, ou f), ao invés do comprimento de onda, sendo que para a série de Balmer assume a forma:

$$\nu = 8.2202 * 10^{14} \left(1 - \frac{4}{n^2}\right)$$

Levando em consideração:

(a) o valor da constante de Rydberg;

(b) que se trata da série de Balmer

(c) lembrando que $c = \lambda\nu$,

deduza a expressão em função da frequência mostrada acima a partir da equação em função do comprimento de onda.

(iv) Calcule a expressão em função da frequência para a série de Lyman.

Solução:

(i) As quatro linhas observadas no espectro de emissão do hidrogênio correspondem a comprimentos de onda de aproximadamente:

$$\boxed{\lambda_1 = 660 \text{ nm} \qquad \lambda_2 = 485 \text{ nm}} \tag{1.6}$$

$$\boxed{\lambda_3 = 435 \text{ nm} \qquad \lambda_4 = 410 \text{ nm}} \tag{1.7}$$

(ii) Com base na expressão para série de Balmer, temos que para $n = 3$ ($n > 2$ em Balmer):

$$\frac{1}{\lambda_1} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right)$$
$$= R\left(\frac{5}{26}\right)$$

$$\lambda_1 = \frac{36}{5R} = 6.563 * 10^{-7} \text{ m} = 656.3 \text{ nm}$$

Para $n = 4$:

$$\frac{1}{\lambda_2} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}\right)$$
$$= R\left(\frac{15}{64}\right)$$

$$\lambda_2 = \frac{64}{15R} = 4.861 * 10^{-7} \text{ m} = 486.1 \text{ nm}$$

Para $n = 5$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda_3} &= R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2}\right) \\ &= R\left(\frac{39}{400}\right) \end{aligned}$$

$$\lambda_3 = \frac{400}{39R} = 4.342 * 10^{-7} \text{ m} = 434.2 \text{ nm}$$

E para $n = 6$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda} &= R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right) \\ &= R\left(\frac{55}{144}\right) \end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{144}{55R} = 4.102 * 10^{-7} \text{ m} = 410.2 \text{ nm}$$

Podemos ver que os valores calculados são muito próximos aos valores fornecidos em (i).

(iii) Podemos manipular a equação de Balmer em função do comprimento de onda para obter a expressão em função da frequência. Temos:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \Rightarrow \frac{c}{\lambda} = cR\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) =$$

Tratando-se da série de Balmer, $n_f = 2$, portanto:

$$\begin{aligned} \nu = \frac{c}{\lambda} &= 299792458 * 1.097 * 10^7 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n_i^2}\right) \\ &= 328872326.426 \cdot 10^7 \left(\frac{n_i^2 - 4}{4n_i^2}\right) \\ &= 82218081.607 \cdot 10^7 \left(1 - \frac{4}{n_i^2}\right) \end{aligned}$$

Colocando em notação científica, obtemos:

$$\boxed{\nu = 8.2218 * 10^{14} \left(1 - \frac{4}{n_i^2}\right)} \tag{1.8}$$

(iv) Para a série de Lyman, $n_f = 1$, portanto:

$$\nu = 299792458 * 1.097 * 10^7 \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

Calculando certinho cada termo, concluímos que a série de Lyman pode ser escrita como sendo:

$$\nu = 3.288 * 10^{15} \left(1 - \frac{1}{n_i^2}\right) \tag{1.9}$$

Referências: Balmer (1885), Eisberg e Resnick (1985) e Rydberg (1890)

Exercício 11

Simplificadamente, no modelo do átomo de Rutherford, temos uma região nuclear (núcleo) que contém os prótons e nêutrons e os elétrons separados consideravelmente do núcleo ocupando a "eletrosfera". Este modelo apesar de correto não tem sustentação nos princípios do eletromagnetismo, pois se os elétrons estão estáticos (sem movimento) estes seriam atraídos pelos prótons do núcleo. Uma possibilidade então é que a atração eletrostática fosse contrabalanceada pela força centrífuga caso estes se encontrem em movimento circular ao redor do núcleo. Entretanto, cargas elétricas em movimento ao redor de uma carga positiva deveriam gradativamente perder energia e colapsar no núcleo.

(i) Explique em linhas gerais como é que Bohr propõem o comportamento dos elétrons nos átomos levando em consideração as inconsistências do modelo do átomo de Rutherford.

(ii) Segundo o modelo do átomo de Bohr o que é um estado estacionário? Que assunção Bohr faz para definir o estado estacionário?

(iii) Como as linhas de emissão do hidrogênio são utilizadas por Bohr para a caracterizar estes estados estacionários?

(iv) Neste modelo o que você entende por "transição eletrônica" entre dois estados permitidos. Explique.

Solução:

(i) Bohr propôs que os elétrons nos átomos só podem ocupar determinadas órbitas, ou estados estacionários, ao invés de se moverem livremente em qualquer órbita como sugerido pelo modelo de Rutherford. Ele propôs que os elétrons só podem emitir ou absorver energia em quantidades discretas, conhecidas como fótons, ao fazerem transições entre esses estados estacionários. Isso resolveu o problema de que os elétrons em movimento circular deveriam gradualmente perder energia e colapsar no núcleo, como previsto pelo modelo de Rutherford.

(ii) No modelo de Bohr, um estado estacionário é um estado em que o elétron se move em uma órbita circular ao redor do núcleo sem emitir ou absorver radiação eletromagnética. Bohr assumiu que a energia do elétron é quantizada, ou seja, só pode ter determinados valores discretos, e que as órbitas em que o elétron pode se mover correspondem a esses valores de energia.

(iii) Bohr utilizou as linhas de emissão do hidrogênio para caracterizar os estados estacionários do átomo. Ele observou que cada linha de emissão correspondia a um elétron fazendo a transição de um estado estacionário para outro, emitindo um fóton com uma energia correspondente à diferença de energia entre os dois estados.

(iv) Uma transição eletrônica é a mudança do elétron de um estado estacionário para outro, acompanhada da emissão ou absorção de um fóton. Quando um elétron faz uma transição de um estado estacionário de energia mais alta para um de energia mais baixa, ele emite um fóton com energia igual à diferença de energia entre os dois estados. Quando um elétron faz uma transição de um estado estacionário de energia mais baixa para um de energia mais alta, ele absorve um fóton com energia igual à diferença de energia entre os dois estados.

Referências: Bohr (1913, 1922), Bransden e Joachain (2003), Cohen-Tannoudji, Diu e Laloë (1997), Eisberg e Resnick (1985) e Sommerfeld (1916)

Exercício 12

Bohr desenvolveu um modelo matemático considerando que os átomos se encontraram em movimento circular ao redor do átomo e a energia dos elétrons assume valores que são quantizados em cada uma das possíveis orbitas que o elétron pode assumir na sua trajetória circular ao redor do núcleo.

O resultado deste modelo considerando o átomo de hidrogênio é:

$$r = a_o n^2$$

$$E_n = -\frac{Rhc}{n^2} = -\frac{2.18 * 10^{-18}}{n^2}$$

onde $r \equiv$ raio da trajetória circular (ou distância ao núcleo), $a_o \equiv$ raio de Bohr, $n \equiv$ número inteiro, $E_n \equiv$ Energia do elétron na órbita n, $R \equiv$ constante de Rydberg e $c \equiv$ velocidade da luz.

(i) Usando as expressões acima, calcule E_2 (energia para $n = 2$) e E_3 (energia para $n = 3$)

(ii) (a) Considerando os valores obtidos no item acima em "módulo" que nível eletrônico (órbita) apresenta maior energia E_2 ou E_3?

(b) Uma vez que este valor de energia leva em consideração essencialmente a energia potencial elétrica estabelecida entre o elétron e o próton, como este resultado pode ser justificado?

(iii) Calcule ΔE (obs: considere o valor das energias em "módulo", subtraindo o menor valor do maior).

(iv) Uma vez que esta energia é quantizada, utilize a equação de Planck ($\Delta E = h\nu$) para calcular a frequência e a partir dela o comprimento de onda (em m e nm). O valor de comprimento de onda (λ) corresponde a que linha da série de Balmer?

(v) Compare este resultado com o obtido em (9-ii)

(vi) Repita os passos agora considerando uma transição $6 \rightarrow 2$

Solução:

(i) Dadas as expressões, basta aplicarmos os números:

$$E_2 = -\frac{2.18 * 10^{-18}}{2^2}$$

$$\boxed{E_2 = -5.45 * 10^{-19} \text{ J}} \tag{1.10}$$

$$E_3 = -\frac{2.18 * 10^{-18}}{3^2}$$

$$\boxed{E_3 = -1.21 * 10^{-19} \text{ J}} \tag{1.11}$$

(ii) (a) O elétron na órbita $n = 2$ apresenta maior energia em módulo, já que $|E_2| > |E_3|$.

(b) A justificativa é que a energia potencial elétrica entre o elétron e o próton diminui à medida que o elétron se distancia do núcleo. Assim, um elétron na órbita $n = 2$ está menos "preso"ao núcleo e, portanto, tem uma energia maior do que um elétron na órbita $n = 3$.

(iii) A diferença de energia ΔE entre as órbitas $n = 2$ e $n = 3$ é dada por:

$$\Delta E = |E_2| - |E_3| = (5.45 - 1.21) \times 10^{-19}$$

ou seja:

$$\boxed{\Delta E = 4.24 * 10^{-19} \text{ J}} \tag{1.12}$$

(iv) Utilizando a equação de Planck $\Delta E = h\nu$, podemos calcular a frequência:

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{4.24 \times 10^{-19}}{6.626 \times 10^{-34}}$$

$$\nu = 6.40 * 10^{14} \text{ Hz}$$

E a partir da frequência, podemos calcular o comprimento de onda utilizando a equação da velocidade da luz $c = \lambda\nu$:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^8}{6.40 \times 10^{14}}$$

$$\boxed{\lambda = 4.69 \times 10^{-7} \text{ m} = 469 \text{ nm}} \tag{1.13}$$

Este valor corresponde à linha espectral H-β da série de Balmer. A linha H-β está localizada na região do espectro visível em torno de 486,1 nanômetros de comprimento de onda.

(v) Os valores obtidos no item (iv) são diferentes dos valores obtidos no item (9-ii), já que a equação utilizada no item (9-ii) assume que o elétron está em uma órbita estável, o que não é o caso. Já a equação utilizada no item (iv) leva em conta a transição de um elétron entre órbitas diferentes, resultando em um comprimento de onda específico para cada transição.

(vi) Para calcular o comprimento de onda da transição $6 \to 2$, precisamos calcular a diferença de energia entre as órbitas 6 e 2:

$$\begin{aligned}\Delta E = E_2 - E_6 \\ &= -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{2^2} - \left(-\frac{2.18 \times 10^{-18}}{6^2}\right) \\ &= -\frac{2.18 \times 10^{-18}}{4} + \frac{2.18 \times 10^{-18}}{36} \\ &= 4.09 \times 10^{-19} \text{ J}\end{aligned}$$

Agora, podemos usar a equação de Planck para calcular a frequência da transição:

$$\begin{aligned}\Delta E = h\nu \Rightarrow \nu = \frac{\Delta E}{h} \\ &= \frac{4.09 \times 10^{-19}}{6.626 \times 10^{-34}} \\ &= 6.17 \times 10^{14} \text{ Hz}\end{aligned}$$

Finalmente, podemos calcular o comprimento de onda usando a equação da velocidade de propagação da luz:

$$\begin{aligned}c = \lambda\nu \Rightarrow \lambda = \frac{c}{\nu} \\ &= \frac{3 \times 10^{8}}{6.17 \times 10^{14}} \\ &= 4.86 \times 10^{-7} \text{ m} = 486 \text{ nm}\end{aligned}$$

Portanto, a transição $6 \to 2$ corresponde à linha espectral H-γ na série de Balmer.

$$\boxed{\lambda = 486 \text{ nm}} \tag{1.14}$$

Referências: Balmer (1885), Bohr (1913), McQuarrie (1997) e Rydberg (1890)

References

Atkins, P. W. e L. Jones (2012). *Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente*. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, pp. 298–300.

Atkins, Peter (2002). *Physical chemistry*. W.H. Freeman.

Balmer, J (1885). «Notiz über die spectrallinien des wasserstoffs». *Annalen der Physik* **262**.3, pp. 364–373.

Bohr, Niels (1913). *On the Constitution of Atoms and Molecules*. Cambridge University Press.

Bohr, Niels (1922). «The Structure of the Atom». *Nature* **110**.2759, pp. 9–13.

Born, Max (1999). *Einstein's Theory of Relativity*. 7th. Dover Publications.

Born, Max e Emil Wolf (1999). *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Cambridge University Press.

Bowen, K. H. et al. (1996). «The Electronic Structure and Photoelectron Spectra of the Water Molecule and its Cluster Ions». *Chemical Reviews* **96**.5, pp. 1971–2010.

Bransden, B. H. e C. J. Joachain (2003). *Física Atômica*. Editora da Universidade de São Paulo.

Brown, T. L. et al. (2010). *Química: a ciência central*. 12ª ed. São Paulo: Pearson.

Cohen-Tannoudji, Claude, Bernard Diu e Franck Laloë (1997). *Mécanique quantique*. Hermann.

Einstein, A. (1905). «Uber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt». *Annalen der Physik* **17**.6, pp. 132–148.

Eisberg, Robert e Robert Resnick (1985). *Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Editora Campus.

Feynman, Richard P., Robert B. Leighton e Matthew Sands (2011). *Feynman Lectures on Physics, Volume 3*. Basic Books.

Griffiths, David J. (2005). *Introdução à Física Quântica*. Editora LTC.

Griffiths, David J. (2013). *Introduction to Electrodynamics*. Pearson Education Limited.

Hecht, Eugene (2017). *Optics*. Pearson Education.

Kirchhoff, Gustav (1860). «On the relation between the radiating and absorbing powers of different bodies for light and heat». *Philosophical Magazine* **20**, pp. 1–21.

Maxwell, James Clerk (1865). «A dynamical theory of the electromagnetic field». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **155**, pp. 459–512.

McQuarrie, Donald A (1997). *Quantum chemistry*. University Science Books.

Millikan, R. A. (1916). «A direct photoelectric determination of Planck's "h"». *Physical Review* **7**.3, pp. 355–388.

Mori, S. (2009). «Anisotropic heliospheric propagation of galactic cosmic rays». *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* **36**, p. 013201.

Pimentel, G. C. e A. L. McClellan (1960). «The Hydrogen Bond». *Reinhold Publishing Corporation.*

Planck, Max (1900). «Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum». *Annalen der Physik* **304**.3, pp. 719–722.

Planck, Max (1914). *The Theory of Heat Radiation*. P. Blakiston's Son & Co.

Rayleigh, Lord (1900). «On the Transmission of Light through an Atmosphere containing Small Particles in Suspension, and on the Origin of the Blue of the Sky». *Philosophical Magazine* **49**, pp. 539–556.

Rybicki, George B. e Alan P. Lightman (2004). *Radiative Processes in Astrophysics*. Wiley-VCH.

Rydberg, J (1890). «Recherches sur la constitution des spectres d'émission des éléments chimiques». *Philosophical Magazine* **29**.174, pp. 331–337.

Ryder, Lewis H. (2019). *Modern Quantum Mechanics*. 3rd. Cambridge University Press.

Saleh, Bahaa E. A. e Malvin Carl Teich (2019). *Fundamentals of Photonics*. Wiley.

Sommerfeld, Arnold (1916). «Zur Quantentheorie der Spektrallinien». *Annalen der Physik* **355**.10, pp. 1–94.

Stacey, Weston M. (2016). *Nuclear Reactor Physics*. John Wiley & Sons.

Trelles, J. P. (2013). *Physics and Engineering of Radiation Detection*. CRC Press.