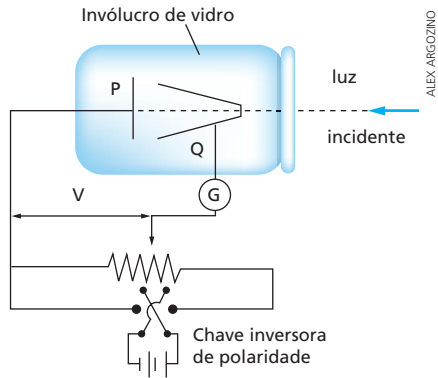
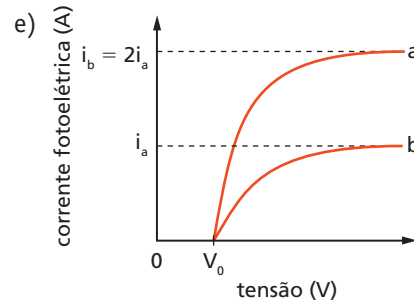
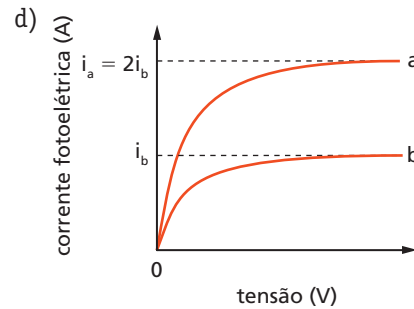
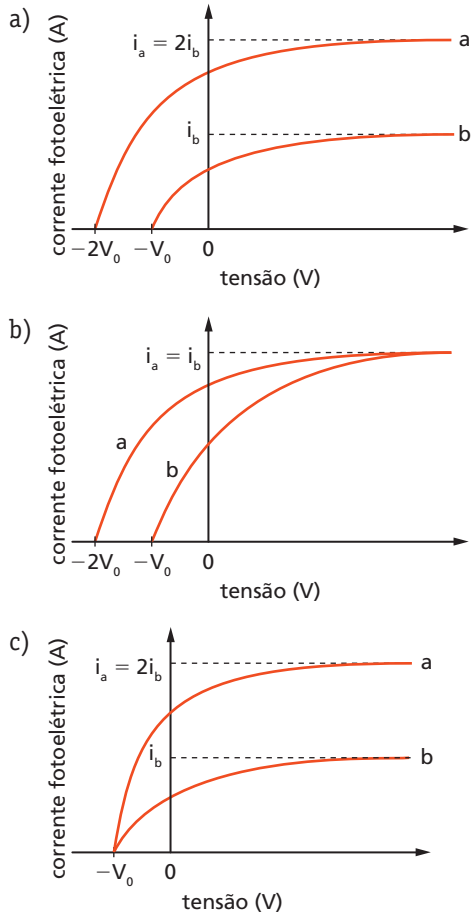


## CAPÍTULO 21 – Mecânica Quântica

1. (ITA-SP) O aparato para estudar o efeito fotoelétrico mostrado na figura consiste de um invólucro de vidro que encerra o aparelho em um ambiente no qual se faz vácuo. Através de uma janela de quartzo, luz monocromática incide sobre a placa de metal  $P$  e libera elétrons. Os elétrons são então detectados sob a forma de uma corrente, devido à diferença de potencial  $V$  estabelecida entre  $P$  e  $Q$ .



Considerando duas situações distintas  $a$  e  $b$ , nas quais a intensidade da luz incidente em  $a$  é o dobro do caso  $b$ , assinale qual dos gráficos abaixo representa corretamente a corrente fotoelétrica em função da diferença de potencial.



2. (UF-CE) De acordo com Einstein, um feixe de luz é composto de fótons (partículas de luz). Cada fóton transporta uma quantidade de energia proporcional à frequência da onda associada a esse feixe de luz. Considere dois feixes de luz, 1 e 2, com comprimentos de onda  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , respectivamente, com  $\lambda_1 = \frac{1}{4}\lambda_2$ . Sejam  $E_1$  a energia dos fótons do feixe 1 e  $E_2$  a energia dos fótons do feixe 2.

A alternativa correta é:

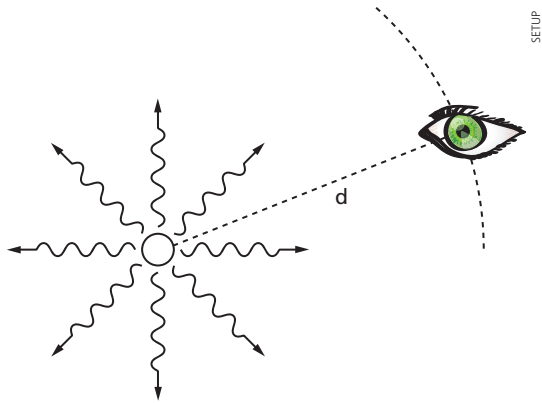
- a)  $E_1 = 4E_2$       c)  $E_1 = E_2$       e)  $E_1 = 0,25E_2$   
 b)  $E_1 = 2E_2$       d)  $E_1 = 0,5E_2$

3. (UF-MG) Em condições normais o olho humano consegue detectar, em média, uma energia mínima de  $10^{-18}$  J. Quantos fótons de comprimento de onda 6000 Å essa energia representa? (Considere:  $h$  (constante de Planck) =  $6,6 \cdot 10^{-34}$  J · s;  $c$  (velocidade da luz) =  $3,0 \cdot 10^8$  m/s).

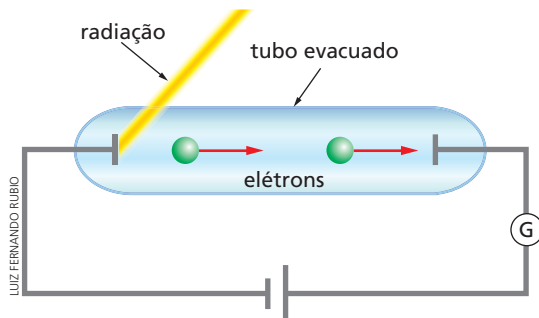
4. (ITA-SP) O olho humano é uma câmara com um pequeno diafragma de entrada (pupila), uma lente (cristalino) e uma superfície fotossensível (retina). Chegando à retina, os fótons produzem impulsos elétricos que são conduzidos pelo nervo óptico até o cérebro, onde são decodificados.

Quando devidamente acostumada à obscuridade, a pupila se dilata até um raio de 3 mm e o olho pode ser sensibilizado por apenas 400 fótons por segundo. Numa noite muito escura, duas fontes monocromáticas, ambas com potência de  $6 \cdot 10^{-5}$  W, emitem, respectivamente, luz azul ( $\lambda = 475$  nm) e vermelha ( $\lambda = 650$  nm) isotropicamente, isto é, em todas as direções. Desprezando a absorção de luz pelo ar e considerando a área da pupila circular, qual das

duas fontes pode ser vista a uma maior distância? Justifique com cálculos.



5. (UF-MG) Uma lâmpada  $L_1$ , emite luz monocromática de comprimento de onda igual a  $3,3 \cdot 10^{-7}$  m com potência de  $2,0 \cdot 10^2$  W. Uma segunda lâmpada  $L_2$  emite luz monocromática de comprimento de onda  $6,6 \cdot 10^{-7}$  m, com a mesma potência de  $L_1$ . São dados:  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  J · s;  $c = 3,0 \cdot 10^8$  m/s.
- Calcule o número de fótons emitidos a cada segundo pela lâmpada  $L_1$ .
  - Quando a lâmpada  $L_1$  é usada para iluminar uma placa metálica, constata-se, experimentalmente, que elétrons são ejetados dessa placa. No entanto, se essa mesma placa for iluminada por  $L_2$ , nenhum elétron é arrancado da placa. Por quê?
  - É possível arrancar elétrons da placa iluminando-a com uma lâmpada que emite luz com o mesmo comprimento de onda de  $L_2$ , porém com maior potência?
6. (UF-BA) No arranjo experimental da figura, utilizado para observação do efeito fotoelétrico, uma radiação eletromagnética de comprimento de onda igual a  $\lambda$  incide sobre a placa de tungstênio, e o galvanômetro  $G$  acusa presença de corrente elétrica.

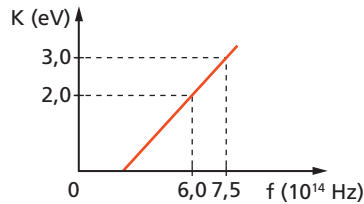


Considera-se a constante de Planck igual a  $h$ , a velocidade de propagação da radiação igual a  $c$ , a massa do elétron igual a  $m$  e a frequência mínima de um fóton para arrancar um elétron da placa igual a  $f_0$ . A partir dessas informações, escreva, em função das propriedades da radiação e da placa, a equação da velocidade dos elétrons emitidos.

7. (Unifap-AP) O comprimento de onda mínimo de uma determinada luz para provocar o efeito fotoelétrico em um determinado material é  $3,3 \cdot 10^{-7}$  m. Considerando a constante de Planck:  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  J · s e a velocidade da luz de  $3,0 \cdot 10^8$  m/s, dê como resposta a soma dos números que antecedem as sentenças verdadeiras.
- (01) O trabalho para arrancar um elétron deste material é  $6,0 \cdot 10^{-19}$  J.
  - (02) A energia cinética máxima dos elétrons emitidos pelo material depende da intensidade da luz incidente.
  - (04) A energia cinética máxima dos elétrons emitidos pelo material aumenta com o aumento da frequência da luz incidente.
  - (08) O efeito fotoelétrico ocorre no núcleo do átomo do material.
8. (UF-SC) Em um laboratório são fornecidas a um estudante duas lâmpadas de luz monocromática. Uma emite luz com comprimento de onda correspondente ao vermelho ( $\lambda \cong 6,2 \cdot 10^{-7}$ ) m e com potência de 150 watts. A outra lâmpada emite luz com comprimento de onda correspondente ao violeta ( $\lambda \cong 3,9 \cdot 10^{-7}$  m) e cuja potência é de 15 W. O estudante deve realizar uma experiência sobre o efeito fotoelétrico. Inicialmente, ele ilumina uma placa de lítio metálico com a lâmpada de 150 W e, em seguida, ilumina a mesma placa com a lâmpada de 15 W. A frequência-limite do lítio metálico é aproximadamente  $6,0 \cdot 10^{14}$  Hz. Em relação à descrição apresentada, dê como resposta a soma dos números que antecedem as sentenças verdadeiras:
- (01) Ao iluminar a placa de lítio com a lâmpada de 15 W, elétrons são ejetados da superfície metálica.
  - (02) Como a lâmpada de luz vermelha tem maior potência, os elétrons serão ejetados da superfície metálica, ao iluminarmos a placa de lítio com a lâmpada de 150 W.
  - (04) A energia cinética dos elétrons, ejetados da placa de lítio, é diretamente proporcional à frequência da luz incidente.
  - (08) Quanto maior o comprimento de onda da luz utilizada, maior a energia cinética dos elétrons ejetados da superfície metálica.
  - (16) Se o estudante iluminasse a superfície de lítio metálico com uma lâmpada de 5 W de luz monocromática, com comprimento de onda de  $4,6 \cdot 10^{-7}$  m (luz azul), os elétrons seriam ejetados da superfície metálica do lítio.
  - (32) Se o estudante utilizasse uma lâmpada de luz violeta de 60 W, a quantidade de elétrons ejetados da superfície do lítio seria quatro vezes maior que a obtida com a lâmpada de 15 W, num mesmo intervalo de tempo.

(64) A energia cinética dos elétrons ejetados, obtida com a lâmpada de luz vermelha de 150 W, é dez vezes maior que a obtida com a lâmpada de luz violeta de 15 W.

9. (UF-CE) O gráfico mostrado a seguir resultou de uma experiência na qual a superfície metálica de uma célula fotoelétrica foi iluminada, separadamente, por duas fontes de luz monocromáticas distintas, de frequências  $f_1 = 6,0 \cdot 10^{14}$  Hz e  $f_2 = 7,5 \cdot 10^{14}$  Hz respectivamente. As energias cinéticas máximas,  $K_1 = 2,0$  eV e  $K_2 = 3,0$  eV, dos elétrons arrancados do metal, pelos dois tipos de luz, estão indicados no gráfico.



A reta que passa pelos dois pontos experimentais do gráfico obedece à relação estabelecida por Einstein para o efeito fotoelétrico, ou seja:

$$K = hf - \phi$$

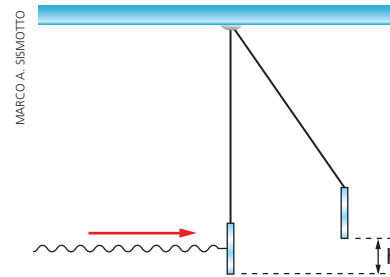
onde  $h$  é a constante de Planck e  $\phi$  é a chamada função trabalho, característica de cada material. Baseando-se na relação de Einstein, o valor calculado de  $\phi$ , em elétron-volts, é:

- a) 1,3    b) 1,6    c) 1,8    d) 2,0    e) 2,3

10. (ITA-SP) Einstein propôs que a energia da luz é transportada por pacotes de energia  $hf$ , em que  $h$  é a constante de Planck e  $f$  é a frequência da luz, num referencial no qual a fonte está em repouso. Explicou, assim, a existência de uma frequência mínima  $f_0$  para arrancar elétrons de um material, no chamado efeito fotoelétrico. Suponha que a fonte emissora de luz esteja em movimento em relação ao material. Verifique a alternativa correta.

- Se  $f = f_0$ , é possível que haja emissão de elétrons, desde que a fonte esteja se afastando do material.
- Se  $f < f_0$ , é possível que elétrons sejam emitidos, desde que a fonte esteja se afastando do material.
- Se  $f < f_0$ , não há emissão de elétrons, qualquer que seja a velocidade da fonte.
- Se  $f > f_0$ , é sempre possível que elétrons sejam emitidos pelo material, desde que a fonte esteja se afastando do material.
- Se  $f < f_0$ , é possível que elétrons sejam emitidos, desde que a fonte esteja se aproximando do material.

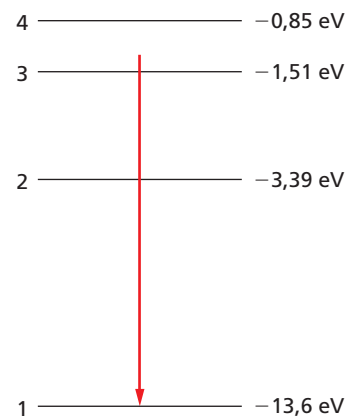
11. (ITA-SP) Um feixe de *laser* com energia  $E$  incide sobre um espelho de massa  $m$  dependurado por um fio. Sabendo que o momentum do feixe de luz *laser* é  $\frac{E}{c}$ , em que  $c$  é a velocidade da luz, calcule a que altura  $h$  o espelho subirá.



12. (UF-PI) Um átomo de hidrogênio está em um estado excitado  $n = 2$ , com uma energia  $E_2 = -3,4$  eV. Ocorre uma transição para o estado  $n = 1$ , com energia  $E_1 = -13,6$  eV, e um fóton é emitido. A frequência da radiação emitida, em Hz, vale aproximadamente: (Dados:  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ;  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

- a)  $2,5 \cdot 10^{15}$     c)  $1,5 \cdot 10^{15}$     e)  $5,0 \cdot 10^{14}$   
 b)  $2,0 \cdot 10^{15}$     d)  $1,0 \cdot 10^{15}$

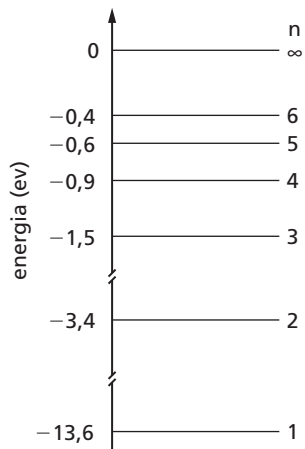
13. (UF-MG) A figura é um esquema dos quatro primeiros níveis de energia do átomo de hidrogênio.



(Dados:  $c$  (velocidade da luz) =  $3,0 \cdot 10^8$  m/s;  $h$  (constante de Planck) =  $6,6 \cdot 10^{-34}$  J · s;  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  J.)

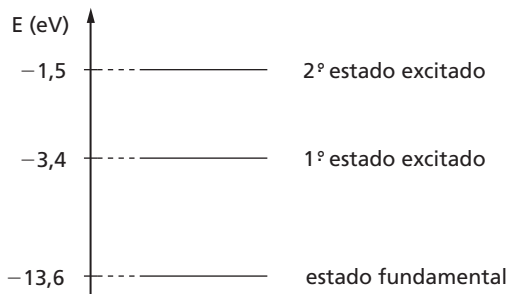
- Calcule a frequência do fóton emitido na transição indicada do nível 3 para o nível 1.
- Qual é o comprimento de ondas desse fóton?

14. (U. F. Juiz de Fora-MG) A figura mostra os níveis de energia do átomo de hidrogênio. Se inicialmente o elétron está no estado quântico fundamental (de menor energia), qual a sua energia cinética após o átomo ter sido ionizado por um fóton de energia 20 eV?



- a) 33,6 eV
- b) 13,6 eV
- c) 6,4 eV
- d) 10,2 eV

15. (UF-RN) Um átomo de hidrogênio, ao passar de um estado quântico para outro, emite ou absorve radiação eletromagnética de energias bem definidas. No diagrama a seguir, estão esquematicamente representados os três primeiros níveis de energia do átomo de hidrogênio.



Considere dois fótons,  $f_1$  e  $f_2$ , com energias iguais a 10,2 eV e 8,7 eV, respectivamente, e um átomo de hidrogênio no estado fundamental.

Esse átomo de hidrogênio poderá absorver:

- a) apenas o fóton  $f_2$ .
- b) apenas o fóton  $f_1$ .
- c) ambos os fótons.
- d) nenhum dos dois fótons.

16. (UF-RS) Os modelos atômicos anteriores ao modelo de Bohr, baseados em conceitos da Física Clássica, não explicavam o espectro de raios observado na análise espectroscópica dos elementos químicos. Por exemplo, o espectro visível do átomo de hidrogênio – que possui apenas um elétron – consiste de quatro raios distintas, de frequências bem definidas. No modelo que Bohr propôs para o átomo de hidrogênio, o espectro de raios de diferentes frequências é explicado:

- a) pelo caráter contínuo dos níveis de energia do átomo de hidrogênio.
- b) pelo caráter discreto dos níveis de energia do átomo de hidrogênio.
- c) pela captura de três outros elétrons pelo átomo de hidrogênio.
- d) pela presença de quatro isótopos diferentes numa amostra comum de hidrogênio.
- e) pelo movimento em espiral do elétron em direção ao núcleo do átomo de hidrogênio.

17. (U. F. Juiz de Fora-MG) A luz emitida por uma lâmpada de gás hidrogênio é aparentemente branca, quando vista a olho nu. Ao passar por um prisma, um feixe dessa luz divide-se em quatro feixes de cores distintas: violeta, anil, azul e vermelho. Projetando-se esses feixes em um anteparo, eles ficam espaçados como ilustrados na figura a.

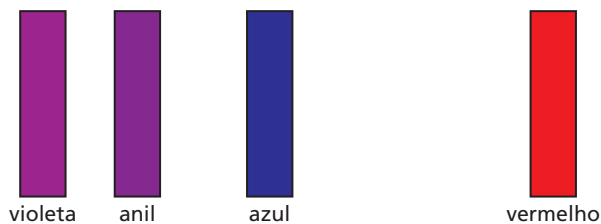


Figura a.

Considere, agora, a figura b, que ilustra esquematicamente alguns níveis de energia do átomo de hidrogênio. As setas mostram transições possíveis para esse átomo. Relacione as informações contidas na figura b com as cores da luz emitida pela lâmpada de gás hidrogênio mostradas na figura a. Justifique sua resposta.

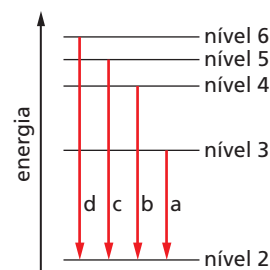


Figura b.

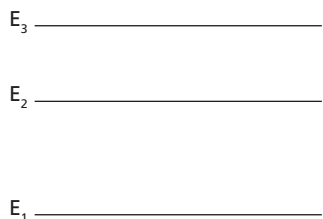
18. (UF-RN) A natureza do processo de geração da luz é um fenômeno essencialmente quântico. De todo o espectro das ondas eletromagnéticas, sabemos que a luz é a parte desse espectro detectada pelo olho humano. No cotidiano vemos muitas fontes de luz branca, como o Sol e as lâmpadas incandescentes que temos em casa. Já uma luz vermelha monocromática – por exemplo, de um laser – temos menos oportunidade de ver. Esse tipo de luz laser pode ser observada

tanto em consultório de dentistas quanto em leituras de códigos de barras nos bancos e supermercados. Nos exemplos citados, envolvendo luz branca e luz vermelha, muitos átomos participam do processo de geração de luz.

Com base na compreensão dos processos de geração de luz podemos dizer que a:

- luz vermelha monocromática é gerada pelo decaimento simultâneo de vários elétrons entre um mesmo par de níveis atômicos.
- luz branca é gerada pelo decaimento simultâneo de vários elétrons entre um mesmo par de níveis atômicos.
- luz vermelha monocromática é gerada pelo decaimento simultâneo de vários elétrons entre vários pares de níveis atômicos.
- luz branca é gerada pelo decaimento sucessivo de um elétron entre vários pares de níveis atômicos.

19. (UF-CE) O diagrama mostra os estados de energia que podem ser ocupados por um determinado elétron. A diferença de energia entre os estados 1 e 2,  $E_2 - E_1$ , é o dobro da diferença de energia  $E_3 - E_2$ , entre os estados 2 e 3. Numa transição do estado 3 para o estado 2, o elétron emite um fóton de comprimento de onda  $\lambda = 600$  nm. Determine os comprimentos de ondas das outras transições possíveis.



20. (UF-GO) A cor amarela característica das lâmpadas de vapor de sódio tem comprimento de onda de 590 nm e é o resultado de transições eletrônicas do subnível 3p para o subnível 3s do átomo de sódio. Calcule, em elétron-volts, a diferença de energia entre esses subníveis. (Dados: velocidade da luz = 300 000 km/s; constante de Planck =  $4,1 \cdot 10^{-15}$  eV · s.)

21. (UF-MG) Nos diodos emissores de luz, conhecidos como LEDs, a emissão de luz ocorre quando elétrons passam de um nível de maior energia para um outro de menor energia. Dois tipos comuns de LEDs são o que emite luz vermelha e o que emite luz verde. Sabe-se que a frequência da luz vermelha é menor que a da luz verde. Sejam  $\lambda_{\text{verde}}$  o comprimento de onda da luz emitida pelo LED verde e  $E_{\text{verde}}$  a diferença de energia entre os níveis desse mesmo LED. Para o LED vermelho, essas grandezas são, respectivamente,  $\lambda_{\text{vermelho}}$  e  $E_{\text{vermelho}}$ .

Considerando-se essas informações, é correto afirmar que:

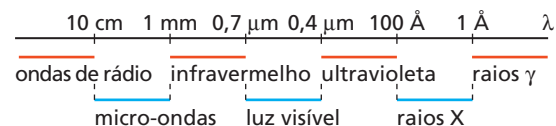
- $E_{\text{verde}} > E_{\text{vermelho}}$  e  $\lambda_{\text{verde}} > \lambda_{\text{vermelho}}$
- $E_{\text{verde}} > E_{\text{vermelho}}$  e  $\lambda_{\text{verde}} < \lambda_{\text{vermelho}}$
- $E_{\text{verde}} < E_{\text{vermelho}}$  e  $\lambda_{\text{verde}} > \lambda_{\text{vermelho}}$
- $E_{\text{verde}} < E_{\text{vermelho}}$  e  $\lambda_{\text{verde}} < \lambda_{\text{vermelho}}$

22. (UF-RN) A lâmpada fluorescente em geral utiliza um tubo com eletrodos em ambas as extremidades, revestido internamente com uma camada de fósforo e contendo um gás composto por argônio e vapor de mercúrio. Quando a lâmpada é ligada, se estabelece um fluxo de elétrons entre os eletrodos. Esses elétrons colidem com os átomos de mercúrio transferindo energia para eles (átomos de mercúrio ficam excitados). Os átomos de mercúrio liberam essa energia emitindo fótons ultravioleta. Tais fótons interagem com a camada de fósforo, originando a emissão de radiação.

Considerando os processos que ocorrem na lâmpada fluorescente, podemos afirmar que a explicação para a emissão de luz envolve o conceito de:

- colisão elástica entre elétrons e átomos de mercúrio.
  - efeito fotoelétrico.
  - modelo ondulatório para radiação.
  - níveis de energia dos átomos.
23. (Unicamp-SP) O grande Colisor de Hádrons (Large Hadron Collider – LHC) é um acelerador de partículas que tem, entre outros propósitos, o de detectar uma partícula, prevista teoricamente, chamada bóson de Higgs. Para esse fim, um próton com energia de  $E = 7 \cdot 10^{12}$  eV colide frontalmente com outro próton de mesma energia produzindo muitas partículas. O comprimento de onda ( $\lambda$ ) de uma partícula fornece o tamanho típico que pode ser observado quando a partícula interage com outra. No caso dos prótons do LHC,  $E = \frac{hc}{\lambda}$ , onde  $h = 4 \cdot 10^{-15}$  eV · s e  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s. Qual é o comprimento de onda dos prótons do LHC?

24. (UF-BA) Considerando o espectro eletromagnético, cujo esquema está apresentado na figura, onde  $\lambda$  é o comprimento de onda, dê como resposta a soma dos números que antecedem as frases verdadeiras.



- Os raios gama, no vácuo, têm velocidade maior do que as ondas de rádio.
- Os raios gama são constituídos de elétrons emitidos na desintegração de núcleos atômicos.
- Os raios X são bastante absorvidos pelos ossos humanos e atravessam, com facilidade, a pele humana.



- (08) Todas as ondas do espectro são transversais e se propagam na direção perpendicular às direções dos campos elétricos e magnéticos oscilantes que as constituem.
- (16) A microscopia ótica constitui uma técnica eficiente na observação dos detalhes da estrutura das membranas celulares, cuja espessura é da ordem de 10 nm.
- (32) A energia cinética dos elétrons ejetados por um metal, no efeito fotoelétrico, é tanto maior quanto maior for a intensidade da luz incidente.

25. (UE-PA) Um experimento que estabeleceu definitivamente a dualidade onda-partícula foi observação da difração de elétrons em metais. A difração de elétrons é utilizada atualmente para investigar a estrutura da matéria. De acordo com a hipótese de De Broglie, o comprimento de onda, associado a um elétron, é igual a  $\lambda = \frac{h}{p}$ , em que  $h$  é a constante de Planck e  $p$  é o momento linear do elétron. Considere um experimento em que a energia dos elétrons que incidem sobre o alvo é de 40 000 eV. Nestas condições, o comprimento de onda associado aos elétrons pode ser calculado pela expressão:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} \cong \frac{1,2}{\sqrt{E}} \text{ nm}$$

em que  $E$  é a energia do elétron em eV. Nestas condições, considerando exclusivamente a natureza ondulatória dos elétrons, justifique a vantagem de se utilizar feixe de elétrons em vez de feixes de raios X, cujo comprimento de onda varia de 0,01 nm a 10 nm, para se investigar a estrutura da matéria.

26. (UF-RN) Crizzoleta Puzzle, estudante de Física, idealizou a seguinte experiência. Numa colisão entre dois nêutrons, são realizadas medidas simultâneas e exatas da posição e da velocidade de cada um dos nêutrons. Em sua idealização, essas medidas são efetuadas em dois instantes: antes da colisão (fig. a) e depois da colisão (fig. b). A letra  $c$ , que aparece nas duas figuras,

representa a velocidade da luz no vácuo, e  $v_1$  e  $v_2$  representam, respectivamente, as velocidades dos nêutrons 1 e 2.

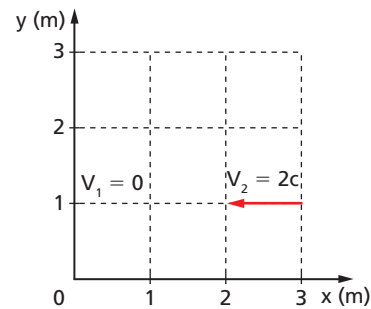


Figura a.

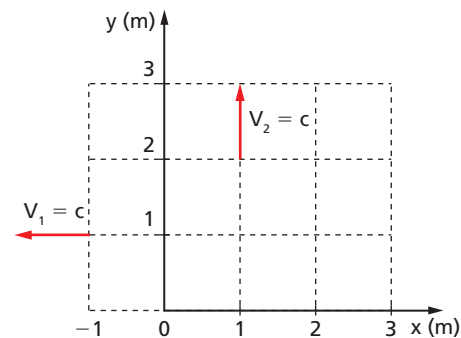


Figura b.

Analisando a experiência proposta, verificamos, à luz da Física Moderna, que a referida estudante violou:

- o Princípio da Incerteza de Heisenberg, a lei de conservação do momento linear e a lei de Coulomb.
- o Princípio da Incerteza de Heisenberg, um postulado da Teoria da Relatividade Especial de Einstein e a lei de conservação do momento linear.
- um postulado da Teoria da Relatividade Especial de Einstein, a lei de conservação de carga elétrica e a lei de conservação do momento linear.
- um postulado da Teoria da Relatividade Especial de Einstein, a lei de Coulomb e a lei de conservação da carga elétrica.