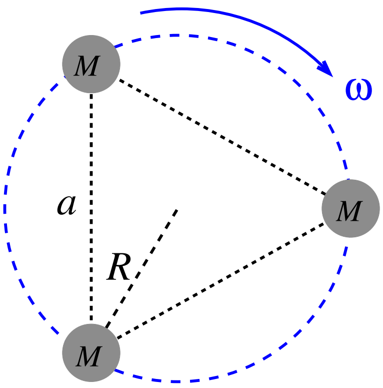
Q. 1 [`mcPT1a`]

Uma configuração central é aquela em que a atração gravitacional mútua de vários corpos resulta numa força total sobre cada um deles que aponta para o centro de massa do sistema. A configuração central ilustrada na figura, descrita por Lagrange, permite que três corpos de massas iguais a M girem com velocidade angular ω em órbita circular de raio R em torno do centro do triângulo equilátero de lado $a = \sqrt{3}R$. Qual deve ser a velocidade de revolução ω desses corpos para que eles permaneçam em órbita circular em torno do centro do triângulo?



■ $\omega = \sqrt{\frac{3GM}{a^3}}$

B $\omega = \sqrt{\frac{3GM}{2a^3}}$

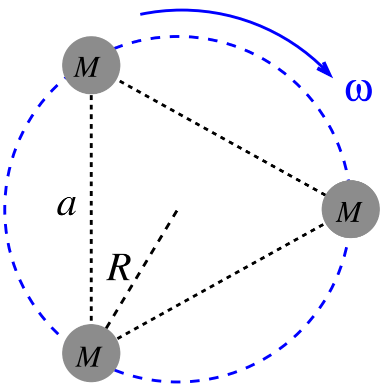
C $\omega = \sqrt{\frac{\sqrt{3}GM}{a^3}}$

D $\omega = \sqrt{\frac{2GM}{3a^3}}$

E $\omega = \sqrt{\frac{GM}{3a^3}}$

Q. 2 [`mcPT1b`]

Uma configuração central é aquela em que a atração gravitacional mútua de vários corpos resulta numa força total sobre cada um deles que aponta para o centro de massa do sistema. A configuração central ilustrada na figura, descrita por Lagrange, permite que três corpos de massas iguais a M girem com velocidade angular ω em órbita circular de raio R em torno do centro do triângulo equilátero de lado $a = \sqrt{3}R$. Qual deve ser o comprimento a do lado do triângulo para que esses corpos permaneçam em órbita circular em torno do centro do triângulo?



■ $a = \left(\frac{3GM}{\omega^2}\right)^{\frac{1}{3}}$

B $a = \left(\frac{3GM}{2\omega^2}\right)^{\frac{1}{3}}$

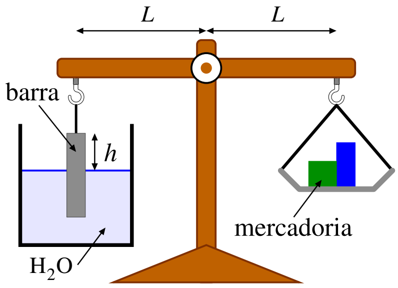
C $a = \left(\frac{\sqrt{3}GM}{\omega^2}\right)^{\frac{1}{3}}$

D $a = \left(\frac{2GM}{3\omega^2}\right)^{\frac{1}{3}}$

E $a = \left(\frac{GM}{3\omega^2}\right)^{\frac{1}{3}}$

Q. 3 [`mcPT2a`]

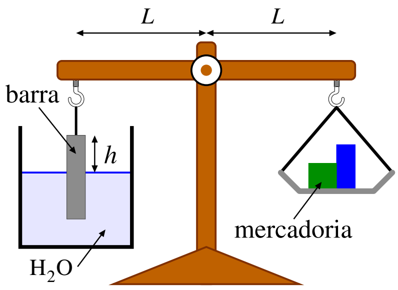
A figura ilustra uma balança de braços de comprimento $L = 30$ cm, uma barra homogênea de densidade $\rho = 5{,}0$ g/cm^3 e de massa $M = 5{,}0$ kg e um balde grande para armazenar água (cuja densidade é 1,0 g/cm^3). Movendo-se o balde para cima ou para baixo até que os braços da balança fiquem perfeitamente horizontais, e então medindo o comprimento emerso h da barra, pode-se obter a massa da mercadoria. Qual o intervalo de massas que pode ser medido com essa balança?



- ■ Entre 4,0 e 5,0 kg.
- B Entre 0,0 e 5,0 kg.
- C Entre 0,0 e 15 kg.
- D Entre 1,0 e 5,0 kg.
- E Não há dados suficientes. Precisa-se do comprimento da barra.

Q. 4 [`mcPT2b`]

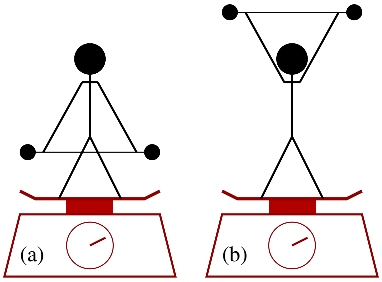
A figura ilustra uma balança de braços de comprimento $L = 40$ cm, uma barra homogênea de densidade $\rho = 3{,}0$ g/cm^3 e de massa $M = 6{,}0$ kg e um balde grande para armazenar água (cuja densidade é 1,0 g/cm^3). Movendo-se o balde para cima ou para baixo até que os braços da balança fiquem perfeitamente horizontais, e então medindo o comprimento emerso h da barra, pode-se obter a massa da mercadoria. Qual o intervalo de massas que pode ser medido com essa balança?



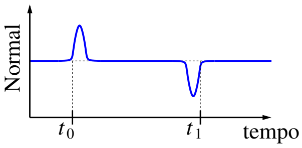
- ■ Entre 4,0 e 6,0 kg.
- B Entre 0,0 e 6,0 kg.
- C Entre 0,0 e 2,4 kg.
- D Entre 2,0 e 6,0 kg.
- E Não há dados suficientes. Precisa-se do comprimento da barra.

Q. 5 [`mcPT3a`]

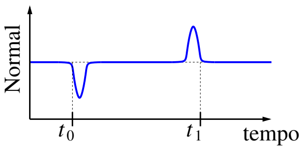
Uma pessoa carregando uma barra com pesos encontra-se sobre os pratos de uma balança de precisão, como ilustrado na figura (a). No instante t_0, a pessoa inicia o levantamento do peso terminando de erguê-lo no instante t_1, como ilustra a figura (b). Qual das alternativas abaixo melhor representa a magnitude da força normal entre a pessoa e a balança?



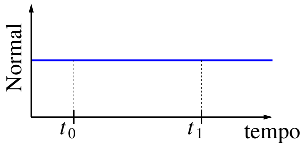
■



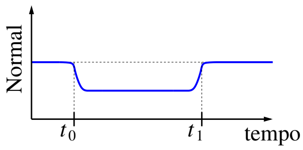
B



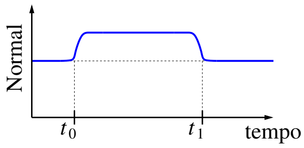
C



D

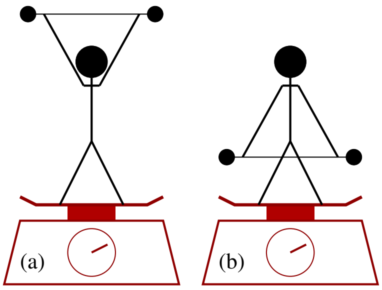


E

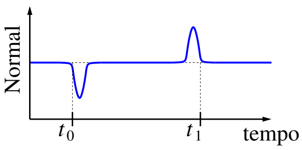


Q. 6 [`mmPT3b`]

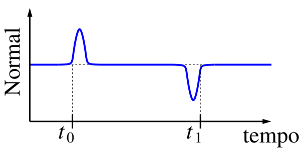
Uma pessoa carregando uma barra com pesos encontra-se sobre os pratos de uma balança de precisão, como ilustrado na figura (a). No instante t_0, a pessoa inicia o abaixamento do peso terminando de fazê-lo no instante t_1, como ilustra a figura (b). Qual das alternativas abaixo melhor representa a magnitude da força normal entre a pessoa e a balança?



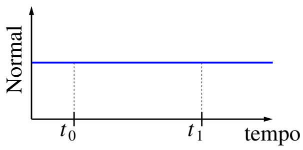
■



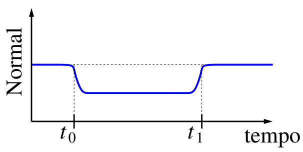
B



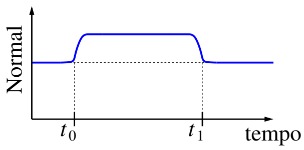
C



D

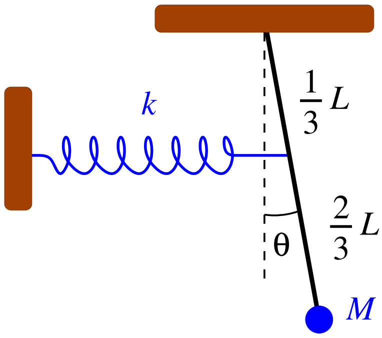


E



Q. 7 [`mcPT4a`]

O pêndulo da figura, formado por uma barra rígida de massa desprezível e comprimento L com uma massa pontual M suspensa, está ligado a uma mola horizontal e longa de massa desprezível e constante de mola k a uma distância $L/3$ de seu eixo de rotação. A mola está relaxada quando o pêndulo se encontra na posição vertical de equilíbrio $\theta = 0$. Sendo g a aceleração da gravidade, considere as seguintes afirmações tendo em mente o regime de pequenas oscilações, ou seja, pequenas amplitudes de oscilação em torno do equilíbrio $\theta \ll 1$, onde $\cos\theta \approx 1 - \frac{1}{2}\theta^2$ e $\sin\theta \approx \theta$.



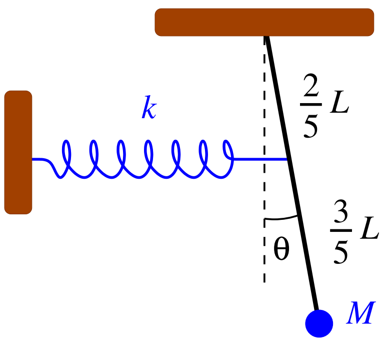
I. A energia potencial gravitacional é conservada durante o movimento.
II. A energia mecânica do sistema é $E = \frac{1}{2}ML^2\left[\dot{\theta}^2 + \left(\frac{g}{L} + \frac{k}{9M}\right)\theta^2\right]$.
III. A frequência de oscilação é $\omega = \sqrt{\frac{g}{L} + \frac{k}{9M}}$.

Qual das alternativas abaixo é a verdadeira?

■ Apenas as afirmações II e III são verdadeiras.
B Nenhuma das outras alternativas.
C Apenas a afirmação I é verdadeira.
D Apenas as afirmações I e III são verdadeiras.
E A afirmação I é verdadeira e a afirmação II é falsa.

Q. 8 [`mcPT4b`]

O pêndulo da figura, formado por uma barra rígida de massa desprezível e comprimento L com uma massa pontual M suspensa, está ligado a uma mola horizontal e longa de massa desprezível e constante de mola k a uma distância $2L/5$ de seu eixo de rotação. A mola está relaxada quando o pêndulo se encontra na posição vertical de equilíbrio $\theta = 0$. Sendo g a aceleração da gravidade, considere as seguintes afirmações tendo em mente o regime de pequenas oscilações, ou seja, pequenas amplitudes de oscilação em torno do equilíbrio, $\theta \ll 1$ onde $\cos\theta \approx 1 - \frac{1}{2}\theta^2$ e $\sin\theta \approx \theta$.



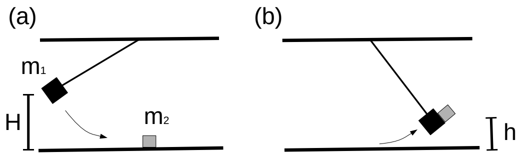
I. A energia potencial elástica é conservada durante o movimento.
II. A energia mecânica do sistema é $E = \frac{1}{2}ML^2\left[\dot{\theta}^2 + \left(\frac{g}{L} + \frac{4k}{25M}\right)\theta^2\right]$.
III. A frequência de oscilação é $\omega = \sqrt{\frac{g}{L} + \frac{4k}{25M}}$.

Qual das alternativas abaixo é a verdadeira?

■ Apenas as afirmações II e III são verdadeiras.
B Nenhuma das outras alternativas.
C Apenas a afirmação I é verdadeira.
D Apenas as afirmações I e III são verdadeiras.
E A afirmação I é verdadeira e a afirmação II é falsa.

Q. 9 [mcPT5a]

Um sistema composto por um pêndulo simples de massa $m_1 = 2M$ é solto do repouso a partir de uma altura H em relação ao solo, conforme ilustrado na figura (a). Ao passar pelo ponto mais baixo de sua trajetória, a partícula de massa m_1 colide com outra partícula de massa $m_2 = M$, que está em repouso no solo. Após a colisão, as duas partículas se movem juntas, formando um novo pêndulo, como mostrado na figura (b).

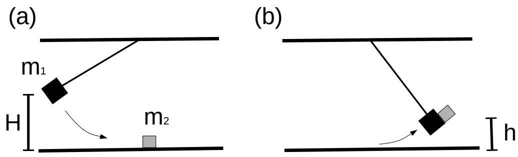


Qual é a altura máxima h que as duas massas subirão após a colisão, em termos de H? Considere que a resistência o ar e o atrito da massa m_2 com o solo são desprezíveis.

■ $h = \frac{4}{9}H$
B $h = \frac{2}{3}H$
C $h = \frac{1}{3}H$
D $h = \frac{1}{9}H$
E $h = \frac{8}{9}H$

Q. 10 [mcPT5b]

Um sistema composto por um pêndulo simples de massa $m_1 = 3M$ é solto do repouso a partir de uma altura H em relação ao solo, conforme ilustrado na figura (a). Ao passar pelo ponto mais baixo de sua trajetória, a partícula de massa m_1 colide com outra partícula de massa $m_2 = M$, que está em repouso no solo. Após a colisão, as duas partículas se movem juntas, formando um novo pêndulo, como mostrado na figura (b).

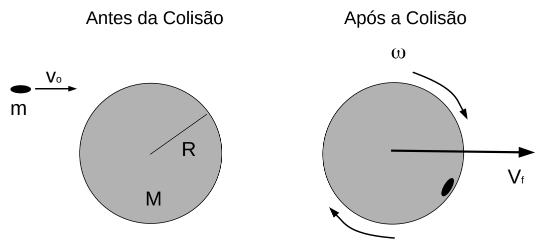


Qual é a altura máxima h que as duas massas subirão após a colisão, em termos de H? Considere que a resistência do ar e o atrito da massa m_2 com o solo são desprezíveis.

■ $h = \frac{9}{16}H$
B $h = \frac{3}{4}H$
C $h = \frac{1}{4}H$
D $h = \frac{1}{16}H$
E $h = \frac{3}{16}H$

Q. 11 [mcPT6a]

Um projétil de massa m e velocidade de módulo v_0 move-se em direção a um disco homogêneo de massa $M \gg m$ e raio R, que está em repouso sobre uma superfície sem atrito, conforme ilustrado na figura (visto de cima). O projétil colide inelasticamente com o disco, ficando alojado na sua periferia a uma distância $r \approx R$ do centro do disco. Com isso, o sistema "disco + projétil" adquire um movimento combinado de translação, com velocidade linear de módulo V_f, e de rotação em torno do centro de massa, com velocidade angular ω.

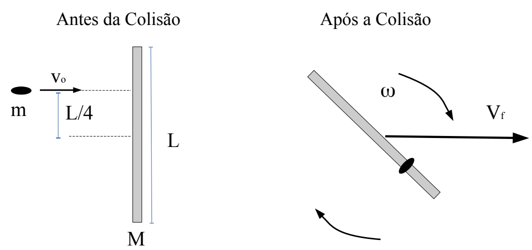


Assumindo que o centro de massa do sistema "disco + projétil" após a colisão está aproximadamente no centro do disco, quais são os valores de V_f e ω? Assuma também que $(M+m) \approx M$ e que o momento de inércia do sistema "disco + projétil" é aproximadamente o momento de inércia do disco em relação ao centro de massa, i.e., $I \approx I_{CM} = \frac{MR^2}{2}$.

- ■ $V_f = \frac{m}{M} v_0$ e $\omega = 2 \frac{m}{M} \frac{v_0}{R}$
- B $V_f = \frac{m}{M} v_0$ e $\omega = \frac{1}{2} \frac{m}{M} \frac{v_0}{R}$
- C $V_f = \frac{m}{M} v_0$ e $\omega = \frac{m}{M} \frac{v_0}{R}$
- D $V_f = \frac{1}{2} \frac{m}{M} v_0$ e $\omega = \frac{m}{M} \frac{v_0}{R}$
- E $V_f = \sqrt{\frac{m}{M}} v_0$ e $\omega = \frac{m}{M} \frac{v_0}{R}$

Q. 12 [mcPT6b]

Um projétil de massa m e velocidade de módulo v_0 move-se em direção a uma barra delgada homogênea de massa $M \gg m$ e comprimento L, que está em repouso sobre uma superfície sem atrito, conforme ilustrado na figura (visto de cima). O projétil colide inelasticamente com a barra, ficando alojado a uma distância $L/4$ do seu centro. Com isso, o sistema "barra + projétil" adquire um movimento combinado de translação, com velocidade linear de módulo V_f, e de rotação em torno do centro de massa, com velocidade angular ω.

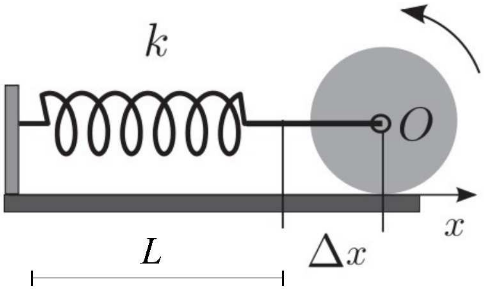


Assumindo que o centro de massa do sistema "barra + projétil" após a colisão está aproximadamente no centro da barra, quais são os valores de V_f e ω? Assuma também que $(M+m) \approx M$ e que o momento de inércia do sistema "barra + projétil" é aproximadamente o momento de inércia de uma barra delgada homogênea em relação ao centro de massa, i.e. $I \approx I_{CM} = \frac{ML^2}{12}$.

- ■ $V_f = \frac{m}{M} v_0$ e $\omega = 3 \frac{m}{M} \frac{v_0}{L}$
- B $V_f = \frac{m}{M} v_0$ e $\omega = 12 \frac{m}{M} \frac{v_0}{L}$
- C $V_f = \frac{m}{M} v_0$ e $\omega = 6 \frac{m}{M} \frac{v_0}{L}$
- D $V_f = \frac{1}{2} \frac{m}{M} v_0$ e $\omega = 3 \frac{m}{M} \frac{v_0}{L}$
- E $V_f = \frac{1}{2} \frac{m}{M} v_0$ e $\omega = \sqrt{\frac{12m}{M}} \frac{v_0}{L}$

Q. 13 [mcPT7a] Questão anulada

A figura mostra um sistema composto por uma mola de massa desprezível, constante elástica k e comprimento relaxado L, com uma das extremidades presa a uma parede fixa e a outra ligada ao centro de um disco homogêneo de massa M e raio R. Sabendo que o disco rola sem deslizar sobre uma superfície horizontal rugosa (i.e., sob a ação de atrito estático), determine a frequência angular ω_0 de oscilação do sistema disco-mola no regime de pequenas oscilações ($\Delta x \ll L$). O momento de inércia do disco em relação ao eixo perpendicular a ele que passa por seu centro é $I_{CM} = \frac{1}{2}MR^2$.



■ $\omega_0 = \sqrt{\frac{2}{3}\frac{k}{M}}$

B $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}}$

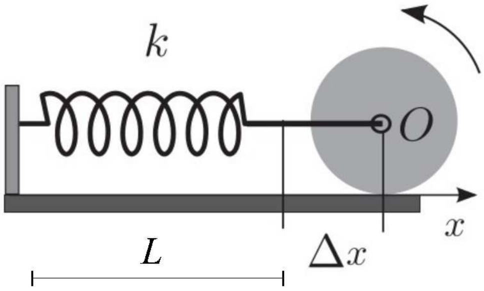
C $\omega_0 = \sqrt{\frac{3}{2}\frac{k}{M}}$

D $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3}\frac{k}{M}}$

E $\omega_0 = \sqrt{2\frac{k}{M}}$

Q. 14 [mcPT7b] Questão anulada

A figura mostra um sistema composto por uma mola de massa desprezível, constante elástica k e comprimento relaxado L, com uma das extremidades presa a uma parede fixa e a outra acoplada a um eixo leve que passa pelo centro de uma esfera maciça homogênea de massa M e raio R. Sabendo que a esfera rola sem deslizar sobre uma superfície horizontal rugosa (i.e., sob a ação de atrito estático), determine a frequência angular ω_0 de oscilação do sistema esfera-mola no regime de pequenas oscilações ($\Delta x \ll L$). O momento de inércia da esfera em relação ao eixo é $I_{CM} = \frac{1}{2}MR^2$.



■ $\omega_0 = \sqrt{\frac{5}{7}\frac{k}{M}}$

B $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}}$

C $\omega_0 = \sqrt{\frac{7}{5}\frac{k}{M}}$

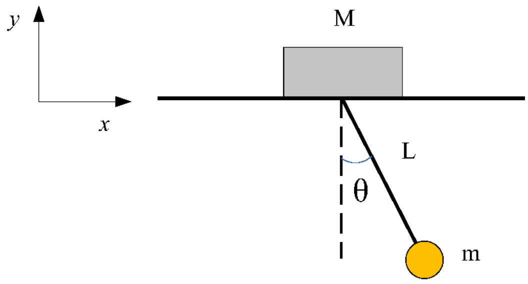
D $\omega_0 = \sqrt{\frac{5}{2}\frac{k}{M}}$

E $\omega_0 = \sqrt{\frac{2}{5}\frac{k}{M}}$

as questões foram anuladas porque o momento de inércia fornecido para a esfera na versão B ficou inadvertidamente igual ao da versão A, embora na versão em inglês ambas as versões estajam corretas. Todos os alunos receberam os pontos dessa questão.

Q. 15 [mcPT8a]

Um bloco de massa M é confinado a se movimentar sobre um trilho de ar com atrito desprezível, sua posição sendo descrita pela coordenada x ($y = 0$). Preso a esse bloco, há uma haste de massa desprezível e comprimento L, com uma partícula de massa m presa na outra extremidade, sob a ação da força gravitacional. A massa m pode oscilar no plano xy, fazendo um ângulo θ com a vertical, como ilustrado na figura. Expressando a lagrangiana $\mathcal{L}$ do sistema em termos de $(x,\ \theta,\ \dot{x},\ \dot{\theta})$, encontre o momento canônico $p_x = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}}$.



■ $p_x = (m + M)\dot{x} + mL\dot{\theta}\cos\theta$.

B $p_x = (m + M)\dot{x}$.

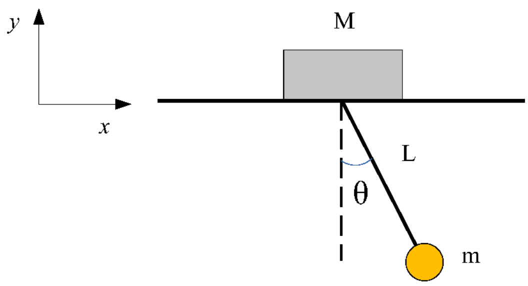
C $p_x = (m + M)\dot{x} + mL\dot{\theta}\sin\theta$.

D $p_x = (m + M)\dot{x} - mL\dot{\theta}\sin\theta$.

E $p_x = (m + M)\dot{x} - mL\dot{\theta}\cos\theta$.

Q. 16 [mcPT8b]

Um bloco de massa M é confinado a se movimentar sobre um trilho de ar com atrito desprezível, sua posição sendo descrita pela coordenada x ($y = 0$). Preso a esse bloco, há uma haste de massa desprezível e comprimento L, com uma partícula de massa m presa na outra extremidade, sob a ação da força gravitacional. A massa m pode oscilar no plano xy, fazendo um ângulo θ com a vertical, como ilustrado na figura. Expressando a lagrangiana $\mathcal{L}$ do sistema em termos de $(x,\ \theta,\ \dot{x},\ \dot{\theta})$, encontre o momento canônico $p_\theta = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}}$.



■ $p_\theta = mL^2\dot{\theta} + mL\dot{x}\cos\theta$.

B $p_\theta = mL^2\dot{\theta}$.

C $p_\theta = mL^2\dot{\theta} + mL\dot{x}\sin\theta$.

D $p_\theta = mL^2\dot{\theta} - mL\dot{x}\cos\theta$.

E $p_\theta = mL^2\dot{\theta} - mL\dot{x}\sin\theta$.

Q. 17 [emPT1a] Um isolante cilíndrico de raio R, infinitamente longo, possui uma distribuição uniforme de cargas com densidade volumétrica $\nu > 0$. Qual é o módulo do campo elétrico $\mathbf{E}$ a uma distância $\rho < R$ do eixo de simetria do cilindro?

■ $E = \frac{\nu\rho}{2\epsilon_0}$ B $E = \frac{\nu\rho}{4\epsilon_0}$ C $E = \frac{2\nu\rho}{\epsilon_0}$ D $E = \frac{\nu R^2}{\epsilon_0\rho}$ E $E = \frac{\nu R^2}{4\epsilon_0\rho}$

Q. 18 [emPT1b] Um isolante cilíndrico de raio R, infinitamente longo, possui uma distribuição uniforme de cargas com densidade volumétrica $\nu > 0$. Qual é o módulo do campo elétrico $\mathbf{E}$ a uma distância $\rho > R$ do eixo de simetria do cilindro?

■ $E = \frac{\nu R^2}{2\epsilon_0 \rho}$ | B $E = \frac{\nu R^2}{4\epsilon_0 \rho}$ | C $E = \frac{\nu \rho}{\epsilon_0}$ | D $E = \frac{\nu \rho^2}{2\epsilon_0 R}$ | E $E = \frac{\nu \rho^2}{4\epsilon_0 R}$

Q. 19 [emPT2a] Num determinado instante, um capacitor de capacitância C, totalmente carregado com uma carga Q_0, começa a descarregar através de um resistor de resistência R. Em qual instante t o capacitor terá a metade de sua carga inicial?

■ $t = RC \ln 2$
B $t = RC \ln 3$
C $t = \frac{1}{2} RC \ln 2$
D $t = \frac{1}{3} RC \ln 3$
E $t = 2RC \ln 3$

Q. 20 [emPT2b] Num determinado instante, um capacitor de capacitância C, totalmente carregado com uma carga Q_0, começa a descarregar através de um resistor de resistência R. Em qual instante t o capacitor terá um terço de sua carga inicial?

■ $t = RC \ln 3$
B $t = RC \ln 2$
C $t = \frac{1}{2} RC \ln 3$
D $t = \frac{1}{3} RC \ln 2$
E $t = 3RC \ln 3$

Q. 21 [emPT3a] Um cabo coaxial é constituído por um cilindro condutor interno de raio a envolto por uma casca cilíndrica externa condutora fina, coaxial ao cilindro interno e de raio $b > a$. O cilindro interno é percorrido por uma corrente I uniformemente distribuída em sua seção reta. O cilindro externo é percorrido por uma corrente de mesma intensidade, uniformemente distribuída na sua superfície, mas que flui em sentido oposto à corrente no cilindro interno. Considerando que o eixo de simetria do cabo coaxial é o eixo z, qual é o campo magnético $\mathbf{B}$ na região $0 < \rho < a$, no interior do condutor interno?

■ $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I \rho}{2\pi a^2} \hat{\varphi}$
B $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I \rho}{4\pi a^2} \hat{\varphi}$
C $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I \rho^2}{2\pi a^3} \hat{\varphi}$
D $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I a}{2\pi \rho^2} \hat{\varphi}$
E $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I a}{4\pi \rho^2} \hat{\varphi}$

Q. 22 [emPT3b] Um cabo coaxial é constituído por um cilindro condutor interno de raio a envolto por uma casca cilíndrica externa condutora fina, coaxial ao cilindro interno e de raio $b > a$. O cilindro interno é percorrido por uma corrente I uniformemente distribuída em sua seção reta. O cilindro externo é percorrido por uma corrente de mesma intensidade, uniformemente distribuída na sua superfície, mas que flui em sentido oposto à corrente no cilindro interno. Considerando que o eixo de simetria do cabo coaxial é o eixo z, qual é o campo magnético $\mathbf{B}$ na região $a < \rho < b$ entre os condutores?

■ $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi \rho} \hat{\varphi}$
B $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi \rho} \hat{\varphi}$
C $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I a}{2\pi \rho^2} \hat{\varphi}$
D $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I b}{2\pi \rho^2} \hat{\varphi}$
E $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I b}{2\pi a \rho} \hat{\varphi}$

Q. 23 [emPT4a] Em uma determinada região do espaço o campo elétrico é dado, em coordenadas esféricas, por $\mathbf{E} = \kappa r^2 \hat{r}$, onde κ é uma constante. Qual é a densidade de carga ρ na região?

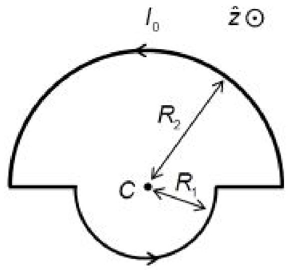
■ $\rho = 4\kappa \epsilon_0 r$
B $\rho = 2\pi \kappa \epsilon_0 r$
C $\rho = 4\pi \kappa \epsilon_0 r$
D $\rho = \kappa \epsilon_0 r$
E $\rho = \pi \kappa \epsilon_0 r$

Q. 24 [emPT4b] Em uma determinada região do espaço o campo elétrico é dado, em coordenadas esféricas, por $\mathbf{E} = \kappa r^3 \hat{r}$, onde κ é uma constante. Qual é a densidade de carga ρ na região?

■ $\rho = 5\kappa\epsilon_0 r^2$
[B] $\rho = 5\pi\kappa\epsilon_0 r^2$
[C] $\rho = 10\kappa\epsilon_0 r^2$
[D] $\rho = 10\pi\kappa\epsilon_0 r^2$
[E] $\rho = 4\pi\kappa\epsilon_0 r^2$

Q. 25 [emPT5a]

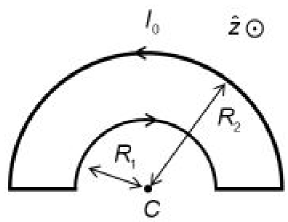
Uma espira situa-se no plano xy e é formada por dois arcos de circunferência centrados na origem C de raios R_1 e $R_2 > R_1$ conectados por segmentos retos (ver figura). A corrente elétrica na espira é I_0 e tem sentido anti-horário no arco de maior raio (R_2) quando vista de cima ($z > 0$). O campo magnético $\mathbf{B}$ na origem C é dado por



■ $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I_0}{4}(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})\hat{z}$
[B] $\mathbf{B} = 0$
[C] $\mathbf{B} = -\frac{\mu_0 I_0}{4}(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})\hat{z}$
[D] $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I_0}{4}(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2})\hat{z}$
[E] $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I_0}{4}(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1})\hat{z}$

Q. 26 [emPT5b]

Uma espira situa-se no plano xy e é formada por dois arcos de circunferência centrados na origem C de raios R_1 e $R_2 > R_1$ conectados por segmentos retos (ver figura). A corrente elétrica na espira é I_0 e tem sentido anti-horário no arco de maior raio (R_2) quando vista de cima ($z > 0$). O campo magnético $\mathbf{B}$ na origem C é dado por



■ $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I_0}{4}(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1})\hat{z}$
[B] $\mathbf{B} = 0$
[C] $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I_0}{4}(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2})\hat{z}$
[D] $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I_0}{4}(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})\hat{z}$
[E] $\mathbf{B} = -\frac{\mu_0 I_0}{4}(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})\hat{z}$

Q. 27 [emPT6a]
O potencial vetor de certa distribuição de corrente elétrica em uma região do espaço é dado, em coordenadas cilíndricas, por $\mathbf{A}(\rho,\varphi,z) = \frac{1}{2}C_0\rho\hat{\varphi}$, com C_0 constante. *i)* Calcule o campo magnético $\mathbf{B}(\rho,\varphi,z)$; *ii)* Em que região espacial próxima a qual distribuição de corrente elétrica pode-se observar esse campo magnético?

■ $\mathbf{B}(\rho,\varphi,z) = C_0\hat{z}$; interior de um solenoide longo
[B] $\mathbf{B}(\rho,\varphi,z) = \frac{1}{4}C_0\rho^2\hat{z}$; proximidades de um fio retilíneo longo
[C] $\mathbf{B}(\rho,\varphi,z) = C_0\hat{\varphi}$; interior de um solenoide longo
[D] $\mathbf{B}(\rho,\varphi,z) = \frac{1}{2}C_0\hat{\varphi}$; ao longo do eixo de uma espira circular
[E] $\mathbf{B}(\rho,\varphi,z) = C_0\hat{\varphi}$; ao longo do eixo de uma espira circular

Q. 28 [`emPT6b`]
O potencial vetor de certa distribuição de corrente elétrica em uma região do espaço é dado, em coordenadas cilíndricas, por $\mathbf{A}(\rho,\varphi,z) = -C_0 \ln{(\rho/a)}\hat{z}$, com C_0 e a constantes. *i)* Calcule o campo magnético $\mathbf{B}(\rho,\varphi,z)$; *ii)* Em que região espacial próxima a qual distribuição de corrente elétrica pode-se observar esse campo magnético?

■ $\mathbf{B}(\rho,\varphi,z) = \frac{C_0}{\rho}\hat{\varphi}$; proximidades de um fio retilíneo longo

[B] $\mathbf{B}(\rho,\varphi,z) = C_0(\frac{a}{\rho})\hat{\varphi}$; proximidades de um fio retilíneo longo

[C] $\mathbf{B}(\rho,\varphi,z) = \frac{C_0}{\rho}\hat{\varphi}$; ao longo do eixo de uma espira circular

[D] $\mathbf{B}(\rho,\varphi,z) = C_0(\frac{a}{\rho})\hat{z}$; interior de um solenoide longo

[E] $\mathbf{B}(\rho,\varphi,z) = C_0\rho\hat{z}$; interior de um solenoide longo

Q. 29 [`emPT7a`]
Uma onda eletromagnética plana propaga-se ao longo da direção $\hat{z}$ num meio dielétrico, não magnético ($\mu = \mu_0$), homogêneo e isotrópico. O campo elétrico da onda é dado, em notação complexa, por $\mathbf{E}(z,t) = E_0 \exp[i(kz - \omega t)](\hat{x} + 3\hat{y})$, com $k = 1{,}8 \times 10^7$ m^{-1}, $\omega = 3{,}6 \times 10^{15}$ Hz e E_0 constante. Calcule: *i)* a velocidade de fase v_f da onda; *ii)* o índice de refração n do meio dielétrico; *iii)* o campo magnético $\mathbf{B}(z,t)$ da onda. A velocidade da luz no vácuo é $c = 3{,}0 \times 10^8$ m/s.

■ $v_f = 2{,}0 \times 10^8$ m/s; $n = 1{,}5$; $\mathbf{B}(z,t) = -\frac{kE_0}{\omega} \exp[i(kz - \omega t)](3\hat{x} - \hat{y})$

[B] $v_f = 2{,}0 \times 10^8$ m/s; $n = 1{,}5$; $\mathbf{B}(z,t) = \frac{kE_0}{\omega} \exp[i(kz - \omega t)](3\hat{x} + \hat{y})$

[C] $v_f = 5{,}0 \times 10^8$ m/s; $n = 6{,}0$; $\mathbf{B}(z,t) = -\frac{kE_0}{\omega} \exp[i(kz - \omega t)](3\hat{x} - \hat{y})$

[D] $v_f = 5{,}0 \times 10^8$ m/s; $n = 6{,}0$; $\mathbf{B}(z,t) = \frac{kE_0}{\omega} \exp[i(kz - \omega t)](3\hat{x} + \hat{y})$

[E] $v_f = 1{,}5 \times 10^8$ m/s; $n = 2{,}0$; $\mathbf{B}(z,t) = \frac{kE_0}{\omega} \exp[i(kz - \omega t)](\hat{x} - 3\hat{y})$

Q. 30 [`emPT7b`]
Uma onda eletromagnética plana propaga-se ao longo da direção $\hat{z}$ num meio dielétrico, não magnético ($\mu = \mu_0$), homogêneo e isotrópico. O campo elétrico da onda é dado, em notação complexa, por $\mathbf{E}(z,t) = E_0 \exp[i(kz - \omega t)](2\hat{x} - \hat{y})$, com $k = 1{,}2 \times 10^7$ m^{-1}, $\omega = 3{,}0 \times 10^{15}$ Hz e E_0 constante. Calcule: *i)* a velocidade de fase v_f da onda; *ii)* o índice de refração n do meio dielétrico; *iii)* o campo magnético $\mathbf{B}(z,t)$ da onda. A velocidade da luz no vácuo é $c = 3{,}0 \times 10^8$ m/s.

■ $v_f = 2{,}5 \times 10^8$ m/s; $n = 1{,}2$; $\mathbf{B}(z,t) = \frac{kE_0}{\omega} \exp[i(kz - \omega t)](\hat{x} + 2\hat{y})$

[B] $v_f = 2{,}5 \times 10^8$ m/s; $n = 1{,}2$; $\mathbf{B}(z,t) = \frac{kE_0}{\omega} \exp[i(kz - \omega t)](\hat{x} - 2\hat{y})$

[C] $v_f = 4{,}0 \times 10^8$ m/s; $n = 7{,}5$; $\mathbf{B}(z,t) = -\frac{kE_0}{\omega} \exp[i(kz - \omega t)](\hat{x} + 2\hat{y})$

[D] $v_f = 4{,}0 \times 10^8$ m/s; $n = 7{,}5$; $\mathbf{B}(z,t) = -\frac{kE_0}{\omega} \exp[i(kz - \omega t)](\hat{x} - 2\hat{y})$

[E] $v_f = 7{,}5 \times 10^8$ m/s; $n = 4{,}0$; $\mathbf{B}(z,t) = \frac{kE_0}{\omega} \exp[i(kz - \omega t)](2\hat{x} + \hat{y})$

Q. 31 [`emPT8a`]
Uma espira condutora quadrada de lado D encontra-se no interior de um solenoide longo de comprimento L e de secção reta circular de raio a ($a \ll L$). O plano da espira é perpendicular ao eixo do solenoide. O número total de voltas do solenoide é N e a corrente elétrica que nele circula é dada por $I(t) = I_0 \cos\omega t$. Qual é a força eletromotriz ε induzida na espira?

■ $\varepsilon = \frac{\omega\mu_0 I_0 N D^2}{L} \sin\omega t$

[B] $\varepsilon = \frac{\omega\mu_0 I_0 N D^2}{L} \cos\omega t$

[C] $\varepsilon = \frac{\mu_0 I_0 N^2 D^2}{L^2} \sin\omega t$

[D] $\varepsilon = \frac{\mu_0 I_0 N(\pi a^2)}{L} \cos\omega t$

[E] $\varepsilon = \frac{\mu_0 I_0 N^2(\pi a^2)}{L^2} \sin\omega t$

Q. 32 [`emPT8b`]
Uma espira condutora quadrada de lado C encontra-se no interior de um solenoide longo de comprimento L e de secção reta circular de raio b ($b \ll L$). O plano da espira é perpendicular ao eixo do solenoide. O número total de voltas do solenoide é N e a corrente elétrica que nele circula é dada por $I(t) = I_0$ sen ωt. Qual é a força eletromotriz ε induzida na espira?

■ $\varepsilon = -\frac{\omega\mu_0 I_0 N C^2}{L} \cos\omega t$

B $\varepsilon = \frac{\omega\mu_0 I_0 N C^2}{L} \sin\omega t$

C $\varepsilon = -\frac{\mu_0 I_0 N^2 C^2}{L^2} \cos\omega t$

D $\varepsilon = \frac{\mu_0 I_0 N (\pi b^2)}{L} \sin\omega t$

E $\varepsilon = -\frac{\mu_0 I_0 N^2 (\pi b^2)}{L^2} \cos\omega t$

Q. 33 [`tePT1a`] Considere um mol de um gás ideal, cuja capacidade térmica a volume constante é C_v, inicialmente em equilíbrio térmico à temperatura T_0. O gás é colocado em contato com um reservatório térmico a uma temperatura $T_R = T_0/2$, estando isolado o sistema formado pelo gás mais o reservatório térmico. Após o contato, por meio de um processo em que não há troca de matéria nem variação de volume, o sistema evolui para um novo estado de equilíbrio. A variação total de entropia nesse processo é

■ $\Delta S = C_v\,(1 - \ln 2)$.

B $\Delta S = C_v$.

C $\Delta S = C_v \ln 2$.

D $\Delta S = C_v\,(1 + \ln 2)$.

E $\Delta S = 0$.

Q. 34 [`tePT1b`] Considere um mol de um gás ideal, cuja capacidade térmica a volume constante é C_v, inicialmente em equilíbrio térmico à temperatura T_0. O gás é colocado em contato com um reservatório térmico a uma temperatura $T_R = 2T_0$, estando isolado o sistema formado pelo gás mais o reservatório térmico. Após o contato, por meio de um processo em que não há troca de matéria nem variação de volume, o sistema evolui para um novo estado de equilíbrio. A variação total de entropia nesse processo é

■ $\Delta S = C_v\left(\ln 2 - \frac{1}{2}\right)$.

B $\Delta S = \frac{C_v}{2}$.

C $\Delta S = C_v \ln 2$.

D $\Delta S = C_v\left(\ln 2 + \frac{1}{2}\right)$.

E $\Delta S = 0$.

Q. 35 [`tePT2a`] Um certo gás real ocupa um recipiente com paredes adiabáticas a uma temperatura T_0 com volume molar v_0. Uma descrição aproximada é tratá-lo como um gás de van der Waals, cuja energia interna por mol é dada por

$$u = RcT - \frac{a}{v},$$

onde R, a e c são constantes. O gás realiza uma **expansão livre** entre os volumes molares v_0 e $v_f = 2v_0$, atingindo dessa forma a temperatura final T_f. O trabalho W realizado pelo gás neste processo e a temperatura final T_f são

■ $W = 0$ e $T_f = T_0 - \frac{a}{2v_0 Rc}$.

B $W = 0$ e $T_f = T_0 + \frac{a}{2v_0 Rc}$.

C $W = RT \ln\left(\frac{2v_0 - b}{v_0 - b}\right) + \frac{a}{2v_0}$ e $T_f = T_0$.

D $W = 0$ e $T_f = T_0$.

E $W = RT \ln\left(\frac{2v_0 - b}{v_0 - b}\right) + \frac{a}{2v_0}$ e $T_f = T_0 - \frac{a}{2v_0 Rc}$.

Q. 36 [tePT2b] Um certo gás real ocupa um recipiente com paredes adiabáticas a uma temperatura T_0 com volume molar v_0. Uma descrição aproximada é tratá-lo como um gás de van der Waals, cuja energia interna por mol é dada por

$$u = RcT - \frac{a}{v},$$

onde R, a e c são constantes. O gás realiza uma **expansão livre** entre os volumes molares v_0 e $v_f = 3v_0$, atingindo dessa forma a temperatura final T_f. O trabalho W realizado pelo gás neste processo e a temperatura final T_f são

■ $W = 0$ e $T_f = T_0 - \frac{2a}{3v_0 Rc}$.

[B] $W = 0$ e $T_f = T_0 + \frac{2a}{3v_0 Rc}$.

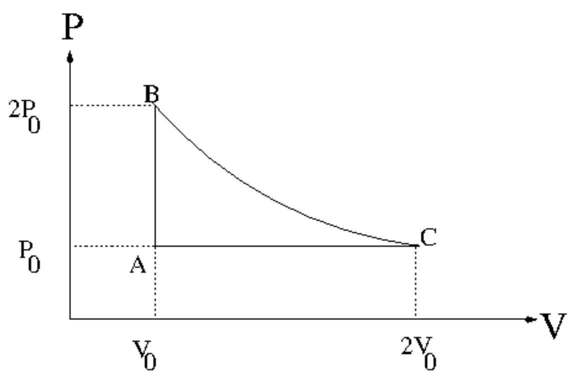
[C] $W = RT \ln\left(\frac{3v_0 - b}{v_0 - b}\right) + \frac{2a}{3v_0}$ e $T_f = T_0$.

[D] $W = 0$ e $T_f = T_0$.

[E] $W = RT \ln\left(\frac{3v_0 - b}{v_0 - b}\right) + \frac{2a}{3v_0}$ e $T_f = T_0 - \frac{2a}{3v_0 Rc}$.

Q. 37 [tePT3a]

Considere um mol de um gás ideal monoatômico ($C_V = \frac{3R}{2}$) que realiza um processo cíclico quase-estático A-B-C-A, conforme ilustra a figura. A etapa A-B é isocórica, a etapa B-C é isotérmica e a etapa C-A é isobárica. O trabalho realizado pelo gás ao longo do ciclo é



■ $W_{ciclo} = P_0 V_0 (\ln 4 - 1)$.

[B] $W_{ciclo} = P_0 V_0 (\ln 4 + 1)$.

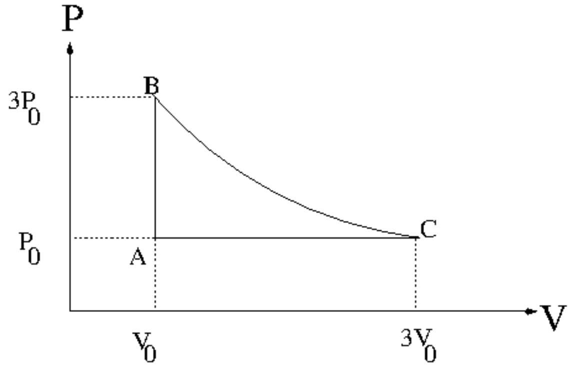
[C] $W_{ciclo} = P_0 V_0 (\ln 4 - 2)$.

[D] $W_{ciclo} = P_0 V_0$.

[E] $W_{ciclo} = -P_0 V_0$.

Q. 38 [tePT3b]

Considere um mol de um gás ideal monoatômico ($C_V = \frac{3R}{2}$) que realiza um processo cíclico quase-estático A-B-C-A, conforme ilustra a figura. A etapa A-B é isocórica, a etapa B-C é isotérmica e a etapa C-A é isobárica. O trabalho realizado pelo gás ao longo do ciclo é



■ $W_{ciclo} = P_0V_0(\ln 27 - 2)$.

B $W_{ciclo} = P_0V_0(\ln 27 + 2)$.

C $W_{ciclo} = P_0V_0(\ln 9 - 2)$.

D $W_{ciclo} = 2P_0V_0$.

E $W_{ciclo} = -2P_0V_0$.

Q. 39 [tePT4a] Considere um certo gás realizando um processo de compressão adiabática quase-estática (em que não há trocas de calor) indo de uma pressão inicial P_0 a uma pressão final $P_f > P_0$. Se N,V são o número de mols e volume, respectivamente, e S, U, F e H os potenciais termodinâmicos entropia, energia interna, energia livre de Helmholtz e entalpia, respectivamente, a quantidade física que caracteriza a variação de temperatura ao longo deste processo é dada por:

■ $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{S,N}$.

B $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{V,N}$.

C $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{U,N}$.

D $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{F,N}$.

E $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{H,N}$.

Q. 40 [tePT4b] Considere um certo gás realizando um processo de expansão adiabática quase-estática (em que não há trocas de calor) indo de um volume inicial V_0 a um volume final $V_f > V_0$. Se N,P são o número de mols e pressão, respectivamente, e S, U, F e H os potenciais termodinâmicos entropia, energia interna, energia livre de Helmholtz e entalpia, a quantidade física que caracteriza a variação de temperatura ao longo deste processo é dada por:

■ $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_{S,N}$.

B $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_{P,N}$.

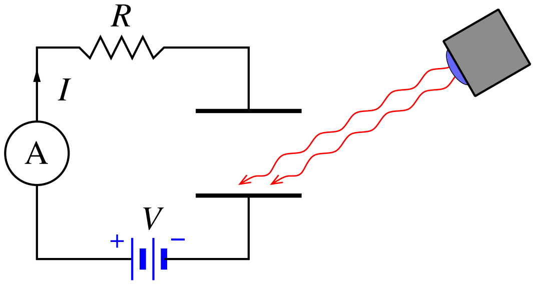
C $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_{U,N}$.

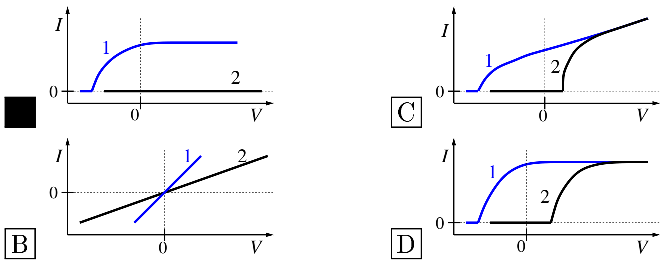
D $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_{F,N}$.

E $\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_{H,N}$.

Q. 41 [`fmPT1a`]

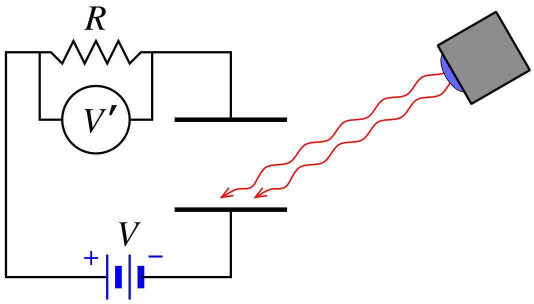
A figura ilustra um circuito RC no vácuo conectado a uma bateria de diferença de potencial V. Sobre uma das placas do capacitor metálico (anodo) incide um feixe de luz gerado por uma fonte que emite uma taxa constante de N fótons por segundo de frequência fixa. Considere dois valores distintos de frequências $f_1 > f_2$, tais que as energias desses fótons são, respectivamente, maior e menor que a função trabalho do anodo. Qual dos gráficos abaixo melhor representa o valor da corrente estacionária I atravessando o amperímetro como função de V?

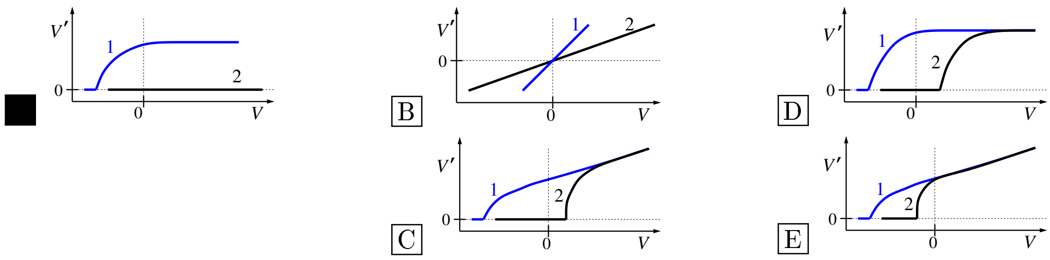




Q. 42 [`fmPT1b`]

A figura ilustra um circuito RC no vácuo conectado a uma bateria de diferença de potencial V. Sobre uma das placas do capacitor metálico (anodo) incide um feixe de luz gerado por uma fonte que emite uma taxa constante de N fótons por segundo de frequência fixa. Considere dois valores distintos de frequências $f_1 > f_2$, tais que as energias desses fótons são, respectivamente, maior e menor que a função trabalho do anodo. Qual dos gráficos abaixo melhor representa o valor da diferença de potencial V' no voltímetro como função de V?





Q. 43 [`fmPT2a`] Uma bomba de massa de repouso m explode e se fragmenta em três pedaços cujas massas de repouso são $m_1 = \frac{1}{4}m$, $m_2 = \frac{4}{9}m$ e $m_3 = \frac{11}{36}m$. As velocidades dos fragmentos 1 e 2 no referencial da bomba imediatamente após a explosão são iguais a $\mathbf{v}_1 = \frac{4}{5}c\hat{x}$ e $\mathbf{v}_2 = -\frac{3}{5}c\hat{x}$, respectivamente, onde c é a velocidade da luz no vácuo. Qual é a velocidade do terceiro fragmento?

■ $\mathbf{v}_3 = \mathbf{0}$

B $\mathbf{v}_3 = -\frac{12}{55}c\hat{x}$

C $\mathbf{v}_3 = \frac{12}{55}c\hat{x}$

D $\mathbf{v}_3 = -\frac{2}{5}c\hat{x}$

E $\mathbf{v}_3 = \frac{1}{5}c\hat{x}$

Q. 44 [fmPT2b] Uma bomba de massa de repouso m explode e se fragmenta em três pedaços cujas massas de repouso são $m_1 = \frac{5}{9}m$, $m_2 = \frac{5}{16}m$ e $m_3 = \frac{19}{144}m$. As velocidades dos fragmentos 1 e 2 no referencial da bomba imediatamente após a explosão são iguais a $\mathbf{v}_1 = \frac{3}{5}c\hat{x}$ e $\mathbf{v}_2 = -\frac{4}{5}c\hat{x}$, respectivamente, onde c é a velocidade da luz no vácuo. Qual é a velocidade do terceiro fragmento?

[redacted] $\mathbf{v}_3 = \mathbf{0}$

B $\mathbf{v}_3 = -\frac{12}{19}c\hat{x}$

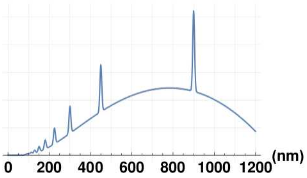
C $\mathbf{v}_3 = \frac{12}{19}c\hat{x}$

D $\mathbf{v}_3 = -\frac{2}{5}c\hat{x}$

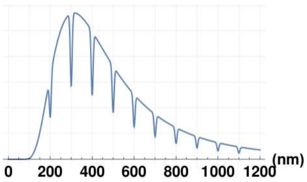
E $\mathbf{v}_3 = \frac{1}{5}c\hat{x}$

Q. 45 [fmPT3a] Um conjunto de partículas não interagentes estão confinadas em um potencial do tipo oscilador harmônico isotrópico. O sistema que as contém é então excitado e mede-se a luz emitida proveniente. O espectro da radiação emitida pelas partículas confinadas difere de um espectro contínuo apenas por um certo conjunto discreto de frequências características. Qual das figuras abaixo melhor ilustra o espectro de emissão em função do **comprimento de onda** da luz correspondente?

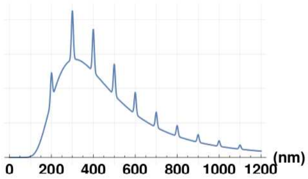
[redacted]



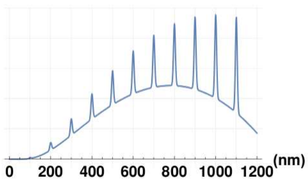
B



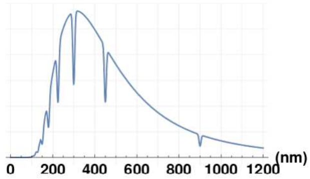
C



D

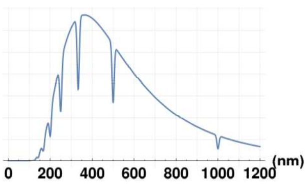


E

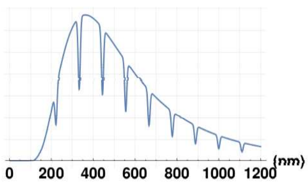


Q. 46 [fmPT3b] Um conjunto de partículas não interagentes estão confinadas em um potencial do tipo oscilador harmônico isotrópico. O sistema que as contém é então iluminado e mede-se a luz transmitida. O espectro da radiação absorvida pelas partículas confinadas difere de um espectro contínuo apenas por um certo conjunto discreto de frequências características. Qual das figuras abaixo melhor ilustra o espectro de absorção em função do **comprimento de onda** da luz correspondente?

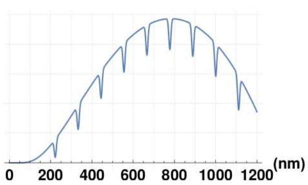
[redacted]



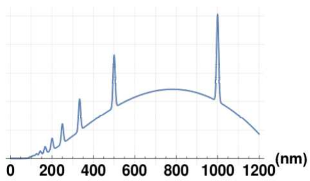
B



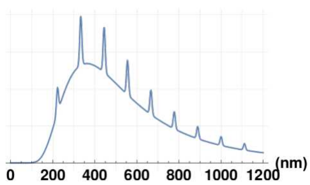
C



D



E



Q. 47 [fmPT4a] Em uma sauna, a temperatura do ambiente é de 45°C. Qual é a ordem de grandeza da potência de calor absorvida por irradiação por uma pessoa cuja área superficial é de 2,1 m^2? Considere o ambiente e a pessoa como corpos negros perfeitos.

[redacted] 10^3 W B 10^2 W C 10^1 W D 10^0 W E 10^{-1} W

Q. 48 [fmPT4b] Em uma sauna, a temperatura do ambiente é de 47°C. Qual é a ordem de grandeza da potência de calor absorvida por irradiação por uma pessoa cuja área superficial é de 1,9 m^2? Considere o ambiente e a pessoa como corpos negros perfeitos.

■ 10^3 W [B] 10^2 W [C] 10^1 W [D] 10^0 W [E] 10^{-1} W

Q. 49 [fmPT5a]
Para um observador no referencial S, duas bombas nas posições $x = -a$ e $x = +a$ no eixo x explodem no mesmo instante. Um observador S', por sua vez, move-se ao longo do eixo x de S com velocidade constante v na direção de x crescente. Indique a alternativa correta sobre as seguintes observações de S':

I. O intervalo de tempo entre as explosões depende da posição de S'.
II. A distância entre as bombas é $2a/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, onde c é a velocidade da luz.
III. A bomba em $x = +a$ explode antes da bomba em $x = -a$.

■ Apenas a afirmação III está correta.
[B] Apenas as afirmações II e III estão corretas.
[C] Apenas a afirmação I está correta.
[D] Apenas a afirmação II está correta.
[E] As afirmações I e II estão corretas.

Q. 50 [fmPT5b]
Para um observador no referencial S, duas bombas nas posições $x = -a$ e $x = +a$ no eixo x explodem no mesmo instante. Um observador S', por sua vez, move-se ao longo do eixo x de S com velocidade constante v na direção de x crescente. Indique a alternativa correta sobre as seguintes observações de S':

I. O intervalo de tempo entre as explosões depende da posição de S'.
II. A distância entre as bombas é $2a\sqrt{1 - v^2/c^2}$, onde c é a velocidade da luz.
III. A bomba em $x = +a$ explode antes da bomba em $x = -a$.

■ Apenas as afirmações II e III estão corretas.
[B] Apenas a afirmação I está correta.
[C] Apenas a afirmação II está correta.
[D] Apenas a afirmação III está correta.
[E] As afirmações I, II e III estão corretas.

Q. 51 [fmPT6a]
Radiação eletromagnética com comprimento de onda de 3 pm incide em elétrons estacionários. A interação da radiação com um dos elétrons resulta em um fóton espalhado que é detectado a 60° da direção da radiação incidente. Qual foi, aproximadamente, a energia transferida para o elétron? (Observação: considere $h/mc = 2$ pm, onde h é a constante de Planck, m é a massa do elétron e c é a velocidade da luz no vácuo.)

■ 100 keV [B] 10 keV [C] 50 keV [D] 70 keV [E] 300 keV

Q. 52 [fmPT6b]
Radiação eletromagnética com comprimento de onda de 2 pm incide em elétrons estacionários. A interação da radiação com um dos elétrons resulta em um fóton espalhado que é detectado a 60° da direção da radiação incidente. Qual foi, aproximadamente, a energia transferida para o elétron? (Observação: considere $h/mc = 2$ pm, onde h é a constante de Planck, m é a massa do elétron e c é a velocidade da luz no vácuo.)

■ 200 keV [B] 10 keV [C] 50 keV [D] 70 keV [E] 300 keV

Q. 53 [`fmPT7a`]
De acordo com o modelo de Bohr, qual é a razão entre os raios da primeira órbita do elétron em um átomo de hidrogênio, r_H, e em um íon de hélio simplesmente ionizado, r_{He^+}, ou seja, r_H/r_{He^+}? (Observação: o número atômico do hélio é 2.)

■ 2   B 1   C 4   D 1/4   E 3

Q. 54 [`fmPT7b`]
De acordo com o modelo de Bohr, qual é a razão entre os raios da primeira órbita do elétron em um íon de hélio simplesmente ionizado, r_{He^+}, e em um átomo de hidrogênio, r_H, ou seja, r_{He^+}/r_H? (Observação: o número atômico do hélio é 2.)

■ 1/2   B 1   C 4   D 1/4   E 3

Q. 55 [`fmPT8a`]
Um fóton de comprimento de onda de 121,6 nm é emitido por um átomo de hidrogênio. As energias do átomo de hidrogênio são dadas por $E_n = -13{,}6\ \text{eV}/n^2$, onde n é o número quântico principal do estado em que o elétron se encontra. Qual é o valor de n do estado em que o elétron se encontrava antes da emissão do fóton?

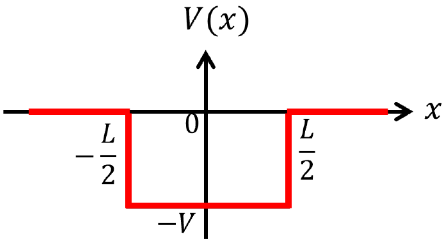
■ 2   B 3   C 4   D 1   E 5

Q. 56 [`fmPT8b`]
Um fóton com um comprimento de onda de 102,6 nm é emitido por um átomo de hidrogênio. As energias do átomo de hidrogênio são dadas por $E_n = -13{,}6\ \text{eV}/n^2$, onde n é o número quântico principal do estado em que o elétron se encontra. Qual é o valor de n do estado em que o elétron se encontrava antes da emissão do fóton?

■ 3   B 2   C 4   D 1   E 5

Q. 57 [`mqPT1a`]

Uma partícula quântica está submetida a um poço de potencial unidimensional $V(x)$ de largura L e profundidade $-V$, representado na figura. O poço é suficientemente profundo para que existam estados ligados. Se E representa um possível auto-valor da energia da partícula, determine se cada afirmativa abaixo é verdadeira (V) ou falsa (F) e indique a alternativa que contém a sequência correta.

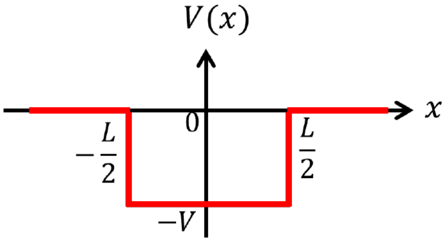


(   ) $E > 0$ pertence à parte discreta do espectro de energias e $E < 0$ à parte contínua.
(   ) Se $E < 0$, a função de onda da partícula só pode ser nula para valores discretos de x na região $|x| < L/2$, mas decai exponencialmente a zero com a distância às bordas do poço na região $|x| > L/2$.
(   ) Se $E < 0$, a função de onda da partícula é estritamente confinada à região $|x| < L/2$, isto é, ela é zero nas bordas e fora do poço.
(   ) Se $E > 0$, a função de onda da partícula é estendida ao longo de todo o eixo x.

■ F, V, F, V.
B F, V, F, F.
C V, F, V, F.
D V, F, V, V.
E V, F, F, V.

Q. 58 [mqPT1b]

Uma partícula quântica está submetida a um poço de potencial unidimensional $V(x)$ de largura L e profundidade $-V$, representado na figura. O poço é suficientemente profundo para que existam estados ligados. Se E representa um possível auto-valor da energia da partícula, determine se cada afirmativa abaixo é verdadeira (V) ou falsa (F) e indique a alternativa que contém a sequência correta.



( ) $E < 0$ pertence à parte discreta do espectro de energias e $E > 0$ à parte contínua.
( ) Se $E > 0$, a função de onda da partícula é estendida ao longo de todo o eixo x.
( ) Se $E < 0$, a função de onda da partícula é estritamente confinada à região $|x| < L/2$, isto é, ela é zero nas bordas e fora do poço.
( ) Se $E < 0$, a função de onda da partícula só pode ser nula para valores discretos de x na região $|x| < L/2$, mas decai exponencialmente a zero com a distância às bordas do poço na região $|x| > L/2$.

■ V, V, F, V.
[B] V, F, F, V.
[C] F, F, V, F.
[D] F, F, V, V.
[E] F, V, F, V.

Q. 59 [mqPT2a] Sejam $\{|A\rangle,|B\rangle\}$ e $\{|1\rangle,|2\rangle\}$ duas bases ortonormais do espaço de estados bidimensional de um sistema quântico, com a seguinte transformação entre as bases: $|A\rangle = [|1\rangle + |2\rangle]/\sqrt{2}$ e $|B\rangle = [-|1\rangle + |2\rangle]/\sqrt{2}$. Supondo que, em um dado instante, o sistema esteja no estado **normalizado** $|\Psi\rangle = a|A\rangle + b|B\rangle$, onde a e b são números reais, as probabilidades de que o sistema se encontre nos estados $|A\rangle$, $|B\rangle$, $|1\rangle$, e $|2\rangle$ neste instante são, respectivamente,

■ a^2, b^2, $1/2 - ab$, e $1/2 + ab$.
[B] a^2, b^2, $1/2 + ab$, e $1/2 + ab$.
[C] a^2, b^2, $-ab$, e $+ab$.
[D] $a^2 + b^2$, $a^2 + b^2$, $1/2 - ab$, e $1/2 + ab$.
[E] a^2, b^2, $1/2$, e $1/2$.

Q. 60 [mqPT2b] Sejam $\{|C\rangle,|D\rangle\}$ e $\{|1\rangle,|2\rangle\}$ duas bases ortonormais do espaço de estados bidimensional de um sistema quântico, com a seguinte transformação entre as bases: $|C\rangle = [|1\rangle + |2\rangle]/\sqrt{2}$ e $|D\rangle = [-|1\rangle + |2\rangle]/\sqrt{2}$. Supondo que, em um dado instante, o sistema esteja no estado **normalizado** $|\Psi\rangle = c|C\rangle + d|D\rangle$, onde c e d são números reais, as probabilidades de que o sistema se encontre nos estados $|C\rangle$, $|D\rangle$, $|1\rangle$, e $|2\rangle$ neste instante são, respectivamente,

■ c^2, d^2, $1/2 - cd$, e $1/2 + cd$.
[B] c^2, d^2, $1/2 + cd$, e $1/2 + cd$.
[C] c^2, d^2, $-cd$, e $+cd$.
[D] $c^2 + d^2$, $c^2 + d^2$, $1/2 - cd$, e $1/2 + cd$.
[E] c^2, d^2, $1/2$, e $1/2$.

Q. 61 [`mqPT3a`] Seja $|n\rangle$ ($n = 0,1,2,...$) o n-ésimo autoestado de energia de um oscilador harmônico e H o respectivo operador Hamiltoniano, tal que $H|n\rangle = \hbar\omega(n + 1/2)|n\rangle$, onde ω é a frequência característica do oscilador. Sabendo que o valor esperado da energia do oscilador é, num certo instante, $1{,}5\hbar\omega$, determine se cada afirmativa abaixo é verdadeira (V) ou falsa (F) e indique a alternativa que contém a sequência correta.

( ) O oscilador pode estar no autoestado com $n = 1$.
( ) O oscilador está, com certeza, no autoestado com $n = 1$.
( ) O oscilador pode estar no estado $(1/\sqrt{2})|0\rangle + (1/\sqrt{2})|2\rangle$.
( ) O oscilador está no estado fundamental.

■ V, F, V, F.
[B] V, F, F, F.
[C] F, V, F, F.
[D] V, V, V, F.
[E] F, F, F, V.

Q. 62 [`mqPT3b`] Seja $|n\rangle$ ($n = 0,1,2,...$) o n-ésimo autoestado de energia de um oscilador harmônico e H o respectivo operador Hamiltoniano, tal que $H|n\rangle = \hbar\omega(n + 1/2)|n\rangle$, onde ω é a frequência característica do oscilador. Sabendo que o valor esperado da energia do oscilador é, num certo instante, $1{,}5\hbar\omega$, determine se cada afirmativa abaixo é verdadeira (V) ou falsa (F) e indique a alternativa que contém a sequência correta.

( ) O oscilador não pode estar no autoestado com $n = 1$.
( ) O oscilador está, com certeza, no autoestado com $n = 1$.
( ) O oscilador pode estar no estado $(1/\sqrt{2})|0\rangle + (1/\sqrt{2})|2\rangle$.
( ) O oscilador não está no estado fundamental.

■ F, F, V, V.
[B] V, F, V, V.
[C] F, F, V, F.
[D] F, F, F, V.
[E] V, V, V, F.

Q. 63 [`mqPT4a`] As matrizes S_α ($\alpha = x,y,z$), que representam as componentes do operador de spin $\mathbf{S}$ de uma partícula de spin 1/2, são dadas, na representação em que S_z é diagonal, por $S_\alpha = (\hbar/2)\sigma_\alpha$, onde σ_α são as matrizes de Pauli, dadas no Formulário. Suponha que uma partícula de spin 1/2 esteja submetida a um campo magnético constante e uniforme que aponta na direção z. O estado de spin da partícula, como função do tempo t, na mesma representação, é

$$\frac{1}{2}\begin{pmatrix} \mathrm{e}^{i\omega t/2} \\ \sqrt{3}\,\mathrm{e}^{-i\omega t/2} \end{pmatrix},$$

onde ω é proporcional ao campo magnético. Obtendo os valores esperados das componentes x e z do spin, $\langle S_x\rangle$ e $\langle S_z\rangle$, respectivamente, identifique a opção correta dentre as afirmativas abaixo.

■ O valor esperado do spin, $\langle\mathbf{S}\rangle$, precessiona em torno da direção do campo magnético, mantendo um ângulo constante com essa direção, isto é, com $\langle S_z\rangle$ constante.

[B] O valor esperado do spin, $\langle\mathbf{S}\rangle$, precessiona em torno do eixo x, mantendo um ângulo constante com a direção x, isto é, com $\langle S_x\rangle$ constante.

[C] O valor esperado do spin, $\langle\mathbf{S}\rangle$, precessiona em torno da direção do campo magnético, com $\langle S_z\rangle$ oscilando entre $-\hbar/2$ e $+\hbar/2$.

[D] O valor esperado do spin, $\langle\mathbf{S}\rangle$, é independente do tempo e tem módulo $+\hbar/2$ ao longo da direção do campo magnético.

[E] O valor esperado do spin, $\langle\mathbf{S}\rangle$, é independente do tempo e tem módulo $+\hbar/2$ ao longo do eixo x.

Q. 64 [mqPT4b] As matrizes S_α ($\alpha = x,y,z$), que representam as componentes do operador de spin **S** de uma partícula de spin 1/2, são dadas, na representação em que S_z é diagonal, por $S_\alpha = (\hbar/2)\sigma_\alpha$, onde σ_α são as matrizes de Pauli, dadas no Formulário. Suponha que uma partícula de spin 1/2 esteja submetida a um campo magnético constante e uniforme que aponta na direção z. O estado de spin da partícula, como função do tempo t, na mesma representação, é

$$\frac{1}{2}\begin{pmatrix} \mathrm{e}^{i\omega t/2} \\ \sqrt{3}\,\mathrm{e}^{-i\omega t/2} \end{pmatrix}$$

onde ω é proporcional ao campo magnético. Obtendo os valores esperados das componentes y e z do spin, $\langle S_y\rangle$ e $\langle S_z\rangle$, respectivamente, identifique a opção correta dentre as afirmativas abaixo.

■ O valor esperado do spin, $\langle \mathbf{S}\rangle$, precessiona em torno da direção do campo magnético, mantendo um ângulo constante com essa direção, isto é, com $\langle S_z\rangle$ constante.

[B] O valor esperado do spin, $\langle \mathbf{S}\rangle$, precessiona em torno do eixo y, mantendo um ângulo constante com a direção y, isto é, com $\langle S_y\rangle$ constante.

[C] O valor esperado do spin, $\langle \mathbf{S}\rangle$, precessiona em torno da direção do campo magnético, com $\langle S_z\rangle$ oscilando entre $-\hbar/2$ e $+\hbar/2$.

[D] O valor esperado do spin, $\langle \mathbf{S}\rangle$, é independente do tempo e tem módulo $+\hbar/2$ ao longo da direção do campo magnético.

[E] O valor esperado do spin, $\langle \mathbf{S}\rangle$, é independente do tempo e tem módulo $+\hbar/2$ ao longo do eixo y.

Q. 65 [mqPT5a]
Considere um sistema quântico cujo espaço de estados é bidimensional. Seja $\{|1\rangle,|2\rangle\}$ uma base ortonormal nesse espaço, nessa ordem. Um observável $\hat{O}$ é representado nessa base pela matriz

$$O = s\begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 2 & 0 \end{pmatrix},$$

onde s é uma constante. Se, em um certo instante, o sistema se encontra no estado $|\psi\rangle = \sqrt{\frac{1}{2}}\,(|1\rangle - |2\rangle)$, os possíveis resultados de uma medida desse observável são

■ $-2s$ com probabilidade 1.

[B] $-2s$ com probabilidade 1/2 e $2s$ com probabilidade 1/2.

[C] $-2s$ com probabilidade 2/3 e $2s$ com probabilidade 1/3.

[D] $2s$ com probabilidade 1.

[E] $-2s$ com probabilidade 3/4 e $2s$ com probabilidade 1/4.

Q. 66 [mqPT5b]
Considere um sistema quântico cujo espaço de estados é bidimensional. Seja $\{|1\rangle,|2\rangle\}$ uma base ortonormal nesse espaço, nessa ordem. Um observável $\hat{O}$ é representado nessa base pela matriz

$$O = s\begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 2 & 0 \end{pmatrix},$$

onde s é uma constante. Se, em um certo instante, o sistema se encontra no estado $|\psi\rangle = \sqrt{\frac{1}{2}}\,(|1\rangle + |2\rangle)$, os possíveis resultados de uma medida desse observável são

■ $2s$ com probabilidade 1.

[B] $2s$ com probabilidade 1/2 e $-2s$ com probabilidade 1/2.

[C] $2s$ com probabilidade 2/3 e $-2s$ com probabilidade 1/3.

[D] $-2s$ com probabilidade 1.

[E] $2s$ com probabilidade 3/4 e $-2s$ com probabilidade 1/4.

Q. 67 [mqPT6a]
Uma partícula de massa m move-se em uma dimensão sob a ação de um potencial $V(x)$. Esse potencial é do tipo caixa, sendo zero no intervalo $-a/2 \leq x \leq a/2$ e infinito fora dele. A função de onda dessa partícula é

$$\psi(x,t) = \begin{cases} N \sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right) e^{-iEt/\hbar}, & -a/2 \leq x \leq a/2, \\ 0, & |x| > a/2. \end{cases}$$

Aqui, x é a posição da partícula, E é a energia da partícula, t é o tempo e N é uma constante de normalização da função de onda. Quais são os valores de N e E?

- ■ $N = \sqrt{2/a}$ e $E = 2\hbar^2\pi^2/ma^2$.
- B $N = 2/a$ e $E = 2\hbar^2\pi^2/ma^2$.
- C $N = \sqrt{2/a}$ e $E = \hbar^2\pi^2/ma^2$.
- D $N = 2/\sqrt{a}$ e $E = \hbar^2\pi^2/ma^2$.
- E $N = \sqrt{2/a}$ e $E = \hbar^2\pi^2/2ma^2$.

Q. 68 [mqPT6b]
Uma partícula de massa m move-se em uma dimensão sob a ação de um potencial $V(x)$. Esse potencial é do tipo caixa, sendo zero no intervalo $-a/2 \leq x \leq a/2$ e infinito fora dele. A função de onda dessa partícula é

$$\psi(x,t) = \begin{cases} N \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-iEt/\hbar}, & -a/2 \leq x \leq a/2, \\ 0, & |x| > a/2. \end{cases}$$

Aqui, x é a posição da partícula, E é a energia da partícula, t é o tempo e N é uma constante de normalização da função de onda. Quais são os valores de N e E?

- ■ $N = \sqrt{2/a}$ e $E = \hbar^2\pi^2/2ma^2$.
- B $N = 2/a$ e $E = \hbar^2\pi^2/2ma^2$.
- C $N = \sqrt{2/a}$ e $E = \hbar^2\pi^2/ma^2$.
- D $N = 2/\sqrt{a}$ e $E = 2\hbar^2\pi^2/ma^2$.
- E $N = \sqrt{2/a}$ e $E = 2\hbar^2\pi^2/ma^2$.

Q. 69 [mqPT7a]
Supondo que seja possível determinar que o módulo do momento angular orbital do elétron em um átomo de hidrogênio, em um dado instante de tempo, seja $L = \sqrt{2}\hbar$, quais seriam os resultados possíveis de uma medição imediatamente posterior de L_z, a componente z de $\vec{L}$?

- ■ $-\hbar$, 0, $\hbar$.
- B 0.
- C 0, $\hbar$.
- D 0, $\hbar$, $2\hbar$.
- E $-2\hbar$, $-\hbar$, 0, $\hbar$, $2\hbar$.

Q. 70 [mqPT7b]
Supondo que seja possível determinar que o módulo do momento angular orbital do elétron em um átomo de hidrogênio, em um dado instante de tempo, seja $L = \sqrt{6}\hbar$, quais seriam os resultados possíveis de uma medição imediatamente posterior de L_z, a componente z de $\vec{L}$?

- ■ $-2\hbar$, $-\hbar$, 0, $\hbar$, $2\hbar$.
- B 0.
- C 0, $3\hbar$.
- D 0, $\hbar$, $2\hbar$, $3\hbar$.
- E $-\hbar$, 0, $\hbar$.

Q. 71 [`mqPT8a`]
Considere um sistema quântico cujo espaço de estados é tridimensional. Seja $\{|a\rangle, |b\rangle, |c\rangle\}$ uma base ortonormal nesse espaço. O Hamiltoniano do sistema é

$$H = \hbar\omega\left(|a\rangle\langle a| - |b\rangle\langle b| + 2|c\rangle\langle c|\right).$$

Suponha que, no tempo $t = 0$, o sistema se encontre no seguinte estado

$$|\psi(0)\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}|a\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}}|b\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}}|c\rangle.$$

O estado do sistema em um tempo $t > 0$ será

■ $|\psi(t)\rangle = \left(e^{-i\omega t}|a\rangle + e^{i\omega t}|b\rangle + e^{-2i\omega t}|c\rangle\right)/\sqrt{3}$.

[B] $|\psi(t)\rangle = \left(e^{i\omega t}|a\rangle + e^{-i\omega t}|b\rangle + e^{2i\omega t}|c\rangle\right)/\sqrt{3}$.

[C] $|\psi(t)\rangle = \left(e^{-i\omega t}|a\rangle - e^{i\omega t}|b\rangle + e^{-2i\omega t}|c\rangle\right)/\sqrt{3}$.

[D] $|\psi(t)\rangle = \left(e^{i\omega t}|a\rangle - e^{-i\omega t}|b\rangle + e^{2i\omega t}|c\rangle\right)/\sqrt{3}$.

[E] $|\psi(t)\rangle = \left(e^{i\omega t}|a\rangle - e^{i\omega t}|b\rangle + e^{2i\omega t}|c\rangle\right)/\sqrt{3}$.

Q. 72 [`mqPT8b`]
Considere um sistema quântico cujo espaço de estados é tridimensional. Seja $\{|a\rangle, |b\rangle, |c\rangle\}$ uma base ortonormal nesse espaço. O Hamiltoniano do sistema é

$$H = \hbar\omega\left(|a\rangle\langle a| + 2|b\rangle\langle b| - 2|c\rangle\langle c|\right).$$

Suponha que no tempo $t = 0$ o sistema se encontre no seguinte estado

$$|\psi(0)\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}|a\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}}|b\rangle + \frac{1}{\sqrt{3}}|c\rangle.$$

O estado do sistema em um tempo $t > 0$ será

■ $|\psi(t)\rangle = \left(e^{-i\omega t}|a\rangle + e^{-2i\omega t}|b\rangle + e^{2i\omega t}|c\rangle\right)/\sqrt{3}$.

[B] $|\psi(t)\rangle = \left(e^{i\omega t}|a\rangle + e^{2i\omega t}|b\rangle + e^{-2i\omega t}|c\rangle\right)/\sqrt{3}$.

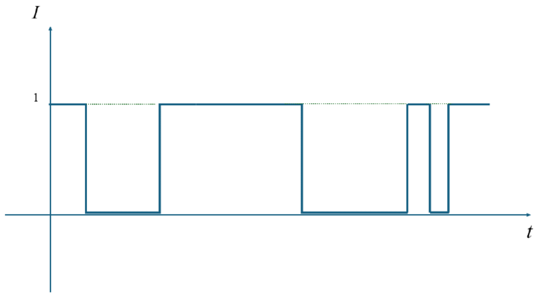
[C] $|\psi(t)\rangle = \left(e^{-i\omega t}|a\rangle + e^{-2i\omega t}|b\rangle - e^{2i\omega t}|c\rangle\right)/\sqrt{3}$.

[D] $|\psi(t)\rangle = \left(e^{i\omega t}|a\rangle + e^{2i\omega t}|b\rangle - e^{-2i\omega t}|c\rangle\right)/\sqrt{3}$.

[E] $|\psi(t)\rangle = \left(e^{i\omega t}|a\rangle + e^{2i\omega t}|b\rangle - e^{2i\omega t}|c\rangle\right)/\sqrt{3}$.

Q. 73 [fePT1a]

O ruído "flicker" ocorre em dispositivos semicondutores, como transistores CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), devido a captura e emissão de elétrons por armadilhas na interface entre o óxido e o silício. A figura ilustra o efeito típico causado por uma dessas armadilhas, onde a alternância de um elétron capturado e um elétron emitido pode ser representada por uma variável aleatória I.



O valor dessa variável binária é 0 quando o elétron está capturado e 1 quando ele é emitido. O valor esperado da $k-$ésima potência de I é

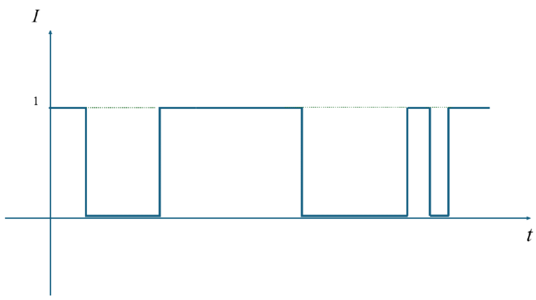
$$\langle I^k \rangle = \sum_I I^k P(I), \tag{1}$$

onde a probabilidade de I assumir o valor 1 é $P(1) = q$ enquanto a probabilidade de I assumir o valor 0 é o complementar $P(0) = 1 - q$, com $0 < q < 1$. Para essa única armadilha, a dispersão $\sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}$ será igual ao valor esperado $\langle I \rangle$ se:

■ $q = \frac{1}{2}$. B $q = \frac{1}{4}$. C $q = \frac{2}{3}$. D $q = \frac{4}{5}$. E $q = 1$.

Q. 74 [fePT1b]

O ruído "flicker" ocorre em dispositivos semicondutores, como transistores CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), devido a captura e emissão de elétrons por armadilhas na interface entre o óxido e o silício. A figura ilustra o efeito típico causado por uma dessas armadilhas, onde a alternância de um elétron capturado e um elétron emitido pode ser representada por uma variável aleatória I.



O valor dessa variável binária é 0 quando o elétron está capturado e 1 quando ele é emitido. O valor esperado da $k-$ésima potência de I é

$$\langle I^k \rangle = \sum_I I^k P(I), \tag{2}$$

onde a probabilidade de I assumir o valor 1 é $P(1) = q$ enquanto a probabilidade de I assumir o valor 0 é o complementar $P(0) = 1 - q$, com $0 < q < 1$. Para essa única armadilha, a dispersão $\sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}$ será igual à metade do valor esperado $\langle I \rangle$ se:

■ $q = \frac{4}{5}$. B $q = \frac{2}{3}$. C $q = \frac{1}{2}$. D $q = \frac{1}{4}$. E $q = 1$.

Q. 75 [fePT2a] Uma estrela composta essencialmente de hidrogênio está a uma temperatura T. Os níveis de energia do átomo de hidrogênio são dados por:

$$E_n = -\frac{\alpha}{n^2}, \quad (n = 1,2,3,\ldots)\,. \tag{3}$$

A degenerescência do nível n é $g_n = 2n^2$. A razão entre o número de átomos no segundo estado excitado ($n = 3$) e aqueles no estado fundamental ($n = 1$) é

■ $9e^{-\frac{8\alpha}{9k_BT}}$.

B $3e^{-\frac{4\alpha}{5k_BT}}$.

C $6e^{-\frac{2\alpha}{9k_BT}}$.

D $4e^{-\frac{\alpha}{2k_BT}}$.

E $2e^{-\frac{8\alpha}{3k_BT}}$.

Q. 76 [fePT2b] Uma estrela composta essencialmente de hidrogênio está a uma temperatura T. Os níveis de energia do átomo de hidrogênio são dados por:

$$E_n = -\frac{\alpha}{n^2}, \quad (n = 1,2,3,\ldots)\,. \tag{4}$$

A degenerescência do nível n é $g_n = 2n^2$. A razão entre o número de átomos no primeiro estado excitado ($n = 2$) e aqueles no estado fundamental ($n = 1$) é

■ $4e^{-\frac{3\alpha}{4k_BT}}$.

B $8e^{-\frac{2\alpha}{5k_BT}}$.

C $3e^{-\frac{2\alpha}{3k_BT}}$.

D $2e^{-\frac{5\alpha}{6k_BT}}$.

E $e^{-\frac{\alpha}{k_BT}}$.

Q. 77 [fePT3a] Considere um sistema de 2 átomos. Cada átomo pode estar em um de três estados quânticos com energias 0, ε e 2ε. O sistema está em contato com um reservatório térmico a uma temperatura T. Supondo que os átomos sejam férmions sem spin, a função de partição canônica do sistema é

■ $e^{-\frac{\varepsilon}{k_BT}} + e^{\frac{-2\varepsilon}{k_BT}} + e^{\frac{-3\varepsilon}{k_BT}}$.

B $1 + e^{\frac{-\varepsilon}{k_BT}} + e^{\frac{-2\varepsilon}{k_BT}}$.

C $e^{\frac{-\varepsilon}{k_BT}} + e^{\frac{-2\varepsilon}{k_BT}}$.

D $1 + e^{-\frac{2\varepsilon}{k_BT}} + e^{\frac{-3\varepsilon}{k_BT}}$.

E $1 + e^{-\frac{\varepsilon}{k_BT}}$.

Q. 78 [fePT3b] Considere um sistema de 2 átomos. Cada átomo pode estar em um de dois estados quânticos com energias 0 e ε . O sistema está em contato com um reservatório térmico a uma temperatura T. Supondo que os átomos sejam bósons sem spin, a função de partição canônica do sistema é

■ $1 + e^{-\frac{\varepsilon}{k_BT}} + e^{-\frac{2\varepsilon}{k_BT}}$.

B $1 + e^{-\frac{2\varepsilon}{k_BT}} + e^{-\frac{3\varepsilon}{k_BT}}$.

C $e^{-\frac{\varepsilon}{k_BT}} + e^{-\frac{2\varepsilon}{k_BT}} + 2e^{-\frac{3\varepsilon}{k_BT}}$.

D $1 + e^{-\frac{\varepsilon}{k_BT}}$.

E $e^{-\frac{2\varepsilon}{k_BT}} + e^{-\frac{3\varepsilon}{k_BT}} + e^{-\frac{4\varepsilon}{k_BT}}$.

Q. 79 [fePT4a] Em primeira aproximação, a atmosfera terrestre pode ser tratada como um gás ideal (essencialmente nitrogênio) mantido a uma temperatura constante T. Desprezando a curvatura da Terra e a variação da força gravitacional com a altura, as partículas do gás, todas de massa m, estão sob a ação do potencial gravitacional

$$U = mgz,$$

onde z é a coordenada na direção vertical. Qual é a altura média das partículas?
Integrais úteis:

$$\int_0^\infty e^{-ax}dx = \frac{1}{a}, \qquad \int_0^\infty xe^{-ax}dx = \frac{1}{a^2}.$$

■ $\langle z \rangle = \dfrac{k_B T}{mg}$.

B $\langle z \rangle = \dfrac{k_B T}{2mg}$.

C $\langle z \rangle = \dfrac{3k_B T}{mg}$.

D $\langle z \rangle = \dfrac{3k_B T}{2mg}$.

E $\langle z \rangle = 0$.

Q. 80 [fePT4b] Em primeira aproximação, a atmosfera terrestre pode ser tratada como um gás ideal (essencialmente nitrogênio) mantido a uma temperatura constante T. Desprezando a curvatura da Terra e a variação da força gravitacional com a altura, as partículas do gás, todas de massa m, estão sob a ação do potencial gravitacional

$$U = mgz,$$

onde z é a coordenada na direção vertical. Qual é a energia potencial média por partícula?
Integrais úteis:

$$\int_0^\infty e^{-ax}dx = \frac{1}{a}, \qquad \int_0^\infty xe^{-ax}dx = \frac{1}{a^2}.$$

■ $\langle U \rangle = k_B T$.

B $\langle U \rangle = k_B T/2$.

C $\langle U \rangle = 3k_B T$.

D $\langle U \rangle = 3k_B T/2$.

E $\langle U \rangle = 0$.