

Universidade de São Paulo

Lista 5 - Física 1 (4310145)



Instruções

- A lista deve ser manuscrita!
- Para entregar sua lista, faça um upload para <https://mega.nz/megadrop/6Blr5qcXTJM>
- Não esqueça de colocar seu nome e número USP na lista!
- Não coloque apenas a resposta final! Apresente seus cálculos, faça diagramas, desenhos e explique, da melhor maneira possível, as etapas da resolução.
- Quando você digitalizar sua lista, coloque todos os exercícios em um mesmo arquivo (preferencialmente pdf) em ordem. Se você não sabe fazer isso, procure aprender com antecedência. Antes de enviar, certifique-se que a digitalização ficou legível. O nome do arquivo da sua lista deve ter a forma “primeiro nome-número USP-Lista-X”, onde X é o número da lista. Por exemplo: “jader-12345678-Lista-3.pdf”
- Você pode e deve discutir a sua lista com seus colegas, mas não deve copiar a lista dos seus colegas.
- Se você tiver qualquer dúvida, entre em contato! ;)

1. Dois blocos de massa m_1 e m_2 estão presos por uma mola. Separamos os dois corpos por uma distância L , como mostrado na Figura 1, e os soltamos. Calcule a posição em que ocorrerá a colisão entre as massas com relação a origem O ?

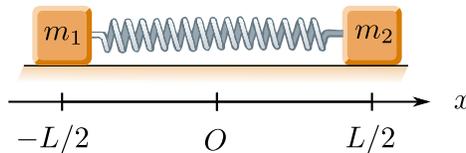


Figura 1: Problema 1.

2. Um bloco de massa m_1 se move para direita com velocidade v_1 e um bloco de massa m_2 se move para direita com velocidade v_2 , tal que $v_1 > v_2$. Uma mola de constante elástica k está presa no bloco 2, como mostrado na Figura 2. Uma vez que os blocos colidem, determine a máxima compressão da mola.

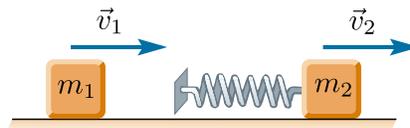


Figura 2: Problema 2.

3. Considere um pedaço quadrado de metal uniforme de lado a . Imagine agora que um triângulo isósceles é tirado de uma das extremidades, como mostrado na Figura 3, tal que o restante do metal, quando suspenso pelo ponto de coordenada P, ficará em equilíbrio em qualquer posição. Qual é a altitude h do corte do triângulo? [Dica: você pode usar o resultado apresentado no

Apêndice A, contanto que você reproduza as contas do Apêndice A na sua lista como parte da resolução do exercício!!!.]

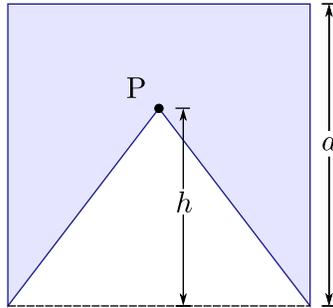


Figura 3: Centro de massa.

4. Um satélite de área de seção transversal de A se movimenta em uma orbita circular a uma altitude h , onde a densidade do ar é ρ . Com a suposição de que os impactos moleculares com o satélite são efetivamente inelásticos (mas que as moléculas literalmente não grudam no satélite, mas saem dele com uma velocidade relativamente pequena), mostre que o módulo da força média de retardamento que o satélite deve experimentar devido ao atrito com o ar, pode ser escrito como

$$|F_{\text{med}}| = A\rho v^2 \quad (1)$$

[Dica: você pode usar o resultado apresentado no Apêndice B, contanto que você reproduza as contas do Apêndice B na sua lista como parte da resolução do exercício!!!.]

5. Considere uma colisão elástica, como mostrado na Figura 4.

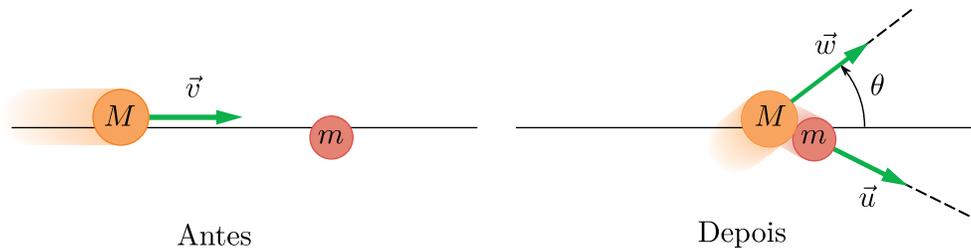


Figura 4: Colisão elástica bidimensional. Uma partícula de massa M e velocidade \vec{v} colide elasticamente com uma partícula de massa m que está inicialmente em repouso. Depois da colisão, a partícula de massa M tem velocidade dada pelo vetor \vec{w} que faz um ângulo θ com relação a direção de propagação inicial, além disso a partícula de massa m obtém velocidade \vec{u} .

- (a) Mostre que

$$\cos \theta = \frac{v^2(M - m) + w^2(M + m)}{2Mvw} \quad (2)$$

[Dica: é possível obter a Eq. (2) sem trabalhar com as componentes do vetor momento individualmente. Lembre-se da definição do produto interno $\vec{a} \cdot \vec{b} = ab \cos \phi$]

- (b) Considere que as quantidades \vec{v} , m e M são fornecidos. Além disso considere que $m < M$. Mostre que o maior valor fisicamente possível para θ é dada por

$$\theta_{\max} = \sin^{-1} \left[\frac{m}{M} \right] \quad (3)$$

6. Mostre que o momento de inércia do cilindro oco, homogêneo de massa M , mostrado na Figura 5 (a), com relação ao eixo mostrado, é dado por

$$I = \frac{1}{2}M(r_1^2 + r_2^2) \quad (4)$$

Calcule também o momento de inércia com relação ao eixo tracejado mostrado na Figura 5 (b).

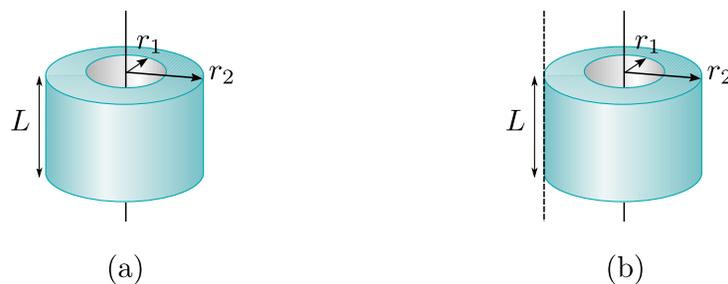


Figura 5: Problema 6.

[Dica: você pode usar o resultado apresentado no Apêndice C, *contanto que você reproduza as contas do Apêndice C na sua lista como parte da resolução do exercício!!!.*]

7. Uma esfera sólida é cortada em um plano paralelo ao plano xy , como mostrado na Figura 6. Calcule o momento de inércia da esfera cortada (figura à esquerda) com relação ao eixo z em função de α , R e da massa da esfera cortada M (figura à esquerda). Depois de calcular o momento de inércia, faça $\alpha = 0$ e cheque se você recupera o momento de inércia esperado para o caso de uma esfera completa $I = \frac{2}{5}MR^2$.

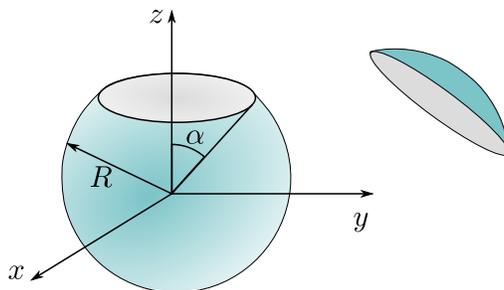


Figura 6: Problema 7. Esfera sólida cortada. A massa da esfera cortada (figura à esquerda) é M .

[Dica: você pode usar o resultado apresentado no Apêndice D, *contanto que você reproduza as contas do Apêndice D na sua lista como parte da resolução do exercício!!!.*]

8. A polia da Figura 7, que tem raio R e massa M , pode girar em torno de seu eixo horizontal. Um fio é enrolado à polia, tendo em sua extremidade livre, uma massa m . Calcule
- a aceleração angular da polia;
 - a aceleração linear do corpo;
 - a tensão no fio.

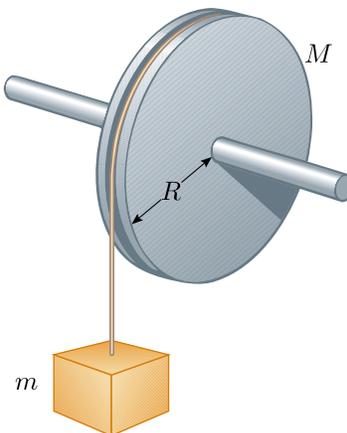


Figura 7: Problema 8.

9. Uma corda é enrolada em uma polia de massa M e raio R . A outra extremidade da corda é conectada a um bloco de massa m . O bloco, inicialmente em repouso, desliza em plano inclinado que faz um ângulo θ com a horizontal. O coeficiente de atrito cinético entre o bloco e o plano é μ_k .
- Use o que você sabe sobre energia para mostrar que a velocidade do bloco em função do deslocamento d no plano inclinado é

$$v = \sqrt{\frac{4gdm(\sin \theta - \mu_k \cos \theta)}{2m + M}} \quad (5)$$

- Encontre a magnitude da aceleração do bloco em termos de μ , m , M , g e θ .
- Discuta os resultados anteriores para o caso em que $\theta = 90^\circ$ e $M = 0$. Os resultados estão de acordo com o que você esperava?

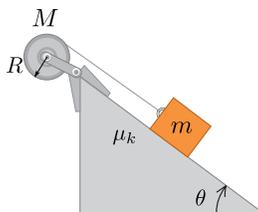


Figura 8: Problema 9.

10. Um cilindro de massa m e raio R está em repouso em cima de um bloco de massa M . O bloco de massa M está em repouso em uma superfície sem atrito, como mostrado na Figura 9. Uma força \vec{F} é aplicada no bloco. O bloco acelera, e o cilindro rola sem deslizar.

(a) Mostre que a aceleração do bloco com relação a superfície pode ser escrita como

$$a_B = \frac{3F}{3M + m} \quad (6)$$

(b) Mostre que a aceleração angular do cilindro pode ser escrita como

$$\alpha = \frac{2F}{R(3M + m)} \quad (7)$$

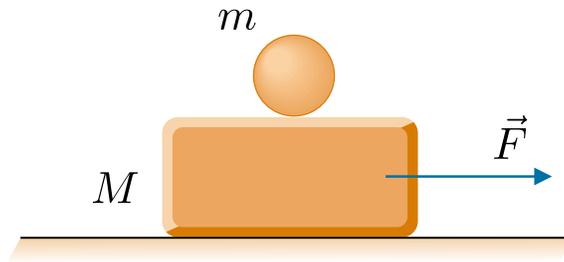


Figura 9: Problema 10.

11. Considere um corpo de secção circular (como um anel, cilindro ou esfera) em uma superfície, como mostrado na Figura 10.

(a) Se o corpo está inicialmente em repouso e começa a rolar sem deslizar, mostre que o tempo que o corpo leva para descer o plano inclinado é dado por

$$t = \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{\frac{2h}{g} \left(1 + \frac{I}{mr^2} \right)} \quad (8)$$

em que I é o momento de inércia com relação ao eixo que passa pelo centro de massa do corpo.

(b) Sendo que uma esfera maciça (de massa m e raio r) leva um tempo t_1 para descer o plano inclinado e uma casca esférica (de massa m e raio r) leva um tempo t_2 , calcule t_1/t_2 .

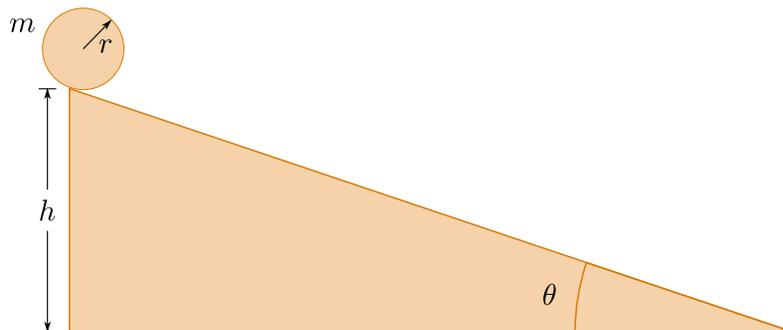


Figura 10: Rolamento sobre um plano inclinado.

12. Um aro de raio r rola sem deslizar em um plano inclinado, como mostrado na Figura 11. A altura h é tal que o aro, inicialmente em repouso, adquire uma velocidade suficiente somente para fazer o loop até o ponto P, isto é, o aro mantém contato com a pista circular de diâmetro d somente até o ponto P. Qual é altura h ? [Dica: você pode usar o resultado apresentado no Apêndice E, *contanto que você reproduza as contas do Apêndice E na sua lista como parte da resolução do exercício!!!.*]

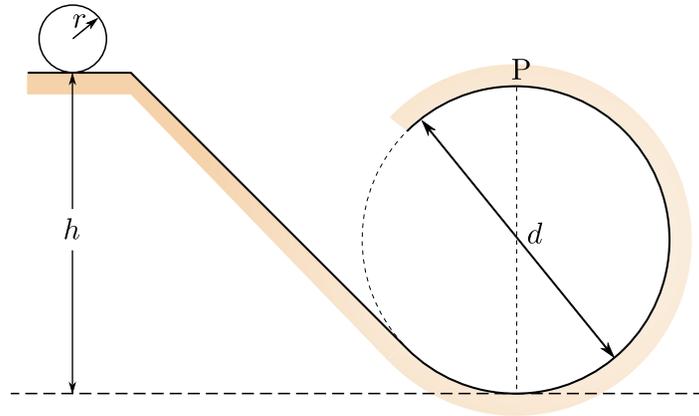


Figura 11: Problema 12.

13. No modelo de Bohr do átomo de hidrogênio, o elétron, de carga $-e$ (em que $e = 1,602176634 \times 10^{-19}\text{C}$) e massa $m \approx 9,11 \times 10^{-31}\text{kg}$, descreve orbitas circulares em torno do próton, de carga e e massa $\approx 1840m$. Com muito boa aproximação, podemos tratar o próton como um centro de forças fixo, identificado com o centro de massa do sistema. A hipótese de Bohr foi que a magnitude $\ell = |\vec{\ell}|$ do momento angular do elétron não pode assumir valores arbitrários, mas somente valores “quantizados”

$$\ell_n = n\hbar \quad (9)$$

em que $n = 1, 2, 3, \dots$ e \hbar é definido como $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ em que h é a constante de Planck, dada por

$$h = 6,62607004 \times 10^{-34}\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

- (a) Leia o Apêndice F.
 (b) Mostre que o raio r_n e a velocidade v_n associados com a órbita n são dados por

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{me^2}n^2 \quad v_n = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar} \frac{1}{n} \quad (10)$$

- (c) Calcule a energia total do elétron, E , dada por

$$E = K + U \quad (11)$$

em que a energia potencial U é dada por

$$U = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad (12)$$

Você deve obter uma expressão para energia E que depende de n (podemos escrever, portanto, E_n). Desta forma, vemos que a quantização do momento angular do elétron implica na quantização de sua energia.

(d) A energia de ligação do átomo de hidrogênio é numericamente igual a energia correspondente à $n = 1$. Calcule E_1 em eV.

14. Um projétil de massa m e velocidade \vec{v} atinge um cilindro de raio R e massa M (Figura 12.) Considere que depois que o projétil atingir o cilindro ele fica fixado na superfície do cilindro. O cilindro está inicialmente em repouso e é montado em um eixo horizontal fixo, que passa pelo seu centro de massa. A linha de movimento do projétil é perpendicular ao eixo e está a uma distância d do centro (veja que $d < R$).

(a) Encontre a velocidade angular do sistema depois que o projétil atinge o cilindro.

(b) Mostre que

$$K_f = \frac{m}{m + M/2} \left(\frac{d}{R} \right)^2 K_i \quad (13)$$

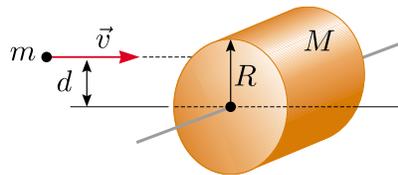


Figura 12: Problema 14.

15. Uma esfera de raio R e massa M é lançada em uma pista de tal forma que, inicialmente, ela desliza sem rolar, com velocidade de módulo v_i (isso pode acontecer, por exemplo, em um jogo de boliche). Suponha que a pista/bola tem coeficiente de atrito cinético igual a μ_k .

(a) Mostre que, quando a bola finalmente começar a rolar sem deslizar, o módulo da velocidade de seu centro de massa, v_f , será

$$v_i = \frac{7}{5} v_f \quad (14)$$

[Dicas: ver Apêndice G]

Apêndice

A Centro de massa de um triângulo isósceles

Considere o triângulo isósceles mostrado na Figura 13.

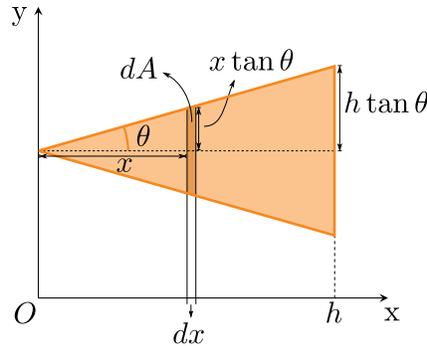


Figura 13: Centro de massa de um triângulo isósceles.

Por simetria, esperamos que a coordenadas y_{cm} do centro de massa seja exatamente na metade do triângulo, ou seja, ao longo da linha tracejada que passa pela metade do triângulo. O que talvez não seja tão óbvio é a coordenada x_{cm} do centro de massa. Para calculá-la, fazemos

$$x_{\text{cm}} = \frac{1}{M} \int x dm \quad (15)$$

Uma vez que a densidade superficial é dada por $\sigma = \frac{dm}{dA}$, podemos escrever

$$dm = \sigma dA \quad (16)$$

Da figura, podemos ver que o infinitesimal de área dA pode ser escrito como

$$dA = 2x \tan \theta dx \quad (17)$$

Assim, podemos escrever x_{cm} como

$$x_{\text{cm}} = 2 \frac{\sigma \tan \theta}{M} \int_0^h x^2 dx = 2 \frac{\sigma \tan \theta}{M} \frac{h^3}{3} \quad (18)$$

Usando $\sigma = \frac{M}{A} = \frac{M}{h^2 \tan \theta}$, obtemos

$$x_{\text{cm}} = \frac{2}{3} h \quad (19)$$

Ou seja, a partir da origem, a coordenada x do centro de massa é $x_{\text{cm}} = \frac{2}{3} h$.

B Força de retardamento sobre o satélite

Para resolver esse exercício podemos usar a relação [ver seção: Colisões em Série - [1]]

$$\vec{F}_{\text{med}} = -n \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \quad (20)$$

em que n é o número total de partículas que colidem com o alvo em um intervalo de tempo Δt e $\Delta \vec{p}$ é a variação do momento de cada partícula. Considere agora a Figura 14.

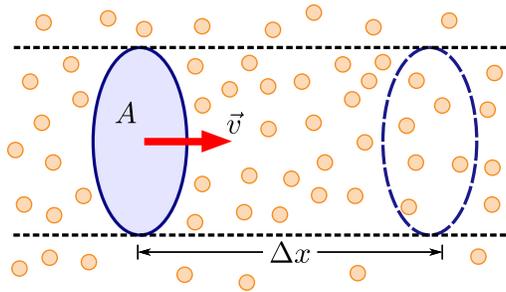


Figura 14: Representação do movimento do satélite (com área efetiva de seção transversal A). Durante um intervalo de tempo Δt o satélite percorre uma distância $\Delta x = v\Delta t$.

Nesta figura mostramos um disco de área A representando o satélite. Também representamos as moléculas. Imagine por um momento que a velocidade do satélite é zero. As moléculas tem a velocidade média, em qualquer direção, igual a zero, pois não existe uma direção preferencial para o deslocamento das moléculas. Desta forma, o impacto das moléculas com o satélite é tal que a transferência de momento é nula, e o satélite permanece parado. Por isso, para o propósito deste exercício, podemos supor que as moléculas tem velocidade zero.

Vamos voltar agora para o caso em que o satélite tem velocidade \vec{v} . Neste caso, do ponto de vista do satélite, as moléculas a sua frente tem velocidade $-\vec{v}$. Assim, a variação de momento de cada molécula que interage com o satélite é

$$\Delta \vec{p} = m\vec{v}_f - m\vec{v}_i = -m\vec{v} \quad (21)$$

Tente agora obter uma expressão para F_{med} usando a densidade das moléculas juntamente com a relação para velocidade ($v = \Delta x/\Delta t$) para resolver o problema.

C Momento de inércia de um cilindro oco

Para resolver esse problema vamos usar as coordenadas cilíndricas. Vamos definir as coordenadas cilíndricas como mostradas na Figura 15(a).

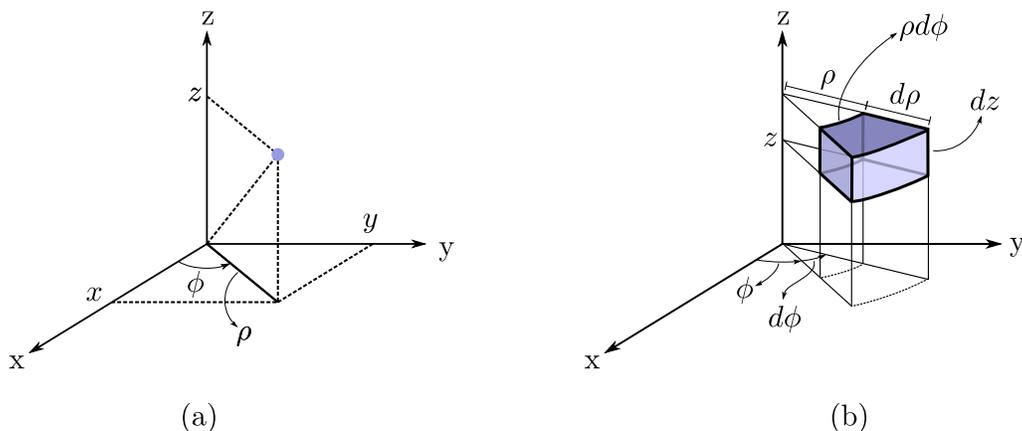


Figura 15: (a) Sistema de coordenadas cilíndricas. (b) Elemento diferencial de volume em coordenadas cilíndricas. Você deve ser capaz de olhar para a Figura (b) e calcular $dV = \rho d\rho d\phi dz$.

As coordenadas cilíndricas, ρ , ϕ e z , se relacionam com as coordenadas cartesianas através das relações

$$x = \rho \cos \phi \quad (22)$$

$$y = \rho \sin \phi \quad (23)$$

$$z = z \quad (24)$$

O elemento diferencial de volume dV em coordenadas cilíndricas pode ser obtido como mostrado na Figura 15(b)

$$dV = \rho d\rho d\phi dz \quad (25)$$

Como veremos a seguir, é extremamente vantajoso trabalhar com as coordenadas cilíndricas no caso do problema 6, pois o sistema em questão tem simetria cilíndrica.

O momento de inércia é definido através da relação

$$I = \int r^2 dm \quad (26)$$

Uma vez que o cilindro oco é homogêneo, podemos escrever a densidade μ como

$$\mu = \frac{M}{V} = \frac{dm}{dV} \quad \implies \quad dm = \frac{M}{V} dV \quad (27)$$

Podemos calcular o momento de inércia como

$$I = \int r^2 dm = \frac{M}{V} \int \int \int r^2 \rho d\rho d\phi dz \quad (28)$$

Porém, olhando a maneira que definimos as coordenadas cilíndricas, percebemos que $r = \rho$ (lembre-se que r na Eq. (26) é definido como a distância do elemento de massa dm até o eixo de rotação) E assim, podemos reescrever I como

$$I = \frac{M}{V} \int \int \int \rho^3 d\rho d\phi dz \quad (29)$$

Agora, vamos colocar explicitamente os limites de integração

$$I = \frac{M}{V} \int_{r_1}^{r_2} \rho^3 d\rho \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^L dz \quad (30)$$

A partir da Eq. (30) você já deve ser capaz de encontrar o resultado (4).

D Momento de inércia da esfera cortada

Como neste caso temos um corpo com simetria esférica, vamos simplificar o problema usando coordenadas esféricas. Vamos definir as coordenadas esféricas como mostradas na Figura 16(a).

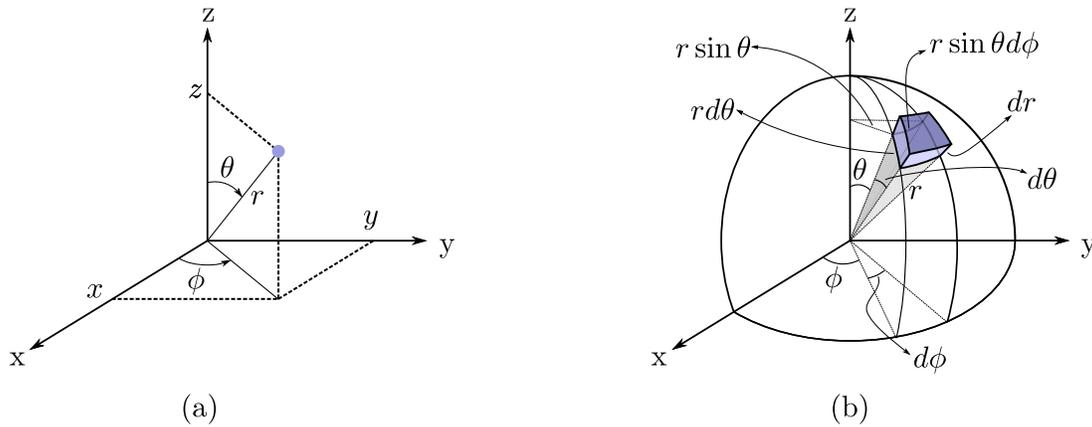


Figura 16: (a) Sistema de coordenadas esféricas. (b) Elemento diferencial de volume em coordenadas esféricas. Você deve ser capaz de olhar para a Figura (b) e calcular $dV = r^2 \sin \theta dr d\phi d\theta$.

As coordenadas esféricas, r , ϕ e θ , se relacionam com as coordenadas cartesianas através das relações

$$x = r \sin \theta \cos \phi \quad (31)$$

$$y = r \sin \theta \sin \phi \quad (32)$$

$$z = r \cos \theta \quad (33)$$

O elemento diferencial de volume dV em coordenadas cilíndricas pode ser obtido como mostrado na Figura 15(b)

$$dV = r^2 \sin \theta dr d\phi d\theta \quad (34)$$

O momento de inércia é definido através da relação

$$I = \int r^2 dm \quad (35)$$

Temos de ter cuidado aqui, pois a variável r na Eq. (35) não é a mesma variável r que aparece na definição das coordenadas esféricas. A variável r que aparece na Eq. (35) é a distância do elemento de

massa dm (ou, equivalentemente, do elemento do volume dV) até o eixo de rotação. É fácil ver que a distância do elemento de volume dV até o eixo z é dado por $r \sin \theta$. Portanto, para este caso, a Eq. (35) será reescrita como

$$I = \int (r \sin \theta)^2 dm \quad (36)$$

Uma vez que o corpo que estamos estudando neste problema (a esfera cortada) é homogêneo, podemos escrever a densidade μ como

$$\mu = \frac{M}{V} = \frac{dm}{dV} \quad \implies \quad dm = \mu dV \quad (37)$$

E podemos calcular o momento de inércia como

$$I = \mu \int \int \int (r \sin \theta)^2 r^2 \sin \theta dr d\phi d\theta \quad (38)$$

Agora, vamos colocar explicitamente os limites de integração (essa é a parte importante neste problema)

$$I = \mu \int_0^R r^4 dr \int_{\alpha}^{\pi} (\sin \theta)^3 d\theta \int_0^{2\pi} d\phi \quad (39)$$

Você já deve ser capaz de calcular I na Eq. (39). Entretanto, para calcular a densidade $\mu = M/V$, teremos de calcular o volume V da esfera cortada. Para isso, temos de resolver a integral

$$V = \int dV = \int_0^R r^2 dr \int_{\alpha}^{\pi} \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi \quad (40)$$

Tente resolver as integrais para resolver o problema.

E Momento de inércia de um aro de raio r

Nesta seção vamos apenas calcular o momento de inércia do aro de raio r . Você terá de usar essa quantidade no problema 12.

Lembramos que o momento de inércia é dado pela relação

$$I = \int r^2 dm \quad (41)$$

Neste caso, como o aro é uma quantidade unidimensional, ele terá uma densidade linear dada por

$$\lambda = \frac{M}{L} = \frac{dm}{ds} \quad (42)$$

em que M é a massa do aro e L é seu comprimento, ou seja, $L = 2\pi r$. O diferencial ds pode ser definido como mostrado na Figura 17.

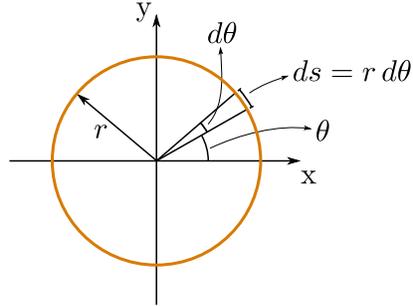


Figura 17: Elemento diferencial de comprimento ds .

Desta forma podemos escrever o momento de inércia como

$$\begin{aligned}
 I &= \int r^2 dm = \lambda \int r^2 ds = \lambda \int r^2 (r d\theta) = \lambda r^3 \int_0^{2\pi} d\theta = \lambda r^3 2\pi \\
 I &= \frac{M}{2\pi r} r^3 2\pi \\
 I &= Mr^2
 \end{aligned} \tag{43}$$

F Sobre o modelo de Bohr

No problema 13, supomos que o elétron gira em uma órbita circular em torno do núcleo, uma vez que $m_p \gg m$, supomos que o núcleo permanece fixo no espaço (ou seja, é o centro de massa), como mostrado na Figura 18. Também na Figura, é representado a força de atração elétrica \vec{F} que atua no elétron devido a presença do próton (porém não estamos representando a força que atua no próton devido ao elétron). A força \vec{F} é obtida pela Lei de Coulomb

$$\vec{F}_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i q_j}{r_{ji}^2} \hat{r}_{ji} \tag{44}$$

onde \vec{F}_{ij} é a força sobre a partícula i (de carga elétrica q_i), devido à partícula j (de carga elétrica q_j), r_{ji} é a distância entre as duas partículas carregadas e \hat{r}_{ji} é o vetor unitário que aponta na direção de j para i . A constante ϵ_0 é denominada permissividade do espaço livre. Note portanto que a força \vec{F} que aparece na Figura 18 é dada por

$$\vec{F} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \hat{r}_{21} \tag{45}$$

em que tomamos a partícula 1 para ser o elétron e a partícula 2 o próton.

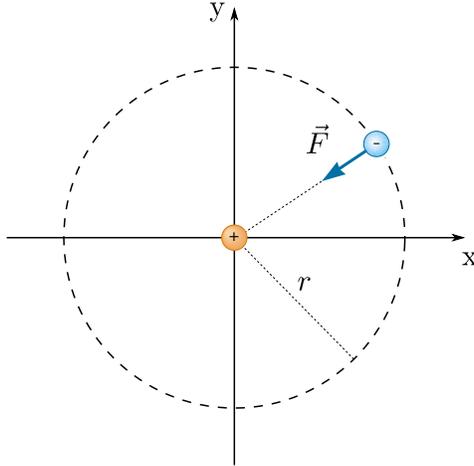


Figura 18: .

Também sabemos que neste caso, a força \vec{F} será responsável pelo movimento circular uniforme do elétron. Portanto podemos igualar o módulo da força centrípeta ao módulo da força elétrica

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad (46)$$

A Eq. 46 será importante na resolução do problema 13.

G Dicas para o problema

Na Figura 19 (a) mostramos a bola em três instantes de tempo diferentes. Em $t = 0$ a bola está apenas deslizando sem rolar, portanto, a velocidade (do ponto de vista do referencial da pista) é a mesma em todos os pontos da bola. A velocidade do centro de massa vai variar com o tempo. Podemos escrever, para $t = 0$, $\vec{v}_{cm}(0) = \vec{v}_i$. No instante de tempo final (quando a bola rola sem deslizar) vamos escrever $\vec{v}_{cm}(t_f) = \vec{v}_f$. Analise a Figura 19 (a) e cheque para ver se você entende/concorda com o comportamento do vetor velocidade nos pontos mostrados.

Na Figura 19 (b) mostramos a bola no instante $t = 0$ e a bola no tempo $t = t_f$. Porém aqui mostramos o vetor força de atrito cinético que atua na bola. Note que quando $t = t_f$ a força de atrito cinético é zero. Sabemos que isso acontece, pois neste instante a bola rola sem deslizar (a velocidade da extremidade inferior da bola com relação ao referencial da pista é zero).

Para resolver esse problema, vamos começar por calcular a resultante dos torques externos que atua na esfera em relação ao ponto P, $\vec{\tau}_{ext}$, como mostrado na Figura 19 (b). Durante o movimento da bola, quem é $\vec{\tau}_{ext}$ com relação ao ponto P? Caso o torque seja nulo, isso implica que o momento angular \vec{L} com relação ao ponto P é conservado. Esse fato pode ser útil para resolver esse problema.

Além disso, como podemos calcular o momento angular da esfera, em relação ao ponto P, em um

instante t ? Podemos usar a relação¹

$$\vec{L}(t) = \vec{L}'(t) + \vec{r}_{\text{cm}}(t) \times \vec{P}(t) \quad (47)$$

em que $\vec{L}'(t)$ é o momento angular da esfera com relação ao centro de massa da esfera no instante t , $\vec{r}_{\text{cm}}(t)$ é a posição do centro de massa da esfera no instante t e $\vec{P}(t)$ é o momento do centro de massa da esfera, no instante t , com relação a P. Também podemos dizer que $\vec{r}_{\text{cm}}(t) \times \vec{P}(t)$ é o momento angular do centro de massa da esfera com relação a P.

Portanto, caso o momento angular seja conservado, $\vec{L}(t_i) = \vec{L}(t_f)$, podemos calcular $\vec{L}(t_i)$ e $\vec{L}(t_f)$ para resolver o problema.

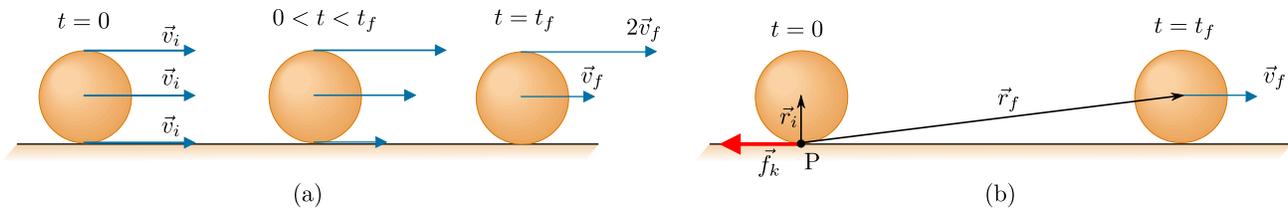


Figura 19: (a) Bola em três instantes de tempo diferente. Esta figura basicamente mostra o comportamento do vetor velocidade. (b) Nesta figura mostramos a bola no instante de tempo $t = 0$ e $t = t_f$, porém aqui mostramos outras informações como o vetor força de atrito cinético e os vetores posição do centro de massa no instante $t = 0$ e $t = t_f$.

mailto:secpos.ift@unesp.br

Referências

- [1] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker, *Fundamentos de Física - Mecânica*, volume 1 (LTC 2016), 10 edition.
- [2] H. Nussenzveig, *Curso de física básica, 1: mecânica* (E. Blucher 2013).

¹Para deduzir essa a Eq. (47) você pode consultar a Ref. [2]