

Equilíbrio do Ponto Material

Em nosso estudo, analisamos várias situações utilizando as Leis de Newton para o movimento. Na maioria delas, as forças atuavam em uma única direção ou em duas direções perpendiculares entre si. Neste módulo, vamos abordar situações em que duas ou mais forças atuam obliquamente entre si, como as trações nos cabos que sustentam a ponte pênsil mostrada na figura 1. De forma geral, problemas que envolvem forças oblíquas não são mais difíceis de resolver do que aqueles estudados até aqui, mas podem ser mais trabalhosos. Por isso, limitaremos nosso estudo aos casos em que os corpos estão em repouso. Muitas vezes, a distribuição das forças que atuam sobre um corpo pode ser representada com todas as forças partindo de um único ponto de ação, que, nesse caso, se comporta como um ponto material em equilíbrio.



Aslak Raanes from Trondheim, Norway / Creative Commons

Figura 1. A ponte Golden Gate (EUA).

A metodologia mais usual para resolver problemas sobre equilíbrio de um ponto material consiste em decompor as forças que atuam sobre esse ponto nas direções x e y (ou mesmo z) de um sistema de eixos ortogonais pré-definido. Por isso, iniciaremos este estudo mostrando como obter as componentes de uma força nessas direções. Em seguida, usando tais componentes, vamos apresentar as condições de equilíbrio para um ponto material. Finalizaremos o módulo com dois exercícios resolvidos que nos ajudarão a sedimentar uma metodologia para a resolução de problemas sobre equilíbrio de um ponto material.

PROJEÇÕES ORTOGONAIS DE UMA FORÇA



Observe a figura 2, que mostra uma força \vec{F} , de módulo $F = 10 \text{ N}$, formando um ângulo $\theta = 30^\circ$ com o eixo x de um sistema de eixos ortogonais x e y. Naturalmente, o ângulo formado entre o vetor \vec{F} e o eixo y é o complemento de θ e vale 60° . Para obtermos as componentes ortogonais da força \vec{F} sobre os eixos x e y, basta projetarmos essa força sobre esses eixos.

A projeção de \vec{F} sobre o eixo x fornece a componente \vec{F}_x , enquanto a projeção de \vec{F} sobre o eixo y fornece a componente \vec{F}_y . Essas duas componentes estão representadas na figura 2.

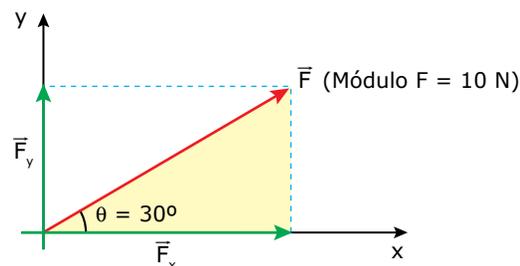


Figura 2. Decomposição de uma força em um sistema de eixos ortogonais.

Método analítico

Podemos obter os módulos das componentes \vec{F}_x e \vec{F}_y de duas formas, analiticamente e graficamente. O método analítico consiste em utilizar as funções seno e cosseno no triângulo retângulo, em destaque na figura 2, formado pela força \vec{F} (hipotenusa), pela componente \vec{F}_x (cateto adjacente a θ) e pela linha pontilhada vertical (cateto oposto a θ). Note que essa linha tem o mesmo comprimento que a componente \vec{F}_y , portanto, o módulo de \vec{F}_y é igual ao cateto oposto ao ângulo θ . Utilizando as definições de seno e cosseno, obtemos:

$$\text{sen } \theta = \frac{\text{Cateto oposto}}{\text{Hipotenusa}} = \frac{F_y}{F} \Rightarrow F_y = F \cdot \text{sen } \theta$$

$$\text{cos } \theta = \frac{\text{Cateto adjacente}}{\text{Hipotenusa}} = \frac{F_x}{F} \Rightarrow F_x = F \cdot \text{cos } \theta$$

Para $\theta = 30^\circ$, temos: $\text{sen } \theta = 0,5$ e $\text{cos } \theta = 0,87$. Inserindo os valores de $\text{sen } \theta$, de $\text{cos } \theta$ e de F nas equações anteriores, obtemos os módulos de \vec{F}_x e de \vec{F}_y :

$$F_x = 10 \cdot 0,5 = 5,0 \text{ N} \quad \text{e} \quad F_y = 10 \cdot 0,87 = 8,7 \text{ N}$$

Você também pode calcular esses valores usando o triângulo retângulo acima de \vec{F} . Por exemplo, tomando como referência o ângulo de 60° entre \vec{F} e \vec{F}_y , podemos escrever: $F_x = F \cdot \text{sen } 60^\circ$ e $F_y = F \cdot \text{cos } 60^\circ$. Note que, substituindo $F = 10 \text{ N}$, $\text{cos } 60^\circ = 0,5$ e $\text{sen } 60^\circ = 0,87$ nessas expressões, obtemos exatamente os valores que foram calculados anteriormente para F_x e para F_y .

Método gráfico

Agora, vamos explicar como obter os módulos de \vec{F}_x e de \vec{F}_y pelo método gráfico. Para aplicar essa técnica, os ângulos formados entre os vetores devem ser desenhados com precisão. Esse é o caso da figura 2, em que os ângulos de 30° , 60° e 90° estão desenhados realmente com essas aberturas.

Para calcular os módulos de \vec{F}_x e de \vec{F}_y , siga estes passos:

1. Meça, com uma régua milimetrada, os comprimentos da força \vec{F} e das suas componentes \vec{F}_x e \vec{F}_y .
2. Calcule o módulo de \vec{F}_x , por meio de uma regra de três simples, igualando a razão entre \vec{F}_x e seu respectivo comprimento com a razão entre o módulo de \vec{F} , 10 N, e seu respectivo comprimento.
3. Calcule o módulo de \vec{F}_y , por meio de um procedimento semelhante ao descrito no passo 2.

Vamos usar alguns valores numéricos para exemplificar os passos anteriores. No passo 1, imagine que o comprimento medido para o módulo do vetor \vec{F} tenha sido de 5,0 cm e que o comprimento medido para o módulo da componente \vec{F}_x tenha sido igual a 4,4 cm. Então, como $F = 10$ N, o passo 2 consiste em escrever a seguinte igualdade de razões:

$$\frac{F_x}{4,4 \text{ cm}} = \frac{10 \text{ N}}{5,0 \text{ cm}} \Rightarrow F_x = 8,8 \text{ N}$$

Observe que as unidades cm, que aparecem nos denominadores dos dois lados da equação, se cancelam. Observe também que o valor obtido pelo método gráfico é bem próximo de 8,7 N, valor mais preciso, que é obtido pelo método analítico.

Em geral, nas provas de vestibulares, não é permitido o uso de régua para resolver as questões de Física. Além disso, as figuras das questões podem ser apresentadas fora de escala. Ainda assim, é interessante aprender o método gráfico, pois muitas questões podem ser resolvidas sem muita precisão, de maneira que, mesmo traçando os vetores à mão livre, é possível achar uma resposta adequada para o problema.

CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO PARA UM PONTO MATERIAL



Para discutir as condições de equilíbrio de um ponto material, vamos considerar a figura 3, que mostra três pequenas esferas idênticas, eletrizadas com cargas de mesmo sinal e suspensas por fios isolantes de comprimento L , que formam um ângulo θ com a vertical. As três esferas estão em equilíbrio estático em posições simétricas ao longo do círculo imaginário, horizontal e de raio R , como mostra a figura. Note que cada esfera está sujeita a quatro forças oblíquas entre si. Uma força é o peso da esfera, outra é a força de tração exercida pelo fio e as outras duas forças são as repulsões elétricas exercidas pelas cargas vizinhas. Essas quatro forças estão indicadas na esfera 3, situada à direita do sistema. As forças de repulsão exercidas pelas esferas 1 e 2 são as forças horizontais \vec{F}_1 e \vec{F}_2 , o peso \vec{P} é vertical, e a tração \vec{T} , exercida pelo fio, é inclinada em relação ao plano horizontal. Um sistema de eixos ortogonais xyz , com a origem no centro do círculo, também está indicado na figura 3.

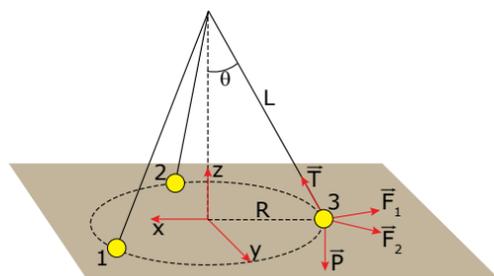


Figura 3. Pontos materiais em equilíbrio estático.

De acordo com a 1ª Lei de Newton, a esfera 3, assim como as esferas 1 e 2, está em equilíbrio porque a resultante de forças sobre ela vale zero. Para simplificar a análise do problema, é melhor decompor a força resultante sobre a esfera 3 em três resultantes parciais, associadas às direções dos eixos x , y e z , e que também valem zero. Assim, a condição de equilíbrio de um ponto material pode ser escrita da seguinte forma:

$$\vec{R}_x = 0, \vec{R}_y = 0 \text{ e } \vec{R}_z = 0$$

Para dar sequência à análise desse problema, vamos decompor as forças atuantes na esfera 3 em componentes nas direções x , y e z . Para isso, devemos usar funções trigonométricas, como seno e cosseno. A força \vec{T} deve ser decomposta em duas componentes, \vec{T}_x e \vec{T}_z , a primeira voltada para a esquerda e a segunda voltada para cima. O peso \vec{P} já está na direção z e não precisa ser decomposto. As forças \vec{F}_1 e \vec{F}_2 devem ser decompostas em componentes nas direções x e y . De posse dessas componentes, podemos, por exemplo, escrever o balanço de forças na direção z da seguinte forma:

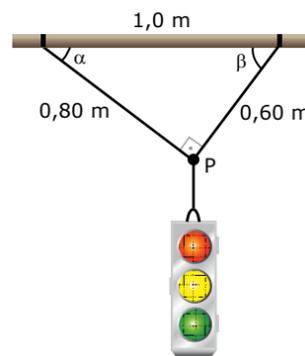
$$R_z = 0 \Rightarrow T_z - P = 0 \Rightarrow T_z = P = mg$$

Nessa equação, m é a massa da esfera e g é a aceleração da gravidade. Outras duas equações semelhantes a essa podem ser obtidas para as componentes nas direções x e y . Além disso, todas as componentes podem ser expressas em função de dados do problema, como o comprimento dos fios, as massas e as cargas das esferas, etc. Por exemplo, a componente T_z é igual a $T \cdot \cos \theta$. Por sua vez, o ângulo θ pode ser calculado em função de L e R .

A solução do sistema de equações envolvendo os balanços de forças nas direções x , y e z representa, em geral, a resposta para os problemas de equilíbrio de um ponto material. A seguir, apresentamos dois exercícios resolvidos para você compreender melhor essa técnica de resolução de problemas.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

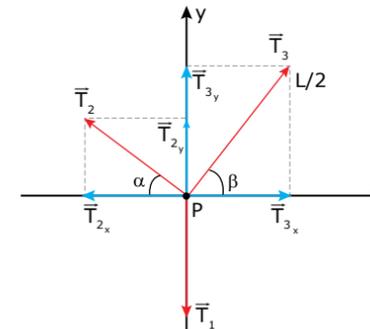
01. Um semáforo, de massa 5,0 kg, é mantido em repouso por meio de três cabos, conforme mostra a figura seguinte. Considere $g = 10 \text{ m/s}^2$.



Explicar, qualitativamente, por que a tração no cabo de comprimento 0,60 m é maior do que a tração no cabo de comprimento 0,80 m. Calcular as trações nos três cabos.

Resolução:

O esquema que se segue mostra as trações nos cabos. Essas trações agem no ponto material P, que é a junção dos cabos. As componentes das trações também estão indicadas na figura. Observe que as duas componentes horizontais, referentes às trações \vec{T}_2 e \vec{T}_3 , possuem sentidos opostos. Como o ponto P está em equilíbrio, $T_{2x} = T_{3x}$. Para isso ocorrer, o módulo de \vec{T}_3 deve ser maior do que o módulo de \vec{T}_2 , pois o ângulo β é maior que o ângulo α . Assim, usando somente argumentos geométricos, provamos que $T_3 > T_2$. Note que chegamos a essa conclusão usando as bases do método gráfico.



Agora, vamos calcular as trações nos três cabos. Observe que o semáforo está em equilíbrio. Para isso ocorrer, o cabo vertical deve exercer sobre o semáforo uma força de mesmo módulo e sentido oposto ao peso deste, que é de 50 N ($P = mg$). Assim, $T_1 = 50$ N. Para determinar os módulos das trações \vec{T}_2 e \vec{T}_3 , precisamos escrever os balanços de forças nas direções x e y . Na direção x , temos:

$$T_{2x} = T_{3x} \Rightarrow T_2 \cdot \cos \alpha = T_3 \cdot \cos \beta$$

Na direção y , a tração \vec{T}_1 , voltada para baixo, deve ser anulada pelas componentes verticais \vec{T}_{2y} e \vec{T}_{3y} , que são voltadas para cima. Assim:

$$T_{2y} + T_{3y} = T_1 \Rightarrow T_2 \cdot \sin \alpha + T_3 \cdot \sin \beta = T_1$$

Os senos e os cossenos de α e β podem ser obtidos a partir do triângulo retângulo formado pelos dois cabos inclinados (catetos) e pela barra de sustentação (hipotenusa). Usando as definições trigonométricas de seno e cosseno, obtemos:

$$\sin \alpha = \cos \beta = 0,60 / 1,0 = 0,60$$

$$\sin \beta = \cos \alpha = 0,80 / 1,0 = 0,80$$

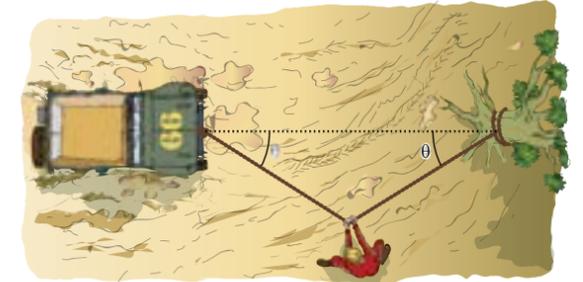
Substituindo esses resultados nas equações de balanço de forças, e utilizando o módulo da tração $T_1 = 50$ N na equação do balanço de forças na direção y , obtemos o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} 0,80 \cdot T_2 = 0,60 \cdot T_3 \\ 0,60 \cdot T_2 + 0,80 \cdot T_3 = 50 \text{ N} \end{cases}$$

Resolvendo esse sistema, obtemos $T_2 = 30$ N e $T_3 = 40$ N. Observe que $T_3 > T_2$, conforme havíamos mostrado.

Comentário: Para $\alpha = \beta$, os cabos inclinados ficam submetidos a forças de mesma intensidade ($T_2 = T_3$). Nessa situação, ângulos pequenos geram grandes trações, podendo levar à ruptura dos cabos. Ao contrário, ângulos maiores geram trações menores. No limite, para os cabos na posição vertical ($\alpha = \beta = 90^\circ$), as trações são mínimas e iguais a $P/2$. Um caso importante, e que vale a pena memorizar, ocorre quando o ângulo entre as cordas inclinadas vale 120° ($\alpha = \beta = 30^\circ$). Usando argumentos de geometria, é fácil mostrar que, para esse caso, $T_2 = T_3 = P$.

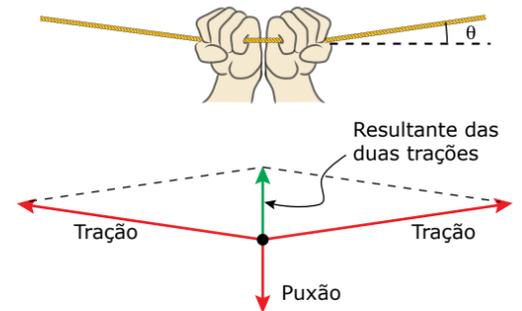
02. Durante um rali, um jipe ficou atolado em um lamaçal. Então, o piloto amarrou uma corda grossa em uma árvore robusta e puxou a corda lateralmente, como mostra a figura seguinte.



- A) Explicar por que é melhor puxar a corda lateralmente do que a puxar diretamente na direção longitudinal do jipe.
- B) Determinar a tração que a corda deve suportar, sem se romper, para que o jipe comece a se mover quando o puxão for de 200 N e o ângulo θ for de 3° . Considere que $\sin 3^\circ \approx 0,05$.

Resolução:

- A) A figura a seguir ilustra as forças que atuam sobre a corda no ponto em que o piloto exerce força sobre ela. A resultante das duas trações na corda é a reação da corda ao puxão exercido pelo piloto. Como o puxão e a resultante das trações na corda formam um par de ação e reação, o módulo do puxão deve ser igual ao módulo da resultante das trações. Observe na figura que o módulo do puxão é muito menor do que o módulo das trações. Quanto menor for o ângulo θ , maior será o módulo da tração na corda para uma dada força aplicada pelo piloto. Por isso, a corda pode exercer uma força suficientemente intensa para desatolar o carro, mesmo que a força lateral exercida pelo piloto não seja tão grande. É claro que, sendo submetida a uma tração muito intensa, a corda deve ser grossa para poder resistir ao esforço sem se romper. O mesmo se aplica à árvore, que deve ser bastante robusta.

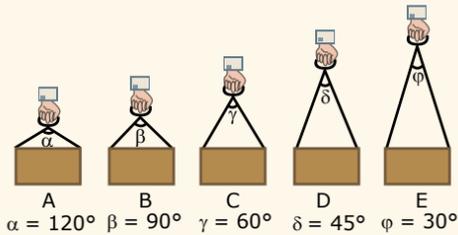


- B) As duas trações mostradas na figura anterior podem ser decompostas nas direções x e y (o eixo y é alinhado ao puxão, e o eixo x é perpendicular a ele). As componentes x são opostas, o módulo de cada uma delas é igual a $T \cdot \cos \theta$ e elas se cancelam. As componentes y são opostas ao puxão e o módulo de cada uma é igual a $T \cdot \sin \theta$. Como a resultante na direção x é nula, temos:
- $$\text{Puxão} = 2T \cdot \sin \theta \Rightarrow T = \text{Puxão} / (2 \cdot \sin \theta)$$
- Substituindo os valores dados, obtemos:
- $$T = 200 / (2 \cdot 0,05) = 200 / 0,1 \Rightarrow T = 2\,000 \text{ N}$$
- Note que essa força é 10 vezes maior que a força exercida pelo piloto.

EXERCÍCIOS DE APRENDIZAGEM

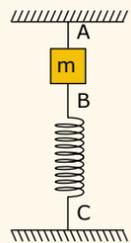


01. (FUVEST-SP) Um mesmo pacote pode ser carregado com cordas amarradas de várias maneiras. A situação, entre as apresentadas, em que as cordas estão sujeitas a maior tração é



- A) A.
- B) B.
- C) C.
- D) D.
- E) E.

02. (UEL-PR) Três cordas A, B e C prendem-se a um bloco de massa m, a uma mola de massa desprezível, ao assoalho e ao teto de uma sala, conforme a figura a seguir.



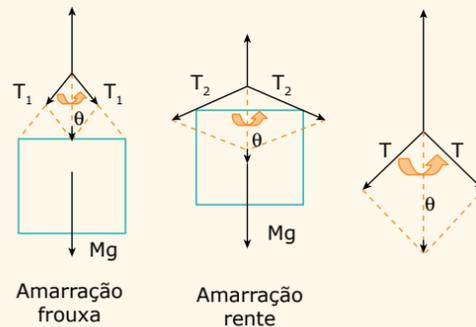
Acerca das trações nas cordas, pode-se afirmar que:

- A) $T_A \neq T_B = T_C$
- B) $T_A \neq T_B \neq T_C$
- C) $T_A = T_C \neq T_B$
- D) $T_A = T_B \neq T_C$
- E) $T_A = T_B = T_C$

03. (UECE-2015) Um fio de náilon é inicialmente tensionado e fixado por suas extremidades a dois pontos fixos. Posteriormente, no ponto médio do fio, é feita uma força perpendicular à direção inicial do fio. Durante a aplicação dessa força, é correto afirmar que a força feita sobre o fio nos pontos de fixação

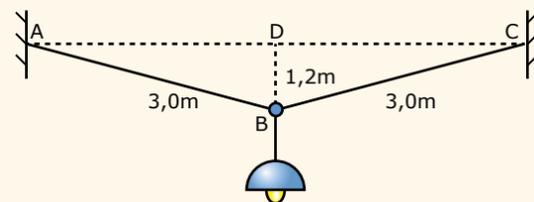
- A) tem direção diferente e é menor que a tensão inicial.
- B) tem direção diferente e é maior que a tensão inicial.
- C) tem a mesma direção e é maior que a tensão inicial.
- D) tem a mesma direção e é menor que a tensão inicial.

04. (UEL-PR) Um estudante resolve transportar, de um quarto para outro, os seus livros de estudo. Ele os organiza em duas pilhas de mesmo peso, amarrando-os da mesma maneira e com barbantes do mesmo carretel. No entanto, ao final, ele percebe que uma das amarrações está um pouco mais frouxa que a outra. Na figura a seguir representações das forças envolvidas nas duas amarrações são mostradas. Assim que o estudante pega as pilhas, pela extremidade superior da amarração, o barbante de uma das pilhas se rompe. Com base no texto e nos conhecimentos de mecânica, é correto afirmar:



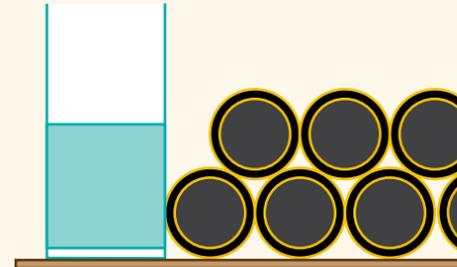
- A) O barbante da amarração mais frouxa arrebentou.
- B) Em condições de equilíbrio, o aumento da componente vertical da tensão no barbante, com a diminuição do ângulo θ , determina a ruptura na amarração mais frouxa.
- C) Em condições de equilíbrio, a dependência da tensão no barbante com o ângulo θ determina a ruptura na amarração mais rente.
- D) Em condições de equilíbrio, a dependência da tensão no barbante com o ângulo θ determina a ruptura na amarração mais frouxa.
- E) O rompimento foi totalmente acidental.

05. (UERJ-2018) Uma luminária com peso de 76 N está suspensa por um aro e por dois fios ideais. No esquema, as retas AB e BC representam os fios, cada um medindo 3 m, e D corresponde ao ponto médio entre A e C.



- Sendo $BD = 1,2$ m e A, C e D pontos situados na mesma horizontal, a tração no fio AB, em newtons, equivale a:
- A) 47,5.
 - B) 68,0.
 - C) 95,0.
 - D) 102,5.

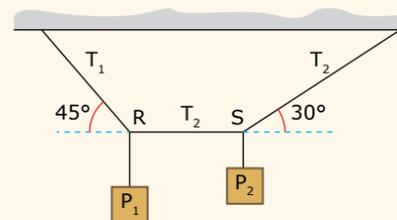
06. (FGV-SP) Durante a cerimônia de formatura, o professor de Física teve seu pensamento absorvido pela pilha de duas camadas de estojos de diplomas, todos iguais, escorada de ambos os lados, por um copo contendo água.



O professor lembrava que $\sin 30^\circ = \cos 60^\circ = \frac{1}{2}$ e que $\sin 60^\circ = \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$. Admitindo que cada estojo tivesse o mesmo peso de módulo P, determinou mentalmente a intensidade da força de contato exercida por um estojo da fila superior sobre um da fila inferior, força que, escrita em termos de P, é:

- A) $\frac{\sqrt{3}}{6} P$
- B) $\frac{\sqrt{3}}{3} P$
- C) $\sqrt{3} P$
- D) $\frac{P}{4}$
- E) $\frac{P}{2}$

07. (UECE) Na figura a seguir, o peso P_1 é de 500 N e a corda RS é horizontal.



- Os valores das tensões T_1 , T_2 e T_3 e o peso P_2 , em Newton, são, respectivamente,
- A) $500\sqrt{2}$, 500, $1\ 000 / \sqrt{3}$ e $500 / \sqrt{3}$
 - B) $500 / \sqrt{2}$, $1\ 000$, $1\ 000\sqrt{3}$ e $500 / \sqrt{3}$
 - C) $500\sqrt{2}$, $1\ 000$, $1\ 000 / \sqrt{3}$ e $500 / \sqrt{3}$
 - D) $500 / \sqrt{2}$, 500, $1\ 000\sqrt{3}$ e $500 / \sqrt{3}$

08. (UFTM-MG) Em um dia de calmaria, um barco reboca um paraquedista preso a um paraglider. O barco e o paraquedista deslocam-se com velocidade vetorial e alturas constantes.



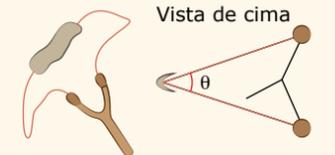
- Nessas condições,
- A) o peso do paraquedista é a força resultante sobre ele.
 - B) a resultante das forças sobre o paraquedista é nula.
 - C) a força resultante exercida no barco é maior que a resultante no paraquedista.
 - D) a força peso do paraquedista depende da força exercida pelo barco sobre ele.
 - E) o módulo da tensão na corda que une o paraquedista ao paraquedista será menor que o peso do paraquedista.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS



01. (UESPI) No estilingue, ou bodoque, da figura a seguir, as tiras elásticas têm tamanhos sem deformação idênticos e constantes elásticas de 100 N/m. Um menino estica cada tira de 5 cm em relação ao seu comprimento não deformado, mantendo-as no plano horizontal, com um ângulo de $\theta = 60^\circ$ entre si (ver figura). Nessa situação, qual o módulo, em newtons, da força que o menino exerce sobre as tiras?

Dados: $\sin 30^\circ = \cos 60^\circ = 1/2$; $\cos 30^\circ = \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$.



- A) $\frac{10}{\sqrt{3}}$
- B) $10\sqrt{3}$
- C) 5
- D) $\frac{5}{\sqrt{3}}$
- E) $5\sqrt{3}$

02. (Unesp) Um lustre está pendurado no teto de uma sala por meio de dois fios inextensíveis, de mesmo comprimento e de massas desprezíveis, como mostra a figura 1, onde o ângulo que cada fio faz com a vertical é 30° . As forças de tensão nos fios têm a mesma intensidade.

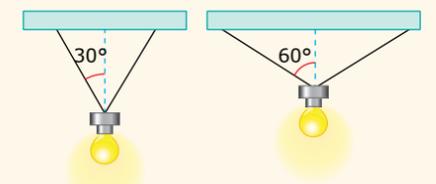
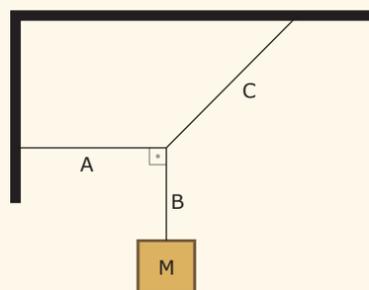


Figura 1 Figura 2

Considerando $\cos 30^\circ \approx 0,87$, se a posição do lustre for modificada e os fios forem presos ao teto mais distantes um do outro, de forma que o ângulo que cada um faz com a vertical passe a ser o dobro do original, como mostra a figura 2, a tensão em cada fio será igual a

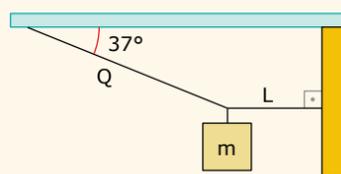
- A) 0,50 do valor original.
- B) 1,74 do valor original.
- C) 0,86 do valor original.
- D) 2,00 do valor original.
- E) 3,46 do valor original.

03. (PUC RS-2017) No sistema apresentado na figura a seguir, o bloco M está em equilíbrio mecânico em relação a um referencial inercial. Os três cabos, A, B e C, estão submetidos, cada um, a tensões respectivamente iguais a T_A , T_B e T_C . Qual das alternativas representa corretamente a relação entre os módulos dessas forças tensoras?



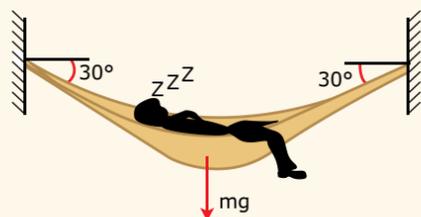
- A) $T_A > T_C$ C) $T_A = T_C$ E) $T_B > T_C$
 B) $T_A < T_C$ D) $T_B = T_C$

04. (EsPCEX-SP) Um bloco de massa $m = 24$ kg é mantido suspenso em equilíbrio pelas cordas L e Q, inextensíveis e de massas desprezíveis, conforme figura a seguir. A corda L forma um ângulo de 90° com a parede e a corda Q forma um ângulo de 37° com o teto. Considerando a aceleração da gravidade igual a 10 m/s^2 , o valor da força de tração que a corda L exerce na parede é de:



- Dados:** $\cos 37^\circ = 0,8$ e $\sin 37^\circ = 0,6$.
- A) 144 N. C) 192 N. E) 320 N.
 B) 180 N. D) 240 N.

05. (Unicamp-SP) Quando um homem está deitado numa rede (de massa desprezível), as forças que esta aplica na parede formam um ângulo de 30° com a horizontal, e a intensidade de cada uma é de 60 kgf (ver figura adiante).

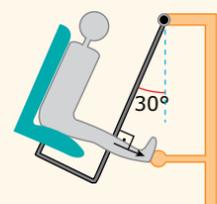


- A) Qual é o peso do homem?
 B) O gancho da parede foi mal-instalado e resiste apenas até 130 kgf. Quantas crianças de 30 kg a rede suporta? (Suponha que o ângulo não mude.)

06. (Unicamp-SP-2017) Hoje é comum encontramos equipamentos de exercício físico em muitas praças públicas do Brasil. Esses equipamentos são voltados para pessoas de todas as idades, mas, em particular, para pessoas da terceira idade. São equipamentos exclusivamente mecânicos, sem uso de partes elétricas, em que o esforço consiste usualmente em levantar o próprio peso do praticante.

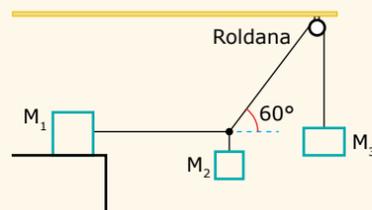
Considere o esquema a seguir, em que uma pessoa de massa $M = 65$ kg está parada e com a perna esticada em um equipamento tipicamente encontrado nessas praças. O módulo da força \vec{F} exercida pela perna da pessoa em razão de sua massa m é

(Se necessário, utilize $g = 10 \text{ m/s}^2$)



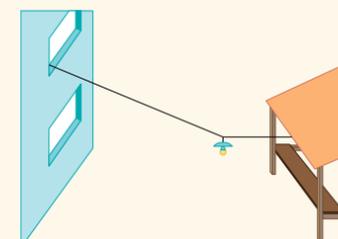
- A) 1 300 N. C) 325 N.
 B) 750 N. D) 560 N.

07. (UFPR) Três blocos de massas m_1 , m_2 e m_3 , respectivamente, estão unidos por cordas de massa desprezível, conforme mostrado na figura. O sistema encontra-se em equilíbrio estático. Considere que não há atrito no movimento da roldana e que o bloco de massa m_1 está sobre uma superfície horizontal. Assinale a alternativa que apresenta corretamente (em função de m_1 e m_3) o coeficiente de atrito estático entre o bloco de massa m_1 e a superfície em que ele está apoiado.



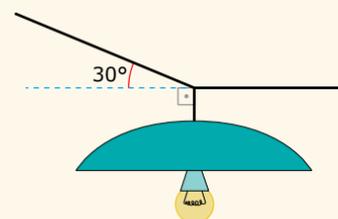
- A) $\frac{m_3}{2m_1}$ C) $\frac{\sqrt{3}m_3}{2m_1}$ E) $\frac{\sqrt{3}m_1}{m_3}$
 B) $\frac{m_1}{2m_3}$ D) $\frac{\sqrt{3}m_1}{2m_3}$

08. (UFTM-MG) As dependências da escola não possuíam tomadas no local em que estava montada a barraca do churrasco e, por isso, uma extensão foi esticada, passando por uma janela do segundo andar do prédio das salas de aula.



Para posicionar a lâmpada logo à frente da barraca, uma corda presa à lona foi amarrada ao fio da extensão, obtendo-se a configuração indicada na figura.

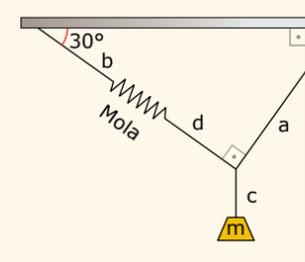
Considere $\sin 30^\circ = \frac{1}{2}$, $\cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$ e $g = 10 \text{ m/s}^2$.



O conjunto formado pela cúpula, lâmpada e soquete, de massa total 0,5 kg, é sustentado pela corda e pelo fio condutor. Desprezando-se os pesos do fio e da corda, é possível afirmar que o fio condutor esticado através da janela sofre ação de uma força de intensidade, em newtons, de

- A) 10. C) $10\sqrt{3}$. E) $15\sqrt{3}$.
 B) 15. D) 20.

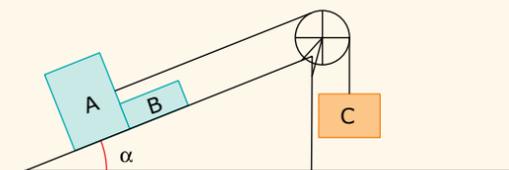
09. (UFPR-2017) Uma mola de massa desprezível foi presa a uma estrutura por meio da corda "b". Um corpo de massa "m" igual a 2 000 g está suspenso por meio das cordas "a", "c" e "d" de acordo com a figura a seguir, a qual representa a configuração do sistema após ser atingido o equilíbrio. Considerando que a constante elástica da mola é 20 N/cm e a aceleração gravitacional é 10 m/s^2 , assinale a alternativa que apresenta a deformação que a mola sofreu por ação das forças que sobre ela atuaram, em relação à situação em que nenhuma força estivesse atuando sobre ela. Considere ainda que as massas de todas as cordas e da mola são irrelevantes.



- A) 0,5 cm. C) 2,5 cm. E) 5,2 cm.
 B) 1,2 cm. D) 3,5 cm.

10. (UFG-GO) Um passarinho pousa no ponto médio de um fio elástico de massa desprezível e constante elástica k , esticado horizontalmente entre duas paredes separadas por uma distância L . Sob a ação de seu peso, o fio passa a formar um ângulo θ com a horizontal. Determine a massa do passarinho em função de θ , k , L e da aceleração da gravidade g .

11. (IFCE-2016) Um conjunto de caixas precisa ser deslocado através de um plano inclinado, conforme mostra a figura seguinte.

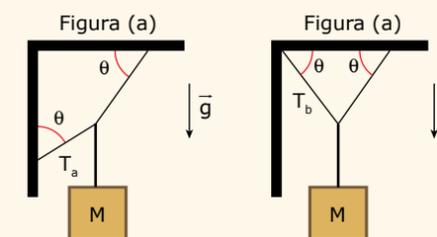


Nesta figura, as massas das 3 caixas A, B e C são, respectivamente, $m_A = 12$ kg, $m_B = 8$ kg e $m_C = 20$ kg. O fio que as une é inextensível e está conectado às caixas A e C. A polia é ideal e o atrito das caixas é desprezível. Nesta situação, a intensidade da força que o bloco A exerce sobre o bloco B é

(Considere a aceleração da gravidade como $g = 10 \text{ m/s}^2$, e também $\cos \alpha = 0,8$ e $\sin \alpha = 0,6$).

- A) 96 N.
 B) 60 N.
 C) 72 N.
 D) 64 N.
 E) 100 N.

12. (UPE) Considere que ambos os sistemas mostrados nas figuras (a) e (b) a seguir estejam em equilíbrio e que as forças de tensão nos fios esquerdos possuam intensidades iguais a T_a e T_b , respectivamente.

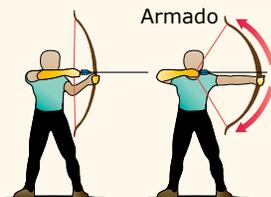


Sabendo-se que $M = 5,0$ kg e que o ângulo θ é igual a 60° , é correto afirmar que:

- A) $T_a = (2)^{1/2}T_b$
 B) $T_a = (3)^{1/2}T_b$
 C) $T_a = (5)^{1/2}T_b$
 D) $T_a = T_b/2$
 E) $T_a = T_b$

SEÇÃO ENEM

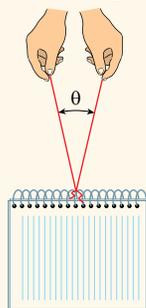
01. Pinturas rupestres comprovam que o uso do arco e flecha surgiu como atividade de caça e guerra ainda na Pré-História. Com o advento da pólvora e das armas de fogo, a prática do arco e flecha perdeu popularidade. Atualmente, ela é difundida em diversas competições, como as Olimpíadas. Ao armar um arco, a corda não é esticada. Apesar de a corda ficar em formato de V, o arco é que é flexionado, como está indicado na figura a seguir:



Para a posição em que o arco está armado, a força feita pela mão direita do arqueiro

- A) possui intensidade igual e sentido oposto ao do peso do arco, pois, estando este em repouso, a resultante de forças sobre ele deve ser igual a zero.
- B) possui intensidade igual e sentido oposto ao da força exercida pela mão esquerda, pois, estando o arco em repouso, a resultante de forças sobre ele vale zero.
- C) possui direção oblíqua, de maneira que a flecha seja lançada com uma velocidade ligeiramente voltada para baixo.
- D) apresenta intensidade igual à da força de tensão na corda, dependendo de o ângulo da corda em V assumir determinado valor.
- E) apresenta uma intensidade sempre igual a do peso do arco, independentemente do valor do ângulo da corda em V.

02. Em uma aula prática sobre equilíbrio de corpos, um professor sustentou um caderno espiral através de dois fios idênticos, como mostra a figura.



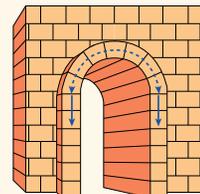
Lentamente, o professor aumentou o ângulo θ entre os fios até que, para θ igual a 100° , um dos fios se rompeu, pois a tração no fio atingiu o limite de ruptura. O valor dessa tração é

- A) igual ao peso do caderno, e o ponto de ruptura ocorreu próximo à mão do professor.
- B) igual ao peso do caderno, e o ponto de ruptura ocorreu próximo ao caderno.
- C) menor que o peso do caderno, mas não é possível prever o local onde o fio se rompeu.
- D) menor que o peso do caderno, e o ponto de ruptura ocorreu próximo à mão do professor.
- E) maior que o peso do caderno, mas não é possível prever o local onde o fio se rompeu.

03. Os antigos romanos construíram grandes pontes e aquedutos em forma de arcos (foto). Geralmente em pedra e tijolo, o arco é construído com blocos em forma de cunha que, colocados lado a lado, permite distribuir todo o peso da construção para dois pilares verticais de suporte (figura). O bloco situado no alto do arco é o último a ser colocado, permitindo o travamento do conjunto. Antes da colocação desse último elemento, a estrutura é sustentada por uma armação provisória, que sustenta o peso do arco e ainda serve de molde para a forma da curva que o arco terá.

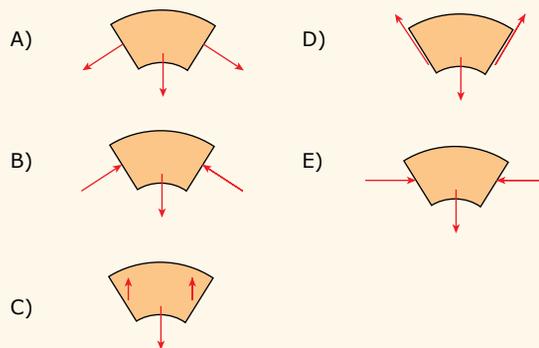


Bernard Gagnon / Creative Commons



Arquivo Bernaulli

Considerando que a força de atrito entre os blocos seja desprezível, qual dos esquemas a seguir melhor representa o sistema de forças atuantes no bloco colocado no ponto mais alto do arco?



GABARITO

Meu aproveitamento

Aprendizagem

Acertei _____ Errei _____

- 01. A 03. B 05. C 07. A
- 02. A 04. C 06. B 08. B

Propostos

Acertei _____ Errei _____

- 01. E 02. B 03. B 04. E
- 05.
 - A) 60 kgf
 - B) 4 crianças
- 06. C 07. A 08. A 09. A
- 10. $m = \frac{2kl}{g}(\text{tg } \theta - \text{sen } \theta)$
- 11. D 12. B

Seção Enem

Acertei _____ Errei _____

- 01. D 02. C 03. B



Total dos meus acertos: _____ de _____ . _____ %

Equilíbrio de Corpos Extensos

Quando um corpo está em repouso e assim permanece, significa que a resultante de forças que atuam sobre ele é igual a zero. Dizemos, nesse caso, que o corpo está em equilíbrio estático. Na verdade, a nulidade da resultante de forças é uma das duas condições necessárias para que um corpo permaneça em equilíbrio estático. A outra condição diz respeito ao momento de uma força (ou torque), grandeza a ser estudada neste módulo e que se aplica aos corpos extensos. Chamamos de corpo extenso qualquer objeto que pode girar em torno de um eixo, como portas, volantes, réguas e muitos outros objetos do nosso dia a dia. Um corpo extenso permanece em equilíbrio estático apenas quando a resultante de forças e a resultante de momentos de força que atuam sobre ele são, ambas, nulas. Este módulo é dedicado ao estudo desse tipo de equilíbrio.

Iniciaremos o módulo definindo momento de uma força e mostrando como essa grandeza afeta a rotação dos corpos. Depois, apresentaremos formalmente as duas condições de equilíbrio estático para os corpos extensos. Na sequência, definiremos o centro de gravidade de um corpo e discutiremos a estabilidade do equilíbrio de um corpo. Por fim, vamos explicar o funcionamento das alavancas, citando vários exemplos de aplicações dessas.

MOMENTO DE UMA FORÇA

A figura 1 mostra um homem trocando o pneu de seu carro. Na primeira tentativa, o homem segurou no meio do cabo da chave de roda e aplicou uma força de 10 N perpendicularmente ao cabo, como mostra a primeira imagem. Com as mãos nessa posição, o homem não conseguiu girar o parafuso. Então, o homem aplicou a mesma força, mas segurando na extremidade do cabo da chave, como indicado na segunda imagem. Nessa tentativa, ele conseguiu soltar o parafuso.

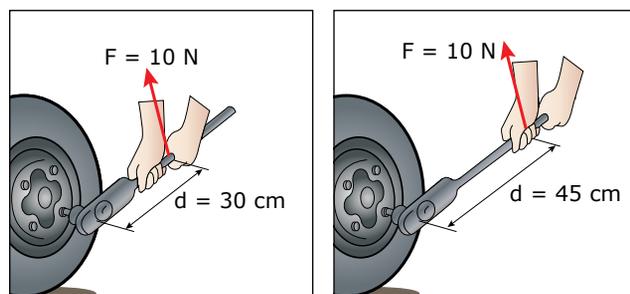


Figura 1. A eficácia da chave de roda depende do ponto de aplicação da força.

Essa experiência nos permite chegar à seguinte conclusão: quanto mais distante do eixo de rotação aplicarmos uma força, mais facilmente conseguiremos girar um corpo. Foi por esse motivo que, na segunda imagem, a aplicação da força na extremidade do cabo da chave permitiu soltar o parafuso, ao passo que a ação da outra força, de mesma intensidade, porém mais próxima ao eixo de rotação, não pôde fazê-lo.

O efeito de rotação que uma força produz em um corpo pode ser quantificado por meio de uma grandeza conhecida como momento de força ou torque. O momento de uma força é definido pela seguinte equação:

$$M_o = F \cdot d$$

Nessa equação, F é a intensidade da força, e d é a distância da linha de ação da força até o ponto (eixo de rotação) em relação ao qual o momento é calculado (o subscrito "O", que aparece no momento, indica esse ponto). No Sistema Internacional, a unidade de momento de força é o newton.metro (N.m). Unidades como N.cm ou kgf.cm também são usuais em alguns problemas.

De acordo com a equação anterior, quanto maior for a distância d , maior será o momento para uma dada força. Observe ainda que o momento é nulo quando d é igual a zero. Um exemplo dessa situação ocorre quando tentamos mover uma porta exercendo uma força sobre a quina onde estão as dobradiças. Por maior que seja nosso esforço, a porta não se moverá, pois, como não existe distância entre a força e o eixo de rotação da porta, nenhum momento é transmitido à porta.

Agora, usando a equação anterior, vamos calcular os momentos das forças representadas na figura 1, tomando como referência o eixo de rotação do parafuso. Para o primeiro ponto de aplicação da força, o momento vale 300 N.cm, que é o produto entre a força de 10 N e a distância de 30 cm. O momento para o outro ponto de aplicação da força vale 450 N.cm, dado pelo produto entre 10 N e 45 cm.

Ainda sobre os valores calculados anteriormente, a seguinte pergunta é importante: por que o momento de 450 N.cm foi suficiente para soltar o parafuso, mas o momento de 300 N.cm não foi? A explicação está na força de atrito que o parafuso sofre da cavidade da roda onde ele está enroscado. Essa força de atrito age tangencialmente à periferia do parafuso, produzindo um momento resistivo que se opõe ao momento aplicado pelo homem. Nesse problema, o momento de 450 N.cm foi suficientemente grande para vencer o momento resistivo, enquanto o momento de 300 N.cm não foi.

Essa discussão nos leva diretamente ao conceito de resultante de momentos de forças, que estará presente na maioria dos problemas deste módulo. Para calcular essa resultante, siga os seguintes passos. Primeiramente, calcule a soma de todos os momentos de forças que tendem a girar o corpo no sentido horário. A seguir, faça o mesmo para todos os momentos que tendem a girar o corpo no sentido anti-horário. Finalmente, subtraia o menor valor do maior para obter o momento resultante.

Condição de equilíbrio de um corpo extenso

Muitos corpos, sob certas condições, não têm liberdade para girar. Esse é o caso, por exemplo, de um livro sendo empurrado sobre uma mesa. Nessas situações, a condição de resultante de forças igual a zero é suficiente para explicar o equilíbrio de um corpo. Porém, para situações em que o corpo pode girar (corpo extenso), além da condição anterior, a resultante dos momentos das forças também deve ser nula. Matematicamente, as condições de equilíbrio estático de um corpo extenso podem ser assim expressas:

$$\Sigma \vec{F} = 0 \text{ e } \Sigma M = 0$$

A figura 2 ilustra um caso de equilíbrio estático de um corpo extenso, constituído por uma régua de 50 cm, de peso desprezível, apoiada no ponto central A, e que sustenta três blocos iguais de peso $P = 10 \text{ N}$. Observe as três forças, $T_1 = T_2 = T_3 = 10 \text{ N}$, exercidas pelos fios que sustentam os três blocos. Devido à ação dessas forças, a régua comprime o apoio com uma força de 30 N. O apoio, por sua vez, aplica na régua a força de reação normal $N = 30 \text{ N}$. Portanto, a resultante de forças sobre a régua vale zero, como esperávamos.

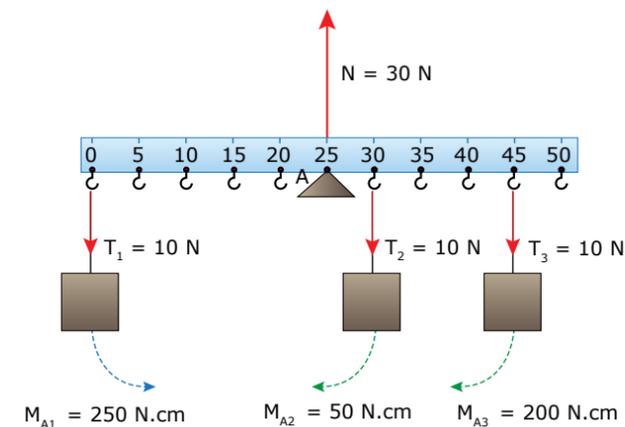


Figura 2. Equilíbrio de um corpo extenso.

Agora, vamos analisar o balanço de momentos sobre a régua. Vamos escolher o ponto de apoio da régua (ponto A) como o eixo em relação ao qual iremos calcular os momentos das várias forças. A reação normal não exerce momento em relação a esse ponto, pois essa força passa pelo ponto A. As forças feitas pelos fios exercem os momentos indicados na figura 2. Cada um desses momentos foi calculado multiplicando-se a força pela sua distância até o ponto A.

Os momentos M_{A2} e M_{A3} tendem a girar a régua no sentido horário e, portanto, os seus efeitos podem ser somados. Essa soma vale 250 N.cm , exatamente igual ao módulo do momento M_{A1} , que tende a girar a régua no sentido anti-horário. Assim, constatamos, como esperado, que a resultante total dos momentos vale zero.

Teorema das Três Forças

Por último, citamos o Teorema das Três Forças, que poderá lhe auxiliar na resolução de alguns problemas de equilíbrio de corpos extensos. O enunciado desse teorema é:

Quando um corpo extenso está em equilíbrio estático sujeito a três forças não paralelas, as linhas de ação dessas forças devem passar por um ponto comum.

Como exemplo, vamos considerar uma barra AB homogênea de peso \bar{P} , articulada em A e apoiada em B na quina de um degrau, como mostra a figura 3. Para determinar graficamente a direção e o sentido da força \bar{F} exercida pela articulação sobre a barra, pense que atuam na barra apenas três forças: a força \bar{F} da articulação, a força \bar{N} exercida pelo degrau e o peso \bar{P} da barra. Note que conhecemos o ponto de ação, o sentido e a direção das forças \bar{P} e \bar{N} (indicadas em cor azul na figura). A primeira, obviamente, atua no centro da barra, sendo vertical e voltada para baixo. A força \bar{N} é perpendicular à barra, pois a barra tende a descrever um arco de círculo centrado em A, de modo que a extremidade B pressiona o degrau no sentido tangente à tendência de rotação. As linhas de ação das forças \bar{P} e \bar{N} são concorrentes no ponto P. Como a linha de ação da força \bar{F} também deve passar pelo ponto P, a direção dessa força pode ser determinada facilmente. O sentido dessa força é para cima porque a barra empurra a articulação para baixo.

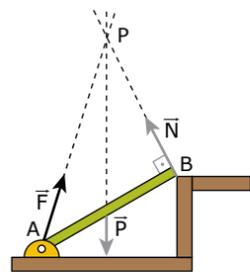


Figura 3. Um corpo submetido a três forças não paralelas está em equilíbrio estático quando as forças são concorrentes em um único ponto e a resultante delas é zero.



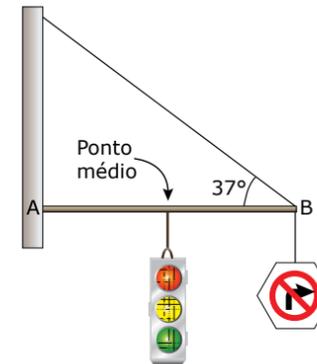
Tetrística

Esse jogo desafiador consiste em uma variação do Tetris, porém, no lugar das peças tradicionais, são fornecidos vetores de força, que devem ser posicionados estrategicamente sobre uma barra para que o torque resultante sobre ela seja nulo (o centro de massa da barra não exerce torque). Use seus conhecimentos de Física e fique atento para movimentar as peças e encaixá-las de modo a obter mais pontos. Bom jogo!



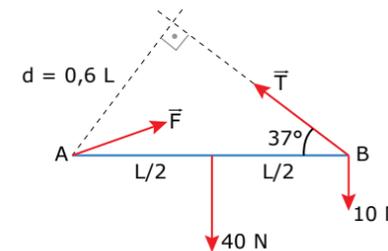
EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. A figura mostra um semáforo, de peso 40 N, e uma placa de sinalização, de peso 10 N, suspensos em uma haste AB de peso desprezível. Em A, a haste está presa em um poste, e em B ela é sustentada por um tirante. Calcular a tração no tirante e a força que o poste exerce sobre a haste. Considere $\text{sen } 37^\circ = 0,6$ e $\text{cos } 37^\circ = 0,8$.



Resolução:

As forças que atuam sobre a haste, representadas na figura seguinte, são as forças verticais dos fios que sustentam o semáforo e a placa, a força \bar{T} exercida pelo tirante (módulo igual ao da tração no tirante) e a força \bar{F} feita pelo poste. Na figura, o comprimento $d = 0,6L$ é dado por $\text{sen } 37^\circ = 0,6 = d/L$, sendo L o comprimento da haste.



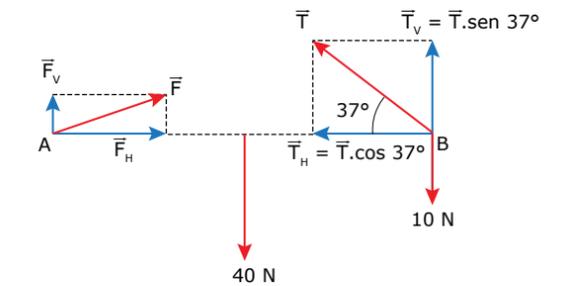
A haste está em equilíbrio, logo, a resultante dos momentos que atuam sobre ela vale zero. Vamos tomar os momentos em relação ao ponto A. Como \bar{F} passa por A, essa força não produz momento. Os momentos exercidos pelas forças de 40 N e 10 N tendem a girar a haste no sentido horário, e o momento exercido por \bar{T} tende a girá-la no sentido oposto. Igualando esses momentos, temos:

$$T \cdot d = 10 \cdot L + 40 \cdot L/2$$

O momento exercido por \bar{T} é igual ao módulo dessa força multiplicado pela distância perpendicular entre a linha de ação de \bar{T} e o ponto A. Observe, na figura anterior, que essa distância é o comprimento d , e não o comprimento L. Substituindo $d = 0,6L$ na equação anterior e cancelando L, obtemos $T = 50 \text{ N}$.

A determinação de \bar{F} é mais difícil, pois não conhecemos o ângulo de inclinação dessa força. A figura a seguir mostra as forças atuantes na haste nas duas direções, horizontal e vertical.

Observe que as forças \bar{F} e \bar{T} foram decompostas nessas duas direções.



A haste está em equilíbrio, logo, a resultante das forças que atuam sobre ela é zero. Como as componentes \bar{T}_v e \bar{F}_v são as únicas forças a atuarem sobre a haste na direção horizontal, essas forças devem possuir módulos iguais para se cancelarem. Assim:

$$T_h = F_h \Rightarrow T \cdot \text{cos } 37^\circ = F_h$$

Substituindo $T = 50 \text{ N}$ e $\text{cos } 37^\circ = 0,8$ na equação, obtemos $F_h = 40 \text{ N}$. Na vertical, a força total de 50 N (voltada para baixo) deve ser anulada pelas componentes \bar{T}_v e \bar{F}_v .

$$T_v + F_v = 50 \text{ N} \Rightarrow T \cdot \text{sen } 37^\circ + F_v = 50 \text{ N}$$

Substituindo $T = 50 \text{ N}$ e $\text{sen } 37^\circ = 0,6$ na equação, obtemos $F_v = 20 \text{ N}$. Finalmente, usando o Teorema de Pitágoras, obtemos o módulo de F:

$$F = \sqrt{F_h^2 + F_v^2} = \sqrt{40^2 + 20^2} = \sqrt{2000} \Rightarrow F \approx 45 \text{ N}$$

CENTRO DE GRAVIDADE

Quando duas ou mais forças paralelas atuam sobre um corpo, é possível substituí-las pela força resultante, que, aplicada em um ponto adequado do corpo, produz um momento de força equivalente ao momento resultante exercido pelas forças paralelas. Por exemplo, a figura 4 mostra uma situação em que uma barra articulada em $x = 0$ está sujeita às forças \bar{F}_1 e \bar{F}_2 , aplicadas nas posições x_1 e x_2 , respectivamente. A força \bar{R} é a resultante dessas duas forças.

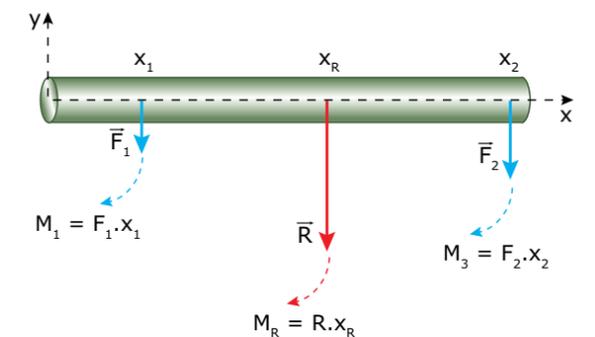


Figura 4. Na posição x_R o momento exercido pela força \bar{R} é equivalente ao momento resultante de \bar{F}_1 e \bar{F}_2 .

Para determinar a posição x_R em que a força resultante \bar{R} deve ser aplicada, devemos impor a seguinte igualdade de momentos: $M_R = M_1 + M_2$. Inserindo os valores indicados na figura 4 na equação anterior e explicitando x_R , obtemos:

$$x_R = \frac{F_1 \cdot x_1 + F_2 \cdot x_2}{R}$$

Podemos utilizar esse mesmo raciocínio para as forças gravitacionais. A divisão de um corpo em partes bem pequenas permite tratar cada pedaço do corpo como uma partícula. Assim, a soma dos momentos exercidos pelos pesos de cada uma dessas partes é equivalente ao momento exercido pelo peso total do corpo, cujo ponto de aplicação é o centro de gravidade (CG) deste. Matematicamente, essa igualdade de momentos pode ser expressa pela seguinte equação:

$$Mg \cdot x_{CG} = m_1 g \cdot x_1 + m_2 g \cdot x_2 + m_3 g \cdot x_3 + \dots + m_n g \cdot x_n$$

O lado esquerdo dessa equação representa o momento exercido pelo peso do corpo, M é a massa do corpo e x_{CG} é a posição do centro de gravidade deste. O lado direito da equação é a soma dos momentos exercidos pelos pesos de cada uma das partes que compõem o corpo. Os termos $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$ são as massas dessas partes e $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ são as posições em que as forças peso de cada uma dessas partes são aplicadas. Nos dois lados da equação, g é a aceleração da gravidade. Quase sempre, o corpo está imerso em um campo gravitacional uniforme, de forma que g não varia com a posição. Por isso, esse termo pode ser cancelado na equação. Explicitando x_{CG} , obtemos:

$$x_{CG} = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + m_3 \cdot x_3 + \dots + m_n \cdot x_n}{M}$$

Essa é a expressão para calcular a posição do centro de gravidade de um corpo em um campo gravitacional uniforme. Independentemente de o campo ser ou não uniforme, a equação anterior sempre representa a posição do centro de massa (CM) do sistema. As posições dos centros de gravidade e de massa coincidem apenas quando o corpo está imerso em um campo gravitacional uniforme.

Enquanto o centro de gravidade está relacionado ao momento exercido pela força peso, o centro de massa está relacionado à força resultante que governa o movimento de um sistema. Por exemplo, quando uma granada explode, o centro de massa do sistema formado pelos fragmentos dessa granada se move como se toda a massa dos fragmentos estivesse concentrada nele e como se todas as forças atuantes em cada um dos fragmentos estivessem atuando, também, no centro de massa. Situações como essa serão abordadas em outra parte desta Coleção. Neste módulo, estaremos mais interessados no conceito de centro de gravidade, que será usado, a seguir, na discussão de novos problemas sobre o equilíbrio de corpos extensos.

Estabilidade do equilíbrio estático

O equilíbrio de um corpo pode ser classificado em três tipos: estável, instável ou indiferente. Um corpo se encontra em equilíbrio estável quando retorna à sua posição inicial após ter sofrido um pequeno deslocamento, gerado por forças ou por momentos de força externos. Caso o corpo não retorne à sua posição inicial e se afaste ainda mais dela, o equilíbrio é instável. A figura 5 mostra exemplos desses dois tipos de equilíbrio. Nessa figura, um mesmo tronco cônico sólido é apoiado, inicialmente, sobre a sua base maior e, posteriormente, sobre sua base menor. Observe que o centro de gravidade do sólido está mais próximo da base maior, onde há maior concentração de massa. Quando o sólido é apoiado sobre a base maior, a linha de ação da força peso continua se projetando sobre essa base, mesmo após o sólido ter sido deslocado. Por isso, ao ser solto, o momento da força peso age girando o corpo no sentido oposto ao giro inicial, restabelecendo a posição inicial do sólido. Na outra situação, veja que a linha de ação da força peso é projetada fora da base de apoio quando o corpo é deslocado. Por isso, ao ser solto, a força peso produz um momento que tende a girar o corpo no mesmo sentido do deslocamento inicial, fazendo-o tombar.

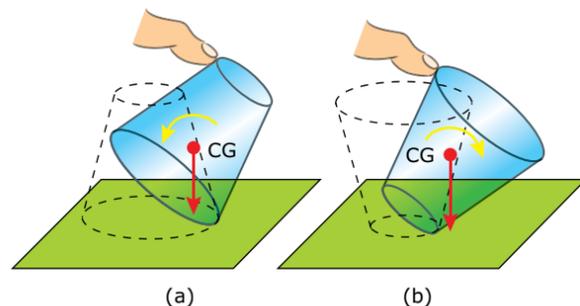


Figura 5. (a) Equilíbrio estável; (b) equilíbrio instável.

Em geral, corpos com centro de gravidade baixo tendem a ser mais estáveis. O critério de estabilidade é baseado na capacidade de resposta de um corpo a um pequeno deslocamento. Na verdade, como o conceito de pequeno é relativo, o próprio conceito de estabilidade é relativo.

Falta ainda explicar o equilíbrio indiferente. Esse tipo de equilíbrio ocorre quando um corpo é deslocado da sua posição inicial e, mesmo após ter sido liberado, o corpo não se move. Uma bola sobre uma superfície horizontal ilustra esse tipo de equilíbrio.

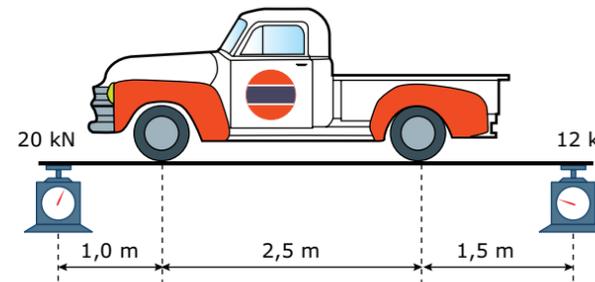


PARA REFLETIR

Dormindo sentado, por que a cabeça de um adulto tende a tombar para frente, mas a de um bebê tende a tombar para trás?

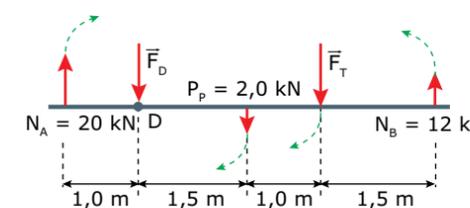
EXERCÍCIO RESOLVIDO

02. Para determinar a posição do centro de gravidade de uma caminhonete, um técnico realizou o seguinte ensaio. Primeiramente, ele colocou uma plataforma homogênea sobre duas balanças especiais. A leitura média em cada balança foi de 1,0 kN. Depois, com a caminhonete sobre a plataforma, as leituras nas balanças passaram a ser de 20 kN e de 12 kN, conforme ilustrado na figura seguinte. Explicar como o técnico determinou a posição do centro de gravidade da caminhonete a partir dos dados fornecidos.



Resolução:

Como a plataforma é homogênea, seu centro de gravidade coincide com seu centro geométrico. Nesse ponto, atua o peso $P_p = 2,0$ kN da plataforma, que é igual à soma dos valores indicados pelas balanças, sem a caminhonete. Com o veículo sobre a plataforma, temos as seguintes forças atuando sobre ela: seu peso, as quatro forças de compressão exercidas pelos pneus do veículo e as duas forças de reação normal, $N_A = 20$ kN e $N_B = 12$ kN, exercidas pelas balanças. Admitindo simetria longitudinal na massa da caminhonete, as duas forças de compressão dos pneus dianteiros podem ser representadas por uma única força \bar{F}_D . O mesmo ocorre nos pneus traseiros, cuja carga é a força \bar{F}_T . A figura seguinte ilustra a distribuição de forças na plataforma.



Tomando o ponto D como referência, os momentos das forças \bar{N}_A , \bar{P}_p e \bar{F}_T tendem a girar a plataforma no sentido horário, enquanto o momento da força normal \bar{N}_B tende a girar a plataforma no sentido anti-horário, conforme está indicado na figura. A força \bar{F}_D não exerce momento em relação ao ponto D porque a sua linha de ação passa por esse ponto. Ao igualarmos os momentos nos dois sentidos, obtemos:

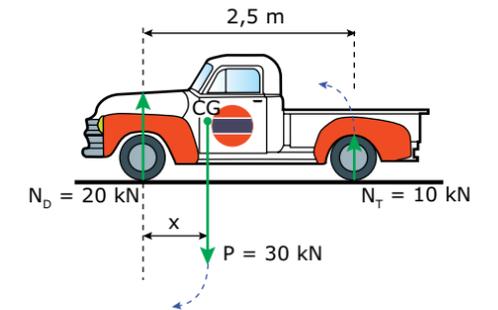
$$20 \cdot 1,0 + 2,0 \cdot 1,5 + F_T \cdot 2,5 = 12 \cdot 4$$

Resolvendo essa equação, obtemos $F_T = 10$ kN. Para calcular a força exercida pelos pneus dianteiros, podemos simplesmente igualar a soma das forças voltadas para baixo com a soma das forças voltadas para cima.

Fazendo isso, obtemos:

$$F_D + 2,0 + 10 = 20 + 12 \Rightarrow F_D = 20 \text{ kN}$$

A soma $F_D + F_T$ é igual ao módulo do peso da caminhonete. A resultante das forças normais exercidas sobre os pneus dianteiros e traseiros possui módulo igual ao da força resultante de compressão exercida pelos pneus dianteiros e traseiros sobre a plataforma, 20 kN e 10 kN, respectivamente. A figura seguinte mostra a distribuição de forças no veículo.



Em relação ao ponto de contato das rodas dianteiras com o solo, o peso da caminhonete tende a girá-la no sentido horário, enquanto a normal na parte traseira tende a girá-la no sentido anti-horário. A força normal dianteira não exerce momento porque ela passa pelo eixo de referência. A igualdade entre os momentos nos dois sentidos permite calcular x , a distância entre o CG da caminhonete e o eixo dianteiro:

$$30 \cdot x = 10 \cdot 2,5 \Rightarrow x = 0,83 \text{ m} = 83 \text{ cm}$$

Portanto, o centro da gravidade da caminhonete acha-se a 83 cm do eixo dianteiro e a 167 cm do eixo traseiro.

ALAVANCAS

Uma alavanca é um elemento rígido que pode girar em torno de um ponto de apoio. Ao exercermos uma força sobre uma alavanca, fazemos aparecer, em outra posição do sistema, uma força capaz de erguer, cortar, esmagar ou simplesmente sustentar algum objeto. Quando cortamos papel com uma tesoura ou pegamos um objeto com uma pinça, estamos usando alavancas. Quando movemos uma pedra com um pedaço de pau apoiado em algum ponto, estamos usando a alavanca mais simples e popular de todas, provavelmente a primeira máquina criada pelo homem. Quando caminhamos ou levantamos algum peso com as mãos, estamos usando alavancas naturais presentes em nosso próprio corpo.

Além do ponto de apoio, toda alavanca possui um ponto de ação e um ponto de resistência. O ponto de ação ou potência é onde exercemos a força para acionar a alavanca. O ponto de resistência é onde se acha o corpo a ser cortado, esmagado, etc. O ponto de apoio está associado ao eixo de rotação da alavanca. De acordo com as posições desses pontos, uma alavanca pode ser classificada em três tipos: interfixa, inter-resistente e interpotente.

A figura 6 mostra esquemas dessas três alavancas e ilustra exemplos práticos de cada uma.

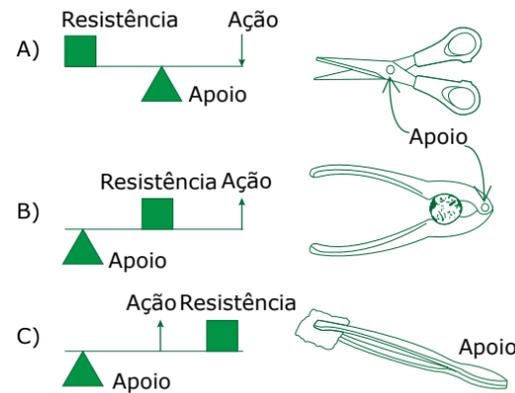


Figura 6. A) Alavancas interfixa (tesoura), B) inter-resistente (quebra-nozes) e C) interpotente (pinça).

A vantagem mecânica de uma alavanca é definida pela razão $V_M = R/F$, sendo R e F os módulos das forças nos pontos de resistência e de ação da alavanca, respectivamente. Quando $V_M > 1$, a alavanca multiplica o esforço nela aplicado, ou seja, $R > F$. Para uma alavanca com $V_M < 1$, temos justamente o contrário, $R < F$. A relação entre os módulos de F e R depende dos braços de ação e de resistência da alavanca. O braço de ação é a distância d_A entre a força \vec{F} e o ponto de apoio da alavanca. O braço de resistência é a distância d_R entre a força \vec{R} e o ponto de apoio. Para explicar melhor a relação entre essas forças e os seus braços, apresentamos, a seguir, dois exemplos de alavancas, uma com $V_M > 1$ e outra com $V_M < 1$.

A figura 7 mostra uma alavanca interfixa clássica. Observe que os braços da alavanca (d_A e d_R) e as suas projeções horizontais (x_A e x_R) estão indicados na figura. Vamos considerar a alavanca na iminência de rotação, de forma que o sistema ainda se encontre em equilíbrio estático. Para o equilíbrio existir, a resultante de forças sobre a alavanca deve ser nula. Por isso, a intensidade da reação no apoio é $N = F + R$ (peso da alavanca desprezado).

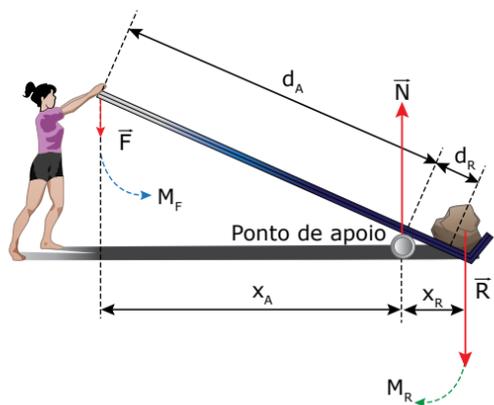


Figura 7. Alavanca interfixa de vantagem mecânica maior que 1.

A outra condição de equilíbrio da alavanca é a nulidade da resultante dos momentos de força. Em relação ao ponto de apoio, o momento da força \vec{R} tende a girar a alavanca no sentido horário, o momento de \vec{F} tende a causar um giro no sentido anti-horário, e a força \vec{N} não exerce momento, pois ela passa pelo ponto de apoio. Para a resultante dos momentos ser zero, devemos ter $F \cdot x_A = R \cdot x_R$. Nessa equação, usamos as projeções horizontais dos braços da alavanca, pois são essas as distâncias perpendiculares das forças até o ponto de apoio. Usando a semelhança entre os triângulos formados pela alavanca, pelos seus braços e por suas projeções no solo, é fácil mostrar que $x_A/x_R = d_A/d_R$. Substituindo essa relação na equação de igualdade dos momentos, obtemos:

$$F \cdot d_A = R \cdot d_R \Rightarrow R = F \frac{d_A}{d_R}$$

Segundo essa equação, quando d_A for maior que d_R (como ocorre na alavanca da figura 7), o módulo de \vec{R} será maior que o de \vec{F} , e a vantagem mecânica será maior que 1. Por exemplo, se d_A for cinco vezes maior que d_R , teremos $F = R/5$, ou seja, $V_M = 5$. Esse número indica que a garota pode manter a alavanca em iminência de rotação e iniciar o seu deslocamento, fazendo uma força cinco vezes menor do que o peso da pedra.

Agora, vamos analisar o equilíbrio mostrado na figura 8, em que uma pessoa segura um peso. Que força \vec{F} o bíceps deve exercer para manter o antebraço na horizontal? Observe que a força \vec{F} acha-se entre o apoio (articulação do cotovelo) e a força \vec{R} . Portanto, temos uma alavanca interpotente. O momento de \vec{R} tende a girar o antebraço no sentido horário, ao passo que o momento de \vec{F} tende a girá-lo no sentido oposto. O equilíbrio ocorre quando esses momentos possuem módulos iguais (pesos do antebraço e da mão desprezados). A igualdade desses momentos fornece a seguinte relação: $F = R(d_R/d_A)$. Para $d_A = 5$ cm e $d_R = 30$ cm, teremos $F = 6R$. Isso quer dizer que o bíceps exerce uma força de módulo seis vezes maior do que o peso do corpo mantido na mão. Todas as alavancas interpotentes, como o antebraço, as pinças ou os pegadores de gelo, apresentam vantagem mecânica menor do que 1, pois o braço de resistência é sempre maior do que o braço de ação.

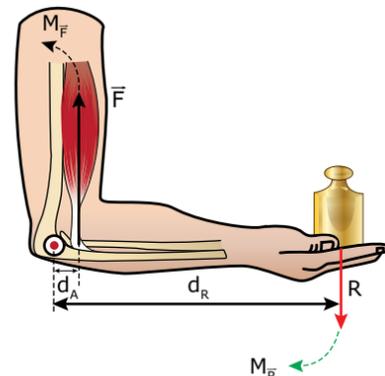


Figura 8. O antebraço é uma alavanca interpotente.

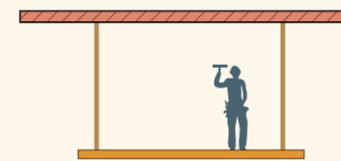
EXERCÍCIOS DE APRENDIZAGEM



- 01.** (UECE-2016) Suponha que um taco de sinuca está escorado em uma parede vertical, formando um ângulo de 80° com o piso, supostamente horizontal. Considere desprezível o atrito entre o taco e a parede vertical, e assumamos que não há deslizamento entre o taco e o piso. Se o taco está em equilíbrio estático, pode-se afirmar corretamente que a força exercida pela parede no taco
- A) forma um ângulo de 80° com o piso.
 B) forma um ângulo de 80° com a parede.
 C) é perpendicular à parede.
 D) é tangente à parede.

- 02.** (UFMG) Para pintar uma parede, Miguel está sobre um andaime suspenso por duas cordas.

Em certo instante, ele está mais próximo da extremidade direita do andaime, como mostrado nesta figura:

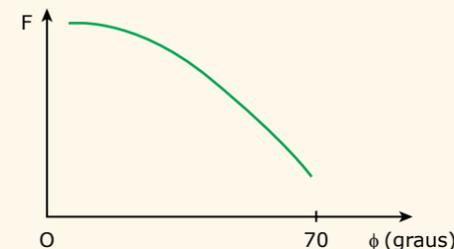


Sejam T_E e T_D os módulos das tensões nas cordas, respectivamente, da esquerda e da direita e P o módulo da soma do peso do andaime com o peso de Miguel.

Analisando-se essas informações, é correto afirmar que:

- A) $T_E = T_D$ e $T_E + T_D = P$
 B) $T_E = T_D$ e $T_E + T_D > P$
 C) $T_E < T_D$ e $T_E + T_D = P$
 D) $T_E < T_D$ e $T_E + T_D > P$

- 03.** (FUVEST-SP) O gráfico a seguir representa a força F exercida pela musculatura eretora sobre a coluna vertebral, ao se levantar um peso, em função do ângulo ϕ , entre a direção da coluna e a horizontal. Ao se levantar pesos com postura incorreta, essa força pode se tornar muito grande, causando dores lombares e problemas na coluna.



Com base nas informações dadas e no gráfico anterior, foram feitas as seguintes afirmações:

- I. Quanto menor o valor de ϕ , maior o peso que se consegue levantar.
 II. Para evitar problemas na coluna, um halterofilista deve procurar levantar pesos adotando postura corporal cujo ângulo ϕ seja grande.
 III. Quanto maior o valor de ϕ , menor a tensão na musculatura eretora ao se levantar um peso.

Está correto apenas o que se afirma em

- A) I. D) I e II.
 B) II. E) II e III.
 C) III.

- 04.** (UECE) Em um parque de diversões, uma roda-gigante gira com velocidade angular constante. De modo simplificado, pode-se descrever o brinquedo como um disco vertical e as pessoas como massas puntiformes presas na sua borda. A força peso exerce sobre uma pessoa um torque em relação ao ponto central do eixo da roda gigante. Sobre esse torque, é correto afirmar-se que

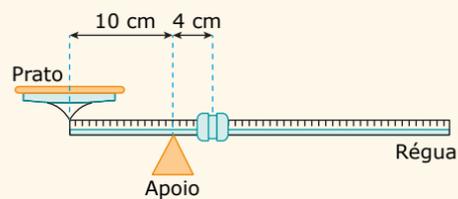
- A) é zero nos pontos mais baixo e mais alto da trajetória.
 B) é não nulo e assume um valor máximo no ponto mais alto e um mínimo no ponto mais baixo da trajetória.
 C) é não nulo e assume um valor máximo no ponto mais baixo e um mínimo no ponto mais alto da trajetória.
 D) é não nulo e tem valores iguais no ponto mais baixo e no mais alto da trajetória.

- 05.** (UECE-2015) Uma gangorra em um parquinho infantil é ocupada por dois gêmeos idênticos e de mesma massa, Cosmo e Damião. Na brincadeira, enquanto um dos irmãos sobe num dos acentos do brinquedo, o outro desce no outro acento. O brinquedo pode ser descrito como uma haste rígida, com um acento em cada extremidade, e livre para girar em um plano vertical em torno do ponto central. Considere os torques na haste da gangorra exercidos pelas forças peso de Cosmo (τ_c) e de Damião (τ_d) em relação ao ponto central. Na configuração em que Cosmo está na posição mais alta, é CORRETO afirmar que:

- A) $|\tau_c| < |\tau_d|$ C) $|\tau_c| > |\tau_d|$
 B) $|\tau_c| = |\tau_d|$ D) $|\tau_c| > -|\tau_d|$

- 06.** (Epcar-SP-2017) Em feiras livres ainda é comum encontrar balanças mecânicas, cujo funcionamento é baseado no equilíbrio de corpos extensos. Na figura a seguir tem-se a representação de uma dessas balanças, constituída basicamente de uma régua metálica homogênea de massa desprezível, um ponto de apoio, um prato fixo em uma extremidade da régua e um cursor que pode se movimentar desde o ponto de apoio até a outra extremidade da régua.

A distância do centro do prato ao ponto de apoio é de 10 cm. O cursor tem massa igual a 0,5 kg. Quando o prato está vazio, a régua fica em equilíbrio na horizontal com o cursor a 4 cm do apoio.



Colocando 1 kg sobre o prato, a régua ficará em equilíbrio na horizontal se o cursor estiver a uma distância do apoio, em cm igual a

- A) 18.
- B) 20.
- C) 22.
- D) 24.

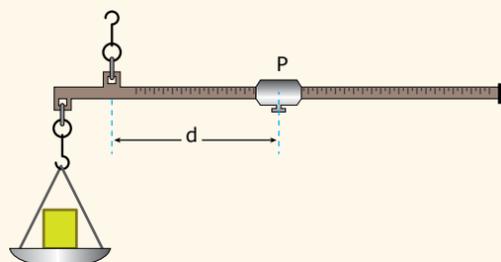


07. (UECE-2015) Uma torre construída com um cano cilíndrico de 12 m é instalada verticalmente com o apoio de três cabos de aço, sendo cada um deles conectado ao solo e ao topo da torre. Os pontos de fixação ao solo são todos distantes 2 m da base da torre e equidistantes entre si. Assuma que os cabos são igualmente tensionados e inextensíveis, e que o sistema formado pela torre e suas estaias (cabos) está completamente estático. Com base nos vetores força atuando na torre, pode-se afirmar corretamente que

- A) o torque total exercido pelas estaias sobre a torre zé diferente de zero.
- B) a torre está tensionada.
- C) a torre sofre uma força de compressão.
- D) a força peso exerce um torque não nulo sobre a torre.



08. (UERJ) Uma balança romana consiste em uma haste horizontal sustentada por um gancho em um ponto de articulação fixo. A partir desse ponto, um pequeno corpo P pode ser deslocado na direção de uma das extremidades, a fim de equilibrar um corpo colocado em um prato pendurado na extremidade oposta. Observe a ilustração:



Quando P equilibra um corpo de massa igual a 5 kg, a distância d de P até o ponto de articulação é igual a 15 cm.

Para equilibrar um outro corpo de massa igual a 8 kg, a distância, em centímetros, de P até o ponto de articulação deve ser igual a

- A) 28.
- B) 25.
- C) 24.
- D) 20.

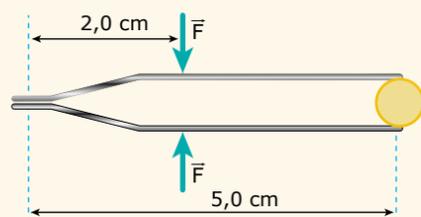
EXERCÍCIOS PROPOSTOS



01. (UEG-GO) Um estudante de Biologia bebe seu refrigerante na cantina do colégio e, com base em seus conhecimentos de Física, observa que, quando leva o líquido à boca, o seu braço realiza um movimento circular, cujo raio é o próprio antebraço, que mede 25,0 cm. Supondo que a massa do copo juntamente com a massa do líquido sejam de aproximadamente 300 g, desprezando-se o peso do antebraço e aplicando-se uma força F, responsável por uma aceleração de 70,0 m/s², para colocar o copo em movimento, o estudante conclui que o torque realizado pelo copo com refrigerante é igual a

- A) 52,50 Nm.
- B) 21,00 Nm.
- C) 5,25 Nm.
- D) 2,10 Nm.

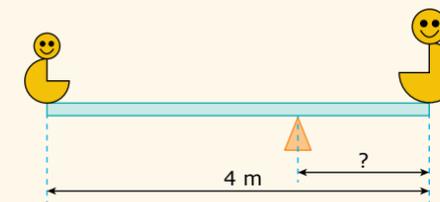
02. (ACAFE-SC) Um instrumento utilizado com frequência no ambiente ambulatorial é uma pinça. Considere a situação em que se aplica simultaneamente uma força F de módulo 10 N, como se indica na figura a seguir:



O módulo da força, em newtons, que cada braço exerce sobre o objeto colocado entre eles é

- A) 15.
- B) 8.
- C) 10.
- D) 4.

03. (EEAR-SP-2016) Dois garotos decidem brincar de gangorra usando uma prancha de madeira de massa igual a 30 kg e 4 metros de comprimento, sobre um apoio, conforme mostra a figura.

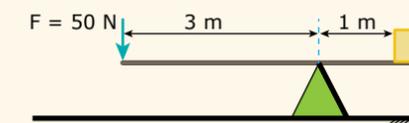


Sabendo que um dos garotos tem 60 kg e o outro 10 kg qual a distância, em metros, do apoio à extremidade em que está o garoto de maior massa?

- A) 1
- B) 2
- C) 3
- D) 4



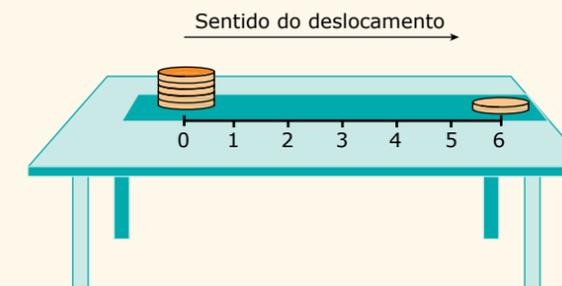
04. (UFU-MG) No decorrer da História, o homem tem empregado princípios físicos para facilitar suas atividades cotidianas como, por exemplo, o uso de alavancas para reduzir seu esforço, o que implicou a construção de guindastes e outros tipos de máquinas. Considere o esquema a seguir, no qual uma pessoa exerce uma força de 50 N perpendicular à barra. Na outra extremidade da barra, há um bloco de 10 kg cujo centro de massa encontra-se a 1 m do ponto de apoio da barra.



Desprezando o peso da barra, e com base na situação descrita, assinale a alternativa correta.

- A) A pessoa consegue levantar a caixa na outra extremidade.
- B) A pessoa só conseguirá levantar a caixa se aplicar uma força maior que 50 N.
- C) Se a caixa tivesse 5 kg de massa e a mesma força fosse aplicada, porém a 1,5 m do ponto de apoio da barra, a pessoa não conseguiria levantá-la.
- D) Só é possível levantar a caixa se a barra estiver com ponto de apoio localizado em seu ponto médio.

05. (UERJ-2017) Um sistema constituído por seis moedas idênticas fixadas sobre uma régua de massa desprezível que está apoiada na superfície horizontal de uma mesa, conforme ilustrado a seguir. Observe que, na régua, estão marcados pontos equidistantes, numerados de 0 a 6.

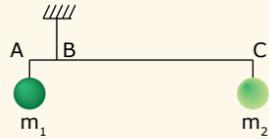


Ao se deslocar a régua da esquerda para a direita, o sistema permanecer em equilíbrio na horizontal até que determinado ponto da régua atinja a extremidade da mesa.

De acordo com a ilustração, esse ponto está representado pelo seguinte número:

- A) 4.
- B) 3.
- C) 2.
- D) 1.

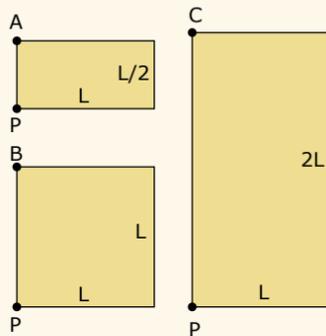
06. (UEL-PR) Uma das condições de equilíbrio é que a soma dos momentos das forças que atuam sobre um ponto de apoio seja igual a zero.



Considerando o modelo simplificado de um móvel, onde AC representa a distância entre o fio que sustenta m_1 e o fio que sustenta m_2 , e $AB = \frac{1}{8} AC$, qual a relação entre as massas m_1 e m_2 ?

- A) $m_1 = \frac{1}{8} m_2$
- B) $m_1 = 7m_2$
- C) $m_1 = 8m_2$
- D) $m_1 = 21m_2$
- E) $m_1 = 15m_2$

07. (UECE) Três chapas retangulares rígidas repousam em um plano horizontal, e podem girar livremente em torno de eixos verticais passando por P. As dimensões das chapas são identificadas na figura a seguir, em termos do comprimento L. Nos pontos A, B e C, são aplicadas três forças horizontais iguais.



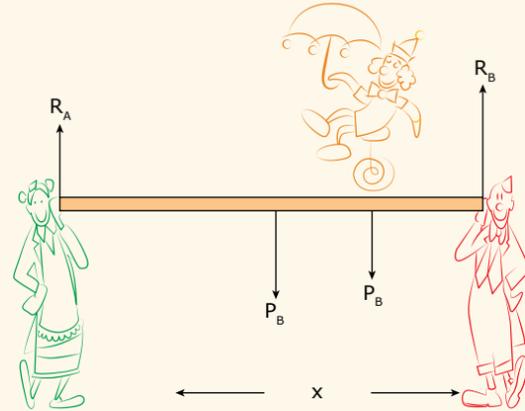
A partir da segunda Lei de Newton, pode-se mostrar que a aceleração angular inicial de módulo $\alpha \neq 0$ de cada chapa é proporcional ao momento da respectiva força em relação ao eixo de rotação de cada corpo. Desprezando todos os atritos, é correto afirmar-se que:

- A) $4\alpha_A = 2\alpha_B = \alpha_C$
- B) $\alpha_A = 2\alpha_B = 4\alpha_C$
- C) $\alpha_A = \alpha_B = \alpha_C$
- D) $\frac{\alpha_A}{4} = \frac{\alpha_B}{2} = 2\alpha_C$

08. (Unifor-CE) Num espetáculo circense, dois palhaços seguram pelas extremidades uma barra homogênea de 3 m de comprimento que pesa 200 N. Um terceiro palhaço com massa total de 50 kg pode deslizar sobre a barra com seu monociclo. O palhaço na extremidade A da barra só pode suportar uma força até 400 N.

Até que distância x da extremidade B o palhaço poderá deslizar em seu monociclo?

Considere $g = 10 \text{ m/s}^2$.



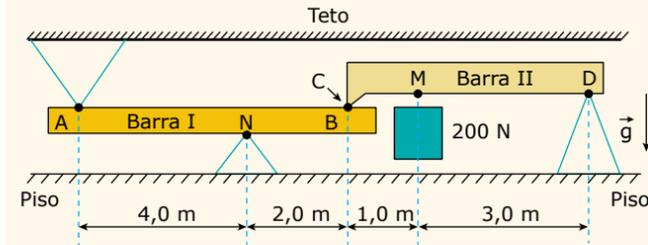
- A) $x = 1,5 \text{ m}$.
- B) $x = 1,8 \text{ m}$.
- C) $x = 2 \text{ m}$.
- D) $x = 2,4 \text{ m}$.
- E) $x = 2,5 \text{ m}$.

09. (UECE-2016) Um ventilador de teto gira a uma velocidade angular de 420 rpm, tem 130 W de potência e hélice com 96 cm de diâmetro. Devido à força de atrito com o ar, há forças atuando ao longo de cada uma das hélices. Essas forças atuam em pontos localizados desde próximos ao eixo de rotação a pontos na extremidade da hélice, provocando torques diferentes em relação ao eixo de rotação. Considerando que a força de atrito em cada ponto seja proporcional à velocidade linear do ponto, é correto afirmar que esse torque, a uma distância R do eixo de rotação, é proporcional a:

- A) R^2
- B) R
- C) R^3
- D) R^4

10. (EspCEX-SP-2017) O desenho a seguir representa um sistema composto por duas barras rígidas I e II, homogêneas e de massas desprezíveis na posição horizontal, dentro de uma sala. O sistema está em equilíbrio estático.

No ponto M da barra II, é colocado um peso de 200 N suspenso por um cabo de massa desprezível. A barra I está apoiada no ponto N no vértice de um cone fixo no piso. O ponto A da barra I toca o vértice de um cone fixo no teto. O ponto B da barra I toca o ponto C, na extremidade da barra II. O ponto D, localizado na outra extremidade da barra II, está apoiado no vértice de um cone fixo no piso.



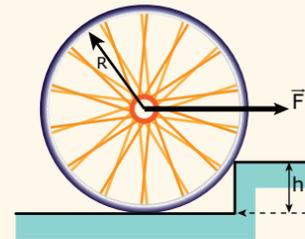
Desenho ilustrativo fora de escala

Os módulos das forças de contato sobre a barra I, nos pontos A e N, são, respectivamente,

- A) 75 N, 150 N.
- B) 150 N, 80 N.
- C) 80 N, 175 N.
- D) 75 N, 225 N.
- E) 75 N, 100 N.

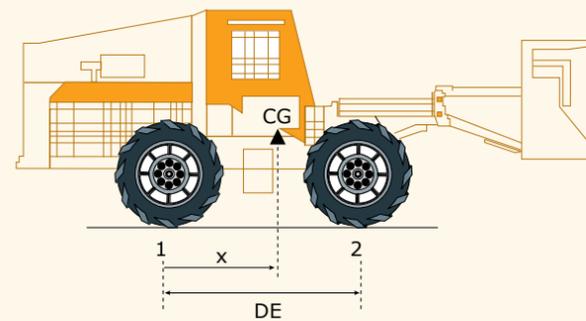
11. (UPE) A figura a seguir ilustra uma roda de raio R e massa m. Qual é o módulo da força horizontal F necessária para erguer a roda sobre um degrau de altura $h = R/2$, quando aplicada no seu eixo?

Considere a aceleração da gravidade g.



- A) $\frac{mg\sqrt{3}}{2}$
- B) $\frac{mg}{2}$
- C) $mg\sqrt{3}$
- D) mg
- E) $\frac{mg\sqrt{3}}{3}$

12. (Unesp) A figura mostra, em corte, um trator florestal "derrubador-amontoador" de massa 13 000 kg; x é a abscissa de seu centro de gravidade (CG). A distância entre seus eixos, traseiro e dianteiro, é $DE = 2,5 \text{ m}$.



LIMA, J. S. S. et al. Disponível em: <www.scielo.br/pdf/rarv/v28n6/23984.pdf>.

Admita que 55% do peso total do trator são exercidos sobre os pontos de contato dos pneus dianteiros com o solo (2) e o restante sobre os pontos de contato dos pneus traseiros com o solo (1). Determine a abscissa x do centro de gravidade desse trator em relação ao ponto 1. Adote $g = 10 \text{ m/s}^2$ e dê a resposta com dois algarismos significativos.

SEÇÃO ENEM

01. (Enem-2018) As pessoas que utilizam objetos cujo princípio de funcionamento é o mesmo do das alavancas aplicam uma força, chamada de força potente, em um dado ponto da barra, para superar ou equilibrar uma segunda força, chamada de resistente, em outro ponto da barra. Por causa das diferentes distâncias entre os pontos de aplicação das forças, potente e resistente, os seus efeitos também são diferentes. A figura mostra alguns exemplos desses objetos.



Em qual desses objetos a força potente é maior que a força resistente?

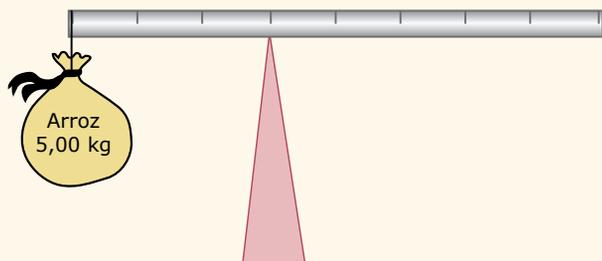
- A) Pinça.
- B) Alicate.
- C) Quebra-nozes.
- D) Carrinho de Mão.
- E) Abridor de garrafa.

02. (Enem-2018) Visando à melhoria estética de seu veículo, o vendedor de uma loja sugere ao consumidor que ele troque as rodas de seu automóvel de aro 15 polegadas para o aro 17 polegadas, o que corresponde a um diâmetro maior do conjunto roda e pneu.

Duas consequências provocadas por essa troca são:

- A) Elevar a posição do centro de massa do veículo tornando-o mais instável e aumentar a velocidade do automóvel em relação à indicada no velocímetro.
- B) Abaixar a posição do centro de massa do veículo tornando-o mais instável e diminuir a velocidade do automóvel em relação à indicada no velocímetro.
- C) Elevar a posição do centro de massa do veículo tornando-o mais estável e aumentar a velocidade do automóvel em relação à indicada no velocímetro.
- D) Abaixar a posição do centro de massa do veículo tornando-o mais estável e diminuir a velocidade do automóvel em relação à indicada no velocímetro.
- E) Elevar a posição do centro de massa do veículo tornando-o mais estável e diminuir a velocidade do automóvel em relação à indicada no velocímetro.

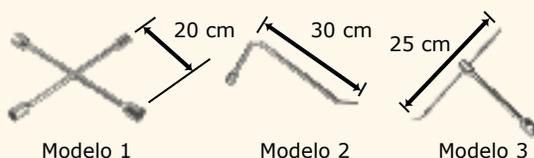
03. (Enem–2015) Em um experimento, um professor levou para a sala de aula um saco de arroz, um pedaço de madeira triangular e uma barra de ferro cilíndrica e homogênea. Ele propôs que fizessem a medição da massa da barra utilizando esses objetos. Para isso, os alunos fizeram marcações na barra, dividindo-a em oito partes iguais, e em seguida apoiaram-na sobre a base triangular, com o saco de arroz pendurado em uma de suas extremidades, até atingir a situação de equilíbrio.



Nessa situação, qual foi a massa da barra obtida pelos alunos?

- A) 3,00 kg.
- B) 3,75 kg.
- C) 5,00 kg.
- D) 6,00 kg.
- E) 15,00 kg.

04. (Enem) Retirar a roda de um carro é uma tarefa facilitada por algumas características da ferramenta utilizada, habitualmente denominada chave de roda. As figuras representam alguns modelos de chaves de roda:



Em condições usuais, qual desses modelos permite a retirada da roda com mais facilidade?

- A) 1, em função de o momento da força ser menor.
- B) 1, em função da ação de um binário de forças.
- C) 2, em função de o braço da força aplicada ser maior.
- D) 3, em função de o braço da força aplicada poder variar.
- E) 3, em função de o momento da força produzida ser maior.

GABARITO

Meu aproveitamento

Aprendizagem

Acertei _____ Errei _____

- 01. C
- 02. C
- 03. E
- 04. A
- 05. B
- 06. D
- 07. C
- 08. C

Propostos

Acertei _____ Errei _____

- 01. C
- 02. D
- 03. A
- 04. A
- 05. D
- 06. B
- 07. A
- 08. B
- 09. A
- 10. D
- 11. C
- 12. $x = 1,4 \text{ m}$

Seção Enem

Acertei _____ Errei _____

- 01. A
- 02. A
- 03. E
- 04. B



Total dos meus acertos: _____ de _____ . _____ %

Impulso e Quantidade de Movimento

O estudo dos diferentes movimentos observados na natureza passou a ser sistematizado no século XVII. Os filósofos da natureza acreditavam que o movimento total do Universo, ou melhor, a quantidade de movimento total do Universo deveria permanecer constante, uma vez que, para eles, o Universo era uma obra divina. Esses filósofos debatiam sobre que grandeza física deveria representar a quantidade de movimento de um corpo: sua velocidade, o produto da massa pela velocidade ou outra expressão qualquer.

Neste módulo, estudaremos duas grandezas vetoriais: a quantidade de movimento (\vec{Q}) e o impulso (\vec{I}). A análise dessas grandezas revelou uma nova abordagem dos princípios de conservação, até então desconhecida. O Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento mostrou-se muito útil para o estudo de colisões e de explosões, situações em que forças intensas e de curto período de duração atuam sobre os corpos.

Quantidade de movimento (\vec{Q})



A quantidade de movimento de uma partícula de massa m é definida pelo produto $m \cdot \vec{v}$, em que \vec{v} é a velocidade da partícula. O vetor quantidade de movimento é representado por \vec{Q} . Logo, $\vec{Q} = m \cdot \vec{v}$, de modo que o vetor quantidade de movimento tem as seguintes características:

Módulo: $|\vec{Q}| = m|\vec{v}|$

Direção: A direção de \vec{Q} é a mesma de \vec{v} .

Sentido: O sentido de \vec{Q} é o mesmo de \vec{v} .

No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de quantidade de movimento é o $\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Quantidade de movimento de um sistema

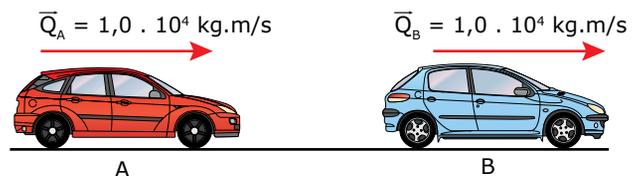
As ciências da natureza, entre elas a Física, apesar de reconhecerem a conexão entre vários elementos existentes na natureza, muitas vezes realizam uma separação desses elementos para melhor compreendê-los. Denominamos de sistema isolado uma parte ou uma região do Universo que, por suas condições particulares, pode ser considerada isolada do resto do Universo, para efeitos de estudo.

Ao trabalharmos com a quantidade de movimento de um sistema, é muito importante delimitarmos quais são os corpos que fazem parte desse sistema, uma vez que isso definirá quais são as forças internas e externas que agem sobre ele.

Consideremos o sistema constituído por dois carros, A e B, de massas iguais, $m = 1\,000\text{ kg}$, ambos se movendo com velocidade de 10 m/s (36 km/h). O módulo da quantidade de movimento de cada carro será igual a $1,0 \cdot 10^4\text{ kg}\cdot\text{m/s}$; porém, a quantidade de movimento total dos dois carros, A e B, dependerá da direção e do sentido em que eles estiverem se movendo. A figura a seguir mostra dois resultados possíveis, caso eles estejam movendo-se no mesmo sentido ou em sentidos opostos.

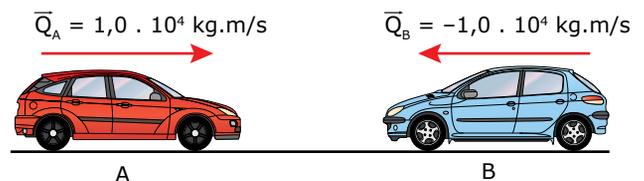
Se os carros possuem a mesma direção e o mesmo sentido:

$$\vec{Q}_{\text{total}} = \vec{Q}_A + \vec{Q}_B \Rightarrow |\vec{Q}_{\text{total}}| = 2,0 \cdot 10^4\text{ kg}\cdot\text{m/s}$$



Se os carros possuem a mesma direção e sentidos opostos:

$$\vec{Q}_{\text{total}} = \vec{Q}_A + \vec{Q}_B \Rightarrow |\vec{Q}_{\text{total}}| = 0$$



De maneira geral, para um sistema de n partículas, a quantidade de movimento total do sistema, \vec{Q} , será dada por:

$$\vec{Q} = \vec{Q}_1 + \vec{Q}_2 + \vec{Q}_3 + \dots + \vec{Q}_n$$

Para alterar a velocidade de uma partícula e, conseqüentemente, sua quantidade de movimento, é necessária a aplicação de uma força. Assim, ao exercermos uma força sobre um corpo, podemos alterar o módulo de sua velocidade, o que modificará, além de sua quantidade de movimento, o valor de sua energia cinética. Podemos também mudar somente a direção ou o sentido de sua velocidade, de forma que sua energia cinética permaneça constante, como mostrado no exemplo a seguir.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. Uma bola de massa 2 kg, que se move com velocidade constante de módulo igual a 3 m/s, choca-se com um muro e inverte o sentido de seu movimento, passando a mover-se com velocidade constante de módulo igual a -3 m/s. Determinar os módulos da quantidade de movimento e da energia cinética da bola antes e depois da colisão com o muro.

Resolução:

Usando as equações que expressam a quantidade de movimento e a energia cinética de um corpo, obtemos:

	Velocidade	Quant. de movimento	Energia cinética
Antes da colisão	+3 m/s	+6 kg.m/s	9 J
Após a colisão	-3 m/s	-6 kg.m/s	9 J

Observe que a energia cinética é uma grandeza escalar. Portanto, a inversão do movimento não alterou seu valor. Entretanto, a quantidade de movimento é uma grandeza vetorial. Dessa forma, a inversão do sentido do movimento alterou o sentido do vetor quantidade de movimento \vec{Q} .

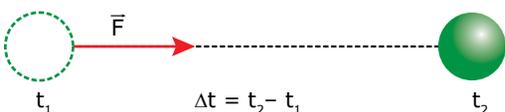
Impulso \vec{I} de uma força constante

Forças de grande intensidade, ainda que atuem por curtos intervalos de tempo, provocam grandes variações na quantidade de movimento dos corpos. Por exemplo, as forças que agem em um carro durante um teste de colisão (*crash test*), apesar de atuarem sobre o veículo durante um pequeno intervalo de tempo, provocam uma grande variação na quantidade de movimento do carro, pois o vetor quantidade de movimento do veículo, que possuía módulo não nulo, torna-se nulo em uma pequena fração de segundo.



Simon Yeo / Creative Commons

Considere uma força constante \vec{F} atuando sobre um corpo durante um intervalo de tempo Δt .



O impulso \vec{I} da força \vec{F} é a grandeza física que mede o efeito de uma força \vec{F} atuando sobre um corpo durante um intervalo de tempo Δt . O impulso \vec{I} é definido como o produto da força \vec{F} pelo intervalo de tempo Δt .

$$\vec{I} = \vec{F} \cdot \Delta t$$

Como Δt é uma grandeza escalar positiva, o vetor impulso possui as seguintes características:

Módulo: $|\vec{I}| = |\vec{F}| \Delta t$.

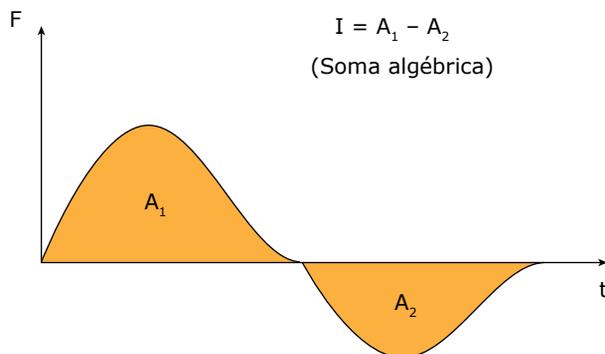
Direção: A direção de \vec{I} é a mesma de \vec{F} .

Sentido: O sentido de \vec{I} é o mesmo de \vec{F} .

A unidade do impulso no SI é o kg.m/s. Como 1 N é igual a 1 kg.m/s², outra unidade do impulso é o N.s.

Método gráfico para se calcular o impulso

A expressão $\vec{I} = \vec{F} \cdot \Delta t$, assim como a expressão usada para se calcular o valor do trabalho realizado por uma força ($W = F \cdot \cos \theta \cdot d$), somente pode ser utilizada se o módulo da força \vec{F} for constante, o que não acontece em muitas ocasiões. Quando o módulo da força \vec{F} for variável, podemos calcular o módulo do impulso \vec{I} por meio da área sob a curva do gráfico de força *versus* tempo. Nesse caso, o cálculo deve levar em consideração o sinal da força, ou seja, áreas acima do eixo do tempo têm sinal positivo, e áreas abaixo do eixo do tempo têm sinal negativo no cálculo algébrico do impulso.

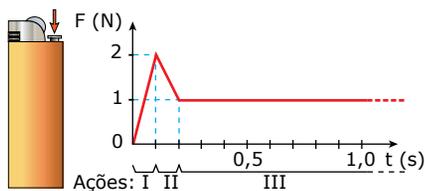


EXERCÍCIO RESOLVIDO

02. (FGV-SP) Ao acender um isqueiro, uma pessoa faz com que seu dedo exerça uma força variável direcionada a três ações distintas:

- I. É preciso vencer a força de atrito estático entre o rolete e a pedra contra ele pressionada.
- II. Superado o atrito estático, a força aplicada não mais necessita ser de tamanho tão elevado e, portanto, pode ser reduzida. Ainda em contato com o rolete, o dedo desce e começa a abaixar a alavanca que libera o gás.
- III. Uma vez livre do rolete e com a alavanca que libera o gás completamente pressionada, a força é mantida constante durante o tempo que for necessário manter a chama acesa.

O gráfico mostra, hipoteticamente, a intensidade da força exercida por uma pessoa no ato de acender um isqueiro, para cada ação descrita.



Nessas condições, o impulso da força exercida pelo dedão sobre o rolete do isqueiro e sobre a alavanca que libera o gás até seu completo abaixamento tem intensidade, em N.s, de

- A) 0,05. B) 0,10. C) 0,15. D) 0,20. E) 0,25.

Resolução:

Interpretando o enunciado, vemos que o impulso da força exercida pelo dedão deve ser calculado somente para as ações I e II, ou seja, para os trechos I e II do gráfico. Não podemos utilizar a equação $\vec{I} = \vec{F} \cdot \Delta t$ para calcular o impulso, pois o módulo da força não é constante. Logo, devemos determinar o módulo do impulso pelo método gráfico.

A área sob a curva do gráfico nos trechos I e II pode ser calculada dividindo-se a figura em 2 triângulos e 1 retângulo, ou seja:

$$I = A \Rightarrow I = \frac{0,1 \cdot 2}{2} + \frac{0,1 \cdot 1}{2} + 1 \cdot 0,1 \Rightarrow$$

$$I = 0,1 + 0,05 + 0,1 \Rightarrow$$

$$I = 0,25 \text{ N.s}$$

Teorema do impulso e da quantidade de movimento

A força resultante \vec{F}_R que atua sobre um corpo de massa m se relaciona com a aceleração \vec{a} adquirida por esse corpo por meio da 2ª Lei de Newton: $\vec{F}_R = m\vec{a}$. Portanto, sendo $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$, temos a equação do Teorema do Impulso e da Quantidade de Movimento:

$$\vec{F}_R = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \Rightarrow \vec{F}_R \Delta t = m \Delta \vec{v} \Rightarrow \vec{I}_R = m\vec{v} - m\vec{v}_0$$

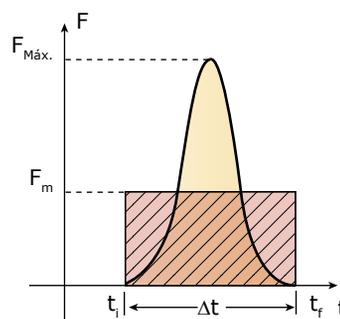
$$\vec{I}_R = \Delta \vec{Q}$$

De acordo com o resultado anterior, a variação da quantidade de movimento de um corpo em certo intervalo de tempo é igual ao impulso da força resultante que atua sobre ele nesse mesmo intervalo de tempo. Como mostrado anteriormente, as unidades N.s (impulso) e kg.m/s (quantidade de movimento) são equivalentes.

A relação entre o impulso e a quantidade de movimento permite analisar várias situações em que a quantidade de movimento de um corpo varia. Vamos nos deter a três situações: (1) a quantidade de movimento aumenta; (2) a quantidade de movimento diminui em um intervalo de tempo longo; (3) a quantidade de movimento diminui em um curto intervalo de tempo. Após a análise dessas três situações, estudaremos outras em que a quantidade de movimento de um corpo se conserva.

1. Aumentando a quantidade de movimento

Para que a quantidade de movimento de um corpo aumente, a força resultante que atua sobre ele deve ser não nula e deve possuir uma componente que atue sobre o corpo na mesma direção e no mesmo sentido do vetor quantidade de movimento desse. Um jogador de futebol, ao cobrar uma falta, tenta exercer sobre a bola uma força com a maior intensidade que ele puder e durante o maior tempo possível, pois, nessa situação, o aumento da quantidade de movimento (e a direção correta) pode significar um gol. As forças de grande intensidade que atuam em intervalos de tempo muito curtos são chamadas de forças impulsivas. O gráfico a seguir representa a intensidade de uma força impulsiva e, ao mesmo tempo, o valor da força média (F_m) que produziria a mesma variação da quantidade de movimento.



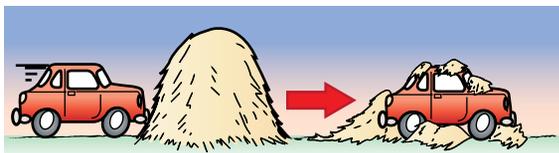
Representação gráfica de uma força impulsiva. A área hachurada possui o mesmo valor da área sob a curva de intensidade da força impulsiva.

Suponhamos que o gráfico anterior represente a intensidade da força que o pé do jogador exerce sobre a bola. O pé do jogador não exercerá força sobre a bola enquanto não houver contato entre o pé e a bola. Logo, durante esse intervalo de tempo, a força F será nula. No instante t_i , o pé do jogador entra em contato com a bola, e o módulo da força que o pé exerce sobre ela aumenta rapidamente até atingir um valor máximo. A partir desse instante, o contato do pé do jogador com a bola diminui e, consequentemente, o módulo da força exercida por ele também. A partir do instante t_f , não haverá mais contato entre o pé e a bola. Logo, a força impulsiva será nula. Quando nos referirmos a forças impulsivas, estaremos nos referindo aos valores médios dessas forças.

2. Diminuindo a quantidade de movimento em um grande intervalo de tempo

Se você estivesse dirigindo um carro que por algum motivo perdeu os freios, e tivesse de escolher entre jogá-lo em uma parede ou em um monte de capim, temos certeza de que o seu bom senso lhe diria para jogar o carro sobre o monte de capim. Em qualquer que fosse o local escolhido, a parede ou o monte de capim, a variação da quantidade de movimento do carro seria, rigorosamente, a mesma, de um valor $Q_0 = m \cdot v$ até um valor $Q = 0$.

Porém, na colisão com o monte de capim, o tempo no qual ocorre a variação da quantidade de movimento é maior e, portanto, o módulo da força impulsiva média é menor.



Lembre-se de que $\bar{I}_R = \Delta\bar{Q}$. Logo, $\bar{F}_R\Delta t = m\Delta\bar{v}$, ou seja, um tempo mais longo é "compensado" por uma força de menor intensidade.

Esse fato é conhecido e utilizado por pessoas que saltam, sejam paraquedistas, atletas ou bailarinos. Para reduzir a intensidade da força que os músculos devem exercer, essas pessoas procuram aumentar ao máximo o intervalo de tempo no qual a sua velocidade está variando, flexionando bem as pernas.

3. Diminuindo a quantidade de movimento em um pequeno intervalo de tempo

Quando os engenheiros tentam nos convencer de que as grossas chapas de ferro, de que eram feitos os carros antigos, são menos seguras que as atuais chapas mais finas, eles estão plenamente conscientes da física que está por trás dessa "aparente" contradição. As chapas mais finas vão se deformar mais, aumentando o tempo de duração do impacto, no caso de uma colisão. Por esse motivo, elas são mais seguras. Em uma colisão de menor duração, o módulo da força impulsiva média é o maior; portanto, as consequências da ação dessa força podem ser mais desastrosas.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

- 03.** A maior fabricante de cintos de segurança no Brasil simula as colisões que podem ocorrer com um motorista colocando um boneco (de massa 80 kg) em um carro de teste. O carro é lançado em uma barreira fixa a 50 km/h e para em menos de 0,5 s.



Brady Holt / Creative Commons

- A) Calcular o módulo da quantidade de movimento inicial e final do boneco.
- B) Qual o módulo da variação da quantidade de movimento do boneco?
- C) Qual o módulo do impulso exercido sobre o boneco?
- D) Os cintos são projetados para suportar uma força de até 3 000 kgf. Sabendo que o intervalo de tempo de uma colisão desse tipo é de 0,15 s, determinar se o cinto irá suportar ou não esse impacto.

Resolução:

- A) Para se calcular o módulo da quantidade de movimento inicial, Q_0 , e final, Q , basta utilizar a equação $Q = mv$, com os valores da velocidade inicial (50 km/h \cong 14 m/s) e da velocidade final (0 km/h):

$$Q_i = mv_0 = 80 \text{ kg} \cdot 14 \text{ m/s} = 1,1 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$Q_f = mv = 80 \text{ kg} \cdot 0 \text{ m/s} = 0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

- B) A variação da quantidade de movimento do boneco é dada por $\Delta Q = Q - Q_0$. Logo:

$$\Delta Q = Q - Q_0 = 0 \text{ kg} \cdot \text{m/s} - 1,1 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$\Delta Q = -1,1 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

- C) O módulo do impulso \bar{I} exercido sobre o boneco é igual ao módulo da variação da quantidade de movimento deste, pois $\bar{I} = \Delta\bar{Q}$. Logo, o impulso exercido sobre o boneco é igual a $1,1 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. é importante lembrar que o boneco é o nosso sistema e que esse impulso é exercido por um agente que não pertence ao sistema, o cinto de segurança. A força peso e a força normal tam bém são forças externas, mas essas se cancelam. Já o efeito da força de atrito, outra força externa, é muito pequeno e pode ser desprezado.

- D) O módulo da força que o cinto aplica sobre o boneco pode ser calculado pela relação $I = F\Delta t$.

$$F = \frac{1,1 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m/s}}{0,15 \text{ s}} = 7,3 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \Rightarrow$$

$$F = 7,3 \cdot 10^3 \text{ N} = 7,3 \cdot 10^2 \text{ kgf}$$

Como o cinto foi projetado para suportar 3 000 kgf, ele, sem dúvida, passou no teste.

- 04.** (UNIFESP) Uma menina deixa cair uma bolinha de massa de modelar que se choca verticalmente com o chão e para. A bolinha tem massa 10 g e atinge o chão com velocidade de 3,0 m/s.

Pode-se afirmar que o impulso exercido pelo chão sobre essa bolinha é vertical, tem sentido para

- A) cima e módulo $3,0 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{s}$.
- B) baixo e módulo $3,0 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{s}$.
- C) cima e módulo $6,0 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{s}$.
- D) baixo e módulo $6,0 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{s}$.
- E) cima e módulo igual a zero.

Resolução:

A força exercida pelo chão sobre a bolinha possui direção vertical e sentido para cima. Logo, o impulso dessa força também será vertical para cima.

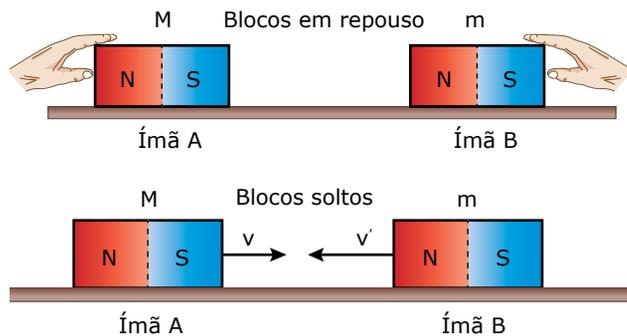
Para se calcular o módulo do impulso, basta utilizar o Teorema do Impulso e da Quantidade de Movimento. Considerando positivo o sentido vertical para cima, temos:

$$I = \Delta Q \Rightarrow I = mv - mv_0 \Rightarrow I = m(v - v_0) \Rightarrow$$

$$I = 1,0 \cdot 10^{-2} [0 - (-3,0)] \Rightarrow$$

$$I = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ N}\cdot\text{s}$$

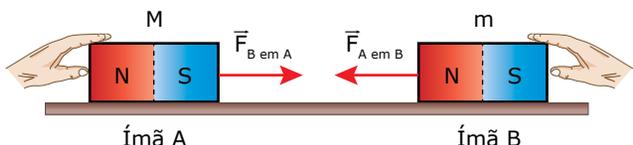
Assim, a alternativa correta é a A.



Conservação da quantidade de movimento

Sistema, forças internas e forças externas

Consideremos um sistema constituído por dois ímãs. Esses ímãs são colocados sobre uma superfície horizontal sem atrito e atraem-se mutuamente, como mostra a figura a seguir. Uma pessoa, externa ao sistema, segura os ímãs para que eles não entrem em movimento.



Os ímãs A e B constituem um sistema de corpos. As forças de interação entre os ímãs são forças internas ao sistema e não alteram a quantidade de movimento desse sistema.

Denominamos forças internas as forças de interação entre os corpos do sistema. No caso apresentado, as forças magnéticas de atração entre os ímãs são as forças internas, uma vez que os ímãs A e B constituem o sistema em estudo.

Já a força peso e a força de reação normal, tanto em A quanto em B, são forças externas. Essas forças são resultado da interação entre os ímãs e a Terra (no caso da força peso) e da interação entre os ímãs e a superfície da mesa (no caso da força normal). Como a Terra e a superfície da mesa não fazem parte do sistema, as forças peso e normal são forças externas.

Observa-se que, ao liberar os ímãs, eles se atraem e adquirem uma velocidade inversamente proporcional à sua massa, isto é, o de maior massa adquire, proporcionalmente, a menor velocidade, já que a força resultante sobre ambos tem o mesmo módulo. Isso tem uma importante consequência: a quantidade de movimento de cada ímã se altera devido à ação da força magnética, porém a quantidade de movimento total do sistema não varia.

Forças internas podem alterar a quantidade de movimento individual de cada partícula, porém a quantidade de movimento total do sistema permanece constante.

	Blocos em repouso	Blocos soltos
Força	$ \vec{F}_{AB} = \vec{F}_{BA} $	$ \vec{F}_{AB} = \vec{F}_{BA} $
Massa	$m_A > m_B$	$m_A > m_B$
Aceleração	$ \vec{a}_A = \vec{a}_B = 0$	$ \vec{a}_A < \vec{a}_B $
Velocidade	$ \vec{v}_A = \vec{v}_B = 0$	$ \vec{v}_A < \vec{v}_B $
Quantidade de movimento	$ \vec{Q}_A = \vec{Q}_B = 0$	$ \vec{Q}_A = - \vec{Q}_B \Rightarrow \vec{Q}_{total} = 0$

Apesar de termos exemplificado um caso simples, o resultado anterior é válido para todas as situações em que o sistema está isolado, isto é, quando o sistema não está sujeito a forças externas.

$$\Sigma \vec{F}_{externas} = 0 \Rightarrow |\vec{I}_{externo}| \Rightarrow |\Delta \vec{Q}| = 0 \Rightarrow \vec{Q}_{antes} = \vec{Q}_{depois}$$

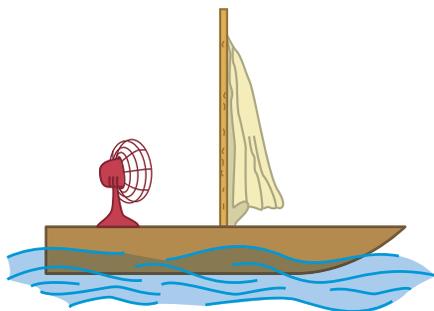
O resultado anterior é conhecido como Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento. Esse princípio nos mostra que, para que a quantidade de movimento do sistema se conserve, é necessário que este esteja isolado. Dizemos que um sistema está isolado de forças externas nos seguintes casos:

- Não atuam forças externas sobre esse sistema;
- A resultante das forças externas que atuam sobre o sistema é nula;
- A resultante das forças externas atuantes sobre o sistema, apesar de não nula, possui módulo desprezível, se comparado aos módulos das forças internas que atuam no sistema.

O Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento de um sistema é um dos princípios fundamentais da Física, conjuntamente com outros princípios de conservação, como o Princípio da Conservação da Energia e o Princípio da Conservação da Carga Elétrica.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

05. (UFMG) A figura mostra um ventilador que está dentro de um barco a vela.

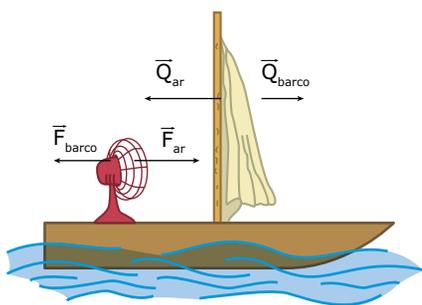


Suponha que o ventilador seja ligado e que o vento provocado por ele atinja apenas a área da vela.

Responder se, dessa forma, é possível o barco movimentar-se. Justificar sua resposta.

Resolução:

A ação do ventilador sobre a vela do barco é feita através do ar. O ventilador empurra o ar e, por consequência, o ar empurra o ventilador com uma força de mesmo módulo e direção, porém, em sentido contrário. Ao incidir sobre a vela, o ar é refletido com uma quantidade de movimento Q_{ar} . Como inicialmente o sistema estava em repouso ($Q = 0$), para que essa situação se conserve após a interação do ar com a vela, o barco deve adquirir uma quantidade de movimento $Q_{barco} = -Q_{ar}$ como mostra a figura a seguir.



Comentário:

A explicação anterior não é válida para o caso em que a vela é plana e rígida; isso acontece porque nesse caso o ar que incide sobre a vela será refletido apenas lateralmente, fazendo com que o barco permaneça em repouso.

Colisões, choques e explosões

Colisões, choques e explosões são situações nas quais as forças internas são muito grandes e atuam em curtos intervalos de tempo, ou seja, são situações em que a aplicação do Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento de um sistema mostra-se muito útil.

Nas colisões ideais, não há dissipação de energia mecânica e, nesse caso, temos uma colisão perfeitamente elástica, na qual a energia cinética total do sistema se conserva.

Nas situações reais, parte da energia mecânica é convertida em outras formas de energia, como som, calor e trabalho, este realizado pelas forças de deformação. Denominamos colisão inelástica ou parcialmente elástica aquela em que a energia mecânica dos corpos que se chocam não se conserva. Existem colisões em que os corpos se movem juntos após o choque e, nesse caso, a dissipação de energia mecânica é a maior possível. Chamamos esse tipo de colisão de colisão completamente inelástica.



Colisões como as que ocorrem em mesas de sinuca se aproximam muito de uma colisão perfeitamente elástica.

Apesar de o valor da energia mecânica sofrer uma redução na maior parte das colisões observadas, o módulo da quantidade de movimento dos sistemas isolados sempre permanece constante. As forças internas ao sistema possuem módulo muitas vezes superior ao das outras forças atuantes e, por isso, podemos afirmar que, imediatamente antes e imediatamente depois da colisão, o módulo da quantidade de movimento total do sistema é o mesmo. Entretanto, após a colisão, os efeitos das forças externas podem passar a ser significativos, o que provocará uma variação na quantidade de movimento do sistema.

Coefficiente de restituição

A perda de energia cinética em uma colisão entre dois corpos está associada à diminuição da velocidade relativa entre eles. Assim, podemos usar a razão entre os módulos da velocidade relativa de afastamento após o choque ($v_{relat. \text{afast.}}$) e da velocidade relativa de aproximação antes do choque ($v_{relat. \text{aprox}}$) como uma medida da perda de energia cinética do sistema. Essa razão é conhecida como coeficiente de restituição (e).

$$e = \frac{v_{relat. \text{afast.}}}{v_{relat. \text{aprox.}}}$$

Nas colisões elásticas, o módulo da velocidade relativa de afastamento após o choque é igual ao módulo da velocidade relativa de aproximação antes do choque. Portanto, o coeficiente de restituição é igual a um ($e = 1$).

Nas colisões inelásticas, o módulo da velocidade relativa de afastamento após o choque é menor que o módulo da velocidade relativa de aproximação antes do choque. Portanto, o coeficiente de restituição é menor que um ($e < 1$).

O menor valor do coeficiente de restituição é zero ($e = 0$) e ocorre quando a velocidade relativa de afastamento após o choque é nula, ou seja, quando os corpos, após o choque, permanecem juntos (colisão completamente inelástica).



Quantidade de movimento em duas dimensões

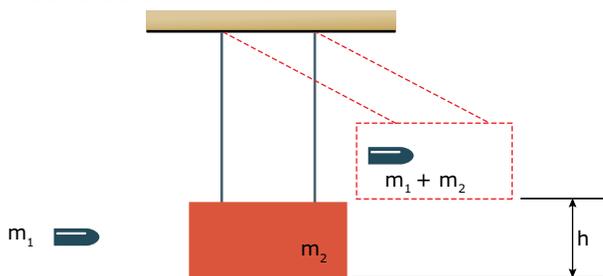
Veja exemplos de diversos casos em que há conservação da quantidade de movimento em duas dimensões. Além disso, você poderá testar seus conhecimentos resolvendo as cinco questões apresentadas na animação. Aproveite também para aprender o funcionamento do pêndulo de Newton. Bons estudos!



EXERCÍCIOS DE APRENDIZAGEM

EXERCÍCIO RESOLVIDO

- 06.** (Unesp) O pêndulo balístico é um sistema utilizado para medir a velocidade de um projétil que se move rapidamente. O projétil de massa m_1 é disparado em direção a um bloco de madeira de massa m_2 , inicialmente em repouso, suspenso por dois fios, como ilustrado na figura. Após o impacto, o projétil se acopla ao bloco e ambos sobem a uma altura h .



- A) Considerando que haja conservação da energia mecânica, determinar o módulo da velocidade do conjunto bloco-projétil após o impacto.
 B) A partir do Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento, determinar a velocidade inicial do projétil.

Resolução:

- A) Durante a subida, após o impacto, o valor da energia mecânica se conserva, ou seja, a energia cinética do sistema bloco-projétil se transforma integralmente em energia potencial gravitacional. Logo:

$$E_c \text{ (após a colisão)} = E_p \text{ (ponto mais alto)}$$

$$\frac{(m_1 + m_2)v^2}{2} = (m_1 + m_2)gh \Rightarrow$$

$$v = \sqrt{2gh}$$

- B) Imediatamente antes da colisão e imediatamente após a colisão, o módulo da quantidade de movimento do sistema bloco-projétil é o mesmo, uma vez que o sistema está isolado. Logo:

$$Q_{\text{total antes}} = Q_{\text{total depois}} \Rightarrow m_1 v_{\text{projétil}} = (m_1 + m_2) v_{\text{conjunto}} \Rightarrow$$

$$v_{\text{projétil}} = \frac{(m_1 + m_2)}{m_1} v_{\text{conjunto}} \Rightarrow$$

$$v_{\text{projétil}} = \frac{(m_1 + m_2)}{m_1} \sqrt{2gh}$$

- 01.** (CEFET-MG) Dois meninos arremessam suas bolinhas de gude (vidro) frontalmente uma contra a outra. Se, antes de se chocarem, elas se moviam com energias cinéticas E_A e E_B e com quantidades de movimento q_A e q_B , então, as quantidades de movimento e a energia cinética do conjunto formado por essas bolinhas, supondo uma colisão inelástica, serão, respectivamente, iguais a _____ e _____.

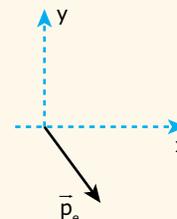
As expressões que completam, respectivamente, as lacunas de forma correta são

- A) $q_A + q_B$ / igual a $E_A - E_B$.
 B) $q_A + q_B$ / igual a $E_A + E_B$.
 C) $q_A - q_B$ / igual a $E_A + E_B$.
 D) $q_A + q_B$ / menor que $E_A + E_B$.
 E) $q_A - q_B$ / menor que $E_A + E_B$.

- 02.** (UnirG-TO-2016) A procura por um estilo de vida saudável tem levado um grande percentual da população à prática de atividades físicas regulares. Contudo, essa prática precisa ser orientada para se evitar lesões. Segundo o Portal Net, a força máxima tolerada pelo tendão de Aquiles é de 4 000 N.

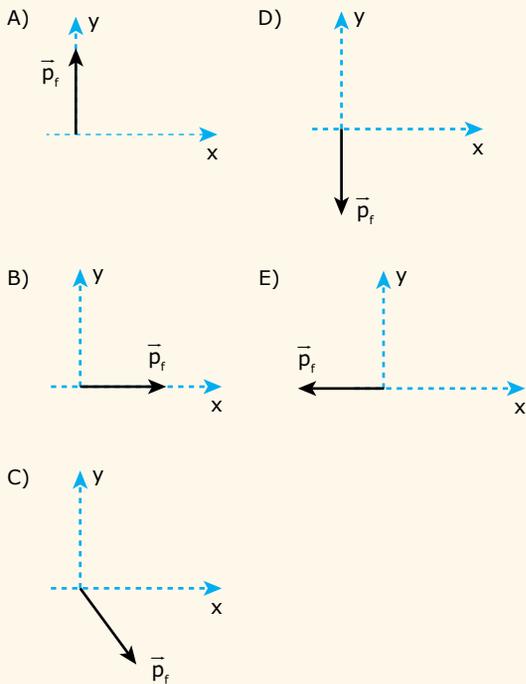
- A) Se uma pessoa de 70 kg dá um salto de 5 cm de altura, e a colisão com o solo – tempo em que a força excede a força normal – dure 0,2 s, a força média de impacto nos pés dessa pessoa será 4 000 N.
 B) A força de impacto de movimentos executados dentro d'água não diminui, se comparada à força de impacto de movimentos executados fora d'água.
 C) A função do uso de tênis é equivalente ao do *airbag* nos carros: aumentar o tempo de colisão, com a finalidade de diminuir a intensidade do impacto.
 D) O impacto não está relacionado com a lei da ação e reação.

- 03.** (FUVEST-SP) Um fóton, com quantidade de movimento na direção e sentido do eixo x , colide com um elétron em repouso. Depois da colisão, o elétron passa a se mover com quantidade de movimento p_e , no plano xy , como ilustra a figura a seguir.

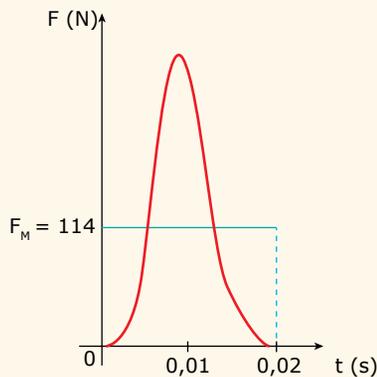


Dos vetores p_f a seguir, o único que poderia representar a direção e o sentido da quantidade de movimento do fóton, após a colisão, é

Note e Adote: O princípio da conservação da quantidade de movimento é válido também para a interação entre os fótons e elétrons.



04. (FAMERP-SP-2015) Uma bola de tênis, de massa 60 g, se chocou com uma parede vertical. O gráfico representa a força, em função do tempo, exercida pela parede sobre a bola, no qual F_M é o valor médio da força no intervalo de tempo entre 0 s e 0,02 s.



Sabendo que a velocidade da bola, imediatamente antes da colisão, era perpendicular à superfície da parede com valor 20 m/s e que, após a colisão, continua perpendicular à parede, é correto afirmar que a velocidade da bola, em m/s, imediatamente após a colisão foi

- A) 24.
- B) 20.
- C) 18.
- D) 38.
- E) 15.

05. (UEFS-BA-2015) Quando uma bola de massa $m = 120,0$ g é atingida por um bastão, sua velocidade varia de +25,0 m/s para -25,0 m/s.

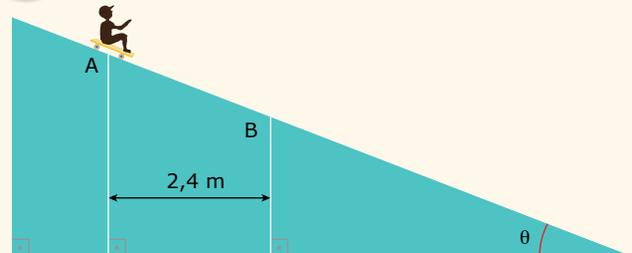
Considerando-se que a bola fica em contato com o bastão por 1,5 ms, é correto afirmar que o módulo da força média exercida sobre a bola pelo bastão, em kN, é igual a

- A) 1.
- B) 2.
- C) 3.
- D) 4.
- E) 5.

06. (FUVEST-SP) Um trabalhador de massa m está em pé, em repouso, sobre uma plataforma de massa M . O conjunto se move, sem atrito, sobre trilhos horizontais e retilíneos, com velocidade de módulo constante v . Num certo instante, o trabalhador começa a caminhar sobre a plataforma e permanece com velocidade de módulo v , em relação a ela, e com sentido oposto ao do movimento dela em relação aos trilhos. Nessa situação, o módulo da velocidade da plataforma em relação aos trilhos é:

- A) $(2m + M) v / (m + M)$
- B) $(2m + M) v / M$
- C) $(2m + M) v / m$
- D) $(M - m) v / M$
- E) $(m + M) v / (M - m)$

07. (Mackenzie-SP) Certo menino encontra-se sentado sobre uma prancha plana e desce por uma rampa inclinada, conforme ilustração.



O coeficiente de atrito cinético entre a prancha e a rampa é $\mu_c = 0,25$, $\cos \theta = 0,8$, $\sin \theta = 0,6$ e $g = 10 \text{ m/s}^2$. Sabe-se que o sistema menino-prancha possui massa de 50 kg e que, ao passar pelo ponto A, sua velocidade era 1,0 m/s. A variação de quantidade de movimento sofrida por esse conjunto entre os pontos A e B foi

- A) 100 N.s.
- B) 200 N.s.
- C) 300 N.s.
- D) 400 N.s.
- E) 500 N.s.

- 08.** (Mackenzie-SP) Um caminhão a 90 km/h colide com a traseira de um automóvel que viaja com movimento de mesmo sentido e velocidade de 54 km/h. A massa do caminhão é o triplo da massa do automóvel. Imediatamente após a colisão, os dois veículos caminham juntos, com velocidade de
- A) 66 km/h.
 - B) 68 km/h.
 - C) 72 km/h.
 - D) 78 km/h.
 - E) 81 km/h.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

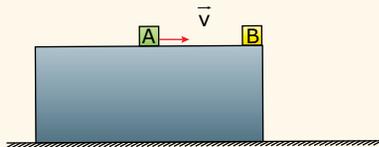


- 01.** (Mackenzie-SP) Em uma competição de tênis, a raquete do jogador é atingida por uma bola de massa 60 g, com velocidade horizontal de 40 m/s. A bola é rebatida na mesma direção e sentido contrário com velocidade de 30 m/s.

Se o tempo de contato da bola com a raquete é de 0,01 s, a intensidade da força aplicada pela raquete à bola é

- A) 60 N.
- B) 120 N.
- C) 240 N.
- D) 420 N.
- E) 640 N.

- 02.** (UFG-GO) A figura a seguir ilustra uma situação de colisão em que as forças dissipativas podem ser desprezadas.

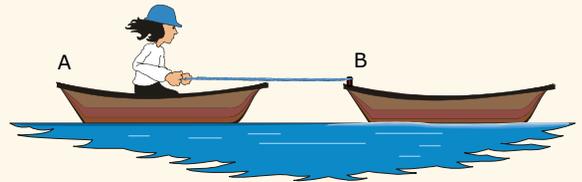


O bloco A, de massa M_A , desliza sobre a plataforma horizontal com velocidade \vec{v} e realiza uma colisão frontal, perfeitamente elástica, com o bloco B, de massa M_B , inicialmente em repouso. Pode-se afirmar que, após a colisão,

- A) se $M_A > M_B$, somente o bloco B cairá.
- B) se $M_A = M_B$, os dois blocos cairão.
- C) se $M_A = M_B$, o bloco B cairá e o bloco A ficará parado.
- D) os dois blocos cairão, independentemente dos valores de M_A e M_B .

- 03.** (UFSC) Na situação apresentada na figura a seguir, despreze o efeito do atrito.

Estando todas as partes em repouso no início, uma pessoa puxa com sua mão uma corda que está amarrada ao outro barco. Considere que o barco vazio (B) tenha a metade da massa do barco mais a pessoa que formam o conjunto (A).

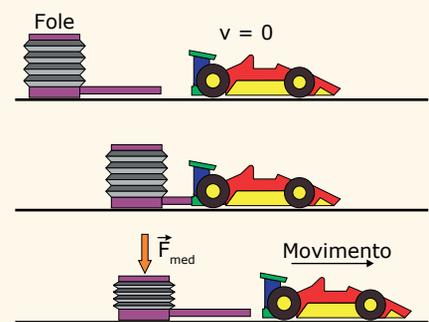


Assinale a(s) proposição(ões) correta(s).

- 01. Após a pessoa puxar a corda, ambos os barcos se moverão com a mesma velocidade.
- 02. Após o puxar da corda, o módulo da velocidade de B será o dobro do módulo da velocidade de A.
- 04. É impossível fazer qualquer afirmação sobre as velocidades das partes do sistema ao se iniciar o movimento.
- 08. Após o puxar da corda, as quantidades de movimento dos barcos apresentarão dependência entre si.
- 16. Ao se iniciar o movimento, a energia cinética de A é sempre igual à energia cinética de B.

Soma ()

- 04.** (Famema-SP-2016) Um brinquedo consiste em um fole acoplado a um tubo plástico horizontal que se encaixa na traseira de um carrinho, inicialmente em repouso. Quando uma criança pisa no fole, comprimindo-o até o final, o ar expelido impulsiona o carrinho.



Considere que a massa do carrinho seja de 300 g, que o tempo necessário para que a criança comprima completamente o fole seja de 0,2 s e que ao final desse intervalo de tempo o carrinho adquira uma velocidade de 8 m/s. Admitindo desprezíveis todas as forças de resistência ao movimento do carrinho, o módulo da força média (F_{med}) aplicada pelo ar expelido pelo tubo sobre o carrinho, nesse intervalo de tempo, é igual a

- A) 10 N.
- B) 14 N.
- C) 12 N.
- D) 8 N.
- E) 16 N.

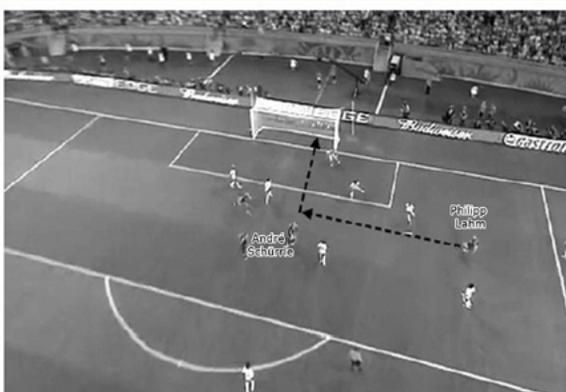
05. (CEFET-MG) Uma bola de futebol de massa $m = 0,20 \text{ Kg}$ é chutada contra a parede a uma velocidade de $5,0 \text{ m/s}$. Após o choque, ela volta a $4,0 \text{ m/s}$. A variação da quantidade de movimento da bola durante o choque, em kg.m/s , é igual a

- A) 0,2.
- B) 1,0.
- C) 1,8.
- D) 2,6.

06. (UDESC-2016) Um foguete, durante a sua subida, queima combustível a uma taxa de $2,8 \text{ kg/s}$. Sabendo-se que o foguete expele os gases da queima a uma velocidade constante de $3,50 \text{ km/s}$ e que a massa inicial do conjunto é de 800 kg , então a aceleração inicial do foguete é de:

- A) $12,25 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$
- B) $12,25 \text{ m/s}^2$
- C) $12,25 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2$
- D) 640 m/s^2
- E) $81,63 \text{ m/s}^2$

07. (UEPA-2015) O jogo Brasil \times Alemanha, na semifinal da Copa do Mundo de 2014, ficou bastante marcado na memória dos brasileiros. Aos 23 minutos do segundo tempo, o meio-campo Philipp Lahm recebeu a bola dentro da área brasileira e cruzou para o atacante André Schürrle, que rebateu para fazer o 6º gol alemão. Admita que o atacante tenha chutado a bola de massa m , fazendo com que ela se movesse em uma direção perpendicular à direção do passe, mantendo a mesma velocidade escalar v . Nesse sentido, o valor do impulso transmitido à bola pelo atacante foi igual a:



Disponível em: <<http://www.cienciahoje.uol.com.br>> (Adaptação).

- A) mv
- B) $\sqrt{3} mv$
- C) \sqrt{mv}
- D) $\sqrt{2} mv$
- E) $2m^2v^2$

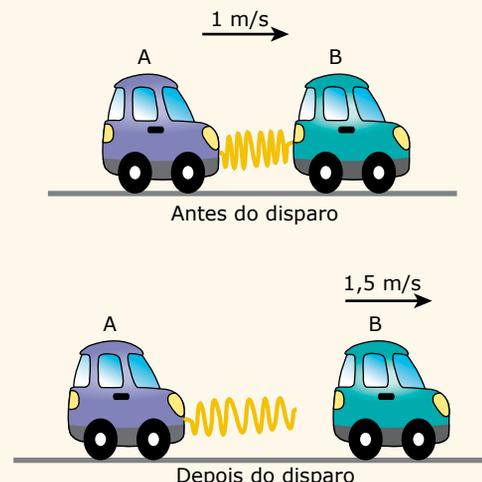
08. (UFG-GO) Um corpo é lançado do chão com velocidade v e ângulo de inclinação de 60° com a horizontal. Quando atinge a altura máxima, colide inelasticamente com outro corpo de mesma massa e velocidade v , que estava em queda livre. Considerando desprezíveis as forças externas durante a colisão, o módulo da velocidade imediatamente após o choque é

- A) $\left(\frac{\sqrt{5}}{4}\right)v$.
- B) $\left(\frac{\sqrt{3}}{8}\right)v$.
- C) $(3/4)v$.
- D) $\left(\frac{\sqrt{3}}{4}\right)v$.
- E) $(3/8)v$.

09. (FGV-2015) Dois estudantes da FGV divertem-se jogando sinuca, após uma exaustiva jornada de estudos. Um deles impulsiona a bola branca sobre a bola vermelha, idênticas exceto pela cor, inicialmente em repouso. Eles observam que, imediatamente após a colisão frontal, a bola branca para e a vermelha passa a se deslocar na mesma direção e no mesmo sentido da velocidade anterior da bola branca, mas de valor 10% menor que a referida velocidade. Sobre esse evento, é correto afirmar que houve conservação de momento linear do sistema de bolas, mas sua energia mecânica diminuiu em

- A) 1,9%.
- B) 8,1%.
- C) 10%.
- D) 11,9%.
- E) 19%.

10. (Unesp) Um brinquedo é constituído por dois carrinhos idênticos, A e B, de massas iguais a 3 kg , e por uma mola de massa desprezível, comprimida entre eles e presa apenas ao carrinho A. Um pequeno dispositivo, também de massa desprezível, controla um gatilho que, quando acionado, permite que a mola se distenda.

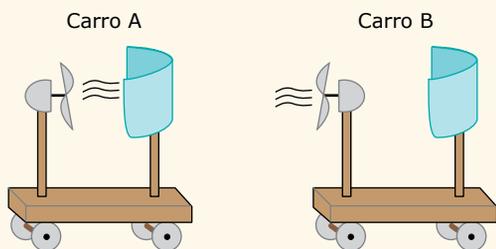


Antes de o gatilho ser acionado, os carrinhos e a mola moviam-se juntos, sobre uma superfície plana horizontal sem atrito, com energia mecânica de 3,75 J e velocidade de 1 m/s, em relação à superfície. Após o disparo do gatilho, e no instante em que a mola está totalmente distendida, o carrinho B perde contato com ela e sua velocidade passa a ser de 1,5 m/s, também em relação a essa mesma superfície.

Nas condições descritas, calcule a energia potencial elástica inicialmente armazenada na mola antes de o gatilho ser disparado e a velocidade do carrinho A, em relação à superfície, assim que B perde contato com a mola, depois de o gatilho ser disparado.

SEÇÃO ENEM

01. (Enem-2018) Em desenhos animados é comum vermos a personagem tentando impulsionar um barco soprando ar contra a vela para compensar a falta de vento. Algumas vezes usam o próprio fôlego, foles ou ventiladores. Estudantes de um laboratório didático resolveram investigar essa possibilidade. Para isso, usaram dois pequenos carros de plástico, A e B, instalaram sobre estes pequenas ventoinhas e fixaram verticalmente uma cartolina de curvatura parabólica para desempenhar uma função análoga à vela de um barco. No carro B inverteu-se o sentido da ventoinha e manteve-se a vela, a fim de manter as características físicas do barco, massa e formato da cartolina. As figuras representam os carros produzidos. A montagem do carro A busca simular a situação dos desenhos animados, pois a ventoinha está direcionada para a vela.

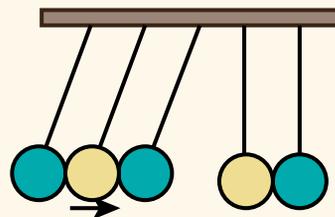


Com os carros orientados de acordo com as figuras, os estudantes ligaram as ventoinhas, aguardaram o fluxo de ar ficar permanente e determinaram os módulos das velocidades médias dos carros A (V_A) e B (V_B) para o mesmo intervalo de tempo.

A respeito das intensidades das velocidades médias e do sentido de movimento do carro A, os estudantes observaram que:

- A) $V_A = 0$; $V_B > 0$; o carro A não se move.
- B) $0 < V_A < V_B$; o carro se move para a direita.
- C) $0 < V_A < V_B$; o carro A se move para a direita.
- D) $0 < V_B < V_A$; o carro A se move para a direita.
- E) $0 < V_B < V_A$; o carro A se move para a esquerda.

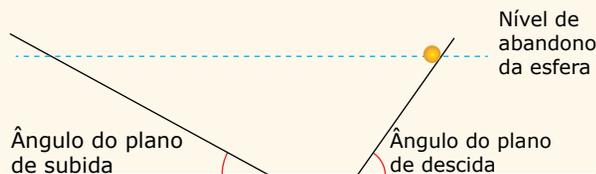
02. (Enem) O pêndulo de Newton pode ser constituído por cinco pêndulos idênticos suspensos em um mesmo suporte. Em um dado instante, as esferas de três pêndulos são deslocadas para a esquerda e liberadas, deslocando-se para a direita e colidindo elasticamente com as outras duas esferas, que inicialmente estavam paradas.



O movimento dos pêndulos após a primeira colisão está representado em:

- A)
- B)
- C)
- D)
- E)

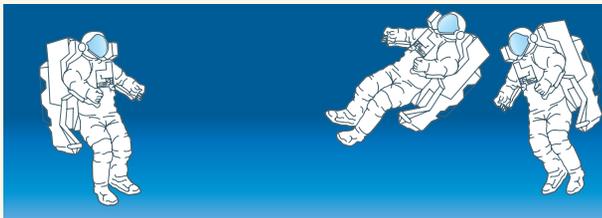
- 03.** (Enem) Para entender os movimentos dos corpos, Galileu discutiu o movimento de uma esfera de metal em dois planos inclinados sem atritos e com a possibilidade de se alterarem os ângulos de inclinação, conforme mostra a figura. Na descrição do experimento, quando a esfera de metal é abandonada para descer um plano inclinado de um determinado nível, ela sempre atinge, no plano ascendente, no máximo, um nível igual àquele em que foi abandonada.



GALILEU e o plano inclinado. Disponível em: <www.fisica.ufpb.br>. Acesso em: 21 ago. 2012 (Adaptação).

Se o ângulo de inclinação do plano de subida for reduzido a zero, a esfera

- A) manterá sua velocidade constante, pois o impulso resultante sobre ela será nulo.
 - B) manterá sua velocidade constante, pois o impulso da descida continuará a empurrá-la.
 - C) diminuirá gradativamente a sua velocidade, pois não haverá mais impulso para empurrá-la.
 - D) diminuirá gradativamente a sua velocidade, pois o impulso resultante será contrário ao seu movimento.
 - E) aumentará gradativamente a sua velocidade, pois não haverá nenhum impulso contrário ao seu movimento.
- 04.** Suponha que existam três astronautas do lado de fora de uma nave espacial e que eles decidam brincar de se arremessarem. Todos eles possuem o mesmo peso na Terra e todos são igualmente fortes. O primeiro astronauta arremessa o segundo para o terceiro e a brincadeira tem início. Quantas arremessadas a mais ainda será possível realizar?



- A) 1
- B) 2
- C) 3
- D) 4
- E) 5

- 05.** Em 13 de janeiro de 1920, o jornal *The New York Times* publicou um editorial atacando Robert Goddard – um físico que propunha utilizar foguetes para viagens espaciais. Dizia o editorial:

O que o Prof. Goddard, com sua "cadeira" no Clark College, e seus colaboradores do Instituto Smithsonian não conhecem é a relação entre ação e reação e a necessidade de ter algo melhor que o vácuo contra o qual reagir – o que dizem é um absurdo. Naturalmente, ele só parece não ter o conhecimento diariamente ensinado nas escolas de Ensino Médio.

O erro científico do editorial foi

- A) definir de forma equivocada o vácuo que, na Física Moderna, não significa ausência de matéria.
- B) desconsiderar que componentes do foguete são empurradas para trás durante o lançamento.
- C) esquecer que um foguete tem que empurrar algo material para que consiga se mover.
- D) impedir que ideias não testadas pudessem ser colocadas à prova experimental para então serem debatidas.
- E) não conhecer as exceções de aplicação das Leis de Newton para os movimentos, em particular a 3ª Lei.

GABARITO

Meu aproveitamento

Aprendizagem

Acertei _____ Errei _____

- 01. D 03. A 05. D 07. B
- 02. C 04. C 06. A 08. E

Propostos

Acertei _____ Errei _____

- 01. D
- 02. C
- 03. Soma = 10
- 04. C
- 05. C
- 06. B
- 07. D
- 08. A
- 09. E
- 10. $E_{\text{pel}} = 0,75 \text{ J}$
 $v'_A = 0,5 \text{ m/s}$

Seção Enem

Acertei _____ Errei _____

- 01. B 03. A 05. B
- 02. C 04. A



Total dos meus acertos: _____ de _____ . _____ %

Difração e Interferência de Ondas

A difração é um fenômeno muito interessante. Diferentemente da reflexão, a difração é uma característica estritamente ondulatória, ou seja, apenas as ondas, ou partículas que apresentem comportamento ondulatório, podem sofrer difração. Esse fenômeno é comum em nosso cotidiano e é responsável por uma série de efeitos que percebemos no dia a dia. O fato de ouvirmos uma pessoa que se encontra do outro lado de um muro, por exemplo, é uma consequência da difração.

DIFRAÇÃO DE ONDAS

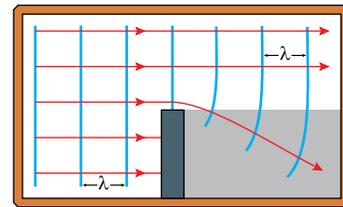
A difração é um fenômeno estritamente ondulatório e muito complexo. Por isso, vamos fazer uma análise semiquantitativa, procurando descrevê-lo com pouca abordagem matemática.

Antes de iniciar, vamos entender o Princípio de Huygens, pois ele é a explicação para a difração. Considere duas ondas, uma reta e outra circular, se deslocando para cima, conforme mostrado a seguir. Segundo Huygens, cada ponto da onda se comporta como se fosse uma fonte secundária (F) pontual de ondas circulares. Dessa forma, a onda seria tangente a todas as ondas circulares formadas pelas fontes secundárias. Logo, a onda, num momento posterior ao mostrado na figura, estaria acima da posição atual, tangenciando as ondas circulares naquele instante.



Considere uma onda reta, de comprimento de onda λ , que se propaga para a direita na água contida em uma cuba de ondas. Veja a figura a seguir. As cristas e os raios de onda estão representados pelas linhas azuis e vermelhas, respectivamente. Se a onda é parcialmente interrompida por um obstáculo, uma parte dela é refletida (não mostrada na figura) e a outra prossegue. Era de se esperar que a parte não refletida continuasse o seu trajeto na mesma direção de incidência. Entretanto, não é o que acontece. A região em destaque cinza, à direita da figura, corresponde à "sombra" do obstáculo. Observe que a parte da onda não interrompida contorna o obstáculo e invade a região de "sombra". Esse fenômeno se chama **difração** e pode ocorrer quando a onda encontra um obstáculo, um orifício ou uma fenda entre dois obstáculos.

A velocidade, a frequência e o comprimento da onda não sofrem alteração quando ela se difrata, apenas sua forma se modifica. Vale destacar que outros fenômenos também podem alterar a forma da onda.

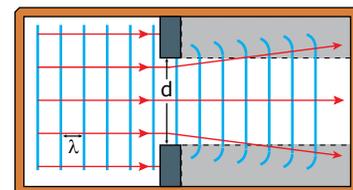


Observe que a região da onda na parte inferior da figura anterior é refletida pelo obstáculo. Assim, o equilíbrio que havia entre as ondas formadas pelas fontes secundárias foi quebrado na parte inferior da onda. Dessa forma, a fonte secundária que está na parte superior do obstáculo gera uma onda circular que tende a contornar aquela barreira.

Dessa forma, difração é o fenômeno que permite a qualquer onda, bi ou tridimensional, contornar obstáculos e atingir a região de "sombra". Vamos discutir mais detalhes da difração. Considere um orifício ou uma barreira de dimensão igual a (d). A difração é mais ou menos acentuada e, portanto, perceptível dependendo da relação entre essa grandeza e o comprimento de onda (λ). As situações a seguir mostram o que acontece quando a onda, formada por cristas retas, por exemplo, encontra orifícios de tamanhos variados.

1) $\lambda \ll d$

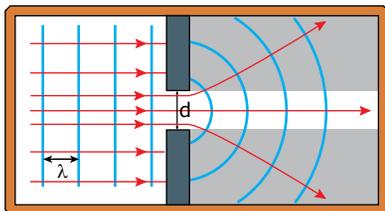
Se o comprimento de onda (λ) é muito menor que a largura do orifício (d), a onda passa através dele sem que a difração seja perceptível. Ou seja, os raios continuam quase que em linha reta, e a onda praticamente não invade a região de "sombra" dos obstáculos que formam o orifício. Veja a seguir. Observe que as partes das cristas contidas na região do orifício continuam sendo retas.



Se o comprimento de onda (λ) aumenta e / ou a largura do orifício (d) diminui, a difração se torna mais acentuada e a onda invade, cada vez mais, a região de "sombra".

2) $\lambda \cong d$

Se o comprimento de onda (λ) é igual (ou muito próximo) à largura da fenda (d), temos uma difração extremamente pronunciada, e as ondas que "saem" do orifício são praticamente circulares, como se no centro do orifício existisse uma única fonte secundária gerando ondas circulares. Veja a seguir. Observe que a onda invade toda a região de "sombra" destacada na cor cinza.



Caso a onda encontre uma barreira (obstáculo), em vez de uma fenda, o seu comportamento apresentará duas importantes diferenças em comparação com a difração em um orifício. Se as dimensões do obstáculo e o comprimento de onda da onda forem da mesma ordem de grandeza, a difração é acentuada e a onda vai contornar o obstáculo, invadindo toda a "sombra" produzida por ele, de forma semelhante à difração no orifício de mesma dimensão do comprimento de onda. Por outro lado, se as dimensões da barreira são muito maiores que o comprimento de onda, a parte da onda que chega às laterais do obstáculo segue direto sem sofrer difração perceptível, e a região de "sombra" não é invadida pela onda.

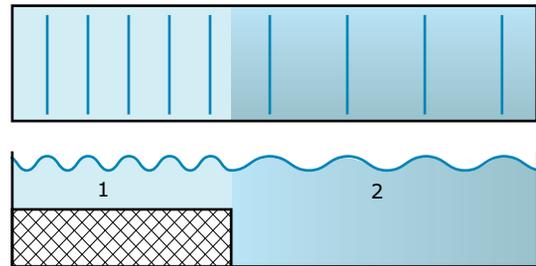
A tabela a seguir mostra o valor do comprimento de onda de três ondas muito conhecidas. Com base nesses valores, vamos analisar a difração de tais ondas.

Onda	Comprimento de onda (λ)
Som	1,7 cm a 17 m
Luz	$4,0 \cdot 10^{-7}$ mm a $7,0 \cdot 10^{-7}$ mm
Micro-ondas de um forno	~ 12 cm

Considere duas pessoas, uma de cada lado de um muro de 2,0 m de altura e 30 cm de espessura. Elas podem se ouvir, mas não podem se ver. É fácil perceber o motivo. O comprimento de onda do som da voz de uma pessoa é da mesma ordem de grandeza das dimensões do muro. Dessa forma, o som difrata bastante e atinge a pessoa do outro lado. As dimensões do muro, por sua vez, são muito maiores que o comprimento de onda da luz refletida pelas pessoas. Dessa forma, essa onda passa pela parte superior do muro, sem sofrer difração perceptível, não chega à pessoa do outro lado, e, assim, elas não se veem.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. Dentro de uma cuba de ondas contendo água, foi colocado um bloco de modo a formar duas regiões de profundidades diferentes. As figuras a seguir mostram, numa vista superior e lateral, respectivamente, as ondas que se propagam na água, a partir da esquerda. O oscilador que produz as ondas vibra com uma frequência de 2,0 Hz. Os comprimentos de onda, nas partes rasa (1) e profunda (2), são 10 cm e 20 cm, respectivamente.



- A) Determinar a velocidade das ondas em cada região.
- B) A velocidade da onda na água depende, basicamente, da profundidade da água (h) e da aceleração da gravidade (g). Com base na análise dimensional, no Sistema Internacional (SI), determinar a proporcionalidade entre a velocidade da onda e as grandezas citadas.

Resolução:

A) A frequência das ondas é imposta pelo gerador. Assim, a frequência da onda nas duas regiões é igual à da fonte:

$$f_1 = f_2 = f_{\text{fonte}} = 2,0 \text{ Hz}$$

Usando $v = \lambda f$, temos:

$$v_1 = 0,10 \cdot 2,0 \Rightarrow v_1 = 0,20 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 0,20 \cdot 2,0 \Rightarrow v_2 = 0,40 \text{ m/s}$$

B) A unidade de velocidade é $[v] = \text{m/s}$, da aceleração da gravidade é $[g] = \text{m/s}^2$ e da profundidade é $[h] = \text{m}$. Como queremos obter m/s, devemos multiplicar as grandezas e extrair a sua raiz quadrada, ou seja:

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{m}} = \sqrt{\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = \frac{\text{m}}{\text{s}} \Rightarrow v \propto \sqrt{gh}$$

INTERFERÊNCIA DE ONDAS

A interferência, assim como a difração, é um fenômeno estritamente ondulatório. Assim, apenas as ondas, ou partículas que possuam comportamento ondulatório, podem sofrer interferência. Esse fenômeno é comum no nosso dia a dia, e muitos são os exemplos de interferência na natureza.

As belas cores na cauda de um pavão, por exemplo, são explicadas pela interferência da luz. Como é um fenômeno complexo, vamos analisar a interferência com o mínimo de abordagem matemática.

O fenômeno da interferência é consequência de um princípio simples chamado de Princípio da Superposição. Nesta Coleção, vamos tratar apenas das ondas para as quais esse princípio é válido. A superposição ocorre quando dois ou mais pulsos ocupam, num dado instante, o mesmo lugar no espaço.

Princípio da Superposição

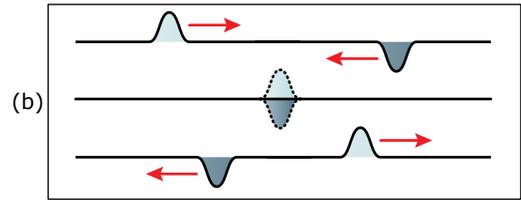
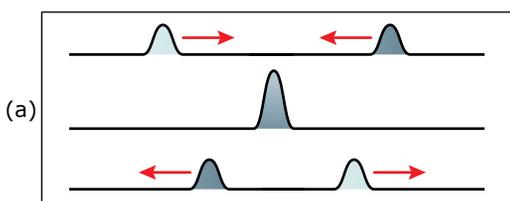
O Princípio da Superposição pode ser usado tanto para as ondas transversais quanto para as longitudinais. Vamos começar com a superposição de dois pulsos unidimensionais numa corda elástica, por exemplo. Quando dois pulsos se cruzam, numa certa posição e num dado instante, os seus efeitos se sobrepõem. Assim, cada ponto do meio deve deslocar-se, naquele instante de acordo com a "resultante" dos efeitos individuais de cada pulso. O efeito resultante pode fazer com que o deslocamento de cada ponto da corda seja maior ou menor do que aquele que ela teria se apenas um pulso se propagasse.

Sejam x a elongação resultante da corda com os pulsos superpostos e x_1 e x_2 as elongações da corda devido a cada pulso individual. Se os pulsos têm:

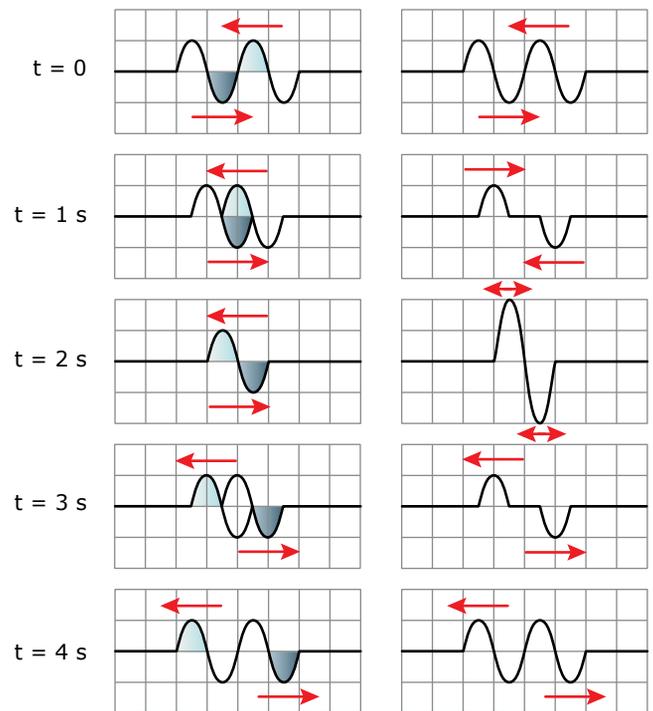
1 - Elongações de mesmo sinal $\Rightarrow |x| = |x_1| + |x_2|$

2 - Elongações de sinais opostos $\Rightarrow |x| = |x_1| - |x_2|$

A interferência, que acontece devido à superposição dos pulsos, pode ser de dois tipos. Se as elongações de um determinado ponto do meio, devido a cada comando individual, são somadas, a interferência é chamada de construtiva. Se as elongações são subtraídas, ela é chamada de interferência destrutiva. Um fato importante da interferência diz respeito ao que acontece com cada pulso após a superposição deles. Independentemente do tipo de interferência (construtiva ou destrutiva), após a superposição dos pulsos, cada um segue o seu caminho com as mesmas características originais. Ou seja, cada pulso mantém inalterados a forma, a fase, a velocidade, a frequência e o comprimento de onda. Veja a seguir a superposição de dois pulsos transversais em fase (a) e em oposição de fase (b).



Considere dois pulsos completos, com a mesma amplitude e em oposição de fase, que se propagam em sentidos opostos ao longo de uma corda elástica, em cinco instantes de tempo. Considere cada quadriculado da figura a seguir com dimensões 2 cm . 2 cm, e que a velocidade de cada pulso seja igual a 1,0 cm/s. Dessa forma, a cada segundo, os pulsos caminham 1,0 cm. Cada figura da direita, em cada um dos instantes, mostra a onda resultante e, claro, a forma que a corda assume devido à superposição dos pulsos.

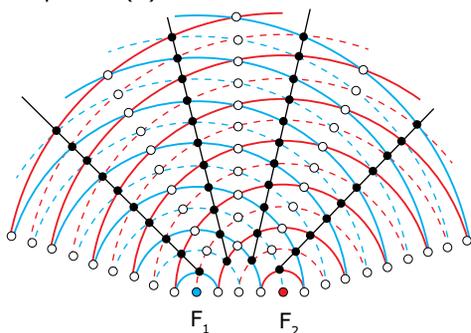


No instante $t = 2$ s, as cristas e os vales dos dois pulsos se superpõem. Dessa forma, a onda resultante apresenta amplitude igual a 4,0 cm. Nos instantes $t = 1$ s e $t = 3$ s, a crista de um pulso se sobrepõe ao vale do outro, e vice-versa. Assim, o efeito resultante é uma amplitude nula. Nesse caso, a interferência é destrutiva total. Você deve desenhar, em casa, as ondas resultantes, nos cinco instantes mostrados anteriormente, para dois pulsos em concordância de fase.

Interferência de ondas bidimensionais

Da mesma forma que ocorre com ondas unidimensionais, as ondas bidimensionais (ou tridimensionais) também sofrem interferência quando ocorre a superposição dos pulsos, no mesmo instante e em cada ponto do meio, gerados por uma ou por mais de uma fonte de ondas.

A figura a seguir mostra duas ondas, geradas por duas fontes F_1 e F_2 , que se propagam na água contida em uma cuba de ondas. Considere que as fontes sejam coerentes, ou seja, que elas produzam ondas com a mesma frequência e em concordância de fase. Assim, o comprimento de onda é o mesmo para as duas ondas. As linhas cheias e pontilhadas representam, respectivamente, as cristas e os vales das ondas. Considere que as duas ondas foram geradas com a mesma amplitude (A).



Essa figura mostra um padrão de interferência. Observe que os pontos pretos indicam posições em que a interferência é destrutiva total (cristas e vales superpostos). Nesses pontos, a todo instante, a amplitude é sempre nula. A linha que une tais pontos (linha preta na figura) é chamada de linha nodal. Em todos os pontos dessas linhas, temos sempre uma interferência destrutiva total e, portanto, a água permanece em repouso. Uma rolha, por exemplo, colocada em qualquer ponto da linha nodal não oscila, ou seja, existe um padrão ou um modelo para a interferência.

As bolinhas brancas mostram pontos do meio em que a interferência é totalmente construtiva (superposições de crista com crista ou de vale com vale). Nesses pontos, a amplitude resultante é máxima, e a água tem a sua maior oscilação. Um objeto flutuante, colocado em qualquer um desses pontos, oscila para cima e para baixo com uma amplitude $2A$. A região compreendida entre duas linhas nodais é chamada de região ventral. Nela, a água está oscilando, para cima e para baixo, com variadas amplitudes.

A fotografia a seguir mostra o padrão de interferência discutido na figura anterior.

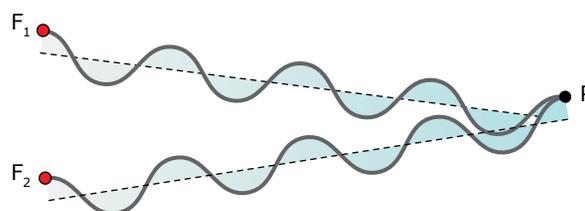


Observe que a fotografia mostra várias linhas nodais. Na linha central das regiões ventrais, podemos ver cristas e vales. Na região ventral, temos a noção do deslocamento das ondas no sentido radial.

As ondas tridimensionais também apresentam padrão de interferência semelhante. A diferença está no fato de que elas, por se propagarem nas três dimensões do espaço, podem formar superfícies nodais (em vez de linhas) e regiões ventrais espaciais (e não planas). Devido à dificuldade de se desenhar tais padrões, eles serão omitidos.

Condições de interferência

Vamos tratar apenas das interferências construtiva ou destrutiva total. Considere duas fontes F_1 e F_2 emitindo ondas em concordância de fase e que se deslocam pelo meio de propagação com comprimento de onda (λ). Essas ondas se superpõem em um ponto P , como mostra a figura a seguir. Observe que o ponto P é atingido, simultaneamente, por duas cristas e, dessa forma, a interferência é construtiva. Observe que cada onda percorre uma distância igual a 4λ até o ponto P . Se nesse ponto chegassem à crista de uma das ondas e o vale da outra, a interferência seria destrutiva. Portanto, o que define se num ponto existe interferência construtiva ou destrutiva, além da fase da onda, é a distância percorrida por cada uma delas até esse ponto. Sejam L_1 e L_2 as distâncias das fontes 1 e 2 até o ponto P , respectivamente.



Para fontes que geram ondas em concordância de fase, a interferência será:

- 1 - Construtiva, se $|L_1 - L_2| = n\lambda$
- 2 - Destrutiva, se $|L_1 - L_2| = (n + \frac{1}{2})\lambda$

Para fontes que geram ondas em oposição de fase, a interferência será:

- 1 - Construtiva, se $|L_1 - L_2| = (n + \frac{1}{2})\lambda$
- 2 - Destrutiva, se $|L_1 - L_2| = n\lambda$

Nessas relações, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

OBSERVAÇÃO

Se um ponto é atingido por uma onda que chega diretamente de uma fonte e por outra emitida pela mesma fonte, mas que sofreu uma reflexão com inversão de fase, devemos usar as relações de interferência para fontes em oposição de fase.



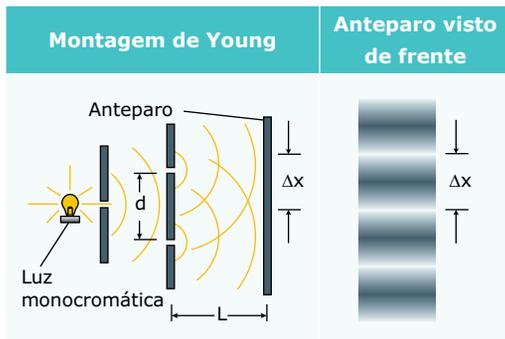
Trombone de Quincke

O trombone de Quincke é um dispositivo que possui dois caminhos para a propagação de ondas sonoras, um de tamanho fixo e outro de tamanho variável. Nesse simulador, você pode variar o comprimento do tubo superior do trombone de Quincke e a frequência de um gerador de áudio. Use-o para constatar o fenômeno da interferência sonora. Boa atividade!



Interferência com a luz

O físico inglês Thomas Young, em 1800, conseguiu, pela primeira vez, produzir interferência com a luz. A figura a seguir mostra o esquema da montagem usada por Young e a visão do anteparo que recebe as ondas.



A luz emitida pela fonte de luz monocromática difrata ao passar pelos orifícios e sofre o fenômeno de interferência exibido no anteparo. Observe o padrão de interferência, constituído por faixas (franjas) claras e escuras. As franjas claras são regiões onde ocorre interferência construtiva, enquanto nas franjas escuras ocorre interferência destrutiva. Vamos chamar de Δx a distância entre duas franjas claras (ou escuras) consecutivas, de d a distância entre as duas fendas e de L a distância entre as fendas e o anteparo de projeção das franjas de interferência. Usando a semelhança de triângulos (não mostrados na figura), é possível provar que

$$\lambda = \Delta x \cdot d / L$$

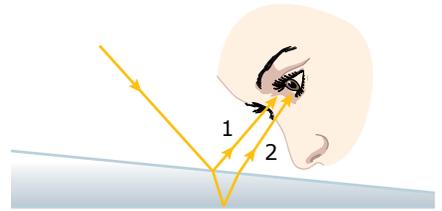
em que λ é o comprimento da luz emitida pela lâmpada. Para realizar essa experiência, é necessário que o tamanho dos orifícios seja muito pequeno e que a distância L seja muito maior que a distância entre os orifícios onde ocorre a segunda difração. Medindo-se os valores de Δx , d e L , é possível determinar o comprimento de onda da luz.

A consequência mais importante dessa experiência foi a aceitação, por parte dos cientistas da época, de que a luz apresenta um comportamento ondulatório. Ou seja, em certas situações, a luz se comporta como uma onda. Até então, era considerado que a luz possuía caráter corpuscular. Essa diferença será mais bem discutida em Física Moderna.

Uma outra situação em que acontece o fenômeno de interferência da luz, muito interessante, ocorre quando ela incide em películas finas e transparentes.

Você já deve ter notado que aparecem diversas cores numa bolha de sabão, num CD ou numa película de óleo, quando iluminados com luz branca. Veja como isso acontece.

Considere uma película de espessura variável (por exemplo, uma fina placa de vidro) iluminada com luz do Sol. A luz incidente é parcialmente refletida na superfície superior e uma outra parte dela, que penetra no vidro, é refletida pela superfície inferior. Veja a seguir:



Arquivo Bernoulli

O observador recebe duas ondas que percorrem distâncias diferentes até o seu olho. Considere a espessura da lâmina, no ponto de incidência, igual a d . Assim, existe uma diferença de caminhos (igual a $2d$) entre as ondas refletidas 1 e 2 até chegarem ao observador. Dessa forma, algumas radiações sofrem interferência construtiva e outras vão apresentar interferência destrutiva. O observador percebe a película na cor da radiação que apresenta interferência construtiva. Como a espessura da película é variável, o observador irá notar cores diferentes em lugares distintos da película.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

02. Os alunos de uma escola foram solicitados a repetir a experiência de Young a fim de determinar o comprimento de onda da luz vermelha ($\lambda = 6,5 \cdot 10^{-7}$ m). Depois de várias tentativas, eles conseguiram estabelecer medidas que permitiram calcular o resultado. Eles colaram uma fita isolante numa placa de vidro e, com uma lâmina de barbear, fizeram dois cortes nessa fita, espaçados por 0,20 mm. Eles pegaram uma caneta laser e direcionaram a luz para as fendas obtidas na fita isolante. O anteparo, onde se formaram as franjas de interferência, foi colocado a 6,5 m da placa de vidro. Nele, as franjas escuras de interferência destrutiva estavam espaçadas 2,0 cm. Determinar o valor obtido pelos estudantes para o comprimento de onda da luz vermelha do laser. Calcular o erro percentual (EP) cometido pelos estudantes na medição realizada.

Resolução:

Na montagem de Young, a relação entre a distância do anteparo (L), a distância entre as fendas (d), a largura entre as franjas de interferência consecutivas (Δx) e o comprimento de onda (λ) é:

$$\lambda = d \Delta x / L \Rightarrow \lambda = (0,02 \text{ cm} \cdot 2,0 \text{ cm}) / 650 \text{ cm} \Rightarrow \lambda = 6,15 \cdot 10^{-5} \text{ cm} \Rightarrow \lambda \cong 6,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

A diferença entre o valor correto e o valor medido é:
 $\Delta \lambda = \lambda - \lambda_M = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ m} - 6,2 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 0,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

Assim, o erro percentual (EP) foi de:

$$EP = (\Delta \lambda / \lambda) 100\% = 4,6\%$$

EXERCÍCIOS DE APRENDIZAGEM



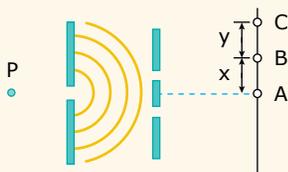
01. (Cesgranrio) O alto do Pão de Açúcar é um lugar privilegiado para se observar ondas na superfície do mar. O comprimento de onda dessas ondas é da ordem do comprimento de um barco pequeno. Considere as seguintes afirmações, a respeito das ondas observadas:

- I. Não sofrem difração no mar aberto (sem obstáculo), antes de atingir a entrada da Baía da Guanabara.
- II. Não sofrem difração na entrada da Baía (10^3 m de largura).
- III. Sofrem difração ao passar por uma boia de sinalização naval (\sim alguns metros).

A(s) afirmação(ões) correta(s) é(são)

- A) apenas II.
- B) apenas I e III.
- C) apenas I e II.
- D) I, II e III.

02. Uma fonte pontual, localizada em P, emite luz monocromática em direção às barreiras. Os pontos A, B e C encontram-se no anteparo e são os pontos centrais de regiões de interferência construtiva consecutivas. As fendas são da ordem de grandeza do comprimento de onda da luz. Assim, é correto afirmar que a relação entre x e y é



- A) $x = y$
- B) $x > y$
- C) $x < y$
- D) um valor que depende da frequência da luz incidente.

03. (UFTM-MG) No imóvel representado, as paredes que delimitam os ambientes, bem como as portas e janelas, são isolantes acústicos. As portas externas e janelas estão fechadas e o ar em seu interior se encontra a uma temperatura constante, podendo ser considerado homogêneo.



Uma pessoa, junto à pia da cozinha, consegue conversar com outra, que se encontra no interior do quarto, com a porta totalmente aberta, uma vez que, para essa situação, é possível ocorrer com as ondas sonoras a

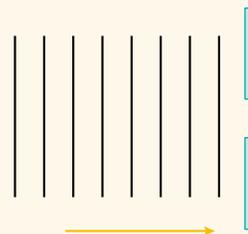
- A) reflexão, apenas.
- B) difração, apenas.
- C) reflexão e a refração, apenas.
- D) reflexão e a difração, apenas.
- E) reflexão, a refração e a difração.

04. (FMTM-MG) Se você está assistindo a um concerto ao ar livre e a cabeça de alguém se interpõe entre você e a orquestra, mesmo assim você continua ouvindo a orquestra porque



- A) as ondas sonoras atravessam facilmente a cabeça.
- B) a cabeça ressoa a onda sonora.
- C) o som é refletido pela cabeça.
- D) o comprimento de onda do som é muito menor do que a cabeça.
- E) uma cabeça não é suficientemente grande comparada com o comprimento de onda do som.

05. (UFMG) Na figura, está representada uma onda que, ao se propagar, se aproxima de uma barreira. A posição das cristas dessa onda, em um certo momento, está representada pelas linhas verticais. A seta indica a direção de propagação da onda. Na barreira, existe uma abertura retangular de largura ligeiramente maior que o comprimento de onda da onda.



Considerando essas informações, assinale a alternativa em que melhor estão representadas as cristas dessa onda após ela ter passado pela barreira.

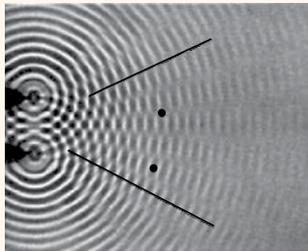
- A)
- B)
- C)
- D)

06. (IFSul-2016) Para que haja interferência destrutiva total entre duas ondas de mesma frequência, é necessário que elas possuam



- A) mesma amplitude e estejam em oposição de fase.
- B) amplitudes diferentes e estejam em oposição de fase.
- C) mesma amplitude e estejam em concordância de fase.
- D) amplitudes diferentes e estejam em concordância de fase.

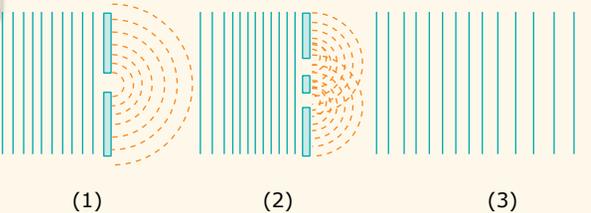
- 07.** (CMMG) A foto mostra duas fontes vibrantes produzindo ondas na superfície da água com a mesma frequência e destacando alguns elementos característicos da interferência dessas ondas.



Pode-se afirmar que, na foto,

- A) o ponto inferior representa um nó.
- B) o ponto superior representa um ventre.
- C) a linha superior representa uma linha nodal.
- D) a linha inferior representa uma linha com interferência destrutiva.

- 08.** (UFRGS-RS) Em cada uma das imagens a seguir, um trem de ondas planas move-se a partir da esquerda.



Os fenômenos ondulatórios apresentados nas figuras 1, 2 e 3 são, respectivamente,

- A) refração – interferência – difração.
- B) difração – interferência – refração.
- C) interferência – difração – refração.
- D) difração – refração – interferência.
- E) interferência – refração – difração.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS



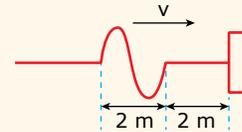
- 01.** (UEM-PR) Sobre os fenômenos de interferência e difração de ondas, assinale o que for correto.
- 01. Em uma interferência de duas ondas mecânicas se propagando em uma corda, os pontos que permanecem em repouso são chamados de antinodos.
 - 02. O fenômeno da interferência de ondas pode ser entendido como consequência do princípio da superposição de ondas e este, por sua vez, como consequência do princípio da conservação da energia.
 - 04. O experimento de difração em fenda dupla pode comprovar a natureza ondulatória da luz.

08. Duas ondas que se interferem construtivamente têm suas características físicas individuais alteradas.

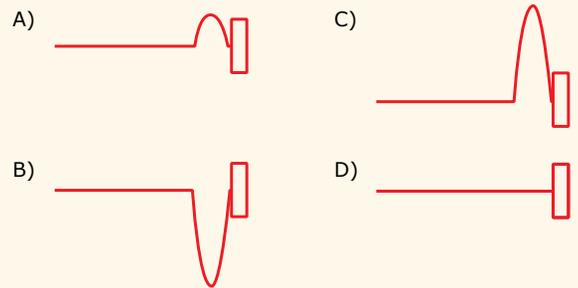
16. A difração é a propriedade que uma onda possui de contornar um obstáculo, ao ser parcialmente interrompida por ele.

Soma ()

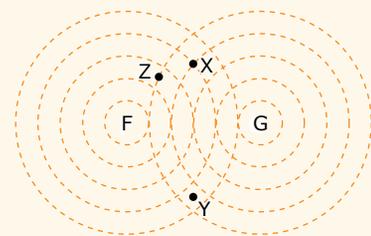
- 02.** Uma onda se propaga com velocidade de 3,0 m/s, para a direita, em uma corda ideal. A extremidade direita da corda está presa a uma parede vertical. Nesse instante, a posição dos pontos da corda está mostrada na figura.



Um segundo após o atual, qual a melhor forma dos pontos da corda?



- 03.** (FCC-SP) A figura seguinte representa as ondas produzidas por duas fontes F e G, que vibram na superfície de um líquido. X, Y e Z são pontos da superfície do líquido. As circunferências indicam cristas. Considere que na região indicada não há amortecimento das ondas.



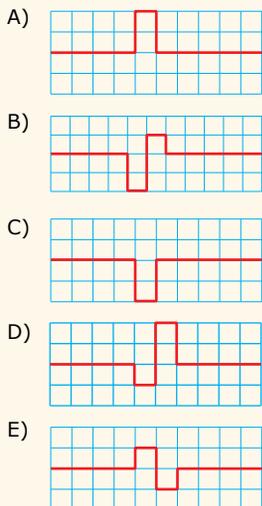
Se x , y e z são amplitudes de vibração da água nos pontos X, Y e Z, qual das seguintes relações está correta?

- A) $x = y = z$
- B) $x = y$ e $z = 0$
- C) $x > y > z$
- D) $x < z$ e $x < y$
- E) $x < y < z$

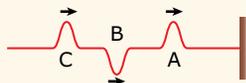
- 04.** (FGV) A figura mostra dois pulsos que se movimentam em sentidos contrários, um em direção ao outro sobre a mesma corda, que pode ser considerada ideal.



No momento em que houver sobreposição total, a disposição esperada para os pontos da corda estará melhor indicada por:

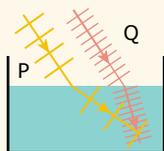


05. Três pulsos, A, B e C, são produzidos em uma corda esticada, que tem uma extremidade fixada numa parede, e se deslocam conforme a figura. Quando os pulsos se superpuserem, após reflexão na parede, ocorrerá



- A) três interferências, nessa ordem, construtiva, construtiva e destrutiva.
- B) três interferências, nessa ordem, construtiva, destrutiva e construtiva.
- C) quatro interferências, nessa ordem, construtiva, destrutiva, construtiva e destrutiva.
- D) quatro interferências, nessa ordem, construtiva, destrutiva, construtiva e construtiva.

06. A luz e o som, produzidos simultaneamente, passam do ar para a água de uma piscina. Considere que, no diagrama, as retas paralelas representam uma pequena parte das "cristas" das ondas luminosas e sonoras e as setas, a direção de propagação dessas ondas.

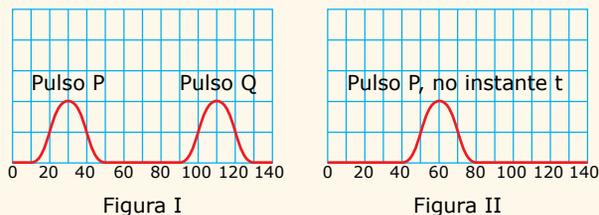


- Os diagramas P e Q representam, respectivamente,
- A) o som e a luz e haverá interferência entre essas ondas dentro d'água.
 - B) o som e a luz e não haverá interferência entre essas ondas dentro d'água.
 - C) a luz e o som e haverá interferência entre essas ondas dentro d'água.
 - D) a luz e o som e não haverá interferência entre essas ondas dentro d'água.

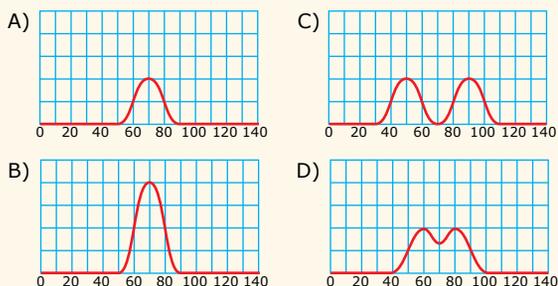
07. (UECE) Uma onda sonora de 170 Hz se propaga no sentido norte-sul, com uma velocidade de 340 m/s. Nessa mesma região de propagação, há uma onda eletromagnética com comprimento de onda $2 \cdot 10^6 \mu\text{m}$ viajando em sentido contrário. Assim, é correto afirmar que as duas ondas têm

- A) mesmo comprimento de onda, e pode haver interferência construtiva.
- B) mesmo comprimento de onda, e pode haver interferência destrutiva.
- C) mesmo comprimento de onda, e não pode haver interferência.
- D) diferentes comprimentos de onda, e não pode haver interferência.

08. (UFMG) Na figura I, estão representados os pulsos P e Q, que estão se propagando em uma corda e se aproximam um do outro com velocidades de mesmo módulo. Na figura II, está representado o pulso P, em um instante t, posterior, caso ele estivesse se propagando sozinho.



A partir da análise dessas informações, assinale a alternativa em que a forma da corda no instante t está corretamente representada.



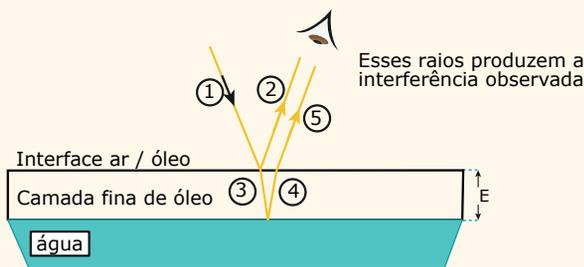
09. (UFRGS-RS) Em um tanque de ondas, duas fontes F_1 e F_2 oscilam com a mesma frequência e sem diferença de fase, produzindo ondas que se superpõem no ponto P, como mostra a figura:



A distância entre F_1 e P é de 80 cm e entre F_2 e P é de 85 cm. Para qual dos valores de comprimento de onda das ondas produzidas por F_1 e F_2 ocorre um mínimo de intensidade (interferência destrutiva) no ponto P?

- A) 1,0 cm.
- B) 2,5 cm.
- C) 5,0 cm.
- D) 10 cm.
- E) 25 cm.

02. (Enem–2015) Certos tipos de superfícies na natureza podem refletir luz de forma a gerar um efeito de arco-íris. Essa característica é conhecida como iridescência e ocorre por causa do fenômeno da interferência de película fina. A figura ilustra o esquema de uma fina camada iridescente de óleo sobre uma poça d'água. Parte do feixe de luz branca incidente ① reflete na interface ar / óleo e sofre inversão de fase ②, o que equivale a uma mudança de meio comprimento de onda. A parte refratada do feixe ③ incide na interface óleo / água e sofre reflexão sem inversão de fase ④. O observador indicado enxergará aquela região do filme em coloração equivalente à do comprimento de onda que sofre interferência completamente construtiva entre os raios ② e ⑤, mas essa condição só é possível para uma espessura mínima da película. Considere que o caminho percorrido em ③ e ④ corresponde ao dobro da espessura E da película de óleo.

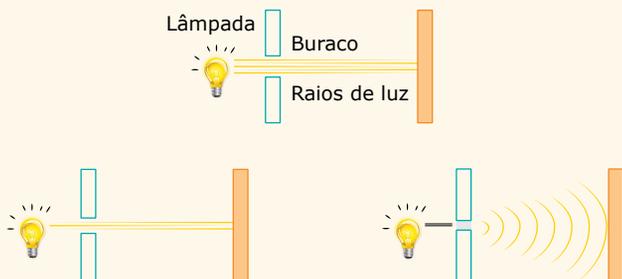


Disponível em: <<http://2011.igem.org>>. Acesso em: 18 nov. 2014 (Adaptação).

Expressa em termos de comprimento de onda (λ), a espessura mínima é igual a:

- A) $\frac{\lambda}{4}$ C) $\frac{3\lambda}{4}$ E) 2λ
 B) $\frac{\lambda}{2}$ D) λ

03. (Inep) Ao diminuir o tamanho de um orifício atravessado por um feixe de luz, passa menos luz por intervalo de tempo, e próximo da situação de completo fechamento do orifício, verifica-se que a luz apresenta um comportamento como o ilustrado nas figuras. Sabe-se que o som, dentro de suas particularidades, também pode se comportar dessa forma.



FIOLHAIS, C. *Física divertida*. Brasília: UnB, 2000 (Adaptação).

Em qual das situações a seguir está representado o fenômeno descrito no texto?

- A) Ao se esconder atrás de um muro, um menino ouve a conversa de seus colegas.
 B) Ao gritar diante de um desfiladeiro, uma pessoa ouve a repetição do seu próprio grito.
 C) Ao encostar o ouvido no chão, um homem percebe o som de uma locomotiva antes de ouvi-lo pelo ar.
 D) Ao ouvir uma ambulância se aproximando, uma pessoa percebe o som mais agudo do que quando aquela se afasta.
 E) Ao emitir uma nota musical muito aguda, uma cantora de ópera faz com que uma taça de cristal se despedace.

04. (Enem) As ondas eletromagnéticas, como a luz visível e as ondas de rádio, viajam em linha reta em um meio homogêneo. Então, as ondas de rádio emitidas na região litorânea do Brasil não alcançariam a Região Amazônica do Brasil por causa da curvatura da Terra. Entretanto, sabemos que é possível transmitir ondas de rádio entre essas localidades devido à ionosfera. Com a ajuda da ionosfera, a transmissão de ondas planas entre o litoral do Brasil e a Região Amazônica é possível por meio da

- A) reflexão. D) polarização.
 B) refração. E) interferência.
 C) difração.

GABARITO

Meu aproveitamento

Aprendizagem

Acertei _____ Errei _____

01. D 03. D 05. D 07. C
 02. A 04. E 06. A 08. B

Propostos

Acertei _____ Errei _____

01. Soma = 22
 02. C 05. B 08. D
 03. B 06. B 09. D
 04. C 07. C 10. D

11.

- A) $1,5 \cdot 10^{-5}$ cm
 B) $\lambda = 7,5 \cdot 10^{-5}$ cm
 C) $V' = 3 \cdot 10^{-3}$ cm³

Seção Enem

Acertei _____ Errei _____

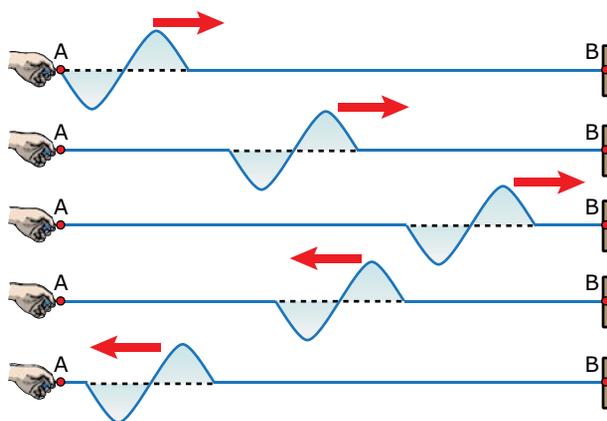
01. E 02. A 03. A 04. A



Total dos meus acertos: _____ de _____ . _____ %

Ondas Estacionárias

Quando um pulso ou uma onda se propaga através de uma corda, por exemplo, a energia é transmitida por meio dessa corda, dizemos, então, que a onda é **progressiva**, ou seja, a energia progride ao longo da corda. A figura a seguir mostra, em cinco instantes diferentes, uma onda que se desloca entre os pontos A e B de uma corda elástica. Observe que a onda e a energia transmitida por ela se deslocam de uma extremidade à outra da corda. Veja ainda que a primeira metade da onda, que possui uma crista, se desloca de A para B sempre na parte superior da figura. Ou seja, enquanto a onda se propaga de A para B, a parte da onda que caminha na frente será sempre uma crista (ou sempre um vale).



Quando encontra a extremidade B, fixa, a onda é refletida com inversão de fase. Assim, a primeira metade da onda volta, após a reflexão, contendo um vale que vai se superpor à segunda metade da onda (que apresenta um vale), produzindo uma interferência construtiva. Após essa interferência, a segunda metade da onda sofre reflexão e volta contendo uma crista. A onda, assim, caminha para a esquerda, de forma ainda progressiva, com os mesmos valores de velocidade, frequência e comprimento de onda. Agora a parte da onda que caminha na frente é sempre um vale. Numa situação real, à medida que a onda se propaga, a sua amplitude vai diminuindo com o passar do tempo. Ou seja, a energia da onda vai, na maioria das vezes, reduzindo-se gradativamente.

O mesmo acontece com um pêndulo que, posto em oscilação, tem a sua amplitude de oscilação reduzida gradativamente até parar por completo. Isso ocorre porque o sistema transfere energia para o meio que o cerca. Se um agente externo fornece energia ao pêndulo, de maneira e frequência convenientes, ele pode manter a sua oscilação por longos períodos, como acontece com um relógio de pêndulo.

Você, provavelmente, já deve ter se divertido em um balanço de cordas. Se uma pessoa empurra o balanço, fornecendo-lhe energia com a mesma frequência de oscilação do sistema e em fase com ele, a amplitude de oscilação do balanço pode ser alterada significativamente. Caso a energia fornecida ao balanço seja igual à energia transferida por ele ao meio circundante, a amplitude de oscilação do balanço permanece sempre a mesma. Entretanto, se a energia que o agente externo fornece ao balanço é maior que a energia que o sistema transfere ao meio, a amplitude de oscilação do balanço aumenta gradativamente. Nesses casos, dizemos que o sistema entra em **ressonância** com o agente externo.

Todo corpo material apresenta uma ou mais frequências naturais de vibração. Se um corpo recebe energia de um agente externo, numa das suas frequências naturais, ele começa a ressoar, e isso pode levar o sistema a oscilar eternamente ou a entrar em colapso. Muitos são os exemplos que ilustram essa situação. Um recipiente de vidro pode estourar se uma onda sonora, com frequência igual a uma das frequências naturais de vibração das moléculas do vidro, incidir sobre o recipiente. Um cálculo renal, por exemplo, pode ser desintegrado pela incidência de uma onda ultrassônica de frequência apropriada.

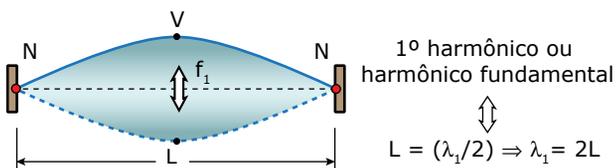
ONDAS ESTACIONÁRIAS EM CORDAS



Considere, agora, uma corda fixa nas extremidades e que um oscilador produza uma série de pulsos sucessivos, com amplitude desprezível, de determinada frequência em uma das extremidades. Os pulsos vão se propagar através da corda, e cada um deles será refletido nas extremidades fixas desta. Nessas extremidades, a corda não pode oscilar e tais pontos ficarão, portanto, em repouso. Dependendo do valor da frequência imposta pelo oscilador, pode acontecer um padrão de interferência na corda, de modo que determinados pontos desta fiquem em permanente repouso devido a uma constante interferência destrutiva, e outros pontos vibrem transversalmente, com amplitude máxima, em decorrência de uma constante interferência construtiva. Quando tal padrão é obtido, a onda formada é chamada de **onda estacionária**. Nesse caso, não mais percebemos a onda propagar-se, ou seja, a energia deixa de progredir na corda e fica aprisionada, oscilando apenas entre os pontos de constante interferência destrutiva – chamados **nós (N)** da onda estacionária.

Os pontos da corda de maior amplitude de vibração são chamados de **ventres (V)** da onda estacionária. As diversas situações nas quais se produz uma onda estacionária na corda são conhecidas como **harmônicos** ou **modos de vibração** da corda (cada uma com sua respectiva frequência). Nessas situações, a corda entra em ressonância com o oscilador. Assim, os pontos da corda correspondentes aos ventres vibram com a maior amplitude possível (para aquela energia que o agente externo fornece).

A menor frequência, portanto, o maior comprimento de onda, que permite a formação de uma onda estacionária é chamada de 1º harmônico da onda ou de frequência fundamental. A figura a seguir mostra o 1º harmônico obtido numa corda elástica, de comprimento L, presa nas extremidades e posta a oscilar com frequência f₁. Quando um padrão semelhante ao mostrado na figura é obtido, percebemos a corda vibrar como um todo, nesse caso, para cima e para baixo, e não vemos a onda deslocar-se através da corda. Observe que a distância entre os dois nós é igual a meio comprimento de onda (λ/2).

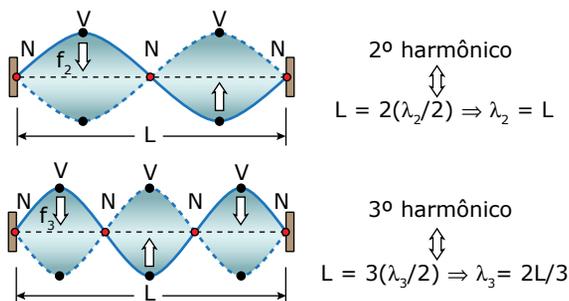


Usando a equação das ondas, a frequência fundamental (f₁) pode ser calculada por:

$$f_1 = v/\lambda_1 \Rightarrow f_1 = v/2L$$

Em que v é o módulo da velocidade das ondas incidentes e refletidas nas extremidades da corda.

Se a frequência do oscilador aumenta, a frequência imposta à corda também aumenta. Como já dito, existem diversos padrões de ondas estacionárias – chamados harmônicos – nos quais a corda vibra com frequências múltiplas da frequência fundamental. Em todas essas situações, a distância entre dois nós consecutivos (ou duas cristas adjacentes) é igual a meio comprimento de onda (λ/2). As figuras a seguir mostram o 2º e o 3º harmônicos. Observe que os pontos da corda onde estão os ventres oscilam, alternadamente, para baixo e para cima.



As frequências dos harmônicos mostrados são:

$$f_2 = v/\lambda_2 \Rightarrow f_2 = v/L \Rightarrow f_2 = 2(v/2L) \Rightarrow f_2 = 2f_1$$

$$f_3 = v/\lambda_3 \Rightarrow f_3 = v/(2L/3) \Rightarrow f_3 = 3(v/2L) \Rightarrow f_3 = 3f_1$$

Os valores das frequências dos possíveis modos de vibração da corda devem ser, sempre, múltiplos inteiros da frequência fundamental. Assim, a frequência de qualquer dos harmônicos pode ser determinada por:

$$f_N = N \cdot f_1, \text{ em que } N = 1, 2, 3, \dots$$

Na equação anterior, N representa o número do harmônico correspondente e, claro, a quantidade de ventres presentes na onda estacionária.



PARA REFLETIR

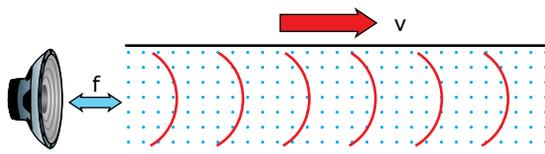
Em uma corda de violão, por exemplo, basta um toque para produzir uma onda estacionária na corda. Explique.

ONDAS ESTACIONÁRIAS EM TUBOS SONOROS



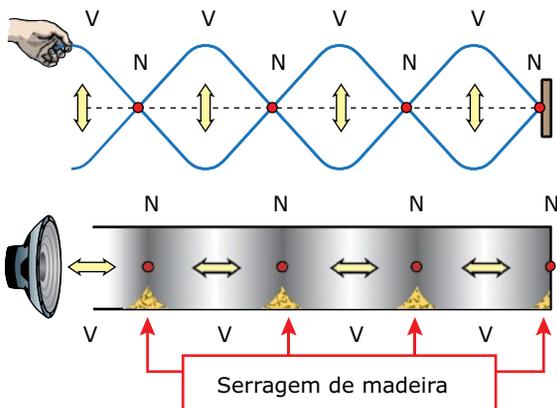
Tubo fechado

Considere um tubo, de comprimento L, fechado em uma extremidade e aberto na outra, preenchido com ar ou outro gás qualquer. Um tubo com tais características é chamado de **tubo fechado**. As partículas de ar em seu interior vibram de maneira aleatória, devido à agitação térmica, conforme visto no estudo de gases. Imagine que um alto-falante, por exemplo, seja colocado em vibração, com frequência f, na extremidade aberta do tubo, como mostra a figura a seguir:

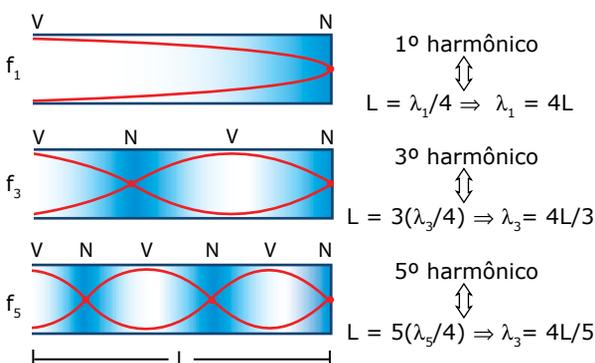


A vibração do alto-falante produz compressões e rarefações do ar no interior do tubo, de forma que uma onda longitudinal se propaga para a direita com velocidade v, comprimento de onda λ e frequência f. Essa onda é refletida pela extremidade fechada do tubo e volta com os mesmos valores de frequência e comprimento de onda e com velocidade de mesmo módulo. Assim, haverá uma superposição das ondas incidente e refletida.

Dependendo da frequência das ondas produzidas pelo oscilador, um padrão de interferência poderá ser obtido e se produzirá, dentro do tubo, uma **onda estacionária**. Ou seja, o ar dentro do tubo entra em ressonância com o alto-falante. Os harmônicos dessa onda exigem que, na extremidade fechada, exista um **nó** (as moléculas em contato com a lateral direita do tubo não podem oscilar) e que, na extremidade aberta, exista um **ventre** (as moléculas vibram livremente para dentro e para fora do tubo com amplitude máxima). As ondas estacionárias em um tubo podem ser comparadas àquelas que se formam em uma corda vibrante. Para essa analogia, veja a figura a seguir. Observe que, nos ventres, as moléculas têm a máxima amplitude de vibração (região de rarefação) e, nos nós, elas não apresentam vibração perceptível (região de compressão). Se um pouco de serragem de madeira, por exemplo, for colocado em toda a extensão do tubo, antes de nele se estabelecer a onda estacionária, esse material ficará depositado nas regiões do tubo onde se formam os nós da onda, conforme mostrado a seguir:



Alguns dos harmônicos que podem ser estabelecidos em um tubo fechado estão mostrados a seguir. Uma vez que a distância entre dois nós (ou ventres) consecutivos é igual a meio comprimento de onda, a distância entre um nó e um ventre, adjacentes, é igual a um quarto do comprimento de onda ($D_{NV} = \lambda/4$).



As frequências f dos harmônicos estacionários no tubo fechado podem ser calculadas pela equação das ondas:

$$v = \lambda \cdot f \Rightarrow f = v/\lambda, \quad v = \text{velocidade da onda no gás}$$

1º harmônico: $f_1 = v/4L$;

3º harmônico: $f_3 = v/(4L/3) = 3(v/4L) \Rightarrow f_3 = 3f_1$;

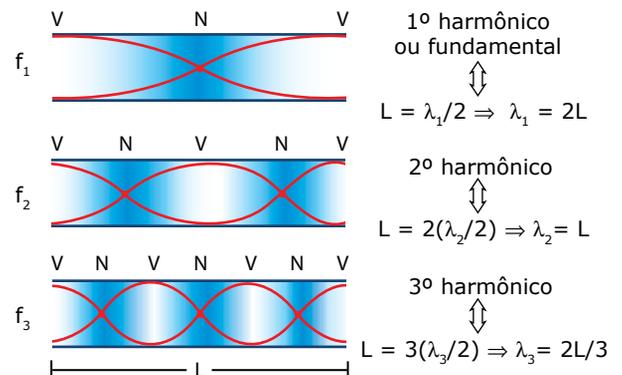
5º harmônico: $f_5 = v/(4L/5) = 5(v/4L) \Rightarrow f_5 = 5f_1$.

O fato de sempre existir um nó na extremidade fechada e um ventre na extremidade aberta limita o número de possíveis harmônicos da onda estacionária no tubo fechado a valores que sejam múltiplos ímpares inteiros da frequência fundamental. Assim, a frequência de qualquer dos harmônicos será:

$$f_N = N \cdot f_1, \quad \text{em que } N = 1, 3, 5, \dots$$

Tubo aberto

Um tubo é chamado de **aberto** se possui as duas extremidades opostas abertas. Dessa forma, os harmônicos das ondas estacionárias que se estabelecem nesses tubos devem ter ventres nesses dois extremos. A figura a seguir mostra alguns harmônicos que se formam no tubo aberto. Quando tais harmônicos são obtidos, o ar no interior do tubo entra em ressonância com o agente externo que está produzindo a vibração.



As frequências f dos harmônicos estacionários no tubo aberto são:

$$v = \lambda \cdot f \Rightarrow f = v/\lambda, \quad v = \text{velocidade da onda no gás}$$

1º harmônico: $f_1 = v/2L$;

2º harmônico: $f_2 = v/L = 2(v/2L) \Rightarrow f_2 = 2f_1$;

3º harmônico: $f_3 = v/(2L/3) = 3(v/2L) \Rightarrow f_3 = 3f_1$.

Assim, a frequência de qualquer dos harmônicos será:

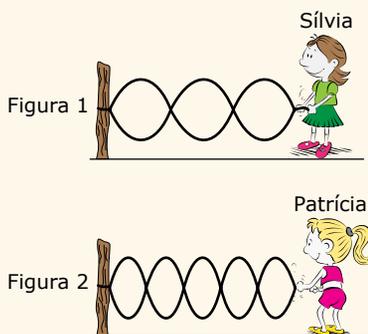
$$f_N = N \cdot f_1, \quad \text{em que } N = 1, 2, 3, \dots$$

EXERCÍCIOS DE APRENDIZAGEM



- 01.** (UECE-2016) Considere duas cordas vibrantes, com ondas estacionárias e senoidais, sendo uma delas produzida por um violino e outra por uma guitarra. Assim, é correto afirmar que nos dois tipos de ondas estacionárias têm-se as extremidades das cordas vibrando com amplitudes
- nulas.
 - máximas.
 - variáveis.
 - dependentes da frequência das ondas.

- 02.** (UFTM-MG) Sílvia e Patrícia brincavam com uma corda quando perceberam que, prendendo uma das pontas num pequeno poste e agitando a outra ponta em um mesmo plano, faziam com que a corda oscilasse de forma que alguns de seus pontos permaneciam parados, ou seja, se estabelecia na corda uma onda estacionária. A figura 1 mostra a configuração da corda quando Sílvia está brincando e a figura 2 mostra a configuração da mesma corda quando Patrícia está brincando.



Considerando-se iguais, nas duas situações, as velocidades de propagação das ondas na corda, e chamando de f_s e f_p as frequências com que Sílvia e Patrícia, respectivamente, estão fazendo a corda oscilar, pode-se afirmar corretamente que a relação f_s / f_p é igual a

- 1,6.
- 1,2.
- 0,8.
- 0,6.
- 0,4.

- 03.** (UFU-MG) Após uma competição de natação, forma-se um padrão de ondas estacionárias na piscina olímpica. Uma piscina olímpica oficial mede 50 metros. Se a distância entre os ventres do padrão de ondas é de 50 centímetros, o número de ventres que aparecem na piscina e o comprimento das ondas propagantes são de
- 98 ventres e comprimento de onda de 1 metro.
 - 50 ventres e comprimento de onda de 50 centímetros.
 - 200 ventres e comprimento de onda de 2 metros.
 - 100 ventres e comprimento de onda de 1 metro.

- 04.** (UEPB) Todo corpo capaz de vibrar ou oscilar tem frequência natural de oscilação, quer seja ele uma lâmina de aço, um copo de vidro, um automóvel, quer seja uma ponte. Se uma fonte oscilante tiver a mesma frequência que a frequência natural de um corpo, este pode atingir o colapso. Foi o que aconteceu com a ponte de Tacoma em 1940 nos Estados Unidos, levando-a a quebrar-se, conforme ilustrado a seguir:

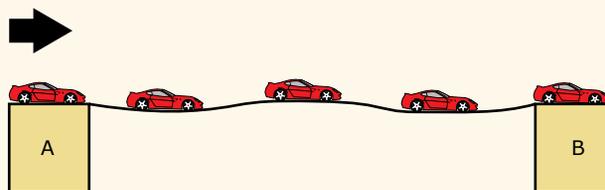
GASPAR, A. *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*. São Paulo: Ática, 2005.



Sobre esse fenômeno, é correto afirmar que

- não há relação alguma entre as frequências da fonte oscilante e a frequência natural do corpo, que possa ocasionar o colapso.
- é devido à superposição de ondas que a frequência da fonte oscilante pode atingir a frequência natural do corpo, e este entrar em colapso.
- é devido à interferência das ondas que a frequência da fonte oscilante pode atingir a frequência natural do corpo, e este entrar em colapso.
- quando a fonte oscilante tem frequência igual à frequência natural do corpo, este entra em ressonância.
- o colapso acontece devido ao efeito Doppler.

- 05.** (UFPR) Uma fila de carros, igualmente espaçados, faz a travessia de uma ponte com velocidades iguais e constantes, conforme mostra a figura a seguir. Cada vez que um carro entra na ponte, o impacto de seu peso provoca nela uma perturbação em forma de um pulso de onda. Esse pulso se propaga com velocidade de módulo 10 m/s no sentido de A para B. Como resultado, a ponte oscila, formando uma onda estacionária com 3 ventres e 4 nós. Considerando que o fluxo de carros produza na ponte uma oscilação de 1 Hz, assinale a alternativa correta para o comprimento da ponte.



- 10 m.
- 15 m.
- 20 m.
- 30 m.
- 45 m.



06. (UEL-PR) Após ter afinado seu violão utilizando um diapasão de 440 Hz, um músico notou que o quarto harmônico da corda Lá do instrumento emitia um som com a mesma frequência do diapasão.

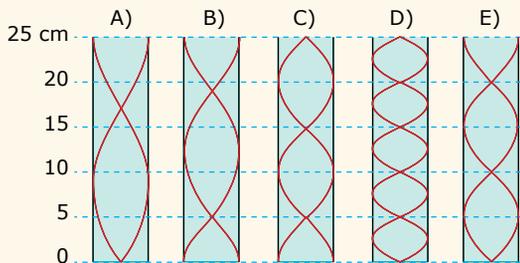
Com base na observação do músico e nos conhecimentos de ondulatória, considere as afirmativas a seguir:

- I. O comprimento de onda da onda estacionária formada na corda, no quarto harmônico, é igual à metade do comprimento da corda.
- II. A altura da onda sonora emitida no quarto harmônico da corda Lá é diferente da altura da onda emitida pelo diapasão.
- III. A frequência do primeiro harmônico da corda Lá do violão é 110 Hz.
- IV. O quarto harmônico da corda corresponde a uma onda estacionária que possui 5 nós.

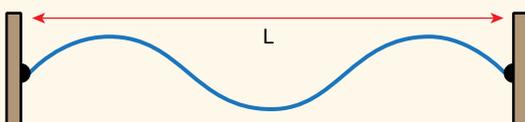
Assinale a alternativa correta.

- A) Somente as afirmativas I e II são corretas.
- B) Somente as afirmativas II e IV são corretas.
- C) Somente as afirmativas III e IV são corretas.
- D) Somente as afirmativas I, II e III são corretas.
- E) Somente as afirmativas I, III e IV são corretas.

07. (FUVEST-SP) Um músico sopra a extremidade aberta de um tubo de 25 cm de comprimento, fechado na outra extremidade, emitindo um som na frequência $f = 1\ 700$ Hz. A velocidade do som no ar, nas condições do experimento, é $v = 340$ m/s. Dos diagramas a seguir, aquele que melhor representa a amplitude de deslocamento da onda sonora estacionária, excitada no tubo pelo sopro do músico, é



08. (UFRGS-RS-2016) A figura a seguir representa uma onda estacionária produzida em uma corda de comprimento $L = 50$ cm.



Sabendo que o módulo da velocidade de propagação de ondas nessa corda é 40 m/s, a frequência da onda é de

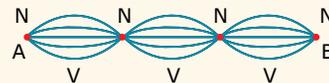
- A) 40 Hz.
- B) 60 Hz.
- C) 80 Hz.
- D) 100 Hz.
- E) 120 Hz.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

01. (UECE-2015) Uma corda de violão vibra de modo que, num dado instante, a onda estacionária tenha duas cristas e três nós. Considere que o comprimento da corda vibrante seja 60 cm. Nessa situação, é correto afirmar que o comprimento de onda desta onda estacionária na corda é, em cm,

- A) 20.
- B) 60.
- C) 180.
- D) 30.

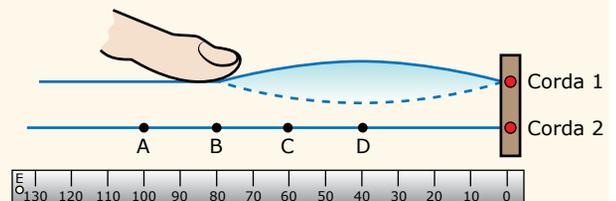
02. (UFSCar-SP) A figura representa uma configuração de ondas estacionárias numa corda.



A extremidade A está presa a um oscilador que vibra com pequena amplitude. A extremidade B é fixa e a tração na corda é constante. Na situação da figura, em que aparecem três ventres (V) e quatro nós (N), a frequência do oscilador é 360 Hz. Aumentando-se gradativamente a frequência do oscilador, observa-se que essa configuração se desfaz até aparecer, em seguida, uma nova configuração de ondas estacionárias, formada por

- A) quatro nós e quatro ventres, quando a frequência atingir 400 Hz.
- B) quatro nós e cinco ventres, quando a frequência atingir 440 Hz.
- C) cinco nós e quatro ventres, quando a frequência atingir 480 Hz.
- D) cinco nós e cinco ventres, quando a frequência atingir 540 Hz.
- E) seis nós e oito ventres, quando a frequência atingir 720 Hz.

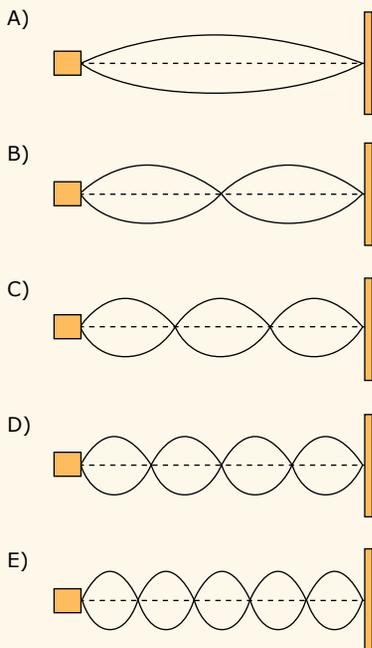
03. (ACAFE-SC-2015) Um professor de Física, querendo ensinar ondas estacionárias aos seus alunos, construiu um experimento com duas cordas, como mostra a figura. Pressionou a corda 1 a 80 cm do ponto fixo e, tocando na corda, criou o primeiro harmônico de uma onda estacionária. Sabendo que a frequência conseguida na corda 1 é 440 Hz, e que a velocidade da onda na corda 2 é o dobro da velocidade da onda na corda 1, determine a posição que alguém deverá pressionar a corda 2 para conseguir o primeiro harmônico de uma onda estacionária com o dobro da frequência conseguida na corda 1.



A alternativa correta é:

- A) C
- B) A
- C) B
- D) D

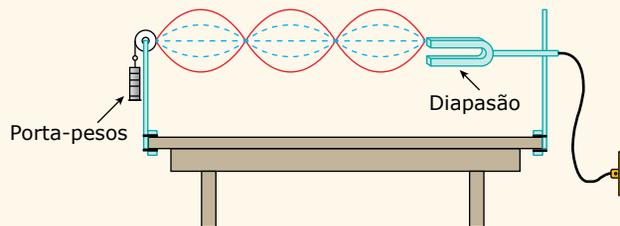
04. (UFPB) A superposição de ondas incidentes e refletidas com mesmas amplitudes dá origem a uma figura de interferência denominada onda estacionária. Nesse sentido, considere uma situação em que uma corda tem uma das suas extremidades fixa a uma parede e a outra extremidade, conectada a um oscilador (fonte de vibração) que vibra com uma frequência de 80 Hz. A distância entre o vibrador e a parede é de 8 m. Sabendo que as velocidades de propagação das ondas na corda são de 320 m/s, a onda estacionária na corda está melhor representada na figura:



05. (EFOMM-RJ-2016) Um diapásio com frequência natural de 400 Hz é percutido na proximidade da borda de uma proveta graduada, perfeitamente cilíndrica, inicialmente cheia de água, mas que está sendo vagarosamente esvaziada por meio de uma pequena torneira na sua parte inferior. Observa-se que o volume do som do diapásio torna-se mais alto pela primeira vez quando a coluna de ar formada acima d'água atinge uma certa altura h . O valor de h , em centímetros, vale

- Dado:** velocidade do som no ar $v_{\text{som}} = 320$ m/s.
- A) 45. C) 28. E) 18.
 B) 36. D) 20.

06. (UPE) Uma das extremidades de um fio de comprimento 3,0 m é presa a um diapásio elétrico; a outra passa por uma roldana e sustenta um peso de 3,6 N que mantém o fio esticado. Fazendo o diapásio vibrar com uma frequência constante de 300 Hz, o fio apresenta uma configuração com três ventres, como pode ser observado na figura a seguir:



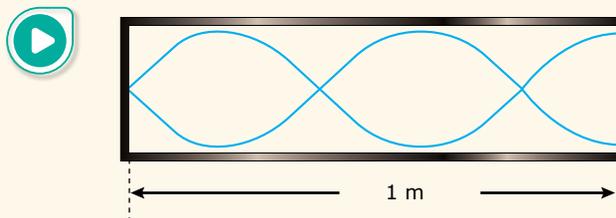
A ordem de grandeza da densidade linear desse fio, em kg/m, vale:

- A) 10^{-4} D) 10^{-2}
 B) 10^3 E) 10^{-1}
 C) 10^{-5}

07. (UERN-2015) Uma pessoa, ao soprar na extremidade aberta de um tubo fechado, obteve o som do primeiro harmônico cuja frequência é 375 Hz. Se o som no local se propaga com velocidade de 330 m/s, então o comprimento desse tubo é de

- A) 20 cm. C) 24 cm.
 B) 22 cm. D) 26 cm.

08. (UNIRIO-RJ)



Um tubo sonoro, como o da figura anterior, emite um som que se propaga no ar com velocidade de módulo 340 m/s. Pode-se afirmar que o comprimento de onda e a frequência da onda sonora emitida são, respectivamente,

- A) 0,75 m e 340 Hz. D) 1,50 m e 455 Hz.
 B) 0,80 m e 425 Hz. E) 2,02 m e 230 Hz.
 C) 1,00 m e 230 Hz.

09. (UDESC-2015) Dois tubos sonoros de mesmo comprimento se diferem pela seguinte característica: o primeiro é aberto nas duas extremidades e o segundo é fechado em uma das extremidades. Considerando que a temperatura ambiente seja de 20 °C e a velocidade do som igual a 344 m/s, assinale a alternativa que representa a razão entre a frequência fundamental do primeiro tubo e a do segundo tubo.

- A) 2,0 D) 0,50
 B) 1,0 E) 0,25
 C) 8,0

10. (Unesp-2016) Um experimento foi feito com a finalidade de determinar a frequência de vibração de um diapásio. Um tubo cilíndrico aberto em suas duas extremidades foi parcialmente imerso em um recipiente com água e o diapásio vibrando foi colocado próximo ao topo desse tubo, conforme a figura 1. O comprimento L da coluna de ar dentro do tubo foi ajustado movendo-o verticalmente.

Verificou-se que o menor valor de L , para o qual as ondas sonoras geradas pelo diapasão são reforçadas por ressonância dentro do tubo, foi de 10 cm, conforme a figura 2.

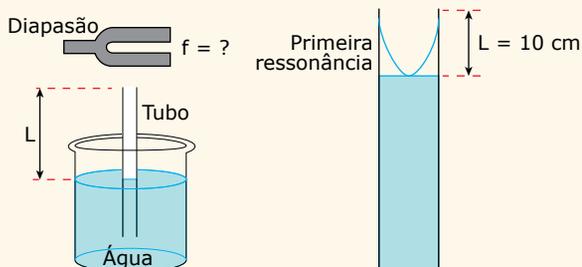


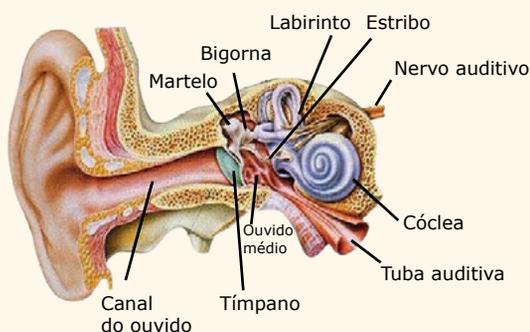
Figura 1

Figura 2

Considerando a velocidade de propagação do som no ar igual a 340 m/s, é correto afirmar que a frequência de vibração do diapasão, em Hz, é igual a

- A) 425. C) 1 360. E) 1 700.
B) 850. D) 3 400.

11. (EBMSP-2016)



O canal auditivo da figura representa o órgão de audição humano que mede, em média, cerca de 2,5 cm de comprimento e que pode ser comparado a um tubo sonoro fechado, no qual a coluna de ar oscila com ventre de deslocamento na extremidade aberta e nó de deslocamento na extremidade fechada.

Considerando-se que a velocidade de propagação do som no ar é igual a 340 m/s e que a coluna de ar oscila segundo um padrão estacionário fundamental no canal auditivo, pode-se afirmar – pela análise da figura associada aos conhecimentos da Física – que

- A) o comprimento da onda sonora que se propaga no canal auditivo é igual a 2,5 cm.
B) a frequência das ondas sonoras que atingem a membrana timpânica é, aproximadamente, igual a 13 600,0 Hz.
C) a frequência fundamental de oscilação da coluna de ar no canal auditivo é igual a 340,0 Hz.
D) a frequência de vibração da membrana timpânica produzida pela oscilação da coluna de ar é igual a 3 400,0 Hz.
E) a frequência do som transmitido ao cérebro por impulsos elétricos é o dobro da frequência da vibração da membrana timpânica.

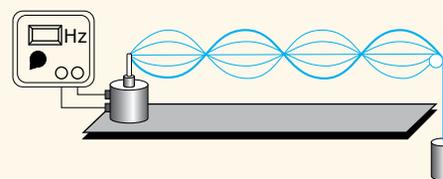
12.



(FPP-PR-2016) A figura mostra esquematicamente uma montagem utilizada em aulas práticas de física para o estudo de ondas estacionárias em cordas. Um gerador de sinal elétrico faz com que um oscilador mecânico produza ondas em uma corda tracionada por uma massa suspensa. A amplitude de oscilação do eixo do oscilador é independente da frequência e muito menor que a altura dos fusos. A roldana é considerada ideal.

Sobre esse experimento, analise as seguintes afirmativas:

- I. Se a distância entre o oscilador e a roldana for reduzida, a frequência para se obter uma onda estacionária de mesmo número de fusos (ventres) que o mostrado na figura será maior e o comprimento de onda será menor.
II. Se a massa suspensa for aumentada, o comprimento de onda do harmônico mostrado não é alterado e a frequência de ressonância será maior.
III. Se a frequência do quarto harmônico for 600 Hz, a do quinto harmônico será 750 Hz.
IV. Todos os pontos da corda vibram com a mesma frequência e velocidade transversal.
V. A velocidade do deslocamento transversal de um ponto da corda será máxima nas posições de cristas e vales.



Com relação às afirmativas, assinale a alternativa correta.

- A) Somente as afirmativas II, III e IV estão corretas.
B) Somente as afirmativas I, III e V estão corretas.
C) Somente as afirmativas I, II e III estão corretas.
D) Somente as afirmativas I, II, IV e V estão corretas.
E) Somente as afirmativas II e IV estão corretas.

13.



(FUVEST-SP) Uma flauta andina, ou flauta de pã, é constituída por uma série de tubos de madeira, de comprimentos diferentes, atados uns aos outros por fios vegetais. As extremidades inferiores dos tubos são fechadas. A frequência fundamental de ressonância em tubos desse tipo corresponde ao comprimento de onda igual a 4 vezes o comprimento do tubo. Em uma dessas flautas, os comprimentos dos tubos correspondentes, respectivamente, às notas Mi (660 Hz) e Lá (220 Hz) são, aproximadamente,

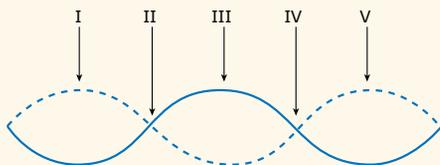
Dado: A velocidade do som no ar é igual a 330 m/s.

- A) 6,6 cm e 2,2 cm.
B) 22 cm e 5,4 cm.
C) 12 cm e 37 cm.
D) 50 cm e 1,5 m.
E) 50 cm e 16 cm.

- 14.** (UFPR) Um órgão é um instrumento musical composto por diversos tubos sonoros, abertos ou fechados nas extremidades, com diferentes comprimentos. Num certo órgão, um tubo A é aberto em ambas as extremidades e possui uma frequência fundamental de 200 Hz. Nesse mesmo órgão, um tubo B tem uma das extremidades aberta e a outra fechada, e a sua frequência fundamental é igual à frequência do segundo harmônico do tubo A. Considere a velocidade do som no ar igual a 340 m/s. Os comprimentos dos tubos A e B são, respectivamente,
- A) 42,5 cm e 31,9 cm. D) 85,0 cm e 42,5 cm.
 B) 42,5 cm e 63,8 cm. E) 85,0 cm e 127,0 cm.
 C) 85,0 cm e 21,3 cm.

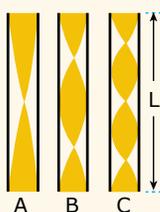
SEÇÃO ENEM

- 01.** (Enem-2016) Um experimento para comprovar a natureza ondulatória da radiação de micro-ondas foi realizado da seguinte forma: anotou-se a frequência de operação de um forno de micro-ondas e, em seguida, retirou-se sua plataforma giratória. No seu lugar, colocou-se uma travessa refratária com uma camada grossa de manteiga. Depois disso, o forno foi ligado por alguns segundos. Ao se retirar a travessa refratária do forno, observou-se que havia três pontos de manteiga derretida alinhados sobre toda a travessa. Parte da onda estacionária gerada no interior do forno é ilustrada na figura.



De acordo com a figura, que posição correspondem a dois pontos consecutivos da manteiga derretida?

- A) I e III. D) II e IV.
 B) I e V. E) II e V.
 C) II e III.
- 02.** (Enem-2015) Em uma flauta as notas musicais possuem frequência e comprimento de onda (λ) muito bem definidos. As figuras mostram esquematicamente um tubo de comprimento L, que representa de forma simplificada uma flauta, em que estão representados: em A o primeiro harmônico de uma nota musical (comprimento de onda λ_A), em B seu segundo harmônico (comprimento de onda λ_B) e em C o seu terceiro harmônico (comprimento de onda λ_C), onde $\lambda_A > \lambda_B > \lambda_C$.



Em função do comprimento do tubo, qual o comprimento de onda da oscilação que forma o próximo harmônico?

- A) $\frac{L}{4}$ C) $\frac{L}{2}$ E) $\frac{6L}{8}$
 B) $\frac{L}{2}$ D) $\frac{L}{8}$

- 03.** (Enem) Em um violão afinado, quando se toca a corda Lá com seu comprimento efetivo (harmônico fundamental), o som produzido tem frequência de 440 Hz. Se a mesma corda do violão é comprimida na metade do seu comprimento, a frequência do novo harmônico
- A) se reduz à metade, porque o comprimento de onda dobrou.
 B) dobra, porque o comprimento de onda foi reduzido à metade.
 C) quadruplica, porque o comprimento de onda foi reduzido à metade.
 D) quadruplica, porque o comprimento de onda foi reduzido à quarta parte.
 E) não se modifica, porque é uma característica independente do comprimento da corda que vibra.

GABARITO

Meu aproveitamento

Aprendizagem

Acertei _____ Errei _____

01. A 03. D 05. B 07. E
 02. D 04. D 06. E 08. E

Propostos

Acertei _____ Errei _____

01. B
 02. C
 03. C
 04. D
 05. D
 06. C
 07. B
 08. B
 09. A
 10. B
 11. D
 12. C
 13. C
 14. C

Seção Enem

Acertei _____ Errei _____

01. A
 02. C
 03. B



Total dos meus acertos: _____ de _____ . _____ %

Som e Efeito Doppler

ONDAS SONORAS

Quando, por exemplo, uma lâmina é posta em vibração, ela provoca um distúrbio vibratório que se propaga através das moléculas de ar de forma semelhante à onda que se propaga em uma mola que vibra longitudinalmente. Quando essa vibração atinge o tímpano, ela é transmitida pelo sistema auditivo até o cérebro. Se a frequência de vibração da lâmina estiver dentro da faixa de audição humana, a pessoa que recebeu essa vibração escutará o som produzido pela lâmina. Ou seja, sempre que uma onda sonora é produzida, um corpo está em vibração de modo a gerar aquele som. Veja a seguir:

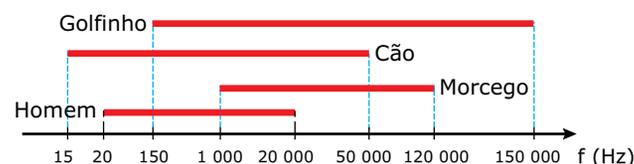


As cordas vibrantes e os tubos sonoros são muito usados em instrumentos musicais de corda e de sopro, respectivamente, para produção de ondas sonoras. Quando as cordas e os tubos entram em ressonância com o agente externo, os elementos vibrantes oscilam com a máxima amplitude para aquele valor de energia fornecido pelo executor do instrumento, e o som produzido é bem perceptível.

A onda sonora é uma onda mecânica, longitudinal, que necessita de um meio material para se propagar. As partículas que compõem o meio oscilam durante a passagem dessa onda. Assim, o meio de propagação apresenta, em certo instante, regiões nas quais a densidade de partículas é maior e outras regiões em que a densidade de partículas é menor. Ou seja, o meio apresenta regiões de maior e de menor pressão, respectivamente. A distância entre duas regiões adjacentes de maior pressão (ou de menor pressão), por exemplo, corresponde ao comprimento de onda (λ) da onda sonora. Dessa forma, medindo-se a pressão nos diversos pontos do meio, conseguimos determinar o seu comprimento de onda.

O espectro das ondas sonoras, para um determinado observador, é composto de três tipos de ondas: o infrassom, o som e o ultrassom. O som, para o homem, corresponde às ondas sonoras com frequências compreendidas entre 20 Hz e 20 000 Hz. Ou seja, o ouvido humano é sensível apenas às ondas sonoras cujas frequências estejam compreendidas nesse intervalo. Esses números são considerados valores padrão e variam de uma pessoa para outra e, muito, com a idade do ouvinte. Um fato alarmante que os médicos têm detectado na conturbada vida atual é o estreitamento dessa faixa de sons audíveis, principalmente nas altas frequências.

Isso se deve, segundo eles, à enorme poluição sonora a que a população urbana está submetida. Certos animais escutam sons abaixo e acima dos valores citados. Muitos deles, inclusive, usam esses sons para mapear o espaço à sua volta. A figura a seguir mostra a faixa audível (som) para alguns animais. O eixo das frequências não está em escala.



Para qualquer um dos animais citados, as ondas sonoras com frequências abaixo e acima da sua faixa audível (som) correspondem ao infrassom e ao ultrassom, respectivamente.

Durante a passagem da onda sonora, as partículas do meio transmitem a energia para as suas vizinhas imediatas, que o fazem para as outras partículas adjacentes, e assim por diante. Dessa forma, quanto mais rapidamente as partículas transferem a energia umas às outras, mais rapidamente a onda sonora propaga através do meio. Assim, fica claro que a onda sonora não pode se propagar no vácuo. A velocidade da onda sonora, em determinado meio, depende de vários fatores, entre eles a elasticidade, a densidade, a rigidez, o grau de organização das partículas e a temperatura do meio. A tabela a seguir mostra a velocidade, aproximada, da onda sonora em algumas substâncias.

Velocidade da onda sonora (m/s)				
Borracha	Ar (20 °C)	Ar (40 °C)	Água	Aço
60	340	352	1 450	5 100

Um fato muito importante deve ser destacado no que diz respeito à velocidade da onda sonora: todas as ondas sonoras, independentemente do tipo (som, infrassom ou ultrassom) e da sua frequência, se propagam num certo meio com a mesma velocidade.

Observe a tabela anterior. Veja que a velocidade do som no ar aumenta com a temperatura. É fácil perceber o motivo. Quanto maior a temperatura, maior a agitação térmica das moléculas, e, dessa forma, elas transmitem a energia umas às outras mais rapidamente.



PARA REFLETIR

Por que a velocidade do som, para os meios citados, é menor na borracha?

QUALIDADES FISIOLÓGICAS DO SOM



O osciloscópio é um aparelho capaz de captar um sinal de áudio (onda sonora), que é longitudinal, e de apresentar, em sua tela, uma “onda transversal” que corresponde ao sinal de entrada. A figura a seguir mostra, respectivamente, a onda sonora (som) progressiva – que se desloca ao longo do meio de propagação – e a tela do aparelho.



Veja que as compressões e rarefações da onda sonora são representadas no osciloscópio por cristas e por vales, respectivamente. Dessa forma, fazendo a leitura do aparelho, podemos determinar as grandezas características da onda sonora (período, frequência, velocidade, comprimento de onda e amplitude). Ou seja, o osciloscópio nos permite “visualizar” a onda sonora. Ao longo deste módulo, representaremos várias ondas sonoras conforme seriam vistas na tela do osciloscópio.

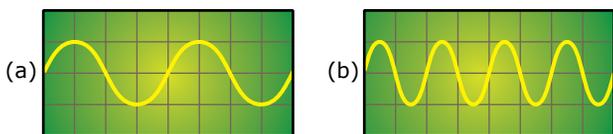
O ouvido humano é capaz de perceber três características no som, conhecidas como qualidades fisiológicas do som, as quais nos permitem distinguir sons uns dos outros. Essas qualidades são: altura, intensidade e timbre.

Altura

A **altura do som** é a qualidade fisiológica pela qual podemos diferenciar os sons **graves** dos sons **agudos**. A altura é uma característica relacionada com a **frequência** (f) do som. Na música, a altura do som é usada para classificar as notas musicais. Assim, elas (dó, ré, mi, fá, sol, lá, si) são sons musicais de frequências e, claro, de alturas diferentes. Veja, a seguir, a relação entre essas grandezas.

Som mais $\left\{ \begin{array}{l} \text{Alto} \Rightarrow f \text{ maior} \Rightarrow \text{mais agudo} \\ \text{Baixo} \Rightarrow f \text{ menor} \Rightarrow \text{mais grave} \end{array} \right.$

As figuras a seguir mostram duas ondas sonoras (a) e (b). O eixo horizontal do osciloscópio está calibrado para o mesmo intervalo de tempo. Observe que a onda (b) tem o dobro da frequência de (a). Dessa forma, o som (b) é mais alto e mais agudo que o som (a).



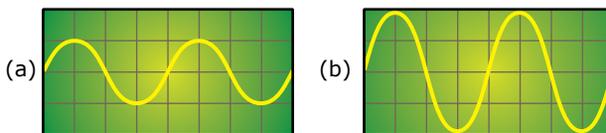
Intensidade

A **intensidade do som** é a qualidade fisiológica que nos permite diferenciar os sons **fortes** dos sons **fracos**. O nível ou volume sonoro estão associados a essa qualidade.

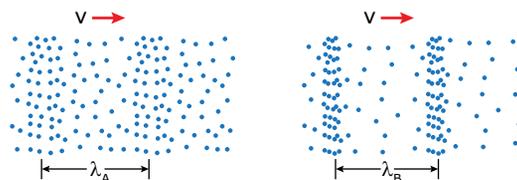
A intensidade depende da **amplitude** (A) da onda sonora e, dessa forma, da **energia** (E) transportada pela onda e necessária para produzi-la. Se você fala com um volume de voz mais elevado, por exemplo, as moléculas de ar vão vibrar com maior amplitude, a onda sonora terá maior intensidade e você gastará mais energia.

Som $\left\{ \begin{array}{l} \text{Mais intenso} \Rightarrow A \text{ maior} \Rightarrow E \text{ maior} \Rightarrow \text{mais forte} \\ \text{Menos intenso} \Rightarrow A \text{ menor} \Rightarrow E \text{ menor} \Rightarrow \text{mais fraco} \end{array} \right.$

As figuras (a) e (b) a seguir mostram, na tela do osciloscópio, dois sons de mesma altura (mesma frequência) que chegam ao aparelho. Veja que o som (b) tem maior amplitude (A) e, dessa forma, é mais intenso e mais forte.



A figura a seguir mostra, de forma aproximada, a densidade das moléculas de ar correspondente aos sons (a) e (b), que se deslocam através do meio com a mesma velocidade (v). Observe que os comprimentos de onda são iguais para as duas ondas.



O som de um trovão é intenso (forte) e baixo (grave). O som emitido por um pirlongo é exatamente o oposto do som emitido pelo trovão: ele é um som pouco intenso (fraco) e alto (agudo). Uma sirene típica emite som forte e alto. A batida do coração, que mal ouvimos, é um som fraco e baixo.

Os pesquisadores mediram a intensidade sonora mínima (I_0) que uma pessoa pode escutar. Os valores obtidos, para uma pessoa de audição normal, variam de 10^{-16} W/m^2 a 10^{-12} W/m^2 . Neste estudo, vamos considerar que esse valor seja $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Não é necessário você guardar esse número, pois, se for indispensável na solução de algum exercício, ele será fornecido.

O nível de intensidade sonora (N) determina a relação entre a intensidade (I) de um som e a intensidade mínima (I_0):

$$N = \log \frac{I}{I_0}$$

O nível de intensidade sonora (N) é medido, na equação anterior, em uma unidade chamada bel (B). Sons comuns, como aqueles que ocorrem em uma conversa moderada, giram em torno de 4 B. Sons mais fortes, como o som de veículos em um trânsito intenso, são próximos de 8 B. O limiar da dor, ou seja, a intensidade sonora máxima que nosso ouvido pode tolerar, corresponde a sons cujo nível de intensidade sonora é maior que 12 B.

Lembre-se de que: $\log_{10} y = x \Rightarrow 10^x = y$

Vamos comparar a intensidade sonora para os seguintes valores de níveis de intensidade:

$$N_1 = 4 \text{ B} \Rightarrow 4 = \log (I_1/10^{-12}) \Rightarrow I_1 = 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

$$N_2 = 5 \text{ B} \Rightarrow 5 = \log (I_2/10^{-12}) \Rightarrow I_2 = 10^{-7} \text{ W/m}^2$$

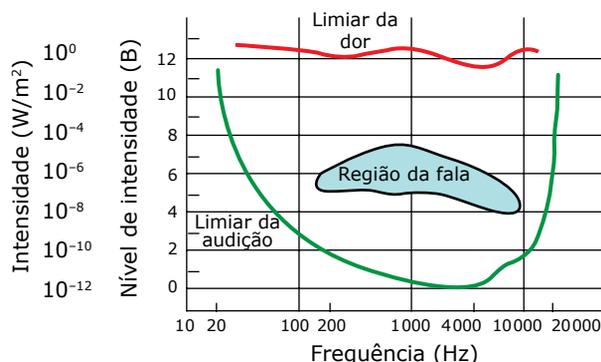
$$N_3 = 6 \text{ B} \Rightarrow 6 = \log (I_3/10^{-12}) \Rightarrow I_3 = 10^{-6} \text{ W/m}^2$$

$$\text{Assim, } I_3 = 10 \cdot I_2 = 100 \cdot I_1.$$

Observe que cada unidade que se aumenta no nível de intensidade, em B, corresponde a multiplicar a intensidade sonora por 10. Dessa forma, um som de 8 B é 1 000 vezes mais intenso que um outro de 5 B.

É usual que o nível de intensidade sonora seja fornecido em dB (decibel), que corresponde à décima parte do bel. Assim, $1 \text{ B} = 10 \text{ dB}$. Se o nível de intensidade sonora estiver em dB, você deve dividir por 10 para obter o valor em bel e, assim, poderá usar a equação anterior.

A figura a seguir mostra a intensidade e o nível de intensidade sonora para diversas faixas de frequência.



Observe na figura que, próximo dos 4 000 Hz, somos capazes de ouvir sons com as menores intensidades. Veja, ainda, que a região da fala é bem mais "estreita" (entre 200 Hz e 10 000 Hz, aproximadamente) do que a região de audição. Vale ressaltar que as ondas sonoras com frequências próximas a 20 Hz ou 20 000 Hz (limites de audição) exigem uma intensidade sonora muito elevada, próxima do limiar da dor, para serem ouvidas. Deve ficar claro que os valores mostrados variam de uma pessoa para outra.

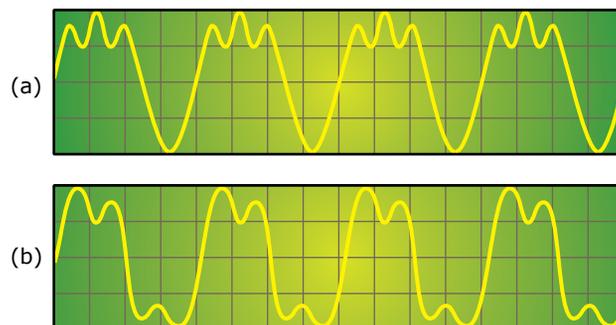
Timbre

O **timbre do som** é a qualidade fisiológica que nos permite distinguir sons provenientes de diferentes fontes sonoras. Ele está relacionado com a **forma** da onda sonora resultante. Quando vibramos a corda de um instrumento musical, por exemplo, ela provoca a vibração dos diversos elementos materiais que compõem o instrumento. Dessa forma, várias ondas são geradas simultaneamente. A combinação de todas essas vibrações e dos diversos harmônicos da corda produz uma onda típica e característica do instrumento. A frequência dessa onda será, sempre, a frequência fundamental da corda que está em vibração. Se dois instrumentos musicais diferentes emitirem sons de mesma altura e de mesma intensidade, poderemos distinguir um som do outro.

Isso é possível porque cada instrumento possui um timbre peculiar e característico. Quando reconhecemos a voz de uma pessoa, mesmo que não a vejamos, é devido ao fato de que cada indivíduo possui um timbre de voz.

O timbre que caracteriza um determinado violão, por exemplo, depende de vários fatores. Entre eles, podemos citar os diversos harmônicos da corda que está em vibração, a intensidade relativa de cada um desses harmônicos, o formato da caixa de ressonância (que é um tubo fechado) e o material de que ela é feita. Você já deve ter notado que dois violões, aparentemente idênticos, podem emitir sons distintos.

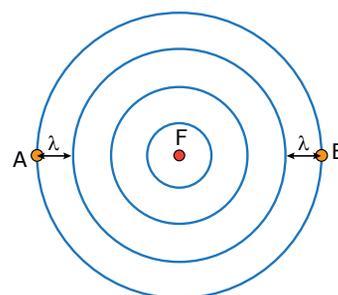
A figura a seguir representa sons emitidos por uma flauta (a) e por um piano (b), analisados por meio do osciloscópio. Observe que os sons correspondem à mesma nota musical, pois apresentam a mesma frequência (mesmo período). Os sons apresentam, também, a mesma intensidade, pois eles possuem a mesma amplitude. Entretanto, a forma da onda é diferente para os dois sons. Dessa forma, o nosso ouvido consegue distinguir um som do outro.



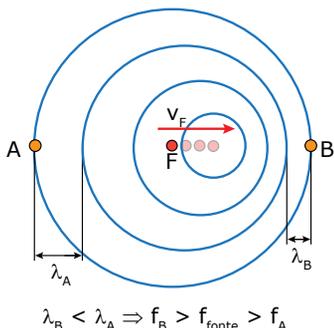
EFEITO DOPPLER

Imagine duas situações bem conhecidas de todos. Primeira situação: você está parado no passeio e uma ambulância passa com a sirene ligada. Quando ela se aproxima de você e depois se afasta, você percebe que o som da sirene, inicialmente, parece mais alto (agudo) e, posteriormente, mais baixo (grave). Segunda situação: considere que você está com uma lancha em uma lagoa. O vento faz com que ondas ("marolas") atinjam a embarcação com determinada frequência. Se a lancha se movimenta de encontro a essas ondas, ela será atingida por uma quantidade maior de cristas e o navegador achará que a frequência das ondas aumentou. Entretanto, se a lancha se movimenta no mesmo sentido das ondas, ela será atingida por uma quantidade menor de cristas e o navegador achará que a frequência das ondas diminuiu. Nos dois exemplos, a **frequência percebida** pelo observador está alterada em relação às frequências verdadeiras das fontes emissoras. Essa alteração da frequência percebida, devido ao movimento relativo entre a fonte de ondas e o observador, é conhecida como **efeito Doppler** e pode acontecer com qualquer tipo de onda.

Considere uma fonte pontual emitindo ondas circulares centradas na posição F. Os observadores A e B, colocados nas posições indicadas, recebem tais ondas com um mesmo comprimento de onda λ conforme a figura a seguir. Nela, cada linha representa uma crista da onda. Uma vez que a velocidade da onda é a mesma, as frequências percebidas pelos observadores são idênticas e iguais à frequência da fonte que gerou as ondas.



Agora, imagine que a fonte se movimentou para a direita com determinada velocidade (v_f). A velocidade da onda não é alterada pelo movimento da fonte, pois aquela depende apenas do meio de propagação. Dessa forma, cada crista, embora circular (velocidade constante), está centrada na posição em que a fonte se encontrava no momento que aquela crista foi gerada. Logo, os observadores A e B recebem as ondas como se o comprimento de onda estivesse alterado. Assim, eles percebem frequências distintas e diferentes da frequência da fonte. Veja a seguir:



A frequência percebida fica também alterada se os observadores se deslocam em relação à fonte. Considere a fonte em repouso. Se o observador se aproxima dela, ele recebe uma quantidade maior de cristas por unidade de tempo, pois ele vai de encontro a elas. Dessa forma, o observador percebe uma frequência maior que a frequência emitida pela fonte. Se o observador se afasta da fonte, ele recebe uma quantidade menor de cristas num certo intervalo de tempo, pois ele tenta escapar das cristas. Assim, a frequência percebida é menor do que a frequência emitida pela fonte. O fenômeno fica ainda mais evidente quando existe um movimento no qual tanto a fonte quanto o observador se afastam ou se aproximam um do outro.

Para o caso das ondas sonoras, a frequência aparente – aquela percebida pelo observador – pode ser calculada, em relação à frequência da fonte, pela equação:

$$f_{\text{aparente}} = f_{\text{fonte}} \cdot \left(\frac{v_{\text{som}} + v_{\text{observador}}}{v_{\text{som}} - v_{\text{fonte}}} \right)$$

Nessa equação, os sinais se referem a uma dupla **aproximação** entre fonte e observador. Se algum deles se movimentar no sentido de afastar-se, o sinal da respectiva velocidade deve ser alterado. Por exemplo, se o observador tenta afastar-se da fonte, $v_{\text{observador}}$ deve ter sinal negativo. Se a fonte tenta afastar-se do observador, v_{fonte} deve ter sinal positivo. É claro que, se o observador ou a fonte estiverem em repouso, a sua velocidade é nula, e a equação se torna mais simples. Vale ressaltar que essa equação só é válida para velocidades da fonte e do observador menores que a velocidade da onda.

O efeito Doppler tem muitas aplicações no nosso dia a dia. O radar, que monitora a velocidade de veículos nas estradas, é uma dessas aplicações. Considere um veículo que se aproxima do radar. O aparelho emite uma onda de frequência f_0 , que é refletida pelo veículo e volta para o dispositivo. Devido ao movimento de aproximação, o carro funciona como uma fonte em movimento, “emissora” de ondas refletidas que o radar recebe de volta com uma frequência f , maior que f_0 . Conhecendo-se os valores dessas frequências e da velocidade da onda, o dispositivo determina e indica a velocidade do veículo.

As ondas eletromagnéticas, como a luz, também apresentam efeito Doppler. A frequência da luz está associada à cor da radiação emitida. Considere uma fonte irradiando, por exemplo, luz monocromática amarela. Se essa fonte se aproxima de um observador, com grande velocidade, a luz recebida por ele tende para o azul (frequência maior). Se a fonte, por outro lado, se afasta do observador, a luz que ele recebe tende para o vermelho (frequência menor). Por meio de potentes telescópios que vasculham o Universo, alguns cientistas perceberam que as luzes emitidas pelas galáxias que estão à nossa volta estão desviadas para o vermelho. Dessa forma, eles concluíram que todas as galáxias se afastam de nós e umas das outras. A única explicação, até agora, para esse afastamento é considerar o universo em expansão. Os cientistas mediram a velocidade com que as galáxias se afastam, usando o efeito Doppler, e concluíram também que, quanto maior o afastamento de uma galáxia, maior a sua velocidade de afastamento.

Para que exista alteração na frequência da luz, como consequência do efeito Doppler, a velocidade da fonte ou do observador deve ser comparável à velocidade da luz. Dessa forma, a equação apresentada anteriormente não é aplicável para ondas eletromagnéticas, pois, nesse caso, os efeitos relativísticos devem ser considerados.



O efeito Doppler e as ondas de choque

O movimento relativo entre uma fonte emissora de ondas e um observador não interfere na velocidade de propagação da onda, porém esse movimento interfere na frequência da onda percebida pelo observador. A essa alteração damos o nome de efeito Doppler. Essa animação vai auxiliar você a compreender o efeito Doppler e as ondas de choque que são produzidas por objetos que viajam em velocidade igual ou mais altas que a do som. Boa atividade!



EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. Uma fonte sonora, em repouso, emite ondas com frequência f_0 , que se propagam no ar com velocidade $v = 330$ m/s. Um carro de corrida, com um detector instalado em seu interior, se aproxima e depois afasta-se dessa fonte. O detector acusa que a frequência de aproximação é o dobro da frequência durante o afastamento do veículo. Determinar a velocidade do carro.

Resolução:

Sejam f_1 e f_2 as frequências aparentes de aproximação e de afastamento do carro de corrida, respectivamente. Como a fonte está em repouso, $v_{\text{fonte}} = 0$. Assim, a equação do efeito Doppler, nos dois casos, será:

$$f_1 = f_0 \left(\frac{v_{\text{som}} + v_{\text{carro}}}{v_{\text{som}}} \right); \quad f_2 = f_0 \left(\frac{v_{\text{som}} - v_{\text{carro}}}{v_{\text{som}}} \right)$$

Como $f_1 = 2f_2$, temos que:

$$f_0 \left(\frac{v_{\text{som}} + v_{\text{carro}}}{v_{\text{som}}} \right) = 2 \cdot f_0 \left(\frac{v_{\text{som}} - v_{\text{carro}}}{v_{\text{som}}} \right) \Rightarrow$$

$$v_{\text{som}} + v_{\text{carro}} = 2(v_{\text{som}} - v_{\text{carro}}) \Rightarrow v_{\text{carro}} = v_{\text{som}}/3 \Rightarrow$$

$$v_{\text{carro}} = 110 \text{ m/s} = 396 \text{ km/h}$$

EXERCÍCIOS DE APRENDIZAGEM



- 01.** (UFMG) Ao tocar um violão, um músico produz ondas nas cordas desse instrumento. Em consequência, são produzidas ondas sonoras que se propagam no ar. Comparando-se uma onda produzida em uma das cordas do violão com a onda sonora correspondente, é correto afirmar que as duas têm
- a mesma amplitude.
 - a mesma frequência.
 - a mesma velocidade de propagação.
 - o mesmo comprimento de onda.

- 02.** (Unimontes-MG) Um telefone celular recebe e emite micro-ondas. Quando ligamos para outra pessoa, o telefone dela recebe as ondas eletromagnéticas e emite um sinal sonoro (o toque) e / ou vibra, dependendo da configuração escolhida pelo usuário. Em um experimento, um telefone celular é pendurado por um fio muito fino no interior de um recipiente de vidro, onde é feito vácuo. Alguém discar para esse telefone, que está configurado para tocar uma música ao receber o chamado. Desconsiderando a possibilidade de que uma quantidade perceptível de onda sonora possa ser transmitida através do fio para as paredes do recipiente, é correto afirmar que
- o telefone não receberá as micro-ondas porque elas não se propagam no vácuo.
 - o telefone não receberá as micro-ondas, mas será possível ouvir a música.
 - o telefone receberá as micro-ondas e será possível ouvir a música.
 - o telefone receberá as micro-ondas, mas não será possível ouvir a música.

- 03.** (UECE) Quando diferentes tipos de instrumentos musicais, como flauta, saxofone e piano, produzem a mesma nota musical, os sons resultantes diferem uns dos outros devido
- às diferentes composições de harmônicos gerados por cada instrumento.
 - às diferentes intensidades das ondas sonoras.
 - às diferentes frequências sonoras produzidas.
 - aos diferentes comprimentos de ondas fundamentais.

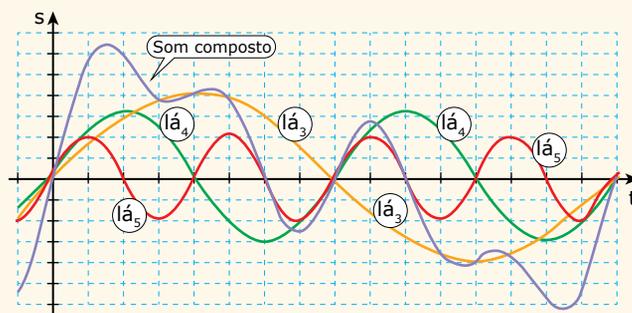
- 04.** (PUC RS-2015) Nossos sentidos percebem de forma distinta características das ondas sonoras, como: frequência, timbre e amplitude. Observações em laboratório, com auxílio de um gerador de áudio, permitem verificar o comportamento dessas características em tela de vídeo e confrontá-las com nossa percepção. Após atenta observação, é correto concluir que as características que determinam a altura do som e a sua intensidade são, respectivamente,
- frequência e timbre.
 - frequência e amplitude.
 - amplitude e frequência.
 - amplitude e timbre.
 - timbre e amplitude.

- 05.** (UFMS) Os morcegos, quando voam, emitem ultrassom para que, através das reflexões ocorridas pelos obstáculos à sua frente, possam desviar deles, e também utilizam esse mecanismo para se orientarem durante o voo. Imagine um morcego voando em linha reta horizontal com velocidade V , em direção a uma parede vertical fixa. Considere que não esteja ventando e que a fonte sonora no morcego seja puntiforme e então, quando ele ainda está a uma certa distância da parede, emite uma onda sonora com uma frequência f de ultrassom. Com fundamentos da mecânica ondulatória, assinale a(s) proposição(ões) correta(s).

- A velocidade das ondas sonoras que possuem frequência de ultrassom é maior que a velocidade de ondas sonoras que possuem frequência menor que as de ultrassom.
- A velocidade da onda sonora no ar, emitida pelo morcego em movimento, é diferente da velocidade da onda sonora no ar emitida pelo morcego quando em repouso.
- A frequência da onda sonora refletida pela parede e percebida pelo morcego é maior que a frequência da onda sonora emitida por ele.
- A velocidade da onda sonora no ar refletida pela parede é igual à velocidade da onda sonora no ar emitida pelo morcego.
- Esse efeito de mudança na frequência de ondas sonoras emitidas por fontes em movimento chama-se batimento.

Soma ()

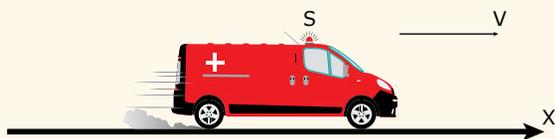
- 06.** (CMMG) Fisicamente, entende-se por som musical o resultado da superposição de ondas sonoras periódicas. O gráfico amplitude (s) x tempo (t) mostra a superposição de três sons musicais simples (l_3 , l_4 e l_5), produzindo um som composto.



O fundo retangular da figura é composto de pequenos retângulos; a altura de cada um é de 1,0 cm. A unidade de tempo da escala do gráfico é de 0,1 s. Sobre esse gráfico, pode-se afirmar que

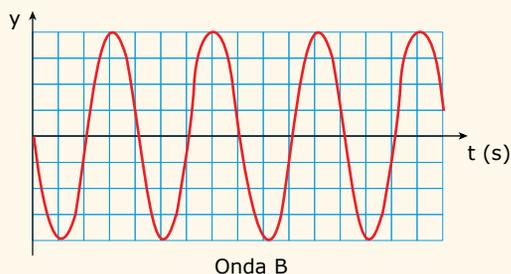
- entre os três sons musicais, o de maior comprimento de onda é o que possui maior amplitude.
- a superposição das ondas sonoras dos sons musicais l_3 e l_4 , no instante 0,3 s, é de 3,8 cm.
- a frequência do som musical l_5 é de 2,0 Hz.
- o período do som composto é de 0,8 s.

- 07.** (UFLA-MG) Uma ambulância desloca-se ao longo de uma estrada retilínea com velocidade constante, soando sua sirene S (figura a seguir). O esquema correto indicado nas alternativas a seguir que representa a propagação das ondas sonoras dessa sirene é:



- A)
- B)
- C)
- D)

- 08.** (IFSul-2017) Nos gráficos a seguir, são representadas duas ondas sonoras. Cada quadradinho vale 1 unidade.

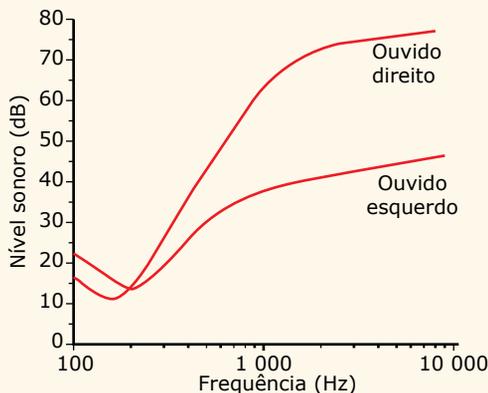


- Analisando cada um dos gráficos, conclui-se que o
- A) gráfico da onda A representa um som agudo e o da onda B um som grave.
 - B) gráfico da onda B representa um som agudo e o da onda A um som grave.
 - C) período e a frequência da onda B são respectivamente 8 s e 0,25 Hz.
 - D) período e a frequência da onda A são respectivamente 4 s e 0,125 Hz.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS



- 01.** (UEL-PR) As ambulâncias, comuns nas grandes cidades, quando transitam com suas sirenes ligadas, causam ao sentido auditivo de pedestres parados a percepção de um fenômeno sonoro denominado efeito Doppler.
- Sobre a aproximação da sirene em relação a um pedestre parado, assinale a alternativa que apresenta, corretamente, o efeito sonoro percebido por ele causado pelo efeito Doppler.
- A) Aumento no comprimento da onda sonora.
 - B) Aumento na amplitude da onda sonora.
 - C) Aumento na frequência da onda sonora.
 - D) Aumento na intensidade da onda sonora.
 - E) Aumento na velocidade da onda sonora.
- 02.** (FGV-SP) A avaliação audiológica de uma pessoa que apresentava dificuldades para escutar foi realizada determinando-se o limiar de nível sonoro de sua audição (mínimo audível), para várias frequências, para os ouvidos direito e esquerdo separadamente. Os resultados estão apresentados nos gráficos a seguir, onde a escala de frequência é logarítmica, e a de nível sonoro, linear. A partir desses gráficos, pode-se concluir que essa pessoa



- A) percebe o som da nota musical lá, de 440 Hz, apenas com o ouvido esquerdo, independente do nível sonoro.
 - B) não escuta um sussurro de 18 dB, independente de sua frequência.
 - C) escuta os sons de frequências mais altas melhor com o ouvido direito do que com o esquerdo.
 - D) escuta alguns sons sussurrados, de frequência abaixo de 200 Hz, apenas com o ouvido direito.
 - E) é surda do ouvido esquerdo.
- 03.** (UFPA-2016) Um homem (observador) assiste sentado a uma corrida de fórmula 1, localizado em uma arquibancada lateral à pista de corrida. O observador tem um aparelho que registra a frequência principal do motor dos carros tanto na aproximação quanto no afastamento. Sabendo-se que a razão entre as frequências na aproximação e no afastamento é 3, pode-se afirmar, nesse caso, que a velocidade do carro de corrida (considerada constante) é, em m/s, igual a:

Dado: A velocidade do som no ar é de 340 m/s.

- A) 170
B) 215
C) 290
D) 315
E) 415

04. (UFU-MG) Um morcego, voando com velocidade v_0 em direção a uma superfície plana, emite uma onda ultrassônica de frequência f_0 . Sabendo-se que a velocidade do som é v , a variação de frequência ouvida pelo morcego será:

- A) $\Delta f = f_0 \left(\frac{v}{v_0} \right)$
B) $\Delta f = f_0 \left(\frac{v_0}{v} \right)$
C) $\Delta f = f_0 \left(\frac{2v_0}{v - v_0} \right)$
D) $\Delta f = f_0 \left(\frac{v + v_0}{v - v_0} \right)$

05. (CEFET-MG-2015) Uma ambulância, emitindo um som de frequência f , move-se com uma velocidade v em direção a um pedestre que se encontra parado na margem de uma rodovia.

Considerando que a velocidade do som no ar é v_s , a frequência f' ouvida pelo pedestre vale:

- A) $f' = f \frac{v}{v_s + v}$
B) $f' = f \frac{v_s}{v_s + v}$
C) $f' = f \frac{v_s - v}{v_s}$
D) $f' = f \frac{v_s}{v_s - v}$
E) $f' = f$

06. (UECE) Os termos a seguir estão relacionados às ondas sonoras.

- I. Volume se refere à intensidade da sensação auditiva produzida por um som e depende da intensidade e da frequência da onda.
- II. Altura se refere a uma qualidade da onda que depende somente da sua frequência: quanto menor a frequência maior a altura.
- III. Batimento se refere às flutuações na intensidade do som quando há interferência de duas ondas sonoras de mesma frequência.
- IV. Timbre é uma característica que depende da frequência e da intensidade dos tons harmônicos que se superpõem para formar a onda sonora.

Está correto o que se afirma em

- A) I e II, apenas.
B) II e III, apenas.
C) III e IV, apenas.
D) I e IV, apenas.

Instrução: Leia o texto a seguir para responder às questões **07** e **08**.

O radar é um dos dispositivos mais usados para coibir o excesso de velocidade nas vias de trânsito. O seu princípio de funcionamento é baseado no efeito Doppler das ondas eletromagnéticas refletidas pelo carro em movimento.

Considere que a velocidade medida por um radar foi $V_m = 72$ km/h para um carro que se aproximava do aparelho.

07. (Unicamp-SP) Para se obter V_m , o radar mede a



diferença de frequências Δf , dada por $\Delta f = f - f_0 = \pm \frac{V_m}{c} f_0$, sendo f a frequência da onda refletida pelo carro, $f_0 = 2,4 \cdot 10^{10}$ Hz a frequência da onda emitida pelo radar e $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s a velocidade da onda eletromagnética. O sinal (+ ou -) deve ser escolhido dependendo do sentido do movimento do carro com relação ao radar, sendo que, quando o carro se aproxima, a frequência da onda refletida é maior que a emitida.

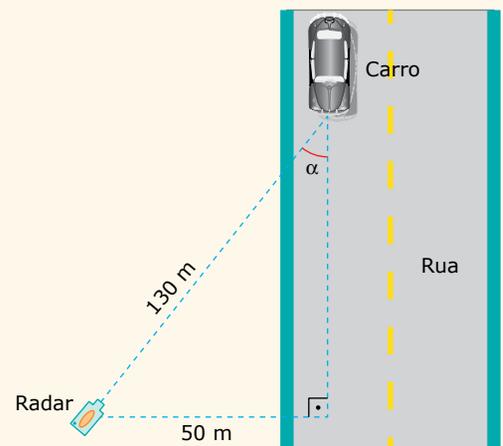
Pode-se afirmar que a diferença de frequência Δf medida pelo radar foi igual a

- A) 1 600 Hz.
B) 80 Hz.
C) -80 Hz.
D) -1 600 Hz.

08. (Unicamp-SP) Quando um carro não se move diretamente na direção do radar, é preciso fazer uma correção da



velocidade medida pelo aparelho (V_m) para obter a velocidade real do veículo (V_r). Essa correção pode ser calculada a partir da fórmula $V_m = V_r / \cos(\alpha)$, em que α é o ângulo formado entre a direção de tráfego da rua e o segmento de reta que liga o radar ao ponto da via que ele mira. Suponha que o radar tenha sido instalado a uma distância de 50 m do centro da faixa na qual o carro trafegava, e tenha detectado a velocidade do carro quando este estava a 130 m de distância, como mostra a figura a seguir:



Se o radar detectou que o carro trafegava a 72 km/h, sua velocidade real era igual a

- A) 66,5 km/h.
B) 78 km/h.
C) $36\sqrt{3}$ km/h.
D) $144/\sqrt{3}$ km/h.

09. (UFRGS-RS) A frequência do som emitido pela sirene de certa ambulância é de 600 Hz. Um observador em repouso percebe essa frequência como sendo de 640 Hz.



Considere que a velocidade da onda emitida é de 1 200 km/h e que não há obstáculos entre o observador e a ambulância.

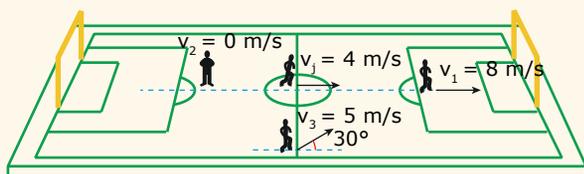
Com base nos dados anteriores, assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas do enunciado a seguir, na ordem em que aparecem.

A ambulância _____ do observador com velocidade de _____.

- A) afasta-se – 75 km /h
- B) afasta-se – 80 km/h
- C) afasta-se – 121 km/h
- D) aproxima-se – 80 km/h
- E) aproxima-se – 121 km/h

10. (UFSC–2017) Em uma escola, os professores foram desafiados pelos alunos para uma partida de futebol. O jogo ocorreu no campo de Futebol 7 do bairro. Decorridos 30 minutos da partida, um dos professores lançou a bola para o atacante, que estava impedido, e o juiz acionou o apito. No exato momento do apito do juiz, alguém tirou uma foto. O professor de Física percebeu que a foto poderia ajudá-lo na exemplificação de um fenômeno trabalhado em sala de aula. Na semana seguinte, apresentou a foto, com algumas alterações, como se vê na figura a seguir. Na imagem, é possível observar o juiz e três jogadores, cada qual com a indicação dos módulos e direções de suas velocidades v_j (juiz) v_1 (jogador 1) v_2 (jogador 2) e v_3 (jogador 3).

Considere os vetores velocidades no plano do gramado e que o som do apito do juiz tem frequência de 500 Hz.



Com base na figura e nos dados anteriores, é correto afirmar que:

- 01. A frequência do som do apito percebida pelo jogador 1 é maior do que a frequência real do som emitida pelo apito.
- 02. A frequência do som do apito percebida pelo jogador 1 é de, aproximadamente, 494,2 Hz.
- 04. A frequência do som do apito percebida pelo jogador 2 é de 500 Hz.
- 08. A frequência do som do apito percebida pelo jogador 1 é a mesma percebida pelo jogador 2.
- 16. O som do apito percebido pelo jogador 3 possui um timbre maior do que o timbre real do som do apito.
- 32. O jogador 3 escuta o som do apito com uma frequência de 500 Hz.
- 64. A frequência do som do apito percebida pelo jogador 3 é maior do que a frequência do som do apito percebida pelo jogador 1.

Soma ()

11. (UEL-PR) A poluição sonora em grandes cidades é um problema de saúde pública. A classificação do som como forte ou fraco está relacionada ao nível de intensidade sonora I , medido em watt/m^2 . A menor intensidade audível, ou limiar de audibilidade, possui intensidade $I_0 = 10^{-12} \text{ watt/m}^2$, para a frequência de 1 000 Hz. A relação entre as intensidades sonoras permite calcular o nível sonoro, NS, do ambiente, em decibéis (dB), dado pela fórmula $NS = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$.

A tabela a seguir mostra a relação do nível sonoro com o tempo máximo de exposição a ruídos.

Nível sonoro (dB)	Tempo máximo de exposição (em horas) de modo a evitar lesões auditivas irreversíveis
80	16
85	6
90	4
95	2
100	1

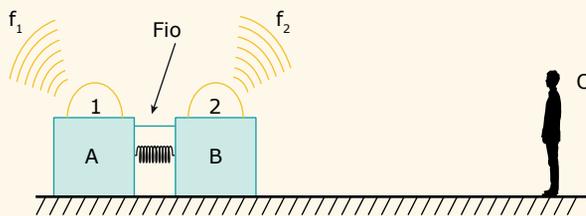
Com base nessa tabela, no texto e supondo que o ruído em uma avenida com trânsito congestionado tenha intensidade de 10^{-3} watt/m^2 , considere as afirmativas a seguir.

- I. O nível sonoro para um ruído dessa intensidade é de 90 dB.
- II. O tempo máximo em horas de exposição a esse ruído, a fim de evitar lesões auditivas irreversíveis, é de 4 horas.
- III. Se a intensidade sonora considerada for igual ao limiar de audibilidade, então o nível sonoro é de 1 dB.
- IV. Sons de intensidade de 1 watt/m^2 correspondem ao nível sonoro de 100 dB.

Assinale a alternativa correta.

- A) Somente as afirmativas I e II são corretas.
- B) Somente as afirmativas I e IV são corretas.
- C) Somente as afirmativas III e IV são corretas.
- D) Somente as afirmativas I, II e III são corretas.
- E) Somente as afirmativas II, III e IV são corretas.

12. (EPCAR-MG–2017) Duas fontes sonoras 1 e 2, de massas desprezíveis, que emitem sons, respectivamente, de frequências $f_1 = 570 \text{ Hz}$ e $f_2 = 390 \text{ Hz}$ são colocadas em um sistema, em repouso, constituído por dois blocos, A e B, unidos por um fio ideal e inextensível, de tal forma que uma mola ideal se encontra comprimida entre eles, como mostra a figura a seguir:



A fonte sonora 1 está acoplada ao bloco A, de massa 2 m, e a fonte sonora 2 ao bloco B, de massa m.

Um observador O, estacionário em relação ao solo, dispara um mecanismo que rompe o fio. Os blocos passam, então, a se mover, separados da mola, com velocidade constantes em relação ao solo, sendo que a velocidade do bloco B é de 80 m/s.

Considere que não existam forças dissipativas, que a velocidade do som no local é constante e igual a 340 m/s, que o ar se encontra em repouso em relação ao solo.

Nessas condições, a razão entre as frequências sonoras percebidas pelo observador, devido ao movimento das fontes 2 e 1, respectivamente, é:

- A) 1.
- B) 2.
- C) 3.
- D) 4.

- 13.** (FUVEST-SP-2016) O nível de intensidade sonora β , em decibéis (dB), é definido pela expressão $\beta = 10 \log_{10} (I/I_0)$, na qual I é a intensidade do som em W/m^2 e $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ é um valor de referência. Os valores de intensidade sonora $\beta = 0$ e $\beta = 120$ dB correspondem, respectivamente, aos limiares de audição e de dor para o ser humano. Como exposições prolongadas a níveis de intensidade sonora elevados podem acarretar danos auditivos, há uma norma regulamentadora (NR-15) do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil, que estabelece o tempo máximo de 8 horas para exposição ininterrupta a sons de 85 dB e especifica que, a cada acréscimo de 5 dB no nível da intensidade sonora, deve-se dividir por dois o tempo máximo de exposição. A partir dessas informações, determine

- A) a intensidade sonora I_0 correspondente ao limiar de dor para o ser humano;
- B) o valor máximo do nível de intensidade sonora β em dB, a que um trabalhador pode permanecer exposto por 4 horas seguidas;
- C) os valores da intensidade I e da potência P do som no tímpano de um trabalhador quando o nível de intensidade sonora é de 100 dB.

Note e adote: $\pi = 3$; diâmetro do tímpano = 1 cm.

- 14.** (FUVEST-SP-2016) Miguel e João estão conversando, parados em uma esquina próxima a sua escola, quando escutam o toque da sirene que indica o início das aulas. Miguel continua parado na esquina, enquanto João corre em direção à escola. As ondas sonoras propagam-se, a partir da sirene, em todas as direções, com comprimento de onda $\lambda = 17$ cm e velocidade $v_s = 340$ m/s, em relação ao ar. João se aproxima da escola com velocidade de módulo $v = 3,4$ m/s e direção da reta que une sua posição à da sirene. Determine:

Dado: Considere um dia seco e sem vento.

- A) A frequência f_M do som da sirene percebido por Miguel parado na esquina.
- B) A velocidade v_R do som da sirene em relação a João correndo.
- C) A frequência f_J do som da sirene percebido por João quando está correndo.

Miguel, ainda parado, assobia para João, que continua correndo. Sendo o comprimento de onda do assobio igual a 10 cm determine:

- D) A frequência f_A do assobio percebido por João.

SEÇÃO ENEM

- 01.** (Enem-2015) Ao ouvir uma flauta e um piano emitindo a mesma nota musical, consegue-se diferenciar esses instrumentos um do outro.

Essa diferenciação se deve principalmente ao(à)

- A) intensidade sonora do som de cada instrumento musical.
- B) potência sonora do som emitido pelos diferentes instrumentos musicais.
- C) diferente velocidade de propagação do som emitido por cada instrumento musical.
- D) timbre do som, que faz com que os formatos das ondas de cada instrumento sejam diferentes.
- E) altura do som, que possui diferentes frequências para diferentes instrumentos musicais.

- 02.** (Enem) Visando reduzir a poluição sonora de uma cidade, a Câmara de Vereadores aprovou uma lei que impõe o limite máximo de 40 dB (decibéis) para o nível sonoro permitido após as 22 horas.

Ao aprovar a referida lei, os vereadores estão limitando qual característica da onda?

- A) A altura da onda sonora.
- B) A amplitude da onda sonora.
- C) A frequência da onda sonora.
- D) A velocidade da onda sonora.
- E) O timbre da onda sonora.

- 03.** (Enem) Quando adolescentes, as nossas tardes, após as aulas, consistiam em tomar às mãos o violão e o dicionário de acordes de Almir Chediak e desafiar nosso amigo Hamilton a descobrir, apenas ouvindo o acorde, quais notas eram escolhidas. Sempre perdíamos a aposta, ele possui o ouvido absoluto.

O ouvido absoluto é uma característica perceptual de poucos indivíduos capazes de identificar notas isoladas sem outras referências, isto é, sem precisar relacioná-las com outras notas de uma melodia.

LENT, R. *O cérebro do meu professor de acordeão*.

Disponível em: <<http://cienciahoje.uol.com.br>>.

Acesso em: 15 ago. 2012 (Adaptação).

No contexto apresentado, a propriedade física das ondas que permite essa distinção entre as notas é a

- A) frequência.
- B) intensidade.
- C) forma da onda.
- D) amplitude da onda.
- E) velocidade de propagação.

Radiação de Corpo Negro e Quantização de Energia

No fim do século XIX, a Física estava apoiada sobre duas grandes áreas: a Mecânica e o Eletromagnetismo. O conjunto de leis e de conceitos físicos desenvolvidos até o fim do século XIX é chamado de Física Clássica. Nessa época, muitos cientistas acreditavam que a Física havia se esgotado e que, doravante, ela seria usada para o avanço da humanidade. De certa forma, essa previsão se confirmou. O extraordinário desenvolvimento tecnológico ocorrido no século XX deveu-se, em grande parte, ao uso da Física Clássica. Carros, aviões, edificações de grande porte, entre tantos outros exemplos, foram e continuam sendo projetados com base nos fundamentos da Mecânica, da Eletrodinâmica e da Termodinâmica clássicas. Todavia, no início do século XX, duas revoluções contrariaram a crença de que a Física fosse apenas aquela desenvolvida até então e que nenhuma nova descoberta seria possível. Em 1900, o físico alemão Max Planck, ao estudar a radiação emitida por corpos negros, enunciou uma nova e revolucionária teoria, a quantização da energia eletromagnética, cujos desdobramentos originaram a Mecânica Quântica. Pouco depois, em 1905, Einstein divulgou a primeira parte da sua famosa Teoria da Relatividade. A Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade constituem as bases da Física Moderna. Muitos equipamentos e tecnologias atuais usam conceitos relativísticos e quânticos. O GPS, os transistores, o *laser*, os aceleradores de partículas, os aparelhos de radioterapia e as usinas nucleares são apenas alguns dos incontáveis exemplos da difusão da Física Moderna. Daí, a importância de estudá-la.

Neste módulo, iniciaremos o estudo da Física Moderna, apresentando a teoria de Planck sobre a radiação de corpo negro e a quantização da energia eletromagnética. Nos módulos seguintes, veremos alguns desdobramentos da Teoria Quântica e estudaremos a Teoria da Relatividade e algumas reações nucleares. Para introduzir esses conceitos, precisaremos adquirir um pouco de conhecimento sobre as ondas eletromagnéticas e, por isso, esse assunto constitui a abertura deste módulo.

A ONDA ELETROMAGNÉTICA

A luz é uma onda eletromagnética

Em 1873, o físico escocês James Clerk Maxwell descobriu que as leis da eletricidade e do eletromagnetismo podiam ser resumidas em um conjunto de quatro equações, atualmente denominadas equações de Maxwell.

A compreensão total dessas equações demanda conhecimento da Matemática estudada no nível superior, e, portanto, as discutiremos apenas de forma conceitual. Maxwell desenvolveu essas equações e mostrou que elas predizem a existência de ondas formadas por campos magnéticos e elétricos oscilantes no tempo, cuja propagação no espaço constitui uma onda eletromagnética. Depois de realizar manipulações algébricas em suas equações, Maxwell chegou à seguinte expressão para calcular a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

Nessa expressão, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$ é a permissividade elétrica do vácuo, e $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m}/\text{A}$ é a permeabilidade magnética do vácuo. Você deve se lembrar de que usamos a permissividade elétrica em equações para calcular forças, campos e capacitâncias elétricas, enquanto a permeabilidade magnética foi usada em equações para calcular campos magnéticos gerados por correntes elétricas. Maxwell substituiu essas constantes na equação anterior e obteve o seguinte resultado para o valor da velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo:

$$v = \frac{1}{\sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Esse valor é exatamente igual à velocidade da luz no vácuo. Maxwell não achou que isso fosse uma mera coincidência, concluindo, corretamente, que a luz era um tipo de onda eletromagnética.

As ondas eletromagnéticas podem ser geradas da aceleração de uma carga elétrica, como o que acontece em uma corrente elétrica alternada em um fio. Obviamente, a oscilação dessa carga produz um campo magnético variável no tempo e no espaço. Pensando na Lei da Indução de Faraday, Maxwell argumentou que a variação desse campo magnético produziria um campo elétrico, que também seria variável. A variação desse campo elétrico deveria, por sua vez, causar o aparecimento de um campo magnético variável. Assim, o campo elétrico e o campo magnético, ambos, se propagariam pelo espaço, um gerando o outro. Tal propagação é a chamada **onda eletromagnética**.

Após a divulgação dos trabalhos de Maxwell, muitos físicos iniciaram a empreitada de produzir artificialmente algum tipo de onda eletromagnética. Em 1888, o físico alemão Heinrich Hertz conseguiu gerar as primeiras ondas eletromagnéticas, construindo emissores e detectores de ondas de rádio. Em 1895, Röntgen descobriu os raios X, fazendo a primeira radiografia da história. Além da luz, das ondas de rádio e dos raios X, outras ondas eletromagnéticas foram descobertas desde então, tais como as micro-ondas e a radiação gama, esta última proveniente de reações nucleares.

A figura 1 mostra uma onda eletromagnética que se propaga da esquerda para a direita, no sentido positivo do eixo x. Nessa imagem, o campo magnético oscila em um plano vertical (eixo y), enquanto o campo elétrico oscila em um plano horizontal (eixo z). Logo, os campos oscilam em planos normais entre si e perpendicularmente à direção de propagação da onda. Por isso, as ondas eletromagnéticas são ondas transversais.

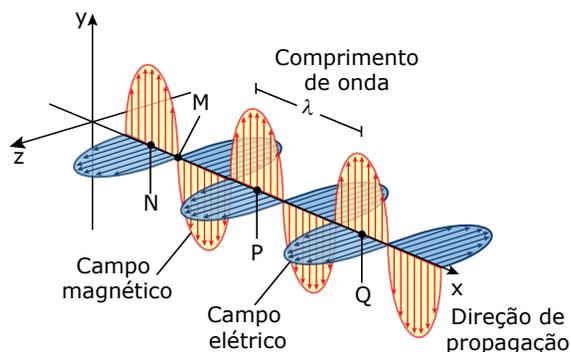


Figura 1. A onda eletromagnética é a propagação de um campo elétrico e de outro magnético, ortogonais entre si.

Um aspecto importante da figura 1 é que ela representa o registro de um instante de tempo da propagação da onda, isto é, ela é a imagem congelada da onda. Nesse instante, observe que os campos apresentam intensidade nula em certos pontos do eixo x (por exemplo, no ponto M), enquanto possuem intensidade máxima em outros pontos desse eixo (por exemplo, no ponto N). Após 1/4 de período, os campos no ponto M possuirão intensidade máxima, enquanto no ponto N eles apresentarão intensidade nula. Esse comportamento é semelhante àquele apresentado por ondas mecânicas, como uma onda se propagando em uma corda elástica. Todavia, ao contrário do que ocorre em uma onda mecânica, a propagação de uma onda eletromagnética não implica a vibração de um meio material. Na onda eletromagnética, o que oscila são os campos elétrico e magnético. De fato, como as ondas eletromagnéticas podem se propagar no vácuo, a presença de um meio material não é uma condição necessária para a sua propagação.



PARA REFLETIR

Certamente, você já deve ter notado ruídos de estática em seu rádio quando ocorre um relâmpago. Às vezes, esses ruídos ocorrem quando ligamos um interruptor de luz. Por que isso acontece?

O espectro eletromagnético

Na figura 1, observe a distância λ , que é o comprimento de onda associado à onda eletromagnética dessa figura. Podemos associar esse valor à distância entre dois pontos, ao longo da direção de propagação da onda, que estão em concordância de fase e que apresentam valores iguais de campo elétrico (ou de campo magnético). Observe que esse é o caso dos pontos P e Q mostrados. Bem antes de Maxwell ter descoberto a natureza eletromagnética da luz, Thomas Young, no início do século XIX, já havia determinado o comprimento de onda de luzes monocromáticas ($\cong 10^{-3}$ mm) por meio de experiências com franjas de interferência projetadas em um anteparo.

A frequência de uma onda eletromagnética, assim como para qualquer outro tipo de onda, é imposta por sua fonte. Ainda que a onda mude de meio (o que, em geral, faz a velocidade e o comprimento de onda variarem), a sua frequência permanece a mesma. Em um sinal de rádio de uma estação, a frequência da onda é determinada pela taxa de oscilações das cargas elétricas livres na antena transmissora. No caso da luz emitida por um filamento de uma lâmpada ou produzida em uma lâmpada de neônio, a frequência da luz está relacionada com fenômenos quânticos no interior dos átomos. Podemos calcular a frequência f de uma onda eletromagnética em função do seu comprimento de onda λ e de sua velocidade de propagação v usando a equação que você já conhece:

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

A figura 2 mostra alguns tipos de ondas presentes no espectro eletromagnético (existem mais), assim como as suas frequências e os seus comprimentos de onda (no vácuo). Observe a grande variedade de comprimentos de onda indicados na parte superior da figura, que se estendem desde valores ínfimos da ordem de dimensões atômicas (os raios X e gama) até comprimentos da ordem de quilômetros (as ondas de rádio). As frequências correspondentes, indicadas na parte inferior da figura, foram calculadas por meio da equação anterior, utilizando como valor para a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s.

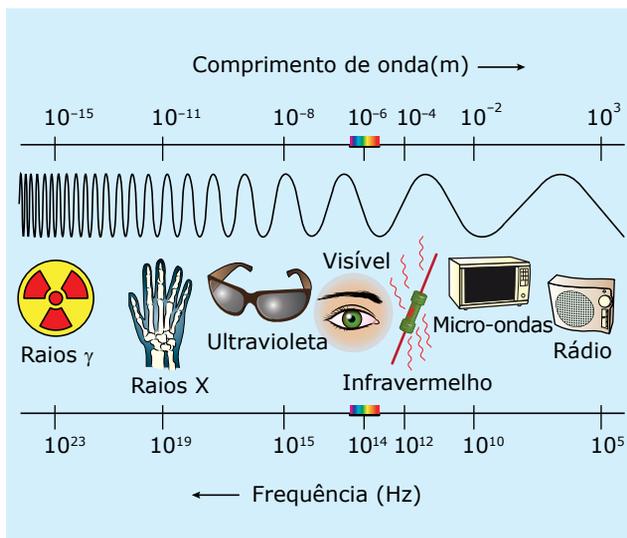


Figura 2. Espectro eletromagnético.

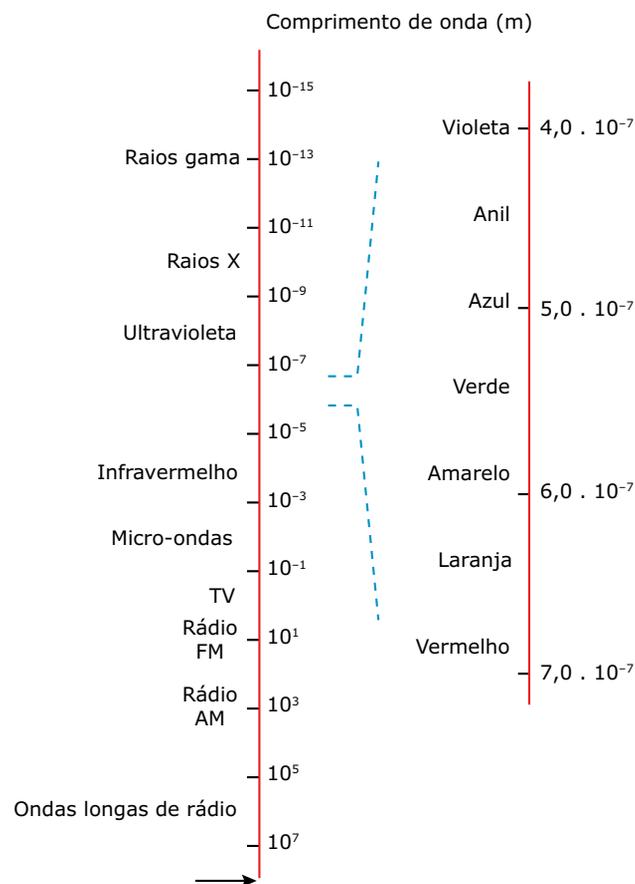
A velocidade da luz

De acordo com a Teoria da Relatividade, a matéria não pode se mover mais rápido que a luz. Assim, podemos estender essa ideia às ondas em geral. No vácuo, nada se move com velocidade igual ou maior que $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s, velocidade com a qual a luz, os raios X e todas as outras ondas eletromagnéticas se propagam. No ar, a velocidade das ondas eletromagnéticas é um pouco menor comparada com a sua velocidade no vácuo. Mesmo assim, o valor dessa velocidade é o mesmo para todas as frequências, ou seja, a luz azul, a luz vermelha, a onda de rádio e todas as outras formas de ondas eletromagnéticas se propagam no ar com velocidades idênticas. Esse comportamento é verificado na maioria dos gases.

Nos meios sólidos e líquidos, como o vidro e a água, a velocidade das ondas eletromagnéticas varia com a frequência da radiação. Nesses meios, chamados de dispersivos, a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas torna-se menor com o aumento da frequência. Assim, na água, por exemplo, os raios X viajam mais lentamente que a radiação ultravioleta. Esta, por sua vez, possui menor velocidade que a luz azul, e assim por diante. É por isso que um feixe de luz branca (luz solar, por exemplo) se dispersa ao penetrar em um prisma de vidro. A porção violeta presente nesse feixe apresenta alta frequência em relação às outras luzes. Assim, ela sofre uma maior redução de velocidade e, conseqüentemente, apresenta maior desvio. A luz vermelha, de menor frequência e, portanto, maior velocidade no prisma, é a parte da luz que sofre o menor desvio. O resultado disso é que o feixe de luz sofre dispersão, como estudado anteriormente em Óptica Geométrica.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. A figura a seguir mostra um diagrama do espectro eletromagnético.



- Explicar por que as ondas de rádio, na extremidade inferior do diagrama, são denominadas de ondas longas.
- Calcular as frequências extremas das ondas de rádio e dos raios gama apresentados no diagrama.
- Especificar a onda de radar a ser usada para localizar um avião intercontinental, sabendo que a reflexão sobre a aeronave é mais eficiente quando o comprimento de onda associado é da ordem de grandeza do avião. Explicar por que a informação contida na onda refletida permite saber se o avião está se aproximando ou se afastando do radar.
- Uma pessoa sacode vigorosamente um bastão eletrizado. Explicar por que uma onda eletromagnética emana do bastão. Estimar o comprimento de onda associado. Se possível, indicar a posição dessa onda no diagrama anterior.

Resolução:

- A) As ondas eletromagnéticas de comprimento de onda superiores a 10 m são usadas em radiotransmissões. As ondas na extremidade inferior do diagrama são ondas de rádio com elevados comprimentos de ondas, podendo chegar à ordem de 10 milhões de metros. Por isso, essa faixa do espectro é denominada de ondas longas de rádio.
- B) Os comprimentos de ondas, λ , nos extremos do diagrama são 10^{-15} m (raio gama) e 10^7 m (onda longa de rádio). Para calcular as frequências, f , correspondentes, devemos usar a equação $c = \lambda \cdot f$, em que $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s é o módulo da velocidade das ondas eletromagnéticas no ar. Substituindo os valores nessa equação, obtemos 30 Hz para a frequência da onda longa e $3,0 \cdot 10^{23}$ Hz para a dos raios gama. O pequeno comprimento de onda (e a elevada frequência dos raios gama) explica por que esse tipo de radiação apresenta um enorme poder de penetração na matéria.
- C) A ordem de grandeza de um avião intercontinental é de 10^2 m. Assim, a onda deve ter um comprimento de onda da ordem de 100 metros. Esse valor corresponde a ondas de rádio de alta frequência. A análise da onda refletida permite dizer se o avião está se aproximando ou se afastando do radar, por meio do efeito Doppler. Quando o avião se afasta do radar, o sinal refletido é percebido com um comprimento de onda maior que aquele do sinal enviado pelo radar. Se ocorrer o contrário, o avião estará se aproximando.
- D) Como o bastão representa uma carga elétrica e como ele apresenta uma aceleração, de acordo com a Teoria de Maxwell, uma onda eletromagnética se deriva do movimento do bastão. A frequência dessa onda é a frequência de oscilação da carga, isto é, do bastão. O movimento do bastão é imposto por uma pessoa, e a frequência de oscilação é da ordem de 1 Hz. Usando a equação $c = \lambda \cdot f$, obtemos um comprimento de onda da ordem de 10^8 m. No diagrama do espectro eletromagnético, essa radiação aparece abaixo do eixo. A sua posição está indicada pela flecha desenhada na extremidade inferior da figura anterior.

Curvas de radiação

No estudo sobre transferência de calor, vimos que todos os corpos emitem constantemente radiação eletromagnética. Qualquer corpo emite uma mistura de todas as radiações eletromagnéticas, com o comprimento de onda (e a frequência) variando de zero a infinito. Isso está evidenciado na figura 3, que mostra as curvas de radiação de três sólidos a temperaturas diferentes.

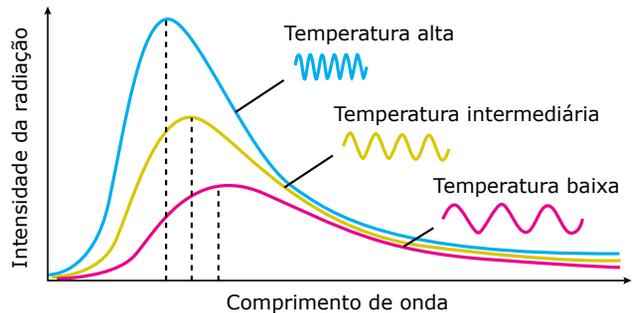


Figura 3. Curvas de radiações de sólidos.

Observe que as curvas da figura 3 apresentam picos. Esses pontos de máximo revelam a existência de um comprimento de onda $\lambda_{\text{máx}}$ (e uma frequência $f_{\text{máx}}$) para o qual a energia eletromagnética emitida pelo sólido é máxima. Observe ainda que $\lambda_{\text{máx}}$ é cada vez menor à medida que a temperatura do corpo aumenta. Em outras palavras, à medida que essa temperatura se torna maior, os picos nas curvas de radiação se deslocam para a esquerda. Quando um objeto está bastante quente, acima de $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$, ele emite radiação eletromagnética com predominância para baixos comprimentos de ondas (e altas frequências), correspondentes à faixa visível do espectro eletromagnético. É por isso que o filamento de uma lâmpada emite luz. Um objeto frio, como o seu livro, ou mesmo você, emite radiação eletromagnética predominantemente na faixa do infravermelho e de longos comprimentos de ondas. Objetos a temperaturas de $200\text{ }^\circ\text{C}$, como as paredes do forno do fogão a gás da sua casa, também irradiam predominantemente na faixa do infravermelho, porém, com comprimentos de ondas um pouco mais curtos. O carvão em brasa possui uma temperatura entre $600\text{ }^\circ\text{C}$ e $700\text{ }^\circ\text{C}$, faixa em que existe energia suficiente para que o corpo adquira uma cor vermelha escura.

A temperatura absoluta T de um corpo negro e o comprimento de onda $\lambda_{\text{máx}}$ se relacionam por meio de uma equação empírica conhecida como a Lei do Deslocamento de Wien, expressa por:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{b}{T}$$

Nessa expressão, T é dado em kelvin, o comprimento de onda é calculado em metros, e b , a constante de Wien, vale $0,0029\text{ m}\cdot\text{K}$. Observe que $\lambda_{\text{máx}}$ é inversamente proporcional a T . Assim, na figura 3, se $\lambda_{\text{máx}}$ do corpo quente for metade do valor correspondente ao corpo frio, então a temperatura absoluta do corpo quente deve ser o dobro da temperatura absoluta do corpo frio.

A QUANTIZAÇÃO DA ENERGIA ELETROMAGNÉTICA

Quando Maxwell descobriu a natureza eletromagnética da luz, o seu caráter ondulatório já era consagrado. Experiências de difração e de interferência com a luz comprovavam esse fato. Então, os físicos fizeram uma nova pergunta sobre a luz e as ondas eletromagnéticas: como elas eram produzidas? Além do Sol, outras fontes de luz são as lâmpadas de filamento, fluorescentes e a vapor. A seguir, vamos entender como esses corpos emitem luz. Veremos que, ao responderem a essa pergunta, os físicos proporcionaram o desenvolvimento da Física Quântica.

Outra equação relacionada à radiação de corpo negro é a chamada Lei de Stefan-Boltzmann. Segundo ela, a taxa de energia eletromagnética emitida por um corpo negro é proporcional à quarta potência da sua temperatura absoluta T . A expressão matemática dessa lei é:

$$P = \sigma \cdot S \cdot T^4$$

A taxa de emissão eletromagnética P é calculada em watt (W). O primeiro fator da equação é a constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, S é a área da superfície do corpo negro (m^2) e T é a sua temperatura absoluta (K). Observe que a constante σ é muito pequena. Por isso, o fluxo de energia eletromagnética emitida (W/m^2) é expressivo apenas quando o corpo apresenta temperaturas mais altas, como o carvão em brasa ou as paredes de um forno aquecido.

Você não precisa memorizar as últimas duas equações. Nos vestibulares, em geral, essas equações são fornecidas nas questões em que o assunto é explorado.



PARA REFLETIR

Por que uma estrela muito massiva e quente tende para a cor azul? O que você pode dizer sobre a cor de uma estrela mais fria?

A equação de Planck da radiação

No fim do século XIX, alguns físicos buscavam uma maneira de determinar teoricamente as curvas de radiação de um corpo negro. Esse corpo é um sistema que absorve toda a radiação eletromagnética que nele incide. Um objeto, pintado de preto fosco e exposto às radiações na faixa do visível, é uma boa aproximação de um corpo negro.

Um corpo negro não precisa, necessariamente, ser da cor preta. O pequeno orifício no objeto oco mostrado na figura 4, por exemplo, é um corpo negro, pois a radiação que entra na cavidade tem pouca chance de sair. Após sofrer múltiplas reflexões internas, a radiação é praticamente toda absorvida pelo corpo. À medida que o corpo absorve essa radiação, ele também se aquece. Quanto maior a sua temperatura, maior a quantidade de radiação que ele emite (observe que os picos na figura 3 são mais altos para as temperaturas maiores). Assim, o corpo atingirá uma temperatura de equilíbrio, na qual a taxa de radiação recebida se torna igual à taxa de radiação emitida. No fim do século XIX, os cientistas procuraram estudar o corpo negro nessa situação de equilíbrio.

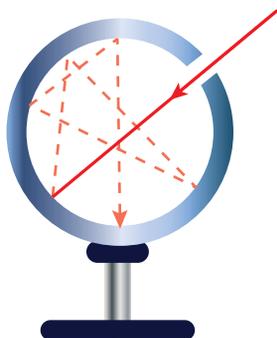


Figura 4. Uma pequena cavidade é um corpo negro.

Alguns físicos propuseram equações para reproduzir as curvas de radiação de corpos negros. Na figura 5, os pequenos círculos representam os pontos obtidos experimentalmente para a curva de radiação de um corpo negro. As outras curvas resultam de equações propostas por cientistas da época. Observe que a curva de Wien reproduz bem a curva de radiação. No entanto, por ser uma lei de natureza empírica, isto é, por se valer apenas de informações experimentais, ela não constitui uma teoria. A outra curva representa a Lei de Rayleigh-Jeans, que concorda com os resultados experimentais apenas para os comprimentos de ondas muito grandes, mas discorda completamente para comprimentos de ondas curtos. Ainda assim, essa lei tem o mérito de ser baseada nos argumentos teóricos da Física Clássica.

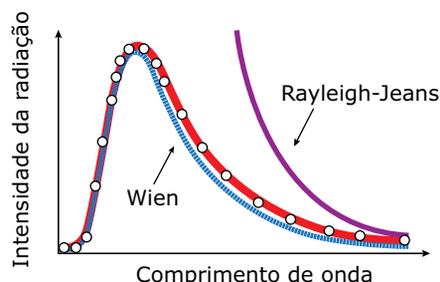


Figura 5. Leis para reproduzir a curva de radiação de um corpo negro.

Inspirado na Teoria Atômica, o físico alemão Max Planck propôs um modelo inteiramente teórico para a radiação do corpo negro. Ele supôs que os átomos do corpo negro agem como pequenos osciladores eletromagnéticos, cada um com uma frequência de oscilação própria. São esses osciladores que emitem e absorvem a energia eletromagnética em um corpo negro. Planck os imaginou oscilando com inúmeras frequências, o que explicaria por que a radiação emitida por um corpo negro apresenta as frequências variando de zero a infinito.

Em seu modelo, Planck introduziu uma ideia que nada tinha a ver com a Física daquela época. Ele considerou que um oscilador não pode ter um valor de energia qualquer, mas certos valores dados por:

$$E = n \cdot h \cdot f$$

Nessa expressão, f é a frequência do oscilador, h é uma constante, hoje chamada de constante de Planck, cujo valor é $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, e o fator n é um número inteiro positivo conhecido como número quântico, que define o valor (ou estado) de energia do oscilador. Um oscilador não irradia (nem absorve) energia enquanto permanece em um determinado estado. Dessa forma, ele irradia energia quando passa de um estado para outro. Essa energia não é emitida de forma contínua, mas sim de forma quantizada, isto é, por meio de pulsos ou de pacotes de energia dados por:

$$\text{Energia emitida} = \Delta n \cdot h \cdot f$$

Em que Δn é a diferença entre o número quântico do estado inicial e do estado final. Por exemplo, quando o oscilador passa do estado 5 para o estado 3 ($\Delta n = -2$), a sua energia diminui, e o oscilador emite radiação.

Quando ocorre o contrário, o oscilador absorve radiação. Quando a transição ocorre entre dois níveis de energia adjacentes (por exemplo, entre os níveis 2 e 3, ou 5 e 6), temos $\Delta n = 1$. Nesse caso, a energia irradiada vale:

$$E = h \cdot f$$

Esse valor corresponde ao pulso de menor energia possível. Planck o chamou de *quantum* (em latim, *quantum* significa quantidade; aqui, devemos pensar em *quantum* como uma quantidade mínima e indivisível).

Agora, vamos fazer alguns cálculos para exemplificar a quantização da energia. Considere um oscilador com frequência $f = 6,0 \cdot 10^{14}$ Hz. De acordo com a equação de Planck, a energia de um *quantum* emitida por esse oscilador é (lembre-se de que $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$):

$$E = h \cdot f = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 6,0 \cdot 10^{14} = 4,0 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Essa energia é muito pequena. Vamos convertê-la para uma unidade mais adequada, o elétron-volt (eV). Como você sabe, $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Assim:

$$E = \frac{4,0 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,5 \text{ eV}$$

Segundo Planck, esse oscilador pode emitir (ou absorver) pacotes energéticos de 2,5 eV. De acordo com a transição de estados, o oscilador pode emitir 2,5 eV (1 pacote), ou 5,0 eV (2 pacotes), e assim por diante. Todavia, ele não pode emitir uma energia, por exemplo, de 4,0 eV, pois esse valor representa 1,6 *quantum*, que é uma quantidade fracionária.

A ideia da quantização não é um conceito físico novo para você. A eletricidade é quantizada, pois a carga de qualquer corpo eletrizado é um múltiplo inteiro da carga do elétron. A massa também é quantizada. Por exemplo, a massa de um bloco de cobre (admitindo cobre puro) é igual ao número de átomos de cobre presentes no bloco multiplicado pela massa de apenas um átomo de cobre.

O conceito de fóton

No início do século XX, experiências mostravam que radiações de frequências altas, como um feixe de luz azul, particularmente, eram capazes de extrair elétrons quando incidiam sobre metais alcalinos. Nenhuma explicação baseada na Teoria Eletromagnética Clássica conseguia esclarecer essa emissão de elétrons, que, mais tarde, foi denominada de efeito fotoelétrico. Em 1905, Albert Einstein explicou o fenômeno, usando como base a teoria da quantização da energia de Planck. Para isso, ele considerou que a própria radiação eletromagnética, emitida por uma fonte, propaga-se pelo espaço concentrada em pacotes de energia, denominados de fótons. Esses pacotes são, de fato, partículas de massa zero, dotados de uma energia dada pela equação de Planck, $E = h \cdot f$. Planck pensava que a quantização da energia era restrita aos átomos oscilantes da fonte de radiação. Einstein foi além dessa ideia, afirmando que a quantização da energia também ocorria com a radiação emitida pela fonte.

Einstein percebeu que a frequência f dos osciladores da fonte é igual à frequência da radiação emitida. Substituindo f por c/λ (c e λ são a velocidade e o comprimento de onda da luz) na equação de Planck, obtemos a seguinte equação alternativa para calcular a energia de um fóton:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

A quantização da energia eletromagnética desencadeou uma revolução na Física. Após a sua descoberta, sucedeu-se uma corrida desenfreada pela compreensão do átomo, levando à edificação da Mecânica Quântica nos primeiros 30 anos do século XX. A figura 6 mostra a energia eletromagnética por fóton estendida para todo o espectro eletromagnético conhecido.

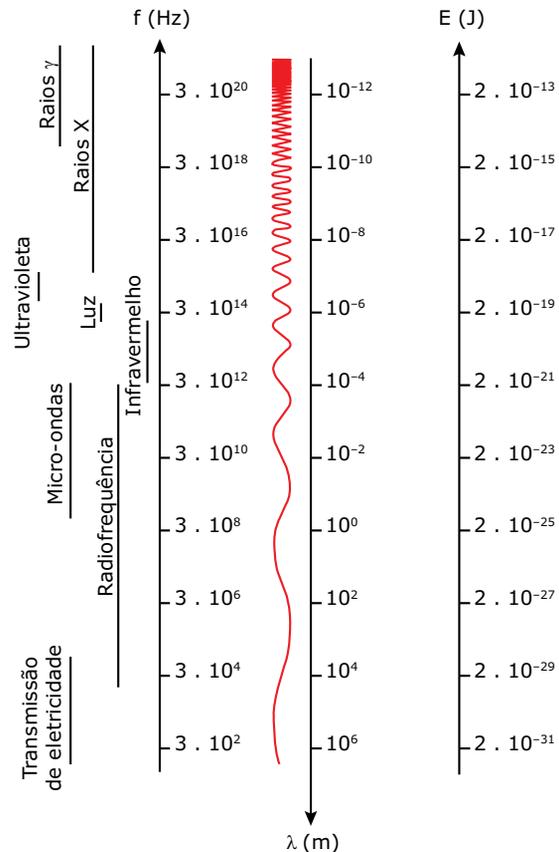
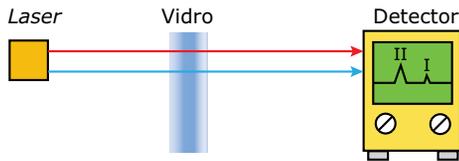


Figura 6. Frequência, comprimento de onda e energia por fóton do espectro eletromagnético.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

02. A figura mostra os trajetos de dois fótons de luz, sendo um de luz vermelha e o outro de luz azul, que são emitidos simultaneamente por um *laser*. Os fótons atravessam uma placa de vidro e atingem um detector muito sensível. Embora os fótons tenham sido disparados ao mesmo tempo, o detector registra a chegada de um primeiro fóton (I) e, depois, a chegada do outro (II). Além disso, a energia do segundo fóton (representada pelo pico II na tela) é maior que a do primeiro fóton.



- A) Explicar por que os fótons não chegam simultaneamente ao detector e identificar os picos I e II às luzes vermelha e azul. Explicar também por que as energias registradas são diferentes.
- B) Considere agora que o *laser* emita um feixe de luz azul de potência 1,0 W. Calcular o número de fótons que chegam ao detector durante 10 s. Considere que o comprimento de onda dessa luz seja $5,0 \cdot 10^{-7}$ m.

Resolução:

- A) Nesse experimento, os fótons percorrem distâncias iguais, mas não o fazem com velocidades sempre iguais. No ar, as velocidades são iguais, mas no vidro, que é um meio dispersivo, a velocidade da luz vermelha é maior que a velocidade da luz azul, pois a luz vermelha possui menor frequência que a azul. Por isso, o fóton de luz azul sofre um pequeno atraso de tempo ao atravessar o vidro em relação ao fóton de luz vermelha. Esse último, portanto, chega primeiro ao detector. Assim, o pico I corresponde ao fóton de luz vermelha, e o pico II, ao fóton de luz azul. Esse resultado está coerente com os registros das energias dos dois fótons. Como a luz azul possui a maior frequência, a energia do fóton associado a ela deve ser maior, de acordo com a equação de Planck.
- B) A energia eletromagnética associada a essa emissão pode ser calculada por:

$$E = P \cdot t = 1,0 \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot 10 \text{ s} = 10 \text{ J}$$

Substituindo essa energia na equação de Planck, obtemos o número N de fótons emitidos:

$$E = N \frac{h \cdot c}{\lambda} \Rightarrow$$

$$10 = N \cdot \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8}{5,0 \cdot 10^{-7}} \Rightarrow$$

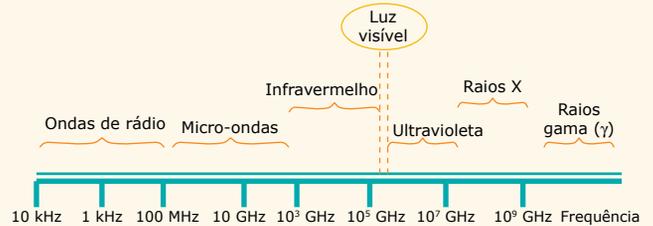
$$N = 25 \cdot 10^{18} \text{ fótons}$$

Esse número também pode ser expresso como $25 \cdot 10^9 \cdot 10^9$ fótons, ou seja, 25 bilhões de bilhões de fótons são emitidos pelo *laser* a cada 10 s.

EXERCÍCIOS DE APRENDIZAGEM



- 01.** (Fatec-SP) Estabelecer uma ligação no celular, sintonizar músicas no rádio ou assistir a um jogo da Copa do Mundo com transmissão ao vivo são fenômenos decorrentes da utilização de ondas eletromagnéticas que podem ser representadas pelo espectro eletromagnético a seguir:



As ondas de frequências destinadas às telecomunicações recebem o nome de radiofrequência e estão inseridas numa parte desse espectro eletromagnético. A tabela seguinte mostra alguns intervalos dessas ondas.

	Rádio AM	TV Aberta (VHF) e Rádio FM	TV (via satélites)	Telefonia celular	Transmissões por fibras ópticas
Intervalos de frequência (valores próximos)	530 kHz a 1 600 kHz	30 MHz a 300 MHz	3 GHz a 30 GHz	300 MHz a 3 GHz	10^5 GHz a 10^6 GHz

De acordo com as informações da tabela e com o espectro eletromagnético, pode-se afirmar que as ondas de radiofrequência

- A) de transmissões por fibras ópticas estão na faixa dos raios X.
 B) de rádio AM e FM estão na faixa do infravermelho.
 C) de TV (via satélites) estão na faixa das ondas de rádio.
 D) de telefonia celular estão na faixa das micro-ondas.
 E) de rádio AM estão na faixa das micro-ondas.



- 02.** (Unesp) Sabe-se que a energia de um fóton é proporcional à sua frequência. Também é conhecido experimentalmente que o comprimento de onda da luz vermelha é maior que o comprimento de onda da luz violeta que, por sua vez, é maior que o comprimento de onda dos raios X. Adotando a constância da velocidade da luz, pode-se afirmar que

- A) a energia do fóton de luz vermelha é maior que a energia do fóton de luz violeta.
 B) a energia do fóton de raio X é menor que a energia do fóton de luz violeta.
 C) as energias são iguais, uma vez que as velocidades são iguais.
 D) as energias dos fótons de luz vermelha e violeta são iguais, pois são parte do espectro visível, e são menores que a energia do fóton de raio X.
 E) a energia do fóton de raio X é maior que a do fóton de luz violeta, que é maior que a energia do fóton de luz vermelha.

03. (PUC RS) Considere o texto a seguir:

A escolha do ano de 2005 como o Ano Mundial da Física teve como um de seus objetivos a comemoração do centenário da publicação dos primeiros trabalhos de Albert Einstein. No entanto, é importante salientar que muitos outros cientistas contribuíram para o excepcional desenvolvimento da Física no século passado. Entre eles cabe destacar Max Planck, o qual, em 1900, propôs a teoria da quantização da energia.

Segundo essa teoria, um corpo negro irradia energia de forma _____, em porções que são chamadas de _____, cuja energia é proporcional à _____ da radiação eletromagnética envolvida nessa troca de energia.

A sequência de termos que preenche corretamente as lacunas do texto é:

- A) descontínua – prótons – frequência
- B) contínua – prótons – amplitude
- C) descontínua – fótons – frequência
- D) contínua – fótons – amplitude
- E) descontínua – elétrons – frequência

04. (UFRGS-RS) Assinale a alternativa que preenche corretamente a lacuna do parágrafo seguinte.

O ano de 1900 pode ser considerado o marco inicial de uma revolução ocorrida na Física do século XX. Naquele ano, Max Planck apresentou um artigo à Sociedade Alemã de Física, introduzindo a ideia da _____ da energia, da qual Einstein se valeu para, em 1905, desenvolver sua teoria sobre o efeito fotoelétrico.

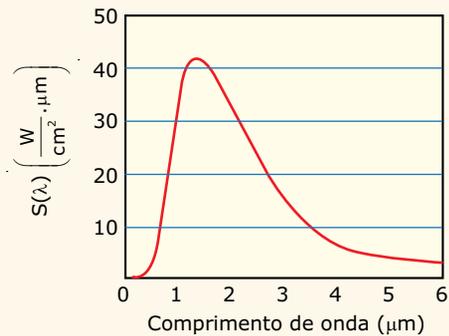
- A) conservação.
- B) quantização.
- C) transformação.
- D) conversão.
- E) propagação.

05. (UEG-GO-2017) Em 1900, Max Planck propôs uma explicação sobre a radiação de corpo negro. Sua equação ficou conhecida em todo o mundo porque relacionava pela primeira vez a energia emitida por um corpo negro com a sua frequência de emissão em pacotes discretos, chamados fótons. A constante de proporcionalidade ficou conhecida como constante de Planck.

A unidade de medida dessa constante é dada por:

- A) $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$
- B) Hz
- C) J.s
- D) $\frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}}$
- E) $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$

06. (UFRN) A radiação térmica proveniente de uma fornalha de altas temperaturas em equilíbrio térmico, usada para fusão de materiais, pode ser analisada por um espectrômetro. A intensidade da radiação emitida pela fornalha, a uma determinada temperatura, é registrada por esse aparato em função do comprimento de onda da radiação. Daí se obtém a curva espectral apresentada na figura a seguir:



A análise desse tipo de espectro levou o físico alemão Wilhelm Wien, em 1894, a propor que, quando a intensidade da radiação emitida é máxima, o comprimento de onda associado obedece à expressão:

$$\lambda_{(máx.)} \cdot T = 3 \cdot 10^3 \text{ (}\mu\text{m} \cdot \text{K)}$$

Em que $\lambda_{(máx.)}$ é o comprimento de onda do máximo da curva espectral, e T é a temperatura da fornalha para um determinado espectro. De acordo com essas informações, é correto afirmar que a temperatura da fornalha é, aproximadamente,

- A) 2 000 K e que $\lambda_{(máx.)}$ aumenta quando a temperatura aumenta.
- B) 1 500 K e que $\lambda_{(máx.)}$ diminui quando a temperatura diminui.
- C) 2 000 K e que $\lambda_{(máx.)}$ diminui quando a temperatura aumenta.
- D) 1 500 K e que $\lambda_{(máx.)}$ aumenta quando a temperatura diminui.

07. (UFG-GO) Um laser emite um pulso de luz monocromático com duração de 6,0 ns, com frequência de $4,0 \cdot 10^{14}$ Hz e potência de 110 mW. O número de fótons contidos nesse pulso é:

Dados:

- Constante de Planck: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J/s.
- $1,0 \text{ ns} = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ s}$.

- A) $2,5 \cdot 10^9$
- B) $2,5 \cdot 10^{12}$
- C) $6,9 \cdot 10^{13}$
- D) $2,5 \cdot 10^{14}$
- E) $4,2 \cdot 10^{17}$

08. (UECE–2018) Exposições demoradas aos raios ultravioleta podem causar queimaduras, degeneração nas células, inflamações nos olhos, envelhecimento prematuro da pele e ainda câncer e catarata. A radiação ultravioleta é mais perigosa que a luz visível, porque apresenta

- A) frequência muito elevada.
- B) maior comprimento de onda.
- C) grande velocidade.
- D) grande intensidade.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS



01. (UPF-RS–2016) Duas fontes de luz *laser*, denominadas de Fonte 1 e Fonte 2, têm as seguintes especificações:

Fonte 1	Fonte 2
Potência: $5 \cdot 10^{-3}$ W	Potência: $2 \cdot 10^{-2}$ W
Comprimento de onda: 632 nm	Comprimento de onda: 632 nm

Considere que um estudante do ensino médio compre as fontes. Ele sabe que a Fonte 1 emite N_1 fótons por segundo, cada um com energia E_1 , e a Fonte 2 emite N_2 fótons por segundo, cada um com energia E_2 . Com relação a essas fontes e considerando-se as informações anteriormente descritas, é correto afirmar que:

- A) $N_1 = N_2$ e $E_1 < E_2$
- B) $N_1 = N_2$ e $E_1 = E_2$
- C) $N_1 < N_2$ e $E_1 = E_2$
- D) $N_2 < N_1$ e $E_1 = E_2$
- E) $N_1 < N_2$ e $E_1 < E_2$

02. (UFG-GO) A coloração do céu deve-se à dispersão da luz do Sol pelas partículas que compõem a atmosfera. Observamos que o céu é azul exceto quando o Sol encontra-se na linha do horizonte, no crepúsculo, quando sua cor é avermelhada. Lord Rayleigh mostrou que a intensidade I de luz espalhada é proporcional à quarta potência da frequência ($I \propto f^4$). O comprimento de onda do azul e do vermelho são, respectivamente, da ordem de 400 nm e 720 nm. A razão entre as intensidades dispersadas da luz azul pela da vermelha é de, aproximadamente,

- A) 0,1.
- B) 0,3.
- C) 1,8.
- D) 3,2.
- E) 10,5.

03. (UFES–2016) Para radiação ultravioleta (UV) com comprimento de onda na faixa 200 – 315 nm, o máximo tempo de exposição (Δt) a cada período de 8h é função do nível de irradiação solar efetiva I_{ef} . A irradiação é definida como potência incidente por unidade de área. A tabela a seguir mostra valores típicos de tolerância à irradiação.

I_{ef} (W/cm^2)	Δt
$1,03 \cdot 10^{-7}$	8 h
$8,25 \cdot 10^{-7}$	1 h
$4,95 \cdot 10^{-6}$	10 min
$4,95 \cdot 10^{-5}$	1 min
$4,95 \cdot 10^{-4}$	6,00 s
$2,97 \cdot 10^{-3}$	1,00 s

Em uma dada região andina, há um buraco na camada de ozônio, sendo necessário que todos os habitantes dessa região estejam bem protegidos, pois, ao meio-dia, somente podem expor sua pele ao Sol por um tempo máximo de $\Delta t = 6,00$ s.

- A) Considerando que o efeito médio da radiação solar seja representado por fótons de frequência $f = 1,20 \cdot 10^{15}$ Hz, determine o comprimento de onda, em nanômetros (nm), e a energia média de cada fóton, em eV.
- B) Nas condições do item (A), determine a quantidade total de fótons que incide em cada cm^2 de pele, supondo uma exposição ao sol pelo tempo máximo de $\Delta t = 6,00$ s.
- C) Considerando um habitante da região andina com $2,00$ m^2 de pele e a hipótese de que toda a área de sua pele tenha recebido uniformemente a mesma irradiação, calcule a energia total absorvida pelo corpo desse habitante no tempo máximo de exposição ao sol de $\Delta t = 6,00$ s.

04. (ITA-SP) No processo de fotossíntese, as moléculas de clorofila do tipo a nas plantas verdes apresentam um pico de absorção da radiação eletromagnética no comprimento de onda $\lambda = 6,80 \cdot 10^{-7}$ m. Considere que a formação de glicose ($C_6H_{12}O_6$) por esse processo de fotossíntese é descrita, de forma simplificada, pela reação:



Sabendo-se que a energia total necessária para que uma molécula de CO_2 reaja é de $2,34 \cdot 10^{-18}$ J, o número de fótons que deve ser absorvido para formar uma molécula de glicose é

- A) 8.
- B) 24.
- C) 48.
- D) 120.
- E) 240.

Instrução: Leia o texto a seguir para responder à questão **05**.

A nanotecnologia, tão presente nos nossos dias, disseminou o uso do prefixo nano (n) junto a unidades de medida. Assim, comprimentos de onda da luz visível são, modernamente, expressos em nanômetros (nm), sendo $1 \text{ nm} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}$. (Considere a velocidade da luz no ar igual a $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.)

- 05.** (UFRGS-RS) Cerca de 60 fótons devem atingir a córnea para que o olho humano perceba um *flash* de luz, e aproximadamente metade deles são absorvidos ou refletidos pelo meio ocular. Em média, apenas 5 dos fótons restantes são realmente absorvidos pelos fotorreceptores (bastonetes) na retina, sendo os responsáveis pela percepção luminosa.

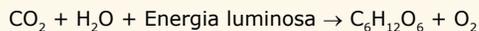
Dado: Considere a constante de Planck h igual a $6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s.

Com base nessas informações, é correto afirmar que, em média, a energia absorvida pelos fotorreceptores quando luz verde com comprimento de onda igual a 500 nm atinge o olho humano é igual a

- A) $3,30 \cdot 10^{-41}$ J. D) $3,96 \cdot 10^{-19}$ J.
 B) $3,96 \cdot 10^{-41}$ J. E) $1,98 \cdot 10^{-18}$ J.
 C) $1,98 \cdot 10^{-32}$ J.

Instrução: Leia o texto a seguir para responder à questão **06**.

A fotossíntese é um processo pelo qual as plantas e alguns micro-organismos utilizam energia luminosa para produzir carboidratos, de acordo com a equação química não balanceada a seguir:



Nas plantas, a fotossíntese ocorre nos cloroplastos devido à absorção da luz. Em laboratório, é possível reproduzir a fotossíntese empregando luz vermelha monocromática ($\lambda = 700$ nm). Nesse processo, 8 fótons são consumidos para cada molécula de dióxido de carbono.

Dados: Constante de Planck: $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s.

Velocidade da luz: $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s.

Número de Avogadro: $N_A = 6,0 \cdot 10^{23}$.

- 06.** (UFG-GO) A quantidade de energia, em Joule, fornecida para a produção de 1 mol desse carboidrato é, aproximadamente:
- A) $2,8 \cdot 10^{-19}$
 B) $1,4 \cdot 10^{-17}$
 C) $1,7 \cdot 10^4$
 D) $2,6 \cdot 10^4$
 E) $8,1 \cdot 10^6$

- 07.** (UEL-PR) A luz emitida pelo vapor incandescente de um elemento químico pode ser separada em raios de diferentes cores, com o uso de um prisma de cristal, revelando uma série de linhas que caracterizam a substância. Quando observamos o céu a olho nu, a nossa galáxia, Via Láctea, é apenas um borrão. Se utilizarmos um binóculo comum, observamos que esse borrão é constituído por milhões de pontos de luz separados.

Se utilizarmos instrumentos cada vez mais potentes, observaremos que as galáxias apresentam uma grande variedade de cores e luminosidades. Por exemplo: as galáxias elípticas são vermelhas, e as galáxias espirais são azuis. Sobre o assunto, assinale a alternativa correta:

- A) A luz azulada das galáxias espirais, cuja temperatura é mais baixa, tem frequência mais elevada se comparada à luz das galáxias elípticas, que é avermelhada.
 B) A luz azulada das galáxias espirais, cuja temperatura é mais alta, tem frequência mais elevada se comparada à luz das galáxias elípticas, que é avermelhada.
 C) A luz azulada das galáxias espirais, cuja temperatura é mais alta, tem frequência mais baixa se comparada à luz das galáxias elípticas, que é avermelhada.
 D) A luz azulada das galáxias espirais, cuja temperatura é mais baixa, tem frequência mais baixa se comparada à luz das galáxias elípticas, que é avermelhada.
 E) A luz azulada das galáxias espirais, cuja temperatura é mais alta, tem a mesma frequência da luz das galáxias elípticas, que é avermelhada.

08.



(UFG-GO) Os dispositivos emissores de luz, comumente chamados de LEDs, são componentes de vários aparelhos eletrônicos presentes no nosso cotidiano. Tais dispositivos baseiam seu funcionamento em determinados elementos químicos tais que, quando uma corrente elétrica atravessa o LED, elétrons desses elementos são excitados até níveis eletrônicos de energia mais altos e, ao retornar às suas configurações iniciais, emitem luz.

Considere um LED que, ao ser atravessado por uma corrente elétrica de 10 mA, emite fótons com energia $E = 3,0 \cdot 10^{-19}$ J. A tabela a seguir apresenta, para cada cor, o comprimento de onda correspondente.

Vermelho	$\lambda = 660$ nm
Amarelo	$\lambda = 580$ nm
Verde	$\lambda = 530$ nm
Azul	$\lambda = 470$ nm

Considerando o exposto, determine:

- A) A cor da luz emitida.
 B) O número de fótons emitidos por segundo, sabendo que a resistência elétrica do dispositivo LED é $R = 420 \Omega$, e que a sua eficiência na conversão de energia elétrica em luz é de 20%.

09.



(UFRN) Os médicos oftalmologistas costumam, muito acertadamente, aconselhar que não se deve olhar diretamente para o Sol, em razão dos possíveis danos causados aos olhos, devido à alta intensidade da radiação solar, que é da ordem de $1,0 \text{ kW/m}^2$. No entanto, é comum observarem-se crianças e adolescentes brincando com canetas *laser*, apontando inclusive para os olhos dos colegas.

Tal tipo de canetas, utilizadas como apontador, quando submetida a tensão de uma pequena bateria, em geral, emite cerca de $6,0 \cdot 10^{18}$ fótons por segundo, na faixa do vermelho, correspondente a um comprimento de onda de $6,0 \cdot 10^{-7}$ m.

Dados: Frequência do fóton: $f = c/\lambda$.

Energia do fóton: $E = hf$.

Velocidade da luz: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Considere o valor aproximado da constante de Planck: $h = 6,0 \cdot 10^{-34}$ J.s.

Considerando que a área iluminada pelo feixe do *laser* é de aproximadamente 10^{-4} m², calcule:

- A energia de um fóton emitido por esse *laser*.
- A intensidade da radiação emitida pelo *laser* e verifique se esta é, ou não, mais perigosa para os nossos olhos que a radiação solar. Justifique sua resposta.

10.



(FUVEST-SP-2016) *Lasers* pulsados de altíssima potência estão sendo construídos na Europa. Esses *lasers* emitirão pulsos de luz verde, e cada pulso terá 10^{15} W de potência e duração de cerca de $30 \cdot 10^{-15}$ s. Com base nessas informações, determine:

Dados: Frequência da luz verde: $f = 0,6 \cdot 10^{15}$ Hz.

Velocidade da luz: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Energia do fóton = $h \cdot f$.

$h = 6 \cdot 10^{-34}$ J.s.

- o comprimento de onda λ da luz desse *laser*.
- a energia E contida em um pulso.
- o intervalo de tempo Δt durante o qual uma lâmpada LED de 3 W deveria ser mantida acesa, de forma a consumir uma energia igual à contida em cada pulso.
- o número N de fótons em cada pulso.

11.



(Unicamp-SP) A Física de Partículas nasceu com a descoberta do elétron, em 1897. Em seguida, foram descobertos o próton, o nêutron e várias outras partículas, entre elas, o pión, em 1947, com a participação do brasileiro César Lattes.

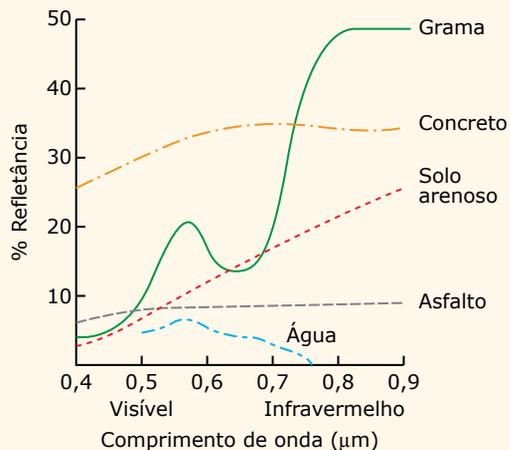
- Em um experimento similar ao que levou à descoberta do nêutron, em 1932, um nêutron de massa m desconhecida e velocidade $v_0 = 4 \cdot 10^7$ m/s colide frontalmente com um átomo de nitrogênio de massa $M = 14$ u (unidade de massa atômica) que se encontra em repouso. Após a colisão, o nêutron retorna com velocidade v' , e o átomo de nitrogênio adquire uma velocidade $v = 5 \cdot 10^6$ m/s. Em consequência da conservação da energia cinética, a velocidade de afastamento das partículas é igual à velocidade de aproximação. Qual é a massa m , em unidades de massa atômica, encontrada para o nêutron no experimento?

- O Grande Colisor de Hádrons (*Large Hadron Collider* – LHC) é um acelerador de partículas que tem, entre outros propósitos, o de detectar uma partícula, prevista teoricamente, chamada bóson de Higgs. Para esse fim, um próton com energia de $E = 7 \cdot 10^{12}$ eV colide frontalmente com outro próton de mesma energia, produzindo muitas partículas. O comprimento de onda (λ) de uma partícula fornece o tamanho típico que pode ser observado quando a partícula interage com outra. No caso dos prótons do LHC, $E = hc/\lambda$, em que $h = 4 \cdot 10^{-15}$ eV.s, e $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Qual é o comprimento de onda dos prótons do LHC?

SEÇÃO ENEM

- (Enem) Ao contrário dos rádios comuns (AM ou FM), em que uma única antena transmissora é capaz de alcançar toda a cidade, os celulares necessitam de várias antenas para cobrir um vasto território. No caso dos rádios FM, a frequência de transmissão está na faixa dos MHz (ondas de rádio), enquanto, para os celulares, a frequência está na casa dos GHz (micro-ondas). Quando comparado aos rádios comuns, o alcance de um celular é muito menor. Considerando-se as informações do texto, o fator que possibilita essa diferença entre a propagação das ondas de rádio e as de micro-ondas é que as ondas de rádio são
 - facilmente absorvidas na camada da atmosfera superior conhecida como ionosfera.
 - capazes de contornar uma diversidade de obstáculos como árvores, edifícios e pequenas elevações.
 - mais refratadas pela atmosfera terrestre, que apresenta maior índice de refração para as ondas de rádio.
 - menos atenuadas por interferência, pois o número de aparelhos que utilizam ondas de rádio é menor.
 - constituídas por pequenos comprimentos de onda que lhes conferem um alto poder de penetração em materiais de baixa densidade.

- (Enem) O processo de interpretação de imagens capturadas por sensores instalados a bordo de satélites que imageiam determinadas faixas ou bandas do espectro de radiação eletromagnética (REM) baseia-se na interação dessa radiação com os objetos presentes sobre a superfície terrestre. Uma das formas de avaliar essa interação é por meio da quantidade de energia refletida pelos objetos. A relação entre a refletância de um dado objeto e o comprimento de onda da REM é conhecida como curva de comportamento espectral ou assinatura espectral do objeto, como mostrado na figura, para objetos comuns na superfície terrestre.



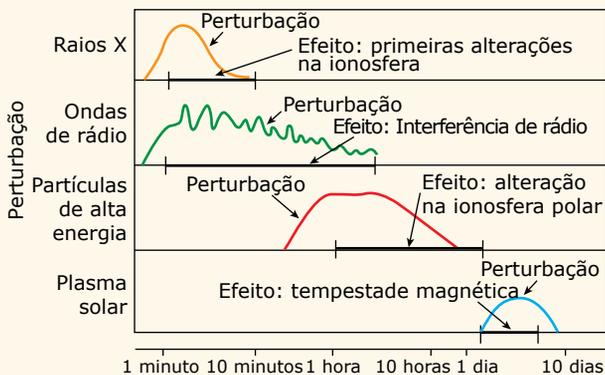
D'ARCO, E. Radiometria e comportamento espectral de alvos. INPE. Disponível em: <<http://www.agro.unitau.br>>. Acesso em: 03 maio 2009.

De acordo com as curvas de assinatura espectral apresentadas na figura, para que se obtenha a melhor discriminação dos alvos mostrados, convém selecionar a banda correspondente a que comprimento de onda em micrômetros (μm)?

- A) 0,4 a 0,5. C) 0,6 a 0,7. E) 0,8 a 0,9.
 B) 0,5 a 0,6. D) 0,7 a 0,8.

03. (Enem) Explosões solares emitem radiações eletromagnéticas muito intensas e ejetam, para o espaço, partículas carregadas de alta energia, o que provoca efeitos danosos na Terra. O gráfico a seguir mostra o tempo transcorrido desde a primeira detecção de uma explosão solar até a chegada dos diferentes tipos de perturbação e seus respectivos efeitos na Terra.

Escala de tempo das perturbações solares e seus efeitos



Disponível em: <www.sec.noaa.gov> (Adaptação).

Considerando-se o gráfico, é correto afirmar que a perturbação por ondas de rádio geradas em uma explosão solar

- A) dura mais que uma tempestade magnética.
 B) chega à Terra dez dias antes do plasma solar.
 C) chega à Terra depois da perturbação por raios X.
 D) tem duração maior que a da perturbação por raios X.
 E) tem duração semelhante à da chegada à Terra de partículas de alta energia.

GABARITO

Meu aproveitamento

Aprendizagem

Acertei _____ Errei _____

- 01. D
- 02. E
- 03. C
- 04. B
- 05. C
- 06. C
- 07. A
- 08. A

Propostos

Acertei _____ Errei _____

- 01. C
- 02. E
- 03.
 - A) $\lambda = 250$
 $E_{ev} = 4,95 \text{ eV}$
 - B) $3,75 \cdot 10^{15}$
 - C) $E = 59,4 \text{ J}$
- 04. C
- 05. E
- 06. E
- 07. B
- 08.
 - A) vermelho
 - B) $2,8 \cdot 10^{16}$ fótons
- 09.
 - A) $3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
 - B) 18 kW/m^2 , 18 vezes maior que a da radiação solar; portanto, é mais perigosa para nossos olhos.
- 10.
 - A) $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
 - B) $E = 30 \text{ J}$
 - C) $\Delta t = 10 \text{ s}$
 - D) $N = 8,3 \cdot 10^{19}$ fótons
- 11.
 - A) $m = 0,9 \text{ u}$
 - B) $\lambda = 1,7 \cdot 10^{-19} \text{ m}$

Seção Enem

Acertei _____ Errei _____

- 01. B
- 02. E
- 03. D



Total dos meus acertos: _____ de _____ . _____ %

Dualidade Onda-Partícula e Efeito Fotoelétrico

Max Planck, em 1900, explicou a distribuição de radiação eletromagnética emitida pelos corpos negros, supondo que os átomos desse corpo oscilassem apenas com determinados valores de energia, múltiplos de um valor elementar. Em outras palavras, a energia dos átomos seria quantizada. A princípio, o estudo de Planck despertou pouco interesse, até que, em 1905, analisando um fenômeno que ficou conhecido como efeito fotoelétrico, Albert Einstein percebeu que a própria radiação eletromagnética é quantizada. Em sua teoria, Einstein acolheu a ideia de que a luz possuía um comportamento dual, ora agindo como onda, ora como partícula. Assim, uma minúscula entidade desprovida de massa era a portadora da energia elementar da luz e de todas as outras radiações eletromagnéticas, tendo sido chamada de fóton. Em 1913, Niels Bohr usou o fóton para explicar os espectros descontínuos do gás hidrogênio. O que se assistiu nos anos seguintes foi a um espetacular avanço da Física Quântica e a uma compreensão, cada vez maior, do mundo atômico.

Neste módulo, estudaremos o efeito fotoelétrico, o comportamento dual da luz e os espectros descontínuos dos gases. Veremos que a teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico vai muito além da simples explicação desse fenômeno. Ao mostrar que a energia luminosa é quantizada, e que o fóton deve ser visto como uma onda-partícula, Einstein criou uma agenda de trabalho entre os físicos, que, paulatinamente, elucidaram e previram vários comportamentos dos átomos. A Física Quântica se tornou a base para o estudo do núcleo atômico e das moléculas, proporcionando muitos avanços tecnológicos. O *laser*, os circuitos transistorizados e o microscópio eletrônico são apenas alguns dos incontáveis exemplos da inserção da Física Quântica entre nós.

A QUANTIZAÇÃO DA LUZ

O efeito fotoelétrico

Em 1887, Hertz descobriu o efeito fotoelétrico. Ele notou que a incidência de luz sobre um metal podia, sob certas circunstâncias, produzir, dessa superfície, a emissão de elétrons. Em 1900, Lenard realizou uma série de experiências sobre o efeito fotoelétrico, usando o aparelho mostrado na figura 1. Observe que a luz incidente sobre a placa metálica A provoca a emissão de elétrons.

Alguns atingem a placa oposta B, e uma corrente elétrica é registrada no galvanômetro G. O número de elétrons emitidos em A e que atingem B pode ser aumentado ou diminuído variando-se a diferença de potencial (V_{AB}) entre A e B. Isso é feito pelo ajuste da posição do cursor sobre a resistência divisora de tensão do experimento.

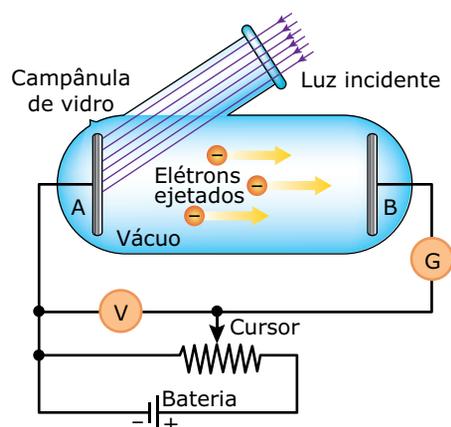


Figura 1. Montagem para estudar o efeito fotoelétrico.

A figura 2 mostra o gráfico da corrente elétrica I registrada no galvanômetro em função da tensão V_{AB} . Como a placa B é conectada ao circuito no lado do polo positivo da bateria, os elétrons emitidos em A são atraídos para B. Para valores de V_{AB} suficientemente elevados, todos os elétrons emitidos por A são coletados em B, e a corrente atinge um valor de saturação. Depois disso, um aumento extra em V_{AB} não afeta mais o valor da corrente, como pode ser observado no gráfico. Observe também que I_a é a corrente de saturação para uma luz de intensidade alta, enquanto I_b é a corrente de saturação para a luz (mesma frequência) de intensidade baixa.

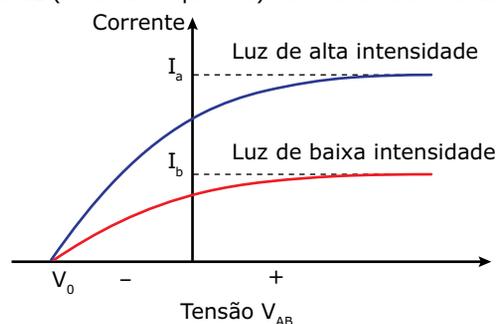


Figura 2. Diferença de potencial aplicada entre a placa emissora A e a placa coletora B em função da corrente.

Se a polaridade da bateria for invertida (nesse caso, $V_{AB} < 0$), a placa B passará a repelir os elétrons emitidos por A. Observe que, para pequenos valores de V_{AB} , a corrente não cai imediatamente a zero, pois os elétrons são emitidos com certa energia cinética. Para valores mais elevados de V_{AB} , a corrente diminui, anulando-se quando $V_{AB} = V_0$, valor conhecido como potencial de corte ou de frenagem. Nesse ponto, a corrente é zero porque os elétrons de máxima energia cinética emitidos pela placa A atingem o repouso exatamente quando chegam à placa B. Pelo Princípio de Conservação da Energia, o valor dessa energia cinética pode ser calculado multiplicando-se o potencial V_0 pela carga do elétron (e). Assim, temos:

$$\left(\frac{1}{2} m \cdot v^2 \right)_{\text{máx}} = e \cdot V_0$$

Alguns elétrons emitidos apresentam uma energia cinética um pouco menor que esse valor porque sofrem colisões internas ao tentar escapar do metal.

Observe novamente o gráfico (Figura 2) e veja que o potencial de corte V_0 é o mesmo tanto para a luz de alta quanto para a luz de baixa intensidade. Isso significa, de acordo com a equação anterior, que a energia cinética máxima dos elétrons independe da intensidade da luz. Esse resultado é surpreendente. De acordo com a Física Clássica, o aumento na intensidade da luz deveria elevar a energia absorvida pelos elétrons, e isso deveria aumentar a energia cinética máxima dos elétrons emitidos.

A seguir, apresentamos as duas principais características do efeito fotoelétrico observadas por Lenard:

1. O aumento na intensidade da luz eleva a taxa de emissão de elétrons, mas a energia cinética destes permanece imutável.
2. Cada metal emite elétrons a partir de uma frequência mínima, acima da qual o aumento da frequência da luz faz crescer a energia cinética dos elétrons.

Veremos, agora, a explicação dada por Einstein para o efeito fotoelétrico.

A interpretação quântica do efeito fotoelétrico

Em 1905, inspirado pela teoria de Planck, Albert Einstein explicou o efeito fotoelétrico por meio da suposição de que a própria luz viajava no espaço concentrada em pacotes de energia, os fótons. Segundo Einstein, o fóton é uma partícula com massa zero, dotado de uma energia dada pela equação de Planck, $E = h \cdot f$.

Enquanto Planck pensava que a quantização da energia era restrita aos osciladores nas paredes do corpo negro, Einstein dizia que a quantização da energia era uma propriedade da luz. Portanto, a frequência f dos osciladores é também a frequência da própria luz emitida pelo corpo. Assim, como citado anteriormente, podemos substituir f pela razão entre a velocidade da luz c e o seu comprimento de onda λ e usar a seguinte equação para calcular a energia do fóton:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

A interpretação quântica do efeito fotoelétrico se ajustou a todas as características do fenômeno discutidas no último tópico. Vejamos como o conceito do fóton explica a independência da energia cinética dos elétrons em relação à intensidade da luz. De acordo com Einstein, um elétron ejetado de uma superfície metálica exposta à luz recebe a energia de um único fóton. Assim, quando o número de fótons incidentes sobre a placa aumenta, em um dado intervalo de tempo, o número de fótons que interage com os elétrons também cresce, e o número de elétrons ejetados aumenta. Porém, como cada fóton permanece com a mesma energia hf , cada elétron também continua recebendo essa mesma energia. É por isso que a energia cinética de ejeção (e o potencial de frenagem V_0) não depende da intensidade da luz. A figura 3 é uma visualização desse fato. Observe que a placa metálica é iluminada por luzes de mesma frequência, mas o feixe da esquerda tem menor intensidade que o feixe da direita. A luz mais intensa (note a maior aglomeração de fótons) gera uma maior taxa de emissão de elétrons. Observe, ainda, que os vetores velocidade dos elétrons são iguais nos dois casos.

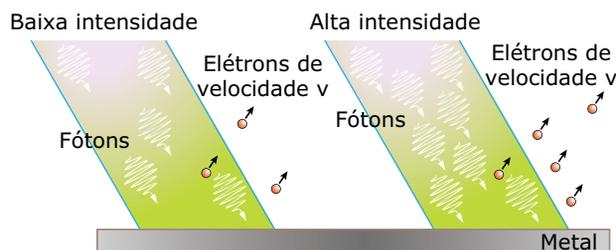


Figura 3. Elétrons de velocidades iguais, apesar de as luzes (de mesmas frequências) terem intensidades diferentes.

Agora, vamos discutir a dependência da energia cinética do elétron com a frequência da luz. Quando um fóton incide sobre uma superfície metálica, uma parcela da sua energia hf é usada para arrancar um elétron. Essa parcela depende do tipo de metal, e é chamada de trabalho de extração (ou função trabalho) Φ .

O restante ($hf - \Phi$) é a energia cinética de ejeção do elétron (isso se ele não sofrer colisões internas). Por exemplo, quando uma luz amarela com fótons de energia $E = hf = 2,2$ eV incide sobre uma placa de césio ($\Phi = 1,8$ eV), a energia cinética máxima de emissão de cada elétron vale 0,4 eV. Para uma frequência maior, digamos, luz azul com fótons de 2,5 eV, a energia cinética aumenta para 0,7 eV. Naturalmente, para cada metal, existe uma frequência mínima, chamada de frequência de corte f_0 , em que a energia do fóton é exatamente igual ao trabalho de extração. Nesse caso, o fóton possui energia suficiente apenas para arrancar o elétron. Para o césio, a frequência de corte vale:

$$f_0 = \frac{\Phi}{h} = \frac{1,8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}} = 4,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Essa é a frequência da luz vermelha no início do espectro visível. Metais alcalinos, como o césio, apresentam baixa eletronegatividade e pequenos valores de Φ e f_0 .

A dualidade onda-partícula

Após a publicação do trabalho de Einstein sobre o efeito fotoelétrico, experiências realizadas em laboratório confirmaram a teoria do fóton (veja o Exercício Resolvido 01). Além desse efeito, outros fenômenos de partículas foram explicados usando-se o conceito de fóton. Todavia, essa teoria parece entrar em conflito direto com a teoria ondulatória da luz, que também foi comprovada depois de muitas experiências. A seguir, apresentamos uma breve discussão sobre essa questão.

Durante muitos anos, Isaac Newton e Christian Huygens protagonizaram um dos mais longos e empolgantes debates da história da Física. Newton defendia a ideia de que a luz era constituída por partículas (Teoria Corpuscular), já Huygens acreditava que ela era um tipo de onda (Teoria Ondulatória). No início do século XIX, várias experiências com a luz mostravam que ela sofria interferência e outros fenômenos perfeitamente explicados do ponto de vista da Teoria Ondulatória. Na segunda metade do século XIX, Maxwell descobriu que a luz era uma onda eletromagnética. Diante de tantas evidências, a teoria ondulatória da luz passou a ser aceita por todos.

A interpretação de Einstein sobre o efeito fotoelétrico reacendeu, de certa forma, as ideias de Newton sobre o comportamento corpuscular da luz. Conforme discutimos no item anterior, a emissão de elétrons de uma superfície metálica exposta à luz é causada pela interação entre as partículas constituintes da luz (os fótons) e os elétrons da superfície.

Embora o fóton seja uma partícula um tanto diferente daquela imaginada por Newton, o seu conceito conduz a uma Teoria Corpuscular para a luz. Atualmente, os físicos admitem um comportamento dual para a luz e para as outras ondas eletromagnéticas. Sob certas circunstâncias, a luz se comporta como uma onda (interferência, difração, etc.), sob outras, ela comporta-se como uma partícula (efeito fotoelétrico, emissão de radiação dos corpos negros, etc.). A figura 4 é interessante, pois ilustra o comportamento dual da luz em duas situações que ocorrem sucessivamente. Primeiro, um feixe de luz refrata e dispersa ao passar por um prisma (comportamento ondulatório). A seguir, o feixe monocromático selecionado produz a emissão de elétrons ao incidir sobre a placa metálica (comportamento corpuscular).

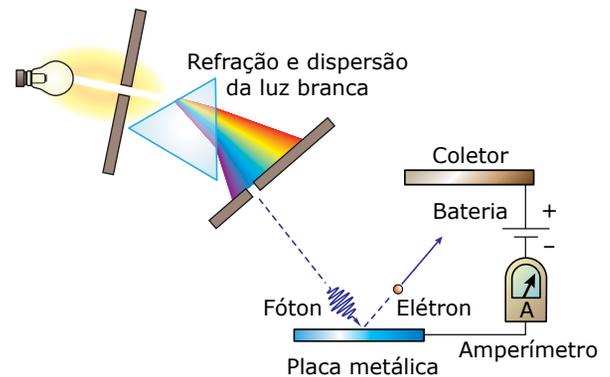


Figura 4. Comportamento ondulatório (dispersão) e corpuscular (efeito fotoelétrico) da luz, presentes nesse experimento.

A natureza é simétrica: existem as cargas positivas e as negativas, o frio e o quente, etc. Pensando assim, em 1924, o francês Louis de Broglie argumentou que, se a luz se comporta ora como onda, ora como partícula, talvez o mesmo acontecesse com a matéria, em particular, com partículas como o elétron. Louis de Broglie previu que o comprimento de onda de uma partícula material é dado por:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

Nessa expressão, h é a constante de Planck, m é a massa e v é a velocidade da partícula. Segundo essa teoria, um feixe de elétrons de baixa energia, cujo comprimento de onda obtido por essa equação é comparável ao comprimento de onda dos raios X, deveria sofrer difração perceptível ao atravessar a rede cristalina de um material de prova. Em 1928, os físicos americanos Davisson e Germer realizaram uma experiência que comprovou tal fato.

Eles dirigiram um feixe de elétrons sobre um cristal de níquel e observaram que, em vez de uma difusão geral (prevista pela teoria clássica), apareciam certas concentrações de elétrons, desviados ordenadamente (difratados) em direções definidas pelos planos do cristal. Além disso, essas direções variavam com a velocidade dos elétrons incidentes, conforme previa a teoria de de Broglie. A montagem e a foto mostradas na figura 5 ilustram a experiência para produzir a difração de elétrons.

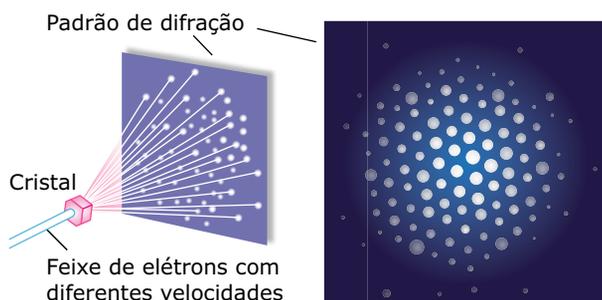
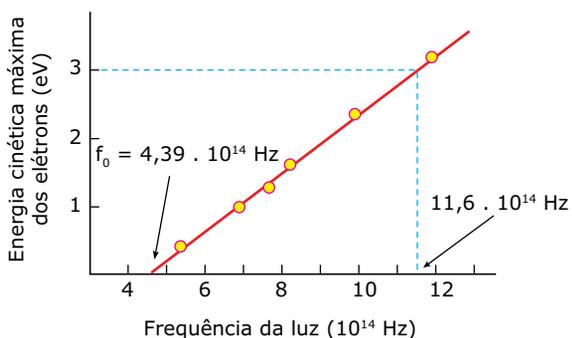


Figura 5. Montagem e imagem da difração de elétrons.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

01. O físico americano Robert Millikan realizou uma série de experiências para comprovar a teoria do fóton proposta por Einstein para explicar o efeito fotoelétrico. Os resultados dos experimentos foram absolutamente concordantes com a teoria. O gráfico a seguir é baseado nos dados publicados por Millikan em 1916. Nele, a ordenada é a energia cinética máxima dos elétrons ejetados por uma placa metálica exposta a luzes de frequências diferentes, e a abscissa representa as frequências dessas luzes.



- A) Explicar por que esse gráfico é uma reta.
- B) Explicar o significado físico da inclinação dessa reta e calcular o seu valor.
- C) Explicar o significado físico da frequência f_0 indicada no gráfico.
- D) Calcular o trabalho de extração da placa metálica.

Resolução:

- A) De acordo com a teoria de Einstein, a energia cinética máxima de ejeção dos elétrons é igual à diferença entre a energia E que o fóton fornece ao elétron e o trabalho de extração Φ gasto em sua remoção. O valor da energia do fóton pode ser calculado por meio do produto entre a constante de Planck h e a frequência f da luz. Assim, a expressão da energia cinética máxima $E_{Cm\acute{a}x}$ é:

$$E_{Cm\acute{a}x} = h \cdot f - \Phi$$

Essa equação indica que a $E_{Cm\acute{a}x}$ varia linearmente com f . Por isso, o gráfico da $E_{Cm\acute{a}x}$ em função de f é uma reta.

- B) De acordo com a equação utilizada no item anterior, o coeficiente angular da reta (inclinação) é a constante de Planck h . Usando alguns dados do gráfico, obtemos:

$$h = \frac{3}{(11,6 - 4,39) \cdot 10^{14}} = 4,2 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$$

Para converter h para a unidade $J\cdot s$, basta multiplicar o valor anterior pelo fator $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}$, e teremos: $h = 6,7 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

- C) O valor $f_0 = 4,39 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ é a frequência de corte. Os fótons de luz com tal frequência apresentam energia suficiente apenas para remover os elétrons. Como não há excedente de energia, o elétron não é ejetado. Abaixo da frequência f_0 , não há energia fotônica para remoção de elétrons.
- D) De acordo com a equação obtida no item (A), o trabalho de extração Φ é o coeficiente linear da reta (valor da ordenada em que a reta corta o eixo vertical). Como o gráfico está interrompido entre a origem e a frequência de corte, a obtenção de Φ diretamente do gráfico é mais difícil. Substituindo $E_c = 0$ e $f = f_0$ na equação da reta, podemos obter o valor de Φ mais facilmente. Assim:

$$0 = h \cdot f_0 - \Phi \Rightarrow \Phi = 4,2 \cdot 10^{-15} \cdot 4,39 \cdot 10^{14} = 1,8 \text{ eV}$$

A ESTRUTURA ATÔMICA

Espectros descontínuos dos gases

De acordo com o modelo de Planck para a radiação de corpo negro, sabe-se que os sólidos emitem radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda. Por isso, a radiação emitida por um sólido forma um espectro contínuo. Em contraste com os sólidos, os espectros de gases são descontínuos. Por exemplo, uma lâmpada de vapor de sódio emite uma luz amarela ao se produzir uma descarga elétrica nesse vapor. Assim, quando essa luz passa por um prisma, como mostrado na figura 6, ela produz uma única linha sobre o anteparo (se a fenda fosse mais estreita, a imagem no anteparo seria mais nítida, e observaríamos que esta é, na verdade, composta de duas linhas muito próximas).

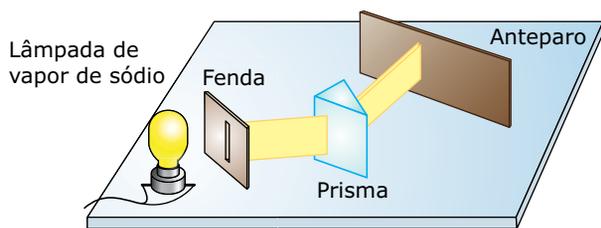


Figura 6. Espectro descontínuo do vapor de sódio.

Planck explicou com sucesso as curvas de radiação dos sólidos utilizando a revolucionária teoria da quantização. Na sequência, veremos como os físicos conseguiram explicar a radiação descontínua dos gases usando a ideia da quantização da energia.

A descoberta do elétron

Em 1897, Joseph John Thomson descobriu a existência do elétron, uma minúscula partícula dotada de carga elétrica negativa, presente em todo tipo de matéria. Por meio de um dispositivo muito engenhoso, Thomson conseguiu determinar o valor da razão entre a massa e a carga do elétron. A ideia de que a matéria é feita de átomos já era um consenso entre os cientistas. Além disso, era sabido que a matéria possuía dois tipos de carga elétrica, a positiva e a negativa, e que, em seu estado normal (neutro), a carga total da matéria é nula. Então, Thomson sugeriu que o átomo fosse uma esfera maciça de carga positiva, recheada de elétrons. A soma das cargas negativas dos elétrons anulava, dessa forma, a carga positiva da esfera. A figura 7 mostra um esquema do átomo de Thomson.

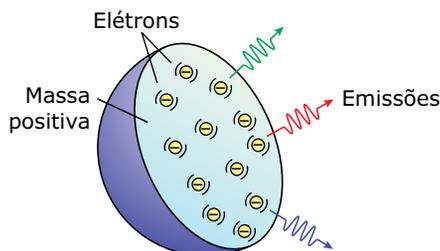


Figura 7. No modelo de Thomson, os elétrons incrustados na massa positiva vibram e emitem radiação.

Para explicar por que os gases emitem radiação eletromagnética com alguns comprimentos de ondas presentes no espectro e outros não, Thomson imaginou que cada elétron oscilasse em torno de sua posição de equilíbrio. Segundo o eletromagnetismo clássico, as cargas irradiam energia quando são aceleradas. Assim, admitindo que um elétron apresentasse uma frequência de oscilação própria, a energia proveniente dele produziria uma linha em uma determinada posição sobre o anteparo usado na produção do espectro do gás.

Na sequência, veremos que o átomo de Thomson se mostrou falho com respeito à distribuição da carga positiva. Ainda assim, esse modelo tem o mérito de ser a primeira ideia sobre a arquitetura atômica.

O núcleo atômico

Em 1911, o físico neozelandês Ernest Rutherford (com a preciosa ajuda de dois estudantes, Marsden e Geiger) realizou uma experiência que revelou uma inconsistência no modelo de Thomson. Segundo esse modelo, a carga positiva do átomo se acha diluída em toda extensão de sua massa. A carga negativa, representada pelos elétrons, também está diluída na esfera atômica. Então, Rutherford argumentou que, se essa teoria estivesse correta, uma fina lâmina metálica seria facilmente perfurada pelo bombardeio de partículas carregadas. Para confirmar suas ideias, Rutherford montou o aparato mostrado na figura 8, constituído por uma fonte de partículas α (carga positiva), uma fina lâmina de ouro e um detector sensível a impactos de partículas. Esse último é um invólucro revestido internamente com sulfeto de zinco, substância que apresenta fluorescência ao ser atingida por partículas de alta velocidade, como as partículas α do experimento.

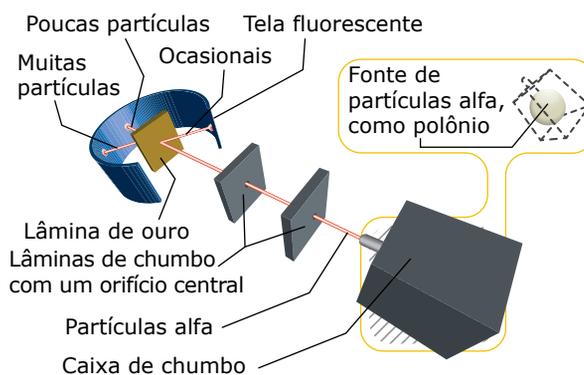


Figura 8. Experimento de Rutherford.

Como dissemos, caso o modelo de Thomson estivesse correto, seria esperado que as partículas α atravessassem a lâmina de ouro, seguindo a direção do feixe incidente (a carga negativa estaria uniformemente distribuída pelo átomo, ocorreriam apenas pequenos desvios das partículas α). Realmente, a maioria dos pontos cintilantes sobre o detector indicou essa trajetória. Porém, alguns pontos apareceram um pouco deslocados para os lados. De fato, para surpresa de Rutherford, apareceram pontos cintilantes em toda a extensão do detector. Ocasionalmente, alguns pontos cintilantes apareciam próximos à entrada do feixe, como mostra a figura. Consta que Rutherford disse: "É como se eu lançasse uma bala de canhão em uma folha de papel, e a recebesse de volta".

Diante das evidências, Rutherford sugeriu que a carga positiva do átomo deveria estar concentrada em uma região muito pequena, o núcleo atômico. Esse núcleo apresentaria uma gigantesca densidade de carga elétrica positiva, explicando os grandes (e ocasionais) desvios sofridos pelas partículas α . Ele sugeriu, ainda, que os elétrons estivessem girando em torno do núcleo, submetidos a uma força centrípeta de origem elétrica, como está ilustrado na figura 9.

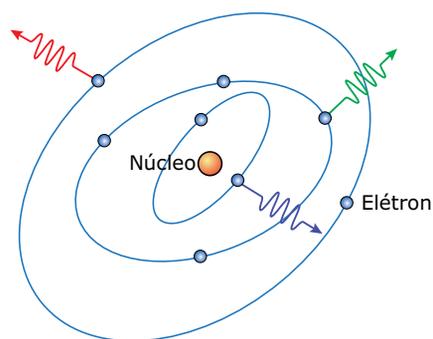


Figura 9. No modelo de Rutherford, os elétrons se movem em círculos em torno de um núcleo positivo.

A emissão de radiação e os espectros descontínuos dos gases poderiam estar associados às acelerações centrípetas dos elétrons em órbita em torno do núcleo, como sugere a figura 9? De fato, não. A ideia dos elétrons irradiando energia eletromagnética é inconsistente, pois essa irradiação implicaria uma perda de energia. O elétron tenderia, portanto, a perder velocidade e a cair no núcleo. Para isso não ocorrer, isto é, para o elétron emitir energia e ainda assim manter uma órbita estável, ele precisaria receber um aporte externo de energia. Em átomos isolados, como é o caso da matéria ordinária, isso não acontece.

Embora o modelo de Rutherford não tenha se mostrado adequado para explicar a emissão de radiação pelos átomos, a descoberta do núcleo atômico foi um grande avanço na compreensão da estrutura da matéria. A seguir, veremos a interpretação quântica (e correta) dada por Bohr a respeito da emissão da radiação atômica.

O modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio

Em 1913, Niels Bohr usou as ideias de Planck, Einstein e Rutherford para desenvolver um modelo atômico para o átomo de hidrogênio. Assim como ocorre com os osciladores de Planck, Bohr imaginou que o átomo de hidrogênio também possui certos estados estacionários de energia, nos quais ele não emite e nem absorve radiação eletromagnética. Para o átomo emitir ou absorver radiação, o elétron deve passar de um estado de energia (associado à sua órbita em torno do núcleo) para outro. O modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio é baseado em três postulados. De acordo com o 1º Postulado, o átomo de hidrogênio emite um fóton quando o elétron passa de um estado de maior energia para outro de menor energia, e absorve um fóton quando o elétron passa de um estado de menor energia para outro de maior energia. A frequência do fóton emitido, ou absorvido, é dada por:

$$f = \frac{\Delta E}{h}$$

Em que ΔE é a diferença de energia entre os dois estados e h é a Constante de Planck.

De acordo com o 2º Postulado, o elétron gira em torno do núcleo em uma órbita circular, de modo que a força centrípeta que atua sobre ele é igual à força de atração elétrica exercida pelo núcleo:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{K_0 e^2}{r^2}$$

Na equação anterior, m , e , v e r são a massa, a carga, a velocidade e o raio orbital do elétron, respectivamente. A constante K_0 , que vale $9,0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2\text{C}^2$, é a constante eletrostática do vácuo.

O 3º Postulado introduz o caráter quântico ao átomo. Para quantizar a energia do elétron, Bohr percebeu que precisava quantizar os valores de r . Para isso, ele propôs esse postulado na seguinte forma:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Nessa expressão, o produto mvr é denominado de momento angular do elétron. O fator n é o número quântico – número inteiro positivo associado às órbitas permitidas do elétron. O número quântico $n = 1$ está associado à órbita mais próxima do núcleo, $n = 2$ está associado à segunda órbita mais próxima do núcleo e assim por diante. Combinando as duas expressões anteriores, Bohr chegou às expressões para calcular o raio orbital e a energia do elétron. A expressão para o raio orbital é:

$$r_n = 0,53n^2 \text{ (em angstrom)}$$

O angstrom é uma unidade adequada para medir distâncias atômicas ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$). Na expressão anterior, fazendo $n = 1$, obtemos o raio da primeira órbita permitida, que é $r_1 = 0,53 \text{ \AA}$. Fazendo $n = 2$, obtemos o raio $r_2 = 0,53 \cdot 2^2 \text{ \AA}$, fazendo $n = 3$, obtemos $r_3 = 0,53 \cdot 3^2 \text{ \AA}$, e assim por diante. Note que, como r é proporcional a n^2 , as órbitas externas são muito mais espaçadas do que as órbitas internas.

A energia total do elétron é composta de duas parcelas, uma associada ao movimento do elétron, que é a parcela relativa à energia cinética E_c , e a outra associada à posição do elétron, que é a parcela relativa à energia potencial elétrica E_p . Bohr mostrou que a energia cinética aumenta quando o elétron gira em órbitas mais próximas do núcleo, enquanto a energia potencial aumenta quando as órbitas são mais externas. Bohr também mostrou que a soma dessas energias é dada por:

$$E_c + E_p = E_n = -13,6 \frac{1}{n^2} \text{ (em elétron-volt)}$$

Ao contrário do raio atômico, as energias se tornam cada vez mais próximas entre si à medida que o elétron passa para órbitas mais externas. Isso pode ser explicado matematicamente pela equação da energia, na qual o quadrado do número quântico aparece no denominador. Esse comportamento está ilustrado na figura 10, que é um diagrama dos níveis de energia do átomo de hidrogênio.

Normalmente, o elétron ocupa o nível mais baixo de energia (estado fundamental), em que $n = 1$, $r_1 = 0,53 \text{ \AA}$ e $E_1 = -13,6 \text{ eV}$. A energia mais alta vale zero, correspondendo a n (e também r) $\rightarrow \infty$. Nesse caso, o elétron está desligado do átomo. Medições realizadas em laboratório indicam que a energia de ionização do átomo de hidrogênio vale $13,6 \text{ eV}$, valor que concorda com a energia de ligação do elétron para $n = 1$.

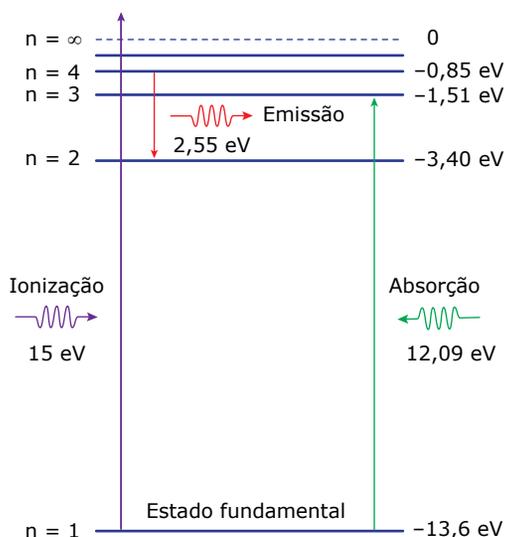


Figura 10. Níveis de energia do átomo de hidrogênio e os processos de emissão e absorção de radiação.

Para passar a um nível mais energético, o elétron deve absorver um fóton de energia exatamente igual à diferença entre a energia do nível de destino e aquela do nível de origem. Na figura 10, note que um fóton de $12,09 \text{ eV}$ é absorvido pelo elétron, que passa do estado fundamental para o terceiro nível. Essa transição eletrônica foi possível porque a diferença entre as energias E_3 e E_1 também vale $12,09 \text{ eV}$ (faça as contas para verificar esse valor). No estado 3, o elétron se acha excitado. Por isso, a tendência é que ele retorne ao estado fundamental. O elétron pode fazê-lo saltando diretamente de volta para o nível 1, ou fazendo um primeiro salto para o nível 2, seguido de outro salto para o nível 1. Em cada uma dessas transições, a energia do elétron diminui, e um fóton de radiação é emitido. Um caso de emissão fotônica é mostrado na figura 10, em que um elétron excitado passa do nível 4 para o nível 2. Observe que o fóton emitido tem energia igual a $2,55 \text{ eV}$, que é exatamente a diferença entre as energias dos níveis 4 e 2.

Um elétron ligado ao átomo não pode absorver (ou emitir) fótons com qualquer valor de energia. Por exemplo, um elétron no estado fundamental é capaz de absorver um fóton de energia de $10,2 \text{ eV}$, mas não um fóton de 8 eV . No primeiro caso, a absorção é possível porque a energia do fóton somada à energia do elétron no estado fundamental resulta na energia do nível 2 ($10,2 - 13,6 = -3,40 \text{ eV}$). Na outra situação, essa soma é $-5,6 \text{ eV}$. Como não existe um nível estacionário com essa energia, o fóton de 8 eV passa pelo átomo de hidrogênio sem interagir com o elétron. Um caso diferente ocorre quando fótons com qualquer energia maior que $13,6 \text{ eV}$ incidem sobre átomos de hidrogênio.

Nesse caso, todos os fótons são absorvidos, e os elétrons são desligados de seus átomos. Como a energia necessária para remover o elétron é de apenas $13,6 \text{ eV}$, o restante da energia é usado para ejetar o elétron do átomo. A figura 10 mostra um fóton de energia 15 eV removendo um elétron do estado fundamental. Este é ejetado do átomo com a energia excedente de $1,4 \text{ eV}$. Fenômeno semelhante a esse ocorre no efeito fotoelétrico.

O porquê dos espectros descontínuos dos gases

O modelo de Bohr permitiu explicar quantitativamente os espectros descontínuos do hidrogênio. Embora esse modelo não possa ser aplicado para calcular as raias espectrais de outros gases, a ideia qualitativa de níveis quânticos de energia pode ser aplicada para todos os átomos e moléculas. Usando esse conceito, poderemos entender por que os espectros dos gases são descontínuos.

A figura 11 mostra três tipos de espectros. O primeiro é um espectro contínuo da luz emitida pelo filamento de uma lâmpada. Nesse caso, existem elétrons excitados em vários níveis de energia pertencentes a órbitas mais externas. Além disso, nos sólidos, os átomos são próximos. Por isso, as transições eletrônicas ocorrem entre níveis de energia de um mesmo átomo, mas também entre níveis de átomos vizinhos. Dessa forma, os fótons emitidos apresentam uma infinidade de energias (e de frequências) e o espectro gerado é contínuo.

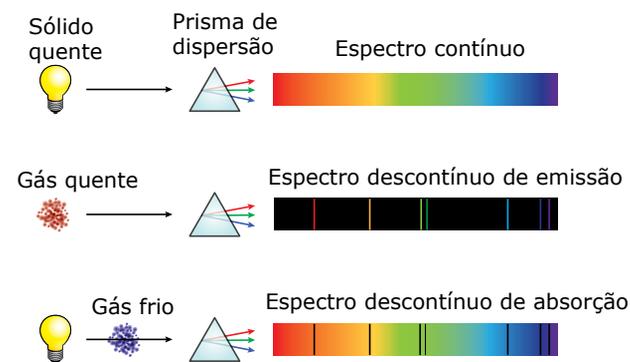


Figura 11. Espectro contínuo e espectros descontínuos de emissão e absorção.

O segundo espectro mostrado na figura 11 é um espectro descontínuo de emissão, gerado pela luz proveniente de um gás aquecido (ou submetido a uma descarga elétrica). Nesse caso, alguns elétrons se acham excitados em níveis energéticos mais externos. Como os átomos dos gases são afastados uns dos outros, os elétrons excitados efetuam transições dentro de seu próprio átomo. As transições eletrônicas são limitadas, e os fótons emitidos apresentam certos valores de energia. Por isso, o espectro dessa radiação é descontínuo. As linhas que vemos no espectro foram produzidas pelas luzes constituídas por esses fótons.

O último espectro mostrado na figura 11 é um espectro de absorção. Uma lâmpada incide luz de todas as frequências sobre o mesmo tipo de gás usado no espectro de emissão. Fótons de determinadas frequências são absorvidos por elétrons que ocupam níveis mais internos de energia dos átomos do gás. Os demais fótons atravessam o gás e produzem um espectro em que faltam as luzes que foram absorvidas pelo gás. As linhas negras no espectro representam essas ausências. Note que as linhas sobre o espectro de emissão se acham nas mesmas posições das linhas negras do espectro de absorção. O espectro de absorção é uma espécie de negativo do espectro de emissão.

Concluimos aqui a explanação sobre a Teoria Quântica. Aprendemos que os fenômenos atômicos, em geral, não podem ser descritos satisfatoriamente pela Física Clássica. Contudo, quando o número quântico é muito grande, a Física Quântica se reduz à Física Clássica. Esse fato é conhecido como o princípio da correspondência. O Exercício Resolvido 02, apresentado a seguir, aborda esse importante aspecto da Teoria Quântica. Antes de vê-lo, procure responder à seguinte pergunta:



PARA REFLETIR

O elemento hélio foi primeiro descoberto no Sol, e somente depois na Terra (*hélios*, em grego, quer dizer Sol). Você imagina como essa descoberta foi feita?



SHQA

Espectros descontínuos dos gases

Em meados do século XIX, os estudos realizados por Kirchhoff e Bunsen levaram à formulação de três importantes enunciados sobre a espectroscopia, que, hoje, são conhecidos como leis de Kirchhoff da espectroscopia. Assista ao vídeo para entender a relação entre o espectro de um gás e os elementos químicos presentes em sua constituição. Aproveite!

EXERCÍCIO RESOLVIDO

- 02.** De acordo com o Eletromagnetismo Clássico, a frequência da luz emitida por um átomo é igual à frequência de rotação do elétron. A Física Quântica prevê que a frequência da luz emitida é a razão entre a diferença de energia dos níveis de transição e a constante de Planck. Calcular a frequência de rotação do elétron no átomo de hidrogênio para a segunda órbita ($n = 2$) e a frequência da luz emitida para uma transição do nível 2 para o nível 1 usando o modelo de Bohr. Repetir os cálculos para a centésima órbita ($n = 100$) e para a transição $100 \rightarrow 99$. Em cada caso, calcular o erro cometido ao se usar a Física Clássica e comentar os resultados.

Resolução:

Primeiramente, vamos deduzir uma expressão para calcular a frequência f' de rotação do elétron em uma órbita circular de raio r . Ela pode ser obtida igualando-se a expressão da força centrípeta que atua sobre o elétron com a expressão da força elétrica, dada pela Lei de Coulomb, e substituindo-se a velocidade por $2\pi r f'$. Efetuando algumas manipulações, obtemos:

$$f' = \frac{e}{2\pi} \sqrt{\frac{K_0}{m_e r^3}}$$

Substituindo o valor da carga elétrica, da massa do elétron ($e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ e $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$) e da constante eletrostática do vácuo $K_0 = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$, obtemos:

$$f' = 2,53 \sqrt{\frac{1}{r^3}}$$

O raio, em metros, é dado por $r = 0,53 \cdot 10^{-10} \cdot n^2$. Para $n = 2$, temos $r = 2,12 \cdot 10^{-10} \text{ m}$. Utilizando esse valor, obtemos $f' = 8,2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$.

Agora, calculemos a frequência da luz prevista pela Teoria Quântica (de Bohr) para a transição $2 \rightarrow 1$. Esse valor é dado por:

$$f = \frac{E_1 - E_2}{h} = \frac{13,6 - 3,40}{4,2 \cdot 10^{-15}} = 24 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Nessa equação, o numerador é a diferença entre os módulos das energias dos níveis 1 e 2 (fornecidas em eV na Figura 10), e o denominador é a constante de Planck na unidade eV.s. O erro entre a frequência calculada classicamente ($8,2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$) e o valor anterior é grande (66%). Isso era esperado, pois os números quânticos 1 e 2 são pequenos, e a Física Clássica discorda da Física Quântica nessas situações.

Para $n = 100$, o raio é $r = 5\,300 \cdot 10^{-10} \text{ m}$. Esse raio atômico é muito grande, e a Física Clássica deve gerar resultados mais próximos da Física Quântica. Nesse caso, a frequência f' vale $6,6 \cdot 10^9 \text{ Hz}$. Para obter a frequência quântica, precisamos usar $E = -13,6/n^2$ para calcular as energias dos níveis 100 e 99. Substituindo esses números na equação, encontramos:

$$E_{100} = -1,36 \cdot 10^{-3} \text{ eV} \text{ e } E_{99} = -1,39 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$$

Calculando a diferença entre essas energias e dividindo-a pela constante de Planck, obtemos $f = 7,2 \cdot 10^9 \text{ Hz}$ para a luz emitida na transição $100 \rightarrow 99$. Como esperado, o erro de f' em relação a f tornou-se menor (8%). Para $n = 10$ mil, o raio atômico vale 2,3 mm. Nesse caso, o "átomo" é tão grande que a Física Clássica prevê com bastante precisão o seu comportamento.

EXERCÍCIOS DE APRENDIZAGEM



- 01.** (UDESC) A emissão de elétrons de uma superfície, devido à incidência de luz sobre essa superfície, é chamada de efeito fotoelétrico. Em um experimento, um físico faz incidir uma radiação luminosa de frequência f e intensidade I sobre uma superfície de sódio, fazendo com que N elétrons sejam emitidos desta superfície.

Em relação aos valores iniciais f e I , assinale a alternativa que apresenta como devem variar a frequência e a intensidade da luz incidente para duplicar o número de elétrons emitidos.

- A) Duplicar a frequência e manter a intensidade.
- B) Manter a frequência e duplicar a intensidade.
- C) Reduzir a frequência pela metade e manter a intensidade.
- D) Manter a frequência e quadruplicar a intensidade.
- E) A emissão de elétrons independe da frequência e da intensidade da luz incidente.

- 02.** (UFU-MG) Considere as seguintes afirmativas.

- I. Os satélites artificiais que giram ao redor da Terra estão em constante queda livre para a Terra, embora sem atingi-la.
- II. O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons de um metal, e sua ocorrência depende da intensidade da radiação eletromagnética incidente no metal.
- III. De acordo com a Mecânica Quântica, tanto a matéria quanto a energia podem exibir um comportamento ondulatório ou corpuscular, dependendo da interação física envolvida.

Assinale a alternativa correta.

- A) Apenas I e II estão corretas.
- B) Apenas II e III estão corretas.
- C) Apenas I está correta.
- D) Apenas I e III estão corretas.

- 03.** (UPE) Se um elétron move-se de um nível de energia para outro mais afastado do núcleo do mesmo átomo, é correto afirmar que, segundo Bohr,

- A) há emissão de energia.
- B) há absorção de energia.
- C) o número atômico varia.
- D) há emissão de luz de um determinado comprimento de onda.
- E) não há variação de energia.

- 04.** (UFC-CE) No início do século XX, novas teorias provocaram uma surpreendente revolução conceitual na Física. Um exemplo interessante dessas novas ideias está associado às teorias sobre a estrutura da matéria, mais especificamente àquelas que descrevem a estrutura dos átomos. Dois modelos atômicos propostos nos primeiros anos do século XX foram o de Thomson e o de Rutherford.

Sobre esses modelos, assinale a alternativa correta.

- A) No modelo de Thomson, os elétrons estão localizados em uma pequena região central do átomo, denominada núcleo, e estão cercados por uma carga positiva, de igual intensidade, que está distribuída em torno do núcleo.
- B) No modelo de Rutherford, os elétrons são localizados em uma pequena região central do átomo e estão cercados por uma carga positiva, de igual intensidade, que está distribuída em torno do núcleo.
- C) No modelo de Thomson, a carga positiva do átomo encontra-se uniformemente distribuída em um volume esférico, ao passo que os elétrons estão localizados na superfície da esfera de carga positiva.
- D) No modelo de Rutherford, os elétrons movem-se em torno da carga positiva, que está localizada em uma pequena região central do átomo, denominada núcleo.
- E) O modelo de Thomson e o modelo de Rutherford consideram a quantização da energia.

- 05.** (UFRN) Os óculos de visão noturna detectam a radiação infravermelha emitida ou refletida pelos corpos. Esses equipamentos são bastante utilizados em aplicações militares, em navegação, e também por pesquisadores, que, com o auxílio deles, podem detectar animais na mata durante a noite, entre outras aplicações.

Um desses tipos de óculos, que utiliza a técnica da imagem térmica, opera por meio da captura do espectro luminoso infravermelho, emitido, na forma de calor, pelos objetos.

A teoria física que explica a emissão de radiação pelos corpos, e na qual se baseia o funcionamento dos óculos de visão noturna, é a teoria

- A) do efeito fotoelétrico, de Einstein.
- B) do átomo, de Bohr.
- C) da dualidade onda-partícula, de De Broglie.
- D) da radiação do corpo negro, de Planck.

- 06.** (UEL-PR) Uma das contribuições da Física para o bem-estar e a segurança nas cidades é o constante avanço tecnológico aplicado à iluminação pública. Parte das luminárias do século XIX era acesa manualmente por várias pessoas ao entardecer. Hoje, o acionamento das lâmpadas tornou-se automático devido à aplicação dos conhecimentos sobre o efeito fotoelétrico (descrito por Albert Einstein, em 1905) e ao desenvolvimento das células fotoelétricas instaladas nos postes de iluminação pública, capazes de detectar a presença de luz natural.

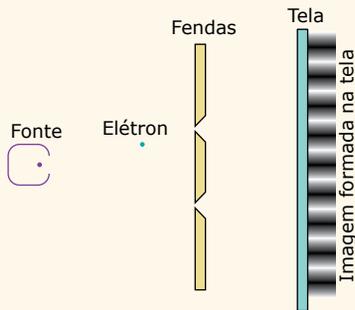
Sobre o efeito fotoelétrico, considere as afirmativas a seguir:

- I. Consiste na emissão de elétrons de uma superfície metálica quando esta é iluminada com luz de determinada frequência.
- II. Ocorre independentemente da frequência da luz incidente na superfície do metal, mas é dependente de sua intensidade.
- III. Os elétrons ejetados de uma superfície metálica, devido ao efeito fotoelétrico, possuem energia cinética igual à energia do fóton incidente.
- IV. Por mais intensa que seja a luz incidente, não haverá ejeção de elétrons enquanto sua frequência for menor que a frequência limite (ou de corte) do metal.

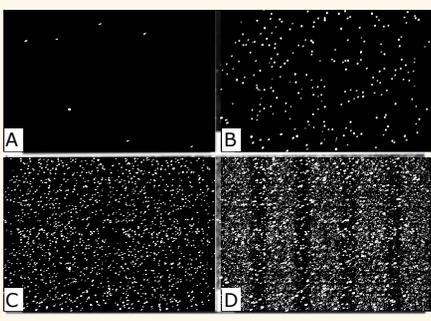
Assinale a alternativa correta.

- A) Somente as afirmativas I e II são corretas.
- B) Somente as afirmativas I e IV são corretas.
- C) Somente as afirmativas III e IV são corretas.
- D) Somente as afirmativas I, II e III são corretas.
- E) Somente as afirmativas II, III e IV são corretas.

07. (UFG-GO) A experiência da dupla fenda realizada por Akira Tonomura, em 1989, consiste em lançar elétrons sobre um anteparo que contém duas fendas e coletar em uma tela as partículas transmitidas, conforme ilustrado a seguir:



Nesse experimento, a fonte emite um elétron por vez. A evolução temporal da imagem formada está ilustrada nas figuras A, B, C e D.

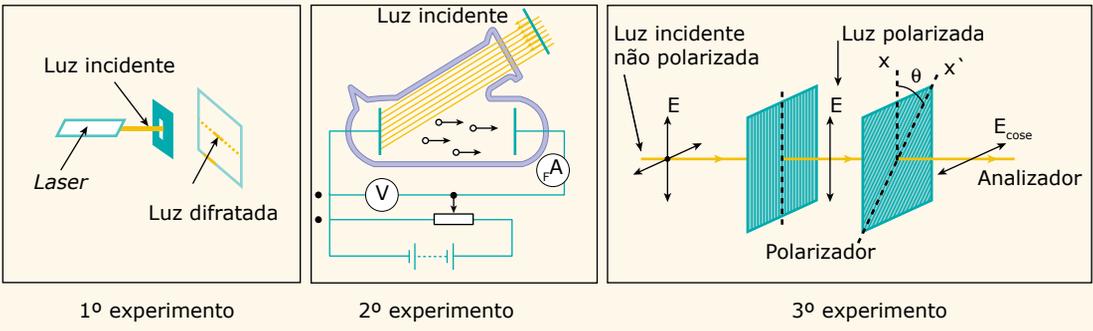


Disponível em: <<http://www.hitachi.com/rd/research/em/doubleslit.html>>. Acesso em: 23 set. 2011.

O fenômeno físico constatado na imagem final D e a teoria que descreve o comportamento dos elétrons são, respectivamente,

- A) refração e quantização de Bohr.
- B) refração e quantização de Planck.
- C) ondulatório e quantização de Planck.
- D) ondulatório e dualidade onda-partícula.
- E) propagação retilínea e dualidade onda-partícula.

08. (UFRN) Estudantes interessados em analisar a natureza dual da luz preparavam uma apresentação para uma Feira de Ciências com três experimentos, conforme mostrados nas figuras seguintes.



- O 1º experimento mostra a difração da luz ao passar por uma fenda estreita;
- O 2º experimento mostra o efeito fotoelétrico caracterizado pela geração de corrente elétrica a partir da incidência de luz sobre uma célula fotoelétrica;
- O 3º experimento mostra o efeito da polarização da luz ao fazê-la incidir sobre filtros polarizadores.

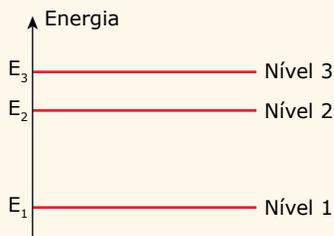
A partir desses experimentos, é correto afirmar que

- o efeito fotoelétrico e a polarização evidenciam a natureza ondulatória da luz, enquanto a difração evidencia a natureza corpuscular da luz.
- a polarização e a difração evidenciam a natureza corpuscular da luz, enquanto o efeito fotoelétrico evidencia a natureza ondulatória da luz.
- a difração e a polarização evidenciam a natureza ondulatória da luz, enquanto o efeito fotoelétrico evidencia a natureza corpuscular da luz.
- o efeito fotoelétrico e a difração evidenciam a natureza ondulatória da luz, enquanto a polarização evidencia a natureza corpuscular da luz.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS



- 01.** (EPCAR-MG-2015) O diagrama a seguir mostra os níveis de energia permitidos para elétrons de um certo elemento químico.



Durante a emissão de radiação por este elemento, são observados três comprimentos de onda: λ_A , λ_B e λ_C .

Sabendo-se que $\lambda_A < \lambda_B < \lambda_C$, pode-se afirmar que $\frac{\lambda_A}{\lambda_C}$ é igual a:

- $\frac{E_3}{E_1}$
- $\frac{E_3 - E_2}{E_3}$
- $\frac{E_3 - E_2}{E_3 - E_1}$
- $\frac{E_2}{E_1}$

- 02.** (FASEH-MG-2018) Um elétron, durante uma transição eletrônica, passa de um nível cuja energia era de $-0,85$ eV para outro cuja energia é de $-3,39$ eV.

Considere a constante de Planck $h = 4,1 \cdot 10^{-15}$ eV·s.

Nessa transição, o fóton foi:

- emitido e sua frequência era de $1,4 \cdot 10^{16}$ Hz.
- emitido e sua frequência era de $6,2 \cdot 10^{14}$ Hz.
- absorvido e sua frequência era de $1,0 \cdot 10^{16}$ Hz.
- absorvido e sua frequência era de $8,3 \cdot 10^{14}$ Hz.

- 03.** (UFJF-MG) Fótons de raios X, com energias da ordem de $1,98 \cdot 10^{-15}$ J, são utilizados em experimentos de difração com cristais. Nesses experimentos, o espaçamento entre átomos do cristal é da ordem do comprimento de onda dos raios X. Em 1924, Louis de Broglie apresentou a teoria de que a matéria possuía tanto características corpusculares como ondulatórias. A teoria de Louis de Broglie foi comprovada por um experimento de difração com cristais, utilizando-se um feixe de elétrons no lugar de um feixe de raios X. Considere a constante de Planck $h = 6,60 \cdot 10^{-34}$ J/s; a velocidade da luz no vácuo $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s; a massa do elétron $m = 9,10 \cdot 10^{-31}$ kg e $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19}$ J.

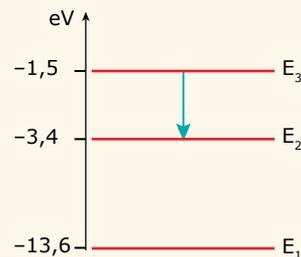
- Calcule o valor do espaçamento entre os átomos do cristal, supondo que o valor do espaçamento é igual ao comprimento de onda dos raios X com energia de $1,98 \cdot 10^{-15}$ J.
- Calcule o valor da quantidade de movimento dos elétrons utilizados no experimento de difração com o cristal, cujo espaçamento entre os átomos foi determinado no item anterior. Despreze os efeitos relativísticos no movimento dos elétrons.
- Calcule o valor aproximado da energia cinética dos elétrons, em elétrons-volts, neste experimento.

- 04.** (UDESC) Um elétron em um átomo de hidrogênio efetua uma transição entre dois estados cujas energias são $E_i = -0,54$ eV e $E_f = -3,40$ eV.

A frequência da radiação emitida é:

- $4,3 \cdot 10^{14}$ Hz
- $6,9 \cdot 10^{14}$ Hz
- $5,2 \cdot 10^{14}$ Hz
- $1,3 \cdot 10^{14}$ Hz
- $8,2 \cdot 10^{14}$ Hz

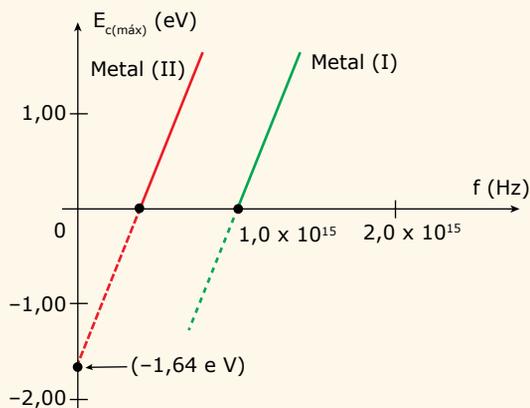
- 05.** (UFG-GO) Transições eletrônicas, em que fótons são absorvidos ou emitidos, são responsáveis por muitas das cores que percebemos. Na figura a seguir, vê-se parte do diagrama de energias do átomo de hidrogênio.



Na transição indicada ($E_3 \rightarrow E_2$), um fóton de energia

- 1,9 eV é emitido.
- 1,9 eV é absorvido.
- 4,9 eV é emitido.
- 4,9 eV é absorvido.
- 3,4 eV é emitido.

Determine



- A) o valor da função trabalho, em eV (elétron-volt), do metal I.
- B) o valor da frequência mínima, em Hz, para que ocorra emissão fotoelétrica a partir do metal II.
- C) a energia cinética máxima dos fotoelétrons emitidos quando da incidência, sobre o metal II, de uma radiação de comprimento de onda $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-7}$ m.

- 12.** (UEG-GO) Um fóton de luz é absorvido por um elétron do átomo de hidrogênio que salta do nível de energia $n = 1$ para o nível $n = 5$. Utilizando o modelo de Bohr e sabendo que a constante de Planck é $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J/s, determine

Dado: $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J.

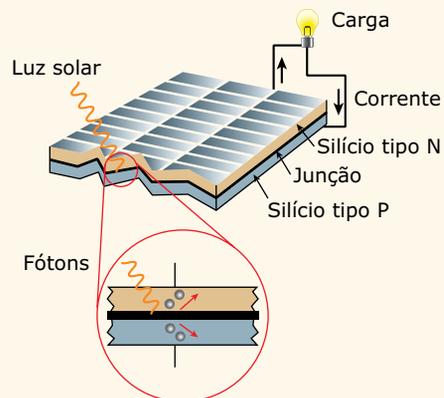
- A) a energia de cada nível eletrônico.
- B) a diferença de energia entre os níveis eletrônicos $n = 1$ e $n = 5$.
- C) a frequência do fóton absorvido.

SEÇÃO ENEM

- 01.** (Enem) Quando a luz branca incide em uma superfície metálica, são removidos elétrons desse material. Esse efeito é utilizado no acendimento automático das luzes nos postes de iluminação, na abertura automática das portas, no fotômetro fotográfico e em sistemas de alarme. Esse efeito pode ser usado para fazer a transformação de energia
- A) nuclear para cinética.
- B) elétrica para radiante.
- C) térmica para química.
- D) radiante para cinética.
- E) potencial para cinética.

- 02.** (Enem) Devido à sua resistência mecânica, baixa condutividade térmica e transparência à luz, o vidro tem sido cada vez mais utilizado na construção civil, aplicado em portas, janelas e telhados. Sua transparência é importante porque resulta em uma grande economia da energia elétrica usada na iluminação interna do ambiente. Microscopicamente, a transparência ocorre devido à forma com que a luz incidente interage com os elétrons dos átomos que compõem o material vítreo. A transparência pode ser explicada, considerando-se que a luz
- A) é absorvida pelos elétrons e transformada em calor.
- B) é absorvida pelos elétrons e reemitida em todas as direções.
- C) não é absorvida pelos elétrons e é espalhada em diversas direções.
- D) não é absorvida pelos elétrons e continua seu caminho em trajetórias regulares.
- E) é absorvida pelos elétrons e reemitida de volta pela mesma trajetória de onde veio.

- 03.** As células fotovoltaicas são fabricadas com materiais semicondutores, como o silício, que apresentam características intermediárias entre os condutores e os isolantes. No escuro, o selênio é isolante. Em seu estado cristalino puro, o silício é um condutor medíocre. No entanto, acrescentando um pouco de fósforo ao silício, obtém-se um ótimo condutor com elétrons livres, ou seja, com portadores de cargas livres negativas. Por isso, esse processo é chamado de dopagem tipo N. Na dopagem com boro, obtém-se também um ótimo condutor, mas com portadores de cargas livres positivas (a ausência de elétrons na faixa de condução do cristal, lacunas, podem ser consideradas como cargas positivas livres). Daí, o nome dopagem tipo P. Uma célula fotovoltaica é formada de uma camada de material tipo N e outra de material tipo P, conforme mostra a figura a seguir. Um campo elétrico é formado devido à diferença de potencial existente na junção P-N. Quando a luz solar incide sobre a célula fotovoltaica, fótons de certos comprimentos de onda arrancam elétrons das duas camadas, transformando-as em condutoras de eletricidade. Por isso, uma lâmpada conectada entre as duas camadas permanecerá acesa enquanto a célula receber luz.



De acordo com as informações do texto, e usando conhecimentos básicos sobre o efeito fotoelétrico, pode-se concluir que a célula fotovoltaica é um dispositivo

- A) que armazena energia elétrica, que aparece na forma de corrente elétrica gerada pela incidência de luz, e o valor dessa corrente depende tanto da intensidade da luz quanto das frequências presentes na luz.
- B) que armazena energia elétrica, que aparece na forma de corrente elétrica gerada pela incidência de luz, e o valor dessa corrente depende da intensidade da luz, mas independe das frequências presentes na luz.
- C) que armazena energia elétrica, que aparece na forma de corrente elétrica gerada pela incidência de luz, e o valor dessa corrente independe da intensidade da luz como também das frequências presentes na luz.
- D) que não armazena energia elétrica, ela apenas mantém uma corrente elétrica enquanto estiver exposta à luz, e o valor dessa corrente depende tanto da intensidade da luz quanto das frequências presentes na luz.
- E) que não armazena energia elétrica, ela apenas mantém uma corrente elétrica enquanto estiver exposta à luz, e o valor dessa corrente depende da intensidade da luz, mas independe das frequências presentes na luz.

GABARITO

Aprendizagem

- 01. B
- 02. D
- 03. B
- 04. D
- 05. D
- 06. B

Propostos

- 01. C
- 02. B
- 03.
 - A) $1,0 \cdot 10^{-10}$ m
 - B) $6,6 \cdot 10^{-24}$ kg.m/s
 - C) $1,5 \cdot 10^2$ eV
- 04. B
- 05. A
- 06. A
- 07. E
- 08. A
- 09. Soma = 11
- 10. Soma = 19
- 11.
 - A) $\Phi = 4,1$ eV
 - B) $f_{\min} = 4,0 \cdot 10^{14}$ Hz
 - C) $E_c \approx 6,6$ eV
- 12.
 - A) $E_i = -13,6$ eV
 $E_s = -0,544$ eV
 - B) $\Delta E_{1-5} = 13,056$ eV
 - C) $f = 3,2 \cdot 10^{15}$ Hz

Seção Enem

- 01. D
- 02. D
- 03. D

Meu aproveitamento 

Acertei _____ Errei _____

07. D

08. C

Acertei _____ Errei _____

Acertei _____ Errei _____



Total dos meus acertos: _____ de _____ . _____ %

Introdução à Relatividade Especial

Iniciaremos este módulo apresentando os postulados da Teoria da Relatividade Especial e suas consequências, como a dilatação do tempo e a contração do espaço. Discutiremos, em seguida, a conversão entre massa e energia. Na parte final do módulo, abordaremos os seguintes fenômenos nucleares: os decaimentos radioativos de certos núcleos atômicos e as reações de fusão e fissão nuclear.

A TEORIA DA RELATIVIDADE

Os postulados da Teoria da Relatividade Restrita

Um sistema de referência inercial é aquele que não possui aceleração, ou seja, ou encontra-se parado ou em movimento retilíneo uniforme. Assim, a Teoria da Relatividade Restrita (ou Especial) permite relacionar medidas de tempo e de espaço entre dois sistemas inerciais, isto é, sistemas de referência que se deslocam em movimento retilíneo uniforme um em relação ao outro. A Teoria da Relatividade Restrita é sustentada pelos seguintes postulados:

Postulado 1: As leis da Mecânica e do Eletromagnetismo são as mesmas em todos os referenciais inerciais.

Postulado 2: A velocidade da luz é absoluta (constante), independentemente do referencial inercial de observação.

O 1º Postulado é o Princípio da Relatividade newtoniana estendido às leis do Eletromagnetismo. Assim, um passageiro dentro de um trem silencioso e sem janelas, que viaja em movimento retilíneo uniforme com velocidade v em relação aos trilhos, não é capaz de detectar o movimento do trem (distinguir se ele está parado ou em movimento retilíneo uniforme) por meio de aparatos mecânicos, como também não pode fazê-lo por meio de medições envolvendo ímãs, fios transportando corrente elétrica ou pulsos de luz.

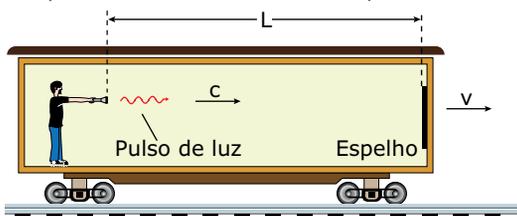


Figura 1. Experiência para constatar o movimento do trem.

O 2º Postulado é uma imposição para que o 1º Postulado seja respeitado. Como a velocidade da luz não depende do referencial inercial, a velocidade do pulso luminoso na figura 1 é igual a c tanto no movimento de ida quanto no movimento de retorno do pulso. Por isso, o intervalo de tempo entre a emissão e o retorno do pulso vale $\Delta t = 2L/c$, tanto para o trem parado quanto para o trem em movimento uniforme. Experiências com o pulso de luz, assim como outras experiências de Eletromagnetismo, não permitem saber se o referencial está ou não em movimento uniforme.

A invariância da velocidade da luz é verificada em todos os referenciais inerciais e em todas as direções. Isso pode parecer surpreendente, mas medidas feitas com instrumentos modernos e extremamente precisos confirmam esse resultado. A seguir, apresentaremos várias consequências dos postulados de Einstein. São essas implicações que constituem, de fato, a Teoria da Relatividade Restrita.

Simultaneidade

Quando dois eventos ocorrem no mesmo instante de tempo, dizemos que eles são simultâneos. De acordo com a Teoria da Relatividade:

Dois eventos simultâneos em um referencial inercial não são necessariamente simultâneos em outro referencial inercial que se move em relação ao primeiro.

Einstein explicou essa ideia por meio do exemplo ilustrado na figura 2. Dois raios de luz A e B são produzidos em locais equidistantes do observador inercial X na Terra e também equidistantes de um observador inercial Y no trem, que se move com velocidade constante em direção a B. Os clarões são percebidos simultaneamente pelo observador X, que conclui, corretamente, que os aparecimentos dos clarões são eventos simultâneos. Agora, considere o observador Y no trem. Para esse observador, de acordo com o 2º Postulado da Relatividade, tanto o clarão B quanto o clarão A se aproximam dele com a mesma velocidade c . Porém, como o trem se aproxima de B, ele percebe o clarão B primeiro, e só depois o clarão A. Portanto, para o observador no trem, os aparecimentos dos clarões não são eventos simultâneos. Se a velocidade do trem fosse comparável à velocidade da luz (por exemplo, 60% de c), o observador Y veria o clarão B e, a seguir, poderia voltar calmamente o seu olhar para trás, esperar um pouco e, só depois, perceberia o clarão A chegando até ele.

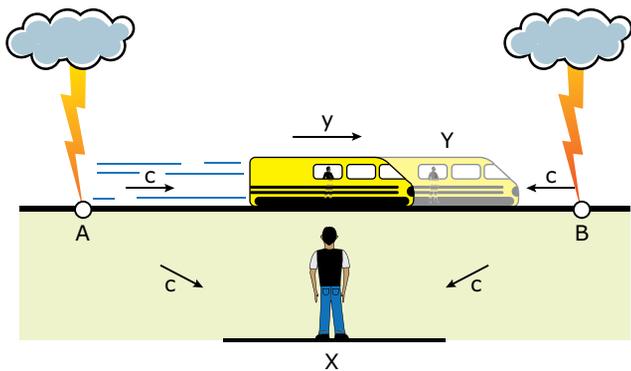


Figura 2. Exemplo proposto por Einstein para explicar a simultaneidade e a não simultaneidade.

Dilatação do tempo

Outra importante consequência do 2º Postulado de Einstein nos conduz ao relativismo do tempo. Para entender esse conceito, vamos considerar os referenciais inerciais S e S'. O primeiro referencial é a Terra, e o segundo é uma nave que viaja com uma velocidade constante v em relação à Terra. Dentro da nave, um astronauta dispara um pulso de luz em direção a um espelho plano fixo no teto. O astronauta registra um intervalo de tempo Δt' no caminho vertical de ida e volta, entre a emissão do pulso e o seu retorno após sofrer reflexão no espelho. Ana Lúcia, uma observadora inercial na Terra, vê o mesmo pulso percorrer um caminho mais longo (na diagonal), registrando um intervalo de tempo entre a saída e o retorno do pulso igual a Δt, como mostra a figura 3.

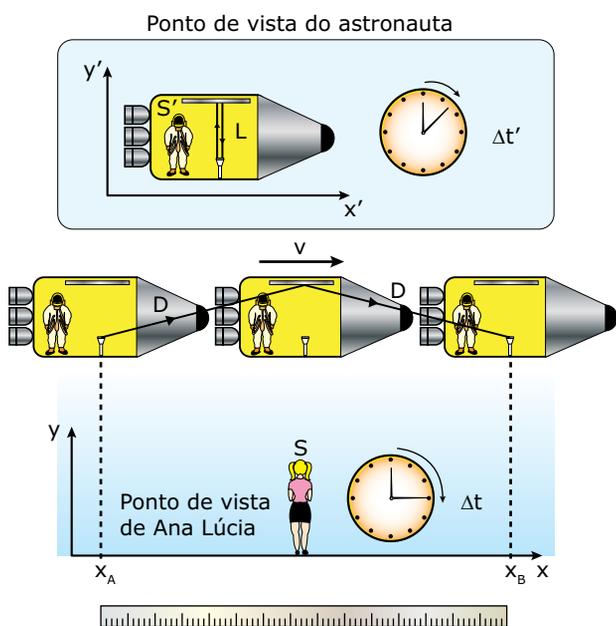


Figura 3. Diferentes trajetórias de um pulso luminoso para quem viaja na nave e para quem está na Terra. (As dimensões foram exageradas para melhor entendimento do problema.)

De acordo com o 2º Postulado de Einstein, a velocidade do pulso de luz vale c tanto no referencial S quanto no referencial S', independentemente do quão rápido a nave possa estar. Como a distância percorrida pelo pulso é maior no referencial S, concluímos que o tempo Δt deve ser maior que o tempo Δt'. Este é chamado de tempo próprio, medido no referencial em que os dois eventos (a emissão e o retorno do pulso luminoso) ocorrem em uma mesma posição. O intervalo de tempo Δt medido em qualquer outro referencial é sempre maior que o tempo próprio. Essa expansão temporal é chamada de dilatação do tempo. Nos referenciais em que o tempo é dilatado, os dois eventos ocorrem em posições diferentes. No referencial S, observe que a emissão do pulso ocorre na posição x_A, enquanto o seu retorno se dá na posição x_B.

Na situação desse exemplo, embora tenhamos medido o tempo com uma espécie de relógio de luz, todos os outros tipos de relógio funcionam mais lentamente no interior da nave, pois o relativismo do tempo não está associado ao mecanismo do relógio usado em sua medição, mas sim à natureza física do tempo. A figura 3 mostra dois relógios analógicos, um marcando o tempo próprio dentro da nave e o outro marcando o tempo dilatado na Terra.

Agora, vamos deduzir uma equação para relacionar o tempo próprio Δt' com o tempo dilatado Δt. O primeiro é o tempo que a luz leva para percorrer a distância vertical 2L no referencial S' (L é a altura do espelho em relação à fonte de luz). O segundo é o tempo que a luz leva para percorrer a distância diagonal 2D no referencial S. Assim:

$$2L = c\Delta t' \text{ e } 2D = c\Delta t$$

Na figura 3, observe que cada uma das metades do caminho diagonal percorrido pela luz em S corresponde à hipotenusa de um triângulo retângulo de altura L. A base do triângulo é a distância que a nave percorre durante o intervalo de tempo Δt/2. Assim, se a velocidade da nave em relação à Terra é v, a base desse triângulo é dada por v.Δt/2. Aplicando o Teorema de Pitágoras, podemos obter o valor da hipotenusa do triângulo em função da altura e da base deste. Multiplicando o valor da hipotenusa por 2, obtemos a distância diagonal 2D:

$$2D = 2\sqrt{L^2 + (v\Delta t/2)^2}$$

Combinando essa expressão com as duas equações anteriores, obtemos a relação entre os tempos nos dois referenciais.

$$\Delta t = \gamma\Delta t', \text{ sendo } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$$

O fator γ que multiplica Δt' indica o quanto o tempo se acha dilatado no referencial S. Esse número é conhecido como fator de Lorentz, em homenagem ao físico holandês Hendrik Lorentz, por suas valiosas contribuições à Teoria da Relatividade. O termo v²/c² é sempre menor do que 1 (pois v < c) e é sempre positivo, de modo que a raiz quadrada no denominador do fator de Lorentz é menor do que 1. Por isso, γ > 1. Para velocidades ordinárias, como a de carros, aviões e foguetes, o valor de v²/c² tende a zero e γ é praticamente 1. Por isso, em nosso dia a dia, não percebemos a dilatação do tempo. Foi esse um dos motivos pelo qual a relatividade do tempo demorou tanto para ser descoberta.

Quando a velocidade de um corpo é comparável à velocidade da luz, o fator γ é suficientemente maior que 1, de modo que a dilatação do tempo é perceptível. Para exemplificar esse fenômeno, considere que a nave da figura 3 se afaste da Terra com velocidade $v = 0,6c$. O astronauta comunica à estação de controle terrestre que ele vai descansar durante 1 hora. Na Terra, quanto tempo irá durar o descanso? A resposta não é 1 hora, pois o início e o fim do descanso não ocorrem na mesma posição no referencial terrestre. Portanto, o tempo terrestre é dilatado do fator de Lorentz, que vale:

$$\gamma = 1/\sqrt{1-0,6^2} = 1/0,8 = 1,25$$

Então, $\Delta t = 1,25 \cdot \Delta t' = 1,25 \cdot 1\text{ h} = 1,25\text{ h}$.

Portanto, o descanso medido na Terra é de 1,25 h.

Contração do comprimento

Um fenômeno diretamente relacionado à dilatação do tempo é a contração do comprimento. Para explicarmos esse conceito, observe a grande régua da figura 3. O comprimento da régua medido no referencial S, no qual ela se acha em repouso, é chamado de comprimento próprio L_p . Ana Lúcia pode calcular esse comprimento usando a expressão $L_p = v \cdot \Delta t$, em que v é a velocidade da nave, e Δt é o tempo que a nave leva para se deslocar de x_A até x_B (posições alinhadas com as extremidades da régua). De dentro da nave, o astronauta vê a Terra passando com uma velocidade $-v$ (o sinal negativo indica que o sentido de movimento da Terra é oposto ao da nave). De forma semelhante, o astronauta pode calcular o comprimento da régua pela expressão $L = v \Delta t'$. Para ele, as passagens das extremidades da régua pela nave ocorrem em uma mesma posição do seu referencial S'. Por isso, o tempo $\Delta t'$ medido por ele é menor que o tempo Δt medido por Ana Lúcia. Como consequência disso, o astronauta vê a barra contraída. É fácil mostrar que o fator de contração do comprimento vale $1/\gamma$. Assim, se a nave se move com uma velocidade $v = 0,6c$ (ou seja, $1/\gamma = 0,8$) e o comprimento próprio da régua for $L_p = 10\text{ m}$, o astronauta verá a régua com o comprimento $L = L_p(1/\gamma) = 10 \cdot 0,8 = 8\text{ m}$.

Agora, imagine que o astronauta veja a sua nave com um comprimento de 3 m e uma altura de 2 m. Esses são os comprimentos próprios da nave, pois ela está em repouso em relação ao astronauta. Da Terra, Ana Lúcia vê a nave contraída com um comprimento $L = 3 \cdot 0,8 = 2,4\text{ m}$. Como a nave não apresenta movimento na direção vertical (y), a altura da nave não é contraída. Portanto, Ana Lúcia vê a nave com a sua altura própria, de 2 m. Logo, podemos concluir que, assim como na dilatação do tempo, a contração do comprimento é percebida nos referenciais em movimento em relação ao objeto de medida.



Paradoxo das gêmeas



Assista ao vídeo para entender mais o fenômeno da dilatação do tempo. Nele você verá o famoso experimento mental proposto por Einstein para exemplificar a teoria da dilatação do tempo, e ainda verá como esse fenômeno afeta os satélites de GPS e a importância da correção do tempo registrado por eles. Aproveite!

Adição relativística de velocidades

Considere um trem que se afasta com velocidade de 60 km/h de uma estação. Se um passageiro caminhar com velocidade de 1 km/h em relação ao trem no sentido do seu movimento, alguém parado na estação verá o passageiro se afastando com a velocidade de 61 km/h. Para pequenas velocidades, o cálculo por meio da simples adição ou subtração das velocidades é adequado. Porém, para velocidades comparáveis à velocidade da luz, o cálculo feito dessa maneira não fornece resultados corretos. Por exemplo, considere uma nave se afastando de uma estação espacial com uma velocidade $v_1 = 0,4c$ (c é a velocidade da luz). Dentro da nave, um elétron é emitido no mesmo sentido do movimento da nave com uma velocidade $v_2 = 0,8c$ em relação à nave. Qual é a velocidade do elétron em relação à estação? A adição simples das velocidades nos conduz à seguinte resposta: $0,4c + 0,8c = 1,2c$. Porém, essa velocidade é maior que a velocidade da luz, o que é impossível de acordo com a Teoria da Relatividade. No caso de as velocidades serem comparáveis à velocidade da luz, devemos usar a seguinte equação relativística de adição de velocidades (não vamos deduzir a equação, tampouco você precisa memorizá-la):

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + (v_1 v_2 / c^2)}$$

Substituindo as velocidades do elétron e da nave nessa expressão, obtemos:

$$v = \frac{0,4c + 0,8c}{1 + (0,4c \cdot 0,8c / c^2)} = 0,91c$$

Agora, o resultado é possível. Um cientista na estação espacial detecta o elétron se afastando dele com uma velocidade muito alta, porém inferior à velocidade da luz.

Podemos usar a equação anterior para calcular a velocidade da luz no seguinte caso. Em vez do elétron, imagine que um pulso de luz seja disparado de dentro da nave com a velocidade $v_2 = c$ e no mesmo sentido da velocidade $v_1 = 0,4c$ da nave. A velocidade do pulso luminoso em relação à estação pode ser obtida substituindo-se as velocidades da nave e do pulso na equação anterior. Isso nos leva ao seguinte resultado:

$$v = \frac{0,4c + c}{1 + (0,4c \cdot c / c^2)} = \frac{1,4c}{1,4} = c$$

Assim, a velocidade do pulso de luz em relação à estação também vale c , o que é consistente com o 2º Postulado da Teoria da Relatividade.

Por último, destacamos o fato de que a equação relativística de adição de velocidades se reduz à equação clássica quando as velocidades são pequenas. Nessas situações, o produto $v_1 \cdot v_2$ é muito menor que c^2 . Por isso, o termo entre parênteses na equação relativística é praticamente zero, o denominador se iguala a 1 e a velocidade v se iguala à soma algébrica simples de v_1 e v_2 .

A energia relativística

No início do século XX, os princípios da conservação da energia e da massa eram conceitos distintos. Basicamente, o Princípio da Conservação da Energia envolvia os processos mecânicos, térmicos, químicos e eletromagnéticos. De outro lado, a Conservação da Massa se aplicava à não modificação da massa em transformações físicas (ebulição, forjamento, etc.) e químicas (oxidação, combustão, etc.).

No desenvolvimento da Teoria da Relatividade, Einstein concluiu que a matéria em si é uma forma de energia. Com essa ideia, Einstein unificou os princípios da conservação da energia e da massa em um único conceito. De acordo com a Teoria da Relatividade, um corpo de massa m possui uma energia, que se deve a essa massa, dada pela seguinte equação:

$$E = mc^2$$

Essa energia é chamada de energia de repouso. Naturalmente, se um corpo está em movimento, além da parcela mc^2 , o corpo também possuirá uma parcela de energia cinética. A energia de repouso, quando liberada, aparece na forma de energia eletromagnética. Como a velocidade da luz é muito grande e como aparece elevada ao quadrado na equação anterior, podemos verificar, por meio de cálculos simples, o gigantesco potencial energético da massa. Imagine, por exemplo, que uma massa igual a 1 kg tenha sido integralmente convertida em energia. De acordo com Einstein, essa energia possui um valor igual a $1,0(3 \cdot 10^8)^2$ joules ou $2,5 \cdot 10^{10}$ kWh. A um custo de 50 centavos o kWh, essa energia vale 12,5 bilhões de reais.

Não é simples converter grandes quantidades de massa em energia. Na natureza, parcelas ínfimas de massas atômicas são transformadas em energia. Quando a taxa de átomos mutantes é elevada, a energia gerada pode ser muito grande. É dessa forma que ocorre a produção de energia nas estrelas, nas quais núcleos leves de hidrogênio se fundem, transformando-se em núcleos de hélio (fusão nuclear). A conversão de massa em energia também explica a geração de energia nas usinas nucleares, nas quais núcleos pesados de urânio são quebrados em núcleos mais leves (fissão nuclear).

De forma inversa, a energia eletromagnética também pode ser convertida em massa. Por exemplo, a figura 4 mostra o processo de formação de pares elétron/pósitron em que dois fótons de radiação gama colidem, convertendo as suas energias nas massas das duas partículas produzidas: um elétron (e^-) e um pósitron (e^+). O pósitron (antipartícula do elétron) possui a mesma massa e carga de mesmo módulo que o elétron, tendo, contudo, carga positiva.

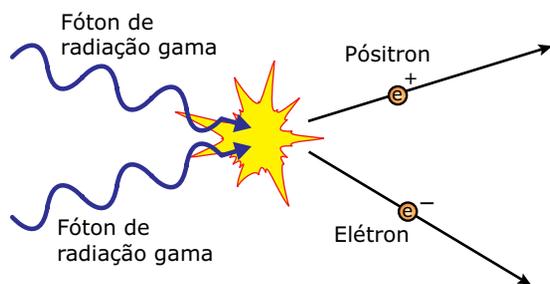


Figura 4. A produção de pares é um exemplo de conversão de energia em massa.

As massas dos fótons são nulas. As massas do elétron e do pósitron valem, cada uma, $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg. Essas massas surgem das energias dos fótons, cuja soma vale $2hf$ ($h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s é a constante de Planck, e f é a frequência de cada fóton). Igualando $2hf$ com a energia de repouso $E = 2mc^2$ das duas partículas, obtemos para a frequência dos fótons o valor $f = 1,24 \cdot 10^{20}$ Hz. Veja que esse valor de frequência está inserido na faixa da radiação gama.

Ao efetuarmos o cálculo relativo ao processo de produção do par elétron/pósitron, igualamos a energia hf de cada fóton à energia mc^2 de cada partícula e , por consequência, desprezamos a energia cinética E_c das partículas. Nas situações em que essa energia é expressiva, devemos efetuar os cálculos considerando a energia total, que é dada por:

$$E = E_c + mc^2$$

Para velocidades comparáveis à velocidade da luz, a energia cinética não pode ser calculada pela equação clássica $E_c = mv^2/2$. Considerando os efeitos relativísticos, é possível provar que a energia cinética de uma partícula é dada por:

$$E_c = (\gamma - 1)mc^2$$

Substituindo essa expressão na equação anterior, obtemos uma expressão para a energia relativística total:

$$E = (\gamma - 1)mc^2 + mc^2 = \gamma mc^2$$

Na produção do par elétron/pósitron descrito anteriormente, as velocidades das partículas são pequenas, de forma que $\gamma = 1$. Por isso, a energia total pôde ser aproximada por $E = mc^2$.

Em alguns textos sobre a Teoria da Relatividade, a quantidade de movimento de uma partícula é expressa pela equação clássica $Q = mv$, em que a massa é dada por $m = \gamma m_0$. Desse ponto de vista, a massa é relativística e aumenta com a velocidade. Para a partícula em repouso, $\gamma = 1$, e a sua massa vale m_0 (massa de repouso). Para a partícula em movimento, $\gamma > 1$, e a massa vale $m > m_0$. Atualmente, entende-se que a massa é uma propriedade física da matéria, tendo o mesmo valor em todos os referenciais. Nesse caso, a quantidade de movimento é dada por $Q = \gamma mv$. Quando a velocidade de uma partícula aumenta, a sua quantidade de movimento também aumenta, pois tanto v quanto o fator γ crescem. Contudo, a massa da partícula permanece constante. Você deve ficar atento, pois, em alguns exames, o conceito da massa relativística ainda é usado.

RADIOATIVIDADE

Descoberta e constituição da radioatividade

Em 1896, Antoine Becquerel descobriu acidentalmente a radioatividade, quando colocou sais de urânio dentro de uma caixa fechada, na qual também havia uma placa fotográfica. Apesar de o interior da caixa ser escuro, no dia seguinte, Becquerel verificou que a placa havia sido sensibilizada por algum tipo de radiação. Ele concluiu corretamente que o urânio tinha a propriedade de emitir espontaneamente essa radiação. Em seguida, diversos cientistas se dedicaram ao estudo da radiação emitida espontaneamente por corpos frios. Entre eles, destacam-se os nomes de Pierre e Marie Curie.

A radiação não é uma manifestação da energia dos elétrons de um átomo, mas sim de seu núcleo. A radiação é um fenômeno natural, ou artificial, em que os núcleos de certos elementos instáveis emitem três radiações básicas: alfa (α), beta (β) e gama (γ). Quando o elemento emite tais radiações, dizemos que ele sofreu decaimentos α , β e γ .

A radioatividade pode ser muito perigosa para os seres humanos, contudo, usada de forma controlada, ela possui várias aplicações, inclusive medicinais. Entre essas aplicações, temos a datação de fósseis e de minerais, por meio da medição de sua atividade radioativa, a geração de energia em usinas nucleares, por meio da fissão nuclear, e o bombardeamento de células cancerosas com radiação gama.

A figura 5 ilustra o poder de penetração das radiações α , β e γ sobre a matéria. A radiação α é facilmente bloqueada por folhas de papel e pelo corpo humano. A radiação β é mais penetrante, sendo bloqueada por metais leves, como o alumínio. A radiação γ é a mais penetrante, e pode atravessar muitos metais. Ela pode ser bloqueada por grossas placas de chumbo e por paredes de concreto.

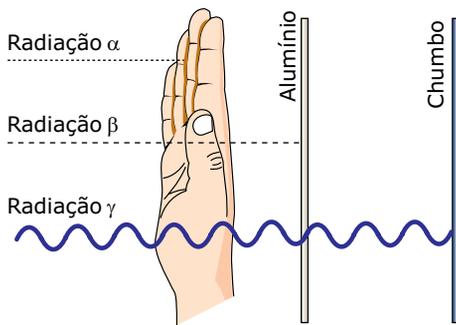


Figura 5. Poder de penetração das radiações α , β e γ na matéria.

Fazendo passar um feixe radioativo por um campo magnético, como mostrado na figura 6, os cientistas descobriram que a radiação α possui carga positiva, que a radiação β possui carga negativa e que a radiação γ é neutra. Observe que o desvio sofrido pela radiação α é menor que aquele sofrido pela radiação β . O motivo principal para a ocorrência desse fenômeno é o fato de que a massa da partícula α é muito maior que a massa da partícula β .

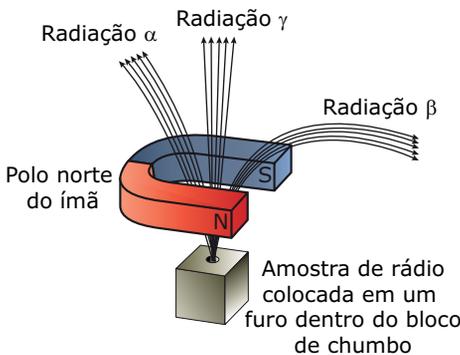


Figura 6. Experimento para determinação das cargas elétricas das radiações α , β e γ .

A partícula α é composta de dois nêutrons e de dois prótons, sendo, portanto, um núcleo do átomo de hélio. No decaimento α , um núcleo original de número atômico Z e número de massa A se transforma em um novo núcleo com número atômico $Z - 2$ e número de massa $A - 4$. A figura 7 ilustra o decaimento α do urânio 238 ($Z = 92$ prótons, $N = 146$ nêutrons e $A = Z + N = 238$). O resultado é o aparecimento do tório-234 ($Z = 90$ prótons, $N = 144$ nêutrons e $A = 234$).

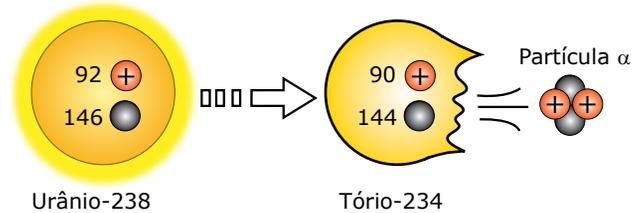


Figura 7. Decaimento alfa.

A radiação β é constituída por elétrons muito energéticos. Embora sejam provenientes do núcleo atômico, esses elétrons não se acham em seu interior antes de o decaimento ocorrer. O elétron é criado no momento da emissão, quando um nêutron se transforma em um próton e em um elétron. Nesse tipo de decaimento, o núcleo original de número atômico Z se transforma em um novo núcleo de número atômico $Z + 1$ sem que haja alteração do número de massa. A figura 8 ilustra o decaimento β do carbono-14 ($Z = 6$ prótons, $N = 8$ nêutrons e $A = 14$). O resultado são o aparecimento do nitrogênio 14 ($Z = 7$ prótons, $N = 7$ nêutrons e $A = 14$) e a emissão da partícula β .

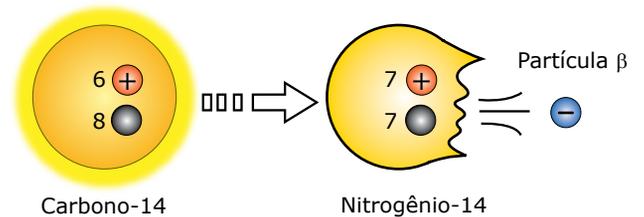


Figura 8. Decaimento beta.

O decaimento β pode ocorrer também por meio da emissão de um pósitron (que é a antipartícula do elétron). Nesse caso, um próton se transforma em um nêutron e em um pósitron. O núcleo original (Z, A) se transforma em um núcleo de número atômico $Z - 1$ e número de massa A .

A radiação γ é constituída de fótons de alta energia e de alta frequência emitidos pelo núcleo atômico. Esses fótons são emitidos em decorrência de os prótons e os nêutrons sofrerem transições entre os níveis de energia existentes no núcleo. Esses níveis são semelhantes aos níveis de energia dos elétrons. Porém, as diferenças de energia existentes entre níveis nucleares são muito maiores do que aquelas existentes entre os níveis eletrônicos. Por isso, os fótons emitidos pelo núcleo são muito mais energéticos (de frequências maiores) que os fótons provenientes de transições envolvendo elétrons.

Causa da radioatividade

No interior do núcleo, os prótons se repelem mutuamente devido às forças elétricas. Por isso, alguns núcleos não são estáveis e se desintegram em núcleos menores por meio dos decaimentos radioativos. Os núcleos estáveis não se rompem porque existe uma interação atrativa entre prótons e nêutrons capaz de superar a repulsão elétrica entre os prótons. Essa interação é uma manifestação da chamada força nuclear forte.

A interação atrativa nuclear se manifesta de forma igual entre prótons e nêutrons, não dependendo da carga elétrica. Porém, essa força é de curto alcance, manifestando-se apenas entre partículas muito próximas. Por isso, para compensar a repulsão elétrica, os núcleos mais pesados devem possuir um número de nêutrons sensivelmente maior que o número de prótons. Todavia, quando o núcleo é muito grande, a instabilidade é inevitável. Átomos com $Z \geq 83$ não são estáveis. Alguns isótopos com $Z < 82$ também podem não ser estáveis. Nesses casos, os núcleos sofrem uma sequência de decaimentos α e β (acompanhados de decaimentos γ) que os transformam em um núcleo estável. A figura 9 mostra a sequência que leva o urânio-238 ($Z = 92$ e $N = 146$) ao elemento chumbo-206 ($Z = 82$ e $N = 124$). Observe que a parte inferior da sequência pode ocorrer por meio de caminhos alternativos.

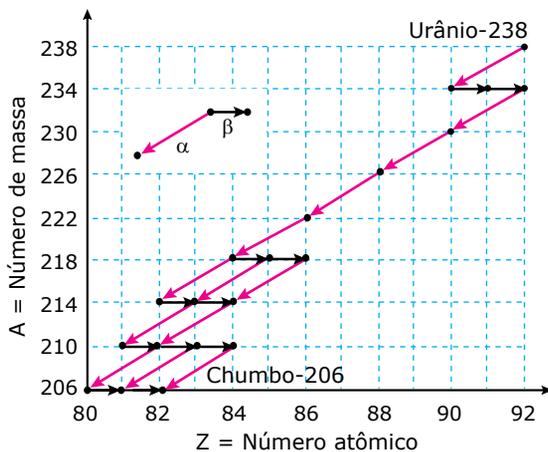


Figura 9. Transformação do U-238 em Pb-206 por meio de vários decaimentos α (diagonal) e β (horizontal).

Tempo de meia-vida

O tempo de meia-vida é o tempo necessário para que uma amostra radioativa tenha a metade dos seus isótopos transformados em outros núcleos. Como a taxa de emissão de partículas (α ou β) depende diretamente do número de núcleos radioativos, o período de meia-vida também é igual ao tempo para que a atividade radioativa da amostra seja reduzida à metade. O tempo de meia-vida é uma propriedade de cada isótopo radioativo, podendo variar de milionésimos de segundo a bilhões de anos, dependendo do elemento. Na tabela a seguir, indicamos os períodos de meia-vida de alguns elementos. Por exemplo, o rádio-226 possui tempo de meia-vida de 1 620 anos. Isso significa que uma amostra cristalina de 100 g de rádio terá a metade dessa massa transformada em outro elemento depois de 1 620 anos, restando 50 g de rádio. Transcorridos mais 1 620 anos, restarão 25 g de rádio, e assim por diante.

Tempo de meia-vida de alguns elementos

Elemento	Isótopo	Meia-vida
Polônio	214	0,001 s
	218	3 min
	210	138 dias
Potássio	42	12,4 horas
Iodo	131	8 dias
Cobalto	60	5,27 anos
Urânio	235	710 milhões de anos
	238	4,5 bilhões de anos
Carbono	14	5 730 anos
Rádio	226	1 620 anos

O gráfico apresentado na figura a seguir mostra a evolução da massa de rádio em função do tempo. Podemos usar esse gráfico para calcular a idade de um mineral. Por exemplo, se a análise química revelar que um mineral é constituído de 6,25% de rádio-226 e 93,75% de chumbo-206, significa que foram decorridos 4 períodos de meia-vida desde a formação do mineral puro. Portanto, como a meia-vida do rádio-226 é de 1 620 anos, concluímos que a idade do mineral é de 4.1 620 anos, ou seja, 6 480 anos.

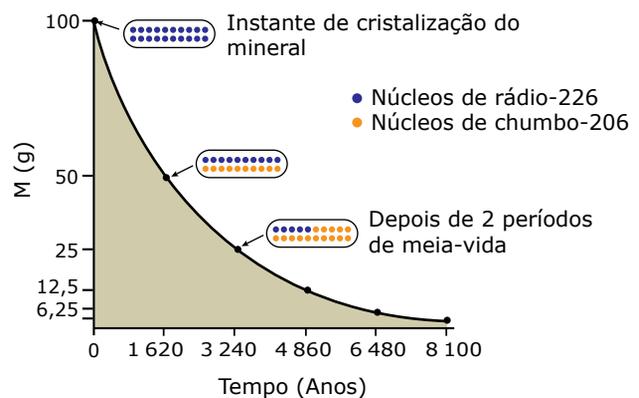


Figura 10. Evolução da massa de uma amostra de rádio-226.

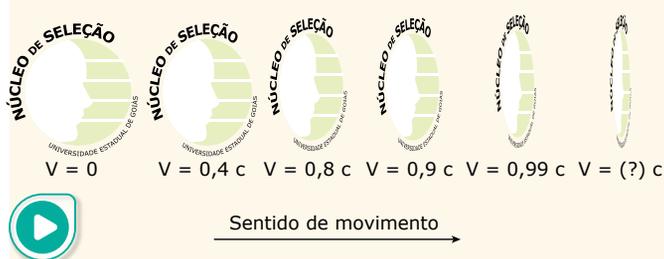


Reator Nuclear

Em uma usina nuclear, a energia elétrica é obtida a partir da fissão dos núcleos dos átomos, porém esse processo não ocorre diretamente. Nessa animação, você verá como é o funcionamento de um reator nuclear e como se dá o processo de geração de energia elétrica. Procure observar os processos de transformações da energia até se obter a energia elétrica. Boa atividade!



04. (UEG-GO) Observe a seguinte sequência de figuras:



Na sequência indicada, estão representadas várias imagens do logo do Núcleo de Seleção da Universidade Estadual de Goiás, cada uma viajando com uma fração da velocidade da luz (c). O fenômeno físico exposto nessa sequência de figuras é explicado

- A) pela ilusão de ótica com lentes.
- B) pela lei de proporções múltiplas.
- C) pelo efeito Compton da translação.
- D) pela teoria da relatividade especial.

05. (CEFET-MG) Einstein deixou um grande legado para humanidade, ao apresentar de forma brilhante a Teoria da Relatividade Restrita. Segundo essa teoria, para uma partícula que se move com velocidade próxima à da luz, grandezas físicas como tempo, espaço e massa, respectivamente,

- A) dilata, dilata, diminui.
- B) dilata, contrai, diminui.
- C) contrai, contrai, diminui.
- D) contrai, dilata, aumenta.
- E) dilata, contrai, aumenta.

06. (UEL-PR-2017) Leia o texto a seguir e responda à questão.

O tempo nada mais é que a forma da nossa intuição interna. Se a condição particular da nossa sensibilidade lhe for suprimida, desaparece também o conceito de tempo, que não adere aos próprios objetos, mas apenas ao sujeito que os intui.

KANT, I. *Crítica da razão pura*. Trad. Valério Rohden e Udo Baldur Moosburger. São Paulo: Abril Cultural, 1980. p. 47. (Coleção Os Pensadores).

A questão do tempo sempre foi abordada por filósofos, como Kant. Na física, os resultados obtidos por Einstein sobre a ideia da "dilatação do tempo" explicam situações cotidianas, como o uso de GPS.

Com base nos conhecimentos sobre a Teoria da Relatividade de Einstein, assinale a alternativa correta.

- A) O intervalo de tempo medido em um referencial em que se empregam dois cronômetros e dois observadores é menor que o intervalo de tempo próprio no referencial em que a medida é feita por um único observador com um único cronômetro.

- B) Considerando uma nave que se movimenta próxima à velocidade da luz, o tripulante verifica que, chegando ao seu destino, o seu relógio está adiantado em relação ao relógio da estação espacial da qual ele partiu.
- C) As leis da Física são diferentes para dois observadores posicionados em sistemas de referência inerciais, que se deslocam com velocidade média constante.
- D) A dilatação do tempo é uma consequência direta do princípio da constância da velocidade da luz e da cinemática elementar.
- E) A velocidade da luz no vácuo tem valores diferentes para observadores em referenciais privilegiados.

07. (UEL-PR) A irradiação para a conservação de produtos agrícolas, tais como batata, cebola e maçã, consiste em submeter esses alimentos a doses minuciosamente controladas de radiação ionizante.

Sobre a radiação ionizante, considere as afirmativas.

- I. A energia da radiação incidente sobre um alimento pode atravessá-lo, retirando elétrons do átomo e das moléculas que o constituem.
- II. As micro-ondas e os raios infravermelho e ultravioleta são exemplos de radiação ionizante.
- III. As fontes radioativas utilizadas na conservação de alimentos são de mesma natureza das utilizadas na radioterapia.
- IV. Por impregnar os alimentos, o uso de radiação ionizante causa sérios danos à saúde do consumidor.

Assinale a alternativa correta.

- A) Somente as afirmativas I e II são corretas.
- B) Somente as afirmativas I e III são corretas.
- C) Somente as afirmativas III e IV são corretas.
- D) Somente as afirmativas I, II e IV são corretas.
- E) Somente as afirmativas II, III e IV são corretas.

08. (UEL-PR) Observe a figura e leia o texto a seguir:



*O Lápis (✎), imagem celestial do ouro terreno, é produzido pela rotação dos elementos, na unificação do superior e do inferior, do fogo (Δ) e da água (∇).

Empédocles propôs “quatro raízes para todas as coisas”: a terra, a água, o ar e o fogo, formando assim os quatro elementos. Acredita-se que, na medida em que o homem manipula essas propriedades, é também possível alterar as estruturas elementares da matéria e transmutá-la. Encontrar a matéria-prima e trazê-la para a terra era a tarefa primordial do alquimista, através das repetidas transmutações dos elementos. Surgem dessa busca superior muitas tentativas analíticas de transformar outras substâncias em ouro.

ROOB, Alexander. *O museu hermético*: alquimia e misticismo. Nova Iorque: Taschen, 1997. p. 14-30 (Adaptação).

Com base no texto e nos conhecimentos sobre estrutura atômica e radioatividade, assinale a alternativa que preenche, correta e respectivamente, as lacunas do texto a seguir:

Hoje, com a construção de aceleradores de partículas, é possível produzir artificialmente o ouro por meio de processos de _____ nuclear (também chamada de transmutação artificial). Como exemplo desse processo, tem-se o _____ do núcleo de chumbo (${}_{82}\text{Pb}^{207}$) por _____ resultando em ouro _____, lítio (${}_{3}\text{Li}^7$) e liberando _____.

- A) fissão / aquecimento / partículas alfa (${}_{2}\alpha^4$) / (${}_{80}\text{Au}^{199}$) / $5({}_0n^1)$.
- B) fissão / aquecimento / pósitrons (${}_0n^1$) / (${}_{79}\text{Au}^{197}$) / $3({}_{-1}\beta^0)$.
- C) fissão / bombardeamento / nêutrons (${}_0n^1$) / (${}_{79}\text{Au}^{197}$) / $4({}_0n^1)$.
- D) fusão / bombardeamento / partículas alfa (${}_{2}\alpha^4$) / (${}_{80}\text{Au}^{203}$) / $1p^1$.
- E) fusão / bombardeamento / nêutrons (${}_0n^1$) / (${}_{79}\text{Au}^{198}$) / $3({}_0n^1)$.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS



01. (FUVEST-SP) A seguinte notícia foi veiculada por <estadao.com.br/internacional> na terça-feira, 5 de abril de 2011:

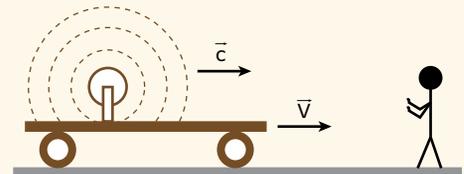
TÓQUIO – A empresa Tepco informou, nesta terça-feira, que, na água do mar, nas proximidades da usina nuclear de Fukushima, foi detectado nível de iodo radioativo cinco milhões de vezes superior ao limite legal, enquanto o céσιο-137 apresentou índice 1,1 milhão de vezes maior. Uma amostra recolhida no início de segunda-feira, em uma área marinha próxima ao reator 2 de Fukushima, revelou uma concentração de iodo-131 de 200 mil becquerels por centímetro cúbico.

Se a mesma amostra fosse analisada, novamente, no dia 6 de maio de 2011, o valor obtido para a concentração de iodo-131 seria, aproximadamente, em Bq/cm^3 ,

Note e adote: Meia-vida de um material radioativo é o intervalo de tempo em que metade dos núcleos radioativos existentes em uma amostra desse material decaem. A meia-vida do iodo-131 é de 8 dias.

- A) 100 mil.
- B) 50 mil.
- C) 25 mil.
- D) 12,5 mil.
- E) 6,2 mil.

02. (UFV-MG) A figura seguinte mostra um vagão aberto que se move com velocidade de módulo V em relação a um sistema de referência fixo no solo. Dentro do vagão existe uma lâmpada que emite luz uniformemente em todas as direções. Em relação ao vagão, o módulo da velocidade de propagação da luz é c . Para uma pessoa parada em relação ao solo, na frente do vagão, o módulo da velocidade de propagação da luz emitida pela fonte será



- A) c
- B) $c + V$
- C) $c - V$
- D) $\frac{c+V}{c-V}$

03. (Unimontes-MG) Em 1905, Albert Einstein propôs uma teoria física do espaço e do tempo denominada Teoria da Relatividade Especial (ou Restrita), que permitiu a conciliação entre a Mecânica de Newton e o Eletromagnetismo de Maxwell. A teoria de Einstein apresenta conceitos de tempo e espaço muito diferentes daqueles da Mecânica de Newton e prevê efeitos muito interessantes, como a contração do espaço e a dilatação do tempo. Quando dois eventos (acontecimentos de curta duração) possuem as mesmas coordenadas espaciais, a distância espacial entre eles é nula e, nesse caso, o intervalo de tempo entre eles é denominado intervalo de tempo próprio, representado por Δt_0 . O intervalo de tempo, Δt , em um referencial em que os eventos ocorrem em pontos distintos, é maior que o intervalo de tempo próprio. Esse efeito é denominado dilatação do tempo. Para exemplificar, vamos considerar dois observadores, um na Terra (em repouso em relação ao solo) e outro numa nave espacial que se move com velocidade de módulo u em relação à Terra, ambos observando uma lâmpada piscar. O observador na Terra mediria o intervalo de tempo próprio, Δt_0 , entre duas piscadas, e o da nave, um intervalo Δt , em princípio, diferente.

A relação entre os dois intervalos de tempo é dada pela expressão.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

em que c é o módulo da velocidade da luz ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s).

Analisando a expressão que relaciona os dois intervalos, se v aumenta, aproximando-se de c , é correto afirmar que

- A) Δt e Δt_0 se aproximam de zero.
 B) Δt se aproxima de Δt_0 .
 C) Δt fica muito pequeno em relação a Δt_0 .
 D) Δt aumenta em relação a Δt_0 .

- 04.** (PUC-Campinas-SP) Protestos de várias entidades ecológicas têm alertado sobre os danos ambientais causados pelas experiências nucleares francesas no Atol de Mururoa.

Isótopos radioativos prejudiciais aos seres vivos, como ^{90}Sr , formam o chamado lixo nuclear desses experimentos.

Quantos anos são necessários para que uma amostra de ^{90}Sr , lançada no ar, se reduza a 25% da massa inicial?

Dado: Meia-vida do $^{90}\text{Sr} = 28,5$ anos.

- A) 28,5 C) 85,5 E) 11
 B) 57,0 D) 99,7

- 05.** (UPE-2017) A sonda caçadora de exoplanetas Kepler encontrou aquele que talvez seja o corpo celeste mais parecido com a Terra. A Nasa anunciou, nesta quinta-feira (23), a descoberta de Kepler-452b, um exoplaneta encontrado dentro de uma zona habitável de seu sistema solar, ou seja, uma região onde é possível que exista água no estado líquido. A semelhança com nosso planeta é tão grande que os pesquisadores chamaram o Kepler-452b de Terra 2.0. O Kepler-452b é cerca de 60% maior que a Terra e precisa de 385 dias para completar uma órbita ao redor de sua estrela, a Kepler 452. E essa estrela hospedeira é muito parecida com nosso Sol: tem quase o mesmo tamanho, temperatura e emite apenas 20% mais luz. Localizado na constelação Cygnus, o sistema solar da Terra 2.0 está 1 400 anos-luz distante do nosso.

Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/tecnologia/noticias/terra-2-0-nasa-anuncia-descoberta-historica-de-planeta-quase-identico-ao-nosso>>. Acesso em: 14 jul. 2016.

Suponha que, a fim de investigar mais de perto o Kepler-452b, uma sonda tenha sido enviada da Terra por uma equipe da Nasa, com uma velocidade igual a $(3)^{\frac{1}{2}} c/2$. Quando o relógio instalado na sonda marcar 28 anos de viagem, quanto tempo terá se passado para a equipe na Terra?

- A) 7 anos. C) 21 anos. E) 56 anos.
 B) 14 anos. D) 42 anos.

- 06.** (Unesp) Durante sua visita ao Brasil em 1928, Marie Curie analisou e constatou o valor terapêutico das águas radioativas da cidade de Águas de Lindoia, SP. Uma amostra de água de uma das fontes apresentou concentração de urânio igual a $0,16 \mu\text{g/L}$. Supondo que o urânio dissolvido nessas águas seja encontrado na forma de seu isótopo mais abundante, ^{238}U , cuja meia-vida é aproximadamente $5 \cdot 10^9$ anos, o tempo necessário para que a concentração desse isótopo na amostra seja reduzida para $0,02 \mu\text{g/L}$ será de
- A) $5 \cdot 10^9$ anos. D) $20 \cdot 10^9$ anos.
 B) $10 \cdot 10^9$ anos. E) $25 \cdot 10^9$ anos.
 C) $15 \cdot 10^9$ anos.

- 07.** (UFRGS-RS) De acordo com a Teoria da Relatividade quando objetos se movem através do espaço-tempo com velocidades da ordem da velocidade da luz, as medidas de espaço e tempo sofrem alterações. A expressão da

contração espacial é dada por $L = L_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}}$, onde v

é a velocidade relativa entre o objeto observado e o observador, c é a velocidade de propagação da luz no vácuo, L é o comprimento medido para o objeto em movimento, e L_0 é o comprimento medido para o objeto em repouso. A distância Sol-Terra para um observador fixo na Terra é $L_0 = 1,5 \cdot 10^{11}$ m. Para um nêutron com velocidade $v = 0,6 c$, essa distância é de

- A) $1,2 \cdot 10^{10}$ m. D) $1,2 \cdot 10^{11}$ m.
 B) $7,5 \cdot 10^{10}$ m. E) $1,5 \cdot 10^{11}$ m.
 C) $1,0 \cdot 10^{11}$ m.

- 08.** (UPF-RS-2015) Analise as afirmações sobre tópicos de Física Moderna.

- I. Um dos postulados da Teoria da Relatividade Especial é o de que as leis da Física são idênticas em relação a qualquer referencial inercial.
 II. Um segundo postulado da Teoria da Relatividade Especial é o de que a velocidade da luz no vácuo é uma constante universal que não depende do movimento da fonte de luz.
 III. Denomina-se efeito fotoelétrico a emissão de fótons por um material metálico quando exposto a radiação eletromagnética.
 IV. A Física Moderna destaca que em algumas situações a luz se comporta como onda e em outras situações como partícula.

Está correto apenas o que se afirma em

- A) I e II. D) II e IV.
 B) II e III. E) I, II e IV.
 C) I, II e III.

- 09.** (UFJF-2016) Em um reator nuclear, átomos radioativos são quebrados pelo processo de fissão nuclear, liberando energia e átomos de menor massa atômica. Esta energia é convertida em energia elétrica com um aproveitamento de aproximadamente 30%. A teoria da relatividade de Einstein torna possível calcular a quantidade energia liberada no processo de fissão nuclear. Nessa teoria, a energia de uma partícula é calculada pela expressão

$$E = mc^2, \text{ onde } m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

Em uma residência comum,

consome-se, em média, 200kWatt-hora por mês. Neste caso, calcule qual deveria ser a massa, em quilogramas, necessária para se manter essa residência por um ano, considerando que a transformação de massa em energia ocorra no repouso.

Dado: $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s.

- A) $3,6 \cdot 10^{-8}$ kg. D) $9,6 \cdot 10^{-8}$ kg.
 B) $6,3 \cdot 10^{-5}$ kg. E) $5,3 \cdot 10^{-5}$ kg.
 C) $3,2 \cdot 10^{-7}$ kg.

- 10.** (UFG-GO) Em 1964, o físico britânico Peter Higgs propôs a existência de um campo, o qual, ao interagir com uma partícula, conferia a ela a sua massa. A unidade básica desse campo foi chamada de bóson de Higgs. Em julho de 2012, os cientistas do CERN (Centro Europeu de Pesquisas Nucleares) anunciaram terem identificado o bóson de Higgs, com uma massa de $125 \text{ GeV}/c^2$ (gigaelétron-volt). O valor dessa massa, em kg, é de:

Dados: $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J; $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s.

- A) $4,50 \cdot 10^{24}$ D) $6,66 \cdot 10^{-27}$
 B) $6,66 \cdot 10^{-18}$ E) $2,22 \cdot 10^{-34}$
 C) $2,22 \cdot 10^{-25}$

- 11.** (UFPB) A Relatividade Especial é uma teoria muito bem consolidada experimentalmente, inclusive tendo aplicações dela no cotidiano. Um exemplo bastante expressivo é o aparelho de navegação GPS, o qual está baseado na Relatividade Especial, e é construído com a finalidade de proporcionar orientação espacial com precisão.

Com base nos conceitos da Relatividade Especial, identifique as afirmativas corretas.

- () A velocidade da luz no vácuo é a mesma em todas as direções e em todos os referenciais inerciais e não depende do movimento da fonte ou do observador.
 () As leis da Física dependem do referencial inercial escolhido.
 () Dois observadores em movimento relativo não concordam, em geral, quanto à simultaneidade entre dois eventos.

() O tempo próprio é o intervalo de tempo entre dois eventos que ocorrem no mesmo ponto em um determinado referencial inercial, medido nesse referencial.

() O comprimento próprio de um objeto é aquele medido em um referencial no qual ele está em repouso.

- 12.** (UFSC-2016) Em 6 de novembro de 2014, estreava no Brasil o filme de ficção científica *Interestelar*, que abordou, em sua trama, aspectos de Física Moderna. Um dos fenômenos mostrados no filme foi a dilatação temporal, já prevista na Teoria da Relatividade de Albert Einstein. Além da relatividade, Einstein explicou o Efeito Fotoelétrico, que lhe rendeu o prêmio Nobel de 1921.

Sobre os fenômenos referidos anteriormente, é correto afirmar que:

01. O Efeito Fotoelétrico foi explicado atribuindo-se à luz o comportamento corpuscular.

02. A alteração da potência de uma radiação que provoca o Efeito Fotoelétrico altera a energia cinética dos elétrons arrancados e não o número de elétrons.

04. De acordo com a Teoria da Relatividade, as leis da Física são as mesmas para qualquer referencial inercial.

08. De acordo com a Teoria da Relatividade, a velocidade da luz no vácuo é uma constante universal, é a mesma em todos os sistemas inerciais de referência e não depende do movimento da fonte de luz.

Soma ()

SEÇÃO ENEM

- 01.** (Enem) A falta de conhecimento em relação ao que vem a ser um material radioativo e quais os efeitos, consequências e usos da irradiação pode gerar o medo e a tomada de decisões equivocadas, como a apresentada no exemplo a seguir:

“Uma companhia aérea negou-se a transportar material médico por este portar um certificado de esterilização por irradiação.”

FÍSICA NA ESCOLA. v. 8, n. 2, 2007 (Adaptação).

A decisão tomada pela companhia é equivocada, pois

- A) o material é incapaz de acumular radiação, não se tornando radioativo por ter sido irradiado.
 B) a utilização de uma embalagem é suficiente para bloquear a radiação emitida pelo material.
 C) a contaminação radioativa do material não se prolifera da mesma forma que as infecções por micro-organismos.
 D) o material irradiado emite radiação de intensidade abaixo daquela que ofereceria risco à saúde.
 E) o intervalo de tempo após a esterilização é suficiente para que o material não emita mais radiação.

02. (Inep) “*Quatro, três, dois, um... Vá!*” O relógio marcava 9h32min (4h32min em Brasília) na sala de comando da Organização Europeia de Pesquisa Nuclear (CERN), na fronteira da Suíça com a França, quando o narrador anunciou o surgimento de um flash branco nos dois telões. Era sinal de que o experimento científico mais caro e mais complexo da humanidade tinha dado seus primeiros passos rumo à simulação do *Big Bang*, a grande explosão que originou o universo. A plateia, formada por jornalistas e cientistas, comemorou com aplausos assim que o primeiro feixe de prótons foi injetado no interior do Grande Colisor de Hadrões (LHC – *Large Hadrons Collider*), um túnel de 27 km de circunferência construído a 100 m de profundidade. Duas horas depois, o segundo feixe foi lançado, em sentido contrário. Os feixes vão atingir velocidade próxima à da luz e, então, colidirão um com o outro. Essa colisão poderá ajudar a decifrar mistérios do universo.

CRAVEIRO, R. “Máquina do Big Bang” é ligada. *Correio Braziliense*, Brasília, p. 34, 11 set. 2008 (Adaptação).

Segundo o texto, o experimento no LHC fornecerá dados que possibilitarão decifrar os mistérios do universo. Para analisar esses dados provenientes das colisões no LHC, os pesquisadores utilizarão os princípios de transformação da energia. Sabendo desses princípios, pode-se afirmar que

- A) as colisões podem ser elásticas ou inelásticas e, em ambos os casos, a energia cinética total se dissipa na colisão.
- B) a energia dos aceleradores é proveniente da energia liberada nas reações químicas no feixe injetado no interior do Grande Colisor.
- C) o feixe de partículas adquire energia cinética proveniente das transformações de energia ocorridas na interação do feixe com os aceleradores.
- D) os aceleradores produzem campos magnéticos que não interagem com o feixe, já que a energia preponderante das partículas no feixe é a energia potencial.
- E) a velocidade das partículas do feixe é irrelevante nos processos de transferência de energia nas colisões, sendo a massa das partículas o fator preponderante.

03. (Enem) O funcionamento de uma usina nucleoeletricitária típica baseia-se na liberação de energia resultante da divisão do núcleo de urânio em núcleos de menor massa, processo conhecido como fissão nuclear. Nesse processo, utiliza-se uma mistura de diferentes átomos de urânio, de forma a proporcionar uma concentração de apenas 4% de material físsil. Em bombas atômicas, são utilizadas concentrações acima de 20% de urânio físsil, cuja obtenção é trabalhosa, pois, na natureza, predomina o urânio não físsil. Em grande parte do armamento nuclear hoje existente, utiliza-se, então, como alternativa, o plutônio, material físsil produzido por reações nucleares no interior do reator das usinas nucleoeletricitárias. Considerando-se essas informações, é correto afirmar que

- A) a disponibilidade do urânio na natureza está ameaçada devido a sua utilização em armas nucleares.
- B) a proibição de se instalarem novas usinas nucleoeletricitárias não causará impacto na oferta mundial de energia.

- C) a existência de usinas nucleoeletricitárias possibilita que um de seus subprodutos seja utilizado como material bélico.
- D) a obtenção de grandes concentrações de urânio físsil é viabilizada em usinas nucleoeletricitárias.
- E) a baixa concentração de urânio físsil em usinas nucleoeletricitárias impossibilita o desenvolvimento energético.

04. (Enem) Um problema ainda não resolvido da geração nuclear de eletricidade é a destinação dos rejeitos radiativos, o chamado “lixo atômico”. Os rejeitos mais ativos ficam por um período em piscinas de aço inoxidável nas próprias usinas antes de ser, como os demais rejeitos, acondicionados em tambores que são dispostos em áreas cercadas ou encerrados em depósitos subterrâneos secos, como antigas minas de sal. A complexidade do problema do lixo atômico, comparativamente a outros lixos com substâncias tóxicas, se deve ao fato de

- A) emitir radiações nocivas, por milhares de anos, em um processo que não tem como ser interrompido artificialmente.
- B) acumular-se em quantidades bem maiores do que o lixo industrial convencional, faltando assim locais para reunir tanto material.
- C) ser constituído de materiais orgânicos que podem contaminar muitas espécies vivas, incluindo os próprios seres humanos.
- D) exalar continuamente gases venenosos, que tornariam o ar irrespirável por milhares de anos.
- E) emitir radiações e gases que podem destruir a camada de ozônio e agravar o efeito estufa.

GABARITO

Meu aproveitamento

Aprendizagem

Acertei _____ Errei _____

- 01. B
- 03. D
- 05. E
- 07. B
- 02. A
- 04. D
- 06. D
- 08. C

Propostos

Acertei _____ Errei _____

- 01. D
- 02. A
- 03. D
- 04. B
- 05. E
- 06. C
- 07. D
- 08. E
- 09. C
- 10. C
- 11. V F V V V
- 12. Soma = 13

Seção Enem

Acertei _____ Errei _____

- 01. A
- 02. C
- 03. C
- 04. A



Total dos meus acertos: _____ de _____ . _____ %