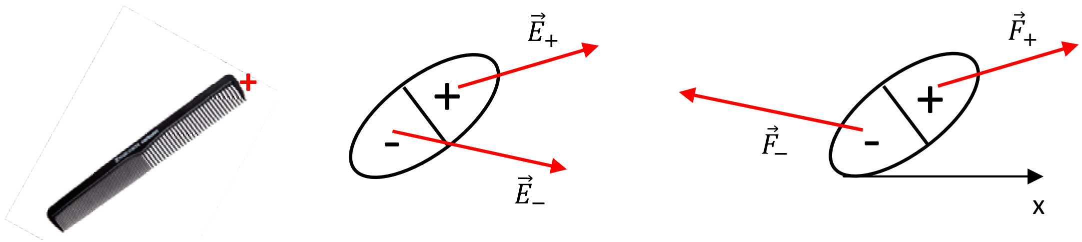
Q21.3: A força elétrica entre partículas carregadas eletricamente decai com o quadrado da distância entre elas (lei de Coulomb). A polarização de um material isolante (um pedacinho de papel, por exemplo) na presença de um campo elétrico externo (gerado por um pente eletricamente carregado, por exemplo) se dá porque os átomos/moléculas desse material (o papel) se deformam na presença desse campo de força, eles se polarizam. A nuvem eletrônica (negativa) é puxada para um lado e o núcleo (positivo) é empurrado para o lado oposto. Dessa forma, o átomo/molécula fica esticado, com uma ponta de carga elétrica positiva e uma ponta de carga elétrica negativa. Essa polarização ocorreria mesmo que o campo elétrico externo fosse independente da distância (uniforme), pois é um efeito apenas da atração e repulsão. Mas, se o campo externo fosse uniforme (independente da distância), o material isolante (o papel) não seria atraído por ele (o pente), porque a força na ponta positiva do átomo/molécula seria igual em módulo, mas de sentido oposto, à força na ponta negativa do átomo/molécula. A Figura abaixo ilustra essa ideia (moléculas do pedacinho de papel):



$\vec{E}_+$ é o valor do campo elétrico (gerado pelo pente carregado) na porção positiva do átomo/molécula (do papel). $\vec{E}_-$ é o valor do campo elétrico gerado pelo pente na porção negativa do átomo/molécula (estamos supondo um pente carregado positivamente). $\vec{F}_+$ é a força elétrica na porção positiva do átomo/molécula. $\vec{F}_-$ é a força elétrica na porção negativa do átomo/molécula (estamos supondo que essas porções carregadas sejam suficientemente pequenas para serem tratadas como partículas). Então, a força resultante na molécula (do papel) é (q é a carga elétrica na ponta positiva do átomo/molécula e –q a carga na ponta negativa):

$$\vec{F} \quad = \vec{F}_+ + \vec{F}_- = q\,\vec{E}_+ + (-q)\vec{E}_- = q\,(\vec{E}_+ - \vec{E}_-)$$

Portanto, se $\vec{E}_+ = \vec{E}_- \Rightarrow \vec{F} \quad = \vec{0}$. Note que essas forças provocam também um torque e giram a molécula, de tal forma que, no equilíbrio, as forças $\vec{F}_+$ e $\vec{F}_-$ se tornam anticolineares e a figura acima se torna mais simples:

$$\vec{F} \quad = q\,\left(\vec{E}_+ - \vec{E}_-\right) = q\,(E_+ - E_-)\,\hat{x}$$

Na prática esperamos que valha $E_+ \neq E_-$ pois a ponta do átomo/molécula que é atraída (a negativa, nesse caso em que o pente é carregado positivamente) estará mais próxima do pente que a ponta que é repelida (a positiva). Como há um decaimento do campo elétrico do pente com a distância até ele, haverá um campo elétrico mais intenso na ponta do átomo/molécula mais próxima do pente. Esse átomo/molécula (e o pedacinho de papel enfim) será sempre atraído pelo pente. Basicamente, tendo em vista a lei de Coulomb: $E_+ \sim 1/r_+^2$ e $E_- \sim 1/r_-^2$, sendo r_+ (r_-) a distância da ponta do átomo/molécula + (-) até o pente. Para um pente carregado positivamente, vale $r_+ > r_-$ e $E_+ < E_-$. Logo, a força resultante $\vec{F}_+ + \vec{F}_-$ aponta na direção do pente ($-\hat{x}$), ou seja, o pedacinho de papel é finalmente atraído pelo pente. Isso ocorreria mesmo que o pente fosse carregado negativamente. Bastaria inverter os sentidos das setas de $\vec{E}_+$ e $\vec{E}_-$ e girar a molécula de tal forma que a ponta positiva ficasse mais próxima do pente, posto que ela estaria sendo atraída por ele.

Concluindo: um campo elétrico uniforme polariza um isolante, mas não exerce força resultante sobre ele (não atrai e nem repele). Lembramos que: um campo uniforme é aquele que assume o mesmo valor (módulo, direção e sentido) em todos os pontos do espaço. Ele é, portanto, independente da distância ou de qualquer coordenada espacial.

Q21.5: Um bastão de vidro carregado positivamente interage com uma esfera metálica pendurada no teto. Inicialmente a esfera metálica está eletricamente neutra (descarregada), mas o campo elétrico do bastão carregado positivamente polariza a esfera, atraindo cargas negativas ($-q1$) para a face da esfera mais próxima do bastão (são atraídos os elétrons livres que existem dentro do metal e que podem fluir dentro dele) e deixando um saldo de cargas positivas ($+q1$) na face da esfera mais afastada (ficam nessa região os íons de carga positiva, cujos elétrons foram atraídos para o outro lado da esfera), de tal forma que a neutralidade elétrica da esfera não se altera: $q1 + (-q1) = 0$. Isso ocorre até que o campo elétrico (resultante: do bastão carregado e das cargas $q1$ e $-q1$) se anule dentro do metal. Quando esse campo elétrico resultante se anula dentro do metal o fluxo de elétrons nessa região cessa e o equilíbrio eletrostático se estabelece. Daí a esfera é atraída porque o campo elétrico do bastão é mais fraco na face mais distante positiva (que é repelida) do que na face mais próxima negativa (que é atraída). Essa é a ideia discutida na questão anterior (Q21.3). A esfera é mais atraída que repelida e o resultado final é uma atração. Supondo que essas regiões carregadas sejam pequenas, podemos escrever para a força elétrica $\vec{F}$ na esfera:

$$\vec{F} = \vec{F}_+ + \vec{F}_- = q1\,\vec{E}_+ + (-q1)\vec{E}_- = q1(\vec{E}_+ - \vec{E}_-)$$

$\vec{E}_+$ é o valor do campo elétrico (gerado pelo bastão) na região positiva da esfera metálica e $\vec{E}_-$ é o valor do campo elétrico na região negativa. Como $|\vec{E}_-| > |\vec{E}_+|$, porque o campo elétrico do bastão decai com a distância até ele, e os campos são mais ou menos colineares apontando para fora do bastão, porque ele tem carga positiva (digamos, ao longo de z, ver a Figura abaixo), obtemos:

$$\vec{F} \quad = \vec{F}_+ + \vec{F}_- = q1(\vec{E}_+ - \vec{E}_-) \cong q1(|\vec{E}_+|\hat{z} - |\vec{E}_-|\hat{z}) = q1(|\vec{E}_+| - |\vec{E}_-|)\,\hat{z}$$

Vemos que a força estará ao longo de –z, pois $|\vec{E}_+| - |\vec{E}_-| < 0$, ou seja, a esfera será atraída.

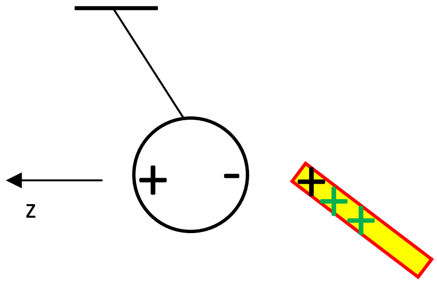
Se a esfera neutra toca o bastão de vidro ela adquire um pouco de carga elétrica positiva (digamos Q) do bastão (elétrons livres da esfera metálica são atraídos e migram para o bastão positivo, que continua positivo, mas com um pouco menos de carga) e a esfera passa então a ter a carga total positiva Q. Agora a esfera metálica possui um excesso de carga positiva Q e a força na esfera passa a ser uma simples repulsão:

$$\vec{F} \quad = \vec{F}_Q = Q\,\vec{E}(0)$$

sendo $\vec{E}(0)$ o campo elétrico criado pelo bastão no centro da esfera metálica (teorema das cascas: uma casca esférica com carga elétrica uniforme sofre força como se fosse uma carga pontual no centro da casca).

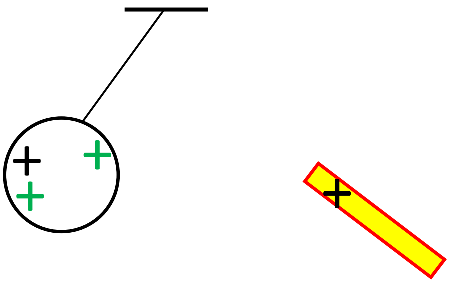
Percebemos aqui que se não houvesse troca de carga entre a esfera e o bastão ($Q = 0$) não haveria essa mudança repentina de atração para repulsão, que é comentada no enunciado da questão. Esse carregamento da esfera, pela troca de carga no contato momentâneo com o bastão, produz a repentina repulsão da esfera metálica.

A Figura abaixo ilustra essas ideias:



antes do bastão tocar a esfera

(esfera neutra, mas polarizada, e atraída pelo bastão).

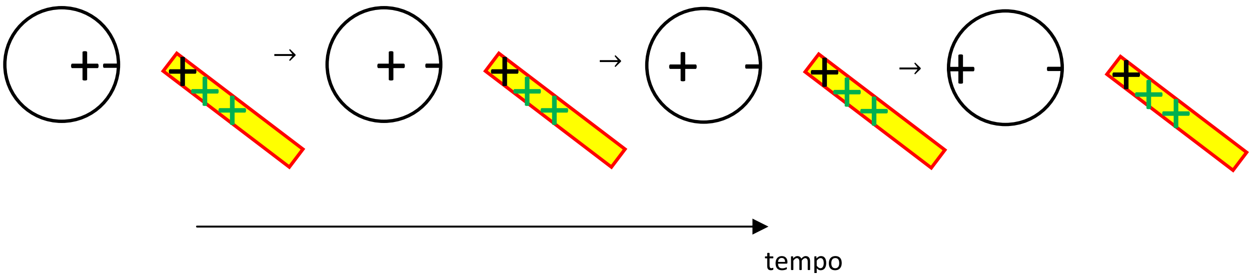


depois do bastão tocar a esfera

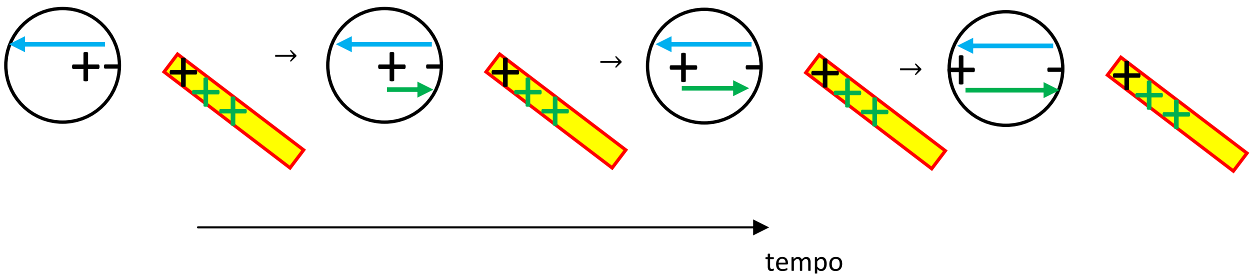
(esfera com excesso de carga de mesmo sinal do bastão e repelida pelo bastão).

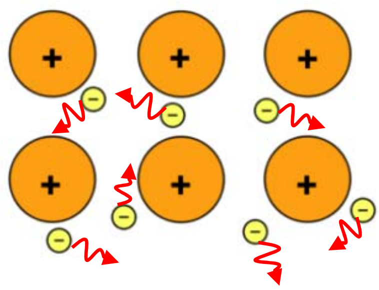
O vidro é um isolante elétrico e esperamos que todas as cargas elétricas transferidas para o bastão de vidro fiquem depositadas, estáticas, na sua superfície. O bastão carregado positivamente tinha um déficit de elétrons em sua superfície. Ao tocar a esfera metálica, elétrons da esfera são atraídos e se transferem para a superfície do bastão de vidro, tornando-o mais próximo da neutralidade elétrica. Com essa perda de elétrons, a esfera se torna positivamente carregada.

É interessante notar que esses processos de polarização de um objeto metálico se dão através de um transiente muito rápido, em que cargas elétricas (elétrons) se deslocam no volume do metal, até que os excessos finalmente se localizem e se estabilizem na superfície do metal. Na Figura abaixo tentamos dar uma idéia de um transiente desses. Em um primeiro instante, elétrons da esfera próximos do bastão são atraídos pelas cargas positivas no bastão e deixam uma região positiva próxima (isso ocorre simultaneamente em todo o volume do metal, mas de forma menos intensa nas regiões mais distantes do bastão). Essa região positiva atrai elétrons próximos e se neutraliza, deixando uma região um pouco mais distante carregada positivamente. Esse processo de transferência de elétrons (uma corrente elétrica) continua até que o déficit de elétrons se encontre na superfície do metal oposta ao bastão, que é quando o transiente termina e o metal se encontra finalmente polarizado com cargas elétricas apenas na sua superfície. Para o cobre, que é um ótimo condutor de eletricidade, esse transiente pode durar apenas 10^{-19} s, ou seja, é quase instantâneo.



Na Figura abaixo ilustramos a ideia de que a movimentação de cargas elétricas no interior do metal é produzida pelo campo elétrico que o bastão carregado gera nessa região (seta azul). À medida que mais e mais cargas vão fluindo para a superfície da esfera, o campo elétrico produzido por essas cargas (seta verde) na região interior da esfera vai aumentando. Com isso o campo elétrico resultante na região condutora vai diminuindo, assim como a corrente elétrica que flui nessa região. O equilíbrio eletrostático se dará quando esses dois campos se anularem na região interior da esfera. Isso sempre vai ocorrer, caso contrário, a eletrostática seria impossível na presença de materiais condutores.





Q21.7: Por que os elétrons livres que existem dentro de um metal não escapam dele? A Figura ao lado ilustra o interior de um metal composto de uma estrutura (razoavelmente) rígida de íons positivos envolvida por uma nuvem de elétrons (oriundos das camadas mais externas dos átomos, que se tornaram íons) que fluem livremente dentro dessa estrutura. Essa combinação "rede de íons + nuvem eletrônica" caracteriza a ligação metálica. Enquanto um elétron (de condução) está viajando no volume do metal ele se sente livre, pois quando ele olha em volta, ele vê basicamente um volume eletricamente neutro (uma mistura de prótons e elétrons). Ele não é atraído e nem repelido para lugar nenhum, pois é atraído e repelido para todos os lados (simetria). Ao chegar na superfície do metal essa simetria deixa de existir. Um elétron na superfície deixa para trás um volume positivamente carregado, pois o metal (contando com esse elétron) é eletricamente neutro. Daí o elétron é puxado para dentro do volume e não escapa da superfície. Mas, é verdade que esse processo possui um limite. Se o elétron se aproximar da superfície com velocidade suficiente, ele consegue saltar e escapar da superfície do metal. Isso acontece, por exemplo, no efeito termiônico e no efeito fotoelétrico. No primeiro caso (termiônico) o metal é aquecido até atingir a incandescência e passa a emitir elétrons, como acontece em filamentos de lâmpadas incandescentes e de válvulas eletrônicas. No segundo caso (fotoelétrico) a luz incide na superfície de um metal e arranca elétrons dessa superfície, como nas células fotoelétricas que podem ser usadas para acionar um circuito na presença de luz. Esperamos que esses efeitos não aconteçam (de forma importante) na temperatura ambiente e na presença da luz (visível) ambiente. O efeito fotoelétrico na maioria dos metais, por exemplo, se torna importante quando a luz incidente está na região do ultravioleta. A menor energia que um elétron em um metal (ou material qualquer) deve ter para escapar da atração do metal é chamada de "função trabalho" (W). Para o cobre, por exemplo, vale $W \cong 4{,}7$ eV. Isso significa que se um elétron saltar da superfície com energia cinética $K \geq W$, ele vai conseguir escapar do metal. Podemos calcular/estimar a velocidade V mínima necessária para esse salto fazendo:

$$K = m\frac{V^2}{2} = W \Rightarrow V = \sqrt{2\frac{W}{m}}$$

Primeiro convertemos W para joules: $W \cong 4{,}7\ \times 1{,}6\ \times 10^{-19}$ J. A massa do elétron é $m \cong 9{,}1\ \times 10^{-31}$ kg. Portanto:

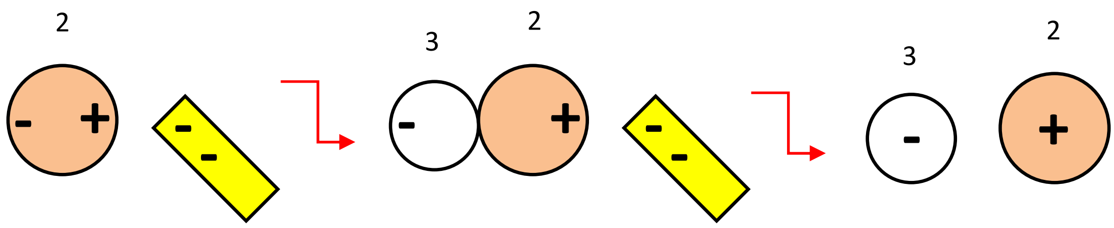
$$V = \sqrt{2\frac{W}{m}} \cong \sqrt{2\ \frac{4{,}7\ \times 1{,}6\ \times 10^{-19}}{9{,}1\ \times 10^{-31}}} \cong 1.3\ \times 10^{6}\ \text{ m/s}$$

Se a temperatura (agitação térmica), ou a absorção de luz levar os elétrons livres no cobre a velocidades dessa ordem de grandeza, haverá emissão de elétrons por efeito termiônico ou fotoelétrico. Note que, infelizmente, a velocidade fornecida no enunciado dessa questão (10^6 m/s) está bem próxima do valor aproximado calculado aqui. Se nos basearmos na nossa estimativa anterior para V, poderíamos dizer que um elétron livre no cobre com velocidade da ordem de 10^6 m/s está no limiar de poder saltar e sair do condutor.

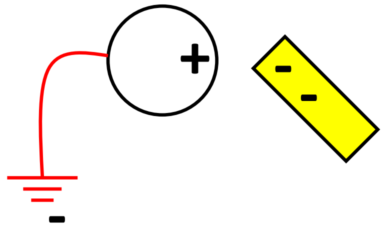
Na prática, essa estimativa que trata os elétrons dentro de um metal como um gás clássico de partículas tem suas limitações e não devemos levar seu resultado ao pé da letra. Os fenômenos que acontecem no nível microscópico dentro de um metal são abordados de forma correta somente através dos conceitos da mecânica quântica. Mas enfim, a idéia básica é a que discutimos aqui: um elétron de condução é livre dentro de um metal, mas ele está eletricamente ligado à estrutura desse metal (ligação metálica) e só poderá escapar se tiver energia suficiente para fazê-lo. Quanto ao cálculo dessa energia, que depende especificamente de cada metal, somente a mecânica quântica é capaz de fornecer um resultado quantitativo fiel à realidade, ou seja, comparável ao observado experimentalmente. Grosso modo, se $V \cong 10^6$ m/s, já existe uma chance de se observar a emissão de elétrons por um metal. Eles simplesmente saltam.

Note que essas idéias são similares às do escape gravitacional, que estudamos na mecânica.

Q21.13: O enunciado dessa questão se refere a uma "esfera metálica isolante" mas, obviamente, isso não existe, trata-se de um erro de tradução/edição. Considere que é um "esfera metálica isolada". Se eu tenho um objeto 1 com excesso de carga elétrica negativa, e este objeto é metálico, basta tocar em um outro objeto 2 também metálico para transferir uma parte dessa carga elétrica negativa (elétrons) para o metal. Isso porque dois objetos metálicos que se tocam funcionam como se fossem um objeto metálico apenas e as cargas elétricas em excesso (que estão se repelindo mutuamente) se depositam/espalham em toda a superfície desse metal (basicamente porque elas se repelem mutuamente). Por outro lado, se o objeto 1 com carga negativa for isolante, ele não poderá transferir seu excesso de elétrons para a esfera metálica (porque esses elétrons não possuem mobilidade em um isolante). Nesse caso, se apenas aproximarmos o objeto 1 (isolante e com excesso de carga negativa) do objeto 2 (metálico), vai ocorrer uma polarização do metal e a face do metal mais distante do objeto 1 vai adquirir uma carga elétrica negativa (repelida), enquanto que a face mais próxima vai ficar carregada positivamente (carga atraída). Se essa face negativa do metal 2 for encostada em um outro objeto 3, também metálico, a carga negativa vai ser transferida para ele. Separando os objetos 2 e 3 e retirando o objeto 1, restam o objeto 2 com carga líquida positiva e o objeto 3 com carga líquida negativa. A Figura abaixo ilustra esse processo em que a haste isolante negativa (objeto 1) cria (através de eletrização por indução) duas esferas metálicas (objetos 2 e 3) de cargas positiva e negativa:



Note que são os elétrons que se movem no metal. Inicialmente alguns elétrons na esfera 2 são repelidos pela carga negativa da haste e vão para a face da esfera mais afastada da haste. A face mais próxima fica com déficit de elétrons, fica positiva. Ao tocar a esfera 3 na esfera 2 os elétrons que estão sendo repelidos pelas cargas na haste continuam se afastando, até parar na face mais distante da esfera 3. De fato, as duas esferas juntas funcionam como se fossem um condutor apenas e a polarização que ocorria somente na esfera 2, ocorre agora no corpo metálico formado pela união das esferas 2 e 3. Ao final, a esfera 2 fica com déficit de elétrons, fica positiva, e a esfera 3 fica com excesso de elétrons, fica negativa. O mesmo efeito sobre a esfera 2 ocorreria se a esfera 3 fosse substituída por um simples aterramento da esfera 2. Nesse caso os elétrons repelidos na esfera 2 fluiriam para a Terra (que é uma esfera condutora gigante). Aterrar significa conectar eletricamente à Terra. Isso é feito geralmente através da conexão elétrica do corpo a ser aterrado, através de fios condutores, a hastes de cobre enterradas no solo. Dessa forma, o corpo aterrado pode trocar cargas elétricas (elétrons) com a Terra, como acontece nesse exemplo com as esferas metálicas 2 e 3 que se tocam. A Figura ao lado ilustra a situação em que a esfera 3 foi substituída por um aterramento (em vermelho). Os tracinhos horizontais compõem o símbolo padrão para o aterramento. Os elétrons que se depositariam na face mais afastada da esfera são redistribuídos para a Terra e a esfera se torna positivamente carregada. Se cortarmos o aterramento e afastarmos a haste, obtemos finalmente uma esfera isolada positivamente carregada.



Q21.15: Duas partículas carregadas se repelem. As duas partículas possuem as propriedades: 1: carga elétrica Q e massa m; 2: carga elétrica $2Q$ e massa m. Estando separadas por uma distância r, elas se repelem mutuamente com forças de magnitude (lei de Coulomb):

$$F_{1/2} = F_{2/1} = k\,\frac{Q\,(2Q)}{r^2} = k\,\frac{2\,Q^2}{r^2}$$

Note que se trata de um par de forças ação e reação (3ª lei de Newton). Portanto, a aceleração da partícula 1 será, de acordo com a 2ª lei de Newton:

$$a_1 = \frac{F_{2/1}}{m} = \frac{k}{m}\frac{2\,Q^2}{r^2}$$

Para a partícula 2 vale:

$$a_2 = \frac{F_{1/2}}{m} = \frac{k}{m}\frac{2\,Q^2}{r^2}$$

Vemos então que $a_1 = a_2$. As partículas possuem a mesma aceleração (em módulo) porque estão submetidas à mesma força (em módulo) e possuem a mesma massa. Apenas os sentidos dos vetores força (e aceleração) nas duas partículas serão opostos, porque elas se repelem e se afastam mutuamente.

Q21.16: Um próton e um elétron submetidos à influência de um mesmo campo elétrico. Digamos que o campo elétrico nesse ponto valha $\vec{E}$. O elétron possui massa m e carga $-q$ e o próton possui massa M e carga $q > 0$. Note que as cargas elétricas possuem o mesmo módulo, mas as massas das duas partículas são bem diferentes, algo como $M \cong 2.000\,m$.

Estando submetido ao campo $\vec{E}$, o elétron vai sofrer a força:

$$\vec{F}_E = -q\,\vec{E}$$

Já o próton vai sofrer a força:

$$\vec{F}_P = q\,\vec{E}$$

Portanto, eles não sofrem a mesma força, elas são opostas (mas possuem a mesma direção, a de $\vec{E}$, e a mesma magnitude/módulo, $q\,E$). O elétron sofre uma força oposta/anticolinear ao campo $\vec{E}$ enquanto que o próton sofre uma força paralela/colinear a $\vec{E}$. Forças são vetores e dois vetores opostos não são iguais.

As acelerações são:

$$\vec{a}_E = \frac{\vec{F}_E}{m} = \frac{-q}{m}\vec{E} \qquad \text{e} \qquad \vec{a}_P = \frac{\vec{F}_P}{M} = \frac{q}{M}\vec{E}$$

As acelerações são opostas e a aceleração do elétron é cerca de 2.000 vezes mais intensa que a do próton. A inércia do elétron é muito menor que a do próton e ele sofre uma aceleração muito mais intensa.

Enfim, o próton e o elétron se movem na mesma direção (a direção do vetor $\vec{E}$), mas em sentidos opostos. O elétron ganha velocidade bem mais rapidamente que o próton, pois sua inércia (massa) é menor.

Q21.19: O campo elétrico de uma carga pontual q possui magnitude no ponto P dada por (lei de Coulomb):

$$E(r) = k\,\frac{q}{r^2}$$

sendo r a distância (radial) de P até a carga pontual. Se a uma distância R vale:

$$E(R) = E_0 = k\,\frac{q}{R^2}$$

então, a distância r em que vai valer:

$$E(r) = \frac{E_0}{3}$$

será dada por:

$$k\,\frac{q}{r^2} = \frac{E_0}{3} = \frac{1}{3}\,k\,\frac{q}{R^2}$$

Portanto:

$$\frac{1}{r^2} = \frac{1}{3}\,\frac{1}{R^2} \Rightarrow r = \sqrt{3}\,R \cong 1{,}73\,R$$

Concluindo: se a uma distância R de uma carga pontual o campo elétrico que ela gera vale E_0, então, a uma distância $\sqrt{3}\,R$ o campo elétrico valerá $E_0/3$. Isso é consequência da lei de Coulomb (decaimento com o quadrado da distância).

Q21.20: Como explicar a estabilidade de um núcleo atômico minúsculo contendo vários prótons se repelindo mutuamente? O núcleo de um átomo com número atômico Z é basicamente uma bolinha de raio 10^{-15} m onde estão confinados cerca de Z prótons e Z nêutrons (o número de nêutrons pode variar um pouco, dando origem aos isótopos desse elemento químico). Portanto, dois prótons dentro desse núcleo estão se repelindo com uma força da ordem de:

$$F_{P/P} = k\ \frac{q^2}{(10^{-15})^2}$$

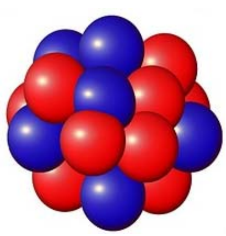
Sendo $q \cong 1{,}6 \times 10^{-19}$ C e $k \cong 9 \times 10^{9}$ N m^2/C^2 obtemos:

$$F_{P/P} \cong 231\ \ \text{N}$$

Para você ter uma ideia dessa força, pense que é basicamente o peso de um objeto de 23 kg (≅ meio saco de cimento). Trata-se de uma força gigantesca para uma partícula de massa 10^{-27} kg. Os nêutrons não sofrem e nem fazem nenhuma força elétrica, porque são eletricamente neutros. O que eles estão fazendo dentro do núcleo?

Alguma outra força, atrativa, tem que compensar essa repulsão entre os prótons. A gravidade é atrativa, mas é desprezível entre partículas elementares, pois suas massas são muito pequenas e a constante de gravitação universal (o análogo de $k \cong 10^{10}$ N m^2/C^2 na lei de Coulomb) é $G \cong 10^{-10}$ N m^2/kg^2.

Investigando a estabilidade dos núcleos, descobrimos então que existe outra força, chamada simplesmente de “força forte”, ou força nuclear, que faz com que dois prótons se atraiam e que também um próton e um nêutron se atraiam e que dois nêutrons se atraiam também. Descobrimos enfim a função dos nêutrons no núcleo: eles servem para dar a “cola” que vai ajudar nesse equilíbrio entre a repulsão entre os prótons e a atração entre prótons, entre prótons e nêutrons e entre nêutrons. Os nêutrons adicionam atração via força forte, sem contribuir para a repulsão elétrica, pois são eletricamente neutros. A quantidade de “cola” necessária para tornar um núcleo estável é basicamente aquela fornecida por um número de nêutrons igual ao número de prótons (Z). Mas, a natureza aceita um pouco de variação nessa quantidade de “cola” e daí entendemos porque existem os diferentes isótopos dos elementos químicos. O excesso de “cola” (um número de nêutrons muito acima de Z) também não é favorável porque requer muito mais energia (massa) para a formação do núcleo.



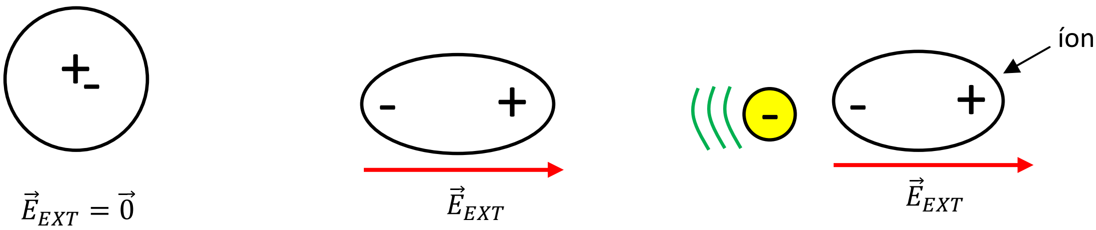
A Figura ao lado ilustra um núcleo como um aglomerado de prótons e nêutrons. Os prótons se repelem e se atraem ao mesmo tempo, pela ação das duas forças: elétrica e forte. Mas, isso não basta para dar estabilidade ao núcleo. Os nêutrons adicionam estabilidade ao atraírem os prótons e se atraírem mutuamente, pela ação da força forte. Essas partículas não estão estáticas dentro do núcleo, elas possuem energia cinética e de alguma forma se movem dentro dele. Prótons e nêutrons também giram em torno de si mesmos, ou seja, possuem spin. O interior de um núcleo está longe de ser estático.

Com base nessas idéias podemos entender por que existem materiais radioativos na natureza: esse equilíbrio entre atração e repulsão dentro do núcleo pode ser crítico para alguns isótopos específicos de alguns elementos químicos e esse núcleo pode ser instável e se quebrar (fissão), emitindo fragmentos que chamamos de radiação nuclear. O carbono (C, Z=6), por exemplo, apresenta 3 isótopos na natureza: o C^{12}

(com 6 nêutrons), o C^{13} (com 7 nêutrons) e o C^{14} (com 8 nêutrons), sendo esse último instável (o C^{14} se transforma em nitrogênio N^{14} (Z=7) através da transformação de um nêutron em um próton e concomitante emissão de um elétron de dentro do núcleo: radiação beta) .

Em uma bomba nuclear essa quebra (fissão) é estimulada e uma imensa quantidade de energia de repulsão é liberada, na forma de energia cinética dos fragmentos dos átomos (que se repelem fortemente). Essa chuva de fragmentos é mortal. Esse mesmo estímulo à fragmentação (fissão) dos núcleos é produzido em um reator de uma usina elétrica nuclear. O calor (energia cinética) gerado na fissão é usado para aquecer e produzir vapor de água, movimentando uma turbina que gira o rotor de um gerador de energia elétrica.

Q21.21: Os átomos não são rígidos (muito menos indivisíveis). Quando um átomo está submetido a um campo elétrico externo $\vec{E}_{EXT}$ ele se deforma. A nuvem eletrônica (negativa) é puxada para um lado e o núcleo (positivo) é empurrado para o outro: o átomo se estica. Se o campo externo esticar demais o átomo ele se quebra: elétrons são arrancados, ou seja, o átomo é ionizado. A figura abaixo ilustra essa ideia:



Se pensarmos no elétron mais externo do átomo (o mais fácil de arrancar), a força atrativa que ele está sofrendo do restante do átomo (núcleo com Z prótons e $Z-1$ elétrons na nuvem eletrônica) é aproximadamente (lei de Coulomb):

$$F \cong k\,\frac{-q\,(Zq)}{a^2} + k\,\frac{-q\,((Z-1)(-q))}{a^2} = -k\,\frac{q^2}{a^2}$$

sendo $-q$ a carga de um elétron e a o raio do átomo (essa é basicamente a atração que um único próton a uma distância a produz no elétron mais externo). O sinal – na força indica apenas que ela é atrativa. Para que o campo externo seja capaz de vencer essa força atrativa e ionizar o átomo deve valer:

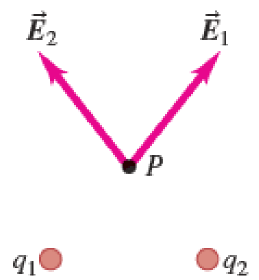
$$q\,E_{EXT} > k\,\frac{q^2}{a^2} \Rightarrow E_{EXT} > k\,\frac{q}{a^2}$$

Usando os valores numéricos: $q \cong 1{,}6 \times 10^{-19}$ C , $k \cong 9 \times 10^9$ N m^2/C^2 e $a \cong 10^{-10}$ m (1 Angstrom) obtemos:

$$E_{EXT} > 9 \times 10^9\,\frac{1{,}6 \times 10^{-19}}{(10^{-10})^2} \cong 1{,}4\ \times 10^{11}\ \ \mathrm{N/C}$$

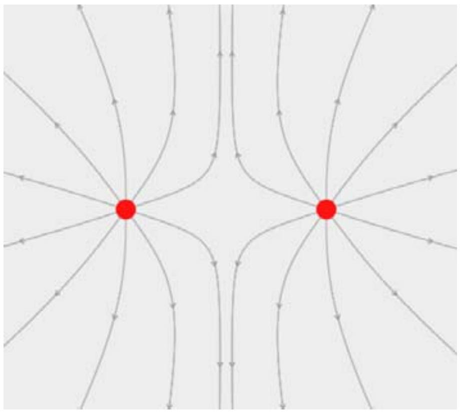
Trata-se de um valor bem elevado para um campo elétrico, o que está de acordo com a estabilidade dos átomos que observamos no dia-a-dia. Ionizações de átomos não acontecem facilmente. Mesmo um forno de microondas, que submete os alimentos dentro dele a um campo elétrico, e que, por isso, é às vezes motivo de suspeita, não consegue ionizar os átomos que compõem esses alimentos.

Esse processo de ionização de átomos por um campo elétrico externo ocorre dentro de uma lâmpada fluorescente e na atmosfera, quando um raio atravessa o ar. No primeiro caso um campo elétrico intenso criado por um "reator" ioniza o gás dentro da lâmpada, que deixa então de ser um isolante e passa a ser um condutor de eletricidade. O fluxo de íons e de elétrons dentro da lâmpada e as colisões entre essas partículas são responsáveis pela emissão de luz da lâmpada. No caso de um raio ocorre algo parecido, mas o campo elétrico externo que ioniza a atmosfera é produzido pelos excessos de cargas elétricas depositadas nas nuvens, e no terreno logo abaixo delas. Esses excessos de cargas elétricas nas nuvens são produzidos pela movimentação de partículas dentro da própria nuvem (gotículas de água e cristais de gelo), que sobem e descem devido ao movimento de ar quente dentro da nuvem, produzindo ao final uma distribuição de cargas elétricas dentro da nuvem que pode ser bem complicada. Apenas como exemplo simples podemos imaginar uma face (a de cima) da nuvem positiva e outra face (a de baixo) negativa. Com isso podem se formar raios (descargas) dentro da própria nuvem (os mais comuns) e da nuvem para o solo. O raio é um fluxo, um jato, de cargas elétricas no ar ionizado, um fluxo de elétrons e de íons. Os átomos excitados pelas colisões e as capturas de elétrons por íons resultam na emissão de luz, o relâmpago. Além disso, esse jato repentino de partículas agita/aquece o ar e produz uma onda sonora, o trovão. Um pára-raios é basicamente um condutor aterrado (ou seja, ligado eletricamente a uma haste metálica enfiada na terra) que se projeta no espaço tentando atrair raios que porventura caiam nas proximidades. Um pára-raios não induz a produção de raios em uma região, ele apenas "captura" os raios que, mesmo se ele não existisse, atingiriam essa região ao acaso. Nesse sentido, o pára-raios protege uma estrutura (um prédio, por exemplo), direcionando os raios (os jatos de cargas elétricas oriundos das nuvens) que caem nela diretamente para o solo.

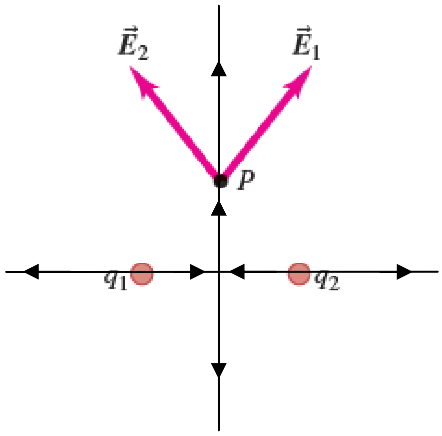


Q21.22: No livro texto encontramos a afirmação: as linhas de campo elétrico não podem se cruzar. Mais especificamente, ao representamos o campo elétrico no espaço através de linhas de força, não pode haver em nenhum ponto do espaço o cruzamento de duas (ou mais) linhas de força. Essa questão aborda então a Figura ao lado, onde são representadas as setas dos campos elétricos $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ produzidos no ponto P pelas cargas pontuais q_1 e q_2 (podemos ver que $q_1 = q_2 > 0$, mas isso não é importante). Esses campos se cruzam em P. Há alguma contradição? Não, porque quando nos referimos ao campo elétrico no espaço, estamos nos referindo ao campo elétrico resultante, ou seja, o campo elétrico que é a soma vetorial de todos os campos elétricos produzidos pelos objetos eletrizados que existam nessa região.

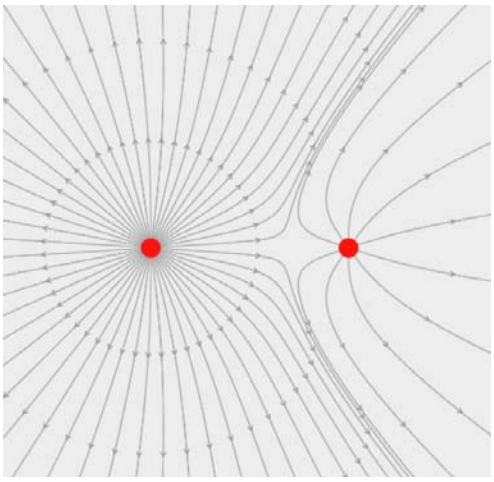
Nesse caso, estaríamos nos referindo ao campo $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. Portanto: ao representamos o campo elétrico $\vec{E}$ no espaço através de linhas de força, não pode haver em nenhum ponto do espaço o cruzamento de duas (ou mais) linhas de força. Isso deve ser assim porque a seta de $\vec{E}$ em P é tangente à (única) linha de força que passa por P. Se houvesse duas linhas de força passando por P (e se cruzando aí), então haveria uma ambigüidade na direção e no próprio valor de $\vec{E}$ em P.



Na Figura ao lado mostramos a configuração de linhas de força para o campo $\vec{E}$ (resultante) na vizinhança de duas cargas pontuais positivas iguais $q_1 = q_2 = q > 0$. Essa configuração de linhas de força foi obtida através de um simulador no site https://academo.org/demos/electric-field-line-simulator/. Note que as linhas nunca se cruzam e parecem se repelir mutuamente na região entre as cargas. No centro da Figura percebemos um vazio de linhas de força. Para entender esse vazio, podemos olhar a Figura que segue onde mostramos algumas linhas de força que não são mostradas na Figura anterior, em particular a linha de força de $\vec{E}$ que passa por P (esqueça $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ e pense que essas linhas são tangentes a $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$). Note que no centro da Figura há um ponto "O" onde linhas de força efetivamente se cruzam (talvez por isso essas linhas sejam raramente mostradas nos diagramas de linhas de força que encontramos por aí), mas que corresponde de fato a um ponto onde $\vec{E} = \vec{0}$ (por simetria). Portanto, não há ambigüidade para a direção de $\vec{E}$ nesse ponto, posto que ele é nulo em O. Nesse sentido, seria mais preciso afirmar que duas linhas de força nunca se cruzam, em pontos onde $\vec{E} \neq \vec{0}$. Agora entendemos que, estando a magnitude do campo elétrico associado à densidade de linhas de força no espaço, o vazio de linhas de força na região central da primeira Figura está refletindo a existência desse ponto central onde vale $\vec{E}(O) = \vec{0}$ e sua vizinhança imediata onde $\vec{E}(\cong O) \cong \vec{0}$.



É sempre bom enfatizar que linhas de força não são objetos reais, que se repelem, se atraem, se concentram aqui e se rarefazem ali e que vão para lá ou para cá. O que existe é o campo elétrico $\vec{E}$, posto que ele se manifesta através de uma força. As linhas de força são apenas uma representação pictórica desse campo, assim como as setas que representam os vetores $\vec{E}$ em cada ponto do espaço. Cada representação possui suas vantagens e desvantagens e, por isso, é sempre bom conhecermos as duas e entender que uma pode ser obtida da outra. Por último, enfatizamos que quando nos referimos ao "campo elétrico no espaço", estamos nos referindo ao campo elétrico "total" ou resultante. Quando nos referimos ao "campo elétrico no espaço criado pelo objeto A", estamos nos referindo ao campo elétrico específico criado apenas pelo objeto A. Nessa questão: $\vec{E}_1$ é criado pela carga q_1, enquanto que $\vec{E}_2$ é criado por q_2. O campo elétrico no espaço é $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.

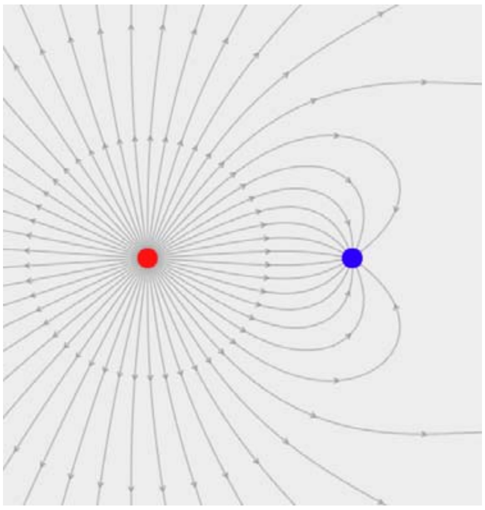


Podemos experimentar um pouco mais com o simulador modificando os valores de q_1 e q_2. A Figura ao lado mostra o caso $q_1 = 5\,q_2 > 0$. Note que o ponto O se deslocou para a direita, para próximo de q_2. Esse simulador nunca representa as linhas de força que se cruzam onde $\vec{E} = \vec{0}$. Cabe a nós desconfiarmos de que se há um "buraco" na distribuição de linhas de força, deve haver aí um ponto especial onde $\vec{E} = \vec{0}$. Note que se emanam 10 linhas de força de q_2 (número arbitrário), então devem emanar 50 linhas de força de q_1. Somente com essa estratégia conseguimos associar corretamente a densidade de linhas no espaço ao módulo de $\vec{E}$.

Chamando de x o eixo que passa por q_1 e q_2, com origem $x = 0$ em q_1 e apontando para a direita, a coordenada x do ponto O é definida por (L é a distância entre as cargas):

$$\vec{E}(O) = \vec{0} \Rightarrow k\left(\frac{q_1}{x^2} - \frac{q_2}{(L-x)^2}\right) = 0 \Rightarrow x = \frac{L}{1 + \sqrt{q_2/q_1}}$$

Para o caso $q_1 = q_2$ vale $x = L/2$ e no caso $q_1 = 5\,q_2$ vale $x = L/(1 + \sqrt{1/5}\,) \cong 0{,}69\,L$.



A Figura ao lado mostra um caso em que q_1 e q_2 têm sinais opostos. Escolhemos q_2 negativo (em azul), e $q_1 = -5\,q_2 > 0$. Note que o ponto O se deslocou para a direita de q_2. No mesmo referencial já definido, a coordenada x do ponto O é definida por (lembre se que vale $q_2 < 0$):

$$\vec{E}(O) = \vec{0} \Rightarrow k\left(\frac{q_1}{x^2} + \frac{q_2}{(x-L)^2}\right) = 0 \Rightarrow x = \frac{L}{1 - \sqrt{-q_2/q_1}}$$

Para o caso $q_1 = -5\,q_2$ vale $x = L/(1 - \sqrt{1/5}\,) \cong 1{,}81\,L$.

Há um vazio de linhas de força nessa distância x à direita de q_1, refletindo o fato de que aí existe esse ponto especial onde vale $\vec{E}(O) = \vec{0}$ e sua vizinhança imediata onde $\vec{E}(\cong O) \cong \vec{0}$.