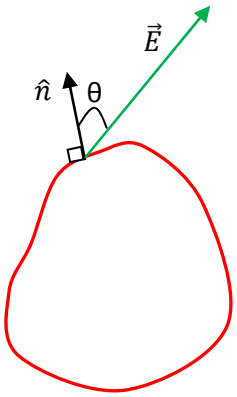
Q22.4: Uma superfície fechada S não contém nenhuma carga elétrica em seu interior: $q_{INT} = 0$.



Na Figura ao lado a superfície S é representada pela curva vermelha (mas, note, trata-se de uma superfície fechada no espaço tridimensional, como um balão de gás flutuando no espaço, mas S é apenas uma superfície imaginária, um objeto matemático).

Portanto, sabemos da lei de Gauss que para essa superfície S (fosse ela a superfície de um balão de gás ou uma superfície imaginária) vale:

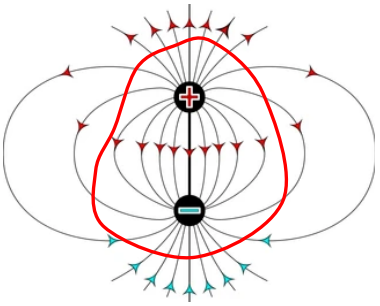
$$\phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot \hat{n}\, dA = \oint_S E\cos(\theta)\ dA = \frac{q_{INT}}{\varepsilon_0} = 0$$

Obviamente, o fato dessa integral, o fluxo ϕ_E do campo elétrico em S, ser nula, não implica que o integrando é nulo, ou seja, que o campo $\vec{E}$ é nulo em todos os pontos de S. O que deve estar acontecendo é que (sendo $E = |\vec{E}| > 0$) a função $\cos(\theta)$ deve estar assumindo valores positivos e negativos sobre a superfície S, levando finalmente a uma soma nula, ou seja, a um fluxo nulo de $\vec{E}$ em S.

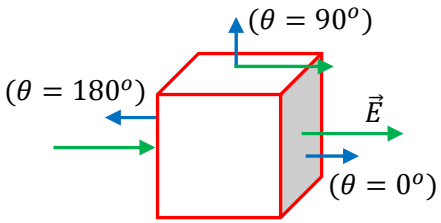
É a mesma idéia de uma equação do tipo (lembre-se que a integral é uma soma):

$$x + y = 0$$

que não prova que $x = y = 0$, mas apenas que $x = -y$, ou seja, que os dois termos dessa equação tem que ter sinais opostos.



A Figura ao lado mostra um exemplo em que S abraça um objeto dipolar (pense em S como um balão) que, como já sabemos, é um objeto eletricamente neutro: $q + (-q) = 0$. Portanto, $q_{INT} = 0$ e $\phi_E = 0$ em S. Mas, podemos ver que as linhas de força do campo $\vec{E}$ existem e estão bem definidas inclusive sobre a superfície S, ou seja, $\vec{E}$ não é nulo em S. Podemos ver que em algumas regiões de S as linhas de força atravessam S para fora ($\cos(\theta) > 0$) e em outras regiões as linhas de força atravessam S para dentro ($\cos(\theta) < 0$). AO final, se realizarmos a integral de $E\cos(\theta)\ dA$ em S vamos obter uma soma de termos positivos e negativos cujo saldo é zero. Enfatizando: $\phi_E = 0$ em S não implica que $\vec{E} = \vec{0}$ em todos os pontos de S, mas implica sim, de acordo com a lei de Gauss, que $q_{INT} = 0$ em S. Pode haver vários objetos carregados dentro de S, mas a carga total interna é nula.



Apenas para ilustrar de uma forma mais quantitativa, podemos ver claramente isso acontecendo se considerarmos o caso particular em que $\vec{E}$ é uniforme no espaço (setas verdes na Figura ao lado) e

Direitos reservados ao autor: José Arnaldo Redinz / Universidade Federal de Viçosa – MG (Nov./2022) Ver. 1.6

escolhermos S como sendo uma superfície de forma cúbica (de lado L) com duas faces ortogonais a $\vec{E}$. Um campo uniforme é um campo que assume o mesmo valor em todos os pontos do espaço. Considerando um campo de vetores $\hat{n}$ normal e apontando para fora em cada face desse cubo (setas azuis), você pode ver claramente que $\theta = 180^o$ na face frontal, $\theta = 0^o$ na face oposta e $\theta = 90^o$ ($\cos(90^o) = 0$) nas outras 4 faces. Portanto, sendo a integral em S a soma das integrais nas 6 faces da superfície cúbica, obtemos:

$$\phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot \hat{n}\, dA = \oint_S E\cos(\theta)\ dA = E[\cos(180^o)\, L^2 + \cos(0^o)\, L^2] = E\,[-L^2 + L^2] = 0$$

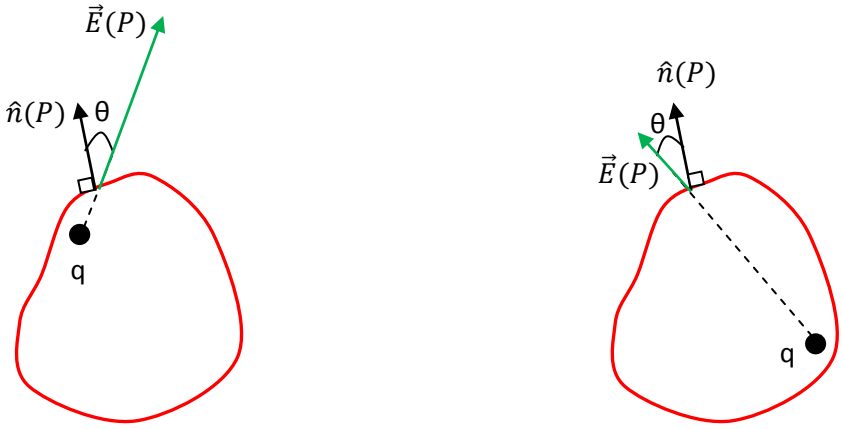
mesmo com $E \neq 0$ em algumas faces de S. Note então que não há cargas elétricas nessa região do espaço, não há cargas elétricas dentro da superfície cúbica, mas há campo elétrico no espaço (geradas por cargas elétricas que estão em algum outro lugar do espaço, que pode ser bem distante). O campo elétrico sobre a superfície cúbica não é nulo, mas o fluxo ϕ_E desse campo é. Esse resultado seria verdadeiro para qualquer superfície S fechada e qualquer campo elétrico $\vec{E}$ no espaço, uniforme ou não, desde que a carga interna total em S fosse nula. É o que afirma a lei de Gauss. Não devemos duvidar disso. É uma lei da natureza.

O campo elétrico será nulo em todos os pontos de uma superfície fechada S somente se essa superfície estiver contida em uma região do espaço em que não há campo elétrico. Por exemplo, se S estiver contida dentro do volume de um condutor em equilíbrio eletrostático, onde vale $\vec{E} = \vec{0}$.

Se S está em uma região onde não existe carga elétrica, mas existe campo elétrico $\vec{E}$, este certamente não será nulo sobre todos os pontos de S (arbitrária). Mesmo assim, de acordo com a lei de Gauss, o fluxo de $\vec{E}$ em S será nulo. De fato, nesse caso, da lei de Gauss: $\phi_E = q_{INT}/\varepsilon_0 = 0$: $q_{INT} = 0 \Rightarrow \phi_E = 0$.

Q22.5: Uma carga elétrica pontual q (apenas) está dentro de uma superfície gaussiana esférica S.

Se movermos a carga q de uma posição A para uma posição B dentro de S, com certeza o campo elétrico em um ponto P particular de S vai mudar de valor. No entanto, o fluxo de $\vec{E}$ não sofre nenhuma alteração, pois ele só depende da carga elétrica total dentro de S e não de onde especificamente ela está dentro de S. Esse raciocínio se aplica para uma superfície gaussiana de forma arbitrária, não necessariamente esférica. A Figura ao lado ilustra essa idéia:



Direitos reservados ao autor: José Arnaldo Redinz / Universidade Federal de Viçosa – MG (Nov./2022) Ver. 1.6

A superfície é representada pela curva vermelha (mas note, trata-se de uma superfície fechada no espaço tridimensional, algo como um balão de gás, mas uma superfície imaginária). Da lei de Coulomb, sabemos que a carga $q > 0$ gera um campo radial, que decai com o quadrado da distância (raio) e que, portanto, é grande no ponto P (um ponto qualquer da superfície) quando a carga q está próxima desse ponto (figura da esquerda) e fica mais fraco quando afastamos q de P (figura da direita). A direção de $\vec{E}(P)$ (sempre radial tomando q como centro) também muda, conforme movemos q dentro de S. Mover q daqui para lá e de lá para cá dentro de S não muda o fato de que $\phi_E = q_{INT}/\varepsilon_0 = q/\varepsilon_0$. Só não podemos extrair q de dentro de S. Se fizermos isso, então o fluxo muda: $\phi_E = q_{INT}/\varepsilon_0 = 0/\varepsilon_0 = 0$.

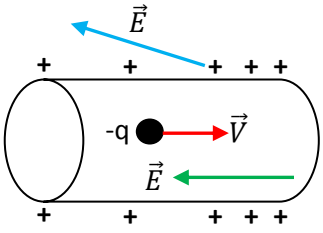
Nas duas situações mostradas na Figura acima vale:

$$\oint_S \vec{E} \cdot \hat{n}\, dA = \oint_S E\cos(\theta)\ dA = \frac{q_{INT}}{\varepsilon_0} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

Fato é que ao movermos a carga q dentro de S o campo elétrico aumenta em alguns pontos de S (que ficam mais próximos de q) e diminui em outros pontos de S (que ficam mais afastados de q). Analogamente, o ângulo θ entre $\vec{E}$ e $\hat{n}$ muda em cada ponto. Mas, o fluxo do campo elétrico em S não está nem aí para isso, ele não muda. O fluxo do campo elétrico em uma superfície fechada S só muda se mudar a carga interna total q_{INT} contida dentro dessa superfície S. É o que afirma a lei de Gauss e não devemos duvidar disso.

Q22.7: Talvez a pergunta mais útil aqui fosse: na região fora de um fio que transporta uma corrente elétrica (onde existe ar, por exemplo) há campo elétrico (que diferença faz o que esperamos ou não)? Essa pergunta me parece um tanto precoce, não há uma discussão no livro texto sobre esse tema específico, que, aliás, é ignorado pela grande maioria dos livros texto de eletromagnetismo, apesar de ser crucial para a compreensão de circuitos elétricos.

Em um fio que transporta uma corrente elétrica há um fluxo de portadores de carga, que se movem dentro do fio como um fluido. Nos metais esses portadores de carga são os elétrons das camadas mais externas dos átomos que compõem esses metais. Esses elétrons se comportam basicamente como um gás (como um gás dentro de um cano) que pode se mover sob ação de um campo de força, um campo elétrico (ou um campo magnético, conforme veremos). Ao se moverem, os portadores de carga sofrem uma força de arraste, que dificulta seu movimento, e dissipa energia (o fio esquenta). Portanto, para haver uma corrente em um fio metálico deve existir dentro desse fio um campo de força, que empurra os portadores de carga para frente, vencendo o arraste. Esse campo de força, um campo elétrico, por exemplo, é produzido por uma densidade de cargas elétricas distribuídas na superfície do fio. Como o arraste é geralmente pequeno, posto que os metais são ótimos condutores de



Direitos reservados ao autor: José Arnaldo Redinz / Universidade Federal de Viçosa – MG (Nov./2022) Ver. 1.6

eletricidade, o campo elétrico necessário para estabelecer uma corrente em um fio é bem pequeno. Portanto, a densidade de carga elétrica superficial necessária para produzir esse campo elétrico no interior do fio é também bem pequena. Mas, é um fato que ela existe. A mesma distribuição de carga elétrica superficial que produz um campo elétrico dentro do fio (seta verde) produz também um campo elétrico fora do fio (seta azul) (por que haveria de ser diferente). Na prática esse campo elétrico é bem fraco, mas ele está lá, na vizinhança externa do fio. A Figura acima ilustra essa idéia, para um fio cilíndrico. Note que o campo externo ao fio está em uma região do espaço ocupada por um isolante elétrico (ar e/ou plásticos isolantes) e não tem, portanto, nenhum efeito prático importante.

A seta verde representa o campo elétrico $\vec{E}$ no interior do fio, ele é (tem que ser) paralelo ao fio e é gerado pelas cargas depositadas na superfície do fio. A seta vermelha representa a velocidade $\vec{V}$ de um portador. Lembre-se que a carga elétrica -q é negativa para um elétron e ele acelera no sentido oposto ao campo $\vec{E}$. A seta azul representa o campo elétrico fora do fio. Estamos admitindo uma densidade de carga elétrica (não uniforme) positiva na superfície do fio. Esse campo externo não tem nenhum efeito importante, posto que ele é pequeno e o material que circunda o fio (o ar, por exemplo) é isolante. Por isso muitas vezes ignoramos a existência desse campo externo a um fio condutor.

Em geral é muito difícil detectar essa densidade de carga superficial nos fios e o campo elétrico externo que ela gera, porque ambos são bem fracos. Eles também são muitas vezes ignorados pelos livros texto. Mas, em um experimento com altas tensões/voltagens, podemos visualizar esse campo. A Figura abaixo mostra o efeito desse campo elétrico externo produzido por um pedaço curvo de fio de cobre conectado a uma fonte de 6 quilovolts (6 kV). O fio está mergulhado em uma solução que permite a visualização do que seriam as linhas de força (simplesmente linhas paralelas ao campo) do campo elétrico externo ao fio (Ref. *New experimental method of visualizing the electric field due to surface charges on circuit element*s, R. Jacobs et al., *American Journal of Physics* 78, 2010). Esse não é um experimento muito fácil de se fazer. 6 kV podem matar.

Q22.10: A existência de correntes elétricas dentro dos fios contradiz a ideia de que nos metais em equilíbrio eletrostático os excessos de carga devem residir nas superfícies desses condutores? Não, por duas razões.

i) Porque esses elétrons liberados pelos átomos do metal não são de fato um excesso de cargas elétricas no metal, eles são cargas do próprio metal, que mantém sua neutralidade elétrica.

Direitos reservados ao autor: José Arnaldo Redinz / Universidade Federal de Viçosa – MG (Nov./2022) Ver. 1.6

Em um metal eletricamente neutro há a mesma quantidade de carga elétrica positiva e negativa. A carga elétrica positiva está nos prótons que estão nos núcleos dos átomos que compõem o metal. A carga elétrica negativa está nos elétrons que circulam em torno desses núcleos. A carga total é zero. O fato de alguns desses elétrons das camadas mais externas se sentirem livres para perambular por todo o volume do metal não altera a neutralidade elétrica do metal. Esses elétrons livres não são um excesso de cargas no metal. Portanto, eles não tem que se localizar na superfície do metal.

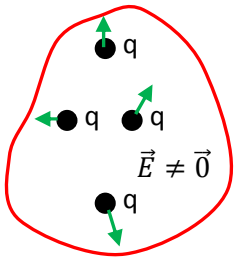
Excessos de carga são quebras nessa neutralidade elétrica. Por exemplo, se eu arranco alguns desses elétrons livres do metal ou se eu acrescento ao metal mais alguns elétrons livres que eu trouxe de outro lugar. Daí o metal estará eletricamente carregado, positivamente ou negativamente, e esse excesso de carga estará localizado na superfície do metal em equilíbrio eletrostático.

Se eu arranco elétrons livres do metal, ficam sobrando prótons no volume do metal, ele fica carregado positivamente. Essa carga positiva em excesso, que está fixa no espaço, dentro do metal, vai atraindo elétrons e sendo neutralizada, até que, após um rápido transiente, o excesso positivo de cargas (o déficit de elétrons) fica localizado na superfície do metal. Mas, note que não houve movimento de prótons, ou íons, para a superfície do metal. Apenas alguns (muitos) elétrons podem se mover livremente no metal. Mas enfim, tudo funciona como se as cargas positivas dentro do metal estivessem se repelido mutuamente e indo parar na superfície do metal. Mas, o que de fato ocorreu é que elétrons fluíram dentro do metal e “taparam” os “buracos” de cargas positivas (eles foram atraídos). Essa movimentação cessa quando todos os “buracos” se localizam na superfície do metal, no equilíbrio eletrostático. Daí $\vec{E} = \vec{0}$ dentro do metal e não há mais movimentação de cargas (elétrons livres) em seu interior.

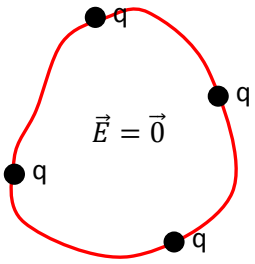
Se eu deposito mais elétrons livres no metal, ficam sobrando elétrons no volume do metal, ele fica carregado negativamente. Essas cargas negativas que coloquei dentro do metal se repelem mutuamente e se afastam umas das outras, até que o excesso de carga negativa fique finalmente localizado na superfície do metal. Daí $\vec{E} = \vec{0}$ dentro do metal e não há mais movimentação de cargas em seu interior.

Esses processos (transientes) em que os excessos de carga se concentram finalmente na superfície do metal levam à condição $\vec{E} = \vec{0}$ dentro do metal, que é a condição de equilíbrio eletrostático dentro de um material condutor. Enquanto não valer a condição $\vec{E} = \vec{0}$ dentro do metal, os excessos de carga continuam sofrendo força e sendo drenados por esse campo $\vec{E}$ para a superfície do metal. A Figura abaixo ilustra essa ideias (tente pensar em uma figura tridimensional). A linha vermelha representa a superfície de um bloco metálico que possui inicialmente um excesso de cargas distribuído em seu volume. Imagine que esse excesso de cargas foi injetado lá dentro, por um processo qualquer. Após um rápido transiente, que é estimulado pelo campo elétrico dentro do metal, tudo volta ao normal (estático), os excessos de carga se repelem e vão para posições fixas na superfície do metal e o campo elétrico dentro dele se anula.

Direitos reservados ao autor: José Arnaldo Redinz / Universidade Federal de Viçosa – MG (Nov./2022) Ver. 1.6



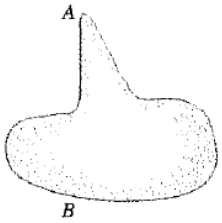
Situação transiente, de não equilíbrio: excessos de cargas se repelindo mutuamente e fluindo para a superfície do condutor. Campo elétrico interno $\vec{E} \neq \vec{0}$.



Situação estacionária, de equilíbrio: excessos de cargas estáticas na superfície do condutor. Campo elétrico interno $\vec{E} = \vec{0}$.

ii) Essa primeira explicação acima já seria suficiente para justificar a resposta "não" à pergunta colocada nessa questão: elétrons de condução não constituem excessos de carga nos fios condutores. Os fios condutores são eletricamente neutros, estejam transportando corrente elétrica ou não. Mas, podemos ir um pouco além e mencionar o fato de que a situação de correntes elétricas fluindo em fios condutores não constitui, e isso é quase que evidente, uma situação eletrostática. A eletrostática trata da situação mais simples em que todas as cargas elétricas estão paradas em suas posições, por hipótese. Uma corrente elétrica consiste em uma movimentação de partículas carregadas, portanto, está fora do domínio da eletrostática. Concluindo, não devemos esperar que uma conclusão que tiramos a partir da hipótese de equilíbrio eletrostático, como a que diz que os excessos de carga em condutores devem permanecer em suas superfícies, valha para a situação de correntes elétricas fluindo em fios condutores.

Q22.12:

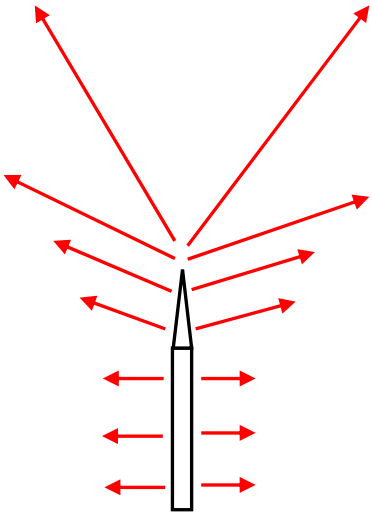


Essa questão faz alusão ao chamado "poder das pontas", que não é simples de ser demonstrado. Por isso, vamos tentar aqui dar uma ideia qualitativa desse fenômeno. No equilíbrio eletrostático os excessos de carga elétrica depositados em um condutor se concentram na superfície desse condutor, com uma densidade de carga elétrica superficial σ (C/m^2). A densidade σ não deve ser e não é necessariamente uniforme. Pelo contrário, excetuando casos particulares simples, σ é, em geral, não uniforme sobre a superfície: maior aqui, menor ali, etc. Nos lugares mais pontudos/cortantes σ é maior. Nos lugares mais arredondados, mais planos, σ é menor. Esse é o chamado "poder das pontas", que explica porque os pára-raios são feitos geralmente de hastes metálicas agudas (lanças). Com a lei de Gauss podemos mostrar que o campo elétrico na vizinhança exterior da superfície do metal é dado por:

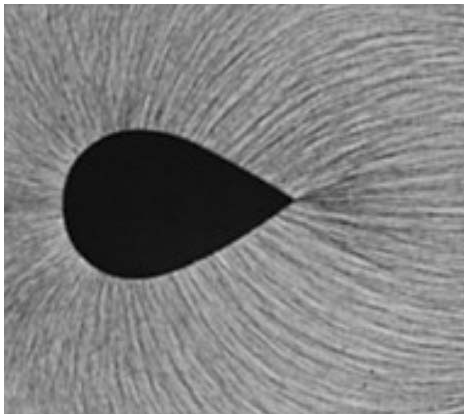
$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\,\hat{n}$$

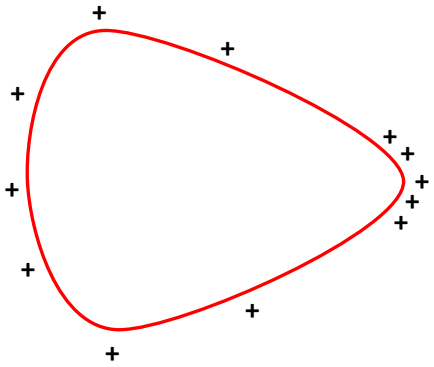
Direitos reservados ao autor: José Arnaldo Redinz / Universidade Federal de Viçosa – MG (Nov./2022) Ver. 1.6

sendo $\hat{n}$ um vetor unitário ortogonal à superfície do metal, apontando para fora. Observamos que nas regiões pontudas σ é maior e, consequentemente, o campo elétrico externo na vizinhança dessas regiões é maior. Na atmosfera na vizinhança da ponta de um pára-raios o campo elétrico externo é gigante, capaz de direcionar um raio próximo para essa ponta, através da ionização do ar circundante. A Figura ao lado ilustra (apenas em duas dimensões) essa ideia (as setas vermelhas representam o campo elétrico na vizinhança externa da haste aguda):



A Figura abaixo ilustra as linhas de força do campo elétrico na vizinhança de um objeto metálico pontudo (resultado experimental, referência não encontrada). Note que as linhas de força são ortogonais à superfície do condutor (direção de $\hat{n}$) e que há uma grande concentração de linhas de força na vizinhança da região aguda. A Figura da direita ilustra como seria a distribuição de carga σ na superfície desse objeto metálico.

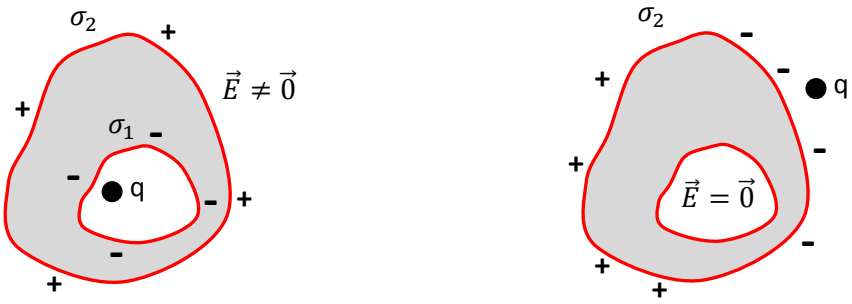




Esse fato (o poder das pontas) pode ser provado calculando-se o campo elétrico na vizinhança externa de um objeto como esse mostrado acima, mas essa não é uma tarefa fácil. Uma idéia qualitativa pode ser dada pela Figura que segue. Imagine uma superfície plana de um metal que possui um excesso de cargas positivas. Uma carga perdida no meio dessa superfície (destacada em vermelho) é repelida igualmente para todos os lados e fica em equilíbrio em sua posição. Imagine agora que dobremos a superfície, quebrando a simetria. Agora essa carga destacada é repelida pelas cargas da esquerda, mas não é repelida na mesma direção pelas cargas da direita, porque elas não estão mais lá. Então, essa dobra deve produzir um acúmulo maior de cargas na região da dobra (uma região pontuda).

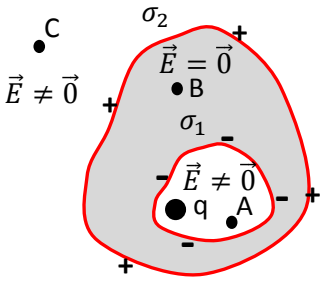
Direitos reservados ao autor: José Arnaldo Redinz / Universidade Federal de Viçosa – MG (Nov./2022) Ver. 1.6

Q22.14: Um bloco condutor sólido possui uma cavidade (vácuo) em seu interior.



Na Figura acima mostramos os dois casos: uma carga q > 0 dentro da cavidade (Figura da esquerda) e fora do condutor (Figura da direita). Tente imaginar essa figura em três dimensões: um bloco condutor com uma bolha dentro dele (a cavidade). As linhas vermelhas são a superfície externa do condutor e a superfície da cavidade (superfície interna do condutor).

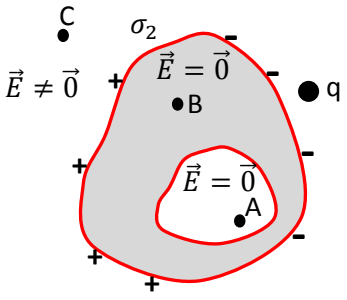
Quando a carga q > 0 está dentro da cavidade há a indução de uma distribuição de carga $\sigma_1 < 0$ na parede da cavidade que "mata" (blinda) o campo elétrico da carga q em todos os pontos fora da cavidade (ou seja, σ_1 cria um campo elétrico que se superpõe ao campo de q, dando uma resultante nula em todos os pontos exteriores à cavidade, pontos dentro do condutor e fora do condutor). Mas, como o condutor é neutro, forma-se na superfície externa do condutor uma densidade de carga elétrica $\sigma_2 > 0$, de tal forma que a carga elétrica total na superfície externa cancela com a carga total na superfície da cavidade. Essa distribuição de carga σ_2 produz campo elétrico na região fora do condutor, mas não produz campo elétrico na região interior (pois se ela fizesse isso anularia o feito de σ_1 de conseguir anular o campo na região condutora). Portanto, podemos dizer que a carga q dentro da cavidade afeta o campo elétrico fora do condutor, não há uma blindagem total dos efeitos da carga q. Mas, é verdade que σ_2 se distribui na superfície externa do condutor como se a carga q não existisse, pois σ_1 está "matando" o campo elétrico (a influência) de q. Se, por exemplo, mudarmos a carga q de lugar dentro da cavidade, σ_1 muda, mas σ_2 não muda, e o campo elétrico fora do condutor não muda. Usando a lei de Gauss, podemos provar que a carga total depositada na parede da cavidade (a integral de σ_1) é –q e que, portanto, a carga total na superfície externa do condutor (a integral de σ_2) é q, dada a neutralidade do condutor. Resumindo: se colocamos uma carga q dentro da cavidade, uma carga –q se concentra na parede da cavidade (porque ela é atraída por q) e uma carga q se concentra na superfície externa do condutor (porque ela é repelida por q), ambas são eletrizações por indução. A carga total no condutor continua sendo zero: q+(-q)=0. A Figura acima e a Tabela abaixo resumem essas idéias:



Direitos reservados ao autor: José Arnaldo Redinz / Universidade Federal de Viçosa – MG (Nov./2022) Ver. 1.6

Região	Campo elétrico resultante	Comentário
Dentro da cavidade (ponto A)	$\vec{E} = \vec{E}_q + \vec{E}_{\sigma_1}$	σ_2 não produz campo elétrico dentro do condutor, nem dentro da cavidade.
Dentro do condutor (ponto B)	$\vec{E} = \vec{E}_q + \vec{E}_{\sigma_1} = \vec{0}$	σ_1 é tal que "mata" o campo elétrico de q dentro do condutor. σ_2 não interfere nisso, σ_2 não produz campo elétrico dentro do condutor.
Fora do condutor (ponto C)	$\vec{E} = \vec{E}_{\sigma_2}$	σ_1 "mata" o campo elétrico de q também fora do condutor e só sobra nessa região o campo elétrico de σ_2.

Se quisermos blindar o exterior do condutor dos efeitos da carga q dentro da cavidade devemos eliminar a densidade de carga σ_2. Isso pode ser feito se aterrarmos (ligarmos eletricamente à terra) a superfície externa do condutor. Aterrar é a mesma coisa que ligar a uma esfera condutora gigantesca, a Terra. Ao fazer isso, a carga σ_2 se espalha na parede desse novo condutor, que é o condutor original mais a Terra. Nessa divisão da carga σ_2, o condutor maior fica com mais carga. Sendo a Terra gigantesca, ela fica com tudo e na superfície do condutor passa a valer $\sigma_2 = 0$ como resultado do aterramento. Daí $\vec{E} = \vec{E}_{\sigma_2} = \vec{0}$ na região fora do condutor. Um condutor aterrado blinda o exterior das influências de q localizada dentro da cavidade.



Quando a carga q > 0 está fora da cavidade há a indução de uma distribuição de carga σ_2 apenas na parede externa do condutor, que "mata" (blinda) o campo de q dentro do condutor, inclusive dentro da cavidade. Essa densidade σ_2 é negativa na face do condutor mais próxima de q e positiva na face oposta, de tal forma que a carga elétrica total induzida no condutor é zero (a neutralidade elétrica se mantém: eletrização por indução). Na parede da cavidade não há nenhuma densidade de carga (a lei de Gauss mostra isso), não há nada, pois a influência de q não atinge essa região, devido à ação (blindagem) de σ_2. Portanto, podemos dizer que a carga q fora do condutor não afeta o campo elétrico dentro da cavidade, há uma blindagem total dos efeitos da carga q nos pontos dentro da cavidade. Esse condutor com uma cavidade vazia é o que chamamos de "gaiola de Faraday". A Figura ao lado e a Tabela abaixo resumem essas idéias:

Direitos reservados ao autor: José Arnaldo Redinz / Universidade Federal de Viçosa – MG (Nov./2022) Ver. 1.6

Região	Campo elétrico resultante	Comentário
Dentro da cavidade (ponto A)	$\vec{E} = \vec{E}_q + \vec{E}_{\sigma_2} = \vec{0}$	σ_2 é tal que "mata" o campo elétrico de q dentro do condutor e dentro da cavidade. Não há σ_1.
Dentro do condutor (ponto B)	$\vec{E} = \vec{E}_q + \vec{E}_{\sigma_2} = \vec{0}$	idem
Fora do condutor (ponto C)	$\vec{E} = \vec{E}_q + \vec{E}_{\sigma_2}$	Fora do condutor há os campos elétricos de σ_2 e de q (a resultante deles).

Resumindo, se uma carga q é colocada dentro da cavidade, podemos detectar um campo elétrico fora do condutor, não há blindagem (só haveria se o condutor fosse aterrado). Mas, é verdade que esse campo externo independe da posição de q dentro da cavidade. Se uma carga q é colocada fora do condutor, não detectamos nenhum campo elétrico dentro da cavidade, ela está blindada das influências elétricas do mundo exterior (esteja o condutor aterrado ou não). Trata-se de uma gaiola de Faraday.

Não podemos e nem devemos estender os resultados da eletrostática para outros contextos, não estáticos. Mas, você vai encontrar por aí a ideia de que se você quer se proteger da incidência de raios em uma tempestade, pode se esconder dentro de um carro, porque as paredes metálicas dele vão funcionar como uma espécie de gaiola de Faraday, e te proteger dos efeitos externos dos raios. Um raio não tem nada a ver com uma distribuição estática de cargas e, por isso, essa extrapolação é um tanto falha. Obviamente, em uma tempestade, ainda é melhor e mais seguro ficar dentro de um carro do que ficar lá fora na chuva. O caso do forno de microondas, que é basicamente uma cavidade, serve como exemplo: dentro do microondas há um campo elétrico oscilatório (não estacionário), uma onda eletromagnética, de alta intensidade e as paredes do forno (incluindo o vidro da porta, que possui uma malha metálica) blindam o mundo exterior desse campo elétrico. Não há campo elétrico, ou seja, onda eletromagnética, fora do forno, pois isso representaria um perigo para quem estivesse próximo dele. Por outro lado, se um telefone celular for colocado dentro do forno de microondas ele vai funcionar, ele vai emitir ondas eletromagnéticas para fora do forno e vai receber ondas eletromagnéticas que entram no forno. Não há blindagem, porque a frequência das ondas eletromagnéticas utilizadas na telefonia celular é diferente da freqüência das ondas eletromagnéticas utilizadas no funcionamento do forno de microondas. Os fenômenos eletromagnéticos não-estáticos são muito mais ricos e complexos do que os fenômenos estáticos que estamos discutindo aqui. Mas enfim, em uma tempestade, é mais seguro ficar dentro de um carro do que lá fora na chuva.

Direitos reservados ao autor: José Arnaldo Redinz / Universidade Federal de Viçosa – MG (Nov./2022) Ver. 1.6

Q22.16: Um condutor esférico contém um excesso de carga elétrica Q positiva. Uma carga elétrica negativa –q é aproximada dessa esfera.

Antes da aproximação da carga –q, a carga Q estava uniformemente distribuída na superfície da esfera, dada a simetria da situação. Podemos mostrar, usando a lei de Gauss, que essa distribuição superficial uniforme de carga, que chamaremos de σ_A (A de antes), não produz campo elétrico em seu interior: $\vec{E} = \vec{0}$. Fora da esfera tudo funciona como se houvesse uma carga Q no centro da esfera e $\vec{E} \neq \vec{0}$. Isso é o que diz o teorema das cascas, que podemos provar facilmente usando a lei de Gauss.

A aproximação da carga –q tira o condutor do equilíbrio eletrostático, e por alguns instantes (um transiente muito rápido) passa a existir campo elétrico também dentro do condutor. Há um rearranjo das cargas que compõem o condutor, a densidade de carga superficial muda, até que finalmente o equilíbrio eletrostático se restabelece (se mantivermos a carga –q parada). A partir desse instante, os novos excessos de carga estão depositados somente na superfície do condutor e o campo elétrico no interior do condutor volta ao valor nulo: $\vec{E} = \vec{0}$ (essa é a definição de equilíbrio eletrostático). As cargas voltam a ficar estáticas. Fora da esfera, continua havendo campo elétrico.

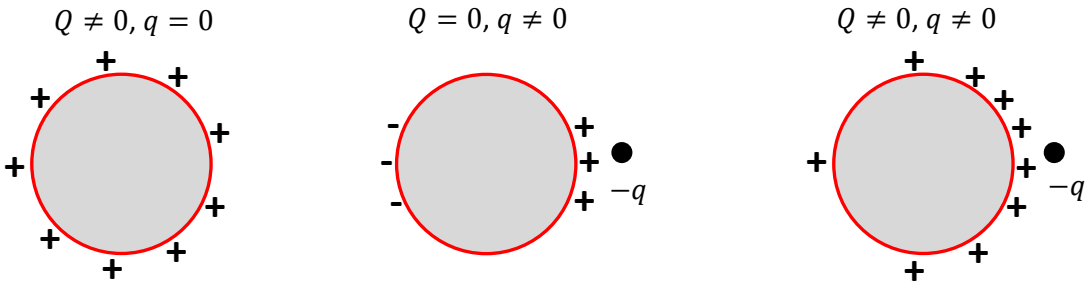
A aproximação da carga –q quebra a simetria, e a nova distribuição de cargas na superfície da esfera, que chamaremos de σ_D (D de depois), deixa de ser uniforme. Se a esfera fosse neutra (Q=0), na face da esfera próxima de –q haveria com certeza um excesso de carga positiva, ou seja, $\sigma_D^0 > 0$ (σ_D^0 é a densidade σ_D no caso Q=0) e na face oposta haveria um excesso de carga negativa, ou seja, $\sigma_D^0 < 0$. A carga total na superfície da esfera, que é uma integral de σ_D^0 nessa superfície, seria nula.

Podemos pensar dessa forma então: suponha que a esfera estava inicialmente neutra. Aproximamos a carga –q e induz-se na superfície da esfera a densidade de carga σ_D^0 conforme descrito acima. O equilíbrio eletrostático já está estabelecido. Agora acrescentamos o excesso de carga Q na esfera, que se distribui uniformemente na superfície da esfera (σ_A), pois σ_A deve ser tal que mantém o equilíbrio eletrostático. Como σ_D^0 já fazia valer $\vec{E} = \vec{0}$ dentro do condutor, então σ_A só pode ser uniforme, para que essa condição continue valendo. Portanto, podemos dizer que $\sigma_D = \sigma_A + \sigma_D^0$.

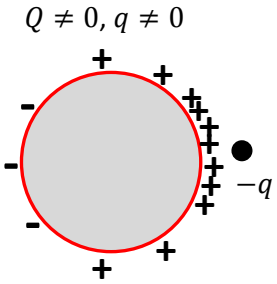
Conclusão, podemos apenas dizer que na face da esfera próxima de –q (onde vale $\sigma_A > 0$ e $\sigma_D^0 > 0$) a densidade σ_D será mais positiva do que na face oposta (onde vale $\sigma_A > 0$ e $\sigma_D^0 < 0$).

A Figura abaixo ilustra essa ideia (supondo que σ_D^0 (que depende do valor de q) não seja capaz de inverter o sinal de σ_A (que depende do valor de Q) na face oposta da esfera). Note que não estamos representando um círculo, mas sim uma esfera no espaço tridimensional.

Direitos reservados ao autor: José Arnaldo Redinz / Universidade Federal de Viçosa – MG (Nov./2022) Ver. 1.6

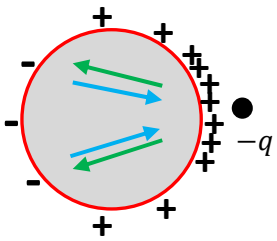


Resumindo: na ausência de –q, a carga Q positiva se distribui uniformemente na superfície da esfera. $\vec{E} = \vec{0}$ dentro do volume da esfera metálica (note que $\vec{E}$ é o campo produzido por Q, ou seja, por σ_A). Ao aproximar –q, ocorre uma atração, e um pouco de carga positiva se concentra na face da esfera próxima de –q. Na face oposta cria-se um déficit de carga positiva. Isso constitui a densidade σ_D^0. Após esse breve transiente, em que essas cargas de moveram no condutor, volta a valer $\vec{E} = \vec{0}$ no interior do condutor (note que agora $\vec{E}$ é o campo resultante produzido por Q (σ_A) superposto aos campos de –q e de σ_D^0) e tudo fica estático novamente. Na região externa, que é preenchida por um isolante, o ar, por exemplo, sempre há campo elétrico, o campo elétrico de Q (σ_A) superposto aos campos de –q e de σ_D^0.



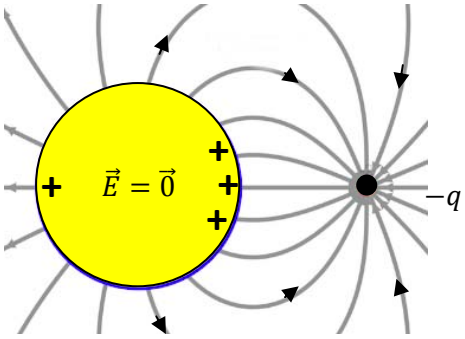
Se a carga -q fosse muito intensa, poderia inverter o sinal de $\sigma_D = \sigma_A + \sigma_D^0$ na face mais afastada da esfera, conforme a Figura ao lado.

A eletrização por indução produzida por –q nunca altera o valor da carga total Q depositada na esfera metálica. A carga –q apenas altera a forma como a carga Q se distribui na superfície da esfera.



Na Figura ao lado ilustramos o campo elétrico de –q (setas azuis) e o campo elétrico das cargas superficiais no condutor (setas verdes) se anulando no interior do condutor.

Na região exterior do condutor há campo elétrico. Por que não haveria? Esse campo é a soma do campo de –q com o campo das cargas superficiais ($\sigma_D = \sigma_A + \sigma_D^0$). A Figura abaixo ilustra algumas linhas de força desse campo (supondo –q não muito intensa).



Direitos reservados ao autor: José Arnaldo Redinz / Universidade Federal de Viçosa – MG (Nov./2022) Ver. 1.6