

T4 – Força de Coulomb e determinação das linhas equipotenciais entre duas cargas

Neste trabalho pretende-se:

- observar a repulsão entre esferas carregadas com cargas do mesmo sinal
- investigar a variação da força de Coulomb com a distância entre duas cargas;
- estudar a variação do potencial elétrico entre duas cargas, traçando linhas equipotenciais
- traçar as linhas de campo eléctrico a partir das linhas equipotenciais

1. Introdução

1.1. Força de Coulomb entre duas esferas condutoras

A força, \vec{F} , que atua entre duas cargas pontuais q_1 e q_2 separadas pela distância r , é dada pela conhecida Lei de Coulomb (ver, por exemplo, referência [1]). Esta lei estabelece que a força tem a direção da linha que une as cargas, é repulsiva se as cargas tiverem o mesmo sinal, é atrativa se as cargas tiverem sinais opostos e tem intensidade:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1)$$

onde k é uma constante de proporcionalidade.

Neste trabalho pretende-se verificar a validade da lei de Coulomb no que diz respeito à variação da força com a separação

entre as cargas. A força elétrica entre duas esferas com a mesma carga é medida recorrendo a uma balança de torção. Uma das esferas é suspensa num fino fio de torção e a outra esfera é colocada a uma distância conhecida da primeira. A força de repulsão eletrostática provoca a torção do fio, sendo que o ângulo de torção, que pode ser medido, é proporcional à força. As esferas são carregadas por contacto com uma ponta metálica ligada a uma fonte de alta tensão.

Quando as esferas são colocadas próximas uma da outra a carga não se distribui uniformemente sobre a sua superfície por causa de fenómenos de indução. É evidente que a expressão (1) só poderá ser confirmada para distâncias entre as esferas (r) muito maiores que o raio das esferas (a). Utilizando o método das imagens é possível obter uma expressão onde se introduzem correções à Lei de Coulomb para o caso de duas esferas iguais e com cargas semelhantes. Essa expressão é dada por [2]:

$$\begin{aligned}
 F' = F(1 - 4\beta^3 - 6\beta^5 + 14\beta^6 - 8\beta^7 + 54\beta^8 - 50\beta^9 \\
 + 154\beta^{10} - 264\beta^{11} + 494\beta^{12} - 1092\beta^{13} + 1830\beta^{14} \\
 - 4192\beta^{15} + 7140\beta^{16} - 15894\beta^{17} + 28234\beta^{18} \\
 - 60320\beta^{19} + 112056\beta^{20} - 230032\beta^{21} + \dots)
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

onde

$$\beta = \frac{a}{r}$$

e F é força dada pela expressão da Lei de Coulomb (equação (1)).

Se a distância entre os centros das esferas não for inferior a $2.5a$, poderá utilizar-se uma versão simplificada da expressão (2) contendo apenas o primeiro termo de correção [2]:

$$F' = F(1 - 4\beta^3) \quad (3)$$

1.1. Linhas equipotenciais entre duas cargas

O vetor campo elétrico num ponto, \vec{E} , é definido pelo quociente entre a força elétrica e o valor da carga de prova positiva, Q , colocada nesse ponto. As linhas de força (ou linhas do campo elétrico) são tangentes, em cada ponto, ao vetor campo elétrico.

O campo elétrico deriva de um potencial escalar, designado por potencial elétrico, V , definido a menos de uma constante por [1]:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V. \quad (4)$$

Fisicamente, V representa o trabalho realizado pela força elétrica no transporte de uma carga unitária desde esse ponto até ao infinito, por qualquer percurso. A unidade S.I. do potencial é o volt. A diferença de potencial entre dois pontos é dada por

$$V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E} \cdot \vec{dl}, \quad (5)$$

onde \vec{dl} é o vetor deslocamento infinitesimal ao longo do percurso.

Uma superfície equipotencial é o lugar geométrico dos pontos, no espaço tridimensional, onde V é constante. Se a análise for feita num plano, o lugar geométrico dos pontos onde V é constante é uma linha equipotencial. Esta definição implica que \vec{E} é, em cada ponto, perpendicular à superfície (ou linha) equipotencial que passa por esse ponto. Decorre ainda da equação (4) que \vec{E} tem sempre o sentido das equipotenciais decrescentes.

No presente trabalho pretende-se fazer um estudo da variação do potencial num plano, localizando uma família de linhas equipotenciais. Estabelece-se entre dois elétrodos uma diferença de potencial (usando uma fonte de alimentação); os elétrodos são assentes sobre um papel revestido com uma película de alta

condutividade elétrica (papel de carbono), colocado num plano horizontal, e usam-se duas pontas metálicas ligadas a um voltímetro para determinar a diferença de potencial entre diferentes pontos no papel; em particular podem achar-se pontos entre quais a diferença de potencial é nula, o que permite traçar linhas equipotenciais no plano.

2. Procedimento experimental

2.1. 1ª parte: Força de Coulomb

2.1.1. Material:

- Balança de Coulomb (*Pasco*)
- Esferas condutoras
- Fonte de alta tensão
- Ponta metálica de carga (ligada a fio de condução)

2.1.2. Descrição do procedimento experimental

Notas prévias:

- Ao efetuar as medidas deve manter-se o mais afastado possível das esferas carregadas; este cuidado minimizará o efeito de cargas estáticas que possam existir nas roupas, particularmente se usar roupas feitas de fibras sintéticas.
- As esferas depois de carregadas poderão descarregar-se, especialmente se a humidade do ar for elevada. Para evitar a perda de cargas das esferas depois de carregadas deve efectuar as medidas o mais rapidamente possível.
- Evite tocar com as mãos nas esferas, para não depositar quaisquer resíduos sobre as suas superfícies; sempre que for necessário descarregar as esferas deve fazê-lo usando um fio ligado à terra **e não tocando com as mãos nas esferas**.
- Após cada medida as esferas devem ser carregadas de novo.

- Qualquer deslocamento de ar junto das esferas pode afectar os resultados das medidas: tome precauções para evitar a produção de quaisquer correntes de ar.

ATENÇÃO: o material utilizado nesta experiência é muito frágil, pelo que deve ser manuseado com muito cuidado. Em particular, deve ser evitado tocar no fio de torção (muito fino e, por isso, pouco visível).

ATENÇÃO: Nesta experiência utiliza-se uma fonte de alta tensão. Apesar das intensidades de corrente serem baixas, deve tomar precauções para não correr qualquer risco de choque elétrico: o botão de regulação da tensão deve ser ajustado para a posição zero antes de ligar ou desligar a fonte; a ponta metálica para carregar as esferas deve ser ligada ao terminal da fonte de cor vermelha, que é aquele que estará ao potencial não nulo; segure a ponta de carga sempre pela protecção feita de material isolante (nunca toque diretamente na parte metálica).

Procedimento:

Preparação da experiência

NOTA: Os passos 1 e 2 já estão efetuados

1-• Ajuste a altura do amortecedor magnético (constituído por dois ímanes com uma separação entre si) de modo a que o contrapeso ligado ao fio de torção se encontre a meia distância dos ímanes (ver figura 1). Simultaneamente ajuste as posições dos anéis de cobre colocados na placa que serve de contrapeso para garantir que esta se encontra horizontal.

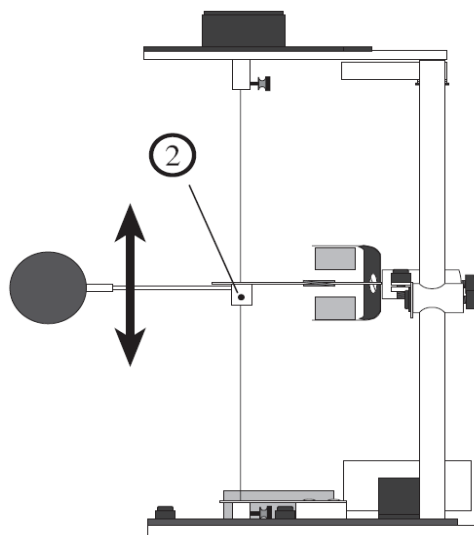


Figura 1: Vista lateral da balança de Coulomb

2-• Fixe o suporte lateral com escala métrica à balança, como se indica na figura 2 (aperte os parafusos com a identificação 1)

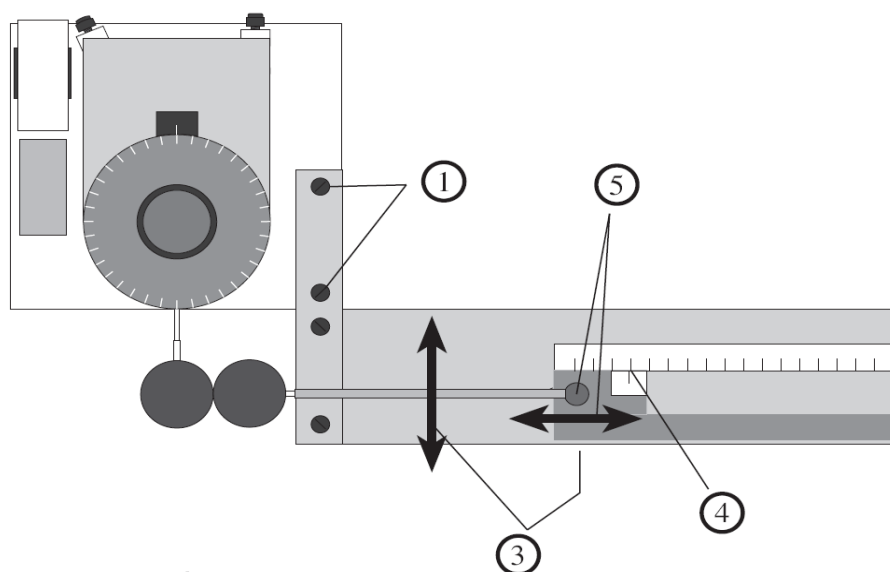


Figura 2: Montagem da balança de Coulomb vista de cima

3-• Alinhe as esferas lateralmente, ajustando a posição da esfera fixada ao suporte lateral (a posição da haste que segura a esfera pode ser ajustada utilizando o parafuso que a prende ao suporte (identificação com o número 5, na figura 2)). Este

alinhamento deve ser feito de modo que a leitura na escala (identificação com o número 4 na figura 2) seja de 3.8 cm quando as esferas se tocam (nestas condições a leitura da escala corresponde à distância entre os centros das esferas).

4-• Depois de se assegurar que as esferas estão completamente descarregadas (tocando-lhes com a ponta metálica ligada à terra), desloque a esfera móvel de modo a afastá-la o mais possível da esfera suspensa na balança de Coulomb.

5-• Coloque a escala do disco superior da balança na posição zero.

6-• Rode o fixador do fio de torção (situado na parte inferior-base da balança) de modo a que a marca situada na placa ligada ao fio (que se encontra a meia altura do fio) fique alinhada com a marca de referência.

Experiência

1-• Mantendo as esferas na posição de máxima separação, carregue-as ao potencial máximo fornecido pela fonte (~5 kV) tocando-lhes com a ponta metálica (note que o outro terminal da fonte deve estar ligado à terra). Imediatamente depois de carregar as esferas deve baixar até zero a tensão fornecida pela fonte e desligá-la.

2-• Coloque a esfera móvel na posição de 20 cm (esta é a distância, r , entre os centros das esferas). Deverá observar um afastamento da esfera ligada ao fio de torção.

4-• Ajuste o botão situado na parte superior da balança de modo que a marca no contrapeso (ligado ao fio de torção) regresse à posição inicial de alinhamento com a referência. Registe o correspondente ângulo de torção, θ (leitura feita na escala situada no disco na parte superior da balança).

5-• Para a mesma separação das esferas repita a medida do ângulo de torção várias vezes, garantindo que obtém resultados reprodutíveis. Note que para cada medida todo o procedimento deve ser reiniciado (**as esferas devem voltar a ser carregadas a partir da posição de máxima separação**).

• Utilizando os mesmos procedimentos realize a medida do ângulo de torção para as distâncias $r = 14$ cm, $r = 10$ cm, $r = 9$ cm, $r = 8$ cm, $r = 7$ cm, $r = 6$ cm e $r = 5$ cm.

2.2. 2ª parte: Linhas equipotenciais

2.2.1. Material:

- Kit para o estudo das linhas equipotenciais (*Phywe*)
- Fonte de tensão DC
- Multímetro

2.2.2. Descrição do procedimento experimental

- Coloque os dois suportes transparentes sobre a placa metálica perfurada.
- Coloque a placa isolante de policarbonato no espaço entre os dois suportes.
- Fixe o suporte de elétrodos aos suportes transparentes.
- Coloque um pedaço de papel milimétrico de 130 mm x 100 mm sobre a placa de policarbonato, sobre este uma folha de papel químico e, finalmente, uma folha de papel de carbono (com as mesmas dimensões).
- Coloque dois elétrodos quase pontuais sobre o papel de carbono, separados de uma certa distância, e pressione-os de modo a garantir um bom contacto elétrico com o papel.

- Usando um lápis de grafite macio, contorne os elétrodos de modo a que sua forma e posição fiquem marcados no papel milimétrico.
- Aplique uma tensão DC de 10 V aos elétrodos.
- Ligue um dos terminais do voltímetro à ponta de prova metálica e o outro terminal ao eléctodo de referência.
- Coloque a ponta de prova sobre o papel de carbono num ponto intermédio sobre a linha que une as duas cargas e meça a diferença de potencial entre o ponto escolhido o eléctrodo de referência; marque esse ponto no papel milimétrico pressionando a ponta de prova.
- Encontre outros pontos ao mesmo potencial do primeiro ponto escolhido de modo a que posteriormente se possa traçar uma linha equipotencial.
- Repita o procedimento anterior de modo a traçar outras linhas equipotenciais. Note que a qualidade dos resultados será tanto melhor quanto mais linhas equipotenciais for possível achar.

3. Resultados e cálculos

1ª parte

Determine a relação entre a força elétrica (que é proporcional ao ângulo de torção, θ) e a distância r . Para isso admita que a força elétrica é proporcional a r^n , isto é:

$$\theta = br^n$$

Então

$$\log \theta = n \log r + \log b$$

Trace um gráfico de $\log(\theta)$ em função de $\log(r)$ e determine n a partir do declive. Analise os resultados tendo em atenção que

para pequenas distâncias as esferas carregadas deixam de poder ser consideradas cargas pontuais (Sugestão: poderá fazer uma correcção aos dados dividindo o ângulo de torção, que é proporcional à força, pelo fator $B = 1 - 4(a/r)^3$, como sugere a equação (3)).

2ª parte

Trace as linhas equipotenciais no papel milimétrico assinalando o potencial de cada uma. Tendo em conta a relação entre as linhas de campo e as equipotenciais, trace linhas de campo e procure estimar a intensidade do campo para alguns pontos.

Referências

- [1] E.M. Purcell, *Electricity and Magnetism*, Berkeley Physics Course (vol. 2;) McGraw-Hill International Editions (1985).
- [2] J. Slisko, R. A. Brito-Orta, "On approximate formulas for the electrostatic force between two conducting spheres", *Am. J. Phys.* **66**, 352 (1998)