

A Força Eletromagnética

A interação eletromagnética, ou força eletromagnética, é aquela que ocorre quando corpos possuidores de cargas elétricas e/ou corpos magnetizados interagem.

As interações eletromagnéticas são descritas por uma parte da física chamada eletrodinâmica. Esta é a teoria física que descreve os fenômenos elétricos e magnéticos, ou seja todos os processos de interação que ocorrem entre corpos carregados que interagem por meio de forças eletromagnéticas. A formulação clássica da Eletrodinâmica foi feita por James Clerk Maxwell.

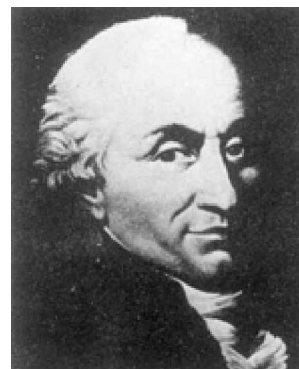
Interação entre corpos carregados: a lei de Coulomb

Sabemos que os elétrons têm carga negativa enquanto que os prótons têm cargas positivas. Desta forma, quando dois ou mais prótons, elétrons ou uma mistura destas partículas são colocadas próximas, sempre ocorre um processo de interação eletromagnética.

A interação elétrica não ocorre apenas entre elétrons e prótons mas sim entre dois ou mais corpos quaisquer que possuam carga elétrica.

Já era conhecido que corpos possuidores do mesmo tipo de carga elétrica se repeliam enquanto que se as cargas fossem diferentes eles eram atraídos. Foi o físico francês Charles Augustin Coulomb que conseguiu, a partir de experiências realizadas em seu laboratório, colocar estas observações sobre o comportamento de corpos carregados em uma forma matemática.

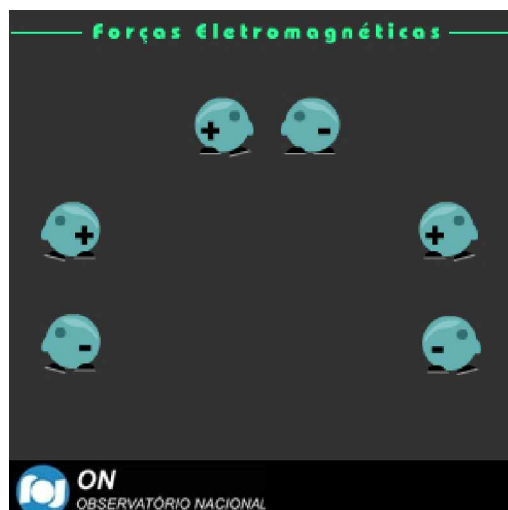
Segundo Coulomb, a força elétrica entre duas partículas carregadas é dada por



$$F = k \frac{q q'}{d^2}$$

onde q e q' são as cargas elétricas dos dois corpos, d é a distância entre os corpos e k é uma constante para a eletricidade (análoga à constante G que surge quando estudamos a gravidade). Esta é a chamada lei de Coulomb.

Observe que, uma vez que as cargas elétricas podem ter sinais diferentes, a força calculada pode ser positiva ou negativa. Se ela for positiva isso significa que os corpos têm cargas elétricas com o mesmo sinal e, portanto, se repelem. Se o sinal da força for negativo, isso nos mostra que as cargas elétricas possuem sinais contrários e, portanto, os corpos carregados se atraem.



Olhe as duas expressões abaixo:

$$\mathbf{F} = \mathbf{G} \frac{\mathbf{Mm}}{d^2} \quad \mathbf{F} = \mathbf{k} \frac{\mathbf{q q'}}{d^2}$$

A da esquerda representa a interação gravitacional entre dois corpos de massa M e m. A da direita mostra a interação elétrica entre dois corpos com cargas q e q'. Rapidamente notamos que estas equações possuem a mesma forma. No entanto, existem algumas diferenças muito importantes entre elas:

- há somente um tipo de massa enquanto que existem dois tipos de carga elétrica - positiva e negativa - que se comportam de maneiras opostas.
- a gravitação é puramente atrativa, mas a força elétrica pode ser ou atrativa ou repulsiva - cargas elétricas com o mesmo sinal se repelem, cargas elétricas com sinais opostos se atraem.
- cargas que se movem produzem e respondem à *força magnética*. Ocorre que as forças elétrica e magnética são manifestações diferentes de um mesmo fenômeno físico. Por esta razão os astrônomos e físicos falam de uma "força eletromagnética".

Note também que a lei de Coulomb nos mostra que a interação elétrica é uma força que tem alcance infinito uma vez que nenhum limite é estabelecido sobre o valor de d.

As equações de Maxwell

As interações eletromagnéticas, ou seja o conjunto de fenômenos que ocorrem com corpos que possuem carga elétrica ou magnetismo, são regidas pelas chamadas equações de Maxwell. James Clerk Maxwell foi um físico escocês que viveu entre 1831 à 1879 e notou que todos os fenômenos elétricos e magnéticos que ocorrem na natureza podem ser descritos por um conjunto de apenas quatro equações! As equações de Maxwell não são simples matematicamente, exceto para os profissionais de ciências. Elas estabelecem uma íntima relação entre os fenômenos elétricos e magnéticos, mostrando que estes não são fenômenos isolados. Os fenômenos elétricos produzem os efeitos magnéticos e vice versa. É por esta razão que os fenômenos elétricos e magnéticos passaram a ser tratados por uma única teoria chamada *eletromagnetismo*. Se você quer conhecer as equações de Maxwell, propostas por ele em 1865, clique no botão abaixo.



Equações do Eletromagnetismo

As leis básicas da eletricidade e do magnetismo podem ser resumidas nas 4 equações seguintes, escritas na forma diferencial:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= 4\pi\rho & \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 & \nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0 \end{aligned}$$

- Lei de Coulomb:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho$$

- Lei de Ampère-Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

- Lei de Faraday:

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$$

- Ausência de pólos magnéticos livres:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Além destas equações, os fenômenos eletromagnéticos devem obedecer a mais duas equações:

- Equação da força de Lorentz:

$$\mathbf{F} = q \left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{B} \right)$$

- Equação da continuidade:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

A luz como uma onda

Também foi Maxwell que mostrou que a radiação eletromagnética, ou seja a luz, se propaga como uma onda. A partir de transformações matemáticas que ele realizou sobre as quatro equações do eletromagnetismo, Maxwell mostrou que elas se reduziam a uma equação de propagação de uma fenômeno ondulatório. Desta forma, a luz se propaga no espaço como uma onda e é por este motivo que a eletrodinâmica é o estudo das propriedades das ondas eletromagnéticas. A luz que recebemos das estrelas nada mais é do que a radiação eletromagnética produzida por fenômenos físicos que ocorrem no seu interior e, posteriormente, emitida por elas. Estas ondas eletromagnéticas se propagam no espaço interestelar e chegam até nós permitindo-nos ver os objetos celestes.

Também foi Maxwell que mostrou, a partir da obtenção da equação de propagação ondulatória da luz, que a velocidade desta propagação, ou seja a velocidade da luz, no vácuo é

$$V_{\text{luz}} = c = 300000 \text{ km/seg}$$

Observação:

É um erro comum vermos escrito que a velocidade de propagação da luz é de 300000 quilômetros por segundo. Isto não é verdade. Esta é a velocidade de propagação da luz *no vácuo*. Em um meio material a luz tem uma velocidade menor do que essa. Este "detalhe" é importante porque a velocidade da luz *no vácuo* é a velocidade limite máxima para todos os corpos materiais, princípio esse estabelecido pela Teoria da Relatividade Restrita de Einstein. Em um meio material a velocidade da luz pode ser superada.

Se você quer conhecer as equações de propagação ondulatória dos fenômenos eletromagnéticos, propostas por Maxwell em 1865, clique no botão abaixo.

As equações de onda do eletromagnetismo

Um aspecto fundamental das equações de Maxwell para o campo eletromagnético é a existência de soluções sob a forma de ondas que se deslocam, e que transportam energia, de um ponto para outro. Estas equações governam o campo eletromagnético em um meio linear, homogêneo, no qual a densidade de carga é zero, seja este meio condutor ou não condutor.

- Equação de onda para o campo elétrico:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - g\mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0$$

- Equação de onda para o campo magnético:

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \epsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - g\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0$$

O alcance da força eletromagnética

Vimos anteriormente que a força eletromagnética é cerca de 10^{40} vezes maior do que a força da gravidade. Se ambas são forças de longo alcance, então porque motivo a gravitação, e não o eletromagnetismo, domina as interações entre os corpos celestes? A gravitação domina essas interações porque a maioria das regiões do espaço são eletricamente neutras e, portanto, não sentem a interação eletromagnética.

A diferença de intensidade entre as forças gravitacional e eletromagnética não é aparente por causa da natureza dual (atrativa/repulsiva) dessa última.

No entanto, no nosso dia-a-dia as forças que impedem você de cair no chão ou de sua cadeira, as forças que são exercidas quando você empurra um objeto (fricção, etc.) todas são exemplos da força eletromagnética em ação.

A Eletrodinâmica Quântica

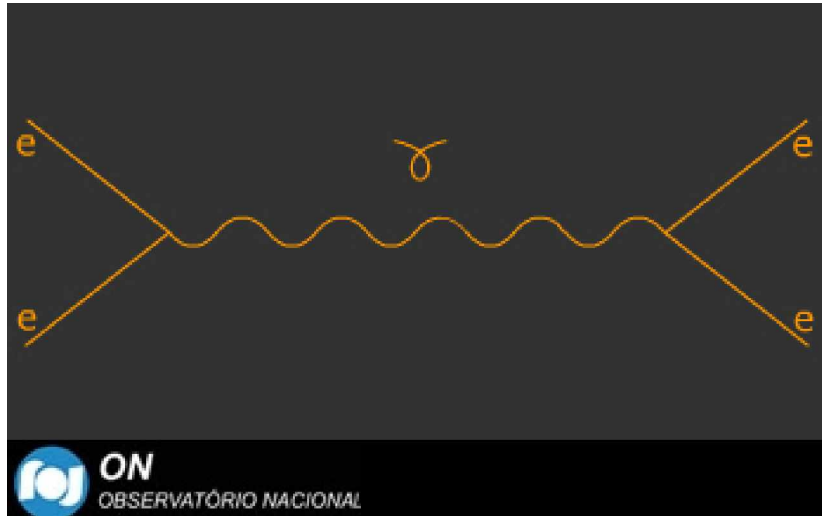
A teoria clássica da eletrodinâmica, construída por Maxwell, já era consistente com a teoria da relatividade especial de Einstein.

No entanto, para aplicar estas equações aos fenômenos eletromagnéticos que ocorriam entre as várias partículas elementares, foi necessário construir uma nova teoria envolvendo a mecânica quântica. O "casamento" do eletromagnetismo com a mecânica quântica, ou seja, a construção de uma "Eletrodinâmica Quântica", foi realizada por grandes nomes da física tais como Dirac, Feynman, Tomonaga e Schwinger nos

anos de 1940.

A eletrodinâmica quântica é uma das teorias mais bem construídas da física. Os equipamentos eletrônicos que você usa em sua casa possuem circuitos integrados cuja construção se baseia na eletrodinâmica quântica. A precisão verificada entre os resultados previstos teoricamente e aqueles obtidos no laboratório é realmente surpreendente.

A eletrodinâmica quântica nos diz que existe uma partícula que é a mediadora de todas as interações eletromagnéticas. Esta partícula é o fóton.



Sempre que ocorre um processo entre partículas carregadas há uma incessante troca de fótons. A descrição das interações eletromagnéticas sob o ponto de vista da eletrodinâmica quântica é uma das áreas mais importantes para nós que gostamos de astrofísica. Lembre-se que vemos as estrelas porque elas emitem radiação e esta radiação nada mais é do que fótons produzidos por processos quânticos que ocorrem no interior da estrela.