

Capítulo 1

pg. 1

Força Elétrica e Campo Elétrico

1.1 → Introdução ao Eletromagnetismo

Vamos explorar durante o curso de Física III os meandros e as idiosincrasias do eletromagnetismo, de um ponto de vista introdutório e na medida do possível claro. Nos preocuparemos dos sistemas carregados estáticos, ou seja, os corpos não apresentam neste ponto nenhum movimento. A descrição do eletromagnetismo no sistema estático é chamado de eletrostática. Cursos mais avançados tratarão de corpos carregados em movimento a chamada eletrodinâmica.

O eletromagnetismo se desenvolveu muito rapidamente nos séculos XVIII, XVI e XX principalmente seu caráter e formalismos matemáticos. Para o aluno de graduação esta é uma das primeiras disciplinas que demandam um esforço matemático mais avançado, uma sólida formação em cálculo, é portanto desejável e necessário. Contudo, as principais ideias foram descobertas já na Grécia antiga, de observações de forças "desconhecidas" à época quando se atritavam um pedaço de âmbar com tecido. O âmbar após o atrito passa a atrair pedaços de palha.

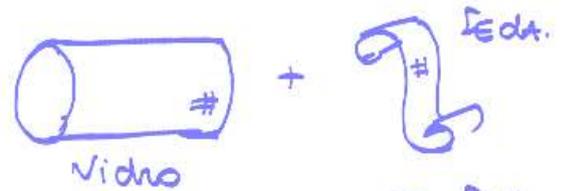
O âmbar é uma resina vegetal fossilizada, que ao longo do tempo perde a água e se polimeriza, seu nome em Grego é 'ELEKTRON' batizando assim a força elétrica de hoje. A ciência se desenvolveu rapidamente nas mãos de experimentalistas como Orsted, Faraday, Lenz, Franklin, etc mas toma corpo matemático formal com o formalismo e as contribuições de James Clerk Maxwell 1888 escrevendo as leis do eletromagnetismo em sua forma diferencial e integral, num conjunto conhecido por equações de Maxwell.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1), \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2), \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3), \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

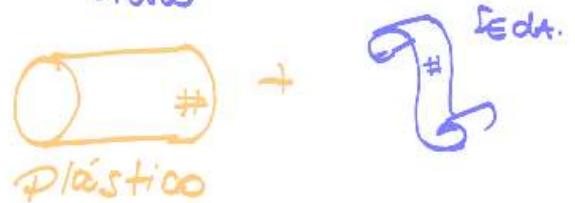
Atualmente sabemos que as interações de origem eletromagnética são devido a presença de cargas elétricas, veja que essa ideia não é trivial, carga elétrica é apenas uma das diversas estranhezas da física. O que é então carga elétrica? Começamos do passado com alguns experimentos, depois daremos um salto ao presente.

Simple experimento e/ rápida observação do efeitos macroscópicos

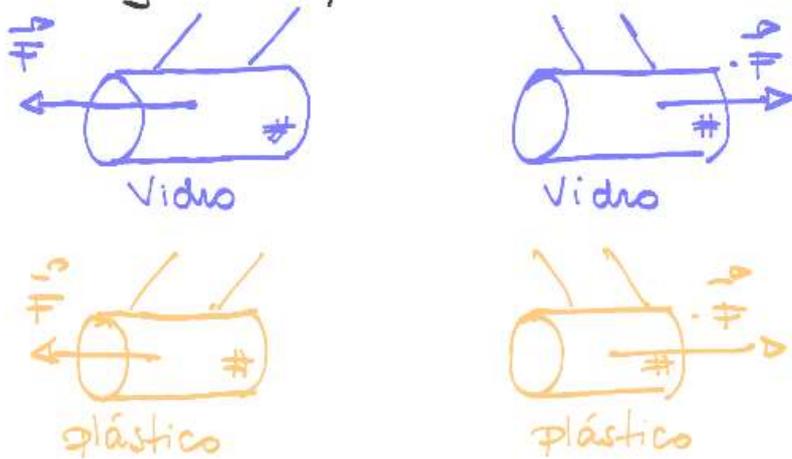
① → Vamos atritar/esfregar um pano de seda com um bastão de vidro,



② → Vamos atritar um pano de seda com um bastão de plástico,

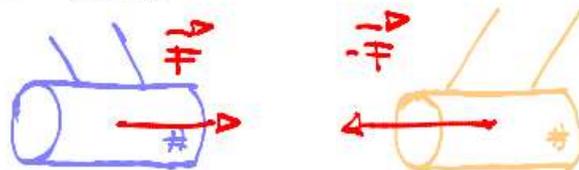


③ → Após esta preparação observamos duas importantes observações experimentais:



Vemos que os bastões de mesmo material se repelem mutuamente, ou seja, há o aparecimento de uma força repulsiva \vec{F} entre eles.

No entanto, se aproximarmos bastões de diferentes materiais observamos o oposto, ocorre o aparecimento de uma força atrativa entre eles.



Esse processo "carregou" ambas os bastões de diferentes materiais, essa carga é a carga elétrica. O que se observa é que cargas iguais se repelem e cargas diferentes se atraem.

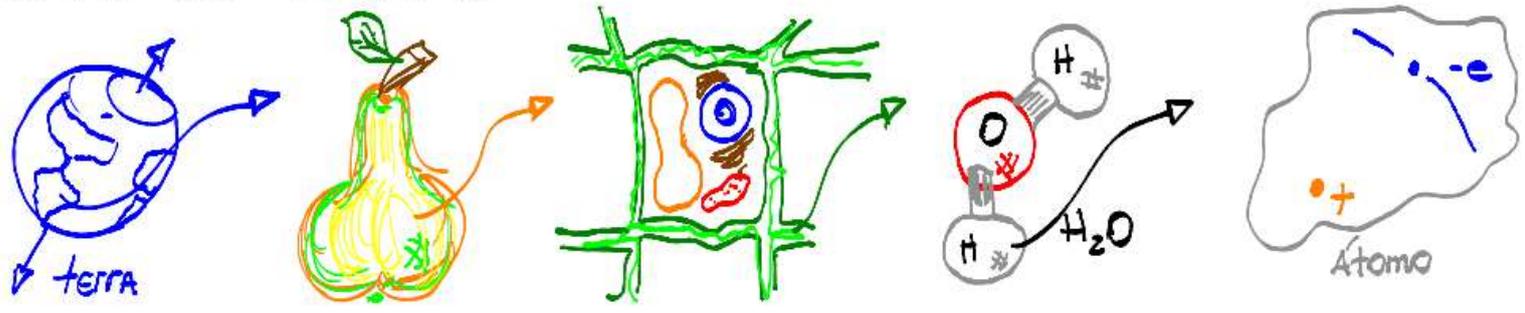
Do ponto de vista macroscópico parecem existir apenas dois tipos de cargas, as que se repelem entre o mesmo tipo e se atraem quando diferentes. De forma conveniente e muito inteligente Benjamin Franklin nomeou essas cargas de positivas e negativas, dando um primeiro caráter matemático à essa característica. Veja que os nomes poderiam ser quais quer, banana e maça, direita e esquerda, azul e verde, etc não importa.

Mas o que são do ponto de vista microscópico essas benditas cargas elétricas?



Entremos agora numa discussão mais atual da física conhecida, note que o desenvolvimento intelectual não é rápido e vou apresentar o conhecimento atual sem mencionar a todo momento os fatos históricos ou sua ordem cronológica.

Hoje em dia observamos na natureza três forças fundamentais, força é o resultado da interação entre corpos. A primeira interação fundamental é a gravitacional as forças resultantes dessa interação dão origem às estrelas, aos cometas, aos planetas, aos satélites, aos buracos negros, às galáxias etc. E é claro governa na escala humana nosso modo de vida. A força gravitacional é gerada por corpos que possuem massa, ou seja, a massa discutida ou não cria um "campo" gravitacional. Para compreender as outras duas forças fundamentais vamos primeiro discutir o modelo de matéria.



O átomo é o tijolo fundamental de toda a matéria que observamos, os experimentos de colisão mostram que são formados por um núcleo de carga positiva e onde está a maior parte de sua massa e uma eletrosfera, onde encontramos as elétrons, uma partícula fundamental (até o momento sem estrutura interna aparente) com massa 2000 vezes menor que a da partícula nuclear

NUCLEAR fundamental o próton e o neutrão. O elétron por convenção carrega a carga elétrica negativa e o próton positiva, o neutrão não possui carga elétrica. O elétron portanto é a partícula que se locomove entre os bastões e o tecido. Assim, um excesso de elétrons torna o corpo negativamente carregado e uma falta um corpo positivamente carregado. A princípio os átomos / corpos possuem o mesmo número de cargas positivas (prótons) e negativas (elétrons) fazendo com que a carga final seja nula, ou o corpo é eletricamente neutro.

Os elétrons então se repelem mutuamente pois possuem o mesmo tipo de carga, os prótons também se repelem mutuamente. Mas prótons são atraídos por elétrons e vice-versa pois possuem cargas opostas. Essa interação é puramente elétrica.



Átomos / elementos químicos mais pesados possuem muito mais que um próton em seu núcleo. Numa abordagem ingênua esse núcleo não deveria existir já que cargas de mesmo sinal se repelem (sistema instável), mas há uma terceira força fundamental que apenas tem importância à distâncias muito curtas, no núcleo os núcleons são mantidos coesos pela força nuclear à distâncias médias de $10^{-15}m$. A história vai mais longe ainda, os núcleons (próton e neutrões) são formadas por partículas fundamentais os quarks que se apresentam sempre em números de três mantidas juntos pela interação forte (força forte). Não discutirei a estabilidade nuclear (física nuclear, teoria de campos, física de partículas, cromodinâmica quântica, etc.).

Na natureza observamos também as antipartículas, que são partículas com a carga elétrica oposta. Um pósitron é a antipartícula do elétron (carga positiva) o anti-próton do próton, etc. As massas são as mesmas, apenas a característica elétrica é invertida. Podem haver, portanto, anti-átomos como o anti-hidrogênio quando se ligam um anti-próton - carga negativa \ominus - com um pósitron - carga positiva \oplus . Nosso universo parece ser composto unicamente por matéria e não anti-matéria, esse é ainda um mistério a ser explorado.

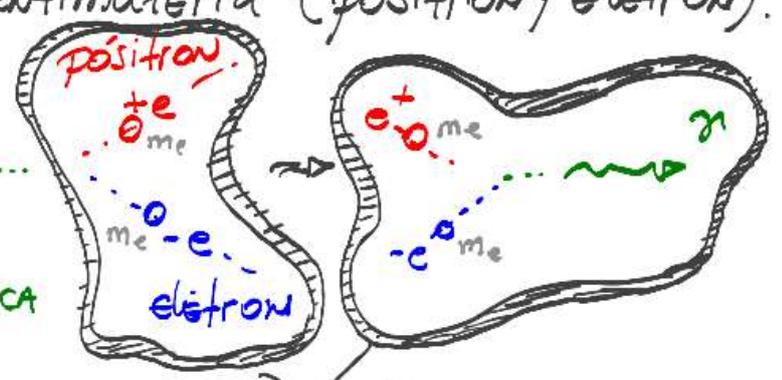
Consideremos um sistema fechado que engloba alguma quantidade de carga Q . O sistema isolado se define aqui como um volume isolado do meio exterior por uma barreira que impede a fluxo de matéria pela mesma. Neste caso é observado experimentalmente que essa quantidade de carga apenas se modifica se carga é retirada ou adicionada ao sistema cruzando-se a barreira. A relação matemática que representa essa conservação local é chamada de equação da continuidade.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad , \quad (5)$$

Voltaremos a discutir a equação (5) no futuro quando tivermos as ferramentas matemáticas necessárias. Um exemplo interessante de conservação de cargas é a criação espontânea de pares de matéria - antimatéria (pósitron / elétron).

Raio gamma γ
fóton altamente energético

$m=0$
 $q=0$
s/ carga elétrica



Podemos então interpretar a conservação da carga como um postulado teórico ou uma lei empírica suportada por observações experimentais.

Lei da Conservação da carga elétrica \Leftrightarrow A carga elétrica total de um sistema isolado, ou seja, a soma algébrica das cargas positivas e negativas presentes num certo tempo nunca muda.

Em outras palavras a carga elétrica não pode ser destruída ou criada, apenas transportada de um corpo a outro, ou de uma posição espacial a outra.

Uma questão interessante é se perguntar sobre a invariância relativística da carga, ou seja, será que múltiplos observadores relativos medem/observam uma mesma quantidade de carga elétrica? A resposta é sim, e possui consequências fundamentais na compreensão do eletromagnetismo.

1.4 → Quantização da carga elétrica

As cargas elétricas que encontramos na natureza, se apresentam na forma de uma carga fundamental, que é a carga de um elétron representado por e ou $-e$. Note que não discutimos a estrutura interna do elétron e até o momento as observações não mostram tal estrutura. O próton por outro lado possui carga igual ao elétron de sinal oposto $+e$ e o neutrão parece ter carga nula. Contudo, hádrons como prótons e neutrons possuem estrutura interna, hoje sabemos que são formados por partículas chamadas "quarks" e possuem segundo a melhor descrição teórica (Cromodinâmica quântica - QCD) carga elétrica fracionada $\pm \frac{1}{3}e$, $\pm \frac{2}{3}e$. Essas partículas fundamentais nunca foram observadas isoladamente. Assim a carga fundamental é a carga de um elétron.

Diversos experimentos mostram como resultado um limite baixo de 10^{-20} na diferença entre as cargas do próton e do elétron. Ou seja, não se observou discrepâncias até o momento (ano 2019), a carga do neutrão também é medida no limite experimental de 10^{-20} . Trataremos o elétron como uma carga pontual (sem dimensões) com carga unitária e .

Os núcleos atômicos compostos por prótons e neutrons tem dimensões da ordem de 10^{-13} a 10^{-15} metros, muito menores que os raios orbitais do elétron $\sim 10^{-9}$ a 10^{-10} metros. Em 1911 Ernest Rutherford (1871-1937) estudou o espalhamento de partículas alpha (α -núcleo de hélio) por folhas de ouro. O padrão de espalhamento obtido dá a informação da seção de choque e efetivo, ou em outras palavras o tamanho do núcleo. O corpo é carregado quando há um desequilíbrio entre o número de elétrons e prótons no corpo. Em geral o elétron flui (leve).