

1.1 Introdução – Eletromagnetismo como uma teoria de forças

A disciplina Física III é uma introdução ao eletromagnetismo, que compreende os fenômenos elétricos e magnéticos. As aplicações do eletromagnetismo são universalmente presentes na vida moderna. É difícil imaginar qualquer atividade do homem moderno que não envolva alguma utilização da eletricidade, seja para a simples geração de luz, geração de baixas temperaturas para poder desfrutar uma cerveja gelada, seja nas inúmeras atividades que envolvem informação, como aquelas relacionadas à televisão, telefonia, computação eletrônica etc. Seria desejável que qualquer cidadão da vida moderna tivesse algumas noções básicas do eletromagnetismo. Uma das principais características que diferencia o ser humano dos demais primatas é sua habilidade de compreender, pelo menos parcialmente, as suas condições de vida de forma consciente. O macaco vive muito bem na floresta e cumpre suas tarefas de vida eficientemente, mas ele não tem a mínima ideia das condições necessárias que permitem o crescimento das bananas que ele come. Grande parte da sociedade moderna voltou ao estado de macaco, navega eficientemente na internet e toma a cerveja gelada sem ter a mínima noção dos fenômenos físicos que estão por trás destas maravilhas técnicas que ele utiliza. Se é desejável que o homem comum tenha noções básicas do eletromagnetismo, imaginem então um engenheiro ou um cientista! Estes devem dominar este assunto com elevado grau de perfeição!

O eletromagnetismo não é apenas a base de um vasto mundo de aplicações técnicas, mas ele é também uma das bases do funcionamento da própria vida. Toda ligação química é mantida por forças elétricas. Então químicos e biólogos deveriam saber algo do eletromagnetismo, mesmo que a atividade de um biólogo raras vezes dependa diretamente deste conhecimento.

No estudo do eletromagnetismo conheceremos passo a passo uma estrutura de estranha e elevada beleza e, surpreendentemente, certos elementos desta estrutura parecem ser universais; se aplicam também a outras forças básicas da natureza, como a força fraca (responsável pelo decaimento beta) e a força forte que mantém os núcleos dos átomos juntos. O descobrimento das leis do eletromagnetismo foi uma das maiores conquistas da humanidade e ela provavelmente é a chave de entrada para outras descobertas a respeito da natureza do nosso Universo. O estudante que faz um curso de Física III pode se considerar uma pessoa privilegiada por ter a oportunidade de conhecer esta área do conhecimento humano. Em contrapartida, esperamos dos estudantes um comportamento sério de estudo. O aluno que começa a decorar algumas soluções de exercício uma semana antes da prova não terá a mínima chance de ser aprovado nesta disciplina!

O eletromagnetismo é uma teoria de forças. Para poder apreciar o que isto significa, vamos nos deter um pouco no conceito de força. Este conceito é introduzido com a segunda lei de Newton; força é massa vezes aceleração; $\vec{F} = m\vec{a}$. No entanto esta lei não é de fácil compreensão. Da forma como a frase anterior formulou esta lei, parece se tratar de uma

simples definição de força e de não uma lei da natureza. De fato a segunda lei de Newton define a força; mesmo assim ela tem conteúdo observacional e vai além de uma mera definição. A essência da segunda lei é que, na maioria dos casos, ela é uma equação diferencial que permite prever o futuro comportamento de um sistema mecânico. Veremos com um exemplo o que isto significa:

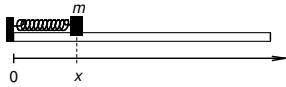


Fig. 1.1.1 Trilho de ar com sistema massa-mola.

Considere um carrinho de massa m num trilho sem atrito preso numa mola espiral, como mostrado da figura 1.1.1.

Podemos colocar o carrinho em diversas posições e podemos atribuir ao carrinho diversas velocidades. Mas não conseguiremos atribuir livremente diferentes valores da aceleração ao carrinho depois que a posição for escolhida. Depois que a posição é escolhida, a aceleração não pode mais ser escolhida, ela depende da posição. Colocando o carrinho em muitas posições diferentes e medindo as acelerações, podemos elaborar uma tabela de dados e podemos tentar ajustar estes dados com uma função simples. Encontramos a seguinte lei empírica:

$$a(x) = -K \times (x - x_0) \quad (1.1.1)$$

onde K e x_0 são constantes. Aqui usamos uma descrição unidimensional e suprimimos o caráter vetorial da aceleração. Quando falamos de constantes, é sempre importante mencionar quais são as variáveis das quais estas grandezas não dependem. Aqui constante significa que K e x_0 não dependem da posição x do carrinho. Se trocamos o carrinho por outro de massa maior, descobrimos que o valor de K muda, mas o valor de x_0 , não. Experimentalmente encontramos que

$$K = \frac{1}{m} k \quad (1.1.2)$$

onde k também é uma constante. Esta nova constante k é constante tanto em relação a x quanto ao valor da massa do carrinho. Ela descreve uma propriedade da mola. Juntando tudo encontramos que

$$ma = -k \times (x - x_0) \quad (1.1.3)$$

Esta igualdade foi encontrada para posições que colocamos voluntariamente. Mas, se supomos que ela vale também para posições atingidas pelo próprio movimento do carrinho, a igualdade se transforma em algo muito diferente e sumamente poderoso: uma *equação diferencial*.

O que é uma equação diferencial? Bom, primeiramente temos que entender o que é uma equação! A palavra equação provém da palavra igual. Mas nem toda fórmula que expressa igualdade será chamada de equação. Por exemplo $3 + 2 = 5$ é uma igualdade, mas uma equação tem algo mais. $3 + x = 5$ é uma equação. Esta última igualdade na verdade é uma charada. Ela contém a incógnita x e a tarefa é encontrar o objeto que, quando posto no lugar do x , transforme a fórmula numa igualdade válida. Então equações são charadas em forma de igualdades que contêm incógnitas. As incógnitas podem ser números

desconhecidos, como no caso da equação $3 + x = 5$, ou outros objetos matemáticos como vetores, matrizes etc. No caso das equações diferenciais as incógnitas não são números, mas são funções. No caso da equação (1.1.3) a incógnita é uma função do tempo. Para cada instante t o valor $x(t)$ indica a posição que o carrinho ocupa naquele instante. Esta associação de instantes e posições define a função $x(\cdot)$ e esta é a incógnita da equação. No lado esquerdo da equação aparece a derivada segunda desta incógnita, pois a (1.1.3) pode ser escrita na forma

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -k \times (x(t) - x_0) \quad (1.1.4)$$

Equações diferenciais são charadas em forma de igualdades nas quais aparecem os valores de derivadas de uma função incógnita e a tarefa é determinar a função que, quando posta no lugar da incógnita, transforme a fórmula numa igualdade válida para todos os valores da variável independente, da qual a função incógnita depende.

Dos tempos da escola sabemos que equações podem às vezes ter mais de uma solução. Por exemplo, a equação $y^2 + 2y - 40 = 0$ possui duas soluções. No caso das equações diferenciais existe em geral um número infinito de soluções. Poder-se-ia pensar que uma charada com um número infinito de soluções não é muito interessante. Mas, ao contrário, justamente por terem tantas soluções, as equações diferenciais são extremamente úteis. Por exemplo, as soluções da equação (1.1.4) descrevem os possíveis movimentos do carrinho. O carrinho pode mover-se de muitas formas diferentes. Todos estes diferentes movimentos são descritos pela única equação (1.1.4). Dados iniciais como posição e velocidade podem ser usados para selecionar uma das soluções da equação. Tendo uma determinada solução, podemos usá-la para prever o comportamento futuro do carrinho. Então o enorme poder da segunda lei de Newton reside na possibilidade de prever o futuro comportamento de um sistema para uma infinidade de possíveis movimentos.

No entanto este enorme poder da segunda lei de Newton existe somente se conhecermos a força como função da posição. No caso do exemplo do carrinho, imaginamos que previamente levantamos um número considerável de dados experimentais que permitiram determinar esta função com um ajuste numa tabela de dados. A segunda lei de Newton se tornaria um instrumento ainda muito mais útil se tivéssemos uma teoria de forças que permitisse escrever uma função força a partir de poucos dados. Bastaria medir a força para poucas posições para determinar que tipo de partículas estão presentes no sistema físico, e com esta informação, a teoria permitiria escrever as forças como funções das posições, ou eventualmente também como funções das velocidades das partículas. O eletromagnetismo é justamente este tipo de teoria. Ela permite determinar as forças para determinado tipo de partículas (as partículas eletricamente carregadas). Com isto a teoria eletromagnética complementa a mecânica de Newton e a torna uma ferramenta ainda mais poderosa. Mas, como veremos ao longo do desenvolvimento desta teoria, o eletromagnetismo não somente complementa a mecânica de Newton, mas ele mostrará também que existem graves falhas na mecânica Newtoniana.