AMIII - As Equações de Maxwell

8 de Janeiro de 2002

Como com todas as equações básicas da Física, não é possível *deduzir* as equações de Maxwell; de certa forma elas funcionam como os axiomas do electromagnetismo. No entanto, é possível torná-las pelo menos plausíveis, e explorar algumas das suas consequências mais simples. É o que se pretende fazer nos exercícios que se seguem.

1. A *Lei de Lorentz* para a força $\mathbf{F}$ sobre uma partícula de carga eléctrica e movendo-se com velocidade $\mathbf{v}$ sob a acção de um campo eléctrico $\mathbf{E}$ e de um campo magnético $\mathbf{B}$ é
$$\mathbf{F} = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}).$$
Mostre que o trabalho W realizado pelo campo electromagnético sobre a carga quando esta descreve uma curva C é
$$W = e \int_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r}.$$

2. Experimentalmente, verifica-se que o campo eléctrico criado por uma carga pontual e situada na origem é
$$\mathbf{E} = \frac{e\mathbf{r}}{4\pi\varepsilon_0 r^3},$$
onde $\mathbf{r} = (x, y, z)$, $r = \|\mathbf{r}\|$ e ε_0 é uma constante (dita a *permitividade eléctrica do vácuo*). Mostre que $\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0}$ e que $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ em $E^3 \setminus \{\mathbf{0}\}$. Mostre ainda que se C é uma qualquer curva fechada que não contém a origem,
$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} = 0,$$
e que se S é uma qualquer 2-variedade compacta que não contém a origem, então
$$\oiint_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} \, dV_2 = \begin{cases} \frac{e}{\varepsilon_0} \text{ se } S \text{ envolve a origem} \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$$
(onde $\mathbf{n}$ designa a normal unitária exterior).

3. Experimentalmente verifica-se que o electromagnetismo é uma teoria *linear*, i.e., o campo criado por várias cargas pontuais é a soma dos campos criados por cada carga (esta afirmação é não trivial, e não é verdade, por exemplo, no caso do campo gravitacional). Mostre que se $\mathbf{E}$ é o campo eléctrico criado por um número finito de cargas pontuais e C e S são uma

curva e uma 2-variedade compactas que não contêm qualquer ponto onde esteja colocada uma carga, então

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} = 0 \tag{1}$$

e

$$\oiint_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} \, dV_2 = \frac{Q}{\varepsilon_0}, \tag{2}$$

onde Q é a soma das cargas envolvidas por S ($\mathbf{n}$ designa a normal unitária exterior).

4. Demonstre o *Lema da Localização*: a única função contínua $f : E^n \to \mathbb{R}$ tal que

$$\int_B f dV_n = 0$$

para qualquer bola $B \subset E^n$ é a função identicamente nula.

5. Em situações nas quais o número de cargas eléctricas envolvido é muito grande, a distribuição de carga eléctrica é aproximada por uma *densidade de carga eléctrica* $\rho : E^3 \to \mathbb{R}$, suposta de classe C^1, de forma a que a carga total num dado conjunto mensurável A seja

$$Q = \iiint_A \rho \, dV_3.$$

Se admitirmos que (1) e (2) continuam a ser válidas nesta situação, e que o campo eléctrico é de classe C^1, mostre que o Lema da Localização implica que

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0} \text{ (o campo eléctrico é conservativo);}$$
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \text{ (Lei de Gauss).}$$

Estas são as *equações fundamentais da Electroestática*.

6. Experimentalmente, verifica-se que o campo magnético é produzido por correntes eléctricas. Mais precisamente, o campo magnético $\mathbf{B}$ criado por uma corrente eléctrica de intensidade I percorrendo o eixo dos zz de baixo para cima e é dado por

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi\varepsilon_0 r^2}(-y, x, 0),$$

onde agora $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ é a coordenada cilíndrica radial e μ_0 é uma constante (dita a *permiabilidade magnética do vácuo*). Mostre que $\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{0}$ e que $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ em $E^3 \setminus \{x = y = 0\}$. Mostre ainda que se C é uma qualquer curva fechada que não contém qualquer ponto do eixo dos zz,

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \begin{cases} \mu_0 I \text{ se } C \text{ envolve o eixo dos } zz \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases}$$

e que se S é uma qualquer 2-variedade compacta que não contém qualquer ponto do eixo dos zz, então

$$\oiint_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, dV_2 = 0.$$

7. Uma *corrente eléctrica* é simplesmente um conjunto de cargas em movimento. Na aproximação em que a distribuição de carga eléctrica num dado instante é dada por uma densidade $\rho : E^3 \to \mathbb{R}$, define-se a *densidade de corrente eléctrica* como
$$\mathbf{j} = \rho \mathbf{v},$$
onde $\mathbf{v} : E^3 \to E^3$ é o campo vectorial (suposto de classe C^1) que em cada ponto indica a velocidade da carga eléctrica que ocupa esse ponto e nesse instante[1]. Mostre que se S é uma 2-variedade orientável e $\mathbf{n} : S \to E^3$ é uma normal unitária, então a carga eléctrica total que atravessa S na direcção de $\mathbf{n}$ por unidade de tempo é
$$I = \iint_S \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} \, dV_2.$$

8. Se $A \subset E^3$ é uma 3-variedade com bordo, a carga total contida em A no instante t é
$$Q(t) = \iiint \rho \, dV_3$$
e portanto para haver conservação da carga eléctrica devemos ter
$$\frac{dQ}{dt} = -\oiint_{\partial A} \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} \, dV_2$$
(onde $\mathbf{n}$ é a normal unitária exterior). Use este facto e o Lema da Localização para mostrar que ρ e $\mathbf{j}$ devem satisfazer a *equação da continuidade*
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0.$$

9. Se a distribuição de cargas não depende do tempo tem-se $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$. Mostre que neste caso se C é uma curva fechada e S é uma 2-variedade qualquer tal que $C = \partial S$, então
$$I = \iint_S \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} \, dV_2$$
está bem definida (i.e., não depende de S). I diz-se a *intensidade de corrente envolvida por* C.

10. Se baseados no caso da corrente ao longo do eixo dos zz admitirmos que o campo magnético criado por uma distribuição de corrente arbitrária $\mathbf{j}$ satisfaz
$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \mu_0 I;$$
$$\oiint_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, dV_2 = 0,$$
e que o campo magnético é de classe C^1, mostre que o Lema da Localização implica que
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} \text{ (Lei de Ampère);}$$
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \text{ (Lei de Gauss para o campo magnético).}$$
Estas são as *equações fundamentais da Magnetoestática*.

[1] Há aqui no entanto uma subtileza: na maior parte das correntes eléctricas produzidas artificialmente existem *duas* distribuições de carga eléctrica simétricas: uma negativa, formada pelos electrões livres que de facto se movem no fio, e outra positiva, formada por cargas imóveis. Deste modo existe corrente eléctrica mas a densidade de carga total do fio é nula.

11. Considere em circuito C que é transportado com velocidade constante $\mathbf{v}$ através de um campo magnetoestático $\mathbf{B}$. Devido à Lei de Lorentz, as cargas no circuito sofrem a acção de uma força cujo trabalho ao longo do circuito é

$$W = e\oint_C (\mathbf{v}\times\mathbf{B})\cdot d\mathbf{r}.$$

Mostre que

$$W = -e\frac{d\Phi}{dt}$$

onde Φ é o fluxo de $\mathbf{B}$ através de uma 2-variedade S qualquer tal que $\partial S = C$ (Φ está bem definido em virtude da Lei de Gauss para o campo magnético). (**Sugestão:** *Considere a superfície descrita por C no decorrer de um intervalo de tempo Δt, e faça depois $\Delta t \to 0$*).

12. Um observador inercial que se mova com a mesma velocidade $\mathbf{v}$ do circuito C da questão anterior vê este circuito em repouso, e é portanto forçado a atribuir a força exercida sobre as cargas de circuito a um campo eléctrico $\mathbf{E}$ tal que

$$\oint_C \mathbf{E}\cdot d\mathbf{r} = -\frac{d\Phi}{dt}, \tag{3}$$

onde do seu ponto de vista o fluxo Φ varia no tempo porque o campo magnético $\mathbf{B}$ varia no tempo.

13. Assuma que (3) é a lei correcta para campos electromagnéticos dependentes do tempo. Use o Lema da Localização para mostrar que

$$\nabla\times\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \text{ (Lei de Faraday).}$$

(Esta lei é de facto a correcta, e foi descoberta por Faraday não com base neste argumento teórico mas sim experimentalmente. É este o princípio usado nos dínamos para converter energia mecânica em energia eléctrica: movendo um íman nas proximidades de um circuito gera-se corrente. Na prática usam-se enrolamentos de fios com um grande número de espiras; porquê?).

14. Mostre que a Lei de Ampère requer que

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

e portanto só pode ser válida no regime estacionário, em que $\frac{\partial\rho}{\partial t} = 0$. Use a Lei de Gauss e a equação da continuidade para mostrar que no caso geral

$$\nabla\cdot\left(\mathbf{j} + \varepsilon_0\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}\right) = 0,$$

e que portanto as equações do campo electromagnético implicam a conservação da carga eléctrica se substituirmos a Lei de Ampére por

$$\nabla\times\mathbf{B} = \mu_0\,\mathbf{j} + \varepsilon_0\mu_0\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} = 0 \text{ (Lei de Ampère-Maxwell).}$$

(*O termo* $\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}$ *diz-se a* corrente de deslocamento, *e foi o único termo de facto introduzido por Maxwell nas equações do campo electromagnético, que são conhecidas, claro está, como as* equações de Maxwell).

15. Mostre que

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})\mathbf{b} - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})\mathbf{c},$$

e use esta identidade vectorial para mostrar que se $\mathbf{F} : E^3 \to E^3$ é um campo vectorial de classe C^2 então

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{F}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) - \nabla^2 \mathbf{F},$$

onde

$$\nabla^2 \mathbf{F} = (\nabla^2 F^1, \nabla^2 F^2, \nabla^2 F^3).$$

16. Use as equações de Maxwell e a identidade da questão anterior para mostrar que no vazio ($\rho = 0$, $\mathbf{j} = \mathbf{0}$) o campo electromagnético satisfaz

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mathbf{0};$$
$$\nabla^2 \mathbf{B} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = \mathbf{0}.$$

17. A equação

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

é conhecida como a *equação das ondas*. Mostre que se $\mathbf{n}$ é um vector unitário e $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ é uma função de classe C^2 então

$$u(\mathbf{x}, t) = f(\mathbf{x} \cdot \mathbf{n} - ct)$$

é uma solução desta equação, onde $\mathbf{x} = (x, y, z)$. Esta função representa uma onda plana movendo-se na direcção $\mathbf{n}$ com velocidade c.

Portanto as equações de Maxwell prevêm a existência de *ondas electromagnéticas* propagando-se com velocidade

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}.$$

Quando Maxwell substitui ε_0, μ_0 pelos seus valores numéricos (determinados experimentalmente), obteve para c (para sua surpresa) o valor da velocidade da luz no vácuo (que já fora medido experimentalmente). Daqui concluiu imediatamente que a luz era uma onda electromagnética.