9 – Eletromagnetismo

História e Epistemologia da Física

Antecedentes

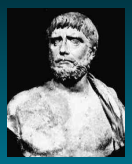
- Egípcios: teriam algum entendimento dos fenômenos elétricos observando relâmpagos e interagindo com peixes elétricos?
- lâmpada de Dendera

Antecedentes

- na Antiguidade, os indianos já sabiam que certos cristais, quando aquecidos, atraíam cinzas, atribuindo ao fenômeno causas sobrenaturais

Antecedentes

- Tales (c. 600 a.C.) teria sido o primeiro a estudar a eletricidade e o magnetismo
- procurava descrever o efeito eletrostático do âmbar (ἤλεκτρον - *eléktron*):
  - ao se esfregar âmbar com pele de carneiro, observou que penas eram atraídas



Antecedentes

- há bactérias que fabricam cristais de magnetita (Fe_3O_4) ou greigita (Fe3S4), materiais com propriedades magnéticas, e orientam seus movimentos pelo campo magnético terrestre
- as vacas e os carneiros alinham-se no eixo norte-sul magnético local
- China, séc. 4 a.C., Livro do Mestre do Vale do Demônio: “A magnetita atrai o ferro”

Antecedentes

- os fenômenos permaneceram através dos tempos apenas como curiosidade.

Lendas

- haveria uma montanha magnética no pólo, onde os navios jamais chegariam porque a força de atração removeria todos os pregos do navio
- o magnetismo poderia ser destruído pelo contato com o alho

Lendas

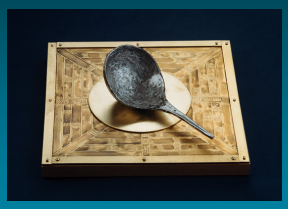
- os ímãs podiam ser usados para denunciar esposas infiéis
- haveriam rochas que atrairiam carne, madeira ou ouro

Lendas

- Magnes teria tido os pregos de sua sandália atraídos pela pedra enquanto pastoreava no monte Ida (Creta)
- magnetita: por ter vindo da região conhecida como Magnésia, na Tessália (Grécia) (terra de Jasão, Aquiles e ... Vangelis)

Bússola

- 'sapos', 'peixes', 'tartarugas', colheres e agulhas eram usados na Geomancia e no Feng Shui como indicadores de direção



Bússola

- *"Quando o povo de Cheng sai em busca de jade, eles carregam um 'apontador para o sul' com eles para não se perderem"*
- 2634 a.C.: imperador Huang Ti inventa um carro para guiar suas tropas

Bússola

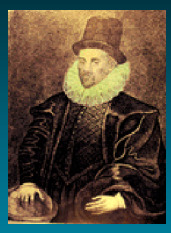
- séc. 12: chineses já usavam a bússola de magnetita para navegação
- Shen Kuo (1031-1095) escreveu sobre a bússola de agulha magnética e maior acurácia da navegação empregando o conceito astronômico de Norte Verdadeiro
- depois de Shen Kuo, Alexander Neckham foi o primeiro na Europa a descrever (1187) a bússola e seu uso na navegação

Gerolamo Cardano (1501-1576)

Cardano

- (Jerôme Cardan, Hieronymus Cardanus, Dzhirolamo Kardano, etc.)
- iniciou a teoria das equações algébricas
- primeiro a descrever clinicamente a febre tifóide
- publicou (apropriou-se de) o método de Scipione del Ferro e Tartaglia p/ resolver a equação cúbica
- 1550: discutiu em seu livro *De Subtilitate* as diferenças entre forças elétricas e forças magnéticas.

William Gilbert (1544-1603)

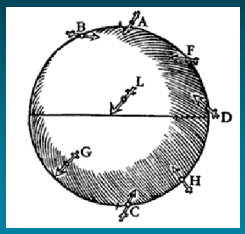


Gilbert

- médico inglês de Elizabeth I e James I e filósofo natural
- pesquisou eletricidade e magnetismo
- cunhou o termo 'eletricidade'

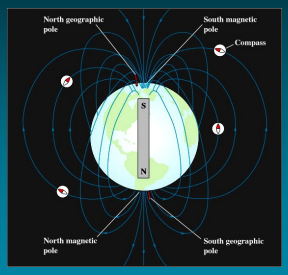
Gilbert

- 1600: *De Magnete*
- experiências c/ modelo *terrela* (esfera magnetizada)



Gilbert

- Terra era um magneto
  - ⇒ atraía bússolas
- antes acreditava-se que era devido à estrela Polar ou a uma grande ilha magnética no pólo Norte



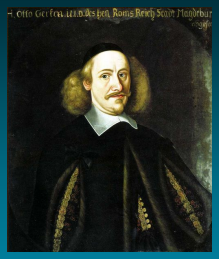
Gilbert

- estudou eletricidade estática com âmbar (**elektron**) atritado
  ⇒ 'força elétrica'
- acreditava que eletricidade e magnetismo eram coisas diferentes, principalmente porque a eletricidade desaparecia com o aquecimento e o magnetismo não (**errado!**) (vide ponto de Curie)

Gilbert

- acreditava que o magnetismo era a força que Kepler e outros tinham observado governando os movimentos dos astros
- apontou que o movimento das estrelas se devia à rotação da Terra e não às 'esferas celestes' 20 anos antes de Galileu

Otto von Guericke (1602 - 1686)

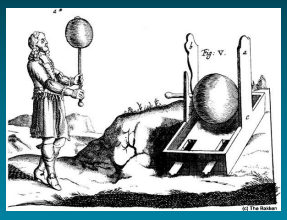


Otto von Guericke

- prefeito da cidade de Magdeburgo,
- conhecido pela demonstração de 1654
- 16 cavalos não separam os hemisférios unidos apenas pela pressão atmosférica

Otto von Guericke

- 1660: *Elektrisiermaschine*: a primeira máquina eletrostática
- tocou a esfera de enxofre girada em alta velocidade com uma luva girada, eletrizando-a



Otto von Guericke

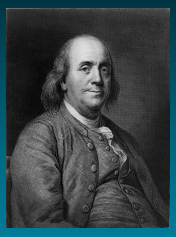
- observou atração, repulsão, centelhas e ruído de descarga
- conclui que a eletricidade podia passar de um corpo para o outro
- demonstrou que atrações elétricas e magnéticas propagavam-se no vácuo

Charles François de Cisternay du Fay (Paris, 1698-1739)

du Fay

- 1733: dois tipos de “fluido” elétrico: “vítreo” (positivo) e “resinoso“ (negativo)
  (depois contestado por Franklin)
- identificou a diferença entre isolantes e condutores
  (contrariando Stephen Gray, que acreditava que as propriedades elétricas dos corpos dependiam das suas cores)

Benjamin Franklin (1706-1790)

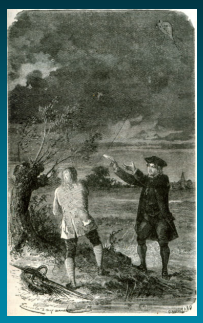


Franklin

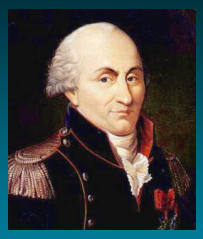
- foi tipógrafo, jornalista, editor, autor de auto-ajuda, filantropo, ao mesmo tempo calvinista e iluminista, abolicionista, diplomata, um dos líderes da Revolução Americana, primeiro ministro dos correios, metereologista, inventor e cientista

Franklin

- propôs a famosa experiência
- só há um “tipo” de eletricidade em quantidades diferentes: positiva e negativa
- propôs o Princípio de Conservação da Carga Elétrica



Charles-Augustin de Coulomb (1736–1806)



Coulomb

- físico e engenheiro militar francês
- trabalhou na reconstrução do Forte Bourbon (Martinica): estudou a resistência dos muros de sustentação inspirado pelas idéias sobre a fricção de Pieter van Musschenbroek
- participou da definição de padrões de pesos e medidas do governo revolucionário francês (1788)

Coulomb

- publicou trabalhos sobre o atrito e sobre a viscosidade
- descobriu a relação inversa entre a força entre cargas elétricas e o quadrado da sua separação (Lei de Coulomb)

Força elétrica

- Lei de Coulomb
- forma semelhante à da força gravitacional

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{qQ}{r^2}\hat{r}$$

Michael Faraday (1791–1867)

Faraday

- químico e físico inglês
- era um devoto cristão da igreja Sandemaniana
- foi aprendiz de tipografia, onde leu muitos livros, especialmente sobre eletricidade
- descobriu o benzeno e três cloretos de carbono
- inventou o predecessor do bico de Bunsen
- inventou o número de oxidação
- liquefez vários gases

Faraday

- aos vinte anos, assistiu a palestras de Humphry Davy.
- enviou suas notas das palestras, encadernadas
  - ⇒ Davy o contratou como assistente porque ficou quase cego num acidente de laboratório
- viajou como assistente e criado com Davy: quase desistiu de tudo mas teve contato com um mundo de informações científicas

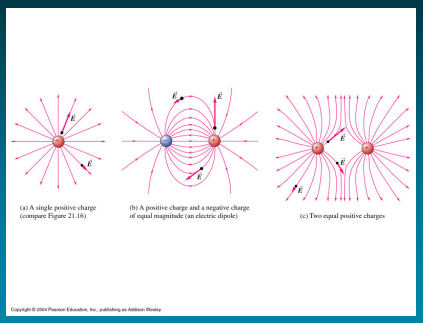
Faraday

- contribui com as leis da eletrólise
- popularizou os termos eletrodo, cátodo, ânodo e íon
- precisou o conceito de quantidade de eletricidade

Faraday

- descobriu
  - a indução eletromagnética,
  - o diamagnetismo e
  - a eletrólise
- concebeu as linhas de campo
- inventou o primeiro motor elétrico e o dínamo
- estabeleceu que o magnetismo pode afetar a propagação dos raios de luz

Campo elétrico



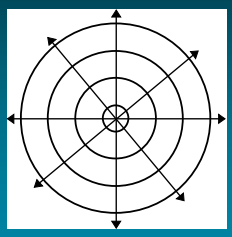
Campo elétrico

- campo: função definida no espaço
- região do espaço onde se sente uma influência
- detectável com uma carga de prova

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{Q}{r^2}\hat{r}$$

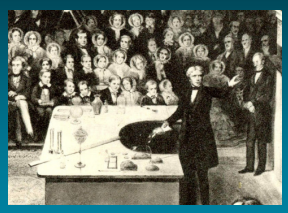
Linhas de força

- linhas de força: tangentes ao campo em cada ponto
- superfícies equipotenciais: onde o campo tem o mesmo valor em módulo
- ortogonais às linhas de força

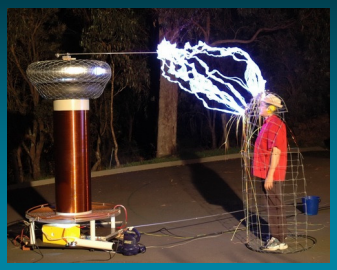


Faraday

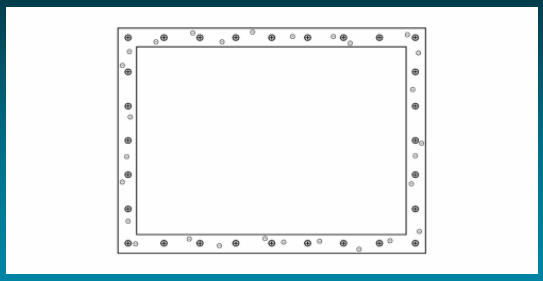
- foi admitido na *Royal Society* em 1824
- rejeitou um título de nobreza e a Presidência da *Royal Society*
- instituiu as **palestras de natal** enquanto diretor da *Royal Institution*
- apesar da pouca instrução, é considerado o melhor experimentalista da história



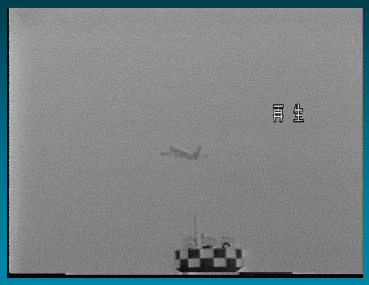
Gaiola de Faraday



Gaiola de Faraday



Gaiola de Faraday



Johann Carl Friedrich Gauß (1777-1855)

Gauss

- deu à eletricidade e ao magnetismo o seu primeiro sistema de unidades
- autor do famoso teorema

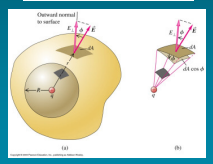
Unidades

- Corrente: Ampére
- Q: C ≡ As
- E: N/C
- B: Tesla ≡ $NA^{-1}m^{-1}$
- V: Volt ≡ Nm/C
- R: Ohm ≡ $NA^{-1}m/C$
- $\mu_0/4\pi=10^{-7}NA^{-2}$
- $\varepsilon_0=1/c\ \mu 0$
- $=8{,}85\times10^{-12}C^2N^{-1}m^{-2}$

Lei de Gauss

- o fluxo total do campo elétrico através de qualquer superfície fechada é dado pela carga contida no seu interior

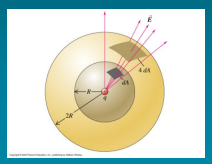
$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}4\pi r^2 = \frac{q}{\varepsilon_0}$$



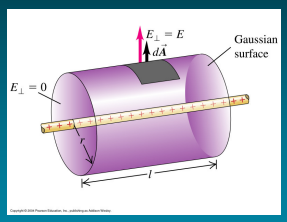
Campo de distribuição esférica

- distribuição esfericamente simétrica.
- no exterior, campo igual ao de uma carga puntual situada na origem.
- no interior, só a carga interior é relevante.

$$\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{S} = E4\pi r^2 = \frac{Q_{tot}}{\varepsilon_0} \Rightarrow E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q_{tot}}{r^2}$$

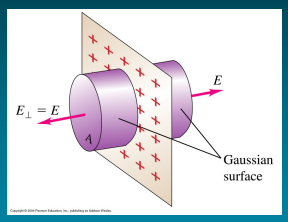


Campo gerado por um fio infinito



$$\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{S} = E2\pi rL = \frac{Q_{tot}}{\varepsilon_0} = \frac{\lambda L}{\varepsilon_0} \Rightarrow E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{\lambda}{r}$$

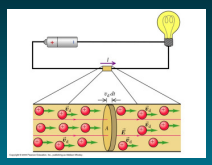
Campo gerado por superfície



$$\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{S} = E2\pi r^2 = \frac{Q_{tot}}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma\pi r^2}{\varepsilon_0} \Rightarrow E = \frac{1}{2\varepsilon_0}\sigma$$

Corrente elétrica

Corrente elétrica



$$\vec{J} = Nq\vec{v}$$
$$I = \int \vec{J} \cdot d\vec{S} = \frac{dQ}{dt} \Rightarrow Q = \int_0^t I dt$$

- num condutor são os elétrons livres que transportam a corrente
- sentido convencional da corrente **oposto** ao movimento dos elétrons
- vetor densidade de corrente

Garrafa de Leyden

- Von Kleist e Van Musscchenbroek independentemente em 1746 desenvolvem a garrafa de Leyden (primeiro capacitor), melhor do que as peles de gato para experiências elétricas

'Bateria' de Bagdá

- encontrada no Iraque em 1938
- seria a 1ª bateria elétrica (sec. III a.C.?)

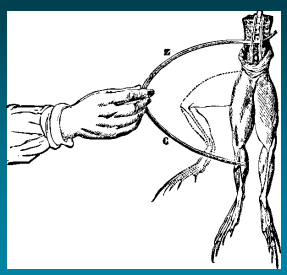
Concepções Alternativas

- eletricidade é um fluido
- bateria é um recipiente
- dois tipos de eletricidade saem um da cada pólo e se encontram na lâmpada
- cada elétron percorre todo o circuito de um pólo ao outro
- a corrente se desgasta ao passar por uma resistência

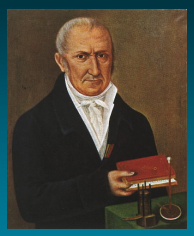
Luigi Galvani (1737-1798)

Galvani

- arcos bimetálicos provocavam espasmos em pernas de rã (1783)
- acreditou que eletricidade (animal) provinha do músculo



Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (1745-1827)



Volta

- associado de Galvani
- desenvolveu as células voltaicas, predecessoras da pilha elétrica (1800)

Georg Simon Ohm (1789-1854)

Ohm

- fez a relação entre a corrente elétrica num circuito e a diferença de potencial (voltagem) da pilha.

Lei de Ohm

- s: condutividade
- R: resistência
- Energia transformada em calor num fio (efeito Joule)

$$\vec{J} = \sigma\vec{E}$$
$$I = AJ = A\sigma E$$
$$El = V$$
$$\Rightarrow V = RI$$
$$R = l / \sigma A$$
$$E = VI = RI^2$$

Eletromagnetismo

Antecedentes

- marinheiros já haviam observado que um relâmpago perturbava a agulha da bússola
- Romagnosi, filósofo, economista e jurista italiano, publicou em 1802, num jornal italiano, a sugestão de uma relação entre eletricidade e magnetismo

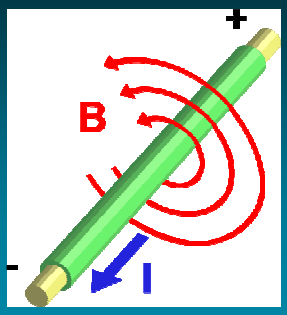
André-Marie Ampère (1775–1836)

Ampère

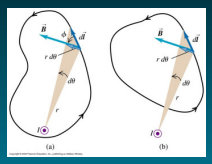
- físico francês
- disse que aos 18 anos sabia tanta Matemática quanto jamais soube
- 18 anos: os três pontos altos da vida:
  - a 1ª comunhão,
  - a leitura do "*Eulogy of Descartes*", de Thomas e
  - a Tomada da Bastilha (França)

Ampère

- desenvolveu a observação de Ørsted: corrente elétrica gera campo magnético
- construiu o primeiro galvanômetro



Lei de Ampère

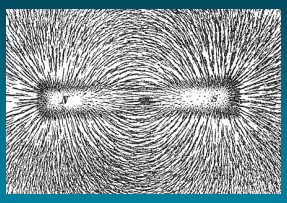


$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{int}}$$

- circulação do campo magnético
- corrente produz campo magnético

Campo magnético

- um magneto comporta-se como um dipolo
- tem sempre dois pólos

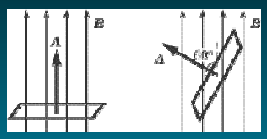


Campo magnético

- não há cargas magnéticas isoladas (monopolos)

$$\Phi_B = \int_{S_{fech}} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Lei de Faraday



$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$$

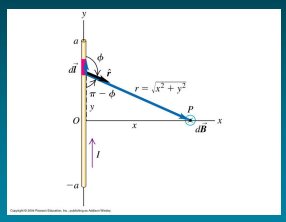
- circulação do campo elétrico
- variação do campo magnético produz campo elétrico

Lei de Biot-Savart

- campo magnético gerado por uma corrente elétrica

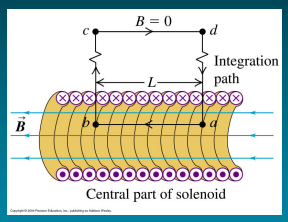
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I}{r^2} \hat{I} \times \hat{r} dx$$

Campo devido a um fio



$$\hat{I} \times \hat{r} = \operatorname{sen}\theta$$
$$r^2 = d^2 + x^2$$
$$\operatorname{sen}\theta = d/r$$
$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{I}{r^2} \frac{d}{r} dx$$
$$\Rightarrow \quad = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Id}{(d^2 + x^2)^{3/2}} dx$$
$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{d}$$
$$\Rightarrow \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{d} \hat{e}_\perp$$

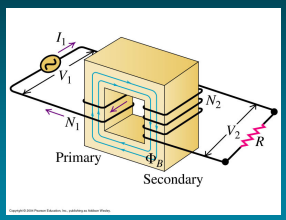
Campo gerado por solenóide



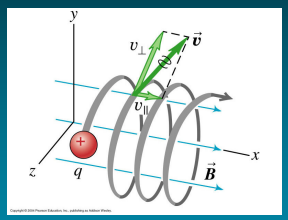
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{int}}$$
$$\Rightarrow \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 NI$$
$$\Rightarrow \begin{cases} \vec{B}_{ext} = 0 \\ B_{\text{int}} l = \mu_0 NI \end{cases}$$

Transformador

- 'transforma' uma voltagem em outra

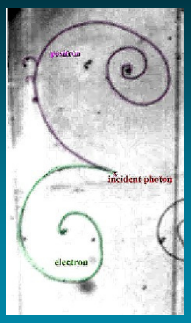


Força de Lorentz

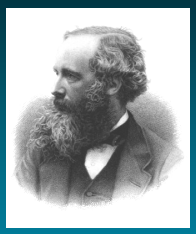


$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$
$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$
$$\Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$$

Criação de pares

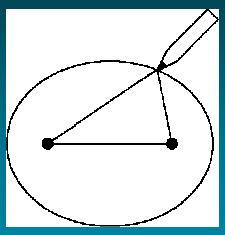


James Clerk Maxwell (1831–1879)



Maxwell

- matemático e físico escocês
- devoto cristão
- aos 14 publicou na *Royal Society* um artigo sobre o desenho de curvas geométricas com cordel



Maxwell

- 1859: demonstrou que os anéis de Saturno não podiam ser líquidos nem sólidos
- 1861: foi eleito para a *Royal Society*
- 1864: apresentou as famosas equações

Equações de Maxwell

- unificam e completam
  - Lei de Faraday
  - Lei de Ampére
  - Lei de Gauss

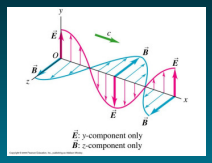
$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 4\pi\rho$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 4\pi\vec{j} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

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

Ondas Eletromagnéticas



$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

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

- equações de Maxwell ⇒ equação de onda
- velocidade de propagação igual à velocidade da luz
  - Þ luz: onda eletromagnética

Maxwell

- obteve a distribuição que descreve estatisticamente os gases
- tirou a primeira fotografia colorida usando filtros de um tartan (xadrez escocês)
- recebeu medalha por seu trabalho no daltonismo

Referências

Referências

- GOTTSCHALL, Carlos Antonio Mascia. *Do mito ao pensamento científico: A busca da realidade, de Tales a Einstein*. São Paulo : Atheneu, 2004.

Referências

- LÉVY-LEBLOND, Jean-Marc, *A Electricidade e o Electromagnetismo em Perguntas*, Gradiva, Lisboa, 1991.
- SCHRÖDINGER, Erwin, *O Que é a Vida?*, Ed. Fragmentos, Lisboa, 1989, cap. VI, "O Mistério das Qualidades Sensoriais"
- BACHELARD, Gaston, *O Novo Espírito Científico*, Edições 70, Lisboa, 1996.

Referências

- CHAIB & ASSIS. Apresentação distorcida da obra de Ampère nos livros didáticos. In *Anais do X EPEF*, 2006. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/x/sys/resumos/T0023-1.pdf>
- SILVA & PIMENTEL. Benjamin Franklin e a História da Eletricidade em livros didáticos. In *Anais do X EPEF*, 2006. Disponível em <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epef/x/sys/resumos/T0150-1.pdf>

Referências

- http://portal.cbpf.br/index.php?page=GruposPesquisa.Apresentacao&grupo=33
- BEGALL, Sabine. *Magnetic alignment in grazing and resting cattle and deer*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, v. 105, n. 36, pp. 13451–13455, 9 set. 2008. Disponível em <http://www.pnas.org/content/early/2008/08/22/0803650105.full.pdf>. Acesso: 26 ago. 2008.

Referências

- http://pt.wikipedia.org/wiki/História_da_electricidade
- http://pt.wikipedia.org/wiki/Eletricidade
- http://pt.wikipedia.org/wiki/Electrostática
- http://pt.wikipedia.org/wiki/Magnetismo
- http://pt.wikipedia.org/wiki/Magnetostática