

Eletricidade e Magnetismo

De Gilbert à Faraday e Maxwell

Victor O. Rivelles

Instituto de Física da Universidade de São Paulo

e-mail: rivelles@fma.if.usp.br

<http://www.fma.if.usp.br/~rivelles>

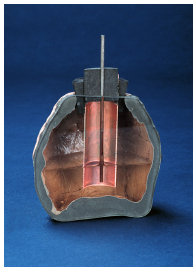
Convite à Física, 22/08/07

Introdução

- A eletricidade e o magnetismo eram conhecidos desde a antiguidade.

Introdução

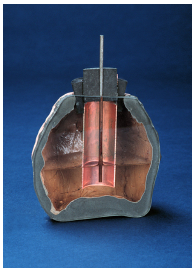
- A eletricidade e o magnetismo eram conhecidos desde a antiguidade.



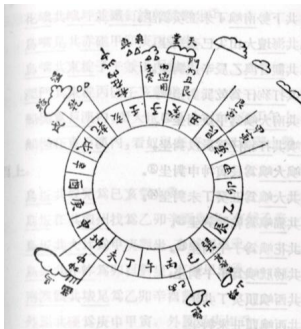
A bateria de Bagdá

Introdução

- A eletricidade e o magnetismo eram conhecidos desde a antiguidade.



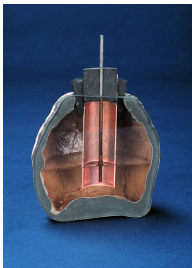
A bateria de Bagdá



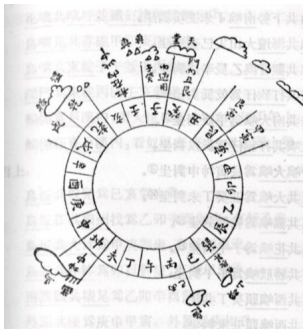
Bússola chinesa

Introdução

- A eletricidade e o magnetismo eram conhecidos desde a antiguidade.



A bateria de Bagdá



Bússola chinesa

- Porém, uma **compreensão sistemática** só começou cerca de 4 séculos atrás!

William Gilbert

- Estudou a eletricidade estática e o magnetismo em 1600.



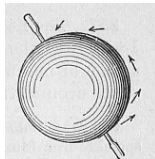
William Gilbert

- Estudou a eletricidade estática e o magnetismo em 1600.
- Usava um pedaço de ambar (em grego: **elektron**).



William Gilbert

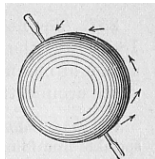
- Estudou a eletricidade estática e o magnetismo em 1600.
- Usava um pedaço de ambar (em grego: **elektron**).
- Concluiu que a Terra é um imenso imã e por isso a agulha de uma bússola aponta para o Norte.



Terrella

William Gilbert

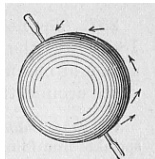
- Estudou a eletricidade estática e o magnetismo em 1600.
- Usava um pedaço de ambar (em grego: **elektron**).
- Concluiu que a Terra é um imenso imã e por isso a agulha de uma bússola aponta para o Norte.
- O campo magnético da Terra numa erupção solar



Terrella

William Gilbert

- Estudou a eletricidade estática e o magnetismo em 1600.
- Usava um pedaço de âmbar (em grego: **elektron**).
- Concluiu que a Terra é um imenso ímã e por isso a agulha de uma bússola aponta para o Norte.
- O campo magnético da Terra numa erupção solar
- Enorme influência sobre Kepler e Newton.



Terrella

Benjamin Franklin

- Dois tipos de eletricidade eram conhecidas (dois fluídos):

Eletricidade vítrea

Eletricidade resinosa



Benjamin Franklin

- Dois tipos de eletricidade eram conhecidas (dois fluídos):
 - Eletricidade vítrea
 - Eletricidade resinosa
- Franklin propôs que as duas formas de eletricidade eram devidas a um único fluído:
 - Matéria com pouco fluído elétrico: carregado **positivamente** – **vítrea**
 - Com excesso de fluído elétrico: carregado **negativamente** – **resinosa**



Benjamin Franklin

- Dois tipos de eletricidade eram conhecidas (dois fluídos):
 - Eletricidade vítrea
 - Eletricidade resinosa
- Franklin propôs que as duas formas de eletricidade eram devidas a um único fluído:
 - Matéria com pouco fluído elétrico: carregado **positivamente** – **vítrea**
 - Com excesso de fluído elétrico: carregado **negativamente** – **resinosa**
- Descobriu o princípio da conservação da carga elétrica!



Benjamin Franklin

- Dois tipos de eletricidade eram conhecidas (dois fluídos):
 - Eletricidade vítrea
 - Eletricidade resinosa
- Franklin propôs que as duas formas de eletricidade eram devidas a um único fluído:
 - Matéria com pouco fluído elétrico: carregado **positivamente** – **vítrea**
 - Com excesso de fluído elétrico: carregado **negativamente** – **resinosa**
- Descobriu o princípio da conservação da carga elétrica!
- Raio numa tempestade é composto de eletricidade: invenção do pára-raios.



Benjamin Franklin

- Dois tipos de eletricidade eram conhecidas (dois fluídos):
 - Eletricidade vítrea
 - Eletricidade resinosa
- Franklin propôs que as duas formas de eletricidade eram devidas a um único fluído:
 - Matéria com pouco fluído elétrico: carregado **positivamente** – vítrea
 - Com excesso de fluído elétrico: carregado **negativamente** – resinosa
- Descobriu o princípio da conservação da carga elétrica!
- Raio numa tempestade é composto de eletricidade: invenção do pára-raios.
- Eletroscópio



Lei de Coulomb

- Início do estudo quantitativo da eletricidade e magnetismo.

Lei de Coulomb

- Início do estudo quantitativo da eletricidade e magnetismo.
- **Lei de Coulomb:** A força produzida por duas cargas é diretamente proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas.

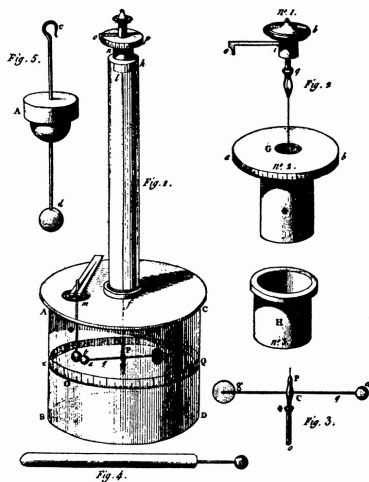
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Lei de Coulomb

- Início do estudo quantitativo da eletricidade e magnetismo.
- **Lei de Coulomb:** A força produzida por duas cargas é diretamente proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

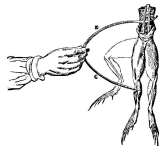
- Balança de torção:



Galvani e Volta

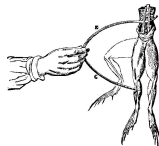
- LUIGI GALVANI

Galvani e Volta



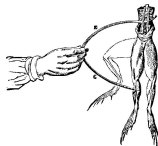
- **LUIGI GALVANI**
- Bisturi eletricamente carregado faz a perna de uma rã [mover-se.](#)
- Eletricidade animal, hoje: bioeletricidade.

Galvani e Volta



- **LUIGI GALVANI**
- Bisturi eletricamente carregado faz a perna de uma rã [mover-se.](#)
- Eletricidade animal, hoje: bioeletricidade.
- **ALESSANDRO VOLTA**

Galvani e Volta

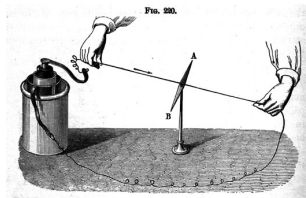


- **LUIGI GALVANI**
- Bisturi eletricamente carregado faz a perna de uma rã [mover-se.](#)
- Eletricidade animal, hoje: bioeletricidade.
- **ALESSANDRO VOLTA**
- [Pilha Voltaíca](#): zinco e cobre, e cartão de papel embebido em salmoura.
- Corrente elétrica.



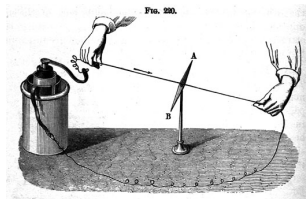
Ørsted e Ampère

- **Hans Christian Ørsted**
- Descobriu que quando ligava e desligava uma bateria a agulha de uma bússola próxima era defletida.
- Isto é o que ele observou.



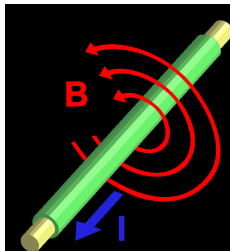
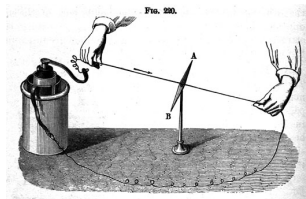
Ørsted e Ampère

- **Hans Christian Ørsted**
- Descobriu que quando ligava e desligava uma bateria a agulha de uma bússola próxima era defletida.
- Isto é o que ele observou.
- O campo magnético é irradiado por um fio que transporta uma corrente elétrica: relação entre eletricidade e magnetismo!
- A força **não** atua na linha que liga o fio à bússola!



Ørsted e Ampère

- **Hans Christian Ørsted**
- Descobriu que quando ligava e desligava uma bateria a agulha de uma bússola próxima era defletida.
- Isto é o que ele observou.
- O campo magnético é irradiado por um fio que transporta uma corrente elétrica: relação entre eletricidade e magnetismo!
- A força **não** atua na linha que liga o fio à bússola!
- **André-Marie Ampère**
- Lei de Ampère: $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$



Michael Faraday

- Fez enormes e importantes descobertas sobre o eletromagnetismo.

Michael Faraday

- Fez enormes e importantes descobertas sobre o eletromagnetismo.
- Lei de Faraday: campo magnético que varia com o tempo produz uma força eletromotriz: $\epsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$



Figure 1

Michael Faraday

- Fez enormes e importantes descobertas sobre o eletromagnetismo.
- Lei de Faraday: campo magnético que varia com o tempo produz uma força eletromotriz: $\epsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$
- Construiu o primeiro dínamo.



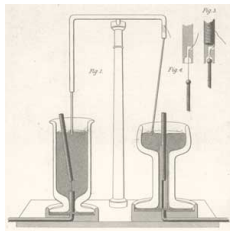
Figure 1

Michael Faraday

- Fez enormes e importantes descobertas sobre o eletromagnetismo.
- Lei de Faraday: campo magnético que varia com o tempo produz uma força eletromotriz: $\epsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$
- Construiu o primeiro dínamo.
- E também o motor elétrico! Variações: motor homopolar, ou outro motor homopolar, ou carrinho homopolar.



Figure 1

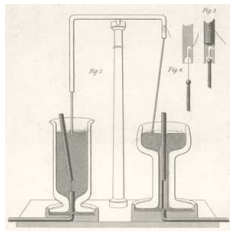


Michael Faraday

- Fez enormes e importantes descobertas sobre o eletromagnetismo.
- Lei de Faraday: campo magnético que varia com o tempo produz uma força eletromotriz: $\epsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$
- Construiu o primeiro dínamo.
- E também o motor elétrico! Variações: motor homopolar, ou outro motor homopolar, ou carrinho homopolar.
- A divisão entre os vários tipos de eletricidade (estática, corrente e animal) era ilusória.

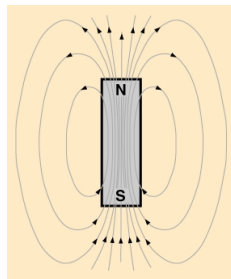
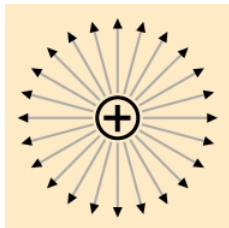


Figure 1



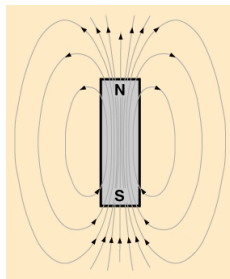
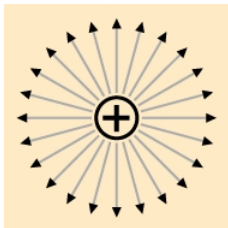
Michael Faraday

- Linhas de força elétrica e magnética eram essenciais para Faraday.



Michael Faraday

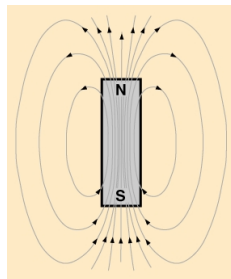
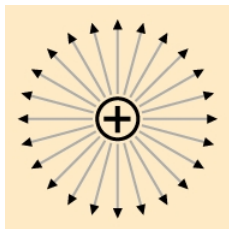
- Linhas de força elétrica e magnética eram essenciais para Faraday.



- Os campos elétrico e magnético não representam apenas as linhas de força, mas tem **existência física** pois armazenam energia.

Michael Faraday

- Linhas de força elétrica e magnética eram essenciais para Faraday.



- Os campos elétrico e magnético não representam apenas as linhas de força, mas tem **existência física** pois armazenam energia.
- [Canhão de Gauss](#)

James Clerk Maxwell

- Sintetizou todo o conhecimento do eletromagnetismo num conjunto de equações: as equações de Maxwell.

AND GOD SAID,"

$$\nabla \times \bar{\mathbf{E}} = -\mu \frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial \tau}$$

$$\nabla \times \bar{\mathbf{H}} = \mathbf{J}_c + \epsilon \frac{\partial \bar{\mathbf{E}}}{\partial \tau}$$

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{D}} = \rho_v$$

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

LET THERE BE
LIGHT."

James Clerk Maxwell

- Sintetizou todo o conhecimento do eletromagnetismo num conjunto de equações: as equações de Maxwell.
- As eqs. de Maxwell possuem soluções oscilantes, que se propagam com velocidade $1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ cujo valor numérico coincide com a velocidade da luz no vácuo.

AND GOD SAID,"

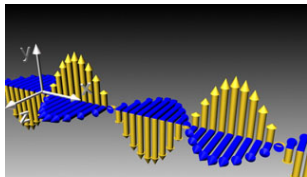
$$\nabla \times \bar{E} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial \tau}$$

$$\nabla \times \bar{H} = \mathbf{J}_c + \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial \tau}$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho_v$$

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

LET THERE BE
LIGHT."



James Clerk Maxwell

- Sintetizou todo o conhecimento do eletromagnetismo num conjunto de equações: as equações de Maxwell.
- As eqs. de Maxwell possuem soluções oscilantes. que se propagam com velocidade $1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ cujo valor numérico coincide com a velocidade da luz no vácuo.
- A luz é uma onda EM!

AND GOD SAID,"

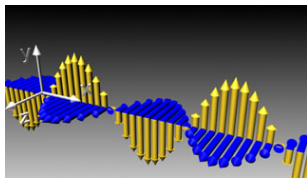
$$\nabla \times \bar{E} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial \tau}$$

$$\nabla \times \bar{H} = \mathbf{J}_c + \epsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial \tau}$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho_v$$

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

LET THERE BE
LIGHT."



James Clerk Maxwell

- Sintetizou todo o conhecimento do eletromagnetismo num conjunto de equações: as equações de Maxwell.
- As eqs. de Maxwell possuem soluções oscilantes. que se propagam com velocidade $1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ cujo valor numérico coincide com a velocidade da luz no vácuo.
- A luz é uma onda EM!
- Para produzir tais ondas era necessário fazer cargas elétricas oscilarem com frequência muito alta ($\sim 10^{15} \text{s}^{-1}$): não havia como testar se a luz era uma onda EM!

AND GOD SAID,"

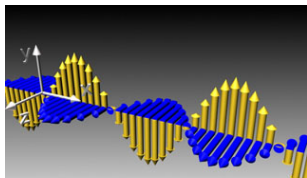
$$\nabla \times \bar{\mathbf{E}} = -\mu \frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial \tau}$$

$$\nabla \times \bar{\mathbf{H}} = \mathbf{J}_c + \epsilon \frac{\partial \bar{\mathbf{E}}}{\partial \tau}$$

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{D}} = \rho_v$$

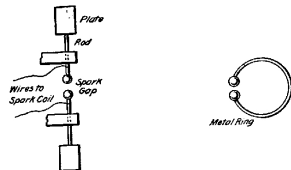
$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{B}} = 0$$

LET THERE BE
LIGHT."



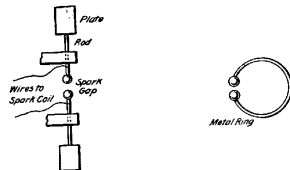
Heinrich Hertz

- Hertz construiu um centelhador para produzir ondas de frequência $\sim 10^9 \text{ s}^{-1}$.



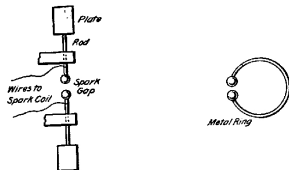
Heinrich Hertz

- Hertz construiu um centelhador para produzir ondas de frequência $\sim 10^9 \text{ s}^{-1}$.
- As ondas produzidas tinham todas as propriedades da luz: reflexão, refração, interferência, polarização,... exceto ser visível!



Heinrich Hertz

- Hertz construiu um centelhador para produzir ondas de frequência $\sim 10^9 \text{ s}^{-1}$.
- As ondas produzidas tinham todas as propriedades da luz: reflexão, refração, interferência, polarização,... exceto ser visível!
- Este foi o teste decisivo de que a luz é radiação eletromagnética!



<http://www.fma.if.usp.br/~rivelles>