

Eletrromagnetismo Avançado

7600035

Aula de 18 de agosto

Programa

1. Leis de conservação

2. Ondas eletromagnéticas

- a) Propagação em uma dimensão
- b) Propagação no vácuo
- c) Em meios materiais
- d) Absorção e dispersão
- e) Guias de ondas
- f) Cavidades

3. Potenciais eletrodinâmicos

- a) Formalismo
- b) Distribuídos no espaço e no tempo
- c) Potenciais de uma carga em movimento

Programa

4. Radiação

- a) Dipolo
- b) Carga pontual

5. Relatividade

- a) Espaço-tempo
- b) Mecânica relativística
- c) Eletrodinâmica relativística

Critérios de aprovação

1. Principal (0.8)

A. 4 provas (sub)

B. 1 projeto (grupo)

2. Complementar (0.2)

4 Listas, com 5 exercícios * (sub)

Critérios de aprovação

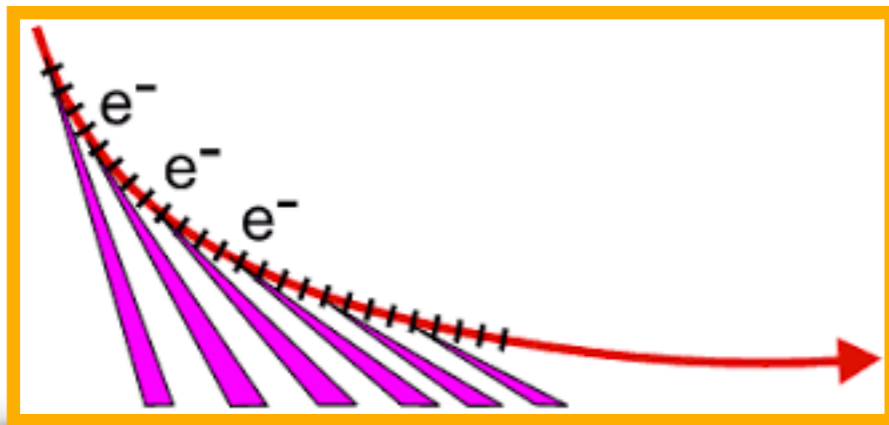
A) Provas

1. 24 setembro
2. 22 outubro
3. 19 novembro
4. 17 dezembro

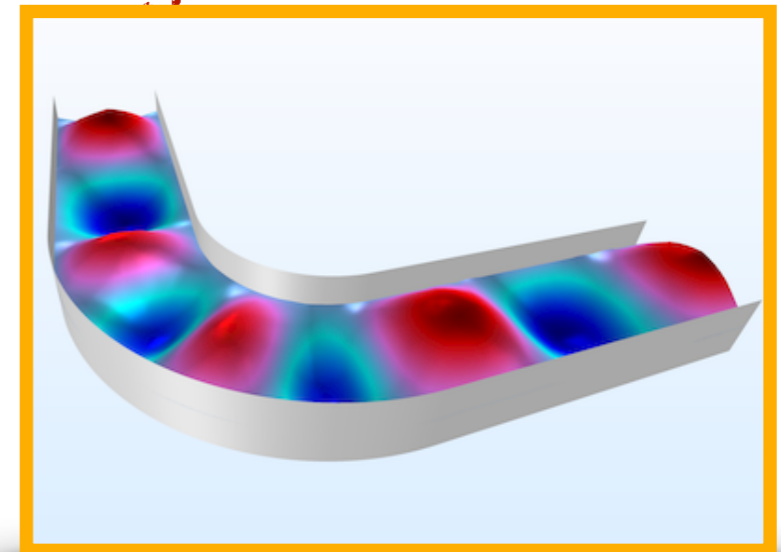
Critérios de aprovação

B. Exemplos de projetos

1. Radiação emitida por uma linha síncrotron



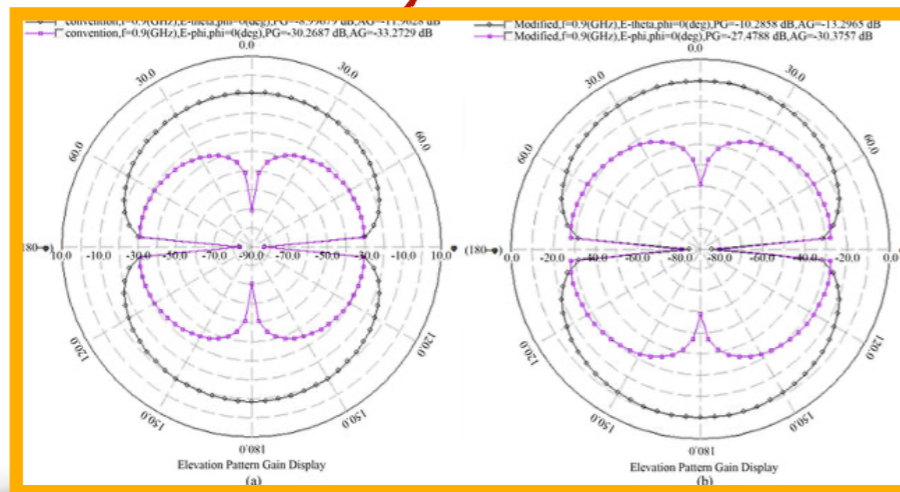
2. Campo eletromagnético em uma guia de ondas



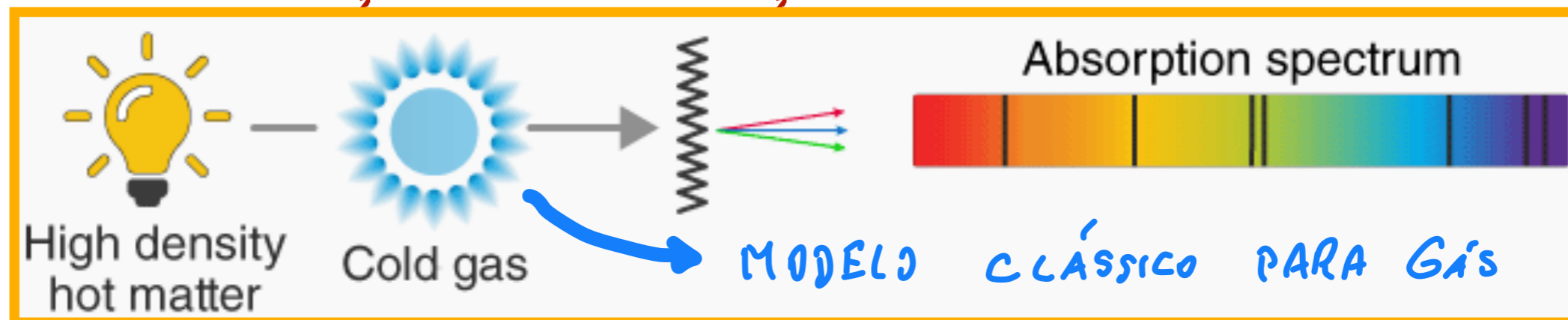
Critérios de aprovação

B. Exemplos de projetos

3. Radiação emitida por uma antena



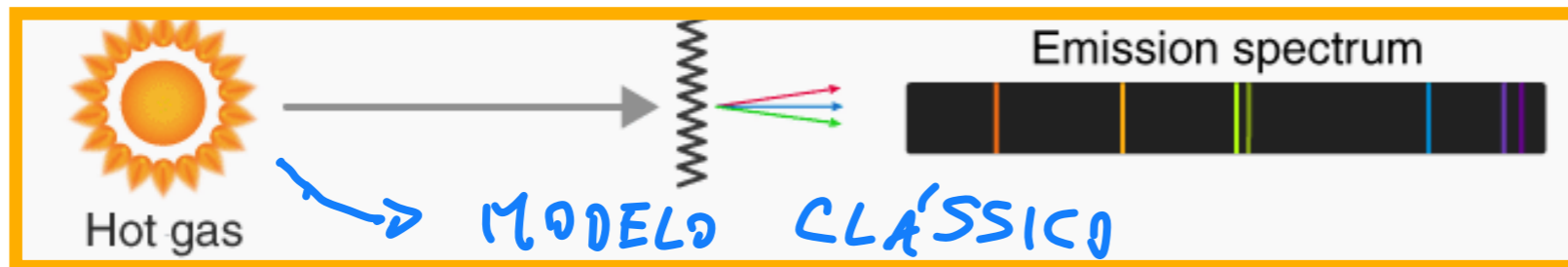
4. Absorção de radiação



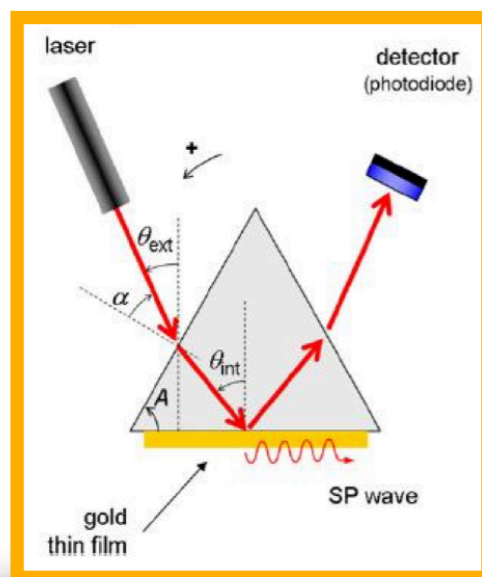
Critérios de aprovação

B. Exemplos de projetos

5. Emissão de radiação



6. Plasmônica



Critérios de aprovação

B) Projetos – definição

Até 31 agosto

Formação de grupos

Escolha dos projetos: 1º setembro

Critérios de aprovação

B) Projetos – acompanhamento

1. 24 setembro

Proposta < 3 páginas

2. 22 outubro

Apresentação oral < 10 minutos + discussão

3. 19 novembro

Relatório < 5 páginas + discussão

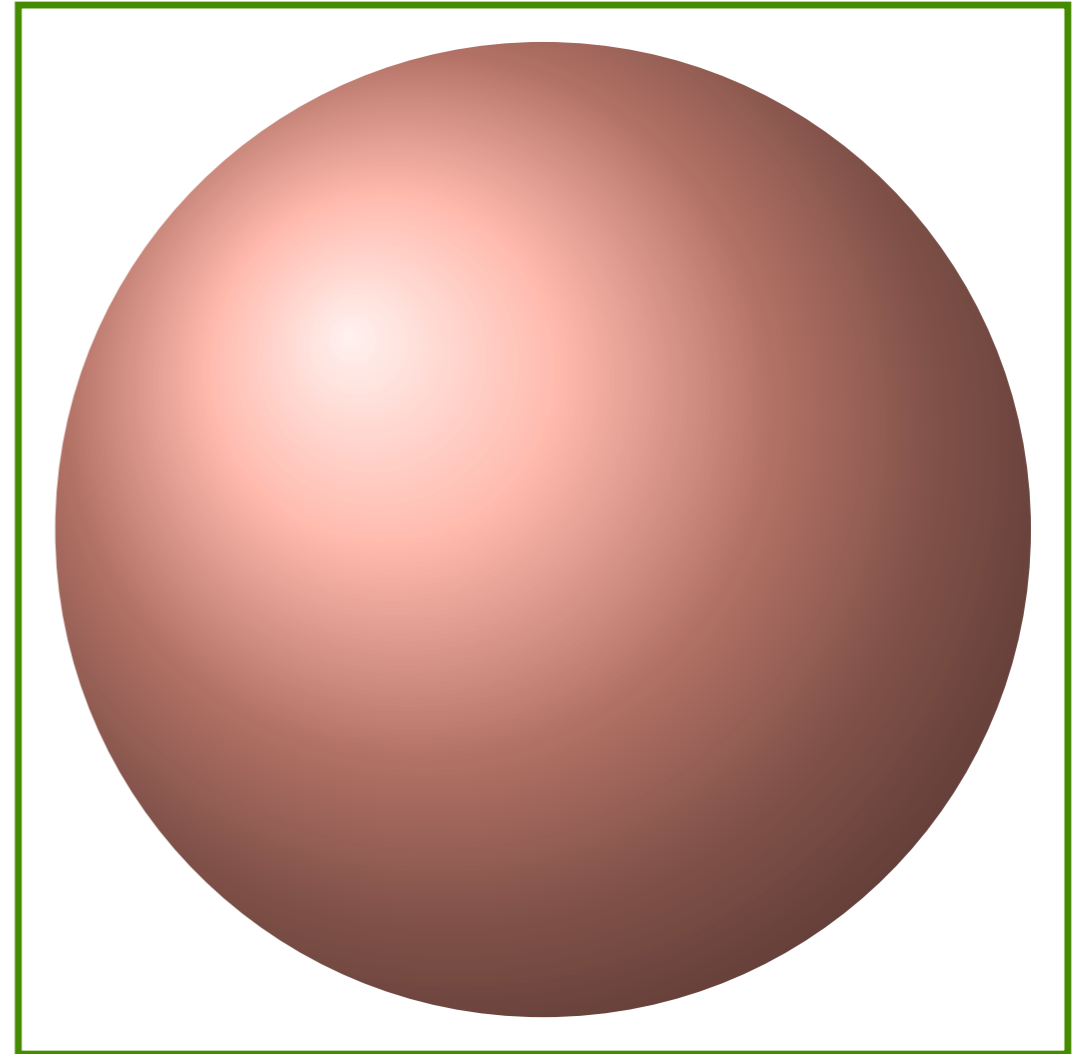
4. 17 dezembro

Apresentação de resultados

Leis de conservação

1. Carga elétrica

$$Q(t) = \int_V \rho \, d\tau$$

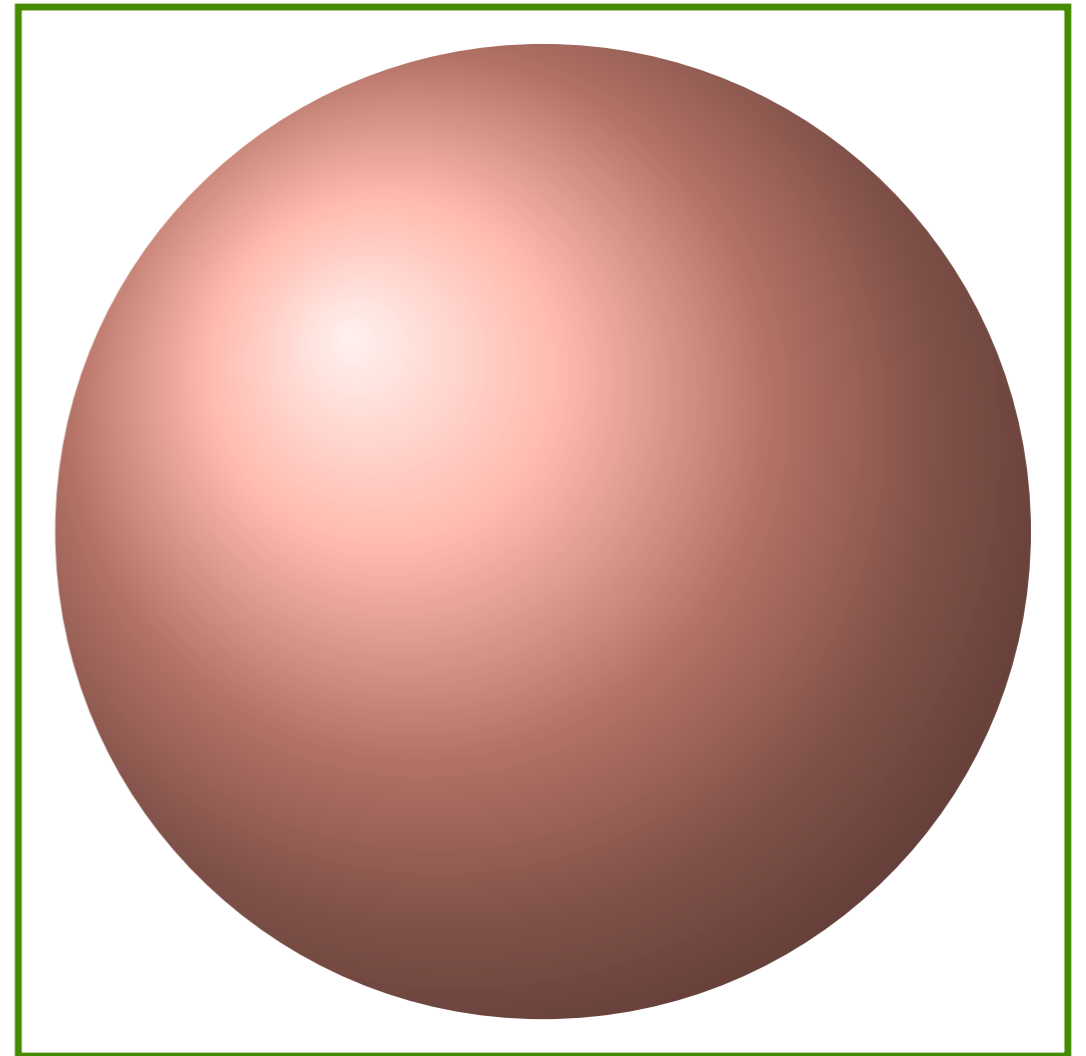


Leis de conservação

1. Carga elétrica

$$Q(t) = \int_{\mathcal{V}} \rho \, d\tau$$

$$\frac{dQ}{dt} = \int_{\mathcal{V}} \frac{\partial \rho}{\partial t} \, d\tau$$



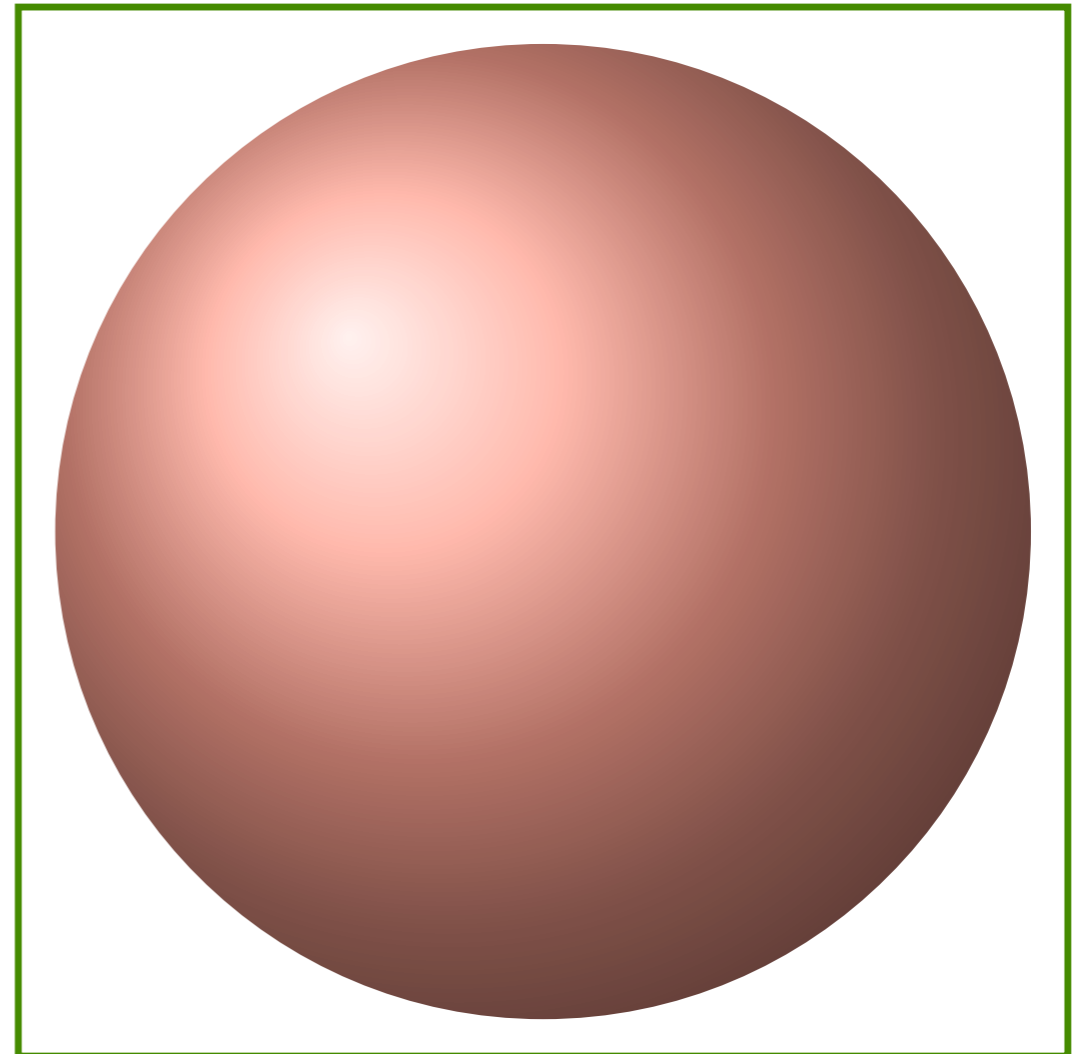
Leis de conservação

1. Carga elétrica

$$Q(t) = \int_{\mathcal{V}} \rho \, d\tau$$

$$\frac{dQ}{dt} = \int_{\mathcal{V}} \frac{\partial \rho}{\partial t} \, d\tau$$

$$\frac{dQ}{dt} = -I(t)$$



Leis de conservação

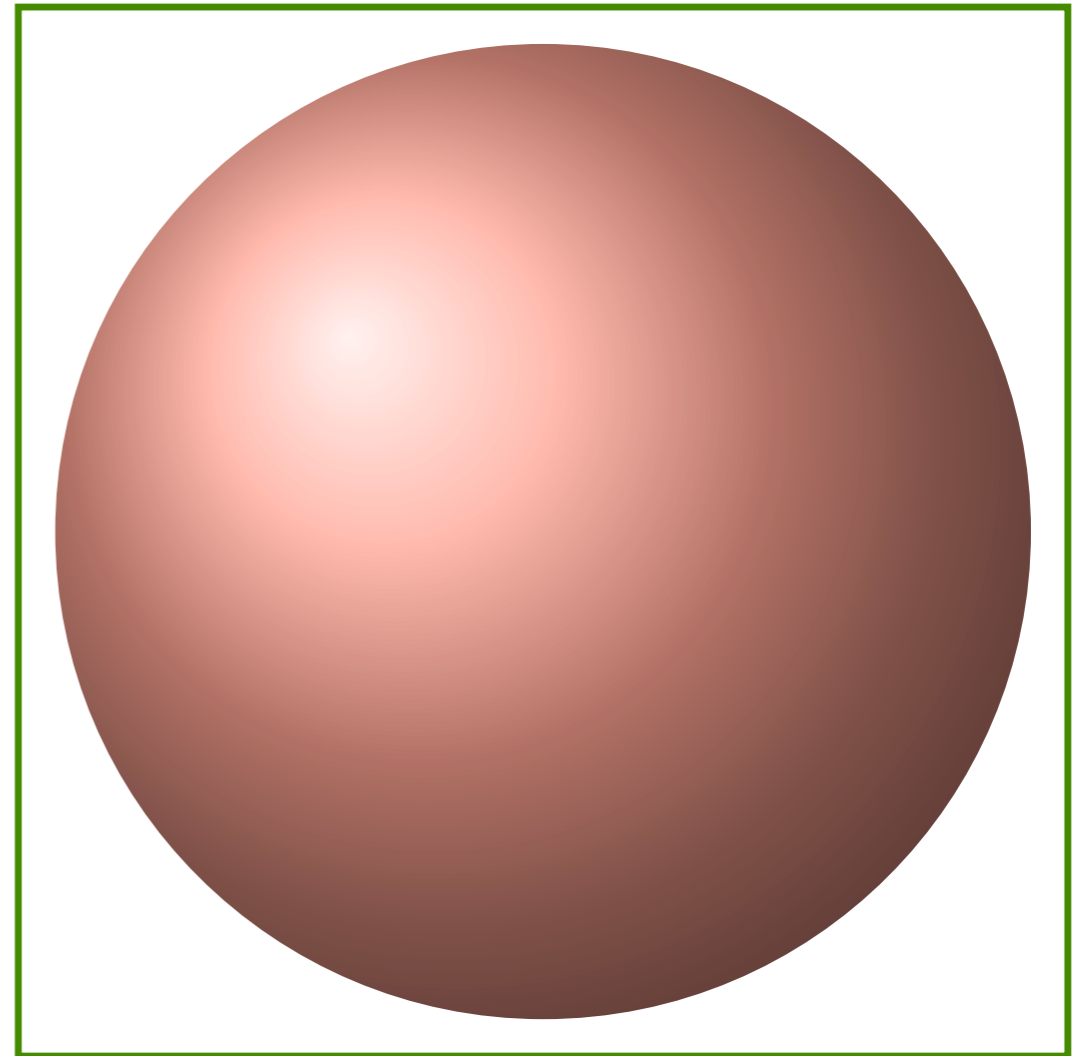
1. Carga elétrica

$$Q(t) = \int_{\mathcal{V}} \rho \, d\tau$$

$$\frac{dQ}{dt} = \int_{\mathcal{V}} \frac{\partial \rho}{\partial t} \, d\tau$$

$$\frac{dQ}{dt} = -I(t)$$

$$I = \int_{\mathcal{A}} \vec{J} \cdot \hat{n} \, da$$



Leis de conservação

1. Carga elétrica

$$Q(t) = \int_{\mathcal{V}} \rho \, d\tau$$

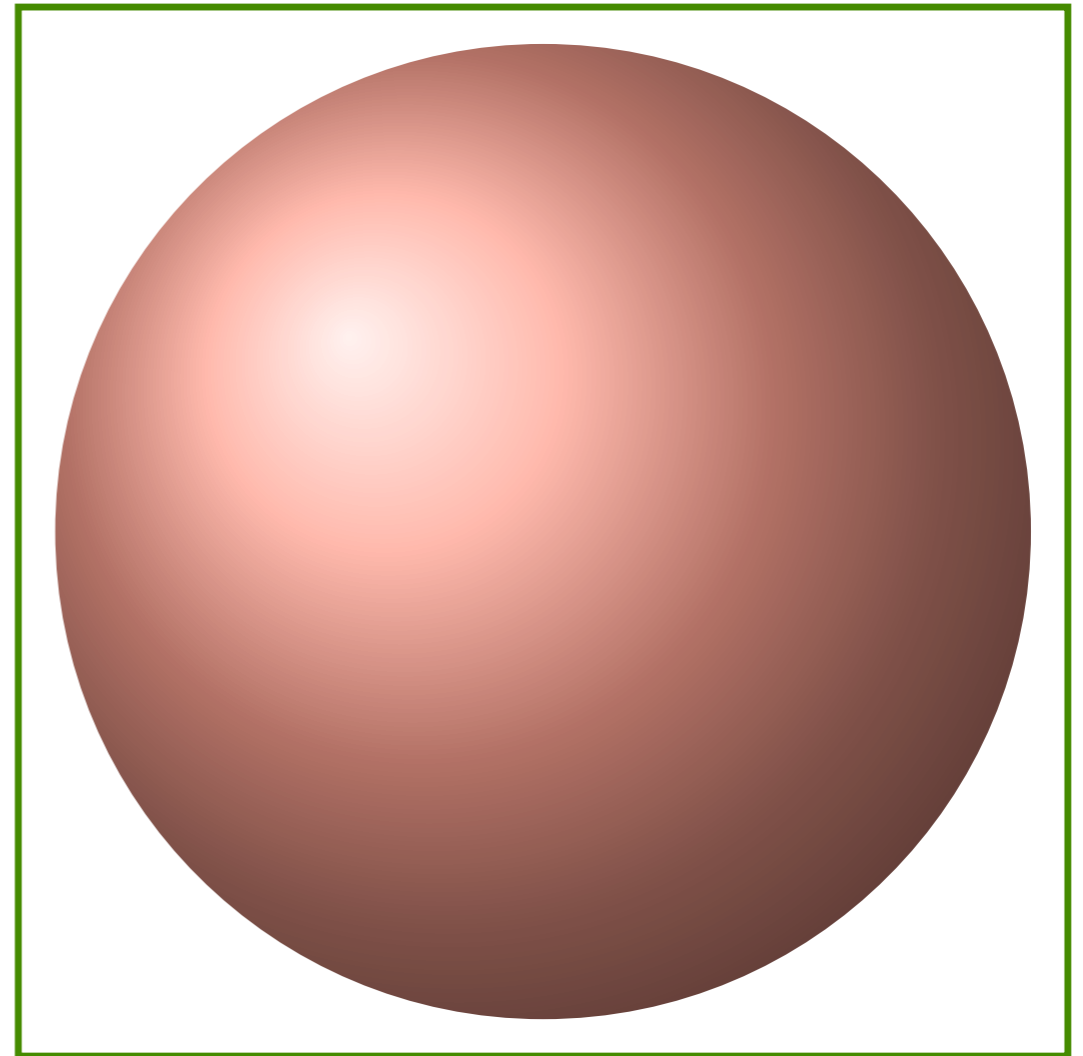
$$\frac{dQ}{dt} = \int_{\mathcal{V}} \frac{\partial \rho}{\partial t} \, d\tau$$

$$\frac{dQ}{dt} = -I(t)$$

$$I = \int_{\mathcal{A}} \vec{J} \cdot \hat{n} \, da$$

$$I = \int_{\mathcal{V}} \vec{\nabla} \cdot \vec{J} \, d\tau$$

TEOREMA DE GAUSS



Leis de conservação

1. Carga elétrica

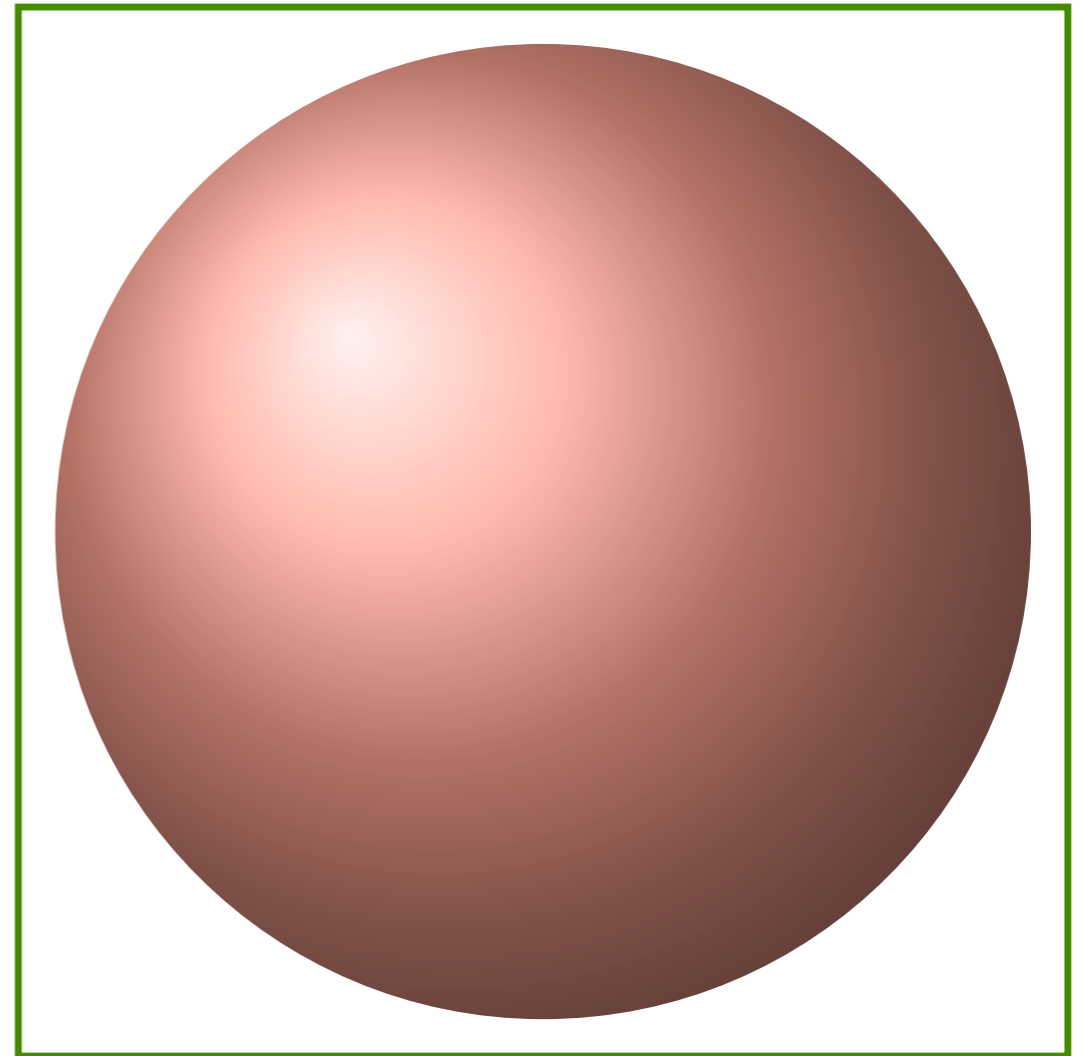
$$Q(t) = \int_{\mathcal{V}} \rho \, d\tau$$

$$\frac{dQ}{dt} = \int_{\mathcal{V}} \frac{\partial \rho}{\partial t} \, d\tau$$

$$\frac{dQ}{dt} = -I(t)$$

$$I = \int_{\mathcal{A}} \vec{J} \cdot \hat{n} \, da$$

$$I = \int_{\mathcal{V}} \vec{\nabla} \cdot \vec{J} \, d\tau$$



$$\Rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

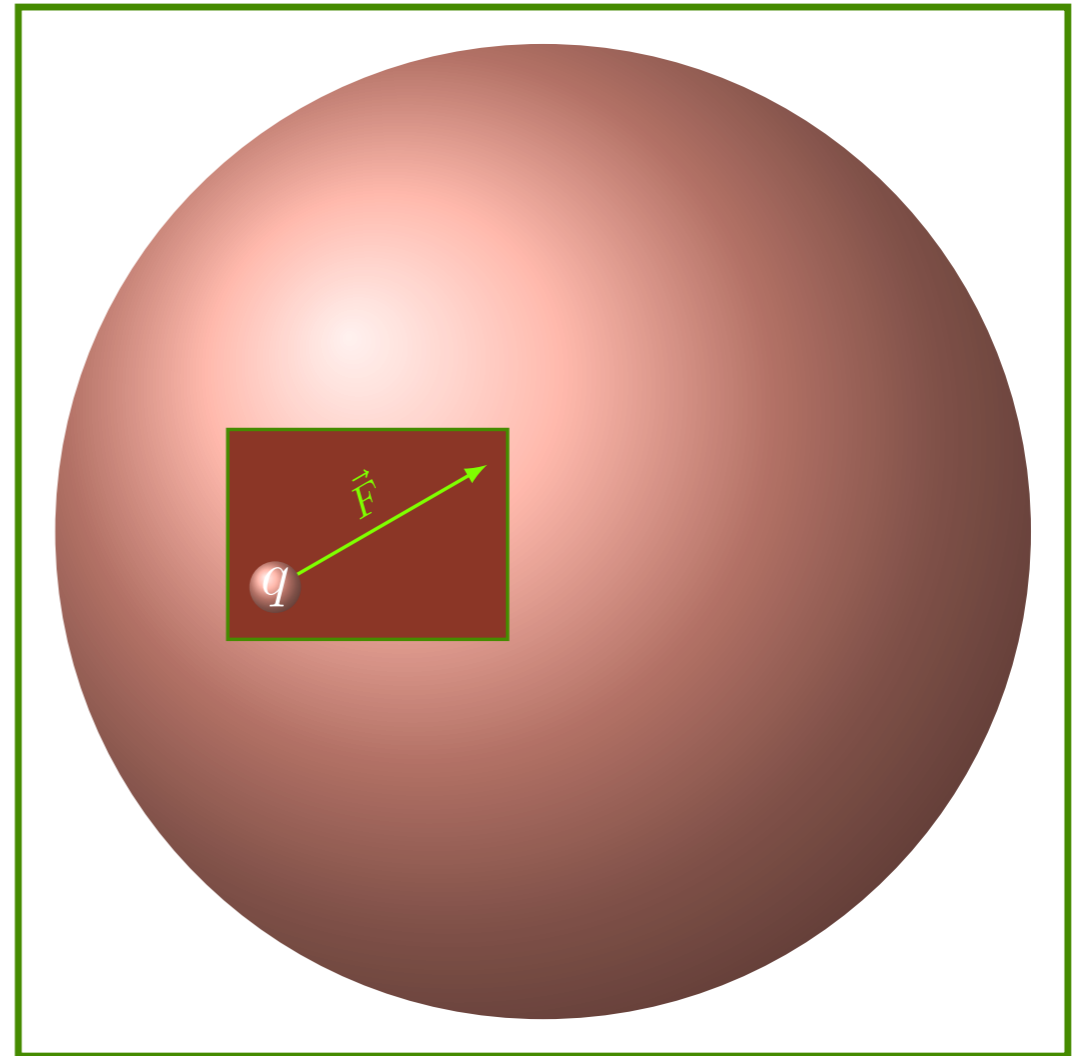
↳ EQ. DA CONTINUIDADE

↳ ρ AUMENTA

Leis de conservação

2. Energia

$$\text{LORENTZ} \Rightarrow \vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

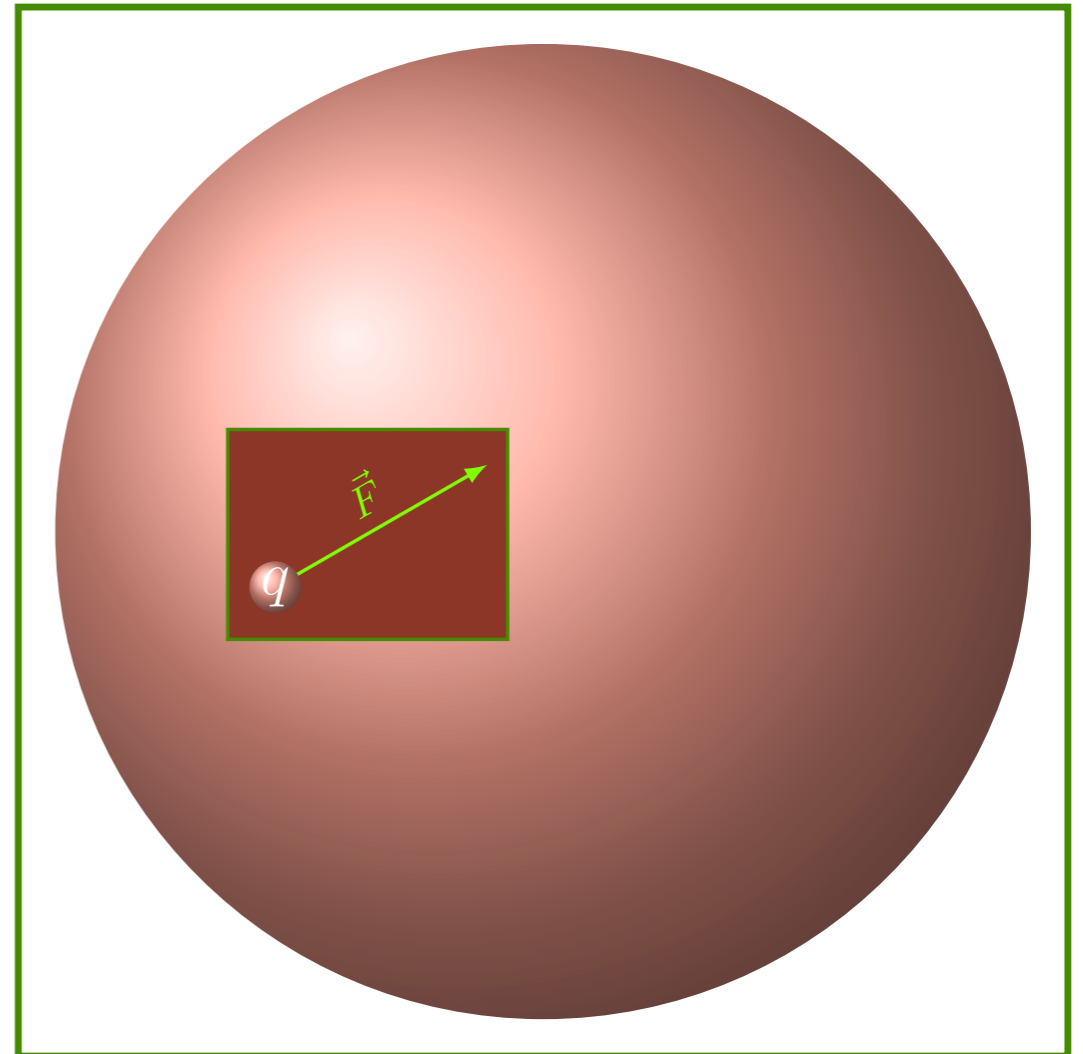


Leis de conservação

2. Energia

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

POTÊNCIA $\Rightarrow \vec{F} \cdot \vec{v} = q\vec{E} \cdot \vec{v}$



Leis de conservação

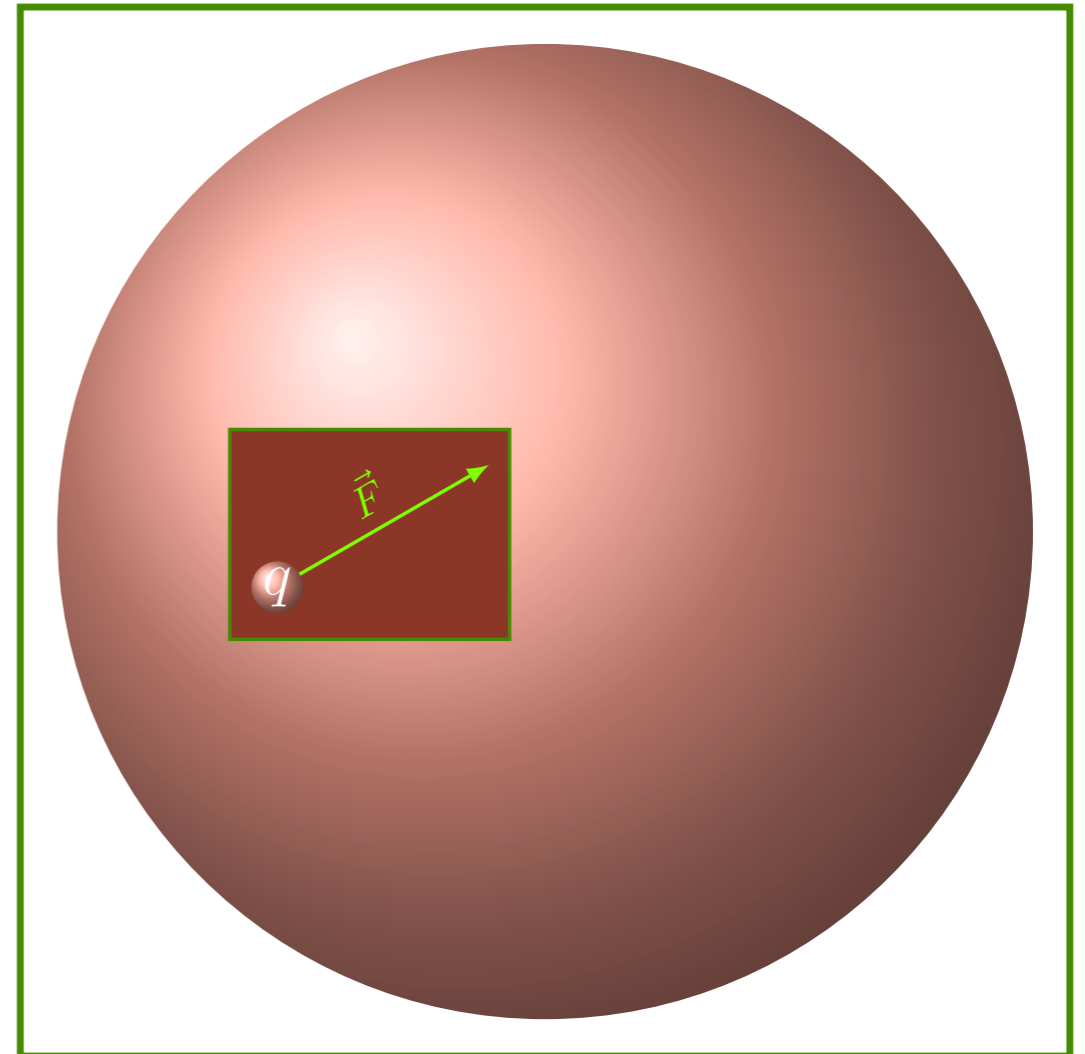
2. Energia

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$\vec{F} \cdot \vec{v} = q\vec{E} \cdot \vec{v}$$

$$\frac{dW}{dt} = \int dq \vec{E} \cdot \vec{v}$$

POTÊNCIA DISPENDIDA PELA
FORÇA ELÉTRICA



Leis de conservação

2. Energia

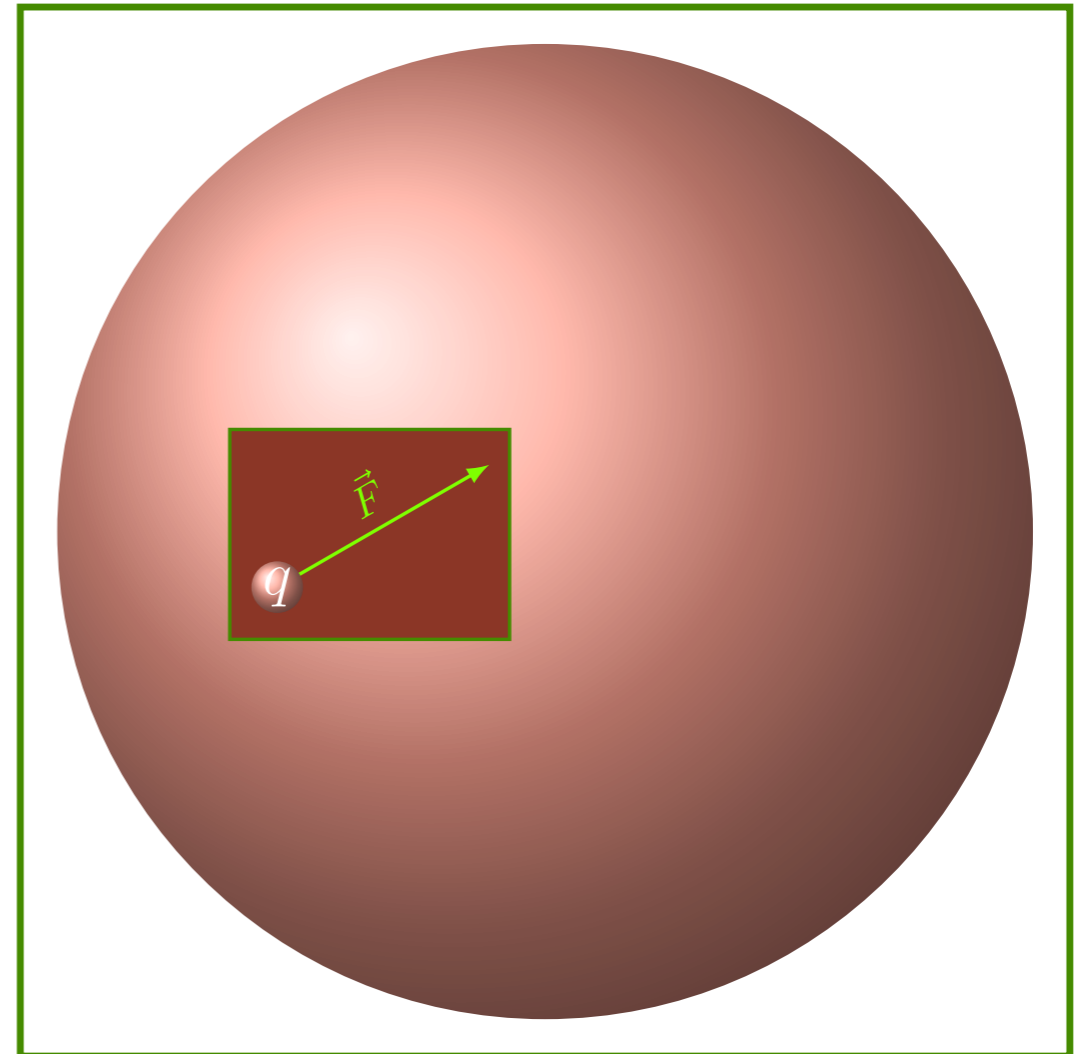
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$\vec{F} \cdot \vec{v} = q\vec{E} \cdot \vec{v}$$

$$\frac{dW}{dt} = \int dq \vec{E} \cdot \vec{v}$$

↳ $\rho d\tau$

$$\Rightarrow \frac{dW}{dt} = \int \rho \vec{E} \cdot \vec{v} d\tau$$



Leis de conservação

2. Energia

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

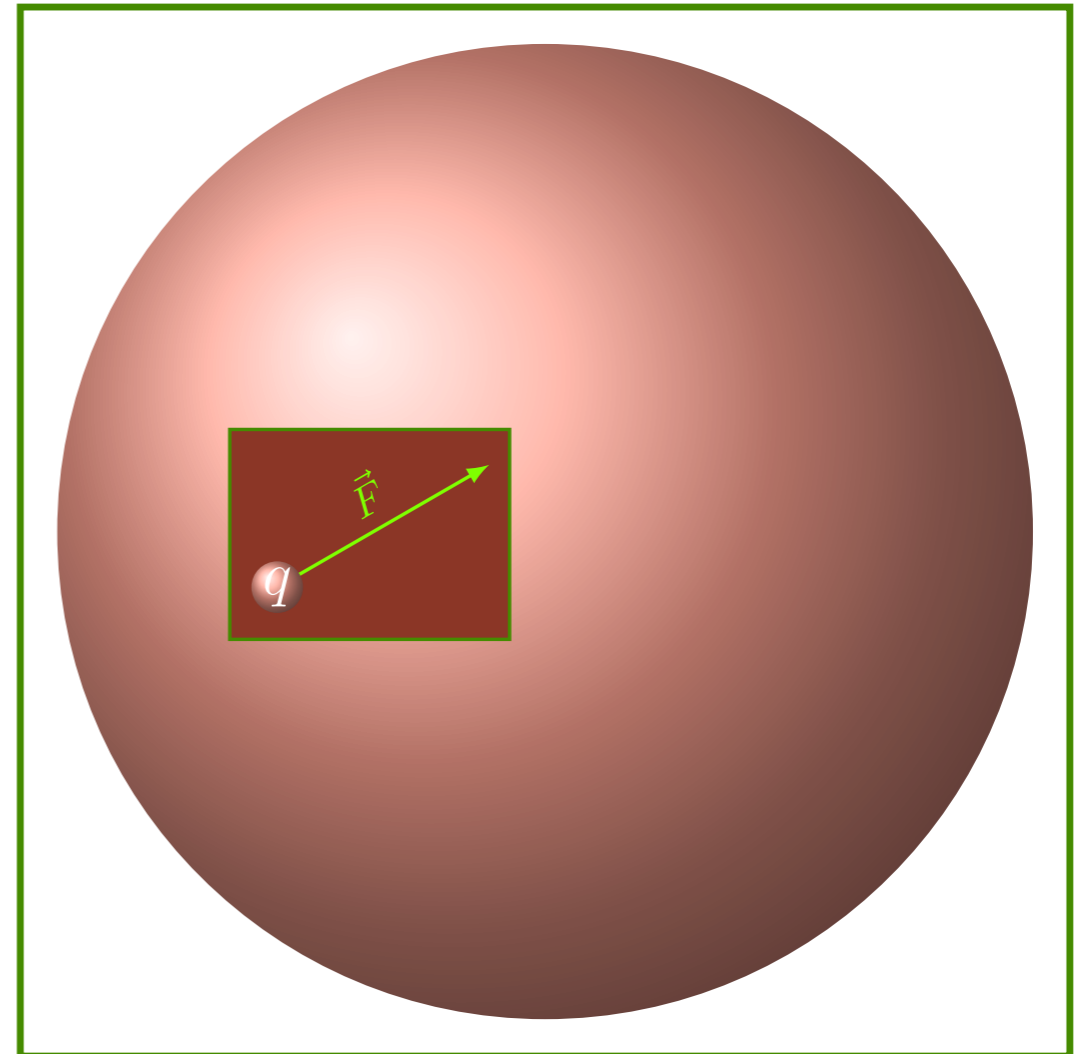
$$\vec{F} \cdot \vec{v} = q\vec{E} \cdot \vec{v}$$

$$\frac{dW}{dt} = \int dq \vec{E} \cdot \vec{v}$$

$$\frac{dW}{dt} = \int \rho \vec{E} \cdot \vec{v} d\tau$$

$\rho \vec{v} = \vec{J}$

$$\frac{dW}{dt} = \int \vec{J} \cdot \vec{E} d\tau$$



Leis de conservação

2. Energia

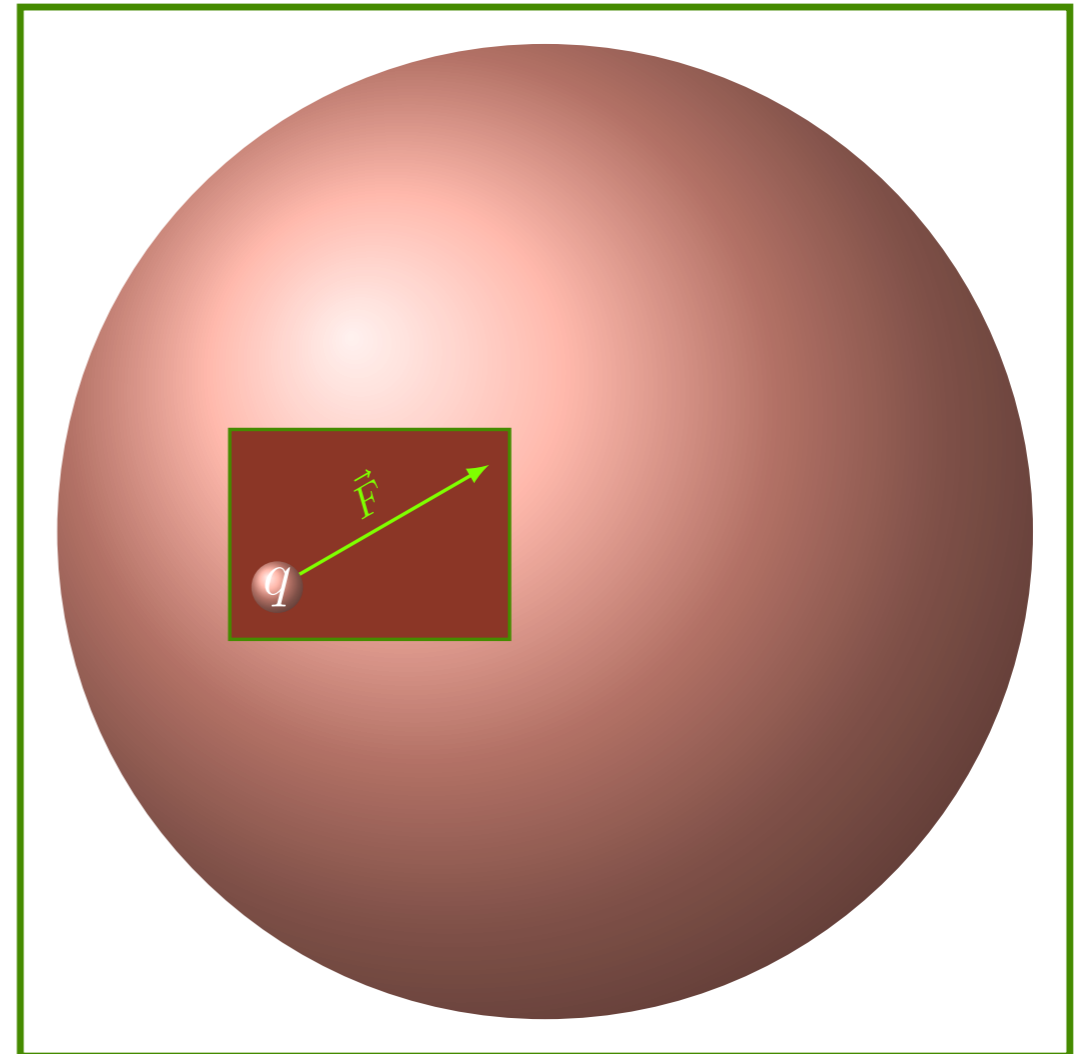
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$\vec{F} \cdot \vec{v} = q\vec{E} \cdot \vec{v}$$

$$\frac{dW}{dt} = \int dq \vec{E} \cdot \vec{v}$$

$$\frac{dW}{dt} = \int \rho \vec{E} \cdot \vec{v} d\tau$$

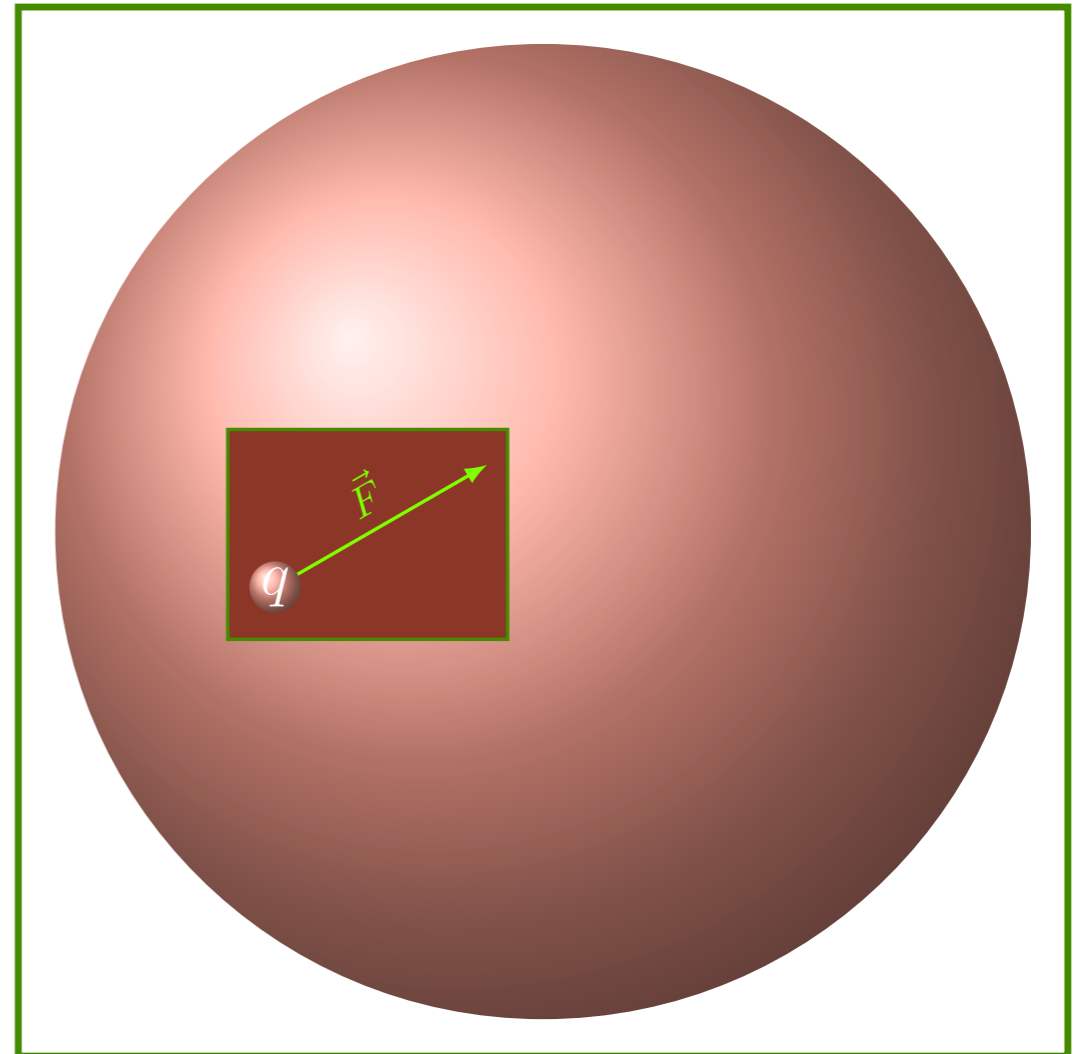
$$\frac{dW}{dt} = \int \vec{J} \cdot \vec{E} d\tau$$



Leis de conservação

2. Energia

$$\frac{dW}{dt} = \int \vec{J} \cdot \vec{E} d\tau$$

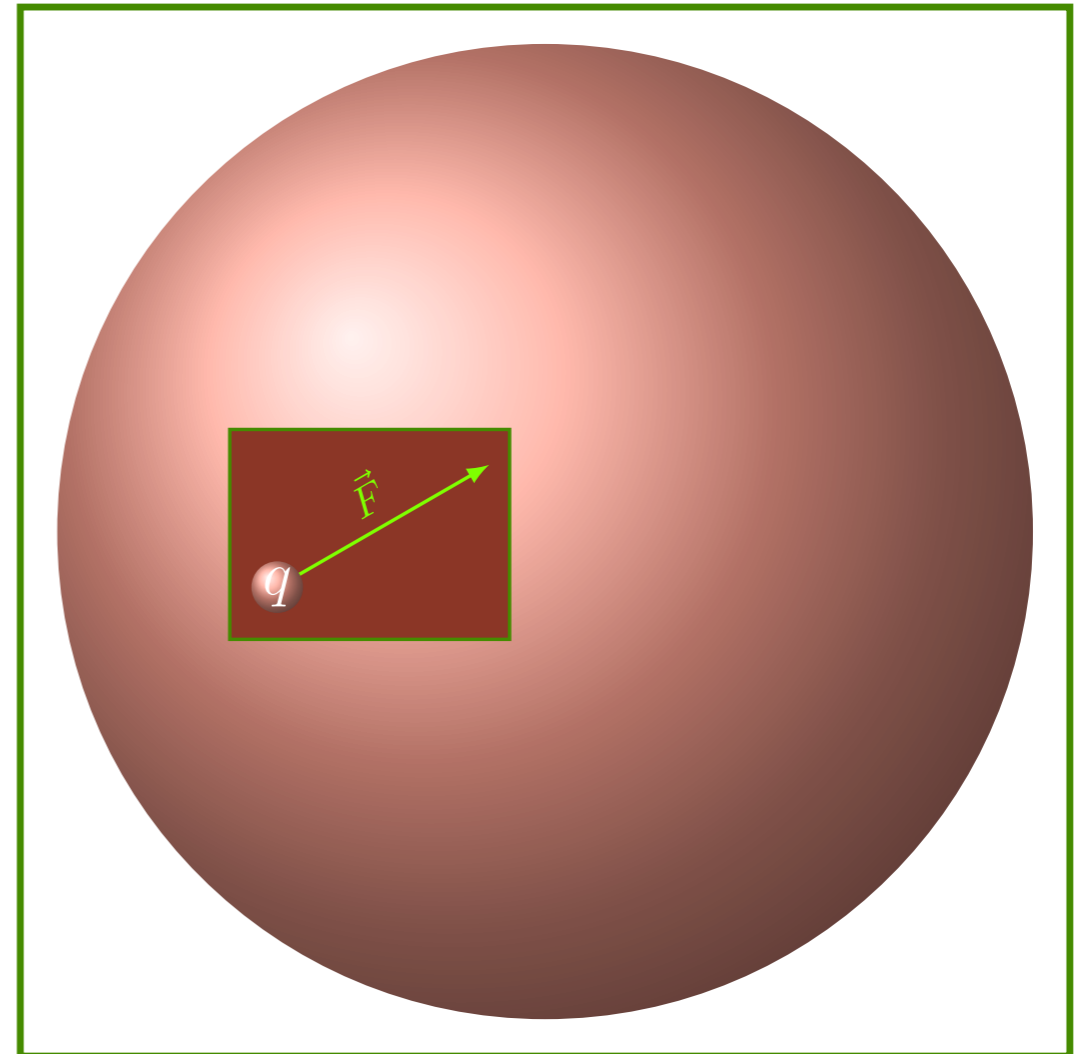


Leis de conservação

2. Energia

$$\frac{dW}{dt} = \int \vec{J} \cdot \vec{E} \, d\tau$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$



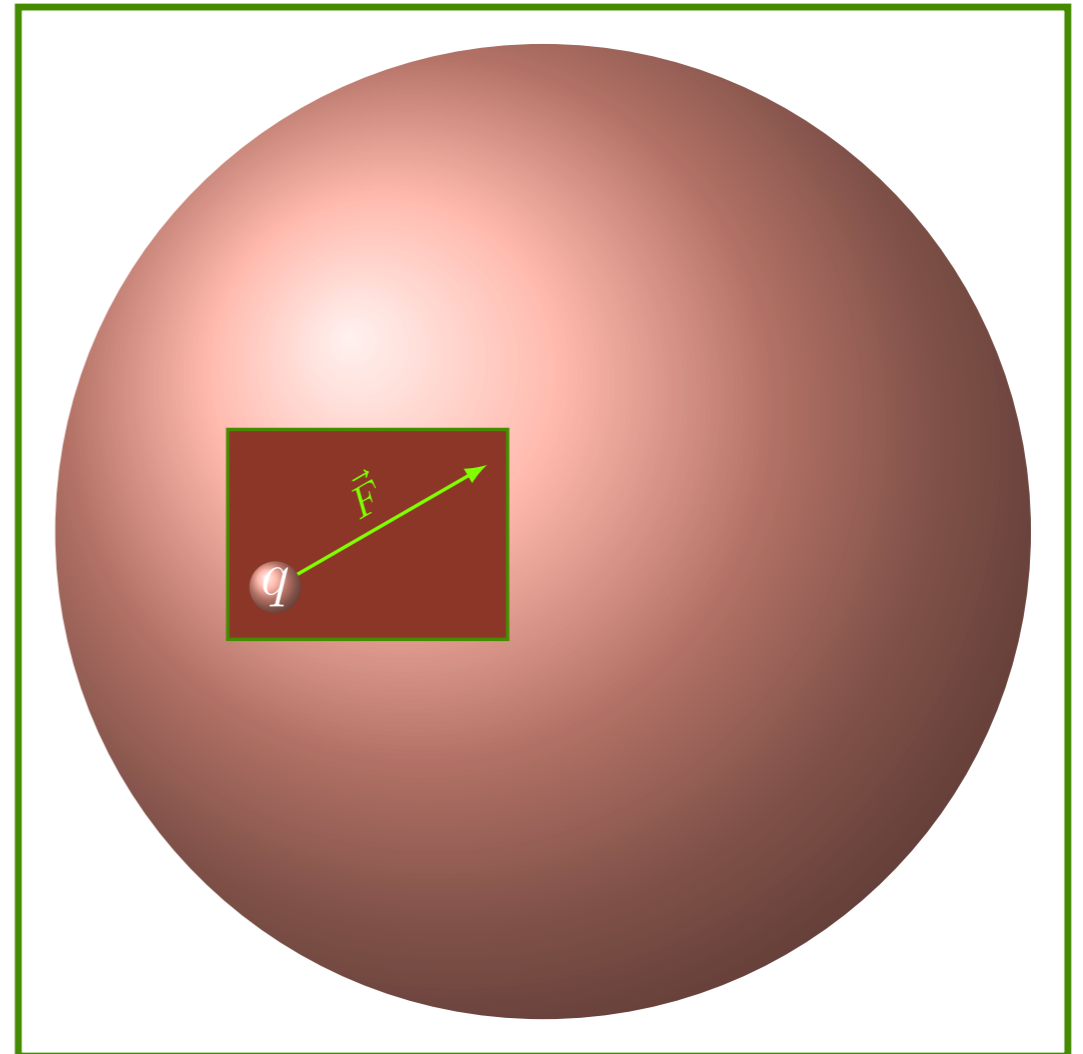
Leis de conservação

2. Energia

$$\frac{dW}{dt} = \int \vec{J} \cdot \vec{E} \, d\tau$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{B} - \epsilon_0 \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



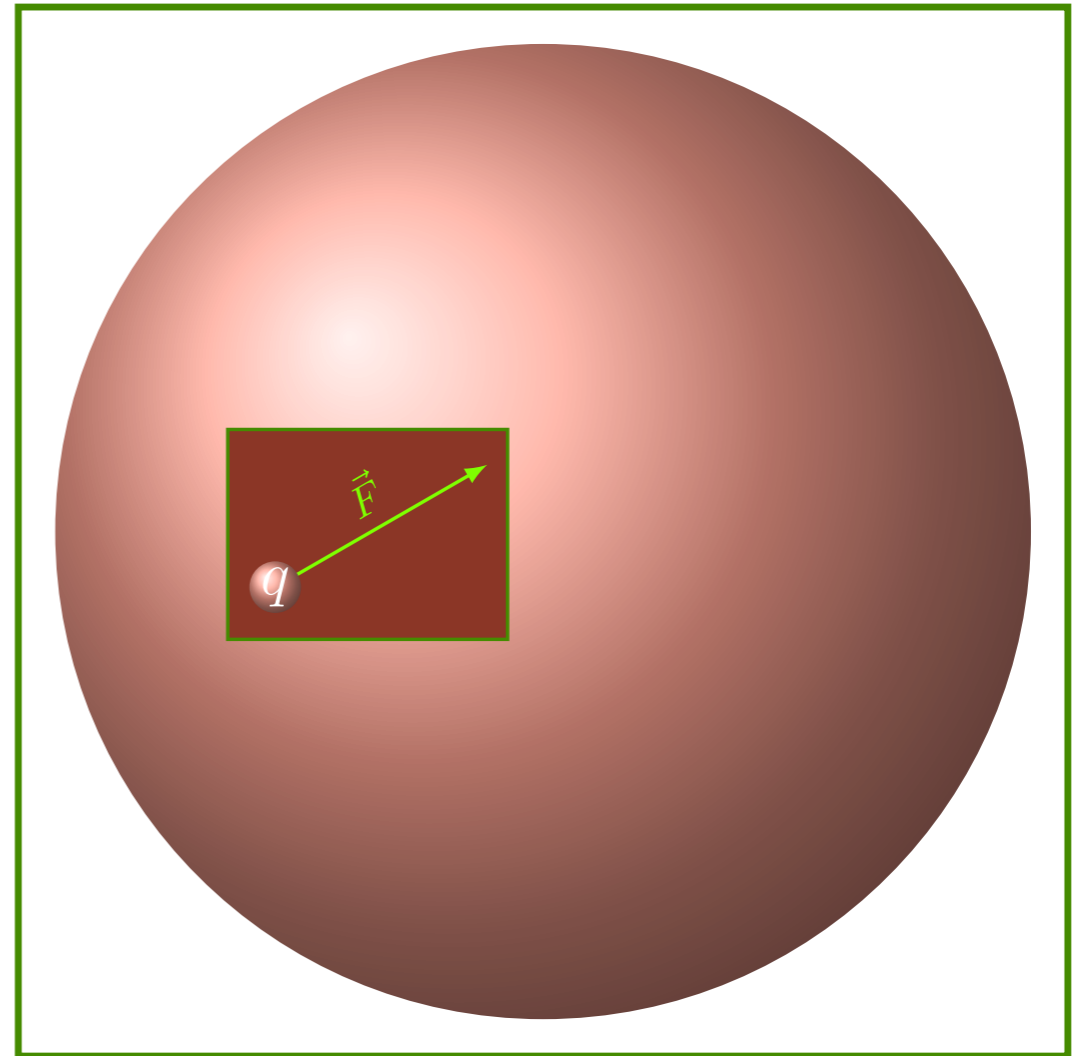
Leis de conservação

2. Energia

$$\frac{dW}{dt} = \int \vec{J} \cdot \vec{E} \, d\tau$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{B} - \epsilon_0 \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



DERIVADA DO PRODUTO $\Rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \times \vec{B} = \vec{B} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{E} - \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{B}$

$$\begin{aligned} \vec{v} \cdot \vec{u} \times \vec{w} &= \vec{w} \cdot \vec{v} \times \vec{u} \\ &= \vec{u} \cdot \vec{w} \times \vec{v} = -\vec{u} \cdot \vec{v} \times \vec{w} \end{aligned}$$

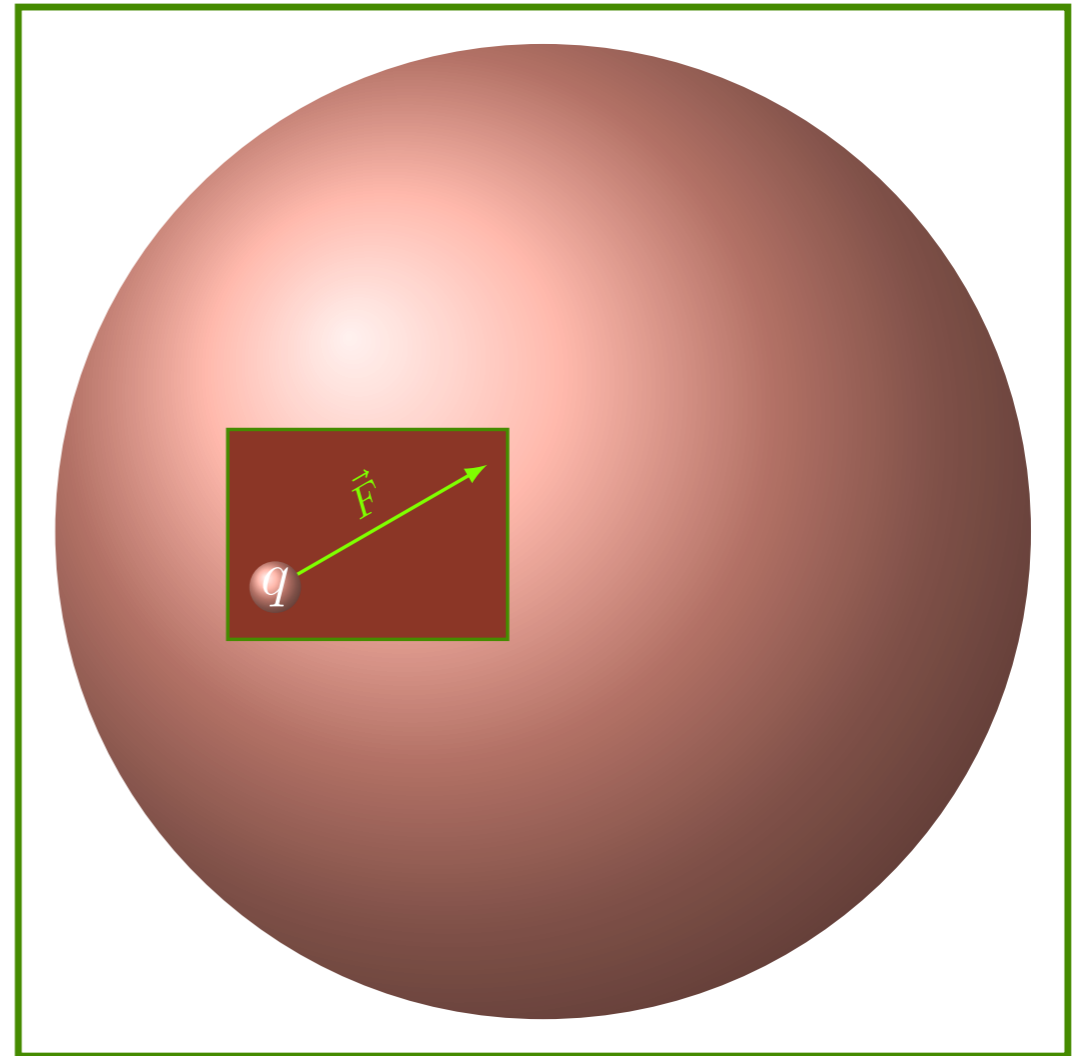
Leis de conservação

2. Energia

$$\frac{dW}{dt} = \int \vec{J} \cdot \vec{E} \, d\tau$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{B} - \epsilon_0 \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} \times \vec{B} = \vec{B} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{E} - \underbrace{\vec{E} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{B}}_{\text{FARADAY}}$$

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

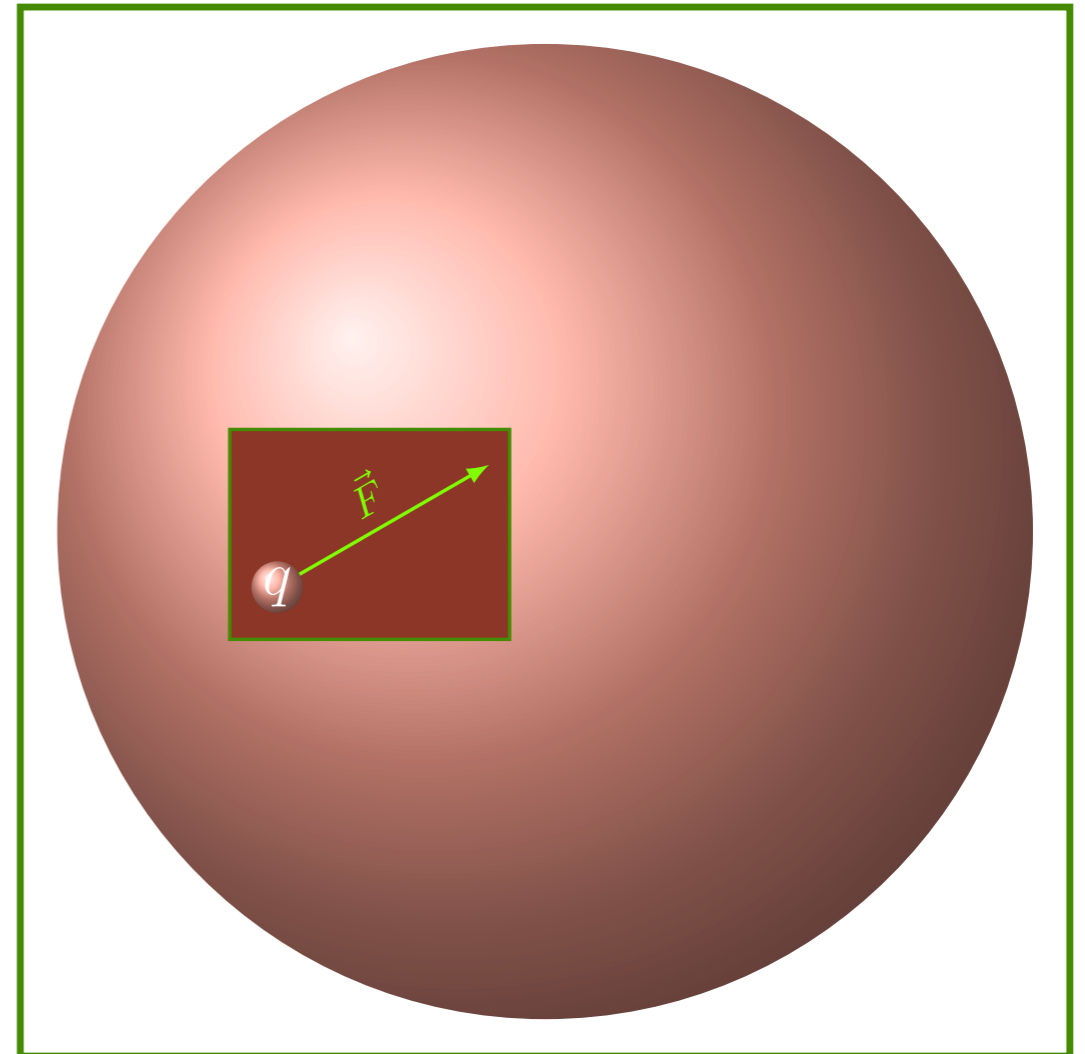
Leis de conservação

2. Energia

$$\frac{dW}{dt} = \int \vec{J} \cdot \vec{E} \, d\tau$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{B} - \epsilon_0 \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



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

Leis de conservação

2. Energia

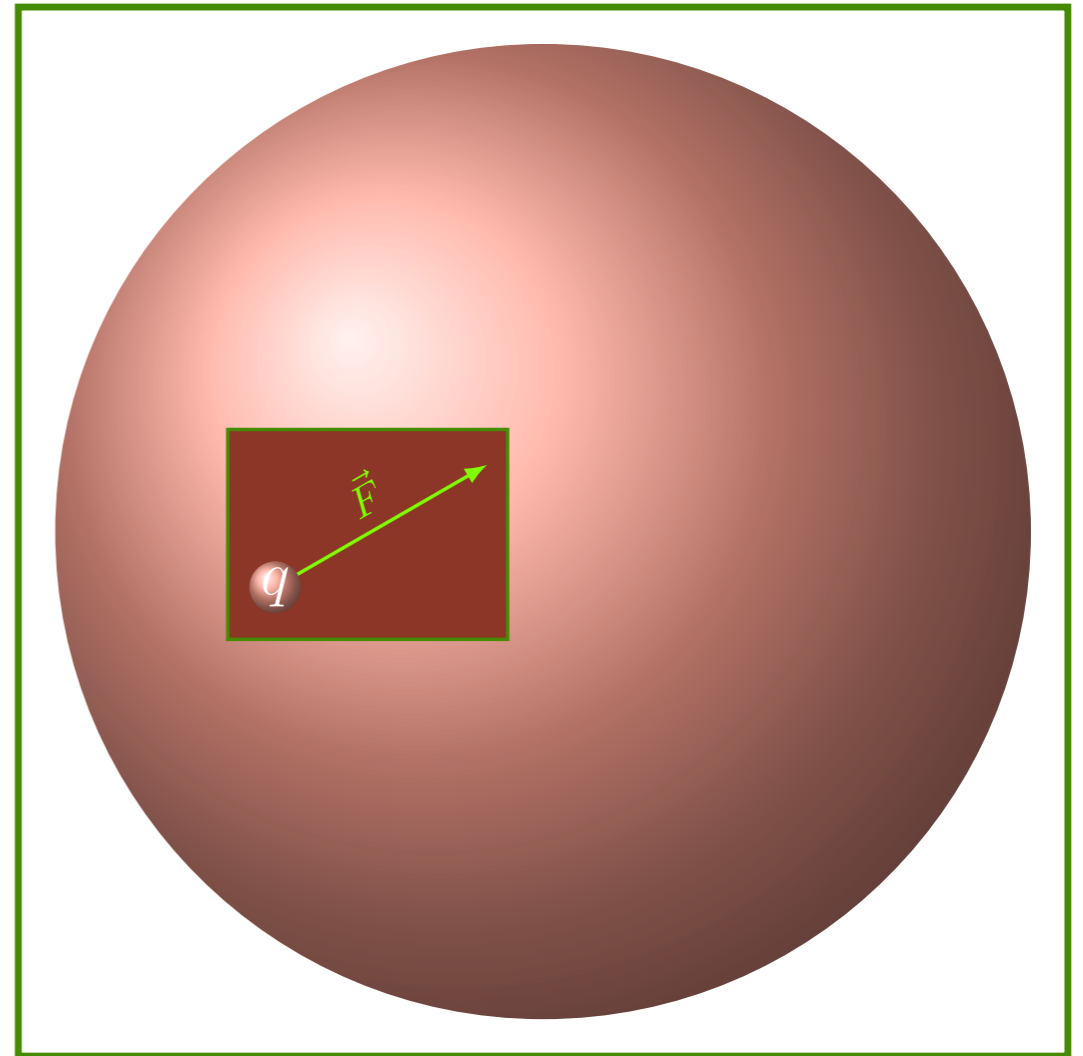
$$\frac{dW}{dt} = \int \vec{J} \cdot \vec{E} \, d\tau$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{B} - \epsilon_0 \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = \frac{-1}{\mu_0} \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{E} \times \vec{B} + \vec{B} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) - \epsilon_0 \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

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



Leis de conservação

2. Energia

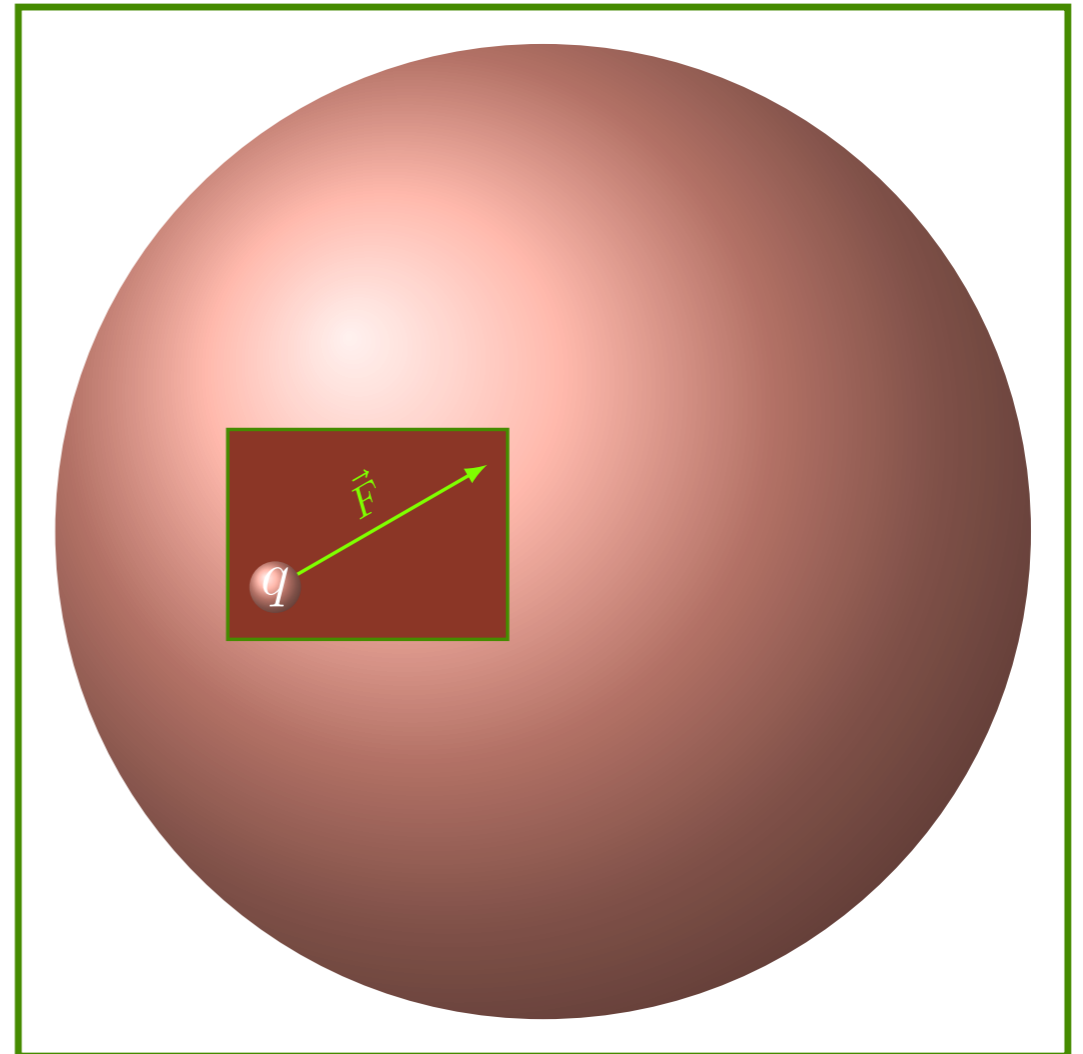
$$\frac{dW}{dt} = \int \vec{J} \cdot \vec{E} \, d\tau$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{B} - \epsilon_0 \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = \frac{-1}{\mu_0} \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{E} \times \vec{B} + \vec{B} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) - \epsilon_0 \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = -\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \times \vec{B} - \frac{1}{2\mu_0} \frac{\partial B^2}{\partial t} - \frac{\epsilon_0}{2} \frac{\partial E^2}{\partial t}$$



Leis de conservação

2. Energia

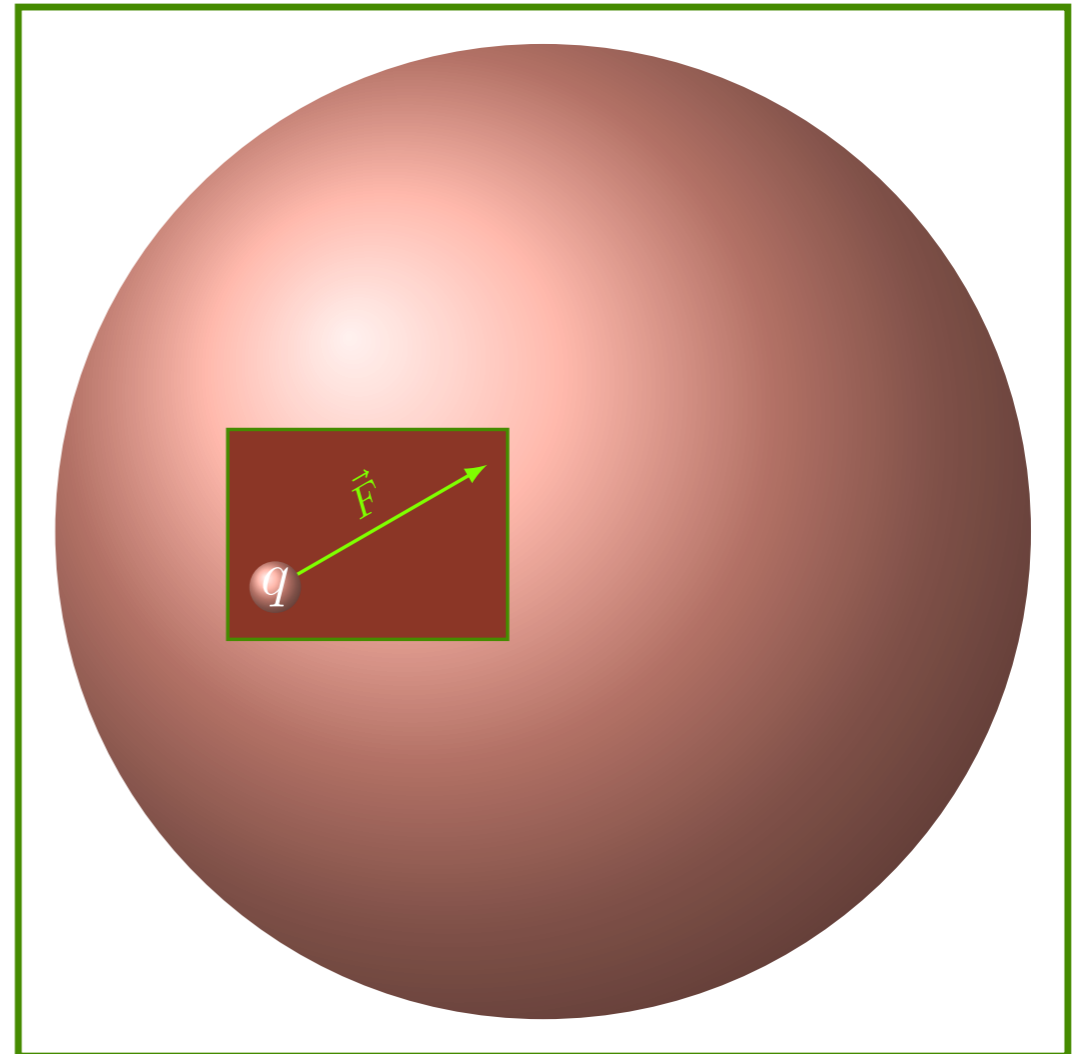
$$\frac{dW}{dt} = \int \vec{J} \cdot \vec{E} \, d\tau$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{B} - \epsilon_0 \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = \frac{-1}{\mu_0} \left(\vec{\nabla} \cdot \vec{E} \times \vec{B} + \vec{B} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) - \epsilon_0 \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = -\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \times \vec{B} - \frac{1}{2\mu_0} \frac{\partial B^2}{\partial t} - \frac{\epsilon_0}{2} \frac{\partial E^2}{\partial t}$$

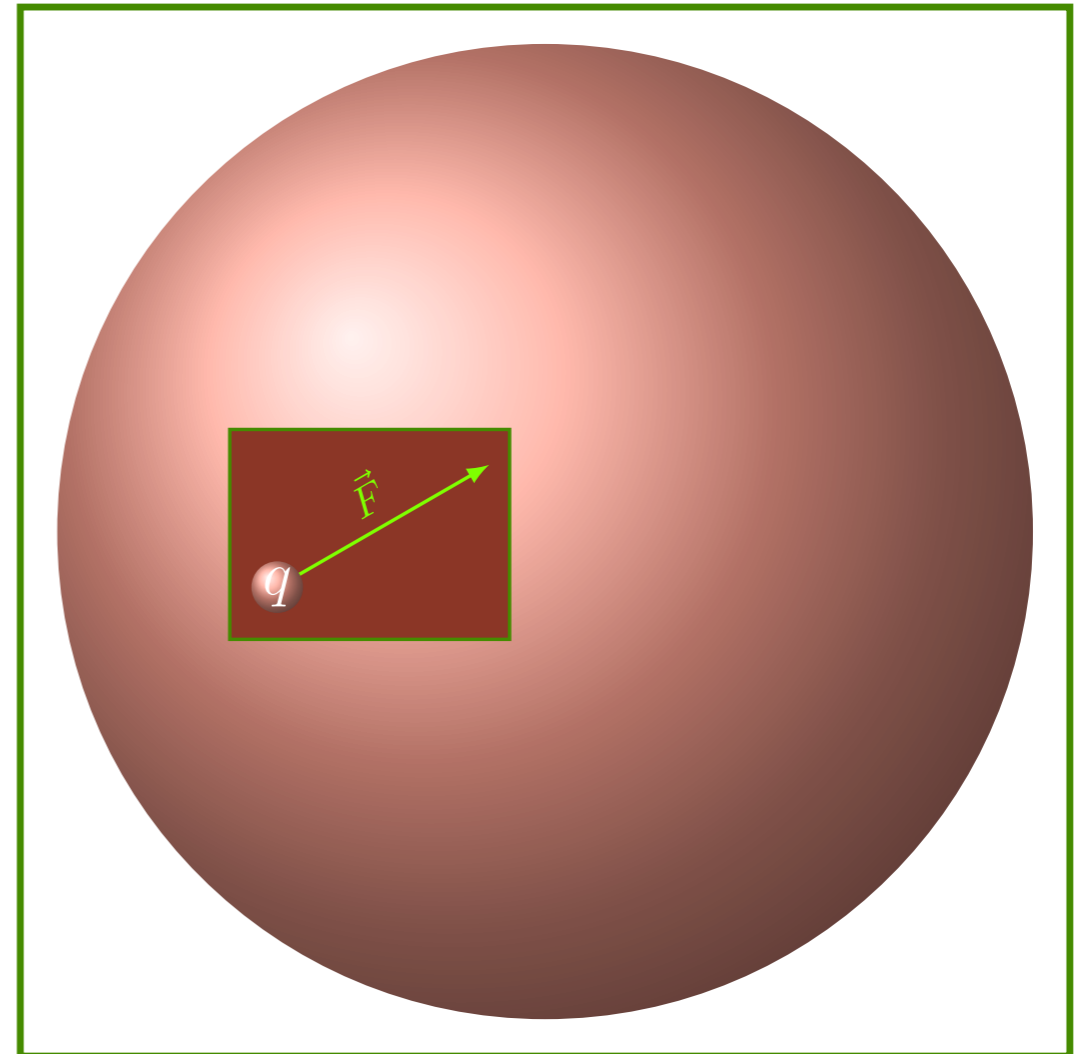


Leis de conservação

2. Energia

$$\frac{dW}{dt} = \int \vec{J} \cdot \vec{E} \, d\tau$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = -\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \times \vec{B} - \frac{1}{2\mu_0} \frac{\partial B^2}{\partial t} - \frac{\epsilon_0}{2} \frac{\partial E^2}{\partial t}$$



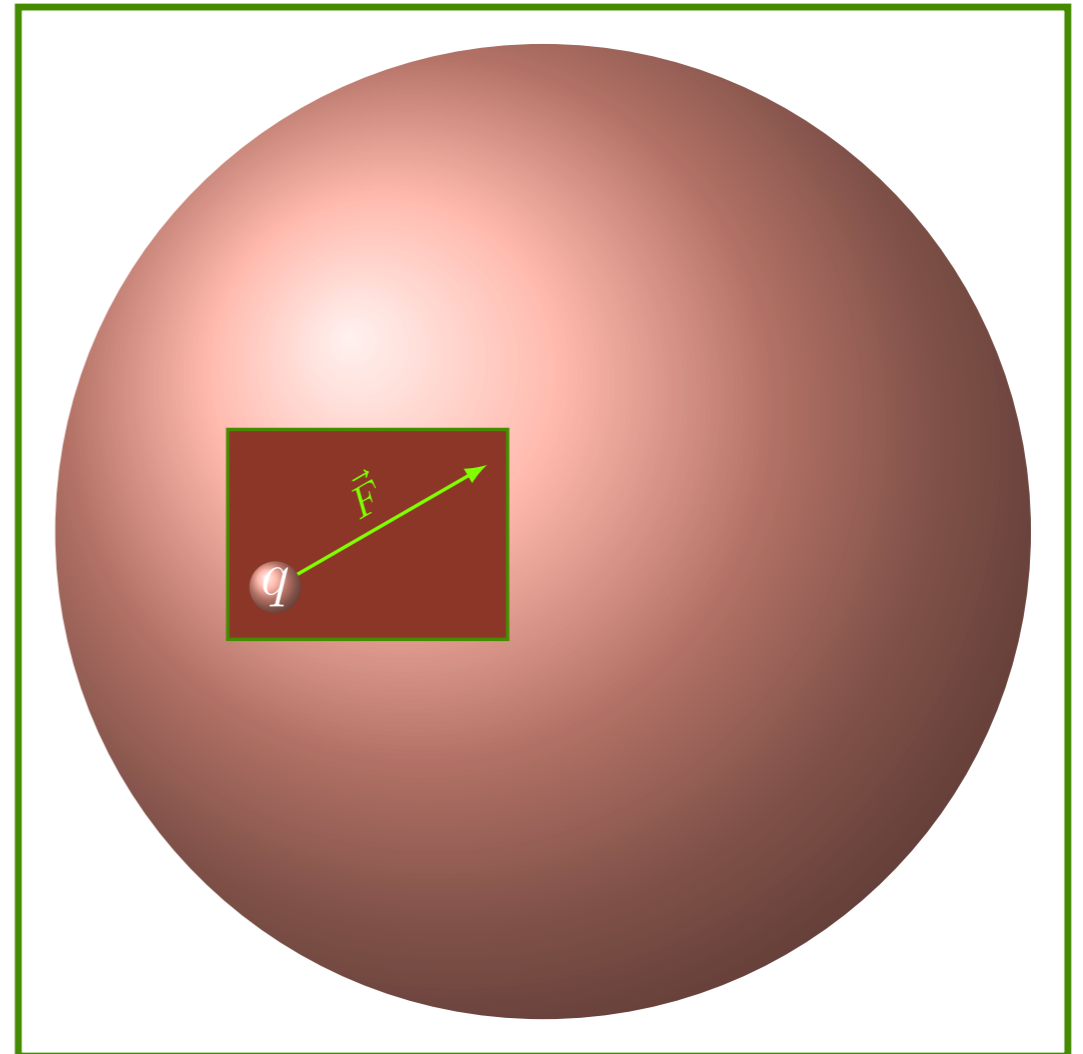
Leis de conservação

2. Energia

$$\frac{dW}{dt} = \int \vec{J} \cdot \vec{E} \, d\tau$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = -\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \times \vec{B} - \frac{1}{2\mu_0} \frac{\partial B^2}{\partial t} - \frac{\epsilon_0}{2} \frac{\partial E^2}{\partial t}$$

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{1}{\mu_0} \int_{\mathcal{A}} \vec{E} \times \vec{B} \cdot \hat{n} \, da - \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \int_{\mathcal{V}} \left(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) \, d\tau$$

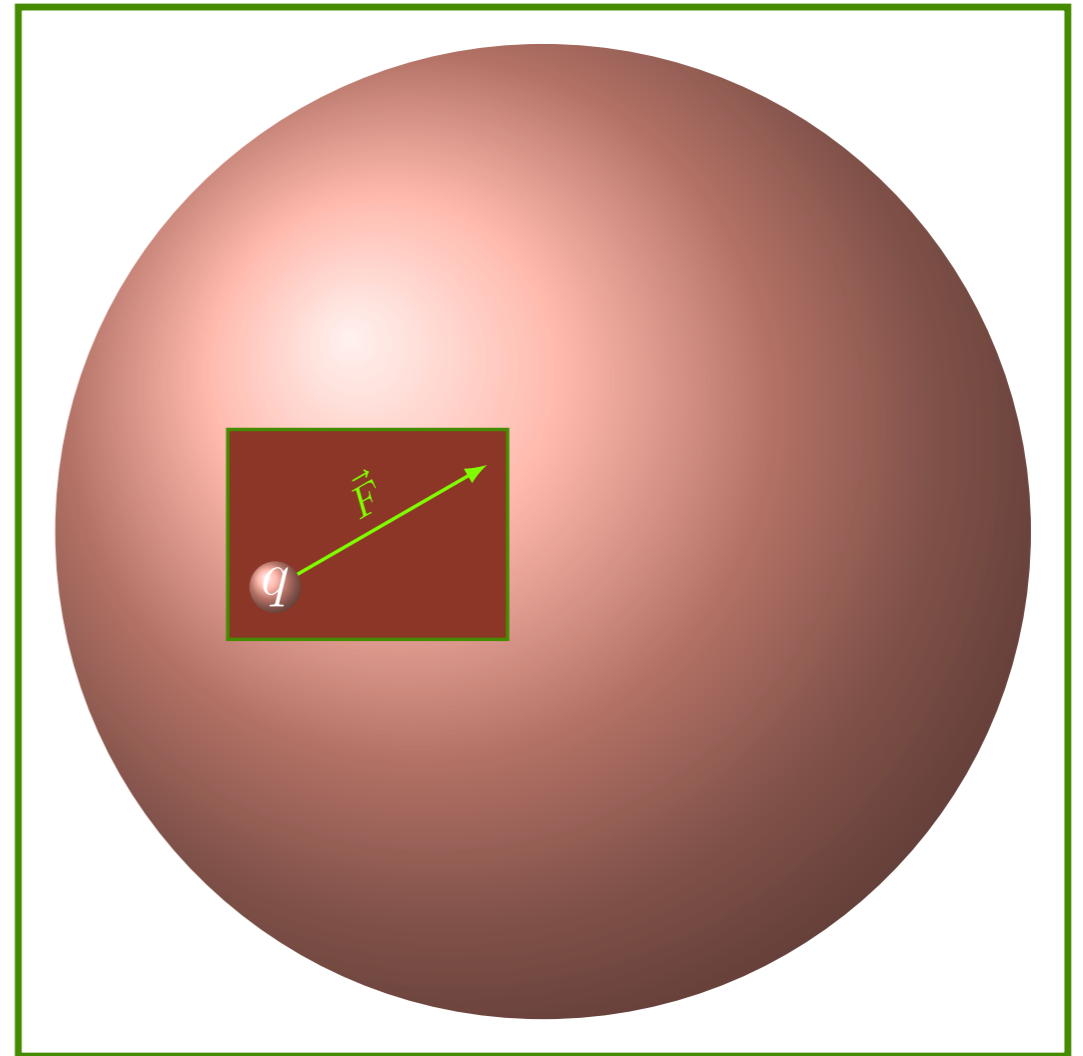


Leis de conservação

2. Energia

$$\frac{dW}{dt} = \int \vec{J} \cdot \vec{E} \, d\tau$$

$$\vec{J} \cdot \vec{E} = -\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} \times \vec{B} - \frac{1}{2\mu_0} \frac{\partial B^2}{\partial t} - \frac{\epsilon_0}{2} \frac{\partial E^2}{\partial t}$$



$$\frac{dW}{dt} = -\frac{1}{\mu_0} \int_{\mathcal{A}} \vec{E} \times \vec{B} \cdot \hat{n} \, da - \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \int_{\mathcal{V}} \left(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) d\tau$$