



**FARADAY E MAXWELL: CAMPI,
SIMMETRIE E LUCE**
Una crisi annunciata

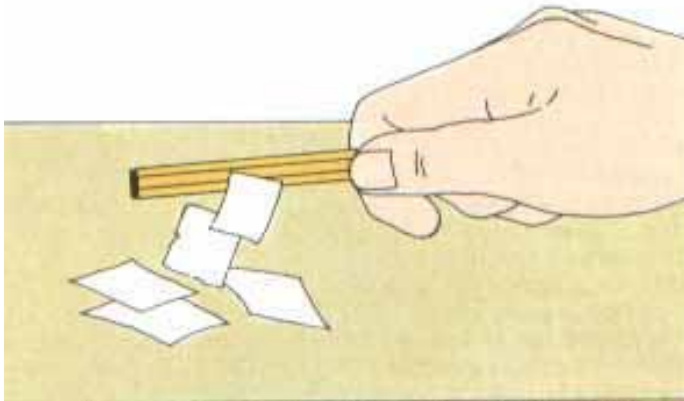
Massimo Nocente

L'elettromagnetismo domina la nostra vita quotidiana



Fenomeni elettrici e magnetici fino a fine Settecento: due realtà distinte (e scarso interesse)

Effetti elettrici dovuti a strofinio



Attrazione magnetica tra alcuni materiali



Bussola: 1200 d.C.



Uno studio rigoroso della forza tra due cariche elettriche: l'esperimento di Coulomb



- La forza elettrica si manifesta tra **cariche**
- Può essere di natura **repulsiva** o **attrattiva**
- Mostra le stesse dipendenze della **legge di gravitazione universale**



*Legge di
Coulomb*

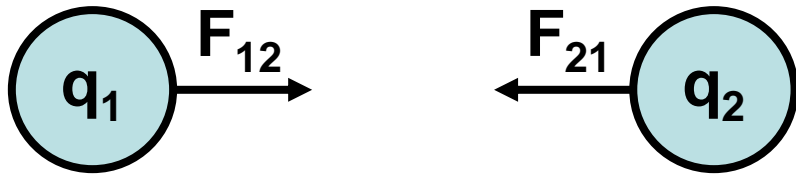
$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

*Legge della
gravitazione
universale*

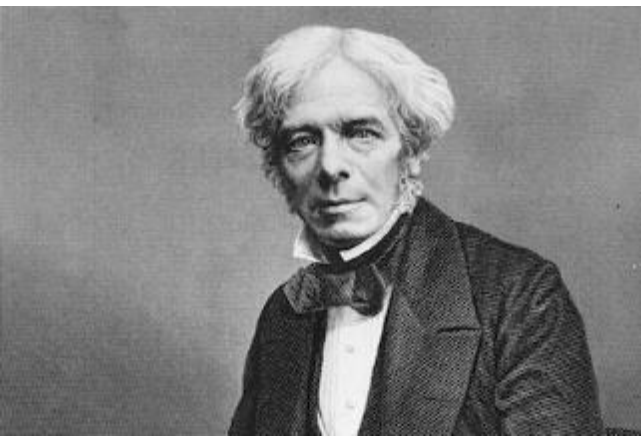
Il problema dell'interazione a distanza e il concetto di campo

Concezione newtoniana



La **forza** tra due corpi è esercitata **istantaneamente a distanza** (velocità **infinita** di “propagazione dell’interazione”); l’interazione tra i corpi è **diretta**

Concezione di campo (Faraday)



L’interazione non è tra le cariche, ma tra la **carica** e il **campo** (elettrico), che è il mediatore dell’interazione

Una metafora per comprendere il concetto di campo



Sorgente del campo

$$(q_1 > 0)$$

Campo

$$E = k \frac{q_1}{r^2}$$



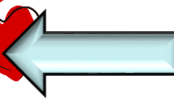
Oggetto su cui
agisce il campo

$$(q_2 < 0)$$

In assenza di campo la carica q_2 non è in moto



In presenza di campo, prodotto da q_1 , lo spazio è permeato dal campo e la carica q_2 si muove, perchè soggetta al campo



*Problema aperto: Con quale
velocità propaga il campo?*

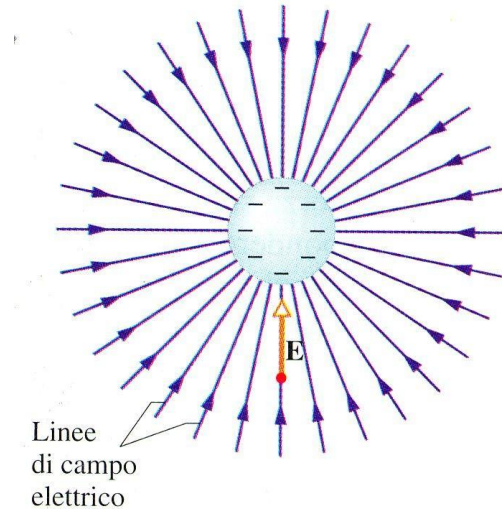
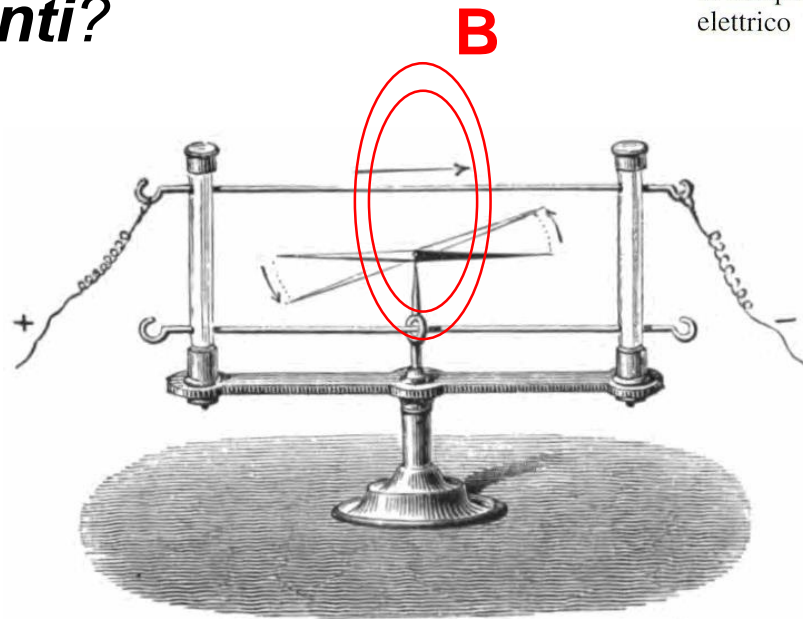
Correnti e fenomeni magnetici

Per generare un **campo elettrostatico**
servo **cariche ferme**

*Che cosa generano le
cariche in movimento =
correnti?*



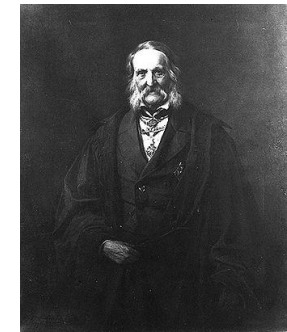
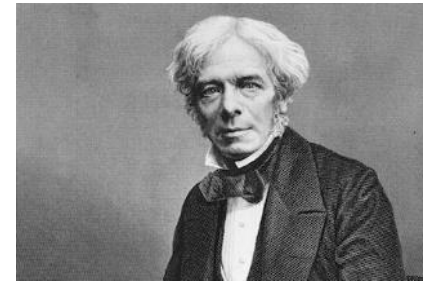
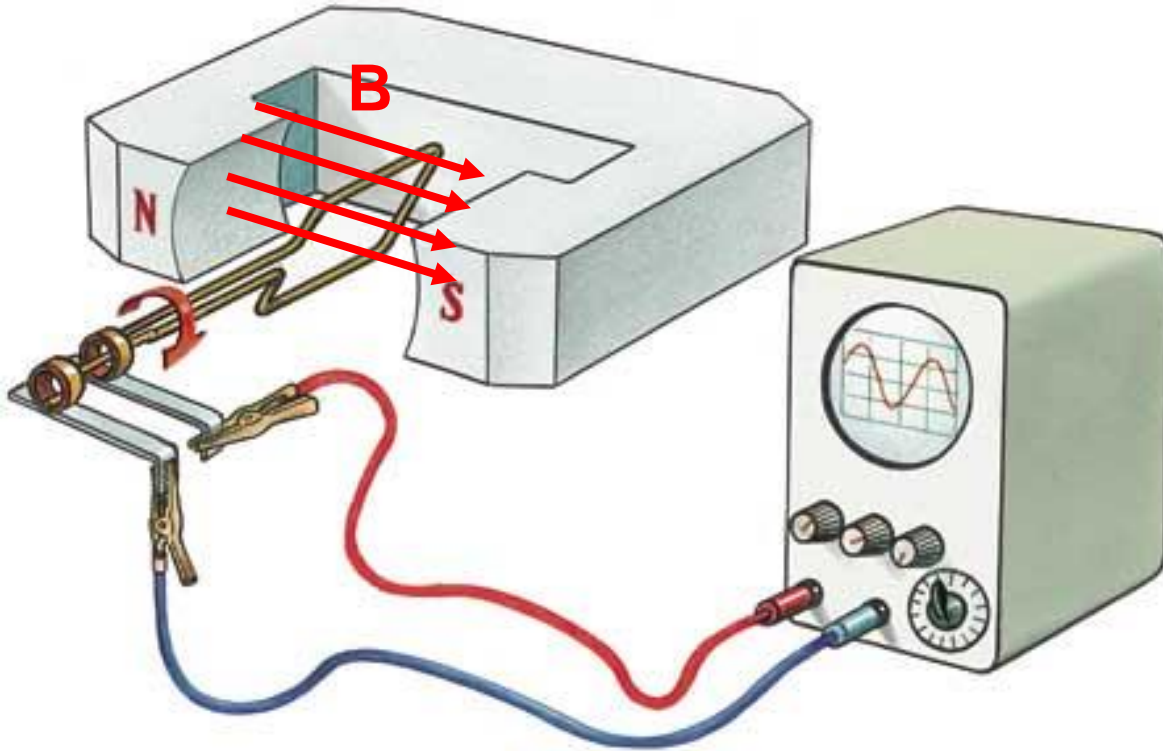
Hans Christian Ørsted
(1777-1851)



**I campi
magnetici
sono generati
dalle correnti
e agiscono
sulle correnti**

**Simmetria tra cariche ferme e in moto: sorgenti dei e
soggette ai rispettivi campi**

Campi elettrici e magnetici si possono indurre l'un l'altro

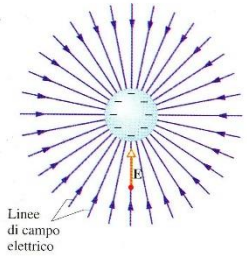


Un flusso di **campo magnetico variabile nel tempo** induce un **campo elettrico** (si può mostrare anche il viceversa)



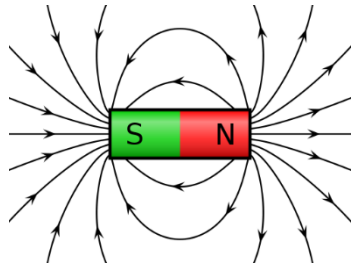
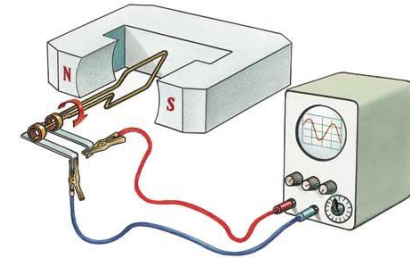


L'unificazione di fenomeni elettrici e magnetici nelle equazioni di Maxwell



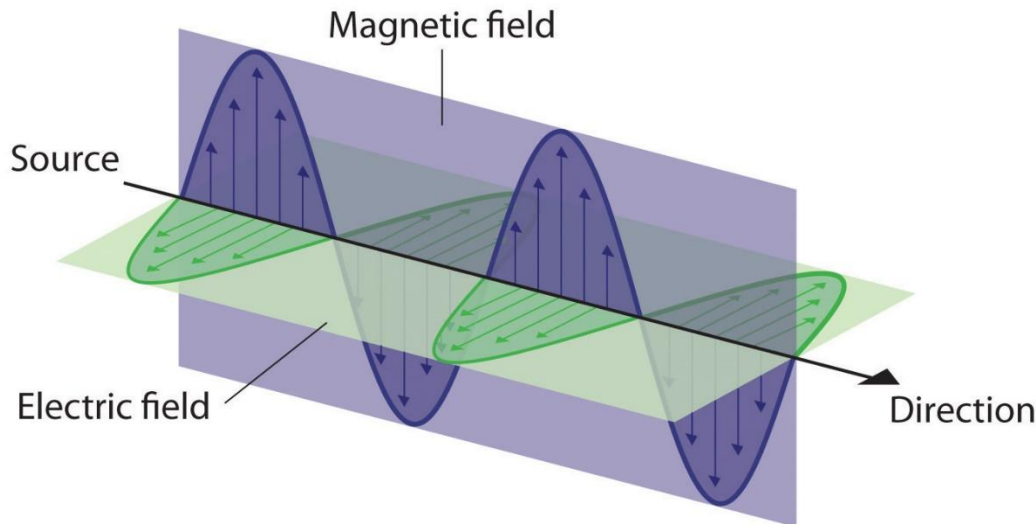
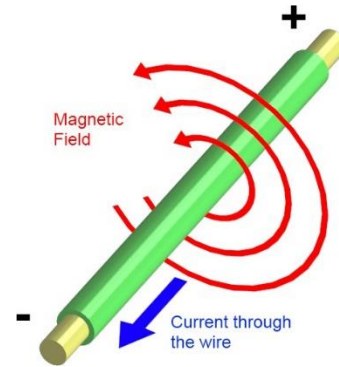
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

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



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

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$



Campo elettrico e magnetico propagano come **onde a velocità finita**:
le onde elettromagnetiche

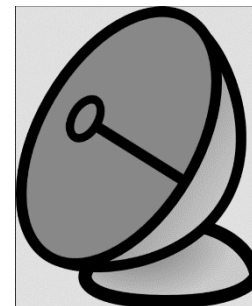
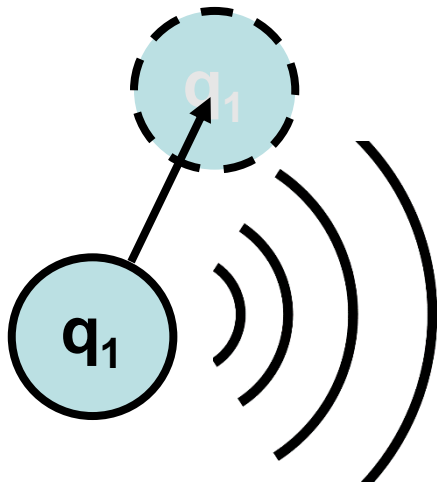
A che velocità propagano le onde elettromagnetiche?

Teoria di Maxwell

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

La luce è un'onda elettromagnetica

Si risolve anche il problema dell'interazione istantanea
(Concetto di **potenziale ritardato** o di Liénard-Wiechert)

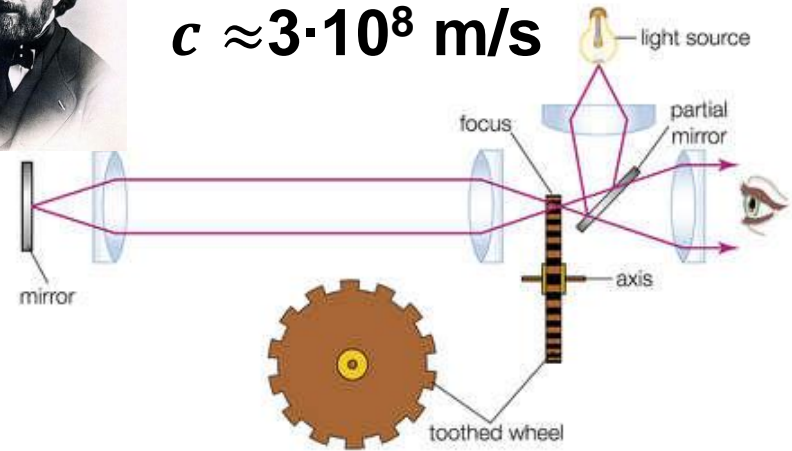


Velocità **finita** di propagazione del campo!!!

Esperimento di Fizeau sulla velocità della luce



$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

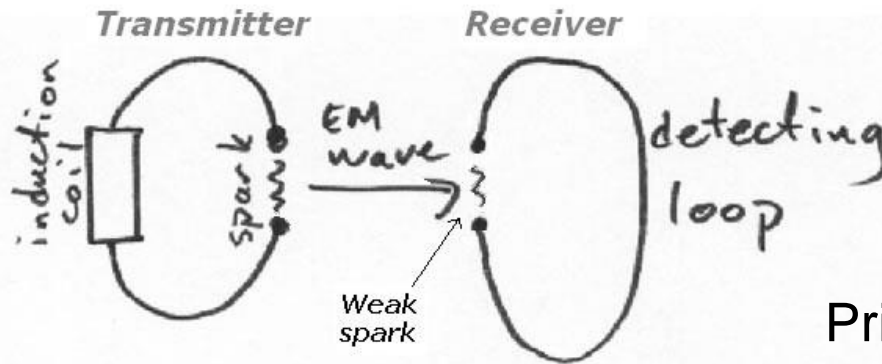


Il ricevitore “vede”
la carica al tempo

$$t' = t - \Delta x / c$$

non a t

E' "solo" una teoria?



Hertz dimostra la produzione e la rivelazione delle onde e.m.

Prima illuminazione elettrica del teatro alla Scala (1883)

Marconi e la radio (1901)



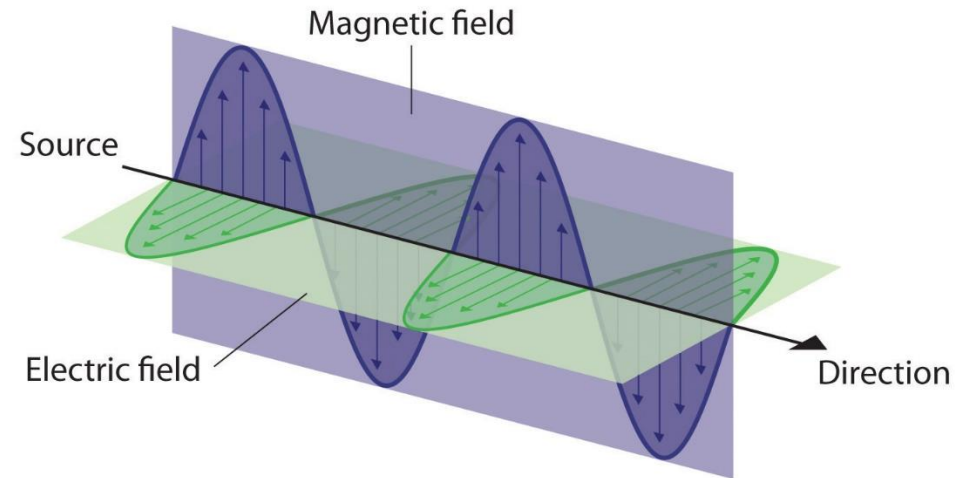
*Le leggi fondamentali e i fatti più importanti della fisica sono stati tutti scoperti, e sono così ben stabiliti che è **assolutamente remota** la possibilità che vengano soppiantati a seguito di nuove scoperte.*

Albert Michelson, 1899

L'inizio della crisi

- Le onde elettromagnetiche propagano anche nel **vuoto**

*(a differenza delle onde elastiche e sonore che propagano in **un mezzo**)*



Ipotesi dell'**etere**

Mezzo che permea tutto l'universo:

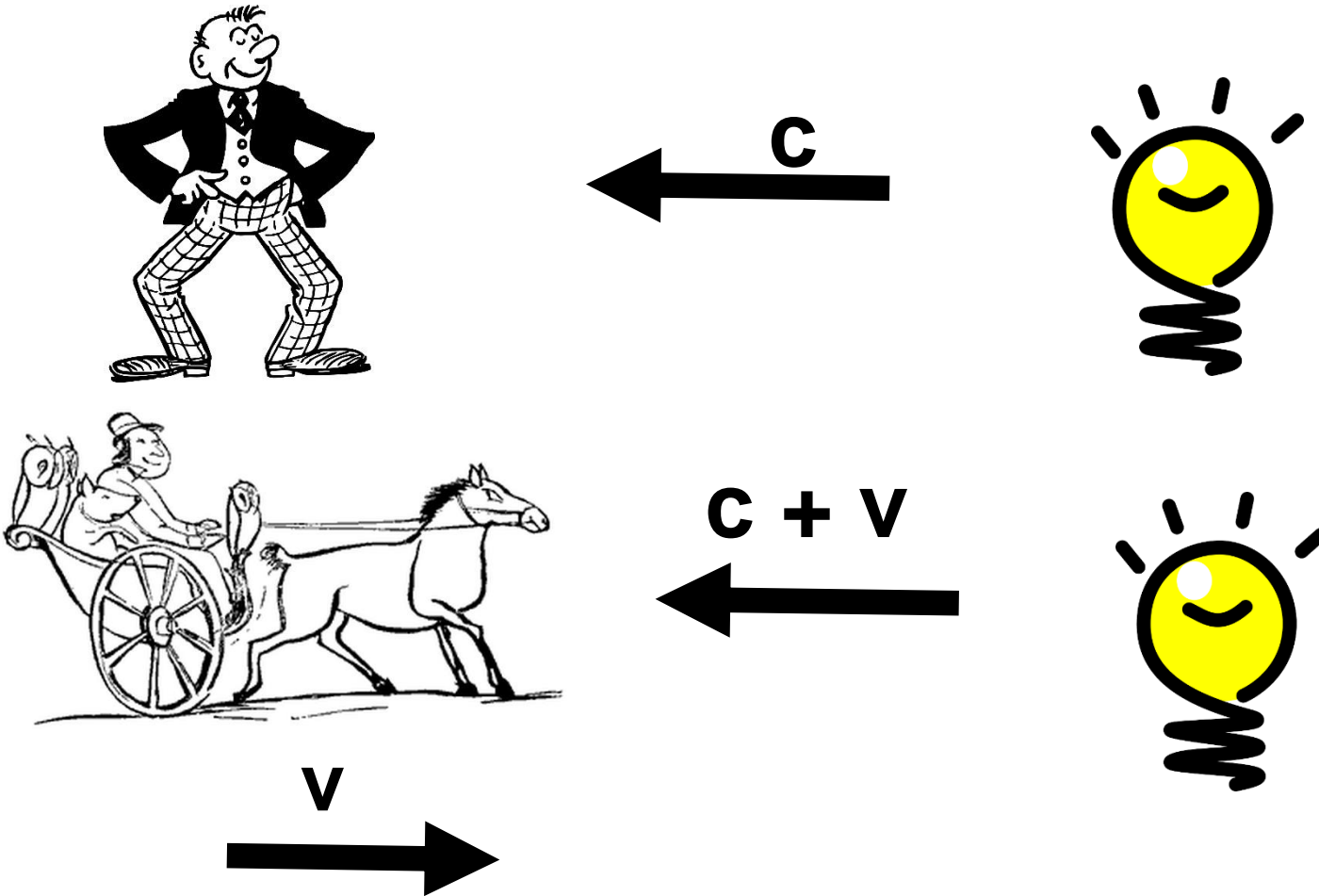
- poco denso per permettere ai corpi di muoversi attraverso esso
- molto rigido per permettere alla luce di propagare ad altissima velocità



La velocità della luce è indipendente dal sistema di riferimento

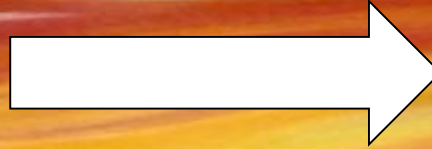
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Contraddice il principio di relatività galileiano



**Teoria
dell'elettro-
magnetismo**

Suggerisce



**Esistenza di un
sistema
assoluto
(etere; Newton)**

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

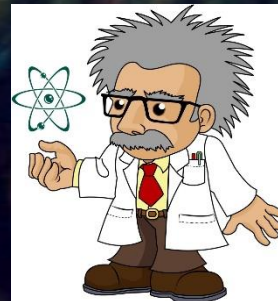
Contraddice

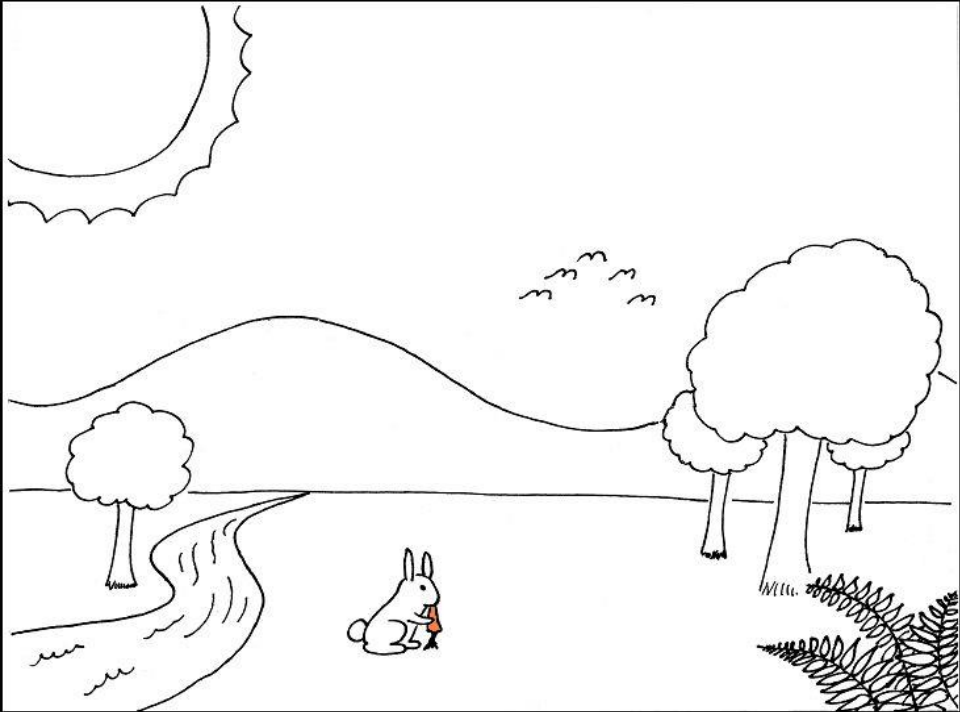


**Ciascuna teoria *NON*
è contraddetta dai
dati sperimentali
dell'epoca**

**Serve un nuovo
paradigma**

**Relatività
galileiana**



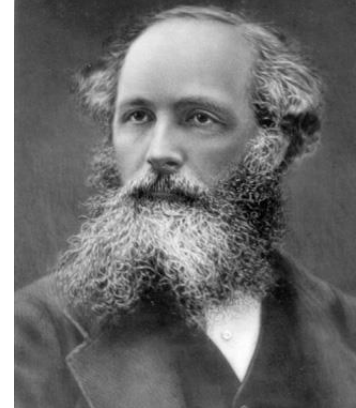


$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

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

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

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$



**Grazie
dell'attenzione!**

$$\begin{aligned} &^1\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^2\text{H} + e^+ + \nu_e \\ &^2\text{H} + ^1\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \gamma \\ &^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow 2\text{He} + 2^1\text{H} \end{aligned}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho$$

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

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$$

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

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = C$$

$$n\text{CO}_2 + n\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{h\nu} (\text{CH}_2\text{O})_n + n\text{O}_2$$

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$$

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right] \Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi$$

$$f_1(x,y) = \begin{bmatrix} 0.85 & 0.07 \\ -0.04 & 0.85 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \dots$$

$$f_2(x,y) = \begin{bmatrix} 0.15 & \dots \\ 0.25 & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \dots$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \mu_i + \dots$$

$$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$$