



Il problema della velocità della luce

La sintesi di Maxwell

Le leggi fondamentali dell'elettromagnetismo sono state sintetizzate per la prima volta da J.C. Maxwell nel "***A Treatise on Electricity and Magnetism***" pubblicato nel 1873.

$$\Phi_S(\vec{E}) = \frac{Q_s}{\epsilon_0}$$

$$C_\Gamma(\vec{E}) = -\frac{d\Phi(\vec{B})}{dt}$$

$$\Phi_S(\vec{B}) = 0$$

$$C_\Gamma(\vec{B}) = -\mu_0 \left(i + \epsilon_0 \frac{d\Phi(\vec{E})}{dt} \right)$$



WEBINAR

Maxwell e le onde elettromagnetiche

Una delle conseguenze più importanti delle equazioni di Maxwell è la previsione dell'esistenza delle **onde elettromagnetiche**.

Nella teoria di Maxwell:

- le onde elettromagnetiche propagano **campi elettrici e magnetici** in un mezzo chiamato **etere**.
- **Rispetto all'etere** le onde elettromagnetiche si propagano con una velocità pari a:
- L'etere costituisce un **sistema di riferimento privilegiato** per l'elettromagnetismo. Un osservatore in moto rispetto all'etere dovrebbe **misurare velocità diverse per la luce**.



Esperimenti compiuti per rilevare il moto della Terra rispetto all'etere

All'epoca di Maxwell si ipotizzava che l'**etere fosse fermo rispetto alle stelle** in particolare rispetto al Sole.

La Terra si muove attorno al Sole con una velocità pari a circa $3 \cdot 10^4$ m/s

Gli esperimenti condotti da Fizeau nel 1849 indicavano che la velocità della luce fosse circa di $3 \cdot 10^8$ m/s.

Qualsiasi misura per rilevare il moto della terra rispetto all'etere avrebbe dovuto avere un errore relativo inferiore a 10^{-8} .

Le misure di Fizeau non potevano raggiungere la **precisione necessaria** per rilevare il moto della Terra rispetto all'etere.

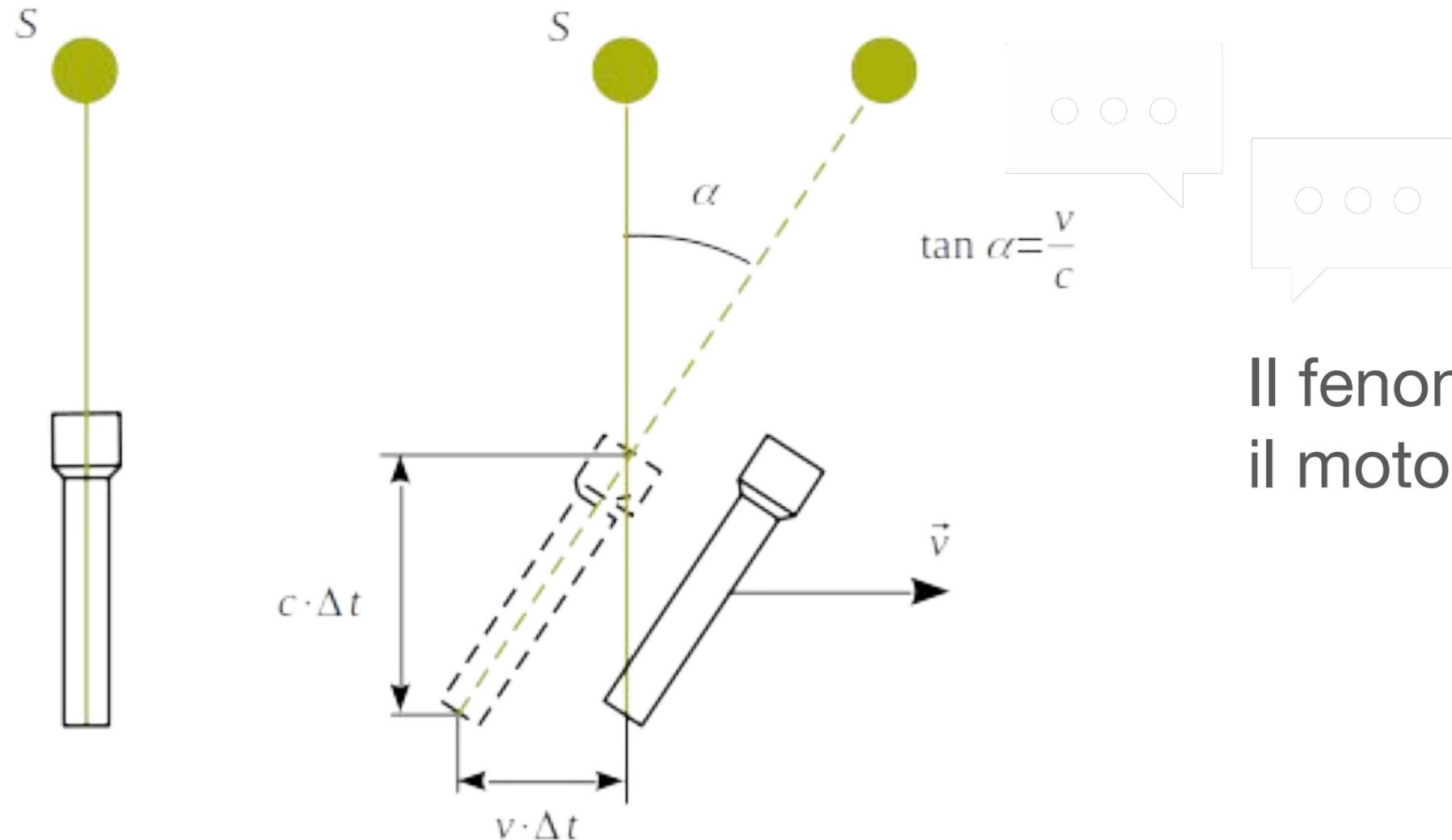
Maxwell stesso non riteneva possibile effettuare misure di tale precisione.



WEBINAR

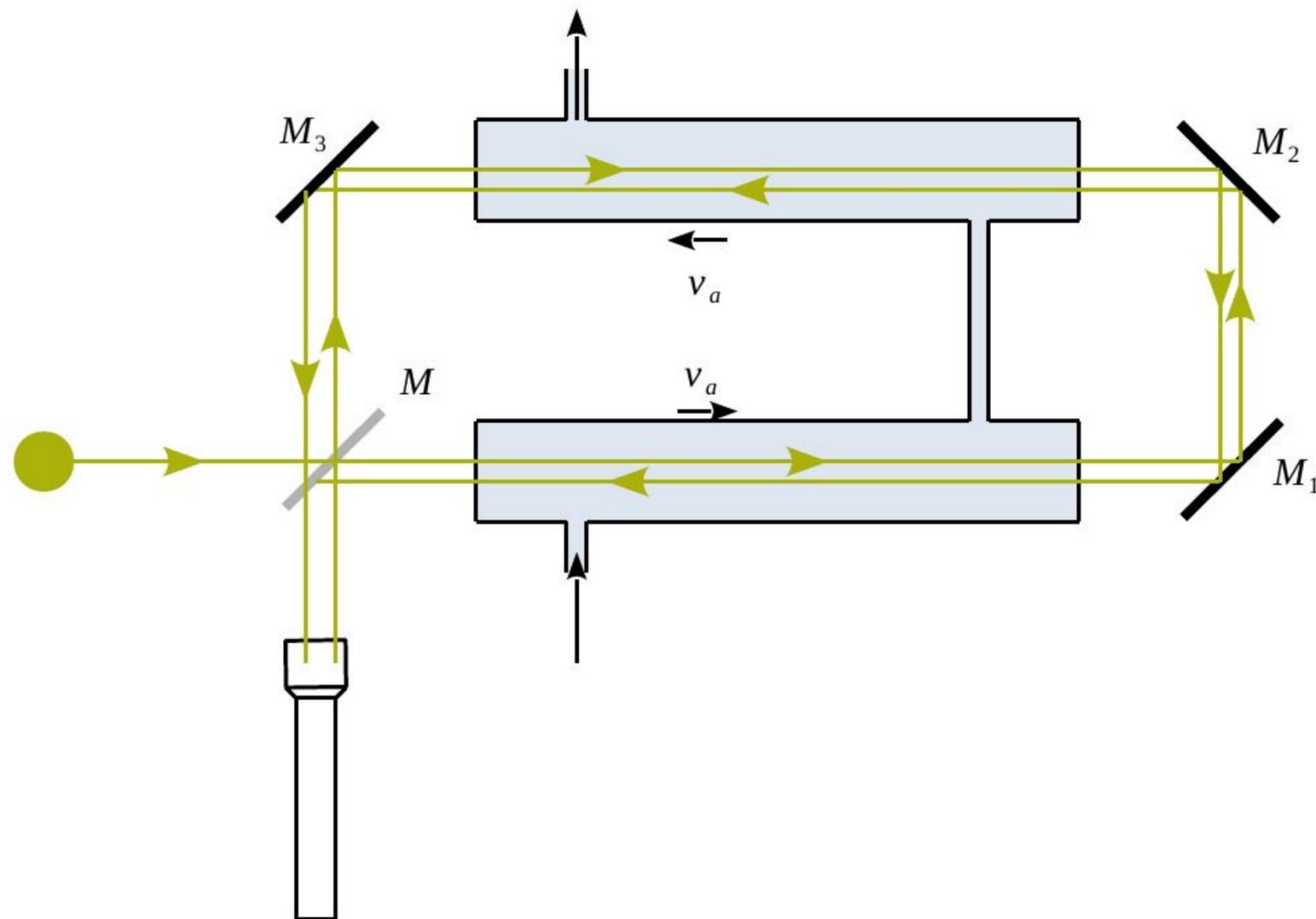
L'aberrazione stellare

Fenomeno osservato per la prima volta nel 1727 dall'astronomo Bradley e consiste nel fatto che per osservare la luce di una stella occorre inclinare il telescopio di un angolo pari a $20,5''$.



Il fenomeno veniva spiegato attraverso il moto della Terra rispetto all'etere.

L'esperimento di Fizeau



Fresnel nel 1817 aveva previsto che la luce potesse essere parzialmente trascinata da un mezzo in movimento.

Fizeau nel 1851 condusse un esperimento interferometrico che dimostrava che **l'etere non era trascinato dall'acqua.**

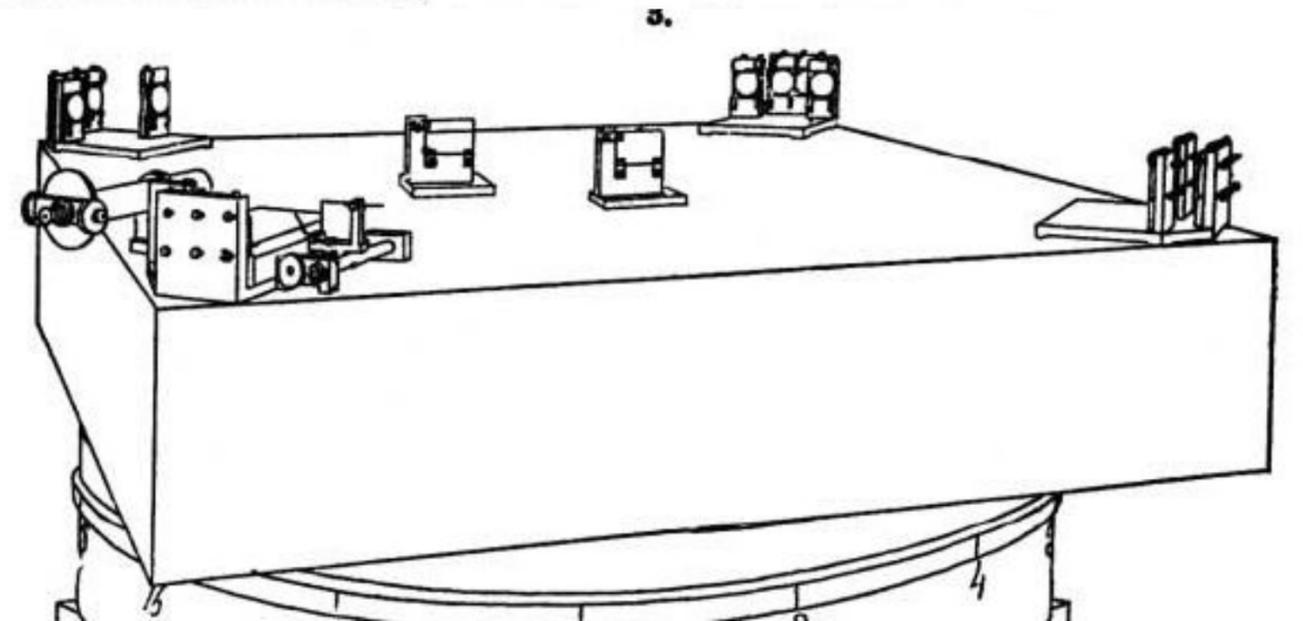
WEBINAR

L'esperimento di Michelson-Morley

Nel 1884 Michelson e Morley misero a punto un dispositivo interferometrico sufficientemente sensibile da essere in grado di rilevare il moto della Terra rispetto all'etere.

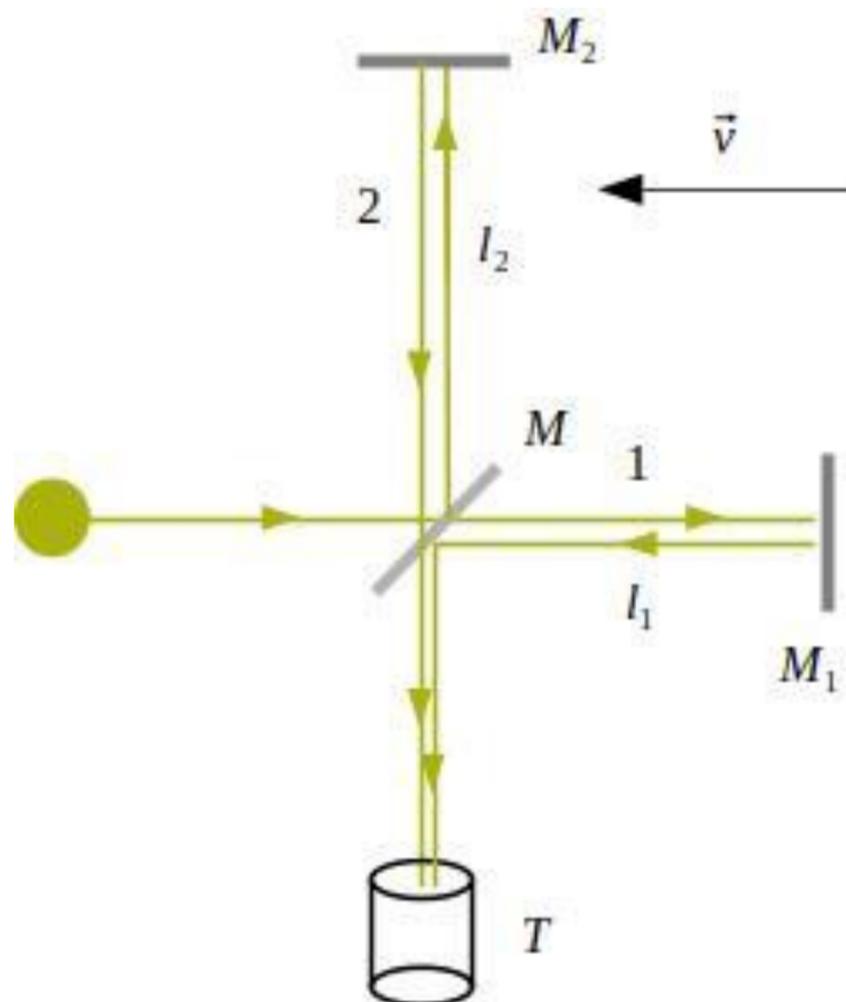
Questo esperimento era stato pensato per dare una conferma dei risultati sperimentali di Fizeau.

THE discovery of the aberration of light was soon followed by an explanation according to the emission theory. The effect was attributed to a simple composition of the velocity of light with the velocity of the earth in its orbit. The difficulties in this apparently sufficient explanation were overlooked until after an explanation on the undulatory theory of light was proposed. This new explanation was at first almost as simple as the former. But it failed to account for the fact proved by experiment that the aberration was unchanged when observations were made with a telescope filled with water. For if the tangent of the angle of aberration is the ratio of the velocity of the earth to the velocity of light, then, since the latter velocity in water is three-fourths its velocity in a vacuum, the aberration observed with a water telescope should be four-thirds of its true value.†

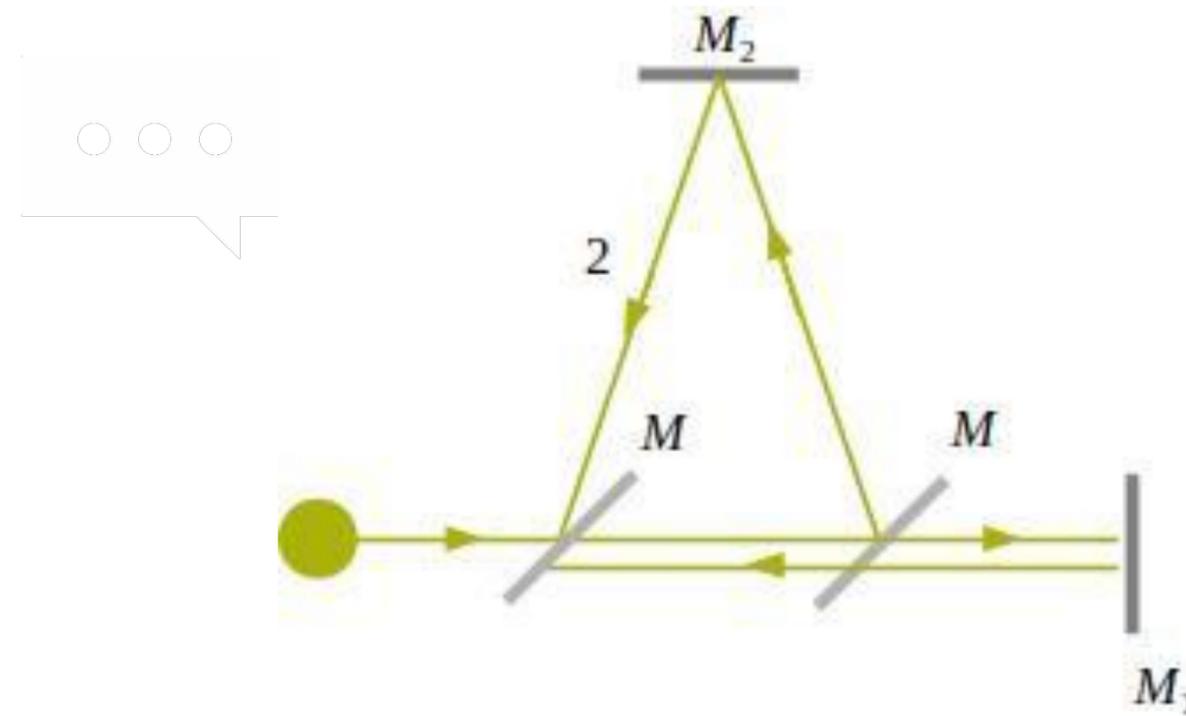


Interferenza della luce nell'interferometro di Michelson-Morley

Schema dell'interferometro
 \vec{v} è la velocità dell'etere



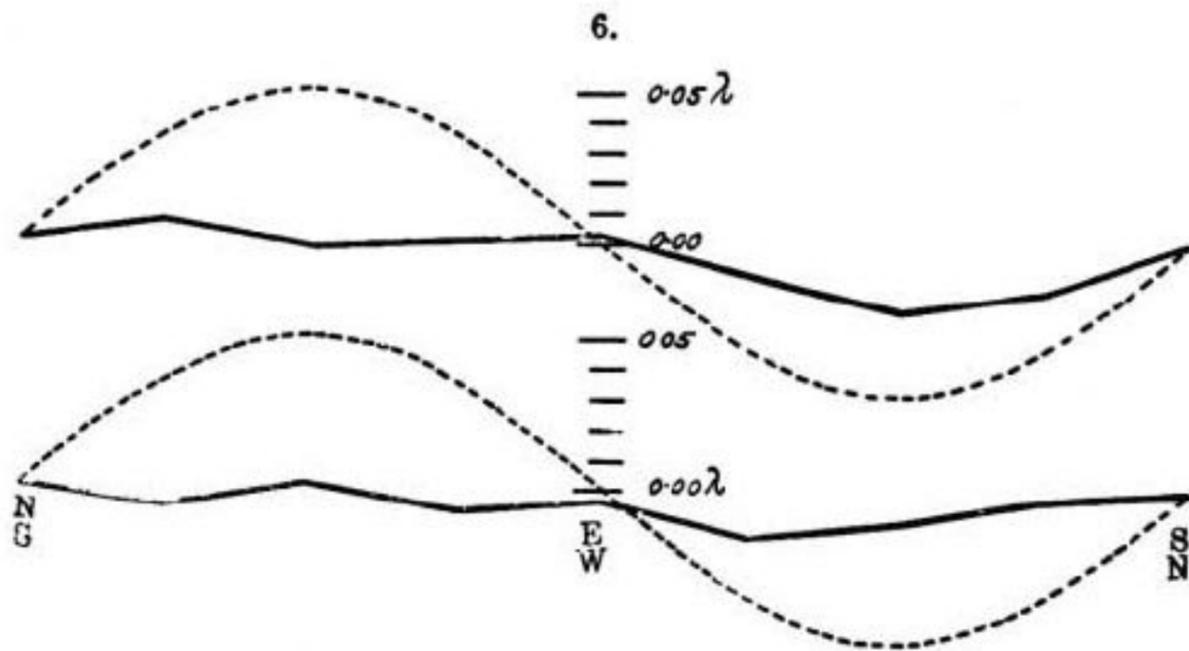
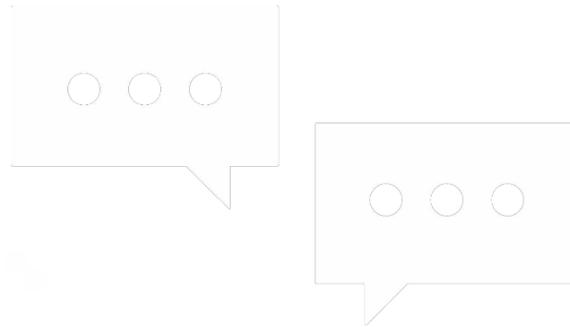
Percorsi dei raggi di luce visti nel sistema dell'etere



Il risultato dell'esperimento

A causa del moto della Terra rispetto all'etere ci si attendeva che ruotando di 90° il dispositivo nell'oculare si verificasse uno spostamento di frange dato da:

$$\Delta N = \frac{l_1 + l_2}{\lambda} \frac{v^2}{c^2}$$



Il risultato ottenuto mostrò che non si verificava nessuno spostamento di frange e che quindi la **Terra non era in moto rispetto all'etere.**

Tentativi di spiegazione: l'ipotesi del trascinamento dell'etere

All'epoca si riteneva che l'etere fosse un mezzo materiale. Stokes ipotizzò che, per effetto dell'attrito viscoso, **i pianeti nel loro moto potessero trascinare l'etere.**

Questo **spiegherebbe il risultato nullo dell'esperimento di Michelson-Morley.**

Ma è in **contrasto** con:

- Aberrazione stellare
- Esperimento di Fizeau



Tentativi di spiegazione: Teorie emissive

Le **teorie emissive** si basano sull'ipotesi che la velocità della luce sia una costante **relativa alla sorgente** che la emette anziché rispetto all'etere all'interno del quale la luce si propaga.

Difficoltà

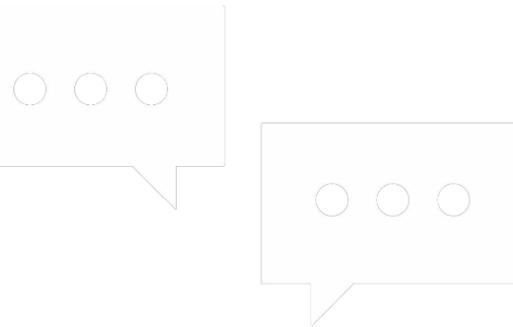
- La luce sarebbe l'unica onda la cui velocità di propagazione non è relativa al mezzo ma alla sorgente
- Contraddice l'esperimento di De Sitter sulle stelle binarie.
- Esperimenti del tipo di Michelson-Morley condotti con luce proveniente dalle stelle.



WEBINAR

Tentativi di spiegazione: Ipotesi di contrazione delle lunghezze

Nel 1892 G.F.Fitzgerald e in modo indipendente nel 1893 H.A. Lorentz ipotizzarono che i corpi in moto rispetto all'etere subissero un accorciamento pari a

$$l = \frac{l_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$


Difficoltà

- **Non è verificabile sperimentalmente** in quanto si contraggono sia gli oggetti sia gli strumenti di misura.



WEBINAR

A.Einstein “Zur Elektrodynamik bewegter Körper, Annalen der Physik 17, 891-921 (1905)”

“È noto che **l'elettrodinamica di Maxwell** - come la si interpreta attualmente - nella sua applicazione ai corpi in movimento porta a delle **asimmetrie, che non paiono essere inerenti ai fenomeni.**”

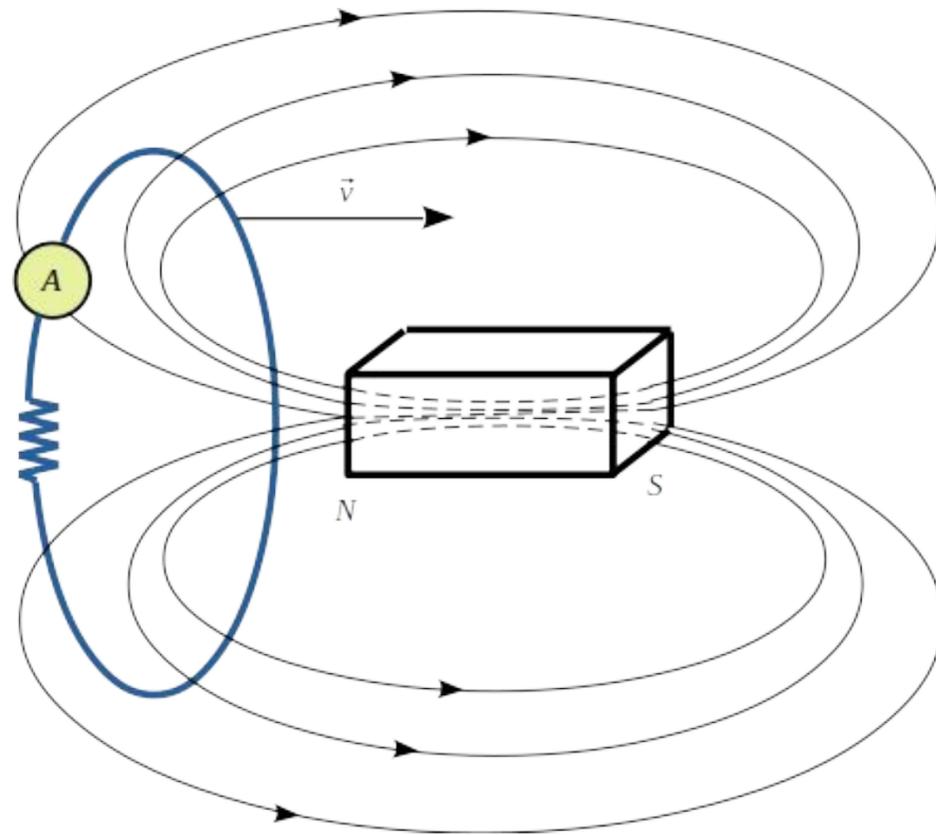
“ Si pensi per esempio all'interazione elettromagnetica tra un magnete e un conduttore.

I fenomeni osservabili in questo caso dipendono soltanto dal moto relativo del conduttore e del magnete, mentre secondo l'interpretazione consueta i due casi, a seconda che l'uno o l'altro di questi corpi sia quello in moto, vanno tenuti rigorosamente distinti.”



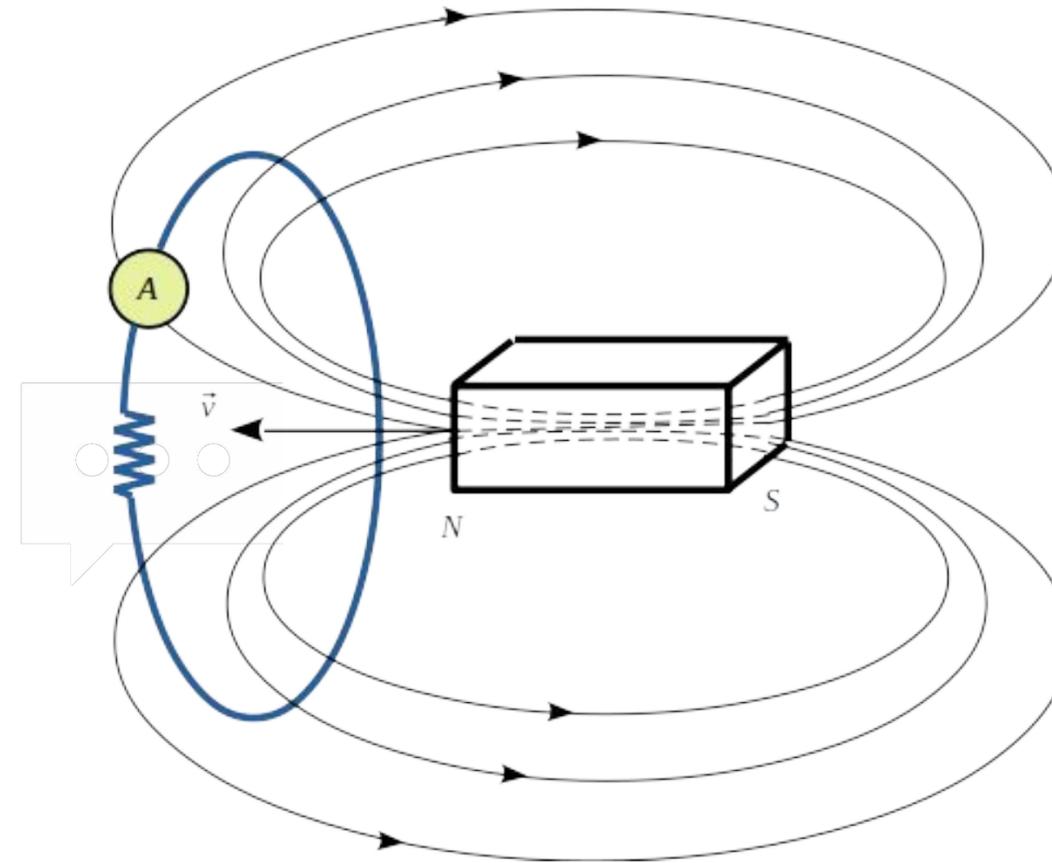
L'induzione elettromagnetica

Spira in moto - flusso tagliato



L'amperometro segna una corrente i che può essere spiegata sulla base della forza di Lorentz

Magnete in moto - flusso concatenato



L'amperometro segna una corrente uguale al caso precedente ma che non può essere spiegata sulla base delle leggi fisiche già note.

Asimmetria

Nell'interpretazione di Maxwell **i due fenomeni sono diversi** ed è la presenza dell'etere a permettere di distinguere i due casi:

- nel caso di **flusso tagliato il conduttore è in moto rispetto all'etere.**
- nel caso di **flusso concatenato è il magnete che si muove rispetto all'etere**

Nella teoria di Maxwell anche se in entrambi i casi la corrente indotta è la stessa **non è possibile affermare che sono lo stesso fenomeno osservato da due sistemi di riferimento diversi.**

Questo non contrasta con la relatività galileiana che riguarda solamente **i fenomeni meccanici** mentre l'induzione elettromagnetica è un fenomeno elettromagnetico.

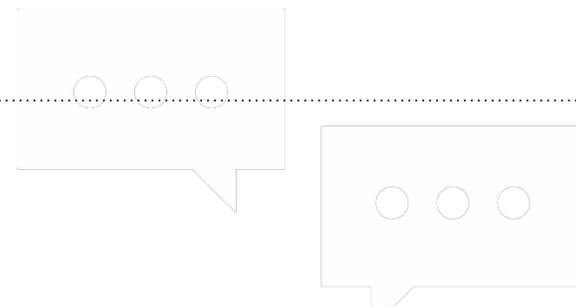


WEBINAR

Einstein e i principi della Relatività

Principio di relatività galileiana:

Le leggi della **meccanica** hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento inerziali”



1- Principio di relatività:

Le leggi della **fisica** hanno la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento inerziali.

2- Principio di invarianza della velocità della luce:

La velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore **c** rispetto a qualsiasi sistema di riferimento inerziale.



Conseguenze

Per mantenere costante la velocità della luce rispetto a qualsiasi sistema inerziale occorre **modificare le equazioni di trasformazione di Galileo**. In particolare è necessario **abbandonare l'idea del tempo come una grandezza fisica costante e immutabile** in tutti i sistemi di riferimento.

Galileo

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

\Rightarrow

Lorentz

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \end{cases}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

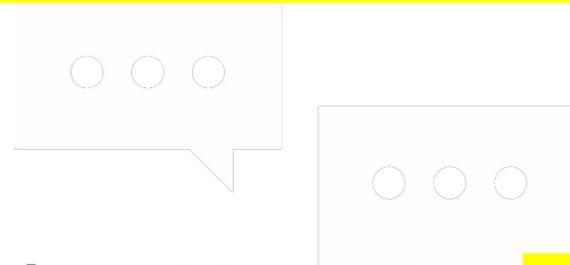


WEBINAR

Conclusioni

I principi della relatività di Einstein:

- si basano su un'approfondita analisi di esperimenti che rivelano come **la velocità della luce non dipenda dal sistema di riferimento rispetto a cui è misurata.**
- estendono il principio di relatività galileiana a **tutti i fenomeni fisici.**
- portano a sostituire le trasformazioni di **Galileo** con le trasformazioni di **Lorentz**. Le principali conseguenze di queste trasformazioni: dilatazione dei tempi, contrazione delle lunghezze sono effetti che sono stati **misurati sperimentalmente.**



WEBINAR

Referenze

- R.Resnick “Introduzione alla relatività ristretta”
- A.Michelson, E.Morley “On The Relative Motion of the Earth ad the Luminiferous Ether”
- S.Bergia, A.P.Franco “Le strutture dello spaziotempo”
- J.C.Maxwell nel “A Treatise on Electricity and Magnetism”
- A.Einstein “Sull’elettrodinamica dei corpi in movimento”



WEBINAR

*Vi ringrazio per l'attenzione
e auguro a tutti buon lavoro*

Andrea Brognara



webinar@mondadorieducation.it

www.mondadorieducation.it