



**Σ B**  
BUONARROTI

  
**Dip. Matematica & Fisica**  
Liceo Buonarroti Monfalcone

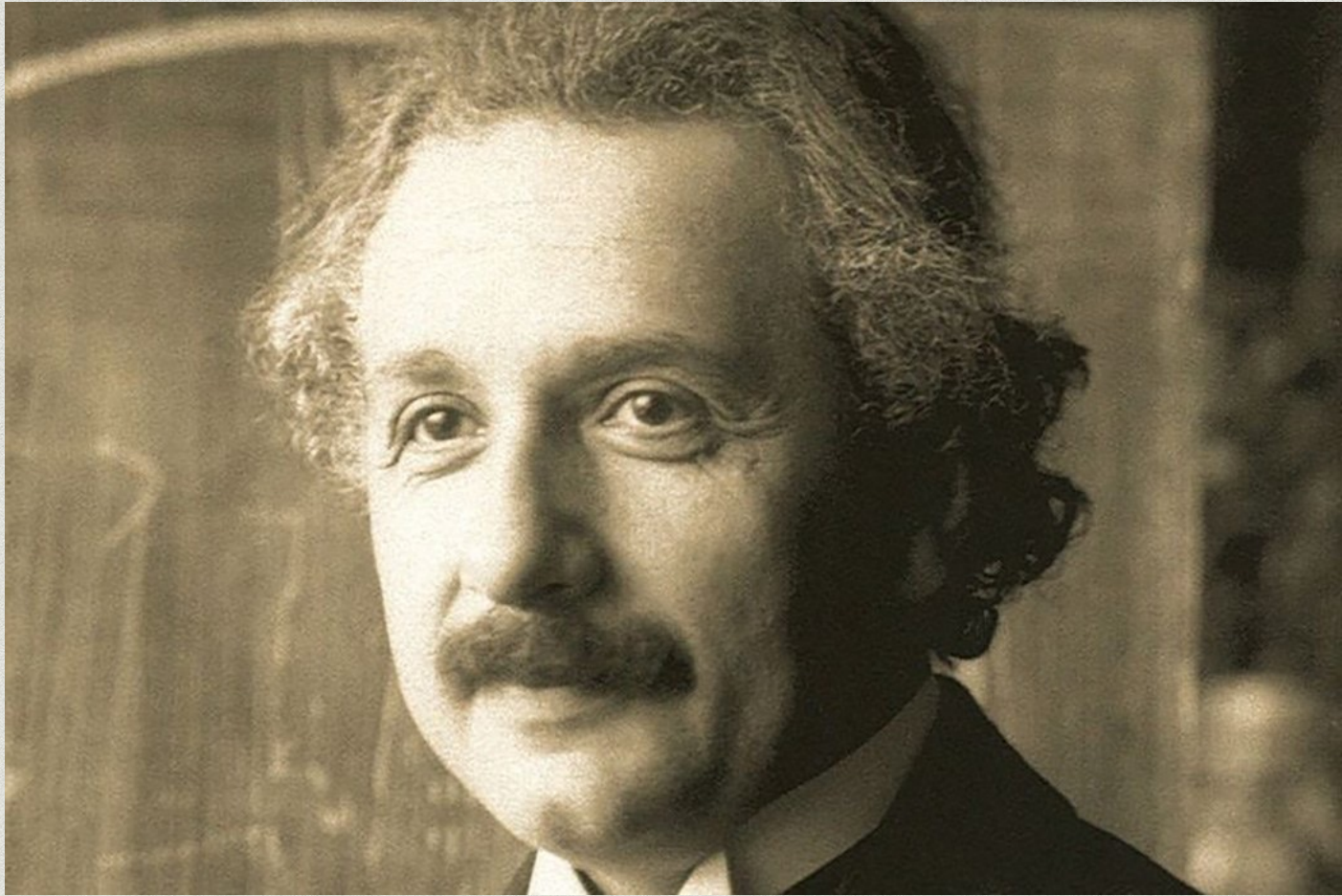
# IL CONCETTO DI RELATIVITÀ: DA EUCLIDE AD EINSTEIN

**PROF. ARMANDO PISANI - LICEO SCIENTIFICO E LINGUISTICO - M. BUONARROTI (MONFALCONE - GORIZIA)**

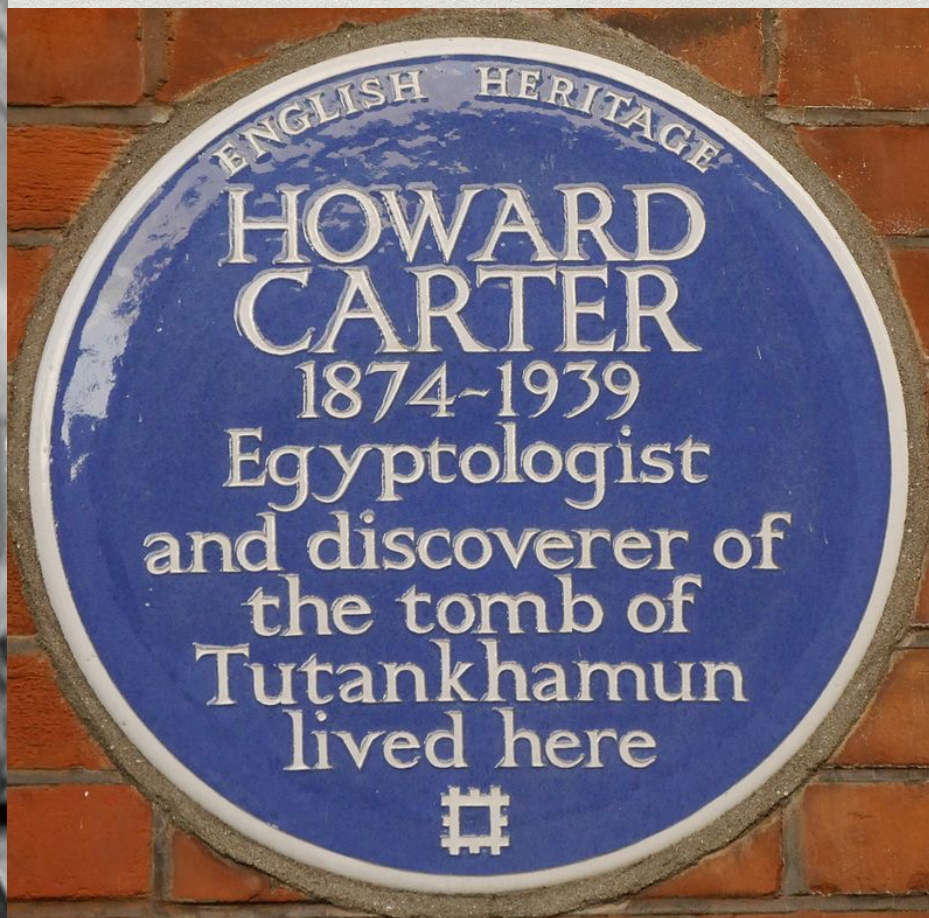
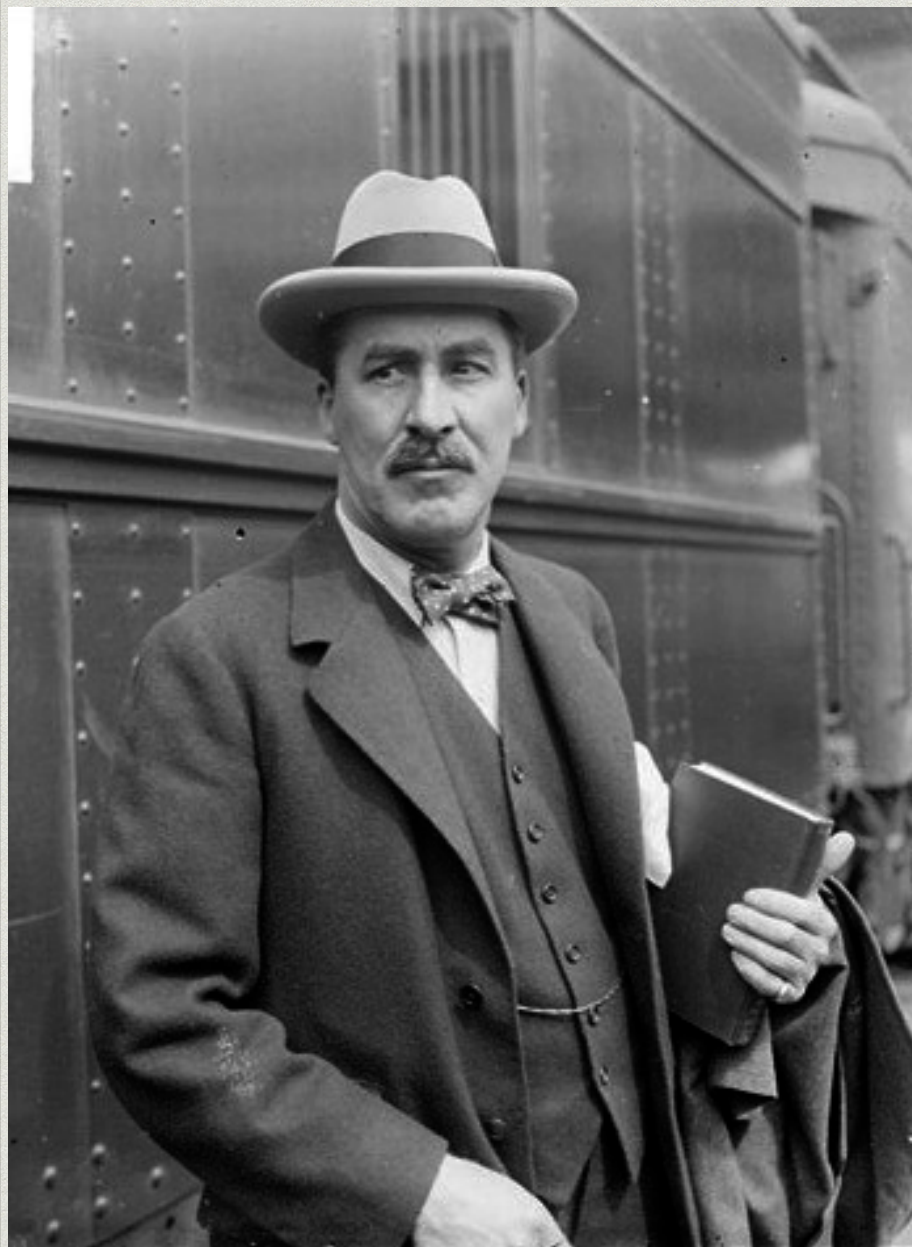




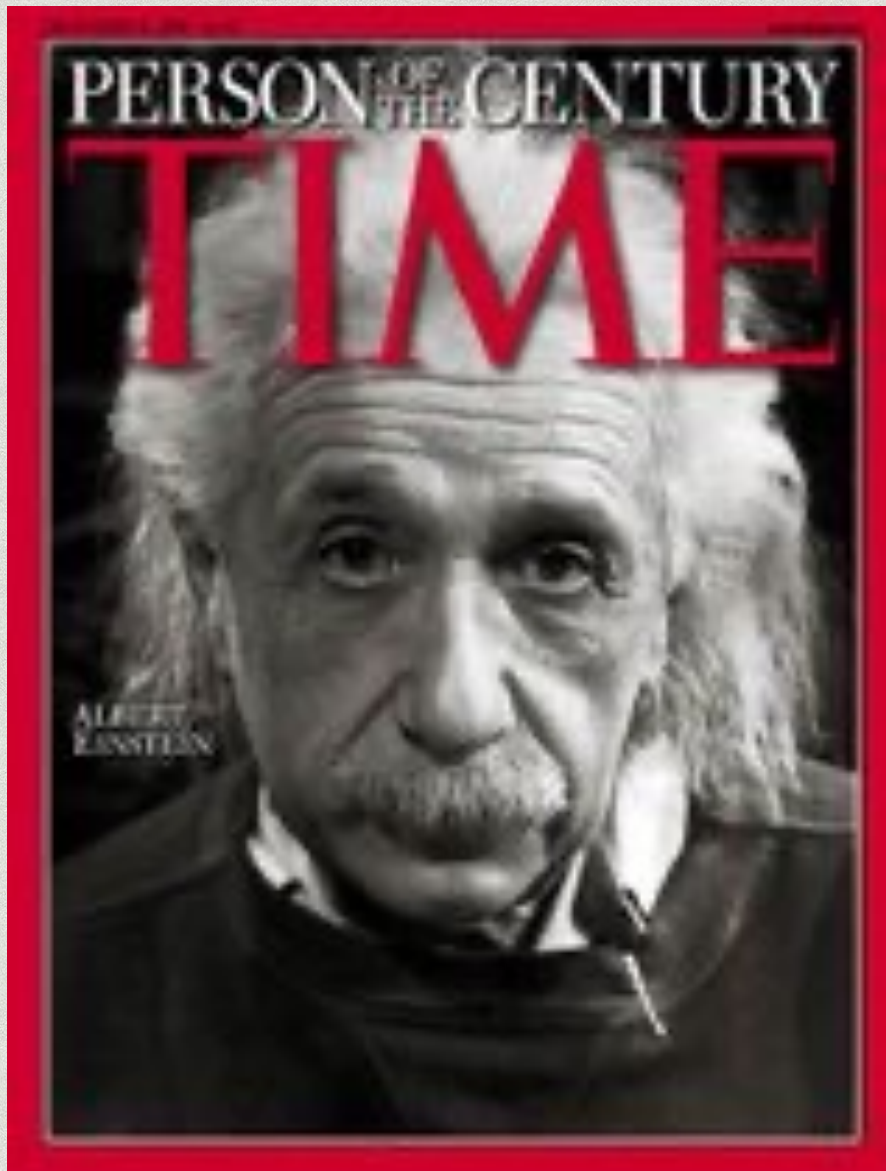












*Nel 1999 la rivista americana TIME rivela che, in base ad un sondaggio, il personaggio più rappresentativo del XX secolo è Albert Einstein.*

*La rivista "Physics World" indica A. Einstein come il più grande fisico di tutti i tempi.*



# LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less  
Agog Over Results of Eclipse  
Observations.

---

## EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

---

Stars Not Where They Seemed  
or Were Calculated to be,  
but Nobody Need Worry.

---

## A BOOK FOR 12 WISE MEN

---

No More in All the World Could  
Comprehend It, Said Einstein When  
His Daring Publishers Accepted It.

*Il 7 novembre 1919 il  
New York Times*

*“La teoria di Einstein  
trionfa”*

*Nasce un MITO.*



# Indice

- \* 1) Introduzione
- \* 2) La relatività prima di Galileo
- \* 3) Il principio di relatività galileiano
- \* 4) L'elettromagnetismo e la luce
- \* 5) Il principio di relatività di Einstein



**IL MOTO:**  
**IL GABBIANO È FERMO.**





**IL MOTO:**

**LA BAMBINA SI MUOVE**





# IL MOTO È ASSOLUTO?



**A PRIMA VISTA: SÌ!**



# Primo studio del moto

- \* Aristotele (384-322 a.C.)
- \* Fisica & De Coelo:
- \* Luoghi speciali (centro dell'Universo)
- \* Sistema di riferimento ASSOLUTO (non serve specificarlo) -> moto assoluto
- \* La Terra è ferma al centro dell'Universo (finito).





# De Coelo

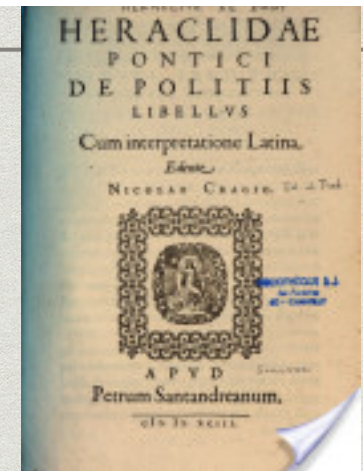


- \* “Noi diremo per prima cosa se [la Terra] è in moto o sta ferma. Come abbiamo detto, alcuni ne fanno uno degli astri, mentre altri, ponendola al centro, dicono che si muove ruotando attorno all’asse centrale. Che ciò sia impossibile ...”

**Non tutti la pensano come Aristotele!**



# Primo passo verso la relatività:



- \* Iceta di Siracusa (400 - 335 a.C.): “la Terra si muove secondo un circolo” -> moto giornaliero delle stelle
- \* Ecfanto di Siracusa (IV sec. a.C.): la Terra ruota attorno al suo asse
- \* Eraclide Pontico (385-310 a.C.): Rotazione della Terra come spiegazione del moto diurno delle stelle.
- \* Aristarco di Samo (310-230 a.C.): sistema Eliocentrico

**La terra non è più un sistema di riferimento assoluto**



# L'apparenza inganna!





# ANCORA UN PASSO VERSO LA RELATIVITÀ DEL MOTO: EUCLIDE (IV-III SEC. A.C.)

“SE SI MUOVONO NELLA STESSA DIREZIONE L’OCCHIO E DIVERSI CORPI CHE SI SPOSTANO CON VELOCITÀ DIVERSA, QUELLI CHE SI MUOVONO CON LA STESSA VELOCITÀ DELL’OCCHIO SONO GIUDICATI FERMI, QUELLI PIÙ LENTI APPAIONO MUOVERSI ALL’INDIETRO E QUELLI PIÙ VELOCI IN AVANTI” (OTTICA, PROP.51)



**Lo stato di moto dipende da chi lo descrive**



# La Terra si muove!

- \* Plutarco (46-125 d.C.) *Platonicae questiones* , 1006C:
- \* “Doveva [Timeo] pensare che la Terra fosse stata progettata non confinata e stabile, ma rivolgenti e ruotante, come successivamente affermarono Aristarco e Seleuco, il primo assumendolo solo per ipotesi e Seleuco, invece, (di)mostrandolo anche.”



# Seleuco di Babilonia (150 – 190 a.C.)

- \* Sostiene il sistema eliocentrico e l'infinità dell'universo.
- \* Seleuco dimostra la rotazione e la rivoluzione della Terra con una teoria che interpreta le maree (gli stessi principi dell'attuale teoria delle maree!).
- \* Galileo (Dialogo dei Massimi Sistemi): cita la teoria di Seleuco (senza nominarlo).



# Se la Terra ruota ....



- \* Raggio della Terra: 6400 km (Eratostene 276-194 a.C.)
- \* Periodo: 24h
- \* Velocità di rotazione (all'equatore):



$$v_E = \frac{2\pi R}{T} = 1675 \text{ km / h}$$

$$v(45^\circ) = \frac{2\pi R}{T} \cos(45^\circ) = 1185 \text{ km / h}$$





**DAL FILM "AGORÀ"**

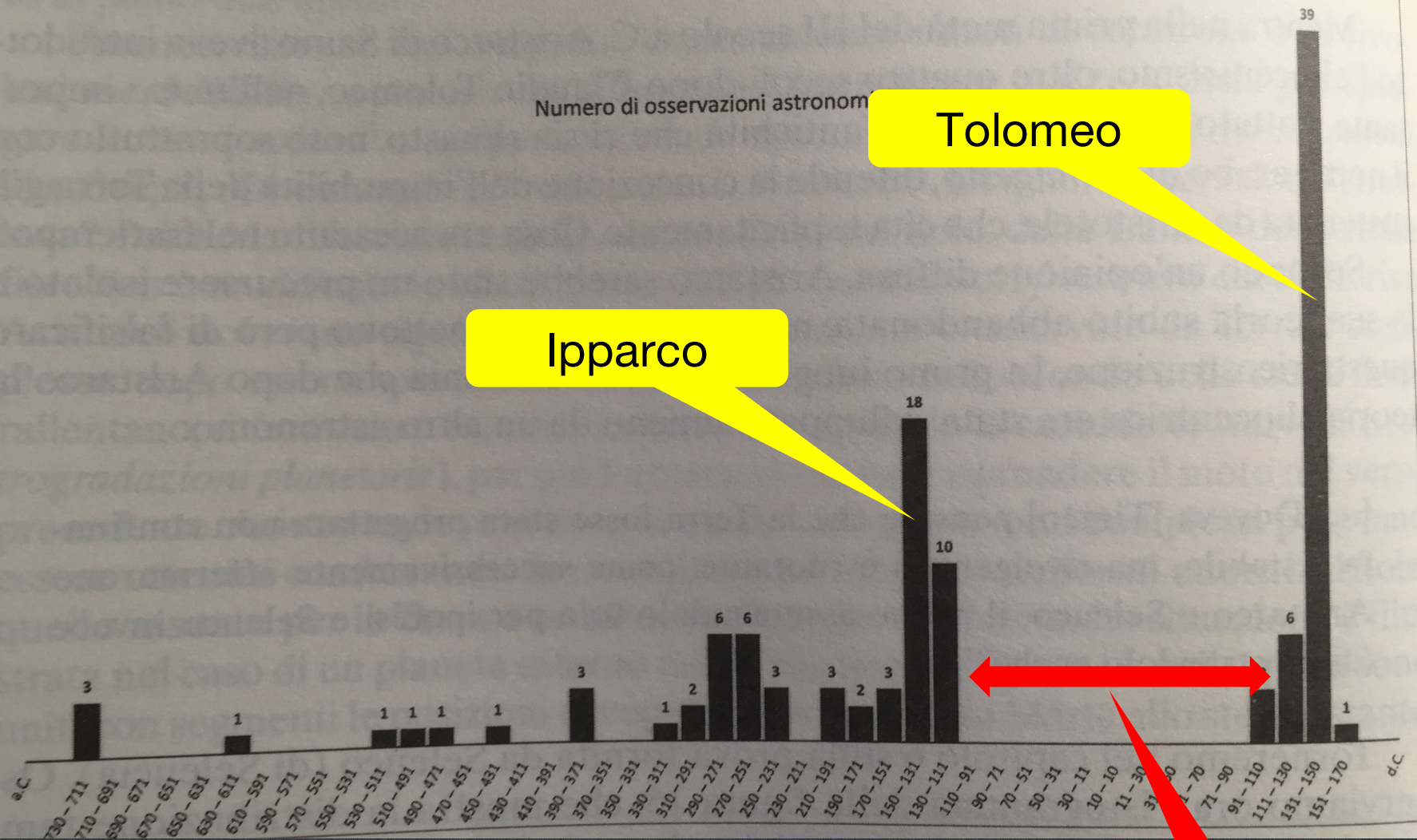
LA RELATIVITÀ DEL MOTO



Numero di osservazioni astronomiche

Tolomeo

Ipparco



**SI TORNA INDIETRO**

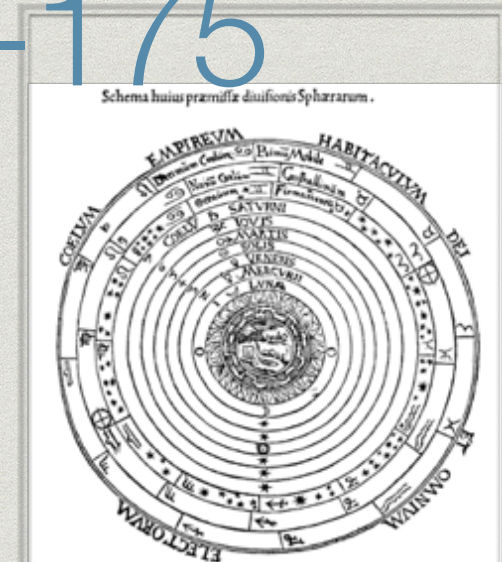
200 anni

Da Lucio Russo: Stelle, atomi e velieri, Mondadori



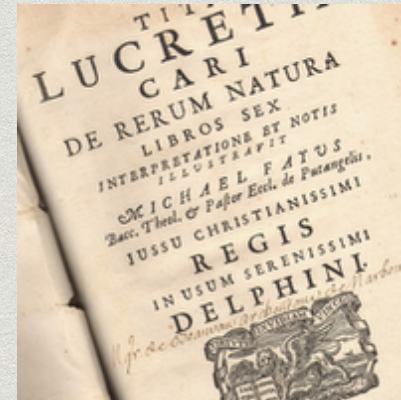
# Claudio Tolomeo (100-175 d.C.)

- \* “Trattato matematico” (Almagesto)
- \* Sistema Geocentrico
- \* Per motivare la sua scelta, descrive il punto di vista opposto: quello “relativista”:
- \* Equivalenza tra la rotazione del Cielo e quella della Terra (se l’asse è lo stesso).
- \* Riconosce che nessuna osservazione astronomica permette di distinguere i due casi. (anche in altri riferimenti a fonti ellenistiche).
- \* **Non ci accorgiamo del moto della Terra dato che tutto ciò che è in essa partecipa al suo moto.**

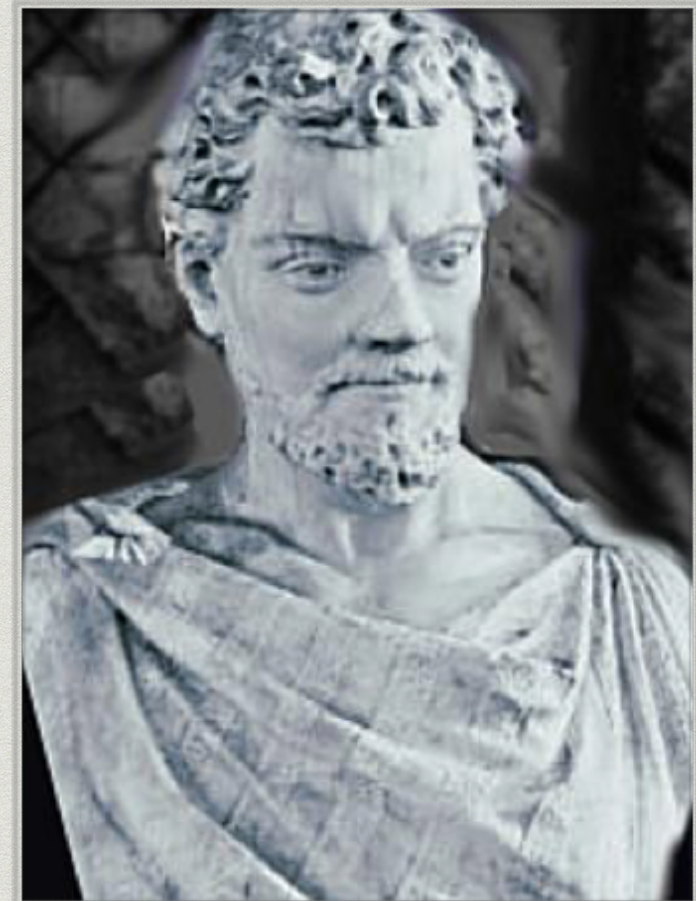




# Tito Lucrezio Caro (94-50 a.C.)



- \* De Rerum Natura, IV, 387-390:
- \* “Quando il mare è calmo, e noi stiamo navigando a vele spiegate, non ci accorgiamo del moto della nave. Ci sembra, anzi, che le altre navi all’ancora nel porto ci superino, e che i campi e le colline fuggano a poppa.”





# Publio Virgilio Marone (70-19 a.C.)



- \* Eneide, III, 72:
- \* “Salpiano dal porto, e la terre e le città si allontanano.”





# Importante:

- \* 25 maggio 1085: re Alfonso VI di Castiglia conquista Toledo: trova un'immensa biblioteca che fa tradurre ai dotti d'Europa.
- \* Sec. XII riconquista della Sicilia
- \* 1088 Nascono le Università in Europa (Bologna)
- \* 1120 Adelardo di Bath traduce in latino gli "Elementi" di Euclide
- \* 1175 Gerardo da Cremona traduce l'Almagesto e la Geografia di Tolomeo.
- \* 1537 Pubblicazione del "Trattato sulle coniche" di Apollonio di Perga.





# Successivamente:

- \* Nicola d'Oresme: "Trattato del Cielo e del Mondo (1377)
- \* N. Copernico: De revolutionibus orbium caelestium (1543) (cita Aristarco e il passo di Virgilio)
- \* G. Bruno: Cena delle ceneri (1584), sviluppa le conseguenze dell'eliocentrismo e dell'atomismo. Descrive l'esempio della nave poi ripreso da Galilei.



# N. Copernico

## 1473-1543

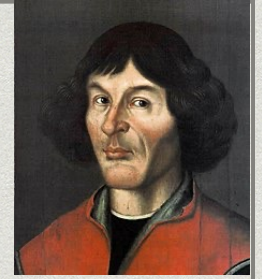


- \* Studia in Italia: Padova, Bologna e Ferrara
- \* Legge l'Arenario di Archimede e prende conoscenza del sistema eliocentrico di Aristarco di Samo.





# N. Copernico 1473-1543

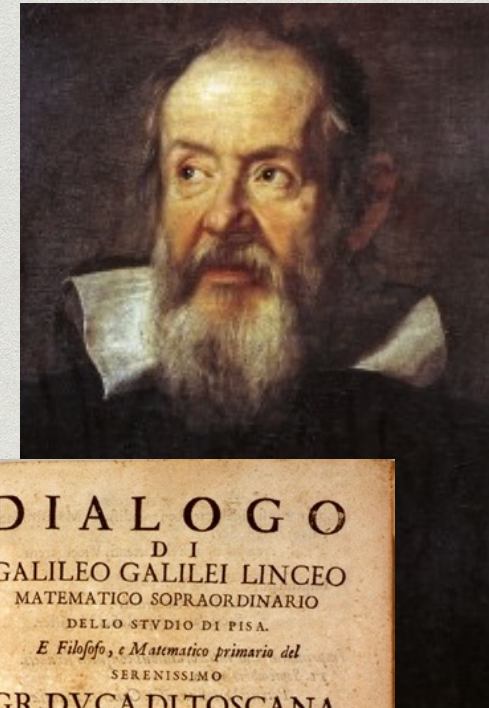


- \* [...] fui preso da irritazione per il fatto che nessun calcolo sicuro dei movimenti della macchina del mondo - creata per noi dal migliore e più perfetto artefice - fosse noto ai filosofi che pure avevano scrutato con tanta cura le minime cose di questo mondo. Perciò mi assunsi l'impresa di raccogliere i libri di tutti i filosofi, che potessi avere, al fine di indagare se mai qualcuno avesse opinato che i movimenti delle sfere del mondo fossero diversi da quelli che ammettono coloro che insegnano matematiche nelle scuole. **E trovai così innanzi tutto in Cicerone che Niceto aveva pensato che la Terra si muovesse. Poi anche in Plutarco trovai che altri ancora erano della stessa opinione,[...].**
- \* Di qui dunque, imbattutomi in questa opportunità, presi anch'io a pensare alla mobilità della Terra.
- \* [Copernico (dall'epistola dedicatoria del De revolutionibus - 1543)]



# Galileo Galilei (1564-1642)

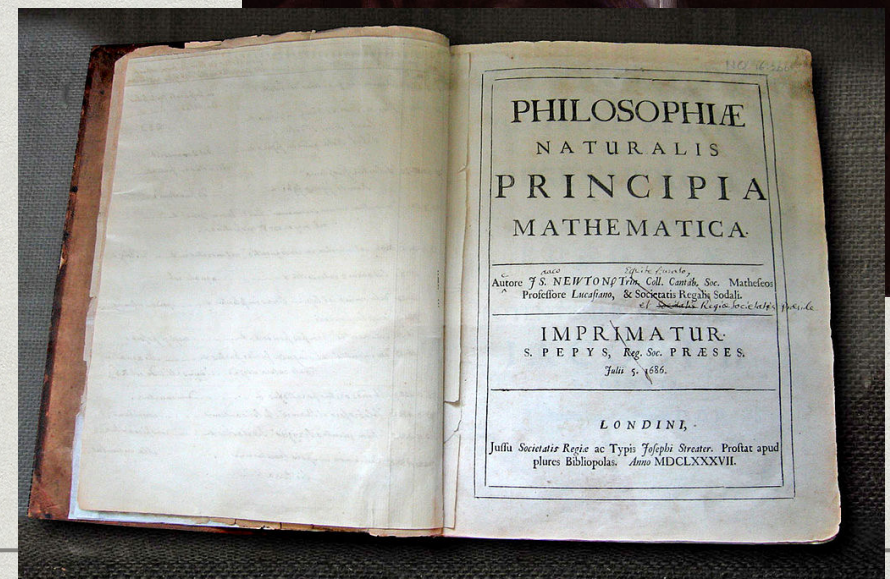
- \* “Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo” (1632)
- \* Discute del moto relativo e usa l’esempio della nave.
- \* Non è possibile rilevare differenza tra fenomeni che indichino se un sistema è in moto (rettilineo uniforme) oppure è fermo.





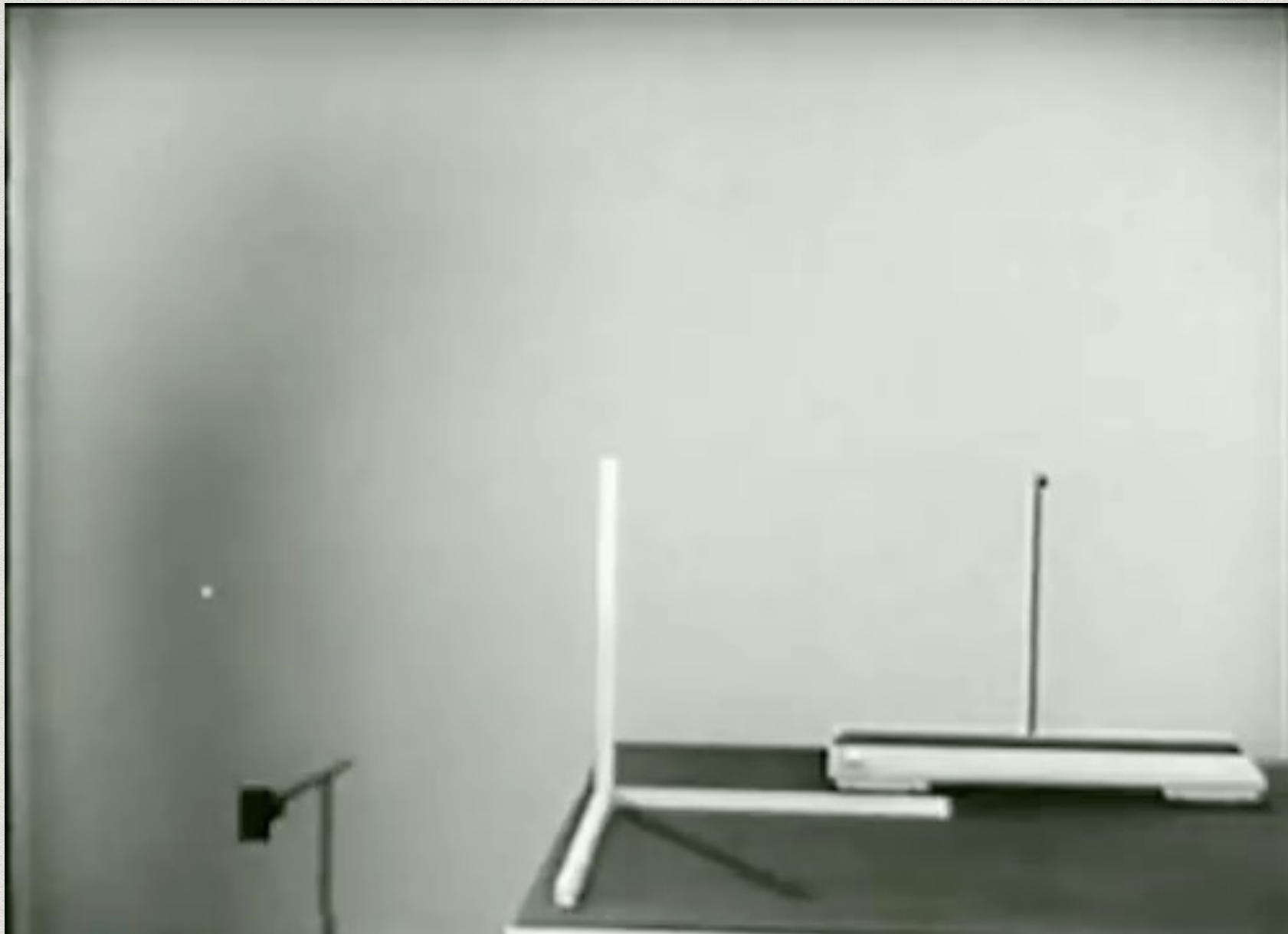
# Isaac Newton (1642-1727)

- \* Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica (1687)
- \* I tre principi della dinamica incorporano il principio di relatività galileiano.
- \* Reintroduce lo spazio ed il tempo assoluti! (forte influenza aristotelica)





# Un utile filmato (PSSC):



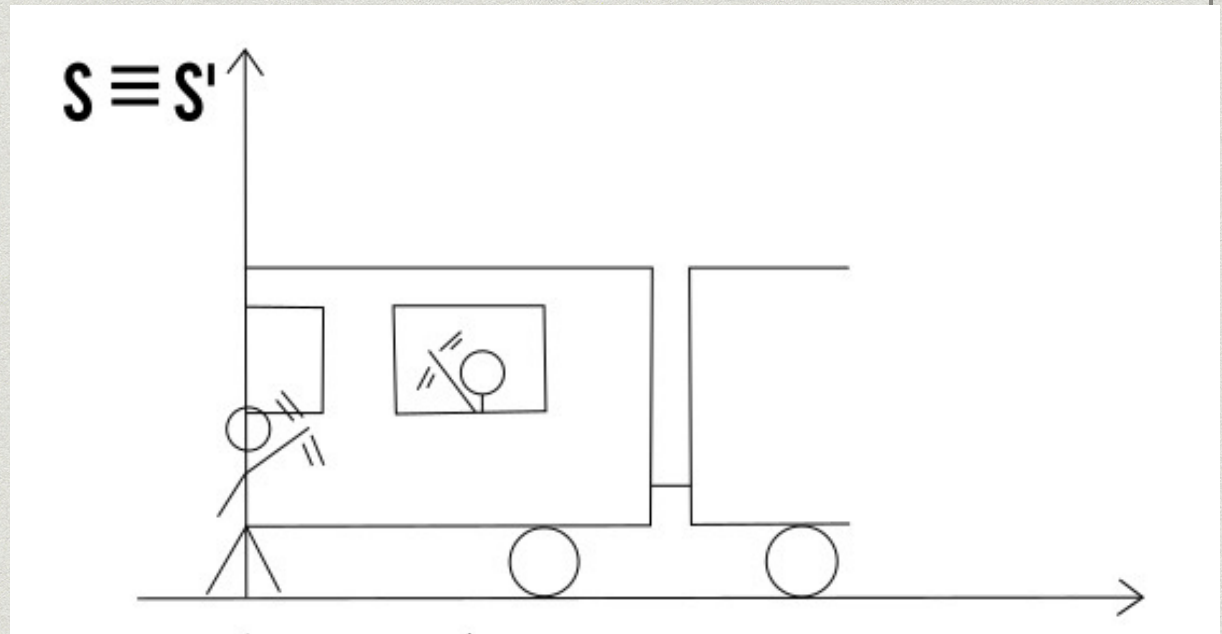
<https://www.youtube.com/watch?v=7QbYE3o5qPE>



# Il principio di relatività in fisica classica (“galileiano”)

- \* Due sistemi di riferimento: S ed S'
- \* Inizialmente i due sistemi hanno la stessa origine.
- \* S' viaggia verso destra con moto rettilineo uniforme.

$$t_0 = 0 \quad \rightarrow \quad x = x'$$

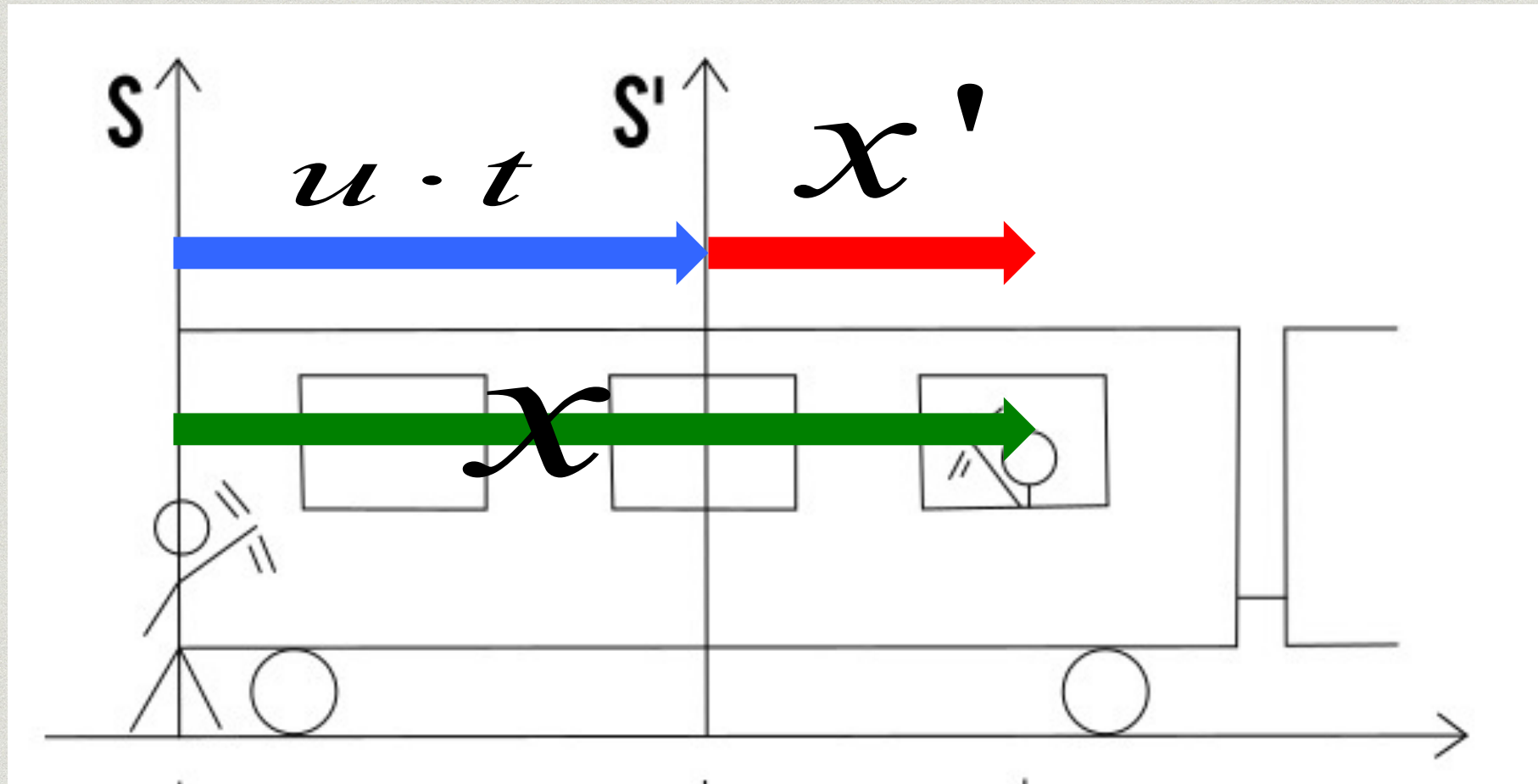




\* In seguito:

**u=costante**

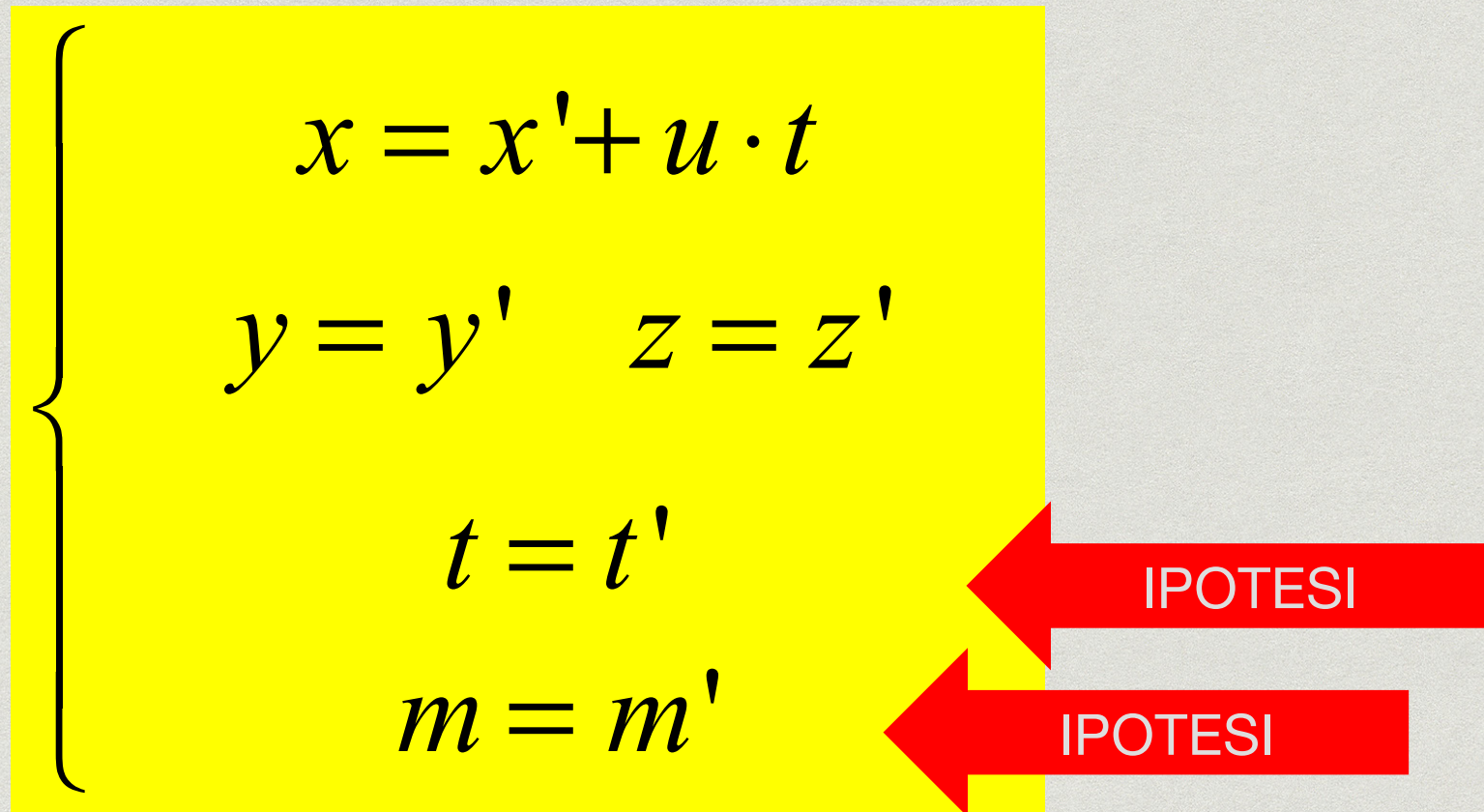
$$t > 0 \rightarrow x = x' + u \cdot t$$





# Trasformazioni di Galileo

- \* Come passare da un sistema di riferimento ad un altro:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = x' + u \cdot t \\ y = y' \quad z = z' \\ t = t' \\ m = m' \end{array} \right.$$


The diagram shows the Galilean transformation equations enclosed in a large left-facing curly bracket. To the right of the equations, two red arrows point left towards the equations. The top arrow points to the time equation  $t = t'$  and is labeled "IPOTESI". The bottom arrow points to the mass equation  $m = m'$  and is also labeled "IPOTESI".



- \* Consideriamo due istanti successivi:

$$t_2 > t_1$$

- \* Il viaggiatore si sposta sul treno. Le posizioni del viaggiatore nei due sistemi sono:

$$t_1 \rightarrow x_1 = x_1' + u \cdot t_1$$

$$t_2 \rightarrow x_2 = x_2' + u \cdot t_2$$

- \* Lo spostamento del viaggiatore è:

$$\Delta x = x_2 - x_1 = (x_2' + u \cdot t_2) - (x_1' + u \cdot t_1)$$



$$\Delta x = x_2 - x_1 = (x'_2 + u \cdot t_2) - (x'_1 + u \cdot t_1)$$

$$\Delta x = x_2 - x_1 = x'_2 + u \cdot t_2 - x'_1 - u \cdot t_1$$

$$\Delta x = x_2 - x_1 = x'_2 - x'_1 + u \cdot t_2 - u \cdot t_1$$

$$\Delta x = x_2 - x_1 = x'_2 - x'_1 + u \cdot (t_2 - t_1)$$

$$\Delta x = x_2 - x_1 = \Delta x' + u \cdot \Delta t$$





- \* Divido per la durata dello spostamento

$$\Delta t$$

$$\Delta x = \Delta x' + u \cdot \Delta t$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x'}{\Delta t} + \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta t}$$

- \* Abbiamo ottenuto:  $\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x'}{\Delta t} + u$

$$v = v' + u$$

- \* Velocità del passeggero rispetto alla stazione (S):  $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$

- \* Velocità del passeggero rispetto al treno (S'):  $v' = \frac{\Delta x'}{\Delta t}$



# Legge di composizione delle velocità (Galileiana)

- \* Abbiamo ottenuto una legge importante:
- \* La velocità  $v$  rispetto alla stazione (S) è data dalla somma della velocità  $v'$  rispetto al treno (S') più la velocità  $u$  del treno rispetto alla stazione.

$$v = v' + u$$



# Se il viaggiatore accelera...

- \* Supponiamo che il viaggiatore cambi velocità (acceleri),
- \* Mentre il treno continua a viaggiare di moto rettilineo uniforme ( $u = \text{costante}$ ).

$$t_1 \quad \rightarrow \quad v_1 = v_1' + u$$

$$t_2 \quad \rightarrow \quad v_2 = v_2' + u$$



- \* Accelerazione  $a$  del passeggero rispetto alla stazione (S):

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

- \* Accelerazione  $a'$  del passeggero rispetto al treno (S'):

$$a' = \frac{\Delta v'}{\Delta t}$$

- \* Abbiamo che:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = \frac{(v'_2 + u) - (v'_1 + u)}{\Delta t}$$



\* Quindi: 
$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = \frac{(v'_2 + u) - (v'_1 + u)}{\Delta t}$$

$$a = \frac{\cancel{v'_2 + u} - \cancel{v'_1 - u}}{\Delta t} = \frac{v'_2 - v'_1}{\Delta t} = a'$$

- \* Se la velocità  $u$  del moto relativo di un sistema rispetto all'altro è costante, allora le accelerazioni nei due sistemi hanno lo stesso valore:

$$u = \text{cost} \quad \rightarrow \quad a = a'$$





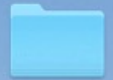
**ANDIAMO IN LABORATORIO**



# Un semplice esperimento:

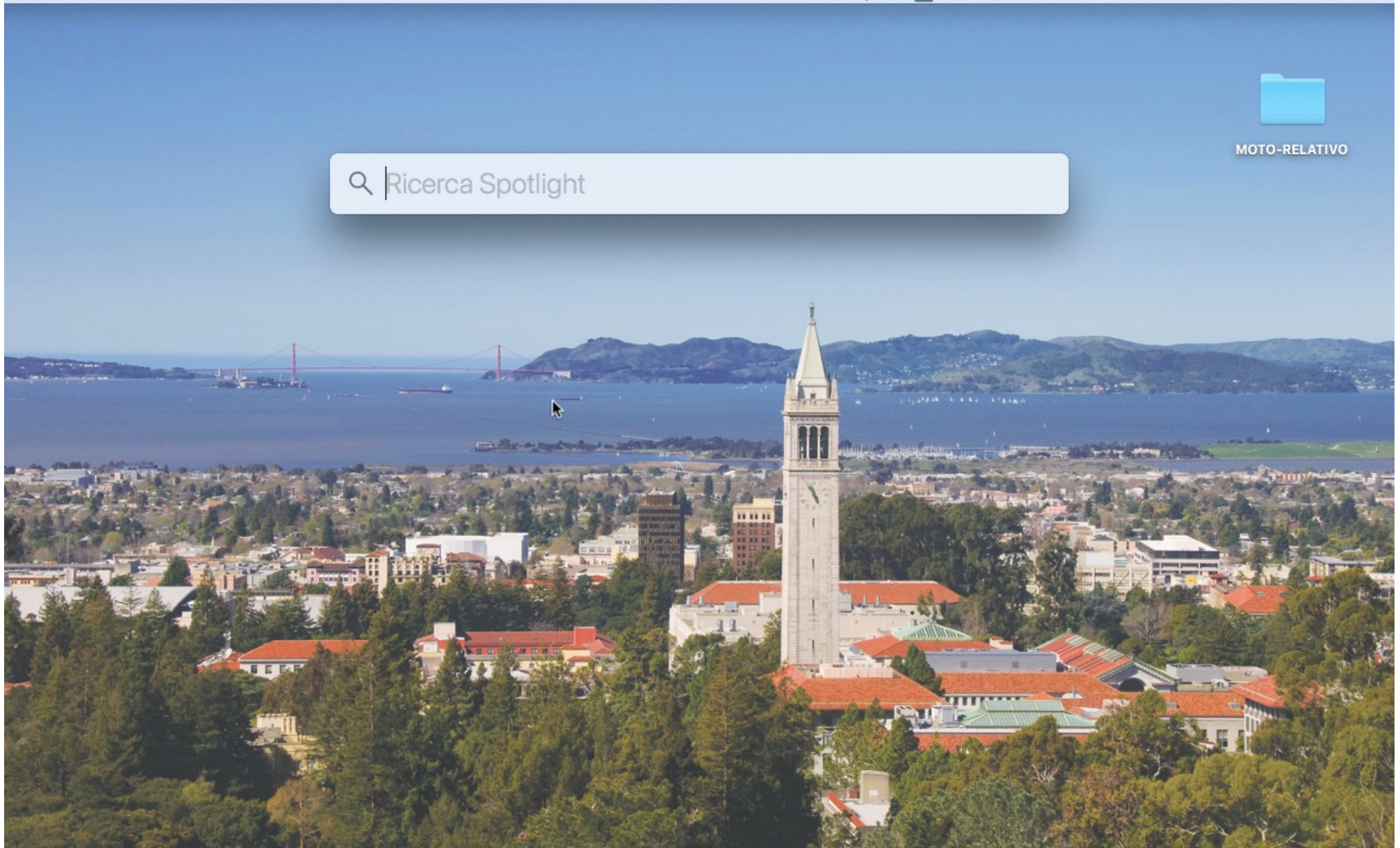






MOTO-RELATIVO

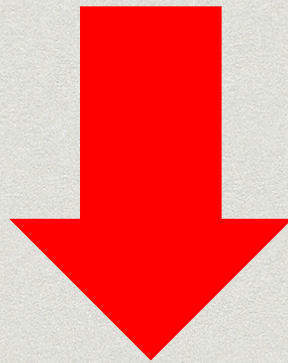
Ricerca Spotlight





- \* Ma la massa è invariante, quindi, per il secondo principio della dinamica:

$$F = m \cdot a \qquad F' = m \cdot a'$$



Principio di  
relatività  
galileiano

$$u = \text{cost} \quad \rightarrow \quad F = F'$$



# Principio di relatività galileiano:

- \* Se due sistemi di riferimento sono in moto rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro, le leggi della fisica sono le stesse in entrambi.
- \* Non è possibile realizzare un fenomeno fisico in grado di distinguere un sistema rispetto ad un altro se i due sono in moto relativo rettilineo uniforme.
- \* **NON ESISTE IL MOTO ASSOLUTO!**

$$u = \text{cost} \quad \rightarrow \quad F = F'$$



# I sistemi di riferimento inerziali

- \* Nei sistemi di riferimento inerziali vale la prima legge della dinamica:

$$\vec{F}_{ris} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \vec{a} = 0$$

- \* Per il principio di relatività galileiano: tutti i sistemi di riferimento inerziali sono equivalenti, cioè forniscono la stessa descrizione della Natura.
- \* **NON ESISTE UN SISTEMA INERZIALE PREVILEGIATO**



# La dinamica di Newton & Galileo:

- \* Interpreta tutti i moti in Cielo ed in Terra
- \* Orbite dei Pianeti e moto dei gravi
- \* Interpreta le proprietà dei gas (teoria cinetica)

**GRANE SUCCESSO**





MA ...



# Elettromagnetismo (fast&furious I)

- \* VI sec. a.C.: Talete di Mileto: prima descrizione dei fenomeni elettrici
- \* I sec. a.C. Plinio, *Naturalis historia*, Lucrezio (*De rerum natura*): fenomeni magnetici.
- \* 1550: G. Cardano distingue le forze elettriche e magnetiche.
- \* 1752: B. Franklin: collegamento tra fulmini ed elettricità
- \* 1788: C.A. Coulomb: le forza tra cariche elettriche
- \* 1799: A. Volta: la pila consente la corrente continua.



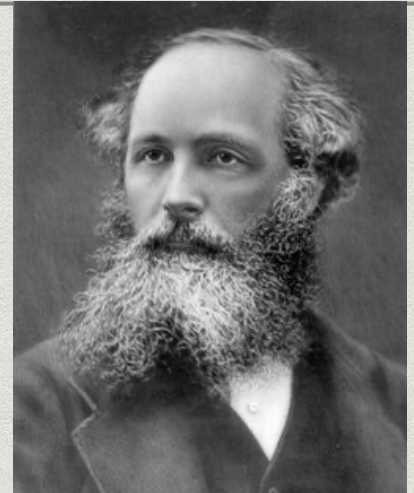
# Elettromagnetismo (fast&furious II)

- \* 1800: A.M. Ampere: studi sulla corrente elettrica
- \* 1820: H. Oersted: influenza tra correnti elettriche e magnetismo
- \* 1854: M. Faraday: concetto di campo, induzione elettromagnetica.
- \* **1862-1878: J.C. Maxwell**: Trattato sull'elettricità ed il magnetismo: unifica in elettromagnetismo, equazioni del campo el.magn.

**GRANE SINTESI: ELETTRICITA'+MAGNETISMO**



# James Clerk Maxwell



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

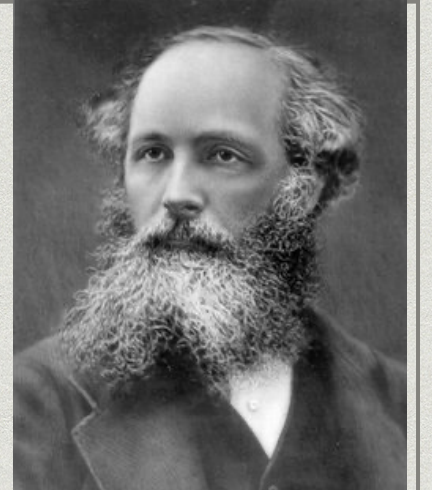
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

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

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



# James Clerk Maxwell



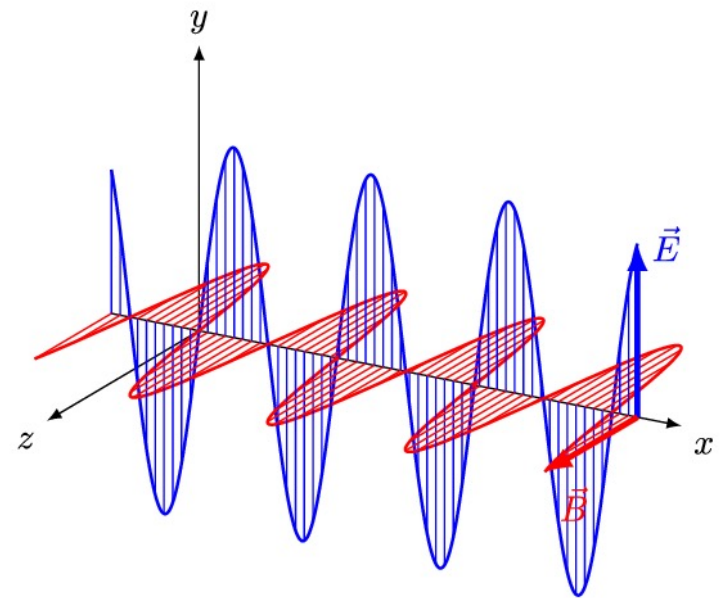
$$E_x = f(z - ct)$$

[www.maxwells-equations.com](http://www.maxwells-equations.com)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{\partial f(z-ct)}{\partial z} = f'(z-ct) \left( \frac{\partial(z-ct)}{\partial z} \right) = f'(z-ct) \\ \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) = f''(z-ct) \left( \frac{\partial(z-ct)}{\partial z} \right) = f''(z-ct) \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial f(z-ct)}{\partial t} = f'(z-ct) \left( \frac{\partial(z-ct)}{\partial t} \right) = -c f'(z-ct) \\ \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial E_x}{\partial t} \right) = f''(z-ct) \left( \frac{\partial(z-ct)}{\partial t} \right) = c^2 f''(z-ct) \end{array} \right\}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \quad \text{if } E_x = f(z-ct) \text{ and } c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$



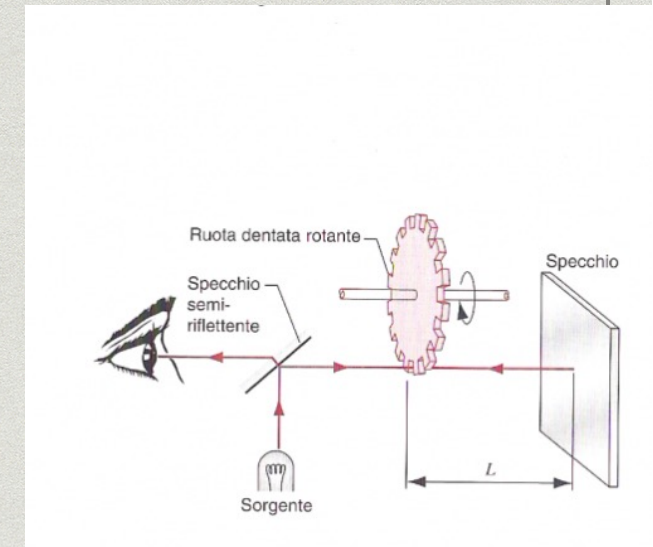
**Onde  
elettromagnetiche**



# La velocità della luce

- \* Aristotele: velocità infinita
- \* Galileo Galilei (Discorsi e dimostrazioni ...): tentativo infruttuoso di misura
- \* Newton: propone una misura astronomica, ma non la realizza
- \* O. Roemer 1675: misura astronomica
- \* A.H.L. Fizeau (1849) : misura sulla Terra:

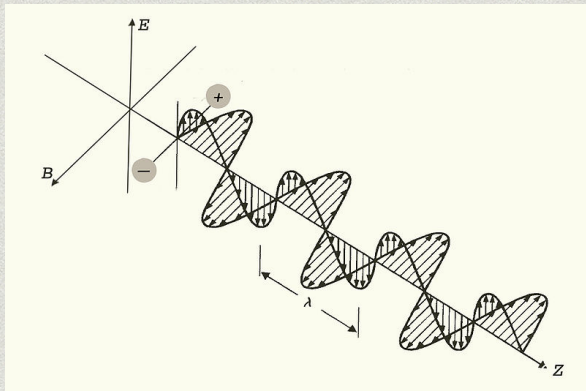
$$c_{Fizeau} \cong 3 \times 10^8 \text{ m / s}$$





# Heinrich R. Hertz (1885)

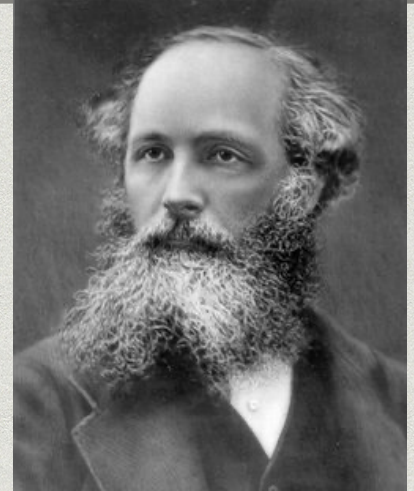
- \* Rivela l'esistenza delle onde elettromagnetiche
- \* La luce è un'onda elettromagnetica



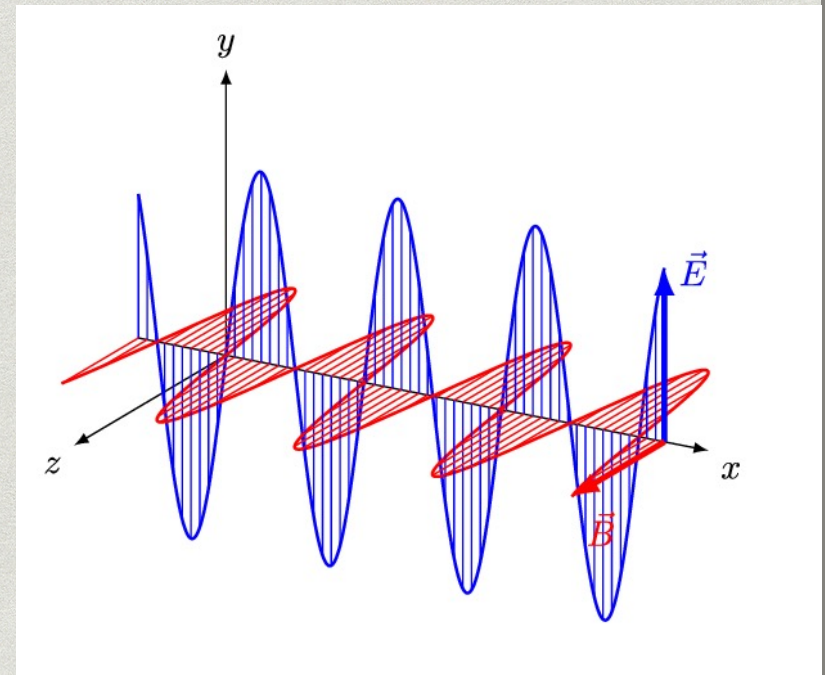
$$c \cong 3 \times 10^8 \text{ m / s}$$



# James Clerk Maxwell



**Unifica:  
Elettricità +  
Magnetismo +  
Ottica**





Fisica verso la fine del XIX sec.

La dinamica di Newton &  
Galileo

Elettromagnetismo (e ottica)  
(J.C. Maxwell)



Problema:

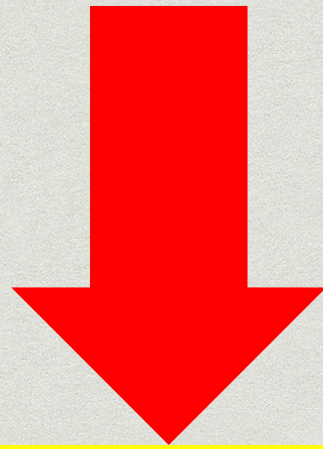
La dinamica di Newton &  
Galileo

**INCOMPATIBILI**

Elettromagnetismo (e ottica)  
(J.C. Maxwell)



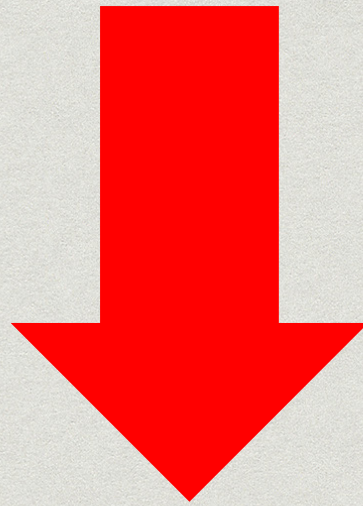
La dinamica di Newton &  
Galileo:



Non esiste il moto assoluto

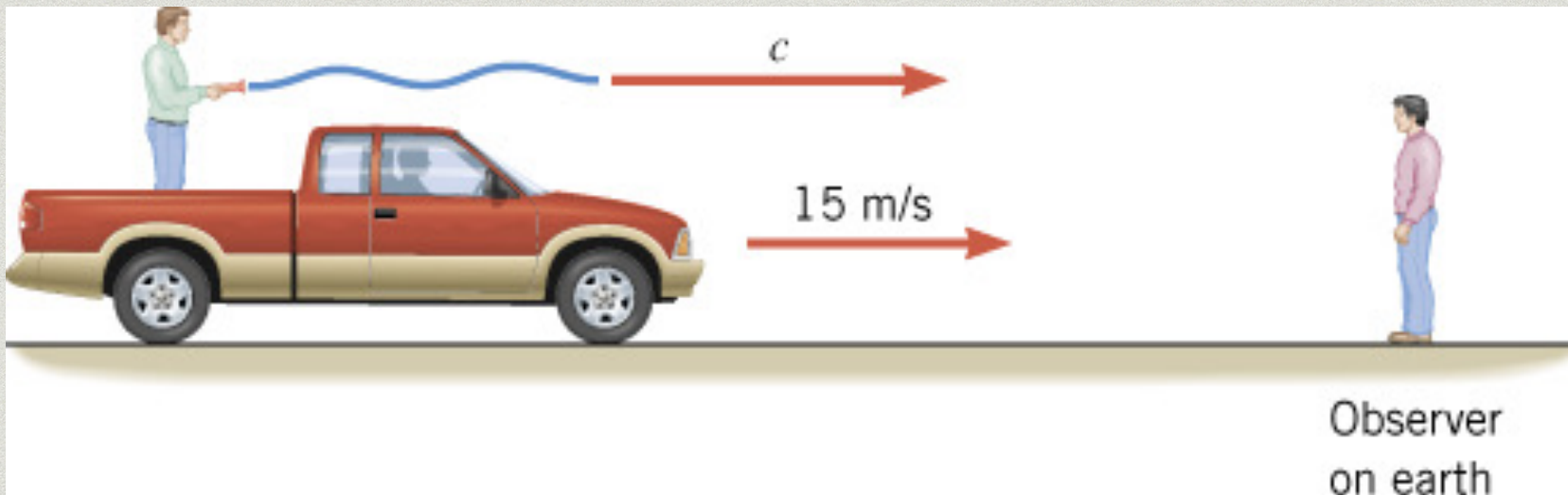
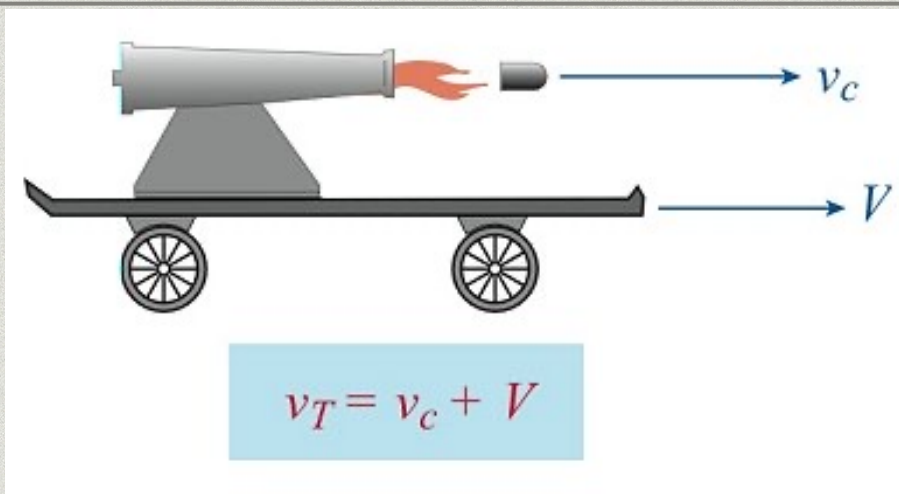


# Elettromagnetismo (e ottica) (J.C. Maxwell)



Onde el.magn. che viaggiano  
a velocità:  $c \cong 3 \times 10^8 \text{ m / s}$





**Vel. Luce rispetto a terra =  $c + 15\text{m/s}$**



$$E_x = f(z - ct)$$

[www.maxwells-equations.com](http://www.maxwells-equations.com)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{\partial f(z - ct)}{\partial z} = f'(z - ct) \left( \frac{\partial(z - ct)}{\partial z} \right) = f'(z - ct) \\ \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) = f''(z - ct) \left( \frac{\partial(z - ct)}{\partial z} \right) = f''(z - ct) \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{\partial f(z - ct)}{\partial t} = f'(z - ct) \left( \frac{\partial(z - ct)}{\partial t} \right) = -c f'(z - ct) \\ \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial E_x}{\partial t} \right) = f''(z - ct) \left( \frac{\partial(z - ct)}{\partial t} \right) = c^2 f''(z - ct) \end{array} \right\}$$

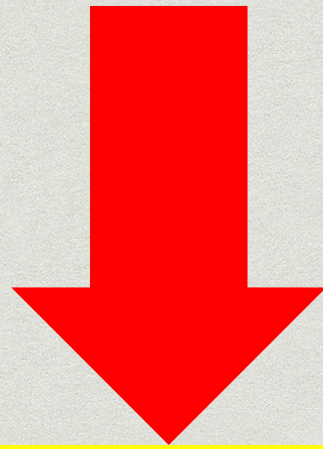
$$\Rightarrow \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \quad \text{if } E_x = f(z - ct) \text{ and } c = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}$$

$$c \cong 3 \times 10^8 \text{ m / s}$$

Sistema di riferimento privilegiato  
-> Moto ASSOLUTO (etere)



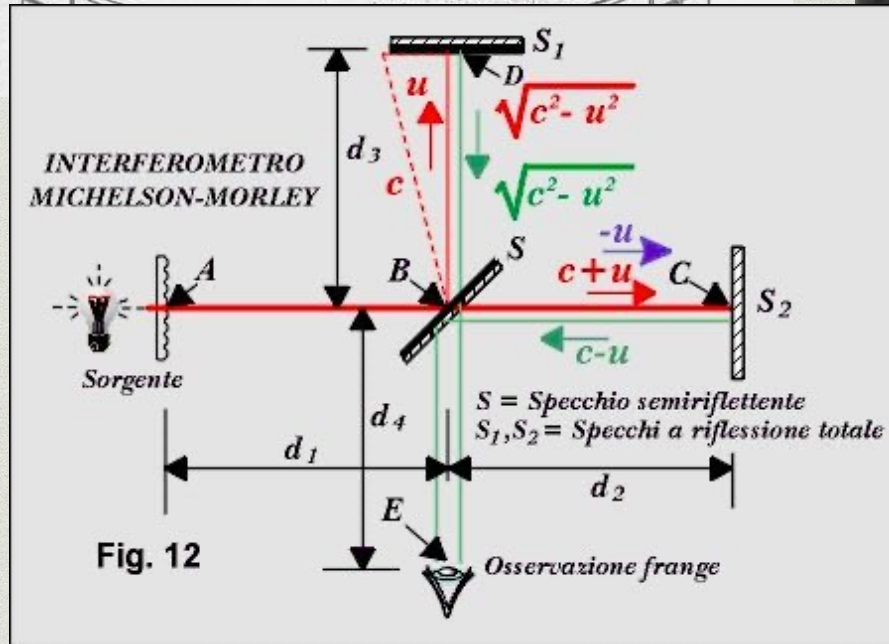
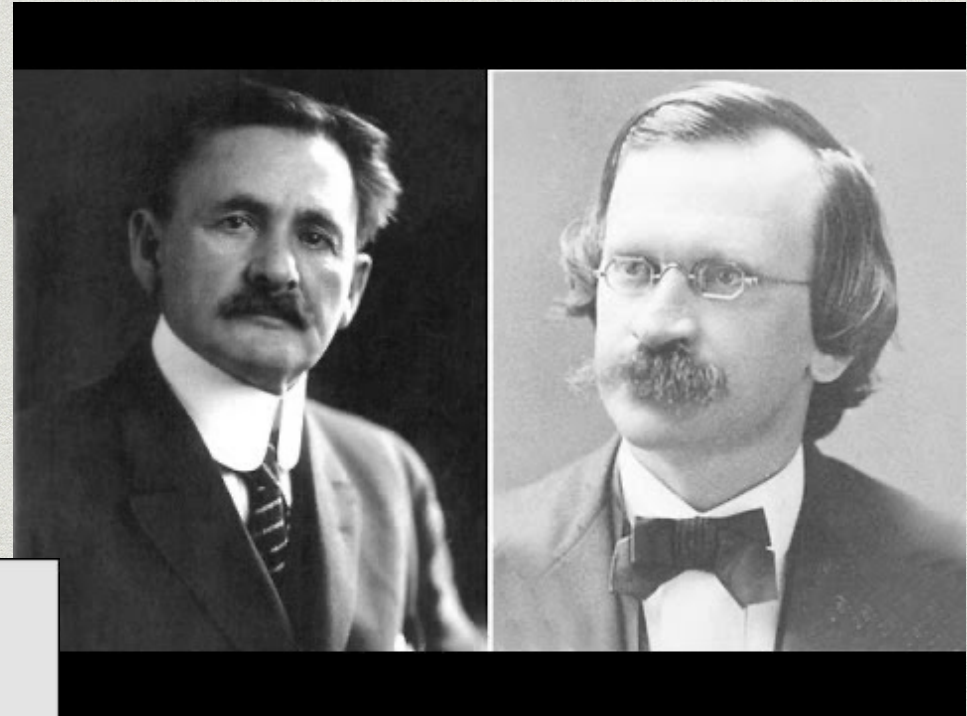
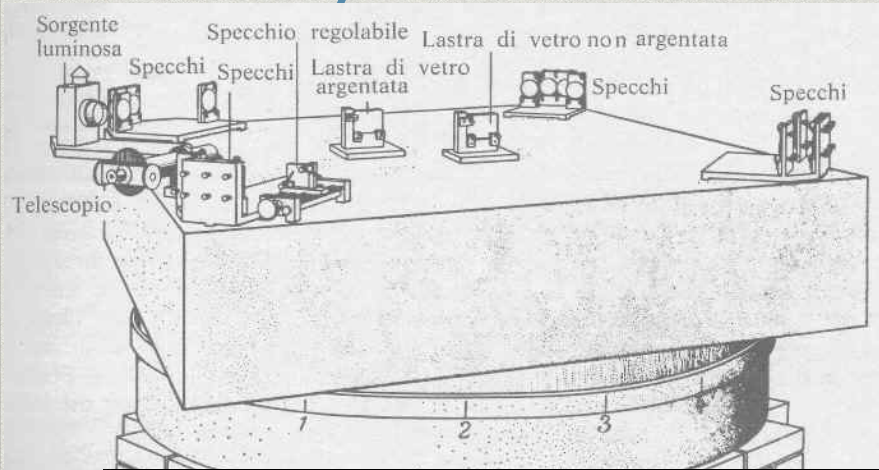
# Come risolvere il problema?



esperimento



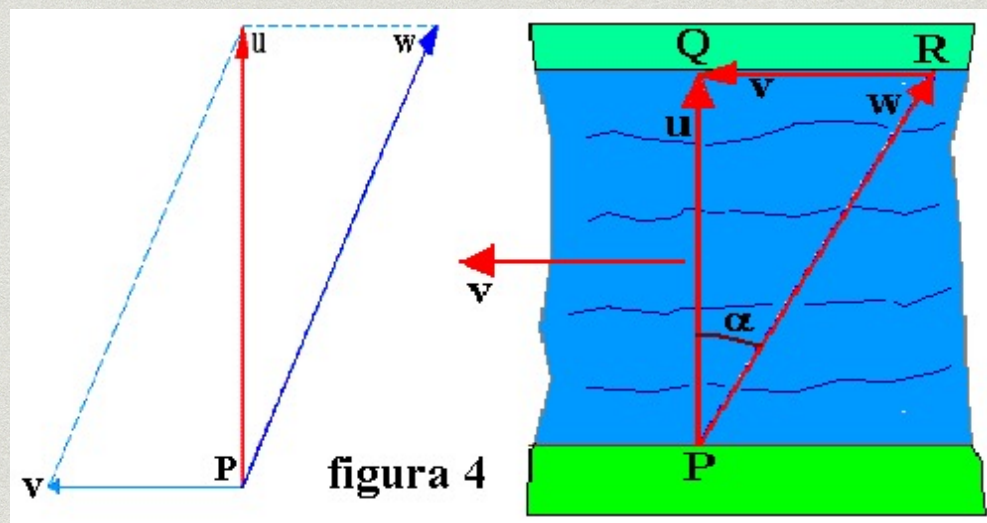
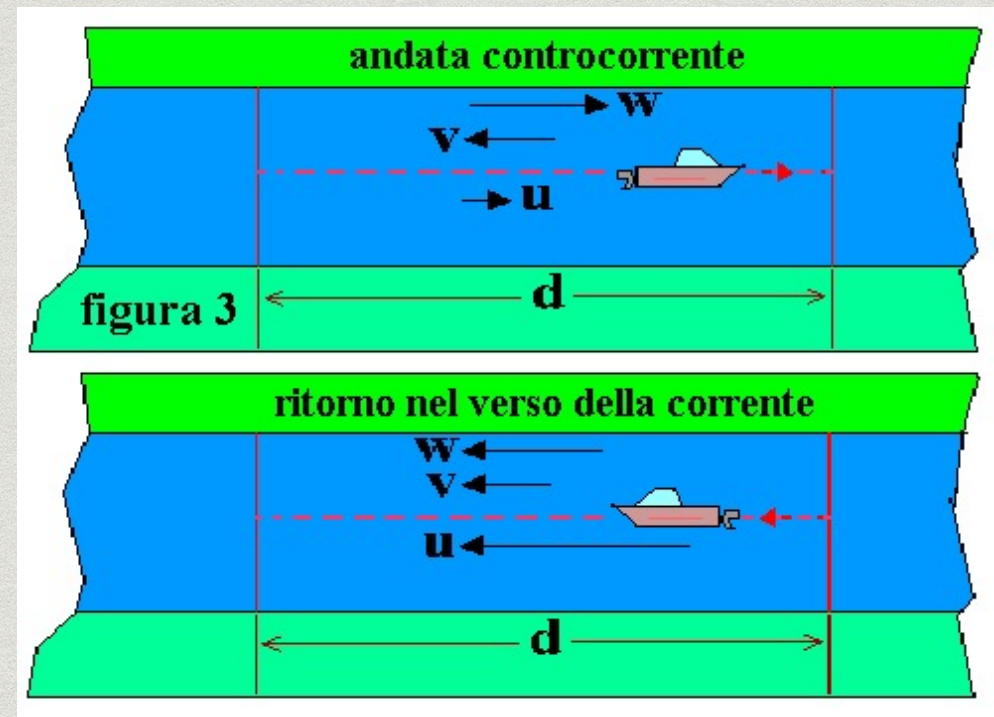
# Michelson & Morley (1881-1887)





# Un'analogia:

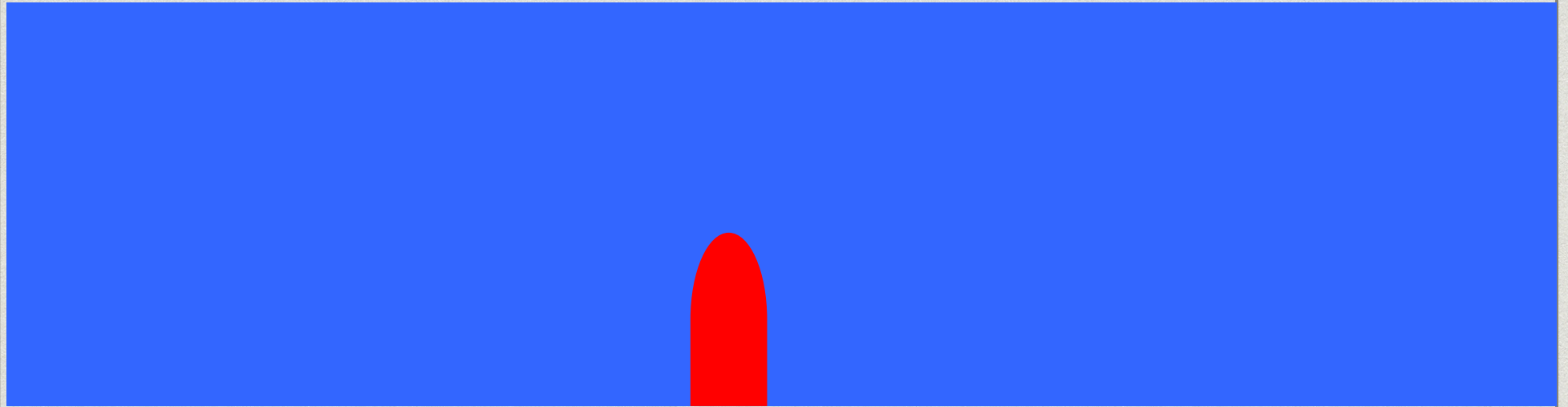
## Il moto della barca sul fiume





Un'analogia:

**B**



**A**

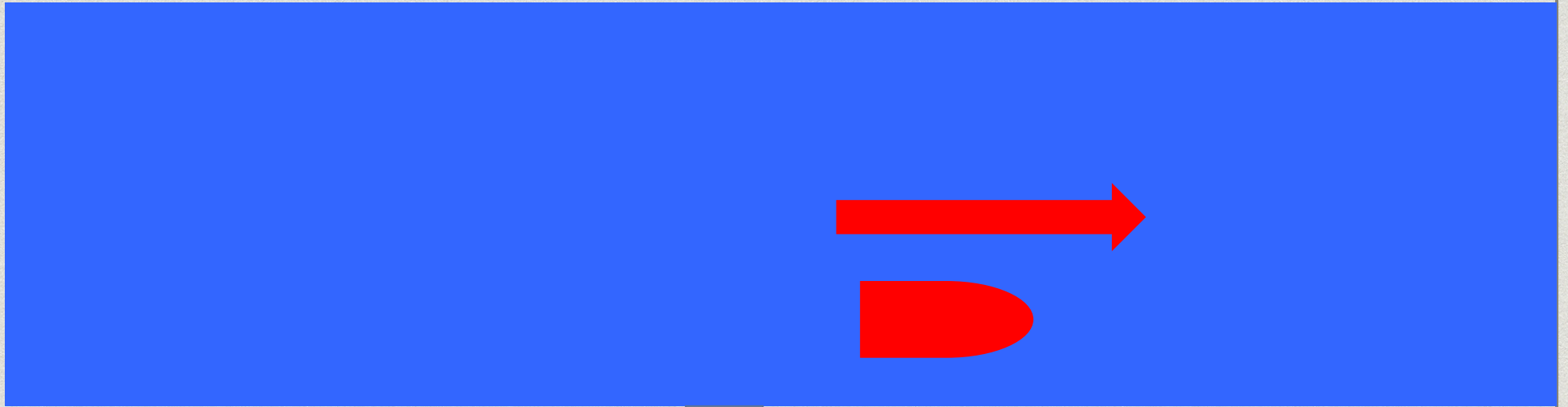
**C**

- \*  $AB=AC=L$
- \*  $v$  = velocità della corrente
- \*  $c$  = velocità della barca rispetto all'acqua



A → C

B



A

C

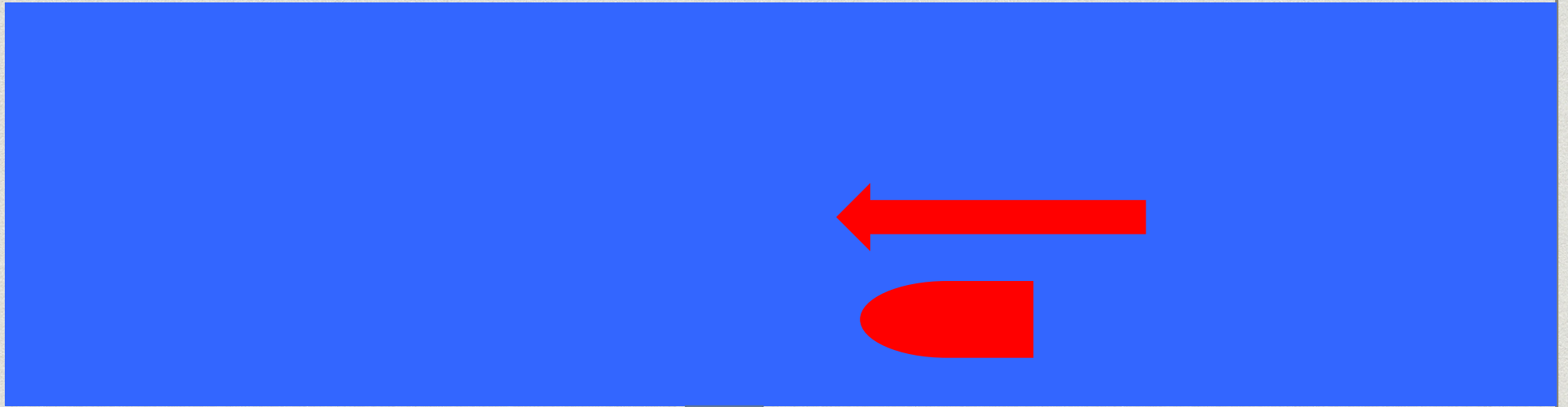
- \* Velocità della barca rispetto alla riva:  $c+v$
- \* Tempo di percorrenza da A a C:

$$t(A \rightarrow C) = \frac{AC}{c+v} = \frac{L}{c+v}$$



C → A

B



A

C

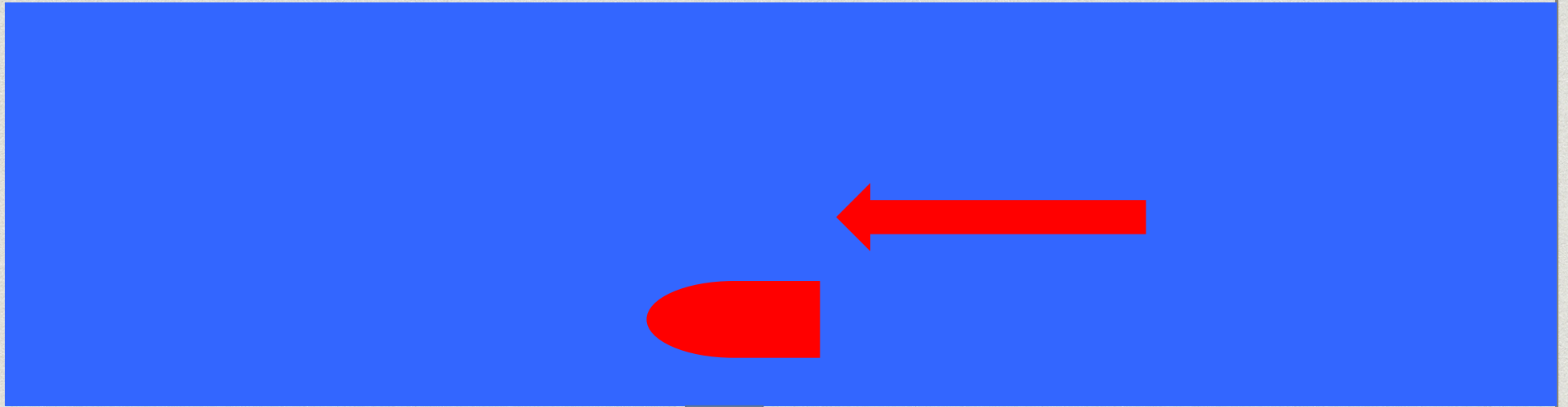
- \* Velocità della barca rispetto alla riva:  $c-v$
- \* Tempo di percorrenza da C a A:

$$t(C \rightarrow A) = \frac{AC}{c-v} = \frac{L}{c-v}$$



A → C → A

B



A

C

\* Tempo di percorrenza da A a C e ritorno ad A:

$$t(A \rightarrow C \rightarrow A) = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v}$$



Un po' di algebra:

$$t(A \rightarrow C \rightarrow A) = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v}$$

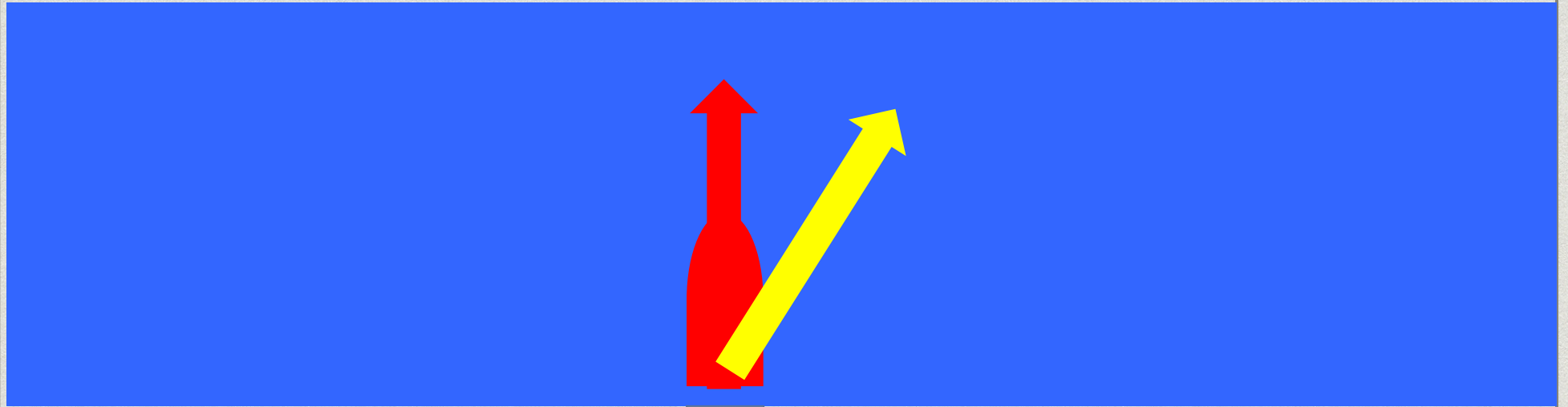
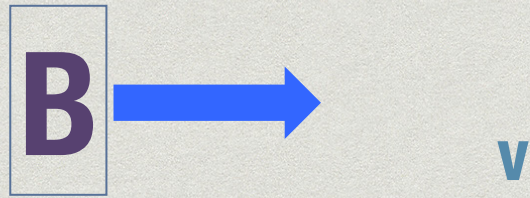
$$t(A \rightarrow C \rightarrow A) = \frac{L(c-v) + L(c+v)}{(c+v)(c-v)}$$

$$t(A \rightarrow C \rightarrow A) = \frac{Lc - Lv + Lc + Lv}{(c+v)(c-v)} = \frac{2Lc}{c^2 - v^2}$$

$$t_{\parallel} = \frac{2L/c}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$



A → B



A

C

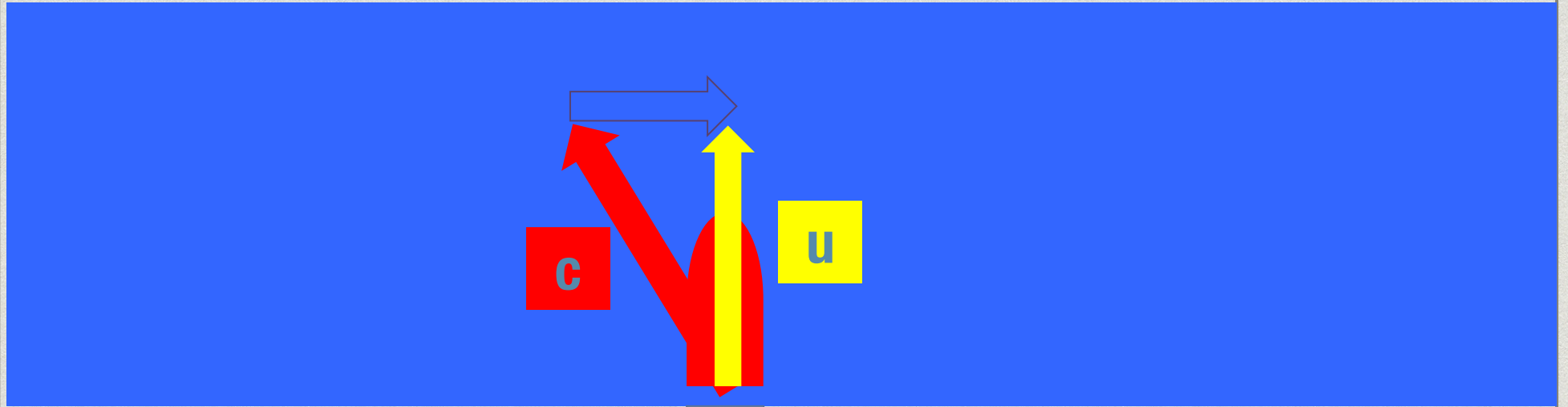
- \* Per arrivare in B, la barca deve puntare più a monte, altrimenti la corrente la trascina in un punto diverso da B.



A → B

v

B



- \* Per arrivare in B, la barca deve puntare più a monte, altrimenti la corrente la trascina in un punto diverso da B.

- \* Avremo:

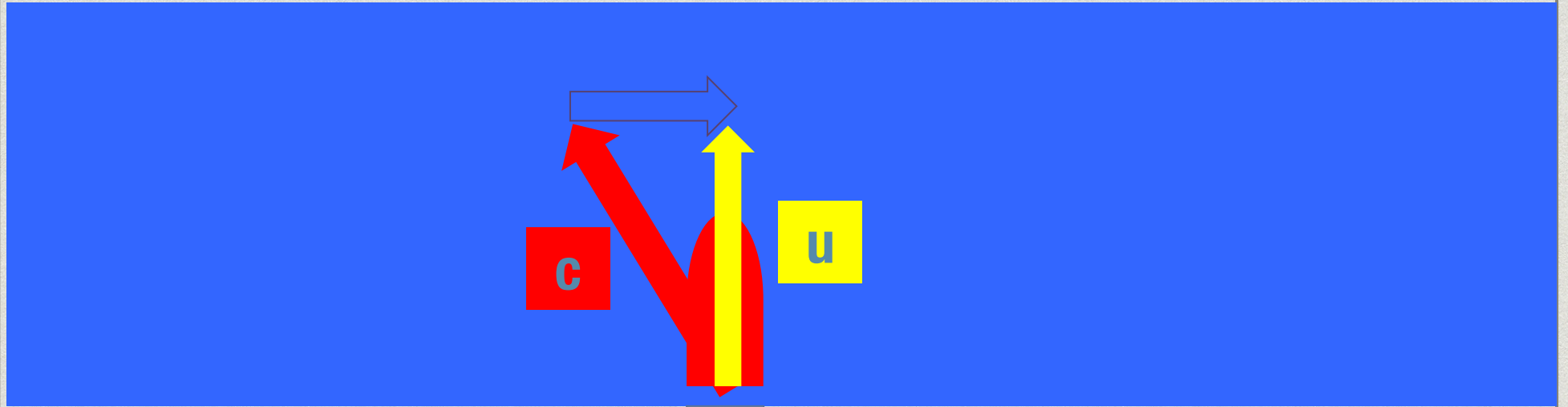
$$u = \sqrt{c^2 - v^2}$$



A → B

v

B



A

C

- \* Il tempo di percorrenza da A a B è:

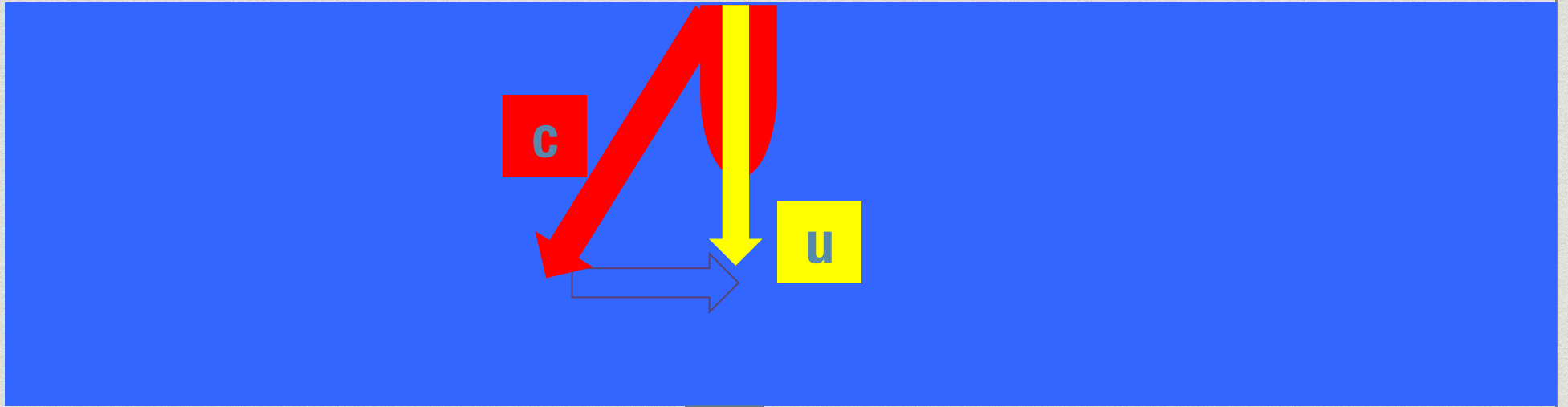
$$t(A \rightarrow B) = \frac{AB}{u} = \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$



B → A

v

B



A

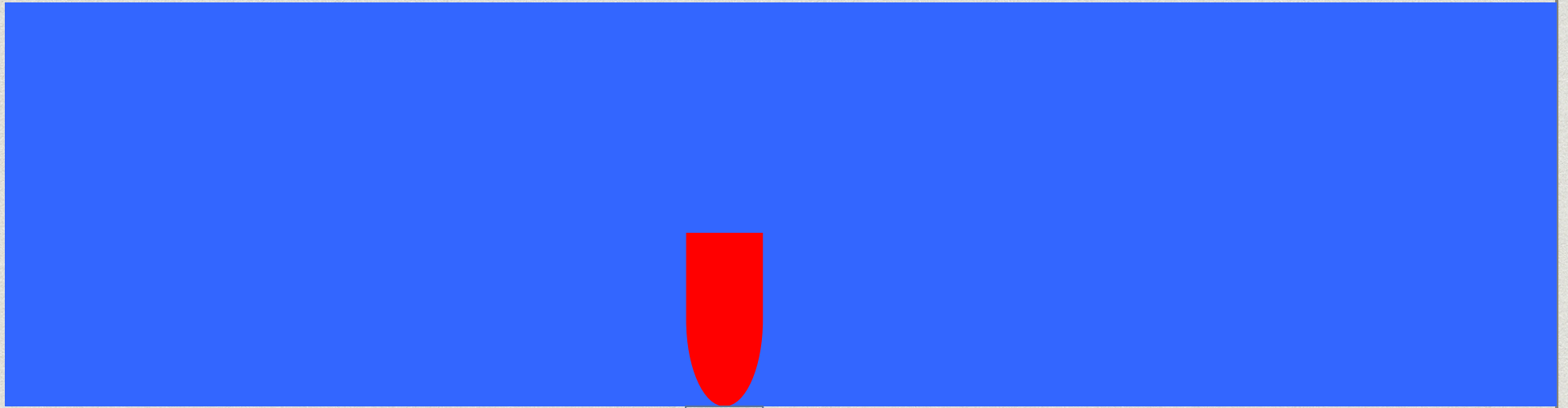
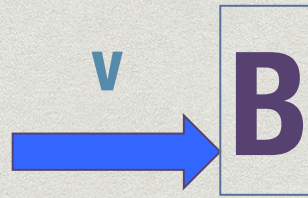
C

- \* Il tempo di percorrenza da B a A è:

$$t(B \rightarrow A) = \frac{AB}{u} = \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$



A → B → A



A

C

\* Il tempo di percorrenza da A a B e ritorno ad A è:

$$t(A \rightarrow B \rightarrow A) = 2 \frac{AB}{u} = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$



Un po' di algebra:

$$t(A \rightarrow B \rightarrow A) = 2 \frac{AB}{u} = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

$$t_{\perp} = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2L}{c \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$t_{\perp} = \frac{2L/c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$



Riassumendo:

$$t_{\parallel} = \frac{2L/c}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

$$t_{\perp} = \frac{2L/c}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Quindi:

$$\frac{t_{\perp}}{t_{\parallel}} = \frac{2L/c}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \cdot \frac{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}{2L/c} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$



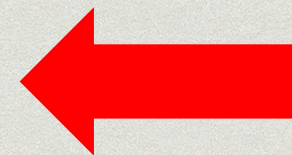
# Inverto

$$\frac{t_{\perp}}{t_{\parallel}} = \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

$$(t_{\perp} / t_{\parallel})^2 = 1 - v^2 / c^2$$

$$v^2 / c^2 = 1 - (t_{\perp} / t_{\parallel})^2$$

$$v = c \cdot \sqrt{1 - (t_{\perp} / t_{\parallel})^2}$$





# Un altro esempio

<http://www.cabrillo.edu/~jmccullough/Applets/Flash/Modern%20Physics%20and%20Relativity/MichelsonMorley.swf>

QuickTime Player File Modifica Vista Finestra Aiuto

Downloadable Java Applets from PhET

Indietro Avanti Ricarica Interrompi

<http://www.cabrillo.edu/~jmccullough/Applets/Flash/Modern Physics and Relativity/MichelsonMorley.swf> Cerca

Pagina iniziale Segnalibri Più visitati SeaMonkey mozilla.org mozillaZine mozdev.org

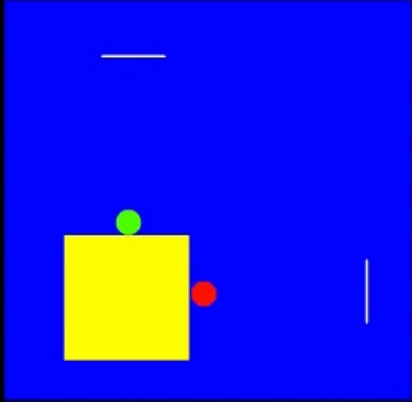
micelson morley animation - Cer... <http://www.cabri...elsonMorley.swf>


## Two Swimmers

We have identical two swimmers, represented by red and green balls. They are swimming in a still lake.

The red swimmer swims horizontally away from the platform a fixed distance and returns.

The green swimmer swims vertically the same distance away from the platform and returns.



Click for an animation: 



# A questo punto:

$$v = c \cdot \sqrt{1 - (t_{\perp} / t_{\parallel})^2}$$

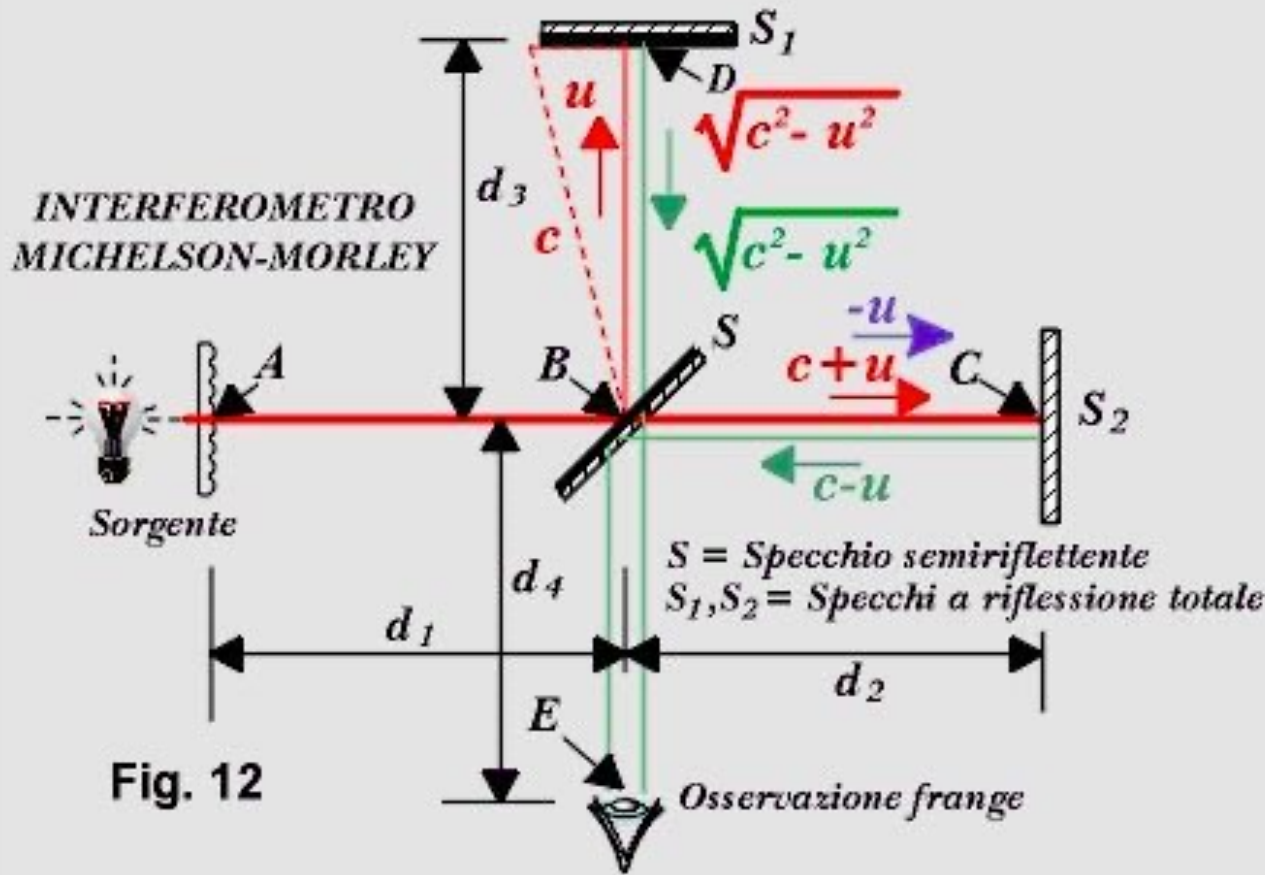
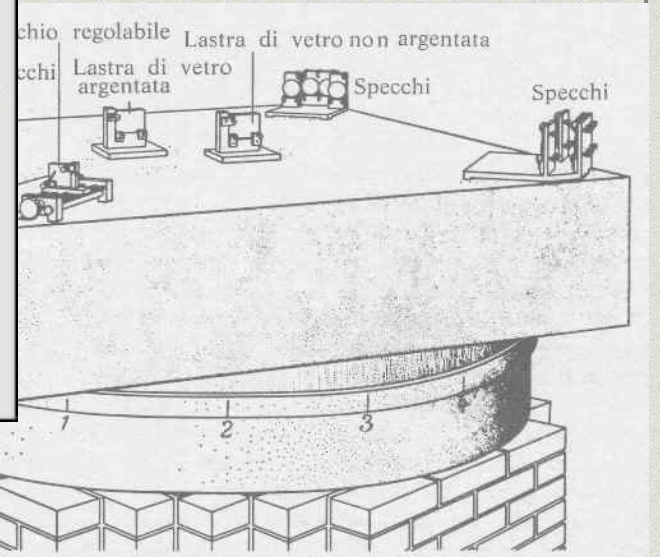
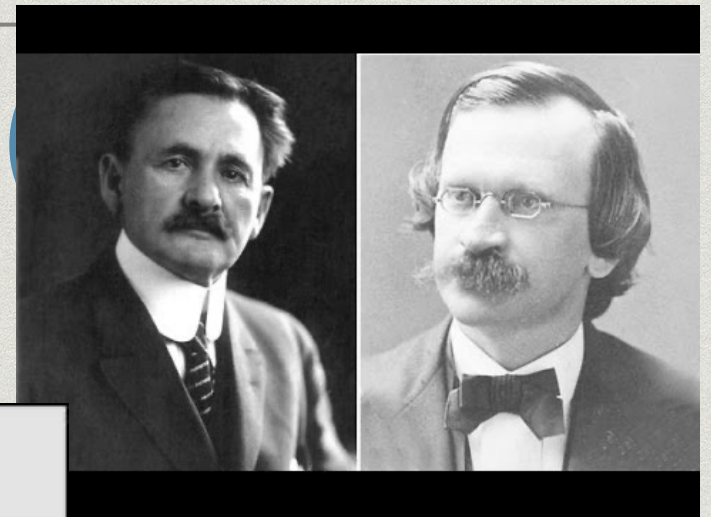
OTTENGO

MISURO

- \* Michelson & Morley 1881-1887 (L=11m)
- \* c= velocità della luce rispetto all'etere (sistema p.)
- \* v=velocità della Terra rispetto all'etere ( $10^{(-4)}c$ )
- \* Sensibilità:  $v/c=10^{(-6)}$



# Michelson & Morley (1887)





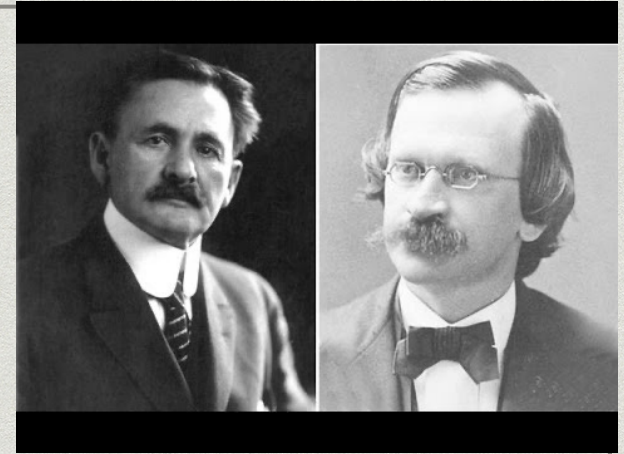
# Risultato:

$$v = c \cdot \sqrt{1 - (t_{\perp} / t_{\parallel})^2}$$

$$t_{\perp} = t_{\parallel}$$



$$v = 0$$



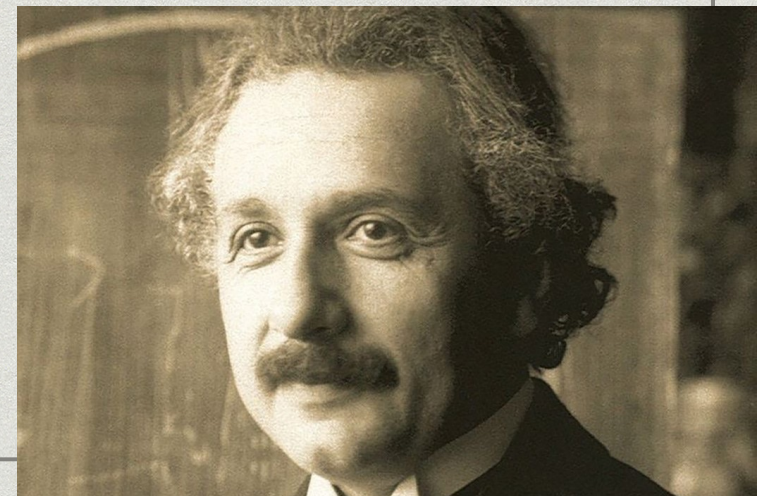
Premio Nobel 1907





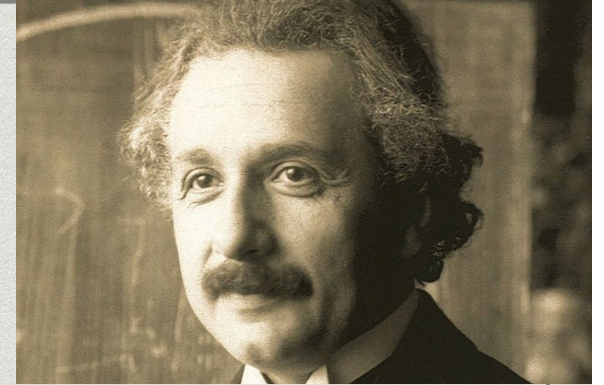
# Problema: come interpretare questo risultato?

- \* Diversi tentativi in termini di meccanica classica: tutti infruttuosi.
- \* Albert Einstein (1905): in impiegato dell'ufficio brevetti di Berna.
- \* Nota biografica su A.E.





# Annus mirabilis : 1905



- \* A. Einstein pubblica su Annalen der Physik:
- \* “Su un punto di vista euristico circa la generazione e la trasformazione della luce” (**Effetto fotoelettrico**) (17 marzo 1905).
- \* “Sulla nuova determinazione delle dimensioni molecolari” (**Teoria Atomica**) (30 aprile 1905).
- \* “Sul moto di particelle in sospensione in un fluido in quiete” (**Teoria Atomica**) (11 maggio 1905)
- \* “Sull’elettrodinamica dei corpi in movimento” (**RELATIVITA’**) (30 giugno 1905)
- \* “L’inerzia di un corpo dipende da suo contenuto energetico?” (**RELATIVITA’**) (27 settembre 1905)
- \* “Sulla teoria del moto browniano” (**Teoria Atomica**) (19 dicembre 1905)



# La relatività di A. Einstein

=

Le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi inerziali (Galileo & Newton)

+

La velocità della luce è la stessa in tutti i sistemi di riferimento, è un invariante.



La velocità della luce è la stessa in tutti i sistemi di riferimento, è un invariante.

spazio

tempo

massa

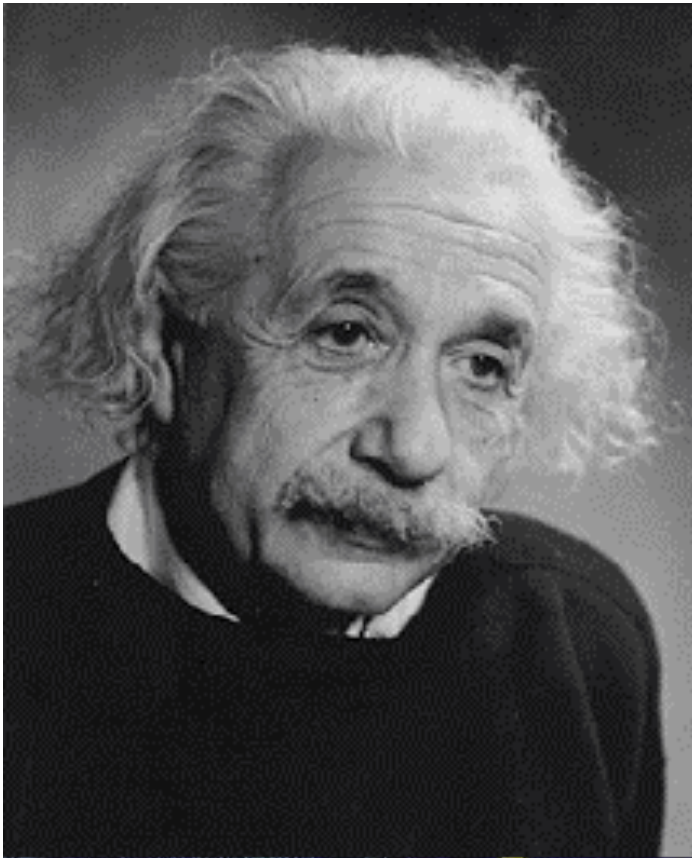
energia



# Rivoluzione scientifica

- \* Profondo cambiamento della visione dell'Universo: un cammino culturale che inizia da molto lontano.
- \* Effetti sulla tecnologia
- \* ... cosa hanno di speciale i sistemi inerziali?...
- \* ... ma questa è un'altra storia...





Einstein



**La cosa più bella che noi possediamo  
è il senso del mistero. Esso è la sorgente  
di tutta la vera arte e di tutta la  
scienza...**