



# La Luce: natura e modelli

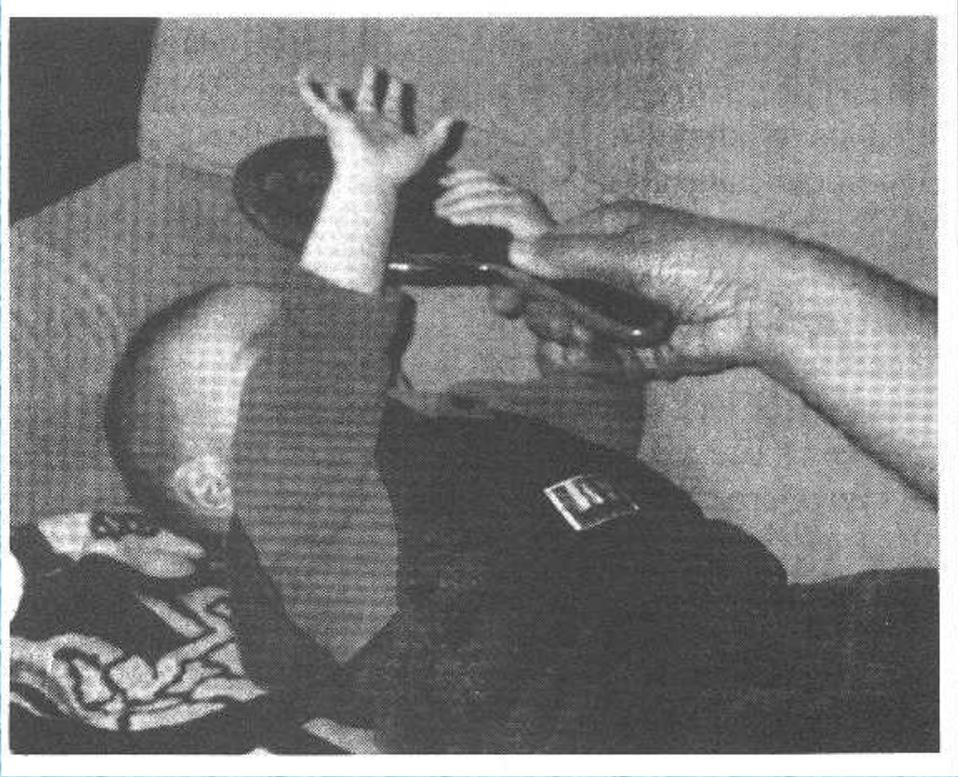
*L. Martina*

*Dipartimento di Fisica dell'Universita' e Sezione  
INFN, Lecce*

**Dove il mondo cessa di essere ribalta  
per ambizioni e desideri personali,  
dove noi, come esseri liberi,  
lo osserviamo meravigliati, per indagarlo e contemplarlo,  
là entriamo nel dominio dell'arte e della scienza**

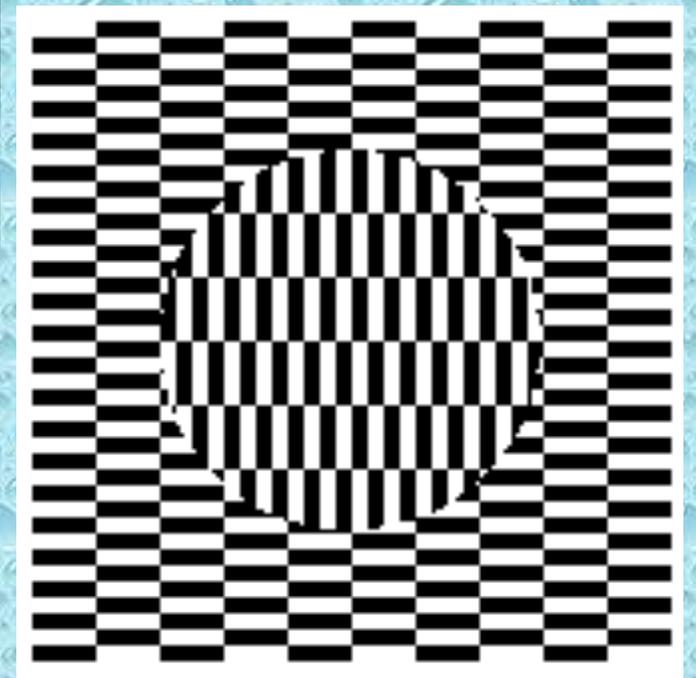
*Albert Einstein*

# Perche si vede ciò che si vede



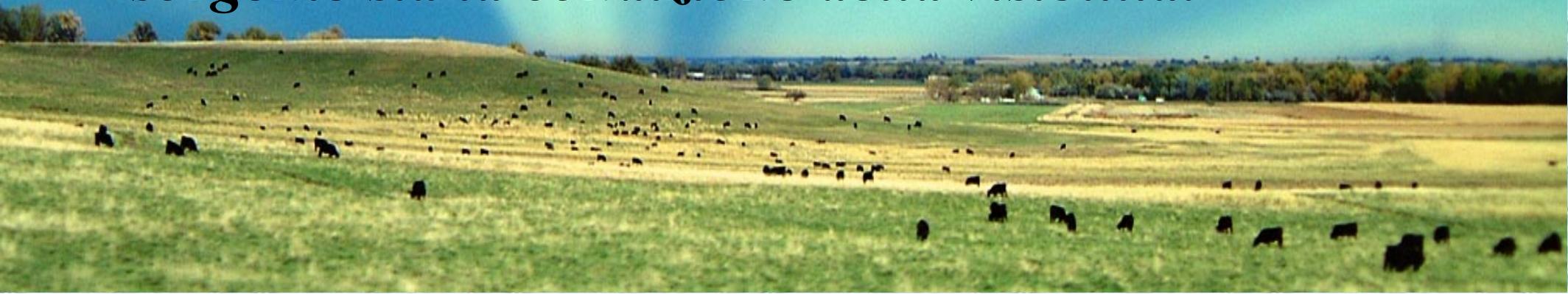
- Qual è la natura della luce
- Quali le sue sorgenti
- Quali le sue leggi
- Come vediamo

# Alcune Difficolta'

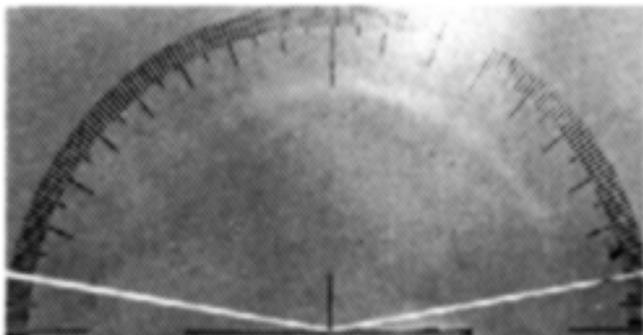
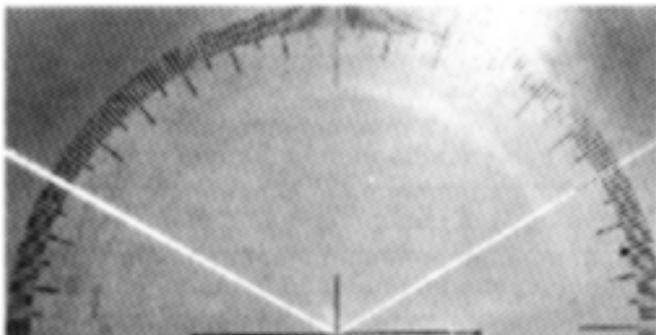
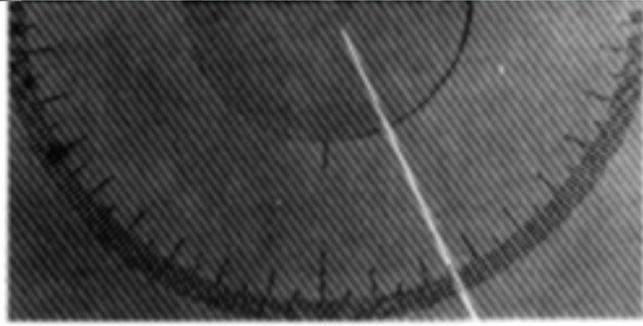
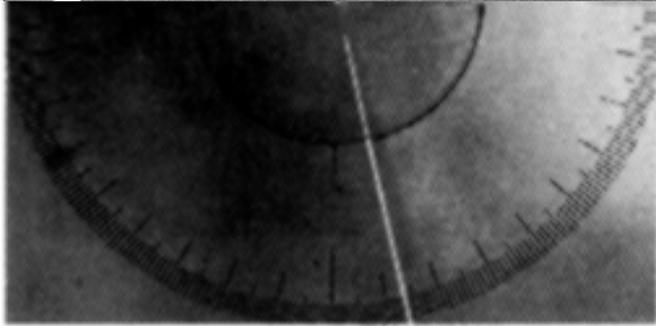
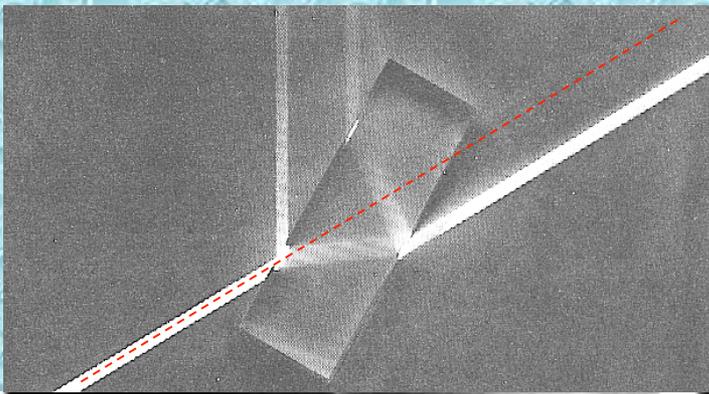


- La luce sembra indissolubilmente legata alle sue sorgenti.
- I fenomeni luminosi rimangono associati al processo di visione..
- La luce svolge un ruolo subordinato agli oggetti
- Solo le sorgenti luminose sembrano essere soggette a moti, non la luce stessa.

- " I parametri fisici caratteristici sono fuori dai limiti della percezione umana.*
- " Dipendenza sensibile dalle proprietà del mezzo nel quale si propaga la luce.*
- " Associazione delle immagini alle proprietà degli oggetti .*
- " Astrazione del concetto di raggio luminoso*
- " Limiti di applicabilità dell'ottica geometrica*
- " La parola "luce" serve ad indicare sia una sorgente sia la condizione della visibilità.*



# Rifrazione



$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = n$$

Legge di  
Snell - Cartesio

# I Fondatori dell'Ottica Geometrica

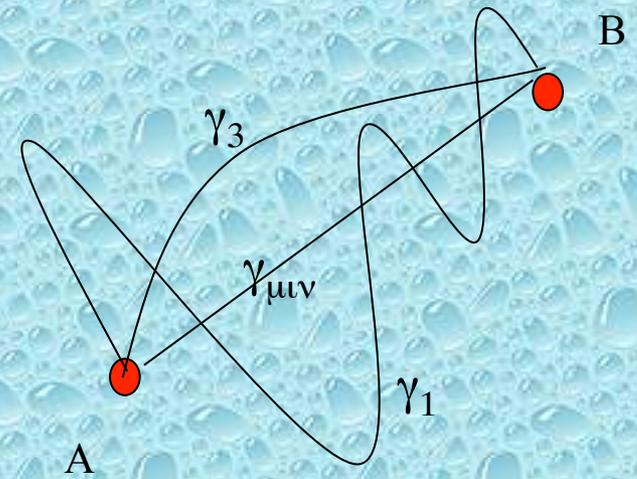
- „ J. Kepler (1571-1630): Paralipomena ad Vitellionem (1604), Dioptrice (1611)
- „ G. Galilei (1564-1642): Nuncius Sidereus (1610)
- „ R. Descartes (1596-1650): La dioptrique, De l'arc en ciel (1637) ,
  - „ teoria corpuscolare della luce
- „ P. De Fermat: Principio del tempo minimo (1650)

# Il Principio di Fermat del tempo minimo

- Tra tutti i possibili cammini possibili per andare da un punto ad un altro fissati, la luce seguirà quello che richiede il tempo più breve.
- La velocità della luce nei mezzi otticamente più densi è minore di quella nel vuoto

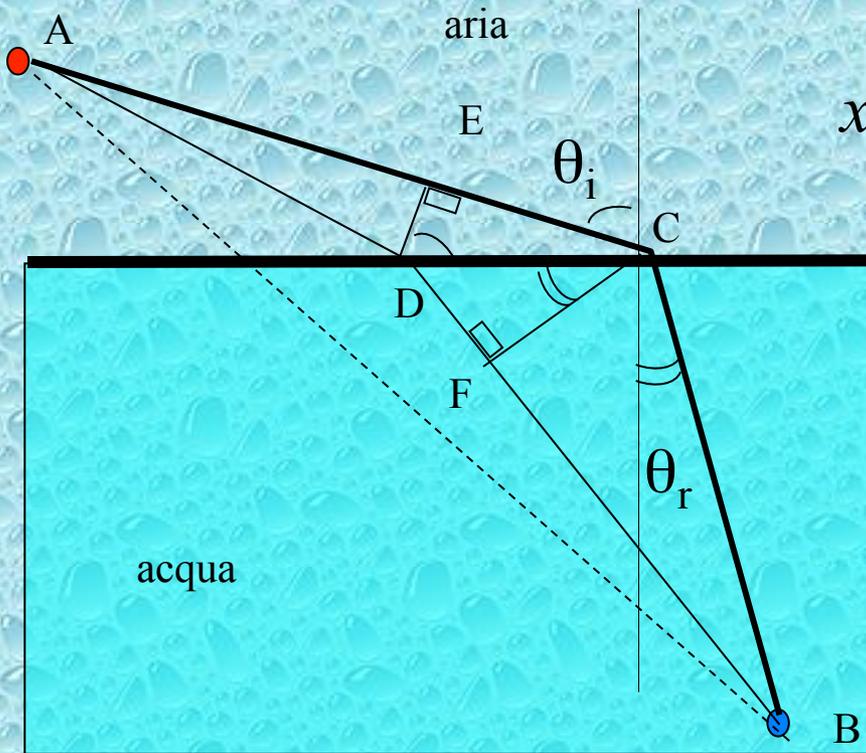


$$\gamma \longrightarrow t_\gamma \quad \min_{\{\gamma\}} \{t_\gamma\} \longrightarrow \gamma_{\min}$$



# Principio di Fermat e Rifrazione

Ipotesi:  $c_{acqua} = \frac{c_{aria}}{n}$   $n > 1$



$x = |CD|$  piccolo  $t_{EC} \approx t_{DF} + o(x^2)$

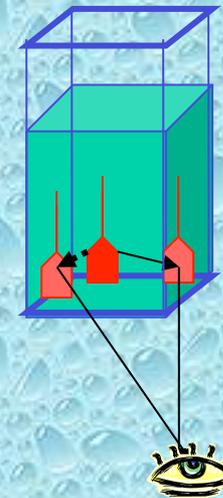
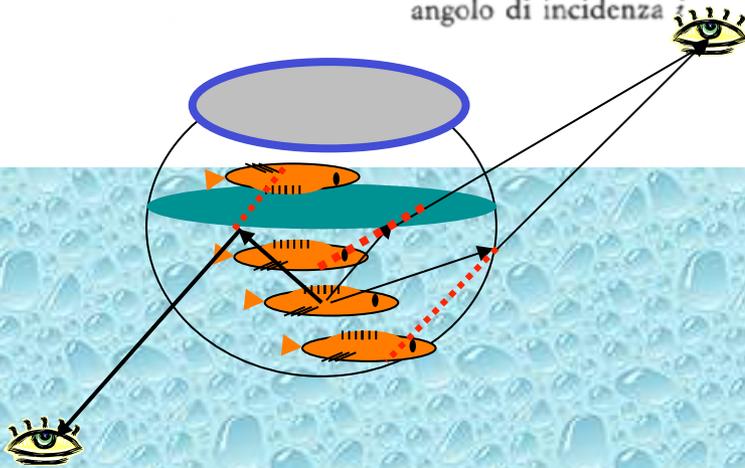
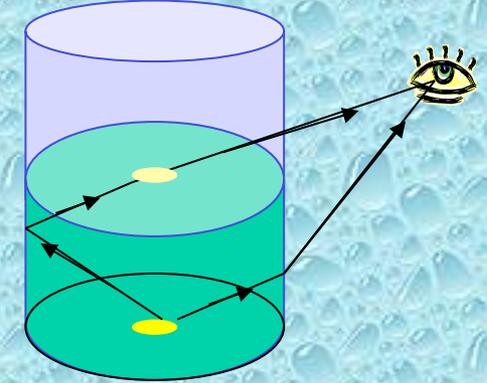
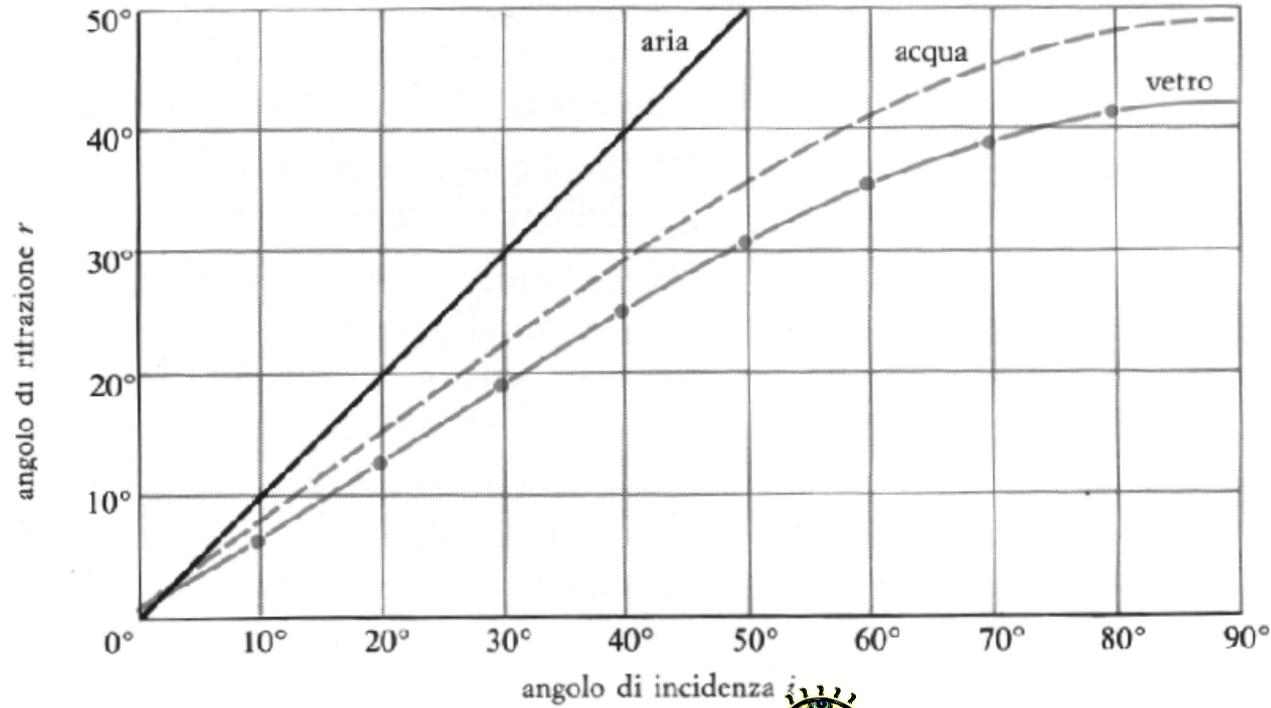
$$t_{EC} = \frac{|EC|}{c_{aria}} \quad t_{DF} = \frac{|DF|}{c_{acqua}} = n \frac{|DF|}{c_{aria}}$$

$$|EC| \approx n|DF| \quad (x \rightarrow 0)$$

$$x \sin \widehat{EDC} = x \sin \theta_i = nx \sin \widehat{DCF} = nx \sin \theta_r$$

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = n$$

# Rifrazione: osservazioni e misure



# Applicazioni

- Reciprocità dei cammini

$$n_{kj} = n_{ij} / n_{ik}$$

$$n_{ij} = n_i / n_j$$

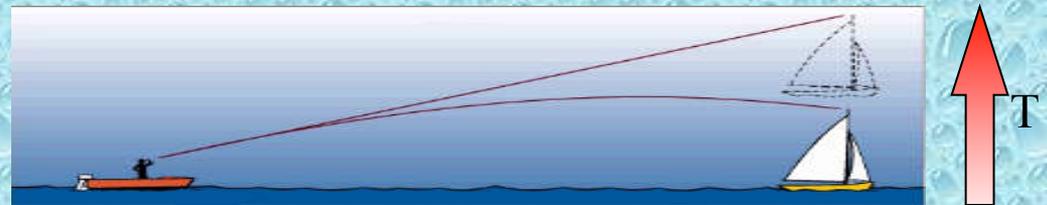
- Indice di rifrazione assoluto e relativo:

•

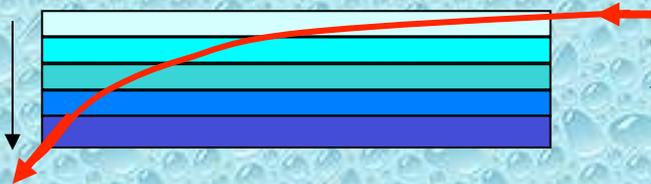
*Miraggio inferiore*



*Miraggio superiore*



- Propagazione in mezzi non omogenei



Gradiente di densità realizzato  
usando soluzioni acqua/zucchero con differenti concentrazioni

# L'arcobaleno

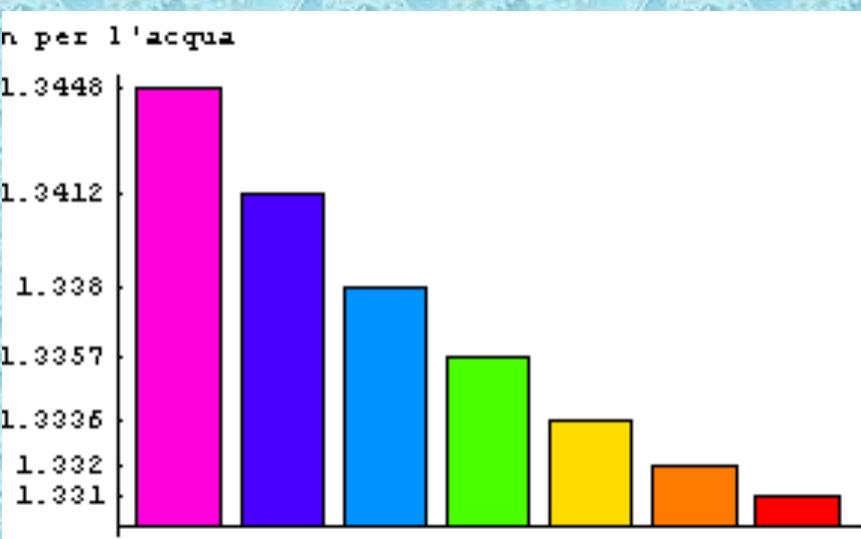


# Dispersione della luce



E così la vera causa [...] non si doveva ad altro che al fatto che la luce non è simile od omogenea, ma consiste di raggi diversi, alcuni dei quali sono più rifrangibili degli altri; cosicché a parità di angolo di incidenza sullo stesso mezzo, alcuni saranno più rifratti di altri [...].

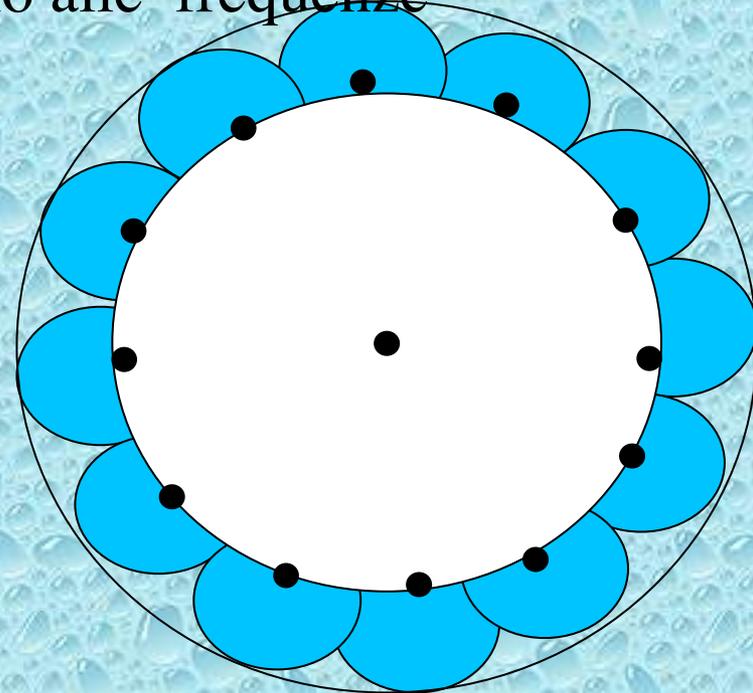
**I. Newton, "A new theory about light and colours"**



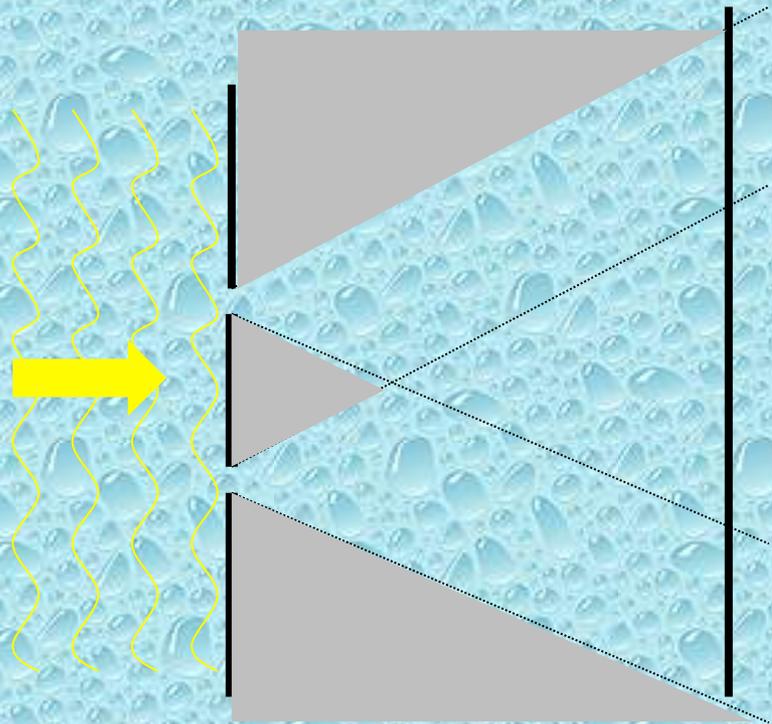
I. Newton (1642-1727): *Optica* (1670)  
Teoria corpuscolare (moderata) della luce

# I Colori come le Note

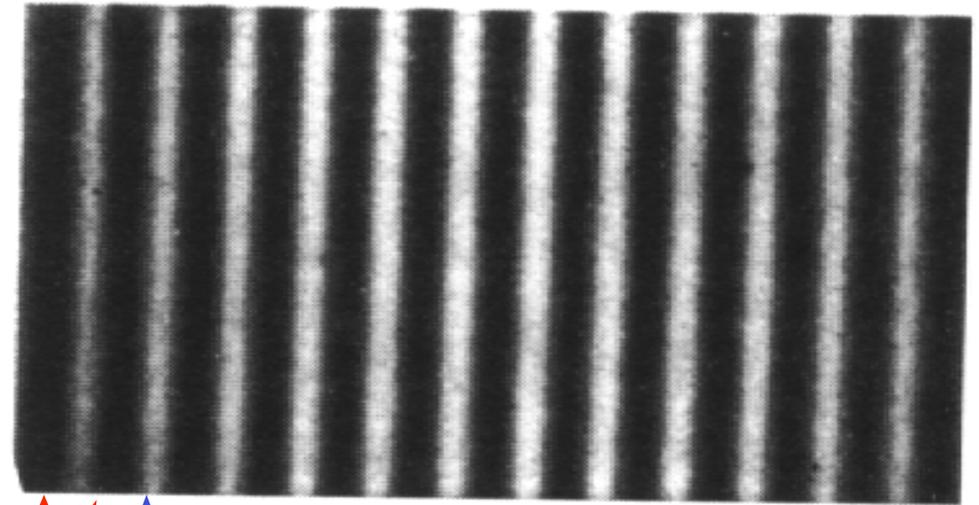
- „ Cartesio: corpi luminiferi rotanti
- „ P. Grimaldi: Pshyco-Mathesis de lumine, coloribus et iride (1665), la Diffrazione
- „ Horror Vacui e Etere
- „ R. Hooke: Micrographya, i Colori corrispondono alle frequenze di oscillazione dell'etere (1667)
- „ C. Huygens (1629-1625): principio
- „ dei fronti d'onda, riflessione e rifrazione



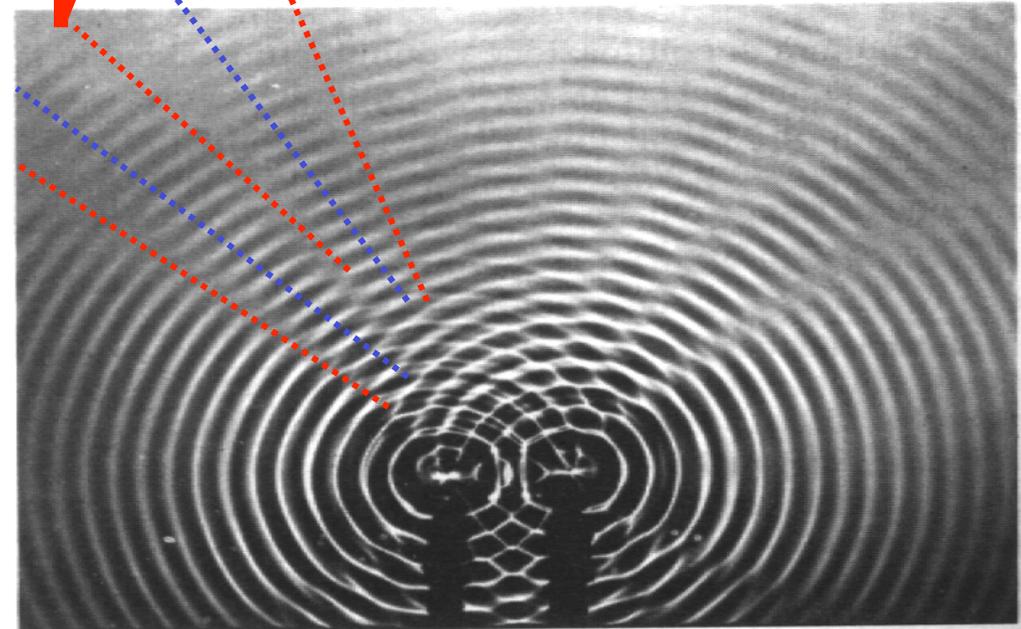
# Ipotesi ondulatoria della luce



Linee nodali



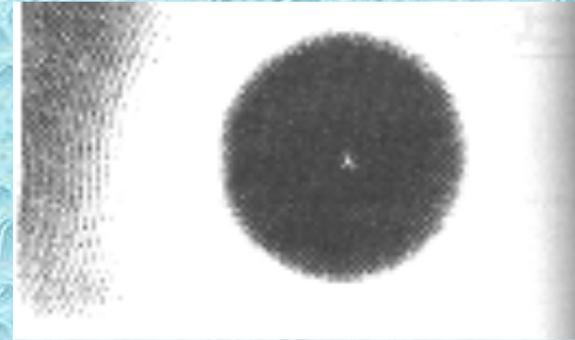
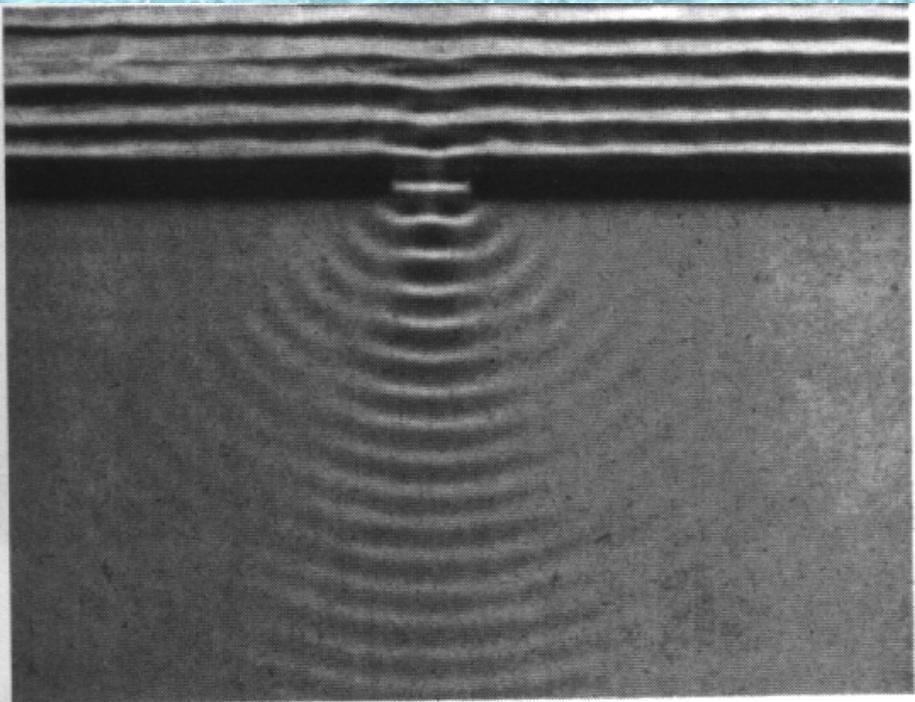
Linee di interferenza costruttiva



Esperienza di Young (1803)

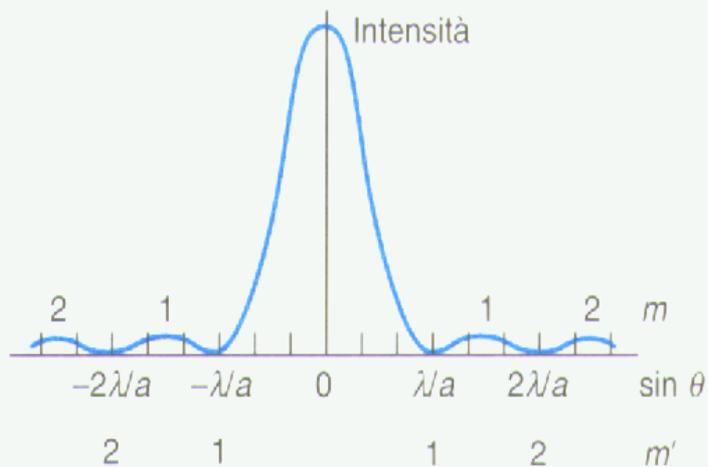
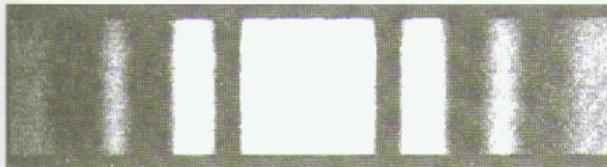
Interferenza di onde meccaniche

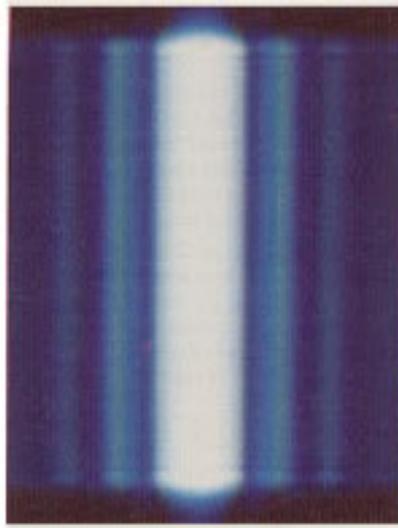
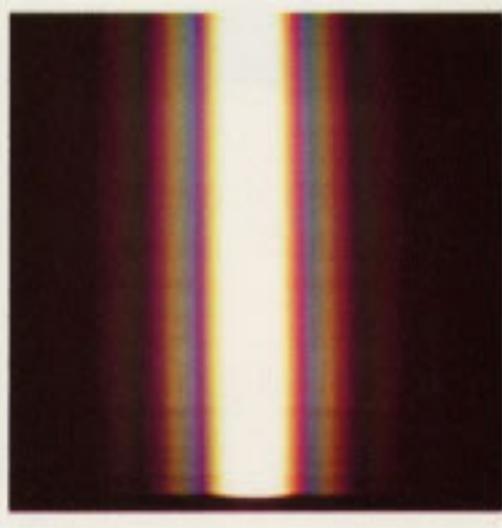
# Diffrazione



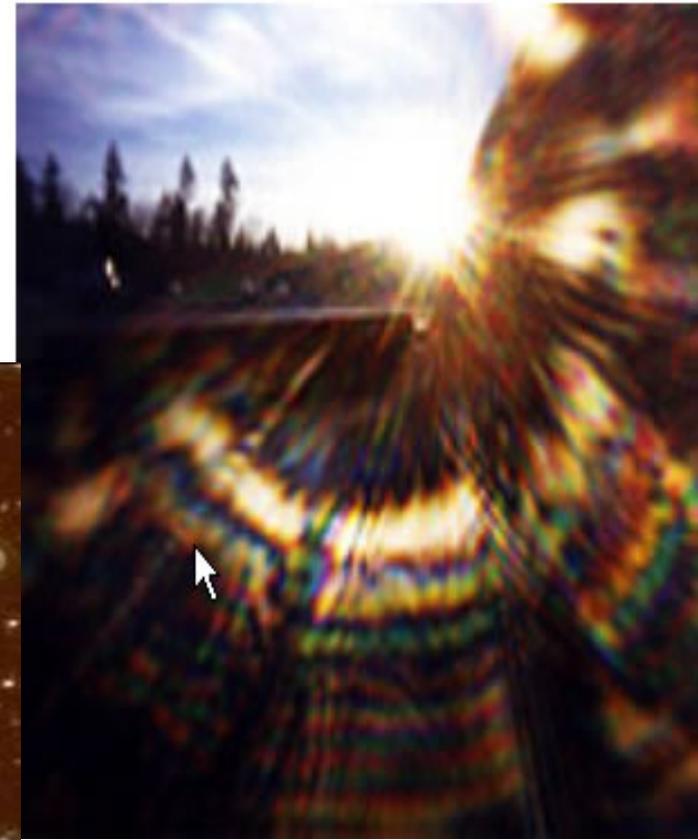
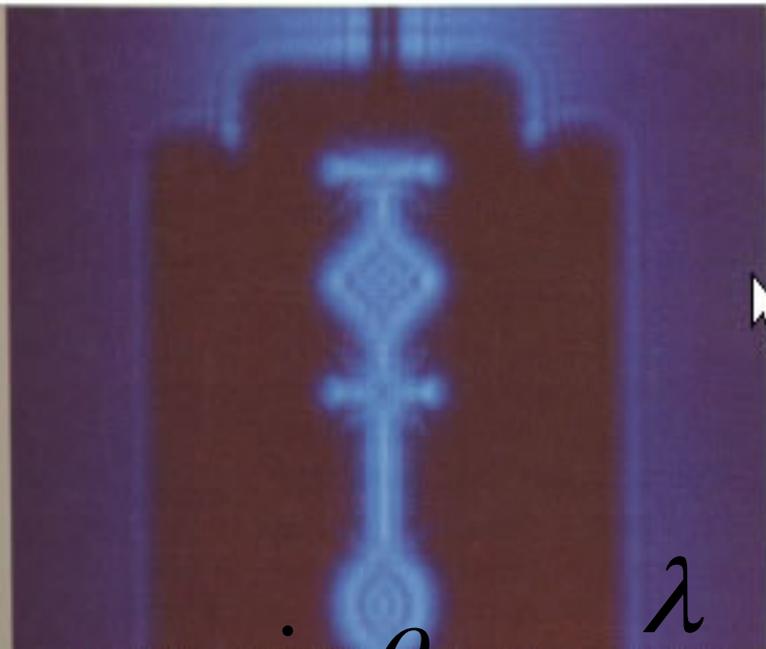
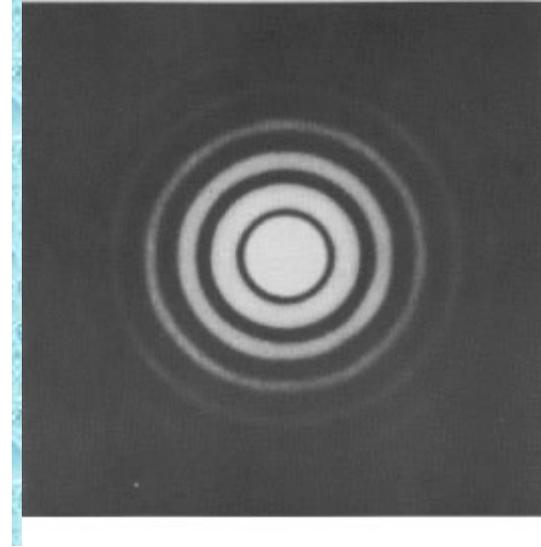
A.J. Fresnel (1788 – 1827)

F. Fraunhofer

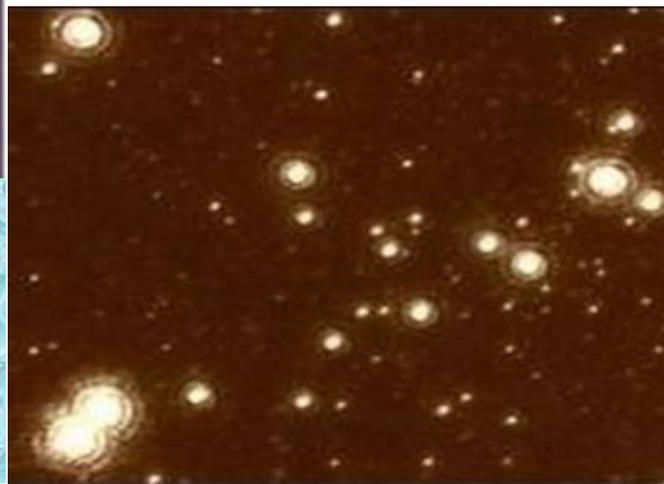
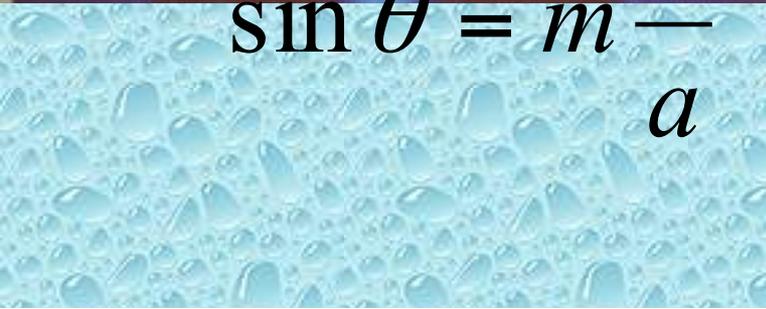




Diffrazione di  
luce bianca e  
blu



$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{a}$$



# Maxwell e le Onde

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



$$\nabla^2 f - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = 0$$

Equazione delle onde

Velocità della luce

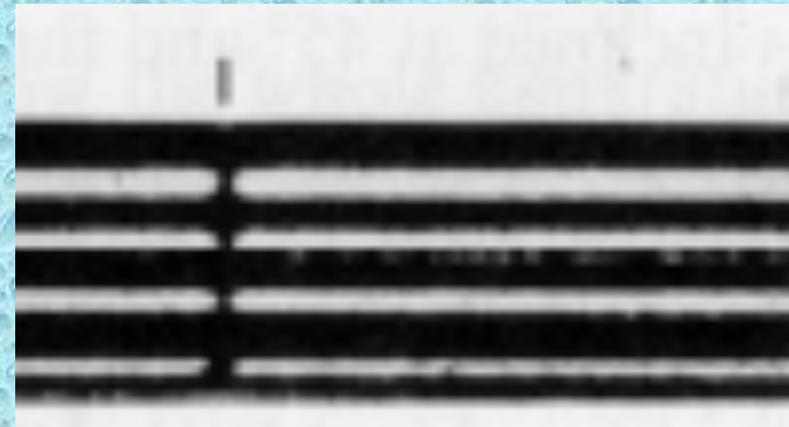
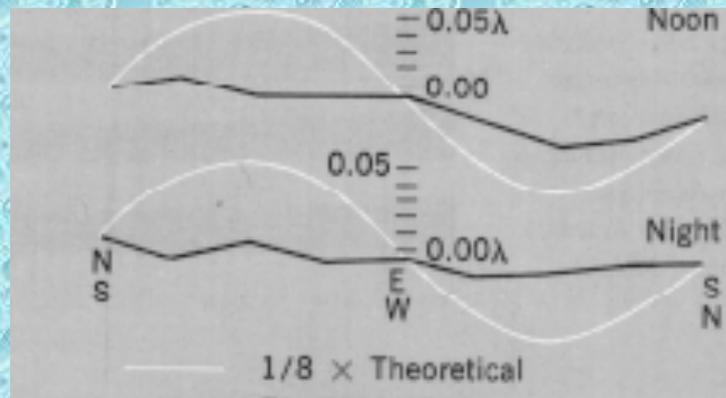
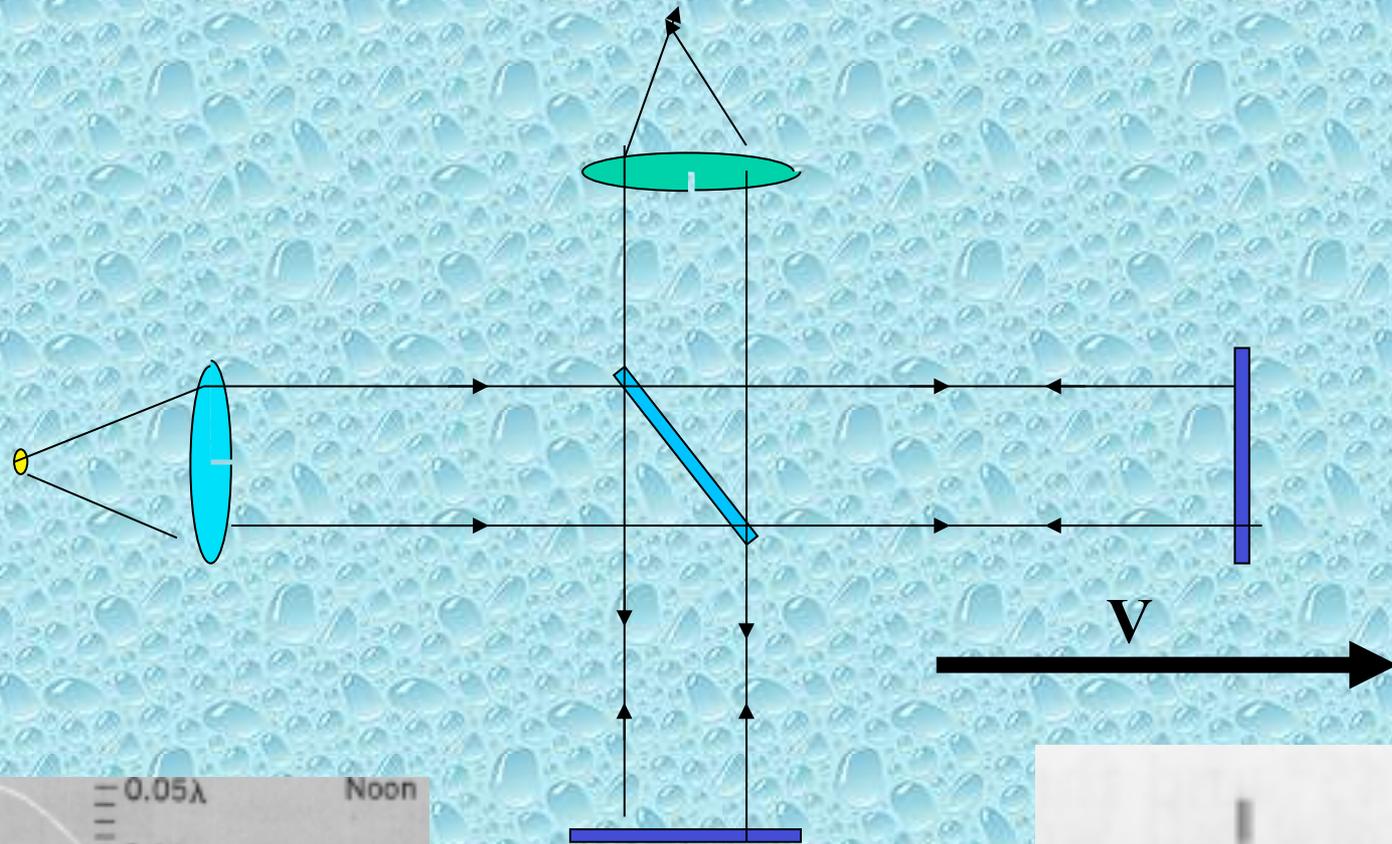
$$\omega = c k$$

Legge di dispersione

$$f = A \sin(kx - \omega t)$$

Onde Hertziane (1887)

# Michelson e Morley: cercando il vento di Etere (1881)



Risultato: Nessun vento di etere osservato!

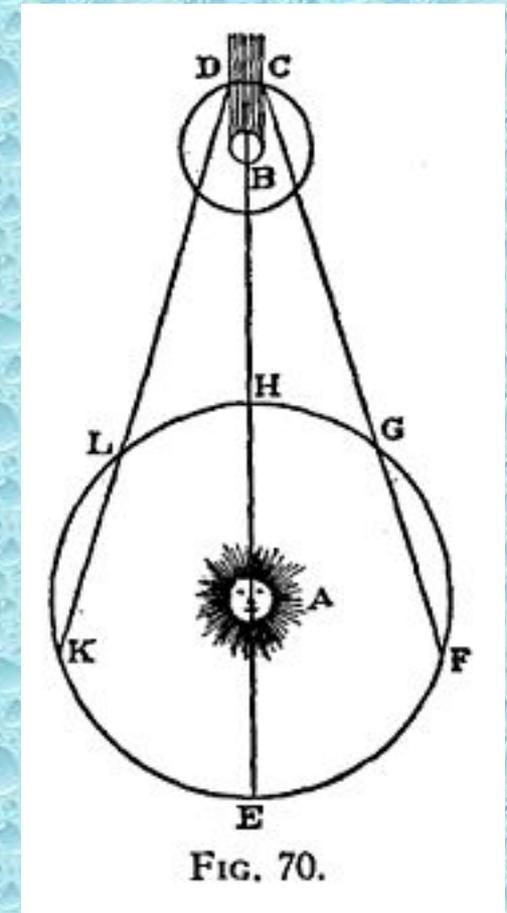
# Misura della velocità della luce



1670, Ole Roemer



214000 km/sec



# Misura della velocità della luce

Metodo di Foucault -  
Michelson  
relazione dei punti coniugati

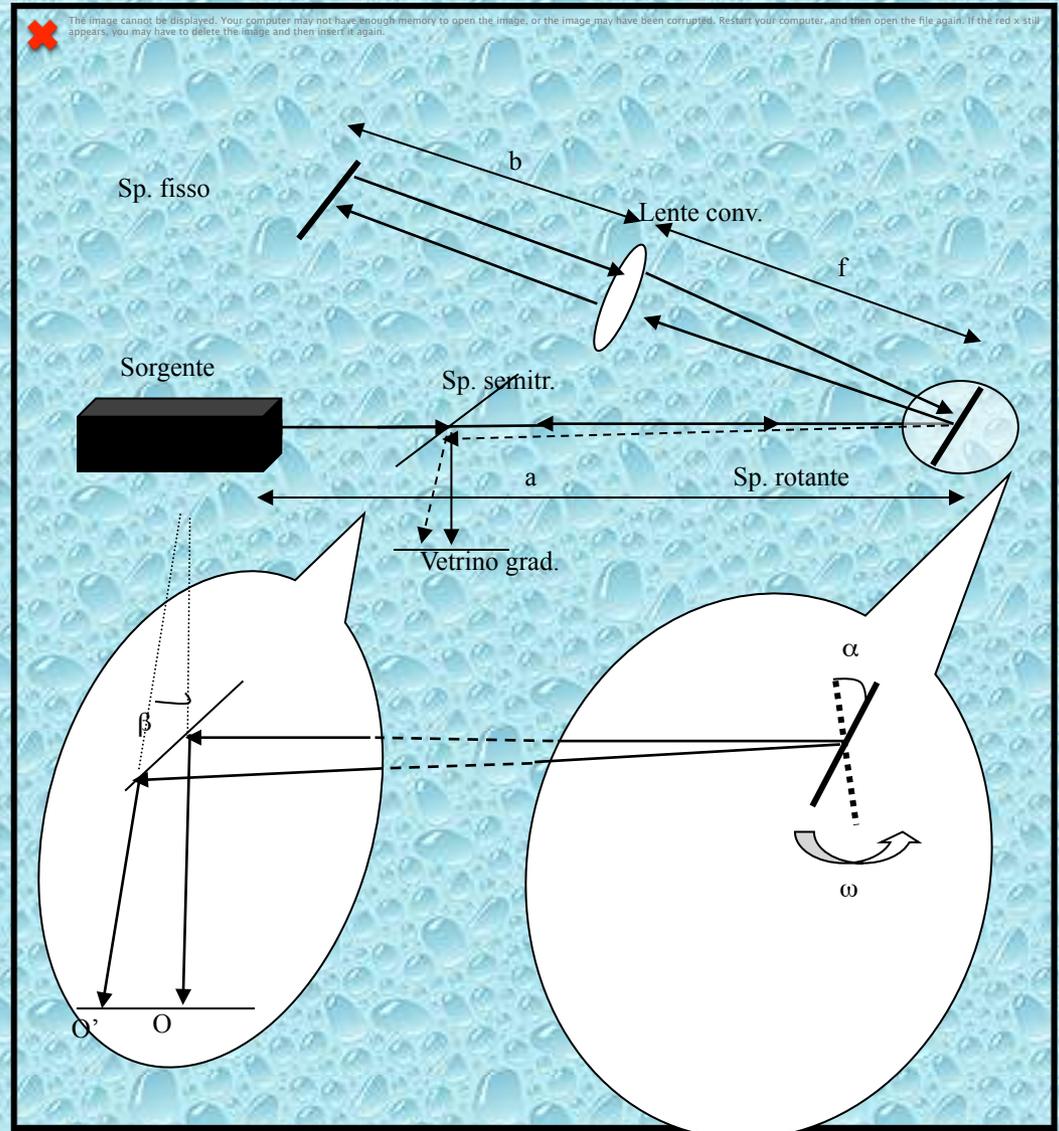
$$\frac{1}{a+f} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \Delta s = 2(b+f)$$

$$\alpha = \omega \Delta t \quad \beta = 2\alpha$$

$$|OO'| = 2\alpha a$$

$$c = \frac{4\omega(b+f)a}{|OO'|}$$



Date	Author	Method	Result (km/s)	Error
1676	Olaus Roemer	Jupiter's satellites	214,000	
1726	James Bradley	Stellar Aberration	301,000	
1849	Armand Fizeau	Toothed Wheel	315,000	
1862	Leon Foucault	Rotating Mirror	298,000	+500
1879	Albert Michelson	Rotating Mirror	299,910	+50
1907	Rosa, Dorsay	Electromagnetic constants	299,788	+30
1926	Albert Michelson	Rotating Mirror	299,796	+4
1947	Essen, Gorden-Smith	Cavity Resonator	299,792	+3
1958	K. D. Froome	Radio Interferometer	299,792.5	+0.1
1973	Evanson et al	Lasers	299,792.4574	+0.001
1983		Adopted Value	299,792.458	

## speed of light in vacuum

Value **299 792 458 m s<sup>-1</sup>**

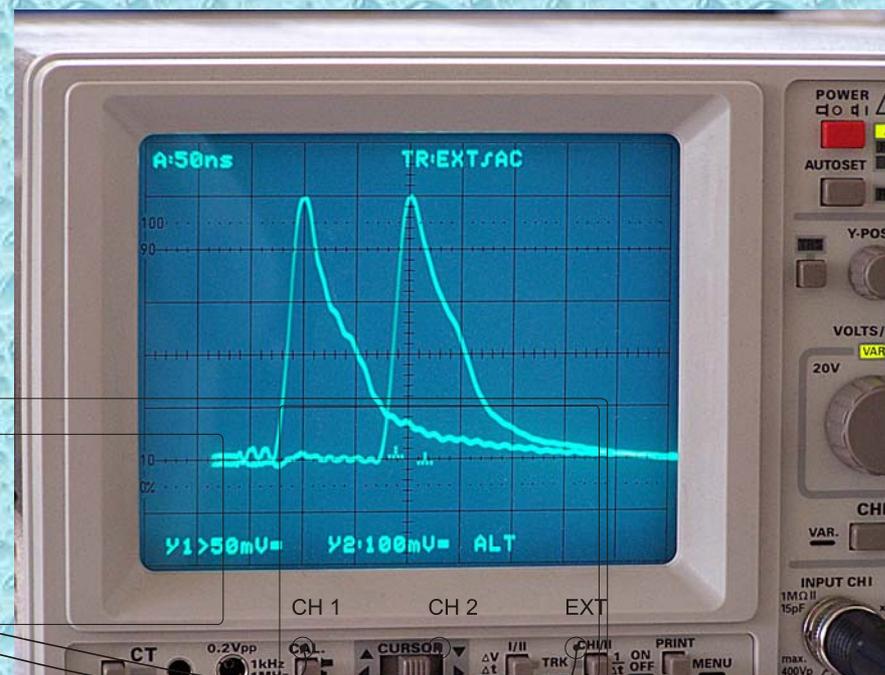
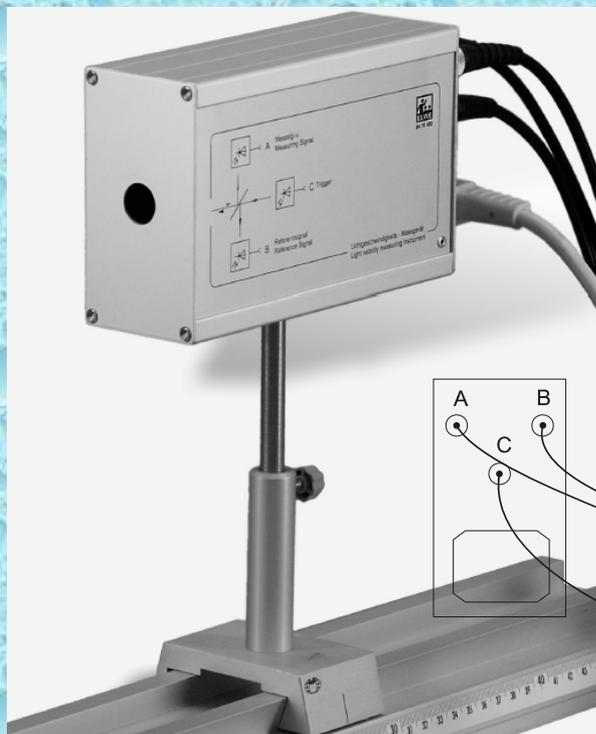
Standard uncertainty (**exact**)

Relative standard uncertainty (**exact**)

Concise form **299 792 458 m s<sup>-1</sup>**

Il metro è la lunghezza percorsa dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo di 1/299792458 di secondo.

# Apparecchiatura per la misura della velocità della luce



### 3. Technical data

#### Basic unit

Light emitter: LED  
Pulse rate: 30 kHz approx.  
Power input: 3 W approx.  
Voltage: 115/230 V, 50/60 Hz  
Dimensions: 103 x 56 x 175 mm<sup>3</sup>  
Stem: 150 mm x 10 mm diam.  
Weight: 1 kg approx.

#### Lens

Fresnel lens:  $f = 375$  mm  
Lens surface: 245 mm x 245 mm  
Dimensions: 285 mm x 285 mm  
Stem: 54 mm x 10 mm diam.  
Weight: 200 g approx.

#### Mirror

Design: Micro-prism mirror  
Mirror diameter: 100 mm approx.  
Dimensions: 170 x 170 x 40 mm<sup>3</sup>  
Stem: 54 mm x 10 mm diam.

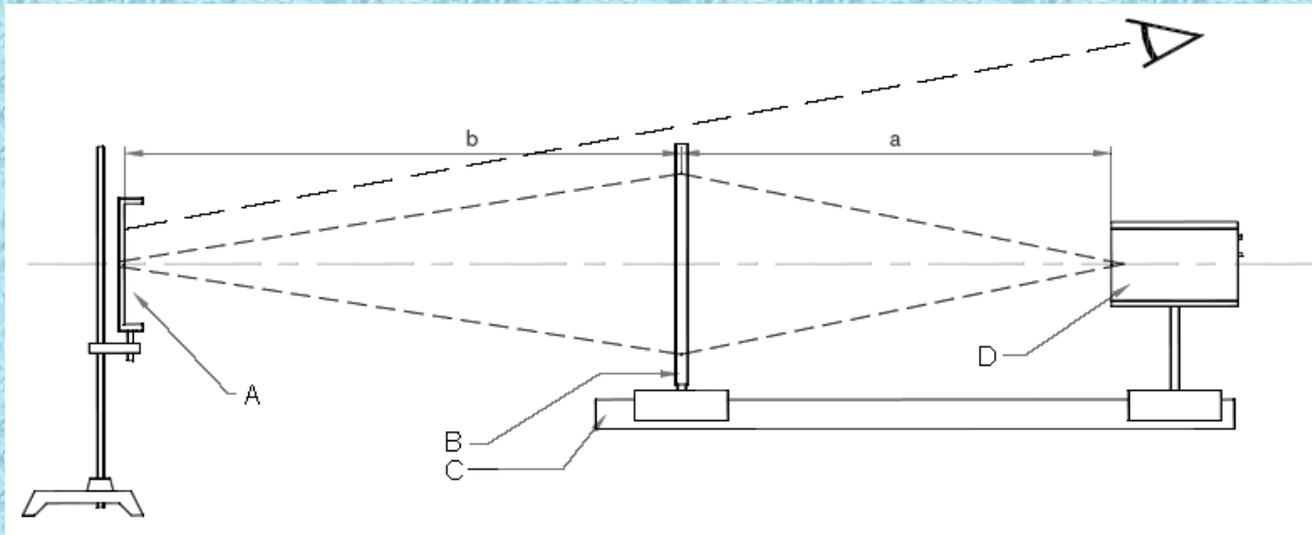


Fig. 1: Experiment set-up: A Microprism mirror, B Fresnel lens, C Optical bench, D Basic unit



$s = 260\text{ cm}$  ,  $\Delta t = 10.0\text{ ns}$

$v = 2.6 \times 10^8\text{ m/sec}$



$s = 208\text{ cm}$  ,  $\Delta t = 8.0\text{ ns}$

$v = 2.6 \times 10^8\text{ m/sec}$

t (ns)	s (cm)	v (m/s) x 10 <sup>8</sup>
9,8	280	2,86
9,4	250	2,66
9,4	212	2,26
8,6	172	2,00
8,2	146	1,78
8,6	168	1,95
11	266	2,42
10,5	224	2,13
9,7	210	2,16
11,1	274	2,47

2,86    0,33

**c**    **± σ**

# Relatività

Le Leggi della Meccanica di Newton sono invarianti di Galilei.

Le leggi di Maxwell NON sono invarianti rispetto a trasformazioni di Galilei  
Quindi incompatibili con la Meccanica

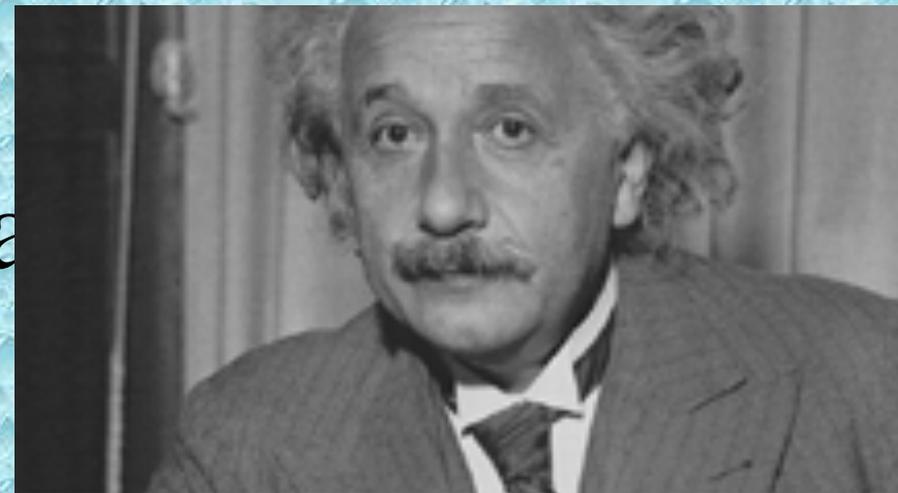
Quale tra queste due teorie qual è più fondamentale?

La velocità della luce cambia tra due sistemi di riferimento in moto relativo uniforme?



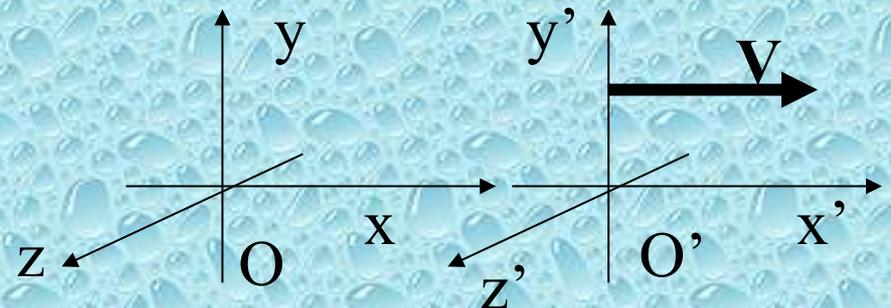
# Relatività Speciale

- La velocità della luce è indipendente dal moto della sorgente o del ricevitore
- Le leggi della Fisica sono le stesse in tutti sistemi di riferimento
- Le coordinate dello spazio-tempo tra due sistemi di riferimento inerziali in moto relativo uniforme sono dettate dalle TRASFORMAZIONI di LORENTZ

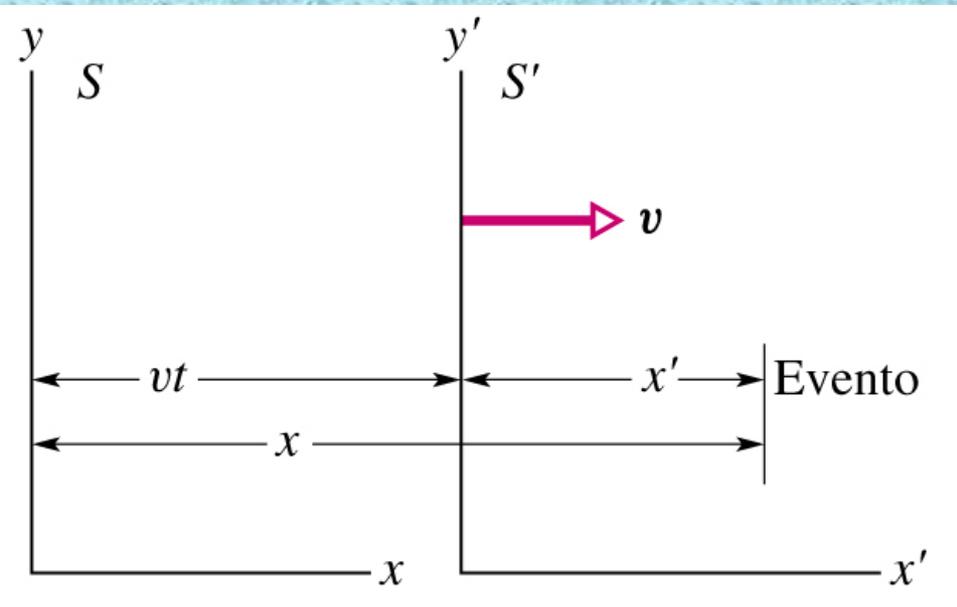


Trasformazioni di Lorentz

$$x' = \frac{x - Vt}{\left(1 - V^2/c^2\right)^{1/2}}, \quad y' = y, \quad z' = z$$
$$t' = \frac{t - V/c^2 x}{\left(1 - V^2/c^2\right)^{1/2}}$$



# Trasformazioni di Lorentz



## Trasformazioni di Galileo

$$x' = x - vt$$

$$t' = t \quad \text{valide a basse velocità}$$

$S \rightarrow (x, y, z, t)$  per un Evento **Trasformazioni di Lorentz**

$S' \rightarrow (x', y', z', t')$

In che relazione sono queste quantità?

$$x' = \gamma(x - vt)$$

$$y' = y \quad \text{valide a ogni possibile velocità}$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma\left(t - vx/c^2\right)$$

# Relatività della lunghezza

$$x = \gamma(x' + vt')$$

e, quindi,

$$\begin{aligned} x_1 &= \gamma(x'_1 + vt'_1) \\ x_2 &= \gamma(x'_2 + vt'_1) \end{aligned} \implies x_2 - x_1 = \gamma(x'_2 - x'_1).$$

Chiamata  $l = x'_2 - x'_1$  la lunghezza dell'asta in  $S'$ , avremo allora

$$l_0 = \gamma l \iff l = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} l_0 < l_0.$$

Es.



$$l = v\Delta t_0 \quad (\text{Sally})$$

$$l_0 = v\Delta t \quad (\text{Sam})$$

$$\frac{l}{l_0} = \frac{v\Delta t_0}{v\Delta t} = \frac{1}{\gamma} \quad \text{o} \quad l = \frac{l_0}{\gamma}$$

# Relatività dei tempi

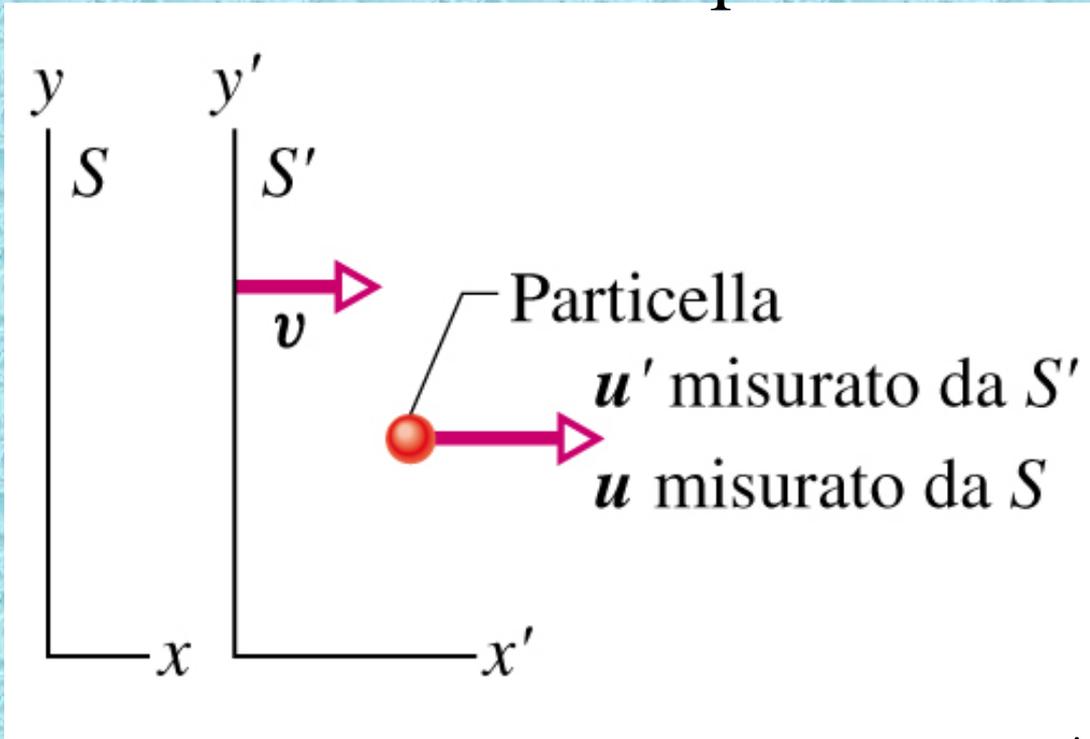
$$\Delta t = \gamma \left( \Delta t' + \frac{v\Delta x'}{c^2} \right)$$

$$\Delta t = \gamma \frac{v\Delta x'}{c^2} \neq 0 \quad (\text{eventi simultanei in } S')$$

$$\Delta t = \gamma\Delta t' \quad (\text{eventi nella stessa posizione in } S')$$

$$\Delta t = \gamma\Delta t_0 \quad (\text{dilazione temporale})$$

# Composizione delle velocità



$$\Delta x = \gamma (\Delta x' + v \Delta t')$$

$$\Delta t = \gamma \left( \Delta t' + \frac{v \Delta x'}{c^2} \right)$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x' + v \Delta t'}{\Delta t' + \Delta x' / c^2}$$

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \text{and} \quad u' = \frac{\Delta x'}{\Delta t'} \quad \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x' / \Delta t' + v}{1 + v (\Delta x' / \Delta t') / c^2}$$

$$u = \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2} \quad (\text{trasformazione relativistica delle velocità})$$

$$c \rightarrow \infty \quad u = u' + v \quad (\text{trasformazione classica delle velocità})$$