

La luce e alcune curiosità

(continua)

Marco Zangrando



La velocità

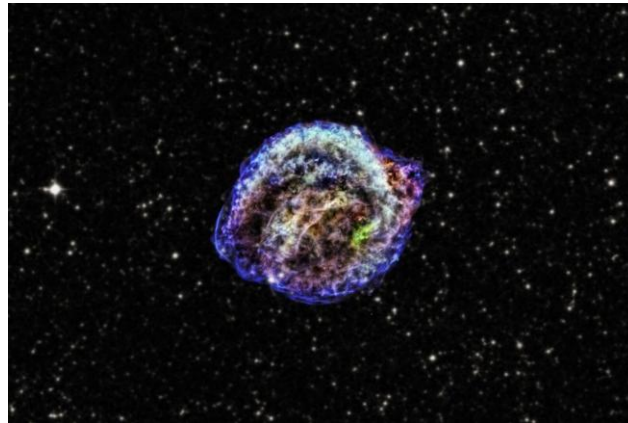
della luce

1604



Johannes Kepler – 1571-1630

Convinto che la velocità fosse infinita e che viaggiasse lungo delle linee rette dette raggi

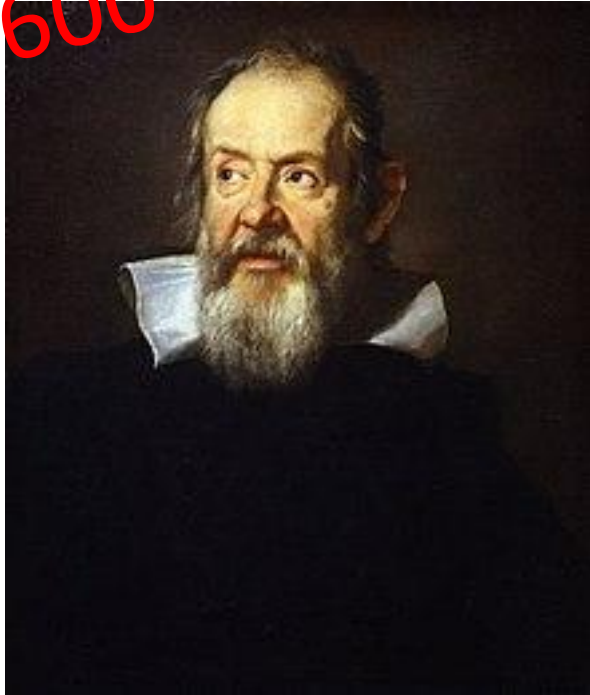


Nel 1604 la luce di una nana bianca esplosa in una [supernova](#) raggiunse la Terra: il fenomeno, abbastanza normale per quel tipo di oggetto, avviene quando una stella piccola e molto densa supera la cosiddetta **massa critica** strappando materiale a una stella compagna che le ruota attorno. In quel caso specifico, l'esplosione, proveniente da una distanza di soli 20.000 anni luce dalla Terra e presumibilmente avvenuta attorno al 18000 a.C., fu visibile anche a occhio nudo per diversi mesi: l'evento venne documentato da vari astronomi del tempo, tra i quali anche Keplero - e da lui la supernova prese il nome. 400 anni dopo il primo bagliore della supernova, l'esplosione è ancora in fortissima espansione.

Velocità della luce INFINITA

(potrebbe essere ragionevole se confrontato con la nostra esperienza quotidiana)

1600



Galileo Galilei – 1564-1642

Guidato dalla similitudine con il suono, Galileo fu il primo a tentare di misurare la [velocità della luce](#). La sua idea fu quella di portarsi su una collina con una lanterna coperta da un drappo e quindi toglierlo lanciando così un segnale luminoso ad un assistente posto su un'altra collina ad un chilometro e mezzo di distanza: questi non appena avesse visto il segnale, avrebbe quindi alzato a sua volta il drappo della sua lanterna e Galileo vedendo la luce avrebbe potuto registrare l'intervallo di tempo impiegato dal segnale luminoso per giungere all'altra collina e tornare indietro. Una misura precisa di questo tempo avrebbe consentito di misurare la velocità della luce ma il tentativo fu infruttuoso data **l'impossibilità per Galilei di avere uno strumento così avanzato che potesse misurare i centomillesimi di secondo che la luce impiega per percorrere una distanza di pochi chilometri.**

Anche se l'esperimento non ebbe successo, lui rimase convinto che la luce avesse velocità finita: semplicemente era troppo veloce da essere misurata (da lui e i suoi strumenti)



Velocità della luce FINITA

(ma non riuscì a misurarla – troppo veloce)

1637



René Descartes – 1596-1650

Razionalista teorico (non è uno sperimentale)

Eclissi di Luna: se vedo l'ombra della Terra sulla Luna allora la velocità della luce è infinita, sennò nel frattempo la Luna si sposterebbe (pensava che ci mettesse un paio di ore per andare e tornare dalla Terra alla Luna)



Velocità della luce INFINITA

(l'errore risiedeva nel considerare la velocità della luce non elevata)

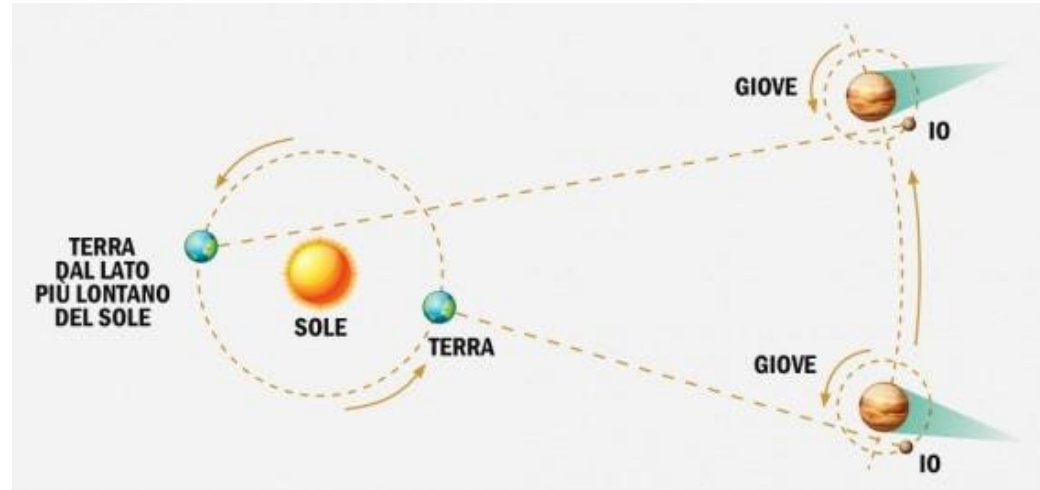
1676



Astronomo e usa eclissi di Io, luna di Giove.

Nel 1676 egli osservò che il moto di “Io”, la più interna delle lune di Giove, non si ripeteva regolarmente nel tempo, ma si notava una variazione nel periodo delle sue eclissi. Dopo sei mesi di osservazione, ovvero quando la Terra si trovava dall'altra parte della sua orbita, rispetto alla prima osservazione, fu riscontrato un ritardo complessivo dell'ordine di 20 minuti. Questo valore è circa il tempo impiegato dalla luce per attraversare l'orbita terrestre. Poiché Roemer disponeva di un valore piuttosto inaccurato del diametro dell'orbita della Terra ricavò 214 300 km/s

Ole Christensen Rømer – 1644-1710



Velocità della luce FINITA

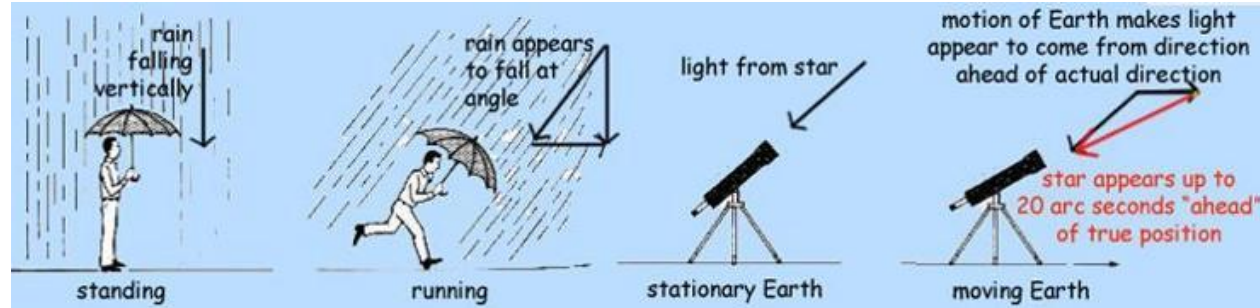
(214.300km/s)

1725



James Bradley – 1693-1762

L'aberrazione della luce (detta anche aberrazione astronomica o aberrazione stellare) è lo spostamento apparente delle stelle sulla volta celeste, dovuta al moto di rivoluzione della Terra e al fatto che la velocità della luce è finita.

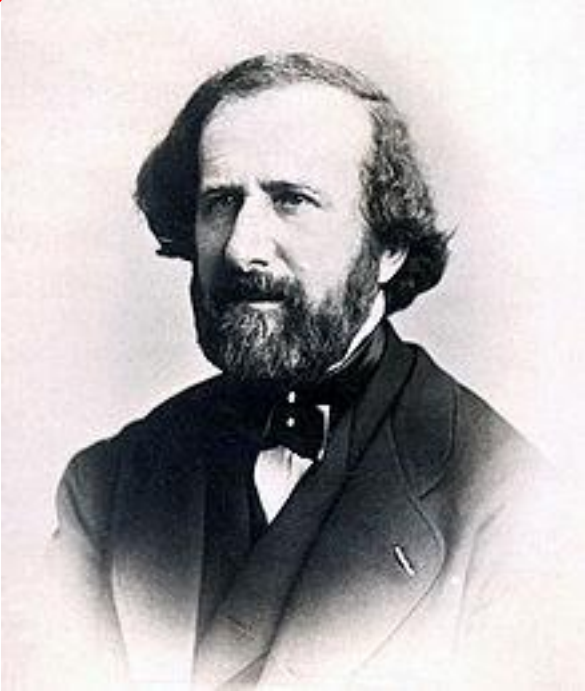


Per capire meglio cosa sia in effetti, immaginiamo di passeggiare sotto la pioggia. Se, mentre ci muoviamo, guardiamo alla nostra destra o sinistra la pioggia venir giù, noteremo che le gocce descrivono una traiettoria obliqua e provengono apparentemente da un punto del cielo davanti a noi. Se ci fermiamo vediamo invece la traiettoria raddrizzarsi e la pioggia cadere verticalmente. Quindi quando ci muoviamo la pioggia sembra provenire da una zona di cielo davanti a noi, mentre in effetti proviene dalla nostra perpendicolare. Lo stesso effetto si verifica per la luce che raggiunge la Terra, e che, a causa del movimento del pianeta intorno al Sole, fa sembrare che essa provenga da una zona di cielo leggermente diversa da quella reale, causando uno spostamento apparente della stella. In sostanza quando noi vediamo una stella in un punto preciso della volta, in effetti quella stella non è proprio lì, ma leggermente indietro lungo l'asse di rivoluzione della Terra intorno al Sole.

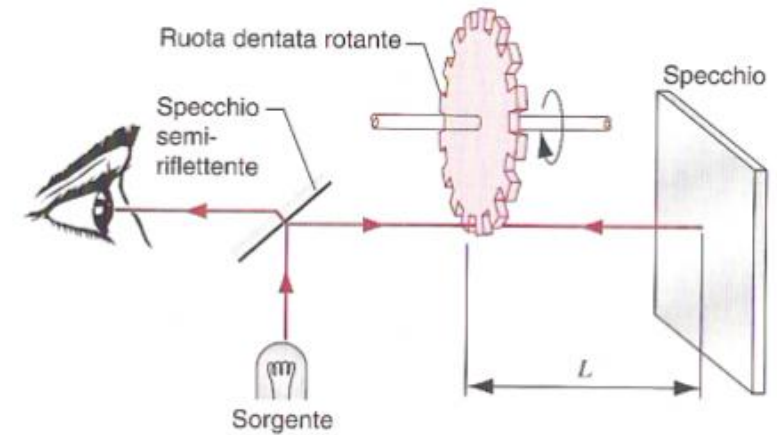
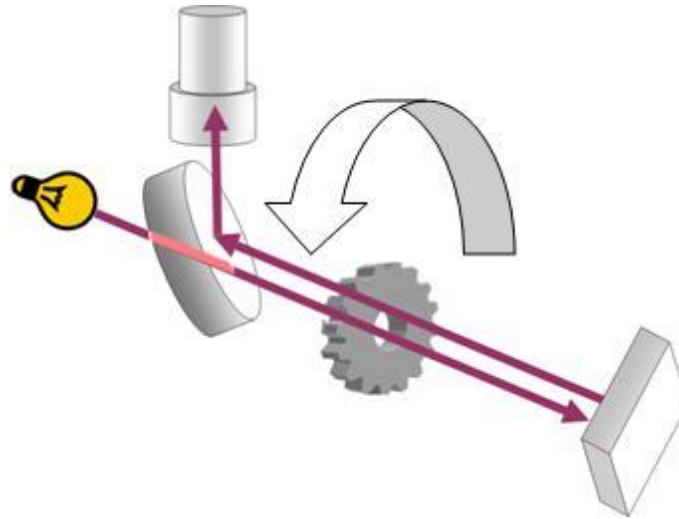
Velocità della luce FINITA

(305.600km/s)

1849



La prima misura fu effettuata 1849 da Fizeau con l'apparecchiatura schematizzata in figura. Un fascio di luce incide su uno specchio piano, posto su una collina, passa attraverso una ruota dentata in rotazione e incide su un altro specchio distante dal primo circa 8630 m. Il fascio riflesso torna indietro, attraversa di nuovo la ruota dentata e arriva all'osservatore



Armand Hippolyte Louis Fizeau –
1819-1896

Velocità della luce FINITA

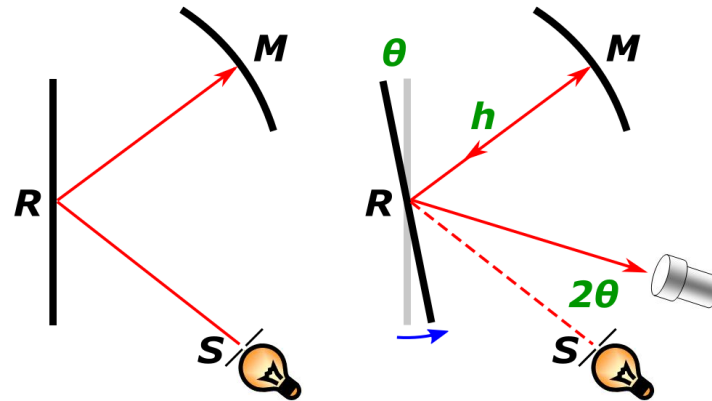
(313.000km/s)

1862



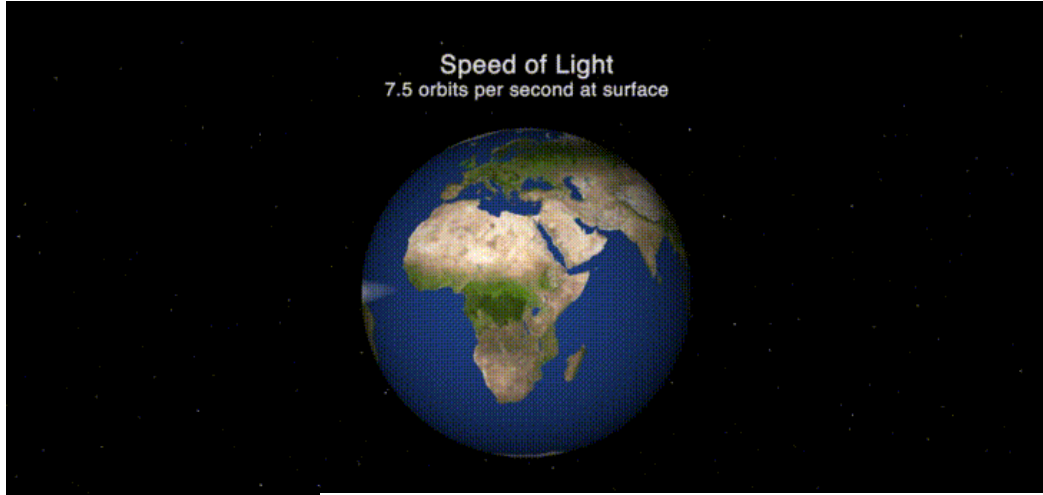
Jean Bernard Léon Foucault –
1819-1868

Nel 1862, Léon Foucault perfezionò il metodo utilizzando uno specchio rotante al posto della ruota dentata. Ora il tempo trascorso veniva misurato da un leggero cambiamento di direzione del raggio di luce riflesso. Progettò il suo esperimento in modo da condurre tutte le misure in laboratorio. Questa misurazione fornì, come velocità della luce nell'aria, 298.000 chilometri al secondo.



Velocità della luce FINITA

(298.000km/s)

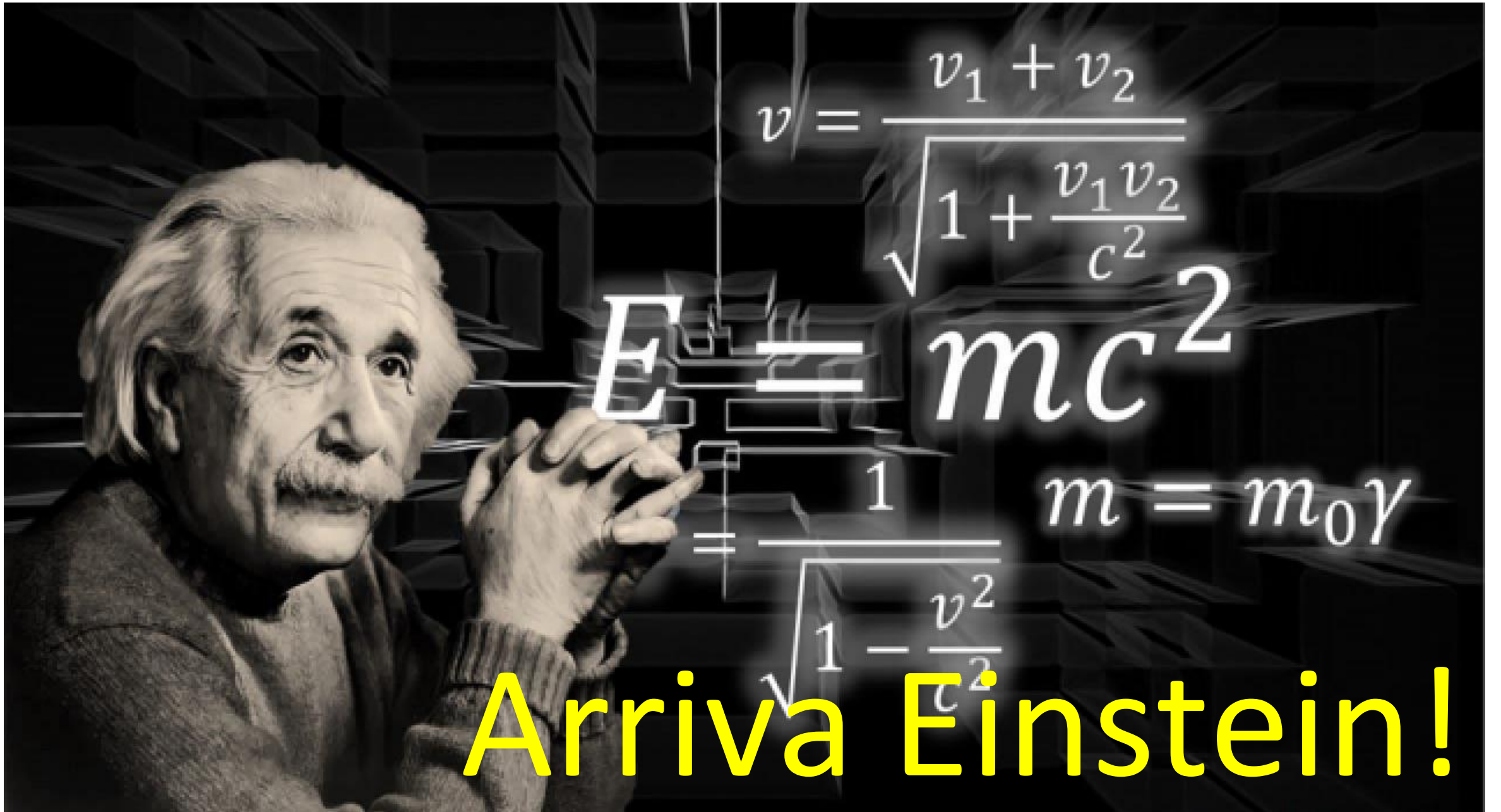


299 792 458 m/s



La luce è un'onda elettromagnetica che viaggia a 298.000 km/s

La velocità della luce ha qualche particolarità?
È la stessa per chiunque la misuri?



$$v = \frac{v_1 + v_2}{\sqrt{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}}$$

$$E = mc^2$$

$$m = m_0 \gamma$$
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Arriva Einstein!

I due pilastri su cui si appoggió Einstein nel 1905

IL PRINCIPIO
DI RELATIVITÀ
DI GALILEO

LA COSTANZA
DELLA VELOCITÀ
DELLA LUCE



Principio di relatività di Galileo

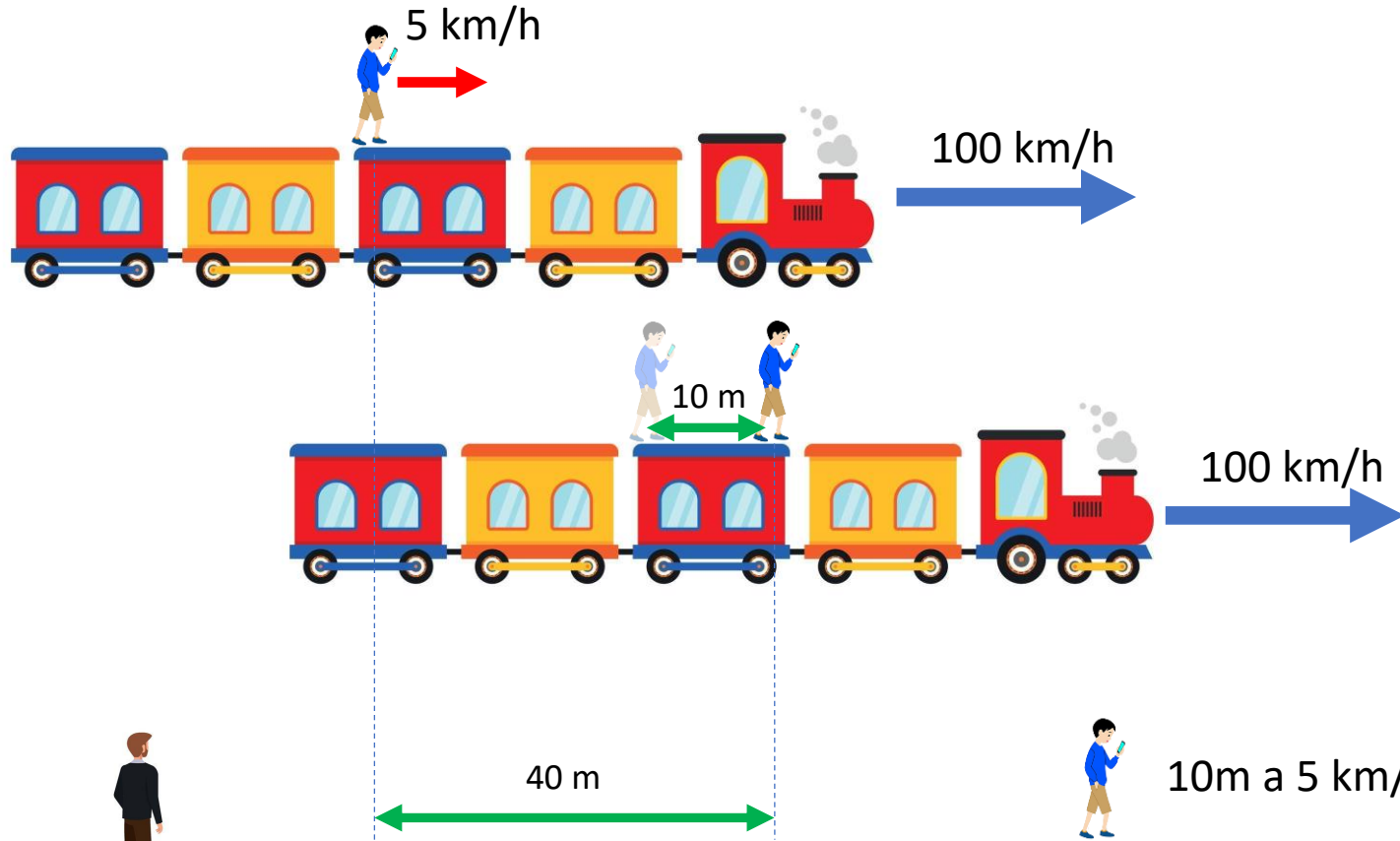
Se le leggi della fisica sono valide per un osservatore, allora lo sono anche per tutti quegli osservatori in moto rettilineo a velocità costante rispetto al primo.

I concetti di tempo e spazio alla base del Principio di Relatività di Galileo

Il tempo scorre uguale per tutti.

Le velocità e le distanze si sommano.

Esperimento «mentale»



Fermo alla stazione

10m a 5 km/h

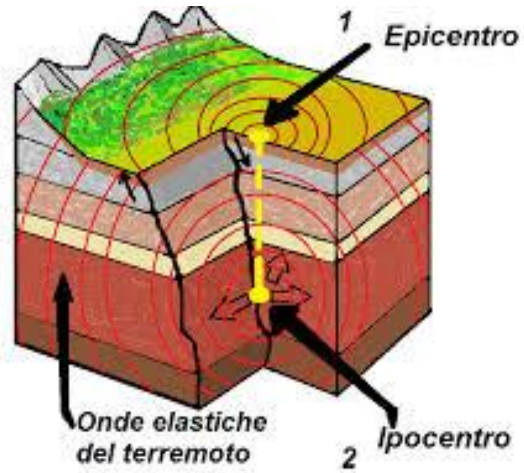
Vedo che va a 105 km/h!
E vedo che si sposta di ~40 m
(10 m + lo spostamento del treno)

Sistemi
di riferimento
differenti
=
Velocità
differenti

Principio di relatività di Galileo

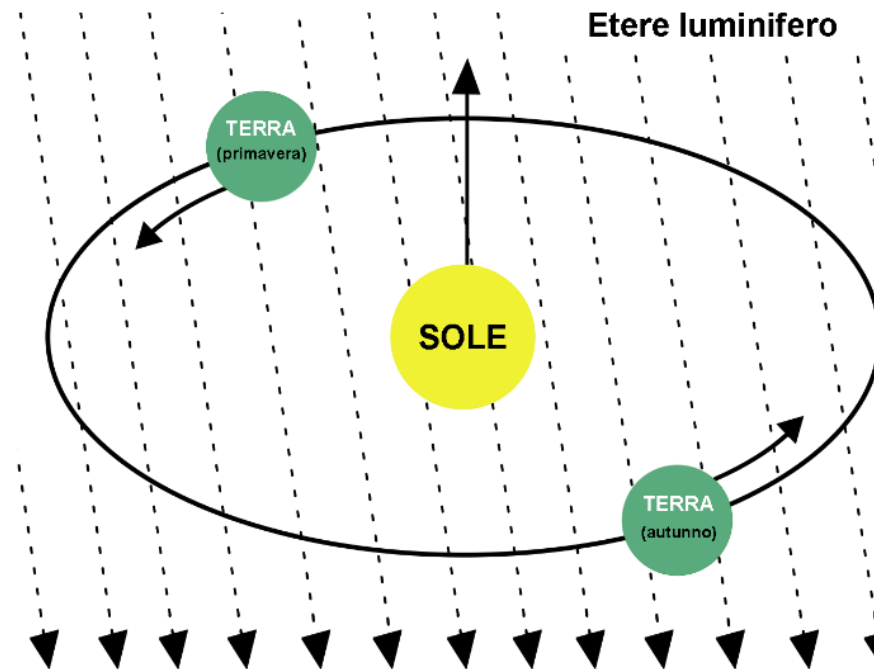
The background of the image is a dark, almost black, space filled with ethereal, flowing light trails. These trails are primarily in shades of deep blue and vibrant purple, with some hints of cyan. They appear to be long-exposure light trails or digital simulations of energy, moving in various directions and creating a sense of dynamic movement and depth. The overall effect is reminiscent of a nebula or a complex data visualization.

Etere o non etere



Con l'affermarsi della teoria ondulatoria della luce l'esigenza di postulare un mezzo materiale per la sua propagazione si fece più stringente.

La natura di questo mezzo materiale fu sin dall'inizio fonte di numerosi problemi. Il fatto che le onde luminose fossero onde trasversali richiedeva un etere solido, invece che liquido o gassoso; l'elevatissima velocità di propagazione della luce richiedeva una rigidità corrispondentemente elevata per l'etere; il fenomeno astronomico dell'aberrazione della luce delle stelle indicava che l'etere dovesse restare immobile su distanze, appunto, astronomiche. E tuttavia, in apparente contrasto con tutto ciò, non si poteva rivelare alcuna resistenza al moto dei corpi da poter attribuire all'etere.



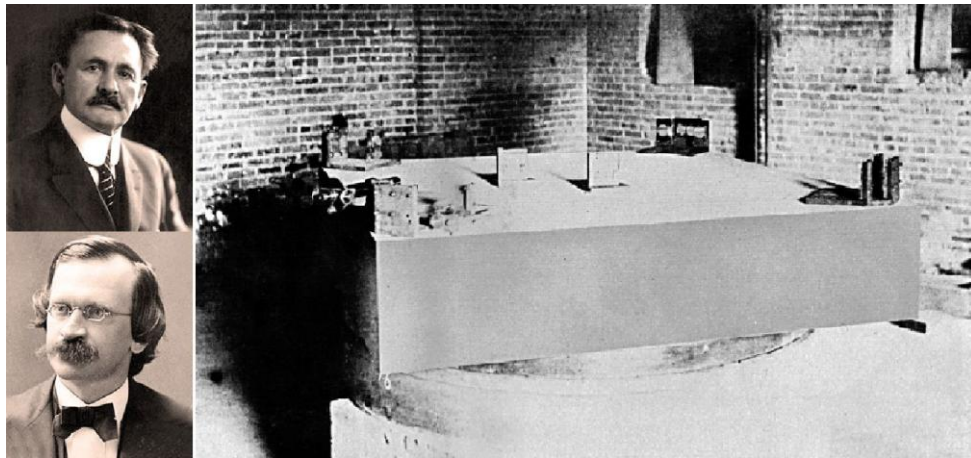
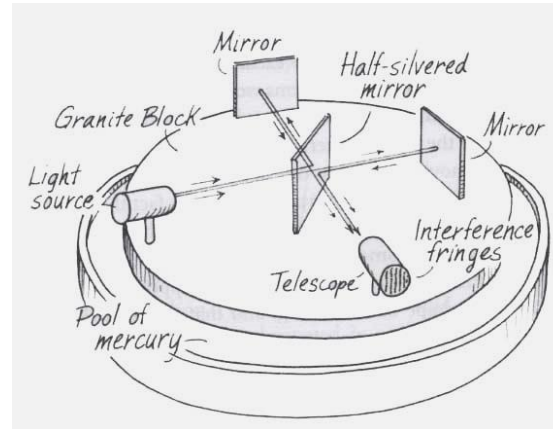


Albert Abraham Michelson –
1852-1931



Edward Williams Morley –
1838-1923

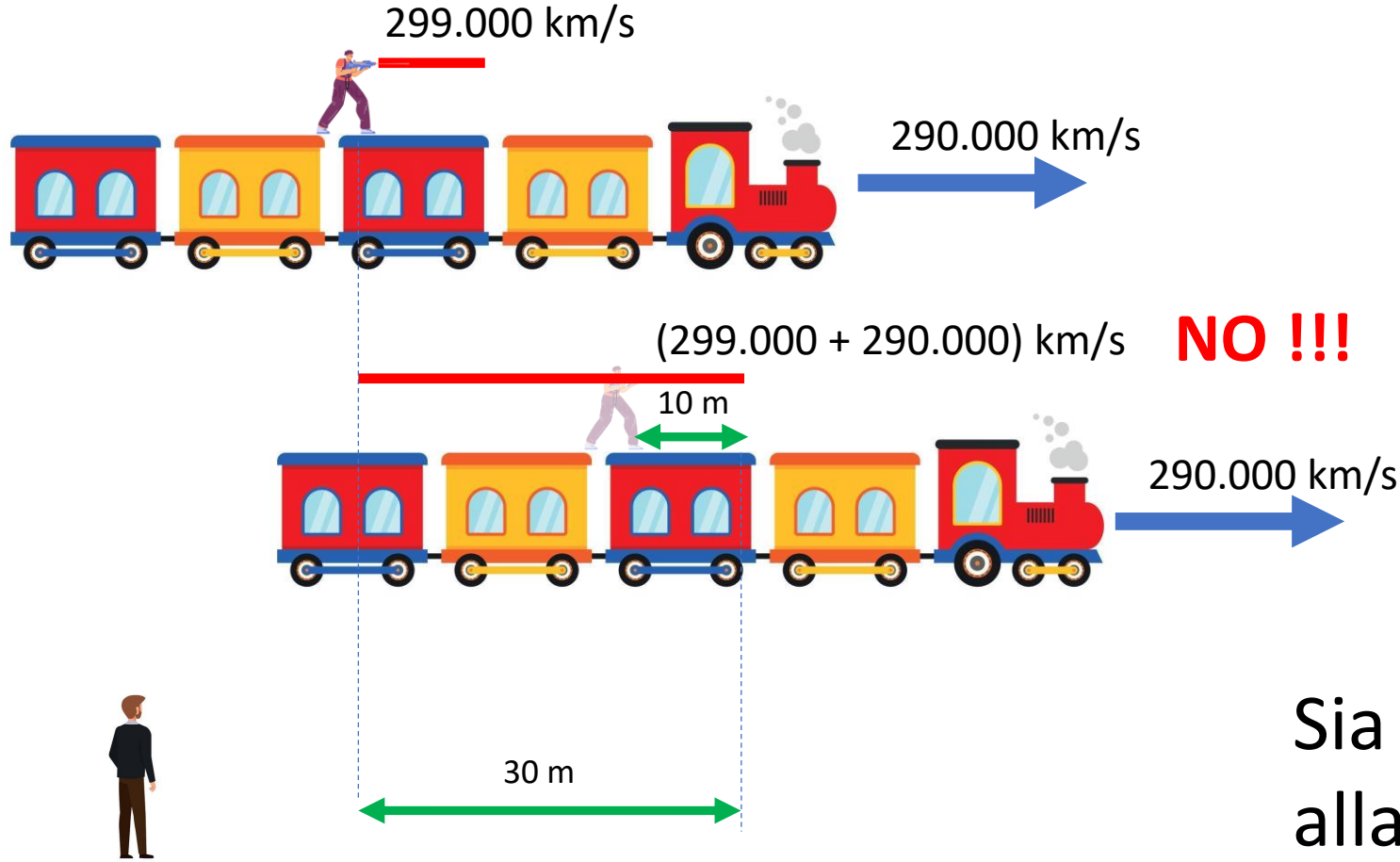
Nel 1887, Michelson e Morley, con il loro noto esperimento, hanno fornito quello che, a posteriori, viene dai più considerato come **l'experimentum crucis** sulla questione. In realtà non esistevano modelli alternativi capaci di inquadrare coerentemente i dati sperimentali e il risultato venne interpretato semplicemente come la prova dell'assenza di vento d'etere.



→ La luce ha sempre la stessa velocità (c), indipendentemente da come ci si muove rispetto ad essa, e l'etere luminifero NON esiste.

**LA COSTANZA
DELLA VELOCITÀ
DELLA LUCE**

Esperimento «mentale»



Fermo alla stazione

La luce va sempre alla stessa velocità



Sia quello sul treno che quello alla stazione misurano sempre la stessa velocità della luce!

I due pilastri su cui si appoggió Einstein nel 1905

**IL PRINCIPIO
DI RELATIVITÀ
DI GALILEO**

**LA COSTANZA
DELLA VELOCITÀ
DELLA LUCE**

Principio di relatività di Galileo

Se le leggi della fisica sono valide per un osservatore, allora lo sono anche per tutti quegli osservatori in moto rettilineo a velocità costante rispetto al primo.

I concetti di tempo e spazio alla base del Principio di Relatività di Galileo

Il tempo scorre uguale per tutti.

Le velocità e le distanze si sommano.

Una delle crisi più profonde della scienza !

Tempo è un entità assoluta... NO! Solo la velocità della luce è uguale per tutti e dovunque

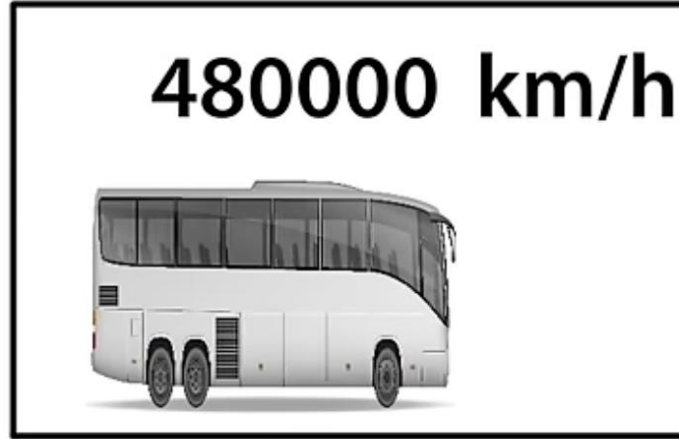
Einstein ha il colpo di genio: invece che far lavorare insieme i due pilastri, lui mette in dubbio i concetti di spazio, tempo e velocità



I risultati della relatività ristretta di Einstein (1905)



Il tempo rallenta se ci muoviamo



Gli oggetti in movimento si accorciano



La luce è l'oggetto più veloce dell'Universo



La simultaneità non è univoca



L'equivalenza tra massa ed energia



La luce si propaga nello spazio vuoto

Credit: Christoph Kaltseis (lighstorm.at) & ESA/ESO/NASA



**Il tempo rallenta se
ci muoviamo**

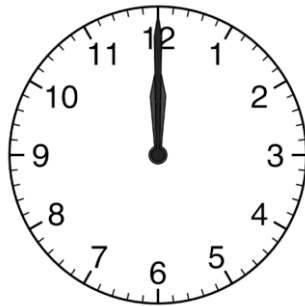
Se la velocità
è costante e
lo spazio aumenta

$$V = S/T$$



deve aumentare
anche il tempo

Nel treno:
5 secondi

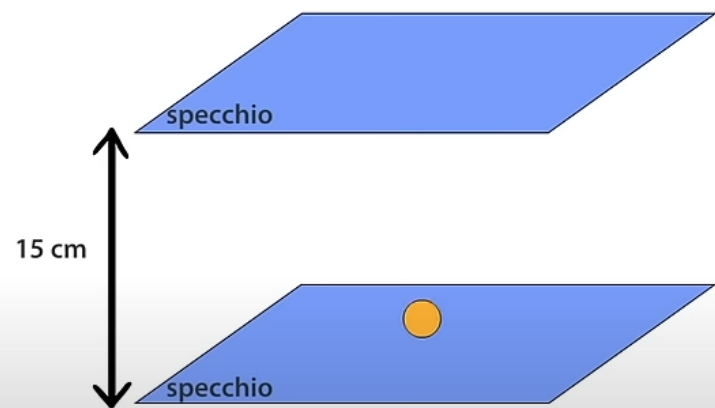


Fuori dal treno:
10 secondi



Nel treno il tempo scorre più lentamente rispetto alla stazione !!!!

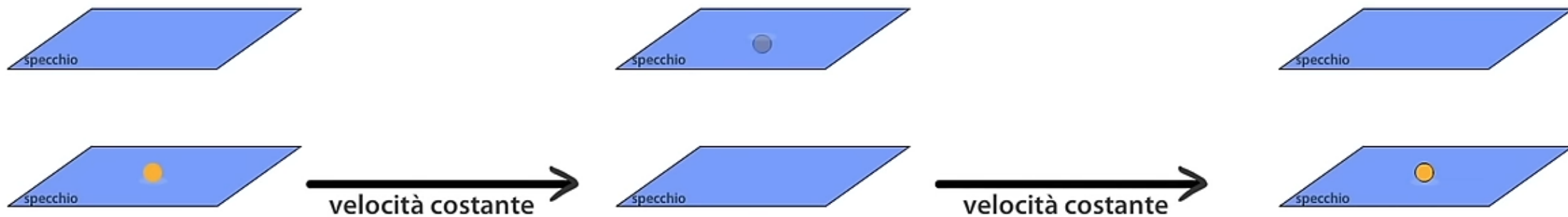
Caso 1. Costruiamo un "orologio a luce" L'orologio è **fermo** rispetto a me.



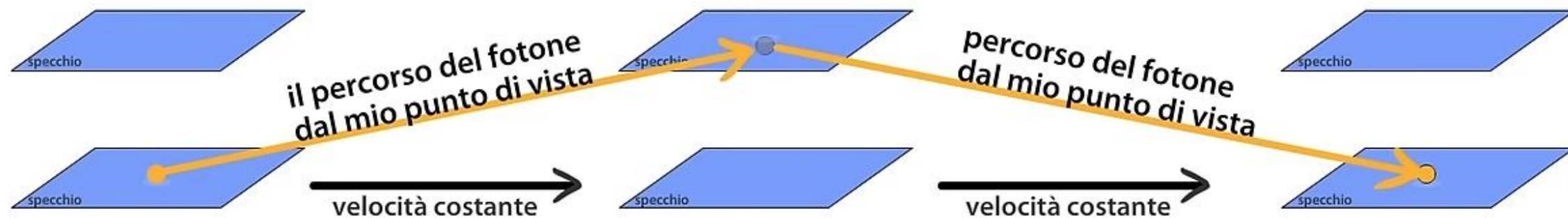
Il fotone urta lo specchio inferiore ogni 1 miliardesimo di secondo.

Dopo 1 miliardo di colpi, sarà passato un secondo.

Caso 2. Metto un orologio **in moto** rispetto a me.



Caso 2. Metto un orologio **in moto** rispetto a me.



Quindi dal mio punto di vista (che sono fermo):

Il fotone percorre un **cammino più lungo** per ritornare allo specchio inferiore

+

La velocità della luce è sempre la stessa, misurata da ogni osservatore.

=

L'orologio in moto va **più piano** del mio, perché impiega più tempo a battere un colpo.

480000 km/h



Gli oggetti in movimento si accorciano

500 km/h

Il bus si contrae nella direzione del moto



Ma non in altezza o larghezza



50000 km/h

Il bus si contrae nella direzione del moto



Ma non in altezza o larghezza



480000 km/h

Il bus si contrae nella direzione del moto



Ma non in altezza o larghezza



(visto da un osservatore a terra)



Quanto si contrae un oggetto quando si muove?

Velocità della luce nel vuoto:	Velocità del bus rispetto all'osservatore	% velocità della luce	Quanto si contrae	Lunghezza misurata da osservatore fermo
c = 299792458 m/s = 1079252849 km/h	0 km/h	0 %	0 %	11 m
	180 km/h	0,0000167 %	0,000000000001399 %	10,9999999999998 m
Lunghezza del bus da fermo:	300 km/h	0,0000278 %	0,000000000003864 %	10,9999999999996 m
L = 11 m	1000 km/h	0,0000927 %	0,000000000042921 %	10,9999999999953 m
	10792528 km/h	1,0000000 %	0,005000125006249 %	10,9994499862493 m
	107925285 km/h	10,0000000 %	0,501256289338003 %	10,9448618081728 m
	539626424 km/h	50,0000000 %	13,397459621556100 %	9,5262794416288 m
	1060000000 km/h	98,2160947 %	81,195778600962200 %	2,0684643538942 m

Quanto rallenta il tempo quando ci si muove?

Sincronizziamo gli orologi con un pilota di Formula 1 e lanciamolo a velocità sempre più alte e calcoliamo quanto rallenta il suo tempo rispetto al nostro.

Velocità della luce nel vuoto:	Velocità del pilota rispetto all'osservatore fermo	% velocità della luce	Quanto il tempo scorre più piano rispetto a chi è fermo	Tempo passato per il pilota dopo un'ora per chi è fermo	Ritardo dell'orologio del pilota rispetto all'osservatore fermo
c = 299792458 m/s = 1079252849 km/h	0 km/h	0,00000 %	0 %	1,000000000000000 h	0
	180 km/h	0,00002 %	0,0000000000001 %	0,999999999999986 h	50 milionesimi di milionesimo di sec.
Il pilota conduce il veicolo per un tempo totale di:	300 km/h	0,00003 %	0,0000000000004 %	0,999999999999961 h	0,1 nanosecondi
T = 1 h	1000 km/h	0,00009 %	0,0000000000043 %	0,999999999999571 h	1,5 nanosecondi
	10792528 km/h	1,00000 %	0,005000125006 %	0,999949998749938 h	un decimo di secondo
	107925285 km/h	10,00000 %	0,501256289338 %	0,994987437106620 h	18 secondi
	539626424 km/h	50,00000 %	13,397459621556 %	0,866025403784439 h	8 minuti
	1060000000 km/h	98,21609 %	81,195778600962 %	0,188042213990378 h	49 minuti

Si genera subito un nuovo conflitto

Newton (1727)

La teoria della gravitazione di Newton descrive la gravità come una forza che agisce a distanza con effetto istantaneo.

Quindi gli effetti della gravità si trasmetterebbero con una velocità infinita.

Einstein (1905)

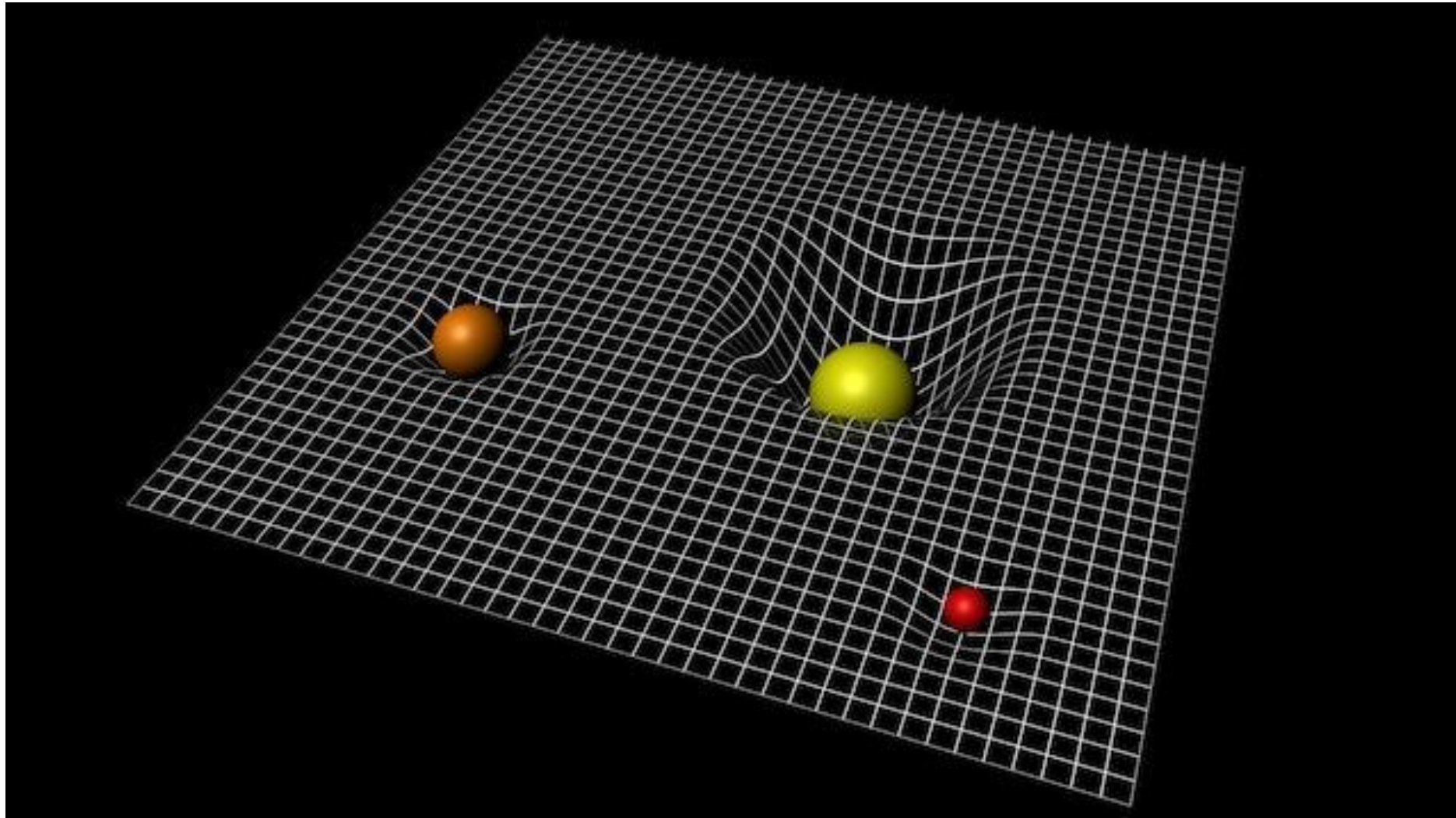
La relatività ristretta deduce che niente può viaggiare più veloce della luce.



CONFLITTO

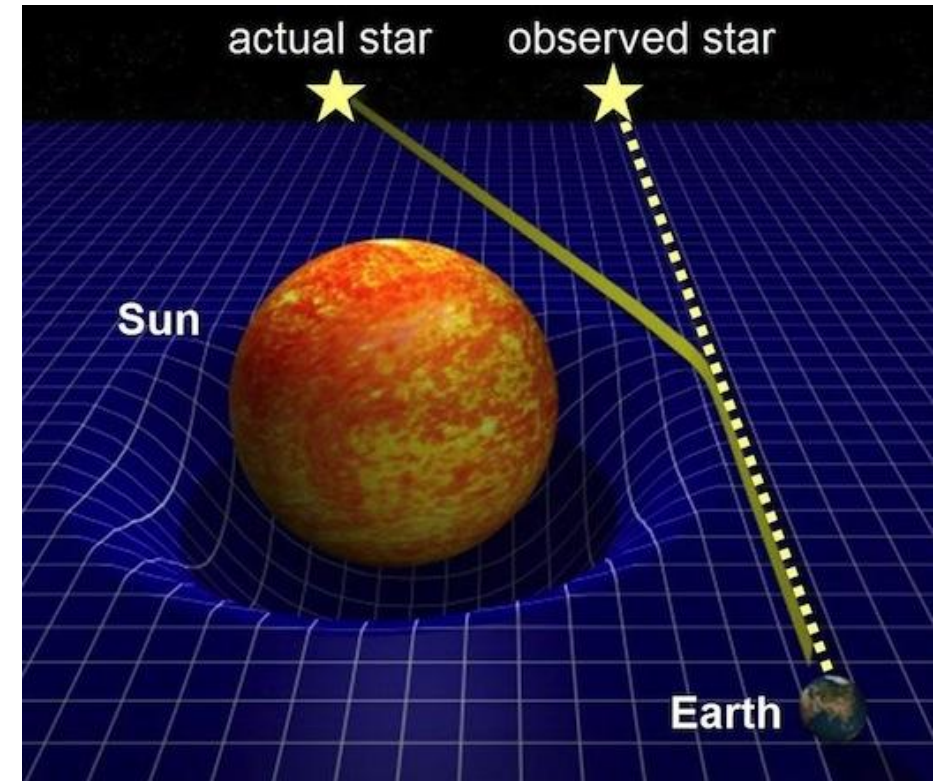
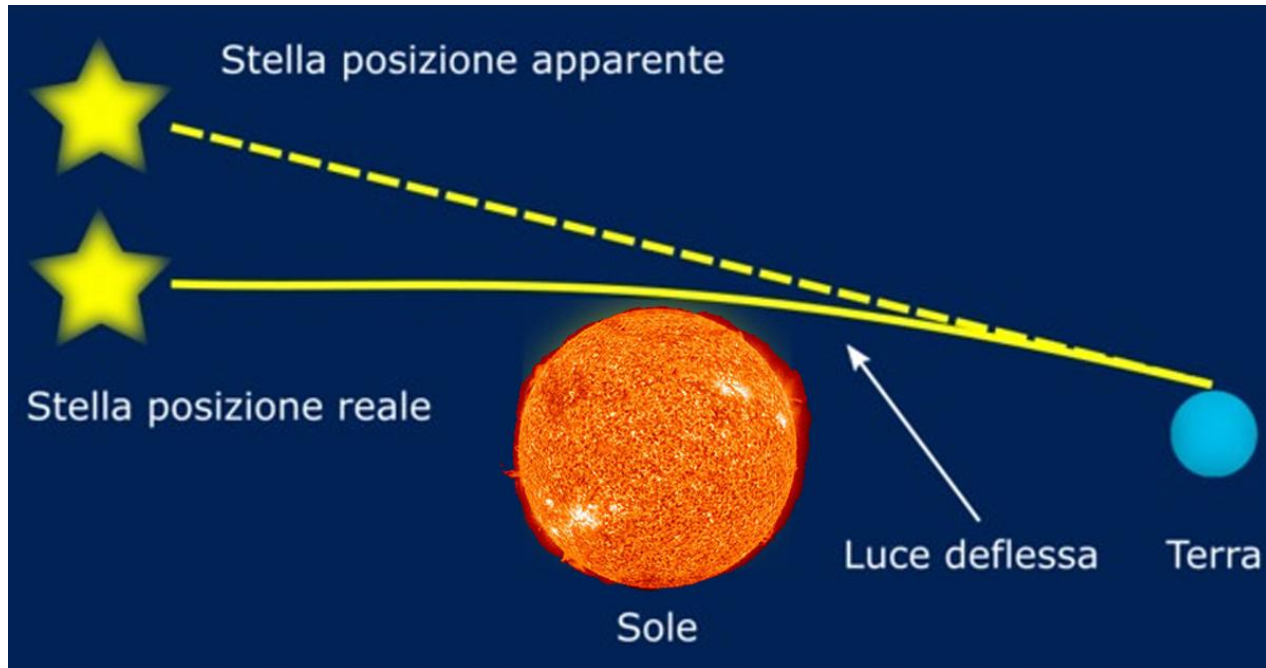
Risolto di nuovo da Einstein nel 1915 con la Relatività Generale, una nuova teoria della gravità.

Relatività generale: concetto chiave
la gravitazione altera lo spazio-tempo



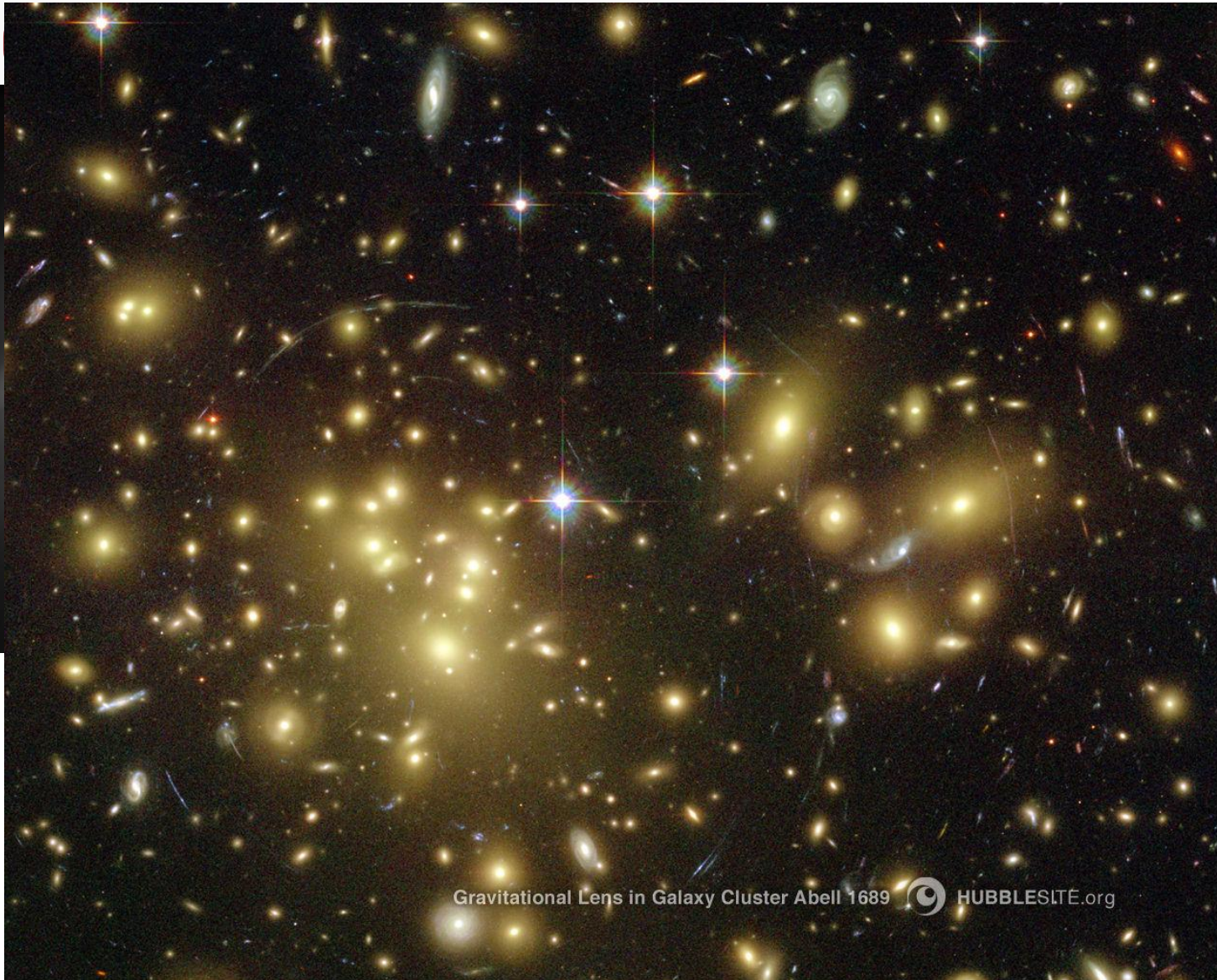
Prova sperimentale: esperimento di Arthur Eddington (1919 – Isola del principe)


Ipotesi: la massa del Sole piega la luce proveniente da una stella lontana



La foto

HR1375



Gravitational Lens in Galaxy Cluster Abell 1689  HUBBLESITE.org

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.

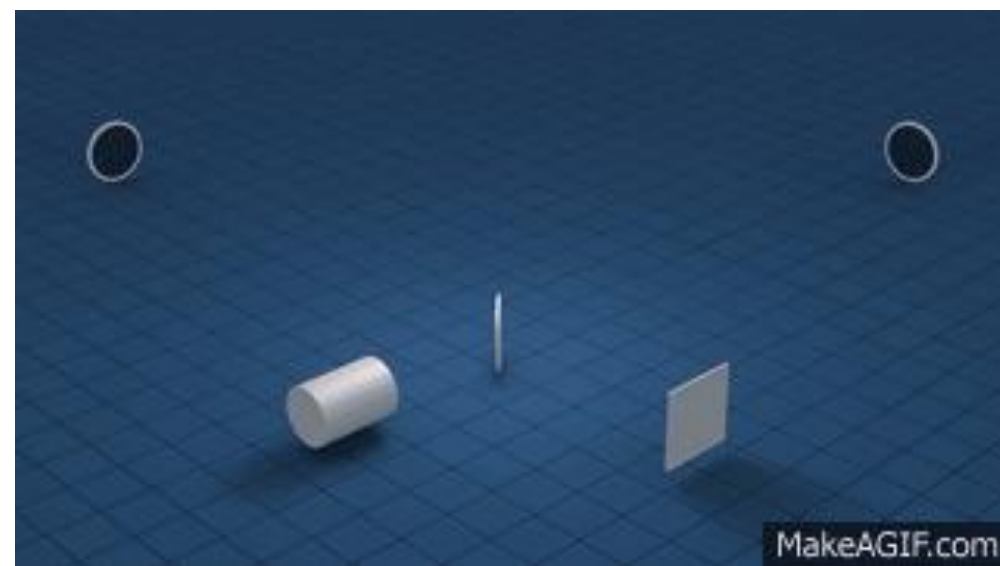
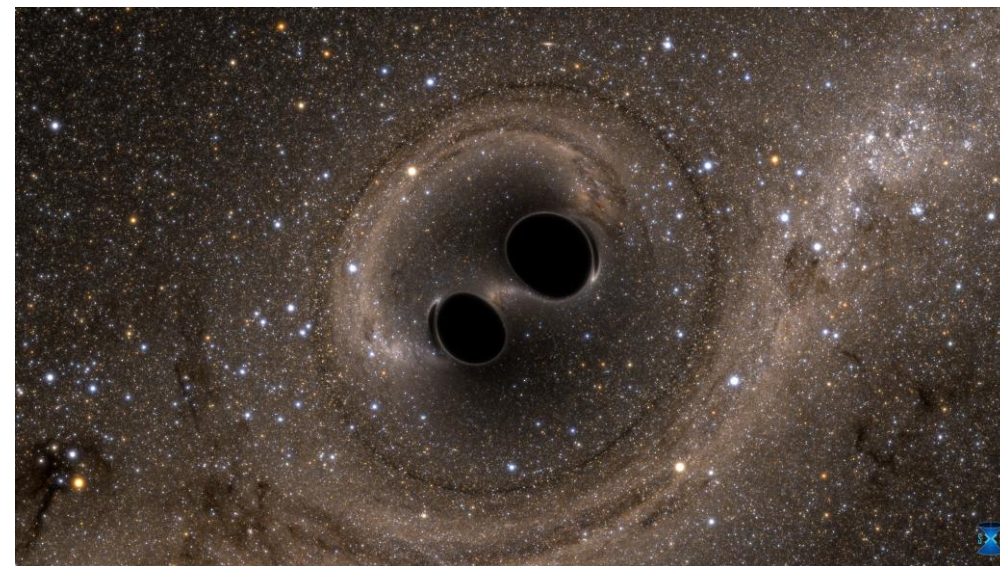
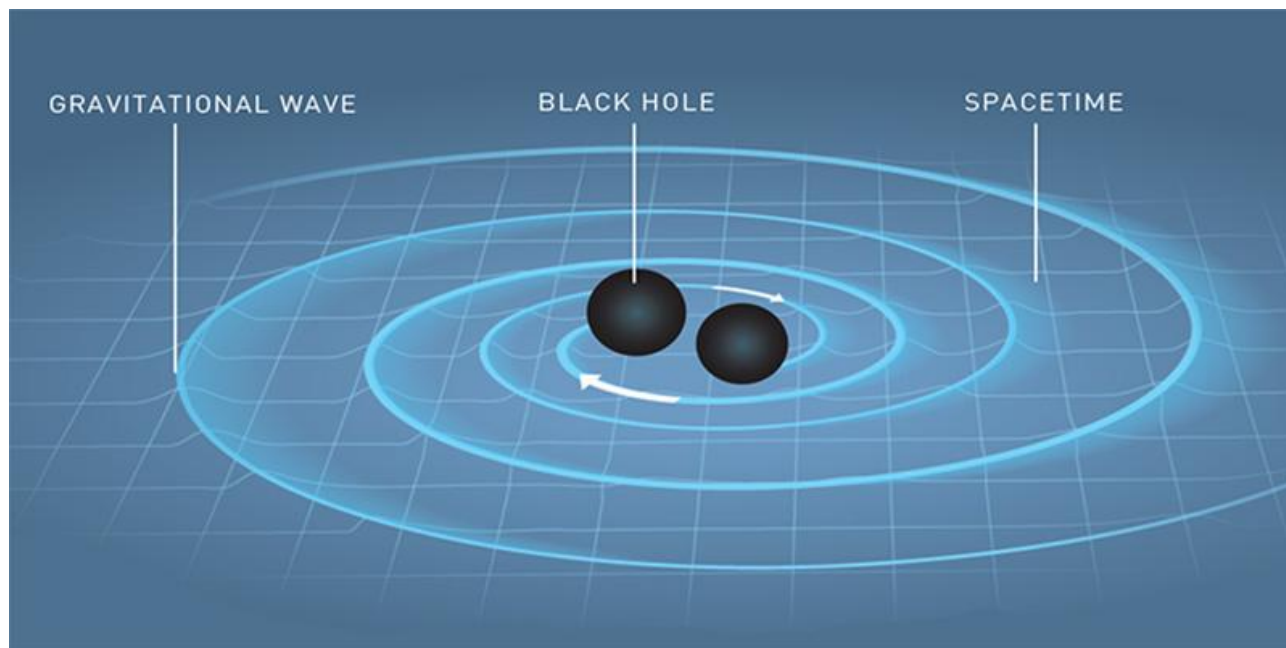
A BOOK FOR 12 WISE MEN

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

L'ANNUNCIO ALLE 16.30 A PISA

Scoperte le onde gravitazionali: Einstein aveva ragione

La conferma della teoria della relatività. Un nuovo modo di studiare l'universo, i buchi neri e il tessuto dello spazio-tempo. L'importante contributo italiano



Grazie per l'attenzione