



Università "Cardinale Giovanni Colombo" - Milano
A.A. 2024 - 2025

Corso di Astrofisica
Docente: **Adriano Gaspani**

Lezione 3

La velocità della luce

Che cos'è la luce

- Per secoli la natura della luce è stata discussa tra gli scienziati:
- **Teoria corpuscolare** (proposta da Newton): la luce veniva vista come composta da **piccole particelle di materia** (corpuscoli) emesse in tutte le direzioni.
- **Teoria ondulatoria** (proposta da Huygens): la luce veniva vista come un'onda che si propaga (in maniera del tutto simile alle onde del mare o a quelle acustiche) in un mezzo, chiamato etere, che si supponeva pervadesse tutto l'universo e fosse formato da microscopiche particelle elastiche.

Che cos'è la luce

- James C. Maxwell (1831-79) dimostrò che tutte le proprietà note della luce erano spiegabili attraverso un insieme di equazioni basate sull'ipotesi che la luce fosse un'onda elettromagnetica.
- **La luce (o, più in generale, la radiazione elettromagnetica) è formata da onde elettromagnetiche che si propagano in linea retta con una velocità (c) pari a 2.9979×10^8 m s⁻¹ nel vuoto**
- **La radiazione elettromagnetica si propaga nel vuoto a velocità costante = velocità della luce (c) in moto rettilineo uniforme**

Misure storiche della velocità della luce c

Data	Autore	Paese	Metodo	Velocità [10 ⁸ m/s]	Errore
Antichi	Aristotele - Keplero	Europa	Analogie e fenomeni	infinita	---
1638/1665	Galilei/Cimento	Italia	Lanterne	veloce?	----
1676	Rømer	Francia	Lune di Giove	2.14	28%
1729	Bradley	Inghilterra	Aberrazione	3.08	2.7%
1849	Fizeau	Francia	Ruota dentata	3.14	4.70%
1879	Michelson	USA	Specchio rotante	2.99798	18x10 ⁻⁶
1950	Essen	Inghilterra	Cavità microonde	2997925	0.1x10 ⁻⁶
1958	Froome	Inghilterra	Interferometro	2.997925	0.1x10 ⁻⁶
1972	Evenson et al.	USA	Laser	2.9979457	2x10 ⁻⁹
1974	Blaney et al.	Inghilterra	Laser	2.9979459	2x10 ⁻⁹
1976	Woods et al.	Inghilterra	Laser	2.9979459	2x10 ⁻⁹
1983	XVII Conferenza generale di pesi e misure			2.9979458	



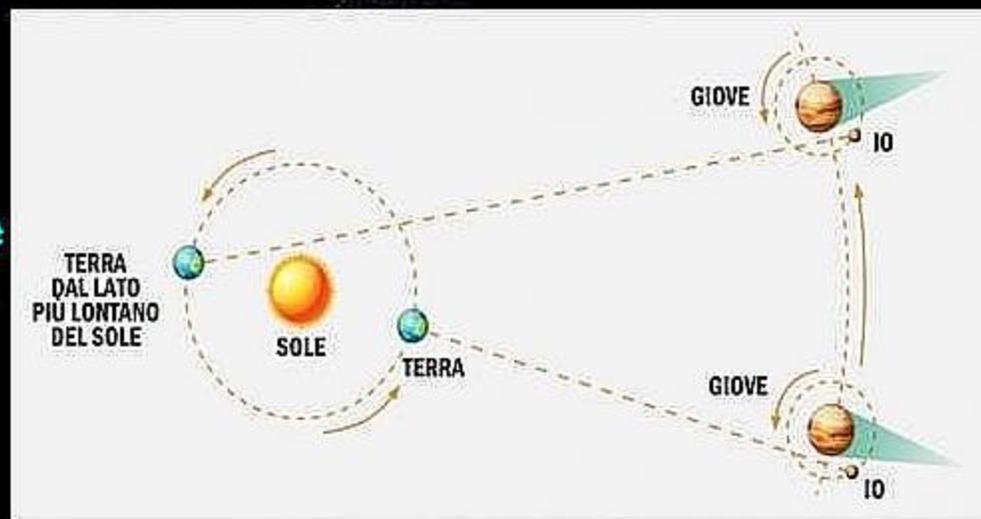
Ole Rømer (1644 – 1710)

Astronomo danese. A lui si deve la prima misura quantitativa della velocità della luce nel 1676

Ole Rømer nel 1676 intuì di dover ricorrere alle enormi distanze tra i corpi celesti nello spazio (in tal modo si poteva essere misurato con facilità)

Il metodo consiste in osservazioni astronomiche attraverso cui studiare le eclissi dei satelliti di Giove, cioè il fenomeno per cui periodicamente il satellite scompare dall'osservazione terrestre, nascosto dal cono d'ombra di Giove.

La velocità della luce è finita



L'esperimento di Michelson – Morley

Alle domande precedenti una risposta efficace e memorabile fu data alla fine del secolo scorso da due fisici americani Michelson (1852-1931) e Morley (1838-1923)

In particolare, con il loro esperimento, Michelson e Morley tentarono di verificare se la Terra avesse una sua velocità rispetto all'etere, pensato come riferimento assoluto.

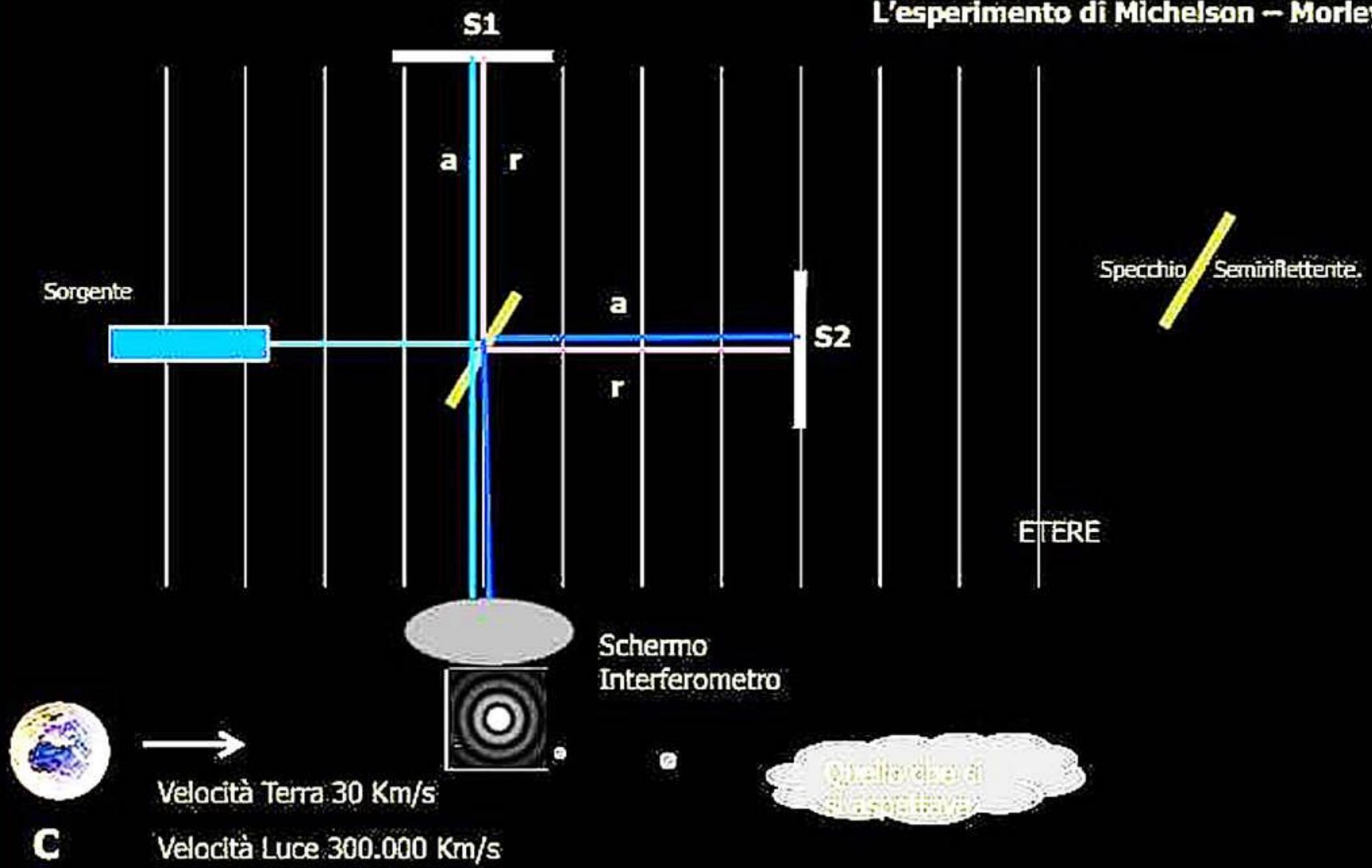
Per verificare la bontà o meno dell'ipotesi di un moto assoluto della Terra rispetto all'etere, Michelson e Morley si servirono di uno strumento, denominato interferometro, di cui riportiamo lo schema assieme al ragionamento di supporto.

Il risultati dell'esperimento furono un clamoroso FALLIMENTO che presto si tramutò in un grande contributo per lo sviluppo della fisica relativistica.

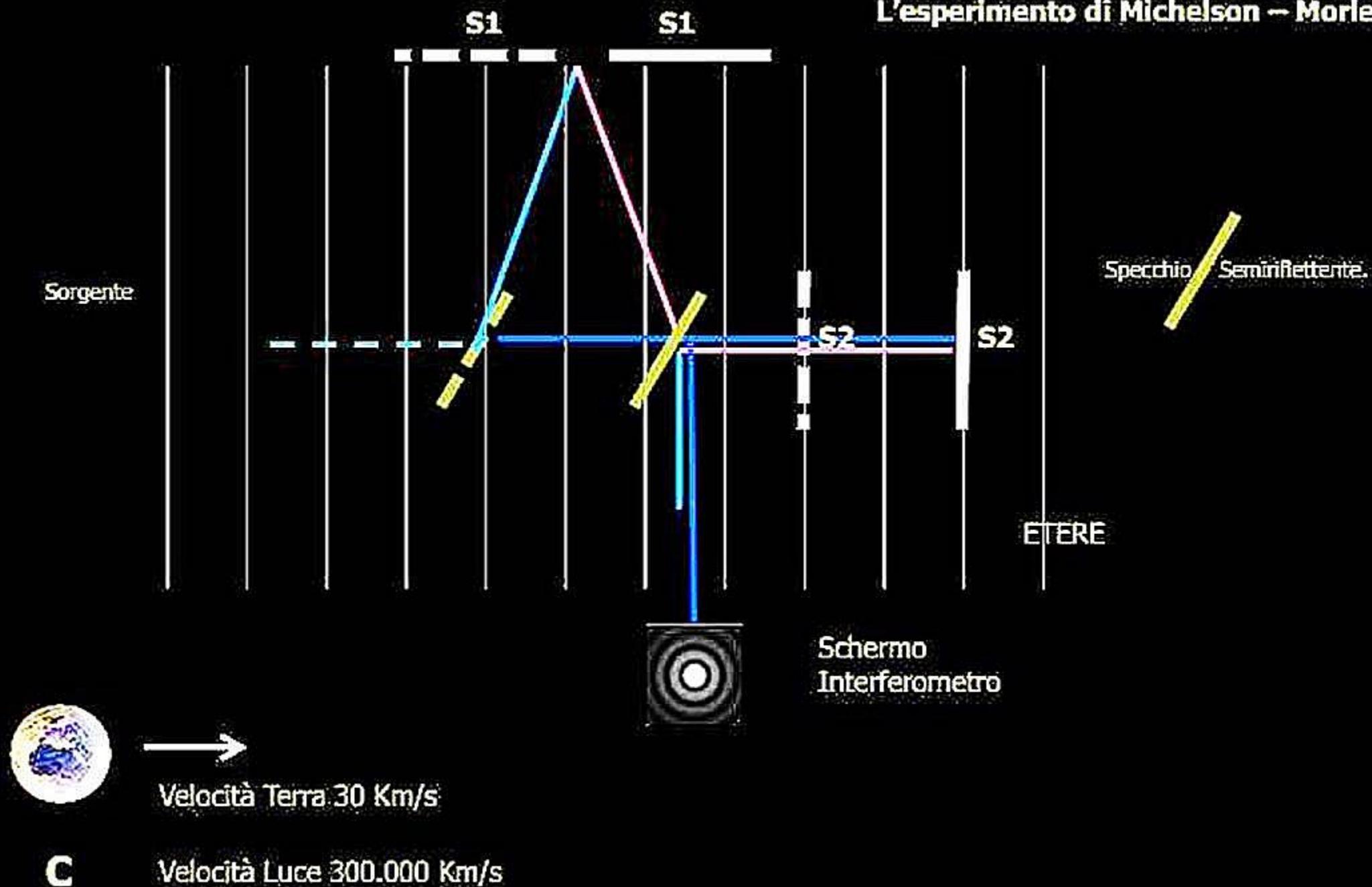
Occorre ricordare che, negli anni successivi al celebre esperimento, molti altri, con mezzi più raffinati e con tecnologie più avanzate, tentarono l'esperimento, con risultati sempre fallimentari ma di successo.



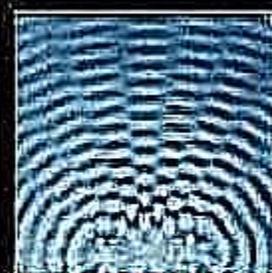
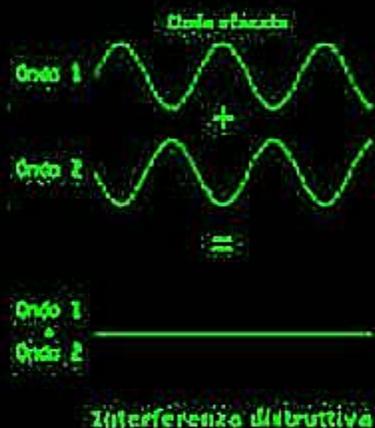
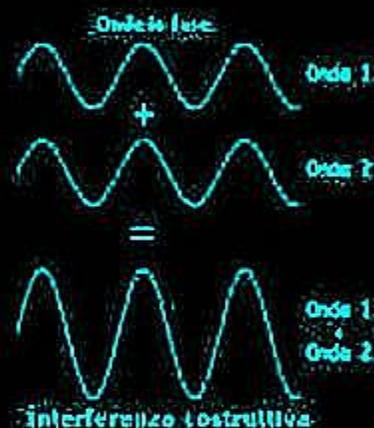
L'esperienza di Michelson - Morley



L'esperimento di Michelson – Morley



Quello che i due fisici si aspettavano dall'esperimento era la comparsa di **righe di interferenza al cannocchiale dove si trova l'osservatore.**



Interferenza nell'acqua tra due onde che provengono da sorgenti diverse

Questo effetto non viene osservato nè da Michelson, nè da altri sperimentatori: è come se la Terra trascinasse l'etere nel suo movimento o in alternativa come se il suo moto non avesse alcuna influenza sulla velocità della luce.

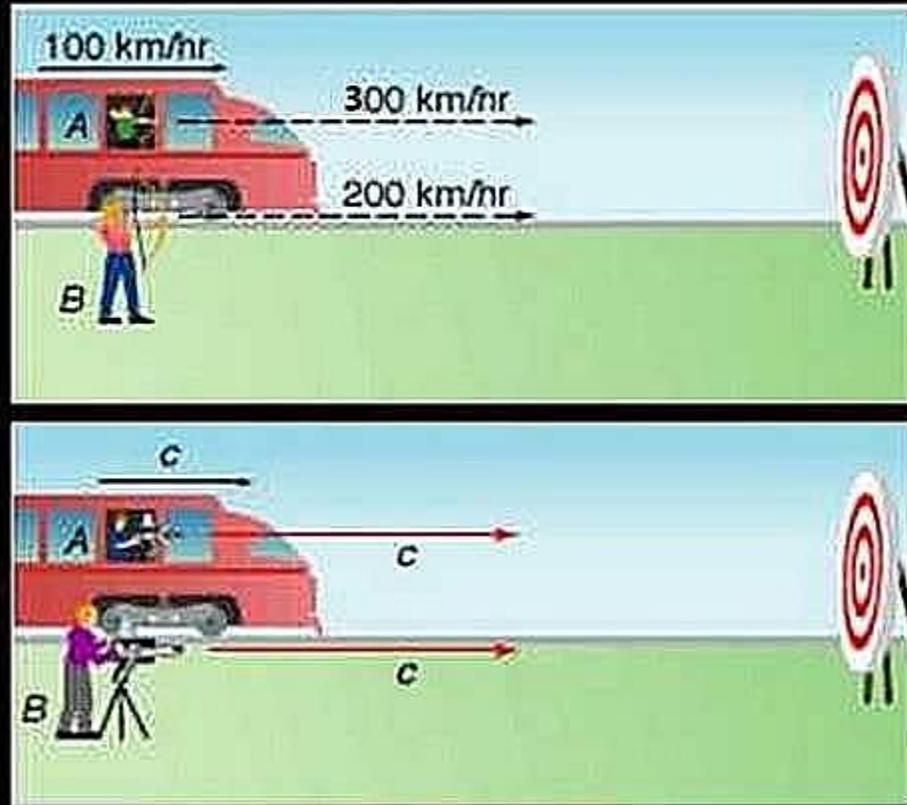
Nell'arco di un ventennio l'esperimento viene più volte ripetuto sempre con risultati negativi; anche facendo ruotare l'interferometro di 90° in modo da ottenere eventuali righe di interferenza scambiate con le precedenti.

Le naturali conseguenze dell'esperimento di Michelson e Morley sono:

- a) la velocità della luce è indipendente dalla velocità della sorgente e non si compone secondo il principio galileiano delle velocità ;
- b) la costanza della velocità della luce ;
- c) l'impossibilità di provare l'esistenza del moto assoluto della Terra rispetto all'etere.

Dunque, l'ETERE NON ESISTE

Un esempio per comprendere l'indipendenza della velocità della luce rispetto alla sorgente.

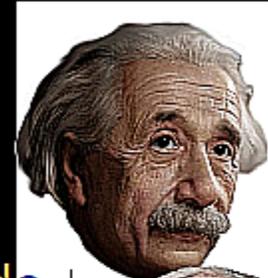


Una freccia lanciata da un treno in corsa e da una postazione fissa raggiungerà il bersaglio a diverse velocità; in questo caso 300 e 200 Km/h, rispettivamente.

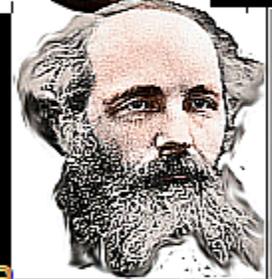
Questa ovvia regola di addizione delle velocità non si applica alle onde elettromagnetiche. I fasci di luce emessi da due laser, uno sul treno e l'altro a terra raggiungeranno il bersaglio con la stessa velocità c . La radiazione elettromagnetica ha velocità costante e indipendente dalla velocità della sorgente da cui è stata emessa.

Perché la misura di c è così importante?

- Serve a escludere l'esistenza di un infinito (sempre difficile da intendere); la **Relatività Generale** farà lo stesso con la **velocità dell'interazione gravitazionale**, ritenuta infinita da **Isaac Newton** (ma «Hypotheses non fingo»).

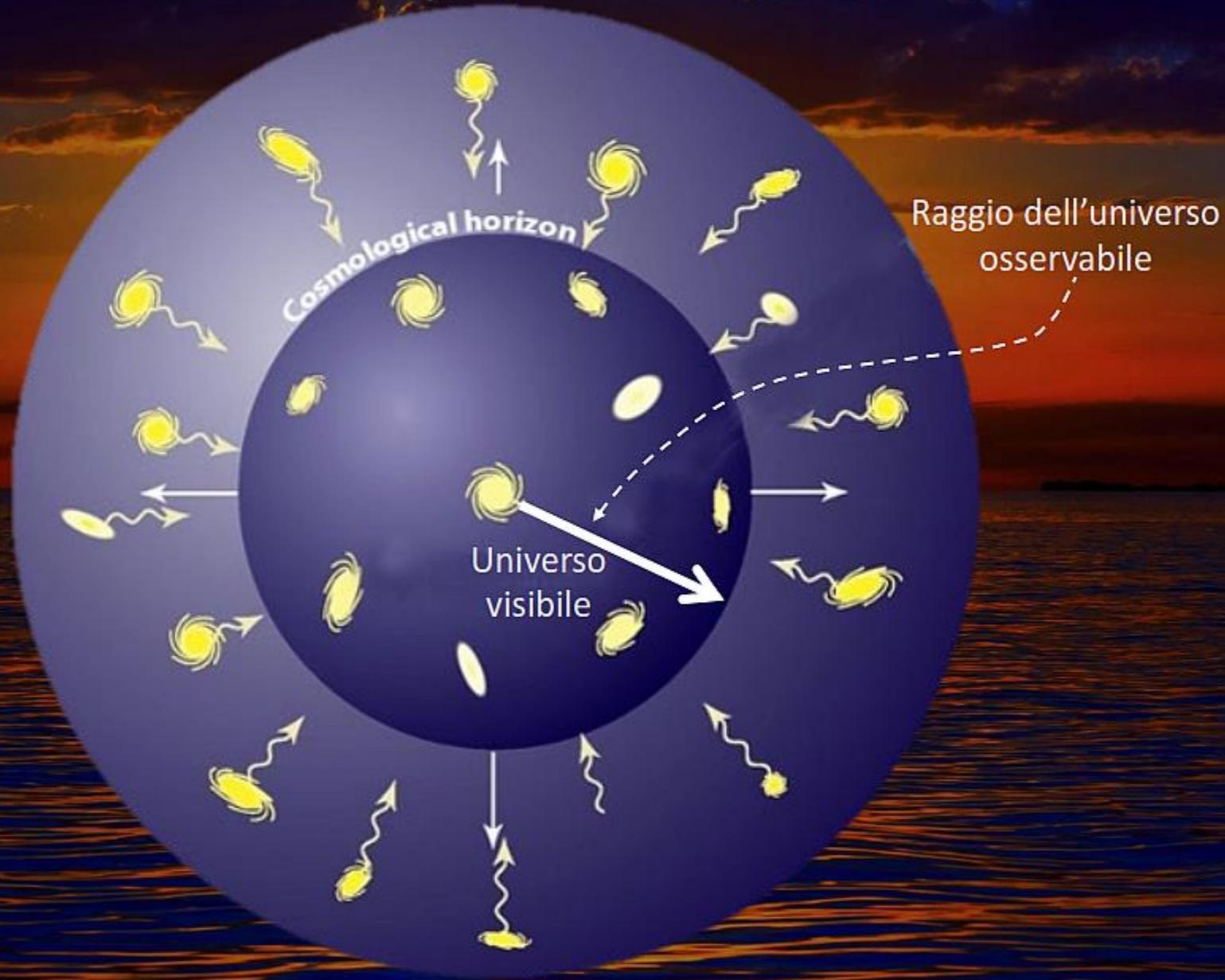


- La constatazione che il valore della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche fornita dalla sua teoria ($c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$) coincideva con la misura della luce indusse nel 1873 lo scozzese **James Clerk Maxwell** a postulare che la luce visibile sia essa stessa un'onda elettromagnetica (*A Treatise on Electricity and Magnetism*).

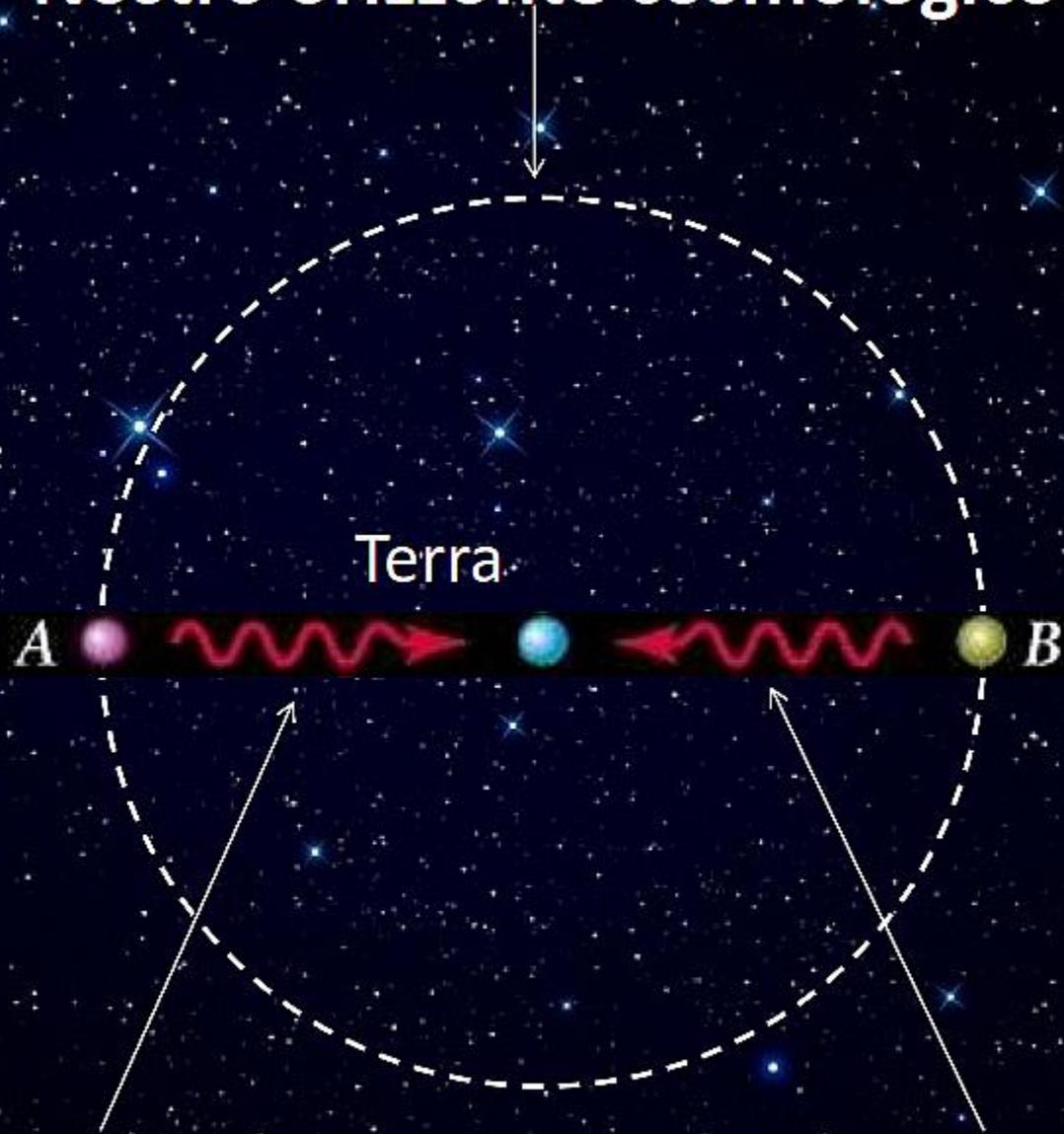


- Insieme all'**età finita** del cosmo e al **ritmo di espansione**, serve a definire le **dimensioni dell'orizzonte cosmologico**.
- Nella **Relatività ristretta** il modulo di c è **invariante** ai moti di sorgente e/o dell'osservatore → **limite per l'applicazione del principio di causa ed effetto** (e.g. scoperta dei buchi neri supermassicci negli AGN, inflazione cosmica, ...).

L'orizzonte cosmologico (età del cosmo e c finiti)



Nostro orizzonte cosmologico



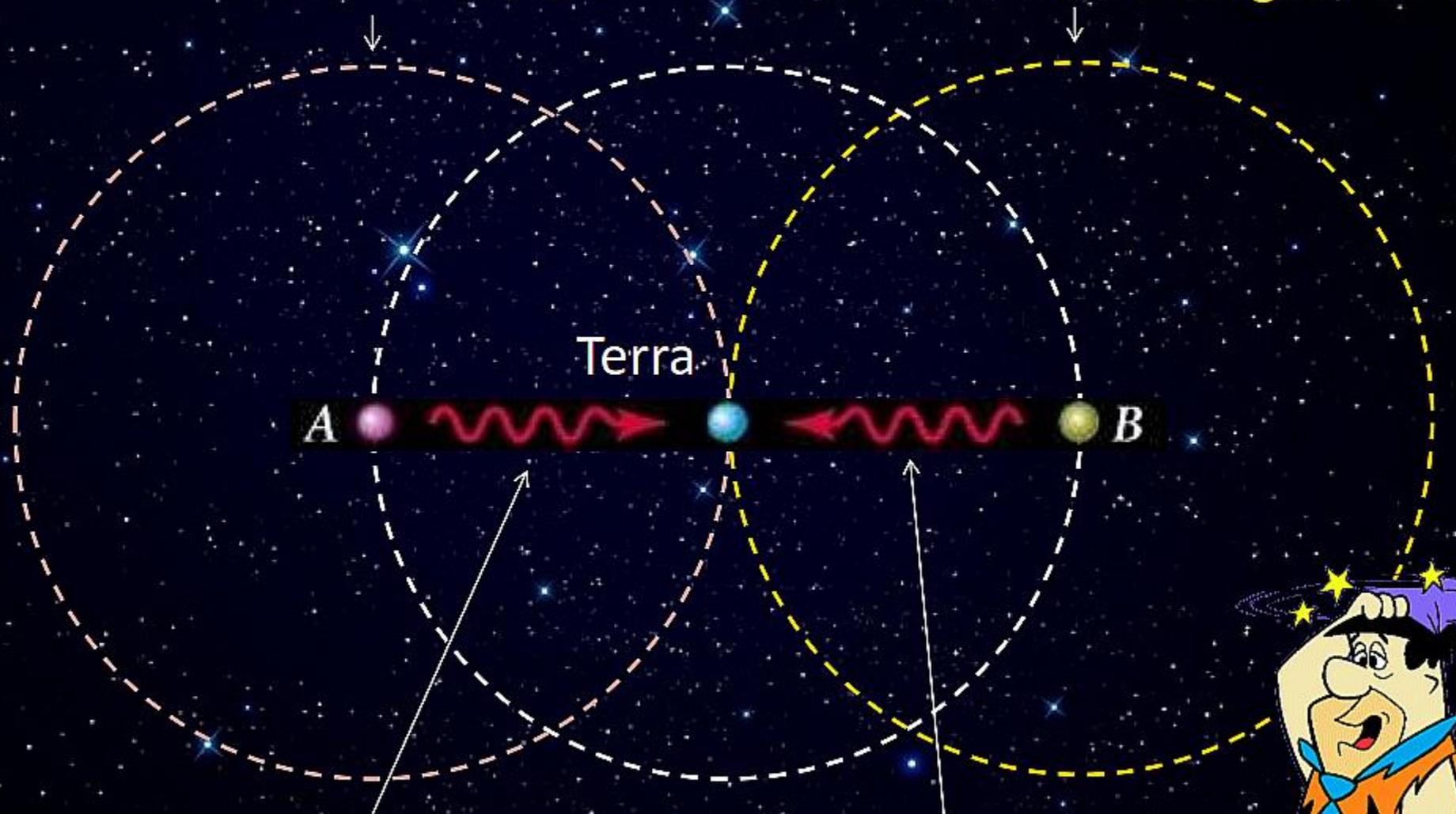
La radiazione impiega 14 miliardi d'anni per venire a noi da **A**

La radiazione impiega 14 miliardi d'anni per venire a noi da **B**

Nostro orizzonte cosmologico

Orizzonte cosmologico di **A**

Orizzonte cosmologico di **B**



La radiazione impiega 14 miliardi d'anni per venire a noi da **A**

La radiazione impiega 14 miliardi d'anni per venire a noi da **B**



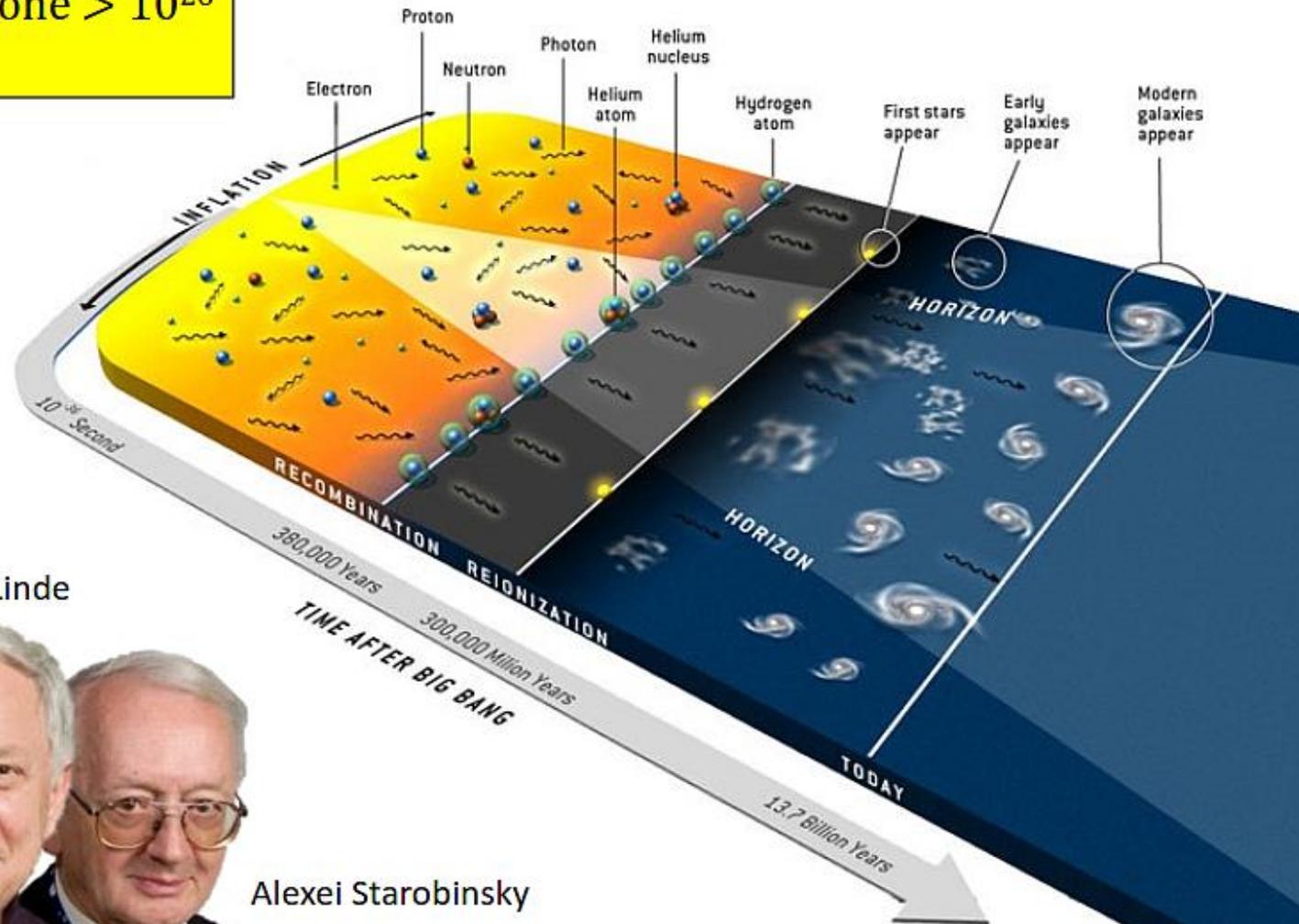
Inflazione cosmica

$t_0 = 10^{-32}$ s dalla singolarità

$\Delta t = 10^{-36}$ s

fattore di espansione $> 10^{26}$

$T_0/T_1 = 100,000$



Alan Guth

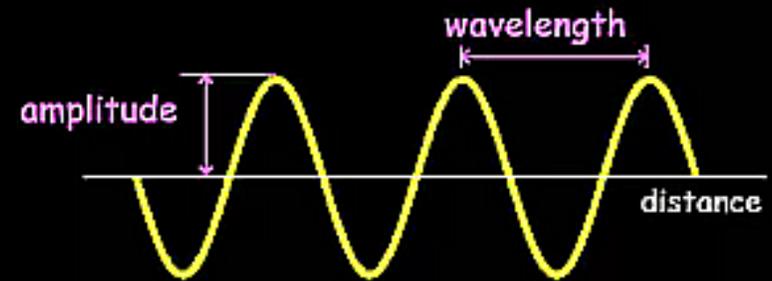
Andrei Linde



Alexei Starobinsky

La luce come onda elettromagnetica

- Lunghezza d'onda λ = tratto corrispondente all'intero ciclo di valori del campo elettrico (unità di misura metri)
- Frequenza n = numero di volte per secondo in cui il campo elettrico assume l'intero ciclo di valori (unità di misura 1/s)
- Ampiezza A = è il massimo valore assunto dal campo elettrico o magnetico. L'intensità della radiazione (energia) è proporzionale al quadrato dell'ampiezza delle onde elettriche o magnetiche.



L'effetto Doppler



1842: **Christian Johann Doppler (1803-1853):**

«Lanciando un sasso in uno specchio d'acqua immobile, si produrranno cerchi che sono equidistanti dal centro. Ma se un battello si muove, questi cerchi saranno allungati, ovali, e viaggeranno con il loro centro allontanandosi dal punto dove sono stati creati, seguendo il natante».

Postulato: sia il suono che la luce sono costituiti da onde (**longitudinali!?**). Fenomeno previsto per l'**acustica** e anche per l'**ottica**, sebbene le onde elettromagnetiche siano trasversali.

Spiegazione errata dei colori delle doppie fisiche. **Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels** (Sui colori della luce delle stelle binarie e alcune altre stelle del cielo).

«È ormai quasi certo che in un futuro non troppo lontano questo effetto offrirà agli astronomi un modo per determinare i moti e le distanze di quelle stelle che, a causa delle loro enormi distanze e la conseguente esiguità degli angoli di parallasse, fino a oggi parevano irraggiungibili».

Effetto Doppler: casi classico e relativistico

Caso classico:

Moto della sorgente: $\nu' = \left(1 - \frac{v_s}{c}\right)^{-1} \nu$,
con v_s = velocità radiale della sorgente.



Moto dell'osservatore: $\nu' = \left(1 - \frac{v_o}{c}\right) \nu$,
con v_o = velocità radiale dell'osservatore.



In generale: $\nu' = \nu \left(\frac{c - v_r}{c - v_o}\right)$, ossia:

$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$ con $v = v_s - v_o$, velocità radiale relativa
tra sorgente e osservatore.

Caso relativistico: $\lambda = \gamma \left(1 + \frac{v}{c}\right) \lambda_0$

La componente trasversale, che nel caso classico è nulla,
in quello relativistico è sempre positiva.

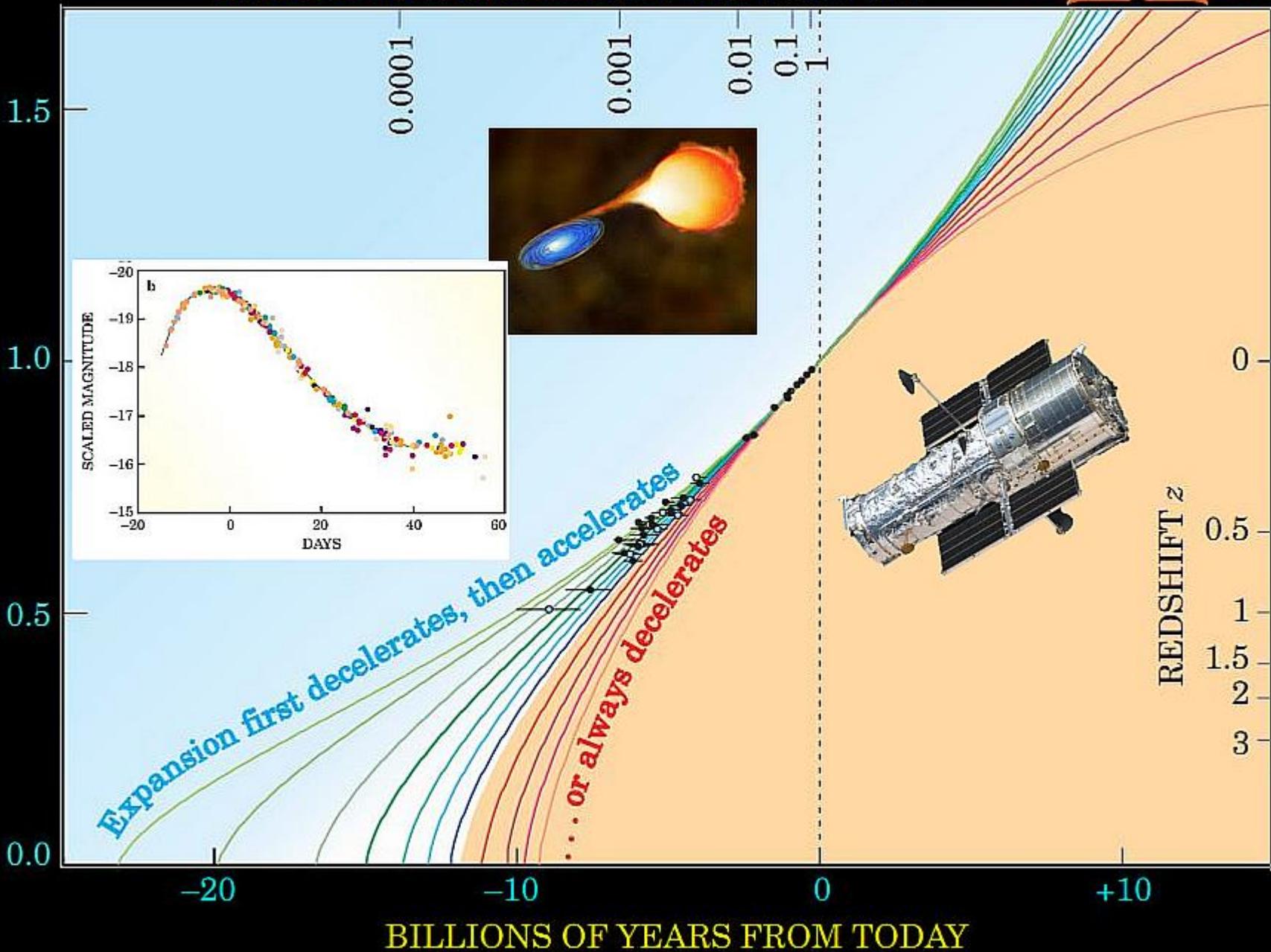
Infinite applicazioni

LINEAR SCALE OF UNIVERSE RELATIVE TO TODAY

RELATIVE BRIGHTNESS OF SUPERNOVAE

Eternal expansion

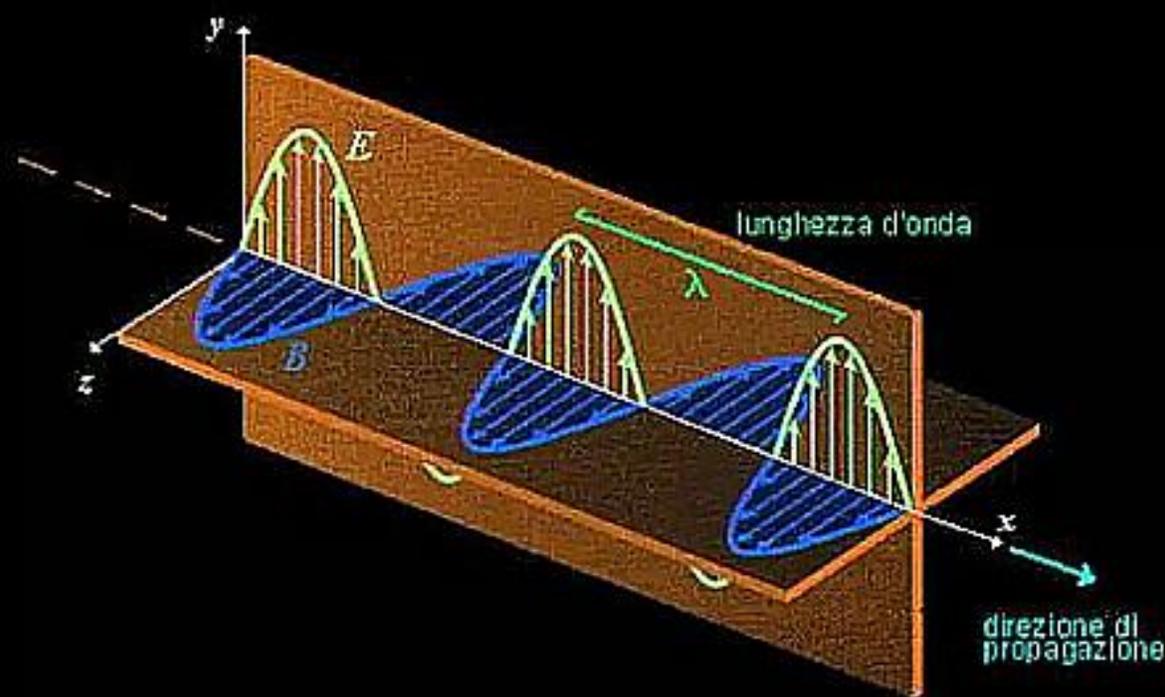
Eventual collapse



BILLIONS OF YEARS FROM TODAY

La luce come onda elettromagnetica

- Data un direzione di propagazione esistono un campo elettrico e un campo magnetico ortogonali fra loro e alla direzione di propagazione.



Natura dualistica della luce

- Equazione di Plank $E = h \nu$

- Costante di Planck $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$

- L'energia delle onde elettromagnetiche associata ai processi di assorbimento/emissione è quantizzata.

- La radiazione di ogni determinata lunghezza d'onda (o frequenza) può trasportare solo determinate quantità di energia.

Natura dualistica della luce

- Equazione di Plank

$$E = h \nu$$

- Equazione di Einstein

$$E = m c^2$$

- Dove c è la velocità della luce nel vuoto
- La luce può correttamente essere considerata sia come una radiazione elettromagnetica che come una particella.

Natura dualistica della luce: il fotone

Dall'uguaglianza tra le equazioni discende che:

$$h \nu = m c^2$$

- Possiamo quindi concludere che la luce è costituita da particelle dette fotoni, con massa:

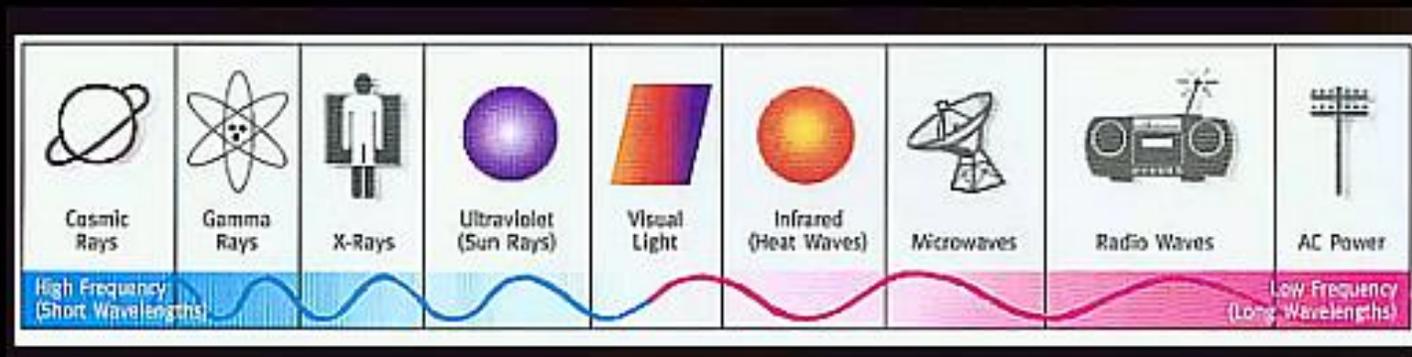
$$m = h \nu / c^2$$

No!!

Lo Spettro Elettromagnetico

- Le lunghezze d'onda delle radiazioni elettromagnetiche variano da 10^{-16} m fino a valori dell'ordine di 10^6 m.
- Si dice monocromatica una radiazione che associa un unico valore di lunghezza d'onda
- **L'occhio umano è sensibile solo a radiazioni comprese nell'intervallo $4-8 \times 10^{-7}$ m. La somma di queste ultime radiazioni fa la luce bianca (per esempio la luce del Sole).**

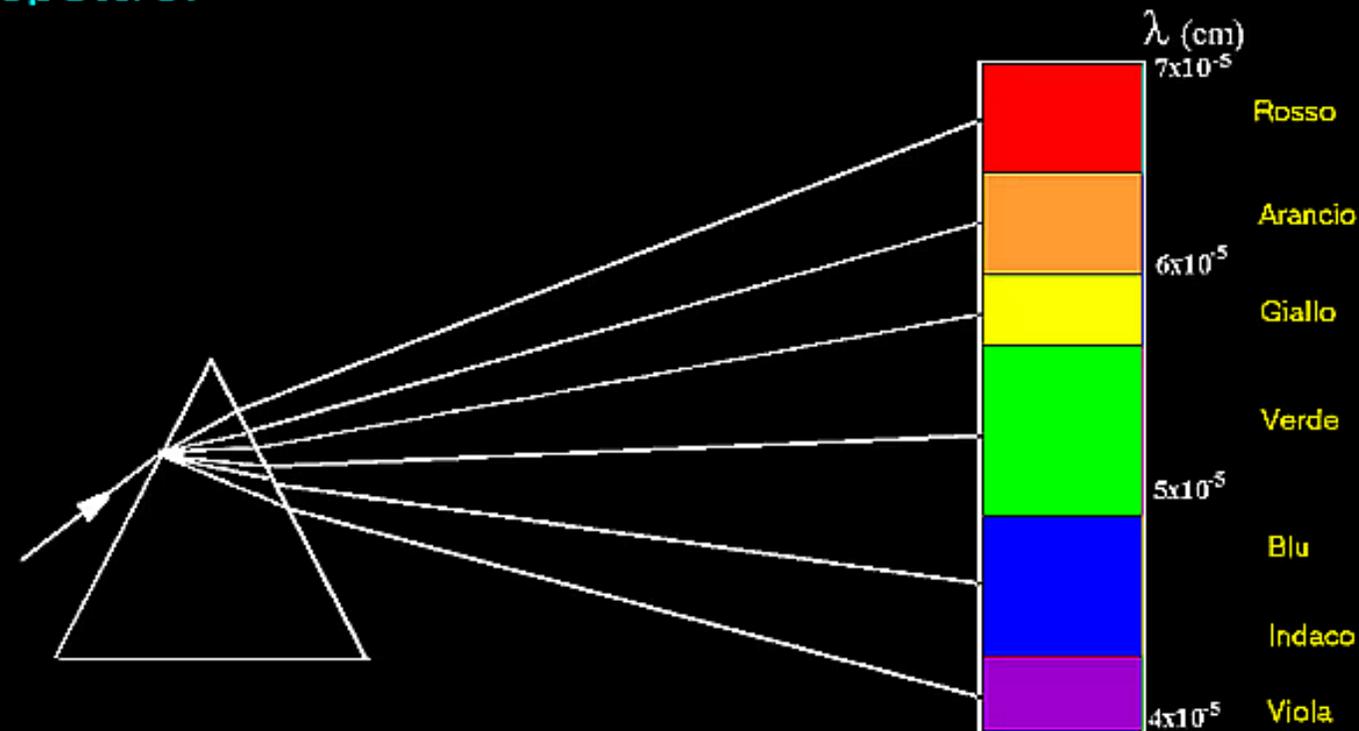
Spettro elettromagnetico





Spettro del visibile

- L'insieme delle radiazioni monocromatiche separate da un fascio si chiama spettro.



Spettro del visibile

- La scomposizione (dispersione) in diversi colori tramite un prisma si spiega in quanto:
 - la luce “bianca” è in realtà un miscuglio di radiazioni di diversa frequenza e quindi corrispondenti a tutti i colori;
 - quando un raggio di luce passa da un mezzo ad un altro viene deviato (fenomeno detto “rifrazione”): l'entità della deviazione dipende dalla lunghezza d'onda del raggio incidente.



Spettro del visibile

- Una radiazione di un solo colore ottenuta tramite dispersione, caratterizzata da una ben precisa lunghezza d'onda e frequenza, viene detta fascio di luce **MONOCROMATICA**.
- Si parla invece di fascio di luce **POLICROMATICA** quando esso è costituito da radiazioni di frequenza e lunghezza d'onda diverse. La luce bianca proveniente dal sole è policromatica.
- Per sapere se un fascio di luce è monocromatico o policromatico è sufficiente farlo passare attraverso un prisma: se il raggio rimane unico si può dire che è monocromatico; se invece è policromatico, viene scomposto in diversi raggi.

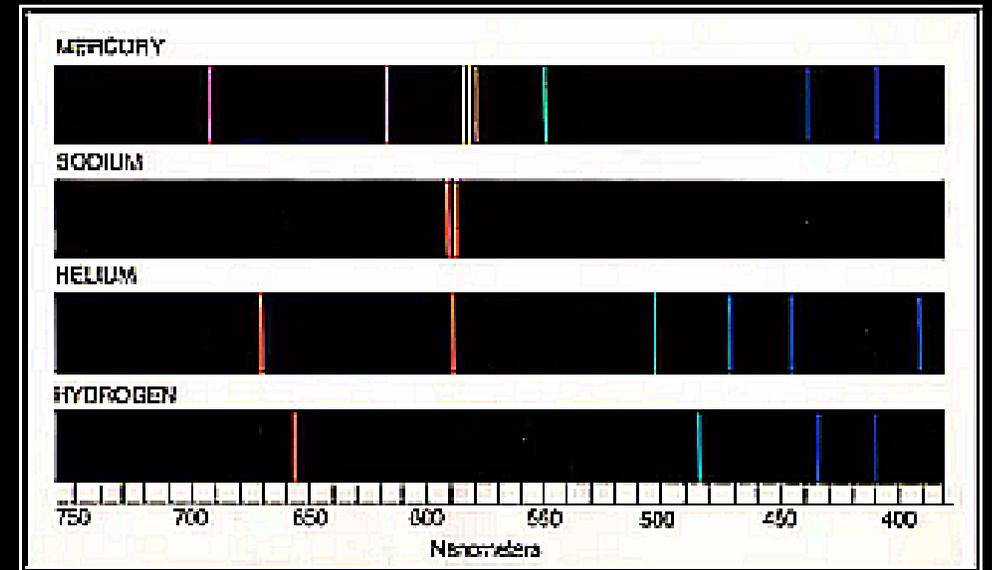
Spettro

- Lo spettro è costituito dall'ordinata disposizione delle radiazioni secondo la loro lunghezza d'onda.
- Uno spettro può essere:
 - continuo
 - discontinuo (a righe o a bande)
- In uno spettro continuo sono presenti le radiazioni di tutte le frequenze; ad esempio la luce 'bianca' emessa da una comune lampadina a incandescenza ha uno spettro continuo (nel visibile):

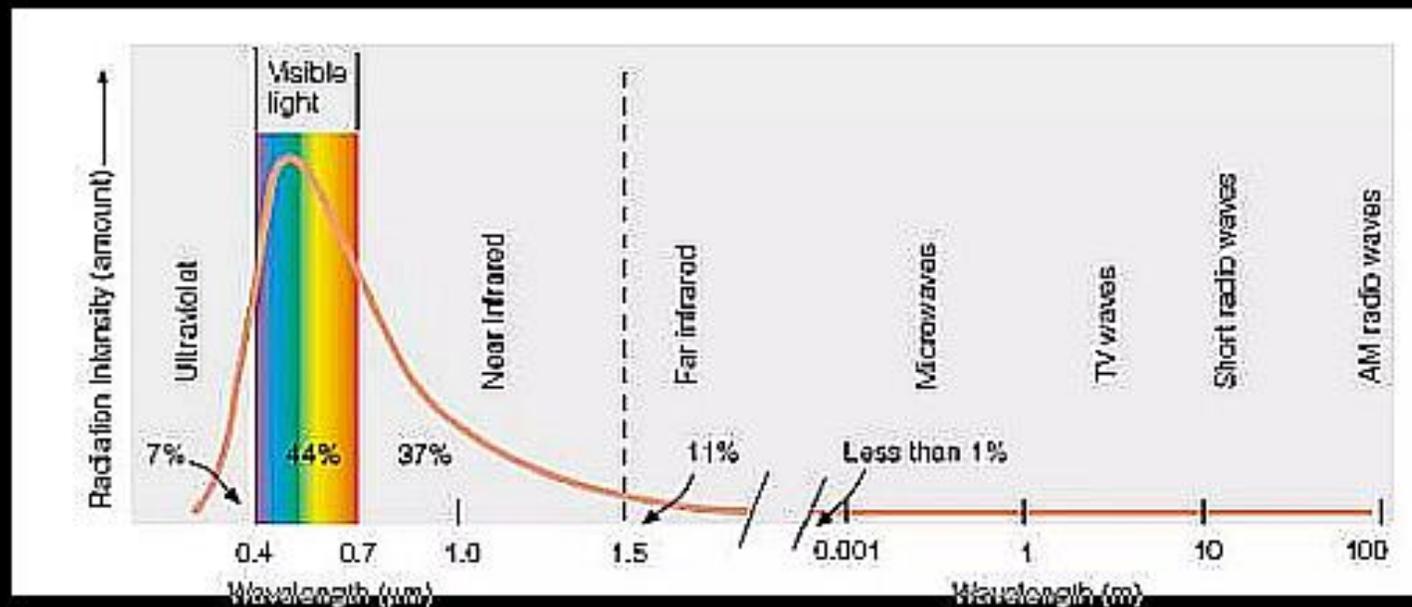


Spettro

- In uno spettro discontinuo si osserva invece la mancanza di alcune radiazioni. È uno spettro a righe, come quelli qui riportati.
- Gli atomi degli elementi danno spettri discontinui e ogni elemento ha uno spettro caratteristico.

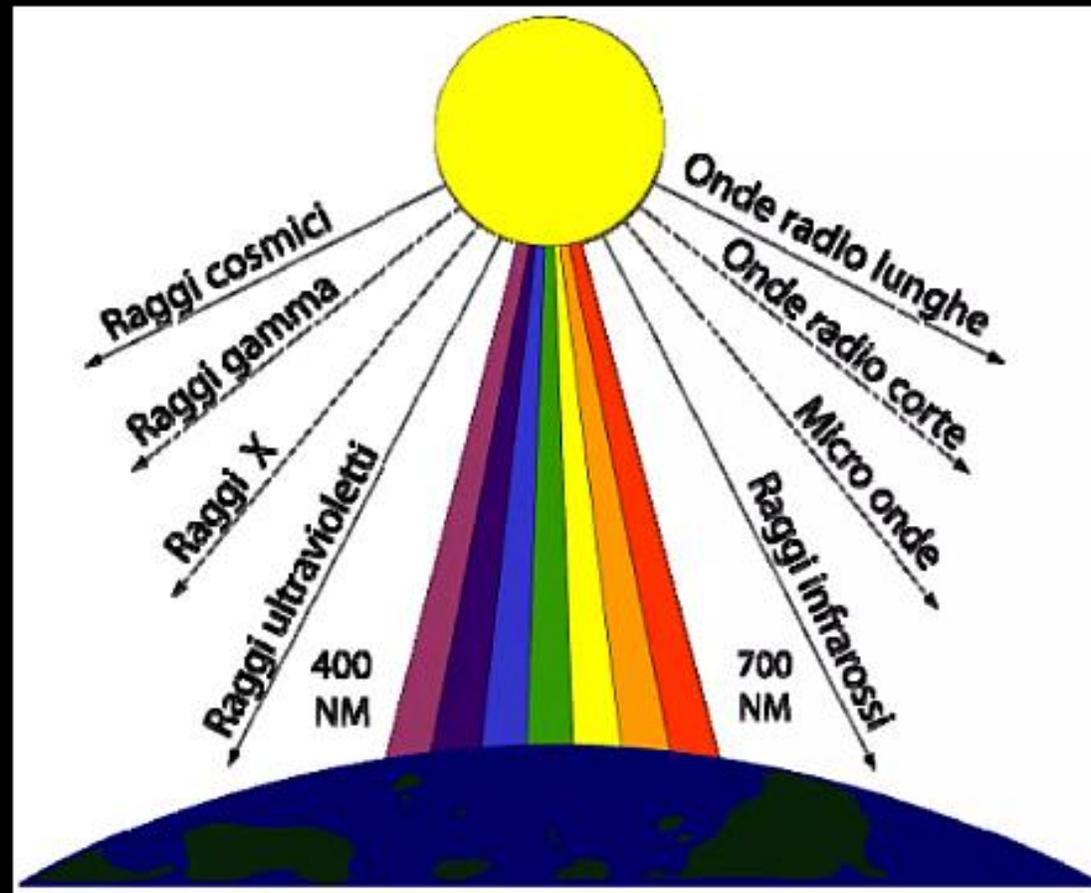


Spettro della radiazione solare



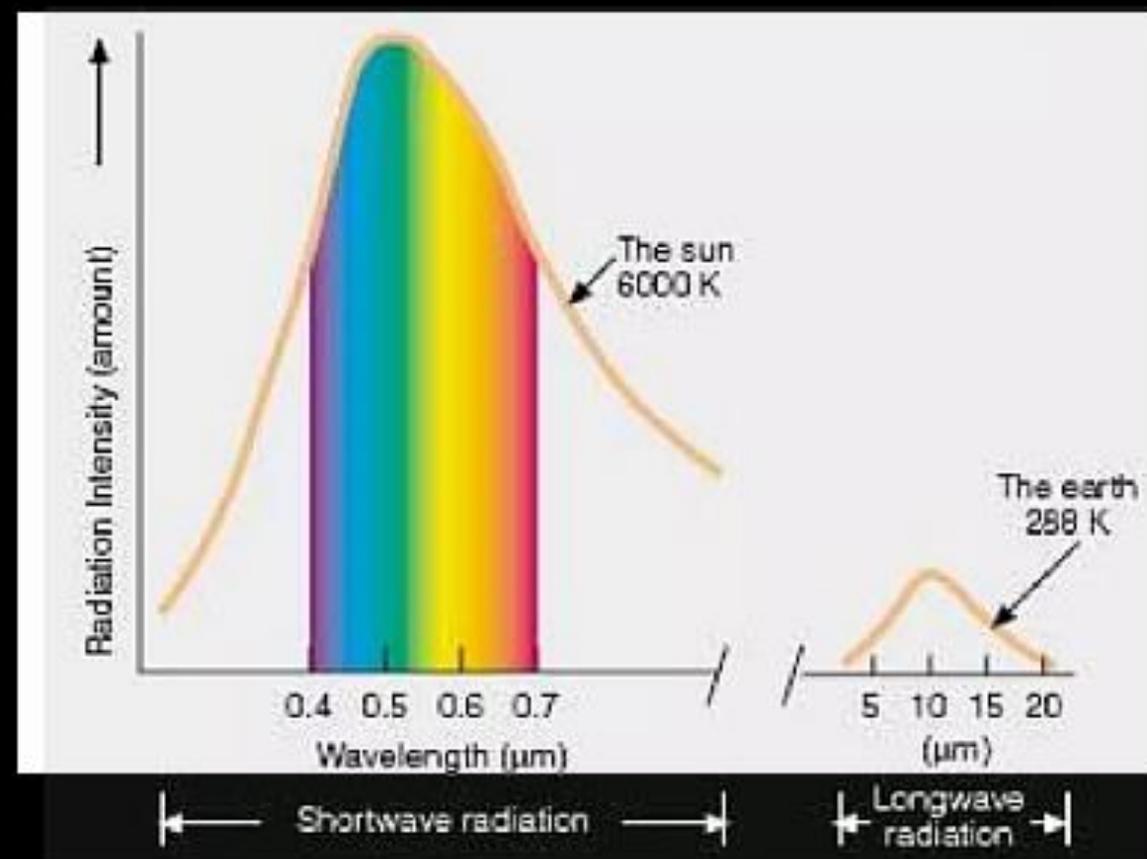
- Lo spettro della radiazione proveniente dal Sole si colloca fra le lunghezze d'onda $0,15\mu\text{m}$ e $4\mu\text{m}$ (ossia fra il vicino infrarosso e il vicino ultravioletto) passando per la luce visibile dove viene registrato il massimo dell'intensità in corrispondenza delle frequenze della luce gialla e verde (circa $0,5\mu\text{m}$).

Spettro della radiazione solare



Radiazione solare e radiazione terrestre

- In meteorologia si dice che: Il Sole emette onde corte mentre la Terra emette onde lunghe.

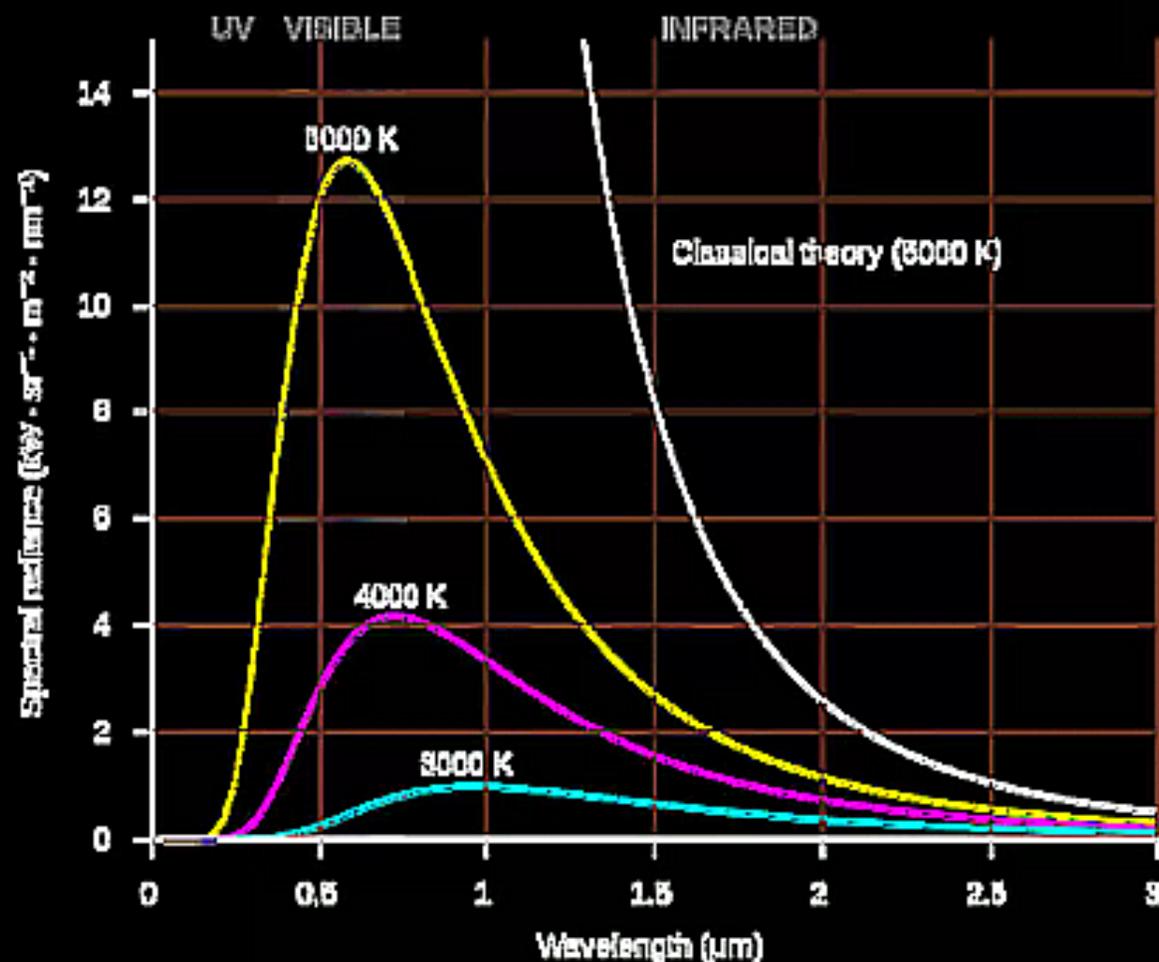


Corpo nero

- In fisica un **corpo nero** è un oggetto (ideale) che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente senza rifletterla (ed è quindi detto nero secondo l'interpretazione classica del colore dei corpi).
- Non riflettendo, il corpo nero assorbe dunque tutta l'energia incidente e, per la conservazione dell'energia, **re-irradia tutta la quantità di energia assorbita** (coefficiente di emissione uguale a quello di assorbimento e pari ad uno) e deve quindi il suo nome unicamente all'assenza di riflessione.

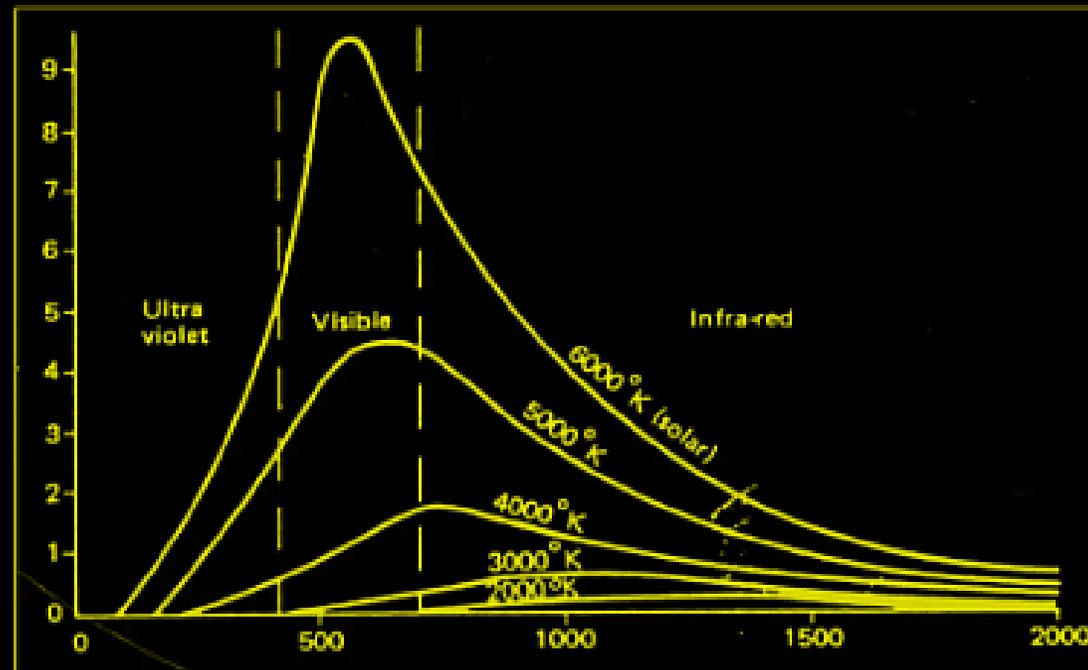
Corpo nero – legge di Wien

- La legge di Wien, detta anche legge dello spostamento di Wien, è una legge fisica sperimentale, scritta dal fisico tedesco Wilhelm Wien nel 1893, che consente di individuare per quale lunghezza d'onda è massima l'emissione radiativa di un corpo nero di massa generica posto ad una certa temperatura T .



La luce solare

- Il sole ha uno spettro di emissione molto simile a quello di un **corpo nero** la cui temperatura è di **5780 K**



Propagazione della luce e ottica

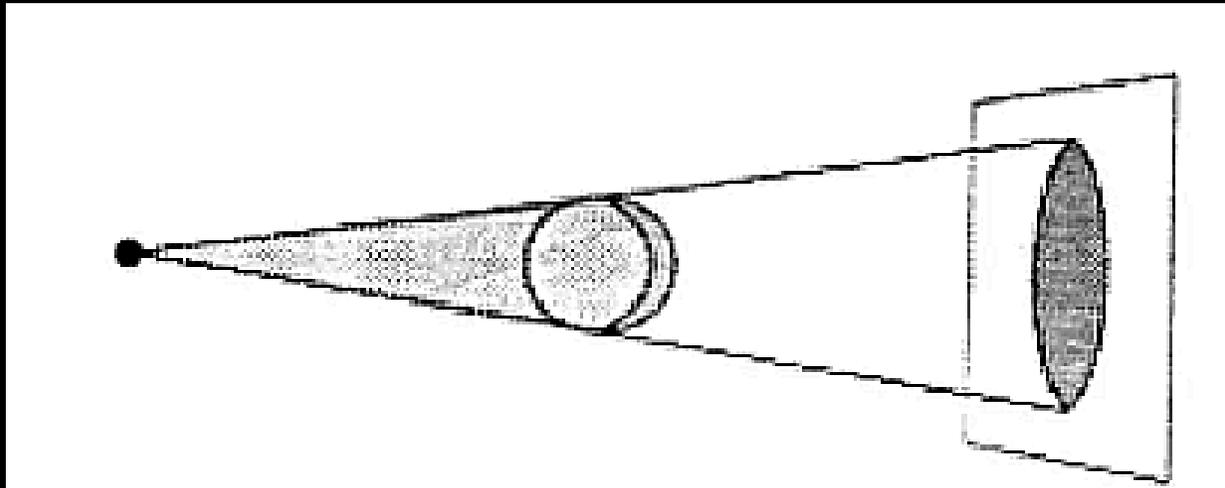
- La propagazione della luce è studiata dall'**ottica**.
- **OTTICA FISICA**: si occupa della natura ondulatoria della luce, quindi di fenomeni quali interferenza, diffrazione e polarizzazione
- **OTTICA GEOMETRICA**: si ignora il carattere ondulatorio della luce e si parla di raggi luminosi che si propagano in linea retta, quindi di fenomeni quali riflessione e rifrazione

La propagazione rettilinea della luce: ombra e penombra

- Una sorgente luminosa può essere Puntiforme o Estesa. Da essa partono i fasci di raggi di luce, che possono essere intercettati da un corpo.
- Se esso arresta completamente il cammino della luce si dirà Opaco, altrimenti sarà detto Trasparente.

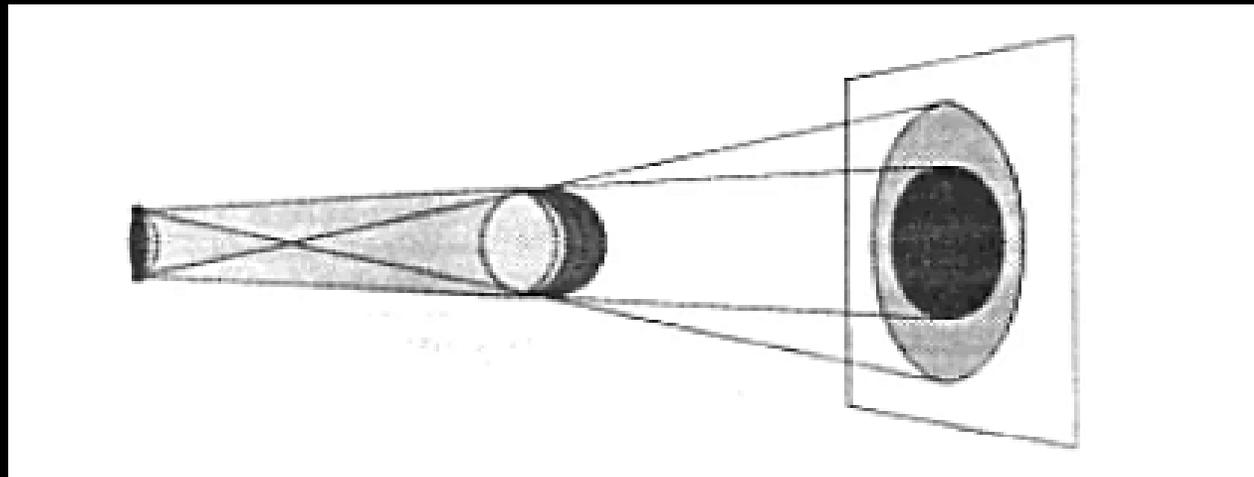
La propagazione rettilinea della luce: ombra

- Supponiamo di proiettare su uno schermo la luce proveniente da una **sorgente puntiforme** e di frapporre un corpo opaco: sullo schermo otterremo l'ombra dell'oggetto dai contorni ben delineati



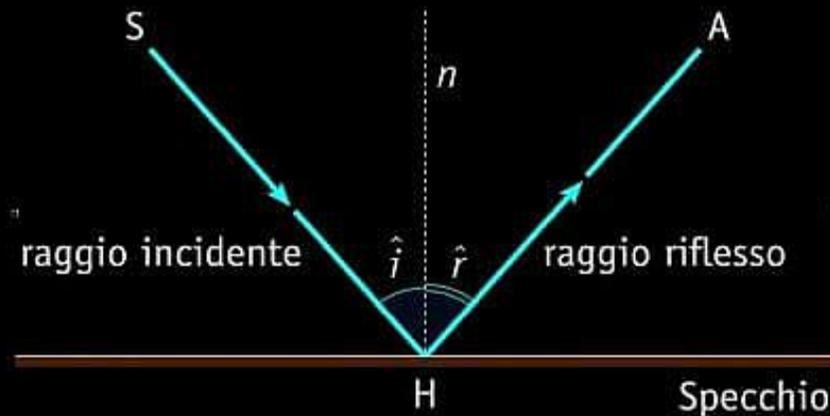
La propagazione rettilinea della luce: penombra

- Se invece di considerare una sorgente puntiforme consideriamo una **sorgente estesa**, ma minore del corpo opaco, si determinano sullo schermo delle zone di penombra, cioè i contorni della zona d'ombra sullo schermo non sono ben delineati e si passa gradualmente dall'ombra alla luce piena.



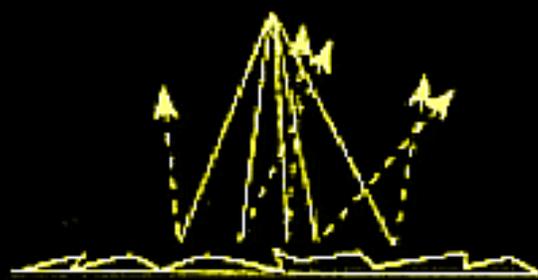
Riflessione

- La riflessione della luce verifica la seguente legge sperimentale, nota sotto il nome di **Legge di Snellius-Cartesio**:
 - 1) Il raggio incidente, la normale alla superficie riflettente nel punto di incidenza ed il raggio riflesso giacciono sullo stesso piano;
 - 2) L'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione.



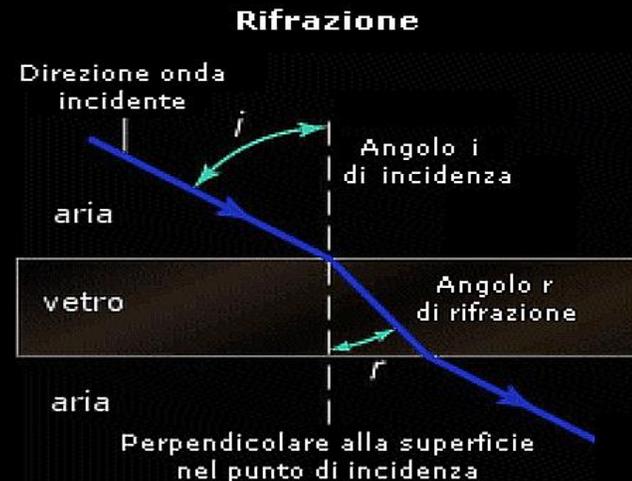
Diffusione

- Se la luce viene proiettata su una superficie non levigata, assistiamo al fenomeno della **diffusione**. La superficie scabra su cui si proietta il fascio luminoso può essere approssimata microscopicamente con una spezzata composta da tanti segmentini ognuno piano. I raggi, colpendo i segmentini, vengono riflessi secondo le leggi della riflessione, ma globalmente il fascio non viene deviato uniformemente ma diffuso in tante direzioni



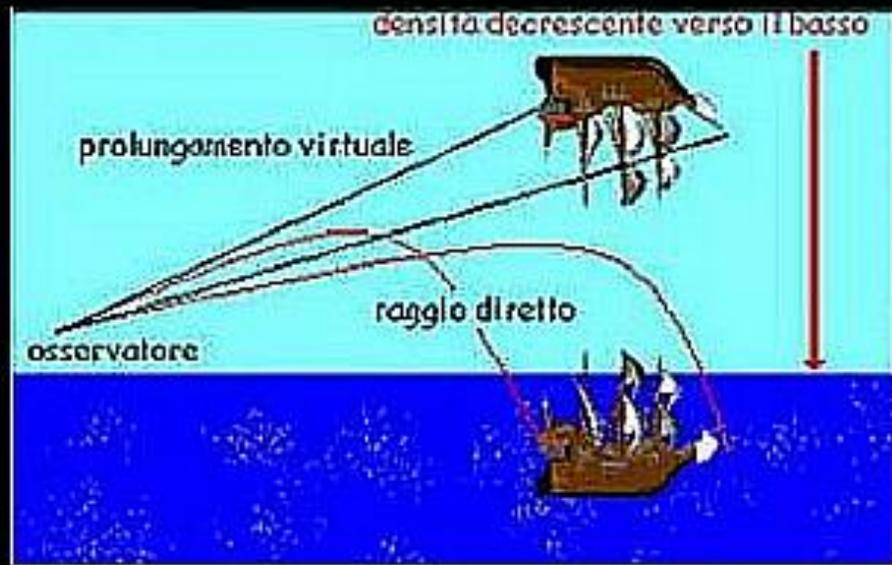
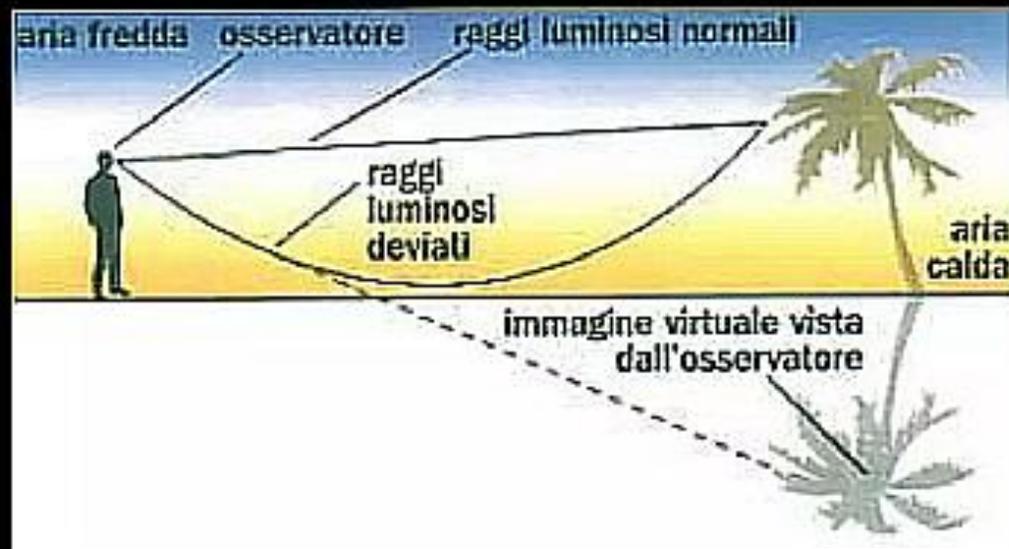
Rifrazione

- Consideriamo un raggio luminoso che viaggia attraverso un mezzo trasparente, ad esempio l'aria. Se sul suo cammino incontra un nuovo mezzo trasparente, ad esempio acqua o vetro, nel passaggio dall'uno all'altro mezzo il raggio subisce una deviazione abbastanza netta. Si dice in tal caso che il raggio viene rifratto.



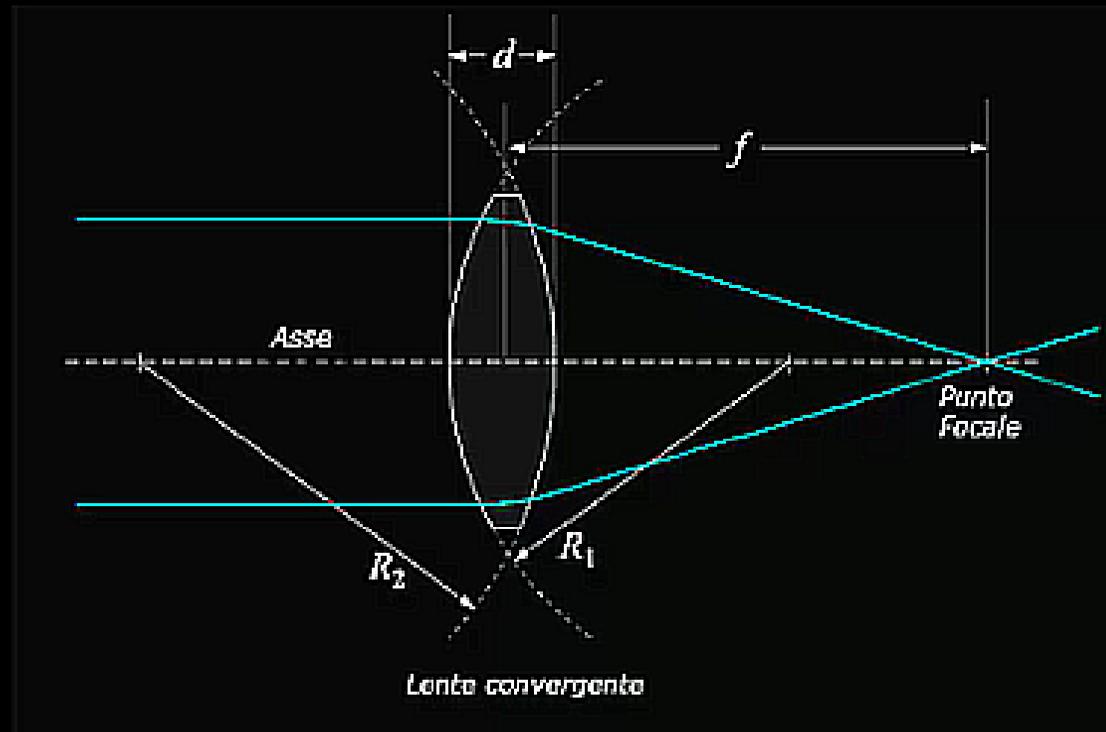
Miraggio e Fata Morgana

- La rifrazione è anche causa di numerosi fenomeni naturali, ad esempio il miraggio e la fata morgana. Entrambi sono dovuti alla diversa densità degli strati di aria, per cui quelli più densi risultano più rifrangenti rispetto a quelli meno densi.



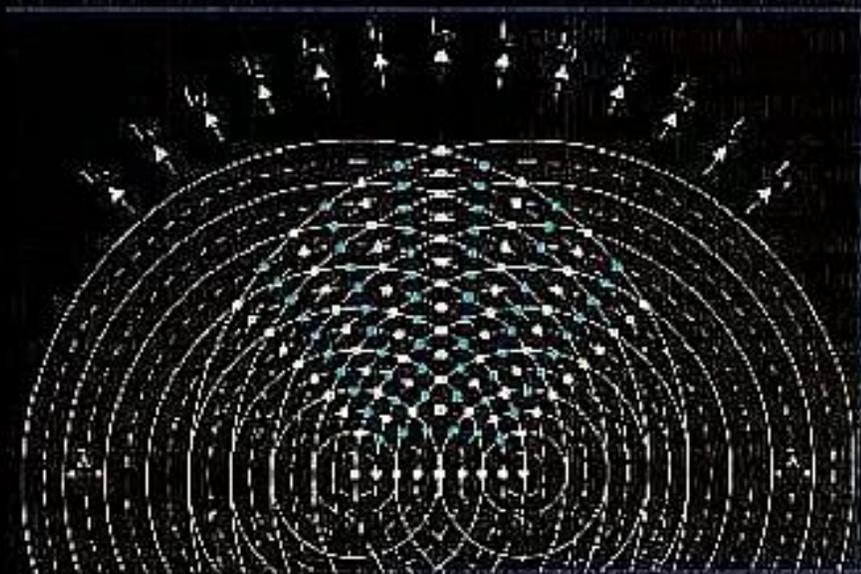
Lenti

- Chiameremo lente un qualsiasi corpo trasparente limitato da due superfici curve o da una superficie piana e una curva, in grado di modificare la traiettoria di un raggio luminoso che l'attraversi.



Interferenza

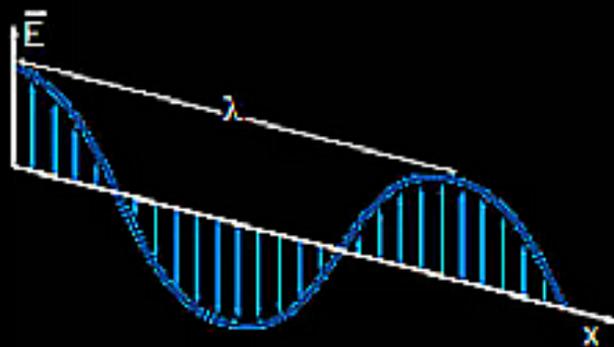
- In generale si ha interferenza quando due o più onde dello stesso tipo e stessa frequenza, con una differenza di fase costante tra di loro, attraversano la stessa regione di spazio nello stesso istante.



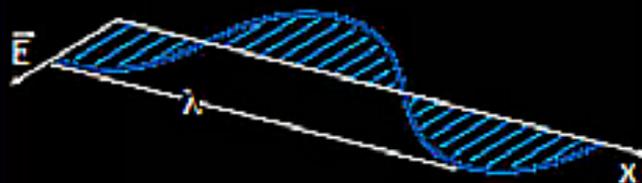
Polarizzazione della luce

- Un'onda elettromagnetica si dice polarizzata quando l'oscillazione dei vettori \vec{E} e \vec{B} ha caratteristiche ben definite.

► se \vec{E} oscilla sempre in un piano verticale, l'onda è *polarizzata verticalmente*.

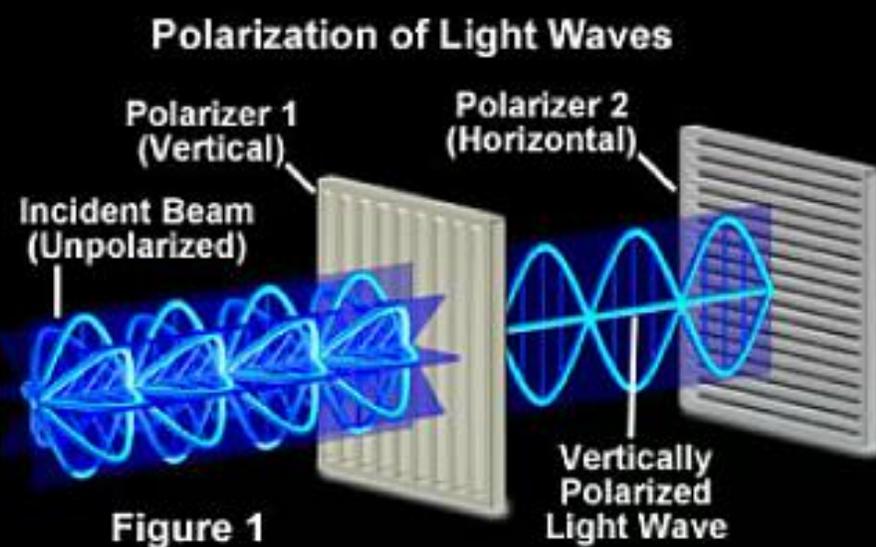


► Se \vec{E} oscilla sempre in un piano orizzontale, l'onda è *polarizzata orizzontalmente*.



Filtri polarizzanti

- I filtri polarizzanti sono composti da lamelle spaziate tra loro dell'ordine della lunghezza d'onda della luce incidente. Le lamelle impediscono o smorzano l'oscillazione del campo elettrico lungo la direzione ad esse ortogonale selezionando la polarizzazione ad esse parallele.



Intensità luminosa

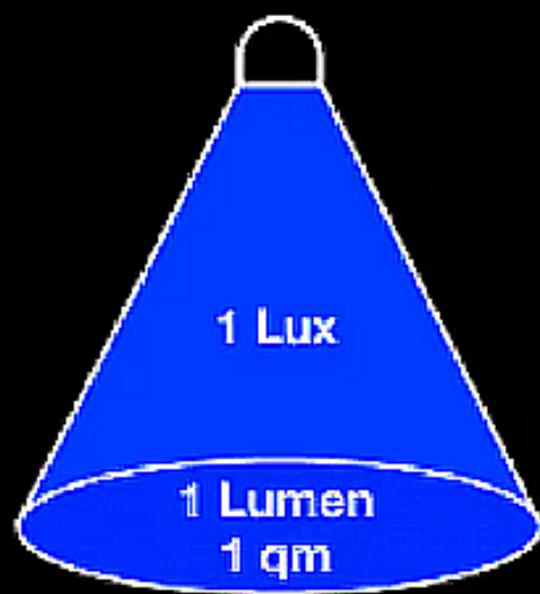
- È la grandezza corrispondente nel visibile all'intensità di radiazione, cioè è il flusso luminoso emesso in un angolo solido pari a 1 steradiante.
- La unità di misura della intensità luminosa è la candela (simbolo cd): 1 cd è un flusso luminoso di 1 lm emesso in un angolo solido di 1 steradiante.
- Una candela è definita pari all'intensità luminosa di una sorgente che emette, in una data direzione, una radiazione monocromatica di frequenza pari a 540×10^{12} hertz (lunghezza d'onda nel vuoto 555 nm) e che ha intensità radiante in quella direzione di $1/683$ watt /steradiante.

Flusso luminoso

- Il flusso luminoso, si misura in lumen, dove 1 lumen equivale al flusso luminoso rilevabile in un angolo solido di 1 steradiante emesso da una sorgente puntiforme ideale con intensità luminosa di 1 candela.
- In tali condizioni una sorgente luminosa avente 1 watt (luminoso) di potenza emette un flusso di 683 lumen.

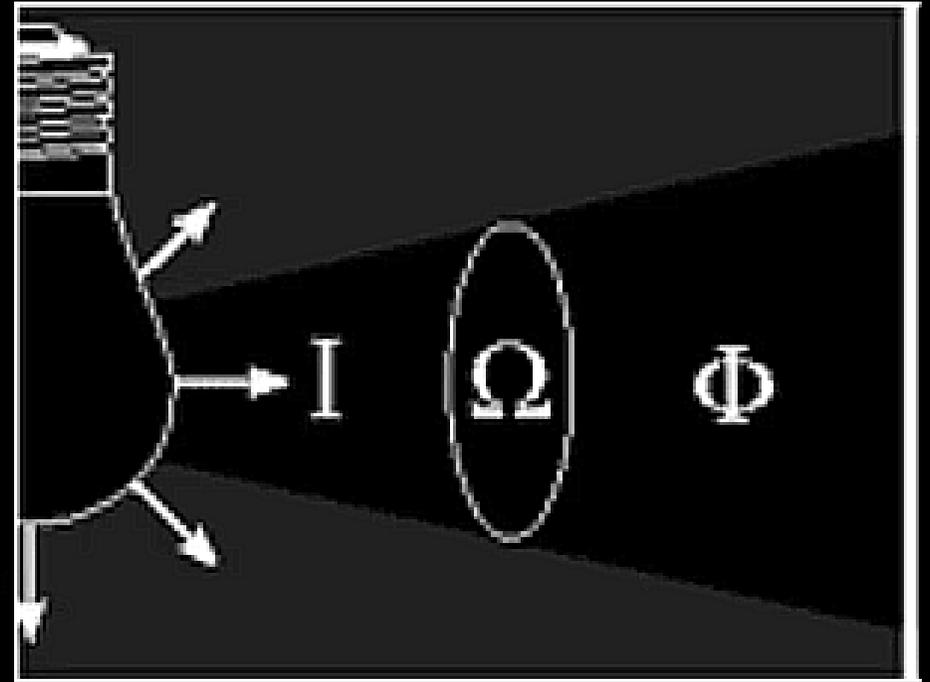
Illuminamento

- È il flusso luminoso che incide su una superficie di area unitaria (1 m²) in direzione perpendicolare.
- La sua unità di misura è il lux (simbolo lx), che è il flusso luminoso intercettato da una superficie di 1 m² posta a distanza di 1m in direzione perpendicolare da una sorgente che emette con l'intensità di 1 candela. 1 lux = 1 lumen / m²
- Dimensionalmente si ha: $lx = [cd \text{ sr}/m^2]$
- Uno stesso flusso luminoso (espresso in lumen) produce un diverso illuminamento in funzione dell'area che illumina: 1 lumen su un metro quadro da un illuminamento di 1 lux, mentre lo stesso lumen su 10 metri quadri da 0,1 lux.



Riassumendo:

- L'intensità luminosa I (cd) genera un flusso luminoso Φ (lm) nell'angolo solido ampio Ω (sr).
- Se questo flusso cade su una superficie di S (m²) genera un illuminamento di Φ/S lux.



Ricordiamo

- Lux e lumen sono due diverse misure del flusso luminoso, ma mentre il lumen è una misura assoluta della "quantità di luce", il lux è una misura relativa ad un'area. Così 1 lumen su un'area di 1 m² corrisponde ad 1 lux, mentre lo stesso lumen concentrato in 1 cm² corrisponde a 10.000 lux.

Luminanza

- È il flusso luminoso emesso da una superficie di area unitaria (1 m²) della sorgente entro un angolo solido di 1 sr in direzione perpendicolare alla superficie.
- È importante per le sorgenti estese, perché dà un'idea di quanto concentrata è la sorgente.

Tipiche luminanze

Sole	10 ⁹	cd/m ²
Faro di automobile (abbagliante)	10 ⁷	cd/m ²
Strada nel sole di mezzogiorno	10 ⁵	cd/m ²
Cielo diurno	10 ⁴ , 10 ⁶	cd/m ²
Lampada fluorescente	10 ³ , 10 ⁵	cd/m ²
Luna piena	10 ³ , 10 ⁴	cd/m ²
Minimo per visione fotopica	10	cd/m ²
Minimo per visione scotopica	0,01	cd/m ²
Illuminazione stradale	1	cd/m ²
Cielo notturno con luna piena	0,01	cd/m ²
Cielo notturno senza luna	10 ⁻⁶ , 10 ⁻³	cd/m ²

Luminanza

- Luce solare a mezzogiorno (medie latitudini) 10^5 lx
- Flash fotografico a 2 m di distanza 10^4 lx
- ufficio illuminato (secondo l'attuale normativa europea Uni En 12464) 500 Lx
- Giorno nuvoloso (all'aperto) 10^3 lx
- Illuminazione necessaria per leggere 100 lx
- Luna piena 0,2 lx
- Notte senza luna 10^{-4} lx



Grazie per l'attenzione!!