

Mathesis Firenze
mercoledì 28 ottobre 2015



Percorsi sulla luce:
dall'ottica geometrica ai fotoni

Prof. Emilio MARIOTTI

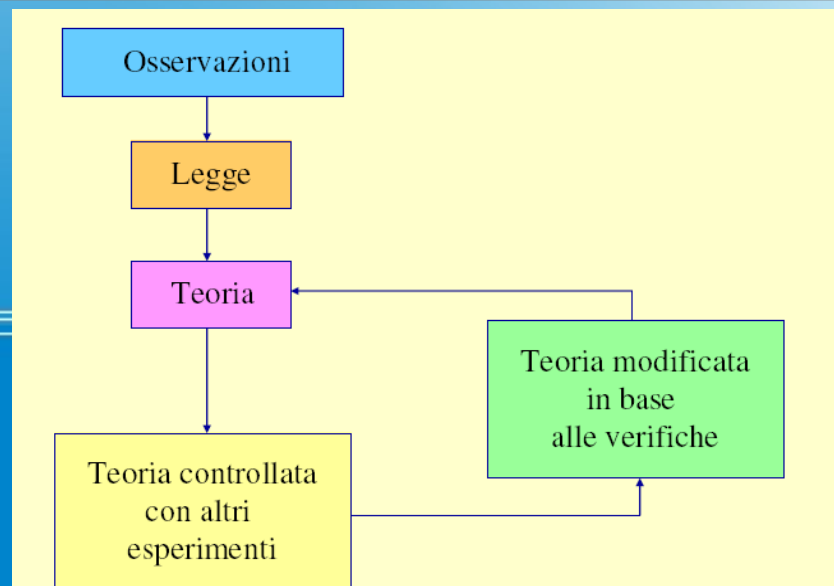
COS'È LA LUCE?

La luce è un fenomeno fisico.

(Facile a dirsi, oggi)

Per studiare la luce, non c'è bisogno di sapere cos'è (come d'altronde per il calore, l'elettricità, ecc.).

Quello che dobbiamo fare è osservare la realtà per “immaginarci” la luce a modo nostro, ovvero per farci un modello della luce.



UN PÒ DI STORIA

La prima “fisica” era antropomorfa,
una sorta di fisiologia dei sensi

	Discipline			
	Meccanica	Calore	Ottica	Suono
Sensazioni di	Forza	Caldo/freddo	Luce/colore	Rumore

Le sensazioni erano rappresentazioni psichiche della mente che traducevano i segnali corporei.

Lo scopo della fisica era perciò spiegare come la mente **soggettiva** può conoscere il mondo esterno.

UN PÒ DI STORIA

Rifiutando il concetto di azione a distanza, si deve ammettere una comunicazione tra oggetti e organi sensoriali.

Per tatto e gusto c'è contatto diretto; per l'olfatto è l'esalazione di un odore. E per la vista?

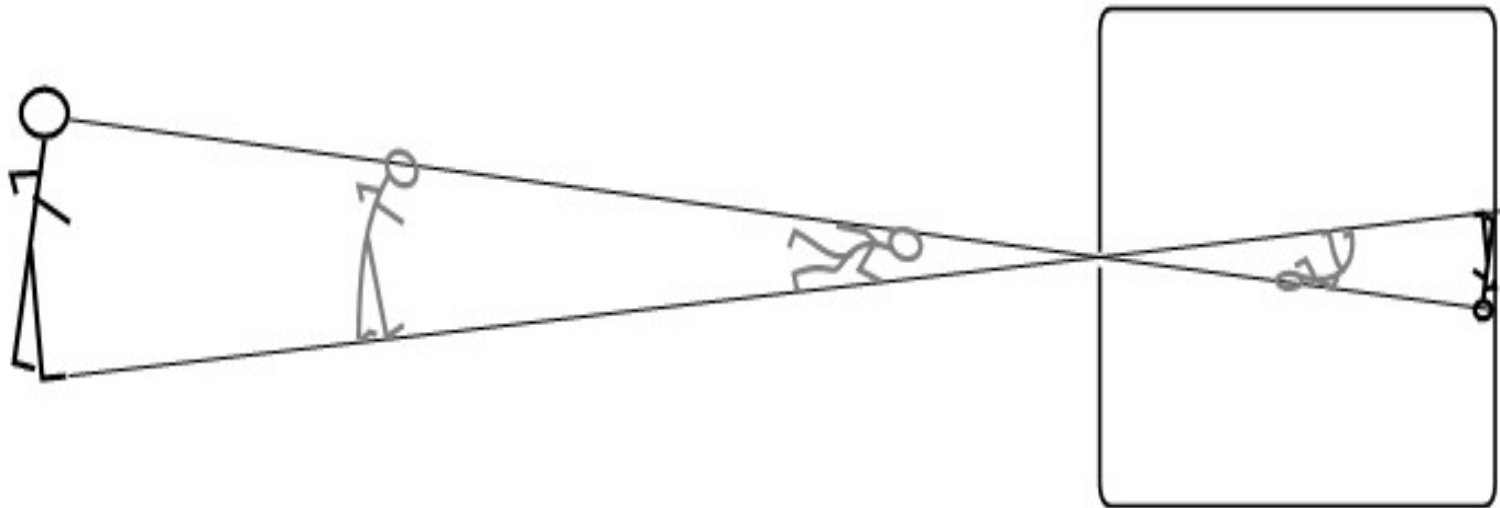
Ipotesi degli εἶδολα (species): una sorta di pelle lascia i corpi portando forme e colori

Problema: come fa l'immagine di una montagna a entrare nella pupilla? Risposta: si contrae!! (con un rapporto che muta con la distanza....)

Altri problemi: come fa l'immagine di una montagna a invertirsi nella riflessione da uno specchio? Perché non vediamo al buio? Perché vediamo sfuocato quando avviciniamo un oggetto all'occhio?

UN PÒ DI STORIA

ειδολα (species)



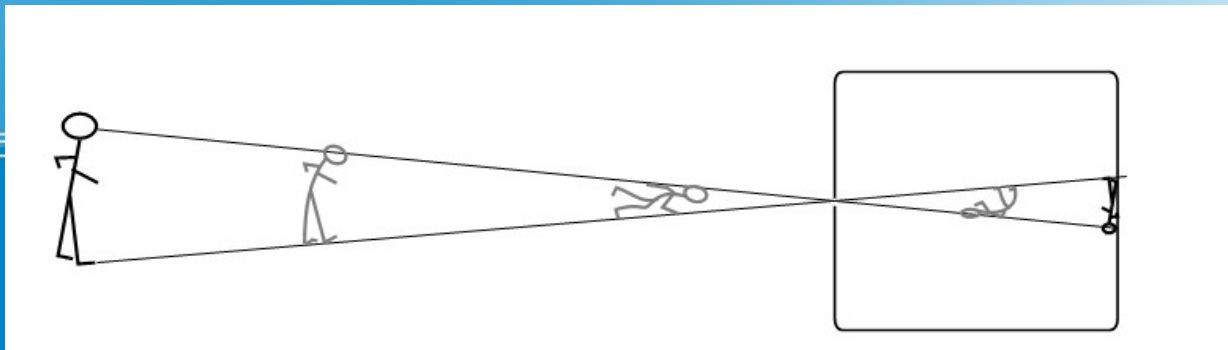
UN PÒ DI STORIA?

ειδολα (species) nel terzo millennio

Perché ci vediamo nello specchio? Anna (14 anni): perché la mia immagine si riflette su quel piano.

Prof. N., primario “Fatebenefratelli”: “Se il cristallino è trasparente, le immagini lo attraversano liberamente”.

Rivista scientifica “Sapere”, descrizione di una camera oscura: “Un'immagine luminosa esterna alla scatola e diretta verso la parete forata tenderà, dopo essersi ribaltata verticalmente, a proiettarsi sulla parete opposta”.



UN PÒ DI STORIA

Ipotesi dei raggi visivi (o del cieco): l'occhio emette dei “bastoncini” rettilinei che esplorano il mondo esterno e portano alla mente dati capaci di rappresentare forme e colori. (Nello stesso modo un cieco può conoscere la realtà senza contatto diretto utilizzando dei bastoncini).

Problemi: in sostanza, gli stessi dell'altra ipotesi.....

In ogni modo, nel mondo fisico esistono solo le immagini oppure i raggi visivi, mentre la LUCE è un prodotto della nostra mente.

UN PÒ DI STORIA - OSSERVAZIONI



Ibn al Haitham (al Hazen) 965-1039

1. Una persona che guardi il sole e poi chiuda gli occhi, conserva per qualche tempo l'immagine del disco solare.
2. Una persona che guardi direttamente il sole prova un senso di fastidio o addirittura dolore.

UN PÒ DI STORIA

Ibn al Haitham (al Hazen) 965-1039

Salta con queste osservazioni l'ipotesi dei raggi visivi. Invece, è richiesto un agente esterno che colpisca l'occhio.

Un oggetto qualsiasi deve essere risolto in piccolissime unità, ciascuna delle quali emette le sue immagini in ogni direzione.

La ricostruzione dell'intero oggetto avviene per rifrazione delle diverse unità da parte della cornea, che ricostruisce l'immagine sul “sensorium” (la nostra retina).

Problemi (?):

l'immagine globale dovrebbe essere invertita sulla retina.....

L'eredità di al-Haitham fu persa nelle traduzioni occidentali delle sue opere

UN PÒ DI STORIA



Francesco Maurolico da Messina 1494-1575

“Da ogni punto di un corpo si dipartono in tutte le direzioni raggi luminosi.” La sua idea non ebbe seguito immediato

UN PÒ DI STORIA

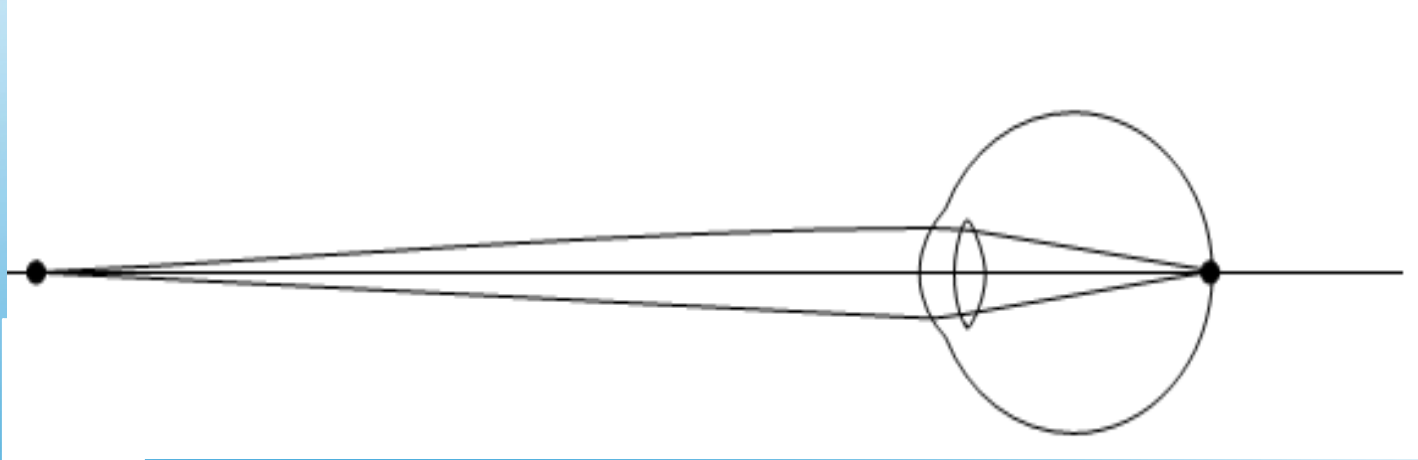


Johannes Kepler 1571-1630

“I corpi esterni consistono di aggregazioni di punti. Ciascuno di questi emette in tutte le direzioni raggi rettilinei infinitamente estesi, se non incontrano ostacoli. Un punto è come una stella che irraggia. Se c'è un occhio davanti al punto - stella, tutti i raggi formano un cono che ha vertice nel punto e base sulla pupilla. I raggi, rifratti dalla cornea, formano un nuovo cono con vertice un punto sulla retina”

UN PÒ DI STORIA

Johannes Kepler 1571-1630



“I corpi esterni consistono di aggregazioni di punti. Ciascuno di questi emette in tutte le direzioni raggi rettilinei infinitamente estesi, se non incontrano ostacoli. Un punto è come una stella che irraggia. Se c'è un occhio davanti al punto - stella, tutti i raggi formano un cono che ha vertice nel punto e base sulla pupilla. I raggi, rifratti dalla cornea, formano un nuovo cono con vertice un punto sulla retina”

UN PÒ DI STORIA



Isaac Barrow 1630-1677

“I fisici discutono molto sulla natura della luce; alcuni la ritengono una sostanza corporea, altri un [...] movimento. E' oggetto di discussione anche l'origine della luce, se essa si propaghi in modo continuo oppure a sbalzi, accrescendosi. [...] A me non è riuscito di scoprire le occulte proprietà della luce. Neppure i filosofi più capaci possono rispondere a domande come queste. [...] Entrambe le concezioni urtano contro le medesime difficoltà. Per questo motivo, sono dell'opinione che la luce può essere generata da ambedue le forme di movimento. [...] Poiché è necessario dire qualcosa sulla natura della luce, io mi dichiaro d'accordo con quelle tra le ipotesi accennate che offrono una qualche spiegazione, con la riserva che le cose possono avvenire così o in modo analogo.”

UN PÒ DI STORIA



Isaac Newton 1642-1727

“Hypotheses non fingo (non formulo ipotesi): qualunque cosa, infatti, non deducibile dai fenomeni va chiamata ipotesi; e nella filosofia sperimentale non trovano posto le ipotesi sia metafisiche, che fisiche, sia delle qualità occulte, che meccaniche.”

COSA NON E' LA LUCE?

La luce viene pericolosamente confusa con il processo visivo. Qualcuno definisce l'Ottica come la scienza della visione e parla di metafora dei 4 giocatori:

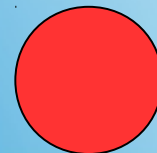
1. La sorgente di luce (ci sono oggetti che emettono luce)
2. L'oggetto (ci sono oggetti che rimandano la luce),
3. L'occhio (parte della luce entra nella pupilla e arriva sulla retina),
4. Il cervello (che interpreta i segnali ricevuti dalla retina).

L'Ottica si compone quindi non solo di fisica (che si occupa di 1 e 2), ma anche di fisiologia (3,4) e di psicologia (4).

DIMOSTRAZIONE 1

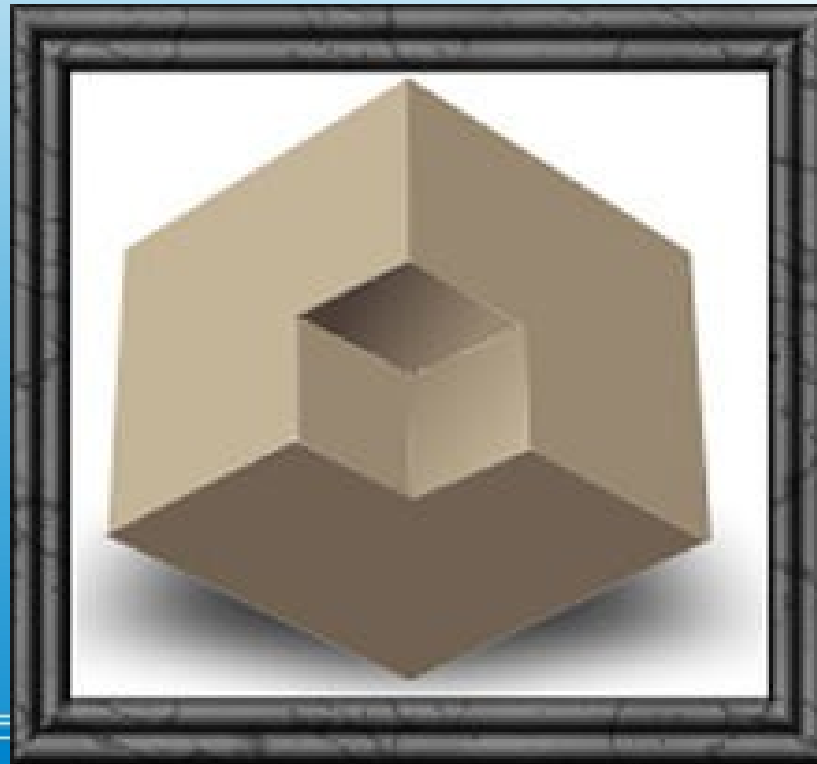
Vediamo sempre ciò che abbiamo davanti agli occhi?

Provate a disegnare sul foglio una croce e un punto distanziati tra loro di una decina di centimetri, mettete davanti all'occhio destro la croce tappando il sinistro e osservandola fissamente. Ci sarà una distanza dal foglio per cui non riuscirete a vedere il cerchio. E' un problema fisiologico.



DIMOSTRAZIONE 2

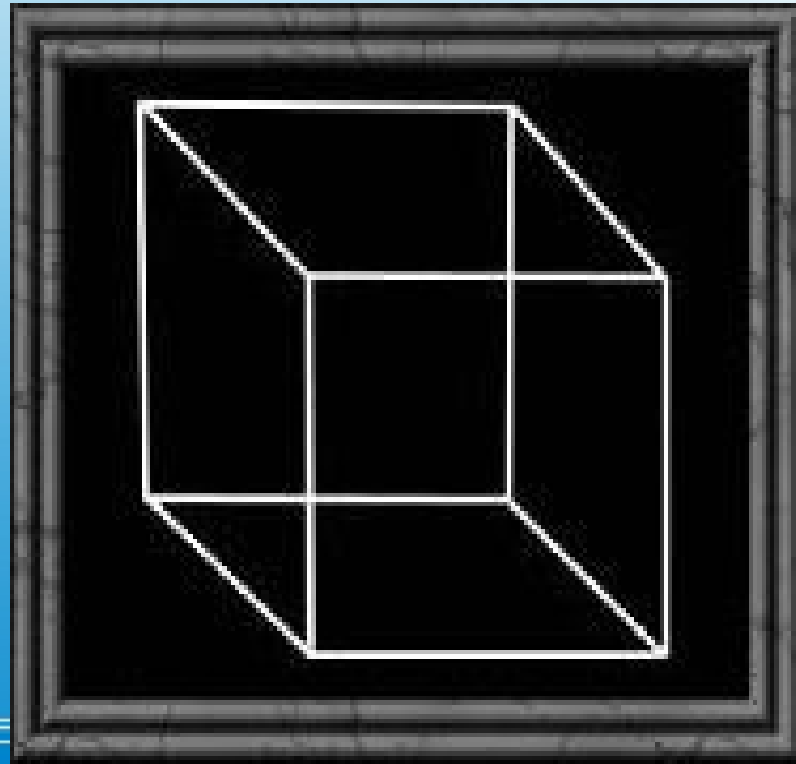
Interpretiamo sempre facilmente ciò che abbiamo davanti agli occhi?



Cosa rappresenta la figura?

DIMOSTRAZIONE 2

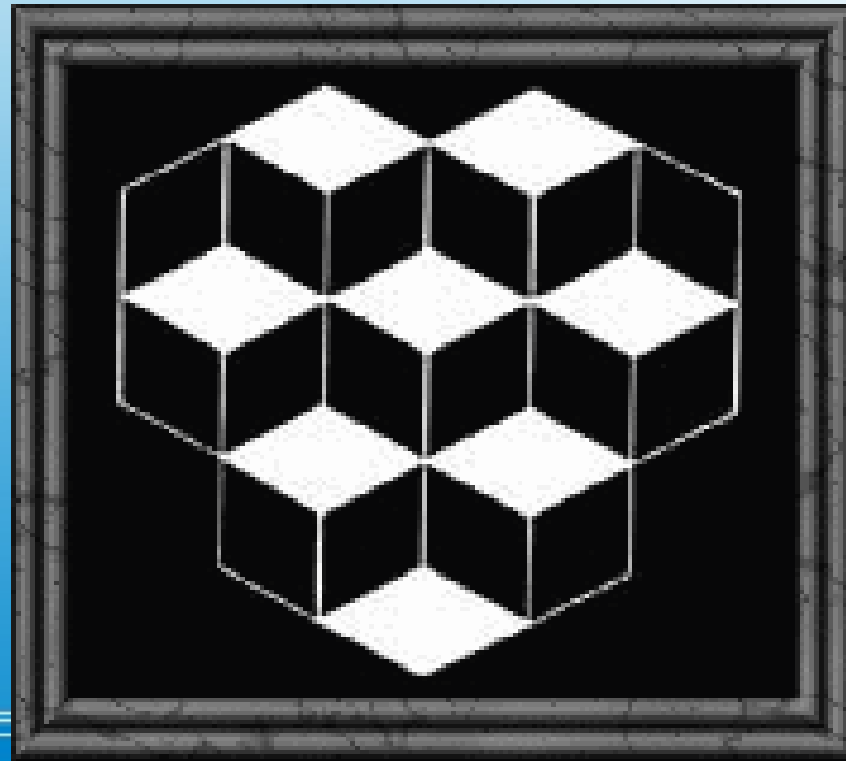
Interpretiamo sempre facilmente ciò che abbiamo davanti agli occhi?



Quale faccia è quella anteriore?

DIMOSTRAZIONE 2

Interpretiamo sempre facilmente ciò che abbiamo davanti agli occhi?



Quanti cubi ci sono in figura?

DIMOSTRAZIONE 2

Interpretiamo sempre facilmente ciò che abbiamo davanti agli occhi?



La rivista è aperta verso di noi o contro di noi?

DIMOSTRAZIONE 2

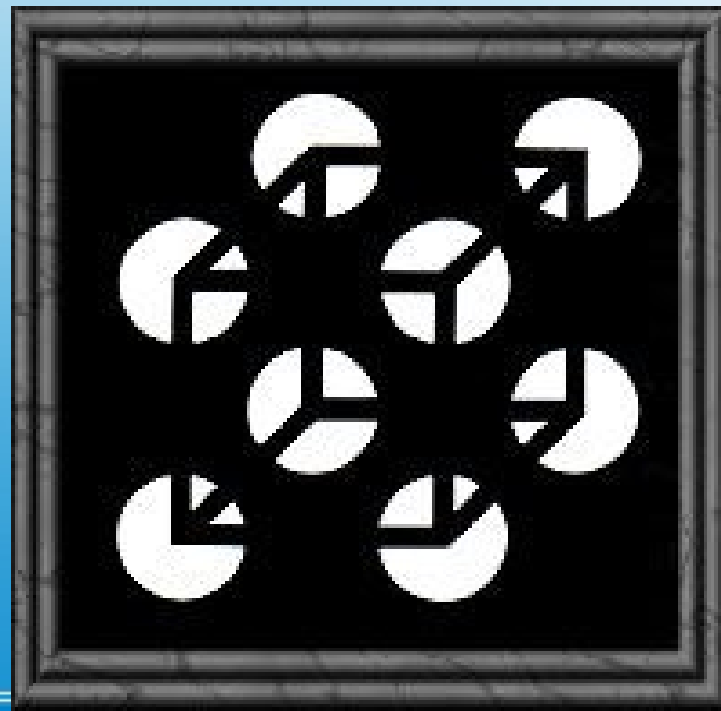
Interpretiamo sempre facilmente ciò che abbiamo davanti agli occhi?



La strada è in salita o in discesa?

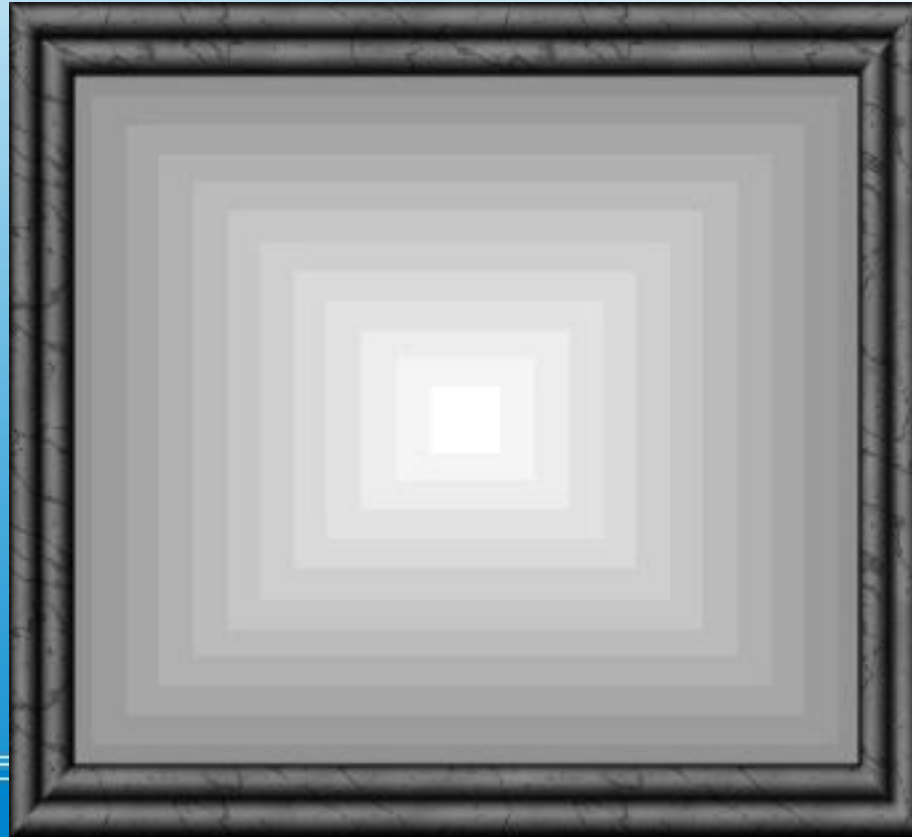
DIMOSTRAZIONE 3

Vediamo SOLO ciò che abbiamo davanti agli occhi?



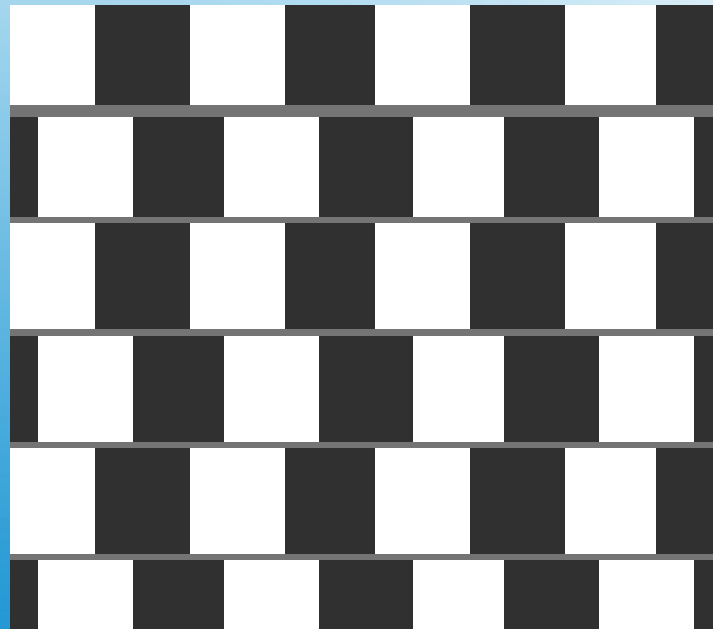
DIMOSTRAZIONE 3

Vediamo SOLO ciò che abbiamo davanti agli occhi?



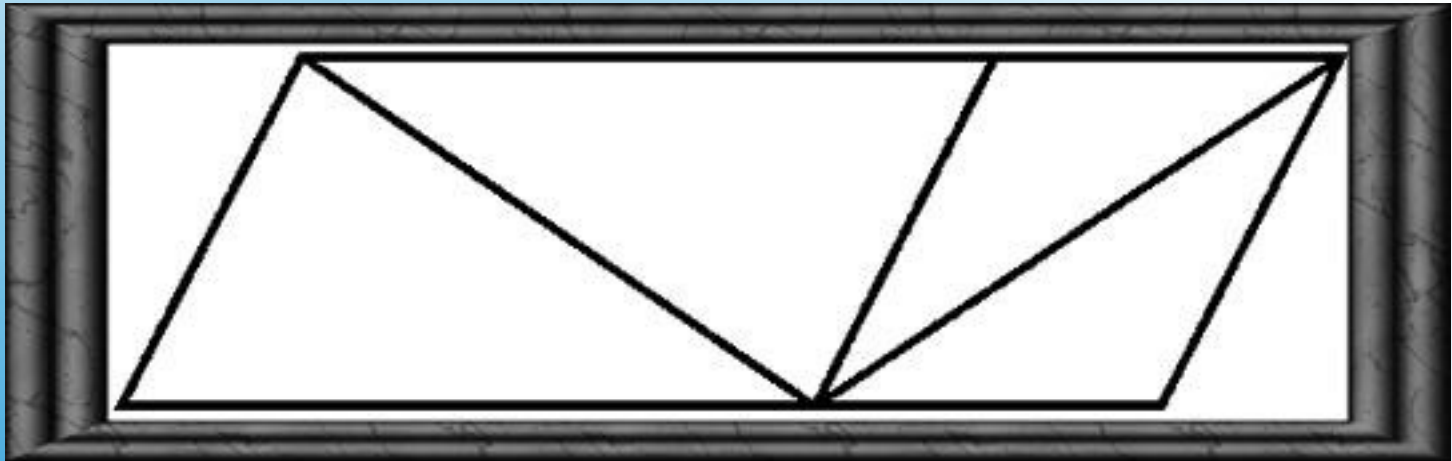
DIMOSTRAZIONE 3

Vediamo SOLO ciò che abbiamo davanti agli occhi?



DIMOSTRAZIONE 4

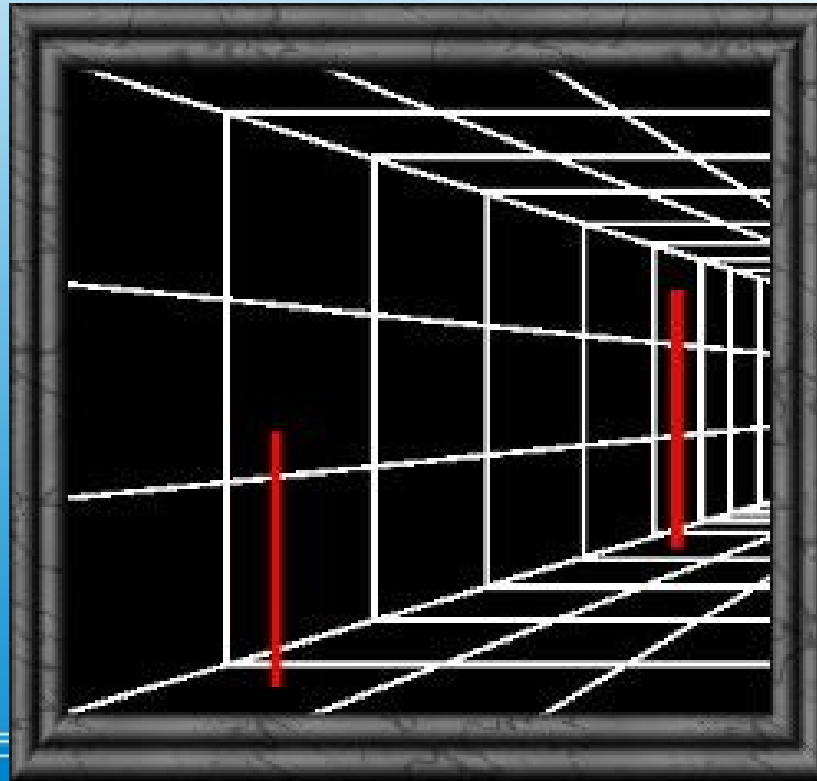
Misuriamo correttamente le distanze?



Quale parallelogramma ha la diagonale più lunga?

DIMOSTRAZIONE 4

Misuriamo correttamente le distanze?



Qual è il paletto più lungo?

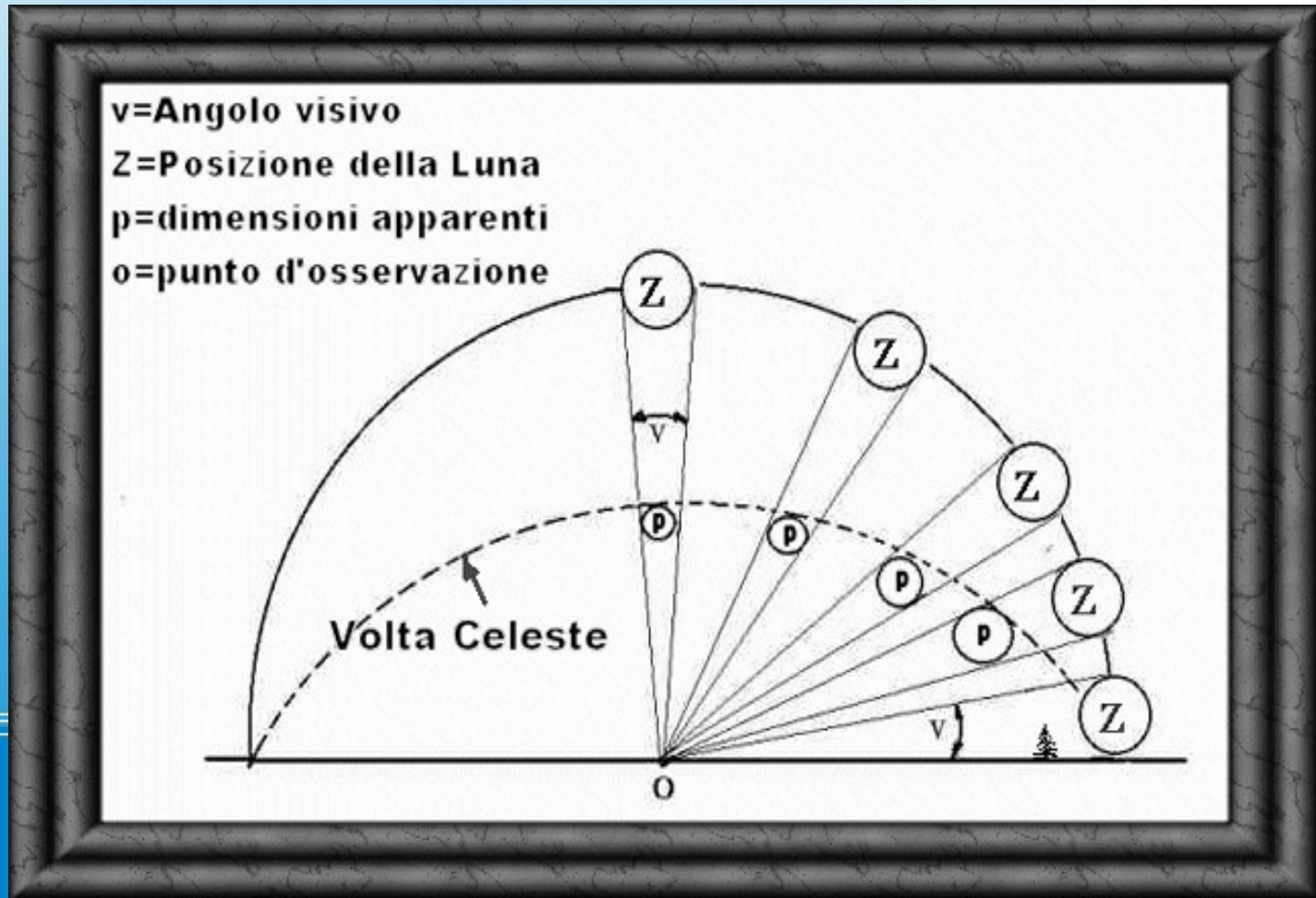
DIMOSTRAZIONE 4

Misuriamo correttamente le distanze?



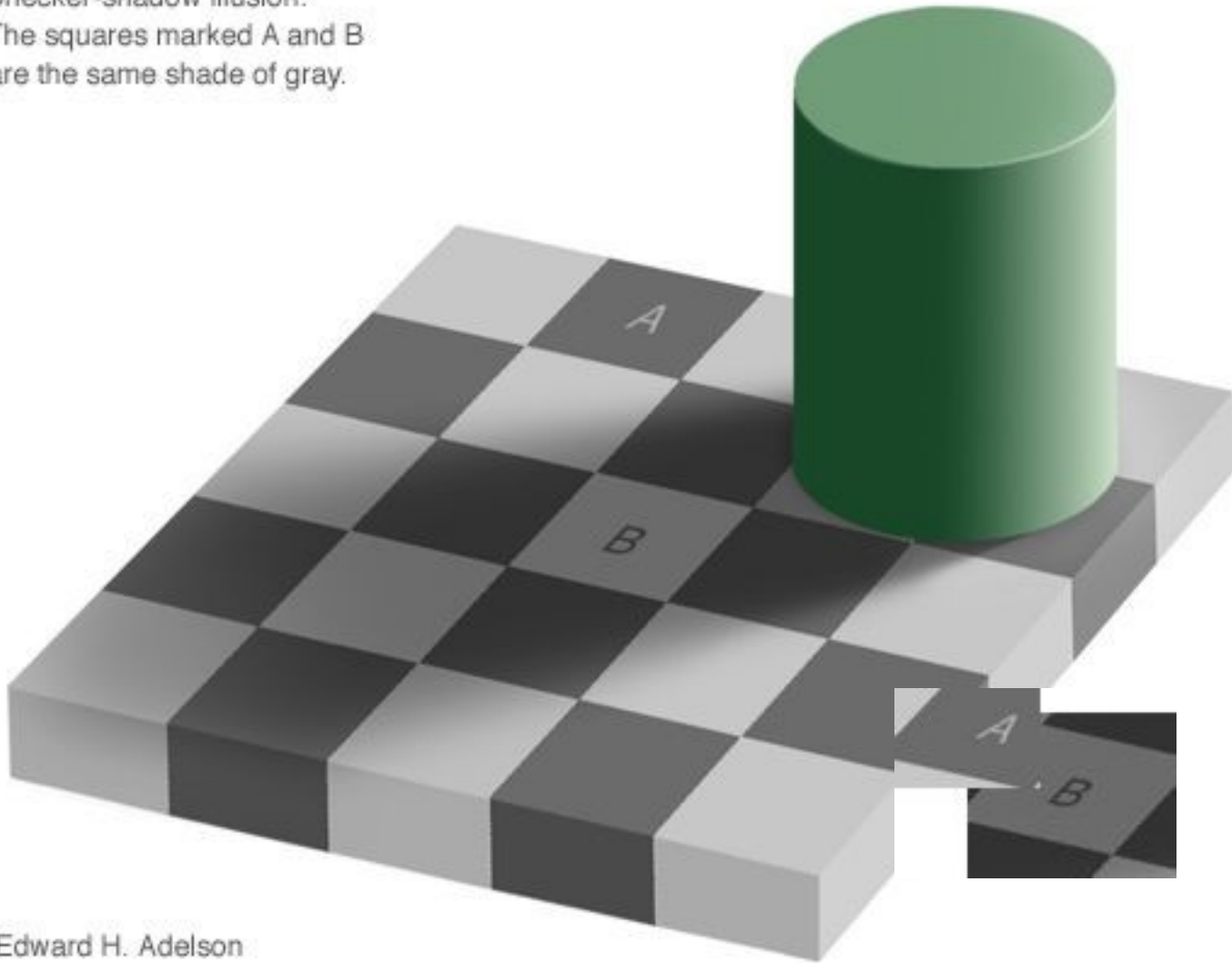
DIMOSTRAZIONE 4

Misuriamo correttamente le distanze?



ILLUSIONI OTTICHE SUI COLORI

Checker-shadow illusion:
The squares marked A and B
are the same shade of gray.

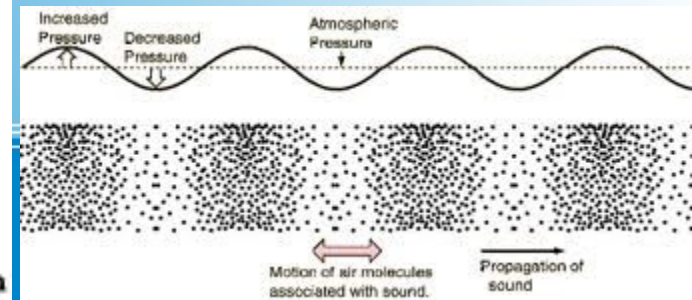
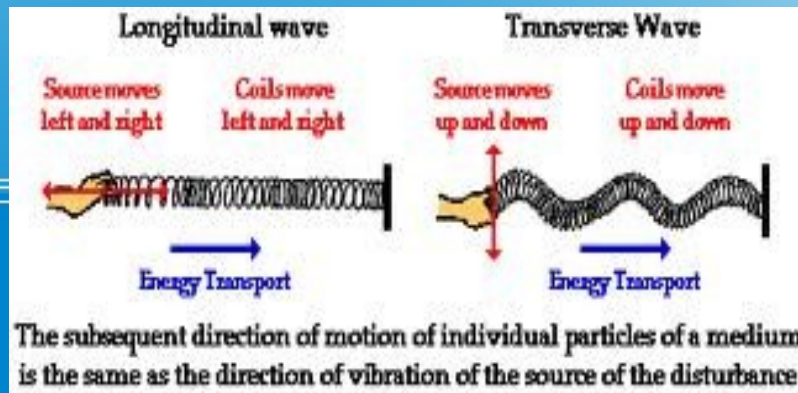


Edward H. Adelson

CAMPI CLASSICI

La nozione di onda idealizza anch'essa alcuni fenomeni fisici, come le perturbazioni sulla superficie del mare o gli urti successivi tra vagoni all'aggancio di una locomotiva. l'idea astratta viene resa visibile da uno spostamento (trasversale nel primo caso, longitudinale nel secondo) che si propaga per passi successivi e in modo continuo attraverso un mezzo.

Ci sono però campi classici in cui è impossibile visualizzare spostamenti o un mezzo che garantisce la propagazione: il campo elettromagnetico e' l'esempio più importante.



CAMPI CLASSICI

COSA CARATTERIZZA I CAMPI?

- **CARATTERE CONTINUO:**
un'onda è definita in ogni punto dello spazio, ad ogni istante di tempo.
- **VOLUME INFINITO:**
è perciò un fenomeno **NON localizzato**, di estensione spaziale in linea di principio infinita, anche se spesso i valori dei campi restano sensibilmente diversi da zero in zone finite.
- **AMPIEZZA:**
i valori dei campi sono associati a una quantità (che può essere scalare o vettoriale) $A(r,t)$.
- **EVOLUZIONE TEMPORALE:**
un campo si propaga, cioè il luogo dei punti in cui $A(r,t)$ assume simultaneamente lo stesso valore A_0 (**fronte d'onda**) si sposta nel tempo.
- **SOVRAPPOSIZIONE:**
due campi $A_1(r,t)$, $A_2(r,t)$ “si incontrano senza influenzarsi”, si “combinano” secondo una semplice operazione di somma. Esiste cioè un unico campo $A_1(r,t)+A_2(r,t)$.

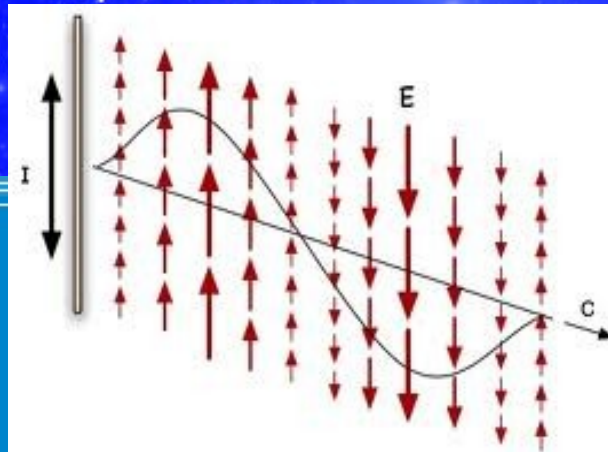
CAMPI CLASSICI

Onde elettromagnetiche

Le onde sono un modalità di trasferimento di **energia** al quale non è associato alcun trasferimento di materia.

Nelle onde meccaniche la materia si muove solo localmente (oscillazioni del mezzo di propagazione attorno alle posizioni di equilibrio).

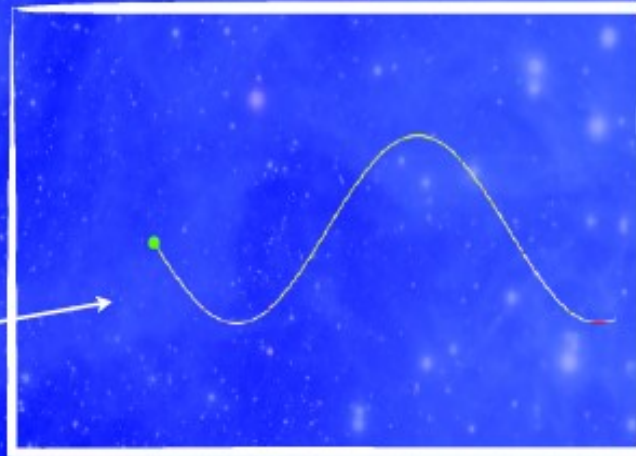
Nelle onde elettromagnetiche ad oscillare sono il campo elettrico e magnetico distribuito nello spazio (anche in assenza di materia, quindi).



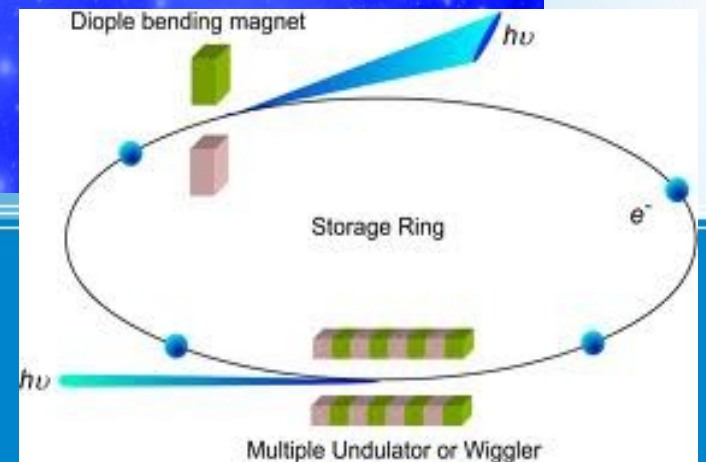
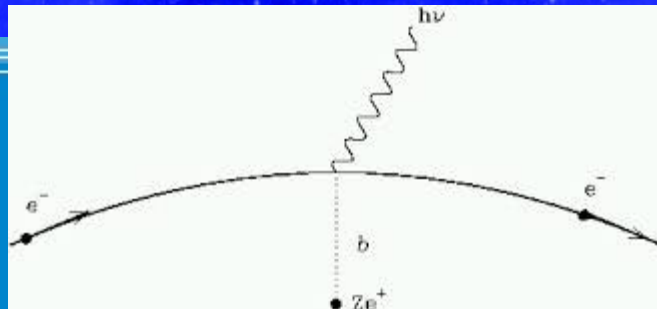
CAMPI CLASSICI

Una carica elettrica oscillante, con moto armonico di frequenza f , genera un'onda elettromagnetica (come una lunga corda tesa scossa ad un estremo)

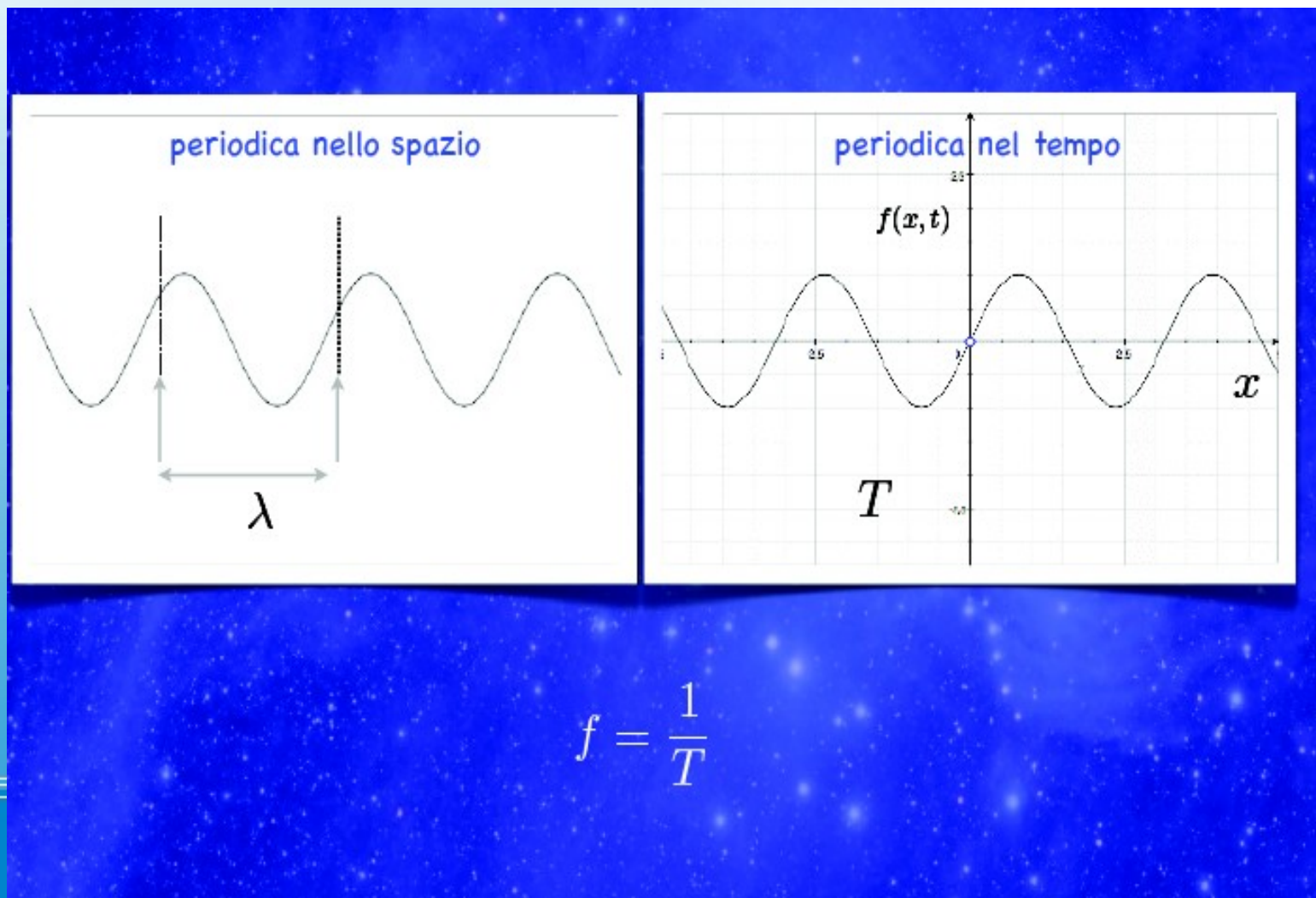
carica in
moto accelerato



In questo caso si parla di **onda armonica**.

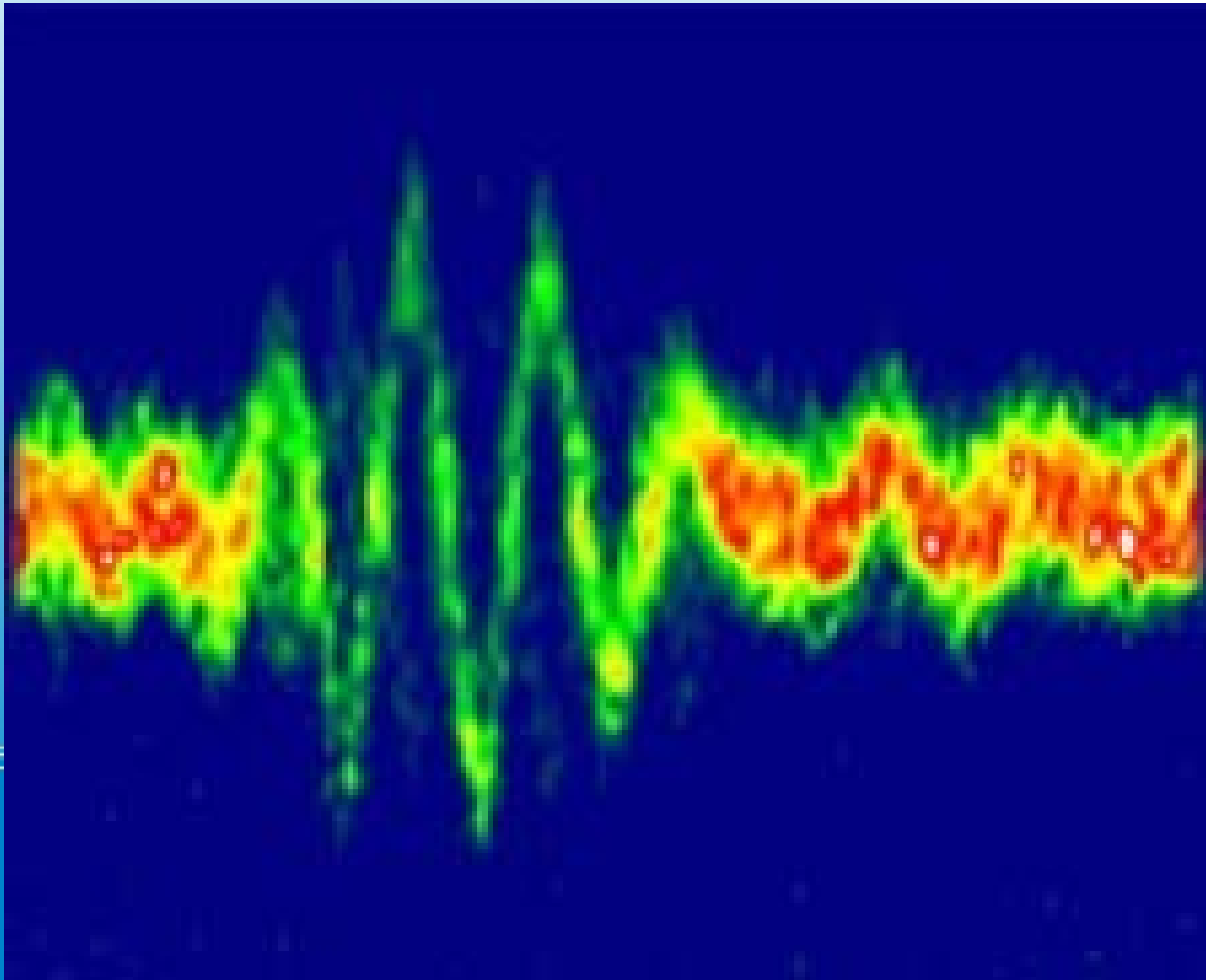


CAMPI CLASSICI



I CAMPI E.M. NON SI VEDONO?

FISICA ALL'ATTOSECONDO



CAMPI CLASSICI

PERIODICITA' SPAZIALE E TEMPORALE

$$A(\vec{r}, t + \tau) = A(\vec{r}, t) \Rightarrow A(t) = a \cos(\omega t + \phi_0)$$

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ è la pulsazione, T il periodo temporale

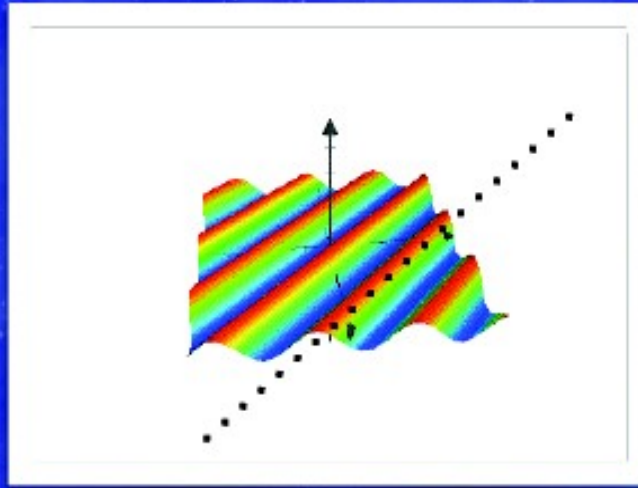
$$A(r + \lambda, t) = A(r, t) \Rightarrow A(r) = a \cos(kr + \alpha_0)$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ è la ondulazione, λ il periodo spaziale (lunghezza d'onda)

$$A(\vec{r}, t) = a \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi_0)$$

CAMPI CLASSICI

Misuriamo la velocità dell'onda:



nell'intervallo di tempo Δt conto il passaggio di N creste attraverso il "traguardo".

Ciascuna cresta è separata nel tempo da un periodo T , quindi $\Delta t = N \cdot T$

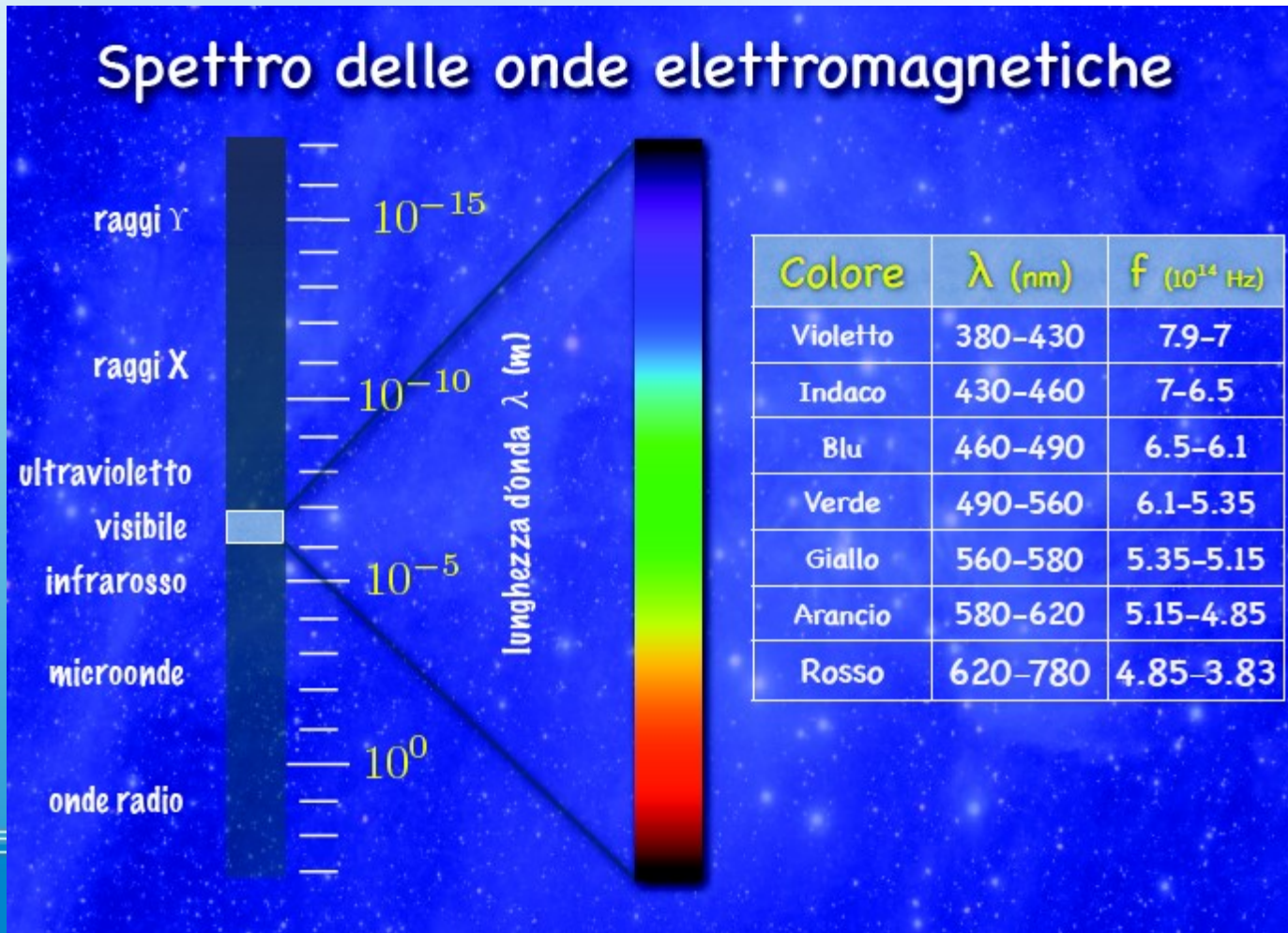
Ciascuna cresta è separata nello spazio da una distanza λ

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{N \cdot \lambda}{N \cdot T} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

Nel vuoto:

$$v = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

CAMPI CLASSICI



LO SPETTRO DELLE ONDE E.M.

ENERGIA ►

Frequenze in Hz

10^0 10^2 10^4 10^6 10^8 10^{10} 10^{12} 10^{14} 10^{16} 10^{18} 10^{20} 10^{22} 10^{24} 10^{26}



Basse frequenze

Alte frequenze

Onde lunghe, medie, corte, ultracorte, microonde

Luce infrarossa - visibile - ultravioletta

Raggi X

Raggi gamma

Radiazione secondaria di quota



Elettrodotti



Radio



Telefono cellulare



Calore



Luce



Radiografia



Radioattività

NON IONIZZANTE

IONIZZANTE

CAMPI CLASSICI

ENERGIA



CAMPI CLASSICI

QUANTITÀ DI MOTO

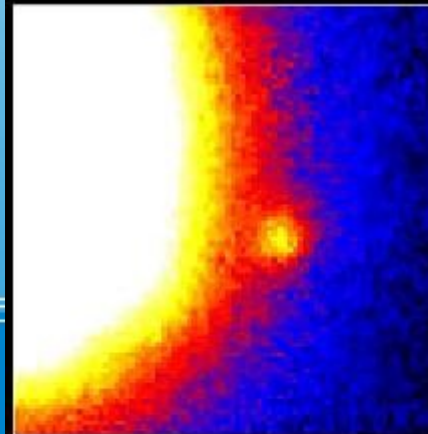


Radiation pressure bends a comet's tail.

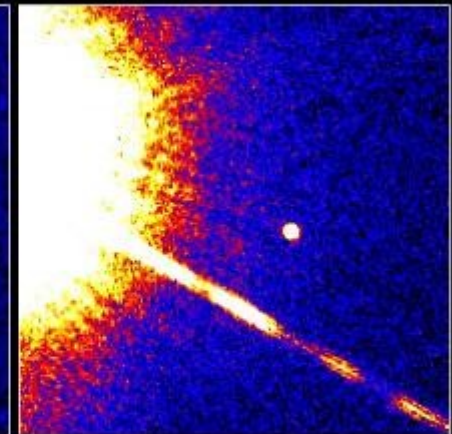
$$F_{rad} = \frac{\sigma_{abs} \times I}{c}$$

$$P_{rad} = \frac{I}{c}$$

Brown Dwarf Gliese 229B



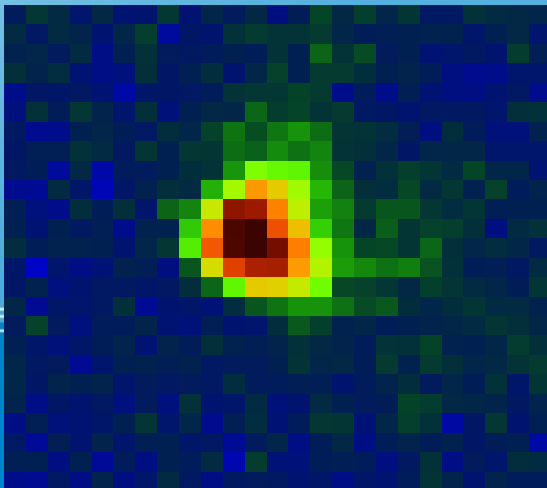
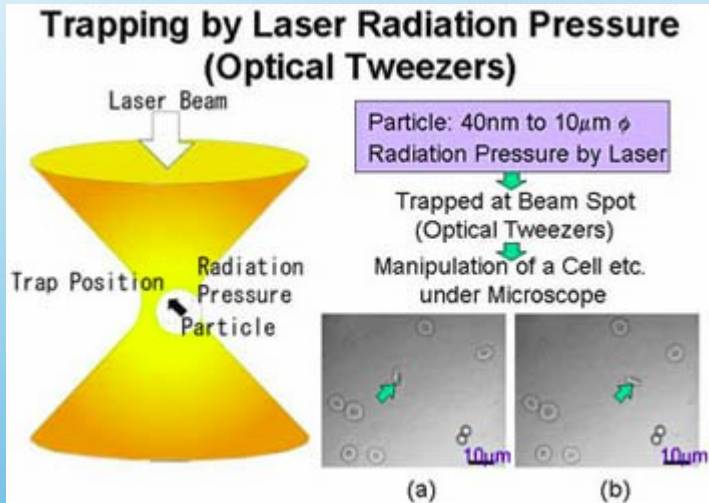
Palomar Observatory
Discovery Image
October 27, 1994



Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera
November 17, 1995

CAMPI CLASSICI

QUANTITÀ DI MOTO



CAMPI CLASSICI

MOMENTO ANGOLARE

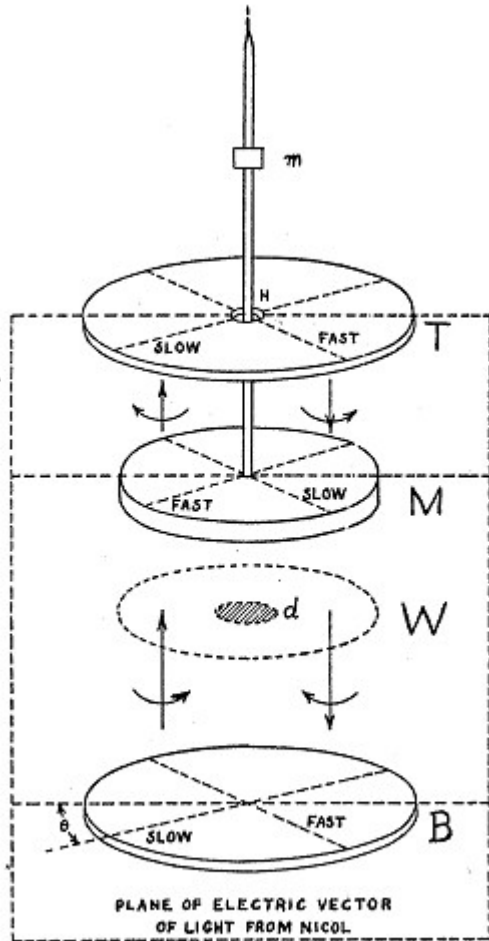
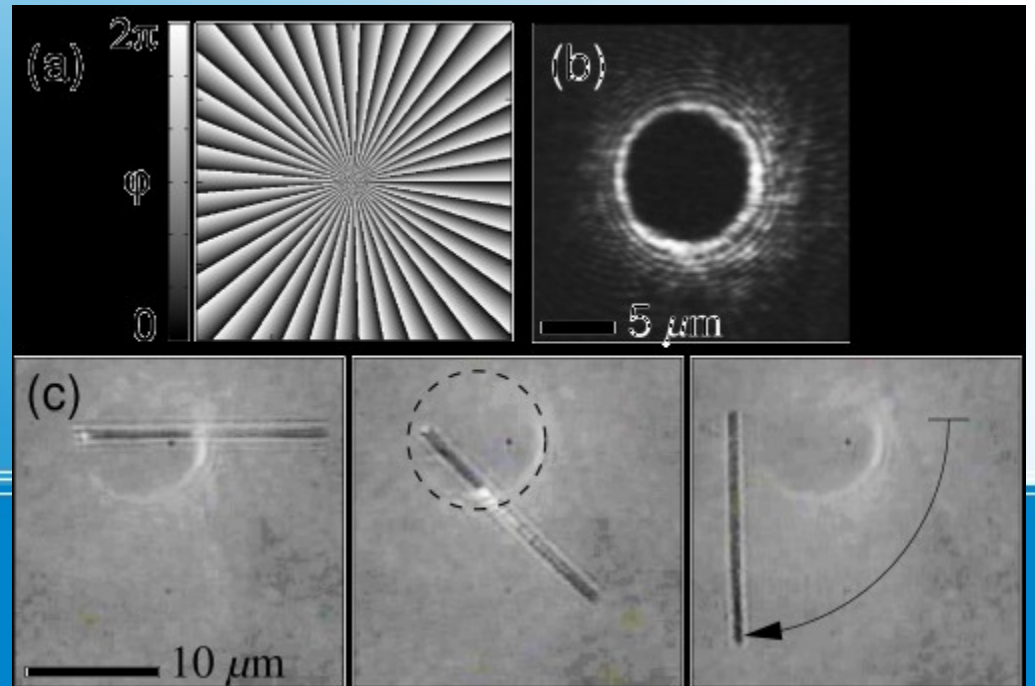
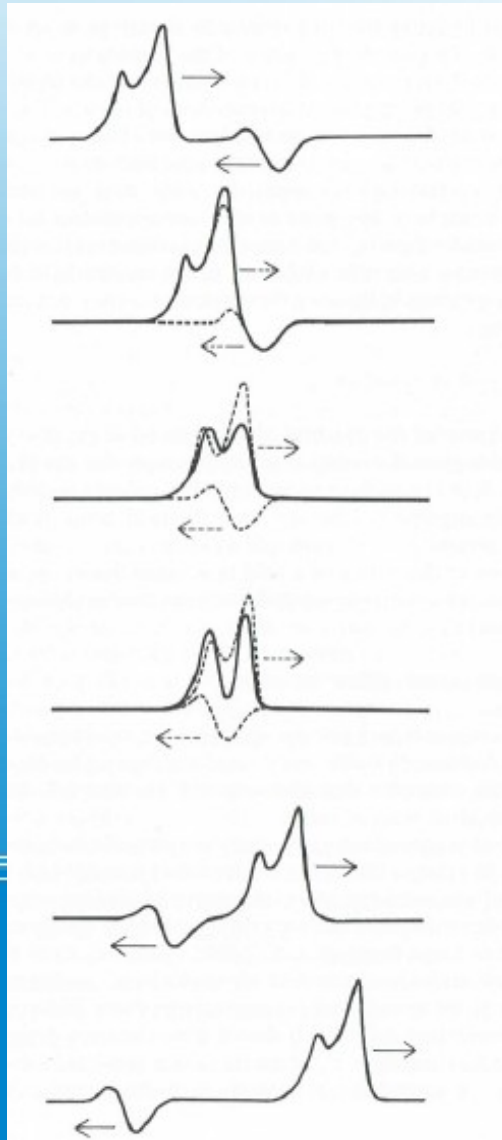


FIG. 3. Wave plate arrangement.



CAMPI CLASSICI

PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE (EQUAZIONI LINEARI!!)



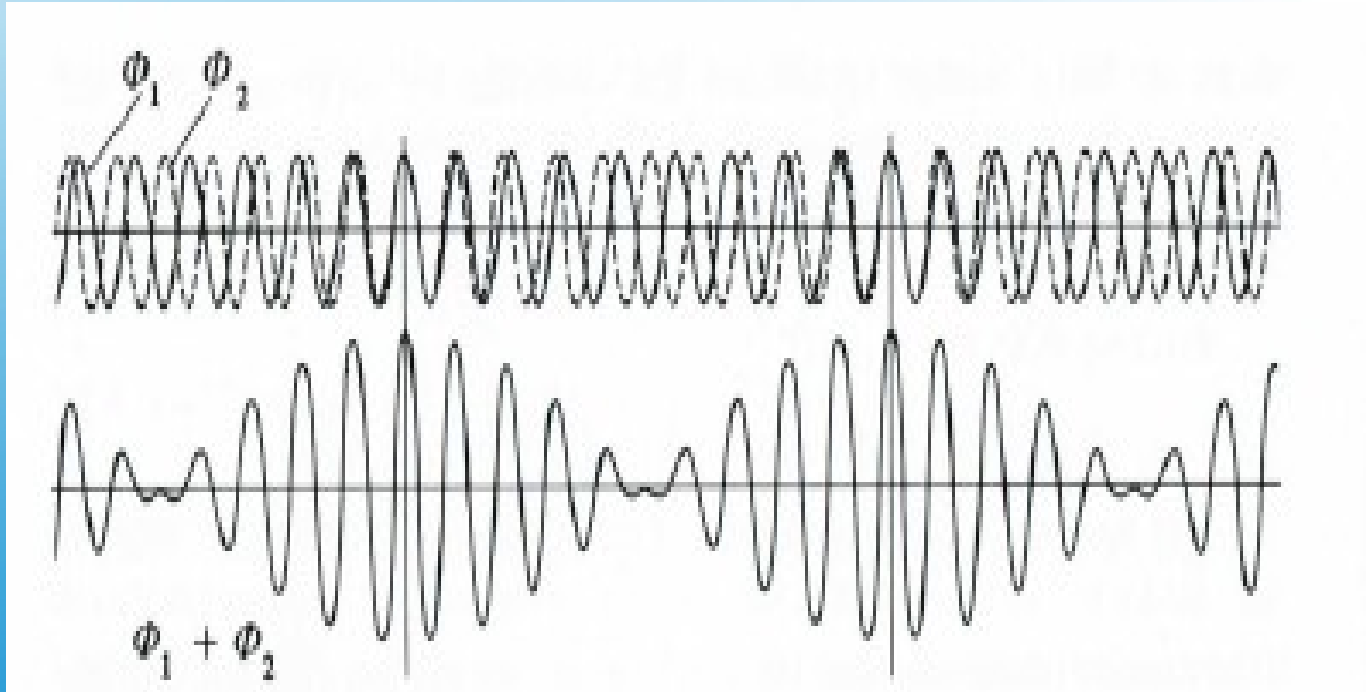
CAMPI CLASSICI

Macchina “vinycombe wave”

CAMPI CLASSICI

BATTIMENTI

$$A_{1,2}(\vec{r}, t) = a \cos(\omega_{1,2} t - \vec{k}_{1,2} \cdot \vec{r} + \phi_{1,2})$$



Diapason!

CAMPI CLASSICI

INTERFERENZA E DIFFRAZIONE

interferenza



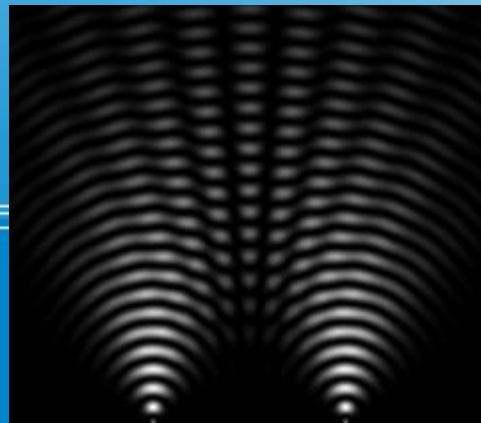
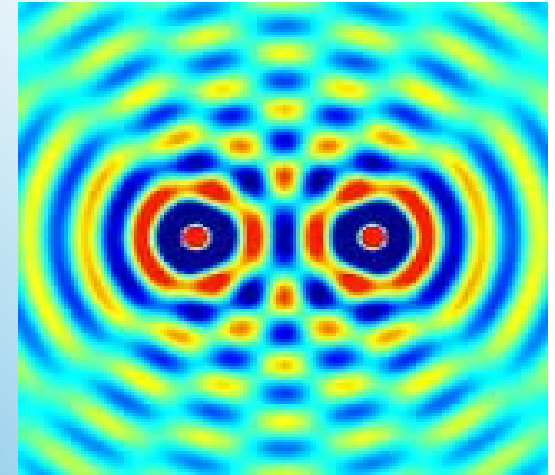
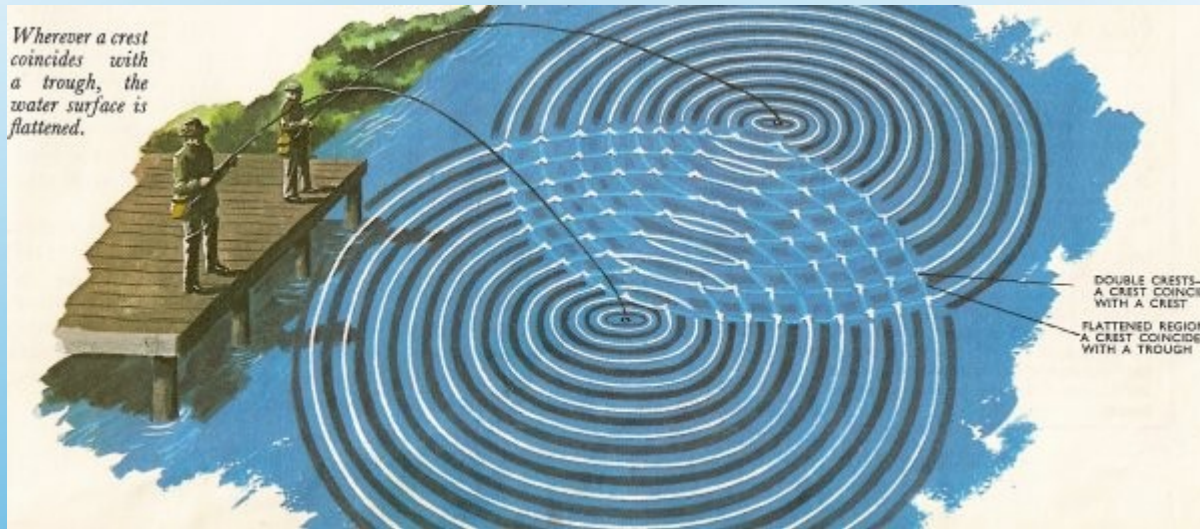
diffrazione



slide 9-2

CAMPI CLASSICI

INTERFERENZA (2 sorgenti)



In Phase Sources

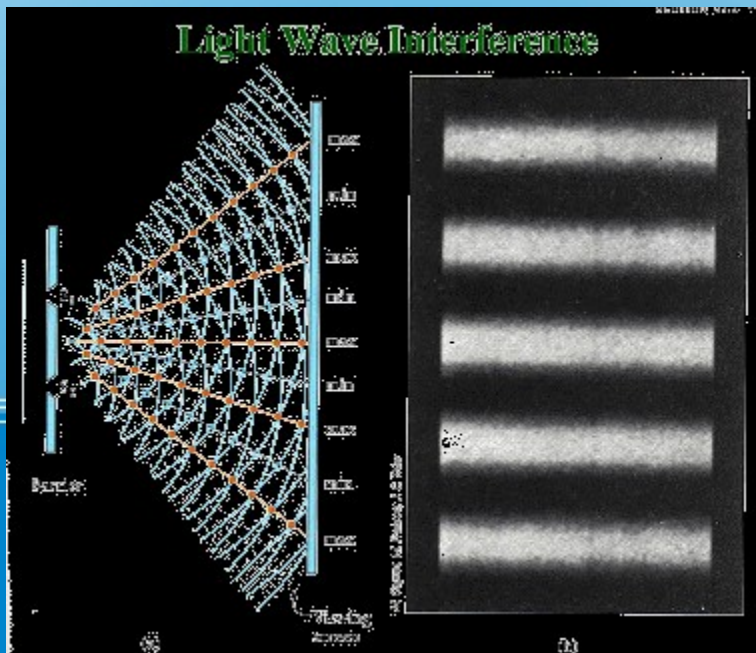
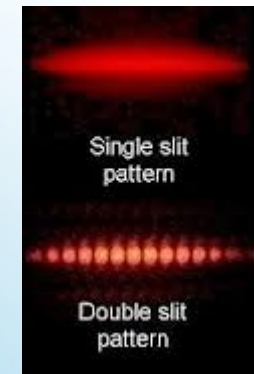
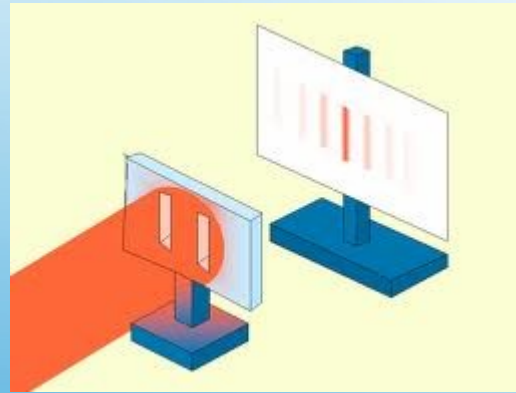
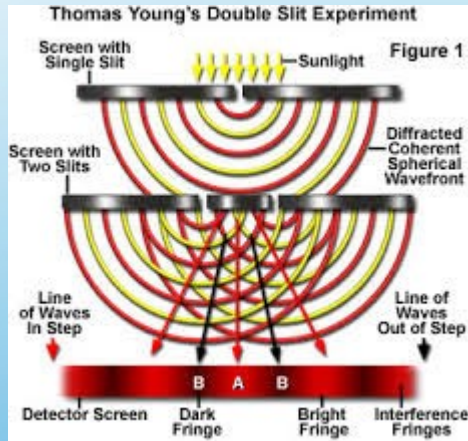
$$\Delta l = \begin{cases} m\lambda & \text{Constructive} \\ (m + \frac{1}{2})\lambda & \text{Destructive} \end{cases}$$

Out of Phase Sources

$$\Delta l = \begin{cases} m\lambda & \text{Destructive} \\ (m + \frac{1}{2})\lambda & \text{Constructive} \end{cases}$$

CAMPI CLASSICI

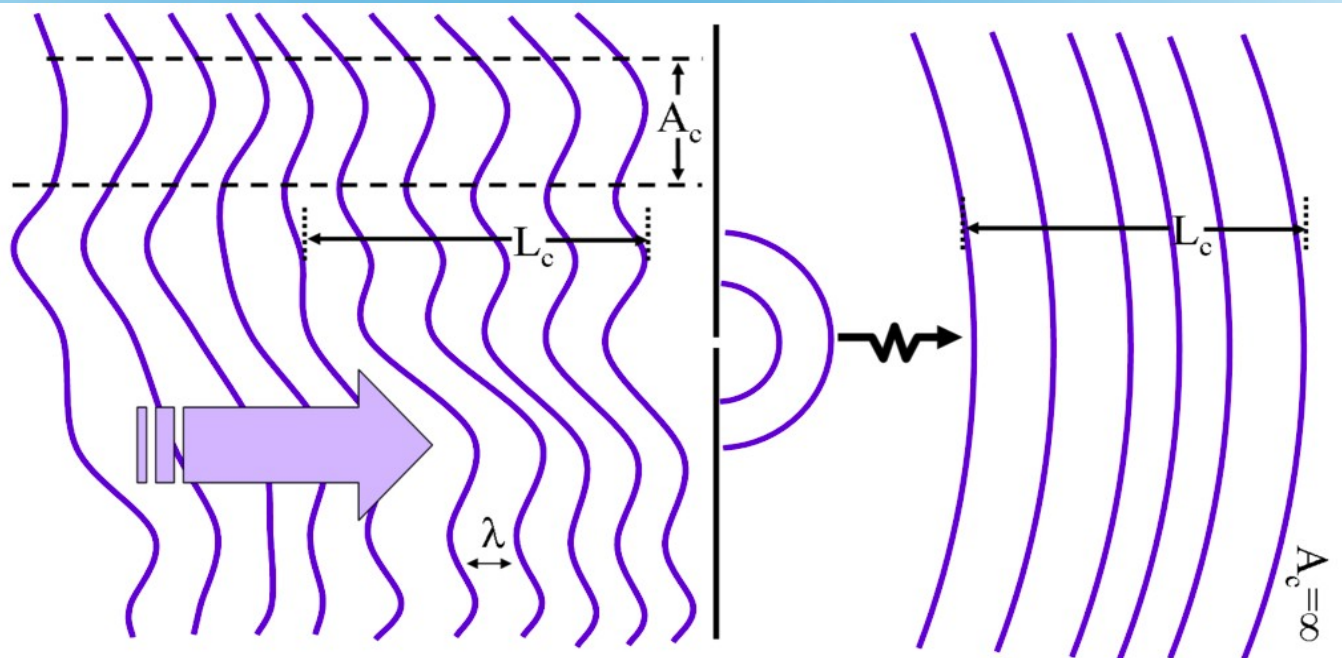
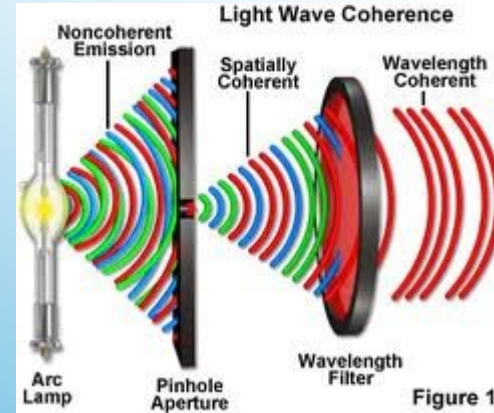
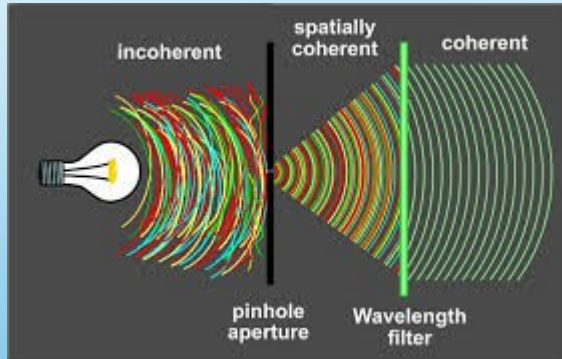
INTERFEROMETRO DI YOUNG



Attenti al linguaggio!

CAMPI CLASSICI

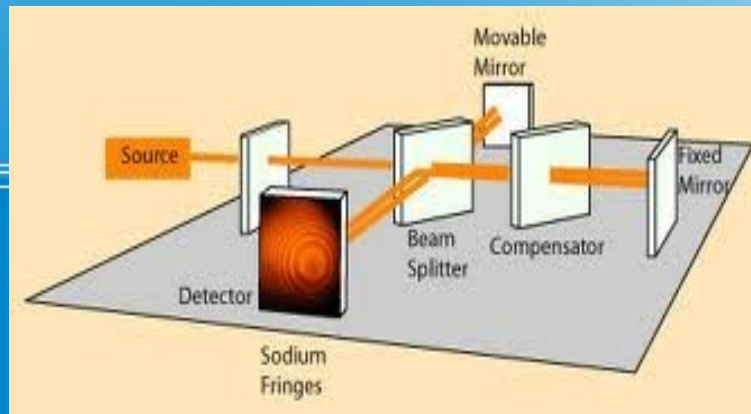
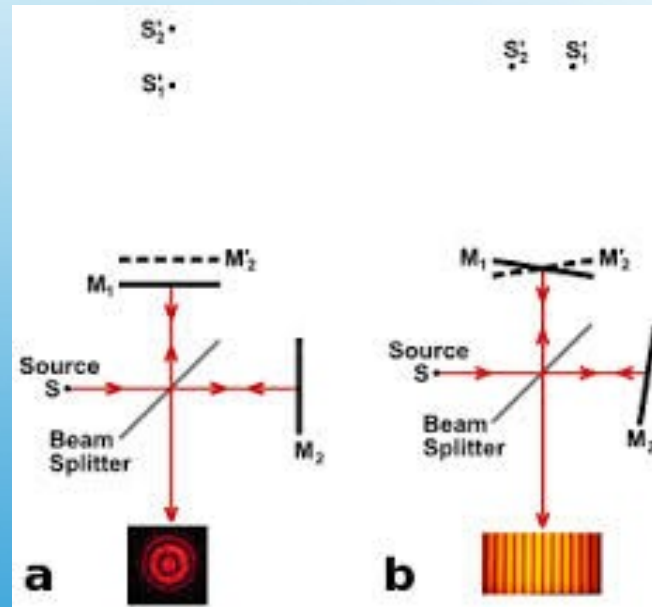
COERENZA



Sorgenti
coerenti
vs.
sorgenti
incoerenti
??

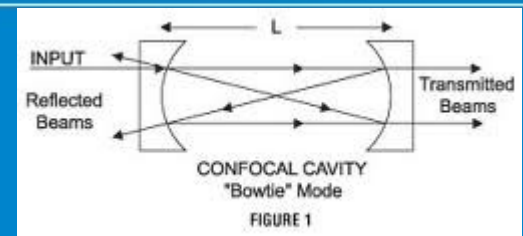
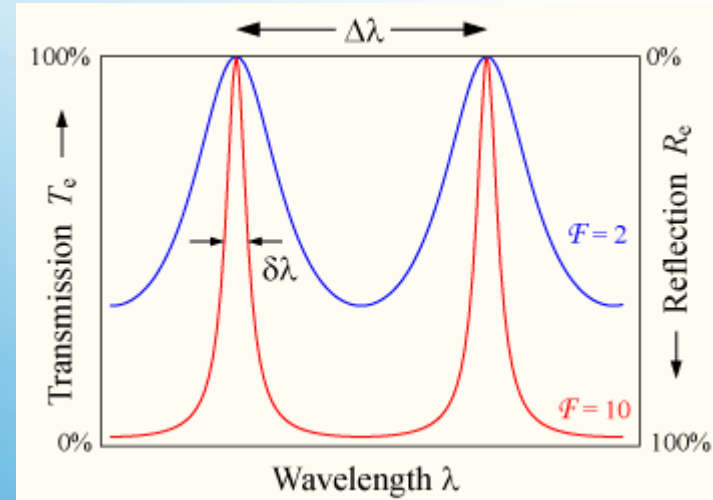
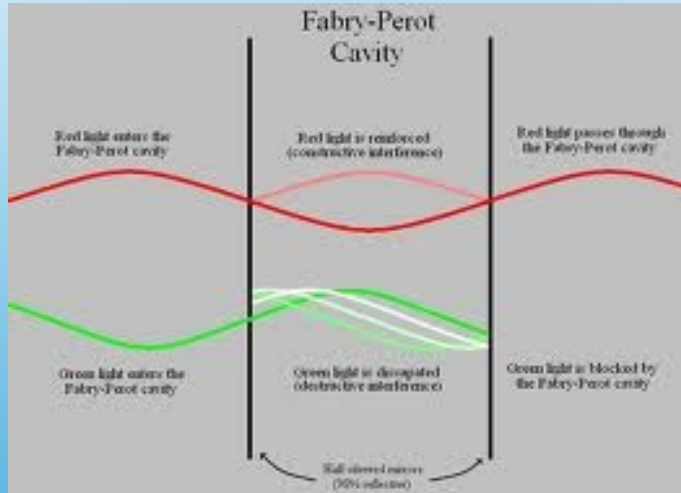
CAMPI CLASSICI

INTERFEROMETRO DI MICHELSON



CAMPI CLASSICI

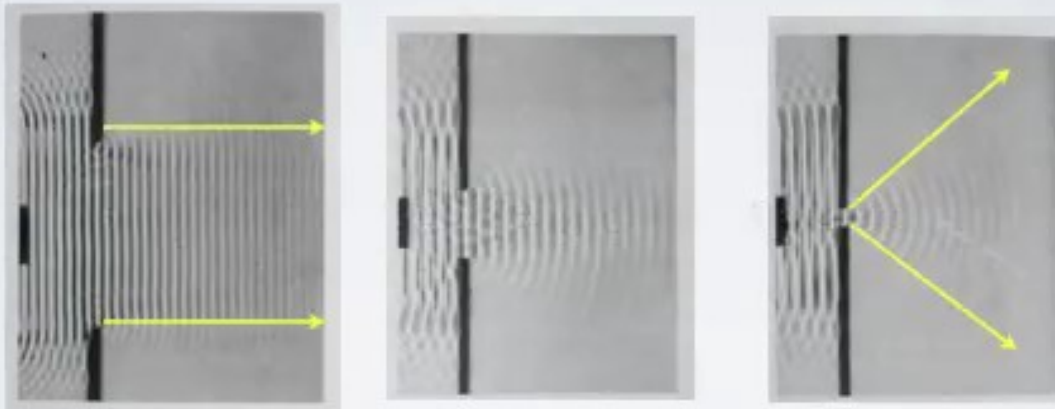
INTERFEROMETRO DI FABRY - PÈROT



CAMPI CLASSICI

DIFFRAZIONE

Il fenomeno della diffrazione risulta ben evidente quando le dimensioni dell'ostacolo sono confrontabili o minori di λ



Quando la luce incontra ostacoli molto maggiori della lunghezza d'onda la diffrazione risulta trascurabile ed è quindi valida l'approssimazione dei raggi e tutte le conclusioni dell'ottica geometrica.

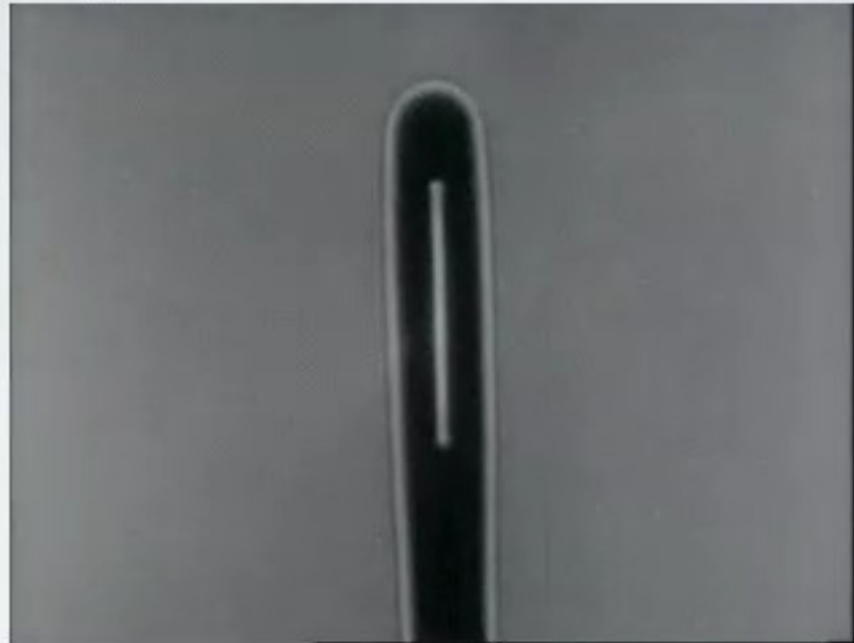
slide 12

CAMPI CLASSICI

DIFFRAZIONE

Quanto può essere nitida un'ombra?

Cambiamo oggetto: vediamo nelle stesse condizioni l'ombra di un ago:

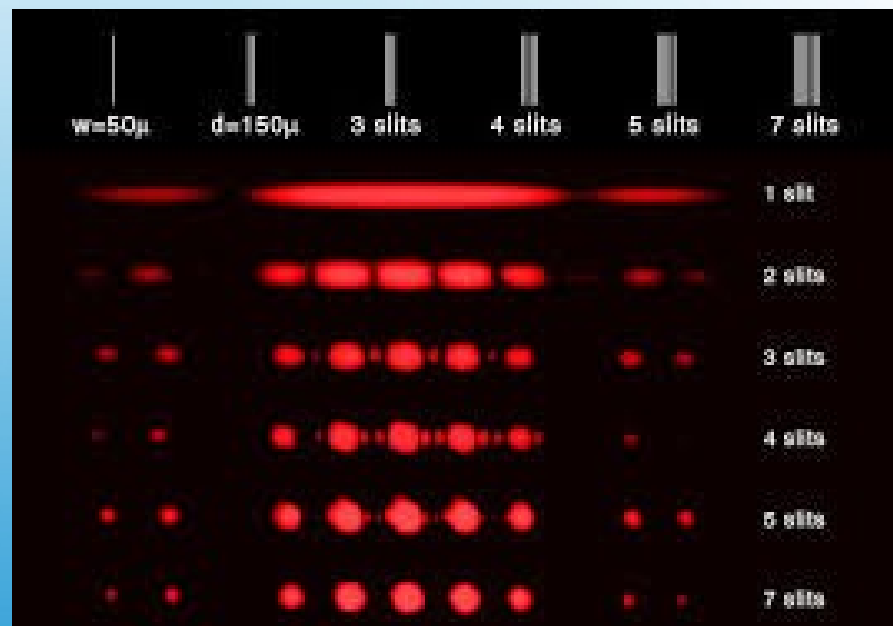


Queste deviazioni dalla legge di propagazione rettilinea prendono il nome di fenomeni di diffrazione

slide 40-2

CAMPI CLASSICI

DIFFRAZIONE



CAMPI CLASSICI

DIFFRAZIONE

- ✓ lampione con lampada al sodio (sorgente quasi monocromatica)
- ✓ grande distanza da sorgente (sorgente puntiforme di onda piana)
- ✓ osservazione della figura a distanza infinita dal reticolo (pattern su piano focale lente)
- ✓ effetto di ingrandimento obiettivo videocamera

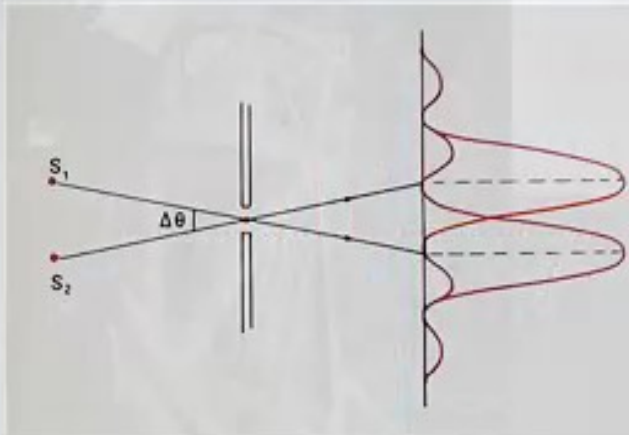
modulazione intensità
dovuta a diffrazione
singola apertura

slide 60-5

CAMPI CLASSICI

DIFFRAZIONE

Un'onda piana è prodotta da una sorgente puntiforme a distanza infinita.
L'immagine di questa sorgente all'infinito si trova sul piano focale
⇒ l'immagine di un punto non è un punto (disco di Airy)



Potere risolutivo di una lente:
anche se la lente è corretta
da aberrazioni non posso
risolvere (per la stessa
natura della luce) sorgenti
puntiformi all'infinito
separate da angoli inferiori a

$$\Delta\theta = 1.22 \frac{\lambda}{d}$$

Sorgenti
risolte



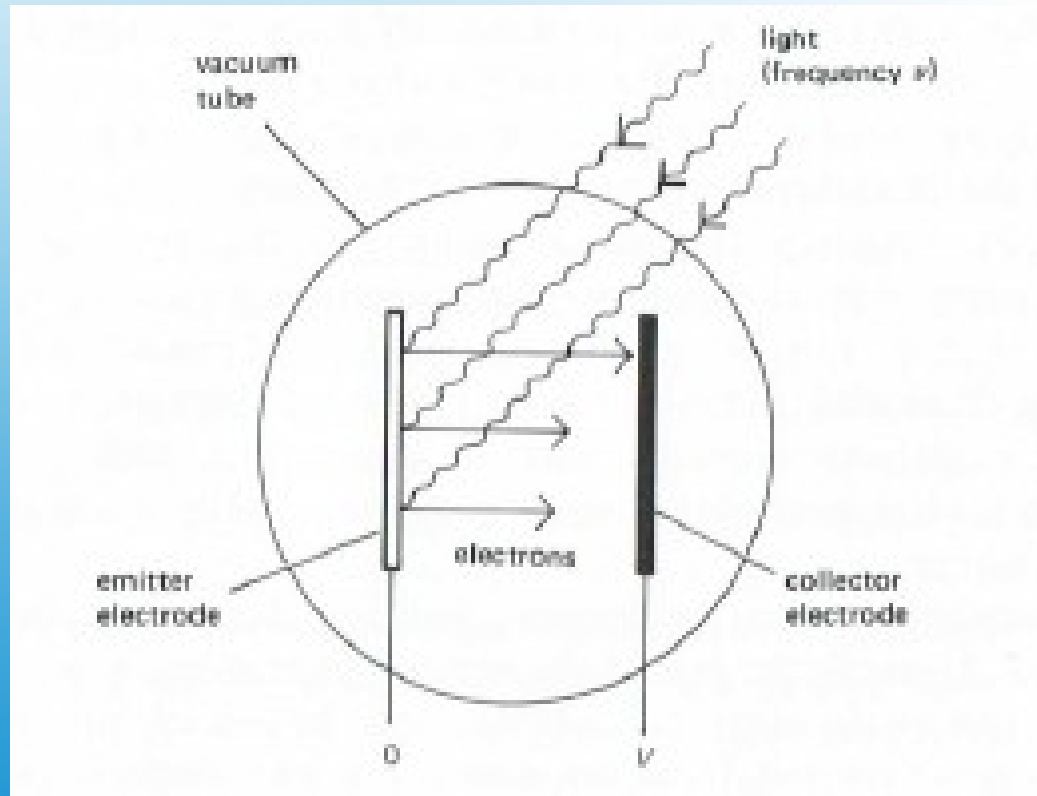
Sorgenti non
irrisolte



slide 63

ONDE CHE FANNO LE PARTICELLE

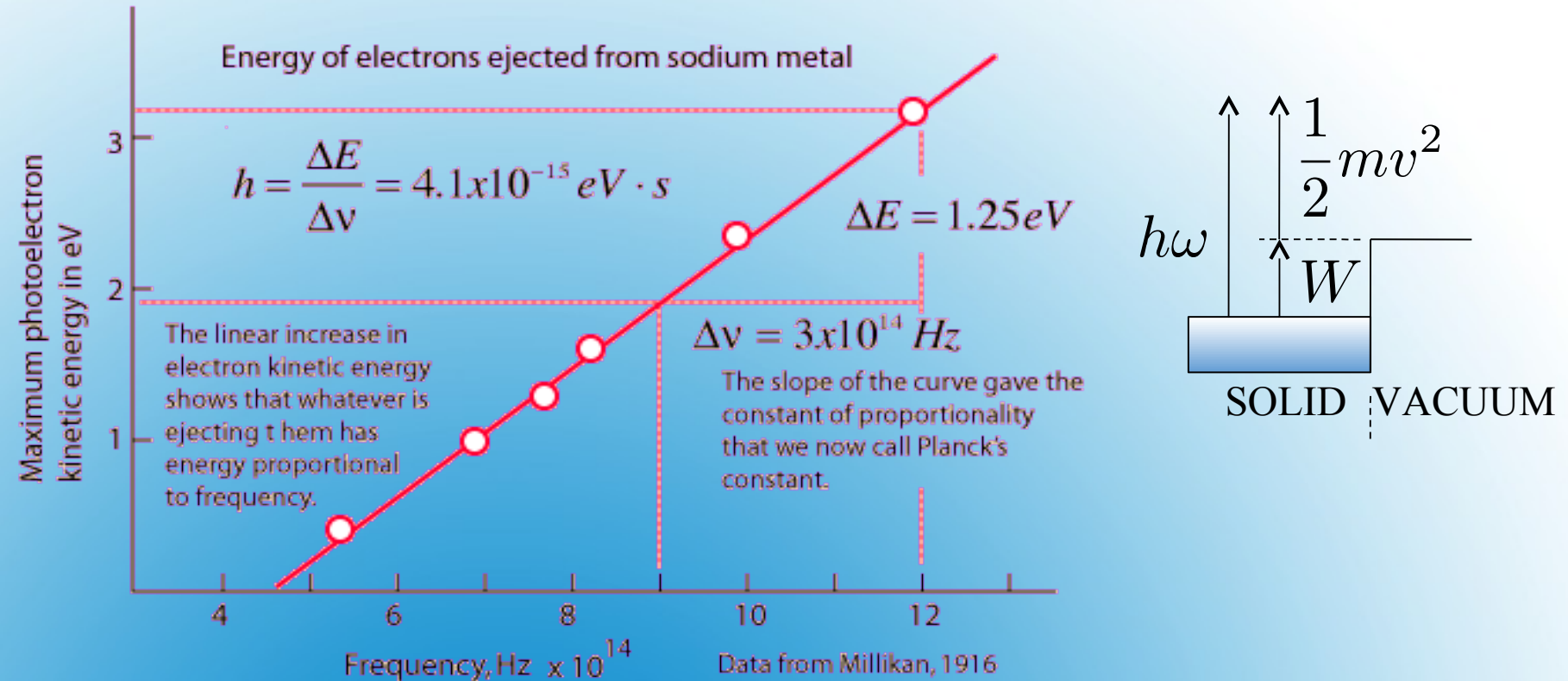
L'EFFETTO FOTOELETTRICO



La radiazione uv riesce ad estrarre elettroni dai metalli.
L'energia degli elettroni non dipendedall'intensita' della luce!!
(Il numero di elettroni estratti invece sì)

ONDE CHE FANNO LE PARTICELLE

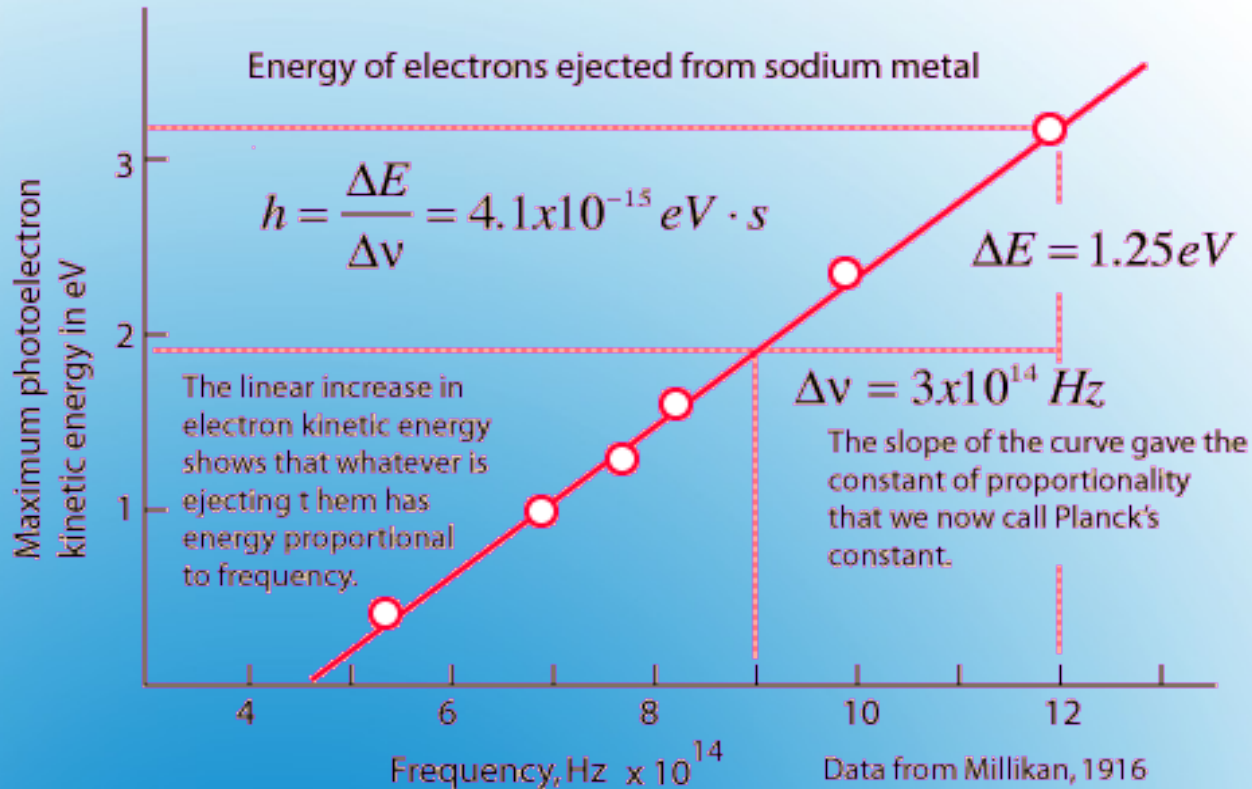
L'EFFETTO FOTOELETTRICO



la massima energia cinetica degli elettroni dipende in modo lineare dal colore (frequenza) della luce, la costante di proporzionalità **non** dipende dal metallo, l'energia “di soglia” sì.

ONDE CHE FANNO LE PARTICELLE

L'EFFETTO FOTOELETTRICO



$$E_{\text{cinetica}}^{(\text{max})} = h \nu_{\text{radiazione}} - W_{\text{estrazione}}$$

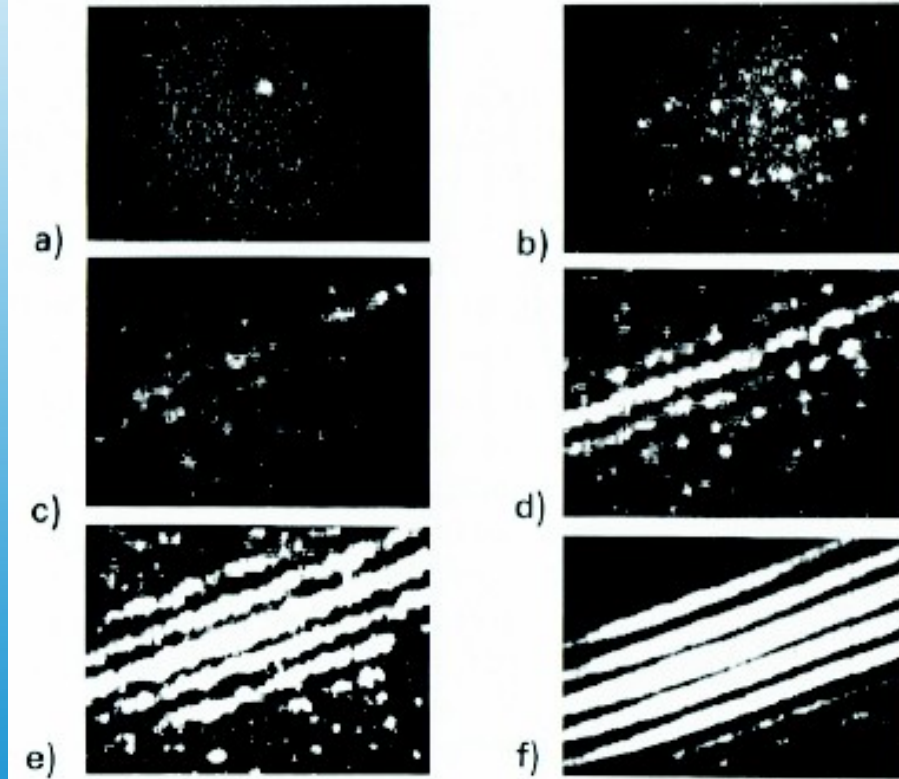
ENERGIA TRASPORTATA DAI FOTONI

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad \longrightarrow \quad \frac{\text{Watts}}{\text{cm}^2}$$

$$\left| \vec{S} \right| = \frac{n\hbar\omega}{\tau A} \quad \longrightarrow \quad \frac{\text{photons}}{\text{sec cm}^2} \frac{\text{J}}{\text{photon}} = \frac{\text{Watts}}{\text{cm}^2}$$

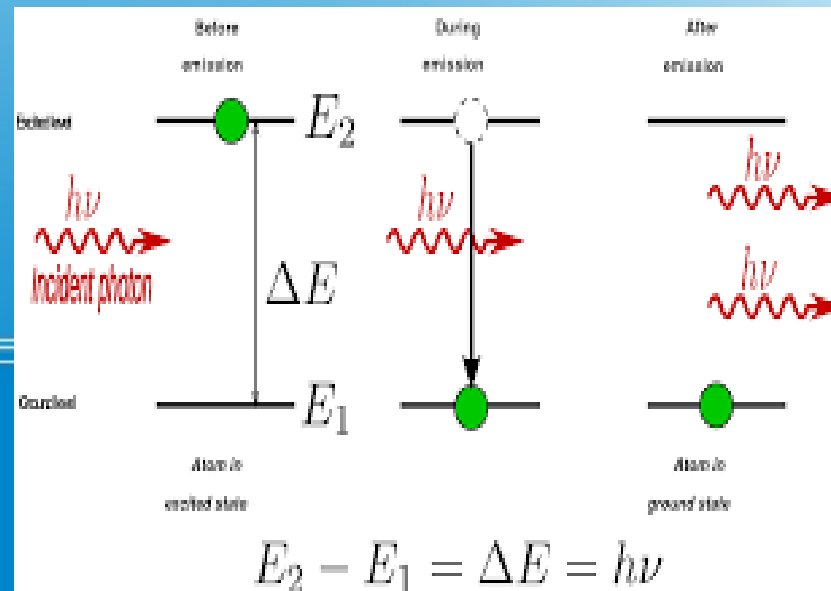
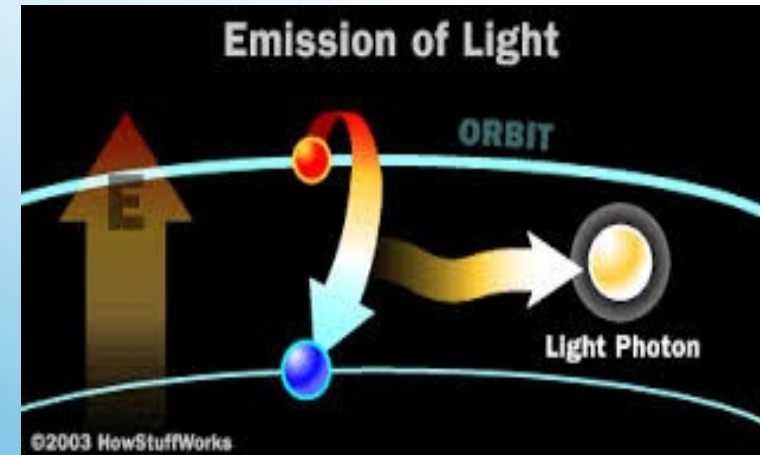
ONDE CHE FANNO LE PARTICELLE

L'ESPERIMENTO DELLA DOPPIA FENDITURA A BASSA INTENSITÀ



$$A = \frac{P \tau R}{c} \simeq \frac{P \tau}{ck} = \frac{N \hbar \omega}{ck} \gg \hbar \rightarrow N \tau \gg 1$$

I PROCESSI DI INTERAZIONE RADIAZIONE MATERIA

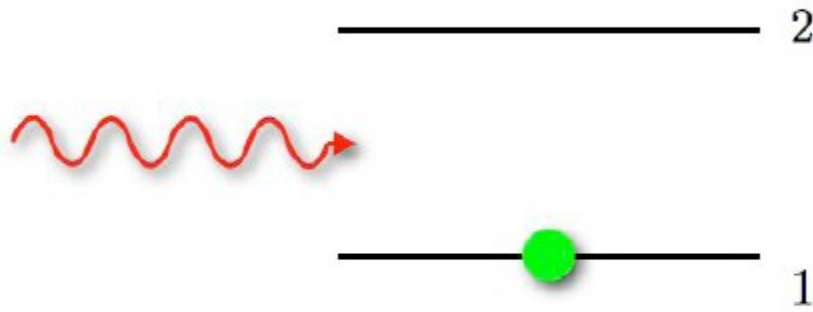


INTERAZIONE ATOMO - LUCE

Quantum mechanics

assorbimento stimolato

$$I = h\nu \frac{n_{\text{fotoni}}}{S\Delta t} \Rightarrow W_{12} \propto I$$



Prob. per unità di tempo assorbimento stimolato:

$$W_{12}$$

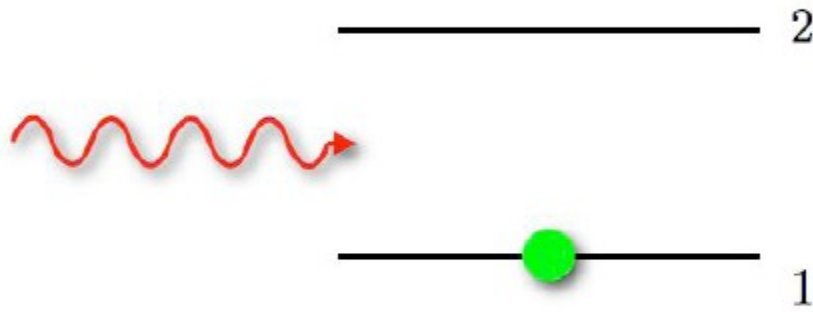
dipende dai livelli 1 e 2 presi in esame.

INTERAZIONE ATOMO - LUCE

Quantum mechanics

assorbimento stimolato

$$I = h\nu \frac{n_{\text{fotoni}}}{S\Delta t} \Rightarrow W_{12} \propto I$$



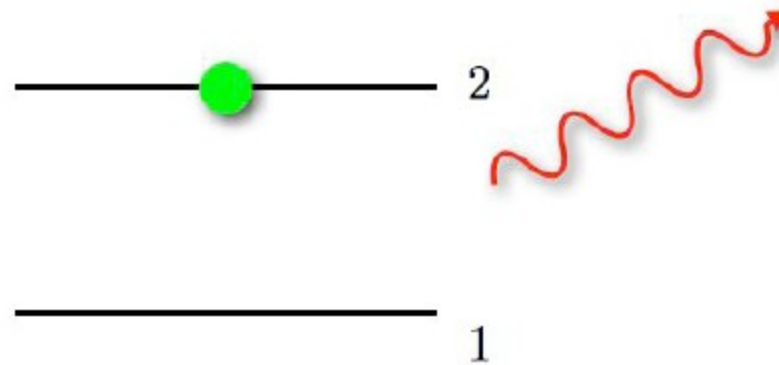
Prob. per unità di tempo assorbimento stimolato:

$$W_{12}$$

dipende dai livelli 1 e 2 presi in esame.

INTERAZIONE ATOMO - LUCE

emissione spontanea



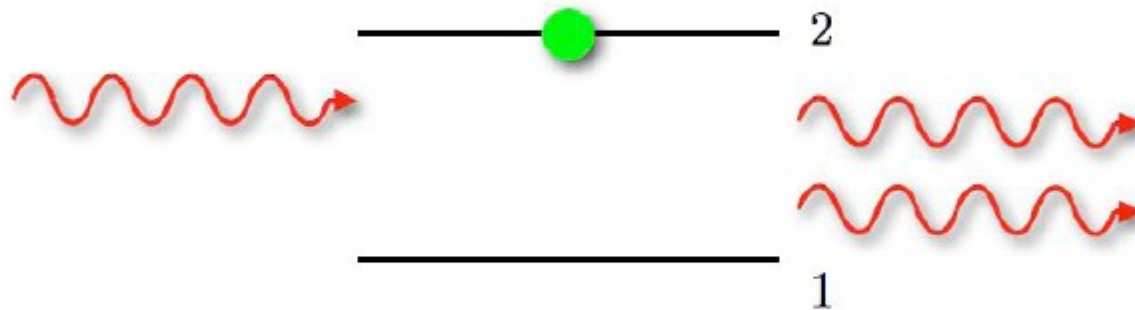
Prob. per unità di tempo emissione spontanea:

$$\gamma = \frac{1}{\tau}$$

dipende dai livelli 1 e 2 presi in esame.

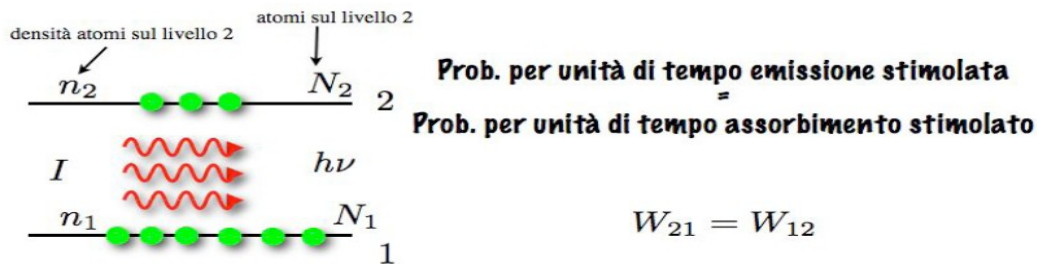
INTERAZIONE ATOMO - LUCE

emissione stimolata



Prob. per unità di tempo emissione stimolata:

$$W_{21}$$



Prob. per unità di tempo emissione stimolata

Prob. per unità di tempo assorbimento stimolato

$$W_{21} = W_{12}$$

numero fotoni assorbiti nell'unità di tempo = $W N_1$

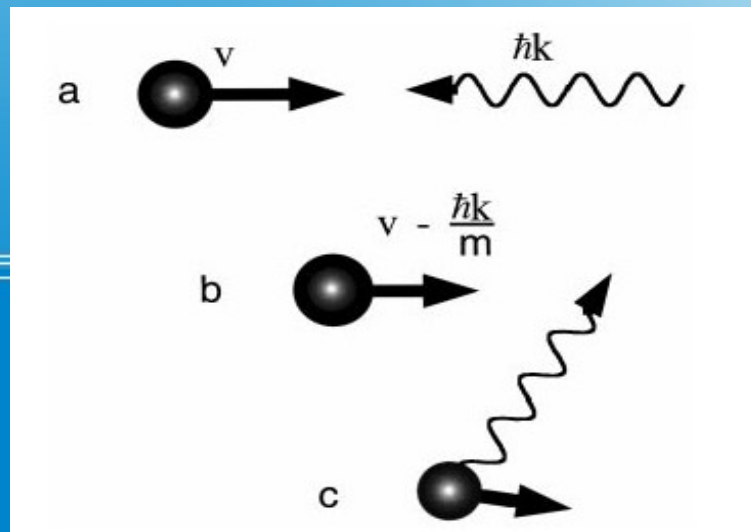
numero fotoni emessi nell'unità di tempo = $W N_2$

I FOTONI TRASPORTANO IMPULSO

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(mv) \cdot v = \frac{1}{2}p \cdot v$$

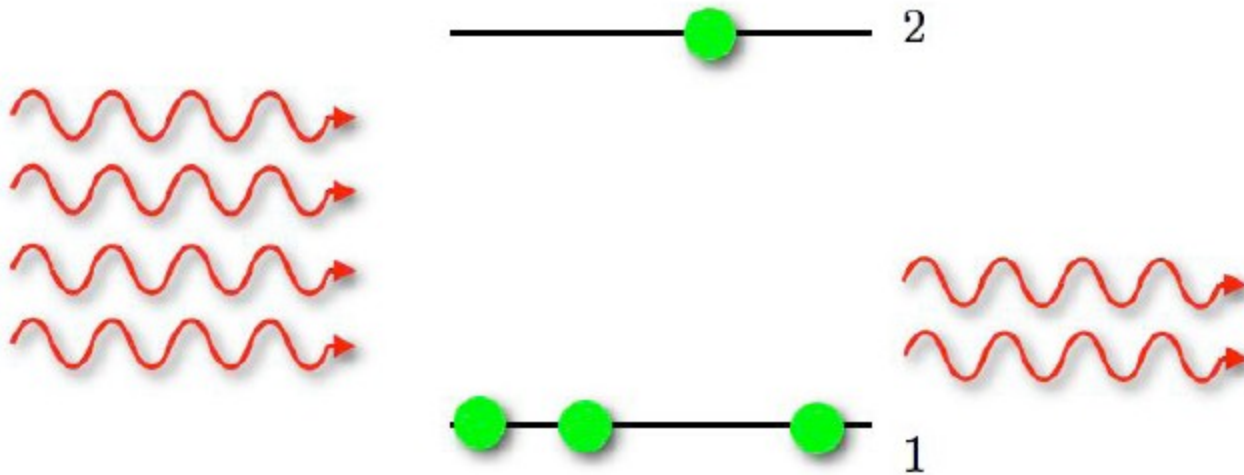
I fotoni hanno energia e velocità finita, quindi deve esistere un impulso associato ad essi!

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$$



INTERAZIONE ATOMO - LUCE

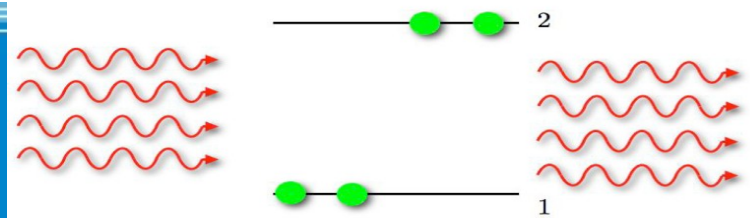
popolazione



All'equilibrio termico alla temperatura $T=300\text{ K}$
il livello 2 risulta praticamente spopolato

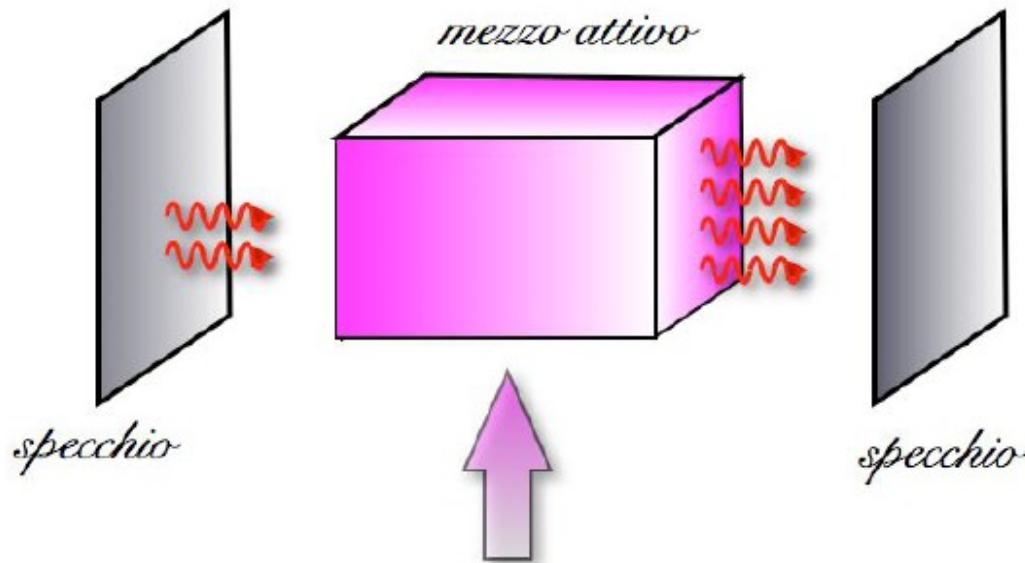
Bisogna infatti confrontare:

$$K_B T \sim 0,025\text{ eV} \quad E_{12} \sim 2\text{ eV} \quad E_{12} \gg K_B T$$



$$E_{12} \ll K_B T$$

IL LASER



il meccanismo dell'emissione stimolata

e

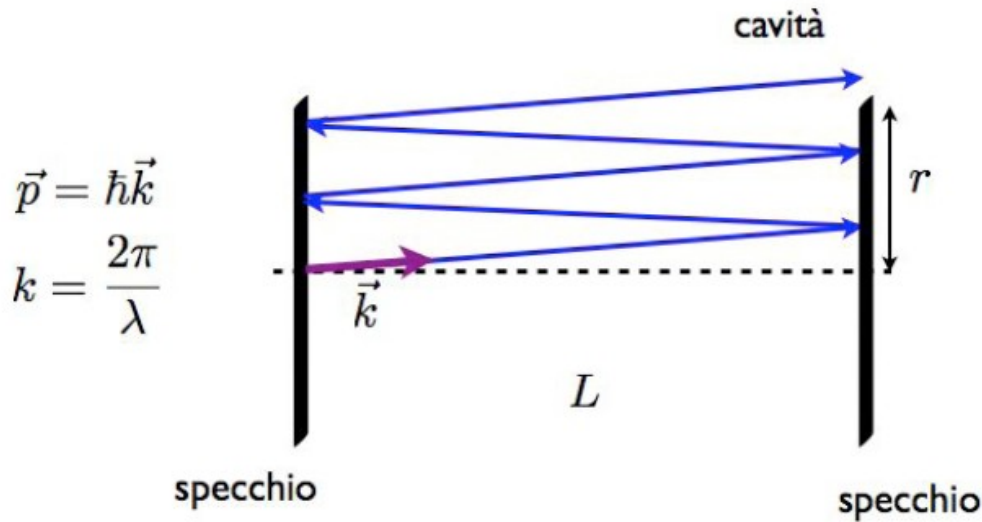
*la presenza della cavità
sono responsabili delle peculiari
proprietà del fascio laser*

proprietà del fascio laser

- direzionalità
- monocromaticità
- intensità
- coerenza spaziale e temporale

IL LASER

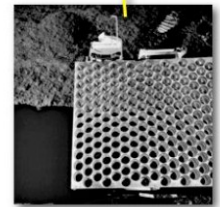
direzionalità del fascio laser



$$\alpha \sim 5 \cdot 10^{-6}$$

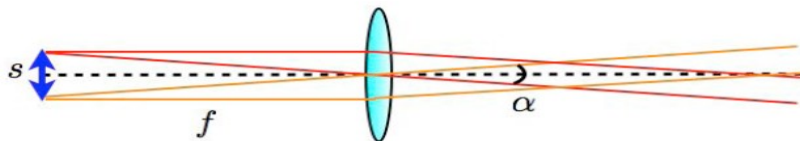
$$L \sim 3,8 \cdot 10^8 \text{ m}$$

$$r \sim 2 \text{ km}$$



il fotone deve incontrare gli specchi: localizzazione della posizione lungo la direzione y quindi indeterminazione sulla componente y della quantità di moto

Come si realizza un fascio collimato con una sorgente "ordinaria"?
Ad esempio, si pone la sorgente nel fuoco di una lente convergente:



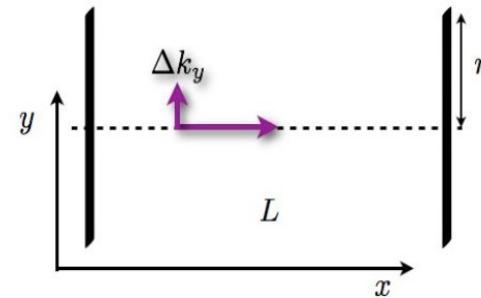
divergenza del fascio:

$$\alpha \sim \frac{s}{f}$$

$$\alpha \sim 5 \cdot 10^{-6}$$

$$f \sim 10^{-1} \text{ m} \Rightarrow s \sim 5 \cdot 10^{-7} \text{ m} !$$

$$\Delta p_y \Delta y \sim \hbar$$



$$\Delta k_y \Delta y \sim 1$$

$$\Delta y \sim r$$

$$\Delta k_y \sim \frac{1}{r}$$

divergenza del fascio:

$$\alpha \sim \frac{\Delta k_y}{k} \sim \frac{\lambda}{r}$$

IL LASER

sorgente "ordinaria"

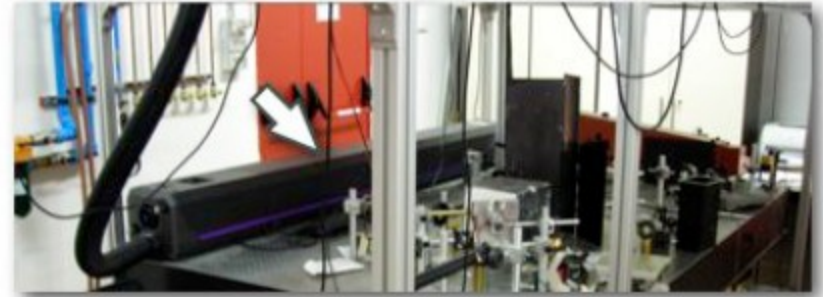


**il processo principale è
l'emissione spontanea!**

**gli atomi emettono
treni d'onda in
maniera
indipendente,
casuale e scorrelata**

**emissione su molte frequenze e fronti
d'onda che si deformano nel tempo**

laser



**il processo principale è
l'emissione stimolata!**

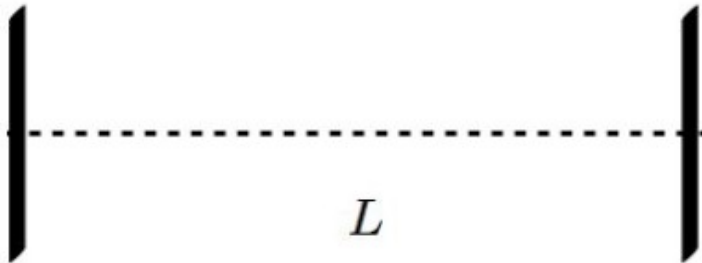
**"gli atomi vanno
tutti d'accordo"**

coerenza spaziale da sorgente estesa

**monocromaticità → coerenza
temporale**

monocromaticità del fascio laser

IL LASER



il fotone è confinato nella cavità, questo comporta che i livelli energetici accessibili sono discreti:

$$E_n = \frac{c\hbar\pi}{L}n \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Pertanto le frequenze permesse al fotone in cavità sono:

$$\nu_n = \frac{c}{2L}n \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

supponiamo che il fotone "viva" in cavità un tempo τ
la relazione di indeterminazione tempo-energia mi dice che:

$$\Delta E \cdot \tau \gtrsim \hbar$$

se gli specchi sono completamente riflettenti allora

$$\tau \rightarrow \infty \quad \Delta E \rightarrow 0 \quad (\Delta\nu \rightarrow 0)$$

i fotoni possono avere solo frequenze precise selezionate dalla cavità

IL LASER

Coerenza temporale quantificata da **lunghezza di coerenza**:

$$l_c = c \times \tau_c \approx \frac{c}{\Delta\nu}$$

Lampadina ad incandescenza (tutto lo spettro):

$$\Delta\nu \sim 10^{14} \text{ Hz} \Rightarrow l_c = \frac{c}{\Delta\nu} \approx \frac{(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{(10^{14} \text{ s}^{-1})} = 3 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Laser:

$$\Delta\nu = 1 \text{ MHz} \div 100\text{kHz} \Rightarrow l_c = 3 \times 10^2 \div 3 \times 10^3 \text{ m}$$