UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
DIPARTIMENTO DI FISICA

La meccanica quantistica, un breve viaggio

Niente è più vero della fantasia

Stefano Olivares
Applied Quantum Mechanics Group
Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Milano, Italy

stefano.olivares@fisica.unimi.it
http://users.unimi.it/aqm

QuTech
Quantum Technology Lab

Sommario

Gli inizi
(Planck & Einstein)

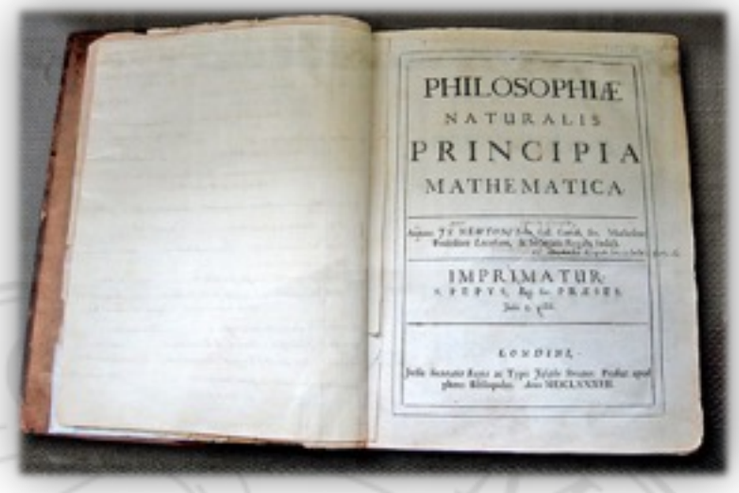
Concetti basilari
(sovrapposizione e "entanglement")

La meccanica quantistica
intorno a noi

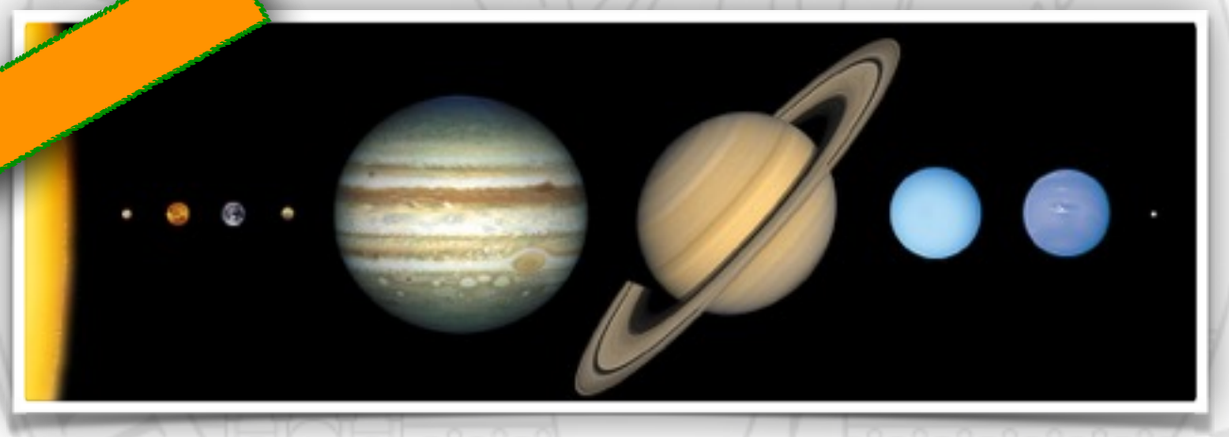
Cos'è la Fisica

La Fisica è la scienza che studia i fenomeni naturali
e le leggi che li governano.

teoria: leggi,
principi, paradigmi,...



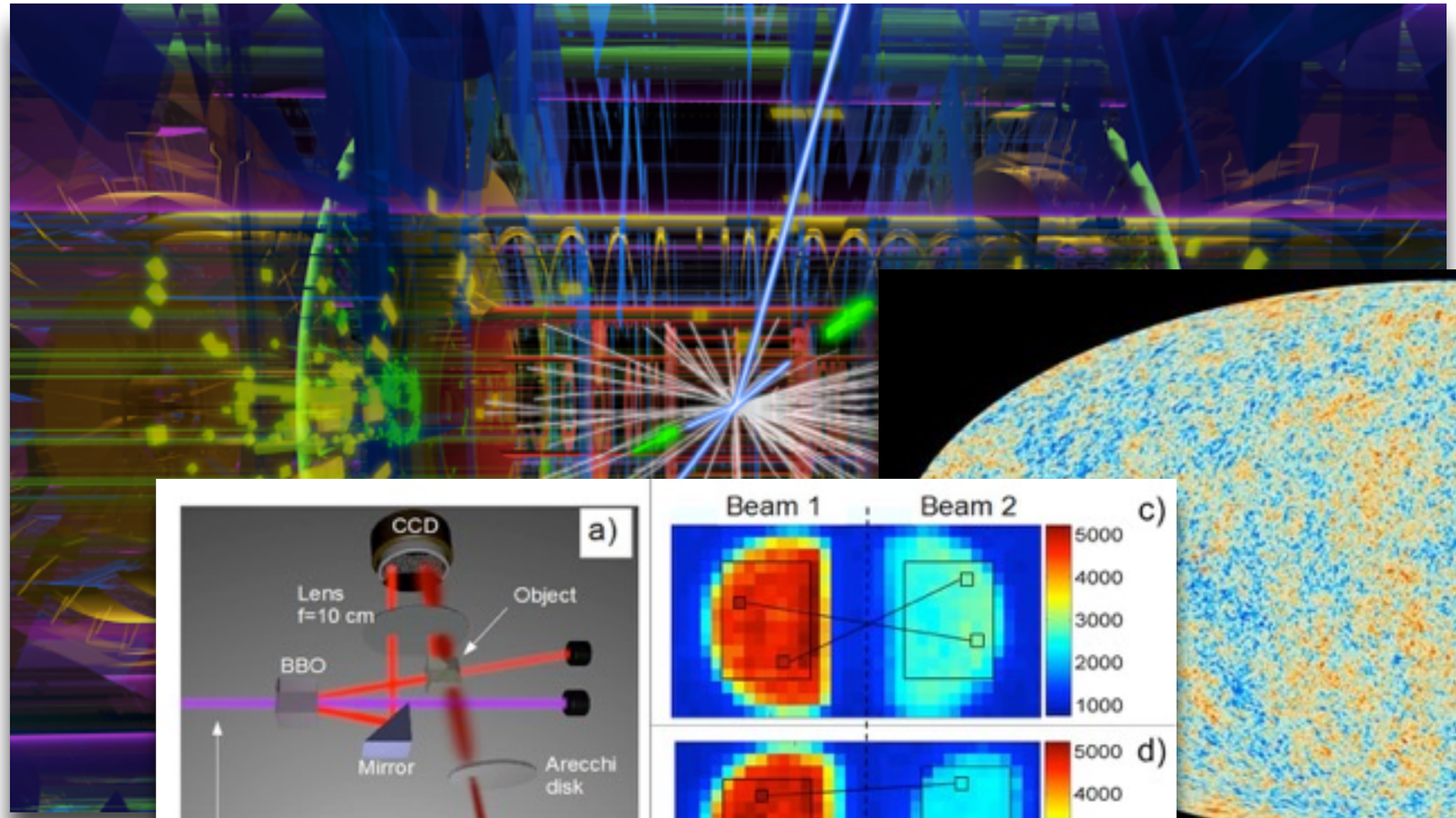
previsioni teoriche
di nuovi fenomeni



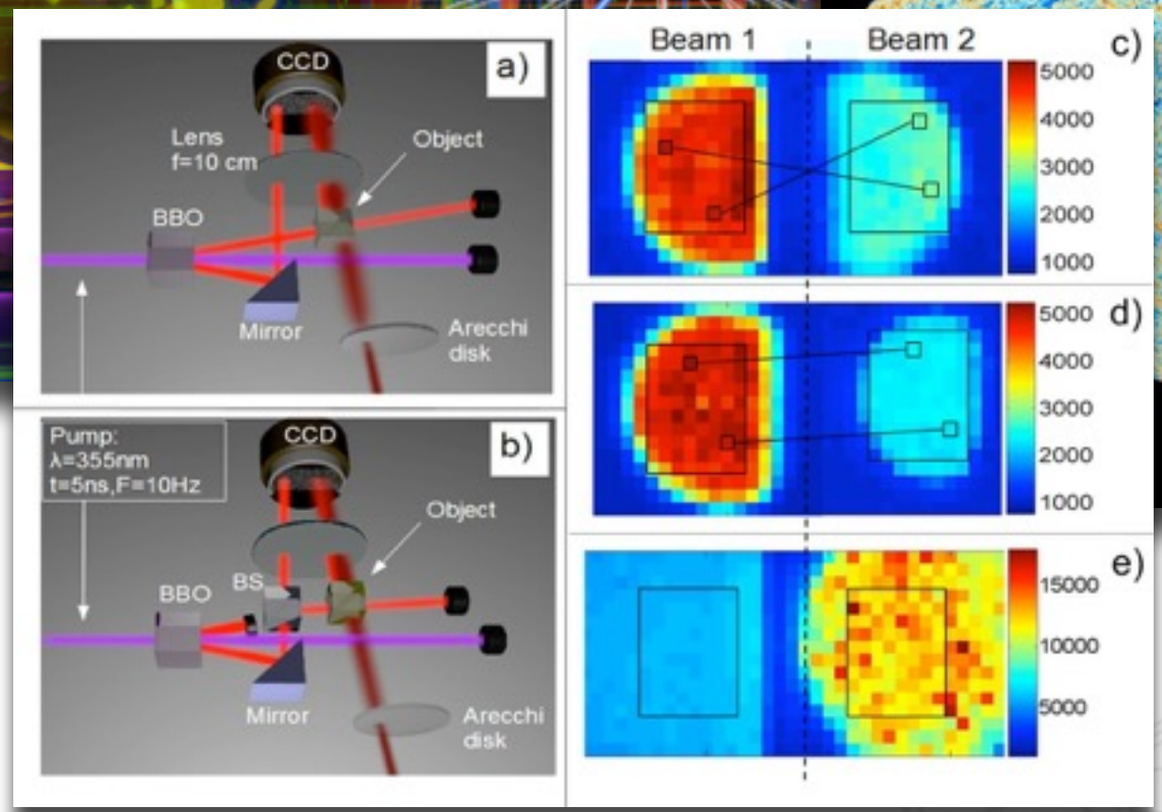
osservazione
della natura e dei
fenomeni naturali

Cos'è la Fisica

Dall'infinitamente piccolo...

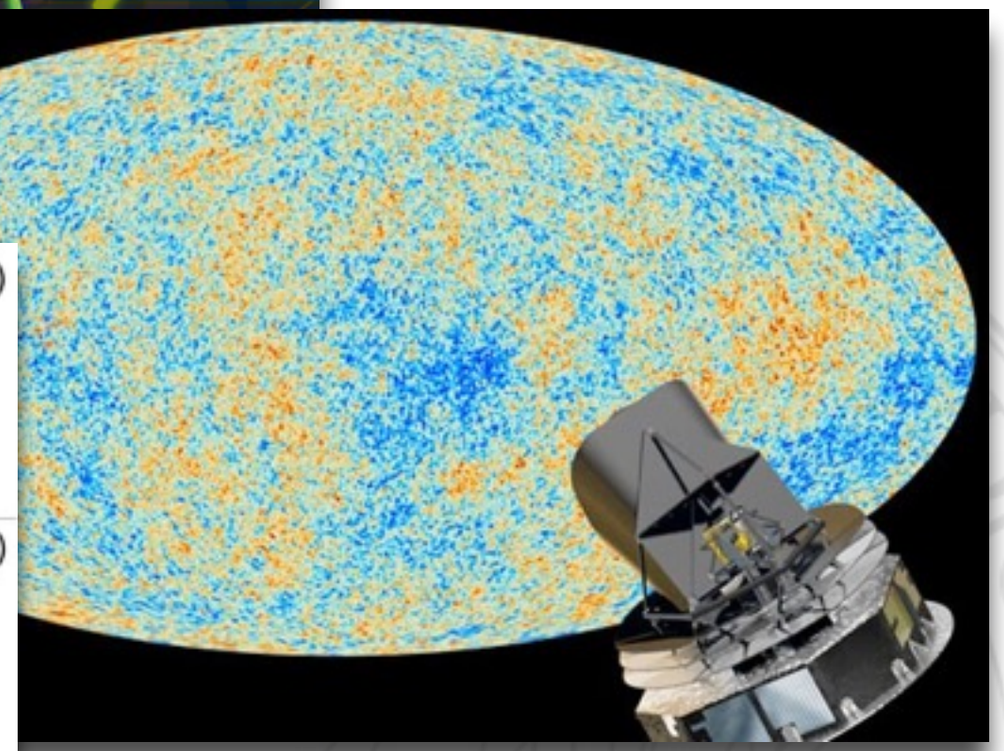


ATLAS @ CERN 2013



Illuminazione quantistica - INRIM e UniMi

... all'infinitamente grande...

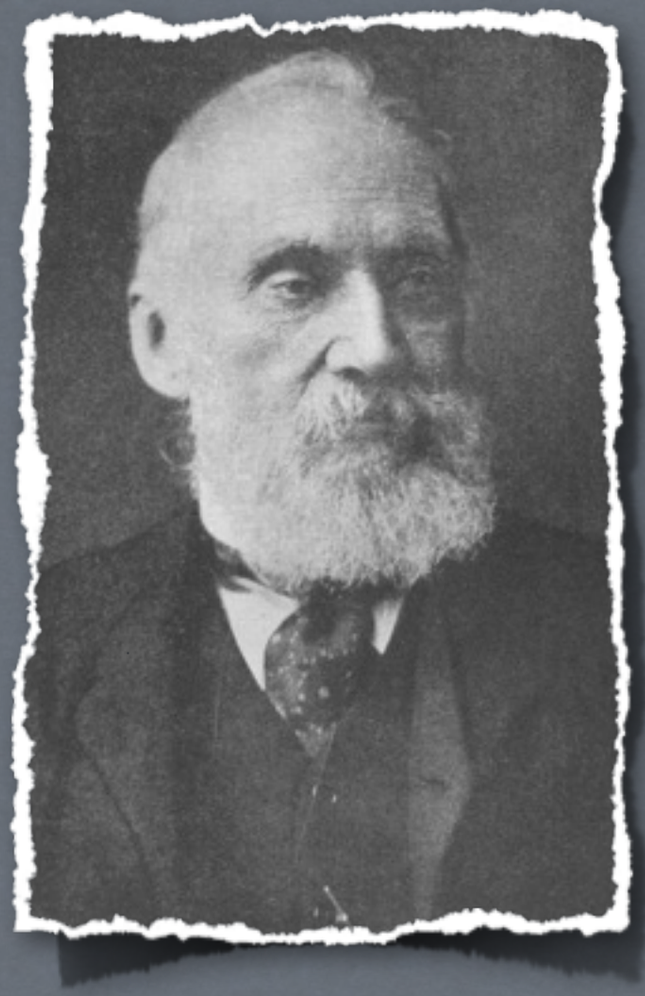


Planck - fluttuazioni CMB

... senza dimenticare la luce!

Un po' di storia per iniziare

La fisica moderna



Nel 1900 Lord Kelvin diede una lezione intitolata "Nubi del diciannovesimo secolo sulla teoria dinamica del calore e della luce".

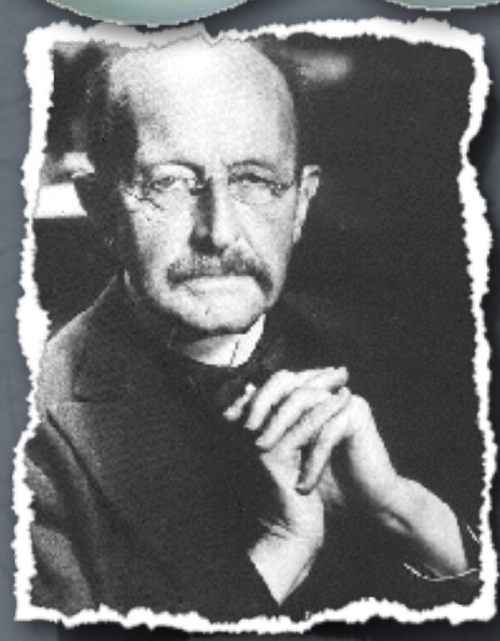
Le due "nubi oscure" a cui alludeva erano le insoddisfacenti spiegazioni che la fisica di quel periodo poteva dare per due fenomeni...

l'esperimento di Michelson-Morley

radiazione di "corpo nero"

Albert Einstein

teoria della relatività speciale



Max Planck

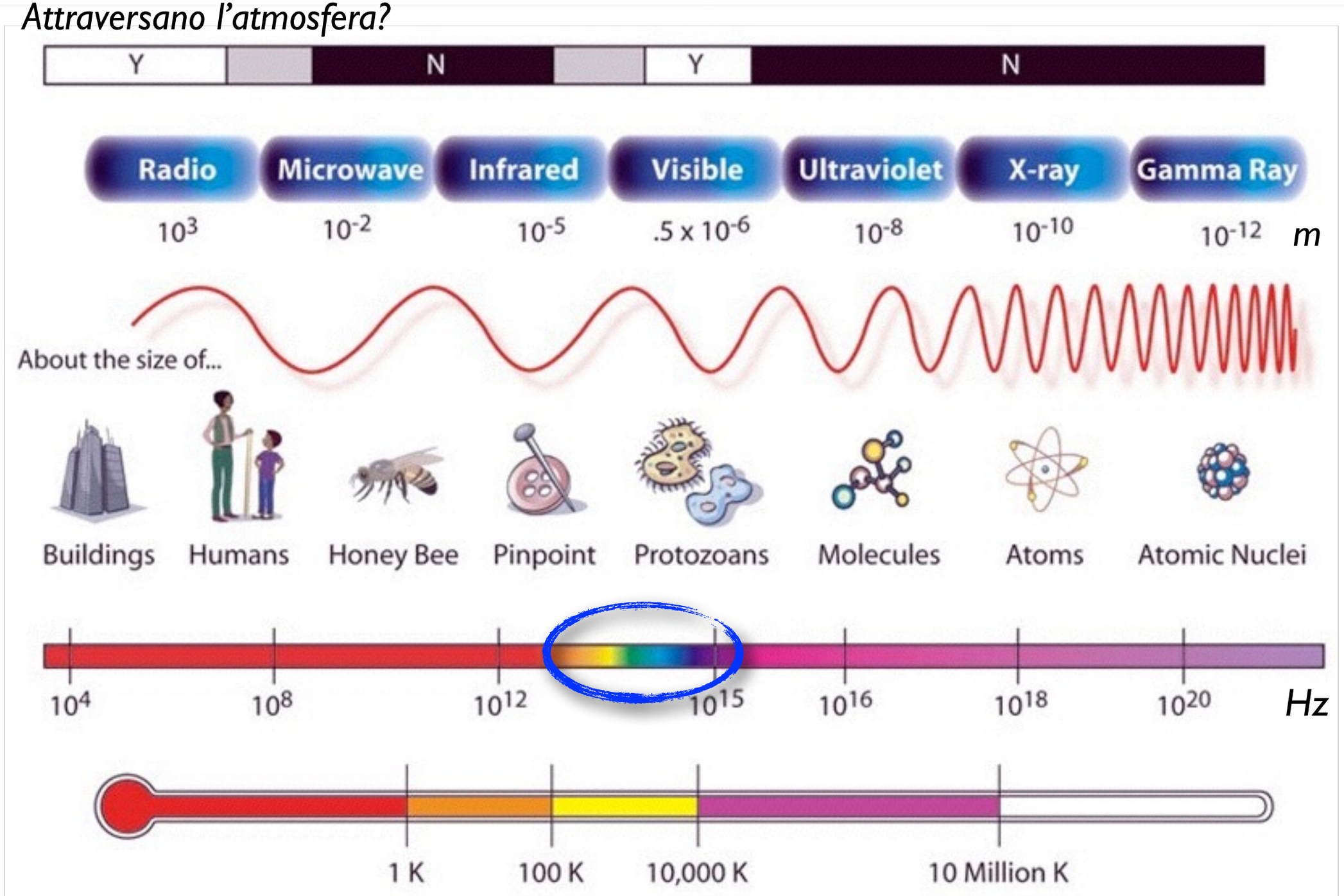
meccanica quantistica

Le origini della fisica quantistica

"Fiat lux" (Gen. 1, 3)

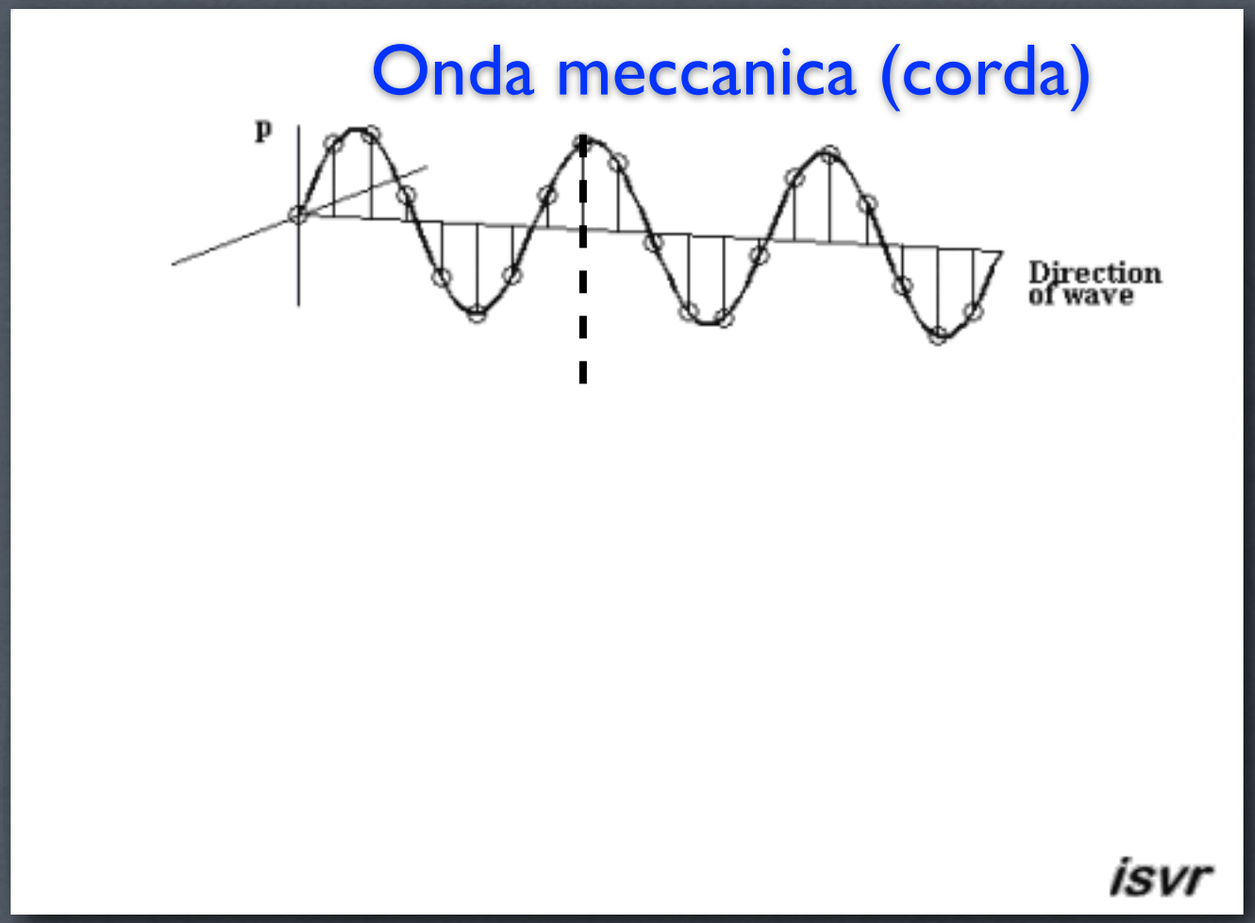
Lo spettro elettromagnetico

Attraversano l'atmosfera?



Il campo elettromagnetico

"Tutti sappiamo cos'è la luce, ma spiegarlo non è semplice."

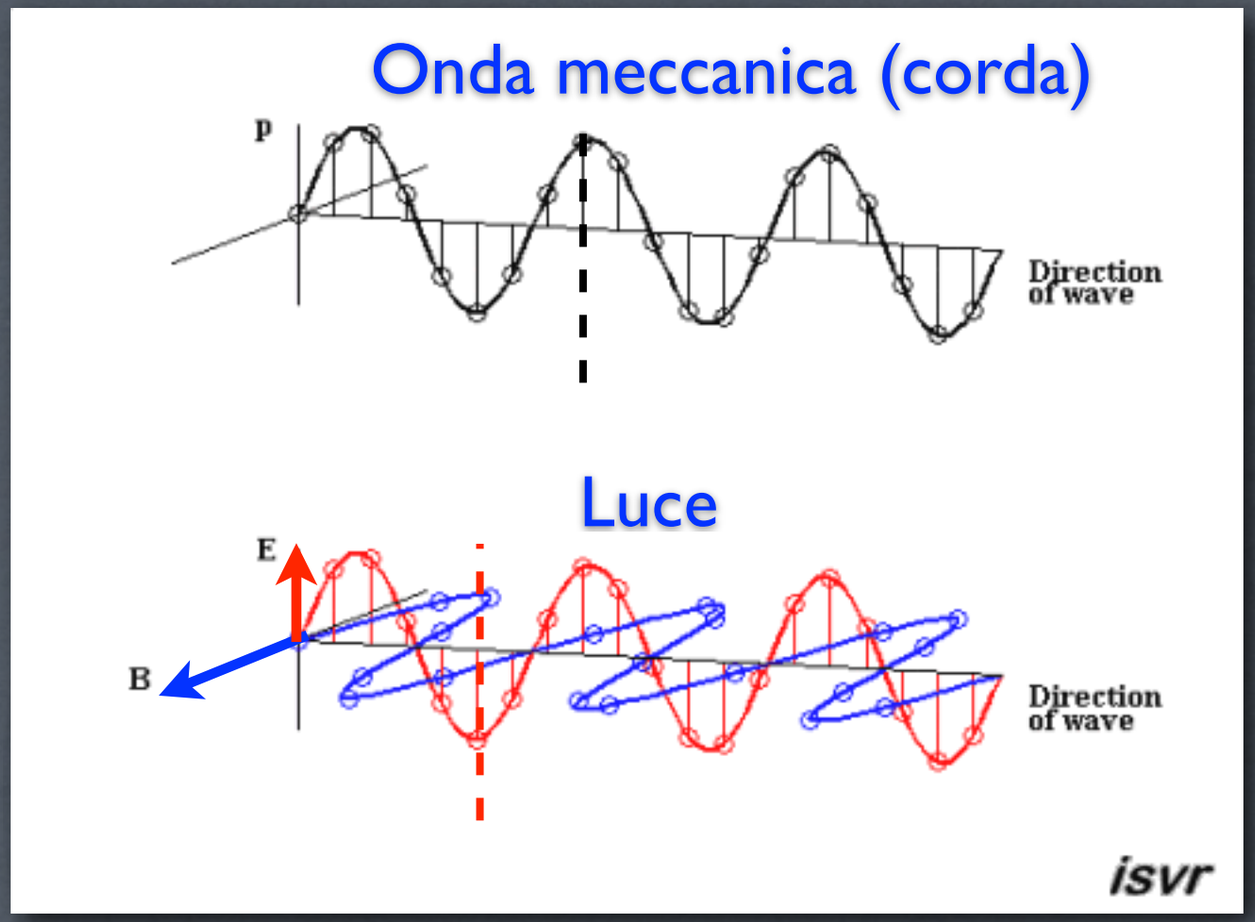


La polarizzazione della luce

"Tutti sappiamo cos'è la luce, ma spiegarlo non è semplice."

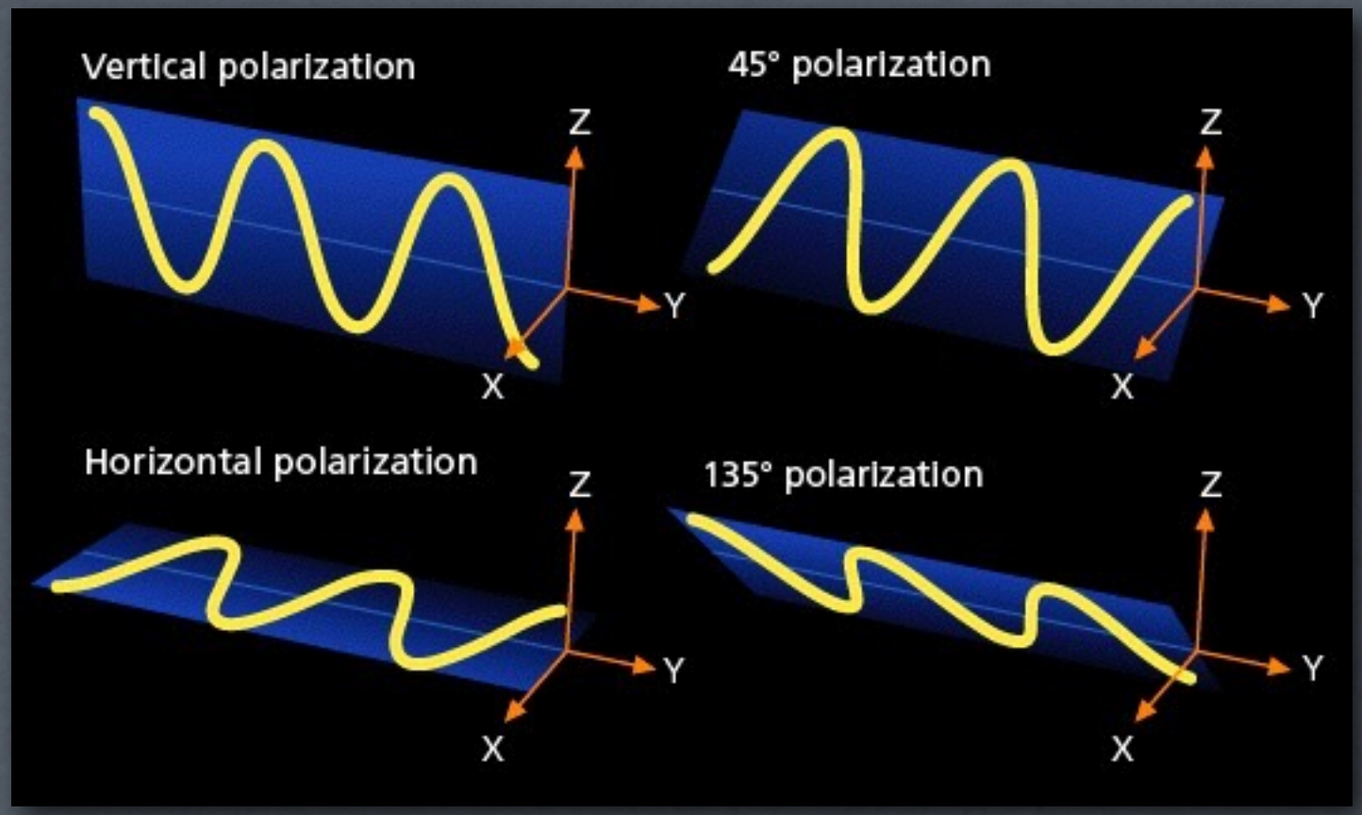
Nel caso della luce quel che oscilla sono il campo elettrico (E) e il campo magnetico (B).

La frequenza "f" con cui oscillano è legata al "colore" della luce.



La polarizzazione

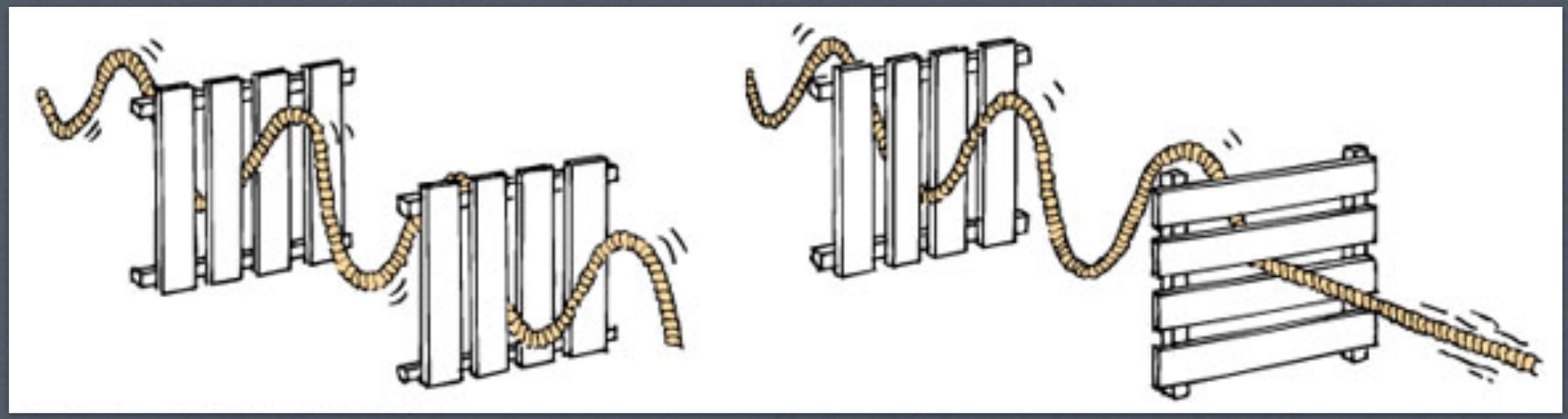
il piano di polarizzazione
o
polarizzazione
(lineare) della luce



polarizzazione (lineare)
orizzontale (*H*), verticale (*V*), +45°, -45°

Filtri polarizzatori

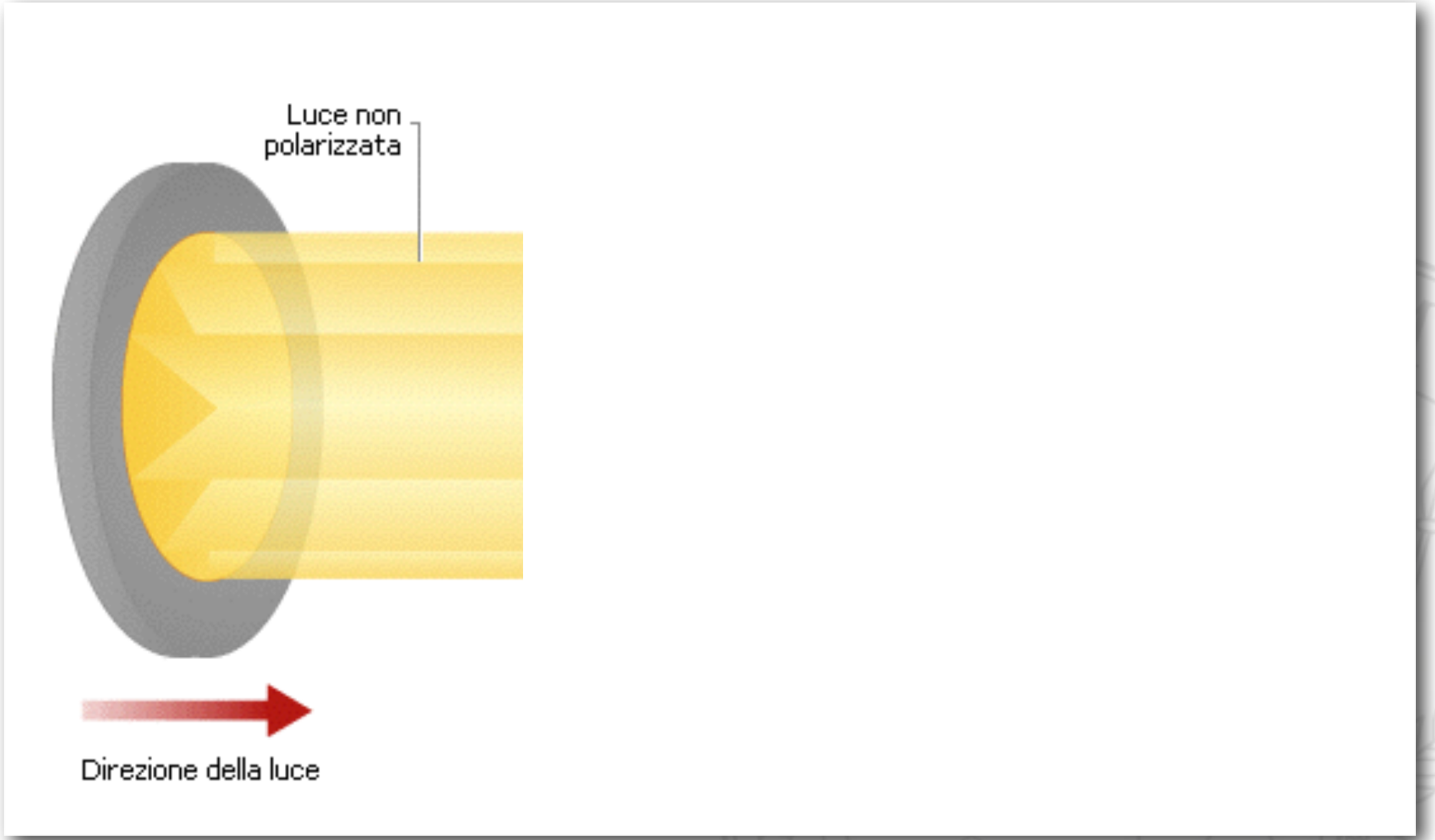
Analogia "meccanica" (*corda oscillante*):



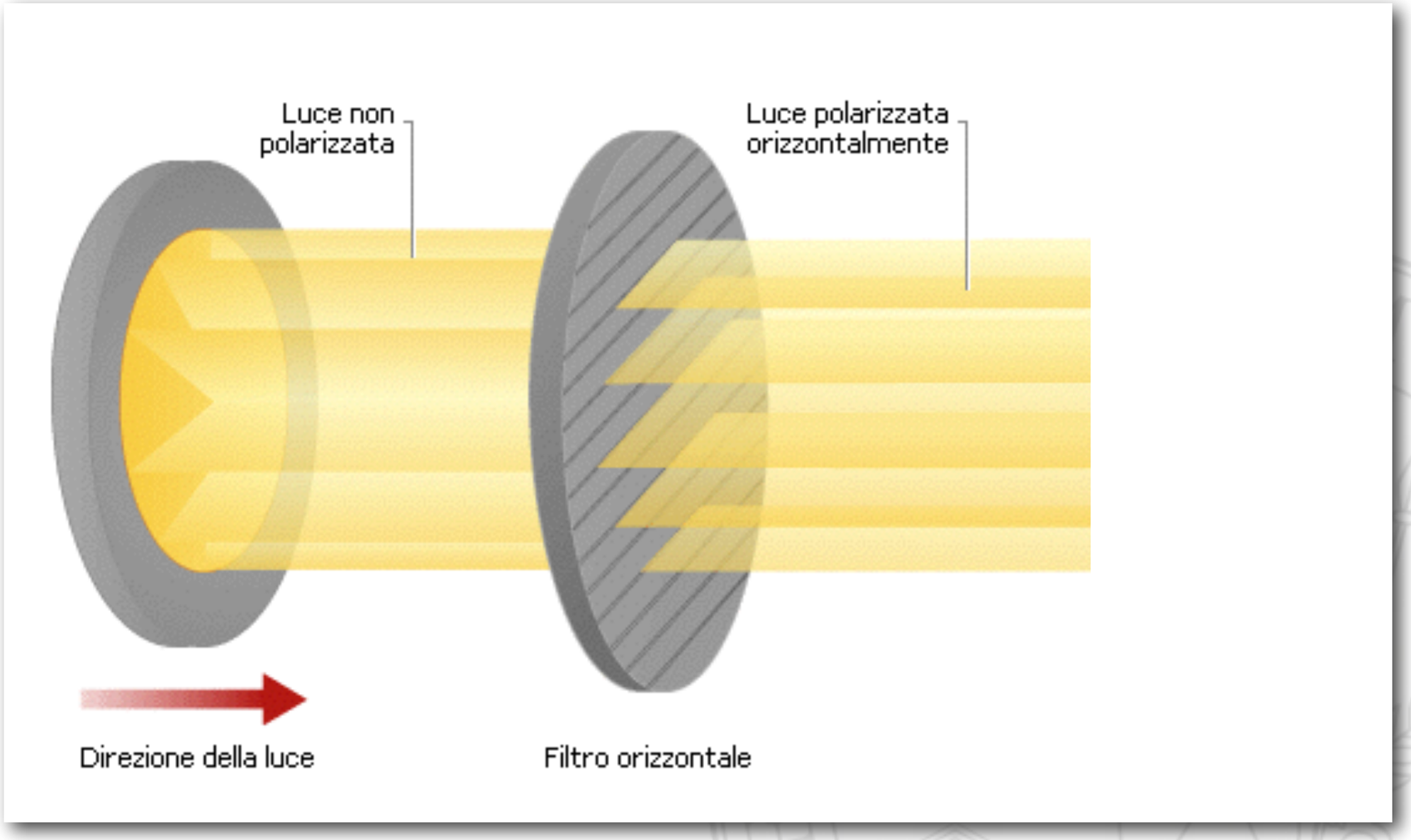
La corda
oscilla liberamente
se le griglie sono
allineate

La corda
non oscilla
se le griglie sono
perpendicolari

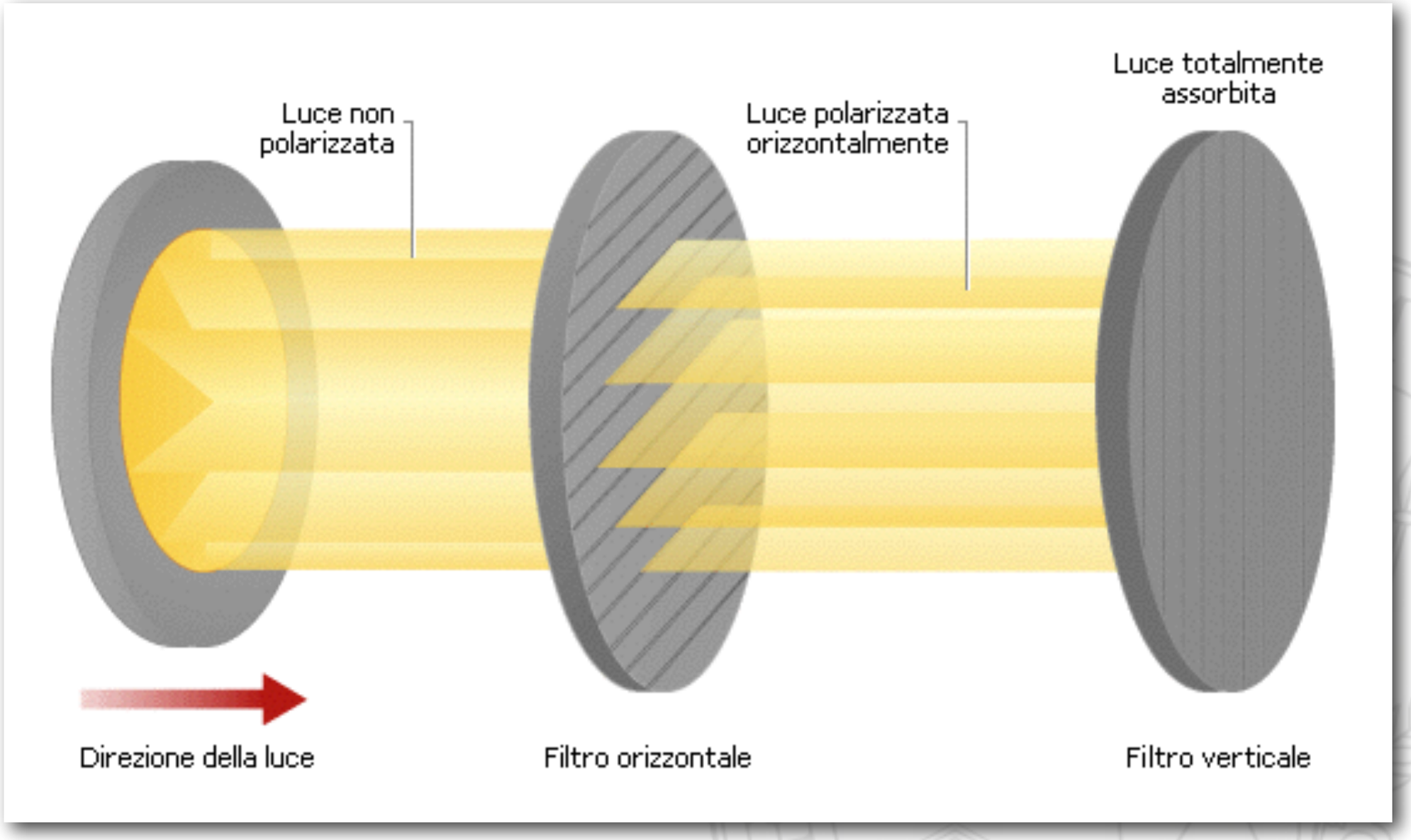
Filtri polarizzatori



Filtri polarizzatori



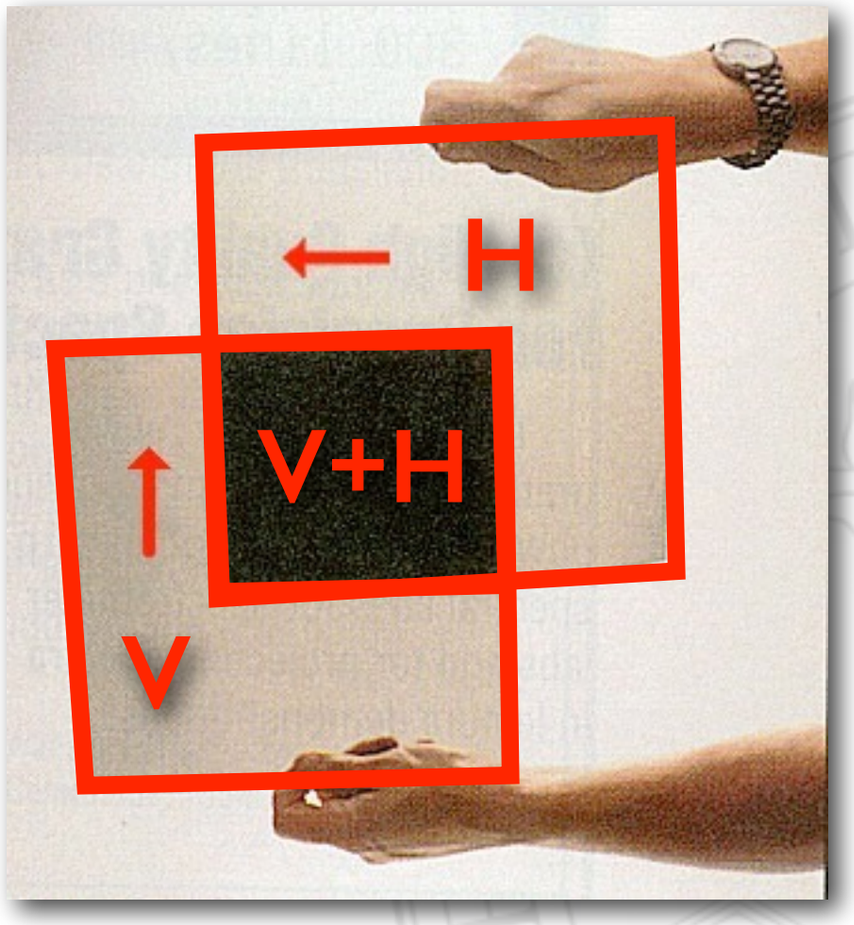
Filtri polarizzatori



Filtri polarizzatori

Filtro orizzontale (H)

Filtro verticale (V)



Filtri verticale + orizzontale (V+H) ⇒ BUIO!

Le origini della fisica quantistica - *il "corpo nero"*

"Fiat lux" (Gen. 1, 3)

Le origini della fisica quantistica - *il "corpo nero"*

"Fiat lux" (Gen. 1, 3)

“Bianco/Nero” e “Luminoso/Scuro”…

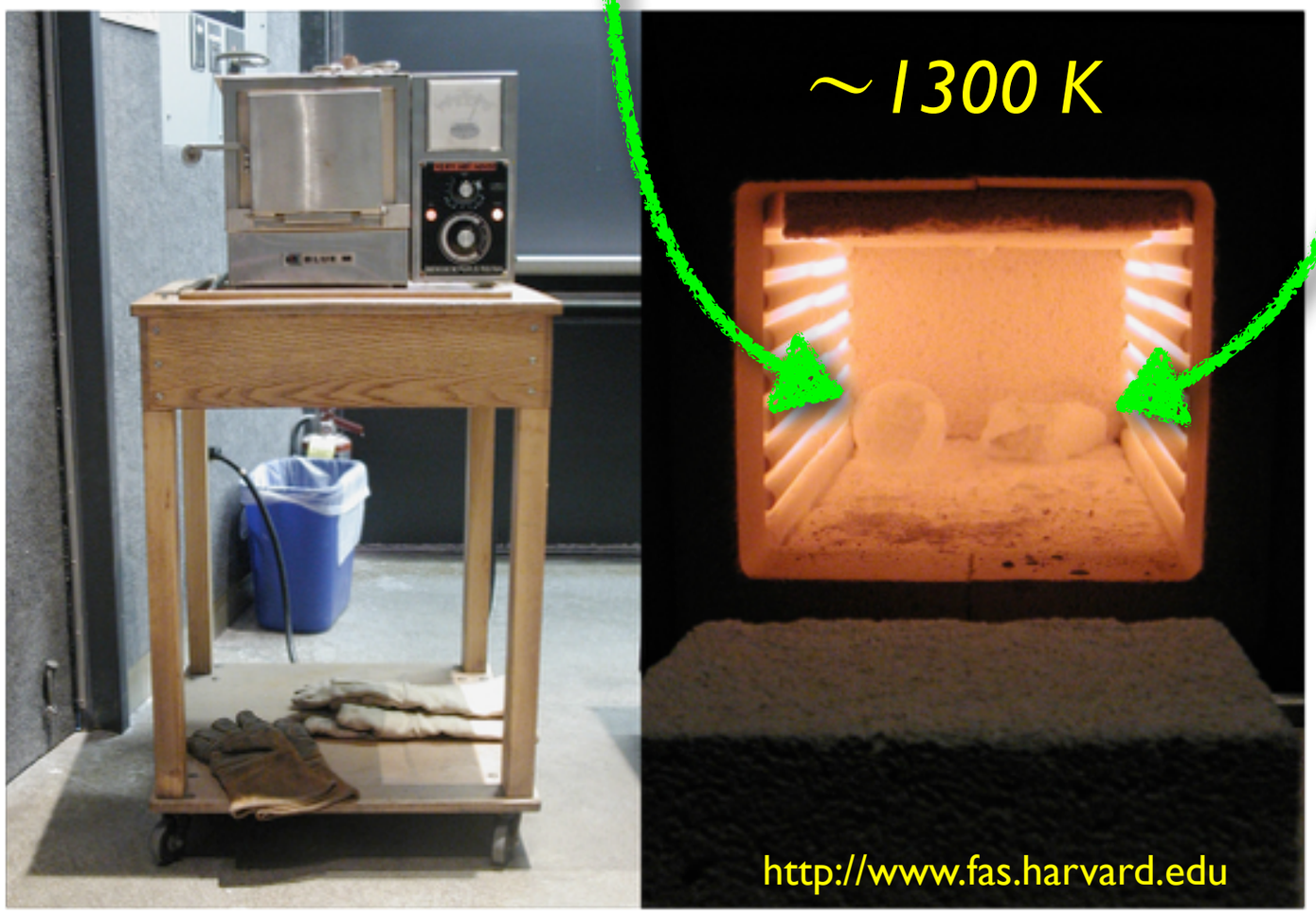
Sfera di metallo

Mattone di terracotta

“Bianco/Nero” e “Luminoso/Scuro”…

Sfera di metallo

Mattone di terracotta

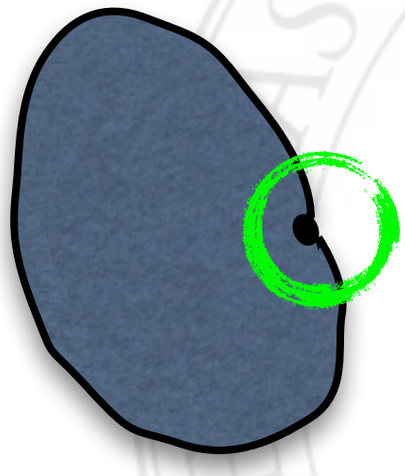


Spettrometro

Il "corpo nero" ("black body")

Un qualsiasi corpo ad una data temperatura T emette e assorbe radiazione...

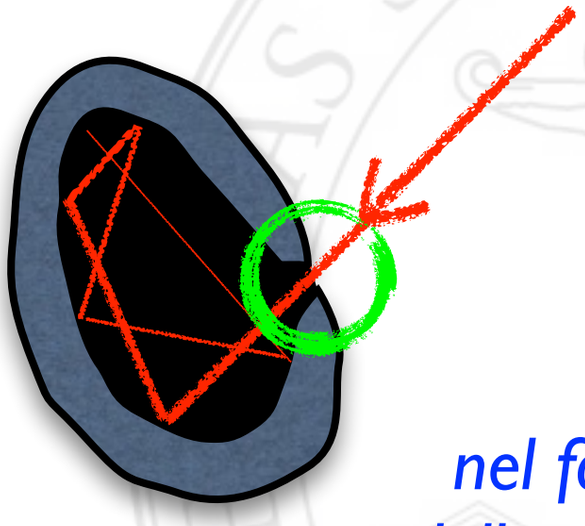
... un corpo che assorbe tutta la radiazione incidente si chiama "corpo nero".



Il "corpo nero" ("black body")

Un qualsiasi corpo ad una data temperatura T emette e assorbe radiazione...

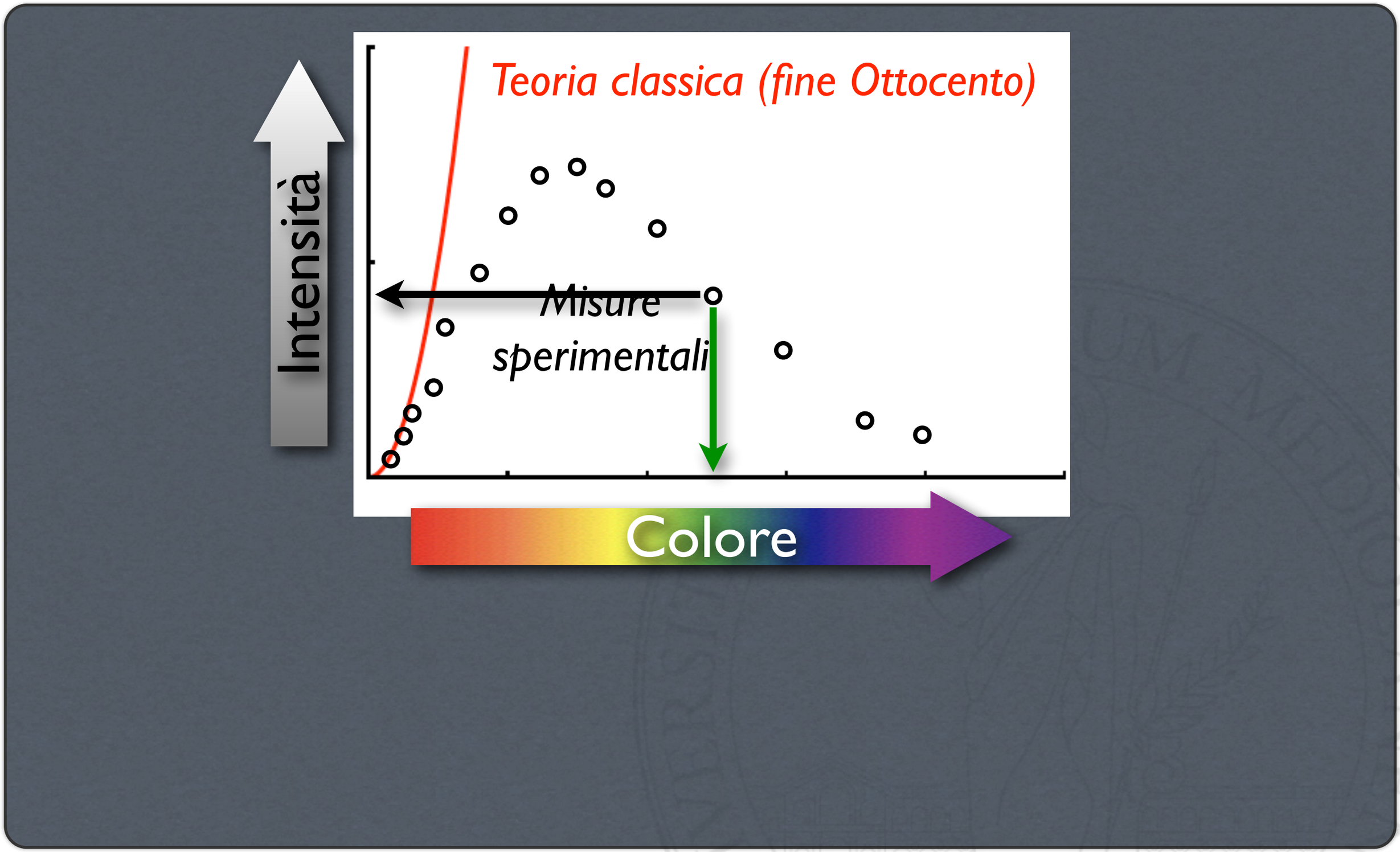
... un corpo che assorbe tutta la radiazione incidente si chiama "corpo nero".



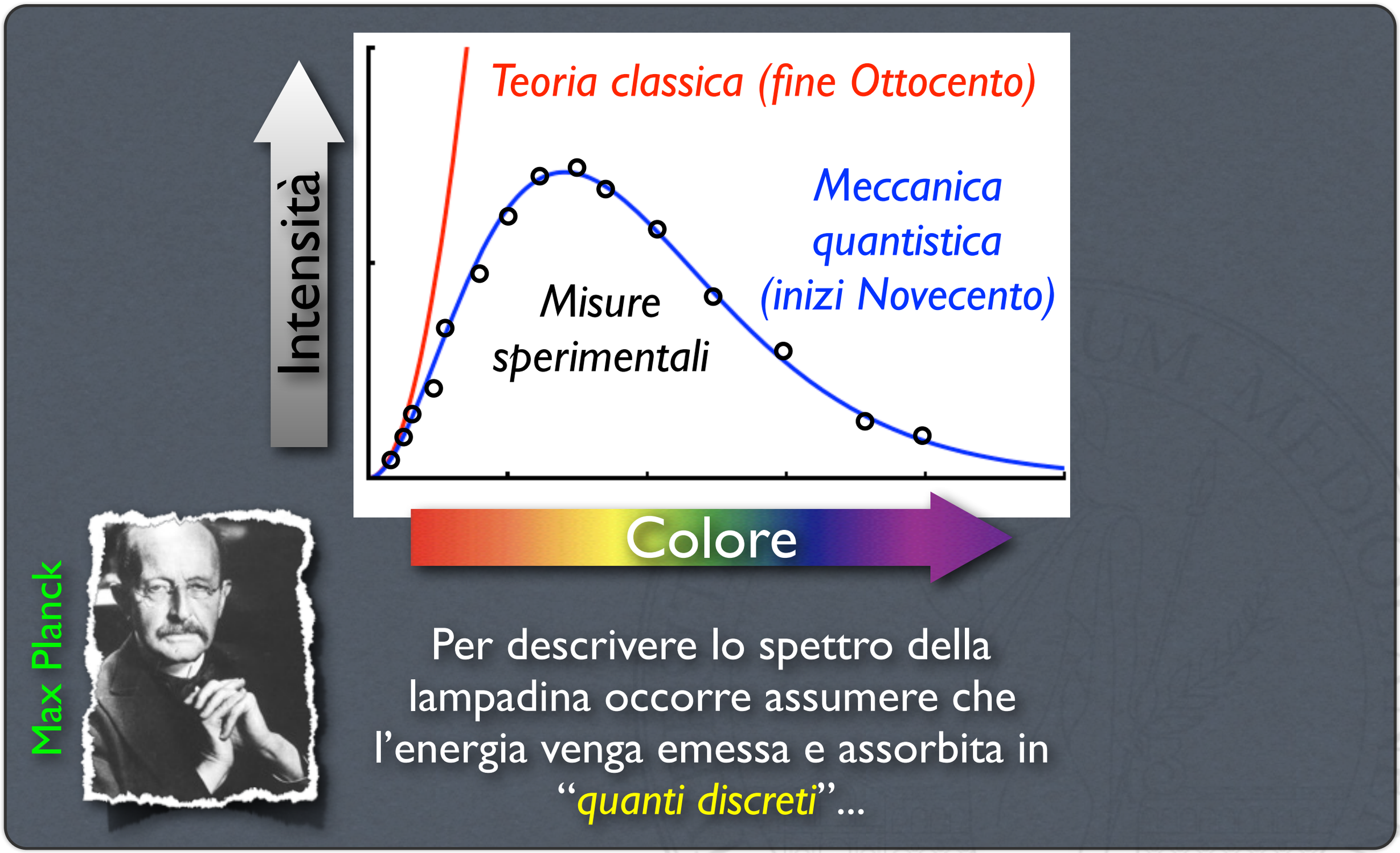
La radiazione emessa dal buco è la radiazione di corpo nero!
(radiazione di "Hohlraum", "cavità" in Tedesco)

Tutta la radiazione che entra nel foro viene assorbita all'interno della cavità: il foro è un corpo nero!

Le origini della fisica quantistica



Le origini della fisica quantistica



Per descrivere lo spettro della lampadina occorre assumere che l'energia venga emessa e assorbita in "*quanti discreti*"...

Le origini della fisica quantistica

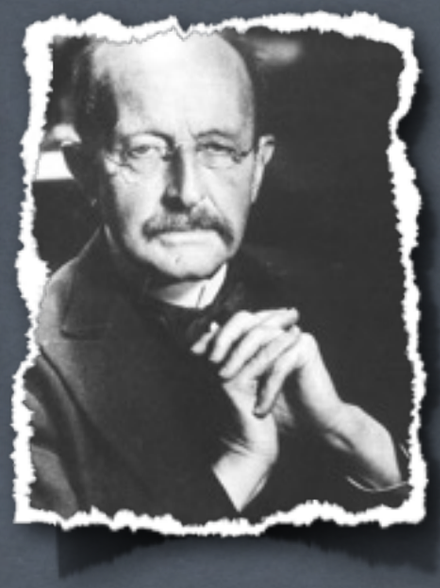
… per approfondire…

L. Belloni e S. Olivares

"Planck"

(Ed. Corriere della Sera, 2016)

Colore



Max Planck

Albert Einstein

Per descrivere lo spettro della lampadina occorre assumere che l'energia venga emessa e assorbita in "*quanti discreti*"...

La via di Einstein al fotone

Premio Nobel per la Fisica (1921):

> *"Ad Albert Einstein, per i suoi servizi alla fisica teorica e specialmente per la sua scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico."*

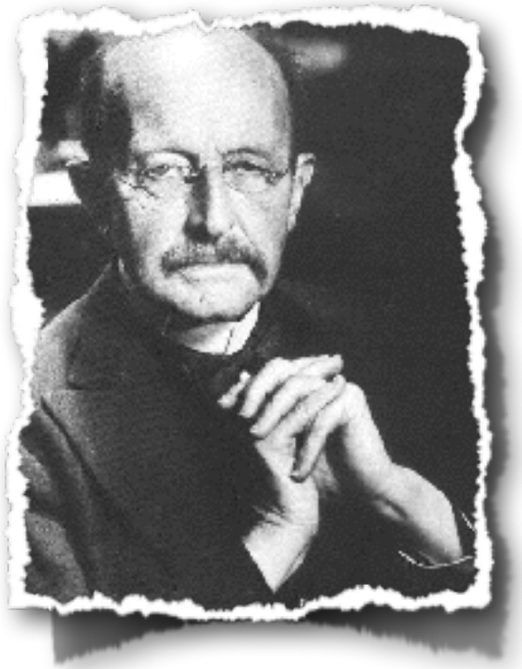
CONCERNING AN HEURISTIC POINT OF VIEW TOWARD THE EMISSION AND TRANSFORMATION OF LIGHT

BY A. EINSTEIN

A PROFOUND formal distinction exists between the theoretical concepts which physicists have formed regarding gases and other ponderable bodies and the Maxwellian theory of electromagnetic processes in so-called empty space. While we consider the state of a body to be completely determined by the positions and velocities of a very large, yet finite, number of atoms and electrons, we make use of continuous

* Ann. Physik **17**, 132 (1905); Translation published with the permission of *Annalen der Physik*.
† Department of Physics.
‡ Department of German.

(Un punto di vista euristico relativo alla generazione e trasformazione della luce -1905)



« Insomma, si può dire che difficilmente troviamo anche uno soltanto dei grandi problemi di cui è ricca la fisica moderna a cui Einstein non abbia dato un contributo significativo. »

« Non si può neanche rinfacciargli troppo d'aver mancato talvolta il bersaglio nelle sue speculazioni, come, per esempio, nella sua ipotesi dei quanti di luce, perché infatti non è possibile introdurre concetti davvero nuovi nella più esatta tra le scienze senza prendersi a volte dei rischi. »

- Planck, 1913

(Proposta per l'ammissione di Einstein alla prestigiosa Accademia Prussiana)

La via di Einstein al fotone

Premio Nobel per la Fisica (1921):

> *"Ad Albert Einstein, per i suoi servizi alla fisica teorica e specialmente per la sua scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico."*

CONCERNING AN HEURISTIC POINT OF VIEW TOWARD THE EMISSION AND TRANSFORMATION OF LIGHT

BY A. EINSTEIN

A PROFOUND formal distinction exists between the theoretical concepts which physicists have formed regarding gases and other ponderable bodies and the Maxwellian theory of electromagnetic processes in so-called empty space. While we consider the state of a body to be completely determined by the positions and velocities of a very large, yet finite, number of atoms and electrons, we make use of continuous

* Ann. Physik **17**, 132 (1905); Translation published with the permission of *Annalen der Physik*.
† Department of Physics.
‡ Department of German.

(Un punto di vista euristico relativo alla generazione e trasformazione della luce -1905)

La via di Einstein al fotone

Premio Nobel per la Fisica (1921):

> *"Ad Albert Einstein, per i suoi servizi alla fisica teorica e specialmente per la su*

Eurìstico

Vocabolario on line

Treccani.it
L'ENCICLOPEDIA ITALIANA

eurìstico agg. [der. del gr. εὑρίσκω «trovare, scoprire»] (pl. m. *-ci*). – Nel linguaggio scient., detto di ipotesi che viene assunta precipuamente come idea direttrice nella ricerca dei fatti, e del metodo stesso di ricerca così condotta: *mezzo e.*, in senso lato, mezzo di ricerca. In partic., in matematica, *procedimento e.*, qualsiasi procedimento non rigoroso (a carattere approssimativo, intuitivo, analogico, ecc.) che consente di prevedere o rendere plausibile un risultato, il quale in un secondo tempo dovrà essere controllato e convalidato per via rigorosa.

istico

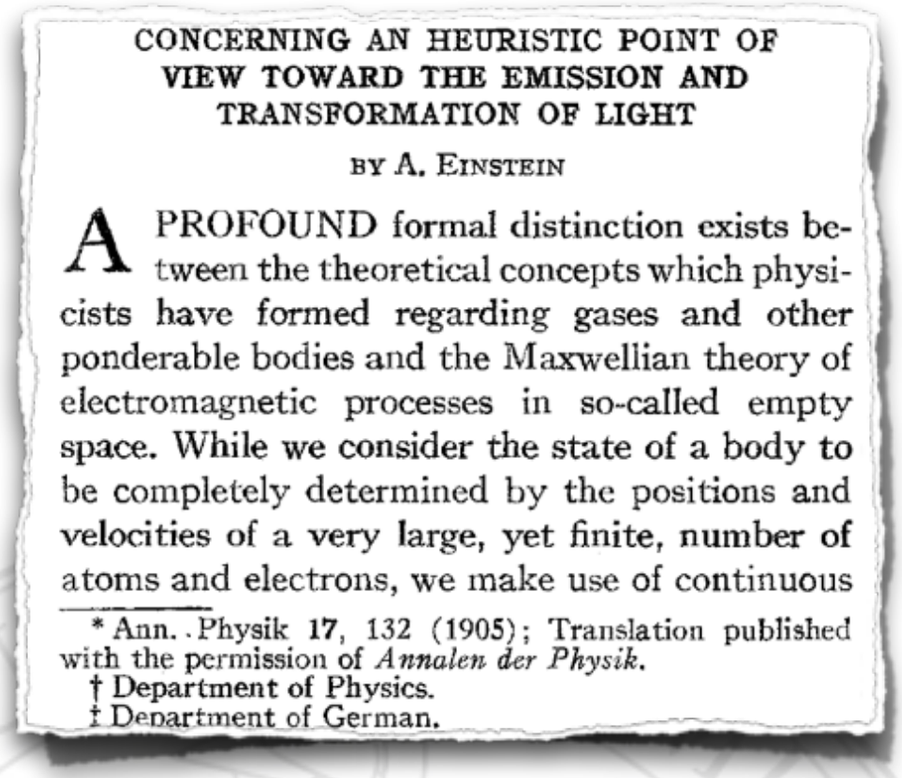
e

luce -1905)

A PR
two
cists ha
ponderal
electromagnetic processes in so-called empty space. While we consider the state of a body to be completely determined by the positions and velocities of a very large, yet finite, number of atoms and electrons, we make use of continuous

* Ann. Physik 17, 132 (1905); Translation published with the permission of *Annalen der Physik*.
† Department of Physics.
‡ Department of German.

La via di Einstein al fotone (1905)



CONCERNING AN HEURISTIC POINT OF VIEW TOWARD THE EMISSION AND TRANSFORMATION OF LIGHT

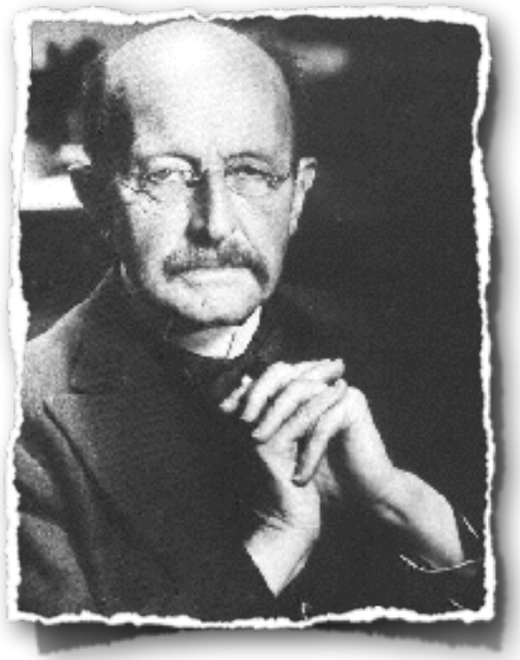
BY A. EINSTEIN

A PROFOUND formal distinction exists between the theoretical concepts which physicists have formed regarding gases and other ponderable bodies and the Maxwellian theory of electromagnetic processes in so-called empty space. While we consider the state of a body to be completely determined by the positions and velocities of a very large, yet finite, number of atoms and electrons, we make use of continuous

* Ann. Physik **17**, 132 (1905); Translation published with the permission of *Annalen der Physik*.
† Department of Physics.
‡ Department of German.

« In realtà, a me sembra che le osservazioni sulla "radiazione di corpo nero", la fotoluminescenza, la generazione dei raggi catodici tramite luce ultravioletta, e altri fenomeni associati all'emissione o alla trasformazione della luce appaiano più comprensibili assumendo una distribuzione spaziale discontinua dell'energia luminosa. »

Planck e Einstein



$h = 6.626\ 10^{-34}$ J s

L'emissione e l'assorbimento di energia elettromagnetica di frequenza f da parte di atomi e molecole avviene per dosi discrete multiple di hf.
(M. Planck)

"Una radiazione monocromatica di bassa densità si comporta, dal punto di vista termodinamico, come se consistesse di un numero di quanti di energia indipendenti $\mathcal{E}$ / hf."
(A. Einstein)

Dalla luce ai fotoni

Facciamo un conto ($\mathcal{E}$ / hf)…

potenza puntatore laser laser

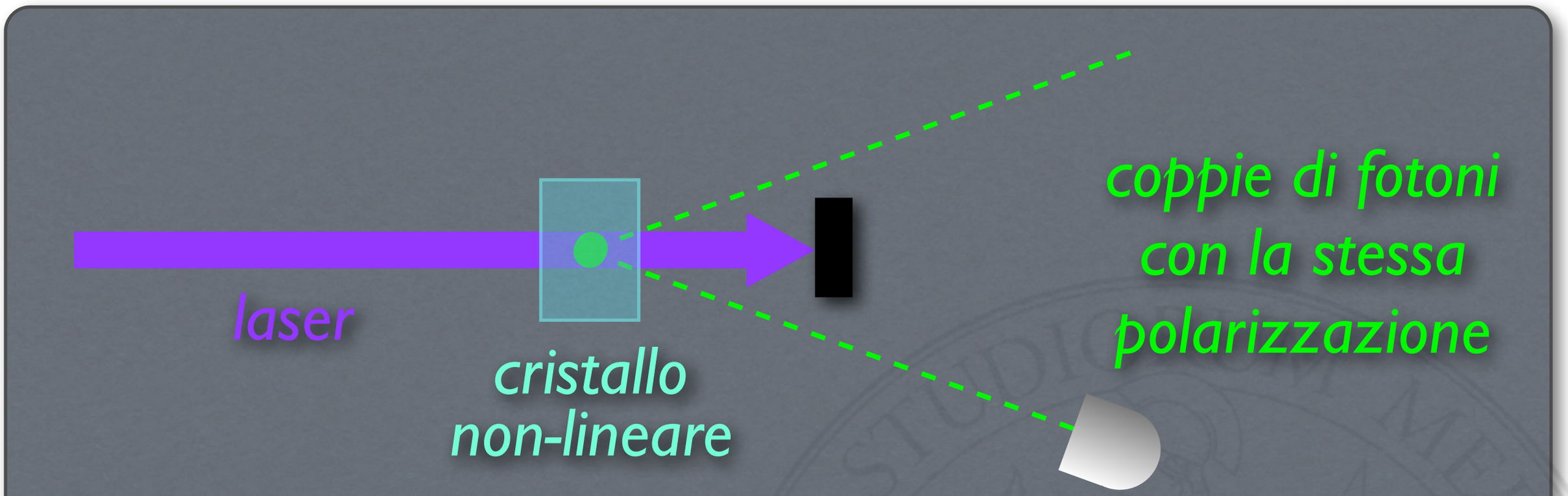
10^{-3} W

10^{-34} J s 10^{15} Hz

costante di Planck

frequenze ottiche

Fotoni singoli



I fotoni vengono *generati a coppie*:
rivelandone uno si è certi della presenza dell'altro...

... che può essere *usato per gli esperimenti*!

Fotoni singoli

Come la radiazione e.m. i fotoni:

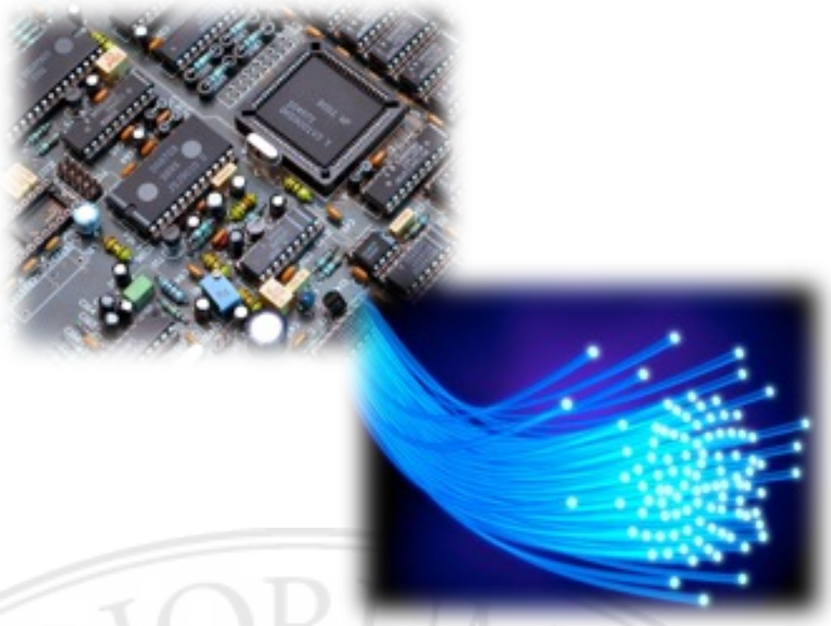
- hanno una *frequenza* (colore),
- hanno una *direzione di propagazione*,
- hanno una *polarizzazione*.

... però mostrano caratteristiche "squisitamente" quantistiche!

La meccanica quantistica intorno a noi

Fisica & informazione

L'informazione viene codificata, trasmessa ed elaborata utilizzando sistemi fisici.

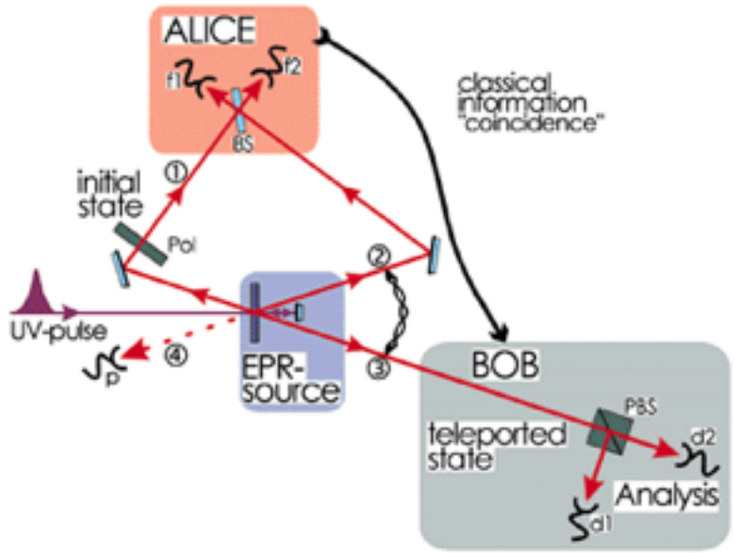


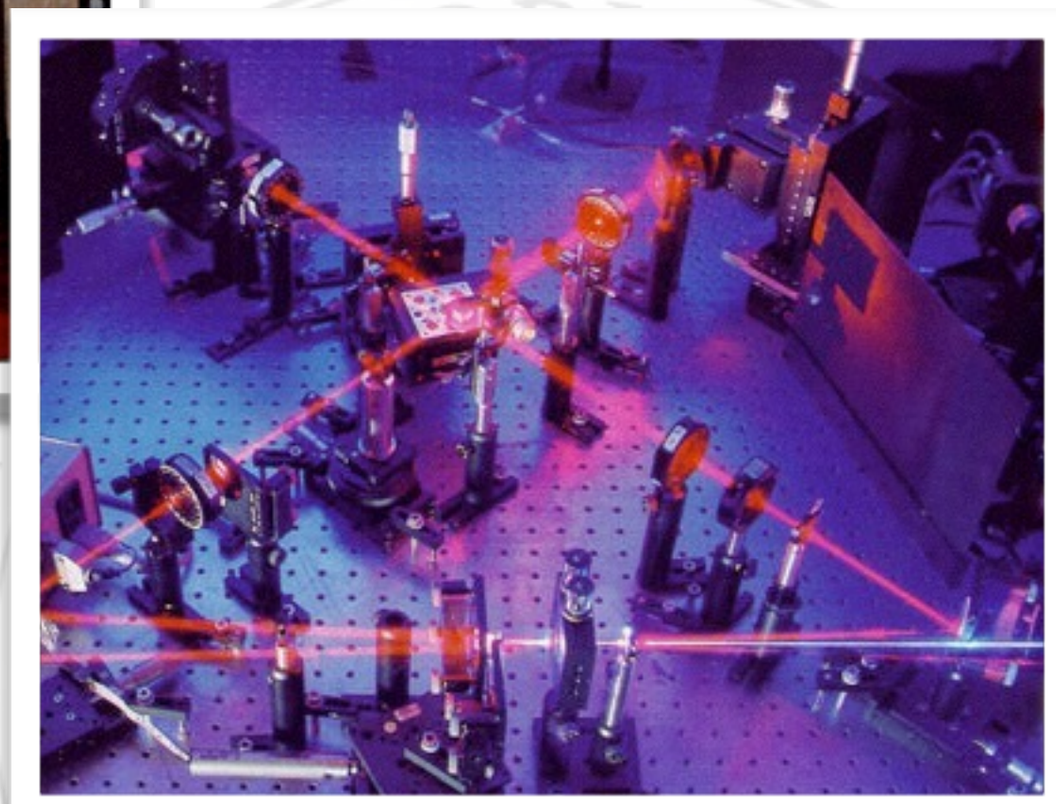
In ultima analisi, tutti i sistemi fisici sono descritti dalle leggi della meccanica quantistica.

L'informazione e la computazione quantistica si occupano di studiare come le proprietà quantistiche dei sistemi fisici possano essere sfruttati per migliorare la codifica, la trasmissione e l'eleborazione dell'informazione.

Teletrasporto... quantistico!

Star Trek





Esperimento di teletrasporto quantistico, Vienna

- *No trasporto di materia...*
- *Niente di istantaneo...*

"Teletrasporto" di informazione da un sistema fisico ad un altro!

Crittografia quantistica

In questo capitolo ci occuperemo di crittografia quantistica.

La sicurezza della crittografia quantistica si basa su:

- Principio di indeterminazione di Heisenberg (una misura introduce, in generale, un disturbo...).

- Entanglement.

- L'informazione quantistica non può essere clonata.

La meccanica quantistica... intorno a noi

La *meccanica quantistica* è una teoria estremamente *raffinata*, dal formalismo *elegante*, in grado di *descrivere* in modo molto accurato la *natura*.

... in ultima analisi
tutto è quantistico!

Niente è più vero
della fantasia

La realtà è fantasia

Gli aspetti più *peculiari* della meccanica quantistica risiedono in alcune *conseguenze delle sue leggi*.

Ad esempio, un oggetto può trovarsi in *due stati ben distinti* nello *stesso istante*... (*principio di sovrapposizione*).

Oppure, due oggetti possono *influenzarsi a distanza* e istantaneamente... (*entanglement, non-località quantistica*).

La sovrapposizione quantistica

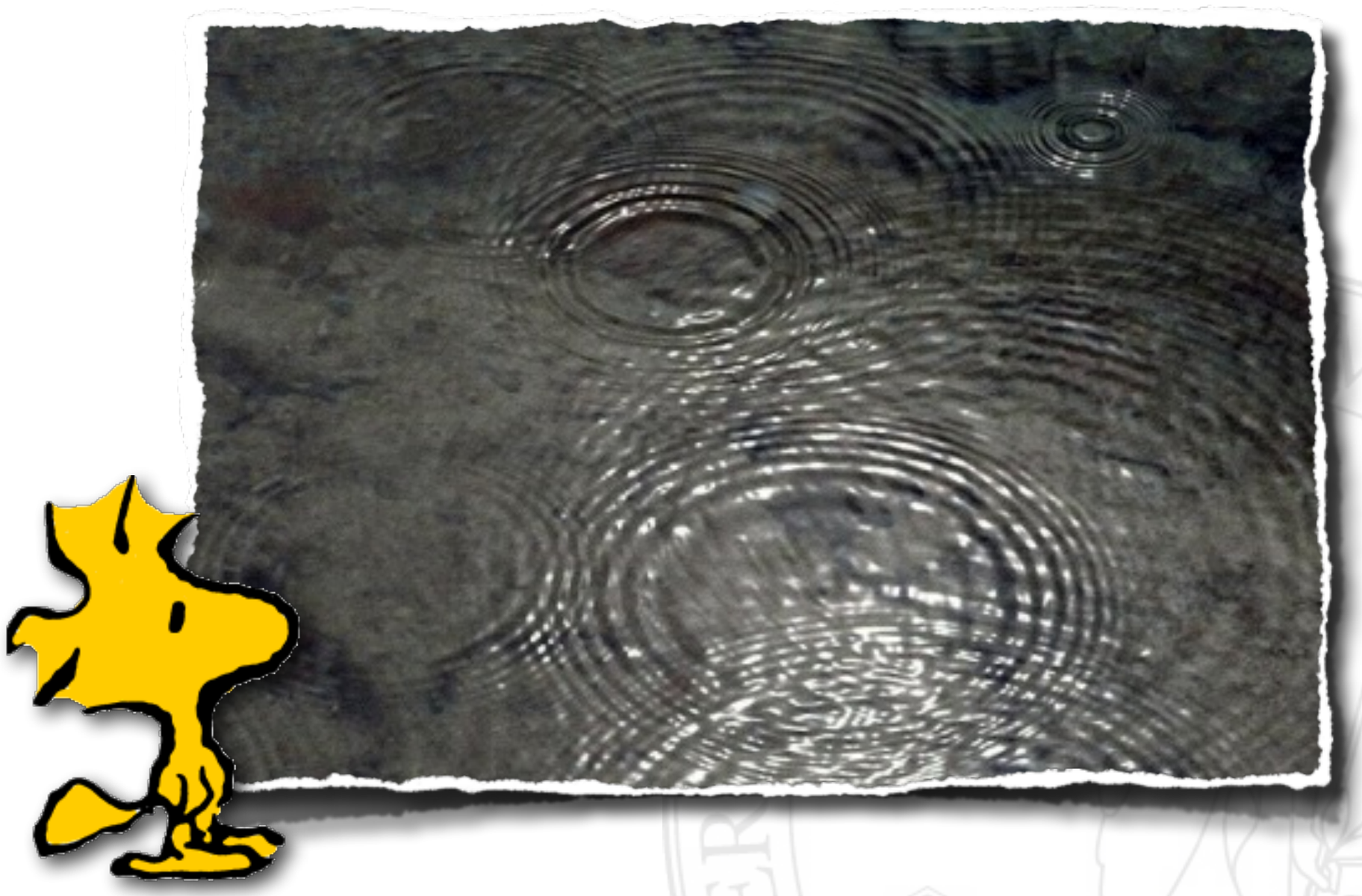
Consideriamo ora una "*freccia*":

Lo *stato* della freccia è: "*su*"

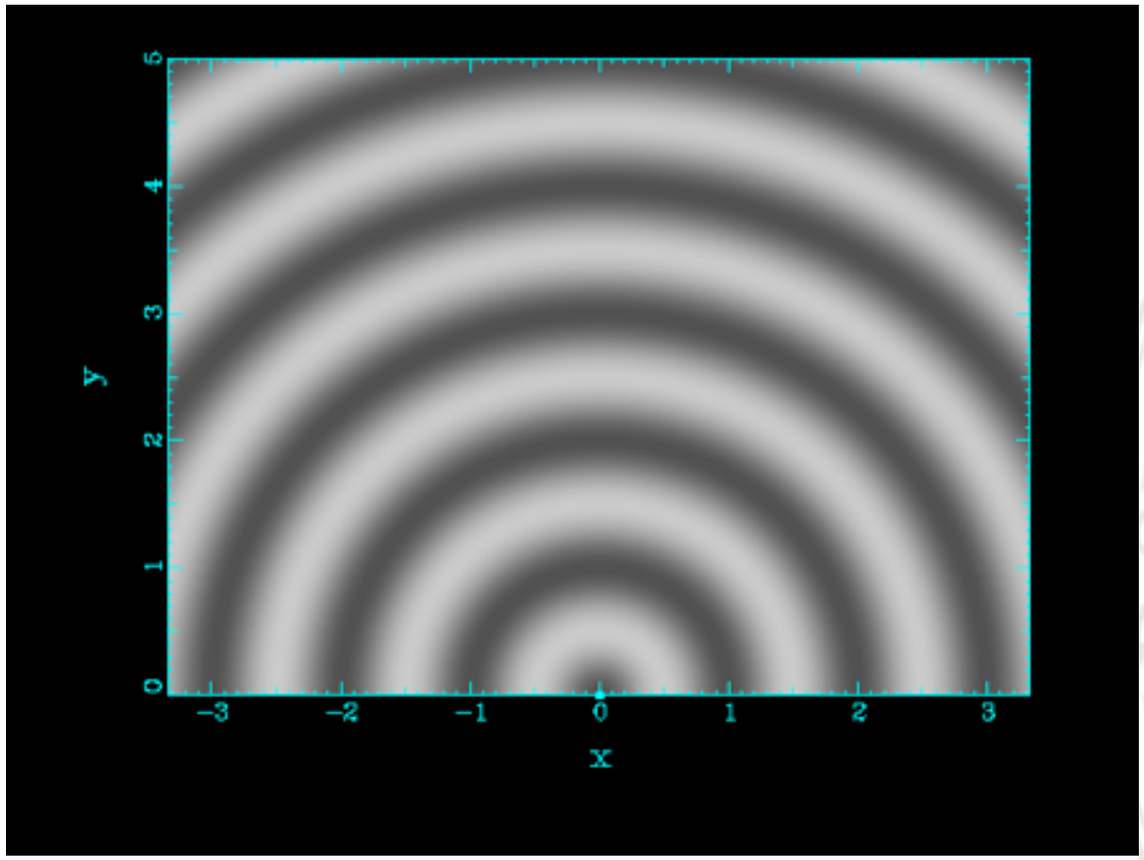
Lo *stato* della freccia è: "*giù*"

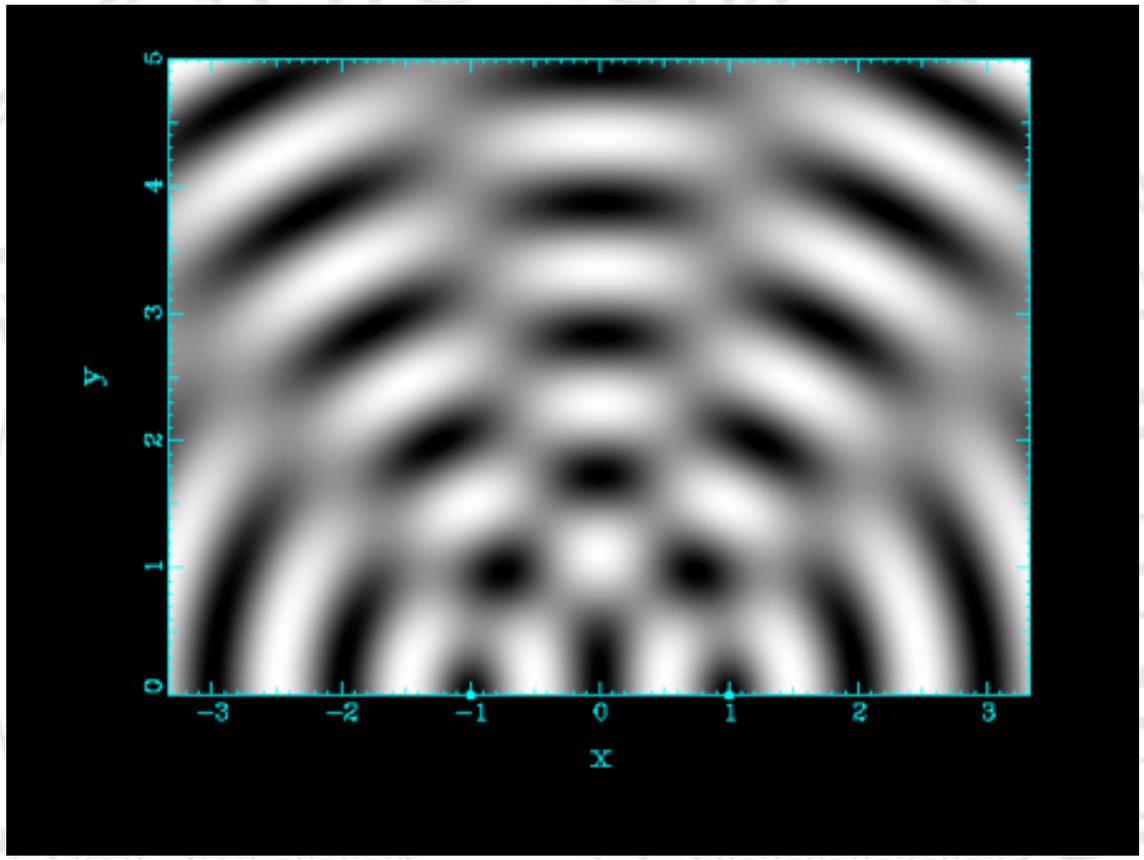
Questa freccia si trova in una *sovrapposizione* "*su*" e "*giù*":

La sovrapposizione di onde



La sovrapposizione di onde





L'entanglement (non-separabilità)

L'*entanglement*, l'intreccio quantistico o non-separabilità, sta alla base di tutti gli esperimenti che rendono la *fisica quantistica* così *differente* dalla *fisica classica*...

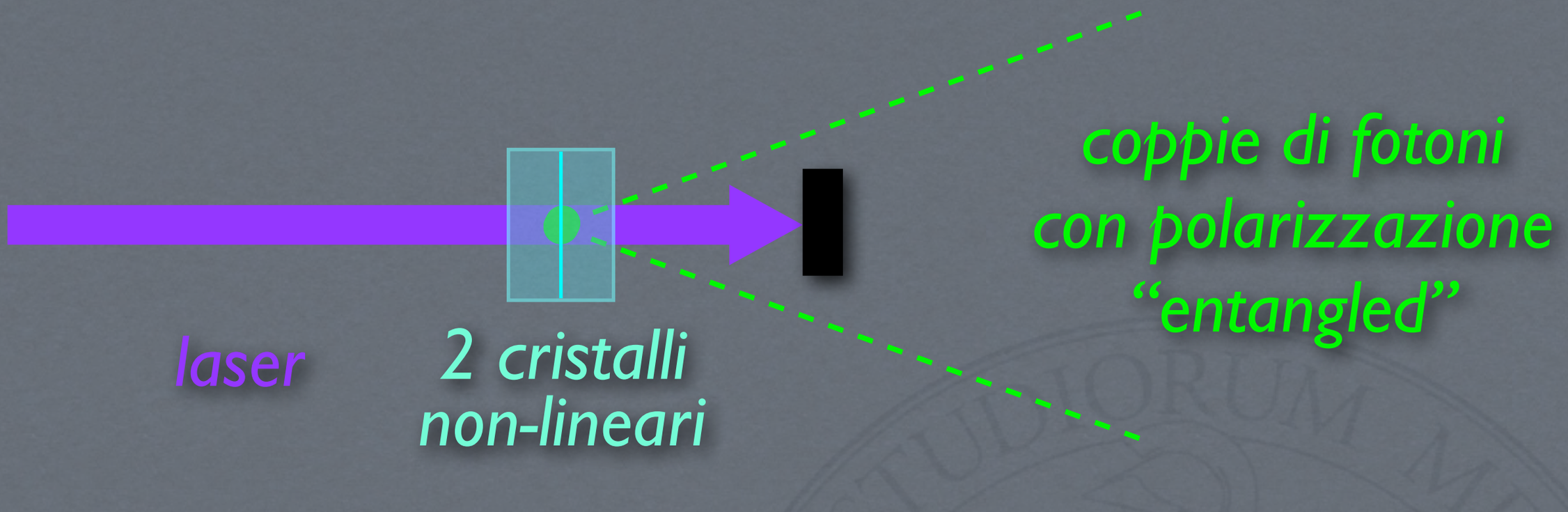
Sebbene l'entanglement sia nato come un "*problema teorico e di fondamento della meccanica quantistica*", oggi, anche grazie al progresso tecnologico, è diventato una *risorsa* per l'*informazione quantistica*.

L'entanglement quantistico

L'*entanglement* è una *proprietà di due o più sistemi* quantistici e si manifesta con *correlazioni* che non hanno un analogo classico.

Le correlazioni tra gli oggetti sono *istantanee*!

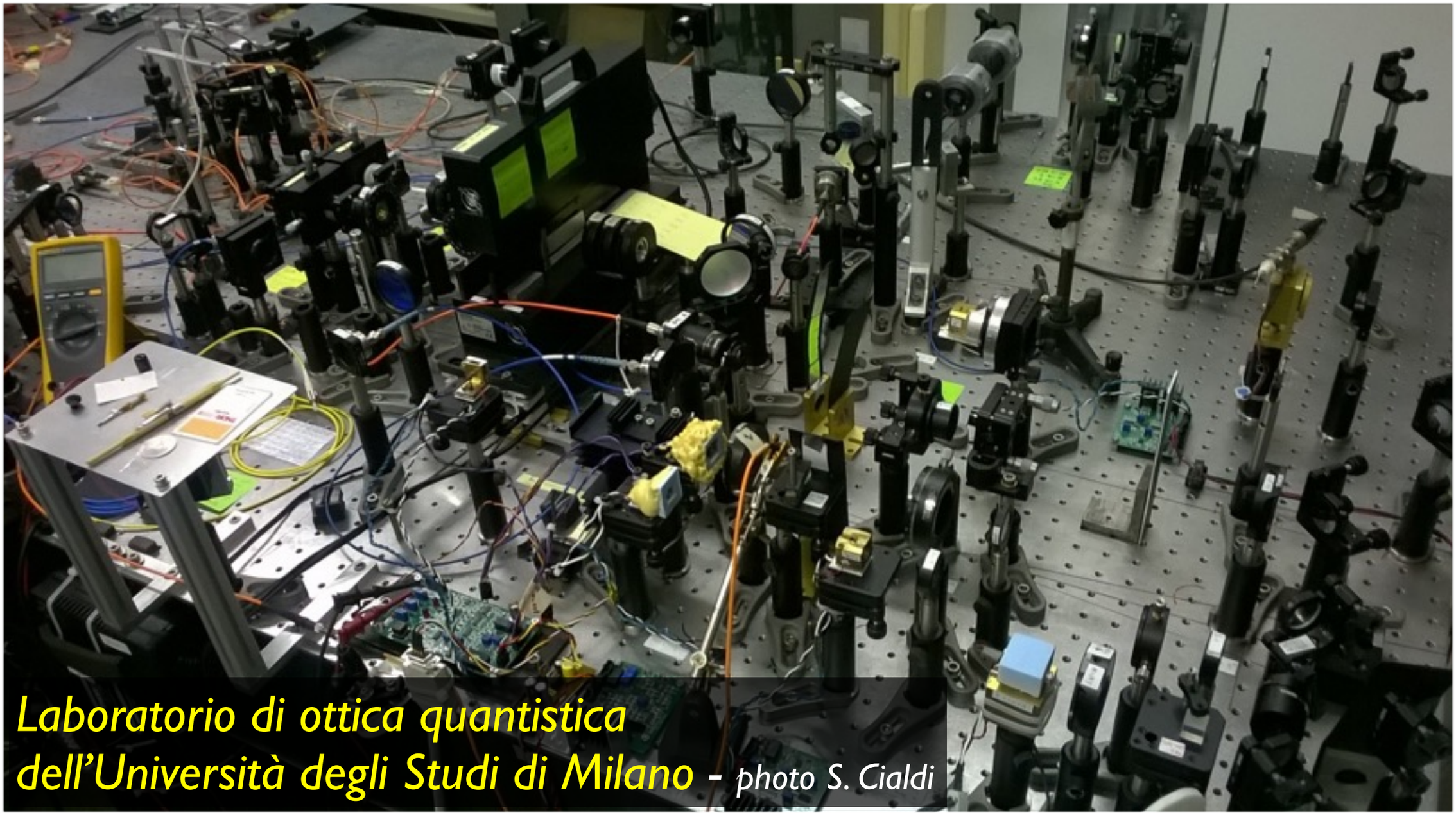
L'entanglement quantistico… con i fotoni



I fotoni vengono ancora *generati a coppie*, però *ogni* fotone può essere misurato *H* o *V* (50%, come testa o croce), ma se uno è misurato *H* (o *V*) l'altro sarà sicuramente *H* (o *V*), e viceversa *(la visione locale realista è violata…)*!

"Spooky action at a distance" - A. Einstein

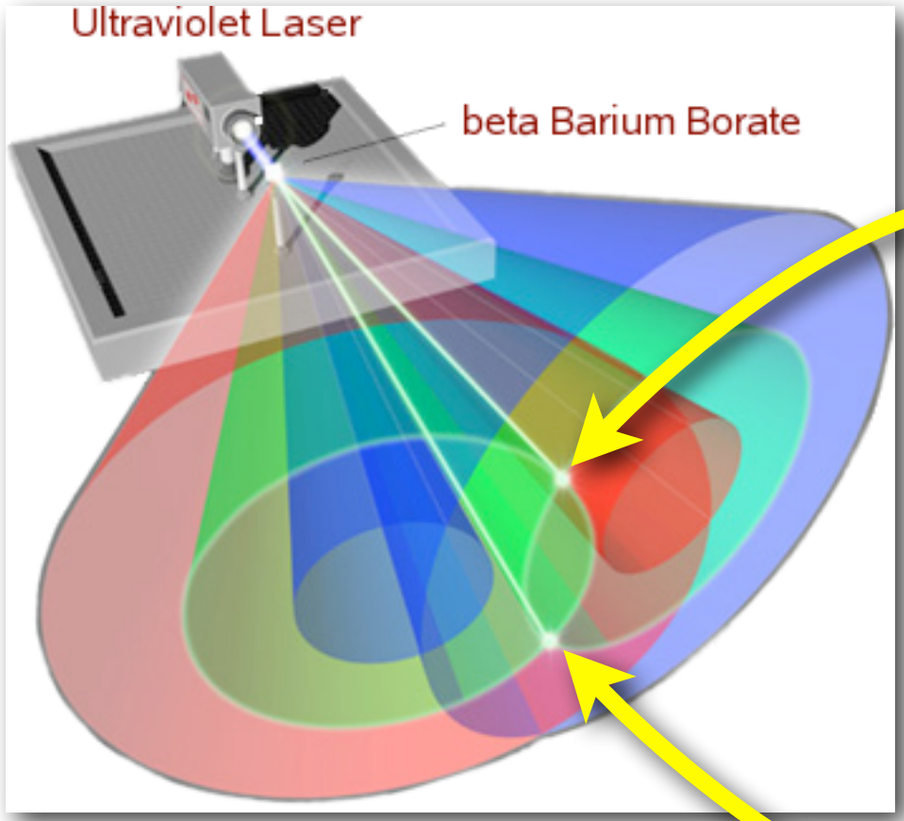
L’entanglement quantistico… con i fotoni

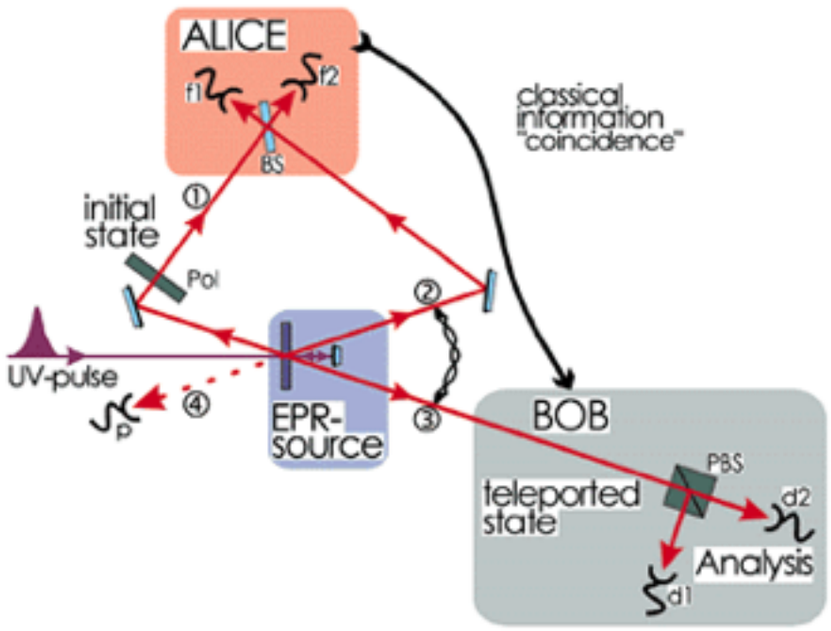


Laboratorio di ottica quantistica dell’Università degli Studi di Milano - *photo S. Cialdi*

Spooky action at a distance - *A. Einstein*

L'entanglement quantistico… con i fotoni





… to be continued…

Grazie per l'attenzione!

... to be continued...