

# Una storia della luce

**Gianluca Introzzi**

**Università di Pavia**

Corso di Fondamenti della Fisica

Anno accademico 2017/18

# Il mistero della luce

« Io mi era tenuto tanto inhabile a poter penetrare che cosa sia il lume, che mi sarei esibito a stare in carcere in pane e acqua purché io fossi assicurato di conseguire una da me tanto disperata cognizione.»

**Galileo Galilei**

# Cos'è la luce ?

« E' accettato da tutti che la luce consiste, o nell'emissione da una sostanza luminosa di particelle molto minute, che sono effettivamente emesse e continuano a muoversi con la velocità comunemente attribuita alla luce, o nell'eccitazione di un moto ondulatorio, analogo a quello che caratterizza il suono, in un mezzo altamente leggero ed elastico [Etere] che pervade l'universo; tuttavia i giudizi dei filosofi di ogni epoca sono stati largamente divisi sulla preferenza dell'una o dell'altra opinione.»

**(Thomas Young – *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts* (1807) p.359)**

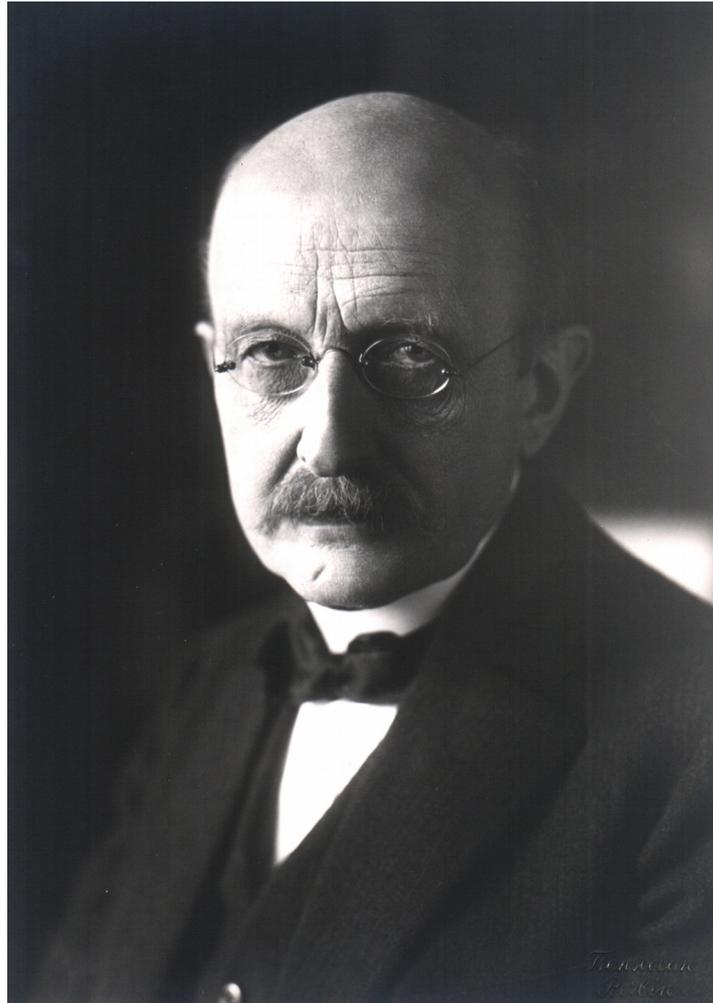
## Parte IV

# La LUCE QUANTISTICA nel '900

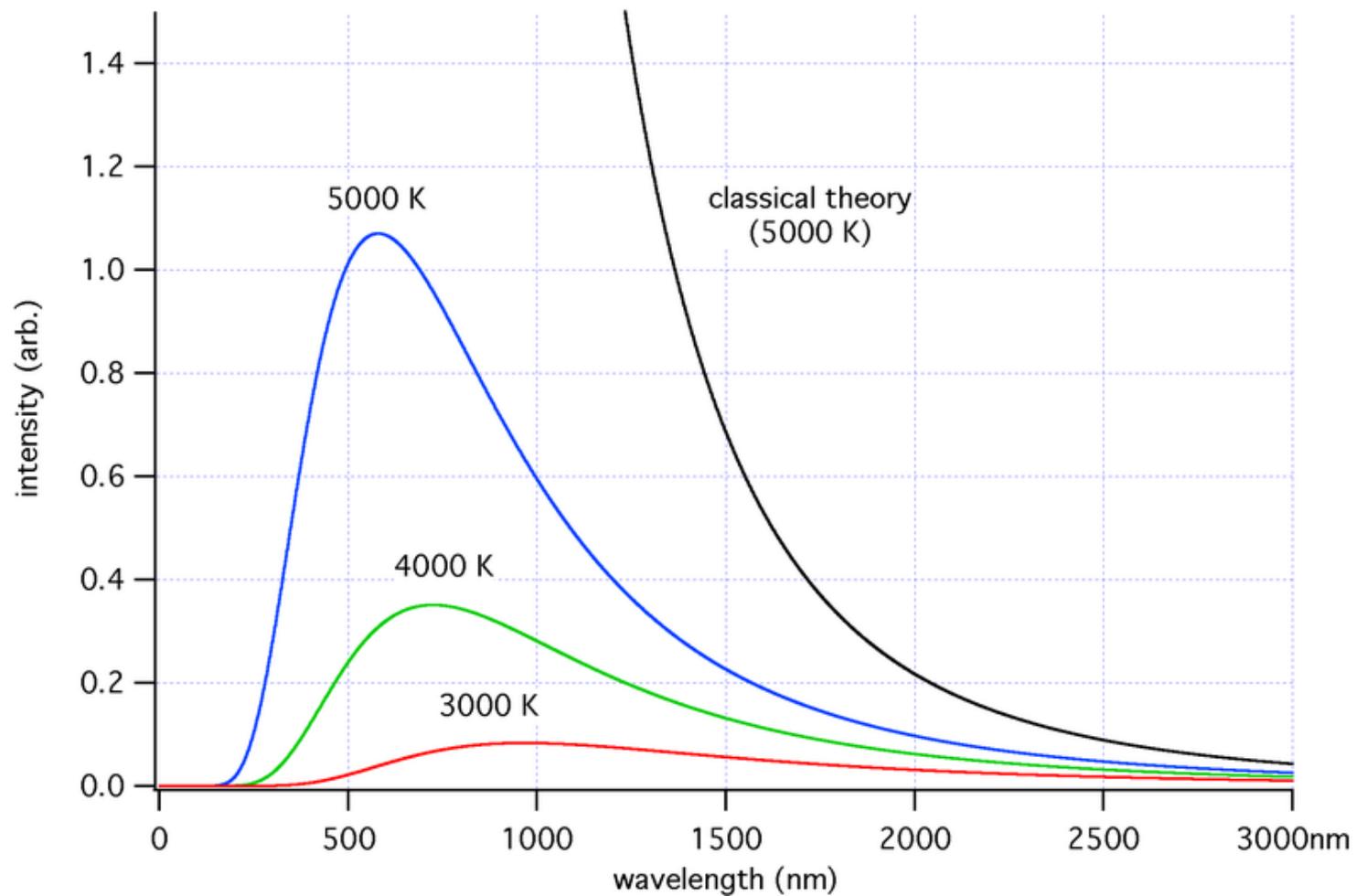
# I quanti di Planck e di Einstein

- Max Planck introdusse nel 1900 il concetto di quanto d'energia ( $E = h\nu$ ), l'energia minima emessa da un corpo nero ad una certa temperatura  $T$  che quindi irraggia onde e.m. (UV - visibile - IR) di frequenza  $\nu$ . Si trattava, secondo Planck, di un artificio matematico al quale non corrispondeva alcuna reale situazione fisica.
- Albert Einstein ipotizzò nel 1905 che la luce, a livello microscopico, fosse costituita non da onde, ma da particelle, che chiamò quanti di luce (ora fotoni). Se  $\nu$  è la frequenza della luce, l'energia di quei fotoni è data da  $E = h\nu$ , con  $h$  costante di Planck:  $h = 6.63 \times 10^{-34}$  Js. Grazie a tale ipotesi riuscì a spiegare l'effetto fotoelettrico, per il quale vinse il premio Nobel nel 1921.
- Ma allora, in definitiva, aveva forse ragione Newton ?

# Max Planck (1858-1947)

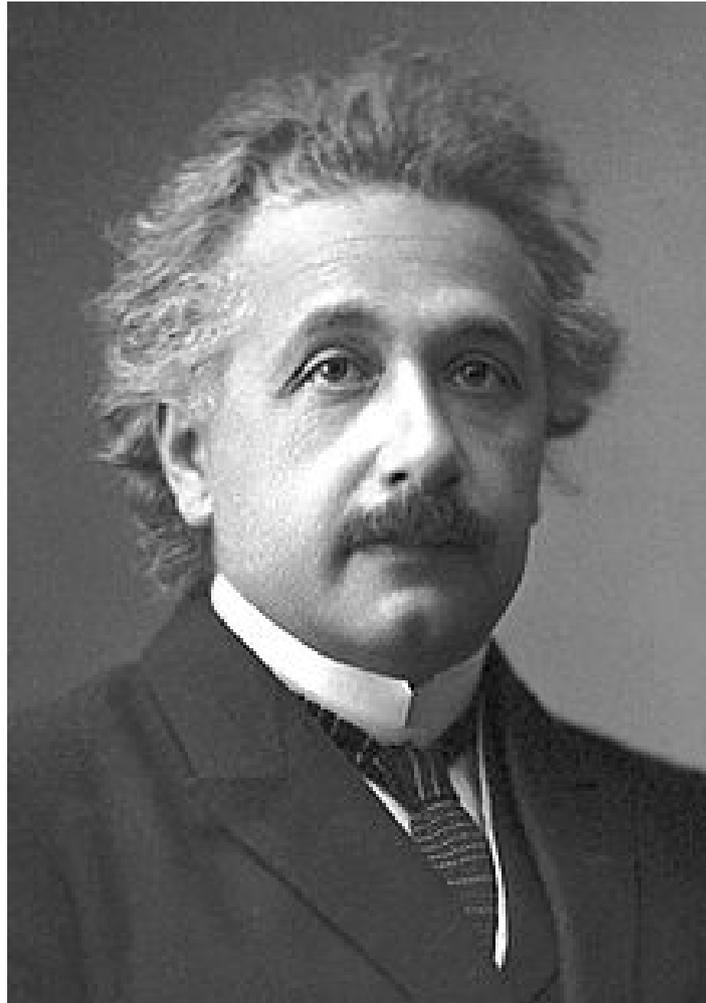


# Spettro emissivo di un corpo nero

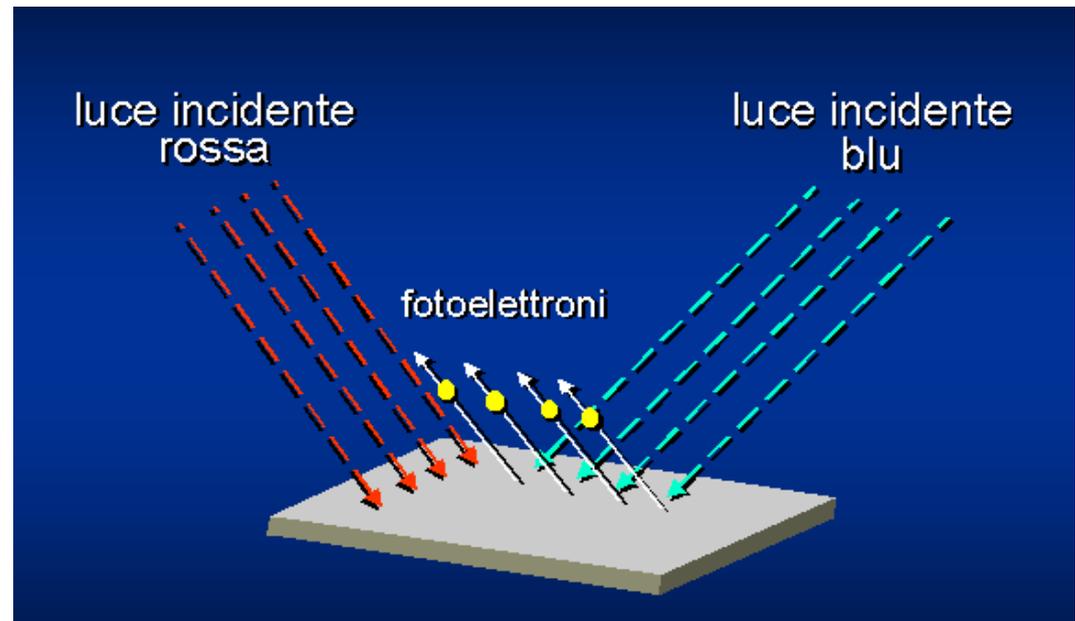
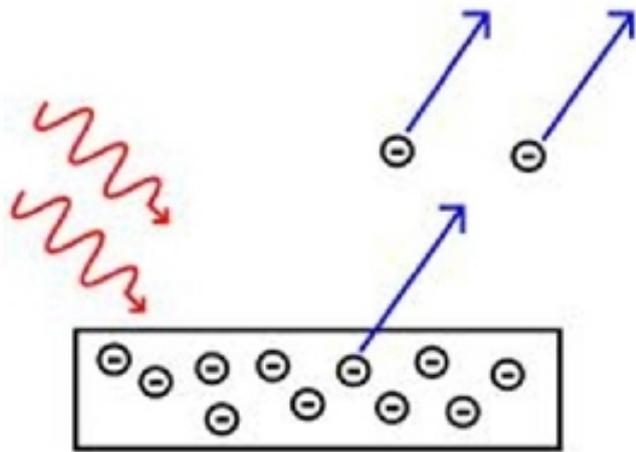


# Albert Einstein

(1879-1955)



# Effetto fotoelettrico e fotoni

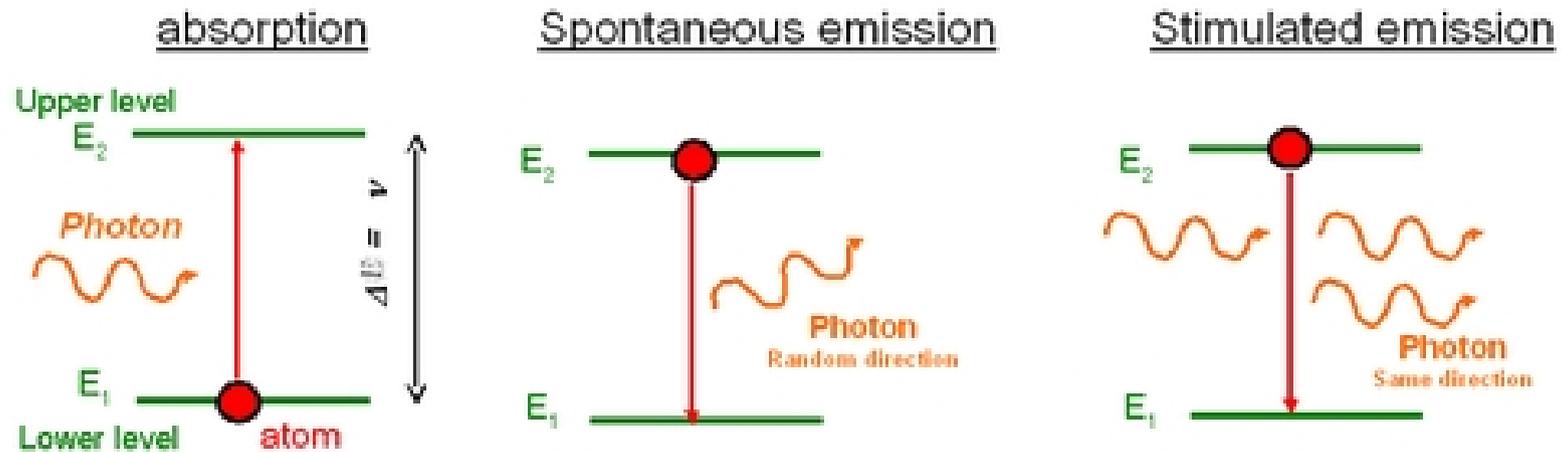


Metallo illuminato dalla luce – Fotoni:  $E=hf < E=hf$

# Il Laser

- **Albert Einstein** pubblicò nel **1917** l'articolo "***Sulla teoria quantistica della radiazione***", nel quale descrisse l'emissione di luce stimolata da radiazione incidente
- **T.H. Maiman** realizzò nel **1960** il **primo laser** (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), basato sul principio dell'emissione stimolata. La luce laser è:  
**1) intensa 2) direzionale 3) monocromatica 4) coerente**
- Il laser era «una soluzione alla ricerca di un problema»  
**(C.H. Townes – “*The first laser*”)**
- Oggi non potremmo fare a meno dei laser: **metrologia**, lavorazione dei **metalli**, **chirurgia laser**, trasmissione con **fibre ottiche**, **lettori laser** (CD, DVD, codici a barre), **olografia**, **armi** (purtroppo) e **luci da discoteca...**

# Emissione stimolata e Laser



# Proprietà della luce - 7

## **ONDULATORIE**

Riflessione

Rifrazione

Birifrangenza

Interferenza

Diffrazione

**Velocità aria/acqua**

Polarizzazione

## **CORPUSCOLARI**

Riflessione

Rifrazione

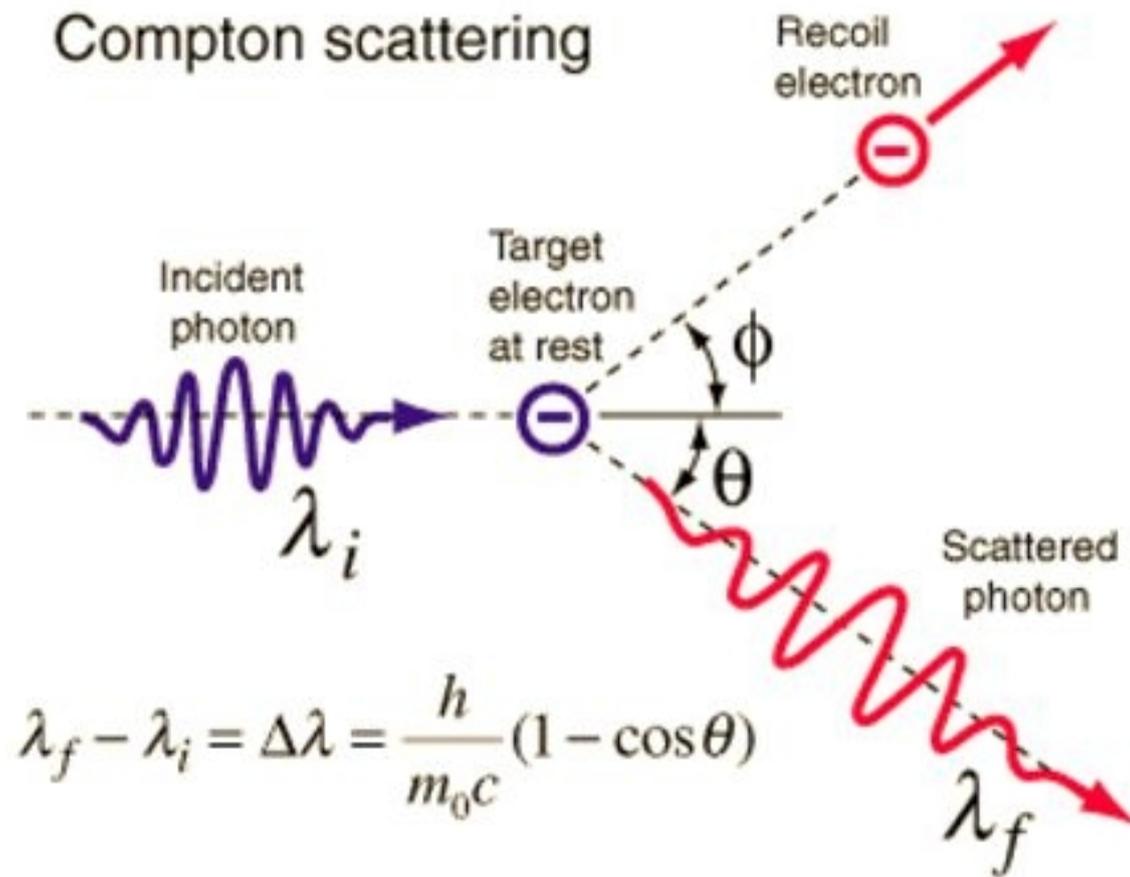
Effetto fotoelettrico

# Arthur Compton

(1892-1962)



# Effetto Compton



- L'esperimento del **1922** dimostra che nell'urto elastico con un elettrone a riposo, **la radiazione incidente si comporta come una particella (fotone)**.
- **Le leggi di conservazione dell'energia e dell'impulso permettono di ricavare l'aumento della lunghezza d'onda emessa  $\lambda_f$  rispetto a quella incidente  $\lambda_i$ :**

$$\Delta\lambda = \lambda_f - \lambda_i = h/m_e c (1 - \cos \theta)$$

- La **coincidenza temporale** tra l'emissione dell'elettrone di rinculo e del fotone diffuso è stata **misurata nel 1925** da **W. Bothe** e **H. Geiger**, eliminando ogni dubbio sulla **correlazione tra i due eventi**.
- E' stato un ***experimentum crucis*** a favore della **natura corpuscolare della luce nelle singole interazioni atomiche**.

# Proprietà della luce - 8

## **ONDULATORIE**

Riflessione

Rifrazione

Birifrangenza

Interferenza

Diffrazione

**Velocità aria/acqua**

Polarizzazione

## **CORPUSCOLARI**

Riflessione

Rifrazione

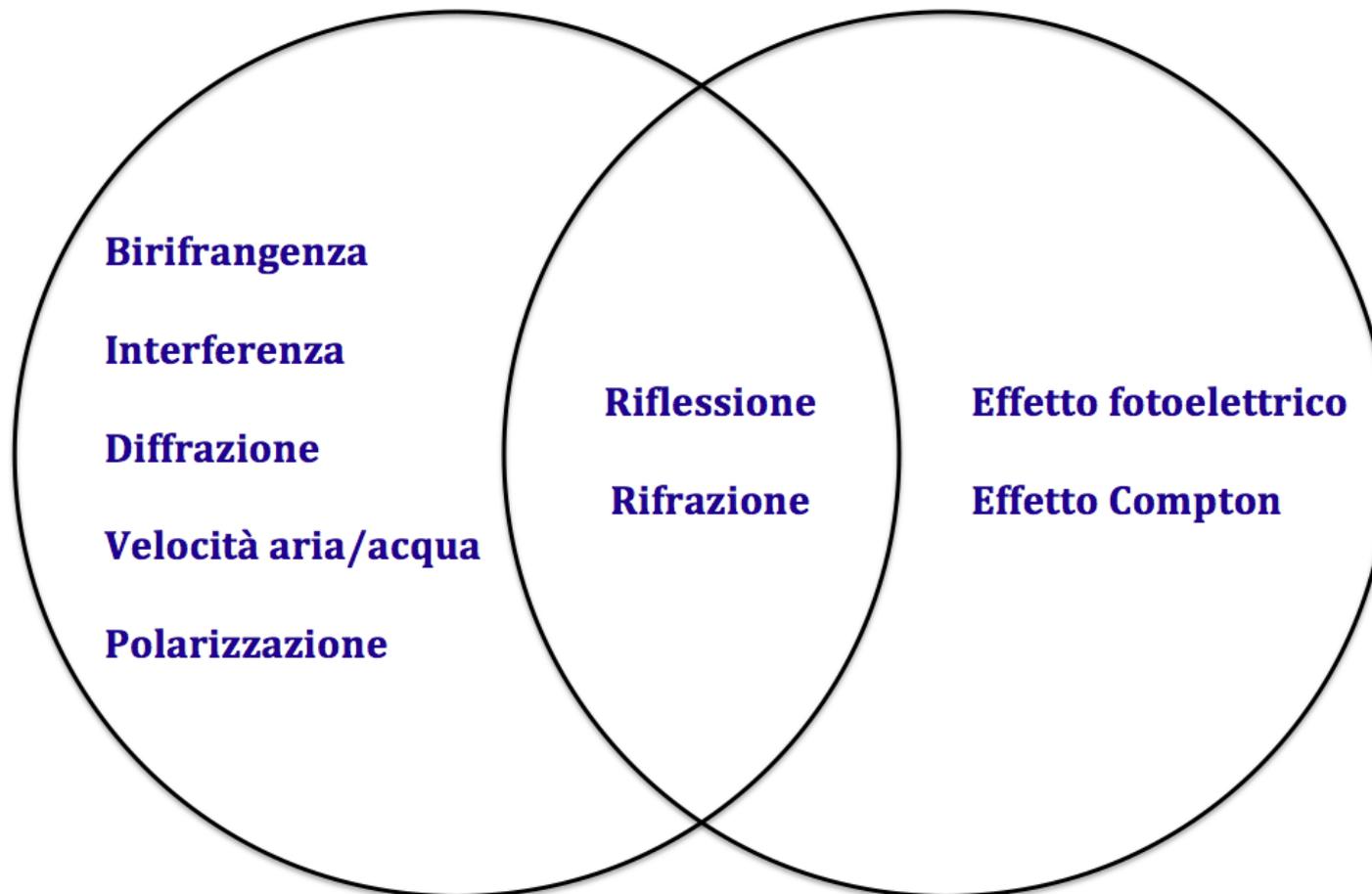
Effetto fotoelettrico

**Effetto Compton**

# L'ambigua natura della luce

**ONDULATORIA**

**CORPUSCOLARE**



# Meccanica Quantistica: una nuova ontologia

- Gli enti della **Fisica Classica (FC)** sono classificabili come **onde** (trasporto d'energia senza alcun trasporto di materia) o **particelle** (oggetti dotati di massa, la cui energia a riposo vale  $E_0 = mc^2$ ).
- Ma in **Meccanica Quantistica (MQ)** la **situazione è profondamente diversa**.
- « I numerosi risultati sperimentali che hanno sondato e confermato la validità della meccanica quantistica possono di fatto essere considerati come contributi ad una metafisica sperimentale.» **(Abner Shimony – “Search for a naturalistic world view – vol.2”)**

# Louis de Broglie (1892-1987)



# Dualismo e Complementarità

- Albert Einstein nel 1909 e Louis De Broglie nel 1923 sostennero che a livello microscopico vi è un dualismo onda/particella, per cui gli enti quantistici hanno contemporaneamente proprietà classiche sia di onda, sia di particella.
- Niels Bohr nel 1927 enuncia il “principio di complementarità”, secondo il quale non è possibile in linea di principio attribuire in modo univoco agli enti quantistici proprietà di onda o di particella. Essi avrebbero statuto ontologico non definito, e si manifesterebbero come onde o come particelle a seconda dello strumento d'indagine che si utilizza negli esperimenti (un po' come l'acqua, che prende la forma del recipiente che la contiene).

# Richard Feynman

(1918-1988)



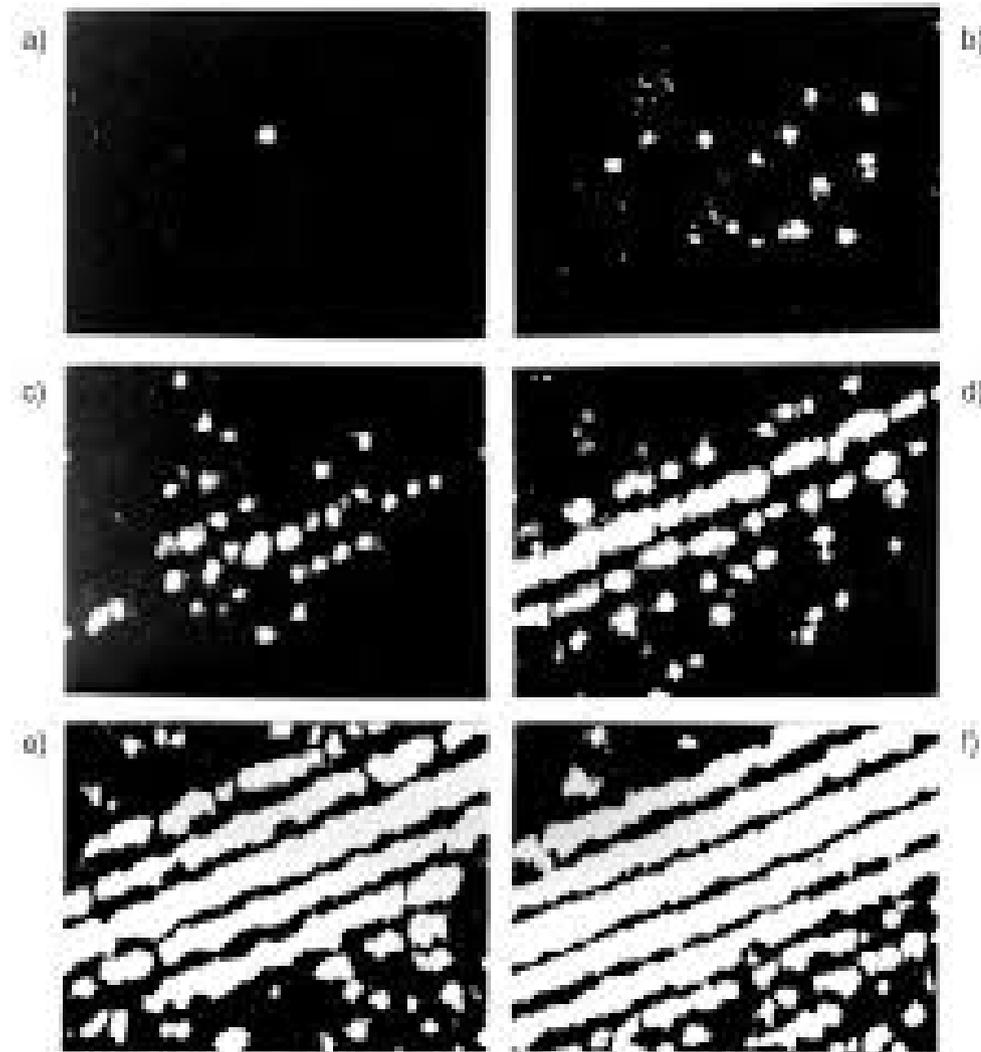
# L'esperimento mentale di Feynman

- L'esperimento della doppia fenditura con elettroni singoli:  
«Prenderò questo solo esperimento che è stato formulato in modo da contenere tutti i misteri della meccanica quantistica, così da mettervi interamente di fronte ai misteri, ai paradossi e alle particolarità della natura. Qualsiasi altra situazione della meccanica quantistica può sempre essere spiegata dicendo: "Vi ricordate dell'esperimento delle due fenditure ? E' la stessa cosa".»
- R. Feynman nel 1965 aveva scritto che l'elettrone «non si comporta in nessuno dei due modi ... non è né l'una né l'altra cosa... Il comportamento quantistico degli oggetti atomici (elettroni, protoni, neutroni e così via) è lo stesso per tutti, sono tutti "onde-particelle", o qualunque altro nome vi piaccia dar loro.» (R. Feynman – *"The Feynman Lectures on Physics – vol.3"*)

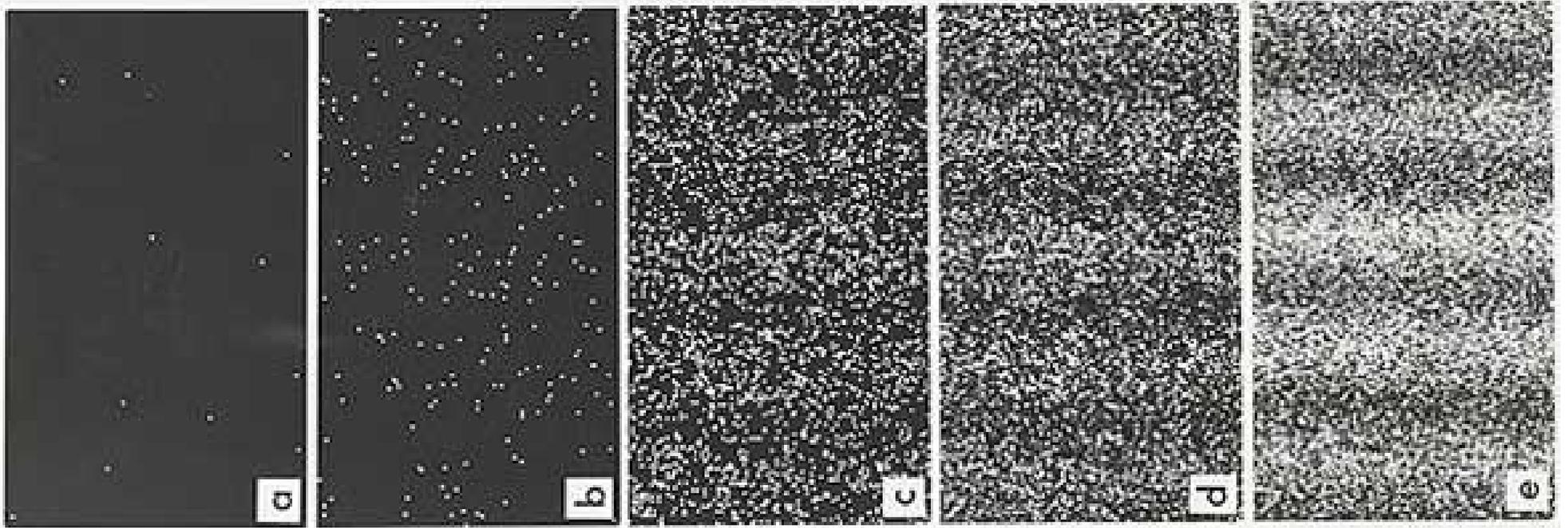
# L'esperimento di Young per elettroni

- Come si comportano degli **elettroni inviati, uno alla volta, attraverso una doppia fenditura** ? Si tratta di **particelle dotate di massa**. Ma la **figura** che si forma sullo schermo dopo che molti elettroni si sono accumulati sulla lastra è **tipica delle onde**: si vedono le **frange d'interferenza** !
- **Dove sta il mistero ?** Per avere una figura d'interferenza, il **singolo elettrone** dovrebbe essere **passato contemporaneamente da entrambe le fenditure** ! Ma si tratta, secondo la Fisica Classica, di una **particella dotata di massa**, ovvero di **un ente singolo**.
- Impossibile secondo la Fisica Classica; **dualismo onda/particella** o **complementarità di Bohr** in MQ.

# P.G. Merli, G.F. Missiroli, G. Pozzi (Bologna, 1976)



A. Tonomura et al.  
(Hitachi Ltd., 1989)



10 – 200 – 6.000 – 40.000 – 140.000 elettroni

# Niels Bohr

(1885-1962)



# Interpretazione di Copenhagen: la doppia fenditura secondo Bohr

- Com'è possibile che l'elettrone singolo “sappia” dove andare a finire sullo schermo in modo da contribuire, insieme ad altri che sono passati o passeranno per la doppia fenditura, a formare la figura d'interferenza ?
- Secondo l'interpretazione di Copenhagen (principalmente dovuta a Niels Bohr) della MQ, si tratta di un fatto incomprensibile: la MQ non può dire nulla sulla traiettoria degli elettroni.
- Secondo Bohr, la MQ può solo calcolare le probabilità d'arrivo dell'elettrone sullo schermo, e trova che tali probabilità coincidono con la formazione di una figura d'interferenza.

# David Bohm

(1917-1992)



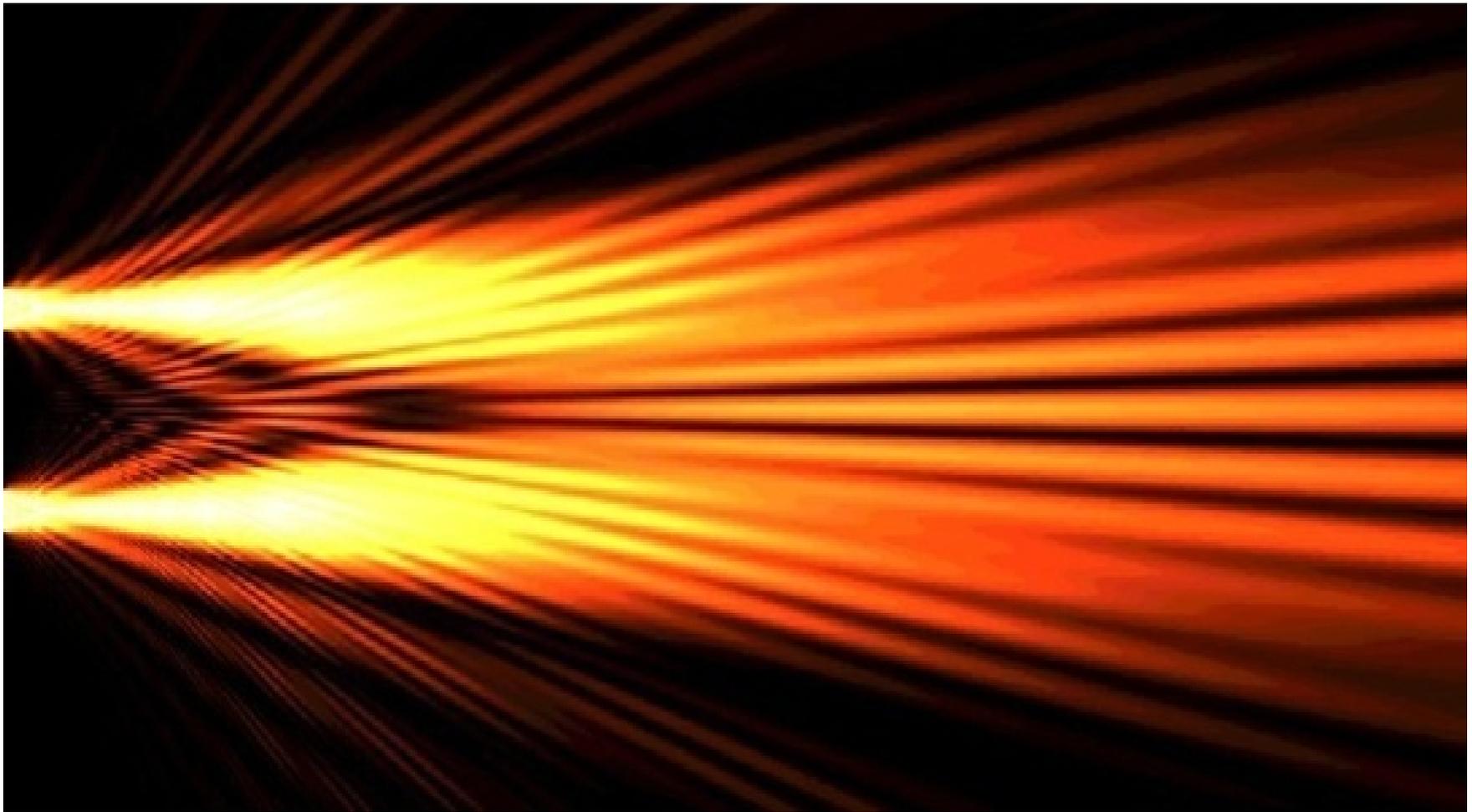
# Interpretazione causale della MQ

- Ma esiste anche un'interpretazione causale della MQ, dovuta a David Bohm (1952), secondo la quale è possibile reintrodurre il concetto di traiettoria in MQ, e descrivere causalmente il moto delle particelle per effetto di una forza quantica  $F_q$ , analoga alla forza classica  $F_c$ , con l'aggiunta di un potenziale quantico  $Q$ .
- Anche la formulazione di Bohm utilizza l'equazione di Schroedinger: il formalismo è quindi analogo a quello di Copenhagen (stesse predizioni), ma se ne discosta radicalmente a livello dell'interpretazione della teoria.

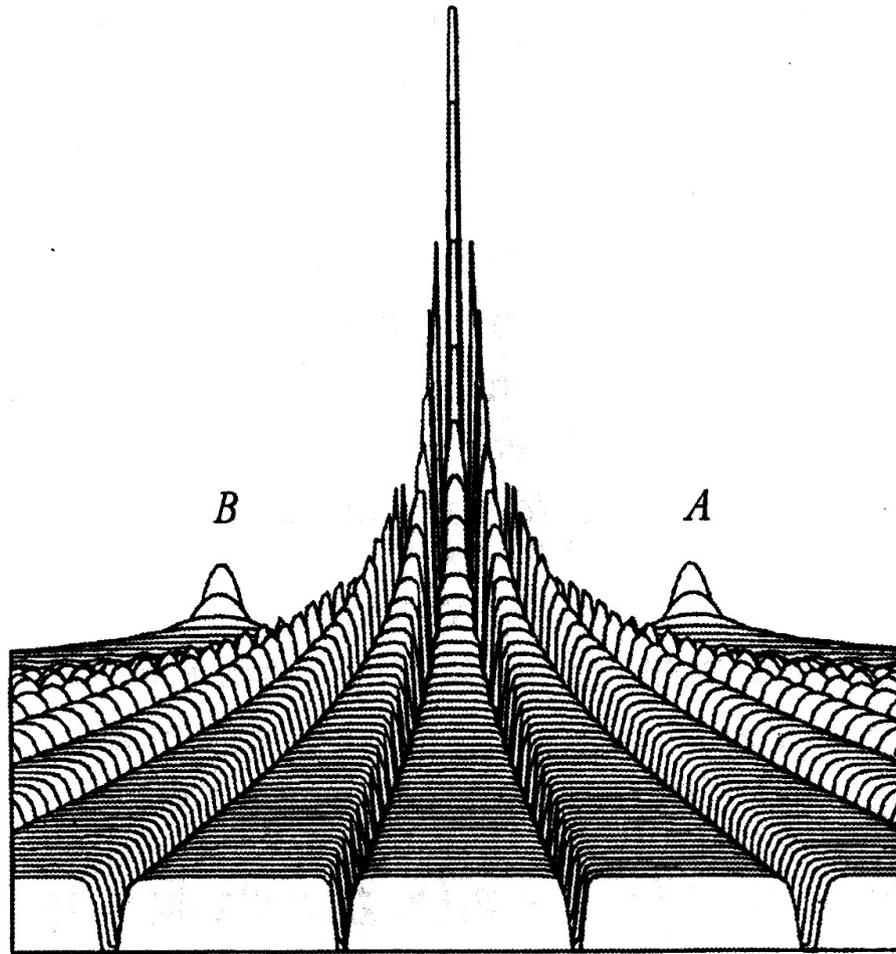
# La doppia fenditura secondo Bohm

- Secondo Bohm, **esiste** quindi **un potenziale  $Q$  quantico** tra le fenditure e lo schermo, che “guida” ogni **singolo elettrone** entrante ad andare di preferenza in certe zone dello schermo.
- **Il risultato complessivo**, quando si registra l'effetto di molti elettroni attraverso le due fenditure, **è proprio la figura d'interferenza**. Quindi **secondo Bohm non c'è alcun mistero**: tutti gli elettroni sono guidati dallo stesso potenziale  $Q$  per formare la figura d'interferenza.

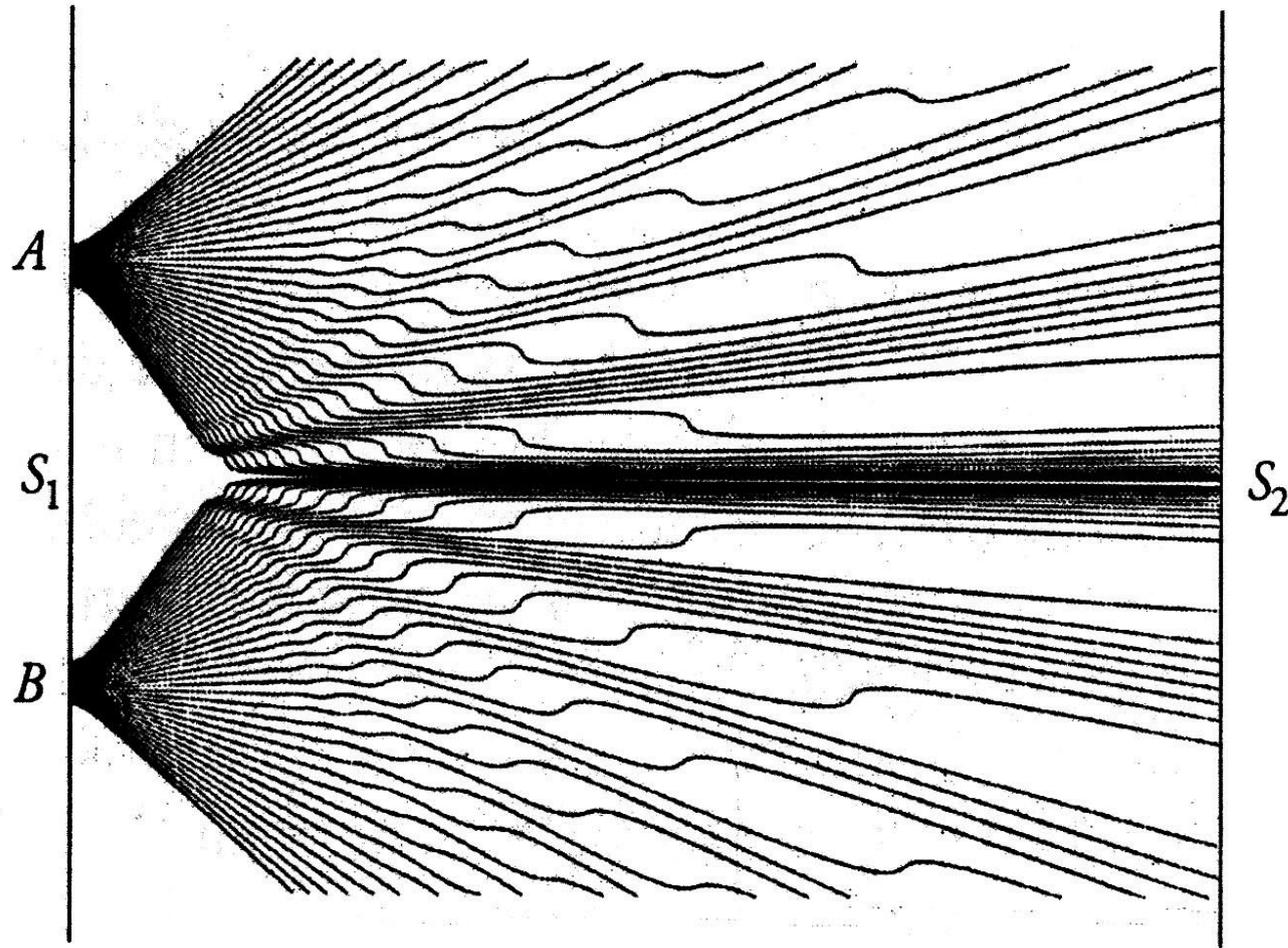
# Rappresentazione delle traiettorie possibili secondo Bohm



# Potenziale quantico di Bohm

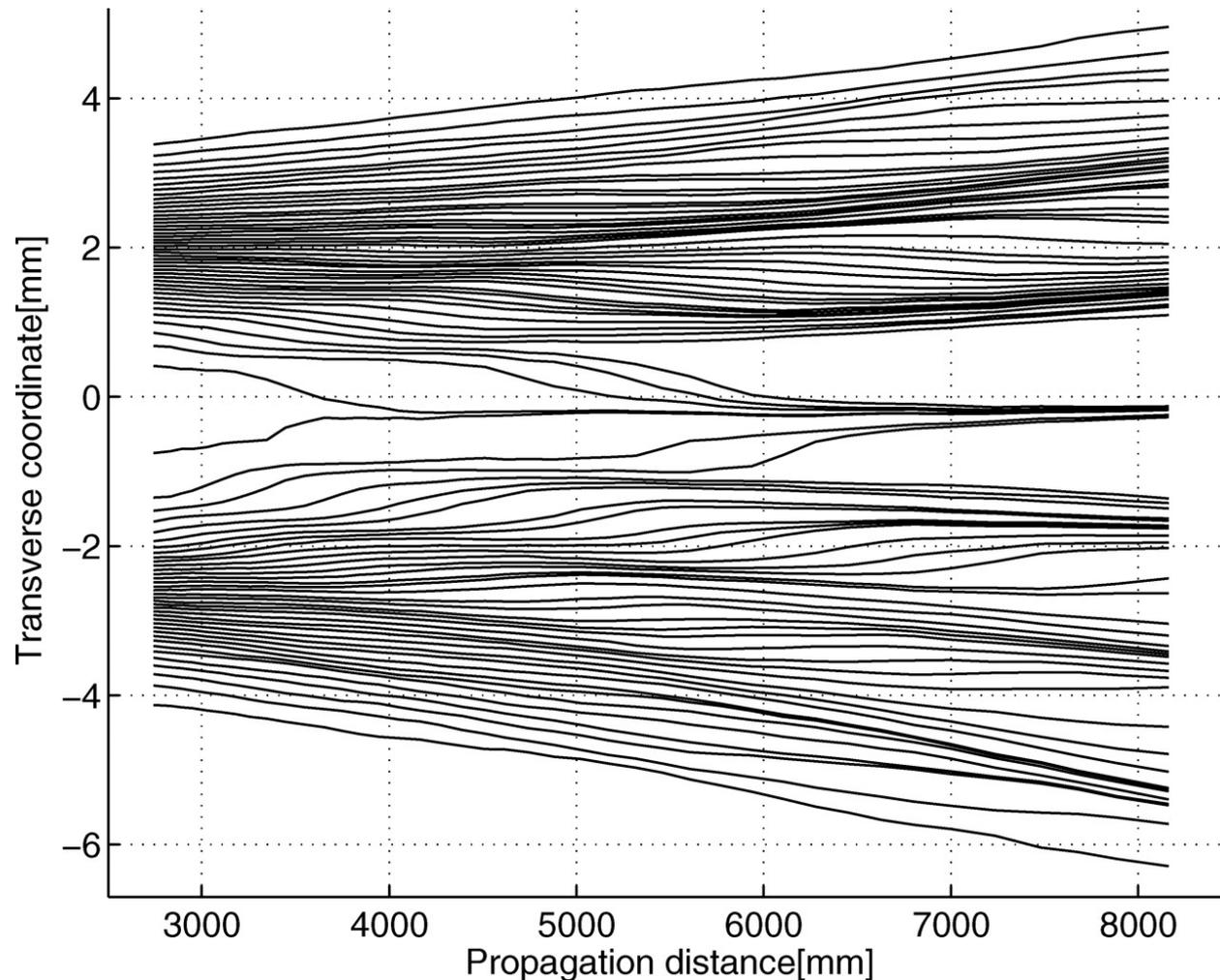


# Traiettorie possibili secondo Bohm



# Misura “debole” su fotoni singoli

A.M. Steinberg et al. - Science (2011)



# Quantoni: gli enti della MQ

- Nel 1967 l'epistemologo Mario Bunge suggerì d'usare un nuovo nome collettivo per gli enti della MQ: né on- de né particelle, ma quantoni:

« ...è necessario riconoscere che si ha in questo caso un tipo differente d'entità, che è specificatamente quantico. Perciò chiamiamo questi enti *quantoni*.» (J.-M. Lévy-Leblond – “*Quantics. Rudiments of Quantum Physics*”)

- Ma cosa sono i “quantoni” ? Sono nuovi enti fisici o un *escamotage* nominalistico ? Si tratta in effetti di un “nuovo animale” (ornitorinco) o di un nuovo nome che abbiamo inventato per identificare un “animale fantastico” (unicorno) ?

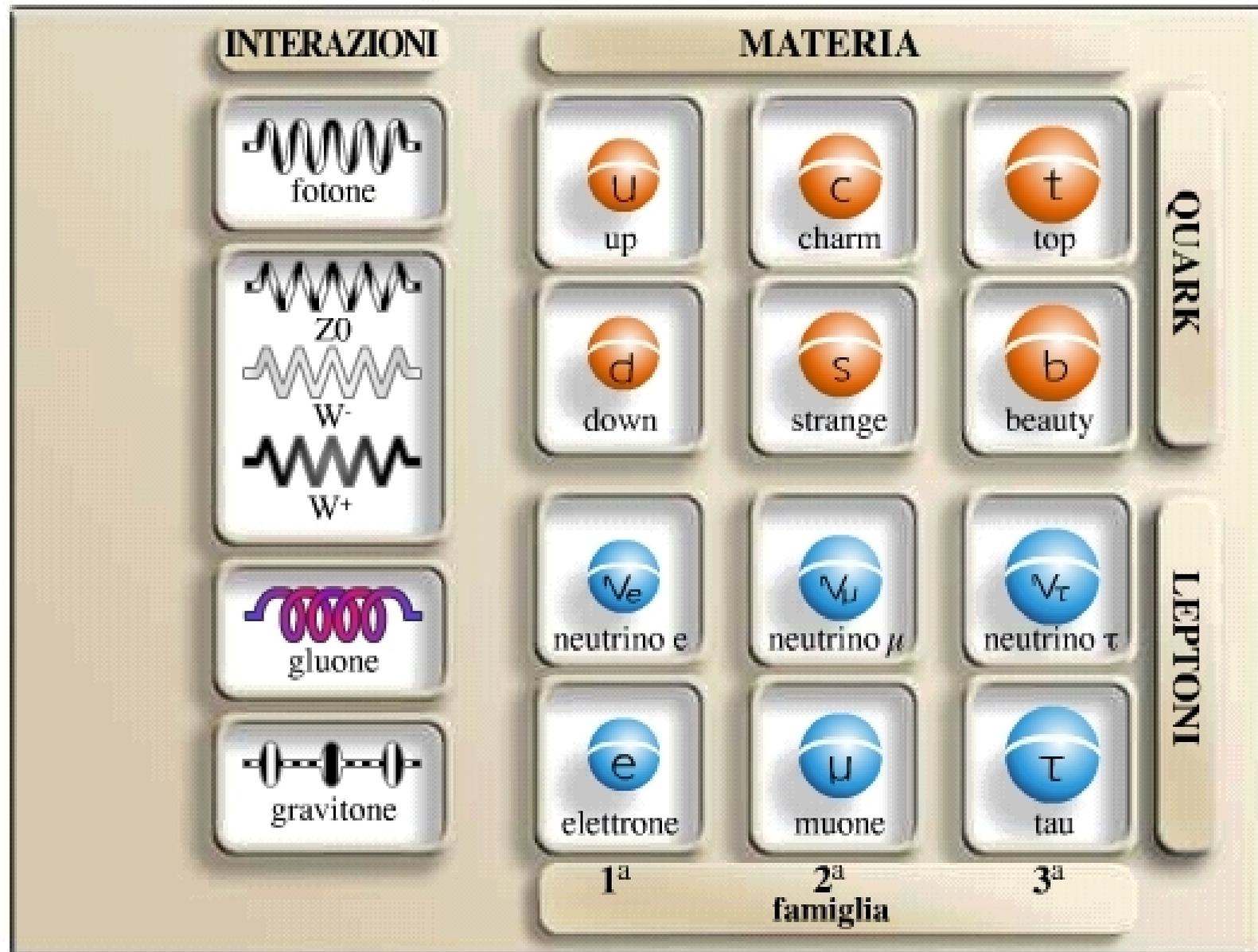
# Bosoni e Fermioni

- Il teorema di **connessione tra spin e statistica**, formulato da **Wolfgang Pauli** nel **1940**, identifica due tipi di enti quantici:
  - 1) **Bosoni con *spin* intero (0, 1, 2...)**
  - 2) **Fermioni con *spin* semi-dispari (1/2, 3/2, 5/2...)**
- Tutti gli enti microfisici (**quantoni**) sono classificabili o come **bosoni** o come **fermioni**. La **dicotomia onda/particella** caratterizza **sistemi classici (FC)** mentre quella **bosone/fermione** è fondamentale in **ambito quantistico**. Secondo la **MQ**, i **fotoni sono dei bosoni**.
- La **struttura ontologica della realtà quantistica** è costituita non da onde e/o particelle (FC), ma da **bosoni o fermioni: modello standard dei costituenti elementari**.

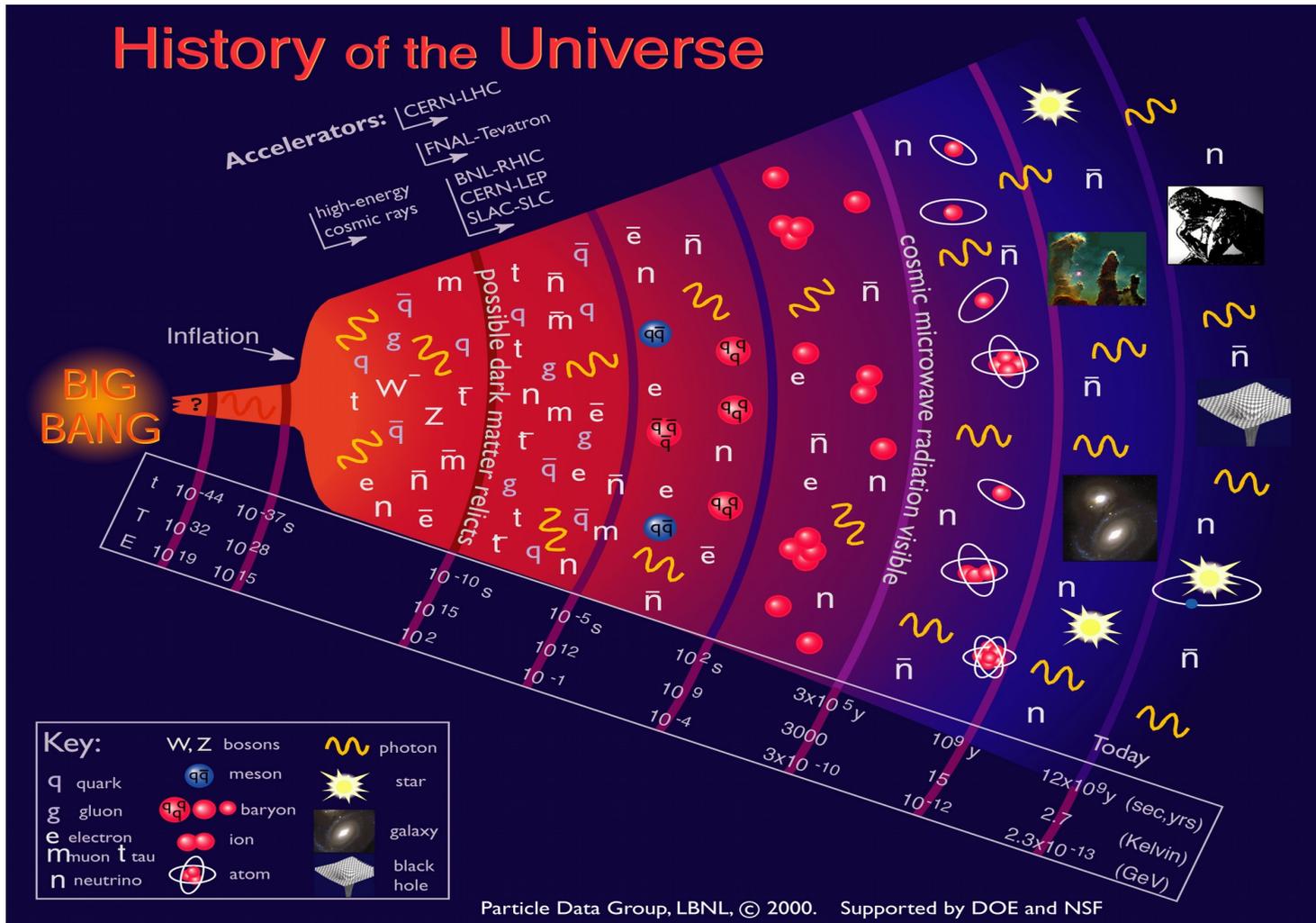
# Cos'è un fotone

- Chiedersi se un fotone sia un'onda o una particella ha lo stesso senso di domandare se un canguro sia una mela o una pera. Anche se gli ultimi tre sono tutti studiati in biologia, appartengono a due regni distinti (animale e vegetale) e quindi incomparabili. Lo stesso vale per onda, particella e fotone: sono enti fisici, ma i primi due della Fisica Classica; il terzo della MQ.
- Secondo la MQ non relativistica, un fotone è un bosone con spin  $S = 1$  che viaggia alla velocità della luce  $c = 3 \times 10^8$  m/s e di conseguenza ha massa nulla:  $m = 0$ .
- Si tratta di un bosone relativistico, la cui trattazione in MQ non relativistica presenta dei limiti (significato non probabilistico della funzione d'onda  $\psi$ ).

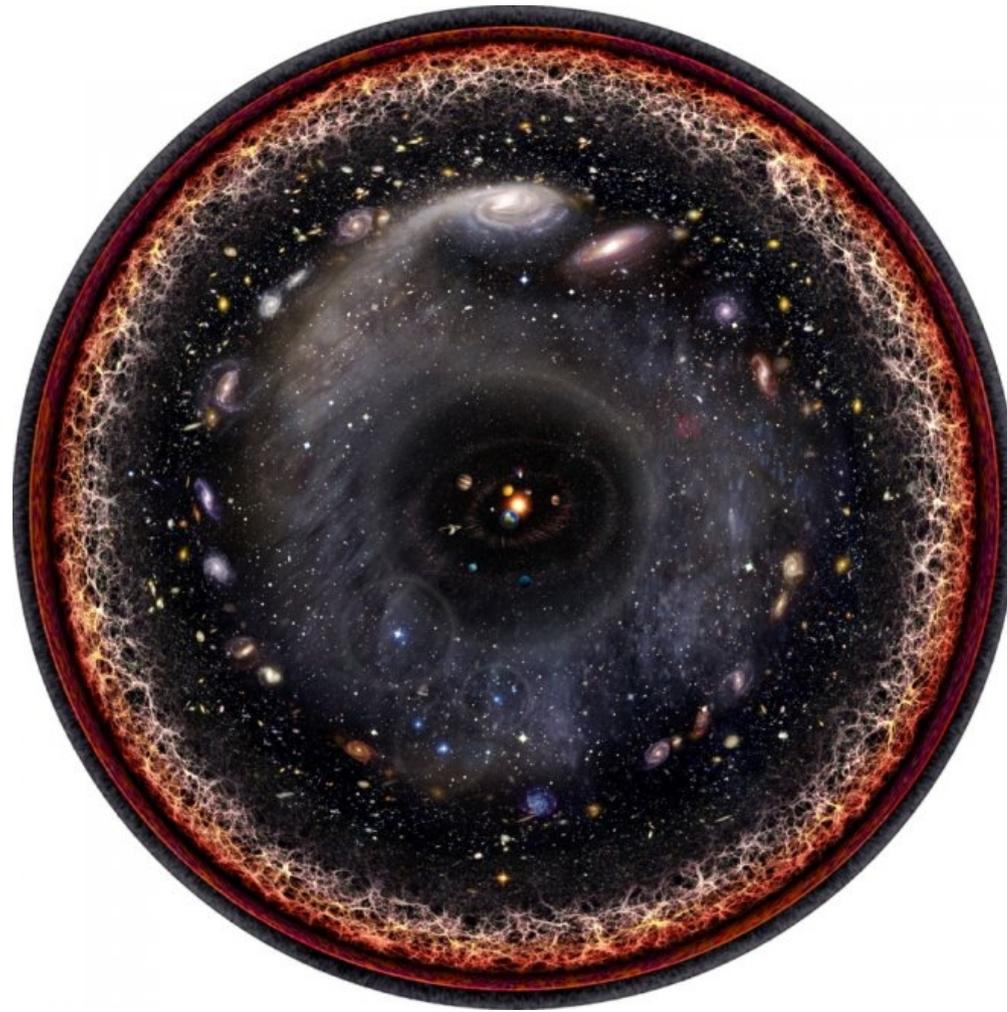
# Bosoni e Fermioni elementari



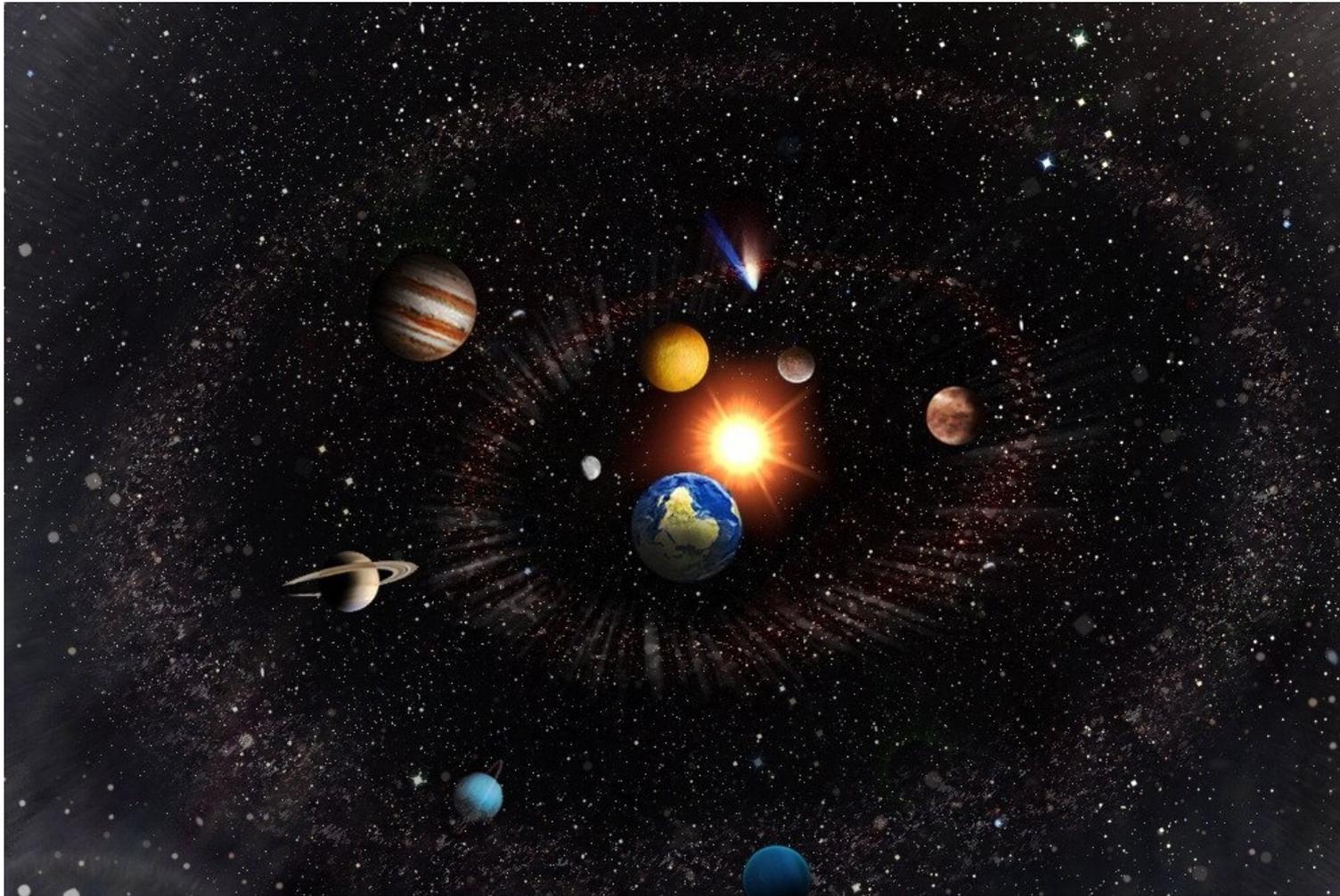
# Big Bang: l'origine dell'Universo



# Universo logaritmico - P.C. Budassi



# Sistema solare - P.C. Budassi



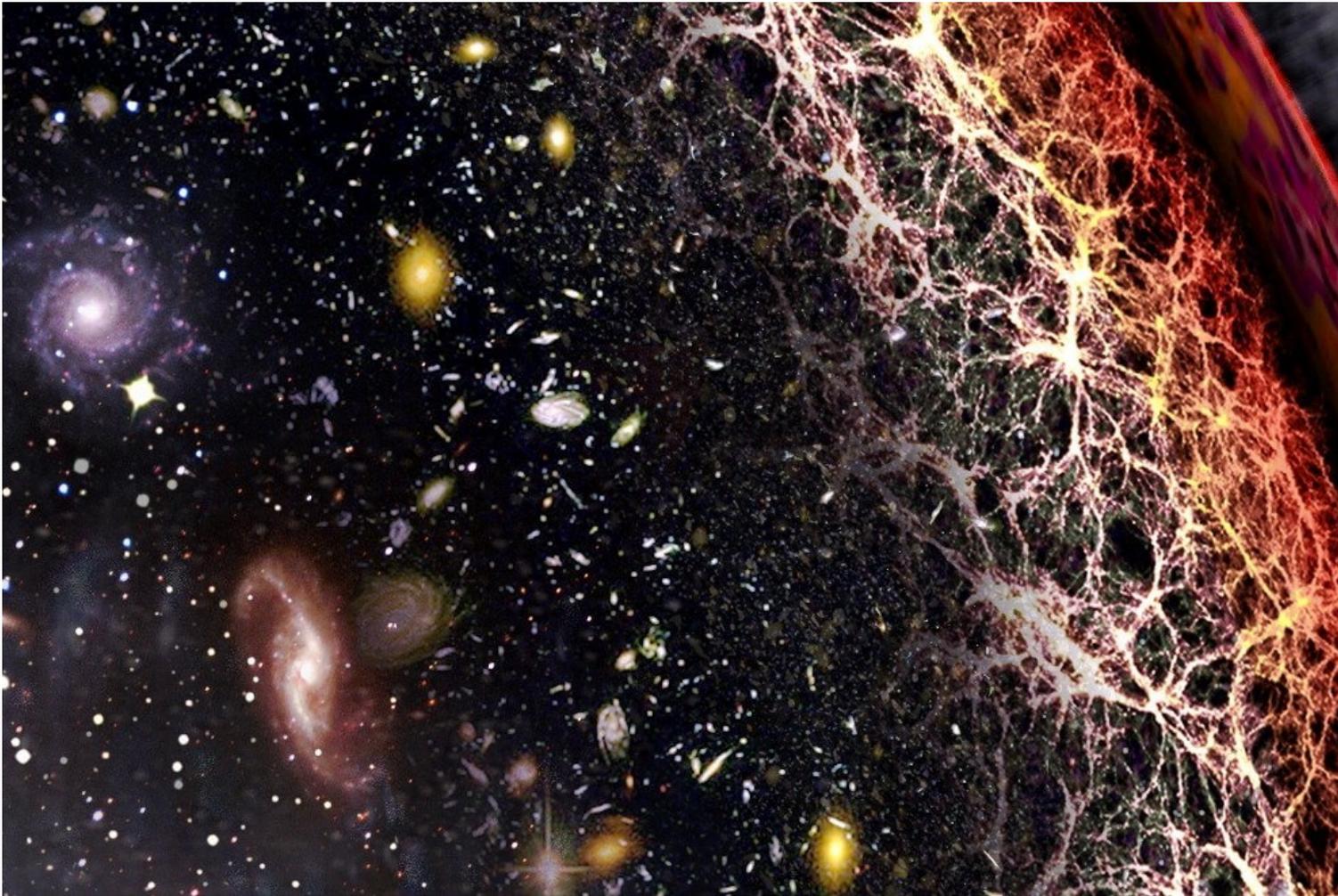
# Galassie spiraliformi - P.C. Budassi



# Ammassi globularari - P.C. Budassi



# Ai confini dell'universo - P.C. Budassi



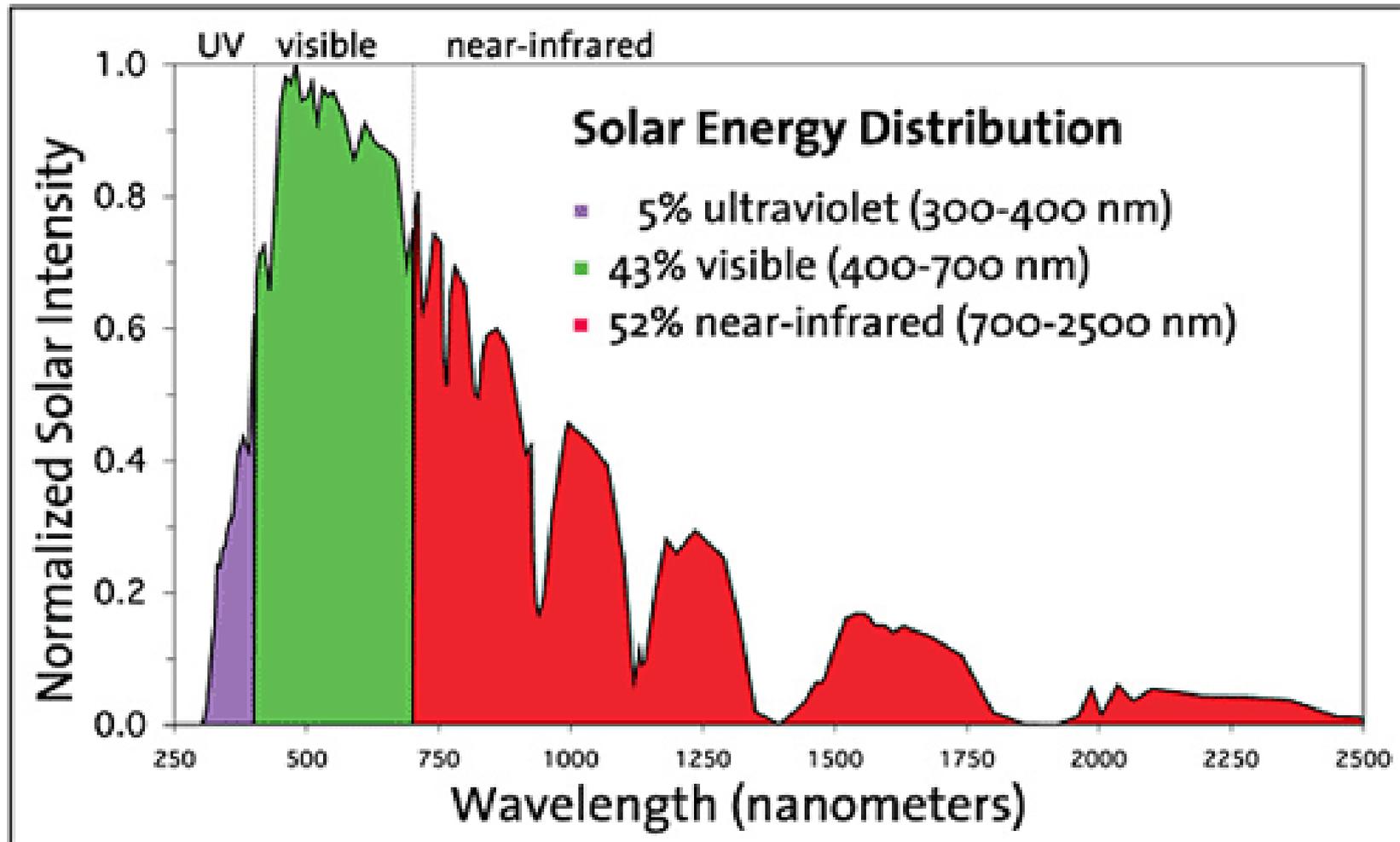
# Parte V

## **Il SOLE, la VITA e l'EVOLUZIONE**

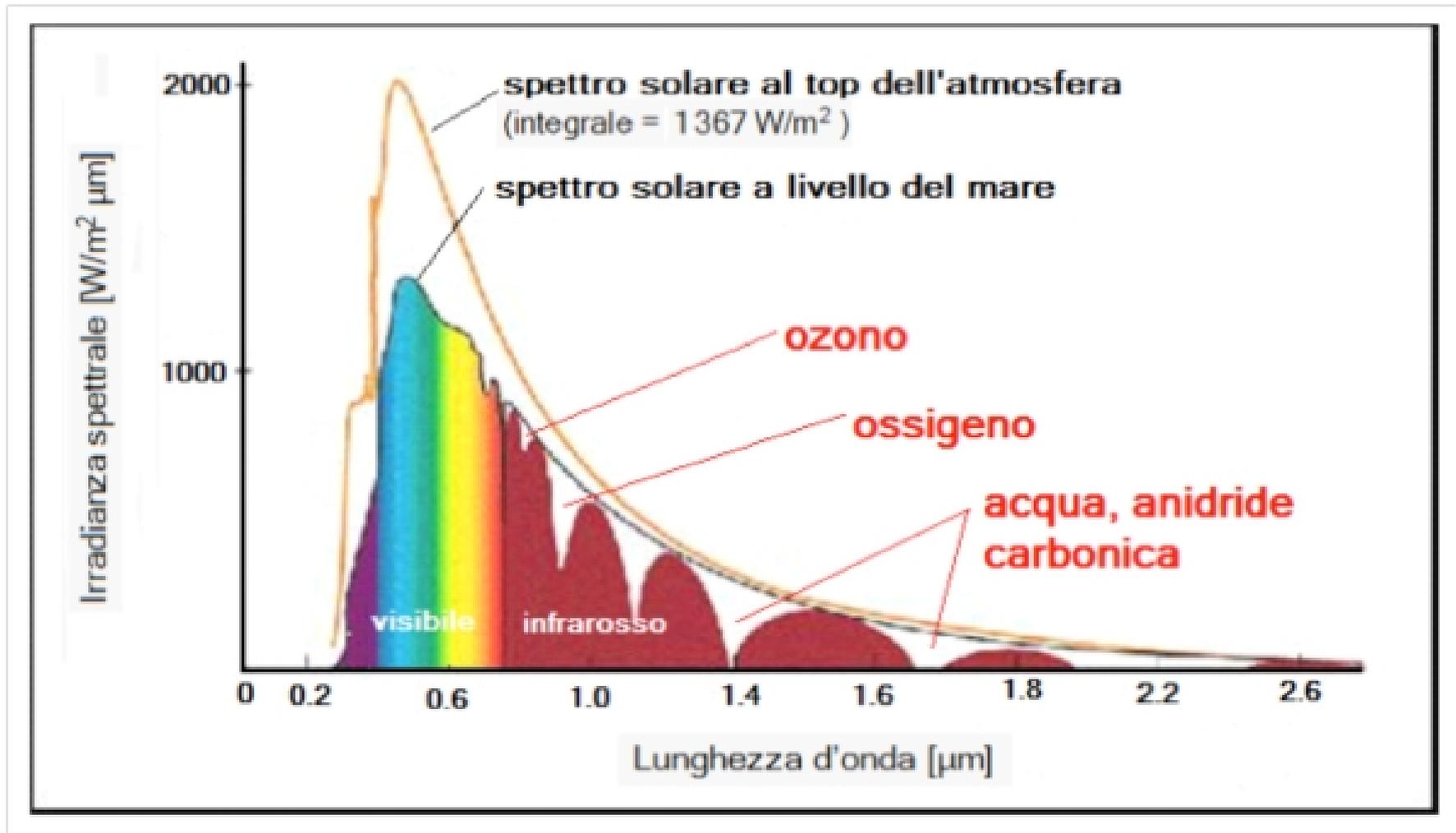
# Il Sole e la vita sulla Terra

- Il Sole è una stella di ca 4.5 miliardi di anni. Sta a  $150 \times 10^6$  km dalla Terra. La sua temperatura al centro è di ca 11.000.000 °C, 5.500 °C sulla superficie.
- La potenza irradiata è di  $6.0 \times 10^{26}$  watt. Sulla Terra arrivano  $1.7 \times 10^{17}$  watt. Di questi: 30% riflessi (persi) - 46% calore - 23% ciclo idrogeologico - 1% fotosintesi
- Quasi tutta l'energia disponibile e utilizzabile sulla Terra proviene dal Sole (salvo il nucleare). Anche il petrolio è energia solare "fossilizzata..."
- La fotosintesi clorofilliana è il meccanismo di produzione (resa del 50% ca) d'energia biologicamente utile:  
 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{luce} = \text{glucosio} + \text{O}_2$

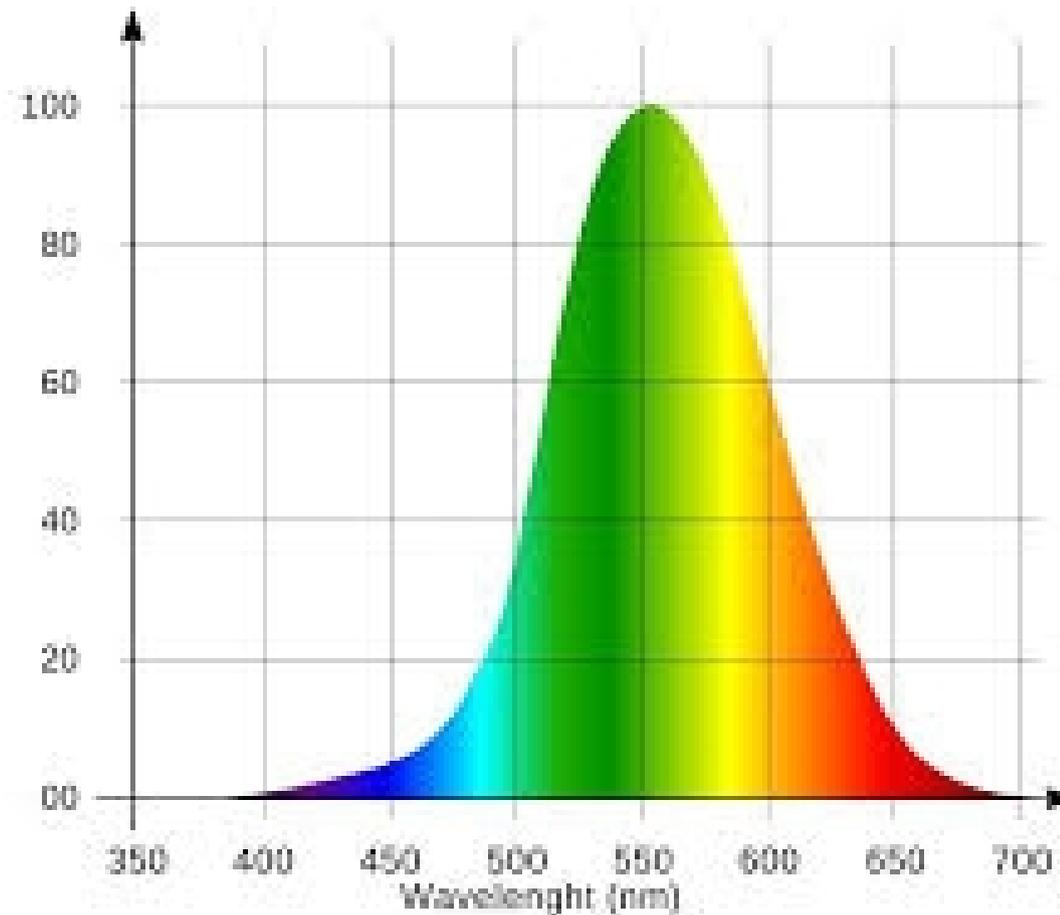
# Distribuzione dell'energia solare



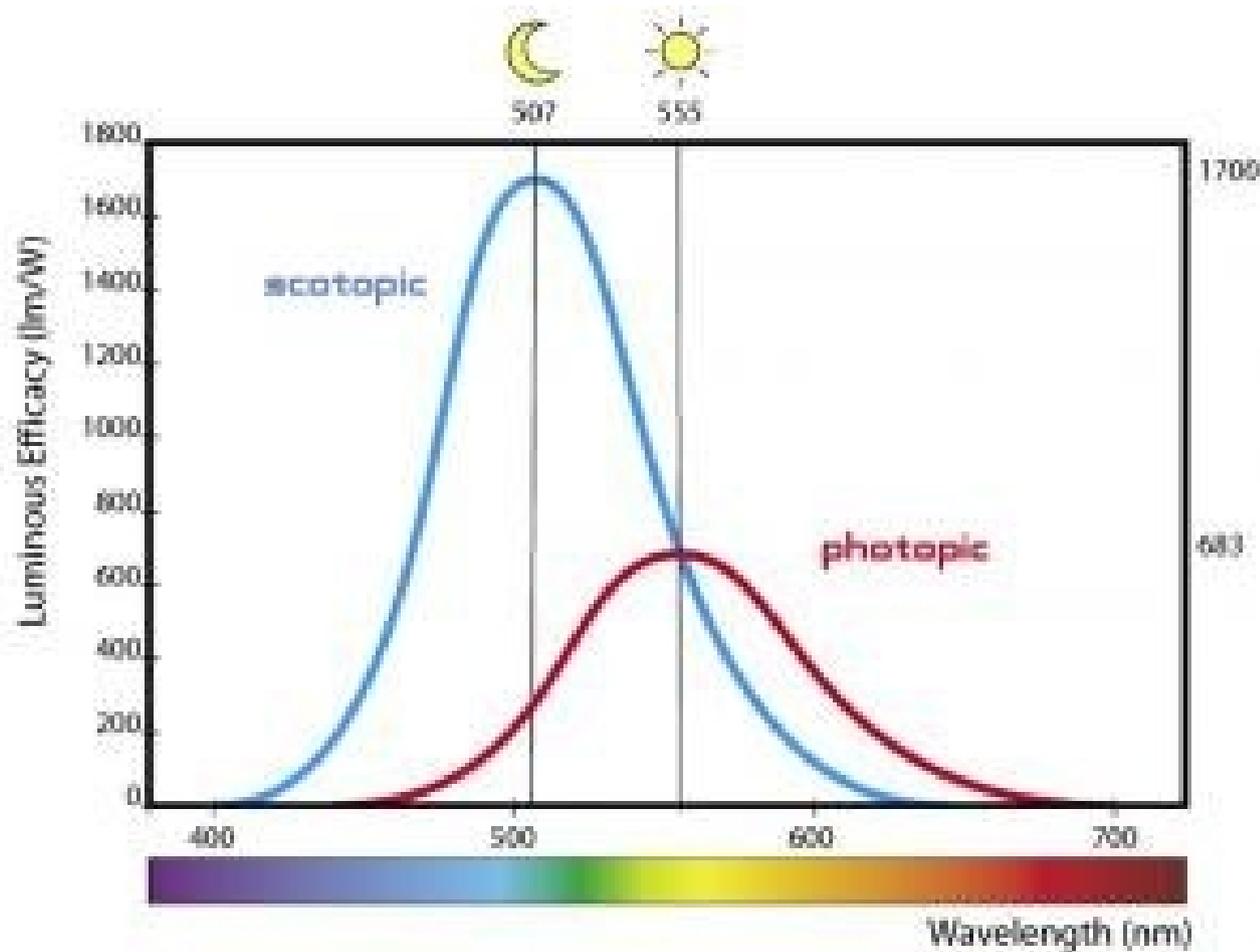
# Lo spettro solare sulla Terra



# Adattamento evolutivo: Sensibilità dell'occhio umano

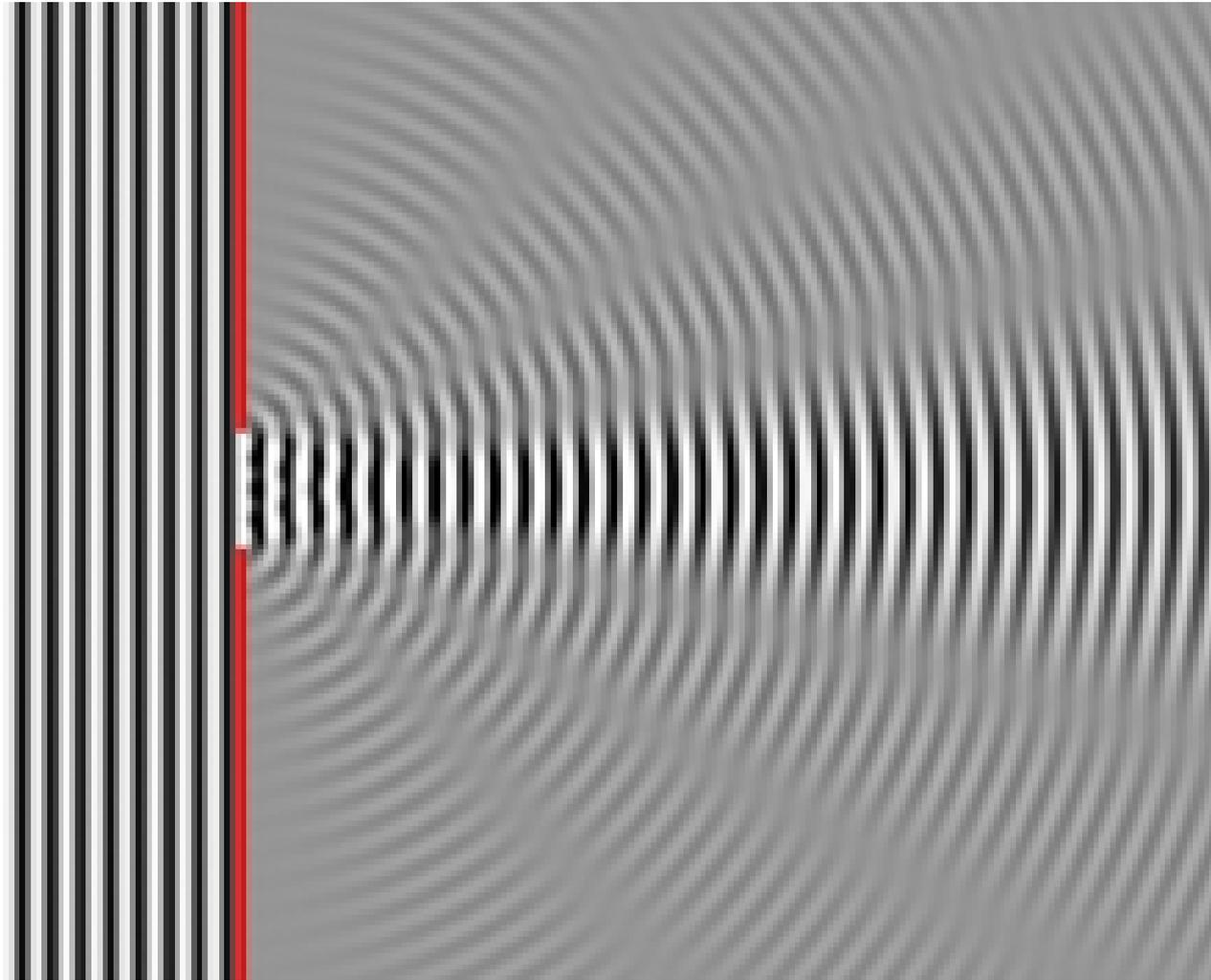


# Adattamento evolutivo: Visione diurna e notturna

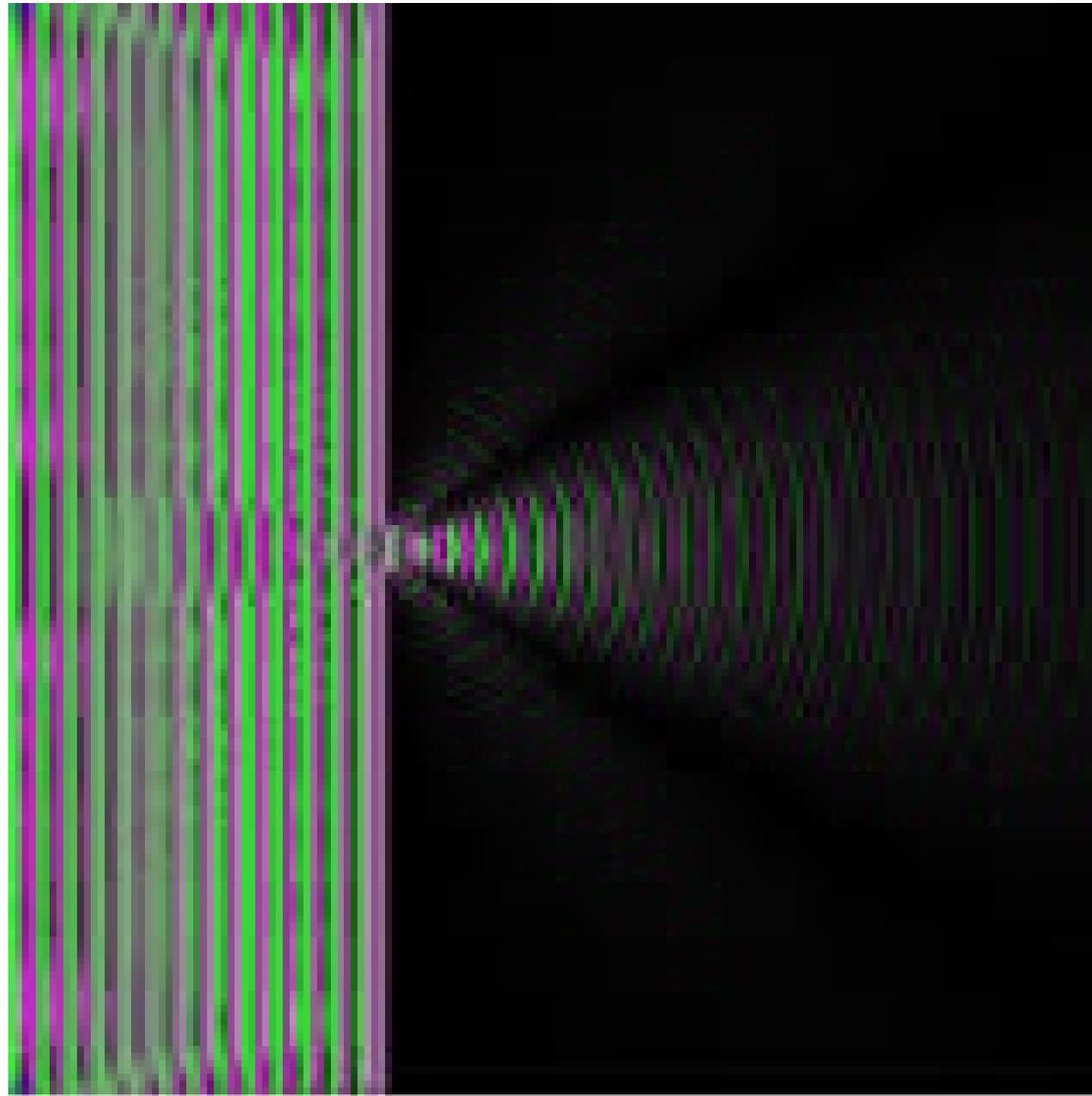


# Lucidi di riserva

# Diffrazione della luce - Onde



# Diffrazione della luce - Colori

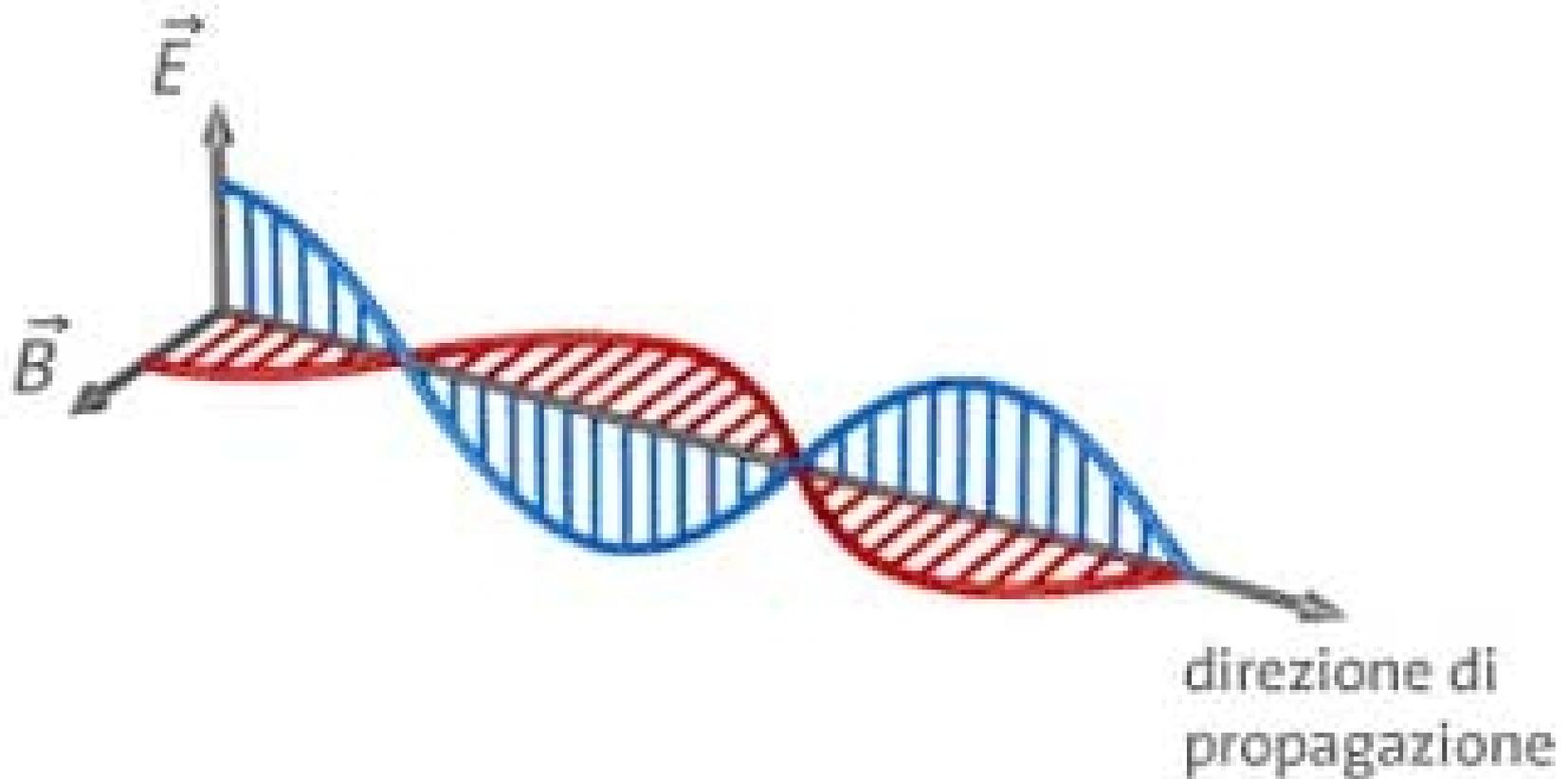


# Newton in “laboratorio”



 campo  
magnetico

 campo  
elettromagnetico



# Radiazioni ionizzanti

