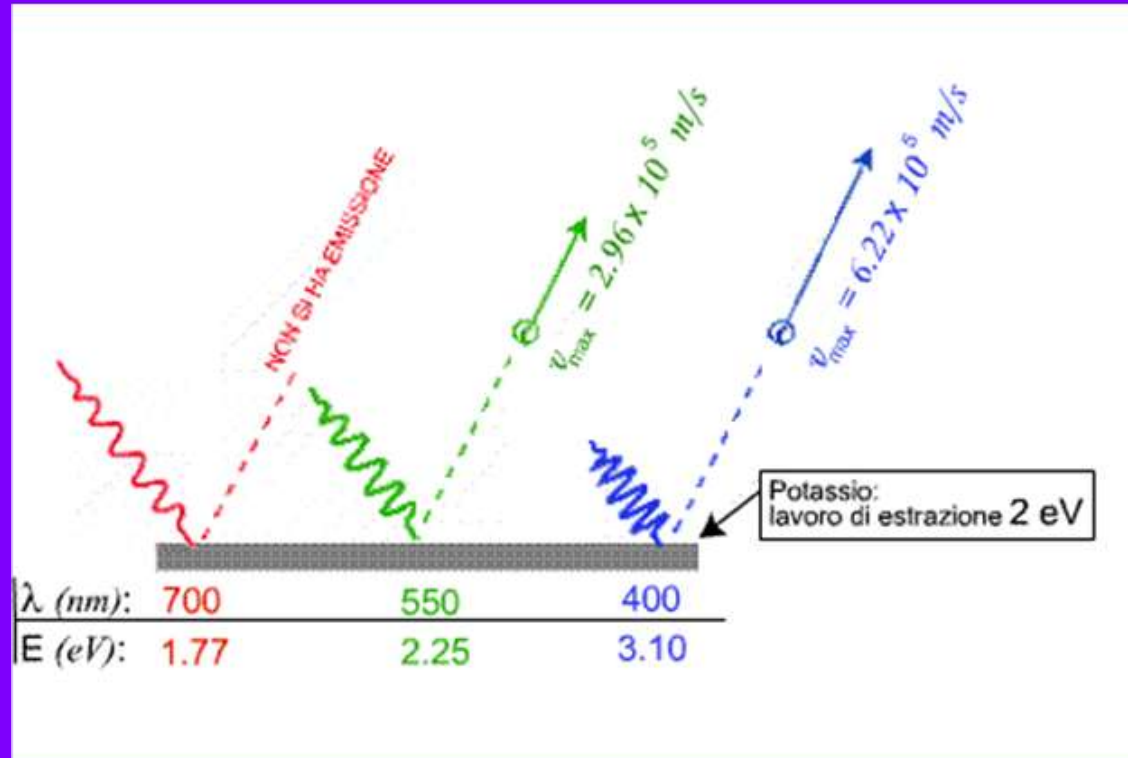
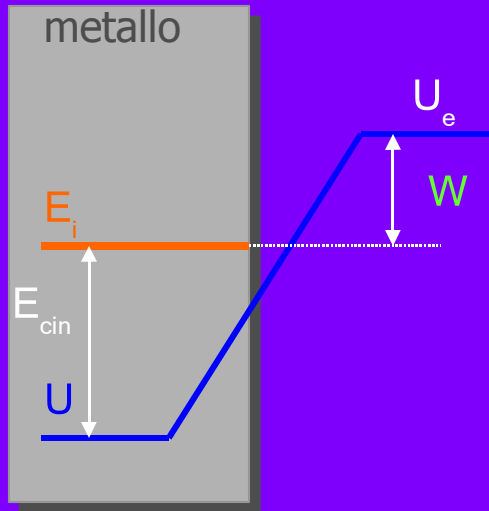


Estrazione di elettroni da un metallo illuminato



- Prime osservazioni Hertz 1857
- Esperimento di Lenard – 1902
- Spiegazione teorica di Einstein - 1905

L'elettrone di conduzione in un metallo è in una buca di potenziale



U energia di legame degli elettroni nel reticolo metallico

E_{cin} energia cinetica dell'elettrone nel metallo

E_i energia totale dell'elettrone nel metallo

$$E_i = E_{cin} + U$$

U_e energia potenziale dell'elettrone libero

Il lavoro di estrazione W è la minima energia che deve essere fornita all'elettrone affinché abbandoni il metallo.

$$W = U_e - E_i$$

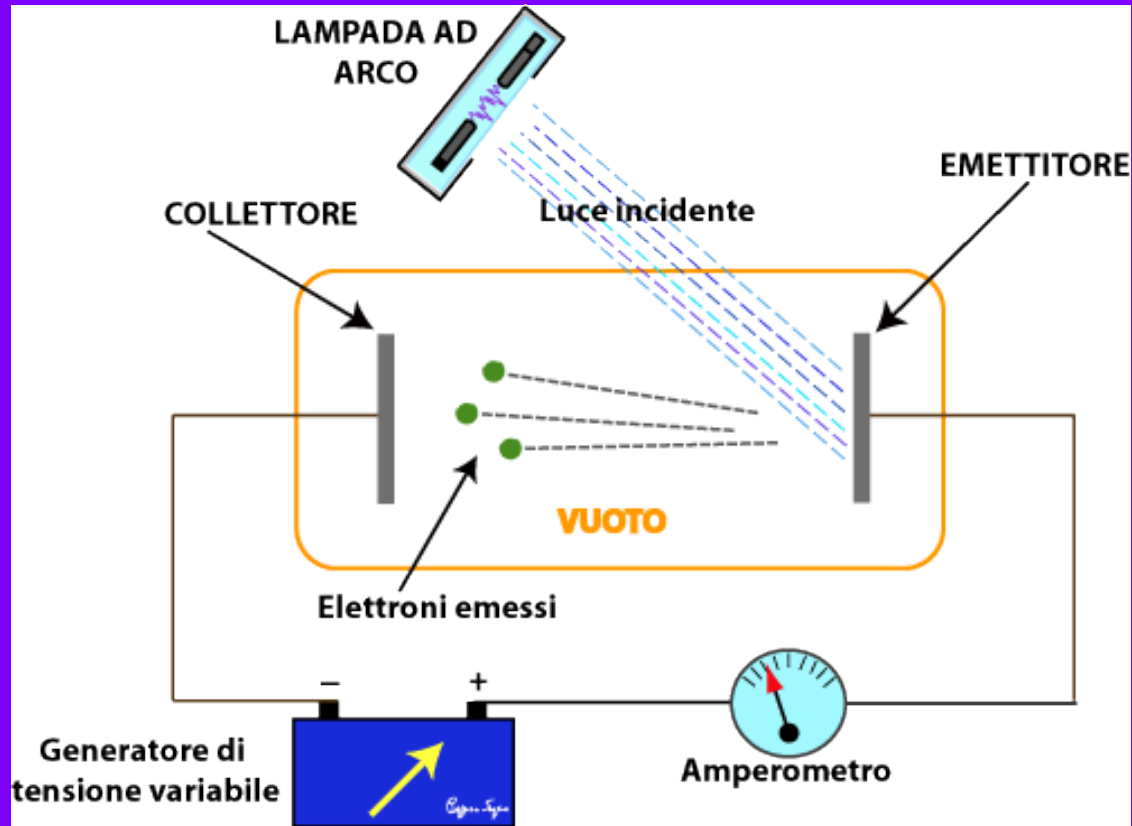
Esso dipende dal tipo di metallo (U) e dalla sua temperatura (E_{cin})

$$V = \frac{\Delta E}{e}$$

Potenziale di estrazione di alcuni metalli

metallo	Potenziale di estrazione V espresso in volt	Lavoro di estrazione ΔE espresso in elettronvolt eV	Lavoro di estrazione ΔE espresso in joule
Cesio Cs	1,9 V	1,9 eV	$1,9V \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}C = 3,04 \cdot 10^{-19}J$
Sodio Na	2,7 V	2,7 eV	$4,32 \cdot 10^{-19}J$
Zinco Zn	3,4 V	3,4 eV	$5,44 \cdot 10^{-19}J$
Rame Cu	4,4 V	4,4 eV	$7,04 \cdot 10^{-19}J$
Platino Pt	6,0 V	6,0 eV	$9,6 \cdot 10^{-19}J$
Ferro Fe	3,2 V	3,2 eV	$5,12 \cdot 10^{-19}J$

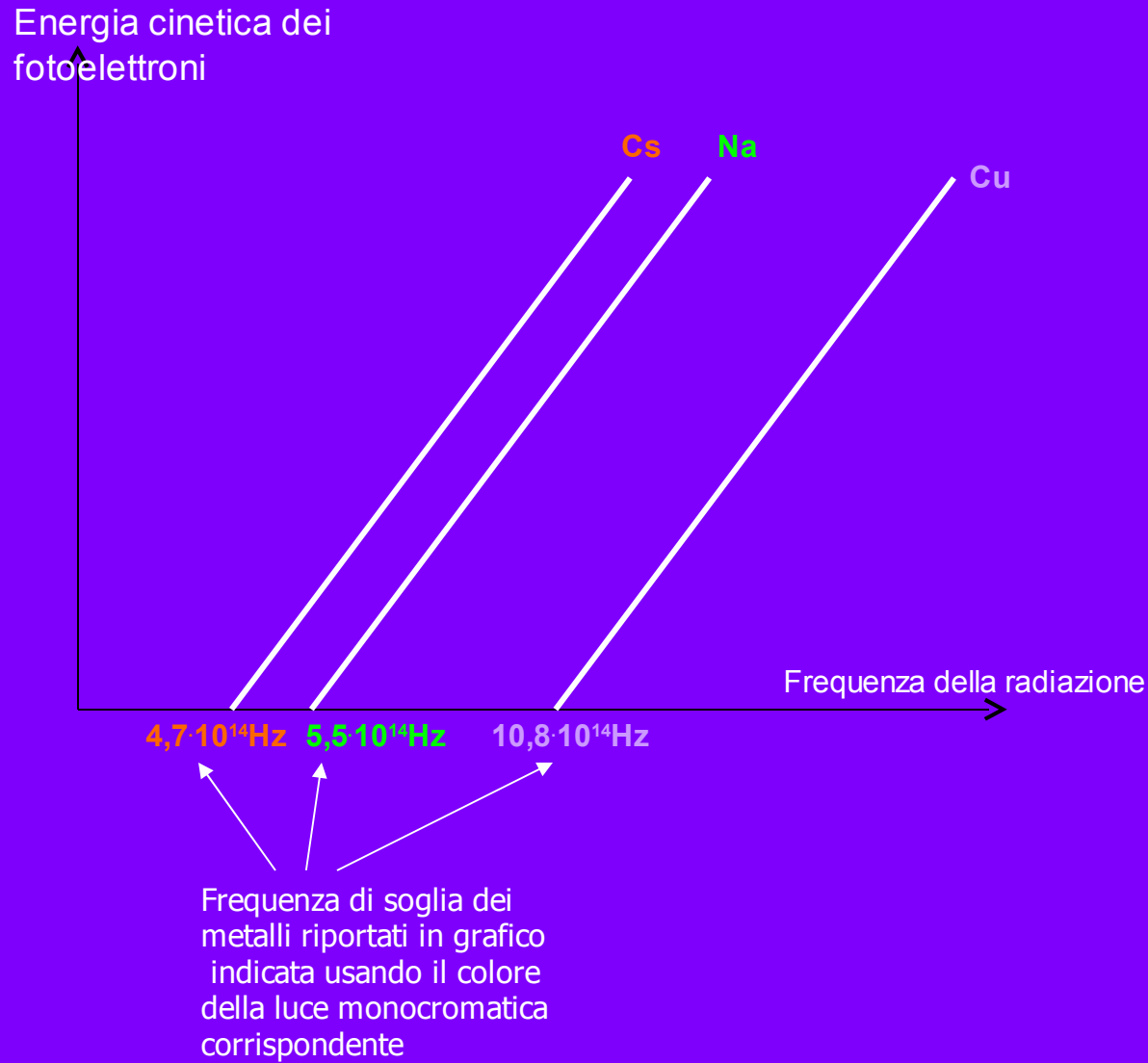
Schema dell'apparato sperimentale utilizzato da Lenard per studiare gli aspetti quantitativi dell'effetto fotoelettrico



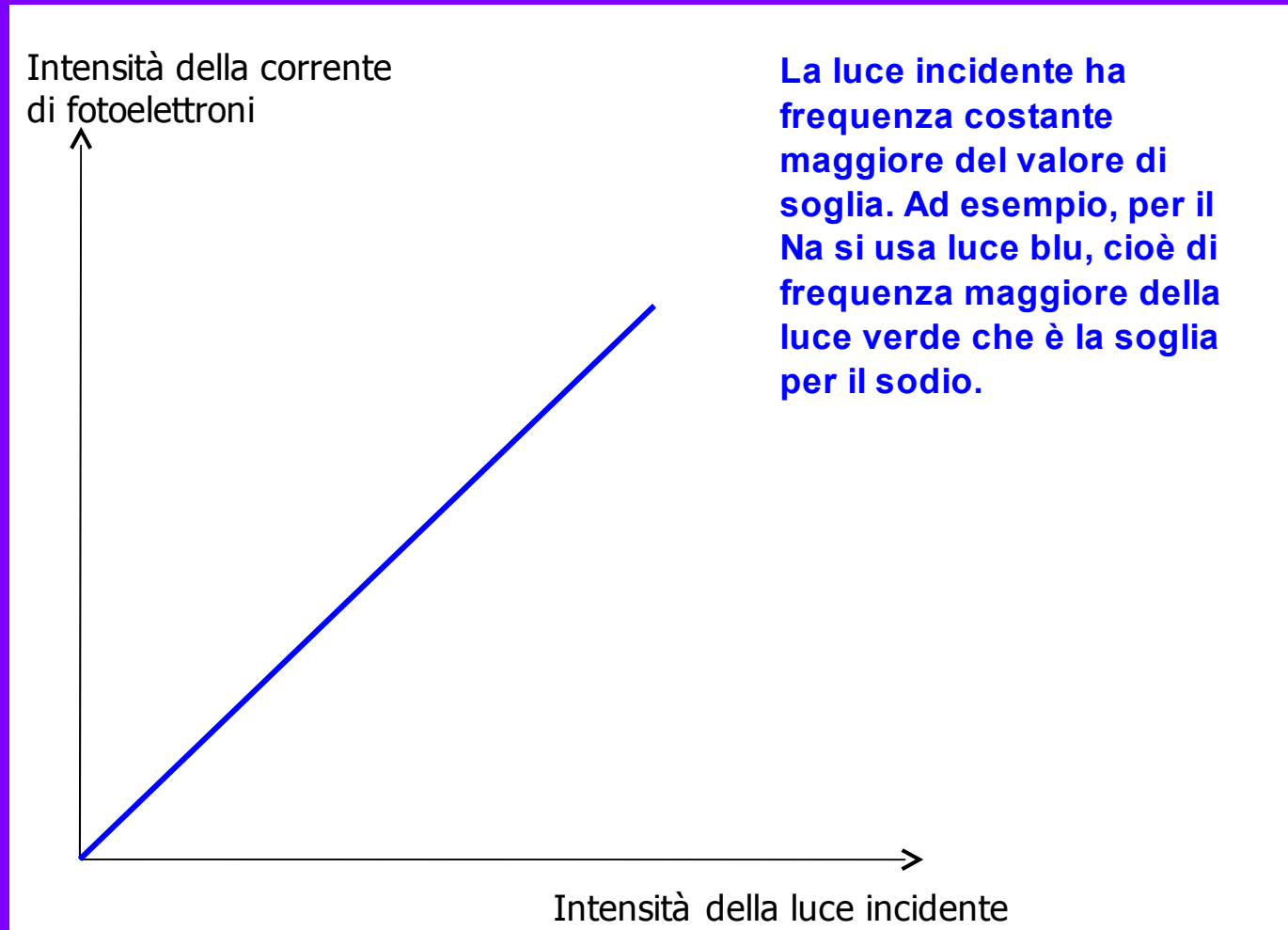
http://www.fis.unical.it/pls_fisica/lo/fotoelettrico/fotoelettrico/percorso/approfondimenti/lenard/lenard.htm

- **Fenomeno osservato da Hertz**
 - Illuminando con luce visibile la superficie di alcuni tipi di metalli si può manifestare emissione di elettroni dalla superficie stessa
- **Osservazioni sperimentali di Lenard**
 - 1) Il fenomeno presenta una frequenza di soglia ν_0 (detta **soglia fotoelettrica**) al di sotto della quale non si osserva il fenomeno
 - 2) L'energia cinetica degli elettroni emessi è indipendente dall'intensità della radiazione incidente
 - 3) L'energia cinetica degli elettroni emessi è indipendente dal tipo di metallo
 - 4) L'energia cinetica degli elettroni emessi è indipendente dalla distanza tra il metallo e il rivelatore
 - 5) Il n° di elettroni emessi aumenta con l'intensità della radiazione
 - 6) Il n° di elettroni emessi è indipendente dalla frequenza della radiazione incidente
 - 7) L'energia del singolo elettrone aumenta al crescere della frequenza della radiazione incidente
- **Questi risultati non si spiegano se gli elettroni ricevono energia da una radiazione descritta in termini classici!**

Grafici dei risultati sperimentali dell'effetto fotoelettrico



Grafici dei risultati sperimentali dell'effetto fotoelettrico



I quanti di luce - Planck (1901)

1. Ogni volta che avviene, da parte della materia, emissione o assorbimento della radiazione elettromagnetica la quantità di energia scambiata è legata alla frequenza ν della radiazione dalla relazione

$$E=h\nu \quad h=6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \quad \text{costante di Planck}$$

3. L'energia della radiazione elettromagnetica non è distribuita con continuità nello spazio, bensì è raccolta in quanti detti **fotoni**

Interpretazione quantistica dell'effetto fotoelettrico (Einstein, 1905)

- 1) Se $h\nu < W$ non si ha energia sufficiente per estrarre gli elettroni dal materiale → **soglia fotoelettrica**
- 2) Un elettrone può ricevere energia solo da un quanto → **l'energia cinetica degli elettroni emessi non dipende dall'intensità della radiazione incidente**
- 3) $E_{\text{cin}} = h\nu - W$ → **L'energia del singolo elettrone aumenta al crescere della frequenza della radiazione incidente**
- 5) Aumentando l'intensità della radiazione aumenta il n° di pacchetti di energia → **il n° di elettroni emessi aumenta con l'intensità**

W energia necessaria per estrarre un elettrone dal materiale

$h\nu$ energia fornita al materiale dal singolo fotone

Previsioni della meccanica classica

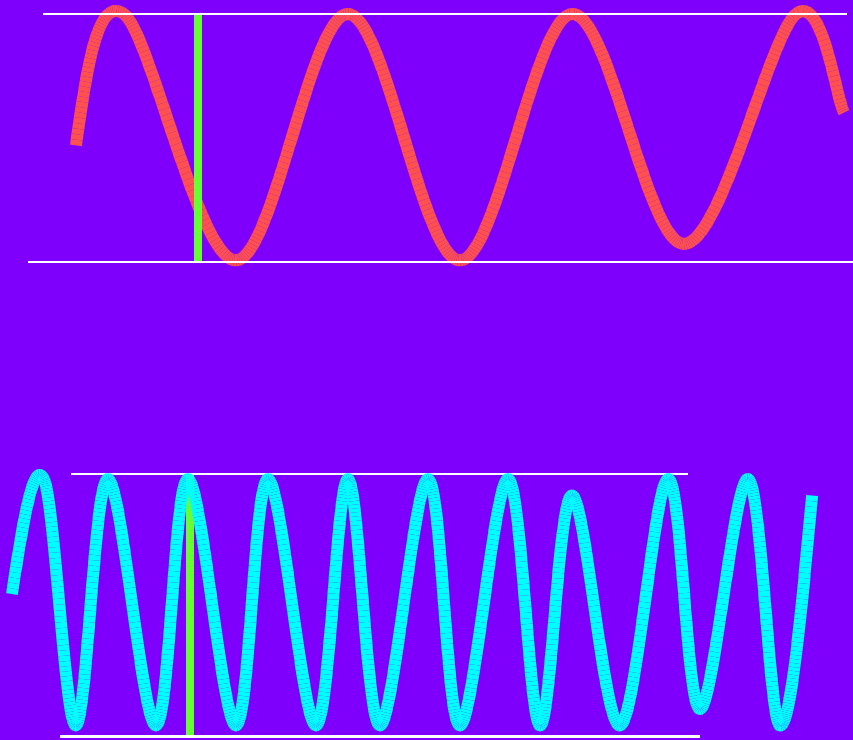
(in disaccordo con i risultati sperimentali)

3. L'energia cinetica degli elettroni emessi non dipende dalla frequenza della radiazione incidente
5. L'energia cinetica degli elettroni emessi dipende dell'intensità della radiazione incidente
7. Qualunque radiazione, di qualsunque frequenza , può causare l'emissione di elettroni. Se essa è poco intensa ci vorrà un po' di tempo (ritardo) perché gli elettroni accumulino l'energia sufficiente per uscire dal metallo

Perché la meccanica classica non fa previsioni corrette, in questo caso?

Ripassiamo la teoria delle onde

Secondo la teoria ondulatoria l'energia trasportata da un'onda è proporzionale alla sua **ampiezza**



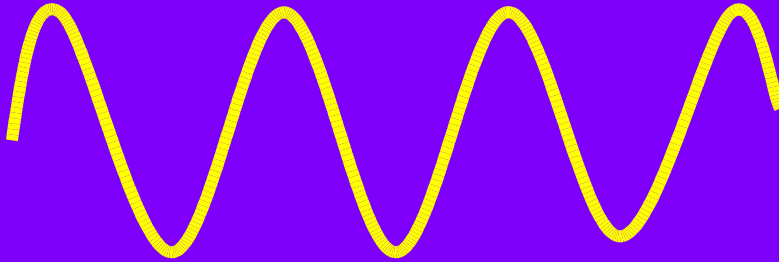
Queste due onde hanno la stessa energia anche se hanno diversa frequenza

Se l'energia trasportata dell'onda dipende dalla sua ampiezza e non dalla frequenza, allora perché succede questo?

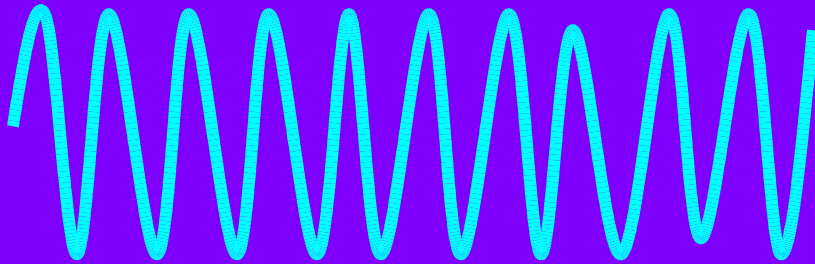


Anche una debolissima luce UV è capace di strappare elettroni da un metallo, mentre un faro da 1000 watt giallo non ci riesce

L'effetto fotoelettrico mostra che è la frequenza ν a determinare l'energia trasportata dalla luce



bassa frequenza
bassa energia

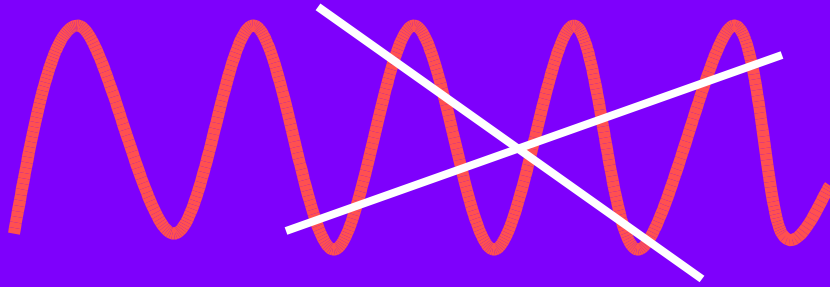


alta frequenza
alta energia

Ma allora la luce non è un'onda!

I quanti di Planck

La luce è quantizzata



Grandezza
continua



Grandezza
discreta

Dall'articolo sui quanti di luce

pubblicato da Einstein nel 1905 sugli "Annalen der Physik"

Dice Einstein:

"Secondo l'ipotesi che voglio qui proporre, quando un raggio di luce si espande partendo da un punto, l'energia non si distribuisce su volumi sempre più grandi, bensì rimane costituita da un numero finito di quanti di energia localizzati nello spazio, che si muovono senza suddividersi e che non possono essere assorbiti o emessi parzialmente."

Dall'articolo sui quanti di luce

"La consueta concezione, per la quale l'energia della luce si distribuisce in modo continuo nello spazio irradiato, incontra, nel tentativo di spiegare i fenomeni fotoelettrici, notevoli difficoltà, che sono state fatte oggetto di uno studio particolarmente approfondito dal Signor Lenard [Einstein si riferisce all'articolo di Lenard del 1902]. Partendo dal principio che la luce eccitatrice è costituita di quanti di energia $h\nu$, l'emissione ... [di elettroni] si può spiegare nel seguente modo. I quanti di energia penetrano nello strato superficiale del corpo e la loro energia si trasforma, almeno in parte, in energia cinetica di elettroni... Inoltre va supposto che ogni elettrone, nell'abbandonare il corpo, debba effettuare un lavoro w (che è caratteristico del corpo considerato). Ad uscire dal corpo con la massima velocità normale $[V_{\max}]$ saranno gli elettroni eccitati che si trovano direttamente alla sua superficie e che acquistano una velocità normale ad essa".

Potenziale di estrazione, frequenza di soglia ν_0 e lunghezza d'onda λ_0

metallo	Lavoro di estrazione W espresso in elettronvolt	Energia di soglia del fotone $h\nu_0$	Frequenza di soglia ν_0	Lunghezza d'onda λ_0 espressa in nanometri
Cesio Cs	1,95 eV	$3,12 \cdot 10^{-19} \text{J}$	$4,7 \cdot 10^{14} \text{Hz}$	638nm arancio
Sodio Na	2,7 V	$4,32 \cdot 10^{-19} \text{J}$	$5,45 \cdot 10^{14} \text{Hz}$	550nm verde
Rame Cu	4,48 V	$7,16 \cdot 10^{-19} \text{J}$	$10,8 \cdot 10^{14} \text{Hz}$	277nm ultraviolett

$$\nu_0 = \frac{W}{h} \quad \lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}$$