

MA0748 - FISICA PER I DISPOSITIVI IOT

Lorenzo Santi

AA 2022/23 – Lezione 13 02/05/2023

Argomenti della lezione di oggi

- Le onde
 - Onde meccaniche in una slinky
 - Onde trasversali in una corda
 - Ondoscopio
- La luce

Le onde

Una definizione di onda da «enciclopedia»

Non esiste.

La cosa più vicina ad una definizione è la frase

La propagazione della perturbazione di un sistema fisico che trasporta energia.

Questo perché i fenomeni ondosi ha una base fenomenologica quanto mai varia, dal suono alla luce, fino ad arrivare alle basi della meccanica quantistica, impossibile da riassumere in una sola frase.

Tuttavia, il modello di onda coinvolge concetti che sono trasversali a tutte queste fenomenologie.

Per vedere quali sono, prenderemo ad esempio il caso delle **onde meccaniche**

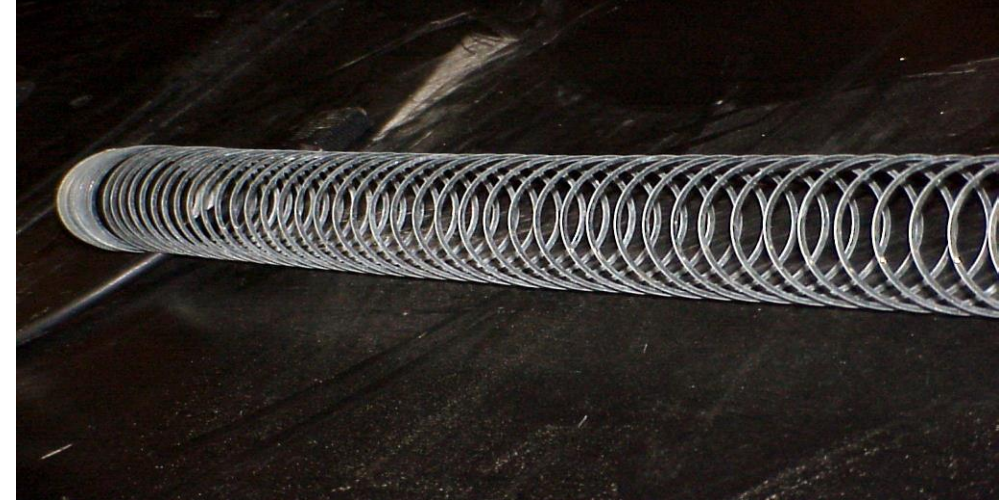
Onde meccaniche in una slinky

Come sistema fisico in cui propagare una perturbazione usiamo una molla particolare, chiamata slinky. Con essa possiamo generare sia onde TRASVERSALI che LONGITUDINALI

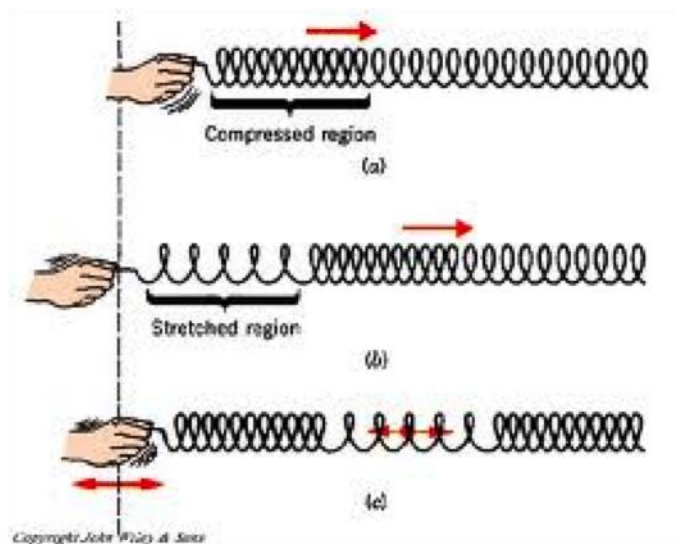


Mettiamo in tensione la molla
(stato imperturbato)

Ora possiamo perturbare in due modi
diversi la molla

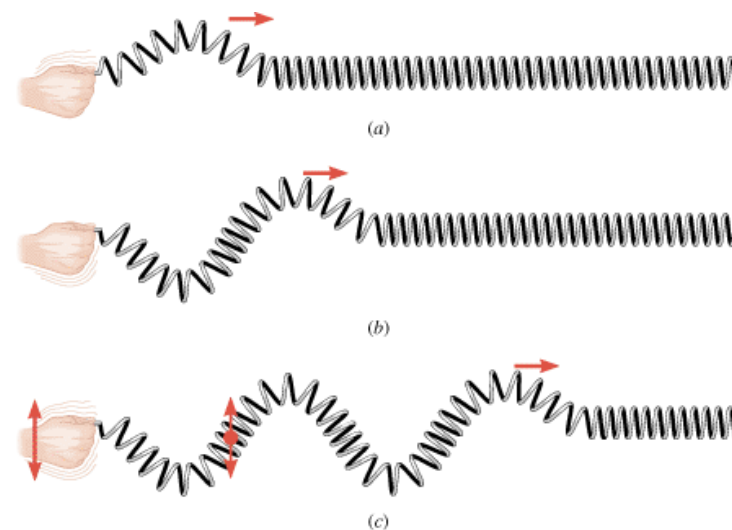


Tirandola e rilasciandola



Onda longitudinale

dandogli un colpo trasversale



Onda trasversale

Onde trasversali in una slinky



Video: <https://youtu.be/DeKoXt4yDtQ>
(fino al minuto 2:12. Oppure cercare su YouTube
«Waves PSSC»)

Cosa abbiamo imparato

Un'onda è caratterizzata dai seguenti parametri o aspetti associati alla perturbazione propagata in un mezzo fisico, altrimenti in equilibrio

- Ampiezza
- Forma
- Velocità di propagazione
- Attenuazione

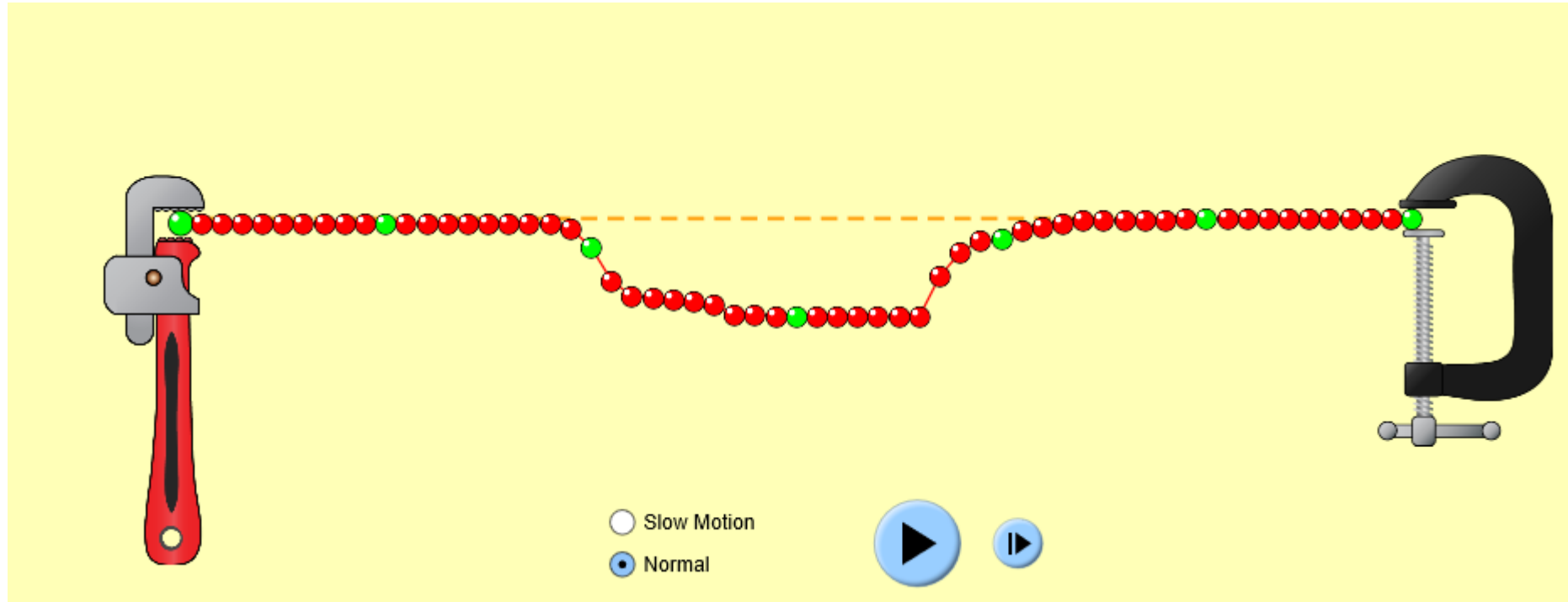
Concentriamoci sulla velocità di propagazione

Onde in slinky con differenti tensioni



Video: <https://youtu.be/DeKoXt4yDtQ?t=126>

Onde trasversali in una corda



Sito simulazione :

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-on-a-string>

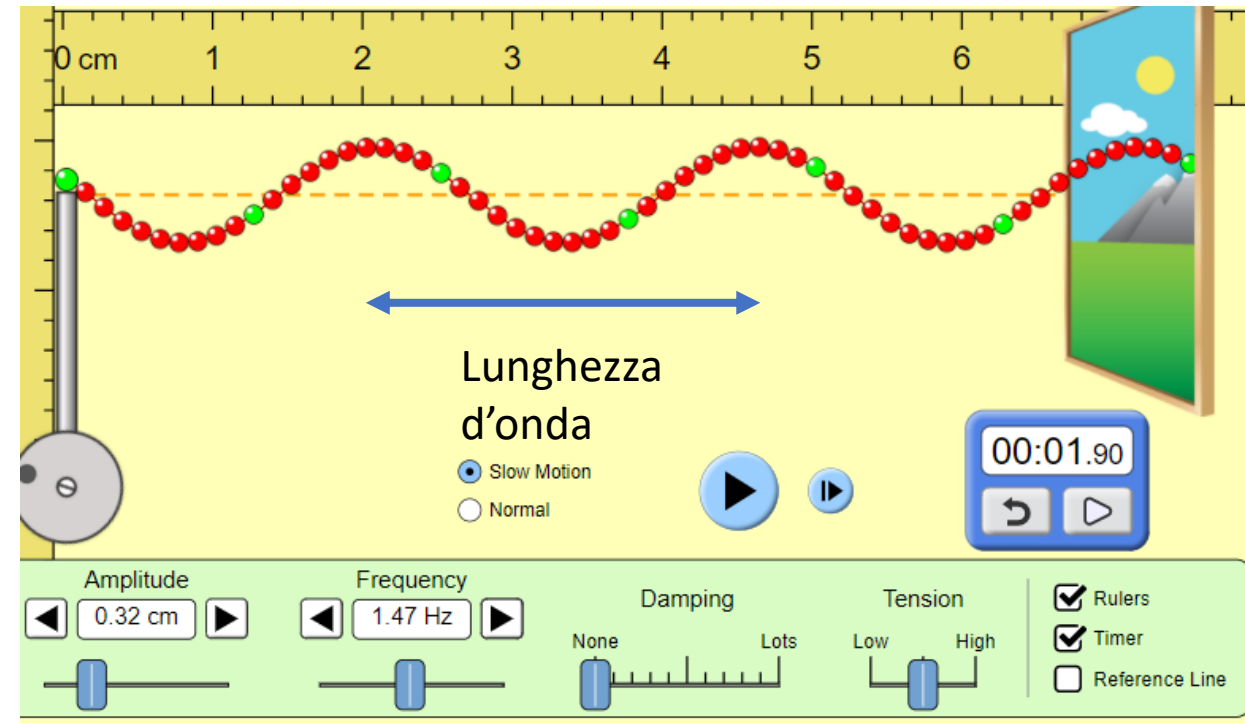
Che cosa abbiamo imparato

Che possiamo generare delle onde trasversali periodiche nella fune

Che queste onde sono caratterizzate da una

- lunghezza d'onda (ad esempio, la distanza tra due massimi)
- Frequenza (la frequenza della sollecitazione esterna)

Che queste onde si spostano con una velocità che dipende dal valore di alcune grandezze di stato del sistema (nel caso della simulazione, dalla tensione della fune)



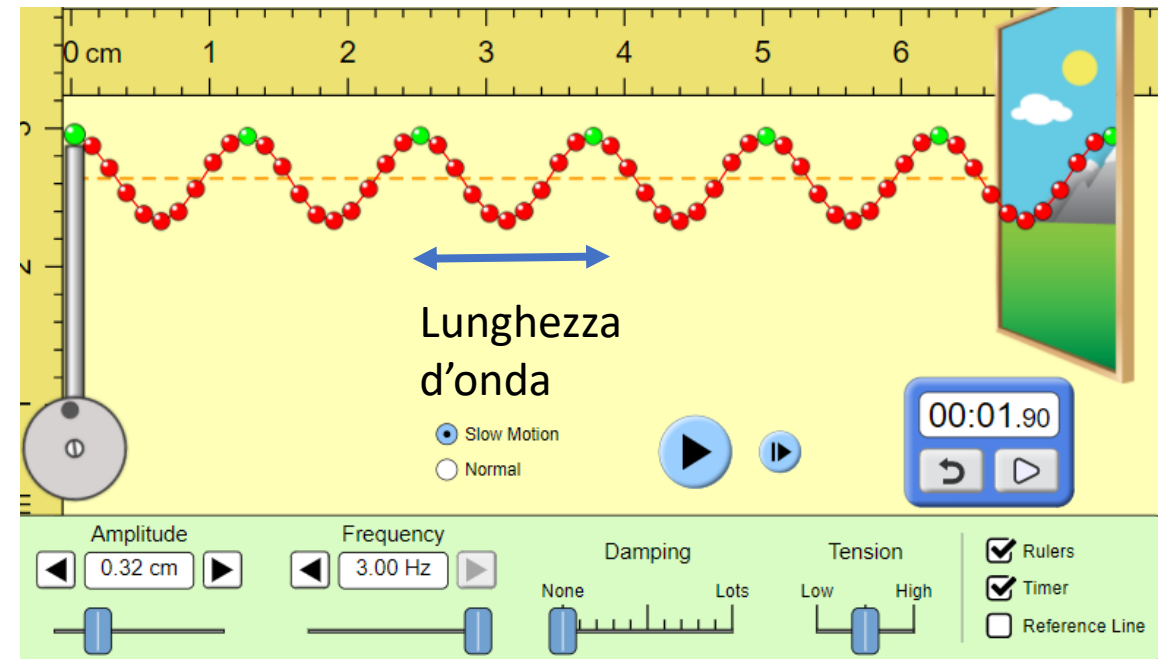
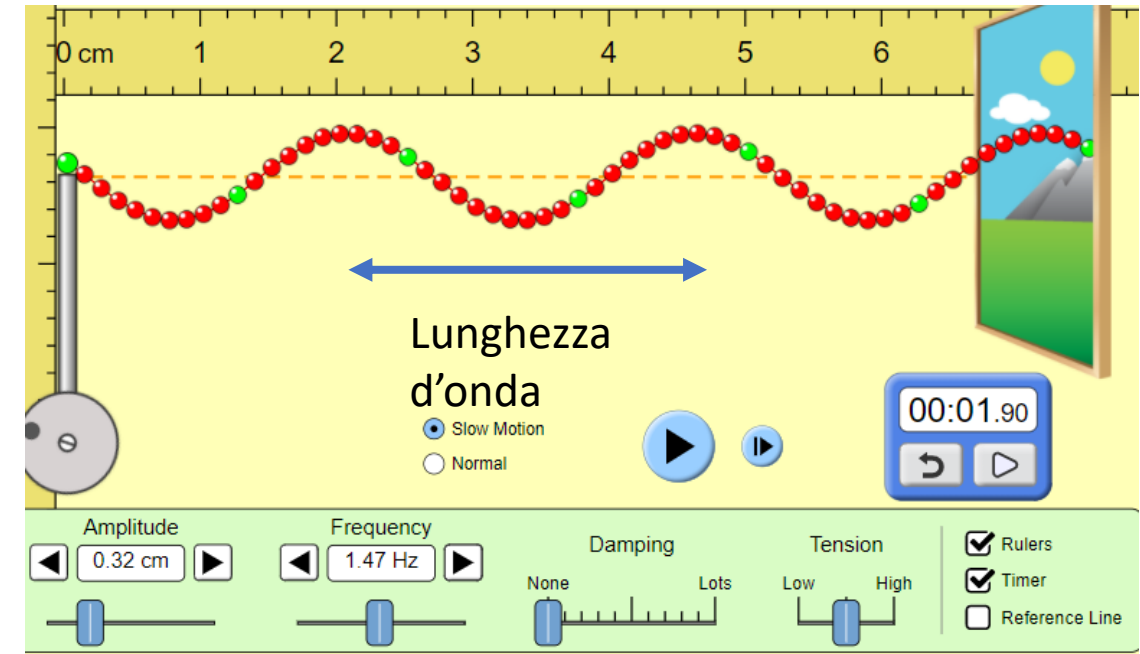
Che cosa abbiamo imparato

Che a parità di tensione (e quindi di velocità di propagazione dell'onda) la lunghezza d'onda λ dipende in maniera inversa dalla sua frequenza ν

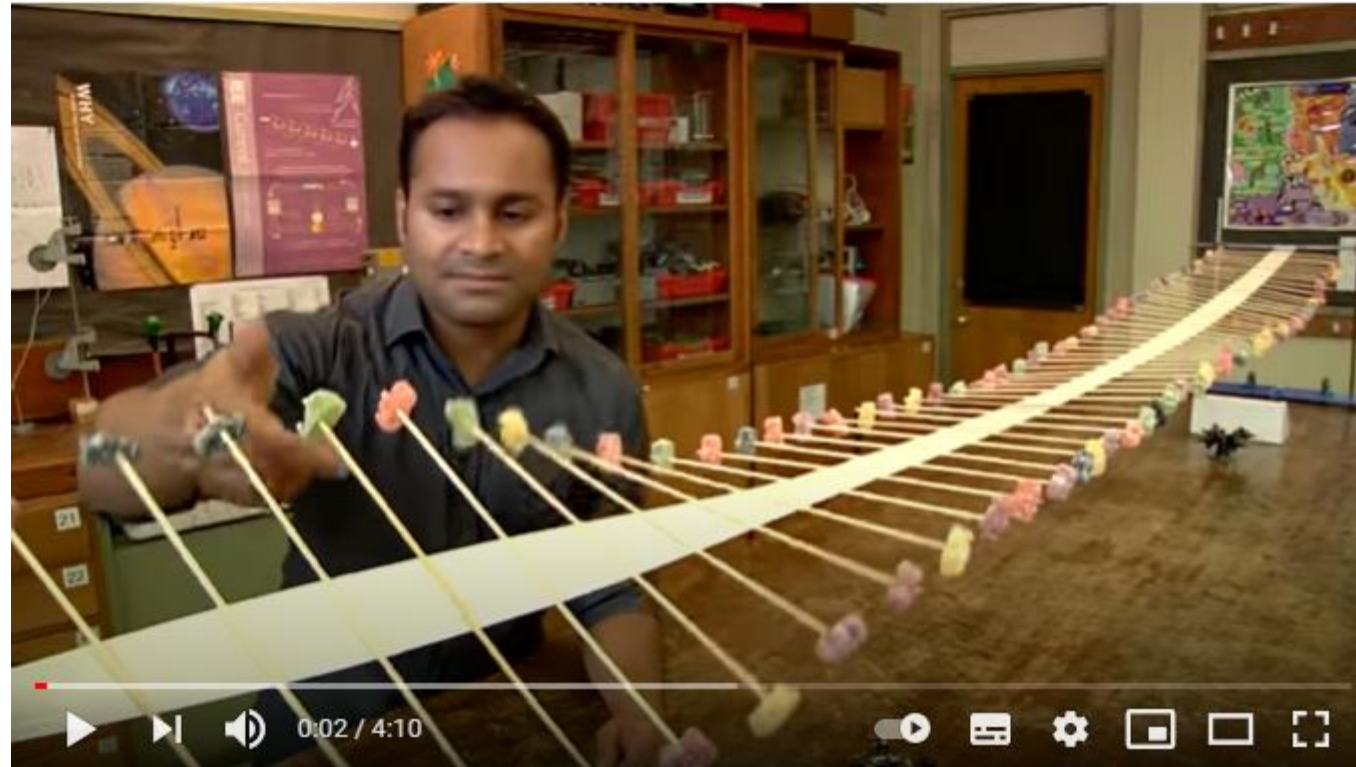
$$\lambda \propto 1/\nu$$

Che al variare della velocità di propagazione v dell'onda vale comunque

$$v = \lambda \nu$$



Ondoscopio



https://youtu.be/VE520z_ugcU

(cercate su YouTube «wave machine», National STEM Centre)

Abbiamo visto come il fenomeno della propagazione delle onde è presente in diversi fenomeni molto diversi fra di loro:

Le vibrazioni trasversali (o longitudinali) di una molla slinky

Le vibrazioni trasversali di una fune tesa

Le vibrazioni rotazionali dell'ondoscopio

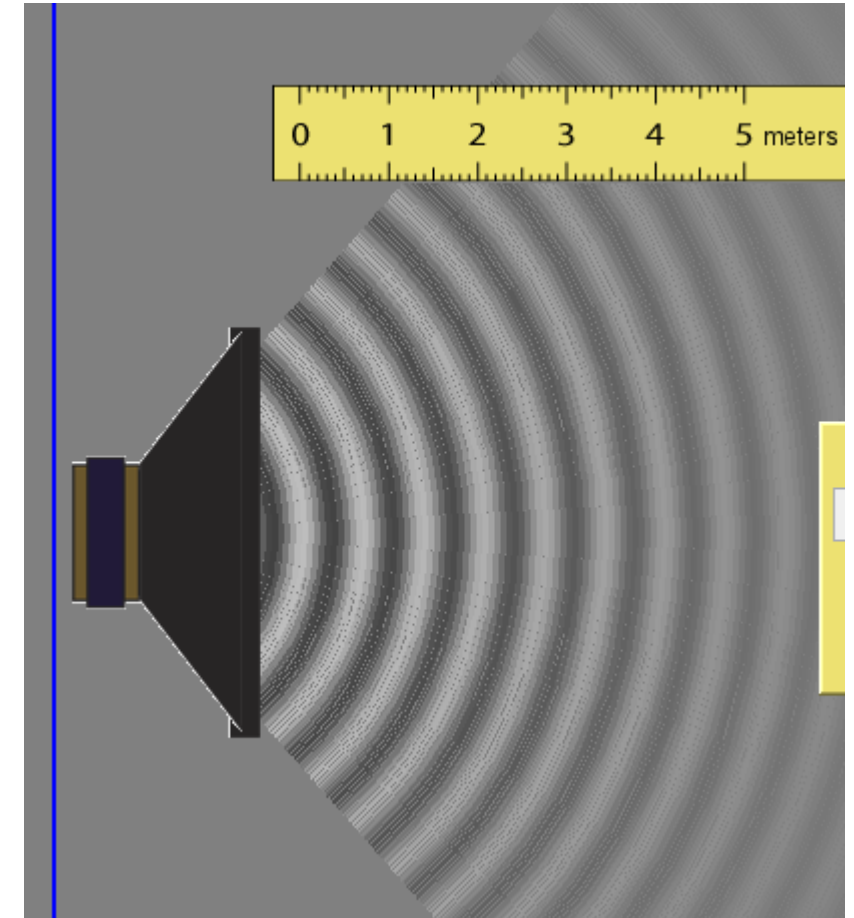
In generale, per qualsiasi sistema fisico nel quale esista una configurazione di equilibrio che possa essere sollecitata con una perturbazione locale, genera un fenomeno ondoso, in cui tale perturbazione viene propagata nello spazio circostante.

Consideriamo il caso delle onde sonore.

L'aria che riempie un certo volume, in condizioni standard, possiede un valore prefissato di pressione.

Se essa viene perturbata localmente (ad esempio muovendo velocemente avanti ed indietro la membrana di uno speaker) si crea un aumento (o una diminuzione locale) di pressione, che si propaga verso l'esterno.

Se la perturbazione è periodica, la propagazione è quella di un'onda, con una determinata velocità v (quella del suono per i valori di pressione e temperatura), di frequenza ν (quella di vibrazione dello speaker) e di lunghezza d'onda λ (data dalla relazione $v = \lambda \nu$)



La luce

La luce è una forma di **radiazione** che si propaga nello spazio, anche in assenza di materia.

Per radiazione in fisica si intende un qualsiasi **fenomeno capace di trasportare energia nello spazio e cederla alla materia**, interagendo con essa.

Nel caso della luce, potete sperimentare sensorialmente questo, ponendo una mano sotto una lampada e sentendo la pelle illuminata scaldarsi.

(in figura è mostrata una dimostrazione un po' più raffinata, nella quale viene misurata la variazione di temperatura di tre lastre metalliche, illuminate dalla lampada).



La luce solare, che noi percepiamo come bianca, in realtà risulta essere il risultato della combinazione di **componenti** di luce di **diverso colore**.

Questo può essere evidenziato con il fenomeno della rifrazione ottica, facendo ad esempio incidere della luce su un prisma trasparente ed osservando le diverse componenti colorate separate spazialmente.

In natura tale fenomeno produce l'arcobaleno, in cui il processo di rifrazione della luce avviene nelle goccioline d'acqua sospese nell'aria.



La luce come radiazione elettromagnetica

Ma cosa è la luce?

La luce in realtà è la parte percepibile all'occhio umano di una categoria di radiazioni più generale, la **radiazione elettromagnetica**.

La radiazione elettromagnetica è essenzialmente un'onda che si propaga nello spazio, anche in assenza di materia. La grandezza fisica che viene perturbata in questa propagazione è legata ai fenomeni elettrici e magnetici.

I fenomeni elettromagnetici vengono descritti formalmente mediante delle grandezze fisiche chiamate **campi elettrico e magnetico**. Quando questi campi risultano diversi da zero in un punto dello spazio, una carica elettrica ivi presente (ad esempio un elettrone) modifica il suo stato (ad esempio può accelerare, cioè variare la sua velocità).

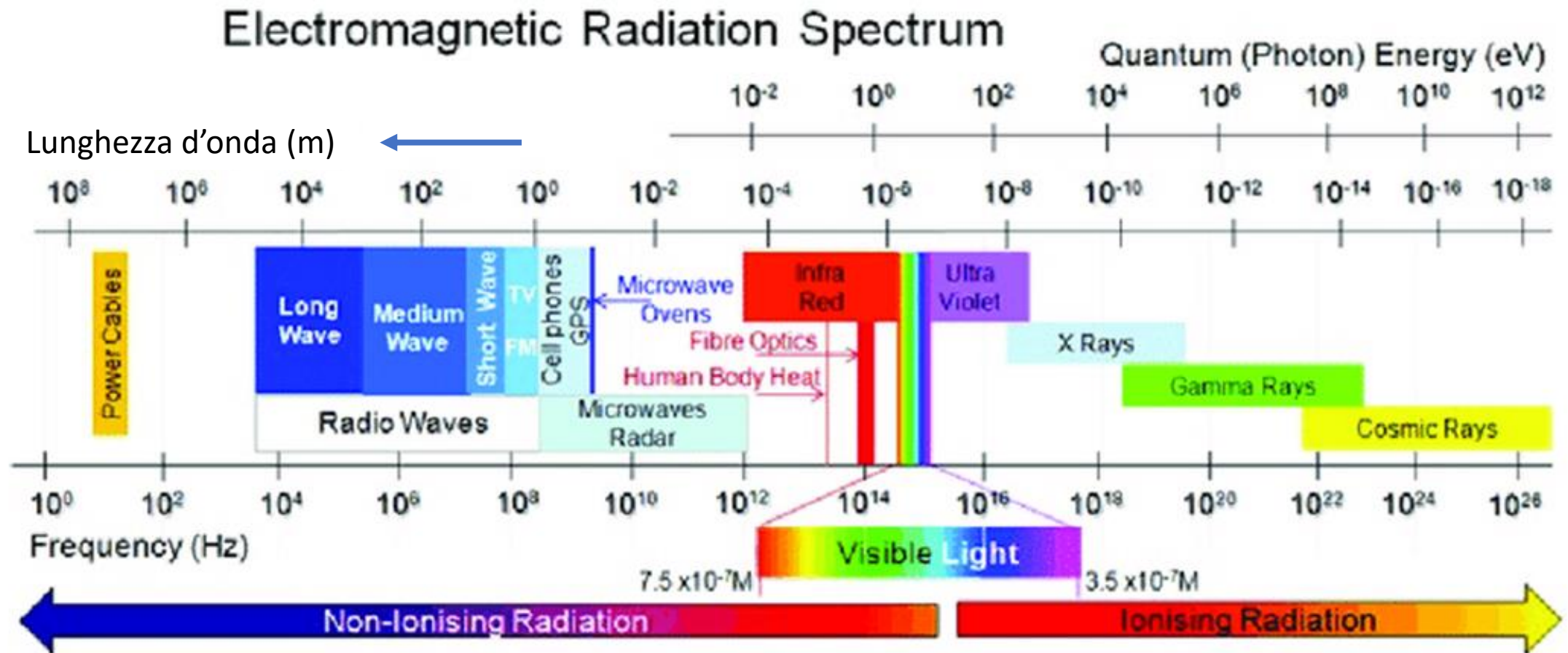
In condizioni normali, i campi elettrico e magnetico in un punto dello spazio sono nulli o comunque costanti nel tempo.

Se però per una qualche ragione si forma una perturbazione (cioè i campi variano) questa variazione fa sì che anche i campi dei punti limitrofi vengono influenzati, mediante un fenomeno chiamato induzione elettromagnetica, variando di conseguenza.

La perturbazione si propaga così dal punto originario (sorgente) nello spazio circostante, generando un'onda.

In caso di perturbazioni periodiche di tipo sinusoidale, l'onda prodotta può essere descritta in termini dei parametri che abbiamo già visto nel caso generale

- Ampiezza
- Lunghezza d'onda
- Frequenza
- Velocità di propagazione (nel vuoto questa risulta circa $c = 2.99 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)



Come si colloca la luce nel contesto della radiazione elettromagnetica?

Risulta essere una radiazione EM avente lunghezze d'onda comprese in una banda tra 350 nm e 750 nm

I colori poi sono associati a diversi intervalli in lunghezza d'onda in questa banda, confinanti con le regioni degli infrarossi e degli ultravioletti.

Abbiamo quindi che la luce come onda è caratterizzata da una velocità di propagazione $c \cong 2.99 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ e da una lunghezza d'onda λ (o equivalentemente da una frequenza ν tale che $\lambda = c/\nu$) associata al suo colore.

L'ampiezza dell'onda poi risulta correlata con la potenza trasmessa (più esattamente, la potenza è proporzionale all'ampiezza al quadrato).

L'effetto della luce (o della radiazione EM in generale) sulla materia è quello di interagire con le cariche elettriche del materiale, cedendogli dell'energia.

Un classico esempio di tale tipo di interazione è costituita dall'effetto fotoelettrico.

L'effetto fotoelettrico

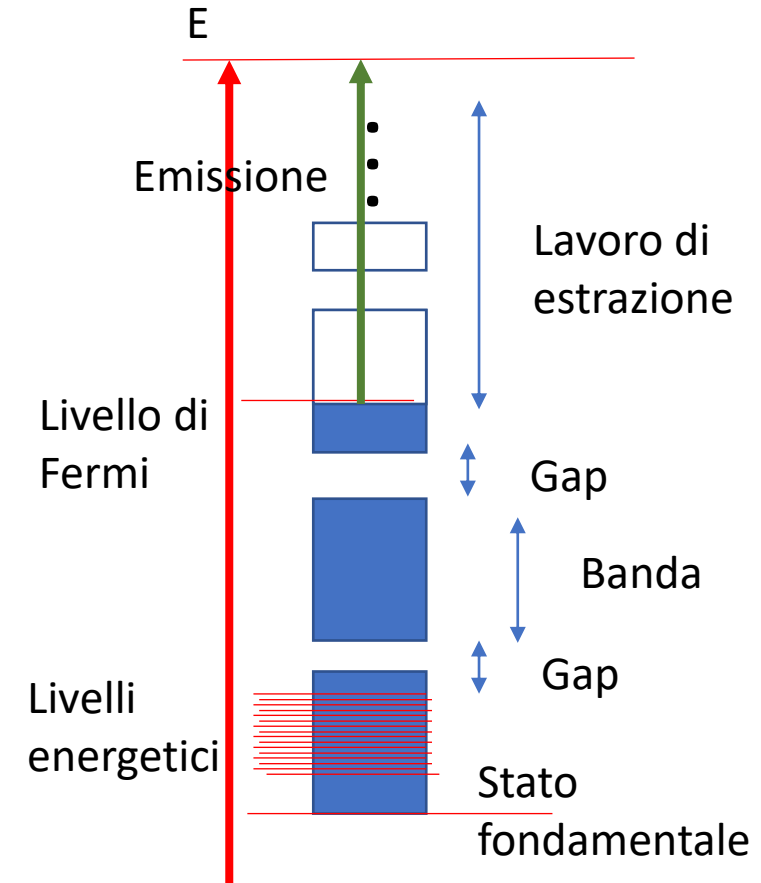
Della luce incidente sulla superficie di un metallo può interagire con gli elettroni di conduzione del materiale, fornendo loro dell'energia.

L'elettrone di conduzione sulla superficie del materiale normalmente si trova in uno stato legato, cioè è in un livello energetico inferiore a quello (di ionizzazione) per il quale può uscire dal materiale.

La differenza in energia tra questi due livelli viene chiamata **lavoro di estrazione**.

Se la luce comunica all'elettrone una quantità di energia superiore al lavoro di estrazione, l'elettrone viene emesso dalla superficie.

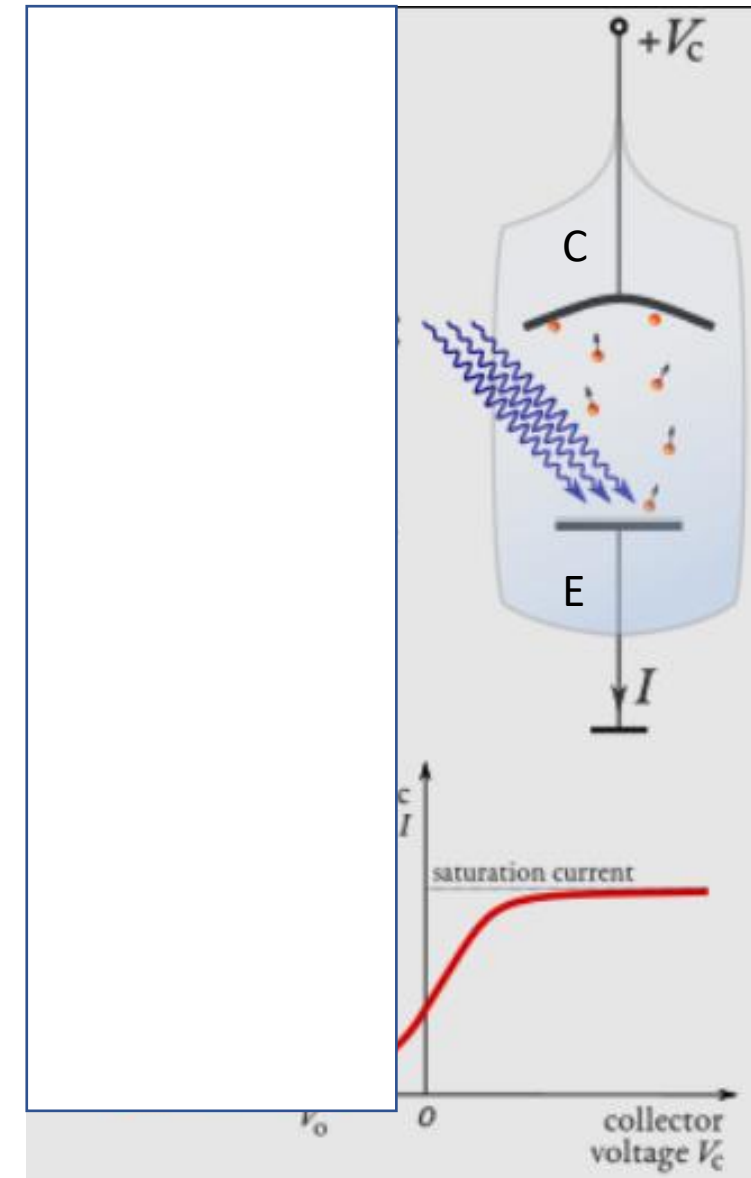
Questo fenomeno viene chiamato **effetto fotoelettrico**.



L'effetto fotoelettrico venne scoperto verso la fine del 1800.

Un tipico dispositivo sperimentale con cui si può evidenziare questo fenomeno è il tubo a vuoto elettronico rappresentato in figura.

Illuminando con della luce la superficie di un elettrodo metallico (emettitore E in figura) nel tubo, si osserva che applicando una ddp tra l'emettitore ed un altro elettrodo conduttore (collettore C) in opportune condizioni si osserva un flusso di corrente positiva in uscita dal terminale dell'emettitore.

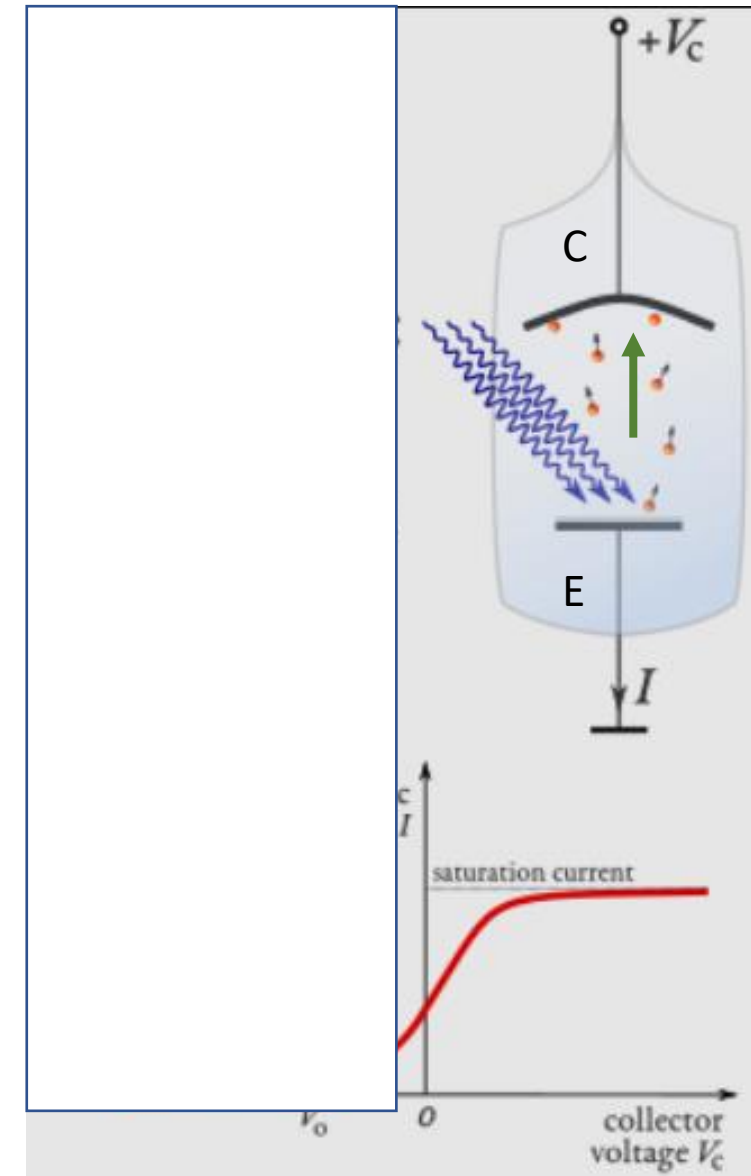


Poiché nel tubo è realizzato il vuoto, in condizioni normali non ci sono portatori di carica che possono permettere flussi di corrente.

La corrente osservata viene interpretata ipotizzando che la luce assorbita dall'emettitore faccia emettere degli elettroni, che possiedono una certa energia cinetica e possono quindi migrare verso il collettore (freccia verde).

Regolando la tensione tra emettitore e collettore si può fare in modo che tutti gli elettroni emessi arrivino al collettore, indipendentemente dalla direzione originaria di emissione.

Si raggiunge così un valore limite della corrente condotta (detta di saturazione), che dipende essenzialmente dalla potenza trasportata dalla luce incidente (poiché questa determina il numero di elettroni emessi)

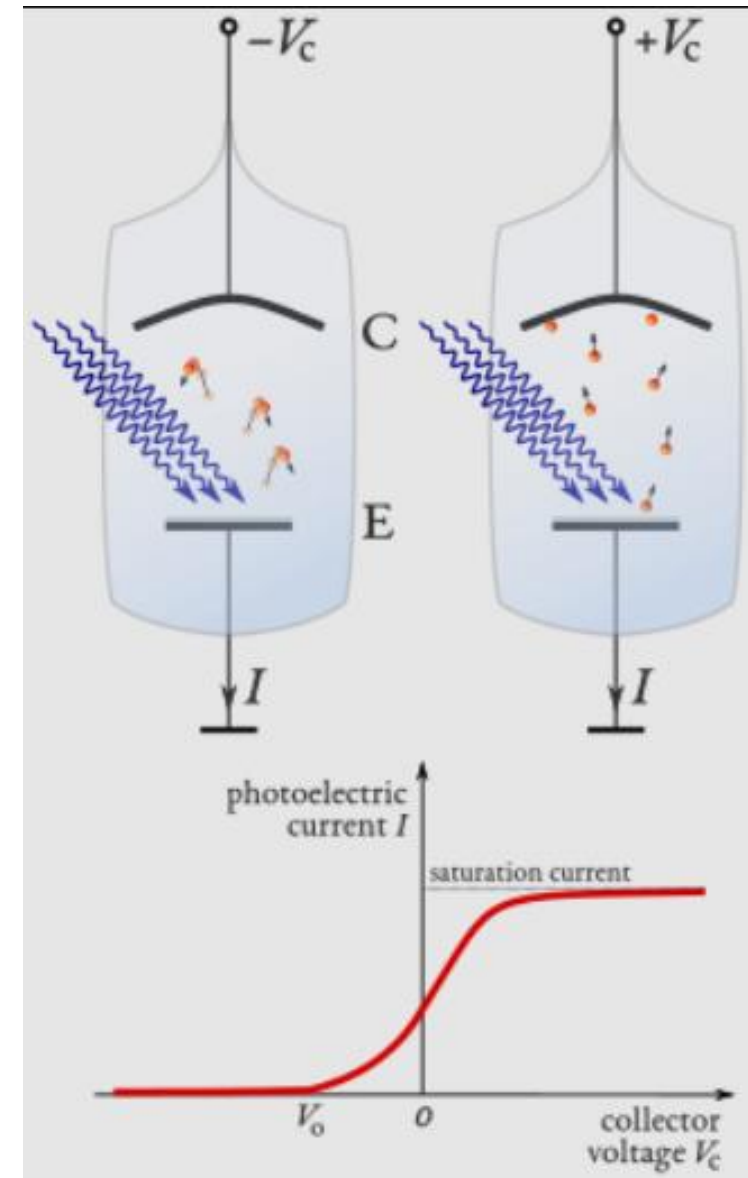


Viceversa, se viene applicata una tensione negativa tra emettitore e collettore, questa tende a rallentare gli elettroni nel loro moto.

Una frazione degli elettroni emessi non riesce a raggiungere il collettore e quindi non contribuisce al flusso di corrente.

La corrente diminuisce all'aumentare della tensione negativa applicata, fino a che per una **tensione** V_0 chiamata **di arresto** la corrente si annulla.

La tensione di arresto viene interpretata supponendo che per tale ddp gli elettroni, emessi dall'emettitore con una certa energia cinetica K , non riescono a raggiungere il collettore, poiché spendono tutta la loro energia cinetica contro la differenza di energia potenziale elettrica $e V_0$.



Variando poi la frequenza della luce incidente (e quindi il suo colore) il potenziale d'arresto V_0 varia, più esattamente cresce in maniera lineare con la frequenza.

Viceversa, diminuendo la frequenza, esiste un valore di soglia al di sotto del quale l'effetto fotoelettrico non si verifica.

Una spiegazione teorica del fenomeno venne data da Einstein, con l'introduzione del modello che in seguito venne chiamato del fotone.

Il fotone

L'ipotesi avanzata da Einstein per spiegare l'esistenza nell'effetto fotoelettrico di un valore di soglia per la frequenza della luce e una energia cinetica di emissione prefissata (indipendente dalla potenza trasportata dalla luce incidente) fu quella che **l'interazione luce-materia (in particolare con gli elettroni dell'effetto) avviene per scambi di pacchetti di energia prefissata E , dipendente dalla frequenza ν della luce**

$$E = h \nu$$

ove h è una costante (chiamata di Plank).

$$E = h \nu$$

Questa energia deve essere usata per estrarre l'elettrone dal metallo (e quindi fornire una quantità pari al lavoro di estrazione L): la parte rimanente appare sottoforma di energia cinetica K dell'elettrone.

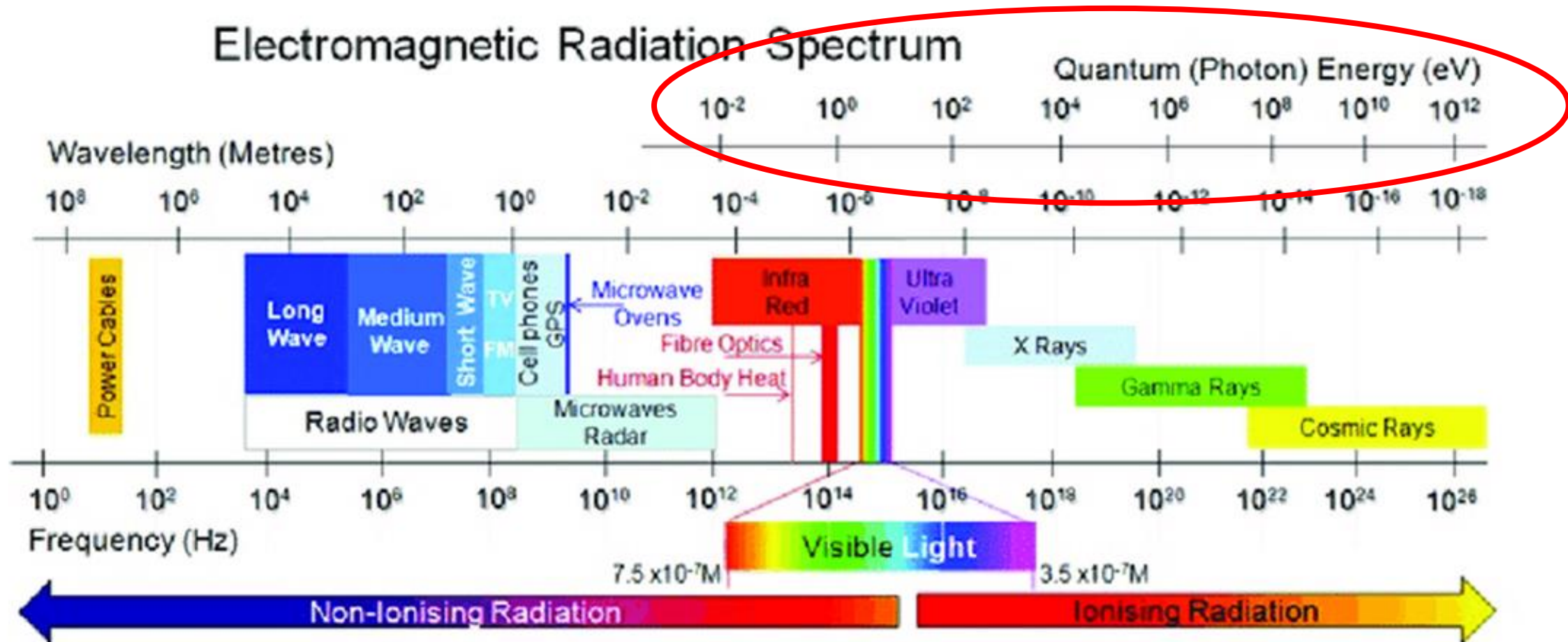
$$K = h \nu - L$$

Se riscriviamo il lavoro di estrazione come $L = h \nu_0$, vediamo che l'energia cinetica

$$K = h (\nu - \nu_0)$$

risulta positiva solo se $\nu > \nu_0$, in caso contrario l'elettrone non viene emesso: questo spiega l'esistenza di una soglia in frequenza per la conduzione nel tubo.

Inoltre, poiché l'energia cinetica dipende linearmente dalla frequenza, anche il potenziale d'arresto $V_0 = K/e$ ha la stessa relazione con la frequenza.



Poiché per l'ipotesi di Einstein per il fotone $E = h \nu$ possiamo rileggere lo spettro della radiazione EM in termini di energia scambiata con la materia mediante un singolo fotone

Nel precedente spettro le energie del fotone sono espresse in eV (o suoi multipli): questo perché per frequenze dell'ordine dello spettro visibile, l'energia data dalla espressione $h \nu$ è dell'ordine del eV .

