



La storia della luce : l'effetto fotoelettrico

**Presentazione a cura di :
Moreno Arcieri – Nicola Carollo – Anna Claudia Chierici – Roberto Compagno
TFA A049 – Università di Ferrara**

Breve descrizione generale dei contenuti

Scopo di questa presentazione è quello di mostrare dal punto di vista didattico in cosa consiste l'effetto fotoelettrico e quale sia stata la sua importanza agli inizi del '900, sia dal punto di vista storico (e quindi sperimentale) , sia da quello teorico.

L'effetto fotoelettrico, assieme all' effetto Compton, rappresenta infatti un importante “capitolo” della lunga storia sulla comprensione del fenomeno “luce”, cominciato fin dai tempi di Euclide.

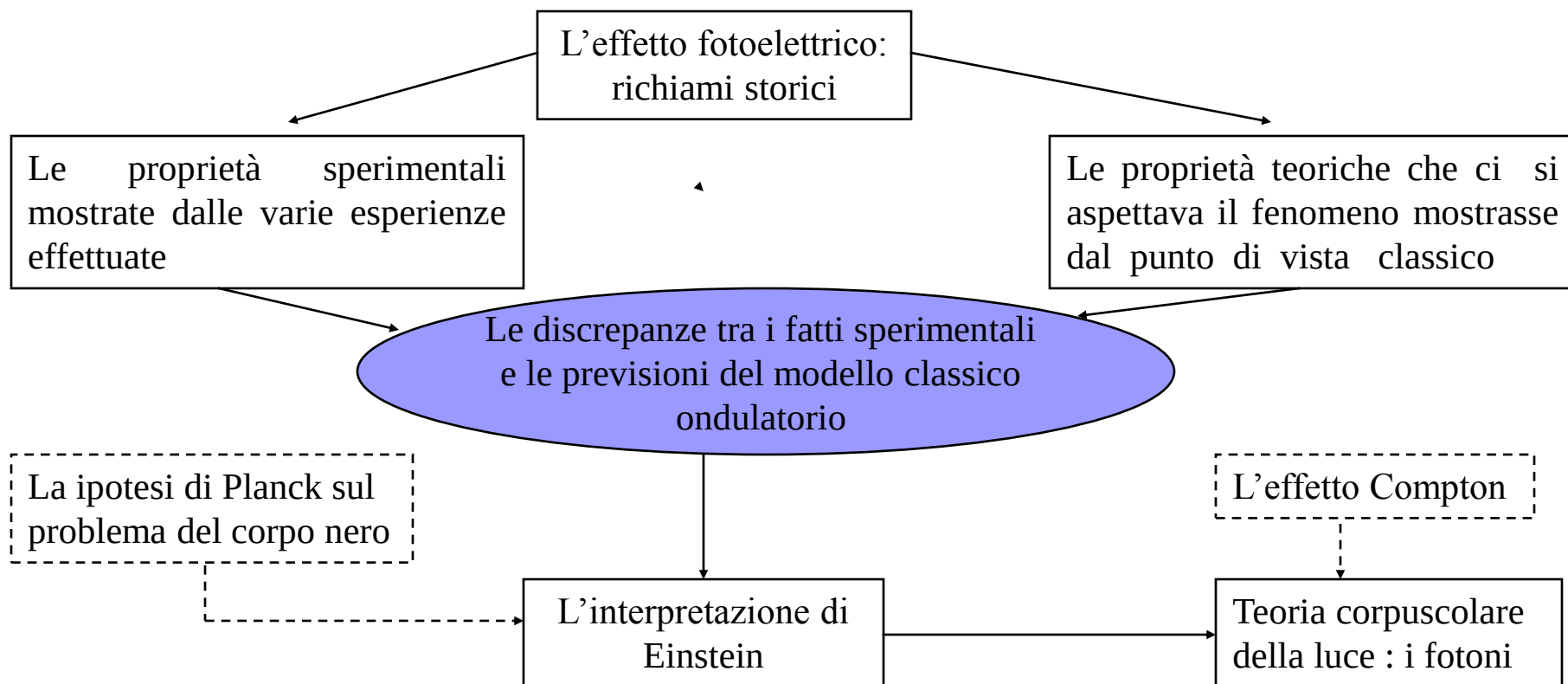
Presento allo scopo una mappa concettuale di riferimento.



La storia della luce :

l' effetto fotoelettrico

La mappa concettuale





La storia della luce : L'effetto fotoelettrico

Richiami storici (1)

- Teoria corpuscolare di Newton (XVII secolo): senza fare alcuna ipotesi sulla natura dei costituenti corpuscolari della luce, permetteva di spiegare parte dei fenomeni dell'ottica geometrica (ad es. propagazione rettilinea; le leggi della riflessione; il trasporto di energia; la teoria dei colori).
- Nello stesso secolo, Huygens sviluppa una teoria ondulatoria.
- Durante il XIX secolo, diversi esperimenti misero in evidenza il comportamento ondulatorio della luce (nel 1801, esperimento di interferenza di Young) e confermarono la teoria di Huygens. La teoria ondulatoria comincia ad affermarsi per spiegare tutti i fenomeni allora noti.
- Apice della teoria ondulatoria della luce: nel 1864 Maxwell dimostrò che una perturbazione associata ai campi elettrici e magnetici nel vuoto si propaga con una velocità uguale a quella della luce. La luce è identificata definitivamente come onda elettromagnetica.
- Alla fine dello stesso secolo e all'inizio del '900, alcuni nuovi esperimenti danno dei risultati inconciliabili con la teoria ondulatoria della luce

La storia della luce :

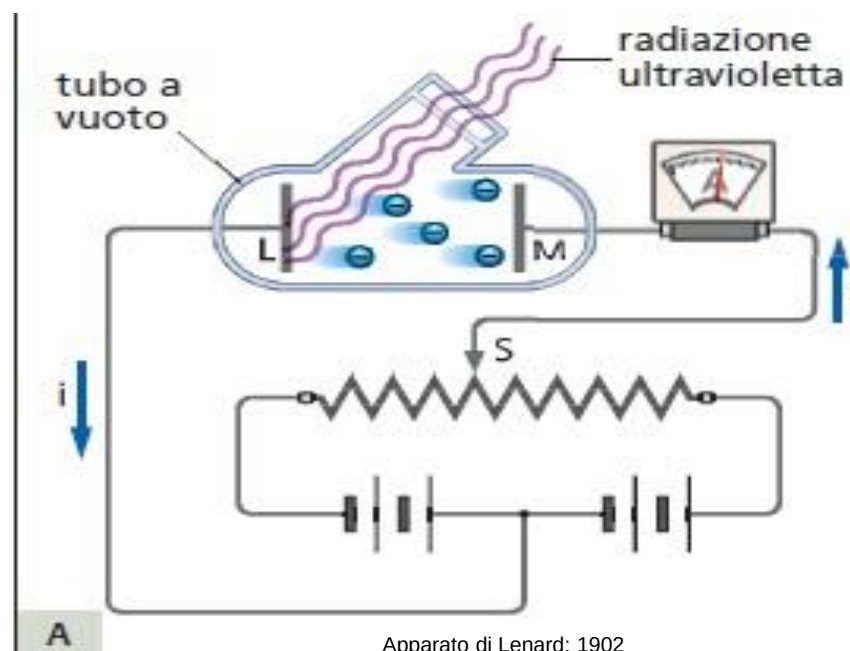
L'effetto fotoelettrico

Richiami storici (2)

L'effetto fotoelettrico è un fenomeno prima osservato e poi analizzato da più studiosi: Hertz (1857 e 1880); Righi e Hallwachs (1888); Thomson (1899); Lenard (1902); Millikan (1914).

Consiste nella emissione di elettroni causata dall'incidenza della luce su una superficie metallica (il catodo L nella figura che apparirà a lato).

Fu Lenard che per primo eseguì uno studio sistematico dell'effetto, usando una apparecchiatura schematizzata a lato.





La storia della luce : L'effetto fotoelettrico

Le proprietà sperimentali osservate (1)

Identifichiamo in primis quali sono le variabili fisiche associate al fenomeno e che verranno appunto studiate da Lenard.

- La frequenza monocromatica della luce incidente (f), modificabile cambiando la sorgente luminosa o usando filtri particolari ;
- La d.d.p. presente tra il catodo e l'anodo (ΔV) ; modificabile sia valore sia in polarità;
- la intensità di corrente rilevata dal galvanometro (i) ;
- Il tempo necessario per osservare la eventuale fotoemissione degli elettroni (t) ;
- La intensità di luce incidente (I), modificabile variando la potenza della sorgente ;
- La energia cinetica degli elettroni emessi (E_c).



La storia della luce : L'effetto fotoelettrico

Le proprietà sperimentali osservate (2)

Lenard riuscì subito ad identificare alcune importanti proprietà dell'effetto fotoelettrico :

- Nel fenomeno è presente una frequenza di soglia sotto la quale, per qualunque intensità della luce incidente, non si ha mai la emissione di elettroni ;
- La frequenza di soglia dipende dal tipo di metallo scelto : ogni metallo possiede cioè una sua frequenza caratteristica ;
- L'emissione degli elettroni, rilevabile dalla misurazione del passaggio della corrente elettrica, è sempre istantanea (tempi inferiori a 10^{-9} s) ;
- La corrente elettrica misurata è proporzionale all'intensità della luce incidente .

La storia della luce :

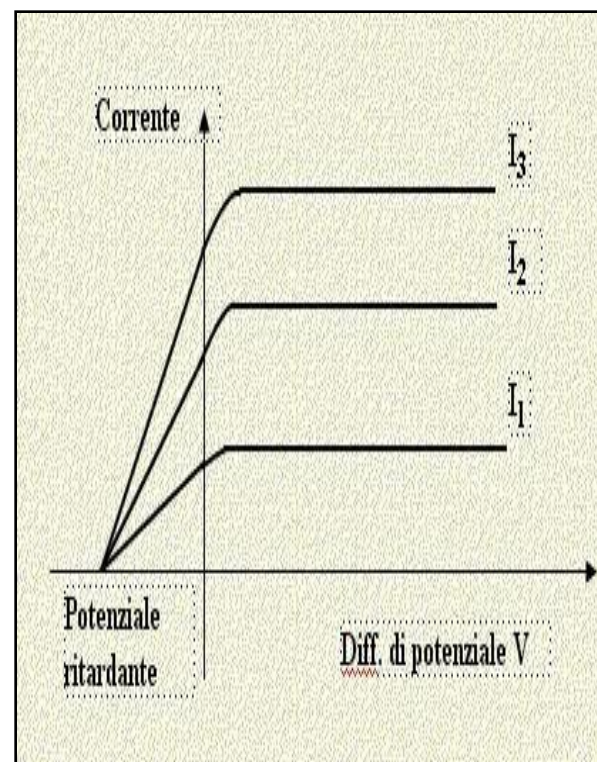
L'effetto fotoelettrico

Le proprietà sperimentali osservate (3)

Fissata una opportuna frequenza di luce incidente e variando opportunamente la d.d.p. applicata e la intensità I della luce, Lenard ottenne e studiò il seguente grafico tensione-corrente in funzione della intensità I della luce.

Per un dato valore di intensità della luce (ad es I_1), variando la ddp $\Delta V = V_A - V_C$ si osserva:

- Per $V_A - V_C > 0$, gli elettroni emessi dal catodo C accelerano verso l'anodo A e rapidamente, all'aumentare della d.d.p., vengono tutti raccolti all'anodo. A questo punto si osserva una corrente i costante (detta di saturazione)
- Per $V_A - V_C < 0$, gli elettroni emessi dal catodo sentono un controcampo e sono frenati. La corrente i decresce molto rapidamente per annullarsi ad un certo $V = V_0 < 0$, detto potenziale ritardante o potenziale d'arresto.



La storia della luce :

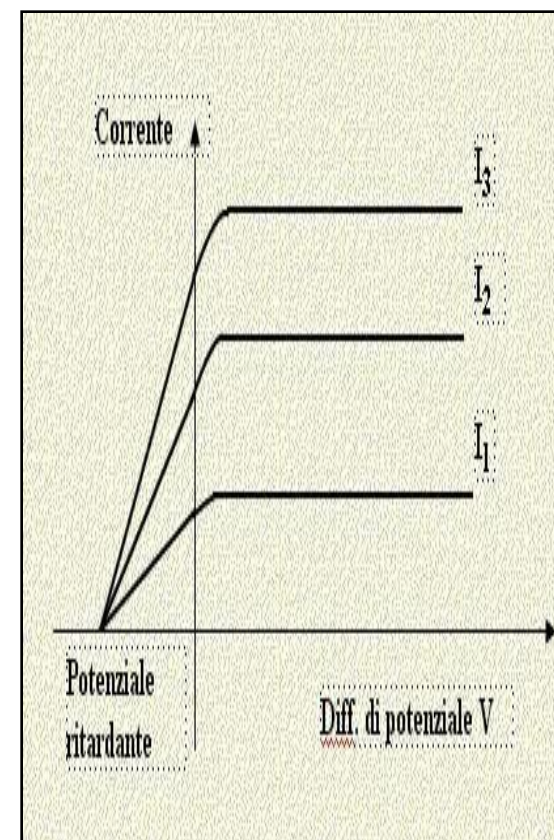
L'effetto fotoelettrico

Le proprietà sperimentali osservate (4)

In particolare:

Per $V_A - V_C > 0$, la corrente è dovuta all'emissione di elettroni dal fotocatodo e alla loro raccolta sull'anodo. L'efficienza di raccolta aumenta al crescere di V fino a raggiungere un valore costante di saturazione, quando tutti gli elettroni emessi vengono raccolti.

Per $V_A - V_C < 0$, gli elettroni emessi dal fotocatodo sentono un "controcampo": la corrente non si annulla (in particolare per $\Delta V = 0$, $i \neq 0$!!). Gli elettroni sono emessi dal catodo con energia cinetica diversa da zero e alcuni sono ancora in grado di superare il controcampo dato dalla ddp negativa applicata.



La storia della luce :

L'effetto fotoelettrico

Le proprietà sperimentali osservate (5)

In particolare possiamo dire che, in presenza di un controcampo applicato, l'elettrone riesce ad arrivare all'anodo (non si arresta prima) solo se:

$$\frac{1}{2} m_e v^2 > e |V_A - V_c|$$

Non tutti gli elettroni sono emessi con una velocità che soddisfa questa condizione; per questo la corrente misurata diminuisce man mano che si aumenta la d.d.p. negativa applicata.

Questo implica che in corrispondenza del potenziale d'arresto, tutti gli elettroni (quindi anche quelli di velocità massima) sono arrestati prima di raggiungere l'anodo, e la corrente misurata è pertanto nulla. Ricordando che ad una variazione energia cinetica deve corrispondere una variazione di energia potenziale, si ha :

$$\frac{1}{2} m_e v_{max}^2 = eV_0$$

La storia della luce :

L'effetto fotoelettrico

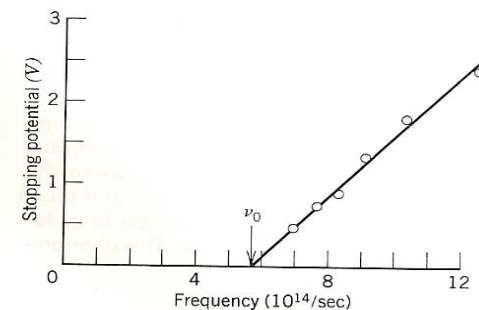
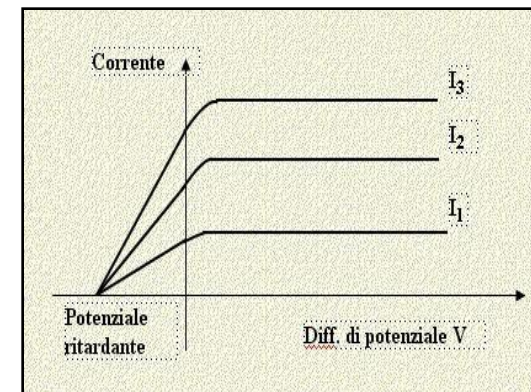
Le proprietà sperimentali osservate (6)

Una prima osservazione importante :

La relazione precedente ($\frac{1}{2} m_e v_{\max}^2 = eV_0$) implica che l'energia cinetica massima degli elettroni emessi è quindi indipendente dalla intensità della luce incidente.

Infatti, anche come si nota dal primo grafico a lato, il potenziale di arresto a frequenza fissata è indipendente da I .

Se invece si varia la frequenza della luce incidente, si osserva che il potenziale di arresto V_0 (e quindi la energia cinetica degli elettroni) è proporzionale ad $(f - f_0)$ (secondo grafico a lato).



La storia della luce :

L'effetto fotoelettrico

Le proprietà sperimentali osservate (7)

Riepilogando, queste sono le osservazioni sperimentali di Lenard:

1. Il fenomeno presenta una frequenza di soglia f_0 (detta soglia fotoelettrica), la quale dipende dal tipo di metallo presente sul catodo ed al di sotto della quale NON si ha emissione di elettroni ;
2. L'energia cinetica degli elettroni emessi è indipendente dall'intensità della radiazione incidente ;
3. Il numero di elettroni emessi è proporzionale alla intensità della radiazione incidente ;
4. L'energia cinetica degli elettroni emessi è proporzionale ad $(f - f_0)$;
5. Gli elettroni sono emessi dalla superficie del metallo quasi istantaneamente, anche quando la luce ha intensità molto bassa;
6. (Conseguenza della 2.) Il potenziale di arresto V_0 risulta essere indipendente dall'intensità della luce.

La storia della luce : L'effetto fotoelettrico

Le proprietà teoriche previste dal modello (1)

Ma cosa prevedeva la teoria classica della radiazione e.m. (teoria ondulatoria), che aveva da poco conosciuto il suo culmine con la formulazione delle equazioni di Maxwell ?

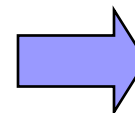
Classicamente, l'emissione degli elettroni può essere spiegata nei termini di interazione fra l'onda elettromagnetica e gli elettroni nel materiale. Gli elettroni vengono sollecitati dalla onda esterna ed assorbendo il campo elettrico $\vec{E}$ trasportato dall'onda, acquisiscono via via energie cinetiche sempre crescenti. Prima o poi, la loro energia cinetica è sufficiente per superare la barriera di potenziale offerta dal materiale e possono essere liberati.

La storia della luce :

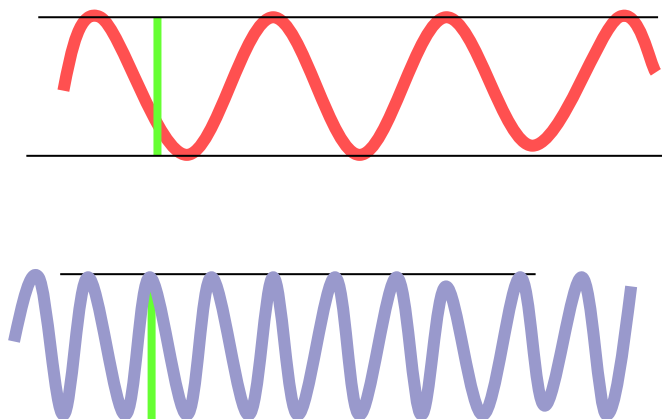
L'effetto fotoelettrico

Le proprietà teoriche previste dal modello (2)

Secondo la teoria ondulatoria l'intensità **I** di un'onda e.m., definita come rapporto tra energia trasportata per unità di tempo ed unità di superficie, è proporzionale al quadrato della ampiezza del campo elettrico $\vec{E}$



$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c |E|^2$$



Queste due onde hanno
la stessa intensità *I* anche
se hanno diversa frequenza

La storia della luce :

L'effetto fotoelettrico

Le proprietà teoriche previste dal modello (3)

- 1° previsione : la corrente misurata dal galvanometro è proporzionale all'intensità della luce incidente. *Questa previsione è l'unica verificata sperimentalmente.*
- 2° previsione : Il potenziale d'arresto V_0 deve essere dipendente dall'intensità della luce. Per intensità maggiori il campo elettrico è maggiore; l'energia cinetica con cui vengono emessi gli elettroni (in particolare quella massima) deve quindi aumentare concordemente.
- 3° previsione : L'energia trasferita dall'onda all'elettrone dipende dal modulo del campo elettrico dell'onda (e quindi dall'intensità) e deve quindi avvenire per qualsiasi frequenza della luce.
- 4° previsione : per due diverse intensità di luce incidenti si devono osservare tempi di emissione della corrente elettrica diversi (se l'intensità è minore, occorrerà più di tempo per trasferire agli elettroni sufficiente energia per essere emessi).

La storia della luce :

L'effetto fotoelettrico

Le discrepanze

Perchè il fenomeno non è spiegabile nell'ambito della teoria classica?

1° osservazione: Il potenziale d'arresto V_0 è indipendente dall'intensità della luce. *Questo non è spiegabile classicamente*. Per intensità di luce maggiori il campo elettrico è maggiore, e l'energia cinetica con cui vengono emessi gli elettroni (in particolare quella massima) dovrebbe aumentare concordemente. Invece si osserva che:

$$\frac{1}{2} m_e v_{\max}^2 = eV_0$$

; cioè la energia cinetica è indipendente dalla intensità della luce.

2° osservazione: Nel fenomeno è presente una frequenza di soglia sotto la quale, per qualunque intensità della luce, il fenomeno non avviene. *Questo non è spiegabile classicamente*. Infatti classicamente, l'energia trasferita dall'onda all'elettrone dipende dal modulo del campo elettrico dell'onda (e quindi dall'intensità) e dovrebbe quindi avvenire per qualunque frequenza della luce.

3° osservazione: L'emissione è sempre istantanea (tempi inferiori a 10^{-9} s). *Questo non è spiegabile classicamente*. Infatti classicamente, per due diverse intensità di luce si dovrebbero invece osservare tempi di emissione diversi (se l'intensità è minore occorrerà più di tempo per trasferire agli elettroni sufficiente energia per essere emessi).

La storia della luce :

L'effetto fotoelettrico

L'interpretazione di Einstein (1)

La corretta spiegazione dell'effetto fotoelettrico è dovuta ad Einstein, nel 1905, basandosi sul concetto di quanto di energia introdotto da Planck (1900) nello studio della radiazione di corpo nero.

Queste le sue ipotesi :

- La radiazione e.m. è composta da singoli pacchetti o quanti di energia, detti fotoni, localizzati in un piccolo volume spaziale. L'energia E dei fotoni è legata alla frequenza f della luce incidente dalla relazione: $E = hf$, dove h è la costante di Planck. L'energia resta localizzata in questi “pacchetti” mentre viaggia con velocità costante c .
- Il processo di cessione di energia fra luce ed elettroni del materiale non è continuo come nella visione classica, ma avviene secondo eventi discreti. In particolare, Einstein ipotizzò che nell'interazione radiazione e.m. – materia il singolo elettrone potesse assorbire l'energia di un solo fotone alla volta.

La storia della luce :

L'effetto fotoelettrico

L'interpretazione di Einstein (2)

Quindi, nella singola interazione elettrone-fotone, e riferendosi all'elettrone con la massima velocità di emissione, seguendo l'ipotesi di Einstein si può scrivere il seguente bilancio energetico:

$$\frac{1}{2} m_e v_{max}^2 = hf - W_{estr}$$

dove :

- la grandezza hf è l'energia che l'elettrone assorbe dal fotone incidente ;
- W_{estr} è un'energia caratteristica del materiale, detta lavoro di estrazione, definito come la minima energia necessaria per un elettrone per attraversare la superficie metallica e sfuggire alle forze attrattive, che normalmente lo tengono legato ai nuclei del metallo.

La storia della luce :

L'effetto fotoelettrico

L'interpretazione di Einstein (3)

Ma l'ipotesi del fotone introdotta da Einstein come risponde alle discrepanze generate dalla interpretazione classica ?

- 1) Nei riguardi della indipendenza della energia cinetica dalla intensità di illuminazione : la teoria dei fotoni spiega bene il motivo. Se si raddoppia infatti l'intensità della luce, si ha che raddoppia anche il numero di fotoni e perciò anche la corrente elettrica raddoppia, ma non cambia l'energia dei singoli fotoni ;
- 2) Nei riguardi della esistenza di una frequenza di soglia : un elettrone per essere fotoemesso deve avere energia cinetica positiva; quindi dalla relazione precedente segue che dev'essere $hf - W_{\text{estr}} > 0$, onde $f_0 = f > W_{\text{estr}}/h$, dove con f_0 abbiamo indicato proprio la frequenza di soglia. Se la frequenza viene ridotta sotto f_0 il singolo fotone non ha energia sufficiente per l'emissione di un elettrone, indipendentemente dall'intensità della radiazione (cioè dal numero di fotoni).
- 3) Nei riguardi del tempo di ritardo di emissione: se l'energia che il fotone trasmette è sufficiente per estrarre l'elettrone, l'emissione avviene istantaneamente.

La storia della luce :

L'effetto fotoelettrico

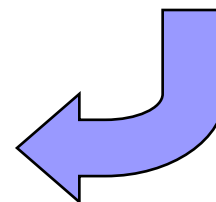
L'interpretazione di Einstein (4)

Inoltre, fissando la frequenza f della luce, la proporzionalità diretta fra intensità di corrente di elettroni emessi e intensità della luce (spiegabile anche classicamente) è parimenti prevista dall'ipotesi di Einstein tenendo presente che: $I = nhf$, dove n è il numero di fotoni per unità di tempo e per superficie perpendicolare di incidenza.

La relazione: $\frac{1}{2} m_e v_{max}^2 = hf - W_{estr}$, può essere riscritta come:

$$eV_0 = hf - W_{estr}$$

Questa relazione prevede una dipendenza lineare del potenziale di arresto dalla frequenza, in perfetto accordo con una delle varie misure sperimentali che Millikan farà nel 1914 e che sancirà finalmente, assieme all'effetto Compton, la validità della teoria della luce intesa come composta da fotoni.





La storia della luce : L'effetto fotoelettrico

L'interpretazione di Einstein (5)

Einstein quindi riprende il concetto di energia “discreta” che Planck aveva ipotizzato ed introdotto per la spiegazione dello spettro del corpo nero.

Ma c'è differenza tra il concetto di energia di Planck e quello di Einstein ?

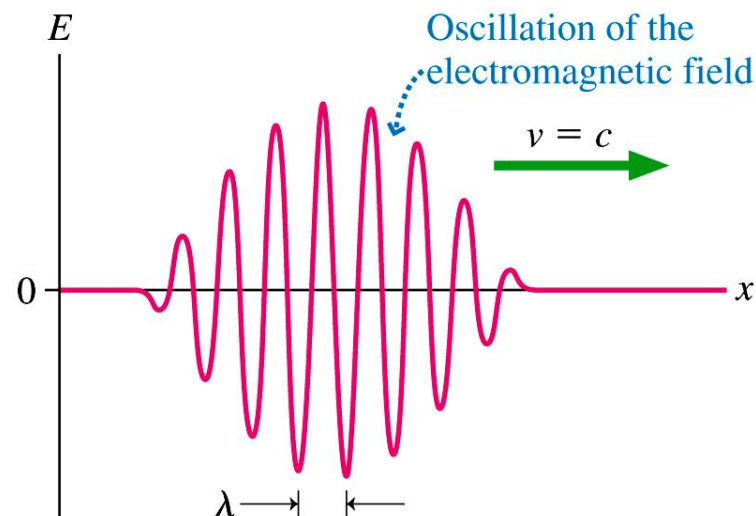
Per meglio cogliere l'apporto di Einstein alla definizione del concetto di quanto di radiazione dobbiamo ricordare che la quantizzazione degli scambi di energia era concepita da Planck nel corpo nero come una descrizione degli scambi tra materia e radiazione all'equilibrio. In definitiva, Planck pensava che all'equilibrio i fatti avvenissero come se gli scambi di energia fossero granulari, senza con ciò implicare che questa fosse sempre la vera natura della radiazione luminosa. Fu con Einstein e con la spiegazione dell'effetto fotoelettrico che invece il quanto si afferma come caratteristica in sè, corpuscolare, della luce.

La storia della luce :

L'effetto fotoelettrico

L'interpretazione di Einstein (6)

Einstein ricevette il Premio Nobel nel 1921, non per la teoria della relatività, ma per la spiegazione dell'effetto fotoelettrico. Ad Einstein spetta l'aver mostrato in maniera convincente che la quantizzazione dell'energia è insita nella struttura stessa della luce, che viaggia sotto forma di pacchetti di energia che si comportano come particelle e che ora sono chiamati **fotoni**.

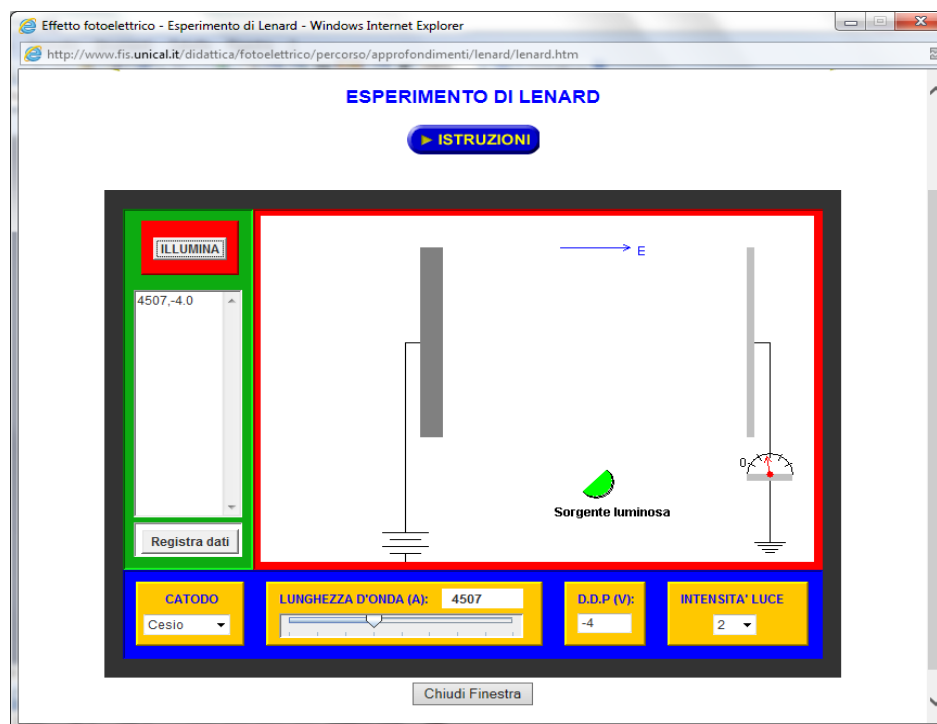


Ecco quindi che, alla fine, come sempre, creato un nuovo modello, sorgono nuove domande, nuove sfide per arrivare ad una comprensione sempre più profonda dei fenomeni naturali. Ma la luce, insomma, che cos'è ?? E' un fenomeno corpuscolare o ondulatorio ? E questo comportamento è caratteristico solo della luce o anche della materia ? La risposta alla prossima presentazione....

La storia della luce :

L'effetto fotoelettrico

Dal punto di vista didattico, in rete si trovano alcune applet in Java molto belle ed utili per mostrare il fenomeno. Nella applet sottostante è possibile anche modificare il valore della frequenza, l'intensità, la polarità, il valore della d.d.p; il tipo di metallo ... L'indirizzo è <http://www.fis.unical.it/didattica/fotoelettrico/percorso/approfondimenti/lenard/lenard.htm>





La storia della luce : L'effetto fotoelettrico

La presentazione è finita.

Grazie per la attenzione

Corsisti partecipanti :

**Moreno Arcieri – Nicola Carollo –
Anna Claudia Chierici – Roberto Compagno**