

43. L'EFFETTO FOTOELETTRICO

43.0. Prerequisiti: Modello corpuscolare della luce

Si ricorda che durante il secondo anno di corso si è trattato il Modello Corpuscolare della Luce, è quindi ora necessario recuperare gli argomenti svolti nel capitolo 4.

43.1. Effetto fotoelettrico (qualitativo)

L'aumento della temperatura di un corpo che assorbe la luce non è l'unico modo in cui la luce può cedere la propria energia: in certe condizioni la luce può anche liberare elettroni dalle superfici di varie sostanze. Giungiamo a questa conclusione in base alle seguenti osservazioni. Un elettroscopio carico negativamente e collegato a una lamina di zinco si scarica rapidamente quando la luce emessa da una lampadina a mercurio colpisce la lamina (Fig. 43.1); quando invece l'elettroscopio è carico positivamente, si produce soltanto una scarica molto lenta (Fig. 43.2).

Queste osservazioni indicano che la luce determina l'emissione di elettroni dalla lamina di zinco. Gli elettroni vengono emessi dalla lamina carica negativamente e perciò l'elettroscopio perde la propria carica; gli elettroni sono invece attirati dalla lamina carica positivamente e quindi non contribuiscono a scaricarlo.

La lampadina a mercurio emette sia luce visibile che radiazione ultravioletta; cerchiamo di determinare quale tipo di radiazione sia responsabile dell'emissione degli elettroni.

Se collochiamo una lastra di vetro comune fra la lampadina e l'elettroscopio, possiamo notare che l'elettroscopio carico negativamente non si scarica. Come ricorderete, il vetro comune non lascia passare le radiazioni ultraviolette e in questo caso si osserva che l'elettroscopio non si scarica nemmeno se si aumenta l'intensità della luce. È evidente dunque che per liberare elettroni dallo zinco è necessaria la radiazione ultravioletta.

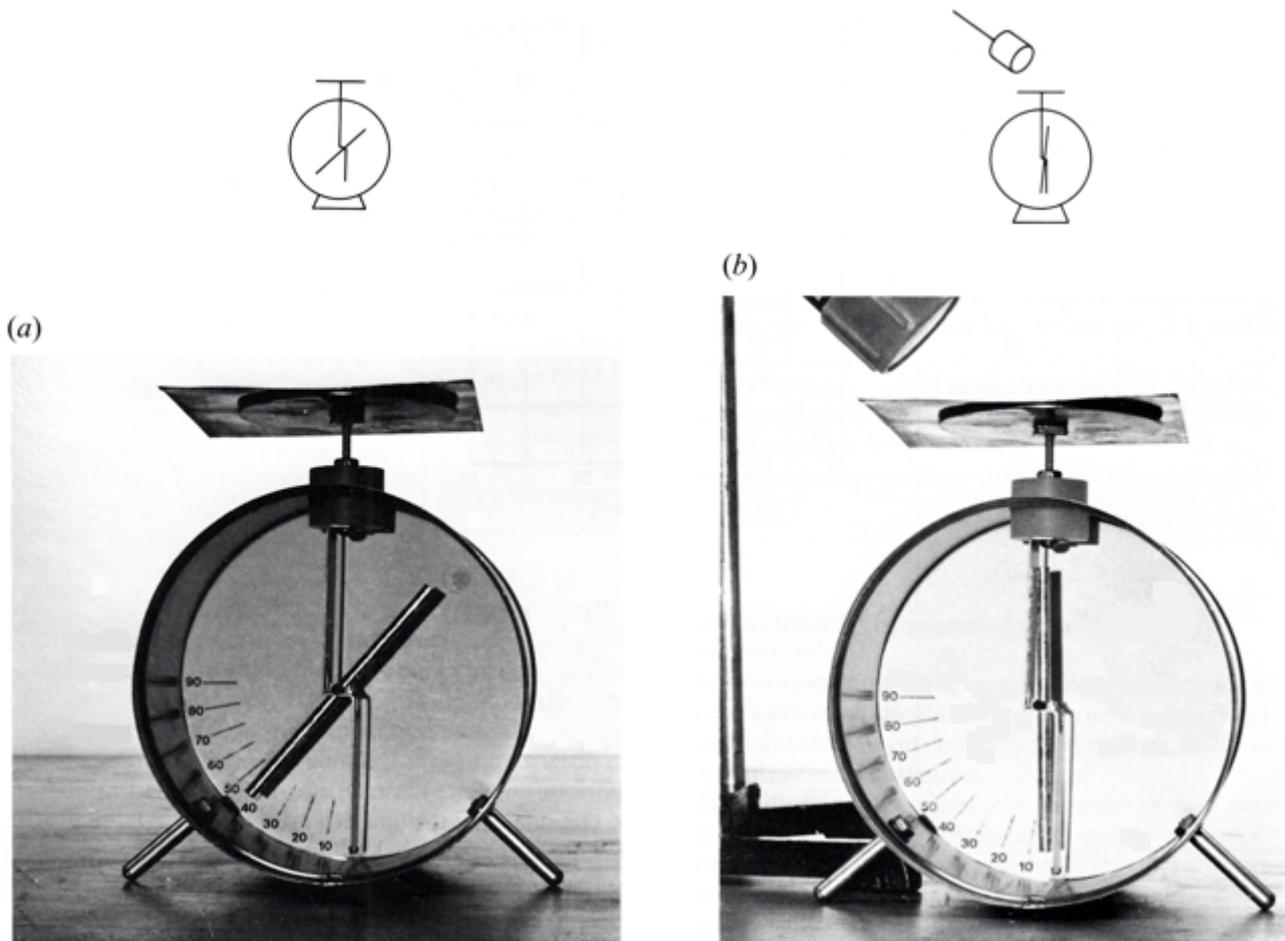


Fig. 43.1. (a) Un elettroscopio con una lamina di zinco sulla sommità è carico negativamente. (b) Illuminando la lamina di zinco con radiazione ultravioletta si provoca la scarica dell'elettroscopio.

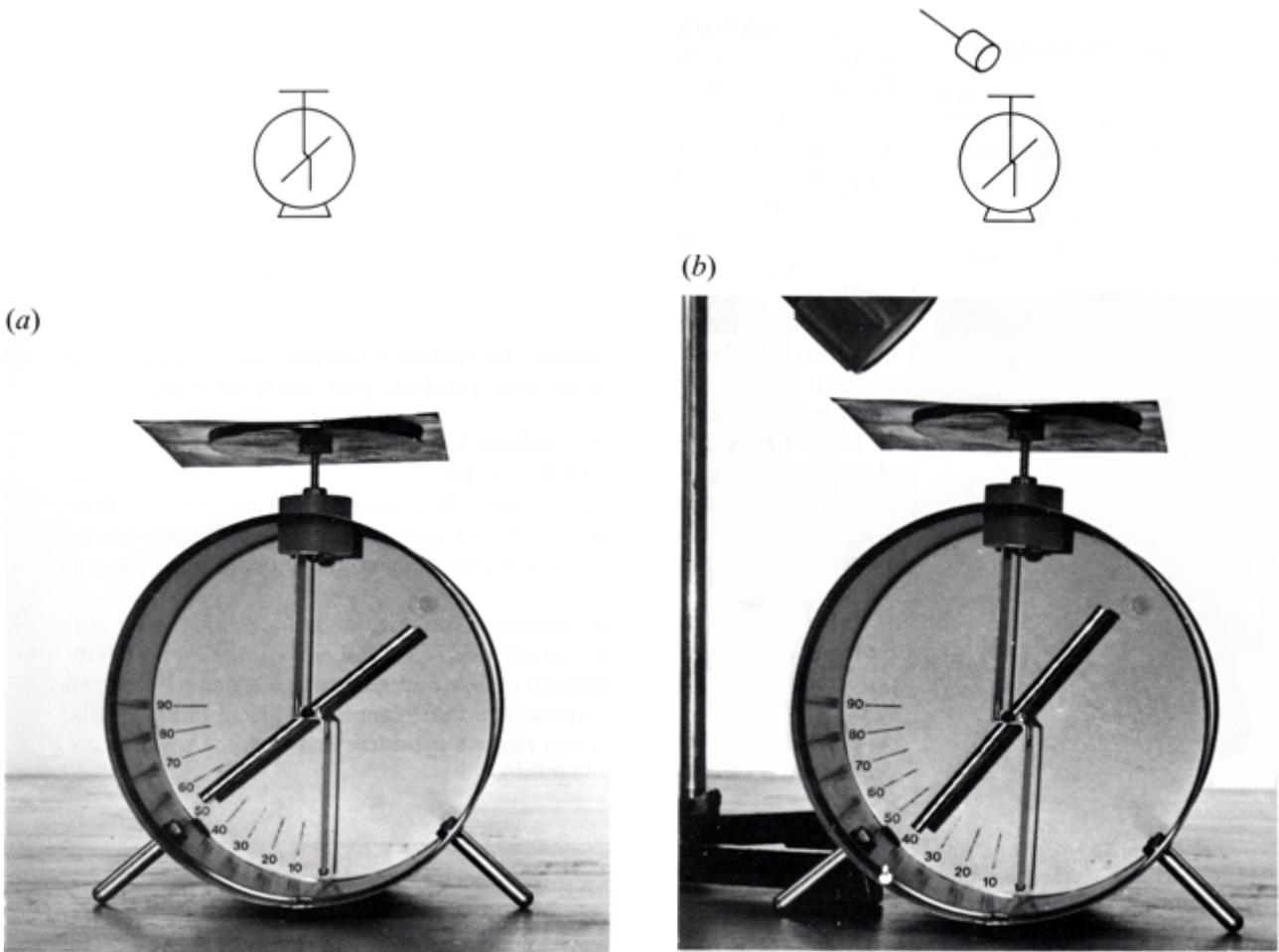


Fig. 43.2. (a) Lo stesso elettroscopio della Fig. 43.1 è carico positivamente. (b) Illuminando la lamina di zinco con radiazione ultravioletta ora si provoca soltanto una variazione molto piccola della carica portata dall'elettroscopio.

Esaminiamo ora l'emissione di elettroni da superfici diverse dallo zinco; per alcune sostanze l'esperimento dovrà essere eseguito nel vuoto perché queste possono reagire con l'ossigeno e il vapore acqueo presenti nell'aria.

Non è necessario che la lamina su cui facciamo cadere la luce sia inizialmente carica: possiamo usare una cellula fotoelettrica (Fig. 43.3). Quando la lamina cilindrica, il catodo, è illuminata, vengono emessi elettroni che sono raccolti dal filamento conduttore, l'anodo. Nella cellula è stato fatto il vuoto e l'ampolla di vetro è fatta di quarzo in modo da potere essere attraversata sia dalle radiazioni ultraviolette che dalla luce visibile.

Il catodo ha una grande superficie ed è rivestito con la sostanza che emette gli elettroni, l'anodo invece è costituito da un'asticella metallica sottile.

Quando il catodo e l'anodo sono collegati esternamente con un filo metallico, gli elettroni emessi dal

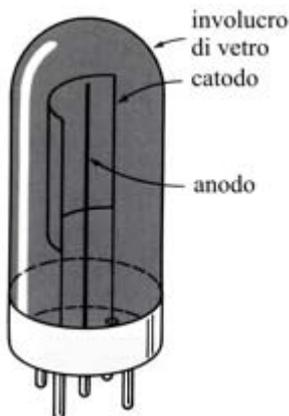


Fig. 43.3. Una cellula fotoelettrica.

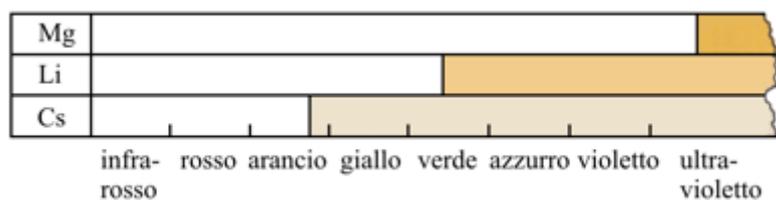


Fig. 43.4. Schema in cui sono indicati i colori della luce che determinano l'emissione di elettroni dal magnesio, dal litio e dal cesio.

catodo e raccolti sull'anodo tornano indietro lungo il filo. La corrente prodotta può essere misurata con un microamperometro.

Nella Fig. 43.4 sono indicati i colori della luce che può estrarre elettroni dal magnesio, dal litio e dal cesio; il magnesio, come lo zinco, richiede luce ultravioletta, mentre il litio emette elettroni con luce ultravioletta, violetta, azzurra e verde, ma non con luce gialla. Il cesio emette elettroni con luce di tutti i colori che abbiamo menzionato oltre che con il giallo-arancio.

In tutti questi casi se aumenta l'intensità della luce aumenta la corrente nel circuito, cioè il numero degli elettroni emessi nell'unità di tempo. In nessun caso tuttavia un colore non adatto può espellere elettroni se la sua intensità viene aumentata. Per esempio, un fascio di luce gialla, sia pure di alta intensità, non riesce a produrre una corrente in una fotocellula con il catodo di magnesio.

Quesiti

- 43.1.** Si può caricare un elettroscopio con una lamina di zinco illuminandolo con luce ultravioletta? In caso affermativo, quale sarà il segno della carica?
- 43.2.** L'aria immediatamente al di sopra di un elettroscopio viene ionizzata dalla radiazione ultravioletta. Qual è l'effetto se l'elettroscopio è carico (a) negativamente? (b) positivamente?
- 43.3.** (a) Quale sarà l'effetto del campo elettrico sul moto di un elettrone emesso da una superficie carica negativamente?
(b) Quale sarà l'effetto del campo elettrico se un elettrone viene emesso da una lamina carica positivamente?
(c) Qual è la relazione fra le risposte ai punti (a) e (b) con il processo di scarica di un elettroscopio per opera della luce?
- 43.4.** Si supponga di illuminare con una comune lampadina a incandescenza ciascuno dei metalli menzionati in questo paragrafo. Da quali di questi metalli verrebbero emessi fotoelettroni?
-

43.2. Effetto fotoelettrico (breve nota storica)

Nel 1865 Maxwell pubblica la teoria delle onde elettromagnetiche, predicendo che si propagano nel vuoto con velocità c .

Nel 1887 H. Hertz, durante i suoi studi sulle onde radio, nota che le scariche del suo rivelatore aumentano quando illumina le sfere metalliche di cui il rivelatore è costituito con luce ultravioletta. La luce visibile non dà alcuna differenza rivelabile.

Nel 1888 Hallwach scopre, usando un elettroscopio a foglie, che l'illuminazione con UV di lastre di zinco cariche negativamente ne determinano una rapida scarica. Ciò non accade con lastre cariche positivamente.

Nel 1899: JJ Thomson mostra che un metallo illuminato emette cariche identiche agli elettroni.

Nel 1902 Philipp von Lenard scopre che la produzione di elettroni da un metallo illuminato avviene esclusivamente con luce di frequenza al di sopra di una soglia precisa e giunse a stabilire le seguenti caratteristiche dell'emissione fotoelettrica:

- aumentando l'intensità della luce aumentava il numero, ma non l'energia, degli elettroni emessi;
- l'energia di emissione delle particelle dipendeva dalla lunghezza d'onda della luce usata, ed esisteva una lunghezza d'onda limite al di sopra della quale la luce non era in grado di indurre fotoemissione, indipendentemente dalla sua intensità;
- per lunghezze d'onda al di sotto di quella limite si aveva fotoemissione immediatamente anche con intensità luminose estremamente basse.

Nel 1905 abbandonando completamente la teoria classica della luce, Albert Einstein descrive l'effetto fotoelettrico come l'assorbimento di un "quanto" di luce da un elettrone. Per questo riceverà il Premio Nobel nel 1921.

Nel 1915 Robert Millikan, nel tentativo (iniziato nel 1905) di dimostrare l'infondatezza dell'ipotesi di Einstein, ne conferma con grande precisione le previsioni. Riceve il Premio Nobel nel 1923 per questa scoperta.

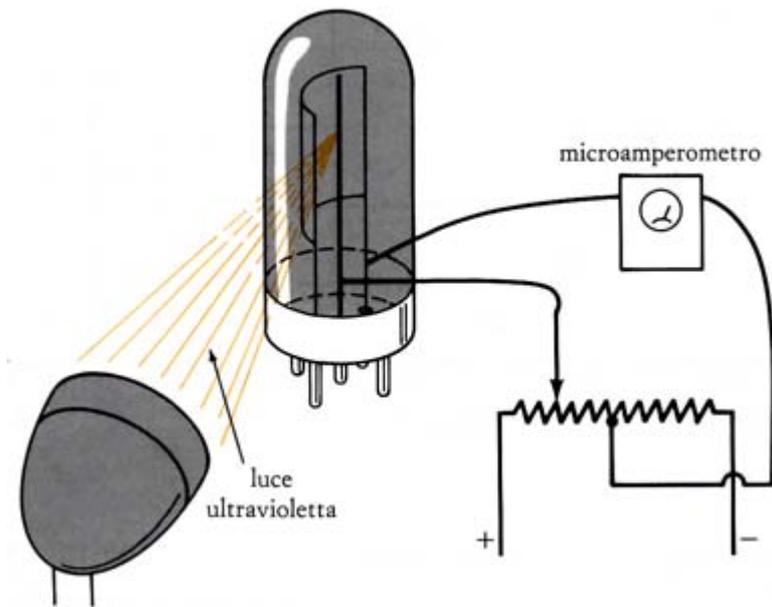


Fig. 43.5. Il circuito a cui è collegata la cellula fotoelettrica permette di regolare la differenza di potenziale fra il catodo e l'anodo. Il contatto mobile è collegato all'anodo e può essere regolato in modo da rendere il suo potenziale positivo o negativo rispetto al catodo.

43.2. L'energia cinetica dei fotoelettroni

Quando la luce colpisce la superficie del catodo di una fotocellula, provoca l'emissione di elettroni che abbandonano la superficie con diverse energie cinetiche. È possibile dimostrare sperimentalmente questo fatto applicando una differenza di potenziale V alle lamine in modo che il catodo sia positivo rispetto all'anodo (Fig. 43.5). In questo modo gli elettroni devono muoversi «in salita» e superare la differenza di potenziale ritardante per raggiungere l'anodo.

Quando la tensione ritardante aumenta, la corrente nel circuito diminuisce. La Fig. 43.6 mostra la curva che si ottiene quando il catodo è illuminato da luce verde.

Notiamo che se $V = 0.70$ V nessun elettrone raggiunge l'anodo. Questa differenza di potenziale è detta *tensione di arresto* V_0 e l'energia potenziale acquistata dagli elettroni che raggiungono l'anodo è eV_0 . Questo guadagno di energia potenziale è pagato con la perdita di energia cinetica. Se gli elettroni riescono a guadagnare energia potenziale soltanto fino a eV_0 , possiamo concludere che l'energia cinetica massima degli elettroni emessi è $T_{max} = eV_0$. Nel caso della Fig. 43.5, $T_{max} = 0.70$ eV.

Se aumenta l'intensità della luce emessa dalla sorgente, aumenta anche l'energia cinetica massima degli elettroni? Nella Fig. 43.7 è rappresentato il grafico della corrente in funzione della differenza di potenziale ritardante per una luce notevolmente più intensa, ma dello stesso colore.

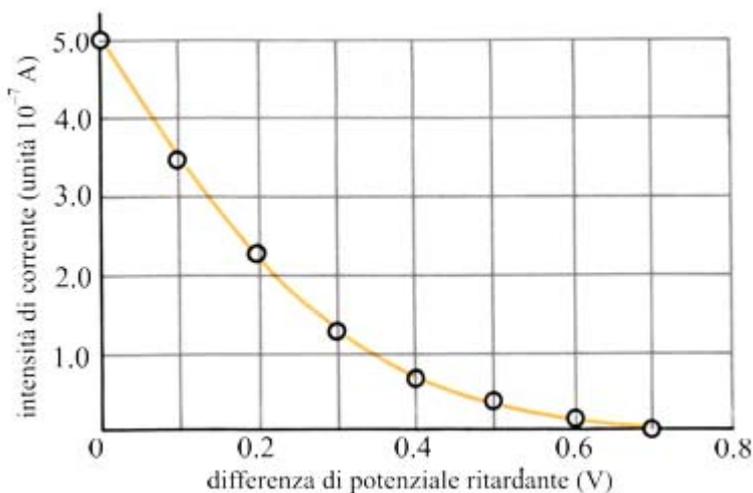


Fig. 43.6. Grafico dell'intensità di corrente attraverso una fotocellula in funzione della tensione ritardante quando la fotocellula è illuminata con luce verde e la sorgente è collocata a una distanza fissa dalla fotocellula.

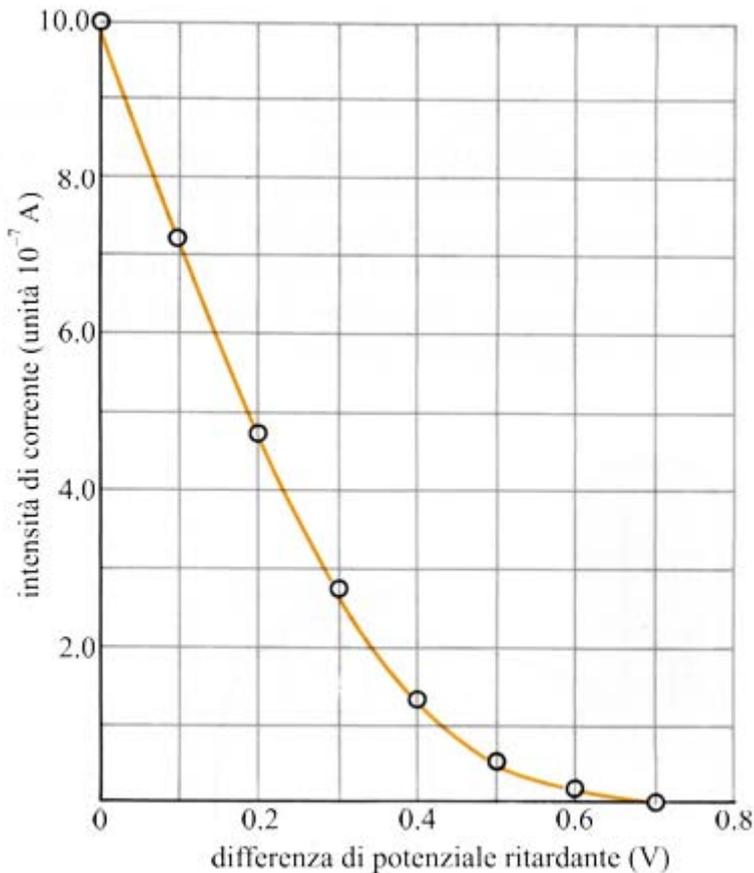


Fig. 43.7. Grafico dell'intensità di corrente attraverso una fotocellula in funzione della tensione ritardante quando la fotocellula è illuminata con luce verde e la sorgente viene avvicinata alla cellula in modo da aumentare l'intensità di illuminazione.

Se si confrontano le Figg. 43.6 e 43.7, si nota che la sorgente di luce più intensa produce una corrente maggiore. Per esempio, per $V_0 = 0$ si ha $i = 5 \times 10^{-7}$ A per la luce meno intensa e $i = 10 \times 10^{-7}$ A per la luce più intensa. In corrispondenza di $V_0 = 0.30$ V, le correnti sono rispettivamente 1.3×10^{-7} A e 2.7×10^{-7} A, ma l'intensità di corrente si annulla in entrambi i grafici per $V_0 = 0.70$ V. Una luce più intensa determina l'emissione di un maggior numero di elettroni nell'unità di tempo, ma non fornisce maggiore energia ai singoli elettroni.

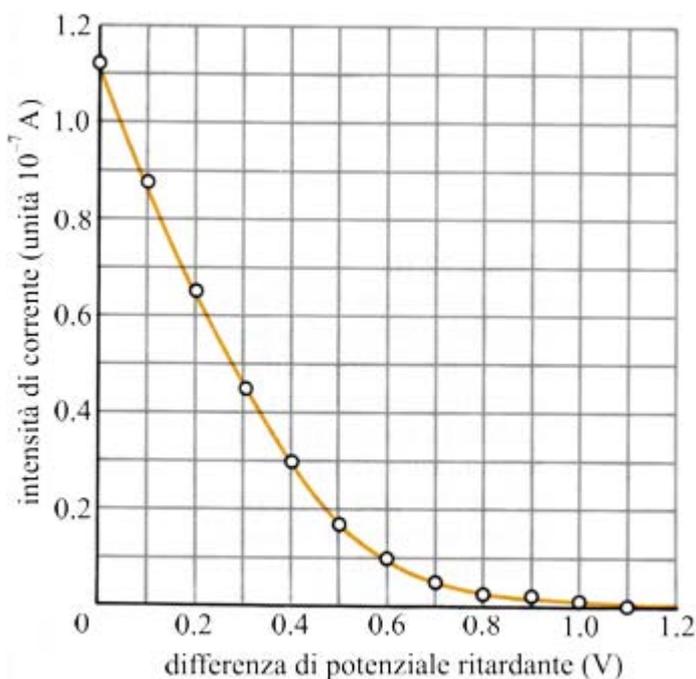


Fig. 43.8. Grafico dell'intensità di corrente attraverso una fotocellula in funzione della tensione ritardante quando la fotocellula è illuminata con luce azzurra e la sorgente è collocata a una distanza fissa dalla fotocellula.

Nel paragrafo precedente abbiamo visto che metalli diversi per emettere elettroni richiedono luce di colori diversi. Alla domanda se il colore della luce influenzi l'energia cinetica massima dei fotoelettroni, la risposta è evidentemente affermativa. La Fig. 43.8 è un grafico della corrente in funzione della tensione ritardante nel caso della stessa fotocellula illuminata con luce azzurra. In questo caso si nota che la corrente si annulla in corrispondenza di $V_0 = 1.1$ V e questo significa che la luce azzurra determina l'emissione di un elettrone dal catodo e gli conferisce un'energia cinetica massima di circa 1.1 eV, mentre l'energia cinetica massima nel caso della luce verde è di circa 0.70 eV.

Quesiti

- 43.5. Supponete che il catodo e l'anodo di una fotocellula siano collegati direttamente a un amperometro mentre la fotocellula è illuminata. Se l'amperometro indica una corrente di 1.0×10^{-6} A, quanti elettroni al secondo passano dal catodo all'anodo della fotocellula?
- 43.6. (a) In base alla Fig. 43.6, quanti elettroni vengono emessi al secondo con $T \geq 0.40$ eV?
(b) Quanti elettroni vengono emessi al secondo con un'energia cinetica compresa tra 0.40eV e 0.45eV?
- 43.7. Supponendo che la fotocellula esaminata nel paragrafo 43.1 sia illuminata con luce violetta e tenendo presente l'ordine dei colori nello spettro della luce bianca, quale previsione si può fare, da un punto di vista qualitativo, riguardo all'energia cinetica massima degli elettroni emessi?

43.3. Celle fotovoltaiche e diodi emettitori di luce (LED)

Nell'effetto fotoelettrico gli elettroni assorbono luce e acquistano energia cinetica. Le calcolatrici tascabili e i pannelli solari che forniscono energia elettrica alle sonde spaziali contengono un dispositivo che assorbe la luce e conferisce agli elettroni un'energia potenziale. La Fig. 43.9 è un grafico della differenza di potenziale fra i terminali di tale dispositivo in funzione dell'intensità di illuminazione della cellula. La differenza di potenziale tende a un valore limite che non è influenzato da un ulteriore aumento dell'intensità di illuminazione. Ecco perché tali dispositivi sono detti cellule fotovoltaiche.

Se si collega un amperometro a una cellula fotovoltaica e si misura la corrente in funzione dell'intensità di illuminazione, si trova che la funzione è di proporzionalità diretta (Fig. 43.10), cioè la stessa relazione che abbiamo trovato per la corrente in una cellula fotoelettrica.

Tale corrente può essere prodotta da luce di qualsiasi colore? È difficile rispondere a questa domanda con un'apparecchiatura semplice perché tutti i colori visibili producono una corrente nelle cellule fotovoltaiche comuni. Si deve quindi sfruttare il fatto che la radiazione infrarossa non produce corrente

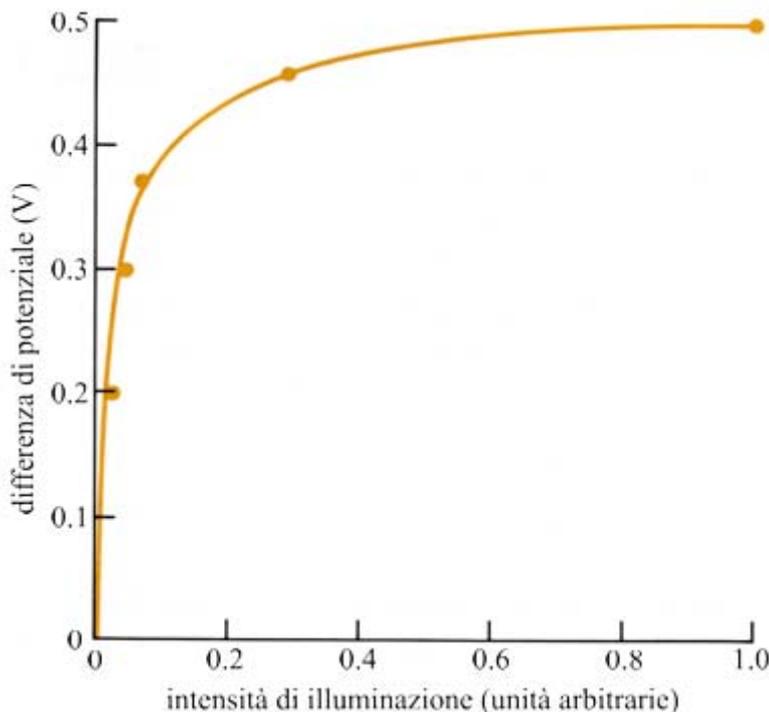


Fig. 43.9. La differenza di potenziale ai capi di una cellula fotovoltaica in funzione dell'intensità di illuminazione della cellula. L'intensità di illuminazione è stata misurata usando la legge dell'inverso del quadrato della distanza. L'intensità di illuminazione è stata posta uguale a quella a 10 cm.

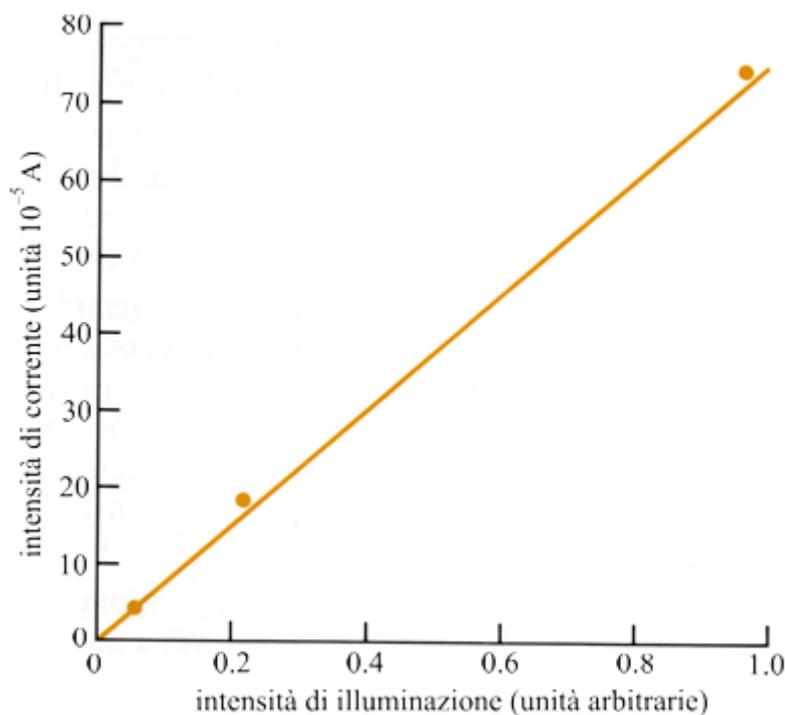


Fig. 43.10. L'intensità di corrente attraverso la cellula in funzione dell'intensità di illuminazione. Per queste misurazioni alla cellula è stato collegato soltanto un amperometro.

qualunque sia la sua intensità.

Come nella cellula fotoelettrica, anche in quella fotovoltaica il colore per cui si interrompe la corrente dipende dalle sostanze usate nella costruzione della cellula. Le cellule che producono una differenza di potenziale più alta richiedono luce di colori vicino al visibile.

In una cellula fotoelettrica e in una cellula fotovoltaica, viene assorbita luce e l'energia degli elettroni aumenta, ma esiste anche un dispositivo in cui avviene l'opposto. Tale dispositivo, detto diodo emettitore di luce o LED (dall'inglese *light-emitting diode*), emette luce se viene collegato a una sorgente di differenza di

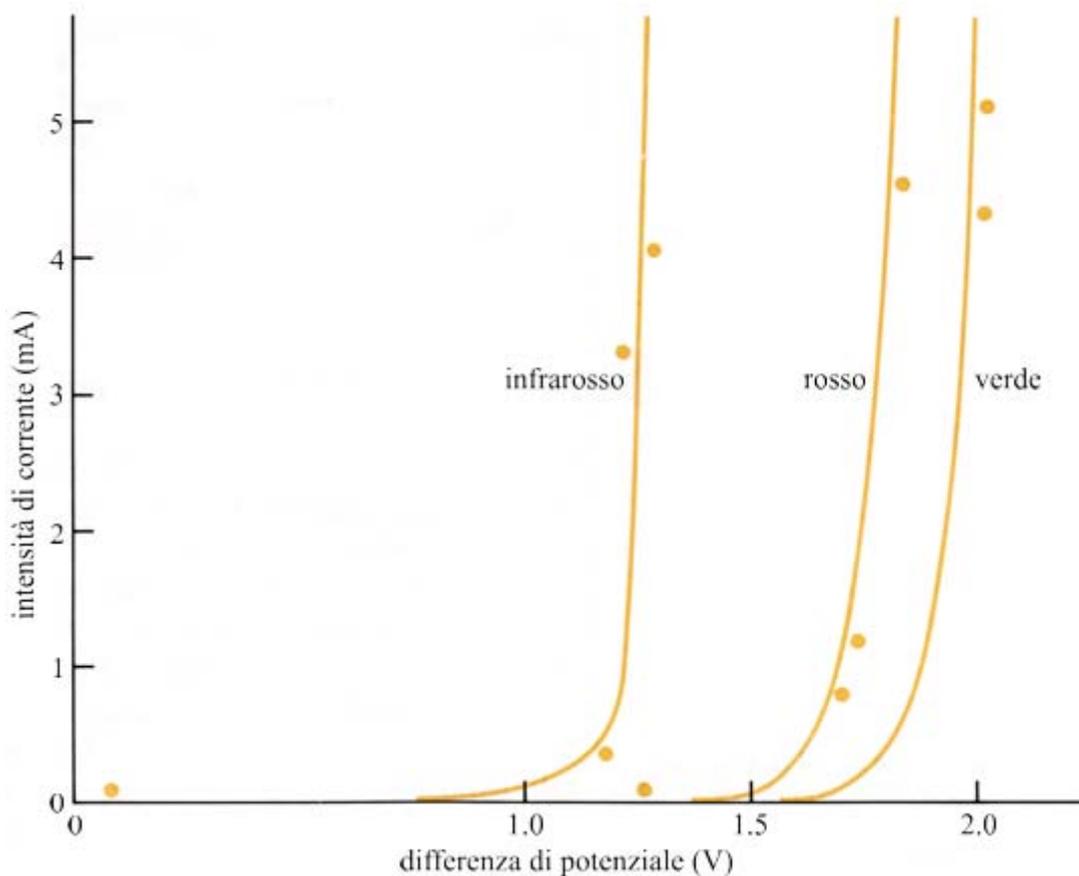


Fig. 43.11. L'intensità di corrente elettrica attraverso tre LED rappresentata sullo stesso grafico.

potenziale. La Fig. 43.11 è un grafico della corrente elettrica che passa attraverso il LED in funzione della differenza di potenziale fra i suoi terminali nel caso di tre LED costruiti con differenti sostanze. In tutti e tre i casi la luce viene emessa quando la corrente comincia ad aumentare.

La differenza di potenziale in corrispondenza della quale la corrente aumenta rapidamente dipende dal colore della luce. Per ogni LED l'energia raggiante emessa nell'unità di tempo è in relazione con la corrente.

La corrente in una cellula fotoelettrica e in una cellula fotovoltaica sono esempi di fenomeni in cui la generazione di corrente dipende dal colore della luce. Se si ha generazione di corrente, questa è proporzionale all'intensità di illuminazione del dispositivo.

Quesiti

- 43.8.** (a) Quante cellule fotovoltaiche del tipo che è stato usato per tracciare il grafico della Fig. 43.9 sono necessarie per costruire una batteria solare che generi una differenza di potenziale di 100 V?
 (b) Le cellule dovrebbero essere collegate in serie o in parallelo?
- 43.9.** (a) Quante cellule voltaiche del tipo usato nel quesito 43.8 sono necessarie per fornire una corrente di intensità 1 A quando sono illuminate da 1 unità di intensità di illuminazione nelle condizioni della Fig. 43.9?
 (b) Come dovrebbero essere collegate in serie o in parallelo?
 (c) Come costruireste una batteria fotovoltaica che eroghi una corrente di 1 A a 100 V?
- 43.10.** Supponendo che esista un LED che emetta luce gialla, a quale differenza di potenziale ai capi del diodo comparirebbe quella luce?

43.4. L'interpretazione corpuscolare dell'effetto fotoelettrico

Secondo il modello corpuscolare della luce si può considerare l'emissione di un fotoelettrone come un urto tra un fotone e un elettrone legato vicino alla superficie del solido. Parte dell'energia del fotone viene utilizzata per liberare l'elettrone e l'energia rimanente si trasforma in energia cinetica dell'elettrone.

Gli atomi del solido hanno una massa talmente più grande di quella dell'elettrone che possono assorbire qualunque quantità di moto sia necessaria per la conservazione della quantità di moto senza assorbire una quantità apprezzabile dell'energia del fotone.

Questa interpretazione dell'effetto fotoelettrico spiega immediatamente l'aumento della corrente fotoelettronica all'aumentare dell'intensità della luce, infatti se un numero maggiore di fotoni urta contro la superficie nell'unità di tempo, viene emesso un maggior numero di elettroni.

Il modello prevede inoltre che la corrente sia proporzionale all'intensità della luce; ora che sappiamo come varia con la distanza l'intensità della luce emessa da una sorgente di piccole dimensioni, possiamo verificare questa previsione.

Misuriamo la corrente fotoelettrica, ponendo la sorgente di luce alla distanza r dalla fotocellula e poi avviciniamo la sorgente di luce fino a una distanza $\frac{1}{2}r$. La legge dell'inverso del quadrato della distanza ci dice che in questo modo quadruplichiamo il numero di particelle di luce che urtano contro la fotocellula nell'unità di tempo.

Questo dovrebbe quadruplicare la corrente, il che è quanto avviene sperimentalmente purché la sorgente non venga avvicinata troppo alla fotocellula. La stessa relazione è valida per la corrente in una cellula fotovoltaica (Fig. 43.9).

Maggiore è il numero di fotoni che urtano la fotocellula nell'unità di tempo e maggiore è il numero degli elettroni che acquistano energia potenziale.

Per spiegare il fatto che la luce azzurra cede ai fotoelettroni più energia cinetica della luce verde, dobbiamo ampliare il modello corpuscolare e supporre che le particelle di luce azzurra abbiano più energia delle particelle di luce verde. Più in generale, l'energia dei fotoni aumenta lungo lo spettro, dall'infrarosso all'ultravioletto.

Questa semplice estensione del modello corpuscolare riesce a spiegare qualitativamente tutte le nostre osservazioni sulla cellula fotoelettrica. Supponete che l'energia di legame (paragrafo 27.7) dell'elettrone meno legato nel catodo sia W . Se l'energia di un fotone di luce azzurra è $T_{\text{fot(azzurro)}}$, allora l'energia cinetica del fotoelettrone diventa:

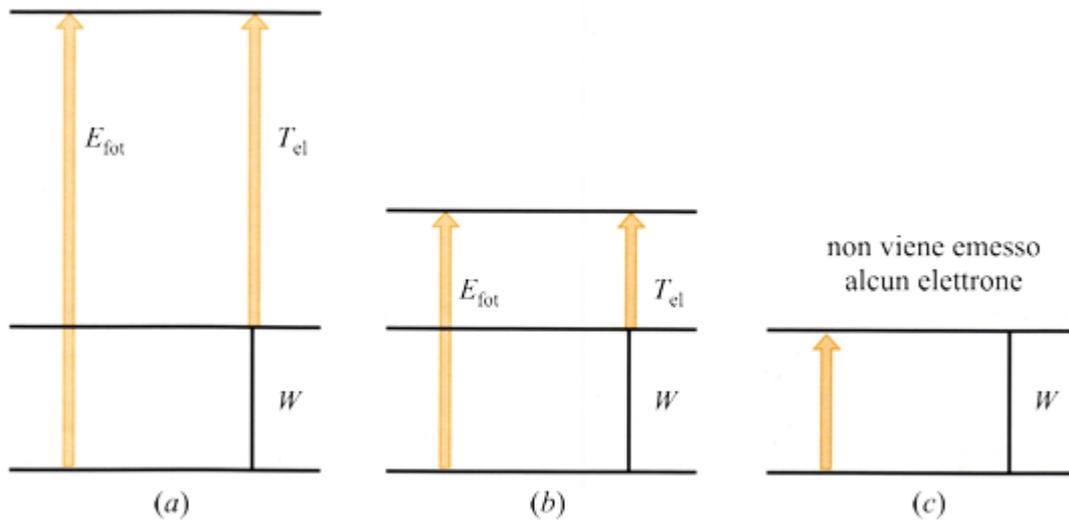


Fig. 43.12. Schemi della relazione tra energia dei fotoni ed energia cinetica dei fotoelettroni.

$$[43.1] \quad T_{\text{el}} = E_{\text{fot(azzurro)}} - W .$$

Per un fotone di luce verde si ha $E_{\text{fot(verde)}} < E_{\text{fot(azzurro)}}$ e quindi l'energia cinetica del fotoelettrone sarà minore, in accordo con le nostre osservazioni. La luce rossa non determina l'emissione di alcun elettrone nella fotocellula ed è quindi evidentemente:

$$[43.2] \quad E_{\text{fot(rosso)}} < W .$$

Gli schemi della Fig. 43.12 riassumono la situazione; come si può vedere, in (a) e in (b) viene utilizzata una quantità fissa dell'energia del fotone per liberare il fotone, mentre la rimanente energia del fotone compare sotto forma di energia cinetica dell'elettrone. Il fotone in (a) ha più energia di quello in (b) e produce un elettrone più energetico. In (c) l'energia del fotone è troppo piccola per determinare l'emissione del fotone: l'elettrone non viene emesso.

Potreste stupirvi del fatto che la luce di un certo colore non emetta un elettrone di una data energia cinetica. Ciò non avviene per due motivi: in primo luogo alcuni degli elettroni che vengono urtati dalle particelle di luce sono lievemente al di sotto della superficie e perdono una certa quantità di energia cinetica urtando contro altri elettroni nel tragitto che li porta fuori della superficie, in secondo luogo alcuni elettroni sono legati più fortemente di altri. Semplici previsioni sulle energie dei fotoni possono quindi essere fatte soltanto per gli elettroni con energia cinetica massima.

Quesiti

- 43.11.** Supponete di eseguire esperimenti relativi all'effetto fotoelettrico utilizzando come sorgente una piccola lampadina a incandescenza e di volere variare l'intensità di illuminazione sulla fotocellula. Perché vi conviene avvicinare o allontanare la sorgente dalla fotocellula piuttosto che variare la differenza di potenziale applicata alla lampadina?
- 43.12.** I dati rappresentati nei grafici delle Figg. 43.6 e 43.7 sono stati ottenuti illuminando la fotocellula con diverse intensità di illuminazione. Calcolate il rapporto tra le intensità di illuminazione nei due casi.
- 43.13.** Esaminate la Fig. 43.4 e supponete che la stessa sorgente di luce violetta illumini una superficie di litio e una di cesio. Come sarà la massima energia cinetica degli elettroni emessi dal cesio rispetto alla massima energia cinetica di quelli emessi dal litio?

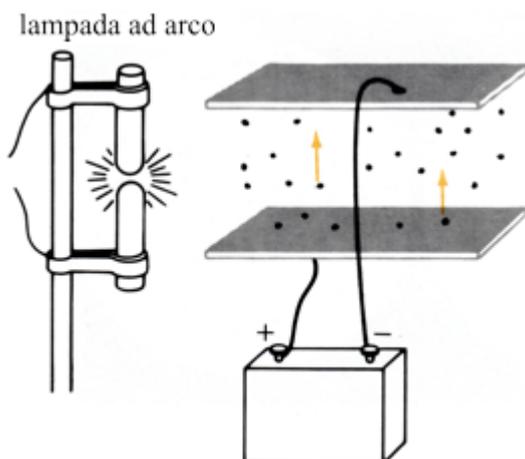


Fig. 43.13. La luce emessa dalla lampada ad arco illumina un grande numero di «goccioline» o corpuscoli di metallo. Questi corpuscoli sono in sospensione tra le lamine metalliche parallele cariche e non sono altro che una grande moltitudine di «goccioline d'olio di Millikan». Quando la luce incide sui corpuscoli, essi possono perdere elettroni. Ogni volta che perde un elettrone, il corpuscolo comincia a muoversi verso l'alto verso la lamina negativa, poiché ora è carico positivamente in misura più che sufficiente per equilibrare il proprio peso.

43.5. Difficoltà con il modello ondulatorio della luce

Nei capitoli 6, 7 e 8 abbiamo esaminato prove assai persuasive a favore del modello ondulatorio della luce. Il modello ondulatorio riusciva a spiegare la riflessione e la rifrazione parziale che la luce subisce quando passa da un mezzo a un altro, e anche la riflessione totale. Inoltre metteva in relazione l'interferenza della luce dovuta a una fenditura doppia e la diffrazione dovuta a una fenditura singola. Questi fenomeni sono proprio quelli che il modello corpuscolare non riusciva a spiegare in alcun modo: le particelle infatti non si scindono né si annullano reciprocamente.

Chiediamoci d'altra parte se il modello ondulatorio è in grado di interpretare quei fenomeni che il modello corpuscolare riesce a spiegare, come l'effetto fotoelettrico e se con lo stesso modello è possibile spiegare il fatto che la luce, se non è del colore appropriato, non genera alcuna corrente fotoelettrica, anche se è molto intensa (paragrafi 43.1 e 43.2).

Si può dimostrare che l'energia di un'onda in una molla è data da:

$$[43.3] \quad E = \text{costante} \cdot A^2 \nu^2 t$$

dove A e ν sono, rispettivamente, l'ampiezza e la frequenza dell'onda mentre t è il tempo durante il quale l'onda viene generata. L'energia si può ottenere con questa relazione anche nel caso di onde sull'acqua, di onde sonore e di un corpo che assorbe la luce riscaldandosi.

Non sappiamo tuttavia se la [43.3] è valida anche quando la luce viene assorbita da singoli atomi o elettroni e per determinare questo fatto consideriamo l'effetto fotoelettrico (paragrafi 43.1 e 43.2). Abbiamo visto che l'energia cinetica dei fotoelettroni dipende soltanto dal colore della luce e secondo il tipo di superficie la produzione di fotoelettroni comincia in differenti punti dello spettro (Fig. 43.4). Inoltre l'intensità della luce influenza soltanto l'intensità di corrente, cioè il numero di elettroni emesso nell'unità di tempo.

Nel modello ondulatorio il colore della luce è in relazione con la frequenza dell'onda e secondo la [43.3] la frequenza non ha un ruolo particolare nell'energia di un'onda luminosa: qualsiasi variazione della frequenza può essere compensata da una variazione del tempo di generazione o dell'intensità della luce. Tuttavia sappiamo dalle osservazioni sperimentali che non si può sostituire una luce verde intensa a una luce azzurra debole per produrre elettroni con la stessa energia cinetica. Siamo perciò di fronte a una contraddizione fondamentale fra il modello ondulatorio e le osservazioni sperimentali.

Incontriamo altre difficoltà se cerchiamo di applicare il modello ondulatorio per prevedere il comportamento della luce di debole intensità. Consideriamo l'esperimento seguente. La radiazione ultravioletta emessa da una lampada ad arco colpisce un gran numero di piccolissime particelle di metallo (o di goccioline) che si trovano fra due lamine metalliche cariche (Fig. 43.13). Secondo il modello ondulatorio quando la luce colpisce una particella, il campo elettrico presente nell'onda luminosa esercita una forza sugli elettroni presenti negli atomi. Se un elettrone viene emesso da un atomo, la sua emissione deve essere un effetto del campo elettrico che lo costringe a deviare dal suo moto normale all'interno degli atomi. (Il campo magnetico esercita una forza perpendicolare alla velocità dell'elettrone e quindi non ha effetto.)

Dunque, in un fascio luminoso il campo elettrico oscilla rapidamente, ma, in un dato istante, l'intensità del campo elettrico ha lo stesso modulo in tutti i punti del fronte d'onda. Se la luce è abbastanza intensa,

vengono emessi molti elettroni e le particelle (o le goccioline) si muovono verso l'alto immediatamente. D'altra parte, se la luce è poco intensa, il modello ondulatorio prevede che non accadrà nulla finché gli elettroni situati in qualche punto fra le lamine non avranno acquistato un'energia sufficiente per abbandonare le particelle. Dopo questo tempo ci attenderemmo di vedere molte particelle che cominciano a muoversi, ma ciò non avviene. Anche con una sorgente di ultravioletto molto debole alcune particelle cominceranno a muoversi di quando in quando non appena la luce viene accesa.

Un conflitto analogo tra il modello ondulatorio e le osservazioni sperimentali sorge quando si cerca di applicare questo modello all'effetto provocato dalla luce su una lastra fotografica. Su una lastra fotografica è depositato uno strato di corpuscoli molto piccoli, ciascuno dei quali può essere trasformato dalla luce incidente in una forma che la soluzione dello sviluppo può annerire. Quando confrontiamo una lastra che è stata esposta a una luce intensa con una che è stata esposta a una luce molto debole per lo stesso tempo, non ci sorprende trovare che quella che è stata esposta alla luce più intensa è più annerita.

Se esaminiamo le lastre al microscopio, troviamo che esse non sono annerite in modo uniforme. Inoltre ogni lastra contiene corpuscoli neri delle stesse dimensioni e sulla lastra esposta alla luce intensa ci sono più corpuscoli neri per unità di area rispetto alla lastra esposta alla luce debole per lo stesso tempo. I corpuscoli non sono disposti in un ordine particolare e a occhio nudo le lastre appaiono annerite uniformemente, come dovrebbe accadere con un'onda luminosa di intensità costante.

Tuttavia, a un esame più attento, vediamo che la luce ha prodotto corpuscoli neri in alcuni punti e non in altri e che inoltre i corpuscoli hanno lo stesso grado di annerimento su entrambe le lastre. L'intensità della luce ha effetto solo sul numero di corpuscoli, ma non sulle loro dimensioni o sul loro grado di annerimento e questo risultato è incompatibile con il modello ondulatorio, secondo il quale l'energia è distribuita in modo uniforme.

Quesiti

- 43.14.** La Fig. A mostra tre negativi fotografici dopo che sono stati esposti per intervalli di tempo diversi a una debole sorgente di particelle radioattive. Qual è la differenza tra l'aspetto di questi negativi e quello di una pellicola fotografica esposta a luce molto debole, se
- la luce si comporta come le particelle?
 - la luce si comporta come le onde?

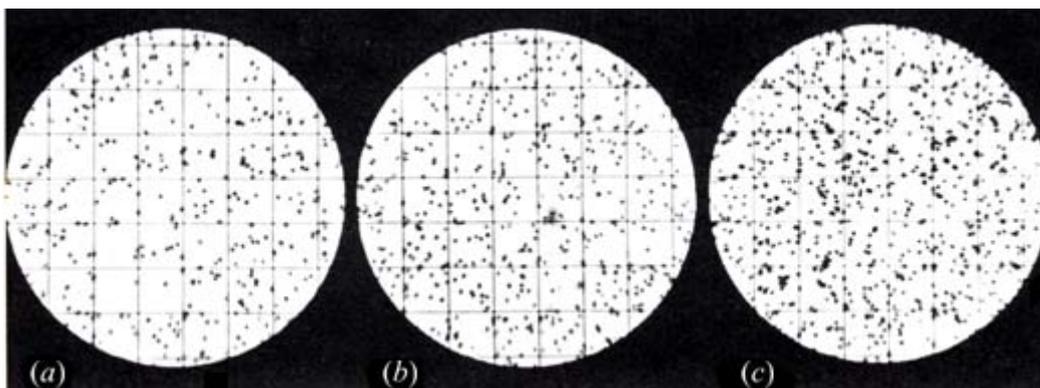


Fig. A.

43.6. La sintesi: l'interpretazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico

Abbiamo visto che alcuni fenomeni sono interpretati dal modello corpuscolare della luce, mentre altri sono spiegati perfettamente dal modello ondulatorio e abbiamo anche rilevato il fatto molto interessante che ogni modello riesce a interpretare i fenomeni che l'altro non è in grado di spiegare. L'interazione della luce con singoli elettroni e atomi è in accordo con il modello corpuscolare, infatti un fotone più energetico produce un fotoelettrone più energetico. E inoltre se aumenta il numero dei fotoni in un fascio luminoso, aumentano anche il numero dei fotoelettroni prodotti in un fototubo, il numero degli elettroni emessi dalle particelle in un esperimento simile a quello di Millikan e il numero di corpuscoli che vengono anneriti sulla

lastra fotografica. Il modello corpuscolare spiega anche il fatto che con un fascio di luce molto debole può non esserci alcun ritardo di tempo nell'emissione di elettroni: infatti anche un singolo fotone con energia sufficiente può produrre un effetto immediato. Sono questi i fenomeni a cui non è applicabile il modello ondulatorio, che in cambio riesce a spiegare perfettamente la riflessione, la rifrazione e l'interferenza. Questi sono fenomeni relativi alla propagazione, che non implicano uno scambio di energia con singoli elettroni o atomi e che il modello corpuscolare non è in grado di interpretare.

A questo punto è necessario operare una sintesi dei due modelli e costruire un modello più generale che sia in accordo con il modello ondulatorio per i fenomeni che questo riesce a spiegare e con il modello corpuscolare dove questo interpreta correttamente i dati sperimentali. Tale modello fu proposto da Einstein nel 1905.

Per esaminare tale modello consideriamo nuovamente l'energia cinetica dei fotoelettroni. Nel paragrafo 43.2 abbiamo visto che l'energia cinetica massima dei fotoelettroni dipende dal colore della luce e dalla natura della superficie da cui essi vengono emessi. Con l'aiuto del modello ondulatorio possiamo sostituire il termine «colore», troppo vago, con una grandezza misurabile, la lunghezza d'onda e in base ai dati sperimentali rappresentiamo con un grafico l'energia cinetica massima dei fotoelettroni per ciascun tipo di superficie in funzione della lunghezza d'onda della luce. Da questi grafici si ottengono curve difficili da interpretare, ma un grafico dell'energia cinetica massima dei fotoelettroni in funzione della *frequenza* della luce, $\nu = c/\lambda$, fornisce un risultato sorprendentemente semplice, presentato nella Fig. 43.14.

Come si può vedere, il grafico dell'energia cinetica massima in funzione della frequenza è una retta, qualsiasi sia la natura della superficie, e il coefficiente angolare h della retta è lo stesso per tutte le sostanze. Soltanto l'ordinata W varia da sostanza a sostanza. Perciò, i grafici per tutte le sostanze possono essere descritti dalla relazione:

$$[43.4] \quad T_{\text{el}} = -W + h\nu$$

dove h è una costante universale, W è una costante che dipende dal tipo di metallo e ν è la frequenza della luce, che varia con il colore dello spettro.

Dai risultati sperimentali emerge quindi chiaramente una distinzione tra il ruolo della luce e quello della superficie fotoelettrica. La superficie è rappresentata unicamente dal termine $-W$. Per esempio, l'ordinata W_{Cu} indicata a sinistra nella Fig. 43.14 si riferisce a una superficie di rame e indica qual è l'energia che è necessario fornire affinché un fotoelettrone venga emesso senza alcuna energia cinetica.

Essa rappresenta l'energia con cui gli elettroni sono legati alla superficie del metallo (*energia di legame*).

D'altra parte la luce è caratterizzata dal termine $h\nu$, che è sempre lo stesso per la luce di una data frequenza.

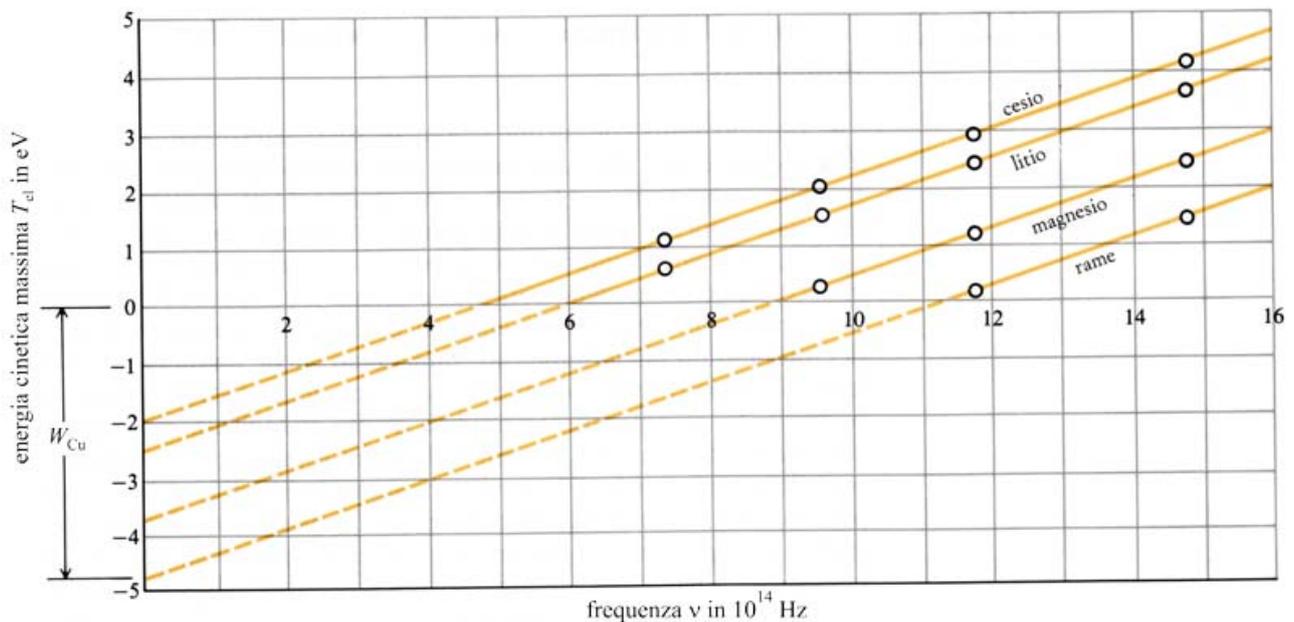


Fig. 43.14. I risultati degli esperimenti con l'apparecchiatura della Fig. 43.5, integrata con varie sorgenti di luce e filtri di differenti colori. L'energia cinetica massima T_{el} è rappresentata graficamente in funzione della frequenza ν della luce usata. Il coefficiente angolare delle rette dà il valore di h .

Poiché il coefficiente angolare h è lo stesso per tutte le sostanze, è chiaro che questo termine non ha nulla che fare con la composizione chimica della superficie fotoelettrica.

Riscrivendo la [43.4] nella forma:

$$[43.5] \quad T_{\text{el}} + W = h\nu$$

si giunge a una conclusione importante. Nel primo membro della [43.5] compare l'energia totale assorbita dall'elettrone, e per il principio di conservazione dell'energia, questa energia è uguale all'energia del fotone:

$$[43.6] \quad T_{\text{el}} + W = E_{\text{fot}}$$

La [43.5] descrive l'effetto fotoelettrico con riferimento al modello ondulatorio della luce, mentre la [43.6] descrive lo stesso effetto con riferimento al modello corpuscolare. Einstein effettuò una sintesi dei due modelli per la luce e tale sintesi è espressa dalla combinazione di queste due relazioni:

$$[43.7] \quad E_{\text{fot}} = h\nu.$$

La [43.7] esprime il fatto che l'energia del fotone (una particella) è uguale a una costante moltiplicata per la frequenza dell'onda. Misurazioni del coefficiente angolare delle rette nella Fig. 43.14 forniscono il risultato:

$$[43.8] \quad h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}.$$

Per valutare quanto sia rivoluzionaria la [43.7], riassumiamo le proprietà delle particelle e delle onde come erano conosciute nel 1905 (Tab. 43.1). Tali proprietà sono state individuate in base a dati sperimentali sicuri e sono il frutto di molti esperimenti. Come vedremo nel prossimo capitolo, la sintesi di questi due concetti opposti ha un suo costo.

Tab. 43.1.

Particelle	Onde
Si trovano in una posizione determinata in un istante determinato	Possono avere una grande estensione
Hanno una traiettoria definita	Si diffrangono
Entrano in collisione	Si sovrappongono

Dato che in laboratorio misuriamo la lunghezza d'onda della luce, anziché la sua frequenza, nei calcoli relativi ai dati degli esperimenti è meglio esprimere l'energia di un fotone in funzione della lunghezza d'onda:

$$[43.9] \quad E_{\text{fot}} = \frac{hc}{\lambda}.$$

Il valore numerico della costante hc dipende dalle unità scelte per misurare l'energia e la lunghezza d'onda del fotone. Nel Sistema Internazionale, in cui l'energia è misurata in joule e la lunghezza d'onda in metri, si ha:

$$[43.10] \quad E_{\text{fot}} = \frac{1.99 \times 10^{-25} \text{ J} \cdot \text{m}}{\lambda}.$$

Ricordando che $1 \text{ J} = 6.25 \times 10^{18} \text{ eV}$ e $1 \text{ m} = 10^9 \text{ nm}$, otteniamo:

$$[43.11] \quad E_{\text{fot}} = \frac{1.24 \times 10^3 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda}.$$

La lunghezza d'onda media della luce visibile è circa 500 nm e di conseguenza un fotone visibile medio trasporta un'energia pari a

$$[43.12] \quad E_{\text{fot}} = \frac{1.24 \times 10^3 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{500 \text{ nm}} \cong 2.5 \text{ eV}.$$

L'energia dell'intera gamma dei fotoni visibili ha valori che vanno da circa 2 eV per il rosso a un poco più di 3 eV per l'azzurro.

Questi valori per l'energia, di qualche elettronvolt per fotone, appartengono alla regione più bassa della gamma di energie in grado di causare importanti trasformazioni chimiche e quindi le emulsioni fotografiche, le superfici fotoelettriche e la retina dell'occhio stesso sono sensibili a questi valori, ma non a valori inferiori. Le differenze fra gli intervalli «visibili» a cui reagiscono questi rivelatori sono assai piccole. Nessuna superficie fotoelettrica conosciuta reagirà all'infrarosso con una lunghezza d'onda dieci volte maggiore di quella della luce rossa.

Osserviamo che i risultati sperimentali presentati nella Fig. 43.14 non erano disponibili per Einstein nel 1905, ma che egli li prevede. Nella sua opera Einstein si basò sul risultato che Planck aveva ottenuto nel 1900 risolvendo il problema della radiazione di corpo nero (Capitolo 42). Il risultato di Planck si basava infatti sull'idea che l'energia di un'onda luminosa di frequenza ν potesse aumentare o diminuire solo secondo quantità finite pari a h . Come abbiamo già detto nel Capitolo 42, la costante di proporzionalità h è detta costante di Planck. Prima che il fotone venisse riconosciuto come una particella, i «pacchetti» di energia $h\nu$ erano chiamati quanti di luce e per questo la branca della fisica in cui la costante di Planck è pertinente è detta *meccanica quantistica* o *fisica quantistica*. Il termine *fotone* venne introdotto da Einstein.

Quesiti

- 43.15.** Nella Fig. 43.14 quali punti dei grafici sono stati ottenuti usando luce violetta?
- 43.16.** Qual è l'energia minima, in elettronvolt, che i fotoni devono possedere per determinare l'emissione di elettroni dalla superficie fotoelettrica di cesio che è stata usata nella Fig. 43.14?
- 43.17.** Un buono specchio riflette circa l'80% della luce incidente. Come si può determinare se non viene riflesso il 20% dei fotoni oppure se i fotoni sono stati riflessi tutti, ma ciascuno con un'energia del 20% minore?
- 43.18.** La luce rossa ha una lunghezza d'onda di circa 650 nm.
- (a) Qual è la sua frequenza?
 - (b) Qual è l'energia, in joule, di un fotone della luce rossa?
 - (c) Qual è l'energia, in elettronvolt, di un fotone siffatto?
 - (d) Trova approssimativamente la lunghezza d'onda più lunga e più corta e calcola l'energia dei fotoni corrispondenti.
- 43.19.** Un fascio di luce di lunghezza d'onda 500 nm illumina una superficie. Qual è la differenza di potenziale necessaria per fermare tutti gli elettroni emessi dalla superficie se la loro energia di legame alla superficie è 2.0 eV?
- 43.20.** Nella preparazione di un esperimento di Young supponiamo di avere inciso una fenditura doppia usando una lametta da barba e che la distanza tra le due fenditure risulti di 3.5×10^{-1} mm. Illuminando con una sorgente di luce monocromatica questa fenditura doppia, osserviamo, su uno schermo posto alla distanza di 2.0 m dalla fenditura doppia, una figura di interferenza in cui i nodi sono separati da una distanza di 2.8 mm.
- (a) Se in seguito si illumina con la stessa luce una fotocellula con una superficie di cesio, qual è il valore dell'energia cinetica massima dei fotoelettroni emessi? (Vedi Fig. 43.14.)
 - (b) Quali dei vostri calcoli si sono basati esclusivamente sulle proprietà ondulatorie della luce? Quali sulla sintesi dei due modelli della luce?
-

Problemi di fine capitolo

- 43.21.** La luce azzurra emessa da una data sorgente determina l'espulsione di elettroni da una lamina rivestita di litio con un'energia cinetica massima di 0.3 eV. La stessa luce determina l'emissione di elettroni da una lamina rivestita di cesio con un'energia cinetica massima di 0.7 eV. Che cosa siete in grado di dire riguardo alla differenza tra le energie di legame degli elettroni meno legati nei due metalli?
- 43.22.** (a) Qual è il rapporto fra l'energia di un fotone di lunghezza d'onda 450 nm (luce azzurra) e l'energia di un fotone di lunghezza d'onda 630 nm (luce rossa)?
(b) Qual è il rapporto fra l'energia massima degli elettroni emessi da una superficie con un'energia di legame di 1.8 eV quando si usa luce rossa e quando si usa luce azzurra?
- 43.23.** Si vuole ottenere l'emissione di elettroni da lastre metalliche di materiali diversi su cui incide una radiazione di frequenza 7.80×10^{14} Hz. Determinare, motivando la risposta, quale tra i materiali in elenco è l'unico adatto allo scopo.

Materiale	Lavoro di estrazione
Argento	4.8 eV
Cesio	1.8 eV
Platino	5.3 eV

Individuato il materiale da utilizzare, determinare la velocità massima che può avere un elettrone al momento dell'emissione.

- 43.24.** Si osserva che illuminando un catodo di argento con luce ultravioletta di lunghezza d'onda 100 nm occorre applicare un potenziale ritardante di 7.7 V per arrestare completamente i fotoelettroni. Qual è il lavoro di estrazione dell'argento?
- 43.25.** In una cella fotoelettrica viene generata una corrente di saturazione $I = 15 \mu\text{A}$ sfruttando l'effetto fotoelettrico. Come catodo viene utilizzato un materiale metallico il cui lavoro di estrazione è di 5.15 eV.
(a) Determinare la lunghezza d'onda massima della radiazione incidente sul catodo capace di estrarre elettroni da esso;
(b) calcolare il numero minimo di fotoni che ogni secondo devono incidere sul catodo, nell'ipotesi che solo il 75% di essi riescano ad estrarre un elettrone.
-