

Elettronica dello Stato Solido

Lezione 4: L'effetto fotoelettrico e il dualismo onda-particella



Daniele Ielmini

DEIB – Politecnico di Milano

daniele.ielmini@polimi.it

Outline

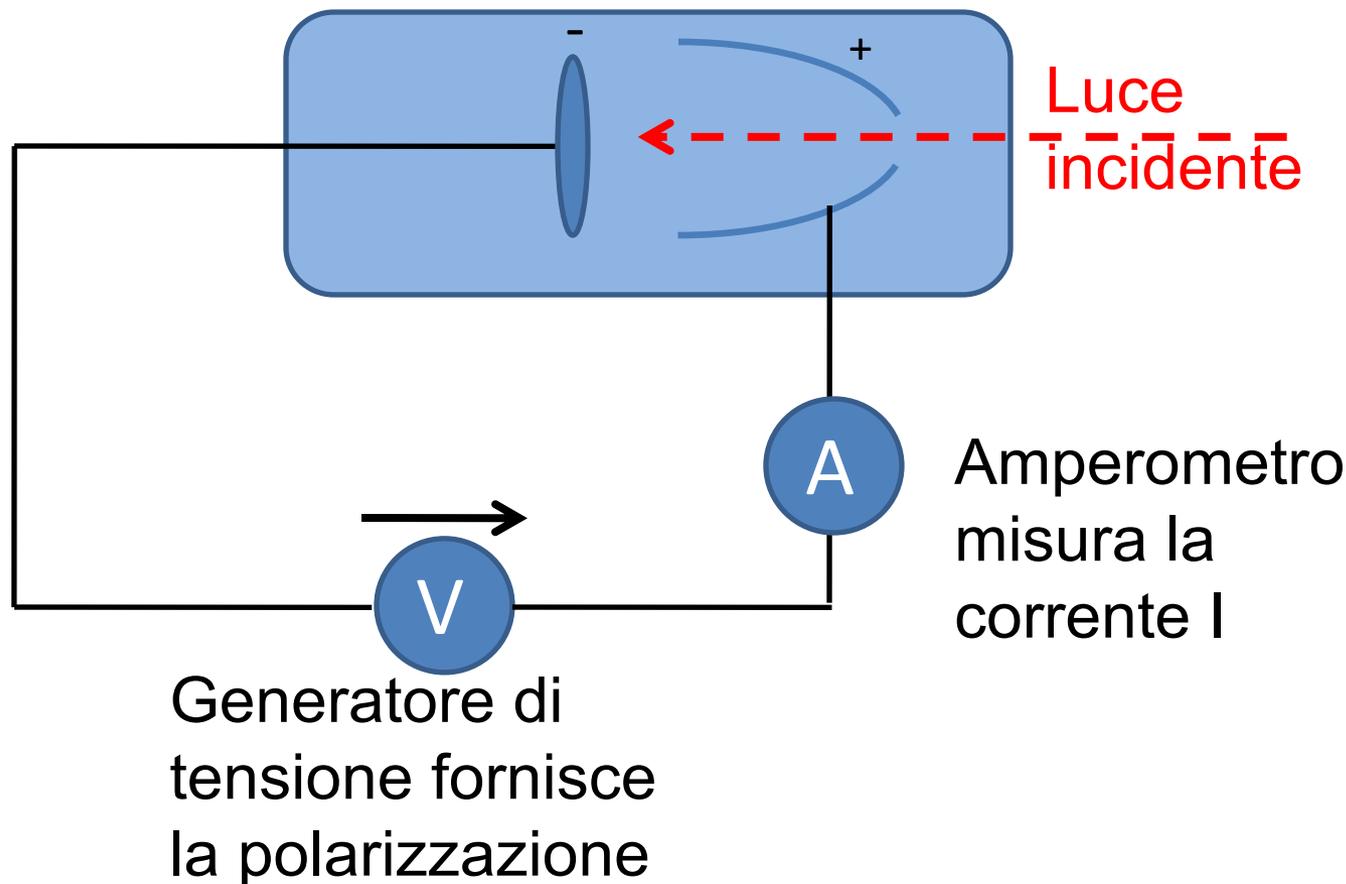
- Crisi della meccanica classica
 - Radiazione del corpo nero
 - Effetto fotoelettrico
 - Diffrazione da particelle
- Conclusioni

Limiti della meccanica classica

- Come per la BBR, l'effetto fotoelettrico (photoelectric, PE) non poteva essere spiegato dalle leggi classiche dell'elettrodinamica
- Questo è un altro effetto macroscopico (corrente in un circuito) che rivela che le leggi della fisica classica non sono più valide nell'ultrapiccolo
- L'effetto PE (come altri effetti e.g. Compton e la radiazione di Bremsstrahlung) suggerisce un comportamento corpuscolare delle onde
- Il comportamento ondulatorio delle particelle verrà introdotto più avanti

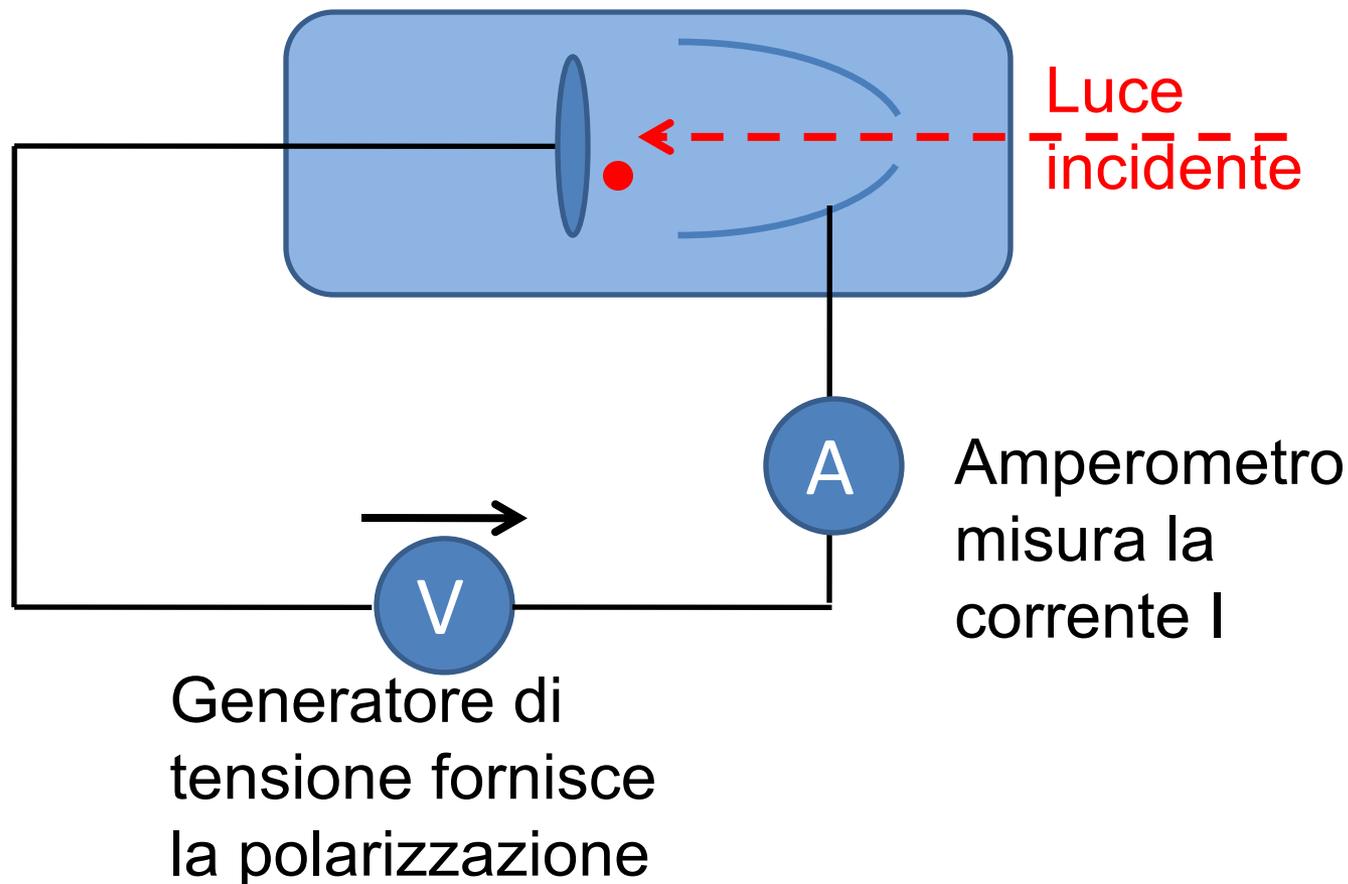
L'esperimento per l'effetto PE

- Il setup sperimentale per l'effetto PE



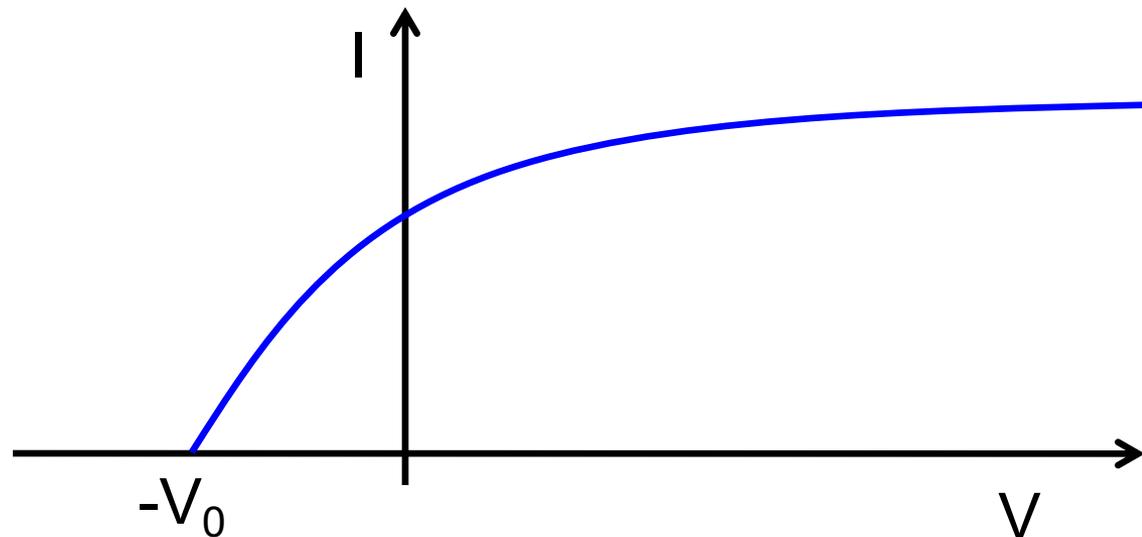
L'esperimento per l'effetto PE

- Il setup sperimentale per l'effetto PE



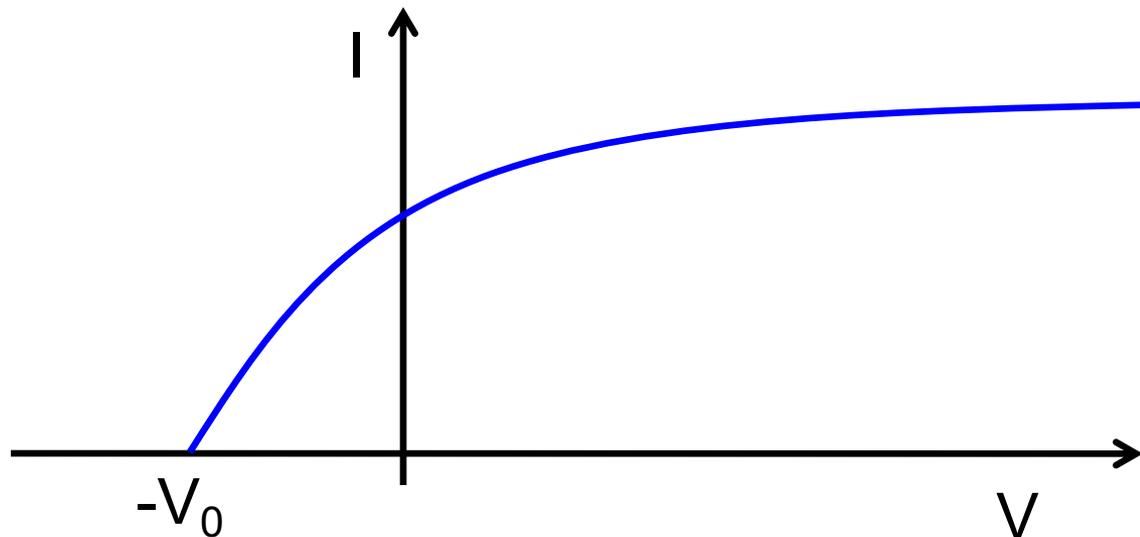
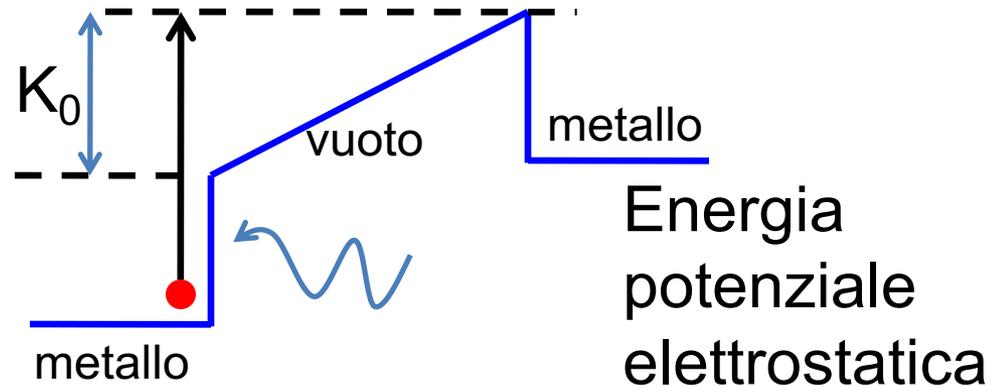
Caratteristica I-V

- Tensioni alte $V > 0$: la corrente satura, tutti i fotoelettroni sono raccolti
- Tensione nulla $V = 0$: la corrente è positiva non nulla, alcuni elettroni sono raccolti
- Tensione di stopping $V = -V_0 < 0$: la corrente si azzerava



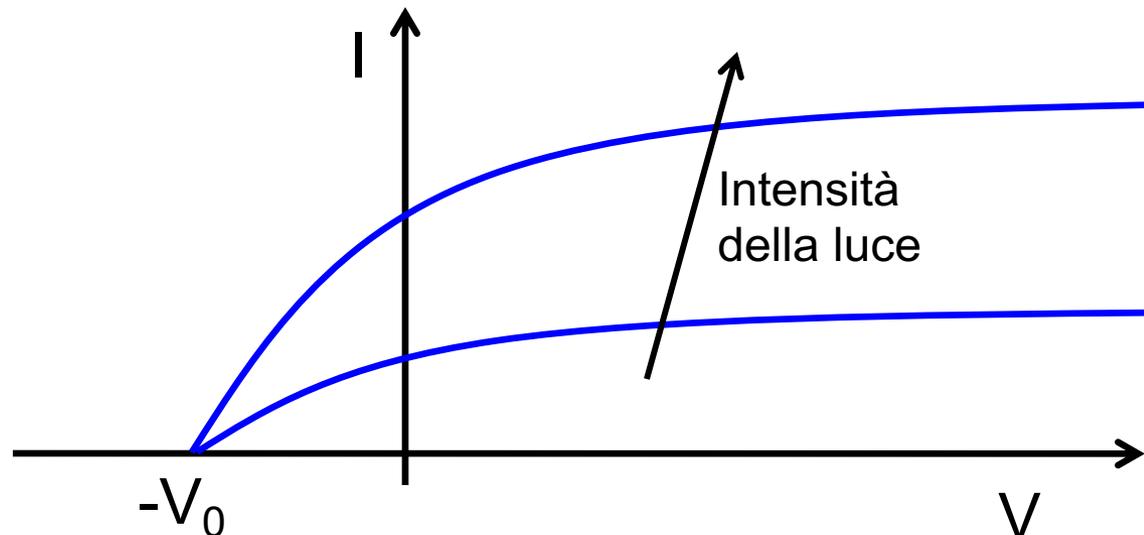
Tensione di stopping

- $K_0 = qV_0$ ha il significato di energia cinetica degli elettroni appena fuoriusciti dal catodo



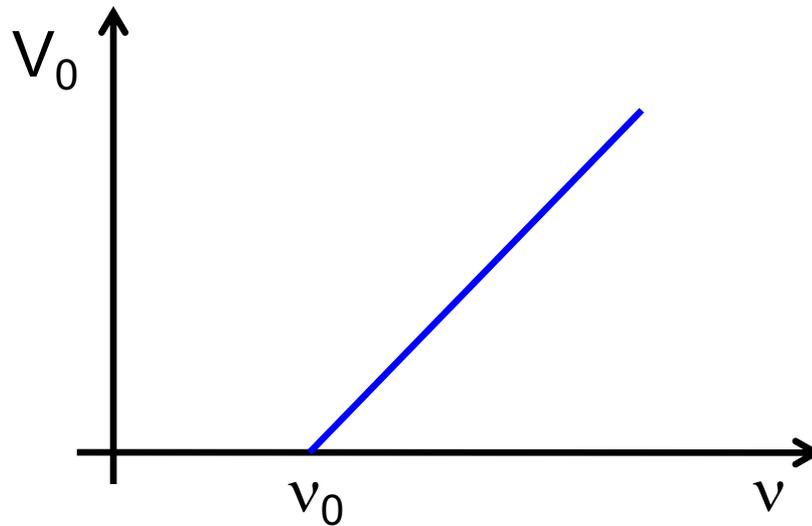
Paradosso #1

- Se l'intensità della luce viene cambiata, la tensione di stopping non cambia
- Secondo l'elettrodinamica classica l'energia cinetica del fotoelettrone dovrebbe dipendere dal campo elettrico della radiazione, che aumenta con l'intensità secondo $\mathcal{I} \sim \mathcal{E}^2$
- Perché V_0 è indipendente dall'intensità della luce?



Paradosso #2

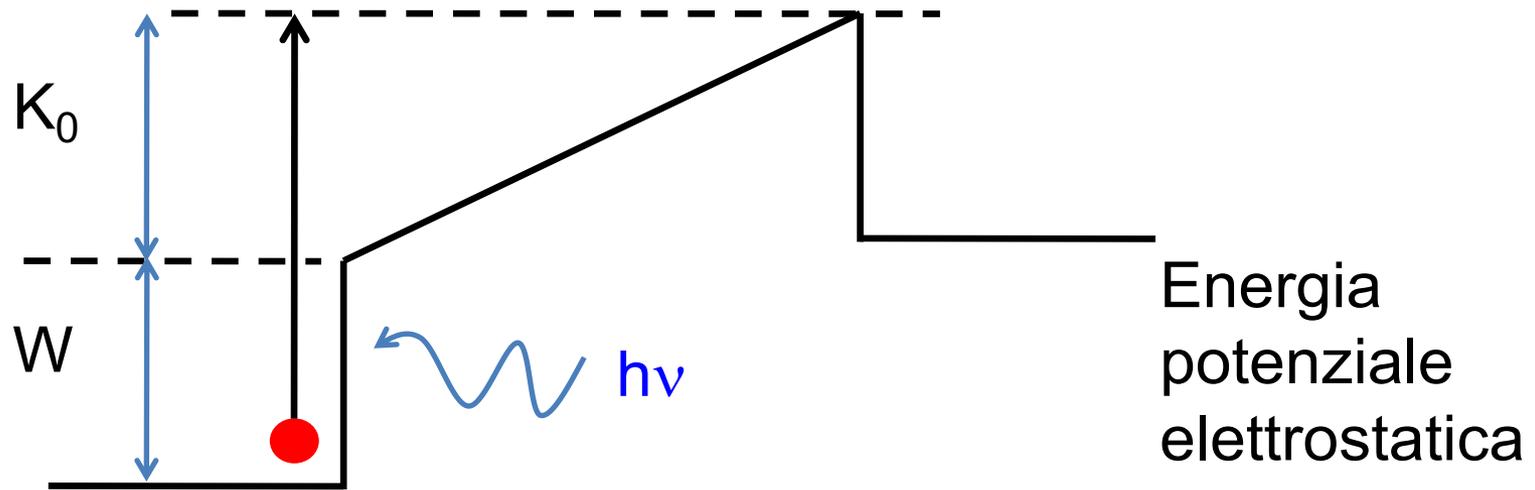
- Dipendenza della tensione di stopping dalla frequenza della radiazione
- Sotto una frequenza di taglio ν_0 non c'è più effetto fotoelettrico
- L'elettrodinamica classica prevede che vi sia effetto PE per ogni frequenza, ammesso che l'intensità sia sufficiente per l'eccitazione
- Perché non c'è PE sotto la frequenza di taglio?



Teoria di Einstein

- Einstein (1905) spiegò l'effetto con un concetto di quantizzazione simile a quello invocato da Planck per spiegare il BBR
- Sebbene la luce si propaghi come un'onda, si comporta come corpuscoli quando emessa o assorbita, ogni corpuscolo (o quanto) di luce avendo la stessa discretizzazione di energia proposta da Planck, i.e. $\Delta E = h\nu$

Interpretazione quantistica del PE

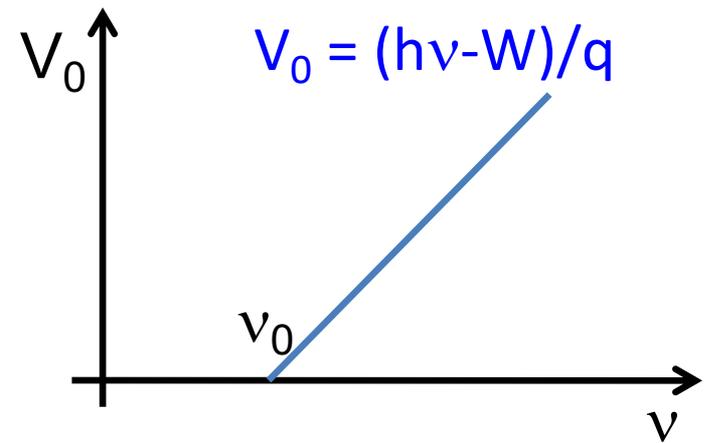
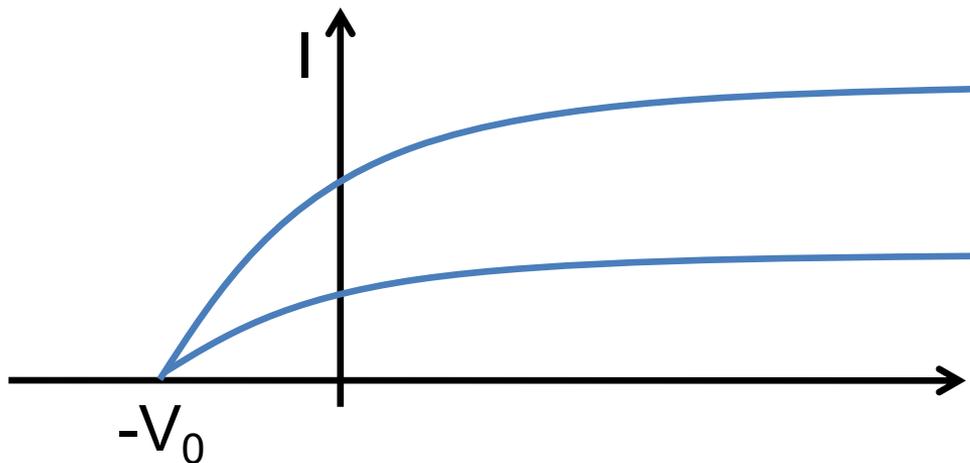


- $K_0 = h\nu - W =$ massima energia cinetica degli elettroni PE
- $W =$ work function, lavoro necessario per liberare un elettrone dal piatto metallico

Spiegazione dei paradossi

#1 $V_0 = K_0/q = (h\nu - W)/q$ non dipende dall'intensità

#2 quando $h\nu \leq W$, gli elettroni non possono neppure arrivare al vuoto, ma rimangono 'intrappolati' nel metallo indipendentemente dall'intensità. La frequenza di taglio è data da $\nu_0 = W/h$



Stima della costante di Planck

- Gli effetti associati a BBR e PE forniscono due metodi indipendenti per la stima della costante di Planck
- Dallo spettro BBR ad alta frequenza :

$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu \approx \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} e^{-\frac{h\nu}{kT}} d\nu$$

- Dalla tensione di stopping vs. frequenza:

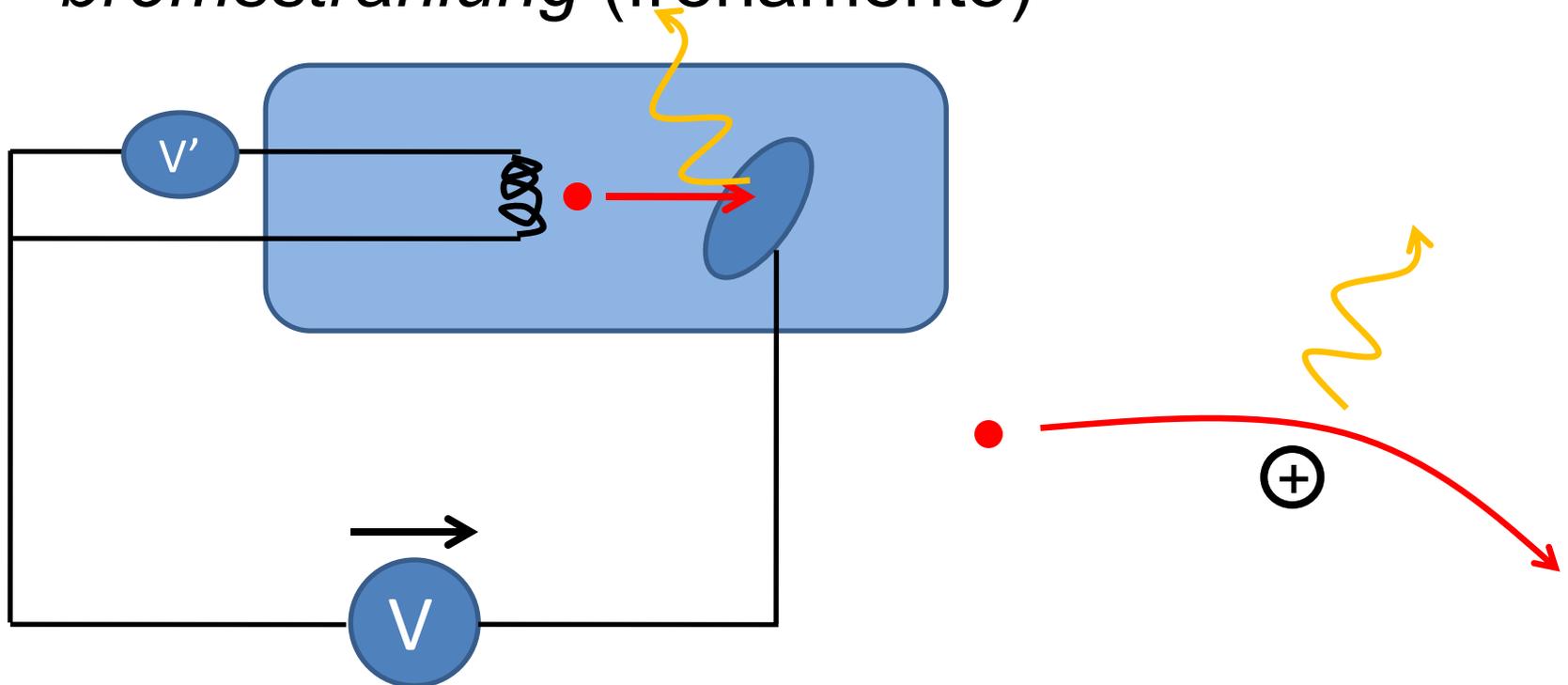
$$V_0 = (h\nu - W)/q$$

Il fotone

- La quantizzazione introduce la natura corpuscolare della luce
- Particella di luce = fotone
- Lunghezza d'onda = λ
- Vettore d'onda $k = 2\pi/\lambda$
- Frequenza $\nu = c/\lambda$
- Momento $p = h/\lambda$
- Energia $E = h\nu = hc/\lambda = 1.2424/\lambda$ [eV/ μm]

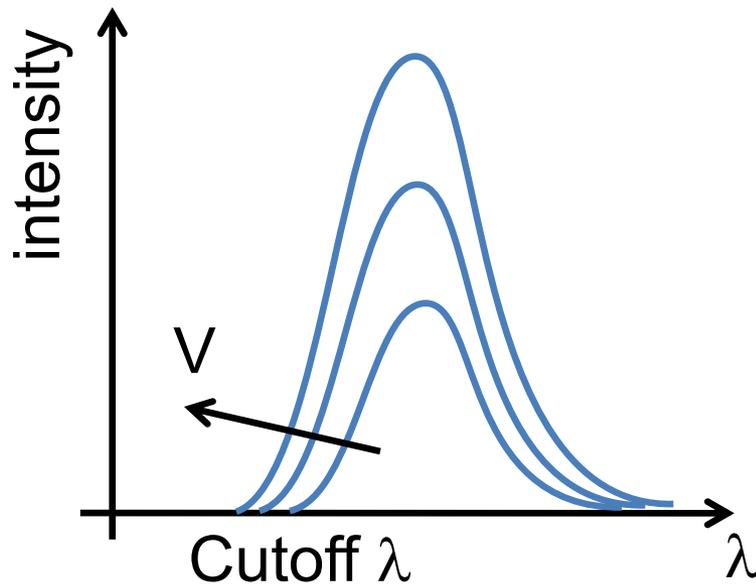
Radiazione di Bremsstrahlung

- Invece di fotoni che incidendo su un metallo liberano fotoelettroni, gli elettroni possono essere irraggiati su un metallo causando l'emissione di fotoni
- Il portatore accelerato irradia un fotone di *bremsstrahlung* (frenamento)



Spettro di Bremsstrahlung

- Secondo la fisica classica, non ci dovrebbe essere una lunghezza d'onda di cutoff, ogni lunghezza d'onda potrebbe essere irradiata



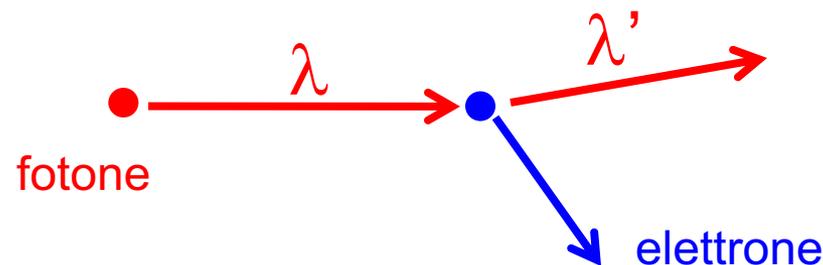
- La massima energia del fotone irradiato è l'energia cinetica dell'elettrone $K = qV$
 $\rightarrow \lambda_{\min} = hc/(qV)$

Effetto Compton

- Un'altra evidenza della natura corpuscolare della radiazione EM è fornita dall'effetto Compton
- Esperimento di scattering di raggi X su metalli solidi: una componente scatterata alla stessa lunghezza d'onda incidente λ (e.g. diffrazione Bragg), un'altra a più alta lunghezza d'onda λ'
- Previsione classica: la radiazione eccita elettroni nell'atomo alla stessa frequenza della radiazione incidente
- Gli atomi riemettono alla stessa frequenza \rightarrow la lunghezza d'onda modificata λ' non può essere spiegata!

Fotoni come palle da biliardo

- Fotoni colpiscono un elettrone in un atomo e scambiano sia energia sia momento come se fossero particelle
- Un po' di energia viene trasferita all'elettrone → la radiazione scatterata ha meno energia di quella incidente → componente scatterata Compton con $\lambda' > \lambda$



$$\lambda = hc/E$$

Outline

- Crisi della meccanica classica
 - Radiazione del corpo nero
 - Effetto fotoelettrico
 - Diffrazione da particelle
- Conclusioni

Comportamento ondulatorio di particelle

- Einstein \rightarrow ad un'onda elettromagnetica ($\lambda\nu = c$) si può associare una particella (fotone) con energia $E = h\nu$ e momento $p = h/\lambda$
- DeBroglie (1924) \rightarrow analogamente, a ogni particella possiamo associare un'onda, con lunghezza d'onda $\lambda = h/p$ (relazione di DeBroglie) e frequenza $\nu = E/h$ ($E =$ energia totale)
- Questo postulato è puramente ispirato alla simmetria con l'analogo radiazione/fotone
- Le leggi di DeBroglie vennero dimostrate sperimentalmente più tardi e sono un caso speciale delle leggi della meccanica quantistica (particelle libere)

Dualismo onda/particella

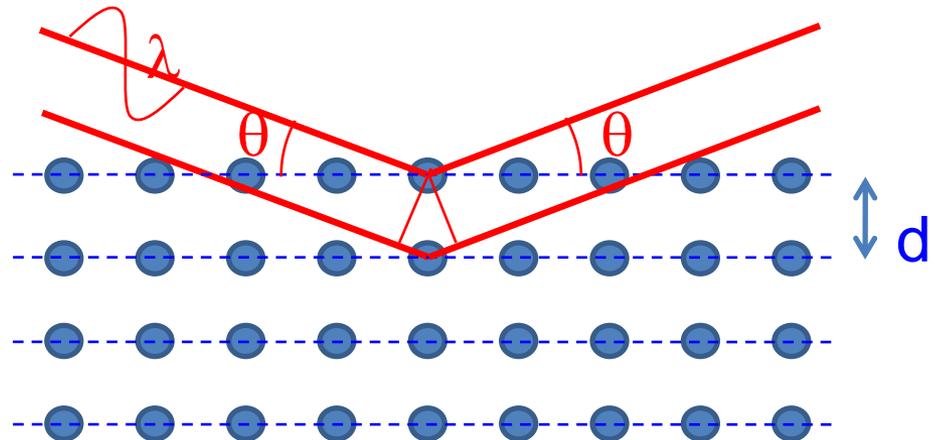
Onda	Particella
Onda elettromagnetica Lunghezza d'onda λ Frequenza ν Velocità $c = \lambda\nu$	Fotone Massa $m = 0$ Energia $= h\nu$ Momento $p = h/\lambda$
Onda di DeBroglie Lunghezza d'onda $\lambda = h/p$ Frequenza $\nu = E/h$	Elettrone Massa $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg Velocità v Momento $p = mv$ Energia cinetica $K = 1/2mv^2$ Energia totale $E = K + V$

Esperimento di diffrazione

- Per provare la natura ondulatoria delle particelle, abbiamo bisogno di verificare la loro capacità di dar luogo a diffrazione ed interferenza
- La diffrazione di Bragg indica che abbiamo bisogno di λ e d dello stesso ordine di grandezza \rightarrow Davisson e Germer usarono elettroni accelerati da un potenziale (circa 50 eV) diretti su un cristallo di nickel e trovarono picchi di diffrazione

Diffrazione da elettroni

- Angolo di diffrazione $\theta = 65^\circ$
- $d = 0.91 \text{ \AA}$ (dalla diffrazione a raggi x)
- Dalla teoria di Bragg si ha $\lambda = 2d \sin \theta = 1.65 \text{ \AA}$
- DeBroglie prevede $\lambda = h/p = 1.65 \text{ \AA}$
(momento $p = (2mE)^{1/2} = 4 \times 10^{-24} \text{ kgms}^{-1}$ per
 $E = qV = 54 \text{ eV}$)
- Accordo perfetto!



Dualismo onda-particella

- Come possiamo concepire una particella che si comporta come onda e vice versa?
- La chiave è la pittura statistica
- Einstein fu il primo a unificare la descrizione corpuscolare e quella ondulatoria della radiazione elettromagnetica con un approccio probabilistico

L'interpretazione probabilistica di Einstein

- Pittura ondulatoria: intensità $\mathcal{I} \sim \varepsilon^2$
- Pittura corpuscolare : intensità $\mathcal{I} \sim N h \nu$,
dove N = numero medio di fotoni per unità di tempo che attraversano un'area unitaria perpendicolare al vettore d'onda $\rightarrow \varepsilon^2$ è proporzionale alla probabilità di trovare localmente il fotone

Interpretazione probabilistica di Born

- Analogamente, Born propose un approccio probabilistico alle onde di materia
- Particella libera (energia e momento ben definiti) \rightarrow funzione d'onda $\Psi(x,t) = A \sin 2\pi(x/\lambda - vt)$, simile al campo elettrico intensità $\mathcal{E}(x,t) = A \sin 2\pi(x/\lambda - vt)$ per la radiazione elettromagnetica
- Analogamente all'approccio di Einstein, Born propose che $|\Psi(x,t)|^2$ dà una misura della probabilità locale di trovare una particella
- Mentre \mathcal{E} è un'onda che soddisfa l'equazione di Maxwell, Ψ è un'onda che soddisfa l'equazione di Schrödinger (prossima lezione)

Principio di sovrapposizione

- L'interferenza e la diffrazione sono il risultato del fatto che i campi elettrici (non le intensità!) \mathcal{E}_1 e \mathcal{E}_2 si sovrappongono in ogni punto dando $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$
- Analogamente, funzioni d'onda si sovrappongono: $\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 \rightarrow |\Psi|^2 = |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2 + 2\Psi_1\Psi_2 \cos\theta$

Principio d'indeterminazione

- Le leggi della fisica classica sono deterministiche, i.e. possiamo prevedere esattamente posizione e velocità dei corpi (e.g. un proiettile o un pianeta) nel tempo
- L'interpretazione probabilistica implica che, trattando una piccola particella, non possiamo determinare esattamente la sua posizione e altri dettagli
- Questo è espresso quantitativamente dal principio di indeterminazione (Heisenberg):
 $\Delta p_x \Delta x > \hbar/2$

Filosofia quantistica

- Rivoluzione = transizione da leggi deterministiche a leggi probabilistiche
- Il meglio che possiamo fornire è la funzione d'onda che risolve l'equazione di Schrödinger
- Ma la funzione d'onda non dirà tutto sulla particella (dov'è ora? Con quale velocità/accelerazione?)
- Sebbene la meccanica quantistica sia corretta (non c'è stata falsificazione finora), qualcuno dubita che sia completa
- Potremo alla fine descrivere il moto di un elettrone attorno ad un protone in un atomo di idrogeno? E come potremo verificare questa teoria?

Conclusioni

- L'effetto PE si erge come il secondo grosso fallimento della fisica classica (dopo BBR)
- La natura corpuscolare della luce è rivelata da PE, Compton e Bremsstrahlung
- La natura ondulatoria delle particelle è rivelata da esperimenti di diffrazione con elettroni
- DeBroglie propone il dualismo particella onda che può comprendersi sulla base di una pittura probabilistica
- Dobbiamo abbandonare la ricerca di una descrizione deterministica delle particelle?