



*Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca*

**BRST - ESAME DI STATO DI LICEO SCIENTIFICO**

CORSO SPERIMENTALE – Progetto “BROCCA”

**Indirizzo:** SCIENTIFICO TECNOLOGICO

**Tema di:** FISICA

Il candidato svolga una relazione su uno solo dei seguenti due temi, a sua scelta, prestando particolare attenzione al corretto uso della terminologia scientifica e delle cifre significative nella presentazione dei risultati numerici.

**Primo tema**

L'effetto fotoelettrico, che presenta oggi tante applicazioni tecnologiche, si basa su una fondamentale interpretazione teorica che ha contribuito in modo essenziale allo sviluppo della fisica contemporanea.

Il candidato risponda ai seguenti quesiti e, dove è necessario effettuare calcoli, descriva i passaggi intermedi e commenti le conclusioni.

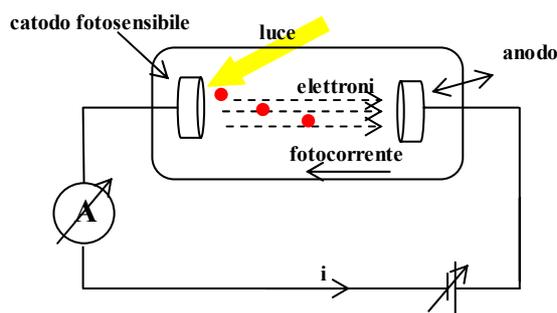
1. Relazionare sulla spiegazione teorica dell'effetto fotoelettrico proposta da Albert Einstein, confrontandola con i falliti tentativi d'interpretazione basati sulla fisica classica.
2. Dopo avere scritto e commentato le leggi che governano l'effetto fotoelettrico, proporre un esempio pratico descrivendo un'applicazione tecnologica e spiegandone il funzionamento.
3. Calcolare la lunghezza d'onda corrispondente alla frequenza di soglia per l'estrazione di fotoelettroni dal potassio, sapendo che il suo lavoro di estrazione è 2,21 eV.
4. Calcolare, in J e in eV, la massima energia cinetica e la corrispondente quantità di moto degli elettroni estratti da una superficie ricoperta di potassio irradiata con raggi ultravioletti di lunghezza d'onda  $\lambda = 248,2$  nm e calcolare la corrispondente lunghezza d'onda di de Broglie.

Si ricordano i seguenti dati approssimati:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}; \quad m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{kg}; \quad h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}; \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

I punti 1) e 2) sono strettamente correlati, per cui si ritiene conveniente effettuare una trattazione unificata

L'effetto fotoelettrico consiste nell'emissione di elettroni da una placca metallica sottoposta ad irradiazione elettromagnetica, tipicamente nello spettro del visibile o del primo ultravioletto. L'apparato sperimentale idoneo a studiare il fenomeno può rappresentarsi mediante il seguente schema.



L'esperimento mette in luce alcune peculiarità non spiegabili nell'ambito della teoria elettromagnetica classica, in particolare:

- esiste una *frequenza di soglia*, ovvero l'emissione dell'elettrone avviene solo se la radiazione incidente supera una frequenza minima, tipica di ogni metallo;
- l'emissione del *fotoelettrone*, per frequenze superiori alla frequenza di soglia, è praticamente *istantanea*, indipendentemente dall'intensità della radiazione utilizzata;
- il *potenziale di arresto*, ovvero il potenziale negativo da attribuire all'anodo per inibire la *fotocorrente* è anch'esso indipendente dall'intensità della radiazione utilizzata.

La fisica classica tenta di interpretare l'effetto fotoelettrico in modo sostanzialmente analogo all'effetto termoionico: l'energia trasportata dalla radiazione incidente viene assorbita dal reticolo cristallino, in particolare dagli elettroni di conduzione, debolmente legati; quando un elettrone acquisisce un'energia almeno pari alla sua energia di legame (dell'ordine di qualche eV) ha luogo l'emissione, per cui nel circuito si rileva il passaggio di una corrente elettrica (*fotocorrente*). In base alla teoria elettromagnetica classica l'energia della radiazione è proporzionale alla sua intensità, ovvero al quadrato del modulo del campo elettrico che ne costituisce una componente, per cui l'emissione dovrebbe aver luogo per qualunque frequenza di illuminazione, eventualmente con tempi di esposizione lunghi per intensità particolarmente basse, in palese contrasto con la realtà sperimentale.

Nel 1905 Einstein propose una spiegazione in contrasto con la fisica classica: la radiazione elettromagnetica è *quantizzata*, ovvero composta da corpuscoli elementari indivisibili, assimilabili a particelle, detti *quanti di radiazione* (chiamati in seguito *fotoni*, adattandone il nome alla nomenclatura tipica delle particelle elementari) ciascuno dei quali trasporta un'energia  $E = h\nu$ ; e una quantità di moto  $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$  dove  $h$  è la costante di Planck e  $\nu$  la frequenza della radiazione. L'ipotesi del fotone riprende, dandole per la prima volta una modellizzazione fisica, l'ipotesi di quantizzazione introdotta nel 1900 da Planck per spiegare lo spettro di emissione del corpo nero; la relazione sulla quantità di moto deriva invece dalla correlazione classica tra energia e impulso della radiazione elettromagnetica (deducibile nell'ambito delle equazioni di Maxwell), che può ritrovarsi come caso particolare della relazione relativistica nel caso di particelle di massa nulla:

$$E^2 - c^2 p^2 = m^2 c^4$$

che, per  $m = 0$ , diviene

$$p = \frac{E}{c}.$$

L'ipotesi di Einstein permette di spiegare in modo estremamente semplice le caratteristiche dell'effetto fotoelettrico, in quanto la trasmissione di energia dalla radiazione incidente alla placchetta metallica avviene in seguito all'assorbimento di un fotone, la cui energia è ceduta integralmente (in *pacchetto*) non al reticolo ma al singolo elettrone.

Indicando con  $E_0 = eV_0$  l'energia di legame dell'elettrone (dove  $V_0$  è il *potenziale di ionizzazione* o di *estrazione*) segue che l'emissione può avvenire solo se il quanto di energia assorbito è sufficiente a vincere il legame tra elettrone e reticolo (è assolutamente improbabile che lo stesso elettrone assorba successivamente due o più fotoni), ovvero se

$$h\nu \geq eV_0 \Rightarrow \nu \geq \frac{eV_0}{h} = \nu_0 \text{ (frequenza di soglia)}$$

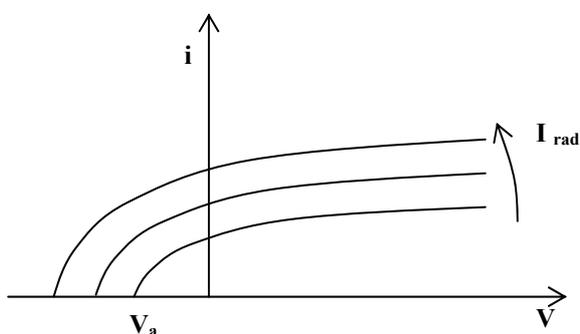
Quando avviene, l'emissione è praticamente istantanea, anche per radiazioni estremamente flebili (tecniche attuali consentono di irradiare la placchetta con radiazioni costituite dalla successione di singoli fotoni).

Per frequenze superiori a quella di soglia l'elettrone viene emesso con energia cinetica iniziale non nulla, misurabile attribuendo all'anodo un potenziale negativo in grado di contrastare il moto dell'elettrone emesso, dissipandone l'energia cinetica e inibendo così la fotocorrente:

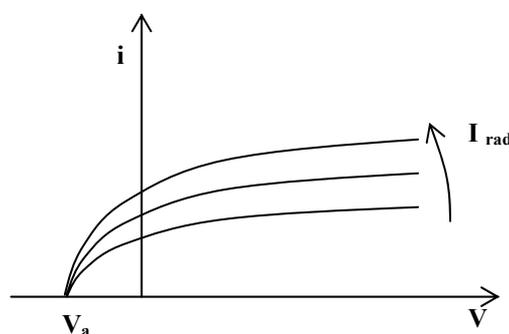
$$h\nu = eV_0 + E_C = eV_0 - eV_a \Rightarrow V_a = V_0 - \frac{h}{e}\nu$$

(N.B.  $V_a < 0$ )

Da questa relazione si deduce un'ulteriore proprietà dell'effetto fotoelettrico non spiegabile in ambito classico, ovvero la dipendenza del potenziale di arresto dalla frequenza ma non dall'intensità della radiazione incidente: classicamente l'energia cinetica iniziale dell'elettrone aumenta all'aumentare dell'intensità di illuminazione, per cui il potenziale di arresto dovrebbe diminuire (aumentare in valore assoluto) con l'intensità (v. figura successiva): l'esperimento mostra invece che, per un dato metallo, il potenziale di arresto risulta indipendente dall'intensità della radiazione.

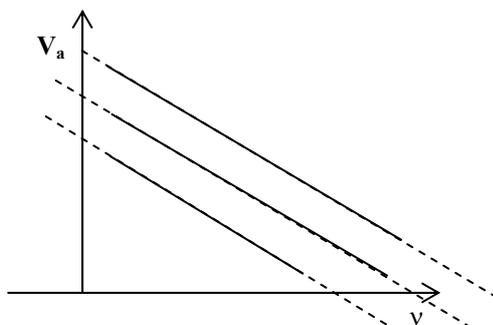


*Previsione classica: il potenziale di arresto diminuisce all'aumentare dell'intensità della radiazione incidente*



*Risultato sperimentale: il potenziale di arresto non varia al variare dell'intensità della radiazione incidente*

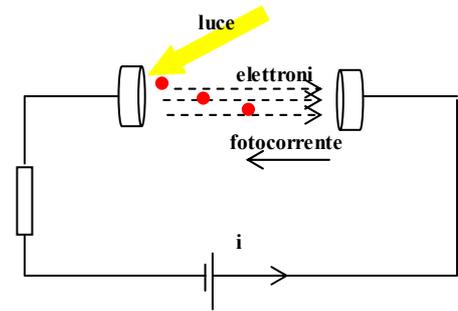
Dall'ultima relazione ricavata si deduce ancora che la dipendenza tra potenziale di arresto e frequenza di illuminazione è lineare, con rette che, per diversi metalli, presentano uguale pendenza e ordinata all'origine diversa (pari al potenziale di estrazione); infine si nota dai grafici l'esistenza di una corrente di saturazione che si verifica allorché il numero di elettroni che riescono a raggiungere, nell'unità di tempo, l'anodo uguaglia quello degli elettroni emessi dal catodo; in questo caso le interpretazioni classica e quantistica coincidono.



*Dipendenza del potenziale di arresto dalla frequenza della radiazione incidente per diversi metalli*

## 2. seconda parte

Un'applicazione tecnologica dell'effetto fotoelettrico è costituita dalla *cellula fotoelettrica* che può schematizzarsi come un normale circuito elettrico dove un ramo è sostituito dalla fotocorrente prodotta dall'illuminazione (visibile o ultravioletta) di un catodo fotosensibile (*fotocellula*); l'interposizione di un corpo opaco tra sorgente luminosa e catodo interrompe il passaggio di corrente, aprendo il circuito, per cui la fotocellula svolge la funzione assolta, in un circuito ordinario, da un interruttore.



3.

$$v_{soglia} = \frac{eV_0}{h} \Rightarrow \lambda_{soglia} = \frac{c}{v_{soglia}} = \frac{hc}{eV_0} = \frac{6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2.21 \text{ eV} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 5.6 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 560 \text{ nm}$$

corrispondente a radiazione visibile di colore verde.

4.

$$E_C = hv - eV_0 = \frac{hc}{\lambda} - eV_0 = \frac{6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{248.2 \cdot 10^{-9} \text{ m}} - 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 2.21 \text{ eV} = 4.4 \cdot 10^{-19} \text{ J} =$$

$$= \frac{4.4 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 2.8 \text{ eV}$$

cui corrisponde l'impulso

$$p = \sqrt{2m_e E_C} = 8.9 \cdot 10^{-25} \text{ N} \cdot \text{s}$$

essendo  $E_C = 2.8 \text{ eV} \ll m_e c^2 = 5.11 \cdot 10^5 \text{ eV}$  è sufficiente svolgere il calcolo classico.

Infine la lunghezza d'onda di de Broglie è data da:

$$\lambda = \frac{h}{p} = 7.4 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

valore dell'ordine di grandezza del raggio di un atomo di medie dimensioni (i raggi atomici hanno valori compresi tra circa  $0.5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  e  $300 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ )