

## LA LUCE:ONDE E FOTONI NELL'EFFETTO FOTOELETTRICO

Con la strumentazione di questo banco è possibile mettere in evidenza contemporaneamente il comportamento ondulatorio e quello corpuscolare della radiazione ; in questo caso si tratta di radiazione visibile,ma in linea di principio questo comportamento è valido per ogni tipo,quindi frequenza, della radiazione elettromagnetica.

I componenti principali della strumentazione, con riferimento alla fig. 1, sono i seguenti:

1) una sorgente luminosa consistente in una lampada in cui si ha una scarica elettrica in vapore di mercurio (questo tipo di lampada è stata la più usata fino a qualche anno fa per l'illuminazione stradale ed ora quasi completamente sostituita da lampade "gialle" al sodio).E' possibile utilizzare due aperture, su due lati opposti dell'involucro, da cui esce la luce.

2) un gruppo reticolo/lente convergente posto davanti all'apertura anteriore che separa la radiazione nelle sue componenti monocromatiche e ne forma un'immagine che,nel nostro caso ,deve essere messa a fuoco sulla zona del rivelatore.Le righe visibili sono cinque corrispondenti alle lunghezze d'onda seguenti:

578 nm (nanometri) riga gialla

546 verde

436 blu

405 viola

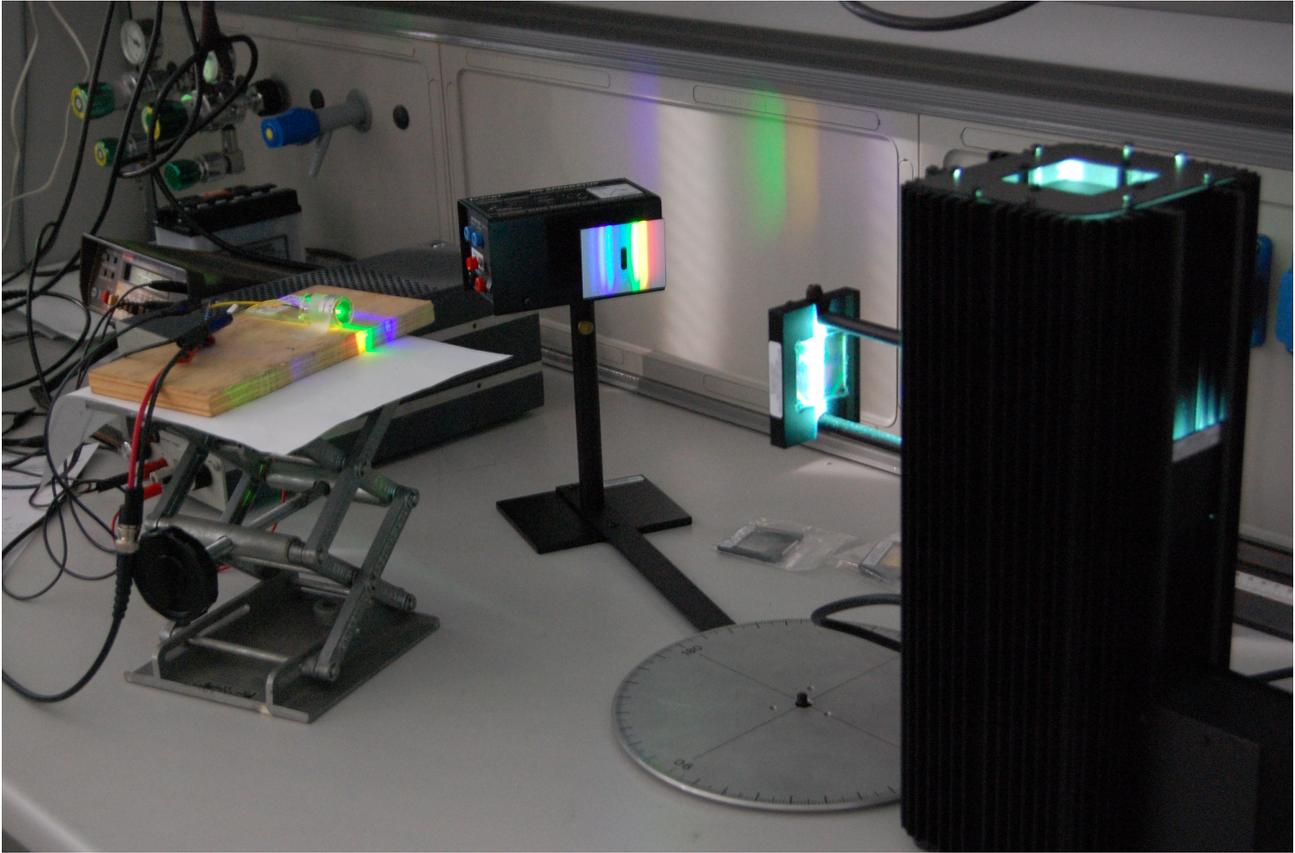
365 ultravioletto (reso visibile per mezzo di un fosfore)

Questa separazione delle componenti della radiazione per mezzo di un reticolo ( o di un prisma) è caratteristica dell'aspetto ondulatorio della luce.

3) un gruppo di rivelazione della luce incidente costituito da un diodo o cellula fotoelettrica a vuoto, da batterie di alimentazione ed un amplificatore del segnale; in uscita viene misurato con un voltmetro il potenziale di arresto degli elettroni (più in generale si può misurare la fotocorrente in funzione della tensione applicata agli elettrodi)

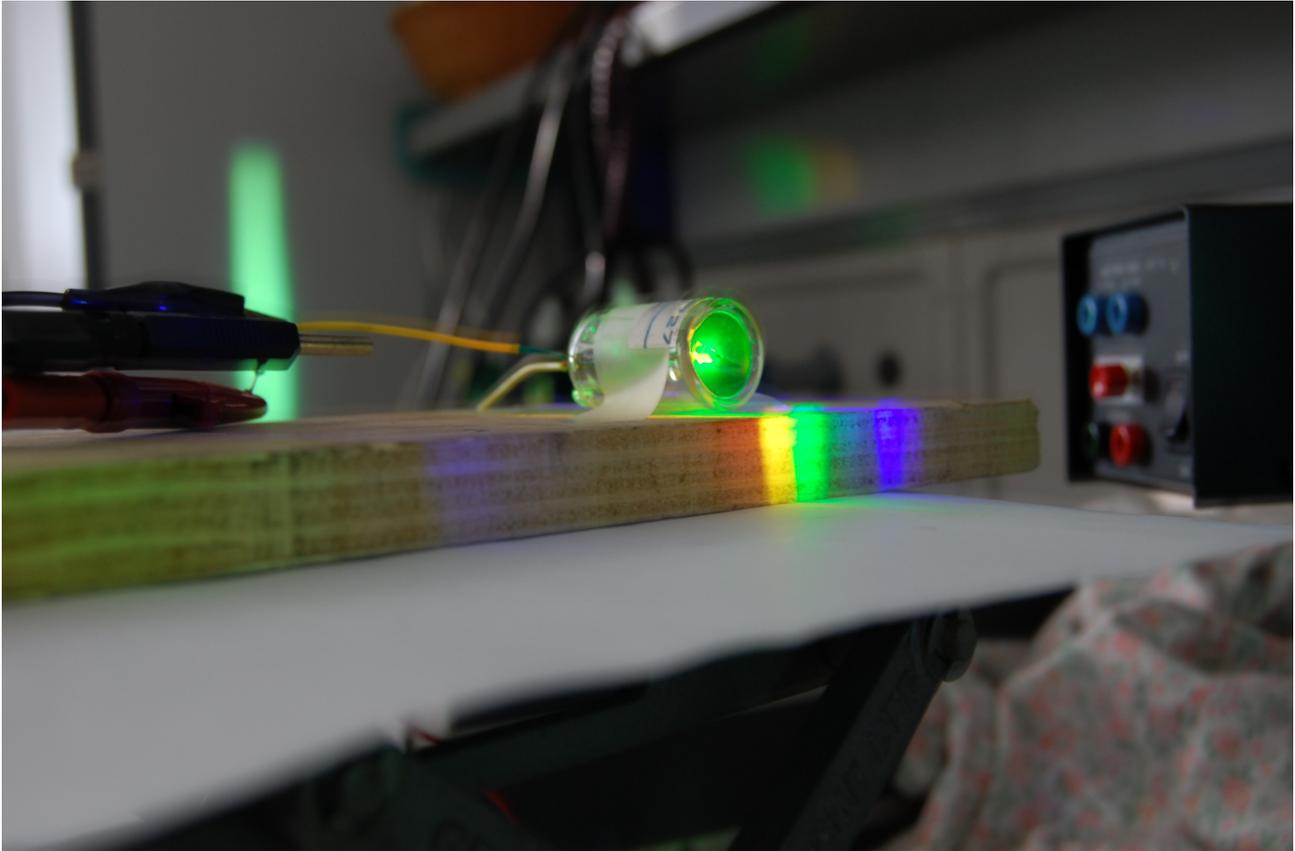
4) un semplice sistema di barre di supporto permette di variare l'angolo tra la direzione di uscita della luce dalla lampada e la direzione in cui ritrova il rivelatore , permettendo di variare con l'angolo la lunghezza d'onda della radiazione inviata alla fotocella.L'ampiezza di questo angolo può essere misurata con un goniometro ed in questo modo si può verificare la relazione esistente tra angolo, lunghezza d'onda e passo del reticolo  $d \sin\theta = m\lambda$  con  $m=0,1,2,\dots$ . E' importante notare che si possono vedere gli spettri al primo ( $m=1$ ) e al secondo ( $m=2$ ) ordine su entrambi i lati rispetto al massimo centrale (ordine zero); il terzo ordine è visibile in condizioni di ambiente quasi completamente oscurato.

Si dispone infine di un gruppo di tre filtri: uno cosiddetto "grigio" diviso in settori a diversa trasmissione (trasparenza) e due colorati (uno verde ed uno giallo). Col filtro grigio si può modificare l'INTENSITA' della luce che incide sulla fotocella,con i filtri colorati si bloccano i secondi ordini della radiazione ultravioletta , in particolare la fortissima riga a 254 nm.



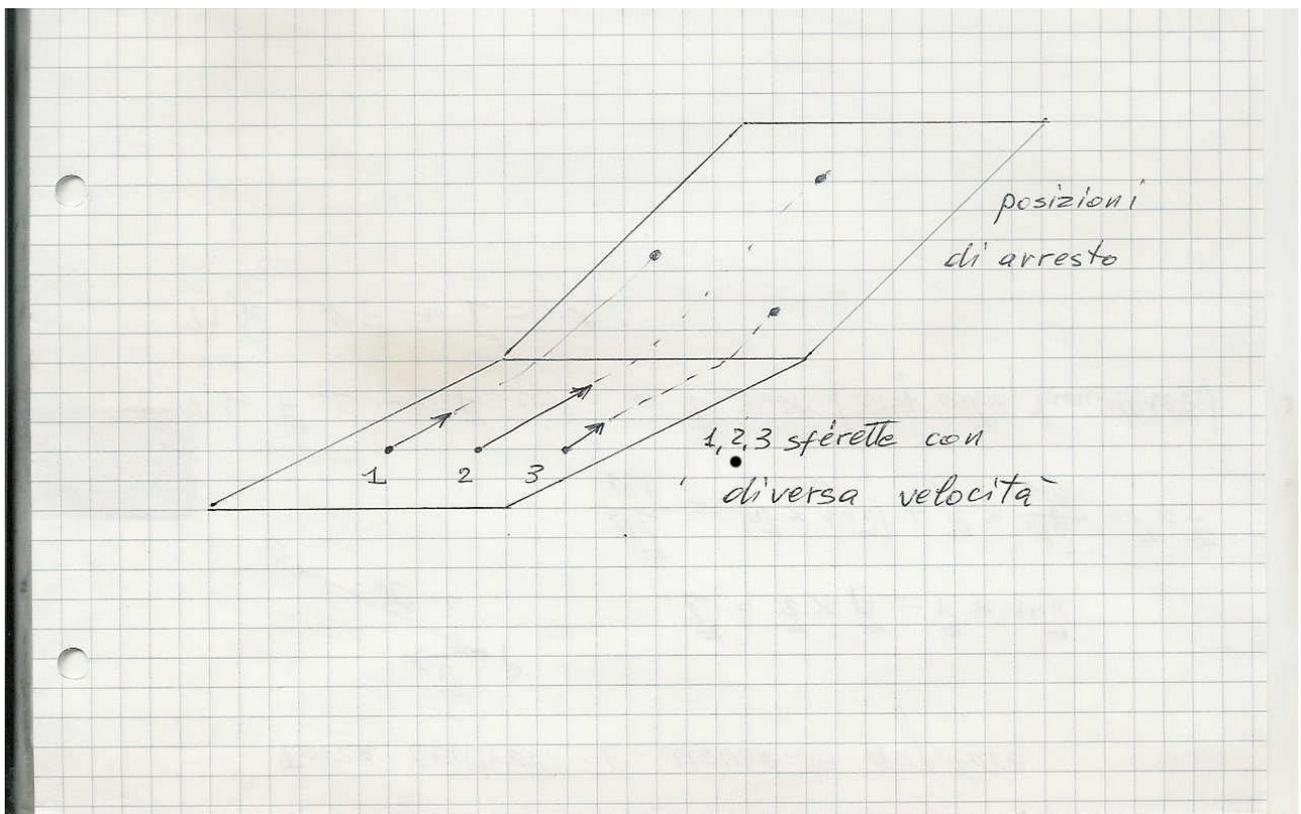
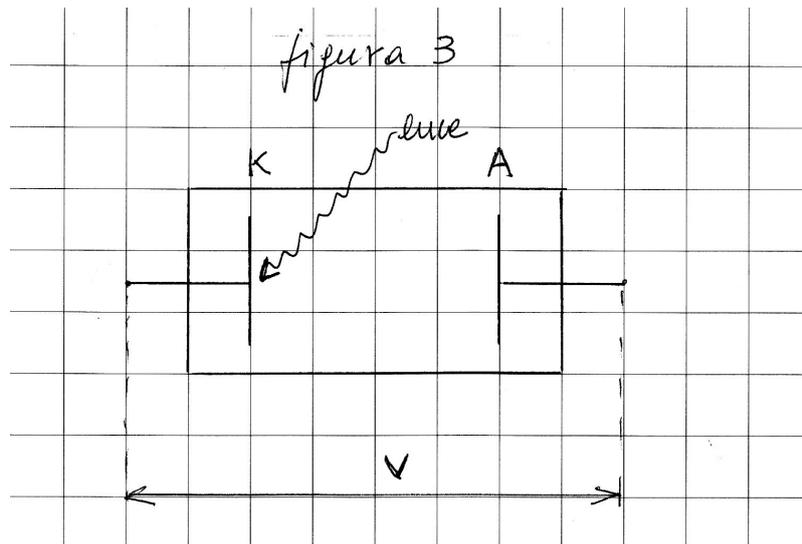
La strumentazione sopra illustrata ci permette di mettere in evidenza in particolare i seguenti aspetti:

innanzitutto la separazione delle componenti monocromatiche (“colori”) è un effetto tipico dei fenomeni ondulatori ed avviene ad opera del reticolo, cioè di una superficie su cui sono tracciate numerose “righe”, tra loro parallele, il cui effetto è di disperdere le diverse lunghezze d’onda (quindi le frequenze) ad angoli diversi. Nel nostro caso abbiamo 600 righe al millimetro, cioè la distanza “d” tra due righe adiacenti è 1,33 micron (millesimi di millimetro) e la superficie “rigata” è larga circa 40 mm per un totale di circa 24000 righe. E’ una situazione analoga per dimensioni a quella che si incontra nei CD, nei quali le dimensioni dei “buchi” che vengono letti dal laser è dell’ordine del micron (ed infatti i CD danno i riflessi colorati conseguenti alla scomposizione della luce bianca).



La cella fotoelettrica (vedi fig.3) è sostanzialmente un involucro di quarzo (trasparente anche alle radiazioni UltraViolette o UV) contenente due elettrodi metallici. Il primo elettrodo, in grado di emettere elettroni dotati di una certa energia cinetica è denominato catodo (K) e l'altro, denominato anodo (A), è in grado di attrarli se il suo potenziale elettrico rispetto al catodo è positivo, mentre tenderà a respingerli se il suo potenziale è negativo. Il catodo può emettere elettroni se è opportunamente illuminato da una radiazione che normalmente può essere UV, visibile o IR (infrarossa), con lunghezze d'onda quindi variabili da circa 200 nm a circa 800 nm. Gli elettroni emessi hanno in generale differenti velocità, quindi differenti energie cinetiche; aumentando progressivamente il potenziale repulsivo (negativo) dell'anodo rispetto al catodo potremo arrivare ad arrestare tutti gli elettroni prima che arrivino all'anodo stesso; questo potenziale, detto POTENZIALE D'ARRESTO, ci fornisce la misura dell'energia cinetica "massima", cioè quella degli elettroni più veloci.

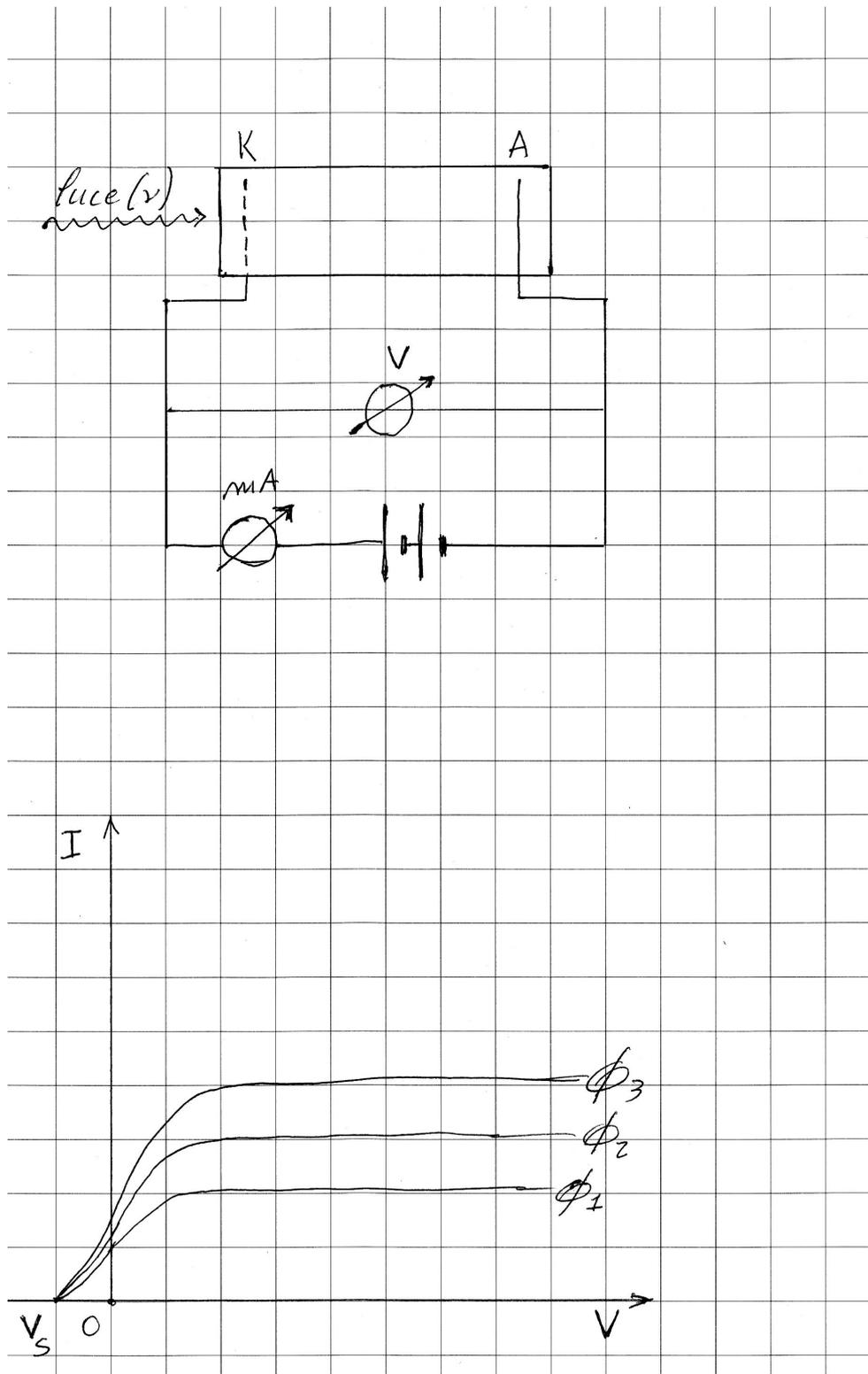
Per rendere ancora più intuitiva la situazione possiamo pensare ad un analogo modello meccanico (vedi fig.4); un flusso di sferette lanciate con diverse velocità a risalire un lungo piano ad inclinazione variabile. Aumentando progressivamente tale inclinazione si arriva ad arrestare tutte le sferette entro una certa distanza.



Il potenziale d'arresto è la quantità importante da misurare, e corrisponde alla massima energia cinetica (quindi alla massima velocità) degli elettroni emessi. Ora nasce la domanda più importante riguardo la natura della luce: da cosa dipende la velocità degli elettroni emessi, dall'intensità della luce che incide sul catodo o da altre caratteristiche, ad esempio dalla frequenza (cioè il "colore")? Non resta che procedere alla verifica sperimentale, cosa che potrete fare con questa strumentazione. Per variare l'intensità della luce incidente si posizionano dei filtri cosiddetti "grigi" che riducono la radiazione trasmessa ad una percentuale definita rispetto a quella incidente ed uguale per tutte le frequenze (o "colori"); potremo quindi variare l'intensità dal 100 % sino a valori estremamente bassi (es. 1%). Per valutare invece una eventuale dipendenza del potenziale d'arresto dalla frequenza della radia-

zione si invia sul fotocatodo di volta in volta la luce delle singole righe spettrali emesse dalla lampada e separate spazialmente dal reticolo.

Nella figura 5 trovate lo schema del circuito da realizzare se si vuole misurare la corrente  $I$  che passa nella fotocella al variare della differenza di potenziale tra anodo e catodo  $V$  per i diversi valori della frequenza  $\nu$  della radiazione incidente. Scelto un valore della frequenza, cioè una delle righe della lampada, si ottiene un grafico con un andamento simile a quello riportato in figura 6; se poi, per ogni frequenza, si fa variare (ad es. per mezzo dei filtri) anche l'intensità  $\Phi$  della luce incidente, allora si ottiene una famiglia di curve che hanno una proprietà molto importante: tutte quante hanno il valore di corrente  $I=0$  per LO STESSO VALORE DEL POTENZIALE DI ARRESTO  $V_s$ , e tale potenziale è negativo.

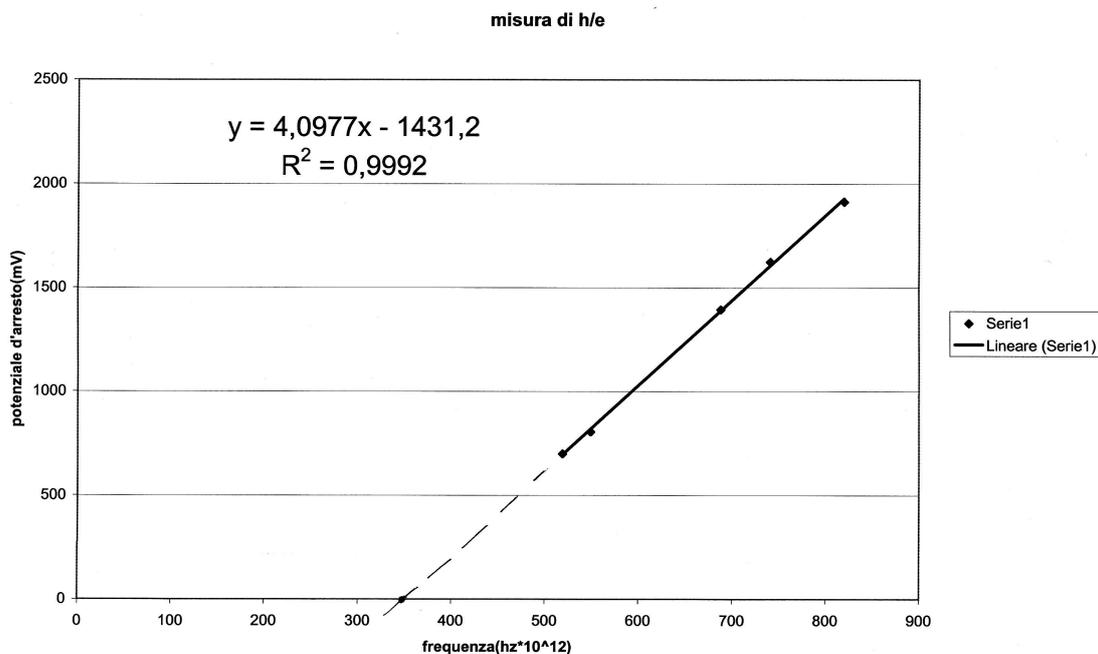


Se adesso si ripete questa misura per ogni riga spettrale, cioè per diverse frequenze  $\nu$ , si ottengono curve corrente-tensione simili ma diversi valori di  $V_s$ , che è perciò una funzione della frequenza. Mettendo in grafico i valori di  $V_s$  in funzione di  $\nu$  (moltiplicati per la carica dell'elettrone ci danno l'energia potenziale  $eV_s$  alla quale si fermano), come in figura 7, si nota un evidente andamento rettilineo che possiamo esprimere con una equazione di primo grado:

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

dove  $K$  è la costante che ci dà la pendenza della retta e  $\nu_0$  è il valore di frequenza, detto frequenza di soglia, al di sotto del quale non esiste più potenziale di arresto perché viene a cessare l'effetto stesso; con questo si intende dire che, se illuminate il fotocatodo con una luce di frequenza MINORE di  $\nu_0$ , per quanto aumentiate l'intensità non otterrete nessuna corrente, cioè dal catodo non escono elettroni. A questo punto abbiamo raggiunto una prima, importantissima conclusione: l'emissione di elettroni per irraggiamento si ottiene per frequenze superiori alla frequenza di soglia, mentre non esiste nessuna "intensità di soglia", e possiamo riassumere questa conclusione nelle seguenti affermazioni:

- 1) per frequenze  $\nu < \nu_0$  non si ha fotocorrente per nessun valore di intensità della luce incidente
- 2) per frequenze  $\nu > \nu_0$  si ha fotocorrente  $I$  proporzionale all'intensità della luce  $\Phi$
- 3) per  $\nu > \nu_0$  il potenziale di arresto è proporzionale alla frequenza  $\nu$



L'interpretazione di questi risultati sperimentali, come probabilmente sapete, non è possibile nel quadro delle leggi dell'elettromagnetismo "classico" ed è stato di Albert Einstein il merito di avere formulato le nuove ipotesi necessarie per giungere ad una esauriente spiegazione dell'esperimento.

Innanzitutto la costante  $K$ , opportunamente calcolata dai dati sperimentali, risulta avere esattamente il valore di " $h$ ", la costante introdotta da Planck pochi anni prima per ottenere la legge che descrive lo spettro del "corpo nero", e la precedente equazione diventa:  $eV_s = h(\nu - \nu_0)$ .

Il termine  $eV_s$  rappresenta una energia, quindi anche  $h\nu$  e  $h\nu_0$  sono energie (le equazioni della fisica devono essere omogenee dal punto di vista delle dimensioni), e l'interpretazione che ne diamo è questa: la luce viene assorbita dal catodo (che è "materia") sotto forma di "granelli" o

“quanti” ,definiti da Eistein FOTONI, ognuno dei quali possiede una energia  $E=h\nu$ . Se questa energia è sufficiente, una parte uguale ad  $h\nu_0$  viene spesa per estrarre un solo elettrone dal fotocatodo e la parte restante ( $h\nu-h\nu_0$ ) rimane all’elettrone sotto forma di energia cinetica,cioè esce dal metallo che costituisce il catodo con una certa velocità. A questo punto l’elettrone può essere attirato verso l’anodo (se è positivo rispetto al catodo) oppure respinto, tanto più quanto più negativo è l’anodo; quando si raggiunge il potenziale d’arresto l’elettrone spende tutta la sua energia cinetica per “risalire” l’energia potenziale  $eVs$  ,non arriva all’anodo e la corrente scende a zero. L’equazione che descrive il processo è quindi:

$$\frac{1}{2} mv^2 = eVs = h(\nu-\nu_0)$$

il termine  $h\nu_0$  viene anche detto “lavoro di estrazione” e viene spesso indicato col simbolo  $W_0$ .

#### Considerazioni finali

A questo punto può essere opportuno fare una breve riflessione sull’esperienza compiuta. In essa la luce è presente sia nel suo aspetto ondulatorio che in quello corpuscolare; infatti noi siamo in grado di separare le diverse frequenze emesse dagli atomi di mercurio mediante un reticolo che è un dispositivo tipicamente basato sulla dispersione spaziale di onde che poi,quando interagiscono con la materia, scambiano con essa la loro energia con una modalità corpuscolare,cioè per quantità discrete, che chiamiamo fotoni.

## SPETTROSCOPIA CON IL RETICOLO DI DIFFRAZIONE

Tutte le sostanze, opportunamente eccitate, diventano sorgenti di radiazioni luminose. Lo spettro di emissione dipende dallo stato di aggregazione. I gas allo stato atomico emettono radiazione luminosa composta da una serie discreta di lunghezze d'onda (*righe*), che sono caratteristiche della struttura atomica dell'elemento.

Uno spettroscopio che impiega un reticolo di diffrazione serve ad analizzare queste lunghezze d'onda, ovvero a misurare lo *spettro di emissione* della sostanza.

### RETICOLO DI DIFFRAZIONE

Un reticolo di diffrazione è un sistema costituito da un numero elevato  $N$  di fenditure, di larghezza  $a$ , separate da una distanza  $d$ , qualche micron, che prende il nome di *passo del reticolo*. Il reticolo è in grado di mettere in evidenza il fenomeno della dispersione della luce. Se illuminiamo (fig.14.24) il reticolo  $R$  con una sorgente luminosa, quello che osserviamo su uno schermo è l'interferenza prodotta dalle  $N$  sorgenti, costituite dalle singole fenditure illuminate. Ciascuna lunghezza d'onda  $\lambda$  di cui la luce è formata, produce un'immagine colorata della fenditura, detta comunemente riga, mentre l'insieme delle righe è lo spettro della sorgente luminosa. Se la luce contiene tutte le lunghezze d'onda della banda del visibile lo spettro appare continuo e tutti i colori sono presenti. In caso contrario, appare discontinuo, cioè abbiamo uno "spettro a righe" caratterizzato solo da alcune immagini colorate della fenditura. Solo in corrispondenza di certe direzioni di osservazione si hanno le immagini prodotte dal reticolo. Per una lunghezza d'onda  $\lambda$  (corrispondente ad un certo colore) lo spettro rivelato è mostrato in figura 14.29: le righe del colore caratteristico della lunghezza d'onda  $\lambda$  si osservano in corrispondenza alle direzioni di osservazione identificate dagli angoli  $\theta_m$  che soddisfano la seguente relazione:

$$\sin \theta_m = (\lambda/d) m \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (1)$$

Le righe corrispondenti a  $m = \pm 1$ , e quindi a  $\sin \theta_1 = \pm (\lambda/d)$  (due direzioni simmetriche rispetto alla riga centrale identificata da  $m = 0, \theta = 0$ ) si chiamano del *primo ordine*, quelle successive ( $m = \pm 2, \pm 3, \dots$ ) o di ordine superiore, sono di ordine due, tre ...

Se nella sorgente luminosa sono presenti più lunghezze d'onda, per ognuna di esse, si avrà una serie di righe la cui posizione è sempre determinata dalla (1). Al centro,  $\theta = 0$ , la (1) è verificata per qualsiasi lunghezza d'onda, per cui esse si presenteranno sovrapposte. Nella direzione di emissione ( $\theta = 0$ ) la sorgente apparirà quindi del colore che risulta dalla sovrapposizione delle lunghezze d'onda che la costituiscono. All'aumentare dell'ordine l'intensità delle righe diminuisce (fig.14.29) per effetto della diffrazione che avviene a ciascuna delle fenditure, per cui oltre un certo ordine le righe corrispondenti non risultano più osservabili.

### PROCEDURA PER LA MISURA DEL PASSO DI UN RETICOLO.

Lo spettroscopio a reticolo di diffrazione è rappresentato schematicamente in figura 1. La luce prodotta da una sorgente viene collimata su un reticolo di diffrazione; la luce diffusa dal reticolo ai vari ordini viene osservata su uno schermo montato su una piattaforma rotante, che permette di misurare l'angolo  $\theta$  di osservazione per mezzo di un goniometro montato sulla piattaforma stessa.

La lampada a vapore di mercurio, di cui lo spettroscopio è corredato, è costituita da varie lunghezze d'onda d'intensità diversa, e, tra esse, quelle che hanno un'intensità tale da essere osservate a più ordini ( $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3$ ) hanno lunghezza d'onda ben note:

ultravioletto	$\lambda_u = 365 \text{ nm},$	viola	$\lambda_{vi} = 405 \text{ nm},$
blu	$\lambda_b = 436 \text{ nm},$	verde	$\lambda_{ve} = 546 \text{ nm},$
giallo	$\lambda_g = 578 \text{ nm}$		

(2)

• Si sceglie di utilizzare lo spettroscopio per la **misura del passo  $d$  del reticolo di diffrazione**.

• Inizialmente, escludendo dal campo di osservazione il reticolo, montato esso pure su un supporto, si allinea il goniometro con la luce emessa direttamente dalla sorgente e si verifica che la luce della sorgente sia ben collimata.

• Si inserisce il reticolo, si sceglie la riga di un certo colore ( $\lambda$ ), e, ruotando la piattaforma, ci si pone con lo schermo in direzione tale da osservare la riga del primo ordine a destra ( $m = + 1$ ) rispetto alla riga centrale ( $\theta = 0$ ); si esegue la misura dell'angolo  $\theta_{dx}$  utilizzando il goniometro di cui la piattaforma è corredata. Ci si pone poi nella direzione corrispondente al massimo del primo ordine a sinistra ( $m = - 1$ ) rispetto alla riga centrale ( $\theta = 0$ ) e si esegue la misura dell'angolo  $\theta_{sx}$ . Da questi dati si ricava il valore dell'angolo del primo ordine  $\theta_1$ :

$$\theta_1 = (\theta_{dx} + \theta_{sx})/2 \quad (3)$$

costituisce la misura di  $\theta_1$  relativa alla due righe del primo ordine ( $m = \pm 1$ ) della lunghezza d'onda  $\lambda$  in esame.

• Si procede in questo modo con le righe degli ordini superiori ( $m = \pm 2, \pm 3$ ).

• Alla fine per la lunghezza d'onda  $\lambda$  si saranno ottenuti dalla (1):

$$d_m = m\lambda / \text{sen}\theta_m \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3) \quad (4)$$

diversi valori di  $d$  che vengono riportati in una tabella. L'errore  $\Delta d_m$  su ciascun valore di  $d$  è stato calcolato dalla:

$$\Delta d_m = [\partial(m\lambda / \text{sen}\theta_m) / \partial\theta] \Delta\theta = d_m \Delta\theta / \tan\theta_m \quad (5)$$

in cui  $\Delta\theta$  è la *sensibilità dello strumento* in radianti,  $d_m$  e  $\Delta d_m$  in  $\mu\text{m}$ , ( $1\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ;  $1\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ). (Osserviamo che in tabella gli angoli sono espressi in centesimi di grado).

- Si può ripetere il procedimento per le altre lunghezze d'onda, ottenendo alla fine, per ogni  $\lambda$  una tabella analoga, (che è stata eseguita per 3 ordini), ottenendo più valori del passo  $d$  del reticolo.

$m$	$\theta_m$	$\text{sen}\theta_m$	$d_m$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta d_m$ ( $\mu\text{m}$ )	$1/\Delta d_m^2$ ( $\mu\text{m}^{-2}$ )
1					
2					
3					

### Valutazione del valore medio del passo del reticolo

Dalla tabella e dalla (5) si osserva che i valori  $d_m$  non sono noti con la stessa precisione (l'errore  $\Delta d_m$  diminuisce con l'ordine  $m$ ), per cui, volendo calcolare un valore medio, i valori noti con maggiore precisione devono *pesare* maggiormente nel risultato. Il criterio usato assegna a ciascun valore  $d_m$  un peso  $p_m$  inversamente proporzionale  $(\Delta d_m)^2$  ovvero:

$$\langle d \rangle = \frac{\sum_m \frac{d_m}{\Delta d_m^2}}{\sum_m \frac{1}{\Delta d_m^2}} \quad (72)$$

Come valutazione dell'errore con cui si misura  $\langle d \rangle$  si usa la relazione:

$$\Delta \langle d \rangle = \sqrt{\frac{1}{\sum_m \frac{1}{\Delta d_m^2}}} \quad (73)$$

per cui il risultato della misura è:

$$\langle d \rangle = (\langle d \rangle \pm \Delta \langle d \rangle) \mu\text{m}$$

Il passo del reticolo viene quindi misurato con un errore  $\Delta(\langle d \rangle)/\langle d \rangle\%$ .  
Il reticolo ha dunque una densità di fenditure  $n = 1/d$  fenditure/cm.

- Si consiglia di eseguire la procedura descritta per i primi 3 ordini ( $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3$ ) di ciascuna delle 4 lunghezze d'onda (colori), ottenendo dodici misure del passo  $d$  del reticolo. Da esse si ottiene il valore medio  $\langle d \rangle$  con l'errore  $\Delta \langle d \rangle$ .

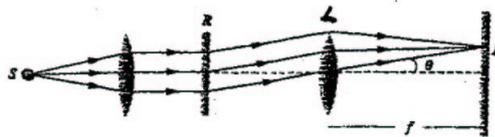


Figura 14.24

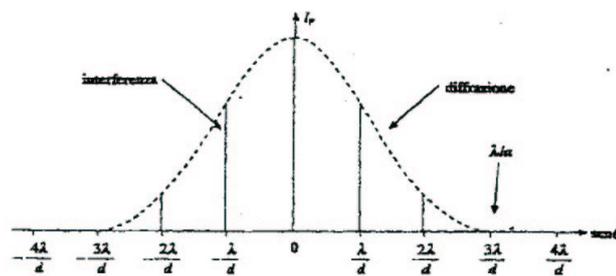


Figura 14.29

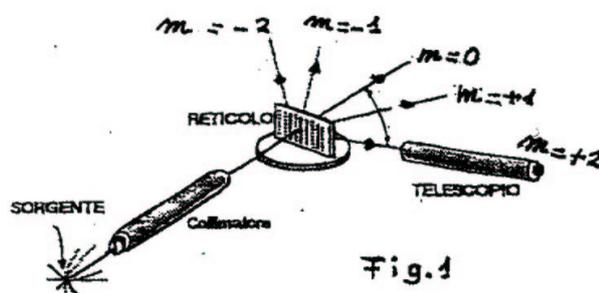


Fig.1