

# **Studio sperimentale dell'interazione radiazione materia tramite uno spettrometro auto-costruito**

*Marco Anni*

*Dipartimento di Matematica e Fisica "Ennio De Giorgi", Università del Salento, Lecce*

## **1 Motivazione**

I programmi di Fisica delle scuole secondarie superiori tipicamente includono lo studio delle onde elettromagnetiche e dell'ottica. La recente riforma inoltre prevede che nel corso dell'ultimo anno (ad esempio nei Licei Scientifici), oltre al completamento dello studio dell'elettromagnetismo con lo studio delle onde elettromagnetiche, si affrontino a livello introduttivo i concetti chiave delle relatività e i primi risultati sperimentali che hanno portato alla cosiddetta "Fisica Moderna".

I programmi ministeriali fanno esplicito riferimento all'ipotesi di Planck per spiegare gli spettri di radiazione termica, all'effetto fotoelettrico, e alla "discussione delle teorie e dei risultati sperimentali che evidenziano la presenza di livelli energetici discreti nell'atomo."

L'introduzione nella attività didattica di esperimenti in laboratorio su tale tematiche è tipicamente resa complicata dai costi di acquisto che facilmente superano i 1000 € per i kit didattici venduti da varie ditte specializzate. Tale ordine di grandezza è palesemente incompatibile con l'allestimento di molteplici postazioni sperimentali, necessarie per consentire agli alunni di eseguire le esperienze di laboratorio divisi in gruppi (auspicabilmente da non più di 4-5 persone l'uno).

Nell'ambito del presente corso ci si propone di presentare delle possibili attività sperimentali da eseguirsi con strumentazione che è ragionevole attendersi sia già presente nei laboratori delle scuole (quali generatori di tensione, multimetri e cassetta elettrica), integrata da semplici strumenti auto-costruiti e da sistemi acquistabili con pochi Euro per singola postazione di lavoro.

Gli esperimenti proposti riguardano vari aspetti dell'interazione radiazione materia, e sono accomunati dall'utilizzo di uno spettrometro auto costruito con materiale povero, che potrà diventare patrimonio strumentale di ogni studente, aprendo alla possibilità di consentire l'ideazione individuale di esperimenti anche a casa per gli studenti più curiosi e intraprendenti.

Dopo aver illustrato il principio di funzionamento di uno spettrometro tradizionale saranno illustrati, a titolo di spunto per i docenti, alcuni esperimenti resi possibili da uno spettrometro relativi agli argomenti introduttivi alla fisica del '900.

Infine descriveremo come superare l'ostacolo dell'elevato costo degli spettrometri commerciali auto costruendo uno spettrometro utilizzando materiale povero (principalmente cartone, vecchi dischi ottici e un vecchio cellulare o una webcam).

## **2 Principio di funzionamento di uno spettrometro**

La luce è costituita da onde elettromagnetiche di diversa lunghezza d'onda. L'intervallo di lunghezza d'onda visibile all'occhio umano è da circa 400 a circa 700 nanometri. Praticamente tutti i sistemi materiali, dagli atomi nei gas ai corpi solidi, in condizioni opportune emettono radiazione luminosa.

Ad esempio i corpi riscaldati a temperatura sufficientemente alta emettono luce per incandescenza, i gas nei tubi a fluorescenza emettono luce in seguito ad eccitazione per impatto da una scarica elettrica etc.

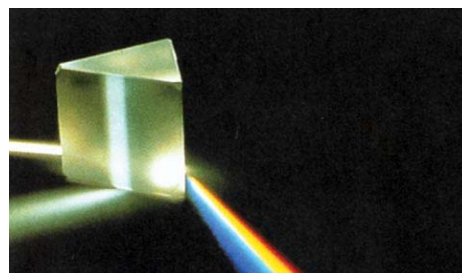
La determinazione dell'intensità della luce emessa da un corpo in funzione della lunghezza d'onda, che costituisce lo *spettro di emissione*, consente di determinare molte informazioni sulle proprietà elettroniche del corpo stesso.

Analogamente, quando un sistema materiale è attraversato da luce, ad alcune lunghezze d'onda tipiche del materiale, la luce può essere assorbita o diffusa (deviata). Anche in questo caso la determinazione dell'intensità dell'assorbimento o della diffusione in funzione della lunghezza d'onda consente la determinazione di proprietà elettroniche spesso complementari a quelle ottenibile dagli spettri di emissione.

Uno spettrometro è uno strumento in grado di misurare l'intensità della radiazione luminosa ad ogni lunghezza d'onda che contiene. Per ottenere questa informazione lo strumento contiene un elemento in grado di modificare la direzione di propagazione della luce da analizzare, in funzione della lunghezza d'onda.

Dopo che le varie componenti cromatiche sono state separate spazialmente un rivelatore ne misura individualmente l'intensità della luce.

Il sistema più semplice per disperdere spettralmente la luce è un prisma di vetro che, grazie alla dipendenza dalla lunghezza d'onda del suo indice di rifrazione, rifrange ad angoli diversi la luce di diverse lunghezze d'onda (vedi Figura 1).



**Figura 1:** Esempio di separazione cromatica della luce sfruttando le proprietà di dispersione di un prisma

Il più semplice rivelatore è invece l'occhio umano. In tal caso lo strumento, non avendo un rivelatore in grado di misurare quantitativamente l'intensità della luce, è detto *spettrografo a prisma*.

Per quanto semplice l'utilizzo del prisma si rivela spesso scomodo, perché non consente di modificare agevolmente la capacità dello strumento di distinguere due lunghezze d'onda vicine (potere risolutivo). Infatti, dato che gli angoli di uscita dal prisma di due lunghezze d'onda vicine sono molto simili, per poter separare spazialmente le due componenti cromatiche sarà necessario osservarle a grande distanza dal prisma. Ovviamente le dimensioni di uno strumento non sono sempre aumentabili a piacere e di conseguenza l'utilizzo del prisma è ormai una rarità negli strumenti moderni.

Analogamente l'osservazione diretta della luce consente solo l'osservazione dello spettro, rendendo difficoltosa la misura delle lunghezze d'onda componenti, e impossibile la misura dell'intensità alle varie lunghezze d'onda.

Negli attuali spettrometri sia l'elemento disperdente che il rivelatore sono scelti in modo da consentire un'agevole progettazione di strumenti con potere risolutivo diverso, e di misurare quantitativamente le intensità luminose.

L'elemento che effettua la dispersione della luce è tipicamente un *reticolo di diffrazione* cioè una superficie riflettente (o trasparente) con una serie di righe parallele. La luce incidente sulle varie righe del reticolo viene deviata dalla propagazione di riflessione speculare (o da quella rettilinea) a causa della diffrazione, e per opportuni angoli le componenti diffratte si sommano in fase, dando un massimo di intensità dovuto all'interferenza costruttiva. Poiché l'angolo a cui si ha interferenza costruttiva dipende dalla lunghezza d'onda, un tale sistema separa spazialmente la radiazione in funzione delle lunghezze d'onda componenti.

Significativo vantaggio del reticolo rispetto al prisma è che la differenza tra gli angoli di deviazione di due lunghezze d'onda vicine dipende, oltre che dalle lunghezze d'onda, anche dalla distanza tra due righe consecutive (detta *passo del reticolo*). La realizzazione di reticoli con passo differente consente di modificare in modo semplice il potere risolutivo. Tipicamente i reticoli per lunghezze d'onda visibili hanno un numero di righe per millimetro tra 150 e 2400.



**Figura 2:** Struttura di un moderno spettrometro a reticolo.

Per un reticolo trasparente, che quindi lavora in trasmissione, supponendo che la luce incida in direzione perpendicolare al piano del reticolo, la relazione tra angolo di diffrazione  $\vartheta$ , lunghezza d'onda  $\lambda$  e passo  $d$  è:

$$n\lambda = d \sin \vartheta$$

Dove  $n$  può assumere valori interi e si chiama *ordine di diffrazione*.

Tipicamente l'intensità di trasmissione decresce con l'ordine di diffrazione, quindi gli spettrometri lavorano sempre nella condizione  $n=1$ .

Per quanto riguarda invece la misura quantitativa dell'intensità della luce alle varie lunghezze d'onda l'occhio umano è sostituito da un rivelatore, tipicamente una matrice rettilinea di fotorivelatori.

Ogni rivelatore si comporta come una piccola cella

solare, fornendo in uscita una corrente elettrica proporzionale all'intensità della luce incidente. Poiché la luce arriva sul rivelatore separata spazialmente a seconda della lunghezza d'onda, dopo un'opportuna calibrazione è possibile associare univocamente alla posizione di ogni rivelatore un valore di lunghezza d'onda.

Uno strumento così costituito è quindi in grado di consentire la misura quantitativa dello spettro della radiazione luminosa incidente, e può costituire il cuore di vari esperimenti di interesse per studenti delle scuole secondarie superiori.

La struttura completa di uno spettrometro commerciale è visibile in Figura 2, e comprende anche delle ottiche di collimazione della luce incidente e di focalizzazione di quella in uscita dal reticolo, oltre a elementi di raffreddamento del rivelatore.

Un sistema del genere ha costi di almeno 1000 €, ed è spesso fuori scala per un realistico piano di investimento nelle condizioni di finanziamento attuale del sistema scolastico e, in ogni caso, inadeguato alle intenzioni del presente corso di formazione, che richiede esplicitamente attività sperimentale a basso costo.

Prima di entrare nei dettagli di come sia possibile costruire uno spettrometro a costo zero elenchiamo e descriviamo brevemente alcuni esperimenti che lo spettrometro rende possibile, alcune delle quali saranno condotte nell'attività pratica, con la speranza che possano essere di stimolo per studenti e docenti.

## 2 Possibili esperimenti di spettrometria di interesse per studenti di scuole secondarie superiori

### 1) Differenza tra spettri continui emessi dai solidi e spettri a righe dei gas rarefatti

I corpi in seguito ad eccitazione esterna spesso emettono luce. Tra i sistemi caratterizzati da emissione di luce visibile ci sono le lampade a incandescenza ( in cui l'emissione di luce è dovuta al riscaldamento di un

filamento di tungsteno) e le lampade a fluorescenza (in cui parte dell'emissione è dovuta all'eccitazione tramite una scarica elettrica di un gas contenuto nel tubo della lampada). I corpi solidi sono caratterizzati da un'emissione con uno spettro continuo (contenente cioè tutte le lunghezze d'onda in un dato intervallo) mentre i gas hanno uno spettro discreto, contenente solo alcune lunghezze d'onda caratteristiche della specie chimica responsabile dell'emissione.

*Scopo dell'esperienza:* misura quantitativa dello spettro emesso da una normale lampadina a incandescenza e da gas rarefatti, per ottenere l'evidenza sperimentale della diversa struttura.

*Apparato sperimentale di minima:* una lampadina a incandescenza e una lampada a fluorescenza (tubo al neon o lampada a basso consumo), uno spettrometro.

*Ulteriore apparecchiatura utile:* lampade a gas se disponibili nel laboratorio.

*Metodo sperimentale:* L'esperimento consiste nel misurare lo spettro di emissione dei vari corpi illuminanti disponibili. In caso di presenza nei laboratori di lampade a gas, la misura di più lampade diverse consentirà di evidenziare come lo spettro sia sempre a righe, ma le righe di emissione dipendano dal tipo di gas contenuto nella lampada. In tal caso la conoscenza dello spettro di vari gas consente di determinare tramite lo spettro di emissione la composizione chimica di miscele di gas incognite. Particolarmente di impatto sugli studenti è ad esempio la dimostrazione che le lampade a fluorescenza, tipicamente dette "tubi al neon", contengono all'interno in realtà principalmente mercurio, consentendo inoltre di evidenziare l'utilità di un corretto smaltimento delle lampade non funzionanti.

## **2) Legame tra colore dei corpi opachi e il loro spettro di riflessione**

Il colore dei corpi dipende da come riflettono e assorbono la luce incidente (tipicamente bianca). Il legame tra colore e spettro di assorbimento e riflessione non è di solito però ben compreso dagli studenti (anche a quelli universitari). Nel momento in cui un corpo è illuminato da luce bianca, parte della luce viene riflessa dalla superficie del corpo, parte assorbita dal materiale e, se il corpo è almeno parzialmente trasparente, parte viene trasmessa (se la superficie del corpo non è sufficientemente liscia parte della luce viene anche diffusa in direzione casuale).

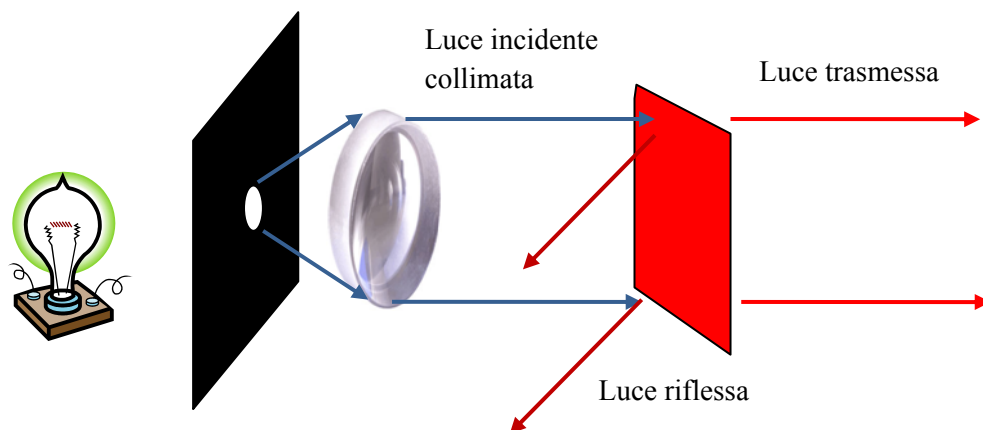
L'intensità dei vari fenomeni descritti e la loro dipendenza dalla lunghezza d'onda della luce incidente viene misurata determinando la frazione di luce riflessa, assorbita o trasmessa, definite riflettanza  $R$ , assorbanza  $A$  e trasmittanza  $T$ , rispettivamente.

*Scopo dell'esperienza:* Determinare lo spettro di riflessione di materiali di diverso colore, per evidenziare il legame tra il colore percepito e l'intervallo di lunghezze d'onda in cui il materiale riflette.

Nel caso in cui il materiale sia trasparente (vetri o fogli di acetato colorati) l'esperimento può essere completato misurando anche lo spettro di trasmissione.

*Apparato sperimentale:* una lampada a incandescenza, una lente per collimare la luce della lampada, un diaframma in cartoncino nero.

*Metodo sperimentale:* Lo schema dell'apparato sperimentale è riportato nella figura seguente:



Dopo aver praticato un foro circolare sul cartoncino nero si posiziona la lente per collimare un fascio di luce bianca e si misura lo spettro della luce incidente. Dopo aver posizionato il materiale da analizzare in modo che sia investito dal fascio di luce collimata si ripete la misura per determinare lo spettro della luce trasmessa, e si esegue una misura dello spettro della parte di luce che viene riflessa dal campione.

Lo spettro della frazione di luce trasmessa e quello della frazione riflessa dal materiale sono determinabili dalle relazioni:

$$T(\lambda) = \frac{I_T(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

$$R(\lambda) = \frac{I_R(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

Nell'eseguire la misura si fa attenzione a non variare le impostazioni di acquisizione dello spettrometro e si verifica che nell'intervallo di basse lunghezze d'onda, dove il segnale dello spettrometro è piatto, il valore misurato sia compatibile con zero (non ci sia apprezzabile rumore di fondo o, eventualmente, sottrarlo).

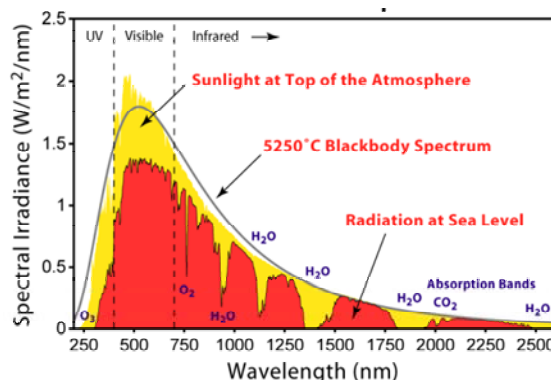
### 3) Spettro di assorbimento dell'atmosfera

La luce proveniente dal sole, caratterizzata da uno spettro continuo ben riprodotto dallo spettro di un corpo nero, raggiunge la superficie terrestre dopo aver attraversato l'atmosfera. Considerato che i gas hanno un assorbimento solo ad alcune lunghezze d'onda, la luce solare al livello del suolo ha un'intensità diminuita dall'assorbimento dell'atmosfera a lunghezze d'onda discrete (vedi Figura 3).

*Scopo dell'esperienza:* l'esperienza è finalizzata a determinare lo spettro del sole, al fine di cercare di osservare le righe di assorbimento.

*Strumentazione necessaria:* è sufficiente lo spettrometro, oltre che una finestra per osservare la luce del sole.

*Metodo sperimentale:* l'esperienza è molto semplice perché è sufficiente misurare un singolo spettro della luce solare, preferibilmente dopo diffusione da una superficie bianca per non saturare il rivelatore e non danneggiarlo. Se si vuole andare oltre la determinazione della presenza delle righe di emissione si può



**Figura 3:** Confronto tra spettro solare incidente sull'atmosfera e al livello del suolo.

confrontare lo spettro ottenuto con quello atteso per un corpo nero. Tale confronto consentirà di osservare che lo spettro misurato non è lo spettro di corpo nero, a causa dell'assenza di risposta del rivelatore alla radiazione infrarossa, e alla non uniforme risposta spettrale dei singoli pixel del rivelatore, che può portare a irregolarità locali nella risposta. Tale confronto è comunque istruttivo, perché consente di evidenziare agli studenti come l'utilizzo di un qualsiasi strumento per compiere una qualsiasi misura richieda necessariamente la conoscenza del tipo di risposta dello strumento nelle condizioni in cui è utilizzato per poter legare il risultato di una misura ad un valore affidabile della grandezza da misurare.

#### **4) Sviluppo individuale di esperimenti da parte degli studenti**

Lo spettrometro che descriveremo nella prossima sezione potrà essere costruito da ogni studente, che avrà la possibilità di disporre di uno strumento di misura da portare a casa e da utilizzare per determinare la composizione cromatica di sorgenti luminose arbitrarie. Può essere quindi estremamente istruttivo stimolare gli studenti a sviluppare propri esperimenti, per determinare informazioni quantitative legate al colore della luce su qualunque aspetto li incuriosisca e, in generale, a farsi incuriosire da quello che hanno a disposizione in casa.

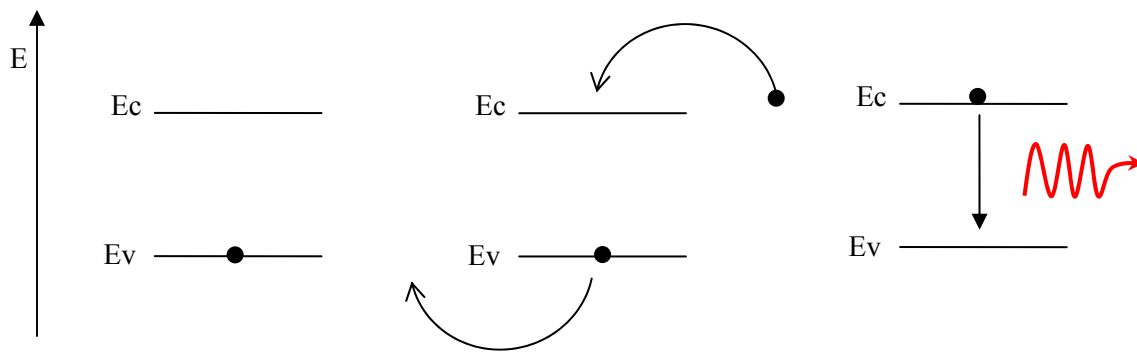
#### **5) Determinazione della costante di Planck tramite diodi ad emissione di luce (LED)**

Il primo passo per lo sviluppo della Meccanica Quantistica è stato rappresentato dall'ipotesi di Planck sulla discretizzazione dell'energia elettromagnetica per determinare una forma di riga dello spettro di corpo nero in accordo con i dati sperimentali.

La misura affidabile dello spettro di emissione di un corpo nero è meno banale di quanto potrebbe sembrare, perché lo spettro si estende dal visibile all'infrarosso, richiedendo rivelatori diversi nell'intervallo spettrale di emissione.

E' possibile però ottenere una stima ragionevole del valore della costante di Planck tramite un esperimento molto semplice, basato sulla misurazione della tensione minima necessaria per accendere LED con diversi colori di emissione.

Un LED è tipicamente costituito da un materiale semiconduttore in cui, grazie a dei contatti elettrici, si introducono (iniettano) elettroni ad energia  $E_c$  (pari all'energia minima della banda di conduzione, equivalente al primo stato eccitato di un atomo) e si tolgono elettroni da uno stato ad energia  $E_v$  (energia massima della banda di valenza, equivalente allo stato fondamentale di un atomo) (vedi Figura 5).



**Figura 5:** Principio di funzionamento di un LED. Sinistra: occupazione degli stati elettronici quando il materiale non è eccitato. Centro: effetto dell'**iniezione**, un elettrone viene aggiunto nello stato eccitato e uno tolto da quello fondamentale. Destra: **ricombinazione**: l'elettrone rilassa dallo stato eccitato al fondamentale perdendo energia emettendo un fotone.

La presenza di un elettrone in uno stato eccitato e la simultanea creazione di uno stato in grado di ospitare un elettrone nello stato fondamentale consente un processo di *ricombinazione radiativa*, cioè una transizione elettronica dallo stato eccitato al fondamentale, con conseguente perdita di energia sotto forma di luce.

L'energia persa dal materiale è pari a  $E = E_c - E_v$  (per la conservazione dell'energia).

Ricordando che l'energia della radiazione elettromagnetica è quantizzata, nel processo viene emesso un fotone di frequenza  $\nu$  che, per la conservazione dell'energia, deve avere energia  $h\nu$  uguale a quella persa dall'elettrone, pertanto  $h\nu = E_c - E_v$ .

Inoltre, sempre per la conservazione dell'energia, l'energia che ogni elettrone perde sotto forma di un fotone (energia in uscita dal LED) deve essere non superiore all'energia che l'elettrone riceve per effetto dell'applicazione di una differenza di potenziale ai capi del dispositivo (energia in ingresso) pari al prodotto tra carica dell'elettrone e tensione applicata.

Pertanto deve valere la relazione  $h\nu \leq eV$ .

Tale relazione evidenzia che per avere emissione di luce deve essere applicato una tensione minima, detta tensione di accensione  $V_0$ , tale che  $h\nu = eV_0$ .

Esprimendo la relazione precedente in funzione della lunghezza d'onda della luce emessa dal LED (ricordando che  $\lambda\nu = c$ , con  $c$  velocità della luce nel vuoto) si ottiene

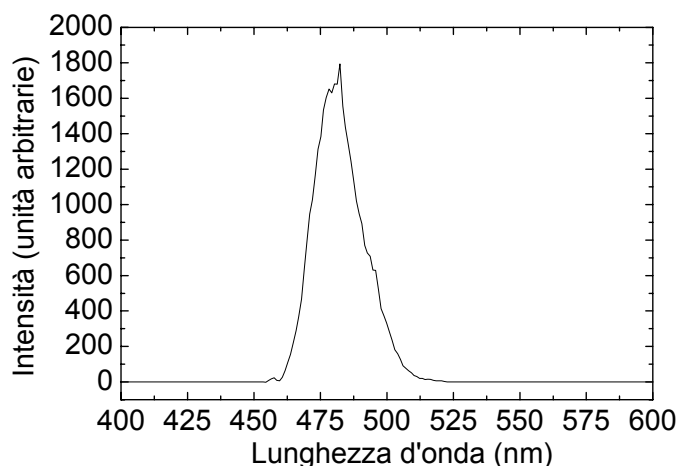
$$\frac{hc}{\lambda} = eV_0 \Leftrightarrow V_0 = \frac{hc}{e\lambda}$$

Determinando indipendentemente la tensione di accensione e la lunghezza d'onda di emissione per diversi LED si può ottenere la costante di Planck dalla pendenza del grafico di  $V_0$  in funzione di  $1/\lambda$ .

*Apparato sperimentale:* Uno spettrometro per la determinazione della lunghezza d'onda di emissione, un sistema per applicare una differenza di potenziale variabile per determinare  $V_0$ , LED colorati di diverso colore (accertarsi di acquistare LED con rivestimento trasparente e non quelli con rivestimento colorato che falsano il colore raccolto rispetto a quello originale).

*Apparato di minima:* I LED tipicamente si accendono tra 1 V e 2 V, è pertanto sufficiente alimentarli con una pila a bottone da 3 V, collegata in serie ad una resistenza variabile. In tal modo si può variare la tensione con continuità, ma non misurare in modo affidabile la corrente che attraversa il LED (modificata continuamente dal variare della resistenza). Un multimetro per leggere la tensione ai capi del LED

*Apparato completo:* Un generatore di tensione variabile, un multimetro per misurare la tensione applicata, e un multimetro per misurare la corrente che attraversa il LED.



**Figura 6:** spettro di emissione di un LED blue, misurato con uno spettrometro auto-costruito

*Metodo sperimentale:*

Nel momento in cui si cerca di determinare sperimentalmente le due grandezze necessarie si evidenziano due complicazioni.

Innanzitutto un LED non emette uno spettro con una sola lunghezza d'onda, ma uno spettro continuo (vedi Figura 6).

Per associare una singola lunghezza d'onda allo spettro la via più semplice è stimare la lunghezza d'onda di massima intensità.

Come via più raffinata si potrebbe determinare la lunghezza d'onda mediana, cioè quella che separa la metà meno intensa dello spettro dalla metà più intensa.

Il confronto tra i due approcci consente di osservare come il secondo criterio, forse un po' più rigoroso, in realtà non porti ad apprezzabili miglioramenti nella stima di  $h$ , rendendo preferibile il primo, sicuramente più semplice.

La seconda difficoltà nasce nella stima della tensione di accensione, perché tale tensione è una tensione di soglia per l'emissione di luce, ma non per il passaggio di corrente.

In seguito presentiamo due approcci per arrivare ad una ragionevole stima della tensione di accensione, che richiedono esperimenti di complessità diversa, e che comunque può essere istruttivo confrontare, se la strumentazione disponibile lo consente.

*Metodo sperimentale di minima*

La procedura più semplice per determinare la tensione di accensione è l'osservazione diretta dei LED al variare della tensione applicata. Oscurando l'ambiente e variando gradualmente la tensione applicata si potrà determinare la tensione minima che consente di vedere la luce emessa. Ripetendo più volte la misura (magari



a volte a salire con la tensione e a volte a scendere) si potrà ragionevolmente stimare la tensione di accensione. Il limite di questo approccio è che restringe l'intervallo di lunghezza d'onda utilizzabile al visibile, mentre i LED disponibili per poche decine di centesimi coprono anche il vicino UV e il vicino infrarosso e lo spettrometro che si propone di costruire può lavorare da circa 350 nm a circa 800 nm. Inoltre la risposta dell'occhio umano varia con la lunghezza d'onda, portando a sovrastimare la tensione di accensione nelle zone di bassa sensibilità (blue e rosso).

In ogni caso tali effetti non impediscono la determinazione della costante di Planck se ci si accontenta dell'ordine di grandezza e di un paio di cifre significative.

### *Procedura sperimentale completa*

Per estendere l'intervallo spettrale utile e svincolarsi dalla risposta dell'occhio si può cercare un criterio oggettivo per definire la tensione di accensione. Sperimentalmente si osserva che al crescere della tensione applicata la corrente del LED non aumenta linearmente, ma ha un andamento da diodo.

Per basse tensioni la corrente è molto bassa e in un circuito con un normale generatore di tensione variabile e due multimetri per misurare tensione e corrente, quando il LED è attraversato da corrente bassa (alta resistenza) di fatto si misura una corrente legata alla resistenza interna del multimetro usato per leggere la tensione (in parallelo al LED). Al crescere della tensione la resistenza del LED cala progressivamente, portando ad una variazione di pendenza della curva IV. Considerato che l'aumento di pendenza è legato all'aumento della corrente che passa nel LED, che porta all'emissione di luce, si può legare  $V_0$  all'andamento della curva IV.

In figura si riportano le curve IV estratte dal lavoro "Analysis of LED data for the measurement of Planck's constant in the undergraduate laboratory" di Valeria Indelicato, Paola La Rocca, Francesco Riggi, Gianluca Santagati, Gaetano Zappalà (E-mail: [Francesco.Riggi@ct.infn.it](mailto:Francesco.Riggi@ct.infn.it)) Eur. J. Phys. 34 (2013) 819–830, in cui si descrive in grande dettaglio il confronto tra 8 diverse varianti dell'esperimento.

Misurando la curva IV e graficando i dati in scala lineare si può definire la tensione di accensione estrapolando il tratto lineare ad alta tensione fino ad intersecare l'asse V, determinando quindi la tensione al di sotto della quale si può considerare nulla la corrente nel LED.

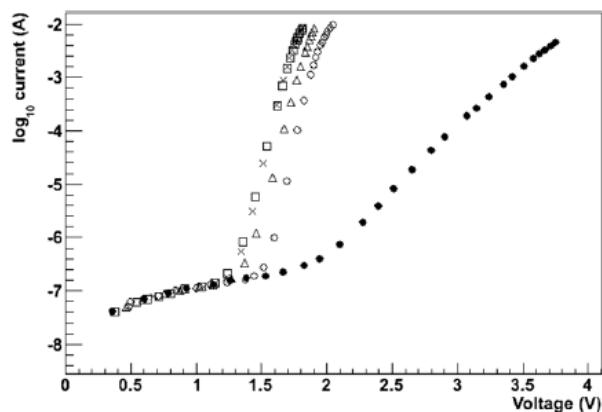
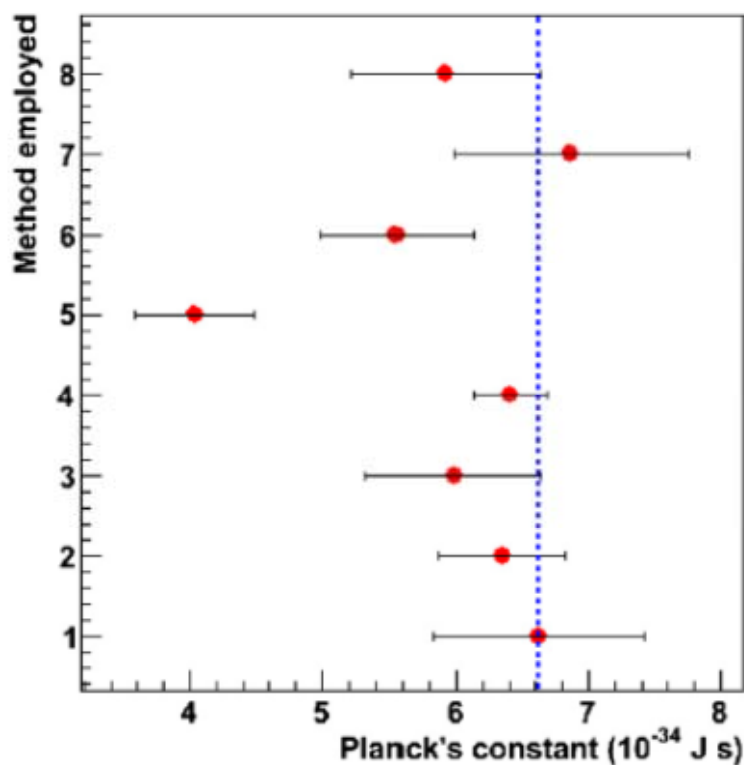


Figure 8.  $I$ - $V$  curves measured for the various LEDs in the second setup.

Il vantaggio di questo approccio è che consente di estendere il numero di LED analizzabili, eventualmente consentendo di analizzare anche LED che emettono nell'IR (affidandosi al valore nominale della lunghezza d'onda di picco dell'emissione, affidabile entro pochi nanometri).

Nella figura seguente si mostra il confronto tra gli 8 approcci analizzati nel lavoro citato prima, che consente di osservare come le variazioni del principio alla base della determinazione della lunghezza d'onda di emissione e della tensione di accensione consente praticamente sempre di ottenere valori compatibili entro l'errore con il valore di  $h$ .



### 3 Comprare uno spettrometro.... in cartoleria

Dopo aver ampiamente descritto l'utilità di uno spettrometro nel consentire vari esperimenti legati allo studio dell'interazione radiazione materia resta aperto il punto di come dotarsi di uno spettrometro senza doverlo comprare.

Il primo fondamentale passaggio verso la direzione che percorreremo è stato fatto nel 2009 da A. Scheeline e K. Kelley della University of Illinois (USA), che hanno proposto la realizzazione di un semplice spettrometro utilizzando dei reticoli di diffrazione a basso costo (meno di 1 \$ l'uno) e la fotocamera di un vecchio cellulare come rivelatore.

Tutto il materiale realizzato, tra cui il link al download del software per estrarre gli spettri, si può scaricare al link [http://www.asdlib.org/onlineArticles/elabware/Scheeline\\_Kelly\\_Spectrophotometer/](http://www.asdlib.org/onlineArticles/elabware/Scheeline_Kelly_Spectrophotometer/)

Il progetto è realizzato con licenza Creative Common 3.0 e disponibile all'uso di terzi e alla copia a condizione di citare il lavoro originale.

Il progetto originale prevede che lo spettrometro non abbia un involucro esterno, rendendolo quindi molto sensibile alla luce ambientale, e comunque richiede l'acquisto dei reticoli di diffrazione (per quanto di costo limitatissimo).

Un successivo sviluppo è arrivato da un gruppo di "Hardware libero" che ha sviluppato vari mini-spettrometri, vendendoli ma dando anche le istruzioni per realizzarli in casa.

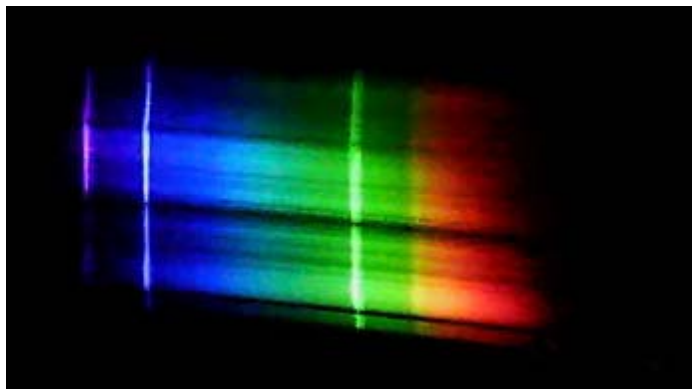
Il link al materiale completo è <http://publiclab.org/wiki/foldable-spec>

In questo sistema lo strumento è chiuso da un involucro di cartoncino nero (meno di 1 € per un foglio formato A0), e si utilizza come reticolo di diffrazione un pezzo di un DVD disassemblato.

La furbizia di tale approccio è l'osservazione che i dischi ottici hanno una struttura con righe equidistanziati, come i reticoli di diffrazione con un numero di righe per millimetro in numero confrontabile a quello dei reticoli commerciali (670 l/mm nei CD, 1300 l/mm nei DVD e 3500 l/mm nei Blu Ray). Il DVD è il miglior compromesso prestazioni/costo.

Avendo l'accortezza di utilizzare la parte più esterna del disco ottico, per minimizzare l'effetto della curvatura delle linee, si possono ottenere circa 35 reticoli da 1 cm<sup>2</sup> per ogni DVD, consentendo la realizzazione di uno spettrometro a studente per classe con un DVD solamente (non necessariamente nuovo).

Una volta realizzato lo spettrometro è necessario attaccarlo allo strumento scelto per la rivelazione (cellulare o web cam). Puntando lo strumento verso una lampada a basso consumo sarà possibile osservare le righe di emissione del mercurio, da utilizzarsi per orientare lo spettrometro fino ad osservare righe verticali. Una tipica immagine ottenuta con una webcam a colori è riportata nella figura seguente:



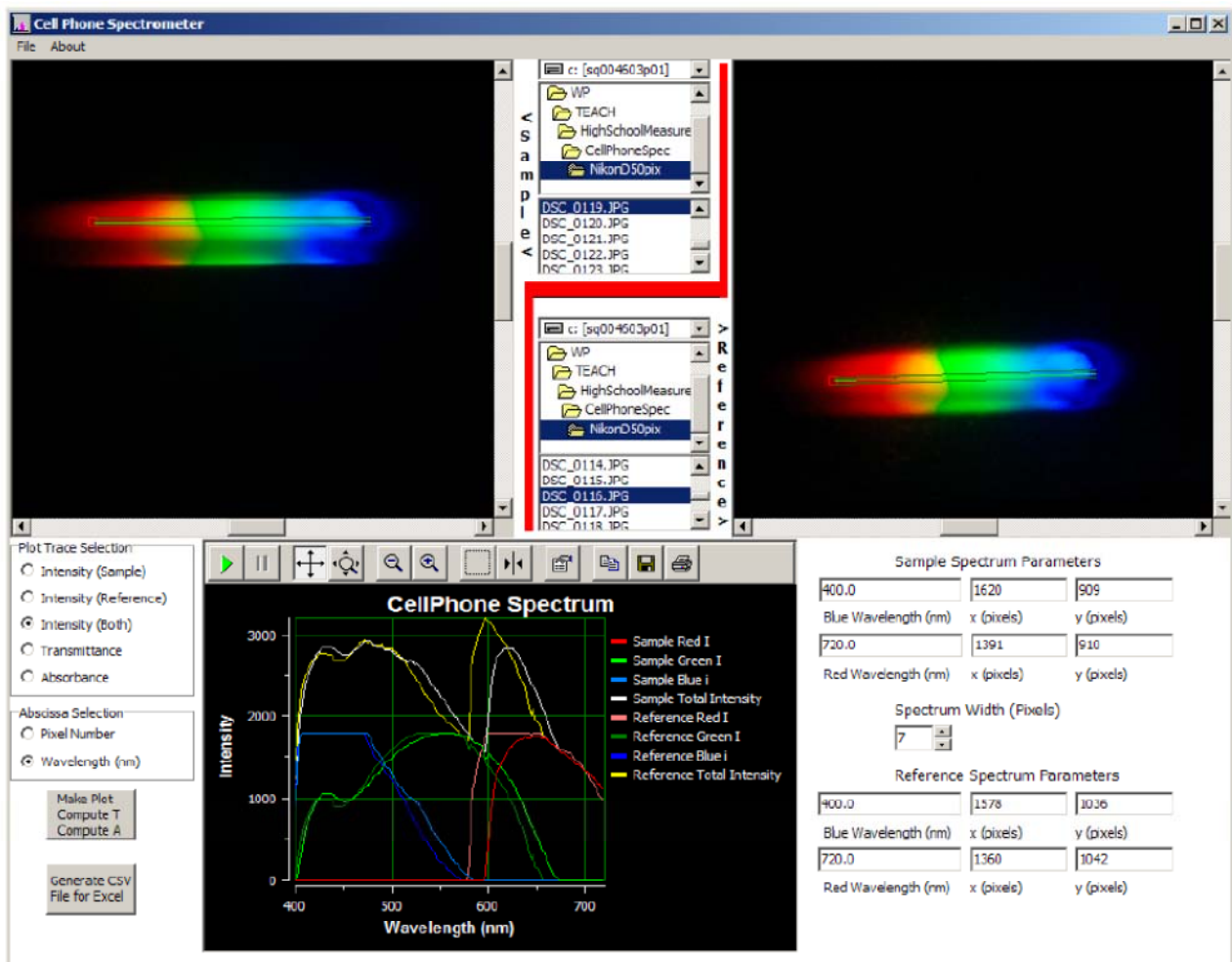
Una volta orientato correttamente lo spettrometro rispetto al rivelatore lo si fissa con del nastro adesivo e lo strumento è pronto all'uso.

Sarà sufficiente puntare lo spettrometro verso la sorgente luminosa di interesse e catturare l'immagine dello spettro. La scelta del tipo di rivelatore è tutto sommato irrilevante, ed è da preferirsi che gli studenti utilizzino un proprio vecchio telefono o la propria web cam, con cui hanno già dimestichezza piuttosto che introdurre un passaggio di familiarizzazione con uno strumento standard (che inoltre andrebbe acquistato).

Per esperienza personale i cellulari consentono di ottenere degli spettri più risolti, perché hanno una messa a fuoco via software (non sempre però facile da controllare), mentre le webcam consentono di catturare le immagini impostando manualmente le condizioni di acquisizione, e possono quindi essere preferibili quando si voglia confrontare quantitativamente più spettri, richiedendo condizioni di acquisizione fisse.

Per ottenere lo spettro luminoso come file ASCII è sufficiente utilizzare il software di Scheeline e Kellthan.

Osservando la schermata principale del software (riportata nella Figura seguente) nel menù a tendina centrale superiore si carica l'immagine jpeg della foto dello spettro, che viene mostrato nella finestra di sinistra.



Dopo aver individuato la regione di massimo segnale è sufficiente un click ad una delle estremità dello spettro. Il software chiede se il punto selezionato è l'estremo nel blue o nel rosso dello spettro. Un'analoga operazione va condotta all'altro estremo.

Il campo *spectrum width* consente di sommare il segnale proveniente da più pixel, per migliorare il rapporto segnale rumore.

A questo punto è sufficiente selezionare (sinistra) *Intensity (sample)* per avere lo spettro e *Generate CSV file for excel* per estrarre il file ASCII.

Lo spettro riporta come colonna delle ascisse il numero dei pixel, e quattro colonne per le ordinate, corrispondenti al segnale dei pixel sensibili al rosso, al verde e al blue, e al segnale totale.

Per passare da uno spettro in funzione dei pixel a uno in lunghezza d'onda è sufficiente cambiare l'asse, ricordando che le 4 righe visibili nello spettro delle lampade al neon o a fluorescenza sono del mercurio e sono a 404.7 nm, 435.8 nm, 546.1 nm e 578.2 nm.

La conversione avviene introducendo un nuovo asse  $x'$  in lunghezze d'onda legato a quello  $x$  in pixel dall'equazione di una retta passante per due punti (è meglio scegliere come riferimento la lunghezze d'onda minima e la massima):

$$x' = \lambda_2 + \frac{x - p_{x2}}{p_{x1} - p_{x2}} (\lambda_1 - \lambda_2)$$

A questo punto è possibile annotarsi i valori di lunghezze d'onda corrispondente al minimo e massimo pixel dell'intervallo selezionato e introdurre direttamente i valori nel frame in alto a destra , dove si specificano i valori di partenza e arrivo della linea di selezione in pixel e in lunghezze d'onda.

In tal modo i successivi spettri, se si ha l'accortezza di mantenere fisso l'intervallo spettrale selezionato, potranno essere ottenuti direttamente in lunghezza d'onda.