

SPETTROMETRO

Laboratorio di Fisica II - CdL in Fisica dell'Università di Milano-Bicocca

January 31, 2021

Abstract

Gli atomi di un gas eccitati da una scarica elettrica emettono radiazione luminosa con uno spettro di lunghezze d'onda discreto. Nello spettrometro si sfrutta il potere dispersivo di un prisma o di un reticolo per 'separare' e misurare le diverse lunghezze d'onda. Queste sono caratteristiche degli elementi chimici contenuti nel gas eccitato e consentono di identificarne la presenza. La spettrometria atomica (sia per emissione che per assorbimento) è utilizzata per esempio in chimica, per l'identificazione degli atomi che compongono una sostanza ignota, o in astronomia, per la determinazione degli elementi costituenti di una stella o delle nubi interstellari.

1 L'esperienza in breve

Elenco dei passi principali, incluse due misure facoltative da svolgere solo se avete tempo a sufficienza (il suggerimento è farne almeno una delle due).

1. **mettere a fuoco lo spettrometro:** lo strumento analizzatore (prisma o reticolo) deve essere illuminato da un fascio di luce con fronte d'onda piano ('raggi paralleli') e poi focalizzato nell'occhio.
2. **determinare i coefficienti della legge di Cauchy:** si misura - mediante l'angolo di minima deviazione - l'indice di rifrazione del prisma in corrispondenza delle righe più intense della lampada al **Hg**.
3. **FACOLTATIVO identificare il gas contenuto in una lampada:** si misurano le lunghezze d'onda delle sue righe di emissione.
4. **misurare il passo del reticolo:** si usa la lampada al Na, scegliendo una delle due righe del doppietto giallo.
5. **FACOLTATIVO identificare il gas contenuto in una lampada** si misurano le lunghezze d'onda delle sue righe di emissione.

2 Scopo dell'esperienza

L'esperienza si realizza impiegando uno spettrometro, due elementi analizzatori (il prisma a dispersione e il reticolo di diffrazione) e alcune lampade a scarica. Si usano due lampade ad alta luminosità, contenenti vapori di Hg o di Na, per la calibrazione rispettivamente di prisma e reticolo. Successivamente si identifica

– misurandone le righe di emissione caratteristiche – il gas contenuto in uno o più tubi spettrali. Le misure da realizzare sono:

PRISMA

1. misura dell'indice di rifrazione del prisma per le righe visibili del Hg. Verifica dell'adattamento dei dati alla legge di Cauchy e stima dei parametri che la descrivono.
2. misura delle righe di emissione di una lampada contenente un gas ignoto, identificazione dell'elemento eccitato.

RETICOLO

1. stima del passo del reticolo usando il doppietto del sodio
2. identificazione di tutte le righe spettrali della lampada del Na
3. misura delle righe di emissione di una lampada contenente un gas ignoto, identificazione dell'elemento eccitato.

3 Strumentazione e procedura sperimentale

Spettrometro Nella sua forma più semplice uno spettrometro è costituito da una lente che produce un fascio di luce collimata illuminando un dispositivo analizzatore (prisma o reticolo). Una seconda lente focalizza nell'occhio la luce trasmessa dall'analizzatore. Usualmente il fascio di luce proviene da una fenditura di forma rettangolare, l'immagine prodotta nell'occhio è costituita pertanto da una serie di righe. Da qui la denominazione 'linee o righe spettrali'.

Lo spettrometro messo a disposizione in laboratorio è un oggetto un po' più complesso, è descritto in dettaglio nella scheda PASCO dove è spiegato come leggere la scala goniometrica di Venier. La procedura di messa a fuoco è descritta in questa sezione.

Lampade ad arco Le lampade ad arco sono costituite da ampole o tubi di quarzo (per resistere ad alte temperature) o di vetro (che filtra i raggi UV) provvisti di due elettrodi e contenenti un gas o i vapori di un metallo a bassa pressione. La corrente che si instaura polarizzando i due elettrodi ionizza ed eccita gli atomi del gas/vapore contenuti nel tubo con la conseguente emissione caratteristica.

In laboratorio sono a disposizione due lampade ad alta intensità luminosa, e una serie di tubi spettrali (tubi di Plucker) che emettono luce meno intensa ma esibiscono linee più strette¹. Sia le lampade che i tubi spettrali vanno avvicinati il più possibile alla fenditura dello spettrometro senza essere a contatto.

Le lampade ad alta intensità sono provviste di una lastrina forata che riduce il diametro del fascio luminoso in modo da evitare che esca luce lateralmente al collimatore (normalmente la lastrina è già montata su uno dei due lati della lampada). Queste lampade devono scaldarsi per raggiungere la massima efficienza. Vanno accese un po' prima del loro utilizzo facendo attenzione al

¹Nelle lampade ad alta intensità il gas si scalda producendo un allargamento delle righe spettrali per effetto Doppler

fatto che possono surriscaldarsi: non va perciò di impedita la dissipazione termica coprendole completamente. I tubi spettrali sono estremamente fragili, per la loro sostituzione rivolgersi ai docenti.

Righe spettrali Le righe di emissione atomica di una sostanza sono consultabili sul database del NIST:

<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/periodictable.htm>

Si utilizzino le tabelle relative alle ‘strongest lines’ dove oltre alla lunghezza d’onda è indicato lo stato di ionizzazione (I o II) dell’atomo emettitore e l’intensità relativa della riga. Si tenga conto delle intensità relative per capire quali righe devono risultare visibili e quali no.

Scala goniometrica si utilizzi la minima divisione della scala di Venier. In laboratorio sono a disposizione lenti di ingrandimento e in alternativa si può usare la fotocamera dello smartphone.

Errori di misura come in ogni altra esperienza di laboratorio, per ciascuna grandezza misurata si analizzino le sorgenti che limitano la precisione di misura (tipicamente la sensibilità dello strumento e/o l’errore statistico) e si identifichi la procedura più adatta per massimizzare la precisione e accuratezza della misura.

3.1 Messa a fuoco dello spettrometro

Questa procedura serve a illuminare il reticolo con un fascio collimato e a regolare la messa a fuoco dell’immagine nell’occhio dell’osservatore.

Si utilizzi la lampada al Na e il reticolo, procedendo come segue:

1. Mettere a fuoco il telescopio all’infinito: si sposti lo spettrometro sul davanzale della finestra e si metta a fuoco l’edificio di fronte. La croce di puntamento e l’oggetto lontano devono apparire nitidi simultaneamente.
2. Si posizioni nuovamente lo spettrometro sul banco e si illumini la fenditura con la lampada al Na. Si regoli quindi la messa a fuoco del collimatore e l’apertura della fenditura finché non si ottiene un’immagine nitida di quest’ultima.
3. La regolazione fine della fenditura, necessaria per ottenere il massimo potere risolutivo, viene fatta montando il reticolo e osservando la riga gialla al secondo ordine del sodio: si stringa la fenditura fino a quando la risoluzione non migliora più e l’intensità diminuisce (miglior rapporto risoluzione/intensità).

3.2 Misura con il prisma

La luce propagandosi in un mezzo dielettrico (otticamente trasparente) è soggetta a un fenomeno detto ‘dispersione’ che macroscopicamente si manifesta come un indice di rifrazione dipendente dalla frequenza dell’onda elettromagnetica. La

relazione tra indice di rifrazione e lunghezza d'onda λ nel vuoto² è usualmente descritta con la formula di Cauchy:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots \quad (1)$$

dove i coefficienti sono caratteristici del dielettrico attraversato. Spesso la descrizione è sufficientemente buona fermandosi ai primi due addendi³. In conseguenza del fenomeno della dispersione, l'angolo di rifrazione ha un'ampiezza che dipende dalla lunghezza d'onda. Questo effetto è sfruttato nel prisma a dispersione per misurare la lunghezza d'onda della luce, conoscendo i coefficienti della legge di Cauchy per il materiale di cui è composto il prisma.

Nello spettrometro a prisma si utilizza un prisma di vetro a base triangolare avente (almeno) due facce ottiche (cioè lucidate in modo da essere assimilabili a superfici perfettamente piane e non scabre). Un fascio collimato di luce viene fatta incidere su una delle due facce del prisma (con un angolo di incidenza θ_i) e osservato emergere dalla seconda faccia con un angolo di deviazione δ (angolo formato tra la direzione del raggio incidente sulla prima faccia del prisma e quella del raggio emergente dalla seconda faccia) che dipende dalla lunghezza d'onda. Ruotando il prisma (e quindi modificando l'angolo di incidenza) l'angolo di deviazione δ cambia presentando un minimo quando $\theta_i = \theta_e$.

In corrispondenza del minimo vale la relazione:

$$\sin \frac{\delta + \alpha}{2} = n \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

Invertendo la relazione è possibile ricavare l'indice di rifrazione per la lunghezza d'onda λ . Avendo a disposizione una sorgente che emette luce su più lunghezze d'onda (la lampada al Hg) è possibile studiare la legge di Cauchy e stimare i coefficienti che compaiono in Eq 1.

Si posiziona il prisma come indicato sulla scheda PASCO (attenzione il prisma ha solo due facce lucidate in modo ottico, e sono quelle da utilizzare). Nella prima parte delle misure si utilizza la lampada al Hg. Dapprima si misura l'angolo al vertice del prisma (quello tra le due facce ottiche) sfruttando la riflessione quindi si misura l'angolo di minima deviazione per tutte le righe distinguibili del Hg. Per ciascuna riga, dall'angolo di minima deviazione si ricava l'indice di rifrazione per quella lunghezza d'onda (si faccia riferimento ai valori tabulati per l'emissione del Hg). Si interpolano quindi i dati per stimare i coefficienti della legge di Cauchy.

Successivamente, alla lampada al Hg si sostituisce un tubo spettrale, si misurano gli angoli di deviazione associati a ciascuna riga di emissione e si usa la legge di Cauchy per associarvi una lunghezza d'onda. L'identificazione del gas contenuto nel tubo spettrale deve quindi basarsi sull'insieme di righe osservate, da confrontare quelle tabulate (si considerino i gas nobili, il CO₂, il Hg, il Na).

Suggerimenti, note e domande:

- verificare se la misura dell'angolo di minima deviazione è riproducibile.

²In laboratorio l'aria la consideriamo assimilabile al vuoto poichè il suo indice di rifrazione è molto prossimo a 1

³<https://refractiveindex.info/>

1000 P, c	3983.931	Hg II
400 P	4046.563	Hg I
60	4339.223	Hg I
100	4347.494	Hg I
1000 P	4358.328	Hg I
12 c	5128.442	Hg II
15	5204.768	Hg II
80 P	5425.253	Hg II
500 P	5460.735	Hg I
200 P	5677.105	Hg II
50	5769.598	Hg I
60	5790.663	Hg I
12	5871.279	Hg II
20 c	5888.939	Hg II
15	6146.435	Hg II
250 P, c	6149.475	Hg II
25	7081.90	Hg I
6	7346.508	Hg II

Figure 1: Righe di emissione del Hg. Le intensità riportate sono in unità arbitrarie. Le righe visibili nella lampada a disposizione in laboratorio sono quelle di I ionizzazione.

- identificare quale è il numero minimo di linee spettrali che devono essere utilizzate per la stima dei parametri che compaiono nella legge di Cauchy. E' meglio misurare tante righe o poche ma in modo più accurato ?
- porre attenzione a come si stimano gli errori sulle lunghezze d'onda delle righe del tubo spettrale. Questa stima richiede di invertire la legge di Cauchy, utilizzando i valori dei parametri che compaiono in Eq. 1 ricavati interpolando i dati raccolti con la lampada al Hg assieme alla matrice di covarianza.
- valutare il potere risolutivo del prisma

3.3 Misura con il reticolo

Un reticolo è costituito da un insieme di fenditure equispaziate e di uguale ampiezza. Illuminato da un fascio di luce collimata, il reticolo proietta un'immagine caratteristica costituita da massimi e minimi di intensità con posizioni angolari differenti. Essi corrispondono alle posizioni in cui si ha interferenza costruttiva o distruttiva tra i fasci emergenti dalle fenditure. Nel caso di incidenza perpendicolare, la figura di diffrazione è costituita da un massimo centrale (ad angolo zero rispetto alla direzione di incidenza) e una serie di massimi secondari con posizione angolare data dalla relazione:

$$d \cdot \sin \theta = n \lambda \quad (3)$$

dove d è la distanza tra le fenditure del reticolo ('passo del reticolo'), λ è la lunghezza d'onda della luce incidente e n è l'ordine del massimo (che è contato a partire dal massimo centrale che ha $n = 0$). Ogni singola fenditura produce una figura di diffrazione che ha come effetto di modulare l'intensità della figura di interferenza per cui il massimo centrale è quello caratterizzato dalla maggiore intensità luminosa. Quando l'incidenza della luce sul reticolo è perfettamente perpendicolare, la figura di interferenza è simmetrica e i massimi di interferenza che si osservano a dx e sx del massimo centrale si trovano alla stessa distanza

angolare da questo. Ovviamente questo suggerisce un modo per controllare la perpendicolarità del reticolo.

Si posiziona il reticolo come indicato sulla scheda PASCO (nell'utilizzare il reticolo di vetro fare in modo che il lato della lastrina in cui si trovano le fenditure sia rivolto verso il canocchiale e non verso il collimatore). Verificare la perpendicolarità del reticolo al fascio luminoso confrontando la posizione angolare del massimo di interferenza dx e sx . Scegliere l'ordine di massimo maggiore visibile con il reticolo in dotazione. E' possibile aggiustare la posizione del reticolo fino ad avere angoli dx e sx praticamente identici (entro l'errore di misura). Se lo spettrometro è stato messo a fuoco accuratamente, è possibile osservare la separazione delle due righe del doppietto del sodio, scegliere quindi di puntare sempre a una delle due o al loro baricentro. Si misuri il passo d del reticolo con la miglior accuratezza possibile. Successivamente, alla lampada al Na si sostituisca un tubo spettrale, si misurino le lunghezze d'onda delle righe visibili e si proceda, come fatto per il prisma, all'identificazione del gas contenuto nel tubo spettrale.

Suggerimenti, note e domande:

- verificare se la misura della posizione angolare di un massimo è riproducibile e confrontare posizione angolare dx e sx dello stesso massimo (stessa riga, stesso ordine). Usando le leggi dell'ottica ondulatoria, si calcolino le posizioni angolari dx e sx del massimo di interferenza di ordine n per un reticolo illuminato da un fronte d'onda piano che forma un angolo α con il reticolo stesso (cioè nel caso di incidenza non perfettamente perpendicolare). Come si modifica l'equazione per la posizione angolare dei massimi? Questo suggerisce un modo per minimizzare l'effetto dell'errore di allineamento del reticolo e/o di sensibilità del goniometro ?
- è meglio stimare il passo del reticolo scegliendo una delle due righe del doppietto del sodio o misurando la separazione tra le due righe ?
- che differenza c'è tra reticolo e prisma in termini della capacità di misura di una lunghezza d'onda e di identificazione di tutte le righe di emissione di un atomo eccitato?

4 Misura e analisi dei dati. Stesura della relazione

Le misure devono essere fatte scegliendo una strategia che consenta di minimizzare le sorgenti di errore. E' pertanto importante individuare per ogni grandezza, che sia misurata direttamente o derivata, quali sono le principali fonti di errore e quale è il loro peso reciproco.

La procedura adottata, sia per effettuare le misure che per effettuare l'analisi dati, deve essere documentata nella relazione (o nel quaderno di laboratorio).

La relazione NON deve contenere un riassunto di questa scheda nè del manuale PASCO dello spettrometro. Si può fare tranquillamente riferimento a termini e figure presenti nel manuale.

Trovate una Guida alla Stesura di una Relazione sul sito e-learning.

150	4113.70	Na II
1	4324.62	Na I
1	4390.03	Na I
600	4392.81	Na II
1	4393.34	Na I
400	4405.12	Na II
500	4455.23	Na II
400	4490.87	Na II
1	4494.18	Na I
1	4497.66	Na I
2	4664.811	Na I
2	4668.560	Na I
2	4978.541	Na I
5	4982.813	Na I
1	5148.838	Na I
1	5153.402	Na I
50	5414.55	Na II
4	5682.633	Na I
1	5688.193	Na I
7	5688.205	Na I
1000 P	5889.950	Na I
500 P	5895.924	Na I
2	6154.225	Na I
3	6160.747	Na I
50	6514.21	Na II
70	6530.70	Na II
70	6544.04	Na II
70	6545.75	Na II

Figure 2: Righe di emissione del Na. Le intensità riportate sono in unità arbitrarie. Le due righe che costituiscono il doppietto del sodio corrispondono all'eccitazione dell'elettrone di valenza dal livello 3s al livello $3p_{1/2}$ e $3p_{3/2}$ e successiva diseccitazione. Le righe visibili nella lampada a disposizione in laboratorio sono quelle di I ionizzazione.

1000 P, c	3983.931	Hg II
400 P	4046.563	Hg I
60	4339.223	Hg I
100	4347.494	Hg I
1000 P	4358.328	Hg I
12 c	5128.442	Hg II
15	5204.768	Hg II
80 P	5425.253	Hg II
500 P	5460.735	Hg I
200 P	5677.105	Hg II
50	5769.598	Hg I
60	5790.663	Hg I
12	5871.279	Hg II
20 c	5888.939	Hg II
15	6146.435	Hg II
250 P, c	6149.475	Hg II
25	7081.90	Hg I
6	7346.508	Hg II

Figure 3: Righe di emissione del Hg. Le intensità riportate sono in unità arbitrarie.

5 BIBLIOGRAFIA

- Manuale PASCO disponibile sul sito.
- ‘Fisica 2’, Halliday, Resnik, Krane.