

## STUDIO DELL'EFFETTO ZEEMAN NORMALE NELLE RIGHE DEL NEON

### ESECUZIONE DA REMOTO PER EMERGENZA COVID-2019

Visto il protrarsi delle restrizioni per contrastare la diffusione del coronavirus, abbiamo modificato l'esperienza sull'effetto Zeeman in modo da poterla svolgere interamente da remoto. Anche se non sarà possibile eseguire tutte le fasi dell'esperienza come negli anni scorsi, le operazioni accessibili permettono di farsi un'idea abbastanza precisa del funzionamento del dispositivo e dei principali aspetti di fisica dell'esperimento.

Le istruzioni per il collegamento remoto sono reperibili nel documento [LineeGuidaPerConnessione.pdf](#) che trovate sul sito moodle.

### Logbook elettronico

Nel computer della postazione è predefinita una directory DATI\_GRUPPI all'interno della quale dovrete creare una sub-directory **gruppoN** con il numero del vostro gruppo.

I dati grezzi e analizzati e i risultati principali vanno salvati in questa directory (*logbook elettronico*). *Vedete nei prossimi paragrafi e in fondo a questo documento la lista delle informazioni da produrre durante l'esecuzione dell'esperimento.*

### Computer della postazione

Ogni postazione è dotata di un PC con sistema operativo Linux. *Terminata l'esperienza, non fate logout dal computer, non spegnetelo, semplicemente chiudete la connessione VNCviewer.*

## Guida all'esecuzione dell'esperimento

### Caratteristiche degli spettrometri utilizzati.

Sono disponibili due setup sperimentali (**Zeeman 1** e **Zeeman 2**) molto simili, ma con alcuni componenti leggermente differenti.

Gli elementi base di entrambi sono i seguenti:

- una sorgente al Neon
- una lente condensante
- un prisma
- una lamina di Lummer
- una lente di camera (focus lens)
- un sistema di raccolta della luce sul piano focale (CCD).

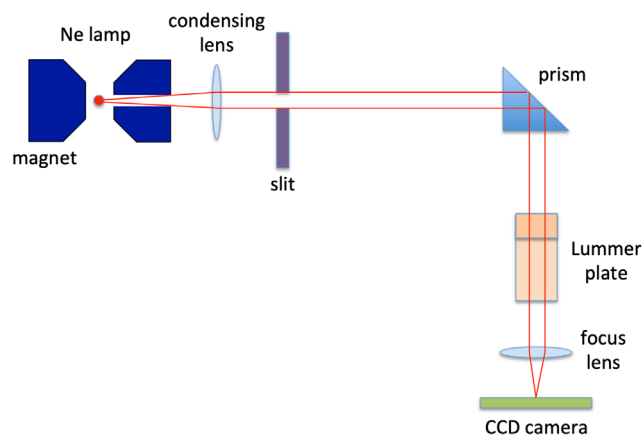


Fig 1: schema apparato Zeeman

Le informazioni riportate di seguito valide per entrambi gli spettrometri sono scritte in **nero**. Le parti che riguardano solo lo spettrometro Zeeman 1 (postazione SA6) in **blu** e quello riguardanti solo lo spettrometro Zeeman 2 (postazione SA5) in **verde**.

Una volta collegati sul computer con vncviewer, aprire un terminale e

1) verificare lo stato del programma di controllo zeeman, digitando all'interno di un terminale:

```
$ zclient status
```

Se il comando non fornisce come risposta il numero di processo, e vi ritorna la stringa

```
Process zeemanControl is not running
```

dovete far partire il processo con

```
$ zclient start
```

```
Starting zeemanControl ...
```

```
Process zeemanControl is running - PID: 30080
```

2) far partire il programma di acquisizione:

```
$ zeemanGui
```

Vi comparirà la seguente schermata:



Fig 2: schermata principale di controllo dell'apparato.

Una finestra di pop-up vi chiederà se volete attivare l'apparato. La procedura richiede alcuni minuti, in quanto viene effettuata anche una calibrazione della movimentazione del CCD.

Accendete la lampada e, una dopo aver aperto la fenditura ('slit'), potete acquisire uno spettro della lampada. La schermata dell'apparato di controllo sarà del tipo:

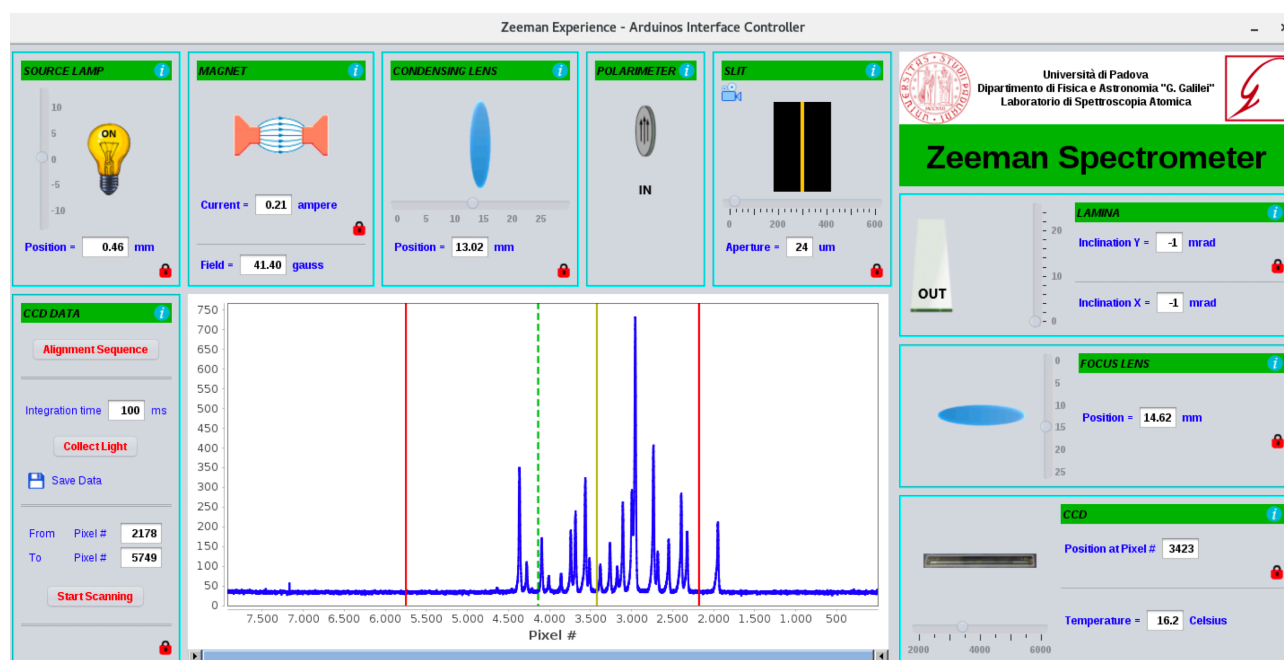


Fig 2: schermata principale programma di controllo con spettro acquisito.

Importante: ogni riquadro possiede, in basso a destra, un lucchetto rosso. Per poter operare sul singolo elemento, è necessario abilitarlo, 'cliccando' sul lucchetto (che quindi diventa verde). Una volta terminata l'operazione, per poter operare su un altro elemento del banco ottico, è necessario chiudere il lucchetto precedente.

Come esempio, potete vedere, nella figura di sinistra il controllo della lampada con il lucchetto rosso. Premendo il mouse sul lucchetto è possibile abilitare il riquadro (e il lucchetto diventa verde). Accendiamo quindi la lampada. Se poi cerchiamo di operare su un altro riquadro, un messaggio di errore ci avvisa che dobbiamo prima richiudere il lucchetto della lampada.

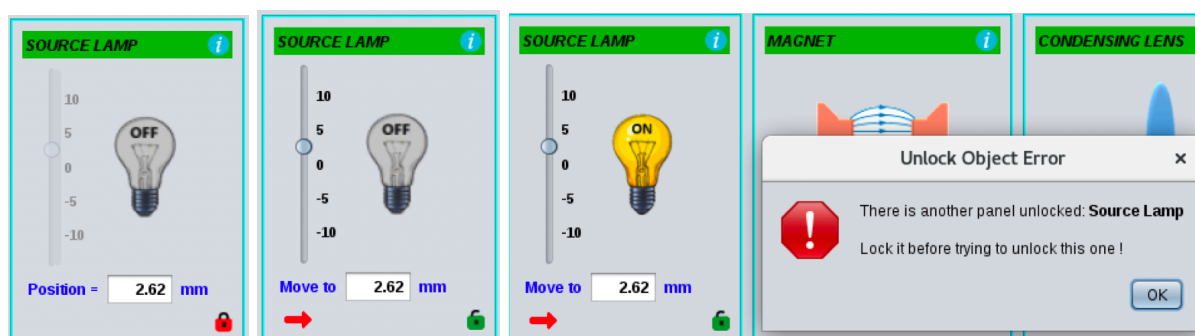


Fig 3: utilizzo dei 'lucchetti' nei riquadri del programma.

## Dati comuni a entrambi gli spettrometri

### LEGGERE ATTENTAMENTE PRIMA DI PROSEGUIRE CON I PUNTI SEGUENTI!

Il prisma è di vetro denso ( $n = 1.75$ ) e l'intervallo di lunghezze d'onda esplorabile va da 390 nm a 900 nm. Per tale prisma la risoluzione e la dispersione lineare inversa dipendono dalla lunghezza d'onda secondo la tabella a fianco.

Per generare il campo magnetico nella regione della sorgente di luce è disponibile un elettromagnete in grado di generare un campo massimo di circa 10-15 kGauss. Esso è montato su un supporto che permette una sua rotazione di 90 gradi attorno ad un asse perpendicolare al campo magnetico stesso; inoltre uno dei poli è forato in modo che la sorgente posta al centro del magnete sia vista dalla fenditura dello spettrometro anche con campo parallelo. L'alimentatore del magnete ha il controllo in corrente direttamente dal programma di controllo del setup.

La sorgente di luce usata è una lampada al Neon a scarica a bagliore alimentata in corrente continua. La tensione applicata agli elettrodi è di alcune centinaia di Volt e la corrente che vi scorre risulta di pochi mA. (Una sorgente a scarica a bagliore risente meno dell'effetto Doppler rispetto ad una corrispondente a scarica ad arco, con la quale sarebbe impossibile vedere l'effetto Zeeman). La sorgente è delicata e si può notare che la scarica si spegne se il campo magnetico è troppo intenso; per questo useremo solo campi massimi dell'ordine di 5 kGauss.

Qui sotto e a lato sono riportate le principali transizioni visibili nello spettro del Neon, con l'indicazione delle righe nelle quali possiamo osservare l'effetto Zeeman normale (la freccia rossa indica la riga più intensa visibile nello spettro, a 640 nm)

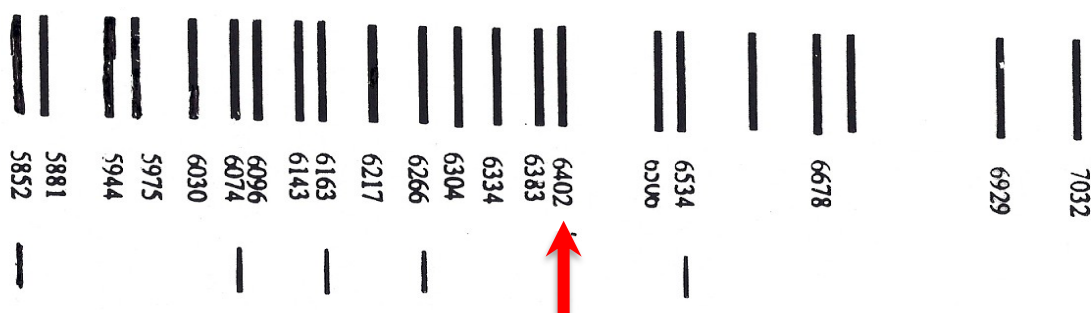


Fig4: righe dello spettro del Neon e schema dei livelli atomici.

Le dimensioni limitate della lamina, la necessità di tenere la sorgente ad una certa distanza dalla fenditura (spazio per il magnete) ed altri fattori che riducono l'intensità della luce che raggiunge il prisma, richiedono l'introduzione di una lente condensante prima della fenditura per concentrare su di essa la maggior quantità di luce possibile.

Oltre alla lente condensante è disponibile un filtro polaroid per analizzare la polarizzazione della luce: esso consiste di una lamina di materiale dicroico che lascia

passare solo (o meglio, prevalentemente) la luce polarizzata lungo una determinata direzione.

### Dati apparato Zeeman 1

La larghezza della fenditura è regolabile da un minimo di 6  $\mu\text{m}$  con step di 6  $\mu\text{m}$ .

La distanza focale della lente di camera è 280 mm; il diametro utile delle lenti è di 31,5 mm.

La lamina è in quarzo, lo spessore è  $d = 4.04$  mm e la lunghezza  $L = 120$  mm. Il valore dell'indice di rifrazione per la riga a 585.3 nm è pari a 1.4585 e, sempre a questa lunghezza d'onda, il  $dn/d\lambda$  vale  $-4.1 \times 10^{-5} \text{ nm}^{-1}$ .

La dimensione trasversale del pixel del CCD è di 7  $\mu\text{m}$ .

### Dati apparato Zeeman 2

La larghezza della fenditura è regolabile da un minimo di 5  $\mu\text{m}$  con step di 5  $\mu\text{m}$ .

La distanza focale della lente di camera è 250 mm.

La lamina di Lummer è di vetro K7. Il valore dell'indice di rifrazione è stato misurato per 3 righe:  $n(6563 \text{ Å}) = 1.5097$ ,  $n(5893 \text{ Å}) = 1.5115$ ,  $n(4861 \text{ Å}) = 1.5176$ . Utilizzando queste informazioni è possibile calcolarsi l'indice di rifrazione e il  $dn/d\lambda$  alla lunghezza d'onda delle righe di interesse del Neon.

La lamina ha lo spessore di 3,47 mm ed è lunga 130 mm. L'inclinazione può essere regolata in modo che i raggi emergenti siano più o meno radenti.

La dimensione trasversale del pixel del CCD è di 7  $\mu\text{m}$ .

### Incertezze sui dati di costruzione e sui risultati finali delle misure

- Le incertezze sulle dimensioni dei componenti e degli altri dati di costruzione non sono note con precisione, tuttavia sappiamo essere trascurabili rispetto al resto delle incertezze e pertanto possiamo considerarle nulle al fine dell'analisi dei dati.
- Le incertezze significative sono quelle statistiche che si potranno ricavare dall'analisi dei dati e quella sul valore del campo magnetico.
- La geometria delle linee di campo dei magneti, soprattutto nel caso di Zeeman1, è abbastanza complicata. Per l'analisi dei dati utilizzeremo il valore di  $B$  letto sul gaussometro quando la sorgente è in posizione di misura e gli assoceremo un errore sistematico ( $\sigma$ ) pari al 2% per Zeeman1 e all'1% per Zeeman2.

### Sequenza delle operazioni di messa a punto dell'apparato e di misura

*Note sull'uso dell'interfaccia di controllo in java:*

- *nella maggior parte dei casi i valori dei parametri si possono variare cliccando sulle frecce accanto al campo con il numero, oppure inserendo a mano il valore. Per poter abilitare la modifica, è sempre richiesta una abilitazione cliccando sul lucchetto rosso,*

*nell'angolo in basso a destra per ogni riquadro. Una volta abilitati, il lucchetto diventerà di colore verde. Convalidate col tasto Enter oppure cliccando sulla freccia rossa il valore impostato.*

1. L'impostazione dell'apparato viene fatta inizialmente senza lamina di Lummer:

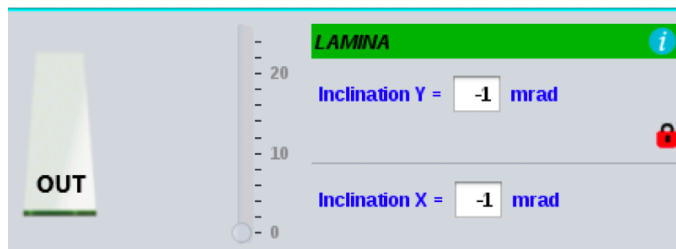


Fig 5: controllo inserimento lamina di Lummer

accendere la lampada e aprire bene la fenditura (circa 30-40  $\mu\text{m}$ ) in modo da vederla bene con la telecamera. Si guarda con la telecamera la luce sulla fenditura: conviene agire sulla posizione della sorgente per far partire da un estremo rispetto alla fenditura, poi si inserisce una posizione della parte opposta e si vede durante lo spostamento quando la luce si concentra sulla fenditura, infine si cerca la posizione che corrisponde al centro della fenditura (in questa fase basta un centraggio approssimato, si ottimizzerà in seguito). Verificare che la temperatura del CCD sia inferiore a 17  $^{\circ}\text{C}$  (cifre nere, al di sopra diventano rosse), eventualmente attendere il raffreddamento.

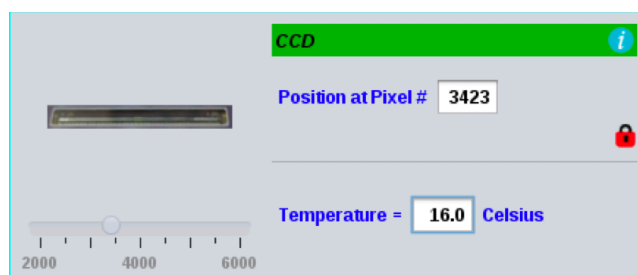


Fig 6: controllo rotazione CCD.

2. Si acquisisce un primo spettro grezzo col CCD orizzontale (100ms). Lo spettro raccolto è simile a quello riportato in Figura 2.
3. Si ottimizzano gli altri parametri per migliorare la forma e l'intensità della riga che andremo a studiare. Le operazioni possibili sono le seguenti:
  - a. riduzione dell'apertura della fenditura (18  $\mu\text{m}$ )
  - b. riposizionamento fine della posizione della sorgente
  - c. in Zeeman2 va ottimizzata la posizione della lente di camera (denominata 'focus lens' nel programma)
  - d. ottimizzazione della posizione della lente condensante (quella vicino alla sorgente)

*Nota: in questa fase puntiamo a vedere in modo chiaro la transizione in esame e a massimizzarne l'intensità, mentre la larghezza della riga (legata al potere risolvante del prisma) non è un parametro fondamentale.*

Alla fine salvare lo spettro del Neon come file (lgobook elettronico)

4. Identificare la riga a 585.3 nm e posizionare lo spettro in posizione corretta per la rotazione del CCD: spostare i cursori rossi che sono visibili sullo spettro, in modo da evidenziare gli estremi dello scan. Questi ultimi sono indicati nel riquadro in basso a sinistra, vicino al bottone 'start scanning'. Per il posizionamento dei cursori rossi che delimitano la zona di acquisizione, vedere il video tutorial dell'esperienza.

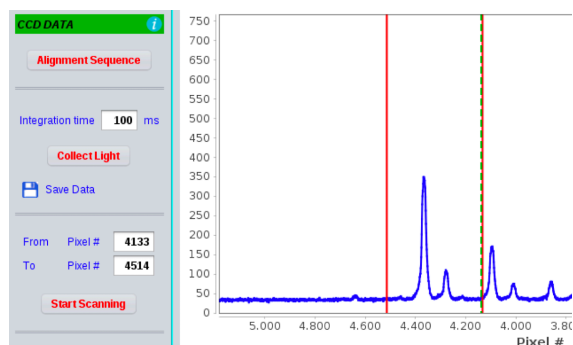


Fig. 7: regione di acquisizione per lo scanning con la lamina inserita.

5. Ruotare il CCD e inserire la Lamina. Verificare che i valori degli angoli x e y siano corretti (eventualmente chiedere aiuto ai docenti.). In Zeeman2 è possibile variare l'inclinazione della lamina, ma è un settaggio delicato da evitare. In caso di dubbi chiede aiuto ai docenti.
6. Registrare uno spettro bidimensionale (esposizione 500-600 ms) Fare in modo che il picco di interesse sia ben incluso tra i due cursori rossi (vedere ad esempio la Figura 7).
7. visualizzarlo con la macro ROOT disponibile:
  - a. inizializzare l'ambiente ROOT con l'alias `root6`, dopodiché sarà possibile richiamare root all'interno di qualsiasi directory;
  - b. caricare la macro ( `.L /home/studenti/macro/ReadZeemanImage.C` )
  - c. visualizzare il bidimensionale: `ReadZeemanImage("nomefile.zee")`

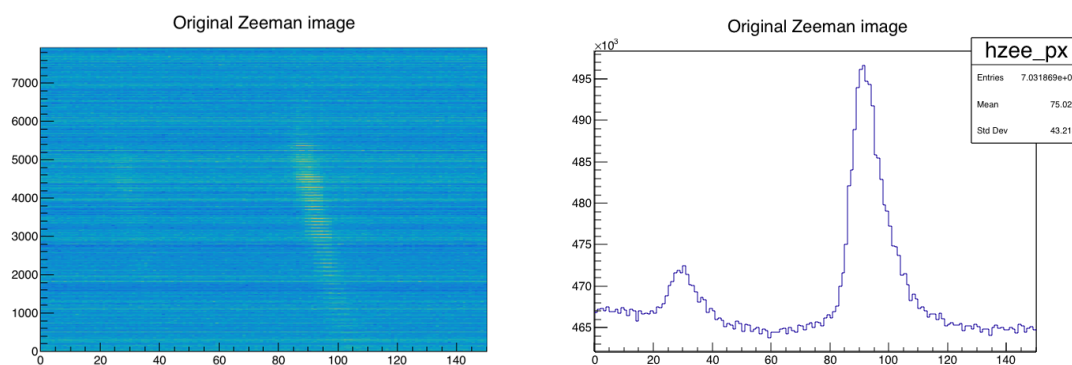


Fig 8: spettro acquisito a campo magnetico spento.

- d. riconoscere la riga e registrarsi i limiti della regione del fondo [`bkgfrom`, `bkgto`] riferendosi alla proiezione sull'asse X (`hzee_px`). Eseguire quindi `ReadZeemanImage("nomefile.zee", bkgfrom, bkgto)`. La macro mostra nuovamente l'immagine grezza e quella col fondo sottratto. Se la figura non risulta nitida provare a migliorare la sottrazione del fondo.



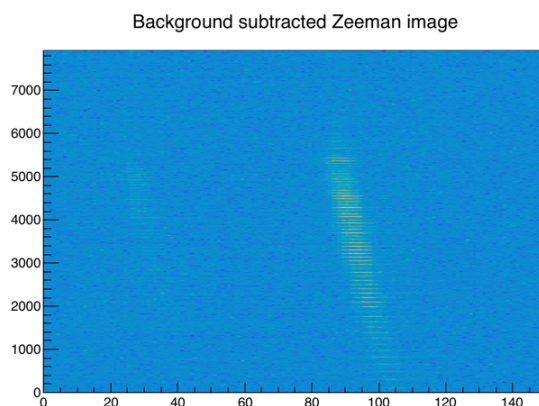


Fig. 9: immagine Zeeman dopo la sottrazione del fondo. E' visibile attorno alla colonna 100 la riga in esame.

- e. Registrarsi i limiti della zona del segnale [projYfrom, projYto] ed eseguire `ReadZeemanImage("nomefile.zee", bkgfrom, bkgto, projYfrom, projYto)`. La macro mostra ora anche la proiezione della regione di segnale sull'asse Y, uno spettro 1D che dovrebbe mostrare una sequenza di picchi.

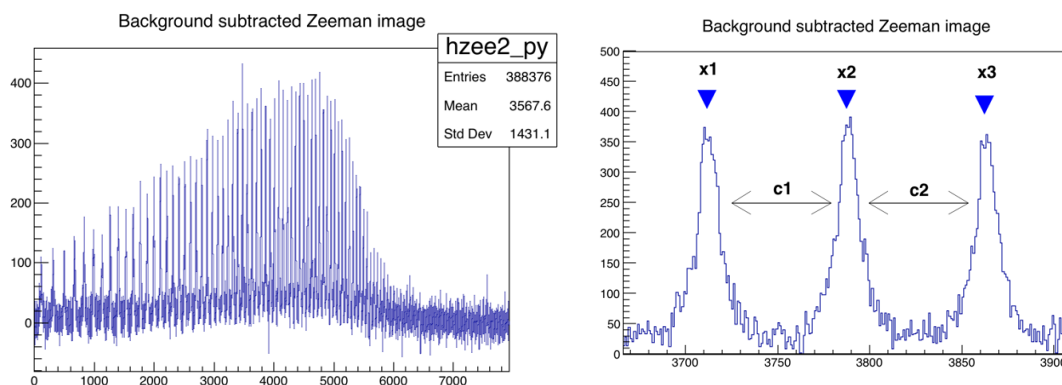


Fig 10: Esempio di proiezione sull'asse Y della riga con i picchi di interferenza e zoom di una zona centrale dello spettro

*Nota: dopo la scansione 2D il CCD è traslato rispetto alla posizione iniziale. Se dovete prendere una nuova scansione, ricordarsi di riportare il CCD nella posizione iniziale attraverso il controllo "translation".*

## 8. Analisi dei picchi:

- misurare la posizione di 3 picchi consecutivi in 3 zone dello spettro (sinistra, centro, destra) e ricavare la spaziatura per ciascuna zona come media delle due spaziature. Es. (vedi figura):  $\Delta x_{r,u}(x2) = (c1+c2)/2$  ;
- calcolare il  $\Delta \lambda_{r,u}$  attraverso le formule e calibrare l'asse X;
- misurare la larghezza dei picchi nelle 3 zone e ricavare, utilizzando la calibrazione precedente, il potere risolvibile  $R(x_i) = \lambda/\Delta \lambda$ . Fare quindi la media dei 3 valori ottenuti.

9. Riportare il CCD orizzontale, rimuovere la lamina e riportarsi nelle condizioni del punto 5). Acquisire uno spettro e verificare di ritrovare circa quello che avevate prima.

10. Accendere il campo magnetico. Agire sul controllo della corrente per portare il campo a circa 5 kGauss (non superare i 12 A di corrente).



11. La presenza del campo modifica il percorso della scarica all'interno della lampada (in Zeeman1 si può controllare sulla telecamera l'illuminazione della sorgente). Agire sul controllo di posizione della sorgente per rimettere la luce nella posizione corretta: acquisire uno spettro, verificare la corretta posizione delle righe e modificare in modo fine la posizione della sorgente in modo da massimizzare l'intensità della riga in esame (che dovrebbe essere alla fine maggiore della corrispondente intensità senza campo...)
12. Reinserire la lamina e rimettere il CCD verticale.
13. Registrare lo spettro bidimensionale e analizzarlo con ROOT. Calcolare lo split Zeeman dei picchi nelle 3 zone analizzate precedentemente e, utilizzando le stime precedenti, trasformarlo in un  $\Delta\lambda_{\text{zee}}$ . Fare quindi la media dei 3 valori trovati. Calcolare infine il fattore di Landé  $g$ .
14. Dimezzare il campo magnetico, togliere la lamina e rimettere il CCD orizzontale. Ripetere quindi i punti da 10 a 13 e confrontare i risultati ottenuti.
15. Nel caso in cui siate riusciti a svolgere il resto dell'esperienza in tempo: spegnere il campo, togliere la lamina e rimettere il CCD orizzontale. Posizionarsi ora sulla seconda riga Zeeman assegnata dal docente o dall'assistente. Ripetere la procedura senza campo e con il campo  $B$  massimo, analizzando solo una zona centrale ristretta dello spettro. Calcolare  $g$  e confrontare il risultato con quelli precedenti.

## Analisi dati completa

### • Dati senza campo magnetico

- a. completare l'analisi del punto 7) misurando le posizioni di un numero maggiore di picchi, in modo da sfruttare tutta l'estensione dello spettro.
- b. riportare in grafico le separazioni tra i picchi  $\Delta x_{r,u}(x)$  in funzione della posizione.
- c. migliorare la stima di  $\Delta\lambda_{r,u}$ , introducendo una valutazione più precisa dell'angolo di incidenza

### • Dati con campo magnetico

- a. completare l'analisi dei dati col campo massimo (13) e riportare in grafico il rapporto  $\Delta x_{\text{zee}}/\Delta x_{r,u}$  in funzione della posizione. Determinare la miglior stima di questo rapporto e l'incertezza associata.
- b. trovare infine la miglior stima di  $\Delta\lambda_{\text{zee}}$  e del fattore di Landé con le relative incertezze.
- c. analizzare i dati con campo dimezzato e ricavare il fattore di Landé

### • Seconda riga Zeeman

- a. riguardare l'analisi fatta in laboratorio alla luce di quello che avete imparato facendo l'analisi sulla riga principale.

## Logbook elettronico

I dati acquisiti, i plot realizzati e le grandezze calcolate vanno lasciate nella directory gruppoN creata all'inizio. Più in dettaglio:

- tutti i dati grezzi acquisiti durante l'esperimento (istogrammi 1D e 2D)
- screenshot del pannello di controllo una volta terminata l'ottimizzazione dei parametri (alla fine del punto 3)
- spettro 1D del Neon acquisito alla fine del punto 3
- spettro proiezione della riga Zeeman senza campo (punto 7), con gli eventuali fit dei picchi
- spettro proiezione della riga Zeeman con campo massimo (punto 13), con gli eventuali fit dei picchi
- file di testo con i risultati dell'analisi:
  - o posizioni dei picchi ( $B=0$ ), calcolo delle spazature, calcolo del  $\Delta\lambda_{r,u}$  e del potere risolvente;
  - o calcolo dello split Zeeman e del  $g$  per il campo massimo ed eventualmente per il campo dimezzato
  - o eventuali spettri e risultati significativi della seconda riga Zeeman

Alla fine dell'esperienza, impacchettare tutto il materiale prodotto (quello che c'è) e sottomettere su MOODLE. Utilizzare un browser disponibile direttamente sul computer dove avete svolto l'esperienza.

- posizionarsi nella directory DATI\_GRUPPI
- `tar cvfz logbook_gruppoN_zeeman.tgz gruppoN`
- postare il file **logbook\_gruppoN\_zeeman.tgz**

Se volete completare qualche conto o qualche punto dell'analisi, potete sottomettere su moodle il materiale aggiuntivo entro la sera del giorno successivo.