

Osservazione dell'effetto Zeeman normale in direzione ortogonale e longitudinale

Obiettivi dell'esperimento

- Osservare la scomposizione dello spettro in tre righe nel caso dell'effetto Zeeman ortogonale
- Determinare la polarizzazione delle tre componenti
- Osservare la scomposizione dello spettro in due righe nel caso dell'effetto Zeeman longitudinale
- Determinare la polarizzazione delle due componenti

Principio fisico

Effetto Zeeman

L'effetto Zeeman è un fenomeno fisico che va collegato alla scomposizione dei livelli atomici di energia o delle righe dello spettro dovuta all'azione di un campo magnetico esterno. Tale effetto fu previsto per primo da *H. A. Lorentz* nel 1895 sulla base della teoria elettronica classica, ma fu confermato sperimentalmente da *P. Zeeman* alcuni anni più tardi. Zeeman si accorse che, in presenza di un campo magnetico orientato perpendicolarmente, si provocava la scomposizione di una riga dello spettro in tre righe diverse, mentre con un campo magnetico orientato parallelamente le righe ottenute per scomposizione erano due. Successivamente, si osservò che la scomposizione delle righe dello spettro era molto più complessa, per cui il fenomeno fu interpretato come un'anomalia dell'effetto Zeeman. Per spiegare tale anomalia, nel 1925 *Goudsmit* ed *Uhlenbeck* introdussero per la prima volta l'ipotesi dello

spin dell'elettrone. Il problema è stato chiarito solo recentemente, per cui si è giunti alla seguente conclusione: le anomalie dell'effetto Zeeman costituiscono la regola generale, mentre l'effetto Zeeman "normale" rappresenta l'eccezione.

L'effetto Zeeman normale si verifica soltanto nei casi in cui i cambiamenti degli stati atomici avviene con uno spin risultante $S = 0$. In questo caso, il momento angolare complessivo $J = L + S$ di uno stato energetico è quello dovuto al solo momento angolare degli elettroni per effetto del loro movimento lungo le rispettive orbite ($J = L$). Il momento magnetico corrispondente si può esprimere semplicemente in questo modo:

$$\mu = \frac{\mu_B}{\hbar} J \quad (I)$$

essendo

$$\mu_B = \frac{\hbar e}{2m_e} \quad (II)$$

(μ_B = magnetone di Bohr, m_e = massa dell'elettrone, e = carica dell'elettrone, \hbar = costante di Planck)

In presenza di un campo magnetico esterno di intensità B , il momento magnetico possiede una energia

$$E = -\mu \cdot B \quad (III)$$

La componente del momento angolare secondo la direzione del campo magnetico vale

$$J_z = M_J \cdot \hbar \text{ con } M_J = J, J-1, \dots, -J \quad (IV)$$

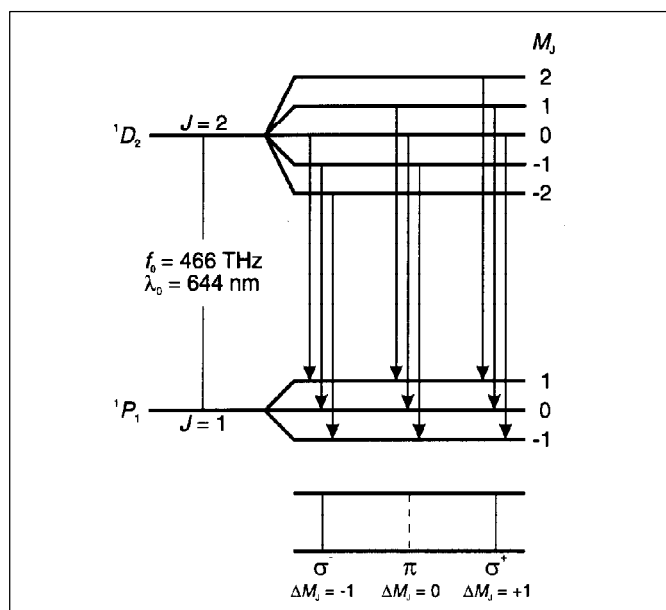
Pertanto, il termine di momento angolare J viene suddiviso nelle due componenti di Zeeman $2J + 1$ equidistanti fra loro e che differiscono della quantità M_J . L'intervallo energetico che separa due componenti contigue M_J ed M_{J+1} vale

$$\Delta E = \mu_B \cdot B \quad (V)$$

L'effetto Zeeman normale si può osservare, per esempio, nella riga rossa dello spettro del cadmio ($\lambda_0 = 643.8 \text{ nm}$, $f_0 = 465.7 \text{ THz}$). Ciò corrisponde alla trasformazione 1D_2 ($J = 2$, $S = 0$) \rightarrow 1P_1 ($J = 1$, $S = 0$) di un elettrone del quinto strato (vedere Fig.1).

In presenza di un campo magnetico, il livello 1D_2 si suddivide in cinque componenti di Zeeman, mentre il livello 1P_1 si suddivide in tre componenti di Zeeman; l'intervallo energetico che separa tali componenti si calcola con la formula (V).

Fig. 1: Scomposizione in più livelli e relativi trasferimenti dovuti all'effetto Zeeman normale nel cadmio



Apparecchiature

1 Lampada al cadmio per l'effetto Zeeman	451 12
1 Sistema ottico per osservare l'effetto Zeeman	471 20
1 Lamina di Lummer-Gehrcke	471 21
1 Elettromagnete per l'effetto Zeeman	514 50
1 Impedenza universale per 451 12	451 30
1 Generatore di corrente elevata	521 55
Cavi di collegamento con sezione del conduttore di 2.5 mm ²	

I fenomeni ottici dovuti al passaggio da un livello all'altro sono possibili soltanto sotto forma di radiazioni prodotte da dipoli elettrici. Per ciò che riguarda gli stati M_J del quanto magnetico si può applicare la seguente regola:

$$\Delta M_J \begin{cases} = \pm 1 & \text{per componenti } \sigma \\ = 0 & \text{per componenti } \pi \end{cases} \quad (\text{VI})$$

Per questo motivo, il numero totale di righe presenti nello spettro sono tre (vedere Fig. 1); la componente π non subisce spostamenti, mentre le due componenti σ vengono traslate di

$$\Delta f = \pm \frac{\Delta E}{h} \quad (\text{VII})$$

rispetto alla frequenza di origine. La grandezza ΔE che compare in questa equazione è l'intervallo energetico calcolato mediante la (V).

Norme di sicurezza

I collegamenti elettrici presenti nella lampada al cadmio e le resistenze degli elettrodi di avviamento sono facilmente accessibili:

- Non toccare i conduttori percorsi da corrente (sono sotto tensione!).

Le caratteristiche costruttive della lamina di Lummer-Gehrcke sono molto rigorose, infatti le sue superfici risultano ben levigate e perfettamente parallele fra loro.

- Non forzare meccanicamente la lamina di Lummer-Gehrcke curvandola o sottoponendola ad altri tipi di sollecitazione.
- Prendere la lamina di Lummer-Gehrcke solo lungo i bordi.
- Nel montare la lamina di Lummer-Gehrcke assicurarsi che la sua superficie sia sorretta uniformemente dal piano di appoggio per tutta la sua lunghezza.
- Prima di trasportare l'intero apparato, togliere la lamina di Lummer-Gehrcke dal piano di appoggio e custodirla in un posto sicuro.

Gli oggetti ferromagnetici liberi possono essere attratti violentemente dall'elettromagnete e danneggiare, così, il bulbo di quarzo della lampada al cadmio.

- Per sicurezza, prima di attivare la circolazione di corrente nel magnete, verificare che le espansioni polari siano ben avvitate.
- Durante la circolazione di corrente nel magnete, non maneggiare oggetti ferromagnetici in prossimità della lampada al cadmio.

I depositi dovuti al sudore della pelle possono distruggere il bulbo di quarzo della lampada al cadmio durante la fase di riscaldamento.

- Non toccare mai a mani nude il bulbo di quarzo della lampada al cadmio.

Distribuzione angolare e polarizzazione

A seconda della componente ΔM_J del momento angolare secondo la direzione del campo magnetico, l'emissione di fotoni è caratterizzata da un diverso diagramma di radiazione. La Fig.2 mostra in forma polare due sezioni del diagramma di radiazione. Si può osservare sperimentalmente che, per tutti gli atomi di cadmio, il campo magnetico è orientato sempre nella stessa direzione.

In altri termini, il caso in cui $\Delta M_J = 0$ corrisponde ad un dipolo infinitesimo che oscilla parallelamente al campo magnetico. In questo caso nessun quanto viene emesso nella direzione del campo magnetico, per cui non è possibile osservare la componente π parallela al campo magnetico. La luce emessa perpendicolarmente al campo magnetico risulta polarizzata linearmente, per cui le oscillazioni del vettore E sono parallele al campo magnetico (vedere Fig. 3).

Viceversa, nel caso in cui $\Delta M_J = \pm 1$ la maggior parte dei quanti si spostano perpendicolarmente al campo magnetico. Questo caso corrisponde alla presenza di due dipoli paralleli le cui oscillazioni sono sfasate di 90°.

Dalla sovrapposizione dei due dipoli si ottiene una spirale elementare percorsa da corrente. In questo modo, nella direzione del campo magnetico viene emessa una radiazione luminosa polarizzata circolarmente; quando $\Delta M_J = +1$ si ha il verso positivo di rotazione cioè il verso antiorario, mentre con $\Delta M_J = -1$ il verso di rotazione è quello orario.

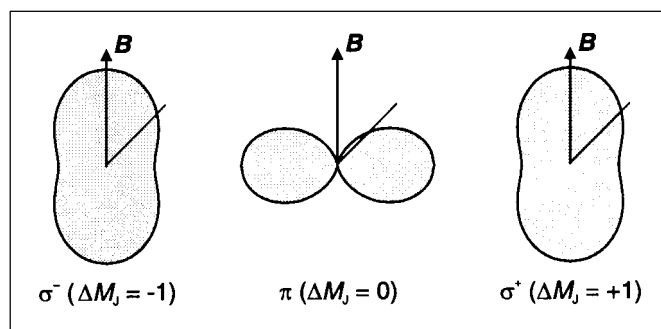


Fig. 2: Diagramma di radiazione del dipolo elettrico (ΔM_J : componente del momento angolare di emissione fotonica secondo la direzione del campo magnetico)

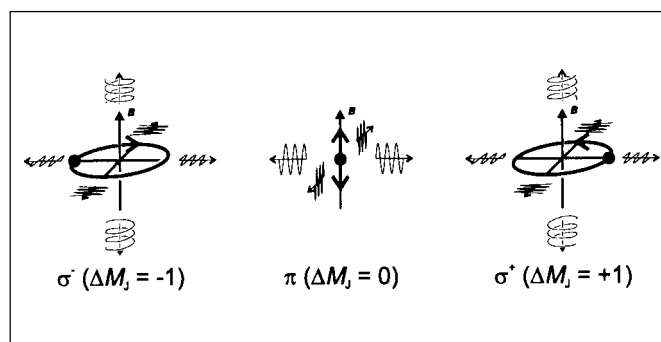


Fig. 3: Rappresentazione schematica della polarizzazione delle componenti di Zeeman

Spettroscopia delle componenti di Zeeman

L'effetto Zeeman permette di separare per via spettroscopica le componenti con diverso tipo di polarizzazione. Pertanto, se si vuole analizzare tale separazione è necessario ricorrere ad un analizzatore di spettro ad altissima risoluzione; ad esem-

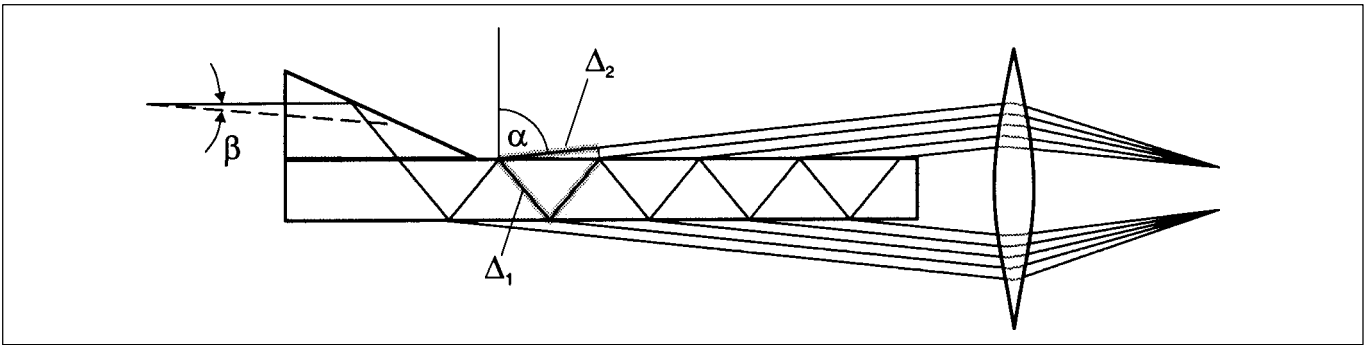


Fig. 4: Lamina di Lummer-Gehrcke come spettrometro ad interferenza (il percorso del raggio luminoso a tratto continuo si riferisce al caso di un angolo di incidenza $\beta = 0^\circ$). La differenza di percorso tra due raggi adiacenti è dato da:
 $\Delta = n \Delta_1 - \Delta_2$

pio, con una densità di flusso magnetico $B = 1 \text{ T}$, le due componenti σ delle righe rosse del cadmio vengono traslate di $\Delta f = 14 \text{ GHz}$ a cui corrisponde soltanto una variazione $\Delta \lambda = 0.02 \text{ nm}$.

In questo esperimento si utilizza una lamina di *Lummer-Gehrcke*. Questo componente viene realizzato con molta cura e precisione per quanto riguarda sia il parallelismo che l'elevato grado di finitura delle due superfici. I raggi luminosi vengono deviati verticalmente e fatti passare attraverso una fessura orizzontale tramite un prisma solidale alla lamina (vedere Fig. 4). All'interno della lamina, i raggi luminosi vengono riflessi alternativamente verso l'alto e verso il basso ed in corrispondenza di ogni riflessione parte di essi sono devianti verso l'esterno. Quando si raggiunge un angolo $\alpha \approx 90^\circ$, all'interno della lamina la riflessione è quasi totale poiché ancora non è stato raggiunto l'angolo limite. Il coefficiente di riflessione risulta molto elevato perciò, se la lamina è sufficientemente lunga, la maggior parte dei raggi luminosi interferiscono tra di loro. I raggi luminosi esterni si possono osservare con un cannocchiale focalizzato all'infinito posto subito dopo la lamina. In corrispondenza di una determinata lunghezza d'onda λ , sopra e sotto la lamina, si possono osservare due sistemi di righe orizzontali specularmente identiche. A ciascun angolo α con il quale i raggi luminosi emergono dalla lamina di *Lummer-Gehrcke* ed a ciascun angolo β di incidenza dei raggi sul prisma corrisponde una riga d'interferenza.

I raggi che emergono secondo l'angolo α_k interferiscono con i raggi adiacenti quando "a parità d'inclinazione" (vedere Fig. 4) soddisfano alla condizione:

$$\Delta = 2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_k} = k \cdot \lambda \quad \text{con } k = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{VII})$$

(Δ = differenza di percorso dei raggi luminosi, d = spessore della lamina, n = indice di rifrazione del vetro, k = ordine di interferenza)

Una variazione $\delta \lambda$ della lunghezza d'onda provoca una variazione angolare $\delta \alpha$ e quindi uno spostamento delle righe di interferenza. Se le righe presenti nello spettro comprendono più componenti che differiscono tra loro di $\delta \lambda$, tali righe si suddividono nelle varie componenti il cui numero dipende dalla differenza angolare $\delta \alpha$. Dalla scomposizione dello spettro nelle diverse righe di interferenza è possibile individuare se una riga contiene due o più componenti diverse.

Configurazione del sistema di misura

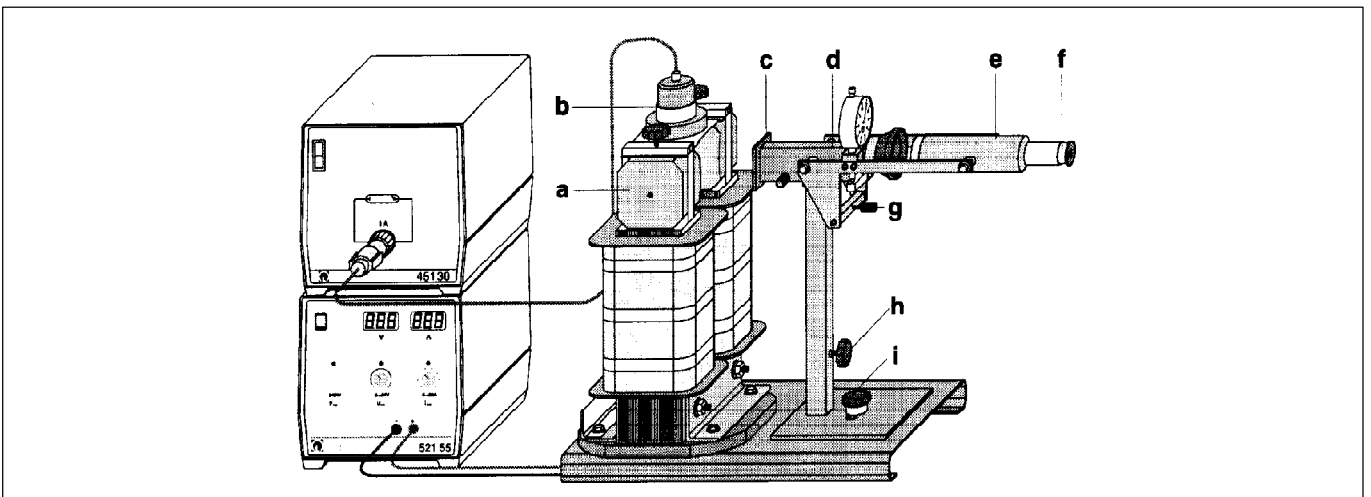
Operazioni iniziali:

La fig. 5 mostra, in prospettiva, la disposizione delle apparecchiature utilizzate per l'esperimento.

- Montare l'elettromagnete sul piano di base del sistema ottico. Nello stringere le viti esagonali (da 27) che si trovano nella parte inferiore, assicurarsi che l'elettromagnete sia ben solidale alla base di appoggio.

Fig. 5: Schema di montaggio delle apparecchiature utilizzate per l'esperimento sull'effetto Zeeman

- (a) espansioni polari
- (b) lampada al cadmio con portalamпада
- (c) sede di innesto del filtro rosso
- (d) coperchio
- (e) cannocchiale
- (f) oculare
- (g) regolazione altezza del cannocchiale
- (h) vite di arresto della colonna di sostegno
- (i) vite di arresto per la base della colonna di sostegno



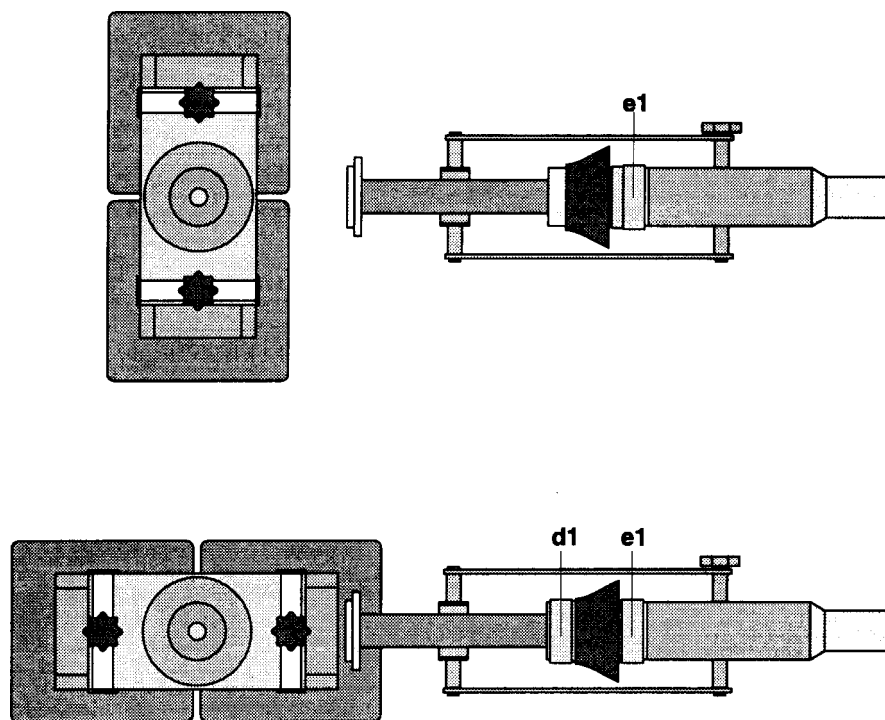


Fig. 6: Vista dall'alto del sistema di misura in configurazione trasversale (sopra) e longitudinale (sotto)
(d1) sostegno con lamina in quarto d'onda
(e1) sostegno con filtro di polarizzazione

- Montare le espansioni polari dell'elettromagnete (a) ad una distanza di 10 mm.
- Avvitare la lampada al cadmio (b) nel portalamпада con l'apertura rivolta verso i collegamenti elettrici dell'elettromagnete.
- Bloccare le espansioni polari ed il portalamпада mediante le viti di arresto e le staffe di sostegno.
- Ruotare la zona fusibili della lampada al cadmio ed orientarla verso i cavi elettrici di alimentazione in modo da non ostruire il raggio luminoso.
- Stringere la vite della colonna del sistema ottico facendo in modo che la base di sostegno sia più lontana possibile dall'elettromagnete.
- Togliere il coperchio (d) e collocare con cura la lamina di Lummer-Gehrcke sulla base ricoperta dallo strato di velluto. Assicurarsi che la lamina sia perfettamente orizzontale e che appoggi in modo uniforme per tutta la sua lunghezza. Fare scorrere il prisma il più vicino possibile al lato illuminato.
- Ruotare il coperchio in modo che l'attacco cilindrico sia rivolto verso il cannocchiale (e) ed appoggiarlo con cura senza disturbare la lamina di Lummer-Gehrcke. Quindi stringere le viti di arresto.
- Far scivolare il filtro rosso con la lente concentratrice nell'apposita sede (c).
- Per evitare interferenze con la luce ambiente, applicare uno schermo pieghevole sull'attacco cilindrico del coperchio ed un anello di gommapiuma sul cannocchiale.

Passaggio dall'osservazione trasversale a quella longitudinale:

- Allentare la vite di arresto (i) sulla base della colonna del sistema ottico e spostarla il più lontano possibile dall'elettromagnete.
- Togliere il filtro rosso con la lente concentratrice dalla sua sede.
- Ruotare l'elettromagnete con la lampada al cadmio nella direzione desiderata (vedere Fig. 6) ed orientarlo in modo tale che il lato del suo piano di base sia parallelo al lato interno della base del sistema ottico.
- Far scivolare il filtro rosso con la lente concentratrice nell'apposita sede.
- Avvicinare il più possibile la colonna del sistema ottico all'elettromagnete.

Collegamenti elettrici:

- Collegare la lampada al cadmio all'impedenza universale. Dopo aver chiuso l'interruttore, attendere cinque minuti in modo da ottenere un raggio luminoso sufficientemente intenso.
- Collegare in parallelo le bobine dell'elettromagnete (collegare il morsetto 1 al morsetto 3 ed il morsetto 2 al morsetto 4) e collegarle al generatore di corrente.

Regolazione del sistema ottico per osservare l'effetto Zeeman:
Regolare l'altezza del sistema ottico nel caso di configurazione longitudinale e non modificare tale regolazione quando si passa alla configurazione trasversale.

La regolazione del sistema ottico è ottimale quando le figure orizzontali rosse ottenute per interferenza presentano la massima luminosità ed il massimo contrasto sopra e sotto la lamina di Lummer-Gehrcke.

- Togliere l'oculare del cannocchiale (**f**); ottimizzare alternativamente la luminosità ed il contrasto
 - a) orientare il sistema ottico e spostarlo a sinistra e a destra lungo la base di appoggio (usare la vite di arresto (**i**));
 - b) regolare l'altezza del sistema ottico rispetto alla lamina al cadmio ed all'apertura delle espansioni polari (usare la vite di arresto (**h**)).
- Per migliorare la luminosità ed il contrasto delle righe, può essere necessario sollevare il coperchio oppure il filtro rosso con la lente concentratrice.

Regolazione fine:

Se il cannocchiale viene puntato sulla lamina di Lummer-Gehrcke con precisione, le righe d'interferenza appaiono distribuite uniformemente tra la superficie superiore e quella inferiore. Le righe interne risultano più luminose e quindi si possono osservare meglio.

- Illuminare l'oculare e mettere a fuoco il reticolo.
- Inserire nel cannocchiale l'oculare e spostarlo in modo tale da mettere a fuoco le righe di interferenza

Esecuzione dell'esperimento

Nota:

il filtro di polarizzazione è un po' più opaco della lamina in quarto d'onda.

a) Configurazione trasversale

- Inizialmente osservare le righe d'interferenza in assenza di campo magnetico ($I = 0$) ed orientare il cannocchiale in modo che il reticolo dell'oculare resti posizionato su una riga d'interferenza.
- Aumentare lentamente la corrente nel magnete a circa $I = 10$ A, in modo da ottenere la netta separazione di una riga dall'altra.

Per individuare le componenti π e le componenti σ

- Far scorrere l'anello di gommapiuma sopra il sostegno del filtro di polarizzazione.
- Mettere il sostegno con il filtro di polarizzazione (**e1**) davanti al cannocchiale (vedere Fig. 6) e ruotarlo attorno al proprio asse fino a far scomparire la riga che si trova al centro della tripletta di righe.
- Ruotare di altri 90° il sostegno con il filtro di polarizzazione in modo da far scomparire le altre due componenti della tripletta.

b) Configurazione longitudinale:

- Inizialmente osservare le righe d'interferenza in assenza di campo magnetico ($I = 0$) ed orientare il cannocchiale in modo che il reticolo dell'oculare resti posizionato su una riga d'interferenza.
- Aumentare lentamente la corrente nel magnete a circa $I = 10$ A, in modo da ottenere la netta separazione di una riga dall'altra.

Per individuare la componente σ^+ e la componente σ^- :

- Far scorrere lo schermo pieghevole sopra il sostegno della lamina in quarto d'onda.
- Montare il sostegno con la lamina in quarto d'onda (**d1**) sull'attacco cilindrico del coperchio ed il sostegno con il filtro di polarizzazione (**e1**) davanti al cannocchiale (vedere Fig. 6).
- Ruotare il sostegno con il filtro di polarizzazione attorno al proprio asse fino a far scomparire una delle due componenti, ruotarlo di altri 90° in modo da far scomparire l'altra componente.

Esempio di misura e valutazione dei risultati

a) Configurazione trasversale

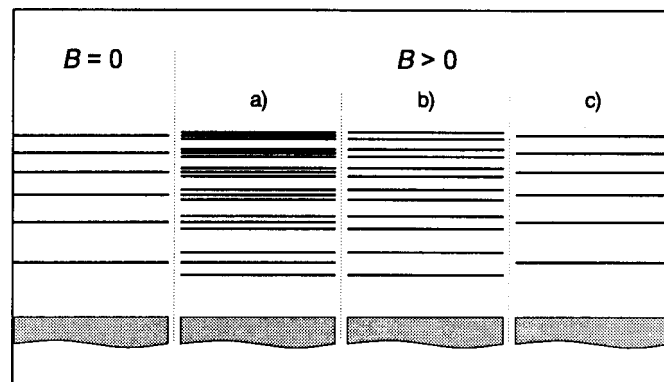


Fig. 7: Figura d'interferenza per l'effetto Zeeman in configurazione trasversale

- a) risultato senza filtro di polarizzazione
- b) risultato con direzione di polarizzazione del filtro perpendicolare al campo magnetico
- c) risultato con direzione di polarizzazione del filtro parallela al campo magnetico

b) Configurazione longitudinale

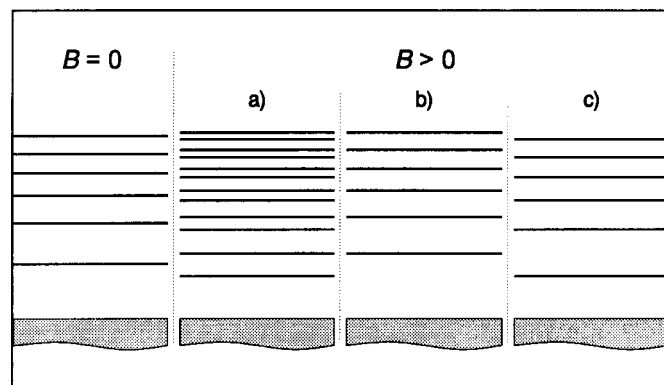


Fig. 8: Figura d'interferenza per l'effetto Zeeman in configurazione longitudinale

- a) risultato senza lamina in quarto d'onda e senza filtro di polarizzazione
- b), c) risultato con lamina in quarto d'onda e filtro di polarizzazione per dimostrare l'esistenza della polarizzazione circolare in verso orario ed antiorario.

Informazioni supplementari

L'intensità complessiva di tutte le componenti di Zeeman è la stessa in tutte le direzioni. Nel caso di osservazione trasversale, l'intensità della componente π è uguale all'intensità complessiva delle due componenti σ .