

Observación del efecto Zeeman normal en configuración transversal y longitudinal

Espectroscopía con un etalón de Fabry-Perot

Objetivos del experimento

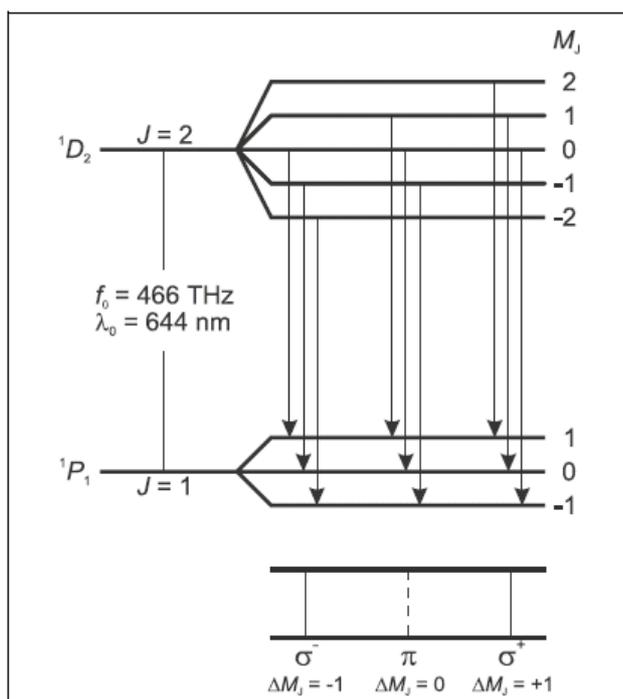
- Observación del triplete de líneas con el efecto Zeeman normal y transversal.
- Determinación del estado de polarización de los componentes del triplete.
- Observación del doblete de líneas con el efecto Zeeman normal y longitudinal.

Fundamentos

Efecto Zeeman normal:

Se denomina efecto Zeeman al desdoblamiento de los niveles de energía atómicos o bien de las líneas espectrales en presencia de un campo magnético externo. Este efecto fue predicho por H. A. Lorentz en 1895 en el marco de su teoría clásica de los electrones y confirmada experimentalmente un año después por P. Zeeman. Zeeman observó que perpendicularmente a un campo magnético, en lugar de una línea espectral, se encontraba un triplete de líneas, y que paralelo a dicho campo se encontraba un doblete de líneas. Más tarde fueron descubiertos

Fig. 1 Desdoblamiento de y transiciones en el efecto Zeeman normal para el cadmio



desdoblamientos más complicados de líneas espectrales, lo que recibió el nombre de efecto Zeeman anómalo. A fin de brindar una explicación, Goudsmit y Uhlenbeck enunciaron en 1925 la hipótesis del spin del electrón. Se dijo entonces que el efecto Zeeman anómalo era el que seguía la regla y que el efecto Zeeman normal constituía la excepción.

El efecto Zeeman normal aparece sólo en transiciones entre estados atómicos con spin total $S = 0$. El impulso angular total $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$ de un estado es, luego, un impulso angular orbital puro ($\mathbf{J} = \mathbf{L}$). Para el momento magnético relacionado se tiene sencillamente

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

con

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

($m_B =$ magnetón de Bohr, $m_e =$ masa del electrón,

$e =$ carga elemental, $\hbar = h/2\pi$, $h =$ constante de Planck).

La energía

$$E = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} \quad (III)$$

que se debe a la presencia de un campo magnético externo de inducción \mathbf{B} , está ligada al momento magnético. La componente del impulso angular en la dirección del campo magnético puede adoptar los valores

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

Es por eso que el término con el impulso angular \mathbf{J} se desdobra en $2J + 1$ componentes de Zeeman, que se diferencian entre sí en el valor de M_J . La diferencia energética entre las componentes contiguas M_J y M_{J+1} es

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

Se puede observar el efecto Zeeman normal en, por ejemplo, la línea espectral roja del cadmio ($\lambda_0 = 643,8 \text{ nm}$, $f_0 = 465,7 \text{ THz}$). Esta línea corresponde a la transición 1D_2 ($J = 2, S = 0$) \rightarrow 1P_1 ($J = 1, S = 0$) de un electrón de la quinta capa (ver figura 1). En un campo magnético, el nivel 1D_2 se desdobra en cinco componentes Zeeman, y el nivel 1P_1 en tres, con la diferencia energética calculada con la ecuación (V).

Equipo

1 lámpara de cadmio para efecto Zeeman	451 12
1 núcleo en U con yugo	562 11
2 bobinas, 10 A, 480 vueltas	562 131
1 par de expansiones polares con orificio grande	560 315
1 etalón de Fabry-Perot	471 221
2 lentes focales cóncavas en montura, 150 mm	460 08
1 disco de cuarto de longitud de onda	472 601
1 filtro de polarización	472 401
1 soporte con muelles	460 22
1 juego de filtros cromáticos, primarios o bien	467 95
1 apoyo para filtro de interferencia	468 41
1 filtro de interferencia 644 nm	468 400
1 ocular con regla graduada	60 135
1 banco de óptica con perfil normal, 1 m ...	460 32
1 jinetillo con rosca	460 358
7 jinetillos ópticos 60/50	460 351
1 bobina de reactancia universal para 451 12	451 30
1 fuente de alimentación de alta corriente .	521 55
cables con conductor de sección 2,5 mm ²	

Las transiciones ópticas entre estos niveles son solamente posibles en forma de radiación por dipolos eléctricos. Aquí tienen validez las siguientes reglas de selección para los números cuánticos M_J de los estados relacionados:

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

Se observan en total tres líneas espectrales (ver figura 1), de las cuales la componente π no sufre corrimiento, mientras que ambas componentes σ

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

sufren un corrimiento frente a la frecuencia de salida. ΔE es aquí el desdoblamiento equidistante de energía calculado en (V).

Indicaciones para la seguridad

Los cables de conexión de la lámpara de cadmio están expuestos, al igual que las resistencias de los electrodos de encendido.

- Evitar todo contacto con las partes que conducen corriente.

Los objetos ferromagnéticos sueltos pueden ser atraídos por electroimanes de gran fuerza y dañar las ampollas de cuarzo de la lámpara de cadmio.

- Antes de dar corriente al imán controlar que los terminales polares estén bien atornillados.

- No manejar objetos ferromagnéticos cerca de la lámpara de cadmio mientras circule corriente por el imán.

La ampolla de cuarzo de la lámpara de cadmio se rompe al ser calentada, si se encuentra con rastros de grasa de las manos en su superficie.

- Por ese motivo, no tocar jamás la lámpara de cadmio directamente con las manos.

Distribución angular y polarización:

Según su componente del impulso angular ΔM_J en la dirección del campo magnético, los fotones emitidos presentan distintas distribuciones angulares. La figura 2 muestra las distribuciones angulares como diagramas polares bidimensionales. Pueden ser observadas de manera experimental, ya que el campo magnético describe un eje común a todos los átomos de cadmio.

El caso $\Delta M_J = 0$ corresponde, en la representación clásica, al dipolo de Hertz, que oscila paralelo al campo magnético. En la dirección del campo magnético no se emiten quanta, o sea, paralelamente al campo magnético no se puede observar la componente π . La luz emitida perpendicularmente al campo magnético está polarizada linealmente, mientras que el vector E oscila en la dirección del dipolo, esto es, paralelo al campo magnético (ver figura 3).

Por el contrario, en el caso $\Delta M_J = \pm 1$, la mayoría de los quanta se dirigen en la dirección del campo magnético. En la representación clásica, este caso corresponde a dos dipolos perpendiculares entre sí que oscilan con una diferencia de fase de 90° . La superposición de ambos dipolos no produce ninguna corriente circular. Por ese motivo, en la dirección del campo magnético se emite luz polarizada circularmente: para $m = 1$, circular a la derecha, y para $m = -1$, circular a la izquierda (ver figura 3).

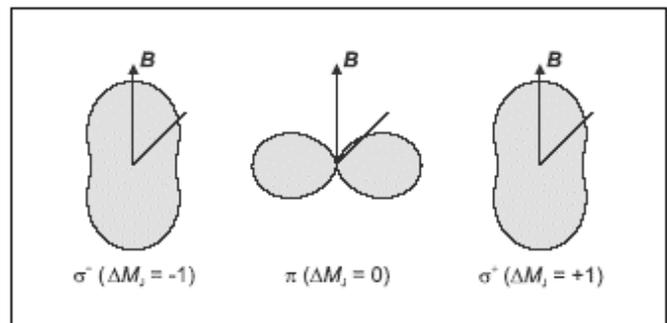


Fig. 2 Distribución angular de la radiación eléctrica del dipolo (ΔM_J : dirección del impulso angular de los fotones emitidos en dirección del campo magnético)

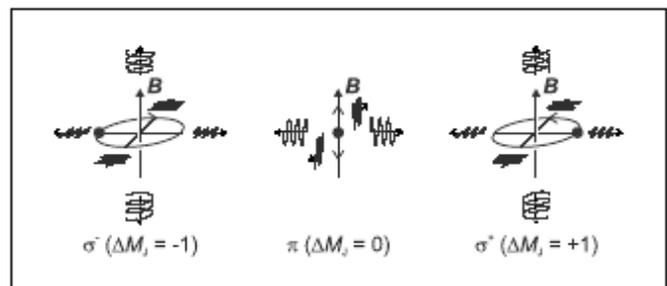


Fig. 3 Distribución angular de la radiación eléctrica del dipolo (ΔM_J : dirección del impulso angular de los fotones emitidos en dirección del campo magnético)

Espectroscopía de las componentes de Zeeman

El efecto Zeeman posibilita la separación espectroscópica de las componentes polarizadas de manera diferente. Para comprobar el corrimiento se necesita, de todas maneras, un aparato espectral de gran resolución, ya que ambas componentes σ de la línea roja de cadmio son corridas, por ejemplo para una inducción magnética $B = 1$ T, tan sólo en $\Delta f = 14$ GHz, o sea, en $\Delta \lambda = 0,02$ nm.

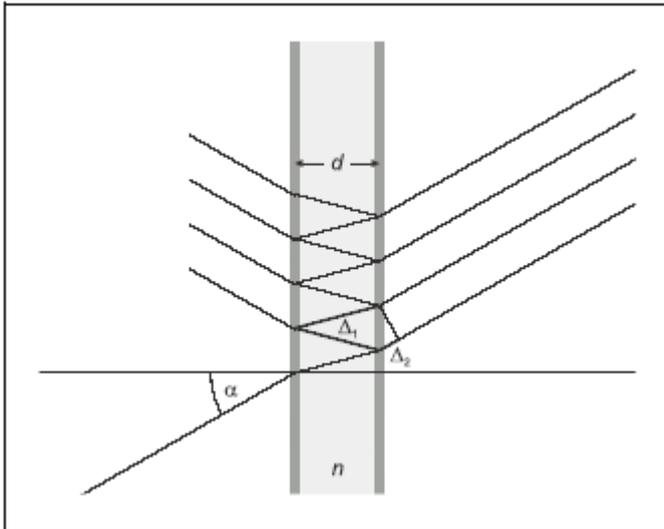


Fig. 4 Etalón de Fabry-Perot como espectrómetro de interferencia. Se observa la marcha del haz para un ángulo $\alpha > 0$ respecto del eje óptico. La diferencia óptica de camino entre dos haces que salen uno al lado del otro es de $\Delta = n \cdot \Delta_1 - \Delta_2$.

$$\Delta = 2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_k} = k \cdot \lambda \quad \text{(VIII)}$$

(Δ = diferencia óptica de camino, d = espesor del etalón, n = índice de refracción del vidrio, k = orden de interferencia).

Una variación en la longitud de onda de $\delta\lambda$ se hace observable como una variación de la abertura angular de un anillo de $\delta\alpha$. Según la distancia focal de la lente, una abertura angular de α corresponde a un radio r , y la variación de abertura angular $\delta\alpha$ corresponde a una variación del radio de δr . Si una línea espectral posee varias componentes a distancia $\delta\lambda$, entonces cada anillo de interferencia se desdobra en tantas componentes a distancia radial δr como corresponda. Luego, se reconoce un doblete de líneas espectrales en una estructura de doblete, y un triplete de líneas espectrales en la estructura de triplete de los anillos de interferencia.

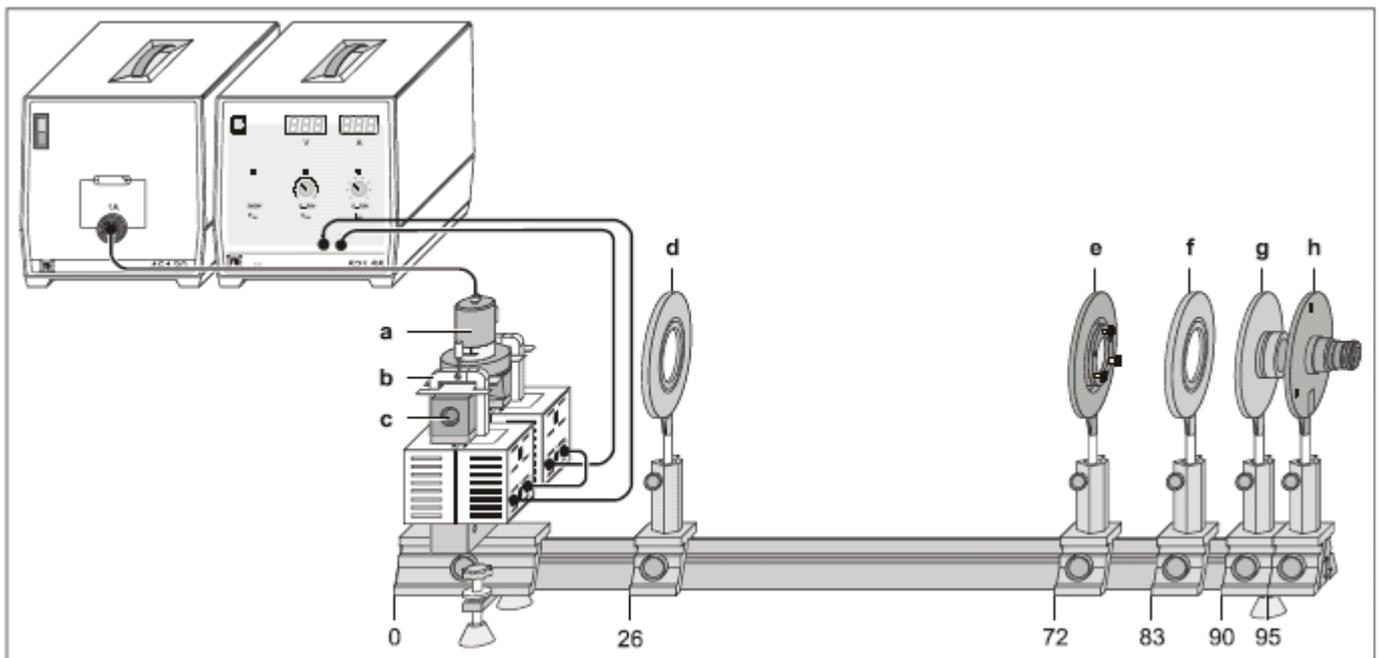
En el experimento se utiliza un etalón de Fabry-Perot. Se trata de un disco de vidrio de un alto planoparalelismo, espejado en ambas caras. La luz levemente divergente entra en el etalón, normal al eje óptico, y es reflejada varias veces hacia uno y otro lado mientras que una parte sale en cada reflejo (ver figura 4). Debido al espejado, la parte que sale en cada reflexión es pequeña, lo cual permite que muchos haces que salen interfieran unos con otros. Los haces salientes son enfocados detrás del etalón mediante una lente hacia el plano focal de ésta. Con un ocular puede observarse allí, para una longitud de onda λ , un sistema de anillos concéntricos. La abertura angular de un anillo es idéntica al ángulo de salida α de los haces parciales del etalón de Fabry-Perot.

Los haces que salen con un ángulo α_k interfieren entre sí de manera constructiva, si dos haces vecinos cumplen la condición de interferencia para "curvas de igual pendiente" (ver figura 4):

Montaje

La figura 5 muestra el montaje completo del experimento en configuración transversal.

Fig. 5 Montaje del experimento para el efecto Zeeman en configuración transversal, con posiciones indicadas en cm para el borde izquierdo del jinetillo óptico.
a lámpara de cadmio con portalámparas
b grapas
c terminales polares
d lente convergente, $f = 150$ mm (lente condensadora)
e etalón de Fabry-Perot
f lente convergente, $f = 150$ mm (lente de imagen)
g filtro cromático (rojo) con soporte
h ocular con regla graduada



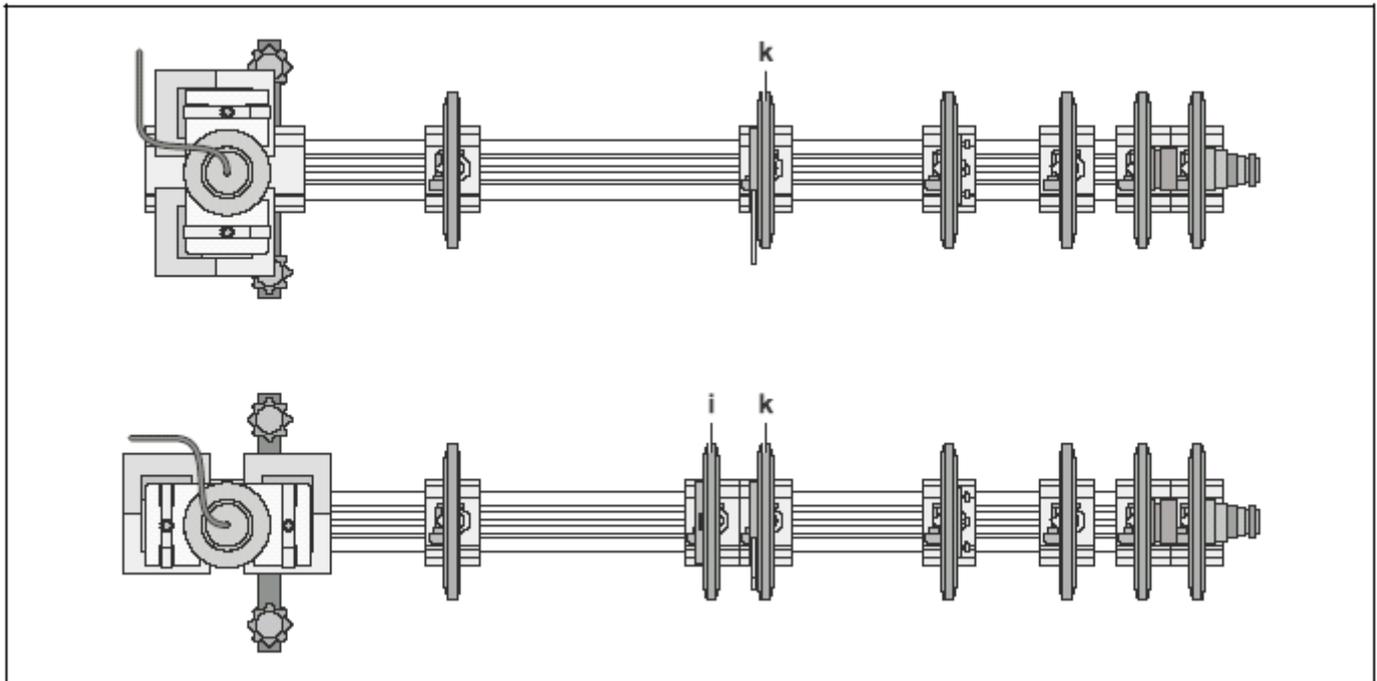


Fig. 6 Montaje en configuración transversal (arriba) y en configuración longitudinal (abajo), visto desde arriba
 i disco de cuarto de longitud de onda
 k filtro de polarización

Montaje mecánico y óptico:

- Atornillar la varilla roscada en el jinetillo con rosca.
- Colocar en el jinetillo el núcleo en U a través de la varilla roscada para que éste gire libremente, y colocar las bobinas.
- Mediante las grapas montar los terminales polares y el portalámparas de la lámpara de cadmio de manera que entre los terminales polares exista una distancia de aproximadamente 10 mm y la abertura del portalámparas mire hacia adentro; no ajustar aún los tornillos de las grapas.
- Deslizar con cuidado la lámpara de cadmio entre los terminales polares.
- La lámpara de cadmio debe encontrarse exactamente en la mitad de los terminales polares, la zona de fundición de la ampolla de vidrio debe mirar hacia atrás, y los cables lo más lejos posible del paso de los haces.
- Acercar entre sí con cuidado los terminales polares para trabajar después con un campo magnético mayor.
- Fijar con los tornillos de la grapa los terminales polares y el portalámparas.
- Montar los componentes ópticos según muestra la figura 5.

Conexión eléctrica:

- Conectar la lámpara de cadmio a la bobina universal de reactancia. Tras el encendido, esperar 5 minutos hasta lograr una emisión de luz suficientemente fuerte.
- Conectar en serie las bobinas del electroimán y enchufar a la fuente de alta corriente.

Ajuste del iluminador:

Indicación: El montaje tiene un ajuste óptimo cuando el patrón de interferencia es claro y contrastante, y el centro del sistema de anillos yace sobre la regla graduada. No ubicar aún el filtro de polarización ni el disco de cuarto de longitud de onda a fin de que la imagen observada sea lo más clara posible.

- Enfocar nítidamente el ocular sobre la regla graduada.
- Deslizar la lente de la imagen hasta que pueda observarse una imagen nítida del sistema de anillos.
- Deslizar la lente condensadora hasta que la imagen observada esté iluminada lo más parejo posible.
- Volcando levemente el etalón de Fabry-Perot con el tornillo de posición, correr el centro del sistema de anillos a la mitad de la regla graduada.

En caso de que el margen de corrección no sea suficiente:

- Girar el etalón de Fabry-Perot con todo el zócalo, o bien, adaptar entre sí la altura de la lente de imagen y el ocular.

Realización**a) Observación en configuración transversal:**

- Primero observar el patrón de anillos de interferencia sin campo magnético ($I = 0$ A).
- Aumentar la corriente por el imán a aproximadamente $I = 3$ A, hasta que los anillos desdoblados estén claramente separados unos de otros.

Para diferenciar entre las componentes π y σ :

- Ubicar el filtro polarizador en el paso de los haces (ver figura 6) y girar 90° hasta que desaparezcan sendas componentes externas de la estructura de triplete.
- Girar el filtro de polarización a 0° hasta que la componente del medio (no desplazada) desaparezca.

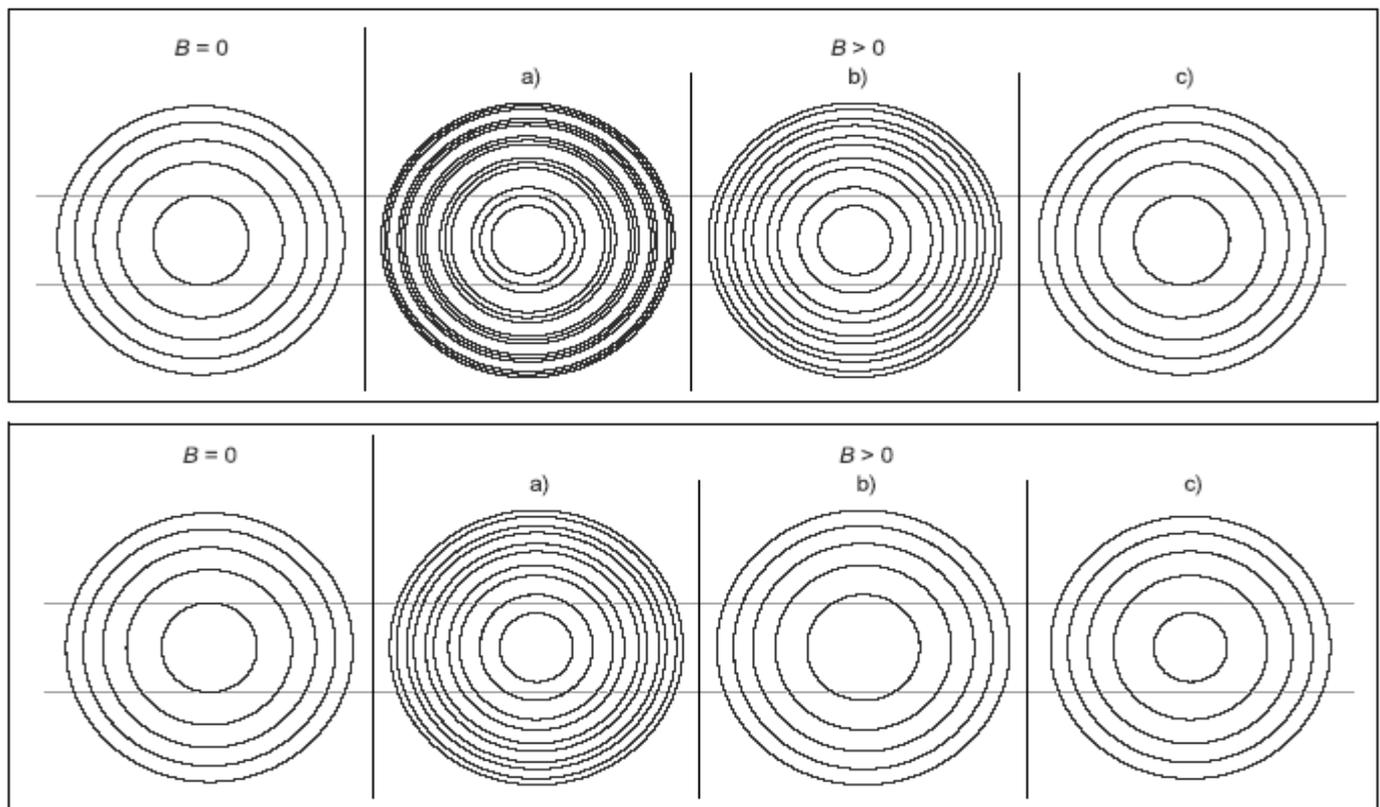
b) Observación en configuración longitudinal:

- Girar 90° todo el montaje de la lámpara de cadmio con los terminales polares sobre el jinetillo con rosca.
- Primero observar el patrón de anillos de interferencia sin campo magnético ($I = 0$ A).
- Aumentar la corriente por el imán a aproximadamente $I = 3$ A, hasta que los anillos desdoblados estén claramente separados unos de otros.

Para diferenciar entre las componentes σ^+ y σ^- :

- Además, interponer en la marcha del haz un disco de cuarto de longitud de onda, entre la lámpara de cadmio y el filtro de polarización (ver Fig. 6), y, girándolo, llevarlo a 0° .
- Girar el filtro de polarización y llevarlo a $+45^\circ$ y -45° hasta que en cada caso desaparezca una de las dos componentes del doblete.

Fig. 7 (Arriba) Patrón de interferencia en el efecto Zeeman, configuración transversal
 a) sin filtro de polarización
 b) dirección de polarización perpendicular al campo magnético
 c) dirección de polarización paralela al campo magnético

**Ejemplo de medición y análisis**

a) Observación en configuración transversal: Ver figura 7.

b) Observación en configuración longitudinal: Ver figura 8.

Información adicional

La suma de la intensidad de todas las componentes de Zeeman es igual en todas las direcciones espaciales. Por lo demás, para una observación transversal, la intensidad de la componente π corresponde a la intensidad total de las componentes σ .

Fig. 8 (Abajo) Patrón de interferencia en el efecto Zeeman, configuración longitudinal
 a) sin disco de cuarto de longitud de onda ni filtro de polarización
 b), c) con disco de cuarto de longitud de onda y filtro de polarización para comprobar la polarización circular