

Guía de laboratorio

FÍSICA MODERNA



uniandes

Departamento de Física

2021

Física Moderna
Guías de laboratorio

Revisión

Jose Ricardo Mejía
Nicolás Berrío



Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia-2021

Índice

1. Efecto fotoeléctrico	1
2. Espectros de átomos y espectrografía	3
3. Espectro de hidrógeno y deuterio	6
4. Efecto Zeeman	8
5. Radioactividad	11

Experimento 1

Efecto fotoeléctrico

El premio Nobel en física en el año 1921 se otorgó a Albert Einstein “*por sus aportaciones a la física teórica y, especialmente, por el descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico.*”

Objetivos

- * Estudiar la emisión de electrones por una superficie metálica iluminada.
- * Usar los electrones para determinar la energía de los fotones incidentes.
- * Mostrar cómo la energía de los fotones depende del color.
- * Mostrar que esa energía no depende de la intensidad de la luz.

Materiales

Celda fotoeléctrica, Láser con diferentes frecuencias LEDs de varios colores, fuente de voltaje, microamperímetro, voltímetro. El circuito mostrado está muy simplificado. No muestra la alimentación de los LEDs ni la del amperímetro.

Las longitudes de onda de los picos o máximos de emisión de los LEDs disponibles son:

• Rojo 659 nm • Ámbar 590 nm • Verde 567 nm • Azul 469 nm

(longitudes de onda medidos por Benjamín Oostra. Los picos tienen un ancho “FWHM” de unos 30 nm).

Marco Teórico

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno físico en el cual láminas de metal, al ser iluminadas con una fuente de luz producen cargas eléctricas. Estas cargas eléctricas emitidas son electrones, llamados también *fotoelectrones*. En

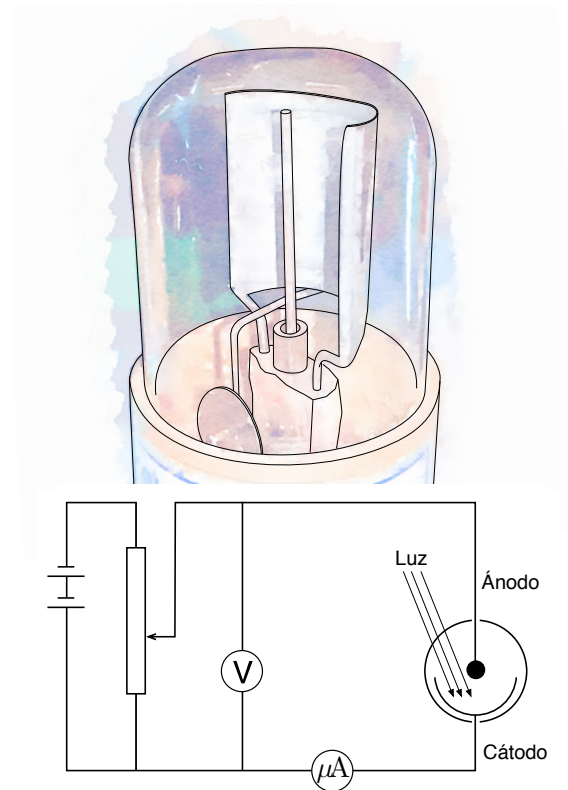


Figura 1.1: Montaje experimental

1902, Philip Lenard descubrió que la energía cinética a la que se emiten estos fotoelectrones no depende de la intensidad de la luz y que además, esta energía cinética aumenta con la frecuencia de la luz incidente. Fue en 1905 que Albert Einstein introduce el concepto de *cuantos de luz* o fotones con energía hf con el fin de explicar este fenómeno. Cuantitativamente la ecuación que describe al efecto fotoeléctrico se puede expresar como

$$\phi + K_{\max} = hf, \quad (1.1)$$

donde K_{\max} es la energía cinética máxima de los foto-

electrones, $h = 6,6260664 \times 10^{-34}$ Js es la constante de Planck, f es la frecuencia del fotón incidente. El parámetro ϕ se denomina *función de trabajo* y depende del material e indica la energía mínima necesaria para desprender un fotoelectrón.

Durante el experimento, los fotoelectrones se frenarán con una diferencia de potencial V por lo que $K_{\max} = eV$.

Ejercicios

1. Haga un resumen de importancia conceptual e histórica del efecto fotoeléctrico.
2. Investigue los valores experimentales de ϕ para diferentes metales.
3. Demuestre que usando la teoría clásica ondulatoria, la energía cinética de los electrones emitidos depende de la intensidad I mas no de la frecuencia f . Suponga que la luz llega con intensidad uniforme sobre la placa de área A . Ayuda: Encuentre la energía de la onda incidente en términos de la intensidad, el área y un intervalo de tiempo Δt , iguale esta energía a la energía cinética del electrón desprendido (tenga en cuenta la función de trabajo ϕ).

Con su expresión, encuentre el tiempo Δt que le tomaría a un electrón para desprenderse de la placa metálica de sodio. Use como área el área circular correspondiente a un radio atómico $r = 0.1$ nm. Como intensidad use $I = 1.0 \times 10^{-7}$ mW/cm² y $\phi = 2.28$ eV. Con estos datos experimentalmente se ve una corriente de fotoelectrones. Comente sus resultados.

Procedimiento

Conectamos todo el circuito con mucho cuidado. Antes de poner los LEDs sobre la fotocelda, verificamos que ella funciona: El micro-amperímetro debe acusar una corriente, que debe disminuir al cubrir la fotocelda (por ejemplo, con la mano).

Para ajustar el cero de la escala del microamperímetro:

1. Desconectar el cable que lo une con la fotocelda (para que no haya corriente);
2. Mantener oprimido el botón rojo (para maximizar la sensibilidad del instrumento);
3. Girar la perilla “zero adjust” hasta que la aguja indique “cero”.

Sobre la celda fotoeléctrica colocamos una caperuza que, además de contener varios LEDs de cierto color, también

excluye la luz del ambiente. Conectamos los LEDs. La caperuza no se debe mover durante la medición, para que la luz tenga intensidad constante.

El voltaje de frenado se obtiene de una fuente que fijamos en unos 2 voltios. Lo variamos usando el potenciómetro instalado junto a la celda. Lo medimos con un voltímetro.

En el micro-amperímetro observamos la corriente de electrones emitidos. Aumentamos el voltaje de frenado para lograr corrientes de 10... 9.5... 9.0... hasta 0.5 ($\times 10^{-8}$ A). Para cada corriente anotamos el voltaje. Para medir corrientes aún más pequeñas oprimimos el botón rojo que multiplica por 10 la sensibilidad del medidor. Seguimos aumentando el voltaje de frenado y midiendo corrientes y voltajes. De esta manera determinamos el voltaje de corte que justo anula la corriente. Repetimos para todas las caperuzas de colores.

Para uno de los colores repetimos la medición con una intensidad diferente. Una manera de disminuir la intensidad es girar los LEDs para que no iluminen la celda de frente. La idea de esto es mostrar que la corriente disminuye, pero el voltaje de corte sigue siendo el mismo, es decir, no depende de la intensidad de la luz. ¿Se cumple? ¿Qué significa?

Análisis

Graficamos I contra V para cada LED. ¿Cómo se podría modelar y explicar esta curva? ¿Tiene algo que ver con la Ley de Ohm? Con ayuda de la gráfica determinamos el voltaje de corte para cada color. Este voltaje, multiplicado por la carga del electrón, es la energía máxima de los electrones (¿por qué?). Esta coincide con la energía de los fotones (¿por qué?)

Conociendo las longitudes de onda emitidas por los LEDs calculamos las correspondientes frecuencias y sus incertidumbres. Se grafica energía contra frecuencia. Esperamos comprobar que la energía es proporcional a la frecuencia. A partir de la gráfica se obtiene la constante de Planck, la frecuencia mínima, y la “función de trabajo” del material con sus respectivas incertidumbres. ¿Con esta información se puede determinar el metal con que está construida la celda?

Experimento 2

Espectros de átomos y espectrografía

Objetivos

- * Medir las longitudes de onda emitidas por un átomo de hidrógeno, y comprobar que se ajustan a la fórmula de Balmer.
- * Determinar la constante de Rydberg.
- * Medir algunas líneas espectrales de otros elementos.
- * Grabar con una cámara varios espectros de líneas de emisión
- * Observar 4 líneas de hidrógeno (de la serie de Balmer)
- * Usar el espectro de hidrógeno para calibrar la escala horizontal de las imágenes
- * Con la escala calibrada medir las longitudes de onda de otros espectros.
- * Medir la estructura fina de la línea amarilla del mercurio.

Preparación

Ejercicio 1

Investigue y haga un resumen sobre los siguientes temas:

Espectros atómicos. Longitudes de onda del hidrógeno en el espectro visible. Fórmula de Balmer y constante de Rydberg. Difracción en una rejilla. ¹

Ejercicio 2

- a) Suponga que el electrón en un átomo de hidrógeno obedece la mecánica clásica en vez de la mecánica cuántica. ¿Por qué ese átomo hipotético emite un espectro continuo en vez de las líneas espectrales que se observan?

¹Debe consultar la NIST. Pregunte a su profesor por ayuda en la interpretación de los datos allí suministrados.

- b) Muestre que la fórmula de Balmer:

$$\lambda = C_2 \left(\frac{n^2}{n^2 - 2^2} \right), \quad (2.1)$$

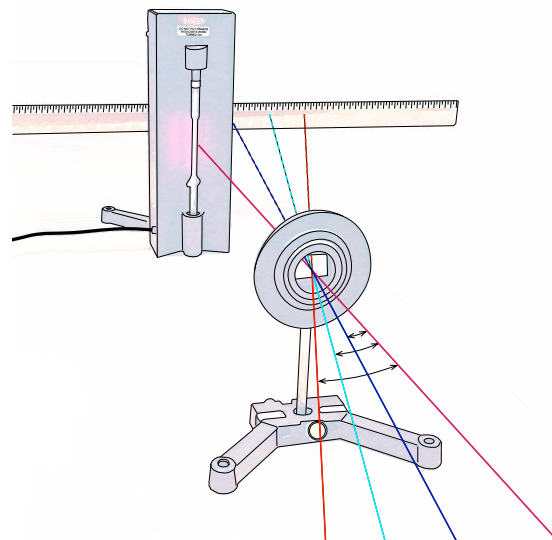
se reduce a la fórmula de Rydberg:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (2.2)$$

donde $2^2/C_2 = R$. Verifique que $2^2/C_2$ tiene el mismo valor numérico que R .

Equipo

Tubos espectrales (hidrógeno y otro) con su fuente, LEDs con su fuente, rejilla de difracción, regla. Opcional: una pantalla negra u otro objeto oscuro sirve como fondo. Tubos con hidrógeno y mercurio con su fuente de voltaje; rejilla de difracción, cámara, computador. Es mejor que la rejilla esté pegada a la cámara (recostada contra ella), no en un soporte separado. Cada grupo debe tener cómo llevarse sus imágenes.



Procedimiento en presencial

Instalamos un tubo de hidrógeno en posición vertical. A un metro del tubo se instala la cámara. Pegada a la cámara se coloca una rejilla de difracción, verificando que la difracción disperse la luz en sentido horizontal.

Se conecta la cámara al computador y se activa el Logitech Webcam Software. Elegimos “Captura rápida” y desactivamos el RightLight para elegir manualmente la velocidad (tiempo de exposición) adecuada (en el menú “Configuración Avanzada”). También es conveniente ajustar manualmente la “ganancia” o sensibilidad de la cámara, y poner en mínimo la “intensidad del color”, de modo que las imágenes queden en blanco y negro. Curiosamente la espectrografía funciona mejor así. Para reconocer una línea por su color se puede aumentar momentáneamente la “intensidad de color”, pero para grabar las imágenes es mejor dejarla en cero.

Además se puede ajustar la resolución (tamaño en píxeles) de la imagen y un factor de aumento (“zoom”). Para este experimento se recomienda usar la opción “pantalla panorámica” y la resolución grande (720). Además usamos inicialmente el “zoom” mínimo.

Encendemos el tubo y giramos la cámara para que capte el tubo (en orden cero) y el espectro de primer orden. El fondo debe ser oscuro. Se puede girar la fuente (alrededor de su eje vertical) para que la cámara no capte el reflejo de la luz sobre la fuente.

Inicialmente ponemos el tiempo de exposición mínimo para que en el espectro se vean sólo las líneas más brillantes del hidrógeno, y grabamos esa imagen. Luego tomamos más fotos, aumentando cada vez el tiempo de exposición (pero sin mover el tubo ni la cámara!); la imagen directa del tubo quedará saturada, y también las líneas espectrales más brillantes, pero se podrá ver las líneas más débiles. Cuando el tiempo de exposición está en máximo, todavía queda la opción de aumentar la sensibilidad (ganancia). De esta manera esperamos ver 5 líneas de Balmer. También hay emisión de luz en el sector amarillo; esto no pertenece a la serie de Balmer, y es más fuerte en los extremos del tubo, pudiendo ser insignificante en el centro. Esta emisión amarilla se debe al hidrógeno molecular (H_2) que no se disocia en átomos individuales.

Luego se cambia el tubo de hidrógeno por el de mercurio, sin cambiar la configuración de la cámara. Se toman las imágenes de la misma manera: tiempos cortos para las líneas fuertes, y tiempos largos para las líneas débiles.

La línea amarilla del mercurio es doble (tiene estructura fina). Esto se ve fácilmente poniendo la rejilla delante del ojo, pero en las fotos probablemente no se ha visto has-

ta ahora. Las longitudes de onda son 577 nm y 579 nm. Para poder resolver la línea doble, aumentamos al máximo el “zoom” de la cámara y centramos las líneas verde y amarilla del mercurio. Además se puede usar el espectro de segundo orden. Buscamos un tiempo de exposición adecuado y grabamos la doble línea amarilla, teniendo cuidado de incluir también la línea verde (para calibración de λ).

Análisis

Abrimos la imagen de hidrógeno con IRIS. Trazamos un perfil horizontal a través de todas las líneas espectrales, incluyendo la imagen directa. Esto se puede hacer con “slice”, pero hay maneras mejores:

Nota: Comandos útiles de IRIS

En IRIS se puede abrir un cuadro para escribir comandos. Para mejorar este experimento pueden ser útiles los comandos “tilt” y “slant” (para enderezar la imagen), el comando l_{add} para sumar varios renglones (20, o 100...) y el comando l_{plot} para extraer el perfil de dicha suma.

Sobre el perfil medimos en pixels las posiciones de las líneas. En las imágenes con poca luz (exposiciones cortas) medimos las posiciones de las líneas espectrales más brillantes y de la imagen directa del tubo. Sobre las imágenes de mayor tiempo medimos las posiciones de las líneas más débiles.

Una vez tengamos todas las posiciones, a cada posición restamos la posición de la imagen directa. Esta operación nos da las distancias medidas en pixels. Luego graficamos longitudes de onda (en y) versus distancias (en x). Interpolamos los puntos mediante una función cuadrática. Evaluamos la precisión de este ajuste (por ejemplo, calculando las longitudes de onda mediante la ecuación, restandoles las longitudes de onda nominales, y calculando la dispersión de las diferencias).

La ecuación de esta interpolación es la función de calibración que podemos asumir válida para los otros espectros, siempre que no hayamos cambiado la rejilla ni la configuración de la cámara. De esta manera usamos el hidrógeno como espectro de calibración.

Sobre las imágenes de mercurio medimos (en pixels) las posiciones las líneas espectrales a partir de la imagen directa del tubo. Con la función de calibración calculamos las longitudes de onda. Confrontamos estos resultados con las longitudes de onda encontrados en la literatura² y evaluamos la precisión del método.

²Consultar la NIST

En la imagen de mercurio con “zoom” alto naturalmente ya no vale la calibración que obtuvimos del hidrógeno. Para calibrar la escala de esta imagen, medimos las posiciones de la línea verde y de la línea amarilla conjunta, y les asignamos las longitudes de onda ya conocidas (que medimos en el paso anterior). Con esta calibración medimos la separación (en ángstrom o nanómetros) de las dos líneas amarillas.

¿Qué tan anchas son las líneas espectrales en la imagen? Expresamos este ancho en unidades de longitud de onda ($\Delta\lambda$) y calculamos (para varias líneas) la cantidad $R = \lambda/\Delta\lambda$. Este número es conocido como la resolución espectral del instrumento. La calculamos para las dos configuraciones que hemos usado (zoom bajo y zoom alto).

¿Qué ventajas y desventajas tiene el método fotográfico con respecto al método visual?

Experimento 3

Espectro de hidrógeno y deuterio

Objetivos

- * Familiarizarnos con el espectrógrafo de alta resolución disponible en el Observatorio.
- * Observar la diferencia entre los espectros de hidrógeno (H) y deuterio (D).
- * Medir y explicar la diferencia entre las longitudes de onda de H-alfa y D-alfa.
- * Observar y medir la estructura fina de la línea H-alfa y D-alfa.

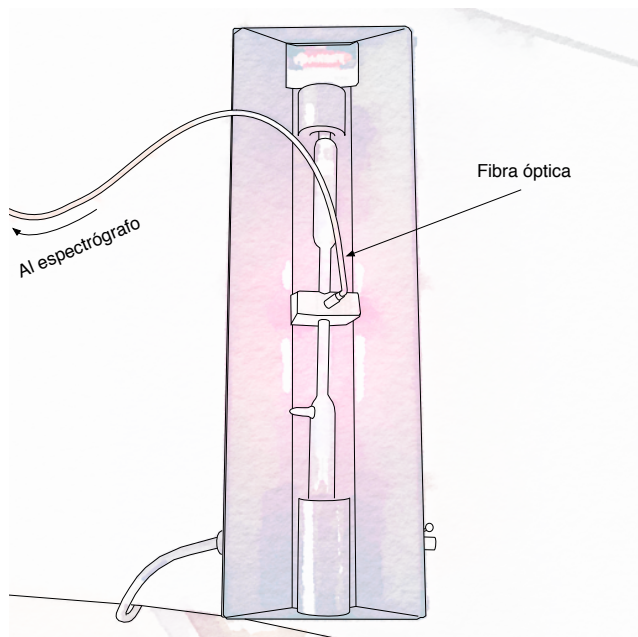


Figura 3.1

Materiales

Espectrógrafo de alta resolución. Tubos espectrales de sodio, mercurio, hidrógeno, deuterio y neón. Cada grupo debe tener algún medio para llevarse sus datos.

La luz entra a ESPARTACO a través de una fibra óptica; por eso las “líneas” espectrales no son propiamente líneas, sino puntos (por tradición se siguen llamando líneas) debido al uso de rejillas de difracción y la fibra óptica. Un espectro tomado con ESPARTACO no cubre todo el rango visible sino solo unos 5 nm.

Preparación

En un catálogo de líneas de Neón (por ejemplo NIST Atomic Spectra Database) se busca la longitud de onda de la línea de neón que esté más cercana a H-alfa (por encima o por debajo). Esa línea será usada para calibrar la escala de los espectros. Investigue y responda las siguientes preguntas en su cuaderno previo a la práctica:

- * Longitudes de onda de la línea amarilla de sodio y mercurio hasta milésimas de nanómetro (o mejor).
- * Las longitudes de onda de H-alfa, D-alfa y la línea más cercana de Neón; hasta milésimas de nanómetro (o mejor).
- * ¿Qué es la resolución espectral de un instrumento?
- * ¿Cuáles fenómenos contribuyen al ancho observado de una línea espectral?
- * ¿Qué es deuterio?
- * El modelo de Bohr del átomo de hidrógeno
- * ¿Qué influencia tiene la masa del núcleo atómico sobre la longitud de onda?
- * ¿Cómo se puede, midiendo las longitudes de onda de H-alfa y D-alfa, deducir la proporción entre la masa del electrón y la de un nucleón?
- * ¿Qué es la estructura fina de las líneas espectrales, en particular el caso del hidrógeno, y su importancia histórica? ¿Cómo contribuyó al desarrollo de la física atómica? ¿Cómo cambia la estructura fina al cambiar hidrógeno por elementos más pesados (Na, Hg)?

* ¿Cómo funciona ESPARTACO, el espectrógrafo a usar?¹

Procedimiento

Inicialmente se toman espectros de las líneas amarillas de mercurio y de sodio, para tener una idea de la resolución espectral que estamos usando.

Se toman espectros de H-alfa, D-alfa, y una línea de neón cercana. No es necesario tomar todas estas líneas en una misma imagen; se pueden tomar una por una.

Con IRIS se extraen los perfiles. Con los comandos l_{add} y l_{plot} se miden las posiciones de los centros de las líneas de H y Ne, hasta décimas de pixel para calibrar la escala. Con la función *SLICE* se toman perfiles de H y D a varias alturas (varios valores de y) hasta encontrar el que muestre más nítidamente la estructura fina.

Análisis

Se observa que las líneas H-alfa y D-alfa son dobles. En el caso de H es más difícil distinguir las dos componentes: ¿por qué? Medimos la separación de las dos componentes (con su incertidumbre).

Con las longitudes de onda conocidas de H-alfa y neón se calibra la escala horizontal. Con la escala horizontal calibrada se mide la separación entre H-alfa y D-alfa.

A partir de la separación o diferencia entre H-alfa y D-alfa calculamos la proporción de masas entre el electrón y un nucleón (con su incertidumbre). Comparamos el resultado con el valor dado en la literatura.

Medimos el ancho a media altura (FWHM), en unidades de longitud de onda, de la línea de neón. A partir de ahí calculamos la resolución espectral del instrumento.

También evaluamos el ancho de H-alfa y D-alfa y los comparamos entre sí y con el ancho de la línea de neón. ¿A qué se deben las diferencias?

Comparamos la separación de las dos componentes de H-alfa (la estructura fina) con el valor reportado en la literatura.

El espectro de deuterio muestra una línea débil justo en la posición de H-alfa. ¿Por qué?

Determine la constante de estructura fina α con su respectiva incertidumbre.

¹Consultar <https://observatorio.uniandes.edu.co/index.php/instrumentos/espectografos/espartaco>

Experimento 4

Efecto Zeeman

Objetivos

- * Observar el Efecto Zeeman normal en Cd. Medir el cambio en longitud de onda. A partir de ahí, medir el campo magnético.
- * Observar el Efecto Zeeman anómalo.
- * Medir las posiciones de las líneas espectrales que surgen por el campo magnético.
- * Interpretar el patrón de líneas.

Teoría

La perturbación de la energía de un nivel atómico ΔE_B debido a un campo magnético externo B está dada por [3]:

$$\Delta E_B = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu_B g_L m_J B, \quad (4.1)$$

donde $\mu_B = 9.2740100783(28) \times 10^{-24}$ J/T, g_L es el factor de Landé y m_J es el número cuántico que indica la proyección del momento angular total $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$ en la dirección del campo magnético.

Preparación

Para la preparación de la práctica, debe responder las siguientes preguntas:

- * ¿En qué consiste el Efecto Zeeman?
- * ¿Cuál es la diferencia entre el efecto Zeeman “normal” y el efecto Zeeman “anómalo”?
- * ¿Cómo se puede calcular el campo magnético a partir de $\Delta\lambda$?
- * ¿Qué son las componentes π y σ ?
- * ¿Cuáles son las reglas de selección?

- * ¿En qué longitud de onda está la línea roja del cadmio (hasta milésimas de nm)?
- * ¿Cómo es la estructura electrónica (números cuánticos) de los niveles inicial y final de esta transición?
- * Historia de la línea roja del cadmio.
- * Usaremos la línea de Neón con $\lambda = 724,5$ nm (eso es infrarrojo; averiguar el valor exacto). ¿Cuáles son los números cuánticos de los niveles inicial y final de esta transición?
- * ¿En cuántos subniveles se divide cada uno de estos niveles cuando hay campo magnético? (esto depende del número cuántico “J”).
- * Diferencia ΔE de energía entre los subniveles.
- * Factor de Landé (definición, y valores para los dos niveles involucrados).
- * Relación entre ΔE y $\Delta\lambda$

Ejercicio: Se sabe que $E = hc/\lambda$, pero NO es cierto que $\Delta E = hc/\Delta\lambda$. Demuestre que:

$$\Delta\lambda = \frac{\mu_B g_L \Delta m_J}{hc} \lambda^2 B. \quad (4.2)$$

Equipo

Usaremos el espectrógrafo ESPARTACO ubicado en el Observatorio Astronómico. Espectrógrafo de alta resolución. Lámpara de cadmio. Electroimán con su fuente de corriente.

⚠ Advertencia: Cada grupo debe tener algún medio físico (USB, disco duro, etc) para llevarse sus datos.

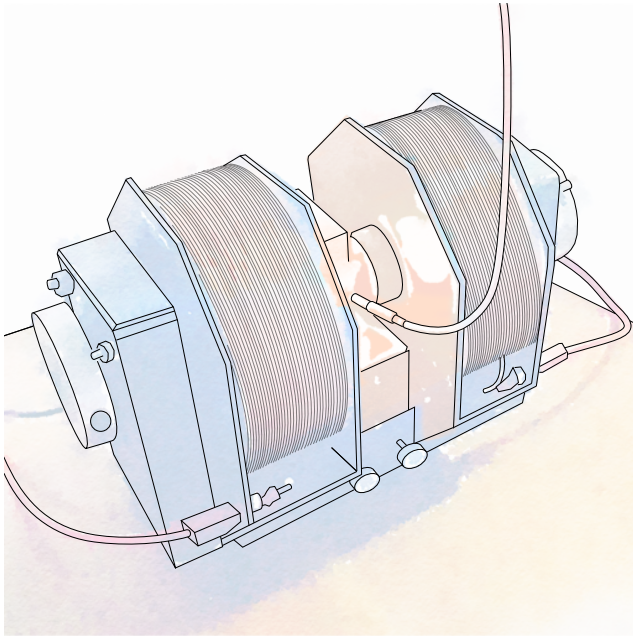


Figura 4.1: Bobinas con lámpara de Cadmio en su interior

Procedimiento

Efecto Zeeman Normal

Instalamos la lámpara de Cd entre los polos del electroimán y la encendemos. Grabamos la parte del espectro que contiene la línea roja. También debemos grabar, en el mismo rango espectral, una línea de referencia, por ejemplo la de Neón de 640 nm (buscar el dato exacto) para determinar la dispersión (pixels/angstrom) del instrumento.

Encendemos la corriente del electroimán (5-6 amperios). Tomamos nota de la corriente. Tomamos dos espectros de la línea roja del cadmio: uno con la luz que sale paralelo al campo magnético, y otro con la luz que sale perpendicular.

Efecto Zeeman Anómalo

Instalamos la lámpara de Neón entre los polos del electroimán y la encendemos. Tomamos el espectro sin campo magnético.

Tomamos el espectro de Argón para calibrar la escala. Es posible grabar las dos líneas (Neón y Argón) en una sola imagen, pero teniendo en cuenta que el argón necesita más tiempo que el neón.

Encendemos el electroimán (5 o 6 amperios). Tomamos nota de la corriente. Grabamos dos espectros: uno con la luz que sale paralelo al campo magnético, y otro con la

luz que sale perpendicular.

Análisis

Efecto Zeeman Normal

Con el programa IRIS sacamos perfiles de los espectros. Primero usamos los comandos L_{ADD} y L_{PLOT} para medir las posiciones de la línea de neón y la de cadmio sin campo magnético (este método da las posiciones en “píxeles absolutos”, medidos a partir del borde izquierdo de la imagen). Con estos datos determinamos la dispersión del instrumento (cuántos pixels equivalen a 1 angstrom).

Luego usamos la función SLICE para analizar los espectros afectados por el efecto Zeeman (cuidado; este método no da las posiciones “absolutas” de las líneas, sino medidas desde un punto de partida arbitrario). Trazamos perfiles a varias alturas (valores de “y”) para ver cuál sale más nítido. Medimos la separación de líneas en pixels (estimando décimas de pixel). Con la dispersión instrumental conocida (pixels/angstrom) calculamos el desplazamiento $\Delta\lambda$ de Zeeman. Calculamos el aporte de energía ΔE del campo magnético. Conociendo el valor del “magnetón de Bohr” y las demás constantes, calculamos el campo magnético usando la ecuación (4.2).

Comparamos cualitativamente los tres espectros. Dibujamos los niveles de energía inicial y final de la transición, con los subniveles generados por el campo. Dibujamos todas las transiciones posibles y sus energías. Identificamos cuáles salen perpendiculares al campo y cuáles salen paralelos. Damos una explicación cualitativa de esta diferencia.

¿Por qué la línea π ($\Delta m = 0$) no aparece en la emisión paralela a B ?

El informe debe incluir los perfiles graficados, y la manera de medir las posiciones de las líneas espectrales. También debe incluir un esquema de los niveles y subniveles de energía, con las transiciones permitidas.

Medimos el ancho (a media altura) de las líneas espectrales y lo expresamos en nanómetros. Con esto calculamos la resolución espectral del instrumento.

Identificamos las fuentes de error.

Efecto Zeeman Anómalo

Con el programa IRIS sacamos perfiles de los espectros. Primero, con los comandos L_{ADD} y L_{PLOT} medimos las posiciones de la línea de argón y la de neón sin campo; con estos datos determinamos la dispersión del instrumento (pixels/angstrom).

Luego, con la función SLICE, extraemos el mejor perfil posible de los espectros afectados por el efecto Zeeman. Medimos en pixels las posiciones de las líneas componentes. Observamos cuántas líneas hay, y si están o no igualmente espaciadas. Usando la dispersión ya conocida, calculamos los $\Delta\lambda$.

Comparamos cualitativamente los tres espectros. Dibujamos los niveles de energía inicial y final de la transición, con los subniveles generados por el campo. Dibujamos todas las transiciones posibles y sus energías. En el efecto Zeeman normal hay solo una línea π , pero ahora hay más; ¿Cuántas y cuáles son? ¿Por qué?

¿Cuánto es la diferencia ΔE entre subniveles del nivel superior? ¿Y cuánto es en el nivel inferior? Calculamos el factor de Landé para cada uno de los dos niveles. La fórmula teórica sencilla del factor de Landé no es aplicable en este caso, porque ella asume determinado esquema de acople de los momentos angulares de los electrones (“acople LS”), mientras que el neón usa un esquema diferente (y tiene valores semienteros de L).

Ayuda:

El nivel superior tiene energía E_1 y se divide en subniveles separados una diferencia a . Eso hace que las energías de los subniveles sean

$$E_1 + m_J a \quad (m_J = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots)$$

El nivel inferior tiene energía E_2 y se divide en subniveles separados una diferencia b . Eso hace que las energías de los subniveles sean

$$E_2 + m'_J b \quad (m'_J = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots)$$

Las diferencias de energía (léase: líneas espectrales, longitudes de onda) serán:

- * Si $\Delta m_J = 0$, entonces $\Delta E = E_1 - E_2 + m_J(a - b)$.
- * Si $\Delta m_J = m_J - m'_J = +1$, entonces $\Delta E = E_1 - E_2 + m_J(a - b) + b$.
- * Si $\Delta m_J = m_J - m'_J = -1$, entonces $\Delta E = E_1 - E_2 + m_J(a - b) - b$.

Experimento 5

Radioactividad

El premio Nobel en física en el año 1903 se otorgó a Antoine Henri Becquerel “*por el descubrimiento de la radiactividad espontánea*”.

El premio Nobel en física en el año 1903 se otorgó a Maria Skłodowska-Curie y a Pierre Curie “*por sus investigaciones conjuntas sobre los fenómenos de la radiación descubiertos por el profesor Henri Becquerel*”.

El premio Nobel en química en el año 1908 se otorgó a Ernest Rutherford “*por sus investigaciones en la desintegración de los elementos y en la química de las sustancias radioactivas*”.

El premio Nobel en química en el año 1911 se otorgó a Maria Skłodowska-Curie “*por el descubrimiento del radio y el polonio, el aislamiento del radio y el estudio de la naturaleza y compuestos de este destacable elemento químico*”.

El premio Nobel en química en el año 1935 se otorgó a Frédéric Joliot y a Irène Joliot-Curie “*por sus síntesis de elementos radioactivos*”.

Objetivos

- * Medir el número de partículas detectadas del decaimiento de una sustancia radioactiva y usar esta información para estimar el tiempo de vida medio de la sustancia.

Ejercicio 1

1. Sobre el decaimiento α , β y γ investigue: las principales fuentes de radiación, protección para cada tipo de radiación y qué interacciones están presentes durante el decaimiento.
2. Explique cómo funciona un contador de Geiger-Müller ¹ e indique qué otros métodos existen para

¹Ver <https://www.phywe.com/en/geiger-mueller-counter.html>

medir la radiación emitida por elementos radioactivos. Indique con qué eficiencia podría detectar cada uno de los tipos de radiación.

Materiales

- * Detector Geiger-Muller con su equipo electrónico y soportes.
- * Cesio-137.

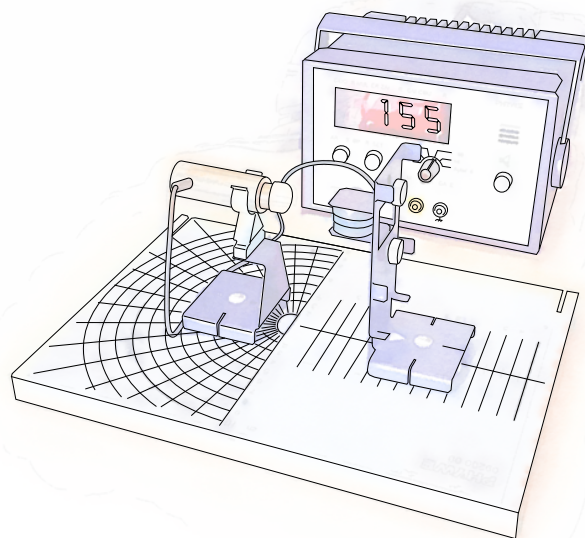


Figura 5.1: Montaje experimental con contador Geiger-Müller

Teoría

Las partículas α son núcleos de Helio emitidos por núcleos atómicos pesados e inestables. El decaimiento α de un núcleo atómico se da principalmente debido a que es

energéticamente favorable tener un núcleo menos pesado más la partícula α de acuerdo a la relación de Einstein $E = mc^2$. Este tipo de decaimiento se produce para núcleos con un número atómico mayor a $Z = 82$. La energía de la partícula α dependerá de la relación de masas entre el núcleo original y el núcleo después de la emisión de la partícula α . Esta energía oscila entre los 4MeV y los 9MeV para los elementos mostrados en la Fig.5.2

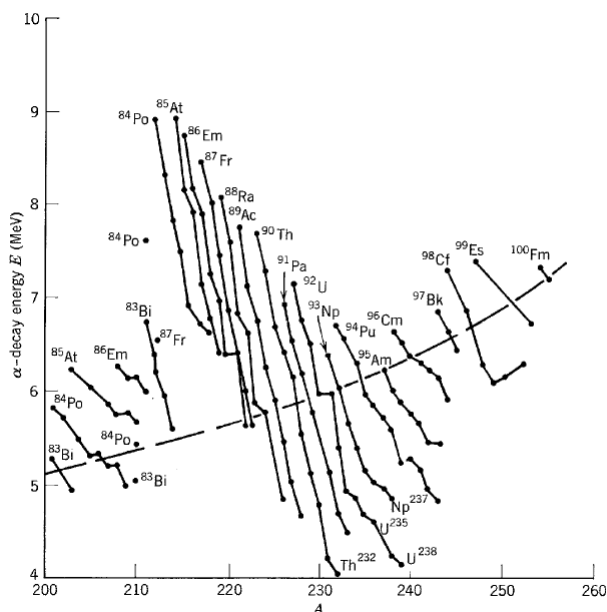


Figura 5.2: Energía de la partícula α en términos del número de nucleones para diferentes elementos radioactivos. Tomada de [1].

La radiación β se emite cuando en un núcleo atómico un neutrón n se transforma en un protón p o viceversa. De acuerdo a la física de partículas, se debe tener conservación de la carga y además de número leptónico, así que

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (5.1)$$

donde e^- denota al electrón y $\bar{\nu}_e$ es un antineutrino electrónico [2]. Este último fue introducido por Enrico Fermi (y luego confirmado experimentalmente) para asegurar que durante este proceso se conservara el momento lineal, la energía y el momento angular. Entonces, lo que se conoce como radiación β serán electrones (positrones) y antineutrinos (neutrinos).

Finalmente, la radiación γ corresponde a radiación electromagnética de alta energía. Los fotones que componen esta radiación son generados cuando un núcleo atómico se encuentra en un estado excitado, probablemente producto de un decaimiento α o β , y decae a un estado con menor energía.

Ejercicio 2

Sea N el número de núcleos radioactivos presentes en la muestra. Según la ley de desintegración radioactiva la tasa de cambio de esta cantidad está dada por

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N, \quad (5.2)$$

donde λ es la probabilidad de que uno de estos elementos radioactivos decaiga.

- * Muestre que $N(t)$ sigue una ley exponencial.
- * Muestre que el periodo de *semi-desintegración* T , definido como el tiempo en el cual han decaído la mitad de los núcleos iniciales está dado por

$$T = \frac{\ln(2)}{\lambda}. \quad (5.3)$$

- * El tiempo de vida medio τ se define como el promedio de tiempo de vida de todos los núcleos. Para hacer este promedio calcule

$$\frac{\int_0^\infty t N(t) dt}{\int_0^\infty N(t) dt} \quad (5.4)$$

- * Muestre que τ es el tiempo en el cual han decaído $N_0(1 - e^{-1})$ núcleos, donde N_0 es el número inicial de núcleos. Muestre que este tiempo es igual a

$$\tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (5.5)$$

⚠ Advertencia: Manipular las muestras con pinzas para evitar que una partícula de polvo se quede en la piel. No comer durante la práctica, y después de ella solo luego de lavarse muy bien para evitar ingerir un microgramo de mineral radiactivo.

El tubo Geiger es muy delicado; hay que tratarlo con sumo cuidado. La tapa plástica debe permanecer puesta cuando no se esté usando. No usar distancias menores que 2 cm.

Procedimiento en presencial

Conectamos el contador GM y lo acercamos a una fuente radioactiva para comprobar que funciona. Se puede activar el audio para oír un sonido cada vez que el instrumento detecta una partícula. El contador tiene varios modos: Puede contar eventos durante 10 segundos, 1 minuto, 100 segundos, o tiempo indefinido (manual).

1. Primero alejamos las fuentes radioactivas y hacemos varias mediciones largas (por ejemplo 5 minutos) para medir la radiación del ambiente. Comparando varios conteos igual duración podemos hacernos una idea de la precisión de la medición.
2. Con el detector cerca de una pieza de material radioactivo hacemos varios conteos de 1 minuto, varios de 3 minutos, y varios de 10 minutos, a una misma distancia.
3. Elegimos un tiempo razonablemente largo y hacemos mediciones a varias distancias, por ejemplo 2 cm, 4 cm, 8 cm (medidas desde el centro de la muestra).
4. Comparamos dos fuentes distintas usando tiempos iguales y distancias iguales.

Análisis

Todos los conteos (números) deben ser divididos por los respectivos tiempos para obtener las frecuencias.

1. Reportamos la radiación ambiental con su incertidumbre. Si es considerable, debemos restarla de todas las mediciones posteriores. ¿A qué se debe esta radiación ambiental?
2. Comparamos entre sí los conteos de una misma duración y calculamos la desviación estándar. ¿Qué tanto fluctúan las mediciones? ¿Qué sucede con esta dispersión al incrementar el tiempo de integración?
3. Estudiamos cómo varía la actividad (frecuencia) al aumentar la distancia. ¿Se cumple la teoría? Estimamos el ángulo sólido cubierto por el detector y calculamos número de partículas (por segundo) que emite la fuente en todas las direcciones (no solo en la dirección del detector).
4. Comparamos las dos fuentes. ¿Qué tanto más fuerte es la una de la otra? ¿En qué unidades se indica la actividad de una muestra de material?

Describir las características de los rayos alfa, beta y gamma, y la interacción entre estos rayos y la materia. Para cada tipo de barrera, ¿por qué un tipo de radiación la atraviesa y otro no? Justificar con argumentos físicos.

⚠ Advertencia: Manipular las muestras con pinzas, para evitar que una partícula de polvo se quede en la piel. No comer durante la práctica, y después de ella sólo luego de lavarse muy bien, para evitar ingerir un microgramo de mineral radiactivo.

El tubo Geiger es muy delicado. Hay que tratarlo con sumo cuidado. La tapa plástica debe permanecer puesta todo el tiempo. No usar distancias menores que 2 cm.

Realizando conteos de la radiación de fondo y de una muestra radioactiva, y colocando diferentes barreras entre el detector y el mineral, se pretende establecer la contribución de los diferentes tipos de radiación emitidos a la radiación total.

Partimos del siguiente supuesto: La radiación de fondo y la de la muestra contienen radiación alfa, beta y gamma; la radiación alfa es detenida por el papel, y la radiación beta es detenida por el plomo, y la radiación gamma pasa todas las barreras. Para realizar la medición se requiere medir la radiación total; para esto se dispone el contador sobre el soporte. Se elige un tiempo de conteo suficientemente largo (por ejemplo 10 minutos) y se realizan medidas de la radiación emitida. Para cuantificar la contribución de cada uno de los tipos de radiación se interpone una barrera: primero se interpone papel y posteriormente se interpone el plomo. En cada caso se realizan conteos de igual duración. Estas medidas se hacen con dos montajes: uno sin ninguna fuente para la radiación de fondo y otro con la muestra de mineral a una distancia de 2 cm del detector.

Tomamos medidas de la radiación neta en 4 ocasiones distintas manteniendo siempre la muestra en la misma posición y a la misma distancia del detector. Realizar en promedio sobre estas medidas en conteos por segundo. La radiación medida será

$$R1 = R_{\alpha} + R_{\beta} + R_{\gamma}.$$

Medimos la radiación captada por el detector al poner una barrera de papel entre el mineral y el detector. Realizamos esta medida 4 veces para obtener un promedio de la radiación

$$R2 = R_{\beta} + R_{\gamma}.$$

Realizar de nuevo la medida anterior interponiendo una barrera de plomo y obtener

$$R3 = R_{\gamma}.$$

De los datos obtenidos anteriormente deducimos el porcentaje de la radiación alfa, beta y gamma que emite la muestra. Repetimos los procedimientos anteriores sin la muestra, es decir, midiendo la radiación de fondo. Ejem-

pló: Como R1 es la radiación total y R3 es la radiación gamma, el porcentaje de gamma es $R3/R1$.

Bibliografía

- [1] R.M. Eisberg y R. Resnick. *Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles*. Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles. Wiley, 1985. ISBN: 9780471873730. URL: <https://books.google.co.in/books?id=mv5QAAAAAAAJ>.
- [2] David J Griffiths. *Introduction to electrodynamics*. Pearson, 2013.
- [3] Andrew S. Taylor, Alexander R. Hyde y Oleg V. Batishchev. “Zeeman effect experiment with high-resolution spectroscopy for advanced physics laboratory”. En: *American Journal of Physics* 85.8 (2017), págs. 565-574. DOI: [10.1119/1.4984809](https://doi.org/10.1119/1.4984809). eprint: <https://doi.org/10.1119/1.4984809>. URL: <https://doi.org/10.1119/1.4984809>.