

Determinación experimental de la constante de Rydberg, en el laboratorio docente



José Manuel López Guerra¹, Leandro Cruz Rodríguez²

¹Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". La Habana, Cuba.

²Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba.

E-mail: jlopez@automatica.cujae.edu.cu

(Recibido el 6 de octubre de 2016 aceptado el 18 de diciembre de 2017)

Resumen

En los centros de educación superior como parte de la disciplina Física, se imparten aspectos básicos de la teoría mecanocuántica. Este trabajo está encaminado al empleo de técnicas básicas de la espectroscopía para determinar de manera experimental la constante de Rydberg, estudiando el espectro obtenido en una lámpara de descarga de hidrogeno. El equipamiento experimental empleado consiste en un espectrómetro, una lámpara de descarga, una red de difracción y una bobina de Tesla. Se determina la constante de la red empleada, obteniendo un valor de $(1675 \pm 5) \cdot 10^{-9} m$. El valor de la constante de Rydberg determinado es de $(1,0975 \pm 0,0017) \cdot 10^7 m^{-1}$, con una incertidumbre porcentual de 0.15 %. Estos resultados demuestran la utilidad de las prácticas de laboratorios como complemento a la componente teórica de la especialidad y su uso para la comprobación de leyes básicas de la física.

Palabras clave: Espectroscopía, constante de Rydberg, prácticas de laboratorios, espectrómetro.

Abstract

Basic aspects of quantic theory are taught within the subject of Physics at High Education Centers. Such a task aims to the implementation of basic spectroscopy techniques for the experimental determination of Rydberg constant, so to study the obtained spectrum under a hydrogen discharge lamp. The experimental set used involves a spectrometer, a discharge lamp, a diffraction net, a Tesla dynamo. The constant at the net to be employed is determined after the outcome of a $(1675 \pm 5) \cdot 10^{-9}$ value. Determinete value of Rydberg constant is $(1,0975 \pm 0,0017) \cdot 10^7 m^{-1}$ with a 0.15 % of uncertainty. These outcomes show how useful lab trainings are as a complement to the theoretical components of the specialty and its utility to proof basic physical laws.

Keywords: Spectroscopy, Rydberg constant, lab trainings, spectrometer.

PACS: 01.50.Pa, 06.20.Jr, 07.60.Rd, 32.30.Jc

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente hay gran consenso en que aprender ciencia también requiere aprender a hablar en el idioma propio de la ciencia. Esto conlleva a hacer uso de un lenguaje conceptual muy particular al leer y escribir, al razonar y resolver problemas durante las prácticas de laboratorio así como también en la vida cotidiana.

Formando parte de las estrategias didácticas que diseñan los docentes para lograr el aprendizaje de las ciencias y en particular la Física, se pueden mencionar a los materiales de estudio que se recomiendan a los estudiantes como apoyo para el curso y promoción de los contenidos de las distintas asignaturas en el nivel universitario. Siendo la Física una ciencia experimental, entre dichos materiales se encuentran los manuales para las prácticas de laboratorio, las cuales constituyen no sólo una herramienta, sino una pieza fundamental para comprobar las comprensión de lo estudiado [1].

Aunque han existido, en diversas épocas, críticas a determinados enfoques utilizados, nadie niega la importancia de las prácticas de laboratorio en las clases de Física. De hecho, es en el laboratorio donde se adquiere el mayor aprendizaje significativo de esta materia, para ello se construyen laboratorios convencionales, con su equipamiento adecuado para el desarrollo de las prácticas.

Estas pueden desarrollarse de manera que el alumno esté en contacto físico y pueda manipular los elementos, dispositivos e instrumental requeridos para el experimento (laboratorio real) o utilizando simulaciones interactivas programadas con el empleo de las PC (laboratorio virtual). Ambas formas requieren la autopreparación por parte de los estudiantes, a través de materiales impresos (textos o folletos), o en formato electrónico [2].

Se conoce que son diversas las maneras en que se introduce la cuantización de la energía en el átomo en la enseñanza y que este tema sigue siendo objeto de investigación [3]. También son diversas las propuestas destinadas a introducir trabajos experimentales en la

Autores José Manuel López Guerra y Leandro Cruz Rodríguez
enseñanza de la física cuántica, y en algunas de ellas se proponen usos didácticos del espectroscopio [4]. Sin embargo, todas ellas se limitan a un uso cualitativo del espectroscopio que impide el desarrollo y aplicación, en detalle, de un modelo cuántico de emisión y absorción de radiación [5]. Por ello, nuestro trabajo ha tenido como objetivo el diseño y puesta a punto de una práctica de laboratorio donde usando un espectrómetro se determine la constante de Rydberg.

Antes de describir el experimento es conveniente dar una reseña teórica de la espectroscopia. Según el modelo atómico de Bohr, los diferentes átomos emiten o absorben energía en frecuencias bien definidas. Un electrón solo emite o absorbe energía en transiciones de una órbita permitida a otra. En dicha transición emite o absorbe un fotón cuya energía es la diferencia de energía entre ambos niveles. Este fotón, según la ley de Planck tiene una energía:

$$E = hf = E_{n_i} - E_{n_f}, \quad (1)$$

donde n_i identifica el número cuántico principal del nivel inicial y n_f la final, y f es la frecuencia. Cada energía E_n está identificada por:

$$E_n = -\frac{m_r Z_{efic}^2 e^4}{8\epsilon_0^2 n^2 h^2}, \quad (2)$$

donde:

m_r es una cantidad llamada masa reducida del sistema. Para un sistema formado por dos cuerpos de masas m_1 y m_2 , la masa reducida se define como $m_r = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}$,

e la carga del electrón,

Z_{efic} el número atómico del átomo aparente debido al efecto de apantallamiento del núcleo por parte del resto de los electrones

h la constante de Planck.

Entonces, tenemos que (1) queda:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{m_r Z_{efic}^2 e^4}{8\epsilon_0^2 ch^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right). \quad (3)$$

Ésta última expresión fue muy bien recibida porque explicaba teóricamente la ley empírica hallada antes por Balmer para describir las líneas observadas desde finales del siglo XIX en la desexcitación del Hidrógeno, que venían dadas por:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_i^2} \right), \quad (4)$$

con $n_f = 3; 4; 5; \dots$, y donde R es la constante de Rydberg. Como vemos, la expresión teórica para el caso $n_f = 2$, es la expresión predicha por Balmer. El valor medido experimentalmente de la constante de Rydberg es: $R = (10973731; 568527 \pm 0; 000073)m^{-1}$ [6].

De la revisión bibliográfica realizada se observa que el método más adecuado para que el estudiante se apropie de

los conocimientos de la asignatura es el de trabajo experimental [7].

En este trabajo vamos a aplicar este método para la comprobación de la teoría mecanocuántica del átomo de hidrógeno mediante la determinación de la constante de Rydberg, con la variante de no contar con instrumentos de alta tecnología.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajará con un espectrómetro como el mostrado en la figura 1. En éste, la luz proveniente de una lámpara de descarga gaseosa incide sobre la rendija situada a la entrada del colimador. La rendija se encuentra en el plano focal del sistema óptico del colimador, por lo cual de este emerge un haz de rayos paralelos los que inciden normalmente sobre la red.

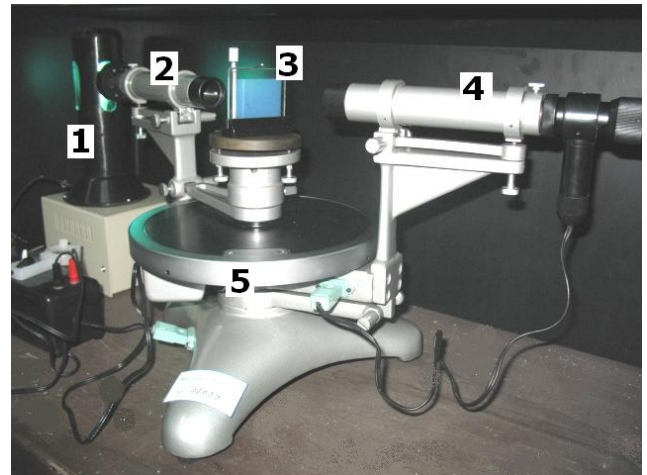


FIGURA 1. Espectrómetro. 1. Lámpara de descarga gaseosa. 2. Colimador, 3. red de difracción, 4. Telescopio, 5. Espectrómetro.

El telescopio está montado de tal forma que puede girar angularmente a ambos lados de la dirección del eje óptico, donde se observa el espectro de orden cero.

Los rayos paralelos correspondientes a las diferentes líneas espectrales inciden sobre el ocular del telescopio para los diferentes ángulos θ_k siendo enfocados por este en su plano focal, donde se observarán como líneas brillantes.

En la vecindad del objetivo hay un retículo en forma de cruz que permite precisar la posición de las rayas para realizar la lectura de los ángulos.

Una vez que el colimador y el telescopio se encuentren ajustados (el proceso de ajuste se explica más adelante) se pasa a la determinación experimental de los ángulos θ_k bajo los cuales aparecen las líneas brillantes correspondientes a los distintos órdenes de los máximos principales. Para esta determinación se mueve el telescopio angularmente, hasta centrar el retículo con la línea deseada utilizando el tornillo micrométrico del telescopio.

Hay un nonio (de 30 divisiones) solidario al telescopio que permite leer el valor del ángulo (con apreciación de

medio minuto) sobre el limbo circular que se encuentra en el cuerpo del espectrómetro.

Para lograr buenos resultados en la observación de los espectros es necesario el oscurecimiento en la zona de la red de difracción, lo que se logró haciendo un recipiente de cartón con dos orificios uno asociado al colimador y otro al telescopio [5].

A. Ajuste perpendicular de la red y colimación

Para que se cumpla la condición de Fraunhofer para la difracción es necesario que la luz incida como un haz proveniente del infinito y para poder trabajar con las condiciones de máximo de interferencia estudiadas, que llegue perpendicularmente a la red. Esto se logra mediante el siguiente ajuste:

Se busca la imagen directa de la rendija sin haber colocado la red, se fija el telescopio en esta posición (es más cómodo si se pone ahí el cero). Entonces se rota el telescopio 90° y se fija en esta posición. Ahora se rota la red de difracción hasta obtener la imagen de la rendija por la reflexión en la superficie de la red. Cuando esto ocurra la red se encontrará a 45° respecto al eje del colimador, o sea, del haz incidente.

Dejando fijo el telescopio se gira entonces la red 45° , haciendo girar la platina donde se encuentra montada y se pasa a hacer el ajuste de nivelación, observando reiteradamente las líneas a uno y otro lado del orden central.

Una forma muy cómoda de colimar el sistema es observar a través del telescopio por una ventana, hacia los detalles del horizonte (infinito) y luego sin tocar más los tornillos de enfoque del telescopio, poner el espectrómetro ante la lámpara y ajustar mediante los tornillos del colimador hasta ver en el ocular la imagen nítida de la rendija.

B. Resultados

B.1 Determinación del período de la red

Para este ejercicio se cuenta con una lámpara de mercurio.

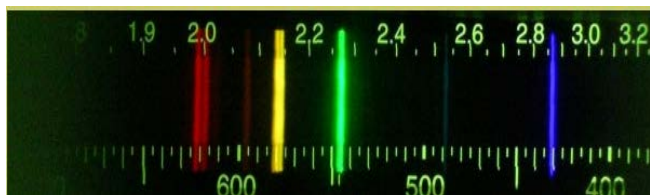


FIGURA 2. Espectro de una lámpara de mercurio obtenido con el espectrómetro del proyecto Star [8].

Se colocó la lámpara de mercurio y se localizó la línea violeta del espectro del mercurio, que corresponde a una longitud de onda $\lambda = 435,835 \text{ nm}$ [9], se determinó la posición angular de esta línea para los máximos de primer y segundo orden tanto hacia la izquierda como hacia la

derecha del máximo central. Se hizo lo mismo para la línea verde de $\lambda = 546,074 \text{ nm}$ [9] y se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla I.

TABLA I. Posición angular de los máximos de primer y segundo orden de las líneas violeta y verde del espectro del mercurio.

$\lambda_{\text{violeta}} = 435,835 \text{ nm}$			
Derecha		Izquierda	
$m=1$	$m=2$	$m=1$	$m=2$
$14^\circ 59'$	$31^\circ 43'$	$15^\circ 5'$	$31^\circ 40'$
$15^\circ 6'$	$31^\circ 14'$	$15^\circ 7'$	$31^\circ 36'$
$\lambda_{\text{verde}} = 546,074 \text{ nm}$			
$18^\circ 53'$	$40^\circ 35'$	$18^\circ 58'$	$40^\circ 45'$
$18^\circ 59'$	$40^\circ 46'$	$19^\circ 17'$	$40^\circ 50'$

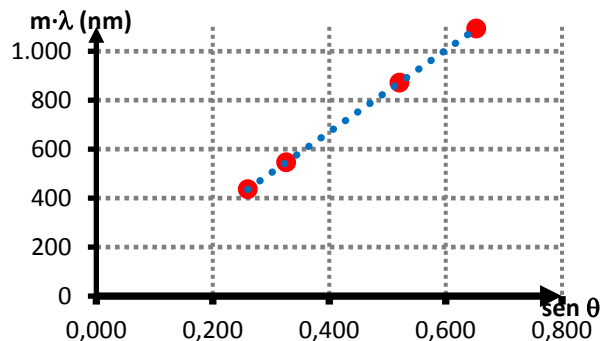


FIGURA 3. Gráfica de longitud de onda del máximo en función del seno de la posición angular, para el espectro del mercurio.

Lo que nos caracteriza que la red posee $597 \pm 2 \text{ ranuras/mm}$ y un período de:

$$d = (1675 \pm 5)10^{-9} \text{ m.}$$

Ya conocido el período de la red se realizó el estudio espectral de una lámpara de descarga de hidrógeno, la que fue excitada usando una bobina de Tesla y determinar las diferentes longitudes de onda de las líneas H_α y H_β del espectro del hidrógeno que corresponden a los colores rojo y azul-verde respectivamente, que son las que se emiten con mayor intensidad.

El primer paso es localizar para qué orden de máximo se ven estas líneas.

Después de esto solo es necesario medir el ángulo bajo el cual se observa cada una de las líneas. Estos ángulos se deben buscar a ambos lados de la franja central de manera que θ_1 sea un promedio de los valores obtenidos para la franja roja (H_α) a la izquierda y la derecha de la franja central. Lo mismo se hará para la franja azul-verde (H_β). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla II.

TABLA II. Posición angular de los máximos de primer y segundo orden de las líneas azul-verde y roja del espectro del hidrógeno.

	Derecha		Izquierda	
	$m=1$	$m=2$	$m=1$	$m=2$
azul-verde	16° 53'	35° 36'	16° 52'	35° 25'
rojo	23° 4'	51° 35'	23° 04'	51° 36'

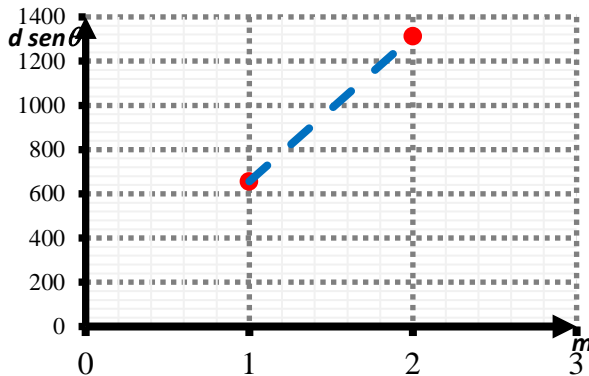


FIGURA 3. Gráfica de diferencia de marcha en función del orden del máximo para la línea roja del espectro del hidrógeno.

Lo que nos da un valor para la longitud de onda de la línea H_{α} de $(656,2 \pm 0,2) \text{ nm}$

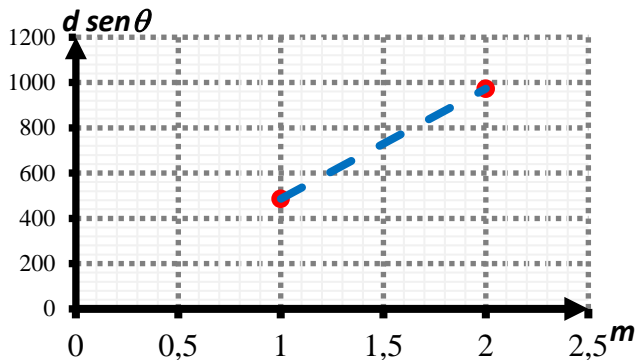


FIGURA 4. Gráfica de diferencia de marcha en función del orden del máximo para la línea azul-verde del espectro del hidrógeno.

Y un valor para la longitud de onda de la línea H_{β} de $(486,6 \pm 0,3) \text{ nm}$. Ambos valores coinciden con los reportados por la bibliografía [10].

$$R = 1,09651868 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}.$$

A partir de estos valores se obtiene un valor para la constante de Rydberg de:

$$R = (1,0975 \pm 0,0017)10^7 \text{ m}^{-1}.$$

El cual coincide dentro del rango de incertidumbre con el valor reportado [6].

IV. CONCLUSIONES

El procedimiento experimental empleado permite integrar la componente teórica de las diferentes asignaturas impartidas como parte de la especialidad Física General con la actividad practica que desarrolla el estudiante como parte de su formación básica. El empleo de ecuaciones que caracterizan la difracción por múltiples ranuras, así como ecuaciones de la mecánica cuántica, permiten desarrollar un entendimiento más integral de la física por parte del estudiante. La determinación del periodo de la red empleada se utilizó una lámpara de mercurio, el valor de la constante de red es de $1675 \pm 5 \text{ nm}$. El empleo de la expresión para la serie de Balmer permitió calcular el valor de la constante de Rydberg como $(1,0975 \pm 0,0017)10^7 \text{ m}^{-1}$ con una incertidumbre porcentual del 0.15 %. Se incorporan nociones básicas de espectroscopia, la cual es una poderosa herramienta en la identificación de sustancias y materiales en diferentes estados de agregación. Se emplean equipos de fácil adquisición, aumentando la utilidad de los mismos y variando el enfoque clásico de su empleo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los profesores Juan José Llovera, Justo Ortega del departamento de Física de la CUJAE y al profesor Alberto Rodríguez de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la CUJAE, la colaboración prestada en la revisión de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Giorgi, S., Cámara, C., Marino, L., Carreri, R. y Bonazzola M., Análisis de contenidos de mecánica en libros de texto utilizados en la enseñanza de la física en el ciclo inicial de carreras universitarias, XII Simposio de Investigación en Educación en Física, 22–24 de octubre, Tandil, Argentina (2014).
- [2] Alejandro CA. Su Apple favorito en Física. 2003. [Consultado el 11 de mayo de 2016]. Disponible en: http://www.quadernsdigitals.net/datos/hemeroteca/r_1/nr_5_02/a_6867/6867.pdf
- [3] Savall-Aleman, F., Doménech-Blanco, J. L., Martínez-Torregrosa, J., *El espectroscopio cuantitativo como instrumento para la construcción y uso de modelos de emisión y absorción de radiación en física cuántica*, Revista Brasileira de Ensino de Física **36**, 4302-1, 4302-8 (2014).
- [4] Fischer, R., *Teaching diffraction with hands-on optical spectrometry*, Physics Education **47**, 603 (2012).
- [5] Nuñez, E., Guzmán, T., *Un abordaje cuantitativo al estudio de espectros de emisión*, [Consultado el 9 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.uruguayeduca.edu.uy/Userfiles/P0001%5CFile%5CEspectros.pdf>.

[6] *The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty*. [Consultado el 9 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?ryd>

[7] Dos Reis, F., Sánchez, A. D., *Espectroscopía* (2011). [Consultado el 7 de mayo de 2016]. Disponible en: http://users.df.uba.ar/bragas/Labo5_1er2011/G5Espectroscopia.pdf.

[8] *Imagen del espectro de una lámpara de mercurio*. [Consultado el 7 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://www.ticfisquim.org/atomtic/3c.htm>.

[9] *Indice HyperPhysics. Espectro Atómico*. [Consultado el 16 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/hframe.html>

[10] *Indice HyperPhysics. Transiciones Electrónicas* [Citado 16 de mayo de 2016]. Disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/hframe.html>.