

ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DEL MODELO DE BOHR ACERCA DE LA PREDICCIÓN DE LAS LÍNEAS DE EMISIÓN DEL ÁTOMO DE HELIO EN EL MARCO DEL DICTADO DE FÍSICA MODERNA EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNLP

ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF THE BOHR MODEL IN THE PREDICTION OF THE EMISSION LINES OF THE HELIUM ATOM IN THE FRAME OF THE MODERN PHYSIC COURSE OF THE FACULTY OF ENGINEERING OF LA PLATA UNIVERSITY

F. Sanjuan^{1,2}, E.L. Muñoz^{1,3}*, M. Creus^{1,2}, H. Rabal^{1,2}, H. Chiodini¹, A. Biasetti^{1,3}, J. Gallego Sagastume¹, B. Porcel de Peralta¹.

¹Dpto. de Cs. Básicas, Fac. de Ingeniería, UNLP, Argentina.

²Centro de Investigaciones Ópticas (CIOp, CIC-CONICET), Gonnet, Argentina.

³Departamento de Física e IFLP (CCT La Plata - CONICET), Fac. de Cs. Exactas, UNLP, Argentina.
e-mail: munoz@fisica.unlp.edu.ar

Recibido 30/03/2012; aprobado 07/09/2012

El dictado de la materia Física IIIA de las carreras de Ingeniería Electrónica (IE1), Electricista (IE2) y Química (IQ) dictadas en la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) abarca dos módulos bimestrales. En el segundo de ellos se abordan temas de Física Moderna y entre las actividades de laboratorio establecidas, los alumnos deben realizar un experimento destinado a determinar las líneas características de emisión de una lámpara de gas de He a baja presión utilizando un espectrómetro portátil. En el presente trabajo se describe el instrumental utilizado, la metodología experimental adoptada, se presentan las mediciones realizadas de las líneas características emitidas por el átomo He (HeI) y se las compara con las líneas publicadas en la literatura. A partir del uso del modelo de Bohr para el caso del átomo de He⁺¹ simplemente ionizado (HeII), se estiman las longitudes de onda emitidas por el ión HeII y se las compara con las líneas características del HeII publicadas. También en el marco del modelo de Bohr, se calculan las longitudes de onda emitidas por el átomo HeI despreciando la repulsión entre los electrones y se las compara con las líneas observadas en el laboratorio. Finalmente, se analiza la aplicabilidad del modelo de Bohr en la descripción de los sistemas HeI y HeII.

Palabras Claves: Bohr, Ingeniería, laboratorio, línea de emisión, longitud de onda. (hasta 6)

The Physic IIIA course of the Electronic, Electric and Chemical Engineering degrees of La Plata University includes two modules of two months each. The second teaching module includes Modern Physic topics. In special, in the laboratory activities, students carry out an experiment to determine the characteristic emission lines of an He lamp using a didactic spectrometer. In the present work, we describe the approach used in the laboratory and the experimental methodology. We present the emission lines measured and we compare these measurements with the He emission lines reported in the literature. From the Bohr model, we estimate the emitted wave length for the case of the He⁺¹ ion (The He atom without an electron) and we compare these wave lengths with the lines published. In this sense, we also calculate the emitted lines of the He atom in the frame of the Bohr model and we compare these calculations with the lines measured in the laboratory. Finally, we analyze the potential application of the Bohr model in the description of the He atom and of the He⁺¹ ion.

Key Words: Bohr, Engineering, laboratory, emission line, wave length. (until 6)

I. INTRODUCCIÓN

Las temáticas abordadas en la materia Física IIIA dictada para las carreras de IE1, IE2 e IQ de la FI, UNLP, abarcan tópicos de óptica física, óptica geométrica y física moderna. La modalidad del curso es teórico – práctico y, además, el dictado contempla la realización de prácticas de laboratorio con una activa

participación de los alumnos. Los trabajos de laboratorio correspondientes a los temas de física moderna son: Emisión de Radiación de un Cuerpo Negro, Efecto Fotoeléctrico y Líneas Espectrales Emitidas por Átomos.

En el experimento de Líneas Espectrales los alumnos deben determinar las líneas emitidas por una lámpara de

* Autor a quién debe dirigirse la correspondencia.

gas de He a baja presión utilizando un espectrómetro cuyas características serán descritas en la siguiente sección. Además, en el marco de este trabajo de laboratorio, los alumnos deben estudiar aplicabilidad del modelo atómico de Bohr en la predicción de las emitidas por el átomo de He.

En el presente trabajo se determinaron experimentalmente las líneas que caracterizan la emisión de radiación del átomo de He. Mediante el análisis de los errores aportados por cada dispositivo utilizado en el desarrollo del experimento, se estimó el error en la determinación de cada longitud de onda característica observada. Mediante el uso del modelo de Bohr [1], se calcularon las longitudes de onda emitidas por el átomo HeII y se las compararon con las líneas publicadas en la literatura. Para el caso del átomo HeI, se ha aplicado el modelo de Bohr despreciando la repulsión entre los electrones del He, se calcularon las líneas emitidas por el átomo He y se las compararon con las longitudes de onda observadas.

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la realización del experimento se utilizó un espectrómetro (marca: Griffin & George Ltd.; origen: Inglaterra). En la Figura 1 se presenta un esquema del espectrómetro que se compone de tres partes principales: un colimador, una platina con vernier y un anteojo de observación o telescopio. A la entrada del colimador se halla una ranura ajustable para colimar la luz incidente al sistema. La platina consta de un portaobjetos donde se coloca la red de difracción por transmisión con una constante $d=3.33 \mu\text{m}$ (300 líneas/mm -valor nominal-; marca: Paton Hawksley; origen: Inglaterra [2]). El vernier presenta una escala angular graduada con una resolución de $0.5'$. La platina tiene 3 tornillos que permiten variar su inclinación y de este modo alinear horizontalmente la figura de difracción observada. Finalmente, el anteojo de observación presenta un ocular con una mirilla formada en forma de cruz ortogonal que al rotarla permite alinear uno de sus ejes con la dirección del largo de la imagen de la ranura (ver Figura N°1).

Para alinear el espectrómetro se utilizó un láser de He-Ne ($\lambda=632.816 \text{ nm}$; marca: Melles Griot [3]). Primero, se observó la figura de difracción (patrón) aproximadamente a 2 m de distancia de la red sin que el anteojo de observación obstruya el paso de la luz difractada. Los 3 tornillos del plato de apoyo fueron ajustados de modo que la figura de difracción estuviese dispuesta horizontalmente. Posteriormente, con los anteojos de colimación y observación alineados con el haz incidente, se situó la red perpendicularmente a esta dirección y se estableció para esta condición el centro del vernier (0°). Finalmente, se corroboró que las posiciones angulares de los órdenes $m=1$ y $m=-1$ (primer orden a derecha e izquierda respectivamente), sean iguales y se determinó la constante de la red a partir de la ecuación (1).

$$d \cdot \text{sen} \theta = m \cdot \lambda \quad (1)$$

Siendo d la distancia entre rendijas, θ el ángulo de desviación del haz, m el orden del máximo y λ la longitud de onda.

Por último, se procedió a determinar las líneas de emisión de una lámpara de gas de He a baja presión (marca: Philips, Type 93098E; origen: Bélgica [4]) midiendo los ángulos bajo los que se observaron los máximos del orden $m=1$ (ver Figura N°1). De este modo, vía la ecuación de la red (ver ec. (1)) se calcularon las longitudes de onda características de la emisión del átomo He.

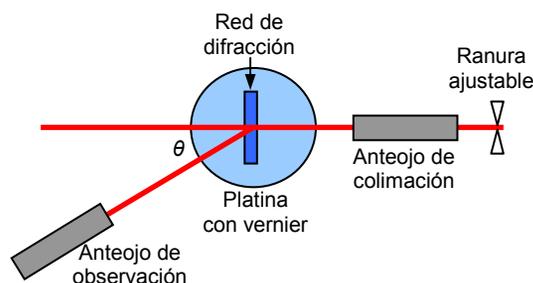


Figura 1. Esquema del espectrómetro utilizado en el experimento con sus partes principales señaladas.

III. MARCO TEÓRICO

En este apartado se detalla la metodología utilizada para calcular las líneas emitidas por el átomo He a partir del modelo atómico de Bohr. Debido a que el modelo no tiene en cuenta la interacción electrón – electrón, primero vamos a considerar el caso del ión HeII.

Los postulados que definen el modelo atómico propuesto por Bohr [1] son:

- (I) Un electrón en un átomo se mueve en una órbita circular alrededor del núcleo bajo la influencia de la atracción de Coulomb experimentada y sujeto a las leyes de la física clásica;
- (II) Para un electrón, solo es posible moverse en una órbita donde el momento angular electrónico sea un múltiplo entero de \hbar (ver ec. (2)),

$$L = m_e \cdot v \cdot r = n \cdot \hbar \quad (2),$$

donde L es el módulo del momento angular del electrón moviéndose en una órbita permitida, m_e es la masa del electrón, v es el módulo de la velocidad tangencial del electrón y r el radio de la órbita permitida.

- (III) A pesar de que el electrón se acelera constantemente cuando se mueve en una de las órbitas permitidas, no irradia energía electromagnética de modo que la energía total del electrón permanece constante;
- (IV) El átomo emitirá radiación si un electrón, que inicialmente se mueve en una órbita con una energía

total E_i , cambia su movimiento de manera discontinua para moverse en una órbita con una energía total E_f . De este modo, la energía de la radiación emitida será:

$$\Delta = E_i - E_f = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3),$$

Siendo ν y λ , la frecuencia y la longitud de onda del fotón emitido, respectivamente.

A partir de los postulados correspondientes al modelo atómico de Bohr, se puede demostrar que la energía total del electrón girando en una órbita permitida alrededor de un núcleo de número atómico Z es (pág. 130, Cap. 4, [1]):

$$E_n = -\frac{13.6 \text{ eV} \cdot Z^2}{n^2} \quad (4),$$

donde n es el número cuántico de momento angular definido en el postulado (II).

A partir de la ecuación (4) se puede despejar el inverso de la longitud de onda de la radiación emitida por el átomo en la transición del estado n_i al estado n_f . Debido a que en la deducción de la expresión (4) implícitamente se supuso a la masa nuclear infinitamente grande respecto a la masa del electrón, entonces el inverso de la longitud de onda teniendo en cuenta la corrección por masa nuclear finita (pág. 136, Cap. 4, [1]), nos queda:

$$\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{m_e}{m_e + M} \right) \cdot \frac{E_i \cdot Z^2}{h \cdot c} \cdot \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (5),$$

donde E_i representa la energía de ionización del átomo H ($E_i=13.6 \text{ eV}$) y M es la masa del núcleo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se describen los resultados obtenidos en la experiencia, los cuales son comparados con las líneas características del He encontradas en la literatura. En primer lugar se procedió con el centrado del espectrómetro tal como se describió en la segunda sección. Mediante la utilización del láser de He-Ne se obtuvo un valor experimental de $d=3.32 \mu\text{m}$ para la constante de la red de difracción (esto equivale a 301 líneas/mm). Posteriormente se sustituyó el láser por una lámpara de He y se midieron las posiciones angulares de las líneas características observadas mediante el uso del espectrómetro. En la Tabla N°1 se detallan las posiciones angulares observadas y sus correspondientes longitudes de onda calculadas a partir de la expresión (1).

| θ | $\lambda_{\text{exp. (nm)}}$ |
|----------|------------------------------|
| 7° 40' | 442.9(1.0) |
| 7° 45' | 447.7(1.0) |
| 8° 10' | 471.6(1.0) |
| 8° 35' | 495.5(1.0) |
| 8° 41' | 501.2(1.0) |
| 10° 13' | 588.8(1.1) |
| 11° 38' | 669.4(1.2) |
| 12° 18' | 707.2(1.2) |

TABLA 1: POSICIONES ANGULARES Y LONGITUDES DE ONDA MEDIDAS EN EL EXPERIMENTO.

En la Tabla N°1 se puede apreciar que el error relativo cometido en la determinación de las longitudes de onda medidas es aproximadamente del 0.2%. Esto se debe a la buena precisión del espectrómetro utilizado ($\Delta\theta=0.5'$).

Para la observación de las líneas se colocó la lámpara de manera que la región de mayor intensidad de luz (Figura N°2, zona A) fuese colectada por la ranura del objetivo del espectrómetro. Cuando se iluminó con la luz de la zona menos intensa, las longitudes de onda de 442.9, 495.5 y 707.2 nm no fueron observadas.

En la Tabla N°2 se comparan las longitudes de onda medidas con las encontradas en la literatura. Además, se especifica si las longitudes tabuladas corresponden a "saltos" entre estados excitados del átomo HeI o del ión HeII.

En la Tabla N°2 se puede apreciar que las longitudes de onda medidas, considerando la incertidumbre asociada a su determinación, están en muy buen acuerdo con las publicadas. Además, se observa que todas las líneas observadas corresponden a transiciones cuánticas del átomo HeI. Finalmente, es de destacar que las líneas de menor intensidad relativa son las que no se observan al enfocar la región menos intensa de la lámpara de He (ver Fig. N°2).

Por último, se analiza el poder de predicción del modelo de Bohr para las transiciones correspondientes a los sistemas HeI y HeII. Primero se considera el caso del átomo ionizado HeII. Las longitudes de onda publicadas son 468.6 y 656.0 nm¹.

A partir del modelo de Bohr aplicado al átomo hidrogenoide con $Z=2$ (ver ecuación (5)) se obtuvo una longitud de 469.4 nm para el salto electrónico $n_i=4 \rightarrow n_f=3$, y una longitud de 657.1 nm para el salto $n_i=6 \rightarrow n_f=4$. Por lo tanto, se puede concluir que el modelo de Bohr es inadecuado para reproducir (o predecir) las longitudes de onda emitidas por el átomo He simplemente ionizado. Además, cabe remarcar que los saltos cuánticos predichos por el modelo coinciden con los números cuánticos principales de los saltos reportados en la literatura.

¹ Fuente:

http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

| $\lambda_{exp.}$ (nm) | λ^1 (nm) | Ión | Intensidad relativa (%) |
|-----------------------|------------------|-----|-------------------------|
| 442.9(1.0) | 443.7 | HeI | 1 |
| 447.7(1.0) | 447.1 | HeI | 40 |
| 471.6(1.0) | 471.3 | HeI | 10 |
| 495.5(1.0) | 492.2 | HeI | 4 |
| 501.2(1.0) | 501.6 | HeI | 20 |
| 588.8(1.1) | 587.6 | HeI | 100 |
| 669.4(1.2) | 667.8 | HeI | 20 |
| 707.2(1.2) | 706.6 | HeI | 5 |

TABLA 2: COMPARACIÓN ENTRE LAS LONGITUDES DE ONDA MEDIDAS EN EL EXPERIMENTO Y LAS LONGITUDES DE ONDA PUBLICADAS EN LA LITERATURA.

Para analizar la aplicabilidad del modelo de Bohr al caso del átomo HeI se comparan las longitudes de onda publicadas que presentan mayor intensidad relativa con las predichas por el modelo de Bohr para el caso del átomo HeI. Para la aplicación del átomo de Bohr al caso neutro se tuvo en cuenta el siguiente escenario: inicialmente se supone que uno de los electrones está en el estado fundamental y el otro en algún estado excitado y el átomo emitirá radiación al pasar a un estado de energía más bajo. Debido a que el modelo no tiene en cuenta la repulsión electrón – electrón, entonces se desprecia tal repulsión.

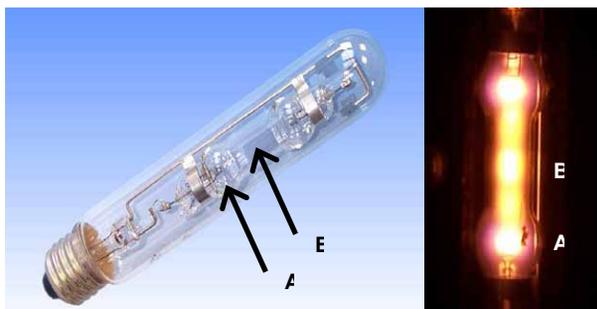


Figura 2. Zonas de intensidad luminosa diferentes. La zona indicada con la letra A es la de mayor brillo.

En la Tabla N°3 se comparan las longitudes publicadas con las longitudes más próximas predichas por el modelo.

| λ^2 (nm) | λ_{Bohr} (nm) | Salto energético | $\Delta\lambda/\lambda$ [%] |
|------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 447.7 | 454.6 | $n_i=9 \rightarrow n_f=4$ | 1.7 |
| 587.6 | 542.0 | $n_i=7 \rightarrow n_f=4$ | 7.7 |
| 667.8 | 669.4 | $n_i=13 \rightarrow n_f=5$ | 0.2 |
| 706.6 | 719.0 | $n_i=11 \rightarrow n_f=5$ | 1.7 |

TABLA 3: COMPARACIÓN ENTRE LAS LONGITUDES DE ONDA PUBLICADAS Y LAS LONGITUDES DE ONDA CALCULADAS MEDIANTE EL MODELO DE BOHR.

Comparando los resultados de la Tabla N°3 se aprecia un gran desacuerdo entre las líneas publicadas y las calculadas a partir del modelo de Bohr. Además, cabe destacar que los saltos cuánticos considerados en el modelo están en total desacuerdo con los saltos publicados. Por lo tanto, se concluye que el modelo de Bohr es inadecuado para reproducir las líneas emitidas por el átomo HeI.

V. CONCLUSIONES

A partir de la comparación de las líneas medidas en el experimento con las publicadas en la literatura se concluye que el espectrómetro utilizado es muy preciso para la determinación de las posiciones angulares y además es muy sofisticado para reproducir las medidas publicadas. Desde el análisis del poder de predicción del modelo de Bohr aplicado a las transiciones cuánticas del átomo HeI y HeII, se concluye que el modelo resulta satisfactorio para representar las transiciones en el HeII. Sin embargo, el modelo es inadecuado para representar la física del átomo HeI.

Referencias

- 1 - R. M. Eisberg, R. Resnick, Física cuántica: átomos, moléculas, sólidos y partículas, Ed. Limusa México, 1° ed. 1989.
- 2 - URL: <http://www.patonhawksley.co.uk/transmission.html>.
- 3 - URL: <https://www.cvimmellesgriot.com/Products/Green-543.5-nm-Cylindrical-Helium-Neon-Laser-Systems.aspx>.
- 4 - URL: <http://www.lampstech.co.uk/Spec%20Sheets/Philips%20L%20He.htm>.

² Fuente: http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html