

PRÁCTICA 8 ANÁLOGO CLÁSICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE FERMI-DIRAC

OBJETIVO

Realizar un experimento, basado en un conjunto de esferas que vibran dentro de un recipiente y obtener una distribución de densidad en altura de estas esferas. Explicar las similitudes y diferencias con la función de distribución de Fermi-Dirac.

FUNDAMENTOS FÍSICOS

Los fermiones son partículas que cumplen el principio de exclusión de Pauli, es decir, si existe un fermión en un estado determinado, no puede existir ningún otro fermión en ese mismo estado. La estadística que siguen estas partículas es distinta a la de partículas clásicas o la de bosones y se denomina estadística de Fermi-Dirac.

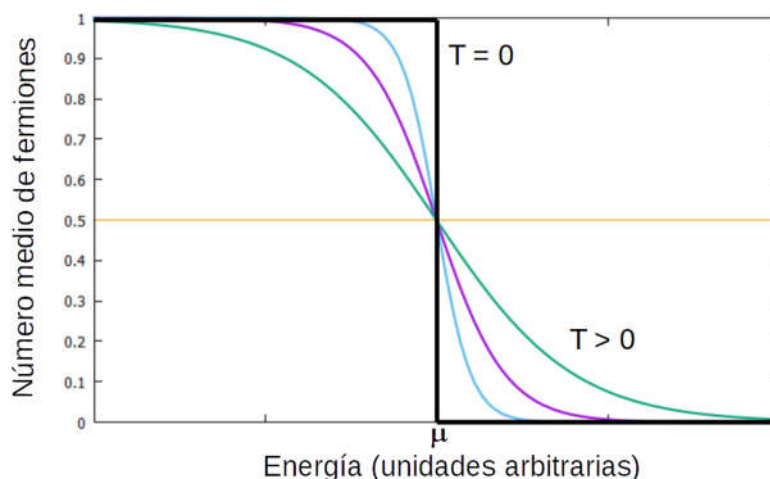
El número medio de fermiones (o la probabilidad de encontrar un fermión) en un estado de energía ϵ , para una determinada temperatura T y potencial químico μ viene dado por la distribución de Fermi-Dirac:

$$\bar{n}(\epsilon) = \frac{1}{e^{(\epsilon - \mu)/kT} + 1} \quad (1)$$

donde k es la constante de Boltzmann.

Según esta ecuación, el número medio de fermiones en un estado de energía ϵ siempre estará entre 0 y 1 ya que, si la energía ϵ es muy alta $\bar{n} \rightarrow 0$, y por muy pequeño que sea el valor de la energía, el valor máximo de esta función es 1. Esta es la condición impuesta por el principio de exclusión de Pauli. La siguiente figura muestra la distribución de Fermi-Dirac para distintas temperaturas. En el límite de $T = 0$ (línea negra en la figura) los fermiones ocuparán distintos niveles de energía, desde el estado fundamental hasta valores de energía cada vez mayores, ya que sólo se permite un fermión por estado. La energía del último estado ocupado se corresponderá con el potencial químico.

Al aumentar la temperatura, los fermiones en el último estado ocupado pueden pasar a ocupar



estados de energía más alta y la función tendrá la forma representada en la figura. A temperatura $T > 0$ el potencial químico se corresponde con el nivel de energía para el que la ocupación es $\frac{1}{2}$.

En esta práctica vamos a estudiar el comportamiento de unas esferas metálicas contenidas en un recipiente cuando se aplica una vibración que hace que cambie la densidad de esferas en función de la altura. El número máximo de esferas en cada altura está limitado por el tamaño del recipiente y la vibración simularía el efecto de la temperatura. Por tanto, en este caso lo que podemos determinar es el número medio de partículas en función de la altura. A partir de esta distribución se discutirán las similitudes y las diferencias entre los datos obtenidos en este sistema clásico y lo que se esperaría de una distribución tipo Fermi-Dirac, como la que puede existir en los electrones de conducción de un metal.

MATERIAL

- Dispositivo consistente en un vibrador mecánico y un pistón que permite la vibración de un conjunto de esferas (de entre 2 y 3 mm de diámetro aproximadamente) contenidas en un recipiente con ventanas transparentes. El tamaño del recipiente es delgado, de modo que las esferas se colocan en una única capa.
- Dispositivo consistente en una horquilla, cuya altura se puede variar, y que tiene dos brazos que contienen un emisor y un receptor de luz, respectivamente. Su función es contar las esferas que interrumpen el haz de luz en el camino entre el emisor y el receptor. El recipiente con las esferas se coloca entre los dos brazos de la horquilla en la zona en la que no hay esferas cuando el vibrador está en reposo.

REALIZACIÓN EXPERIMENTAL

Con el motor apagado sitúa los brazos de la horquilla que contienen el emisor y el receptor de luz a ambos lados del recipiente a una altura tal que el haz atraviere el recipiente en una zona sin bolas (a una cierta altura por encima de ellas). Conecta el motor y ajusta la frecuencia y la amplitud de vibración de manera que las bolas de la superficie estén saltando y algunas de ellas lleguen a atravesar el camino del haz de luz. Cada vez que una bola interrumpe el haz de luz el contador digital lo registra.

El dispositivo para contar las bolas tienes tres botones:

START, pulsar para empezar a contar. En ese momento con el cronómetro se empieza a contar el tiempo.

STOP, para detener el contador, una vez se llega al tiempo establecido.

NULL, para resetear el contador a cero una vez se quiere iniciar una nueva medida.

- 1) Determina el valor de la variable que correspondería al potencial químico en tu análogo clásico.
- 2) Una vez seleccionadas la frecuencia y la amplitud adecuadas, toma nota del número de registros para diferentes alturas fijando un tiempo de medición.
- 3) Haz lo mismo para diferentes tiempos.
- 4) Haz lo mismo para diferentes valores de la amplitud y frecuencias.

5) Representa el número de registros, en todos los casos, como función de la altura. ¿Qué significado tiene esta representación? ¿Qué relación podría tener con la expresión de la distribución de Fermi-Dirac?.

6) Interpreta los resultados.

Bibliografía:

Modern Physics, P. A. Tipler, R. A. Llewellyn, W. H. Freeman and Company, New York

Fundamentals of Statistical and Thermal Physics, F. Reif

PRÁCTICA 4

EXPERIMENTO DE FRANCK-HERTZ

OBJETIVO

Verificar que la transferencia de la energía en las colisiones entre electrones libres y átomos de mercurio y de neón se produce de forma discontinua, es decir, está cuantizada.

LECTURAS RECOMENDADAS

- [1]<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/627/A4.pdf?sequence=4>.
- [2][https://www.pas.rochester.edu/~rrubenza/projects/RAR_PHY243W_Lab2_FranckHertz.pdf\(rochester.edu\)](https://www.pas.rochester.edu/~rrubenza/projects/RAR_PHY243W_Lab2_FranckHertz.pdf(rochester.edu))
- [3]<https://www.physics.purdue.edu/~sergei/classes/phys342l/franckhertz.pdf>

FUNDAMENTOS FÍSICOS

Según la mecánica cuántica, los átomos poseen niveles discretos de energía, de forma que pueden absorber o emitir solamente la energía correspondiente a la diferencia entre dos de dichos niveles. Este hecho puede verificarse para átomos no hidrogenoides estudiando las energías de ionización de los átomos con el tubo electrónico de Franck-Hertz.

En 1913 Niels Bohr propuso el modelo atómico de Bohr, que supone que los átomos sólo pueden existir en ciertos estados de energía ligada. Esta idea recibió un poderoso impulso en 1914 cuando James Franck y Gustav Hertz realizaron un experimento que demostró la existencia de niveles de energía cuantificados en mercurio (Hg). El experimento consistió en enviar un haz de electrones a través de vapor de Hg y observar la pérdida de energía cinética cuando un electrón choca inelásticamente con un átomo de mercurio y lo excita desde su estado de energía más bajo a uno más alto.

El **átomo de mercurio** neutro tiene 80 electrones, distribuidos en la siguiente configuración:
 $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 3d^{10}, 4s^2, 4p^6, 4d^{10}, 4f^{14}, 5s^2, 5p^6, 5d^{10}, 6s^2$

Los átomos de vapor de mercurio normalmente están en su estado más bajo o fundamental, con los dos electrones de valencia que ocupan un estado designado por $(6s)^2$ (dos electrones en $n = 6$, $l = 0$). Los dos electrones no se mueven independientemente, por lo que tres cantidades (el momento angular de giro total S , el momento angular orbital total L , y el momento angular total J son constantes del movimiento, designadas por los números cuánticos S , L y J , respectivamente). Así, los estados de los electrones se designan con la notación espectroscópica $^{2S+1}L_J$. El valor de L será S cuando $L = 0$, P cuando $L = 1$, etc. El estado fundamental del mercurio es entonces 1S_0 .

Como se ve en la Figura 1, los siguientes niveles energéticos por encima del fundamental son los tripletes (3P_0 , 3P_1 y 3P_2), donde los espines de los electrones están paralelos. Hay un estado singlete superior 1P_1 con espines antiparalelos. En una colisión con un electrón energético, el átomo podría elevarse a cualquiera de estos estados excitados. En el experimento de Franck-Hertz clásico se observa principalmente excitación al estado 3P_1 .

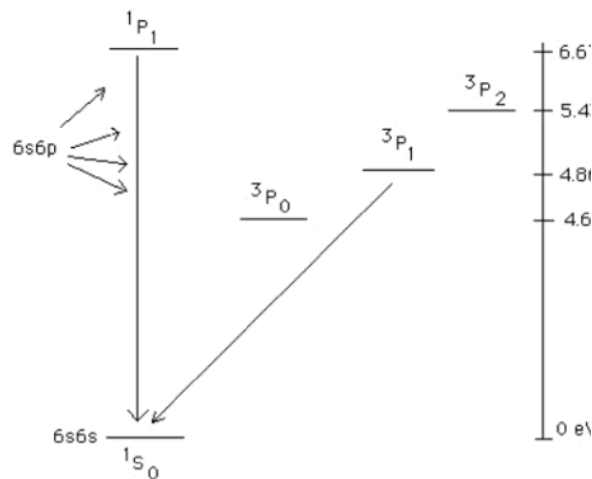


Figura 1. Niveles de energía del átomo de mercurio

La desexcitación que sigue desde el estado excitado al fundamental se produce emitiendo un fotón de energía igual a la diferencia de energía entre ambos niveles (correspondiente a una emisión en el ultravioleta, con $\lambda = 254 \text{ nm}$). Puesto que esta emisión no está en el visible, no es posible demostrar el fenómeno mediante simple visualización de la luz emitida, siendo necesario realizar un experimento más elaborado, implicando la aplicación de diferencias de potencial entre electrodos para visualizar cambios en la corriente recogida cuando se producen las excitaciones.

En el caso de **Neón** la configuración electrónica es:
 $1s^2, 2s^2, 2p^6$

La excitación más probable mediante colisión inelástica se produce desde el estado fundamental a los estados 3p, que tienen energías entre 18.4 eV y 19.0 eV sobre el estado fundamental, mientras que la excitación a los estados 3s, con energía menor (entre 16.6 y 16.9 eV) tiene una probabilidad menor (ver Figura 2). La desexcitación desde los niveles 3p al fundamental se produce mediante transición previa a los estados 3s con la emisión de un fotón cuya energía corresponde al rango visible (entre rojo y verde), y por tanto se puede visualizar con el ojo.

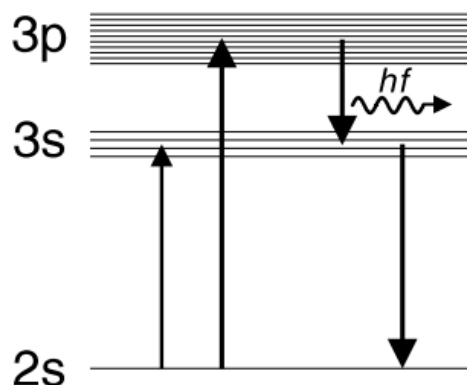


Figura 2. Diagrama de energías simplificado para neón

Sistema experimental

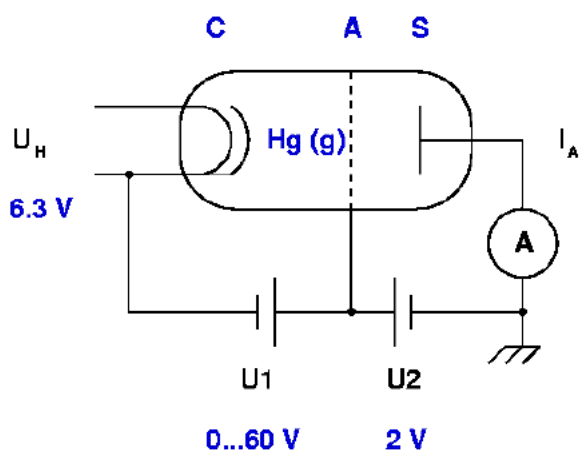
El equipo de Franck-Hertz es un equipo que incluye tres componentes: 1) el tubo de Franck Hertz, consistente en un dispositivo de emisión de electrones de energía cinética controlable que atraviesan un gas diluido de átomos (comúnmente de Hg o Ne); 2) unidad de control que permite variar los diversos parámetros ajustables del experimento; 3) ordenador portátil equipado con un software de Phywe (Measure).

El experimento se realizará con Hg y con Ne, utilizando tubos diferentes, con sus correspondientes unidades de control, siendo el ordenador el mismo. A continuación, se describe cada uno de ellos de forma separada:

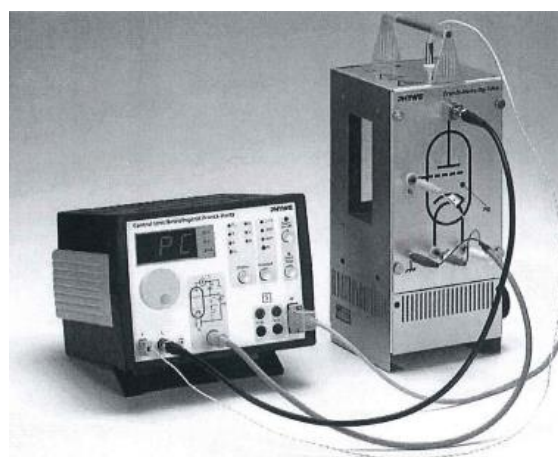
Dispositivo Franck Hertz con Hg

El tubo consta de un dispositivo emisor de electrones, que consta de 3 electrodos (ver esquema y fotografía en Figura 3):

1. **Cátodo C emisor de termoelectrones.** La emisión de los electrones por el filamento emisor se produce por efecto térmico debido a someterlo a una tensión alterna de calentamiento, U_H , que se fija en 6.3 V.
2. **Ánodo A en forma de rejilla,** para acelerar estos electrones. Se aplica una diferencia de potencial variable, U_1 (entre 0 y 60 V), entre C y A, que define la energía cinética de los electrones $E_K = e U_1$ que se moverán de C a A.
3. **Electrodo colector S.** Su papel es recoger parte de los electrones (los que tienen energía cinética suficiente para llegar), midiéndose la corriente I_A . Se aplica una diferencia de potencial de oposición o frenado (contratensión) U_2 entre A y S (prestad atención a la polaridad), que permite recoger sólo los electrones con mayor velocidad y por tanto visualizar los picos de forma más contrastada. El experimento se realiza con un valor fijo de U_2 (entre 0.5 y 2V).



(a)



(b)

Figura 3. a) Esquema del tubo de Franck-Hertz con Hg; (b) Fotografía de tubo (calefactado) y unidad de control.

El tubo contiene vapor de Hg, de modo que los termoelectrones pueden chocar con los átomos de Hg cuando se mueven hacia el ánodo, A. Al ir aumentando la tensión de aceleración U_1 , llega un momento en que los termoelectrones adquieren energía cinética suficiente para que la energía liberada en el choque (inelástico) sea suficiente para que los electrones de valencia del mercurio, al absorberla, puedan pasar del nivel fundamental a niveles excitados. Como consecuencia, los termoelectrones no alcanzan el electrodo colector S (que está conectado a una tensión ligeramente negativa respecto al ánodo A) y se produce un mínimo de la corriente recogida por I_A . Al seguir aumentando la tensión U_1 , el proceso se repite, siempre que la energía de los termoelectrones, que viene dada por (eU_1) , siendo e la carga del electrón, sea un múltiplo entero de la energía de excitación E_a de los átomos de mercurio.

En este experimento se pretende obtener experimentalmente la curva de variación de la corriente I_A en función de la tensión de aceleración U_1 . La corriente irá aumentando, presentando mínimos para ciertos valores de U_1 ($U_{1,\min}$ que vendrá dado, en primera aproximación por:

$$U_{1,\min} = n E_a/e = n E_{a,eV} \text{ siendo } n=1,2,3,\dots \text{ el número de mínimo} \quad (1)$$

siendo $n=1,2,3,\dots$ el número de mínimo, E_a la energía de excitación (diferencia de energía entre el estado fundamental y el excitado, expresada en julios) y e la carga del electrón ($E_{a,eV}$ es la energía de excitación en unidades de electrón voltio). Para poder tener vapor de mercurio y para que su densidad sea la adecuada para una buena observación de los mínimos (el recorrido libre medio de los electrones debe ser menor a la distancia entre C y A), es necesario calentar el tubo a una temperatura entre 140°C y 175°C . Por ello, el tubo está calefactado (va incorporado en un horno). Por encima de este intervalo de temperatura la corriente I_A disminuye y los mínimos tienden a desaparecer. Por debajo de 140°C , la corriente aumenta rápidamente y si se mantiene la tensión el tubo se podría quemar.

POR TANTO, ATENCIÓN:

NO TOCAR EL SELECTOR DE TEMPERATURA DEL HORNO (ESTÁ YA AJUSTADO PARA QUE LA TEMPERATURA PERMITA EL RANGO $145\text{-}175^\circ\text{C}$). El horno se activa al conectarlo a la red.

LA APLICACIÓN DE CORRIENTES CATODICAS ELEVADAS A TEMPERATURAS MENORES DE 100°C PODRÍA DAÑAR EL APARATO

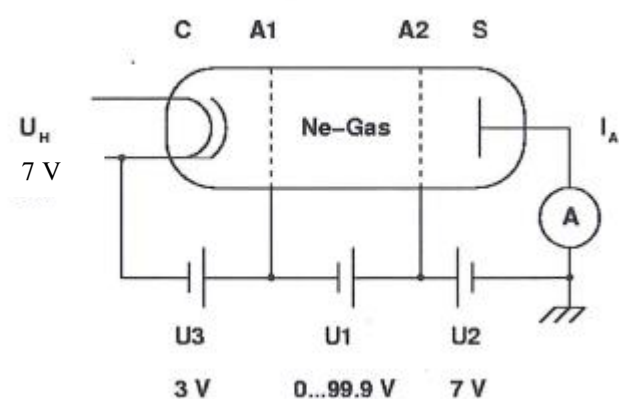
PARA EL ESTUDIO CON T QUE SE PIDE CON EL TUBO DE Hg, LA TEMPERATURA DE MEDIDA SE SELECCIONA CON EL SOFTWARE, NUNCA CAMBIANDO EL SELECTOR DEL HORNO.

Dispositivo Franck Hertz con Ne

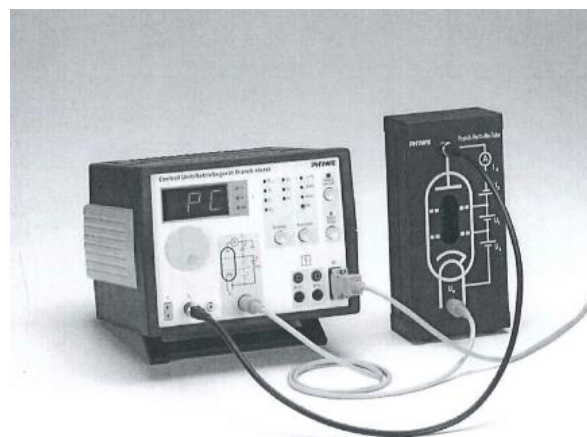
Este dispositivo va equipado con 4 electrodos, en lugar de 3 y no está calefactado. El sistema es similar al utilizado con Hg, pero en este caso hay dos rejillas, en lugar de 3 (ver Figura 4). Consta de:

1. **Cátodo C emisor de termoelectrones.** Su papel es similar al caso del Hg. La tensión de calentamiento U_H , que se fija en 7 V (para valores más altos se corta la medida porque se producen descargas en el tubo que pueden dañarlo).
2. **Ánodo A1 en forma de rejilla,** colocado cerca del cátodo C. Se aplica una diferencia de potencial fija entre C y A1, que llamamos U_3 , que dirige los termoelectrones generados en C hasta A1.

3. **Ánodo A2 en forma de rejilla** colocado a una distancia de A1 suficiente para que se puedan producir choques entre los electrones y los átomos de Ne (grande comparada con el recorrido medio de los electrones en el gas). Se aplica un potencial de aceleración U_1 entre A1 y A2, variable (en este caso entre 0 y 99.9 V).
4. **Electrodo colector S.** Su papel es similar al caso del Hg. Se aplica una contratensión U_2 para facilitar la recolección de los electrones y la visualización de los máximos y mínimos de corriente.



(a)



(b)

Figura 4. a) Esquema del tubo de Franck-Hertz con Ne; (b) Fotografía de tubo y unidad de control.

REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA

1. Tubo de Franck-Hertz con Hg

Objetivo 1: Experimento clásico de Franck Hertz. Obtener la curva de corriente I_A en función del potencial de aceleración U_1 y a partir de ella la energía de excitación del Hg desde el estado fundamental al primer excitado. Esta energía corresponde aproximadamente al espaciamiento entre los mínimos (se asume que el espaciamiento entre los dos mínimos consecutivos es constante al aumentar n , de acuerdo con la ecuación 1).

Objetivo 2: Estudiar la dependencia con la T. Analizar posibles efectos en las energías de excitación e investigar el papel del recorrido libre medio.

Montaje del sistema experimental

1. Tubo de Franck-Hertz calefactado. Conectar el cable del sensor de temperatura (T) a la unidad de control. A continuación, conectar el cable de suministro eléctrico del horno. El selector de temperatura ya está ajustado para que la temperatura permita medir en el rango entre 145 y 175 °C (NO TOCARLO). Debe esperarse varios minutos para esté caliente y se puedan hacer medidas. Mientras tanto ir conectando los cables a la unidad de control según se explica en el punto 2.
2. Conectar la unidad de control a la red alterna y encender con el interruptor de alimentación situado en la parte trasera. Conecta el tubo de Hg con la unidad de control mediante un cable de 5 polos (con etiquetas, para suministrar U_H , U_1 , U_2 y U_3) y un cable BNC (para medir I_A).
3. Conectar la unidad al ordenador mediante un cable RS232. Encender el ordenador e iniciar el programa de software (Measure). El programa detecta si está conectado un tubo de Hg o

de Ne. Los parámetros necesarios para medir están preconfigurados con los siguientes valores: U1 final: 60 V; U2 = 2 V; UH = 6.3 V; T = 175 °C.

Medidas y análisis

1. **Experimento clásico de Franck-Herzt.** Obtener la curva de U1 en función de I_A para los parámetros preconfigurados, así como para dos casos más, cambiando U2 (= 1 V; 1.5 V).

Determina el espaciamiento entre dos mínimos consecutivos $\Delta U_{1,\min}$ para cada caso (se sugiere despreciar el primer mínimo, $n = 1$) Suponiendo que este espaciamiento es independiente del número de mínimo (n), determina la energía de excitación promedio y su error. Prueba también a representar $U_{1,\min}$ en función de n y ajustando con la ecuación (1) obtén la energía de excitación. Comprobar si corresponde con el nivel de energía 3P_1 (4.89 eV, Figura 1).

2. **Estudio del efecto de la temperatura.** Poniendo de nuevo los parámetros preconfigurados, haz medidas cambiando la temperatura (cada 5 °C) a la que ésta se realiza en el rango entre 145 y 175 °C. Determina el espaciado entre mínimos consecutivos $\Delta U_{1,\min}$ y represéntalo, para cada T, en función del número de mínimo.

En este caso realiza un análisis acorde al llevado a cabo en el trabajo de R. Rubenzah et al. (lectura recomendada [2]). Según este estudio, el espaciado entre mínimos $\Delta U_{1,\min}$ (para una T dada) no es constante al aumentar el número de mínimo (n), sino que aumenta según la ecuación:

$$\Delta U_{1,\min}(n) = \left(1 + \frac{l}{L}(2n - 1)\right) V_a, \quad (2)$$

donde V_a es el voltaje de aceleración mínimo al que pueden producirse colisiones elásticas (4.67 eV, coincidente con el nivel 3P_0), l es el recorrido libre medio y L es la distancia entre el cátodo y la rejilla.

- a) Para cada T, representa $\Delta U_{1,\min}$ en función de n . Ajusta los resultados con la ecuación (2) y extrapola el valor de $\Delta U_{1,\min}$ para $n = 0.5$, que corresponderá con el valor de V_a mínimo para que se produzcan colisiones elásticas. Verifica que la energía obtenida corresponde al nivel 3P_0 .
- b) Analiza el efecto de la temperatura representando $\Delta U_{1,\min}$ (para $n = 2$) en función de la temperatura. Explica a qué es debido el comportamiento observado, explicando el papel del recorrido libre medio l . ¿Puedes determinar (o estimar) el valor de l en tus experimentos y su dependencia con la T?

2. Tubo de Franck-Hertz con Ne

Objetivo 1: Obtener la curva de corriente I_A en función del potencial de aceleración U1 y a partir de ella la energía de excitación del Ne desde el estado fundamental al primer excitado. Esta energía corresponde aproximadamente al espaciamiento entre los mínimos (se asume que el espaciamiento entre los dos mínimos consecutivos es constante al aumentar n, de acuerdo con la ecuación 1).

Objetivo 2: Observar cualitativamente la emisión de la luz en el tubo, como consecuencia de la desexcitación desde el estado excitado al fundamental.

Montaje del sistema experimental

Conectar el tubo de Franck-Hertz con Ne (en este caso no está calefactado) con la unidad de control y ésta con el ordenador (ver Figura 4b). En el programa de software (Measure) los parámetros para

medir están preconfigurados con los siguientes valores: $U_H = 8 \text{ V}$; U_1 final: 99.9 V ; $U_2 = 7 \text{ V}$; $U_3 = 3 \text{ V}$.

MUY IMPORTANTE: CAMBIAR U_H A UN VALOR MENOR $U_H = 7 \text{ V}$ (la medida se corta porque la corriente parece ser excesiva). Cada vez que se hace una nueva medida el programa lo cambia al valor preconfigurado (**ASEGURAR QUE SE CAMBIA A 7 V**)

Medidas y análisis

a) Obtención de curvas de I_A versus U y obtención de energía mínima de excitación del Ne.

Obtener curvas variando diferentes parámetros, explicando la razón de las diferencias observadas, en función del papel que juegan en el experimento:

- Efecto de cambiar la corriente de calefacción U_H . Obtener curvas con $U_H = 7 \text{ V}$ y $U_H = 6 \text{ V}$. El resto de los parámetros fijos: U_1 final = 99.9 V ; $U_2 = 7 \text{ V}$; $U_3 = 3 \text{ V}$.
- Efecto de cambiar U_3 . Obtener curvas para diversos valores de U_3 (en torno a 3 V) con el resto de los parámetros fijos: $U_H = 7 \text{ V}$ (o 6 V), U_1 final = 99.9 V ; $U_2 = 7 \text{ V}$.
- Efecto de cambiar U_2 . Obtener curvas para diversos valores de U_2 (en torno a 7 V) con el resto de los parámetros fijos: $U_H = 7 \text{ V}$ (o 6 V), U_1 final = 99.9 V ; $U_3 = 3 \text{ V}$.
- Con las mejores curvas obtenidas, determina el espaciado entre mínimos consecutivos, para obtener la energía de excitación del Ne y conocer a qué nivel excitado corresponde (Figura 2).

- b)** Realiza de nuevo varios experimentos, con los parámetros que mejores curvas hayan dado, y presta atención a la emisión de luz del tubo. i) Observad si se produce en el momento justo después de la observación de un mínimo; ii) ¿Se observa algún cambio en la posición (distancia a A1) desde la cual se ve la luz emitida al ir aumentando el voltaje de aceleración U_1 ?; iii) A partir del color de la emisión, ¿puedes estimar su longitud de onda y comprobar si es coherente con la diferencia de energía entre el estado fundamental y el excitado? Para esta parte puede ser útil grabar un video del tubo, que comience justo cuando se inicia la medida.

**ASIGNATURA TÉCNICAS EXPERIMENTALES II (3^{er} Curso Grado en Física)
Curso 2022-2023**

**PRACTICA 1B: EFECTO FOTOELÉCTRICO Y DETERMINACIÓN DE LA
CONSTANTE DE PLANCK.**

1B- Selección de frecuencias mediante red de difracción.

OBJETIVO PRINCIPAL (común a 1A y 1B)

Estudiar experimentalmente el fenómeno del efecto fotoeléctrico y la necesidad de utilizar la Mecánica Cuántica para su interpretación.

OBJETIVOS CONCRETOS (común a 1A y 1B)

- 1) Comprobar experimentalmente la verificación de la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico.
- 2) Determinar experimentalmente la constante de Planck y la función de trabajo del metal.
- 3) Analizar otros indicadores de la necesidad de la Mecánica cuántica para explicar el efecto fotoeléctrico, tales como la existencia de una frecuencia umbral mínima para la observación del fenómeno, o la independencia de dicho valor con la intensidad de la luz incidente.
- 3) Los objetivos concretos anteriores se realizarán utilizando dos métodos diferentes para obtener luz de diferentes frecuencias. Concretamente, utilizando:
 - A) Una fuente de luz continua y filtros interferenciales.
 - B) Una fuente de luz continua y una red de difracción.

COMPETENCIAS CONCRETAS QUE SE PRETENDE EL ALUMNO ADQUIERA (común a 1A y 1B)

- Comprender en detalle uno de los experimentos clave que dio lugar al origen de la Mecánica Cuántica: el efecto fotoeléctrico.
- Aprender diversos métodos de obtener luz de diferentes frecuencias a partir de un haz de luz continua: mediante filtros interferenciales o mediante una red de difracción.

PRACTICA 1B: Selección de frecuencias con red de difracción

FUNDAMENTOS FÍSICOS BÁSICOS

El efecto fotoeléctrico externo fue descrito por primera vez en 1886 por Heinrich Hertz. Pronto quedó claro que este efecto muestra ciertas características que no pueden explicarse mediante la teoría clásica de la onda de la luz. Por ejemplo, cuando la intensidad de la luz que brilla en un metal se vuelve más intensa, la teoría clásica de la onda tendría en cuenta que los electrones liberados del metal absorberían más energía. Sin embargo, los experimentos mostraron que la energía máxima posible de los electrones eyectados depende solo de la frecuencia de la luz incidente y es independiente de su intensidad.

La explicación teórica fue dada por Einstein en 1905. Sugirió que se podría considerar que la luz se comporta como partículas en algún aspecto, moviéndose con una velocidad constante. La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico, que demuestra el comportamiento de la luz similar a una partícula de los fotones, contribuyó al desarrollo de la teoría cuántica. Por lo tanto, el efecto fotoeléctrico externo es uno de los experimentos clave en el desarrollo de la física moderna y

Einstein obtuvo el Premio Nobel de Física "por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico".

El efecto fotoeléctrico es un proceso por el cual los electrones de conducción escapan de un metal tras absorber energía de una radiación electromagnética. Según la mecánica cuántica, la cantidad de energía E que puede intercambiarse en el proceso es la correspondiente a un fotón

$$E = h \nu \quad (1)$$

donde h es la constante de Planck y ν la frecuencia de la radiación.

Si Φ es la energía necesaria para que un electrón escape del metal, la diferencia $(h\nu - \Phi)$ aparecerá como energía cinética del electrón W_{cin} .

$$W_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - \Phi \quad (2)$$

No todos los electrones necesitan la misma energía para escapar. La energía cinética máxima corresponde al valor mínimo de Φ que se llama energía de arranque o función de trabajo del metal y se representa por Φ_0 .

$$W_{cin,max} = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = h\nu - \Phi_0 \quad (3)$$

En esta práctica, para estudiar el efecto fotoeléctrico, se utiliza un fototubo ubicado dentro de una caja cerrada. La parte de la superficie cilíndrica interior está recubierta con una capa metálica, que será el emisor de electrones, y el eje del cilindro es un hilo conductor (colector de electrones); una pantalla colocada delante del eje impide la iluminación del hilo conductor. Al iluminar la superficie metálica con luz de una determinada frecuencia, se emiten electrones, siempre que la energía de la luz sea lo suficientemente grande. Si los electrones emitidos alcanzan el hilo conductor, son absorbidos por éste, dando como resultado una corriente, que se denomina fotocorriente, dado que ha sido inducida por luz. Como resultado, la superficie metálica que ha emitido los electrones se carga positivamente respecto al hilo conductor (por ello a ambos conductores se les llama cátodo y ánodo, respectivamente) apareciendo una diferencia de potencial entre ambos. En teoría de bandas a este potencial se le llama de contacto (V_{AC}) y su aparición hace que los electrones sufran un cierto retraso en su viaje del emisor al colector.

Como ya se mencionó anteriormente, para que la superficie metálica iluminada pueda emitir electrones, es necesario que la energía de los fotones incidentes sea mayor al trabajo de extracción o función de trabajo del metal, que este caso es el cátodo (denominado función de trabajo del cátodo, Φ_c). Si esta condición se cumple, el electrón liberado tendrá una energía máxima dada por la Ecuación (3) (con $\Phi_0 = \Phi_c$).

Experimentalmente, para poder medir la energía cinética de los electrones emitidos, lo que se hace es aplicar un voltaje externo (V_{bias}) entre cátodo y ánodo de manera que frene a los electrones que viajan del emisor and colector. Este voltaje será negativo respecto al cátodo y tendrá la misma polaridad que el potencial de contacto V_{AC} , por lo que al igual que éste contribuye al retardo de los electrones. Al valor de V_{bias} para el cual la fotocorriente se hace prácticamente cero se le denomina potencial de frenado y se le denota como V_0 .

Así, para el valor del potencial de frenado V_0 , la energía cinética máxima de los electrones será:

$$W_{cin,max} = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = e(V_0 + V_{AC}) \quad (4)$$

El potencial de contacto se puede calcular a partir de los potenciales electroquímicos del ánodo y cátodo, que multiplicados por la carga del electrón, constituyen las funciones de trabajo de ánodo (Φ_A) y cátodo (Φ_C), respectivamente. Teniendo en cuenta la ecuación (3), se llega a la expresión siguiente:

$$W_{cin,max} = e(V_0 + V_A - V_C) = h\nu - \Phi_C \quad (5)$$

que se puede reescribir según:

$$V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{\Phi_A}{e} \quad (6)$$

El experimento consistirá en medir el potencial de frenado V_0 para diferentes frecuencias. Representando una frente a otra, se puede obtener a partir de un ajuste lineal el valor de la constante de Planck y de la función de trabajo del metal del ánodo. Nótese que la función de trabajo del cátodo no aparece en la expresión.

Por otra parte, de la ecuación de Einstein, también se sigue que si la frecuencia de la radiación es menor que un valor

$$\nu_0 = \Phi_A / h \quad (7)$$

llamado umbral de frecuencias, no es posible la emisión. Esta frecuencia umbral también se puede obtener de la representación gráfica anterior, pues corresponde con el corte de la recta con el eje x.

MATERIAL

- Celda fotoeléctrica en carcasa.
- Red de difracción de 600 líneas/mm.
- Filtro de color, que transmite longitudes de onda mayores de 600 nm.
- Rendija ajustable.
- Diafragma y soporte.
- 2 lentes montadas de distancia focal 10 cm.
- Lámpara halógena de 12 V, 50 W y soporte con objetivo a la salida de distancia focal 6 cm.
- Fuente de alimentación DC.
- Amplificador universal.
- 2 multímetros digitales.
- Banco óptico de 60 cm de longitud con dos brazos, uno de los cuales puede rotar y lleva un goniómetro para medir el ángulo entre los brazos.
- Resistor variable con resistencia máxima de 100 Ohm y cables de conexión.

REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Sistema experimental (Figura 1)

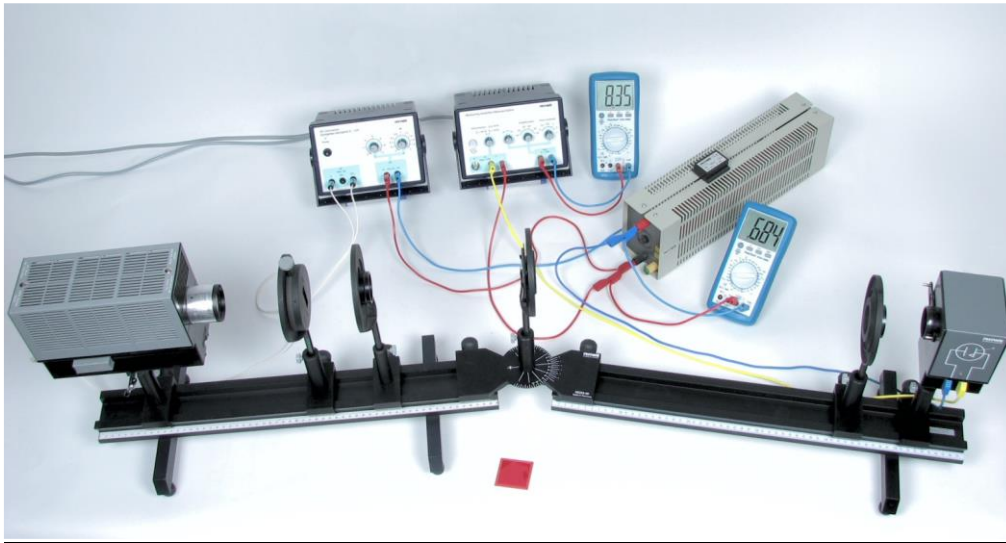


Fig. 1: Sistema experimental completo.

- Colocar el banco óptico con los dos brazos de manera que uno de ellos esté fijo sobre la mesa y el otro pueda girar.

- En el brazo fijo se colocan la lámpara, la rendija variable y una de las lentes de distancia focal 10 cm, a distancias respecto al extremo libre de 9.0 cm, 34.0 cm y 44.0 cm, respectivamente.

¿Por qué hay que colocar los elementos en estas posiciones? ¿Qué ocurre si no los pones ahí?

Con estos elementos realizar las siguientes operaciones:

- Conectar la lámpara.
- Ajustar la anchura de la rendija para que sea la misma que la de la rendija de entrada a la celda fotoeléctrica.
- Mover el soporte de la lámpara dentro de la carcasa para enfocar la luz que sale de la lámpara sobre el plano de la rendija.
- Mover la lente de manera que el haz de luz a su salida sea paralelo.

- Insertar la red de difracción en el soporte con el diafragma y colocarlo en el extremo del brazo móvil, en el nudo de conexión con el otro brazo. Ajustar las líneas de la red para que estén en posición vertical. Para ello observar que el espectro que forma en las superficies circundantes tiene la misma altura a ambos lados de la red.

- Colocar la célula fotoeléctrica en el extremo libre del brazo que puede rotar y con la otra lente de focal 10 cm focalizar la luz proveniente de la rendija variable sobre la rendija de entrada a la celda fotoeléctrica.

- Anotar como ángulo cero aquel en el que toda la luz no difractada entra por la rendija de entrada a la celda fotoeléctrica.

- Realizar las conexiones eléctricas según se muestra en la figura 2 y llevar a cabo las siguientes operaciones:

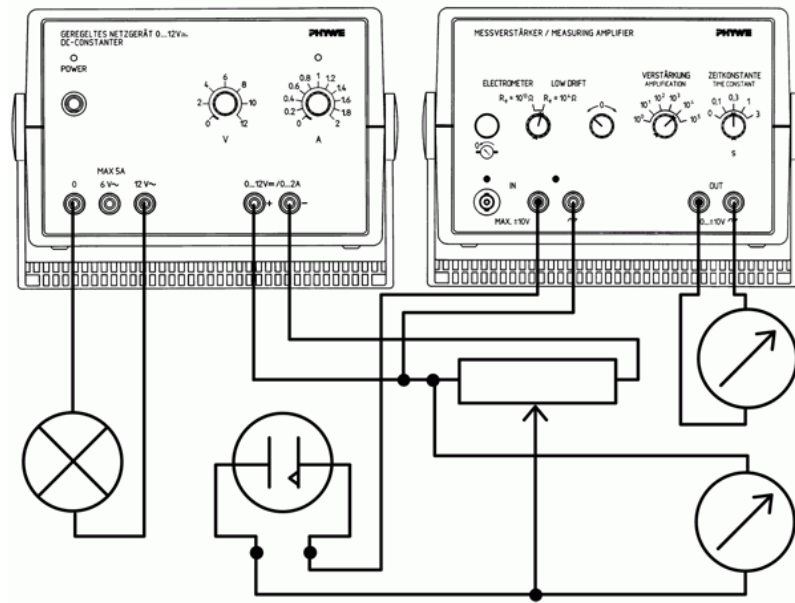


Fig. 2: Esquema de las conexiones eléctricas.

- Ajustar el amplificador en modo “low drift”, factor de amplificación 10^5 y constante de tiempo 0.3 s. Comprobar el cero del amplificador (sin conexión en la entrada, ajustar el voltaje de salida del amplificador a cero, utilizando el botón de cero del aparato). Nótese que el voltaje que se mide a la salida del amplificador es proporcional a la fotocorriente, y cuyo valor depende del potencial de frenado aplicado.
- En la fuente de voltaje, ajustar el potenciómetro para tener 3 V y una corriente de 1 A. Entonces ajustando con el reóstato se puede variar el potencial de frenado aplicado y que se mide en el voltímetro conectado a él.

Notas importantes:

La entrada del amplificador tiene una Resistencia de 10,000 Ohm. Así, si se usa por ejemplo un factor de amplificación de 10^4 , entonces 1 voltio en la salida del amplificador corresponde a 0.0001 V en la entrada y una corriente de 10 nA.

Para realizar una medida precisa de los ángulos de difracción, además de la escala del goniómetro, que tiene divisiones cada 5° , se utiliza otra escala, conocida como escala “vernier”, que permite tener una precisión mayor (0.5°). En la Figura 3 se muestra un ejemplo explicativo de cómo se realizan medidas usando esta escala.

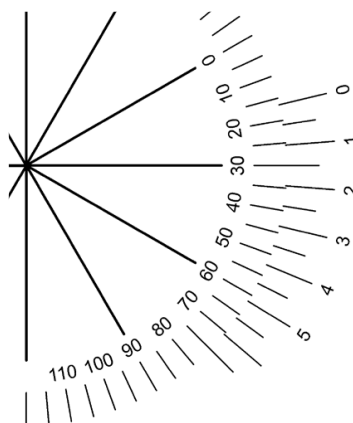


Fig. 3: Ejemplo de lectura utilizando la escala Vernier; Según la escala principal, el ángulo que se quiere medir es un poco mayor a 15° . En la escala de la derecha se busca la primera marca que coincida con una marca de la escala principal. En el ejemplo esta marca es la de 1.5° , por lo que ángulo será de 16.5° .

Realización y análisis: Parte 1

Medir el voltaje aplicado V_{bias} cuando la corriente es muy próxima a cero, esto es, el voltaje umbral V_0 , para el rango de ángulos del brazo móvil entre 13° y 25° . Nótese que en estas condiciones la luz que incide sobre la célula fotoeléctrica corresponde al primer orden de difracción de la lámpara. Para ángulos mayores de alrededor de 21° , es necesario colocar un filtro rojo delante de la entrada de la célula, que sólo transmite luz de longitud de onda mayor a 600 nm. Este filtro tiene por objeto evitar que sobre la celda fotoeléctrica incida luz UV del segundo orden de difracción, que produciría perturbaciones en la medida. Es posible que haya un rango de longitudes de onda, antes de que sea necesario colocar el filtro en el que las medidas no sean buenas.

Calcular la longitud de onda, y a partir de ella la frecuencia, de la luz que corresponde a cada uno de los ángulos α , utilizando la expresión:

$$d \sin \alpha = n \lambda \quad (8)$$

donde d es la constante de la red de difracción o periodo (en este caso $1/600$ mm), λ es la longitud de onda de la luz emitida y n es un número entero, que indica el orden de difracción (en este caso $n = 1$).

Representar gráficamente el voltaje umbral en función de la frecuencia y ajustar con la expresión (6), determinando el cociente h/e y la función de trabajo del ánodo.

Realización y análisis: Parte 2

Para al menos 6 ángulos de los anteriores, medir la intensidad de corriente para distintos valores de voltaje y obtener la curva I-V. Ajusta los resultados y obtén para cada una el potencial umbral. Compara los valores con los medidos en el apartado anterior.

¿A qué puede ser debido que para potenciales de frenado elevados se midan valores negativos de fotocorriente?

Realización y análisis: Parte 3

Para uno de los ángulos, realizar varias curvas I-V para distintos valores de la intensidad de la luz incidente. Para variar la intensidad del haz puedes usar los filtros de densidad óptica de la práctica 1ª.

Realización y análisis: Parte 4

Si tienes tiempo prueba a hacer el experimento cambiando la red de difracción por otra con diferente número de líneas por mm.

ASIGNATURA TÉCNICAS EXPERIMENTALES II (3^{er} Curso Grado en Física)

Curso 2022-2023

PRÁCTICA 7. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES DE MAXWELL-BOLTZMANN

OBJETIVO

Visualizar la distribución de velocidades de un sistema de partículas y comprobar que es similar al de las moléculas de un gas ideal y que viene dada por la distribución o estadística de Maxwell-Boltzmann.

FUNDAMENTOS FÍSICOS

En un gas ideal, las velocidades v de un conjunto de partículas están dadas por la distribución de probabilidad o estadística de Maxwell-Boltzmann,

$$f(v) = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta v} = C_1 v^2 \exp(-C_2 v^2) \quad (1)$$

donde las constantes C_1 y C_2 dependen del número de moléculas por unidad de volumen, su masa y la temperatura a que se encuentra el gas. Es obvio que el número de partículas con velocidades comprendidas en el intervalo $[v, v+dv]$ estará dado por

$$\Delta N = f(v) \Delta v \quad (2)$$

En esta práctica, las moléculas están representadas por esferitas de vidrio. Estas esferitas se encuentran encerradas dentro de una cámara cuya base es una plataforma que vibra. Las vibraciones se transmiten a las esferitas comunicándoles un movimiento desordenado "similar" al térmico de las moléculas de un gas ideal. En una de las paredes de la cámara se encuentra un filtro compuesto por un orificio y una rendija horizontal que permite la salida, únicamente, de las esferitas cuya velocidad es horizontal. La selección de las esferitas con velocidad horizontal no quita generalidad al experimento puesto que todas las direcciones son equivalentes. En estas condiciones, el módulo de la velocidad es proporcional al alcance x de las esferitas (tiro parabólico)

$$v = \left(\sqrt{\frac{g}{2y}} \right) x \quad (3)$$

Para clasificar las esferitas según su velocidad se utiliza una cubeta dividida en $N^s = 24$ sectores anulares concéntricos de anchura 10 mm. En el fondo de la cubeta hay una rendija que comunica con unas células verticales transparentes que permiten visualizar la curva de distribución de velocidades directamente. No obstante, para realizar cálculos será necesario contar el número de esferitas que llega a cada sector.

Para realizar el experimento de forma adecuada es importante que la frecuencia de vibración y el número total de esferitas en el interior de la cámara se mantengan constantes durante el tiempo que dura el experimento. Su variación equivaldría a una variación de la temperatura o del número de moléculas por unidad de volumen del gas ideal, respectivamente.

MATERIAL UTILIZADO EN LA PRÁCTICA

- Simulador del movimiento térmico de las moléculas de un gas ideal, cuyos elementos principales son: motor; plataforma que vibra accionada por el motor y burbuja para su nivelación; orificio y filtro que permite seleccionar las bolas con velocidad horizontal; pistón, que permite limitar el volumen de la cámara; tolva de carga.
- Cubeta de clasificación.
- Alfombrilla para aislar las vibraciones del simulador.
- Reóstato (500Ω , 220V): resistencia variable que permite cambiar el voltaje que alimenta el motor y por tanto variar la frecuencia de vibración de la plataforma.
- Estroboscopio, que sirve para medir cuantitativamente la frecuencia de vibración de la plataforma del simulador.
- Cronómetro.
- Tubos de ensayo y esferitas de vidrio.
- Balanza

REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA

1) Preparación del simulador, la cubeta de clasificación de las esferitas y las esferitas. Tras nivelar horizontalmente la plataforma del simulador, aproximar la cubeta hasta tocar el simulador, de modo que la rendija de salida del simulador quede justamente 80 mm por encima del borde de los sectores anulares de la cubeta de clasificación. Este valor es el parámetro y de la ecuación (2). Ajustar la altura del pistón a 60 mm y obturar la salida de las esferitas.

A continuación, contar 400 esferitas e introducirlas en la cámara a través de la tolva de carga. Además, preparar 14 tubos de ensayo con 45 esferitas cada uno, que deberán ser vaciados uno a uno por minuto, una vez se inicie el experimento (45 esferitas es la cantidad aproximada de esferitas que son expulsadas de la cámara por minuto). Si se quiere evitar contar bolitas puede estimarse el número mediante pesada. En este caso debería calcularse los errores cometidos en cada caso.

2) Conectar el simulador para que empiece a vibrar la plataforma y ajustar su frecuencia. Conectar el motor del simulador a la red a través del reóstato. Este permite variar la frecuencia de vibración, que debe ajustarse con la ayuda del estroboscopio para que sea de 3000 rpm. Para ello, seleccionar esa frecuencia en la escala del estroboscopio, iluminar el fondo de la cámara y aumentar lentamente las revoluciones del motor moviendo el cursor del reóstato hasta que la plataforma que vibra parezca estar en reposo o se mueva muy lentamente.

3) Realización del experimento. Abrir el obturador y simultáneamente poner en marcha el cronómetro. A intervalos de un minuto, introducir en la cámara del simulador 45 esferitas de las preparadas con anterioridad. La duración del experimento es de unos 15 min, al cabo de los cuales se desconecta el motor.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

1) Cuantificación y representación gráfica de los resultados experimentales. Observar la forma de la curva de distribución de velocidades en la parte baja de la cubeta de clasificación. Para poder cuantificar y representarla, contar el número de esferitas que hay en cada uno de los compartimentos y confeccionar una tabla con los valores del número de orden del compartimento ($i=1, \dots, N^s$), número de esferitas en cada compartimento ΔN_i y la velocidad media v_i ($i=1, \dots, N^s$)

correspondiente a cada compartimento calculada mediante la fórmula (3). Representar gráficamente ΔN_i en función de v_i .

2) Representación de la curva de distribución teórica (ecuaciones 1 y 2) y comparación con la curva experimental. Para representar la curva teórica es necesario calcular los valores de las constantes C_1 y C_2 .

Para el cálculo de C_2 consideramos el punto más singular de la curva experimental obtenida que es su máximo ($v_m, \Delta N_m$) e imponemos que el máximo de la curva teórica ocurra a la misma velocidad, es decir que $f(v_m)$ sea el máximo de la distribución de Maxwell-Boltzmann de la Ecuación (1). Derivando esa ecuación con respecto a "v" e igualando a cero se obtiene,

$$C_2 = \frac{1}{v_m^2} \quad (4)$$

Para el cálculo de C_1 se utilizarán dos procedimientos alternativos:

Procedimiento A) Imponemos que dicho punto ($v_m, \Delta N_m$) pertenezca a la curva teórica, es decir,

$$\Delta N_m = f(v_m) \Delta v_m = C_1 v_m^2 \exp(-C_2 v_m^2) \Delta v_m$$

obteniendo,

$$C_1 = \frac{e \times \Delta N_m}{v_m^2 \Delta v_m} \quad (5)$$

donde Δv_m se calcula utilizando la Ecuación (3),

$$\Delta v_m = \left(\sqrt{\frac{g}{2y}} \right) \Delta x_m$$

dado que todos los sectores son iguales $\Delta x_m = \Delta x_i = 0.01m$, para $i=1, \dots, N^s$.

Procedimiento B) Imponemos que la distribución teórica nos dé el número total de partículas utilizadas en el experimento, es decir,

$$\int_0^\infty f(v) dv = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \frac{C_1}{C_2^{1.5}} = \sum_{i=1}^{N^s} \Delta N_i = N^e \quad (6)$$

siendo N^e el número total de esferitas. De la Ecuación (6) se deduce la expresión alternativa para la constante C_1 ,

$$C_1 = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{N^e}{v_m^3} \quad (7)$$

CUESTIONES

Cuestión 1: Buscar en la bibliografía la distribución de velocidades de un gas ideal para obtener expresiones de las constantes C_1 y C_2 en función de parámetros físicos. Hacer una estimación de los valores de estas constantes en este experimento. ¿Distan mucho de los correspondientes a un gas ideal? ¿Por qué?

Cuestión 2: Si utilizamos la Ecuación (5) para calcular C_1 no está garantizado que la distribución de probabilidad teórica nos dé el número total de esferitas utilizado en el experimento. Mediante la Ecuación (6) calcular el número de esferitas que nos da la expresión teórica y comentar el resultado.

Cuestión 3: Utilizando la distribución de Maxwell-Boltzmann, estimar la temperatura a la que tendrían que estar las bolitas para que pudieran vibrar sin necesidad del motor, del mismo modo al que lo hacen en el experimento.

Cuestión/actividad 4: Hacer simulaciones de la distribución de Maxwell-Boltzmann variando de forma independiente los parámetros implicados en las constantes (masa y temperatura). En el experimento aquí realizado con bolitas ¿cómo podrías simular un cambio de temperatura? Si te es posible realiza tales experimentos y discute los resultados.