

PRÁCTICAS DE FÍSICA CUÁNTICA I

Grado en Física

Curso: 2015/16



Universidad
Zaragoza

Departamento de Física de la Materia Condensada
Universidad de Zaragoza
Pedro Cerbuna 12
50009 Zaragoza

© Luis A. Morellón Alquézar
y Elías Palacios Latasa

ÍNDICE

1. Efecto Fotoeléctrico: Determinación de la constante de Planck	5
2. Física de Rayos X: Efecto Compton	11
3. Determinación de espectros atómicos	27
4. Difracción de electrones	35

NORMAS DE SEGURIDAD

1) Es imprescindible que cada alumno lea, se dé por enterado y firme las hojas editadas por la Facultad de Ciencias sobre **normas de seguridad** en los laboratorios de prácticas de alumnos.

2) Además de las normas generales, para FÍSICA CUÁNTICA I hay que prevenir los riesgos específicos de:

a) **IRRADIACIÓN EXTERNA** debida a un mal uso del generador de Rayos X.

b) **Altos voltajes** en la práctica de difracción de electrones.

a) Irradiación externa: El equipo está suficientemente blindado con plomo y puerta corredera de óxido de plomo que absorbe toda la radiación incidente. El equipo desconecta automáticamente el tubo emisor de rayos X si se abre la puerta.

Antes de comenzar la práctica verificar que efectivamente es así.

Si por un mal funcionamiento el tubo de rayos X quedase encendido al abrir la puerta, no hacer nada, alejarse del equipo y avisar al profesor.

b) Altos voltajes. Los cables de la práctica de difracción de electrones soportan tensiones de 10000 voltios. Están perfectamente aislados pero:

b1) Si un cable está pelado, no tocarlo y avisar al profesor.

b2) No tocar los bornes con la mano con el equipo encendido.

b3) No mover el equipo encendido. Esto no afecta a la seguridad personal pero es por prevención de daños en el tubo de rayos catódicos.

PRÁCTICA n° 1**EFEECTO FOTOELÉCTRICO****Objetivo:**

Observación del efecto fotoeléctrico y determinación de la constante de Planck.

RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD:

- 1) Se utilizan lámparas calientes. No tocarlas encendidas, pues pueden producir quemaduras.
- 2) No mover la lámpara de mercurio encendida. Puede fundirse muy fácilmente. Después de apagarla hay que esperar unos minutos a que se enfríe.
- 3) Obviamente no hay que tocar los cables eléctricos no aislados.

Fundamentos:

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones (fotoelectrones) desde la superficie de un metal por la acción de la luz. Históricamente fue observado por Hertz y más tarde por Lenard. La explicación fue dada por A. Einstein (1905) suponiendo la cuantificación de la luz, es decir que la luz está formada realmente por partículas mínimas llamadas hoy “fotones” cuya energía es $E = h\nu$. Esta interpretación confirma y extiende un poco la de Planck para el espectro de emisión del cuerpo negro.

Finalmente R. Millikan (en 1916, pocos años después de haber probado la cuantificación de la carga eléctrica en otro experimento memorable) diseñó un experimento muy cuidadoso, similar al que haremos nosotros, para “descartar” la hipótesis de Einstein, pero su conclusión fue la contraria: la hipótesis de Einstein funcionaba perfectamente. Por ello ambos, Einstein y Millikan recibieron el premio Nobel.

En la Fig. 1 se muestra el esquema de un dispositivo para estudiar el efecto fotoeléctrico:

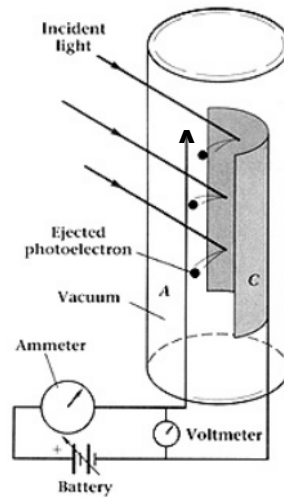


Fig. 1 Aparato utilizado para estudiar el efecto fotoeléctrico

Los electrones liberados por los fotones que inciden sobre la superficie fotosensible (cátodo, C) son atraídos por el ánodo A que se encuentra a un potencial V respecto de C. V es producido por la batería en el dibujo, y mediante una fuente externa de tensión regulable en las prácticas. Estos electrones vuelven al cátodo mediante un cable eléctrico exterior, de modo que se establece una corriente en el circuito que puede medirse. Experimentalmente se observa que:

- Al ir aumentando V , la corriente I tiende a alcanzar un valor máximo que depende de la longitud de onda (λ) e intensidad de la luz (I_a, I_b en Fig. 2).
- Al cambiar la polaridad de V , la corriente I disminuye, existiendo una tensión negativa, V_0 para la cual se anula la corriente. Se observa que V_0 (potencial de frenado) depende de la longitud de onda de la luz pero **no de su intensidad** (este y el siguiente son los detalles cruciales que llevaron a Einstein a formular la cuantificación de la luz)
- Al aumentar λ , V_0 disminuye y **a partir de una cierta longitud de onda ya no se emiten fotoelectrones** por muy intensa que sea la radiación incidente [ver $V_0(\nu)$ en Fig. 3].

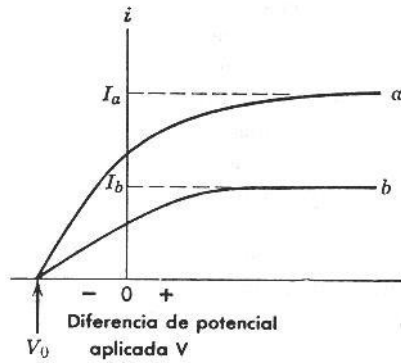


Fig. 2 Gráficas i (V) obtenidas con un sistema como el de la Fig. 1. La intensidad de la radiación en a era el doble que en b

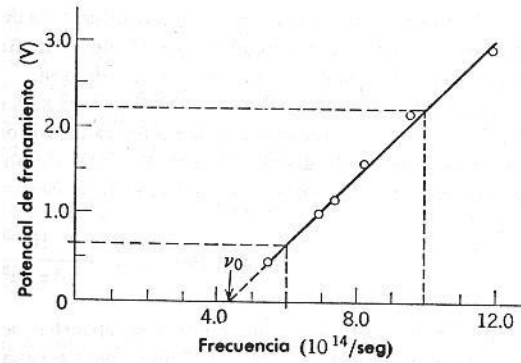


Fig. 3 Dependencia con la frecuencia del potencial de frenado para el Na

La explicación de Einstein es que la luz está compuesta de partículas, llamadas hoy “**fotones**”, de energía:

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

Además Einstein supuso que un electrón puede absorber un solo fotón cada vez de modo que su energía se incrementa en la cantidad $h\nu$. Como cada electrón dentro del metal tiene una energía potencial negativa $-w_0$ (llamada “función de trabajo”, característica de cada metal, por eso el electrón no se escapa espontáneamente, por las buenas, sino sólo cuando recibe energía de la onda electromagnética) la energía cinética del electrón después de recibir el fotón y saltar fuera del metal es:

$$E_k = h\nu - w_0$$

Los electrones así “fotoexcitados” nunca llegarán al ánodo, ni siquiera los que vayan mejor dirigidos en la dirección del mismo, si se aplica un voltaje **opuesto** V de modo que: $eV \geq h\nu - w_0$

El **potencial de corte** es el mínimo voltaje inverso que anula la corriente. Viene dado por la ecuación de Einstein:

$$V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{w_0}{e}$$

donde $\nu = c/\lambda$ es la frecuencia de los fotones y w_0 la función de trabajo del metal.

Lo más interesante de esta práctica es que **la determinación de V_0 para varias longitudes de onda permite obtener h/e y w_0** mediante un ajuste lineal, por mínimos cuadrados, de los datos experimentales a la ecuación anterior. w_0 es una propiedad específica del metal, interesante para el estudio de los materiales, pero h/e es una constante física fundamental, independiente de todo. El hecho de que Millikan hubiera

determinado unos años antes con precisión la carga del electrón le permitió obtener h , que resultó ser la misma usada por Planck y la que posteriormente saldría en la relación de de Broglie, comprobada también por nosotros en la práctica 4.

Montaje experimental:

El montaje experimental es similar al de la Fig. 1. Disponemos de una célula fotoeléctrica constituida por un tubo de vacío en cuyo interior existe una superficie fotosensible sobre la que se hace incidir la luz y un terminal (ánodo) que recoge los fotoelectrones. La célula se mantiene tapada con una diapositiva negra cuando no se utiliza para evitar su envejecimiento.

El mayor problema experimental para nosotros es obtener luces monocromáticas de distintas longitudes de onda y de potencia suficiente. Emplearemos como fuentes de radiación una lámpara de Hg y una lámpara LED. Las longitudes de onda de las líneas del espectro de emisión del Hg se pueden encontrar el guión de la práctica 3, pero las vamos a determinar experimentalmente mediante una red de difracción pues es posible que la lámpara contenga también otros elementos distintos del Hg para producir una luz más blanca. También podemos comprobar que la lámpara LED emite un espectro blanco, con todas las longitudes de onda del espectro visible.

De entre todas las longitudes de onda que emite la fuente seleccionaremos a ser posible una sola utilizando diversos filtros de color con una banda pasante de la forma indicada en la Fig. 4, para varios de ellos. En caso de usar dos filtros, la transmitancia es el producto de las de los dos. Hay que tener en cuenta que los filtros dejan pasar una banda de longitudes de onda bastante ancha. Esta es la principal dificultad y fuente de error experimental pues hay un compromiso entre el máximo de la banda pasante (más fotones de esa longitud de onda) y la menor longitud de onda de la banda (fotoelectrones con más energía cinética). Los filtros se mantendrán expuestos a la luz de la lámpara de Hg el menor tiempo posible para evitar un calentamiento excesivo de los mismos.

Disponemos además de un sistema electrónico que nos permite monitorizar el valor del voltaje aplicado a la célula fotoeléctrica y de un voltaje proporcional a la intensidad de los fotoelectrones. Este dispositivo dispone de un amplificador que utilizaremos

normalmente en la escala de 10^0 , pero puede subirse si la intensidad de la luz incidente es muy baja.



Figura 4: Montaje experimental para observar el efecto fotoeléctrico

Realización de la práctica:

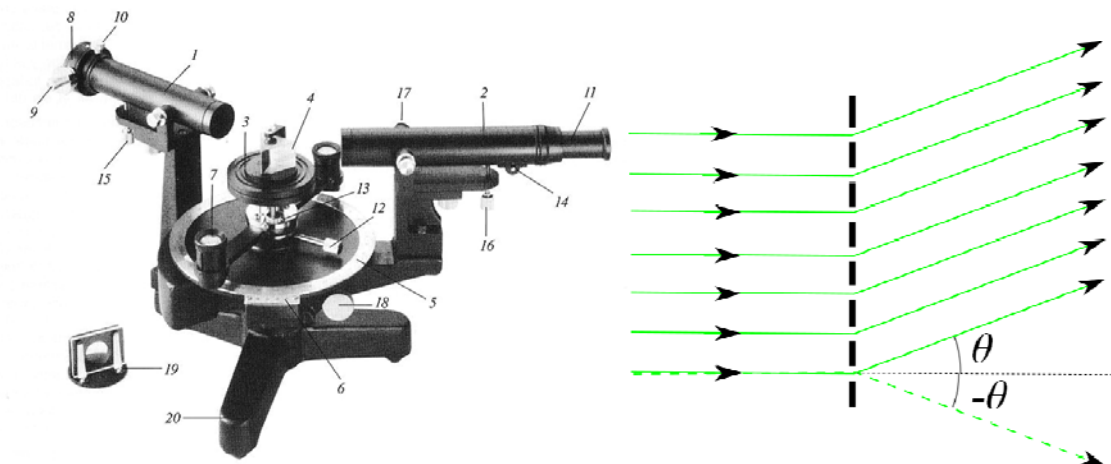


Figura 5: Goniómetro y esquema de la difracción por una red para determinar el espectro de la lámpara.

1. Determinar el espectro de la lámpara usando un goniómetro y una red de difracción. Para ello **pedir al profesor** que la monte adecuadamente con el goniómetro y la red de difracción. Determinar los ángulos de los rayos difractados hacia un lado y hacia otro, para doblar la precisión y eliminar errores de cero. Teniendo en cuenta que la red tiene 800 rayas/mm determinar las longitudes de onda de la radiación emitida por la fuente. Comprobar también las líneas que se ven **interponiendo los filtros interferenciales**. Estas son las que van a contar para el experimento del efecto fotoeléctrico. Se

comprobará que a veces la radiación incluso filtrada se compone de varias longitudes de onda. Para el potencial de corte importa la de menor longitud de onda de las observadas, ya que las demás se cortan antes. Sin embargo para otros potenciales el resultado es la suma de los efectos producidos por todas las longitudes de onda.

2. Determinaremos las curvas $i(V)$ (que deben salir similares a la Fig. 2) en el rango de voltajes aplicados que permite nuestra electrónica para la colección de filtros de color numerados y cuyas curvas de transmitancia se muestran en la Fig. 4. Usaremos los filtros etiquetados como F5 (2+9), F6 (2+12), F7 (7+10), F9 (13+16), F11 (2+13) y F12 (10+17). Basta medir las curvas $i(V)$ entre ± 2 V, con un paso de 0.2 V.

3. Con uno de los filtros anteriores, medir de nuevo la curva $i(V)$ pero reduciendo la intensidad de la radiación incidente utilizando una diapositiva negra con una apertura. La finalidad de reducir la intensidad es que no se sature el amplificador con voltajes positivos.

4. Repetir las medidas para una segunda colección de filtros con las siguientes longitudes de onda típicas: 440 nm, 505 nm, 525 nm, 580 nm y 595 nm. No se dispone de las curvas de transmisión medidas de estos filtros, pero se puede ver cualitativamente interponiendo uno de ellos en el experimento de determinar el espectro de la lámpara, parte 1. Medir las curvas $i(V)$ entre ± 2 V, con un paso de 0.2 V.

5. Con uno de los filtros de la segunda colección, repetir la medida de $i(V)$ en todo el rango de voltajes que permite la electrónica, es decir ± 9 V aproximadamente. Se recomienda medir con un espaciado de ± 0.5 V (bajos voltajes) o de ± 1 V (altos voltajes).

Cuestiones:

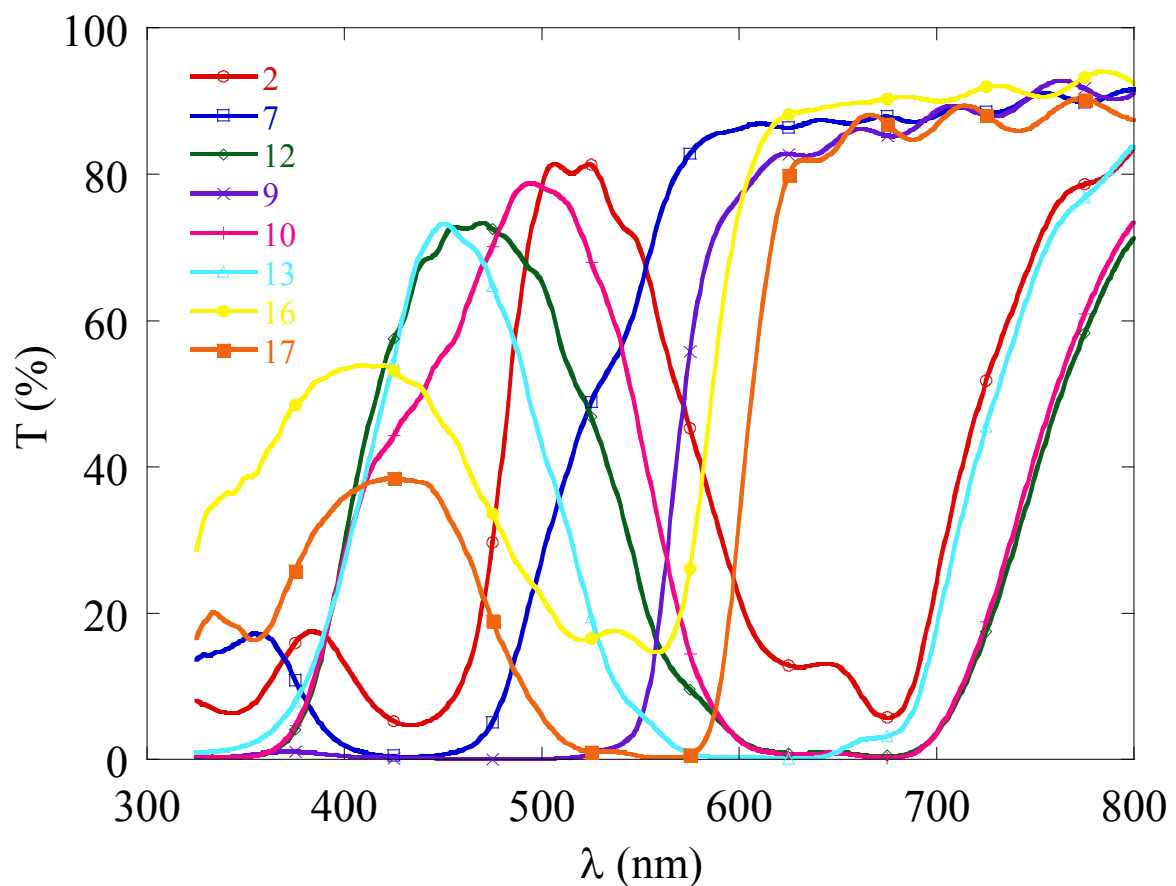
1. Represente las curvas $i(V)$ determinadas y comente su forma comparada con las de la Fig. 2. Determinar el voltaje de frenado a partir de estas curvas. Verifique para el filtro elegido que la longitud de frenado no depende de la intensidad de la radiación incidente.

2. Con los datos de las líneas de emisión más intensas para el Hg (parte 1 y datos de la práctica 3) y las curvas de transmisión de los filtros (Fig. 4), ¿qué longitud de onda es la más probable que produzca el efecto fotoeléctrico en cada caso?

3. Determine la constante de Planck usando la ecuación de Einstein. Quizás necesite descartar los datos correspondientes a algún filtro, justifique su decisión.

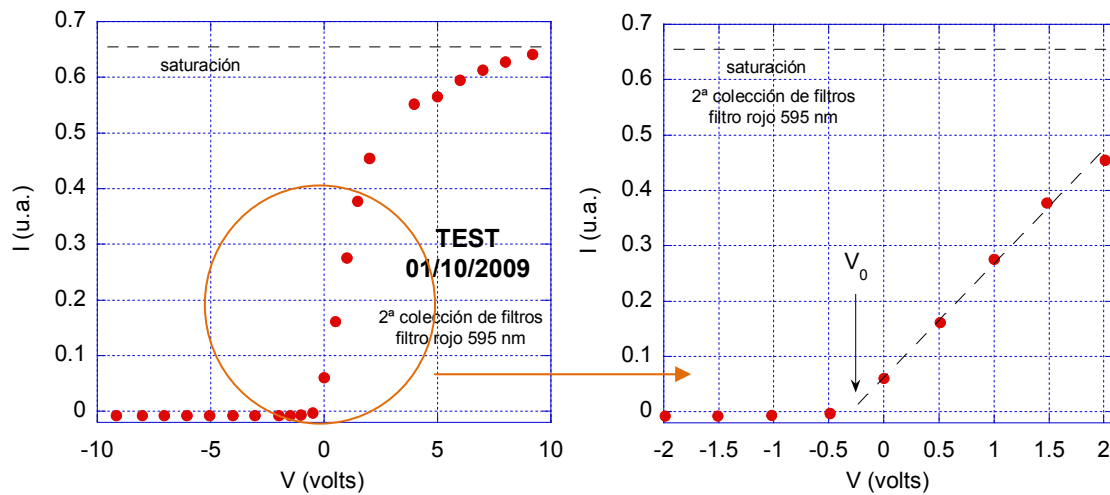
4. Determinar la constante de Planck para la segunda colección de filtros. Comentar los ajustes y resultados.

5. Teniendo en cuenta los ajustes realizados, ¿se puede dar el orden de magnitud de la función de trabajo del metal del cátodo de nuestra fotocélula?



Comentarios / Aspectos prácticos

1) Para la determinación del voltaje de frenado se recomienda medir las curvas $i(V)$ entre ± 2 V, con un paso de 0.2 V. En el curso 2009/2010 se cambió la electrónica con lo que ahora se puede variar a ± 9 V aproximadamente. Tests de la electrónica en el 2009/2010:



2) La lámpara de Hg se enciende nada más llegar. Así cuando se acabe ya estará caliente. De todos modos en 10-15 minutos se calienta. Hay que apagarla y esperar unos 5 minutos para cambiar de la determinación de las líneas del espectro al efecto fotoeléctrico.

3) No hay que acercar la lámpara más. Se queman los filtros. Sí que es recomendable para tener la máxima señal colocar la célula fotoeléctrica en la posición de señal máxima. Amplificar más no ayuda.

PRÁCTICA n° 2**FÍSICA DE RAYOS X: EFECTO COMPTON****Objetivo:**

(a) Determinación de la constante de Planck a partir de medidas del voltaje mínimo para la producción de rayos x (b) Determinación de la longitud de onda Compton.

PRECAUCIONES DE SEGURIDAD

El equipo está blindado con plomo y puertas de vidrio de óxido de plomo de 1 cm de grosor, que absorben totalmente los rayos X.

Lleva un contacto eléctrico que desconecta la fuente de rayos X cuando la puerta se abre, lo que impide trabajar en el interior (para cambiar muestras, etc) con el tubo de rayos X encendido.

En cualquier caso, se observa perfectamente a través de una ventana cuándo está el tubo funcionando. Asegurarse siempre de que el equipo está apagado antes de manipularlo.

NO MANIPULAR EL EQUIPO, ALEJARSE Y AVISAR INMEDIATAMENTE AL PROFESOR SI EL TUBO DE RAYOS X PUEDE ENCENDERSE CON LA PUERTA ABIERTA, pues hay peligro grave de irradiación.

Fundamentos teóricos:

Los rayos X se producen en el blanco de un tubo de rayos X (ánodo) cuando un haz de electrones de alta energía, acelerados típicamente en una diferencia de potencial (V) de miles de voltios, se frenan al chocar con el blanco (bremsstrahlung). El espectro de rayos X es continuo con unas líneas características del material del ánodo. Una característica notable del espectro es la existencia de una longitud de onda mínima $\lambda_{min} = hc/eV$, que corresponde a fotones de la máxima energía posible, y que ocurre cuando toda la energía del electrón se invierte en emitir un solo fotón.

El efecto Compton consiste en la dispersión de fotones por electrones libres. La teoría predice que la diferencia entre la longitud de onda del fotón dispersado (λ') y la del incidente (λ) viene dada por $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos\theta)$, donde $\lambda_C = h/m_0c = 0.0243 \text{ \AA}$ se denomina longitud de onda Compton y θ es el ángulo de dispersión del fotón. Se utilizan los fotones provenientes del tubo de rayos X para producir efecto Compton en los electrones de un bloque de PMMA (polimetil-metacrilato, que es un plástico transparente y duro). Se utiliza PMMA porque está formado solamente por átomos de C, O e H y la energía de ligadura de los electrones al átomo (del orden de 500 eV o menos) es despreciable frente a la de los fotones incidentes (del orden de 30 keV) por lo que considerar los electrones libres es buena aproximación. Además el PMMA absorbe muy poco los rayos X.

Montaje experimental:

El montaje experimental (Fig. 1) es una unidad compacta para la producción y realización de diversos experimentos con rayos X. La unidad apantalla perfectamente la emisión de rayos x al exterior y no hay riesgos de exposición para el usuario. La cámara experimental se cierra mediante una puerta corrediza fabricada con un vidrio de óxido de plomo. Si esta puerta no está debidamente cerrada (cierre TURN/PUSH), no se produce la emisión de rayos X.

Los rayos X se producen en un tubo de ánodo de Cu. El voltaje (U_A) se puede variar de 0.0 a 35.0 kV (pulsador HV). La intensidad de electrones incidentes (I_A) se puede seleccionar hasta un máximo de 1.00 mA (pulsador I). Para almacenar los valores de voltaje e intensidad hay que presionar el botón ENTER cada vez. La radiación se emite al pulsar HV-ON. Los rayos X emitidos entran en la sección experimental a través de una apertura en la parte izquierda en forma de un haz divergente tal que la pantalla fluorescente (parte derecha) está completamente iluminada. Podemos utilizar tres diafragmas con aperturas circulares de 1 mm, 2 mm y 5 mm para colimar el haz.

Inmediatamente a la derecha de la salida de los rayos x está la fijación para colocar la muestra, en nuestro caso usaremos un monocristal de LiF. La fijación del monocristal se puede rotar mediante un motor a pasos (paso mínimo de 0.1°). El detector de rayos X se

mueve con un motor a pasos idéntico pero independiente del anterior. En esta práctica trabajaremos en el modo de rotación acoplada en el que el ángulo del detector es el doble que el del cristal (modo $\theta-2\theta$). El detector está conectado a un contador digital Geiger-Müller que indica un pequeño porcentaje de los fotones recibidos. Los controles (GONIOMETER) permiten mover independientemente el detector (posición superior), el cristal (posición media), o ambos en modo acoplado (posición inferior). Podemos también barrer en ángulos de modo automático entre un ángulo inicial (START) y final (STOP), con un paso de ángulos especificado ($^{\circ}/S$). No olvidemos que cada parámetro que se cambie requiere que pulsemos ENTER para que quede almacenado. El posicionamiento a cero de muestra y detector se consigue con el control RESET. El tiempo de contaje se especifica en GATE (0.5 – 100 s).

Para el experimento de dispersión Compton disponemos de un elemento dispersor adicional (PMMA) y una placa de Al (absorbente). Se trabajará en geometría de detección a 90° . El montaje se indica en la Fig. 2.

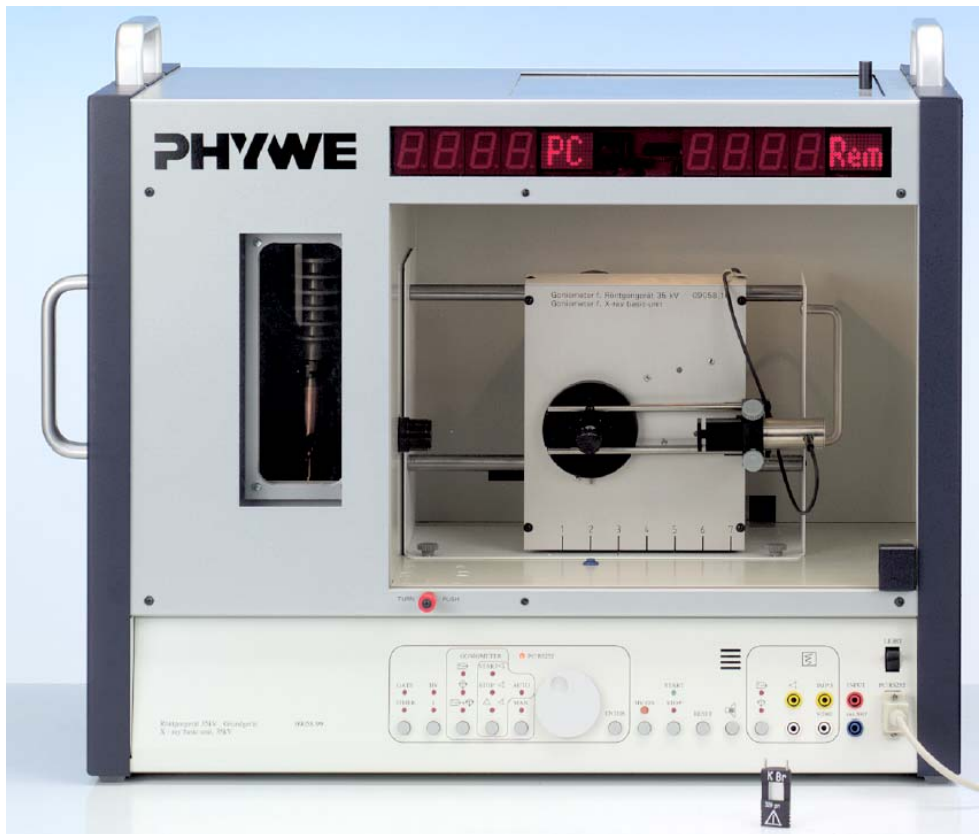


Fig. 1. Unidad de rayos X: montaje parte (a).

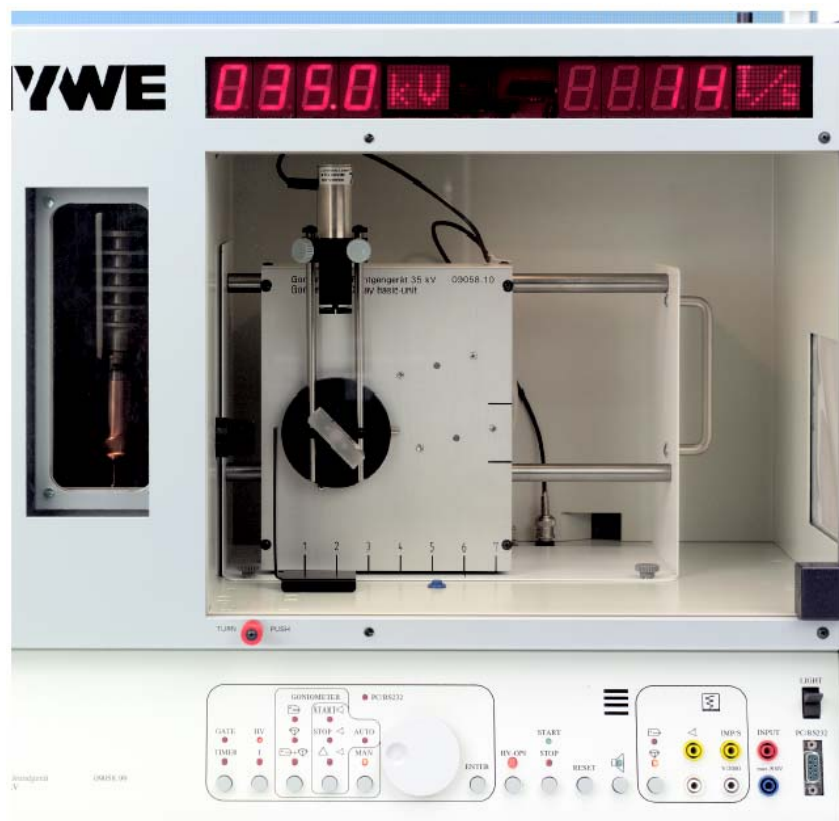


Fig. 2. Unidad de rayos X: montaje parte (b).

Realización de la práctica:

La unidad de rayos X se controla remotamente con un PC a través de una salida serie RS232. Todos los apartados de esta práctica se realizarán usando el software de medida *measure* de Phywe. El manejo de este software es bastante intuitivo pero se incluye un pequeño manual de instrucciones en un anexo al final de este guión.

(a) Determinación de la constante de Planck, h .

1. En primer lugar determinaremos el espectro de emisión característico del ánodo de Cu utilizando como analizador un monocristal de LiF. Dicho monocristal se utiliza para seleccionar la longitud de onda de los rayos x incidentes por reflexión Bragg, $n\lambda = 2d \sin\theta$ ($d = 2.014 \text{ \AA}$). El montaje es el de la Fig. 1. Los parámetros de medida son los siguientes: colimador de 1 mm, modo acoplado $\theta-2\theta$, $U_A = 35 \text{ kV}$, $I_A = 1 \text{ mA}$, rango de ángulos de $3^\circ-55^\circ$ con un paso de 0.1° , tiempo de integración 2 s. El tiempo de integración es el tiempo en que el sistema está contando los fotones recibidos para moverse a la siguiente posición.

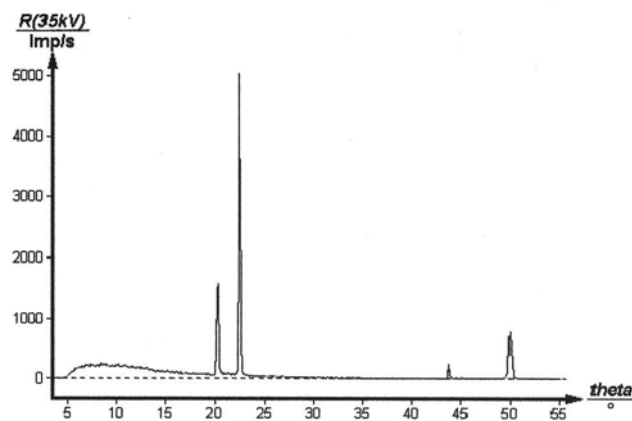


Fig. 3. Espectro característico del ánodo de Cu utilizando un monocristal de LiF (001) como analizador.

2. A continuación, utilizando el mismo montaje que en el apartado anterior, determinaremos la parte del espectro debida a Bremsstrahlung para diversos valores del voltaje del ánodo U_A . Se recomienda utilizar los siguientes parámetros: $13 \text{ kV} \leq U_A \leq 25 \text{ kV}$ en pasos de 2 kV, $I_A = 1 \text{ mA}$, rango de ángulos de $4^\circ-20^\circ$ con un paso de 0.1° (no es necesario medir todo el rango angular, hay que elegir el intervalo óptimo según U_A),

tiempo de integración 2 s. Los datos tendrán típicamente la forma de la Fig. 4. A partir de estas medidas obtener la longitud de onda mínima para la producción de rayos x en función del voltaje del ánodo, $\lambda_{min}(U_A)$.

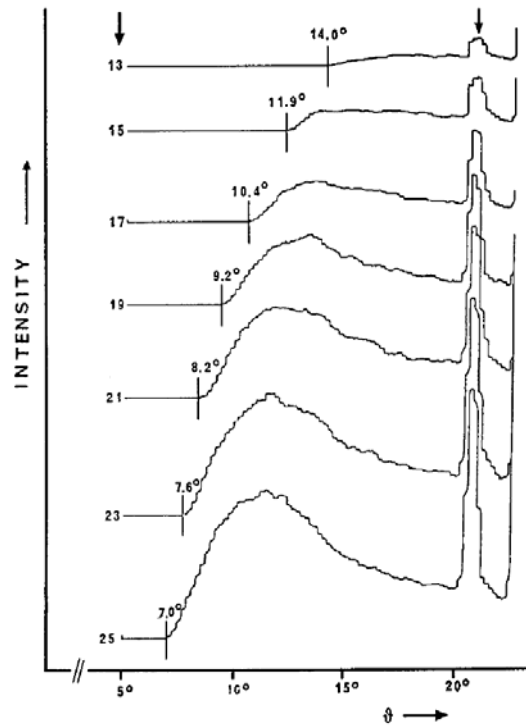


Fig. 4. Espectro característico del ánodo de Cu para diferentes valores del voltaje del ánodo.

(b) *Determinación de la longitud de onda Compton, λ_C .*

3. Con el montaje de la Fig. 1 realizaremos un experimento de absorción de rayos X por una lámina de Al en función de la longitud de onda del haz incidente (monocromatizada con el monocristal de LiF como en la parte anterior; $U_A = 35$ kV, $I_A = 1$ mA, colimador de 2 mm). Realizaremos contajes de 100 s (el error estadístico relativo es $\Delta N/N = N^{-1/2}$). Mediremos la intensidad del haz de rayos x en el intervalo $6.5^\circ \leq \theta \leq 10.0^\circ$ en pasos de $\Delta\theta = 0.2^\circ$. Los resultados para el número de cuentas por segundo se pueden corregir del tiempo muerto del detector ($\tau = 90 \mu\text{s}$) usando la relación: $N_{\text{real}} = N / (1 - \tau N)$.

4. Insertaremos la lámina de Al entre la salida de los rayos X y el monocristal de LiF. Repetiremos el apartado 3 y calcularemos el factor de transmisión T en función de la longitud de onda λ . Esta dependencia proporcionará una curva de calibrado T (λ) similar a la de la figura:

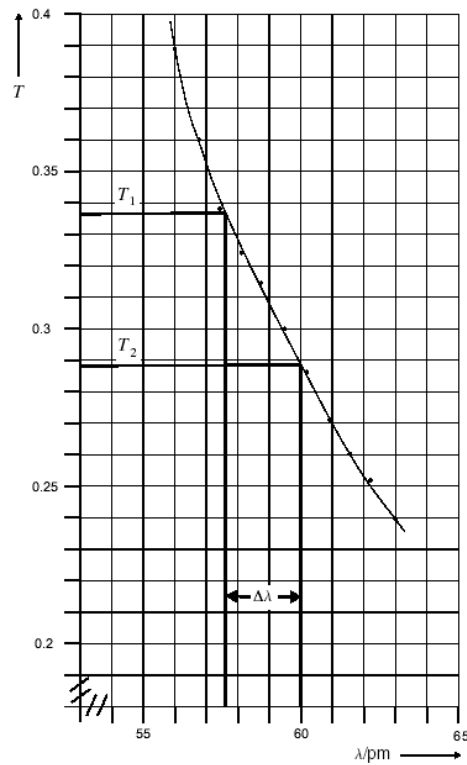


Fig. 5. Factor de transmisión en función de la longitud de onda.

5. El montaje es el indicado en la Fig. 2 para realizar el experimento de dispersión Compton a 90° . Hay que sustituir el monocristal de LiF por la pieza de PMMA y posicionarlo a 135° , sustituir el colimador de 2 mm por el de 5 mm y colocar el detector a 90° ($U_A = 35$ kV, $I_A = 1$ mA). Las medidas a realizar son las siguientes (ver Fig. 6): (i) Intensidad del haz con el material dispersor (S) (ii) Intensidad con la lámina de Al en posición 1 (A1) (iii) Intensidad con la lámina de Al en posición 2 (A2). Para que la estadística sea suficientemente buena hay que utilizar tiempos de contaje de 300 s.

La **idea fundamental que subyace tras este experimento** es que los rayos X incidentes tienen una longitud de onda media dada. La podemos estimar aproximadamente midiendo la absorción ya que $T(\lambda)$ depende fuertemente de la longitud de onda, lo que hemos determinado ya anteriormente. Midiendo la intensidad recibida sin y con absorbente de Al puesto **antes** del PMMA obtenemos la absorción media para los rayos **incidentes**. Midiendo ahora la intensidad detectada con la chapa absorbente puesta **después** del PMMA obtenemos la transmitancia de la chapa para la longitud de onda λ' de la onda que sale a 90° de la incidente. Esta onda, en principio

está compuesta de la longitud de onda incidente, desviada elásticamente, y la nueva, de longitud de onda mayor por efecto Compton, pero la elástica decae muy rápidamente conforme aumenta el ángulo para átomos ligeros (porque se difracta en ellos), como los que forman el PMMA (esta es otra razón para usar PMMA). A 90° la intensidad de la onda desviada elásticamente es despreciable. Por lo tanto se puede considerar que prácticamente la onda que surge a 90° es debida sólo al efecto Compton. El hecho de que el incremento de longitud de onda $\lambda' - \lambda$ sea independiente de la longitud de onda incidente en principio justifica el método aunque la radiación incidente no sea monocromática.

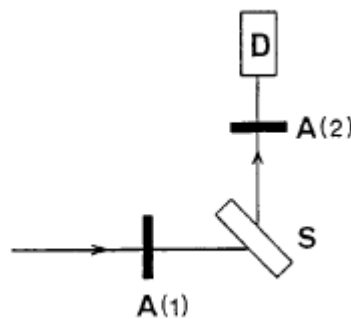


Fig. 6. Representación esquemática del dispositivo para la medida de λ_C . S: elemento dispersor (plexiglass); A: elemento absorbente (placa de Al); D: detector

Cuestiones:

Parte (a):

1. Del espectro obtenido en el apartado 1, obtener los valores experimentales del umbral de absorción K del Cu (K_α y K_β) y comparar con los valores de la literatura (obtenidos en otros experimentos) según el siguiente esquema de niveles:

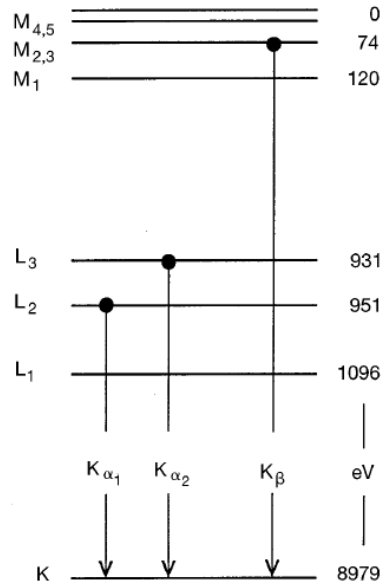


Fig. 6. Niveles energéticos del Cu ($Z=29$)

2. Del ajuste de los datos obtenidos en el apartado 2 con la expresión teórica adecuada, obtener la constante de Planck y comparar con el valor real.

Parte (b):

3. Determinar los factores de transmisión con los datos obtenidos en el apartado 5 y usando la curva de calibre del apartado 4 estimar la longitud de onda Compton y comparar con el valor real.



measure • measuring software

User guide

Congratulations on the purchase of your new measuring software. With *measure* you now have an extensive and convenient measuring program, which is to a great extent intuitively operable. *measure* is available for a wide range of PHYWE measuring instruments, including all *PHYWE Hand-held measuring instruments* and *PHYWE Cobra3* with various modules and sensors.

The *measure* software offers you a uniform face for processing and visualizing your measurement data, and so enables you to work rapidly, reliably and simply with greatly differing measuring instruments. You will quickly learn how to work with and operate the software with one measuring instrument, and can then apply this knowledge directly to working with other measuring instruments.

Take the time to read this user guide. It explains how the software is to be installed, and the use of the basic program functions. You will get to know further, special functions during your work with *measure*. The comprehensive online help will answer detailed questions. Most new instruments in the PHYWE product line are supplied with literature on experiments which have been specially suited to your measuring instrument and subject, and which includes very detailed descriptions on how to use the software.

Should you have questions on working with *measure*, however, or possibly suggestions or ideas on further improvements, please contact PHYWE support, whereby it is best to send an email to:

measure@phywe.de

We wish you success and enjoyment in working with *measure*.

Installation

The software is equipped with its own installation program. To install it, place the original installation CD-ROM in the drive. Usually the installation program starts autonomously.

If it does not, open Windows™ Explorer, select the CD-drive, and double click on

- **start.exe**

Follow now the instructions on the monitor.

Working with *measure*

In the following, you will be introduced to the basic *measure* functions, and be familiarized with how you can record, display, evaluate and store a measurement. You will find that you can work quickly and easily with *measure*, and will very soon have become accustomed to the way it operates.

Your new measuring program *measure* offers you a variety of functions and possibilities. Give yourself a little time, therefore, and do not try to understand everything down to the last detail at the first go. These instructions give you a first overview of the program functions and how you can use them. Based on this knowledge, you can discover and use program functions not mentioned in this guide yourself.

The online help, and naturally the intuitive user prompting in the software, are always there to assist you. The online help gives you not only context-related, specific information on a certain program function, but also general comments on software function. You reach the online help when you

- select the menu prompt *Help /Manual* (also via *Shift+F1*).
- Within dialogs, press key *F1*, or a help key when available.

As these brief instructions are merely an introduction to working with *measure*, the online help is an indispensable tool for you, both to answer questions which arise, as well as to explain specific program functions and settings.

Recording of data

The first step is to learn how you can gather data with your measurement program. For this, you must naturally have the appropriate measuring instrument connected at the PC interface (RS232) which is set in the program (see the section on Installation) and switched on. Should you have several measuring instruments, or types of software modules, installed in the software, then you must select the one you want via the menu prompt *Gauge* before beginning data logging. This instrument is then given a hook in the menu and is from now on the actual measuring instrument (software module). This procedure is naturally not necessary when you only have one measuring instrument (software module) installed, as the single instrument is always selected. When you are using a *PHYWE Hand-held measuring instrument*, please select the measuring instrument type *PHYWE Hand-held measuring instrument* in the software, which then recognizes automatically which type of instrument (e.g. Temperature, Lux or IR Gas analysis) you are using.

After selecting the measuring instrument, select the menu prompt *File /New measurement* or press the red recording button on the button panel. You now come into a dialog in which you can set all parameters for the coming measurement. This dialog is designed differently for each measuring instrument (software module), according to which possibilities the measuring instrument offers and which functions the quantity to be measured requires. It is therefore clear, that this brief guide cannot cover all of the different settings for all of the available measuring instruments, but can only give an overview of possible functions and groups of functions, which may not be present in your special case and with the measuring instrument you have chosen. It is also possible that your measuring instrument offers you far more choices.

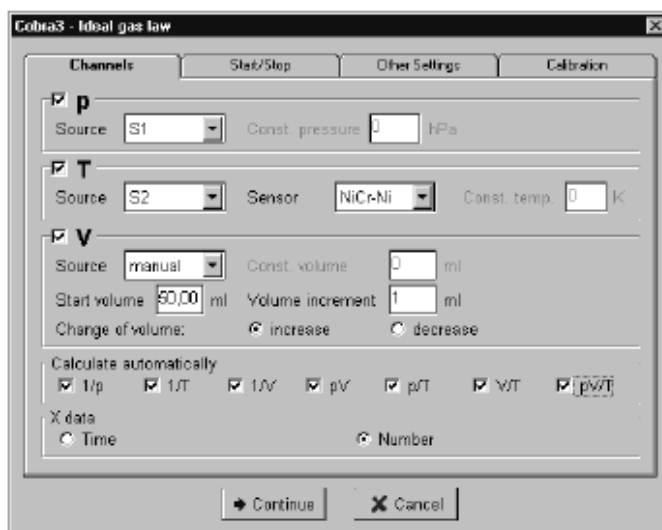


Fig. 3: The parameter dialog for a coming measurement

Exact information on your measuring instrument and on the possible settings and parameters for a measurement are supplied for you in the *PHYWE Experimental Handbooks*, which explain to you in detail the required settings for a specific experiment. In the following, we shall discuss some standard settings which are supported by most of the measuring instruments (software modules). We will use the measurement parameter directory of the *Cobra3 Temperature* as example (see Fig. 3).

With most measuring instruments, you can select which measured values you want to record. In *measure* these are called measurement channels. Later, in the main program, you can have measurement channels plotted against the X data record (e.g. time or number in this case). A measurement channel is a series of data for a definite, measured quantity. In our example, you can select diverse temperatures as well as temperature differences. The channels marked will then be recorded during the following measurement, so that the measured data is at your disposal for subsequent processing.

All measuring instruments (software modules) also have in common, that you can select the display instruments which are to be shown during the measurement, whereby, with most measuring instruments, you have digital and analog displays as well as simple diagrams at your disposal. Select the display instruments you want to use to follow the course of the measurement.

Please take into consideration, that the measurement channels displayed by the display instruments are not automatically recorded and available for later usage. As previously described, only those channels selected in the *Channels* selection list are recorded.

With many measuring instruments, you can determine whether measured data is to be recorded automatically at set time intervals or each time a key is pressed. To do this, select from the *Get value* selection panel. In most cases you will also be offered a so-called trigger for the start and end of the measurement. With this you determine under which conditions the data recording should begin and end, whereby you often have the choice of *on keypress* and of a certain *time*, as well as a condition for a channel ("*if value bigger or smaller*"). According to the experimental conditions, the use of a trigger can be extremely useful.

All measuring instruments have an *Allocate memory* selection panel, in which you can select the maximum number of measured values which *measure* should be prepared for in the coming measurement. You can routinely set this at a very high number, in order to always have sufficient storage space reserved for the coming measurement. As *measure* can process a maximum of 1 million measured values, it has sufficient storage space even for long-term measurements. In any case, when the measurement has finished, *measure* has only used as much storage as has actually been required by the measured data. The purpose of this choice is rather for you to be able to select a lower number with computer systems with little storage space (e.g. an old computer or some portable computers such as laptops etc.), with which data recording with *measure* could be impossible because of a lack of main storage (RAM). Should you receive such an error message from the program, therefore, select a lower number here.

In many cases, a button is offered for the calibration of your measuring instrument and of the sensors of your measuring instrument. This gives you the opportunity to considerably increase the accuracy of measurement and to minimize tolerances. If you do not accept calibration, the program will still carry out a standard internal calibration, but despite this you cannot be sure of getting the best possible results with your measuring instrument. We therefore recommend that you always take advantage of calibration when it is offered by the software. We would also like to point out, that a new calibration may be necessary when measuring instruments or measuring instrument modules are changed, as otherwise the calibration of the previous measuring instrument will be used.

As stated previously, this dialog can contain various other settings which have not been described here, but on which you will be informed by the *PHYWE Experimental Handbooks*.

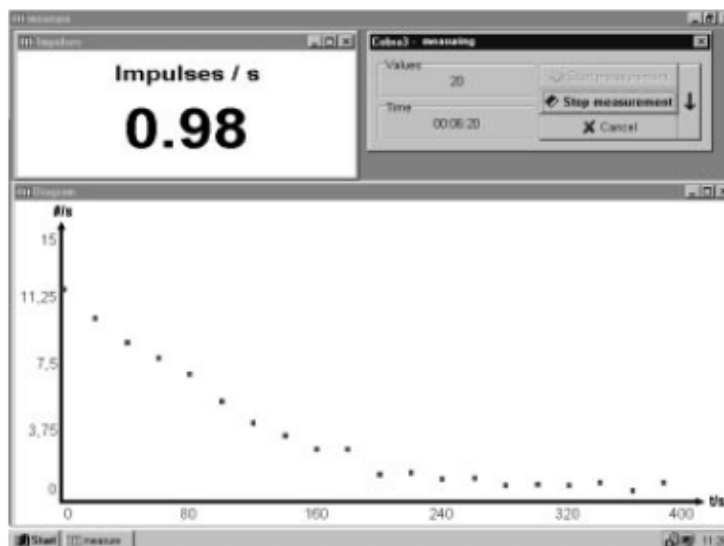


Fig. 4: The display instruments during a measurement

When all settings have been made, you can reach the data recording area by pressing the *Continue* button (see Fig. 4). Here you will again find the display instruments you have selected, as well as a window with the name *measuring*. You can shift the display instruments to anywhere on the screen, change their size and position them where you want. You should normally do this before data logging begins, as shifting them afterwards could result in a termination of the measurement, because the PC is possibly fully loaded by the data recording, according to its capacity.

Now you can start the recording of the measured data and the actual measurement by pressing the *Start measurement* button, provided you have previously installed an automatic, interval type data recording. It is naturally not necessary to press this button when you have selected a different trigger condition than *on keypress* for the start of

the measurement. In this case, the data logging starts automatically when the given conditions are met. If you previously selected the *Get value on keypress* setting, you can now record each individual value required by appropriately pressing the *Save value* button.

The button with the downward pointing arrow serves to temporarily hide the data recording dialog, to make more room for the display instruments. You can re-call the data recording dialog, which you may need to control the current measurement, at any time by pressing the right mouse key while holding the mouse pointer above one of the display instruments.

When you have entered a trigger condition for the end of data recording, then this is automatically stopped when the condition is reached; otherwise you can stop the measurement by pressing the *Stop measurement* button. You now come into the main program, in which you find the measurements you have just recorded visualized in a diagram. Note: Some measuring instruments (software modules) such as, for example, *Cobra3 Timer/Counter*, do not generate a diagram because no measurement data are permanently stored.

Displaying, processing and evaluating data

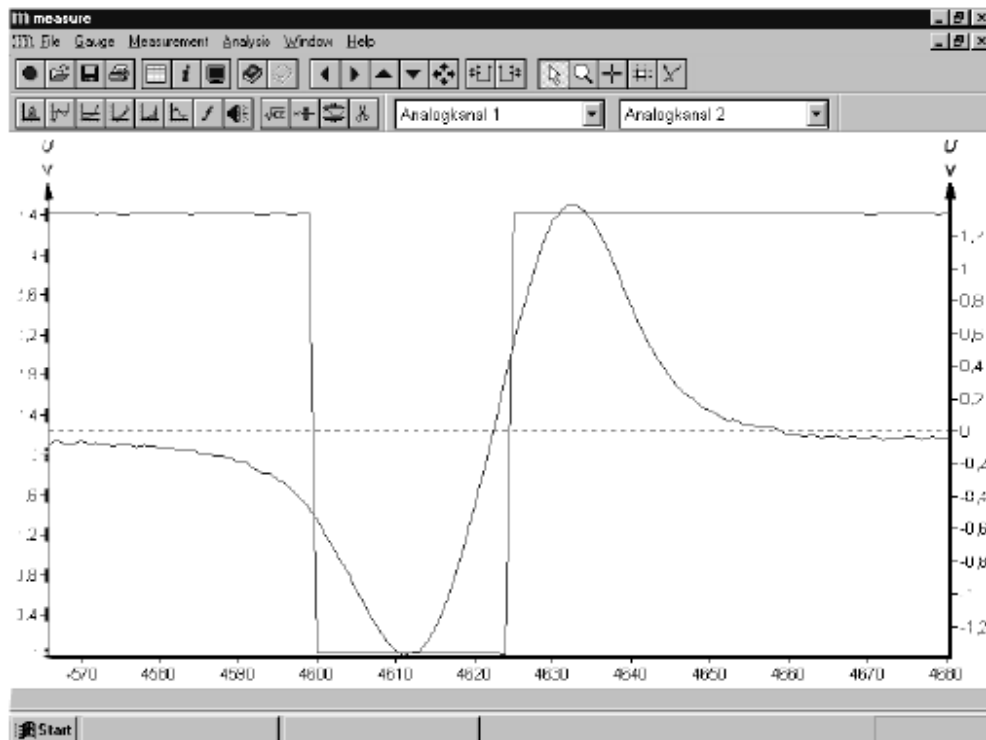


Fig. 5: Visualization of a completed experiment in the main program

After a measurement has been successfully brought to completion, the data which has just been recorded is visualized in a diagram. This diagram is presented in a sub-window. You can display as many diagrams simultaneously as you want, and change their size and position, for example, so that you can place them next to each other. In this section, you should first learn how to store the data permanently on a floppy or hard disk. Simply select the menu prompt *File /Save measurement*, or *File /Save measurement* as should you want to change the file name before storing it. Alternatively, click the mouse on the button with the floppy icon in the top button panel.

As you can see, *measure* offers a whole series of menu prompts and buttons (see Fig. 5), and in the following we will use these buttons to comment further on some program functions. Take a closer look at the two short-cut button panels, situated near the top edge of the screen. Within these panels you will find various buttons, which are grouped according to their functions. We will use these buttons to outline some program functions.



On the top panel, far left, you will find the button for the recording of a new measurement, which you have already encountered. Next to this is a button for opening an existing *measure* file. The button for storage, already mentioned, and the button for printing out an existing measurement are also in this group. Each of these program functions is also available to you via the *File* menu.



The functions which are hidden behind the table icon, the information icon and the screen icon in the next group of buttons are also extremely important when working with *measure*. When you press the button with the table icon, or select the menu prompt *Measurement /Data table*, you obtain a table of the measured values from your actual measurement, in which each individual measured value is displayed and can even be changed -very helpful, when your measurement should at some time have a small outlier!



Hidden behind the button with the information icon, and the menu prompt *Measurement /Information* is a dialog window, in which you can make a series of settings for your actual measurement on four separate register pages. You can, for example, name your measurement under *General* and deposit any appropriate information in *Notes*. Under *x-Data* you can name the channel and enter the symbol and the unit (which you will find again in the labelling of the axes of your diagram).

In the edit box *Digits beyond point* you can enter the number of decimal places e.g. the table of measured values, should go to.

The register page *Channels* allows analogous settings to the *x-Data* record page, but the desired measurement channel (corresponding to a Y data record series) must first be selected. Here you can, for example, change the quantity or the unit of the measurement channel.



You reach the display options via the menu prompt *Measurement /Display options* or by pressing the button with the screen icon. Within this dialog, you can make various settings which determine the appearance of your diagrams. You can, e.g. have crosses displayed for the measured values, or switch the X-axis labelling on or off. In addition, you can enter the displayed measured value area and so zoom manually or trim the automatically generated scale in the diagram to acceptable values.

In this dialog, you can also decide which measurement channel you want to be displayed. You can select the left and the right Y-axis for the channel to be displayed, provided you have recorded more than one measurement channel.

You can further allocate a mathematical function to the axes, and so obtain, for example, a logarithmic representation in the Y-axis. The function allocated here relates only to the graphical display, and not to the measured data. A smoothed representation of measured value curves (spline interpolation) is also possible. By the way, you also enter the display options when the mouse arrow icon in the upper button panel is activated (pressed) and you then press the right mouse key in the region of the X-axis or one of the Y-axes.



Next to the button for the display options is a button with a book icon. With this you call up the table of contents of the online help, in which you can click through to further, more specific information. As already mentioned, you also reach the online help when you select the menu prompt *Help /Manual* or start the context-sensitive text with the *F1* key.

You can see a further book icon to the right of the help icon. After starting the program, it is coloured gray and is not active. When you open an experiment described by PHYWE with *File/Open experiment*, however, it is activated and a yellow book is visible. When you click on this icon, Acrobat Reader™ is opened and the loaded description of the experiment is shown as a PDF file.

Should faults occur during the loading or operating of Acrobat Reader™, the reason could be that you either have an outdated version of Acrobat Reader™, or no version of it at all, installed in your computer. There is a current version of Acrobat Reader™ on the *measure* CD. First delete any outdated version of Acrobat Reader™ from your hard disk, then place the *measure* CD in the appropriate drive. When the installation screen appears, click on *Acrobat Reader™*. Acrobat Reader™ will then be installed to your computer.



The next group of buttons serves both to shift a segment in the diagram on display, and to match and fit it in the diagram. With the quadruple arrows, you can adjust the axes so that the complete curve is shown in the diagram. Please note, when doing this, that the left and right axes can be given a completely different scaling when they display two channels simultaneously. If you wish to match the scaling of one Y-axis to that of the other Y-axis, then use the buttons for axis matching, the ones with the vertical double arrow. You can choose here whether the scaling of the left axis should be matched to the right axis or vice versa. These functions are not reachable via the menu, and can only be mouse operated.



We have not yet explained the functions of the last group of buttons in the upper button panel. There is a distinctive feature in this group. One of the buttons is always switched on and cannot be switched off. This button indicates namely the mouse mode in the diagram. When the mouse arrow is selected, then on every mouse click in the diagram, the current position in the diagram is displayed, i.e. the X value and the one or two (when two measurement channels are simultaneously displayed) Y values. This allows you to quickly get a rough estimation of the position of peaks, for example. When you activate the magnifying glass, you come into the zoom mode. You can then zoom into the diagram by moving onto the upper left corner with the mouse, pressing the left mouse key and holding it depressed while moving to the wanted lower right corner, and releasing it there. The axes of the diagram are then adjusted to this sector and the new diagram is correspondingly displayed. Zoom out with the right mouse key.

The reticle icon takes you into the marking mode. You can mark an X segment with the mouse by moving it from left to right while depressing the left mouse key. The marked segment can then be, e.g., cut out (menu prompt *Analysis /Cut*) or an analysis function be related only to this marked segment.

The button with the square icon shifts *measure* to the survey mode. The square which appears can be relocated and the coordinates are then displayed. The last button, with the lines icon, switches into the linear regression mode. Up to 3 straight lines are made available to you, whose data area, the basis for the regression, is given by the position of the relocatable marking points. You can add a further straight line with the right mouse key.



The lower button panel is comprised of functions for the analysis and modification of data. The first eight buttons are for various analysis functions which, however, do not change the original measurement data. The following functions are at your disposal: peak analysis, curve analysis, display of average values, slope, integral, the extremities of the curves, Fourier analysis and acoustic recording of the measurement data on the soundcard of your computer. These functions are always related to the section marked (see the previous section) or to the whole diagram, when no part of it is marked.

The remaining four buttons change the original measurement channel under some circumstances. The button with the square root calls up the channel modification. You can naturally also reach this via the menu prompt *Analysis /Channel modification*. Here you can apply mathematical functions to a displayed measurement channel, you can differentiate or integrate it, or form a progressive average value. The button with the steel press icon represents a simple smoothing function, which can smooth your measurement, e.g. when this is covered by noise. The roller icon, on the other hand, forms a local average value in a marked section and inserts this. The button with the scissors performs the cutting out, or deletion, of a marked section. With this you can eliminate an outlier from a diagram, for example. Only this value is cut out, the other values remain unchanged and the X-axis does not contract.

Next to these numerous buttons for the analysis and modification of data are two selection boxes, which show you which channel is presently displayed at the left axis and which at the right axis. When you open these boxes, you can change the display channel, just as you can do in *Measurement/Display options*.

Let 's go...

You have now become familiar with a number of *measure* functions and are well prepared to carry out your measurements with *measure*. During your work with the software, you will find many further functions in the menus which could not be introduced in this brief guide. You will certainly soon discover, and take advantage of, the *Function generator* or the interesting possibilities offered for your work by *Channel manager* (all in the *Measurement* menu), and the online help is always ready and waiting to give you detailed information.

Should you at some time experience a technical difficulty with your *measure* measurement software, please first try to solve it with this guide and the online help. Check also if the problem could be the result of a not quite fault-free installation of your operating system and PC.

Install *measure*, if available, on a different computer for example, and check if the problem occurs there also. The cause of the problem can then often be determined from the differences in the configurations of the two computers. Should a thorough investigation still not enable you to solve the problem, please do not hesitate to contact us, if possible by email at: measure@phywe.de

Comentarios / Aspectos prácticos

1) En el apartado 2 (Fig 4, página 15) se mide cada curva por separado y se guarda. Además se mide sólo un par de grados por debajo y por encima del corte. Por ejemplo, a 25 kV basta medir entre 5° y 9° y a 13 kV entre 12° y 16° . Si en alguna se queda corto se repite en un rango algo mayor.

2) El apartado 3 se mide sin la lámina de Al.

3) El apartado 4 se mide con la lámina de Al.

4) El apartado 5 se puede medir directamente con la opción Compton del software y va pidiendo que se ponga y se quite la lámina. La única observación es que se repite la medida que el guión llama (i), es decir sin lámina en ninguna parte 2 veces. Esto está pensado para medir un “background” pero aquí es irrelevante. Merece la pena, sólo se pierden 5 minutos más.

5) De izquierda a derecha: lámina de Al; cristal de LiF, diafragmas de 1, 2 y 5 mm, lámina de PMMA para efecto Compton.



PRÁCTICA nº 3**DETERMINACIÓN DE ESPECTROS ATÓMICOS****Objetivo:**

(a) Determinación de las líneas espectrales del He, Na, Hg y Zn usando un espectrómetro de prisma (b) Estructura fina del átomo de Na usando una red de difracción.

Fundamentos teóricos:

En las tablas siguientes se recogen las líneas de los espectros de emisión en el rango visible del He, Na, Hg, Zn. Estos datos se han obtenido del CRC Handbook of Chemistry and Physics y también se pueden consultar en la siguiente base de datos accesible en la Web: <http://www.nist.gov/pml/data/handbook/index.cfm>

Líneas espectrales del He

<i>Intensidad</i>	λ (Å)	<i>Intensidad</i>	λ (Å)	<i>Intensidad</i>	λ (Å)
500	3888.65	3	4437.55	100	5875.97
20	3964.729	200	4471.479	100	6678.15
1	4009.27	25	4471.68	3	6867.48
50	4026.191	30	4713.146	200	7065.19
5	4026.36	4	4713.38	30	7065.71
12	4120.82	20	4921.931	50	7281.35
2	4120.99	100	5015.678		
3	4143.76	10	5047.74		
10	4387.929	500	5875.62		

Líneas espectrales del Na

<i>Intensidad</i>	λ (Å)	<i>Intensidad</i>	λ (Å)	<i>Intensidad</i>	λ (Å)
60	4494.18	200	4978.541	40000	5895.924
100	4497.66	400	4982.813	120	6154.225
10	4541.63	40	5148.838	240	6160.747
15	4545.19	80	5153.402		
120	4664.811	280	5682.633		
200	4668.560	70	5688.193		
20	4747.941	560	5688.205		
30	4751.822	80000	5889.950		

Líneas espectrales del Hg

<i>Intensidad</i>	λ (Å)	<i>Intensidad</i>	λ (Å)	<i>Intensidad</i>	λ (Å)
1800	4046.56	20	5102.70	100	5789.66
150	4077.83	40	5120.64	280	5790.66
40	4108.05	20	5137.94	140	5803.78
250	4339.22	20	5290.74	60	5859.25
400	4347.49	5	5316.78	20	5871.98
4000	4358.33	60	5354.05	20	6072.72
5	4883.00	30	5384.63	30	6234.40
5	4889.91	1100	5460.74	160	6716.43
80	4916.07	30	5549.63	250	6907.52
5	4970.37	160	5675.86		
5	4980.64	240	5769.60		

Líneas espectrales del Zn

<i>Intensidad</i>	λ (Å)	<i>Intensidad</i>	λ (Å)	<i>Intensidad</i>	λ (Å)
25	4292.88	15	5069.58	10	5777.11
25	4298.33	200	5181.98	8	6237.90
35	4629.81	8	5308.65	8	6239.17
300	4680.14	7	5310.24	1000	6362.34
400	4722.15	7	5311.02		
400	4810.53	4	5772.10		
7	5068.66	4	5775.50		

Montaje experimental:

En la siguiente figura se muestra el sistema que utilizaremos para determinar los espectros atómicos. Los principales componentes son: tubo del colimador (1), tubo de observación (2), mesita para el prisma o red de difracción (3) y la placa con limbo (5) y nonio (6). El sistema se debe ajustar y alinear, lo cual se ha hecho previamente por el profesor. Se ha de tener cuidado de no mover el espectrómetro ni cambiar ninguno de los tornillos de ajuste (10, 15, 13, 17, 16) que estarán fijos. Principalmente se actuará sobre: (i) el ancho y altura de la ranura a través del tornillo moleteado (9) y de una corredera en V situada simétricamente a éste en el tubo del colimador, (ii) fijación de la posición inicial de la escala angular (12) y (iii) tornillo micrométrico para el tubo de observación (18).

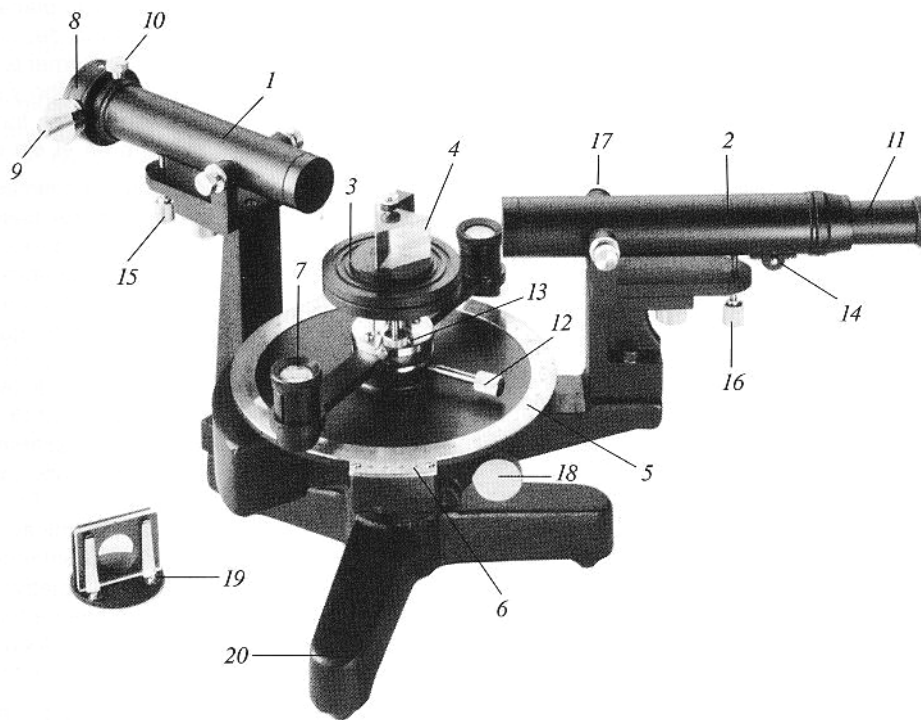


Fig. 1. Espectrómetro de prisma/rejilla

Las lámparas espectrales alcanzan su intensidad de luz máxima después de un periodo de calentamiento de unos 5 minutos. La carcasa de la lámpara debe ser colocada sin tapar las rendijas de ventilación. La lámparas de Hg debe ser encendida una vez colocada la carcasa debido a la emisión de radiación UV. Antes de cambiar las lámparas se debe esperar un cierto tiempo hasta que se enfríen. No tocarlas con los dedos, utilizar un pañuelo de papel o un trapo de tela. Si se han tocado con los dedos, limpiarlas con alcohol antes de volver a encenderlas.

Realización de la práctica:

(a) *Determinación de las líneas espectrales del He, Na, Hg, Zn usando un espectrómetro de prisma*

1. Colocaremos la lámpara de He y el prisma. Comprobaremos que vemos las líneas espectrales del He perfectamente centradas verticalmente. Mediremos las posiciones angulares del resto de líneas que observemos. Hemos de asegurarnos que medimos bien

este espectro pues nos servirá de calibre para el resto de la práctica. Es importante no mover la posición del prisma a lo largo de la práctica.

2. Apagaremos la lámpara de He y esperaremos que se enfríe lo suficiente para poder cambiarla. Repetiremos el procedimiento con el resto de lámparas disponibles, Hg y Zn, midiendo en cada caso la posición de las líneas del espectro.

3. Montaremos por último la lámpara de Na y mediremos la posición de las líneas espectrales.

(b) Estructura fina del átomo de Na usando una red de difracción.

4. Sin apagar la lámpara de Na, quitaremos el prisma y colocaremos la red de difracción con su plano perpendicular al eje del tubo del colimador. Mediremos la posición angular inicial del haz incidente ($\theta=0$) y la de todas las líneas observadas. En particular la línea amarilla del Na aparecerá resuelta en dos líneas perfectamente definidas.

Cuestiones:

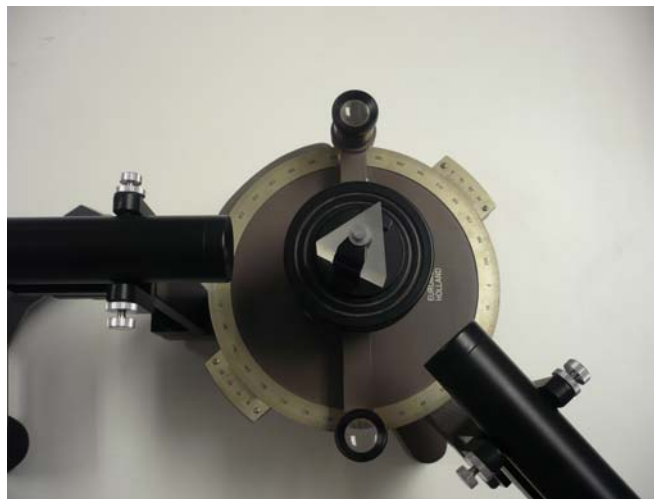
Parte (a):

1. Utilizando el espectro del He, identificar las longitudes de onda de las líneas observadas y realizar una curva de calibre del ángulo del goniómetro φ , $\lambda = \lambda(\varphi)$. Se recomienda usar una función del tipo $\lambda(\varphi) = A + B/\varphi + C/\varphi^2$, aunque se puede utilizar ajustes a otras funciones tipo polinómico teniendo cuidado en el comportamiento de éstas para valores de φ fuera del rango medido.

2. Obtener, a partir del calibre anterior, las longitudes de onda de las líneas espectrales del resto de los elementos medidos y compararlas con los valores esperados dados en las tablas.

Parte (b):

3. Utilizar algunas líneas del Na identificadas en el apartado 2 (valores teóricos) para calibrar el espaciado de la red, d , de acuerdo con la expresión $n\lambda = d \sin\alpha$, $n = 0, 1, 2, \dots$ (la red es de aproximadamente 800 líneas/mm). Estimar la separación del doblete amarillo del Na y comparar con el valor teórico. ¿Podrías estimar el error en esta medida teniendo en cuenta la precisión en la determinación del ángulo?



Comentarios / Aspectos prácticos

- 1) El espectrómetro está calibrado. No hay que moverlo del sitio.
- 2) El espectrómetro está calibrado. No hay que reenfozar el ocular, ni el objetivo.
- 3) Las lámparas no se tocan con los dedos. Sólo tardan 10 minutos en enfriarse. Se quitan con un papel y se dejan en la mesa hasta que estén verdaderamente frías. Si no, aunque muy poco calientes se pegan en la espuma de las cajas.
- 4) La posición precisa del prisma no es relevante siempre que se vean las líneas bien, pero no se puede mover de posición en toda la práctica. Si no el calibre del He no sirve.
- 5) La posición del cero de ángulos es irrelevante siempre que no se cambie a lo largo de la práctica.
- 6) En la parte de la red de difracción no hay que olvidarse de apuntar la posición del ángulo del haz directo. Se consiguen ver varias líneas del espectro del Na (la roja, la amarilla, dos verdes y quizás alguna azul). Para ello hay que abrir bien la rendija (aun a costa de perder resolución) y tapar la red de difracción con el paño negro para evitar la luz ambiente.
- 7) La siguiente tabla orientativa puede ser de utilidad



<i>Color</i>	<i>Longitud de onda</i>
violeta	380-450 nm
azul	450-495 nm
verde	495-570 nm
amarillo	570-590 nm
anaranjado	590-620 nm
rojo	620-750 nm

PRÁCTICA n° 4**DIFRACCIÓN DE ELECTRONES****Objetivo:**

- 1) Verificación de la hipótesis de de Broglie
- 2) Determinación de la longitud de onda de los electrones. Obtención de la constante de Planck

PRECAUCIONES DE SEGURIDAD:

Esta práctica usa altos voltajes. Los cables están bien aislados eléctricamente y no deben representar ningún problema pero si no es así avisar al profesor.

No tocar en ningún caso los bornes de la fuente de alta tensión ni cables eléctricos no aislados.

Fundamento:

Este experimento es el **verdadero fundamento de la Mecánica Cuántica**.

En 1924 de Broglie sugirió (sin mucha base en realidad, por eso este experimento) que las partículas libres podrían tener propiedades ondulatorias, además de las propiedades características de las partículas. Presentó la hipótesis de que la longitud de onda de las partículas es inversamente proporcional a su momento lineal: $\lambda = h/p$. Sus conjeturas fueron confirmadas por los experimentos de Davisson y Germer sobre la difracción de electrones en estructuras cristalinas de níquel en 1927 y por otro de G. Thomson en 1928, similar al que reproducimos aquí.

En este experimento se demuestra el carácter ondulatorio de los electrones en la “difracción” por una red policristalina de grafito, parecidamente al experimento de Debye-Scherrer (1913), éste hecho con rayos X (“verdaderas” ondas). En realidad el fenómeno físico importante **no es difracción** (la difracción interviene sólo en la intensidad de las ondas producidas y no la analizaremos aquí), **sino interferencia**, pero el nombre se ha mantenido. En contraposición al experimento de Davisson y Germer, en el que la difracción de los electrones se observa sobre un monocristal, este montaje

estudia la difracción por una muestra policristalina, y reproduce el realizado por Thomson en 1928. Hoy día la difracción de electrones, y también de neutrones (que no se habían descubierto en 1928), además de los rayos X se utiliza muchísimo en el estudio de los sólidos, no para reproducir por millonésima vez el experimento de Davidsson y Germer sino con la finalidad de determinar las distancias interatómicas en sólidos asumiendo la validez de la hipótesis de L. de Broglie.

Lo crucial es por un lado a) **la observación misma de los anillos de interferencia** de los electrones desviados por cada uno de los átomos. Si los electrones se comportasen como partículas clásicas se observaría en la pantalla una sola mancha central, que sería simplemente la suma incoherente de las producidas por cada átomo separadamente, sin relación entre ellas, de manera parecida a la iluminación total de una pared producida por varias lámparas de luz natural (no láser) o el experimento de Rutherford con partículas alfa. Pero no ocurre así: aparecen anillos que sólo se pueden producir por la interferencia coherente de las ondas producidas conjuntamente por todos los átomos (del orden de 10^{15} átomos) de cada pequeño cristalito.

La segunda observación importante es que b) **efectivamente la longitud de onda es inversamente proporcional al momento de los electrones** y la tercera es que además c) **la constante de proporcionalidad es precisamente la constante de Planck h** , la misma que Plank necesitó para explicar el espectro del cuerpo negro, Einstein para el fotoeléctrico, Bohr para el átomo de hidrógeno, Compton para describir su efecto, y la misma que hoy día regula el comportamiento de los láseres, relojes atómicos, superconductores,... es decir, una constante fundamental de la Física.

Finalmente, dejando de lado la historia científica, hay que añadir que hoy día se estudian cada año más de 10000 cristales sólidos por difracción de electrones y de neutrones. Cuando se examina no sólo la dirección en que salen las ondas difractadas sino también su intensidad, la hipótesis ondulatoria se confirma hasta detalles que se pueden calificar como auténticamente increíbles por quien no sea un experto cristalógrafo. Está fuera del estudio de esta práctica pero entre esos detalles se puede determinar la posición de los átomos con precisión de 0.001 \AA , los movimientos térmicos, los momentos magnéticos, el tamaño de los cristalitos, el orden o no de los átomos dentro del cristal, etc. Entre los muchos miles de artículos científicos publicados desde 1927 sobre difracción de partículas, ni uno solo ha señalado la más insignificante diferencia entre el experimento y la predicción de la hipótesis ondulatoria

de de Broglie, aunque la precisión de los experimentos es hoy miles de veces mejor que la de Davidsson y Germer.

El montaje es un tubo de rayos catódicos con un emisor de electrones por efecto termoiónico que tras atravesar una lámina de grafito policristalino inciden sobre una pantalla fluorescente. Se observan directamente en la pantalla los anillos de difracción. Se trata de comprobar que si V es el voltaje de aceleración de los electrones (2 – 4.5 kV), se verifica que $\lambda = 1.23 V^{-1/2}$ nm (V en voltios).

Situándonos en el contexto histórico de L. de Broglie, en un estudio cristalográfico previo por difracción de rayos X, P. Debye y P. Scherrer (1913) obtuvieron las distancias interatómicas en el grafito. Dicho estudio previo, que no vamos a explicar permite afirmar que las distancias interplanares del grafito relevantes **en este experimento** son las mostradas en la Fig. 1, siendo $d_1 = 2.13 \text{ \AA}$ y $d_2 = 1.23 \text{ \AA}$.

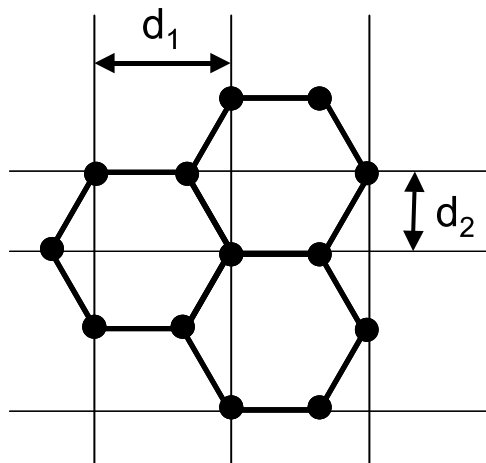


Figura 1. Red cristalina del grafito y distancias interplanares.

Montaje experimental y realización de la práctica:

El montaje experimental se observa en la Fig. 2. Un detalle de las conexiones eléctricas que hay que verificar siempre antes de enchufar se muestra en la Fig. 3. Un detalle de la geometría del experimento se detalla en la Fig. 4.



Figura 2. Montaje experimental general (arriba) donde observamos la fuente de alimentación del filamento de baja tensión (izquierda), la fuente de alto voltaje (derecha) y tubo de electrones (centro y detalle abajo).

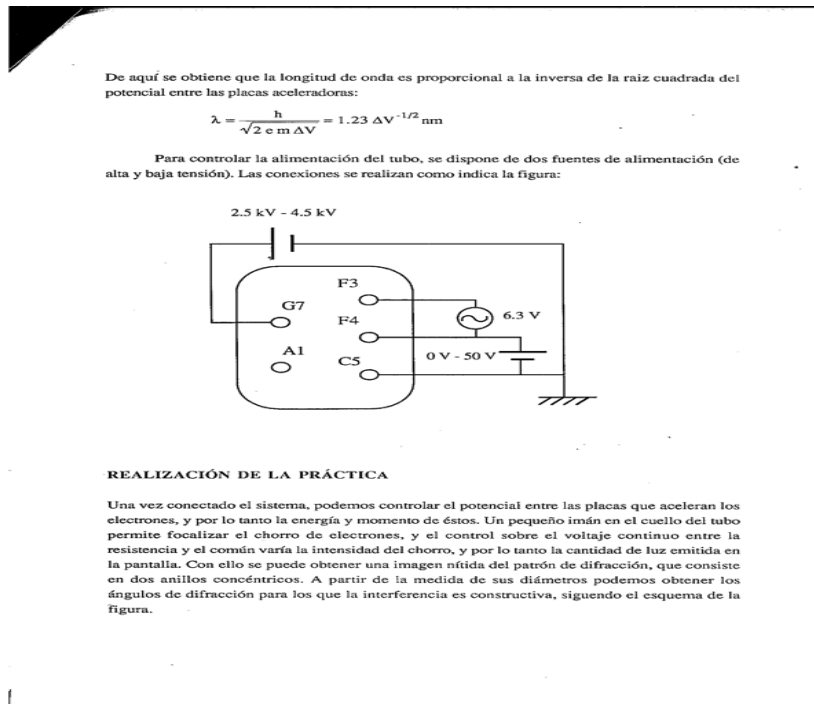


Figura 3. Detalle de las conexiones eléctricas.

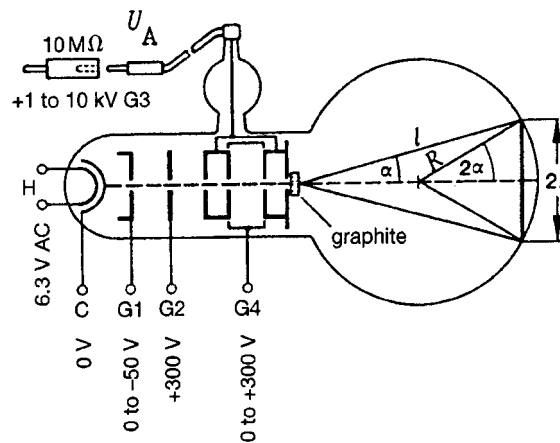


Figura 4. Geometría experimental.

La clave para el análisis del experimento es que los rayos de electrones difractados salen formando un ángulo $\alpha = 2\theta$ con el rayo incidente obedeciendo la fórmula de Bragg:

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

con un valor de θ para cada una de las distancias entre planos atómicos posibles en el cristal. El hecho de que la muestra está formada por muchos cristalitas orientados al azar hace que los rayos difractados por una familia de planos cristalinos salgan en todas

las direcciones que forman el ángulo 2θ (notar que es EL DOBLE del que figura en la fórmula de Bragg) con el incidente, es decir en un cono, que se ve como una circunferencia cuando incide en la pantalla. Hay un anillo para cada distancia interplanar, debido a que corresponde a un valor de θ diferente. En la práctica se observan con facilidad los dos más intensos, que corresponden a las distancias d_1 y d_2 anteriormente mencionadas.

Hay que añadir que con el montaje de la práctica (muy poco sofisticado) sólo se observan los anillos correspondientes al primer orden interferencial $n = 1$. Si a la ley de Bragg (que debe cumplir cualquier onda) se añade la hipótesis de L. de Broglie para electrones se obtiene:

$$2d \sin \theta = \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{h}{\sqrt{2meV}}$$

Siendo $E = p^2/2m = eV$ la energía cinética con la que inciden los electrones, según el voltaje acelerador aplicado V , que puede elegirse a voluntad. La hipótesis de L. de Broglie queda probada si se cumplen las TRES condiciones siguientes:

- 1) Aparecen anillos de difracción.
- 2) El seno del ángulo θ es proporcional a la raíz cuadrada del voltaje acelerador V , para cada anillo observado.
- 3) La constante de proporcionalidad es siempre, para cada anillo (con su d correspondiente) precisamente $\frac{h}{2d\sqrt{2me}}$, siendo h la misma constante usada por Planck, y que aparece en el efecto fotoeléctrico y el Compton

Algunas simplificaciones matemáticas para analizar rápidamente el experimento

Considerando que el ángulo de difracción es pequeño, la condición del primer máximo de difracción de Bragg se puede escribir como $\lambda = 2\theta d = \alpha d$. Si D es el diámetro lineal de un anillo de difracción en la pantalla, entonces $\alpha = (D/2) / L$, siendo L la distancia entre el blanco y la pantalla (Fig. 4). Por tanto, es claro que $D \propto V^{1/2}$.

Se dispone de un calibre para determinar la distancia entre el blanco y la pantalla L y los diámetros de los dos anillos de difracción D_1 y D_2 ($D_1 < D_2$) que se observan. Se realizarán medidas de estos diámetros en función del voltaje de aceleración V entre 2 y

4.5 kV. Los anillos se observan algo gruesos, debido a que la energía de los electrones no está perfectamente determinada. Hay que estimar el diámetro D medio de cada anillo.

Cuestiones:

1. Representar los diámetros D en función de $V^{-1/2}$ y ajustar a una recta. Verificar si los datos realmente se ajustan y determinar las constantes de proporcionalidad para cada d . Determinar el valor de h que mejor ajusta las dos rectas simultáneamente.

Comparar con los resultados precisos admitidos hoy día.

2. Si en lugar de tomar $\lambda = d \alpha$ consideramos $\lambda = 2d \sin\theta$ al calcular la relación entre el diámetro de los anillos y la tensión de aceleración, ¿Cómo se modifican los resultados?

3. ¿Cómo cambian los resultados si se corrige la distancia L entre el anillo de difracción y la lámina de grafito teniendo en cuenta la curvatura de la pantalla y el espesor del bulbo? (Fig. 4). Cuándo es más importante esta corrección, ¿para voltajes pequeños o grandes?

4. Este experimento, con los medios disponibles, ¿confirma la hipótesis de L. de Broglie o no es concluyente por falta de precisión?

Comentarios / Aspectos prácticos

1) Tubo de rayos catódicos:

- El filamento del tubo de rayos catódicos no debe ser calentado con una tensión superior a 6 V.

- Cuando el filamento del tubo está caliente puede romperse si se maneja con brusquedad. Por este motivo no deben moverse bruscamente los tubos de rayos catódicos mientras el filamento está encendido, ni tampoco inmediatamente después de apagarlos.

- No deben ejercerse fuerzas o tracciones excesivas sobre las clavijas salientes de los tubos: el vidrio puede romperse.

- No deben aplicarse tensiones mayores de 4.5 kV sobre el ánodo.

- No se deben tocar los bornes de ánodo y cátodo para evitar descargas: la tensión es alta.

2) Fuente de alimentación de alta tensión:

- El potenciómetro de selección de la tensión de salida de la fuente debe estar a cero al conectar y desconectar la fuente.

- Desconecta siempre la corriente para modificar el circuito o hacer nuevas conexiones.

