

Efecto Compton - medición directa de dispersión de energía



Física

La Física Moderna

Física de Rayos-X



Nivel de dificultad

difícil



Tamaño del grupo

2



Tiempo de preparación

45+ minutos



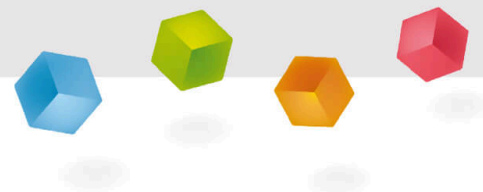
Tiempo de ejecución

45+ minutos

This content can also be found online at:

<http://localhost:1337/c/63436f70580cc10003958040>

PHYWE



Información para el profesor

Aplicación

PHYWE



Montaje

La mayoría de las aplicaciones de los rayos X se basan en su capacidad para atravesar la materia. Como esta capacidad depende de la densidad de la materia, es posible obtener imágenes del interior de los objetos e incluso de las personas. Esto tiene un amplio uso en campos como la medicina o la seguridad.

Información adicional para el profesor (1/2)

PHYWE



Conocimiento previo

Los conocimientos previos para este experimento se encuentran en la sección de principio.



Principio

Los fotones del molibdeno K_{α} Los rayos X se dispersan en los electrones casi libres de un cubo de vidrio acrílico. La energía de los fotones dispersados se determina en función del ángulo con la ayuda de un detector semiconductor giratorio y un analizador multicanal.

Información adicional para el profesor (2/2)

PHYWE



Objetivo

El objetivo de este experimento es llegar a investigar el efecto Compton.



Tareas

1. Calibrar el detector de energía semiconductor.
2. Determinación de la energía de los fotones del $W-L_{\alpha}$ -línea que se dispersa a través de un elemento de vidrio acrílico en función del ángulo de dispersión.
3. Comparar los valores de energía medidos de las líneas de dispersión con los valores de energía calculados.
4. Calcular la longitud de onda Compton de los electrones y una comparación de este valor con el valor correspondiente de la dispersión a 90° .

Principio (1/2)

PHYWE

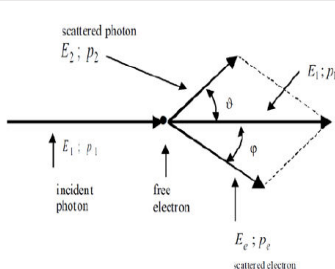


Fig. 1: Relación entre el momento y la energía del efecto Compton

La figura 1 muestra una representación esquemática del efecto Compton.

Debido a la interacción con un electrón libre en el elemento sólido, el fotón incidente pierde energía y se desvía de su dirección original con el ángulo de dispersión θ . El electrón en reposo absorbe energía cinética adicional y abandona el punto de colisión bajo el ángulo ϕ .

$$E_2 = \frac{E_1}{1 + \frac{E_1}{m_e c^2} (1 - \cos(\theta))} \quad (1)$$

Energía de los fotones antes y después de la colisión E_1 resp. E_2

Equivalente $1 \text{ eV} = 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Ángulo de dispersión θ

Velocidad de la luz en el vacío $c = 2.988 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Masa en reposo del electrón

$$m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Principio (2/2)

Después de la colisión, el fotón tiene un nivel de energía más bajo E_2 y una mayor longitud de onda λ_2 . Con $E = h \cdot \nu$ (1) puede transformarse en

$$\frac{1}{h\nu_2} - \frac{1}{h\nu_1} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos(\theta)) \quad (2)$$

Con $\lambda = c/\nu$ (2) lleva a:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta)) \quad (3)$$

Para la dispersión a 90° , la diferencia de longitud de onda, que sólo consta de las tres componentes universales, proporciona la llamada longitud de onda Compton λ_C para los electrones.

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = 2.426 \text{ pm}$$

En cuanto a los casos especiales de la dispersión hacia delante y hacia atrás por $\theta = 0^\circ$ y $\theta = 180^\circ$, el cambio en la longitud de onda es $\Delta\lambda = 2\lambda_C$.

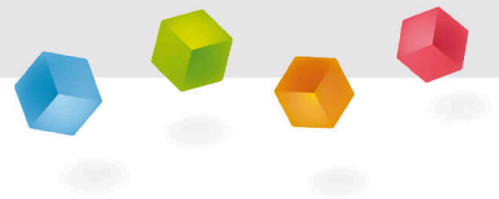
El quantum de acción de Planck $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Frecuencia de los fotones ν

Material

Posición	Material	Artículo No.	Cantidad
1	XR 4.0 Unidad de rayos X, 35 kV	09057-99	1
2	XR 4.0 X-ray goniometro	09057-10	1
3	X-ray Módulo enchufable con tubo de rayos X de cobre (Cu)	09057-51	1
4	XR 4.0 Set de Extensión Análisis de Materiales con Rayos X	09165-88	1

PHYWE



Montaje y ejecución

Montaje (1/2)

PHYWE

- Enroscar el anillo adaptador en el tubo de entrada del detector de energía y conectar los cables de señal y de alimentación a los puertos correspondientes del detector con la ayuda de los enchufes en ángulo recto.
- Conectar los cables de señal y de alimentación a los puertos correspondientes de la cámara de experimentación del equipo de rayos X. En la figura 2, el puerto para el cable de señal está marcado en rojo y el puerto para el cable de alimentación está marcado en verde. Conectar los puertos X RED externos de la unidad de rayos X (ver la figura 3) al analizador multicanal (MCA). Conectar el cable de señal al puerto "Input" y el cable de alimentación al puerto "X-Ray Energy Det." del MCA.



Fig. 2: Conectores en la cámara de experimentación



Fig. 3: Conexión del analizador multicanal

Montaje (2/2)

PHYWE

- Fijar el detector de energía en el soporte del brazo giratorio del goniómetro. Colocar los dos cables con la longitud suficiente para que el goniómetro pueda girar libremente en todo su recorrido.
- Conectar el analizador multicanal y el ordenador con la ayuda del cable USB.
- Introducir el tubo con la abertura de 2 mm.
- Llevar el bloque del goniómetro y el detector a sus respectivas posiciones finales de la derecha.

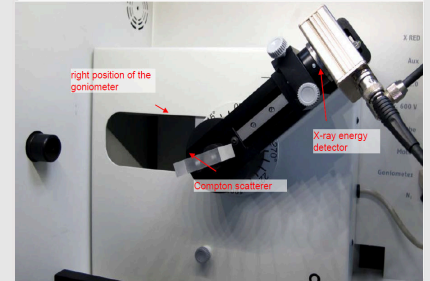


Fig. 4: Montaje del goniómetro

Ejecución (1/5)

PHYWE

- Llevar el bloque del goniómetro y el detector a sus respectivas posiciones finales de la derecha.
- Introducir el tubo con la abertura de 1 mm en el tubo de salida del tubo de rayos X.
- Con la unidad de rayos X encendida y la puerta cerrada, llevar el detector a la posición 0°. A continuación, desplazar el detector unas décimas de grado fuera de la posición cero para reducir la tasa total.
- Datos de funcionamiento del tubo de rayos X de tungsteno: Seleccionar una tensión anódica $U_A = 25 \text{ kV}$ y una corriente anódica $I_A = 0,02 \text{ mA}$ y confirmar estos valores pulsando el botón "Enter".
- Encender la radiación X

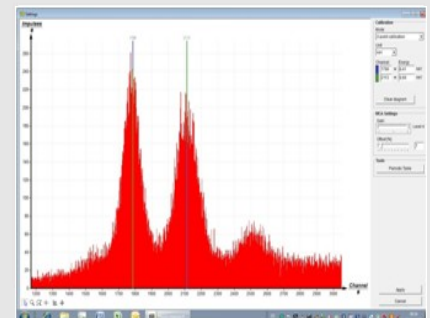


Fig. 5: Calibración del analizador multicanal

Ejecución (2/5)

PHYWE

- En el programa MEASURE, seleccionar "Analizador multicanal" en "Gauge". A continuación, seleccionar "Ajustes y calibración". Tras pulsar el botón "Calibrar", se puede medir un espectro. La tasa de recuento debe ser < 300 c/s. Ajustes de calibración de energía: - Calibración de 2 puntos, - Unidad = keV, Ganancia = 2 - Ajustar el offset de forma que se supriman las señales de ruido de baja energía (normalmente basta con unos pocos porcentajes), Ver Fig. 5.
- Tiempo de medición: 5 minutos. Utilizar el temporizador de la unidad de rayos X.
- Hacer que las dos líneas de calibración coloreadas sean congruentes con los centros de las dos líneas de rayos X características. Los valores de energía correspondientes (ver, por ejemplo, P2544705) $E(L_3M_5/L_3M_4) = 8,41\text{keV}$ y $E(L_2N_4) = 9,69\text{keV}$ se introducen en los campos correspondientes, en función del color. (Nota: Dado que una separación de las líneas L_3M_4 y L_3M_5 no es posible, el valor medio de ambas líneas se introduce como la energía de la línea).
- Poner un nombre a la calibración y guardarla.

Ejecución (3/5)

PHYWE

Dispersión Compton

Colocar el detector en la posición cero y seleccionar los siguientes datos de funcionamiento: tubo de membrana con $d = 1\text{mm}$, $U_A = 30\text{ kV}$, $I_A = 0,08\text{ mA}$.

- Introducir los siguientes parámetros en el campo "Control" de la ventana "Registro de espectros": - Ganancia = 2, - Desplazamiento = 5%, - Datos X = keV, - Ancho de intervalo [canales] = 1.
- Poner en marcha el tubo de rayos X. El tiempo de medición debe ser de aproximadamente 5 minutos para que la intensidad de la K_α -el pico es de aproximadamente 200-300 pulsos. Aceptar los datos y guárdarlos.
- Colocar el elemento de vidrio acrílico (dispersor) del equipo Compton en el soporte de la muestra y ajustarlo en una posición de 10° . Ajustar el detector a 20° .

Ejecución (4/5)






PHYWE

- Ahora, añadir el tubo con la apertura de 5 mm y aumentar los datos de funcionamiento del tubo de rayos X a $U_A = 35 \text{ kV}$ y $I_A = 0,3 \text{ mA}$.
- Iniciar la medición. El tiempo de medición es de aproximadamente 10 minutos. La intensidad de la K_α -el pico debe ser de aproximadamente 200 pulsos. Detener la medición con "Aceptar datos".
- Dejar el dispersor de vidrio acrílico en su posición y realizar mediciones adicionales. Para ello, cambiar el ángulo del detector en pasos de 10° hasta el valor final de 160° .

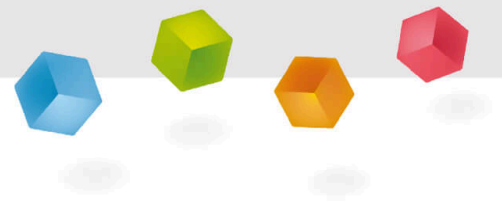
Ejecución (5/5)

PHYWE

Resultados de las curvas de medición

- Para determinar la energía de la línea, pase de la visualización de barras a la visualización de curvas. Para ello, hacer clic en "Opciones de visualización" y luego en "Interpolación y líneas rectas".
- Ampliar la sección de la línea correspondiente con la ayuda de la función de zoom .
- A continuación, seleccionar la sección de curvas con Abrir la ventana "Ajuste de funciones A  continuación, seleccionar "Distribución normal escalada" y confirmar. .
- Encontrar el centro de la línea de la distribución normal con "Análisis de picos" o determinarlo con la función "Encuesta"  .

PHYWE



Resultados

Tarea 2

PHYWE

La figura 6 muestra una parte del espectro de rayos X del molibdeno. Para el desplazamiento de la energía de la radiación dispersa en función del ángulo, sólo la intensidad alta L_{α} -debe tenerse en cuenta la línea.

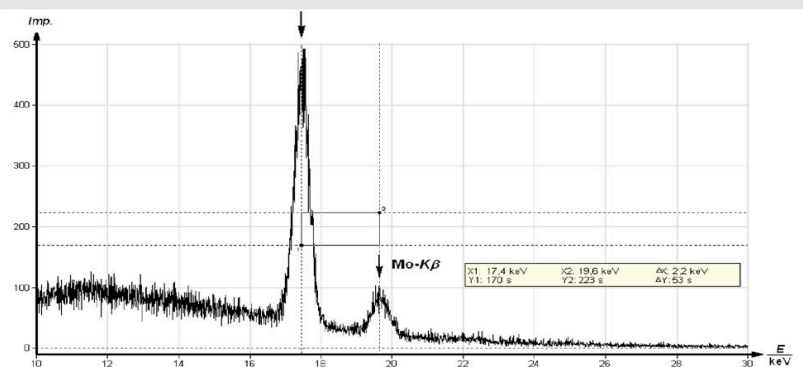


Fig. 6: Espectro de rayos X del molibdeno (sección)

Tarea 3

PHYWE

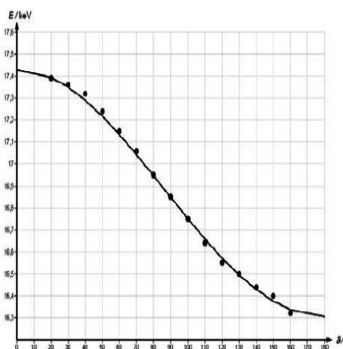


Fig. 7: Energía del molibdeno K_{α} -en función del ángulo de dispersión.

La columna B de la tabla 1 muestra los valores energéticos experimentales de los picos de línea del W- L_{α} -en función del ángulo de dispersión (columna A).

Para comparar, la columna C muestra los valores de energía que se calcularon con $E_1(\text{Mo} - K_{\alpha}) = 17.43 \text{ keV}$ en base a (1).

La figura 7 muestra el contenido de la tabla 1 en forma de gráfico para mayor claridad.

A	B	C
$\theta / ^\circ$	$E_2(\text{exp.}) / \text{keV}$	$E_2(\text{theor.}) / \text{keV}$
20	17,39	17,394
30	17,36	17,350
40	17,32	17,290
50	17,24	17,218
60	17,15	17,134
70	17,06	17,043
80	16,95	16,947
90	16,85	16,849
100	16,75	16,752
110	16,64	16,659
120	16,55	16,572
130	16,50	16,495
140	16,44	16,429
150	16,40	16,376
160	16,32	16,337

Cuadro 1: Energía E_2 de los fotones dispersos en función del ángulo de dispersión θ .

Tarea 4

PHYWE

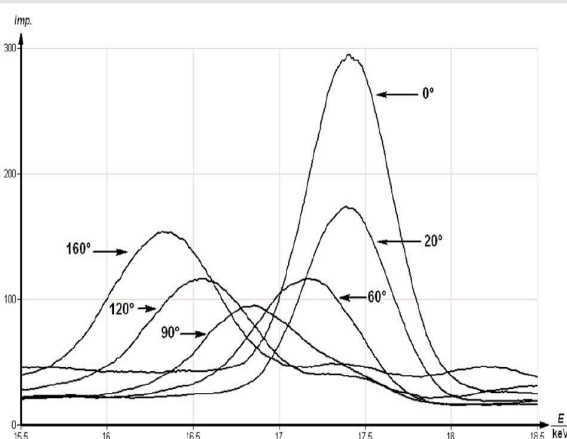


Fig. 8: Molybdenum- K_{α} -Línea de varios ángulos de dispersión θ .

Para determinar la longitud de onda Compton λ_C basándose en la dispersión de 90° , la ecuación (3) se transforma con $\lambda = hc/E$:

$$\lambda_C = \lambda_2 - \lambda_1 = hc \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right) \quad (4)$$

Con $E_2(90^\circ) = 16,64 \text{ keV}$ (ver tabla) y $E_1(0^\circ) = 17,43 \text{ keV}$ y la equivalencia $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ se obtiene la siguiente longitud de onda Compton basada en el experimento:

$$\lambda_C = 2.49 \text{ pm}$$

PHYWE



Anexo

Conservación del momento:

PHYWE

$$p_1 = p_2 + p_3 \rightarrow p_e^2 = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1p_2 \quad (5)$$

Lo siguiente se aplica al ángulo θ que está formado por los dos vectores de momento p_1 y p_2 :

$$\cos(\theta) = \frac{p_1 p_2}{\sqrt{|p_1|^2 |p_2|^2}} \quad (6)$$

Con (6) y las relaciones momento-energía $p_1 = E_1/c$ y $p_2 = E_2/c$ (relación momento-energía basada en una combinación de $E = h\nu$ el momento del fotón $p = h/\lambda$ (de Broglie) y $c = \lambda\nu$), la ecuación (5) conduce a:

$$p_e^2 = \frac{1}{c^2} (E_1^2 + E_2^2 - 2E_1 E_2 \cos(\theta)) \quad (7)$$

Conservación de la energía:

PHYWE

Si se tienen en cuenta los efectos relativistas para un electrón con la velocidad v , resulta lo siguiente:

$$E_1 + m_0c^2 = E_2 + E_e = E_2 + \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad (8)$$

Con $E = mc^2$ y $p_e = mv$ es lo que sigue:

$$v^2 = \frac{c^4 p_e^2}{E_e^2} \quad (9)$$

Si se pone (9) en (8), resulta lo siguiente:

$$p_e^2 = \frac{1}{c^2} (E_1^2 + E_2^2 + 2m_0c^2(E_1 - E_2) - 2E_1E_2) \quad (10)$$

La combinación de (7) y (10) conduce a lo siguiente para E_2 :

$$E_2 = \frac{E_1}{1 + \frac{E_1}{m_0c^2} (1 - \cos(\theta))} \quad (11)$$