

# Bordes de absorción K y L de los rayos X / Ley de Moseley y la constante de Rydberg



Física

La Física Moderna

Física de Rayos-X



Nivel de dificultad



Tamaño del grupo



Tiempo de preparación



Tiempo de ejecución

difícil

2

45+ minutos

45+ minutos

This content can also be found online at:

<http://localhost:1337/c/6017985c6b5e40000357c171>

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



#### Principio

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

Se irradian muestras de distintos grosores con los rayos X policromáticos de un tubo de rayos X de cobre. La radiación que atraviesa las muestras se analiza con la ayuda de un monocrystal. La constante de Rydberg se calcula a partir de los ángulos de deslizamiento de los bordes de absorción.\N-Este experimento está incluido en el conjunto de actualización "XRS 4.0 X-ray structural analysis". En este experimento está incluido en el conjunto de actualización "XRS 4.0 X-ray structural analysis".

## Información adicional para el profesor (2/2)

PHYWE



### Objetivo

El objetivo de este experimento es llegar a investigar el perfil de radiación X del cobre utilizando la absorción de los bordes K y L.



### Tareas

1. Analizar la radiación X del cobre con la ayuda de un monocrystal de LiF y en función del ángulo de Bragg sin y con varias muestras de absorción de borde K como absorbentes. Determine los bordes de absorción K de diferentes absorbentes basándose en los espectros.
2. Calcular la constante de Rydberg y la constante de cribado a partir de los valores energéticos de los bordes de absorción K.
3. Proceda como se describe para la tarea 1, pero esta vez con varias muestras para la absorción del borde L.
4. Calcular la constante de Rydberg a partir de los valores energéticos de los bordes de absorción L.

## Instrucciones de seguridad

PHYWE



Cuando manipule productos químicos, deberá utilizar guantes de protección adecuados, gafas de seguridad y ropa apropiada. Consultar el apéndice para obtener instrucciones de seguridad detalladas.

## Principio (1/4)

PHYWE

Cuando los rayos X interactúan con la materia, pierden energía debido a la dispersión Compton, la producción de pares y los efectos fotoeléctricos. La fuerza respectiva de estos tres efectos depende de la energía de la radiación. En el rango de energía disponible durante este experimento, el efecto fotoeléctrico juega el papel más importante. La figura 1 muestra el curso esquemático de la transmisión  $T$  en función de la energía de radiación  $E$ . La causa de la irregularidad que se conoce como "absorción de borde" es el efecto fotoeléctrico.

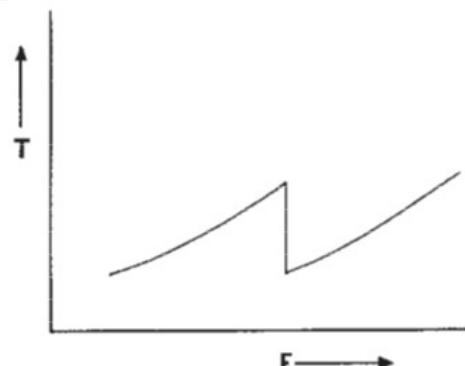


Fig. 1: Curso esquemático de la transmisión  $T$  en función de la energía  $E$  en la zona de un borde de absorción

## Principio (2/4)

Lo siguiente es válido para la energía de enlace  $E_n$  de un electrón en una capa con el número cuántico principal  $n$ :

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} (Z - \sigma)^2 \text{ donde } (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

Con la introducción de la constante de Rydberg  $R$ :

$$R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = 3.2898 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1} \quad (2)$$

la ecuación (1) se convierte en

$$E_n = R \cdot h (Z - \sigma)^2 \frac{1}{n^2} \quad (3)$$

Masa de electrones:  $m_e = 9.1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Cargo elemental:  $e = 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ As}$

La constante de Plank:  $h = 6.6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

$$\epsilon_0 = 8.8544 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Constante dieléctrica:  $Z$

Número atómico:  $\sigma$

Para los electrones de la capa K ( $n = 1$ ), la constante de apantallamiento es  $\sigma \approx 1$ .

## Principio (3/4)

Cálculo de la energía en función de los ángulos de deslizamiento:

Utilizando la ecuación de Bragg

$$2d \sin(\theta) = n\lambda \quad (d: \text{espacio interplanar}; n = 1, 2, 3, \dots)$$

(LiF(200) distancia interplanar  $d = 201.4 \text{ pm}$ )

con  $n = 1$  y junto con la ecuación de energía

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (5)$$

finalmente obtenemos la energía ( $n = 1$ ) a partir de los ángulos de deslizamiento de los bordes de absorción:

$$E = \frac{h \cdot c}{2d \sin(\theta)} \quad (6)$$

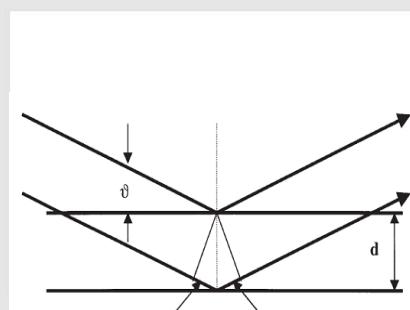


Fig. 2: Dispersión de Bragg en un par de planos de la red

## Principio (4/4)

El cuadro 1 muestra los  $\theta$  valores de los bordes de absorción de varios absorbentes que se tomaron de la figura 8. Se utilizó la ecuación (6) para calcular los valores de energía  $E_K$  de las cáscaras K asociadas. A modo de comparación, también se proporcionan los valores correspondientes de la literatura.

La ecuación (3) se convierte para calcular la constante de Rydberg R.

$$Z = \frac{1}{\sqrt{R \cdot h}} \cdot \sqrt{E + \sigma} \text{ (con } n = 1\text{)} \quad (7)$$

Z	$\theta [^\circ]$	$E_K \text{ (exp.) [keV]}$	$E_K \text{ (lit.) [keV]}$
Zn	30	18.6	9.66
Ge	32	16.1	11.10
Se	34	14.0	12.66
Br	35	13.2	13.47
Rb	37	11.6	15.20
Sr	38	11.0	16.10
Ag	47	6.8	25.51

Tabla 1: Energías de borde K

## 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 Estructural con Rayos X	09145-88	1
5	JGO.QUIMICOS P.ABSORCION D.BORDES	09056-07	1
6	NITRATO DE PLATA, 25 G	30222-04	1



## Montaje y ejecución

### Montaje

Conectar el goniómetro y el tubo contador Geiger-Müller a sus respectivos enchufes en la cámara de experimentación (véanse las marcas rojas en la Fig. 3). El bloque del goniómetro con el cristal del analizador debe situarse en la posición final del lado derecho. Fijar el tubo contador Geiger-Müller con su soporte en el tope posterior de los carriles guía. No olvide instalar el diafragma delante del tubo contador (véase la Fig. 4). Introduzca un tubo de diafragma con un diámetro de 2 mm (sin absorbedor) o de 5 mm (con absorbedor) en la salida del haz de la unidad de enchufe del tubo para la colimación del haz de rayos X.

**Para la calibración:** Asegúrese de que se ha introducido el cristal correcto en los parámetros del goniómetro. A continuación, seleccione "Menú", "Goniómetro", "Autocalibración". El aparato determina ahora las posiciones óptimas del cristal y del goniómetro entre sí y luego las posiciones de los picos.



↓Fig. 4: Montaje del goniómetro



## Ejecución (1/4)

PHYWE

- Conectar la unidad de rayos X mediante el cable USB al puerto USB de su ordenador (el puerto correcto de la unidad de rayos X está marcado en la figura 5).
- Iniciar el programa "medir". En la pantalla aparecerá una unidad de rayos X virtual.
- Puede controlar la unidad de rayos X haciendo clic en las distintas características de la unidad de rayos X virtual y debajo de ella. También puede cambiar los parámetros en la unidad de rayos X real. El programa adoptará automáticamente los ajustes.



Fig. 5: Conexión del ordenador

## Ejecución (2/4)

PHYWE

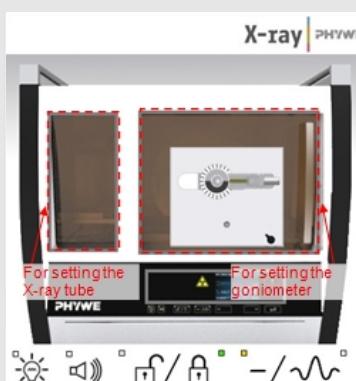


Fig. 6: Parte de la interfaz de usuario del software

- Hacer clic en la cámara del experimento (véase la marca roja en la Figura 6) para cambiar los parámetros del experimento. Seleccionar los ajustes como se muestra en la vista general para los distintos experimentos.

Ángulo de inclinación  $\theta = 5^\circ\text{--}26^\circ$ . Para la grabación sin absorbente, utilice el tubo de diafragma con un diámetro de 2 mm. Si se utiliza un absorbente, utilizar el tubo de diafragma con un diámetro de 5 mm.

- Si hace clic en el tubo de rayos X (véase la marca roja en la figura 6), podrá modificar la tensión y la corriente del tubo de rayos X. Seleccionar los parámetros como se muestra en la Fig. 7.

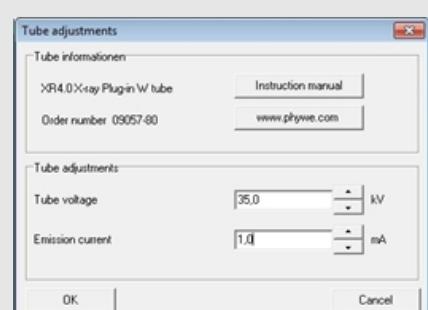
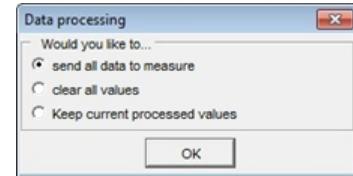


Fig. 7: Ajustes de tensión y corriente

## Ejecución (3/4)

PHYWE

- Iniciar la medición haciendo clic en el círculo rojo: 
- Tras la medición, aparece la siguiente ventana:



- Seleccionar el primer elemento y confirme con OK. Los valores medidos se transferirán ahora directamente al software "measure".
- Al final de este manual, encontrará una breve introducción a la evaluación de los espectros resultantes.

## Ejecución (4/4)

PHYWE

### Visión general de los ajustes del goniómetro y de la unidad de rayos X:

- Modo de acoplamiento 1:2
- rango de escaneo:  $4^\circ$ - $21^\circ$
- ancho de paso del ángulo  $0,1^\circ$
- Tensión anódica  $U_A = 35$  kV; corriente anódica  $I_A = 1$  mA

#### Grabación sin absorción

- Tiempo de la puerta 2 s

#### Grabación con K absorbedor de bordes

- Tiempo de la puerta 3 s

#### Grabación con una L absorbedor de bordes

- Tiempo de la puerta 6 s



## Resultados

### Tarea 1

**Analizar la radiación X del cobre con la ayuda de un monocrystal de LiF y en función del ángulo de Bragg sin y con varias muestras K de absorción de borde como absorbentes. Determinar el bordes K de absorción de los diferentes absorbentes en función de los espectros.**

La figura 8 muestra la intensidad I de la radiación X del cobre en función del ángulo de Bragg  $\theta$  hasta la característica  $K_{\beta}$  línea. La curva superior muestra el espectro sin ningún absorbente. Todas las demás curvas se registraron con una muestra de absorbente adicional. Cuanto más alto es el número atómico del absorbente, más se desplaza el borde de absorción hacia ángulos de deslizamiento más pequeños.

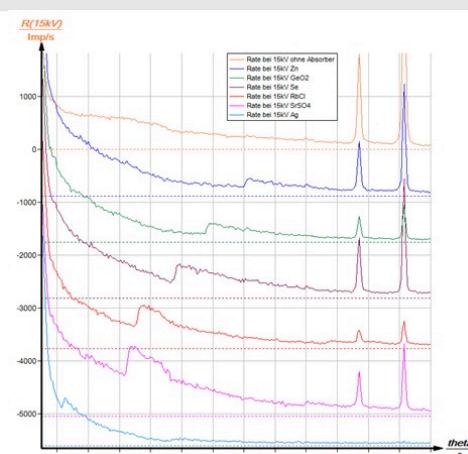


Fig. 8: Espectros de rayos X del cobre sin ningún absorbente (curva superior) y con los bordes de absorción de varios elementos

## Tarea 2

### Calcular la constante de Rydberg y la constante de cribado a partir de los valores energéticos de la K abordes de absorción.

Con la ayuda de la ecuación (6), se pueden obtener los valores de energía de absorción de los bordes. La figura 9 muestra la función  $Z = f(\sqrt{E_K})$  en función de los valores energéticos  $E_K$  (exp.) de la tabla 1. A partir de la ecuación de la recta  $a = \frac{1}{\sqrt{R \cdot h}}$  se deduce lo siguiente para la constante de Rydberg:

$$R = \frac{1}{h} \cdot \frac{|\Delta(\sqrt{E})|^2}{(\Delta Z)^2} \quad (8)$$

Con el valor de R y el  $E_K$  (exp.) de la tabla 1, la ecuación (3) conduce a  $\sigma(K) = (3.5 \pm 0.1)$  como el valor medio de la constante de cribado.

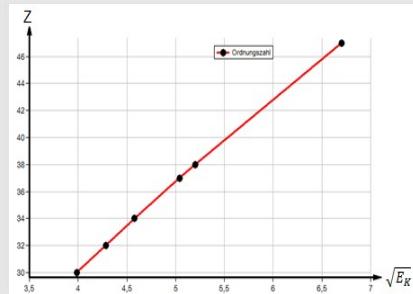


Fig. 9: Línea de Moseley de la absorción del borde K para determinar la constante de Rydberg.

## Tarea 3

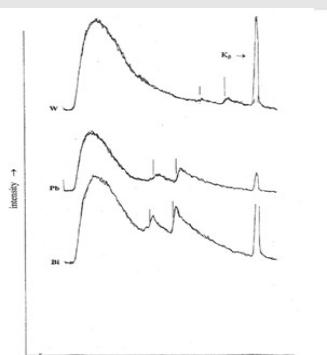


Fig. 10: Espectro de rayos X del cobre con los bordes de absorción L de varios elementos

Proceda como se describe en la tarea 1, pero esta vez con varias muestras para L de la absorción de la energía.

La figura 10 muestra el espectro de la radiación con los bordes de absorción de los elementos de mayor número atómico. Sin embargo, aunque en teoría se pueden esperar tres bordes de las tres capas L, sólo se pueden ver dos. La separación de los bordes de absorción de los  $L_2$  y  $L_3$  no es posible.

## Tarea 4

### Calcular la constante de Rydberg a partir de los valores energéticos de los L límites de absorción.

La tabla 2 muestra los resultados relativos del límite de la absorción L. El valor de la literatura  $E_{L_{1,2}}$  que se da para la comparación se ha calculado tomando la media de los correspondientes  $L_1$  y  $L_2$  valores.

Una evaluación con la ayuda de la ecuación (1) no tiene sentido en este caso, ya que además de la interacción de Coulomb-hay que tener en cuenta otros procesos interactivos. No obstante, la ecuación (1) es útil para dar una idea aproximada del apantallamiento de los electrones en las capas L. Según (3) y con  $n = 2$  más los valores energéticos experimentales de la tabla 2, resulta lo siguiente

$$\sigma(K) \ll \sigma(L_{1,2}) < 15 < \sigma(L_3) < 20$$

El crecimiento de la constante de apantallamiento subraya la influencia decreciente del potencial nuclear sobre los electrones de las capas exteriores.

La figura 11 muestra el curso lineal de la función  $Z = f(\sqrt{E_K})$  para  $L_{1,2}$  y  $L_3$  (9).

## Tarea 4 (parte 2)

	W (Z = 74)	Hg (Z = 80)	Pb (Z = 82)	Bi (Z = 83)
$\theta(L_{1,2})$	15.5	12.4	11.6	11.2
$E_{L_{1,2}}$ (exp)	11.52	14.33	15.31	15.85
$E_{L_{1,2}}$ (lit)	11.82	14.52	15.53	16.05
$\theta(L_3)$	17.6	14.5	13.6	13.2
$E_{L_3}$ (exp)	10.20	12.29	13.09	13.48
$E_{L_3}$ (lit)	10.21	12.28	13.04	13.42

Tabla 2: Energías del límite L

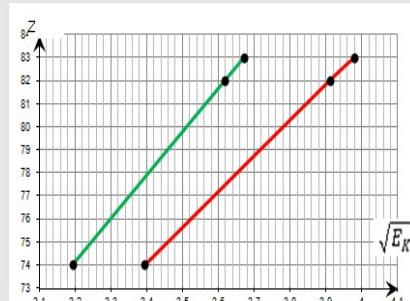


Fig. 11: Líneas de Moseley para la absorción del límite L

## Observaciones

PHYWE

### Software "a medida"

En primer lugar, hay que convertir los ángulos de deslizamiento (ángulo del cristal = eje x) de los espectros en los valores energéticos correspondientes. Para ello, proceda como sigue: "Análisis", "Espectroscopia de rayos X", "Convertir eje x" y "Energía (n = 1)". Las líneas de Moseley pueden obtenerse a partir de los espectros convertidos ( $\text{Imp/s} = f(E/\text{keV})$ ) de la siguiente manera:

- Hacer clic en "Análisis", "Espectroscopia de rayos X" y "Recta de Moseley". y aparece la ventana "Recta de Moseley". Ofrece la absorción de los límites K y L. A continuación, seleccione el centro del borde de absorción como banda estrecha con la ayuda del marcador y haga clic en "Aceptar valor". Si es necesario, se puede ampliar la zona del límite de absorción con ayuda de la función de zoom. Si se ha introducido el valor de absorción y su número atómico en la ventana inicial, se mostrarán los correspondientes valores del par para la energía del borde y el número atómico. Estos últimos también pueden introducirse posteriormente en la ventana adicional "Recta de Moseley". Para generar la línea recta, haga clic en "Generar línea de Moseley". La constante de Rydberg puede determinarse haciendo clic en "Análisis", "Espectroscopia de rayos X" y "Determinar la constante de Rydberg". Con "Opciones de visualización", "Canales" y "Símbolo", se pueden mostrar los puntos de medición de la línea de Moseley si se desea.

PHYWE



## Observaciones

14/18

## Información de seguridad (1/7)

PHYWE

Símbolo de peligro, palabra clave	Declaraciones de peligro	Declaraciones de precaución
<b>Cloruro de rubidio (RbCl)</b>	--	--
<b>Óxido de germanio (IV) (Ge O<sub>2</sub>)</b>	H302: Nocivo por ingestión H332: Nocivo por inhalación	--



## Información de seguridad (2/7)

PHYWE

Símbolo de peligro, palabra clave	Declaraciones de peligro	Declaraciones de precaución
<b>Cloruro de plata (I) (AgCl)</b>	H400: Muy tóxico para la vida acuática	P273: Evitar su liberación al medio ambiente.
<b>Zinc</b>	--	--



## Información de seguridad (3/7)

PHYWE

Símbolo de peligro, palabra clave	Declaraciones de peligro	Declaraciones de precaución
<b>Selenio</b>	 <p>H301: Tóxico si se engrosa Tóxico por inhalación H373: Provoca daños en los órganos por exposición prolongada o repetida H413: Puede provocar efectos nocivos duraderos en la vida acuática.</p>	--.

## Información de seguridad (4/7)

PHYWE

Símbolo de peligro, palabra clave	Declaraciones de peligro	Declaraciones de precaución
<b>Bromuro de potasio (KBr)</b>	 <p>H315: Provoca irritación de la piel H319: Provoca irritación ocular grave. H335: Puede causar irritación de las vías respiratorias</p>	<p>P261: Evitar respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol.</p> <p>P305 + P351 + P338: EN CASO DE ENTRADA EN LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar los lentes de contacto, si están presentes y es fácil hacerlo. Continuar con el enjuague..</p>
<b>Sulfato de estroncio (SrSO<sub>4</sub>)</b>		

## Información de seguridad (5/7)

PHYWE

Símbolo de peligro, palabra clave	Declaraciones de peligro	Declaraciones de precaución
<b>Plomo (IV) óxido (PbO<sub>2</sub>)</b>		
	<p>H272: Puede intensificar el fuego; oxidante</p> <p>H302: Nocivo por ingestión</p> <p>H332: Nocivo por inhalación</p> <p>H360: Puede dañar la fertilidad o al feto</p>	<p>P201: Obtenga instrucciones especiales antes de su uso.</p> <p>P220: Mantener/almacenar alejado de ropa/.../materiales combustibles.</p> <p>P273: Evitar la liberación al medio ambiente.</p>

## Información de seguridad (6/7)

PHYWE

Símbolo de peligro, palabra clave	Declaraciones de peligro	Declaraciones de precaución
<b>Óxido de tungsteno (IV) (W O<sub>2</sub>)</b>		
	<p>H335: Puede causar irritación de las vías respiratorias</p>	--

## Información de seguridad (7/7)

PHYWE

Símbolo de peligro, palabra clave	Declaraciones de peligro	Declaraciones de precaución
 <b>Óxido de bismuto (III) (Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	<p>H315: Provoca irritación de la piel</p> <p>H319: Provoca irritación ocular grave.</p> <p>H335: Puede causar irritación de las vías</p>	<p>P261: Evitar respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol.</p> <p>P305 + P351 + P338: EN CASO DE ENTRADA EN LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si están presentes y es fácil hacerlo. Continuar con el enjuague.</p>