

**Universidad de Nariño**  
**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales**  
**Departamento de Física**



**Experiencias con rayos X**

**TRABAJO DE GRADO**

Para optar el título profesional de:

**Física**

**Luisa María Andrade López y Paola Andrea Muñoz Ruano**

San Juan de Pasto, Colombia

Diciembre 2018

**Universidad de Nariño**  
**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales**  
**Departamento de Física**

**Experiencias con rayos X**

**Luisa María Andrade López y Paola Andrea Muñoz Ruano**

**TRABAJO DE GRADO**

Director:

**Yithsbey Giraldo Úsuga**

Doctor en física

Codirector:

**James Perengüez López**

Magíster en fotónica

San Juan de Pasto, Colombia

Diciembre 2018

©2018 -Luisa María Andrade López y Paola Andrea Muñoz Ruano

“Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado son responsabilidad exclusiva de los autores”

Artículo 1. del acuerdo No. 324 del 11 de Octubre de 1966, emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Todos los derechos reservados.

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Yithsbey Giraldo Úsuga

---

Director

Karla Patricia Reyes Sánchez

---

Jurado

Juan Carlos Salazar Montenegro

---

Jurado

San Juan de Pasto, 10 de Diciembre 2018

## **Agradecimientos**

Agradecemos en especial a: nuestro compañero Daniel Felipe Ruíz por su tiempo y disposición en la toma de fotografías; al Profesor James Perengüez por su guía, preocupación y acompañamiento durante la realización de este trabajo de grado; al profesor Yitshbey Giraldo Úsuga por su asesoría y por brindarnos una parte de su tiempo para resolver nuestras dudas e inquietudes; a Liliana Quintana por brindarnos su tiempo, amistad y afecto durante el transcurso de toda la carrera.

Yo Paola Andrea Muñoz Ruano agradezco a mis padres, familiares, amigos, compañeros y profesores quienes me brindaron su apoyo para lograr cumplir este sueño. En especial agradezco a mi madre Emilia Ruano por su amor y apoyo incondicional, sus palabras siempre han sido una fuente de fortaleza y una guía para seguir siempre adelante y no desfallecer ante los problemas y dificultades. Ella ha sido mi fuente de inspiración y admiración por su gran perseverancia y tenacidad. Además le agradezco mucho a mi compañera Luisa Andrade por su apoyo tiempo y paciencia en la realización de este trabajo

Yo Luisa Maria Andrade López agradezco a: mis padres Wilson Andrade y Eugenia López por todo su apoyo durante el transcurso de mi carrera y mi vida, por enseñarme a ser valiente, una luchadora y jamás rendirme ante las adversidades de la vida; mi novio Mauricio Portilla quien me ha acompañado, ayudado, aconsejado y apoyado en la mayor parte de mi carrera universitaria; mi hermano Daniel Andrade por sus consejos y apoyo; a mi primo Michael Melo por siempre motivarme a seguir mis sueños; a mi mejor amiga Ivana Narvaéz por ayudarme a levantar en momentos difíciles; a mi mejor amiga de la carrera Andrea Botina por ser un apoyo incondicional en todo momento; a mi compañera de tesis Paola Ruano por hacer de este trabajo una de las mas bonitas experiencias en mi vida y por ultimo agradezco a todos mis compañeros y profesores los cuales han hecho que mi estadía en la universidad este llena de aprendizaje y buenos momentos.

*Yo Paola Andrea Muñoz dedico este trabajo a mi gran amor, mi hija  
Maria Emilia.*

*Yo Luisa Maria Andrade López dedico este trabajo a mis padres  
Wilson Andrade y Eugenia López.*

## **Experiencias con rayos X**

### **Resumen**

*En este trabajo de grado se utiliza el montaje de rayos X que se encuentra disponible en el laboratorio de física moderna de la Universidad de Nariño. El objetivo es hacer una guía de manejo y calibración del equipo así como también hacer experiencias de laboratorio con rayos X, como: fluorescencia de una pantalla luminosa debido a los rayos X, influencia de un medio de contraste en la absorción de rayos X, relación Duane-Hunt y determinación de la constante de Planck, espectro de rayos X para un ánodo de molibdeno en función del voltaje y la corriente de emisión, producción de un haz monocromático de rayos X mediante un filtro y estructura fina de la radiación X característica del molibdeno. Esto permitirá que los estudiantes de física puedan utilizar el equipo de rayos X para hacer prácticas e investigaciones.*

## **Experiences with X-ray**

### **Abstract**

*In this work of degree the assembly of X-rays is used that is available in the modern physics laboratory of the University of Nariño. The objective is to make a guide to the handling and calibration of the equipment as well as to make laboratory experiments with X-rays, such as: fluorescence of a luminous screen due to X-rays, influence of a contrast medium on X-ray absorption, relationship Duane-Hunt and determination of the Planck constant, energy spectrum of an X-ray tube as a function of high voltage and emission current, production of a monochromatic X-ray beam by a filter and fine structure of the X radiation characteristic of molybdenum. This will allow physics students to use the X-ray equipment to do practices and investigations.*

# Índice general

Título . . . . .	I
Título . . . . .	II
Aceptación . . . . .	IV
Agradecimientos . . . . .	V
Dedicatoria . . . . .	VI
Resumen . . . . .	VII
Abstract . . . . .	VIII
Índice de tablas . . . . .	XIV
Índice de figuras . . . . .	XVI
Glosario . . . . .	XIX
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Física de los rayos X</b>	<b>3</b>
1.1. Introducción . . . . .	3
1.2. Radiación electromagnética . . . . .	5
1.2.1. Radiación ionizante . . . . .	6
1.2.2. Radiación no ionizante . . . . .	6
1.3. Los Rayos X: ondas - fotones . . . . .	6
1.4. Producción de rayos X . . . . .	7
1.4.1. Radiación de “Bremsstrahlung” . . . . .	9
1.4.2. Líneas características del blanco. . . . .	11
1.5. Interacción: rayos X - materia . . . . .	16
1.5.1. Dispersión . . . . .	16
1.5.2. Dispersión en una red Cristalina: Difracción . . . . .	17
1.5.3. Absorción . . . . .	18
<b>2. Equipo de Rayos X 554 801</b>	<b>22</b>
2.1. Descripción . . . . .	22
2.2. Datos Técnicos . . . . .	24
2.3. Panel de conexión a la red . . . . .	25
2.4. Recinto del tubo . . . . .	26
2.5. Cámara de experimentos . . . . .	27
2.6. Goniómetro . . . . .	28
2.6.1. Montaje y desmontaje del goniómetro . . . . .	29
2.6.2. Montaje y desmontaje del soporte del blanco . . . . .	31
2.6.3. Montaje y desmontaje de la mesa del blanco . . . . .	32

2.6.4.	Montaje del blanco . . . . .	33
2.6.5.	Montaje y desmontaje del soporte del sensor . . . . .	34
2.6.6.	Montaje del sensor . . . . .	36
2.6.7.	Colimador . . . . .	37
2.7.	Panel de control . . . . .	38
2.7.1.	Panel visualizador . . . . .	40
2.7.2.	Pulsador ADJUST (ajustar) . . . . .	40
2.7.3.	Teclas de selección de parámetros . . . . .	40
2.7.4.	Teclas de modo de escaneo . . . . .	41
2.7.5.	Teclas de comando . . . . .	44
2.7.6.	Lámpara de control de . . . . .	45
2.8.	Panel de conexiones . . . . .	46
2.9.	Pantalla fluorescente . . . . .	47
2.10.	Canal vacío . . . . .	47
2.11.	Bloqueo . . . . .	47
2.12.	Cuidado y mantenimiento del equipo . . . . .	48
2.13.	Instrucciones de seguridad de equipo de rayos X. . . . .	49
2.14.	Prueba del funcionamiento de los circuitos de seguridad . . . . .	50
2.15.	Manual de software “Aparato de Rayos X” . . . . .	51
2.15.1.	Ajustes . . . . .	56
2.15.2.	Información adicional . . . . .	59
<b>3.</b>	<b>Calibración del equipo de rayos X 555-801</b>	<b>61</b>
	Resumen . . . . .	61
	Abstract . . . . .	61
3.1.	Introducción . . . . .	61
3.2.	Materiales y equipos requeridos . . . . .	64
3.3.	Notas de seguridad y preparación del experimento . . . . .	64
3.3.1.	Notas de seguridad . . . . .	64
3.3.2.	Preparación del experimento . . . . .	65
3.4.	Procedimiento . . . . .	66
3.5.	Resultados y análisis . . . . .	67
3.5.1.	Gráficas . . . . .	67
3.5.2.	Tablas . . . . .	69
3.6.	Conclusiones . . . . .	69
<b>4.</b>	<b>Fluorescencia de una pantalla luminosa debido a los rayos X</b>	<b>71</b>
	Resumen . . . . .	71
	Abstract . . . . .	71
4.1.	Introducción . . . . .	71

4.2. Material y equipos requeridos . . . . .	72
4.3. Notas de seguridad y preparación del experimento . . . . .	73
4.3.1. Notas de seguridad . . . . .	73
4.3.2. Preparación del experimento . . . . .	73
4.4. Procedimiento . . . . .	74
4.5. Resultados y análisis . . . . .	75
4.6. Conclusiones . . . . .	76
<b>5. Influencia de un medio de contraste en la absorción de rayos X</b>	<b>77</b>
Resumen . . . . .	77
Abstract . . . . .	77
5.1. Introducción . . . . .	78
5.2. Material y equipos requeridos . . . . .	78
5.3. Notas de seguridad y preparación del experimento . . . . .	79
5.3.1. Notas de seguridad . . . . .	79
5.3.2. Preparación del experimento . . . . .	80
5.4. Procedimiento . . . . .	81
5.5. Resultados y análisis . . . . .	82
5.6. Conclusiones . . . . .	83
<b>6. Relación Duane-Hunt y determinación de la constante de Planck</b>	<b>85</b>
Resumen . . . . .	85
Abstract . . . . .	85
6.1. Introducción . . . . .	85
6.2. Material y equipos requeridos . . . . .	88
6.3. Notas de seguridad y preparación del experimento . . . . .	88
6.3.1. Notas de seguridad . . . . .	88
6.3.2. Preparación del experimento . . . . .	89
6.4. Procedimiento . . . . .	91
6.5. Resultados y análisis . . . . .	93
6.5.1. Gráficas . . . . .	93
6.5.2. Tablas . . . . .	96
6.6. Conclusiones . . . . .	97
<b>7. Espectro de rayos X para un ánodo de molibdeno en función del voltaje y la corriente de emisión</b>	<b>98</b>
Resumen . . . . .	98
Abstract . . . . .	98
7.1. Introducción . . . . .	98
7.2. Material y equipos requeridos . . . . .	100

---

7.3. Notas de seguridad y preparación del experimento . . . . .	101
7.3.1. Notas de seguridad . . . . .	101
7.3.2. Preparación del experimento . . . . .	101
7.4. Procedimiento . . . . .	102
7.5. Resultados y análisis . . . . .	104
7.5.1. Gráficas . . . . .	104
7.5.2. Tablas . . . . .	107
7.6. Conclusiones . . . . .	108
<b>8. Producción de un haz monocromático de rayos X mediante un filtro</b>	<b>109</b>
Resumen . . . . .	109
Abstract . . . . .	109
8.1. Introducción . . . . .	109
8.2. Material y equipos requeridos . . . . .	111
8.3. Notas de seguridad y preparación del experimento . . . . .	111
8.3.1. Notas de seguridad . . . . .	111
8.3.2. Preparación del experimento . . . . .	112
8.4. Procedimiento . . . . .	113
8.5. Resultados y análisis . . . . .	115
8.5.1. Gráficas . . . . .	115
8.5.2. Tablas . . . . .	116
8.6. Conclusiones . . . . .	117
<b>9. Estructura fina de la radiación X característica del molibdeno</b>	<b>118</b>
Resumen . . . . .	118
Abstract . . . . .	118
9.1. Introducción . . . . .	119
9.2. Material y equipos requeridos . . . . .	122
9.3. Notas de seguridad y preparación del experimento . . . . .	123
9.3.1. Notas de seguridad . . . . .	123
9.3.2. Preparación del experimento . . . . .	123
9.4. Procedimiento . . . . .	125
9.5. Resultados y análisis . . . . .	126
9.5.1. Gráficas . . . . .	126
9.5.2. Tablas . . . . .	129
9.6. Conclusiones . . . . .	130
<b>Conclusiones generales</b>	<b>131</b>

---

<b>A. Normatividad para el uso de rayos X en Colombia</b>	<b>135</b>
A.1. Resolución 482 de 2018 . . . . .	135
A.1.1. Fundamento legal de la resolución de expedición de la Resolución 482 de 2018 . . . . .	137
A.2. Señalización de zonas donde se encuentran equipos generadores de radiación ionizante . . . . .	138
<b>B. Difracción de rayos X en redes cristalinas</b>	<b>140</b>
B.1. Introducción . . . . .	140
B.2. Estructura Cristalina . . . . .	141
B.2.1. Celda unidad . . . . .	141
B.2.2. Designación de puntos, planos y redes . . . . .	142
B.2.3. Red recíproca . . . . .	143
B.2.4. Sistemas Cristalinos . . . . .	144
B.2.5. Estructura de cristales . . . . .	147
B.3. Difracción . . . . .	149
B.3.1. Ley de Bragg: . . . . .	152
<b>Bibliografía</b>	<b>155</b>

# Índice de tablas

3.1.	Ángulo de dispersión $\theta$ de la radiación de rayos X característica del molibdeno para la difracción de un monocristal de NaCl hasta el tercer orden [23]. . . . .	64
3.2.	Ángulos medidos para los tres primeros ordenes de difracción ( $n = 1, 2, 3$ ) donde se encuentra la línea característica $K_\alpha$ para el molibdeno y el valor calculado de longitud de onda. . . . .	69
3.3.	Ángulos medidos para los tres primeros ordenes de difracción ( $n = 1, 2, 3$ ) donde se encuentra la línea característica $K_\beta$ para el molibdeno y el valor calculado de longitud de onda. . . . .	69
6.1.	Parámetros de medición recomendados por LD didactic para poder observar la variación de $\lambda_{min}$ con respecto al voltaje ( $U$ ) en la región del espectro continuo. Las especificaciones y uso de estos parámetros se encuentra en la sección [?]. . . . .	91
6.2.	Datos del Voltaje $U$ ( $kV$ ) y la longitud de onda mínima $\lambda_{min}$ ( $pm$ ). Los valores de $\lambda_{min}$ fueron obtenidos a partir de la figura 6.4 . . . . .	96
6.3.	Constante de Planck obtenida a partir de las mediciones de las longitudes de onda tomadas por los observadores 1 y 2. . . . .	97
7.1.	Datos de la longitud de onda para las líneas características $K_\alpha$ y $K_\beta$ a diferentes valores de voltaje. . . . .	107
7.2.	Datos de la longitud de onda para las líneas características $K_\alpha$ y $K_\beta$ a diferentes valores de corriente. . . . .	107
7.3.	Tasas de conteo de las líneas características $R_{(K_\alpha)}$ y $R_{(K_\beta)}$ ; y de los máximos del continuo Bremsstrahlung $R_c$ . . . . .	107
8.1.	Tasas de conteo integrales para los picos de las líneas características $K_\alpha$ y $K_\beta$ haciendo uso de un filtro; y la razón $V$ para las correspondientes mediciones. . . . .	116
8.2.	Tasas de conteo integrales para los picos de las líneas características $K_\alpha$ y $K_\beta$ sin hacer uso de un filtro; y la razón $V$ para las correspondientes mediciones. . . . .	116
9.1.	Parámetros de medición recomendados por LD didactic para realizar un estudio por separado del primer y quinto orden de difracción para la radiación X característica del ánodo de molibdeno. Las especificaciones y uso de estos parámetros se encuentra en la sección [?]. . . . .	125
9.2.	Valores teórico y experimental de la longitud de onda para la línea característica $K_\alpha$ y $[K_\beta + K_\gamma]$ . . . . .	129

- 9.3. Datos experimentales a quinto orden de difracción ( $n = 5$ ) para las longitudes de onda  $\lambda$  ( $pm$ ) de las líneas características  $K_{\alpha 1}$ ,  $K_{\alpha 2}$ ,  $K_{\beta}$  y  $K_{\gamma}$  y sus respectivos valores a primer orden de difracción  $n = 1$ , calculados mediante la relación (9.3), junto con los valores encontrados en la literatura a primer orden de difracción. También se presenta el error relativo porcentual de las longitudes de onda a primer orden de difracción para cada una de las líneas características . . . . . 129

# Índice de figuras

1.1. Espectro electromagnético, correspondiente a la radiación transmitida mediante ondas, marcando la radiación ionizante de color violeta y la radiación no ionizante de color azul. Tomado de ESA / AOES Medialab [6]. . . . .	5
1.2. Tubo de rayos X junto a la producción de los rayos X [9]. . . . .	8
1.3. Espectro de rayos X con ánodo de molibdeno: espectro continuo y radiación característica. Tomado de Elements of X-Ray Diffraction, tercera edición [1].	9
1.4. Transición electrónica para la formación de las líneas características con sus respectivas series: $K$ , $L$ , $M$ , $N$ y $O$ [9]. . . . .	12
1.5. Diagrama parcial de las transiciones de algunas subcapas a la capa $K$ [9]. . .	15
1.6. Líneas características para el Molibdeno a $35\text{ keV}$ junto al doblete $K_{\alpha 1}$ y $K_{\alpha 2}$ . Tomado de Elements of X-Ray Diffraction, tercera edición [1] . . . . .	16
1.7. Emisión fotoeléctrica de rayos X y emisión del electrón Auger mediante el proceso de absorción fotoeléctrica en la capa $K$ , [9]. . . . .	19
2.1. Equipo de rayos X [9]. . . . .	22
2.2. Fotografía del panel de conexión a la red del equipo de rayos X 554 801 [9]. .	25
2.3. Fotografía del recinto del tubo del equipo de rayos X 554 801 [9]. . . . .	26
2.4. Fotografía de la cámara de experimentación del equipo de rayos X 554 801 [9].	27
2.5. Fotografía del goniómetro en la cámara de experimentación del equipo de rayos X 554 801 [9]. . . . .	28
2.6. Gráfico guía para el montaje y desmontaje del soporte del soporte del blanco [17]. . . . .	31
2.7. Gráfico guía para el montaje y desmontaje de la mesa del blanco [17]. . . . .	32
2.8. Gráfico guía para el montaje del blanco [17]. . . . .	33
2.9. Gráfico guía para el montaje y desmontaje del soporte del sensor [17]. . . . .	34
2.10. Gráfico guía para el montaje y desmontaje del soporte del sensor [17]. . . . .	36
2.11. Fotografía del colimador del equipo de rayos X 554 801 [9]. . . . .	37
2.12. Fotografía del colimador y el filtro [9]. . . . .	38
2.13. Fotografía del panel de control del equipo de rayos X 554 801 [9]. . . . .	39
2.14. Fotografía del panel de conexiones del equipo de rayos X 554 801 [9]. . . . .	46
2.15. Fotografía de la cubierta de protección contra el polvo del equipo de rayos X 554 801 [9]. . . . .	48
2.16. Revisión circuitos de seguridad [9]. . . . .	51
2.17. Geometría del aparato de rayos X mostrada en la plataforma del software “Aparato de rayos X” [9]. . . . .	53
2.18. Ventaja Ajustes del aparato de rayos X [9]. . . . .	57

2.19. Ventana cristal [9]. . . . .	58
2.20. Ventana ajuste del cristal [9]. . . . .	59
2.21. Diagrama esquemático de la difracción de rayos X en un cristal de NaCl y acoplamiento $2\theta$ entre el ángulo del tubo contador y el ángulo de dispersión. . . . .	60
3.1. Dispersión de Bragg de rayos X por planos consecutivos de átomos [9]. . . . .	63
3.2. Montaje Experimental [9]. . . . .	66
3.3. Gráficas de la tasa de conteo $R$ en función del ángulo de Bragg $\theta$ para los tres primeros ordenes de difracción ( $n = 1, 2, 3$ ). . . . .	68
4.1. Cámara de experimentación [9]. . . . .	74
4.2. Imágenes de un mouse portátil en una pantalla luminosa (fotografiadas por el estudiante de física Daniel Felipe Ruiz, con una cámara digital kanon a 1.6s de exposición) con un voltaje máximo de 35.0 kV y diferentes corrientes de emisión: $I = 1.00 \text{ mA}$ , $I = 0.70 \text{ mA}$ e $I = 0.40 \text{ mA}$ respectivamente. . . . .	75
4.3. Imágenes de un mouse portátil en una pantalla luminosa (fotografiadas por el estudiante de física Daniel Felipe Ruiz, con una cámara digital kanon a 1.6s de exposición) con una corriente de emisión máxima de 1.00 mA y diferentes altos voltajes: $U = 35.0 \text{ kV}$ , $U = 30.0 \text{ kV}$ y $U = 25.0 \text{ kV}$ respectivamente. . . . .	75
5.1. Cámara de experimentación [9]. . . . .	81
5.2. Imágenes del modelo de vaso sanguíneo (fotografiadas por el estudiante de física Daniel Felipe Ruiz, con una cámara digital kanon con 2.0 s de exposición) con circuito lleno de aire, en presencia de agua y con solución de yoduro de potasio respectivamente, observadas en una pantalla luminosa. . . . .	82
6.1. Espectro de emisión de un tubo de rayos X junto con la longitud de onda límite $\lambda_{min}$ del continuo de bremsstrahlung y las líneas características $K_{\alpha}$ y $K_{\beta}$ [34]. . . . .	86
6.2. Emisión de rayos X por Bremsstrahlung . . . . .	87
6.3. Cámara de experimentación [9]. . . . .	90
6.4. Gráficas de la tasa de conteo $R$ en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda $n\lambda$ a primer orden de difracción ( $n = 1$ ) junto con sus respectivas rectas promedio. . . . .	94
6.5. Gráfica de la longitud de onda mínima $\lambda_{min}$ en función del inverso del voltaje $1/U$ . Los datos describen una línea recta. . . . .	95
7.1. Cámara de experimentación [9]. . . . .	102
7.2. Gráficas de la tasa de conteo $R$ en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda $n\lambda$ a primer orden de difracción ( $n = 1$ ) para variaciones de voltaje del tubo de rayos X. . . . .	105

7.3.	Gráficas de la tasa de conteo $R$ en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda $n\lambda$ a primer orden de difracción ( $n = 1$ ) para variaciones de la corriente de emisión. . . . .	106
8.1.	Cámara de experimentación [9]. . . . .	113
8.2.	Gráficas de la tasa de conteo $R$ en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda $n\lambda$ a primer orden de difracción ( $n = 1$ ) en presencia y ausencia de un filtro de circonio. . . . .	115
9.1.	Diagrama de estructura fina de la línea característica $K_{\alpha}$ . . . . .	120
9.2.	Definición del ancho angular $\delta\theta$ y del espaciado angular $\Delta\theta$ de dos intensidades máximas. . . . .	121
9.3.	Tasa de conteo (en escala logarítmica) en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda para los primeros 5 ordenes de difracción [15]. . . . .	122
9.4.	Cámara de experimentación [9]. . . . .	124
9.5.	Gráficas de la tasa de conteo $R$ en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda $n\lambda$ para primer orden de difracción ( $n = 1$ ). . . . .	127
9.6.	Gráficas de la tasa de conteo $R$ en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda $n\lambda$ para quinto orden de difracción ( $n = 5$ ). . . . .	128
A.1.	Símbolo internacional de la radiación ionizante [45]. . . . .	138
A.2.	Símbolo en Colombia para la radiación ionizante [46]. . . . .	139
B.1.	Parámetros de red de una celda unidad [1]. . . . .	142
B.2.	Redes de Bravais [1]. . . . .	145
B.3.	Estructuras cristalinas del CsCl y NaCl [1]. . . . .	148
B.4.	Difracción de un haz de rayos X por un cristal [1]. . . . .	150

# Glosario

- Ánodo:** en la producción de rayos X es el material bombardeado por electrones a alta velocidad.
- Bremsstrahlung:** radiación producida por la desaceleración de una partícula cargada.
- Brillo:** es la cantidad de flujo de luz que emite un determinado cuerpo.
- Cátodo:** en la producción de rayos X es el filamento que produce electrones por efecto termoiónico.
- Circuito:** conducto utilizado para simular un vaso sanguíneo.
- Contraste:** permite ajustar la diferencia entre los colores más oscuros y los más claros.
- Coplanar:** indica que los elementos se encuentran en un mismo plano.
- Efecto termoiónico:** consiste en la emisión de electrones por una superficie metálica caliente.
- Estructura fina:** distribución poco espaciada de algunos niveles de energía de un átomo, a causa del acoplamiento espín-órbita de los electrones y efectos relativistas.
- Fase de una onda:** se entiende por fase el estado de vibración de un punto de la onda. Decimos que dos puntos de la onda están en fase o que tienen igual fase cuando su elongación y la velocidad de su movimiento (velocidad de vibración) coinciden. Por el contrario, decimos que dos puntos se encuentran en oposición de

fase o que tienen fase opuesta cuando las respectivas elongaciones y velocidades de vibración son justo las contrarias (igual valor, distinto signo).

**Filtro de circonio:** artefacto utilizado para monocromatizar los rayos X producidos por un ánodo de molibdeno.

**Gray (Gy):** es una unidad derivada del Sistema Internacional de Unidades que mide la dosis absorbida procedente de radiaciones ionizantes por un determinado material. Un gray es equivalente a la absorción de un julio de energía por un kilogramo de masa de material irradiado.

**Ion:** es una partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutro. Conceptualmente esto se puede entender como que, a partir de un estado neutro de un átomo o partícula, se han ganado o perdido electrones.

**Materiales radioactivos:** todo material que, natural o artificialmente, es capaz de emitir o radiar energía en forma de partículas (Alfa, Beta, Neutrones) o Radiación Electromagnética (Rayos Gamma o X).

**Medio de contraste:** es cualquier sustancia que se usa para mejorar la visibilidad de estructuras o fluidos dentro de un cuerpo.

**Molibdeno:** es un elemento químico con número atómico  $Z = 42$ , con una temperatura de fusión de  $2610^{\circ}C$ .

**Número atómico:** es el número total de protones que tiene cada átomo del elemento químico. Se suele representar con la letra  $Z$ .

**Pantalla fluorescente:** pantalla recubierta de un material fluorescente el cual es capaz de convertir cualquier tipo de radiación en luz visible.

**Rayos X monocromáticos:** son rayos con aproximadamente una misma longitud de onda.

**Rayos catódicos:** chorro de electrones.

**Semivida:** de un elemento radiactivo es el tiempo que tarda la mitad de sus átomos en desintegrarse, y puede variar desde una fracción de segundo a millones de años.

**Sievert (Sv):** es una unidad derivada del SI que mide la dosis de radiación absorbida por la materia viva, corregida por los posibles efectos biológicos producidos. 1 *Sv* es equivalente a un julio por cada kilogramo ( $J/kg$ ).

**Transiluminación:** Paso de radiación X a través del objeto que se quiere examinar. La zona que se va a observar está interpuesta entre el observador y la fuente de rayos X.

# Introducción general

La radiación electromagnética es un modo de transportar energía a través del espacio y se distingue por su longitud de onda, frecuencia y energía. La radiación electromagnética se agrupa, según la longitud de onda en diferentes regiones o partes del espectro electromagnético: rayos infrarrojos, ultravioleta, rayos X, rayos gamma ( $\gamma$ ), etc.

Los rayos X fueron descubiertos en 1895 por el físico alemán Röntgen, y fueron llamados X por su naturaleza desconocida hasta ese entonces. Invisibles a nuestros ojos, producen imágenes visibles cuando usamos placas fotográficas o detectores especiales para ello. En 1912 se comprendió la naturaleza exacta de los rayos X. En ese año se descubrió el fenómeno de la difracción de rayos X por cristales y este descubrimiento demostró simultáneamente la naturaleza ondulatoria de los rayos X y proporcionó un nuevo método para investigar la estructura fina de la materia [1].

En los laboratorios del Departamento de Física de la Universidad de Nariño se tienen varios equipos donde, solo algunos de ellos disponen de una guía de laboratorio con especificaciones para su uso y desarrollo de prácticas, mientras que otros carecen de este material, como es el caso del montaje de rayos X. Este montaje de rayos X de Mo (Molibdeno) marca LEYBOLD modelo 554801 ingresó a la Universidad de Nariño en el mes de abril del año 2015, pero muchos estudiantes desconocían la existencia de este equipo en nuestra Universidad, lo cual privó del aprendizaje asociado con su uso, junto con el amplio campo de investigación en el ámbito concerniente a la radiación X. No fue sino hasta el 15 de septiembre de 2017 cuando empezamos con las primeras pruebas de reconocimiento del equipo. La dificultad en el uso del equipo se debía a la falta de una guía para: el manejo conjunto del equipo y el software (“Aparato de rayos X”), la calibración y la realización de prácticas.

Por ende, se plantea hacer un estudio detallado acerca de este instrumento y de su software, así como también de la fundamentación teórica respecto a la radiación X, de tal manera que se den las bases necesarias para el manejo conjunto software-equipo y la realización de

prácticas; permitiendo que estudiantes de física y de otros programas como biología, química o medicina etc, puedan tener acceso a una guía que les permita realizar diferentes experiencias con rayos X dependiendo del área de estudio en la que quieran enfatizar.

# Capítulo 1

## Física de los rayos X

### 1.1. Introducción

Los rayos X son radiación electromagnética<sup>1</sup> de alta energía y longitud de onda corta en el rango de los Angstroms ( $10^{-10} m$ ). Fueron descubiertos en 1895 por el físico alemán Röntgen al experimentar con tubos de rayos catódicos, cuando notó que si hacía pasar corriente de alta tensión por uno de estos tubos de vacío, previamente recubierto con pedazos de cartón negro para eliminar su intensa luminosidad, se producía simultáneamente una luz fluorescente en una pantalla de platinocianuro de bario, independientemente de la distancia a la cual estuviera colocada del tubo o los elementos interpuestos entre el tubo y la pantalla. Al interponer los diferentes objetos, Röntgen observó la sombra espectral de los huesos y tejidos blandos de sus propias manos en la pantalla fluorescente y comprobó que algunos metales como el platino y plomo, producían sombras en la pantalla [2]. Estas imágenes fueron registradas en láminas fotográficas. Así fueron descubiertos los rayos X y fue como nació la radiología.

Fueron llamados rayos X por su naturaleza desconocida hasta ese entonces, se caracterizan por ser invisibles a nuestros ojos y producir imágenes visibles cuando usamos placas fotográficas o detectores especiales para ello. En 1912 el físico Max Von Laue descubrió el fenómeno de la difracción de rayos X por cristales. Los fenómenos de difracción muestran cómo la materia cristalina es construida por los átomos que forman una red periódica. El éxito del experimento de Von Laue corrobora dos postulados: (1) los rayos X son radiaciones invisibles de longitud de onda muy corta, y (2) los iones de los cristales están ordenados en una estructura regular tridimensional. Como consecuencia directa se abrieron dos nuevos e

---

<sup>1</sup>La radiación electromagnética está formada por partículas llamadas fotones. De acuerdo a su energía recibe diferentes nombres: luz visible, rayos X, rayos gamma, luz ultravioleta, microondas y otros.

importantes campos de la física experimental: (1) el estudio y la medición de las longitudes de onda de los rayos X, y (2) el estudio de las estructuras cristalinas por su acción sobre los rayos X, esto proporcionó un nuevo método para investigar la estructura de la materia incluido el ADN, algo realmente fascinante [3].

William Henry Bragg y William Lawrence Bragg (padre e hijo), este último, aunque sólo era un joven estudiante de la época (1912) analizó con éxito el experimento de Laue y expresó la difracción en una forma matemática más simple que la utilizada por Von Laue. Además contribuyó en el estudio de la estructura cristalina haciendo uso de la nueva herramienta de difracción de rayos X. Las estructuras del NaCl, KCl, KBr y KI fueron las primeras determinaciones completas de la estructura cristalina [1], estableciendo así las bases del campo de la cristalografía, lo que permitió posteriormente determinar la estructura de las moléculas [4]. Hoy en día se conoce que los rayos X son una forma de radiación electromagnética de longitud de onda corta que está entre  $(10 - 0.01) \text{ nm}$ , con propiedades similares a la luz visible. Sin embargo, a diferencia de la luz, los rayos X tienen una mayor energía y pueden atravesar la mayoría de los objetos, incluyendo los cuerpos biológicos. En cuanto a sus aplicaciones son numerosas tanto en la industria, como en la medicina. En lo que a la industria se refiere los rayos X se utilizan como un medio para adentrarse en las grandes estructuras sólidas y averiguar posibles defectos internos que, sin el uso de la radiación sería muy difícil averiguar. En medicina no sólo se usan para diagnóstico médico por medio de equipos de rayos X convencionales o la más novedosa técnica de la tomografía axial computarizada, sino que se usan incluso para terapia [5].

## 1.2. Radiación electromagnética

La radiación electromagnética es una combinación entre los campos eléctricos y magnéticos oscilantes transmitiendo energía a través del espacio ya sea en un medio material o el vacío, mediante ondas o partículas. La radiación se caracteriza por tener una velocidad de  $300000 \text{ km/s}$  en el vacío independientemente de su fuente.

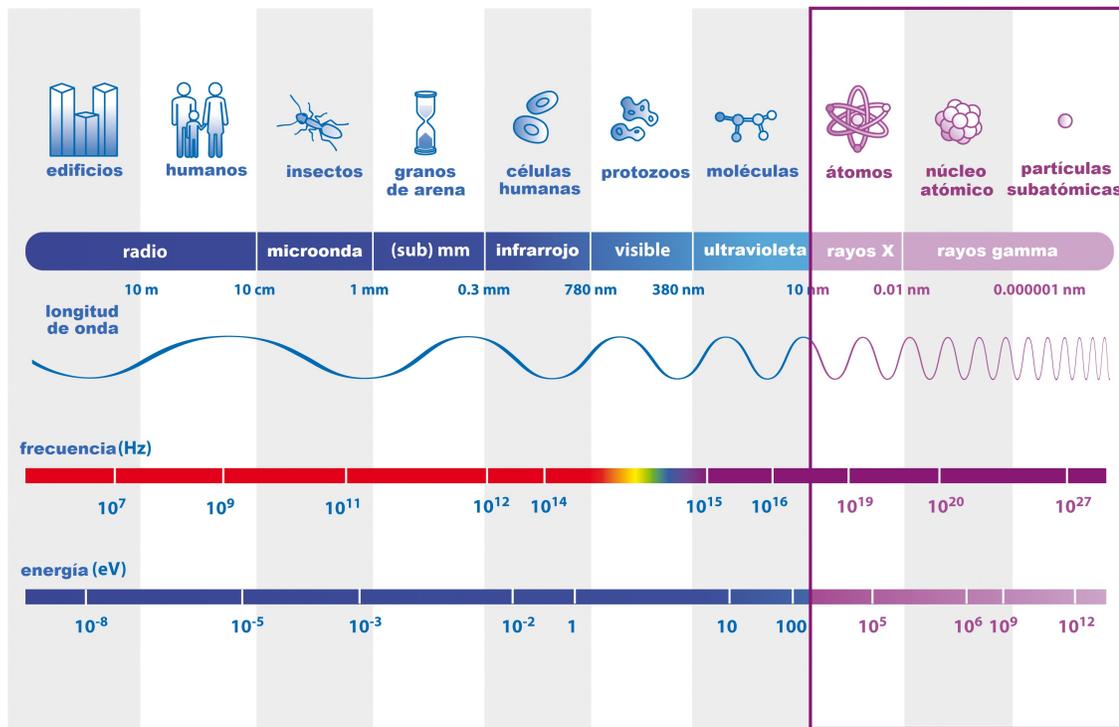


Figura 1.1: Espectro electromagnético, correspondiente a la radiación transmitida mediante ondas, marcando la radiación ionizante de color violeta y la radiación no ionizante de color azul. Tomado de ESA / AOES Medialab [6].

La energía está relacionada directamente con la frecuencia de propagación de la radiación que a su vez está relacionada con el número de ondas que pasan por segundo en cada punto; de esta manera tenemos las radiaciones ionizantes de alta frecuencia, es decir, superior a  $10^{17} \text{ Hz}$  y las radiaciones no ionizantes cuya frecuencia es menor a este valor [7].

### **1.2.1. Radiación ionizante**

Las radiaciones ionizantes son aquellas radiaciones con energía suficiente para ionizar la materia, extrayendo los electrones de sus estados ligados al átomo creando iones. Esta radiación puede proceder de sustancias radiactivas que producen radiación de forma espontánea, por ejemplo, los materiales radioactivos como el yodo 131 (que tiene una vida media de 8 días) [8], o de generadores artificiales, tales como los generadores de rayos X y los aceleradores de partículas.

La radiación interactúa con la materia causando efectos en ella, sus daños se miden mediante:

- La dosis absorbida: se define como la cantidad de energía absorbida por unidad de masa. Las unidades de su medida son los grey (Gy).
- La dosis efectiva: se define como la dosis absorbida en un tejido u órgano, ponderada en función del tipo y calidad de la radiación, indicando así la potencia que tiene la radiación ionizante para causar daños. Las unidades de su medida son los sievert (Sv).

### **1.2.2. Radiación no ionizante**

Las radiaciones no ionizantes son aquellas de energías bajas, por lo cual no pueden ionizar la materia, es decir que esta radiación no le puede transmitir energía a una molécula o un átomo para alterar su estructura atómica. Entre estas radiaciones se encuentra la luz visible, la radiación ultravioleta o la radiación de un láser, entre otras.

La radiación no ionizante no produce mayores efectos en la salud como la radiación ionizante, y se ha convertido en parte fundamental de nuestra cotidianidad al estar presente en nuestros equipos electrónicos e incluso para calentar la comida, en el microondas.

## **1.3. Los Rayos X: ondas - fotones**

Los rayos X son radiación electromagnética; según la teoría clásica ha sido considerada como un movimiento ondulatorio que vibra perpendicularmente a su dirección de propagación. Su

característica ondulatoria mas notoria es su longitud de onda que va desde unos 10  $nm$  hasta 0.01  $nm$ . Cuanto menor es la longitud de onda, mayor es su energía y poder de penetración. De acuerdo a su longitud de onda los rayos X se clasifican en:

- Rayos X blandos: tienen mayor longitud de onda, por tanto menor frecuencia y energía, se encuentran ubicados cerca a la banda ultravioleta en el espectro electromagnético.
- Rayos X duros: tienen menor longitud de onda (más corta), por tanto mayor energía y frecuencia, se encuentran ubicados cerca a la zona de los rayos gamma.

Por otra parte, de acuerdo a la teoría cuántica, la radiación electromagnética esta compuesta de partículas llamadas fotones, a cada fotón de acuerdo a la cuantización de la energía se le asigna un paquete de energía  $h\nu$ , donde  $h$  es la constante de Planck ( $6.63 \times 10^{-34} Js$ ) y  $\nu$  la frecuencia del movimiento de la partícula, indicando la estrecha relación onda-partícula que tiene la radiación y por ende los rayos X, por lo que para encontrar la frecuencia de oscilación de la onda basta con saber la energía del fotón y viceversa. Además, la rapidez de flujo de esta energía a través del área unitaria perpendicular a la dirección del movimiento de la onda se denomina intensidad  $\mathcal{I}$ .

## 1.4. Producción de rayos X

Los rayos X se producen cuando los electrones de alta velocidad colisionan con un objetivo metálico. El tubo de rayos X (figura 1.2) debe contener (a) una fuente de electrones (filamento de tungsteno) que funciona como cátodo. El cátodo es un filamento que produce electrones por efecto termoiónico<sup>2</sup>, (b) un alto voltaje de aceleración y (c) un objetivo de metal que funciona como ánodo, así, los electrones emitidos por el filamento son fuertemente acelerados hacia el ánodo produciéndose en la colisión radiación de frenado y radiación característica, la cual depende del material del ánodo. Los rayos X son producidos en el punto de impacto y radian en todas direcciones. La mayor parte de la energía cinética de los electrones que

<sup>2</sup>Cuando un metal se calienta algunos de los electrones de los átomos más externos consiguen escapar, a mayor corriente que pasa por el filamento, mayor será la temperatura y el número de electrones que se emiten.

golpean al ánodo es convertida en calor y alrededor del 1 % de esta energía se transforma en rayos X. Por lo que el ánodo se calienta bastante si no tiene un sistema de enfriamiento [1]. Todos los componentes del tubo están encerrados en una ampolla de vidrio en la que se ha hecho el vacío, si no fuera así, los electrones chocarían con los átomos del gas y se frenarían y los iones resultantes acabarían destruyendo el filamento, además, el número y la velocidad de los electrones que llegarían al ánodo variarían de forma incontrolada.

Los átomos dispersan rayos X incidentes en todas las direcciones. Para algunas de estas direcciones los rayos dispersados estarán completamente en fase y se refuerzan mutuamente para formar rayos difractados [1] (La ampliación de esta información se encuentra consignada en la sección B.3). Además, se dispersan también en todas las direcciones al colisionar con las distintas estructuras dentro y alrededor del tubo. Si el tubo no estuviera rodeado de un blindaje de plomo, la intensidad de dosis local podría dañar el tejido vivo durante tiempos muy cortos de exposición.

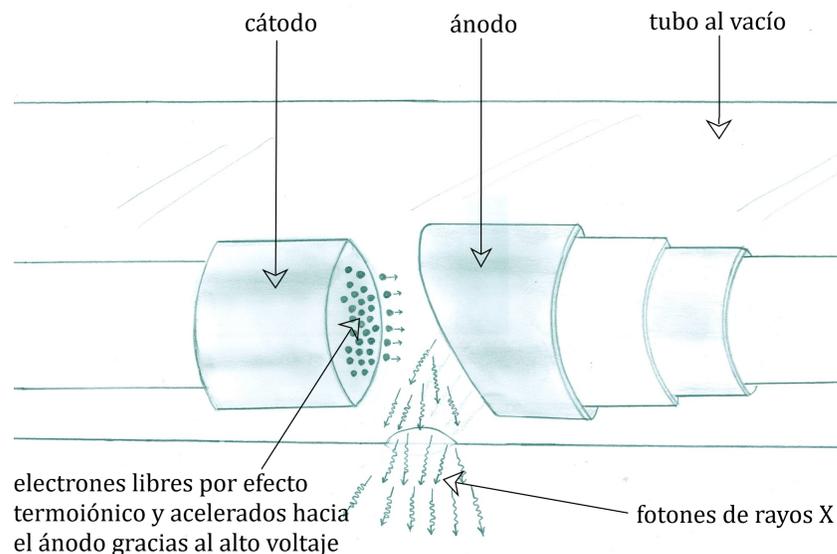


Figura 1.2: Tubo de rayos X junto a la producción de los rayos X [9].

La emisión de rayos X es posible cuando el haz de electrones muy energéticos (con energía cinética del orden de  $1\text{ keV}$ ) se desaceleran al chocar con el blanco metálico. De acuerdo a

la mecánica clásica, una carga acelerada emite radiación electromagnética. La variación del valor de la longitud de onda depende del voltaje del tubo, el cual al ser elevado hace que se aumente la intensidad de todas las longitudes de onda. Cabe resaltar que la intensidad es cero después del llamado límite de longitud de onda corta ( $\lambda_{min}$ ), como se puede observar en la Figura 1.3.

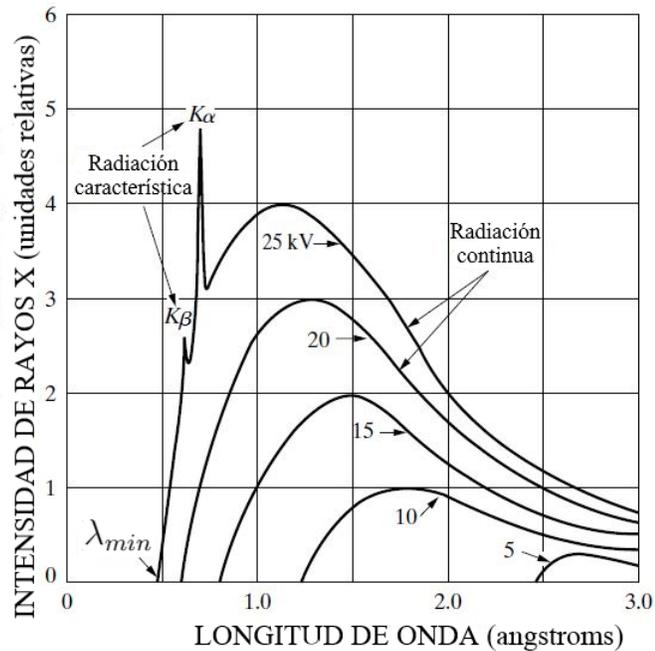


Figura 1.3: Espectro de rayos X con ánodo de molibdeno: espectro continuo y radiación característica. Tomado de Elements of X-Ray Diffraction, tercera edición [1].

#### 1.4.1. Radiación de “Bremsstrahlung”

La radiación de Bremsstrahlung<sup>3</sup> o radiación de frenado se produce por la variación brusca de la velocidad de una partícula cargada en presencia de un campo coulombiano generado ya sea por un núcleo u otras partículas cargadas.

<sup>3</sup>Del alemán bremsen (frenar) y strahlung (radiación).

La energía cinética del electrón incidente:

$$E = \frac{1}{2}mU^2, \quad (1.1)$$

adquirida por la diferencia de potencial  $E = eU$ , hace que el electrón tienda a acercarse al núcleo de un átomo y orbitar parcialmente alrededor de éste por la fuerte atracción electromagnética (el núcleo positivo y el electrón negativo), causando un cambio de velocidad y dirección. Estos cambios se ven reflejados en una pérdida de energía del electrón que se irradia en forma de rayos X. Teniendo en cuenta que el número de electrones que experimentan desviaciones y frenamientos son grandes, los fotones de rayos X producidos tendrán diferentes energías que forman un espectro llamando **Espectro Continuo** o radiación Bremsstrahlung. La máxima energía que un electrón incidente le puede transmitir a un fotón corresponde a la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo, es decir:

$$E_{max} = h\nu_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}} \quad \text{y} \quad \text{como} \quad eU = \frac{hc}{\lambda_{min}} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{min} = \frac{hc}{eU}, \quad (1.2)$$

reemplazando la constante de Planck ( $h$ ), la velocidad de la luz ( $c$ ) y la carga del electrón ( $e$ ), se tiene la relación para la longitud de onda corta o mínima  $\lambda_{min}$  [1], como se denota en la Figura 1.3 :

$$\lambda_{min} = \frac{12.40 \times 10^3}{U}, \quad (1.3)$$

con  $\lambda_{min}$  en picómetros ( $pm^4$ ) y  $U$  en voltios. Cuando la velocidad perdida por los electrones en el choque con el átomo es parcial y no total, es decir, que no se detienen en el choque, la energía del fotón producido es menor a  $E_{max} = h\nu_{max}$ . A medida que se incrementa el voltaje aplicado se incrementa la intensidad de los rayos X emitidos haciendo que se corra hacia longitudes de onda mas cortas (hacia la izquierda) como podemos observar en la Figura 1.3, indicando una mayor producción de fotones.

La energía total de los rayos X emitida por segundo depende de la corriente  $I$  (el número de electrones por segundo que golpea el blanco), del voltaje  $U$  (diferencia de potencial entre

---

<sup>4</sup> $pm \equiv 10^{-12} m$ .

cátodo y ánodo) y el número atómico ( $Z$ ) del blanco. De acuerdo a lo anterior la intensidad total de los rayos X esta dada por:

$$\mathcal{I} = AIZU^m, \quad (1.4)$$

donde  $A$  es una constante de proporcionalidad y  $m$  es una constante con un valor de aproximadamente 2 [1]. Tengamos presente que el material del blanco afecta la intensidad y es independiente a la longitud de onda.

### 1.4.2. Líneas características del blanco.

Las líneas características de rayos X del blanco se producen cuando un electrón a alta velocidad penetra e interactúa con electrones orbitales del elemento blanco, resultando en la ionización o excitación<sup>5</sup> de estos. Como material blanco se puede usar molibdeno<sup>6</sup>.

Un átomo ionizado es sumamente inestable, por lo que los vacíos electrónicos tienden a ocuparse inmediatamente mediante el decaimiento de electrones. Los niveles atómicos se denotan por las letras  $K, L, M, \dots$  correspondientes a los números cuánticos principales  $n = 1, 2, 3, \dots$  [1] (figura 1.4).

---

<sup>5</sup>Excitar un átomo es provocar el desplazamiento de algunos de sus electrones a niveles de mayor energía, por lo que se necesita una energía exacta para provocar este salto o excitación. Cuando esta energía es mucho mas alta hace que el electrón quede separado del átomo, generándose así una ionización

<sup>6</sup>El molibdeno es un elemento con número atómico  $Z = 42$ , con una temperatura de fusión de  $2610^\circ C$ .

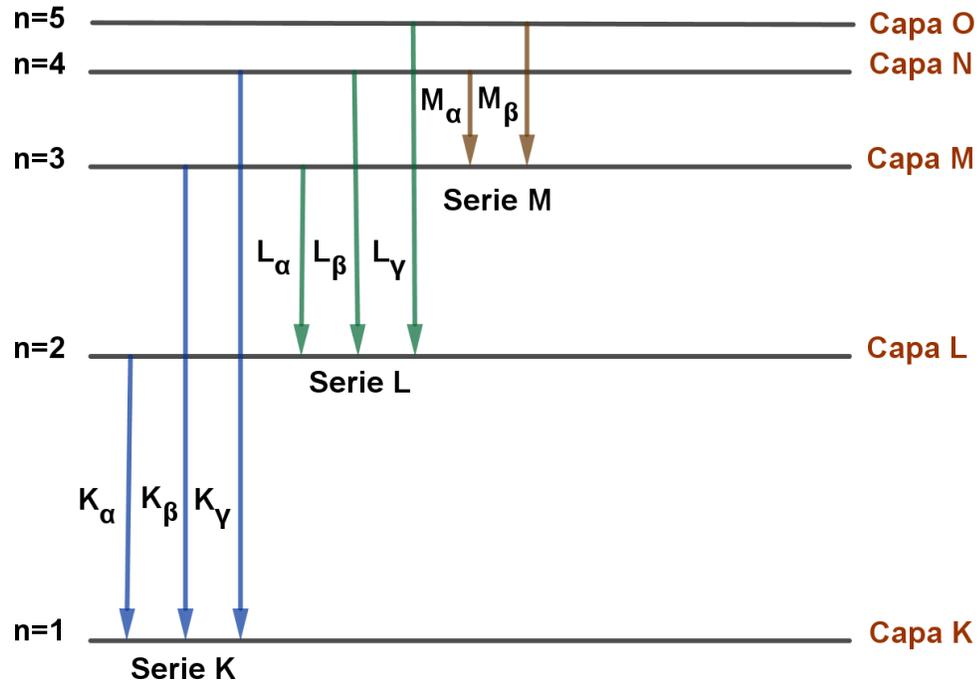


Figura 1.4: Transición electrónica para la formación de la líneas características con sus respectivas series: K, L, M, N y O [9].

Si un electrón tiene energía suficiente para ionizar una capa K, el átomo queda excitado en un estado de energía más alto. Uno de los electrones exteriores cae inmediatamente hacia la capa K, retornando el átomo a su estado base y emitiendo un fotón de energía igual a la diferencia de energía entre los niveles involucrados, el potencial para producir este proceso es:

$$eU_K \geq E_K, \tag{1.5}$$

donde  $E_k$  es la energía necesaria para desprender un electrón de la capa K y  $U_K$  es el potencial crítico de excitación al cual se empiezan a generar las líneas características K, por ejemplo para el ánodo de molibdeno,  $U_K$  tiene un valor mayor o igual a 20.01 kV [1]. Cuando se aplica potenciales mayores a éste solo se aumenta la intensidad de las líneas sin afectarse

su longitud de onda<sup>7</sup>.

La intensidad de las líneas características depende de la corriente, la diferencia entre el voltaje aplicado y el voltaje crítico ( $U_K$ ) para la formación de las líneas características como se indica en la siguiente relación:

$$\mathcal{I}_{\text{línea } K} = BI(U - U_K)^n, \quad (1.6)$$

donde  $B$  y  $n$  son constantes [1]. La alta intensidad de la línea característica  $K_\alpha$  es de gran utilidad en la difracción de rayos X al generar un espectro monocromático en comparación con la diferencia de intensidad de las otras líneas características y el espectro continuo.

El trabajo  $W_K$  necesario para eliminar un electrón de la capa  $K$  requiere que los electrones tengan una energía cinética tal que:

$$W_K = \frac{1}{2}mv^2.$$

Requiere menos energía para eliminar un electrón de la capa  $L$  que un electrón de la capa  $K$ , ya que el primero está más alejado del núcleo; por lo tanto, se deduce que la tensión de excitación  $L$  es menor que la  $K$  y que la radiación característica  $K$  no se puede producir sin la radiación  $L$ ,  $M$ , etc., que la acompaña [1].

El estudio de las líneas características empezó con su descubrimiento por parte de W. H. Bragg. Luego Henry Moseley en 1913 modeló el comportamiento de estas líneas a partir del número atómico ( $Z$ ) del blanco y la raíz cuadrada de la frecuencia ( $\nu$ ), de tal manera que al aumentar el número atómico la longitud de onda disminuye. Esta es la llamada **Ley de Moseley**.

$$\sqrt{\nu} = C(Z - \sigma), \quad (1.7)$$

donde  $C$  y  $\sigma$  son constantes.

---

<sup>7</sup>Es importante aclarar que al ir aumentando el voltaje, el espectro continuo si cambia con respecto a las longitudes de onda corriéndose hacia valores mas pequeños como se puede observar en la figura 1.3, pero esto no implica que la longitud de onda cambie para las líneas características, dado que se trata de una característica del material del ánodo

### Estructura fina de la serie K

Cuando se examinan las líneas del espectro característico de la serie K, para un material a una resolución muy alta, se encuentra que son dobletes (dos líneas características) poco espaciados entre sí, lo anterior se conoce como estructura fina de la radiación X característica de la serie K para un material. Las pequeñas divisiones de la línea espectral, se atribuye a una interacción entre el espín del electrón  $s$ , y el momento angular orbital  $l$ , llamado interacción spin-órbita [10].

La estructura fina de las líneas características de la capa K surge de la estructura fina de las otras capas ( $L$ ,  $M$ ,  $N$ ,...), por ejemplo la capa L en realidad consiste en tres subcapas, designadas como  $L_{\perp}$ ,  $L_{\parallel}$  y  $L_{|||}$  en espectroscopia de rayos X [11]. Las transiciones de las subcapas a la capa K o están sujetas a las reglas de selección<sup>8</sup> las cuales están descritas por:

$$\Delta l = \pm 1, \Delta j = 0, \pm 1, \quad (1.8)$$

donde  $\Delta l$  es el cambio en el momento angular y  $\Delta j$  la variación del momento angular total ( $j = s + l$ ) siendo  $s$  es el spin del electrón) en la transición. Siguiendo con el ejemplo las transiciones posibles de las subcapas L a la capa K según las reglas de selección son: de  $L_{|||}$  a K llamada  $K_{\alpha 1}$  y de  $L_{\parallel}$  a K llamada  $K_{\alpha 2}$ . En la figura 1.5 se muestran las transiciones posibles de las subcapas de L, M, y N a la capa K.

<sup>8</sup>Es importante tener en cuenta que cualquier transición de electrones que implique la emisión de un fotón, debe implicar un cambio de 1 en el momento angular. Se dice que el fotón tiene un momento angular intrínseco, o "spin", de uno, por lo que la conservación del momento angular en la emisión de fotón, requiere un cambio de 1 en el momento angular del átomo [10].

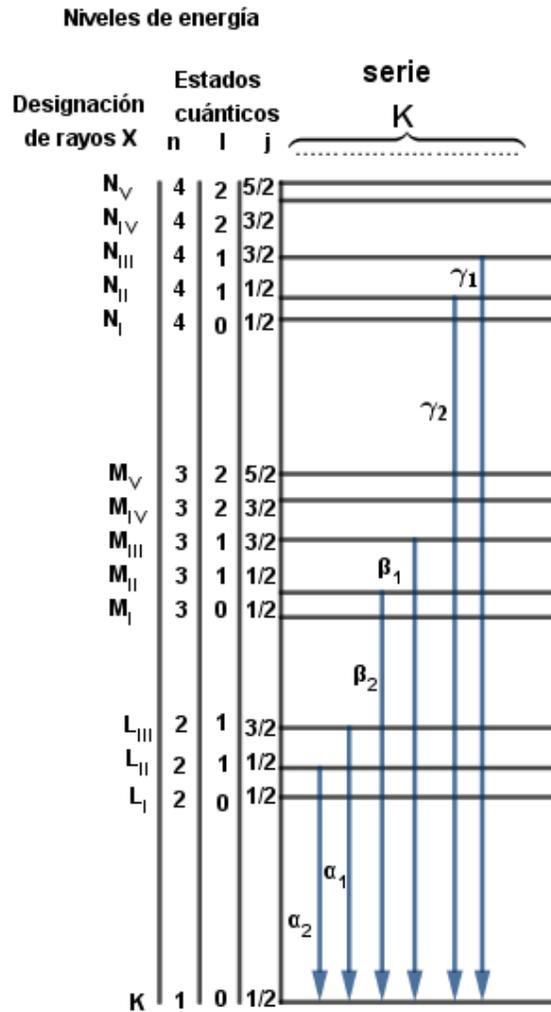


Figura 1.5: Diagrama parcial de las transiciones de algunas subcapas a la capa K [9].

La longitud de onda para cada línea en cada serie se incrementa en el sentido K, L, M,... donde para la serie K:  $K_{\alpha_1} = 0.709 \text{ \AA}$ ,  $K_{\alpha_2} = 0.71 \text{ \AA}$ , y  $K_{\beta} = 0.632 \text{ \AA}$ , donde  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  corresponden al doblete para  $K_{\alpha}$  (La forma para lograr visualizar este desdoblamiento se verá más adelante en el capítulo 9) cuyas longitudes de onda son muy próximas y se suelen tomar como  $K_{\alpha}$  [1]. Estas líneas son características del material del ánodo y forman el llamado **Espectro Característico** (figura 1.6).

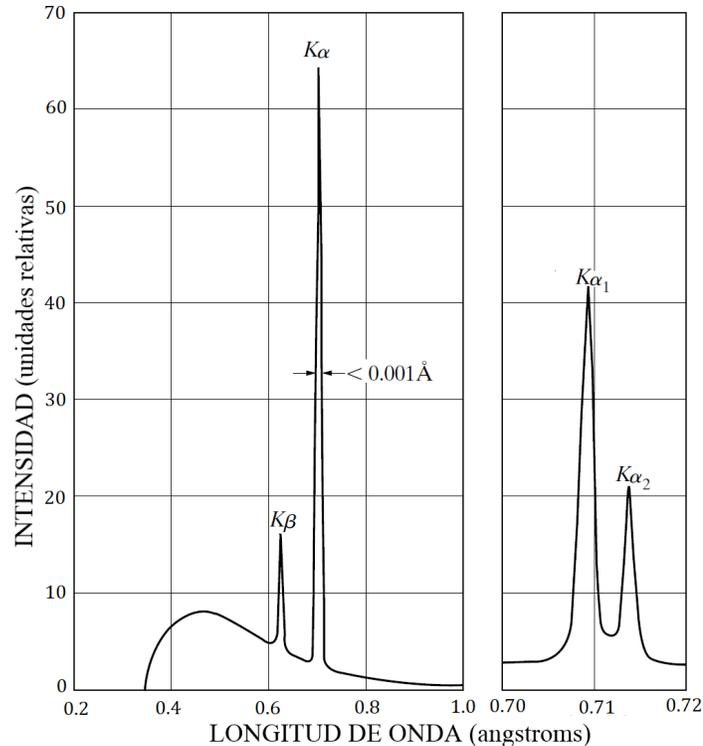


Figura 1.6: Líneas características para el Molibdeno a 35 kV junto al doblete  $K_{\alpha 1}$  y  $K_{\alpha 2}$ . Tomado de Elements of X-Ray Diffraction, tercera edición [1]

## 1.5. Interacción: rayos X - materia

Los rayos X tienen la capacidad de penetrar e interactuar con la materia perdiendo o cediendo parte de su energía al medio que atraviesan, dependiendo de la energía que tenga el haz de rayos X incidente así como también de su intensidad y las propiedades del medio.

### 1.5.1. Dispersión

Cuando los rayos X se encuentran con un electrón su interacción hace que este se convierta en fuente de radiación electromagnética secundaria dispersada. De acuerdo a la longitud de onda y la relación de fases entre la radiación inicial y dispersada es posible identificar si se

trato de un proceso elástico o inelástico.

El proceso elástico obedece a una descripción mecánico-clásica y se lleva a cabo cuando tanto el electrón como el haz de rayos X conservan su energía, en este proceso el ángulo de incidencia será el mismo ángulo de dispersión, conservando la misma longitud de onda, es decir que entre los haz de incidencia y dispersión habrá un ángulo  $2\theta$ , algunos de los fotones son dispersados conservando su energía y su misma longitud de onda ( $\lambda$ ) dando origen al fenómeno de **difracción**.

El proceso inelástico obedece a una descripción mecánico-cuántica y se lleva a cabo cuando parte de la energía del haz de rayos X es transferida al electrón, así el haz dispersado tendrá una frecuencia menor a la inicial y una longitud de onda mayor. Este proceso es conocido como **efecto Compton** [1].

### 1.5.2. Dispersión en una red Cristalina: Difracción

En la interacción de los rayos X con la materia algunos de los fotones son dispersados conservando su energía y su longitud de onda dando origen al fenómeno de difracción. Un rayo difractado esta compuesto de muchos rayos dispersados que se encuentran en fase y se refuerzan mutuamente.

El fenómeno de la difracción involucra muchos átomos que se encuentran organizados periódicamente de forma tridimensional en la materia formando una red cristalina. De acuerdo a la estructura que se forma es posible trazar infinitos planos consecutivos por una serie de puntos; la separación entre planos se le llama distancia interplanar " $d$ ". Cuando un haz de rayos X pasa por al menos dos de sus planos el ángulo de incidencia es el mismo de dispersión, y si los rayos dispersados están en fase se tendrá una interferencia constructiva y será posible detectar el rayo difractado.

Tras el descubrimiento de los rayos X en 1895 por Röntgen; en 1912 el físico Max Von Laue dio inicio a la cristalografía de rayos X que establece tres hipótesis: el medio cristalino es periódico, los rayos X son ondas y la longitud de onda de los rayos X es del mismo orden de magnitud de la separación de los planos que se repite entre los cristales [3]. Con las anteriores hipótesis fue posible confirmar la difracción de rayos X. Luego se encontró que la

geometría de la difracción de rayos X es la misma aplicada a la reflexión de un haz de luz en un espejo plano, y de esta manera permite interpretar planos de cierta distribución periódica de los átomos en una estructura tridimensional cristalina, descubriendo así padre e hijo, William Henry Bragg y William Lawrence Bragg respectivamente, la conocida **Ley de Bragg** (esta ley se estudia en la sección B.3) descrita por:

$$n\lambda = 2d\sin(\theta); n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.9)$$

donde  $n$  corresponde al orden de difracción,  $d$  es la distancia entre planos de un cristal,  $\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X y  $\theta$  es el ángulo de difracción.

### 1.5.3. Absorción

En la interacción de los rayos X con la materia, los fotones que componen esta radiación son parcialmente absorbidos y parcialmente transmitidos por el átomo. En este proceso se gasta una parte de su energía y la restante es transmitida a los electrones para su ionización. Este fenómeno es llamado **absorción fotoeléctrica** [4]. En la absorción fotoeléctrica la energía que el fotón le transfiere al electrón hace que este salga eyectado del átomo dejando un hueco en la capa y su llenado se realiza mediante dos procesos distintos: emisión de rayos X fluorescentes (uno de los electrones de la capa adyacente superior llena el hueco liberando energía en forma de un fotón generando radiación característica) y emisión de un electrón Auger (uno de los electrones de la capa adyacente superior llena la vacante liberando energía. Esta energía es transferida a un electrón de una capa externa, lo que con lleva a que el átomo libere a este electrón y alcance su estado base).

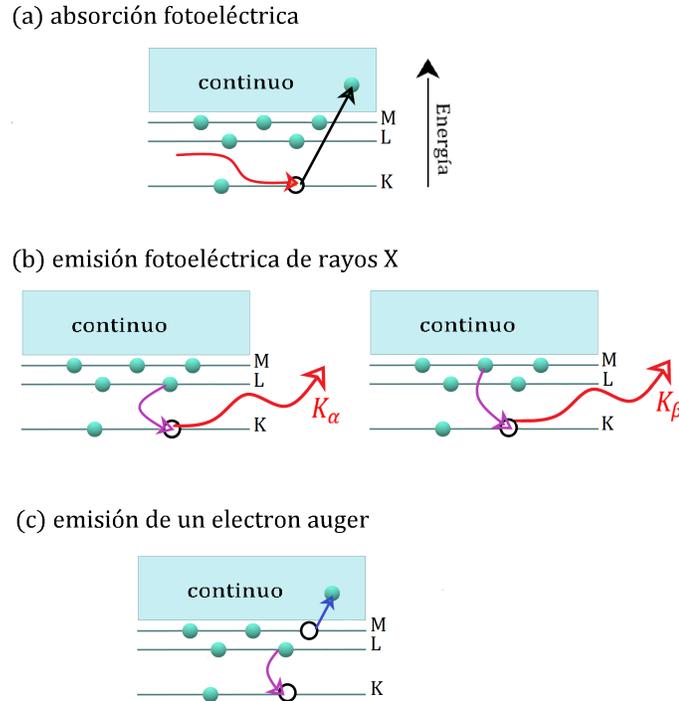


Figura 1.7: Emisión fotoeléctrica de rayos X y emisión del electrón Auger mediante el proceso de absorción fotoeléctrica en la capa K, [9].

La sección transversal de absorción fotoeléctrica varía con el número atómico  $Z$  del absorbedor, aproximadamente en un factor de  $Z^4$  [4]. Esta variación corresponde al contraste, entre los diferentes elementos que hacen que los rayos X sean tan útiles para la obtención de imágenes de cuerpos formados por diferentes materiales no observables mediante la luz visible, por ejemplo, el tejido está constituido principalmente de agua e hidrocarburos, comportándose como buenos transmisores de rayos X, mientras que el hueso contiene una gran cantidad de calcio (Ca) y una transmisión de rayos X correspondientemente más pequeña. De esta manera es como se tiene la capacidad de mirar a través del cuerpo, una práctica que inició Röntgen cuando descubrió los rayos X hace más de 100 años.

Por otra parte, Röntgen estableció que para la absorción de un material el decrecimiento de la intensidad de un haz de rayos X pasando a través de una sustancia homogénea es proporcional a la distancia  $x$  como se indica a continuación:

$$-\frac{d\mathcal{I}}{\mathcal{I}} = \mu dx, \quad (1.10)$$

donde  $\mu$  es una constante llamada constante de absorción lineal, depende del material en consideración, su densidad y la longitud de onda de los rayos X, la cantidad  $\mu dx$  corresponde a la atenuación del haz que atravesó una capa de grosor  $dx$  de una superficie. Integrando con  $\mathcal{I}_{(x=0)} = \mathcal{I}_0$  se llega a la siguiente expresión:

$$\mathcal{I}(x) = \mathcal{I}_0 e^{-\mu x}, \quad (1.11)$$

donde  $\mathcal{I}_0$  corresponde a la intensidad del haz de rayos X incidente,  $\mathcal{I}(x)$  es la intensidad que se ha absorbido por el material y  $\mu$  es el coeficiente lineal de absorción, el cual, se puede determinar experimentalmente mediante la relación de intensidades de un haz con y sin muestras.

El coeficiente de absorción lineal  $\mu$  es proporcional a la densidad  $\rho$ , lo que significa que la cantidad  $\mu/\rho$ , llamada *coeficiente de absorción de masa*, es una constante del material e independiente de su estado físico (sólido, líquido o gas). Esta última cantidad, llamada coeficiente de absorción de masa, es la que se suele tabular. La ecuación 1.11 puede ser reescrita en una forma más utilizable

$$\mathcal{I}(x) = \mathcal{I}_0 e^{-(\mu/\rho)x}. \quad (1.12)$$

Aclaremos que la materia absorbe los rayos X mediante dos formas: la dispersión y la absorción fotoeléctrica, y estos dos procesos juntos conforman la absorción total medida por el coeficiente de absorción másico. La dispersión de rayos X por un átomo se da en todas las direcciones y dado que su energía no es percibida en el haz transmitido se dice que ha sido absorbida, cabe resaltar que su aporte es bastante pequeño excepto para elementos ligeros, dentro de la absorción total. La verdadera absorción es causada por las transiciones electrónicas de un átomo que se dan lugar a partir de una cantidad mínima de energía donde el electrón es expulsado, este proceso se le denomina foto-electrónico y la radiación característica emitida se llama radiación fluorescente, por ejemplo para una transición de la capa K

es necesaria una cantidad  $E_K$  de energía, y teniendo en cuenta la cuantización de la energía tenemos la siguiente relación:

$$E_K = \frac{hc}{\lambda_K}, \quad (1.13)$$

donde  $\lambda_K$  corresponde a la longitud de onda del borde de absorción<sup>9</sup>. Podemos observar que a medida que la longitud de onda disminuye, aumenta la energía de los fotones, lo que causa que el coeficiente de absorción disminuya, ya que a mayor energía de un cuanto, más fácilmente pasa a través de un absorbente. Cuando la longitud de onda se reduce justo por debajo del valor crítico  $\lambda_K$ , el coeficiente de absorción aumenta repentinamente, incluso hasta aproximadamente ocho veces el valor pero a medida que la longitud de onda del haz incidente disminuye por debajo de  $\lambda_K$ , el coeficiente de absorción comienza a disminuir nuevamente, a pesar de que la producción de radiación  $K$  fluorescente y foto-electrones aun se este llevando a cabo.

---

<sup>9</sup>Las longitudes de onda de absorción varían de acuerdo con la ley de Moseley (ecuación 1.6)

# Capítulo 2

## Equipo de Rayos X 554 801

### 2.1. Descripción

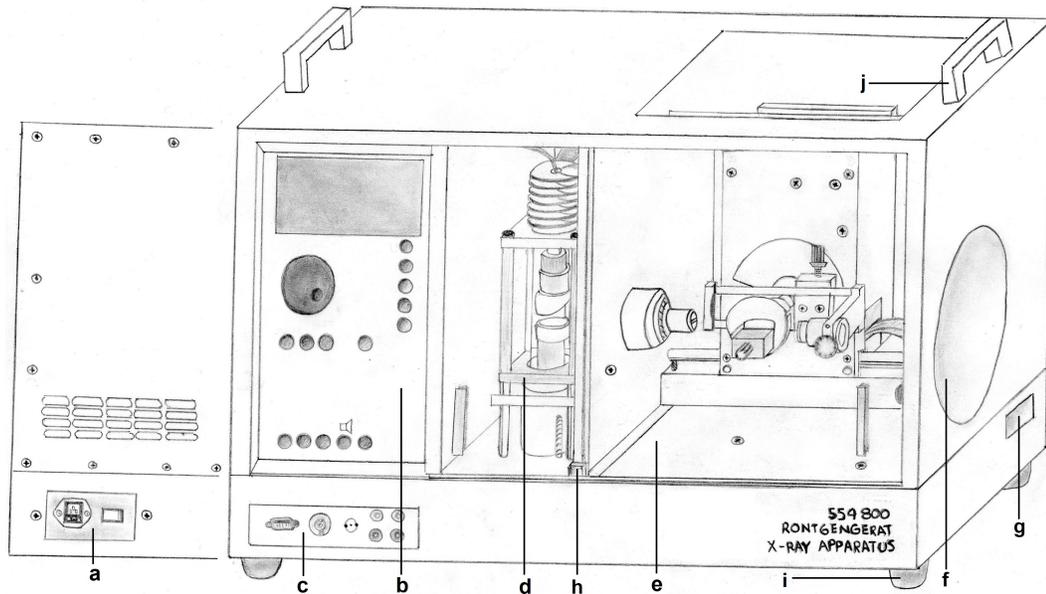


Figura 2.1: Equipo de rayos X [9].

- |                                |   |                           |
|--------------------------------|---|---------------------------|
| a. Panel de conexión a la red. | de rayos X).  | g. Canal vacío.           |
| b. Panel de control.           | e. Cámara de experimentación (aquí con goniómetro). | h. Pulsador de seguridad. |
| c. Panel de conexión.          |   | i. Bases.                 |
| d. Recinto del tubo (con tubo  | f. Pantalla fluorescente.                           | j. Manijas de transporte. |

En el estudio de los rayos X y su interacción con la materia tenemos el equipo de rayos X 554 801 de la Leybold, el cual permite realizar experiencias interdisciplinarias asociadas a la física, que va desde la física atómica hasta la física del estado sólido, tal como, la transiluminación<sup>1</sup> de objetos, observada gracias a la pantalla fluorescente contenida en el equipo y experimentos de ionización y dosimetría.

El equipo de rayos X 554 801 (figura 2.1) es una máquina que contiene un tubo generador de rayos X con ánodo fijo de Molibdeno (d), filtro de Zirconio, un goniómetro con un tubo contador Geiger-Müller (e). El equipo se controla a través de un microprocesador facilitando la configuración de los parámetros de su funcionamiento de forma manual o mediante su software “aparato de rayos X”. Independientemente del procedimiento elegido, el equipo de rayos X tiene una pantalla digital (b) que permite observar los cambios realizados. Con el equipo se pueden realizar las siguientes prácticas:

- Fluorescencia de una pantalla luminosa debido a los rayos X.
- Influencia de un medio de contraste en la absorción de rayos X.
- Producción de un haz monocromático de rayos X mediante un filtro.
- Estructura fina de la radiación X característica del molibdeno.
- Espectro de rayos X para un ánodo de molibdeno en función del alto voltaje y la corriente de emisión.
- Relación Duane-Hunt y determinación de la constante de Planck.
- Reflexión de Bragg.

---

<sup>1</sup>Transiluminación: Paso de radiación X a través del objeto que se quiere examinar. La zona que se va a observar está interpuesta entre el observador y la fuente de rayos X.

## 2.2. Datos Técnicos

Antes de usar el equipo de rayos X es necesario tener un buen conocimiento sobre las medidas y límites de seguridad bajo los cuales trabaja la máquina, esto le asegurará su adecuado funcionamiento así como también mediciones confiables. Las especificaciones técnicas y limitaciones de la máquina se mencionan a continuación:

- Las dimensiones del equipo son:  $67\text{ cm} \times 48\text{ cm} \times 3\text{ cm}$  y una masa de:  $41\text{ kg}$ .
- El aparato de rayos X cuenta con una protección completa, (BfS 05/07 V/Sch RöV<sup>2</sup>), que permite el uso de tubos intercambiables de hierro (Fe), molibdeno (Mo), cobre (Cu), plata (Ag), wolframio (W) y oro (Au). Por el momento solo se cuenta con un tubo de Molibdeno.
- El índice de dosis a  $10\text{ cm}$  de distancia es:  $< 1\ \mu\text{Sv}/\text{h}^3$ .
- La tensión elevada del tubo se encuentra entre  $0.0$  y  $35.0\text{ kV}$  (voltaje DC estabilizado) y la corriente del tubo de  $0.0$  a  $1.0\text{ mA}$  (corriente DC regulada independientemente).
- El tubo de rayos X con ánodo de molibdeno tiene sus líneas características:  
 $K_{\alpha} = 17.4\text{ keV}$  ( $71.1\text{ pm}$ ),  $K_{\beta} = 19.6\text{ keV}$  ( $63.1\text{ pm}$ ).
- El diámetro de la pantalla fluorescente para experimentos de transiluminación es  $D = 15\text{ cm}$  (figura 2.1 f).
- El equipo cuenta con un puerto USB que le permite la transmisión de datos a una computadora y controlar el experimento.
- La tensión de red se puede observar en la placa de características en la parte posterior de la carcasa, el consumo de energía es de  $115\text{ VA}$ .

---

<sup>2</sup>BfS 05/07 V/Sch RöV es una homologación generada por la Oficina Federal de Protección Radiológica donde se garantiza que el equipo de rayos X 554 800 está aprobado para su uso en la realización de experimentos y con fines educativos en escuelas, colegios y universidades.

<sup>3</sup>El  $\mu\text{Sv}/\text{h}$  o el  $\mu\text{Sv}/\text{año}$  además de utilizarse para medir la cantidad de radiación (dosis), también es útil para expresar la velocidad a la que se entrega esta dosis (tasa de dosis) [12].

### 2.3. Panel de conexión a la red

El panel de conexión a la red (figura 2.1 a) se usa para conectar el equipo a una red eléctrica de 115 V a través del cable de alimentación insertado en la hembrilla de conexión (figura 2.2 a2).



Figura 2.2: Fotografía del panel de conexión a la red del equipo de rayos X 554 801 [9].

- **a1** Portafusible
- **a2** Hembrilla de conexión a la red
- **a3** Interruptor de encendido de la máquina

## 2.4. Recinto del tubo

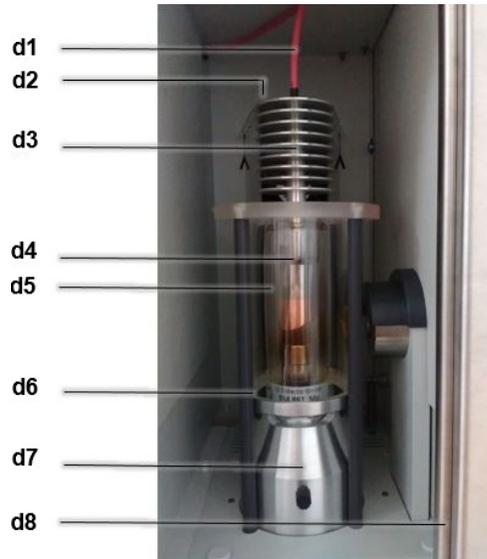


Figura 2.3: Fotografía del recinto del tubo del equipo de rayos X 554 801 [9].

- **d1** Cable de alta tensión
- **d2** Ventilador
- **d3** Disipador de calor
- **d4** Tubo de rayos X
- **d5** Tubo de vidrio emplomado
- **d6** Tornillo de apriete
- **d7** Portatubo con tornillo de fijación
- **d8** Puerta corrediza de vidrio emplomado

El recinto del tubo (figura 2.1 d) sirve para recibir al tubo de rayos X y como dispositivo de blindaje del tubo de rayos X. Por la puerta corrediza de vidrio emplomado situada delante del recinto del tubo y por el tubo de vidrio emplomado circundante al tubo de rayos X es posible observarlo directamente durante su funcionamiento.

## 2.5. Cámara de experimentos

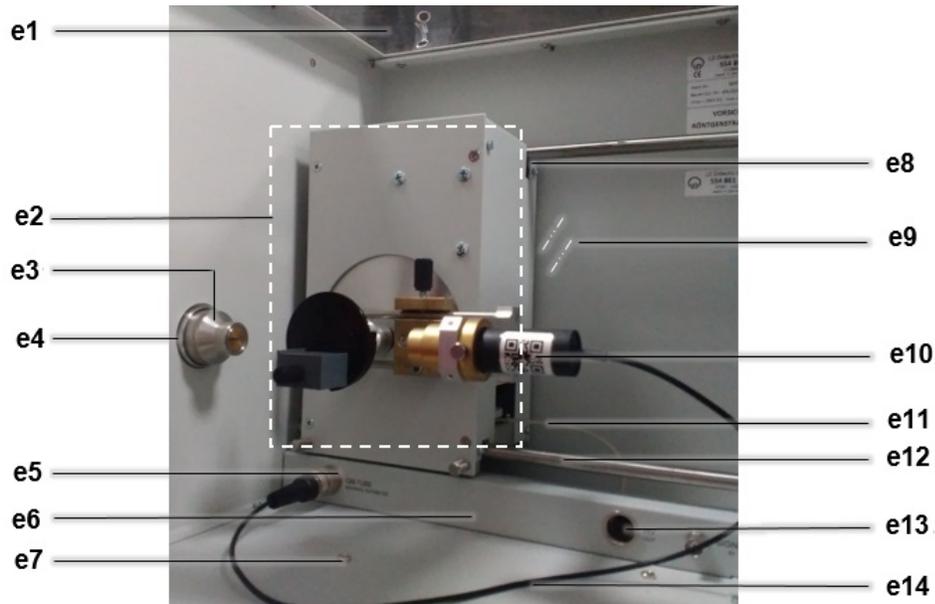


Figura 2.4: Fotografía de la cámara de experimentación del equipo de rayos X 554 801 [9].

- |  |  |  |
|--|--|--|
| ■ <b>e1.</b> Ventana de vidrio emplomado | ■ <b>e6.</b> Regleta de conexiones                 | ■ <b>e11.</b> Cable plano, con conector múltiple |
| ■ <b>e2.</b> Goniómetro                  | ■ <b>e7.</b> Zócalos de montaje                    | ■ <b>e12.</b> Riel guía inferior                 |
| ■ <b>e3.</b> Colimador                   | ■ <b>e8.</b> Ranura de riel guía superior          | ■ <b>e13.</b> Hembrilla HV OUT                   |
| ■ <b>e4.</b> Asiento del colimador       | ■ <b>e9.</b> Puerta corrediza de vidrio emplomado  | ■ <b>e14.</b> Cable del sensor                   |
| ■ <b>e5.</b> Hembrilla GM TUBE           | ■ <b>e10.</b> Sensor (Tubo contador Geiger Müller) |  |

La cámara de experimentación (figura 2.1 e) sirve para alojar los dispositivos de experimentación, como por ejemplo, el goniómetro (554 831).

A través de la puerta corrediza de vidrio emplomado (figura 2.4 e9) y la ventana de vidrio emplomado (figura 2.4 e1) se puede observar de muy cerca los dispositivos de experimentación, aún durante el funcionamiento del tubo de rayos X.

## 2.6. Goniómetro

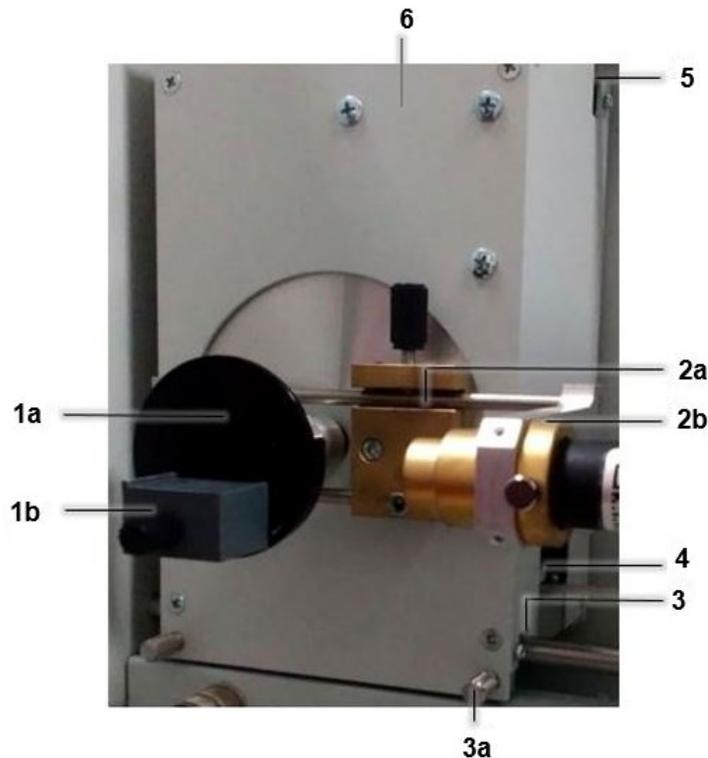


Figura 2.5: Fotografía del goniómetro en la cámara de experimentación del equipo de rayos X 554 801 [9].

- **1 Brazo del blanco**
  - 1a Soporte del blanco
  - 1b Mesa del blanco
- **2 Brazo del sensor**
  - 2a Soporte del sensor
  - 2b Asiento del sensor
- **3 Ranura guía inferior**
  - 3a Tornillos malteados
- **4 Hembrilla múltiple**
- **5 Ranura guía superior**
- **6 Caja de conexiones**

El goniómetro es una unidad autónoma para ser montada en el aparato de rayos X 554 801. Esta unidad posee dos motores paso a paso independientes y controlables, con los que se puede mover el brazo del sensor (figura 2.10 2) y el brazo del blanco (figura 2.10 1). El movimiento es fijado mediante pulsadores del panel de control (figura 2.1 b) del aparato de rayos X , manualmente con el pulsador ADJUST o automáticamente con la tecla SCAN (estos movimientos serán estudiados mas adelante en la sección 2.7.4). La mesa del blanco (figura 2.10 1b) sirve para sostener a un blanco que puede ser por ejemplo un cristal de fluoruro de litio (LiF 554 77), o un cristal de cloruro de sodio (NaCl 554 78).

El goniómetro puede ser desplazado como una unidad completa moviendo la caja de conexiones (figura 2.10 6) a través de los rieles guía (figura 2.4) superior e inferior.

### 2.6.1. Montaje y desmontaje del goniómetro

Para la realización de algunas practicas como fluorescencia de una pantalla luminosa debido a los rayos X (capítulo 4) e influencia de un medio de contraste en la absorción de rayos X (capítulo 5), donde es necesario el uso de la pantalla fluorescente, se requiere desmontar el goniómetro de tal manera que no interfiera con el paso de los rayos X hacia los objetos a ser transiluminados.

#### Montaje (figura 2.10)

- Monte el soporte del blanco (figura 2.10 1a) y el soporte del sensor (figura 2.10 2a).
- Extienda el cable plano (figura 2.4 e11) del aparato de rayos X hacia la derecha, por detrás del riel guía inferior (figura 2.4 e12) en la cámara de experimentación.
- Destornille los tornillos malteados (figura 2.10 3a) de la ranura guía inferior.
- Coloque la ranura guía superior en el riel guía superior del aparato de rayos X.
- Gire la parte inferior del goniómetro acercándolo al riel guía del aparato de rayos X, levante el goniómetro y colóquelo de tal manera que el riel inferior se sumerja en la ranura guía inferior del goniómetro.

- Desplace el goniómetro en la cámara de experimentación hacia la izquierda y enchufe el cable plano en la hembrilla múltiple del goniómetro (tenga en cuenta la protección contra polarización inversa).
- Desplace el goniómetro hacia el colimador (figura 2.4 e3) hasta la distancia deseada, coloque los tornillos malteados de la ranura guía inferior y apriételes.
- Monte el sensor (ver sección 2.6.5) .

### **Desmontaje**

- Extraiga el sensor del asiento del mismo.
- Destornille los tornillos malteados de la ranura guía inferior del goniómetro.
- Desplace el goniómetro en la cámara de experimentación hacia la izquierda y jale el cable plano de la hembrilla múltiple del goniómetro.
- Gire manualmente el brazo del sensor del goniómetro hacia la posición de  $0^\circ$ .
- Levante el goniómetro hasta el tope, gire la parte inferior del goniómetro hacia delante y baje el goniómetro hasta que la parte superior del mismo también puede ser tornada hacia delante.

### 2.6.2. Montaje y desmontaje del soporte del blanco

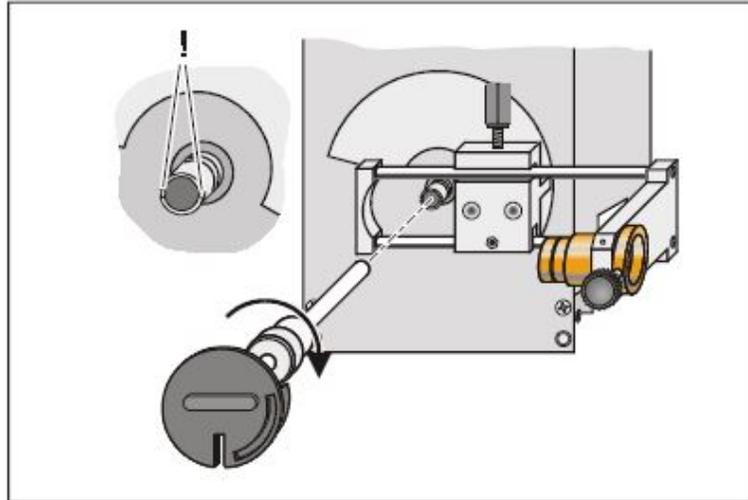


Figura 2.6: Gráfico guía para el montaje y desmontaje del soporte del blanco [17].

#### Montaje

- Monte el goniómetro y ponga el brazo del blanco del goniómetro en posición horizontal (coloque la ranura de forma de V verticalmente en el manguito del brazo del blanco).
- Introduzca el eje de giro del soporte del blanco en el manguito del brazo del blanco, de tal manera que el pasador del eje de giro se deslice en la ranura del manguito de forma de V.
- Apriete fijamente la tuerca del soporte del blanco.

#### Desmontaje

- Suelte la tuerca del soporte del blanco.
- Jale hacia delante el eje de giro del soporte del blanco por el manguito del brazo del blanco.

### 2.6.3. Montaje y desmontaje de la mesa del blanco

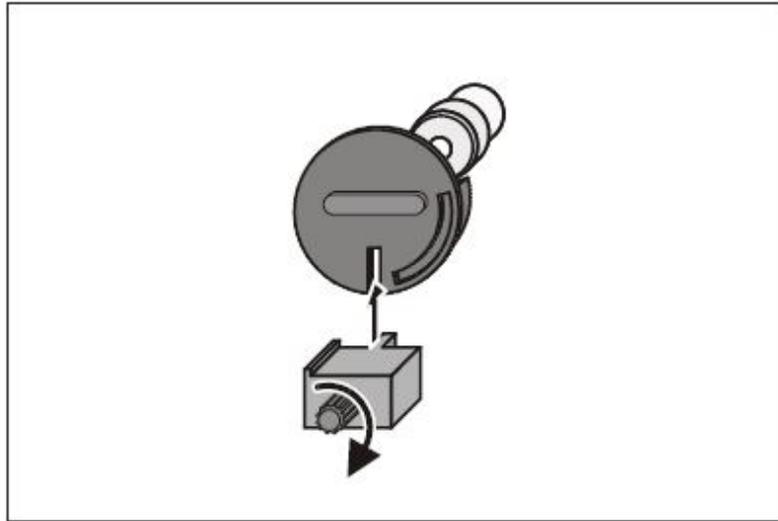


Figura 2.7: Gráfico guía para el montaje y desmontaje de la mesa del blanco [17].

#### Montaje

- Suelte el tornillo malteado en la mesa del blanco.
- Desde abajo introduzca la guía de plástico en la ranura, en el soporte del blanco, y desplace la mesa del blanco hacia arriba hasta el tope.
- Apriete fijamente el tornillo malteado.

#### Desmontaje

- Suelte el tornillo malteado en la mesa del blanco y jale la mesa del blanco hacia abajo fuera de la ranura del soporte del blanco.

**Nota:** Tenga en cuenta que si el goniómetro está ubicado en la parte izquierda del recinto de experimentación los ángulos de movimiento del brazo del sensor tendrán una limitación

extra importante. Si usa la opción *SENSOR* este tendrá un límite máximo angular de  $100^\circ$  y en la opción *COUPLED* este límite será de  $50^\circ$ , dado que su paso angular es 2 : 1 en relación al brazo del blanco. De lo contrario si se encuentra ubicado en el centro verifique los datos técnicos.

#### 2.6.4. Montaje del blanco

En la realización de algunas prácticas como calibración del equipo de rayos X 555-801 (capítulo 3), producción de un haz monocromático de rayos X mediante un filtro (capítulo 8), espectro de rayos X para un ánodo de molibdeno en función del alto voltaje y la corriente de emisión (capítulo 7), estructura fina de la radiación X característica del molibdeno (capítulo 9), relación Duane-Hunt y determinación de la constante de Planck (capítulo 6). Es necesaria la presencia de un cristal de NaCl (blanco) el cual se encarga de difractar los rayos X. A continuación se indica como colocar dicho cristal en el aparato de rayos X.

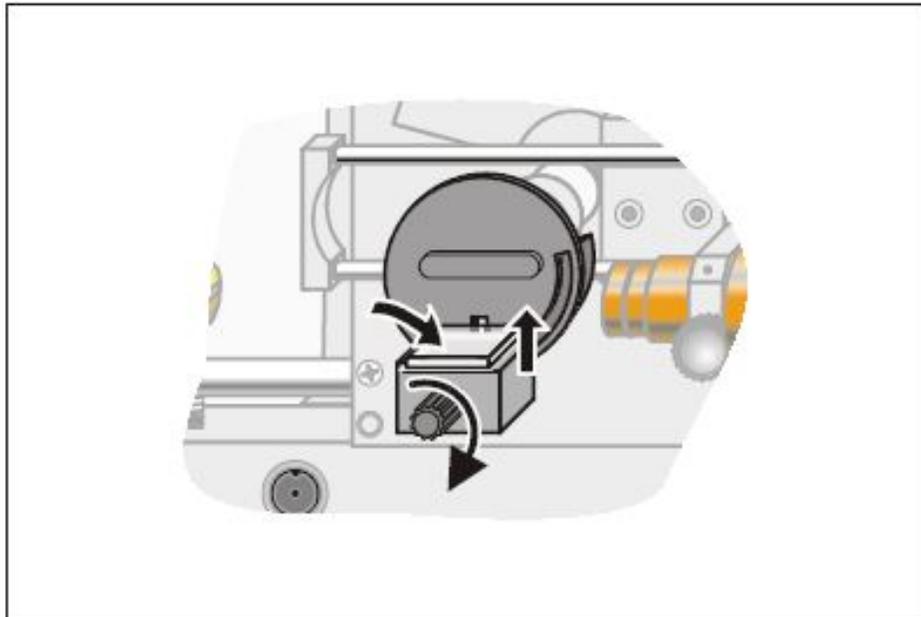


Figura 2.8: Gráfico guía para el montaje del blanco [17].

- Coloque el brazo del blanco y el brazo del sensor del goniómetro en posición horizontal.
- Suelte el tornillo moleteado en la mesa del blanco y baje un poco la mesa del blanco.
- Coloque el blanco (por ej. un cristal de NaCl o un dispersor de Al) tendido sobre la mesa del blanco y desplácelo hasta el tope posterior.
- Desplace hacia arriba la mesa y el blanco juntos, hacia el borde y apriete fijamente el tornillo moleteado.
- Verifique cuidadosamente que el blanco esté bien fijo.

### 2.6.5. Montaje y desmontaje del soporte del sensor

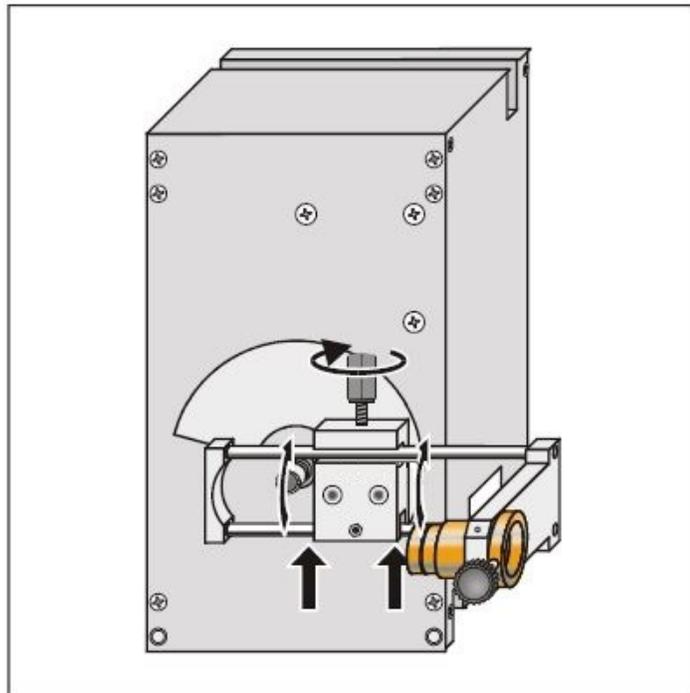


Figura 2.9: Gráfico guía para el montaje y desmontaje del soporte del sensor [17].

### **Montaje**

- Desmonte el soporte del blanco.
- Suelte el tornillo malteado del brazo del sensor.
- Primeramente coloque el riel guía inferior del soporte del sensor en la ranura inferior del brazo del sensor, finalmente haga encajar el riel guía superior en la ranura superior.
- Ajuste la distancia deseada entre blanco y sensor y bloquee el soporte del sensor a esa distancia con el tornillo malteado.

### **Desmontaje**

- Desmonte el sensor.
- Desmonte el soporte del blanco.
- Suelte el tornillo malteado en el brazo del sensor.
- Gire el riel guía superior del soporte del sensor fuera de la ranura superior del brazo del sensor y baje el soporte del sensor.

### **Ajuste del brazo del sensor**

Suelte el tornillo malteado en el brazo del sensor. Ajuste la distancia deseada entre blanco y sensor y bloquee la distancia del soporte del sensor con el tornillo malteado. Lo anterior se hace en muchas practicas debido a que la distancia entre el sensor y el blanco influye en la toma de datos del sensor.

### 2.6.6. Montaje del sensor

Una manera de captar la radiación X difractada por el blanco es con la utilización de un tubo contador Geiger Müller (GM). Este tubo contiene un gas que se ioniza al paso de la radiación, de tal manera que cuenta el número de partículas o fotones (independientemente de su naturaleza o energía) que atraviesan al sensor en un determinado tiempo [18], a esto se le denominara **tasa de conteo**. Debido a que en muchas prácticas se requiere la utilización del tubo contador GM, es necesario saber como posicionarlo en el equipo de rayos X, de tal manera que se pueda hacer una buena toma de datos con este.

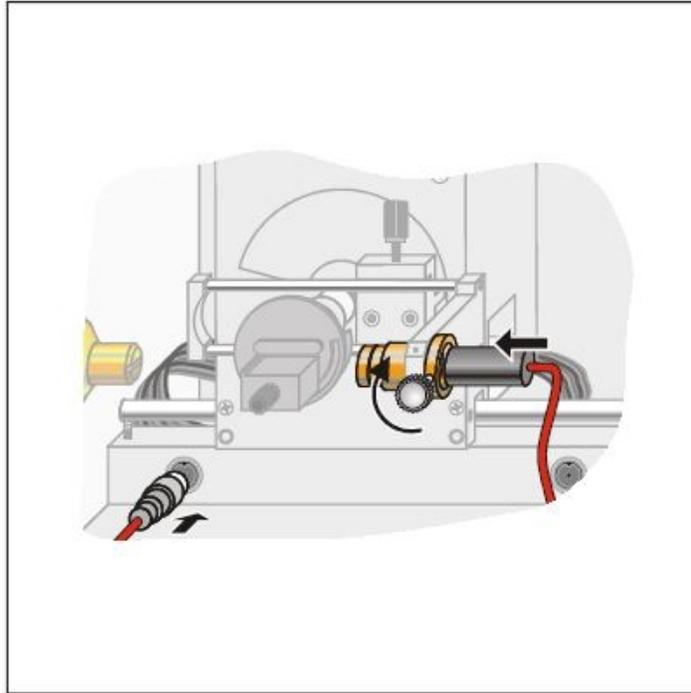


Figura 2.10: Gráfico guía para el montaje y desmontaje del soporte del sensor [17].

- En caso dado desplace el goniómetro hacia la izquierda en el recinto de experimentación.
- Suelte el tornillo malteado del asiento del sensor.

- Retire la tapa cobertora del tubo contador, introduzca cuidadosamente en el asiento del sensor hasta el tope desde atrás y fíjelo con el tornillo malteado.

*Para utilizar el medidor de tasas interno:* Conecte el cable del tubo contador en el recinto de experimentación a la hembra GM TUBE .

*Para utilizar una unidad contadora externa:* Conecte el cable de la unidad en el recinto de experimentación a la hembra HV OUT y en el panel de conexiones conecte la hembra HV IN con la unidad externa.

### 2.6.7. Colimador

Un colimador es un sistema que a partir de un haz de rayos divergente obtiene un haz paralelo, es decir, sirve para homogeneizar las trayectorias o rayos que, emitidos por una fuente, salen en todas direcciones obteniendo así un chorro de partículas o conjunto de rayos con las mismas propiedades. Esto se logra gracias a que el colimador esta hecho de materiales con alta densidad y excelente capacidad de absorción de rayos X [20].

#### Montaje del colimador



Figura 2.11: Fotografía del colimador del equipo de rayos X 554 801 [9].

- Gire el colimador de tal forma que el pasador guía esté alineado con la ranura respectiva del asiento del colimador y la rendija del colimador se encuentre en posición horizontal.
- Deslice el colimador hasta que los casquillos estén conectados a los pines del asiento del colimador.

### Montaje del filtro (figura 2.12 b)

En muchos experimentos de difracción de rayos X ( ver capítulo 8) se requieren radiación lo más monocromática posible, es por eso que se ve necesario la utilización de un filtro el cual disminuye la intensidad de radiaciones características no deseadas. El montaje del filtro se ilustra a continuación.



Figura 2.12: Fotografía del colimador y el filtro [9].

## 2.7. Panel de control

El aparato de rayos X se controla utilizando una serie de teclas para configurar los parámetros y seleccionar el modo de funcionamiento, un mando para configurar el valor deseado del parámetro seleccionado y un panel de visualización que muestra el valor establecido, para cada botón. Un LED indica la selección de parámetro correspondiente.

Dependiendo del estado respectivo del aparato de rayos X, no es posible activar todas las teclas en todo momento. En particular, algunas teclas no tienen función cuando el goniómetro (554 831) no está montado.

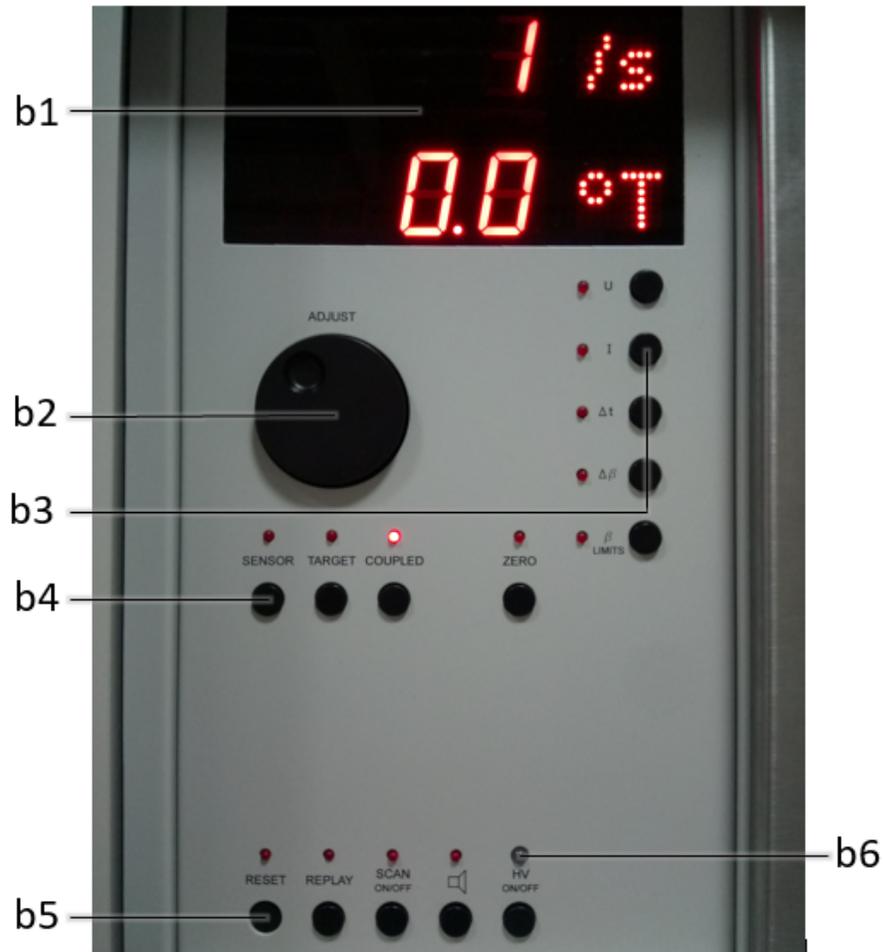


Figura 2.13: Fotografía del panel de control del equipo de rayos X 554 801 [9].

- **b1** Panel visualizador
- **b2** Pulsador ADJUST
- **b3** Teclas de selección de parámetros
- **b4** Teclas de modo escaneo
- **b5** Teclas de comando
- **b6** Lámpara de control del alto voltaje

### 2.7.1. Panel visualizador

Campo de visualización superior: muestra la velocidad de conteo actual. Campo de visualización inferior: muestra la cantidad seleccionada con una tecla.

En el modo de escaneo acoplado, la posición angular del objetivo aparece en el campo de visualización inferior; el campo de visualización superior se puede alternar entre la velocidad de conteo y la posición angular del sensor presionando la tecla COUPLED.

### 2.7.2. Pulsador ADJUST (ajustar)

Permite establecer los valores deseados de los parámetros.

Este elemento de control incremental se puede activar en ambas direcciones y tiene una respuesta dinámica, es decir, cuando la perilla se gira rápidamente se observan incrementos mayores en el parámetro que se está ajustando. El aparato acepta los valores mostrados cuando se presiona otra tecla.

### 2.7.3. Teclas de selección de parámetros

- Tecla *U*: activa la visualización y configuración del tubo de alta tensión.

Rango de valores: 0.0 – 35.0 *kV*

Anchura de paso: 0.1 *kV*

Predeterminado: 5.0 *kV*

El valor ajustado se muestra independientemente de si el alto voltaje del tubo está encendido.

- Tecla *I*: activa la visualización y el ajuste de la corriente de emisión.

Rango de valores: 0.00 – 1.00 *mA*

Anchura de paso: 0.01 *mA*

Valor predeterminado: 0.00 *mA*

El valor ajustado se muestra independientemente de si la corriente de emisión está fluyendo.

- Tecla  $\Delta t$ : activa la visualización y el ajuste del tiempo de medición por paso angular.  
Rango de valores: 1 – 9999 s  
Ancho del paso: 1 s  
Por defecto: 1 s
  
- Tecla  $\Delta\beta$ : cuando se monta el goniómetro (554 831), esto activa la visualización y el ajuste del ancho del paso angular para el modo de escaneo automático.  
Rango de valores: 0.0° – 20.0°  
Ancho de paso: 0.1°  
Predeterminado: 0.1°  
El ajuste  $\Delta\beta = 0.0^\circ$  desactiva el modo de escaneo automático y activa el modo exposición - temporizador.
  
- Límites de la tecla  $\beta$  ( $\beta$ LIMITS): Cuando se monta el goniómetro (554 831), esto activa la visualización y definición de los ángulos de límite superior e inferior para el modo de escaneo automático. No se puede iniciar una medición cuando el límite superior es menor que el límite inferior. La pantalla parpadea hasta que se corrija esta situación.  
La primera vez que se presiona esta tecla, el panel de visualización muestra el símbolo  $\downarrow$ . Ahora puede establecer el ángulo límite inferior.  
La segunda vez que se presiona esta tecla, el panel de visualización muestra el símbolo  $\uparrow$ . Ahora puede establecer el ángulo límite superior.

#### 2.7.4. Teclas de modo de escaneo

Estas teclas permiten diferentes formas de escaneo. El escaneo hace referencia a la detección (a través de un tubo contador Geiger-Müller) de los fotones de rayos X en el proceso de interacción de estos con la materia (cristal de NaCl). Este escaneo se verá afectado por el movimiento del brazo del blanco debido a que de éste depende el ángulo de incidencia de los rayos X en el cristal, también se afecta por el movimiento del brazo del sensor debido a que

de esté depende el ángulo con el que se dispersan los rayos X después de su interacción con el cristal.

- Tecla SENSOR (sensor): cuando se monta el goniómetro (554 831), esta tecla activa el modo de escaneo SENSOR (movimiento del brazo del sensor) de forma automática o manual.

Puede definir los ángulos límite del brazo del sensor para escaneo automático con ayuda de la tecla  $\beta$ LIMITS. El campo de visualización inferior muestra la posición angular del sensor.

- Tecla TARGET (objetivo): cuando se monta el goniómetro (554 831), esta tecla activa el modo de escaneo TARGET (movimiento del brazo del blanco) de forma automática o manual.

Puede definir los ángulos límite del brazo objetivo para el escaneo automático. El movimiento del brazo objetivo se puede controlar de forma manual o automática. El campo de visualización inferior muestra la posición angular del objetivo.

- Tecla COUPLED (acoplado): cuando se monta el goniómetro (554 831), esta tecla activa el modo de escaneo COUPLED (movimiento conjunto del brazo del sensor y del blanco) de forma automática o manual.

Los brazos del sensor y el objetivo se pueden mover de forma manual o automática con un acoplamiento angular de 2 : 1 el cual hace referencia a que el paso angular del sensor es el doble respecto al del portamuestras. En el movimiento controlado manualmente, el punto de referencia para el acoplamiento 2 : 1 es la posición angular del objetivo y el sensor antes de pulsar la tecla COUPLED, y para el movimiento automático, el punto de referencia es el punto cero del sistema de medición.

El campo de visualización inferior muestra la posición angular del objetivo. Al presionar la tecla COUPLED se alterna el campo de visualización superior entre la velocidad de conteo y la posición angular del sensor.

- Tecla CERO (Key ZERO): cuando se monta el goniómetro (554 831), esta tecla hace que los brazos del objetivo y del sensor se muevan a la posición cero del sistema de

medición sin cambiar los valores de los parámetros establecidos con anterioridad.

### **Escaneo automático**

En el escaneo automático, automáticamente se mueven los brazos del goniómetro después de oprimir el pulsador SCAN (esta tecla se estudiara mas adelante en la sección 2.7.5). Aquí se puede elegir entre los modos de escaneo TARGET, SENSOR o COUPLED. El aparato de rayos X almacena todos los valores medidos (ángulos y tasas de conteo). A continuación se indica como realizar este tipo de escaneo.

- Para elegir el modo de escaneo oprima la tecla TARGET, SENSOR o COUPLED.
- Oprima la tecla  $\beta$  LIMITS y con el pulsador ADJUST ajuste el límite inferior del escaneo.
- Oprima nuevamente el pulsador  $\beta$  LIMITS y con el pulsador ADJUST ajuste el límite superior del escaneo.
- Elija los parámetros de medición  $I$  y  $U$ .
- Elija un ancho de paso angular  $\Delta\beta$ .
- Ajuste del tiempo de medición por paso angular deseado  $\Delta t$ .
- Para almacenar y procesar los datos que se obtendrán en el escaneo conecte el equipo de rayos X a una computadora a través del cable USB y arranque el programa “Aparato de rayos X”.
- Inicie el escaneo automático con la tecla SCAN.
- En caso de que se detenga la medición oprima la tecla REPLAY y con el pulsador ADJUST solicite los datos medidos almacenados para cada paso angular.

### Escaneo manual

En el escaneo manual el movimiento de los brazos del goniómetro se realiza manualmente mediante ADJUST. Aquí se puede elegir entre los modos de escaneo TARGET, SENSOR o COUPLED. A continuación se indica como realizar este tipo de escaneo.

- Para elegir el modo de escaneo oprima la tecla TARGET, SENSOR o COUPLED.
- Seleccione los parámetros de medición  $I$  y  $U$ .
- Ajuste el tiempo de medición por paso angular  $\Delta t = 1 s$ .
- Dirija manualmente el brazo del goniómetro con ADJUST hacia la posición angular deseada.
- Espere unos 2 s, hasta que el panel visualizador muestre la tasa de conteo para la nueva posición angular.

#### 2.7.5. Teclas de comando

- Tecla RESET (reiniciar): con el goniómetro (554 831) incorporado este pulsador mueve el brazo del blanco y el brazo del sensor hacia la posición instrumental del cero y pone todos los parámetros a los valores predeterminados.  
La alta tensión del tubo se desconecta.
- Tecla REPLAY (repetición): activa la lectura de la memoria de datos. En el panel visualizador se representan las posiciones angulares, solicitadas manualmente mediante el pulsador ADJUST, y las tasas respectivas promediadas en el tiempo de medición por paso angular  $\Delta t$  y son entregadas a través de un cable USB a una computadora. En las hembrillas de salida ANGLE (ángulo) y RATE (tasa) se entregan las tensiones respectivas ( esto se estudiara mas adelante en la sección 2.8). Si se realiza una toma de datos, estos valores pueden ser llamados las veces que uno quiera, siempre que el pulsador RESET o SCAN no sean oprimidos y que el aparato de rayos X no esté desconectado.

- Tecla SCAN ON/OFF (escaneo encendido/apagado): al conectar el alto voltaje del tubo se activa el pulsador de seguridad (figura 2.1 h) impidiendo que se abran las puertas vidrio emplomadas, para dar inicio a mediciones con el equipo de rayos S. Los valores medidos son depositados en la memoria de datos.

La tecla SCAN sólo puede ser accionada en combinación con uno de las teclas SENSOR, TARGET o COUPLED (escaneo automático) o para  $\Delta\beta = 0.0^\circ$  (modo de servicio: “tiempo de exposición”).

En el escaneo automático se recorre primero la posición instrumental del cero y luego el límite angular inferior. Después se conecta el voltaje del tubo. Tan pronto se aplica el voltaje y fluye una corriente de emisión, empieza el escaneo. Los puntos inicial y final son fijados con los límites angular inferior y superior mediante la tecla  $\beta$  LIMITS. En “tiempo de exposición” se conecta la alta tensión del tubo. Tan pronto se aplica el voltaje y fluye una corriente de emisión, el cronómetro comienza a correr en sentido antihorario para indicar el tiempo de exposición restante.

### **2.7.6. Lámpara de control de**

Se hace intermitente cuando la alta tensión del tubo está conectada.

La alta tensión del tubo puede ser conectada con las teclas SCAN o HV ON/OFF.

## 2.8. Panel de conexiones



Figura 2.14: Fotografía del panel de conexiones del equipo de rayos X 554 801 [9].

- Salida USB: La interfaz está aislada eléctricamente del aparato de rayos X. El equipo está conectado a una computadora a través del cable suministrado (cable USB).
- Entrada HV IN: Entrada de voltaje, unida con la salida de alto voltaje HV OUT en la barra de conexión de la cámara de experimentación.  
La entrada del voltaje permite realizar experimentos, por ejemplo, con un contador Geiger-Müller, que funciona con un contador externo.
- Salida SIGNAL OUT (señal de salida): Salida BNC, unida con la salida para la entrada BNC SIGNAL IN en la barra de conexión de la cámara de experimentación.  
La salida BNC permite realizar por ejemplo experimentos con sensores con conexión BNC.
- Salida ANGLE (ángulo): Salida analógica para conectar un registrador XY.  
Luego de oprimir el pulsador SCAN o REPLAY se entrega una tensión de  $0,5 V / 10$  grados proporcional al ángulo, para el brazo del blanco del goniómetro.
- Salida RATE (tasa): salida analógica para conectar un registrador XY.  
Después de oprimir el pulsador SCAN o REPLAY se entrega una tensión de  $0,5 V / 1000 / s$  proporcional a la tasa.

## 2.9. Pantalla fluorescente

La pantalla fluorescente (figura 2.1 f) es una luna de vidrio emplomado recubierta con un material fluorescente<sup>4</sup> e impermeable a la luz, apropiada para el recinto de experimentación, y que sirve como simple medio detector de rayos X, por ejemplo, en los experimentos de transmisión de rayos X a través de objetos de diferentes capacidades de absorción. La “observación directa” de los rayos X que inciden es posibilitada por la excitación de fenómenos luminiscentes. El diámetro es elegido de tal manera que la pantalla queda completamente iluminada cuando el colimador no está montado.

Para proteger la capa fluorescente de la luz exterior se debe colocar nuevamente la placa de protección suministrada después de terminar con el experimento

## 2.10. Canal vacío

El canal vacío (figura 2.1 g) une el recinto de experimentación con el exterior de la carcasa. Ha sido diseñado como un laberinto por razones de protección contra la radiación, de tal manera que el recinto de experimentación pueda ser accedido desde afuera, aún cuando las puertas corredizas de vidrio emplomado están cerradas y se produzcan rayos X.

La sección transversal rectangular del canal vacío (60 mm - 20 mm) permite, por ejemplo, el paso de una manguera para la realización de la practica influencia de un medio de contraste en la absorción de rayos X (capítulo 5) .

## 2.11. Bloqueo

Las puertas son cerradas con llave automáticamente y solo vueltas a abrir cuando ninguna radiación de rayos X pueda ser producida.

---

<sup>4</sup>La Fluorescencia es un fenómeno físico mediante el cual ciertas sustancias absorben energía (a partir de luz ultravioleta) emitiéndola nuevamente en forma de luz, esta vez del espectro del visible y de un color característico (una longitud de onda determinada).

## 2.12. Cuidado y mantenimiento del equipo

Siempre que se hace el uso del equipo es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones para hacer un buen uso del mismo.



Figura 2.15: Fotografía de la cubierta de protección contra el polvo del equipo de rayos X 554 801 [9].

- Para proteger la capa fluorescente de la pantalla frente a la luz exterior ponga la placa de protección.
- En periodos largos cubra el aparato de rayos X con la cubierta protectora contra el polvo suministrada.
- Use guantes de latex para evitar manchas y rayones de la capa de vidrio emplomado.
- Limpie todas las superficies de vidrio del aparato de rayos X sólo con un limpiador de vidrio suave (el vidrio emplomado es muy suave y se raya fácilmente.)
- No limpie las superficies laqueadas del aparato de rayos X con agentes de limpieza agresivos.
- Para proteger el End-window counter (contador Geiger-Müller) de radiación  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y rayos X, es importante colocarle la tapa después de cada experimentación.

- Al finalizar las practicas asegúrese de guardar todos los elementos usados, especialmente el cristal de NaCl, dado que debido a la humedad este se puede derretir.
- Se debe tener cuidado al manipular el cristal de NaCl tomándolo únicamente de los bordes y usando guantes para evitar que se deteriore.
- Al usar el sensor (Tubo contador Geiger-Müller) tenga en cuenta que se debe retirar la tapa protectora. Terminado el uso del sensor se debe volver a colocar la tapa de manera cuidadosa evitando girarla y que se bloquee el orificio de ventilación.

### 2.13. Instrucciones de seguridad de equipo de rayos X.

En el laboratorio de física moderna al igual que en todos los laboratorios se deben cumplir las Normas de Bio-seguridad que se encuentran establecidas en el aula, además para el uso del equipo de rayos X 554 800 se deben cumplir las normas e instrucciones de seguridad del equipo de rayos X.

El aparato de rayos X genera radiación ionizante que puede exceder una tasa de dosis local de  $10 Sv/h$  en el cono de radiación del tubo de rayos X. Esta tasa de dosis puede dañar el tejido vivo incluso durante tiempos de exposición cortos. La protección incorporada y las medidas de detección reducen la tasa de dosis local fuera del aparato de Rayos X a menos de  $1\mu Sv/h$ , un valor que está en el orden de magnitud de la radiación de fondo natural. La alta tasa de dosis que se produce dentro del dispositivo significa que el operador debe tener especial cuidado al operar el aparato de rayos X.

El aparato de rayos X cumple con los requisitos de seguridad para equipos eléctricos para medición, control y uso en laboratorio según DIN EN 61010<sup>5</sup> parte 1 y está construido para cumplir con los requisitos de la clase de protección I. Está diseñado para operar en cuartos secos que son adecuado para equipos o instalaciones de operación eléctrica, a una altura de  $0 - 2500 m.s.n.m.$  Cuando se usa según lo previsto, el aparato de rayos X es seguro para

<sup>5</sup>DIN EN 61010-1: requisitos de seguridad para equipos eléctricos para medición, control y uso en laboratorio - Parte 1: Requisitos generales (IEC 61010-1: 2001); Versión alemana EN 61010-1: 2001 [19]

operar.

Tenga en cuenta que:

- Debe mantener el aparato de rayos X protegido del acceso de personas no autorizadas.
- Antes de poner el dispositivo en funcionamiento por primera vez, verifique que el voltaje de entrada del equipo corresponda a 115 V.
- Antes de cada puesta en funcionamiento verifique la integridad de la carcasa (figura 2.1 k) y los elementos de mando y visualización (figura 2.19) del aparato de rayos X, en especial de las ventanas y puerta emplomadas, así como del tubo de vidrio emplomado que rodea al tubo de rayos X (figura 2.3 d5).
- Antes de poner en funcionamiento, asegúrese de que el cable del ánodo esté enchufado firmemente en el disipador térmico del ánodo. Si se observan fallas o defectos, no ponga en funcionamiento el aparato de rayos X. Notifique inmediatamente al laboratorista encargado.
- No debe colocar animales vivos dentro del aparato de rayos X.
- Se debe evitar que el ánodo del tubo de rayos X se sobrecaliente, para ello al poner en funcionamiento el aparato de rayos X verifique que el ventilador (figura 2.3 d2) del recinto del tubo (figura 2.3) esté girando.

## **2.14. Prueba del funcionamiento de los circuitos de seguridad**

De acuerdo con los requisitos de diseño de prueba (PTB 2005), la máquina de rayos X debe verificar antes de cada activación del voltaje que los circuitos de seguridad son funcionales. Esta comprobación se realizará automáticamente cuando las puertas estén cerradas y se presione el botón HV ON / OFF o SCAN ON / OFF. Durante esta comprobación, la máquina

de rayos X muestra el texto SAFE (SEGURO) ver figura 2.16 (a) y luego de finalizar exitosamente la prueba, se confirma OK ver figura 2.16 (B). Cuando una de las puertas está abierta, la autopruueba fallará y no se podrá activar el alto voltaje, la línea superior del campo de visualización parpadeará.



(a) SAFE(Seguro)

(b)

Figura 2.16: Revisión circuitos de seguridad [9].

## 2.15. Manual de software “Aparato de Rayos X”

El aparato de rayos X registra tasas de conteo ( $R_n$  con  $n=1, 2, \dots$  donde  $n$  representa el número de mediciones) las cuales hacen referencia al número de fotones detectados por el sensor (tubo contador Geiger-Müller) en un determinado tiempo, en función de los ajustes angulares del blanco y del sensor. Según el tipo de cristal utilizado (blanco), los ángulos corresponden a rayos X de diferentes longitudes de onda. El software permite la representación gráfica de estas tasas de impulsos en función del ángulo del blanco o de la longitud de onda ( $n\lambda$  introduciendo la distancia interplanar  $2d$  del cristal). Los valores medidos por el aparato de rayos X son introducidos directamente en una tabla, empezando con  $R_0$ . Cada nueva medición contiene una nueva columna de la tabla, de tal manera que siempre es posible realizar una comparación de varios espectros.

Si el valor de la constante de rejilla  $2d$  es conocido, entonces a partir de la relación de Bragg

el software calcula el nuevo eje horizontal  $n\lambda$  (con  $n$  como orden de difracción). Si el orden de difracción es conocido (para pequeños ángulos  $n = 1$ ) se pueden sacar conclusiones acerca de la radiación característica de los tubos de rayos X (para la línea de molibdeno  $K_\alpha$  es  $l = 71 \text{ pm}$ ).

*Nota: La evaluación posterior para la determinación de la constante de Planck  $h$  requieren del dato de la constante de rejilla  $2d$ , para así poder obtener una representación en función de la longitud de onda.*

El programa cuenta con botones rápidos que se encuentran en la línea superior, con los cuales se puede ejecutar directamente las funciones básicas del software. Estos botones también pueden ser pulsados mediante las teclas de funciones.

-  Borra, o bien, la serie de mediciones actual conservando los ajustes del cristal o si no se tiene medición alguna, borra los ajustes del cristal actuales. Puede ser llamada utilizando la tecla F4.
-  Carga una serie de medición con sus evaluaciones. Puede ser llamada utilizando la tecla F3.
-  Almacena las series de mediciones actuales con sus evaluaciones. Puede ser llamada utilizando la tecla F2.
-  Imprime la tabla actual o el diagrama actual.
-  Inicia y detiene un barrido del aparato de rayos X. Puede ser llamada utilizando la tecla F9.
-  Se utiliza para modificar los parámetros del aparato de rayos X, el ajuste actual del cristal. Puede ser llamada utilizando la tecla F5.
-  Representa el contenido de la línea de estado (línea inferior) en una ventana grande o la oculta. Puede ser llamada utilizando la tecla F6.
-  Muestra un dibujo de la geometría del aparato de rayos X (figura 2.17) mediante una representación vectorial. Puede ser llamada utilizando la tecla F7.

-  Ayuda. Puede ser llamada utilizando la tecla F1.
-  Da información acerca de la versión del software.

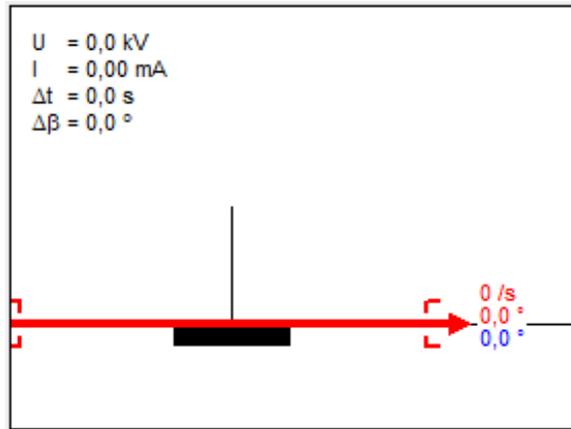


Figura 2.17: Geometría del aparato de rayos X mostrada en la plataforma del software “Aparato de rayos X” [9].

Para la evaluación de las mediciones, el software cuenta con las representaciones Bragg, Planck, Transmisión y Moseley, las cuales pueden ser activadas haciendo un clic sobre ellas. Al hacer clic con la tecla derecha del ratón en la plataforma del software se muestran otras opciones de evaluación que son las siguientes:

- **Propiedades:** en cada columna de la tabla  $R_n$  con  $(n = 0, 1, 2, \dots)$  se registra adicionalmente los parámetros de la medición (alta tensión, corriente de emisión, tiempo de medición por paso angular y ancho del paso angular). En este menú es posible indicar las propiedades, a través de la selección de la medición de tasas deseada, mediante la tecla derecha del ratón.
- **Borrar columna:** Una columna de la tabla puede ser borrada posteriormente. Sin embargo, siempre hay que tener en cuenta que el borrado de una medición de tasas también borra la transmisión respectiva calculada y viceversa.

- **Elegir tamaño de letra:** El tamaño de los caracteres de la tabla es ajustable. Para su elección se dispone de caracteres pequeños, de tamaños medios y grandes.
- **Visualizar coordenadas (Alt + C):** Después de activar esta función, la línea de estado muestra las coordenadas actuales del puntero del ratón cuando éste último se encuentra dentro de un diagrama. La visualización de coordenadas queda activa hasta que se vuelva nuevamente a elegir la función o hasta que se elija otra opción.  
Las coordenadas actuales pueden ser escritas en el diagrama utilizando Alt+T, sin cambiar la posición del ratón, de otro modo se asumirán coordenadas no deseadas.
- **Selección del ancho de línea:** El ancho de línea ayuda en la visualización del diagrama y dispone de líneas delgadas, medianas y gruesas
- **Insertar valores:** Al activar esta función las posiciones de cada uno de los valores medidos son marcadas con pequeños cuadrados.
- **Insertar líneas de unión:** Sirve para visualizar u ocultar las líneas de unión entre los puntos de la medición.
- **Seleccionar regla:** Sirve para visualizar u ocultar la regla de la izquierda-arriba o la de la izquierda-abajo del diagrama.
- **Insertar rejilla:** Esta función sirve para activar o desactivar la cuadrícula en el diagrama.
- **Representación logarítmica:** Un espectro Bragg también puede ser representado en forma logarítmica. En esta representación se pueden observar mejor los picos del espectro.
- **Zoom (Alt + Z):** Después de activar esta función se debe definir el área que va a ser aumentada con ayuda de la tecla izquierda del ratón.  
Un área que ha sido previamente aumentada puede ser aumentada nuevamente con esta misma función.

- **Desactivar zoom (Alt + O):** Desactiva el zoom del área seleccionada.
- **Pegar marcas:** Se dispone de cuatro funciones diferentes de marcaciones.  
Las marcaciones pueden ser editadas o desplazadas haciendo un doble clic con la tecla izquierda del ratón sobre la marcación respectiva; al pulsar cancelar en el recuadro que surge se borra la marca.
  - Alt+T: Texto. Con la función texto se puede rotular el diagrama con el texto deseado en cualquier lugar. Después de la entrada del texto hay que desplazarlo hacia la posición deseada y colocarlo con la tecla izquierda del ratón.
  - Alt+V: Línea vertical. Con esta función es posible insertar líneas verticales en cualquier posición dentro del diagrama. La posición será indicada en la línea de estado.
  - Alt+H: Línea horizontal. Con esta función es posible insertar líneas horizontales en cualquier posición dentro del diagrama. La posición será indicada en la línea de estado.
  - Alt+D: Medir diferencia. Después de hacer un clic sobre un punto de referencia se puede insertar cualquier línea en el diagrama. La diferencia de coordenadas entre el punto inicial y el punto final de la línea respectiva se escribirá en la línea de estado.
- **Calcular centro de pico:** La función muestra el centro del pico de una porción de curva que se fija con la tecla izquierda del ratón. El centro de pico calculado se indica en la línea de estado.  
El centro de pico también puede ser escrito en el diagrama como Texto. Para borrar una línea del centro de pico insertada en el diagrama basta con hacer un doble clic con el ratón.
- **Inscribir cotas en canto  $K$ :** Si las curvas de transmisión son representadas en función de la longitud de onda (en caso dado, después de definir el tipo de cristal), el cálculo del canto  $K$  ofrece la posibilidad de verificar la Ley de Moseley.

- **Recta promedio:** La función ajusta la porción de curva seleccionada (con la tecla izquierda del ratón) a una recta  $y = Ax + B$ . Los parámetros ( $A$  y  $B$ ) son indicados en la línea de estado después del ajuste.  
Para borrar una recta promedio insertada en el diagrama basta con hacer un doble clic sobre la misma recta con el ratón.
- **Recta por el origen:** Esta función realiza una recta que pasa por el origen ( $y = Ax$ ) de una porción de curva seleccionada con la tecla izquierda del ratón. El parámetro  $A$  del ajuste es indicado en la línea de estado después del ajuste.  
Para borrar una recta que pasa por el origen de coordenadas e insertada en el diagrama, basta con hacer un doble clic sobre la misma con el ratón.
- **Cálculo de la integral:** El valor de la integral resulta del área que encierra la porción de curva (área del pico marcado). El valor de la integral es indicado en la línea de estado. Esta evaluación desactiva la función Visualizar coordenadas borrándose el contenido de la línea de estado.  
El valor actual de la integral calculada puede ser insertado en el diagrama como texto.
- **Borrar última evaluación Alt + Retroceder:** Deshace la última evaluación efectuada.
- **Borrar todas las evaluaciones:** Sirve para borrar todas las evaluaciones.

### 2.15.1. Ajustes

Hablemos un poco mas acerca de esta herramienta puesto que tiene gran importancia a la hora de realizar nuestros experimentos.

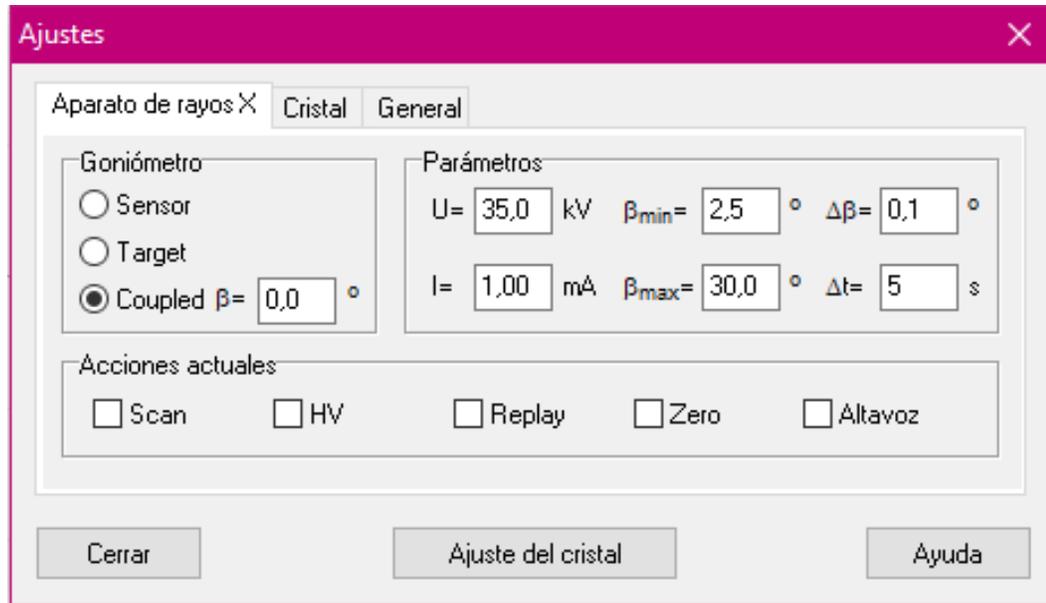


Figura 2.18: Ventaja Ajustes del aparato de rayos X [9].

En la ventana de entrada se puede modificar los parámetros de funcionamiento del aparato de rayos X (o también pueden hacerse directamente en el aparato de rayos X) e iniciar o detener las mediciones (figura 2.18).

Al pulsar en cristal se presenta un recuadro como se muestra en la figura 2.19, en donde para una representación Bragg si se quiere graficar la tasa de conteo  $R_n$  en función del ángulo del blanco  $\beta$  se debe elegir *inactivo* en la opción “Distancia entre planos  $2d$ ”, y cuando se quiere una gráfica en función de la longitud de onda ( $n\lambda$ ) es necesario introducir la distancia interplanar del cristal utilizado.

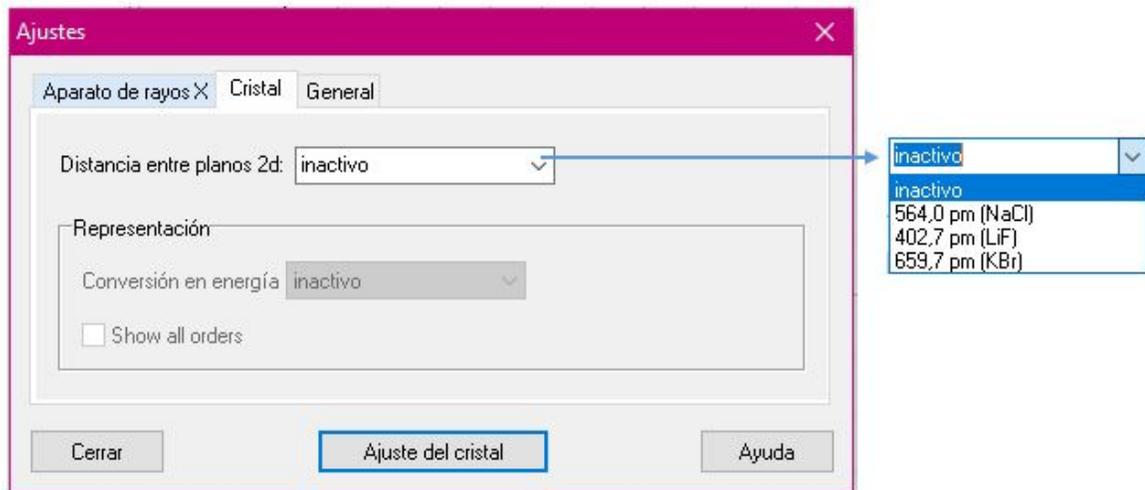


Figura 2.19: Ventana cristal [9].

El aparato de rayos X cuenta con un ajuste especial para el cristal (figura 2.20) donde se indica el material del blanco (cristal) y el doble de la distancia interplanar del mismo esto permite una buena toma de datos. La opción iniciar búsqueda permite hallar los puntos de mayor intensidad de la radiación; una vez terminada la operación, se aplica esta información para así empezar con la medición.

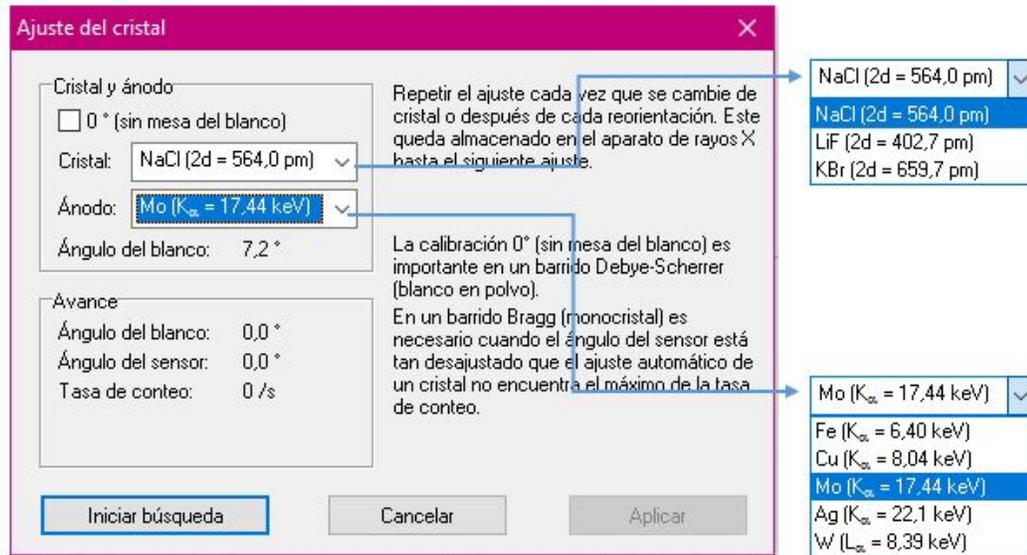


Figura 2.20: Ventana ajuste del cristal [9].

### 2.15.2. Información adicional

Los rayos X producidos por la máquina van en diferentes direcciones y son homogeneizadas por un colimador de tal manera que incidan directamente sobre el plano de un cristal de cloruro de sodio (solo podrán interactuar con el cristal los rayos X que tengan una longitud de onda y ángulo de incidencia que este en conformidad con la ley de Bragg ecuación (1.9)), a continuación el tubo contador Geiger Müller (GM) detecta los rayos X difractados por el cristal, el cual tiene una distancia interplanar  $d = 281.01 \text{ pm}$  y un parámetro de red ( $a$ ) igual al doble de ésta distancia, de tal manera que:  $2d = a = 564.02 \text{ pm}$  (dado que su estructura es una cubica centrada en las caras). En modo COUPLED (sección 2.7) el contador y el cristal se mueven en un acople 2 : 1, es decir el tubo avanza con un ángulo igual al doble con el que se mueve el cristal como se indica en la figura 2.21 (este movimiento se hace para obtener el espectro de rayos X del molibdeno, el cual se consigue haciendo incidir rayos X en un cristal que varía su posición de tal manera que los rayos siempre lo penetren en un ángulo diferente. Para captar estos rayos el sensor debe moverse el doble del paso angular del cristal, de tal

manera que el ángulo de incidencia sea igual al ángulo de difracción. La anterior información se amplía y explica en la sección B.3), tomando datos del número de fotones difractados (tasa de conteo) para cada ángulo de incidencia ( $\theta$ ). Estos datos son transmitidos a través de un cable USB a la computadora y registrados en tablas en el software “Aparatos de rayos X”. En la representación Bragg se gráfica la tasa de conteo ( $1/s$ ) en función de  $\theta$  ( $^\circ$ ) o  $n\lambda$  (pm) donde “ $n$ ” es el orden de difracción, lo que produce el espectro de rayos X característico del ánodo de molibdeno (Mo). La ley de Bragg (ecuación (1.9)) puede aplicarse de dos maneras usando un cristal con planos de espaciado conocido “ $d$ ”: la primera cuando tenemos la gráfica tasa de conteo en función de  $\theta$  donde manualmente calculamos la longitud de onda correspondiente a cada ángulo y la segunda en la gráfica tasa de conteo en función de  $n\lambda$  donde el software calcula automáticamente la longitud de onda para diferentes ordenes de difracción de los rayos X. El proceso anterior se conoce como espectroscopia de rayos X siendo el espectrómetro el conjunto colimador, cristal y contador GM.

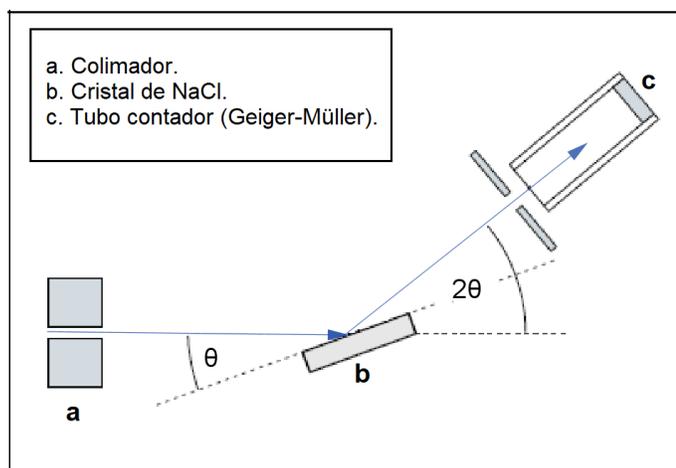


Figura 2.21: Diagrama esquemático de la difracción de rayos X en un cristal de NaCl y acoplamiento  $2\theta$  entre el ángulo del tubo contador y el ángulo de dispersión.

# Capítulo 3

## Calibración del equipo de rayos X 555-801

### Resumen

En esta práctica se realiza la calibración del equipo de rayos X mediante la verificación de la ley de Bragg, usando la difracción de rayos X en un monocristal de NaCl. De igual modo se determina la longitud de onda de la radiación X característica ( $K_\alpha$  y  $K_\beta$ ) del molibdeno.

### Abstract

In this practice the calibration of the X-ray equipment is performed by checking the Bragg's law, using X-ray diffraction in a single NaCl crystal. In the same way, the wavelength of the characteristic X-radiation ( $K_\alpha$  y  $K_\beta$ ) of the molybdenum is determined.

### 3.1. Introducción

La calibración es la medición exacta y la comparación de las entradas y salidas de un instrumento contra un patrón conocido. A través de una interpretación adecuada de los resultados de esa comparación, pueden ser identificados y corregidos errores en los instrumentos [21]. En nuestro caso el patrón es suministrado por el software “Aparato de rayos X”, éste consiste en un diagrama del espectro de difracción de la radiación X característica del molibdeno (Mo) para la reflexión de Bragg en un monocristal de NaCl.

En 1895 el físico alemán Wilhelm Roentgen, encontró que un haz de electrones a alta velocidad incidiendo en un metal producía un nuevo tipo de radiación extremadamente penetrante (rayos X). Las primeras estimaciones obtenidas a partir de la difracción de rayos X a través de una estrecha ranura mostraron que las longitudes de onda de estos rayos median aproximadamente  $10^{-10}$  m, que es del mismo orden de magnitud que la separación atómica en los cristales.

Un método particularmente sencillo para analizar la dispersión de rayos X a partir de los planos paralelos de cristal fue propuesto por W.L.Bragg en 1912. Considere dos planos consecutivos de átomos, como se muestra en la figura 3.1. Observe que los átomos adyacentes en un solo plano, A, se dispersarán constructivamente si el ángulo de incidencia,  $\theta_i$ , es igual al ángulo de reflexión,  $\theta_r$ . Átomos en planos consecutivos (A y B) se dispersarán constructivamente a un ángulo  $\theta$  si la diferencia de longitud en la trayectoria de los rayos (1) y (2) es un número entero n de longitudes de onda,  $n\lambda$ . A partir del diagrama, se puede observar que ocurre interferencia constructiva cuando [22]

$$AB + BC = n\lambda \quad ; n = 1, 2, 3\dots$$

Y como  $AB = BC = d \sin \theta$ , donde  $d$  es la separación entre planos, se concluye que

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad ; n = 1, 2, 3\dots, \quad (3.1)$$

donde  $n$  es el orden de difracción,  $\lambda$  es la longitud de onda del rayo X y  $\theta$  es el ángulo medido desde el plano A. Hay varios máximos diferentes para  $d$  y  $\lambda$  fijos, correspondientes a  $n = 1, 2, 3, \dots$  la ecuación (3.1) se conoce como la ecuación de Bragg, y fue utilizada con gran éxito por los Bragg para determinar las posiciones atómicas en los cristales [22].

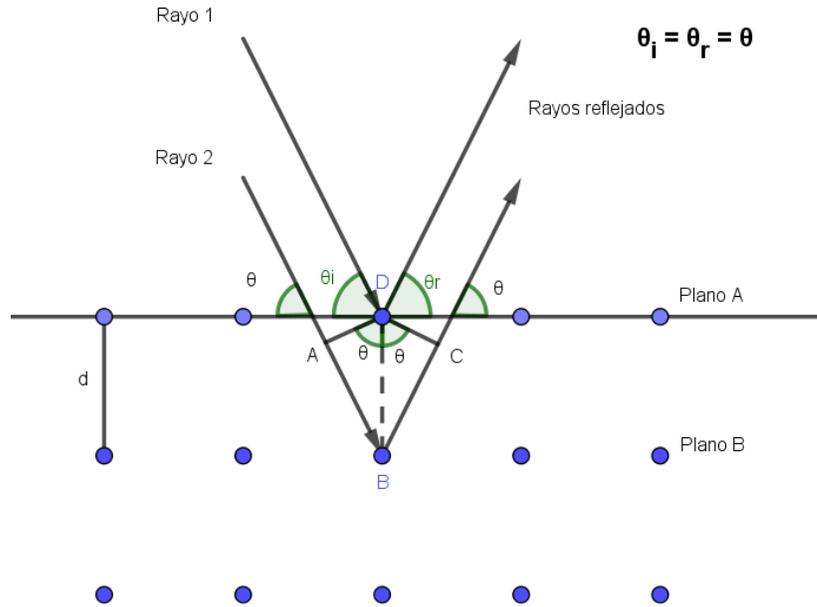


Figura 3.1: Dispersión de Bragg de rayos X por planos consecutivos de átomos [9].

La radiación de rayos X emitida por el molibdeno al ser bombardeado por electrones de alta velocidad consiste en el continuo bremsstrahlung<sup>1</sup> y varias líneas claramente definidas que corresponden a la radiación característica de rayos X del ánodo de Mo y que se originan en las transiciones  $K_\alpha$  y  $K_\beta$  de los átomos de molibdeno. Esta radiación característica es particularmente adecuada para investigar la ley de Bragg. Sus propiedades se conocen a partir de la literatura. La Tabla 3.1 muestra los ángulos de dispersión correspondientes a los que se esperan los máximos de difracción de la radiación característica para la dispersión en un monocristal de NaCl ( $d = 282.01 \text{ pm}^2$ ) hasta el tercer orden de difracción.

<sup>1</sup>Bremsstrahlung: termino alemán que significa radiación de frenado

<sup>2</sup> $\text{pm} \equiv 10^{-12} \text{ m}$

n	$\theta_{K\alpha}$ (°)	$\theta_{K\beta}$ (°)
1	7.24	6.42
2	14.60	12.93
3	22.21	19.61

Tabla 3.1: Ángulo de dispersión  $\theta$  de la radiación de rayos X característica del molibdeno para la difracción de un monocristal de NaCl hasta el tercer orden [23].

## 3.2. Materiales y equipos requeridos

- 1 aparato de rayos X
- 1 cristal de cloruro de sodio (NaCl)
- 1 End-window counter (tubo contador Geiger-Müller)
- 1 computadora con el software (“Aparatos de rayos X”) suministrado por la LD didactic
- 1 par de guantes

## 3.3. Notas de seguridad y preparación del experimento

### 3.3.1. Notas de seguridad<sup>3</sup>

- Antes de utilizar el aparato de rayos X
  - Fue necesario asegurarse de que la máquina no esté dañada, es decir, que los tornillos de la parte exterior de la máquina no fueran manipulados y no se observen rayones en las ventanas emplomadas; también se observó que el cable del ánodo esté insertado en el disipador de calor del tubo de rayos X.

<sup>3</sup>La ampliación y especificación de esta información se encuentra consignada en la sección 2.13.

- Se observó que tanto los tornillos del brazo del goniómetro como del portamuestras estuvieran bien ajustados.
- Una vez encendida la máquina:
  - Se tuvo en cuenta que no se presente sobrecalentamiento del ánodo en el tubo de rayos X.
  - Se verificó que los circuitos de seguridad estén funcionando de manera adecuada (sección 2.14).
  - Se revisó que el ventilador esté girando.
- Se tuvo cuidado al manipular el cristal de NaCl tomándolo únicamente de los bordes y utilizando guantes. Al finalizar la practica fue necesario guardarlo cuidadosamente en su respectivo empaque para evitar que se deteriore.

### 3.3.2. Preparación del experimento

Antes de comenzar con la práctica fue necesario conectar la máquina a una computadora a través de un cable USB, también se requirió que dentro de la cámara de experimentación, se encontraran el colimador, el porta muestras, un cristal de cloruro de sodio (objetivo) y el sensor (tubo contador Geiger-Müller), los cuales fueron montados y ajustados en sus respectivos lugares (figura 3.2). La distancia entre el colimador y el porta muestras ( $X_1$ ), se colocó de tal manera que midiera aproximadamente 5 *cm*; también se ajustó la distancia entre el porta muestras y el sensor ( $X_2$ ) aproximadamente a 6 *cm*. El cristal <sup>4</sup> fue montado horizontalmente sobre la plataforma del porta muestras y apretado con el brazo que lo sostiene (la importancia de que se prepare la cámara de experimentación de esta manera se aprecia en la sección 2.15.2).

---

<sup>4</sup>El Cristal de NaCl se usa para difractar los rayos X y obtener el espectro continuo para el ánodo de molibdeno

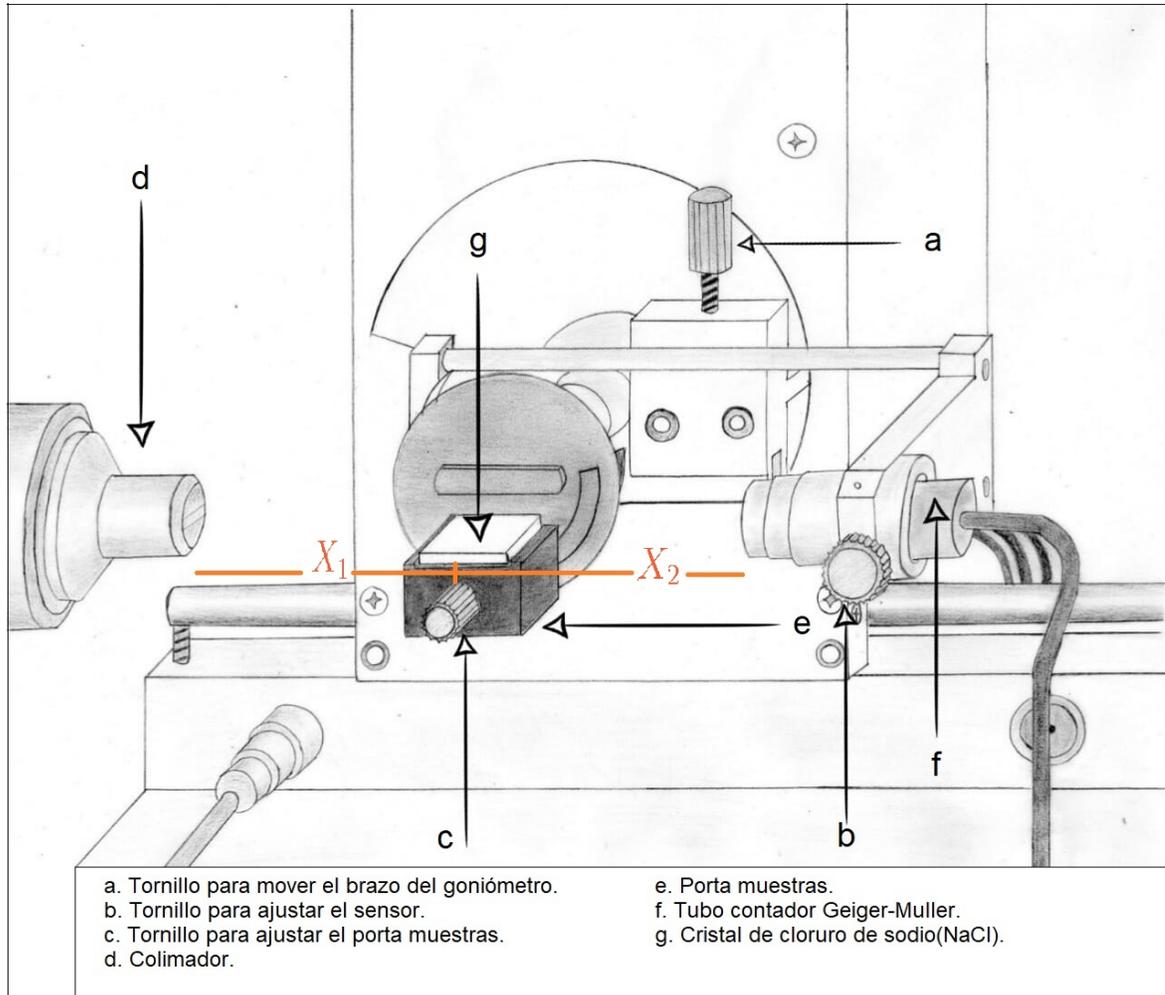


Figura 3.2: Montaje Experimental [9].

### 3.4. Procedimiento

Una vez encendida la máquina se prosiguió a ajustar los parámetros de la siguiente manera: la alta tensión del tubo  $U = 35.0 \text{ kV}$ , la corriente de emisión  $I = 1.00 \text{ mA}$ , el tiempo de medición por paso angular  $\Delta t = 20 \text{ s}$  y el ancho del paso angular  $\Delta\beta = 0.1^\circ$ . Para

habilitar el acoplamiento angular 2 : 1<sup>5</sup> del sensor respecto al objetivo se presionó la tecla COUPLED (el funcionamiento de esta tecla se explica en la sección 2.7.4) en el dispositivo, consiguiente a esto se ajustó los parámetros: límite inferior del ángulo objetivo  $\beta_{min} = 2.5^\circ$  y el límite superior  $\beta_{max} = 25^\circ$  (las especificaciones y uso de estos parámetros se encuentra en la sección [?]).

Se inició el programa “Aparatos de rayos X” en la computadora y se cargó una medición ejemplo en donde se gráfica la tasa de conteo en función del ángulo de Bragg, para que sirva de comparación con la nueva gráfica a realizar. Se ingresó en la opción ajustes, una vez allí se pudo visualizar los parámetros ajustados y luego se accedió a la opción cristal para seleccionar inactivo en la distancia entre planos  $2d$ . En la opción ajuste del cristal se seleccionó el cristal (NaCl) y el ánodo (Mo) con los que se estaba trabajando; se usó la opción iniciar búsqueda, y una vez terminada esta, se seleccionó aplicar. Realizados estos pasos se prosiguió con la medición en la representación Bragg.

Terminada la medición se llevamos a cabo la evaluación de la gráfica obtenida y la de muestra (figura 3.3), haciendo uso de la función de evaluación “calcular centro de pico”, y con esta se calculamos el ángulo donde se encontraban las líneas características  $K_\alpha$  y  $K_\beta$  para el ánodo de molibdeno en las dos gráficas. Una vez obtenidos estos datos se prosiguió a verificar la ley de Bragg. Los datos anteriores los consignamos en las tablas 3.2 y 3.3.

*Nota: El gráfico obtenido a través del software, fue copiada mediante la función de evaluación “copiar diagrama”, seleccionando la opción “Metafile”, y editada en Paint.*

## 3.5. Resultados y análisis

### 3.5.1. Gráficas

A continuación se muestra la medición ejemplo (color negro) superpuesta a la gráfica obtenida experimentalmente (color rojo).

---

<sup>5</sup>El acoplamiento angular 2:1 hace referencia a que el paso angular del sensor es el doble respecto al del portamuestras

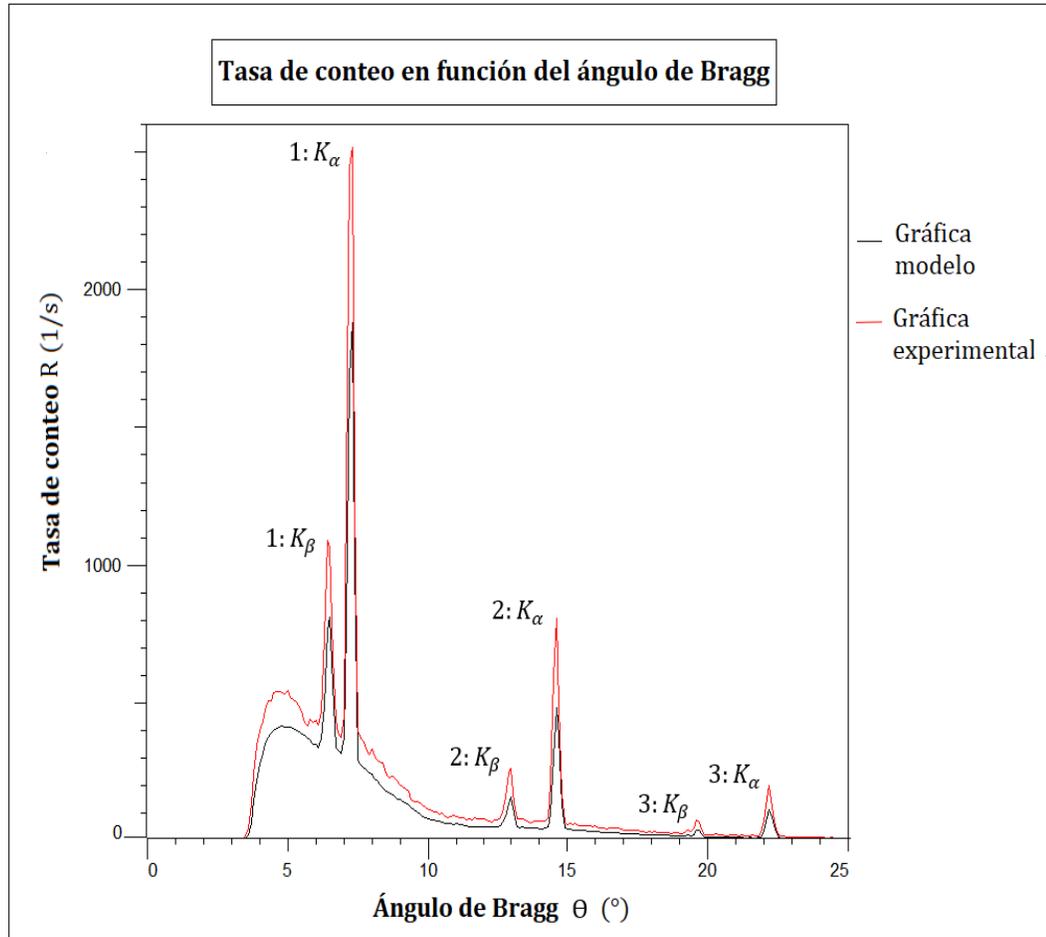


Figura 3.3: Gráficas de la tasa de conteo  $R$  en función del ángulo de Bragg  $\theta$  para los tres primeros ordenes de difracción ( $n = 1, 2, 3$ ).

De la anterior figura observamos que la radiación característica de los rayos X producida por las transiciones  $K_\alpha$  y  $K_\beta$  de los átomos de molibdeno en las gráficas experimental y modelo coinciden en el ángulo de dispersión para los tres órdenes de difracción, pese a que las tasas de conteo sean diferentes. Esto se debe a que en la gráfica modelo no se conocen los parámetros como la tensión del tubo y la corriente de emisión, las cuales influyen sobre esta tasa.

### 3.5.2. Tablas

A continuación se presentan las tablas que contienen los datos obtenidos experimentalmente ( ángulo de dispersión  $\theta$ ) y los obtenidos a través de la ecuación (3.1) referente a la ley de Bragg (longitud de onda  $\lambda$ ), en donde tanto para la gráfica modelo como para la experimental se obtuvieron los mismos resultados.

n	$\theta(^{\circ})$	$\lambda (pm)$
1	7.25	71.18
2	14.60	71.09
3	22.20	71.04

Tabla 3.2: Ángulos medidos para los tres primeros ordenes de difracción ( $n = 1, 2, 3$ ) donde se encuentra la línea característica  $K_{\alpha}$  para el molibdeno y el valor calculado de longitud de onda.

n	$\theta(^{\circ})$	$\lambda (pm)$
1	6.45	63.36
2	12.95	63.20
3	19.64	63.19

Tabla 3.3: Ángulos medidos para los tres primeros ordenes de difracción ( $n = 1, 2, 3$ ) donde se encuentra la línea característica  $k_{\beta}$  para el molibdeno y el valor calculado de longitud de onda.

De las anteriores tablas (3.2 y 3.3) se tiene que:

- La longitud de onda promedio para la línea  $k_{\alpha}$  es  $\lambda = 71.10 \pm 0.04 pm$  y tiene un error relativo porcentual de 0.02% con respecto al valor encontrado en la literatura correspondiente a  $\lambda = 71.08 pm$  [23].
- La longitud de onda promedio para la línea  $k_{\beta}$  es  $\lambda = 63.25 \pm 0.06 pm$  y tiene un error relativo porcentual de 0.2% con respecto al valor encontrado en la literatura correspondiente a  $\lambda = 63.09 pm$  [23].

## 3.6. Conclusiones

- Dado que la comparación del ángulo de dispersión en la gráfica modelo y la obtenida experimentalmente arrojaron los mismos resultados así como también los errores porcentuales en las longitudes de onda para las líneas  $K_{\alpha}$  y  $K_{\beta}$  fueron muy pequeños (verificando así la ley de Bragg ) se puede concluir que el equipo está calibrado.

- Con la gráfica mostrada en la figura 3.3 se puede calcular la longitud de onda correspondiente a las líneas del espectro característico para primer, segundo y tercer orden de difracción mediante la utilización de la ley de Bragg, para esto se debe conocer la distancia interplanar del cristal de NaCl ( $d = 281.01 \text{ pm}$ ) y tener datos de los ángulos donde se producen dichas líneas.
- La diferencia en la tasa de conteo en las líneas características de las gráficas modelo y la obtenida experimentalmente no influyen en la calibración del equipo pues esta depende de la corriente de emisión y el voltaje del tubo (esta información se amplía en el capítulo 7).

# Capítulo 4

## Fluorescencia de una pantalla luminosa debido a los rayos X

### Resumen

En esta práctica se pretende investigar la dependencia del brillo y el contraste de la pantalla luminosa con respecto a la variación de la corriente de emisión y el voltaje del tubo, mediante la observación de la fluorescencia de una pantalla luminosa, la cual muestra la estructura interna de un objeto al estar expuesto a rayos X.

### Abstract

This practice is intended to investigate the dependence of brightness and contrast of the luminous screen with respect to the variation of the emission current and high voltage of the tube, by observing the fluorescence of a luminous screen, which shows the internal structure of an object when it is exposed to X-rays.

### 4.1. Introducción

Cuando Röntgen experimentó por primera vez con rayos X observó una luminiscencia de color verde brillante en un papel pintado con una sustancia fluorescente (platino-cianuro de

bario), la cual se convertiría en la primera pantalla luminosa, usada para la evaluación y exploración del cuerpo humano. Hoy en día se usa casi exclusivamente el sulfuro de cadmio y zinc que emiten fluorescencia de color amarillo-verde.

La fluorescencia es la emisión de radiación electromagnética, generalmente luz visible, causada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, (radiación X fluorescente o secundaria). Debido a que el proceso ocurre tan rápido ( $< 10^{-5}$  s), la fluorescencia cesa tan pronto como se elimina la fuente de excitación, a diferencia de la fosforescencia, que persiste como un resplandor.

Los rayos X se atenúan a medida que pasan a través de la materia. La reducción puede ser causada por la absorción o dispersión de los fotones del haz, a su vez estos pueden verse alterados por diferentes factores, como la energía del haz en la variación de la corriente de emisión y la alta tensión del tubo de rayos X (que afectan el brillo y el contraste de la imagen respectivamente) y el número atómico del absorbente. Es por eso que las imágenes en la pantalla luminosa revelan detalles de la estructura interna de los objetos.

## **4.2. Material y equipos requeridos**

- 1 aparato de rayos X con pantalla fluorescente
- 1 objeto para la transiluminación, mouse portátil con carcasa de plástico
- 1 cámara digital

## 4.3. Notas de seguridad y preparación del experimento

### 4.3.1. Notas de seguridad<sup>1</sup>

- Antes de utilizar el aparato de rayos X fue necesario asegurarse de que la máquina no esté dañada, es decir que los tornillos de la parte exterior de la maquina no fueran manipulados y no se observen rayones en las ventanas emplomadas; también se observó que el cable del ánodo esté insertado en el disipador de calor del tubo de rayos X.
- Una vez encendida la máquina:
  - Se tuvo en cuenta que no se presente sobrecalentamiento del ánodo en el tubo de rayos X.
  - Se verificó que los circuitos de seguridad estén funcionando de manera adecuada (sección 2.14).
  - Se revisó que el ventilador esté girando.

### 4.3.2. Preparación del experimento

Antes de comenzar con la práctica se retiró el colimador de la cámara de experimentación, así como el goniómetro, el porta muestras, y la cubierta protectora de la pantalla luminosa (figura 4.1). Adicional a esto se posicionó y ajustó la cámara digital de tal manera que enfoque la pantalla y tenga un tiempo de exposición de 2 s. El objeto para ser transiluminado (mouse) se colocó dentro del equipo de rayos X tras la pantalla (a la menor distancia posible) y sobre un soporte de 3 cm de altura. Para desarrollar la experiencia fue necesario realizarlo en una habitación oscura.

---

<sup>1</sup>La ampliación y especificación de esta información se encuentra consignada en la sección 2.13.

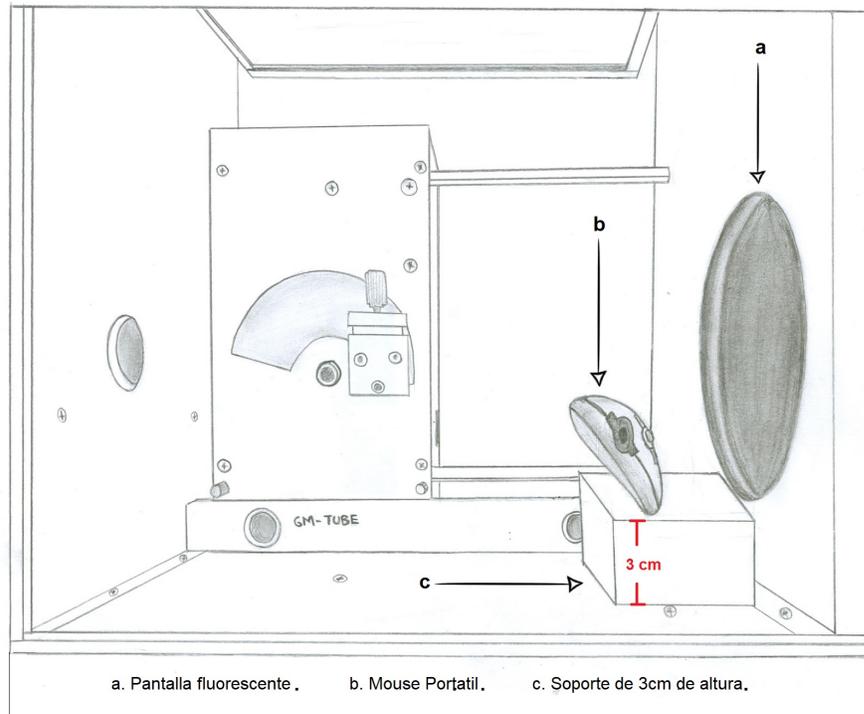


Figura 4.1: Cámara de experimentación [9].

#### 4.4. Procedimiento

En primera instancia se prendió la máquina de rayos X y se varió los parámetros voltaje ( $U$ ) y corriente de emisión ( $I$ ) a  $35.0 \text{ kV}$  y  $1.00 \text{ mA}$  respectivamente (dado que no se retiró el soporte del sensor fue necesario colocar  $\Delta\beta = 0.0^\circ$ ), seguido a esto se tomó una fotografía de lo observado en la pantalla fluorescente. Se prosiguió a variar la corriente de  $1.00 \text{ mA}$  a  $0.70 \text{ mA}$  y por último a  $0.40 \text{ mA}$ , manteniendo la alta tensión constante ( $U = 35.0 \text{ kV}$ ), una vez realizado esto se procedió a variar la alta tensión de  $35.0 \text{ kV}$  a  $30.0 \text{ kV}$  y por último a  $25.0 \text{ kV}$ , manteniendo la corriente de emisión constante ( $I = 1.00 \text{ mA}$ ). Para cada una de las anteriores variaciones se hizo un registro fotográfico. Se tuvo que tener en cuenta que para hacer las variaciones de  $U$  e  $I$  primero se debe apagar el tubo de rayos X, hacer el cambio del

parámetro y volver a encenderlo, con el fin de evitar daños en el tubo.

## 4.5. Resultados y análisis

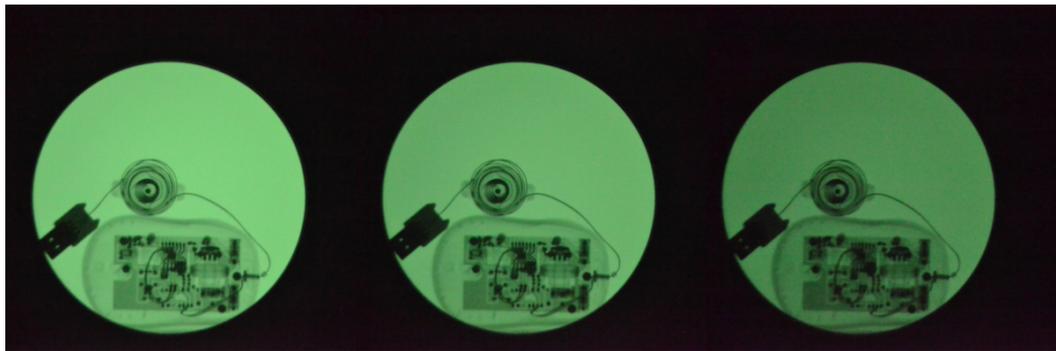


Figura 4.2: Imágenes de un mouse portátil en una pantalla luminosa (fotografiadas por el estudiante de física Daniel Felipe Ruiz, con una cámara digital kanon a 1.6s de exposición) con un voltaje máximo de 35.0 kV y diferentes corrientes de emisión:  $I = 1.00 \text{ mA}$ ,  $I = 0.70 \text{ mA}$  e  $I = 0.40 \text{ mA}$  respectivamente.

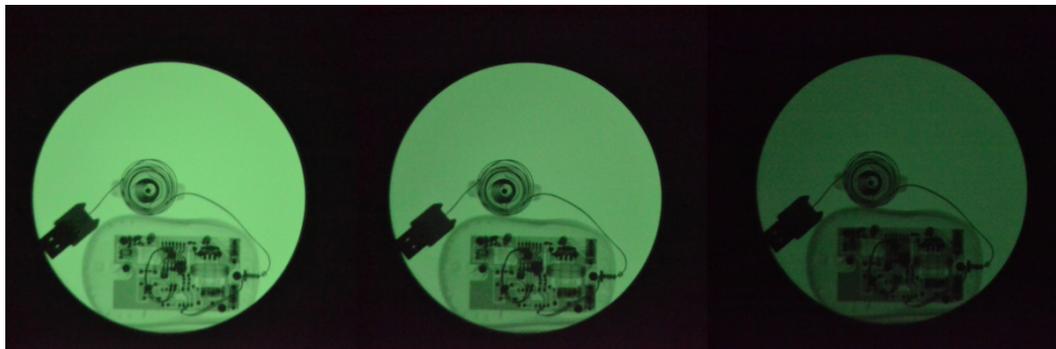


Figura 4.3: Imágenes de un mouse portátil en una pantalla luminosa (fotografiadas por el estudiante de física Daniel Felipe Ruiz, con una cámara digital kanon a 1.6s de exposición) con una corriente de emisión máxima de 1.00 mA y diferentes altos voltajes:  $U = 35.0 \text{ kV}$ ,  $U = 30.0 \text{ kV}$  y  $U = 25.0 \text{ kV}$  respectivamente.

- En la figuras 4.2 y 4.3 se pueden observar los elementos internos del mouse, que a simple vista no son posibles de mirar. Lo anterior es posible gracias a la pantalla fluorescente quien se encarga de convertir los rayos X atenuados en luz visible. La atenuación se debe a la capacidad de absorción de rayos X de cada elemento, que a su vez depende principalmente del número atómico del material y la longitud de onda de los rayos incidentes, así como también del grosor de este.
- En la figura4.2 se puede observar que las imágenes (de izquierda a derecha) cada vez son más opacas, esto se debe a que al disminuir la corriente de emisión se disminuye el número de electrones que bombardean el ánodo, que a su vez, disminuye el flujo de rayos X, afectando el brillo<sup>2</sup> de la imagen.
- En la figura4.3 se puede observar que las imágenes (de izquierda a derecha) cada vez son más oscuras y borrosas, esto se debe a que al disminuir el alto voltaje del tubo se disminuye la energía de los electrones, produciendo rayos X menos energéticos, los cuales son absorbidos de manera más uniforme por el objeto transiluminado y esto hace que se afecte el contraste<sup>3</sup> de la imagen y se dañe la calidad de la misma.

## **4.6. Conclusiones**

Los rayos X permiten observar mediante una pantalla fluorescente la imagen de la estructura interna de cuerpos que están compuestos de diferentes materiales, o sus elementos están lo suficientemente espaciados. La calidad de la imagen depende del brillo y el contraste, que a su vez, se modifican por la corriente de emisión y el alto voltaje del tubo de rayos X respectivamente.

---

<sup>2</sup>El brillo es la cantidad de flujo de luz que emite un determinado cuerpo[24].

<sup>3</sup>El contraste permite ajustar la diferencia entre los colores más oscuros y lo más claros[25].

# Capítulo 5

## Influencia de un medio de contraste en la absorción de rayos X

### Resumen

En esta práctica se pretende investigar como un medio de contraste afecta la absorción de rayos X, haciendo uso de un modelo de vaso sanguíneo, el cual inicialmente se lo llena con agua (lo más pura posible), sin observar cambios en la imagen formada en la pantalla fluorescente. El agua luego se remplaza por un fluido fuertemente absorbente (yoduro de potasio), observando áreas oscuras en la parte interna del material que contiene la solución.

### Abstract

This practice aims to investigate how a contrast medium affects the absorption of X-rays, making use of a blood vessel model, which is initially filled with water (as pure as possible), without observing changes in the image formed in the fluorescent screen. The water is then replaced by a strongly absorbent fluid (potassium iodide), observing dark areas on the inside of the material containing the solution.

## **5.1. Introducción**

Con el descubrimiento de los Rayos X por Wilhelm Conrad Röntgen a finales del siglo XIX, fue posible por primera vez hacer visible debido a la atenuación, las estructuras densas internas del organismo, entre ellas, la parte del esqueleto óseo y las variaciones anormales de densidad como los cálculos en los riñones y en las vías biliares. Por otro lado, los órganos formados por tejidos blandos eran apreciados con dificultad y su imagen radiográfica no se diferenciaba del entorno.

Al aplicar los rayos X en el tórax del cuerpo humano, los huesos, los pulmones llenos de aire, el corazón y otros tejidos, se observa un contraste natural adecuado. Mientras que en otras regiones, por ejemplo en el abdomen, la composición de los órganos es tan similar que las diferencias de absorción son muy pequeñas, y solo se pueden visualizar mediante medidas adicionales. Este problema fue el punto de partida para la creación de medios de contraste (MC) que comenzó poco tiempo después del descubrimiento de los rayos X.

Los medios de contraste radiológicos son sustancias que se emplean con fines diagnósticos debido a su capacidad para absorber los rayos X en mayor o menor grado que los tejidos blandos. Esto permite obtener una representación visual de determinadas estructuras y órganos, así como de cavidades y de procesos funcionales del organismo. Son apropiados como MC algunos elementos que absorben con mayor intensidad la irradiación aplicada a los tejidos corporales. Esto depende básicamente del coeficiente de absorción del elemento utilizado. Son especialmente apropiados los elementos de número atómico intermedio entre  $Z = 50$  y  $Z = 60$  tales como el yodo:  $Z = 53$ , Bario:  $Z = 56$ , Lantano:  $Z = 57$ , etc. Siempre que se puedan usar en una forma que no sea tóxica para los organismos vivos [28].

## **5.2. Material y equipos requeridos**

- 1 aparato de rayos X
- 1 modelo de vaso sanguíneo para medio de contraste

- Yoduro de potasio KI (100 g)
- 2 beaker de 400 ml
- 1 varilla de vidrio
- 2 jeringas de 150 ml
- 1 par de guantes
- Bata de laboratorio
- Gafas de laboratorio
- Agua (250 ml)
- 1 cámara digital

## 5.3. Notas de seguridad y preparación del experimento

### 5.3.1. Notas de seguridad<sup>1</sup>

- Antes de utilizar el aparato de rayos X fue necesario asegurarse de que la máquina no esté dañada, es decir que los tornillos de la parte exterior de la maquina no fueran manipulados y no se observen rayones en las ventanas emplomadas; también se observó que el cable del ánodo esté insertado en el disipador de calor del tubo de rayos X.
- Una vez encendida la máquina:
  - Se tuvo en cuenta que no se presente sobrecalentamiento del ánodo en el tubo de rayos X.
  - Se verificó que los circuitos de seguridad estén funcionando de manera adecuada (sección 2.14).

---

<sup>1</sup>La ampliación y especificación de esta información se encuentra consignada en la sección 2.13.

- Se revisó que el ventilador esté girando.
- Se tuvo en cuenta que el **yoduro de potasio**<sup>2</sup> puede causar tos y dificultad para respirar si es inhalado, irritación en el tracto gastrointestinal si es ingerido en grandes dosis, irritación con enrojecimiento y dolor si tiene contacto con la piel o los ojos. Para evitar los riesgos mencionados debe usarse implementos de seguridad tales como guantes, gafas y bata de laboratorio.

### 5.3.2. Preparación del experimento

Antes de comenzar con la práctica se retiró el colimador de la cámara de experimentación, así como el goniómetro, el porta muestras, y la cubierta protectora de la pantalla luminosa. Adicionalmente se ubico y ajustó una cámara digital de tal manera que enfoque la pantalla y tenga un tiempo de exposición de 2 s. Para realizar la experiencia fue necesario hacer un modelo de vaso sanguíneo que permitiera introducir y extraer un líquido. Consta de una base de madera que tiene como medidas: largo= 15.7 cm, ancho= 4.0 cm y alto= 20.5 cm; mangueras plásticas con diámetro de 3 mm, las cuales se colocaron en una área circular de 15 cm de diámetro; un recubrimiento plástico y jeringas de 50 ml. Se introdujo esta estructura en la cámara de experimentación del equipo de rayos X, de tal manera que las mangueras salieran por el canal vacío (figura 5.1) para facilitar su uso, adicional a esto se requirió la ayuda de dos beakers de 400 ml. También fue necesario preparar una solución formada por 30 g de agua y 15 g de yoduro de potasio puesto que la solubilidad del yoduro de potasio es de 72 g por 50 g de agua. Así que para evitar que se cristalice, se usó una solución al 50 %. Fue necesario hacer este experimento en una habitación oscura.

---

<sup>2</sup>El yoduro de potasio **no** se puede usar como medio de contraste para un sistema vivo. Este experimento es solo un ejemplo de lo que pasa con un medio de contraste adecuado en procedimientos médicos.

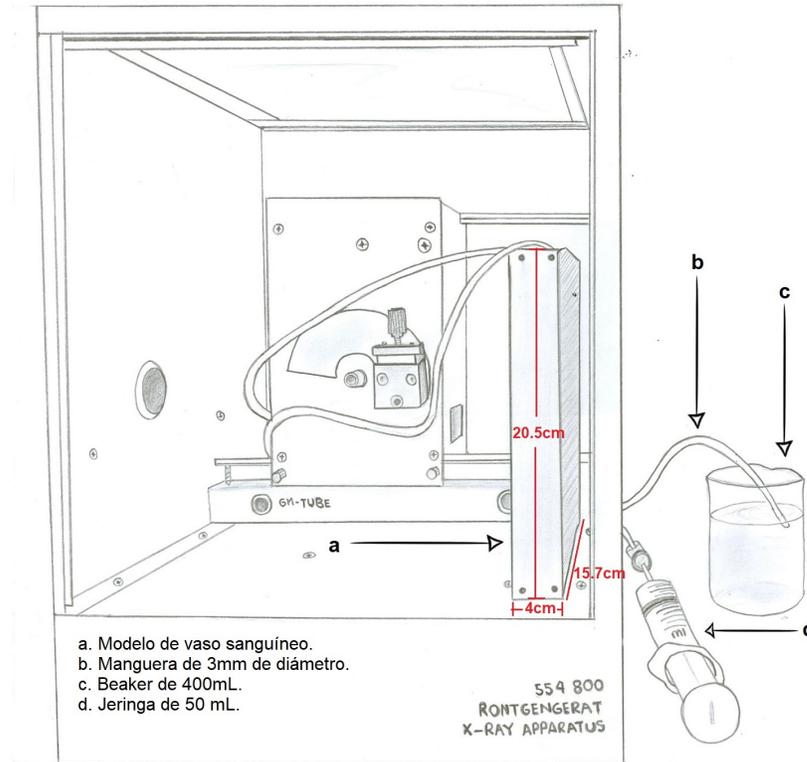


Figura 5.1: Cámara de experimentación [9].

## 5.4. Procedimiento

En primer lugar se prendió la máquina de rayos X y se varió los parámetros voltaje del tubo ( $U$ ) y corriente de emisión ( $I$ ) a  $35\text{ kV}$  y  $1.00\text{ mA}$  respectivamente (dado que no se retiró el soporte del sensor fue necesario colocar  $\Delta\beta = 0.0^\circ$ ). Se prosiguió a llenar agua en el modelo de vaso sanguíneo con ayuda de una jeringa y hacer un registro fotográfico de lo observado. Una vez extraída el agua del modelo (usando la jeringa) se le introdujo la solución de yoduro de potasio y se realizó su correspondiente registro fotográfico.

*Notas:*

- Se tuvo en cuenta que en el proceso de extracción del líquido no quedaran gotas en las paredes de la manguera, y en la introducción de la solución no se presentaran burbujas.
- No se logró encontrar una manguera lo suficientemente delgada y que fuera incapaz de absorber radiación X, de tal manera que esta sea imperceptible en la pantalla fluorescente.

*Nota: Se tuvo en cuenta que en el proceso de extracción del líquido no quedaran gotas en las paredes de la manguera, y en la introducción de la solución no se presentaran burbujas.*

*Nota: No se logró encontrar una manguera lo suficientemente delgada y que fuera incapaz de absorber radiación X de tal manera que esta sea imperceptible en la pantalla fluorescente.*

## 5.5. Resultados y análisis

A continuación se presentan los registros fotográficos del modelo de vaso sanguíneo haciendo variaciones del medio que pasa través del circuito.

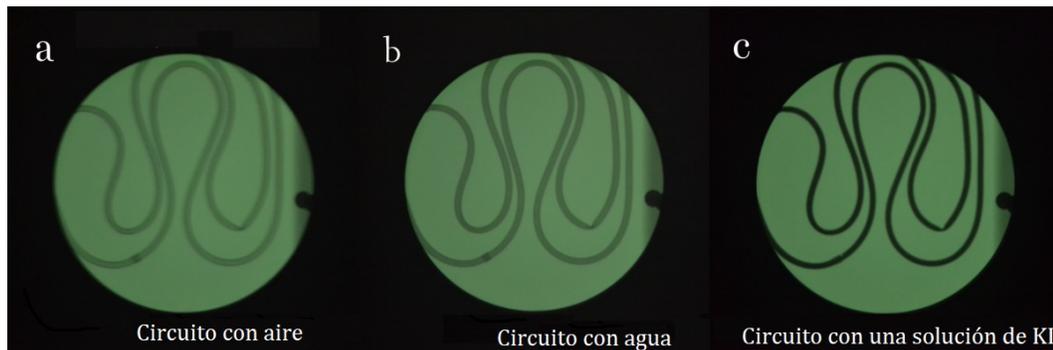


Figura 5.2: Imágenes del modelo de vaso sanguíneo (fotografiadas por el estudiante de física Daniel Felipe Ruiz, con una cámara digital kanon con 2.0 s de exposición) con circuito lleno de aire, en presencia de agua y con solución de yoduro de potasio respectivamente, observadas en una pantalla luminosa.

- En la figura 5.2a se logra observar el recorrido del circuito, debido a que la manguera que lo conforma es bastante gruesa y aunque está compuesta de materiales pobremente

absorbentes (plástico y silicona entre otros), esto no la hace imperceptible en la pantalla fluorescente. La absorción de rayos X depende del grosor y el tipo de material que conforma el objeto (la ampliación de esta información se encuentra en el capítulo 4).

- En la figura 5.2b el contraste de la imagen observada en la pantalla ha aumentado un poco debido a la presencia de agua y sus impurezas.
- En la figura de 5.2c el contraste de la imagen ha aumentado considerablemente (se observa un alto contraste del circuito) gracias a la presencia de la solución de yoduro de potasio, esto es debido a la alta absorción del yodo, el cual tiene un número atómico  $Z = 53$ .

De acuerdo con lo observado anteriormente se puede hacer una comparación con la manera de uso de un medio de contraste en seres vivos, en donde debido a la composición de los cuerpos, la absorción de rayos X es considerablemente diferente, por ejemplo a primera vista en una imagen tomada a un ser vivo vertebrado, solo los huesos son claramente visibles porque absorben gran cantidad de rayos X, mientras que, la distinción de los órganos individuales es mucho más difícil porque generalmente tienen una absorción de rayos X muy similar a la del tejido circundante. Es por esto que en muchos casos al hacer un diagnóstico médico se suele inyectar en el paciente un compuesto fuertemente absorbente y de fácil excreción (compuestos a base de yodo) en el torrente sanguíneo que permita distinguir en el cuerpo una región específica. El modelo de vaso sanguíneo mostrado en la figura 5.1 permite entender mejor esta situación mostrando como cambia el contraste de la imagen en la pantalla fluorescente en presencia de diferentes medios. *Nota: El punto negro en la figura 5.2 es una chinche utilizada para unir la cubierta de plástico con el soporte de madera.*

## 5.6. Conclusiones

- El uso de un material fuertemente absorbente permite mejorar el contraste en una imagen, haciendo más notorio el lugar donde éste se encuentra.

- Los medios de contraste son una excelente herramienta para los profesionales de la salud a la hora de realizar un diagnóstico, dado que permiten observar una representación visual de determinadas estructuras y órganos, así como también de cavidades y de procesos funcionales.
- El agua y el plástico son materiales que no funcionan como medios de contraste al estar compuestos de elementos con baja absorción de rayos X.
- Al tener un número atómico alto ( $Z = 53$ ), el yodo absorbe gran cantidad de radiación X, razón por la cual es muy utilizado como medio de contraste para fines diagnósticos.

# Capítulo 6

## Relación Duane-Hunt y determinación de la constante de Planck

### Resumen

En esta práctica se determina la longitud de onda mínima  $\lambda_{min}$  del continuo bremsstrahlung como función del voltaje del tubo de rayos X ( $U$ ), para confirmar la relación Duane-Hunt y determinar la constante de Planck.

### Abstract

In this practice is determine the minimum wavelength,  $\lambda_{min}$  of the continuous bremsstrahlung as a function of the voltage of the X-ray tube ( $U$ ), to confirm the Duane-Hunt relation and to determine the Planck constant.

### 6.1. Introducción

El espectro continuo de la radiación en un tubo de rayos X (Bremsstrahlung) está caracterizado por una longitud de onda mínima ( $\lambda_{min}$ ), la cual disminuye conforme el voltaje ( $U$ ) en el tubo se incrementa. La existencia de esta longitud de onda mínima fue predicha por Einstein en 1906, y la evidencia experimental fue obtenida por William Duane y Franklin

Hunt, quienes descubrieron la siguiente relación inversa entre  $\lambda_{min}$  y  $U$  [32]:

$$\lambda_{min} = A \left( \frac{1}{U} \right), \quad (6.1)$$

donde  $A$  es una constante de proporcionalidad.

La longitud de onda límite ( $\lambda_{min}$ ), delimita el inicio de la formación del espectro continuo como se indica en la figura 6.1. Dicho límite no depende de la naturaleza del elemento utilizado como ánodo, sino solamente del voltaje aplicado al mismo [33].

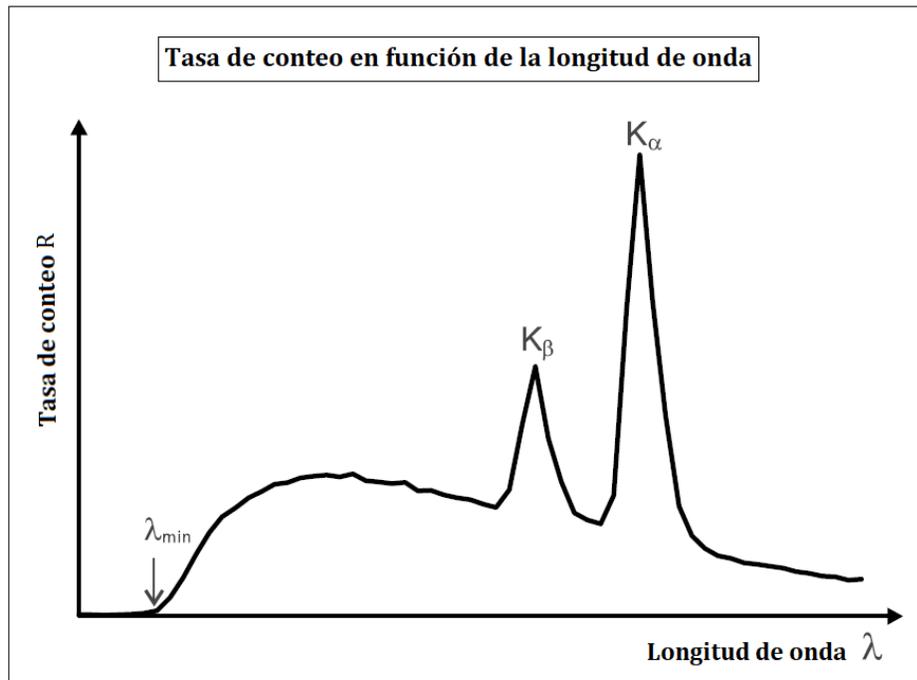


Figura 6.1: Espectro de emisión de un tubo de rayos X junto con la longitud de onda límite  $\lambda_{min}$  del continuo de bremsstrahlung y las líneas características  $K_{\alpha}$  y  $K_{\beta}$  [34].

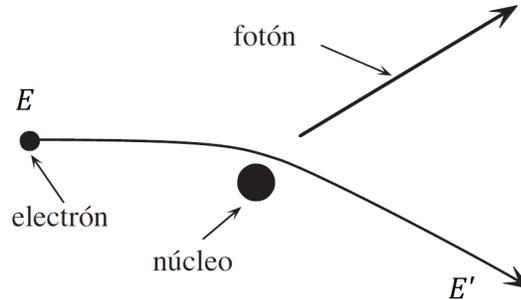


Figura 6.2: Emisión de rayos X por Bremsstrahlung .

En la emisión de rayos X por Bremsstrahlung (figura 6.2) un electrón con energía cinética inicial  $E$  se frena al interactuar con el núcleo de un átomo del ánodo. A medida que el electrón incidente frena y pierde energía cinética (debido a la fuerte atracción electromagnética ejercida por el núcleo), la energía perdida es usada para crear un fotón con una energía  $h\nu = E - E'$  donde  $E'$  es la energía cinética del electrón después de dicha interacción. Un fotón de longitud de onda  $\lambda_{min}$  se emite cuando el electrón se frena totalmente perdiendo toda su energía. Cuando esto ocurre  $E' = 0$ , entonces

$$E = h\nu_{max}, \quad (6.2)$$

donde  $\nu_{max}$  es la máxima frecuencia transferida al fotón y  $h$  la constante de Planck. Por otra parte, la energía cinética del electrón incidente, obtenida cuando éste se acelera en la diferencia de potencial del tubo de rayos X viene dada por:

$$E = eU, \quad (6.3)$$

donde  $e$  es la carga eléctrica absoluta del electrón ( $e = 1.6022 \times 10^{-19} C$ ) y  $U$  es la diferencia de potencial entre cátodo y ánodo en el tubo de rayos X. En consecuencia, a partir de (6.2) y (6.3) se obtiene

$$eU = h\nu_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}}, \quad (6.4)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío ( $c = 2.9979 \times 10^8 m/s$ ). Es decir:

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eU}. \quad (6.5)$$

La ecuación anterior se conoce como la ley Duane-Hunt, donde  $\frac{hc}{e}$  es la constante de proporcionalidad  $A$  mencionada inicialmente en (6.1).

## 6.2. Material y equipos requeridos

- 1 aparato de rayos X
- 1 cristal de cloruro de sodio (NaCl)
- 1 End-window counter (Tubo contador Geiger-Müller)
- 1 computadora con el software (“Aparatos de rayos X”) suministrado por la LD didactic
- 1 par de guantes

## 6.3. Notas de seguridad y preparación del experimento

### 6.3.1. Notas de seguridad<sup>1</sup>

- Antes de utilizar el aparato de rayos X
  - Fue necesario asegurarse de que la máquina no esté dañada, es decir que los tornillos de la parte exterior de la máquina no fueran manipulados y no se observen rayones en las ventanas emplomadas; también se observó que el cable del ánodo esté insertado en el disipador de calor del tubo de rayos X.
  - Se observó que tanto los tornillos del brazo del goniómetro como del portamuestras estuvieran bien ajustados.
- Una vez encendida la máquina:
  - Se tuvo en cuenta que no se presente sobrecalentamiento del ánodo en el tubo de rayos X.

---

<sup>1</sup>La ampliación y especificación de esta información se encuentra consignada en la sección 2.13.

- Se verificó que los circuitos de seguridad estén funcionando de manera adecuada (sección 2.14).
- Se revisó que el ventilador esté girando.
- Se tuvo cuidado al manipular el cristal de NaCl tomándolo únicamente de los bordes y utilizando guantes. Al finalizar la practica fue necesario guardarlo cuidadosamente en su respectivo empaque para evitar que se deteriore.

### 6.3.2. Preparación del experimento

Antes de comenzar con la práctica fue necesario conectar la maquina a una computadora a través de un cable USB, también se requirió que dentro de la cámara de experimentación, se encontraran el colimador, el porta muestras, un cristal de cloruro de sodio (objetivo) y el sensor (tubo contador Geiger-Müller), los cuales fueron montados y ajustados en sus respectivos lugares (ver figura 6.3). La distancia entre el colimador y el porta muestras ( $X_1$ ), se colocó de tal manera que midiera aproximadamente  $5\text{ cm}$ ; también se ajustó la distancia entre el porta muestras y el sensor ( $X_2$ ) aproximadamente a  $4.5\text{ cm}$ . El cristal<sup>2</sup> fue montado horizontalmente sobre la plataforma del porta muestras y apretado con el brazo que lo sostiene (la importancia de que se prepare la cámara de experimentación de esta manera se aprecia en la sección 2.15.2).

---

<sup>2</sup>El Cristal de NaCl se usa para difractar los rayos X y obtener el espectro continuo para el ánodo de molibdeno

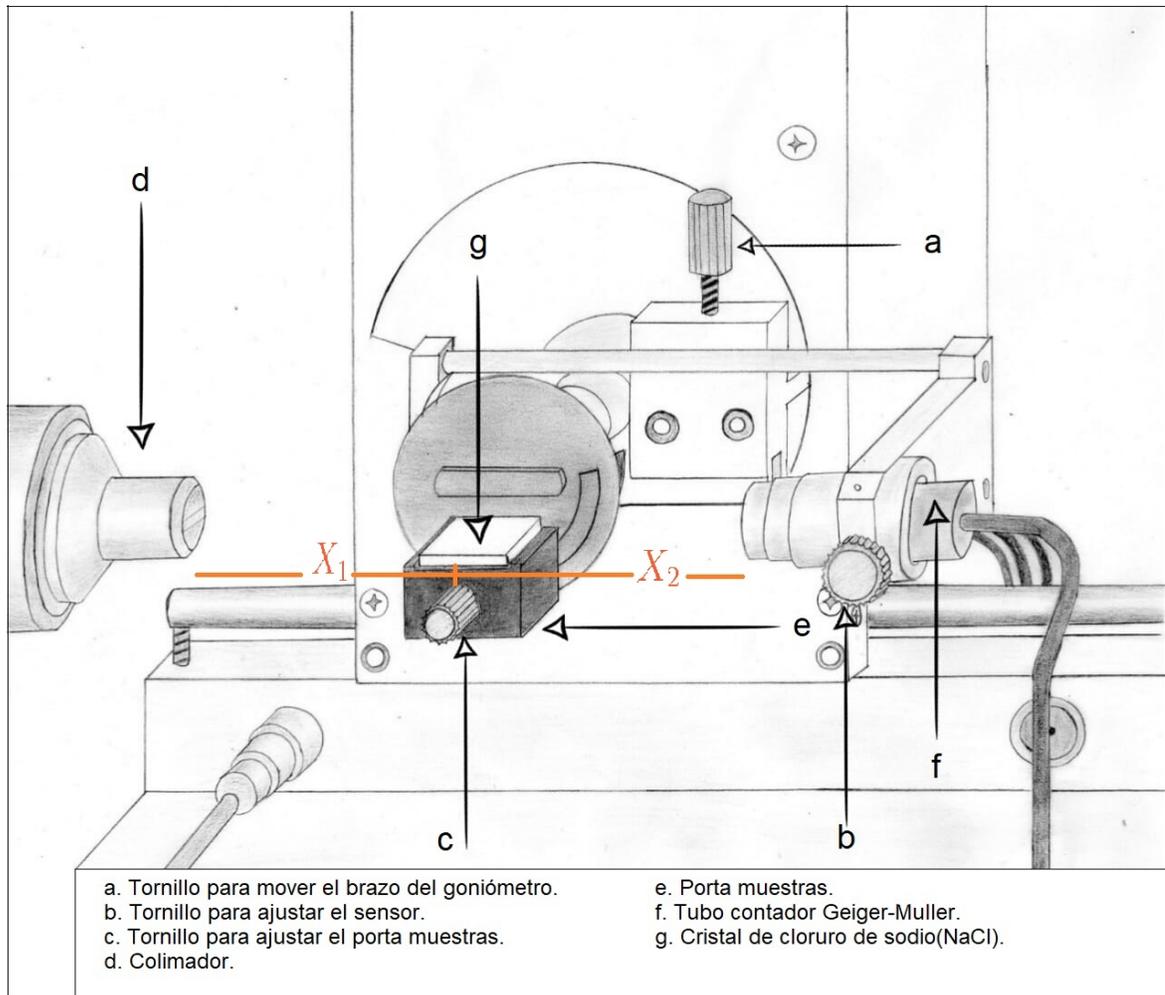


Figura 6.3: Cámara de experimentación [9].

## 6.4. Procedimiento

Para esta práctica se utilizaron los siguientes ajustes de parámetros estudiados por LD didactic<sup>3</sup> [34] para que se grafique la región del espectro continuo para cada valor de voltaje (tabla 6.1):

$U$ (kV)	$I$ (mA)	$\Delta t$ (s)	$\beta_{min}$ (°)	$\beta_{max}$ (°)	$\Delta\beta$ (°)
22.0	1.00	30	5.2	6.2	0.1
24.0	1.00	30	5.0	6.2	0.1
26.0	1.00	20	4.5	6.2	0.1
28.0	1.00	20	3.8	6.0	0.1
30.0	1.00	10	3.2	6.0	0.1
32.0	1.00	10	2.5	6.0	0.1
34.0	1.00	10	2.5	6.0	0.1
35.0	1.00	10	2.5	6.0	0.1

Tabla 6.1: Parámetros de medición recomendados por LD didactic para poder observar la variación de  $\lambda_{min}$  con respecto al voltaje ( $U$ ) en la región del espectro continuo. Las especificaciones y uso de estos parámetros se encuentra en la sección [?].

Para habilitar el acoplamiento angular 2 : 1<sup>4</sup> del sensor respecto al objetivo se presionó la tecla COUPLED (el funcionamiento de esta tecla se explica en la sección 2.7.4) en el dispositivo.

Se inició el programa “Aparato de rayos X” en la computadora, y se ingresó a la opción “ajustes”, una vez allí se pudo visualizar los parámetros de ajuste y luego se accedió a la opción “cristal” en donde se escogió la distancia entre planos  $2d = 564,0 \text{ pm}$  para el NaCl, luego se ingresó a “ajuste del cristal”, para seleccionar el cristal (NaCl) y el ánodo (Mo) con los que se estaba trabajando; se usó la opción iniciar búsqueda, una vez terminada ésta, se

<sup>3</sup>El Grupo LD didactic es un fabricante líder a nivel mundial de sistemas de enseñanza y capacitación en ciencias e ingeniería de alta calidad para escuelas (escuelas secundarias), colegios y Universidades [36]

<sup>4</sup>El acoplamiento angular 2:1 hace referencia a que el paso angular del sensor es el doble respecto al del portamuestras.

seleccionó aplicar. Realizados estos pasos se empezó con la medición en la representación Bragg. Terminada la primera medición se prosiguió a reajustar los parámetros y hacer una nueva toma de datos. Esto se hizo con los 8 grupos de parámetro consignados en la tabla 6.1. Terminadas las mediciones se llevó a cabo la evaluación de las gráficas obtenidas, haciendo uso de la función de evaluación “recta promedio”, con la que se seleccionó puntos de cada gráfica que tuvieran un comportamiento lineal. Una vez realizada esta acción el software arroja automáticamente el valor de la longitud de onda mínima ( $\lambda_{min}$  se puede visualizar después de usar la función de evaluación “recta promedio” en la línea de estado ubicada en la parte inferior izquierda de la plataforma del software) correspondiente a cada variación en el voltaje del tubo, estos últimos se graficaron automáticamente al ingresar en la representación Planck, en donde se uso la función de evaluación “recta por el origen” para calcular la constante de Planck. La constante de Planck es arrojada por el software de manera inmediata al usar la función de evaluación “recta por el origen” y se puede visualizar en la línea de estado junto con la pendiente de la recta ( $A$ ).

*Notas:*

- *Debido a que las gráficas deben ir superpuestas, fue necesario hacer una medición, guardarla, cerrar el programa, pulsar RESET a la máquina, abrir nuevamente el programa, cargar la medición y sobre esta graficar una nueva. Este proceso se realizó para todos los grupos de parámetros de la tabla 6.1.*
- *La gráfica de la tasa de conteo en función de la longitud de onda se realizó siete veces debido a que al hacer el cálculo con la función “recta promedio”(con la cual se seleccionan los puntos de cada gráfica con un comportamiento lineal) se observó que  $\lambda_{min}$  cambiaba dependiendo de los puntos escogidos y esto a su vez alteraba el valor de la constante de Planck, razón por la cual el anterior procedimiento se realizó por dos personas obteniendo 14 valores para dicha constante.*
- *Los gráficos obtenidos a través del software, fueron copiados mediante la función de evaluación “copiar diagrama”, seleccionando la opción “Metafile”, y editadas en Paint.*

## **6.5. Resultados y análisis**

### **6.5.1. Gráficas**

A continuación se presentan dos figuras, la figura 6.4 representa las gráficas del espectro continuo del molibdeno para diferentes voltajes ( $U$ ) las cuales se obtienen a partir de la tabla 6.1, también se presentan rectas promedio formadas por los datos con comportamiento lineal de cada gráfica, estas rectas son de la forma:  $y = mx + b$ , donde el intercepto con el eje horizontal corresponde al valor de la longitud de onda mínima, estos datos se encuentran registrados en la tabla 6.2; la figura 6.5 representa las longitudes de onda mínimas obtenidas de la anterior figura en función del inverso de los voltajes aplicados (estos datos se encuentran registrados en la tabla 6.2), en donde la recta mostrada es de la forma  $y = mx$  en donde en conformidad con la ley de Duane-Hunt  $m$  representa a la constante de proporcionalidad mostrada en la ecuación (6.5) a partir de los datos obtenidos de la primera figura.

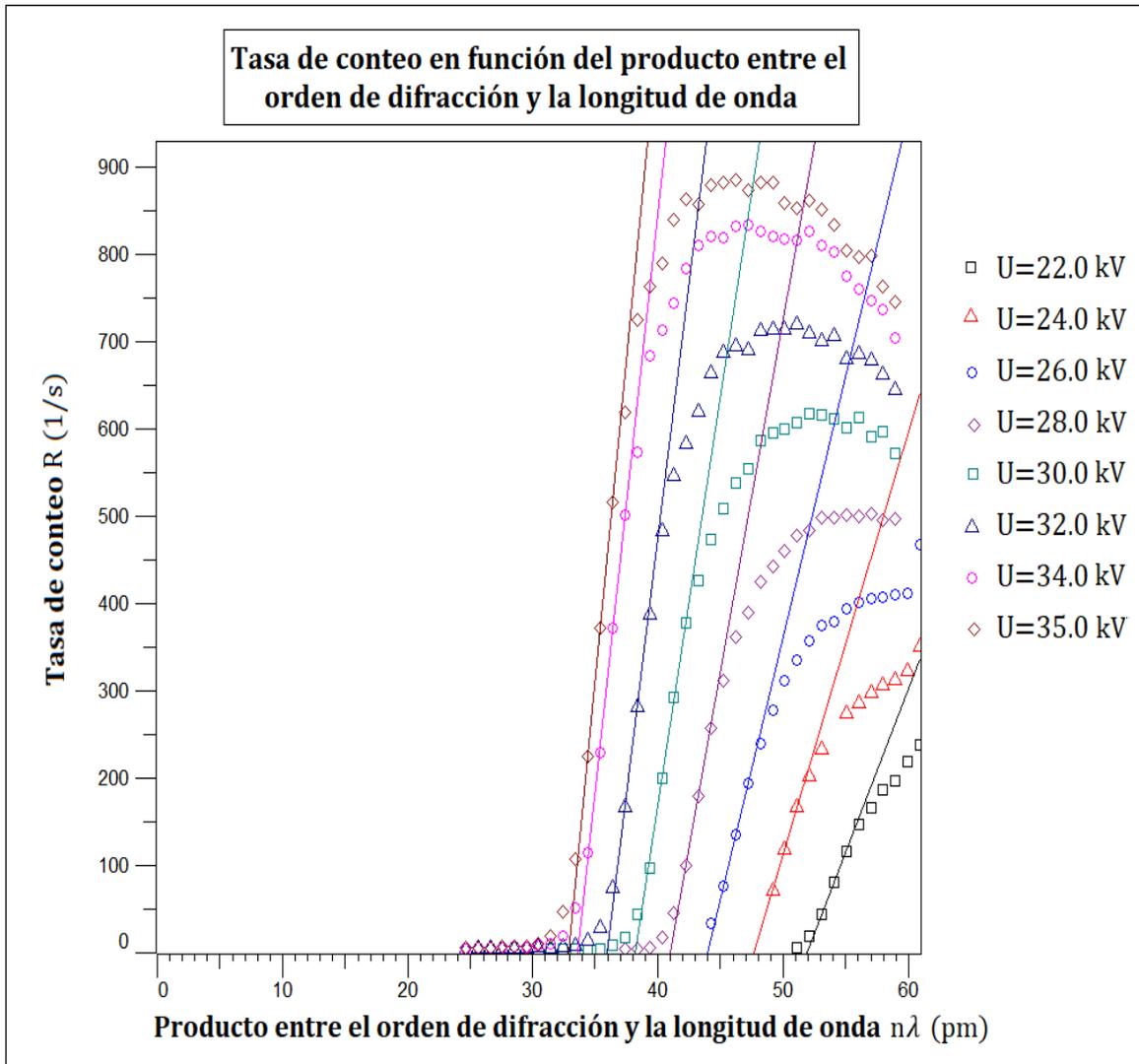


Figura 6.4: Gráficas de la tasa de conteo  $R$  en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda  $n\lambda$  a primer orden de difracción ( $n = 1$ ) junto con sus respectivas rectas promedio.

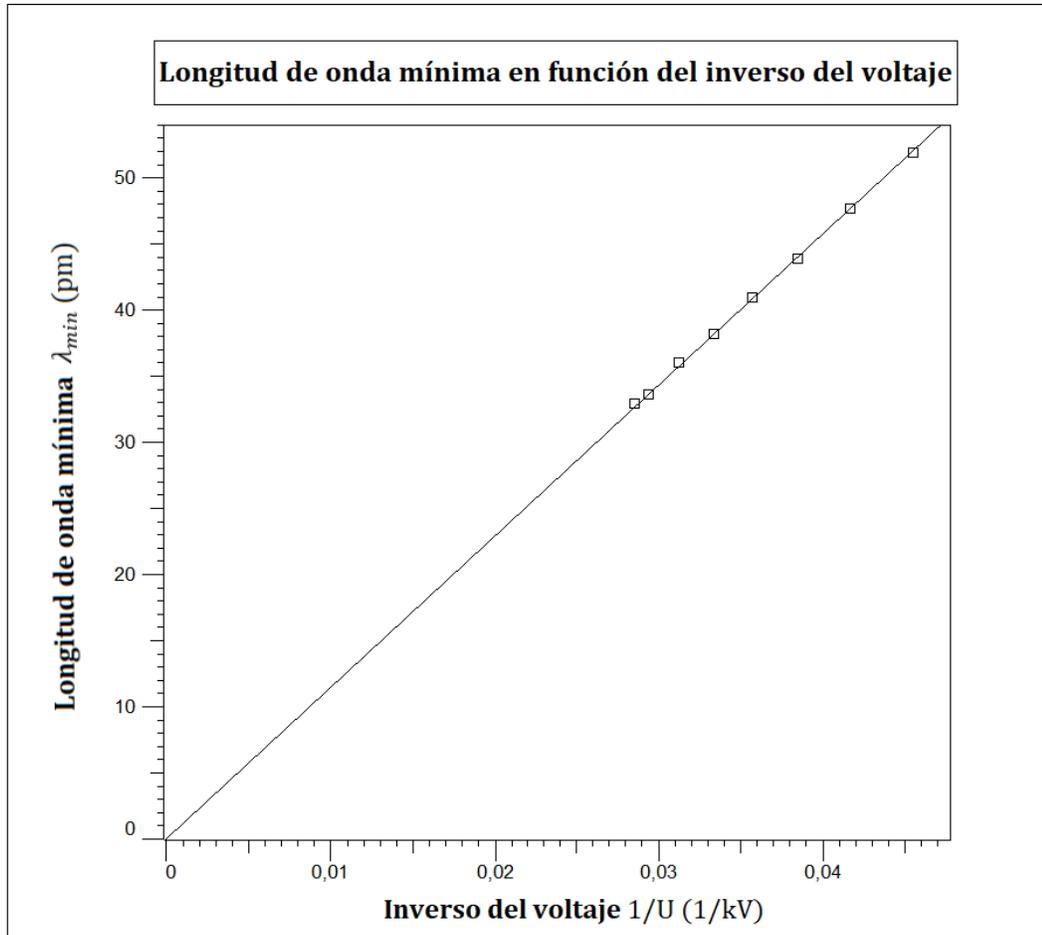


Figura 6.5: Gráfica de la longitud de onda mínima  $\lambda_{min}$  en función del inverso del voltaje  $1/U$ . Los datos describen una línea recta.

- En la figura 6.4 se puede observar solamente el continuo Bremsstrahlung en la región que permite detallar la variación de la longitud de onda mínima para diferentes valores del voltaje del tubo de rayos X.
- De la figura 6.5 se visualiza como  $\lambda_{min}$  es proporcional al inverso del voltaje del tubo. También se observa que la pendiente  $A = 1145 \text{ pm} \times \text{kV}$ , corresponde según la ley de Duane-Hunt (ecuación (6.5)) a la cantidad  $\frac{hc}{e}$  del cual se determina el valor de la constante de Planck.

- Debido a que los datos obtenidos experimentalmente no permiten visualizar el inicio del espectro continuo definido por la longitud de onda mínima, ésta se determina en el software al trazar una recta por los primeros datos con comportamiento lineal, donde su valor corresponde al intercepto de la recta con el eje horizontal.

### 6.5.2. Tablas

A continuación se encuentra: la tabla 6.2 donde se encuentran registrados los datos de voltaje y sus correspondientes valores de longitud de onda mínima obtenidos a partir de las rectas promedio de las gráficas de tasa de conteo en función del producto entre el orden de difracción y la longitud para el espectro Bremsstrahlung (figura 6.4); y tabla 6.3 es el resultado de siete mediciones tomadas por dos observadores diferentes:

Voltaje $U$ ( $kV$ )	Longitud de onda mínima $\lambda_{min}$ ( $pm$ )
22.0	51.9
24.0	47.7
26.0	43.9
28.0	41.0
30.0	38.2
32.0	36.0
34.0	33.6
35.0	32.9

Tabla 6.2: Datos del Voltaje  $U$  ( $kV$ ) y la longitud de onda mínima  $\lambda_{min}$  ( $pm$ ). Los valores de  $\lambda_{min}$  fueron obtenidos a partir de la figura 6.4

Medición	$h(\text{observador1}) \times 10^{-34} J_s$	$h(\text{observador2}) \times 10^{-34} J_s$
1	6.11	6.08
2	6.10	6.09
3	6.14	6.11
4	6.12	6.12
5	6.09	6.09
6	6.12	6.12
7	6.16	6.16

Tabla 6.3: Constante de Planck obtenida a partir de las mediciones de las longitudes de onda tomadas por los observadores 1 y 2.

El valor promedio de la constante de Planck es  $h = (6.12 \pm 0.01) \times 10^{-34} J_s$  y un error relativo porcentual del 8% con respecto al valor encontrado en la literatura correspondiente a  $h = 6.63 \times 10^{-34} J_s$  [34].

## 6.6. Conclusiones

- Dado que se pudo observar que la longitud de onda mínima es proporcional al inverso del voltaje del tubo de rayos X, se puede concluir que se cumple la ley de Duane-Hunt (ecuación (6.5)) y es posible calcular a través de ésta la constante de Planck.
- El espectro continuo de la radiación producida en un tubo de rayos X (Bremsstrahlung) está caracterizado por una longitud de onda mínima, la cual se puede encontrar al trazar una recta sobre los primeros valores con comportamiento lineal en el espectro de tal manera que se fije el inicio de éste.
- El equipo de rayos X en conjunto con el software “Aparato de rayos X” permiten determinar la constante de Planck, dado que al comparar el valor obtenido experimentalmente y el establecido por la teoría solo se obtuvo un error porcentual de 8% que se encuentra dentro de los límites permitidos para una medida experimental.

# Capítulo 7

## Espectro de rayos X para un ánodo de molibdeno en función del voltaje y la corriente de emisión

### Resumen

En esta práctica se pretende entender los espectros de rayos X como una superposición del continuo de radiación bremsstrahlung y las líneas de la radiación característica del material del ánodo, así como también su dependencia con el alto voltaje y la corriente de emisión.

### Abstract

This practice is intended to understand the X-ray spectra as a superposition of the bremsstrahlung radiation continuum and the lines characteristic of the anode material, as well as its dependence on the high voltage and the emission current.

### 7.1. Introducción

Los rayos X se crean cuando los electrones que se mueven con gran velocidad se desaceleran rápidamente al impactar la materia, la radiación producida puede ser de dos tipos: una cuya

longitud de onda varia de una manera continua en un amplio intervalo, por lo que se suele llamar espectro continuo y otro superpuesto a este, formado por unos máximos de intensidad visibles, que constituyen líneas espectrales muy definidas y cuyas longitudes de onda son características del metal que forma el ánodo, que se conoce como el espectro característico.

En el **espectro continuo** la radiación producida por la desaceleración de una partícula cargada es llamada *bremsstrahlung*, que significa radiación de frenado. Esta tiene un espectro continuo que se extiende a partir de una cierta frecuencia máxima  $\nu_{max}$  (o desde una longitud de onda mínima  $\lambda_{min}$ ). Existe una relación entre la longitud de onda mínima y la diferencia de potencial ( $U$ ) entre cátodo y ánodo del tubo de rayos X, dada por (ver capítulo 6):

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eU}, \quad (7.1)$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $c$  la velocidad de la luz en el vacío y  $e$  la carga eléctrica del electrón.

En el **espectro característico** la emisión de rayos X se produce por ionización o excitación de los átomos del material del ánodo. Esto ocurre cuando un electrón incidente choca con un electrón del átomo y le transfiere su energía cinética, dependiendo de que tan energético quede este último puede ser expulsado del átomo (ionización) o subir a un nivel energético más alto (excitación).

Los electrones más cercanos al núcleo, los más fuertemente ligados, están en la capa  $K$  (son los 1  $s$ ). La siguiente posición de mayor enlace están en la línea  $L$ , y después la capa  $M$ , luego en la  $N$ , y así sucesivamente. Cuando los electrones incidentes altamente energéticos remueven un electrón de la capa  $K$ , un electrón de la capa  $L$  cede energía en forma de rayos X cuando pasa a ocupar la vacante dejada en la capa  $K$ . Esta radiación, característica del material del blanco, se denomina  $K_\alpha$ . El electrón de la capa  $M$  que llena la vacante en la capa  $K$  cede energía en forma de otro rayo X llamada línea  $K_\beta$ . Estas transiciones de las líneas  $L$ ,  $M$ ,  $N$ , etc. a la capa  $K$  dan lugar a las series de líneas  $K_\alpha$ ,  $K_\beta$ ,  $K_\gamma$ , etc. llamada la serie  $K$ . A medida que aumenta el voltaje acelerador en el tubo de rayos X, los electrones incidentes producen un espectro continuo *bremsstrahlung* hasta que, a cierto voltaje crítico  $U_K$ , los

electrones adquieren suficiente energía para despojar electrones de las capas interiores [38]. Así:

$$eU_K \geq E_K$$

Donde  $E_K$  es la energía necesaria para liberar un electrón de la capa  $K$ . La intensidad de cualquier línea característica del espectro, depende tanto de la corriente  $I$  del tubo como de la cantidad que excede el voltaje aplicado al valor del voltaje de excitación de dicha línea. Para la línea  $K$  la intensidad esta dada aproximadamente por:

$$\mathcal{I}_{lineaK} = BI(U - U_K)^n \quad (7.2)$$

Donde  $B$  es una constante de proporcionalidad,  $U_K$  el voltaje de excitación para la capa  $K$  y  $n$  un parámetro con valor cercano a 1.5 (en realidad varía entre 1 y 2, y su promedio para muchos materiales es próximo a 1.6).

En este experimento se trabaja con datos del número de fotones que capta al sensor (Tubo contador Geiger-Müller) en un determinado tiempo, a esto le conocemos como tasa de conteo ( $R$ ), la cual esta relacionada con la intensidad de las líneas características de la siguiente forma:

$$\mathcal{I} = \frac{R}{A} \times \frac{hc}{\lambda}, \quad (7.3)$$

donde  $A$  representa el área del sensor que atraviesan los fotones,  $h$  es la constante de Planck,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $\lambda$  es la longitud de onda del fotón.

## 7.2. Material y equipos requeridos

- 1 aparato de rayos X
- 1 cristal de cloruro de sodio (NaCl)
- 1 End-window counter (Tubo contador Geiger-Müller)
- 1 computadora con el software (“Aparatos de rayos X”) suministrado por la LD didactic
- 1 par de guantes

## 7.3. Notas de seguridad y preparación del experimento

### 7.3.1. Notas de seguridad<sup>1</sup>

- Antes de utilizar el aparato de rayos X
  - Fue necesario asegurarse de que la máquina no esté dañada, es decir que los tornillos de la parte exterior de la maquina no fueran manipulados y no se observen rayones en las ventanas emplomadas; también se observó que el cable del ánodo esté insertado en el disipador de calor del tubo de rayos X.
  - Se observó que tanto los tornillos del brazo del goniómetro como del portamuestras estuvieran bien ajustados.
- Una vez encendida la máquina:
  - Se tuvo en cuenta que no se presente sobrecalentamiento del ánodo en el tubo de rayos X.
  - Se verificó que los circuitos de seguridad estén funcionando de manera adecuada (sección 2.14).
  - Se revisó que el ventilador esté girando.
  - Se tuvo cuidado al manipular el cristal de NaCl tomándolo únicamente de los bordes y utilizando guantes. Al finalizar la practica fue necesario guardarlo cuidadosamente en su respectivo empaque para evitar que se deteriore.

### 7.3.2. Preparación del experimento

Antes de comenzar con la práctica fue necesario conectar la máquina a una computadora a través de un cable USB, también se requirió que dentro de la cámara de experimentación, se encontraran el colimador, el porta muestras, un cristal de cloruro de sodio (objetivo) y el sensor (tubo contador Geiger-Müller), los cuales fueron montados y ajustados en sus respectivos

<sup>1</sup>La ampliación y especificación de esta información se encuentra consignada en la sección 2.13.

lugares (ver figura 7.1). La distancia entre el colimador y el porta muestras ( $X_1$ ), se colocó de tal manera que midiera aproximadamente 5 cm; también se ajustó la distancia entre el porta muestras y el sensor ( $X_2$ ) aproximadamente a 6 cm. El cristal <sup>2</sup> fue montado horizontalmente sobre la plataforma del porta muestras y apretado con el brazo que lo sostiene (la importancia de que se prepare la cámara de experimentación de esta manera se aprecia en la sección 2.15.2).

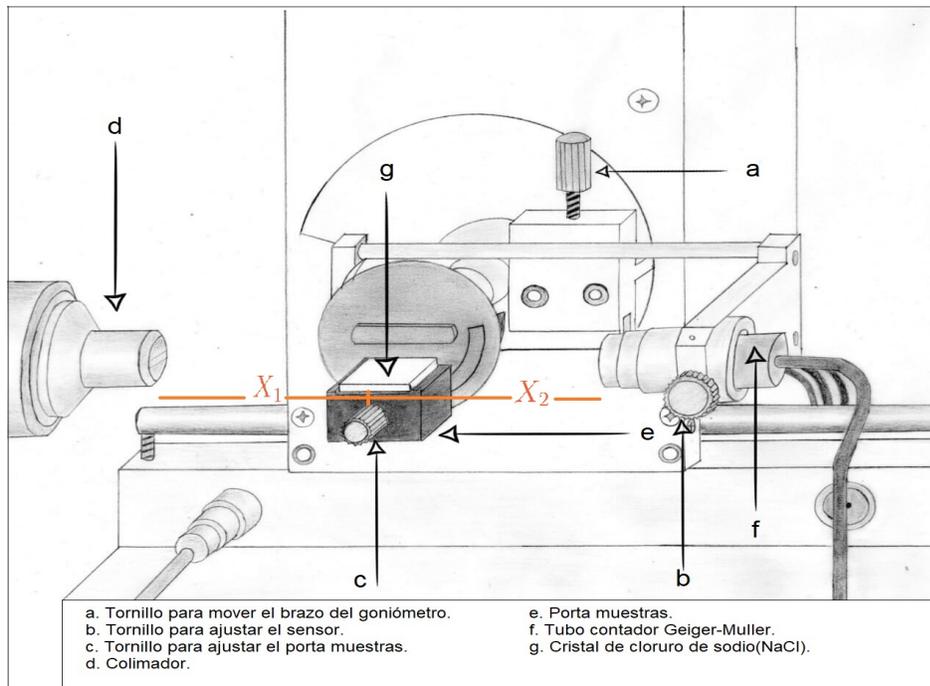


Figura 7.1: Cámara de experimentación [9].

## 7.4. Procedimiento

Una vez encendida la máquina se prosiguió a ajustar los parámetros de la siguiente manera: la tensión del tubo  $U = 15.0 \text{ kV}$ , la corriente de emisión  $I = 1.00 \text{ mA}$ , el tiempo de

<sup>2</sup>El Cristal de NaCl se usa para difractar los rayos X y obtener el espectro continuo para el ánodo de molibdeno

medición por paso angular  $\Delta t = 10 \text{ s}$  y el ancho del paso angular  $\Delta\beta = 0.1^\circ$ . Para habilitar el acoplamiento 2 : 1<sup>3</sup> del sensor respecto al objetivo se presionó la tecla COUPLED (el funcionamiento de esta tecla se explica en la sección 2.7.4) en el dispositivo, pero seguido se ajustó los parámetros: límite inferior del ángulo objetivo  $\beta_{min} = 2.5^\circ$  y el límite superior  $\beta_{max} = 12.5^\circ$  (las especificaciones y uso de estos parámetros se encuentra en la sección [?]). Se Inició el programa “Aparatos de rayos X” en la computadora, y se ingresó a la opción “ajustes”, una vez ahí se pudo visualizar los parámetros ya ajustados y se accedió a la opción “cristal” en donde se escogió la distancia entre planos  $2d = 564.0 \text{ pm}$  para el NaCl, luego se ingresó a “ajuste del cristal”, para seleccionar el cristal (NaCl) y el ánodo (Mo) con los que se estaba trabajando; después de esto se usó la opción iniciar búsqueda, una vez terminada ésta, se seleccionó aplicar y se empezó con la toma de datos en la representación Bragg. Una vez terminada la primera gráfica (tasa de conteo en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda) de la medición se realizaron 4 gráficas adicionales con valores de voltaje del tubo de  $20.0 \text{ kV}$ ,  $25.0 \text{ kV}$ ,  $30.0 \text{ kV}$  y  $35.0 \text{ kV}$ . También se realizó un proceso análogo para variación en la corriente de emisión empezando en  $0.40 \text{ mA}$ , luego  $0.60 \text{ mA}$ ,  $0.80 \text{ mA}$  y  $1.00 \text{ mA}$  dejando constante el voltaje del tubo a  $35.0 \text{ kV}$ .

Una vez terminadas las mediciones se llevó a cabo la evaluación de las gráficas obtenidas, haciendo uso de la función de evaluación “calcular centro de pico”, con esta se calculó la longitud de onda para las líneas características  $K_\alpha$  y  $K_\beta$  (ver tablas 7.1 y 7.2). Para la gráfica de la variación de la corriente de emisión también fue necesario poner inactiva la distancia entre planos y luego con ayuda de la función de evaluación “visualizar coordenadas” calcular el cambio de la tasa de conteo en los picos en el continuo bremsstrahlung (tabla 7.3 ).

*Notas:*

- Debido a que las dos gráficas tanto la de la variación del alto voltaje del tubo como la de la variación de la corriente de emisión se componen de gráficas superpuestas,

---

<sup>3</sup>El acoplamiento angular 2:1 hace referencia a que el paso angular del sensor es el doble respecto al del portamuestras

*fue necesario hacer una medición, guardarla, cerrar el programa, pulsar RESET a la máquina, abrir nuevamente el programa, cargar la medición y sobre esta graficar una nueva. Este proceso se realizó con todas las variaciones.*

- *Los gráficos obtenidos a través del software, fueron copiados mediante la función de evaluación “copiar diagrama”, seleccionando la opción “Metafile”, y editadas en Paint.*

## **7.5. Resultados y análisis**

### **7.5.1. Gráficas**

A continuación se presentan las gráficas obtenidas experimentalmente, donde se representa la tasa de conteo medida en Hertz ( $1/s$ ) en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda ( $n\lambda$ ) medida en picómetros ( $pm$ ), para variaciones del voltaje del tubo de rayos X (figura 7.2) y la corriente de emisión (figura 7.3).

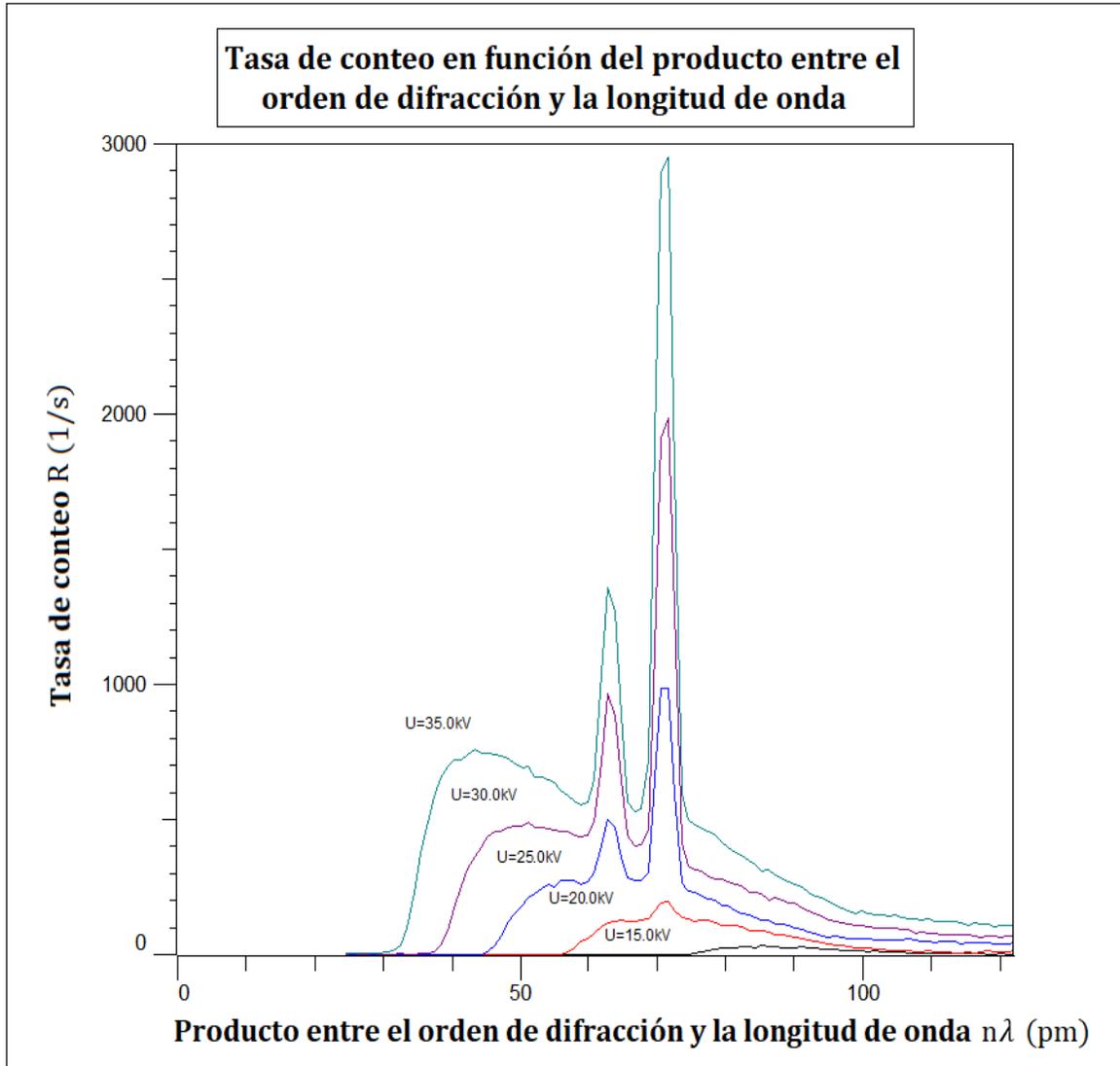


Figura 7.2: Gráficas de la tasa de conteo  $R$  en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda  $n\lambda$  a primer orden de difracción ( $n = 1$ ) para variaciones de voltaje del tubo de rayos X.

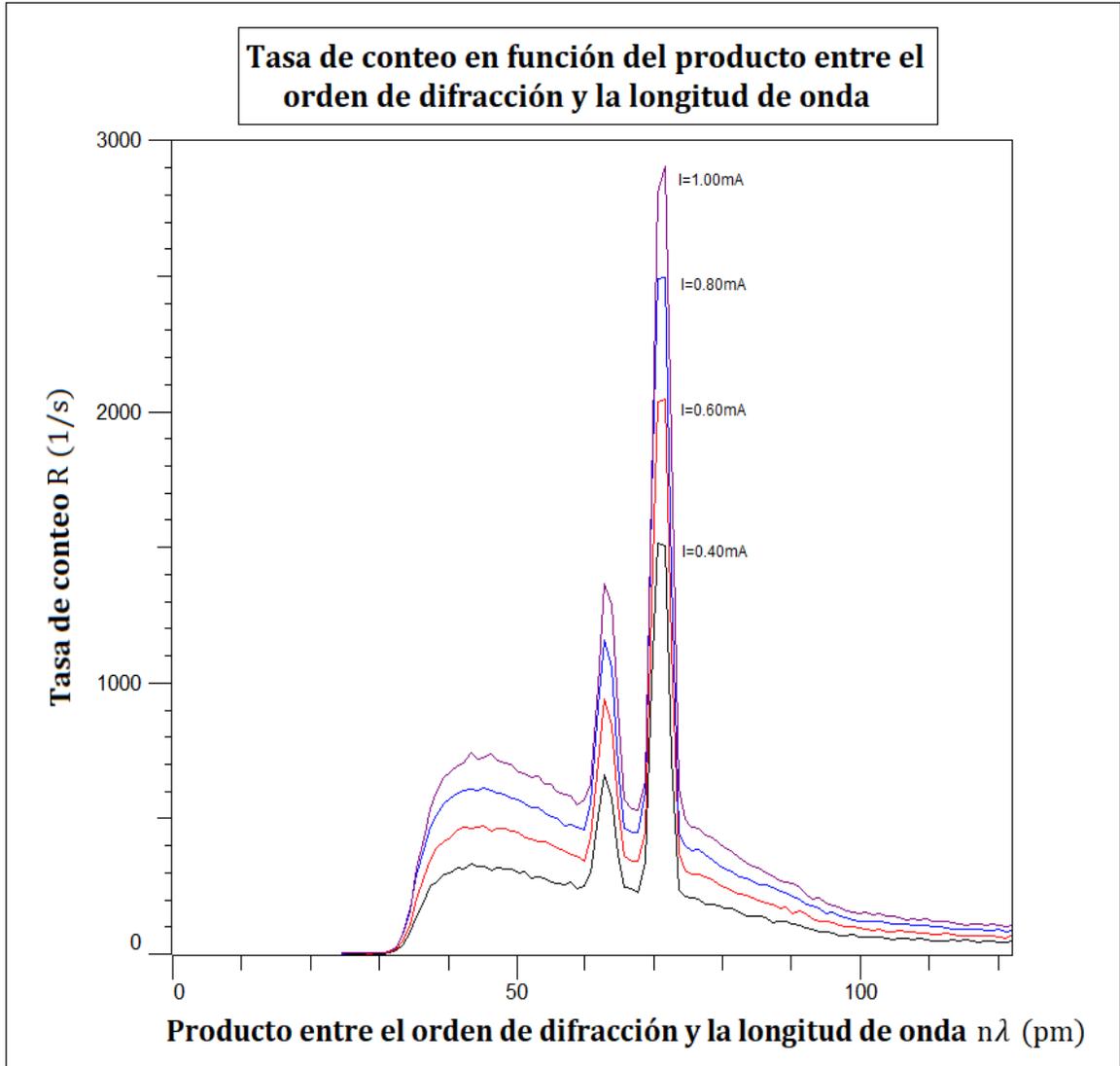


Figura 7.3: Gráficas de la tasa de conteo  $R$  en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda  $n\lambda$  a primer orden de difracción ( $n = 1$ ) para variaciones de la corriente de emisión.

- En la figura 7.2 se puede observar que los picos de las líneas  $K_\alpha$  y  $K_\beta$ , son observables para voltajes superiores a los  $20.0\text{ kV}$  y las longitudes de onda en estos permanecen constantes (ver tabla 7.1), esto se debe a que la radiación característica del material del ánodo es observable al superar un voltaje crítico. Por otra parte se puede observar que

el espectro continuo va cambiando de forma y la longitud de onda  $\lambda_{min}$  se va haciendo más pequeña a medida que aumenta el voltaje (obedeciendo la relación 7.1), indicando que los rayos X producidos son más energéticos (rayos X duros).

- En la figura 7.3 se puede observar que la variación de la corriente de emisión no afecta la forma del espectro de rayos X dado que el rango de las longitudes de onda permanecen constantes (tabla 7.2), la variación de la corriente solo influye en la tasa de conteo.

### 7.5.2. Tablas

A continuación se presenta los datos obtenidos a partir de las gráficas 7.2 y 7.3.

$U$ (kV)	$\lambda_{(K_\alpha)}$ (pm)	$\lambda_{(K_\beta)}$ (pm)	$I$ (mA)	$\lambda_{(K_\alpha)}$ (pm)	$\lambda_{(K_\beta)}$ (pm)
			0.40	71.18	63.26
25.0	71.18	63.26	0.60	71.18	63.26
30.0	71.18	63.26	0.80	71.18	63.26
35.0	71.18	63.26	1.00	71.18	63.26

Tabla 7.1: Datos de la longitud de onda para las líneas características  $K_\alpha$  y  $K_\beta$  a diferentes valores de voltaje.

Tabla 7.2: Datos de la longitud de onda para las líneas características  $K_\alpha$  y  $K_\beta$  a diferentes valores de corriente.

$I$ (mA)	$R_{(K_\alpha)}$ ( $s^{-1}$ )	$R_{(K_\beta)}$ ( $s^{-1}$ )	$R_c$ ( $s^{-1}$ )
0.40	1512,6	656.9	198.1
0.60	2042,4	933.3	245.0
0.80	2490.2	1152.2	537.0
1.00	2852.2	1336.0	568.3

Tabla 7.3: Tasas de conteo de las líneas características  $R_{(K_\alpha)}$  y  $R_{(K_\beta)}$ ; y de los máximos del continuo Bremsstrahlung  $R_c$ .

En las tablas 7.1 y 7.2 se puede confirmar que la longitud de onda para las líneas características  $K_\alpha$  y  $K_\beta$  no cambia pese a que se hagan variaciones en el voltaje del tubo y la corriente de emisión.

La tabla 7.3 muestra la proporcionalidad indicada en la relación (7.2) existente entre la corriente y la intensidad<sup>4</sup> para el espectro Bremsstrahlung y las líneas características. La intensidad esta relacionada con la tasa de conteo (ecuación 7.3), que a su vez corresponde al número de fotones con energía  $h\nu$  detectados por el sensor Geiger Müller durante 10s.

## 7.6. Conclusiones

- La corriente de emisión y el voltaje del tubo afectan la tasa de conteo en el espectro de rayos X de acuerdo con las relaciones (7.2) y (7.3), pero la forma de este solo se ve alterada por el voltaje.
- Al aumentar el voltaje del tubo disminuye la longitud de onda mínima de los rayos X en el espectro producido según la relación (7.1) (capitulo 6).
- La longitud onda de las líneas características depende directamente del material del ánodo, mas no de la corriente, ni del voltaje después de pasar por su valor crítico ( $U_K$  correspondiente a 20 kV).

---

<sup>4</sup>intensidad de fotones: numero de fotones por unidad de tiempo

# Capítulo 8

## Producción de un haz monocromático de rayos X mediante un filtro

### Resumen

En esta práctica se pretende comparar el espectro no filtrado de un tubo de rayos X y el espectro filtrado con una lámina de circonio, observando el cambio en la tasa de conteo total en las gráficas.

### Abstract

In this practice we try to compare the unfiltered spectrum of an X-ray tube and the filtered spectrum with a zirconium sheet, observing the change in the total count rate in the graphs.

### 8.1. Introducción

Cuando hablamos de atenuación de los rayos X, nos referimos a la disminución en la intensidad que ocurre cuando la radiación pasa a través de la materia. Esta atenuación es causada principalmente por dos efectos: dispersión y absorción. El efecto de absorción a menudo predomina [41].

La absorción de los rayos X se debe esencialmente a la ionización de los átomos, que liberan un electrón de una capa interna. La absorción depende mucho de la energía cuántica  $h\nu$ , de la

longitud de onda  $\lambda$  de los rayos X así como de la energía de excitación de los átomos y, por lo tanto el número atómico  $Z$ . Para que ocurra la ionización, la energía cuántica de los rayos X debe ser mayor que la energía de enlace  $E$  de los electrones de la capa respectiva. Si  $R_0$  es la tasa de conteo original de incidencia y  $R$  es la tasa de conteo emergente, podemos cuantificar la transmisión ( $T$ ) de la radiación para caracterizar la permeabilidad de un atenuador usando la relación:

$$T = \frac{R}{R_0}. \quad (8.1)$$

La transmisión del material aumenta abruptamente en función de la longitud de onda

$$\lambda_K = \frac{h \cdot c}{E_k}, \quad (8.2)$$

donde  $\lambda_K$  es la longitud de onda del borde de absorción,  $E_K$  es la energía mínima para expulsar un electrón de la capa  $K$ ,  $h$  es la constante de Planck y  $c$  la velocidad de la luz. Este cambio abrupto se conoce como borde de absorción ( este se define como el cambio abrupto de una región de poca atenuación hacia una región de fuerte atenuación [40]).

Muchos experimentos de difracción de rayos X requieren radiación lo más monocromática posible. Sin embargo, el haz de un tubo de rayos X operado a un voltaje por encima de  $U_K$  (voltaje crítico para que ocurran las transiciones  $K$ ) contiene no solo la línea  $K_\alpha$  fuerte sino también la línea  $K_\beta$  más débil y el espectro continuo. La intensidad de estos componentes no deseadas puede disminuirse con relación a la intensidad de la línea  $K_\alpha$  pasando el haz a través de un filtro hecho de un material cuyo borde de absorción  $K$  se encuentre entre las longitudes de onda  $K_\alpha$  y  $K_\beta$  del metal objetivo. Para cumplir con ello el material del filtro debe ser de un número atómico ( $Z$ ) menor en una o dos unidades al  $Z$  del blanco (ánodo), por ejemplo, en el caso de un blanco de Molibdeno cuyo  $Z = 42$ , el filtro que se usa es de circonio con  $Z = 40$ . Es importante resaltar algunos puntos: dicha filtración no es perfecta y la calidad del haz de rayos X filtrado no se ve afectada [1].

## **8.2. Material y equipos requeridos**

- 1 aparato de rayos X
- 1 cristal de cloruro de sodio (NaCl)
- 1 End-window counter (tubo contador Geiger-Müller)
- 1 computadora con el software (“Aparatos de rayos X”) suministrado por la LD didactic
- 1 filtro de Circonio
- 1 par de guantes

## **8.3. Notas de seguridad y preparación del experimento**

### **8.3.1. Notas de seguridad<sup>1</sup>**

- Antes de utilizar el aparato de rayos X
  - Fue necesario asegurarse de que la máquina no esté dañada, es decir que los tornillos de la parte exterior de la maquina no fueran manipulados y no se observen rayones en las ventanas emplomadas; también se observó que el cable del ánodo esté insertado en el disipador de calor del tubo de rayos X.
  - Se observó que tanto los tornillos del brazo del goniómetro como del portamuestras estuvieran bien ajustados.
- Una vez encendida la máquina:
  - Se tuvo en cuenta que no se presente sobrecalentamiento del ánodo en el tubo de rayos X.

---

<sup>1</sup>La ampliación y especificación de esta información se encuentra consignada en la sección 2.13.

- Se verificó que los circuitos de seguridad estén funcionando de manera adecuada (sección 2.14).
- Se revisó que el ventilador esté girando.
- Para introducir el filtro de circonio en el colimador fue necesario tomarlo de los bordes plásticos sin tocar la placa de circonio para evitar rayaduras y manchas.
- Se tuvo cuidado al manipular el cristal de NaCl tomándolo únicamente de los bordes y utilizando guantes. Al finalizar la practica fue necesario guardarlo cuidadosamente en su respectivo empaque para evitar que se deteriore.

### **8.3.2. Preparación del experimento**

Antes de comenzar con la práctica fue necesario conectar la maquina a una computadora a través de un cable USB, también se requirió que dentro de la cámara de experimentación, se encontraran el colimador, el porta muestras, un cristal de cloruro de sodio (objetivo) y el sensor (tubo contador Geiger-Müller), los cuales fueron montados y ajustados en sus respectivos lugares (figura 8.1). La distancia entre el colimador y el porta muestras ( $X_1$ ), se colocó de tal manera que midiera aproximadamente 5 cm; también se ajustó la distancia entre el porta muestras y el sensor ( $X_2$ ) aproximadamente a 5 cm. El cristal <sup>2</sup> fue montado horizontalmente sobre la plataforma del porta muestras y apretado con el brazo que lo sostiene (la importancia de que se prepare la cámara de experimentación de esta manera se aprecia en la sección 2.15.2).

---

<sup>2</sup>El Cristal de NaCl se usa para difractar los rayos X y obtener el espectro continuo para el ánodo de molibdeno

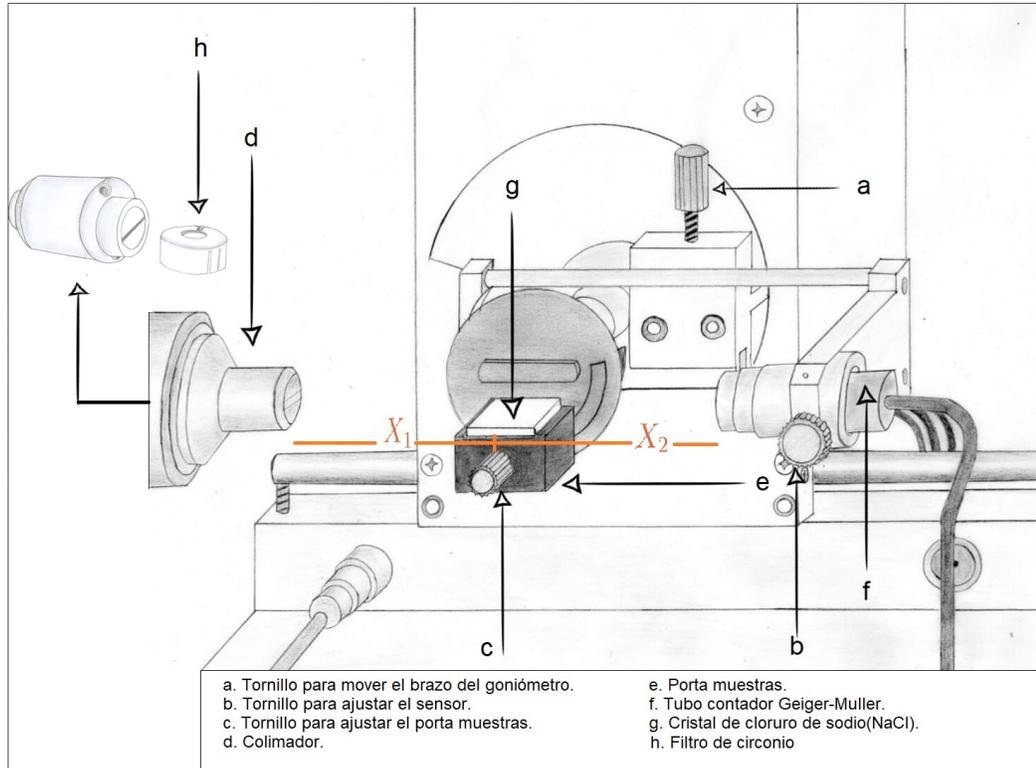


Figura 8.1: Cámara de experimentación [9].

## 8.4. Procedimiento

Una vez encendida la máquina se prosiguió a ajustar los parámetros de la siguiente manera: la tensión del tubo en  $U = 30.0 \text{ kV}$ , la corriente de emisión  $I = 1.00 \text{ mA}$ , el tiempo de medición por paso angular  $\Delta t = 5 \text{ s}$  y el ancho del paso angular  $\Delta\beta = 0.1^\circ$ . Para habilitar el acoplamiento 2 : 1<sup>3</sup> del sensor respecto al objetivo se presionó la tecla COUPLED (el funcionamiento de esta tecla se explica en la sección 2.7.4) en el dispositivo, pero seguido se ajustaron los parámetros: límite inferior del ángulo objetivo  $\beta_{min} = 4.2^\circ$  y el límite superior

<sup>3</sup>El acoplamiento angular 2:1 hace referencia a que el paso angular del sensor es el doble respecto al del portamuestras

$\beta_{max} = 8.3^\circ$  (las especificaciones y uso de estos parámetros se encuentra en la sección [?]). Se inició el programa “Aparato de rayos X” en la computadora, y se ingresó a la opción “ajustes”, una vez ahí se pudo visualizar los parámetros ya ajustados y se accedió a la opción “cristal” en donde se escogió la distancia entre planos  $2d = 564.0 \text{ pm}$  para el NaCl, luego se ingresó a “ajuste del cristal”, para seleccionar el cristal (NaCl) y el ánodo (Mo) con los que se estaba trabajando. Después de esto se usó la opción iniciar búsqueda, una vez terminada esta, se seleccionó aplicar. Ya habiendo hecho todo esto se prosiguió con la medición en la representación Bragg, primero haciendo uso de un filtro de circonio y luego en ausencia de éste<sup>4</sup>.

Una vez terminada la medición se llevó a cabo la evaluación de las gráficas obtenidas, haciendo uso de la función de evaluación “cálculo de la integral”, con esta se calculó la tasa de conteo total para cada pico. Al utilizar la función de evaluación “cálculo de la integral” se mide la tasa de conteo total (representada por el área bajo la curva del ancho pico) seleccionando con click izquierdo el punto donde empieza y termina el pico, consiguiente a esto se observa esta tasa en la línea de estado. El anterior procedimiento se realizó tres veces dado que al seleccionar los límites del ancho de los picos se observó que la tasa de conteo total variaba dependiendo de dónde se los escogiera. Los datos tomados se consignaron en las tablas 8.1 y 8.2 .

*Notas:*

- *Dado que la posición del colimador cambia en presencia del filtro de circonio, fue necesario volver a tomar la medida  $X_1$  para garantizar que su valor siga siendo el mismo (5 cm).*
- *Nota: El gráfico obtenido a través del software, fue copiada mediante la función de evaluación “copiar diagrama”, seleccionando la opción “Metafile”, y editada en Paint.*

---

<sup>4</sup>Si se tiene dificultades para el montaje y desmontaje del filtro la sección 2.6.7 muestra como hacer este procedimiento.

## 8.5. Resultados y análisis

### 8.5.1. Gráficas

A continuación se presentan las gráficas obtenidas experimentalmente en presencia (gráfica roja) y ausencia (gráfica negra) de un filtro de circonio.

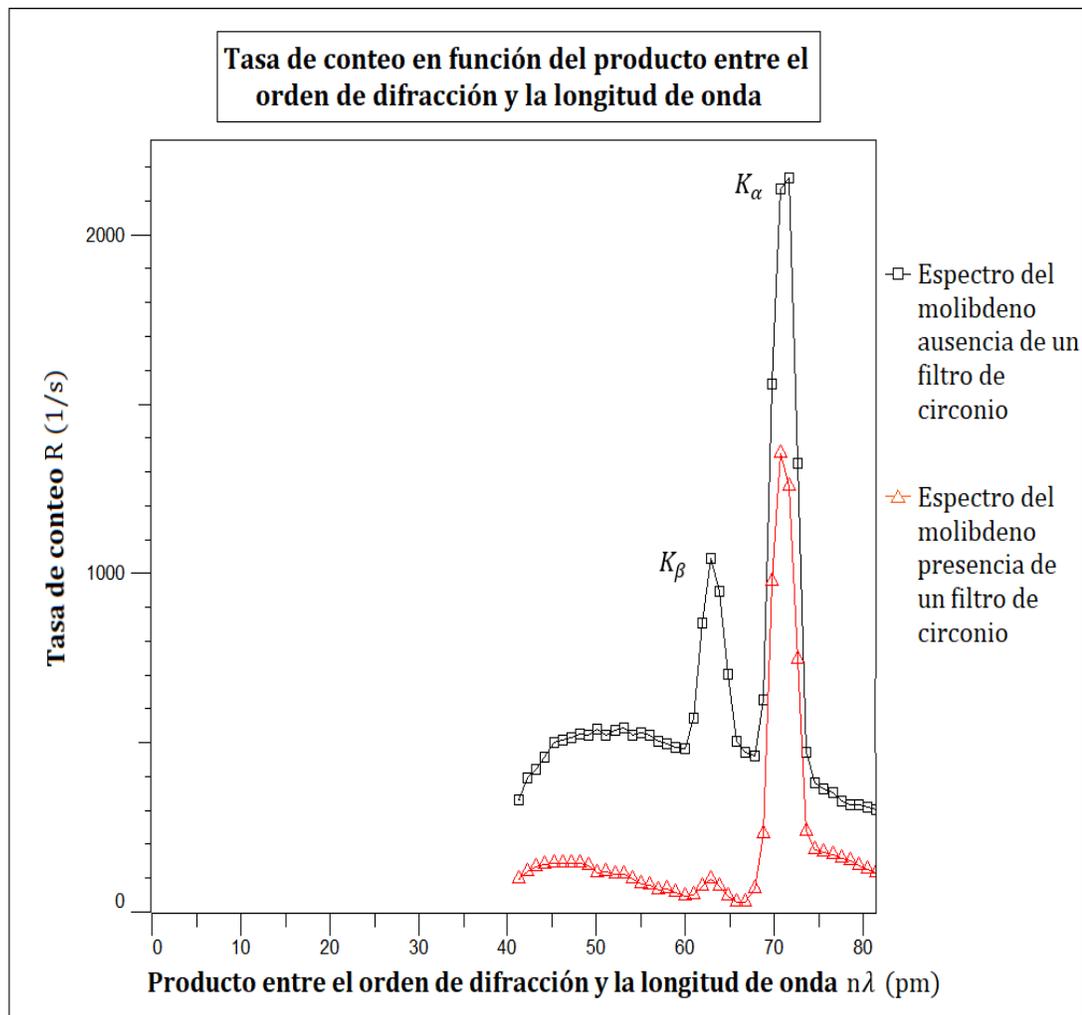


Figura 8.2: Gráficas de la tasa de conteo  $R$  en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda  $n\lambda$  a primer orden de difracción ( $n = 1$ ) en presencia y ausencia de un filtro de circonio.

- En la figura 8.2 se puede observar como la tasa de conteo disminuye al usar el filtro, siendo más significativo para la línea característica  $K_\beta$ , esto se debe a que la absorción del filtro atenúa los rayos X (dejando aproximadamente solo la línea  $K_\alpha$ ).
- La tasa de conteo es la cantidad de fotones detectados por el sensor en 5 s, al utilizar la función de evaluación “cálculo de la integral” se mide la tasa de conteo total para el ancho de cada pico, este valor se indica en la línea de estado.

### 8.5.2. Tablas

En las tablas 8.1 y 8.2 se encuentran consignados los datos de la tasa de conteo total para cada uno de los picos de las líneas características  $K_\alpha$  y  $K_\beta$  y la razón  $V$  que representa la fracción de la radiación  $K_\beta$  con respecto a la radiación total ( $R_t$ ) como se indica en la relación 8.3.

$$V = \frac{R_{t(K_\beta)}}{R_{t(K_\alpha)} + R_{t(K_\beta)}} \quad (8.3)$$

Medición	$R_{t(K_\alpha)}(s^{-1})$	$R_{t(K_\beta)}(s^{-1})$	$V$
1	3889.1	137.8	0.034
2	3719.6	143.0	0.037
3	3795.9	140.8	0.036

Tabla 8.1: Tasas de conteo integrales para los picos de las líneas características  $K_\alpha$  y  $K_\beta$  haciendo uso de un filtro ; y la razón  $V$  para las correspondientes mediciones.

Medición	$R_{t(K_\alpha)}(s^{-1})$	$R_{t(K_\beta)}(s^{-1})$	$V$
1	5170.0	1603.8	0.24
2	5031.4	1475.2	0.23
3	4988.0	1389.2	0.22

Tabla 8.2: Tasas de conteo integrales para los picos de las líneas características  $K_\alpha$  y  $K_\beta$  sin hacer uso de un filtro; y la razón  $V$  para las correspondientes mediciones.

El promedio de la razón  $V$  para la tabla 8.1 es de  $V = 0.036$  con un error en la medida de 0.001 y para la tabla 8.2  $V = 0.23$  con un error en la medida de 0.01. Esto permite visualizar cómo se reduce considerablemente la tasa de conteo en 0.2 en la línea  $K_\beta$ , esto evidencia que el circonio realiza una filtración adecuada de la radiación X del molibdeno aunque no sea perfecta.

## **8.6. Conclusiones**

- La absorción del filtro de circonio permite la filtración parcial de la línea  $K_\beta$  en el haz de rayos X producido por el ánodo de molibdeno, confirmando lo que teóricamente se había mencionado: el material del filtro debe ser de un número atómico menor en una o dos unidades al del blanco para que ocurra la monocromatización.
- El programa “Aparato de rayos X” permite calcular el área bajo la curva de cualquier sección de la gráfica haciendo uso de la función de evaluación “cálculo de la integral”.
- Con el programa “Aparato de rayos X” se puede visualizar la superposición de las gráficas del espectro característico del molibdeno a primer orden de difracción antes y después de usar un filtro de circonio lo que permite observar la disminución de la tasa de conteo en la línea  $K_\beta$ .

# Capítulo 9

## Estructura fina de la radiación X característica del molibdeno

### Resumen

En esta práctica se pretende comparar el espectro de rayos X característico del molibdeno por medio de la reflexión de Bragg en un monocristal NaCl del primer y quinto orden de difracción, identificando las líneas características  $K_\alpha$ ,  $K_\beta$  y  $K_\gamma$  y la estructura fina de  $K_\alpha$  como un doblete de líneas  $K_{\alpha_1}$  y  $K_{\alpha_2}$ , además se pretende determinar el intervalo de longitud de onda  $\Delta\lambda$  dentro del doblete.

### Abstract

In this practice, we intend to compare the characteristic X-ray spectrum of the first and fifth diffraction order of molybdenum by means of the Bragg reflection in a single NaCl crystal, identifying the characteristic lines  $K_\alpha$ ,  $K_\beta$  and  $K_\gamma$  and the fine structure of  $K_\alpha$  as a doublet of lines  $K_{\alpha_1}$  and  $K_{\alpha_2}$ , plus it is intended to determine the wavelength interval  $\Delta\lambda$  inside the doublet.

## 9.1. Introducción

Cuando se examinan las líneas del espectro característico de la serie K, para un material a una resolución muy alta, se encuentra que son dobletes (dos líneas características) poco espaciados entre sí, lo anterior se conoce como estructura fina de la radiación X característica de la serie  $K$  para un material. Las pequeñas divisiones de la línea espectral, se atribuye a una interacción entre el espín del electrón  $s$ , y el momento angular orbital  $l$ , llamado interacción spin-órbita [10].

La estructura fina de las líneas características de la capa  $K$  surge de la estructura fina de las otras capas ( $L, M, N, \dots$ ). Por ejemplo la capa  $L$  en realidad consiste en tres subcapas, designadas como  $L_1, L_{||}$  y  $L_{|||}$  en espectroscopia de rayos X [11]. Las transiciones de las subcapas a la capa  $K$  están sujetas a las reglas de selección, las cuales están descritas por:

$$\Delta l = \pm 1, \Delta j = 0, \pm 1, \quad (9.1)$$

donde  $\Delta l$  es el cambio en el momento angular y  $\Delta j$  la variación del momento angular total ( $j = s + l$ ) siendo  $s$  es el spin del electrón) en la transición. Según lo anterior, se permiten 2 transiciones de las subcapas  $L$  a la capa  $K$  denominadas  $K_{\alpha_1}$  y  $K_{\alpha_2}$  como se muestra en la figura 9.1, estas componentes tienen longitudes de onda tan cercanas que el intervalo de longitud de onda de las dos líneas es de  $\Delta\lambda = 0.43 \text{ pm}$ . También se encuentra un doblete para la línea  $K_{\beta}$  que consiste en la línea de  $K_{\beta}$  pura, es decir, las transiciones de los átomos excitados de la capa  $M$  a la capa  $K$ , y la línea  $K_{\gamma}$ , las transiciones de la capa  $N$  a la capa  $K$ . El intervalo de longitud de onda entre estas dos líneas es de  $\Delta\lambda = 1.2 \text{ pm}$ .

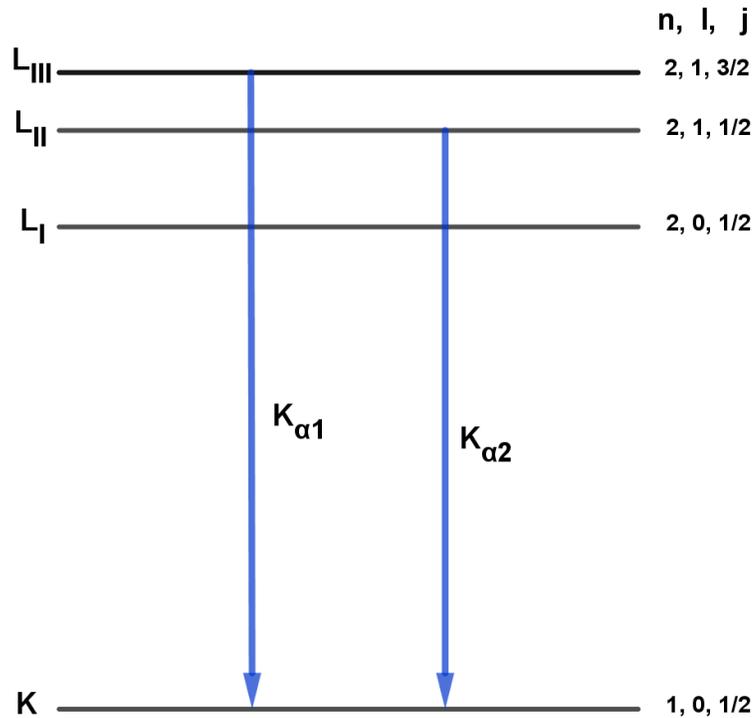


Figura 9.1: Diagrama de estructura fina de la línea característica  $K_{\alpha}$ .

El doblete  $K_{\alpha}$  formado por  $K_{\alpha_1}$  y  $K_{\alpha_2}$  y el doblete formado por  $K_{\beta}$  y  $K_{\gamma}$  se pueden resolver por medio de la reflexión de Bragg en un monocristal de NaCl cuando se mide en un orden de difracción superior.

Diferenciando la ley de Bragg (ecuación (1.9)) se obtiene

$$n \cdot \Delta\lambda = 2 \cdot d \cdot \cos\theta \cdot \Delta\theta,$$

de donde despejando  $\Delta\theta$  se tiene

$$\Delta\theta = \frac{n \cdot \Delta\lambda}{2 \cdot d \cdot \cos\theta}, \quad (9.2)$$

donde  $n$  es el orden de difracción,  $\lambda$  es la longitud de onda del rayo X,  $\theta$  es el ángulo de Bragg y  $d = 282.01 \text{ pm}$  es la distancia interplanar para el NaCl. Es importante distinguir

entre el espaciado angular  $\Delta\theta$  y el ancho angular  $\delta\theta$  de una intensidad máxima (Figura 9.2). Este último debe ser más pequeño que el espaciado angular para que las dos líneas se puedan observar por separado.

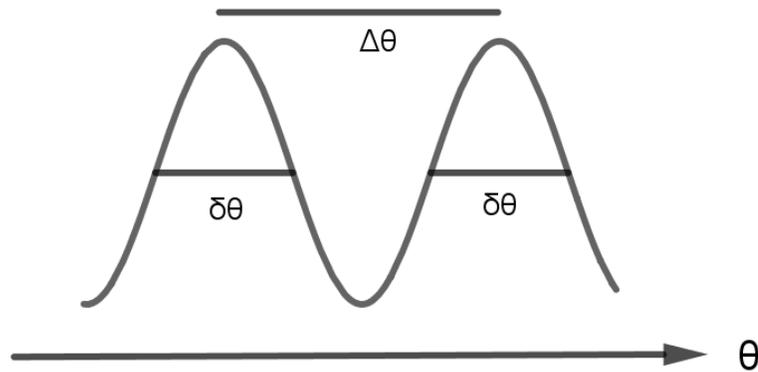


Figura 9.2: Definición del ancho angular  $\delta\theta$  y del espaciado angular  $\Delta\theta$  de dos intensidades máximas.

En esta práctica para conseguir resolver el doblete de  $K_{\alpha}$  se tiene en cuenta la figura 9.3 (esta gráfica es proporcionada por LD didactic) donde se gráfica la tasa de conteo (en escala logarítmica) en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda para los primeros 5 ordenes de difracción. En esta figura se observar que para el orden de difracción  $n = 5$  se logran distinguir las líneas  $K_{\alpha_1}$  y  $K_{\alpha_2}$ .

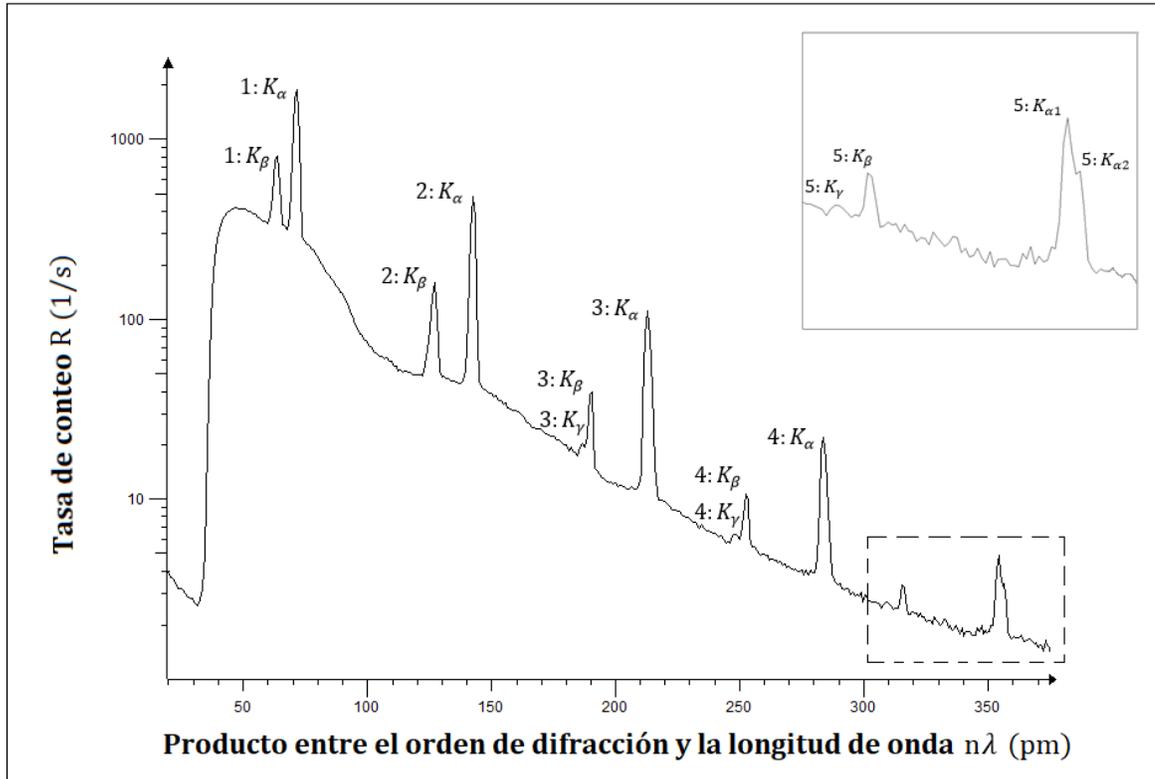


Figura 9.3: Tasa de conteo (en escala logarítmica) en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda para los primeros 5 órdenes de difracción [15].

## 9.2. Material y equipos requeridos

- 1 aparato de rayos X
- 1 cristal de cloruro de sodio (NaCl)
- 1 End-window counter (tubo contador Geiger-Müller)
- 1 computadora con el software (“Aparatos de rayos X”) suministrado por la LD didactic
- 1 par de guantes

## 9.3. Notas de seguridad y preparación del experimento

### 9.3.1. Notas de seguridad<sup>1</sup>

- Antes de utilizar el aparato de rayos X
  - Fue necesario asegurarse de que la máquina no esté dañada, es decir que los tornillos de la parte exterior de la máquina no fueran manipulados y no se observen rayones en las ventanas emplomadas; también se observó que el cable del ánodo esté insertado en el disipador de calor del tubo de rayos X.
  - Se observó que tanto los tornillos del brazo del goniómetro como del portamuestras estuvieran bien ajustados.
- Una vez encendida la máquina:
  - Se tuvo en cuenta que no se presente sobrecalentamiento del ánodo en el tubo de rayos X.
  - Se verificó que los circuitos de seguridad estén funcionando de manera adecuada (sección 2.14).
  - Se revisó que el ventilador esté girando.
  - Se tuvo cuidado al manipular el cristal de NaCl tomándolo únicamente de los bordes y utilizando guantes. Al finalizar la practica fue necesario guardarlo cuidadosamente en su respectivo empaque para evitar que se deteriore.

### 9.3.2. Preparación del experimento

Antes de comenzar con la práctica fue necesario conectar la máquina a una computadora a través del cable USB, también se requirió que dentro de la cámara de experimentación, se encontraran el colimador, el porta muestras, un cristal de cloruro de sodio (objetivo) y el sensor (tubo contador Geiger-Müller), los cuales fueron montados y ajustados en sus respectivos

---

<sup>1</sup>La ampliación y especificación de esta información se encuentra consignada en la sección 2.13.

lugares (figura 9.4). La distancia entre el colimador y el porta muestras ( $X_1$ ), se colocó de tal manera que midiera aproximadamente 5 cm; también se ajustó la distancia entre el porta muestras y el sensor ( $X_2$ ) aproximadamente a 6 cm. El cristal <sup>2</sup> fue montado horizontalmente sobre la plataforma del porta muestras y apretado con el brazo que lo sostiene (la importancia de que se prepare la cámara de experimentación de esta manera se aprecia en la sección 2.15.2).

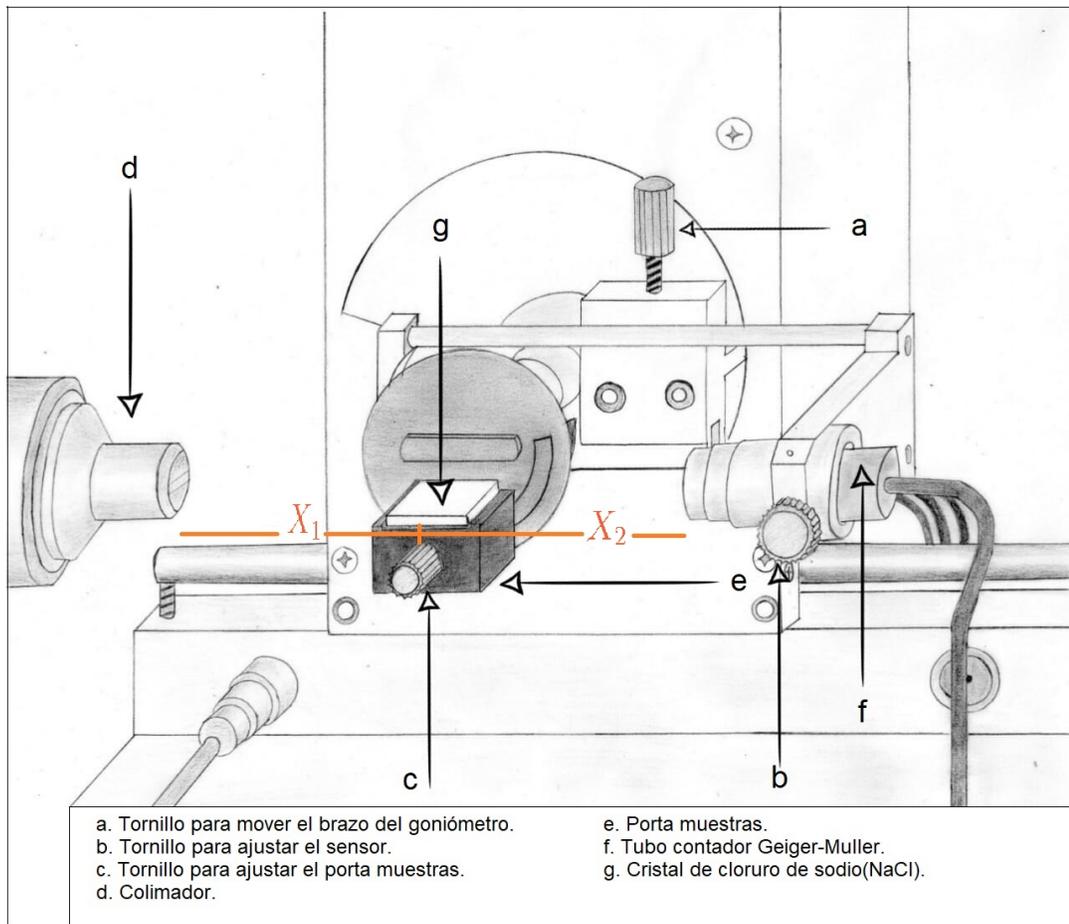


Figura 9.4: Cámara de experimentación [9].

<sup>2</sup>El Cristal de NaCl se usa para difractar los rayos X y obtener el espectro continuo para el ánodo de molibdeno

## 9.4. Procedimiento

Para esta práctica se utilizaron los siguientes ajustes de parámetros estudiados por LD didactic [11], para realizar un estudio por separado del primer y quinto orden de difracción para la radiación X característica del ánodo de molibdeno (tabla 9.1):

Orden de difracción	$U$ (kV)	$I$ (mA)	$\beta_{min}$ (°)	$\beta_{max}$ (°)	$\Delta\beta$ (°)	$\Delta t$ (s)
primero	35.0	1.00	5.50	8.00	0.10	10
quinto	35.0	1.00	32.50	40.50	0.10	400

Tabla 9.1: Parámetros de medición recomendados por LD didactic para realizar un estudio por separado del primer y quinto orden de difracción para la radiación X característica del ánodo de molibdeno. Las especificaciones y uso de estos parámetros se encuentra en la sección [?].

Para habilitar el acoplamiento angular 2 : 1<sup>3</sup> del sensor respecto al objetivo se presionó la tecla COUPLED (El funcionamiento de esta tecla se explica en la sección 2.7.4) en el dispositivo. Se Inició el programa “Aparatos de rayos X” en la computadora, y se ingresó a la opción ajustes”, una vez allí se pudo visualizar los parámetros ajustados y luego se accedió a la opción “cristal” en donde se escogió la distancia entre planos  $2d = 564,0 \text{ pm}$  para el NaCl, luego se ingresó a “ajuste del cristal”, para seleccionar el cristal (NaCl) y el ánodo (Mo) con los que se estaba trabajando; se usó la opción iniciar búsqueda, una vez terminada esta, se seleccionó aplicar. Realizados estos pasos se empezó con la medición en la representación Bragg. Terminada la primera medición se prosiguió a utilizar el otro grupo de parámetros de la tabla 9.1 y hacer una nueva toma de datos.

Terminadas las mediciones se llevó a cabo la evaluación de las gráficas obtenidas (figuras 9.6 y 9.5), haciendo uso de la función de evaluación “Visualizar coordenadas”, con esto se calculó las longitudes de onda de las líneas características a primer ( $K_\alpha$  y  $K_\beta$ ) y quinto ( $K_{\alpha_1}$ ,  $K_{\alpha_2}$ ,  $K_\beta$  y  $K_\gamma$ ) orden de difracción. Estos resultados fueron consignados en las tablas 9.2 y 9.3.

<sup>3</sup>El acoplamiento angular 2 : 1 hace referencia a que el paso angular del sensor es el doble respecto al del portamuestras.

Notas:

- Debido a que el tiempo para realizar la práctica con el quinto orden de difracción fue de nueve horas, se tuvo que hacer tres mediciones de dos horas y una de tres horas, para evitar que se sobrecaliente el tubo de rayos X
- En esta práctica es necesario que el tiempo de medición por paso angular ( $\Delta t$ ) para la realización de la gráfica del espectro característico de un ánodo de molibdeno a quinto orden de difracción sea alto, debido a que en esta región la tasa de conteo es muy pequeña y este tiempo permitirá que se observen con claridad los picos de las líneas características.
- Los gráficos obtenidos a través del software, fueron copiados mediante la función de evaluación “copiar diagrama”, seleccionando la opción “Metafile”, y editadas en Paint.

## 9.5. Resultados y análisis

### 9.5.1. Gráficas

A continuación se presentan las gráficas obtenidas experimentalmente, donde se representa la tasa de conteo medida en Hertz ( $1/s$ ) en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda ( $n\lambda$ ) medida en picómetros ( $pm$ ), para primer (figura 9.5) y quinto (figura 9.6) orden de difracción.

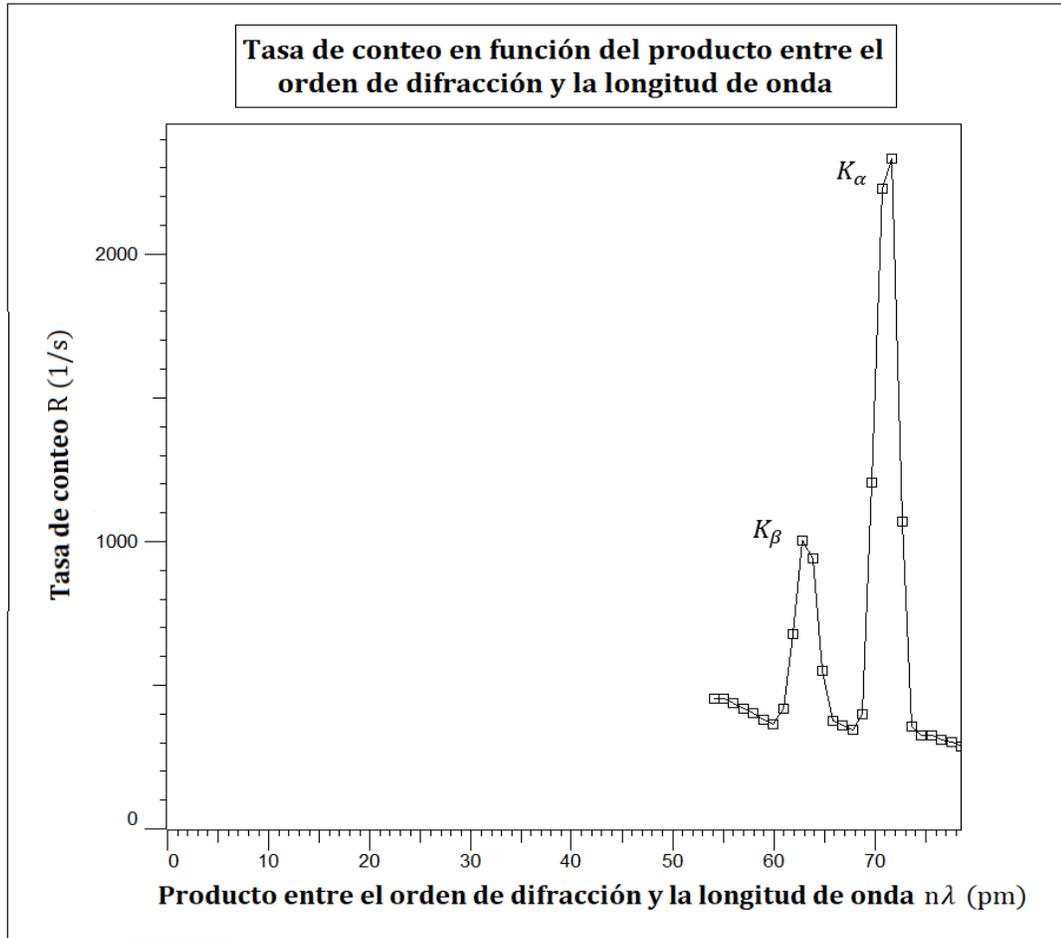


Figura 9.5: Gráficas de la tasa de conteo  $R$  en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda  $n\lambda$  para primer orden de difracción ( $n = 1$ ).

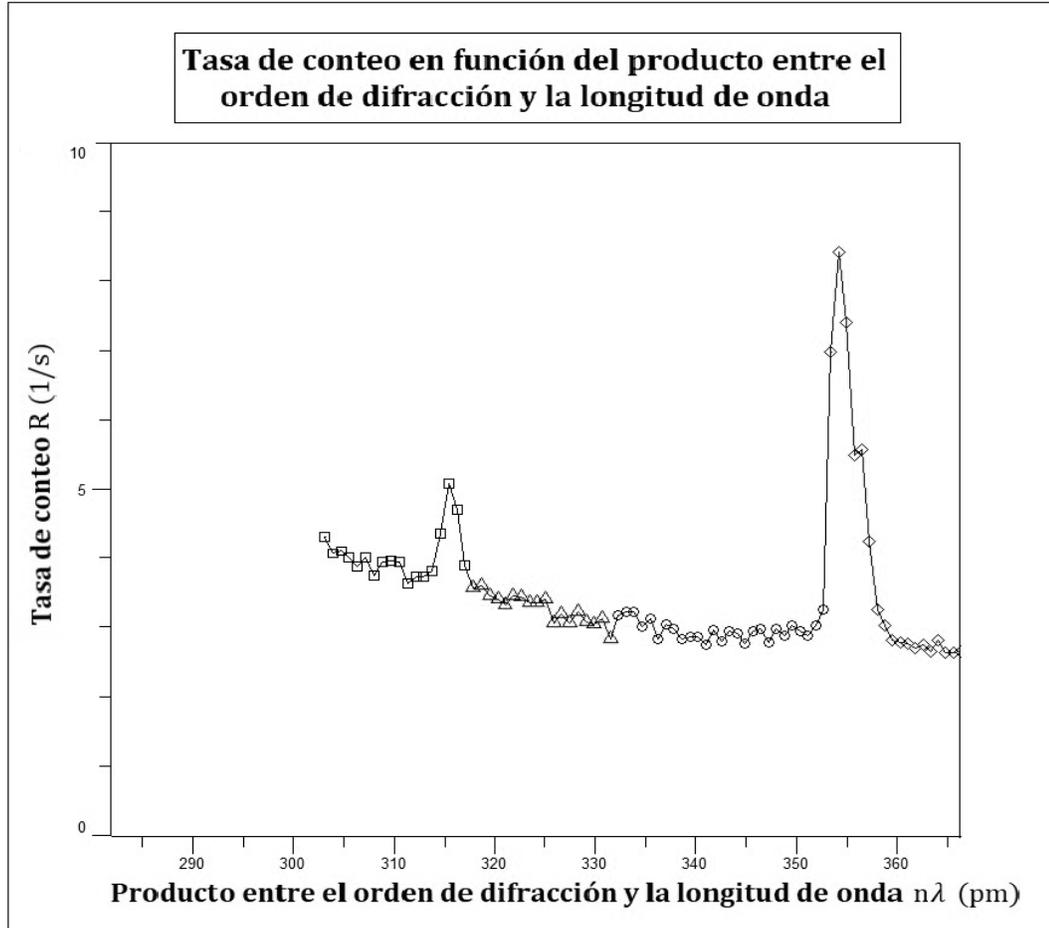


Figura 9.6: Gráficas de la tasa de conteo  $R$  en función del producto entre el orden de difracción y la longitud de onda  $n\lambda$  para quinto orden de difracción ( $n = 5$ ).

- En la figura 9.5 se observa que el espaciado angular tiene aproximadamente la misma medida que el ancho angular, razón por la cual a primer orden de difracción no es posible visualizar el desdoblamiento en las líneas características  $K_{\alpha_1}$  y  $K_{\alpha_2}$ .
- Las figuras 9.5 y 9.6 permiten observar el aumento proporcional del espaciado angular  $\Delta\theta$  con respecto al orden de difracción  $n$  en conformidad con la ecuación (9.2).
- De la figura 9.6 se puede observar cómo el pico en donde para la figura 9.5 solo se encontraba la línea característica  $K_{\alpha}$  se desdobra en dos líneas  $K_{\alpha_1}$  y  $K_{\alpha_2}$ , de igual

manera el pico donde se encontraba la línea característica  $K_\beta$  se desdobra en las líneas  $K_\beta$  y  $K_\gamma$ . Esto se debe a que para el quinto orden de difracción la medida del espaciado angular ( $\Delta\theta$ ) es lo suficientemente grande respecto a la del ancho angular ( $\delta\theta$ ), lo que permite el desdoblamiento de estas líneas.

### 9.5.2. Tablas

A continuación se presentan los resultados obtenidos a través de las figuras 9.5 y 9.6.

Línea característica	Resultado de la medida		Valor en la literatura	
	$\lambda$ (pm)		$\lambda$ (pm)	
$K_\alpha$	71.18		71.08	
$K_\beta + K_\gamma$	63.36		63.09	

Tabla 9.2: Valores teórico y experimental de la longitud de onda para la línea característica  $K_\alpha$  y [ $K_\beta + K_\gamma$ ].

Línea	Resultado de la medida		Valor en la literatura		$E_r$ %
	$5\lambda$ (pm)	$\lambda$ (pm)	$\lambda$ (pm)		
$K_{\alpha 1}$	354.2	70.84	70.93		0.1
$K_{\alpha 2}$	356.5	71.30	71.36		0.1
$K_\beta$	315.4	63.08	63.26		0.3
$K_\gamma$	309.65	61.93	63.09		1.8

Tabla 9.3: Datos experimentales a quinto orden de difracción ( $n = 5$ ) para las longitudes de onda  $\lambda$  (pm) de las líneas características  $K_{\alpha 1}$ ,  $K_{\alpha 2}$ ,  $K_\beta$  y  $K_\gamma$  y sus respectivos valores a primer orden de difracción  $n = 1$ , calculados mediante la relación (9.3), junto con los valores encontrados en la literatura a primer orden de difracción. También se presenta el error relativo porcentual de las longitudes de onda a primer orden de difracción para cada una de las líneas características

- La tabla 9.3 permite verificar el desdoblamiento de las líneas características  $K_\alpha$  en  $K_{\alpha 1}$  y  $K_{\alpha 2}$  y  $K_\beta$  en  $K_\beta$  y  $K_\gamma$  dado que su valor de longitud de onda a primer orden tiene

un error relativo porcentual muy bajo respecto al valor encontrado en la literatura. El valor de la longitud de onda a primer orden se calcula haciendo uso de la relación (9.3) y de los datos obtenidos experimentalmente para la longitud de onda a quinto orden de difracción.

$$\lambda_{\text{primer orden}} = \frac{\lambda_{\text{quinto orden}}}{5} \quad (9.3)$$

- La tabla 9.3 permite calcular el intervalo de longitud de onda para la línea característica  $K_{\alpha}$  dado por  $\Delta\lambda_{K_{\alpha}} = \lambda_{K_{\alpha_2}} - \lambda_{K_{\alpha_1}} = 0.46 \text{ pm}$  con un error relativo porcentual de 7% con respecto al valor encontrado en la literatura de  $\Delta\lambda_{K_{\alpha}} = 0.43 \text{ pm}$ . También permite encontrar el intervalo de longitud de onda para la línea característica  $K_{\beta}$  dado por  $\Delta\lambda_{K_{\beta}} = \lambda_{K_{\beta}} - \lambda_{K_{\gamma}} = 1.15 \text{ pm}$  con un error relativo porcentual de 2% con respecto al valor encontrado en la literatura de  $\Delta\lambda_{K_{\beta}} = 1.17 \text{ pm}$ .

## 9.6. Conclusiones

- Para obtener un desdoblamiento de las líneas características  $K_{\alpha}$  y  $K_{\beta}$ , es necesario que el espaciado angular sea más grande que el ancho angular como se observa en la figura 9.2.
- En las figuras 9.5 y 9.6 se puede observar el aumento proporcional del espaciado angular  $\Delta\theta$  (entre los picos del espectro) con respecto al orden de difracción  $n$  en conformidad con la ecuación (9.2). Lo anterior permite entender por que la resolución en el espectro a primer orden aumenta cuando se lo observa a quinto orden difracción.
- En la practica se logro encontrar el intervalo de longitud de onda para las líneas características  $K_{\alpha}$  y  $K_{\beta}$  con un errores relativos porcentuales de 7% y 2% respectivamente con respecto a sus valores encontrados en la literatura. Estos intervalos se encontraron experimentalmente a partir de las longitudes de onda del espectro a quinto orden de difracción del doblete de  $K_{\alpha}$  formado por  $K_{\alpha_1}$  y  $K_{\alpha_2}$  y el doblete de  $K_{\beta}$  formado por  $K_{\beta}$  y  $K_{\gamma}$ . Lo anterior es una clara evidencia de que a quinto orden de difracción se consiguen desdoblar las líneas  $K_{\alpha}$  y  $K_{\beta}$ .

## Conclusiones generales

- El aparato de rayos X se puede usar como espectrómetro usando la ley de Bragg. Para este proceso se necesita un contador Geiger Müller, un cristal y un colimador. El colimador homogeneiza la trayectoria de los rayos X, estos inciden en el cristal de NaCl, el cual los difracta siempre y cuando su longitud de onda y ángulo de incidencia  $\theta$  (ángulo del portamuestras) estén en conformidad con la ley de Bragg. Esta difracción se realiza para diferentes ángulos de incidencia y para cada uno de ellos el contador Geiger Müller detecta los fotones de rayos X con los que interacciona en un determinado tiempo (tasa de conteo), estos datos son transportados hasta el software “Aparato de rayos X” donde mediante la opción representación Bragg se grafican en función del ángulo ( $\theta$ ) o el producto entre el orden de difracción y la longitud de onda ( $n\lambda$ ) formando así el espectro de rayos X.

El espectro de rayos X puede ser estudiado mediante la ley de Bragg (ecuación (1.9)) de dos maneras diferentes usando un cristal con planos de espaciado conocido “ $d$ ”: la primera cuando tenemos la gráfica tasa de conteo en función de  $\theta$  donde manualmente calculamos la longitud de onda correspondiente a cada ángulo y la segunda en la gráfica tasa de conteo en función de  $n\lambda$  donde el software calcula automáticamente la longitud de onda para diferentes ordenes de difracción de los rayos X.

- El software “Aparato de rayos X” permite ajustar los parámetros del equipo de rayos X sin necesidad de manipularlo, también está diseñado para trabajar con cristales y ánodos de los que contenga información en su programación, lo que impide trabajar con muestras desconocidas. Sin embargo que contenga esta información ayuda a comprobar si el cristal con el que trabaja es puro mediante la observación del espectro que se obtiene con éste.

El software almacena los valores medidos por el equipo de rayos X, los cuales son introducidos directamente en tablas, empezando con  $R_0$ . Cada nueva medición contiene una nueva columna de la tabla, de tal manera que siempre es posible realizar una

comparación de varios espectros. También permite graficar los datos de tasa de conteo en función del ángulo ( $\theta$ ) o el producto entre el orden de difracción y la longitud de onda ( $n\lambda$ ) utilizando la representación de Bragg.

Para la evaluación de las mediciones el software cuenta con funciones de evaluación que permiten modificar el aspecto de gráficas (por ejemplo tamaño de letra, ancho de línea, representación logarítmica, insertar rejilla, seleccionar regla, zoom, entre otras), visualizar sus componentes (por ejemplo visualizar coordenadas, pegar marcas, calcular centro del pico entre otras) y hacerle un análisis (por ejemplo recta promedio, recta por el origen, cálculo de la integral, entre otras). Con este análisis gráfico se obtienen nuevos datos que permiten trabajar, por ejemplo en la representación Planck.

- Después de 3 años de haber ingresado el equipo de rayos X 554 801 de la marca Leybold a la Universidad de Nariño, fue posible calibrarlo por primera vez tomando como referencia el ejemplo proporcionado por LD didactic del espectro de rayos X para un ánodo de molibdeno obtenido con un cristal de cloruro de sodio (NaCl). Se logró realizar una gráfica que coincidiera con la gráfica ejemplo en su forma y en los valores de ángulos de Bragg  $\theta$  para las líneas características  $K_\alpha$  y  $K_\beta$ , esto permitió concluir que el equipo estaba funcionando de manera adecuada y por ende se encontraba calibrado.
- El equipo de rayos X se utilizó para realizar con éxito las siguientes prácticas: fluorescencia de una pantalla luminosa debido a los rayos X, con la cual se verificó la dependencia del brillo y el contraste de la pantalla luminosa con respecto a la variación de la corriente de emisión y el voltaje del tubo; influencia de un medio de contraste en la absorción de rayos X, esta práctica permitió investigar como un medio de contraste afecta la absorción de rayos X; relación Duane-Hunt y determinación de la constante de Planck, con la que se confirmó la ley de Duane-Hunt y mediante esta el software determinó la constante de Planck con un error relativo porcentual del 8 % respecto al valor encontrado en la literatura; espectro de rayos X para un ánodo de molibdeno en función del voltaje y la corriente de emisión, en esta práctica se logró visualizar que la forma del espectro de rayos X depende del voltaje del tubo y la corriente de emisión;

producción de un haz monocromático de rayos X mediante un filtro, con la cual se observo el cambio la tasa de conteo en el espectro de rayos X al filtrarlo con una lamina de circonio; estructura fina de la radiación X característica del molibdeno, en esta práctica se logro ver con mayor resolución el espectro de rayos X característico del molibdeno, al estudiar por separado el espectro a primer y quinto orden de difracción; teniendo en cuenta que estas son las que se pueden realizar hasta el momento, debido a que el equipo solo cuenta con un ánodo de molibdeno, un goniómetro y una pantalla fluorescente incorporados, un cristal de cloruro de sodio y un sensor Geiger Müller. Estas prácticas son la base para entender el funcionamiento del equipo de rayos X, así como también permiten reconocer los elementos que lo conforman, además ayuda a comprender la física de los rayos X.

Si el equipo se dota con más elementos se podrán aumentar otras practicas a las descritas anteriormente, por ejemplo Transmisión (se necesita un conjunto de absorbentes) y Moseley (se necesita ánodos de materiales diferentes al de molibdeno).

- La pantalla fluorescente es un elemento del equipo de rayos X que permite observar imágenes, donde su calidad se ve influenciada por la corriente y el voltaje responsables de los elementos: brillo y contraste de dicha imagen respectivamente. Además el contraste se ve marcado de acuerdo a la capacidad de absorción de rayos X que tienen los materiales, dado que algunos los atenúan débilmente mientras que otros fuertemente convirtiéndose estos últimos en acreedores al título de medios de contraste, destacándose en este ámbito el yodo.
- El espectro continuo de rayos X empieza a formarse a partir de una longitud de onda mínima, la cual varía dependiendo de la diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo (voltaje), por ello su forma depende directamente de este voltaje, además su intensidad también se ve afectada por el valor de la corriente de emisión. El espectro característico de rayos X para el molibdeno se forma cuando se supera un voltaje crítico, por ejemplo para la serie *K* éste tiene un valor de  $20\text{ kV}$ , también se puede notar que para éste espectro la intensidad se ve afectada por el voltaje del tubo y la

corriente de emisión. Las líneas características del espectro de rayos X presentan intensidades máximas para ángulos específicos, es decir ángulos que cumplen la ley de Bragg. Debido a que para cada material estos ángulos son diferentes el espectro de rayos X es una propiedad intrínseca de cada material. Es importante resaltar que dependiendo del orden de difracción que se estudie en el espectro de rayos X se logra observar con mayor resolución las líneas características, es así como por ejemplo para primer orden de difracción solo se observa la línea  $K_\alpha$  y para quinto orden se observa un desdoblamiento de esta en  $K_{\alpha 1}$  y  $K_{\alpha 2}$ .

- Este trabajo servirá como apoyo fundamental para la construcción del manual de laboratorio de física moderna en el campo de rayos X.

# Apéndice A

## Normatividad para el uso de rayos X en Colombia

En el laboratorio de física moderna de la Universidad de Nariño se encuentra el equipo de rayos X con ánodo de molibdeno (Mo) modelo 554801 de la empresa LEYBOLD, su fecha de ingreso corresponde a Abril del año 2015, este equipo genera radiación ionizante con una tasa de dosis local de  $10 Sv/h$  en el cono de radiación del tubo de rayos X y menos de  $1 \mu Sv/h$  corresponde a la tasa de dosis local fuera del equipo.

En el laboratorio de física moderna al igual que en todos los laboratorios se deben cumplir las Normas de Bio-seguridad que se encuentran establecidas en el aula, además para el uso del equipo de rayos X 554 800 se deben cumplir las normas e instrucciones de seguridad del equipo de rayos X y los recuerde que es por su seguridad. En general los equipos generadores de radiación ionizante requieren del cumplimiento de normas que protejan la seguridad e integridad de las personas que usen o estén cercanas a un generador de radiación ionizante como lo es el caso del equipo de rayos X. El ministerio de salud y protección social de Colombia presenta la Resolución 482 de 2018 para la regulación de uso de equipos generadores de radiación ionizante y prestación de servicios de protección radiológica y control de calidad, esta se presenta a en la siguiente sección.

### A.1. Resolución 482 de 2018

Por la cual se reglamenta el uso de equipos generadores de radiación ionizante, su control de calidad, la prestación de servicios de protección radiológica y se dictan otras disposiciones. Artículos de interés en el uso de equipos que producen radiación ionizante en radiación ioni-

zante para propósitos de investigación.

**Artículo 1.** *Objeto.* La presente resolución tiene por objeto reglamentar tanto el uso de equipos generadores de radiación ionizante y su control de calidad en prácticas médicas, veterinarias, industriales o de investigación, a través del otorgamiento de licencias para el ejercicio de dichas prácticas, como la prestación de servicios de protección radiológica. Adicionalmente, mediante este acto administrativo se adoptan los Anexos Nos. 1, 2, 3, 4 y 5, que forman parte integral del mismo.

**Artículo 2.** *Ámbito de aplicación.* Las disposiciones contenidas en esta resolución se aplicarán a todas las personas naturales y jurídicas que en las prácticas a que refiere el artículo anterior, hagan uso de equipos generadores de radiación ionizante, a las personas naturales y jurídicas a quienes se les otorgue licencia para la prestación de servicios de protección radiológica y control de calidad y a las entidades territoriales de salud de carácter departamental y distrital.

**Artículo 3.** Actores que intervienen en el uso de equipos generadores de radiación ionizante. Los actores intervinientes en el uso de equipos generadores de radiación ionizante que se relacionan a continuación, deberán cumplir las responsabilidades detalladas en el Anexo No.1.

3.1. El Ministerio Salud y Protección Social.

3.2. Las entidades territoriales de salud de carácter departamental y distrital.

3.3. Las personas naturales y jurídicas que:

3.3.1. Hagan uso de equipos generadores de radiación ionizante.

3.3.2. Se les otorgue licencia para la prestación de servicios de protección radiológica y control de calidad.

**Artículo 14.** *Protocolos de control de calidad.* El Ministerio de Salud y Protección Social expedirá los protocolos de control de calidad de las prácticas que hacen uso de equipos generadores de radiación ionizante, los cuales deberán ser utilizados en la prestación de los servicios autorizados. Entre tanto, se aplicarán como mínimo los lineamientos internacionales establecidos en el protocolo ARCAL XLIX y el TECDOC 1151 del Organismo Internacional de Energía Atómica — OIEA y sus respectivas actualizaciones.

**Artículo 31.** *Licencia de práctica industrial, veterinaria o de investigación.* Los interesados en realizar una práctica industrial, veterinaria o de investigación que haga uso de equipos generadores de radiación ionizante, móviles o fijos, deberán solicitar la correspondiente licencia ante la entidad territorial de salud de carácter departamental o distrital de la jurisdicción en la que se encuentre la instalación donde se prevé realizar la práctica.

**Artículo 32.** *Categorización de la práctica.* Para efectos del otorgamiento de la licencia a que refiere el artículo anterior, se considerarán las siguientes categorías:

32.1. Categoría I. Radiología industrial de baja complejidad

32.2. Categoría II

32.2.1. Radiología industrial de alta complejidad

32.2.2. Radiología veterinaria

32.2.3. Radiología en investigación

**Parágrafo.** Las prácticas industriales, veterinarias o de investigación que no se encuentren expresamente señaladas en el presente artículo, se considerarán como categoría II [44]

### **A.1.1. Fundamento legal de la resolución de expedición de la Resolución 482 de 2018**

En el artículo 151 de la Ley 9 de 1979, mediante la cual se dictan medidas sanitarias, establece que toda persona que posea o use equipos de materiales productores de radiación ionizante, deberá tener licencia expedida por el Ministerio de Salud, hoy Ministerio de Salud y Protección Social, de igual manera el artículo 152 de la misma Ley determina que este Ministerio debe establecer las normas y reglamentaciones que se requieran para la protección de la salud y la seguridad de las personas contra los riesgos derivados de la radiación ionizante y adoptar las medidas necesarias para su cumplimiento [46].

## A.2. Señalización de zonas donde se encuentran equipos generadores de radiación ionizante

La señalización de las zonas de una instalación se sigue la normatividad internacional, realizadas por el Organismo Internacional de Energía Atómica. Se recomienda que el símbolo y la leyenda estén en un tamaño adecuado y proporcionado para el lugar donde se exhibe, y no se saturen las áreas de letreros o avisos.



Figura A.1: Símbolo internacional de la radiación ionizante [45].

Las instalaciones que hacen uso de equipos generadores de radiación son señalizadas usando el símbolo internacional de radiactividad, que es el trébol clásico, en color negro y fondo amarillo, como se muestra en la figura A.2. Para el caso, la Resolución 482 de 2018, requiere el uso del símbolo trébol magenta sobre amarillo para la señalización de las zonas de la instalación donde se está usando el equipo que está generando radiación ionizante, figura A.2. El símbolo puede ser incluido en los letreros de advertencia de cada zona, manteniendo la que se muestra en la Figura 2, donde el trébol es diseñado a partir de un circo central que mide X cm, encima del símbolo estará la leyenda “PRECAUCIÓN” o “ATENCIÓN”, debajo del símbolo, estará la leyenda “RADIACIÓN IONIZANTE” o “RAYOS X”. Para este

tipo de instalaciones con generadores de radiación ionizante, no aplica la leyenda “material radiactivo” o “fuente radiactiva”.

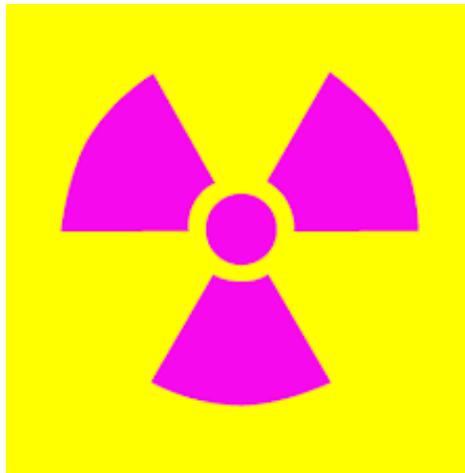


Figura A.2: Símbolo en Colombia para la radiación ionizante [46].

Se debe verificar las señales audibles o luminosas ubicadas al ingreso de las zonas controladas, donde se ubican los equipos generadores de radiación, deben estar conectadas con el obturador del equipo, de manera que la activación de estas no sea discreción o voluntad del operador del equipo y que este no tenga que preocuparse de activarla cada que obture el equipo. El tamaño y diseño de la señal luminosa exterior a la sala donde se encuentra el equipo generador de radiación ionizante es libre, pero se recomienda que de tamaño proporcionado para la sala y de color rojo o amarillo.

# Apéndice B

## Difracción de rayos X en redes cristalinas

### B.1. Introducción

Tras el descubrimiento de los rayos X en 1895 por Röntgen; en 1912 el físico Max Von Laue dio inicio a la cristalografía de rayos X en base a tres hipótesis: el medio cristalino es periódico, los rayos X son ondas y la longitud de onda de los rayos X es del mismo orden de magnitud de la separación entre capas que se repite entre los cristales. Con lo que fue capaz de confirmar la difracción de rayos X. A continuación Bragg encontró que la geometría de la difracción de rayos X es la misma aplicada en la reflexión de un haz de luz en un espejo plano, de esta manera permite interpretar planos de cierta distribución periódica de los átomos en una estructura tridimensional cristalina, descubriendo así padre e hijo, William Henry Bragg y William Lawrence Bragg respectivamente, la conocida Ley de Bragg, estos aportes en la cristalografía con rayos X los hicieron merecedores del premio nobel de Física en 1915.

En este capítulo se realiza un estudio más detallado del fenómeno de difracción de rayos X (DRX), en su interacción con estructuras cristalinas. Para ello comenzaremos hablando sobre los cristales y su geometría, es decir, su estructura cristalina; y de esta manera realizar el acople con nuestro estudio inicial (física de rayos X). Dentro de ello se involucran algunos conceptos importantes, además de la deducción de las ecuaciones que describen dichos fenómenos, esto nos permitirá conocer la estructura atómica de los materiales. En el fenómeno de la difracción se encuentran involucrados muchos átomos que están organizados periódicamente de forma tridimensional, formando una red cristalina. Con la estructura que se forma es posible trazar infinitos planos paralelos constituidos por una serie de puntos; a la separación entre planos se le llama distancia interplanar “d”. Cuando un haz de rayos X pasa

por al menos dos de sus planos el ángulo de incidencia es el mismo de dispersión, si los rayos dispersados están en fase se tendrá una interferencia constructiva y será posible detectar el rayo difractado.

## **B.2. Estructura Cristalina**

Los experimentos han demostrado que los sólidos están compuestos de átomos, iones o moléculas ordenados entre sí formando un patrón periódico tridimensional con ciertas relaciones de simetría. Tal grupo de sólidos se les conoce como un **crystal**. Se dice que un sólido es un cristal si los átomos están dispuestos de tal manera que sus posiciones son exactamente periódicas. Hay varios tipos de estructura cristalina, dependiendo de la geometría de la disposición atómica se tienen los monocristales donde los cristales están dispuestos de forma contigua y son de una sola sustancia mientras que los policristales son un agregado de cristales de diferentes sustancias que también toman el nombre de cristalitas o granos cristalinos. Por otra parte es importante aclarar que no todos los sólidos son cristalinos, algunos son **amorfos**, es decir, tienen una disposición irregular de sus átomos, iones o moléculas.

Para su estudio, los cristales se representan como una red formado por una matriz tridimensional de puntos, constituida por celdas unidad. Hay dos clases de redes: la Bravais y la no Bravais. En una red de Bravais, todos los puntos reticulares son equivalentes, y por lo tanto necesariamente todos los átomos en el cristal son del mismo tipo. Por otro lado, en una red no Bravais, algunos de los puntos reticulares no son equivalentes. Un enrejado no Bravais a veces se conoce como un enrejado con una base, la base se refiere al conjunto de átomos estacionados cerca de cada sitio de un enrejado Bravais.

### **B.2.1. Celda unidad**

La forma mas simple de una estructura cristalina es una celda unidad que al ser trasladada varias veces genera el cristal, se caracteriza por tres vectores que definen las tres direcciones independientes del sistema de coordenadas de la celda, de esta manera, contiene **seis**

**parámetros de red** correspondientes a: los módulos  $a$ ,  $b$ , y  $c$  de los tres vectores, y los ángulos  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , como se puede observar en la figura B.1. La acumulación de celdas unidad para la creación de un cristal hace que un átomo de un vértice de la misma sea compartido por un total de ocho celdas. La celda que contenga un átomo se le llama **celda primitiva**.

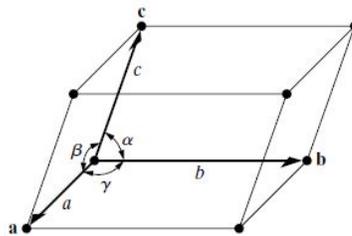


Figura B.1: Parámetros de red de una celda unidad [1].

### B.2.2. Designación de puntos, planos y redes

A cada punto dentro de la red o enrejado se le asigna un vector de posición  $\mathbf{r} = u'\mathbf{a} + v'\mathbf{b} + w'\mathbf{c}$ . El punto localizado por  $\mathbf{r}$  debe ser un punto reticular y sus coordenadas se escriben simplemente como un triplete ordenado  $(u'v'w')$ . Los puntos en el espacio que no son puntos reticulares tienen valores no enteros de  $u'$ ,  $v'$  y  $w'$ , y es posible escribir  $\mathbf{r}$  como la suma de múltiplos enteros  $n, p, q$  de los vectores reticulares más fracciones  $u, v$  y  $w$  de los vectores de traslación así:  $\mathbf{r} = (n+u)\mathbf{a} + (p+v)\mathbf{b} + (q+w)\mathbf{c}$  escrito de otro modo  $\mathbf{r} = (n\mathbf{a} + p\mathbf{b} + q\mathbf{c}) + (u\mathbf{a} + v\mathbf{b} + w\mathbf{c})$ . Cuando escribimos entre corchetes  $u, v, w$  como sigue  $[uvw]$ , corresponden a los índices de la dirección de la línea. También son índices de cualquier línea paralela a la línea dada, ya que la red es infinita y el origen puede tomarse en cualquier punto. Cualesquiera que sean los valores de  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ , siempre se convierten en un conjunto de enteros más pequeños por multiplicación o división, por ejemplo:  $[\frac{1}{2}\frac{1}{2}1]$ ,  $[112]$ , y  $[224]$  todos representan el mismo punto, pero se prefiere  $[112]$ . Por otro lado, los índices negativos se escriben con una barra encima del número:  $[\bar{1}12]$

La orientación de los planos en una red también puede representarse simbólicamente, por los

llamados índices de Miller (definidos como los recíprocos de las intersecciones fraccionarias que hace el plano con los ejes cristalográficos. Por ejemplo, si los índices de Miller de un plano son  $(hkl)$ , escritos entre paréntesis, entonces el plano hace intersecciones fraccionales de  $1/h, 1/k, 1/l$  con los ejes, y, si las longitudes axiales son  $a, b, c$ , el plano realiza intersecciones reales  $(a/h, b/k, c/l)$ . En el caso general, el plano dado se inclinará con respecto a los ejes cristalográficos, y, dado que estos ejes forman un marco de referencia conveniente, la orientación del plano podría describirse dando las distancias reales, medidas desde el origen, a los puntos que intercepta los tres ejes.

Cada plano tiene una distancia interplanar  $d_{hkl}$ , medida con respecto a ángulos rectos y las constantes de red  $(a, b, c, \alpha, \beta, \gamma)$

### B.2.3. Red recíproca

Los vectores  $a_i$  es decir  $(a, b, c)$  definen los vectores base de una red tridimensional, pero también es posible crear una red recíproca  $\mathbf{b}_i$ , relacionada con la red real mediante los vectores:

$$\mathbf{b}_1 = \frac{\mathbf{a}_2 \times \mathbf{a}_3}{\mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{a}_2 \times \mathbf{a}_3}. \quad (\text{B.1})$$

$$\mathbf{b}_2 = \frac{\mathbf{a}_3 \times \mathbf{a}_1}{\mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{a}_2 \times \mathbf{a}_3}. \quad (\text{B.2})$$

$$\mathbf{b}_3 = \frac{\mathbf{a}_1 \times \mathbf{a}_2}{\mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{a}_2 \times \mathbf{a}_3}. \quad (\text{B.3})$$

La permutación de los índices se realiza cíclicamente hacia la derecha. El producto del numerador permite tener una red recíproca diestra y el producto del denominador es el volumen de la celda unitaria de la red espacial directa y este volumen es el mismo independientemente de los multiplicandos. Las unidades de la red recíproca son  $\text{Å}^{-1}$ . Los productos cruz garantizan la propiedad de ortogonalidad de la red recíproca, por otra parte, un vector  $\mathbf{H}_{hkl}$  dibujado desde el origen del espacio recíproco a cualquier punto en el espacio recíproco que tiene coordenadas  $h, k, l$  es perpendicular al plano en el espacio directo cuyos índices de Miller

son  $hkl$ . La longitud  $\mathbf{H}_{hkl}$  del vector de red recíproca:  $\mathbf{H}_{hkl} = h\mathbf{b}_1 + k\mathbf{b}_2 + l\mathbf{b}_3$  es igual al recíproco de la periodicidad de  $(hkl)$ , es decir:  $\mathbf{H}_{hkl} = \frac{1}{\mathbf{d}_{hkl}}$ .

El vector de espacio directo  $[hkl]$  en sistemas no cúbicos no será necesariamente perpendicular a  $(hkl)$ . Además por medición directa las longitudes de los vectores reticulares recíprocos son iguales a la inversa del espaciado entre los planos correspondientes.

Un conjunto de planos reticulares paralelos  $(hkl)$  se identifica mediante su orientación y su periodicidad. Estos son dados por lo normal a los planos (una sola dirección) y el espacio entre los planos ( $\mathbf{d}_{hkl}$ ). Un único punto reticular en el espacio recíproco, definido por el vector  $\mathbf{d}_{hkl}$ , es suficiente, por lo tanto, para representar la serie infinita de planos espaciales físicos directos.

Es importante tener en cuenta que los índices de un plano o dirección no tienen sentido a menos que se indique la orientación de los ejes de la celda unitaria. Esto significa que los índices de un plano reticular particular dependen de la celda unidad elegida.

#### B.2.4. Sistemas Cristalinos

Si se considera solamente la simetría de las redes<sup>1</sup>, solamente existen 7 diferentes formas de arreglar los puntos en el espacio de manera periódica, caracterizados por sus propias operaciones de simetría. Además existe: 14 redes de Bravais, 32 grupos puntuales, 11 clases de Laue y 230 grupos espaciales. En la figura B.2 las diferentes redes de Bravais propias para cada uno de los sistemas cristalinos.

<sup>1</sup>Una red cristalina tiene cuatro simetrías: reflexión, rotación, inversión, roto-inversión

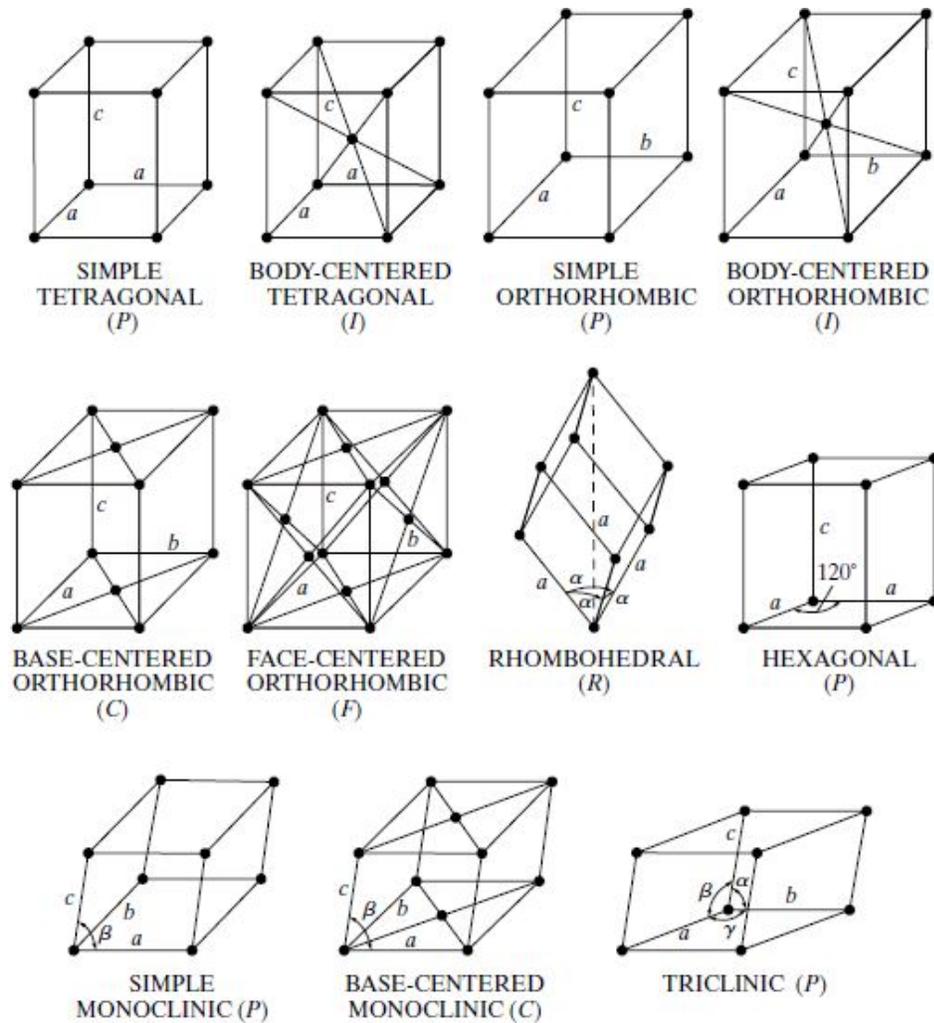


Figura B.2: Redes de Bravais [1].

Cualquier celda que contenga puntos reticulares en las esquinas es primitiva, mientras que una contiene puntos adicionales en el interior o en las caras no es primordial, simbolizadas con P y R. Los puntos reticulados en una celda unitaria no primaria se pueden extender a través del espacio mediante aplicaciones repetidas de los vectores de celda unitaria  $a, b, c$  al igual que los de una celda primitiva. Los puntos reticulares asociados con una celda unitaria se pueden traducir uno por uno o como un grupo. Los símbolos F e I se refieren a células centradas en la cara y centradas en el cuerpo, respectivamente, mientras que A, B y C se

refiere a celdas centradas en la base, centradas en un par de caras opuestas A, B o C. (La cara A es la cara definida por los ejes b y c, etc.) El símbolo R se usa especialmente para el sistema romboédrico.

En cualquier sistema cristalino hay conjuntos de planos reticulares equivalentes relacionados por simetría. Estos se llaman planos de una forma o una familia de planos, y los índices de cualquier plano, encerrados entre llaves  $hkl$ , representan todo el conjunto. En general, los planos de una forma tienen el mismo espaciado pero diferentes índices de Miller.

Los planos de una zona son planos que son todos paralelos a una línea, llamado eje de zona, y la zona, es decir, el conjunto de planos, se especifica dando los índices del eje de la zona. Dichos planos pueden tener índices y espaciamientos bastante diferentes, el único requisito es que sean paralelos a una sola línea. Si el eje de una zona tiene índices  $[uvw]$ , entonces cualquier plano pertenece a esa zona cuyos índices  $(hkl)$  satisfacen la relación:

$$hu + kv + lw = 0. \quad (\text{B.4})$$

Dos planos no paralelos son planos de una zona ya que ambos son paralelos a su línea de intersección. Si sus índices son  $(h_1k_1l_1)$  y  $(h_2k_2l_2)$ , entonces los índices de su eje de zona  $[uvw]$  están dados por  $[h_1k_1l_1] \times [h_2k_2l_2]$ , es decir,

$$\begin{aligned} u &= k_1l_2 \times k_2l_1, \\ v &= l_1h_2 \times l_2h_1, \\ w &= h_1k_2 \times h_2k_1. \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

Además los espaciamientos interplanares  $d_{hkl}$  para  $hkl$  dependen del sistema cristalino involucrado, por ejemplo para sistema cúbico:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}. \quad (\text{B.6})$$

En el sistema tetragonal (figura B.2, la ecuación de espaciamiento involucra naturalmente los parámetros de red a y c ya que estos no son generalmente iguales:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2(a^2/c^2)}}. \quad (\text{B.7})$$

### B.2.5. Estructura de cristales

Ahora es el momento de describir la estructura de algunos cristales reales y relacionar esta estructura con las retículas puntuales, los sistemas cristalinos y los elementos de simetría discutidos anteriormente, para ello aclaremos algunos aspectos importantes: las características asociadas con cada punto de la red se denominan la base de la red, y esto se aplica a las redes unidimensionales y bidimensionales, así como a las estructuras cristalinas tridimensionales. Los cristales más simples imaginables son los formados por la colocación de átomos del mismo tipo en los puntos de una red de Bravais. No todos estos cristales existen, pero muchos metales se cristalizan de esta manera simple; en la estructura cristalina de compuestos de átomos diferentes, las estructuras se construyen sobre el esqueleto de una red de Bravais, pero deben obedecer ciertas reglas, dada la gran variedad de átomos, las cuales se mencionan a continuación:

- Las estructuras con redes de Bravais centradas en el cuerpo, la cara o la base, si están presentes, deben comenzar y terminar en átomos del mismo tipo. Por ejemplo, si la estructura se basa en una red centrada en el cuerpo, entonces debe ser posible pasar de un átomo A, digamos, a otro átomo A mediante la traslación.
- El conjunto de átomos A en el cristal y el conjunto de los átomos B deben poseer por separado los mismos elementos de simetría que el cristal en su conjunto, ya que de hecho forman el cristal. En particular, la operación de cualquier elemento de simetría presente debe traer un átomo dado, A por ejemplo, en coincidencia con otro átomo del mismo tipo, a saber, A.

Ahora consideremos las estructuras de los cristales CsCl y NaCl, en la figura B.3 ilustra las celdas unitarias de dos compuestos iónicos, CsCl y NaCl. Estas estructuras, ambas cúbicas, son comunes en muchos otros cristales. Al considerar una estructura cristalina, una de las

cosas más importantes es determinar su red de Bravais, ya que es el marco básico sobre el que se construye el cristal y porque tiene un efecto profundo en la forma en que ese cristal difracta los rayos X.

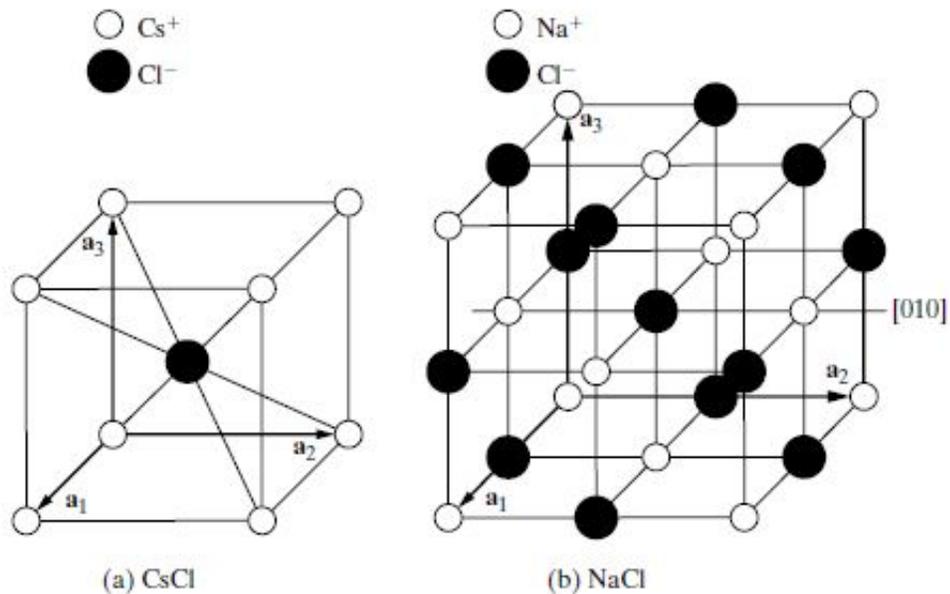


Figura B.3: Estructuras cristalinas del CsCl y NaCl [1].

Iniciemos con el CsCl, en la figura B.3 (a) se muestra que la celda unitaria contiene dos átomos, iones realmente, ya que este compuesto está completamente ionizado incluso en estado sólido: un ion cesio a  $[000]$  y un ion cloro en  $[\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}]$ . La red de Bravais obviamente no está centrada en la cara, pero la traducción centrada en el cuerpo conecta dos átomos. Sin embargo, estos son diferentes a los átomos y la red no está centrada en el cuerpo. Es por eliminación, simple cúbico. Si uno desea, puede pensar que ambos iones, el cesio en  $[000]$  y el cloro en  $[\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}]$ , están asociados con el punto de la red en  $[0\ 0\ 0]$ . Sin embargo, no es posible asociar un ion de cesio con ningún ion de cloro en particular, y referirse a ellos como una molécula de CsCl; el término “molécula”, por lo tanto, no tiene una importancia física real en un cristal así, y lo mismo ocurre con la mayoría de los compuestos y aleaciones inorgánicas.

A continuación observemos la estructura del NaCl, el cual presenta una red de Bravais cubica centrada en la cara, como se muestra en la figura B.3 (b) la celda unitaria de NaCl contiene 8 iones, localizados de la siguiente manera:

$$\begin{array}{l} 4Na^+ \quad en \quad [000] \quad \left[\frac{1}{2}\frac{1}{2}0\right] \quad \left[\frac{1}{2}0\frac{1}{2}\right] \quad \left[0\frac{1}{2}\frac{1}{2}\right] \\ 4Cl^- \quad en \quad \left[\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}\right] \quad \left[00\frac{1}{2}\right] \quad \left[0\frac{1}{2}0\right] \quad \left[\frac{1}{2}00\right] \end{array}$$

los iones de sodio están claramente centrados en la cara  $[000]$  y  $\left\langle\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}\right\rangle$ , cuando se aplican al cloro Ion a  $\left[\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}\right]$ , se reproduciría todos los iones de cloro.

### B.3. Difracción

La difracción se debe esencialmente a la existencia de ciertas relaciones de fase entre dos o más ondas<sup>2</sup> y un haz difractado puede definirse como un haz compuesto por un gran número de rayos dispersos que se refuerzan mutuamente. La difracción es, por lo tanto, esencialmente un fenómeno de dispersión y no un tipo de interacción “nueva” entre los rayos X y los átomos. Los átomos dispersan rayos X incidentes en todas las direcciones y en algunas de estas direcciones los rayos dispersos estarán completamente en fase y se reforzarán entre sí para formar rayos difractados.

---

<sup>2</sup>Dos rayos están completamente en fase cada vez que sus longitudes de trayectoria difieren en cero o en un número entero de longitudes de onda. Las diferencias en la longitud de la trayectoria de varios rayos surgen de forma bastante natural cuando se considera cómo un cristal difracta los rayos X

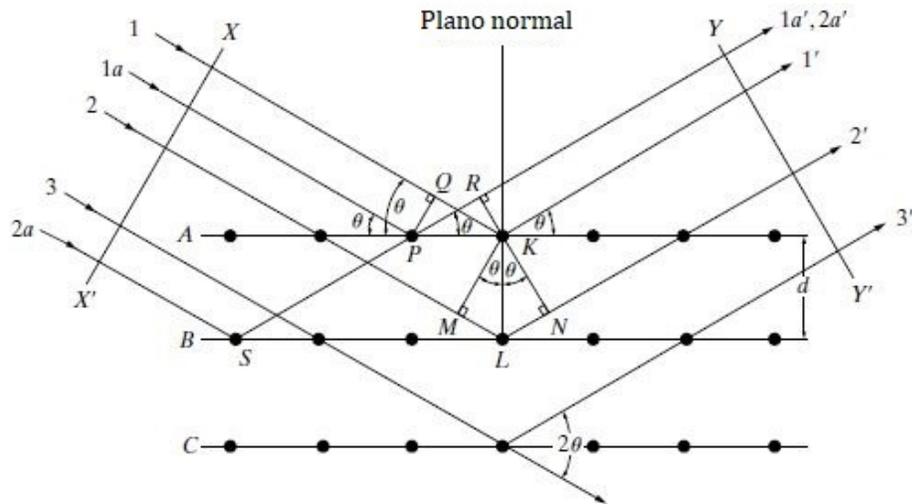


Figura B.4: Difracción de un haz de rayos X por un cristal [1].

Ahora estudiemos la geometría de la difracción de un haz de rayos X en un cristal. La figura B.4 muestra una sección de un cristal, sus átomos dispuestos en un conjunto de planos paralelos A, B, C, D, normal al plano del dibujo y espaciados a una distancia  $d$ . Si un haz de rayos X perfectamente paralelos y perfectamente monocromáticos de longitud de onda  $\lambda$  incide en este cristal a un ángulo  $\theta$ , llamado *ángulo de Bragg*<sup>3</sup>. Para las condiciones particulares descritas en la figura B.4, el único haz difractivo formado es el que se muestra, es decir, uno que forma un ángulo de salida  $\theta$  con respecto a los planos de difracción<sup>4</sup> igual al ángulo de incidencia. Estudiemos este fenómeno, primero, para un plano de átomos y, segundo, para todos los átomos que forman el cristal.

Consideremos los rayos 1 y 1a en el haz incidente; golpean los átomos K y P en el primer plano de los átomos y se dispersan en las direcciones 1' y 1a' sin embargo, estos haces dispersos están completamente en fase y son capaces de reforzarse entre sí; lo hacen porque la diferencia en la longitud de su trayectoria entre los frentes de onda  $XX'$  y  $YY'$  es igual a:

<sup>3</sup>Se mide entre el haz incidente y los planos de cristal considerados.

<sup>4</sup>Note que estos ángulos se definen de manera diferente en la difracción de rayos X y en la óptica general. En este último, los ángulos de incidencia y reflexión son los ángulos que los haces incidentes y reflejados forman con la normal a la superficie reflectante.

$$QK - PR = PK \cos \theta - PK \cos \theta = 0.$$

Esto también ocurre con los rayos dispersados por todos los átomos del primer plano en una dirección paralela a  $1'$  están en fase y agregan sus contribuciones al haz difractado. Esto ocurre para todos los planos. Ahora estos rayos se refuerzan de la siguiente manera: por ejemplo, los rayos 1 y 2, han sido dispersados por los átomos K y L donde la diferencia de caminos  $1K1'$  y  $2L2'$  es:

$$ML + LN = d \sin \theta + d \sin \theta.$$

Los rayos dispersos estarán completamente en fase y darán lugar al fenómeno de difracción, si la diferencia de trayectoria es igual a un número entero  $n$  de longitudes de onda, o si:

$$n\lambda = 2d \sin \theta. \quad (\text{B.8})$$

La relación B.8 es conocida como la *Ley de Bragg* y formulada por primera vez por William Lawrence Bragg. En dicha relación  $n$  se llama *orden de difracción*; puede tomar cualquier valor entero, de tal manera que sea consistente para que  $\sin \theta$  no exceda la unidad y es igual al número de longitudes de onda en la diferencia de trayectoria entre los rayos dispersados por los planos adyacentes. Por lo tanto, para valores fijos de  $\lambda$ , puede haber varios ángulos de incidencia  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$  en los que puede ocurrir la difracción, correspondientes a  $n = 1, 2, 3, \dots$ . El haz difractado es bastante fuerte en comparación con la suma de todos los rayos dispersos en la misma dirección, simplemente debido al refuerzo que se produce<sup>5</sup>, pero es extremadamente débil en comparación con el haz incidente ya que los átomos de un cristal dispersan solo una pequeña fracción de la energía incidente de ellos.

---

<sup>5</sup>Si los átomos dispersantes no estuvieran dispuestos de manera regular, periódica sino de alguna manera independiente, entonces los rayos dispersados por ellos tendrían una relación de fase aleatoria entre sí. En otras palabras, habría una probabilidad igual de que la diferencia de fase entre dos rayos dispersos que tengan cualquier valor entre cero y una longitud de onda. En estas condiciones no se producen interferencias constructivas ni destructivas, y la intensidad del haz dispersado en una dirección particular es simplemente la suma de las intensidades de todos los rayos dispersos en esa dirección.

Importante aclarar las diferencias entre la difracción de los rayos X por los cristales y la reflexión de la luz visible por los espejos, dado en ambos fenómenos el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión y puede parecer que consisten en el mismo fenómeno, (parece que los planos de los átomos actúan como pequeños espejos que reflejan las radiografías). La difracción y la reflexión, sin embargo, difieren fundamentalmente en al menos tres aspectos:

- El rayo difractado de un cristal está compuesto por los rayos dispersados por todos los átomos del cristal que se encontraron en la trayectoria del rayo incidente, mientras que el rayo reflejado de luz visible tiene lugar únicamente en una capa superficial delgada.
- La difracción de los rayos X monocromáticos tiene lugar solo en aquellos ángulos de incidencia particulares que satisfacen la ley de Bragg, mientras que el reflejo de la luz visible puede ocurrir en cualquier ángulo de incidencia.
- El reflejo de la luz visible por un buen espejo es casi 100 % eficiente, mientras que la intensidad de un haz de rayos X difractado es extremadamente pequeña en comparación con la del haz incidente, como se había mencionado anteriormente.

Cabe resaltar que a pesar de lo descrito se usa frecuentemente los términos planos reflectantes y haces reflejados al referirse a los planos difractantes y los haces difractados, este es un uso común pero siempre se debe tener en cuenta que difracción no significa reflexión<sup>6</sup>.

### **B.3.1. Ley de Bragg:**

Al conseguir una interferencia constructiva, es decir cuando los la radiación difractada por diferentes átomos está en fase proporcional a  $2\pi$  nos encontramos el cumplimiento de la Ley de Bragg. Para un mejor entendimiento es necesario aclarar algunos puntos geométricos:

- El rayo incidente, el plano normal al reflectante y el rayo difractado son siempre coplanares.

---

<sup>6</sup>Los rayos X pueden reflejarse totalmente en una superficie sólida, al igual que la luz visible en un espejo, pero solo en ángulos de incidencia muy pequeños (por debajo de aproximadamente un grado).

- El ángulo entre el haz difractado y el haz transmitido es siempre  $2\theta$ , esto se conoce como ángulo de difracción y  $\theta$  es el ángulo medido experimentalmente.

Recordemos que la difracción en general ocurre solo cuando la longitud de onda del movimiento de onda es del mismo orden de magnitud que la distancia de repetición entre los centros de dispersión (distancia interatómica), ello se desprende de la ley de Bragg, dado que  $\sin\theta$  no puede exceder la unidad, por tanto:

$$\frac{n\lambda}{2d} = \sin(\theta) \geq 1 \quad (\text{B.9})$$

De esta manera,  $n\lambda$  es menor que  $2d$  y  $n$  es un número entero mayor e igual que 1<sup>7</sup>. Por lo tanto, la condición de difracción para cualquier ángulo observable  $2\theta$  es:

$$\lambda < 2d$$

Teniendo en cuenta que para una amplia cantidad de cristales el valor de la distancia interplanar corresponde a valores menores e iguales a 3 Armstrongs, implica que la longitud de onda de un haz incidente debe ser menor a 6 amstrongs para que se produzca el fenómeno de difracción.

Por otra parte, podemos escribir la ley de Bragg así:

$$\lambda = \frac{2d\sin\theta}{n}$$

Si la difracción es de primer orden podemos escribir:

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

---

<sup>7</sup> $n = 0$  hace referencia a un rayo difractado con la misma dirección que el transmitido, hecho que no es observable.

No hay infinitos órdenes de difracción (puesto que  $\text{sen}\theta \geq 1$ ) y su número máximo depende de las condiciones experimentales: la deposición y tipo de cristal, teniendo en cuenta que los ángulos de difracción  $\theta$  depende sólo de la geometría de la red, y no de la naturaleza de los átomos y la longitud de onda:

$$n_{max} = \frac{2d}{\lambda}$$

# Bibliografía

- [1] B.D. Cullity y S.R. Stock, *Elements of X-Ray Diffraction*, Edinburgh gate, 2014, Pearson Education Limited, p.1-19, 91-94.
- [2] L. H. Ulloa, *Historia de la medicina (Revista de la facultad de medicina Universidad Nacional de Colombia): Röentgen y el descubrimiento de rayos X*, Vol.43 N° (Págs.150-152), 1995, p.150, disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/22596/1/19228-63070-1-PB.pdf>, Fecha de consulta: Abril de 2018.
- [3] Harvey E. y White, *Física Moderna*, Universidad de California, México, Limusa, 2010, p. 884.
- [4] Jens Als-Nielsen y Des McMorrow, *Elements of Modern X-ray Physics*, United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd, 2011, p. 1-23, 29.
- [5] J. Pardiell, 2018, *Física de los rayos X*, disponible en: <http://www.pardell.es/fisica-de-los-rayos-x.html>, Fecha de consulta: Marzo de 2018.
- [6] C. Mignone, R. Barnes, 2012, *Más allá de lo que el ojo ve: el espectro electromagnético*, Science in School the European journal for science teachers, disponible en: <https://www.scienceinschool.org/es/2011/issue20/em>, Fecha de consulta: Marzo de 2018.
- [7] *Radiaciones*, disponible en: <https://www.uv.es/DSSQA/documentacion/castellano/PDF/14%20RADIACIONES.pdf>, Fecha de consulta: Marzo de 2018.
- [8] G. González y C. Rabin, *Para entender las RADIACIONES*, Universidad de la República, Uruguay, DIRAC, 2011, p. 17.
- [9] L. Andrade, P. Muñoz. Grupo de trabajo “Experiencias con rayos X”.
- [10] M.Olmo R.Nave. *HyperPhysics: Estructura Fina del Hidrógeno*, disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/quantum/hydfin.html>: Noviembre de 2018.
- [11] LD DIDACTIC GmbH. *LD Physics Leaflets: Fine structure of the characteristic x-radiation of a molybdenum anode*, P6.3.6.1. Disponible en: [https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p6/p6361\\_e.pdf](https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p6/p6361_e.pdf). Fecha de consulta: junio de 2018.

- [12] *Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección*, Organización Mundial de la Salud, 2016, disponible en: <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>, Fecha de consulta: Abril de 2018
- [13] S. G. Benka y G. B. Lubkin, 1995, *Special Issue: X Rays 100 Years Later*, Physics Today, disponible en: <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.881455>, Fecha de consulta: Mayo de 2018.
- [14] *TEMA 6. ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X Y ELECTRONICA*, DocPlayer, 2018, disponible en: <https://docplayer.es/21563460-Tema-6-espectroscopia-de-rayos-x-y-electronica.html>, Fecha de consulta: Junio de 2018.
- [15] Dr. Michael Hund. *LD DIDACTIC GmbH: Aparato de rayos X*, disponible en: <https://www.leybold-didactic.de>. Fecha de consulta: marzo de 2018.
- [16] Dr. Michael Hund. *LD DIDACTIC GmbH: Instruction sheet 554 800, 08/14-W03*, Disponible en: <https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/GA/GA/5/554/554800e.pdf>. Fecha de consulta: octubre de 2017.
- [17] Dr. Sel. *LD DIDACTIC GmbH: Instrucciones de servicio 554 83, 08/14-W03*, Disponible en: <https://manualzz.com/doc/5418987/goni%C3%B3metro-archivo>. Fecha de consulta: marzo de 2018.
- [18] *Prácticas de Laboratorio: Detección de radiación mediante contador Geiger-Muller.*, Disponible en: <https://www.ugr.es/amaro/radiactividad/practicas/geiger.pdf>. Fecha de consulta: noviembre de 2018
- [19] *DIN EN 61010-1*, Disponible en: [https://www.techstreet.com/standards/din-en-61010-1?product\\_id=1069265](https://www.techstreet.com/standards/din-en-61010-1?product_id=1069265) Fecha de consulta: noviembre de 2018
- [20] *Plansee Colimadores para detectores de rayos X.*, Disponible en: <https://www.plansee.com/es/productos/componentes/generacion-proteccion-y-guiado-de-radiacion/colimadores-para-detectores-de-rayos-x.html> Fecha de consulta: noviembre de 2018

- [21] E. R. Castro. *MANUAL DE CALIBRACIÓN DE EQUIPOS DE RAYOS X MEDIANTE LA MEDICIÓN DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA: MANUAL DE PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO DE RAYOS X*, Guatemala, 2004, p.49.
- [22] R.A. Serway, C.J.Moses, C.A.Morey. *FÍSICA MODERNA: Rayos X*, Thomson, 2003, p.86-87.
- [23] LD DIDACTIC GmbH. *LD Physics Leaflets: Bragg reflection diffraction of x-rays at a monocystal*, P6.3.3.1. Disponible en: [https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p6/p6331\\_e.pdf](https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p6/p6331_e.pdf). Fecha de consulta: marzo de 2018.
- [24] *Definicion: Definición de Brillo*, disponible en: <https://definicion.mx/brillo/>. Fecha de consulta: Octubre de 2018.
- [25] *Diferencias.info: Diferencia entre Brillo y Contraste*, disponible en: <https://diferencias.info/diferencia-entre-brillo-y-contraste/>. Fecha de consulta: Octubre de 2018.
- [26] LD DIDACTIC GmbH. *LD Physics Leaflets: Fluorescence of a luminous screen due to x-rays*, P6.3.3.1. Disponible en: [https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p6/p6311\\_e.pdf](https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p6/p6311_e.pdf). Fecha de consulta: marzo de 2018.
- [27] *ENCYCLOPEDIA BRITANNICA: Fluorescencia*, disponible en: <https://www.britannica.com/science/fluorescence>. Fecha de consulta: julio de 2018.
- [28] *MEDIOS DE CONTRASTE RADIOLOGICOS*, disponible en: <http://radiologiarte.tripod.com/contrasterx.htm>. Fecha de consulta: julio de 2018.
- [29] LD DIDACTIC GmbH. *LD Physics Leaflets: Influence of a contrast medium on the absorption of X-rays*, P6.3.3.6. Disponible en: [https://www.ld-didactic.de/documents/EN-US/EXP/P/P6/P6316\\_e.pdf](https://www.ld-didactic.de/documents/EN-US/EXP/P/P6/P6316_e.pdf). Fecha de consulta: marzo de 2018.
- [30] GRUPO TRANSMERQUIM.2014, *HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD: YODURO DE POTASIO*, p.6. Disponible en: [http://www.gtm.net/images/industrial/y/YODURO %20DE %20POTASIO.pdf](http://www.gtm.net/images/industrial/y/YODURO%20DE%20POTASIO.pdf). Fecha de consulta: marzo de 2018.

- [31] LD DIDACTIC GmbH. *LD Physics Leaflets: Influence of a contrast medium on the absorption of X-rays*, P6.3.3.6. Disponible en: [https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/P/P6/P6316\\_e.pdf](https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/P/P6/P6316_e.pdf). Fecha de consulta: marzo de 2018.
- [32] J. Agudelo. *Efecto Fotoeléctrico Y La Relación De Duane-Hunt: Practica N° 3*, disponible en: <https://es.scribd.com/document/79420249/Practica-3-El-Efecto-Fotoelectrico-Y-La-Relacion-De-Duane-Hun>. Fecha de consulta: septiembre de 2018.
- [33] Departamento de física teórica Universidad de Valencia. *Laboratorio virtual de física cuántica: P5-Espectro de Rayos X*, disponible en: [https://www.uv.es/inecfis/QPhVL/p5/p5\\_intro.html](https://www.uv.es/inecfis/QPhVL/p5/p5_intro.html). Fecha de consulta: septiembre de 2018.
- [34] LD DIDACTIC GmbH. *LD Physics Leaflets: Duane-Hunt relation and determination of Planck's constant*, P6.3.3.3. Disponible en: [https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p6/p6333\\_e.pdf](https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p6/p6333_e.pdf). Fecha de consulta: junio de 2018.
- [35] J. Gratton. *Introducción a la mecánica cuántica: Radiación, fotones y la constante de Planck*, Buenos Aires, 2003, p.31.
- [36] LD DIDACTIC GmbH. Disponible en: <https://www.ld-didactic.de/en/ld-didactic-group.html>: noviembre de 2018.
- [37] *EcuRed: Rx*, disponible en: <https://www.ecured.cu/Rx>. Fecha de consulta: septiembre de 2018.
- [38] J.A. Tabares. *Laboratorio de física moderna 1: capítulo 5*, Universidad del Valle, 2010, p.79-85.
- [39] LD DIDACTIC GmbH. *LD Physics Leaflets: Investigating the energy spectrum of an x-ray tube as a function of the high voltage and the emission current*, P6.3.3.2. Disponible en: [https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p6/p6332\\_e.pdf](https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p6/p6332_e.pdf). Fecha de consulta: junio de 2018.
- [40] *SCITECH: Atenuación de rayos X*, disponible en: <http://www.scitech.pe/producto/educacion/experimentos-de-fisica/fisica-atmica-y-nuclear/fisica-de-rayos-x/atenuacion-de-rayos-x-detail>. Fecha de consulta: agosto de 2018.
- [41] LD DIDACTIC GmbH. *LD Physics Leaflets: Investigating the attenuation of x-rays as a function of the absorber material and absorber thickness*, P6.3.2.1, p. 1, disponible en: [https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p6/p6321\\_e.pdf](https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p6/p6321_e.pdf). Fecha de consulta: agosto de 2018.

- [42] LD DIDACTIC GmbH. *LD Physics Leaflets: Edge absorption: filtering x-rays*, P6.3.3.5. Disponible en: [https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p6/p6335\\_e.pdf](https://www.ld-didactic.de/literatur/hb/e/p6/p6335_e.pdf). Fecha de consulta: junio de 2018.
- [43] A. Martínez. 2009, *La Mecánica Cuántica: Las reglas de selección*, disponible en: <http://la-mecanica-cuantica.blogspot.com/2009/08/las-reglas-de-seleccion.html>. Fecha de consulta: octubre de 2018.
- [44] *Resolución número 482 de 2018*, Ministerio de Salud y Protección Social, 2018, disponible en: [https://www.minsalud.gov.co/Normatividad\\_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%20No.%20482-20de%202018.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%20No.%20482-20de%202018.pdf), Fecha de consulta: octubre de 2018.
- [45] *El peligro de la radiación*, Peda.net, 2018, disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/MET/abece-res482-2018-industrial.pdf>, Fecha de consulta: octubre de 2018.
- [46] *ABECÉ Sobre equipos generadores de radiación ionizante en prácticas veterinarias, industriales o de investigación*, Ministerio de Salud y protección social, 2018, disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/MET/abece-res482-2018-industrial.pdf>, Fecha de consulta: mayo de 2018.