



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA FÍSICA

**“APLICACIÓN DE LA DISPERSIÓN COMPTON PARA
ANALIZAR LA INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN
ELECTROMAGNÉTICA IONIZANTE CON UN
POLIMETILMETACRILATO (PMMA)”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para obtener el grado académico de:

FÍSICO

AUTOR: LUIS ANGEL IZURIETA GUAMÁN

DIRECTOR: DR. RICHARD WILLIANS PACHACAMA CHOCA MSC.

Riobamba-Ecuador

2022

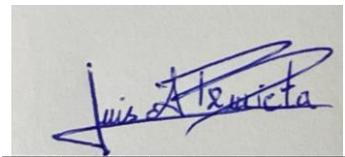
© 2022, Luis Angel Izurieta Guamán

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Luis Angel Izurieta Guamán, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 1 de abril de 2022



Luis Angel Izurieta Guamán

060419116-3

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA FÍSICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo Proyecto de Investigación, **APLICACIÓN DE LA DISPERSIÓN COMPTON PARA ANALIZAR LA INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA IONIZANTE CON UN POLIMETILMETACRILATO (PMMA)**, realizado por el señor: **LUIS ANGEL IZURIETA GUAMÁN**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Mat. Luis Marcelo Cortez Bonilla Msc. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022-04-01
Dr. Richard Willians Pachacama Choca Msc. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2022-04-01
Biof. María Fernanda Heredia Moyano. Msc ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2022-04-01

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se lo dedico a mi madre y hermano que siempre han estado a mi lado, y juntos hemos salido a delante. Y de manera especial a mi padre, que vive en cada corazón y recuerdo de mi familia. ¡¡¡ Muchas gracias, mamá, papá y hermano!!!

Luis

AGRADECIMIENTO

A mi madre Luz María, por ser el apoyo y fortaleza de mi vida, a mi hermano como mi guía e inspiración para seguir adelante. A todos mis tutores que me han acompañado en este proceso de enseñanza y aprendizaje, Al Doctor Richard Pachaca que acepto ser mi tutor. Sin ellos no habría sido posible realizar mi trabajo de titulación.

Luis

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPITULO I

1.	MARCO TEÓRICO.....	7
1.1.	Radiación ionizante y no ionizante.....	7
1.1.1.	<i>Radiación ionizante</i>	7
1.1.1.	<i>Radiación no ionizante</i>	8
1.2.	Naturaleza de la radiación electromagnética.....	8
1.3.	Interacción radiación materia.....	9
1.3.1.	<i>Interacción de partículas cargadas con la materia</i>	10
1.3.2.	<i>Interacción de los fotones con la materia</i>	12
1.3.3.	<i>Atenuación de fotones</i>	14
1.4.	Efecto Compton.....	15
1.5.	Rayos X.....	19
1.5.1.	<i>Radiación Bremsstrahlung</i>	20
1.5.2.	<i>Rayos X característicos</i>	21
1.6.	Espectroscopia de rayos x.....	24
1.6.1.	<i>Espectro del haz de rayos X</i>	24
1.6.2.	<i>Detección de rayos X</i>	25
1.6.3.	<i>Difracción de rayos X</i>	25
1.7.	Tubo de rayos X.....	27
1.8.	Aplicación de los rayos X.....	28
1.9.	Protección radiológica.....	29

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	30
2.1.	Equipo de rayos X “XR 4.0 X-RAY EXPERENT UNIT, 35 KV”	30
2.1.1.	<i>Componentes del equipo de rayos X</i>	31
2.1.2.	<i>Goniómetro</i>	33
2.1.3.	<i>Tubo contador Geiger-Müller</i>	35
2.2.	Montaje del equipo	37
2.3.	Indicaciones de seguridad	43

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	45
-----------	---	----

	CONCLUSIONES	51
--	---------------------------	----

	RECOMENDACIONES	53
--	------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1:	Elementos para colimar y dispersar el haz de radiación.....	36
Tabla 2-2:	Configuración de parámetros.....	39
Tabla 2-3:	Constantes para determinar la radiación característica del ánodo	39
Tabla 2-4:	Configuración de parámetros para detectar radiación dispersada	40
Tabla 2-5:	Configuración de parámetros con absorbente	40
Tabla 2-6:	Configuración de parámetros con lámina dispersora (PMMA) sin absorbente.....	41
Tabla 2-7:	Configuración de parámetros con lámina dispersora (PMMA).....	42
Tabla 2-8:	Configuración (PMMA) con absorbente en la frente al tubo contador	42
Tabla 3-1:	Resultados del análisis de un haz de rayos policromáticos	47
Tabla 3-2:	Resultados del análisis de un haz de radiación sobre un material.	49

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1:	Ionización y excitación	11
Ilustración 1-2:	Representación efecto fotoeléctrico	12
Ilustración 1-3:	Representación dispersión Compton.....	13
Ilustración 1-4:	Representación creación de pares	14
Ilustración 1-5:	Coefficiente de absorción en función de energía (Al).....	15
Ilustración 1-6:	Esquema experimental para observar el efecto Compton	16
Ilustración 1-7:	Corrimiento Compton, ángulo de dispersión α	17
Ilustración 1-8:	Interacción del fotón de colisión.....	17
Ilustración 1-9:	a) e^- - desacelerados y b) espectro.....	21
Ilustración 1-10:	a) e^- - y b) espectro de emisión discreto (Cu)	22
Ilustración 1-11:	Niveles de energía del Cu, para transmisiones de rayos x característicos ...	23
Ilustración 1-12:	Difracción de rayos x sobre un plano cristalino.....	26
Ilustración 1-13:	Componentes básicos de un tubo de rayos x	27
Ilustración 2-1:	Equipo de rayos x, XR 4.0 de 35 Kv	30
Ilustración 2-2:	Componentes “XR 4.0 X-RAY EXPERENT UNIT”, 35KV	31
Ilustración 2-3:	Modulo insertable de tubo de rayos x con ánodo Cu.....	32
Ilustración 2-4:	Interfaz del software Measure de Phywe	33
Ilustración 2-5:	Goniómetro	34
Ilustración 2-6:	Interfaz del software Measure de Phywe	34
Ilustración 2-7:	Tubo contador Geiger Müller	35
Ilustración 2-8:	Montaje del equipo de rayos x con un pc	37
Ilustración 2-9:	Interfaz del software Measure (unidad de rayos x).....	38
Ilustración 2-10:	Pestaña de procesamiento de datos	43
Ilustración 3-1:	Espectro de rayos x característicos de Cu con un cristal analizador de LiF	46
Ilustración 3-2:	Curva de transición del absorbente en función de ondas	48

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: ZONA DONDE OPERA EQUIPO RAYOS X “XR 4.0 X-RAY EXPERENT UNIT

ANEXO B: MONTAJE UNIDAD DE RAYOS X PARA DISPERSION DE RAYOS X EN 90°

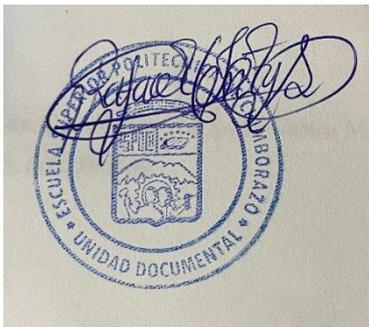
ANEXO C: PANTALLA COMPLETA DE LA INTERFAZ DEL SOFTWARE “MEASURE”

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis de la interacción de la radiación sobre un material dispersor polimetilmetacrilato (PMMA) por medio de la dispersión Compton, como proceso de interacción se usó un absorbedor de aluminio en el cual los rayos incidentes se transmiten y se difractan en un monocristal, para la dispersión Compton se cambia el cristal analizador por un cristal dispersor obteniendo radiación de transmisión dispersada y no dispersada, el cual nos permite determinar la longitud del electrón dispersado como proceso de interacción de la radiación. Como fuente generadora y emisora de radiación se empleó un equipo de rayos X “XR 4.0 X-RAY EXPERIMENT UNIT, 35 KV” el cual permite configurar los parámetros en la producción de rayos X, para simular procesos de interacción de la radiación con una tensión del tubo de rayos X de Cu de 35 KeV y con una corriente de emisión de 1 mA. Las mediciones de radiación se detectan en un tubo contador Geiger Müller, los resultados para la caracterización de rayos X característicos del ánodo se presentan en un espectro, mientras que para el análisis de la radiación por dispersión Compton, se determina el comportamiento de transmisión antes y después de interactuar con un absorbente, y bajo el comportamiento de la curva de transmisión se determinó el desplazamiento Compton como proceso de dispersión en la interacción de la radiación. Como una técnica para analizar radiación característica se usó la espectroscopia, la cual describe el paso de radiación difractada. Además, se describe el equipo y sus componentes como fuente emisora de radiación e instrumento interdisciplinario para ensayos en física o medicina como el radiodiagnóstico el cual se basa en principios de interacción de la radiación con la materia, también contiene información de los fenómenos del accionar de las radiaciones sobre la materia.

Palabras clave: <INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA IONIZANTE>, <DISPERSIÓN COMPTON>, <DIFRACCIÓN>, <RAYOS X>, <EQUIPO DE RAYOS X>, <ESPECTROSCOPIA>.

1303-DBRA-UPT-2023



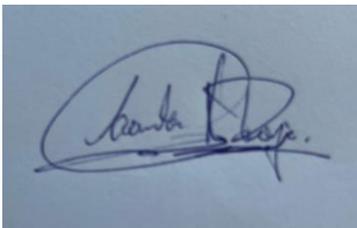
ABSTRACT

This work presents an analysis of the interaction of radiation on a polymethylmethacrylate (PMMA) scattering material by means of Compton scattering. An aluminium absorber was used as the interaction process in which the incident rays are transmitted and diffracted in a single crystal; for Compton scattering, the analyser crystal was replaced by a scattering crystal, obtaining scattered and non-scattered transmission radiation, which allows us in order to determine the length of the scattered electron as a radiation interaction process. As a source of radiation generation and emission, an X-ray machine "XR 4.0 X-RAY EXPERIMENT UNIT, 35 KV" was used as the X-ray source and emitter, which allows the parameters of the X-ray production to be set to simulate radiation interaction processes with a Cu X-ray tube voltage of 35 KeV and an emission current of 1 mA. The radiation measurements are detected in a Geiger Müller counter tube, the results for the characterisation of anode characteristic X-rays are presented in a spectrum, while for the analysis of Compton scattering radiation, the transmission behaviour is determined before and after interacting with an absorber, and under the behaviour of the transmission curve the Compton shift was determined as a scattering process in the radiation interaction. As a technique to analyse characteristic radiation, spectroscopy, which describes the diffracted radiation path, was used.

Furthermore, the device and its components are described as a radiation source and interdisciplinary instrument for tests in physics or medicine such as radiodiagnostics, which is based on the principles of interaction of radiation with matter, and also contains information on the phenomena of the action of radiation on matter.

Keywords: <INTERACTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION IONISING>, <COMPTON SCATTERING>, <DIFFRACTION>, <X-RAYS>, <X-RAY EQUIPMENT>, <SPECTROSCOPY>.

1303-DBRA-UPT-2023

A blue ink handwritten signature on a light blue background. The signature is cursive and appears to read 'Carmita Rojas Castro'.

Dra. Carmita Eulalia Rojas Castro Mgs.

Cl. 0602890469

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo transmitir una descripción general básica de los procesos de interacción de la radiación con la materia sin una discusión en profundidad de las teorías cuánticas ni relativistas, introduce definiciones y cantidades de uso en física moderna. Las radiaciones electromagnéticas están presentes en todas partes, desde fuentes naturales como la emisión de la luz del sol, hasta las artificiales como la luz que emite una lámpara, son emisiones de luz visible y radiación invisible, que se propagan a través del campo electromagnético y están representadas en el espectro electromagnético, cuya interacción con la materia constituyen un campo de estudio y aplicación en la ciencia y tecnología, como técnicas interdisciplinarias para la manipulación y aplicación en diferentes áreas de formación donde se use radiación ionizante, exclusivamente rayos X.

Los rayos X desde su descubrimiento por Roentgen tiene varias aplicaciones, en el área de medicina como radiodiagnóstico, o dentro de la investigación como la cristalografía o como técnica de espectroscopia de rayos X, todos estos procedimientos tienen como principio la interacción de radiación ionizante sobre la materia, donde intervienen los fenómenos de absorción o dispersión. Además, como experiencia con los rayos X para manipular equipos cuya fuente es la emisión de radiación contribuye al área de enseñanza-aprendizaje en la física moderna.

Como principio de la interacción de radiación electromagnética ionizante, los fotones son paquetes de energía sin carga que se propagan a través del espacio en forma de onda, y cuando interactúan con la materia su naturaleza es corpuscular, es decir transfiere energía y momento al átomo del material produciendo absorción o dispersión de energía con una longitud de onda mayor a la radiación incidente. Como prueba de este principio se realiza el ensayo sobre un equipo fuente de radiación que interactúa sobre un material dispersor para analizar el accionar de los rayos x sobre el dispersor.

El presente trabajo ayuda a manipular el equipo de rayos X, que de manera sutil utiliza técnicas de espectroscopia y cristalografía como sistemas de detección de radiación, que consta principalmente de una fuente generadora de radiación (tubo de rayos x), una muestra (material dispersor) y un detector de radiación, como una metodología para el estudio o análisis de radiación sobre la materia, además permite desarrollar ensayos con fines de enseñanza- aprendizaje como técnicas de investigación para el uso de radiaciones dentro del Laboratorio de Física Moderna de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

El trabajo integrador está dividido en tres capítulos, en el capítulo I se aborda el marco teórico referente a la radiación electromagnética y su interacción con la materia, como procesos de dispersión y absorción de radiación, además, como principio de detección de radiación a partir de espectros, así como una introducción a la producción de rayos X y protección radiológica.

En el capítulo II, abarca el marco metodológico, que describe las condiciones de operabilidad y manejo del equipo de rayos X, así como sus componentes y accesorios, sumados a la configuración del equipo y sus parámetros para reproducir ensayos de emisión de radiación sobre una muestra dispersora de radiación.

En el capítulo III, se aborda el análisis e interpretación de resultados, donde se observa el efecto de la radiación x sobre una muestra de análisis como sistema de detección de radiación para determinar la dispersión Compton de la radiación, posteriormente recurrimos a conceptos teóricos para comparar los resultados del ensayo.

ANTECEDENTES

En junio de 1865, Maxwell en su artículo titulado “*A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*”, Una teoría dinámica del campo electromagnético, donde publica que, parece que tenemos razones de peso para concluir que la propia luz (incluido el calor radiante, y otras radiaciones si las hay) es una perturbación electromagnética en forma de ondas que se propagan a través del campo electromagnético según las leyes del electromagnetismo (Beléndez, 2020).

Donde considera la emisión de la radiación en forma de ondas que se propagan en el espacio. A partir de ahí se considera que la naturaleza de las radiaciones era ondulatoria, hasta que el 17 de marzo de 1905 Einstein, en su trabajo publicado sobre el cuanto de luz, además de los fenómenos de interacción entre materia y radiación (al cual se le atribuye el premio Nobel de la Física por el descubrimiento del efecto fotoeléctrico), una manera diferente de tratar a las radiaciones, como si estuviese compuesto de partículas (Cassini et al., 2013, p.186).

Durante el siglo XX, la incógnita sobre si naturaleza de las radiaciones eran ondas o partículas, dio origen a la física moderna, que empieza por Einstein, quien inició dos tendencias revolucionarias de pensamiento en 1905. Una fue su teoría especial de la relatividad, y la otra, una nueva forma de considerar a la radiación electromagnética mediante su postulado sobre el cuanto de luz, que iba a convertirse en los principios de la teoría cuántica: la teoría de los fenómenos atómicos (Capra, 1992, p.26).

Dentro del trabajo que Einstein atribuye a los procesos de interacción de radiaciones con la materia, el comportamiento de la naturaleza de la radiación no daba por aceptado en la comunidad científica, hasta que una evidencia más directa de la propiedad corpuscular (partícula), fue obtenida en 1923 por Arthur Compton (físico norteamericano), el cual experimento con emisión de rayos x sobre la materia (un blanco de grafito), donde experimentan dispersión de partículas materiales (Escudero, 2017, p.1).

Como parte de la interacción radiación materia, Arthur Compton descubrió el llamado “efecto Compton”, entonces la mayoría de los físicos, aunque con importantes excepciones, admitió que el trabajo de Einstein sobre el cuanto de luz debía considerarse confirmada. (Cassini et al., 2013, p. 186), la existencia del efecto Compton fue demostrada experimentalmente en 1920, en colisiones entre fotones de rayos x, con energías del orden de los keV, y electrones de conducción con energías de unos pocos eV (Mainardi, 2006, p.1).

A partir de estos acontecimientos, se suscitaron el descubrimiento de los rayos x, la teoría del cuanto, de luz de Max Planck, procesos de interacción materia, la naturaleza de las radiaciones, etc., que forman parte de lo que hoy es la física moderna, con aplicaciones en áreas de conocimiento dentro del campo de medicina, detectores, sistemas de detección de radiación, que atribuyen a la sociedad en ciencia y tecnología.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las radiaciones electromagnéticas están presentes en todas partes, desde fuentes naturales como la emisión de luz del sol hasta las artificiales como la luz que emite una lámpara, son emisiones de luz visible y radiación invisible, que se propagan a través del campo electromagnético y están representadas en el espectro electromagnético, cuya interacción con la materia constituyen un campo de estudio y aplicación en ciencia y tecnología, que la física aborda.

La aplicación de radiaciones electromagnéticas ionizantes para analizar el proceso de interacción radiación sobre la materia, como una manera de estudio y manipulación de radiaciones, en áreas de espectroscopia, física de las radiaciones o física moderna. Además, tomando en cuenta que estos generan radiación nociva para la salud, lo que implica temas de protección radiológica, además, del manejo de equipos para un funcionamiento correcto, procedimiento de ensayos para reproducir procesos de interacción radiación materia a partir de la radiación ionizante (rayos X) por medio de la dispersión Compton.

Reproducir fenómenos dentro de la física para su comprensión, además de la aplicación de métodos científicos, para el uso y calibrado de equipos a fin de simular dichos fenómenos físicos; que nos ayudaría a entender la caracterización de los rayos x, efecto Compton a partir de la máquina de rayos X (Phywe), que es de uso limitado para proceso de enseñanza-aprendizaje.

FORMULACIÓN

¿Qué características teóricas y de ensayo se deben considerar para el análisis de la interacción radiación materia por medio del efecto Compton utilizando el equipo de rayos x?

JUSTIFICACIÓN

La radiación electromagnética está representada en el espectro electromagnético, que comprende radiaciones electromagnéticas ionizantes directas e indirectas, para este trabajo empleamos el efecto Compton a partir de los rayos X para analizar la interacción de la radiación electromagnética ionizante con la materia no viva.

El presente trabajo resulta de sustentar conocimientos de física moderna en procesos de interacción de radiación con la materia para la formación en el campo de la física y como base para comprender la aplicación de las radiaciones, permitiendo estudiar los espectros característicos de la radiación, procesos de interacción con la materia producidos por la acción de las radiaciones, además de conceptos básicos a la física de las radiaciones como una manera de especialidad. Dentro del campo de la física; nos limitamos a estudiar, comprender y analizar, pero una manera interdisciplinaria que contribuya al estudio de las radiaciones sobre un material polimetilmetacrilato (PMMA) para comprender dicho fenómeno es manipulando las radiaciones a partir de un ensayo.

Dentro del presente trabajo, como una forma de comprender los procesos de interacción radiación materia; se emplea un ensayo a partir de la radiación ionizante que de manera indirecta usan los rayos X para determinar la longitud de onda de Compton (dispersión Compton de rayos x) como método para analizar el proceso de interacción materia, además de un sistema de detección de radiación por medio del equipo Phywe XR 4.0, para el análisis y comprensión de la radiación ionizante en materia no viva.

Desde la caracterización de rayos x, a comprender conceptos básicos sobre espectroscopia, difracción de rayos x, y efectos de la radiación en la materia como parte de interactuar con las radiaciones; son procesos que conduce, explica y analizan la interacción de las radiaciones ionizantes en la materia.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

GENERAL

Analizar la interacción de la radiación electromagnética ionizante con la materia (PMMA) por medio del efecto Compton a partir de la caracterización de los rayos X.

ESPECÍFICOS

- Revisión de conceptos que abordan en la física moderna sobre la interacción radiación materia. Entender el efecto Compton y la caracterización de los rayos X.
- Identificar las condiciones de operabilidad y funcionamiento de la máquina de rayos X (Phywe), para el ensayo del presente trabajo integrador. Caracterización de los rayos x de Cu para el análisis del PMMA.
- Determinar la longitud de onda de Compton del electrón basándose en la curva de transmisión, a partir de la caracterización de rayos X.

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Radiación ionizante y no ionizante

El exceso o falta de electrones respecto a un átomo o molécula neutro corresponde a un ión que es una partícula con carga eléctrica. El exceso de electrones corresponde es un anión con carga negativa, por el contrario, se denomina catión a la falta de electrones y su carga es positiva (Huidobro, 2014, p.202).

La ionización es el proceso físico o químico por el cual se producen iones. Por lo que se dice que la materia esta ionizada cuando se crea un ión. Los comportamientos de las radiaciones electromagnéticas constituyen tanto una propagación de ondas como de partículas, denominadas “fotones”. Los fotones, no tienen masa, pero sí energía, que es directamente proporcional a la frecuencia de la emisión, al transferirse la energía parcialmente a la materia, y esta es suficiente para desprender un electrón a los átomos y moléculas que la constituyen, se crean iones (Huidobro, 2014, p.202).

En referencia a esto, las radiaciones se clasifican en:

1.1.1. Radiación ionizante

Proceso por el cual las emisiones de energía con una longitud de onda corta, una frecuencia mayor y por ende una energía penetrante con la que arranca un electrón del átomo de un objeto o material. Las emisiones de radiaciones ionizante cuya frecuencia es considerablemente elevada para ionizar la materia y alterar la estructura molecular de la materia son rayos X, gamma. (Frizzera, 2007, p.8)

a. Las radiaciones ionizantes directas constituyen partículas cargadas, que son los electrones energéticos (llamados a veces negatrones), los positrones, los protones, los mesones cargados, los muones, las partículas alfa y los iones pesados (átomos ionizados). Este tipo de radiación ionizante interactúa con la materia sobre todo mediante la fuerza de Coulomb, que les hace atraer o repeler electrones de átomos y moléculas en función de sus cargas. (Cherry, 1998, p.2)

b. Las radiaciones ionizantes indirectas son producidas por partículas con ausencia de carga, los tipos más comunes de radiación ionizante indirecta son los formados por fotones con energía superior a 10 keV (rayos X y rayos gamma) y todos los neutrones. La interacción de los fotones es por:

- a. Efecto fotoeléctrico donde interactúan fotones de baja energía, por lo que el fotón cede la totalidad de su energía al electrón, abandonando el átomo y desaparece el fotón.
- b. Mediante el efecto Compton interactúan los fotones de energía intermedia, proceso por el cual el fotón y un electrón colisionan. El fotón toma nueva dirección y continúa su trayectoria con su energía reducida, mientras que el electrón liberado parte con el resto de la energía entrante.
- c. En la producción de pares, es posible con fotones cuya energía es superior a 1,02 MeV. (con energías cerca de 1,02 MeV. La producción de pares predomina con energías más altas.) La interacción del fotón con las cercanías del núcleo produce una pareja de electrón-positrón debido a que desaparece el fotón por consideraciones del momento cinético y la energía. La producción de pares de electrones y positrones energéticos, la radiación se comporta como directa (Cherry, 1998, p.2).

1.1.1. Radiación no ionizante

Emisión de energía con longitud de onda amplias, una frecuencia menor y por ende una energía menos penetrante con la que interactúa en un objeto o material. Las radiaciones no ionizantes son parte del espectro electromagnético cuya energía es demasiado débil para romper enlaces atómicos y alterar la estructura atómica. Forman parte de las radiaciones no ionizantes, la ultravioleta, la luz visible, la radiación infrarroja, los campos de radiofrecuencias y microondas, y los campos de frecuencias extremadamente bajas. Es significativo mencionar que las ondas radioeléctricas, que emiten radiación no ionizante, aun cuando sean de alta intensidad de potencia, no pueden causar ionización en un sistema biológico, es decir que no alteran la estructura molecular de la materia (Frizzera, 2007, p.9).

1.2. Naturaleza de la radiación electromagnética

La naturaleza de la radiación tiene características de onda y partícula, también conocida como dualidad onda-corpúsculo, establece que toda la radiación presenta características tanto ondulatorias como corpusculares comportándose de uno u otra forma dependiendo del proceso específico que se estudie. Según este concepto de la física cuántica, no existen diferencias fundamentales entre partículas y ondas: las partículas pueden comportarse como ondas y viceversa, por ejemplo; para conocer la energía de un quantum o fotón (corpúsculo de energía), es necesario conocer la longitud de onda, y la onda tiene comportamiento ondulatorio. La radiación electromagnética experimenta, por tanto, comportamientos ondulatorios (difracción, reflexión, refracción) pero también comportamientos de partículas (cuando interacciona con la materia para transferir una cantidad fija de energía). Así, se define el fotón como la partícula

elemental responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético. El fotón es la partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética (Huidobro, 2014, p. 80).

a. Reflexión: cuando experimenta un cambio de dirección la radiación al colisionar con una superficie. Cumple con: el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie se encuentran en el mismo plano, y una segunda es, el ángulo de incidencia como el reflejado son iguales. (Rivera, 2014, p.53)

b. Refracción: cuando experimentan un cambio de dirección la radiación cuando pasa de un medio a otro con distinta densidad. La velocidad de la luz dentro de una sustancia es menor que la velocidad en el vacío, la velocidad de la luz c entre el vacío y la velocidad del medio v se conoce como índice de refracción n . Cumplen con: el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie de separación de los dos medio se encuentran en el mismo plano, por otro lado tenemos, la relación entre velocidades de ambos medios es igual a la que existe entre los senos del ángulo de incidencia y el ángulo de refracción. (Rivera, 2014, p.54)

1.3. Interacción radiación materia

Cuando un haz de radiación de cualquier tipo interacciona en la materia, sucede que la radiación puede ser absorbida por completo, puede dispersarse o parte puede atravesarla sin interacción alguna. En términos de interacciones entre partículas los procesos de absorción y dispersión pueden describirse y explicarse. En la interacción del haz de radiación con el material las partículas se detienen, o se dispersan (BHU, 2018, p.2).

La radiación ionizante es emisión de energía en forma de onda o partícula a través del espacio, capaz de alterar la estructura atómica del material. El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) en su módulo de SUPERVISORES de instalaciones radiactivas, hace referencia a situaciones de las radiaciones ionizantes (fotones, neutrones, partículas cargadas) como la manera de adentrarse en la materia e interactuar con ella, para el estudio de los procesos y condiciones de interacción con la materia. Las radiaciones al interactuar con el material pierden una parte o toda su energía cediéndola al medio que atraviesa mediante distintas formas de interacción que dependen del tipo de radiación, energía, y de las propiedades del medio material con el que entra en contacto. Los procesos de interacción de la radiación con la materia causan excitación, ionización, radiación de frenado o características en partículas de materia viva y no viva, a partir de ahí se implantan condiciones sobre la propagación del haz de energía y este se dispersa o propaga emitiendo radiación útil o de fuga, así como el diseño de los blindajes apropiados para que atenúen los diferentes tipos de radiación. La acción que ejerce la radiación con un material determinado depende fundamentalmente del tipo de radiación con la que esta interactúa (CSN, 2013, p.3).

Los procesos de interacción radiación materia se llevan a cabo por medio de partículas cargadas en la producción de rayos X al interactuar con el blanco, y por medio de fotones que al ser procedentes de un tubo de rayos X que interactúan con la materia. Cuando hay interacción puede ocurrir los siguientes casos: transmisión (el haz de radiación penetra la materia como radiación directa), absorción (transferencia de energía del haz incidente sobre el material) y dispersión (luego de la interacción el haz de radiación cambia de dirección con pérdida de energía, toma el nombre de radiación dispersa “*scattered*” o secundaria)

1.3.1. Interacción de partículas cargadas con la materia

Una partícula cargada (electrones, protones, etc.) al interactuar con la materia experimenta una serie de colisiones con uno o más electrones del núcleo o con las cercanías del mismo, dejando rastros, eventualmente por procesos de ionización y excitación, como resultado se pierde energía continua hasta detenerse, debido a los procesos de interacción de fuerzas eléctricas producidas por la partícula cargada y los átomos del medio absorbente, dicha partícula al estar rodeada por su campo de fuerza eléctrica de Coulomb, contribuye a procesos de colisiones inelásticas y elásticas. Las colisiones entre electrones y el medio son las más comunes (Mayles et al., 2007, pp.36-37).

a. Colisión elástica: En la interacción de un electrón con las capas externas del átomo, o también interacción de una partícula cargada con la materia dejando de lado las propiedades de onda, existe transferencia mínima de energía, y cambio de trayectoria de la partícula en el material, ya que el electrón al pasar por la nube de electrones del material, este experimenta interacciones de Coulomb, es decir el electrón es atraído por el potencial de cargas de las partículas, causando dispersión elástica, sin ocasionar ninguna alteración atómica o nuclear en los átomos de la materia con los que interactúa. Cuando la distancia entre cargas es menor, es decir, cuando más cerca pasa el electrón del núcleo, mayor es la fuerza de Coulomb, y en consecuencia el ángulo de dispersión cambia ya que la interacción es elástica, existe cambio de dirección del haz incidente lo que significa que no se transfiere energía o se transfiere una insignificante energía. Este tipo de interacción depende del número atómico del material, es decir, la interacción de coulomb aumenta al aumentar el número atómico (Krumeich, 2011, pp.4-8).

b. Colisión inelástica: la partícula cargada o el electrón cuando interactúa con los electrones del medio cede parte de su energía, ocasionando alteraciones atómicas o nuclear en los átomos de la materia con los que interactúa, produciendo fenómenos de excitación o ionización.

Cuando la estructura electrónica que componen un átomo ocupa los niveles más bajos de energía se dice que el átomo se encuentra en su estado fundamental, que es el estado natural en el que se encuentra un átomo. Si una partícula cargada interacciona con la estructura electrónica del átomo y transfiere suficiente energía como para romper el enlace de uno de sus electrones, este queda liberado del nivel de energía y abandona el átomo. Este proceso recibe el nombre de ionización. Con la ionización se producen un par de iones: uno de carga negativa que es electrón liberado y otro de carga positiva que corresponde al átomo al que le falta un electrón. Si la energía que ha recibido la estructura electrónica es menor como para romper su enlace con el núcleo se dice que esta estructura se encuentra excitada. El proceso se denomina excitación. De manera que, un electrón excitado es aquel que ha absorbido la energía y deja su nivel de energía anterior para ocupar uno de superior energía dentro del mismo átomo. La energía que ha absorbido el electrón es la diferencia entre las energías de enlace de la capa inicial y la final (Zubeldia, 2012, p.24).

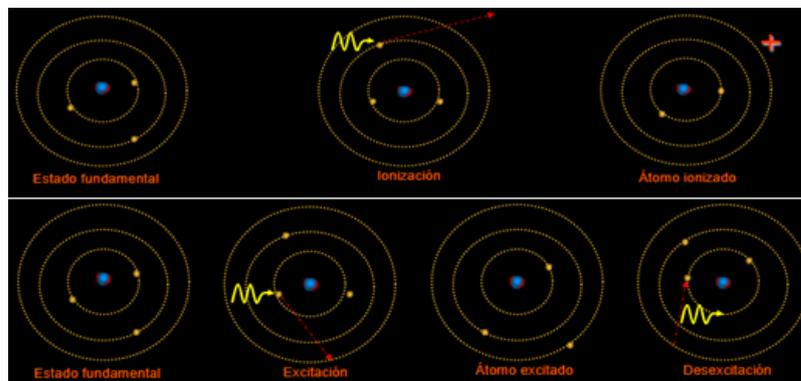


Ilustración 1-1: Ionización y excitación

Fuente: (Devera, 2016)

Un átomo al experimentar fenómenos de ionización o excitación tiende a recuperar su estabilidad inicial o estado fundamental mediante la emisión de la energía absorbida. Este proceso recibe el nombre de desexcitación. La energía liberada por el átomo es en forma de uno o varios fotones que depende del nivel de energía al que pertenezca el electrón y será igual a la diferencia entre las energías de enlace del electrón en la capa más externa y la de la capa más profunda a la que haya ido el electrón, estos tendrán energías distintas (Zubeldia, 2012, p.24).

c. Colisión radiactiva: Cuando una partícula cargada interactúa con las cercanías de un núcleo atómico puede sufrir una deceleración o frenado debido a la interacción eléctrica entre cargas de distinto signo, desviándola de su trayectoria. Como resultado, la partícula cargada emite un fotón con energía igual a su pérdida de energía cinética (Alcaraz, 2017, p.2).

1.3.2. Interacción de los fotones con la materia

Las interacciones de fotones con la materia se pueden caracterizar como procesos de dispersión o absorción. En la dispersión, un fotón incidente interactúa con la materia y su trayectoria, energía e impulso pueden cambiar debido a esta interacción. El fotón, no obstante, no es absorbido y los cambios de cantidad de movimiento y energía se basan por las leyes de la cinemática relativista. En la absorción, el fotón incidente pierde toda su energía y la energía se transfiere al medio con el que interactúa. Las partículas secundarias se emiten durante o posteriormente a la interacción. Los principales procesos de absorción son el efecto fotoeléctrico y la producción de pares. En los procesos de dispersión tenemos al efecto Compton (Mayles et al., 2007, p.59).

a. Efecto Fotoeléctrico. Se origina en la interacción de un fotón con un electrón ligado al átomo de un material, produciendo la absorción total de la energía incidente y la emisión del electrón. La energía cinética del electrón está dada por la energía del fotón incidente $h\nu$ menos la energía de enlace del electrón en su orbital expulsado: $T = h\nu - E$. Este efecto tiene lugar principalmente en los niveles de energía internos, K, L, M..., aquellos que tiene mayor energía de ligadura, los electrones de los niveles de energía más externos cubren el sitio del electrón expulsado, y la diferencia de energías de ligadura es emitida en forma de rayos X (Fernández, 2007, p.40)

Así pues, el efecto fotoeléctrico depende del número atómico Z del absorbente, al igual que también depende de la energía del fotón incidente, siendo significativo para energías bajas. En resumen, el efecto fotoeléctrico es predomina para energías incidentes bajas (hasta 50 KeV) y números atómicos Z del absorbente altos. La figura 3-1. Muestra una representación del efecto fotoeléctrico (Zubeldia, 2012, p.27).

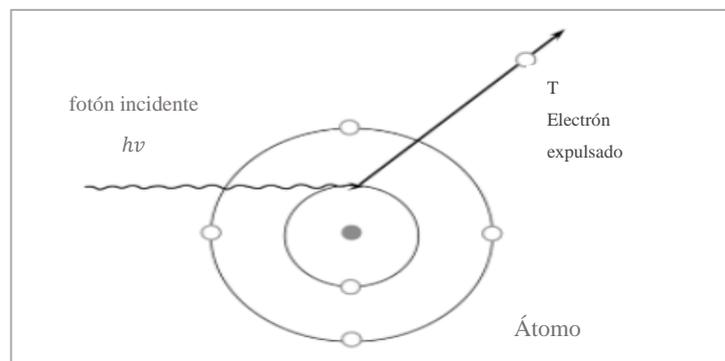


Ilustración 1-2: Representación efecto fotoeléctrico

Fuente: (Mayles et al., 2007)

b. Dispersión Compton. En términos cualitativos, se describe al efecto Compton, partiendo de que la radiación incidente está formada por cuantos de energía (fotones) discretos que se mueven en determinadas direcciones. Al interactuar los fotones con los electrones de los átomos de la materia, cada fotón individual resulta dispersado, y presenta disminución en su energía. El electrón dispersa al fotón en una dirección que forma un ángulo determinado respecto de la trayectoria del fotón incidente. Como resultado de la interacción, el electrón, que se encuentra orbitando en los niveles de energía del átomo (más externos) cuya energía del fotón es mayor a la energía de ligadura de electrón, es expulsado a causa de la energía y el momento que recibe del fotón, y cuya velocidad, resulta despreciable comparada con la de la luz. Puesto que, a la conservación de la energía y el momento en la interacción, el fotón dispersado tendrá una energía igual a la del fotón incidente menos la energía cinética del retroceso del electrón. Si el fotón concede parte de su energía al electrón que lo dispersa, y como su velocidad permanece constante, las fórmulas para el momento y la energía implican que su frecuencia debe reducirse y su longitud de onda debe ampliarse. La figura 4-1. Representa la dispersión Compton (Cassini et al., 2013, p.13).

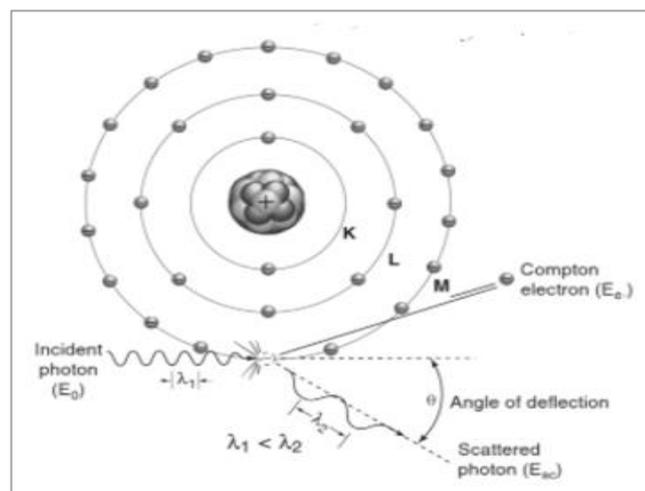


Ilustración 1-3: Representación dispersión Compton

Fuente: (Bushberget al., 2011)

El enfoque cuantitativo, describe al efecto Compton a partir de las ecuaciones para la frecuencia y la longitud de onda de los cuantos dispersados. De manera que cada cuanto de luz tiene asignado una energía $E = h\nu$ y un momento lineal $p = h\nu/c$, donde la interacción de la radiación con la materia, se conserva la energía y el momento. De manera que, la radiación dispersada también tiene con una longitud de onda y una frecuencia (Cassini et al., 2013, p.13).

c. Creación de pares. En la creación de pares el proceso tiene lugar en la absorción de fotones de alta energía que desaparecen y dan lugar a un electrón y un positrón. Ocurre generalmente cerca del núcleo atómico. Sin embargo, también puede tener lugar, con menor probabilidad, en el campo

de un electrón atómico. Este último proceso generalmente es llamado "producción de tripletes". Así dos electrones y un positrón son expulsados del sitio de la interacción. Obviamente, se requiere una energía fotónica mínima de $2mc^2 = 1.022 \text{ MeV}$ para que ocurra la producción de pares en el campo nuclear. Y se necesita de una energía mínima de $4mc^2$ para poder iniciar la producción de tripletes. Como se observa en la figura 5-1. La representación de la creación de pares (Attix, 2008, pp.146-148).

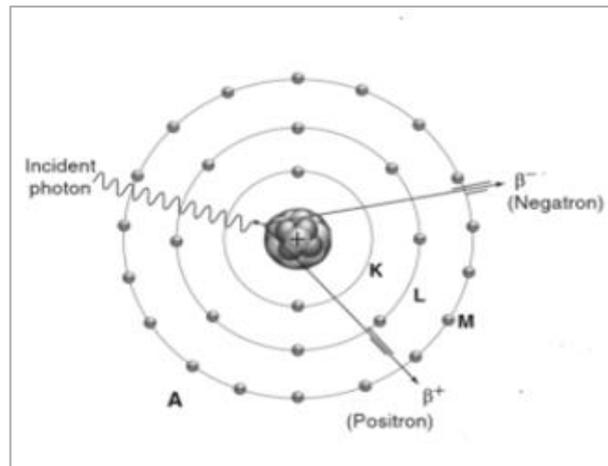


Ilustración 1-4: Representación creación de pares

Fuente: (Bushberget et al., 2011)

1.3.3. *Atenuación de fotones*

Un haz de rayos X está compuesto por fotones de diferente energía, es decir, con diversidad en su longitud de onda, son denominados policromáticos. En la interacción de los fotones con la materia, se producen procesos de absorción como el efecto fotoeléctrico, o procesos de dispersión como el Compton, como resultado se tiene la disminución de energía en el medio que atraviesa, a estos procesos se le conoce como atenuación, el cual depende del número atómico del medio, densidad y espesor de este y de las características de radiación.

La atenuación también es disminución de fotones, se debe a la interacción de un haz de radiación con los átomos que componen el medio material, parte de la energía se transfiere al electrón produciendo ionización o excitación. De manera que parte de la radiación es absorbida por la materia. De forma, que la transferencia de energía o disminución de fotones es la responsable de efectos biológicos por interacción de radiaciones ionizantes. Por otra parte, las energías de los fotones después de interactuar tienen energía menor o igual a la de antes de interactuar, cuya dirección es distinta, son los llamados fotones dispersados (Consejo de Seguridad Nuclear, 2009).

En los procesos de absorción en un material, se encuentran el efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton, y la Generación de pares. Como resultado, el coeficiente de absorción dependiente de la energía de un material μ que se compone del coeficiente de absorción de la generación de pares μ_{Pa} , del efecto fotoeléctrico μ_{Ph} y del efecto Compton μ_{Co} .

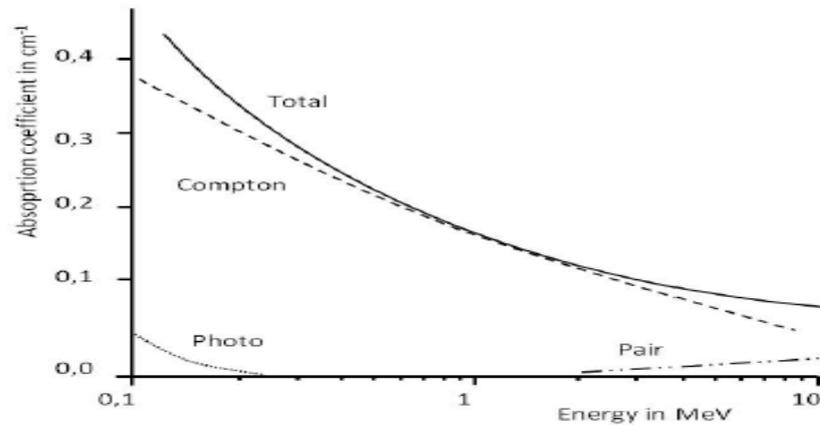


Ilustración 1-5: Coeficiente de absorción en función de energía (Al)

Fuente: (Systeme GmbH, 2017)

En la figura 5-1. Para niveles de energía, $E \approx 1-100$ keV, μ_{Pa} puede despreciarse, ya que no emite iones, para μ_{Ph} como proceso de absorción, libera electrones y no fotones, y para μ_{Co} se detecta casi exclusivamente fracciones Compton.

1.4. Efecto Compton

Para entender el efecto Compton y sus características como proceso de interacción de la radiación con la materia, recurrimos al estado del arte, cuando en 1905 Albert Einstein en su artículo sobre el cuanto de luz, trata de explicar los fenómenos de la interacción de las radiaciones con la materia, a los cuales les atribuyó como procesos de absorción o emisión de luz en la materia, para las cuales la teoría ondulatoria de Maxwell no daba explicación, ya que se limitaba a explicar la propagación de la radiación libre en el espacio, al igual que los procesos de interferencia y difracción de las ondas electromagnéticas, además, para esos tiempos la naturaleza cuántica de la radiación se refiere a características tanto ondulatorias como corpusculares. Einstein en su trabajo introdujo la hipótesis de la naturaleza cuántica de la radiación, considerando que la luz “se comporta como si” estuviera formado por cuantos, de energía, en la que relaciona la frecuencia con la constante de Planck (Cassini et al., 2013, pp.2-4).

$$E = h\nu \tag{1.1}$$

A partir de los cuantos de energía, Einstein explica de manera unánime los fenómenos de interacción entre radiación y materia, para ello, supuso que los cuantos de luz podrían ser absorbidos y emitidos por los electrones de los átomos, en una relación de uno a uno, es decir; cada electrón podía absorber o emitir un único cuanto de luz, y cada cuanto podía ser absorbido o emitido por un único electrón, además considero que la interacción entre cuantos no podía ser cuando esta se propagaba como radiación libre. Estas consideraciones lo llevaron a postular el efecto fotoeléctrico al cual se le atribuye un premio nobel. En 1909 Einstein sugiere que los cuantos de luz estaban dotados de direccionalidad, ya que cuando un cuanto de radiación es absorbido por una molécula y cede energía, también transfiere un momento $h\nu/c$, por tanto, cuando la molécula emite un cuanto de energía $h\nu'$, este le transfiere un momento $h\nu'/c$, por lo tanto, la radiación emitida tiene una dirección determinada. Con la atribución de momento, la hipótesis había adquirido características corpusculares de la radiación, dicha hipótesis distaba de ser completa, ya que ahora parecía más difícil explicar los fenómenos de interferencia y difracción que son características de la onda, además de que la teoría de Einstein no podía predecir cuándo una partícula (electrón) emitirá un cuanto de energía ni tampoco la dirección en la que lo hará (Cassini et al., 2013, pp.3-12).

En 1923 Compton da por confirmada la teoría sobre el cuanto de luz de Einstein, atribuyendo que la radiación se comporta como partícula, debido a la conservación de energía y momento en la que se basó para explicar la interacción de la radiación con la materia, ya que considera a la radiación incidente como un conjunto de fotones de energía $E = h\nu$ y que estos al interactuar con la materia dispersan electrones, el fotón incidente transfiere parte de su energía al electrón con el que interactúa, el fotón dispersado tiene una energía menor E' . En consecuencia, tiene una frecuencia $\nu' = E'/h$ menor, lo cual implica una longitud de onda $\lambda' = c/\nu'$ mayor., además de establecer las ecuaciones de frecuencia y longitud de onda de los cuantos dispersados, de esa manera Compton logro determinar los cambios de frecuencia y longitud de onda de la radiación dispersada. (Resnick, 1994, pp.489-491)

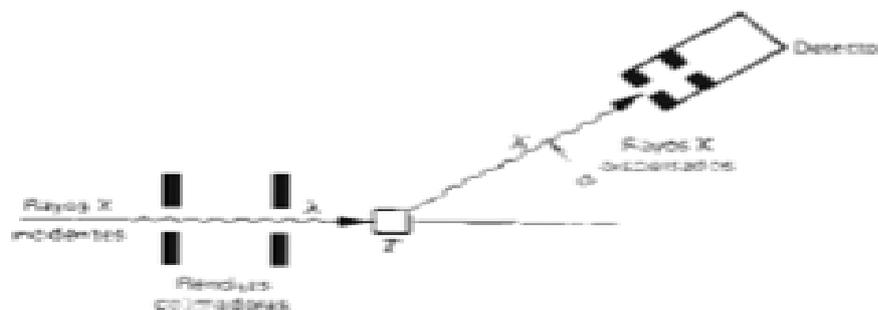


Ilustración 1-6: Esquema experimental para observar el efecto Compton

Fuente: (Resnick, 1994)

Como se observa en la figura 6-1., Compton experimento con un haz de rayos X, que tiene una longitud de onda λ , y estos inciden sobre un blanco de grafito T,. Los rayos dispersados tienen una longitud de onda λ' y que estos varían según el ángulo de dispersión ϕ , la intensidad de los rayos X dispersados se mide en función de su longitud de onda; En la figura 7-1., se muestra los resultados del experimento Compton, en donde los rayos X dispersados tienen picos de intensidad en dos longitudes de onda; una de ellas es la misma la longitud de onda incidente, y la otra λ' que es mayor. El corrimiento de Compton $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ varía con el ángulo al cual se observan los rayos X dispersados (Resnick, 1994, pp.489-491).

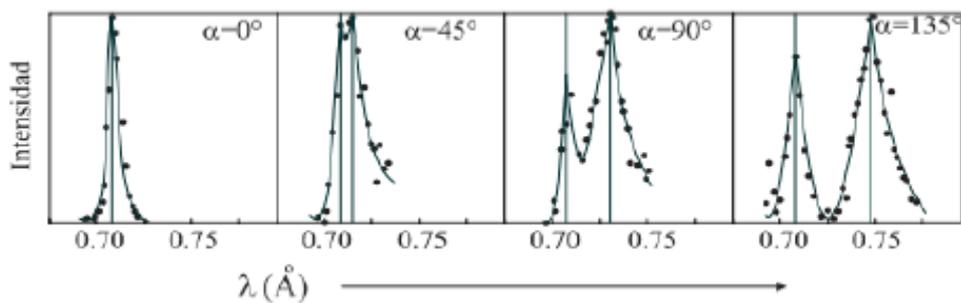


Ilustración 1-7: Corrimiento Compton, ángulo de dispersión α

Fuente: (Resnick, 1994)

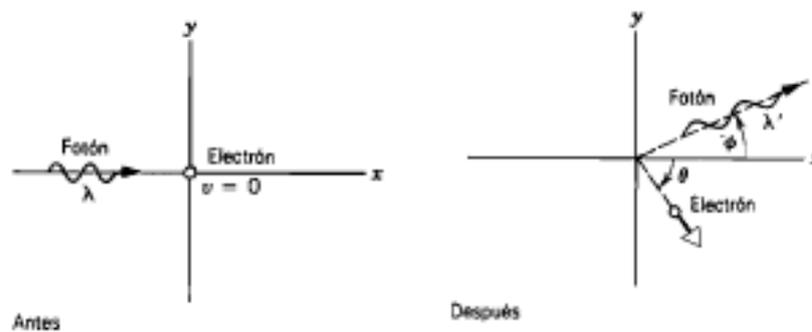


Ilustración 1-8: Interacción del fotón de colisión

Fuente: (Resnick, 1994)

Analizando el efecto Compton a partir de un enfoque cuantitativo entre la colisión de un fotón-electrón. El electrón se encuentra inicialmente en reposo y libre, es decir que se encuentran en la capa más externas del átomo, cuya energía de ligadura es menor a la del fotón incidente, aplicando la conservación de energía a esta colisión, y usando la expresión relativista de energía cinética k para el electrón ya que esta se mueve a velocidades comparables a la de la luz, tenemos:

$$E = E'$$

O sea

$$hv + mc^2 = hv' + mc^2 + k \quad (1.2)$$

Donde mc^2 es la energía de reposo del electrón, k es su energía cinética (relativista)

$$k = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right)$$

Y v es la frecuencia

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad ; \quad v' = \frac{c}{\lambda'}$$

Reemplazando términos tenemos

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right) \quad (1.3)$$

Apliquemos ahora la ley de la conservación de momento a la colisión

$$p = p' + p_e$$

donde

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hv}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

y

$$E = pc$$

Para el electrón, la expresión relativista del momento lineal está dada por

$$p_e = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

De esta manera obtenemos la conservación de momento

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

Escribiendo la conservación del momento para la componente "x"

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} \cos\phi + \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \cos\theta \quad (1.4)$$

y para la componente “y”

$$0 = \frac{hc}{\lambda'} \sin\phi - \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \sin\theta \quad (1.5)$$

Reduciendo las ecuaciones (1.3), (1.4), y (1.5)

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\phi) \quad (1.6)$$

El corrimiento Compton $\Delta\lambda$, no depende de la longitud de onda inicial λ , depende del ángulo ϕ . La ecuación (1.6) predice los corrimientos Compton que se observan en la figura 7-1. La explicación que Compton da a sus resultados experimentales no es cuántico, ya que utiliza la mecánica clásica para analizar las interacciones entre los fotones y electrones que están en reposo en la materia, donde considera a la interacción como un caso de dispersión, y no de absorción y emisión, ya que durante la colisión los fotones transfieren una parte de su energía y momento a los electrones, y como resultado se dispersan los fotones con una menor longitud de onda, y se expulsa un electrón con una energía E' y momento p' (Cassini et al., 2013, p.16).

Nota: Para la dispersión de 90° , la diferencia de longitud de onda, que consta únicamente de los tres componentes universales, conduce a la llamada longitud de onda Compton λ_C para electrones.

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = \frac{6,626 * 10^{-34}}{(9,109 * 10^{-31}) * (2,998 * 10^8) \text{ kg} * \text{ms}^{-1}} \frac{\text{Js}}{\text{kg} * \text{ms}^{-1}} = 2,426 \text{ pm}$$

1.5. Rayos x

Durante el siglo XVII se empezó a experimentar con el vacío. De esa manera en 1895 se descubrieron los rayos x por el físico alemán Wilhelm Conrad Röntgen mientras estudiaba los rayos catódicos; de manera accidental al dejar el tubo de rayos catódicos envuelto en un trozo de papel negro y expuesta a una pantalla de platino cianuro de bario en una habitación oscura, está emitía luz fluorescente siempre que funcionaba el tubo. Determinó que la fluorescencia se debía

a una radiación invisible más penetrante que la ultravioleta y dada su naturaleza desconocida los denominó rayos X, posteriormente también ocupan el nombre de rayos de Röntgen. Por su descubrimiento recibió el premio Nobel de la Física en el año 1901 (Sociedad Española de Física Médica, 2004, p.22).

Los rayos x son un tipo de radiación electromagnética ionizante con una longitud de onda comprendida entre los 10 nm a 0,01 nm; a longitudes de onda corta, mayor es su energía y poder de penetración con la materia produciendo una serie de efectos de interacción con la materia, el origen de los rayos X resultan de interacciones entre electrones (Passariello, 1999, p. 2).

Los rayos X se definen como paquetes de energía (fotones) sin carga eléctrica que se propagan en forma de ondas a una frecuencia dada y a la velocidad de la luz, por lo que constituyen un tipo de radiación electromagnética, entre ellas tenemos las ondas de la radio, las microondas que utilizamos en la cocina, las ondas de la luz, los rayos gamma de las bombas atómicas, los rayos cósmicos del espacio, etc. Debido a la naturaleza de las radiaciones, los rayos x se consideran como ondas y como partículas, son ondas de radiación electromagnética cuando experimentan reflexión, refracción, o difracción, para el comportamiento de partículas la radiación describe su interacción con la materia. La cantidad de energía transportada en cada fotón depende de la frecuencia de la onda, cuando estos ionizan la materia son llamadas radiaciones ionizantes (Zubeldia, 2012, p. 25).

Los rayos x al igual que rayos gamma son formas de radiación electromagnética con suficientemente energía que pueden ionizar la materia, de ahí radiación ionizante, la diferencia entre estas dos radica en su origen, mientras que los rayos gamma se originan en el núcleo del átomo, la emisión de los rayos x se origina en los niveles atómicos. La emisión de rayos x se pueden producir en un tubo de rayos x por radiación bremsstrahlung como por radiación característica (Beutel, y otros, 2000, p.3).

1.5.1. Radiación Bremsstrahlung

Cuando un haz de electrones es acelerado y estos interactúan con las cercanías del núcleo de los átomos, se encuentran con campos de fuerza de Coulomb donde experimentan un cambio en su velocidad y su trayectoria, y por lo tanto se desaceleran o cambian su dirección, debido a ese cambio la energía cinética de los electrones desacelerados reaparece en energía de los fotones de rayos x conocida como radiación de frenado o bremsstrahlung. Los materiales con un número atómico de alto Z convierten de la energía del electrón con una fracción mayor en rayos x de bremsstrahlung que los de Z más bajo, para un número atómico alto, su punto de fusión es alto.

La energía que no se irradia como bremsstrahlung, produce ionización o excitación por interacciones de colisión, esta energía se convierte en calor en la materia, a excepción de la fracción muy pequeña emitida como rayos X (Attix, 2008, pp.210-211).

Dependiendo de la energía cinética inicial del electrón y cuan mayor sea la proximidad al núcleo, además del número de veces que sufra interacciones en la materia puede perder una parte, la totalidad, o nada de esa energía cinética, conforme sea su trayectoria a través de la materia, los rayos X de frenado tienen una energía comprendida entre cero y el máximo de energía cinética de los electrones incidentes. El espectro de emisión de rayos X de frenado es continuo (Attix, 2008, pp.210-211).

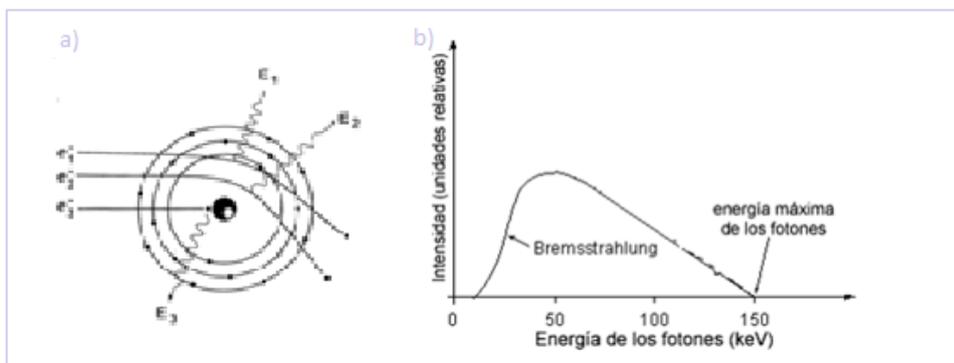


Ilustración 1-9: a) e^- desacelerados y b) espectro

Fuente: (Beutel, 2000)

1.5.2. Rayos X característicos

La radiación X característica se produce cuando partículas cargadas como los electrones interactúan con los electrones de las capas más internas del átomo en el material. Unos máximos de dos electrones forman la capa electrónica más interna (capa K) y están ligados con aproximadamente la misma energía (energía de enlace). La capa que le sigue a la K es la L, esta ocupa un máximo de ocho electrones, cada uno unido con similar energía al núcleo, pero con una energía de enlace menor que los electrones de la capa K. Cuando los electrones interactúan con los electrones atómicos de las capas más internas, y estos son expulsados, continúan interactuando con otros átomos, hasta que se reduzca su energía cinética (Beutel, 2000, pp.7-9).

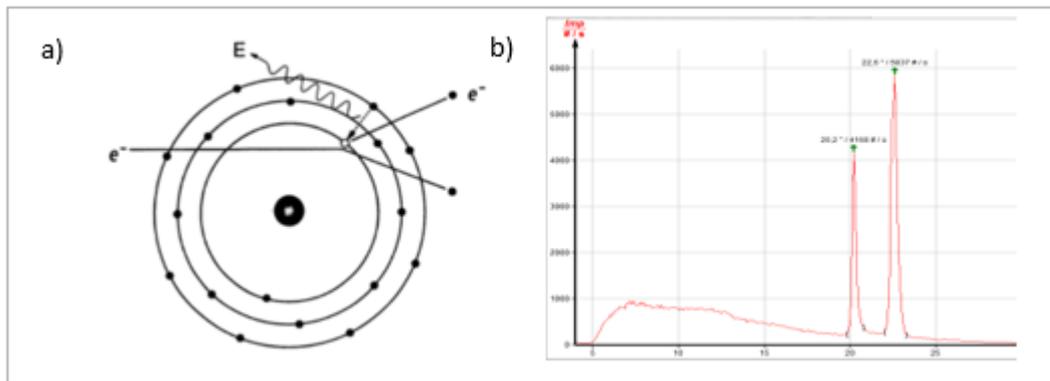


Ilustración 1-10: a) e^- y b) espectro de emisión discreto (Cu)

Realizado por: Izurieta L., 2022

Son 7 las capas o niveles de energía donde se sitúan los electrones. El orden de las capas de electrones empieza por K y avanza alfabéticamente. Los átomos con mayor Z tienen más electrones en órbita y, por lo tanto, tienen más capas de electrones. Si la energía cinética del electrón incidente es menor que la energía de enlace de un electrón orbital, la energía del electrón es invariable y no acontecerá a la expulsión. Cuando un electrón de la capa K es expulsado, deja una vacante en esa capa del átomo, que luego será llenada por un electrón atómico de una capa diferente. Esto, acontecerá a una vacante nueva en esa capa, que será ocupada por un electrón de una capa externa más distante. Por consiguiente, la expulsión de un electrón de capa K establece toda una cascada de transiciones de electrones, hasta que los electrones en las capas de valencia más externas se llenan con electrones libres en el medio, la transición de un electrón de una capa a otra requiere que se emita energía. Las transiciones de electrones de la capa K-L son K_α , las de capa K-M son K_β , cuando se da entre los orbitales L-M son L_α , o aquellas de M-N son M_α , debido a esto, los picos de las líneas K tienen generalmente una mayor intensidad en el espectro (Beutel, 2000, pp.7-9).

La radiación característica comprende niveles de energía para las transiciones de las capas que son propias de cada elemento.

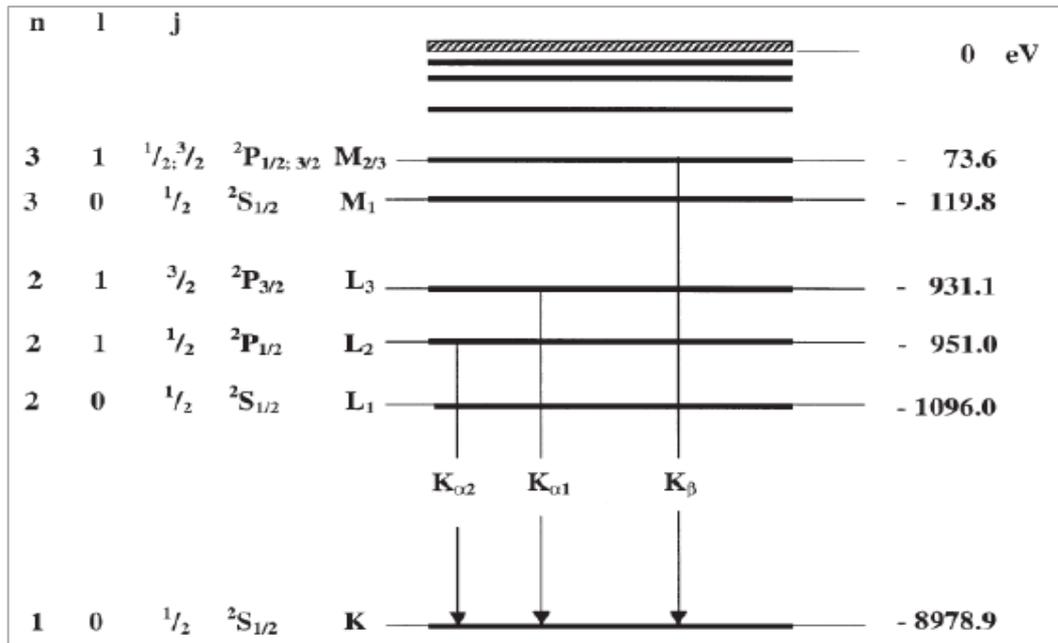


Ilustración 1-11: Niveles de energía del Cu, para transmisiones de rayos x característicos

Fuente: PHYWE Systeme GmbH, 2017

En la transición de un electrón de la capa L a la capa K para el cobre se tiene:

$$E_{K\alpha}^* = E_K - \frac{1}{2}(E_{L2} + E_{L3}) = 8,0378 \text{ KeV}$$

$$E_{K\beta} = E_K - E_{M2.3} = 8,9044 \text{ keV}$$

$E_{K\alpha}^*$ es el valor medio energético de las líneas $K\alpha_1$ y $K\alpha_2$. Estas son energías características del cobre y únicas.

Los rayos X característicos producen líneas espectrales discretas. Los rayos X resultantes de la transición de electrones entre capas atómicas se denominan rayos X característicos; cada elemento de la tabla periódica tiene sus propias energías de enlace atómicas únicas y, por consiguiente, las energías de los rayos x característicos son características y por lo tanto únicas de cada átomo. Los rayos X de baja energía en el espectro son absorbidos por el propio medio (auto absorción) y otras estructuras como en el de producción de radiación por medio del tubo de rayos X (Beutel, 2000, pp.7-9).

1.6. Espectroscopia de rayos x

La espectroscopia de rayos X es el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, donde describe técnicas espectroscópicas para realizar el análisis de la naturaleza química, cristalográfica, o estructura atómica de una amplia gama de materiales mediante la dispersión de radiación electromagnética, por medio de la detección de rayos X. Cuando una muestra es irradiada con rayos x de suficiente energía, se emite un espectro de rayos X propio de los átomos que componen la muestra (Rodríguez, 2017).

1.6.1. Espectro del haz de rayos X

Debido a que el haz de emisión de rayos X es heterogéneo en longitud de onda y energía (policromática), el espectro de un haz de rayos X es una representación gráfica de la energía de los fotones que constituyen el haz. En él se combinan por radiación de frenado espectros continuos y por radiación característica espectros discretos. La comprensión de los espectros de los rayos X ayuda a entender cómo influyen los cambios de la tensión (kV), la corriente (mA), el tiempo (s) y la filtración del haz de rayos X cuando interactúa con la materia (SEFM, 2004, p.44).

El espectro de emisión de rayos x tiene la misma forma para todas las máquinas de rayos x considerando los mismos parámetros de producción de rayos x, pero esos parámetros también modifican el espectro de rayos mas no la forma. La tensión del tubo determina la energía máxima de los rayos x emitidos haciéndolos más o menos penetrantes, el voltaje establece la velocidad de los electrones que viajan del cátodo al ánodo y tendrán mayor o menor energía cinética, dentro del espectro estos se mueven hacia la derecha cuando son más penetrantes. En cambio, cuanto mayor sea el área bajo la curva del espectro, mayor será la intensidad (energía total contenida en el haz) del haz de rayos x. El número de rayos x producidos depende del número de electrones emitidos por el filamento. El número de electrones emitidos por el filamento depende directamente de la corriente del tubo o mA utilizados. El tiempo de exposición es el intervalo de tiempo durante el cual se producen los rayos x. Los rayos x se crean en una serie de explosiones o pulsos en vez de una corriente continua por lo que se mide en impulsos (Langland et al., 2002, p.36).

1.6.2. Detección de rayos X

En la “Detección de rayos X” Rodríguez (2017, pp.11-12), explica dos sistemas de detección diferentes: dispersivo en longitudes de onda o “*Wavelength Dispersive Spectroscopy*” (WDS) y dispersivo en energías o “*Energy Dispersive Spectroscopy*” (EDS). Los primeros se basan en el análisis mediante un cristal analizador de acuerdo con la ley de Bragg, es decir, asocia cada ángulo de difracción a una interferencia constructiva, de acuerdo con la longitud de onda de la radiación detectada y su relación con el espacio Inter planar del cristal. En los sistemas EDS usan detectores contruidos con materiales semiconductores, de modo que los fotones incidentes existan electrones en la banda de valencia hacia la banda de conducción, y un voltaje aplicado detecta la carga en los electrodos (cátodo y ánodo), proporcional a la energía depositada por cada fotón registrado.

Los sólidos cristalinos o cristales son estructuras ordenadas periódicamente, que por fuerza de atracción o cohesión que existen entre las partículas que lo componen hacen que estas se distribuyan regular y simétricamente en el espacio (González, 2015, p.2).

1.6.3. Difracción de rayos X

En 1913 los físicos británicos William Henry Bragg y su hijo William Lawrence Bragg formularon la ley de Bragg, que permite calcular detalles sobre la estructura cristalina, o si se conoce la estructura cristalina, determinar la longitud de onda de los rayos X incidentes sobre un material con estructura atómica periódica (materiales cristalinos), los átomos del material cristalino dispersan la radiación incidente en todas las direcciones, y en algunas direcciones los rayos dispersados entran en fase, es decir, tienen interferencia constructiva, dando origen al fenómeno de la difracción. Varios rayos dispersados conforman un rayo difractado (Suryanarayana et al., 2013, pp.50-51).

La ley de Bragg supone a la difracción como una reflexión de los rayos X, la reflexión de la luz visible es un fenómeno superficial que ocurre en una capa (espejos), y la difracción de rayos X ocurren sobre estructuras cristalinas formadas por planos de átomos agrupados y ordenados de manera periódica separados entre sí por una distancia constante “d” (espacio Inter planar), como se observa en la figura 10.1. Los rayos incidentes son dispersados por los átomos de la red cristalina, estos pueden ser de interferencia constructiva o destructiva, cuando es constructiva las ondas incidentes y difractada están en fase con un ángulo “ θ ” específico para un plano determinado, los ángulos de incidencia y difractados sobre los planos atómicos iguales.

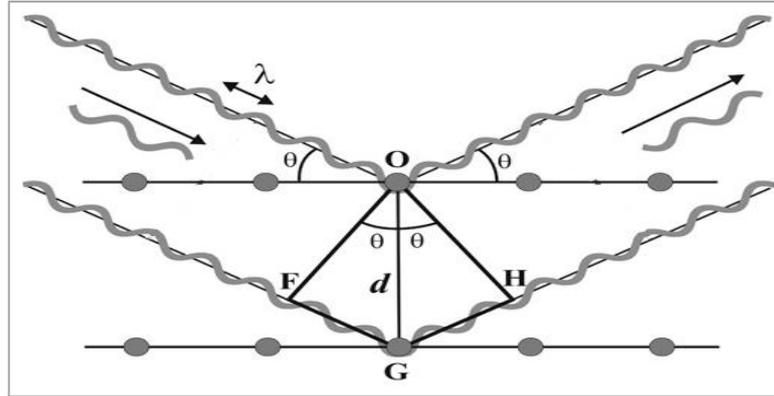


Ilustración 1-12: Difracción de rayos x sobre un plano cristalino

Fuente: (CSIC, 2015)

Para que la onda este en fase después de la dispersión, cada punto de la onda debe coincidir, de acuerdo con la figura 10.1. Los segmentos adicionales de onda FG y GH deben diferir exactamente en un numero entero “n” para que la onda difractada se mantenga en fase. Por consiguiente, las sumas de los segmentos adicionales de ambas ondas tienen que ser un número entero múltiplo de la onda.

$$FG + GH = n\lambda$$

Donde $n= 1,2,3,\dots$ orden de difracción, la diferencia del recorrido de ambas ondas por geometría:

$$\text{sen}\theta = \frac{FG}{d} \quad ; \quad \text{sen}\theta = \frac{HG}{d}$$

$$FG = d\text{sen}\theta \quad ; \quad GH = d\text{sen}\theta$$

Por tanto,

$$2d\text{sen}\theta = n\lambda \tag{1.7}$$

La ecuación (1.7) determina la ley de Bragg para que haya difracción. Debido a la naturaleza repetitiva del cristal, estos planos estarían separados entre sí por distancias constantes. Por tanto, la ley de Bragg depende del ángulo con los que inciden la radiación y del material cristalino.

1.7. Tubo de rayos X

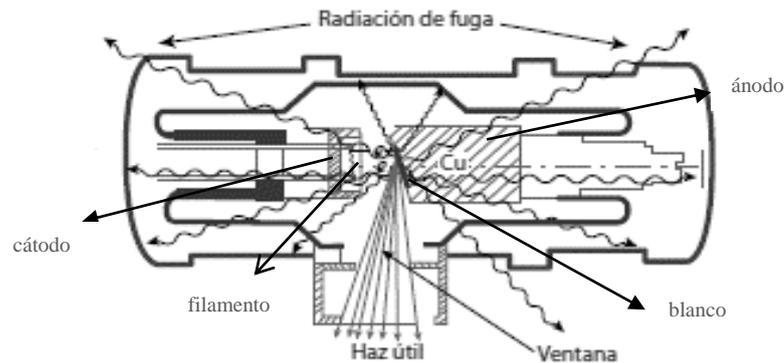


Ilustración 1-13: Componentes básicos de un tubo de rayos x

Fuente: (Martínez, 2007)

El tubo de rayos X es un dispositivo electrónico donde se producen los rayos x, es un tubo al vacío que consta de dos electrodos; un cátodo (electrodo negativo) o filamento donde se produce una corriente de electrones debido a que se suministra un voltaje del tubo (kV), y una corriente eléctrica (mA), lo suficiente intensa como para liberar los electrones de la capa externa del filamento, ya que entran en ebullición y son expulsados del filamento con dirección a un blanco o ánodo (electrodo positivo), los electrones al chocar con el blanco, estos interactúan con los átomos del mismo, transfiriendo energía cinética (cada electrón alcanza una energía cinética en keV dependiendo de la tensión que se le aplica) para la emisión de radiación, esta puede ser del tipo radiación Bremsstrahlung (radiación de frenado), radiación característica o radiación térmica, este último se da porque no existe la suficiente energía para ionizar el blanco, solo hace que los electrones del blanco se exciten pasando a un nivel de energía más alto, volviendo a su estado fundamental con emisión de radiación térmica (calor). La mayor parte de la energía cinética de los electrones es convertida en calor y solo el 1 % de esa energía se transforma en rayos X que son nocivos para la salud. Motivo por el cual consta con una corteza que actúa como protección radiológica atenuando los rayos, y un sistema de refrigeración para la protección eléctrica del equipo ante la radiación de fuga.

Los haces de radiación se emiten por todas las direcciones dentro del tubo, aquellas que salen por la ventana constituyen el haz útil, radiación primaria o haz directo, aquellas que se escapan por el blindaje del tubo son los haces de fuga, no contribuyen al análisis o estudio de las radiaciones dependiendo del campo a la que esté orientada la investigación, pero son perjudiciales para quienes estén expuestos a estas radiaciones, también están los rayos dispersados que al interactuar con la carcasa del tubo se dispersan.

Para la producción y el control de rayos X son necesarios dos componentes; un tubo de rayos X y un generador de rayos X. El tubo de rayos X proporciona los componentes apropiados para producir rayos X, mientras que el generador de rayos X le proporciona al tubo la corriente al filamento y la alta tensión, esto es el voltaje adecuado para generar el haz de rayos X. Como fuente de haz de electrones está el filamento, que consiste en la emisión de electrones por causa del calentamiento generado por la intensidad de corriente sobre el filamento, produciendo emisión termoiónica, los electrones que van del cátodo al ánodo producen radiación electromagnética siendo el ánodo buen conductor para disipar el calor y evitar daño al equipo, ya que el 99% de la energía de los electrones se deposita en el blanco en forma de calor (Seibert, 2004, pp.3-6).

Los generadores de rayos X son el conjunto de dispositivos eléctricos que proporcionan energía eléctrica al tubo de rayos X y con el panel de mando, permite seleccionar la configuración de los parámetros en la unidad de rayos X. El control de la energía y la cantidad de rayos X, se logra ajustando los parámetros de potencial de voltaje en kilovoltios (kV), la corriente del tubo de rayos X en miliamperios (mA) y el tiempo de exposición en segundos (s), donde el usuario ajusta para reproducir los ensayos (Seibert, 2004, pp.3-6).

Debido a que se produce rayos x de bajas energías que se dispersan dentro del tubo, este cuenta con filtración inherente que es propia del tubo, es la primera filtración al haz para eliminar fotones de baja energía, una segunda filtración es la añadida que se consigue con filtros adicionales que se sitúan a la salida del haz, (normalmente láminas de Al o Cu) que junto a la filtración inherente forman una filtración total que garantizará una calidad de haz suficiente en el que los fotones de baja energía tengan poco peso específico (SEFM, 2004, p.46).

1.8. Aplicación de los rayos X

Los rayos x no se pueden escanear, oír, sentir, ni oler, además de que siempre viajan en línea recta, pueden desviarse, pero adoptan trayectoria lineal, viajan a la velocidad de la luz, además de tener una amplia gama de longitudes de onda, desde los 0,01 a 0,05 nm, debido a su longitud de onda corta son penetrantes. Al interactuar los rayos x en la materia sus usos y aplicaciones en la ciencia y tecnología, ayudan al estudio de la espectroscopia para determinar estructuras cristalográficas o en el campo de la medicina, radiodiagnóstico, cuyo efecto biológico al atravesar la materia viva, produce lesiones en el organismo vivo (Langland et al., 2002, p.22).

El uso de los rayos x para determinar estructuras cristalinas se basa en hacer pasar un haz de rayos X sobre una muestra de estudio (cristal) cuya estructura está constituida por partículas ordenadas

periódicamente con patrones de repetición en un espacio tridimensional formando una red cristalina ordenada y cuyo espacio Inter planar es constante; como los monocristales que tiene una red cristalina continua y ordena periódicamente. Los haces de rayos x interactúan sobre la muestra dispersándose en varias direcciones, formando haces de interferencia constructiva o destructiva sobre un material, de manera que sobre una película fotográfica se forman un conjunto de manchas características, conocida como un patrón de difracción, o a través de un espectro de rayos x donde se observa líneas características propio de los átomos que componen la muestra.

Dentro del área de radiodiagnóstico, el uso de los rayos x como técnica experimental para obtener imágenes al hacer pasar un haz de rayos x sobre la materia viva que se quiere examinar, de la cual sobre una placa fotográfica o pantalla fluorescente registra las variaciones de intensidad, es decir mientras más radiación se transmite, más ennegrecimiento produce sobre la placa o pantalla, por lo contrario, si la radiación es absorbida por la materia se obtiene una imagen blanca. Los diferentes tonos de gris son resultado de valores intermedio de atenuación de la radiación en la materia (Niconoff et al., 1996, pp.163-172).

1.9. Protección radiológica

La exposición a la radiación se refiere a que las personas absorben radiaciones ionizantes causando enfermedades, que resultan de interacciones a escala atómica, ionizando o excitando los electrones orbitales de la materia viva, alterando su estructura molecular o acumula energía, produciendo quemaduras en la piel o alteraciones genéticas de la célula. Proviene principalmente de fuentes artificiales como plantas nucleares, o equipos de rayos x usados en distintas disciplinas como medicina en radiodiagnóstico o en el ámbito de investigación. El uso de equipos como fuente de radiación requiere normas de seguridad que garanticen que los beneficios recibidos sean mayores que los riesgos a los cuales se expone los operarios o usuarios en el ámbito de la medicina. El objetivo de la protección radiológica es permitir los beneficios de la radiación, asumiendo un riesgo aceptable para quienes se exponen a la radiación. (Medidas Básicas de Protección Radiológica, 2010, pp.25-30).

Las reglas fundamentales de protección contra fuentes de radiación son:

- Distancia: mantenerse alejado de la radiación, para disminuir la intensidad de radiación.
- Blindaje: carcasas protectoras entre la fuente radiactiva y las personas, quienes absorben los rayos x son muros de hormigón, láminas de plomo o acero o cristal enriquecidos de plomo.
- Tiempo de exposición: disminuye la duración de exposición a la radiación.

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe las condiciones de operacionalidad y manejo del equipo Phywe emisor de radiación, para a un análisis de las interacciones de las radiaciones ionizantes emitidas por un tubo de rayos X, y generadas por el equipo, sobre una muestra cristalina, mediante montajes de sistemas de detección que se realizan dentro del equipo de rayos X, para determinar radiación dispersa, por medio de recolección de datos, por medio del espectro característico de rayos X, la cual contiene información de la radiación dispersada.

A continuación, se describe al equipo y sus componentes como fuente generadora de rayos x para el ensayo de determinación y análisis de la dispersión de rayos X.

2.1. Equipo de rayos X “XR 4.0 X-RAY EXPERENT UNIT, 35 KV”



Ilustración 2-1: Equipo de rayos x, XR 4.0 de 35 Kv

Fuente: (PHYWE Systeme GmbH, 2017)

En el estudio de radiaciones ionizantes, rayos X y su interacción con la materia se utiliza el equipo de rayos X, XR 4.0. de 35 kV, de la empresa alemana Phywe, que se encuentra en el laboratorio de física Moderna. El cual, permite realizar experiencias interdisciplinarias asociadas a la física en el campo de las radiaciones, como detectar rayos X característicos del ánodo, o al campo de medicina mediante experimentos simples de dosimetría y radioscopia a partir de la transiluminación (técnica de iluminar objetos por transmisión de luz). En este equipo se generan las condiciones necesarias para la producción de rayos X, El equipo debe enchufarse a una red eléctrica acorde a la tensión de red del equipo. Para el presente trabajo integrador se enchufo a un

tomacorriente de 220V, cuenta con una carcasa protectora que evita radiación de fuga, dado que los rayos X son nociva para la salud, el índice de dosis con los parámetros de generación al máximo (corriente del filamento 1 mA, voltaje del tubo 35 kV) a 10 cm de distancia del equipo es menor $1\mu Sv/h$. El equipo cuenta con sistemas de refrigeración para disipar el calor tanto en el tubo como en el compartimento de ensayo, por lo que se debe asegurar que las rejillas de ventilación estén limpias, el uso del equipo debe usarse bajo supervisión de un profesional.

El equipo de rayos X como unidad base para entrar en funcionamiento y experimentar con radiaciones, cuenta con los siguientes elementos:

2.1.1. Componentes del equipo de rayos X



Ilustración 2-2: Componentes “XR 4.0 X-RAY EXPERENT UNIT”, 35KV

Fuente: (PHYWE Systeme GmbH, 2017)

1. Compartimiento del ensayo: lugar donde se realiza los experimentos y donde se alojan componentes adicionales, como el goniómetro, detector Geiger-Müller, tiene una puerta corredora de cristal acrílico plomífero para atenuar la radiación dispersa, además de un sistema de bloqueo automático, que detecta si está o no cerrada la puerta, condición necesaria para realizar ensayos. Dentro del compartimento hay una abertura por donde salen haces de radiación primaria con diafragmas doble circulares para generar un haz adaptado al experimento, por último, un canal de trabajo donde se desplazan o montan muestras dependiendo del experimento, además de un sistema de iluminación y ventilación.

2. Panel de mando: nos permite seleccionar unas series de opciones del menú del equipo, que nos permite configurar los valores operativos y de funcionamiento en el equipo, como el goniómetro, el bloqueo de puerta, además de los parámetros de rayos X para la generación. Rango de tensión de los tubos: 0,0 kV - 35kV, Rango de corriente de emisión: 0,00 mA – 1,00 mA, viene incluido un panel digital donde se observa el estado del equipo para su funcionalidad, así como su puesta en marcha, y las mediciones. Los ajustes del equipo, así como las mediciones obtenidas en un ensayo se realizan manualmente por medio de este apartado, o mediante un USB conectado a un pc al cual transmite datos de mediciones, e incluso se puede manipular el ensayo. Para tener control en el pc, el equipo viene con un software “measure version 4,6 Release 17”.
3. Cajón de accesorios: para guardar componentes adicionales con molduras que se adapten a la forma del tubo contador Geiger-Müller, o muestras estándar (cristales), o tubo de diafragmas.
4. Modulo insertable de tubo de rayos X: aquí se aloja el tubo de rayos X cubierta por una carcasa de chapa de acero montado y ajustado de fábrica, con tecnología de intercambio que permite optar por otras líneas de rayos X características de ánodo en la unidad base. Para evitar daños por sobrecalentamiento durante la operación, los tubos están encerrados en un cilindro de cristal Duran (marca de vidrio de borosiliacato), que cuenta con un soporte lateral por el cual pasa una refrigeración forzada mediante un ventilador que contiene el aparato base. La vida útil del tubo es de 500 horas de funcionamiento, sus máximos valores de funcionamiento son de 1 mA/ 35kV.
5. El módulo insertable viene de fábrica y no se puede reemplazar por cualquier otro tubo que no sea parte del equipo, su funcionamiento comienza una vez insertado en el compartimento de rayos x del equipo, y para emitir radiación la puerta debe estar bloqueada.



Ilustración 2-3: Modulo insertable de Cu

Fuente: (PHYWE Systeme GmbH, 2017)

En la interfaz del Software, como se observa la figura 16-2., el tubo de rayos x permite realizar ajustes de tensión y corriente, para emitir electrones del filamento del cátodo al ánodo del tubo y por colisión se produzcan rayos X. De esta manera se manipula la emisión de rayos X.

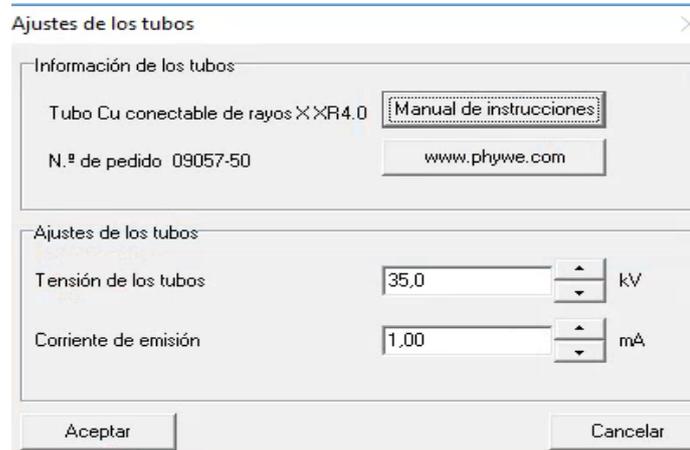


Ilustración 2-4: Interfaz del software Measure de Phywe

Realizado por: Izurieta L., 2022

6. Panel de hembrillas en el compartimento de ensayos: para conectar diferentes componentes a la red eléctrica del equipo, como el goniómetro y el tubo contador *Geiger-Müller*.
7. Panel de hembrillas exterior: para conectar diferentes componentes fuera del equipo sin exponerse a la radiación. El puerto de USB se encuentra en esta sección.

Además de los componentes que forman parte del equipo para operar, el equipo cuenta con accesorios que permiten ampliar las experiencias con los rayos X.

2.1.2. *Goniómetro*

Accesorio del equipo que cuenta con dos bandas magnéticas en la parte trasera que permite fijarlo al equipo de rayos X dentro de la cabina de ensayo. además de dos motores que rotan de manera independiente entre sí, que permiten girar el soporte de la muestra (cristal o cuerpo dispersor Compton), o el brazo del tubo contador, en una relación de 1:2. El goniómetro cuenta con una configuración propia dentro del equipo que nos permite cambiar el tipo de escaneo del modo de medición, estos parámetros modificables son: modo acoplado, detector fijo y la muestra se mueve, o el cristal fijo y el detector se mueve, además del ángulo de paso para cambiar de

posición cada cierto tiempo. El goniómetro funciona como un sistema de espectrómetro, el cual permite sujetar el material de análisis y el detector de radiación tipo *Geiger-Müller*.



Ilustración 2-5: Goniómetro

Fuente: (PHYWE Systeme GmbH, 2017)

En la interfaz del software, el goniómetro permite configurar el tipo de cristal, el absorbedor y el tiempo de medición por paso angular, esto permite manipular las muestras que se exponen a la radiación, y se usa como técnica de espectroscopia, como se observa en la figura 14-2. La conexión del goniómetro y el equipo de rayos X se lo hace enchufando el cable fijo del goniómetro en la toma de unidad de rayos X etiquetada como “Goniómetro”. Esto permite el control simultaneo de la unidad de rayos X y el goniómetro, de manera manual o a través del software.



Ilustración 2-6: Interfaz del software Measure de Phywe

Realizado por: Izurieta L., 2022

El goniómetro como instrumento de medición de posiciones puede verse alterado, por ejemplo, la posición del cristal respecto al tubo contador puede ser alterada, por transporte de la unidad de

rayos X a otra posición, o que los cristales analizadores pueden tener un error en sus orientaciones desviando las trayectorias de radiación, y que estas no son detectadas por el tubo contador, tal que las líneas características del espectro de rayos X no son halladas en los ángulos de difracción deseados dentro del espectro, o cuando se reemplaza un cristal analizador. Por eso es necesario calibrar el goniómetro configurando la posición del cristal analizador respecto al tubo contador. La manera más fácil de calibrar el equipo es a partir del panel de control opción goniómetro, ajustes “auto calibrar”, esto ajustara las posiciones adecuadas de la muestra y el detector obteniendo intensidades de picos en los ángulos deseados por la teoría de Braggs, difracción de los rayos x.

2.1.3. *Tubo contador Geiger-Müller*



Ilustración 2-7: Tubo contador Geiger Müller

Realizado por: Izurieta L., 2022

Consta de un tubo de metal de paredes delgadas que por dentro contiene un alambre de metal delgada y aislado que pasa por medio del tubo, además de una mezcla de gases inertes que no permite que haya ninguna reacción. El metal de la carcasa es tan delgado que la radiación gamma puede atravesarlo. La radiación alfa y beta, o radiación x pasan por la ventana de mica en el extremo del tubo. El tubo contador utiliza el efecto ionizante para medir la radiación, los rayos x que entran al tubo contador, ionizan las partículas de gas, creando iones cargados positivamente y electrones libres (primarios). Los electrones cuando se acercan al ánodo, aumentan su aceleración. Los electrones son acelerados hacia el alambre de conteo cargado positivamente, una avalancha de electrones llega al ánodo, que da como resultado un flujo de corriente entre la pared del tubo contador y el hilo contador y, por lo tanto, una caída de tensión que se detecta. Los electrones secundarios que se crean por interacción del contra tubo son interceptados por un gas de extinción (halógenos). Hay un tiempo en que el tubo contador no puede detectar nuevas partículas durante

aproximadamente 100 μ s. Este es el llamado tiempo muerto. Durante este tiempo los iones cargados positivamente protegen el ánodo del campo eléctrico.

Los accesorios descritos anteriormente forman parte general del equipo como sistemas detectores, pero para atenuar haces de rayos x, monocromatizar un haz policromático o dispersar radiación dentro del compartimento del ensayo se logra con elementos adicionales, que contribuyan con información en el desarrollo del ensayo.

Los equipos de rayos X cuenta con sistemas monocromadores que consisten placas o tubos de metal, como los diafragmas que absorbe los haces de radiación que contribuyen con la formación del espectro, por otra parte, elementos dispersantes, montados en el goniómetro, como monocristales, o cristales acrílicos (PMMA), que permiten rotarlos, a fin de dispersar o difractar radiación en función del ángulo de Bragg. Para analizar un haz de radiación policromático y obtener información se usa los siguientes elementos:

Elementos para colimar y dispersar el haz de radiación.

Tabla 2-1: Elementos para colimar y dispersar el haz de radiación

Accesorio	Descripción	Función	Gráfico
Monocristal (LiF)	Espacio Inter planar constante $d=2.014 \times 10^{10}$ m	Filtra la radiación policromática mediante monocristales, para emitir radiación monocromática.	
Tubo de diafragma	diámetro= 2mm diámetro= 5mm	Para la colimación de rayos x (absorben los haces de radiación dispersados que no contribuyen con información al espectro, excepto los paralelos)	 

<p>Accesorios Compton</p>	<p>Vidrio acrílico dispersor (PMMA) (40x30x10) mm</p> <p>Absorbedor de aluminio d= 1,5 mm</p>	<p>El PMMA como lámina dispersora de radiación</p> <p>El absorbedor de aluminio como atenuador de radiación débil</p>	
---------------------------	---	---	---

Realizado por: Izurieta L., 2022

2.2. Montaje del equipo

Conectamos el goniómetro con sus componentes; el monocristal de (LiF) para obtener un espectro característico del ánodo del tubo de rayos x, además de filtrar los haces policromáticos, el tubo contador *Geiger-Müller* debe estar conectada a su respectiva entrada del panel de hembra del compartimento de ensayo, además de tubos de diafragma de 2mm y 5mm en la salida del haz de radiaciones para la colimación, para absorber la radiación dispersa que no es útil (de menor energía) y no contribuya a la información del espectro. Para calibrar el goniómetro, el mismo panel de control en su barra de menú aparece la opción “auto calibrar”, esto ajustara las posiciones adecuadas del cristal y el detector, ayudando a obtener una mejor intensidad esperada de acuerdo al ángulo de Bragg. El equipo se operó con un pc marca Dell con procesador INTEL(R) COREi5 con una memoria RAM de 4 GB.



Ilustración 2-8: Montaje del equipo de rayos x con un pc

Realizado por: Izurieta L., 2022

El software detecta el equipo de rayos x automáticamente cuando está conectada al pc. En la interfaz que nos ofrece el programa se observa en la figura 7.2., una unidad de rayos X virtual,

donde se puede clicar sobre ella para cambiar los parámetros del tubo de rayos X, también los parámetros del Goniómetro. Las mediciones del tubo contador se reflejan en el espectro en función de la intensidad y el ángulo de giro. Se pueden controlar en el equipo a través del software o alternativamente, también se puede cambiar los parámetros en la unidad de rayos X real, y este adoptara las configuraciones automáticamente.



Ilustración 2-9: Interfaz del software Measure (unidad de rayos x)

Realizado por: Izurieta L., 2022

CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS PARA REPRODUCIR LA EMISIÓN DE RAYOS X Y ANALIZAR LA INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN

Una vez descrito la unidad de rayos x y sus componentes, se puede reproducir ensayos como procesos interdisciplinarios para el estudio o análisis de fenómenos con la radiación, a partir de la fuente generadora de rayos x y sistemas detectores de radiación. Como ensayo para analizar la interacción de las radiaciones sobre un material se emite radiación sobre un cristal analizador, que a partir de la difracción de rayos x, estos se detectan con un tubo contador, que por medio del movimiento sincronizado miden la radiación en pulsos y la representan en un espectro.

Dado que la radiación que emite un tubo de rayos X es policromática, para analizar un haz de radiación incidente se hace pasar por un cristal analizador, el cual por difracción determina un espectro característico del material del ánodo y lo representa en un espectro eliminando la mayor parte de radiación continua de baja energía, para ello se usan filtros, la disposición del sistema de detección acopla la rotación del cristal analizador y del tubo contador, para determinar un espectro se configura los siguientes parámetros en el equipo de rayos X.

Tabla 2-2: Configuración de parámetros

Zona A	Zona B
Voltaje del tubo: U =35 kV	Modo de acoplamiento: 1:2
	Cristal analizador: LiF
	Rango de escaneo: 4°-55°
Corriente de emisión: I= 1 mA	Ancho de paso del ángulo: 0,1°
	Tiempo de integración: 2s
	Sin absorbedor

Realizado por: Izurieta L., 2022

Como experiencia con los rayos X, se usa un sistema de detención de radiación, sabiendo la estructura de un material cristalino de acuerdo con Bragg, se determinará la longitud de onda de los rayos X incidentes, el sistema consta de una fuente generadora de radiación (rayos x), una muestra la cual difracta el haz de radiación dispersado y un detector que mide la radiación. La ecuación de Bragg tiene ciertos parámetros como constantes, y para determinar la radiación de las transiciones de energía de la radiación característica tenemos:

Tabla 2-3: Constantes para determinar la radiación característica del ánodo

Constante de Planck	$h = 6,6256 * 10^{-34} \text{ Js}$
Velocidad de la luz	$c = 2.9979 * 10^8 \text{ m/s}$
Espacio Inter planar del LiF	$d = 2.014 * 10^{-10} \text{ m}$

Realizado por: Izurieta L., 2022

Una vez configurado los parámetros para determinar un haz de radiación monocromático y obtener un espectro de líneas características del ánodo, se inicia la medición dentro del panel de control aceptando la opción “iniciar”, para el software aparece en la barra de ajustes un botón rojo, con la descripción “iniciar medición”.

APLICACIÓN DE LA DISPERSIÓN COMPTON PARA ANALIZAR LA INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN

Los procesos de absorción y dispersión son por fenómenos de interacción de la radiación electromagnética sobre el material, los rayos X que inciden sobre la materia se transmiten y llegan a un bloque de vidrio acrílico (PMMA) donde las radiaciones se dispersan, la intensidad de la

radiación dispersada se mide con un tubo contador. Para determinar la longitud de onda Compton se configura el equipo de manera que se obtenga una curva de transmisión.

En función del ángulo de Bragg, para para un ángulo incidente el ángulo dispersado de radiación se difracta en interferencia constructiva, para determinar la longitud de onda de los rayos incidentes, y medir la energía de radiación que pasa a través de un cristal se usa un monocristal de LiF para tener un haz monocromático, utilizamos un tubo de diafragma con un diámetro de 2mm en la salida de la radiación X para la colimación (reducen la intensidad de la radiación dispersa), sobre un cristal analizador, en un rango de ángulos de $7,5^{\circ}$ - $9,5^{\circ}$ para obtener un espectro referente, y medir la frecuencia de pulso, mientras se gira la muestra en un ángulo ϑ , el detector se mueve 2ϑ en movimiento sincronizado 2:1 para detectar la radiación dispersada, con un tiempo de medición 100s. El tubo contador detecta la radiación dispersada en frecuencias de pulso con un cristal analizador. Para medir valores de N1 que se difractan, se configura el equipo de la siguiente manera.

Tabla 2-4: Configuración de parámetros para detectar radiación dispersada

Zona A	Zona B
Voltaje del tubo: U =35 kV	Modo de acoplamiento: 1:2
	Cristal analizador: LiF
	Rango de escaneo: $7,5^{\circ}$ - $9,5^{\circ}$
Corriente de emisión: I= 1 mA	Ancho de paso del ángulo: $0,1^{\circ}$
	Tiempo de integración: 100s
	Sin absorbedor

Realizado por: Izurieta L., 2022

Para determinar la radiación transmitida N2, como proceso de interacción sobre un absorbedor de aluminio se ajusta la misma configuración añadiendo el absorbedor.

Tabla 2-5: Configuración de parámetros con absorbente

Zona A	Zona B
Voltaje del tubo: U =35 kV	Modo de acoplamiento: 1:2
	Cristal analizador: LiF
	Rango de escaneo: $7,5^{\circ}$ - $9,5^{\circ}$
Corriente de emisión: I= 1 mA	Ancho de paso del ángulo: $0,1^{\circ}$
	Tiempo de integración: 100s
	Con absorbedor: Al

Realizado por: Izurieta L., 2022

El tubo contador Geiger Müller detecta la radiación, para eso es importante saber que no toda la radiación será tomada en cuenta, ya que el tubo contador detecta frecuencias de pulso, es decir, para no sobrecalentar ni reducir su vida útil el Geiger muller tiene un tiempo muerto donde no detecta más radiación y pasa un determinado tiempo para recuperarse hasta que es capaz de producir un pulso máximo de amplitud. El tiempo que demora en volver a contar es de $90 \mu s$, para ello se determina medidas reales, que se logra configurando dentro del software el tiempo muerto, en el apartado análisis, “espectroscopia de rayos X” y “corrección del tiempo de vida”, esto disminuirá el tiempo de recuperación del tubo contador. Una vez determinado la frecuencia de pulsos reales, para las ondas incidentes y transmitidas, se determina la curva de trasmisión en función de la longitud de onda.

Para determinar la trasmisión de rayos X dispersada y no dispersada, se sustituye el cristal analizador por uno de dispersión, al igual que el diafragma, permitiendo obtener mayor intensidad de radiación. Para la frecuencia de pulsos N_3 , que es la radiación dispersada sin absorbedor, se configura los parámetros de la siguiente manera. Ver tabla 6-2.

Tabla 2-6: Configuración de parámetros con lámina dispersora (PMMA) sin absorbente

Zona A	Zona B
Voltaje del tubo: $U = 35 \text{ kV}$	Modo de acoplamiento: cristal firme-detector se mueve
	Cristal analizador: PMMA (<i>plexi glass scattered</i>)
	Angulo inicial del cristal: 135°
Corriente de emisión: $I = 1 \text{ mA}$	Angulo del detector: 90°
	Tiempo de integración: 100s
	Sin el absorbedor

Realizado por: Izurieta L., 2022

Para obtener medidas de trasmisión dispersadas y no dispersada, el compartimento de ensayo se ajusta a un arreglo para dispersión de 90° , colocando el absorbedor en una posición en medio del diafragma y del cristal dispersor (posición 1), y luego en una posición entre el material dispersor y el tubo contador (posición 2). Fíjese en los Anexos B.

Para la configuración del has transmitido no dispersado N_4 , el material dispersor está en la posición 1.

Tabla 2-7: Configuración de parámetros con lámina dispersora (PMMA)

Zona A	Zona B
Voltaje del tubo: U =35 kV	Modo de acoplamiento: cristal firme-detector se mueve
	Cristal analizador: PMMA (<i>plexi glass scattered</i>)
	Angulo inicial del cristal: 135°
Corriente de emisión: I= 1 mA	Angulo del detector: 90°
	Tiempo de integración: 100s
	Sin el absorbedor

Realizado por: Izurieta L., 2022

Para la configuración del has transmitido dispersado N_5 , el material dispensor está en la posición 2.

Tabla 2-8: Configuración (PMMA) con absorbente en la frente al tubo contador

Zona A	Zona B
Voltaje del tubo: U =35 kV	Modo de acoplamiento: cristal firme-detector se mueve
	Cristal analizador: PMMA (<i>Plexi Glass Scattered</i>)
	Angulo inicial del cristal: 135°
Corriente de emisión: I= 1 mA	Angulo del detector: 90°
	Tiempo de integración: 100s
	Sin el absorbedor

Realizado por: Izurieta L., 2022

Una vez configurado los parámetros para determinar variables que ayuden a determinar la dispersión Compton, se inicia la medición, luego de acabar la medición aparecerá una pestaña como se observa en la figura 21-2. Esta ventana transferirá los datos al software de medida, mostrando un espectro en función de los impulsos/s sobre el ángulo del cristal.

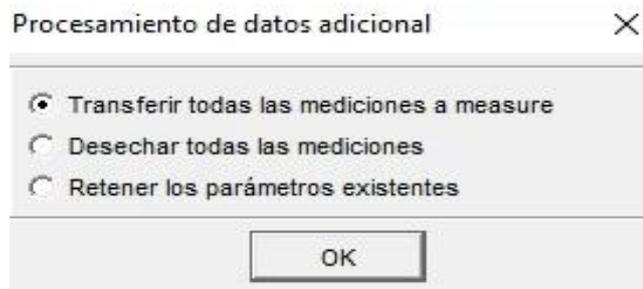


Ilustración 2-10: Pestaña de procesamiento de datos

Realizado por: Izurieta, L., 2022

2.3. Indicaciones de seguridad

Al usar el equipo de rayos x se debe tener en cuenta que el equipo trabaja con radiación ionizante, por lo que el equipo cuenta con normas de seguridad para evitar daños físicos del operador y de la máquina.

El equipo cumple con las condiciones necesarias para la enseñanza y protección total de radiación según las normas del reglamento de rayos X (RöV).

El interruptor de red debe enchufarse a un tomacorriente con conductor de protección para evitar daños eléctricos en el equipo.

El equipo tiene entrada USB que le permite transferir datos al ordenador, además de manipular las variables, permite reproducir ensayos con los rayos x a través del ordenador.

Debe asegurarse que todos los cristales de protección están intactos, además de comprobar que la puerta del compartimento de ensayo puede bloquearse, de manera contraria el equipo no emite radiación.

El goniómetro no debe tener obstrucciones en el paso de los brazos para no limitar el movimiento, al igual que el tubo contador Geiger-Müller, para obtener diferentes medidas de ángulos.

Debe asegurarse que el equipo no cuente con obstrucciones en la ventilación para evitar sobrecalentamiento en el tubo de rayos x. La intensidad de dosis fuera del equipo es de 1 $\mu\text{Sv/h}$ gracias a la protección y blindaje del equipo, este valor se encuentra en el orden de la carga radiactiva natural

Para colocar los arreglos en la transmisión del haz de radiación dentro del compartimento de ensayo, se usa accesorios de la marca de Phywe, ya que estos se ajustan al desarrollo del ensayo, por lo que no se debe usar materiales diferentes que puedan dañar la estructura del equipo. Como reglas fundamentales de protección contra fuentes de radiación se debe tener en cuenta el blindaje, el tiempo de exposición y la distancia, como medidas de protección radiológica.

CAPÍTULO III

3. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

ANÁLISIS DE UN HAZ DE RAYOS X CUANDO INTERACCIONA CON UN MATERIAL DE ESTRUCTURA PERIÓDICA. (MONOCRISTAL)

En la interacción de partículas cargadas con un blanco en un tubo al vacío se producen rayos x, los rayos x se emiten en todas direcciones y con diferentes longitudes de onda, con la ayuda de filtros se absorben rayos X de baja energía o aquellos cuya dirección no es paralela al material analizador o no contribuyen con información por su baja energía. El haz de radiación x es policromática, pero con ayuda de filtros añadidos, colimadores, y por interacción con un material analizador (monocristal LiF) se obtienen haces de radiación monocromática que se detecta con un tubo contador *Geiger Müller*, este transfiere información a un espectro que representa la intensidad de radiación detectada. De acuerdo con la ley de Bragg, la longitud de onda de los rayos X incidentes al interactuar con el material analizador se dispersan e interfieren de manera constructiva o destructiva, dependiendo del ángulo con el que interfieran constructivamente, los rayos X se difractan y determinan un espectro característico del material, permitiendo obtener difracción en el ángulo deseado y determinar el haz de radiación característico del material del ánodo.

Como técnica de detección de radiación emitida, se usa un sistema de detección dispersivo en longitudes de onda que consta de un sistema similar al de un espectrómetro, es decir cuenta con una fuente de rayos (tubo de rayos x), un cristal analizador (monocristal) y un detector (detecta la radiación dispersa), a medida que los rayos interactúan sobre el material cristalino, estos se dispersan, y de acuerdo al ángulo con el que interfieran se detecta un espectro característico, que por movimiento sincronizado del goniómetro, la muestra y el detector se recopila información en el para diferentes ángulos adquiriendo espectros continuos y característicos.

Cuando los electrones chocan con el ánodo se produce dos tipos de radiación; de frenado y característica, su espectro es continuo para radiación de bremsstrahlung y discreto para la radiación característica, esto nos ayuda a analizar de manera cualitativa el espectro de rayos x. Otra manera de analizar el haz de rayos X, es de manera cuantitativa, a partir de la dispersión de rayos X, que por interacción con la estructura de un material analizador se adquiere líneas bien definidas que se interponen en el espectro y son características de un material que permanecen

inalteradas cuando se varía los parámetros de corriente y voltaje, que por la ley de Bragg nos permite obtener el valor de las radiaciones característica.

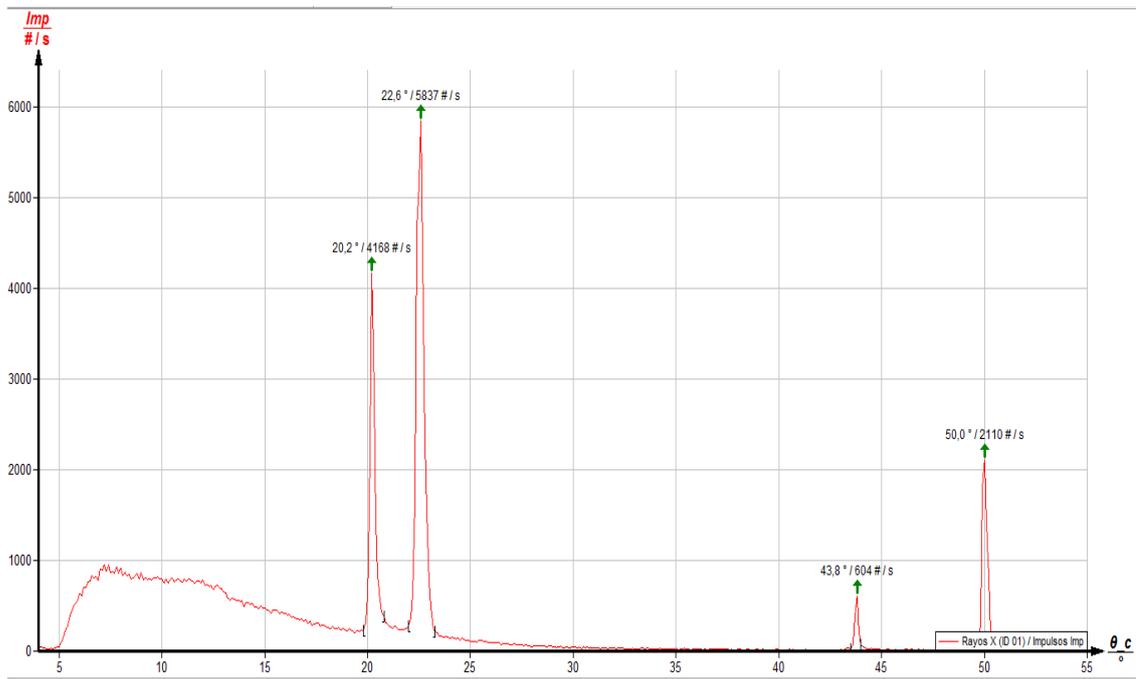


Ilustración 3-1: Espectro de rayos x característicos de Cu con un cristal analizador de LiF

Realizado por: Izurieta L., 2022

La figura 21-3., muestra el espectro de rayos X del cobre que se analizó con un monocristal de LiF, con un diafragma de 2mm que permite el paso de radiación primaria, esto para analizar un haz de rayos x monocromático. Donde se observa un espectro continuo y discreto en función del ángulo y la intensidad. Muestra líneas bien definidas características del material del ánodo, que corresponde a la radiación característica. Para determinar las líneas de radiación característica que corresponde a transiciones de electrones en los niveles de energía como parte de la interacción de partículas cargadas en la materia para producir rayos X, se determina con la ley de Bragg cuando los rayos interactúan con el material analizador y se difractan, luego son detectados por un tubo contador de radiación, esta información es transferida al ordenador con el software y se representan en un espectro.

Se puede determinar las líneas de rayos x característicos de acuerdo con la ley de Bragg, en función del ángulo con el que interfiere constructivamente. Para un orden de difracción entero. A partir de la ecuación de Bragg (1.7)., y la energía de un fotón. (1.1) se determina las líneas de rayos x característicos del ánodo, con la ecuación (1.8)., que resulta de despejar la longitud de onda en la ecuación de Bragg y sustituirla en la ecuación de la energía de un fotón.

$$E = \frac{nhc}{2d\sin\theta} \quad (1.8)$$

Tabla 3-1: Resultados del análisis de un haz de rayos policromáticos

LiF	θ° del cristal	Transición de niveles de energía	E/KeV
n1	22,6°	k_α	8,0096
	20,2°	k_β	8,9136
n2	50°	k_α	8,0362
	43,8°	k_β	8,8942

Realizado por: Izurieta L., 2022

La Tabla 9-2., muestra los resultados de la energía de las líneas de transición de los rayos x característicos cuando se difractan y se superponen sobre el espectro continuo, los ángulos de mirada de las líneas permanecen inalteradas cuando se varía el voltaje, esto indica que son características de los rayos x del ánodo. La interferencia que hay en el espectro corresponde a la de primer orden para n1 y segundo orden para n2.

ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN DE RADIACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA COMPTON

Dentro de los procesos de interacción de la radiación con la materia, la radiación electromagnética ionizante actúa de diferente manera, dentro de ellos las partículas cargadas actúan por colisiones produciendo ionización o excitación, mientras que los fotones causan procesos de absorción o dispersión.

Para analizar la interacción de la radiación electromagnética ionizante de los rayos X sobre un material, se incide rayos x sobre un absorbente que por procesos de interacción estos son absorbidos o dispersados, luego se transmiten e inciden sobre un bloque dispersor (PMMA) que dispersa la radiación y esta es detectada por un tubo contador Geiger Müller. Para el rango de radiación que emite el equipo se desprecia los coeficientes de absorción por creación de pares y efecto fotoeléctrico ya que solo se liberan electrones y no fotones. En el efecto Compton, la radiación incidente debido a la interacción con un electrón libre, el fotón incidente pierde energía y se dispersa, el electrón absorbe energía cinética y abandona el átomo del material.

Durante este ensayo, el número de fotones de un haz de rayos x dispersados se mide con un tubo contador, para ello se determina el comportamiento de transmisión antes y después de interactuar con un absorbente, para determinar la radiación incidente y dispersada, de modo que la longitud de onda Compton pueda determinarse a partir de la atenuación de intensidad variable en diferentes longitudes de onda según el ángulo de mirada del cristal de acuerdo con Bragg, utilizando una curva de transmisión.

Con el fin de determinar la curva de transmisión, el detector cuenta las radiaciones que ingresan al tubo como frecuencias de pulso, esto porque ioniza los gases del tubo contador y genera impulsos que son detectados en forma de impulsos sobre segundo, y se representa en un espectro en función del ángulo de mirada del cristal.

Dado que el tubo contador mide una señal de salida para cada pulso de corriente, de manera que, los detectores dan un pulso por cada cuanto que interacciona con su volumen activo, es decir, recolecta información por cada pulso de corriente, para ello el detector llega a un pulso máximo de amplitud donde no detecta más, y habrá pasado un tiempo para que vuelva a contar, de ahí que no toda la radiación será detectada, este tiempo que deja de contar se denomina tiempo muerto y determina la eficacia de medición. Esto es necesario para armar la curva de transmisión ya que considera la frecuencia de pulsos medida y la frecuencia de pulsos real de sucesos.

La curva representa los coeficientes de transmisión cuya dependencia es la longitud de onda, esto nos ayudara a determinar la longitud de onda de la radiación dispersada y no dispersada, de modo que la curva va a estar en función del ángulo de mira del cristal, usando Bragg para determinar la longitud de onda, y el coeficiente de transmisión es igual a la frecuencia de pulso real de un absorbente sobre la frecuencia de pulso real sin absorbente.

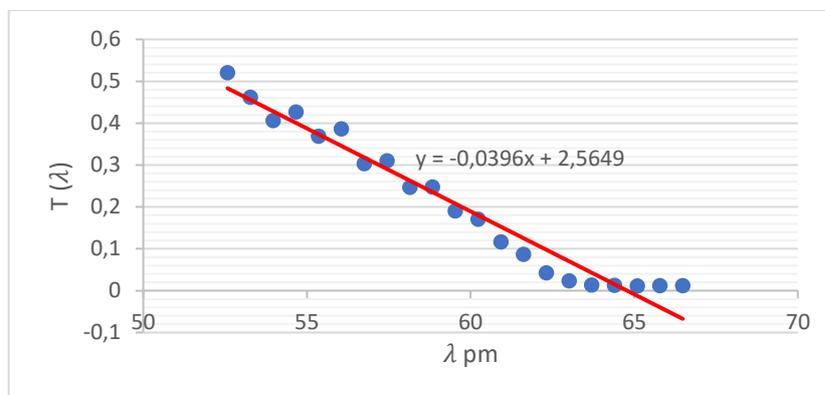


Ilustración 3-2: Curva de transición del absorbente en función de ondas

Realizado por: Izurieta L., 2022

Para determinar la longitud de onda Compton para el electrón, el absorbente de aluminio absorbe longitudes de onda más cortas con menos fuerza que longitudes de onda más larga, es decir, para la posición en la que se encuentre el absorbente delante de la salida del haz de rayos x se determina la transición de radiación no dispersa, cuando el absorbedor estado en la posición entre el dispersor y el detector se determina la transmisión de radiación x dispersada.

Para la radiación dispersada por un dispersor (PMMA) N3, la transmisión de la radiación no dispersada N4, y la transmisión de la radiación dispersada N5, tenemos la frecuencia de pulsos reales:

$$n_3^* = 116,543 ; n_4^* = 50,899 ; n_5^* = 38,802$$

A partir de la frecuencia de pulsos se determina la transmisión de la radiación X dispersada y no dispersada, tomando en cuenta el error relativo para estas mediciones.

$$T_1 = 0,436 \pm 1,68\%$$

$$T_2 = 0,333 \pm 1,853\%$$

Los errores sistemáticos no se consideran, debido a que es radiación policromática, los rayos X también se difractan para entrar en el detector, también el error causado por la fluorescencia es insignificante porque la energía de radiación correspondiente es demasiado baja para ser registrada.

Tabla 3-2: Resultados del análisis de un haz de radiación sobre un material.

ϑ	n_3^*	n_4^*	n_5^*	T_1	T_2	λ_1	λ_2	$\Delta\lambda$
90°	116,543	42,832	38,802	0,399	0,333	53,741	56,363	2,622

Realizado por: Izurieta L., 2022

La tabla 10-3. muestra que el ensayo de la dispersión Compton, el ángulo dispersado para 90 grados es igual al electrón dispersado determinado de manera teórica, revisar el capítulo 1, parte 1-7., de manera que se al incidir radiación sobre un material este por proceso de interacción de la radiación con la materia se dispersa o absorbe, para analizar dicho comportamiento, se determinó la transmisión de los rayos x antes y después de accionar sobre un material, el cual se dispersa sobre un PMMA para detectar la radiación con un tubo contador, que también por procesos de interacción detecta la radiación.

A partir de los resultados obtenidos, se puede demostrar que, de acuerdo con Compton un haz de radiación que interactúa con la materia se dispersa emitiendo un fotón y un electrón.

Al disminuir el ángulo de dispersión, la diferencia en la longitud de onda también disminuye. Esto se puede comprobar para diferentes ángulos de dispersión.

CONCLUSIONES

La física moderna comienza por dos tendencias revolucionarias de pensamiento, una fue su teoría especial de la relatividad, y la otra, una nueva forma de considerar a la radiación electromagnética, dentro de los fenómenos de la física, la radiación electromagnética y como estos interactúan con la materia constituían una nueva manera de ver a la física, comprendían un fin a la mecánica clásica y un comienzo al estudio de un mundo atómico. A partir de la naturaleza de las radiaciones se pudo determinar que son ondas cuando estas se propaga por el espacio, y se mueven a la velocidad de la luz trasportando energía, a esta forma de energía se les conoce como fotones, cuyo conjunto de fotones conforman un haz de radiación, y comprenden un amplio rango de longitudes de onda, que se los clasifica por un espectro electromagnético debido al tipo de energía, clasificados en ionizantes y no ionizantes, cuando estos interactúan con la materia su comportamiento cambia y se comportan como partículas transfiriendo momento y energía al electrón, sus procesos están determinados por procesos de absorción y dispersión.

Como procesos de interacción de la radiación electromagnética con la materia, resultan de procesos de absorción y dispersión, para Einstein resultado de procesos de absorción y emisión, donde cada electrón podía absorber o emitir un cuanto, de luz, al igual que cada cuanto podía ser absorbido o emitido por un único electrón, esto explico el efecto fotoeléctrico, y no sus expectativas de que la radiación podía tener comportamiento de partícula. Hasta que Compton, en sus experimentos con los rayos X, había determinado que cuando los cuantos de energía incidentes interacción con la materia, cada forma de energía resulta dispersado por un único electrón al cual considera en reposo despreciando su velocidad, este experimenta un cambio en su dirección y energía, debido a la interacción se conserva el momento y energía. En sus experimentos, había determinado que la radiación dispersada tenía una mayor longitud de onda que la radiación incidente. La explicación que Compton ofrece a sus resultados es de manera clásica, ya que considera la interacción de fotones con electrones en reposo, y estos colisionan de manera elástica, en el que se transfiere parte de energía y momento a los electrones.

En la producción de rayos x, la interacción de partículas cargadas con un blanco produce radiación x, esto se da por la ionización del ánodo en un tubo al vacío, cuando las partículas cargadas interactúan con las cercanías del núcleo se produce radiación Bremsstrahlung cuyo espectro de emisión es continuo, y su energía está comprendida entre cero y el máximo de electrones. Para las partículas cargadas que interactúan con las cercanías del nucleó, y ionizan la materia liberando electrones, y como resultado una transición de un electrón de la capa externa, produciendo

emisión de radiación característica, única de cada elemento ya que cada capa tiene definido su nivel de energía.

La unidad de rayos X “*XR 4.0 X-RAY EXPERIMENT UNIT, 35 KV*” actúa como la fuente generadora de rayos X, cuyas condiciones para que entre en marcha y funciones son un tubo de rayos X y un generador de rayos X. El tubo de rayos X proporciona los componentes apropiados para producir rayos X, mientras que el generador de rayos X le proporciona al tubo la corriente al filamento y la alta tensión, esto es el voltaje adecuado para generar el haz de rayos X. La mayor parte de la energía cinética de los electrones es convertida en calor y solo el 1 % de esa energía se transforma en rayos X. Los generadores de rayos X son el conjunto de dispositivos eléctricos que proporcionan energía eléctrica al tubo de rayos X y con el panel de mando, permite seleccionar la configuración de los parámetros en la unidad de rayos X. El control de la energía y la cantidad de rayos X, se logra ajustando los parámetros de potencial de voltaje en kilovoltios (kV), la corriente del tubo de rayos X en miliamperios (mA) y el tiempo de exposición en segundos (s), donde el usuario ajusta para reproducir los ensayos que junto con accesorios y elementos amplía la experiencia con los rayos X, permitiendo adoptar técnicas de espectroscopia o técnicas para cristalografía. Que son aplicables en ciencia e investigación para determinar la estructura de un material cristalino, además de ser un instrumento interdisciplinario cubre áreas en medicina, como un instrumento para radiodiagnóstico.

Como técnica para detectar la radiación se usó un sistema de detección de radiación dispersivo en longitud de onda, el cual se basó en un sistema similar al de un espectrómetro, que bajo la ley de Bragg asocia cada ángulo de difracción a una interferencia constructiva, de acuerdo con la longitud de onda de la radiación detectada y su relación con el espacio interplanar del cristal. Esta radiación es detectada por un tubo contador Geiger Müller, que, mediante el modo sincronizado del goniómetro, registra la radiación en un espectro para los diferentes ángulos difractados, obteniendo intensidades de picos en los ángulos deseados por la teoría de Bragg, característicos del material del ánodo.

La dispersión Compton resulta que la longitud de onda de la radiación dispersada aumenta al transmitirse, este depende del ángulo con el que se dispersa, la radiación que se utiliza es del espectro característico de los rayos x de Cu. Como proceso de interacción de la radiación con la materia este se dispersa sobre un bloque de vidrio acrílico.

RECOMENDACIONES

Para realizar cualquier ensayo referente a la máquina de rayos X se debe revisar el manual de instrucciones, así como las normas de seguridad y operacionalidad de cada instrumento o accesorio que compone el equipo de rayos X, para operar de manera adecuada y evitar daños en su funcionalidad, ya que su aplicación como fuente de investigación en radiaciones es amplio y contribuye a la metodología de enseñanza y aprendizaje para mejorar las experiencias con la radiación.

Para reproducir cualquier ensayo en la unidad de rayos X se debe revisar la bibliografía para saber cuál es el principio del fenómeno que se va a realizar, ya que el equipo cuenta con un amplio manual de experiencias, componentes y accesorios, cada uno cumple una función en el equipo y puede alterar la toma de medidas o recolección de datos que pueden alterar el ensayo.

El software con el que cuenta el equipo de rayos X es una versión beta, ya que, tras una larga toma de medidas y manipulación del equipo por la interfaz virtual, el tiempo de espera es amplio cuando se realiza una nueva toma de medidas, llegando a esperar 10 minutos para manipular el equipo de nuevo. Además de que el software no permitió realizar auto calibrado desde el ordenador, por lo que se usa el panel de control para manipular de manera manual al equipo. El software detecta de manera automática el equipo de rayos x cuando este está conectado al ordenador, y permite trabajar con los datos ya almacenados después de su desconexión con el equipo.

El equipo de rayos x como fuente de radiación ionizante no permite realizar ensayos con la puerta corredora abierta, además debe asegurarse que el área de compartimento de ensayos este limpia, y el funcionamiento de la ventilación este en óptimas condiciones para evitar sobre calentamiento del tubo de rayos X y del equipo en general, además el interruptor de red debe enchufarse a un tomacorriente con conductor de protección para evitar daños eléctricos en el equipo.

Como operador del equipo de rayos x cuando se manipula la unidad emisora de radiación se debe tener en cuenta distancia, blindaje y tiempo como las reglas fundamentales de protección radiológica. Para evitar daños biológicos ante cualquier fuente emisora de radiación ionizante.

Dependiendo del ensayo que se realiza con la unidad de rayos x se debe asegurar que tanto el goniómetro como el detector de radiación funcionen correctamente y no presenten daños ya que el equipo trabaja de manera simultánea con estos componentes, además se debe revisar el entorno del equipo con el fin de que no cuente con averías.

BIBLIOGRAFÍA

ALCARAZ, M. *Interacción de la Radición con la Materia*. [En línea]. Universidad de Lima 2017. [Consulta: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <https://webs.um.es/mab/miwiki/lib/exe/fetch.php?media=t2.pdf>.

BELÉNDEZ, A. *Maxwell y la teoría electromagnética de la luz*. Universidad de Alicante. [En línea] Universidad de Alicante 2020. [Consulta: 1 de enero de 2022]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=LB_5jK64bH0&t=2715s. ISBN.

BEUTEL, Jacob; et al. *Handbook of Medical Imaging*. State of America. Edicions 3, 2000, pp.3-208.

BUSHBERG, Jerrold; et al. *The Essential Physics of Medical Imaging*. Filadelfia. Edicions 7, 2011, p.56.

CAPRA, F. *El Tao de la Física: una exploración de los paralelismos entre la física moderna y el misticismo oriental*. Siria. Edicions 6, 1992, p.26.

CASSINI, Alejandro; et al. *Einstein y el Efecto Compton*. São Paulo. Edicions 4, 2013, p.186.

CHERRY, R. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. [En línea] 1998. (Londres), [Consulta: 23 Noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/162520/Capítulo+48.+Radiaciones+ionizantes>. ISBN : 84-8417-047-0.

FLORES, M. Consejos de Seguridad Nuclear. [En línea] 2013. (Florida), [Consulta: 23 Noviembre 2021]. Disponible en: https://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/764096047_1572009112411.pdf.

ESCUADERO, C. *Compton Características y Aplicaciones en la Física*. [En línea]. Facultad de Ingeniería. 2017. [Consulta: 16 de enero de 2022]. Disponible en: <http://ex000290.ferozo.com/fisica/fiib/archivos/Efecto%20Compton%20Apuntes%202017.pdf>.

FERNÁNDEZ, J. *El Universo de las Radiaciones*. Buenos Aires. Edicions 1, 2007, p.15.

GONZÁLEZ, F. Características de Materiales. [En línea] 2015. (Madrid), p.2. [Consulta: 10 Marzo 2022]. Disponible en: https://ocw.uc3m.es/cursos-archivados/caracterizacion-de-materiales/practicas-2/Practicas_de_DRX.pdf.

HUIDOBRO, J., & ORDÓÑEZ, J. *Comunicaciones por Radio: Tecnologías, Redes y Servicios de Radiocomunicaciones*. Madrid. Edicions 3, 2014. p.202.

JIMÉNEZ, J. *Fundamentos y Teorías Físicas*. [En línea]. Universidad Politécnica de Madrid 2015. [Consulta: 16 de enero de 2022]. Disponible en: http://ocw.upm.es/pluginfile.php/531/mod_label/intro/tema-10.-ondas-electromagneticas.pdf.

KRUMEICH, F. Properties of electrons, their interactions with matter and applications in electron microscopy. [En línea] 2011. (Florida), pp.4-8. [Consulta: 28 Enero 2022]. Disponible en: <https://www.microscopy.ethz.ch/downloads/Interactions.pdf>.

LANGLAND, O. et al. *Principles of Dental Imaging*. Portugal. Edicions 4, 2002. p.36.

LINDELL, B *Historia de la radiación, la radiactividad y la radioprotección: La caja de Pandora*. Buenos Aires. Edicions 2, 2012, p.44.

MAINARDI, R. Analesafa. [En línea] 2006. (London), p.1 [Consulta: 26 Noviembre 2021]. Disponible en: <https://afan.df.uba.ar/journal/index.php/analesafa/article/view/344/353>.

MAYLES, P, et al. *Handbook of Radiotherapy Physics: Theory and Practice*. Barcelona. Edicions 1, 2007, pp.36-37.

NICONOFF, D. et al. Los Rayos X y Algunos de sus Aplicaciones. [En línea] 1996. (London), pp.163-172. [Consulta: 15 Febrero 2022]. Disponible en: <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/5478/199623P163.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.

RESNICK, Robert; et al. *Física Versión Ampliada*. España, Edicions 2, 1994, pp.489-491.

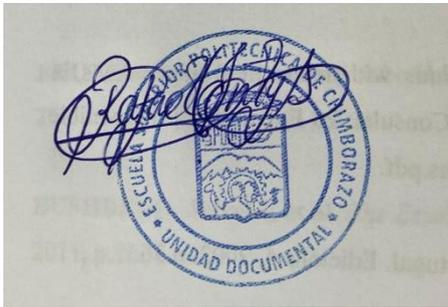
RIVERA, Ismael; et al. *Guía de Examen Extraordinario de física IV*. Bogotá, Edicions 5, 2014, pp.53-54.

RODRÍGUEZ, T. Interacción de electrones y protones con la materia. Caracterización del espectro de rayos X emitido por impacto de electrones y protones (Trabajo de titulación). (Doctoral) Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba. 2017. pp.11-12.

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA MÉDICA. *Fundamentos de Física Médica.* Madrid. Edicions 2, 2004. p.22

SEIBERT, J. *Journal of nuclear medicine technology.* California. Edicions 32, 2004. pp.3-6.

ZUBELDIA, F. *Protección en radiología odontológica.* Barcelona. Edicions 3, 2012, p.24.



ANEXOS

ANEXO A: ZONA DONDE OPERA EL EQUIPO DE RAYOS X “XR 4.0 X-RAY EXPERENT UNIT, 35 KV

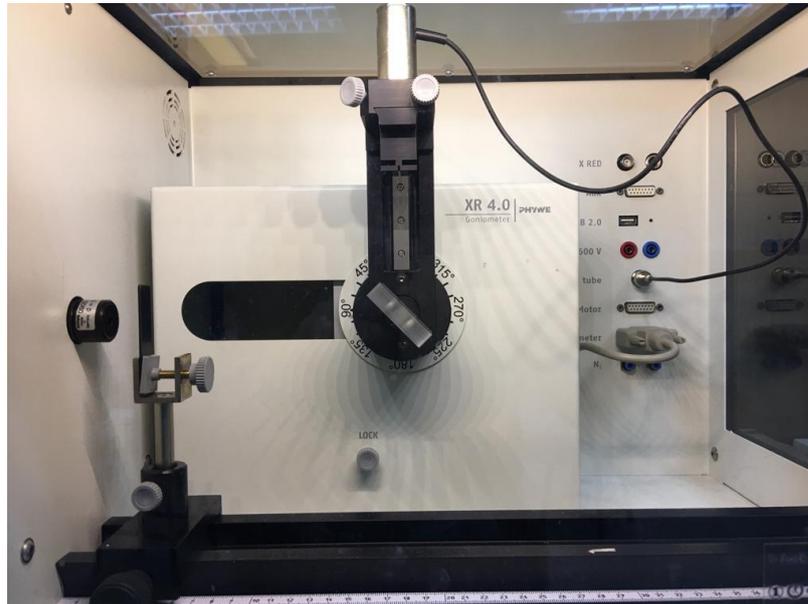


Laboratorio de física moderna de la Facultad de Ciencias, ESPOCH.

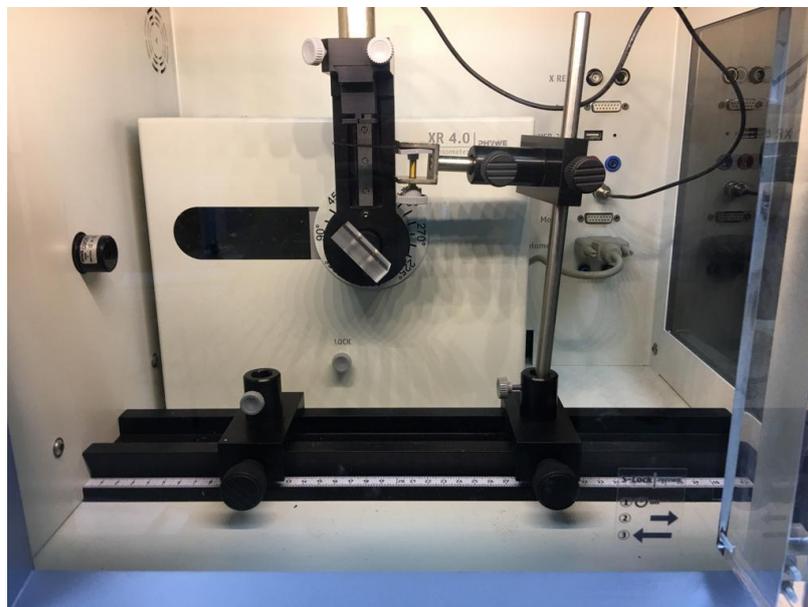


Auto calibración del equipo de manera manual a partir del panel de control

ANEXO B: MONTAJE DE LA UNIDAD DE RAYOS X PARA DISPERSION DE RAYOS X EN 90°

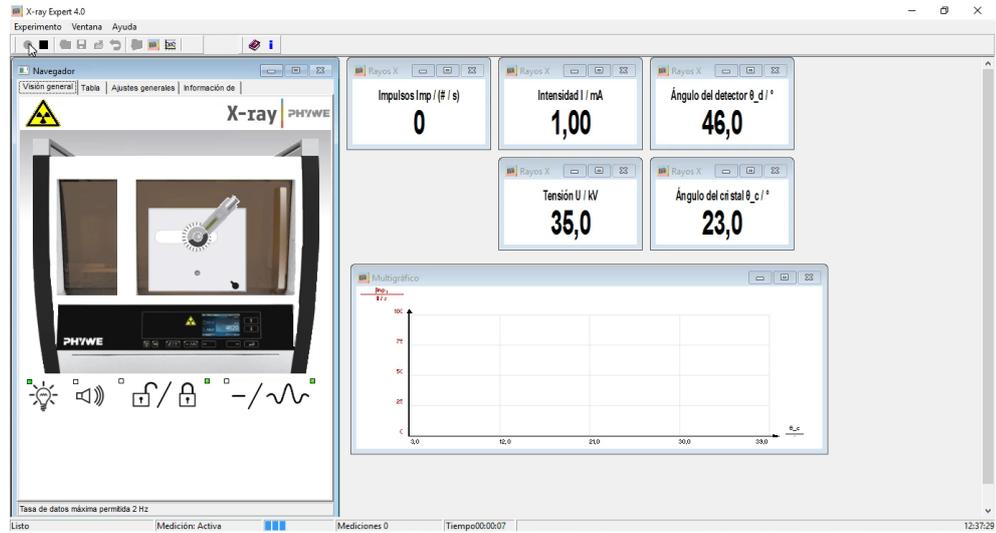


Posición del absorbedor y tubo contador a 90°, para determinar N4

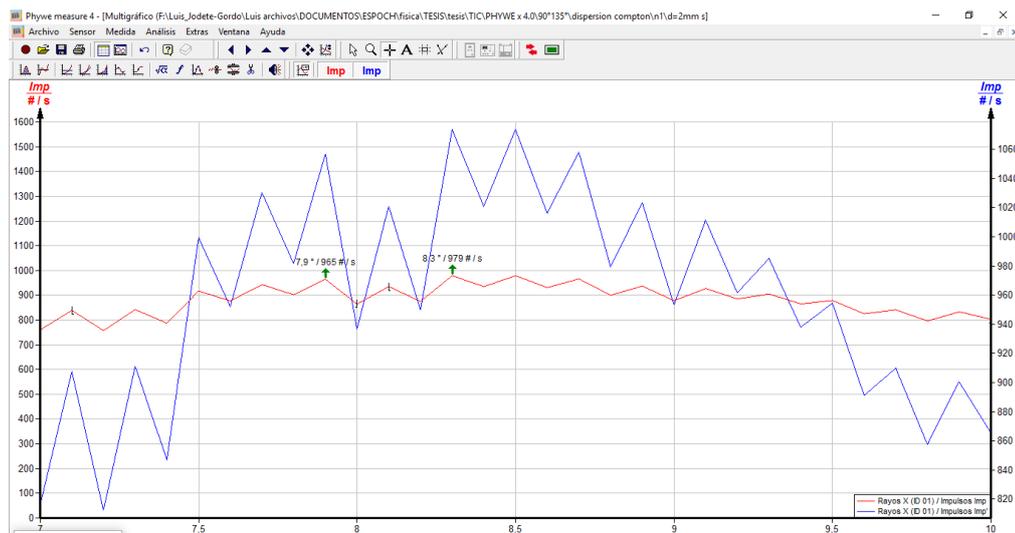


Posición del absorbedor y tubo contador a 90°, para determinar N5

ANEXO C: PANTALLA COMPLETA DE LA INTERFAZ DEL SOFTWARE “MEASURE”



Pantalla de inicio del software measure



Multigráfico del software “measure”



epoch

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 10 / 07 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Luis Angel Izurieta Guamán
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Física
Título a optar: Físico
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

1303-DBRA-UPT-2023

