



UNIVERSIDAD DE GRANADA

Facultad de Ciencias

GRADO EN FÍSICA

TRABAJO FIN DE GRADO

PROCESADO DE LA SEÑAL RECIBIDA DE UN CENTELLEADOR

Presentado por:
D. Francisco Morales Pardo

Curso Académico 2021/2022

A todos aquellos que me habéis acompañado durante estos años, dando ánimos y compartiendo tanto experiencias como muchas horas de estudio. No fueron pocas las ocasiones en las que empujabais más que yo mismo. Gracias por vuestro apoyo.

Resumen

La radiación ionizante juega un papel significativo en la sociedad moderna, tanto en la generación de energía eléctrica o el tratamiento y detección de diferentes patologías, como, por ejemplo, en aplicaciones industriales tales como la verificación de la calidad de soldaduras. Esta circunstancia lleva a una inevitable necesidad de comprender en detalle los diferentes procesos que dan lugar a este fenómeno. En particular, la detección de los diferentes tipos de radiación ocupa un lugar central en su estudio, dando importancia a la mejora de las técnicas y el procesado de la señal generada por los equipos de laboratorio. En el presente documento se abordará este último punto, proponiendo un método integral para el análisis de las señales producidas por un detector de barrera de superficie, si bien tanto los resultados como la metodología pueden ser aplicados a detectores de centelleo.

Abstract

Ionizing radiation plays a significant role in modern society, both in the generation of electrical energy or the treatment and detection of different pathologies, as, for example, in industrial applications such as welding quality control. This circumstance leads to an inevitable need to comprehend the details of the different processes that give rise to this phenomenon. In particular, the detection of the different kinds of radiation takes centre stage on its study, therefore giving importance to the improvement of the techniques and the processing of signals generated by laboratory equipment. This document will address this last point, proposing an integral method for the analysis of signals produced by a surface barrier detector, although both results and methodology can be applied to scintillation detectors.

Índice

1	Introducción	7
1.1	Objetivos	7
1.2	Materiales	8
1.3	Conceptos clave	9
1.3.1	Principio de funcionamiento del detector	9
1.4	Metodología	10
1.4.1	Confección del software de procesamiento	10
1.4.2	Obtención de espectros de emisión	11
2	Fase de documentación	11
2.1	Equipo de laboratorio	11
2.2	Detección de eventos	12
2.3	Análisis de pulsos individuales	12
2.4	Trasvase de información	12
3	Software de adquisición y procesamiento de señales	14
3.1	Adquisición de señales	14
3.2	Procesamiento de señales	15
4	Resultados obtenidos	16
4.1	Guía básica de radiaciones	21
4.1.1	Emisión β	21
4.1.2	Captura electrónica (C.E.)	21
4.1.3	Emisión α	22
4.1.4	Emisión γ	23
4.1.5	Electrones de conversión interna	23
4.1.6	Aniquilación electrón-positrón	24
5	Problemas detectados	25
6	Conclusiones	30
6.1	Trabajo futuro	30
	Referencias	32
A	ANEXOS	33
A.1	Glosario de términos	33
A.2	Documentación adicional	33

Índice de figuras

1	Detalle de muestras radiactivas.	8
2	Detector de barrera de superficie de silicio.	9
3	Esquema de un detector de barrera de superficie de silicio. ((1))	9
4	Sección de la zona activa de un detector de barrera de superficie. ((1))	9
5	Entorno de programación JupyterLab.	10
6	Esquema de un detector de centelleo. ((2))	12
7	Diagrama de flujo de la adquisición de datos desde el detector.	14
8	Señal saturada por exceso de amplificación.	15
9	Diagrama de flujo del análisis de la señal.	16
10	Señal recibida por el equipo durante un periodo de 25 ms. Radiación α	16
11	Pulso correspondiente a evento aislado. Radiación α	17
12	Pulso correspondiente a evento aislado. Radiación β^-	17
13	Pulso suavizado. Radiación β^-	18
14	Espectro de emisión de una muestra de ^{226}Ra	18
15	Espectro de emisión de una muestra de ^{226}Ra obtenida mediante el equipo presente originalmente en el laboratorio.	19
16	Serie radiactiva del ^{226}Ra . ((3))	20
17	Proceso de emisión β . ((4))	21
18	Proceso de captura electrónica. ((5))	22
19	Emisión de partículas α . ((6))	23
20	Emisión de electrones de conversión interna. ((7))	24
21	Juntas tóricas para el sellado de la cámara de vacío.	25
22	Cámara de vacío con restos de aceite.	26
23	Portamuestras con restos de aceite.	26
24	Válvula transparente con aceite en su interior.	26
25	Bomba de vacío original.	27
26	Bomba de vacío de reposición.	27
27	Red cristalina con Defectos Frenkel.((8))	28

1 Introducción

La adecuada detección de las radiaciones producidas en los diferentes procesos, tanto naturales como artificiales, es de vital importancia para su entendimiento y posterior aplicación en una gran variedad de campos, tanto a nivel tecnológico como en el ámbito científico. El trabajo realizado previo a la elaboración de este documento debe entenderse enmarcado en el contexto de un equipo multidisciplinar, habiendo contado con la colaboración de compañeros de muy diversos ámbitos. Esta circunstancia ha condicionado los objetivos iniciales del proyecto, que serán expuestos en lo sucesivo, al tiempo que ha permitido alcanzar un nivel de conocimientos más profundo, aportando enfoques diferentes a los propios del autor.

En primera instancia, debe precisarse que los términos «radiación ionizante» pueden referirse a una amplia variedad de fenómenos, atendiendo tanto a su origen como a las partículas involucradas. En cualquier caso, este concepto engloba a las diferentes radiaciones con energía suficiente como para ionizar la materia. Así, el abanico de posibles energías de las partículas de radiación ionizante abarca desde unos pocos eV, suficientes para ionizar un átomo de cesio ($E_i \approx 4$ eV), hasta el rango de energías propias de los rayos cósmicos, las cuales alcanzan valores superiores a los 10^{21} eV.

En lo referente a las partículas que componen la radiación, deben tenerse en cuenta dos grandes familias, siendo éstas la radiación electromagnética, conformada por fotones, y la radiación corpuscular, conformada por partículas masivas. Este último grupo puede ser subdividido a su vez en función del tipo concreto de partícula emitida, pudiendo considerar así la radiación α , compuesta por núcleos de helio (${}^4\text{He}^{2+}$), la radiación β^+ y β^- , compuestas de positrones y electrones respectivamente, así como la radiación compuesta por protones, neutrones u otras partículas con masa.

Debe considerarse, no obstante, que el objetivo de este texto no es el tratamiento pormenorizado de los diferentes tipos de radiación, sino el análisis de las señales producidas cuando éstas inciden sobre un detector. En cualquier caso, los efectos observados serán dependientes del tipo de partícula, así como de su energía.

El presente documento se centrará en los diferentes procesos llevados a cabo por un software diseñado a efectos de recepción, almacenamiento, tratamiento y análisis de las señales producidas tanto en detectores de barrera de superficie como en detectores de centelleo.

1.1 Objetivos

El objetivo principal del trabajo consiste en el análisis de las señales producidas por un detector de barrera de superficie, con la finalidad de permitir la posterior obtención de espectros de emisión de diferentes muestras radiactivas.

Adicionalmente, se han planteado objetivos paralelos que se exponen a continuación:

- Formación de los diferentes miembros del equipo con el propósito de aportar unas nociones básicas del comportamiento y efectos de los diferentes tipos de radiación.
- Mejora de los sistemas de detección y medida del laboratorio de Física Cuántica a nivel de software de procesamiento.

- Implementación de un sistema de vacío que reduzca la pérdida de energía de las radiaciones a detectar por efecto de la capa de aire entre muestra y superficie del detector.
- Desarrollo de una interfaz gráfica para el software de análisis.

1.2 Materiales

Los materiales utilizados durante las diferentes pruebas realizadas quedan recogidos a continuación:

- Osciloscopio Hameg HMO2024
- Amplificador y fuente de alimentación Modelo 5010 (The Nucleus inc.)
- Detector de barrera de superficie de silicio (Ortec)
- Detector de barrera de superficie alfa/beta Modelo 5030 (The Nucleus inc.)
- Bomba de vacío de doble efecto
- Muestras de diferentes radioisótopos
- Conductos y válvulas para el circuito de vacío
- Cableado de conexión
- Fuente de corriente continua para alimentación del detector



Figura 1: Detalle de muestras radiactivas.

1.3 Conceptos clave

1.3.1 Principio de funcionamiento del detector

La estructura básica del detector consiste en un fino disco de silicio recubierto de una capa de oro ($\sim 200 \text{ \AA}$) en una de sus caras. La cara opuesta está recubierta por una capa de aluminio de aproximadamente 2000 \AA . Las superficies metalizadas harán las veces de electrodos de conexión, permitiendo la aplicación de un potencial externo sobre el disco de silicio.

El plano recubierto con oro corresponderá al polo negativo del montaje, mientras que la capa de aluminio será el positivo, de forma que los pares electrón-hueco creados al incidir radiación ionizante sobre el detector serán separados por el campo eléctrico presente en el material, evitando la recombinación y permitiendo la recolección de portadores en los extremos del montaje.



Figura 2: Detector de barrera de superficie de silicio.

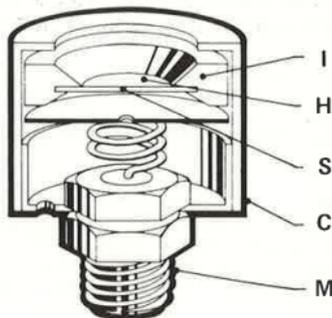


Figura 3: Esquema de un detector de barrera de superficie de silicio. ((1))

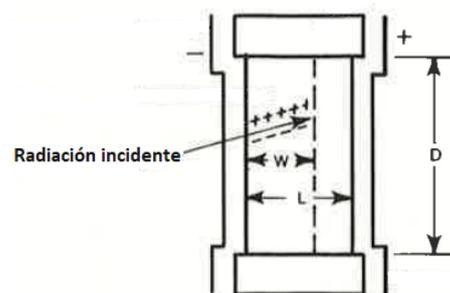


Figura 4: Sección de la zona activa de un detector de barrera de superficie. ((1))

La descripción de los diferentes elementos señalados en las **Figuras 3** y **4** queda recogida a continuación:

- I: Anillo aislante cerámico.
- H: Superficie sensible recubierta con oro.
- S: Oblea de silicio.
- C: Carcasa metálica.

- M: Conector BNC para alimentación y salida de señal.
- W: Zona de campo eléctrico no nulo debido a la aplicación de un potencial externo.
- L: Espesor total de la oblea de silicio y respectivos recubrimientos metálicos.
- D: Diámetro efectivo del detector.

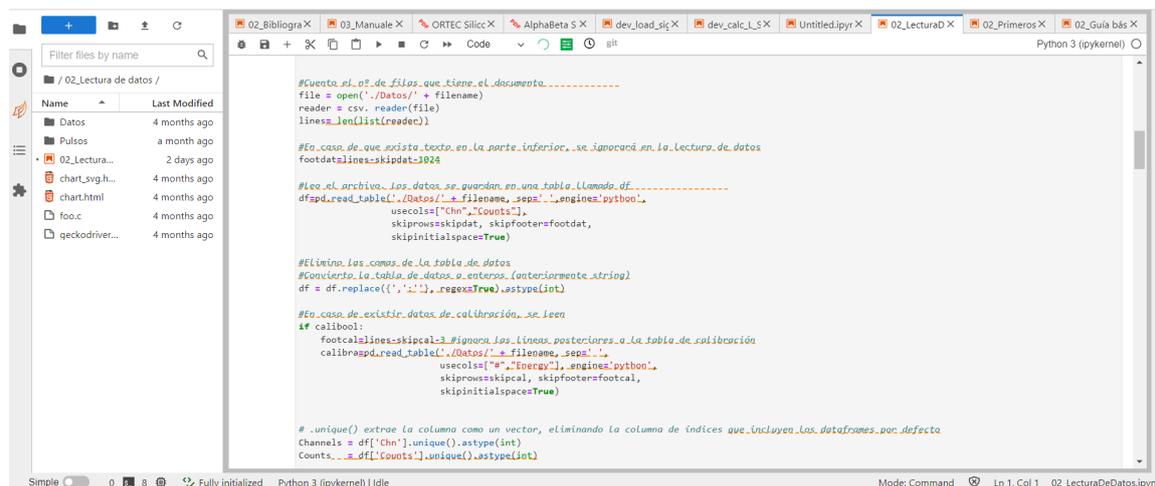
El manejo del detector debe realizarse con precaución, tanto en su operación como en su manipulación manual, dado que la fina capa de oro que recubre la oblea de silicio es extremadamente delicada. Debe evitarse el contacto directo con la superficie del detector, a riesgo de producir daños irreversibles en el mismo. Asimismo, los potenciales aplicados sobre el dispositivo deben permanecer en todo momento dentro de los límites operativos, debiendo aplicarse además de forma progresiva.

1.4 Metodología

La metodología seguida puede ser separada en dos partes, siendo cada una de estas la referente a la confección del software de procesamiento y la referente a las medidas realizadas para la obtención de espectros de emisión de radioisótopos.

1.4.1 Confección del software de procesamiento

Para la confección del software se ha recurrido al lenguaje de programación Python 3, en el entorno de JupyterLab, permitiendo y fomentando así la modularidad del producto final.



```

#Cuenta el nº de filas que tiene el documento
file = open('./Datos/' + filename)
reader = csv.reader(file)
lines = list(reader)

#En caso de que exista texto en la parte inferior, se ignorará en la lectura de datos
footdat = lines[skipdat:1024]

#Leo el archivo. Los datos se guardan en una tabla llamada df
df = pd.read_table('./Datos/' + filename, sep=',', engine='python',
                 usecols=["Chn", "Counts"],
                 skiprows=skipdat, skipfooter=footdat,
                 skipinitialspace=True)

#Elimino las comas de la tabla de datos
#Convierto la tabla de datos a enteros (anteriormente string)
df = df.replace(',', ' ', regex=True).astype(int)

#En caso de existir datos de calibración, se leen
if calibool:
    footcal = lines[skipcal:3] #ignora las líneas posteriores a la tabla de calibración
    calibra = pd.read_table('./Datos/' + filename, sep=',',
                          usecols=["E", "Energy"], engine='python',
                          skiprows=skipcal, skipfooter=footcal,
                          skipinitialspace=True)

# unique() extrae la columna como un vector, eliminando la columna de índices que incluyen los datos por defecto
Channels = df["Chn"].unique().astype(int)
Counts = df["Counts"].unique().astype(int)

```

Figura 5: Entorno de programación JupyterLab.

La primera condición necesaria para el análisis de las señales producidas en el detector consiste en la correcta configuración del osciloscopio, pues éste cumplirá una función equivalente a la de una tarjeta de adquisición de datos. La citada configuración se realizará sin necesidad de interacción física con el equipo y mediante la librería PyVisa

incluida en Python. Este conjunto de funciones permite el control de las diferentes funcionalidades del dispositivo mediante el envío de comandos a través de un cable de conexión.

Posteriormente, los diferentes eventos detectados deben ser registrados por el software, quedando almacenados en forma de vector para su posterior análisis.

El análisis de pulsos debe comenzar con un suavizado de la curva obtenida, de forma que se minimice el impacto del ruido de fondo en los resultados finales. A continuación, se debe realizar un cálculo del área bajo la curva del pulso, pues la energía depositada por la partícula incidente será proporcional a ésta.

Las áreas de los diferentes pulsos deben almacenarse en un vector, lo que permitirá la confección de un histograma que muestre el número de eventos detectados en función de la energía depositada.

1.4.2 Obtención de espectros de emisión

Una vez el software permita la generación de espectros de emisión, el procedimiento a seguir para el estudio de un determinado radioisótopo será el siguiente:

La fuente de alimentación conectada al detector debe ser encendida tras comprobar que no se aplicarán diferencias de potencial excesivas, ni de forma demasiado abrupta, sobre los electrodos. Posteriormente, se aumentará el valor de la tensión de forma progresiva y uniforme hasta alcanzar el valor requerido.

El amplificador de señal debe permanecer encendido a lo largo de las adquisiciones de datos. El valor de la amplificación podrá ser ajustado mediante la actuación sobre los diferentes selectores.

La muestra se colocará en el portamuestras de la cámara de vacío, directamente bajo el detector, y en la posición más cercana que el propio montaje permita. Posteriormente, y en caso de así desearlo, se podrá extraer el aire del interior de la cámara mediante la activación de la bomba de vacío. El sellado de la junta tórica puede no ser óptimo, por lo que puede ser conveniente la aplicación de cierta presión sobre la tapa del montaje durante los primeros instantes del proceso de aspiración.

Una vez se haya alcanzado el nivel de presión deseado, la bomba de vacío podrá ser desconectada, accionando también la válvula de cierre para evitar la entrada de aire al interior de la cámara.

Es en este momento en el que se podrá hacer uso del software de procesamiento para obtener el espectro de emisión de la muestra estudiada, considerando que, para que las medidas sean representativas, el tiempo total de la medida debe ser mayor cuanto menor sea la actividad de la muestra.

2 Fase de documentación

2.1 Equipo de laboratorio

De cara a un manejo correcto, eficiente y seguro, tanto para el usuario como para los diferentes instrumentos, la primera toma de contacto con el equipo de laboratorio se realizó mediante los pertinentes manuales. A la vista de la información recogida en

estos, puede concluirse que, si bien el proceso físico que da lugar a la producción final de la señal es diferente para los detectores de barrera de superficie y para los detectores de centelleo, las características a analizar son idénticas, lo que permite que los resultados aquí presentados sean aplicables sin importar la tecnología en uso, habiéndose utilizado en este caso un detector de barrera de superficie.

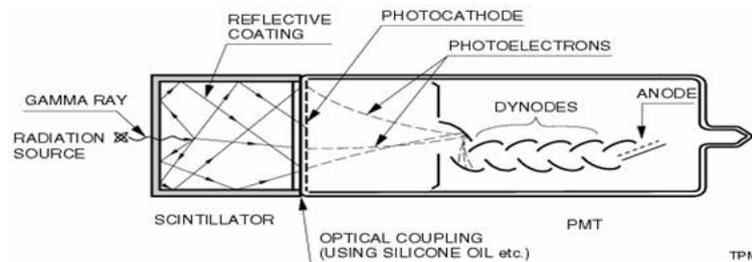


Figura 6: Esquema de un detector de centelleo. ((2))

2.2 Detección de eventos

Se engloban aquí los diferentes procesos físicos que dan lugar a la producción de cada pulso, así como los elementos eléctricos y electrónicos que intervienen en su conversión a un formato apropiado para su interpretación por parte del software de análisis. Se incluye también la información referente a los posibles defectos en el detector, los cuales pueden dar lugar a pérdida de información, así como a desviaciones en las medidas realizadas. Esta problemática será abordada con posterioridad en una sección independiente.

2.3 Análisis de pulsos individuales

Una vez los eventos han sido registrados por el software, estos deben ser correctamente procesados. En este punto se recurrió a los trabajos realizados previamente por la Dra. Patricia Schuster, donde se realiza un análisis de los pulsos generados en un detector de centelleo. La Dra. Schuster permite el libre acceso a las librerías de funciones de Python creadas por ella misma, lo que ha permitido hacer uso de aquellos elementos que pudieran haber resultado útiles para el presente documento.

En cualquier caso, los trabajos a los que en este epígrafe se hace referencia involucraban análisis más profundos que los que se requieren para la confección de espectros de emisión, lo que ha requerido la modificación del código original.

Las funciones aportadas por la Dra. Schuster han facilitado la manipulación, comparación y análisis de los diferentes pulsos recopilados, además de haber facilitado la comprensión de los procesos involucrados en la detección y procesamiento de la señal.

2.4 Trasvase de información

Con el objetivo de que todos los miembros del equipo tuvieran los conocimientos necesarios para abordar las tareas proyectadas se llevó a cabo un trasvase de información

entre disciplinas. Así, desde el ámbito de la física se aportó una guía básica sobre radiaciones ionizantes, de forma que se pudieran comprender los fenómenos a estudiar independientemente de la especialidad de origen.

Por su parte, el resto de especialistas aportaron los conocimientos referentes al funcionamiento interno de los equipos de medida, amplificación y procesamiento de señales.

3 Software de adquisición y procesamiento de señales

Los procesos de adquisición y tratamiento de las señales han sido considerados de forma independiente, de manera que se pueda llevar a cabo un análisis detallado de cada una de las partes que conforman el software. En cualquier caso, ambas partes serán ejecutadas de manera secuencial.

3.1 Adquisición de señales

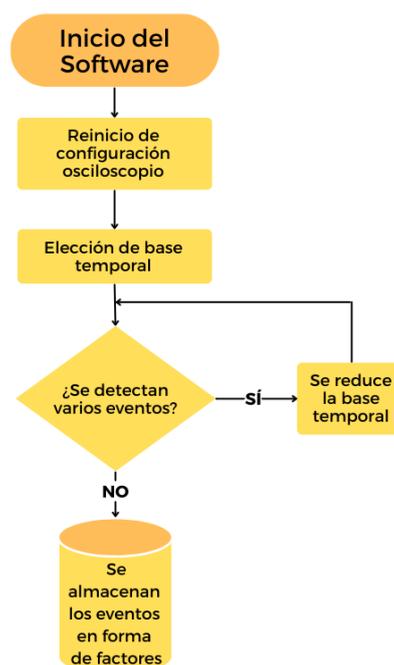


Figura 7: Diagrama de flujo de la adquisición de datos desde el detector.

El módulo de software destinado a la adquisición de señales se basa, en primer lugar, en la correcta configuración del osciloscopio, pues éste cumplirá la función de una tarjeta de adquisición de datos, siendo capaz de separar cada evento de detección individual, de forma que pueda ser almacenado en un vector de voltaje a lo largo del tiempo.

En este proceso, se comenzará eligiendo una escala temporal arbitraria. A continuación, y en base a la cantidad de eventos detectados durante el periodo de tiempo de la medida, se podrá estimar el periodo de detección. Dado que el osciloscopio no cuenta con un eje temporal continuo, sino discretizado a ciertos valores concretos, el mejor valor para la escala temporal configurada será el más cercano al periodo que permita el propio equipo. En caso de que el periodo de detección no coincida con valores permitidos por el dispositivo, se escogerá el valor inmediatamente superior.

Debe considerarse en todo momento que, en caso de una amplificación excesiva, la señal podría quedar saturada, con la consiguiente pérdida de información.



Figura 8: Señal saturada por exceso de amplificación.

La detección de este fenómeno, así como su corrección, son responsabilidad del usuario, para lo cual debe tenerse presente el aspecto de un pulso saturado.

3.2 Procesamiento de señales

El paso siguiente a la obtención de picos de detección aislados debe ser el suavizado de los mismos, lo que permite reducir el efecto del ruido de fondo sobre los espectros finales. Para este efecto, se ha programado una función que asigna al elemento i -ésimo del vector el valor de la media de los $2m+1$ elementos centrados en i . Se aplica un $m = \frac{L}{200}$, siendo L la longitud total del vector.

Posteriormente, y en caso de que se detecten zonas negativas en el pulso recibido, se calculará el valor absoluto del mismo, lo que permitirá obtener el área bajo la curva como suma aritmética de los valores almacenados en el vector.

Previamente al cálculo del área encerrada por la señal, se debe seleccionar el umbral mínimo para la suma de valores. Esto es, la fracción de la altura total del pulso a partir de la cual se comenzará a calcular la superficie. En la práctica, este valor será fijado en 0.5, si bien podrá ser alterado por el usuario.

Una vez el pulso ha sido convenientemente tratado, se procederá al cálculo del área encerrada bajo el mismo. Dado que la energía depositada por la partícula incidente será proporcional a la citada superficie, los valores obtenidos para cada evento podrán incorporarse a un histograma, permitiendo así la confección de un espectro de emisión para el radionúclido estudiado.

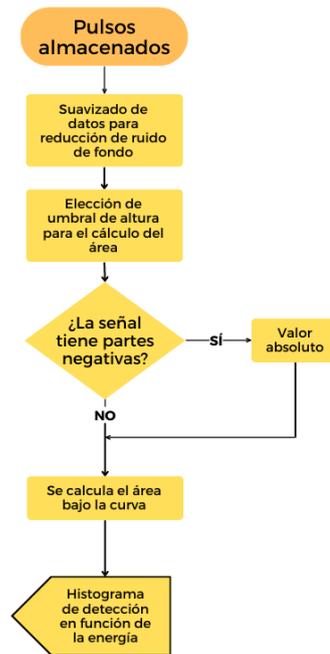


Figura 9: Diagrama de flujo del análisis de la señal.

4 Resultados obtenidos

En una primera aproximación al análisis de las señales producidas en el detector, el objetivo debía ser el reconocimiento de los pulsos producidos en cada evento individual. A este efecto, se realizaron una serie de muestreos que permitieran identificar las características básicas de los pulsos producidos en detecciones, tanto de partículas α como β^- .

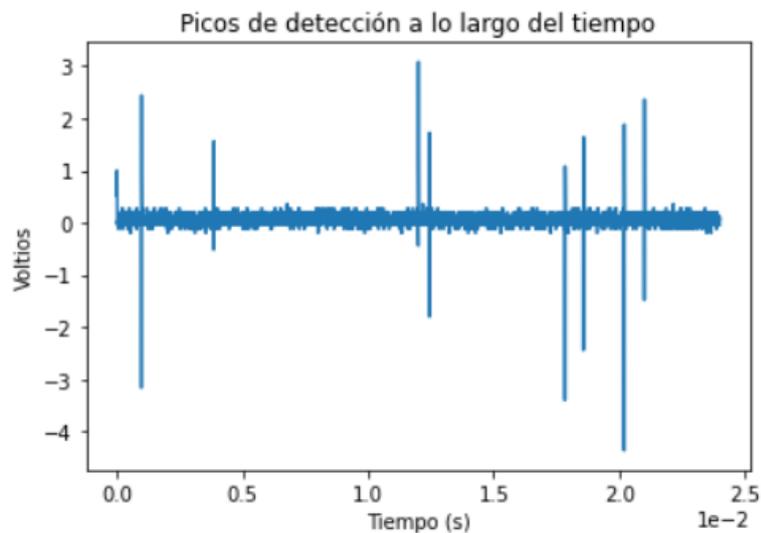


Figura 10: Señal recibida por el equipo durante un periodo de 25 ms. Radiación α .

En concreto, se aprecia que la radiación incidente produce pulsos con regiones negativas. Estas regiones deben ser consideradas positivas para la suma de áreas que dará lugar a la obtención del histograma de energías.

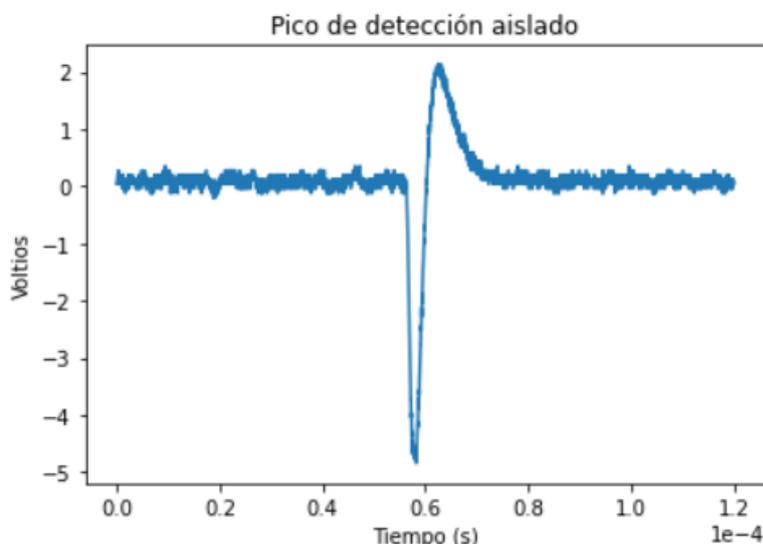


Figura 11: Pulso correspondiente a evento aislado. Radiación α .

En el caso de la radiación β^- , el pulso producido exhibe polaridad invertida. Esto se debe exclusivamente al hecho de que las medidas se realizaron con detectores diferentes, siendo los potenciales aplicados por cada uno de ellos de signo contrario.

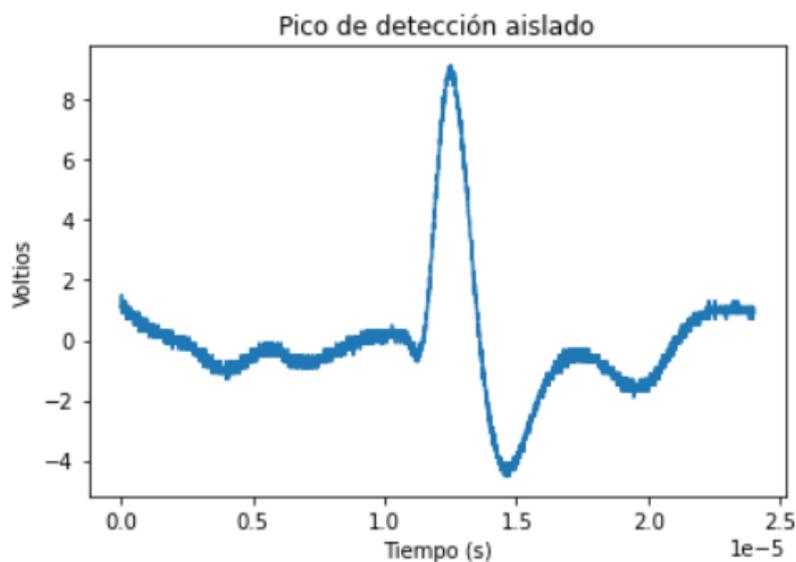


Figura 12: Pulso correspondiente a evento aislado. Radiación β^- .

Puede apreciarse a la vista de las figuras la evidente similitud en la forma de los pulsos debidos a cada tipo de radiación. En consecuencia, el tratamiento de los mismos será similar, siendo el objetivo principal del análisis la obtención de la suma de superficies encerradas por las diferentes señales (en valor absoluto).

Errores en el funcionamiento del detector Modelo 5010 han impedido la confección de una figura que muestre varios pulsos de detección a lo largo del tiempo y en conjunto. Estos problemas quedarán detallados en la sección correspondiente.

El proceso de suavizado de los pulsos, que permite minimizar el impacto del ruido de fondo, al tiempo que reducirá ligeramente la dispersión de los datos, estrechando los picos de detección, será la siguiente tarea a abordar. En este caso, aplicando la función de suavizado a los datos de la **Figura 12**:

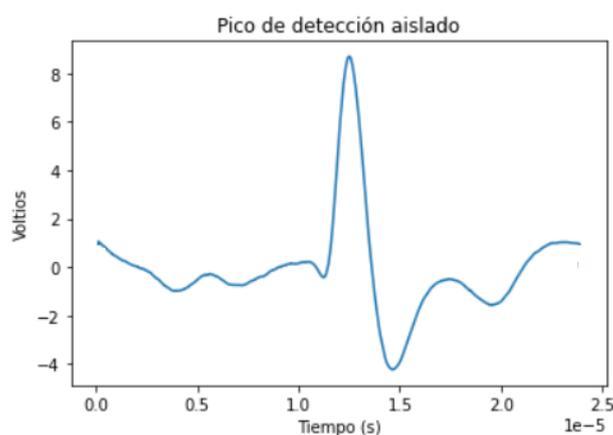


Figura 13: Pulso suavizado. Radiación β^- .

Los procesos restantes consisten en el cálculo del área encerrada bajo la curva obtenida, dando lugar a un valor asociado a cada pulso individual. Dicho valor será almacenado en un vector, lo que permite la obtención del espectro asociado al material radiactivo. En particular, aquí se presenta el espectro obtenido para el caso del ^{226}Ra , radionúclido que se desintegra mediante emisión α en ^{222}Rn . A su vez, los productos de esta desintegración sufrirán sendos procesos de emisión que darán lugar finalmente a la aparición de ^{206}Pb :

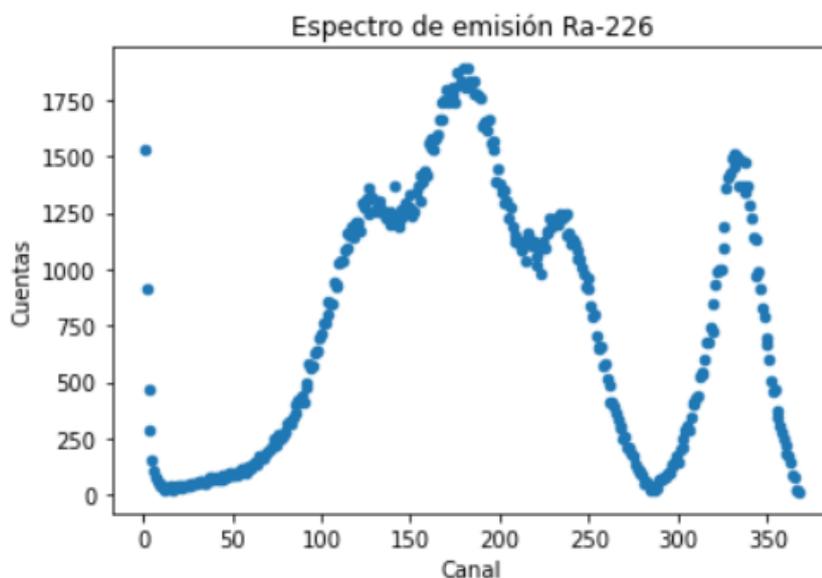


Figura 14: Espectro de emisión de una muestra de ^{226}Ra .

Cabe destacar que, si bien no se ha realizado una calibración de las energías del espectro presentado, su eje X se puede hacer corresponder con una escala de energías, por lo que debe tenerse en cuenta la equivalencia implícita entre canales y unidades energéticas. La explicación de las diferentes zonas relevantes del espectro, señaladas en la **Figura 14**, queda recogida a continuación:

Zona de bajas energías

En la zona cercana al Canal 0, se puede observar un gran número de detecciones que debe achacarse al ruido de fondo esperable en el detector. Esta zona no presenta interés experimental, pues no puede obtenerse información útil de ella.

Región intermedia

Esta región presenta tres picos diferenciados con una estructura hombro-cabeza-hombro en la que el pico central destaca sobre los colindantes.

En particular, el pico de menor energía, correspondiente a 4784 keV, se asocia a la emisión α del ^{226}Ra en su decaimiento a ^{222}Rn .

A su vez, el pico intermedio y más elevado se corresponde con el solapamiento de las emisiones α producidas por el ^{210}Po en su decaimiento a ^{206}Pb y las producidas por el ^{222}Rn en su decaimiento a ^{218}Po . Las energías respectivas de las partículas α emitidas en estos procesos son 5304 keV y 5489 keV. El solapamiento se produce por falta de resolución en el equipo de laboratorio.

Por último, el tercer pico de esta región, correspondiente a una energía de 6002 keV, se atribuye a la desintegración de ^{218}Po en ^{214}Pb .

Zona de alta energía

En la región correspondiente a las energías más altas se puede observar un solo pico aislado, al que se le asocia una energía de 7687 keV. La presencia de ^{214}Po en la muestra, y su desintegración en ^{210}Po mediante emisión α permite la aparición de este pico.

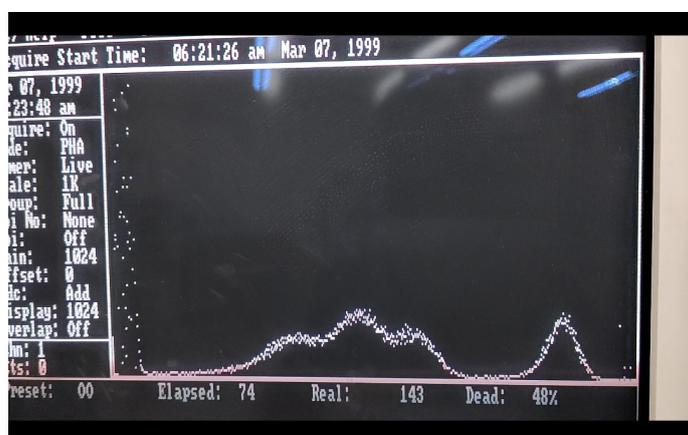


Figura 15: Espectro de emisión de una muestra de ^{226}Ra obtenida mediante el equipo presente originalmente en el laboratorio.

Como método de comprobación de la calidad del espectro obtenido, se propone la comparación con los datos presentados por el equipo original del laboratorio. Así, a la vista de las similitudes entre la **Figura 14** y la **Figura 15** se puede concluir que el análisis es adecuado y arroja resultados de buena calidad.

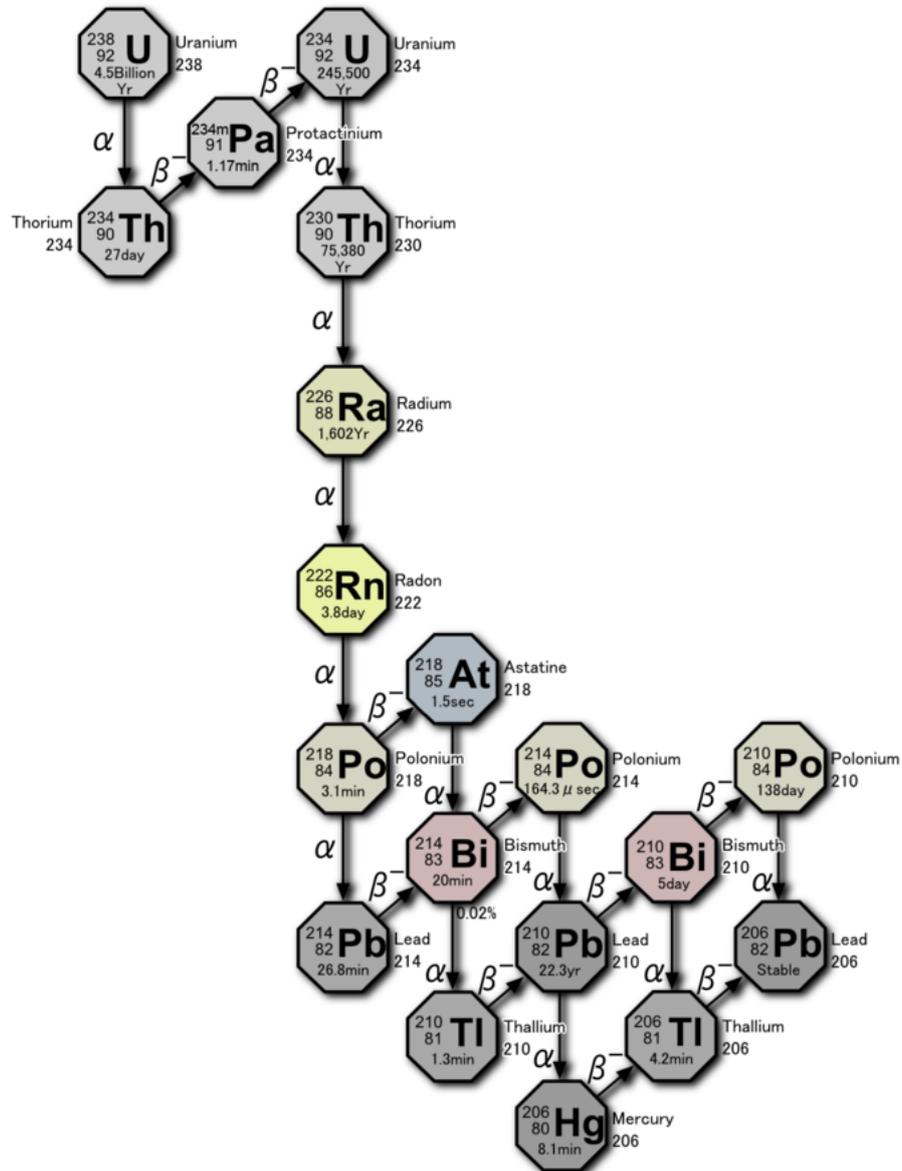


Figura 16: Serie radiactiva del ^{226}Ra . ((3))

Se presenta en la **Figura 16** la conocida como serie radiactiva del radio (también serie radiactiva del uranio), que incluye los diferentes elementos producidos a partir de la desintegración de esta especie. Aquellos radionúclidos que muestran desintegración α son los que tienen efecto en la generación del espectro presentado en la **Figura 14**.

4.1 Guía básica de radiaciones

Se ha recogido en esta sección la guía de radiaciones presentada ante los diferentes miembros del equipo de GranaSat y que ha permitido que cada uno de ellos obtenga las nociones mínimas necesarias para el tratamiento del proyecto.

4.1.1 Emisión β

En un proceso de desintegración β , un núclido inestable emite una partícula beta para alcanzar un estado de mayor estabilidad. Los núcleos con exceso de neutrones emitirán partículas β^- (electrones), convirtiendo así un neutrón en un protón $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$. Los núcleos con exceso de protones sufren un proceso similar, emitiendo en su caso partículas β^+ (positrones) para ganar un neutrón al tiempo que pierden un protón $p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu$. La emisión de partículas β^+ compite con el proceso de captura electrónica.

Cabe mencionar la aparición de (anti)neutrinos en los procesos de desintegración beta, si bien son partículas muy difíciles de detectar, pues sólo interactúan débilmente.

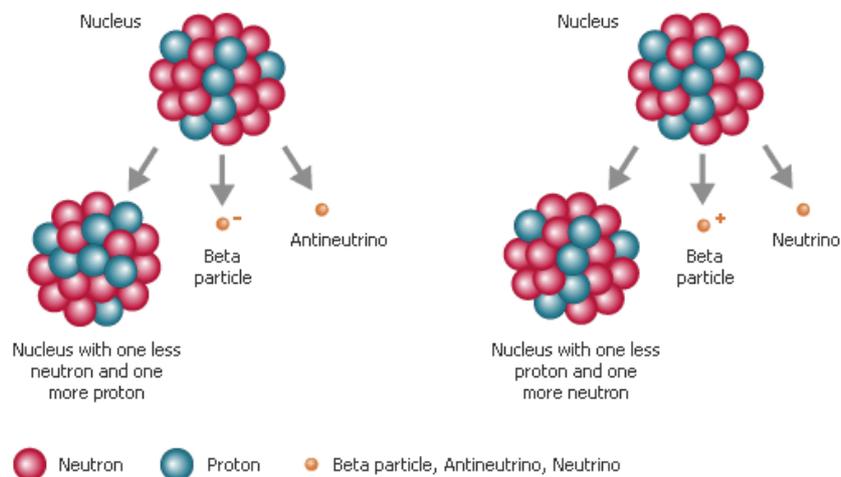


Figura 17: Proceso de emisión β . ((4))

4.1.2 Captura electrónica (C.E.)

Los procesos de captura electrónica se dan en radioisótopos con exceso de protones, compitiendo con la emisión β^+ . En algunos casos, la C.E. es la única vía de desintegración posible, pues es energéticamente más favorable que la emisión de positrones. La captura electrónica se da cuando un electrón de las capas internas de la corteza electrónica del átomo es capturado por el núcleo, dando lugar a la reacción $p^+e^- \rightarrow n\nu$. Es habitual que la captura electrónica dé lugar a estados excitados del núcleo hijo, lo que producirá emisión posterior de fotones gamma y electrones de conversión interna.

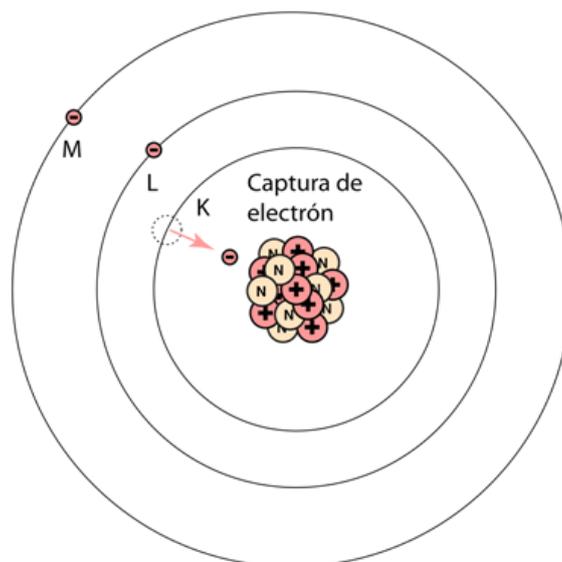


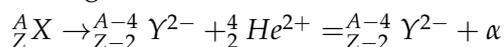
Figura 18: Proceso de captura electrónica. ((5))

Este proceso produce un hueco en las capas internas de la corteza electrónica. La vacante en las capas internas es ocupado por un electrón más energético (menos ligado), cediendo éste su energía en forma de un fotón (rayos X) o bien mediante la emisión de electrones Auger.

Los electrones Auger son emitidos cuando la energía de la transición es cedida a un electrón poco ligado de la corteza electrónica (sin producción de fotones intermedios).

4.1.3 Emisión α

Ciertos núcleos pesados pueden desintegrarse emitiendo núcleos de Helio (${}^4_2\text{He}^{2+}$), perdiendo en el proceso 4 unidades de número másico y dos unidades de número atómico, dando lugar a la reacción:



Si bien el átomo hijo queda ionizado, los electrones sobrantes son emitidos al medio rápidamente, siendo generalmente aceptados por las partículas alfa, formando así átomos neutros de helio.

El isótopo más ligero en el que este proceso tiene lugar de forma espontánea es el ${}^{106}\text{Te}$.

Dado que las partículas alfa son relativamente pesadas, y que tienen una carga neta distinta de 0, son muy poco penetrantes, siendo así que la fina capa de piel muerta que recubre la dermis es suficiente para detenerlas sin que lleguen a producir daños al organismo. De esta forma, tocar una fuente de partículas alfa es, en general, seguro. No obstante, la contaminación interna por inhalación o ingesta de emisores alfa es peligrosa, pues sí puede producirse perjuicio a los órganos internos. Asimismo, debe tenerse en cuenta que, en muchas ocasiones, los emisores alfa pueden dar lugar a emisión gamma, o formar parte de una cadena de desintegración en la que aparezcan emisores beta, lo cual puede aumentar el riesgo en su manipulación.

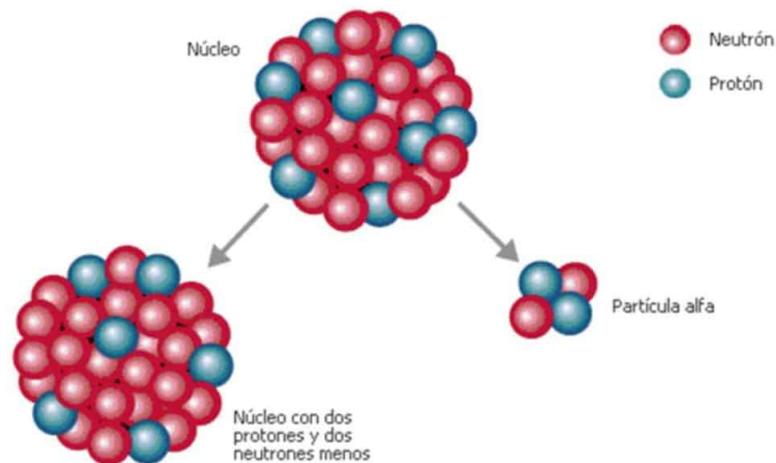
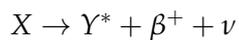
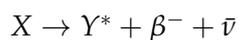
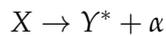


Figura 19: Emisión de partículas α . ((6))

4.1.4 Emisión γ

Los procesos de desintegración anteriormente descritos pueden dar lugar a emisión secundaria de fotones altamente energéticos. Este fenómeno tiene lugar cuando el decaimiento original no tiene como producto el estado fundamental del núcleo hijo, sino un estado excitado del mismo, siguiendo las posibles reacciones:



A continuación, el núcleo excitado Y^* cederá energía para llegar a su estado fundamental. Este proceso puede darse por dos vías, siendo la primera la emisión de rayos gamma, y la segunda la emisión de electrones de conversión interna.

4.1.5 Electrones de conversión interna

Una alternativa a la emisión de un fotón energético es la cesión de la energía del núcleo excitado a un electrón de las capas internas de la corteza electrónica. Este proceso **no es mediado por un fotón**, sino que la energía es adquirida de forma directa por el electrón en un único paso. Dado que tras la emisión de un electrón quedará una vacante en la corteza electrónica, los procesos de emisión de electrones de conversión interna van acompañados de emisión de rayos X y emisión de electrones Auger.

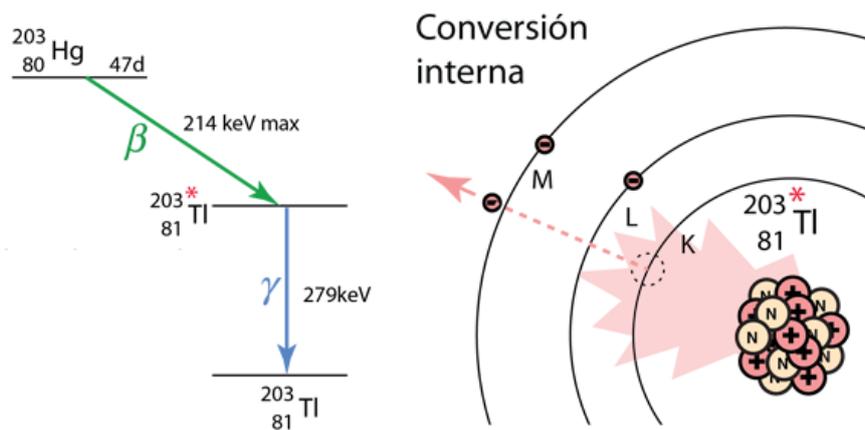
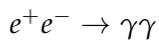


Figura 20: Emisión de electrones de conversión interna. ((7))

4.1.6 Aniquilación electrón-positrón

Este proceso tiene lugar cuando un positrón (antielectrón) emitido por un radionúclido colisiona con un electrón del medio. Dado que la masa (energía en reposo) de ambas partículas es idéntica (511 keV), la energía total involucrada en el proceso será de 1,022 MeV. El proceso de aniquilación puede resumirse en la siguiente expresión:



Ambos fotones son emitidos con energía igual a la masa en reposo del electrón y en sentidos opuestos (aproximadamente, pues debe tenerse en cuenta la conservación del momento inicial del sistema positrón-electrón).

En rigor, los fotones emitidos en procesos de aniquilación no deben considerarse radiación gamma, pues estos son producidos exclusivamente por procesos de desexcitación nuclear. No obstante, el rango de energías es comparable y, puesto que determinar el origen de un fotón concreto es imposible, la diferenciación queda reducida al ámbito teórico.

5 Problemas detectados

Se detallan en este apartado las problemáticas presentadas durante la realización del trabajo, y que han condicionado la consecución de ciertos objetivos, así como las diferentes soluciones aportadas o propuestas.

Bomba de vacío

El equipo de vacío presente en el laboratorio, así como las diferentes conducciones, han presentado problemas de importancia durante la realización de los experimentos.

En primer lugar, el valor de presión alcanzado no se correspondía con lo esperado, debido a la pérdida de estanqueidad del circuito por desgaste de los diferentes elementos. Se procedió en este caso a la sustitución de canalizaciones, así como de la junta tórica correspondiente al cierre de la cámara de medida.

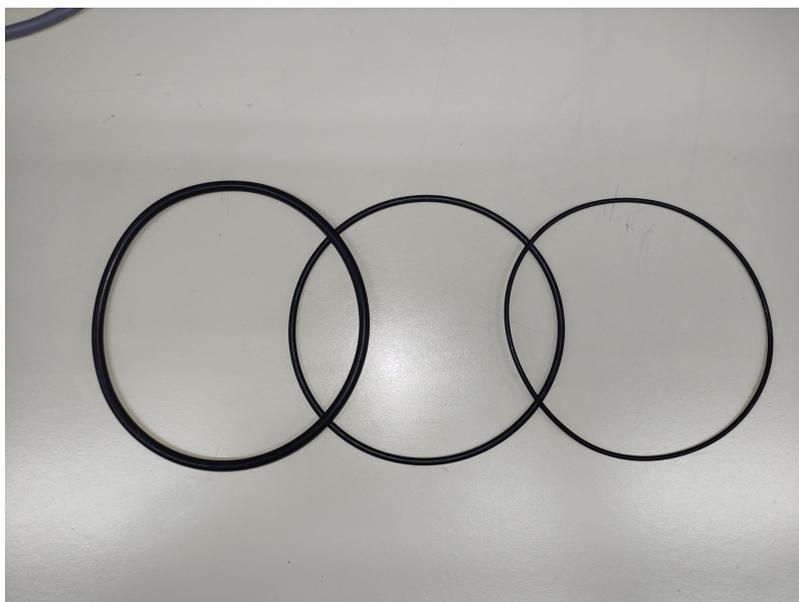


Figura 21: Juntas tóricas para el sellado de la cámara de vacío.

Por su parte, el equipo de succión presentaba diversos fallos que lo hacían incompatible con un uso adecuado. En primer lugar, la temperatura alcanzada por el motor hacía peligrosa su manipulación, haciendo inadecuada su utilización en un ambiente académico. Se advirtió también la presencia de fugas de aceite, así como salpicaduras producidas por la expulsión a presión del mismo, constituyendo una fuente constante de contaminación de los diferentes medios del laboratorio. El problema más destacado, no obstante, se corresponde con la presencia de lubricante en el circuito de vacío del montaje. El fluido era empujado a través de los diferentes conductos en los momentos en los que la succión era desconectada, dando lugar a varios incidentes que tuvieron como consecuencia la contaminación de determinadas muestras radiactivas, así como de los equipos de medida.



Figura 22: Cámara de vacío con restos de aceite.



Figura 23: Portamuestras con restos de aceite.

A su vez, la presencia de fluido lubricante en las canalizaciones neumáticas comprometía la calidad de los experimentos posteriores. Para reducir el impacto de este suceso, se decidió llevar a cabo la sustitución o limpieza de los elementos del circuito.

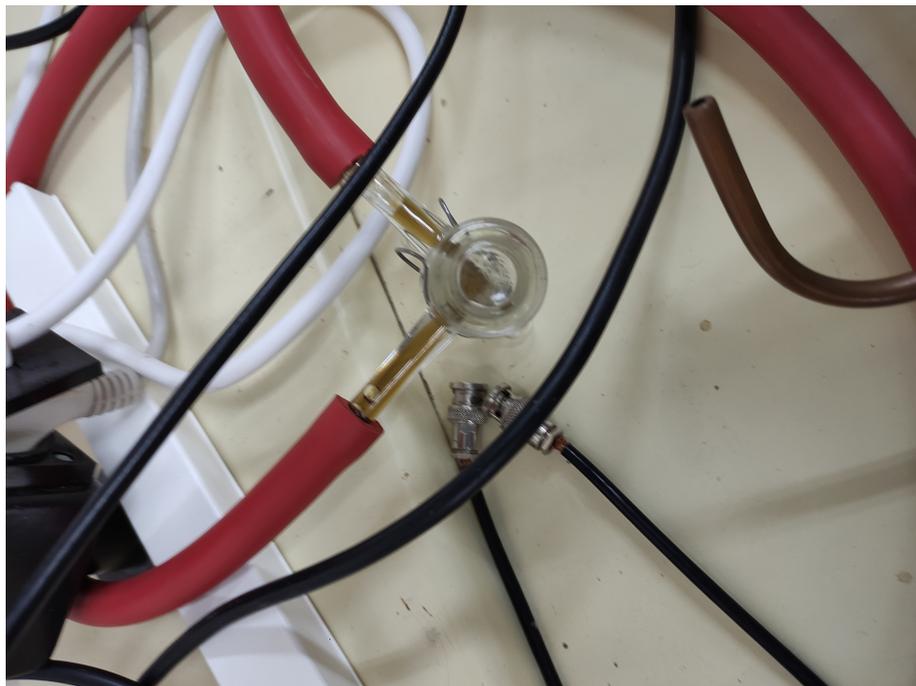


Figura 24: Válvula transparente con aceite en su interior.

Finalmente, y tras abordar el intento de reparación de la bomba de vacío original, se tomó la decisión de adquirir una nueva, de forma que se pudieran evitar los posibles riesgos para el equipamiento de laboratorio, muestras, así como para el personal docente y los estudiantes.



Figura 25: Bomba de vacío original.



Figura 26: Bomba de vacío de reposición.

En pruebas realizadas con el nuevo material, éste parece adaptarse sobradamente a los requerimientos del montaje experimental, permitiendo alcanzar presiones absolutas inferiores a las 0,1 atm. Adicionalmente, tanto los problemas referentes a sobrecalentamiento, como los derivados de la presencia de aceite en el circuito de vacío han sido solventados.

La documentación referente a la adquisición del nuevo material queda recogida en el Anexo [A.2](#)

Osciloscopio

El uso del osciloscopio como sistema intermedio de lectura de datos ofrece numerosas ventajas frente a la habitual tarjeta de adquisición, siendo posible el estudio pormenorizado de cada pulso de detección individual, o permitiendo la localización de artefactos en la señal recibida. No obstante, el procesado se realiza a una velocidad mucho menor de lo que sería posible en otro caso, impidiendo a su vez la recolección de gran cantidad de datos para su análisis posterior. En el caso del espectro presentado en la [Figura 14](#), las tareas de recogida de datos se prolongaron durante varias horas, mientras que, para el caso de un equipo tradicional, la escala temporal se habría reducido aproximadamente en un factor 60.

Debe tenerse presente que, para la confección de este texto, se ha planteado un enfoque ilustrativo, de forma que se puedan comprender en profundidad los detalles del procesado de señales. No obstante, en un escenario realista, bien para casos de docencia o para investigación, la adquisición de datos debe hacerse de la forma más eficiente que sea posible, siendo necesaria la implementación de un sistema tradicional de adquisición.

Daños por radiación en el cristal del detector

La exposición continuada a radiación ionizante es capaz de modificar la estructura de los materiales, dando lugar a defectos que puedan alterar tanto la sensibilidad como la precisión con la que se detecta cada evento aislado. En el caso concreto del detector aquí expuesto, fabricado con silicio de muy alta pureza (en el marco de pocas impurezas por billón), los daños por radiación corpuscular pueden dar lugar a cambios en el comportamiento esperado. Así, uno de los defectos que puede causar una partícula incidente

es el *Defecto Frenkel*, que consiste en el desplazamiento de un átomo de la red cristalina del silicio desde su posición natural en la red hacia un intersticio.

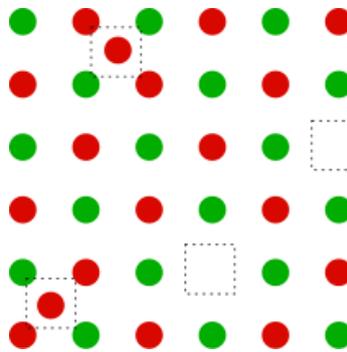


Figura 27: Red cristalina con Defectos Frenkel.((8))

Este tipo de defectos reducen la eficiencia en la recolección de cargas, pues actúan como trampas de portadores, dando lugar a una pérdida de resolución del detector. Adicionalmente, también pueden actuar como centros de recombinación electrón-hueco, lo que puede llevar aparejado un aumento del ruido de fondo.

En caso de que el detector sea usado para el estudio de productos de fisión nuclear, debe tenerse en cuenta la deposición en el cristal de átomos externos, los cuales son capaces de ocupar posiciones intersticiales, deformando la red cristalina y produciendo efectos adversos.

Para la reducción de las consecuencias de estos defectos se recomienda aumentar el potencial aplicado entre los electrodos del detector. No obstante, en el presente caso, el potencial aplicado ya se encontraba en el límite admisible por el equipo, por lo que esta solución no fue viable.

Cabe mencionar que no se ha podido inferir la presencia de defectos en vista de los resultados mostrados, salvo en casos puntuales en los que los pulsos mostraron un comportamiento anómalo. Esto puede explicarse por el uso relativamente limitado del detector. En cualquier caso, y a modo de prevención, el uso correcto del equipo incluye la retirada de las muestras del interior de la cámara durante los periodos en los que no se realicen medidas.

Efectos de la temperatura

En términos generales, un aumento de temperatura del detector lleva aparejado un aumento en el ruido de fondo. Este fenómeno se debe a la mayor energía de los electrones en el cristal de silicio, los cuales son capaces de escapar de su posición de reposo y ser recolectados por los electrodos diseñados a tal efecto.

En particular, se ha observado que las diferentes pruebas llevadas a cabo durante el mes de febrero presentaban un menor nivel de ruido que las realizadas durante épocas más calurosas del año.

En cualquier lugar, este fenómeno ha sido paliado mediante el suavizado de los pulsos, permitiendo minimizar sus efectos en los resultados finales.

Mal funcionamiento del detector Modelo 5010

Durante las diferentes pruebas realizadas con ambos detectores se han presentado problemas de funcionamiento en el Modelo 5010, el único capaz de detectar radiación beta. El mal funcionamiento del detector ha impedido la realización de experimentos de larga duración, dado que sólo permitía el envío de señales durante cortos periodos de tiempo. Esto ha impedido la adquisición de conjuntos de pulsos para su comparación con los producidos por partículas α , al tiempo que ha hecho imposible la obtención de espectros correspondientes a radionúclidos que se desintegran por esta vía, como por ejemplo el ^{60}Co , que decae en ^{60}Ni mediante la emisión de un electrón.

El siguiente enlace contiene un archivo de vídeo en el que se muestran los problemas presentados por el detector:

[Mal funcionamiento Modelo 5010.](#)

Puede observarse como el ruido se reduce significativamente al aplicar una diferencia de potencial sobre los electrodos del detector. No obstante, este fenómeno se prolonga durante pocos segundos, dando paso, a continuación, a una situación en la que se hace imposible el aprovechamiento de la información aportada por el equipo.

A día de la finalización de este documento no se ha alcanzado una solución satisfactoria para el problema descrito con este detector.

6 Conclusiones

Los problemas presentados por el detector de radiación β , así como la decisión de utilizar un osciloscopio como medio de adquisición de pulsos, han impedido la obtención de espectros de emisión correspondientes a gran cantidad de muestras radiactivas disponibles. No obstante, la buena correspondencia entre el espectro representado en la **Figura 14** y el obtenido mediante los medios ya presentes en el laboratorio llevan a la conclusión de que tanto la adquisición, como el procesado y posterior análisis de las señales se han llevado a cabo de forma adecuada. Asimismo, se puede concluir que el método elegido mediante el cual se obtiene la energía depositada por las partículas en base al área bajo el pulso producido, constituye una elección adecuada.

En la práctica, los sistemas de detección y medida han sido modernizados, si bien se deben realizar pruebas adicionales que permitan conocer la viabilidad real del uso del software en condiciones de trabajo habituales. Esto es, llevando a cabo la adquisición de datos mediante la correspondiente tarjeta adquisidora.

En lo referente a la implementación de un sistema de vacío funcional, se han alcanzado los objetivos planteados inicialmente, dado que la estanqueidad del circuito ha resultado satisfactoria, permitiendo alcanzar valores aceptables de presión en la cámara de medida.

En términos de trasvase de información entre compañeros de diferentes campos, se puede considerar que los diferentes miembros del equipo que no estaban familiarizados con las propiedades, causas y efectos de la radiación, han alcanzado un nivel adecuado de comprensión en este campo.

Para finalizar, no se ha conseguido materializar el desarrollo de la interfaz gráfica planteada al inicio del proyecto. No obstante, partiendo de un software funcional, se propone la posibilidad de llevar a cabo tareas futuras en esta dirección, pudiendo ser completada en lo sucesivo.

6.1 Trabajo futuro

A la finalización de este texto se ha alcanzado un grado de precisión aceptable en los resultados obtenidos durante el análisis de señales mediante el software diseñado. Así pues, las mejoras propuestas se basan en la adición de una interfaz gráfica que permita el aprovechamiento de los trabajos realizados incluso a los usuarios con escasa o nula experiencia en labores de programación.

Adicionalmente, tal y como se menciona en el epígrafe anterior, se recomienda la implementación de una tarjeta de adquisición de datos que permita una velocidad mayor de trabajo, dado que los tiempos de experimentación se ven vastamente dilatados como consecuencia del uso del osciloscopio.

Se propone también la creación de una práctica de laboratorio que favorezca la toma de contacto de los alumnos de diferentes asignaturas relacionadas con los fenómenos radiactivos con el método de detección utilizado, permitiendo a su vez mostrar los diferentes pasos que se han de seguir desde la detección de cada evento individual hasta la obtención de un espectro completo de emisión de una determinada muestra. En este sentido, es recomendable la confección de una guía práctica, que permita el correcto uso de los diferentes elementos implicados, al tiempo que garantice la seguridad de los

equipos y usuarios.

Por último, es conveniente hacer hincapié en las tareas de mantenimiento de los dispositivos utilizados. Dado que el circuito de vacío permite mejorar de forma significativa la calidad de los datos experimentales, es necesario tener presente su correcta conservación, siendo parte esencial de ésta la prevención del deterioro de las diferentes juntas y elementos de conducción.

Referencias

- [1] ORTEC Incorporated, *Silicon Surface Barrier Radiation Detectors Instruction Manual*, pp.1-14, Atlanta, 1977.
[Manual](#)
- [2] Nuclear.fis.ucm.es. 2022. Grupo de F. Nuclear, UCM.
http://nuclear.fis.ucm.es/webgrupo/labo/archivos/guiones_virtual/Tiempos_vida/Detectores.htm
- [3] ResearchGate. 2022.
https://www.researchgate.net/figure/Figura-9-Serie-radiactiva-del-radio-de-origen-natural-De-ellas-se-extrae-la-relacion_fig7_299560004
- [4] Ramanujan25449.blogspot.com. 2022. Obstinados navegantes en océanos de incertidumbre.
<https://ramanujan25449.blogspot.com/2013/05/?view=sidebar>
- [5] Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu. 2022. Radioactivity.
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Nuclear/radact2.html>
- [6] Cumbre Pueblos. 2022. PARTÍCULAS ALFA » Qué son, Características, Usos - Cumbre Pueblos.
<https://cumbrepuebloscop20.org/energias/nuclear/particula-alfa/>
- [7] Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu. 2022. Radioactivity.
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Nuclear/radact2.htmlc5>
- [8] Es.wikipedia.org. 2022. Defecto Frenkel - Wikipedia, la enciclopedia libre.
https://es.wikipedia.org/wiki/Defecto_Frenkel

A ANEXOS

A.1 Glosario de términos

- E_i : primera energía de ionización
- eV: electronvoltio. Unidad de energía equivalente a $1,602 \cdot 10^{-19}$ J.
- Radiación α : Radiación corpuscular consistente en núcleos de ${}^4\text{He}$. Esto es, átomos de helio completamente ionizados.
- Radiación β : Radiación corpuscular consistente en electrones (β^-) o positrones (β^+).
- Ångstrom (Å): Unidad de longitud equivalente a 10^{-10} m.
- BNC (Bayonet Neill-Concelman): Tipo de conector para cable coaxial. Permite alimentación y salida de datos de forma simultánea.
- PyVisa: Librería de funciones de Python que permite el control de dispositivos electrónicos tales como osciloscopios mediante el envío de comandos por conexión USB.

A.2 Documentación adicional

La documentación referente a los contactos con las diferentes empresas, así como los presupuestos recibidos y albaranes de compra se pueden encontrar en los siguientes enlaces:

- [Correo electrónico 1/3.](#)
- [Correo electrónico 2/3.](#)
- [Correo electrónico 3/3.](#)
- [Listado de bombas.](#)
- [Orden de compra.](#)
- [Albarán de compra.](#)

Se presenta también un enlace donde revisar el código desarrollado (formato Notebook de JupyterLab):

- [Código.](#)