



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

MEDICIÓN DE LA SECCIÓN EFICAZ POR AMS
PARA LA REACCIÓN $^{28}\text{Si}(d, \alpha)^{26}\text{Al}$, CERCA DE LA
BARRERA DE COULOMB

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A :

AMACALLI BONITZU ZUNUN TORRES

TUTOR

DR. EFRAÍN RAFAEL CHÁVEZ LOMELÍ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Para Francisca.

Agradecimientos

Nada de esto sería posible sin cada una de las personas que acompañó mi camino, es por lo que quiero agradecer a mi familia, profesores, amigos y hasta mascotas.

A mi familia por estar ahí siempre. Mis padres que me aconsejaban y acompañaban a cada paso que daba, incluso en aquellos momentos que callaba; mis hermanos Xchel y Zyanya, porque cada platica e incluso pelea eran divertidas y alegraban aquellos días estresantes; a mi abuelita Francisca, que creía en mí, y aunque hubiera deseado que estuviera a mi lado más tiempo, agradezco el que paso conmigo, pues me enseñó que no existe edad para dejar de aprender; a mi pareja por siempre darme ánimos y motivarme a continuar en cada aspecto de mi vida, y finalmente a mi hijo que llevando unos meses en mi vida a traído inspiración, felicidad y un nuevo motivo para continuar.

A mis profesores por las enseñanzas, en especial mi asesor Efraín por su infinita paciencia conmigo, por estar siempre abierto a escuchar y apoyar; igualmente a mis sinodales por estar atentos a mis mensajes, por el tiempo que les tomo la revisión de este trabajo, dándome retroalimentación valiosa.

Mis amigos por hacer más llevadera mi vida académica, a Dayana mi amiga que en la preparatoria me hizo creer más en mí y por ello me decidí a aventurarme a esta bella carrera. A mis amigos “los otros” que durante toda la carrera estuvieron sufriendo y disfrutando entre tareas y exámenes, y de entre ellos especialmente a Jaime que fue mi gran compañero hasta mi último semestre.

Y aunque no saben leer, mi gatita Catra que en cada momento de escritura estuvo a mi lado, a mi perro Maxwell que cada día me recibía al llegar a casa después de un día cansado.

Reconocimientos

Arcadio Huerta Hernández, María G. Rodríguez Ceja, Santiago Padilla, Sergio Martínez, el taller del IFUNAM, el ININ...

Este trabajo no hubiera sido posible sin el importante apoyo financiero del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM con números: IA103218, IG101016 e IG101120 y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) con números: 271802, 280760, 299073, 299186, 294537 y 315839.

Resumen

Este trabajo muestra los resultados de la reacción $^{28}\text{Si}(d,\alpha)$ y su producción de ^{26}Al ya estudiada en años anteriores, ampliando ahora el rango de energías entre 3.4 MeV y 4.8 MeV, para ello el experimento se realizó en el Laboratorio del acelerador Tandem Van de Graaff del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares ININ.

Con ayuda del programa SIMNRA se analizaron los espectros del experimento obteniendo el número de deuterios incidentes en las irradiaciones en el blanco, además se realizó un análisis por AMS, en el Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores (LEMA) del Instituto de Física de la UNAM para la obtención del ^{26}Al producido en la muestra.

Glosario

AMS: Accelerator Mass Spectrometry

MS: Mass Spectrometry

SNICS: Sputter Negative Ion Cesium Source

IBA: Ion Beam Analysis

PIPS: Passivated Implanted Planar Silicon

NRA: Nuclear Reaction Analysis.

RBS: Rutherford Back Scattering

ERDA: Energy Recoil Dispersion Analysis.

Índice general

Agradecimientos	2
Reconocimientos	3
Resumen	4
Glosario	5
1. Introducción	7
1.1. Una breve historia sobre el ^{26}Al	7
1.2. Motivación y antecedentes de la reacción $^{28}\text{Si}(d,\alpha)$	7
2. Marco Teórico	8
2.1. Estructura Nuclear del ^{26}Al	9
2.2. Decaimiento β	10
2.3. Reacciones Nucleares productoras de ^{26}Al	12
2.4. Sección Eficaz	12
2.5. Aceleradores Electroestáticos	14
2.5.1. Principios de operación	14
2.6. Espectrometría de masas con aceleradores (AMS)	16
2.6.1. Principios de espectrometría de masas con aceleradores, AMS.	17
3. Metodología	19
3.1. Acelerador Tándem, ININ	19
3.1.1. Irradiación de Deuterio	20
3.2. Laboratorio de espectrometría de masas con aceleradores, LEMA	21
3.2.1. Preparación Radioquímica.	22
3.2.2. Espectrometría de masas con aceleradores para la medida del ^{26}Al .	22
4. Análisis de datos y resultados	23
4.1. Determinación del número de deuterios incidentes en las irradiaciones.	23
4.1.1. Detectores monitores: Calibración.	23
4.1.2. Simulación y análisis de datos con SIMNRA.	24
4.2. Análisis por AMS	27
4.2.1. Separación y conteo del ^{26}Al producido en las irradiaciones	27

4.2.2. Normalización y sección eficaz.	28
Conclusiones	31
Trabajo Futuro	32
Apéndice A. Nucleosíntesis	33
A.1. Nucleosíntesis explosiva.	34
A.2. Algunos procesos nucleosintéticos.	34
Apéndice B. Datos obtenidos en los experimentos.	36
Bibliografía	43

1 Introducción

En gran medida nuestro entendimiento sobre el universo se ha ido moviendo de acuerdo con la información que éste nos va aportando, las respuestas no siempre resultan inmediatas pero la investigación de estos hallazgos nos permite iluminar más nuestra comprensión de la naturaleza. Tal es el caso del meteorito Allende que cayó en una madrugada el 8 de febrero de 1969, y que su estudio aportó información nueva.

1.1. Una breve historia sobre el ^{26}Al

Como se ha mencionado el estudio del meteorito Allende abrió una puerta a interrogantes, sobre nuestro conocimiento del universo temprano y los radionúclidos de vida corta, su análisis reveló un exceso de ^{26}Mg relativo a los valores terrestres normales, y la producción de ^{26}Al se dedujo por primera vez de esta abundancia anómala de ^{26}Mg observada en meteoritos [1, 2]. El exceso de ^{26}Mg fue causado por el decaimiento $^{+\beta}$ del ^{26}Al [3].

El ^{26}Al es un isótopo único que juega un papel importante en una gran variedad de campos de estudio de la física que va desde nucleosíntesis, ciencias de la tierra, investigación biomédica, y otras ciencias. [4–7]

Es de notar que sobran razones para el estudio del ^{26}Al , y la búsqueda del entendimiento de la producción de este isótopo se ha hecho desde diversas reacciones nucleares, siendo $^{25}\text{Mg}(p,\gamma)^{26}\text{Al}$ la reacción más estudiada, sin embargo, continuamos nuestro estudio en la reacción $^{28}\text{Si}(d,\alpha)^{26}\text{Al}$, reacción que bien podría competir con la citada primero.

1.2. Motivación y antecedentes de la reacción $^{28}\text{Si}(d,\alpha)$

Se ha mencionado ya el interés que surgió hacia el ^{26}Al , estando la interrogante de cómo se produce ^{26}Al en el universo, con esta inspiración en años previos comenzó el estudio de la reacción $^{28}\text{Si}(d,\alpha)^{26}\text{Al}$ a energías de 900 keV hasta 2.6 MeV, donde se midió la producción ^{26}Al y su sección eficaz a bajas energías, en tal estudio se contó con las facilidades del Laboratorio Acelerador Van de Graaff de 5.5 MV (donde se llevó a cabo la irradiación de Deuterio) y el Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores LEMA (usado para la medición de la concentración de ^{26}Al producida en una mezcla de blancos Al/Si, después de la irradiación). Aquellas medidas mostraron que se debía hacer mejoras para alcanzar el objetivo. [1, 8, 9].

Así el objetivo de este trabajo es continuar con el estudio de la reacción $^{28}\text{Si}(d,\alpha)^{26}\text{Al}$ y la medición de su producción de ^{26}Al , extendiendo el rango de energías 3.4 MeV

hasta 4.8 MeV, por tal razón el experimento fue realizado en el Laboratorio del Acelerador Tandem Van de Graaff del ININ [10]. Para ello se planeó utilizar el método de espectrometría de masas para el conteo del ^{26}Al , además de analizar los espectros del experimento con ayuda del programa SIMNRA para obtener el número de deuterios incidentes en las irradiaciones.

2 Marco Teórico

Los núcleos radioactivos pueden ser usados como cronómetros, de donde se pueden derivar diferentes escalas de tiempo, como la edad de los elementos, el tiempo entre el fin de la nucleosíntesis y la formación del sistema solar, etc. Así que es a través del estudio de estos radionúclidos que se ha avanzado en el entendimiento sobre nuestro universo temprano. Esto se venía haciendo solamente con los radionúclidos de larga vida media, sin embargo, la situación dio un cambio drástico en los años 70 cuando tras el estudio detallado del material contenido en el meteorito en Allende se encontró un exceso de ^{26}Mg que fue atribuido al ^{26}Al [3], un radionúclido de vida corta. Tras el descubrimiento de que en el universo hay regiones con ^{26}Al [11, 12] se han encontrado muchos otros isótopos de vida corta que han existido en los primeros materiales del sistema solar [13–15].

La existencia de los isótopos radiactivos de vida media corta no era desconocida, desde 1960 cuando se mostró un exceso de ^{129}Xe correlacionado con su relativa abundancia de yodo [16], implicando la presencia de ^{129}I , pero en el caso del ^{129}I su abundancia en el sistema solar se entendió con la producción de núcleos a largo plazo en el proceso-r.

Durante un largo periodo de tiempo y sin éxito se buscó la presencia de más radionúclidos como el ^{129}I , los avances en técnicas analíticas (en la espectrometría de masas de alta precisión y sensibilidad, microquímica analítica y preparación de muestras) fueron cruciales para el hallazgo de ^{26}Al en el meteorito Allende.

Núcleo padre	Núcleo hijo	$\tau_{1/2}(a)$	Proceso nucleosintético
^{26}Al	^{26}Mg	7.4×10^5	Nucleosíntesis explosiva
^{40}K	^{40}Ca	1.3×10^9	Nucleosíntesis explosiva
^{87}Rb	^{87}Sr	4.7×10^{10}	Proceso r
^{129}I	^{129}Xe	1.7×10^7	Proceso r
^{146}Sm	^{142}Nd	10^8	Proceso r
^{232}Th	^{208}Pb	1.4×10^{10}	Proceso p
^{235}U	^{207}Pb	7×10^8	Proceso r
^{244}Pu	^{232}Th	8.2×10^7	Proceso r

Tabla 2.1: Algunos cronómetros importantes, en el resaltado rosa se muestra el caso específico del ^{26}Al . [17]

Una limitación en los modelos de formación del sistema solar viene de las mediciones de los ahora extintos radionucleidos de vida media corta, cuya presencia en el sistema solar temprano se ha inferido de las variaciones isotópicas de su decaimiento [12] en muestras de meteoritos (en el caso del ^{26}Al su presencia se infiere con el ^{26}Mg , como se muestra resaltado en la Tabla 2.1). Es decir que el problema se resume en que el núcleo padre decayó y se debe encontrar el núcleo hijo, planteando un desafío importante en los estudios del sistema solar primitivo.

Sin embargo, la rápida tasa de desintegración de los isótopos de vida media corta significa que las diferencias isotópicas inferidas se traducen en períodos de tiempo relativamente cortos, es decir, estos cronómetros potenciales tienen una precisión inherentemente alta (resolución temporal) [18].

El estudio de estos radioisótopos resulta de gran interés dado que una gran variedad de fuentes estelares es requerida para la producción de estas especies nucleares [11, 19], siendo de gran importancia para aprender sobre los últimos eventos nucleosintéticos. Ahora bien, un hecho que sin duda marcó un antes y después fue el estudio de la condrita carbonosa Allende, dominando la historia del descubrimiento de anomalías isotópicas, donde el ^{26}Al es uno de los principales protagonistas.

2.1. Estructura Nuclear del ^{26}Al

El aluminio es un elemento que cuenta con alrededor de 20 isótopos conocidos, siendo el ^{27}Al su único isótopo estable, el ^{26}Al es su único radioisótopo con vida media larga (7.2x10⁵ años), y sus demás isótopos cuentan con vidas medias menores a 10 minutos. El ^{26}Al , tiene una estructura nuclear especial ya que es un núcleo impar-impar, cuyo estado base tiene un gran momento angular (5_+ , T=0) que prohíbe su decaimiento β al estado base del isóbaro par-par ^{26}Mg , razón de la tan larga vida media del estado base. Su primer estado excitado (0_+ , T=1) con sólo 228 keV de energía de excitación, decae mediante una transición β_+ súper permitida de Fermi [20] al estado base de ^{26}Mg . Experimentalmente el esquema de niveles del ^{26}Al debajo de 5 MeV es bien conocido, el espín y paridades de estos niveles se determinaron principalmente de estudios de decaimientos β y γ .

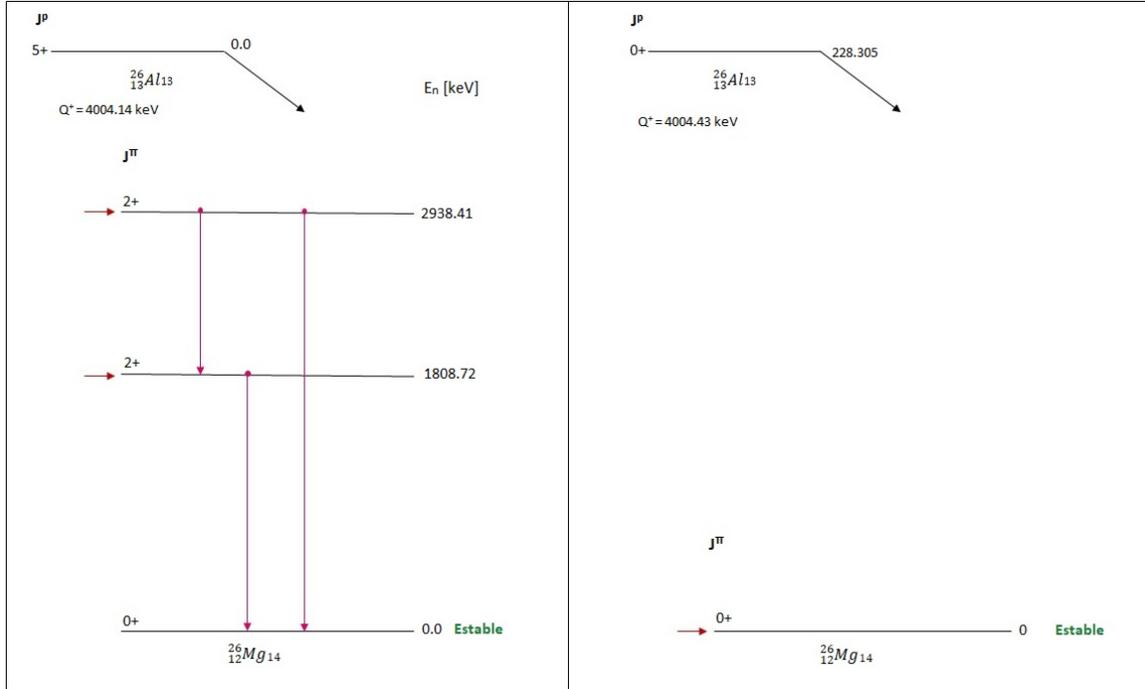


Figura 2.1: Diagrama de niveles del ^{26}Mg , con J^p es el momento angular y paridad del estado, J^π es el momento angular y paridad del núcleo hijo, y E_n la energía por nivel

Es de señalar que ningún modelo de la estructura nuclear ha logrado describir en su totalidad (Nilson, rotacional, capas) todas sus propiedades espectroscópicas [21], y que trabajos como el de Brut y Jang [22] mostraron la importancia de los estados intrínsecos de Hartree-Fock con diferentes formas para el núcleo del ^{27}Al y ^{27}Si , así que posiblemente la estructura nuclear del ^{26}Al puede ser caracterizada por la existencia de varios estados intrínsecos con diferente naturaleza [23].

2.2. Decaimiento β

Nuestra historia comenzará con Henri Becquerel, que de forma casual cuando experimentaba con el fenómeno de fluorescencia, observó que el Uranio emitía una radiación desconocida en ese entonces. Ernest Rutherford continuó con estos experimentos descubriendo dos tipos de radiación que nombró α y β en 1899 cuando publicó sus resultados siendo la emisión de electrones de los primeros fenómenos de decaimiento radioactivo observado. El proceso inverso (captura electrónica) fue observado hasta 1937 por L. Álvarez [24]. Años antes y siendo los primeros en producir radioisótopos artificiales, Irene y Frederic Joliot-Curie en 1934 [25] observaron por primera vez la emisión de un positrón (partícula con las características de un electrón, pero con carga opuesta), dos años después del descubrimiento del positrón en rayos cósmicos. Estos tres procesos están estrechamente relacionados y se les asignó el mismo nombre, decaimiento β .

Me enfocaré en el decaimiento β más básico, resultado de la interacción débil de un nucleón (neutrón o protón) que se encuentra en exceso en el núcleo, en tal situación un núcleo con Z protones y N neutrones decae a otro con el mismo número de nucleones A con $(Z\pm 1, N \mp 1)$, emitiendo un electrón o positrón (partículas β). Teniendo así el decaimiento β^- y β^+ :



Es decir, en el decaimiento β^- un núcleo inestable decae a un núcleo “hijo” con número atómico Z mayor en una unidad emitiendo un electrón y un antineutrino, mientras que el decaimiento β^+ el núcleo “padre” decae a un núcleo “hijo” con Z menor en una unidad, emitiendo un neutrino y un positrón (Figura 2.2); los átomos producto de la desintegración son átomos de diferentes elementos y por lo tanto diferentes propiedades químicas. A un nivel más fundamental, el decaimiento β puede ser visto como la transformación de un tipo de quark a otro, a través de la interacción débil, resultando posible el cambio de sabor del quark [26].

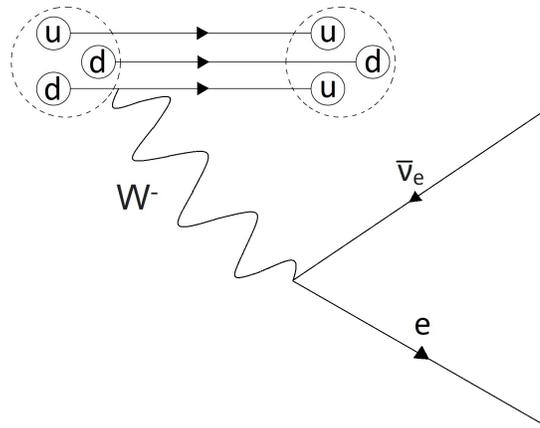


Figura 2.2: Diagrama de Feynman del decaimiento β^- donde se observa el cambio de un quark down a un quark up mediante la emisión de un boson W^- el cual decae a un par electrón-antineutrino, de forma más general, el cambio de neutrón a protón

Una característica fundamental del decaimiento β , es su espectro de energía continuo a consecuencia de que la energía disponible para la desintegración (el valor Q) se comparte con el neutrino (antineutrino). En la figura 2.3, se muestra un espectro típico de este tipo de desintegración.

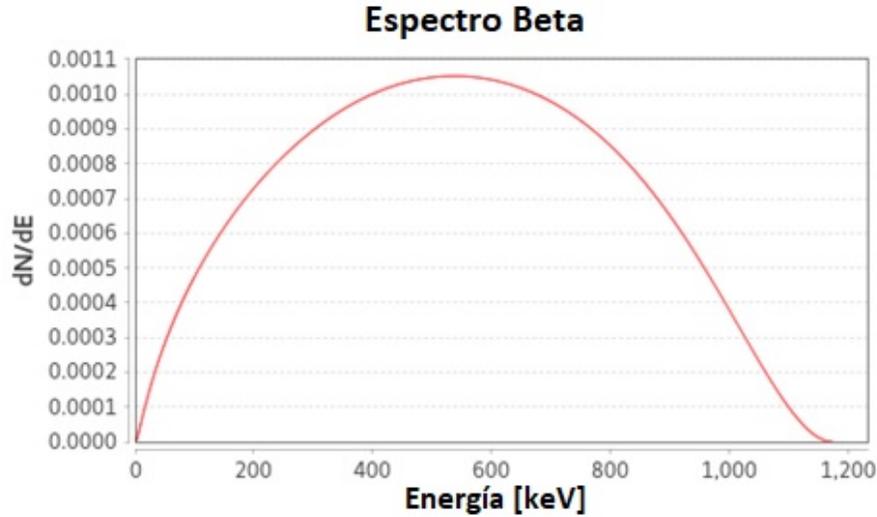


Figura 2.3: Espectro de emisión de partículas β del ^{26}Al . (Datos: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html#dcy2>)

2.3. Reacciones Nucleares productoras de ^{26}Al

Si bien se ha mostrado particular interés en el estudio de la reacción $^{28}\text{Si}(d, \alpha) ^{26}\text{Al}$, varias reacciones nucleares se han considerado como potenciales contribuidoras a la producción de ^{26}Al , con el fin de no dejarlas a un lado nos enfocaremos ahora en hablar un poco de aquellas reacciones y su importancia en diferentes escenarios.

2.4. Sección Eficaz

En términos generales se puede entender a la sección eficaz como la medida de la probabilidad relativa de que una reacción $A(a,b)B$ ocurra. Es decir, la medida cuantitativa de interacción entre partícula y un blanco.

Si se considera un experimento típico de colisión, donde un flujo de partículas I_0 incide sobre un blanco A cuya densidad por unidad de volumen es $n[\text{cm}^{-3}]$ y espesor Δx , al darse el choque con el blanco, el detector colocado medirá las partículas emitidas b, en la dirección (θ, ϕ) respecto a la dirección del haz incidente, dentro de un ángulo sólido $d\Omega$ tal como se muestra en la Figura 2.4.

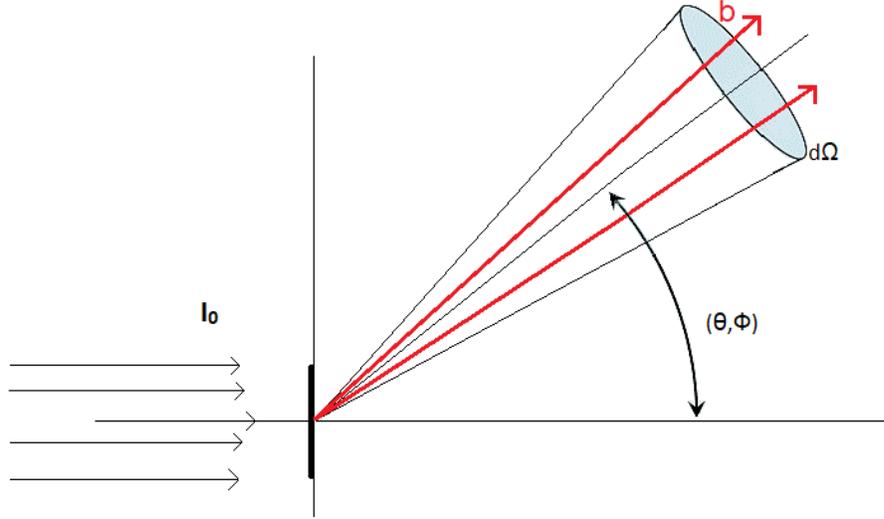


Figura 2.4: Geometría de la reacción, donde se muestra el haz I_0 que irradia un blanco, y la posterior salida de un haz b a un ángulo (θ, ϕ) sólido para llegar al ángulo sólido $d\Omega$ (del detector).

Dado que el detector ocupa sólo un ángulo sólido $d\Omega$ no observará todas las partículas salientes b , sólo una fracción dN y por tanto sólo una fracción de la sección eficaz se puede detectar. Suponiendo que las partículas del haz están uniformemente distribuidas, se hablará del flujo de partículas incidente por unidad de área por unidad de tiempo F . Tras el choque con el blanco la partícula incidente sale formando un ángulo θ , pudiendo incidir y registrarse en el detector, siendo N el número promedio de dispersiones por unidad de tiempo en el ángulo sólido que subtiende el detector, tomando en cuenta n como el número de centros de dispersión del blanco que abarca el haz. La sección eficaz diferencial se puede definir como [27, 28]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{nF} \frac{dN}{d\Omega} \quad (2.2)$$

Y la sección eficaz se obtiene simplemente integrando la ecuación anterior.

2.5. Aceleradores Electrostáticos

De una forma quizá romántica se podría decir que el desarrollo de los aceleradores electrostáticos comenzó con los estudios tempranos sobre electricidad y la construcción de las primeras máquinas electrostáticas. Con los nuevos estudios sobre la estructura de la materia que inició con el estudio de colisiones con proyectiles obtenidos de fuentes radioactivas y dio el nacimiento de una nueva rama de la física (la física nuclear), se mostró una necesidad de obtener partículas aceleradas y de controlar el tipo de partículas que se quiere acelerar, su energía y flujo.

En 1930 J.D. Cockcroft y E.T.S. Walton aceleraron protones a 200 keV y en 1932 construyeron el primer acelerador de iones positivos [29], generando un haz para bombardear un blanco de ${}^7\text{Li}$, creando la primera reacción nuclear artificial; por otro lado, en 1931 Robert Van de Graaff construye el primer generador de alto voltaje, reportando un voltaje de 1.5 MV. Los primeros aceleradores diseñados y construidos se basaron en principios de electrostática, sin embargo, durante estos años se dio un progreso en cuanto a las características de los aceleradores, y su evolución se fue basando en la necesidad de la física nuclear de obtener proyectiles con energías más altas, para estudios de la estructura nuclear, producción de isótopos radioactivos, etc. [30]

2.5.1. Principios de operación

Un acelerador se basa en la idea simple de que una partícula con carga q , debe ganar energía al pasar a través de un potencial eléctrico, si se quiere aumentar la energía, el potencial debe ser aumentado proporcionalmente. De ahí trazar una trayectoria para la partícula a acelerar, requiere el uso de campos electromagnéticos por ende el movimiento de las partículas se regirá por la fuerza de Lorentz.

$$F = e(v \times B + E) \quad (2.3)$$

Si la partícula se mueve del punto a , al punto b , la energía cambiará como:

$$\Delta E = \int_a^b F \cdot dr = e \int_a^b (v \times B + E) \cdot dr \quad (2.4)$$

Suponiendo el diferencial de desplazamiento paralelo a la velocidad, entonces el vector $v \times B$ es perpendicular a dr implicando que $(v \times B) \cdot dr = 0$, por lo tanto:

$$\Delta E = \int_a^b E \cdot dr = eU \quad (2.5)$$

Donde U es la diferencia de potencial aplicado a la partícula y e la carga del electrón. Por lo consiguiente queda claro que el cambio de energía depende únicamente de los campos eléctricos y el campo magnético B no contribuye, cuando el vector

desplazamiento es paralelo al vector velocidad. Cabe destacar que a los aceleradores les concierne la tarea de acelerar y direccionar el haz, procesos que como se ha visto dependen de los fundamentos de la teoría electromagnética, siendo las ecuaciones de Maxwell de vital importancia [31].

El principio de operación de los aceleradores electrostáticos es la producción de un alto voltaje de aceleración, en consecuencia, se han desarrollado métodos para producir altos voltajes y alcanzar diferencias de potencial de hasta varios millones de voltios, con el objetivo de exponer mejor como se consiguen estos voltajes, a continuación, se dará un breve enfoque al funcionamiento de dos aceleradores electrostáticos ampliamente utilizados:

Cockcroft -Walton: El acelerador de Cockcroft y Walton se basa en un sistema de rectificadores, logrando un voltaje alrededor de 400 000 V en su primer intento, basándose en los principios de rectificación y multiplicación de voltaje; este tipo de acelerador es conocido como generador de cascada ya que la idea detrás de su sistema es tener una red de capacitores y diodos en cascada conectados a una tensión alterna. Actualmente muchos aceleradores modernos con varias etapas de aceleración emplean en su primera etapa aceleradores tipo Cockcroft -Walton para producir haces de alta intensidad.

Van de Graaff: Si bien no fue el primero en producir la primera reacción nuclear, han sido ampliamente utilizados en el estudio del núcleo atómico y en especial para medir secciones eficaces. En su estructura este tipo de aceleradores cuenta con una banda de material aislante que gira sobre dos poleas (una en la parte de arriba conectada a la terminal de alto voltaje y otra abajo en tierra) con ayuda de un motor (ver Figura 2.5). La banda es cargada por una fuente de alto voltaje y un electrodo en la parte inferior del acelerador, y será la encargada de transportar la corriente hasta un electrodo superior, que depositará la carga en la terminal de alto voltaje.

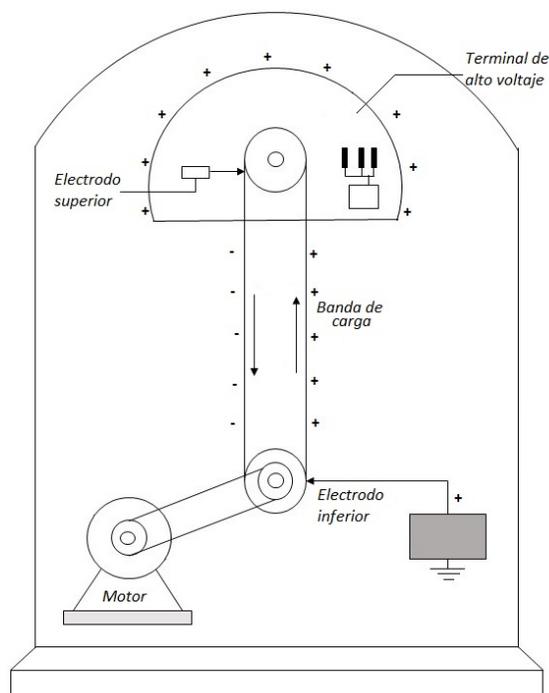


Figura 2.5: Esquema de un Acelerador Van de Graff.

En la actualidad la mayoría de los aceleradores en el mundo son utilizados para implantar o estudios de espectrometría de masas, investigación en materiales, medicina, etc. [32]

2.6. Espectrometría de masas con aceleradores (AMS)

Durante los años 70 fue cuando se consolidó la espectrometría de masas con aceleradores (Accelerator Mass Spectrometry, AMS), antes de eso había sólo tres artículos que reportaban trabajos en espectrometría de masas de alta energía. Y fue hasta 1977 cuando Müller en su búsqueda de quarks, reportó su intento fallido y su medición de ^3He en agua, que se dio el primer ejemplo de AMS, usando como herramienta de trabajo un Ciclotrón de Berkeley, no obstante, en ese mismo año dos grupos independientes hicieron la primera medición de ^{14}C usando aceleradores electrostáticos, que resultaron más efectivos para este trabajo que los ciclotrones [33, 34].

En general la técnica de espectrometría de masas nos permite identificar a los radionúclidos, haciendo uso de la diferencia de masa de isótopos en átomos y especies moleculares [35], tras el desarrollo de la técnica por AMS el espectro de estudio se amplió para otros radioisótopos de larga vida media como ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca y ^{129}I . Además, frente a otras técnicas analíticas, la AMS tiene las ventajas de poder trabajar con muestras de tamaño muy reducido y disminuir considerablemente el tiempo de la medida, siendo la principal diferencia las velocidades a las cuales los iones son acelerados. La técnica AMS se volvió una poderosa y sofisticada herramienta

analítica. [36]

2.6.1. Principios de espectrometría de masas con aceleradores, AMS.

Como se ha venido expresando con la incorporación de un acelerador al sistema de espectrometría de masas (MS), sus limitaciones se vieron reducidas, a continuación, se hablará con más detalle de las partes más básicas que conforman un sistema de espectrometría, además de sus principios físicos esenciales para llevar a cabo su tarea. Así pues, un sistema AMS consiste esencialmente de una fuente de iones, un inyector (o primer acelerador de muy baja energía), un analizador de masas, un acelerador, selectores magnéticos y electrostáticos, detector y jaulas de Faraday.

La labor de un AMS comenzará en la fuente de iones con el objetivo de producir iones de baja energía de la muestra que se quiere analizar, en la Tabla 2.2 se dan algunos ejemplos del tipo de material de muestra utilizado para diferentes isótopos, el tipo de iones producidos, el isótopo estable correspondiente y las corrientes de haz típicas para el isótopo estable. [37]

Isótopo	Material de muestra	Ion raro	Ion estable	Corriente del ion estable (μA)
^{10}Be	BeO	$^{10}\text{Be}^{16}\text{O}^-$	$^9\text{Be}^{16}\text{O}^-$	5-10
^{14}C	Grafito	$^{14}\text{C}^-$	$^{12}\text{C}^-$, $^{13}\text{C}^-$	30-100
^{26}Al	Al_2O_3	$^{26}\text{Al}^-$	$^{27}\text{Al}^-$	0.1-1
^{36}Cl	AgCl	$^{26}\text{Cl}^-$	$^{25}\text{Cl}^-$	10-20
^{59}Ni	Ni	$^{59}\text{Ni}^-$	$^{58}\text{Ni}^-$	1-5

Tabla 2.2: Diferentes métodos analíticos (en AMS) que utilizan haces de iones [37]

En el inyector se hará una primera selección en masa, la cual ocurre en dos etapas, primero filtrando las partículas por energía, después por rigidez magnética. Así con la masa seleccionada, se llevará el haz hasta el acelerador donde los iones generados pasarán por el proceso de stripping (desnudar en inglés, que se usa normalmente para designar el proceso de intercambio de carga) para eliminar moléculas, ser acelerados y dirigidos hacia el analizador de masas para ser separados en relación su cociente carga/masa mediante campos eléctricos y magnéticos, aquí se aprovechara la propiedad que tienen las partículas cargadas de que, al moverse en un campo magnético perpendicular a su trayectoria, describen una órbita circular, donde el radio ρ está dado por [38]:

$$\rho = \frac{Mv}{qB} = \frac{\sqrt{2ME}}{qB} \quad (2.6)$$

con E y B el campo eléctrico y magnético aplicado, q la carga y M la masa de la partícula. De acuerdo con esto las partículas serán seleccionadas en función de su rigidez magnética

$$\frac{B^2 \rho^2}{2} = \frac{ME}{q^2} \quad (2.7)$$

Ahora bien, se debe considerar que los iones pueden sufrir procesos donde el estado de carga y energía pueden variar, para no tener una selección insuficiente, se toma en cuenta para la selección, la rigidez eléctrica [36]

$$\frac{\epsilon \rho}{2} = \frac{E}{q} \quad (2.8)$$

Tras estos procesos de selección, los iones llegan al sistema de detección, que puede constar de Jaulas de Faraday, donde a partir de los iones incidentes se genera una corriente eléctrica proporcional a su abundancia. [38]

En resumen, el proceso de espectrometría de masas con aceleradores se divide en zona de baja energía, acelerador y la zona de alta energía, tal como se muestra en el esquema de la Figura 2.6.

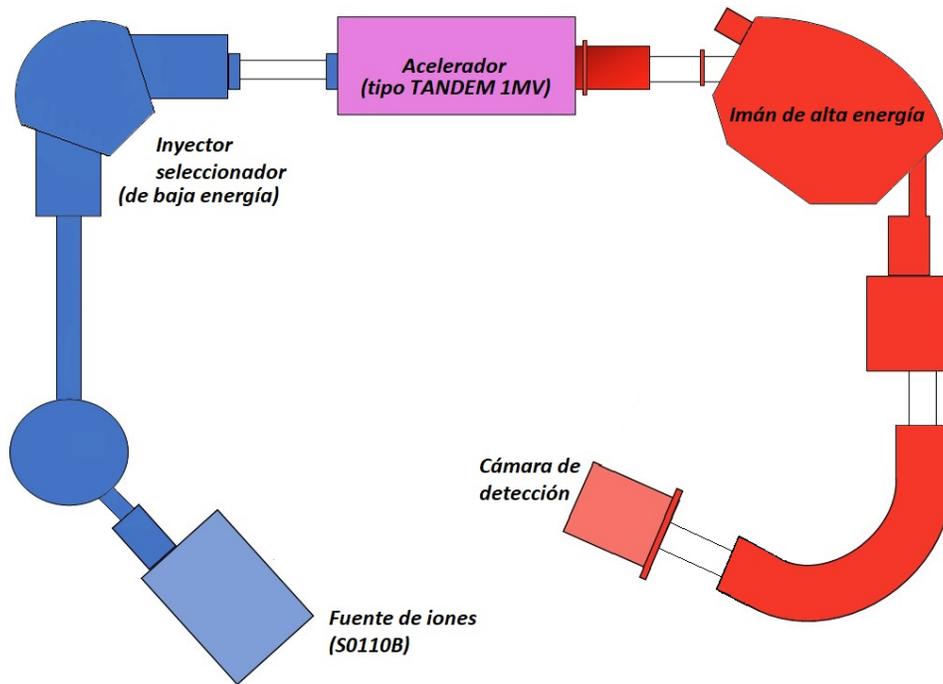


Figura 2.6: Esquema de un espectrómetro de masas basado en el LEMA, en la parte azul se muestra la zona de baja energía mientras que en la roja la zona de alta energía (imagen adaptada de [35]).

3 Metodología

A continuación, se hablará de todos los procesos del experimento, esto se dividirá en dos partes según donde se realizó cada procedimiento: el acelerador Tándem del ININ, y el laboratorio de espectrometría de masas con aceleradores, LEMA.

3.1. Acelerador Tándem, ININ

El acelerador Tándem del ININ es un generador electrostático de alto voltaje, tipo banda y con potencial constante, fue diseñado y construido por High Voltage Engineering Corporation. Cuenta con una fuente de iones tipo SNICS por sus siglas en inglés “Sputter Negative Ion Cesium Source”, de donde se extraen iones negativos que se encaminan hacia el acelerador mediante un electroimán inyector, además de un tanque acelerador con un generador de alto voltaje de hasta 6 MV. El laboratorio del acelerador Tándem dispone de técnicas analíticas IBA, que soportan el desarrollo de proyectos en física nuclear.

En seguida, se explicará brevemente el trabajo que se realiza en el laboratorio del acelerador Tándem del ININ, el cual tiene como función, obtener un haz de iones con el objetivo de dirigirlo hacia un blanco.

Se ha ya mencionado que el acelerador posee una fuente de iones tipo SNICS, esta fuente utiliza iones de Cs que golpean un cátodo generando un haz de iones negativos del elemento deseado, el haz seguirá una trayectoria en línea recta hasta toparse con el electroimán de 20° , con la función de seleccionar iones con la carga y masa requerida; la trayectoria del haz no termina aquí, pues ahora se dirigirá al tanque acelerador donde (valga la redundancia) se aceleran las partículas que pasarán al electroimán de 90° , este electroimán resulta importante pues aquí se selecciona las partículas de una determinada energía, sigue el electroimán selector que selecciona la salida del haz según el experimento a realizar de ahí las partículas pasan a través de los cuadrupolos magnéticos de alta energía para enfocar el haz y que finalmente llegue a su destino en la cámara de bombardeo, que contará con el blanco y dispositivos electrónicos [39].



Figura 3.1: Acelerador tándem Van de Graaff del ININ. (<https://www.gob.mx/inin/acciones-y-programas/acelerador-tandem-van-de-graaff-73303>)

3.1.1. Irradiación de Deuterio

El acelerador tándem del ININ fue utilizado para irradiar un blanco de Silicio con un haz de deuterio, con energías entre 3.4 MeV y 4.8 MeV. Hay que señalar que los datos fueron tomados en intervalos de 200 keV con corrientes típicas de $1 \mu\text{A}$ sobre el blanco.

El blanco consistió de placas de Silicio de sección cuadrada de 5 mm por lado, lo suficientemente amplio para contener al haz. Con un espesor de 1 mm, suficientemente grueso para detener el haz y pequeño para facilitar su estudio en el laboratorio de radioquímica. Para la obtención consecutiva de datos sin la necesidad de abrir la cámara, el soporte de hierro sostuvo dos blancos de silicio, los cuales fueron fijados con alambres de cobre, sujetando los extremos superior e inferior de cada placa de Silicio, con el mínimo traslape del haz y previniendo la caída de las placas durante el experimento. Por otro lado, el arreglo para la detección estaba compuesto de dos detectores de Silicio, colocados a 165° a la izquierda y derecha de la dirección del haz dentro del mismo plano dentro de la cámara de reacción (ver Figura 3.2). El detector 1 fue de barrera superficial ORTEC de $500 \mu\text{m}$ y el detector 2 un Canberra Passivated Implanted Planar Silicon (PIPS) de $300 \mu\text{m}$, fueron colocados a 10 cm y 13 cm del blanco, respectivamente. En la Figura 3.2 se muestra una fotografía de la cámara de reacción con los blancos y detectores del experimento, mientras que en la figura 3.3 se muestra un esquema del arreglo experimental dentro de la cámara de reacción.



Figura 3.2: Cámara de reacción, se muestra el arreglo del blanco con los detectores, desde dos puntos de vista.

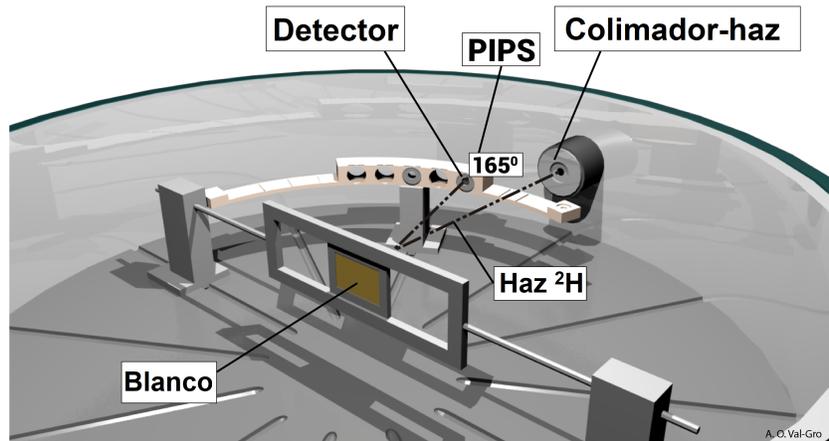


Figura 3.3: Esquema arreglo experimental dentro de la cámara de reacción, se observa el blanco y el detector PIPS a 165° respecto el haz de deuterio. Imagen: A. O. Val-Gro.

3.2. Laboratorio de espectrometría de masas con aceleradores, LEMA

El separador isotópico del laboratorio de espectrometría de masas con aceleradores (LEMA) del IFUNAM, fue manufacturado por la compañía High Voltage Engineering Europa. Se basa en un acelerador tipo Tándem de 1 MV con una fuente de cesio de iones negativos (SNICS) [33]. El funcionamiento del sistema se ha descrito de forma más precisa en la sección 2.6. En breve se dará un enfoque al trabajo realizado en el LEMA.



Figura 3.4: Laboratorio de Espectrometría de Masas con Aceleradores. Foto: D. Belmont.

3.2.1. Preparación Radioquímica.

La forma química en que se introduce el aluminio en el sistema es como Al_2O_3 , para ello debe prepararse el blanco usado en el experimento, pasando por una precipitación, calcinación y posteriormente se mezcla el sólido obtenido con el metal correspondiente a nuestra especie (Al).

El aluminio estándar (1 mg) necesario como haz piloto durante el análisis fue añadido en la muestra y diluido con una mezcla de HNO_3 y HF concentrado. Cuando estuvo totalmente disuelto el $\text{Al}(\text{OH})_3$ fue precipitado añadiendo NH_3 concentrado con pH 7-8. De aquí el Al_2O_3 fue obtenido por calcinación dentro de un horno a 600°C durante 3 h. Finalmente, la muestra fue mezclada con polvo de cobre y prensada en un cátodo de cobre, lista para ser analizada.

3.2.2. Espectrometría de masas con aceleradores para la medida del ^{26}Al .

Como ya se ha mencionado la espectrometría de masas con aceleradores es una técnica poderosa en el análisis de radioisótopos con abundancias bajas, como es el caso del ^{26}Al , y con esta herramienta se lleva a cabo todo un proceso para su detección (proceso del que ya se habló en secciones anteriores), para cada isótopo se toman en cuenta los estándares de referencia siendo en este sentido el análisis ligeramente diferente.

Para el análisis del ^{26}Al , el blanco se midió en el sistema de espectrometría de masas

con aceleradores en el LEMA a 1 MV.

Tras la separación del isótopo raro ^{26}Al por medio de los deflectores eléctricos son contados uno por uno en el detector de ionización de gas con doble ánodo. El haz del isótopo estable ^{27}Al es dirigido y cuantificado en la jaula de Faraday, localizada después del filtro magnético de alta energía.

Para medir la abundancia relativa del isótopo ^{26}Al respecto a su isótopo estable ^{27}Al , cada medida de la concentración de los isótopos $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ constó de 6 conjuntos de 10 medidas de 30 s de duración por cada cátodo, es decir 30 minutos por cátodo. Cabe señalar que cada cociente medido fue normalizado con un blanco estándar con valor nominal de $(7.444 \pm 0.08) \times 10^{-11}$ [40]

4 Análisis de datos y resultados

4.1. Determinación del número de deuterios incidentes en las irradiaciones.

Los detectores colocados en la cámara de reacción proporcionaron una serie de espectros de las reacciones nucleares desencadenadas durante la irradiación con el objetivo de obtener el número de deuterios incidentes. Se mostrará a continuación el análisis realizado sobre estos con ayuda de SIMNRA el cual es un programa de simulación para el análisis de NRA, RBS y ERDA.

4.1.1. Detectores monitores: Calibración.

Los detectores se calibraron de forma simultánea por dispersión elástica de deuterones a 4.8 MeV sobre un blanco delgado de oro, blanco fijado por una película de carbón. Los espectros obtenidos fueron analizados usando SIMNRA, la figura 4.1 muestra los datos experimentales al irradiar el blanco de Au/C junto con el análisis realizado por SIMNRA.

La calibración realizada con el espectro del blanco Au/C, sirve para fijar las variables dentro de SIMNRA. Además, permitió confirmar la energía de calibración y determinar el ángulo subtendido por el detector 1 relativo al detector 2, como 1.63; siendo consistente con las distancias de los detectores al blanco y el uso de colimadores del mismo tamaño frente ellos.

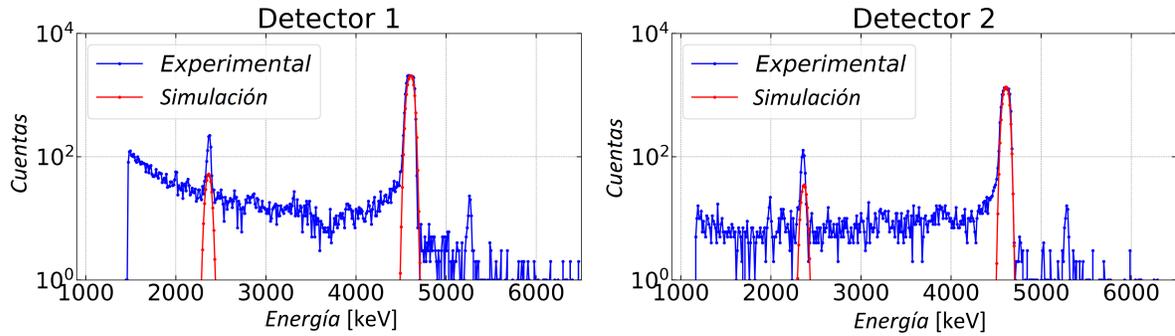


Figura 4.1: Ajuste en los espectros de calibración del blanco Au/C, en la línea roja se muestra la simulación del espectro.

4.1.2. Simulación y análisis de datos con SIMNRA.

Un paso importante para el estudio de la reacción $^{28}\text{Si}(d,\alpha)$, fue hacer un análisis de los espectros obtenidos por la dispersión elástica de deuterones, en la Figura 4.2 se muestran los espectros registrados por los detectores durante la irradiación de deuterones (líneas azules), las energías se muestran en unidades de keV.

Empezando de la parte superior, para el análisis y comprensión de los espectros se utilizó el programa SIMNRA, las simulaciones se presentan en la misma figura, donde las líneas rojas muestran la simulación de la energía de retroceso de los deuterones por dispersión Rutherford en el blanco, cabe señalar que las simulaciones de SIMNRA fueron generadas usando la función automática de ajuste del programa.

En la misma figura se puede mostrar la contribución de la dispersión en la placa del Silicio, Cobre (de los cables) y el soporte de Hierro en diferentes proporciones. Los datos de los detectores en la corrida a 4445 keV no se usaron, dado que se le atribuyen inestabilidades del haz, que deformó el espectro, por lo que no fue posible un ajuste.

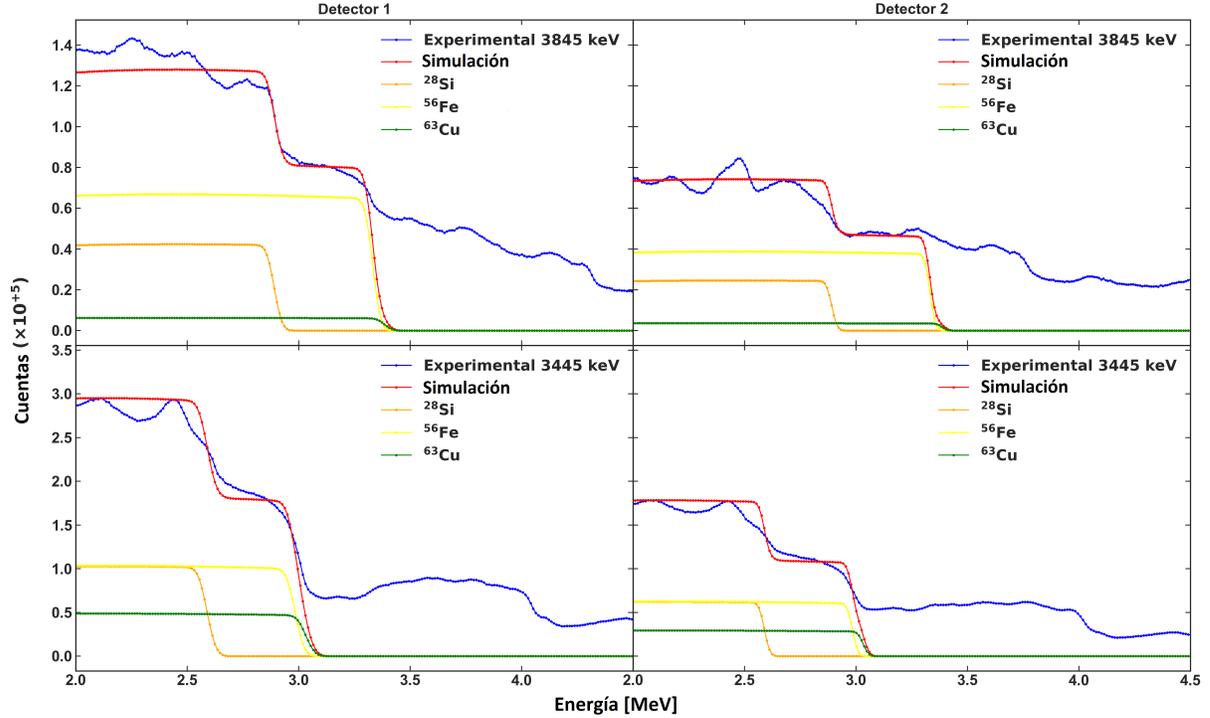


Figura 4.2: Se muestran dos espectros a diferentes energías para el detector 1 (izquierda) y 2 (derecha).

Ed haz de 4845 keV	Ed (keV) 165°
^{197}Au	4650
^{56}Fe	4205
^{28}Si	3648
^{12}C	2490

Tabla 4.1: Se muestran unos cálculos no relativistas, de la energía de retroceso con deuterones a 4847keV. para diferentes átomos a 165°.

En la Tabla 4.1 se muestran las energías esperadas de la dispersión en Oro, Hierro, Silicio y Carbón a 165°, una primera observación es la gran cantidad de eventos con energías más altas que las correspondientes a la dispersión elástica de deuterones. Estas partículas de gran energía son principalmente protones que vienen de reacciones $^{28}\text{Si}(d,p)$ con diferentes estados en ^{29}Si . Algo importante de notar en los espectros (figura 4.2), son sus formas complejas, esto debido a la contribución del blanco por todas estas reacciones nucleares por dispersión elástica; hay que señalar que estas contribuciones no fueron incluidas en la simulación con SIMNRA, la cual fue usada para la deducción del flujo de deuterones de la dispersión elástica. Razón por la que un error sistemático fue añadido.

En la Tabla 4.2 se proporciona para cada energía el número de deuterones detectado en cada detector y la composición del blanco, información deducida del ajuste en

cada corrida de SIMNRA. El cociente de las partículas detectadas en ambos detectores podría ser una constante y estar dentro de la razón del ángulo deducido de la calibración del oro como 1.63, todos los ajustes con excepción para 4245keV fueron consistentes con este valor dentro de un 15 % (ver columna 4). En cuanto al número de deuterones que golpearon el blanco de Silicio, se obtuvo por la composición del blanco (columna 5). Es de notarse que el porcentaje promedio del Silicio visto por el haz es similar, y las pequeñas diferencias pueden deberse a ligeros cambios en el haz, o la lineación del blanco en cada corrida.

1	2	3	4	5	6	7
Ed(keV)	Nd1(10^{-12})	Nd2(10^{-12})	D1/D2	%Si	% Fe	% Cu
3445	8.37	4.97	1.68	70	20	10
3645	3.28	1.93	1.70	69	23	8.0
3845	4.38	2.78	1.58	67	30	3.0
4045	3.65	2.19	1.67	67	25	8.0
4245	2.14	2.52	0.85	67	26	7.0
4645	3.83	2.62	1.46	64	22	14
4845	2.67	1.70	1.57	64	24	12

Tabla 4.2: En la tabla se muestra, en la columna 1 la energía del haz incidente, columna 2 el número de deuterones detectados con el detector 1 (según el ajuste con SIMNRA), 3 lo mismo que la columna 2 pero para el detector 2, 4 la razón entre la columna 2 y 3, y de las columnas 5-7 es la composición del blanco según los detectores (ajuste con SIMNRA).

Finalmente queda por mencionar que a partir del ajuste realizado con SINMRA se obtuvo el factor de normalización, calculado por la multiplicación del número de partículas por esterradián y la fracción del haz que golpeaba la placa de Silicio.

4.2. Análisis por AMS

4.2.1. Separación y conteo del ^{26}Al producido en las irradiaciones

En la Figura 4.3, el mapa bidimensional muestra la amplitud del pulso en el ánodo 2 vs la del ánodo 1, los eventos grabados se agrupan en la región donde se esperan los eventos del ^{26}Al . Siendo un ejemplo del limpio y fiable conteo del ^{26}Al .

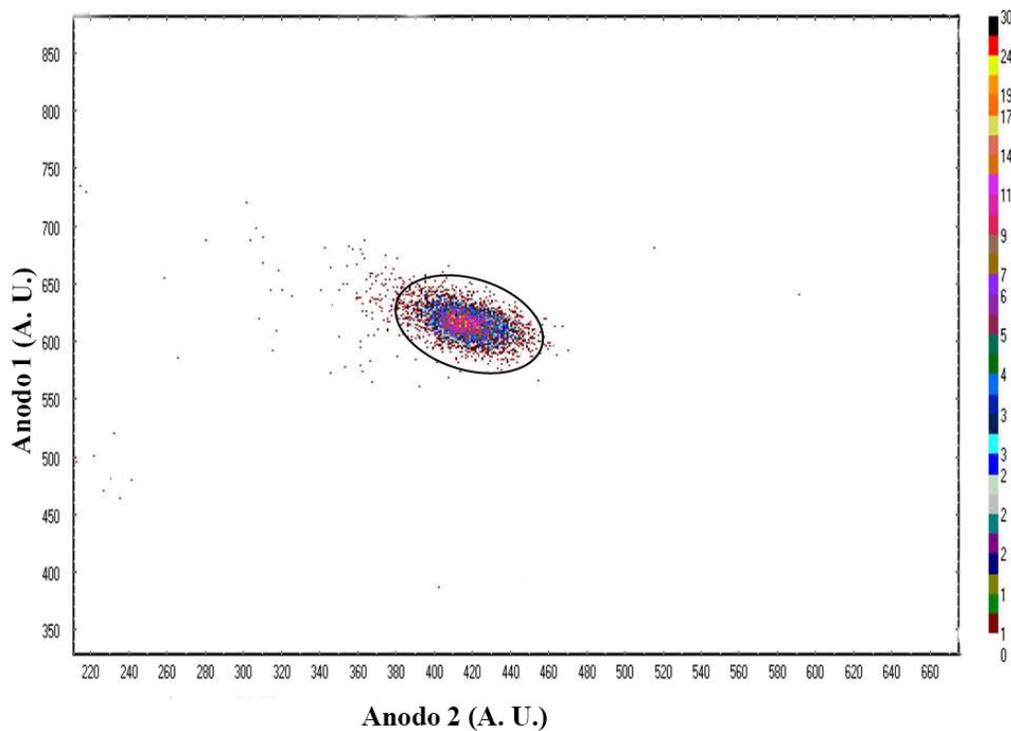


Figura 4.3: Mapa Bidimensional, espectro del Ánodo-1 (eje horizontal) vs Ánodo-2 (eje vertical), en unidades arbitrarias.

Los datos obtenidos para un cátodo se muestran en la Figura 4.4, donde se puede apreciar la robustez de las mediciones, es de notar que los primeros tres puntos muestran un comportamiento inestable, visto a menudo en este tipo de estudios y que se debe al acondicionamiento del cátodo con el haz de Cs dentro de la fuente SNICS. Cada cociente medido fue normalizado con un blanco estándar con valor nominal de $(7.444 \pm 0.08) \times 10^{-11}$ [40].

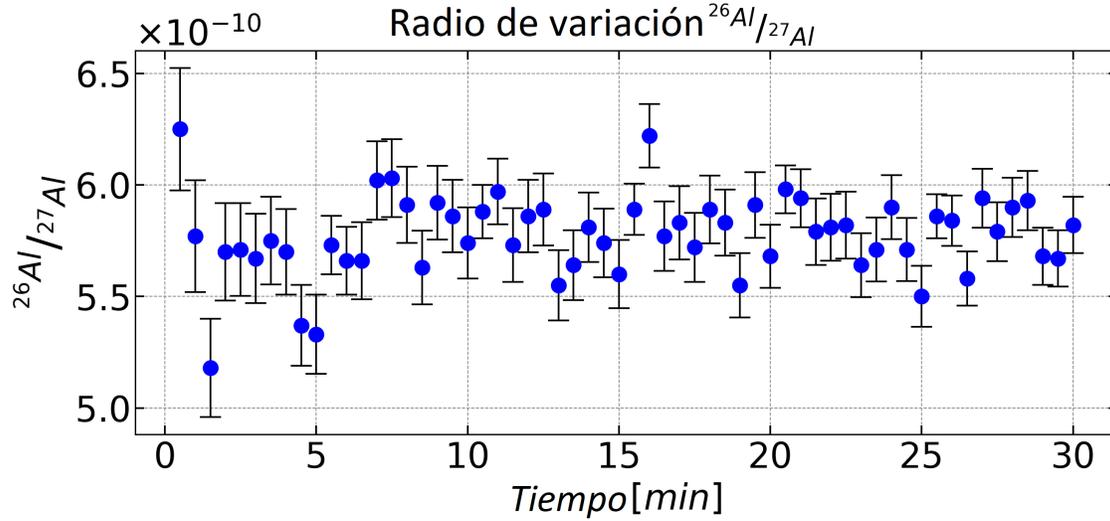


Figura 4.4: Ejemplo del método AMS con datos de un cátodo.

4.2.2. Normalización y sección eficaz.

La cantidad total de ^{26}Al para cada energía en que se realizó el experimento fue normalizada a 1 g del piloto ^{27}Al añadido al blanco, esto se muestra en la Figura 4.5 donde las barras de error estadístico se muestran debajo del 2%. Los datos del ^{26}Al contado por AMS y normalizados, se muestran en la columna 4 de la tabla 5.

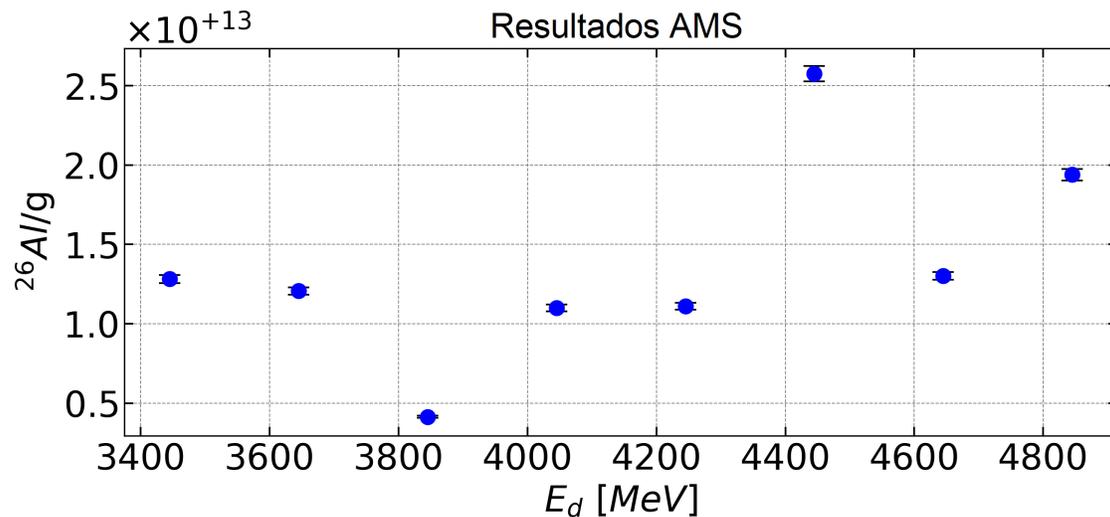


Figura 4.5: Ejemplo del método AMS con datos de un cátodo.

Para el cálculo del factor de normalización se eligió el detector más grueso, el cual se observa en la columna 2 de la tabla 4.3, de forma similar este valor para el otro detector se observa en la columna 3. La columna 4 muestra el número de ^{26}Al contado por AMS, normalizado por el piloto añadido (^{27}Al). Por otro lado, en la última columna

se muestra del detector grueso medido en este trabajo para cada energía, y en la figura 4.6 se muestra el resultado final el “yield” (producción total) de la reacción $^{28}\text{Si}(d,\alpha)^{26}\text{Al}$ después de que todas las corridas fueron normalizadas por el flujo de deuterones deducido en el blanco de Silicio a cada energía.

1	2	3	4	5
Ed(keV)	F1(x10 ¹²)	F(x10 ¹²)	²⁶ Al/g (x10 ¹³)	²⁶ Al/Nd
3445	5.86	3.48	1.28	0.22
3645	2.26	1.33	1.21	0.53
3845	2.93	1.86	0.41	0.14
4045	2.44	1.47	1.10	0.45
4245	1.43	1.69	1.11	0.77
4645	2.45	1.68	1.30	0.53
4845	1.71	1.09	1.94	1.14

Tabla 4.3: En la columna 1 se da la energía del haz incidente, en la 2 el producto de la columna 2 por la 5 de la tabla 4, la 3 igual pero para el detector 2, en la 4 el número de ²⁶Al contado por AMS a un gramo del piloto añadido, finalmente en la columna 5 el cociente de la columna 4 a la columna 2.

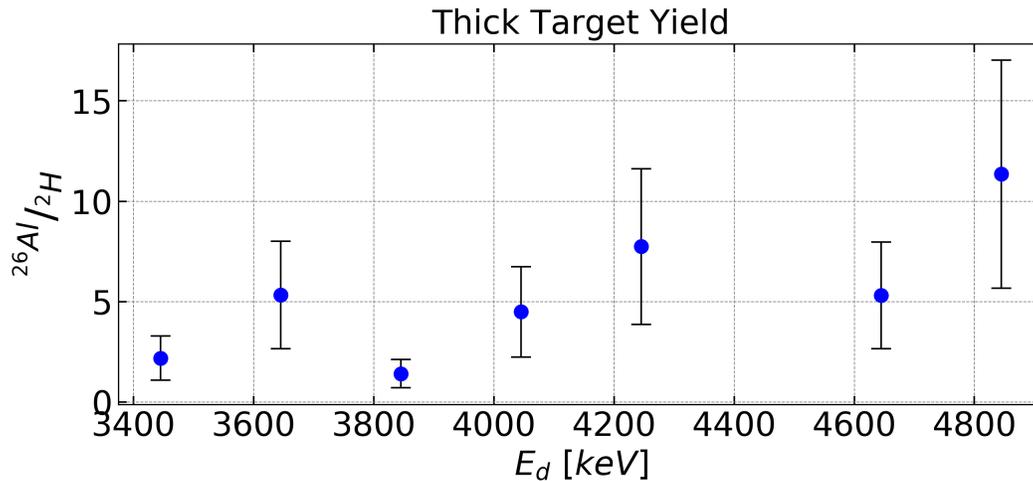


Figura 4.6: La cantidad resultante para el blanco delgado de la reacción $^{28}\text{Si}(d, \alpha)^{26}\text{Al}$ después de la normalización.

La figura 4.6 muestra el resultado final, la cantidad resultante para el blanco delgado de la reacción $^{28}\text{Si}(d, \alpha)^{26}\text{Al}$ después de que todas las corridas son normalizadas por el flujo de deuterones deducido en el blanco de silicio para cada energía.

En el eje vertical de la figura 4.6 se graficó el número total de ²⁶Al contado, como ya se ha mencionado, normalizado a la cantidad piloto añadida al cátodo, es de notar que las incertidumbres estadísticas son pequeñas. Considerando el hecho de que los tiempos de irradiación fueron los mismos para todas las energías, los datos de 3845 keV y 4445 keV son indicativos de los problemas con el haz durante la irradiación. Por

ejemplo, la alineación, inestabilidades, etc, sin embargo, es de notar que la técnica por AMS muestra una notable estabilidad.

Las barras de error incluyen la contribución estadística, que es más pequeña que el 3% en el AMS y un 15% - 20% del ajuste de SIMNRA. Se estimó un 30% adicional de incertidumbre del sistema (en la deducción del número de deuterones que golpean el blanco de silicio).

Conclusiones

La técnica AMS para el conteo del número total de ^{26}Al producido en la reacción $^{28}\text{Si}(d, \alpha)^{26}\text{Al}$ prueba ser una buena elección, dado que los datos por AMS resultan fiables y precisos, estando el error estadístico asociado al conteo de ^{26}Al debajo del 3 %. En cambio, la deducción del número de deuterones que golpearon el blanco de Silicio, deducido del análisis por SIMNRA resultaron tener mucha más incertidumbre, ya que por un lado la dispersión elástica de los deuterones en el Silicio podría no ser puramente de Rutherford y en este sentido no se cuenta con datos previamente publicados para confiar en esto, y por otro lado está el hecho del número de Q valores positivos de reacciones nucleares que producen partículas cargadas (protones y alfas) que alcanzan nuestros detectores con energías que se superponen a la dispersión elástica.

Con respecto a la gran cantidad del blanco grueso o sección transversal integrada reportada, muestra un crecimiento monótonico marginal a medida que va en aumento la energía de bombardeo, tal como debe de ser, sin embargo, aunque esto suene alentador, dadas las grandes incertidumbres, resulta necesario que se aborde en experimentos futuros. Para obtener la sección eficaz absoluta, debió ser necesario tener un valor de sección eficaz a una energía cerca de la barrera de Coulomb, para normalizar los datos. Por lo cual un blanco delgado de Silicio se considera como parte de experimentos futuros.

El objetivo final del proyecto es medir la sección eficaz diferencial de la reacción nuclear $^{28}\text{Si}(d, \alpha)^{26}\text{Al}$ a energías debajo de la barrera de Coulomb para valorar la relevancia de esta reacción en la nucleosíntesis del ^{26}Al en los diferentes escenarios astrofísicos. Los resultados del experimento presente en altas energías demuestran que la irradiación de deuterio seguido de un análisis por AMS de la reacción es apropiado para abordar la región en bajas energías, donde la sección eficaz cae exponencialmente.

Trabajo Futuro

A partir de los resultados obtenidos, se plantea el objetivo de continuar trabajando en la extensión de las medidas en la región de bajas energías, debajo de 3 MeV. Para ello según lo aprendido se requiere resolver el problema de cuantificación del haz irradiado, además de que se proponen las siguientes mejoras al experimento:

- I. Una colimación más estricta del haz de deuterio para tener una mayor seguridad en la determinación del “punto” del haz en el blanco.
- II. Añadir detectores delgados frente a los gruesos ya usados, para hacer la identificación de las partículas dispersadas.
- III. Añadir una capa de oro muy delgada (20-50 nm) en la placa de Silicio para controlar la dispersión elástica sobre el oro y no sobre el Silicio.

Para la continuación de los experimentos sobre la reacción $^{28}\text{Si}(d,\alpha)^{26}\text{Al}$ se podría contar con la participación del Acelerador Van de Graaff del IFUNAM.

Apéndice:

A Nucleosíntesis

En este apéndice se quiere esclarecer algunos conceptos relacionados con la nucleosíntesis, y que llegan a ser utilizados durante la redacción de esta tesis.

La nucleosíntesis intenta interpretar las abundancias medidas de especies nucleares en términos de sus propiedades y un conjunto de entornos en que los núcleos pueden sintetizarse mediante reacciones nucleares [41], intenta también responder las preguntas sobre el origen de los elementos y los procesos donde se dio la formación de estos.

El primer conjunto de reacciones nucleares en la evolución estelar se da mediante la cadena protón-protón, donde sus primeras 2 reacciones son:



, con además 1.02 MeV liberado por aniquilación del positrón



Sin embargo, aunque el Hidrogeno y el Helio son las especies más abundantes, la composición química del propio sistema solar (Figura A.1) es mucho más rica en especies nucleares y revela una historia compleja. [42]

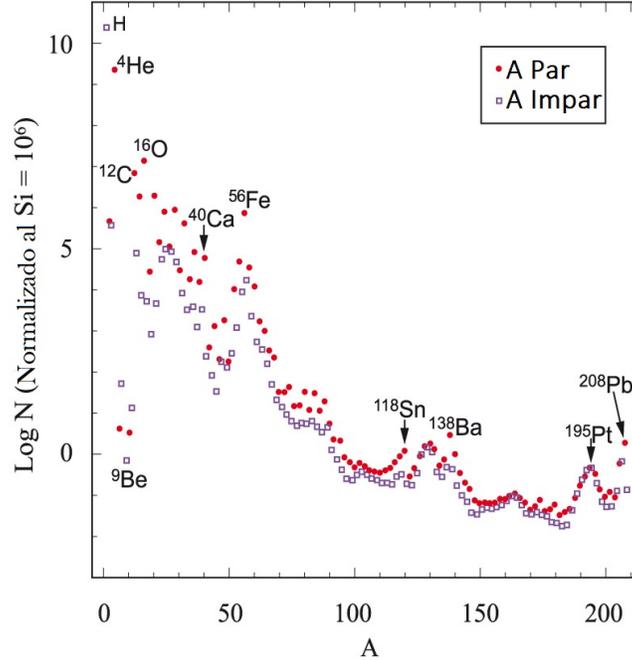


Figura A.1: Abundancias isotópicas de la tierra y el sistema solar por número N vs el número atómico A. Las abundancias están normalizadas al Silicio igual a 10^6 .1001[42]

La nucleosíntesis se ha dado desde el primer minuto del Big Bang con la formación de protones y neutrones, y el proceso de creación de los primeros elementos se da a través de la nucleosíntesis estelar y primordial, sin embargo tan solo nos centraremos en el caso de la nucleosíntesis explosiva, escenario donde se van formando elementos muy pesados, que no son posibles de formarse en los demás procesos nucleosintéticos.

A.1. Nucleosíntesis explosiva.

Este escenario se desarrolla dentro de explosiones de supernovas, donde las temperaturas llegan a ser muy altas ($T > 4 - 5 \times 10^9$ K) en un muy corto periodo de tiempo (t 1s). Aunque también puede ocurrir en explosiones pequeñas, no siempre ligadas a la muerte estelar (como explosiones de novas). [17]

A.2. Algunos procesos nucleosintéticos.

Como es de observarse en la Figura. A.1 después del pico del Fe las abundancias elementales caen rápidamente, a partir de aquí la nucleosíntesis está dominada por procesos de captura de neutrones, creando la mayoría de los elementos arriba del Fe. Los procesos de captura de neutrones son el proceso-s y el proceso-r, sin embargo, aún hay varios nucleidos ricos en protones no alcanzados por estos procesos, nucleidos formados por el proceso-p.

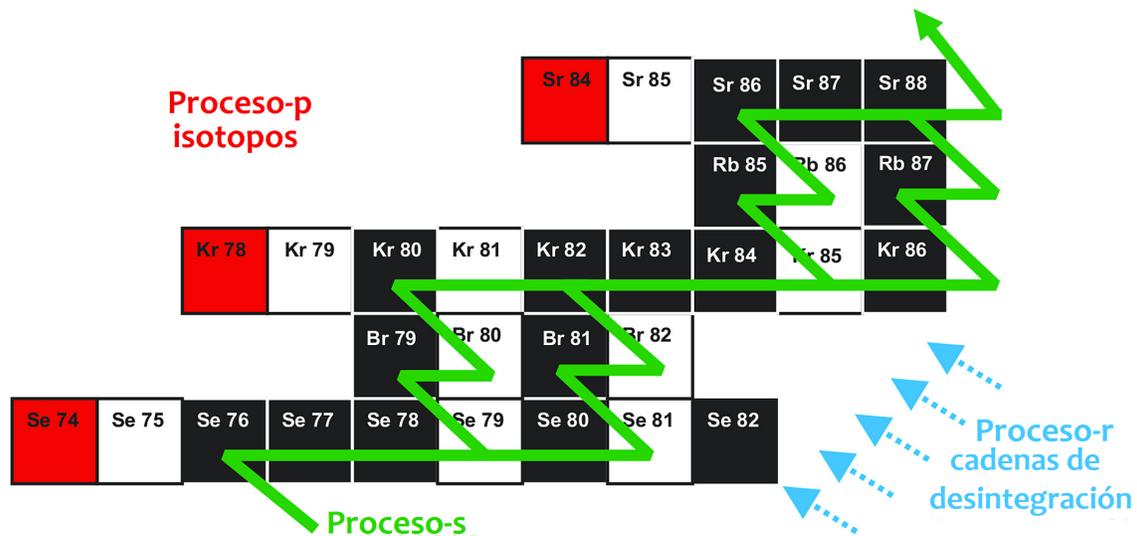


Figura A.2: Región de la tabla nuclear, donde se indica el camino del proceso-s y la ruta de decaimiento del proceso-r. Los isótopos estables se encuentran en negro y rojo, los marcados en rojo son nucleos-p. [43]

Proceso-s

El proceso-s (slow neutron-capture process) implica la captura de neutrones que son más lentas que el decaimiento (Beta^-).

En este proceso un neutrón se transforma en un protón, lo que aumenta el número atómico en una unidad. Tras alcanzar un núcleo estable, se inicia otra cadena de captura de neutrones, así el proceso sintetiza isótopos estables moviéndose a lo largo de nucleidos en zigzag, cerca del valle de estabilidad. (ver Figura A.2.) [42]

Proceso-r

El proceso-r (rapid neutron-capture process) implica la captura de neutrones que son mucho más rápidas que el decaimiento (Beta^-) y por lo tanto altamente ricos en neutrones, aquí varios isótopos de vida corta son producidos.

El proceso-r complementa la nucleosíntesis del proceso-s explicando el patrón de abundancia solar más allá del Fe, explica también la existencia de isótopos ricos en neutrones de un elemento que están separados de la ruta del proceso s por isótopos de vida corta. Da cuenta de picos adicionales en la distribución de abundancia, desplazados a un número de masa más bajo con respecto a los picos del proceso-s. [43]

Proceso-p

Tras estudios sobre la producción de elementos, fueron encontrados alrededor de 30 nucleidos con deficiencia en neutrones, es decir ricos en protones (núcleos-p). Núcleos que son sistemáticamente evitados por los procesos s y r, requiriendo un mecanismo de síntesis diferente. [42]

Aquí la producción de los elementos puede ser a través del procesamiento de núcleos semillas de los procesos r y s, sea por capturas de protones (p, γ), donde debido a la barrera de Coulomb se debe recurrir a temperaturas muy altas, o por reacciones de emisión de fotoneutrones (γ, n), como el flujo de rayos gamma resultante de una explosión estelar. [42,44] Producir núclidos a partir de semillas más ricas en neutrones depende críticamente de la temperatura, con valores superiores a 1.5×10^9 K para que las fotodesintegraciones tengan lugar en escalas de tiempo commensurables con las evolutivas estelares. [45]

B Datos obtenidos en los experimentos.

A continuación, se muestra a más detalle las gráficas de los espectros obtenidos del experimento desarrollado en el ININ, para los dos detectores a todos los rangos de energías.

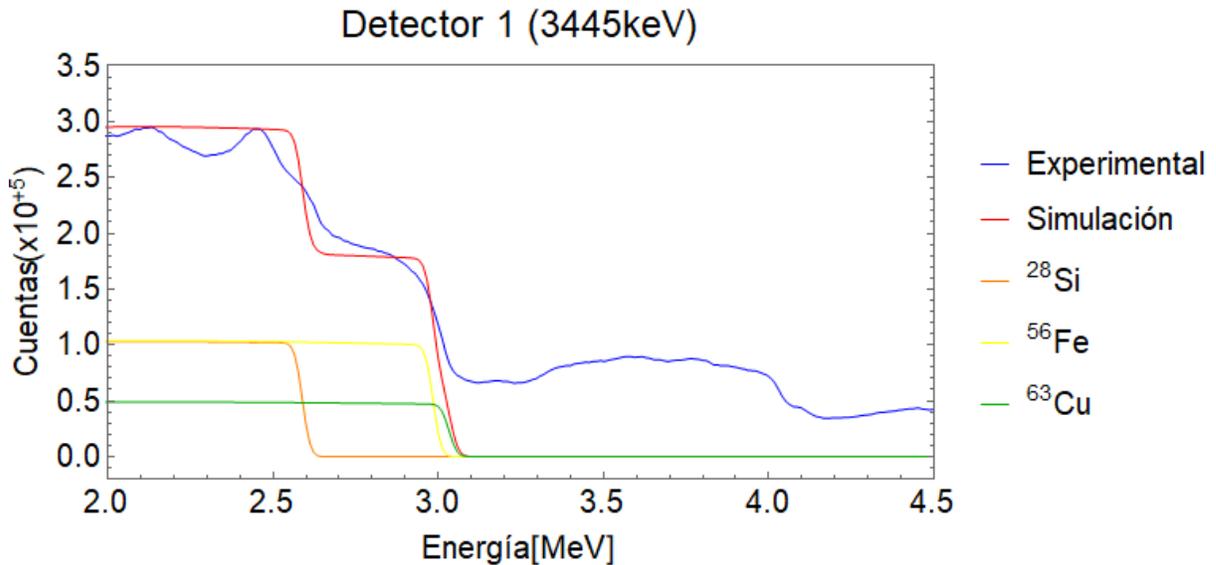


Figura B.1: Espectro detector 1, 3445keV.

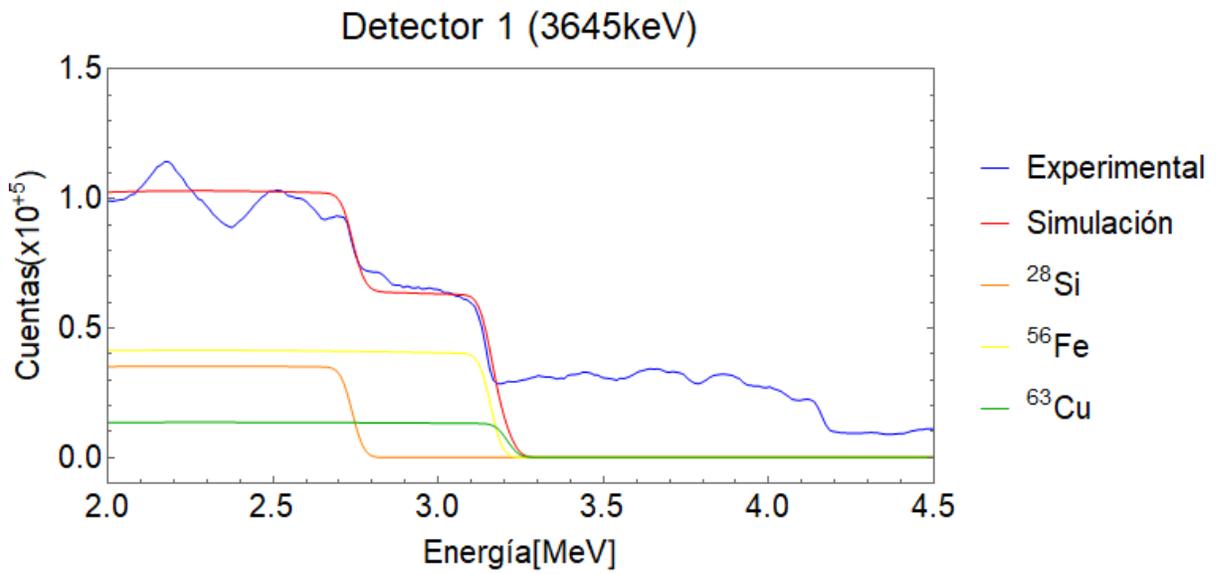


Figura B.2: Espectro detector 1, 3645keV.

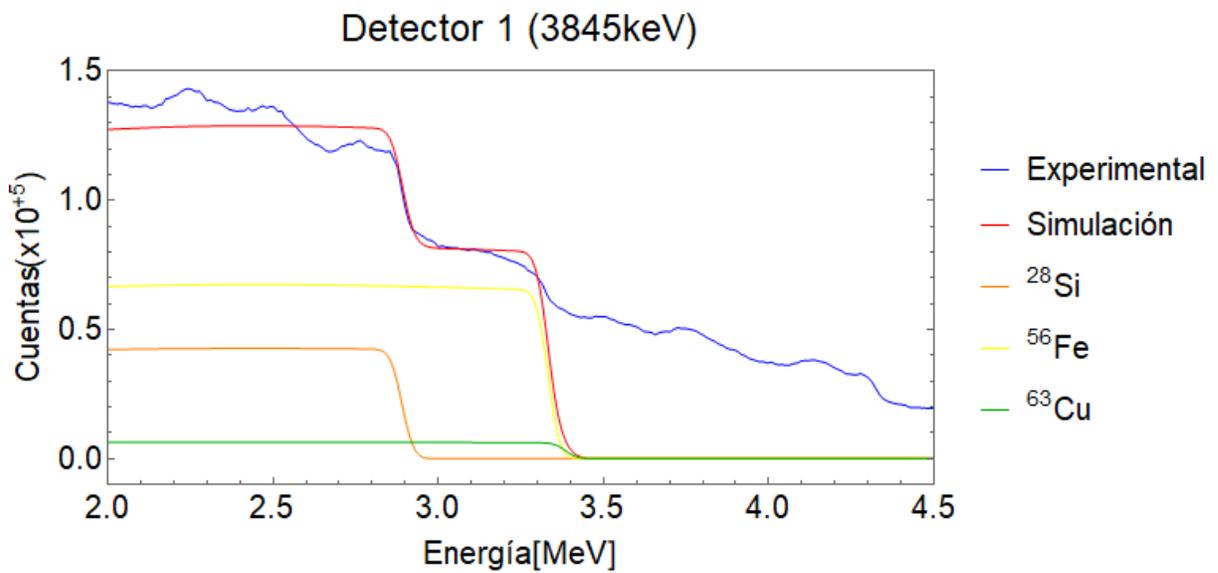


Figura B.3: Espectro detector 1, 3845keV.

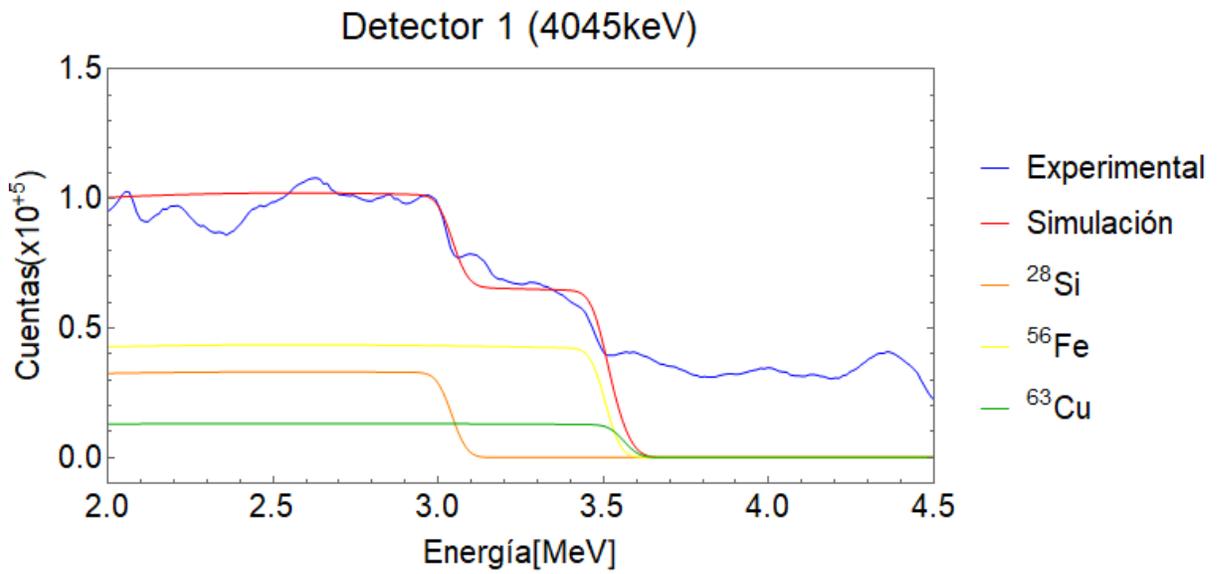


Figura B.4: Espectro detector 1, 4045keV.

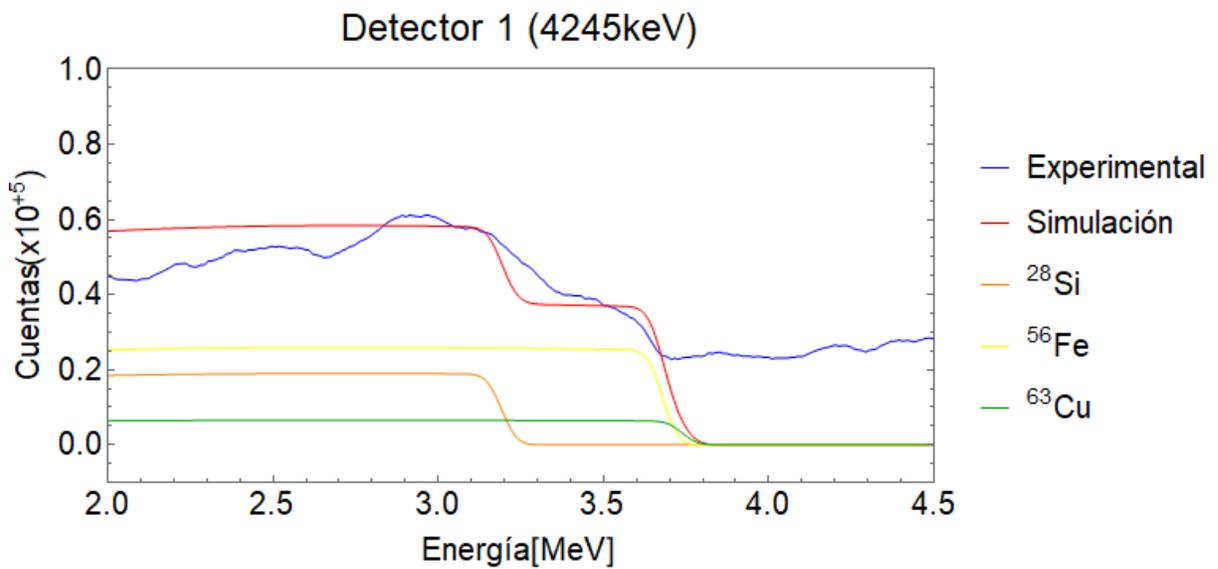


Figura B.5: Espectro detector 1, 4245keV.

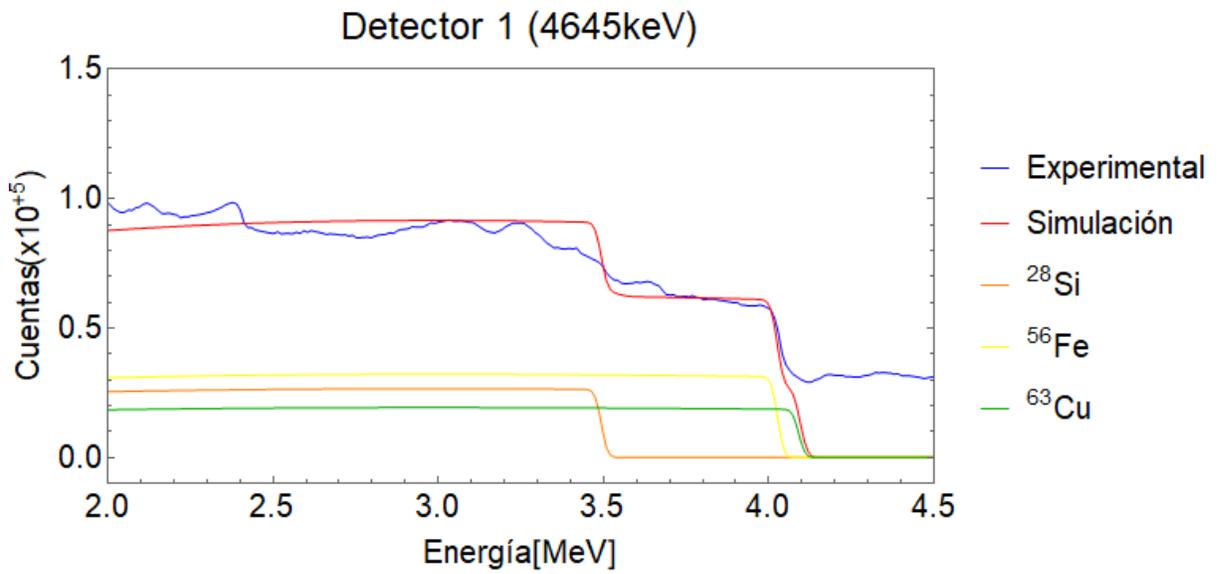


Figura B.6: Espectro detector 1, 4645keV.

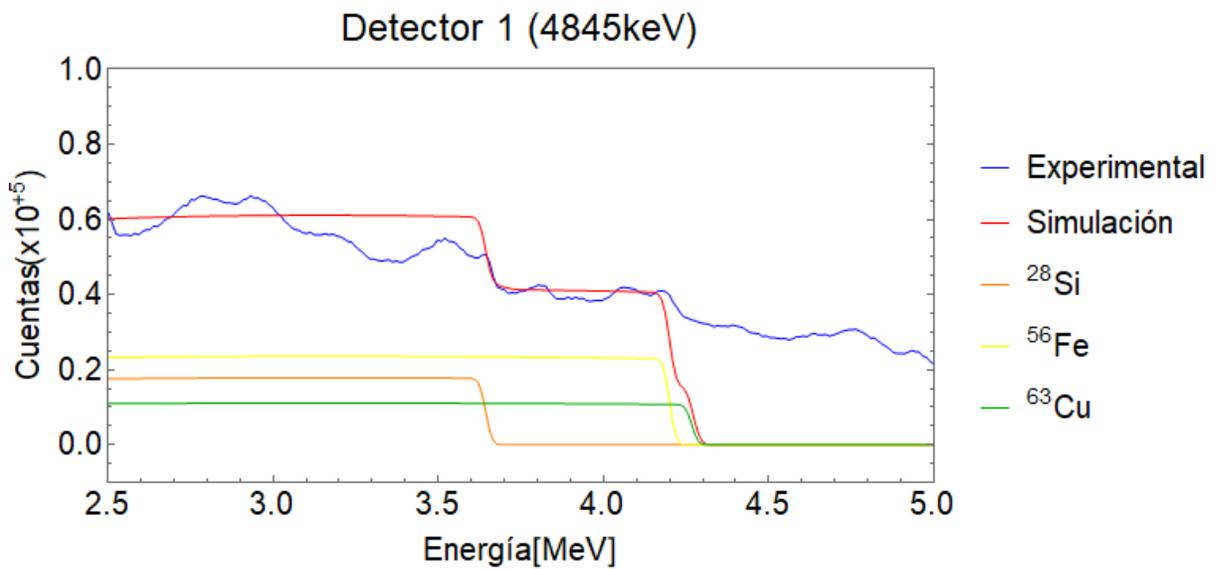


Figura B.7: Espectro detector 1, 4845keV.

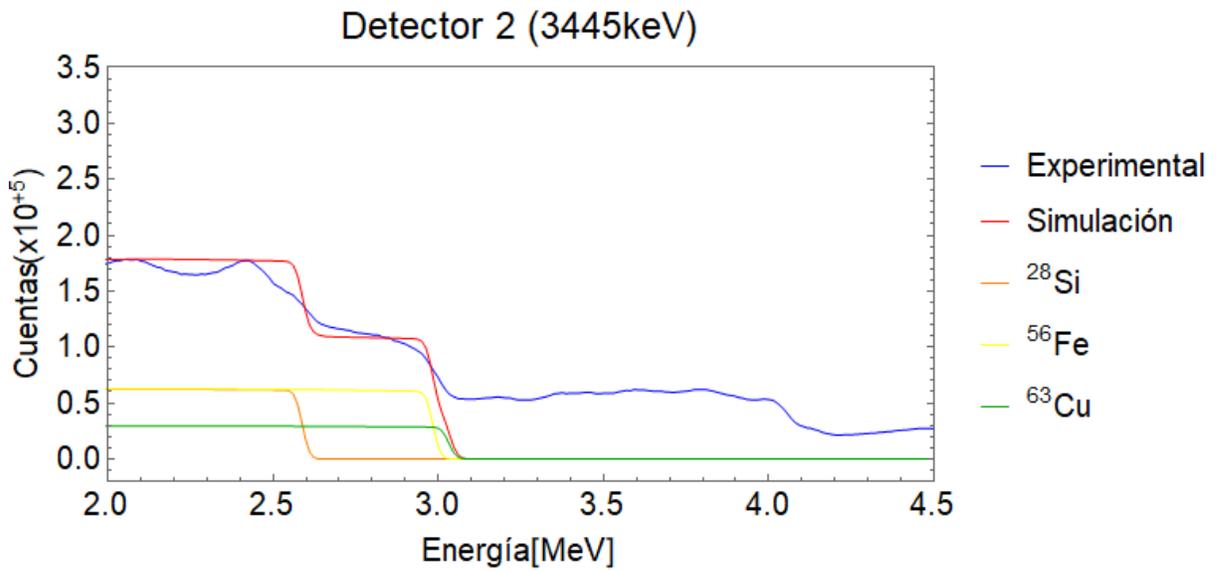


Figura B.8: Espectro detector 2, 3445keV.

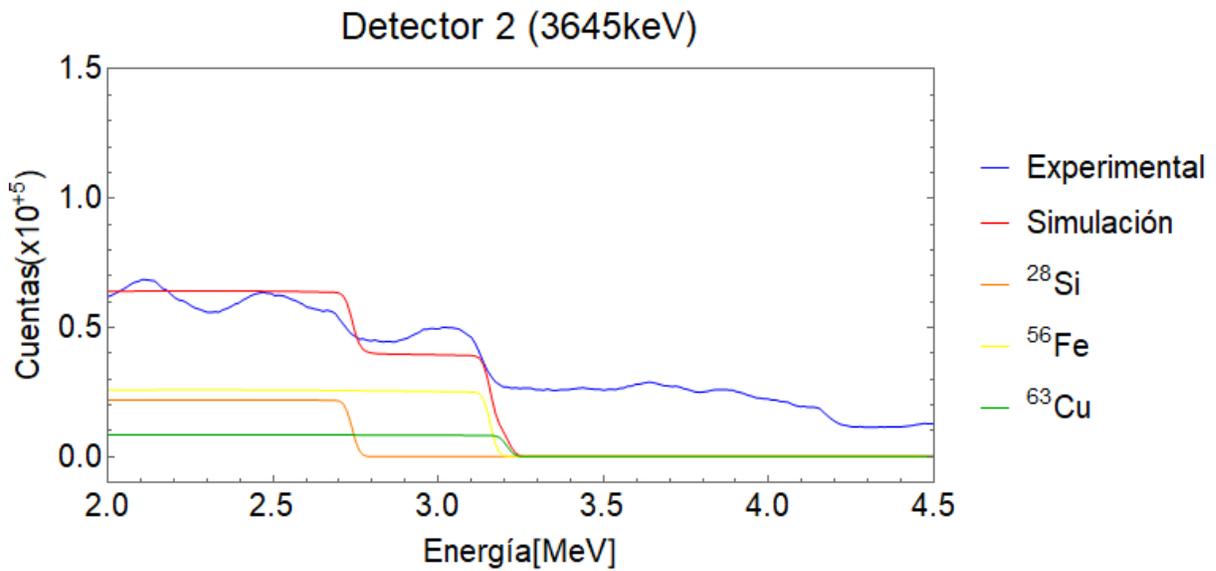


Figura B.9: Espectro detector 2, 3645keV.

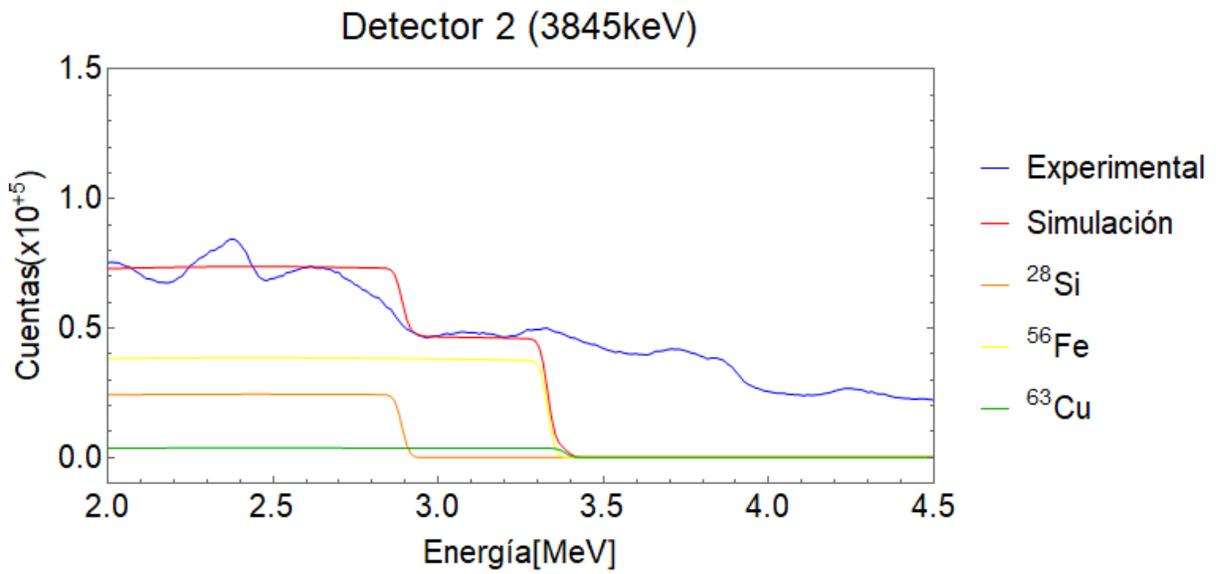


Figura B.10: Espectro detector 2, 3845keV.

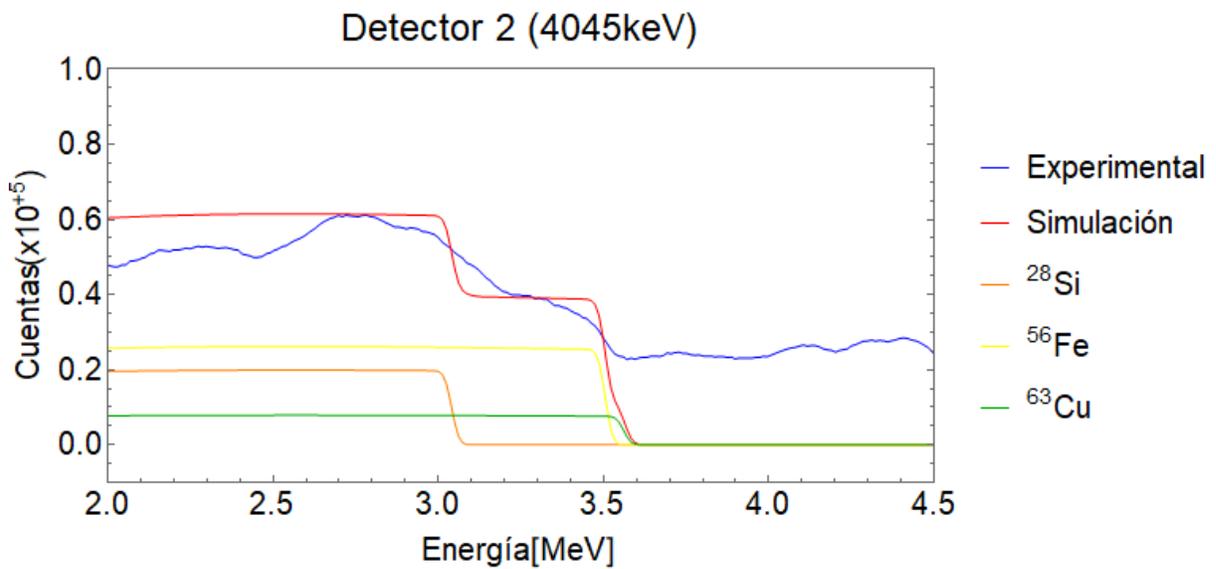


Figura B.11: Espectro detector 2, 4045keV.

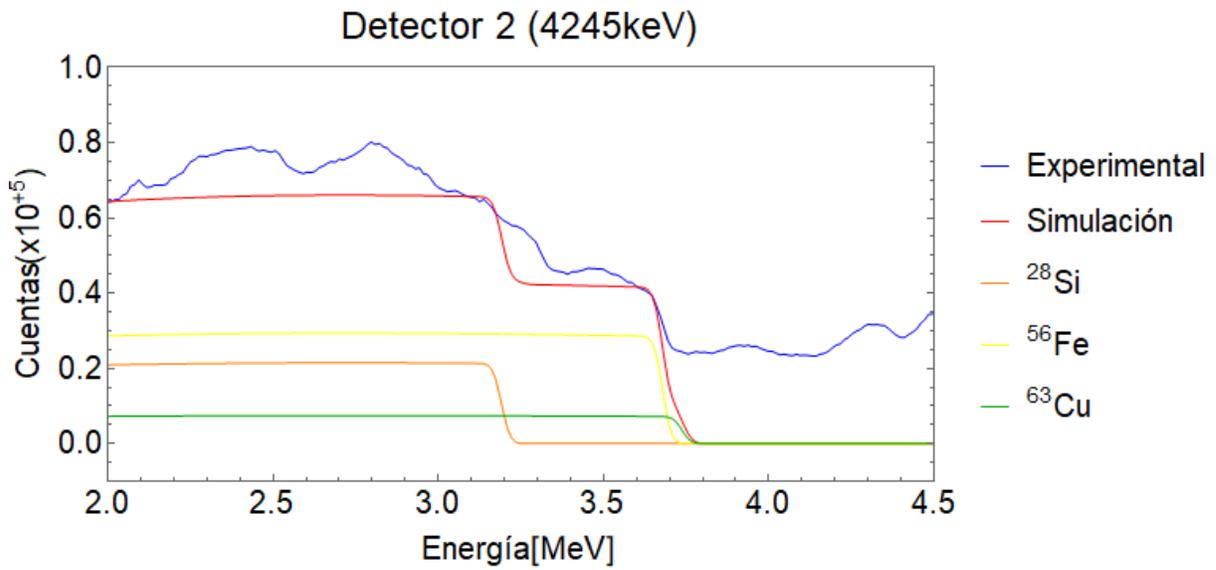


Figura B.12: Espectro detector 2, 4245keV.

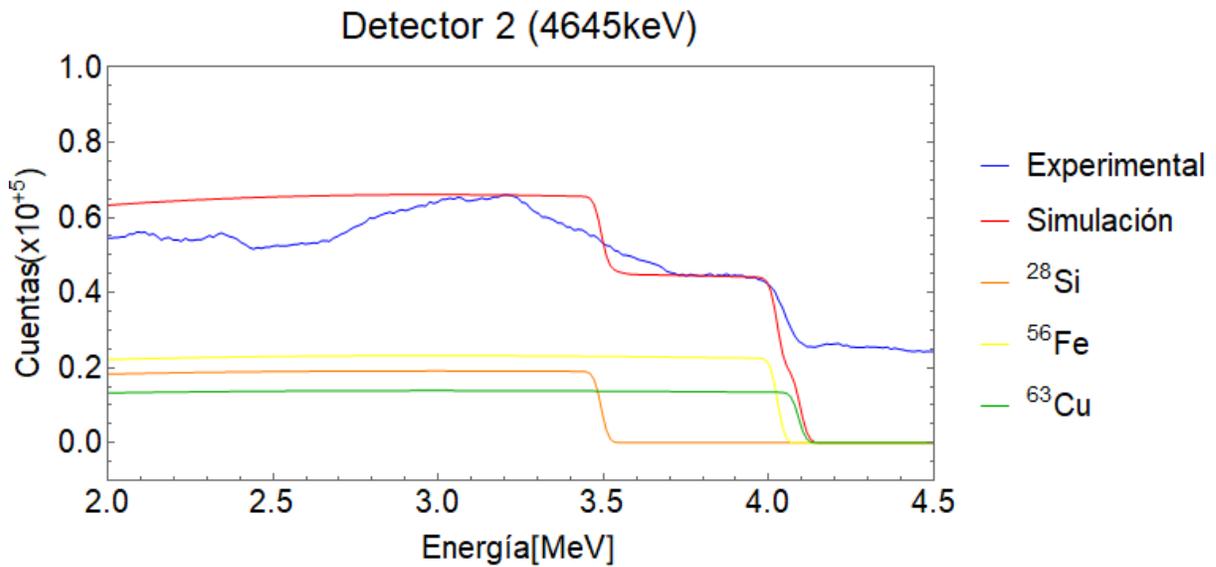


Figura B.13: Espectro detector 2, 4645keV.

Bibliografía

- [1] V. A.-E. et al, “ ^{26}Al production: The allende meteorite (chihuahua) stellar nucleosynthesis and solar models,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1671, pp. 1–6, 2015.
- [2] M. Busso, “Short-lived radioactivities in the early solar system: A fossil record of our origins in stars,” *European Physical Journal Plus*, vol. 133, no. 274.
- [3] T. Lee, D. Papanastassiou, and G. Wasserburg., “Demonstration of ^{26}Mg excess in allende and evidence for ^{26}Al ,” *Geophysical Research Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 109–112, 1976.
- [4] N. Kita, H. Nagahara, S. Togashi, and Y. Morishita, “A short duration of chondrule formation in the solar nebula: Evidence from ^{26}Al in semarkona ferromagnesian chondrules,” *Geochimica et Cosmochimica*.
- [5] S. Russell, G. Srinivasan, G. Huss, G. Wasserburg, and G. MacPherson, “Evidence for widespread ^{26}Al in the solar nebula and constraints for nebula timescales,” *Science*.
- [6] P. Jouhannau, B. Lacour, G. Raisbeck, F. Yiou, H. Banide, E. Brown, and T. Drüeke., “Gastrointestinal absorption of aluminum in rats using ^{26}Al and accelerator mass spectrometry,” *Clin Nephrol*, vol. 40, no. 4, pp. 244–251, 1993.
- [7] N. Priest, R. Talbot, J. Austin, J. Day, S. King, K. Fifield, and R. Cresswell, “The bioavailability of ^{26}Al -labelled aluminium citrate and aluminium hydroxide in volunteers,” *Clin Nephrol*, vol. 9, no. 3, pp. 221–228, 1996.
- [8] V. Araujo-Escalona, L. Acosta, E. Andrade, L. Barrón-Palos, O. de Lucio, F. Favella, A. Huerta, E. López, P. S. Rita, C. Solís, and E. Chávez., “The $^{28}\text{Si}(d,\alpha)^{16}\text{Al}$ reaction,” *Physics C.S.*, vol. 730, p. 012003, 2006.
- [9] V. Araujo-Escalona, L. Acosta, E. Andrade, L. Barrón-Palos, O. de Lucio, F. Favella, A. Huerta, E. López, P. S. Rita, C. Solís, and E. Chávez., “Study of the $^{28}\text{Si}(d,\alpha)^{16}\text{Al}$ nuclear reaction at low energies,” *Phys Procedia*, vol. 90, pp. 421–428, 2017.
- [10] G. Reza, A. Z. Torres, and S. P. et al, “Ams cross-section measurement for the $^{28}\text{Si}(d,\alpha)$ reaction near the coulomb barrier,” *European Physical Journal Plus*, vol. 189, no. 899.

- [11] . G. J. Wasserburg, R. Gallino, and M. Busso., “A test of the supernova trigger hypothesis with ^{60}Fe and ^{26}Al ,” *Astrophysical Journal*, vol. 500, no. 2, pp. 189–193, 1998.
- [12] V. V. Dwarkadas, N. Dauphas, B. Meyer, P. Boyajian, and M. Bojazi., “Triggered start formation inside the shell of a wolf-rayet bubble as the origin of the solar system,” *Astrophysical Journal*, vol. 851, no. 147.
- [13] G. Srinivasan, A. A. Ulyanov, and J. N. Goswami, “ ^{41}Ca in the early solar system,” pp. 67–70, 1994.
- [14] S. V. S. Murty, J. N. Goswami, and Y. A. Shukolyukov., “Excess ^{36}Ar in the efremovka meteorite: A strong hint for the presence of ^{36}Cl in the early solar system,” *Astrophysical Journal*.
- [15] M. Chaussidon, F. Robert, and K. D. McKeegan, “Li and B isotopic variations in an allende cai: Evidence for the in-situ decay of short-lived ^{10}Be and for the possible presence of the short-lived nuclide ^7Be in the early solar system,” *Geochimica*, vol. 70.
- [16] P. M. Jeffery and J. H. Reynolds, “Origin of excess ^{129}Xe in stone meteorites,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 66, no. 10, pp. 3582–3586, 1961.
- [17] J. A. y Sylvie Vauclair., *An introduction to nuclear Astrophysics*. Board, 1980. 1er. Edición.
- [18] A. M. D. y H. D. Holland., *Treatise on Geochemistry.*, vol. 1. Elsevier, 2014. 2da. Edición.
- [19] A. G. W. Cameron, F. K. Thielemann, and J. J. Cowan, “s- and r-process contributions to extinct radioactivities,” *Physics Reports*, vol. 227.
- [20] J. C. Hardy and I. S. Towner, “Superaligned $0^+ \rightarrow 0^+$ nuclear β decays, with precise results for νud and the CKM unitarity,” *Phys. Rev.*, 2015.
- [21] . P. Horvat, P. Kump, and B. Povh, “Low-lying states in ^{26}Al ,” *Nuclear Physics*, vol. 45.
- [22] F. Brut and S. Jang, “Shape-mixing in ^{27}Al nuclei,” *Physics Letters*, vol. 77B, no. 4, pp. 355–358, 1978.
- [23] N. Takahashi, Y. Hashimoto, Y. Iwasaki, K. Sakurai, F. Soga, K. Sagara, Y. Yano, and M. Sekiguchi, “Nuclear structure of ^{26}Al studied by two-nucleon transfer reactions $^{28}\text{Si}(d, \alpha)$ and $^{24}\text{Mg}(^3\text{He}, p)$,” *Physical Review*, vol. 23, no. 4, p. 1305, 1981.
- [24] L. W. Alvarez, “Nuclear k electron capture,” *Physical Review*.
- [25] F. Joliot and I. Curie, “Artificial production of a new kind of radio-element,” *Nature*, vol. 133.

- [26] S. S. Wong, *Introductory Nuclear Physics*. Wiley-VCH, 2004.
- [27] K. S. Krane, *Introductory Nuclear Physics*. Wiley, 1987.
- [28] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer-Verlag, 1992.
- [29] J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton, *Experiments with High Velocity Positive Ions II. The disintegration of elements by high velocity protons*. Royal Society, 1932.
- [30] W. R. Leo, *Electrostatic Accelerators: Particle Acceleration and Detection*. Springer, 2005.
- [31] K. Wille, *The Physics of Particle Accelerators*. Oxford University Press, 2000. 1ra Edición.
- [32] W. Scharf, *Particle Accelerators and their Uses*. Harwood Academic, 1985.
- [33] C. Tuniz, W. Kutschera, D. Fink, G. F. Herzog, and J. R. Bird., “Accelerator mass spectrometry: Ultrasensitive analysis for global science. radiation physics and chemistry,” *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 61.
- [34] L. W. Alvarez., “The early days of accelerator mass spectrometry,” *Physics Today*.
- [35] M. E. O. y Salazar, C. Solís, and E. C. Lomelí., *Espectrometría de masas con aceleradores (Laboratorio Nacional)*. Las prensas de ciencias, 2018.
- [36] S. P. Domínguez., *Medidas de ^{10}Be y ^{26}Al en Espectrometría de Masas con Acelerador de Baja Energía en el Centro Nacional de Aceleradores*. Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear., 2015.
- [37] R. Hellborg and G. Skog, “Accelerator mass spectrometry,” *Published online in Wiley InterScience*.
- [38] E. de Hoffmann and V. Stroobant, *Mass Spectrometry*.
- [39] G. M. Cornejo, *Programa de Simulación de la Trayectoria del haz en el laboratorio del acelerador TANDEM del ININ*. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería., 1996.
- [40] K. Nishiizumi., “Preparation of standars. nuclear instruments and methods in physics,” *Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 223.
- [41] D. D. Clayton, *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*. The University of Chicago Press, 1968.
- [42] J. José, *Stellar Explosions: Hydrodynamics and Nucleosynthesis*. CRC Press, 2016.

- [43] T. Rauscher, *Essential of Nucleosynthesis and Theoretical Nuclear Astrophysics*. IOP Publishing, Bristol, 2020.
- [44] H. Reeves, *Stellar Evolution and Nucleosynthesis*. Gordon and Breach Science Publishers, 1968.
- [45] S. G. Arnould, “The p-process of stellar nucleosynthesis: astrophysics and nuclear physics status,” *Physics Reports*, vol. 384.