

**Núcleos exóticos y los límites de la línea de goteo de neutrones:
Experimento s393 de la colaboración R3B y calibración en
energías de Crystal Ball**

**Exotic nuclei and the neutron drip-line limits: s393 Experiment for
the R3B collaboration and energy calibration of Crystal Ball**

Guillermo Ribeiro Jiménez

g.ribeiro@csic.es

Director: Olof Tengblad

olof.tengblad@csic.es

30-Septiembre-2011

Keywords: s393, Crystal Ball, scintillator, calibration, nuclei, neutron, GSI, unbound

Palabras clave: s393, Crystal Ball, centelleador, calibración, núcleo, neutrón, GSI,
no-ligado

ÍNDICE

1. Halos y Núcleos exóticos
2. Física Relevante
3. Introducción al experimento
4. Introducción a centelleadores y fotomultiplicadores
5. Disposición experimental
6. Crystal Ball
7. Futuros Desarrollos

Resumen

Éste trabajo de máster es el principio de mi tesis, que estará centrada en el análisis de núcleos más allá de la línea de goteo de neutrones. Los datos analizados se obtuvieron en un experimento que tuvo lugar en 2010 en GSI (Darmstadt, Alemania). Éste experimento se realizó en el contexto de la colaboración R3B, que integra un gran número de instituciones de todo el mundo. El propósito de la colaboración es el estudio de la estructura nuclear en reacciones con haces Radioactivos a energías Relativistas.

El objetivo principal de este trabajo de máster ha sido comprender la física en el contexto del experimento y aprender los principios básicos de los detectores utilizados. Especialmente, he concentrado mis esfuerzos en Crystal Ball, una esfera de casi un metro de diámetro formada por 162 centelleadores de NaI que se utilizó como espectrómetro de fotones y protones. He analizado los datos de calibración y obtenido la calibración en energías de los rayos gamma para este detector. Explico el método utilizado para conseguir esta calibración y un resumen de las continuaciones del trabajo en el futuro.

Abstract

This master degree project is the beginning of my PhD thesis, which is going to be focused on the analysis of nuclei beyond the neutron drip-line. The data that is being analyzed were obtained in an experiment that took place in 2010 at GSI (Darmstadt, Germany). This experiment was performed within the framework of the R3B collaboration, which integrates a great number of institutes of the whole world. The aim of the collaboration is the study of the nuclear structure in reactions with Radioactive beams at Relativistic energies.

The main goal of this master work has been to understand the physics context of the experiment and to learn the basic principles of the detectors being used. Especially, I have concentrated my efforts on the Crystal Ball, an almost one metre diameter sphere of 162 NaI scintillators that was used as a photon and proton spectrometer. I have analyzed the calibration data and determined the energy calibration for the gamma ray interaction in this detector. The procedure to achieve this calibration is detailed and the future continuation of this work is outlined.

Índice general

Índice	2
Índice de figuras	4
1. Halos y Núcleos exóticos	6
2. Física Relevante	10
2.1. Reacciones directas: Knockout	10
2.2. Disociación Coulombiana	12
3. Introducción al experimento	13
3.1. Núcleos más allá de la línea de goteo de neutrones	14
4. Introducción a centelladores y fotomultiplicadores	16
5. Disposición experimental	18
5.1. GSI y FRS	18
5.2. Cave C y disposición experimental LAND-ALADIN de la colaboración R3B	20
6. Crystal Ball	27
6.1. Introducción	27
6.2. Características	27
6.3. Electrónica y sistema de adquisición de datos	29
6.4. Calibración en energías	31
6.4.1. Calibración en tiempo y eficiencias	38
7. Futuros desarrollos	39
7.1. Addback	39
7.2. Calibración para protones	39
7.3. Mejora de resolución temporal en los centelladores	40
Bibliografía	40

Índice de figuras

1.1. Tabla de núclidos	6
1.2. Desintegración β	7
1.3. Parábolas de Z frente a energía respecto al nivel fundamental para un A.	8
1.4. Núcleos halo: Radio y dibujo	9
1.5. Estructura nuclear	9
2.1. Reacciones directas de stripping y de knockout	11
2.2. Reacción de knockout	12
2.3. Reacción de disociación coulombiana frente a una reacción en donde intervendría la fuerza nuclear	12
3.1. Reacción de knockout del flúor al oxígeno	14
3.2. Reacción de knockout del carbono al boro y del boro al berilio	15
5.1. Esquema de las instalaciones de GSI	18
5.2. Esquema del separador de fragmentos de GSI(FRS)	19
5.3. Esquema de la disposición del experimento s393 para la colaboración R3B	21
5.4. Primera imagen de la disposición experimental	21
5.5. Diagrama del detector PSP	22
5.6. Imagen del detector de tiempo de vuelo POS	23
5.7. Imagen del dispositivo de selección de blanco	23
5.8. Segunda imagen de la disposición experimental	24
5.9. Esquema del GFI	24
5.10. Tercera imagen de la disposición experimental	25
5.11. Imagen del detector de neutrones LAND	26
6.1. Crystal Ball y blanco	28
6.2. Imagen del módulo en que está un cristal de NaI encapsulado y un fotomultiplicador de Crystal Ball	28
6.3. Diagrama de como se abre Crystal Ball	29
6.4. Electrónica de Crystal Ball	30
6.5. Histograma para el cristal 42 con trigger <i>clock</i>	32
6.6. Histograma de canales del Cobalto-60 para el cristal 42	33
6.7. Histograma de canales del Sodio-22 para el cristal 42	33
6.8. Ajuste lineal para la calibración del cristal 42	34
6.9. Histograma calibrado para el cristal 42 con la fuente de sodio-22	35
6.10. Gráfica del número de cristal frente a su pendiente de calibración	35
6.11. Esquema de la distribución de los cristales en Crystal Ball	36

6.12. Gráfica de Pendiente de calibración frente a los ángulos de los cristales	37
6.13. Factor Doppler en función del ángulo polar θ	37

Capítulo 1

Halos y Núcleos exóticos

Los núcleos forman una inmensa cantidad de la materia conocida en el Universo, lo cual por si solo muestra la importancia que tiene para la ciencia comprender y explicar su formación y estructura. Todo lo que podemos encontrar a nuestro alrededor está compuesto por ellos, ya que son el principal constituyente del átomo. Los núcleos a su vez están formados por *nucleones* (A) que pueden ser de dos tipos: neutrones (N) y protones (Z). Otra característica importante de los núcleos presentes en la mayor parte del Universo es que en su gran mayoría son estables, es decir conservarán su estado actual para siempre o durante escalas de tiempo superiores a las manejadas por el ser humano.

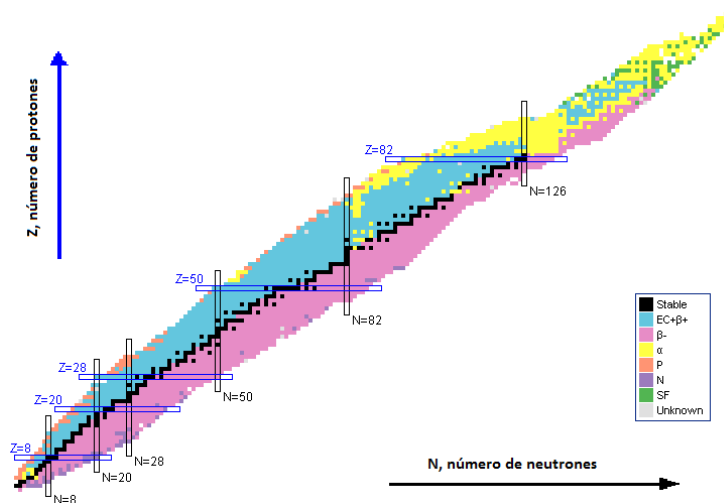


Figura 1.1: *Tabla de núclidos*. El número de neutrones (N), aumenta con el eje X y el de protones (Z), con el eje Y.

Para clasificar la gran cantidad de núcleos que existen en la naturaleza, de la misma forma que la Tabla periódica de los elementos químicos, existe la Tabla de núclidos (ver figura 1.1). A diferencia de lo que nos encontramos normalmente en la naturaleza, la grandísima mayoría de los núcleos representados en la Tabla no son estables. Los núcleos, igual que todos los sistemas físicos, tienden a minimizar su energía, lo que se

consigue mediante las desintegraciones radiactivas hasta que alcanzan un estado en el que no exista un proceso que deje al núcleo en una situación más favorable energéticamente.

La energía de ligadura de un núcleo, es la cantidad de energía necesaria para romperlo y se define como la diferencia entre la masa del núcleo y la de los nucleones, teniendo en cuenta que hay que multiplicar por c^2 . Lo que quiere decir que cuánto más ligado esté un núcleo, mayor será su energía de ligadura. Por lo tanto, para un número másico específico A , habrá una combinación de un número de protones y neutrones que minimizará su energía. Los decaimientos que gobernarán el proceso de minimización de la energía de un núcleo con un número másico específico hasta su núcleo más estable están determinados por la fuerza nuclear débil en las desintegraciones β (ver figura 1.2).

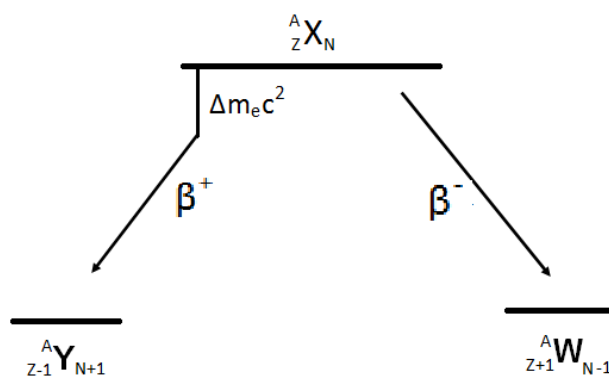


Figura 1.2: *Desintegración β* . En el proceso β^+ se emiten también un positrón y un neutrino electrónico. Para la desintegración β^- se produce la emisión de un electrón y un antineutrino electrónico.

Los núcleos con exceso de protones sufrirán el proceso que convierte a este exceso en neutrones, la desintegración β^+ , y los ricos en neutrones, el que los transforma en protones, la desintegración β^- , conservando el susodicho número másico. Este proceso se puede representar en parábolas como las de la figura 1.3, donde podemos ver que al ir ascendiendo cada paso en las mismas, la energía de ligadura para ese número másico será menor y por tanto, menos estable será el núcleo que ahí se encuentre. Llegará un momento en que dicha energía de ligadura será negativa, ese límite es lo que en la tabla de núclidos es denominado *Línea de goteo*. Ese es el momento en el que los nucleones no disminuirán su energía formando el núcleo, puesto que la energía total del sistema sería superior a la de las partes por separado. Esta es la situación en la que nos encontramos con un núcleo no-ligado, donde el sistema perderá el constituyente que le sobre, intentando alcanzar una situación en que sí que esté ligado. En caso de encontrarnos en el lado de la parábola con muchos protones, este será el que se emitirá, en caso de tratar con un núcleo rico en neutrones, perderemos un nucleón de este tipo.

En los núcleos cercanos a la línea de goteo la energía de ligadura es muy pequeña

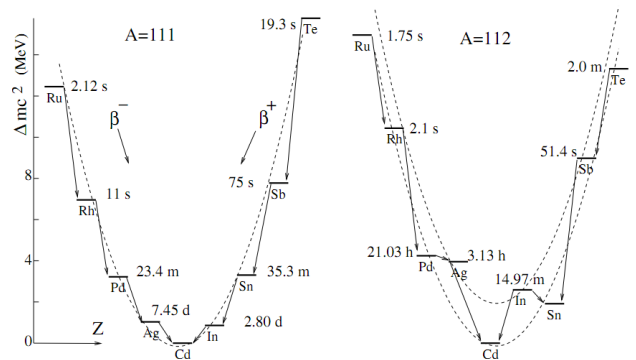


Figura 1.3: Parábolas donde se representan el número de protones frente a la diferencia de energía con el nivel fundamental para un número másico A fijado, para los casos de un número de nucleones par ($A=112$) e impar ($A=111$). Se puede apreciar que los tiempos de desintegración son cada vez menores según ascendemos en las parábolas.

y la fuerza de apareamiento (pairing) tiene una repercusión importante en esta situación. Esta fuerza es una consecuencia de la combinación de la estructura de capas del núcleo y la interacción nuclear fuerte, lo cual produce que la energía de ligadura de un estado nuclear aumente al tener un número par de nucleones en él. Esto desencadena situaciones *exóticas* con núcleos como el ${}^9\text{Li}$, que es inestable, pero ligado. Al añadir un neutrón y encontramos con el ${}^{10}\text{Li}$, el estado fundamental es no-ligado, pero si añadimos uno más, al tener un número par de neutrones, la energía de ligadura se hace positiva y encontramos un estado ligado en el ${}^{11}\text{Li}$.

El ${}^{11}\text{Li}$ no es simplemente un núcleo ligado, es un *núcleo halo*. Estos núcleos tienen un radio mucho mayor que el predicho para los núcleos ligados de su tamaño (ver figura 1.4), también se ha observado que la distribución de carga, en el caso del ${}^{11}\text{Li}$, es casi idéntica a la que tiene el ${}^9\text{Li}$. Para describir este comportamiento se propone una estructura de core (${}^9\text{Li}$) y halo (2 neutrones en este caso) en la que los nucleones del halo se encuentran deslocalizados a una distancia determinada del núcleo [Han87].

Este comportamiento puede ocurrir con dos nucleones o con solo uno como en el caso del ${}^{11}\text{Be} = {}^{10}\text{Be} + n$, los núcleos como el ${}^{11}\text{Li} = {}^9\text{Li} + n + n$ son considerados como *borromeos* ya que solo forman un sistema ligado con los tres componentes, el ${}^{10}\text{Li}$ no es ligado, ni el sistema formado por $n + n$.

Este tipo de fenómenos evidencia que el acercamiento a las líneas de goteo es importante para el estudio de la estructura nuclear, ya que se encuentran comportamientos desconocidos en otras partes de la tabla de núclidos. Es especialmente interesante la línea de goteo de neutrones, puesto que las complicaciones experimentales que supone y la importancia mucho mayor de la fuerza nuclear frente a la coulombiana en esta zona, hace que sea una región mucho más desconocida y por tanto, con nuevas posibilidades.

Para el estudio de la estructura nuclear es para lo que utilizamos los distintos tipos de radiactividad, un ejemplo podemos encontrarlo en la figura 1.5, un núcleo padre

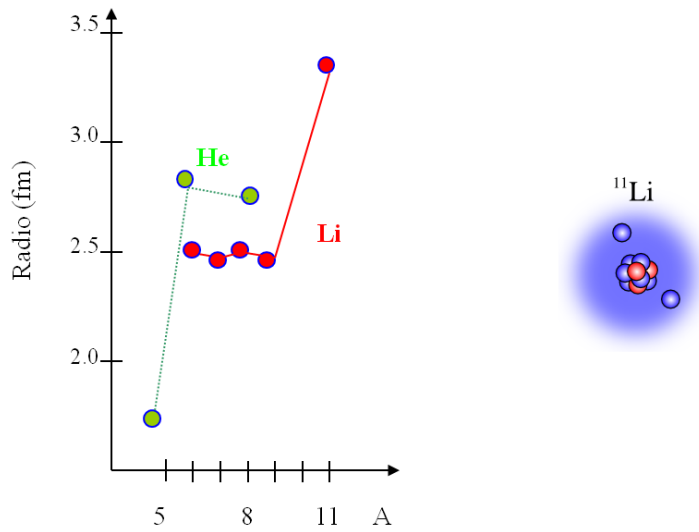


Figura 1.4: A) Representación del número másico (A) frente al radio para núcleos de helio y litio. Se puede apreciar el gran salto en el tamaño de los núcleos al formarse el halo. B) Representación gráfica de un núcleo con halo y borromeo: ^{11}Li

puede sufrir desintegración beta a varios niveles energéticos. En caso de que el núcleo hijo sea ligado, este puede sufrir desexcitaciones con rayos gamma hasta alcanzar un nivel energéticamente más favorable. En caso de encontrarnos con un núcleo hijo no-ligado, este estado no-ligado perderá un nucleón, decayendo el sistema a un isótopo más estable, con una estructura de capas más favorable.

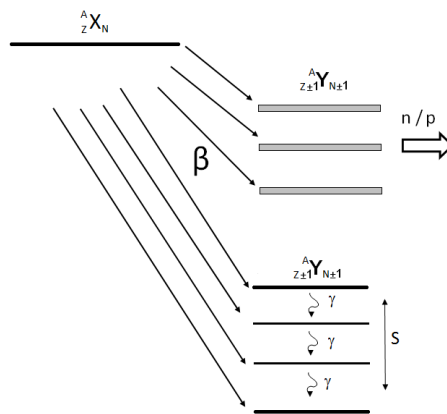


Figura 1.5: Estructura nuclear. Tras la desintegración β , podemos encontrarnos niveles energéticos no-ligados en el núcleo hijo que no están definidos exactamente y emitirán una partícula o un núcleo hijo con niveles ligados que se desexcitará emitiendo rayos gamma hasta el nivel fundamental.

Capítulo 2

Física Relevante

Al hacer incidir un haz de muchos iones por segundo, procedentes de un acelerador de partículas, sobre un blanco, se obtiene toda la variedad posible de reacciones permitidas a esas energías para los isótopos que forman el haz y el blanco, éstos generarán a su vez una gran variedad de núcleos hijos. Como nuestra intención es estudiar núcleos exóticos, debemos conseguir un haz con los isótopos necesarios para que cuando este interaccione con el blanco de reacción, se favorezca la producción de los núcleos en concreto que queramos estudiar .

Para entender mejor la estructura de los núcleos producidos en la reacción, se utilizan dos tipos de blanco: Uno pesado donde la importancia del campo eléctrico y la interacción coulombiana es mayor, y un blanco ligero donde la importancia de la interacción nuclear fuerte es la que predomina normalmente.

2.1. Reacciones directas: Knockout

Cuando dos sistemas nucleares colisionan, si estos están suficientemente tiempo en contacto como para que sus nucleones compartan de forma medianamente uniforme la energía de excitación del sistema, nos encontramos ante una *reacción de núcleo compuesto*, en el caso de que los dos sistemas tengan contacto durante un tiempo muy corto e inmediatamente se separen uno del otro, estamos ante una *reacción directa*. Sus estados internos pueden no sufrir ninguna modificación (scattering elástico), excitarse algunos por contacto (scattering inelástico) o que se transfieran algunos nucleones de un sistema a otro (reacción de transferencia). Dado que en estas reacciones no se forman estados compuestos intermedios, sino que ocurren rápido y pasan directamente del estado inicial al final, se las llama *reacciones directas*, *interacciones directas* o incluso *reacciones periféricas*.

Estas reacciones directas son más probables según se aumenta la energía de la partícula incidente, dado que la longitud de onda asociada disminuye y pueden explorarse áreas más localizadas del núcleo. Este tipo de reacción sucede en un tiempo del orden de 10^{-22} s, las de núcleo compuesto pueden ser hasta seis órdenes de magnitud mayores.

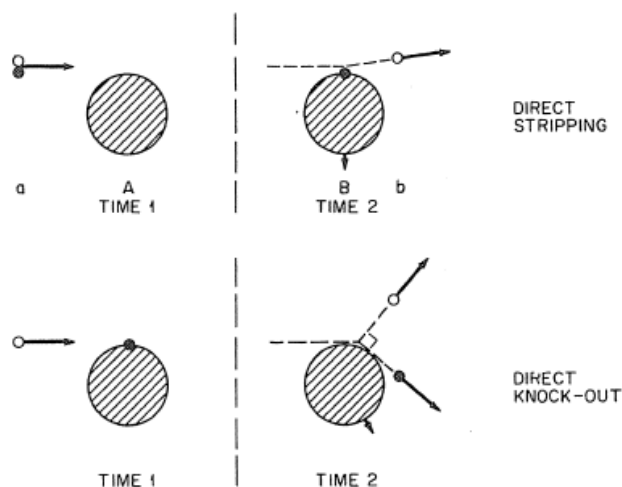


Figura 2.1: Reacciones directas de stripping y de knockout.

Existen tres tipos importantes de reacciones directas[Sat80]:

- **Scattering inelástico** La energía transferida en este caso se utiliza para excitar algún modo colectivo del núcleo como las bandas rotacionales y vibracionales, pero sin modificar la composición.
- **Reacción de Stripping o Pick-up**
Uno o varios nucleones escapan del proyectil al acercarse al blanco. La reacción típica es en la cual sale un neutrón del deuterón y se transfiere al blanco: $A(d, p)B$. Por esta razón también se las llama *reacciones de transferencia*.

- **Reacción de Knockout**

En esta reacción, un proyectil a interacciona con un blanco A, formado por un núcleo en su estado fundamental B con una partícula b en un orbita determinada. Como resultado de la interacción, en primera aproximación para energías cinéticas altas del proyectil, la partícula b queda libre (ver figura 2.2). Para reacciones como $(p, 2p)$, $(\alpha, 2\alpha)$ ó (p, np) , donde la masa del proyectil a es aproximadamente la misma que la de b , al emerger las dos de la reacción se moverán formando un ángulo recto en el sistema de laboratorio: $\theta_a + \theta_b = \frac{\pi}{2}$, siendo también coplanares a la dirección del haz incidente. Detectando ambas partículas en coincidencia y viendo los ángulos que forman, si existe una fuerte preferencia de emisión sobre el ángulo adecuado ($\frac{\pi}{2}$ en caso de partículas de misma masa), podemos interpretar que se produce una reacción de knockout.

A esta reacción también se la llama de *scattering cuasi-libre*, dado que en la interacción entre el proyectil a y la partícula expulsada b , ésta queda aproximadamente libre sin interacción. Este tipo de reacción necesita de energías altas de entre 100 y 1000 MeV/nucleón y altas intensidades del haz para poder hacer medidas en coincidencia.

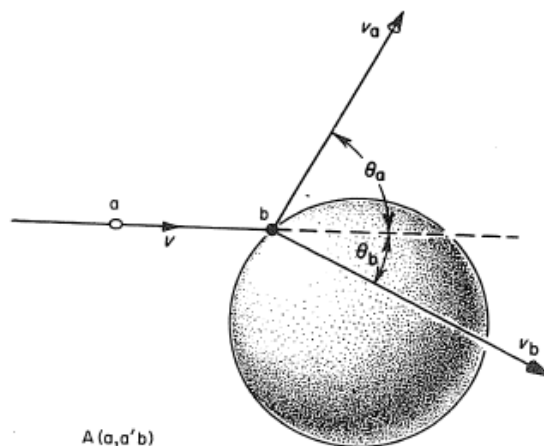


Figura 2.2: Ilustración de una reacción de knockout ($a, a'b$). Se puede ver que $\theta_a + \theta_b = \frac{\pi}{2}$, tal y como ocurre con las situaciones en que las partículas a y b son de la misma masa como en las reacciones $(p,2p)$ ó (p,pn) .

2.2. Disociación Coulombiana

Este método se utiliza principalmente para núcleos exóticos en reacciones normalmente de interés astrofísico, ya que permite medir de forma indirecta las tasas de determinadas reacciones muy difíciles o imposibles de medir directamente. Dada la dificultad de medir estas reacciones de captura radiativa de forma $b + c \rightarrow a + \gamma$, se reproduce el proceso en el sentido inverso en el tiempo: $a + \gamma \rightarrow b + c$. Se hace pasar un proyectil rápido cerca de un blanco pesado de Z alta, el campo electromagnético que produce excitará el núcleo del proyectil, que se desintegrará en dos fragmentos. Si además se utilizan proyectiles con alta energía, se puede conseguir que los fragmentos b y c salgan con energías suficientemente altas (a velocidades parecidas a las del haz) que faciliten su detección posterior.

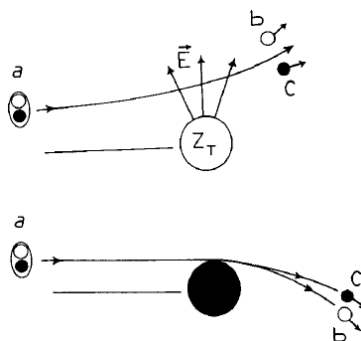


Figura 2.3: Reacción de disociación coulombiana frente a una reacción en donde intervendría la fuerza nuclear.[Ber88]

Capítulo 3

Introducción al experimento

El experimento s393, se realizó entre el 30 de Agosto y el 12 de Septiembre de 2010 en las instalaciones del GSI (Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung), en Darmstadt, Alemania. Está enmarcado en el contexto de la colaboración R3B(Reactions with Relativistic Radiactive Beams)[R3B10]. El objetivo del experimento era el estudio de núcleos ligeros (desde $Z=4$ hasta $Z=10$), ricos en neutrones utilizando medidas en cinemática completa, para lo que se utilizó el montaje LAND/R3B de la Cave C de GSI.

Los intereses del experimento son los siguientes:

- **Medida de las tasas de reacción de (n, γ) para el proceso-R de la nucleosíntesis.**

El objetivo es medir las tasas de algunas de las reacciones más importantes en el proceso rápido de la nucleosíntesis con isótopos de carbono ricos en neutrones, utilizando disociación coulombiana.

- **La estructura de capas y factores espectroscópicos en núcleos exóticos ligados.**

La intención era estudiar niveles energéticos y los factores espectroscópicos correspondientes para toda la cadena ligada del oxígeno desde el ^{14}O al ^{24}O haciendo uso de las reacciones $(p, 2p)$ y (p, pn) .

- **Estudio de la formación de estructuras en los isótopos ricos en neutrones del berilio.**

Los núcleos de berilio estables, forman una estructura que se comporta como si fuese una agrupación de dos núcleos alfa con un solo potencial conjunto. Se intenta estudiar que ocurre al ir enriqueciendo con neutrones este sistema, podríamos volver a una estructura más similar a la mostrada por el modelo de capas o estos neutrones podrían moverse en el potencial global formado por las dos partículas alfa.

Se utilizaban reacciones $(p, p\alpha)$, para obtener la distribución de momentos de las partículas dispersadas que es lo que nos dará información sobre la estructura de los núcleos.

- **Núcleos más allá de la línea de goteo de neutrones.**

El objetivo aquí es conseguir mediante reacciones de knockout varios isótopos no-ligados del berilio, boro y oxígeno.

3.1. Núcleos más allá de la línea de goteo de neutrones

Un experimento reciente sobre un isótopo del litio no-ligado [Aks08], muestra que las reacciones de knockout de protones pueden utilizarse para poblar sistemas no-ligados a uno e incluso dos pasos más allá de la línea de goteo de neutrones. La intención en este experimento era llevar este método de reacciones de knockout a altas energías a regiones un poco más altas en la tabla de núclidos es decir, isótopos no-ligados de berilio, boro y oxígeno, concretamente $^{13,15,16}\text{Be}$, ^{16}B y $^{25,26}\text{O}$. El interés para el futuro desarrollo de mi tesis se centra en estos núcleos exóticos más allá de la línea de goteo.

En la cadena del oxígeno existe un hueco casi desconocido entre el ^{24}O y el doblemente mágico ^{28}O (el cual aún no se ha podido demostrar si se trata de un núcleo ligado), en este intervalo la información existente se limita a unas pocas medidas. El estado fundamental no-ligado del ^{25}O ha sido observado recientemente [Hof08] utilizando reacciones de knock-out de protones a partir de un haz de flúor (^{26}F) con blanco de berilio. Se observó una resonancia en el espectro de $^{24}\text{O} + n$, correspondiente a una energía de decaimiento de neutrones de 770 keV de anchura 172 keV. Se ha establecido que para N=16 el hueco entre su última capa ocupada y la siguiente (*shell gap*) es 4.86 ± 0.13 MeV, mediante la diferencia energética entre los orbitales $1s_{1/2}$ y $0d_{3/2}$. Esta energía se corresponde con los cálculos del modelo sd de capas. Sin embargo, esta interacción también predice que el estado fundamental del ^{26}O es ligado, con una energía para los dos neutrones de aproximadamente 1 MeV, lo cual contradice los datos experimentales que muestran que este núcleo no es realmente ligado. El objetivo es medir la reacción $^{26}\text{F}(p, 2p)^{25}\text{O}$ con mejor estadística y resolución que las medidas actuales y a su vez, observar un número suficiente de sucesos con ^{26}O que nos permita medir su masa y anchura mediante la reacción $^{27}\text{F}(p, 2p)^{26}\text{O}$.

^{24}F 0.34 s	^{25}F 50 ms	^{26}F 10.2 ms	^{27}F 4.9 ms	^{28}F unbound	^{29}F 2.6 ms
^{23}O 82 ms	^{24}O 61 ms	^{25}O unbound	^{26}O unbound		

Figura 3.1: Reacción de knockout del flúor al oxígeno

El estado fundamental del sistema no ligado ^{16}B [Lec09] ha sido investigado mediante la extracción de un protón a partir de un haz de 35 MeV/nucleón de ^{17}C sobre un blanco de carbono. En la reconstrucción del decaimiento del ^{16}B por emisión de un neutrón, se aprecia un pico de energía 85 keV por encima del umbral de emisión de neutrones, es decir 85 keV por encima del límite en el que el núcleo es ligado, que probablemente se deba a una resonancia muy estrecha ($\Gamma \sim 100$ keV) que decae por

emisión de neutrones de onda-d. Esto se va a intentar reproducir con los datos provenientes del experimento.

Recientemente en GSI se ha estudiado el núcleo ^{13}Be utilizando reacciones de extracción de un neutrón utilizando blancos de carbono [Sim08] y de hidrogeno [Aks]. Esto ha revelado una estructura complicada, llena de resonancias para el sistema $^{12}\text{Be} + n$. Dadas las incognitas sobre la estructura del ^{13}Be , se intentará encontrar nueva información utilizando coincidencia γ y reacciones de knockout de un protón desde el ^{14}B .

También se van a estudiar los núcleos de $^{15,16}\text{Be}$ utilizando reacciones de knockout de pérdida de dos protones desde el ^{17}C , y desde el ^{17}B perdiendo un protón y un neutrón ó tan solo un protón.

^{11}C 20.4 m	^{12}C	^{13}C	^{14}C 5730 y	^{15}C 2.45 s	^{16}C 0.747 s	^{17}C 193 ms	^{18}C 92 ms
^{10}B	^{11}B	^{12}B 20.20 ms	^{13}B 17.33 ms	^{14}B 13.8 ms	^{15}B 10.4 ms	^{16}B unbound	^{17}B 5.1 ms
^9Be	^{10}Be 1.6 10^6 y	^{11}Be 13.8 s	^{12}Be 23.6 ms	^{13}Be unbound	^{14}Be 4.35 ms	^{15}Be unbound	^{16}Be unbound
^8Li 840 ms	^9Li 179 ms	^{10}Li unbound	^{11}Li 8.5 ms	^{12}Li unbound	^{13}Li unbound		
^7He unbound	^8He 119 ms	^9He unbound	^{10}He unbound				
^6H unbound	^7H unbound						

Figura 3.2: Reacción de knockout del carbono al boro y del boro al berilio.

Capítulo 4

Introducción a centelleadores y fotomultiplicadores

Los detectores más utilizados en el experimento s393 y en este trabajo de master, son centelleadores y fotomultiplicadores, por esta razón, a continuación voy a hacer una introducción a los principios fundamentales de su funcionamiento [Leo87][Kno00].

Un centelleador es un material que muestra luminiscencia cuando es traspasado por radiación ionizante, esto quiere decir que el material absorbe toda o parte de la energía de la radiación y la reemite en forma de luz visible. Si la luz es reemitida en un espacio de tiempo muy reducido (del orden de 10^{-8} s o menos), el proceso atómico responsable será la fluorescencia. En caso de que el proceso sea más lento, debido a que el estado excitado es metaestable, estaremos hablando de fosforescencia. En general, el proceso de emisión de la luz viene gobernado, en primera aproximación por un decaimiento exponencial,

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} \exp\left(\frac{-t}{\tau_d}\right),$$

siendo N el número de fotones emitidos en el tiempo t, N_0 el número total de fotones emitidos inicialmente y τ_d la constante de decaimiento. Normalmente el tiempo de decaimiento es mucho más lento que el de subida en la mayor parte de los materiales, por lo que hemos asumido este último como cero.

Existen multitud de tipos de centelleadores: Orgánicos (Líquidos, cristales, plásticos), gaseosos, inorgánicos. Una lista de las propiedades fundamentales que diferencian algunos de los centelleadores inorgánicos más comunes puede verse en la tabla 4.1.

Un detector de centelleo consiste en un cristal centelleador acoplado a un fotomultiplicador. Un fotomultiplicador suele consistir en un fotocátodo que recoge cada fotón y emite un electrón por efecto fotoeléctrico, un grupo de dinodos que provocan una cascada electrónica y finalmente un anodo donde se recoge la señal electrónica que ha sido multiplicada. La corriente obtenida al final del fotomultiplicador es lineal, es decir, es directamente proporcional al número de fotones incidentes en el fotocátodo.

	<i>NaI</i>	<i>BGO</i>	<i>CsI</i>
Producción de luz(fotones/MeV)	38000	8200	65000
$\tau_d(\mu s)$	0.23	0.3	0.68(64%),3.34(36%)
Longitud de onda de máxima emisión (nm)	415	480	540

Tabla 4.1: Ejemplos de centelleadores inorgánicos[Kno00]

En general, un centelleador emite una señal de luz que será directamente proporcional a la energía depositada por la partícula ionizante. Como el fotomultiplicador también es lineal, la amplitud de la señal eléctrica que obtenemos al final, será también proporcional a esta energía. Es por esto que un centelleador puede funcionar como espectrometro de energía. Los detectores de centelleo también son rápidos en su respuesta y tiempo de recuperación en comparación con otro tipo de detectores. Estos también permiten distinguir entre tipos de partículas con distinto poder ionizante debido a los cambios en la fosforescencia. También pueden utilizarse para señales de tiempo de vuelo.

Un detector de centelleo, por tanto, suele tener las siguientes características:

- Alta eficiencia de conversión de energía de excitación a luz fluorescente.
- Ser transparente a su radiación fluorescente para permitir que pase a través del cristal de centelleo.
- Un fotomultiplicador que responda al rango espectral del cristal.
- Tener una constante de decaimiento pequeña.
- Muchos son higroscópicos (NaI, CsI(puro), LaBr, LaCl,...) y necesitan un encapsulamiento que evite que se humedezcan.

Capítulo 5

Disposición experimental

5.1. GSI y FRS

GSI es una instalación fundada en Diciembre de 1969 por el Gobierno Federal de Alemania en el estado de Hessen. Este centro es reconocido por la creación de elementos (super) pesados como el Bohrio, Hassio, Meitnerio, Darmstadtio, Roentgenio y Copernicio. También ha sido el impulsor de nuevas formas de tratamiento de cancer de cabeza y cuello. En sus instalaciones, además de proyectos sobre Física Nuclear, se trabaja en física de plasmas, materiales, biofísica, física atómica y física teórica.

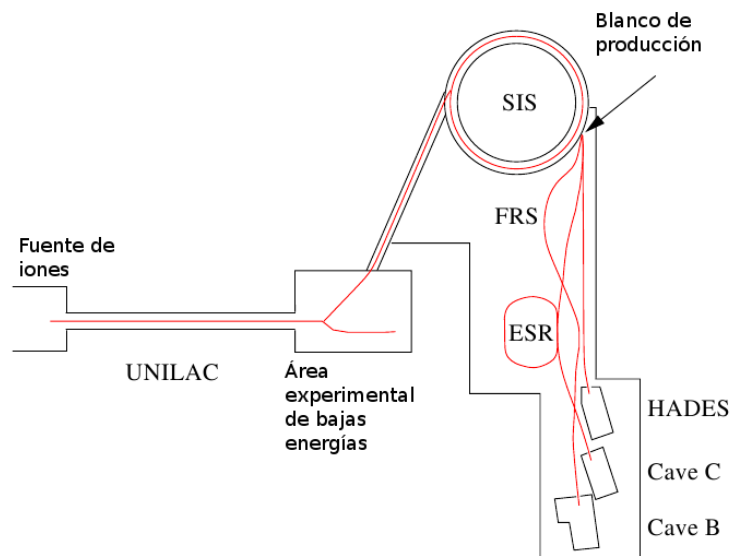


Figura 5.1: Esquema de las instalaciones de GSI.

El experimento s393 se hizo con un haz primario de ^{40}Ar que proviene de la fuente de iones (Figura 5.1) con una intensidad de 10^{10} s^{-1} , que es preacelerado en el Universal Linear ACcelerator (UNILAC), para inyectarlo en el sincrotrón de iones pesados (SIS: SchwerIonenSynchrotron), este es capaz de acelerar todos los iones estables entre

el hidrógeno y el uranio hasta energías de entre 1-4.5 GeV/nucleón [Gei92]. Al salir, los iones impactan sobre un blanco de producción y el haz secundario resultante, que contendrá una gran cantidad de especies nucleares, entra en el separador de fragmentos (FRS).

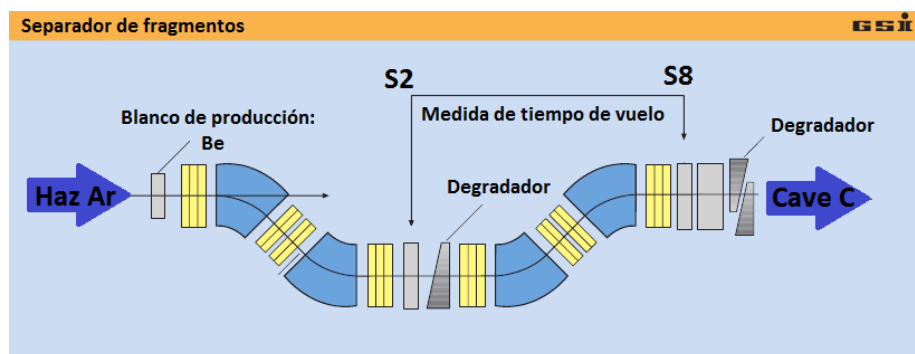


Figura 5.2: Esquema del separador de fragmentos (FRS)[GSI97]. Las zonas azules y amarillas son los dipolos y cuadrupolos magnéticos respectivamente.

Para seleccionar estos núcleos se utiliza el FRS (FRagment Separator)(Figura 5.2), un espectrómetro magnético acromático con un poder de resolución del momento de 1500 para una emitancia de $20\pi \text{ mm mrad}$ que permite separar los núcleos utilizando dipolos y cuadrupolos magnéticos, ajustando el campo magnético para separar los diferentes núcleos según la relación A/Z que queremos conseguir. La proporción entre estas dos magnitudes y su relación con los parámetros manejados en el separador de masas, se puede deducir de equilibrar la fuerza magnética (producida por los imanes del FRS) con la fuerza centrípeta:

$$F = qvB = \frac{mv^2}{\rho} \rightarrow B\rho = \frac{m \cdot v}{q} \approx v \frac{A}{Z}$$

Siendo B el campo magnético, ρ es el radio de la trayectoria, que vendrá determinado por la geometría del FRS, $m \cdot v$ el momento de la partícula y q la carga de la misma, la velocidad del núcleo ionizado v será aproximadamente constante.

Como puede verse también en la Figura 5.2, en la primera parte del FRS, está el primer par de dipolos que desvían el haz aproximadamente 30° que se utilizan para separar las especies nucleares, para medir la posición del haz, el tiempo y la pérdida de energía, se usan centelleadores (S2). En la segunda parte, donde está el segundo par de dipolos, se cancela la dispersión que se produce en la primera de forma que la salida del separador de fragmentos sea acromática, donde se vuelve a medir la posición horizontal del haz, el tiempo y la pérdida de energía utilizando otro centelleador(S8). En caso de que se requiera un haz puro al final del separador de fragmentos, se introducen degradadores tras la primera parte (normalmente, de aluminio, concretamente $AlMg_3$) y dado que la pérdida de energía en ellos depende de Z^2 (ver fórmula de *Bethe-Bloch* [Leo87]) la rigidez magnética ($B\rho$) de cada ión será diferente en la segunda parte del FRS, permitiendo conseguir un haz monocromático.

En el caso de este experimento los iones de argón se aceleraban hasta una energía de 490 MeV/nucleón y tras atravesar el blanco de producción de berilio de espesor 4011 mg/cm^2 los isótopos resultantes de esta primera reacción se dirigen y seleccionaban con el FRS hacia la zona experimental de la Cave C.

5.2. Cave C y disposición experimental LAND-ALADIN de la colaboración R3B

Este experimento se enmarca dentro de la llamada *cinemática inversa*, como los núcleos objetivo de la investigación son radiactivos nos es imposible utilizarlos como blanco para su estudio. Por lo tanto los utilizaremos para bombardear con ellos un blanco estable.

Se utiliza un haz primario estable (^{40}Ar) que al hacerlo incidir sobre el blanco de producción (berilio) nos dará una gran variedad de núcleos, entre los que estará el núcleo radiactivo que sea nuestro objetivo y que seleccionaremos con el FRS. Estos núcleos, al estar acelerados, a pesar de ser radiactivos llegarán hasta el blanco secundario (dentro de Crystal Ball, ver capítulo 6) , donde se producirán las reacciones a estudiar. Éste es un experimento que utiliza *cinemática completa*, lo que quiere decir que con la disposición experimental se pretende conseguir toda la información que suministran los núcleos y partículas antes de la reacción y después de la misma.

Durante el experimento se utilizaron tres blancos de reacción: Plomo, carbono y CH₂. Las medidas principales para las reacciones de knockout y de scattering cuasi-libre se hicieron con CH₂. El blanco pesado de Plomo permite producir disociación Coulombiana. El blanco de carbono, más ligero, nos da la posibilidad de extraer la contribución de la interacción nuclear a la sección eficaz que se mida con el Plomo. También se hicieron medidas sin blanco para poder sustraer el fondo producido por reacciones fuera del blanco. La combinación de los datos conseguidos con estas distintas situaciones nos permitirá resolver el problema del análisis de los núcleos.

La disposición del experimento s393 en la Cave C es la que viene esquematizada en la figura 5.3.

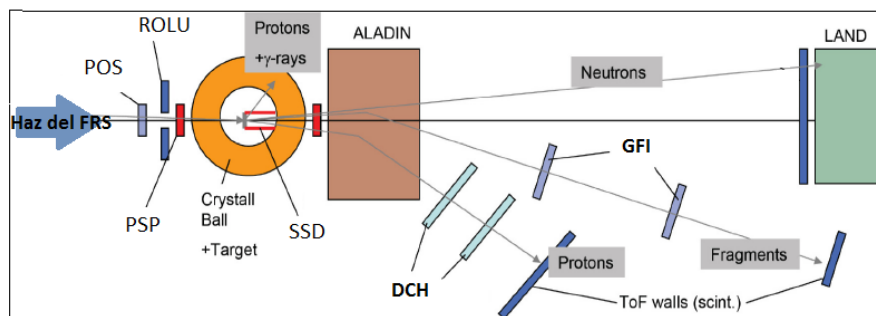


Figura 5.3: Esquema de la disposición experimental[R3B10]

A continuación voy a hacer una pequeña descripción de cada uno de los detectores utilizados en el experimento.

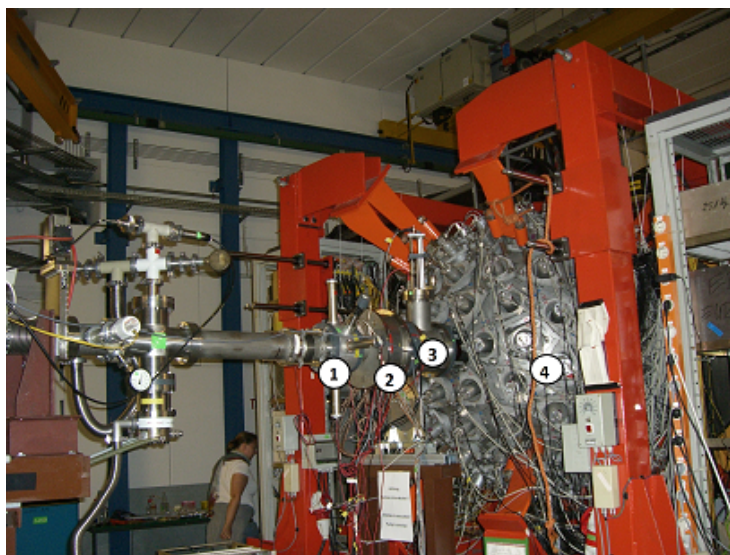


Figura 5.4: Primera imagen de la disposición experimental. El número 1 corresponde al PSP, número 2 al ROLU, número 3 al POS y número 4 Crystal Ball

- **PSP:** Position Sensitive silicon Pin Diode (Número 1 en la Figura 5.4)

Este es el primer detector que tenemos en nuestro montaje experimental, nos da información del haz incidente de dos maneras:

- La posición en dos dimensiones de los iones que pasan a su través, lo que permite reconstruir la dirección del haz radioactivo.

- Carga (Z) de los isótopos que lo atraviesan, mediante la energía que estos depositan en el detector, teniendo en cuenta la fórmula de *Bethe-Bloch* [Leo87].

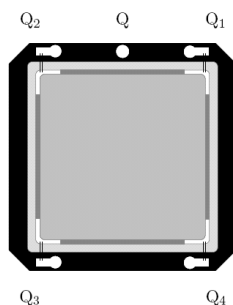


Figura 5.5: *Diagrama del detector PSP*. Pueden verse en las esquinas del detector los contactos donde se recoge la carga. Los contactos Q_{1-4} permiten reconstruir la posición y determinar la dirección que lleva el haz al pasar por el PSP. El contacto Q nos permite medir la pérdida de energía.

Consiste en una placa de silicio tipo n, con iones de boro en su parte frontal formando una unión p-n, haciendo que esta parte funcione como ánodo, mientras que la parte posterior funciona como cátodo. La carga depositada se lee en las cuatro esquinas del ánodo, suponiendo que la carga depositada es proporcional a la distancia entre donde impacte el ión y el electrodo, podemos reconstruir la posición del ión incidente.

La carga también se recoge en un contacto en la cara del cátodo, que es la que estará directamente relacionada con la pérdida de energía en el detector.

- **ROLU:** Rechts, Oben, Links, Unten.[derecha, arriba, izquierda, abajo](Número 2 en la figura 5.4)

Este detector lo forman cuatro centelleadores móviles de plástico, que se utilizan para definir el tamaño final que queremos aceptar del haz. Cualquier partícula que se salga del área que se intenta que tenga el haz impactará contra alguno de los cuatro centelleadores del ROLU, lo que nos dará una señal que podemos utilizar para hacer un trigger de exclusión de sucesos que no sean limpios.

- **POS:** POSition detector (Número 3 en la figura 5.4)

Este detector es un centelleador cuadrado de plástico (2.5x2.5cm), con un fotomultiplicador a cada lado (ver figura 5.6) que se encarga de recoger la luz de centelleo. El POS se utiliza como inicio o fin de medidas de tiempo de vuelo (ToF), también podría usarse para determinar posiciones de forma similar a como se utiliza el PSP, pero actualmente solo se utiliza este último.

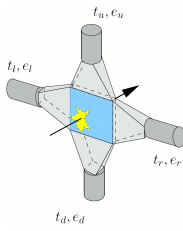


Figura 5.6: *Imagen del detector de tiempo de vuelo POS.*

- **Crystal Ball**(Número 4 en la figura 5.4)

Es una esfera de detectores de centelleo de NaI, se encarga principalmente de medir los rayos gamma que provienen de las interacciones con el blanco de reacción que se encuentra en su centro (ver figuras 5.7 y 6.1). En el capítulo 6 se detalla más sobre este detector.

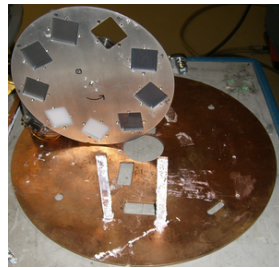


Figura 5.7: *Imagen del dispositivo de selección de blancos que se posiciona en el interior de Crystal Ball.* Consiste en una rueda donde se pueden colocar los diferentes blancos, esta puede girarse automáticamente desde la sala de control del experimento sin necesidad de parar el experimento ni abrir Crystal Ball.

- **SSD:**Silicon Strip Detectors

Durante el experimento se pusieron un total de 8 de estos detectores en el interior de Crystal Ball, dos delante del blanco, cuatro alrededor suyo y dos detrás. Se utilizan para medir la posición (x-y) de las partículas y fragmentos emitidos, también dan información sobre la carga de las mismas, midiendo la pérdida de energía, esto nos permite escoger los canales de reacción.

- **ALADIN:**(Número 5 en la figura 5.8)

Es el imán que deflecta los fragmentos provenientes de las interacciones con el blanco de reacción en el interior de Crystal Ball. Induce como máximo 1.5 T

- **GFI:**Grosser Fiber detektor(Número 6 en la figura 5.8)

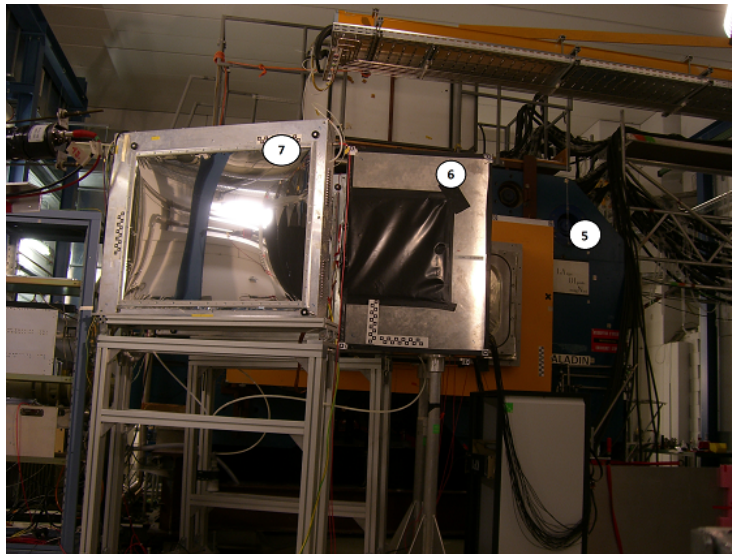


Figura 5.8: Segunda imagen de la disposición experimental. El número 5 es el imán ALADIN, el número 6 es la GFI, y número 7 corresponde al DCH.

Es un centelleador que consiste en aproximadamente 500 fibras paralelas de $1 \times 1 \text{ mm}^2$ de sección eficaz [Cub98] [Mah09].

Uno de los finales de cada fibra está unido a un fotomultiplicador sensible en la posición (PSPM), el otro final de cada una está unido a uno convencional que nos permite medir tiempos y hacer trigger (ver figura 5.9). Este PSPM posee un fotocátodo rectangular de $64 \times 58 \text{ mm}^2$, 16 dínodos en forma de malla y un rejilla de ánodos rectangular con 18 cables en una dirección y 16 en la perpendicular.

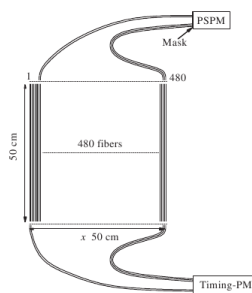


Figura 5.9: Esquema del GFI. Podemos ver como cada uno de finales de las fibras está conectado a un fotomultiplicador diferente.

Cuando un ión pasa a través de una de las fibras, se produce luz de centelleo proporcional a la pérdida de energía de dicho ión en la fibra. Esta luz llega hasta el PSPM, donde se producen señales eléctricas en unos pocos de los ánodos alrededor del punto

de llegada de la luz. Usando la rejilla de ánodos, podemos determinar la posición de deposición de la luz en el fotocátodo e identificar la fibra donde la luz fue depositada.

- **DCH:Drift Chamber** (Número 7 en la figura 5.8)

Es una cámara de deriva que contiene un 20% de CO_2 y un 80% de Argón, que nos permite reconstruir la dirección de los protones que se producen en la reacción nuclear. Dispone de 144 fibras verticales y 112 horizontales.

Consiste en una cámara de gas que, al paso de los protones a su través, provocarán una producción de electrones que será detectada en la fibra más cercana. Conociendo la posición de cada una de las fibras que detecten una señal, podemos determinar la trayectoria de los protones que atraviesen nuestro detector.

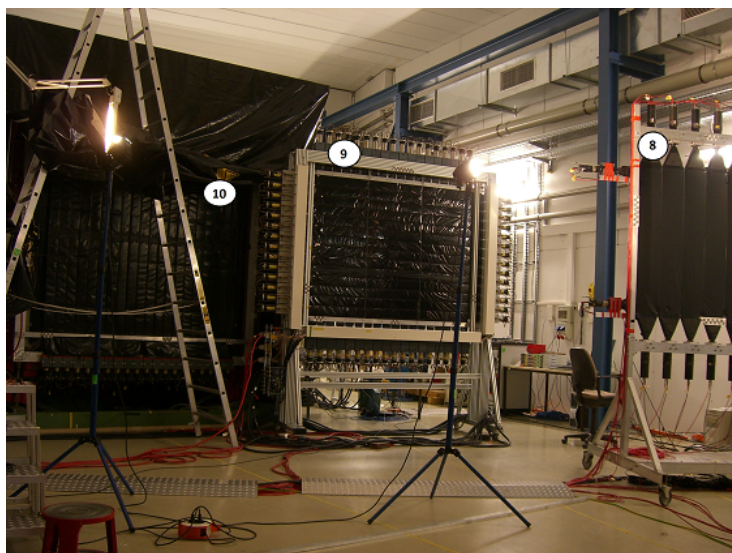


Figura 5.10: Tercera imagen de la disposición experimental. El detector número 8 es el DTF, el TFW corresponde al número 9 y el número 10 es el detector de neutrones LAND.

- **DTF y TFW:ToF Walls**(Número 8 y 9 en la figura5.10)

Estos dos detectores se encargan de proporcionar la medida de tiempo de vuelo, posición y carga de los protones y fragmentos provenientes de nuestra reacción nuclear. El DTF se encarga de medir los protones que son deflectados por ALADIN mientras que el TFW es el responsable de los iones ligeros. Como los protones sufrirán una mayor deflexión por parte del imán el DTF se encontraba a 30 grados respecto a la dirección del haz, mientras que el TFW tan solo a 15 grados, esta posición angular se calcula en base a la energía que se pretende conseguir en el haz y la intensidad que se necesita poner en el imán para que a esas energías se separen los fragmentos y las partículas

convenientemente.

El DTF se compone de seis centelleadores verticales y 3 horizontales, todos ellos en forma de pala. Sin embargo el TFW consiste en 32 centelleadores, 18 de ellos posicionados de forma vertical, y 14 de forma horizontal. Por supuesto, había un fotomultiplicador en la parte final de cada centelleador.

- **LAND:** Large Area Neutron Detector (Número 10 en la figura 5.10)

Este detector se utiliza para medir neutrones rápidos provenientes de las reacciones nucleares con el blanco, nos proporciona el tiempo de vuelo así como la posición de impacto del neutrón.

Funciona permitiendo que los neutrones incidentes reaccionen con el hierro, liberándose protones secundarios que son detectados por los centelleadores plásticos. Dispone de 10 planos con 20 módulos cada uno, cada uno de estos módulos es una estructura de 11 láminas de hierro intercaladas con 10 centelleadores orgánicos [Bla92]. Esto nos permite cubrir un área de 2x2m y 1m de profundidad. Durante el experimento, se encontraba a 12 metros del blanco.

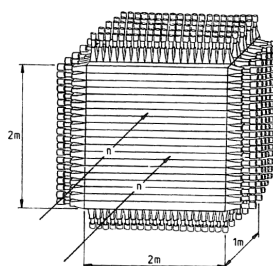


Figura 5.11: *Imagen del detector de neutrones LAND*[Bla92]

Capítulo 6

Crystal Ball

6.1. Introducción

En la colaboración R3B en la que se ha desarrollado el experimento s393 participan una gran cantidad de centros de investigación de distintos países. En el caso específico de este experimento hay una gran cantidad de detectores de distinto tipo como se ha podido ver previamente. Para que el trabajo de la colaboración sea lo más efectivo posible, las distintas calibraciones de los detectores se han dividido entre los estudiantes que pretenden enmarcar su tesis en los resultados del experimento. Yo me he visto involucrado en la calibración de Crystal Ball.

6.2. Características

Crystal Ball es un espectrómetro esférico que permite medir la energía total y multiplicidad de los rayos gamma emitidos por las desintegraciones de los fragmentos nucleares resultantes de la reacción que se produce en el blanco colocado en su centro (ver figura 6.1). El radio interno es de 25 cm y está formada por 162 cristales de NaI de 20 cm de largo. Los cristales son de dos tipos: 12 pentágonos regulares y 150 hexágonos de tres tipos (60,60 y 30), cada cristal cubre un ángulo de 77 msr, lo que permite cubrir casi 4π de ángulo sólido alrededor del blanco.

La Crystal Ball puede funcionar individualmente, o en coincidencia con otros detectores. Cada uno de los cristales de NaI se encuentra en un módulo que puede quitarse independientemente (ver figura 6.2), para ser sustituidos por otro detector en caso de que sea necesario, dejar paso a la línea de haz, etc.. Dispone de una cámara interna de 48 cm de diámetro que permite montar detectores de partículas como los SSD que hay en este experimento. El detector está dividido en dos semiesferas montadas en una plataforma de 2 x 4 metros que permite separar ambos hemisferios perpendicularmente a la dirección del haz utilizando un motor integrado en la estructura (ver figura 6.3).

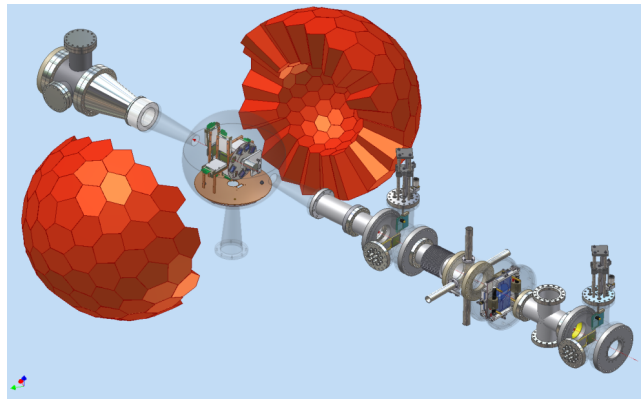


Figura 6.1: *Crystal Ball y blanco*: Diagrama de como la línea de haz llega al interior de Crystal Ball, donde estaba colocado el blanco de reacción. Durante el experimento, Crystal Ball estaba cerrada.

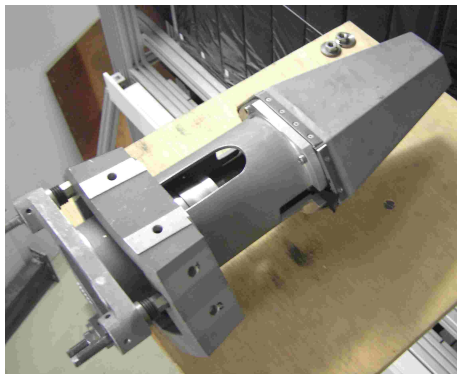


Figura 6.2: *Imagen del módulo en que está un cristal de NaI encapsulado y un fotomultiplicador de Crystal Ball.*

La gran granularidad del detector permite corregir el corrimiento Doppler, mientras que el volumen de los cristales y la agrupación compacta en la esfera nos permite obtener una alta eficiencia de detección y la posibilidad de reconstruir la energía total de los rayos gamma. Los parámetros más importantes vienen resumidos en la tabla 6.1

Para el experimento se modificó la lectura de 64 fotomultiplicadores que se encontraban en los ángulos más hacia delante (en la dirección del haz y posterior a la posición del blanco), de forma que además del ánodo como es habitual, se leyese también el último dínodo independientemente. De esta manera la amplificación producida en esa señal era mucho menor, lo que nos permite tener una lectura para los protones de hasta 274 MeV ; sin esta modificación habrían producido simplemente señales de *sobresaturación* (saliendose el valor de la escala) como los demás fotomultiplicadores.

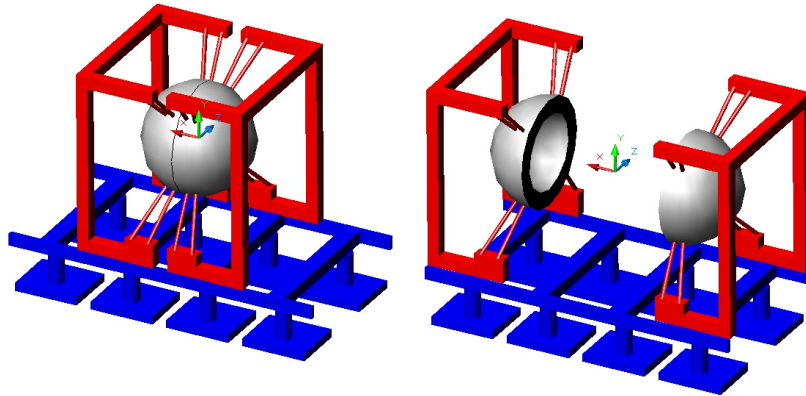


Figura 6.3: Diagrama de como se abre Crystal Ball

Parámetros Crystal Ball	
Resolución intrínseca E_i	7.8% a 662 keV 5.5% a 1332keV
Resolución temporal t_i	2.8 ns
Resolución Energética Total a $M_\gamma = 20$	18-22%
Resolución en la Multiplicidad $M_\gamma = 20$	25-30%
Eficiencia total (4π)	96% para $E_\gamma = 1.3 MeV$ 90% para $E_\gamma = 3.0 MeV$
Eficiencia de detección completa de la energía	71% para $E_\gamma = 1.3 MeV$ 56% para $E_\gamma = 3.0 MeV$

Tabla 6.1: Parametros de Crystal Ball [Met82]

6.3. Electrónica y sistema de adquisición de datos

El esquema electrónico de procesamiento de señales y su digitalización se muestra en la figura 6.4.

Se utilizaban módulos MSCF-16 de Mesytec, por lo que cada uno de estos módulos recibía señales de 16 cristales una en cada uno de sus canales. La señal proveniente del fotomultiplicador, se duplicaba en dos ramas, una de energía y otra de tiempos.

La señal de energías es moldeada en un shaper para facilitar su procesamiento, pasando a continuación por el BLR (Base Line Restorer), tras esto se dirigía a un ADC que se encargaba de convertirla en una señal digital.

La señal de la rama de tiempo, era filtrada y a continuación se volvía a duplicar. La primera de las señales se mandaba a través de un CFD (Constant Fraction Discriminator) que la comparaba con un nivel de ruido, si la altura de nuestra señal de tiempo era mayor que una fracción determinada de este nivel, se generaban dos pulsos. Uno se retrasaba en un delay, para luego llegar a un TDC que almacena la señal como dato

temporal para el experimento y a un scaler que nos permitirá contar el número de pulsos válidos, independientemente de que se descarten señales por trigger.

La otra señal de tiempo proveniente del CFD, junto con las equivalentes de tiempo procedentes de todos los demás cristales, se utilizan para crear una señal lógica OR que es enviada a la lógica de trigger.

La otra señal duplicada en el filtro de tiempo se suma con la proveniente de los otros 15 canales del módulo y se pasa a través de un LED (Leading Edge Discriminator), que la descartará en caso de no superar un nivel. En caso de superarlo, enviará una señal a la lógica de trigger, donde en conjunto con las de los demás módulo creará el trigger suma de Crystal Ball.

La lógica de trigger consiste en módulos Fan-in/Fan-out, donde además de los triggers OR y Suma mencionados, también permite crear una señal OR de cada mitad de la Crystal Ball, y un AND lógico después, que permite crear el trigger para los protones: *L+R muon trigger*.

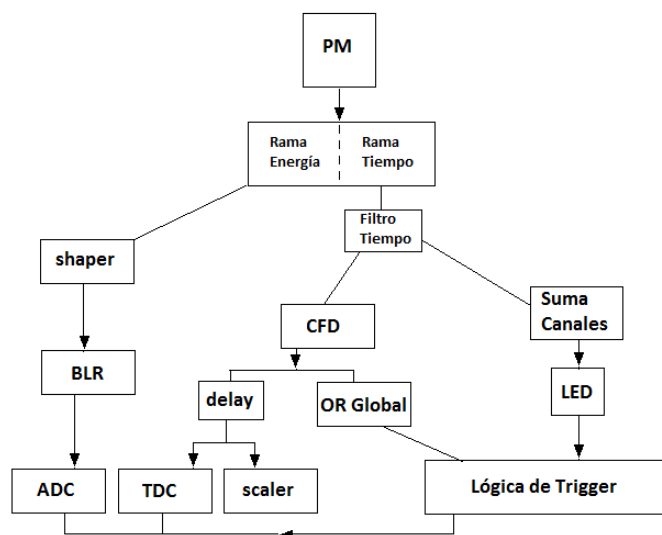


Figura 6.4: Esquema electrónico del detector Crystal Ball

6.4. Calibración en energías

Para la calibración de energía de la radiación gamma, es necesario utilizar fuentes radiactivas emisoras de radiación de este tipo a energías tabuladas y conocidas. Durante el experimento se hicieron medidas con cierta regularidad utilizando fuentes de ^{60}Co y ^{22}Na . También existen tiempos de toma de datos con estas mismas fuentes más ^{56}Co y ^{88}Y con datos del experimento s389, realizado en Octubre del 2010, un poco después del s393.

Fuente	Energía
^{60}Co	1173 keV 1332 keV
^{22}Na	511 keV 1275 keV

Tabla 6.2: Fuentes de calibración utilizadas y sus desintegraciones conocidas y tabuladas.

El programa que permite descomprimir los archivos y es utilizado para el análisis de los experimentos de este tipo en la colaboración R3B en GSI es *land02*[Pla]. Los datos tomados durante el experimento están almacenados en archivos de formato list mode (lmd) de tamaño máximo aproximado de 1Gb. En estos se inscriben los distintos sucesos con los datos de energía y tiempo tomados en los detectores. Estos archivos de datos se descomprimen con el script de *land02*, llamado *paw_ntuple* (recibe este nombre por razones históricas dado que antes se usaba el programa *PAW* basado en Fortran para analizar los datos), esto nos permitirá obtener un archivo que podamos leer con el programa *ROOT* (programa basado en C++, que permite analizar los datos) [ROO]. Este archivo nos dará acceso a las medidas tomadas directamente del sistema de adquisición de datos (nivel de descompresión *RAW*), o si ya tenemos una calibración adecuada, con esta ya aplicada de forma que podamos analizar los datos más cómodamente.

Para la calibración he utilizado cuatro archivos de datos. Para dos de ellos (run336 y run337) se utilizó la fuente de ^{22}Na y la de ^{60}Co para los otros dos (run488 y run506). Las medidas se hacían durante los espacios de tiempo en que el haz del acelerador no estaba activo, abriéndose el detector e introduciendo la fuente en su interior, por lo tanto tal y como se posicionaba la fuente solo se podía medir en uno de los dos lados en los que se separa Crystal Ball, de forma que cada archivo es para uno de esos lados, es por eso que se utilizan dos archivos de datos para cada fuente.

Los datos de calibración tomados durante el experimento s389 aún se está discutiendo si pueden ser utilizados como fuentes de calibración debido a la separación en el tiempo de ambos experimentos. La fuente de ^{88}Y tenía una actividad demasiado baja, de forma que no hay suficiente estadística en el espectro como para distinguir apropiadamente los picos de energía.

Hay unos pocos cristales que no se han tomado en cuenta en el proceso, estos son el 72 y el 78 que se comportan de forma extraña, 81 y 82 que son la entrada y salida

del haz, el 77 que es el que está abajo y se quita para que pase el pie del soporte del blanco y el 103 que presenta una muy mala resolución energética.

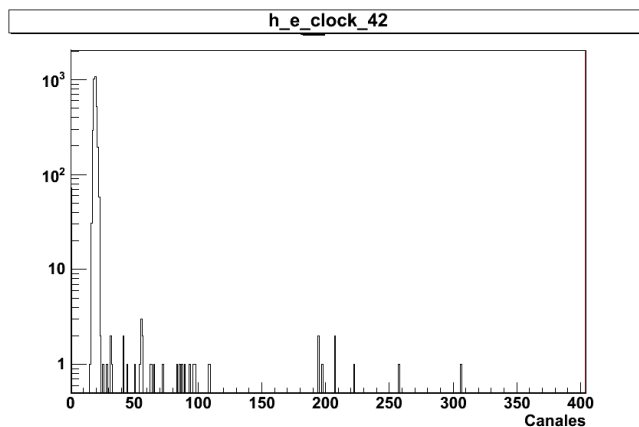


Figura 6.5: *Histograma para el cristal 42 con el trigger clock para la fuente de Sodio-22.* Tenemos un pico importante en nuestro histograma de canales que tan solo proviene del ruido electrónico, pero utilizando los datos tomados con el *trigger clock*, que es el que se encarga de guardar datos únicamente según un tiempo determinado, podemos no tomar en cuenta este pico de forma automática.

Para el proceso de calibración se utiliza un script con el programa ROOT que podemos encontrar en la web de *land02* [Pla]. Para encontrar adecuadamente los picos de cada uno de los cristales, primero obtenemos un histograma con las cuentas tomadas según el *trigger clock* (éste se encarga de tomar datos solo según una frecuencia concreta, cada cierto tiempo determinado arbitrariamente), el resultado es el mostrado en la figura 6.5, encontramos automáticamente el pico de este histograma que proviene prácticamente solo del ruido electrónico (*pedestal*). Una vez hemos encontrado la posición de este, podemos buscar automáticamente los picos *físicos* que queremos encontrar.

Una vez encontrados dichos picos (los dos para el cobalto o los dos para el sodio), estos se ajustan como se puede ver en la figuras 6.6 y 6.7, primero ajustamos una función gaussiana *verde* para uno de los picos de energías y una función lineal (de color *azul* en la figura), para el fondo en la región del pico. Tras obtener estos dos ajustes hacemos uno más preciso con la suma de una función gaussiana y una lineal, en *rojo* en las figuras. Esto se repite para cada uno de los dos picos en el caso del sodio, y se hace una sola vez utilizando una suma de dos gaussianas en el caso del cobalto.

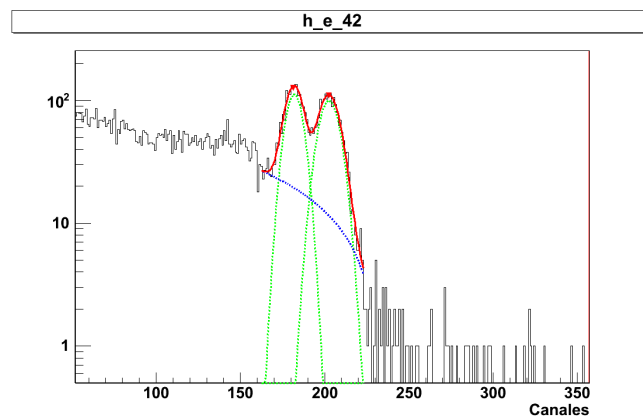


Figura 6.6: *Histograma de canales del Cobalto-60 para el cristal 42.* Se pueden ver la cantidad de cuentas detectadas por canal y los ajustes gaussiano y lineal para el Cobalto-60. Podemos ver el pico de energía a 1173 keV en el canal 181.97 con una resolución 6.7% y a 1332 keV en el canal 202.64 con una resolución de 7.11%.

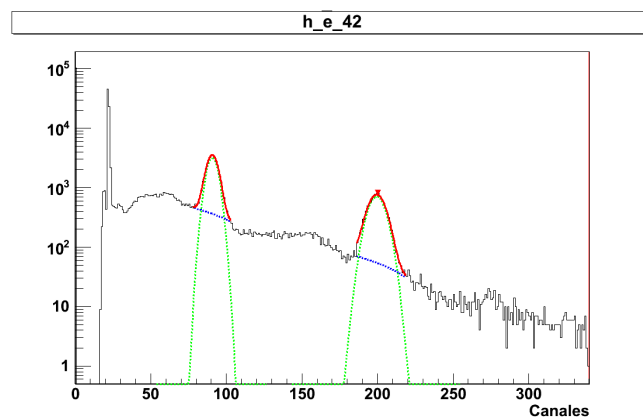


Figura 6.7: *Histograma de canales del Sodio-22 para el cristal 42.* Se pueden ver la cantidad de cuentas detectadas por canal y los ajustes gaussiano y lineal para el Sodio-22. Podemos ver los dos picos de energía a 511 keV en el canal 90.67 con una resolución 9.6% y a 1275 keV en el canal 199.47 con una resolución de 6.6%.

A continuación, una vez obtenida la posición en canales para cada energía (las que vienen en la tabla 6.2), podemos hacer un ajuste lineal para cada cristal utilizando los cuatro puntos obtenidos, un ejemplo sería el de la figura 6.8. De esta forma obtenemos una pendiente y una ordenada en el origen que nos permite relacionar directamente el canal donde se deposita la energía con un valor energético específico. Hay que tener en cuenta que dado que la calibración se hace con fuentes de energía con emisiones en el intervalo $500\text{ keV} - 1400\text{ keV}$, será en esta región donde serán más fiables las energías que obtengamos con la medida de los cristales.

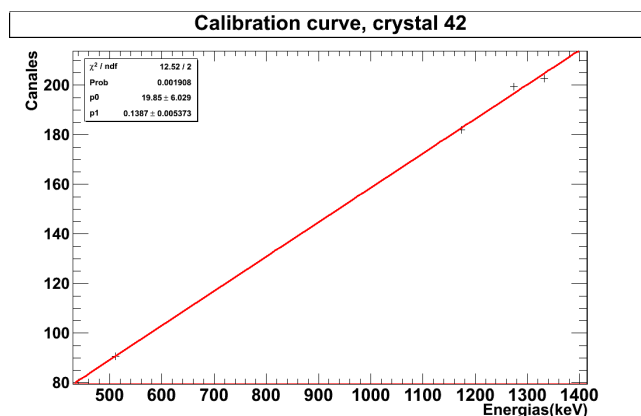


Figura 6.8: Ajuste lineal para la calibración del cristal 42. Se utilizan los cuatro puntos de calibración obtenidos.

Una vez obtenida la calibración, ésta se guarda en un archivo con un formato pre-determinado para que el descompresor *paw_ntuple* lo pueda leer, y darnos un archivo ya con la calibración aplicada. El resultado obtenido es como el que podemos ver en la figura 6.9.

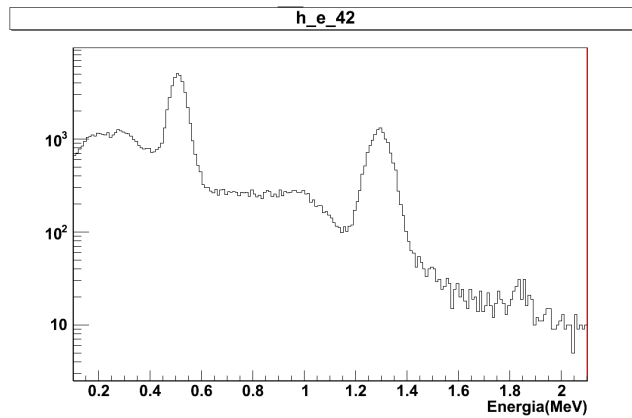


Figura 6.9: *Histograma calibrado para el cristal 42 con la fuente de sodio-22. Esta es la calibración ya aplicada en MeV para el cristal 42, con la fuente de sodio-22*

En la gráfica 6.10 podemos ver la pendiente obtenida en la calibración (que relaciona los canales con la energía depositada en cada uno) frente al número del cristal. Para entender la tendencia que muestra la gráfica, debemos tener en cuenta que la distribución de los cristales de NaI en Crystal Ball es circular en cada hemisferio de la esfera, a partir del cristal 1 y 162 respectivamente, como se muestra en la figura 6.11.

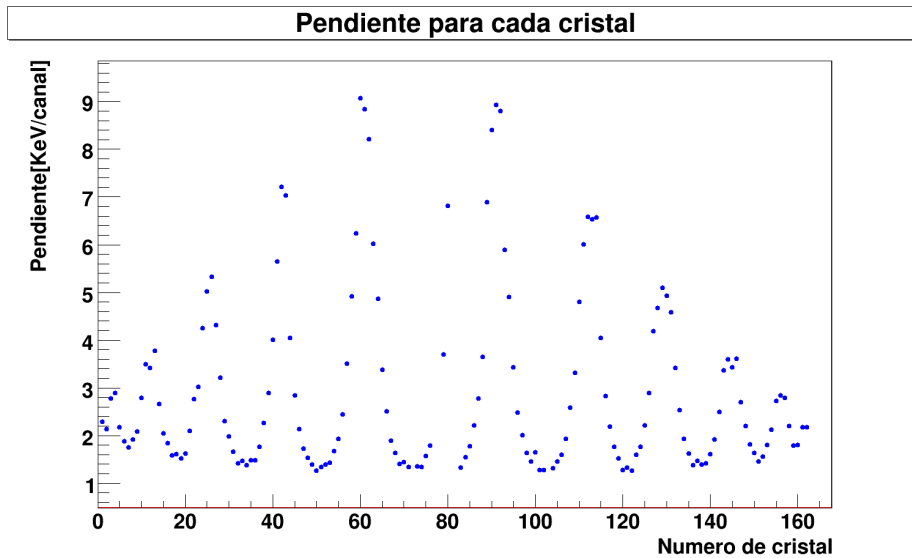


Figura 6.10: *Pendiente de la calibración de cada cristal con la numeración que le corresponde.*

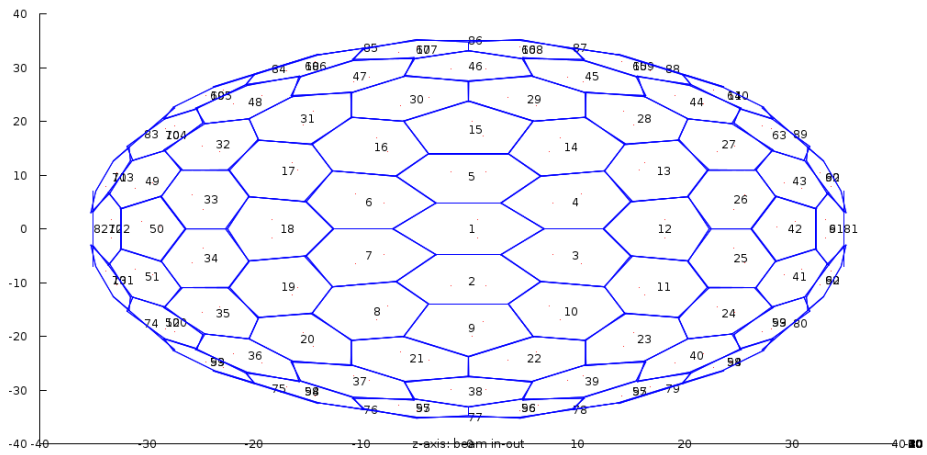


Figura 6.11: *Esquema de la distribución de cristales en Crystal Ball.* La distribución es equivalente siguiendo el sentido contrario, en el otro hemisferio del detector, pero es el cristal 162 el que se encuentra en el centro de la distribución.

Si mostramos dicha pendiente de calibración frente al ángulo polar θ de cada cristal, como puede verse en la figura 6.12, se puede apreciar que la pendiente crece de forma continua según disminuye dicho ángulo θ . Esto es a causa de que los rayos gamma sufren corrimiento Doppler relativista (ver figura 6.13) y como consecuencia de esto, tendrán energías más altas cuanto más vayan a favor de la dirección y sentido del haz, por lo tanto, para poder medir correctamente las energías más bajas, tenemos que amplificar más en la electrónica de los cristales que estén más perpendiculares o en el sentido contrario al del haz y menos en los cristales que van a recibir mayor *rango dinámico*.

Angulo vs Pendiente

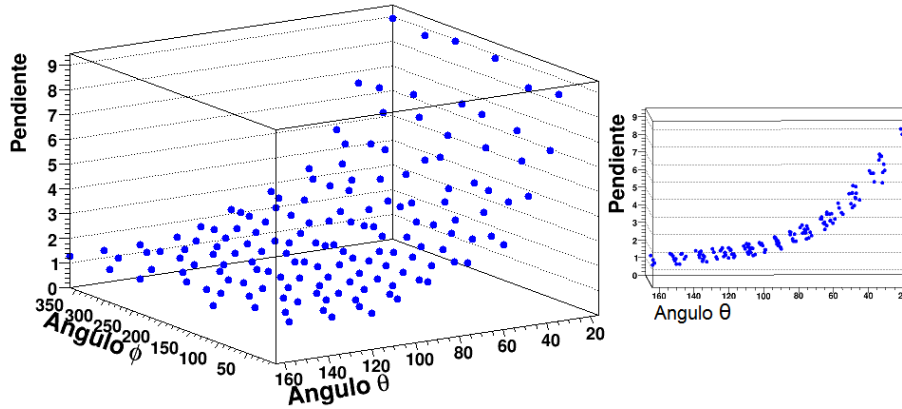


Figura 6.12: *Pendiente de calibración frente a los ángulos de los cristales.* La pendiente (keV/canal) crece al disminuir el ángulo θ , debido a que la ganancia es menor en los amplificadores de los centelleadores que van a recibir energías más altas y es mayor en los más alejados de la dirección y sentido del haz dado que van a detectar partículas menos energéticas.

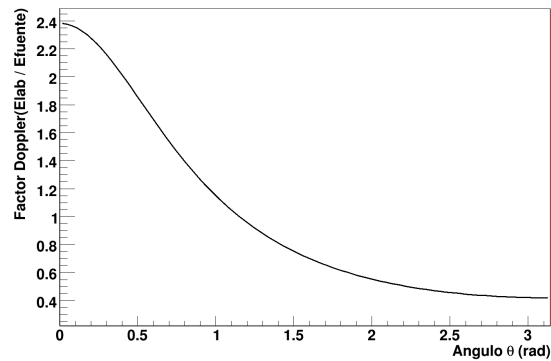


Figura 6.13: *Factor Doppler en función del ángulo polar.* Representación de la relación entre la energía de laboratorio y la energía en el sistema de referencia del rayo gamma frente al ángulo polar. Podemos ver que debido a las correcciones relativistas, la energía en los ángulos más hacia delante en la dirección del haz para el sistema de referencia de laboratorio es mayor que en las otras direcciones.

Aún hay que valorar si se va a usar finalmente la fuente de ^{56}Co para la calibración, ya que a pesar de pertenecer a las medidas de otro experimento con unas condiciones diferentes, es posiblemente la única manera de alcanzar una calibración correcta para las energías más altas que se pretenden medir en el experimento.

A partir del run445 (es decir, entre los dos bloques de runs que hemos utilizado: run336-337 y run488-506), se desactivó el BLR (Base Line Restorer, ver apartado

6.3), lo cual parece que no crea problemas en prácticamente ningún cristal, pero aún se está valorando como evitar los posibles problemas de esta situación.

6.4.1. Calibración en tiempo y eficiencias

La calibración de tiempos se realiza con el script *gamma2* de *land02*, utilizando también fuentes de calibración. Como sabemos que la emisión para ^{60}Co es prácticamente simultánea, podemos calcular la diferencia de la señal de tiempo entre cada cristal, buscando coincidencias entre cada par de cristales para las energías concretas de estas fuentes. Cuando se encuentra en un mismo suceso las dos energías en dos cristales diferentes, se almacena la diferencia en la señal de tiempos de ambos, esta diferencia de tiempo se ajusta después utilizando una función gaussiana, que nos permite obtener una diferencia media de tiempos. Este último dato se utiliza para resolver un sistema de ecuaciones que determina la diferencia de tiempo de cada cristal respecto a un tiempo medio, el cual se toma de forma que todas las diferencias sumen cero. Esta diferencia de tiempo obtenida para cada cristal es la que se almacena finalmente.

La calibración en eficiencias de los cristales centelladores de Crystal Ball es necesaria para que podamos corregir las medidas obtenidas. Ya que es imposible detectar todos los rayos gamma que vayan a pasar a su través, debemos poder estimar que porcentaje de los mismos perdemos.

Uno de los métodos utilizados para solventar este problema consiste en utilizar una vez más las fuentes de calibración para utilizar la propiedad del ^{60}Co de que sus emisiones gamma son siempre dobles (es decir, emiten en dos energías diferentes siempre). Acumulando el número de veces N que detectamos una energía X en un cristal i , siempre y cuando la otra energía Y se detecte en ese mismo suceso en otro cristal diferente, podremos determinar la eficiencia del cristal mediante el cociente entre estas cuentas acumuladas y el número total de veces que la otra energía ha sido detectada

$$eff = \frac{N_{Xi}}{N_{totalY}}.$$

Capítulo 7

Futuros desarrollos

Principales objetivos a corto plazo:

7.1. Addback

Uno de los objetivos principales con el detector Crystal Ball es conseguir medir por completo la energía de los rayos gamma que provienen de las reacciones nucleares que se producen en el blanco. Muchos de esos rayos gamma depositarán previamente parte de su energía mediante colisiones Compton antes de emitir toda la restante con efecto fotoeléctrico.

Nuestros cristales son grandes, pero en caso de que un fotón alcance un centelleador cerca de sus límites puede depositar parte de su energía en este y terminar en su vecino más cercano. Dado que disponemos de un dispositivo 4π podemos plantearnos recoger la energía total de los rayos gamma en estos casos mediante un algoritmo de Addback que sume dichas deposiciones de energía.

Los algoritmos utilizados hasta ahora consistían en medir las deposiciones mayores y sumarle la energía que se haya depositado en sus primeros vecinos. Utilizar a continuación el ángulo del cristal de mayor energía depositada para poder aplicar el corrimiento Doppler.

Actualmente se está intentando comprobar si este tipo de algoritmo no puede ser mejorado, por ejemplo, introduciendo un diferente peso a cada cristal según su energía depositada, para calcular un ángulo más cercano al real y mejorar el corrimiento Doppler.

7.2. Calibración para protones

La Crystal Ball también tiene la posibilidad de medir protones, para poder hacer esta calibración se utilizan muones provenientes de los rayos cósmicos. Estas medidas se hacían en los momentos en que no podía llegar el haz a la cave C. La dificultad de

generar un haz de protones en GSI o de disponer de una fuente de suficiente energía para la calibración es lo que motiva este método.

Se están desarrollando simulaciones con diferentes algoritmos de generación de muones para poder realizar esta calibración.

7.3. Mejora de resolución temporal en los centelladores

El modelo que se utiliza actualmente para medir el tiempo y la energía en los paneles centelladores de los detectores PSP, POS y ToF Walls es muy sencillo, y genera problemas con la resolución temporal, la intención es conseguir un modelo mejor.

Bibliografía

- [Aks] Yu. Aksyutina et al, GSI experimeten S245.
- [Aks08] Yu. Aksyutina et al, Physics Letters B **666**, 430-434 (2008).
- [Ber88] Carlos A. Bertulani and Gerhard Baur , *Electromagnetic processes in relativistic heavy ion collisions*, 1988, pp. 299–408.
- [Bla92] Th. Blaich et al, *A large area detector for high-energy neutrons*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A314**, 136-154 (1992).
- [Cub98] J. Cub et al, *A large-area scintillating fibre detector for relativistic heavy ions*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **402**, 67-74 (1998).
- [Gei92] H. Geissel et al, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **B70**, 286-297 (1992).
- [GSI97] GSI, *Relativistic beams on exotic nuclei: A powerful tool for nuclear structure physics*, GSI-Nachrichten, GSI (1997).
- [Han87] P.G. Hansen and B.Jonson, *The neutron halo of extremely neutron-rich nuclei*, Europhysics Letters **4**, 409-414 (1987).
- [Hof08] C.R. Hoffman et al, *Determination of the n=16 shell closure at the oxygen drip line*, Physical Review Letters **100**, 152502 (2008).
- [Kno00] Glenn.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [Lec09] J.-L. Lecouey et al, Physics Letters B **672**, 6-11 (2009).
- [Leo87] W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1987.
- [Mah09] K. Mahata et al, *Position reconstruction in large-area scintillating fibre detectors*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **608**, 331-335 (2009).
- [Met82] V. Metag et al, *The darmstadt-heidelberg-crystal-ball*, Lecture Notes in Physics **178**, 163 (1982).
- [Pla] R. Plag and H.Johansson, *Land02 the unofficial guide: <http://www-linux.gsi.de/rplag/land02/>*.

- [R3B10] R3B Collaboration, s393 Experimental proposal, GSI (2010).
- [ROO] *Root official webpage: <http://root.cern.ch/drupal/>.*
- [Sat80] G.R. Satchler, *Introduction to Nuclear Reactions*, The MacMillan Press LTD, 1980.
- [Sim08] H. Simon et al, Nucl.Phys.A **810**, 267 (2008).



MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



INSTITUTO DE ESTRUCTURA
DE LA MATERIA (IEM)

El/la abajo firmante, matriculado/a en el Máster de Física Nuclear de la Facultad de Ciencias Físicas, autoriza a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor el presente Trabajo de Fin de Máster: *Núcleos exóticos y los límites de la línea de goteo de neutrones: Experimento s393 de la colaboración R3B y calibración en energías de Crystal Ball*, realizado durante el curso académico 2010-2011 bajo la dirección de Olof Tengblad en el Departamento de Física Nuclear Experimental en el Instituto de Estructura de la Materia, Agencia Estatal de Consejo Superior de Investigaciones Científicas, y a la Biblioteca de la UCM a depositarla en el Archivo institucional E-Prints Complutense con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en Internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo. La publicación en abierto tendrá un embargo de:

Ninguno

Un año

En Madrid 30 de Septiembre 2011

Fdo: Guillermo Ribeiro Jiménez
Estudiante de Doctorado
IEM - CSIC
g.ribeiro@csic.es



MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



INSTITUTO DE ESTRUCTURA
DE LA MATERIA (IEM)

El abajo firmante, director de un Trabajo Fin de Master presentado en el Máster de Física Nuclear de la Facultad de Ciencias Físicas, autoriza a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor el presente Trabajo de Fin de Máster: *Núcleos exóticos y los límites de la línea de goteo de neutrones: Experimento s393 de la colaboración R3B y calibración en energías de Crystal Ball*, realizado durante el curso académico 2010-2011 bajo mi dirección en el Departamento de Física Nuclear Experimental en el Instituto de Estructura de la Materia, Agencia Estatal de Consejo Superior de Investigaciones Científicas, y a la Biblioteca de la UCM a depositarla en el Archivo institucional E-Prints Complutense con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en Internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo.

La publicación en abierto tendrá un embargo de:

Ninguno

Un año

En Madrid 30 de Septiembre 2011

Fdo: Olof TENGBLAD
Prof. de Investigación
IEM - CSIC
Olof.tengblad@csic.es

Dr Olof TENGBLAD
Tlf.: +34 91 561 6800 -943002
Fax: +34 91 585 54 13

6800
E-mail: olof.tengblad@csic.es

SERRANO 113 bis
28006 MADRID.ESPAÑA
TEL.: (34) 91 561

FAX: (34) 91 564 55 57