

Medición de Tiempos de Vida Media de Estados Excitados de  
 $^{75}\text{Br}$  por el Método de Atenuación del Corrimiento Doppler

Edana Karina Merchán Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias  
Departamento de Física  
Grupo de Física Nuclear

Bogotá D. C  
2004

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias  
Departamento de Física  
Grupo de Física Nuclear

Trabajo de grado para optar el título de Física

**Medición de Tiempos de Vida Media de Estados Excitados  
de  $^{75}\text{Br}$  por el Método de Atenuación del Corrimiento  
Doppler**

Presentado por: Edana Karina Merchán Rodríguez

Director: Ramiro Cardona

Bogotá D.C.  
2004

Ramiro Cardona  
Director

Hector Múnera  
Jurado

Javier Cardona  
Jurado

## RESUMEN

Mediante la reacción  $^{48}\text{Ti}(^{30}\text{Si},\text{p}2\text{n})^{75}\text{Br}$  a 85 MeV, se poblaron estados excitados de alto spin del  $^{75}\text{Br}$  con spin hasta  $37/2$ . Usando 10 detectores de Germanio Hiperpuro con supresión anticómp-ton, se obtuvieron espectros de coincidencia  $\gamma$ - $\gamma$  y mediante el método de atenuación del corrimiento Doppler (DSA) se determinaron los tiempos de vida y los tiempos de alimentación lateral de los estados de dos de las principales bandas del  $^{75}\text{Br}$ ; para ésto se utilizó el programa AJUSTE [1]. Los valores obtenidos se comparan con los resultados experimentales obtenidos por Lühmann *et al.* [2] y los tiempos de alimentación lateral simulados por E. Galindo [3]. Se muestra cómo los resultados experimentales de este trabajo concuerdan con la simulación realizada por E. Galindo [3] con el programa GAMMAPACE.

Dedicado a mi mamá  
Aura María Rodríguez  
por todo su amor y esfuerzo.

## Agradecimientos

Quiero agradecer muy especialmente al profesor Fernando Cristancho por darme a conocer el mundo de la Física Nuclear y por guiarme, aconsejarme y ayudarme a lo largo de estos últimos años.

Al profesor Ramiro Cardona por ayudarme con paciencia a culminar esta etapa de mi vida, por confiar en mi y darme la oportunidad de realizar el curso de Física Nuclear Experimental en São Paulo.

A mi mamá por todo su amor, porque sin ella nada de esto hubiera sido posible.

A mi hermano por alegrarme y complementar mi vida.

A Ricardo por acompañarme y amarme incondicionalmente durante tanto tiempo.

A mi familia, en especial a mis tías, porque siempre estuvieron cuando los necesité y me han apoyado toda la vida.

A mis grandes amigos Jhonnatan, Cristina y Lola, por todos los momentos tan especiales junto a ellos.

A mis compañeros del Grupo de Nuclear porque aprendí mucho con ellos y superamos muchas dificultades juntos.

A mis demás profesores, amigos y compañeros con quienes crecí, aprendí y compartí todos estos largos años en la carrera.

# Índice General

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Marco Teórico</b>	<b>3</b>
2.1	Reacciones de Fusión-Evaporación . . . . .	3
2.2	Estados de Alto Espín . . . . .	6
2.3	Características del $^{75}\text{Br}$ . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Montaje Experimental</b>	<b>13</b>
3.1	Aceleradores . . . . .	13
3.1.1	Acelerador Lineal Electrostático TANDEM . . . . .	13
3.1.2	Acelerador Lineal Superconductor LINAC . . . . .	14
3.2	Disposición experimental de detectores . . . . .	17
3.3	Parámetros de calibración . . . . .	20
3.3.1	Calibración en energía . . . . .	20
3.3.2	Resolución en energía . . . . .	20
3.3.3	Eficiencia . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Obtención de Formas de Línea</b>	<b>23</b>
4.1	Almacenamiento de datos . . . . .	23
4.2	Obtención de formas de línea . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Método DSA</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Programa</b>	<b>29</b>
6.1	trim . . . . .	29
6.2	prob_cos . . . . .	30
6.3	stopping9 . . . . .	30
6.4	ajuste15 . . . . .	34
6.5	Determinación y error del tiempo de vida . . . . .	34

<b>7</b>	<b>Ajuste de Formas de Línea</b>	<b>37</b>
7.1	Banda B . . . . .	37
7.1.1	Estado $(37/2^-)$ . Transición 1647.8 keV. . . . .	40
7.1.2	Estado $(33/2^-)$ . Transición 1438.5 keV. . . . .	42
7.1.3	Estado $(29/2^-)$ . Transición 1321.9 keV. . . . .	46
7.1.4	Estado $(25/2^-)$ . Transición 1211.1 keV. . . . .	49
7.1.5	Estado $(21/2^-)$ . Transición 1045.5 keV. . . . .	52
7.1.6	Estado $(17/2^-)$ . Transición 829.9 keV. . . . .	55
7.1.7	Estado $(13/2^-)$ . Transición 562.8 keV. . . . .	58
7.2	Banda D . . . . .	62
7.2.1	Estado $(37/2^+)$ . Transición 1394.2 keV. . . . .	65
7.2.2	Estado $(33/2^+)$ . Transición 1336.3 keV. . . . .	67
7.2.3	Estado $(29/2^+)$ . Transición 1254.2 keV. . . . .	70
7.2.4	Estado $(25/2^+)$ . Transición 1075.3 keV. . . . .	73
7.2.5	Estado $(21/2^+)$ . Transición 917.9 keV. . . . .	77
<b>8</b>	<b>Análisis</b>	<b>81</b>
<b>9</b>	<b>Resumen y Conclusiones</b>	<b>85</b>
<b>A</b>	<b>Errores de medición</b>	<b>87</b>

# Índice de Figuras

2.1	Esquema de una reacción de fusión-evaporación. . . . .	4
2.2	Sección eficaz total de formación de ciertos núcleos residuales para diferentes energías del haz. . . . .	6
2.3	Esquema de una reacción de fusión-evaporación en el espacio de fase Momento angular de espín ( $I$ ) - Energía de excitación ( $E^*$ ). . . . .	7
2.4	Dos diferentes modos de rotación que generan momento angular. a). Rotación colectiva de un núcleo prolato. b). Alinamiento de partículas en un núcleo oblato. . . . .	8
2.5	Tabla de Núclidos; el modo de decaimiento de los núcleos se muestra en el esquema. . . . .	9
2.6	Valores escritos en el esquema de niveles. La transición con energía $E_\gamma$ , se efectúa desde un nivel con energía inicial $E_i$ y espín $I_i$ hasta un nivel con energía inicial $E_f$ y espín $I_f$ , $\pi$ denota la paridad y $\sigma$ la signatura. . . . .	10
2.7	Esquema parcial de niveles del $^{75}\text{Br}$ . El grosor de las flechas indican la intensidad de la transición. El espectro es rotacional como se espera debido a la ubicación del núcleo en la Tabla de Núclidos. Los valores de energía de transición y de excitación están en (keV). . . . .	11
2.8	Gráfica de los niveles de energía del $^{75}\text{Br}$ en el espacio de fase Momento angular de espín ( $I$ ) - Energía de excitación ( $E^*$ ). En donde se observa como a hasta espín $I = 37/2$ la banda yrast está conformada por la banda B y de ahí en adelante por las bandas A y D. . . . .	12
3.1	Diagrama de un acelerador lineal tipo TANDEM. . . . .	14
3.2	Diagrama de las etapas de aceleración en uno de los resonadores de un acelerador lineal tipo LINAC. . . . .	15
3.3	Sistema de aceleradores TANDEM-LINAC de <i>Florida State University</i> . Arriba TANDEM, abajo LINAC. . . . .	16
3.4	Montaje experimental para la obtención de datos; en los cuadros el haz entra por el punto negro, perpendicular al plano de la hoja. . . .	17
3.5	Detector <i>Clover</i> , cuatro segmentos de Germanio Hiperpuro. . . . .	18

3.6	Disposición de detectores para éste experimento en <i>Florida State University</i> . . . . .	19
3.7	Ajuste de FWHM en función de la energía. . . . .	21
3.8	Eficiencia de los detectores en función de la energía. . . . .	22
4.1	Ejemplo de una matriz de coincidencia. . . . .	24
4.2	Proyección de una matriz en uno de sus ejes. . . . .	25
5.1	Los núcleos de $^{75}\text{Br}$ formados en la película son frenados dentro del sustrato y poseen diferentes velocidades. . . . .	27
5.2	Formas de línea correspondientes a diferentes tiempos de vida para un ángulo $\theta < 90$ , a). Tiempo de vida largo, b). Tiempo de vida medio y c). Tiempo de vida corto. La flecha indica el valor de la energía de transición sin corrimiento. . . . .	27
5.3	Esquema de una banda con alimentación lateral. . . . .	28
6.1	Poder de frenado para el $^{75}\text{Br}$ propagándose dentro de el sustrato de $^{181}\text{Ta}$ . . . . .	29
6.2	Distribución de $\cos\theta$ para $\theta = 145^\circ$ . . . . .	31
6.3	La energía cinética del núcleo residual, en función de la profundidad dentro del sustrato $T(x)$ . . . . .	32
6.4	La profundidad del núcleo residual dentro del sustrato, en función del tiempo $x(t)$ . . . . .	32
6.5	Velocidad del núcleo residual dentro del sustrato en función del tiempo. . . . .	33
6.6	Velocidad del núcleo residual dentro del sustrato en función de la profundidad en el sustrato. . . . .	33
6.7	Ejemplo de un patrón de poblamiento . . . . .	35
6.8	Valor calculado $\tau_0$ e incertidumbre; los valores $\tau_a$ y $\tau_b$ representan el mínimo y el máximo valor del tiempo de vida. . . . .	36
6.9	Representación de los valores mínimo y máximo de un tiempo de vida en la forma de línea. . . . .	36
7.1	Esquema de niveles de la banda B. Se muestran las energías de las transiciones $E_\gamma$ en keV, el spin $I$ y la paridad $\pi$ . . . . .	38
7.2	Espectros con corrimiento Doppler para la banda B. Arriba corrimiento con $\theta = 145^\circ$ , abajo corrimiento con $\theta = 35^\circ$ . . . . .	39
7.3	Arriba: $\chi^2$ del tiempo de vida del estado. Abajo: Forma de línea para la transición de 1647.8 keV. . . . .	40
7.4	Patrón de poblamiento para la transición de 1647.8 keV. . . . .	41
7.5	Arriba: Forma de línea para la transición de 1438.5 keV tomada con detectores e $145^\circ$ . Abajo: Forma de línea para la transición de 1438.5 keV tomada con detectores e $35^\circ$ . . . . .	42

7.6	Valores de $\chi^2$ de las formas de línea para la transición de 1438.5 keV. Arriba para 145°. Abajo para 35°, . . . . .	44
7.7	Patrón de poblamiento para la transición de 1438.5 keV. . . . .	45
7.8	Abajo: Forma de línea para la transición de 1321.9 keV tomada con detectores a 35°. Arriba: Forma de línea para la transición de 1321.9 keV tomada con detectores a 145° . . . . .	46
7.9	Valores de $\chi^2$ de las formas de línea para la transición de 1321.9 keV. Abajo para 35°, arriba para 145° . . . . .	47
7.10	Patrón de poblamiento para la transición de 1321.9 keV. . . . .	48
7.11	Arriba: Forma de línea para la transición de 1211.1 keV tomada con detectores a 145°. Abajo: Forma de línea para la transición de 1211.1 keV tomada con detectores a 35°. . . . .	49
7.12	Valores de $\chi^2$ de las formas de línea para la transición de 1211.1 keV. Abajo para 35°, arriba para 145° . . . . .	50
7.13	Patrón de poblamiento para la transición de 1211.1 keV. . . . .	51
7.14	Arriba: Forma de línea para la transición de 1045.5 keV tomada con detectores a 145°. Abajo: Forma de línea para la transición de 1045.5 keV tomada con detectores a 35°. . . . .	52
7.15	Valores de $\chi^2$ de las formas de línea para la transición de 1045.5 keV. Abajo para 35°, arriba para 145° . . . . .	53
7.16	Patrón de poblamiento para la transición de 1045.5 keV. . . . .	54
7.17	Arriba: Forma de línea para la transición de 829.9 keV tomada con detectores a 145°. Abajo: Forma de línea para la transición de 829.9 keV tomada con detectores a 35°. . . . .	55
7.18	Valores de $\chi^2$ de las formas de línea para la transición de 829.9 keV. Abajo para 35°, arriba para 145° . . . . .	56
7.19	Patrón de poblamiento para la transición de 829.9 keV. . . . .	57
7.20	Arriba: Forma de línea para la transición de 562.8 keV tomada con detectores a 145°. Abajo: Forma de línea para la transición de 562.8 keV tomada con detectores a 35°. . . . .	59
7.21	Valores de $\chi^2$ de las formas de línea para la transición de 562.8 keV. Abajo para 35°, arriba para 145° . . . . .	60
7.22	Patrón de poblamiento para la transición de 562.8 keV. . . . .	61
7.23	Esquema de niveles de la banda D. . . . .	63
7.24	Espectros con corrimiento Doppler para la banda D. Arriba corrimiento con $\theta = 145^\circ$ , abajo corrimiento con $\theta = 35^\circ$ . . . . .	64
7.25	Abajo: Forma de línea para la transición de 1394.2 keV tomada con detectores a 145°. Arriba $\chi^2$ del tiempo de vida del estado. . . . .	65
7.26	Patrón de poblamiento para la transición de 1394.2 keV. . . . .	66

7.27	Arriba: Forma de línea para la transición de 1336.3 keV tomada con detectores a 145°. Abajo: Forma de línea para la transición de 1336.3 keV tomada con detectores a 35° . . . . .	67
7.28	Valores de $\chi^2$ de las formas de línea para la transición de 1336.3 keV. Abajo para 35°, arriba para 145° . . . . .	68
7.29	Patrón de poblamiento para la transición de 1336.3 keV. . . . .	69
7.30	Arriba: Forma de línea para la transición de 1254.2 keV tomada con detectores a 145°. Abajo: Forma de línea para la transición de 1254.2 keV tomada con detectores a 35°. $\chi^2$ del tiempo de vida del estado. .	70
7.31	Valores de $\chi^2$ de las formas de línea para la transición de 1254.2 keV. Abajo para 35°, arriba para 145° . . . . .	71
7.32	Patrón de poblamiento para la transición de 1254.2 keV. . . . .	72
7.33	Arriba: Forma de línea para la transición de 1075.3 keV tomada con detectores a 145°. Abajo: Forma de línea para la transición de 1075.3 keV tomada con detectores a 35°. $\chi^2$ del tiempo de vida del estado. .	73
7.34	Valores de $\chi^2$ de las formas de línea para la transición de 1075.3 keV. Abajo para 35°, arriba para 145° . . . . .	74
7.35	Patrón de poblamiento para la transición de 1075.3 keV. . . . .	76
7.36	Arriba: Forma de línea para la transición de 917.9 keV tomada con detectores a 145°. Abajo: Forma de línea para la transición de 917.9 keV tomada con detectores a 35°. $\chi^2$ del tiempo de vida del estado. .	77
7.37	Valores de $\chi^2$ de las formas de línea para la transición de 917.9 keV. Abajo para 35°, arriba para 145° . . . . .	78
7.38	Patrón de poblamiento para la transición de 917.9 keV. . . . .	80
8.1	Comparación de los tiempos de vida obtenidos en el presente trabajo para los estados de la banda B con los encontrados por Lühmann <i>et al.</i> [2]. . . . .	81
8.2	Comparación de los tiempos de alimentación lateral obtenidos en el presente trabajo para los estados de la banda B con los encontrados por Lühmann <i>et al.</i> [2] y los simulados por E. Galindo [3]. . . . .	82
8.3	Comparación de los tiempos de vida obtenidos en el presente trabajo para los estados de la banda D con los encontrados por Lühmann <i>et al.</i> [2]. . . . .	83
8.4	Comparación de los tiempos de alimentación lateral obtenidos en el presente trabajo para los estados de la banda B con los encontrados por Lühmann <i>et al.</i> [2] y los simulados por E. Galindo [3]. . . . .	84

# Índice de Tablas

2.1	Tabla de núcleos involucrados en la reacción. . . . .	3
4.1	Tabla de matrices de coincidencia $\gamma\text{-}\gamma$ para la obtención de formas de línea. . . . .	23
7.1	Tabla de máximo corrimiento de energía para las transiciones de la banda B. . . . .	37
7.2	Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 1438.5 keV. . . . .	43
7.3	Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 1321.9 keV. . . . .	48
7.4	Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la línea de 1211.1 keV. . . . .	51
7.5	Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 1045.5 keV. . . . .	54
7.6	Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 829.9 keV. . . . .	58
7.7	Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 562.8 keV. . . . .	58
7.8	Tabla de máximo corrimiento de energía para las transiciones de la banda D. Se muestra la energía de la transición $E_\gamma$ en keV, el spin $I$ y la paridad $\pi$ . . . . .	62
7.9	Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 1336.3 keV. . . . .	69
7.10	Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 1254.2 keV. . . . .	72
7.11	Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 1075.3 keV. . . . .	75
7.12	Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 917.9 keV. . . . .	79
8.1	Tabla de resultados de los tiempos de vida y de alimentación lateral de la banda B. . . . .	83

8.2	Tabla de resultados de los tiempos de vida y de alimentación lateral de la banda D. . . . .	84
-----	---	----

# Capítulo 1

## Introducción

La física nuclear, dentro del campo general de la física, es un tema en el cual todavía hay mucho por hacer, tanto en el aspecto teórico para la formulación de nuevos modelos que describan cada vez mejor los fenómenos nucleares, como en el aspecto experimental, en donde se han realizado grandes progresos en el desarrollo de espectrómetros gamma y elementos auxiliares cada vez más sofisticados para la detección de estos fenómenos. Los núcleos pueden ser formados en reacciones de fusión-evaporación en donde se involucra la formación de un núcleo compuesto por medio de la colisión entre un par de núcleos más livianos y la posterior evaporación de partículas para la obtención del núcleo residual que se quiere estudiar [4, 5].

Determinar los tiempos de vida de los estados excitados rotacionalmente o por excitaciones de partícula aislada, es parte fundamental del estudio de la estructura nuclear, el cual es uno de los temas más tratados en física nuclear; a partir de éstos se puede evidenciar la deformación del núcleo en varias cantidades medibles como los niveles de energía, momentos de inercia, entre otros [6].

Un método que se puede aplicar para realizar la determinación de los tiempos de vida de los estados poblados, es el método de Atenuación del Corrimiento por Efecto Doppler (DSA <sup>1</sup>). Un hecho característico de este método es el ensanchamiento, por efecto Doppler, de las formas de línea de las transiciones en el espectro de energía, de los rayos gamma emitidos. Para calcular las vidas medias, las formas de línea experimentales, se ajustan con formas de línea generadas por un programa que simula los procesos que tienen lugar en un experimento de atenuación del corrimiento Doppler [1]. El conjunto de programas AJUSTE, que se usa para el análisis de estos datos, fué escrito en el Grupo de Física Nuclear de la Universidad Nacional de Colombia.

El <sup>75</sup>Br es un núcleo que fué estudiado anteriormente por L. Lühmann *et al.* [2]

---

<sup>1</sup>Doppler Shift Attenuation

en donde la energía de excitación fue extendida para poblar bandas hasta 7 MeV y fueron analizados los tiempos de vida y de alimentación lateral de algunos estados excitados. Además, E. Galindo [3] realizó la simulación del tiempo de poblamiento del continuo de estados discretos para núcleos en la región de  $A=80$ , formados en reacciones de iones pesados.

Es este trabajo se utilizan los datos obtenidos en el experimento realizado en *Florida State University* con la reacción  ${}^{48}_{22}\text{Ti}({}^{30}_{14}\text{Si}, p2n){}^{75}_{35}\text{Br}$  a una energía de 85 MeV, detectados por un sistema de 10 detectores de Germanio Hiperpuro; por medio del programa AJUSTE se determinan las vidas medias y los tiempos de alimentación lateral de algunos estados excitados del  ${}^{75}\text{Br}$ . Finalmente se comparan estos resultados con los obtenidos por los autores L. Lühmann *et al.* [2] y E. Galindo [3].

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1 Reacciones de Fusión-Evaporación

En un sentido general la *fusión* es el proceso en el cual dos núcleos forman uno nuevo más pesado, en este caso es básicamente la formación de un núcleo compuesto. Cuando los núcleos entran en contacto, estos forman un sistema en el cual los nucleones (protones y neutrones) interactúan fuertemente, el núcleo compuesto no es estable y puede decaer en cualquiera de los canales disponibles, mediante la emisión de partículas  $\alpha$ , protones o neutrones, lo que se denomina *evaporación* [5, 7, 8].

El concepto de canal es muy usado en general cuando se habla de las reacciones, se puede definir como los posibles estados del sistema. En este tipo de colisiones, el canal de entrada está usualmente bien definido, mientras que la naturaleza probabilística de la colisión produce una colección de canales de salida [9]. Para el caso específico de este experimento:

Canal de entrada	Núcleo compuesto	Canal de salida
${}_{14}^{30}\text{Si} + {}_{22}^{48}\text{Ti} \rightarrow$	${}_{36}^{78}\text{Kr} \rightarrow$	${}_{35}^{75}\text{Br} + p + 2n$
		${}_{34}^{74}\text{Se} + 2p + 2n$
		${}_{34}^{75}\text{Se} + 2p + 1n$
		${}_{34}^{72}\text{Se} + 2p + 4n$
		${}_{36}^{76}\text{Kr} + 2n$

Tabla 2.1: Tabla de núcleos involucrados en la reacción.

En donde los proyectiles son iones de  ${}^{30}\text{Si}$  y el blanco es una película de  ${}^{48}\text{Ti}$  de 600 nm de espesor; el proyectil es acelerado con una energía de 85 MeV. Esquemáticamente una reacción de fusión-evaporación se muestra en la Figura 2.1.

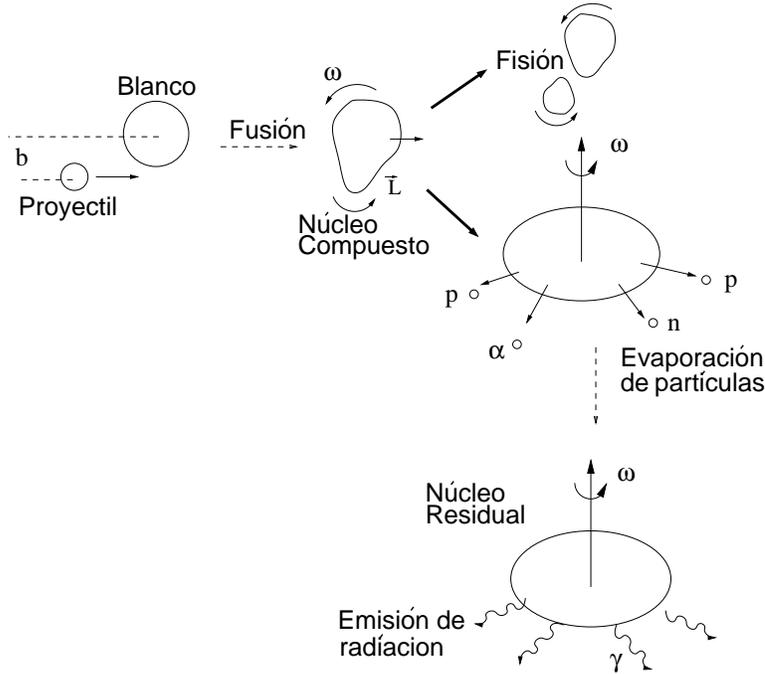


Figura 2.1: Esquema de una reacción de fusión-evaporación.

Otras características básicas de esta reacción son [9]:

- La conservación de la energía

$$m_i c^2 + T_i = m_f c^2 + T_f + E^* \quad (2.1)$$

siendo  $m_i$  y  $m_f$  las masas iniciales y finales de la reacción, respectivamente,  $T_i$  y  $T_f$  las energías cinéticas y  $E^*$  la energía de excitación.

- La conservación del momento angular, teniendo en cuenta que no se obtiene un único momento angular sino una distribución. El momento angular transferido en la reacción se puede determinar mediante el momento angular del proyectil y el parámetro de impacto  $b$  de acuerdo a la relación:

$$l = m_p v_p b \quad (2.2)$$

el parámetro de impacto  $b$  es la distancia entre los centros de masa del proyectil y el blanco en el momento de la reacción [Ver Figura 2.1]. En la figura  $\omega$  es la frecuencia angular a la cual rota el núcleo.

- La conservación del momento lineal, en el sistema de laboratorio.

$$m_p \cdot v_p = m_R \cdot v_R \quad (2.3)$$

siendo  $m_p$  la masa del proyectil,  $v_p$  la velocidad del proyectil,  $m_R$  la masa del núcleo residual,  $v_R$  su velocidad, hay que señalar que se considera la velocidad del núcleo blanco cero y que el momento lineal de las partículas evaporadas es muy pequeño en comparación a la del núcleo residual y se puede despreciar. De esta forma se puede determinar la **velocidad del núcleo residual** en el sistema de laboratorio, un parámetro muy importante para el análisis de datos.

$$v_R = \frac{m_p}{m_R} v_p \quad (2.4)$$

Para esta reacción la velocidad del  $^{75}\text{Br}$ , siendo  $c$  la velocidad de la luz, en el sistema de laboratorio es:

$$\boxed{v_{^{75}\text{Br}} = 0.032 c} \quad (2.5)$$

Luego de la formación del núcleo compuesto, en este caso  $^{78}\text{K}$ , hay cierta probabilidad de que el núcleo se fisione en lugar de que el núcleo decaiga a través de los estados de menor energía. Además de obtenerse un núcleo residual de  $^{75}\text{Br}$ , también se obtienen otros productos, como  $^{74}\text{Se}$ ,  $^{75}\text{Kr}$ , entre otros, debido a los diferentes canales de salida de la reacción como se muestra en la Tabla 2.1.

Por lo tanto al realizar el experimento hay que escoger la pareja de núcleos (proyectil-blanco) y la energía, para la cual el núcleo que se quiere estudiar tiene mayor probabilidad de formación, para esto se determina cual es la más alta sección eficaz de formación del núcleo compuesto a determinada energía. [Ver Figura 2.2]

Para la escogencia de la energía a la cual se va a hacer la reacción hay que tener en cuenta que a mayor energía, mayor momento angular de espín, que es finalmente lo que se quiere conseguir, como se explicará más adelante. Así, la sección eficaz más alta de formación del  $^{75}\text{Br}$  con el proyectil y blanco anteriormente mencionados, para la energía más alta posible (85 MeV) es de 184.34 mb.

Al realizar una gráfica de la energía de excitación y el momento angular de espín, en general se puede determinar para cada núcleo una línea "yrast"; esta línea es la secuencia de todos los estados que tienen el mayor momento angular de espín para una energía dada; debajo de la línea yrast no hay estados, cerca de la línea el número de estados es discretos y el número de estados por unidad de energía crece casi exponencialmente por encima de la línea. En una gráfica de este tipo se puede esquematizar la distribución inicial de la población y la distribución después de la evaporación de partículas en una reacción de fusión-evaporación; los estados

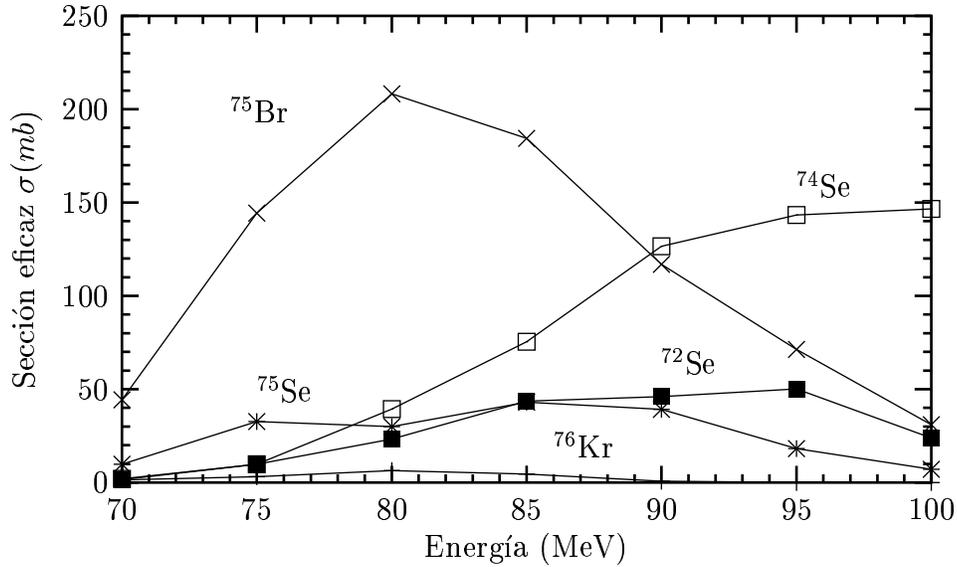


Figura 2.2: Sección eficaz total de formación de ciertos núcleos residuales para diferentes energías del haz.

de entrada pueblan los estados que están sobre la línea *y*rast [Ver Figura 2.3].

En la Figura 2.3, los estados iniciales son los formados directamente por la fusión, el núcleo compuesto obtiene una alta energía de excitación y un gran momento angular de espín, el cual al emitir partículas se libera de energía y puebla los estados de entrada del núcleo residual, los cuales emiten rayos  $\gamma$  hasta llegar a los estados *y*rast o cercanos y a lo largo de estos hasta llegar al estado base. La emisión  $\gamma$  se realiza para energías de excitación menores a la energía de enlace del neutrón.

## 2.2 Estados de Alto Espín

Para los estudios de los estados de alto espín se busca las reacciones en las cuales se transfiera al núcleo el más alto momento angular y energía posibles con la máxima sección eficaz. Se ha encontrado que las reacciones de fusión-evaporación son la forma más eficiente de lograr esto.

La rotación rápida de un núcleo induce modificaciones significativas en el movimiento de los nucleones, la estabilidad nuclear y en la forma. Las grandes cantidades de energía y momento angular transferido en las reacciones nucleares no son solamente convertidas en excitaciones externas, es decir rotación del núcleo como un todo sino

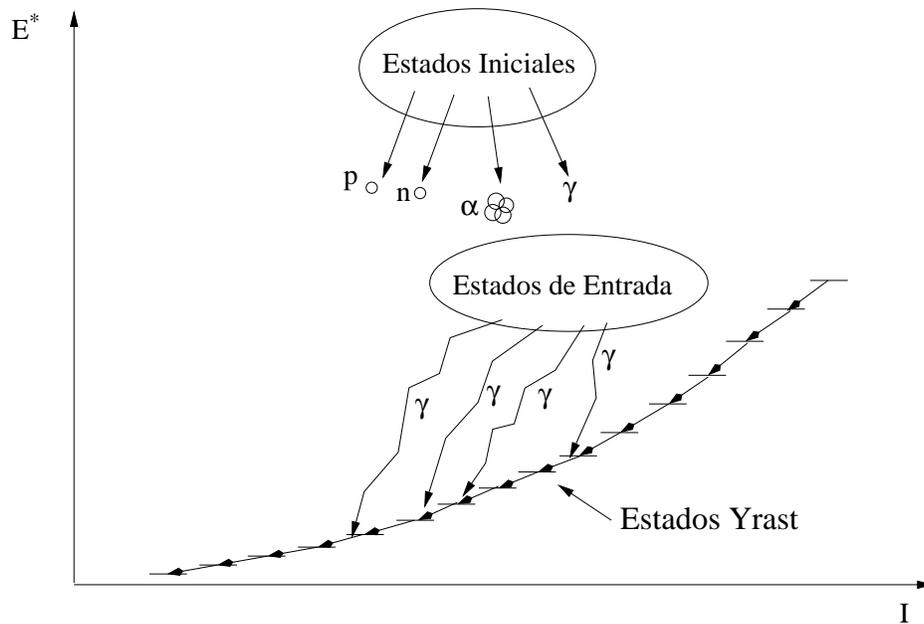


Figura 2.3: Esquema de una reacción de fusión-evaporación en el espacio de fase Momento angular de espín ( $I$ ) - Energía de excitación ( $E^*$ ).

también en otros grados de libertad internos [10, 11].

Existen dos diferentes modos de rotación que generan momento angular de espín alto; siendo  $\omega$  la frecuencia angular:

- **Rotación colectiva:** Muchos nucleones contribuyen coherentemente al movimiento nuclear resultando en una rotación de un número medible de nucleones alrededor de un eje diferente al eje de simetría del núcleo. Un ejemplo esquemático de un núcleo prolato rotando al rededor de un eje perpendicular al eje de simetría nuclear se muestra en la Figura 2.4.a.
- **Rotación no-colectiva:** En el caso de núcleos poco deformados o esféricos, el alineamiento de los orbitales de los nucleones individuales a lo largo del eje de simetría nuclear es el mecanismo de formación del gran momento angular. Este tipo de movimiento nuclear de partícula aislada en un núcleo oblató, se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.4.b.

Los dos tipos de rotación nuclear llevan a diferentes tiempos de vida de los estados excitados, puesto que el rayo  $\gamma$  proviene de transiciones colectivas o en el caso de una rotación no-colectiva por el reordenamiento de sólo algunas partículas, vía transiciones retardadas.

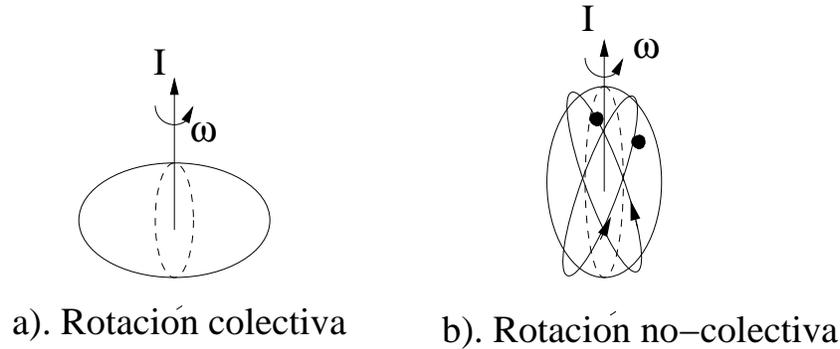


Figura 2.4: Dos diferentes modos de rotación que generan momento angular. a). Rotación colectiva de un núcleo prolato. b). Alinamiento de partículas en un núcleo oblató.

## 2.3 Características del $^{75}\text{Br}$

Con el fin de observar ordenadamente que características tienen y como dependen éstas del número de nucleones, es usual organizar los núcleos en una tabla dependiendo del número de protones  $Z$  y el número de neutrones  $N$ , este ordenamiento recibe el nombre de *Tabla de Núclidos* Figura 2.5 [12].

En la Figura 2.5, los cuadros en negro, representan a los núcleos estables, mientras que los otros decaen por alguna de las vías señaladas en el esquema. Las líneas horizontales y verticales señalan los *números mágicos*, que corresponden al número de nucleones que llenan completamente una capa, descrita por el modelo de capas nuclear, similar al modelo de capas atómico [13]. Los núcleos que se encuentran en cercanía de los números mágicos son particularmente estables, poco deformados o esféricos, forman capas cerradas y sus espectros provienen generalmente de excitaciones de partícula aislada [4, 14].

Por otro lado los núcleos ubicados en las regiones encerradas en círculos, son deformados y los espectros de estos núcleos pueden provenir de excitaciones colectivas rotacionales. El  $^{75}\text{Br}$  posee número de masa 75 y se ubica en la región de masa  $A = 80$ , tiene 35 protones y 40 neutrones, se encuentra alejado de los números mágicos 28 y 50 en la Tabla de Núclidos, lo cual indica que es un núcleo altamente deformado y con espectro rotacional.

La forma usual de representar los niveles de energía de un núcleo Figura 2.6, es el esquema de niveles de energía en el cual verticalmente se representa el aumento de energía de cada nivel ( $E_i > E_f$ ), también se notan los valores de momento angular

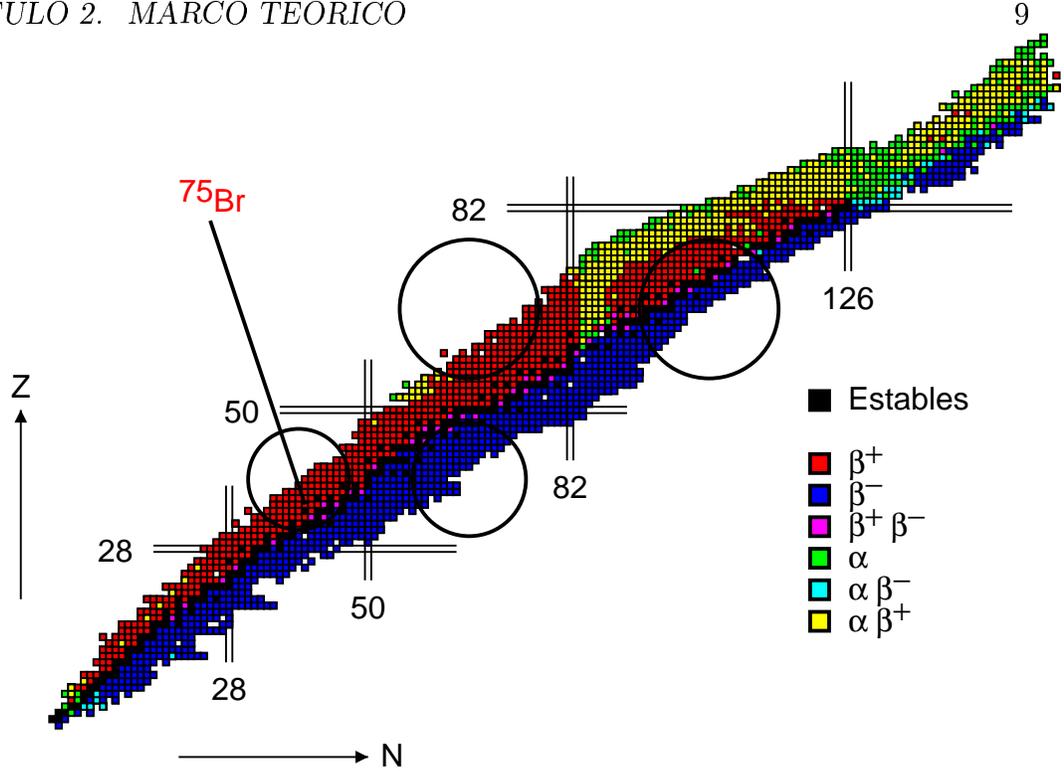


Figura 2.5: Tabla de Núclidos; el modo de decaimiento de los núcleos se muestra en el esquema.

de espín ( $I_i$  y  $I_f$ ) <sup>1</sup> y la energía de transición ( $E_\gamma$ ), es decir, la energía del rayo  $\gamma$  que media la transición. Los esquemas de niveles se separan en bandas, los niveles de cada banda poseen ciertas características en común, como la paridad  $\pi$  y la signatura  $\alpha = \frac{1}{2}(A \bmod 2)$  [15]. Además, siendo  $I$  el momento angular del núcleo y si éste rota colectivamente como un sólido rígido con momento de inercia  $\mathcal{J}$ , su energía de rotación es la solución a la ecuación de valores propios es:

$$\frac{\hbar^2}{2\mathcal{J}}\hat{I}^2|I\rangle = \frac{\hbar^2}{2\mathcal{J}}I(I+1)|I\rangle$$

por lo tanto las diferencias entre los niveles de energía en un esquema aumentan a medida que crece el momento angular de espín del nivel; así este tipo de espectros son característicos de un núcleo rotacional, como en el caso del  $^{75}\text{Br}$  en donde se puede ver ésto claramente, Figura 2.7 [2, 16].

<sup>1</sup>En este trabajo el momento angular de espín se expresa en unidades de  $\hbar$ .

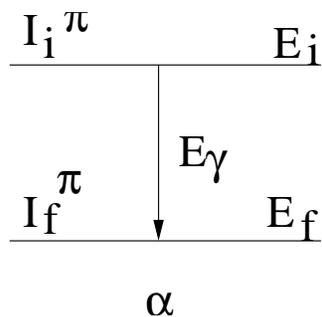


Figura 2.6: Valores escritos en el esquema de niveles. La transición con energía  $E_\gamma$ , se efectúa desde un nivel con energía inicial  $E_i$  y espín  $I_i$  hasta un nivel con energía inicial  $E_f$  y espín  $I_f$ ,  $\pi$  denota la paridad y  $\sigma$  la signatura.

El esquema de niveles de energía del  $^{75}\text{Br}$  posee tres bandas principales (en este trabajo se notan A, B y D) y otras 8 bandas mucho menos intensas (como se observa al comparar la banda C); 5 de estas bandas tienen paridad negativa y las otras 6 tienen paridad positiva. Este esquema parcial no muestra las otras 7 bandas menos intensas y tampoco las transiciones entre las bandas puesto que no se van a tomar en cuenta en el desarrollo del trabajo [17, 12].

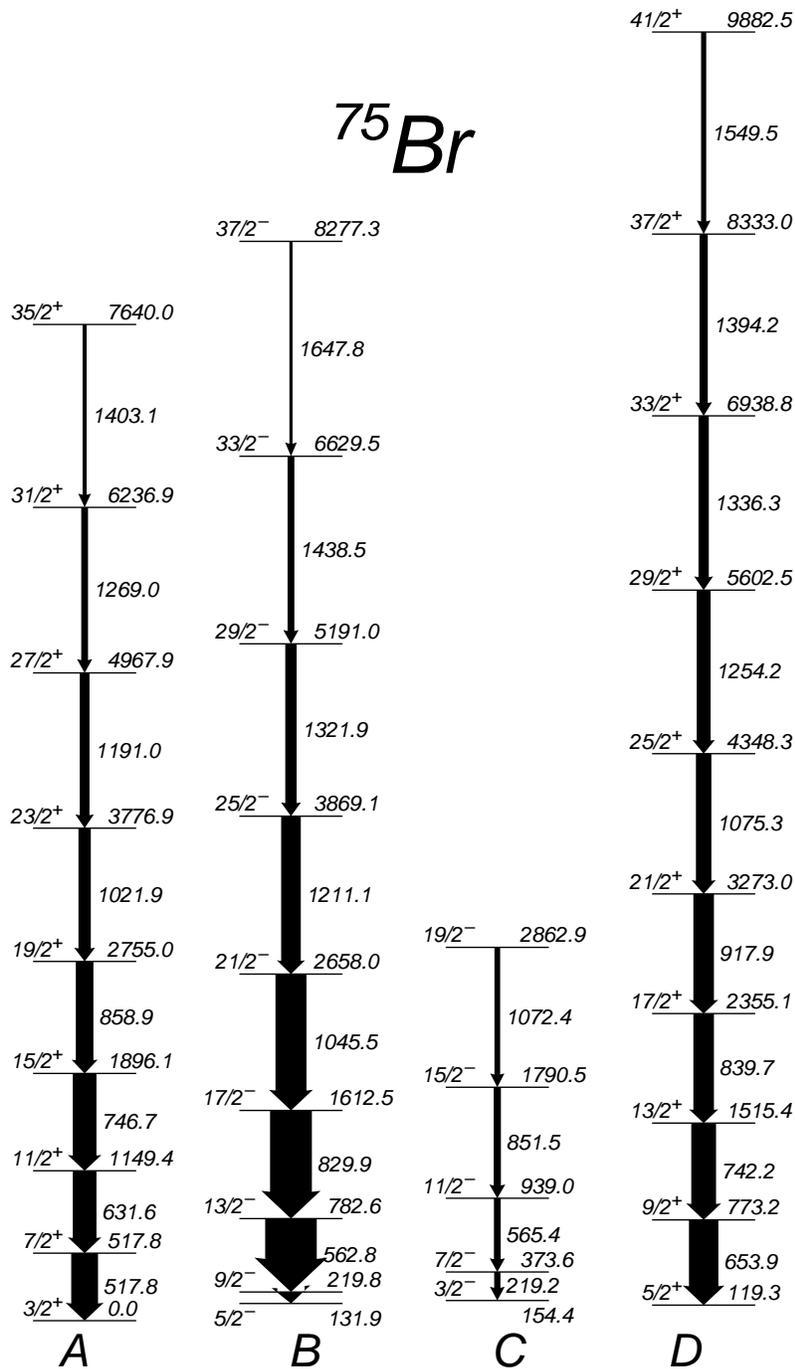


Figura 2.7: Esquema parcial de niveles del  $^{75}\text{Br}$ . El grosor de las flechas indican la intensidad de la transición. El espectro es rotacional como se espera debido a la ubicación del núcleo en la Tabla de Núclidos. Los valores de energía de transición y de excitación están en (keV).

En la Figura 2.8, se ubicaron las tres bandas principales del esquema de niveles, (A, B y D), teniendo en cuenta su energía de excitación y espín. La línea continua indica que los estados de las bandas A y D se ubican sobre la misma curva de decaimiento en este diagrama. Allí se puede ver que la línea yrast esta prácticamente formada por los estados de la banda B, hasta un valor de espín de  $37/2$  en donde se intercambian las líneas mostradas en la gráfica y las bandas A y D pasan a formar la línea yrast.

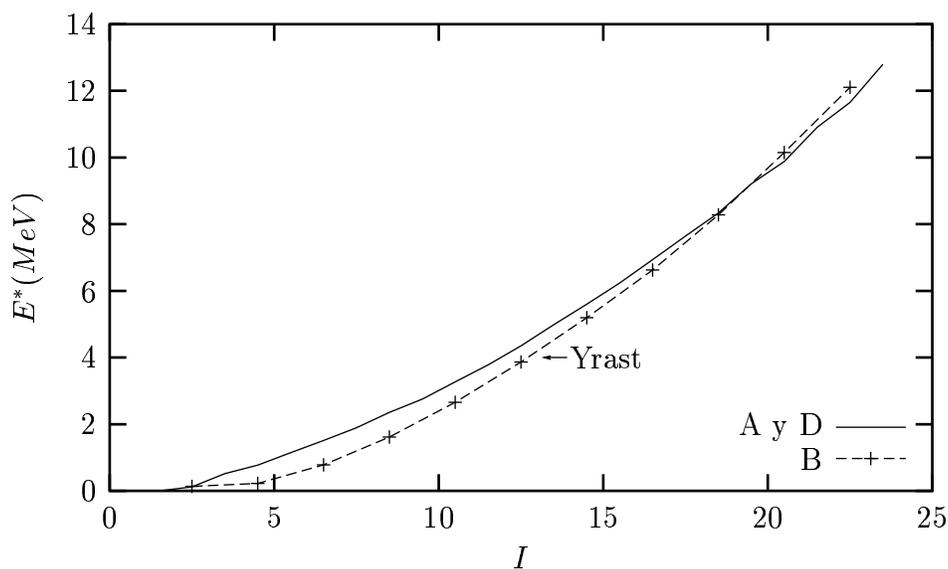


Figura 2.8: Gráfica de los niveles de energía del  $^{75}\text{Br}$  en el espacio de fase Momento angular de espín ( $I$ ) - Energía de excitación ( $E^*$ ). En donde se observa como a hasta espín  $I = 37/2$  la banda yrast esta conformada por la banda B y de ahí en adelante por las bandas A y D.

# Capítulo 3

## Montaje Experimental

### 3.1 Aceleradores

El experimento fué realizado en *Florida State University*, por S. Tabor, M. Cooper, W. Cluff, R. Cardona y F. Cristancho en el 2000, usando un sistema de aceleración tipo TANDEM-LINAC.

El acelerador lineal de *Florida State University* (LINAC) inició su funcionamiento en 1960, complementando un acelerador de Van de Graaff (TANDEM) de 6 MeV, que se incrementó a 9 MeV en 1970, fué el segundo acelerador de este tipo instalado en Estados Unidos y la primera aceleración útil de iones de helio cargados negativamente fué realizada en este laboratorio en 1961. El acelerador lineal superconductor, última versión del LINAC fué abierto en 1987, con este sistema se aumentó la energía, hasta aproximadamente 100 MeV [18].

#### 3.1.1 Acelerador Lineal Electrostático TANDEM

El acelerador TANDEM es un tipo de acelerador electrostático en donde los iones se aceleran a través de un gran campo electrostático el cual es generado por un *generador de Van der Graaff*. Los iones negativos producidos en la fuente de iones en tierra, son acelerados hacia el terminal de alto voltaje. En el momento de llegada al terminal de alto voltaje los iones negativos son transformados en iones positivos<sup>1</sup> los cuales son acelerados de nuevo hacia tierra. De esta forma, el haz de iones es acelerado dos veces por una terminal de alto voltaje Figura 3.1.1.

---

<sup>1</sup>Este proceso se realiza quitándole electrones a los iones haciéndolos pasar por una lámina de carbón.

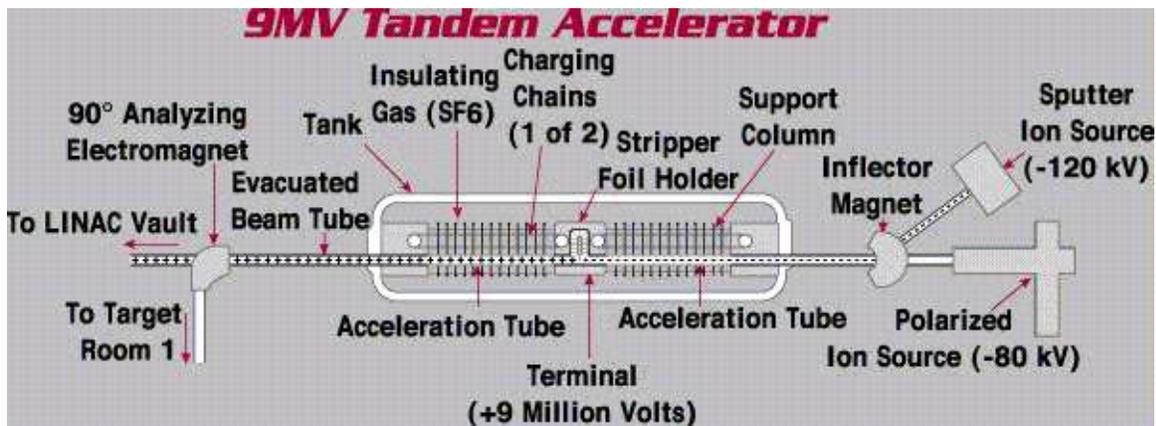


Figura 3.1: Diagrama de un acelerador lineal tipo TANDEM.

### 3.1.2 Acelerador Lineal Superconductor LINAC

Un acelerador lineal superconductor, se compone de varias secciones de aceleración, cada sección es un resonador que tiene dos brazos hechos de niobio metálico superconductor que aumentan la aceleración de los iones.

Si el haz es de iones positivos y considerando que no es continuo sino va en pulsos de iones, la oscilación de carga positiva y negativa entre los dos brazos en la secuencia correcta de tiempo, es la que aumenta la energía de los iones del haz.

En la Figura 3.2 se muestra varias etapas del proceso de aceleración en un resonador.

- a). El pulso de iones entra en el resonador.  
Primer brazo **negativo**, segundo brazo **positivo**.  
Los iones positivos son atraídos hacia el primer brazo negativo.
- b). Primer brazo **positivo**, segundo brazo **negativo**.  
Los iones positivos son atraídos hacia el segundo brazo negativo y repelidos por el primer brazo ahora positivo.

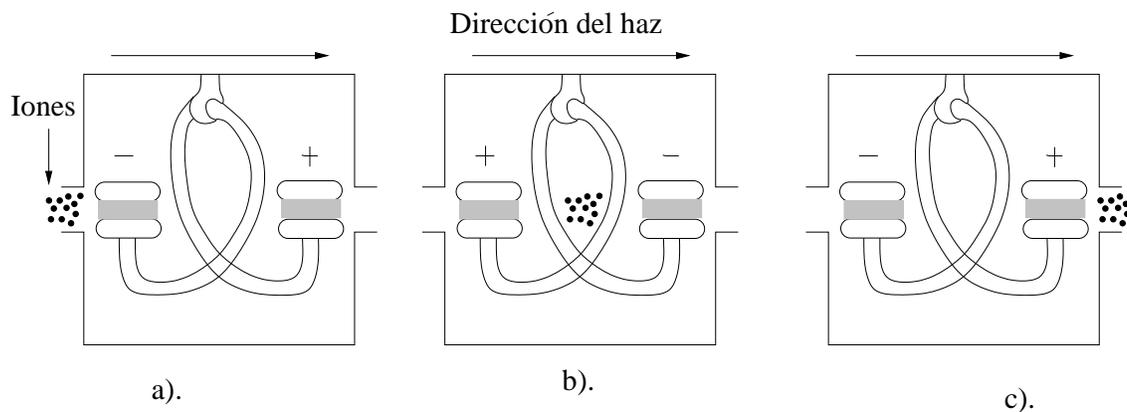


Figura 3.2: Diagrama de las etapas de aceleración en uno de los resonadores de un acelerador lineal tipo LINAC.

- c). Primer brazo **negativo**, segundo brazo **positivo**.  
 Los iones positivos son repelidos hacia afuera del resonador por el segundo brazo positivo y hacia el siguiente resonador en el LINAC.

El siguiente pulso de iones entra en el resonador y el ciclo comienza de nuevo. El tiempo de viaje del pulso de partículas a través del resonador es alrededor de  $0.1 \mu s$ .

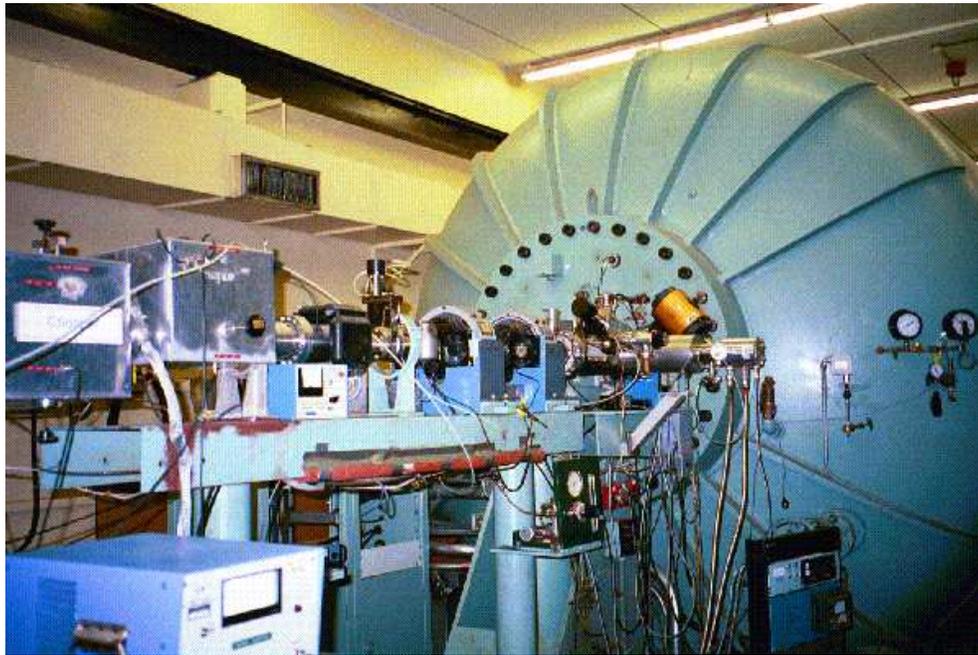


Figura 3.3: Sistema de aceleradores TANDEM-LINAC de *Florida State University*. Arriba TANDEM, abajo LINAC.

### 3.2 Disposición experimental de detectores

El arreglo experimental de detectores utilizado para la obtención de datos fue un montaje de diez detectores de Germanio Hiperpuro, dos de ellos Clovers; se utilizaron también supresores de efecto Compton.

Todos los detectores se encuentran ubicados aproximadamente a la misma distancia del blanco (14 cm); además están distribuidos de la siguiente forma Figura 3.4:

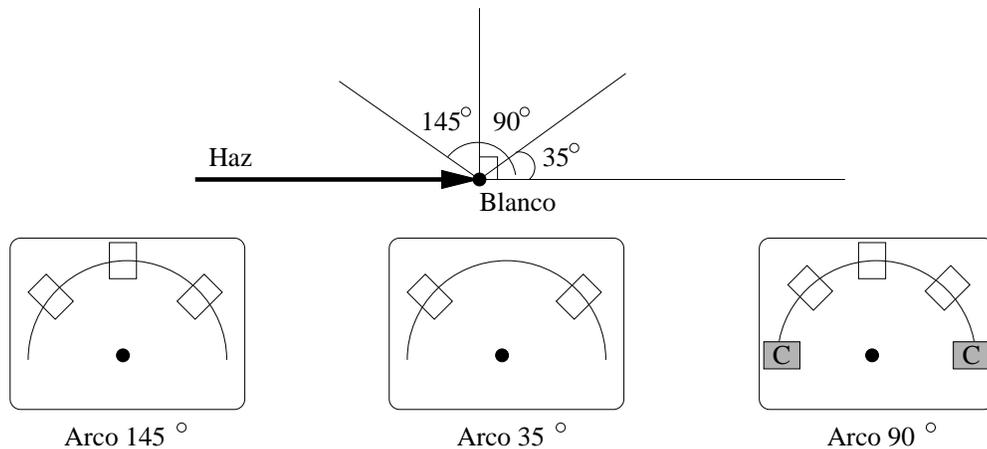


Figura 3.4: Montaje experimental para la obtención de datos; en los cuadros el haz entra por el punto negro, perpendicular al plano de la hoja.

- 3 detectores a  $145^\circ$ .
- 2 detectores a  $35^\circ$ .
- 5 detectores a  $90^\circ$ , dos de ellos *Clovers*.

Las dimensiones de los detectores son aproximadamente 2.6 cm de radio y 5.3 cm de altura.

Los detectores *Clover* son arreglos de 4 detectores de Germanio Hiperpuro ubicados como se muestra en la Figura 3.5, cada segmento puede tomarse como un detector individual en el análisis de datos. Generalmente este tipo de detectores puede utilizarse como detector de polarización de la radiación, mediante el efecto Compton que se presente entre los segmentos [19].

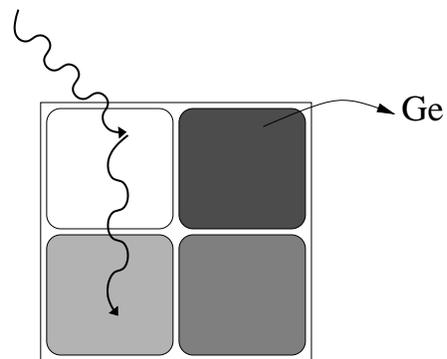


Figura 3.5: Detector *Clover*, cuatro segmentos de Germanio Hiperpuro.

Los rayos  $\gamma$  que presentan efecto Compton en los detectores pierden su identidad, debido a que pierden parte de su energía; esto crea para cada energía lo que se denomina fondo Compton y en un espectro multienergético ésto es un gran problema. Por lo tanto para obtener espectros “buenos” para el análisis, es necesario eliminar este fondo mediante el uso de supresores Compton [20].

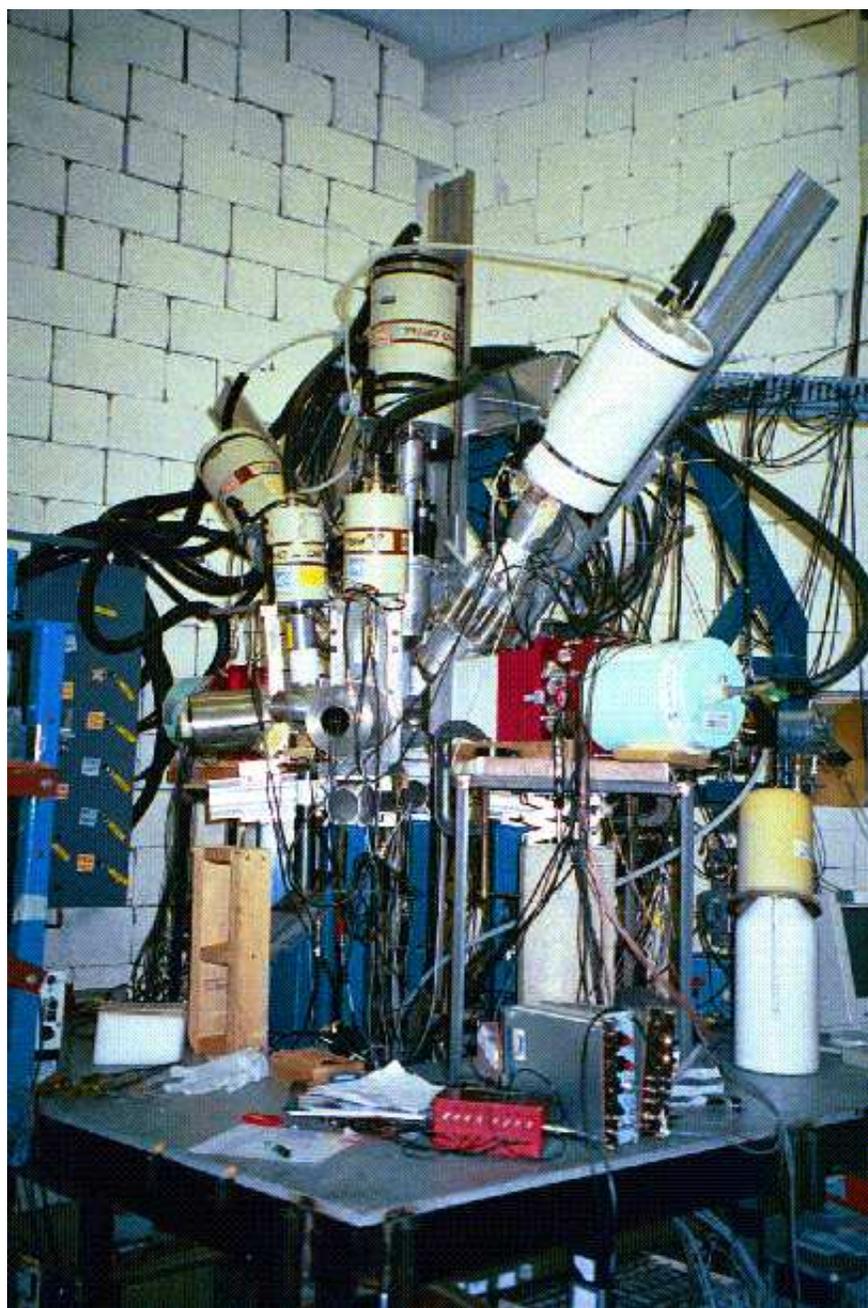


Figura 3.6: Disposición de detectores para éste experimento en *Florida State University*.

### 3.3 Parámetros de calibración

Los parámetros de calibración son muy importantes porque dicen como es la respuesta de los detectores. Hay diferentes tipos de parámetros que se deben tener en cuenta durante la realización del experimento y el análisis de datos. Se explican de forma general los que más influyen en la determinación de los tiempos de vida. En general para obtener todos los parámetros de calibración se usó el espectro de  $^{152}\text{Eu}$ , que es una fuente conocida.

#### 3.3.1 Calibración en energía

Los espectros experimentales se obtienen como histogramas almacenados en canales. Un canal es un segmento del histograma en donde “caen” los eventos con una energía dentro de un intervalo pequeño, así que se puede hallar una relación entre los canales y la energía que generalmente es lineal. En este caso al realizar el experimento se calibran los detectores para que la relación entre los canales y la energía sea de  $E = 0.8 \times \text{canal}$ , esta calibración de energía es la que se utiliza para ubicar los picos de los espectros una vez obtenidos.

#### 3.3.2 Resolución en energía

Uno de los parámetros que interviene en la respuesta del detector es la resolución, esta es la capacidad de un detector para distinguir entre picos de energía muy próximos, experimentalmente se puede determinar el FWHM (Full Width at Half Maximum) que es la anchura a la mitad de la altura de un pico a cierta energía y se relacionan de la siguiente manera [21]:

$$\text{resolución} = \frac{FWHM(E_\gamma)}{E_\gamma} \quad (3.1)$$

El ajuste mostrado en la Figura 3.7, se realizó determinando el valor de FWHM para los picos de la fuente de calibración  $^{152}\text{Eu}$ , para la cual se conocen los valores de las energías de transición y se descartan aquellos picos de baja intensidad. El polinomio al cual se ajusta la curva es:

$$FWHM = a + bE_\gamma + cE_\gamma^2 \quad (3.2)$$

en donde los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$ , son muy importantes en la determinación de los tiempos de vida.

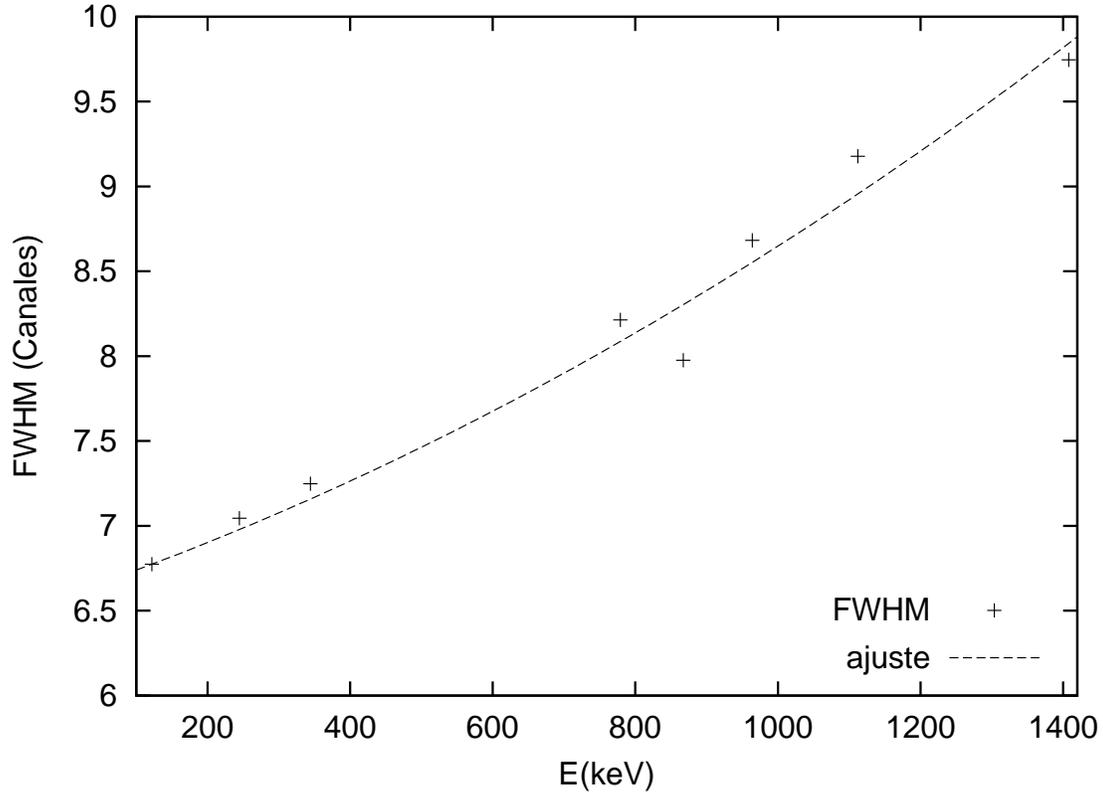


Figura 3.7: Ajuste de FWHM en función de la energía.

### 3.3.3 Eficiencia

La eficiencia es una cantidad que sirve para caracterizar la capacidad de un instrumento para detectar radiación. Existen varias definiciones de eficiencia. De ellas la más interesante es la *eficiencia intrínseca* ( $\epsilon(E_\gamma)$ ) [21].

$$\epsilon(E_\gamma) = \frac{\text{Número de fotones detectados con energía } E_\gamma}{\text{Número de fotones de energía } E_\gamma \text{ que inciden en el detector}} \quad (3.3)$$

Sin embargo no se puede determinar el número de fotones que inciden en el detector; así que se debe utilizar la *eficiencia relativa* que es otro parámetro que se determina a través de la fuente de calibración y muestra que el detector es menos eficiente para los rayos a mayor energía Figura 3.8. Se ajusta por medio de la relación:

$$\epsilon = a \exp(b \ln E) \quad (3.4)$$

Para este caso se asume una eficiencia del 100 % para los rayos provenientes de la

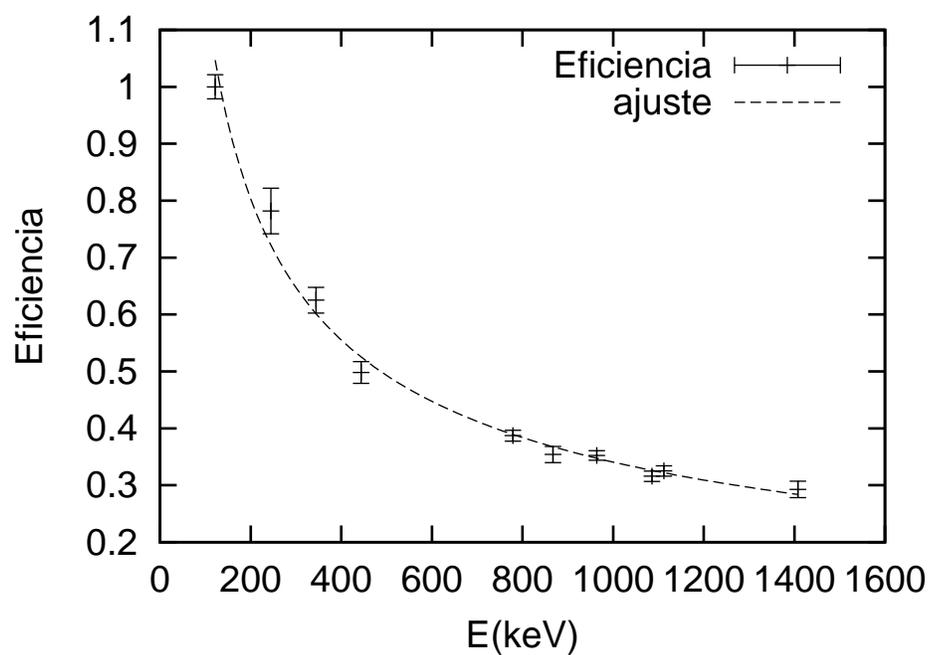


Figura 3.8: Eficiencia de los detectores en función de la energía.

transición de menor energía y se determina de acuerdo a ésta los valores de eficiencia relativa de los rayos  $\gamma$  provenientes de transiciones de mayores energías.

# Capítulo 4

## Obtención de Formas de Línea

### 4.1 Almacenamiento de datos

Los datos obtenidos para este experimento fueron registrados en 27 corridas [*runs*] para la reacción y 10 para calibración, durante 9 días.

Para analizar los datos, inicialmente se forman matrices de coincidencia [Ver Figura 4.1], para este caso en particular se hicieron dos matrices de coincidencia  $\gamma$ - $\gamma$  (histogramas), para los ángulos de  $145^\circ$  y  $35^\circ$ , debido a que el coseno de estos ángulos son complementarios:

Eje $x$	Eje $y$	Eje $z$
Detectores a $90^\circ$	Detectores a $145^\circ$	Eventos en coincidencia.
Detectores a $90^\circ$	Detectores a $35^\circ$	Eventos en coincidencia.

Tabla 4.1: Tabla de matrices de coincidencia  $\gamma$ - $\gamma$  para la obtención de formas de línea.

Al mencionar a los detectores a  $145^\circ$  en uno de los ejes de la matriz [Tabla 4.1], se refiere a los eventos tomados por los detectores ubicados a  $145^\circ$  de la línea del haz. Para explicar la formación de las matrices más fácilmente se tomará un ejemplo de un evento de la matriz. Si un rayo  $\gamma$  de energía  $E_\gamma$  es detectado por un detector ubicado a  $90^\circ$ , en la matriz se registrarán todos los eventos que lleguen a los detectores ubicados a  $145^\circ$  en ese mismo instante (en el caso de la primera matriz); pueden ser tres rayos  $\gamma$  con energías  $E_{\gamma_1}$ ,  $E_{\gamma_2}$  y  $E_{\gamma_3}$ ; así en la matriz quedarán tres puntos con coordenadas  $(E_\gamma, E_{\gamma_1})$ ,  $(E_\gamma, E_{\gamma_2})$  y  $(E_\gamma, E_{\gamma_3})$  y así sucesivamente hasta formar el histograma con la mayor cantidad de datos posibles.

El la Figura 4.1, se muestra un dibujo de como se podría observar una matriz de

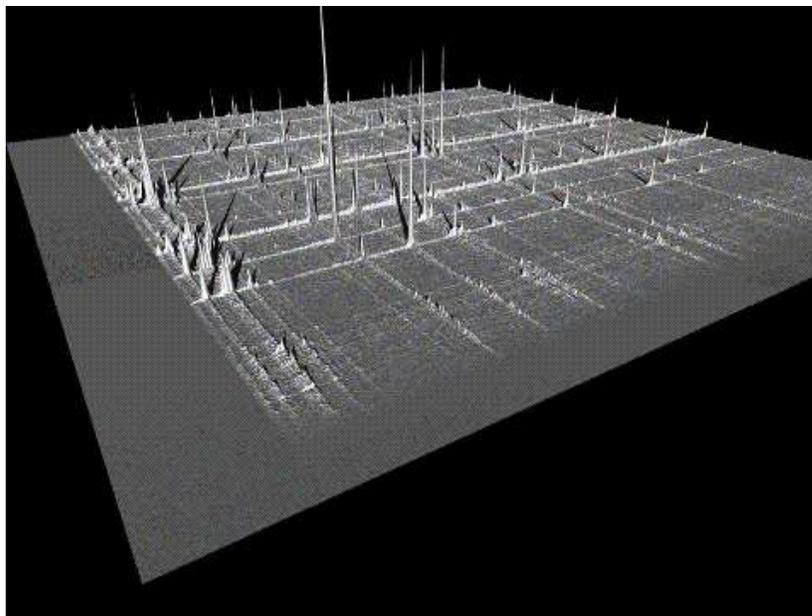


Figura 4.1: Ejemplo de una matriz de coincidencia.

coincidencia, los ejes  $x$  y  $y$  son la escala de energías de los rayos  $\gamma$  para cada grupo de detectores; mientras que en el eje  $z$  (hacia arriba), se almacenan los eventos detectados en coincidencia.

El programa para el manejo de los espectros de calibración es `singlsort`, para las construcciones de las matrices es `sqsort`.

## 4.2 Obtención de formas de línea

Una vez construidas las matrices, se tienen todos los eventos detectados en la reacción completa, sin embargo hay que tener en cuenta que no todos los rayos  $\gamma$  detectados provienen del  $^{75}\text{Br}$ ; para eliminar los eventos no deseados se realizan selecciones del espectro con el programa `gnuscope`.

`Gnscope` presenta inicialmente dos espectros de la matriz seleccionada, cada uno de los espectros son las proyecciones totales de la matriz en uno de sus ejes Figura 4.2.

Para seleccionar los eventos de interés se realiza una proyección de un rango de la matriz en uno de los ejes, el rango se selecciona alrededor de una energía de un rayo  $E_\gamma$  que provenga de una de las bandas del  $^{75}\text{Br}$  y dependiendo de la banda que se desee analizar, debido a que los eventos que se proyectarán serán los que coincidieron

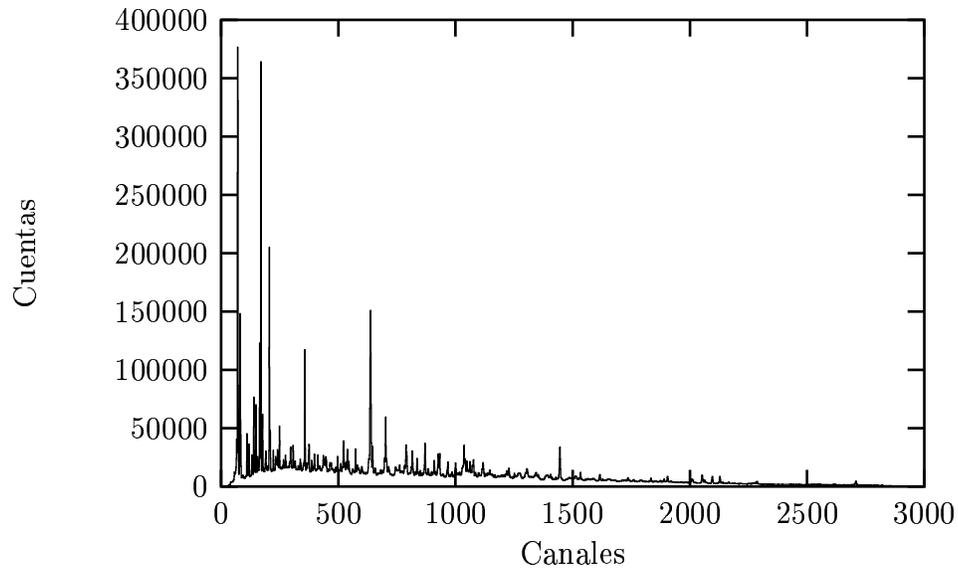


Figura 4.2: Proyección de una matriz en uno de sus ejes.

con  $E_\gamma$ .

Si se está estudiando una banda del esquema de niveles, una vez obtenidos las proyecciones en todas las transiciones de las bandas se suman para obtener un espectro con más estadística y poder de allí extraer las formas de línea de las transiciones de la banda.

# Capítulo 5

## Método DSA

El método de atenuación del corrimiento por efecto Doppler **DSA**<sup>1</sup>, permite medir vidas medias del orden de los pico segundos a las centésimas de picosegundos de estados alto spin, poblados en las reacciones de fusión-evaporación; debido a la alta velocidad relativa del núcleo residual en el marco de referencia del laboratorio al cual se hallan fijos los detectores, los rayos  $\gamma$  emitidos son detectados con un corrimiento en su energía por efecto Doppler,  $\Delta E$ , definido de la siguiente manera [1]:

$$E'_\gamma = E_\gamma + \Delta E \quad (5.1)$$

siendo  $E'_\gamma$  la energía del rayo  $\gamma$  medida en el marco de referencia del laboratorio y  $E_\gamma$  la energía de la transición. A primer orden en  $v/c$ , el corrimiento está dado por:

$$\Delta E = E_\gamma \frac{v}{c} \cos \theta \quad (5.2)$$

en donde  $v$  es la velocidad del núcleo residual en el instante de la emisión,  $c$  es la velocidad de la luz y  $\theta$  es el ángulo entre el detector y el haz [Ver Figura 3.4].

El blanco, una película de  $^{48}\text{Ti}$  de un espesor de 600 nm aproximadamente, se deposita en un sustrato de  $^{181}\text{Ta}$ ; los núcleos de  $^{75}\text{Br}$ , producidos dentro de la película, ingresan al sustrato en donde se frenan gradualmente hasta ser completamente detenidos Figura 5.1.

Es posible que algunos núcleos realicen la emisión cuando tienen una velocidad alta y otros cuando tienen una velocidad baja, dependiendo del tiempo de vida del estado que lo emite, presentando diferentes corrimientos por efecto Doppler Ecuación 5.2, por lo tanto las formas de línea de las transiciones en el espectro de energías se ensanchan desde la energía con corrimiento cero hasta el corrimiento correspondiente a la velocidad más alta  $E_{\gamma max}$  Figura 5.2.

---

<sup>1</sup>Doppler Shift Attenuation

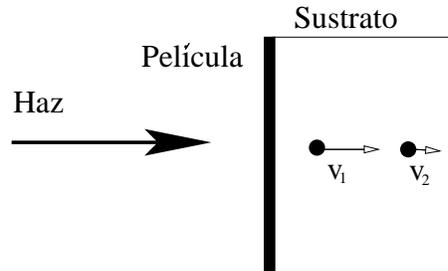


Figura 5.1: Los núcleos de  $^{75}\text{Br}$  formados en la película son frenados dentro del sustrato y poseen diferentes velocidades.

$$E'_{\gamma max} = E_{\gamma} + E_{\gamma} \frac{v_{max}}{c} \cos \theta = (1 + 0.032 \cos \theta) E_{\gamma} \quad (5.3)$$

En la Figura 5.2, además del ensanchamiento de las líneas espectrales se muestran diferentes formas de línea que dependen del tiempo de vida del estado. El pico que se forma sin corrimiento es llamado "stop peak", señalado con la flecha <sup>2</sup>, es el punto de referencia para observar el corrimiento.

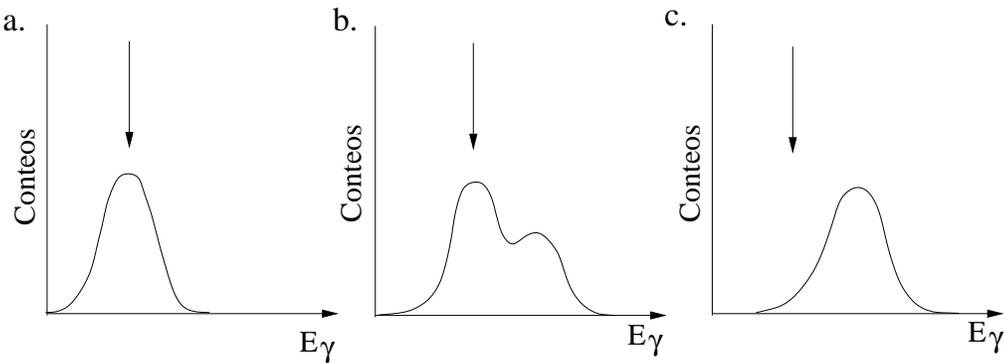


Figura 5.2: Formas de línea correspondientes a diferentes tiempos de vida para un ángulo  $\theta < 90$ , a). Tiempo de vida largo, b). Tiempo de vida medio y c). Tiempo de vida corto. La flecha indica el valor de la energía de transición sin corrimiento.

Cuando el tiempo de vida es muy largo (del orden de picosegundos) el núcleo en el momento de la emisión está totalmente frenado dentro del sustrato y no hay corrimiento por efecto Doppler, el espectro que se obtiene es una distribución alrededor

<sup>2</sup>En general en todos los espectros mostrados en este trabajo se señala el correspondiente stop peak mediante una flecha.

del valor de energía de la transición, debido a que es un proceso estadístico Parte a. Si el tiempo de vida no es muy largo (décimas de picosegundos) algunos de los núcleos emitidos presentan corrimiento y otros no, así se obtiene una forma de línea como la mostrada en la parte b; estas formas de línea son las que se desean analizar para obtener el valor del tiempo de vida del estado. En el caso en que el tiempo de vida sea muy corto (centésimas de picosegundos) los valores de energía de los diferentes núcleos forman una distribución completamente desplazada del valor de energía sin corrimiento Parte c.

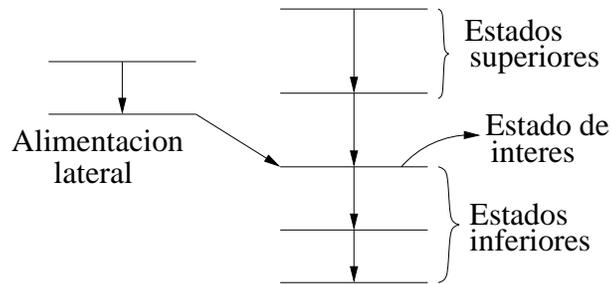


Figura 5.3: Esquema de una banda con alimentación lateral.

Para determinar el tiempo de vida media de un estado de interés, es necesario conocer los tiempos de vida de los estados superiores y además conocer los tiempos de alimentación lateral, que son los tiempos de vida de los estados que alimentan lateralmente el estado de interés; éstas son transiciones provenientes de estados del continuo (parte superior a la línea yrast) y las transiciones entre las bandas del mismo núcleo [Ver Figura 5.3]. Al estado de mayor energía que se desea estudiar, se asume que no posee tiempo de alimentación lateral ni estados superiores, lo cual no resulta necesariamente cierto y lleva a determinar un **tiempo de vida media efectivo**, por lo general mayor.

# Capítulo 6

## Programa

El conjunto de programas AJUSTE fueron realizados por A. Garzón [1], en su trabajo de maestría en el Grupo de Física Nuclear de la Universidad Nacional de Colombia. Estos emplean algoritmos expuestos en el correspondiente trabajo que no se explicarán detalladamente en este trabajo. Los programas para determinar los tiempos de vida se describen a continuación.

### 6.1 trim

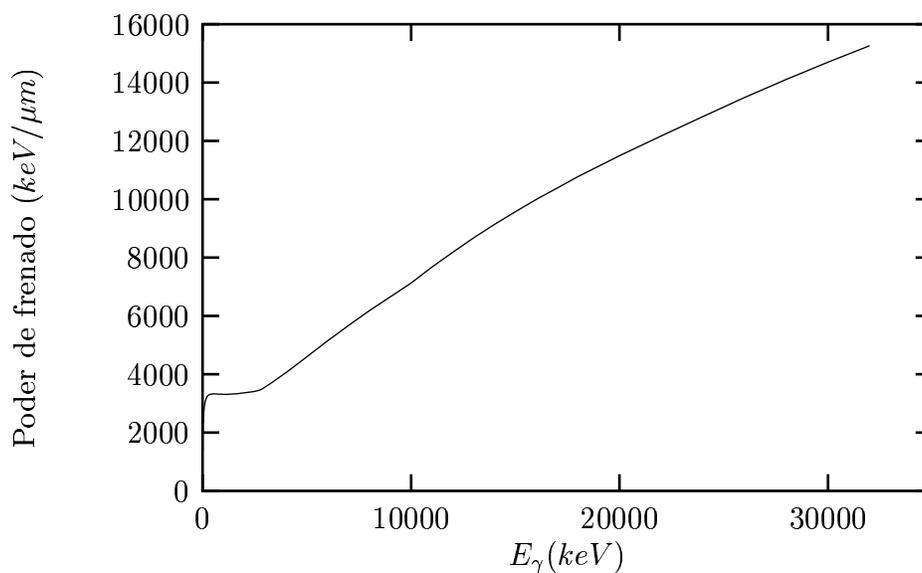


Figura 6.1: Poder de frenado para el  $^{75}\text{Br}$  propagándose dentro del sustrato de  $^{181}\text{Ta}$ .

Inicialmente se necesita generar una tabla de poder de frenado del núcleo residual en el sustrato, es decir la cantidad de energía que pierde el núcleo dentro del frenador por unidad de longitud. La tabla debe abarcar energía desde cero hasta una energía mayor que el máximo valor posible de la energía inicial del núcleo residual (85 MeV). El poder de frenado para el  $^{75}\text{Br}$  propagándose dentro de el sustrato de  $^{181}\text{Ta}$ , calculado con `trim`<sup>1</sup> se muestra en la Figura 6.1.

## 6.2 prob\_cos

Genera la distribución de  $\cos\theta$ , es decir la distribución de probabilidad de la dirección de los fotones emitidos en determinada transición. Este programa genera un archivo con los valores de la distribución Figura 6.2.

Los parámetros de entrada para generar esta distribución son:

1. Radio del detector (2.6 cm).
2. Altura del detectors (5.3 cm).
3. Distancia del detector al blanco (14 cm).
4. Angulo entre el haz y el detector en grados (145° ó 35°).

## 6.3 stopping9

Este programa genera la distribución de probabilidad  $\beta_k$  como función del tiempo, siendo  $\beta_k$  la componente de la velocidad del núcleo residual en la dirección del vector de onda  $\vec{k}$  del fotón emitido, dividida entre la velocidad de la luz.

$$\beta_k = \frac{v}{c} \cos \theta \quad (6.1)$$

Los parámetros de entrada para éste programa son:

1. Número de masa del proyectil A=30.
2. Número de masa del blanco A=48.
3. Número de masa, número atómico del núcleo residual A=75 Z=35.
4. Número de masa, número atómico del frenador A=181 Z=73.

---

<sup>1</sup>NO se de donde salió el programa

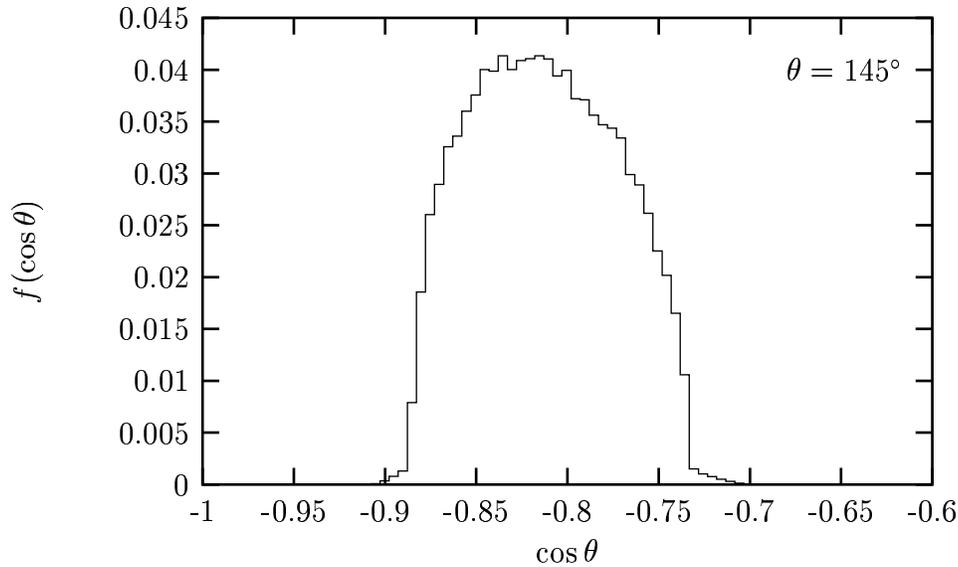


Figura 6.2: Distribución de  $\cos \theta$  para  $\theta = 145^\circ$ .

5. Energía del proyectil (85 MeV).
6. Otros parámetros para el cálculo de la energía cinética, la velocidad y la profundidad.
7. Archivo de la distribución de cosenos.

La energía cinética del núcleo residual  $T(x)$ , en función de la profundidad dentro del sustrato que se obtiene con esta sección del programa esta graficada en la Figura 6.3, allí se puede observar que la energía cinética disminuye a medida que el núcleo se adentra en el sustrato.

La profundidad del núcleo residual dentro del sustrato  $x(t)$ , en función del tiempo, está representado en la Figura 6.4; aquí se nota claramente que el núcleo residual es frenado por completo en aproximadamente 1.5 ps y que sólo es necesario un sustrato con un poco más de 4  $\mu m$  para que la mayoría de los núcleos queden dentro del sustrato.

En general las gráficas de la velocidad del núcleo residual dentro del sustrato en función del tiempo Figura 6.5 y de la velocidad del núcleo residual dentro del sustrato en función de la profundidad en el sustrato Figura 6.6, ofrecen la misma información que la Figura 6.4; en estas gráficas se observa que la velocidad es cero para un tiempo mayor que 1.5 ps y para una profundidad de 4.2  $\mu m$ .

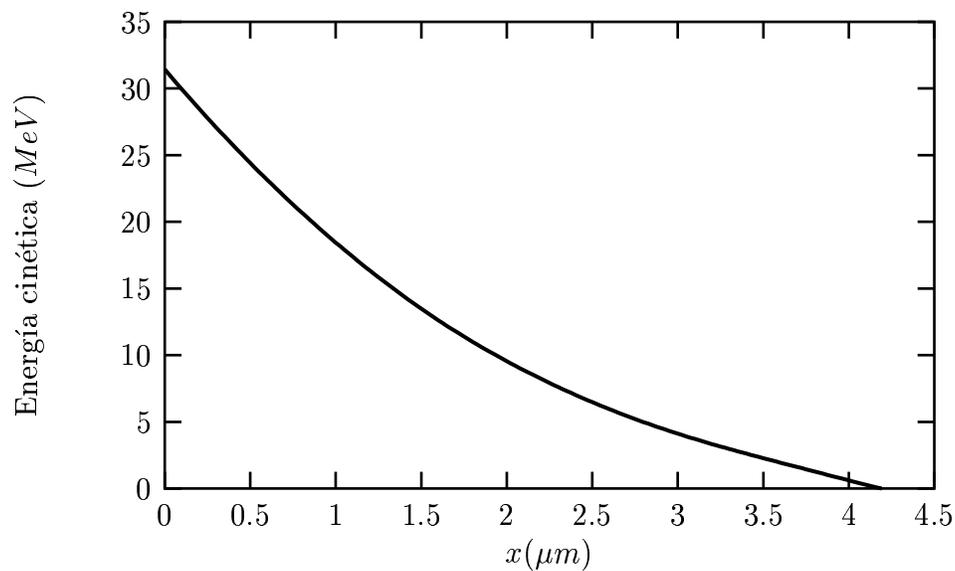


Figura 6.3: La energía cinética del núcleo residual, en función de la profundidad dentro del sustrato  $T(x)$

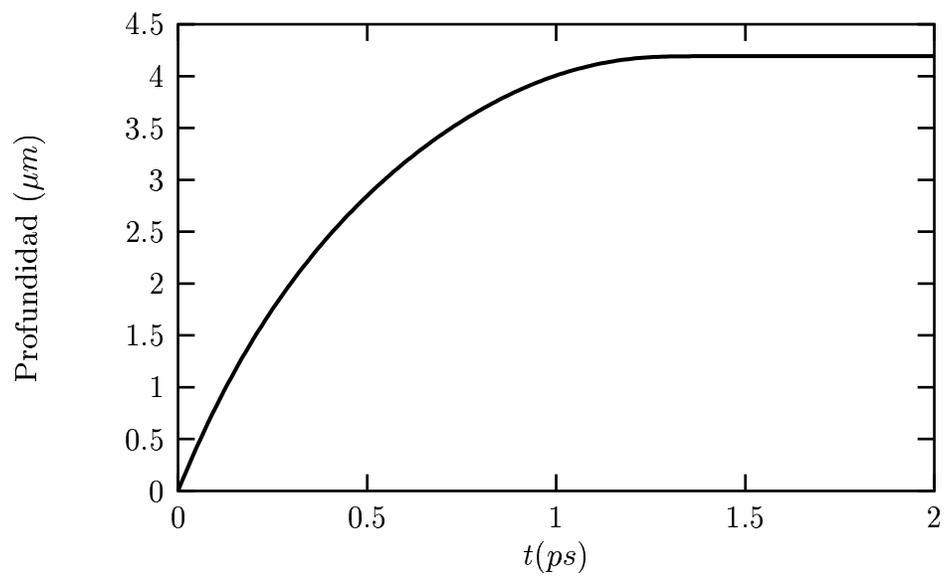


Figura 6.4: La profundidad del núcleo residual dentro del sustrato, en función del tiempo  $x(t)$ .

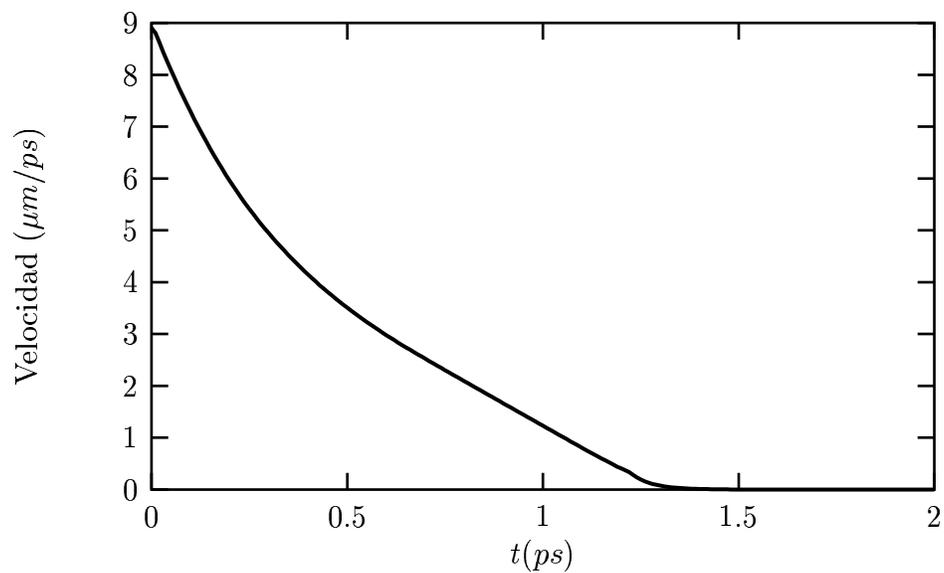


Figura 6.5: Velocidad del núcleo residual dentro del sustrato en función del tiempo.

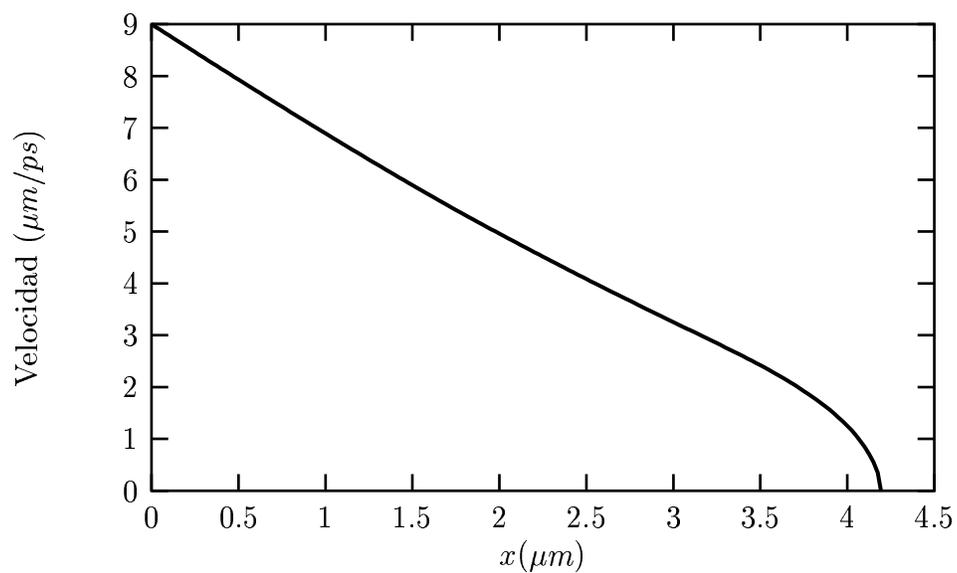


Figura 6.6: Velocidad del núcleo residual dentro del sustrato en función de la profundidad en el sustrato.

## 6.4 ajuste15

Con este programa se generan las formas de línea y se comparan con las formas de línea experimentales, a través de variación en rangos determinados de tiempos de vida y tiempo de alimentación lateral.

Los parámetros de entrada para éste programa son:

1. Energía del rayo  $\gamma$  de la transición correspondiente.
2. La calibración de los canales en energía  $E = 0.8Ch$ .
3. La calibración de FWHM con respecto a la energía.  
FWHM =  $0.81 + 2.54 \times 10^{-5}E + 1.9 \times 10^{-6}E^2$
4. Histograma con el espectro experimental.
5. Radiación de fondo (Background).
6. Patrón de poblamiento.
7. Tiempos de vida de los estados superiores.
8. Intensidades de cada transición superior.

El patrón de poblamiento es muy importante para el ajuste de las formas de línea, para este caso se utilizaron patrones de poblamiento con un sólo tiempo de alimentación lateral por cada estado [Ver Figura 6.7].

En el caso de la Figura 6.7, el estado para el cual se quiere determinar el tiempo de vida es  $|\phi_6\rangle$  y el estado que lo alimenta lateralmente es  $|\phi_5\rangle$ , por lo tanto hay que conocer los tiempos de vida de los estados superiores  $|\phi_4\rangle$  y  $|\phi_2\rangle$  y los tiempos de alimentación lateral correspondientes  $|\phi_3\rangle$  y  $|\phi_1\rangle$ .

## 6.5 Determinación y error del tiempo de vida

Una vez introducidos todos los parámetros apropiados para la ejecución de los programas se procede a obtener la forma de línea que más se ajuste al histograma experimental, para esto se busca el mínimo  $\chi_r^2(\tau)$ , que se calcula de la siguiente forma:

$$\chi_r^2(\tau) = \frac{1}{n} \sum_i \frac{(y_i - C h_i(\tau))^2}{\sigma_i^2} \quad (6.2)$$

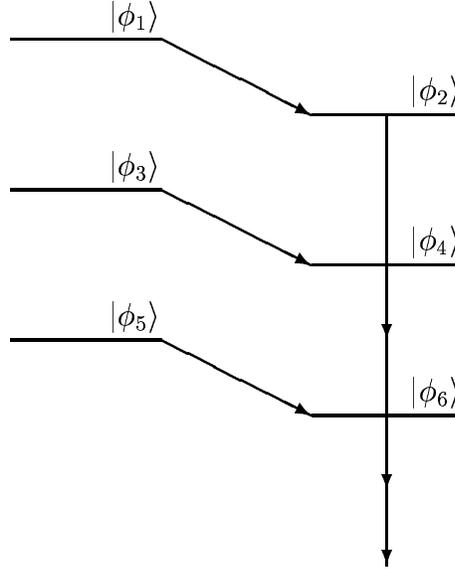


Figura 6.7: Ejemplo de un patrón de poblamiento

en donde  $y_i$  es el número de cuentas en el canal  $i$ -ésimo de la forma de línea experimental,  $\sigma_i$  es la desviación estándar de la distribución de probabilidad  $y_i$ ,  $n$  es el número de canales de la forma de línea experimental,  $C$  es una constante de normalización [1] y

$$h_i(\tau) = \int_{E_i - E_\gamma}^{E_i - E_\gamma + \delta E} f(\Delta E, \tau) d(\Delta E) \quad (6.3)$$

con  $(E_i, E_i + \delta E)$  es el rango de energía abarcado por el canal  $i$ -ésimo.

Cuando se obtenga el valor  $\tau_0$  para el cual  $\chi_r^2(\tau_0) = \chi_{min}^2$ , sea un mínimo, entonces los extremos del intervalo de incertidumbre son los valores  $\tau_a$  y  $\tau_b$  tales que:

$$\chi_r^2(\tau_a) = \chi_r^2(\tau_b) = \chi_{min}^2 + 1 \quad (6.4)$$

En la Figura 6.9, se muestra como se representan los valores mínimo y máximo de un tiempo de vida en el ajuste de la forma de línea.

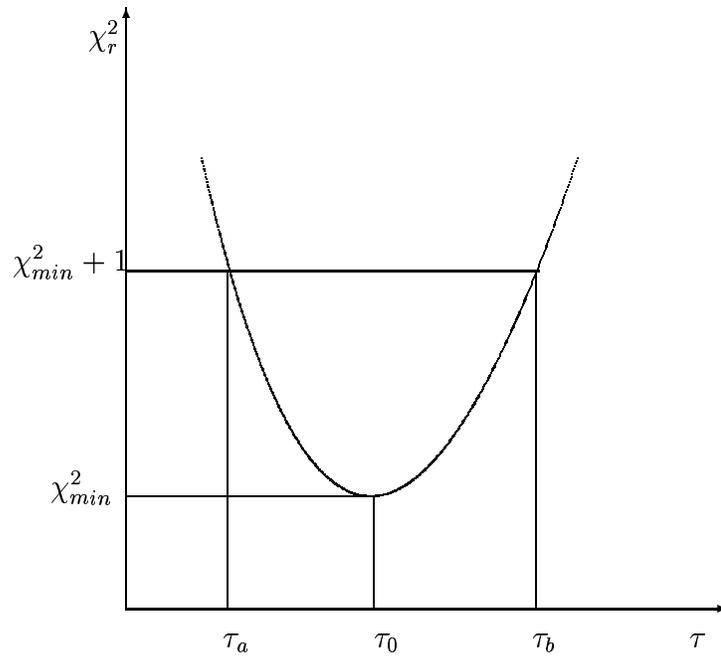


Figura 6.8: Valor calculado  $\tau_0$  e incertidumbre; los valores  $\tau_a$  y  $\tau_b$  representan el mínimo y el máximo valor del tiempo de vida.

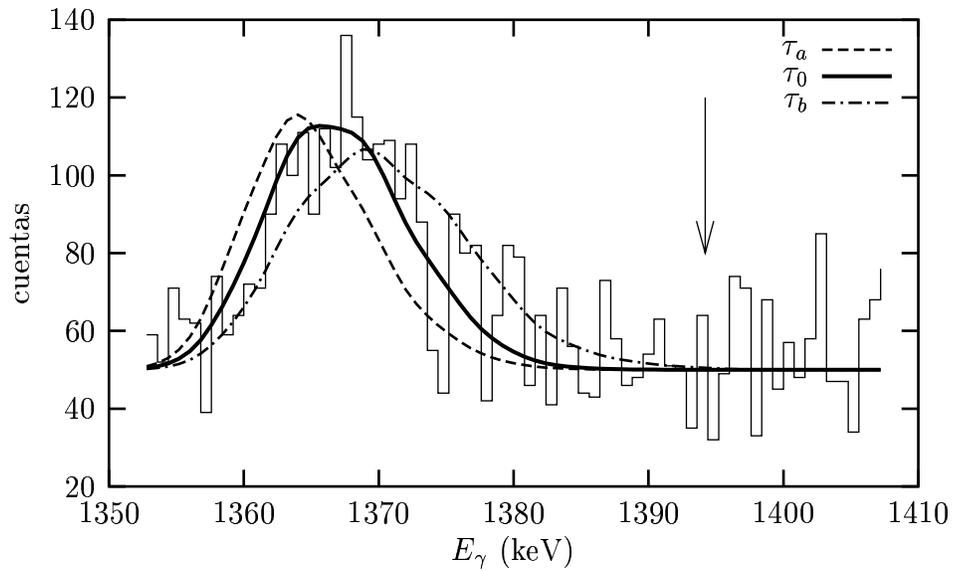


Figura 6.9: Representación de los valores mínimo y máximo de un tiempo de vida en la forma de línea.

# Capítulo 7

## Ajuste de Formas de Línea

Las formas de línea que se obtuvieron fueron de las transiciones de las bandas B y D del esquema de niveles Figura 2.7, se explican separadamente cada una de las formas de línea obtenidas para cada banda.

### 7.1 Banda B

La banda B es la banda que forma la línea yrast con estados excitados hasta de spin  $37/2^-$  Figura 2.3, los estados de baja energía ( $E_\gamma < 1300$  keV) son los más intensos y por lo tanto las transiciones de esta banda son las más numerosas y las que más estadística poseen, facilitando así la extracción de las formas de línea. En la Figura 7.1 se representa la banda B con las transiciones observables, su energía  $E_\gamma$  en keV y el momento angular de spin  $I$  de cada estado excitado en unidades de  $\hbar$ , la banda es de paridad  $\pi$  negativa.

$E_\gamma$ (keV)	$\Delta E_{max}$ (keV)	$E'_{\gamma(max)}(145^\circ)$ (keV)	$E'_{\gamma(max)}(35^\circ)$ (keV)
1438.5	$\pm 37.7$	1400.8	1476.2
1321.9	$\pm 34.6$	1287.2	1356.5
1211.1	$\pm 31.7$	1179.4	1242.8
1045.5	$\pm 27.4$	1018.1	1072.9
829.9	$\pm 21.7$	808.1	851.6
562.8	$\pm 14.7$	548.1	577.5

Tabla 7.1: Tabla de máximo corrimiento de energía para las transiciones de la banda B.

En la Figura 7.2 se muestran los espectros con corrimiento Doppler obtenidos al realizar proyecciones en todas las transiciones posibles (desde 562.8 keV hasta 1211.1

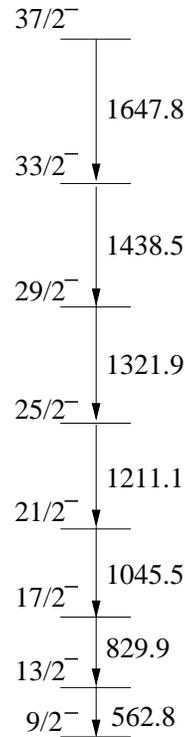


Figura 7.1: Esquema de niveles de la banda B. Se muestran las energías de las transiciones  $E_\gamma$  en keV, el spin  $I$  y la paridad  $\pi$ .

keV) y sumar los espectros obtenidos. Solo se muestran algunas de las transiciones de la banda para observar mejor los corrimientos tanto a mayores energías ( $\theta = 35^\circ$  abajo) como hacia menores energías ( $\theta = 145^\circ$  arriba), las flechas indican la posición que debería tener el pico si no hubiera corrimiento (*stop peak*).

Además en la Tabla 7.1 se muestra que las formas de línea son simétricas alrededor del valor de  $E_\gamma$ , esto debido a que los ángulos a los cuales están ubicados los detectores son simétricos con respecto a  $90^\circ$ ; el corrimiento  $\Delta E_{max}$  (keV) con  $v_{max} = 0.032c$ , es igual para los dos ángulos pero con signo contrario y disminuye con la energía.

Otras características del espectro de la banda son:

- El área de los picos disminuye a medida que la energía aumenta debido a la disminución de intensidad de las transiciones.
- El stop peak solo se ve claramente para las transiciones hasta de 1045.5 keV y desaparece para energías más altas, lo cual indica una disminución del tiempo

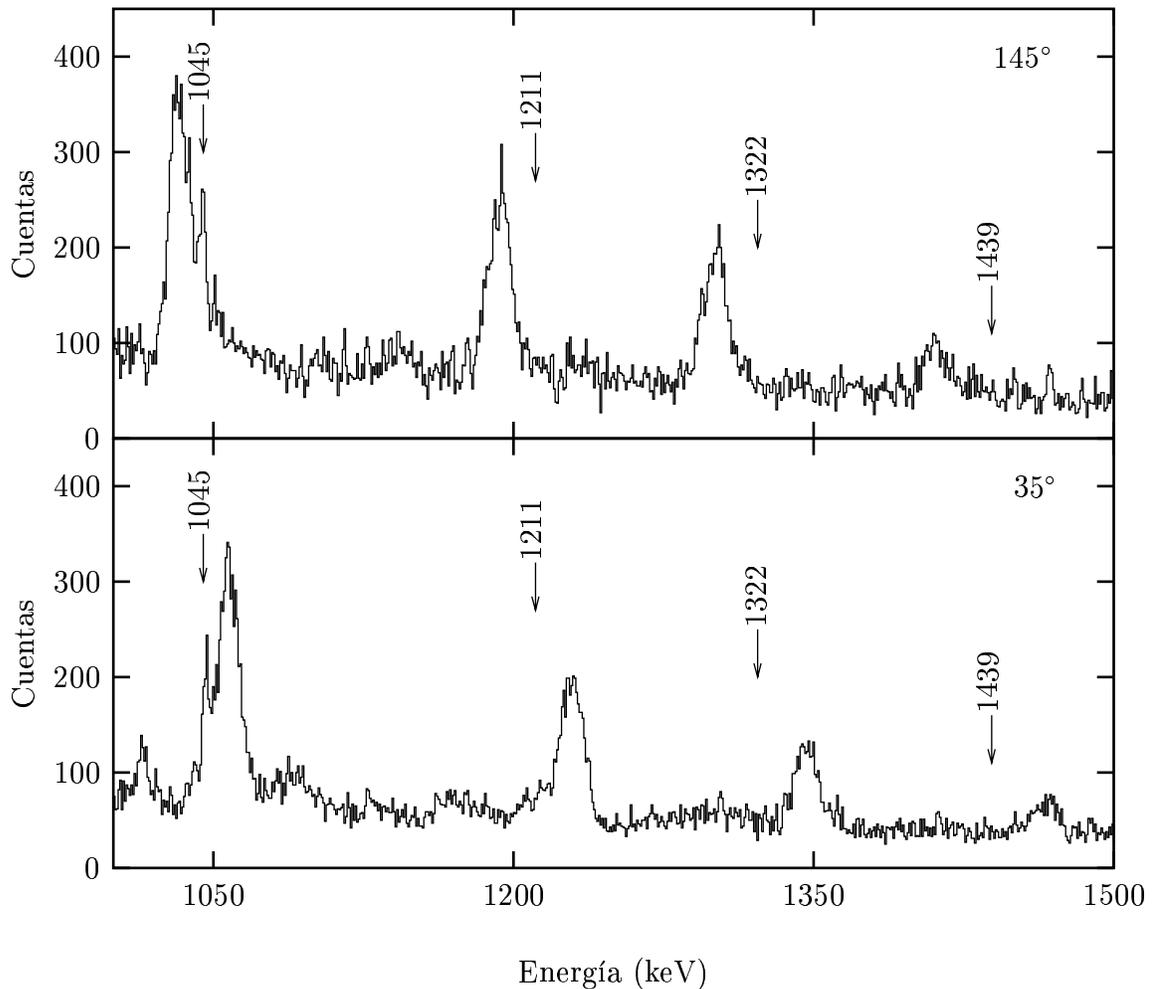


Figura 7.2: Espectros con corrimiento Doppler para la banda B. Arriba corrimiento con  $\theta = 145^\circ$ , abajo corrimiento con  $\theta = 35^\circ$

de vida a medida que la energía aumenta.

- El número de cuentas en el espectro a  $145^\circ$  es por lo general mayor que el número de cuentas en el espectro a  $35^\circ$ , ya que a  $145^\circ$  hay un detector más que para  $35^\circ$ ; lo cual implica una cantidad mayor de eventos detectados para  $145^\circ$ .

Algo muy importante es que se observan pequeños picos a diferentes valores de energía que pueden afectar las distribuciones de las formas de línea, éstos pueden provenir de otras bandas del mismo núcleo o de algún otro núcleo formado en la reacción; sin embargo su intensidad es baja comparados con los picos de interés.

**7.1.1 Estado ( $37/2^-$ ). Transición 1647.8 keV.**

Esta transición es la de mayor energía para la cual se puede obtener una forma de línea que se pueda ajustar, pero únicamente para el corrimiento con  $\theta = 145^\circ$  que como se mencionó anteriormente a ese ángulo hay un detector más que en el ángulo de  $\theta = 35^\circ$  y por lo tanto se tiene mayor estadística.

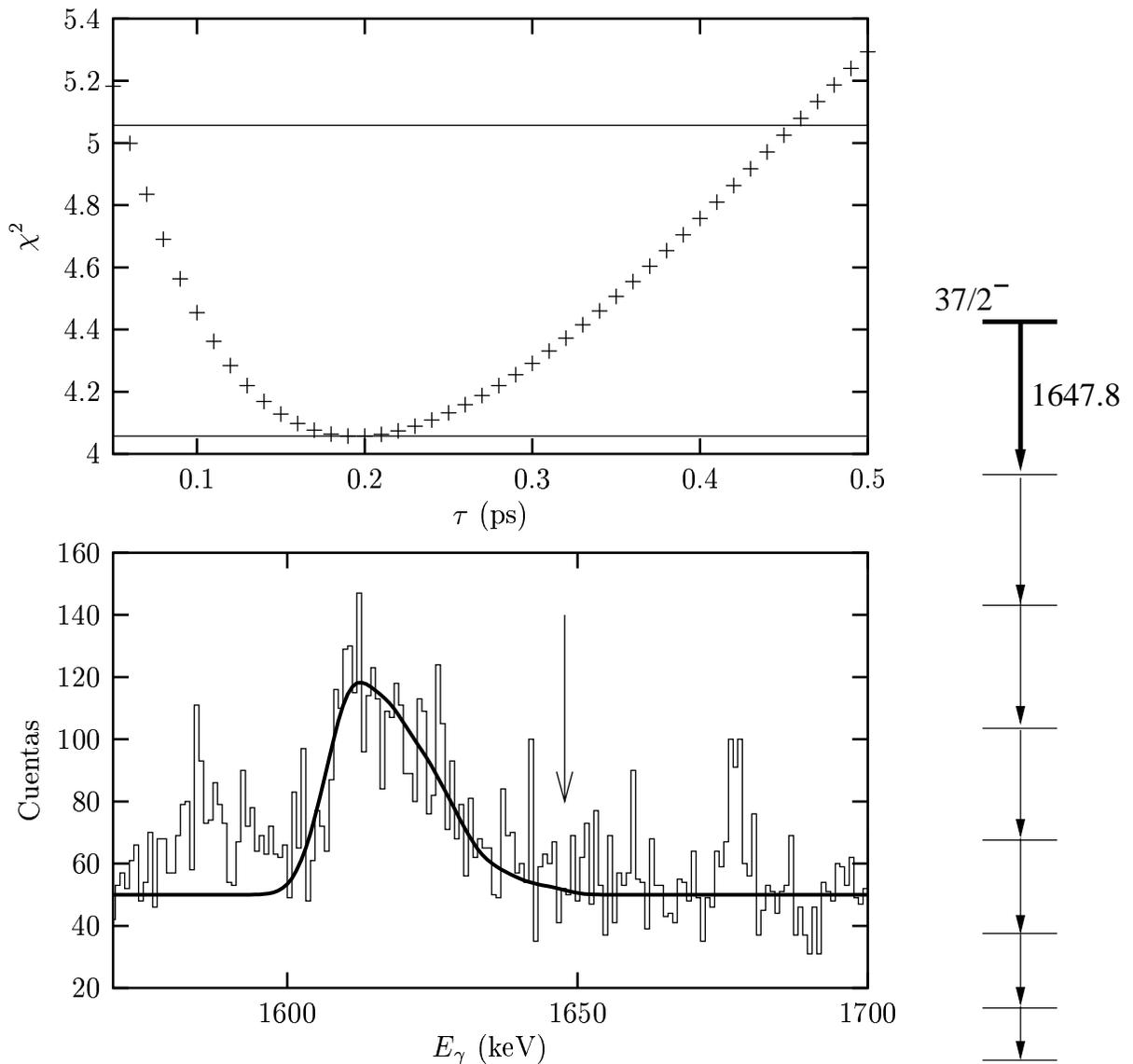


Figura 7.3: Arriba:  $\chi^2$  del tiempo de vida del estado. Abajo: Forma de línea para la transición de 1647.8 keV.

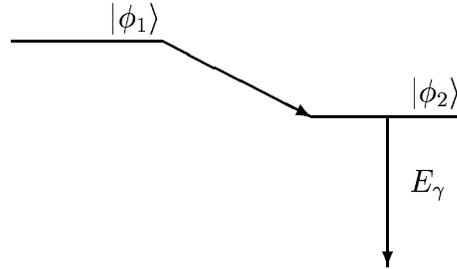


Figura 7.4: Patrón de poblamiento para la transición de 1647.8 keV.

En la Figura 7.3 se muestra (abajo) el mejor ajuste de esta forma de línea dado por AJUSTE, que tiene un valor de  $\tau = 0.20$  ps. Los valores mínimo y máximo del tiempo de vida (arriba) dado por el  $\chi^2_{min} + 1$  son  $\tau_{min} = 0.01$  ps y  $\tau_{max} = 0.45$  ps, sin embargo hay que anotar que como es el estado de mayor energía para el cual se determina el tiempo de vida, éste es un *tiempo de vida efectivo*. El tiempo de alimentación lateral<sup>1</sup> es  $\tau_{sf} = 0.01$  ps y los valores mínimo y máximo en este caso son  $\tau_{sfmin} = 0.01$  ps y  $\tau_{sfmax} = 0.18$  ps.

El patrón de poblamiento que se usó fué el que se muestra en la Figura 7.4, un solo estado de alimentación lateral  $|\phi_1\rangle$  para el estado del cual proviene el rayo  $\gamma$   $|\phi_2\rangle$ .

---

<sup>1</sup>Se nota  $\tau_{sf}$ , debido a que en inglés es *Side Feeding time*.

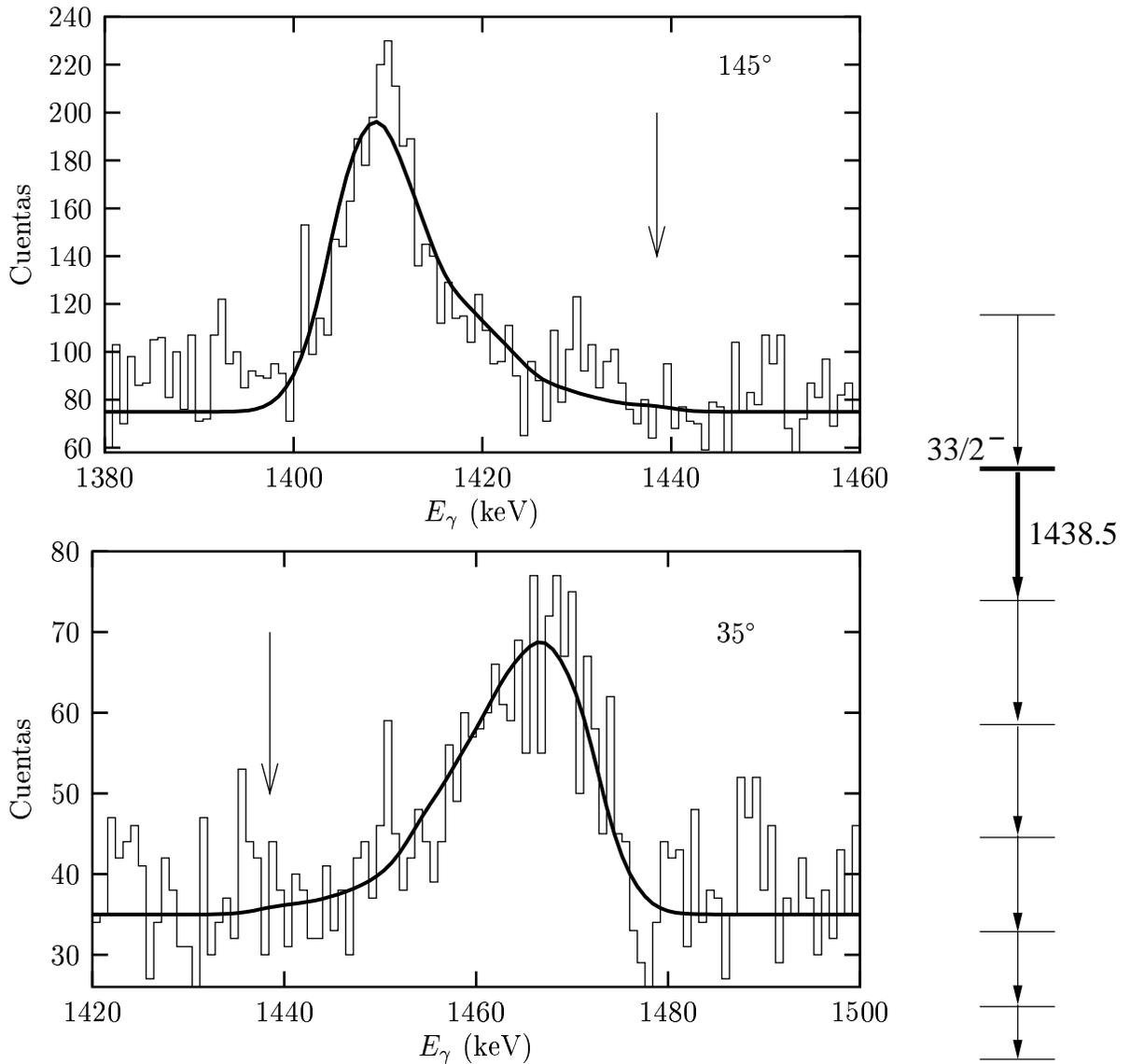
7.1.2 Estado  $(33/2^-)$ . Transición 1438.5 keV.

Figura 7.5: Arriba: Forma de línea para la transición de 1438.5 keV tomada con detectores e  $145^\circ$ . Abajo: Forma de línea para la transición de 1438.5 keV tomada con detectores e  $35^\circ$ .

En este caso se tienen las formas de línea para el corrimiento con  $\theta = 145^\circ$  y la del ángulo de  $\theta = 35^\circ$  Figura 7.5, así se puede realizar una comparación de las formas de línea y los valores obtenidos para promediar los resultados; debido a que el tiempo

de vida del estado no depende del ángulo de detección.

La flecha indica la posición del pico sin corrimiento, también se puede notar claramente como afecta la diferencia del número de detectores, el máximo valor de cuentas que alcanza el espectro a  $35^\circ$  es menos de 80 mientras que a  $145^\circ$  es casi 240.

Aunque los valores de  $\chi_{min}^2$  Figura 7.6 se esperan que sean de 1, en realidad se obtienen valores mayores debido a varios factores como las fluctuaciones del fondo (background) y algunas irregularidades de la distribución.

El patrón de poblamiento utilizado fué como se representa en la Figura 7.7, se toma un estado de alimentación lateral para cada estado de la banda, los estados  $|\phi_1\rangle$  y  $|\phi_2\rangle$  son los mismos estados de la Figura 7.4 y los tiempos de vida hallados anteriormente para esos estados se usan para determinar los de los estados  $|\phi_3\rangle$  y  $|\phi_4\rangle$ .

Los valores de tiempos de vida obtenidos para cada ángulo, los tiempos de alimentación en cada caso y los correspondientes valores mínimo y máximo dados por el  $\chi_{min}^2 + 1$  están registrados en la Tabla 7.2. También los valores promediados tanto para los tiempos de vida como para los tiempos de alimentación lateral.

	$\tau(145^\circ)$ ps	$\tau(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}$ ps	$\tau_{sf}(145^\circ)$ ps	$\tau_{sf}(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}_{sf}$ ps
	0.04	0.07	0.05	0.04	0.05	0.05
mínimo	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.04
máximo	0.08	0.35	0.06	0.11	0.80	0.06

Tabla 7.2: Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 1438.5 keV.

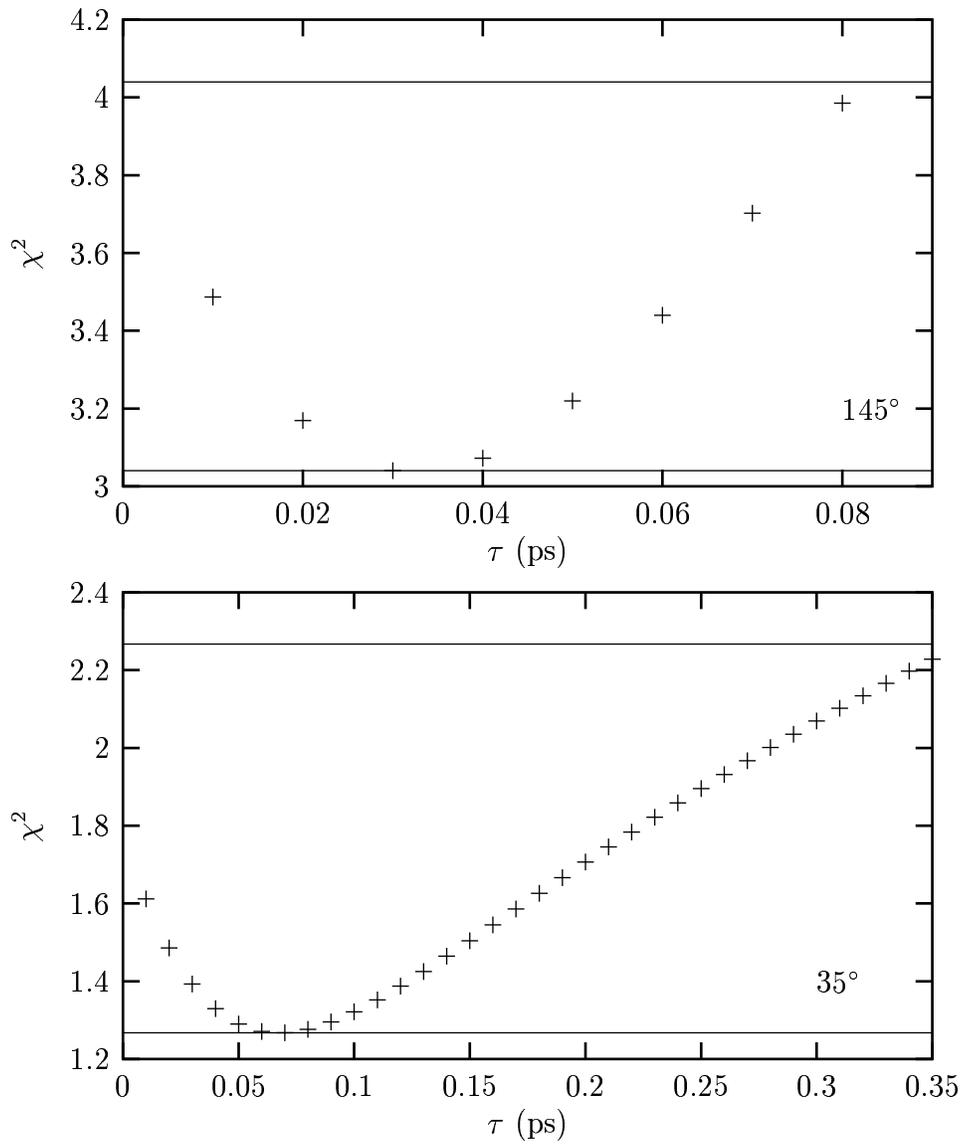


Figura 7.6: Valores de  $\chi^2$  de las formas de línea para la transición de 1438.5 keV. Arriba para 145°. Abajo para 35°.

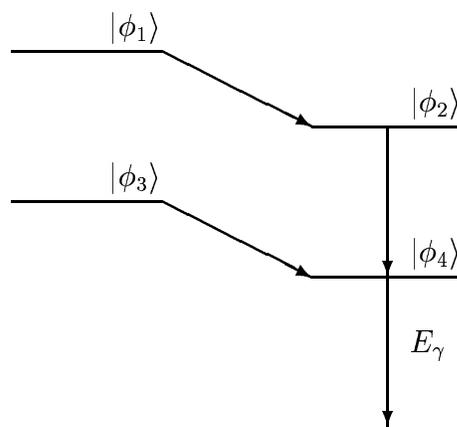


Figura 7.7: Patrón de poblamiento para la transición de 1438.5 keV.

7.1.3 Estado  $(29/2^-)$ . Transición 1321.9 keV.

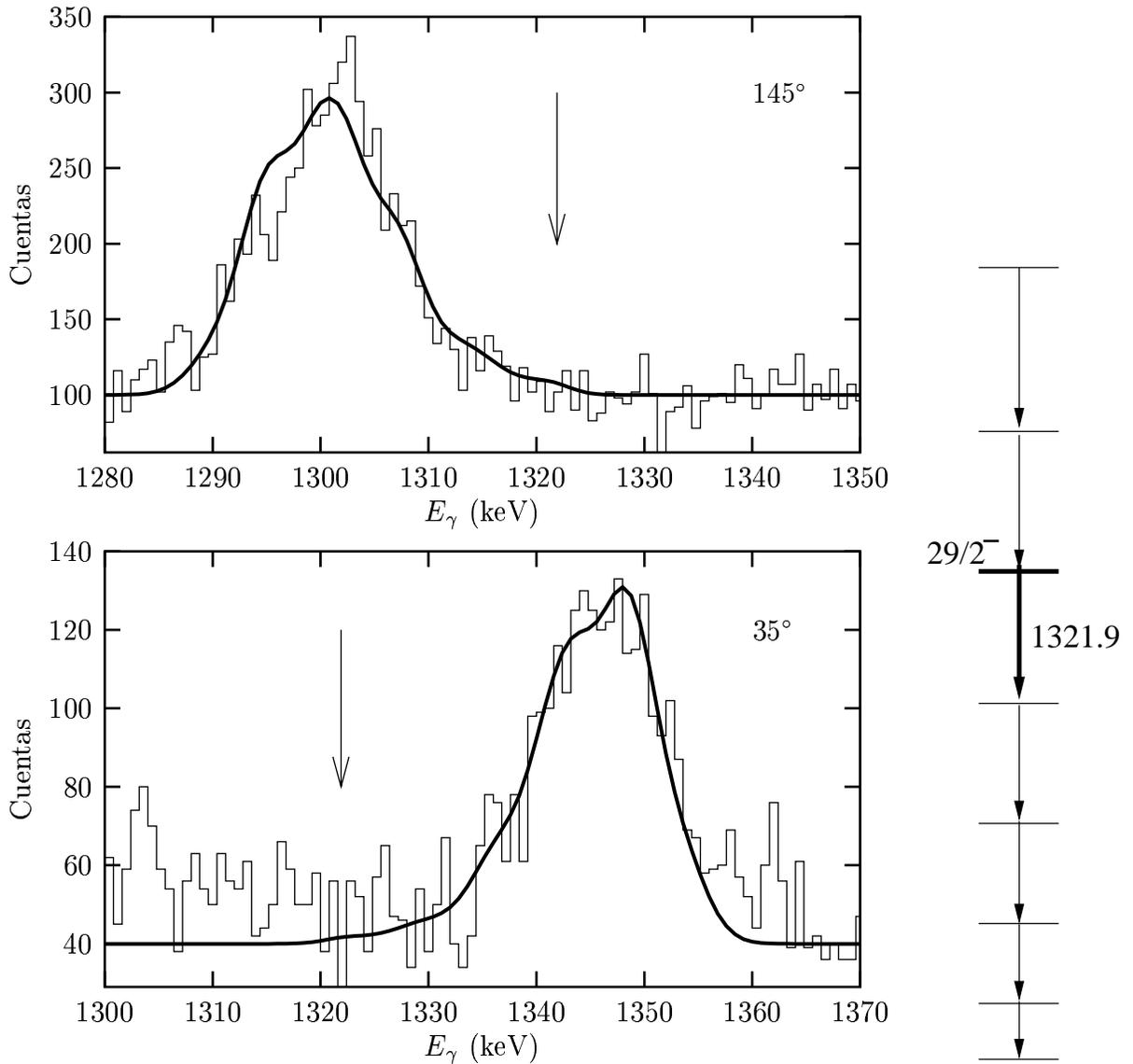


Figura 7.8: Abajo: Forma de línea para la transición de 1321.9 keV tomada con detectores a  $35^\circ$ . Arriba: Forma de línea para la transición de 1321.9 keV tomada con detectores a  $145^\circ$

Igual al caso anterior se tienen en la Figura 7.8 los espectros para los dos ángulos, se señala la posición del pico sin corrimiento mediante la flecha y se nota la menor cantidad de cuentas en el espectro de  $35^\circ$  debido a la falta del detector.

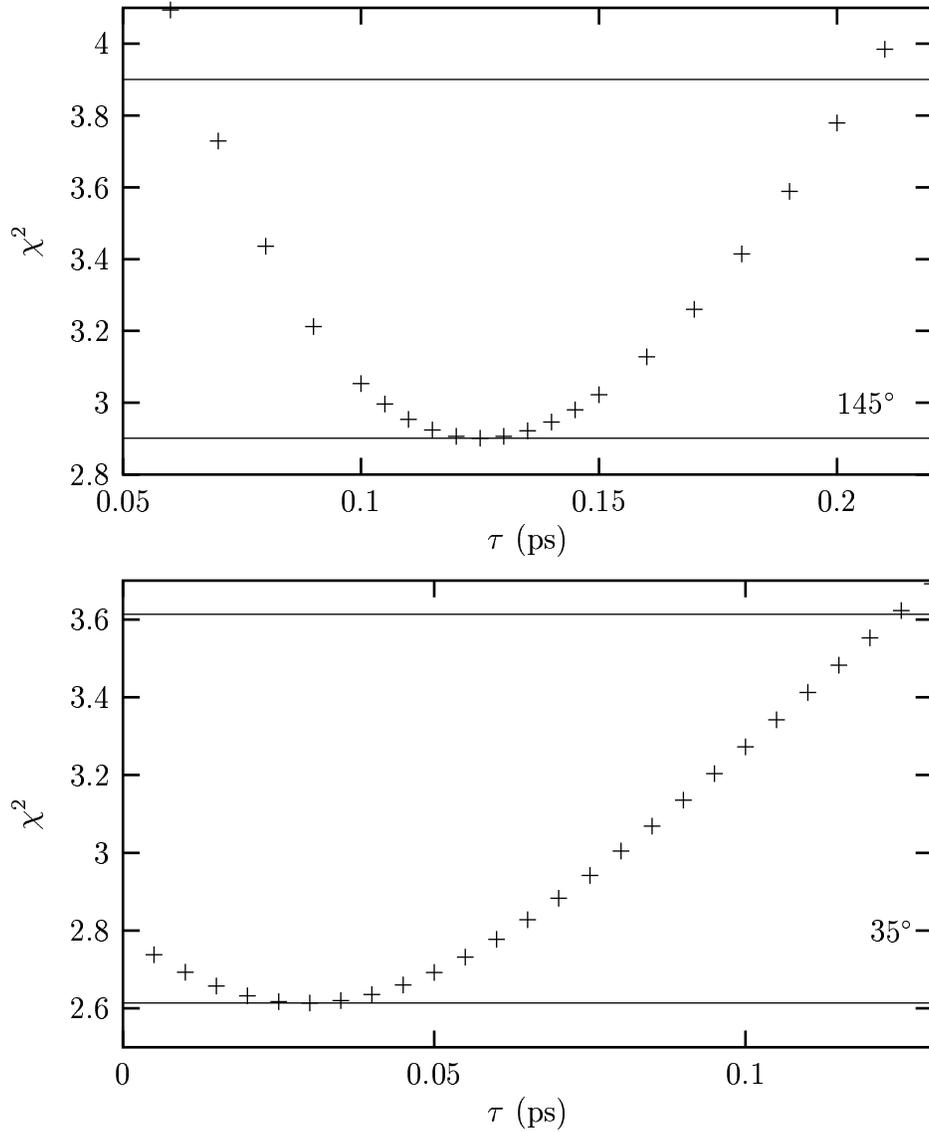


Figura 7.9: Valores de  $\chi^2$  de las formas de línea para la transición de 1321.9 keV. Abajo para  $35^\circ$ , arriba para  $145^\circ$

Los valores de  $\chi^2$  mostrados en la Figura 7.9 son cercanos a 1, y para el patrón de poblamiento se agregan otro par de estados uno de ellos de alimentación lateral, de la misma forma se utilizan los tiempos de vida de los estados  $|\phi_1\rangle$ ,  $|\phi_2\rangle$ ,  $|\phi_3\rangle$  y  $|\phi_4\rangle$  determinados anteriormente para realizar el ajuste de la forma de línea.

Los valores de tiempos de vida obtenidos para cada ángulo, los tiempos de alimentación en cada caso y los correspondientes valores mínimo y máximo dados por el  $\chi_{min}^2 + 1$  están registrados en la Tabla 7.3. También los valores promediados tanto para los tiempos de vida como para los tiempos de alimentación lateral.

	$\tau(145^\circ)$ ps	$\tau(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}$ ps	$\tau_{sf}(145^\circ)$ ps	$\tau_{sf}(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}_{sf}$ ps
	0.13	0.03	0.08	0.11	0.11	0.11
mínimo	0.07	0.01	0.07	0.01	0.01	0.10
máximo	0.20	0.12	0.09	0.41	1.20	0.17

Tabla 7.3: Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 1321.9 keV.

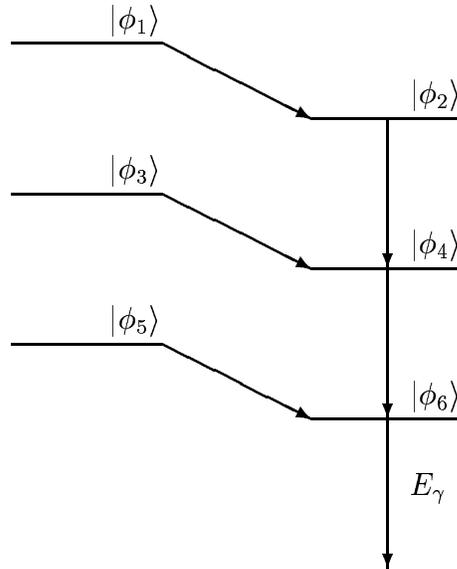


Figura 7.10: Patrón de poblamiento para la transición de 1321.9 keV.

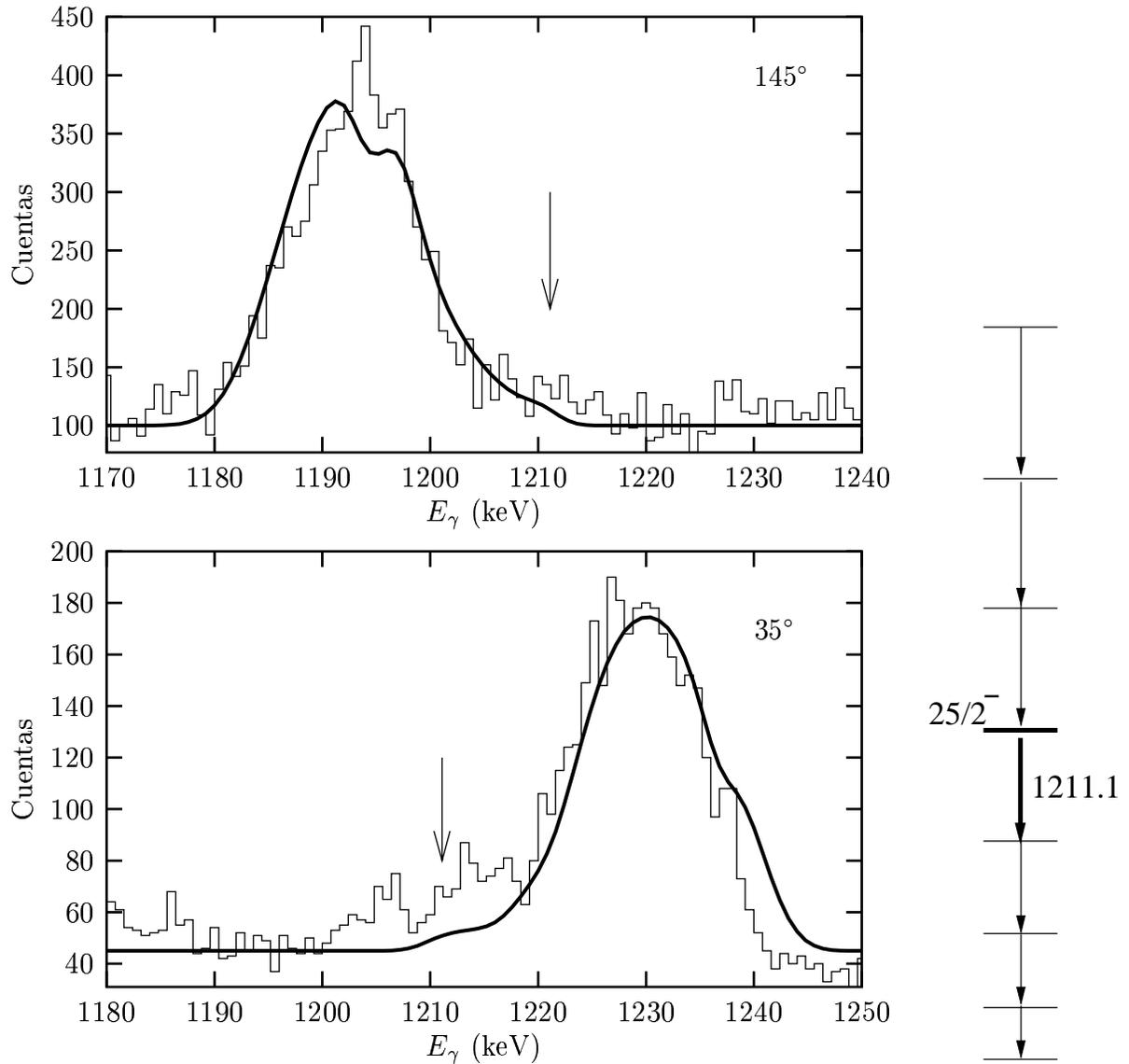
7.1.4 Estado  $(25/2^-)$ . Transición 1211.1 keV.

Figura 7.11: Arriba: Forma de línea para la transición de 1211.1 keV tomada con detectores a  $145^\circ$ . Abajo: Forma de línea para la transición de 1211.1 keV tomada con detectores a  $35^\circ$ .

Los ajustes obtenidos para las formas de línea de los espectros tomados con detectores a  $145^\circ$  (arriba) y  $35^\circ$  (abajo) para la transición de 1211.1 keV se grafican en la Figura 7.11. Los correspondientes valores de  $\chi^2$  para cada caso se muestran en la

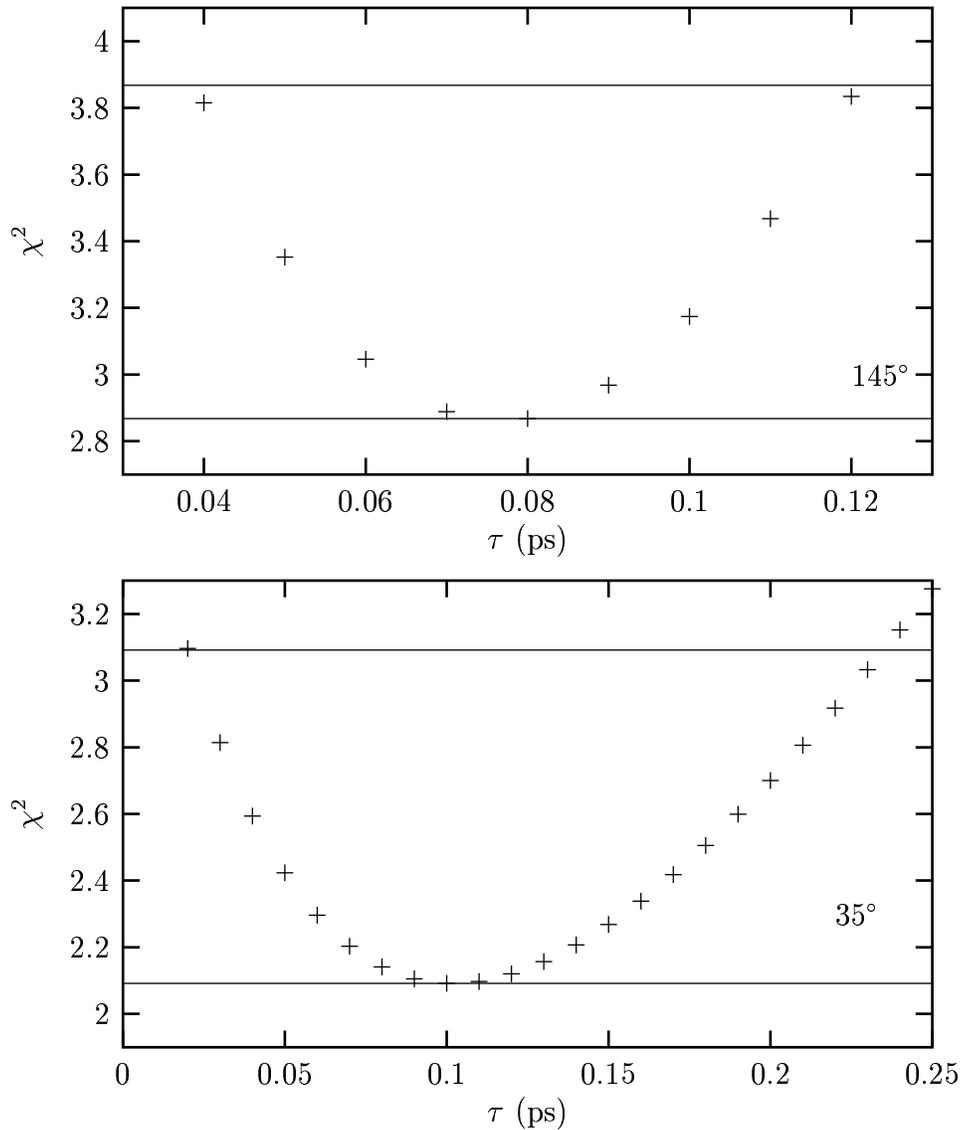


Figura 7.12: Valores de  $\chi^2$  de las formas de línea para la transición de 1211.1 keV. Abajo para  $35^\circ$ , arriba para  $145^\circ$

Figura 7.12, de allí se determinan los valores mínimo y máximo de los tiempos de vida.

El patrón de poblamiento contiene todos los estados anteriores y dos más, el estado para el cual se quiere determinar el tiempo de vida  $|\phi_8\rangle$  y el que lo alimenta lateralmente  $|\phi_7\rangle$  Figura 7.13. Los resultados obtenidos y los promedios se muestran

en la Tabla 7.4.

	$\tau(145^\circ)$ ps	$\tau(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}$ ps	$\tau_{sf}(145^\circ)$ ps	$\tau_{sf}(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}_{sf}$ ps
	0.08	0.10	0.09	0.16	0.50	0.33
mínimo	0.01	0.02	0.08	0.03	0.01	0.21
máximo	0.12	0.24	0.10	0.48	2.50	0.83

Tabla 7.4: Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la línea de 1211.1 keV.

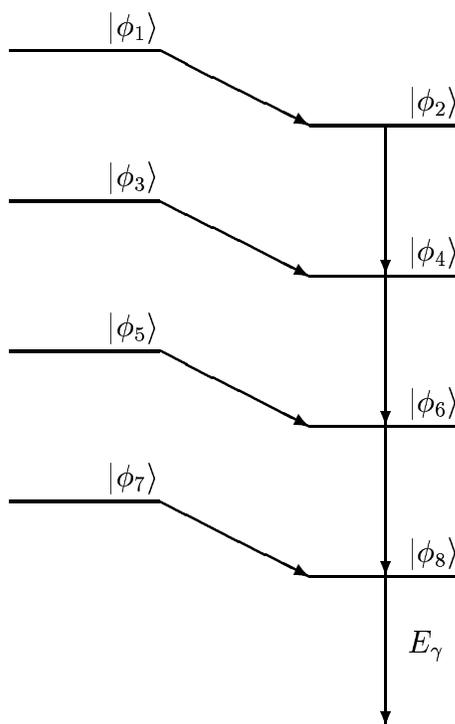


Figura 7.13: Patrón de poblamiento para la transición de 1211.1 keV.

7.1.5 Estado  $(21/2^-)$ . Transición 1045.5 keV.

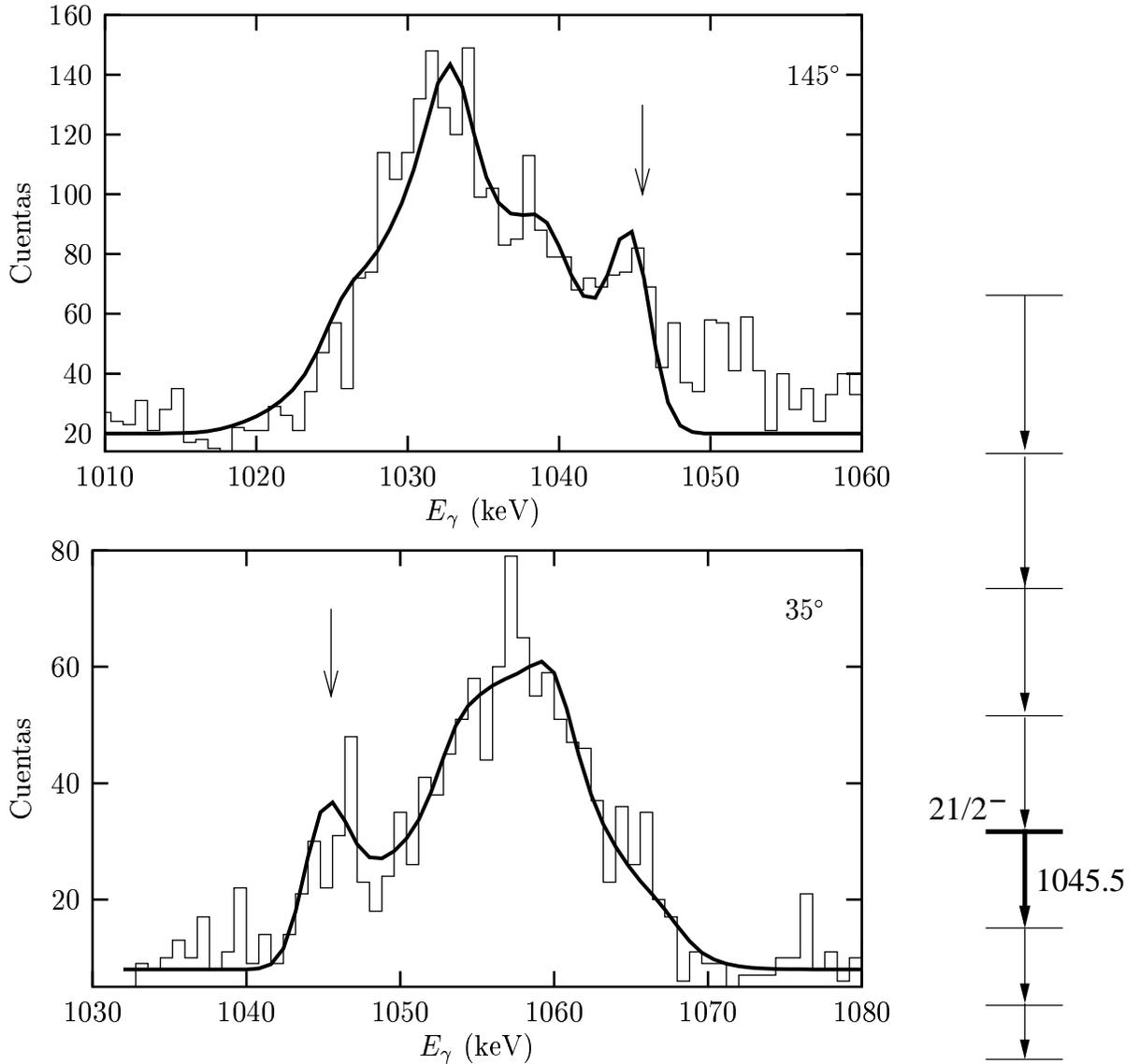


Figura 7.14: Arriba: Forma de línea para la transición de 1045.5 keV tomada con detectores a  $145^\circ$ . Abajo: Forma de línea para la transición de 1045.5 keV tomada con detectores a  $35^\circ$ .

Las formas de línea obtenidas en este caso Figura 7.14, muestran algunas de las cuentas formando un pequeño pico sin corrimiento indicado por la flecha, estos rayos  $\gamma$  fueron emitidos con poca velocidad, lo cual indica un tiempo de vida mayor que el

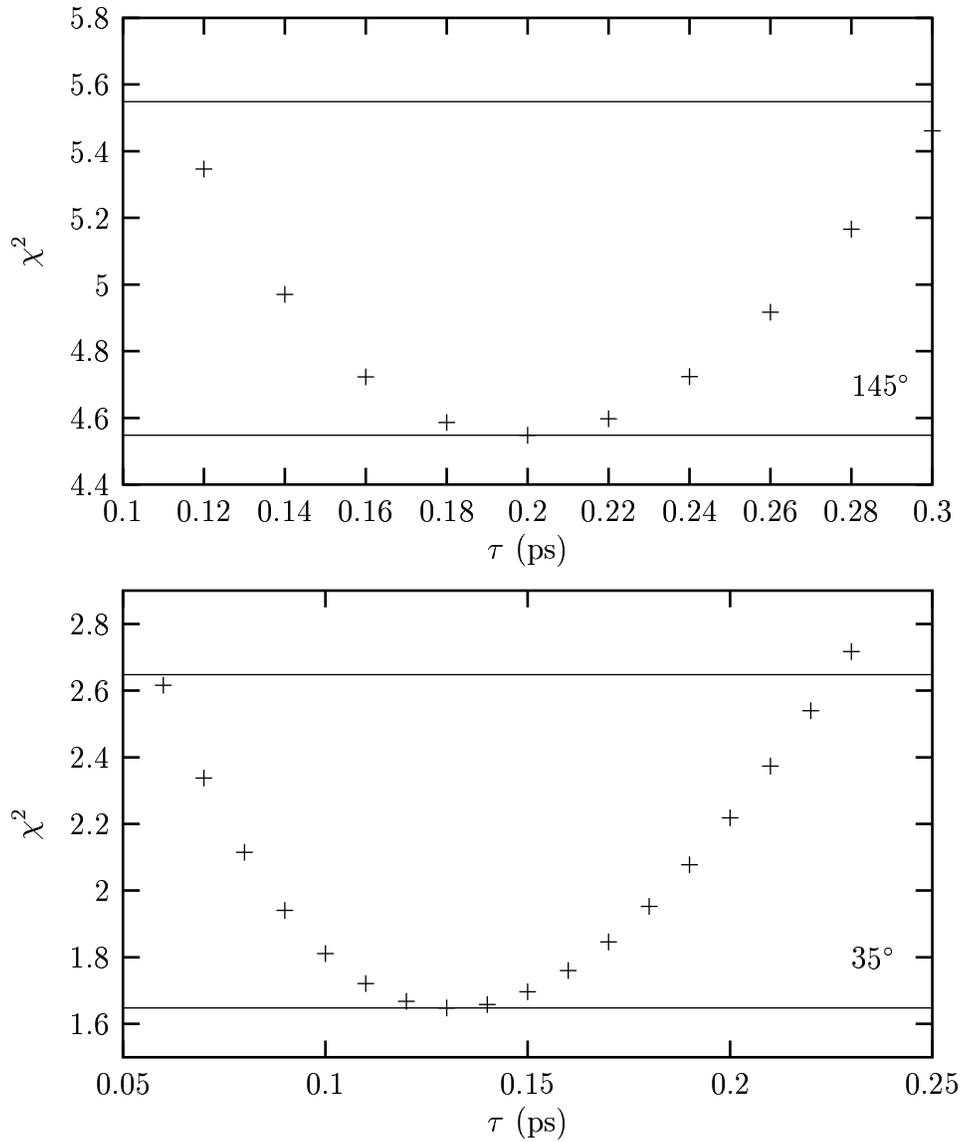


Figura 7.15: Valores de  $\chi^2$  de las formas de línea para la transición de 1045.5 keV. Abajo para  $35^\circ$ , arriba para  $145^\circ$

de los estados de mayor energía. Sin embargo el número de cuentas que presentan un corrimiento en energía es mucho mayor.

El patrón de poblamiento aumenta Figura 7.16, el estado que emite los rayos  $\gamma$  de esta transición es  $|\phi_{10}\rangle$  y el estado que lo alimenta lateralmente es  $|\phi_9\rangle$ . Los resultados obtenidos de tiempos de vida, alimentación lateral y los promedios se

muestran en la Tabla 7.5.

	$\tau(145^\circ)$ ps	$\tau(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}$ ps	$\tau_{sf}(145^\circ)$ ps	$\tau_{sf}(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}_{sf}$ ps
	0.20	0.13	0.17	0.80	0.60	0.70
mínimo	0.11	0.06	0.15	0.10	0.20	0.40
máximo	0.30	0.23	0.18	8.00	4.00	3.76

Tabla 7.5: Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 1045.5 keV.

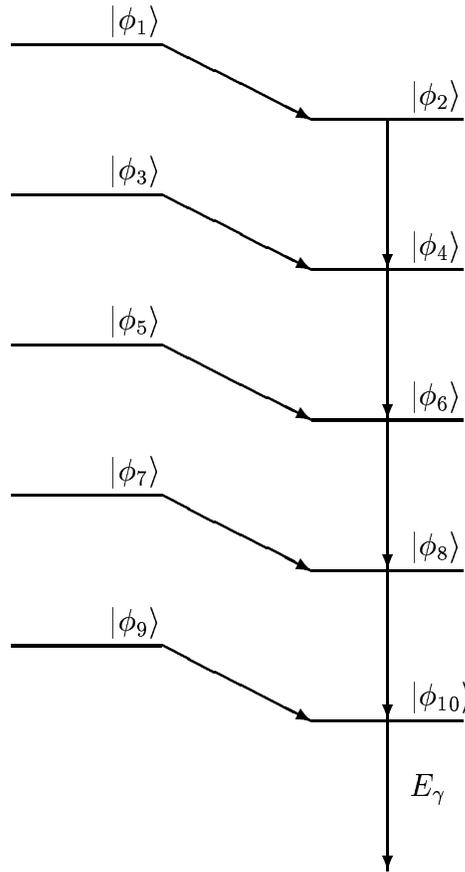


Figura 7.16: Patrón de poblamiento para la transición de 1045.5 keV.

7.1.6 Estado ( $17/2^-$ ). Transición 829.9 keV.

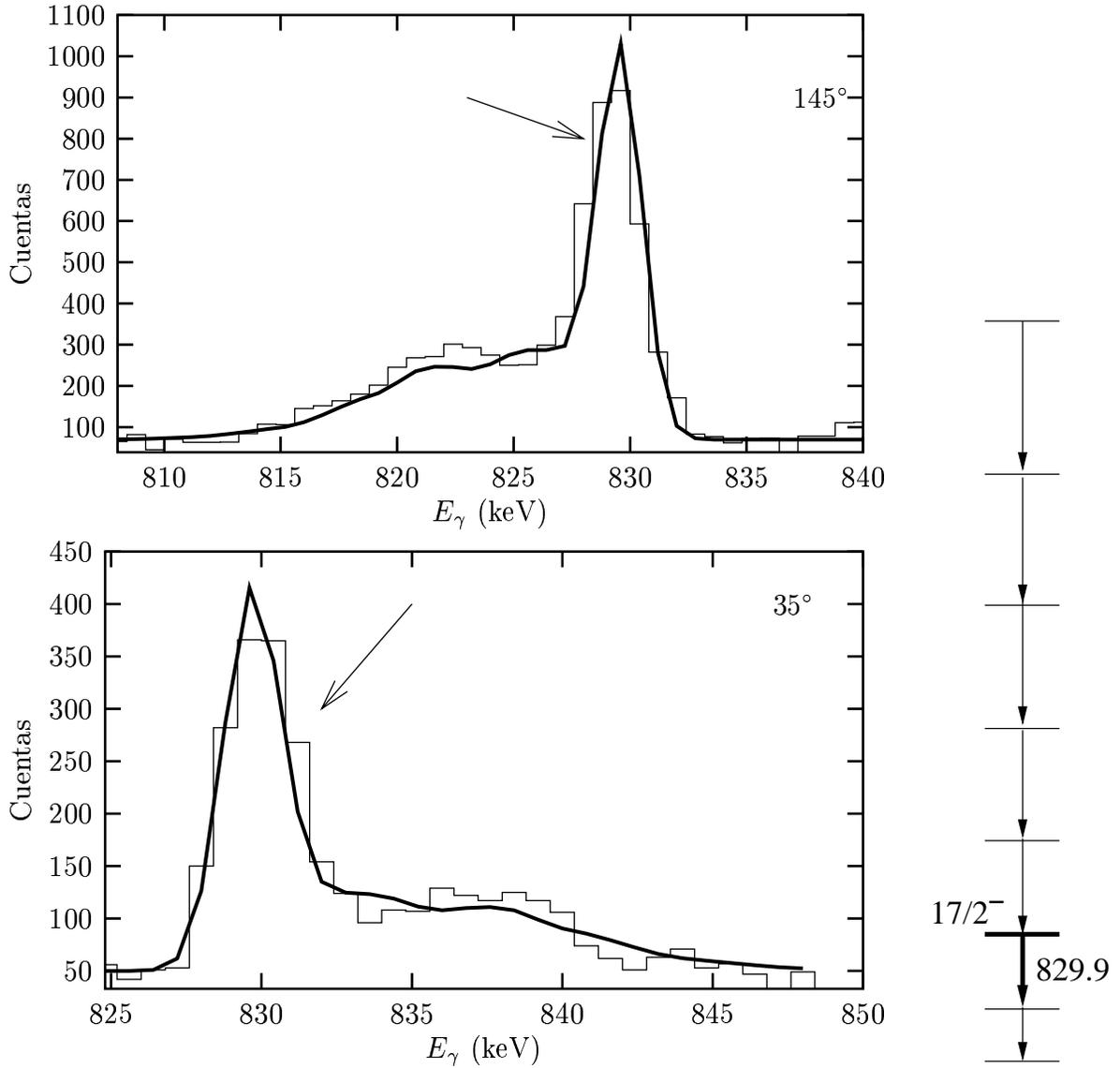


Figura 7.17: Arriba: Forma de línea para la transición de 829.9 keV tomada con detectores a  $145^\circ$ . Abajo: Forma de línea para la transición de 829.9 keV tomada con detectores a  $35^\circ$ .

Las formas de línea obtenidas en este caso Figura 7.17, presentan muchas de las cuentas formando un pico sin corrimiento indicado por la flecha, estos rayos  $\gamma$  fueron emitidos con poca velocidad, lo cual indica un tiempo de vida mayor que el de los

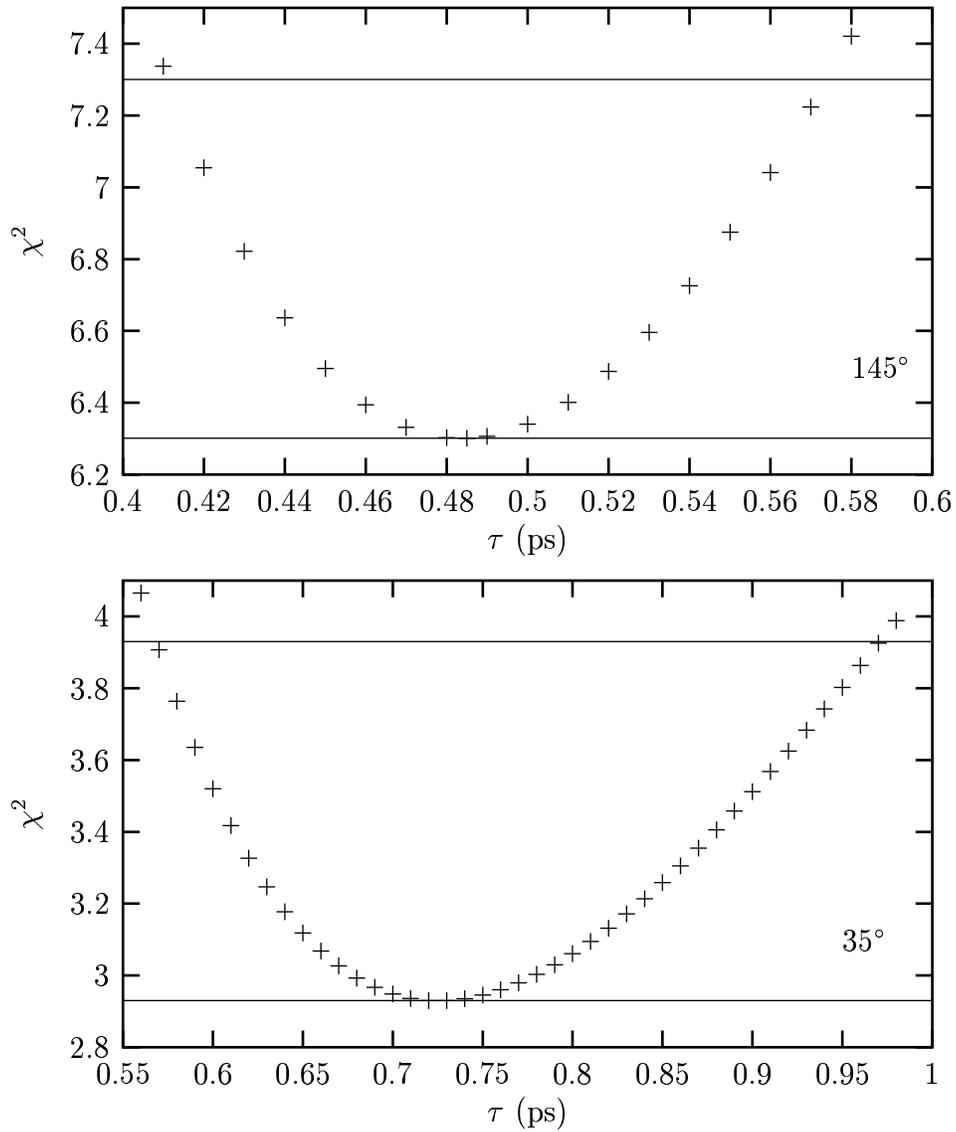


Figura 7.18: Valores de  $\chi^2$  de las formas de línea para la transición de 829.9 keV. Abajo para  $35^\circ$ , arriba para  $145^\circ$

estados de mayor energía. A diferencia del caso anterior el número de cuentas que no presentan corrimiento es cercano al número de cuentas que sí tienen un corrimiento en la energía.

El patrón de poblamiento aumenta Figura 7.19, el estado que emite los trayos  $\gamma$  de esta transición es  $|\phi_{12}\rangle$  y el estado que lo alimenta lateralmente es  $|\phi_{11}\rangle$ . Los

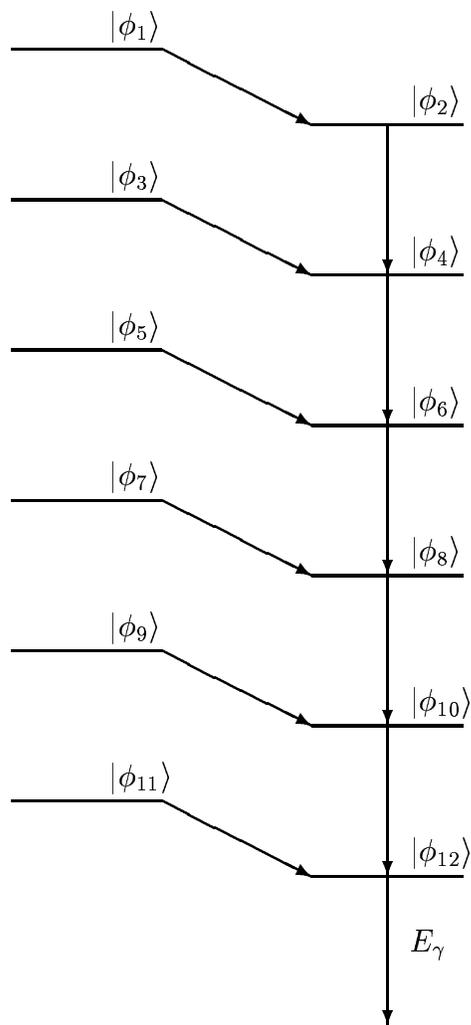


Figura 7.19: Patrón de poblamiento para la transición de 829.9 keV.

resultados obtenidos de tiempos de vida, alimentación lateral y los promedios se muestran en la Tabla 7.6.

	$\tau(145^\circ)$ ps	$\tau(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}$ ps	$\tau_{sf}(145^\circ)$ ps	$\tau_{sf}(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}_{sf}$ ps
	0.48	0.73	0.60	1.00	1.00	1.00
mínimo	0.40	0.56	0.54	0.30	0.10	0.43
máximo	0.58	0.97	0.70	10.00	10.00	7.36

Tabla 7.6: Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 829.9 keV.

### 7.1.7 Estado ( $13/2^-$ ). Transición 562.8 keV.

Las formas de línea obtenidas en este caso Figura 7.20, presentan muchas de las cuentas formando un pico sin corrimiento indicado por la flecha, estos rayos  $\gamma$  fueron emitidos con poca velocidad, lo cual indica un tiempo de vida mayor que el de los estados de mayor energía. A diferencia del caso anterior el número de cuentas que no presentan corrimiento es mucho mayor a el número de cuentas que si tienen un corrimiento en la energía.

En este caso los valores de  $\chi^2$  de la Figura 7.21, son considerablemente mayores. Esto es debido que a esta energía la resolución de los picos es muy alta y la distribución se forma en un rango muy corto de canales lo cual afecta mucho en el momento de ajustar una forma de línea.

De nuevo el patrón de poblamiento aumenta Figura 7.22, el estado que emite los rayos  $\gamma$  de esta transición es  $|\phi_{14}\rangle$  y el estado que lo alimenta lateralmente es  $|\phi_{13}\rangle$ . Los resultados obtenidos de tiempos de vida, alimentación lateral y los promedios se muestran en la Tabla 7.7.

	$\tau(145^\circ)$ ps	$\tau(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}$ ps	$\tau_{sf}(145^\circ)$ ps	$\tau_{sf}(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}_{sf}$ ps
	0.65	0.62	0.63	3.00	3.00	3.00
mínimo	0.55	0.48	0.58	0.80	0.80	0.01
máximo	0.8	0.82	0.71	20.00	22.00	41.20

Tabla 7.7: Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 562.8 keV.

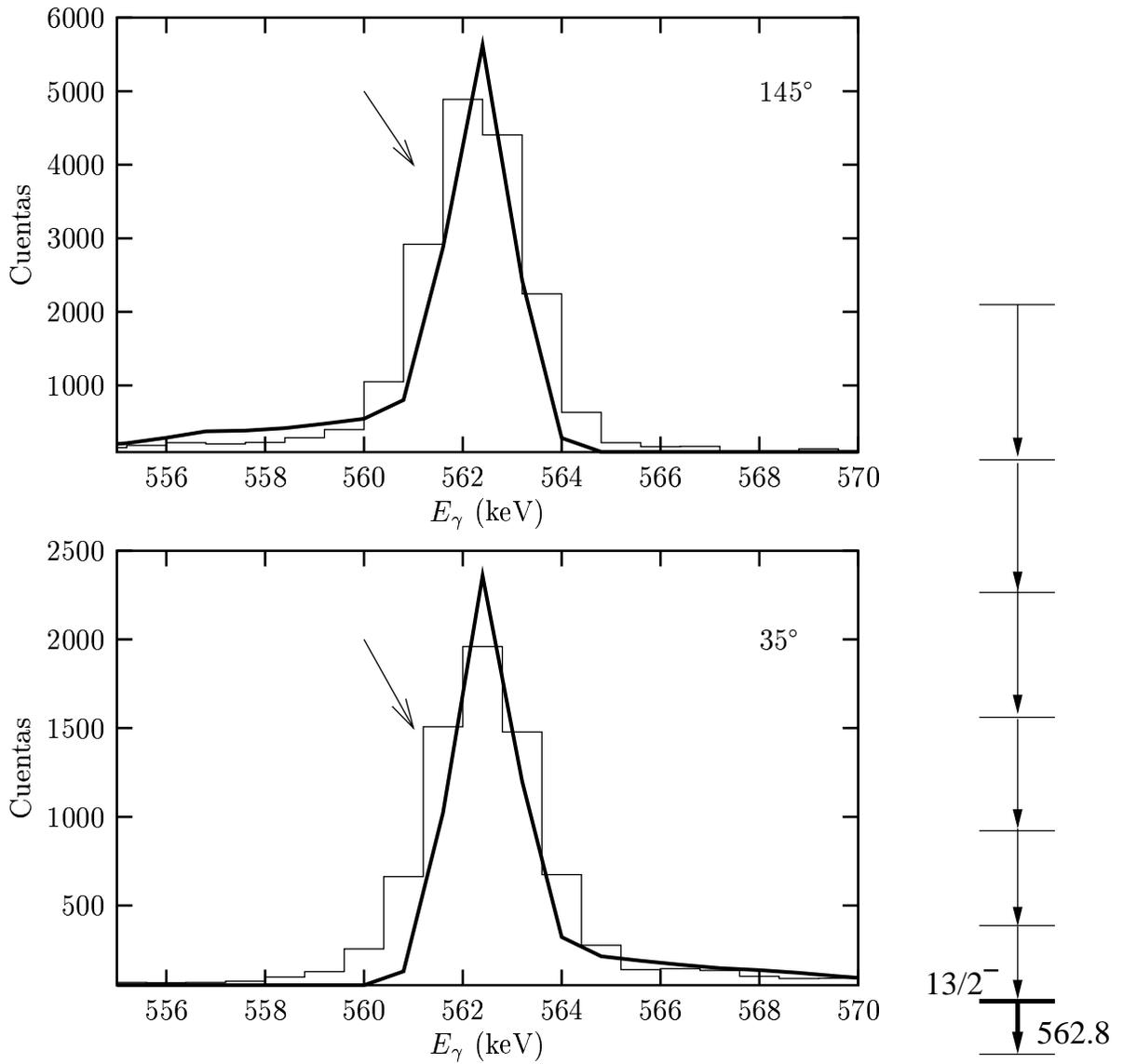


Figura 7.20: Arriba: Forma de línea para la transición de 562.8 keV tomada con detectores a  $145^\circ$ . Abajo: Forma de línea para la transición de 562.8 keV tomada con detectores a  $35^\circ$ .

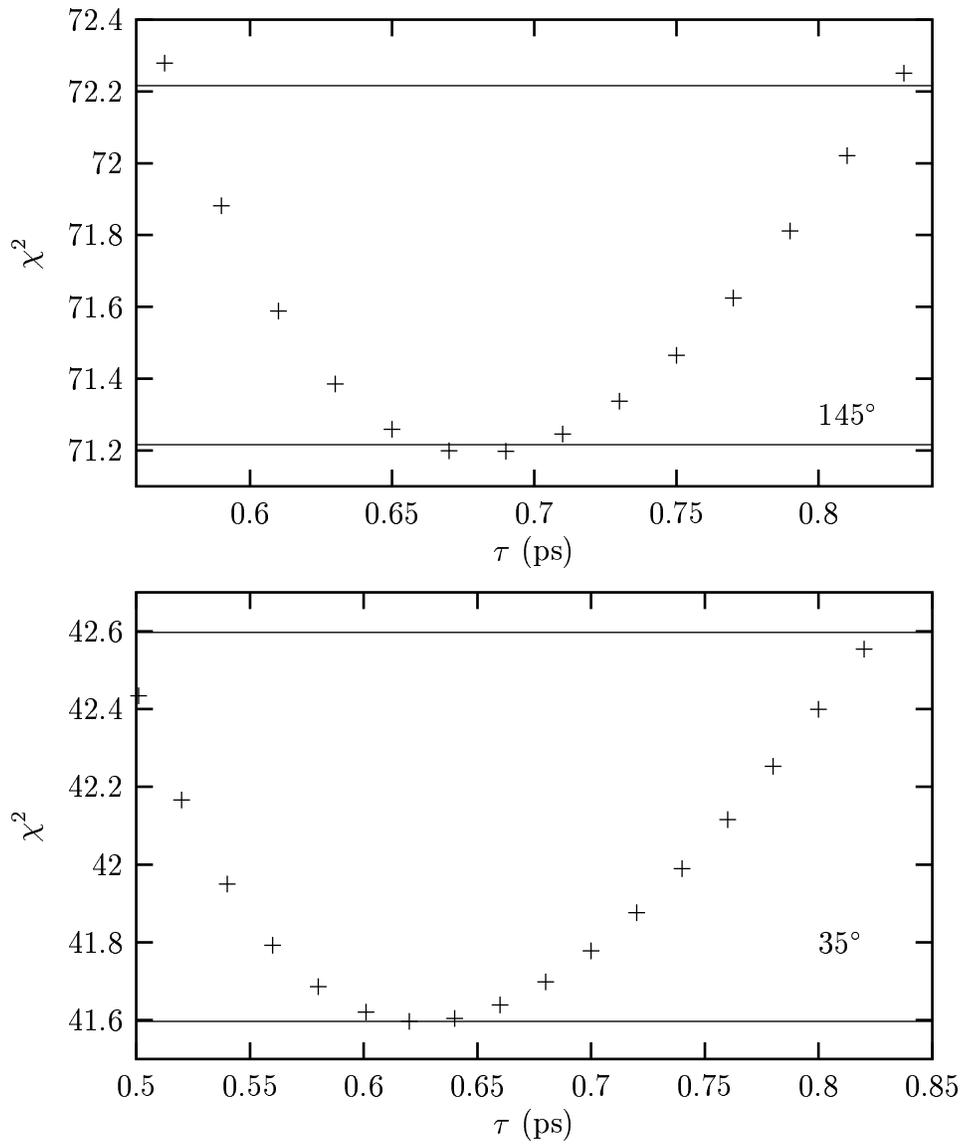


Figura 7.21: Valores de  $\chi^2$  de las formas de línea para la transición de 562.8 keV. Abajo para 35°, arriba para 145°

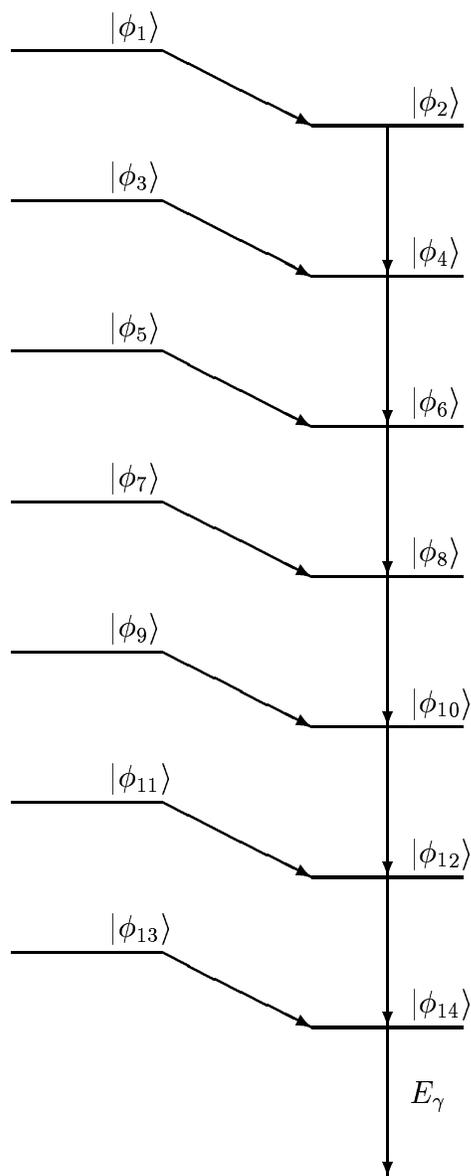


Figura 7.22: Patrón de poblamiento para la transición de 562.8 keV.

## 7.2 Banda D

La banda D, posee un esquema de niveles que se muestra en la Figura 7.24, es una banda de paridad positiva y los niveles de energía poseen los mismos valores de momento angular de spin que los de la banda B; aunque la intensidad de la banda B es mucho mas grande a bajas energías, las transiciones a altas energías ( $E_\gamma > 1300\text{keV}$ ) en esta banda son mucho más intensas, y se puede llegar a obtener valores de tiempos de vida de estados hasta de  $37/2$  de spin.

Los espectros obtenidos mediante la suma de las proyecciones hechos en todas las transiciones posibles (desde 653.9 keV hasta 917.9), de esta banda se muestran en la Figura 7.24. Solamente se muestran los picos pertenecientes a las cuatro transiciones de energía más bajas, para poder observar más facilmente las formas de línea con corrimiento hacia energías menores ( $145^\circ$  arriba) y hacia mayores energías ( $35^\circ$  abajo). A diferencia de los espectros de la banda B Figura 7.2, en estos espectros todas las formas de línea que se muestran poseen varias cuentas formando una distribución alrededor de la energía sin corrimiento  $E_\gamma$ .

$E_\gamma$ (keV)	$\Delta E_{max}$ (keV)	$E'_{\gamma(max)}(145^\circ)$ (keV)	$E'_{\gamma(max)}(35^\circ)$ (keV)
1394.2	$\pm 36.5$	1357.7	1430.7
1336.3	$\pm 35.0$	1301.3	1371.3
1254.2	$\pm 32.9$	1221.3	1287.1
1075.3	$\pm 28.2$	1047.1	1103.5
917.9	$\pm 24.1$	893.9	942.0
839.7	$\pm 22.1$	817.7	861.8
742.2	$\pm 19.5$	722.6	761.7
653.9	$\pm 17.1$	635.9	671.0

Tabla 7.8: Tabla de máximo corrimiento de energía para las transiciones de la banda D. Se muestra la energía de la transición  $E_\gamma$  en keV, el spin  $I$  y la paridad  $\pi$ .

Además en la Tabla 7.8 se muestra que las formas de línea son simétricas alrededor del valor de  $E_\gamma$ , esto debido a que los ángulos a los cuales están ubicados los detectores son simétricos, el corrimiento  $\Delta E_{max}$  (keV) con  $v_{max} = 0.032 c$ , es igual para los dos ángulos pero con signo contrario y disminuye con la energía.

En general las características del espectro de la banda son:

- El área de los picos disminuye a medida que la energía aumenta debido a la disminución de intensidad de las transiciones.

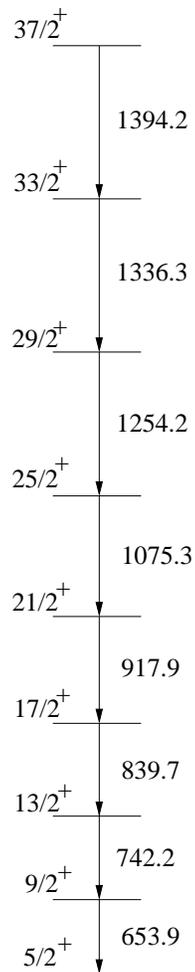


Figura 7.23: Esquema de niveles de la banda D.

- El pico sin corrimiento solo se ve claramente para las transiciones hasta de 1075.3 keV y desaparece para energías más altas, lo cual indica una disminución del tiempo de vida a medida que la energía aumenta.
- El número de cuentas en el espectro a  $145^\circ$  es por lo general mayor que el número de cuentas en el espectro a  $35^\circ$ , ya que a  $145^\circ$  hay un detector más que para  $35^\circ$ ; lo cual implica una cantidad mayor de eventos detectados para  $145^\circ$ .

En estos espectros también se observan pequeños picos a diferentes valores de energía que pueden afectar las distribuciones de las formas de línea, éstos pueden provenir de otras bandas del mismo núcleo o de algún otro núcleo formado en la reacción, sin embargo su intensidad es baja comparados con los picos de interés.

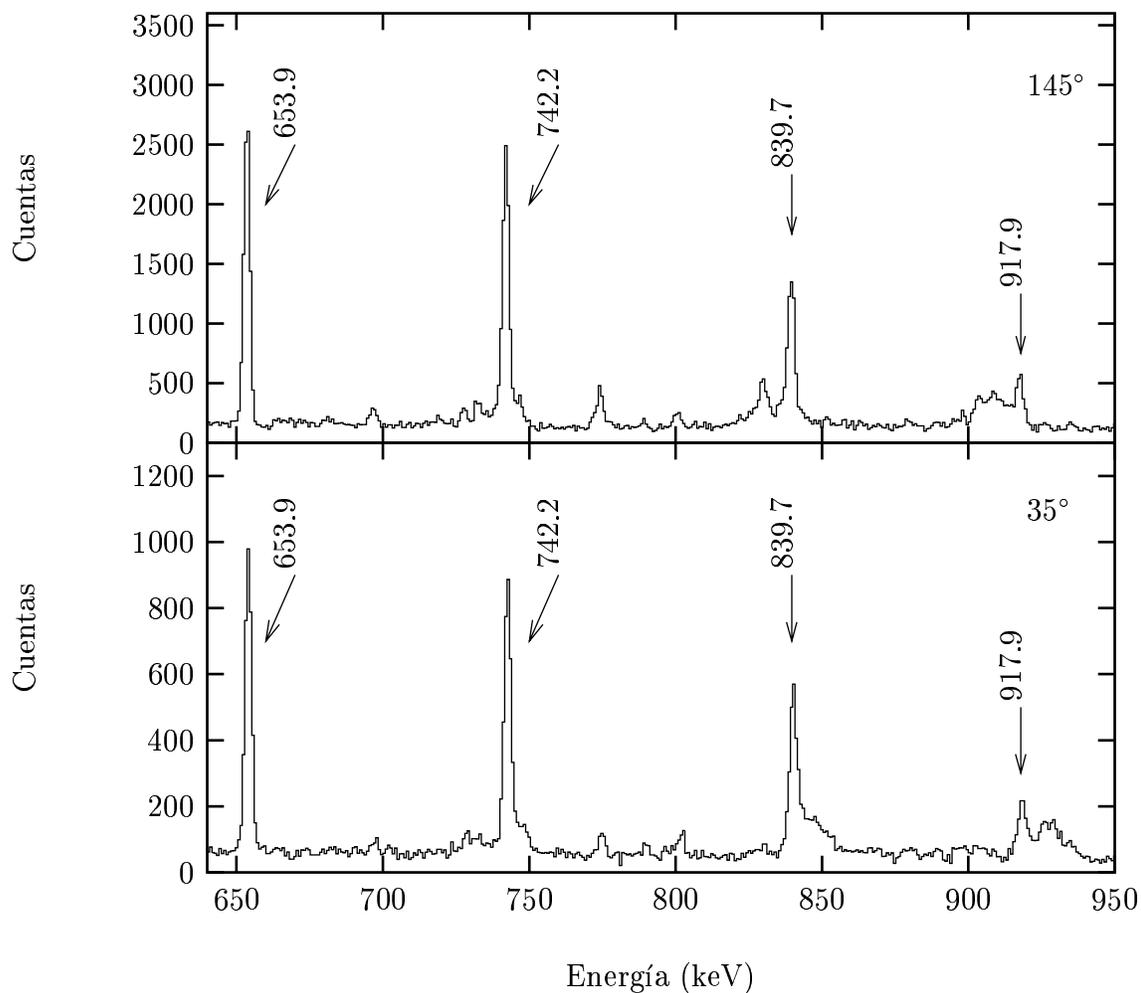


Figura 7.24: Espectros con corrimiento Doppler para la banda D. Arriba corrimiento con  $\theta = 145^\circ$ , abajo corrimiento con  $\theta = 35^\circ$

**7.2.1 Estado ( $37/2^+$ ). Transición 1394.2 keV.**

Esta transición es la de mayor energía para la cual se puede obtener una forma de línea que se pueda ajustar, pero únicamente para el corrimiento con  $\theta = 145^\circ$  debido que en ese ángulo hay un detector más que en el ángulo de  $\theta = 35^\circ$ .

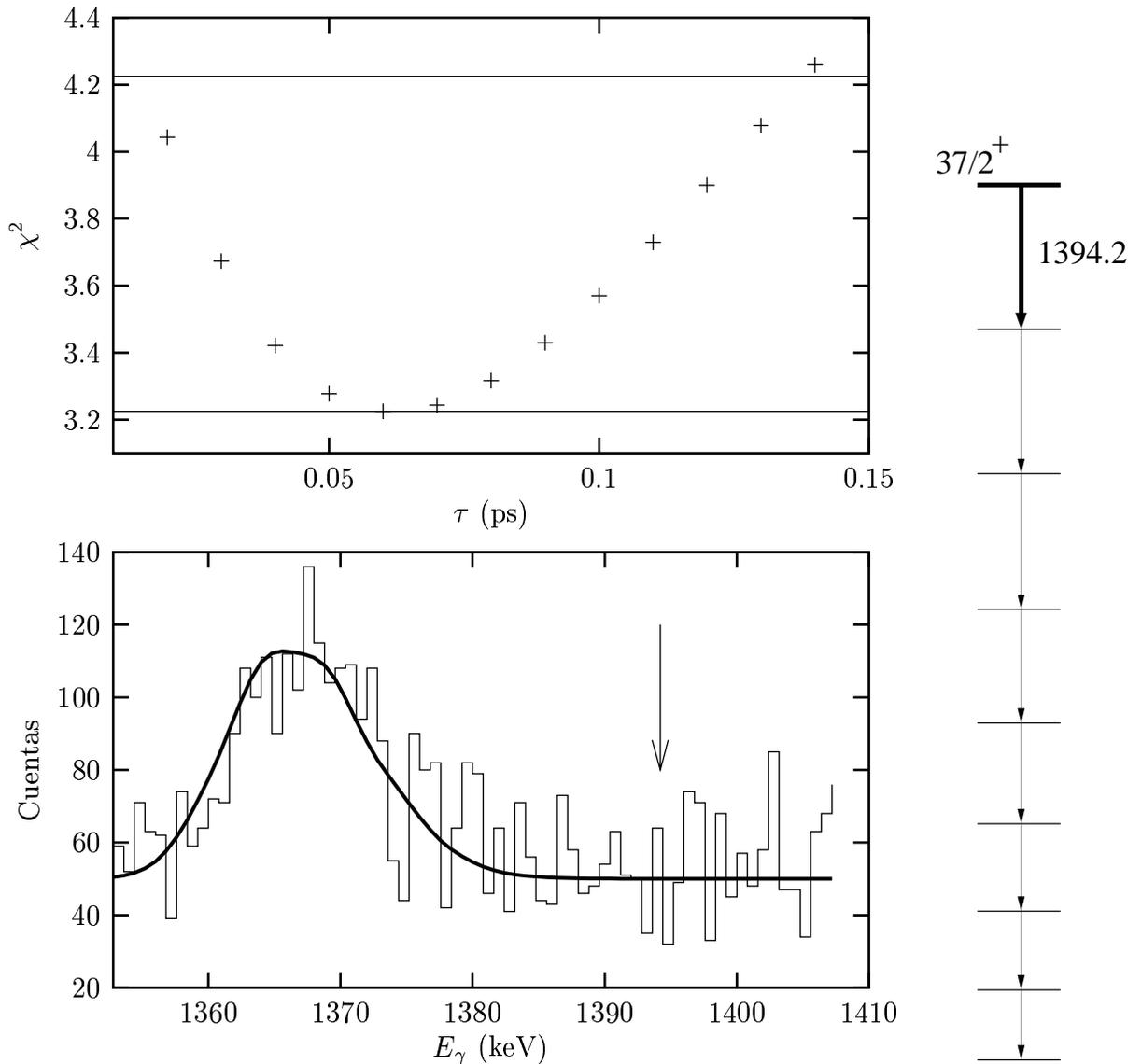


Figura 7.25: Abajo: Forma de línea para la transición de 1394.2 keV tomada con detectores a  $145^\circ$ . Arriba  $\chi^2$  del tiempo de vida del estado.

El patrón de poblamiento utilizado fué como se representa en la Figura 7.26, incluye un solo estado de alimentación lateral  $|\phi_1\rangle$  para el estado de interés  $|\phi_2\rangle$ .

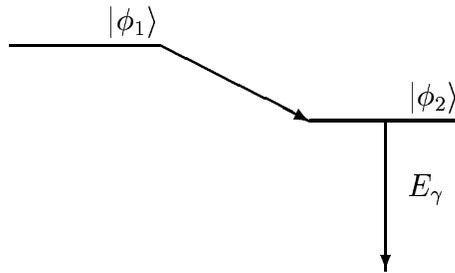


Figura 7.26: Patrón de poblamiento para la transición de 1394.2 keV.

El mejor tiempo de vida de este estado dado por AJUSTE, es de  $\tau = 0.06$  ps y los valores mínimo y máximo del tiempo de vida, dado por el  $\chi_{min}^2 + 1$  es  $\tau_{min} = 0.02$  ps y  $\tau_{max} = 0.14$  ps, sin embargo hay que anotar que como es el estado de mayor energía para el cual se determina el tiempo de vida, éste es un *tiempo de vida efectivo*. El tiempo de alimentación lateral es  $\tau_{sf} = 0.08$  ps y el error en este caso es  $\tau_{sfmin} = 0.03$  ps y  $\tau_{sfmax} = 0.17$  ps.

### 7.2.2 Estado ( $33/2^+$ ). Transición 1336.3 keV.

En este caso se tienen las formas de línea para el corrimiento con  $\theta = 145^\circ$  y la del ángulo de  $\theta = 35^\circ$ , así se puede realizar una comparación de las formas de línea y los valores obtenidos para promediar los resultados.

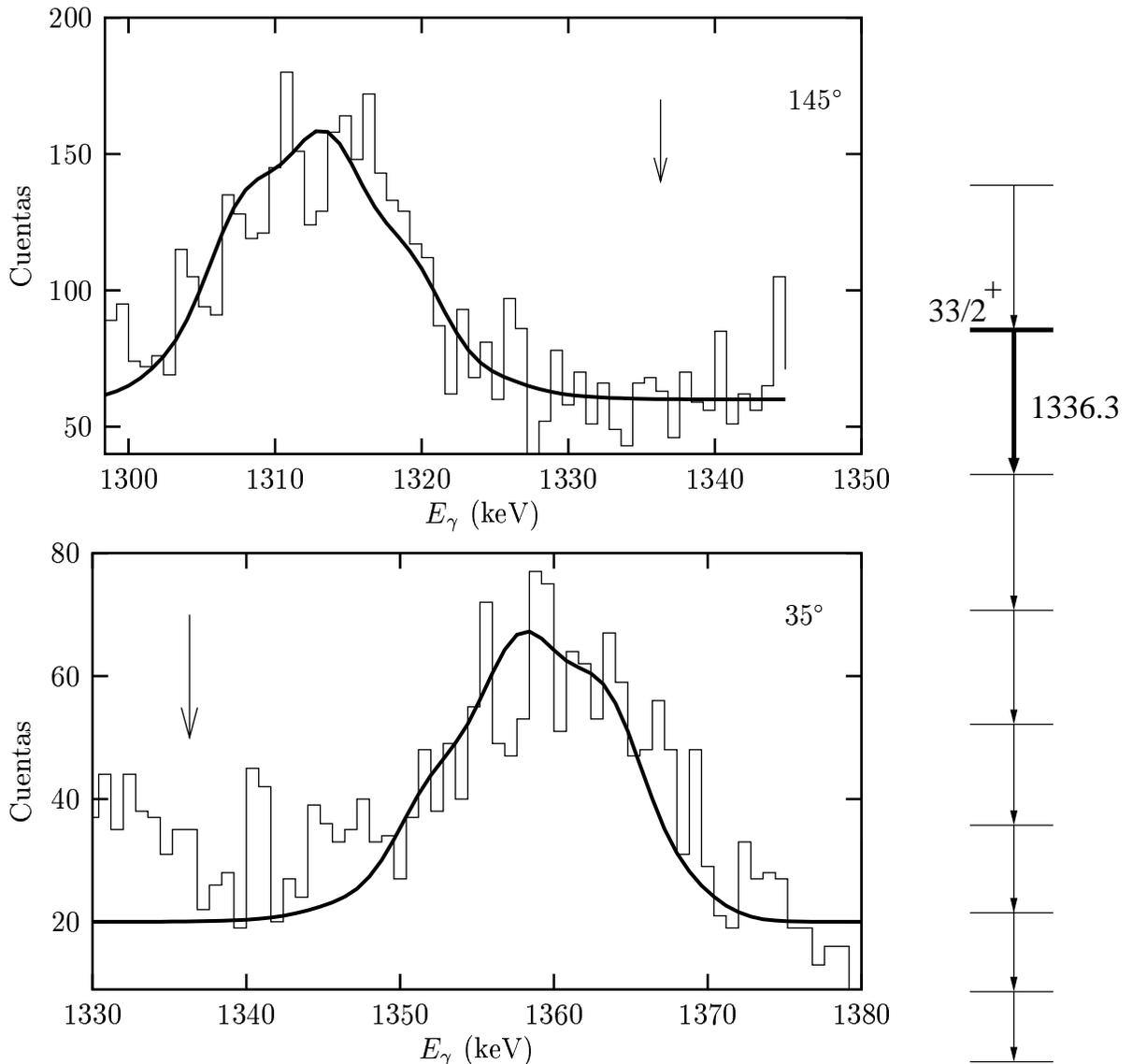


Figura 7.27: Arriba: Forma de línea para la transición de 1336.3 keV tomada con detectores a  $145^\circ$ . Abajo: Forma de línea para la transición de 1336.3 keV tomada con detectores a  $35^\circ$

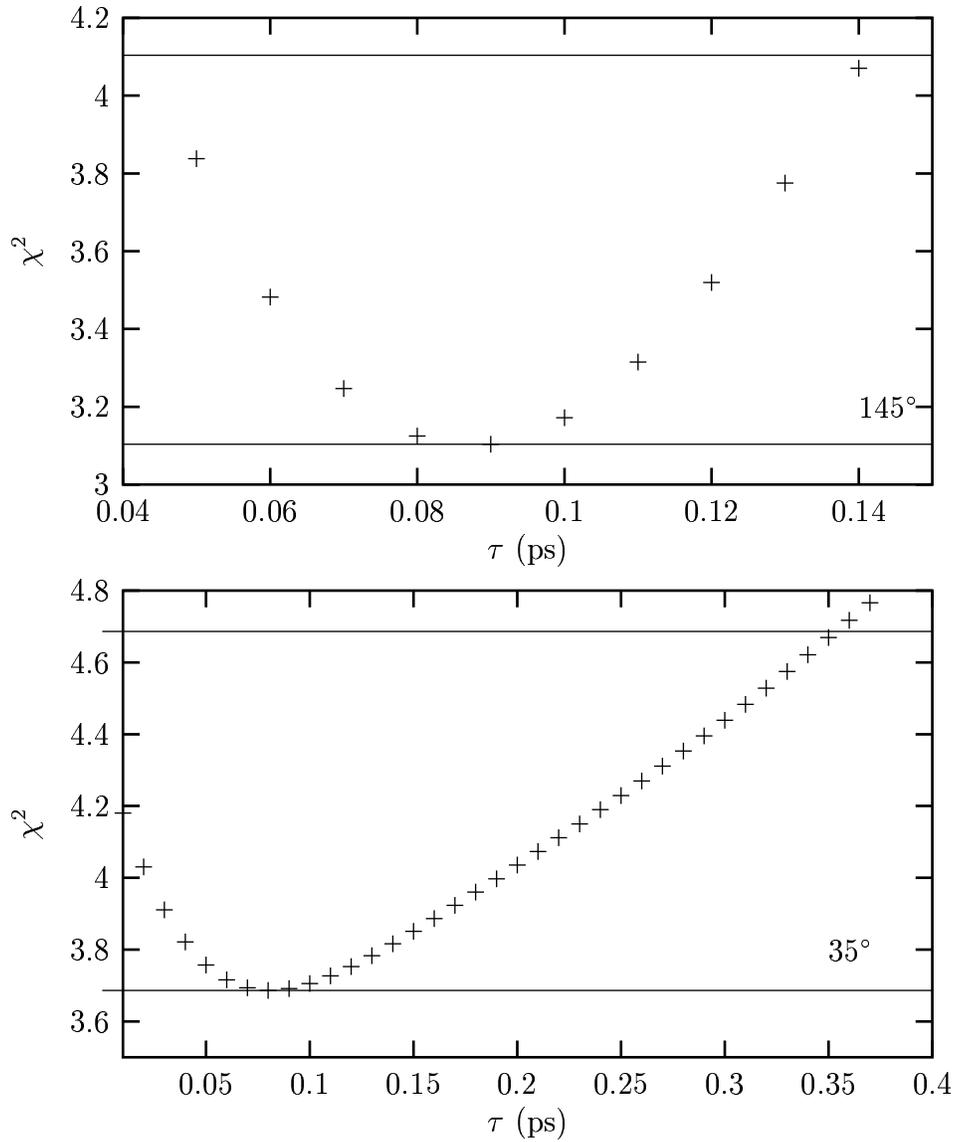


Figura 7.28: Valores de  $\chi^2$  de las formas de línea para la transición de 1336.3 keV. Abajo para  $35^\circ$ , arriba para  $145^\circ$

La flecha indica la posición del pico sin corrimiento, también se puede notar claramente como afecta la diferencia del número de detectores, el máximo valor de cuentas que en este caso alcanza el espectro a  $35^\circ$  es menor de 80 mientras que a  $145^\circ$  es casi 200.

El patrón de poblamiento involucra cuatro estados,  $|\phi_1\rangle$  y  $|\phi_2\rangle$  son los mismos es-

tados de la Figura 7.26 y el estado del cual proviene la transición es el  $|\phi_4\rangle$  y el que lo alimenta lateralmente es  $|\phi_3\rangle$ . Los resultados obtenidos de tiempos de vida, alimentación lateral y los promedios se muestran en la Tabla 7.9.

	$\tau(145^\circ)$ ps	$\tau(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}$ ps	$\tau_{sf}(145^\circ)$ ps	$\tau_{sf}(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}_{sf}$ ps
	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09
mínimo	0.04	0.02	0.08	0.01	0.01	0.08
máximo	0.14	0.36	0.10	0.22	0.20	0.10

Tabla 7.9: Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 1336.3 keV.

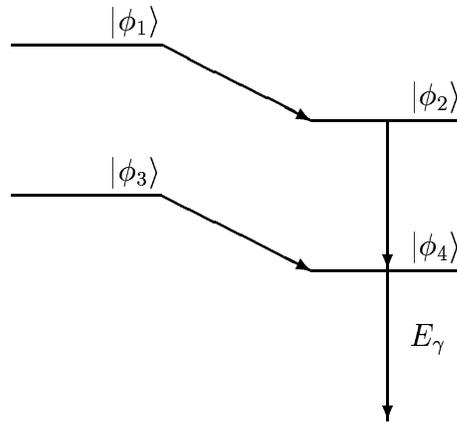


Figura 7.29: Patrón de poblamiento para la transición de 1336.3 keV.

### 7.2.3 Estado ( $29/2^+$ ). Transición 1254.2 keV.

Igualmente se tiene en la Figura 7.30 los espectros para los dos ángulos, se señala la posición del pico sin corrimiento mediante la flecha y se nota la menor cantidad de cuentas en el espectro de  $35^\circ$  debido a la falta del detector.

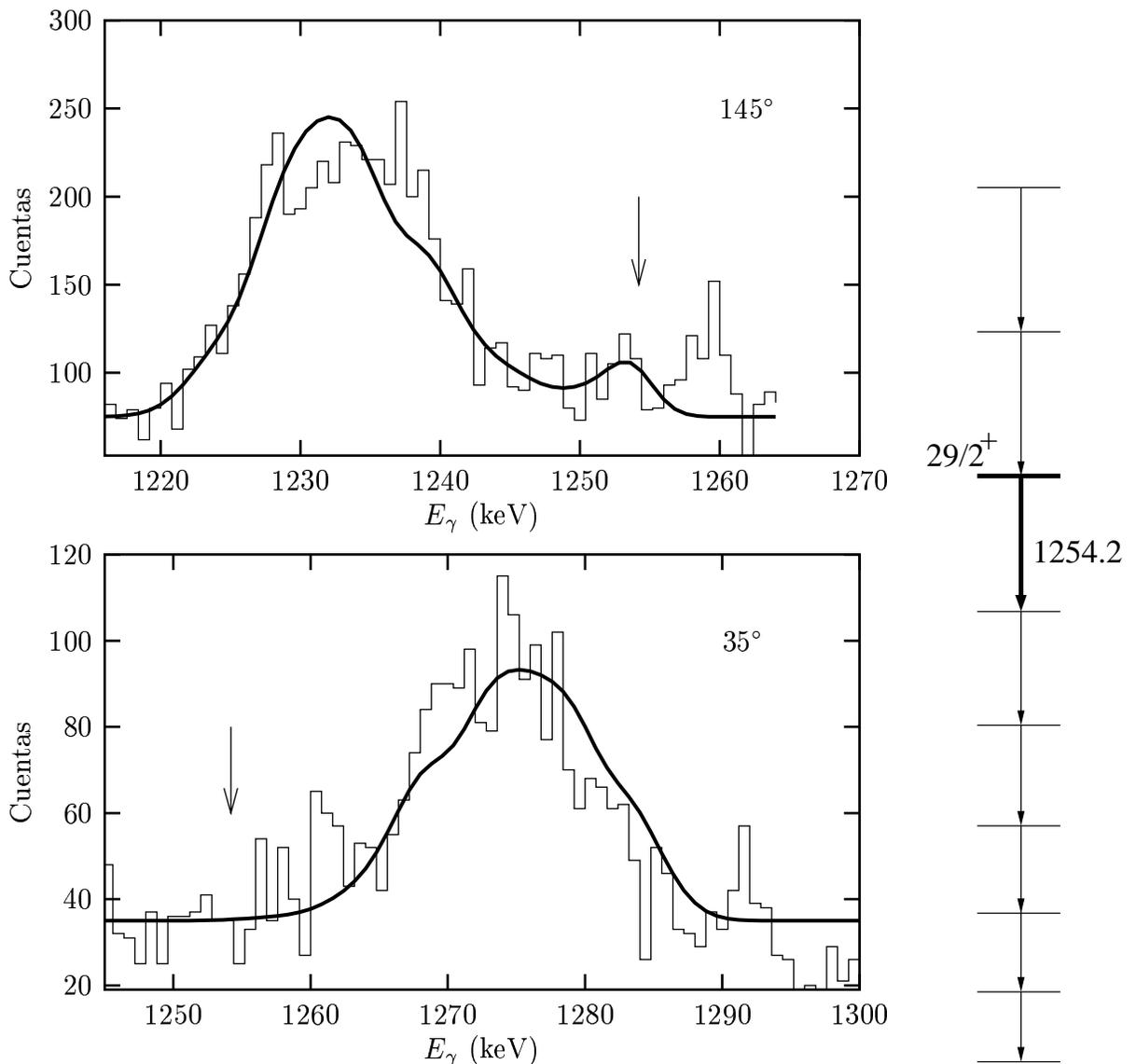


Figura 7.30: Arriba: Forma de línea para la transición de 1254.2 keV tomada con detectores a  $145^\circ$ . Abajo: Forma de línea para la transición de 1254.2 keV tomada con detectores a  $35^\circ$ .  $\chi^2$  del tiempo de vida del estado.

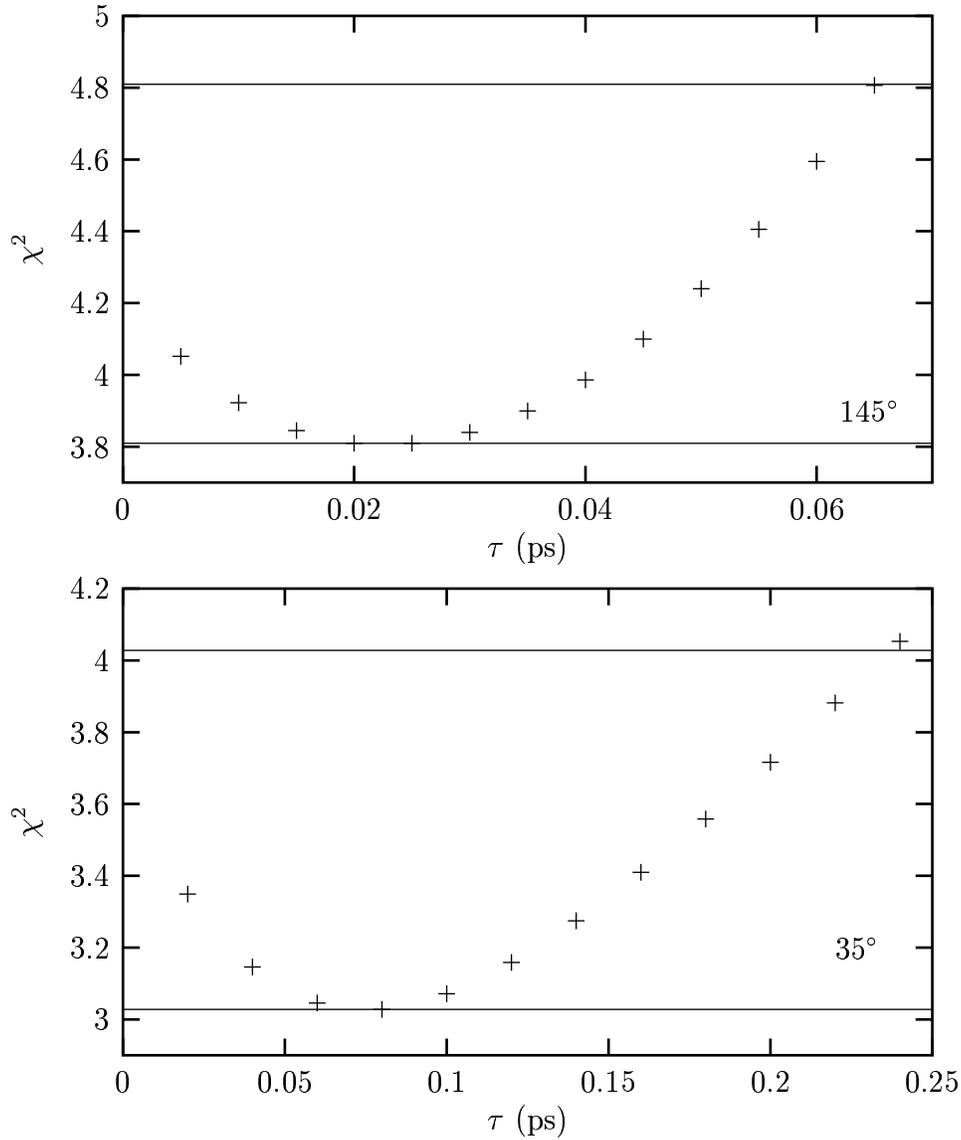


Figura 7.31: Valores de  $\chi^2$  de las formas de línea para la transición de 1254.2 keV. Abajo para 35°, arriba para 145°

de la misma forma se utilizan los tiempos de vida de los estados  $|\phi_1\rangle$ ,  $|\phi_2\rangle$ ,  $|\phi_3\rangle$  y  $|\phi_4\rangle$  determinados anteriormente para realizar el ajuste de la forma de línea, el estado de interés en este caso es  $|\phi_6\rangle$  y el estado  $|\phi_5\rangle$  es el que lo alimenta lateralmente. Los resultados obtenidos de tiempos de vida, alimentación lateral y los promedios se muestran en la Tabla 7.10.

	$\tau(145^\circ)$ ps	$\tau(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}$ ps	$\tau_{sf}(145^\circ)$ ps	$\tau_{sf}(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}_{sf}$ ps
	0.03	0.08	0.05	0.15	0.20	0.18
mínimo	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.15
máximo	0.06	0.24	0.06	1.10	1.30	0.31

Tabla 7.10: Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 1254.2 keV.

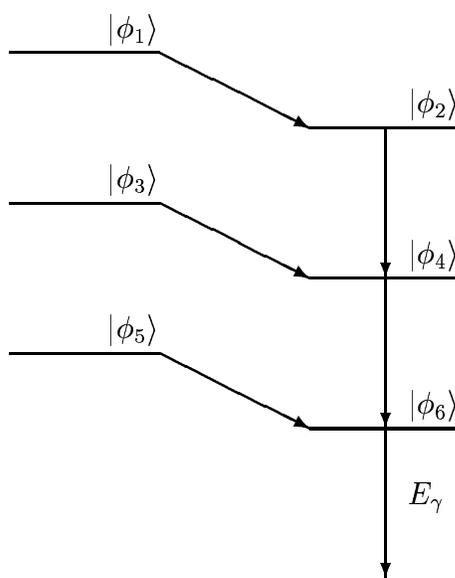


Figura 7.32: Patrón de poblamiento para la transición de 1254.2 keV.

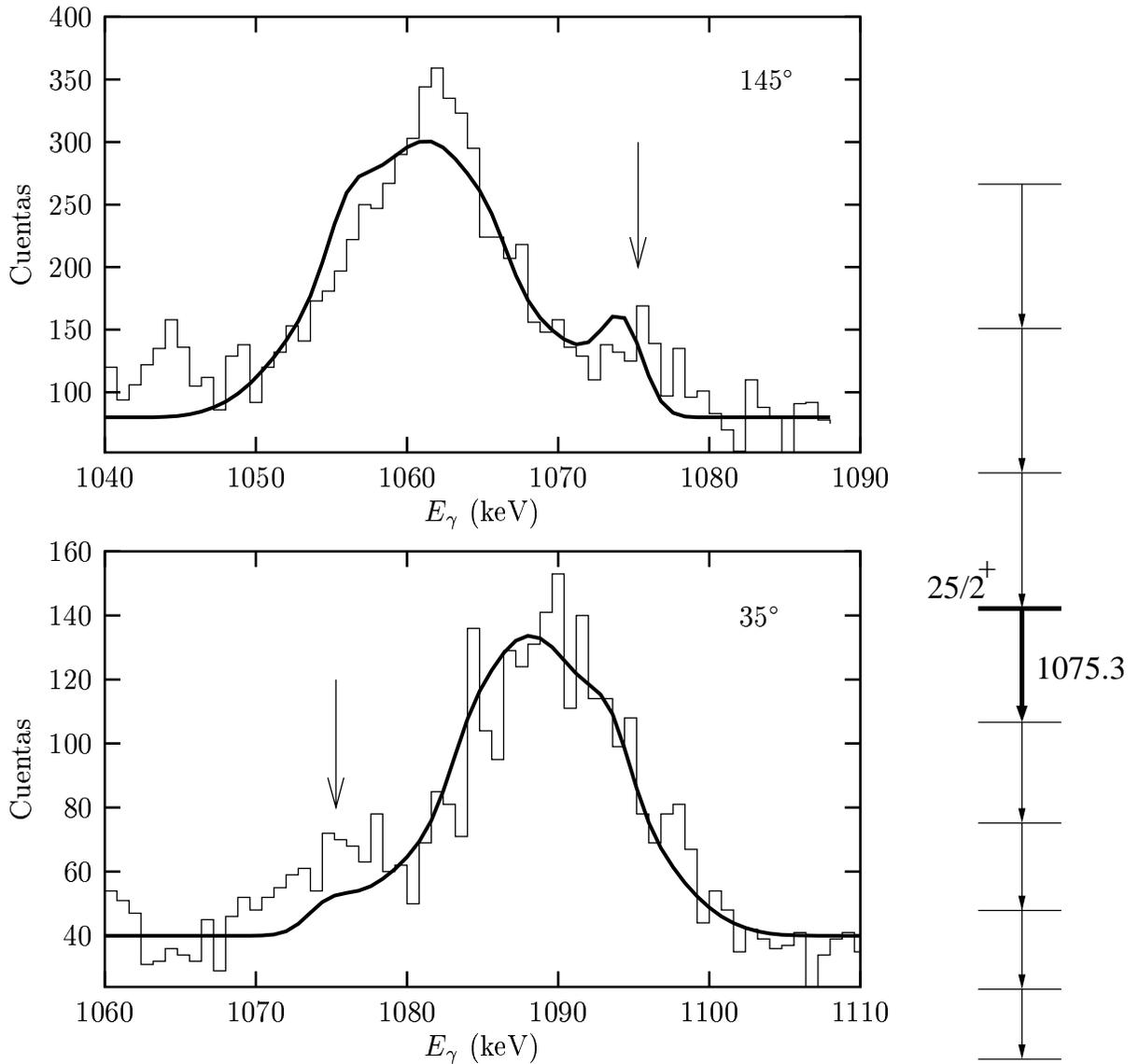
7.2.4 Estado ( $25/2^+$ ). Transición 1075.3 keV.

Figura 7.33: Arriba: Forma de línea para la transición de 1075.3 keV tomada con detectores a  $145^\circ$ . Abajo: Forma de línea para la transición de 1075.3 keV tomada con detectores a  $35^\circ$ .  $\chi^2$  del tiempo de vida del estado.

Los ajustes obtenidos para las formas de línea de los espectros tomados con detectores a  $145^\circ$  (arriba) y  $35^\circ$  (abajo) para la transición de 1075.31 keV se grafican en la Figura 7.33. Los correspondientes valores de  $\chi^2$  para cada caso se muestran en la

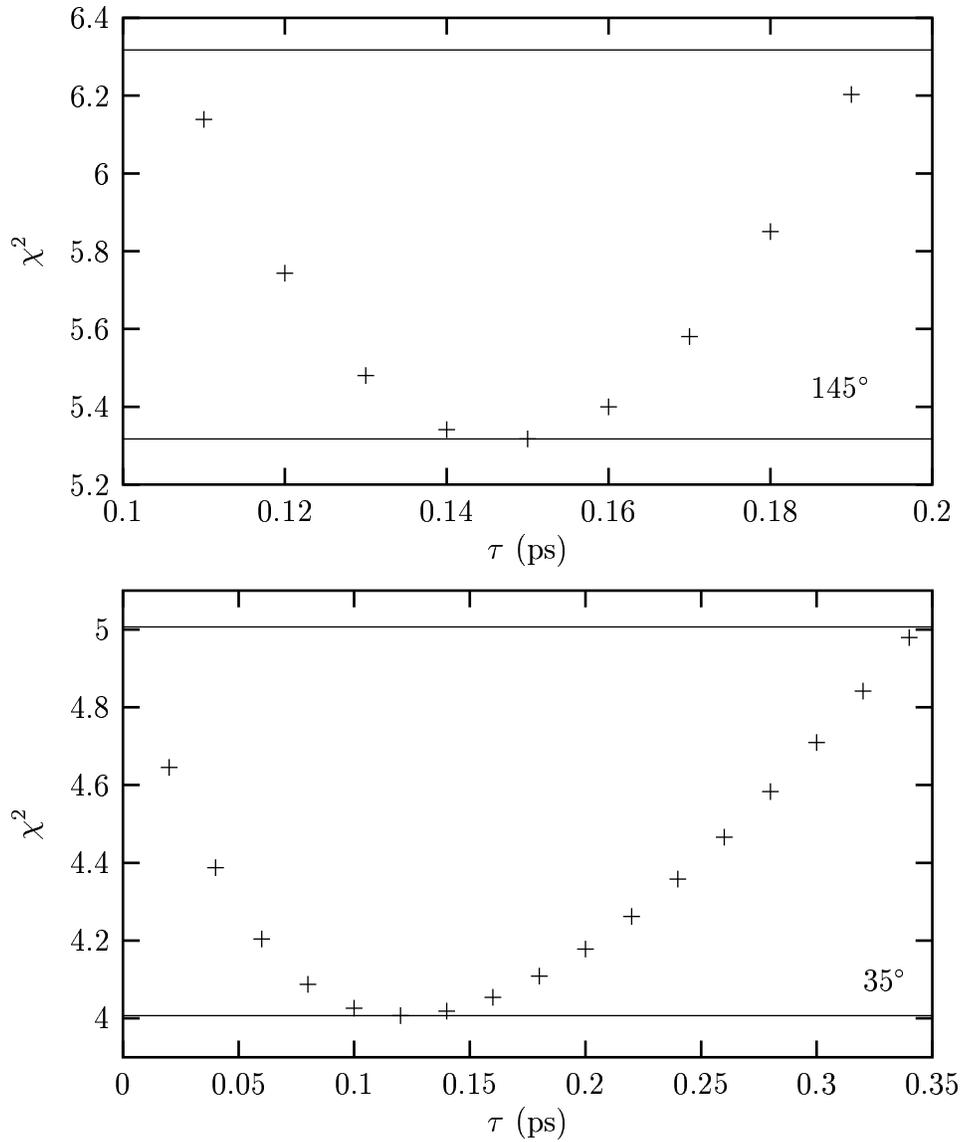


Figura 7.34: Valores de  $\chi^2$  de las formas de línea para la transición de 1075.3 keV. Abajo para 35°, arriba para 145°

Figura 7.34, de allí se determinan los valores mínimo y máximo de los tiempos de vida.

Las formas de línea obtenidas en este caso Figura 7.33, muestran algunas de las cuentas formando un pequeño pico sin corrimiento indicado por la flecha, estos rayos  $\gamma$  fueron emitidos con poca velocidad, lo cual indica un tiempo de vida mayor

que el de los estados de mayor energía. Sin embargo el número de cuentas que presentan un corrimiento en energía es mucho mayor.

El patrón de poblamiento aumenta Figura 7.35, el estado del cual provienen los rayos  $\gamma$  de esta transición es  $|\phi_8\rangle$  y el estado que lo alimenta lateralmente es  $|\phi_7\rangle$ . Los resultados obtenidos de tiempos de vida, alimentación lateral y los promedios se muestran en la Tabla 7.11.

	$\tau(145^\circ)$ ps	$\tau(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}$ ps	$\tau_{sf}(145^\circ)$ ps	$\tau_{sf}(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}_{sf}$ ps
	0.15	0.12	0.14	0.25	0.30	0.28
mínimo	0.11	0.01	0.13	0.07	0.10	0.24
máximo	0.19	0.34	0.15	0.47	1.00	0.38

Tabla 7.11: Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 1075.3 keV.

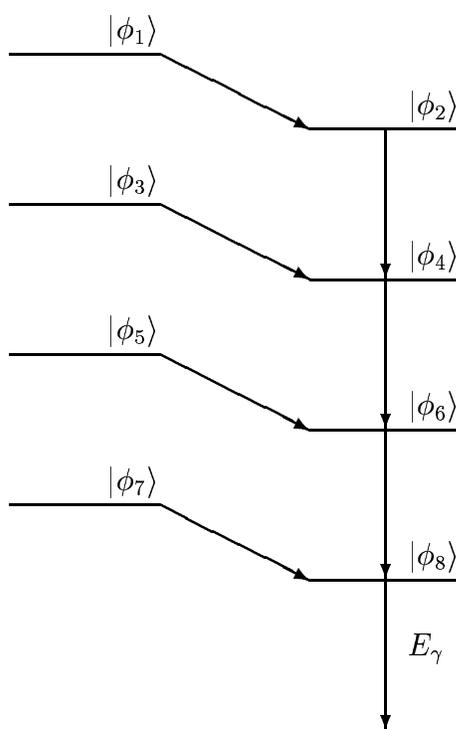


Figura 7.35: Patrón de poblamiento para la transición de 1075.3 keV.

### 7.2.5 Estado $(21/2^+)$ . Transición 917.9 keV.

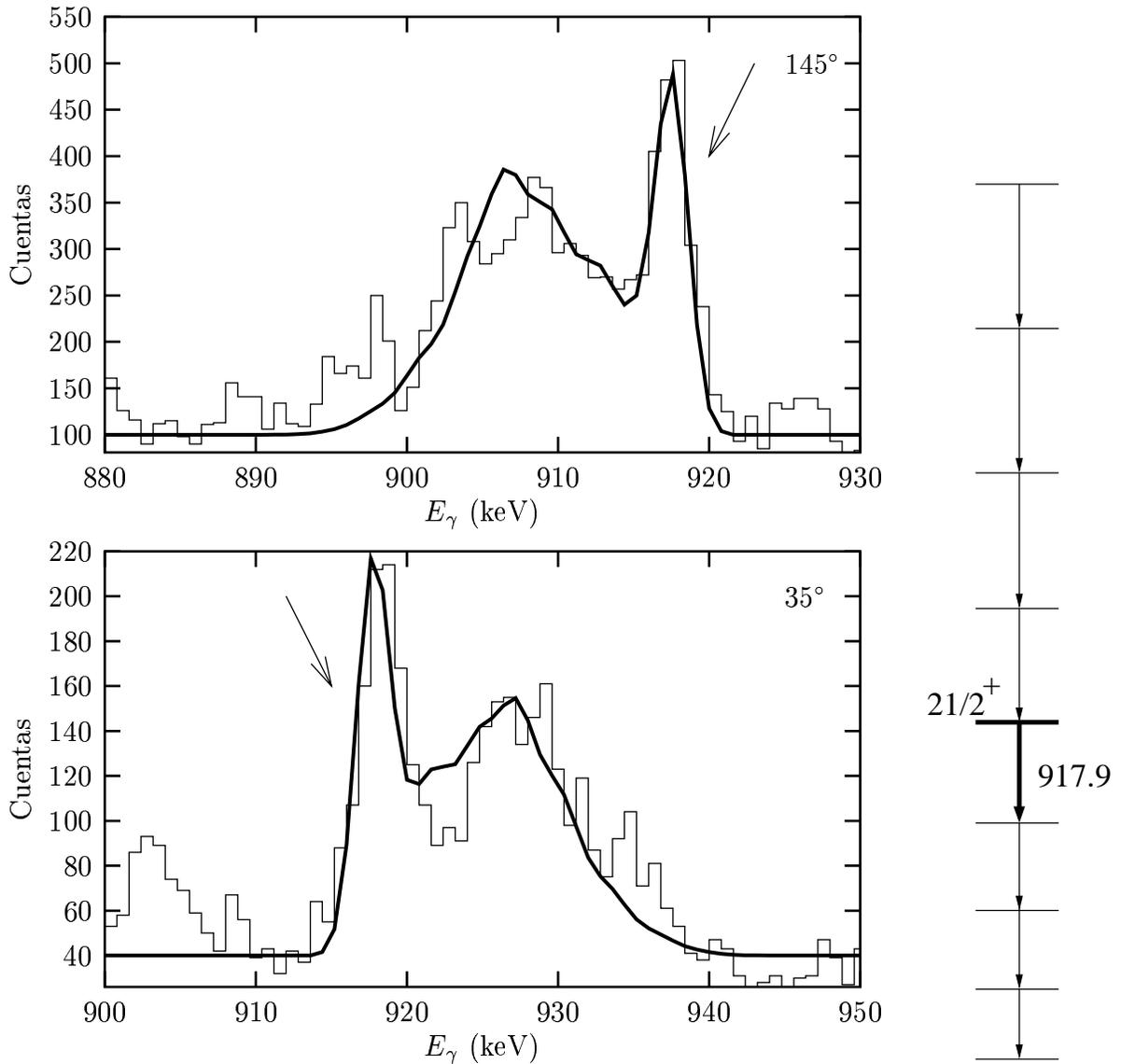


Figura 7.36: Arriba: Forma de línea para la transición de 917.9 keV tomada con detectores a  $145^\circ$ . Abajo: Forma de línea para la transición de 917.9 keV tomada con detectores a  $35^\circ$ .  $\chi^2$  del tiempo de vida del estado.

El patrón de poblamiento utilizado fué como se representa en la Figura 7.13. Las formas de línea obtenidas en este caso Figura 7.36, presentan muchas de las cuentas formando un pico sin corrimiento indicado por la flecha, estos rayos  $\gamma$  fueron

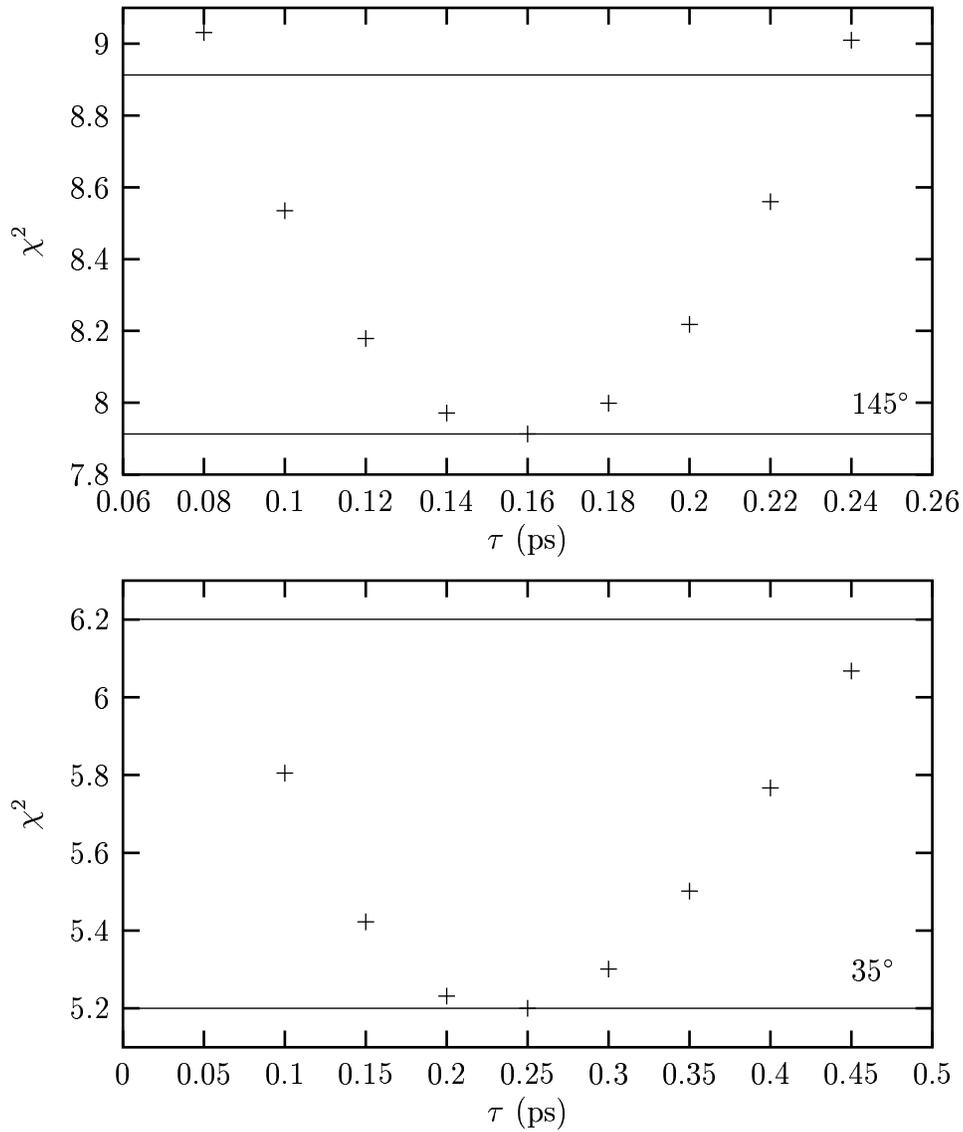


Figura 7.37: Valores de  $\chi^2$  de las formas de línea para la transición de 917.9 keV. Abajo para  $35^\circ$ , arriba para  $145^\circ$

emitidos con poca velocidad, lo cual indica un tiempo de vida mayor que el de los estados de mayor energía. A diferencia del caso anterior el número de cuentas que no presentan corrimiento es cercano a el número de cuentas que si tienen un corrimiento en la energía.

El patrón de poblamiento aumenta Figura 7.38, el estado que emite los trayos  $\gamma$

de esta transición es  $|\phi_{10}\rangle$  y el estado que lo alimenta lateralmente es  $|\phi_9\rangle$ . Los resultados obtenidos de tiempos de vida, alimentación lateral y los promedios se muestran en la Tabla 7.12.

	$\tau(145^\circ)$ ps	$\tau(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}$ ps	$\tau_{sf}(145^\circ)$ ps	$\tau_{sf}(35^\circ)$ ps	$\bar{\tau}_{sf}$ ps
	0.16	0.25	0.20	1.00	1.00	1.00
mínimo	0.08	0.14	0.19	0.80	0.80	0.86
máximo	0.23	0.34	0.22	9.00	11.00	7.40

Tabla 7.12: Tiempos de vida y alimentación lateral obtenidos al realizar el ajuste de la forma de línea de 917.9 keV.

Esta es la última forma de línea que se puede ajustar debido a que los tiempos de vida de los estados de menor energía se salen del rango de funcionamiento del programa y los errores asociados a estos tiempos de vida son muy grandes.

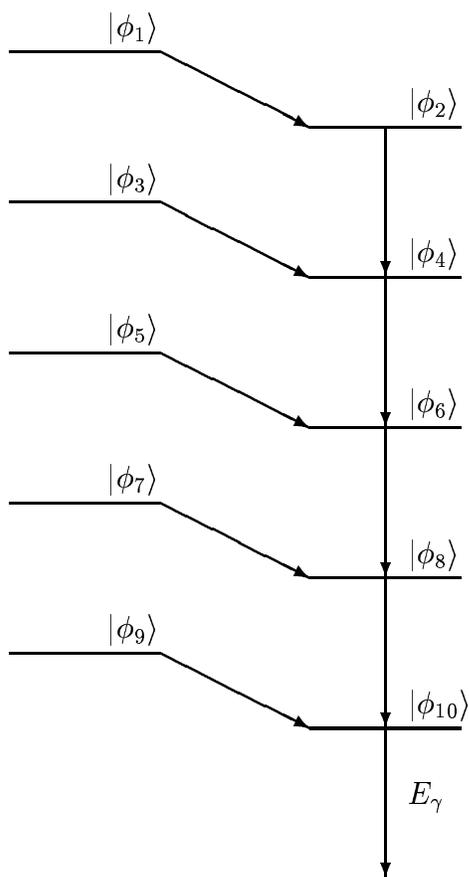


Figura 7.38: Patrón de poblamiento para la transición de 917.9 keV.

# Capítulo 8

## Análisis

Debido a que la energía de la reacción (85 MeV) que se utilizó para poblar los estados de alto espín del  $^{75}\text{Br}$  en este experimento es mayor que la energía utilizada en la reacción realizada por Lühmann *et al.* [2], se pudieron determinar los tiempos de vida de estados hasta con un valor de spin de  $I = 37/2$ , dos estados por arriba de los obtenidos en la referencia [2].

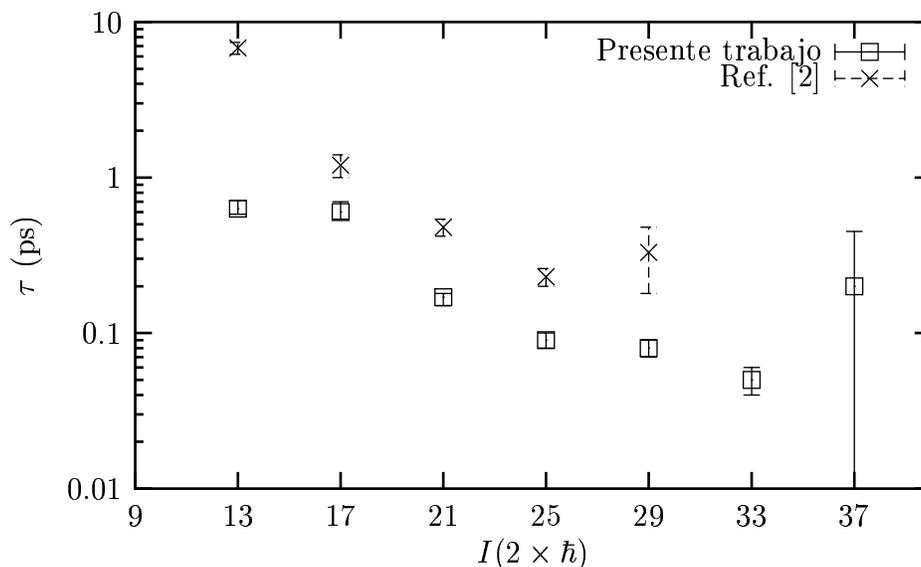


Figura 8.1: Comparación de los tiempos de vida obtenidos en el presente trabajo para los estados de la banda B con los encontrados por Lühmann *et al.* [2].

En la Figura 8.1 se muestran los tiempos de vida obtenidos en este trabajo para los estados de la banda B, con los encontrados también experimentalmente por

Lühmann *et al.* [2]; se puede observar que los resultados se encuentran en el mismo rango y las diferencias pueden provenir del hecho que se determinaron otros tiempos de vida de estados superiores y ya que los estados superiores se utilizan para la determinación de los tiempos de vida de cada estado pueden afectar los resultados de toda la banda, también pueden haber otros factores que afectan el resultado tales como el patrón de poblamiento asumido para cada uno de los estados y otras aproximaciones utilizadas para obtener las formas de línea y para el funcionamiento del programa.

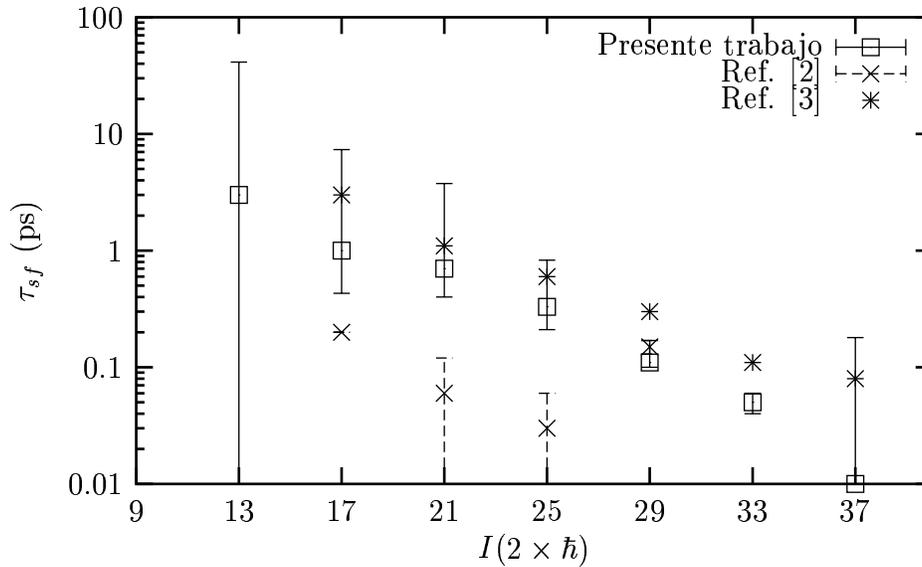


Figura 8.2: Comparación de los tiempos de alimentación lateral obtenidos en el presente trabajo para los estados de la banda B con los encontrados por Lühmann *et al.* [2] y los simulados por E. Galindo [3].

En la Tabla 8.1 se encuentran los resultados finales obtenidos para los tiempos de vida y de alimentación lateral de la banda B, de todos los estados que se pudieron calcular, se indica la energía de excitación  $E^*$  y el espín  $I$  de cada estado.

Para los tiempos de alimentación lateral se graficaron los resultados no solamente de la referencia [2], sino también los resultados obtenidos en la simulación realizada por E. Galindo [3] Figura 8.2. En este caso también se obtuvieron tiempos de alimentación lateral para estados hasta un espín de  $I = 37/2$ . Allí, se observa que los valores obtenidos en el presente trabajo se acercan más a los valores simulados y se alejan aproximadamente un orden de magnitud de los otros resultados experimentales, lo cual implica que la predicción del programa **GAMMAPACE**, utilizado para

$E^*$ (keV)	$I(\hbar)$	$E_\gamma$ (keV)	$\tau$ (ps)	$\tau_{sf}$ (ps)
8277.3	37/2	1647.8	$0.20^{+0.25}_{-0.19}$	$0.01^{+0.17}_{-0.01}$
6629.5	33/2	1438.5	$0.05^{+0.01}_{-0.01}$	$0.05^{+0.02}_{-0.01}$
5191.0	29/2	1321.9	$0.08^{+0.01}_{-0.01}$	$0.11^{+0.06}_{-0.01}$
3869.1	25/2	1211.1	$0.09^{+0.01}_{-0.01}$	$0.33^{+0.50}_{-0.12}$
2658.0	21/2	1045.5	$0.17^{+0.01}_{-0.01}$	$0.70^{+3.06}_{-0.30}$
1612.5	17/2	829.9	$0.60^{+0.09}_{-0.07}$	$1.00^{+6.36}_{-0.57}$
782.6	13/2	562.7	$0.63^{+0.08}_{-0.05}$	$3.00^{+38.2}_{-4.66}$

Tabla 8.1: Tabla de resultados de los tiempos de vida y de alimentación lateral de la banda B.

realizar dicha simulación es buena y que posiblemente hubo alguna inconsistencia en la obtención de los tiempos de alimentación lateral realizada en [2].

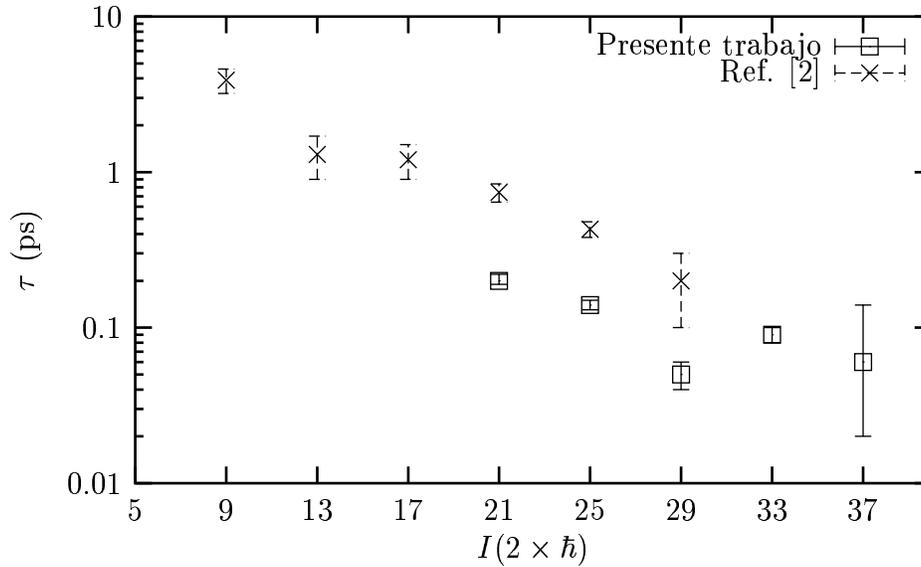


Figura 8.3: Comparación de los tiempos de vida obtenidos en el presente trabajo para los estados de la banda D con los encontrados por Lühmann *et al.* [2].

De la misma forma las Figuras 8.3 y 8.4, muestran correspondientemente los mismos resultados arriba discutidos, pero en este caso para la banda D.

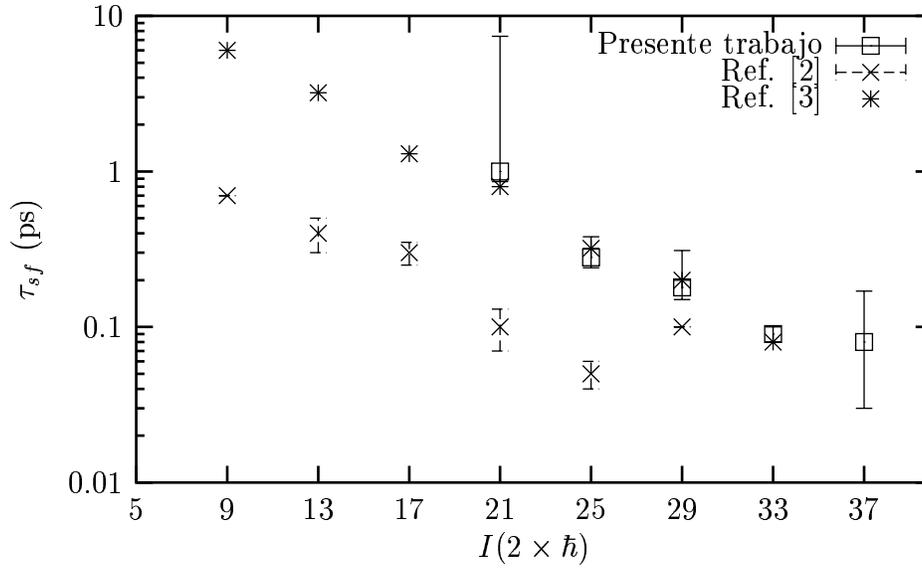


Figura 8.4: Comparación de los tiempos de alimentación lateral obtenidos en el presente trabajo para los estados de la banda B con los encontrados por Lühmann *et al.* [2] y los simulados por E. Galindo [3].

En la Tabla 8.2 se encuentran los resultados finales obtenidos para los tiempos de vida y de alimentación lateral de la banda D, de todos los estados que se pudieron calcular, se indica la energía de excitación  $E^*$  y el espín  $I$  de cada estado.

$E^*$ (keV)	$I(\hbar)$	$E_\gamma$ (keV)	$\tau$ (ps)	$\tau_{sf}$ (ps)
8333.0	37/2	1394.2	$0.06^{+0.08}_{-0.04}$	$0.08^{+0.09}_{-0.05}$
6938.8	33/2	1336.3	$0.08^{+0.01}_{-0.01}$	$0.09^{+0.01}_{-0.01}$
5605.5	29/2	1254.2	$0.05^{+0.01}_{-0.01}$	$0.17^{+0.13}_{-0.02}$
4348.3	25/2	1075.3	$0.13^{+0.01}_{-0.01}$	$0.27^{+0.11}_{-0.03}$
3273.0	21/2	917.9	$0.20^{+0.01}_{-0.02}$	$1.00^{+6.40}_{-0.14}$

Tabla 8.2: Tabla de resultados de los tiempos de vida y de alimentación lateral de la banda D.

# Capítulo 9

## Resumen y Conclusiones

En *Florida State University* se realizó un experimento utilizando la reacción de fusión-evaporación  ${}^{48}_{22}\text{Ti}({}^{30}_{14}\text{Si}, p2n){}^{75}_{35}\text{Br}$  a 85 MeV, para poblar los estados excitados de alto espín del  ${}^{75}\text{Br}$ ; se utilizaron 10 detectores de Germanio Hiperpuro con supresores de efecto Compton, para recolectar los datos en coincidencia  $\gamma$ - $\gamma$  y mediante el método de atenuación del corrimiento Doppler (DSA) se obtuvieron formas de línea para determinar los tiempos de vida y de alimentación lateral de dos de las principales bandas del  ${}^{75}\text{Br}$  con el programa AJUSTE.

Se encontraron de tiempos de vida y de alimentación lateral para los estados de espín desde 9/2 hasta 37/2 de la banda B del esquema de niveles y desde 21/2 hasta 37/2 de la banda D. Para la utilización del programa AJUSTE es necesario conocer los parámetros de la reacción y de detección entre otros. Los mejores ajustes se escogen ubicando el mínimo del valor de  $\chi^2$  y los valores mínimos y máximos se determinan con el valor de  $\chi^2 + 1$ .

Los valores obtenidos se compararon con los resultados experimentales obtenidos por Lühmann *et al.* [2] y los tiempos de alimentación lateral simulados con el programa GAMMAPACE por E. Galindo [3].

De esta forma se pudo observar que los resultados de los tiempos de vida para las dos bandas se encuentran en el mismo rango de las obtenidas en la referencia; las diferencias pueden deberse a el hecho que se determinaron otros tiempos de vida de estados superiores y ya que los estados superiores se utilizan para la determinación de los tiempos de vida de cada estado pueden afectar los resultados de toda la banda; también puede haber otros factores que afectan el resultado tales como el patrón de poblamiento asumido para cada uno de los estados y otras aproximaciones utilizadas para obtener las formas de línea y para el funcionamiento del programa. Sin embargo estos aspectos en su mayoría pueden ser corregidos en algún trabajo

posterior si se quiere aumentar el nivel de confianza de los resultados.

En el caso de los tiempos de alimentación lateral los resultados muestran que los valores obtenidos en este trabajo se aproximan a los valores simulados e implican que la predicción del programa es buena y que hubo posiblemente alguna inconsistencia en la obtención de los tiempos de alimentación lateral realizada en [2].

Finalmente los resultados de este trabajo se pueden extender para las otras bandas del  $^{75}\text{Br}$ . Una vez obtenidos lo más precisamente posible los tiempos de vida del núcleo se puede estudiar a fondo la deformación o de manera general la estructura del núcleo que sería la utilidad final de estos resultados.

# Apéndice A

## Errores de medición

Las mediciones de cualquier clase en cualquier experimento están siempre sujetas a incertidumbres, el proceso de medición es un proceso aleatorio descrito por una distribución de probabilidad; los resultados de la medición son muestras de la distribución las cuales permiten estimar parámetros teóricos.

La distribución  $\chi^2$  es particularmente útil para probar que tan bueno es el ajuste que se realiza a los datos experimentales. Una manera rápida para hacer esta comparación es utilizar el  $\chi_r^2$  que para este caso se definió de la siguiente manera:

$$\chi_r^2(\tau) = \frac{1}{n} \sum_i \frac{(y_i - C h_i)(\tau)}{\sigma_i^2} \quad (\text{A.1})$$

donde  $y_i$  es el número de cuentas en el canal  $i$ -ésimo de la forma de línea experimental y

$$h_i(t) = \int_{E_i - E_\gamma}^{E_i - E_\gamma + \delta E} f(\Delta E, \tau) d(\Delta E) \quad (\text{A.2})$$

con  $(E_i, E_i + \delta E)$  el rango de energías abarcado por el canal  $i$ -ésimo.  $\sigma_i$  es la desviación estandar de la distribución de probabilidad  $y_i$ ,  $n$  es el número de canales de la forma de línea experimental y  $C$  es una constante de normalización que minimiza el  $\chi_r^2$  para un valor de  $\tau$  fijo. El número de cuentas en un canal  $y_i$ , presenta una distribución de Poisson cuya desviación estandar es  $\sigma = \sqrt{y_i}$ .

# Bibliografía

- [1] A. Garzón. Simulación de formas de línea en experimentos de atenuación del corrimiento por efecto doppler. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, 2003.
- [2] L. Lühmann, M. Debray, K. P. Lieb, W. Nazarewicz, and B. Wörmann. Yrast transition strengths and band structure of  $^{75}\text{Br}$ . *Physical Review C* **31**, 828 (1985).
- [3] E. Galindo. Simulación del tiempo de poblamiento desde el continuo de estados discretos para núcleos con  $A \approx 80$ , en reacciones de iones pesados. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, 1997.
- [4] R. Casten. Nuclear structure from a simple perspective. Oxford Science Publications, 2000.
- [5] J. M. Blatt and V. F. Weisskopf. Theoretical nuclear physics. Dover Publications, Inc., 1991.
- [6] Ramiro Cardona. Estructura a alto spin de las bandas normalmente deformadas de  $^{84}\text{Zr}$ . Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Colombia, 2003.
- [7] P. Frobrich and R. Lipperheide. Theory of nuclear reactions. Oxford Science Publications, 1996.
- [8] H. Feshbach. Theoretical nuclear physics nuclear reactions. Wiley Interscience, 1992.
- [9] F. Cristancho. La espectroscopía gamma, el discreto y el continuo nuclear. Notas de Clase. Universidad Nacional de Colombia. Sin publicar, 1999.
- [10] H. Ejiri and M. J. A. de Voigt. Gamma-ray electron spectroscopy in nuclear physics. Capítulo 6. Oxford Science Publications, 1989.
- [11] A. deShalit and H. Feshbach. Theoretical nuclear physics. Volumen 1. Wiley Interscience, 1974.

- [12] R. B. Firestone. Table of isotopes. Octava Edición. Wiley Interscience, 1996.
- [13] K. Heyde. Basic ideas and concepts in nuclear physics. Capítulo 1. Institute of physics publishing, 1999.
- [14] Nilsson. Nuclear structure from a simple perspective. Oxford Science Publications, 1999.
- [15] F. Cristancho. Introducción a la física nuclear de alto spin. Notas de Clase. Universidad Nacional de Colombia. Sin publicar, 2003.
- [16] B. R. Mottelson A Bohr. Nuclear structure. Volumen 2. World Scientific, 1998.
- [17] G. Z. Solomon, G. D. Johns, R. A. Kaye, and S. L. Tabor. Shape competition and shape coexistence in  $^{75}\text{Br}$ . Physical Review C **59**, 1339 (1999).
- [18] **[www.physics.fsu.edu/Nuclear/Brochures/SuperconductingLinearAcceleratorLaboratory/default/htm](http://www.physics.fsu.edu/Nuclear/Brochures/SuperconductingLinearAcceleratorLaboratory/default/htm)**.
- [19] **[www-gsi-vsm.gsi.de/eb/html/eb\\_seg\\_clover.html](http://www-gsi-vsm.gsi.de/eb/html/eb_seg_clover.html)**.
- [20] W. Leo. Thechniques for nuclear and particle physics experiments. Springer - Verlag. 1994.
- [21] F. Cristancho. Instrumentación nuclear. Notas de Clase. Universidad Nacional de Colombia. Sin publicar, 2002.