UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



PRÁCTICAS EN EMPRESA

Estudio de la función de excitación de la reacción ${}^{19}F(p,\alpha){}^{16}O$ mediante espectroscopía gamma

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

TUTOR: OLOF TENGBLAD SUPERVISORES: JOSÉ ANTONIO BRIZ MONAGO, MARIA JOSÉ GARCÍA BORGE

Carlos Marcos Torrejón

Grado en Física Curso académico 2019-2020 Convocatoria ordinaria

1. Introducción

El objetivo de este informe es estudiar la función de excitación de la reacción ${}^{19}F(p,\alpha){}^{16}O$ en el experimento de ${}^{19}F(p,\alpha){}^{16}O$ realizado en abril de 2012 en el Centro de Microanálisis de Materiales (CMAM) a través de la radiación γ de desexcitación en ${}^{16}O$.

Para ello realizaremos una calibración de los espectros y analizaremos la estabilidad temporal así como la resolución y linealidad de la respuesta dada por los detectores con el fin de hallar la región de energías más favorables para poblar los estados excitados a 6.9 y 7.1 MeV de interés astrofísico del ¹⁶O ,empleando un rango variable de energías de haz de protones.

2. Método experimental

En el experimento se utilizaron detectores CEPA4 compuesto por cristales $LaBr_3$ y $LaCl_3$ phoswich y se trabajó con un total de 15 energías del haz de protones desde 1.35 MeV hasta 3 MeV dirigidos hacia un blanco de reacción de MgF_2 . El acelerador de protones se trata de un acelerador tipo tándem de 5 MV.

El diagrama de desintegración se muestra en la figura 1.



Figura 1: Esquema de desintegración ${}^{19}F(p,\alpha){}^{16}O$

El haz de protones impacta sobre un blanco de 120 mg/cm^2 de MgF_2 con 20 mg/cm^2 de Carbon backing. Esto desencadena la reacción de protón sobre ¹⁹F, con la que se pueblan

estados excitados de ²⁰Ne que son inestables a emisión α , poblando así estados excitados de ¹⁶O. Estos niveles de ¹⁶O a su vez, pueden decaer por emisión α hacia ¹²C o, por el contrario, desexcitarse mediante radiación γ terminando en el estado fundamental de ¹⁶O. Nuestro estudio se centrará en este último caso y estudiaremos la intensidad de dichas desexcitaciones γ .

Energía ${}^{16}O^*$ (keV)	E. gamma (keV)	B.R. (%)
6049.4	6048.2	100
6129.89	6128.63	100
6917.1	867.7	0.027(3)
	6915.5	100
7116.85	986.93	0.070(14)
	7115.15	100
8871.9	1754.9	14.7(7)
	1954.9	4.6(7)
	2741.5	100(21)
	2822.2	0.15(5)
	8869.3	9.3(10)
9585	2688	12(4)
	9582	100(16)
9844.5	2927.1	34(7)
	3794.6	30(7)
	9841.2	100(7)

Cada uno de los niveles excitados del ^{16}O mostrados en la Fig.1 y las energías de sus correspondientes desexcitaciones γ se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Niveles excitados de ¹⁶O poblados por la emisión α del ²⁰Ne y sus correspondientes emisiones γ . La emisión γ procedente del nivel 6049.4 keV al estado fundamental de ¹⁶O no se observará pues se trata de una transición $0 + \rightarrow 0 +$.

La accesibilidad a los niveles excitados del ¹⁶O (Tabla 1) dependerá de la energía del haz de protones empleada en cada medida. Conociendo el exceso de masas δ_M^1 de cada uno de los elementos de la reacción ¹⁹ $F(p, \alpha)^{16}O$, podemos calcular qué niveles excitados de ¹⁶O esperamos encontrar según de la energía del haz de protones utilizada (E_p) . Primero tenemos en cuenta que inicialmente en la reacción ¹⁹ $F(p, \alpha)^{16}O$ se pueblan estados excitados de ²⁰Ne

$$\delta_M(^{19}F) + \delta_M(p) + E_p - \delta_M(^{20}Ne) = 12843,46 \ keV + E_p \tag{1}$$

y, acto seguido, se produce la desintegración α del ^{20}Ne en ^{16}O

$$\delta_M({}^{16}O) + \delta_M(\alpha) - \delta_M({}^{20}Ne) = 4729,85 \ keV \tag{2}$$

¹M. Wang, G. Audi, A.H. Wapstra, F.G. Kondev, M. MacCormick, X. Xu B. Pfeiffer, 'The AME2012 atomic mass evaluation', '(II). Tables, graphs and references', Vol. 36, No. 12, Dec., 2012. CPC(HEP NP), 2012, 36(12): 1603–2014

Restando las ecuaciones (1) y (2) obtenemos la energía del estado más excitado de ${}^{16}O$ al que tendremos acceso en función de la energía del haz de protones E_p

$$\delta_M({}^{19}F) + \delta_M(p) + E_p - \delta_M({}^{20}Ne) - (\delta_M({}^{16}O) + \delta_M(\alpha) - \delta_M({}^{20}Ne)) = 8113,61 \, keV + E_p \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que la energía más baja del haz de protones utilizada en el experimento es de 1350 keV (Tabla 2) deberíamos observar detecciones procedentes de la desexcitación de todos los niveles excitados del ¹⁶O por debajo de 8113.61 + 1350 = 9463.61 keV, a falta de correcciones por pérdidas energéticas en el blanco. Conforme la energía del haz de protones aumente, deberíamos obtener acceso a niveles excitados superiores del ¹⁶O, especialmente para las medidas a partir de 2000 keV de energía de haz, para la cual podrían poblarse todos los estados de ¹⁶O citados en la Tabla 1.

Junto con estas detecciones γ también esperamos ver sus asociados picos de escape relacionados con la creación de pares electrón-positrón. Un pico al que llamaremos Single Escape 511 keV debajo del fotopico y, otro, Double Escape a 1022 keV debajo del fotopico. Cabe recordar que estos picos Single y Double escape solo se producirán para aquellas desexcitaciones γ de la Tabla 2 con una energía mayor de 1022 keV (energía umbral para el proceso de creación de un par e^-e^+) y su intensidad debe aumentar respecto a la del fotopico en el espectro cuanto mayor sea la energía del rayo γ .

	En. de haz (keV)	Int. de haz (nA)	T. activo de medida (min)
23/04	1350	2.58	182.7
24/04	1691	1.77	313.9
	2041	1.90	136.35
25/04	2547	1.43	573.4
26/04	2981	2.62	461.4
27/04	1354	1.40	150.4
	2326	1.90	37.1
	2286	2.25	37.9
	2246	2.00	51.4
	2166	2.00	28.7
	2159	2.30	39.2
	2119	2.10	23.5
	2467	2.50	33.3
	2427	2.60	27.2
	2387	2.55	31.1

Las medidas se realizaron a lo largo de la semana del 23 al 27 de abril de 2012. Los datos generales sobre las mediciones se listan en la Tabla 2.

Tabla 2: Orden cronológico de la realización de las medidas para el estudio de la reacción ${}^{19}F(p,\alpha){}^{16}O$ según la energía de haz utilizada. El tiempo de medida mostrado es el activo, habiendo ya sustraído el tiempo muerto.

De todas las medidas las que ofrecen mayor estadística y nos permiten evaluar diferentes rangos de energías son las correspondientes a 2981 keV, 2547 keV, 1691 keV y 1354 keV por lo que se utilizarán como principales referencias en el análisis de resultados (Sección 4).

3. Calibración del espectro

Para la calibración del espectro se decidió utilizar el fotopico procedente de radiación γ interna del cristal de $LaBr_3$: Ce [1] (dopado con Cerio al ~ 5%) que se debe al isótopo ¹³⁸Lacosmogénico, el cual posee una vida media de $t_{1/2} = 1,05 \times 10^{11}$ años. Este núcleo se desintegra por captura de electrones en ¹³⁸Ba con un 66.4% de probabilidad y, por desintegración β_- en ¹³⁸Ce, con un 33.6% de probabilidad. En ambos casos, el ¹³⁸La se desintegra en un estado excitado de los núcleos hijos dando lugar a emisiones γ de desexcitación, de 789 keV para el ¹³⁸Ce y de 1436 keV para el ¹³⁸Ba. Para este último hay que tener en cuenta también emisiones de rayos X, detectándose en coincidencia con el rayo γ a 1436 keV dando lugar a un pico centrado en torno a 1468 keV, el cual es el que usaremos para la calibración del espectro. Junto con éste, usaremos otros dos picos para la calibración. Un fotopico de desexcitación de ${}^{16}O$ a 6128.63 keV y su pico de escape doble a 5106.63 keV. Se realizaron un total de 3 calibraciones diferentes según la energía de haz puesto que se contemplaban desplazamientos entre los espectros calibrados para diferentes energías de haz (esto se demuestra en la Fig. 7).

1. Para las dos primeras medidas con una Energía de haz de 1350 keV y 1691 keV, la primera de ellas efectuada el día 23/04 justo después de la calibración antes mencionada y la segunda el día posterior.



Figura 2: Rectas de ajuste para la calibración de las Energías de haz 1350 keV y 1691 keV.

$\mathrm{E}=\mathrm{b}+\mathrm{m}^{*}\mathrm{C}$								
b (keV)	Δb	m (keV/Ch)						
-545.2	1.5	3.5						
-466.4	1.5	3.3						
-484.1	1.5	3.6						
-481.9	1.5	3.6						



2. Calibración individual para una Energía de haz de 2041 keV, que fue la segunda se realizó el día 24/04, después de la de 1691 keV, para la cual la calibración 1 no era válida.

Figura 3: Rectas de ajuste para la calibración de la Energía de haz 2041 keV.

$\mathrm{E}=\mathrm{b}+\mathrm{m}^{*}\mathrm{C}$							
b (keV)	Δb	m (keV/Ch)					
-309.9	1.4	3.1					
-46.1	1.4	2.6					
-55.8	1.4	2.8					
-74.9	1.4	2.9					

3. Una única calibración para todas las medidas a partir del día 25/04 ya que, después de que se realizaran las medidas a 2041 keV, se observa un comportamiento bastante estable de los detectores al final del experimento, lo que no ocurría con las medidas anteriores.



Figura 4: Rectas de ajuste para la calibración de las Energía de haz 1354 keV y todas las superiores a 2100 keV.

$\mathrm{E}=\mathrm{b}+\mathrm{m}^{*}\mathrm{C}$							
b (keV)	Δb	m (keV/Ch)					
-161.7	70.3	2.9					
-84.9	97.3	2.6					
-90.1	55.4	2.8					
-82.7	63.1	2.8					

Para todas las calibraciones se observa un desajuste por problemas de la pendiente para las energías más altas (cerca de 12 MeV), pero que afecta mínimamente a la región de interés entre 3500-7500 keV.

Cada detector CEPA poseía su propia calibración. Una vez comprobado que la calibración era correcta se sumó la estadística de los cuatro detectores de CEPA4 para cada Energía de haz, obteniendo así un espectro final de mayor estadística.

4. Análisis del espectro

4.1. Simulación con Geant4

De entre todas las desexcitaciones posibles de los niveles excitados del ¹⁶O en los espectros medidos destacaba una región especialmente poblada situada en el rango de entre 3500 - 7500 keV por lo que, para evaluar en qué rango de Energía de haz se obtiene una mejor estadística de las emisiones γ del ¹⁶O, centraremos nuestra atención en cinco picos en el rango de 3500 - 7500 keV. Siguiendo las simulaciones realizadas por Jose Antonio Briz empleando el código Monte Carlo Geant4², estos han sido marcados como 1, 2, 3, 4 y 5.



Figura 5: Simulación realizada con Geant4 para emisiones γ de 6129 keV, 6915 keV, 7115 keV incidiendo sobre un cristal de $LaBr_3$ de 2.54 cm×5.08 cm. Cada uno de los picos están asociados a 1 (o 2) detecciones que observaremos posteriormente en los espectros calibrados, aunque no con la misma intensidad que los aquí presentados en la simulación.

De estos, solo el número 4 no se corresponde a una detección única, sino que está formado por las contribuciones de la emisión γ a 6128.6 keV y un Double escape a 6093.2 keV . Las correspondientes a 6, 7 y 8 por lo general no se aprecian con la misma claridad que los cinco primeros en los espectros tratados, especialmente para las medidas con menor estadística, por lo que las tablas incluidas en la sección 1 del anexo simplemente contendrán los resultados de los ajustes gaussianos efectuados para los cinco primeros picos ya mencionados. Los picos del 1 al 5 nos permitirán estudiar la probabilidad de población de los 3 niveles excitados de ¹⁶O: 6129.89 keV, 6917.1 keV y 7116.85 keV.

²geant4.web.cern.ch

4.2. Estudio de la región 3500-7500 keV

A continuación se adjuntan los ajustes gaussianos realizados en el rango entre 3500 - 7500 keV para las cuatro medidas con mayor estadística.



Figura 6: Ajustes gaussianos realizados para los espectros correspondientes a las cuatro medidas de mayor estadística. En la parte superior de cada espectro se indica la energía de haz utilizada en la medida: (a) Medida de 2981 keV de Energía de haz, 2.62 nA de Intensidad de haz, 461.4 min de medida. (b) Medida de 2547 keV de Energía de haz, 1.43 nA de Intensidad de haz, 573.4 min de medida.(c) Medida de 1691 keV de Energía de haz, 1.77 nA de Intensidad de haz, 313.9 min de medida. (d) Medida de 1354 keV de Energía de haz, 1.40 nA de Intensidad de haz, 150.4 min de medida.

Los ajustes gaussianos se realizaron sobre una versión final del espectro suma de las cuatro señales ya calibradas correspondientes a los cuatro detectores de CEPA4. En todas las Energías de haz se realizó un rebineado de factor 16 al espectro, a excepción de dos energías, 1691 y 1350 keV, para las cuales fue necesario un rebineado mayor, de 32 bines, debido a su baja estadística. La anchura de bin resulta en ~ 43 keV para el rebineado de factor 16 y de ~ 86 keV para el rebineado de factor 32.

Para 2981 keV y 2547 keV de Energía de haz se puede observar mayor definición en la forma gaussiana de los picos como consecuencia de que estos presentaban notablemente mayor estadística. No obstante, a partir de 6300 keV estas dos medidas presentan un frente que impide dilucidar los cuatro picos restantes en esa región (dos fotopicos y dos picos single escape para las detecciones γ de 6915 y 7115 keV).

Para la medida de 1691 keV de Energía de haz se realizó un rebineado mayor (de factor 32), para rebineados menores no se adquirían apenas formas de gaussianas. El pico correspondiente a 6404.5 keV se distingue con claridad, pero el pico de escape doble a 5893.5 keV se fusiona con la pendiente de la gaussiana correspondiente a las detecciones γ y de escape doble a 6128.6 keV y 6093.2 keV, respectivamente.

Para la medida de 1354 keV se realizó un rebineado de factor 16 (43 keV/bin) y en este destaca especialmente la intensidad del pico de escape doble a 5106.6 keV sobre el resto. Esto puede estar motivado por el hecho de que para esta Energía de haz los niveles de mayor energía de excitación (6.9 MeV y 7.1 MeV) estén menos poblados, lo que se traduce en menos detecciones γ y picos de escape de energías mayores.

Para el resto de Energías de haz, las que se situaban por encima de 2000 keV presentan un patrón muy similar al espectro de 2981 keV y 2547 keV de Energía de haz, aunque con menor estadística, principalmente debido a que los tiempos de medida también fueron mucho menores, la medida de 2981 keV presenta 461.4 min de medida, mientras que estas otras no suben de 140 min.

Por debajo de 2000 keV solo se realizaron 3 medidas: a 1350, 1354 y 1691 keV. Dos de ellas ya las hemos comentado y la correspondiente a 1350 keV se asemeja a la de 1354 keV, como era de esperar.

Además, si atendemos a los centroides de los ajustes gaussianos realizados (Figura 7) podemos observar una clara mayor estabilidad en las medidas realizadas a más de 2100 keV de Energía de haz.

Esto puede deberse a lo mencionado anteriormente en las calibraciones. Todas las medidas por encima de 2100 keV de haz se realizaron a partir del día 25/04, con intervalos de tiempo más cortos entre ellas, por lo que todas ellas se rigen por la misma calibración y ponen de manifiesto una mayor estabilidad en dichas medidas. El pico 5 (6404.5 keV) es el más inestable pues para la mayor parte de energías se encontraba desdibujado, se aclarará más este problema cuando discutamos FWHM y tasas de contaje en las Fig. 8 y 9.



Figura 7: Posiciones de los centroides para los ajustes realizados en la región 3500-7500 keV según Energía de haz.

Sin embargo, si atendemos a la tasa de contaje (Fig. 9) y FWHM (Fig. 8) no observamos tanta estabilidad como en los centroides. Esto se entiende por lo difícil que es realizar el ajuste a gaussianas en esta región y por la baja estadística, lo que induce muchas fluctuaciones. En el caso de las medidas para 2981 keV y 2547 keV de Energía de haz, las que poseen mayor estadística, los cuatro primeros ajustes gaussianos poseen un FWHM de entre $\sim 100 keV - 220 keV$, pero conforme la estadística registrada decae en el resto de medidas, el FWHM se aleja de estos valores. Especialmente en el caso de las medidas para 2286 keV, 2041 keV y 1691 keV de Energía de haz se registran FWHM mucho más altos de los esperados. Este fenómeno también se presenta, por tanto, en sus respectivas áreas y tasas de contaje, por lo que deberíamos considerar los resultados para las energías de haz de 2286 keV, 2041 keV y 1691 keV como poco fiables a pesar de que estas dos últimas son de las que mayores tiempos de medida poseían.













Figura 8: FWHM de las gaussianas para los ajustes realizados en la región 3500-7500 keV según Energía de haz. (Tablas 3, 4, 5, 6 y 7)

5. Resultados y discusión

Para la discusión de los principales resultados nos centraremos en la tasa de contaje obtenida para cada los picos 1, 2, 3, 4 y 5 (Fig. 5), calculada como Cuentas/nA/s, la cual nos permite comparar la estadística de cada uno de los picos en relación a la intensidad de haz y tiempo activo de medida empleado para cada energía del haz de protones y detectar en qué rango de energías del haz de protones trabajado obtenemos una mayor sección eficaz en la función de excitación de la reacción ¹⁹ $F(p, \alpha)^{16}O$.







Tasa de contaje (Cuentas/nA/s) de ajustes gaussianos de la región 3500-7000 keV



Tasa de contaje (Cuentas/nA/s) de ajustes gaussianos de la región 3500-7000 keV







Figura 9: Cálculos de las tasas de contaje de las gaussianas para los ajustes realizados en la región 3500-7500 keV según Energía de haz. (Tablas 3, 4, 5, 6 y 7)

En relación a la tasa de contaje de cada uno de los ajustes gaussianos, los realizados para las energías de haz de 2981 keV y 2547 keV difieren en torno a 50 Cuentas/nA/s entre sí. Observando las gráficas 6(a) y 6(b) podemos concluir que el motivo de dicha diferencia puede estar provocado por una considerable mayor tasa de detecciones double escape a 5106.6 keV para 2547 keV de energía de haz. Para el pico 4, correspondiente a detecciones γ a 6128.6 keV y double escape a 6093.2 keV, obtenemos áreas y tasas de contaje muy similares para todas las energías de haz, a excepción de 2041 keV, 1691 keV, 1354 keV y 1350 keV, las energías de haz más bajas.

Una situación diferente tenemos en el caso del pico 5 (6404.5 keV). Como habíamos comentado anteriormente al comienzo de la sección 4.2, a pesar de que los espectros de las energías de haz 2981 keV y 2547 keV presentan la mayor estadística de todos, a partir de 6300 keV no se distinguen con claridad las detecciones que deberíamos observar. Solo para energías de haz menores se hacen visibles, pero como en la mayoría de casos la estadística es baja y no podemos compararlo con las medidas de mayor estadística sería conveniente no considerar fiables los resultados obtenidos para este ajuste.

Por tanto, centrándonos en la tasa de contaje de los picos 1, 2, 3 y 4 (Fig. 9a,b,c) pertenecientes a emisión γ , single y double escape del nivel excitado de ¹⁶O a 6129 keV y los picos double escape de los niveles excitados de ¹⁶O a 6917 keV y 7117 keV; podemos concluir que obtenemos máxima sección eficaz de población de estos estados para energía del haz de protones entre 2100 keV y 2500 keV. Estos resultados son corroborados por las Fig. 10 y 11 donde se observa un aumento de la sección eficaz de reacción en la región 2100-2500 keV de energía de haz.

Con motivo de complementar el estudio de los ajustes gaussianos realizados para los picos mencionados se ha realizado un estudio del área de la región entre 3500 - 7500 keV y su evolución según la Energía de haz. (Tablas en sección 2 del Anexo)



Figura 10: Representación del área de la región entre 3500 keV y 7500 keV para las distintas medidas según su Energía de haz.



Figura 11: Representación de la tasa de contaje de la región entre 3500 keV y 7500 keV para las distintas medidas según su Energía de haz.

Al igual que ocurría en el análisis pico por pico efectuado anteriormente, las medidas para 1350 keV, 1354 keV, 1691 keV y 2041 keV de energía de haz presentan áreas y tasas de contaje inferiores a las del resto de medidas, a pesar de que todas ellas poseen una estadística superior que la mayoría de medidas por encima de 2100 keV de energía de haz. Para el resto de medidas observamos que todas se encuentran en el mismo orden de Cuentas*keV a excepción de las dos medidas a 2981 keV y 2547 keV que presentaban notablemente mayor estadística que el resto (con 461.4 min y 573.4 min de tiempos de medida, respectivamente).

6. Información adicional

6.1. Región 200 - 3000 keV

Para la región de energías más bajas, entre 200 - 3000 keV obtenemos un espectro que presenta una detección principal correspondiente al γ de radiación interna de $LaBr_3$, junto con una región de detecciones α a su derecha procedente de radiación interna del cristal. Ese mismo γ , pero detectado por el $LaCl_3$ también es visible, aunque solo para las Energía de haz más altas, pues para las más bajas se fundía con el contínuo Compton del $LaBr_3$. Ambos picos corresponden a un gamma de 1468 keV, pero como el espectro está calibrado para $LaBr_3$, el detectado por el cristal de $LaCl_3$ aparece a una energía más baja como consecuencia de la diferente producción de luz del cristal de $LaCl_3$ respecto al de $LaBr_3$. Hay un factor ~ 0.7 entre la producción de luz de ambos para una misma energía depositada, por lo que este mismo pico se mostrará en una posición de $0.7 \times 1468 \ keV = 1000 \ keV$ correspondiente a la detección en $LaCl_3$ en el espectro calibrado.



Figura 12: Región entre 200 keV y 3000 keV para diferentes Energías de haz: (a) Medida de 2981 keV de Energía de haz, 2.62 nA de Intensidad de haz, 461.4 min de medida. (b) Medida de 2547 keV de Energía de haz, 1.43 nA de Intensidad de haz, 573.4 min de medida. (c) Medida de 1691 keV de Energía de haz, 1.77 nA de Intensidad de haz, 313.9 min de medida. (d) Medida de 1354 keV de Energía de haz, 1.40 nA de Intensidad de haz, 150.4 min de medida.

Además se observa un pico entre 500 y 1000 keV correspondiente a la contaminación interna de los cristales de $LaBr_3$: Ce debido a la presencia de ^{138}La . Este pico en concreto debe pertenecer a la desexcitación γ de 789 keV procedente de la desintegración β de ^{138}La en ^{138}Ce No se han podido distinguir el resto de fotopicos procedentes del desexcitación de ^{16}O que deberían aparecer en esta región, muy posiblemente porque se funden con el resto de detecciones más intensas, pasando desapercibidos, y por tener *branching ratios* muy bajos.

También cabe comentar que la radiación interna del cristal de $LaBr_3$ puede usarse como reloj de normalización como método más fiable de obtener los tiempos activos de medida.

6.2. Región 8000 - 10000 keV

Otra de las regiones de interés en la detección de gammas por decaimiento de los niveles más altos de excitación de ${}^{16}O$ se encuentra entre 8000 - 10000 keV, en la que encontramos tres niveles excitados.



Figura 13: Región entre 8000 keV y 10000 keV para diferentes Energía de haz: (a) Medida de 2981 keV de Energía de haz, 2.62 nA de Intensidad de haz, 461.4 min de medida. (b) Medida de 2547 keV de Energía de haz, 1.43 nA de Intensidad de haz, 573.4 min de medida.(c) Medida de 1691 keV de Energía de haz, 1.77 nA de Intensidad de haz, 313.9 min de medida. (d) Medida de 1354 keV de Energía de haz, 1.40 nA de Intensidad de haz, 150.4 min de medida.

Para esta región nos encontramos con muy baja estadística en todas las medidas, una mejor toma de radiación de fondo podría subsanar este efecto. No obstante, especialmente para la medida a 1354 keV de Energía de haz se han podido distinguir dos picos especialmente intensos, que también se pueden observar en el resto de medidas, aunque con menor claridad. Debido a la calibración realizada esta región del espectro presenta más desviación por pendiente que el resto, por lo que se puede esperar una variación de entorno a 400 keV en las detecciones de esta parte del espectro. En base a esto, parece que estos dos picos pueden ser de Single o Double escape correspondientes a la emisión γ a 9582 keV (Tabla 2), aunque es improbable que se observen emisiones γ procedente de los niveles excitados de ¹⁶O por encima de 9000 keV para una energía de haz de 1354 keV, pues estos no deberían ser accesibles con energías de haz por debajo de 2000 keV.

7. Conclusiones

Se ha identificado el rango de energías de protones más favorable para poblar los estados de 6.1, 6.9 y 7.1 MeV del ¹⁶O a partir de la reacción ¹⁹ $F(p, \alpha)^{16}O$. El estudio se ha realizado estudiando la radiación electromagnética emitida y que ha sido detectada con un espectrómetro denominado CEPA y consistente en cuatro cristales de nueva generación de $LaBr_3 : Ce$.

Para ello, se han calibrado los cuatros detectores separadamente a partir de la radiación de ^{138}La y emisiones γ de estados excitados de ^{16}O en el rango entre 3500-7500 keV. Los espectros de energía se han sumado para aumentar la estadística.

Acto seguido, se han realizado estudios de estabilidad temporal de la respuesta del detector incluyendo resolución y linealidad. El haz de protones incidente se ha variado con energías entre 1350 y 2980 keV, analizándose 15 valores de la energía incidente distintos. Se ha identificado un aumento de emisión electromagnética con la energía incidente del haz de protones sobre todo a partir de 2100 keV. En relación a la función de excitación, especialmente el rango de energías de protones entre 2100 y 2500 keV parece ser el mas adecuado para poblar los estados de interés astrofísico en ¹⁶O a 6.9 y 7.1 MeV .

Los ficheros analizados tenían los tiempos anotados en un cuaderno al igual que el tiempo muerto del sistema. El área de la transición de ^{138}La a 1468 keV sería la mejor manera de comprobar que estos valores anotados son los correctos y así también verificar las secciones eficaces deducidas.

8. Anexo

8.1. Tablas ajustes gaussianos región 3500-7500 keV (Sección 4.2)

Todos los datos de las tablas están expresados en keV.

11001								
En. de haz	Posi	icion	FW	ΉM	A	Irea	Cuenta	as/nA/s
2981	5094.60	\pm 50.95	100.38	± 0.64	$4.03E{+}05$	\pm 3.11E+03	5.56	± 0.04
2547	5105.80	\pm 51.06	160.88	± 0.79	$1.38\mathrm{E}{+06}$	\pm 1.01E+04	27.95	± 0.20
2467	5065.14	\pm 50.65	111.87	± 1.40	$9.33E{+}04$	\pm 1.64E+03	18.67	± 0.33
2427	5070.35	\pm 50.70	124.82	± 2.88	$8.64E{+}04$	\pm 1.70E+03	20.36	± 0.40
2387	5068.14	\pm 50.68	74.36	± 0.94	$6.25\mathrm{E}{+}04$	\pm 6.80E+02	13.17	± 0.14
2326	5103.71	± 51.04	144.11	± 1.50	$9.80E{+}04$	\pm 1.44E+03	23.23	± 0.34
2286	5083.96	\pm 50.84	1589.53	± 65.35	$2.47\mathrm{E}{+06}$	\pm 3.11E+05	483.74	\pm 60.72
2246	5052.64	\pm 50.53	153.62	± 2.80	$6.00E{+}04$	\pm 1.45E+03	9.73	± 0.23
2166	5058.74	\pm 50.59	150.96	± 2.44	$6.62E{+}04$	\pm 1.33E+03	19.22	± 0.39
2159	5057.44	\pm 50.57	163.33	± 1.85	$1.21\mathrm{E}{+}05$	\pm 1.73E+03	22.47	± 0.32
2119	5096.15	\pm 50.96	187.97	± 3.62	$8.27E{+}04$	\pm 2.50E+03	27.91	± 0.84
2041	5201.32	\pm 52.01	1804.33	\pm 33.29	$9.51\mathrm{E}{+06}$	\pm 4.94E+05	611.79	\pm 31.78
1691	5050.26	\pm 50.50	172.04	± 3.50	$1.32\mathrm{E}{+}05$	\pm 4.28E+03	3.95	± 0.13
1354	5112.96	± 51.13	100.01	± 0.71	$1.79\mathrm{E}{+}05$	\pm 1.62E+03	14.13	± 0.13
1350	4938.07	\pm 49.38	396.24	\pm 18.49	$3.09E{+}04$	\pm 2.16E+03	1.09	± 0.08

PICO 1

Tabla 3: Posición, FWHM, Área y Tasa de contaje del pico 1 para cada una de las Energías de haz.

PICO 2								
En. de haz	Posi	icion	FW	HM	A	Irea	Cuenta	s/nA/s
2981	5592.57	\pm 55.93	139.66	± 1.42	$4.68\mathrm{E}{+05}$	\pm 7.60E+03	6.46	± 0.10
2547	5603.22	\pm 56.03	214.99	± 1.71	$1.79\mathrm{E}{+}06$	\pm 3.14E+04	36.38	± 0.64
2467	5549.52	\pm 55.50	54.45	± 1.72	$4.52\mathrm{E}{+}04$	\pm 6.78E+02	9.05	± 0.14
2427	5541.59	\pm 55.42	141.55	\pm 3.18	$1.01\mathrm{E}{+}05$	\pm 3.70E+03	23.89	± 0.87
2387	5546.24	\pm 55.46	97.54	± 1.95	$4.42\mathrm{E}{+}04$	\pm 1.12E+03	9.30	± 0.24
2326	5613.04	\pm 56.13	138.04	\pm 3.23	$1.43\mathrm{E}{+}05$	\pm 7.07E+03	33.84	± 1.68
2286	5577.38	\pm 55.77	50.48	\pm 3.48	$1.30\mathrm{E}{+}04$	\pm 3.64E+02	2.54	± 0.07
2246	5592.96	\pm 55.93	173.89	\pm 7.89	$9.95\mathrm{E}{+}04$	\pm 9.37E+03	16.15	± 1.52
2166	5544.67	\pm 55.45	102.59	\pm 5.06	$5.68\mathrm{E}{+04}$	\pm 5.30E+03	16.49	± 1.54
2159	5566.28	\pm 55.66	125.19	\pm 7.27	$3.86\mathrm{E}{+04}$	\pm 4.51E+03	7.13	± 0.83
2119	5517.37	\pm 55.17	144.49	\pm 3.04	$5.03\mathrm{E}{+}04$	\pm 1.41E+03	16.98	± 0.48
2041	5852.03	\pm 58.52	1431.53	\pm 3.16	$2.03\mathrm{E}{+}07$	\pm 2.34E+05	1308.94	\pm 15.07
1691	5395.66	\pm 53.96	710.32	\pm 8.47	$6.32\mathrm{E}{+}06$	\pm 2.68E+05	189.20	\pm 8.03
1354	5618.37	\pm 56.18	126.53	± 1.36	$9.70\mathrm{E}{+}04$	\pm 1.23E+03	7.68	± 0.10
1350	5447.41	\pm 54.47	307.24	± 17.13	$1.68\mathrm{E}{+04}$	\pm 1.58E+03	0.59	± 0.06

Tabla 4: Posición, FWHM, Área y Tasa de contaje del pico 2 para cada una de las Energías de haz.

PICO 3								
En. de haz	Posi	icion	FW	/HM	A	Irea	Cuenta	as/nA/s
2981	5868.91	\pm 58.69	148.24	± 1.83	$6.84\mathrm{E}{+}05$	\pm 1.30E+04	9.43	± 0.18
2547	5880.30	\pm 58.80	200.39	\pm 5.85	$6.17\mathrm{E}{+}05$	\pm 4.91E+04	12.52	± 1.00
2467	5798.85	\pm 57.99	194.87	± 6.33	$1.83\mathrm{E}{+}05$	\pm 1.20E+04	36.71	± 2.41
2427	5800.90	\pm 58.01	65.26	± 1.30	$7.40\mathrm{E}{+}04$	\pm 1.06E+03	17.45	± 0.25
2387	5819.95	\pm 58.20	101.70	± 1.47	$8.67\mathrm{E}{+}04$	\pm 1.32E+03	18.27	± 0.28
2326	5887.13	\pm 58.87	144.46	\pm 3.85	$7.38\mathrm{E}{+04}$	\pm 2.94E+03	17.48	± 0.70
2286	5885.66	\pm 58.86	26.89	± 21.75	$3.12\mathrm{E}{+04}$	\pm 6.38E+04	6.11	± 12.48
2246	5825.35	\pm 58.25	126.62	\pm 9.27	$7.04\mathrm{E}{+}04$	\pm 9.72E+03	11.42	± 1.58
2166	5873.85	\pm 58.74	68.55	± 1.61	$3.35\mathrm{E}{+}04$	\pm 1.05E+03	9.73	± 0.30
2159	5803.23	\pm 58.03	693.22	\pm 24.96	$4.04\mathrm{E}{+06}$	\pm 4.06E+05	746.67	\pm 75.06
2119	5797.88	\pm 57.98	93.77	\pm 3.82	$4.71\mathrm{E}{+04}$	\pm 3.09E+03	15.91	± 1.04
2041	5896.56	\pm 58.97	448.21	± 23.56	$1.90\mathrm{E}{+}06$	\pm 2.88E+05	122.45	\pm 18.54
1691	-	-	-	-	-	-	-	-
1354	5911.77	± 0.82	67.26	± 1.66	$2.78\mathrm{E}{+}04$	\pm 9.44E+02	2.20	± 0.07
1350	5867.47	\pm 58.67	160.87	\pm 9.83	$1.40\mathrm{E}{+04}$	\pm 1.31E+03	0.50	± 0.05

Tabla 5: Posición, FWHM, Área y Tasa de contaje del pico 3 para cada una de las Energías de haz.

				PICO 4				
Energía de haz	Post	icion	FW	ΉM	A	Irea	Cuent	as/nA/s
2981	6071.01	\pm 60.71	207.80	± 2.88	1.47E + 06	\pm 3.25E+04	20.30	± 0.45
2547	6095.33	\pm 60.95	149.70	± 1.41	$1.05\mathrm{E}{+}06$	\pm 1.88E+04	21.26	± 0.38
2467	6053.44	± 60.53	92.62	± 0.75	$1.20\mathrm{E}{+}05$	\pm 1.16E+03	24.02	± 0.23
2427	6063.55	\pm 60.64	128.21	± 2.04	$1.06\mathrm{E}{+}05$	\pm 2.00E+03	25.02	± 0.47
2387	6043.58	\pm 60.44	132.52	± 3.87	$9.03E{+}04$	\pm 3.57E+03	19.02	± 0.75
2326	6046.78	\pm 60.47	117.52	± 1.22	$1.09\mathrm{E}{+}05$	\pm 1.70E+03	25.76	± 0.40
2286	6101.56	\pm 61.02	26.24	\pm 7.26	$8.16E{+}04$	\pm 6.12E+04	15.96	\pm 11.96
2246	6049.03	\pm 60.49	144.21	± 1.40	$2.15\mathrm{E}{+}05$	\pm 2.85E+03	34.93	± 0.46
2166	6030.47	\pm 60.30	135.90	± 1.16	$1.88\mathrm{E}{+05}$	\pm 2.38E+03	54.60	± 0.69
2159	6034.99	\pm 60.35	138.54	± 1.42	$1.86\mathrm{E}{+}05$	\pm 2.61E+03	34.49	± 0.48
2119	6052.43	\pm 60.52	123.12	± 1.08	$1.38\mathrm{E}{+}05$	\pm 1.58E+03	46.51	± 0.53
2041	6097.20	\pm 60.97	113.72	± 1.02	$8.26\mathrm{E}{+}04$	\pm 9.24E+02	5.31	± 0.06
1691	6099.58	± 61.00	277.81	± 2.04	$3.58\mathrm{E}{+}05$	\pm 3.47E+03	10.71	± 0.10
1354	6101.91	\pm 61.02	90.06	± 0.74	$1.13\mathrm{E}{+}05$	\pm 9.81E+02	8.97	± 0.08
1350	6222.80	\pm 62.23	107.65	± 2.80	$1.42\mathrm{E}{+04}$	\pm 4.33E+02	0.50	± 0.02

Tabla 6: Posición, FWHM, Área y Tasa de contaje del pico 4 para cada una de las Energías de haz.

PICO 5								
En. de haz	Posi	icion	FW	ΉМ	A	rea	Cuenta	s/nA/s
2981	6445.05	± 64.45	1647.24	± 5.89	$8.61\mathrm{E}{+07}$	\pm 1.09E+06	1187.26	± 15.00
2547	6473.82	± 64.74	1895.24	\pm 7.74	$1.35\mathrm{E}{+08}$	\pm 1.43E+06	2738.74	\pm 29.05
2467	6384.57	± 63.85	586.17	\pm 9.30	$4.90\mathrm{E}{+}06$	\pm 2.79E+05	981.31	\pm 55.93
2427	6362.47	± 63.62	146.29	\pm 5.64	$9.23\mathrm{E}{+}04$	\pm 6.36E+03	21.76	± 1.50
2387	6295.85	± 62.96	287.18	\pm 5.91	$2.80\mathrm{E}{+}05$	\pm 1.20E+04	58.91	± 2.53
2326	6331.09	± 63.31	138.93	\pm 3.42	$4.57\mathrm{E}{+}04$	\pm 1.96E+03	10.83	± 0.46
2286	6315.04	± 63.15	20.91	± 12.69	$5.69\mathrm{E}{+}04$	\pm 1.67E+05	11.13	\pm 32.61
2246	6323.76	± 63.24	79.95	± 1.72	$3.72\mathrm{E}{+}04$	\pm 9.43E+02	6.03	± 0.15
2166	6316.64	± 63.17	19.77	± 0.53	$2.27\mathrm{E}{+}05$	\pm 3.40E+04	65.90	\pm 9.86
2159	6497.73	± 64.98	280.93	\pm 5.37	$4.47\mathrm{E}{+}05$	\pm 1.90E+04	82.78	\pm 3.52
2119	6533.85	± 65.34	107.91	± 1.49	$8.25\mathrm{E}{+}04$	\pm 1.41E+03	27.83	± 0.48
2041	6557.48	± 65.57	1266.19	\pm 19.15	$7.31\mathrm{E}{+06}$	\pm 3.15E+05	470.11	\pm 20.27
1691	6649.15	\pm 66.49	190.37	± 2.10	$2.69\mathrm{E}{+}05$	\pm 4.92E+03	8.07	± 0.15
1354	6580.83	± 65.81	64.94	± 1.44	$4.43\mathrm{E}{+}04$	\pm 9.30E+02	3.51	± 0.07
1350	6815.25	\pm 68.15	322.24	\pm 14.80	$1.52\mathrm{E}{+}04$	\pm 1.09E+03	0.54	± 0.04

Tabla 7: Posición, FWHM, Área y Tasa de contaje del pico 5 para cada una de las Energías de haz.

Energía de haz	Area (Cuentas*keV)	$\Delta Area$	Counts/nA/s	$\Delta Cuentas/nA/s$
2981	$4.26 \text{E}{+}08$	$4.26E{+}06$	$5.87 E{+}03$	$5.87\mathrm{E}{+01}$
2547	$5.49\mathrm{E}{+08}$	$5.49\mathrm{E}{+06}$	$1.11E{+}04$	$1.11\mathrm{E}{+02}$
2467	$6.35\mathrm{E}{+07}$	$6.35\mathrm{E}{+}05$	$1.27\mathrm{E}{+}04$	$1.27\mathrm{E}{+}02$
2427	$5.76\mathrm{E}{+}07$	$5.76\mathrm{E}{+}05$	$1.36E{+}04$	$1.36\mathrm{E}{+}02$
2387	$5.71\mathrm{E}{+07}$	$5.71\mathrm{E}{+}05$	$1.20E{+}04$	$1.20\mathrm{E}{+}02$
2326	$6.46\mathrm{E}{+07}$	$6.46\mathrm{E}{+}05$	$1.53E{+}04$	$1.53\mathrm{E}{+}02$
2286	$2.32\mathrm{E}{+}07$	$2.32\mathrm{E}{+}05$	$4.55\mathrm{E}{+03}$	$4.55\mathrm{E}{+}01$
2246	$7.25\mathrm{E}{+}07$	$7.25\mathrm{E}{+}05$	$1.18E{+}04$	$1.18\mathrm{E}{+02}$
2166	$5.69\mathrm{E}{+}07$	$5.69\mathrm{E}{+}05$	$1.65\mathrm{E}{+}04$	$1.65\mathrm{E}{+}02$
2159	$6.09\mathrm{E}{+}07$	$6.09\mathrm{E}{+}05$	$1.13E{+}04$	$1.13\mathrm{E}{+02}$
2119	$5.68\mathrm{E}{+07}$	$5.68\mathrm{E}{+}05$	$1.92E{+}04$	$1.92\mathrm{E}{+}02$
2041	$2.88\mathrm{E}{+07}$	$2.88\mathrm{E}{+05}$	$1.85\mathrm{E}{+03}$	$1.85\mathrm{E}{+}01$
1691	$1.52\mathrm{E}{+08}$	$1.52\mathrm{E}{+06}$	$4.55\mathrm{E}{+03}$	$4.55\mathrm{E}{+}01$
1354	$7.80\mathrm{E}{+}07$	$7.80\mathrm{E}{+}05$	$6.17\mathrm{E}{+}03$	$6.17\mathrm{E}{+}01$
1350	$2.80\mathrm{E}{+}07$	$2.80\mathrm{E}{+}05$	$9.93\mathrm{E}{+}02$	$9.93\mathrm{E}{+00}$

8.2. Tabla área de la región 3500-7500 keV (final de sección 4.2)

Tabla 8: Tabla correspondiente a las Fig. 9 y 10.