



## 1. INTRODUCCION

La física del núcleo es uno de los campos más excitantes y un reto intelectual en la investigación experimental. Desde comienzos de la década de los '30, los aceleradores de partículas han sido la herramienta básica en el crecimiento de nuestro entendimiento acerca de las propiedades del núcleo atómico y en el excelente entrenamiento de los físicos. La producción y uso de haces nucleares radiactivos en diferentes laboratorios en el mundo ha despertado gran interés y excitación en la comunidad de físicos nucleares. Un caso específico de su aplicación es la medición de secciones eficaces de reacciones nucleares las cuales son de gran interés e importancia en Astrofísica nuclear, particularmente en lo relacionado a nucleosíntesis y evolución estelar y en los procesos de quemado de material estelar.

En el presente trabajo se usó un haz nuclear radiactivo de  ${}^6\text{He}$  (emisor  $\beta$  con vida media de 806.7 ms) para el estudio de la reacción  ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$  la cual puede tener los siguientes productos:

- a)  ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi} \longrightarrow {}^{215}\text{At}$  que puede tener los siguientes decaimientos subsecuentes:
  - i)  ${}^{215}\text{At} \longrightarrow {}^{211}\text{At} + 4n$
  - ii)  ${}^{215}\text{At} \longrightarrow {}^{212}\text{At} + 3n$
  - iii)  ${}^{215}\text{At} \longrightarrow {}^{213}\text{At} + 2n$
  - iv)  ${}^{215}\text{At} \longrightarrow A^1X + A^2Y$
- b)  ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi} \longrightarrow {}^{210}\text{Bi} + {}^5\text{He}$
- c)  ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi} \longrightarrow {}^{211}\text{Bi} + {}^4\text{He}$
- d)  ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi} \longrightarrow {}^{209}\text{Bi} + {}^4\text{He} + 2n$
- e)  ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi} \longrightarrow {}^{209}\text{Bi} + {}^6\text{He}$

En experimentos recientes en la Universidad de Notre Dame, se midieron las secciones eficaces de las reacciones i, ii y iv (referencias 2, 3 y 4). Asimismo personal del ININ participó en la planeación y desarrollo de experimentos para medir las secciones eficaces de las reacciones iii, b, c, d y e. En las reacciones b y c, no ha sido demostrado que las partículas  ${}^4\text{He}$  sean el resultado de la

transferencia de 1 o 2 neutrones al  ${}^{209}\text{Bi}$ , o se deban a la ruptura del proyectil (*breakup*) sin que tales neutrones hayan sido absorbidos por el núcleo blanco.

### 1.1 El sistema dual superconductor Twinsol

El "TwinSol" (del Inglés *Twin*, gemelo y *Sol*, apócope de *Solenoid*, solenoide) es un aparato, único en su tipo, construido para desarrollar investigación con haces nucleares a baja energía. Instalado en el Laboratorio de Estructura Nuclear de la Universidad de Notre Dame, Estados Unidos, el sistema es usado para producir, coleccionar, transportar y analizar haces nucleares radiactivos o estables. Acoplado al acelerador Tandem Van de Graaff de 10 MV, el TwinSol es utilizado para el estudio de reacciones involucradas en procesos astrofísicos

### 1.2 Diseño

El TwinSol consta de dos grandes solenoides colocados a distancia de 4 m uno del otro. Con una corriente de 100 amperes, cada solenoide produce un campo magnético central máximo de 6 teslas y campo axial integral  $\int Bdl = 3.8$

T-m. Los crióstatos tienen 98 cm de longitud y diámetro interior de 30 cm, el cual es ligeramente mayor que el diámetro externo del tubo que conduce el haz. Los magnetos, por estar montados sobre rieles de aluminio tienen independencia de otros componentes del sistema y pueden ser desplazados longitudinalmente. Debido a los campos magnéticos de ambos solenoides, la mínima separación entre ellos puede ser de 2 m aproximadamente. Los magnetos constan de 10 espiras concéntricas de alambre de NbTi que juntos forman un solenoide de 60 cm de longitud y diámetros interior y exterior de 18 y 21 cm, respectivamente. Las espiras están suspendidas en el interior de un crióstato de aluminio con capacidad para 290 litros de helio líquido y aislado térmicamente con nitrógeno líquido a

80°K en la parte externa y con vapor de helio a

20°K por la parte interna.

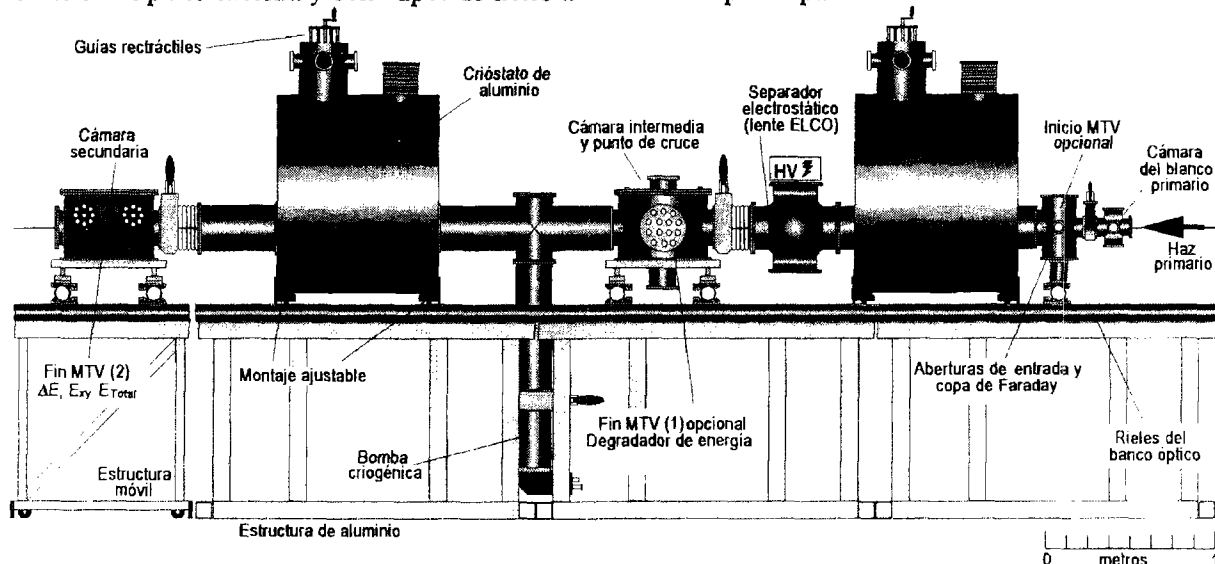


Figura 1-1. Sistema dual superconductor TwinSol

La pérdida de helio puede ser minimizada hasta 0.17 litros por hora, lo cual permite operar el aparato durante 40 días continuos sin recargar refrigerante. Un turbobomba y una bomba criogénica producen un vacío de  $1 \times 10^{-7}$  torr en el tubo que conduce el haz de iones y en la cámara secundaria.

### 1.3 Modos de operación

El TwinSol puede operarse en dos modos: modo de haz paralelo y modo de haz cruzado. El primero de ellos se usa para el estudio de iones con alta rigidez magnética. El segundo ofrece mayores ventajas sobre el primero por la pequeña área que presenta el punto de enfoque y el buen blindaje a la radiación que existe entre los dos solenoides. En el punto de cruce del haz pueden colocarse detectores para medir el tiempo de vuelo (MTV) de ciertas partículas o detectores sensibles a la posición (PSD) para hacer un seguimiento del haz.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Cinemática de reacciones nucleares

En la reacción nuclear  ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi} \rightarrow {}^{210}\text{Bi} + {}^5\text{He}$ , o  ${}^{209}\text{Bi}({}^6\text{He}, {}^5\text{He}){}^{210}\text{Bi}$ , en forma abreviada,

la partícula ligera resultante,  ${}^5\text{He}$  (vida media de  $2 \times 10^{-21}$  s), decae emitiendo un neutrón. Por la vida media tan corta, para todo fin práctico, esta reacción de transferencia de un neutrón está caracterizada por la partícula alfa emitida tras el decaimiento. Su energía  $E_3$  está dada por:

$$E_3 = E_T B (\cos \psi \pm (D/B - \sin^2 \psi)^{1/2})^2 \quad (2-1)$$

mientras que el producto pesado resultante conserva una energía  $E_4$ :

$$E_4 = E_T A (\cos \zeta \pm (C/A - \sin^2 \zeta)^{1/2})^2 \quad (2-2)$$

donde:

$$A = \frac{M_1 M_4 (E_1 / E_T)}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)}$$

$$B = \frac{M_1 M_3 (E_1 / E_T)}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)}$$

$$C = \frac{M_2 M_3}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)} \left( 1 + \frac{M_1 Q}{M_2 E_T} \right)$$

$$D = \frac{M_2 M_4}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)} \left( 1 + \frac{M_1 Q}{M_2 E_T} \right)$$

$Q$ : Energía cinética liberada en la reacción, en MeV.

$E_T$ : Energía total de la reacción;

$E_j$ : Energía del proyectil  ${}^6\text{He}$ ;

$M_j$ : Masa del proyectil, en una;

$M_2$ : Masa del blanco;

$M_3$ : Masa de la partícula ligera;

$M_4$ : Masa del núcleo hijo;

$\psi, \zeta$ : Angulo del producto ligero y del producto pesado, respectivamente, en el sistema de laboratorio.

Experimentalmente, la sección eficaz se obtiene mediante la siguiente expresión matemática:

$$\sigma = \frac{N}{N_h N_b \Omega \epsilon} \quad (2-3)$$

donde:

$N$ : Número de eventos detectados,

$N_h$ : Número de proyectiles en el haz,

$N_b$ : Número de átomos en el blanco,

$\Omega$ : Angulo sólido cubierto por el detector.

$\epsilon$ : Eficiencia del detector.

## 2.2. El programa FRESCO

Escrito en FORTRAN por I. J. Thompson, de la Universidad de Surrey, Inglaterra, este programa, mediante canales acoplados simula interacciones de transferencia entre cualquier número de particiones de masa y cualquier número de excitaciones nucleares en cada partición.

En la reacción  ${}^{209}\text{Bi}({}^6\text{He}, {}^5\text{He}){}^{210}\text{Bi}$ , transferencia de un neutrón, usando el modelo de capas, el núcleo  ${}^{210}\text{Bi}$  puede ser visto como  ${}^{210}\text{Bi} = {}^{208}\text{Pb} + p(h_{9/2}) + n(g_{9/2})$ , o  ${}^{210}\text{Bi} = {}^{209}\text{Pb} + p(h_{9/2})$ . Similarmente, en la reacción de transferencia de dos neutrones,  ${}^{211}\text{Bi} = {}^{210}\text{Pb} + p(h_{9/2})$ . En el  ${}^{209}\text{Pb}$ : el estado base tiene momento angular  $\frac{9}{2}^+$  y el primer estado excitado (778.8 keV)  $\frac{11}{2}^+$ , por lo tanto, los acoplamientos  $\frac{9}{2}^+ \otimes \frac{9}{2}^-$  y  $\frac{11}{2}^+ \otimes \frac{9}{2}^-$  producen 20 multipletes cuya sección eficaz total estimada con FRESCO es 7.28 mb/sr. Para el  ${}^{210}\text{Pb}$ : el estado base tiene momento angular  $0^+$ , el primer estado excitado (779.7 keV)  $2^+$ , el segundo estado excitado (1097.7 keV)  $4^+$  y el tercer estado excitado (1194.6 keV)  $6^+$ . Los acoplamientos  $0^+ \otimes \frac{9}{2}^-$ ,  $2^+ \otimes \frac{9}{2}^-$ ,  $4^+ \otimes \frac{9}{2}^-$  y  $6^+ \otimes \frac{9}{2}^-$  producen 10 multipletes cuya sección eficaz total es 0.135 mb/sr.

Se escribió un programa en FORTRAN, el cual, aplicando las ecuaciones de la cinemática (sección 2.1) y usando los valores de sección eficaz obtenidos con FRESCO, simula el espectro de energía con que son producidas las alfas de los canales de transferencia de 1 y 2 neutrones para el sistema bajo estudio, encontrándose que en el canal 1n se producen entre 14 y 22 MeV, mientras que en canal 2n se producen con energía entre 27.7 y 29 MeV.

## 2.3 Desarrollo experimental

El haz primario de iones de  ${}^7\text{Li}$  producidos en el acelerador Tandem, fue deflectado a  $90^\circ$  para retirar del haz la mayoría de iones que no eran litio considerados contaminantes del haz. A continuación, el haz fue hecho incidir sobre un blanco primario consistente en una lámina de  $12 \mu\text{m}$  de  ${}^9\text{Be}$  en el cual, mediante el proceso de *stripping*, los iones de litio pierden un protón obteniéndose un haz radiactivo secundario de  ${}^6\text{He}$  de 22.4 MeV. El TwinSol, operado en modo de haz cruzado, separa por diferencia de rigidez magnética, aquellas partículas diferentes al  ${}^6\text{He}$  que viajan con el haz y enfoca a éste sobre el blanco secundario formado por una delgada capa de  $3.2 \text{ mg/cm}^2$  de bismuto natural evaporada sobre un soporte de  $204 \mu\text{g/cm}^2$  de polietileno ubicada dentro de la cámara secundaria. La posición de incidencia del haz sobre el blanco secundario se verificó mediante un PSD cuya señal recibida por una computadora reprodujo la imagen del haz sobre el blanco. La detección de las partículas ligeras producidas en la reacción y aquellas que no fueron separadas del haz, fue hecha por un arreglo de detectores de barrera superficial marca EG&G Ortec, colocados verticalmente a diferentes ángulos alrededor del blanco. Cada detector telescópico estuvo formado por un detector delgado ( $\Delta E$ ) seguido por un detector grueso (E). En la tabla 2-1 se presentan las principales características de los detectores utilizados.

Detector	Area (mm <sup>2</sup> )	Espesor (μm)	Voltaje (V)	Angulo sólido (sr)
E <sub>A</sub>	600	1009.0	240.0	
ΔE <sub>A</sub>	450	19.2	12.5	0.02602
E <sub>B</sub>	600	414.0	135	
ΔE <sub>B</sub>	300	49.8	45.0	0.04704
E <sub>C</sub>	600	417.0	213.0	
ΔE <sub>C</sub>	300	48.5	30.0	0.04704
E <sub>D</sub>	600	1016.0	234.0	
ΔE <sub>D</sub>	450	17.8	11.5	0.02602
E <sub>PSD</sub>	450		235.0	
ΔE <sub>PSD</sub>	450	24.4	14.0	0.02602

Tabla 2-1. Características de los detectores.

En los 9 días de duración del experimento, se efectuaron 164 corridas para diferentes propósitos: calibración del sistema, identificación y separación de partículas alfa provenientes de la reacción de <sup>6</sup>He con <sup>209</sup>Bi utilizando como blanco una delgada capa de polietileno de 204 μg/cm<sup>2</sup> similar al soporte original. Otras corridas se hicieron con haz pulsado para medir el tiempo de vuelo de las diferentes partículas detectadas y poder separarlas de las partículas de interés. También se efectuaron corridas manteniendo una película de 7.06 mg/cm<sup>2</sup> de mylar frente al haz para obtener resultados a 19.7 MeV.

Los datos obtenidos mediante un sistema de adquisición CAMAC acoplado a una computadora marca Digital, modelo DEC Station 5000/40, fueron grabados en cintas magnéticas de 4 y 8 mm y analizados posteriormente.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION

El análisis de los datos se efectuó en el ININ, utilizando la computadora Hewlett Packard, modelo HP-9000, del Departamento del Acelerador, utilizando los programas SCANU y DAMM escritos en lenguaje FORTRAN (ambos son parte del paquete UPACK desarrollado en Oak Ridge National Laboratory). Con SCANU se procesaron los bloques de corridas con características similares. La visualización de los datos procesados se hizo con DAMM, el cual mediante compuertas, permite separar y marcar los diferentes grupos de partículas registradas y contar el número de

eventos en cada grupo. La figura 3-1 y la tabla 3-1 siguientes muestran las secciones eficaces medidas.

ψ <sub>lab</sub>	σ <sub>E</sub> /σ <sub>R</sub> @ 19.7MeV	σ <sub>E</sub> /σ <sub>R</sub> @ 22.4MeV
45°	0.9736	1.1034
75°	1.0079	0.9093
105°	0.6123	0.2888
135°	0.5819	0.1553
150°	0.4143	0.1159

Tabla 3-1. Razones de sección eficaz elástica a sección eficaz de Rutherford.

Para encontrar la diferencia entre el número de partículas alfa producidas por la transferencia de neutrones o por el rompimiento de iones de <sup>6</sup>He y aquellas producidas por la reacción entre <sup>3</sup>H y el blanco, se realizó otro experimento, en el cual se bombardeó un blanco de <sup>209</sup>Bi con un haz radiactivo secundario de <sup>3</sup>H. Este experimento demostró que en esa reacción no se producen partículas alfa.

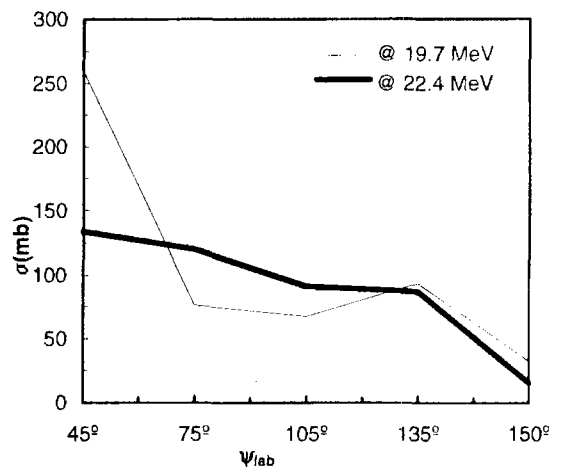


Figura 3-1. Sección eficaz de producción de partículas α en la reacción <sup>6</sup>He+<sup>209</sup>Bi.

### 4. CONCLUSIONES

Los valores experimentales de la sección eficaz de producción de partículas alfa resultan mucho mayores que los valores teóricos predichos por FRESCO para la transferencia de 1 y 2 neutrones a estados ligados del <sup>210,211</sup>Bi lo cual nos conduce a pensar que, además del mecanismo de transferencia de neutrones en el sistema

${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$ , pudiera existir también rompimiento del proyectil, produciéndose así una gran cantidad de partículas alfa. Sin embargo, las predicciones de FRESCO para este proceso difieren también de los valores experimentales.

Inicialmente se pensó que la evaporación de partículas alfa podría ser la explicación a las altas secciones eficaces medidas, pero la distribución angular de este fenómeno y los valores de la sección eficaz encontrados están en contradicción con los resultados experimentales, por lo que fue desechado.

Cálculos posteriores con FRESCO, esta vez incluyendo transferencia de 2 neutrones a estados no ligados del  ${}^{211}\text{Bi}$ , produjeron secciones eficaces mayores a las encontradas mediante estados ligados y más próximos a los encontrados experimentalmente, por lo que este último proceso es mejor candidato para describir los resultados experimentales.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad de Notre Dame, especialmente al personal del Laboratorio de Estructura Nuclear, el apoyo y colaboración brindados para el desarrollo del presente trabajo. Al CONACYT y al ININ agradecemos el apoyo económico durante la estancia de investigación. Cabe mencionar la valiosa colaboración de Jorge Fernández Arnaiz, del Departamento del Acelerador, en la instalación e implementación del paquete UPACK en la computadora de ese Departamento.

## 6. REFERENCIAS

- (1) Becchetti, F. D. & Kolata, J. J., "Low-energy radioactive beams experiments using the UM-UND solenoid RNB apparatus at the UND Tandem: past, present and future". 14<sup>th</sup> international conference on application of accelerators in research and industry. The American Physical Society. Denton, Texas, USA. 1996.
- (2) DeYoung, P. A., Hughey, B., Jolivet, P. L., Peaslee, G. F., Kolata, J. J.,

Guimarães, V., Peterson, D., Santi, P., Griffin, H. C., Zimmerman, J. A. & Hinnefeld, J. D., "Fusion of a neutron skin nucleus: The  ${}^{209}\text{Bi}({}^6\text{He}, 4n)$  reaction". Phys. Rev. C **58**, 3442 (1998).

- (3) Kolata, J. J., Guimarães, V., Peterson, D., Santi, P., White-Stevens, R., DeYoung, P. A., Peaslee, G. F., Hughey, B., Atalla, B., Kern, M., Jolivet, P. L., Zimmerman, J. A., Lee, M. Y., Becchetti, F. D., Aguilera, E. F., Martínez-Quiroz, E. & Hinnefeld, J. D., "Sub-barrier Fusion of  ${}^6\text{He}$  with  ${}^{209}\text{Bi}$ ". Phys. Rev. Lett. **21**, 4580 (1998).
- (4) Kolata, J. J., Guimarães, V., Peterson, D., Santi, P., White-Stevens, R., Von Schwarzenberg, J., Hinnefeld, J. D., Aguilera, E. F., Martínez-Quiroz, E., Roberts, D. A., Becchetti, F. D., Lee, M. Y. & Kryger, R. A. "  ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$  fusion-fission reaction". Phys. Rev. C **57**, R6 (1998).
- (5) Lee, M. Y., Becchetti, F. D., Holmes, J. M., O'Donnell, T. W., Ratajczak, M. A., Roberts, D. A., Zimmerman, J. A., Kolata, J. J., Lamm, L. O., Von Schwarzenberg, J. & Wiescher, M. "Twinsol: a dual superconducting solenoid system for low-energy radioactive nuclear beam research". 14<sup>th</sup> international conference on application of accelerators in research and industry. The American Physical Society. Denton, Texas, USA. 1996.
- (6) Table of isotopes, edited by Firestone, R. B. & Shirley, V. S. John Wiley & Sons, 1996. 8<sup>th</sup> edition.
- (7) Marion, J. B. & Young, F. C., "Nuclear reaction analysis", John Wiley & Sons. Inc. New York, 1968.