

ASIGNACION DE MOMENTOS ANGULARES DE CAPTURA DE NEUTRON
EN DISTRIBUCIONES ANGULARES DE LA REACCION $^{23}\text{Na}(d, p)^{24}\text{Na}$

Ma. Esther O. de López y Lila Carrillo*

Instituto de Física, Universidad Nacional de México

(Recibido: Septiembre 1, 1965)

ABSTRACT

The ground state and sixteen excited levels of ^{24}Na have been analysed through (d, p) reactions in ^{23}Na with a 1.5 MeV Van de Graaff accelerator and the aid of a double broad-range magnetic spectrograph technique. As most cases show typical stripping patterns, Butler and DWBA computations were undertaken. Neutron capture angular momenta $l_n = 0$ could be assigned to levels 3, 4, 5, 7, 8, 12 and 13; $l_n = 1$ to levels 6, 9 and 15; and $l_n = 2$ to the ground, 1, 10, 11 and 14 excited states. Neutron capture angular momenta of higher excited states may be assigned using simple Butler theory, in contrast to DWBA computations, in which the maxima show larger shifts as their Q -values diminish.

* Investigadora del Instituto de Asuntos Nucleares de Colombia, becaria del Organismo Internacional de Energía Atómica. (1964).

RESUMEN

Se han efectuado distribuciones angulares del estado base y dieciseis niveles excitados de ^{24}Na a través de reacciones (d, p) en ^{23}Na con un acelerador Van de Graaff de 1.5 MeV y la técnica de doble espectrógrafo. Como la mayoría de los casos muestran formas típicas de despojo, se realizaron cálculos de Butler y DWBA. Fue posible asignar momentos angulares de captura del neutrón $l_n = 0$ a los niveles 3, 4, 5, 7, 8, 12 y 13; $l_n = 1$ a los niveles 6, 9 y 15; $l_n = 2$ a los estados base, 1, 10, 11 y 14. Los momentos angulares del neutrón capturado de los estados de mayor excitación pueden ser asignados usando la teoría de Butler simplemente; en los cálculos DWBA, los máximos sufren considerables desplazamientos hacia ángulos mayores cuando los valores Q disminuyen.

I. INTRODUCCION

Hasta fecha reciente la información experimental acerca del núcleo $^{24}_{11}\text{Na}$ era muy escasa¹. Es un núcleo que en la actualidad merece atención, pues el grupo teórico del Instituto de Física de la UNAM está en posibilidad de calcular las estructuras de los núcleos de la capa 2s-1d, aunque el hecho que tenga ocho partículas fuera de capa dificulte dicho estudio.

Haciendo uso del ciclotrón de la Universidad de Michigan, C. Daum² efectuó las distribuciones angulares de los diferentes niveles energéticos de la reacción $^{23}\text{Na}(d, p)$ con una energía incidente de 7 MeV, para determinar la estructura del ^{24}Na . Posteriormente el mismo autor publicó un análisis teórico comparativo con su trabajo experimental³.

En estos laboratorios se ha realizado un trabajo similar bombardeando blancos de acetato de sodio y cloruro de sodio con deuterones de 1.5 MeV, haciendo uso del acelerador Van de Graaff de la UNAM y de la técnica del doble espectrógrafo⁴; para aprovechar en ese experimento la alta resolución y el muy bajo fondo (1/5000) que son las principales ventajas de este equipo. Se espera que la información obtenida a esta menor energía (1.5 MeV), respecto a la de Daum (7 MeV),

sea más representativa en lo que se refiere a momentos angulares inferidos de las distribuciones angulares por reacciones de despojo, debido a la menor probabilidad de la formación de núcleo compuesto.

II. METODO EXPERIMENTAL

Con objeto de poder efectuar una normalización adecuada de las intensidades de partículas, es preciso un procedimiento para registrar los deuterones provenientes de choques elásticos, en este caso en el sodio mismo. Para evitar la dificultad que presentan los cambios y aún rompimientos incontrolables de los blancos durante el bombardeo, así como la incertidumbre en la medida absoluta de la corriente del haz de proyectiles, se hace indispensable el uso de la técnica del doble espectrógrafo.

Para hacer comparables los números de partículas a cada ángulo y para todos los niveles observados, así como para presentar los resultados en el sistema centro de masa, es necesario hacer las siguientes correcciones a las intensidades observadas directamente en las placas fotográficas.

1) Para poder comparar las intensidades de partículas de los niveles excitados que en la realidad se observan bajo diferente ángulo sólido por estar en diferentes posiciones del espectro, es necesario efectuar una corrección con objeto de reducir todos los niveles a un mismo punto sobre las placas; se ha escogido como referencia el punto de máxima resolución (Dist. = 41 cm con deflexión a 90°).

2) Debido a que se registró el grupo de deuterones elásticos a 90° (Espectrógrafo II) simultáneamente con las exposiciones correspondientes a cada ángulo de observación (Espectrógrafo I), es posible corregir las intensidades y compararlas a un mismo número de partículas elásticas, lo que permite suponer que se ha experimentado con una cantidad constante de núcleos en el blanco así como de proyectiles.

3) Obtención de la escala de secciones en mb/sterad, que se puede estimar en base a la sección elástica deducible teóricamente, con un error probable pequeño,

tratándose de energías reducidas como las del experimento actual.

- 4) Corrección del ángulo de laboratorio al sistema centro de masa.
- 5) Corrección de la sección observada al sistema centro de masa.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

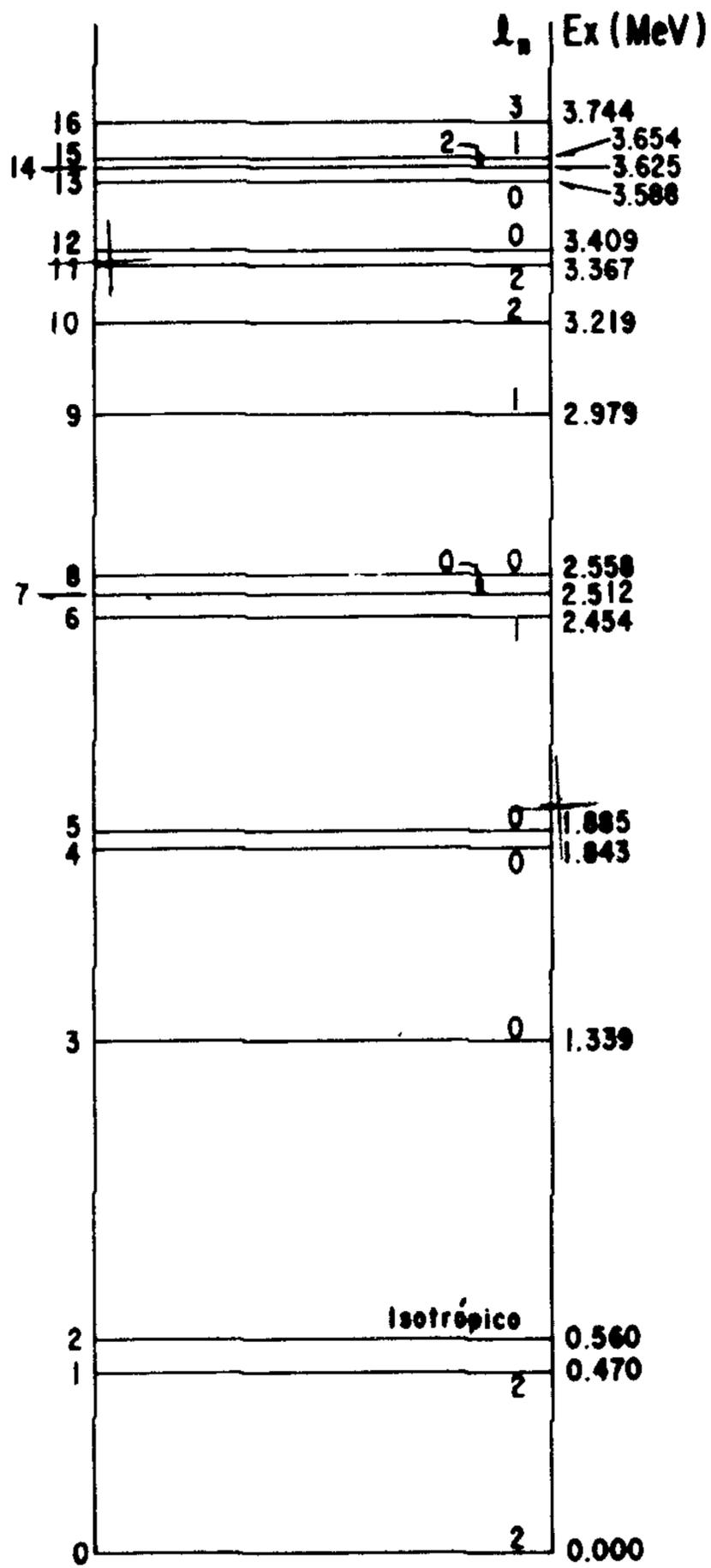
Para mostrar la resolución y fondo, así como el intervalo de energías que se observa simultáneamente en el espectrógrafo I, la fig. 1 muestra los espectros correspondientes a 60° , 90° y 120° . Las ordenadas representan en la escala de la izquierda el número o intensidad de protones registrados en franjas transversales de 0.5 mm en las placas y a la derecha las energías de excitación en MeV, correspondiendo estas últimas a la línea inclinada del dibujo. En las abscisas se tienen las distancias sobre las placas en cm. Los niveles de ^{24}Na están numerados del 0 (estado base) al 16 y los contaminantes indicados con su propio símbolo. De la distancia sobre las placas es posible inferir la energía de excitación y el valor Q de los niveles observados, de tal manera que se puede construir el esquema que se presenta en la fig. 2.

La fig. 3 muestra las distribuciones angulares observadas para el estado base y los 16 primeros niveles excitados. Las ordenadas representan la sección en mb/sterad y las abscisas el ángulo en el sistema centro de masa. Los puntos experimentales obtenidos con blancos de acetato de sodio están indicados con círculos, y con triángulos los obtenidos con blancos de cloruro de sodio. Cada punto experimental muestra mediante una línea limitada la raíz cuadrada de su intensidad.

Se hicieron dos interpretaciones de las distribuciones angulares para inferir el momento angular de captura del neutrón l_n : una con la teoría de Butler (curvas con línea entrecortada donde se especifica el valor l_n y el radio con que fueron calculadas) y otra con la aproximación de Born de onda distorsionada (DWBA) (curvas dibujadas con línea continua para las que también se ha especificado el valor de l_n).

El estado base y el primer excitado fueron calculados con momento angular $l_n = 2$, empleando ambas teorías. La DWBA parece ser aceptablemente buena a

Esta página está intencionalmente en blanco



^{24}Na

Fig. 2

ángulos de observación grandes; sin embargo a ángulos pequeños los cálculos arrojan intensidades altas y puede observarse que en esta región la curva de Butler parece adaptarse mejor.

Con un momento angular $l_n = 1$ fué calculado el segundo nivel excitado; una recta que pase por los puntos experimentales podría ser una solución igualmente satisfactoria, de ahí que pueda considerarse ésta como una distribución isotrópica.

Los siguientes niveles correspondientes a $E_x = 1.339, 1.843$ y 1.885 MeV (3, 4 y 5) que corresponden a $l_n = 0$ se explican aceptablemente por las curvas DWBA, aún cuando en los resultados experimentales se observa que la sección en el mínimo es bastante más alta que la calculada. El último de estos niveles se conserva más o menos constante a partir de 30° .

El ajuste obtenido para el nivel 6 con $l_n = 1$ es aceptable aún cuando adolece de los mismos defectos que los niveles 0 y 1, o sea que para ángulos pequeños la curva de DWBA se mantiene alta.

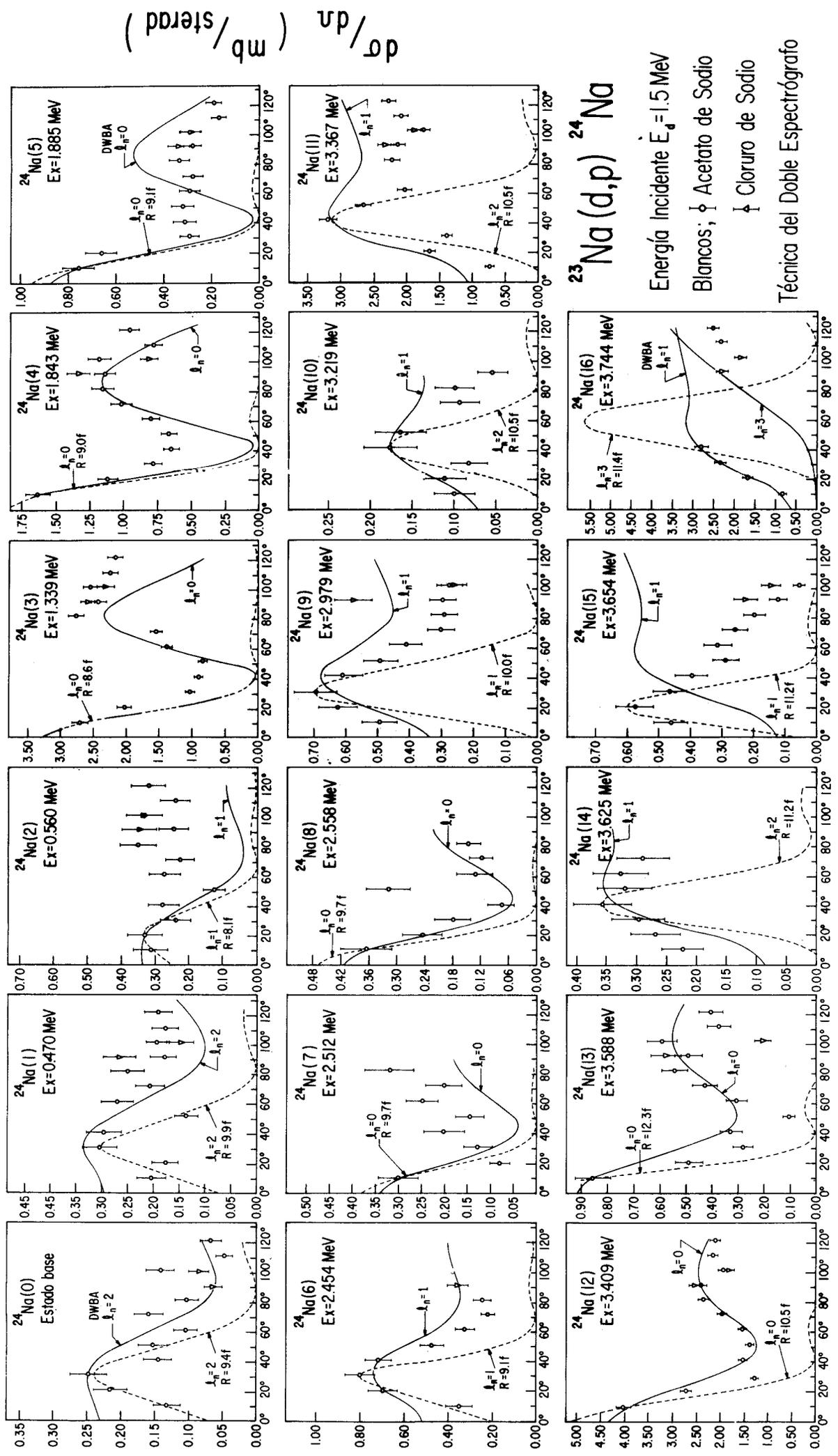
A partir del nivel de energía de excitación 2.512 MeV^5 , solamente pueden adaptarse en base a cálculos DWBA, momentos angulares iguales a 0 a los niveles 7, 8, 12 y 13, los cuales están de acuerdo con la teoría de Butler, y con $l_n = 1$ los niveles 9, 10, 11, 14, 15 y 16 que en algunos casos (niveles 10, 11, 14 y 16) son contradictorios con las curvas de Butler.

Los valores de momento angular de captura de neutrón obtenidos de esta manera se incluyen en la fig. 2 en su nivel correspondiente.

IV. INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

Las curvas DWBA se calcularon con el programa de Tobocman modificado en Los Alamos, utilizando la computadora IBM 709 del Centro Nacional de Cálculo del Instituto Politécnico Nacional.

Dado que parece deseable calcular las distribuciones angulares de todos los niveles con los mismos parámetros ópticos, se realizaron un número bastante grande de intentos, variando cada uno de estos parámetros con objeto de observar el efecto que producen. Como un ejemplo de estas variaciones se presenta la



$d\sigma/d\Omega$ (mb/sterad)

$^{23}\text{Na}(d,p)$ ^{24}Na

Energía Incidente $E_d=1.5$ MeV
 Blancos; \circ Acetato de Sodio
 \triangle Cloruro de Sodio

Técnica del Doble Espectrógrafo

Angulo en Sistema Centro de Masa

Fig. 3

Esta página está intencionalmente en blanco

fig. 4 en la que aparecen las distribuciones angulares experimentales de cuatro de los niveles observados sobre las que se han dibujado un grupo de curvas teóricas cuyos parámetros están indicados en la misma figura.

V y W representan los potenciales real e imaginario, R el radio y a la difusión de los potenciales ópticos de tipo Woods-Saxon que se emplean. Los sub-índices d y p indican si se trata del deuterón o del protón, respectivamente.

Se muestra en la fig. 4 el efecto que producen variaciones en los siguientes parámetros V_p , V_d , W_d , a_p , R_p y R_d . El efecto observado al cambiar notablemente el potencial imaginario del protón W_p fué muy poco sensible, y la variación en la forma de la curva debida a la difusión a_d es muy semejante a la que se consigue al alterar a_p solamente que más exagerada, así que es posible que con excepción del potencial real, las curvas DWBA sean más sensibles a los parámetros del deuterón que a los del protón.

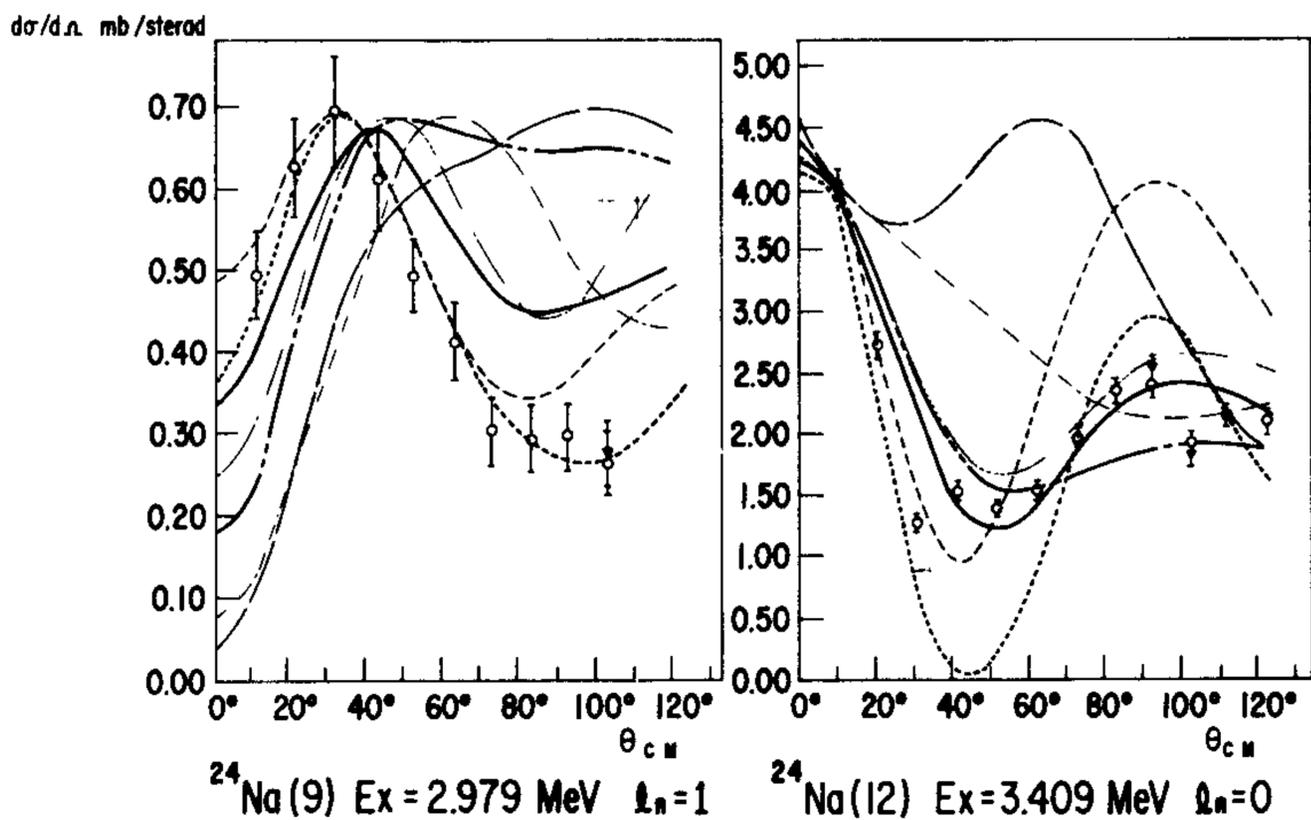
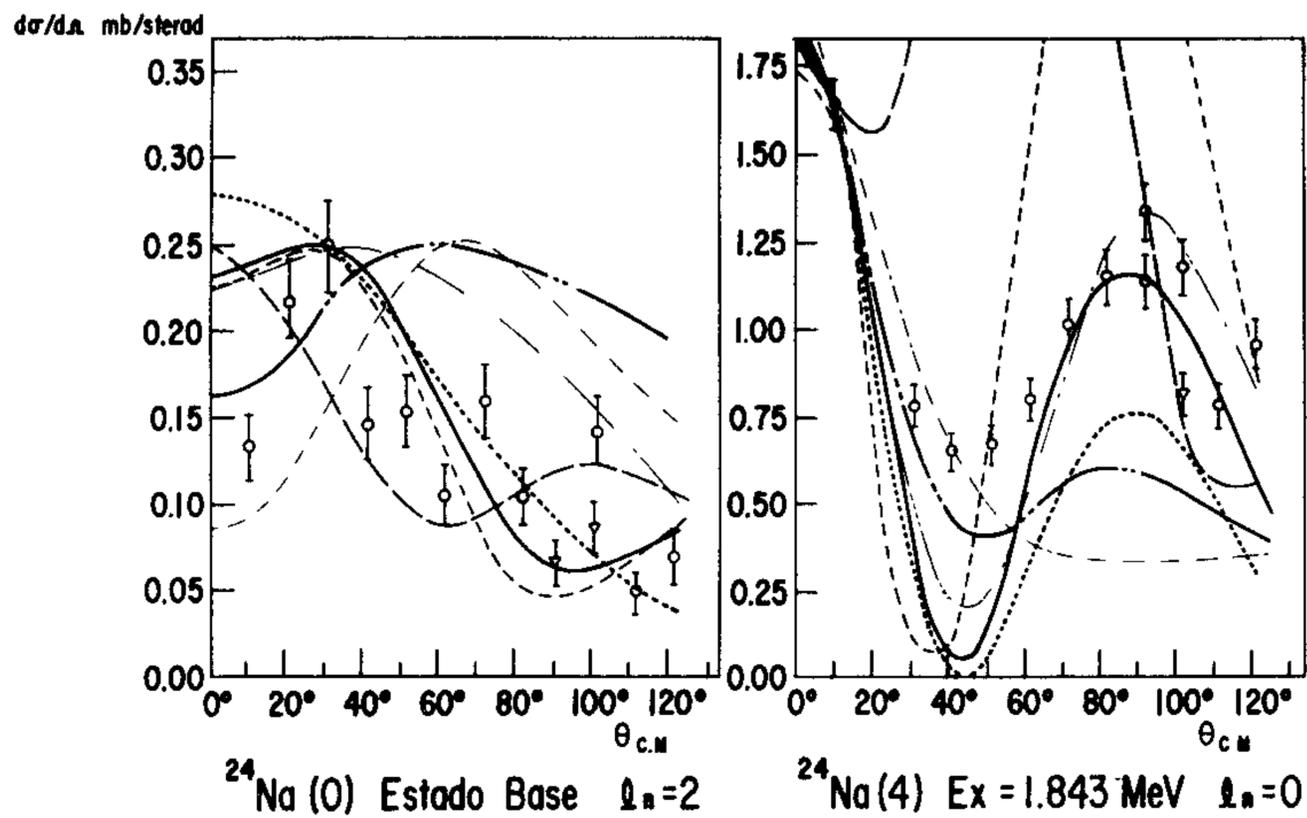
De esos cálculos se pueden sugerir como parámetros medios, que proporcionen un ajuste satisfactorio para varios momentos angulares simultáneamente, los siguientes valores:

$$V_d = -60 \text{ MeV}, \quad W_d = -25 \text{ MeV}, \quad a_d = 0.7 \text{ f}, \quad R_d = 4.27 \text{ f}$$

$$V_p = -50 \text{ MeV}, \quad W_p = -8 \text{ MeV}, \quad a_p = 0.6 \text{ f}, \quad R_p = 3.75 \text{ f}$$

aunque es posible elegir un juego de parámetros para lograr un excelente ajuste en cada caso particular; sin embargo éste deja de ser bueno para otros niveles. La principal ventaja de las curvas DWBA consiste en que muestran intensidades más altas a ángulos grandes, en comparación con las de Butler. Además las correspondientes a $l_n = 0$ presentan con los parámetros adecuados un segundo máximo intenso.

Se observa también que para los niveles de Q grande, la teoría DWBA se ajusta satisfactoriamente, no así para valores Q cercanos a cero; los ajustes para estos últimos son más difíciles y solamente se adaptan para $l_n = 0$ y 1, definitivamente en contradicción con los de la teoría de Butler. Esta última teoría parece



Curva	Vp (MeV)	Vd (MeV)	Wp (MeV)	Wd (MeV)	Qp (f)	Qd (f)	Rp (f)	Rd (f)
—	-50	-60	-8	-25	0.6	0.7	3.7492	4.266
- - -	-30	-60	-8	-25	0.5	0.6	3.7492	4.266
- · - · -	-50	-70	-8	-25	0.5	0.6	3.7492	4.266
- · - · -	-50	-60	-8	-15	0.7	0.6	3.7492	4.266
- · - · -	-50	-60	-8	-25	1.0	0.6	3.7492	4.266
- · - · -	-50	-60	-8	-25	0.5	0.6	4.7500	4.266
- · - · -	-50	-60	-8	-25	0.5	0.6	3.7492	5.000

EFFECTO DE DISTINTOS PARAMETROS EN EL AJUSTE DE CURVAS DWBA CON EL EXPERIMENTO.

Fig. 4

$^{23}\text{Na}(d,p)^{24}\text{Na}$

$E_d=1.5\text{MeV}$ $E_d=7\text{MeV}$

N°	Q MeV	Ex MeV	ln Butler	ln DWBA	ln Daum	σ_{max} mb/sterad	$(2J+1)\gamma$	J ^π
0	4.732 ± 0.008	0	2	2	2	.238	.00281	4 ⁺
1	4.263	0.470 ± 0.005	2	2	2	.310	.00293	1 ⁺
2	4.172	0.560	isotr.	isotr.	0	.341	.00190	—
3	3.394	1.339	0	0	0	2.750	.00300	1 ⁺
4	2.889	1.843	0	0	0	1.650	.00160	1 ⁺ , 2 ⁺
5	2.848	1.885	0	0	2	.760	.00076	1 ⁺ , 2 ⁺
6	2.278	2.454	1	1	2	.800	.00245	0 ⁻ , 1 ⁻ , 2 ⁻ , 3 ⁻
7	2.220	2.512	0	0		.300	.00019	1 ⁺ , 2 ⁺
8	2.174	2.558	0	0	2	.366	.00023	1 ⁺ , 2 ⁺
9	1.754	2.979	1	1	2	.695	.00174	0 ⁻ , 1 ⁻ , 2 ⁻ , 3 ⁻
10	1.512	3.219	2	1	isotr.(4)	.175	.00091	0 ⁺ , 1 ⁺ , 2 ⁺ , 3 ⁺ , 4 ⁺
11	1.368	3.367	2	1	1	3.150	.01372	0 ⁺ , 1 ⁺ , 2 ⁺ , 3 ⁺ , 4 ⁺
12	1.324	3.409	0	0	0	4.000	.00170	1 ⁺ , 2 ⁺
13	1.144	3.588	0	0	0	.860	.00033	1 ⁺ , 2 ⁺
14	1.107	3.625	2	1	2	.355	.00106	0 ⁺ , 1 ⁺ , 2 ⁺ , 3 ⁺ , 4 ⁺
15	1.078	3.654	1	(1)	2	.600	.00104	0 ⁻ , 1 ⁻ , 2 ⁻ , 3 ⁻
16	0.989	3.744	3	1	(3)	3.000	.04260	1 ⁻ , 2 ⁻ , 3 ⁻ , 4 ⁻ , 5 ⁻

Fig. 5

ser la más acertada para determinar momentos angulares de captura del neutrón, ya que por lo menos presenta máximos en los ángulos adecuados. Quizá estas diferencias se deban a la baja energía de bombardeo.

V. CONCLUSIONES

En la fig. 5 se presenta una tabla con los resultados finales de Q , E_x y l_n obtenidos empleando las teorías de Butler y DWBA, así como los valores l_n de Daum¹, la sección en el máximo, el factor $(2J + 1)\gamma$ y las posibilidades de espín y paridad de acuerdo con el presente trabajo. En los casos (niveles 0, 1 y 3) en que se han determinado por otros experimentos⁵ los valores de J , se han tabulado sólo estos, observándose que no están en contradicción con los resultados de este trabajo.

Se deduce de la última columna de esta tabla que con un experimento como el presente, por sí solo, no es posible asignar un valor único y definitivo de J a los niveles, de modo que para poder reducir el número de estas posibilidades se requiere de otro tipo de información, ya sea teórico o de experimentos que podrían ser de polarización, correlaciones angulares de radiación γ , etc.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras desean presentar su agradecimiento al Fís. Marcos Mazari por su valiosa ayuda en la discusión de este trabajo; al grupo de personas que colaboraron en la máquina 709 del Centro Nacional de Cálculo del Instituto Politécnico Nacional por su cooperación con el cómputo de las curvas de DWBA; a los Sres. Luis y Francisco Velázquez quienes se encargaron de la preparación de los blancos y la exposición de las placas; a las Sritas. Edda Osalde y Georgina Moreno por el escrutinio de las placas nucleares al microscopio y al Sr. José Manuel Ramos por su amable contribución en el dibujo de las figuras.

REFERENCIAS

1. D.M. Endt and C. Van Der Leun, "Energy Levels of Light Nuclei III"; Nuclear Phys. **34**, 32 (1962).
2. C. Daum, "The $^{23}\text{Na}(d, p)^{24}\text{Na}$ Reaction and the Nuclear Structure of ^{24}Na ", Nuclear Phys., **45**, 273; (1963).
3. C. Daum, "The Nuclear Structure of ^{24}Na and some Remarks on the Nuclear Structure of ^{25}Mg ", Nuclear Phys., **51**, 244, (1964).
4. J. Rickards, O. de López, M. Mazari, F. Alba, J. Dorantes y L. Velázquez, "Técnica del Doble Espectrógrafo para el Estudio Experimental de Distribuciones Angulares de Reacciones Nucleares", 'Cuarto Simposio Interamericano sobre la Aplicación de la Energía Nuclear para Fines Pacíficos', **1**, 213 (1962).
5. M.E. Ortiz de López, "Nuevo Nivel en ^{24}Na con una Energía de Excitación de 2.512 MeV", Rev.Mex.Fís., **12**, 159 (1963).

Esta página está intencionalmente en blanco