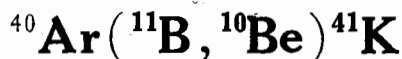


重离子引起的单质子转移反应



刘绍湘

(兰州大学)

摘 要

测量了 50MeV 的 ${}^{11}\text{B}$ 束在 ${}^{40}\text{Ar}$ 上的弹性散射角分布和单质子转移反应 ${}^{40}\text{Ar}({}^{11}\text{B}, {}^{10}\text{Be}){}^{41}\text{K}$ 的微分截面。用光学模型拟合了弹性散射截面。用包含反冲效应的精确有限程扭曲波玻恩近似 (EFR-DWBA) 分析了微分截面, 提取了谱因子。

一、引 言

用轻离子引起的转移反应来研究核结构已经有将近 30 多年的历史了。利用这类反应对许多核进行了分析, 提取了大量的核谱数据。目前这类反应已成为研究核谱的有力工具之一。利用重离子进行转移反应还只是近十多年来的事情。

对转移反应的实验数据的分析常用扭曲波玻恩近似法 (DWBA)。对于轻离子引起的转移反应, 为简化计算, 一般只用零程近似 (ZERO-RANGE APPROXIMATION) 就能达到足够的精确度。但是, 对于重离子引起的转移反应, 由于反冲效应等的影响, 零程近似已不能给出满意的结果, 必须采用精确有限程方法 (EXACT-FINITE-RANGE)。由于计算技术的发展, 目前已有标准 EFR-DWBA 计算程序^[1,2]。

我们选择 ${}^{40}\text{Ar}$ 作为靶核主要原因有二:

- 1) 对于 SD 壳和 FP 壳的双幻核的转移反应, 过去在理论上和实验上都做了大量的工作。但是对于核子可以在 SD 壳和 FP 壳之间转移的核研究得较少。对氩 (Ar) 的同位素的单核子转移反应使我们有可能研究处在 $S_{1/2}$, $D_{3/2}$, $F_{7/2}$ 和 $P_{3/2}$ 壳层的核的结构。
- 2) 所有以前对氩的同位素的单核子转移反应的研究都是用轻离子产生的^[3-5]。重离子引起的氩的转移反应的数据十分稀少。至今所知只要 N. J. Eyre^[6] 做的 117MeV 的 ${}^{11}\text{B}$ 束轰击氩的同位素^{36,38,40}Ar 所引起的转移反应。本文主要的目的是提供 50MeV 的 ${}^{11}\text{B}$ 束在 ${}^{40}\text{Ar}$ 上产生的转移反应的数据, 并检验 EFR-DWBA 分析的结果。

本文 1983 年 9 月 20 日收到。

本文是作者在牛津大学学习期间所做的工作。

二、实验过程

实验是在牛津大学核物理实验室的串列静电加速器上进行的。初始能量为 50MeV 的 ^{11}B 束穿过 $5\mu\text{m}$ 的 Al 窗进入气体靶室。靶室内充有纯度为 99.95% 的 ^{40}Ar ，压力为 100 托。反应产物的探测和分辨是借助于一个 ΔE - E 固态探测器望远镜系统。 ΔE 和 E 探测器的厚度分别为 $30\mu\text{m}$ 和 $510\mu\text{m}$ 。实验数据通过在线计算机 PDP-11 将原始数据逐一记录在磁带上，供离线分析。实验装置和电子学方框图如图 1 所示。图 2 给出 $^{40}\text{Ar}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{Be})^{41}\text{K}$ 反应的典型能谱，图中前两个较强的峰分别对应于 ^{41}K 的基态 $3/2^+$ 和激发态 $7/2^-(1.29\text{MeV})$ 。根据简单的壳模型可以理解为一个质子从弹核 ^{11}B 转移到剩余核 ^{41}K 的 $1d_{3/2}$ 壳和 $1f_{7/2}$ 壳。其余两个峰对应于出射核 ^{10}Be 与剩余核 ^{41}K 之间的相互激发，激发能如图 2 所示。

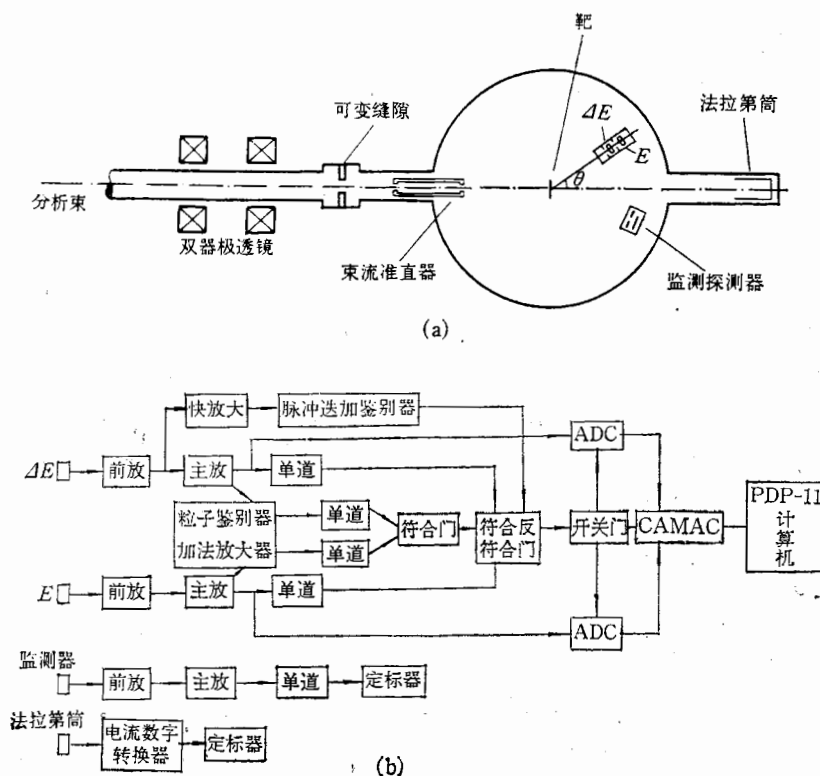


图 1

(a) $^{40}\text{Ar}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{Be})^{41}\text{K}$ 反应的实验装置 (b) 电子学装置方框图

三、结果分析

1) EFR-DWBA 理论概述

详细的精确有限程扭曲波玻恩近似公式已经由许多作者给出^[1,2]。这里只将下面计

第

其系

P₃ 个态发

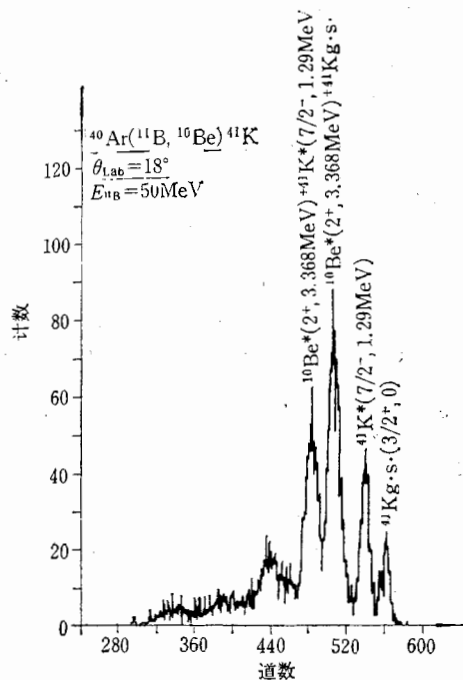


图 2

^{11}B 在 ^{40}Ar 上引起单质子转移反应的能谱图
 $E(^{11}\text{B}) = 50\text{MeV}$, $\theta_{\text{L}} = 18^\circ$

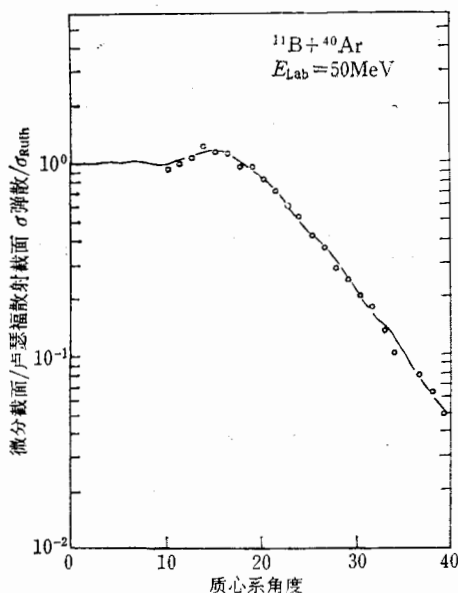


图 3 ^{11}B 在 ^{40}Ar 上的弹性散射截面与卢瑟福散射截面之比。圆点为实验点, 实线是用光学模型计算的结果

算微分截面需要用到的公式概述如下:

对于 $A(a, b)B$ 反应, 其跃迁幅度为

$$T_{\text{DWBA}} \propto \int dr_a \int dr_b \chi_b^{(-)*}(\mathbf{r}_b) \langle \psi_B \psi_b | V | \psi_A \psi_a \rangle \chi_a^{(+)}(\mathbf{r}_a). \quad (1)$$

其中 $\chi_b^{(-)}(\mathbf{r}_b)$ 和 $\chi_a^{(+)}(\mathbf{r}_a)$ 分别是出射道和入射道的弹性散射波函数。 ψ_B , ψ_b , ψ_A 和 ψ_a 分别是核 B 、 b 、 A 和 a 的内部波函数。 V 是引起转移反应的相互作用势。 跃迁矩阵元 $\langle \psi_B \psi_b | V | \psi_A \psi_a \rangle$ 几乎包含了反应的所有物理内容, 即核结构的影响, 角动量选择规则, 以及反应的类型等。(如削裂、拾取, 击出等反应或非弹性散射)

对于 EFR-DWBA 近似, 被转移的角动量应满足下列关系, 即

$$|J_1 - J_2| \leq L \leq |J_1 + J_2| \quad \text{和} \quad |l_1 - l_2| \leq L \leq |l_1 + l_2|. \quad (2)$$

其中下标 1 代表弹核和出射核系统, 下称轻系统。 下标 2 代表靶核和剩余核系统, 下称重系统。 例如反应 $^{40}\text{Ar}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{Be})^{41}\text{K}$ (基态), 对轻系统来说, ^{11}B 可认为是由 ^{10}Be 加一个 $P_{3/2}$ 壳的质子组成, 因此 $J_1 = 3/2$, $l_1 = 1$ 。 而对于重系统, ^{41}K 基态可认为是 ^{40}Ar 加一个 $d_{3/2}$ 壳的质子组成, 因此 $J_2 = 3/2$, $l_2 = 2$ 。 由 (2) 式可知, 单质子转移到 ^{41}K 的基态, 允许转移的角动量为 $L = 1, 2, 3$ 。 相似地可以推知, 单质子转移到 ^{41}K 的 $7/2^-$ 激发态, 允许转移的角动量为 $L = 2, 3, 4$ 。

对于削裂反应, 其微分截面的计算公式为^[1]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{2J_B + 1}{2J_A + 1} \sum_{lij} (2l + 1) W^2(l_1 j_1 l_2 j_2; s_x l) s_1 s_2 \sigma_{L O L A}(\theta), \quad (3)$$

为了拟合实验数据,提取谱因子,通常将截面公式写成如下形式

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{实验}} = (c_1^2 s_1) (c_2^2 s_2) \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{理论}} \quad (4)$$

其中 c_1 和 c_2 分别是轻、重系统的同位旋的克来勃许-哥登系数. s_1 和 s_2 分别是轻、重系统的谱因子. $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{理论}}$ 是我们用程序计算的微分截面.

2) 数值计算

为了得到入射道和出射道的扭曲波函数 $\chi_a^{(+)}(r_a)$ 和 $\chi_b^{(-)}(r_b)$, 我们采用了如下的光学势:

$$U(r) = V(r) + iW(r). \quad (5)$$

其中实部

$$V(r) = V_N(r) + V_C(r)$$

$$V_N \text{ 为核势 } V_N(r) = -V_0 f(r) \quad f(r) = \left[1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right)\right]^{-1}$$

$$V_C \text{ 为库仑势 } V_C(r) = \frac{Z_A Z_a e^2}{R} (3/2 - 1/2 r^2/R^2) \quad r < R$$

$$= \frac{Z_A Z_a e^2}{r} \quad r > R$$

$$R = r_0 (A_a^{1/3} + A_A^{1/3}) \quad r_0 = 1.25 \times 10^{-13} \text{cm.}$$

虚部分为体吸收部分 W_v 和面吸收部分 W_s ,

$$W_v(r) = -W_0 f(r) \quad W_s(r) = 4aW_s \frac{df(r)}{dr}$$

为了选择适当的光学势参数,我们测量了入射道的弹性散射微分截面,并用文献[6]所给出的光学势参数(表1中的势2和势3)做出发点,利用计算机程序自动调节参数拟合实验点.这样选出的光学参数列于表1的第一行.弹性散射的实验截面与卢瑟福散射截面之比和理论拟合曲线如图3所示.出射道的扭曲波函数也是用上述同样的光学势参数求出的.

表1 入射能量为 50MeV 时, $^{11}\text{B} + ^{40}\text{Ar}$ 弹性散射光学势参数

势	V_R (MeV)	r_{OR} (fm)	$a_R = a_s$ (fm)	W_v (MeV)	$r_{OV} = r_{OS}$ (fm)	a_v (fm)	W_s (MeV)
1	60.92	1.012	0.65	23.55	1.021	0.846	
2	47	1.085	0.66	25	1.109	0.16	7.5
3	57	1.046	0.68	20	1.078	0.20	8.5

为得到单粒子束缚态的波函数,我们选用了 Woods-Saxon 势,其几何参数是 $r_0 = 1.25\text{fm}$, $a = 0.65\text{fm}$, 自旋轨道相互作用强度 $V_{so} = 7.0\text{MeV}$. 势的深度利用计算机程序自动调节,直到给出正确的单核子分离能为止.

最后用程序 SESIME 算出 ^4K 的基态和 $7/2^-$ 激发态的微分截面,分别示于图4和图5中.图中同时也给出了各个允许转移的角动量对微分截面的贡献以及所有贡献之和的理论曲线.由图可见理论曲线与实验点拟合得比较好,这使我们有可能提取相应的谱因子.

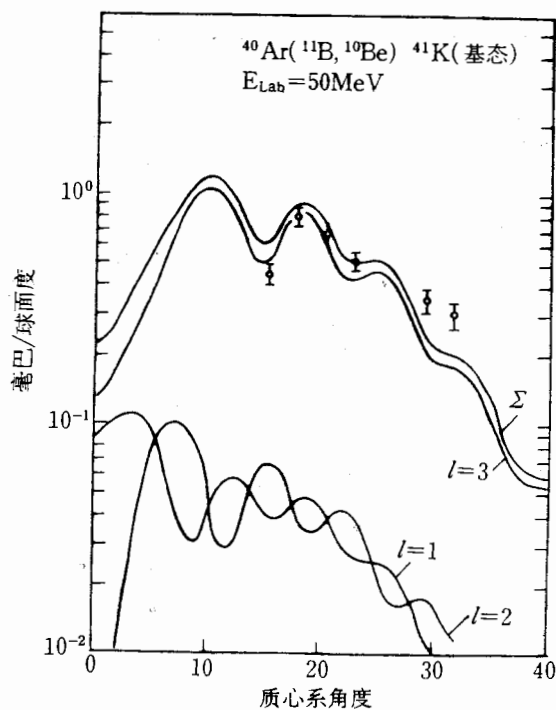


图 4 $^{40}\text{Ar}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{Be})^{41}\text{K}$ (基态)的微分截面。

圆点为实验点, 曲线为 EFR-DWBA 计算的结果, $L=1, 2, 3$ 是各允许转移的角动量对截面的贡献, Σ 是所有截面之和

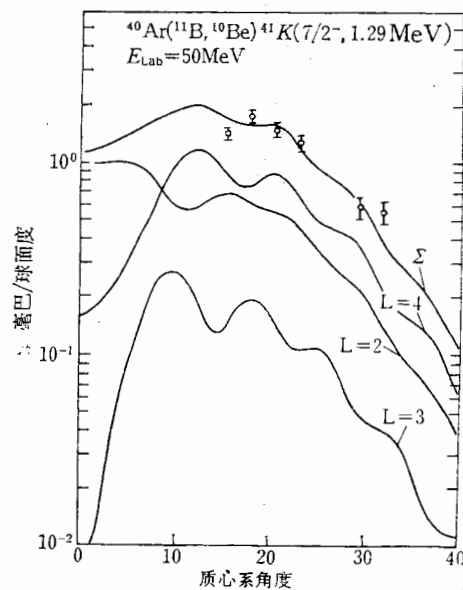


图 5 $^{40}\text{Ar}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{Be})^{41}\text{K}(7/2^-)$ 激发态)的微分截面。

圆点为实验点, 曲线为 EFR-DWBA 计算的结果, $L=2, 3, 4$ 是各允许的转移角动量对截面的贡献, Σ 是所有截面之和

为提取重系统的谱因子, 轻系统谱因子值我们采用 Cohen 和 Kurath^[7] 的计算结果。

由 $^{40}\text{Ar}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{Be})^{41}\text{K}$ 提取的重系统的谱因子, 以及轻离子引起的同一反应所得到的谱因子一并列于表 2 中。

表 2 ^{11}B 在 ^{40}Ar 引起的单质子转移反应的谱因子

反 应	E_x (MeV)	J^π	允许的 L	$c_{i_1 s_1}^2$	$\begin{pmatrix} c_{i_1 s_1}^2 \\ c_{i_1 s_2}^2 \end{pmatrix}$	$c_{i_2 s_2}^2$	轻离子 ⁽¹⁾ $c_{i_2 s_2}^2$	重离子 ⁽²⁾ $c_{i_2 s_2}^2$
$^{40}\text{Ar}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{Be})^{41}\text{K}$	0.0	3/2 ⁺	1, 2, 3	0.43	0.113	0.26	0.38	0.24
	1.29	7/2 ⁻	2, 3, 4	0.43	0.140	0.32	0.36	0.24

四、小 结

本文给出了 50 MeV 的 ^{11}B 在 ^{40}Ar 上的单质子转移反应的微分截面。用包含反冲效应的 EFR-DWBA 方法进行了计算。对实验结果的拟合基本上是满意的。由此提取的谱因子与轻离子引起的相同反应所得的谱因子也比较一致。因此, 重离子引起的转移反应作为一种核谱工具, 也能提供许多有用的核谱数据。

最后, 作者对牛津大学核物理实验室提供的学习条件, 以及允许使用其实验设备和计算机程序表示感谢。作者对 P.S.Fisher 博士的关心和帮助也深表感激。

参 考 文 献

- [1] R. M. DeVries, *Phys. Rev.*, C8(1973), 951.
- [2] T. Tamura, *Physics Report*, 14C (1974), 59.
- [3] M. Hagen et al., *Nucl. Phys.*, A152 (1970), 404.
- [4] L. R. Medsker et al., *Phys. Rev.*, C11 (1975), 1937.
- [5] H. Fuchs et al., *Phys. Lett.*, 31B (1970), 14.
- [6] N. J. Eyre, D. Phil Thesis Oxford (1981).
- [7] S. Cohen and D. Kurath, *Nucl. Phys.*, A101 (1967), 1.

SINGLE PROTON TRANSFER REACTION INDUCED BY HEAVY ION ^{40}Ar (^{11}B , ^{10}Be) ^{41}K

LIU SHAO-XIANG
(Lanzhou University)

ABSTRACT

The angular distribution has been measured for elastic scattering on ^{40}Ar with ^{11}B and for the single proton transfer reaction $^{40}\text{Ar}(^{11}\text{B}, ^{10}\text{Be})^{41}\text{K}$ at the incident beam energy of 50 MeV. The elastic scattering cross section has been fitted in terms of the optical model. The EFR-DWBA approach with recoil effect has been used to analyze the differential cross section. The spectroscopic factor was extracted.

自
有
前
以
不

米
率
谱
空
Br
定

进
分
数