

## d-d 四体破裂反应的单态氘中间过程 (II)

张映箕 刘根宝 周善铸  
(中国科学院上海原子核研究所)

### 摘 要

在“d-d 四体破裂反应的单态氘中间过程 (I)”的研究基础上选择可以减小运动学模糊效应的几何条件,在相应于  $\theta_c = 90^\circ$  和  $\theta_c = 64^\circ$  的实验室角度上测量 d-d 反应形成的单态氘破裂时发出的两个质子的二维能谱,在预期的能区内观测到明显的计数增长. 实验测得单态氘的破裂能  $E_B = (52 \pm 21) \text{keV}$ .

### 一、引 言

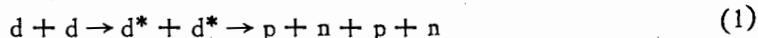
核子-核子 (N-N) 系统的共振是颇受人们注视的问题. 在中高能区, 散射长度数据和理论分析显示出存在几个 N-N 共振态的可能性<sup>[1-3]</sup>; 在低能区, 也有存在 N-N 共振的迹象. 单态氘 ( $d^*$ ) 是 N-N 共振态之一 (p-n 共振). 不久前我们在“d-d 四体破裂反应的单态氘中间过程 (I)”<sup>[4]</sup> 一文中报道了关于  $d^*$  的研究结果, 我们在和  $d^*$  的破裂球面相交的对称的实验室方向上观测到了具有中间共振态特征的二维能谱, 证实了  $d^*$  的存在. 然而由于存在严重的运动学模糊效应, 使能谱变宽乃至峰位移动, 以致确定  $d^*$  的破裂能 (即共振态能级值) 时不得不引入某些修正, 只给出了 (41—82keV) 的能量范围.

如我们曾指出的<sup>[4]</sup>, 如果表示实验室测量方向的直线和  $d^*$  的破裂球面相切, 运动学方程有单一解, 相应的能谱出现单峰. 当实验的角分辨本领好时就能用符合测量法有效地减小运动学模糊效应, 从而求得能级值, 甚至能确定能级宽度.

本工作在前文 [4] 的基础上根据已经确定的破裂能的范围计算并选择可以减小运动学模糊效应的测量角度, 用双探测器符合法测量二维能谱, 寻找角度和能量的对应关系, 从而求解破裂能值, 同时确定能级宽度和能级寿命.

### 二、反应运动学和实验方法

在 d-d 四体破裂反应的单态氘中间过程



中, 碰撞使得每个 d 各自翻转一个核子的自旋, 形成两个  $d^*$ , 随后  $d^*$  破裂, 放出的 p 和 n

的运动学轨迹是一个以  $d^*$  的质心系速度  $V_{d^*}^c$  的顶点为原点, 以 p 或 n 的质心系速度  $V_{p,n}$  为半径的球面。表示末态核子的实验室系出射方向的直线和球面的交点给出其速度值, 二者相切时只有一个解。图 1 是反应的运动学图。图中  $V_c$  为系统的质心速度,  $V_i$  是出射质子的实验室系速度,  $\theta_c$  为质心系角度。如图所示,  $V_{i_1}$  和  $V_{i_2}$  同时各与一个破裂球相切时,  $\theta_c$  的微小变化都使其中一个球面不能与直线相遇, 符合测量系统将测不到计数, 于是除了角分辨本领外, 文献 [4] 中的使能谱发生严重畸变的那种运动学模糊效应不复存在。图 1(a) 是  $\theta_c = 90^\circ$  的对称情况; (b) 是  $\theta_c \neq 90^\circ$  的非对称情况。

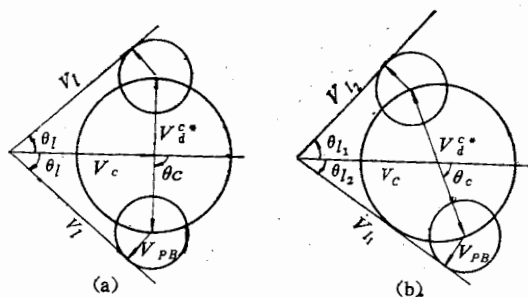


图 1  $d + d \rightarrow d^* + d^* \rightarrow p + p + n + n$  反应运动学图

(a)  $\theta_c = 90^\circ$  (b)  $\theta_c \neq 90^\circ$

按文献 [4] 的结果所作的估算表明,  $\theta_c = 90^\circ$  时, 在  $\theta_i \approx 37^\circ$  的对称角度上能观测到相应于反应式 (1) 的能量峰, 峰位在 2.6 MeV 附近;  $\theta_c$  约为  $65^\circ$  时, 在  $43^\circ$  和  $30^\circ$  附近的角对上, 能谱中将有峰出现, 其二维谱的峰值能量约为 (1.8, 3.5) MeV。

可能的竞争反应是  $D(d, dp)n$ ,  $D(d, pd)n$  和  $D(d, pp)2n^{[5]}$  反应, 第三个反应中的  $2n$  表示 n-n 末态相互作用, 其相对能量  $E_{n-n} = 200 \text{ keV}$  的运动学轨迹和前二者一起示于图 2。图中  $\times$  号表示估算的相应于  $d^*$  的 p-p 峰位。由图可见, 在上述实验条件下可借助于反应运动学有效地把单态氘中间过程和几种可能的三体反应加以区别。  $H(d, pp)n$  反应的质心速度很大, 末态粒子出射的圆锥角较小, 在和  $d^*$  的破裂球面相切的所有角度上其运动学方程均无解, 对待测谱没有干扰。  $E_0 \approx 15 \text{ MeV}$  时双傍观者的准自由过程 (TSQF) 被禁戒。

实验条件和测量方法与文献 [4] 基本相同, 只是选用了高阻金硅面垒型半导体探测器, 灵敏层厚大约 1 mm, 能量分辨好于 30 keV。用本所 1.2 米回旋加速器产生的 15.4 MeV 的氘束 (能散度约为 130 keV) 轰击原约  $500 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  的  $\text{CD}_2$  靶, 流强约为  $0.07 \mu\text{A}$ , 束流管道准直器长 60 cm, 孔径 5 mm。用两个金硅面垒型探测器测量出射的带电粒子, 用快慢符合和飞行时间差法选择相关事件, 用  $64 \times 64$  多道分析器测量二维谱。快符合单元和飞行时间谱的总的分辨时间约为 10 ns, 其时间差谱的中值为估算的  $E_{p_1}$  和  $E_{p_2}$  所对应的飞行时间差值。探测器到靶的距离为 30 cm, 不对称和对称测量时的光阑大小分别为 0.3 和 0.5 cm, 相应的张角为  $0.5^\circ$  和  $1^\circ$ 。用  $\theta_{i_1} = -\theta_{i_2} = 45^\circ$  时的 p-p 弹性散射调试系统, 刻度二维谱和飞行时差谱, 也检验左右对称性和角分辨本领。当其中任一探测器从对称位置偏离  $0.5^\circ$  时, 符合计数率下降到 10% 以下。

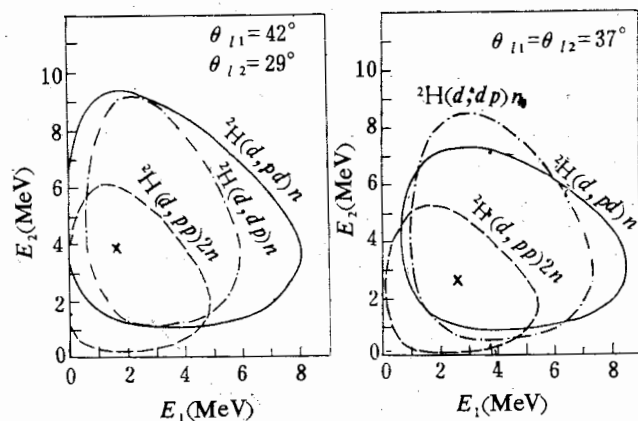
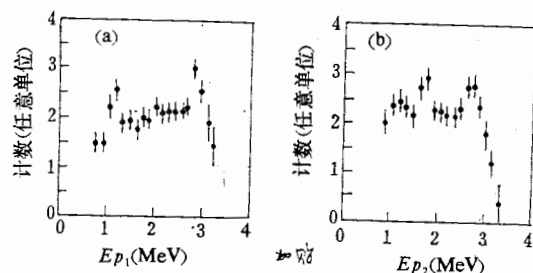


图 2 d-d 三体反应运动学图

### 三、实验结果和分析

在  $\theta_i = \pm 37^\circ$  和  $(\theta_{i_1}, \theta_{i_2}) = (42^\circ, 29^\circ)$  的两种条件下进行测量.  $\theta_i = \pm 37^\circ$  的结果示于图 3,  $x$  和  $y$  轴上的投影谱分别在 2.8MeV 和 2.6MeV 附近呈现一个较宽的峰, 在 1.6—2.0MeV 之间的计数增长是 d-d 三体反应的结果. 与文献[4]的图 7 相比, 本文的结果略有改善. 在那里  $D(d, pd)n$  和  $D(d, dp)n$  反应的峰与  $d^*$  破裂的峰连在一起, 几乎不能区分. 把探测器移动到  $\theta_i = 38^\circ$  时, 预期的能区内没有计数增长, 表明  $\theta_i = \pm 37^\circ$  的实验室方向确和  $d^*$  的破裂球面相切.

图 3  $\theta_i = \pm 37^\circ$  的能谱图

(a) 在  $E_{p_1}$  轴上的投影 (b) 在  $E_{p_2}$  轴上的投影

$(\theta_{i_1}, \theta_{i_2}) = (42^\circ, 29^\circ)$  的二维谱的照片示于图 4. 图中横坐标为  $E_{p_1}$ , 纵坐标为  $E_{p_2}$ , 点的亮度表示计数多少. 预言的能区内计数明显增长, 形成高峰, 峰值计数约为散乱本底的三倍.  $(E_{p_1}, E_{p_2}) \approx (1.0, 2.5)$  MeV 附近出现微弱的  $D(d, pd)n$  和  $D(d, dp)n$  三体反应的峰. 扣除三体反应的可能的影响, 并减去偶然符合本底后的投影谱示于图 5. 能谱分别于 1.6 和 3.9MeV 附近呈峰, 由此求得相应的质心系角  $\theta_c = 64^\circ$ . 两个投影谱峰的半宽度分别为 1.20MeV 和 0.55MeV. 当  $\theta_{i_1}$  和  $\theta_{i_2}$  同时增大  $1^\circ$  时, 长时间测量的结果在预期的能区内没有明显的计数增长, 表明  $(\theta_{i_1}, \theta_{i_2}) = (42^\circ, 29^\circ)$  的方向和  $d^*$  的破裂

表 1  $\theta_c$ 、 $\theta_l$ 、 $E_p$  和  $E_B$  的关系

$\theta_c$	90°						64°	
$\theta_l$	37°						42°	29°
$E_p(\text{MeV})$	2.80	2.69	2.65	2.62	2.55	2.49	1.65	3.90
$E_B(\text{keV})$	25	33*	52°	49*	69	89	45	

\* 测量该组数据的氘束能量为 15.6MeV.

球面相切。

以上述实验室角度和相应的能量测量值为已知量,解一组运动学方程或用数学逼近法计算  $d^*$  的破裂能  $E_B$ , 求其平均作为本文的测量结果。表 1 给出质心系角度  $\theta_c$ , 实验室系角度  $\theta_l$ , 测量值  $E_p$  和破裂能  $E_B$  之间的关系。由表 1 求得

$$E_B = (52 \pm 21) \text{keV}$$

误差为标准误差。

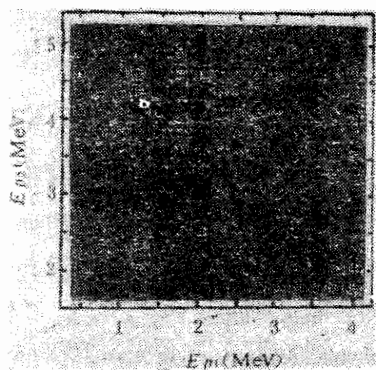


图 4  $(\theta_{l_1}, \theta_{l_2}) = (42^\circ, 29^\circ)$  的二维谱照片  
(点的亮度表示计数多少)

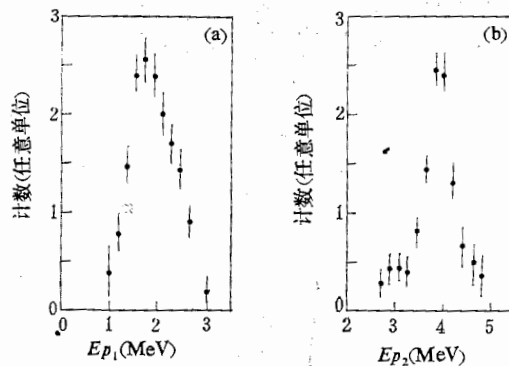


图 5  $(\theta_{l_1}, \theta_{l_2}) = (42^\circ, 29^\circ)$  的能谱图  
(a) 在  $E_{p_1}$  轴上的投影 (b) 在  $E_{p_2}$  轴上的投影

所测各谱中最小的半宽度是 0.55MeV (图 5(b)), 它是  $d^*$  的能级宽度、加速器的能散度、探测系统的能量分辨率和角分辨本领的综合结果, 仅当后三个因子足够小时, 才能精确确定  $d^*$  的能级宽度。然而, 如前所述, 在和破裂球面相切的方向上要进一步提高角分辨本领极为困难, 因而我们的研究不能给出这一 p-n 共振态的能级宽度的确切值。这些性质有待于进一步研究。

在原子核理论发展的早期, 理论家们研究核力的基本性质和氘核的基本理论时, 已认识到由于自旋状态的不同, 处于自旋单态和三重态的核子-核子系统的相互作用势不同, 其中心力的最普遍形式是

$$V(r_{12}, \sigma_1, \sigma_2) = \alpha(r_{12}) + \beta(r_{12}) \sigma_1 \cdot \sigma_2. \quad (2)$$

由总自旋  $s = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2)$  得出

$$\sigma_1 \cdot \sigma_2 = \begin{cases} -3 & \text{对 } s = 0 \text{ (单态)} \\ 1 & \text{对 } s = 1 \text{ (三重态)}. \end{cases} \quad (3)$$

所以单态氘的能级高于氘的结合能是显而易见的。几十年来人们沿着不同的途径,用各种模型<sup>[6-8]</sup>计算这两个态的能级之差,始终未得出满意的结果。

关于单态氘的存在,理论和实验结果趋向一致,对其解级性质的进一步了解有待于理论工作和实验测量技术的改进。本文的实验测量结果,由于没有采用粒子鉴别技术,所测效应中很难完全排除其他过程的干扰。虽然如此,本文仍然是对单态氘破裂过程的直接测量的又一初步实验结果。

本所回旋加速器运行组和制源制靶组的同志给予本工作很大支持和帮助,特表感谢。

### 参 考 文 献

- [1] R. A. Arndt, *Phys. Rev.*, **165**(1968), 1834; H. Suzuki, *Prog. Theor. Phys.*, **54**(1975), 143.
- [2] I. P. Auer et al., *Phys. Lett.*, **70B**(1977), 475. N. Hoshizaki, *Prog. Theor.*, **58**(1977), 716.
- [3] T. Kanae et al., *Phys. Rev. Lett.*, **38**(1977), 468.
- [4] T. Kanae et al., *Phys. Rev. Lett.*, **4**(1981), 436.
- [5] W. Von Witsch et al., *Nucl. Phys.*, **A150**(1970), 461.
- [6] R. V. Reid, *Ann. Phys.*, **50**(1968), 411.
- [7] R. V. Reid, *Ann. Phys.*, **2**(1980), 289.
- [8] M. G. Hare, G. Papini, *Nucl. Phys.*, **B34**(1971), 200.

## SINGLET DEUTERON INTERMEDIATE STATE IN d-d FOUR-BODY BREAKUP REACTION (II)

ZHANG YING-JI LIU KAN-PAO ZHOU SHAN-ZHU

(*Institute of Nuclear Research, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

At C. M. angles  $90^\circ$  and  $64^\circ$  two-dimensional spectra of protons emitted from singlet deuterons were measured under such geometry where the kinematic ambiguity was small. From the data it is obtained that the breakup energy  $E_B$  of the singlet deuteron state is  $(52+21)$  keV.