

低能 d 与 ${}^6\text{Li}$ 核反应的链式结构分子 共振态的研究

姚锦章 卢慧筠 戴能雄 祁步嘉
司国建 阎辰 孙汉城
(中国原子能科学研究院, 北京)

摘 要

测量了在共线条件下入射能量为 7.3—10.6 MeV 的氘束引起的 ${}^6\text{Li}(d, dd)$ α 反应的激发曲线。在 d 能量为 9 MeV 附近观察到共线增强, 被认为是 d- α -d 链式准分子结构态的实验证据。

一、引 言

近十几年来,在实验和理论上对核的集团现象作了大量的研究,许多工作描述了在轻核中存在着的两个核集团组成的准分子结构。理论又进一步指出,不但存在着两集团组成的准分子态,而且还存在三集团、四集团或多集团组成的准分子态^[1]。

实验上寻找三集团或多集团准分子态只是在近几年才开始的。对三集团分子态的这些研究只涉及到如 ${}^{16}\text{O} + {}^{12}\text{C}$ 系统的 ${}^4\text{N}$ 核集团结构。1979年 J. N. Scheurer 等人^[2]作了 ${}^{16}\text{O} + {}^{12}\text{C}$ 三体反应,研究了 ${}^{12}\text{C}-\alpha-{}^{12}\text{C}$ 的共线结构。1980年 K. Katori 等人^[3]作了 ${}^{16}\text{O} + {}^{12}\text{C}$ 反应的研究,指出在某些 ${}^{28}\text{Si}$ 的高激发态中,存在着两个 ${}^{12}\text{C}$ 和一个 α 组成的三集团分子态的组态。

韩文述等^[4]提出在三体反应中,除了人们所熟知的准自由散射(QFS)和末态相互作用(FSI)之外,还存在一种新的反应机制——链式结构准分子共振态,他们指出在 ${}^8\text{Be}$ 的 29.4 MeV 的高激发态存在 d- α -d 的链式准分子共振结构。在这个态中两个 d 之间的相互作用由于受 α 集团的屏蔽而忽略不计。为了寻找 d- α -d 链式共振态,我们研究了 d + ${}^6\text{Li}$ 体系,得到了轻核反应中三团链式准分子态的第一个实验证据。

二、实验方法

实验测量装置及信号获取系统的示意图如图 1 所示。氘束是由 1.2 米可变能量迴旋

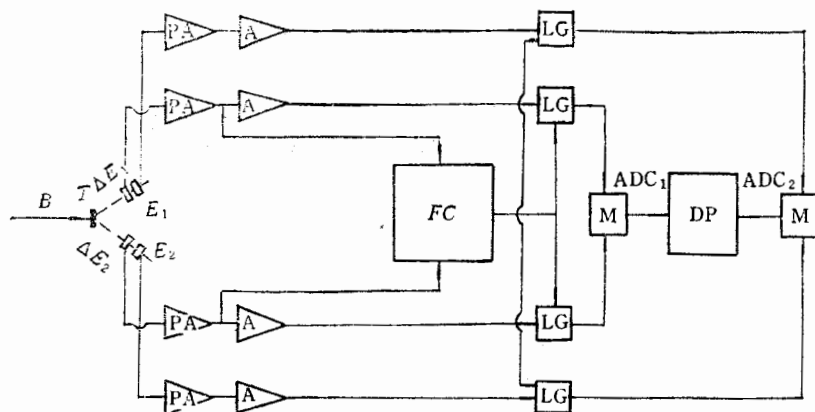


图1 测量装置及信号获取示意图

B: 入射束, I: 靶, ΔE : 全耗尽半导体探测器, E: 硅锂半导体探测器 PA: 前置放大器, A: 线性放大器, FC: 快符合线路, LG: 线性门, M: 混合器, DP: 多道计算机系统

加速器提供的,其能量为 7.3—10.6 MeV,流强为 0.03—0.06 μ A。在实验过程中,入射氦的能量稳定在 $\pm 2\%$ 以内。靶是薄碳底衬的浓缩 ${}^6\text{LiF}$ 靶。用两对 ΔE -E 半导体探测器望远镜符合测量 ${}^6\text{Li}(d, dd)\alpha$ 反应出射的两个氦粒子,望远镜的立体角是 0.87msr ,角度分辨是 ± 0.8 度, ΔE 是面垒探测器,厚度为 $30\mu\text{m}$, E 探测器是 2mm 厚的 Si(Li) 探测器,符合测量的分辨时间为 50ns, ΔE_2 和 E_2 信号相对于 ΔE_1 和 E_1 信号分别延迟 $80\mu\text{s}$,这样四个信号编组进入两个 ADC。用带有 MULTI-8 型微计算机的数据获取与分析系统,作在线粒子分辨处理和二维谱获取。得到的 E_1 - E_2 符合谱是离线处理的。实验系统的调试在文献[5]中作了详细描述。为了检验电子学仪器的线性范围,我们利用 d 粒子与 ${}^6\text{LiF}$ 靶上的 H、 ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 、 ${}^{19}\text{F}$ 以及氦化聚乙烯薄膜靶上的氦的弹性散射峰作能量线性刻度,并用 ${}^6\text{Li}(d, \alpha)\alpha$ 反应的高能 α 峰作监视测量和计数归一。由此得出三体反应截面的绝对值, ${}^6\text{Li}(d, \alpha)\alpha$ 反应的截面值引自文献[6],[7]。

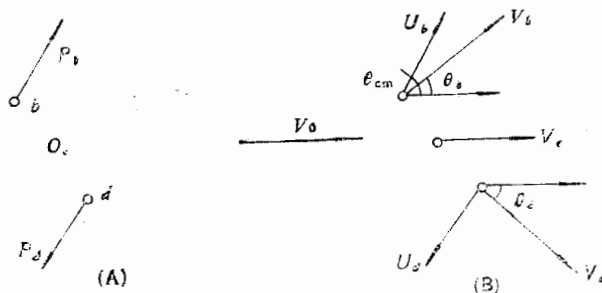


图2 共线运动学

实验测量是在反应产物粒子成共线条件下进行的。核内三集团(或三粒子)在几何上的共线结构可简化对核态的分析。一般情况下出射粒子的几何关系不能反映出射前粒子的几何位置,但在共线条件下,特别是对称直链结构的共振,情况就简单得多。在这样情

况下图 2(A) 和 b 和 d 集团是同类粒子, 在我们所研究的反应中为两个氘粒子, c 集团处于 b 和 d 连线的中点, $b-c-d$ 体系的质心正好落在 c 集团上. 因此, 在质心系中 c 的动量 P_c 为零, b 和 d 的动量数值相等, 方向相反, $P_b = P_d$.

实际上, 核集团在核内可以不断地在平衡位置附近振动; 当系统分离到超出核力范围时, 库仑力起主要作用. 在质心系中, c 集团保持平衡, b 和 d 以大小相等方向相反的动量飞出, 如图 2(B) 所示. 图中 U, V 分别表示在质心系和实验室系中的速度, V_0 是入射粒子的速度, V_c 是质心的速度.

对于三体反应 $A + a \rightarrow b + c + d + Q$, 其中 Q 是反应能, 质心速度为:

$$V_c = \frac{m_a}{m_a + m_A} \sqrt{\frac{2E_0}{m_a}}, \quad (1)$$

这里 m 表示粒子质量, E_0 为实验室系中入射粒子动能. 实验室系中 c 粒子的动能 E_c 可由下式得到:

$$E_c = \frac{m_a m_c}{(m_a + m_A)^2} E_0. \quad (2)$$

实验室系中 b, d 粒子的出射角 θ_b, θ_d 和动能 E_b, E_d 可由下式得到:

$$\sin \theta_b = \frac{U_b}{V_b} \sin \theta_{cm}, \quad (3a)$$

$$\sin \theta_d = \frac{U_d}{V_d} \sin \theta_{cm}, \quad (3b)$$

$$E_b = \frac{1}{2} m_b V_b^2, \quad (4)$$

$$E_d = \frac{1}{2} m_d V_d^2, \quad (5)$$

式中 θ_{cm} 为质心系中出射粒子 b 与入射束方向的夹角. 公式(3)被称为共线条件, 其中:

$$U_b = U_d = \left[\frac{2}{m_b + m_d} \left(\frac{m_A}{m_a + m_A} E_0 + Q \right) \right]^{1/2}, \quad (6)$$

$$V_b^2 = U_b^2 + V_c^2 + 2U_b V_c \cos \theta_{cm}, \quad (7)$$

$$V_d^2 = U_d^2 + V_c^2 - 2U_d V_c \cos \theta_{cm}, \quad (8)$$

由公式(3)–(5) 计算得到的出射粒子 1 和 2 (亦即 b 和 d) 的共线几何位置 θ_1 和 θ_2 以及能量 E_1 和 E_2 . 为了比较, 也测量了非共线条件的情况.

三、测量结果与数据分析

图 3 表示共线条件下 d-d 符合谱在 E_b (即出射氘 1 粒子的能量) 轴上的投影. 当 $E_0 = 9\text{MeV}$ 时, 在 $E_a \leq 20\text{keV}$ 区域所测得的微分截面是 QFS 和 FSI 效应之和的计算值的 5–6 倍. 扣除 QFS 和 FSI 贡献之和, 观察到明显的截面增强.

图 4 表示共线条件下 ${}^6\text{Li}(d, dd)\alpha$ 反应对 $E_a \leq 20\text{keV}$ 能区积分截面值所作的激发函数. 可以看到共线的截面增强随入射能量 E_0 而改变. 峰位在 9MeV 附近.

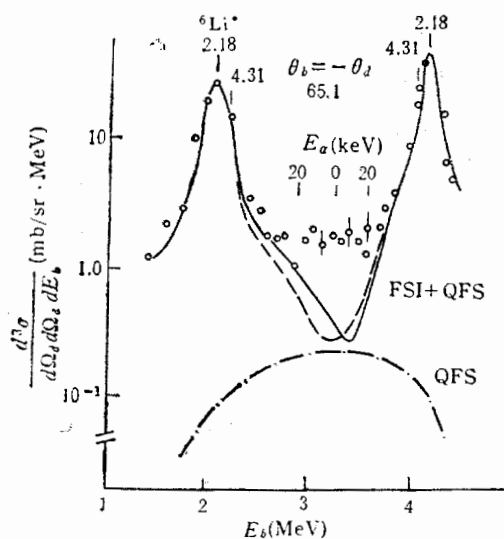


图3 共线条件下实验室系的 d-d 符合谱对 $E_b(E_1)$ 轴上投影, 实验点仅表示统计误差
入射束能量 $E_c = 9\text{MeV}$
——Han; ----Watson-Migdal

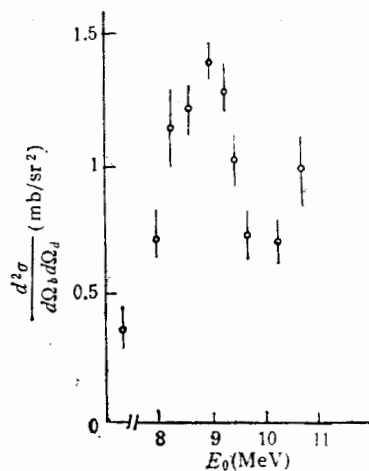


图4 共线条件下取 $E_α \leq 20\text{keV}$ 能区 ${}^6\text{Li}(d, dd)\alpha$ 反应的激发函数

图5表示链态出射氦在质心系中的角分布, 由此得到该共线态的能级信息. 图中数据误差为统计误差. 我们应用超球谐函数描述衰变为三粒子的共振态理论拟合实验结果, 得到角分布的计算值, 在图上用实线表示. 由理论计算的拟合结果得到 ${}^8\text{Be}$ 链式态的 J^π 的可能值是 2^+ 、 3^+ 、 4^+ .

共线事件的数据处理和分析是这样进行的, 实验测得的共线几何条件下的两维 d-d 符合能谱, 按文献[8]的方法扣去偶然符合本底, 它约占 10%. 两维符合谱在三体运动学轨迹附近展宽, 将它并道, 投影在轨迹上, 作坐标变换处理, 得到在 E_b 轴的投影能谱.

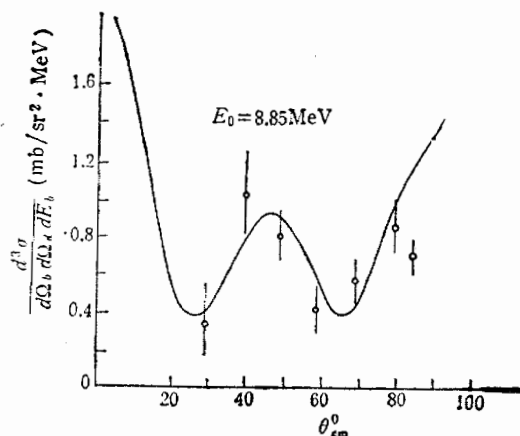


图5 链态出射氦粒子在质心系中的角分布. 实验值仅表示统计误差. 理论计算值是用超球谐函数的共振态理论算得

○ Experimental value — Theoretical curve

如上所述, 三体反应中已知的强效应有末态相互作用 (FSI) 和准自由散射 (QFS), 实验上必须把它们与共线事件区分开. 我们进行三体运动学计算, 从中挑选适当的角度对, 以使我们感兴趣的共线增强区域尽量避开 FSI 和 QFS 效应的干扰. 在 ${}^6\text{Li}(d, dd)\alpha$ 反应中必须考虑 d-d 和 d- α 两种 FSI. 在 9MeV 入射氦的反应中, $E_α = 0$, d-d 的相对能量是 5.27MeV, 它相应于 ${}^4\text{He}$ 的激发能 29.12MeV, 而 ${}^4\text{He}$ 的能级与其最靠近的

是 31MeV, 它离共线区甚远. 所以此能级对共线事件的影响可忽略. d- α 的 FSI, ${}^6\text{Li}$ 的 2.18MeV(3^+) 和 4.31MeV(2^+) 态必须考虑, 它们在运动学轨迹上的位置都远离共线区. 2.18MeV 态是窄能级, 它的影响可忽略. 4.31MeV 是宽能级, 它的尾部可影响到共线区, 应从共线事件中扣除.

对于 QFS, 在 $E_\alpha = 0$ 处, ${}^6\text{Li}$ 中 d- α 集团的相对动量为 92MeV/c. 因此 QFS 在共线区的影响是很弱的.

我们对 FSI 和 QFS 作了理论计算. 采用韩文述等人^[9] 和 Watson-Migdal^[10-12] 两种方法. 韩文述等从紧致核三体 T 矩阵出发给出三体反应截面公式. 在计算 QFS 项用平面波冲量近似计算, FSI 项用单能级公式, 他们拟合了 Miljanic^[13] 的 ${}^6\text{Li}(d, dd)\alpha$ 反应实验数据得到一组参数, 我们应用该公式及他们的参数, 考虑到能量分辨率, 对公式作了修改.

用 Watson-Migdal 方法计算了 ${}^6\text{Li}$ 核 4.31MeV 态的 FSI 贡献. 同样对公式作了能量分辨率影响的修正.

$$\left(\frac{d_\alpha^3}{dQ_1 dQ_2 dE_1}\right)_{2^+} = C \int_0^\infty K \frac{A_z}{\rho} \sin^2(\delta_z^J + \phi_z) \eta(E_1' - E_1) dE_1, \quad (9)$$

式中 C 是拟合实验数据的归一化因子. K 是相空间因子. $A_z^2 = F_z^2 + G_z^2$, F, G 分别为正则和非正则库仑波函数, $\phi_z = \text{tg}^{-1}(F_z/G_z)$, $\rho = kR$, k 是波数, R 是相互作用半径, 取 3.5fm; δ_z^J 是 d- α 系统自旋为 J 的 D 波相移. 数据引自文献[14]. $\eta(E_1' - E_1)$ 是能量分辨函数. 对于 2.18MeV 态的窄能级, 能量分辨函数可以由拟合此态的 FSI 峰数据得到. 由计算结果得到 FSI 和 QFS 总贡献理论曲线. 在共线区域, 所得的实验数据扣除 FSI 和 QFS 的总贡献, 即可得到纯共线事件.

此事件是相干效应的可能性是排除了的. FSI 中两个 ${}^6\text{Li}$ 激发态 3^+ 和 2^+ 可能相干, 但由于 3^+ 是窄能级, 且远离共线区, 即使相干, 也不会影响到共线区. 至于 FSI 和 QFS 如存在相干, 最大可能为振幅的两倍. FSI 和 QFS 在共线区是弱效应, 即使 FSI 和 QFS 之和的两倍也低于共线增强的贡献. 两者在非共线条件下 FSI 和 QFS 之和与实验结果符合很好; 而且共线增强随入射能量而变化, 若存在 FSI 和 QFS 的相干, 它不应随入射能量而明显变化. 这些说明共线增强不是由相干效应引起的.

四、结 论

(1) 在 ${}^6\text{Li}(d, dd)\alpha$ 反应的共线几何条件下, 当入射能量为 9MeV 左右, 有微分截面的增强. 这个增强不能用已知的 FSI 和 QFS 贡献解释.

(2) 这个共线微分截面的增强随入射能量改变而变化. 峰位在 9MeV 附近.

(3) 这个共线微分截面的增强与韩文述等人的理论预言相符合, 为 ${}^6\text{Be}d-\alpha-d$ 链式共振态.

(4) 这个链式共振态, 是由三个核集团 d- α -d 组成的准分子态. 此态是 ${}^6\text{Be}$ 的 29.03MeV 激发态, 其能级宽度约 1.5MeV. 对角分布作理论分析, 得到 J^π 的可能值是 $2^+, 3^+, 4^+$.

感谢回旋加速器研究室的运行人员和多道组的同志们的大力协作,并感谢韩文述同志在理论计算中所给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] H.Heriuchi et al., *Suppl. Prog. Thero. Phys.*, **52**(1972), 89.
- [2] J.N.Scheurer et al., *Nucl. Phys.*, **A319** (1979), 270.
- [3] K.Kator et al., *Phys. Lett.*, **90B** (1980), 233.
- [4] 韩文述等,高能物理与核物理,4卷,1(1980),121.
- [5] 孙祖训等,高能物理与核物理,3卷,6(1979),749.
- [6] 袁容芳等,原子核物理,3卷,2(1981),155.
- [7] R.Risler 等,*Nucl. Phys.*, **A286**(1977), 115.
- [8] 孙汉城等,原子核物理,卷1,1(1979),1.
- [9] 韩文述等,原子核物理,卷2,2(1980),123.
- [10] J. L. Beveridge et al., *Can J. Phys.*, **49**(1971), 1374.
- [11] K.Watson et al., *Phys. Rev.*, **88**(1952), 1163.
- [12] A.B.Migdal et al., *ЖЭТФ*, **28**(1955),3.
- [13] Milyanic et al., *Nucl. Phys.*, **A290**(1977), 77.
- [14] F. Dol Aguila et al., *IL Nuovo Cimento*, **59A**(1980), 283.
- [15] 韩文述等,原子核物理,卷5,2(1983),105.

STUDY OF QUASI-MOLECULE RESONANCE OF CHAIN CONFIGURATION INDUCED BY ${}^6\text{Li}(d,dd) \alpha$ REACTION AT LOW ENERGY

YAO JINZHANG LU HUIJUN DAI NENGXIONG QI BUJIA

SI GUOJIAN YAN CHEN SUN HANCHENG

(Institute of Atomic Energy, China, Beijing)

ABSTRACT

${}^6\text{Li}(d, dd) \alpha$ reaction induced by 7.3—10.6 MeV deuterons was studied under collinear condition. An enhancement in differential cross section beyond the well known QFS and FSI contribution was observed at incident energy of 9 MeV. It is the state of quasi-molecule resonance of chain configuration.