

$^{56,57}\text{Fe}, ^{59}\text{Co}(\alpha, d)$ 核反应及拉长态性质的实验研究*

袁 坚 卢 明 陆道如 陈 泉 孙祖训

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

1994-12-13 收稿

摘 要

利用 $\Delta E-E$ 望远镜及 Q3D 磁谱仪, 在 HI-13 串列加速器提供的 35MeV α 离子束轰击下, 测量 $^{56,57}\text{Fe}, ^{59}\text{Co}(\alpha, d)^{58,59}\text{Co}, ^{61}\text{Ni}$ 核反应的精细能谱和微分截面角分布, 微观 DWBA 近似用来分析实验数据. 在 $^{56}\text{Fe}(\alpha, d)^{58}\text{Co}$ 核反应观测的 9 个强激发能级中, 重点分析和讨论了 6.79MeV 和 6.4MeV 能级的性质, 观测到迄今所能看到的最高拉长组态 ($1g_{9/2}, 1g_{9/2}$), 和首次确认了 6.4MeV 能级 $J^\pi = 1^+$. 在 $^{57}\text{Fe}, ^{59}\text{Co}(\alpha, d)$ 核反应测量中, 未看到孤立强激发能级, 它意味着强度分散在许多能级上, 以致看不到孤立拉长态存在的实验证据.

关键词 拉长态, 微分截面角分布, 微观 DWBA.

1 引 言

尽管原子核壳模型是核结构理论中相当成功的模型, 但在实际计算中组态空间的大小确定仍然是一个极棘手的问题. 即使巨型计算机提供了计算的可行性, 鉴于对核集体行为的特征态或对巨大波函数分量的简化和规律的理解都存在实际困难. 因而核结构物理的使命之一就是截断壳模型空间或者构成另一图象——强调特征自由度, 来尝试简化问题. 原子核拉长态是纯壳模型组态, 其组态波函数可以用来为多粒子壳模型计算定义组态空间的大小和确定相应的剩余相互作用, 因而为核结构研究提供强有力的检验机会, 是研究多核子壳模型、核内核子有效相互作用、中能核反应机制、弱相互作用规律等问题极为重要和有效的手段^[1-3].

在 (α, p) 三核子转移反应微观理论分析中, 至今悬而未决的问题是计算的绝对截面值通常比实验截面小二至三个数量级. 由于 α 光学势存在 discrete ambiguities, 又对束缚态缺乏了解, 解决这一问题的途径显然不应只从光学势的某些特征上去找原因, 计算中使用的某些假设, 特别是微观形状因子的处理可能是问题的结症. 因而, 经实验检验的拉长态波函数将为探讨和解决包括核激发态在内的三核子转移反应绝对截面归一化问

* 国家自然科学基金资助.

题提供重要线索和依据.

(p, π), (e, e')和多核子转移反应是目前探索原子核拉长态的主要实验手段^[3-6]. 在(α, d)反应中, 当偶-偶核芯外有一个质子和一个中子分别转移到角动量为 j_p 和 j_n 的壳模型轨道上时, 通过角动量顺排而耦合成具有最大总角动量 J_{\max} 的组态(拉长态)有明显增强的反应截面. 例如在 ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O 靶核上的(α, d)反应中存在 ^{14}N (9.0MeV 4^+), ^{16}O (14.37MeV 4^+ , 14.81MeV 6^+ , 16.24MeV 5^+)和 ^{18}F (1.119MeV 5^+)优惠合成能级. 这些能级形成来自 p - n 对被俘获. 作为一个在 $d_{5/2}$ 壳上的氘, 相当于 $(d_{5/2})_2^+$ 组态. 对于奇 A 核芯情况 $(j_p j_n)J_{\max}$ 又可以与核芯的 J_{core} 耦合得到自旋更高的拉长组态 $[J_{\text{core}} + (j_p j_n)J_{\max}]J_f$, 它是拉长态在奇 A 核上的表现.

实验上观测到的纯壳模型组态并不多, 主要是在一些较轻的核上找到. 在中等重核上, (α, t)单核子转移反应实验表明, $1g_{9/2}$ 质子俘获占优势, 因而在中等重核上寻找 $(1g_{9/2})_2^+$ 拉长组态的存在成为人们极感兴趣的课题.

本工作试图通过 $^{56,57}\text{Fe}$, ^{59}Co (α, d)反应实验研究探讨强激发能级的性质, 寻找迄今尚未确认的 $(1g_{9/2})_2^+$ 拉长组态以及拉长态在远离双幻数奇 A 核 ^{59}Co 、 ^{61}Ni 上的表现.

2 实验方法

利用我院 HI-13 串列加速器提供的 35MeV α 离子束分别轰击 ^{56}Fe , ^{57}Fe , ^{59}Co 靶核, 测量了 ^{56}Fe , ^{57}Fe , ^{59}Co (α, d) $^{58,59}\text{Co}$, ^{61}Ni 反应能谱和微分截面. 两轮实验的靶子厚度分别为 $97\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 和 $540\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 前者由真空蒸发制备在 $10\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的碳膜上, 后者由金属滚压方式制备成自撑靶. ^{56}Fe , ^{57}Fe 靶为浓缩同位素靶, 其丰度分别为 99% 和 97%, ^{59}Co 为天然材料, 丰度为 100%. 实验结果表明, 滚压靶没观测到钨杂质干扰. 而高温制备的 Fe 靶, Co 靶均看到钨靶材料蒸发在靶上的杂质.

核反应产物测量分两步进行. 第一步是利用 ΔE - E 带电粒子望远镜系统测量反应产物全能谱. 该系统由 $100\mu\text{m}$ 穿透面垒型 Si (Au) ΔE 探测器和紧靠其后的, 厚度为 3mm 的 Si(Li) E 探测器组成, 从 ΔE - E 望远镜接收的事例信号经前置电荷灵敏放大器送至 NIM 电子学放大、成形、甄别再送至基于 VAX11/780 计算机在线数据获取系统, 经软件开窗处理, 实现带电粒子鉴别. 在线得到不同粒子类型的全能谱, 直接观测核反应剩余核强激发能级跃迁, 寻找感兴趣的拉长态候选者, 如图 1(a) $^{56}\text{Fe}(\alpha, d)^{58}\text{Co}$ 核反应能谱所示, 在激发能直至 10MeV 范围内, 6.79MeV、6.4MeV、3.75MeV、3.4MeV、2.7MeV、1.075MeV、0.374MeV 和 0.02MeV 9 个强激发能级被确认. 由于该望远镜系统的能量分辨率在 1% 左右, 一些激发态的鉴别仍有困难, 如图 1(a) 6.4MeV 峰左侧有 $^{16}\text{O}(\alpha, d)^{18}\text{F}$ 基态的干扰, 本底谱也较大. Q3D 磁谱仪尽管一个 Bite 所测量的能谱区间有限, 但其能量分辨率可以很高 ($<0.1\%$), 因而作为核反应产物测量的第二步, 就是对上述方法挑选出来的候选者再由 Q3D 磁谱仪系统进行动量分析. 实现精细能谱学测量. Q3D 磁谱仪装配 0.5m 长焦面轻离子探测器系统, 它由单丝气体正比室组成的焦面位置灵敏探测器以及紧跟其后的 ΔE 气体探测器和塑料闪烁体 E 探测器组成^[7]. 事例信号同样由 VAX11/780 在线数据获取系统记录处理. 图 1(b) 是 Q3D 磁谱仪按

$^{56}\text{Fe}(\alpha, d)^{58}\text{Co}$ 核反应 $E_\alpha = 6.79\text{MeV}$ 置场得到的 bite 能谱, 不仅本底比 $\Delta E-E$ 望远镜小得多, 能谱分辨也明显改善, 6.79MeV 与 6.4MeV 分辨很好. 图中的最强峰是 $^{16}\text{O}(\alpha, d)^{18}\text{F}$ 核反应第一激发态, 是靶中氧杂质的干扰峰. 其他作者已确认它是 ^{18}F 的拉长态, 本工作利用它来刻度整个系统的能量绝对值. 氦粒子的能量分辨为 29keV . 微分截面数据相对误差 $< 15\%$, 主要来自统计误差、重复性误差和扣谱误差的贡献.

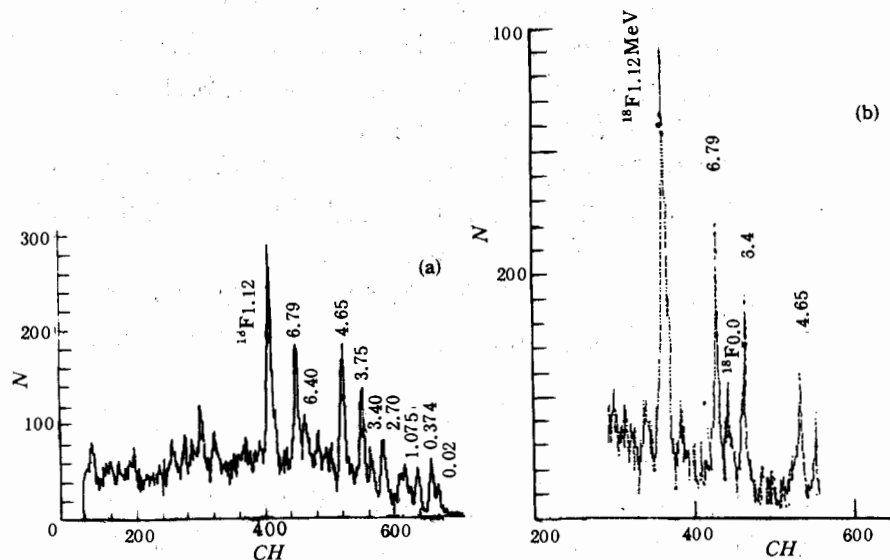


图1 $^{56}\text{Fe}(\alpha, d)^{58}\text{Co}$ 核反应能谱图

(a) $\Delta E-E$ 望远镜测量的全能谱. (b) Q3D 磁谱仪测量的能谱, 其中 $^{16}\text{O}(\alpha, d)^{18}\text{F}$ 基态和 1.12MeV 用于能谱能量绝对刻度.

3 实验结果和讨论

3.1 $^{56}\text{Fe}(\alpha, d)^{58}\text{Co}$ 核反应

在 $\theta_L = 15^\circ - 75^\circ$, 每隔 5° 或 10° 测量了 $^{56}\text{Fe}(\alpha, d)^{58}\text{Co}$ 强激发态能谱和角分布. 图2中带误差棒的数据点是 ^{58}Co 核激发能直至 10MeV 区间内9个强激发能级的微分截面. 除了 6.4MeV 能级微分截面随角度变化较大外, 其它各能级的角分布形状起伏不大. 在 35MeV α 离子束条件下, 直接削裂机制会有重要贡献, 微观扭曲波玻恩近似用来分析实验数据. 计算中设想靶核芯组态在反应中不改变, 光学势参数取自文献[8], 由于 ^{58}Co 的 0.024MeV 和 0.374MeV 能级已由其他作者^[9] 确认为 5^+ 态, 并且由转移角动量 $L=4$ 的微分截面所拟合, 计算时针对我们的 α 离子能量, 对 α 光学势作了小范围调整, 使之更好拟合这两个能级的微分截面实验值, 然后保持这些参数不变, 去拟合其它强激发能级的微分截面实验角分布, 图2中的曲线就是以上微观 DWBA 计算的结果.

(α, d) 核反应是角动量失配反应, 优惠于高角动量态激发, 这一点由我们的微观

DWBA 计算所重现,除了 6.4MeV 能级外,8 个能级都能较好地拟合,显示出其它的复杂过程(诸如核芯激发、多次转移和复合核过程)没有重要贡献,在数据分析中可以不予考虑.

在微观 DWBA 近似分析中,假定转移的质子、中子对处于 $(1g_{9/2}, 1g_{9/2})$ 组态,只有纯 $L=8$ 的计算角分布能与 6.79MeV 能级实验角分布拟合得较好(如图 2 右下方曲线所示),最大计算截面值对应于该能级角动量为 9^+ 的设置.为了比较起见,相应于 $L=6$ 和 $L=7$ 的计算角分布曲线也画在 6.79MeV 能级实验角分布数据点的上方.显然,角分布形状要么与实验角分布完全反相,要么差约 $\pi/2$ 相位,都不能解释实验角分布的特征.

从图 2 中可见,其他几个强激发能级: 4.65MeV、3.75MeV、3.4MeV、2.7MeV 和 1.075MeV 的实验角分布也能由 $L=6$, $L=7$, $L=4$ 的计算值所拟合,与其它实验结果相符,本文不详细讨论.

值得注意的是 6.4MeV 能级的实验角分布有着明显不同于其它几个强激发态的实验角分布,在微观 DWBA 计算中,尝试所有较大转移角动量的计算都不能与实验角分布拟合.我们还考虑了多个角动量转移的不相干求和的贡献,计算结果也与实验数据相差甚多.然而转移角动量 $L=0$ 的计算意外地与实验角分布拟合较好,计算中分别设置转移的 $p-n$ 对处于 $(1g_{9/2}, 1g_{9/2})$, $L=0$; $(1f_{5/2}, 1f_{5/2})$, $L=0$ 和 $(1p_{3/2}, 1p_{1/2})$, $L=0$, 而处于 $(1p_{3/2}, 1p_{1/2})L=0$ 的 $p-n$ 对,相应于 $p-n$ 对自旋耦合成氦的组态有最大的计算截面,首次确认 6.4MeV 能级的 $J^\pi = 1^+$. 在如此高激发能上观测到 $p-n$ 对转移角动量 $L=0$ 的强激发能级,是拉长态的一个例外情况,在 $s-d$ 壳轻核上(α, d)核反应也未见到这种情况.为此,我们再一次审查实验数据,由于该能级不仅由 $\Delta E-E$ 望远镜所观测,也由 Q3D 磁谱仪测量再次重复,如图 2 所示,数据误差相对较小,数据是可信的.因而,中等重核上双核子转移反应仍然是一个值得进一步研究的课题,以上不同于拉长态特征的反常行为还需更多的实验来揭示和支持,多粒子壳模型的计算将有助于这一现象的理解.

3.2 $^{57}\text{Fe}(\alpha, d)^{59}\text{Co}$, $^{59}\text{Co}(\alpha, d)^{61}\text{Ni}$ 核反应

对于奇 A 核 ^{57}Fe 和 ^{59}Co , 靶核自旋 J_{core} 不为零,如引言所提及,相应于 $[J_{\text{core}} + (j_n)J_{\text{max}}]J_f$ 组态可望在(α, d)核反应中强激发.为了从实验上寻找 ^{59}Co , ^{61}Ni 核上角动

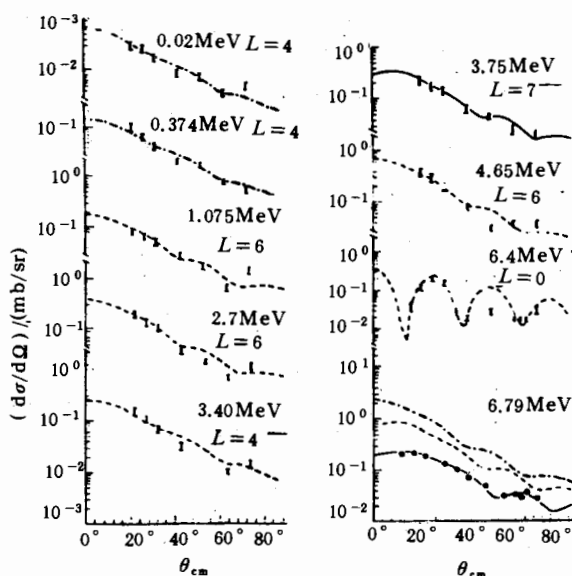


图 2 $^{56}\text{Fe}(\alpha, d)^{58}\text{Co}$ 核反应 9 个强激发能级的实验角分布

曲线是微观 DWBA 分析结果,在 6.79MeV 能级上:——是纯 $L=8$ 的计算角分布曲线;---是 $L=7$ 的计算角分布曲线;— · —是 $L=6$ 的计算角分布曲线.

量为 $17/2 < J < 25/2$ 拉长组态, 测量了 $^{57}\text{Fe}(\alpha, d)^{59}\text{Co}$ 和 $^{59}\text{Co}(\alpha, d)^{61}\text{Ni}$ 核反应能谱和角分布, 利角 Q3D 谱仪在不同 bite 动量区间逐一测量直至 10MeV 激发能的出射氘谱, 实验上没有观测到明显的强激发孤立峰. 这意味着组态强度并未集中在某一孤立态上, 而是由许多态所共享, 因而观测不到更高角动量耦合的拉长态. 像 ^{57}Fe , ^{59}Co 这类奇 A 核, 与 ^{39}K 奇 A 核不同, ($^{39}\text{K}(\alpha, d)$ 反应观测到拉长态存在), 远离双幻数核, 组态混合或集体振动模式的耦合可能有重要贡献.

4 小 结

通过 $^{56}\text{Fe}(\alpha, d)^{58}\text{Co}$ 核反应能谱和角分布测量以及微观 DWBA 近似分析, 确认 ^{58}Co 核 6.79MeV 能级的 $J^\pi = 9^+$. 观测到迄今能看到的最高拉长组态 ($1g_{9/2}$, $1g_{9/2}$), 为大组态空间壳模型计算提供纯壳模型波函数, 以便定义组态空间大小.

强激发能级 6.4MeV 的实验角分布却只能由 $L=0$ 的理论角分布所拟合, 它是拉长态的一个例外情况, 期望有更多实验证据支持. 本工作首次确认其 $J^\pi = 1^+$.

奇 A 核 ^{57}Fe , $^{59}\text{Co}(\alpha, d)$ 核反应未看到更高角动量耦合的拉长态存在的证据, 像 ^{59}Co , ^{61}Ni 这类远离双幻数奇 A 核, 组态混合或集体振动模式的耦合可能有重要贡献.

参 考 文 献

- [1] Yasue M, Tanaka M H, Hasegawa T *et al.*, *Phys. Rev.*, **C40** (1989) 1933.
- [2] Nann H, Jacobs W W, Cravens G *et al.*, *Phys. Rev.*, **C37** (1988) 85.
- [3] Nann H, Jacobs W W, Backer A D *et al.*, *Phys. Rev.*, **C30** (1984) 1509; *Nucl. Phys.*, **A406** (1983) 81.
- [4] Hamill J J, Peterson R J, Yasue M *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A408** (1983) 21.
- [5] Okada K, Kawa J, Yamagata T *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A349** (1980) 125.
- [6] Lu C C, Zisman M S, Harvey B G *et al.*, *Phys. Rev.*, **186** (1969) 1084.
- [7] 袁坚, 万裕德等, *核技术*, **18** (1995) 170.
- [8] Perey C M, Perey F G, *Atomic Data and Nucl. Data Tables*, **17** (1976) 84.
- [9] Peker L K, *Nuclear Data Sheets*, **61** (1990) 189.

Study of Stretched States Populated by $^{56,57}\text{Fe}$, $^{59}\text{Co}(\alpha, d)$ $^{58,59}\text{Co}$, ^{61}Ni Reactions

Yuan Jian Lu Ming Lu Daoru Chen Quan Sun Zuxun

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Received 13 December 1994

Abstract

Spectra and angular distributions of the (α, d) reactions on ^{56}Fe , ^{57}Fe and ^{59}Co have been measured with the $\Delta E-E$ telescopic systems and Q3D magnetic spectrometer at α bombarding energy of 35MeV from the HI-13 Tandem, and analyzed with microscopic DWBA. Among the angular distributions of nine levels strongly populated by $^{56}\text{Fe}(\alpha, d)^{58}\text{Co}$ reaction, the experimental data of 6.79MeV and 6.4MeV levels in ^{58}Co were analyzed and discussed. The highest stretched configuration ($1g_{9/2}, 1g_{9/2}$)₉ was found and $J^\pi = 1^+$ of 6.4MeV level was determined for the first time. No isolated stretched states were observed by ^{57}Fe $^{59}\text{Co}(\alpha, d)$ reactions. This probably means that the strength of the stretched configuration spreads on a number of states.

Key words stretched configuration, angular distribution, microscopic DWBA analysis.