

${}^6\text{He}$ 中 $t+t$ 结构的实验研究*

张高龙¹ 叶沿林^{1;1)} 江栋兴¹ 郑涛¹ 王全进¹ 李智焕¹ 李湘庆¹ 吴翠娥¹
陈志强¹ 胡青元¹ 庞丹阳¹ 王佳¹ A. Ozawa² Y. Yamaguchi²
R. Kanungo² D. Fang² I. Tanihata²

1 (北京大学物理学院技术物理系和教育部重离子物理重点实验室 北京 100871)

2 (RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan)

摘要 在 25MeV/u ${}^6\text{He}$ 轰击 ${}^9\text{Be}$ 靶的反应中, 用探测器望远镜测得氦碎片, 得到了5个角度的能谱, 经过仔细的分析取得了高能直接破碎成分的角分布. 利用 Serber 模型进行了破碎反应的理论计算, 证实了实验中高能成分的 t 来自于 ${}^6\text{He}$ 的直接破碎反应. 利用 Fermi 破碎模型计算了 ${}^6\text{He}$ 中各破碎反应道基于相空间的百分比产额, 进而估算出 ${}^6\text{He}$ 初态中 $t+t$ 结构的概率约占 $1/3$, 而 ${}^4\text{He}$ 核心加价中子的组态约占 $2/3$.

关键词 丰中子核 破裂反应 角分布 Serber 模型 Fermi 模型

1 引言

自从20世纪80年代中期 Tanihata 等人发现 ${}^{11}\text{Li}$ 有非常大的核半径, 预言了中子晕核的存在^[1]以来, 人们对晕现象从实验和理论上进行了大量的研究^[2-4]. 目前认为, ${}^6\text{He}$ 是最轻的中子晕核^[5-7]. 但很多理论计算指出, ${}^6\text{He}$ 基态不仅包括典型的双中子晕结构, 也含有其他结构, 比如 $t+t$ 结构. 增加 $t+t$ 结构可以使计算的束缚能更接近实验值^[8].

随着短寿命放射性核束的流强和束流品质不断提高, 利用核反应研究核结构成为新的热点. 例如库仑激发、弹性散射、破碎反应、转移反应和 β 延迟粒子发射等, 都可以用于从不同侧面反映非稳定核的结构和反应机制. 近几年, 利用直接核反应方法对 ${}^6\text{He}$ 的结构进行了大量研究, 但对于 ${}^6\text{He}$ 中 $t+t$ 结构的概率仍然没有得出清楚的结论^[6, 9-11].

本文主要描述了 25MeV/u ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ 反应中前向几个角度观察到高能成分的氦, 通过仔细地分析, 发现它们来自于 ${}^6\text{He}$ 的破碎反应, 并且得到了它的角分布. 利用 Serber 模型进行了破裂反应的理论计算, 得

到氦的角分布趋势和实验结果基本一致, 说明实验中探测到的高能部分的氦主要来自于 ${}^6\text{He}$ 的直接破碎反应. 利用 Fermi 破碎模型计算了各破碎反应道按照相空间百分比产额, 和实验的结果进行比较, 进一步定量分析了 ${}^6\text{He}$ 基态中的 $t+t$ 结构.

2 实验装置和入射束流

实验是在日本理化学研究所 (RIKEN) 的 RIPS 上做的, 实验的主要目的是测量弹性散射和转移反应^[12], 但也同时测量到破碎产物. 图1给出了实验使用的装置示意图. 70MeV/u 的 ${}^{13}\text{C}$ 轰击初级 8mm 厚的 Be 靶, 通过弹核碎裂过程产生次级束 ${}^6\text{He}$. 通过电磁场输运和能量损失方法分离出约 25MeV/u 的 ${}^6\text{He}$, 纯度好于 90% . 粒子鉴别使用 $B\rho-\Delta E\text{-TOF}$ 方法. F2 和 F3 的两个塑料闪烁体计数器 (0.5mm 和 0.3mm 厚的闪烁薄膜) 用于测量飞行时间 (TOF), 塑料闪烁体计数器的阳极信号提供能损 (ΔE) 测量. 粒子鉴别如图2所示, 通过 $\Delta E\text{-TOF}$ 分析 ${}^6\text{He}$ 能够被清楚地鉴别出来. 次级 Be 靶的厚度是 $100\mu\text{m}$, 倾斜于束流方向 45° 放置, 靶的

2005-01-28 收稿

* 国家自然科学基金和国家重点基础研究发展规划项目 (G2000077403) 资助

1) E-mail: yeyl@pku.edu.cn

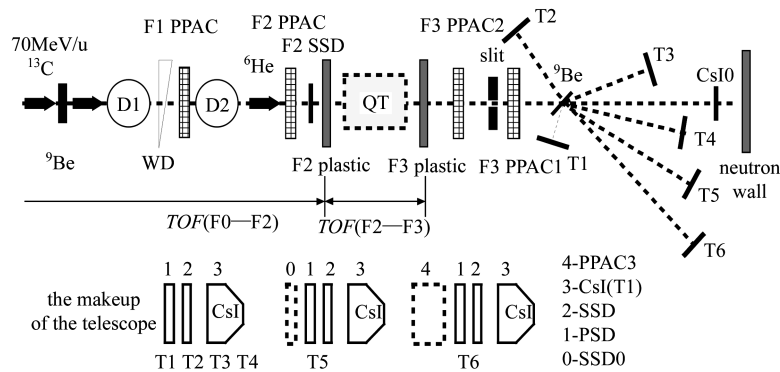


图 1 实验装置示意图

有效面积是 $30\text{mm} \times 30\text{mm}$. 两个平行板雪崩室 (PPAC1 和 PPAC2) 放在次级靶的前面用于监测束流强度. 两个 PPAC 是延迟线类型的 (DL), 工作气体是八氟丙烷. 为了得到较高的探测效率, 工作气体的压强是 4000Pa , 高压约 1650V . 一个 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的狭缝放在 F3-PPAC1 的前面用于限制束斑的大小. 反应后的出射粒子通过 6 套望远镜探测, 每套望远镜由一个位置灵敏硅探测器 (Position Sensitive Detector, 简称 PSD)、大面积硅探测器 (Square Semiconductor Detector, 简称 SSD) 和 CsI (T1) 闪烁体探测器组成. T3, T4, T5 和 T6 是 4 套位于前向角度的探测器, 实验室角度分别为 20° , 11.58° , 30° 和 45° , 用 ^{241}Am α 源和精密脉冲发生器对探测器望远镜进行了能量标定.

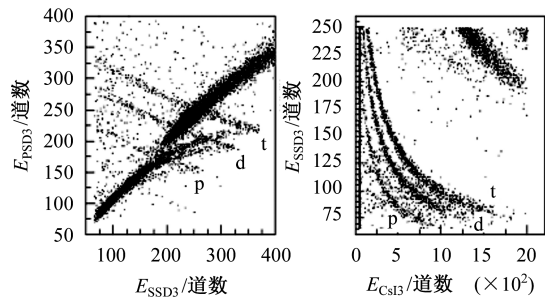


图 3 T3(20°)望远镜中 t 的二维粒子散点图

图 4 给出了 T4 望远镜中得到的氦的能谱, 氦的总能量由 3 个探测器能量之和得到, 即 $E = E_{\text{PSD4}} + E_{\text{SSD4}} + E_{\text{CsI4}}$. 可以看到高能的氦在单核子能量近似与入射粒子单核子能量相同的地方成峰, 在其他探测器中随着角度的增大峰逐渐向低能方向移动, 这和直接

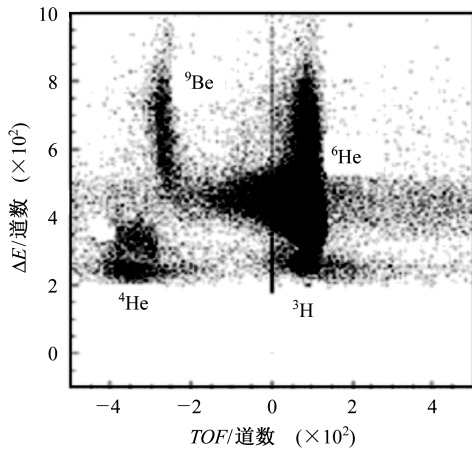


图 2 束流中粒子的鉴别图

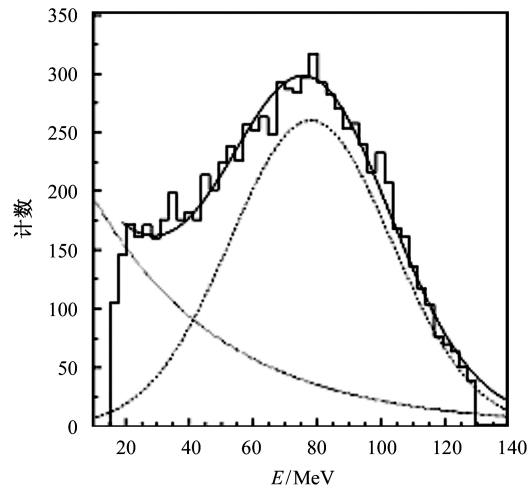


图 4 T4(11.58°)望远镜中 t 的能谱

3 实验数据处理和理论计算

图 3 给出了由 T3 望远镜得到的出射产物的二维粒子散点图, 从中可以很清楚地看到氦的产物, 而且氦的分布和其他同位素能够很好地分辨. 其他望远镜的情况和 T3 的类似.

破碎反应的机制相一致. 在图 5 中, 较大角度的 T6 望远镜探测器中得到的氦的能谱中已经看不到高能峰的存在, 而只有一个指数下降成分, 对应于蒸发和其他本底过程. 直接破碎反应的氦的能谱用高斯函数来描述, 其他非直接反应过程产生的氦粒子构成平滑的

连续谱, 连续谱随能量的变化可近似地用指数函数来描述^[13]. 对各个角度的氦的能谱按指数衰减加高斯函数进行拟合, 这样就可以得到每个角度的直接破碎氦的数目. 由于PSD可以对出射粒子进行定位, 因此T3和T4望远镜的PSD可以分成两部分, 即可以看成两个角度的探测器. 对每个探测器的中心角和立体角采取Monte Carlo模拟得到. 入射粒子数目由PPAC2提供^[12]. 由此可得到实验微分截面的角分布如图6中黑点所示. 可以看到随着角度的增大截面逐渐减小, 这与破碎反应的机制相一致.

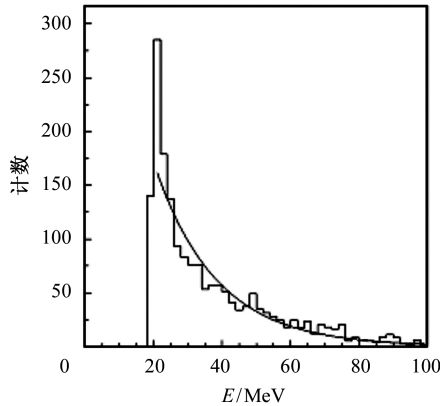


图5 T6(45°)望远镜中t的能谱

数据处理中, 我们仔细检查了束流中少量的杂质氦可能造成对实验结果的影响. 如图2所示, 束流中氦成分可以从 ΔE -TOF分析中得到, 大约占3%左右. 取出这部分入射的氦, 保持上述对出射粒子的分析, 可以得到从束流散射来的氦的贡献, 发现比来自 ${}^6\text{He}$ 的贡献小得多. 实际处理时, 通过 ΔE -TOF选择, 束流中3%的氦也已经基本上去掉, 散射的贡献更加可以忽略. 因此可以准确地认为图6中的截面确实为 ${}^6\text{He}$ 破碎为氦的截面.

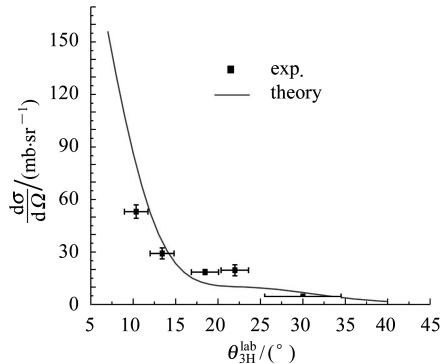


图6 25MeV/u ${}^6\text{He}+{}^9\text{Be}$ 反应t的微分截面

对弹核破裂, 可以利用Serber^[14-16]模型来计算. 这是一个计算直接破裂的模型, 适用于入射能量比较高需要考虑衍射效应的过程. 对于低束缚的核, 破裂

反应有两个主要的过程: 衍射破裂和削裂过程. 衍射过程中弹核在靶核的作用下产生弹性破裂, 弹核的两个集团飞出; 削裂过程中弹核的一个集团与靶核发生很强的非弹性碰撞, 另一个集团与靶核作用后飞出. 计算的结果见图6中的曲线所示, 可以看到计算的结果趋势和实验的基本一致, 说明反应中探测到的氦主要来自 ${}^6\text{He}$ 的直接破碎反应. 同时还计算了 ${}^6\text{He}$ 破碎为 ${}^4\text{He}$ 的截面并与相应的实验结果做了比较^[17], 发现破碎为 ${}^4\text{He}$ 反应道的实验截面大约为总破碎截面的92%^[18], 破碎为t反应道的实验截面大约为总破碎截面的8%, 后者与前者之比为0.087.

进一步采用Fermi破碎模型^[19-21]来计算衰变相空间的贡献. 由于 ${}^6\text{He}$ 破碎成t+t的阈能为12.3MeV, 在Fermi模型中, 按照通常的做法, 我们选用的激发能范围比破碎阈能高1MeV, 即为13.3MeV. 再提高激发能范围对结果没有实质影响. 由此计算得到的 ${}^6\text{He}$ 各破碎反应道中 $(t+t)/({}^4\text{He}+2n)$ 和 $(t+t)/({}^5\text{He}+n)$ 的比率为7.9和0.18, 由于 ${}^5\text{He}$ 是个共振态, 它很快就会发出一个中子衰变到 ${}^4\text{He}$ 的状态, 在实际中测量到的应该全是 ${}^4\text{He}$ 的产额. 因此利用Fermi破碎模型得到 $t+t/{}^4\text{He}$ 的比率为0.176, 即破碎百分比产额分别为15%和85%. 需要指出的是, Fermi模型只是考虑末态相空间的贡献, 并不涉及初态中各种结构组态的概率, 或者说认为各种组态的概率相同. 因此, 将Fermi模型计算的结果与实验结果(或直接拟合实验的计算结果)相比较, 应当得出初态中各种组态的相对概率. 对于本工作而言, 如上所述, 实验得到的 $t+t/{}^4\text{He}$ 截面之比为0.087, 而Fermi模型计算的为0.176. 由此可以推导出初态中t+t组态的概率约是 ${}^4\text{He}$ 为核心的组态概率的0.49倍, 即初态中t+t结构约占1/3, ${}^4\text{He}$ 核心加价中子的组态约占2/3.

4 总结

本文介绍了在25MeV/u的 ${}^6\text{He}$ 轰击 ${}^9\text{Be}$ 靶上的反应中, 用探测器望远镜测到氦碎片, 得到了5个角度的能谱. 经过分析提取出高能量的直接破碎成分, 得到它的角分布. 利用Serber模型进行了破碎反应的理论计算, 证实了实验中高能成分的t来自于 ${}^6\text{He}$ 的直接破碎过程. 利用Fermi破碎模型计算了 ${}^6\text{He}$ 中各破碎反应道基于相空间的百分比产额, 进而估算出 ${}^6\text{He}$ 初态中t+t结构的概率约占1/3, 而 ${}^4\text{He}$ 核心加价中子的组态约占2/3.

作者感谢日本 RIKEN 实验组的员工们为本实验提供了很好的实验束流和部分实验设备, 同时感谢伯明翰大学物理和天文学院核物理组的 N. I. Ashood

和 M. Freer 博士为我们提供了 Fermi 模型计算的帮助, 同时感谢其他几位理论和实验家给我们提供的指导.

参考文献(References)

- 1 Tanihata I et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676
- 2 Zinser M et al. Nucl. Phys., 1997, **A619**: 151
- 3 Warner R E et al. Phys. Rev., 2000, **C62**: 024608
- 4 Esbensen H. Phys. Rev., 1991, **C44**: 440
- 5 Zhukov M V et al. Phys. Rep., 1993, **231**: 151
- 6 Ter-Akopian G M et al. Phys. Lett., 1998, **B426**: 251
- 7 Arai K et al. Phys. Rev., 1999, **C59**: 1432
- 8 Jurgen Wurzer, Hartmut Hofmann M. Phys. Rev., 1997, **C55**: 688
- 9 Wolski R et al. Phys. Lett., 1999, **B467**: 8
- 10 Milin M et al. Nucl. Phys., 2004, **A730**: 285
- 11 Giot L et al. Nucl. Phys., 2004, **A738**: 426
- 12 YE Y L et al. Phys. Rev., 2005, **C71**: 014604
- 13 LI Zhi-Huan et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2003, **27**(3): 206 (in Chinese)
(李智焕等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(3): 206)
- 14 Serber R. Phys. Rev., 1947, **72**: 1008
- 15 Evlanov M V et al. Nucl. Phys., 1986, **A452**: 477
- 16 Shyam R et al. Nucl. Phys., 1992, **A540**: 341
- 17 WANG J, YE Y L et al. Chin. Phys. Lett., 2005, **22**(6): 1370
- 18 Kretschmar M. Annu. Rev. Nucl. Sci., 1961, **11**: 1
- 19 Fermi E. Prog. Theor. Phys., 1950, **5**: 570
- 20 Epherre M, Gradsztajn E. J. Phys. (Paris), 1967, **18**: 48
- 21 Ashwood N I et al. Phys. Lett., 2004, **B580**: 129

Experimental Study of the $t+t$ Structure in ${}^6\text{He}^*$

ZHANG Gao-Long¹ YE Yan-Lin^{1,1)} JIANG Dong-Xing¹ ZHENG Tao¹ WANG Quan-Jin¹
 LI Zhi-Huan¹ LI Xiang-Qing¹ WU Cui-E¹ CHEN Zhi-Qiang¹ HU Qing-Yuan¹
 PANG Dan-Yang¹ WANG Jia¹ A. Ozawa² Y. Yamaguchi²
 R. Kanungo² D. Fang² I. Tanihata²

1 (School of Physics and the MOE Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

2 (RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan)

Abstract The triton fragments produced in the reaction of 25MeV/u ${}^6\text{He}$ on ${}^9\text{Be}$ target were detected by a set of telescopes. Energy spectra at five angles and the angular differential cross sections for the direct breakup components were obtained. Serber model calculation was carried out which reproduces well the experimental distribution, in agreement with the assumption of the direct breakup mechanism. Fermi model calculation was also applied to estimate the contribution of the reaction phase space. Subtraction of this contribution from the experimental data indicates that the $t+t$ configuration takes about 1/3 of the total probability in the initial state of ${}^6\text{He}$, whereas the configuration of ${}^4\text{He}$ core plus valence neutrons takes another 2/3 of the total probability.

Key words neutron-rich nuclei, breakup reaction, angle distribution, Serber model, Fermi model

Received 28 January 2005

*Supported by National Natural Science Foundation of China and Major State Basic Research Development Programme (G2000077403)

1) E-mail: yeYL@pku.edu.cn