

透射法测量丰中子核 ^8He 的去中子截面*

李琛^{1;1)} 叶沿林^{1;2)} 詹文龙² 肖国青² 徐瑚珊² 郭忠言² 王建松² 孙志宇²
李加兴² 王猛² 陈志强¹ 江栋兴¹ 郑涛¹ 华辉¹ 李智焕¹ 李湘庆¹
葛愉成¹ 吴翠娥¹ 庞丹阳¹ 楼建玲¹ 卢飞¹ 范凤英¹

1 (北京大学技术物理系和教育部重离子物理重点实验室 北京 100871)

2 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 利用 HIRFL 提供的 50MeV/u ^{13}C 束流轰击 Be 靶, 通过 RIBLL 选择出丰中子放射性核 ^8He . 利用透射法测量了 ^8He 的去双中子截面和去四中子截面. 利用 Ogawa 等人的理论结合原有 ^8He 的反应总截面数据, 得到 ^8He 的核芯为 ^4He 的结论.

关键词 丰中子 去双中子截面 去四中子截面 透射法

1 引言

1985 年 Tanihata 等人在 LBL 通过测量放射性同位素 ^{11}Li 的相互作用截面发现了 ^{11}Li 的中子晕结构^[1]. 此后, 通过测量非稳定核的相互作用截面或反应总截面, 又发现了 ^6He , $^{11,14}\text{Be}$, ^8B , $^{17,19}\text{B}$, ^{19}C 等多个晕核或皮核. 这些核的价核子分离能较小, 空间分布宽, 使得它们的核子密度分布范围较大, 表现为表面中子区域(中子皮)或很长的中子尾分布(中子晕). 同时价核子的这种空间分布导致反应总截面比核子数相同的稳定核有异常增大, 从截面可以导出核物质密度分布半径较大.

束流透射法是一种不依赖于模型的实验方法, 通过直接测量入射粒子经过一定厚度的靶后的透射粒子数目可以得到粒子的反应总截面. 还可以利用多叠层的望远镜系统同时测量几个不同能量粒子的反应总截面^[1]. 在中低能情况下, 反应总截面对奇异核的密度分布的长尾很灵敏. 因此, 测量奇异核的反应总截面, 并通过拟合不同能量范围的反应总截面, 可以得到奇异核的表面密度分布信息.

由于中子晕核的价核子的分离能比较小, 因而通

常具有较大的去中子截面. 这些截面的测量通常可以与总反应截面的测量同时进行. 通过去中子截面的测量, 可以得到晕核中核心和价核子结构的大体图像. 实验结果表明 ^6He 是晕核, 核芯是 ^4He , 外面有 2 个价中子. 而对于 ^8He 的结构有两种观点, 一是认为 ^8He 核芯为 ^4He 外加 4 个中子^[2], 一是认为 ^8He 核芯为 ^6He 外加 2 个中子^[3]. 本实验通过测量中能 ^8He 的去双中子截面和去 4 中子截面, 结合反应总截面的实验结果判断 ^8He 的大致结构.

本实验采用了透射法测量 25—40MeV/u ^8He 在 Si 靶上的碎裂反应. 所用的次级束是在兰州重离子加速器的放射性束流线(RIBLL)产生的. 实验得到了中能区 ^8He 的去双中子截面和去四中子截面.

2 实验装置和测量方法

实验是在兰州重离子国家实验室放射性次级束流线(RIBLL)^[4, 5]上进行的. 由兰州重离子加速器(HIRFL)提供能量 60MeV/u、流强 50nA 的 ^{13}C 作为初级束, 在 RIBLL 的初级靶室轰击厚 4mm 的 Be 靶, 通过弹核碎裂产生次级粒子. 使用 1mm 的楔形降能

2006-04-21 收稿

* 国家自然科学基金(10205019, 10105011), 国家基础研究发展规划项目(G2000077401, G2000077404), 国家基金委创新研究群体科学基金(10221003)和中俄资源环境领域重大问题合作研究项目(2005CB724800)资助

1) E-mail: lichen@hep.pku.edu.cn

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

器并按照磁刚度 ($B\rho$) 的选择, 可将弹核碎裂产物中不同能量和不同类型的离子分离出来作为次级放射性束流 (RIB).

图 1 为该实验的探测器布局示意图. T1 和 T2 分别为离子飞行的起始时间和终止时间探测器. 该时间探测器采用椭球面聚焦的快塑料闪烁薄膜 (BC-400) 和光电倍增管拾取时间信号, 时间分辨好于 200ps. 多叠层望远镜系统由 7 片全耗尽金硅面垒半导体探测器和一块 CsI(Tl) 阻止型探测器构成. 半导体探测器的厚度分别为 1000, 700, 2000, 1000, 1000, 2000 和 $700\mu\text{m}$, 有效面积为 150mm^2 . CsI 的厚度为 10mm, 有效面积为 $70\text{mm}\times 70\text{mm}$. 在多叠层望远镜系统前还有一块位置灵敏的 Si 探测器 (PSD), 用于确定入射粒子的位置, 该探测器厚度为 $325\mu\text{m}$, 有效面积为 $45\text{mm}\times 45\text{mm}$. 同时, 可以利用次级束在 PSD 上的能损 ΔE 与飞行时间 (TOF) 鉴别入射粒子的种类, 进而选择入射的 ^8He 粒子. 另外, 在 PSD 探测器前放置了 $\phi 8\text{mm}$ 的光阑, 用来限制入射次级束的发散度.

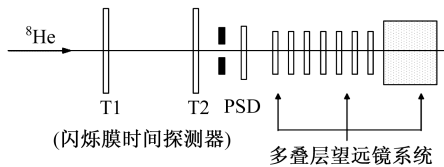


图 1 探测器布局示意图

次级束 ^8He 穿过半导体探测器, 最后被阻止在 CsI(Tl) 探测器中, 前 6 片 Si 探测器既作为能量探测器, 也作为 Si 靶, 前面的 Si 探测器依次作为后续的 Si 探测器的靶. 实验数据以事件列表方式被记录到计算机磁盘中, 然后用 PAW 对数据离线处理.

3 实验结果与理论分析

反应截面分析

本实验采用透射法测量, 可以利用公式 (1) 从实验数据中提取 ^8He 的去双中子截面和去四中子截面^[6]:

$$\begin{aligned}\sigma_{-2n} &= \frac{1}{N_t} \ln \left(\frac{N_{\text{in}}}{N_{\text{in}} - N_{^6\text{He}}} \right), \\ \sigma_{-4n} &= \frac{1}{N_t} \ln \left(\frac{N_{\text{in}}}{N_{\text{in}} - N_{^4\text{He}}} \right),\end{aligned}\quad (1)$$

公式 (1) 中 N_t 为单位面积中靶原子的数目, N_{in} 为入射的 ^8He 粒子数, $N_{^6\text{He}}$ 和 $N_{^4\text{He}}$ 分别为反应生成的 ^6He 和 ^4He 的粒子数. 由此可见, 只要确定入射 ^8He 的粒子数以及相应生成的 ^6He 和 ^4He 粒子数, 就可以得到 ^8He 的去双中子截面和去四中子截面.

本实验通过飞行时间与透射能损联合选出入射粒子 ^8He . 同时由于光阑的限制, 可以认为 ^8He 是沿着二级磁铁的中心轨道入射到次级靶中, 因而可以利用磁刚度确定入射粒子的能量. 利用望远镜系统的 ΔE 和 E 可以鉴别反应生成的产物. 由于 ^8He 的去中子截面较小, 为增加统计数, 将望远镜系统的前 6 片 Si 探测器作为次级靶. 利用飞行时间与第一片 Si 探测器的透射能损可以选出入射到第一片 Si 探测器的 ^8He , 将它穿过第 7 片 Si 探测器时的能损与剩余能量作二维谱图, 如图 2 所示. 从图中可以看到, ^8He , ^6He 和 ^4He 分别沿着一定的带子分布. 通过确定入射的 ^8He 粒子数以及图中的 ^6He 和 ^4He 粒子的数目, 即可得到 ^8He 的去双中子截面和去四中子截面. 但同时从图中还可以看到一条垂直于纵坐标的横向带子, 这是入射的 ^8He 在 Si7 (第 7 片 Si 探测器) 和 CsI 晶体中发生反应所造成的,

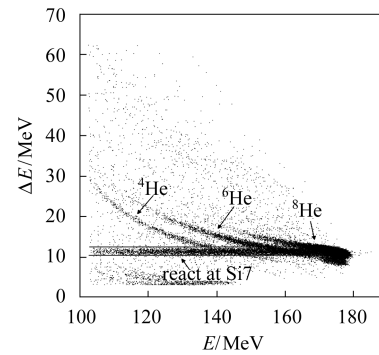


图 2 入射到第一片 Si 探测器的 ^8He 粒子在第 7 片 Si 探测器上的能损与剩余能量的二维关联谱

对于前 6 片 Si 而言它们应该被视为没有反应的 ^8He , 与碎裂产物 ^6He 和 ^4He 的斜带分布有重合. 因此, 我们可以将反应产生的 ^6He 和 ^4He 分为两部分, 一部分是与横带重合的 (图 2 中两平行横线之间), 一部分是没有重合的 (图 2 中两平行横线之上). 平行线之上的部分 ^6He 和 ^4He 可以直接选出. 再将两平行线之间的部分投影到剩余能量的单谱上, 可以得到图 3 所示的结果. 图中的斜线和高斯峰是拟合在 Si7 和 CsI 上发生反应的以及未发生反应的 ^8He 得到的, 可将其作为本底扣除, 从而得到反应生成的 ^6He 和 ^4He (总数分别为 2179 和 769). 加上横带之上的反应产物 ^6He , ^4He (总数分别为 1203 和 193), 可以得到反应生成的 ^6He , ^4He 的总数, 进而可以得到 ^8He 的去双中子截面和去四中子截面. 表 1 所示为 ^8He 的去双中子截面 σ_{-2n} 和去四中子截面 σ_{-4n} . 表中的误差主要来自于碎裂产物 ^6He , ^4He 计数的统计误差、系统误差和拟合反应产物带来的误差, 其中系统误差分别为 2.9%, 数据的统计误差分别

为 1.7% (${}^6\text{He}$) 和 3.2% (${}^4\text{He}$), 其他为拟合带来的误差. 由于次级束的强度较小, 可以认为探测器的探测效率接近 100%.

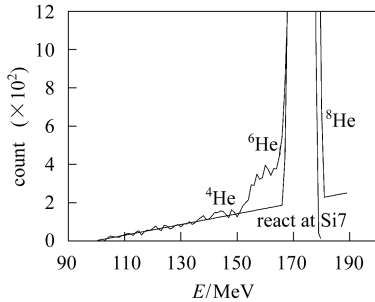


图 3 图 2 中平行线之间的部分在 CsI 阻止探测器的能谱的投影

图中拟合曲线部分为未反应 ${}^8\text{He}$ 的能谱, 与拟合曲线不重合的部分为反应生成的 ${}^6\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$.

表 1 ${}^8\text{He}$ 在 Si 上的双中子反应截面 σ_{-2n} 和去四中子反应截面 σ_{-4n} 的测量结果

$E/(\text{MeV}/u)$	σ_{-2n}/mb	σ_{-4n}/mb
31.15	337 ± 18	95 ± 12

按照 Ogawa, Yabana, Suzuki 通过用 Glauber 模型计算奇异核的反应截面, 推导出反应截面与粒子的去除截面之间的关系^[7]. 对于 ${}^{11}\text{Li}$, 其相互作用截面与双中子去除截面有如下关系:

$$\sigma_{-2n}({}^{11}\text{Li} + \text{T}) = \sigma_{\text{reac}}({}^{11}\text{Li} + \text{T}) - \sigma_{\text{reac}}({}^9\text{Li} + \text{T}), \quad (2)$$

同理, Warner 认为对于中能区的奇异核也满足上面的关系^[5]. 对于 ${}^6\text{He}$, 如果有着 ${}^4\text{He}$ 为核芯加两个中子的结构, 其相互作用截面与双中子去除截面有如下关系:

$$\sigma_{-2n}({}^6\text{He} + \text{T}) = \sigma_{\text{reac}}({}^6\text{He} + \text{T}) - \sigma_{\text{reac}}({}^4\text{He} + \text{T}), \quad (3)$$

对于 ${}^8\text{He}$, 如果核芯是 ${}^6\text{He}$, 则相互作用截面与中子去除截面满足关系式

$$\sigma_{-2n}({}^8\text{He} + \text{T}) = \sigma_{\text{reac}}({}^8\text{He} + \text{T}) - \sigma_{\text{reac}}({}^6\text{He} + \text{T}), \quad (4)$$

如果 ${}^8\text{He}$ 的核芯是 ${}^4\text{He}$, 则相互作用截面与中子去除截面满足关系式

$$\begin{aligned} & \sigma_{-2n}({}^8\text{He} + \text{T}) + \sigma_{-4n}({}^8\text{He} + \text{T}) = \\ & \sigma_{\text{reac}}({}^8\text{He} + \text{T}) - \sigma_{\text{reac}}({}^4\text{He} + \text{T}). \end{aligned} \quad (5)$$

本次实验得到了 ${}^8\text{He}$ 的去双中子截面和去四中子截面, 也可以利用上面的理论判断 ${}^8\text{He}$ 的核芯是 ${}^6\text{He}$ 还是 ${}^4\text{He}$.

表 2 中列出了 ${}^8\text{He}$ 的实验结果以及结合实验结果用 Glauber 模型计算得到 ${}^6\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 的反应截面. 由表 2 中的数据可以得到以下结果:

$$\sigma_{\text{R}}({}^8\text{He}) - \sigma_{\text{R}}({}^6\text{He}) = 70 \pm 90 \text{mb}, \quad (6)$$

$$\sigma_{-2n}({}^8\text{He}) = 337 \pm 18 \text{mb},$$

$$\sigma_{-2n}({}^8\text{He}) + \sigma_{-4n}({}^8\text{He}) = 432 \pm 30 \text{mb}, \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{R}}({}^8\text{He}) - \sigma_{\text{R}}({}^4\text{He}) = 498 \pm 90 \text{mb},$$

由此看出, ${}^8\text{He}$ 的结构主要是以 ${}^4\text{He}$ 为核芯的, 这与 Warner 的结论相一致^[6].

表 2 31.15 MeV/u 的 ${}^8\text{He}$ 的双中子反应截面 σ_{-4n} 和去四中子反应截面 σ_{-4n} 及 ${}^8\text{He}$, ${}^6\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 的反应总截面 (${}^4\text{He}$, ${}^6\text{He}$ 的反应总截面为拟合实验数据得到)

核素	$\sigma_{\text{R}}/\text{mb}$	σ_{-2n}/mb	σ_{-4n}/mb
${}^4\text{He}$	~ 1142		
${}^6\text{He}$	~ 1570		
${}^8\text{He}$	1640 ± 90	337 ± 18	95 ± 12

4 讨论

实验利用透射法得到了中能区 ${}^8\text{He}$ 的去双中子截面和去四中子截面. 数据处理的关键是将反应生成的 ${}^6\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 与后续反应的 ${}^8\text{He}$ 区分开, 进而确定反应生成的 ${}^6\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 的总数.

利用 Ogawa, Yabana, Suzuki 的理论得到的关系式, 结合实验得到的 ${}^8\text{He}$ 的去双中子截面、去四中子截面以及反应总截面, 可以判断出 ${}^8\text{He}$ 的核芯主要为 ${}^4\text{He}$ 而不是 ${}^6\text{He}$. 但是如果得到关于 ${}^8\text{He}$ 结构更准确的信息, 需要利用理论模型对实验结果做细致的分析.

参考文献 (References)

- Tannihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676
- Tanihata I, Hirata D, Kobayashi T et al. Phys. Lett., 1992, **B289**: 261
- Chulkov L V, Aksouh F, Bleile A et al. Nuclear Physics, 2005, **A759**: 43—63
- ZHAN W L, GUO Z Y, LIU G H et al. Science in China, 1999, **A29**(1): 77 (in Chinese)
(詹文龙, 郭忠言, 刘冠华等. 中国科学, 1999, **A29**(1): 77)
- ZHAN W L, GUO Z Y, LIU G H et al. Science in China (Series A), 1999, **42**(5): 528
- Blank B, Gaimard J, Geissel H et al. Nucl. Phys., 1993, **A555**: 408
- Warner R E, Patty R A, Voyles P M et al. Phys. Rev., 1996, **C54**: 1700

Measurement of Neutron-Removal Cross Section of Neutron-Rich Nucleus ^8He by Using the Transmission Method^{*}

LI Chen^{1;1)} YE Yan-Lin^{1;2)} ZHAN Wen-Long² XIAO Guo-Qing² XU Hu-Shan² GUO Zhong-Yan²
WANG Jian-Song² SUN Zhi-Yu² LI Jia-Xing² WANG Meng² CHEN Zhi-Qiang¹ JIANG Dong-Xing¹
ZHENG Tao¹ HUA Hui¹ LI Zhi-Huan¹ LI Xiang-Qing¹ GE Yu-Cheng¹ WU Cui-E¹
PANG Dan-Yang¹ LOU Jian-Ling¹ LU Fei¹ FAN Feng-Ying¹

1 (Department of Technical Physics and the DOE Key Laboratory of Heavy Ion Physics,
Peking University, Beijing 100871, China)

2 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract The neutron-rich nucleus ^8He is selected by RIBLL from the breakup of $50\text{MeV/u } ^{13}\text{C}$ on Be target at HIRFL. The 2n-removal and 4n-removal cross section of ^8He was measured by using the transmission method. The point that ^4He is ^8He core can be reduced from the experiment data via the Ogawa's theory.

Key words neutron-rich nuclear, 2n-removal cross section, 4n-removal cross section, transmission method

Received 21 April 2006

^{*} Supported by National Natural Science Foundation of China (10205019,10105011), Major State Basic Research Development Program (G2000077401, G2000077404), NSFC for Innovative Research Group(10221003) and Cooperation Research on Key Issues Concerning Environment and Resources in China and Russia (2005CB724800)

1) E-mail: lichen@hep.pku.edu.cn

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