

# 丰中子核 $^8\text{He}$ 在 Si 靶上的反应总截面的测量\*

李琛<sup>1,2;1)</sup> 詹文龙<sup>1</sup> 肖国青<sup>1</sup> 郭忠言<sup>1</sup> 孙志宇<sup>1</sup> 李加兴<sup>1</sup> 陈志强<sup>1,2</sup>

王猛<sup>1</sup> 王武生<sup>1</sup> 毛瑞士<sup>1,2</sup> 陈立新<sup>1</sup> 白洁<sup>1</sup> 胡正国<sup>1,2</sup>

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要** 利用 HIRFL 50MeV/u  $^{13}\text{C}$  束流在 Be 靶上碎裂, RIBLL 选择出丰中子放射性次级束流  $^8\text{He}$ , 实验测量了 25—40MeV/u  $^8\text{He}$  在  $^{28}\text{Si}$  靶上的反应总截面. 采用双参数 HO 密度分布形式, 通过微观 Glauber 模型拟合  $^8\text{He}$  实验数据, 发现  $^8\text{He}$  具有扩展的中子密度分布. 实验结果与 Warner 反应总截面实验和 Alkhozov 弹性散射实验结果较好地符合.

**关键词** 丰中子核 反应总截面 Glauber 模型

## 1 引言

放射性束装置是产生和鉴别远离  $\beta$  稳定线核素十分有效的工具. 利用放射性装置产生的放射性次级束可以研究远离  $\beta$  稳定线乃至滴线的放射性核素的性质, 从而拓宽了实验核物理在同位旋自由度上从稳定核直到滴线核的广袤空间. 位于  $\beta$  稳定线及其附近的核, 通常中子数和质子数之比 ( $N/Z$ ) 在 1—1.5 之间, 单核子分离能  $E_s$  约为 6—8MeV, 核物质密度分布半径正比于  $A^{1/3}$ . 对远离  $\beta$  稳定线的非稳定核,  $N/Z$  在 0.6—4 之间, 单核子分离能  $E_s$  在 0—4MeV 之间, 有些核展现出扩展的质子或中子密度分布和核物质密度分布. 通过对这些非稳定核的反应总截面、碎片动量分布、弹性散射微分截面等测量和模型分析, 可以推出它们的密度分布, 晕或皮结构特征, 发现新的物理现象, 从中得到核结构的新信息.

1985 年 Tanihata 等人在 LBL 利用高能的放射性次级束开展了非稳定核的研究. 通过测量 Be, Li 等轻核的放射性同位素的相互作用截面发现了奇异核  $^{11}\text{Li}$  的中子晕结构<sup>[1]</sup>. 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  $^6\text{He}$ ,  $^{11,14}\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$ ,  $^{17,19}\text{B}$ ,  $^9\text{C}$ ,  $^{19}\text{C}$ ,  $^{17}\text{Ne}$ ,  $^{23}\text{Al}$ ,  $^{26}\text{P}$ ,  $^{27}\text{S}$  等多个晕核或皮

核. 这些核价核子的分离能较小, 空间分布被扩展, 核的密度分布较大, 表现为晕或皮的现象. 同时价核子的这种空间分布导致反应总截面比质子数相同的稳定核有异常增大. 核物质密度分布半径较大.

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, 反应总截面实验测量是研究奇异核密度分布状况的常用实验方法. 通过拟合核在不同能量范围的反应总截面实验数据, 可以得到核的密度分布相关参数, 为研究核的结构提供信息.

$^8\text{He}$  是丰中子的奇异核. 一些理论和实验已证明  $^6\text{He}$  是中子晕核, 有着  $^4\text{He}$  核芯和两个价中子的结构.  $^8\text{He}$  比  $^6\text{He}$  多两个中子, 结构更复杂. 但从高能的实验数据发现  $^8\text{He}$  的密度分布半径与  $^6\text{He}$  相近<sup>[2]</sup>, 都有扩展的密度分布. 理论研究推测  $^8\text{He}$  可能是  $^4\text{He}$  核芯和 4 个价中子的结构. 为进一步研究  $^8\text{He}$  的密度分布结构, 我们测量了在低能的反应总截面, 分析核的密度分布情况.

本实验采用了透射法测量 25—40MeV/u  $^8\text{He}$  在 Si 靶上的反应总截面. 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. 通过 Glauber 模型拟合不同能量范围  $^8\text{He}$  的实验数据得到核的密度分布.

2005 - 01 - 05 收稿

\* 国家自然科学基金(10205019, 10105011), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077401, G2000077404)和国家基金委创新研究群体科学基金(10221003)资助

1) E-mail: lichen@impcas.ac.cn

## 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)<sup>[3, 4]</sup> 上进行的. 由兰州重离子加速器 (HIRFL) 提供能量 60 MeV/u、流强 50 enA 的  $^{13}\text{C}$  作为初级束, 在 RIBLL 的初级靶室轰击 4 mm 的 Be 靶, 弹核碎裂. 通过 1 mm 的楔形降能器和磁刚度 ( $B\rho$ ) 的选择, 可将弹核的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

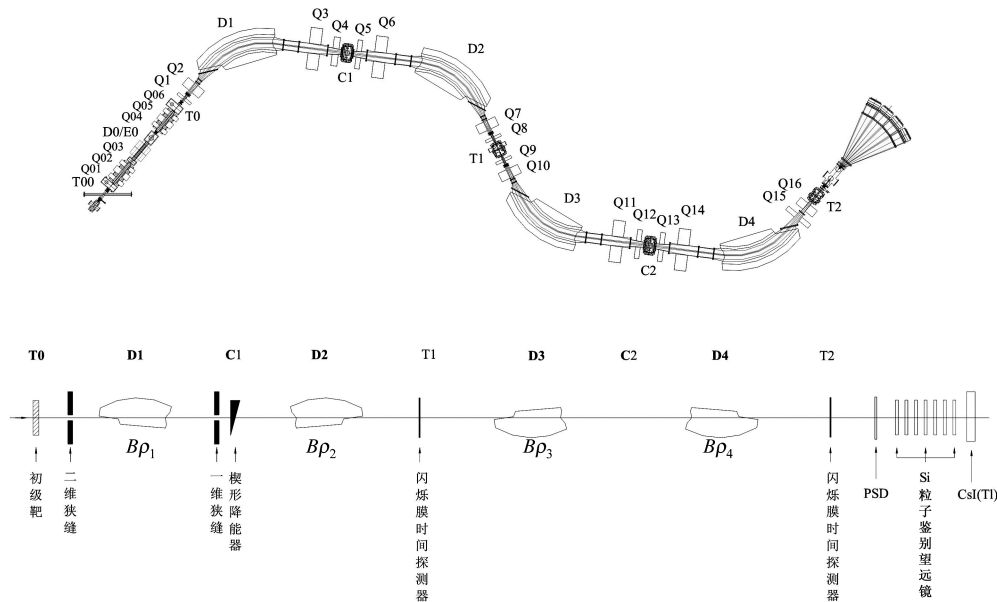


图 1 实验的探测器布局示意图

次级束  $^8\text{He}$  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上, 然后用 PAW 对数据离线处理.

## 3 实验结果与理论分析

实验采用透射法测量  $^8\text{He}$  的反应总截面. 相应的反应总截面的表达式为

$$\sigma_t = \frac{1}{N_t} \ln \left( \frac{N_0}{N_1} \right),$$

其中  $N_t$  为单位面积靶粒子数,  $N_0$  为入射靶上的粒子数,  $N_1$  为出射且未反应的粒子数. 通过  $\Delta E$ -TOF 可以鉴别入射粒子, 将  $^8\text{He}$  选择出来. 图 2 为入射粒子的  $\Delta E_1$ -TOF 的二维谱. 从二维谱中可以将  $^8\text{He}$  选择出

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. 该时间探测器的时间分辨好于 200 ps. 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 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 150  $\text{mm}^2$ . CsI 的厚度为 10 mm, 有效面积为 70 mm  $\times$  70 mm. 在多叠层望远镜系统前还有一块位置灵敏的 Si 探测器, 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 mm  $\times$  45 mm.

来, 得到入射粒子数  $N_0$ , 同时作为选择  $^8\text{He}$  的条件在  $\Delta E_2$ - $E$  二维谱上的投影, 从中区分出未反应的粒子, 提取未发生反应的粒子数  $N_1$ . 其余的 Si 探测器依此类推, 进而得到各片 Si 靶上的反应总截面. 表 1 为各片 Si 靶的反应总截面.

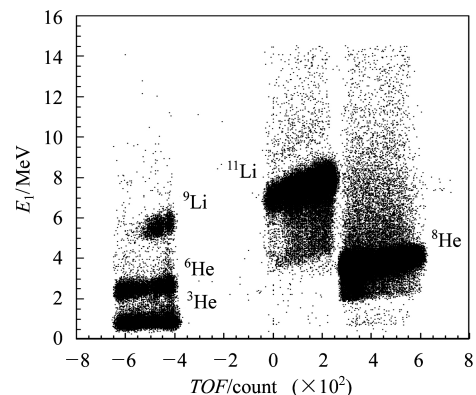


图 2 入射粒子  $\Delta E_1$ -TOF 的二维谱

表 1  $^8\text{He}$  在 Si 上的反应总截面  $\sigma_t$  的测量结果

$E_{in}/(\text{MeV}\cdot\text{u}^{-1})$	$\sigma_t/\text{mb}$
$35.65\pm 0.03$	$1591\pm 90$
$34.19\pm 0.07$	$1613\pm 90$
$33.14\pm 0.07$	$1637\pm 90$
$30.03\pm 0.11$	$1660\pm 90$
$28.38\pm 0.08$	$1686\pm 95$
$26.66\pm 0.77$	$1714\pm 100$

对于奇异核, Glauber<sup>[5, 6]</sup>模型的计算结果与实验结果符合得比较好<sup>[7, 8]</sup>. 用 Glauber 模型拟合反应总截面, 需要输入弹核和靶核的密度分布. 对于稳定核, 其中子和质子的密度分布基本相同. 但奇异核, 其中子和质子的密度分布不同, 需要分别给出其密度分布.

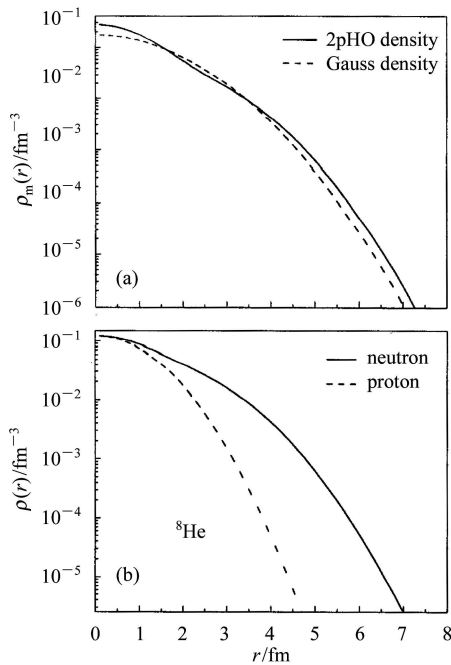


图 3 拟合实验结果得到的  $^8\text{He}$  的密度分布  
(a) 不同形式的  $^8\text{He}$  密度分布; (b)  $^8\text{He}$  的双参数 HO 密度分布形式中子和质子的密度分布曲线.

由于高能的作用截面对于核的密度分布依赖较小. 可以通过先拟合高能的实验数据得到  $^8\text{He}$  和  $^{28}\text{Si}$  的密度分布. 图 3(a) 为拟合  $^8\text{He}$  高能的实验数据得到的两种不同形式的密度分布, 其中虚线为核半径  $R = 2.5\text{fm}$  的高斯形式, 实线为双参数 HO(2pHO) 密度分布, 相应的均方根半径为  $2.49\text{fm}$ . 可以看出两个密度分布的形状不同, 但曲线下的面积相同. 但是用得到的密度分布计算低能的反应总截面时, 用高斯形式的密度分布得到的结果与实验值相差较大, 而双参数 HO 密度分布与实验结果拟合较好. 双参数 HO 密度分布形式如下:

$$\rho(R) = \frac{2}{\pi^{3/2}} \left\{ \frac{1}{a^3} \exp \left[ - \left( \frac{R}{a} \right)^2 \right] + \frac{1}{b^3} \frac{N-2}{3} \left( \frac{R}{b} \right)^2 \exp \left[ - \left( \frac{R}{b} \right)^2 \right] \right\},$$

其中  $a^2 = \alpha^2(1 - 1/A)$ ,  $b^2 = \beta^2(1 - 1/A)$ , 对于  $^8\text{He}$ ,  $\alpha = 1.53$ ,  $\beta = 2.06$ .

图 3(b) 给出了由一组参数得到的  $^8\text{He}$  的中子和质子双参数 HO 密度分布. 其中质子的均方根半径为  $1.75\text{fm}$ , 中子的均方根半径为  $2.69\text{fm}$ . 用相同的模型拟合得到的  $^4\text{He}$  的均方根半径为  $1.63\text{fm}$  与  $^8\text{He}$  的质子均方根半径相近, 由此可见  $^8\text{He}$  是以  $^4\text{He}$  为核芯. 两种密度分布的差别在于双参数 HO 形式的密度分布的中子密度分布范围远大于质子密度分布范围, 而对高斯密度分布两者没有差别. 同时说明  $^8\text{He}$  的密度分布形式在低能情况下对反应总截面的影响较大.

图 4 为本实验测量的结果, 同时也给出了用双参数 HO 密度分布参数输入 Glauber 模型拟合的曲线. 为了比较, Warner 的数据点<sup>[9]</sup> 也被标出. 由图 4 可以看到, 我们的数据拟合得很好. 从 HO 密度分布拟合的结果也看出  $^8\text{He}$  与  $^4\text{He}$  的质子密度分布近似, 但中子密度分布明显扩展.

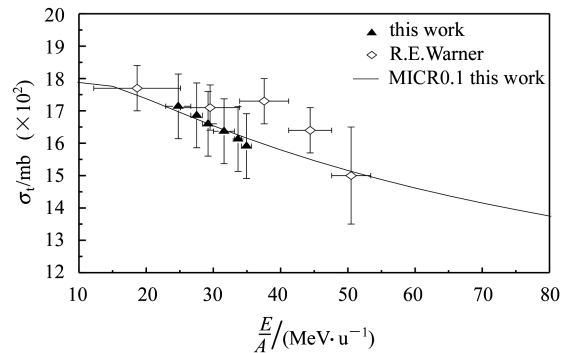


图 4  $^8\text{He}$  在 Si 靶上的反应总截面测量值与 Glauber 模型计算结果

## 4 讨论

实验测量了  $^8\text{He}$  在 Si 靶上反应总截面, 并用 Glauber 模型很好的拟合了结果. 通过拟合高能的  $^8\text{He}$  实验数据得到高斯形式和双参数的 HO 密度分布. 用这两种密度分布参数计算低能的  $^8\text{He}$  反应总截面, 发现只有双参数的 HO 密度分布拟合结果较好. 实验数据与 Warner 的测量结果一致.

拟合的结果表明  $^8\text{He}$  的中子密度分布要比质子密度分布范围大. 而质子密度分布与  $^4\text{He}$  的近似. 因而认为  $^8\text{He}$  有着  $^4\text{He}$  的核芯和扩展的中子密度分布.

## 参考文献(References)

- 1 Tannihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676
- 2 Alkhazov G D, Dobrovolsky A V, Egelhof P et al. Nucl. Phys., 2002, **A712**: 269—299
- 3 ZHAN W L, GUO Z Y, LIU G H et al. Science in China, 1999, **29**(1): 77 (in Chinese)  
(詹文龙, 郭忠言, 刘冠华等. 中国科学, 1999, **29**(1): 77)
- 4 ZHAN W L, GUO Z Y, LIU G H et al. Science in China (Series A), 1999, **42**(5): 528
- 5 Charagi S K, Gupta S K. Phys. Rev., 1990, **C41**: 1610
- 6 Charagi S K. Phys. Rev., 1995, **C51**: 3521
- 7 Lukyanov V K, Zemlyanaya E V, Massen S E et al. Int. J. Mod. Phys., 2004, **E13**: 573
- 8 Ozawa A, Suzuki T, Tanihata I. Nucl. Phys., 2001, **A693**: 32
- 9 Warner R E, Patty R A, Voyles P M et al. Phys. Rev., 1996, **C54**: 1700

## Measurement of Total Reaction Cross Sections for Neutron-Rich Nucleus $^8\text{He}$ on $^{28}\text{Si}^*$

LI Chen<sup>1,2;1)</sup> ZHAN Wen-Long<sup>1</sup> XIAO Guo-Qing<sup>1</sup> GUO Zhong-Yan<sup>1</sup> SUN Zhi-Yu<sup>1</sup> LI Jia-Xing<sup>1</sup>  
CHEN Zhi-Qiang<sup>1,2</sup> WANG Meng<sup>1</sup> WANG Wu-Sheng<sup>1</sup> MAO Rui-Shi<sup>1,2</sup>  
CHEN Li-Xin<sup>1</sup> BAI Jie<sup>1</sup> HU Zheng-Guo<sup>1,2</sup>

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

2 (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The total reaction cross sections for neutron-rich nucleus  $^8\text{He}$  at energy range from 25 to 40MeV/u on Si target have been measured and compared with the experimental data of R. E. Warner et al. The experiment data at high energy and low energy can be fitted well by Glauber model using two-term HO density distribution.

**Key words** neutron-rich nuclei, total reaction cross section, Glauber model

---

Received 5 January 2005

\*Supported by National Natural Science Foundation of China(10205019, 10105011), Major State Basic Research Development Program(G2000077401, G2000077404) and NSFC for Innovative Research Group(10221003)

1) E-mail: lichen@impcas.ac.cn