

中能 ^8B 和 ^9C 与Si反应总截面的测量*

王全进 詹文龙 郭忠言 肖国青 孙志宇 王 猛
陈志强 李加兴 王建松 宁振江 王金川 王建峰

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 能量为75MeV/u的 ^{12}C 初级束轰击2mm厚的初级Be靶,并利用RIBLL从弹核碎片中分离出54.2MeV/u质子滴线核束 ^8B 和61.1MeV/u的 ^9C ,再轰击Si靶,用透射法测量了它们与Si的反应总截面 σ_{R} .并应用Glauber模型进行理论计算,分析结果表明 ^8B 和 ^9C 都可能具有质子晕结构.

关键词 反应总截面 Glauber模型 质子晕

1 引言

随着加速器和相关技术的发展,放射性束流(RIB)装置在许多实验室相继被建成或正在建造中,目前世界上的放射性产生装置主要有弹核碎裂型(PF型)和在线同位素分离型(ISOL型)两种类型,PF型RIB装置有LISE/LISE3, A1200/A1900, RIPS, FRS和RIBLL等; ISOL型有ISOLDE, ISAC等. RIB装置的运行为实验核物理提供了沿着同位旋(T_z)自由度拓广到从稳定核直到滴线核的广阔核空间,在这个区域多达数千种放射性核素未被发现和鉴别,因此开展对这些非稳定核性质、结构及衰变等特性的研究已成为人们关注的热点. 在新核素研究方面, RIB装置已鉴别出数以百计的新核素,甚至一次实验就产生并鉴别出100多种新核素^[1]. 1985年I. Tanihata^[2]等通过高能RIB引起相互作用截面测量,揭开了非稳定核结构研究的序幕. 近年来,放射性束物理的研究和应用取得了广泛深入的进展.

丰中子核 ^{11}Li 的中子晕奇异核结构是在测量由它引起的相互作用截面(σ_i)异常增大而被发现的^[2],从而使得相互作用截面的测量成为判别一个核是否具有晕或皮奇异结构的重要途径之一. 截至目前,人们已对奇异核做了许多理论和实验研究,图1直观显示了这些研究的大致情况. 在轻丰中子奇异核区域,除 ^{11}Li 是中子晕核外, ^6He , $^{11,14}\text{Be}$, $^{17,19}\text{B}$, ^{19}C , $^{23,24}\text{O}$ 等也具有中子晕结构^[2-7],而且Mg和Na的几乎所有丰中子同位素都可能具有中子晕现象^[8]. 在丰质子区域,理论计算也预言,除 ^8B 是质子晕核外, ^9C , ^{12}N , ^{17}F , ^{17}Ne , ^{20}Mg , $^{26-28}\text{P}$ 和 ^{27}S 等也可能具有质子晕结构^[3,9-12],其中 $^{26-28}\text{P}$ 具有质子晕结构已被实验所证实^[10].

2000-09-21 收稿

* 国家自然科学基金(19825115, 19735010, 19935030)资助

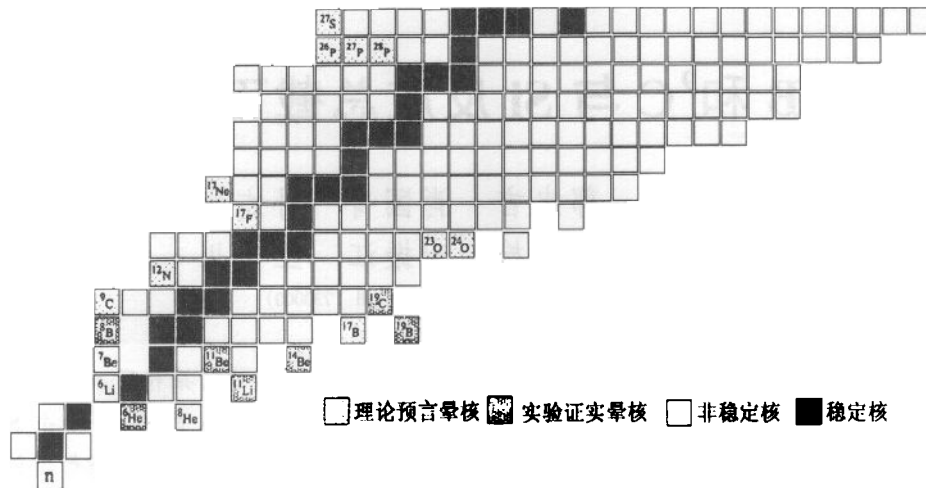


图 1 目前可能具有晕结构的核

R. E. Warner^[14], F. Negoita^[15] 和 M. Fukuda^[16] 等分别测量了中能区⁸B 在 Si 上的总反应截面, 所得到的⁸B 反应总截面异常增大, 无法用传统的 Glauber^[13] 模型进行解释. 他们的实验数据均表明⁸B 具有质子晕结构. 但是, I. Tanihata^[2,6] 及 M. M. Obuti^[17] 等在 800MeV/u 的能区测量了⁸B 与 C 靶的相互作用截面, 结果与镜像核⁸Li 的 σ_1 相同, 相互作用截面没有明显增强, 不能推断⁸B 具有晕结构. 因此, 继续开展⁸B 是否为质子晕核的实验研究, 仍有非常重要意义.

相对于最后一个核子结合能为 138keV 的⁸B 而言,⁹C 的最后一个核子的结合能要大得多, 为 1.299MeV, 同时⁹C 比⁸B 多一个质子, 碎裂反应中⁹C 的产生截面比⁸B 要小得多, 因此, 目前有关⁹C 的反应截面测量的实验非常少. 对于⁹C 是否具有奇异核结构, 人们并不特别清楚.

本文描述了利用穿透法测量中能区⁸B + Si 的反应总截面, 同时也测量了⁹C + Si 的反应总截面, 结果发现 σ_R 明显增大, 应用 Glauber 模型进行了计算, 分析结果认为⁸B 和⁹C 都可能具有质子晕结构.

2 实验布局和粒子鉴别

实验装置如图 2 所示. 图的上部是实验总体布局, 下部是探测器望远镜放大图. 兰州重离子加速器(HIRFL)提供的初级束流为 75MeV/u ¹²C (流强平均约 30enA), 进入 RIBLL^[18] 的初级靶室(T_0), 轰击 2mm 厚的⁹Be 靶, 引起弹核碎裂, 产生质量在弹核以下的多种放射性核素. 在 RIBLL 的 T_0-T_1 段, 通过磁铁 D_1 、楔型降能器选择和磁铁 D_2 ($B\rho_1-dE/dx-B\rho_2$), 到达 RIBLL 第 1 聚焦点(T_1), 同时得⁸B 和⁹C 等次级束流. RIBLL 将它们输运到 RIBLL 第 2 聚焦点(T_2), 注入到 5 片全耗尽 Si 组成的探测器望远镜. 其中第 1 片 Si 探测器作为次级靶, 与⁸B 和⁹C 等次级束流相互作用. 通过粒子在第 1 片 Si 的能量损失信号

ΔE_1 , 入射粒子被清楚鉴别. 望远镜的第 2 片 Si 探测器和后续探测器鉴别出射产物粒子. 用 TOF, ΔE_2 和总能量 E_t 联合鉴别出射碎片^[19]. TOF 分别由放在第 1 聚焦点(T_1)和第 2 聚焦点(T_2)的快塑料闪烁膜 BC-400 时间拾取探测器测量的时间信号 t_1, t_2 给出^[20]. 组成望远镜的 5 片全耗尽面垒型探测器的厚度分别为 150, 150, 150, 2000 和 2000 μm . 在望远镜之后放置一套 10mm 厚的位置灵敏 CsI(Tl) 闪烁探测器测量穿过前 5 片 Si 的较轻粒子. 出射粒子的总能量 $E_t = \sum_{i=2}^5 \Delta E_i + E_{\text{CsI(Tl)}}$.

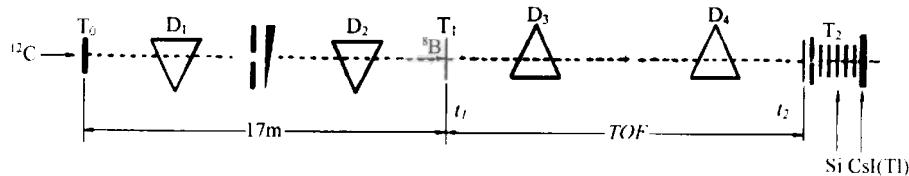


图 2 ⁸B 和 ⁹C 在 Si 靶上引起反应截面测量实验装置
详细说明见正文

实验数据用 RIBLL 数据获取系统在线获取并将数据以事件列表方式记录在磁盘上.

3 实验数据处理与分析

图 3 是对 75MeV/u 的 ¹²C + ⁹Be 反应经过 RIBLL 离子光学分析和反应运动学鉴别得到的入射粒子飞行时间谱. 从图中看到, 除 ⁸B 和 ⁹C 外, 还伴有 ⁷Be 和 ⁶Li, 而且它们已经被很好地鉴别和分离. 在分析数据时, 在 TOF 上加窗, 准确地单选出 ⁸B 或 ⁹C 的放射性束.

采用衰减法测量反应截面 σ_R 的计算公式为

$$\sigma_R = \frac{1}{T \times \rho} \times \ln \frac{N_{in}}{N_{out}}, \quad (1)$$

其中 T 是靶厚, ρ 为靶密度, N_{in} 和 N_{out} 分别表示进入靶子和离开靶子而未发生反应的粒子数目. 对于 150 μm 厚的 Si 靶, 上式的

$\frac{1}{T \times \rho}$ 为 1330b.

从公式(1)中可以看出, 数据处理的关键是如何从原始数据中准确地确定进入次级反应靶 Si(ΔE_1) 的入射粒子数以及穿过 Si 靶而没有与其发生反应的出射粒子数.

在离线分析数据之前, 首先对望远镜中的 Si 探测器进行能量刻度和飞行时间探测器

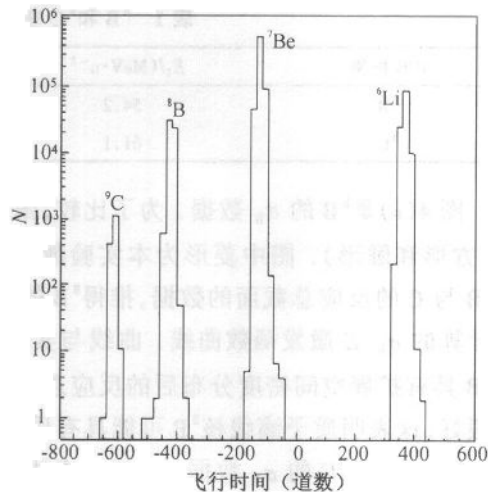


图 3 75MeV/u ¹²C + Be 弹碎裂经 RIBLL 分析选择的 ⁹C, ⁸B, ⁷Be 和 ⁶Li 的 TOF 谱

进行时间刻度. 分析 ${}^8\text{B}$ 和 ${}^9\text{C}$ 反应数据时, 在 *TOF* 累积谱的 ${}^8\text{B}$ 和 ${}^9\text{C}$ 的位置加窗筛选. 对于每一个入射到 ΔE_1 的 ${}^8\text{B}$ 和 ${}^9\text{C}$ 粒子, 望远镜中的 ΔE_2 以及后续探测器联合探测其出射粒子, 由于在 ΔE_1 中发生反应的粒子与没有发生反应的粒子相比, 在 ΔE_2 上的能量损失与粒子总能量 E_1 有明显不同, 因此可从 ΔE_2-E_1 二维关联图上选择出未发生反应的 ${}^8\text{B}$ 和 ${}^9\text{C}$. 但是必须指出的是, 在 ΔE_2 上发生反应的入射粒子与未发生反应的粒子能量损失有重叠区域, 这会引入反应截面计算误差. 为了减小这种误差, 我们将进入第 2 个探测器的“未反应”的粒子(其中可能存在已发生反应的粒子)在 ΔE_3-E_1 二维谱中进行辨认, 发现有一部分 ${}^8\text{B}$ 和 ${}^9\text{C}$ 粒子在第 3 块探测器上的能量沉积有显著区别, 从而确认这些粒子在进入第 3 片探测器之前就已经发生了反应. 因此, 以 ΔE_2-E_1 的二维关联图为主, 对该图分为多个反应与未反应的区域, 初步区分出未反应事件. 以 ΔE_3-E_1 为辅, 进一步辨认重叠区域中未反应事件, 可更加准确地得到穿过第 1 片探测器而未发生反应的 ${}^8\text{B}$ 和 ${}^9\text{C}$ 粒子.

4 实验结果和讨论

在对实验数据进行上述分析的过程中, 应用 Monte-Carlo 方法对探测器的探测效率进行模拟计算, 考虑计数的统计误差, 并同时考虑在分析过程某些未反应粒子与反应的粒子无法区分而产生的误差, 得到了 ${}^8\text{B}$ 和 ${}^9\text{C}$ 在 Si 靶上的反应截面 σ_R , 实验结果列入表 1. 表中 E_1 为入射能量, E_2 为单核子分离能.

表 1 ${}^8\text{B}$ 和 ${}^9\text{C}$ 在 Si 靶上的反应截面 σ_R

RIB 种类	$E_1/(\text{MeV}\cdot\text{u}^{-1})$	E_2/MeV	σ_R/mb
${}^8\text{B}$	54.2	0.138	1634 ± 49
${}^9\text{C}$	61.1	1.299	1699 ± 51

图 4(a)是 ${}^8\text{B}$ 的 σ_R 数据. 为了比较, 图中给出了 R. Warner^[14]和 F. Negoita^[15]的实验数据(方形和圆形). 图中菱形为本实验数据点, 虚线是假定 ${}^8\text{B}$ 是正常核密度分布, 利用高能 ${}^8\text{B}$ 与 C 的反应总截面的数据, 推得 ${}^8\text{B}$ 的核子密度分布半径(HO 分布). 再用 Glauber 模型计算的 σ_R-E 激发函数曲线. 曲线与实验点普遍偏离, 中、低能时偏离增大. 实线是考虑 ${}^8\text{B}$ 具有扩展空间密度分布后的反应总截面的计算值, 该理论值与我们的实验数据符合得很好, 这表明质子滴线核 ${}^8\text{B}$ 可能具有质子晕结构.

图 4(b)是 ${}^9\text{C}$ 的 σ_R 数据. 实线和虚线的意义与图 4(a)相同, 目前还没有其它 ${}^9\text{C}$ 与 ${}^{28}\text{Si}$ 作用截面的实验数据. 但从我们的数据与 Glauber 模型计算的 σ_R-E 响应曲线拟合趋势分析, ${}^9\text{C}$ 也可能是质子晕核.

为了进一步分析实验数据, A. Ozawa^[8]和 D. Q. Fang^[21]等引入了一个参量 d , 其定义为

$$d = \frac{\sigma_{\text{exp}} - \sigma_{\text{cal}}}{\sigma_{\text{cal}}}, \quad (2)$$

公式中 σ_{exp} 代表实验测得的反应截面 σ_R , σ_{cal} 为利用高能实验数据拟合得到的密度分布参

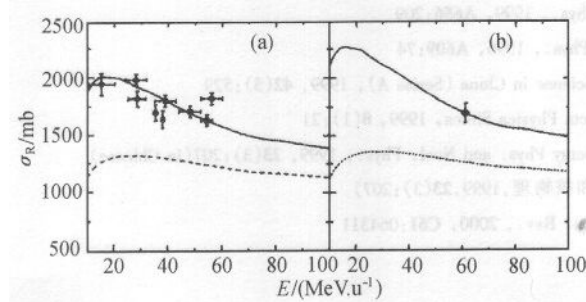


图 4 $^8\text{B} + \text{Si}$ (a)和 $^9\text{C} + \text{Si}$ (b)的实验 σ_R 数据及用 Glauber 模型计算的 σ_R - E 曲线
详细说明见正文.

数,再计算与实验值相同能量点的反应截面值. A. Ozawa 等分析了大量的实验数据,发现对于正常核, d 值一般在 10%—20% 之间变化,而对于具有奇异结构的核(如晕核), d 值变化范围可达 30%—40%,甚至于 50%. 因此,认为 d 值是反映核结构的一个参量,其值大小能判断一个核是否具有晕结构.

利用本实验得到 ^9C , ^8B 与Si反应的截面 σ_R 与用Glauber模型计算的 σ_R ,计算出相应 d 值. 结果发现对于 ^9C 和 ^8B , d 约32%. 因此,我们认为, ^9C 和 ^8B 很可能具有晕结构. 对于 ^8B ,我们的结果与 R. E. Warner, F. Negoita 和 M. Fukuda 等人的结果一致. 对于 ^9C ,其它可供参考的实验数据较少,需要做更多的实验进行研究.

作者十分感谢上海原子核所沈文庆院士、蔡翔舟和方德清博士非常有益的讨论. 衷心感谢兰州中能重离子加速器国家实验室提供稳定的 ^{12}C 初级束流和 ^8B 等放射性次级束流以及许多其它方便.

参考文献 (References)

- 1 Bernas M et al. Nucl. Phys., 1997, **A616**:352c
- 2 Tanihata I et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**:2627
- 3 Chulkov I. et al. Nucl. Phys., 1996, **A603**:219
- 4 Saint-Laurent M G et al. Z. Phys., 1989, **A332**:457
- 5 Suzuki T et al. Nucl. Phys., 1998, **A630**:661
- 6 Tanihata I et al. Phys. Lett. Phys. Lett., 1985, **B160**:380
- 7 Ozawa A et al. Nucl. Phys., 1996, **A608**:63
- 8 Suzuki T et al. Nucl. Phys., 1997, **A616**:286c
- 9 Ozawa A et al. Phys. Lett., 1994, **B334**:18
- 10 REN Z Z et al. Phys. Rev., 1996, **C53**:572
- 11 REN Z Z et al. J. Phys. G. Nucl. Part. Phys., 1998, **24**:1823
- 12 Warner R E et al. Nucl. Phys., 1998, **A635**:292
- 13 Charagi S K et al. Phys. Rev., 1990, **C41**:1610
- 14 Warner R E et al. Phys. Rev., 1995, **C52**:1166
- 15 Negoita F et al. Phys. Rev., 1996, **C54**:1787

- 16 Fukuda M et al. Nucl. Phys., 1999, **A656**:209
- 17 Obuti M M et al. Nucl. Phys., 1996, **A609**:74
- 18 ZHAN Wen-Long et al. Science in China (Series A), 1999, **42**(5):529
- 19 GUO Zhong-Yan et al. Acta Physica Sinica, 1999, **8**(1):21
- 20 LI Jia-Xin et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1999, **23**(3):207(in Chinese)
(李加兴等. 高能物理和核物理, 1999, **23**(3):207)
- 21 FANG De-Qing et al. Phys. Rev., 2000, **C61**:064311

Measurement of Total Reaction Cross Sections for ^8B and ^9C on Silicon Target *

WANG Quan-Jin ZHAN Wen-Long GUO Zhong-Yan XIAO Guo-Qing SUN Zhi-Yu
WANG Meng CHEN Zhi-Qiang LI Jia-Xing WANG Jian-Song NING Zhen-Jiang
WANG Jin-Chuan WANG Jian-Feng

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

Abstract Intermediate energy radioactive ion beams of ^8B and ^9C were produced with 75MeV/u ^{12}C beam on ^9Be target. Total reaction cross sections σ_{R} for ^8B and ^9C on silicon target were measured by the transmission method at the second focus of RIBLL. If the two nuclei are treated as normal nuclei, the values of the total cross sections calculated by Glauber Model are much lower than the experimental ones. Assuming additional tails for the nuclear density distribution of ^8B and ^9C , the calculated values reproduce the experimental data very well. The experimental results combined with Glauber theory analysis show that ^8B and ^9C may be of a halo structure.

Key words total reaction cross section, Glauber model, proton halo

Received 21 September 2000

* Supported by NSFC(19825115, 19735010, 19935030)