

54 MeV/u ^8B + Si 反应总截面的测量*

王全进 肖国青 詹文龙 郭忠言 李加兴 王建松 王金川
王 猛 宁振江 陈志强 王建峰 王武生 毛瑞士

中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000

摘要 能量为 75 MeV/u 的 ^{12}C 初级束轰击 2 mm 厚的初级 Be 靶, 兰州放射性束流线从弹核碎片中分离出 54 MeV/u 的质子滴线核束 ^8B , 再注入到 Si 靶上, 用透射法测量了 ^8B 与 Si 的反应总截面 σ_{R} . 对于 ^8B , 如果用正常的核物质密度分布代入 Glauber 模型中, 计算得到的反应截面值比实验值小得多, 而用扩展的质子密度分布代入该模型中进行计算, 则计算值与实验值符合很好.

关键词 ^8B 反应总截面 Glauber 模型 质子

放射性束流 (RIB) 装置拓宽了实验核物理在同位旋 (T_z) 自由度上从稳定核直到滴线核的广袤空间. 通常, 位于 β 稳定线及其附近的核, 中子数与质子数之比 (N/Z) 在 1~1.5 范围变化, 对于远离稳定线非稳定核, N/Z 可在 0.5~4 范围变化, 如 ^9C 的 $N/Z=0.5$, ^{10}He 的 $N/Z=4$. 开展这些远离 β 稳定线非稳定核性质、结构及衰变特性研究是人们关注的热点.

1985 年 Tanihata 等首先在 LBL 利用高能放射性次级束流开展非稳定核研究, 通过测量相互作用截面 (σ_{I}) 发现丰中子奇异核 ^{11}Li 具有异常大的 σ_{I} , 从而推断 ^{11}Li 中子密度分布呈长尾状, 即中子晕结构^[1]. 目前, 相互作用截面的测量已成为判别奇异核是否具有晕或皮结构的重要方法之一. 人们已对高能区域轻丰中子奇异核引起的相互作用截面进行了较系统测量, 结果发现除 ^{11}Li 外, $^{11,14}\text{Be}$, $^{17,19}\text{B}$, ^{19}C , $^{23,24}\text{O}$ 等也具有中子晕结构. 一般认为, 非稳定核的价核子分离能 <1 MeV, 且价核子处于低角动量轨道时, 价核子可能呈现扩展的空间分布——晕. 晕是核表层的价核子空间, 它应该导致反应截面增强, 研究结果也验证了这一观点^[2]. 判断一种放射性核素是否具有晕结构, 主要通过测量反应截面 (σ_{R}) 或相互作用截面, 弹核碎裂产物的径向动量分布宽度和电四极矩的大小. 晕核的 σ_{I} 或 σ_{R} 明

显增大, 碎裂产物动量分布变窄, 电四极矩增强. 由于反应截面测量方法比较简单, 因此截面的测量常常被首先采用.

计算表明 ^8B 的最后一个核子的结合能很低^[3], 只有 138 keV, 因而认为 ^8B 有可能是具有质子晕结构的质子滴线核. 理论计算也预言, 除 ^8B 外, ^9C , ^{17}F , ^{17}Ne , $^{26-28}\text{P}$, $^{27-29}\text{S}$ 等也可能具有质子晕结构, 但还没有在实验上证实. Smedberg, Esbensen, Kelly 和 Schwab 等分别在他们的实验中, 在不同的能区测量了 ^8B 碎裂反应产物 ^7Be 的径向动量分布, 得到 ^7Be 很窄的径向动量分布宽度^[4~7]. Minamisono 等测量到 ^8B 的电四极矩明显增大^[8]. Warner 等^[9,10] 分别测量了中能区 ^8B 在 Si 上的总反应截面, 所得到的截面异常增大, 无法用传统的 Glauber 模型进行解释. 所有这些实验数据均表明 ^8B 具有质子晕结构.

与此相反, Tanihata 及 Obuti 等在 800 MeV/A 的能区测量了 ^8B 与 C 靶的相互作用截面 σ_{I} , 结果与镜像核 ^8Li 的 σ_{I} 相同, 相互作用截面没有明显增强, 不能推断 ^8B 具有晕结构^[1,11,12]. 因此, 对于 ^8B 是否为质子晕核, 目前仍有争议.

本文描述了利用穿透法测量中能区 ^8B 与 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 具有质子晕结构特征.

2001-04-20 收稿, 2001-06-11 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 19825115, 19935030, 19735010)

1 实验和粒子鉴别

54 MeV/u 放射性次级束流 ^8B 是在兰州重离子加速器放射性束流线 (RIBLL)^[13]产生并经过分离而得到的. 其产生过程如下: 兰州重离子加速器 (HIRFL) 提供的能量为 75 MeV/u ^{12}C 初级束流 (流强约 30 enA), 经过束流输运线到达 RIBLL 的初级靶室 (T_0), 轰击 2 mm 厚的 ^9Be 靶, 弹核 ^{12}C 碎裂, 产生许多放射性核素. 经过 RIBLL 的磁铁分析与平均厚度为 2 mm Al 楔型降能器选择放射性束 (B_p 和 dE/dx 选择), 在 RIBLL 第一聚焦点 T_1 , 得到能量为 54 MeV/u, 强度为 3600 pps 的 ^8B 次级束流. RIBLL 将它输运到 RIBLL 第二聚焦点 (T_2), 注入到 Si 多叠层望远镜. 望远镜的第 1 片 Si 探测器作为次级靶, 与 ^8B 相互作用. 入射粒子 ^8B 通过飞行时间 t_F 和能量损失 ΔE_1 被清楚鉴别. 望远镜的第 2 片 Si 探测器和后续探测器构成出射产物粒子鉴别望远镜, t_F , ΔE_2 和总能量 E 同时鉴别出射碎片^[14]. 其中 t_F 是由分别放在第 1 聚焦点 (T_1) 和第 2 聚焦点 (T_2) 的快塑料闪烁膜时间拾取探测器测得^[15]. Si 多叠层望远镜由 5 片全耗尽型探测器构成, 厚度分别为 150, 150, 150, 2000 和 2000 μm . 望远镜的第 1 片 Si 探测器作为次级靶, 它也提供 ^8B 在其中的能量损失信号 ΔE_1 . 望远镜的第 2 片探测器提供能量损失信号 ΔE_2 , 以此类推, 得到 ΔE_3 , ΔE_4 , ΔE_5 . 在望远镜之后, 设置一套 10 mm 厚的位置灵敏 CsI(Tl) 闪烁探测器, 它测量穿过前 5 片 Si 的较轻粒子. 粒子的总能量 $E_T = \sum_{i=1}^5 \Delta E_i + E_{\text{CsI(Tl)}}$. 对于 54 MeV/u 的 ^8B , 被阻止在第 4 片 Si 中, 因此 $\Delta E_5 = E_{\text{CsI(Tl)}} = 0$.

以此类推, 望远镜的第 2 片和第 3 片 Si 探测器也可作为 $^8\text{B} + \text{Si}$ 反应靶, 分别测量两个不同能量点的反应总截面.

图 1 是 75 MeV/u 的 $^{12}\text{C} + ^9\text{Be}$ 并经过 RIBLL 分析系统得到的 ^8B 的 ΔE_1 的二维关联图. 从图中看到, 除 ^8B 外伴随有 ^9C , ^7Be , ^6Li 和 ^4He . 因此, 在获取 ^8B 的反应截面数据的同时, 也获取了 ^9C , ^7Be , ^6Li 等束流粒子的反应截面数据. 从这幅图可以清楚看出, 尽管在 ^8B 次级束流中有 ^9C , ^7Be , ^6Li 等伴随, 但它们被很好鉴别和分离. 在分析数据时, 只要在 t_F 上或在双维谱 $\Delta E_1 - t_F$ 上加窗, 就可以单选出 ^8B 或其他 RIB.

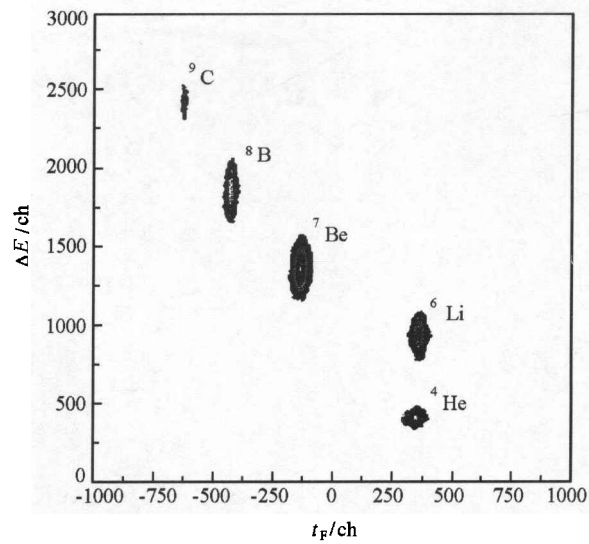


图 1 RIBLL 从 75 MeV/u ^{12}C 轰击 ^9Be 靶产生的碎片中, 经 $B_p - dE/dx$ 选择, $\Delta E - t_F$ 鉴别的放射性束 ^8B 等二维等高图

2 实验数据处理与分析

采用衰减法测量反应截面 σ_R 的关键是如何准确确定进入次级反应靶 Si (ΔE_1) 的入射粒子数 N_{in} 以及穿过 Si 靶而没有与其发生反应的出射粒子数 N_{out} .

离线数据分析之前, 首先要做探测器望远镜的能量刻度和 t_F 的时间刻度. 这是计算粒子总能量和在各个薄片探测器中能量损失的基础. 分析 ^8B 数据时, 在 t_F 和 $\Delta E_1 - t_F$ 上加窗选择出 ^8B , 程序以逐个事件方式进行筛选. 对于每一个入射 ΔE_1 的 ^8B 粒子, 望远镜中的 ΔE_2 以及后续探测器成员符合探测其出射粒子. 由于发生反应的 ^8B 粒子与没有发生反应的 ^8B 粒子相比, 在望远镜探测器上的总能量 E_t 较小, 因而导致在能损探测器上的能量沉积 ΔE_2 与没有发生反应的 ^8B 能量沉积 ΔE_2 及总能量也有显著的不同. 因此可从 $\Delta E_2 - E_t$ 二维关联图上根据反应与未反应的 ΔE 与 E_t 的显著区别, 选择出未发生反应的 ^8B . 但是, 必须指出的是由于探测器分辨本领的限制, 发生反应的 ^8B 与未发生反应的 ^8B 在 ΔE_2 上沉积能量有重叠区, 这样就会增大反应截面测量的系统误差. 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 ^8B 粒子) 构建在第 3 片探测器上的 $\Delta E_3 - E_t$ 二维图, 发现有一部分 ^8B 粒子在第 3 块探

测器上的能量沉积和未反应⁸B相比有显著区别,我们认为这一部分⁸B粒子在进入第3片探测器之前就已经发生了反应.这样可更加精确地得到穿过第2片探测器而未发生反应的⁸B粒子.

根据反应截面的计算公式

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

其中, σ_T 代表反应总截面 (b); T 是靶厚 (cm); ρ 为单位体积的粒子数 ($1/\text{cm}^3$) 即靶密度; N_{in} , 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 $150 \mu\text{m}$ 的 Si 靶, 公式 1 的第 1 项为 1330 b.

3 实验结果和讨论

根据上述分析实验数据的方法,同时应用 Monte-Carlo 方法对整个探测器的探测效率进行模拟计算,考虑计数的统计误差及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,我们得到 54.2 MeV/u ⁸B 与 Si 的反应总截面 $\sigma_R = (1634 \pm 49) \text{ mb}$. 图 2 是 σ_R 数据的图形表示. 为了比较,也画上了 Warner^[9] 和 Negoita^[10] 的实验数据.

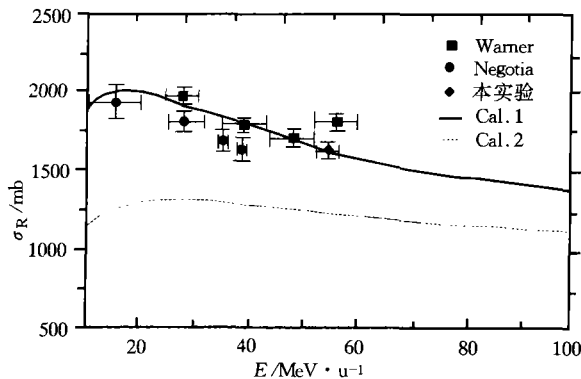


图 2 ⁸B + Si 的实验 σ_R 数据及用 Glauber 模型计算的 σ_R -E 曲线

为了进一步分析实验数据,我们应用 Glauber 模型进行了计算.由于 Glauber 模型是在高能情况下推导的,因此我们首先将⁸B当成正常核,利用高能⁸B与C的反应总截面的数据,推得⁸B的核子密度分布半径(HO分布).在此基础上计算⁸B与Si反应的 σ_R -E曲线(图2中Cal.2曲线).很明显,曲线与实验点普遍偏离,低能时偏离增大.这表明

我们的⁸B在Si靶上反应截面实验数据以及 Warner, Negoita 的数据不能用⁸B具有正常的密度分布解释.为了对本次的实验数据进行合理的解释,我们考虑了⁸B的密度分布具有扩展的长尾,如图3所示,虚线和实线分别为中子和质子的密度分布,其中质子的密度分布与中子的密度分布相比有一个明显的扩展的尾巴(晕),将这种密度分布再代入 Glauber 模型中计算得到了图2中Cal.1曲线,它与实验数据符合得很好.也与 Warner, Negoita 等在中能区的实验结果一致.因此,质子滴线核⁸B与²⁸Si在中能区的反应截面,已经无法用具有正常核密度分布的 Glauber 模型来描述,而将一个扩展的质子密度分布代入 Glauber 模型中,则能够很好地拟合实验数据,说明⁸B可能具有扩展的密度分布,即具有质子晕结构.

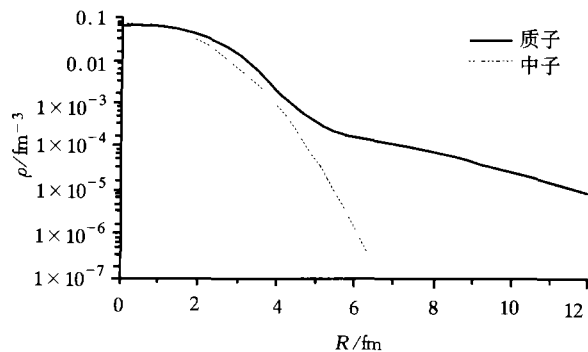


图 3 在 Glauber 模型计算中用于拟合实验数据⁸B 的质子和中子密度分布

从图2中也可以看出, Warner 数据中的较高能量点明显偏离了反应截面曲线. Negoita 的实验数据普遍较低,且实验误差较大.我们的实验数据和 Warner 的数据,与考虑了⁸B的密度分布具有扩展的长尾得到的 σ_R -E 曲线相当符合.

致谢 作者十分感谢中国科学院上海原子核研究所沈文庆院士、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¹²C初级束流和⁸B等放射性次级束流以及许多其他方便.

参 考 文 献

- 1 Tanihata I, et al. Measurements of interaction cross sections and nuclear radii in the light p-shell region. Phys Rev Lett, 1985, 55: 2627

- 2 Anne R, et al. Observation of forward neutrons from the break-up of the ^{11}Li neutron Halo. Phys Lett, 1990, 250B: 19
- 3 Audi G, et al. The 1993 atomic mass evaluation (I). Atomic mass table, Nucl Phys, 1993, A565: 1
- 4 Smedberg M H, et al. New results on the halo structure of ^8B . Phys Lett, 1999, B452: 1
- 5 Esbensen H. Momentum distributions in stripping reactions of single-nucleon halo nuclei. Phys Rev, 1996, C53: 2007
- 6 Kelley J H, et al. Study of breakup reaction $^8\text{B} \rightarrow ^7\text{Be} + \text{p}$: Absorption effects and E2 strength. Phys Rev Lett, 1996, 77: 5020
- 7 Schwab W, et al. Observation of proton halo in ^8B . Z Phys, 1995, A350: 283
- 8 Minamisono T, et al. Proton halo of ^8B disclosed by its giant quadrupole moment. Phys Rev Lett, 1992, 69: 2058
- 9 Waner R E, et al. Evidence for a proton halo in ^8B : Enhanced total reaction cross sections at 20 to 60 MeV/nucleon. Phys Rev, 1995, C52: R1166
- 10 Negoita F, et al. ^8B proton halo via reaction and breakup cross section measurements. Phys Rev, 1996, C54: 1787
- 11 Obuti M M, et al. Interaction cross section and interaction radius of the ^8B nucleus. Nucl Phys, 1996, A609: 74
- 12 Tanihata I, et al. Measurement of interaction cross sections using isotope beams of Be and B and isospin dependence of the nuclear. Phys Lett, 1988, B206: 592
- 13 Zhan W L, et al. Radioactive ion beam line in Lanzhou. Science in China (Series A), 1999, 42(5): 529
- 14 郭忠言, 等. RIBLL 的束流诊断. 高能物理与核物理. 1999, 23: 213
- 15 李加兴, 等. RIBLL 上飞行时间测量. 高能物理与核物理. 1999, 23: 207

编辑部公告

《自然科学进展》和《Progress in Natural Science》期刊于2002年起将全文入网“万方数据——数字化期刊群”(www.wanfangdata.com.cn)。所有在两刊发表文章的作者, 将由编辑部统一纳入“万方数据——数字化期刊群”, 进入因特网信息服务系统。欢迎读者和作者浏览。