

丰中子奇异核 ^{17}B 的实验研究*

胡正国¹⁾ 王 猛¹⁾ 徐瑚珊¹⁾ 孙志宇¹⁾ 王建松¹⁾ 肖国青¹⁾
詹文龙¹⁾ 肖志刚¹⁾ 毛瑞士¹⁾²⁾ 张宏斌¹⁾ 赵铁成¹⁾ 徐治国¹⁾
王 1)2) 陈若富¹⁾²⁾ 黄天衡¹⁾²⁾ 高 辉¹⁾²⁾ 贾 飞¹⁾²⁾
付 芬¹⁾²⁾ 高 启¹⁾²⁾ 韩建龙¹⁾²⁾ 章学恒¹⁾²⁾ 郑 川¹⁾²⁾
余玉洪¹⁾²⁾ 樊瑞睿¹⁾²⁾ 李 波¹⁾²⁾ 郭忠言¹⁾

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)

(2007 年 6 月 4 日收到, 2007 年 9 月 24 日收到修改稿)

在兰州重离子加速器国家实验室(HIRFL)放射性次级束流线(RIBLL)上,用束流透射法测量了丰中子奇异核 ^{17}B 与 C 靶反应的总截面.假定 ^{17}B 具有 ^{15}B 核芯)+ $2n$ 结构,采用 Gauss + HO 形式的密度分布和零力程 Glauber 模型进行计算的结果可以很好地拟合实验数据,并得出 ^{17}B 的密度分布有一个很大的弥散,表明 ^{17}B 是双中子晕核.

关键词: 丰中子奇异核, 反应总截面, Glauber 模型, 密度分布

PACC: 2500, 2570

1. 引 言

核物质密度分布是原子核的重要性质之一,它与核势、单粒子轨道和波函数密切相关.电子散射和质子散射实验是研究稳定核密度分布的传统方法.重离子放射性束流引起反应相互作用截面(高能)或反应总截面(中低能)的测量开辟了研究直到质子滴线和中子滴线不稳定核密度分布的新方法.近年来,在放射性束物理实验研究中发现一些新的物理现象,如 ^{11}Li , ^{11}Be , ^{14}Be 和 ^{17}B 等接近中子滴线核的中子晕^[1]和与之相联系的软模 GDR 新型集体运动和激发模式^[2].对 ^{31}Na 和 ^{32}Mg , $N = 20$ 的壳模型幻数可能消失^[3]等.这些现象对传统的核理论模型提出了尖锐的挑战.

在轻滴线核区,随着束缚能的降低,一些核表现出扩展的密度分布、窄的动量分布等晕态特征.对这些具有晕态特征核的研究是当前放射性束物理的热点之一.迄今,被研究的晕核主要有 2 类:两体晕核和三体晕核.两体晕核由一个核芯与一个价核子

组成,如质子晕核 ^8B ,中子晕核 ^{11}Be , ^{19}C 等.三体晕核由一个核芯与两个价核子组成,如 ^6He , ^{11}Li , ^{14}Be 等.这些三体晕核也称为 Borromean 核,其中任何两体都构不成粒子稳定的子系统.

Ren 等^[4]认为 ^{17}B 是由核芯 ^{15}B 加两个价中子组成的双中子晕核(Borromean 核);Descouvemont^[5]假定 ^{17}B 具有 $^{13}\text{B} + 2n + 2n$ 的结构,并做了相应的理论计算. Suzuki 实验组^[6]在 GSI 的 FRS 上测量了 880 A MeV 的 ^{17}B 在 C 靶上的相互作用截面 $\sigma_I = 1118 \pm 22$ mb. Yamaguchi 等^[7]在 RIKEN 的 RIPS 上测量了 77 A MeV 的 ^{17}B 与 C 靶作用的总截面 $\sigma_R = 1400 \pm 29$ mb. Suzuki 等^[8]还测量了 ^{17}B 的双中子去除截面 $\sigma_{-2n} = 220 \pm 50$ mb.因为在费米能区反应截面随能量的变化更加显著,所以测量该能区 ^{17}B 引起的反应对研究其结构更有说服力.目前还没有费米能区 ^{17}B 引起反应的实验工作,本实验着重研究该能区 ^{17}B 与 C 靶的反应.

2. 实验装置及测量方法

实验是在兰州重离子加速器(HIRFL)的放射性

* 国家自然科学基金(批准号:10221003,10475098,10605033),中科院知识创新工程重要方向(批准号:KJ951-A1-101)和中科院“百人计划”(批准号:0501080BRO)资助的课题.

束流线(RIBLL)^{9,10,1}上进行的.图1为RIBLL束流线及实验中探测器的布局.用HIRFL提供的70 A MeV ^{22}Ne 初级束流轰击位于RIBLL初级靶室T0处、3 mm 厚的Be靶产生次级束流.为了得到包括 ^{17}B 、 ^{19}C 、 ^{14}Be

和 ^{11}Li 等核素的混合次级束流,RIBLL仅通过磁刚度($B\rho$)进行初级选择,没有使用降能器对次级束流进行纯化.通过磁刚度选择后的混合次级束流被输运到位于RIBLL第2焦面T2处的次级反应靶室.

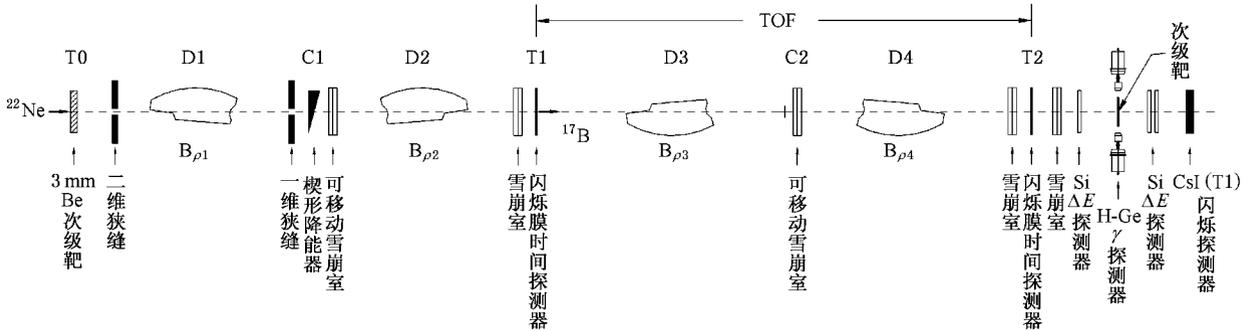


图1 RIBLL束流线及 ^{17}B 实验中探测器的布局

T1和T2处分别放置了测量束流粒子起始时间和终止时间的探测器^[11].在次级C靶前安装了两个位置灵敏的平行板雪崩计数器(PPAC)^[12],用来监测入射束流的方向和束斑的大小;还安装了一片面积 $48\text{ mm} \times 48\text{ mm}$,厚度 $325\text{ }\mu\text{m}$ 的Si- ΔE 探测器,主要用来进行靶前的 ΔE -TOF粒子鉴别.次级靶后放置由两片面积 $48\text{ mm} \times 48\text{ mm}$,厚度 $325\text{ }\mu\text{m}$ 的Si- ΔE 探测器和CsI(Tl)阻止型探测器^[13]组成的望远镜,构成反应后粒子的鉴别系统.在次级靶周围垂直放置4个CLOVER探测器,用来测量与反应碎片符合的 γ 能谱.实验数据以事件列表方式被记录到计算机磁带上,然后用PAW程序进行在线和离线处理.

窗条件投影到靶后的两片Si探测器上,由于穿过Si探测器而未发生反应的离子的能谱应遵从高斯分布,再根据发生反应与未发生反应的 ^{17}B 离子能量损失的不同,即可得到 N_{out} .将上述 N_t 、 N_{in} 和 N_{out} 代入(1)式得出 $43.70 \pm 2.44\text{ A MeV}$ 的 ^{17}B 与C靶的反应总截面 $\sigma_{\text{R}} = 1724 \pm 93\text{ mb}$.测量误差主要考虑了统计误差、界定反应与未反应 ^{17}B 离子的不确定性带来的最大误差以及靶厚的误差.为了弥补在束流输运过程中造成的 ^{17}B 离子损失带来的误差,利用空靶实验进行了校正.表1列出了本实验和另外三个实验对 $^{17}\text{B} + \text{C}$ 体系 σ_{R} 和 σ_1 的测量结果.

3. 实验结果与物理分析

3.1. 实验结果

^{17}B 与C靶反应的总截面是采用束流透射法进行测量的.这种方法原理简单,而且不依赖于理论模型.反应总截面可表示为

$$\sigma_{\text{R}} = \frac{1}{N_t} \ln \left(\frac{N_{\text{in}}}{N_{\text{out}}} \right), \quad (1)$$

其中 N_t 为单位面积的靶核数, N_{in} 为入射到靶上的 ^{17}B 离子数, N_{out} 为未与靶发生反应的透射 ^{17}B 离子数.准确定出 N_{in} 和 N_{out} 是实验成功的关键.图2为靶前混合次级束流的 ΔE -TOF粒子鉴别双维谱,从中可以清楚地鉴别出 ^{17}B .从二维谱上选择出 ^{17}B ,就得到了入射的 ^{17}B 离子数 N_{in} .将选择出的 ^{17}B 作为开

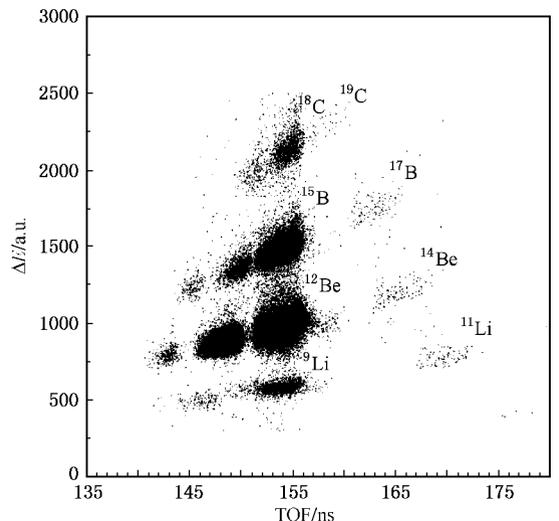


图2 69.3 A MeV ^{22}Ne 轰击3.119 mm厚的 ^9Be 靶,通过 $B\rho$ - ΔE -TOF分离和鉴别的 ^{17}B 混合次级束流的双维谱

表 1 $^{17}\text{B} + \text{C}$ 体系的 σ_R 和 σ_1 数据

能量/A MeV	σ_R/mb	σ_1/mb	来源
43.7	1724 ± 93		本实验
77	1400 ± 29		Exp. Yamaguchi ^[7]
790		1150 ± 200	Exp. Tanihata ^[16]
880		1118 ± 22	Exp. Suzuki ^[6]

3.2. Glauber 模型拟合实验数据

Glauber 模型^[14]是目前最常用的研究反应截面的微观模型,被广泛用于从核反应截面中提取核的密度分布.利用该模型拟合反应截面,需要输入弹核和靶核的密度分布.对于稳定核,中子和质子的密度分布基本相同;但对于奇异核,由于两者不同,需要分别给出中子和质子的密度分布.

GO (Gaussian-Oscillator) 是一种唯象的密度分布形式,它假定核芯的密度分布是 Gaussian 形式的,而价核子的密度分布是 HO (Harmonic Oscillator) 形式的.鉴于采用 GO 形式的密度分布可以较好地拟合 ^6He 的实验数据^[15],我们也采用该形式的密度分布来拟合 ^{17}B 的实验数据.假定 ^{17}B 的结构是核芯 ^{15}B 加两个价中子, ^{15}B 采用 Gauss 形式的密度分布,2 个价中子采用 HO 形式的密度分布,则 ^{17}B 的 GO 密度分布可具体表示为

$$\rho_c(r) = \left(\frac{3}{2\pi R_c^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{3r^2}{2R_c^2}\right), \quad (2)$$

$$\rho_h(r) = \frac{5}{3} \left(\frac{5}{2\pi R_h^2}\right)^{3/2} \left(\frac{r}{R_h}\right)^2 \exp\left(-\frac{5r^2}{2R_h^2}\right),$$

式中 ρ_c 和 ρ_h 分布表示核芯和核芯外价中子的密度分布,可调参数 R_c 和 R_h 分别表示核芯和价中子的均方根半径. ^{17}B 密度分布的均方根半径 R_m 为

$$R_m = \left[\frac{4R_c^2 + (A - 4)R_h^2}{A}\right]^{1/2}. \quad (3)$$

利用 Gauss + HO (GO) 形式的密度分布计算 ^{17}B 的质子和中子密度分布如图 3(a) 所示.可以看出,中子的密度分布具有较大的弥散.当输入的 $R_c = 2.25 \text{ fm}$ 和 $R_h = 5.85 \text{ fm}$ 时,得到的 ^{17}B 密度分布均方根半径为 $R_m = 2.91 \pm 0.10 \text{ fm}$.将 GO 形式的密度分布代入 Glauber 模型得出 $^{17}\text{B} + \text{C}$ 反应的激发函数如图 3(b) 所示.图中除本实验的数据外,还标出了另外三个实验^[6,7,16]的数据.由图可见,计算的激发曲线与四个实验的结果符合得很好,表明 ^{17}B 的结构是核芯 ^{15}B 加两个价中子的假设是合理的.

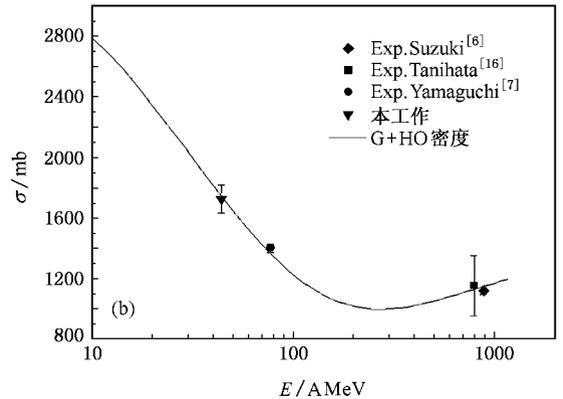
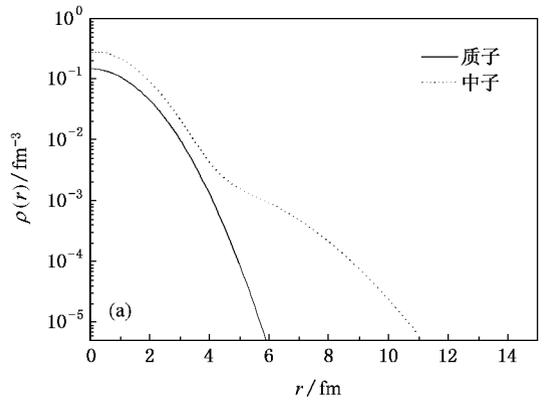


图 3 (a) 采用 GO 形式的密度分布,计算得到的 ^{17}B 的质子和中子密度分布 (b) 将 GO 形式的密度分布代入 Glauber 模型得出的 $^{17}\text{B} + \text{C}$ 反应的激发函数

3.3. ^{17}B 密度分布的提取

从上面的计算可以看出,采用 Gauss + HO 形式的密度分布可以很好地描述 ^{17}B 的密度分布.图 4 是利用 Gauss + HO 形式的密度分布计算的结果,虚线为 ^{17}B 的密度分布,实线为核芯 ^{15}B 的密度分布.可以

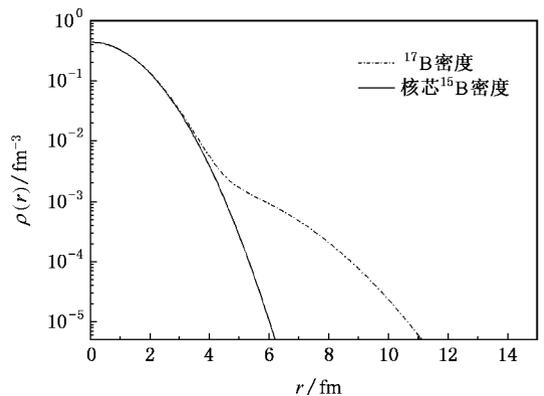


图 4 利用 Gauss + HO 形式的密度分布计算的 ^{17}B 及其核芯 ^{15}B 的密度分布

看出 ^{17}B 的密度分布在核芯外有很大的弥散, 而引起弥散的主要是核芯外的两个价中子, 从而可以得出 ^{17}B 具有双中子晕结构的结论.

4. 结论与讨论

通过 RIBLL 上进行的实验测量了 ^{17}B 与 C 靶反应的总截面. 采用 Gauss + HO 形式的密度分布输入 Glauber 模型进行计算的结果很好地拟合了本实验和另外三个实验的从低能区到高能区的数据.

通过 Gauss + HO 形式的密度分布以及 Glauber 模型计算的 ^{17}B 的激发函数与实验结果的比较, 看出 ^{17}B 的密度分布相对于核芯 ^{15}B 有显著的弥散. 该弥散主要是由核芯外的两个价中子引起的, 从而表明 ^{17}B 具有双中子晕结构. 本实验首次给出了费米能区的 ^{17}B 与 C 靶反应的总截面, 有助于进一步确认 ^{17}B 的晕结构.

我们在实验中曾试图利用 CLOVER 探测器来测量与碎片符合的 γ 能谱. 由于统计较低, 而本底较高, 这方面的工作还有待改进.

- [1] Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O, Nagamiya S, Shida Y, Yoshikawa N, Yamakawa O, Sugimoto K, Kobayashi T, Greiner D E, Takahashi N, Nojiri Y 1985 *Phys. Lett. B* **160** 380
- [2] Ikeda K 1992 *Nucl. Phys. A* **538** 355
- [3] Mittig W 1988 *Proc. RIKEN-IV2P3 Symp. on Heavy Ion Collisions* (Japan : Mori Printing Co) p70
- [4] Ren Z Z, Xu G O 1990 *Phys. Lett. B* **252** 311
- [5] Descouvemont P 1995 *Nucl. Phys. A* **581** 61
- [6] Suzuki T, Kanungo R, Bochkarev O, Chulkov L, Cortina D, Fukuda M, Geissel H, Hellström M, Ivanov M, Janik R, Kimura K, Kobayashi T, Korsheninnikov A A, Münzenberg G, Nichel F, Oglobin A A, Ozawa A, Pfitzner M, Pribora V, Simon H, Sitár B, Strmeň P, Sumiyoshi K, Stümmerer K, Tanihata I, Winkler M, Yoshida K 1999 *Nucl. Phys. A* **658** 313
- [7] Yamaguchi Y, Wu C, Suzuki T, Ozawa A, Fang D Q, Fukuda M, Iwasa N, Izumikawa T, Jeppesen H, Kanungo R, Koyama R, Ohnishi T, Ohtsubo T, Shinozaki W, Suda T, Takahashi M, Tanihata I 2004 *Phys. Rev. C* **70** 054320
- [8] Suzuki T, Ogawa Y, Chiba M, Fukuda M, Iwasa N, Izumikawa T, Kanungo R, Kawamura Y, Ozawa A, Suda T, Tanihata I, Watanabe S, Yamaguchi T, Yamaguchi Y 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 012501
- [9] Sun Z Y, Zhan W L, Guo Z Y, Xiao G Q, Li J X 2003 *Nucl. Inst. and Meth A* **503** 496
- [10] Li J X, Guo Z Y, Xiao G Q, Zhan W L, Wang J S, Sun Z Y, Wang M, Tian W D, Wang W S, Mao R S, Wang Q J, Ning Z J, Wang J F 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 58 (in Chinese) [李加
- 兴、郭忠言、肖国青、詹文龙、王建松、孙志宇、王 猛、田文栋、王武生、毛瑞士、王全进、宁振江、王建峰 2003 物理学报 **52** 58]
- [11] Li J X, Zhan W L, Guo Z Y, Sun Z Y, Xiao G Q, Wang J C, Meng X W, Jiang S H, Qin L J, Zhang W S, Wang Q J 1999 *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* **23** 231 (in Chinese) [李加兴、詹文龙、郭忠言、孙志宇、肖国青、王金川、孟祥伟、江山红、秦礼军、张万生、王全进 1999 高能物理与核物理 **23** 231]
- [12] Wang M, Guo Z Y, Zhan W L, Xiao G Q, Xu H S, Mao R S, Hu Z G, Chen Z Q, Sun Z Y, Li J X, Wang W S, Chen L X, Li C, Bai J, Zhang X A, Zhang J X, Li C F 2003 *Nucl. Tech.* **26** 245 (in Chinese) [王 猛、郭忠言、詹文龙、肖国青、徐瑚珊、毛瑞士、胡正国、陈志强、孙志宇、李加兴、王武生、陈立新、李琛、白 洁、张小安、张金霞、李存藩 2003 核技术 **26** 245]
- [13] Qin L J, Zhan W L, Guo Z Y, Xiao G Q, Sun Z Y, Li J X, Meng X W, Jiang S H, Wang J C, Wang Q J 1999 *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* **23** 629 (in Chinese) [秦礼军、詹文龙、郭忠言、肖国青、孙志宇、李加兴、孟祥伟、江山红、王金川、王全进 1999 高能物理与核物理 **23** 629]
- [14] Glauber R J 1959 *Lectures on Theoretical Physics* (New York : interscience) p1
- [15] Alkhazov G D, Dobrovolsky A V, Egelhof P, Geissel H, Imich H, Khanzadeev A V, Korolev G A, Lobodenko A A, Münzenberg G, Mutterer M, Neumaier S R, Schwab W, Seliverstov D M, Suzuki T, Vorobyov A A 2002 *Nucl. Phys. A* **712** 269
- [16] Tanihata I 1990 *Radioactive Nuclear Beams* (World Scientific) p429

Experimental study for neutron-rich exotic nuclei ^{17}B *

Hu Zheng-Guo¹⁾ Wang Meng¹⁾ Xu Hu-Shan¹⁾ Sun Zhi-Yu¹⁾ Wang Jian-Song¹⁾ Xiao Guo-Qing¹⁾
 Zhan Wen-Long¹⁾ Xiao Zhi-Gang¹⁾ Mao Rui-Shi^{1 2)} Zhang Hong-Bin¹⁾ Zhao Tie-Cheng¹⁾
 Xu Zhi-Guo¹⁾ Wang Yue^{1 2)} Chen Ruo-Fu^{1 2)} Huang Tian-Heng^{1 2)} Gao Hui^{1 2)} Jia Fei^{1 2)}
 Fu Fen^{1 2)} Gao Qi^{1 2)} Han Jian-Long^{1 2)} Zhang Xue-Heng^{1 2)} Zheng Chuan^{1 2)}
 Yu Yu-Hong^{1 2)} Fan Rui-Rui^{1 2)} Li Bo^{1 2)} Guo Zhong-Yan¹⁾

1 $\ddot{\text{X}}$ *Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*

2 $\ddot{\text{X}}$ *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 4 June 2007; revised manuscript received 24 September 2007)

Abstract

The total reaction cross section of ^{17}B on C target has been measured by using the transmission method at the Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou (RIBLL). Assuming ^{17}B consisting of a core ^{15}B plus two halo neutrons, the total cross section of ^{17}B on C target was calculated with the zero-range Glauber model where Gaussian plus HO density distributions were used. It fitted the experimental data very well. A large diffusion was found about the density distribution of ^{17}B . Based on the analysis, the two neutrons halo of ^{17}B was confirmed.

Keywords : neutron-rich exotic nuclei, total cross section, Glauber model, density distribution

PACC : 2500, 2570

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10221003, 10475098 and 10605033), the Funds of the Chinese Academy of Sciences for Key Topics in Innovation Engineering (Grant No. KJCX2-SW-N18), the '100 Talents Project' of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. 0501080BR0).