

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2017.01.005

# $^{16}\text{C}$ 反应截面和去中子截面的研究<sup>①</sup>

桂朝颀<sup>1</sup>, 李加兴<sup>1</sup>, 曾文<sup>1</sup>, 周济人<sup>2</sup>,  
焦磊<sup>2</sup>, 张兴<sup>1</sup>, 段芳芳<sup>1</sup>, 马朋<sup>3</sup>,  
金仕纶<sup>3</sup>, 王凯龙<sup>3</sup>, 宋玉收<sup>4</sup>, 刘辉兰<sup>4</sup>, 胡力元<sup>4</sup>

1. 西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715;

2. 重庆大学 动力学院, 重庆 400044;

3. 中国科学院 近代物理研究所, 兰州 730000;

4. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 哈尔滨 150001

**摘要:** 实验测量了能量为 38A MeV 的  $^{16}\text{C}$  在  $^{12}\text{C}$  靶上的反应截面和去中子截面. 利用有限力程 Glauber 模型进行计算并与实验结果进行比较得出,  $^{16}\text{C}$  主要为芯核( $^{14}\text{C}$ )加价中子( $2n$ )的双核子晕核, 其中价中子主要分布在  $2s_{1/2}$  轨道上. 该实验进一步在更低能量下获得实验数据并和 Glauber 模型计算值符合得很好.

**关键词:** 反应截面; 去中子截面; 有限力程 Glauber 模型; 密度分布

中图分类号: O571.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2017)01-0027-04

自从发现原子核晕结构<sup>[1]</sup>以来, 对不稳定的奇异核结构和性质的研究成为核物理最活跃的研究领域之一. 到现在为止, 有关碳同位素链的研究已经有了大量成果<sup>[2-7]</sup>, 其中  $^{15}\text{C}$  和  $^{19}\text{C}$  是得到确认的具有中子晕的核. 也有研究表明<sup>[8]</sup>, 价核子分离能小是形成晕结构的必要条件而非充分条件, 通过研究反应截面、去中子截面和碎片的纵向动量分布, 可以得到有关价核子布局的更精确的信息, 从而可以更进一步确定是否具有晕结构.

$^{16}\text{C}$  的中子分离能相对于其他丰中子核来说要大一些; 单中子分离能为  $S_n = 4.250$  MeV, 双中子分离能为  $S_{2n} = 5.468$  MeV<sup>[9]</sup>, 图 1 为碳同位素链中去一个中子和去两个中子的分离能<sup>[10]</sup>. 研究  $^{16}\text{C}$  晕结构的意义在于<sup>[3]</sup>:  $^{16}\text{C}$  被假设为  $^{14}\text{C}$  (core) +  $2n$  的两体核, 这并不像  $^6\text{He}$ ,  $^{11}\text{Li}$ ,  $^{14}\text{Be}$  的三体(Borromean)核. 原因在于  $^{15}\text{C}$  是由  $^{14}\text{C} + 1n$  构成的, 价中子是束缚态, 而不是非束缚态. 加之  $^{16}\text{C}$  的中子分离能比其他有晕结构的核大, 并且比起具有双中子晕结构核( $^6\text{He}$ ,  $^{11}\text{Li}$ ,  $^{14}\text{Be}$ )来说,  $^{16}\text{C}$  是更接近稳定线的核, 有其特殊性.

核反应截面是中、低能核反应研究的一个基本物理量. 测量反应截面或相互作用截面是研究

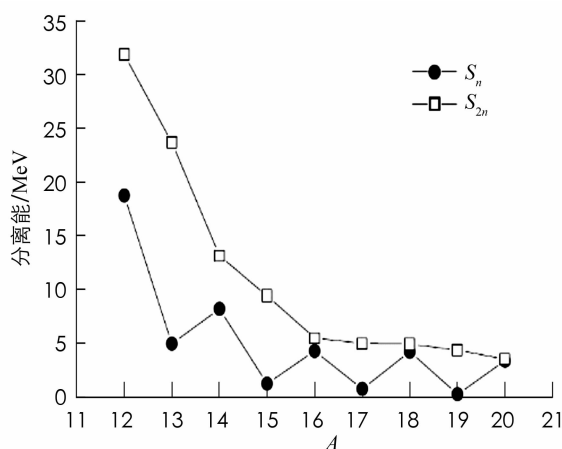


图 1 碳同位素链 1 个和 2 个中子分离能

① 收稿日期: 2015-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(11075133; U1332126; 10205019).

作者简介: 桂朝颀(1990-), 男, 云南昭通人, 硕士研究生, 主要从事原子核实验研究.

丰中子核素是否具有晕结构的有效手段。在碳同位素链中,此方法已经成功发现了 $^{15}\text{C}$ 和 $^{19}\text{C}$ <sup>[5,11]</sup>的晕结构现象。郑涛等<sup>[3]</sup>人也通过测量 $^{16}\text{C}$ 的反应截面,并引入有限力程 Glauber 模型对实验结果进行分析,提取 $^{16}\text{C}$ 的核子密度分布,初步确定 $^{16}\text{C}$ 为双中子晕结构核。测量去中子反应截面和碎片纵向动量分布也是研究丰中子核结构的有力方法,能够给出丰中子核的基态  $J^\pi$  值和不同芯核中子单粒子组态的谱因子<sup>[3]</sup>。Sauvan<sup>[12]</sup>等人总结了现有的  $Z=5-9$ ,  $A=12-25$  的丰中子核的移去 1 个中子截面。

本工作利用兰州放射性次级束流线(RIBLL),测量了 38A MeV 的 $^{16}\text{C}$ 在 $^{12}\text{C}$ 靶上的反应截面和 $^{16}\text{C}$ 移去 1 个中子截面;实验的结果利用有限力程 Glauber 模型计算并与现有的实验结果进行比较,都吻合得很好。

## 1 实验与数据分析

实验在兰州重离子加速器国家实验室(HIRFL)的放射性束流线(RIBLL1)终端<sup>[13-15]</sup>上完成。利用 HIRFL 提供的能量为 80A MeV 的 $^{18}\text{O}$ 作为初级束,轰击 4 615  $\mu\text{m}$  的 $^9\text{Be}$ 靶,其弹核碎裂反应产物在 RIBLL1 上进行分离和鉴别。对次级产物的鉴别采用  $B\rho+(\text{TOF}-\Delta E)$  与  $B\rho+(\Delta E-E)$  联合鉴别方法,该方法利用 4 个  $57^\circ$ 角度的二极磁铁、17 m 长的飞行距离和  $0^\circ$ 角度多重望远镜探测器系统。TOF 是由两个相距 17 m、直径 45 mm、厚度 50  $\mu\text{m}$  的 BC-400 塑料闪烁薄膜组成,两个 TOF 闪烁薄膜分别放置在 RIBLL1 的  $T_1$  和  $T_2$  处。在  $T_2$  处安排 2 个相距 48.6 cm 的位置灵敏平行板雪崩探测器(PPAC)<sup>[16]</sup>,用于确定入射粒子径迹,后面安放一厚度为 325 mm 的方硅,与 TOF 构成 TOF- $\Delta E$ ,用于靶前粒子鉴别,鉴别粒子如图 2 所示。方硅后面的次级靶为厚 100  $\text{mg}/\text{cm}^3$  的碳靶,紧靠靶前安放第 3 个 PPAC,用于确定入射粒子在靶上的反应位置。在次级靶后为  $\Delta E-E$  望远镜,由 1 块  $16\times 16$  的硅条探测器和  $8\times 8$  的 CsI(Tl)<sup>[17]</sup>阵列探测器组成,主要用于靶后粒子鉴别。图 3 为硅条探测器与第 28 块 CsI(Tl)探测器构成的  $\Delta E-E$  望远镜对 $^{16}\text{C}$ 靶后粒子鉴别,可清晰鉴别出 $^{16}\text{C}$ 反应后的 $^{15}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$ 碎片和非弹性散射的 $^{16}\text{C}$ 事件。

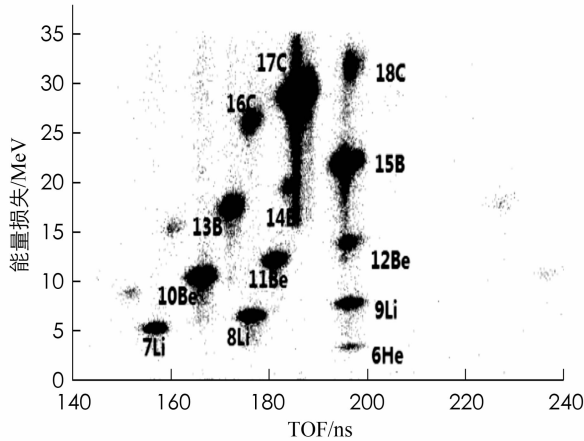


图 2 靶前  $\Delta E$  与 TOF 二维粒子鉴别谱

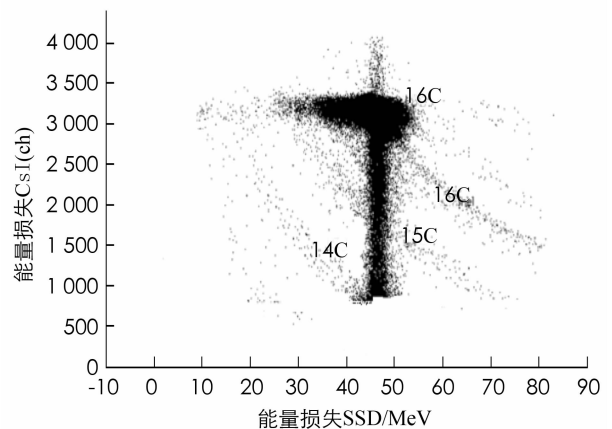


图 3 靶后 $^{16}\text{C}$ 反应碎片粒子  $\Delta E-E$  鉴别谱

在测量 $^{16}\text{C}$ 反应截面时考虑事件统计误差和实验系统误差后,若靶前入射 $^{16}\text{C}$ 数目和靶后测得的没有发生反应的 $^{16}\text{C}$ 数目分别记为  $N_{\text{in}}$  和  $N_{\text{out}}$ ,  $R=N_{\text{in}}/N_{\text{out}}$ , 反应靶厚为  $t$ , 则反应截面可以由下公式给出:

$$\sigma_R = -\frac{1}{t} \ln\left(\frac{R_{\text{in}}}{R_{\text{out}}}\right)$$

$R$  的下标“in”和“out”分别指有靶和空靶实验。

计算去中子截面的公式表达式为

$$\sigma_{-xn} = \frac{1}{t} \frac{N(^{16-x}\text{C})}{T_r N_{\text{in}}}$$

其中:  $x$  为移去的中子个数,  $N(^{16-x}\text{C})$  为靶后测得的各产物事件数,  $T_r$  为 RIBLL 束流线的传输效率。

经过数据分析处理,本工作得到 38A MeV 的 $^{16}\text{C}$ 在 $^{12}\text{C}$ 靶上的反应截面和移去一个中子截面和现有的实验结果分别列入表 1 和表 2。表 1 为 $^{16}\text{C}+^{12}\text{C}$ 在不同能量下的反应截面,表 2 为 $^{16}\text{C}+^{12}\text{C}$ 在不同能量下的中子移去截面。

表 1 不同能量下  $^{16}\text{C}$  在  $^{12}\text{C}$  靶上的反应截面

能量/MeV	反应截面/mb
38A	1 596 ± 12(本实验)
39A	1 559 ± 44(文献[5])
83A	1 237 ± 25(文献[3])
960A	1 036 ± 11(文献[4])

表 2 不同能量下  $^{16}\text{C}$  在  $^{12}\text{C}$  靶上的移去 1 个中子截面

能量/MeV	移去 1 个中子截面/mb
38A	122 ± 15(本实验)
46A	96 ± 11(文献[18])
83A	65 ± 15(文献[19])

## 2 讨 论

实验数据利用有限程 Glauber 模型 FRGM (Finite-Range Glauber Model)<sup>[20]</sup> 拟合分析. 假设  $^{16}\text{C}$  的密度分布为谐振子 HO (Harmonic-Oscillator) 分布, 其半径参数由拟合高能区的反应截面得到, 相应 Glauber 模型的计算结果见图 4. 从图 4 可以看出在低能区, 实验值高于计算值(二者还是存在一定偏差). 再假设  $^{16}\text{C}$  为核芯( $^{14}\text{C}$ )加价中子(2n)密度分布形式:  $^{14}\text{C}$  密度为 HO 分布和价中子<sup>[21]</sup>密度分布取参数与文献[3]中  $^{16}\text{C}$  的相应密度分布参数相同. 计算值与实验值比较, 结果见图 5. 图中实线为假设  $^{16}\text{C}$  的价中子处于  $2s_{1/2}$  轨道的计算值, 虚线为价中子处于  $1d_{5/2}$  轨道的计算值. 可以看出实线部分拟合实验数据比虚线部分拟合得要好多. 对于去中子截面, 本文只给出实验结果, 相关的理论分析正在进行中.

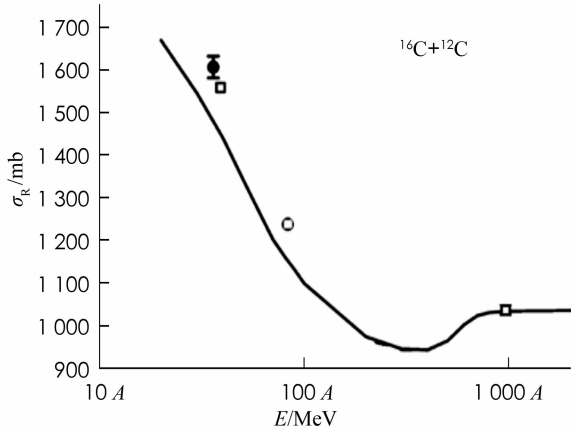
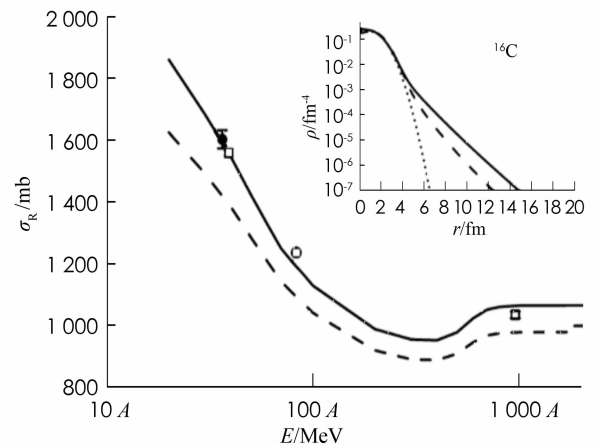


图 4 利用单参数(HO 分布)FRGM 计算值与实验值比较结构



实线为假设  $^{16}\text{C}$  的价中子处于  $2s_{1/2}$  轨道的计算值, 虚线为价中子处于  $1d_{5/2}$  轨道的计算值.

图 5 利用核芯( $^{14}\text{C}$ )加价中子(2n)分布的 FRGM 计算值与实验值比较结果

## 3 总 结

本实验在兰州重离子加速器国家实验室(HIRFL)的放射性束流线(RIBLL1)终端上完成, 测量了能量为 38A MeV 的  $^{16}\text{C}$  在  $^{12}\text{C}$  靶上的反应截面和去中子截面. 利用有限程 Glauber 模型通过拟合现有的  $^{16}\text{C}$  反应截面数据. 对反应截面的分析给出,  $^{16}\text{C}$  的价中子主要出于  $2s_{1/2}$  轨道上, 这与文献 [3, 17] 的实验结果和测量动量分布研究  $^{16}\text{C}$  结构得到的结果一致. 本实验为更低能量下丰中子核反应研究提供实验数据和理论解释.

致谢: 感谢兰州重离子加速器国家实验室(HIRFL), 兰州放射性束流线(RIBLL1)提供的实验条件和帮助.

### 参考文献:

- [1] TANIHATA I. RI Beams Dream and Reality [J]. Nucl Phys A, 2001, 685(1-4): 80-99.
- [2] OZAWA A, SUZUKI T, TANIHATA I. Nuclear Size and Related Topics [J]. Nuclear Physics A, 2001, 693(1-2): 32-62.
- [3] ZHENG T, YAMAGUCHI T, OZAWA A, et al. Study of Halo Structure of  $^{16}\text{C}$  from Reaction Cross Section Measurement [J]. Nucl Phys A, 2002, 709(1-4): 103-118.
- [4] OZAWA A, BOCHKAREV O, CHULKOV L, et al. Measurements of Interaction Cross Sections for Light Neutron-Rich Nuclei at Relativistic Energies and Determination of Effective Matter Radii [J]. Nucl Phys A, 2001, 691(3-4): 599-617.

- [5] FANG D Q, SHEN W Q, FENG J, et al. Measurements of Total Reaction Cross Sections for Some Light Nuclei at Intermediate Energies [J]. *Phys Rev C*, 2000, 61: 064311.
- [6] WU C, YAMAGUCHI Y, OZAWA A, et al. Study of the Density Distribution of  $^{17}\text{C}$  from Reaction Cross Section Measurement [J]. *Nucl Phys A*, 2004, 739(1-2): 3-14.
- [7] LEASK P J, ACHOURI L, ANGELIQUE J C, et al. Search for Molecular States in  $^{16}\text{C}$  [J]. *Phys G: Nucl Part Phys* 2001, 27(8): B9-B14.
- [8] 吴翠娥, 叶沿林, 江栋兴, 等.  $^{17}\text{C}$  反应截面和去中子截面 [J]. *高能物理与核物理*, 2005, 29(11): 1052-1056.
- [9] AUDI G, BERSILLON O, BLACHOT J, et al. The NUBASE Evaluation of Nuclear and Decay Properties [J]. *Nucl Phys A*, 2003, 729(1): 3-128.
- [10] WU C, YAMAGUCHI Y, OZAWA A, et al. Neutron Removal Reactions of  $^{17}\text{C}$  [J]. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2005, 31(1): 39-47.
- [11] CHIBA M, KANUNGO R, ABU-IBRAHIM B. Neutron Removal Studies on  $^{19}\text{C}$  [J]. *Nucl Phys A*, 2004, 741: 29-41.
- [12] SAUVAN E, CARSTOIU F, ORR N A. One-Neutron Removal Reactions on Light Neutron-rich Nuclei [J]. *Phys Rev C*, 2004, 69(4): 044603.
- [13] SUN Zhi-yu, ZHAN Wen-long, GUO Zhong-yan, et al. Separation and Identification of Isotopes Produced from  $^{20}\text{Ne} + \text{Be}$  Reaction by Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou [J]. *Chin Phys Lett*, 1998, 15: 790-792.
- [14] SUN Z, ZHAN W L, GUO Z Y, et al. RIBLL, the Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou [J]. *Nucl Instrum Methods Phys, Sect A*, 2003, 503(3): 496-503.
- [15] ZHAN W L, XIA J W, ZHAO H W, et al. HIRFL Today [J]. *Nucl Phys A*, 2008, 805(1): 533c-540c.
- [16] GENG P, DUAN L M, MA P. Delay-line PPAC for Intermediate Energy Light Ions [J]. *Nuclear Physics Review*, 2010, 27(4): 450-455.
- [17] 姚向武, 杨彦云, 王建松, 等.  $8 \times 8$  单元 CsI(Tl) 探测阵列研制 [J]. *原子能科学学报*, 2010, 44(3): 358-361.
- [18] ASHWOOD N I, FREER M, ANGÉLIQUE J C. Measurements of the Breakup and Neutron Removal Cross Sections for  $^{16}\text{C}$  [J]. *Phys Rev C*, 2004, 70(6): 064607.
- [19] YAMAGUCHI T, ZHENG T, OZAWA A. Momentum Distributions of  $^{14}\text{C}$  and  $^{15}\text{C}$  Fragments from  $^{16}\text{C}$  Breakup [J]. *Nucl Phys A*, 2003, 724(1): 3-13.
- [20] 李加兴, 郭忠言, 肖国青, 等. 利用改进的 Glauber 模型对非奇异核核反应总截面数据的拟合 [J]. *物理学报*, 2003, 52(1): 58-62.
- [21] 刘白伊, 韩 瑞, 夏学伟, 等. 轻核区中子晕结构的系统研究 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 36(4): 18-22.

## On Reaction Cross Section and Neutron Removal Cross Section of $^{16}\text{C}$

GUI Chao-jin<sup>1</sup>, LI Jia-xing<sup>1</sup>, ZENG Wen<sup>1</sup>, ZHOU Ji-ren<sup>2</sup>, JIAO Lei<sup>2</sup>,  
ZHANG Xing<sup>1</sup>, DUAN Fang-fang<sup>1</sup>, MA Peng<sup>3</sup>, JIN Shi-lun<sup>3</sup>,  
WANG Kai-long<sup>3</sup>, SONG Yu-shou<sup>4</sup>, LIU Hui-lan<sup>4</sup>, HU Li-yuan<sup>4</sup>

1. School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

4. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

**Abstract:** The reaction cross section and neutron removal cross section of  $^{16}\text{C}$  with the energy of 38A MeV on carbon target have been measured, and the finite-range Glauber-model calculation been performed and compared with the experimental data. The analysis shows that  $^{16}\text{C}$  has a core ( $^{14}\text{C}$ ) + halo ( $2n$ ) structure and two valence neutrons is in the  $2s_{1/2}$  orbit. In addition, in the case of lower energy, our experimental results are in good agreement with the results from Glauber-model calculated.

**Key words:** reaction cross section; neutron removal cross section; the finite-range Glauber-model; density distribution