

# $^{15}\text{C}$ 的中子晕结构研究\*

方德清<sup>1,2;1)</sup> Yamaguchi T.<sup>2</sup> 郑涛<sup>2,3</sup> Ozawa A.<sup>2</sup> Chiba M.<sup>2</sup> Kanungo R.<sup>2</sup>  
Kato T.<sup>2</sup> Morimoto K.<sup>2</sup> Ohnishi T.<sup>2</sup> Suda T.<sup>2</sup> Yamaguchi Y.<sup>2</sup>  
Yoshida A.<sup>2</sup> Yoshida K.<sup>2</sup> Tanihata I.<sup>2</sup>

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama 351-0198, Japan)

3 (北京大学物理学院技术物理系 北京 100871)

**摘要** 实验测量了  $83\text{ A MeV }^{14,15}\text{C}$  的核反应总截面 ( $\sigma_R$ ) 及  $^{15}\text{C}$  产生  $^{14,15}\text{C}$  和  $^{14}\text{C}$  产生  $^{13}\text{C}$  的动量分布 ( $P_{//}$ ). 分析得到了  $^{15}\text{C}$  产生  $^{14}\text{C}$  和  $^{13}\text{C}$  的动量分布半高宽 (FWHM) 分别为  $71 \pm 9\text{ MeV}/c$  和  $223 \pm 28\text{ MeV}/c$ , 而  $^{14}\text{C}$  产生  $^{13}\text{C}$  的 FWHM 为  $195 \pm 21\text{ MeV}/c$ . 从  $^{15}\text{C}$  和  $^{14}\text{C}$  产生  $^{13}\text{C}$  的 FWHM 与 Goldhaber 模型的预言基本一致. 而  $^{15}\text{C}$  产生  $^{14}\text{C}$  的 FWHM 却要比该模型计算小得多. 同时观测到  $^{15}\text{C}$  的  $\sigma_R$  比相邻核有反常增加. 在 Glauber 模型框架中, 对实验测得的  $P_{//}$  和  $\sigma_R$  进行了探讨.  $P_{//}$  和  $\sigma_R$  的分析结果同时显示  $^{15}\text{C}$  的最后一个中主要处于  $s_{1/2}$  态, 具有中子晕结构.

**关键词** 动量分布 核反应总截面 Glauber模型

## 1 引言

自从中子晕结构的发现<sup>[1]</sup>, 对远离稳定线的核结构研究引起了人们极大的兴趣.  $^{15}\text{C}$  的中子分离能 ( $S_n$ ) 为  $1.218\text{ MeV}$ , 基态的  $J^\pi$  为  $1/2^+$ , 是一个可能的中子晕核<sup>[2]</sup>. 实验测得  $^{15}\text{C}$  的  $s$  波谱因子为  $0.99$ <sup>[3]</sup>. MSU 和 GANIL 测量了  $^{15}\text{C}$  产生  $^{14}\text{C}$  的  $P_{//}$ <sup>[4-6]</sup>. 提取的 FWHM 比 Goldhaber 模型预言窄<sup>[7]</sup>. 这些结果都表明  $^{15}\text{C}$  的基态主要处于  $s$  轨道. 另一方面, 中能和低能的  $\sigma_R$  测量结果却互相矛盾<sup>[8-11]</sup>. 研究显示, 从  $\sigma_R$  和  $P_{//}$  中提取的谱因子可能不一致<sup>[12,13]</sup>. 对  $^{15}\text{C}$ , 从  $\sigma_I$  得出  $^{15}\text{C}$  的  $s$  波谱因子为  $0.49 \pm 0.22$ <sup>[8]</sup>, 这比前面提到的值要小得多. 这种不自洽的结果使得对  $^{15}\text{C}$  结构的进一步研究具有重要意义. 因此, 我们对  $^{14,15}\text{C}$  的  $\sigma_R$  和  $P_{//}$  同时进行了测量<sup>[14]</sup>.

## 2 实验测量

实验是在日本理化学研究所的 RIPS 束线上进行的. 用  $110\text{ A MeV}$  的  $^{22}\text{Ne}$  作主束, 轰击 Be 靶来产

生  $^{14,15}\text{C}$  次级束. 实验装置如图 1 所示.

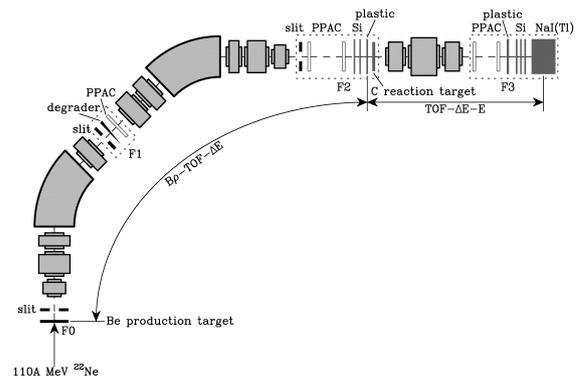


图 1 实验装置

$F1$  的 Al 降能片通过能损来选择粒子, 平行板雪崩探测器 (PPAC) 用来检测束流的动量宽度并给出  $F1$  到  $F2$  的 TOF 起始时间. 在  $F2$  的反应靶前二块 PPAC 用来测量束流的位置和角度, 二块 Si 探测器测量能损和塑料闪烁体给出靶前 TOF 的终止信号和靶后 TOF 的起始信号, 靶前粒子鉴别方法为  $B_p - \Delta E - \text{TOF}$ . 束流通过三个四极磁铁输

\* 国家重点基础研究发展规划项目 (G2000774004), 国家自然科学基金 (10405032, 10328259 和 10135030) 和上海市科技启明星 (03QA14066) 资助

1) E-mail: dqfang@sinap.ac.cn

运和聚焦到F3. 二块PPAC用来测量束流的位置和角度, 塑料闪烁体给出靶后TOF的终止信号.  $\Delta E$ 信号用三块Si来测量. 总能量 $E$ 用NaI测量. 这套TOF- $\Delta E$ - $E$ 粒子鉴别方法能给出很好的电荷和质量分辨.

### 3 测量结果与讨论

产生碎片的 $P_{//}$ 由放在F2和F3的二块塑料闪烁体之间的飞行时间得到. 详细分析方法可参考文献[13]. 我们从分析结果中提取出 $^{15}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{C}$ ,  $^{15}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{C}$ 和 $^{14}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{C}$ 分布的FWHM分别为 $71 \pm 9\text{MeV}/c$ ,  $223 \pm 28\text{MeV}/c$ 和 $195 \pm 21\text{MeV}/c$ .  $^{15}\text{C}$ 产生 $^{14}\text{C}$ 的FWHM与以前的实验结果一致<sup>[4,6]</sup>.  $^{15}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{C}$ 分布的FWHM与Goldhaber模型预言一致<sup>[7]</sup>. 而 $^{14}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{C}$ 分布的FWHM与以前的实验测量及Goldhaber模型预言一致<sup>[6,7]</sup>.

为了深入研究测得的 $^{15}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{C}$ 和 $^{14}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{C}$ 的 $P_{//}$ , 我们用少体Glauber模型进行计算<sup>[15]</sup>. 假设 $^{15}\text{C}$ 和 $^{14}\text{C}$ 为核芯+价中子结构, 核芯的密度分布用HO并通过拟合高能 $\sigma_R$ 确定其参数<sup>[8]</sup>. 价中子的波函数通过求解Woods-Saxon势的本真值问题得到, 调节势深度参数使能量本真值与 $S_n$ 一致<sup>[13]</sup>.

我们把计算结果与实验数据在图2中进行了比较, 插图中给出了可能的擦去过程. 对 $^{14}\text{C}$ 末态为基态和激发态的计算结果几乎一样且与实验数据能很好符合[图2(b)]. 对 $^{15}\text{C}$ 我们分别计算了末态为基态( $0^+$ )和激发态( $1^-$ ,  $0^-$ 和 $2^+$ )的反应道, 价中子分别处于 $s, p, p$ 和 $d$ 轨道. 在图2(a)中, 我们把计算结果与 $P_{//}$ 的实验数据进行了比较. 虽然 $s$ 波分布的宽度与实验结果比较接近, 但没有一个单一的分布能很好地拟合实验数据. 因此我们考虑组态混合, 总的 $P_{//}$ 可以通过谱因子写成各反应道 $P_{//}$ 的叠加<sup>[16]</sup>. 假设谱因子为自由参数, 调节这些参数来拟合 $^{15}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{C}$ 的 $P_{//}$ . 拟合结果如图2(a)的实线所示. 拟合得出 $s$ 波和 $d$ 波对单核子擦去截面( $\sigma_{-1n}$ )的贡献分别为 $66 \pm 13\%$ 和 $4^{+10}\%$ . MSU测量了各反应道的截面, 得到 $d$ 波对 $\sigma_{-1n}$ 的贡献为2%<sup>[5]</sup>. 而库仑离散测量得出 $d$ 波贡献几乎为零<sup>[17]</sup>. 我们的分析同样显示 $d$ 波对 $\sigma_{-1n}$ 的贡献非常小.

实验同时用透射法测量了 $\sigma_R$ , 通过有靶和空靶时没反应的出射粒子与入射粒子之比得到. 详细分析方法可参考文献[12]. 分析得到 $^{14,15}\text{C}$ 的 $\sigma_R$ 如表1所示. 从结果中我们可以看出, 83 A MeV  $^{15}\text{C}$ 的 $\sigma_R$ 比相邻核有很大反常增加, 而在高能区却没有<sup>[8]</sup>. 这是我们观察

到 $^{15}\text{C}$ 可能有反常结构的证据.

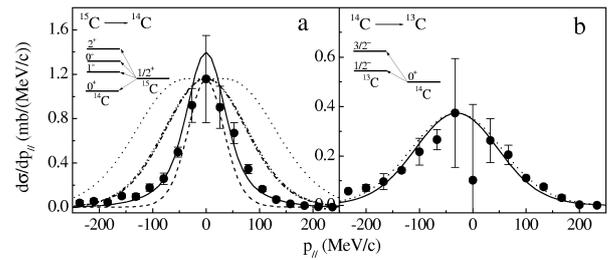


图2  $^{15}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{C}$ (a)和 $^{14}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{C}$ (b)的 $P_{//}$

(a)实心点是实验数据, 实线为少体 Glauber 模型的拟合结果, 短划线、短划-点线、短划-点-点线和点线分别为 Glauber 模型计算出的  $s, p, p$  和  $d$  波的结果; (b)实心点是实验数据, 实线和点线是末态为基态和激发态时的  $P_{//}$ .

表1 C同位素的核反应总截面

炮弹	能量/(A MeV)	$\sigma_R/\text{mb}$	参考文献
$^{12}\text{C}$	83	$957 \pm 39$	[12]
$^{14}\text{C}$	83	$1075 \pm 61$	本实验
$^{15}\text{C}$	83	$1319 \pm 40$	本实验
$^{15}\text{C}$	51	$1560 \pm 44$	本实验
$^{16}\text{C}$	83	$1237 \pm 25$	[12]

为了探讨 $^{15}\text{C}$ 可能的晕结构, 我们用有限力程 Glauber模型从实验测得的 $\sigma_R$ 中提取密度分布. 与前面一样, 假设 $^{15}\text{C}$ 为核芯+价中子结构. 此时, 核芯的HO参数通过拟合本实验中83 A MeV  $^{14}\text{C}$ 的 $\sigma_R$ 确定. 然后在计算价中子波函数时通过调节Woods-Saxon势中的深度参数来拟合 $^{15}\text{C}$ 在83 A MeV和51 A MeV的 $\sigma_R$ , 拟合结果如图3所示. 为了解释实验数据,  $^{15}\text{C}$ 的密度分布要有一个很长的尾巴. 拟合得到的密度分布与 $s$ 波更加接近, 这说明价中子主要处于 $s$ 轨道.

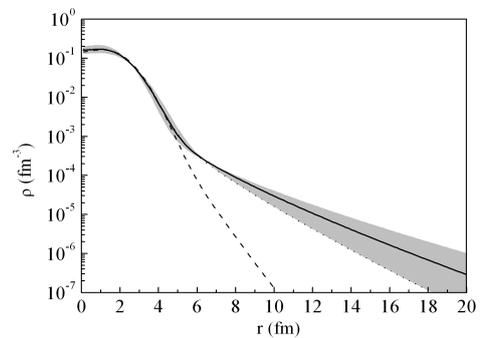


图3  $^{15}\text{C}$ 的密度分布

实线为拟合结果, 阴影部分为拟合的误差. 点线和短划-点线分别为计算出的最后一个中子处于 $s$ 和 $d$ 轨道时的密度分布.

## 4 结论

实验测量了83 A MeV  $^{14,15}\text{C}$ 的 $\sigma_R$ 及 $^{15}\text{C}$ 产生 $^{13,14}\text{C}$ 和 $^{14}\text{C}$ 产生 $^{13}\text{C}$ 的 $P_{//}$ . 分析结果显示 $^{15}\text{C}$ 产生

$^{14}\text{C}$  分布的FWHM要比Goldhaber模型计算小得多. 同时观测到  $^{15}\text{C}$  的  $\sigma_{\text{R}}$  比相邻核有很大的反常增加. 在Glauber模型的框架中, 对实验测得的  $P_{//}$  和  $\sigma_{\text{R}}$  进

行了探讨与分析.  $P_{//}$  和  $\sigma_{\text{R}}$  的分析结果同时显示  $^{15}\text{C}$  的最后一个中主要处于  $s_{1/2}$  态, 具有中子晕结构.

### 参考文献(References)

- 1 Tanihata I et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676
- 2 Audi G, Wapstra A H. Nucl. Phys., 1993, **A565**: 66
- 3 Murillo G, Sen S, Darben S E. Nucl. Phys., 1994, **A579**: 125
- 4 Bazin D et al. Phys. Rev., 1998, **C57**: 2156
- 5 Maddalena V et al. Nucl. Phys., 2001, **A682**: 332c
- 6 Sauvan E et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 044603
- 7 Goldhaber A S. Phys. Lett., 1974, **B53**: 306
- 8 Ozawa A et al. Nucl. Phys., 2001, **A691**: 599
- 9 Saint-Laurent M G et al. Z. Phys., 1989, **A332**: 457
- 10 Villari A C C et al. Phys. Lett., 1991, **B268**: 345
- 11 FANG D Q et al. Phys. Rev., 1999, **C61**: 064311
- 12 ZHENG T et al. Nucl. Phys., 2002, **A709**: 103
- 13 Yamaguchi T et al. Nucl. Phys., 2003, **A724**: 3
- 14 FANG D Q et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 034613
- 15 Ogawa Y, Suzuki Y, Yabana K. Nucl. Phys., 1994, **A571**: 784
- 16 Tostevin J A. J. Phys., 1999, **G25**: 735
- 17 Datta Pramanik U et al. Phys. Lett., 2003, **B551**: 63

## Investigation on the Halo Structure in $^{15}\text{C}$ \*

FANG De-Qing<sup>1,2,1)</sup> Yamaguchi T.<sup>2</sup> ZHENG Tao<sup>2,3</sup> Ozawa A.<sup>2</sup> Chiba M.<sup>2</sup> Kanungo R.<sup>2</sup>  
 Kato T.<sup>2</sup> Morimoto K.<sup>2</sup> Ohnishi T.<sup>2</sup> Suda T.<sup>2</sup> Yamaguchi Y.<sup>2</sup>  
 Yoshida A.<sup>2</sup> Yoshida K.<sup>2</sup> Tanihata I.<sup>2</sup>

1 (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2 (The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama 351-0198, Japan)

3 (Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** The  $\sigma_{\text{R}}$  for  $^{14,15}\text{C}$  and  $P_{//}$  of  $^{13,14}\text{C}$  fragments from  $^{15}\text{C}$ , and  $^{13}\text{C}$  fragments from  $^{14}\text{C}$  breakup have been measured at 83 A MeV. FWHMs of  $P_{//}$  have been determined to be  $71 \pm 9 \text{ MeV}/c$  and  $223 \pm 28 \text{ MeV}/c$  for  $^{14}\text{C}$  and  $^{13}\text{C}$  from  $^{15}\text{C}$ , and  $195 \pm 21 \text{ MeV}/c$  for  $^{13}\text{C}$  from  $^{14}\text{C}$ . The FWHM for  $^{13}\text{C}$  from  $^{15}\text{C}$  and  $^{14}\text{C}$  are consistent with Goldhaber model's prediction. While the FWHM of  $^{14}\text{C}$  fragments from  $^{15}\text{C}$  is much smaller. An anomalous enhancement from its neighbors has been observed in the measured  $\sigma_{\text{R}}$  of  $^{15}\text{C}$ . The experimental data are discussed in the framework of the Glauber model. The analysis of both  $P_{//}$  and  $\sigma_{\text{R}}$  data indicate a dominant  $s$ -wave component in the ground state of  $^{15}\text{C}$ .

**Key words** momentum distribution, reaction cross section, Glauber model

\* Supported by Major State Basic Research Development Program in China(G2000774004), National Natural Science Foundation of China(10405032, 10328259, 10135030) and Phosphor Program in Shanghai(03QA14066)

1) E-mail: dqfang@sinap.ac.cn