

^{17}C 反应截面和去中子截面*

吴翠娥^{1,2} 叶沿林^{1,1)} 江栋兴¹ 郑涛¹ 华辉¹ 李智焕¹ 李湘庆¹ 陈志强¹ 胡青元¹
张高龙¹ 庞丹阳¹ 王佳¹ Yamaguchi Y² Ozawa A² Tanihata I²

1 (北京大学物理学院技术物理系和教育部重离子物理重点实验室 北京 100871)

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

摘要 利用日本理化学研究所的放射性束流线 RIPS, 测量了能量为 79A MeV 的 ^{17}C 在 ^{12}C 反应靶上的反应截面, 并同时得到了 ^{17}C 的移去 1 个、2 个及 3 个中子的截面; 分别利用有限力程 Glauber 模型和少体 Glauber 模型结合壳模型的谱因子分析了反应截面和移去 1 个中子截面, 研究了 ^{17}C 的密度分布、结构和价中子布居. 反应截面和中子移去截面是两个相互独立的量, 通过对两者的分析, 都可以得出 ^{17}C 由芯核 ^{16}C 和价中子组成, 并且价中子主要处于 $d_{5/2}$ 轨道的结论. 总结了现有的碳同位素的反应截面和相互作用截面的工作.

关键词 反应截面 去中子截面 Glauber 模型 TOF- ΔE - E 方法

1 引言

自从发现晕结构^[1]的近二十年以来, 对远离 β 稳定线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. 到目前为止, 对 C 同位素链的研究已经有了大量的工作^[2-14]; 而且, C 同位素链是得到确认的唯一具有两个晕核(^{15}C 和 ^{19}C)的同位素链^[2, 11].

与 ^{15}C 和 ^{19}C 类似, ^{17}C 的单中子分离能很小($S_n = (0.729 \pm 0.018)\text{MeV}$), 而双中子分离能比较大($S_n = (4.979 \pm 0.018)\text{MeV}$), 说明 ^{17}C 的价中子是非常弱束缚的. 研究指出^[15], 价核子分离能小是形成晕结构的必要条件而非充分条件, 通过研究反应截面或相互作用截面及碎片的纵向动量分布, 可以得到有关价核子布居的更精确的信息, 从而可以更进一步确认是否具有晕结构.

中子移去反应是研究丰中子核结构的有力工具, 它能够给出丰中子核的基态 J^π 值、不同芯核和中子单粒子组态的谱因子. 文献[12]总结了现有的 $Z = 5-9$, $A = 12-25$ 的丰中子核的一个中子移去截面. 可以看出, 对 ^{17}C , 现有的数据之间存在较大的差别. MSU 的 Bazin 等人的数据^[16]明显低于 Sauvan 等

人^[12]和 Maddalena 等人^[10]的数据; 文献[12]中指出这主要是由于 A1200 谱仪的接受范围有限造成的; 另外, Sauvan 等人^[12]和 Maddalena 等人^[10]的数据之间也存在差别.

本工作利用日本理化学研究所(RIKEN)的放射性束流线 RIPS(RIKEN Projectile Fragment Separator), 测量了 79A MeV 的 ^{17}C 在 ^{12}C 靶上的反应截面, 并同时得到了 ^{17}C 移去 1 个、2 个和 3 个中子的截面; 本实验装置具有大的反应产物种类和动量接收度, 已经成功地应用在了其他几个测量去中子截面和碎片纵向动量分布的实验研究中^[2, 4, 13, 17].

2 实验介绍

本实验是在 RIKEN 的 RIPS 束流线上完成的, 同时测量了 ^{17}C 的反应截面和中子移去截面, 有关实验的详细介绍请参见文献[5-7]. 放射性核束 ^{17}C 由能量为 110A MeV 的初级束 ^{22}Ne 在初级靶 Be 上发生碎裂反应产生, ^{12}C 靶放置于 RIPS 的消色差焦点 F2. 在 ^{12}C 靶前, 我们采用了标准的磁刚度($B\rho$)-能量损失(ΔE)-飞行时间(TOF)方法鉴别和选择入射粒子.

2005 - 03 - 03 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077403)和国家自然科学基金(10221003)资助

1) E-mail: yeyl@pku.edu.cn

从 RIPS 的 F2 到 F3 的实验装置如图 1 所示. ^{12}C 靶后, 采用了 TOF- ΔE - E 方法来实现粒子鉴别, TOF 由 F2 和 F3 的塑料闪烁体给出, ΔE 由电离室 IC (Ion Chamber) 给出, 剩余总能量 E 由 NaI(Tl) 探测器给出. 对 110A MeV 的 ^{22}Ne 束流, 该 NaI(Tl) 探测器可以达到 7%(FWHM) 的能量分辨^[4].

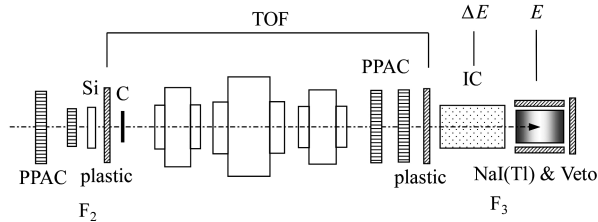


图 1 F2 到 F3 的实验装置示意图

围绕 NaI(Tl) 探测器, 放置了 10 块大面积塑料闪烁体探测器, 这些探测器作为反符合 (Veto) 探测器, 用来探测出射粒子沉积到 NaI(Tl) 探测器时发生反应而发射出的轻带电粒子或中子. 图 2 给出了选择了 $Z=6$ 的出射粒子后的 NaI(Tl) 探测器的能谱, 其中, 斜线阴影部分为使用 Veto 探测器后的能谱. 可以看出, 使用 Veto 探测器后, 由于在 NaI(Tl) 中发生反应而造成的低能尾巴部分明显得到抑制, 发生去中子反应后的碎片所形成的峰可以很明显的与本底区分出来. 通过离线分析, 使用 Veto 探测器可以反符合掉约 86% 的在 NaI(Tl) 探测器中的反应. 由于采用了 TOF- ΔE - E 粒子鉴别方法和反符合技术, 可以得到非常好的粒子分辨^[5-7].

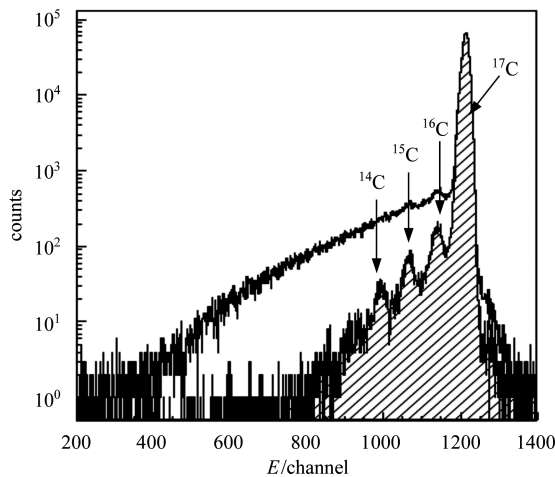


图 2 选择 $Z=6$ 的粒子后的 NaI(Tl) 探测器能谱, 阴影部分为使用 Veto 探测器后得到的能谱

3 实验结果

为了扣除 ^{17}C 束流在传输路径上的各探测器中反应造成的本底, 我们做了空靶实验. 利用不同厚度的初级靶和降能片组合, 调节空靶实验中靶后 ^{17}C 束流的能量与有靶实验时的能量相同, 所以认为有靶实验中在探测系统中反应造成的本底与空靶实验的相同.

若靶前入射 ^{17}C 数目和靶后 F3 处测得的没有发生反应的 ^{17}C 数目分别为 N_{in} 和 N_{out} , $R = N_{\text{in}}/N_{\text{out}}$, 反应靶厚为 t (atoms/cm²), 则反应截面可以由下式给出

$$\sigma_{\text{R}} = -\frac{1}{t} \ln \left(\frac{R_{\text{in}}}{R_{\text{out}}} \right), \quad (1)$$

R 的下标 in 和 out 分别指有靶和空靶实验.

计算中子移去截面的表达式为

$$\sigma_{-xn} = \frac{1}{t} \times \frac{N^{(17-x)\text{C}}}{T \times N_{\text{in}}}, \quad (2)$$

其中, x 为移去的中子个数, t 为靶厚度, $N^{(17-x)\text{C}}$ 为 F3 测得各产物事件数, T 为 RIPS 的 F2 到 F3 对各个碎片的传输效率, 它由 MOCADI 程序^[18]给出.

具体的数据处理过程在文献[5-7]中有详细描述. 本工作得到的 79A MeV 的 ^{17}C 在 ^{12}C 反应靶上的反应截面为: $\sigma_{\text{R}} = 1350 \pm 21$ (mb), 移去 1 个、2 个和 3 个中子的截面总结于表 1 中.

表 1 79A MeV 的 ^{17}C 在 ^{12}C 反应靶上的移去 1 个、2 个和 3 个中子的截面

碎裂产物	去中子截面/mb
^{16}C	$\sigma_{-1n} = 116 \pm 18$
^{15}C	$\sigma_{-2n} = 70^{+33}_{-18}$
^{14}C	$\sigma_{-3n} = 40^{+30}_{-13}$

4 Glauber 模型分析

4.1 反应截面

利用有限程 Glauber 模型^[3], 通过拟合现有的利用透射法得到的 ^{17}C 在 ^{12}C 靶上的反应截面和相互作用截面, 对 ^{17}C 的密度分布进行了分析. 其方法为: 首先假设 ^{17}C 具有一定的密度分布 (其中包含待定参数), 用 Glauber 模型计算给出的反应截面和相互作用截面拟合实验数据, 通过寻找最佳拟合 (即最小 χ^2) 确定待定参数, 从而得到 ^{17}C 密度分布, 如图 3 所示. 分析得出, 同时拟合 ^{17}C 的相互作用截面和反应截面后, ^{17}C 的密度分布中存在一个尾巴; 若假设 ^{17}C 由芯

核 $^{16}\text{C}(2^+)$ 和 1 个价中子 ($1d_{5/2}$ 或 $2s_{1/2}$) 组成, 则可以得到其价中子主要处于 $d_{5/2}(77\% \pm 21\%)$ 轨道上的结论^[5, 6]. 需要说明的是, 图 3 中阴影部分为密度分布的误差, 它表示: 分别假设密度为(谐振子 HO+Yukawa 尾巴)分布和(芯核 ^{16}C + 单粒子密度)分布时, 通过有限力程 Glauber 模型分析得到的 ^{17}C 的两种密度分布的差别. 这种确定密度分布误差的方法在文献[2, 5]中已有应用.

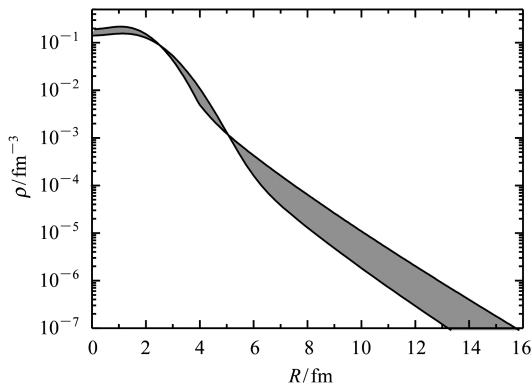


图 3 ^{17}C 密度分布

4.2 去中子截面

^{17}C 移去 1 个中子后, 对应不同芯核态 ^{16}C 的去中子分截面和芯核的动量分布的测量结果^[10]给出, $^{17}\text{C}(J^\pi = 3/2^+)$ 是由不同的芯核态 $^{16}\text{C}(I_c^\pi)$ 和不同的中子单粒子态(量子数为 nlj) 构成, 即 $[I_c^\pi \otimes nlj]^{J^\pi}$. 基于此, 我们认为, ^{17}C 去 1 个中子后到一个特定的芯核态的截面 $\sigma_{-1n}(I_c^\pi)$, 是移去不同中子单粒子态的单粒子截面 σ_{sp} 的叠加, 即

$$\sigma_{-1n}(I_c^\pi) = \sum_{nlj} C^2S(I_c^\pi, nlj) \sigma_{sp}(nlj, S_n^{\text{eff}}), \quad (3)$$

其中, C^2S 是谱因子, $S_n^{\text{eff}} = S_n + E_{\text{ex}}$, E_{ex} 为芯核的激发能, ^{17}C 的去 1 个中子总截面是对应于所有芯核态的 $\sigma_{-1n}(I_c^\pi)$ 的总和.

表 2 79A MeV 的 ^{17}C 在 ^{12}C 靶上的去 1 个中子截面的少体 Glauber 模型的计算结果

I_c^π	E_{ex}/MeV	nlj	C^2S	σ_{sp}/mb	$\sigma_{-1n}(I_c^\pi)/\text{mb}$
0^+	0.0	$1d_{3/2}$	0.035	52.8	1.8
2^+	1.77	$1d_{5/2}$	1.41	40.8	57.6
		$2s_{1/2}$	0.16	79.5	12.7
$2, 3(+), 4^+$	4.1	$1d_{5/2}$	0.76	31.7	24.1
		$2s_{1/2}$	0.22	51.8	11.4
$\sigma_{-1n} = 108\text{mb}$					

在计算中, 与文献[13]相同, 采用了由壳模型^[19]给出的谱因子 C^2S , 单粒子截面由少体 Glauber 模型给出(详细介绍请参见文献[20]). 表 2 给出了所有芯核和

价中子的组态、谱因子 C^2S 、单粒子截面 σ_{sp} 到特定芯核态的分截面 $\sigma_{-1n}(I_c^\pi)$ 以及总的去 1 个中子的截面 σ_{-1n} .

图 4 给出了现有的 ^{17}C 的去 1 个中子截面的实验数据^[12]和少体 Glauber 模型的计算结果. 其中空(实)心点为 C(Be) 靶实验数据; 另外, 点(实)线分别为 C(Be) 靶上的少体 Glauber 模型的计算结果. 可以看出, 本实验数据和 Maddalena 等人的实验结果以及和考虑壳模型给出的谱因子后的少体 Glauber 模型得到的理论结果都符合得很好; 高能的理论计算低估了实验结果, 而低能的理论结果又高于 Sauvan 等人实验数据, 这一现象与文献[13]中对 ^{19}C 的分析类似, 其原因有待于进一步的研究.

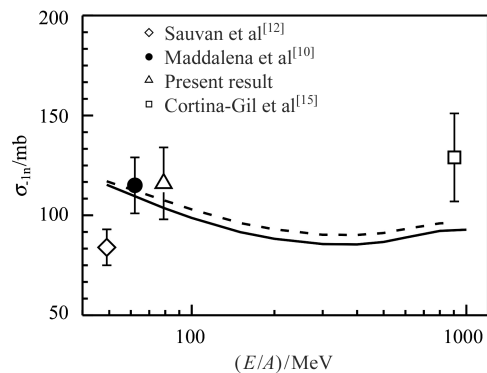


图 4 ^{17}C 去 1 个中子截面实验数据和少体 Glauber 模型计算结果

空(实)心点为 C(Be) 靶实验数据; 点(实)线为 C(Be) 靶的理论结果.

由表 2 可以看出, 构成 ^{17}C 的各组态中, $[2^+ \otimes 1d_{5/2}]^{3/2^+}$ 成分占的比例最大, 其余 4 种成分各自占的比例很小, 即可以认为 ^{17}C 中价中子主要处于 $d_{5/2}$ 轨道上. 单纯考虑芯核 ^{16}C 处于 2^+ 态情况, 可以看出, 价中子处于 $d_{5/2}$ 的比例为 $57.6/(57.6 \pm 12.7) = 82\%$, 这与反应截面分析得出的结论相同.

本工作同时给出了 79A MeV 的 ^{17}C 在 ^{12}C 靶上的去 2 个和 3 个中子的截面, 但由于目前还没有合适的理论模型处理多体问题, 所以没有做进一步的理论分析.

5 碳同位素相互作用截面、反应截面小结

反应截面 σ_R , 即去弹性散射截面, 可表示为

$$\sigma_R = \sigma_T - \sigma_{\text{elas}}, \quad (4)$$

其中 σ_T 和 σ_{elas} 分别表示总截面和弹性散射截面, 而相互作用截面 σ_I 与反应截面 σ_R 的关系为

$$\sigma_{\text{I}} = \sigma_{\text{R}} - \sigma_{\text{inel}}, \quad (5)$$

其中, σ_{inel} 表示非弹性散射截面. 在能区(能量大于几百 A MeV), σ_{inel} 可忽略, 有: $\sigma_{\text{I}} \approx \sigma_{\text{R}}$; 而在中低能区则 σ_{inel} 不可忽略, 如在本实验中 $\sigma_{\text{inel}} = 27 \pm 15(\text{mb})$.

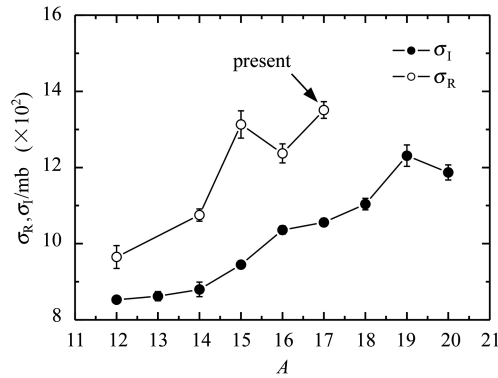


图 5 丰中子碳同位素在 ^{12}C 反应靶上的相互作用截面和反应截面

表 3 丰中子碳同位素在 ^{12}C 靶上的相互作用截面 σ_{I} 和反应截面 σ_{R} 实验数据

^A_ZC	能量/A MeV	$\sigma_{\text{I}}/\text{mb}$	能量/A MeV	$\sigma_{\text{R}}/\text{mb}$
^{12}C	950	$853 \pm 6^{[14]}$	83	$965 \pm 30^{[14]}$
^{13}C	960	$862 \pm 12^{[14]}$		
^{14}C	965	$880 \pm 19^{[14]}$	83	$1075 \pm 61^{[2]}$
^{15}C	730	$945 \pm 10^{[14]}$	83	$1319 \pm 40^{[2]}$
^{16}C	960	$1036 \pm 11^{[14]}$	83	$1237 \pm 25^{[3]}$
^{17}C	965	$1056 \pm 10^{[14]}$	79	$1350 \pm 21^{[5, 6]}$
^{18}C	955	$1104 \pm 15^{[14]}$		
^{19}C	960	$1231 \pm 28^{[14]}$		
^{20}C	905	$1187 \pm 20^{[14]}$		

作为总结, 把现有的碳同位素在 ^{12}C 反应靶上的采用透射法测得的 σ_{I} 和 σ_{R} 的实验数据总结于图 5 和表 3; 需要指出的是, 如表 3 列出的, 图 5 中 σ_{I} 系列是高能区(960 A MeV 左右)的数据, 而 σ_{R} 系列对应中能区(83 A MeV, ^{17}C 能量为 79 A MeV)实验数据, 其中包含了非弹性散射截面.

6 总结

本工作利用日本理化学研究所的放射性束流线 RIPS, 采用 TOF- ΔE - E 粒子鉴别技术, 测量了能量为 79 A MeV 的 ^{17}C 在 ^{12}C 靶上的反应截面, 同时得到了去 1 个、2 个及 3 个中子截面. 利用有限力程 Glauber 模型通过拟合现有的 ^{17}C 相互作用截面和反应截面, 给出了 ^{17}C 的密度分布; 结合壳模型给出的谱因子, 利用少体 Glauber 模型对去 1 个中子截面进行了分析, 实验结果与其他实验数据及理论计算结果都符合的很好. 对反应截面和去中子截面的分析都给出, ^{17}C 的价中子主要处于 $d_{5/2}$ 轨道上, 这与测量动量分布研究 ^{17}C 结构得到的结果一致^[9, 10]. 总结了已有的丰中子碳同位素的相互作用截面和反应截面的实验数据. 为了更精确的探索丰中子核如 ^{17}C 的结构, 我们期待处理多体问题的理论的进一步发展.

感谢日本理化学研究所提供的束流和实验设备支持.

参考文献(References)

- 1 Tanihata Isao. Nucl. Phys., 2001, **A685**: 80c
- 2 FANG D Q, Yamaguchi T, ZHENG T et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 034613
- 3 ZHENG T, Yamaguchi T, Ozawa A et al. Nucl. Phys., 2002, **A709**: 103
- 4 Yamaguchi T, ZHENG T, Ozawa A et al. Nucl. Phys., 2003, **A724**: 3
- 5 WU C, Yamaguchi Y, Ozawa A et al. Nucl. Phys., 2004, **A739**: 3
- 6 WU Cui-E et al. HEP & NP, 2004, **28**(8): 810—813 (in Chinese)
(吴翠娥等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(8): 810—813)
- 7 WU C, Yamaguchi Y, Ozawa A et al. J. Phys., 2005, **G31**: 39
- 8 Baumann T, Borge M J G, Geissel H et al. Phys. Lett., 1998, **B439**: 256
- 9 Pramanik U Datta, Aumann T, Boretzky K et al. Phys. Lett., 2003, **B551**: 63
- 10 Maddalena V, Aumann T, Bazin D et al. Phys. Rev., 2001, **C63**: 024613
- 11 Kanungo R, Tanihata I, Ogawa Y et al. Nucl. Phys., 2002, **A701**: 378
- 12 Sauvan E, Carstoiu F, Orr N A et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 044603; Phys. Lett., 2000, **B491**: 1
- 13 Chiba M, Kanungo R, Abu-Ibrahim B et al. Nucl. Phys., 2004, **A741**: 29
- 14 Ozawa A, Bochkarev O, Chulkov L et al. Nucl. Phys., 2001, **A691**: 599
- 15 Cortina-Gil D, Baumann T, Geissel H et al. Eru. Phys. J., 2001, **A10**: 49
- 16 Bazin D, Benenson W, Brown B A et al. Phys. Rev., 1998, **C57**: 2156
- 17 Kanungo R, Chiba M, Iwasa N et al. Phys. Rev. Lett., 2002, **88**: 142502
- 18 Iwasa N, Geissel H, Münzenberg G et al. Nucl. Instrum. Methods, in Phys. Res., 1997, **B126**: 284
- 19 Warburton E K, Brown B A. Phys. Rev., 1992, **C46**: 923
- 20 Abu-Ibrahim, Ogawa Y, Suzuki Y et al. Computer Physics Communications, 2003, **151**: 369

Reaction Cross Section and Neutron Removal Cross Sections of $^{17}\text{C}^*$

WU Cui-E^{1,2} YE Yan-Lin^{1;1)} JIANG Dong-Xing¹ ZHENG Tao¹ HUA Hui¹ LI Zhi-Huan¹
LI Xiang-Qing¹ CHEN Zhi-Qiang¹ HU Qing-Yuan¹ ZHANG Gao-Long¹ PANG Dan-Yang¹
WANG Jia¹ Yamaguchi Y² Ozawa A² Tanihata I²

1 (School of Physics and the MOE Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

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

Abstract The reaction cross section, together with the one-, two- and three neutron removal cross sections, of ^{17}C with the energy of 79A MeV on carbon target were measured using the radioactive beam line RIPS of RIKEN. The reaction cross section and the one-neutron removal cross section were analyzed within the frame of Glauber model. Both the analyses favor the dominant configuration of a ^{16}C core (2^+) plus a $d_{5/2}$ valence neutron for ^{17}C . The work for the neutron-rich carbon isotope on the reaction cross section σ_{R} and the interaction cross section σ_{I} on ^{12}C target are summarized.

Key words reaction cross section, neutron removal cross section, Glauber model, TOF- ΔE - E method

Received 3 March 2005

*Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077403) and National Natural Science Foundation of China (10221003)

1) E-mail: yeyl@pku.edu.cn