

^{17}C 反应截面测量及有限力程 Glauber 模型分析*

吴翠娥^{1,2} Yamaguchi Y.² Ozawa A.² Tanihata I.² 叶沿林^{1;1)}

1(北京大学物理学院技术物理系 北京 100871)

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

摘要 用透射法测量了能量为 79 A MeV 的 ^{17}C 在 ^{12}C 反应靶上的反应截面;利用有限力程 Glauber 模型对 ^{17}C 的密度分布进行了分析.由高能区(965 A MeV)相互作用截面数据分析认为 ^{17}C 具有谐振子密度分布,但拟合本实验结果及高能区实验数据发现, ^{17}C 的中子密度分布中存在一个尾巴;假设 ^{17}C 密度为芯核加单粒子密度分布形式,分析认为 ^{17}C 的价中子主要处于 $1d_{5/2}$ 轨道.

关键词 反应截面 相互作用截面 有限力程 Glauber 模型 密度分布

1 引言

放射性核束 RIB(Radioactive Ion Beam)的产生和发展开创了核物理及其相关领域的新纪元,它为研究远离稳定线的核素的结构提供了新的机遇及广阔的应用前景;同时,放射性束还广泛应用在材料科学、生物学、医学、能源及相关应用科学领域中^[1].

测量相互作用截面 σ_I 和反应截面 σ_R 是揭示丰质子和丰中子核素是否具有晕(皮)结构的有效手段,利用此方法发现了质子晕核 ^8B 及中子晕核 ^{11}Li , ^{11}Be , ^{19}C 等^[2-5].研究表明,具有晕结构的核素有价核子分离能小,相互作用截面和反应截面大,碎片动量分布窄等特点. ^{17}C 的单中子分离能只有 $S_n = (0.729 \pm 0.018)\text{MeV}$,说明 ^{17}C 很可能具有晕结构,然而相对论能区 ^{17}C 的 σ_I 的测量结果并没有比其相邻核素显著增加^[5];同样, ^{17}C 碎裂反应后碎片 ^{16}C 的动量分布结果也相对较宽($(141 \pm 6)\text{MeV}/c$)^[6-8].

由于中低能区核子-核子作用总截面的增大,反应截面 σ_R 对外层密度分布更敏感,例如对于 ^8B , 高能区的 σ_I 的测量没有显示其具有晕结构,但中低能区的 σ_R 的测量却揭示出质子密度分布中存在尾巴^[4].基于这一点,本工作测量了 ^{17}C 的中能区反应

截面 σ_R ,并利用有限力程 Glauber 模型通过拟合现有实验数据对 ^{17}C 的密度分布及其结构进行了研究.

2 实验装置与技术

本实验是在日本理化学研究所(RIKEN)的放射性束流线 RIPS(Riken Projectile Fragment Separator)^[9]上完成的.实验装置如图 1 所示.

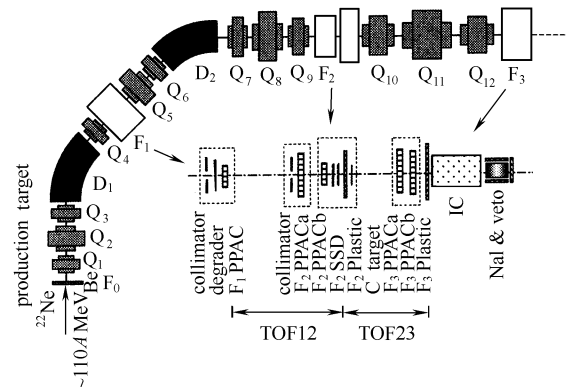


图 1 实验装置

放射性束 ^{17}C 由能量为 110 A MeV 的初级束 ^{22}Ne 在初级靶 Be (Production Target) 上发生碎裂反应产生.在 F_1 , 放置了降能器(Degrader)及平行板雪崩探

2003-12-10 收稿

* 北京大学与日本理化学研究所联合培养研究生项目资助

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

测器 F₁PPAC, F₁PPAC 用来检测束流位置,并给出从 F₁ 到 F₂ 的飞行时间(TOF)的起始信息. 碎裂产物经过降能器和磁铁 D₂ 做能量选择后到达 F₂; 在 F₂ 沿束流方向依次放置了位置探测器 F₂PPACa 和 F₂PPACb、能量损失硅探测器 F₂SSD、塑料闪烁体探测器 F₂Plastic 及¹²C 反应靶, F₂PPACa 和 F₂PPACb 给出束流的位置信息和发射角度信息, F₂Plastic 给出靶前飞行时间终止信息及靶后飞行时间的起始信息, 反应靶前用标准的 B_ρ-ΔE-TOF 方法鉴别粒子. 反应靶后, 出射粒子经过四级透镜组 Q₁₀-Q₁₁-Q₁₂ 传输到 F₃; 在 F₃ 沿束流方向依次放置了 F₃PPACa, F₃PPACb, F₃Plastic, ΔE 探测器电离室 IC(Ion Chamber)及总能量 E 探测器 NaI(T₁), 反应靶后的粒子鉴别通过 TOF-ΔE-E 方法实现. 另外, 使用一组塑料闪烁体探测器(Veto)环绕在 NaI(T₁)探测器周围, 用来测量束流与 NaI(T₁)时发生反应后逃逸出 NaI(T₁)的中子或带电离子, 用此探测器信号作反符合可以使¹⁷C 在反应靶中发生碎裂反应的碎片与所有出射粒子沉积到 NaI(T₁)时形成的本底明显区别开来. 有靶实验中, 反应靶前所有入射粒子及反应靶后选择

Z = 6 的粒子鉴别分别如图 2(a), (b) 所示.

3 数据处理

透射法测定反应截面的表达式为

$$\sigma_R = -\frac{1}{t} \ln\left(\frac{R^{in}}{R^{out}}\right), \quad (1)$$

其中 t 为靶原子厚度, $R = N_{in}/N_{out}$, N_{in} 和 N_{out} 分别指靶前入射¹⁷C 数目和靶后 F₃ 处测得的没有发生反应的¹⁷C 数目, R 的上、下标 in 和 out 分别指有靶和空靶实验. 由(1)式可以看出, 精确测定入射¹⁷C 数目 N_{in} 及靶后没有发生反应的¹⁷C 数目是透射法测量反应截面的关键. 反应靶前粒子鉴别后选择¹⁷C 可以得到 N_{in} ; 反应靶后, 由图 2(b) 可以看出, 要得到没有发生反应的¹⁷C 数目, 需要将其他碎片(¹⁶C, ¹⁵C, ¹⁴C 等)事件数 N_{frag} 及发生了非弹性散射的¹⁷C 的事件数 N_{inel} 在所有 Z = 6 的出射粒子中扣除, 方法如下:

将有靶和空靶时的图 2(b) 旋转一定角度后投影到 NaI(T₁) 能量 E 单维谱上, 认为有靶实验中¹⁷C 在反应靶后所有其他探测器材料中发生反应的本底与空靶实验时相同, 将空靶的 E 单维谱的低能尾巴事件数按有靶实验的全部 Z = 6 的粒子数归一后作为本底从有靶的实验中扣除得到图 3(a), 积分 880—1165 道的所有计数即为在反应靶中生成的其他碎片的事件数 N_{frag} ; 在图 2(b) 中只取¹⁷C 主束及非弹散尾巴后投影到 TOF 单维谱上得到图 3(b), 用指数函数拟合非弹散的尾巴部分, 假设在¹⁷C 的 TOF 主峰下非弹性散射¹⁷C 的粒子分布:(1)上限: 与尾巴相同的指数分布延伸到峰位, 然后以 Gaussian 分布形式衰减到零, 其中 Gaussian 分布的 FWHM 与主峰的 FWHM 相同, 如图 3(b) 中竖线阴影所示面积内的计数;(2)下限: 线性衰减, 到 TOF 主峰峰位时为零, 如图 3(b) 中横线阴影所示面积内的计数; 取上限和下

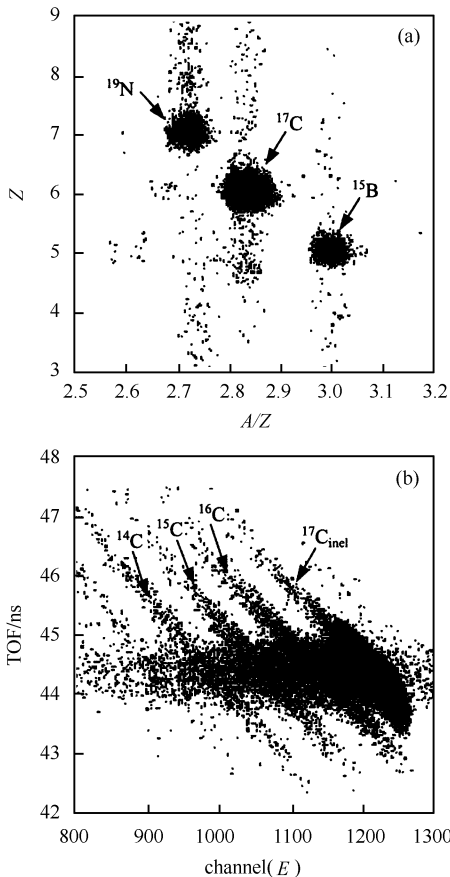


图 2 (a)入射粒子鉴别;(b)F₃ 粒子鉴别图(Z = 6)

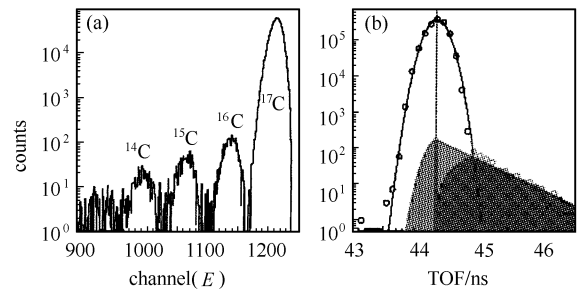


图 3 (a)扣除本底后 NaI(T₁)能量谱;
(b)确定 N_{inel} 方法示意图

限的平均值为非弹散 ^{17}C 的事件数 N_{inel} .

数据分析得到 79A MeV 的 ^{17}C 在 ^{12}C 反应靶上的反应截面为: $\sigma_{\text{R}} = 1350 \pm 21(\text{mb})$, 如图 5 中的实心方点所示; 图中实心圆点为文献[5]的 σ_{I} 的结果.

4 Glauber 模型分析

有限力程 Glauber 模型 FRGM (Finite-Range Glauber Model) 成功的应用在 ^{12}C , ^{14}C 及 ^{16}C 的密度分布分析中^[10]; 通过拟合现有的 ^{17}C 的 σ_{I} 和 σ_{R} 实验数据, 本工作利用 FRGM 对 ^{17}C 的密度分布进行了研究. 若假设 ^{17}C 的密度分布:

(1) 谐振子 HO (Harmonic-Oscillator) 分布, 其半径参数 α_{HO} 由拟合高能区的 σ_{I} 得到, 则密度分布及相应 Glauber 模型的计算结果分别如图 4 和图 5 中的点线所示;

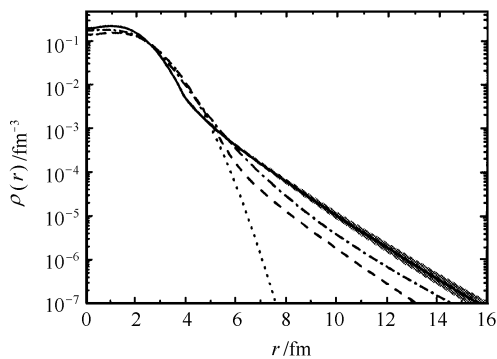


图 4 ^{17}C 密度分布

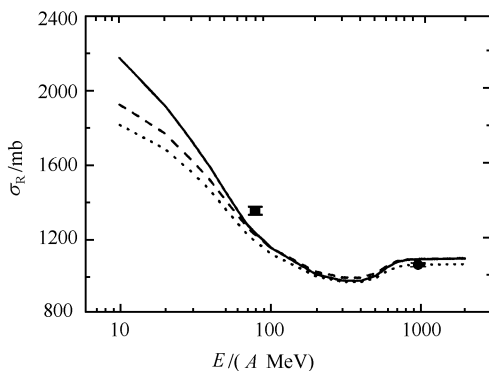


图 5 σ_{R} 和 σ_{I} 的实验结果及 FRGM 的理论结果

(2) 中子密度分布为 HO 加 Yukawa 尾巴形式, 质子密度分布为 HO 形式, 即

$$\begin{cases} \rho_{\text{n}}(r) = \begin{cases} \text{HO}(\alpha_{\text{HO}}) & (r < r_c), \\ \frac{\rho_0 \exp(-\lambda r)}{r^2} & (r \geq r_c), \end{cases} \\ \rho_{\text{p}}(r) = \text{HO}(\alpha_{\text{HO}}), \end{cases} \quad (2)$$

其中 r_c 为 HO 分布与 Yukawa 势相交处的半径, λ 为 Yukawa 势的斜率. 由于实验点数目的限制, 取参数 α_{HO} 和 r_c 与文献[10]中 ^{16}C 的相应密度分布参数相同, 自由参数 λ 由 χ^2 拟合得到. 此假设得到的密度分布及相应 Glauber 模型的计算结果分别如图 4 和图 5 中的实线所示 (图 4 中阴影部分为密度分布的误差);

(3) 芯核 ^{16}C 加单粒子密度分布形式, ^{16}C 密度为 HO 分布, 其参数 α_{HO} 由拟合 ^{16}C 的 σ_{I} 得到, 单粒子密度分布由程序 WAVEFUNC^[11] 得到. 研究发现, 在具有 p - sd 结构 (即质子排满 p 壳层, 中子排到 s, d 壳层) 的丰中子核素中出现了 $1d_{5/2}$ 轨道和 $2s_{1/2}$ 轨道复合的现象^[1]. 由于 ^{17}C 是具有 p - sd 结构的核素, 所以假设其价中子处于 $1d_{5/2}$ 轨道和 $2s_{1/2}$ 轨道的混合态上, 处于 $1d_{5/2}$ 轨道的比例为自由参数, 且由 χ^2 拟合得到. 分析给出, 当 Glauber 的计算结果与实验数据最佳拟合时, 价中子处于 $1d_{5/2}$ 态的比例为 $(77 \pm 21)\%$. 此假设得到的密度分布及相应 Glauber 模型的计算结果分别如图 4 和图 5 中的破折线所示.

由(1)和(2)的分析可以看出, 要同时拟合 ^{17}C 的 σ_{I} 和 σ_{R} 的实验数据, ^{17}C 的中子密度分布需要引入尾巴形式, 这是与单纯拟合 ^{17}C 的 σ_{I} 的数据的结论的重要不同之处; 若考虑 ^{17}C 的结构, 由分析(3)可以看出, ^{17}C 中价中子主要处于 $1d_{5/2}$ 轨道上, 这一结论与碎片动量分布分析得到的结论相同^[12,13]. 作为比较, 图 4 中点划线给出了 RCHB (Relativistic Continuum Hartree-Bogoliubov) 理论^[14]的 ^{17}C 的密度分布的结果.

5 总结

本工作利用透射法测量了中能区 ^{17}C 在 ^{12}C 反应靶上的反应截面, 并利用有限力程 Glauber 模型通过拟合 ^{17}C 的 σ_{I} 和 σ_{R} 的实验数据对 ^{17}C 的密度分布进行了研究. 分析表明, 丰中子核素 ^{17}C 的中子密度分布存在一个尾巴, 这一点明显区别于只由相互作用截面 σ_{I} 得到的谐振子密度分布形式; 同时, 基于芯核加单粒子密度分布的假设, 通过寻找与实验数据的最佳拟合, 发现 ^{17}C 中价中子主要处于 $1d_{5/2}$ 轨道上 $((77 \pm 21)\%)$, 从而确证了碎片动量分布分析得到的结论. 但需要指出, 由于目前为止利用透射法得到的 ^{17}C 在 ^{12}C 反应靶上的 σ_{I} 和 σ_{R} 的实验数据只有两个, 基于不同的假设, 由第 4 节中(2)和(3)两种方

法分析得到的¹⁷C 的密度分布也存在差别,所以,要精确测定¹⁷C 的密度分布,需要积累更多的反应截面的实验数据,尤其是低能区实验数据。

感谢日本理化学研究所加速器组的技术支持;感谢北京大学孟杰教授提供 RCHB 的数据结果。

参考文献 (References)

- 1 Tanihata Isao. Nucl. Phys. , 2001, **A685**:80c
- 2 Fukuda M, Mihara M, Fukao T et al. Nucl. Phys. , 1999, **A656**:209
- 3 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett. , 1985, **55**:2676
- 4 Fukuda M, Ichihara T, Inabe N et al. Phys. Lett. , 1991, **B268**:339
- 5 Ozawa A, Bochkarev O, Chulkov L et al. Nucl. Phys. , 2001, **A691**:599
- 6 Baumann T, Borge M J G, Geissel H et al. Phys. Lett. , 1998, **B439**:256
- 7 Sauvan E, Carstoiu F, Orr N A et al. Phys. Lett. , 2000, **B491**:1
- 8 Bazin D, Benenson W, Brown B A et al. Phys. Rev. , 1998, **C57**:2156
- 9 Kubo T, Ishihara M, Inabe N et al. Nucl. Instrarrc. Methods in Phys. Res. , 1992, **B70**:309
- 10 ZHENG T, Yamaguchi T, Ozawa A et al. Nucl. Phys. , 2002, **A709**:103
- 11 Hirenzaki S. WAVEFUNC Code. RIKEN, 1993
- 12 Maddalena V, Aumann T, Bazin D et al. Phys. Rev. , 2001, **C63**:024613
- 13 Pramanik U Datta, Aumann T, Boretzky K et al. Phys. Lett. , 2003, **B551**:63
- 14 MENG J, ZHOU S-G, Tanihata I. Phys. Lett. , 2002, **B532**:209

Measurement of Reaction Cross Section for ¹⁷C and Finite-Range Glauber Model Analysis*

WU Cui-E^{1,2} Yamaguchi Y.² Ozawa A.² Tanihata I.² YE Yan-Lin^{1;1)}

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

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

Abstract We have measured the reaction cross section σ_R of ¹⁷C on the carbon target at the intermediate energy of 97A MeV by using transmission method. finite-range Glauber model has been employed to investigate the density distribution of ¹⁷C by fitting the present result and the previous result of interaction cross section σ_I . By contrast with the result from the analysis of σ_I , a tail in the neutron density distribution of ¹⁷C is found necessary to interpret the present result. Considering the configuration of the valence neutron, a dominant $1d_{5/2}$ ($77 \pm 21\%$) occupancy is found, which is in agreement with results of momentum distribution measurements.

Key words reaction cross section, interaction cross section, finite-range Glauber model, density distribution

Received 10 December 2003

* Supported by Joint Graduate School Program Between Peking University and RIKEN

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