

^{12}N 直接碎裂反应研究*

李加兴¹⁾

(西南大学物理科学与技术学院 重庆 400715)

摘要 描述了在兰州放射性束流线(RIBLL)上用 78.6MeV/u 的 ^{14}N 束流轰击 Be 靶产生出 34.9MeV/u 的 ^{12}N 次级束流. 利用 ^{12}N 轰击 Si 靶作为次级靶, 利用直接碎裂反应测量它的反应总截面. 利用理论模型进行了计算, 理论计算和实验结果符合的很好. 发现 ^{12}N 的质子密度分布相对于中子而言, 有一个很大的弥散.

关键词 Glauber 模型 反应总截面 飞行时间

1 引言

在应用放射性束流对奇异核结构与反应机制研究中, 放射性束流对相互作用截面 σ_I (高能区) 和反应总截面 σ_R (中低能区) 测量有着特殊的重要性. 因为具有晕(Halo)结构核的一个典型的物理现象就是其 σ_I 或 σ_R 比稳定核明显增大. I.Tanihata 等人首先通过对高能放射性束流的相互作用截面测量发现 ^{11}Li 的相互作用半径远大于邻近核的半径, 并偏离了通常稳定核的半径遵循的 $A^{1/3}$ 规律, 从而发现了 ^{11}Li 为具有奇异结构的核, 即中子晕核^[1]. 这一结果激发了人们对晕核寻找与研究的兴趣. 近年来, 理论预言了许多丰中子奇异核具有晕态结构, 实验也证实了一些核, 如 ^6He , ^{11}Li , ^{11}Be , ^{14}Be , ^{17}B , ^{19}B , ^{19}C 等确实表现出晕结构特征: σ_I 或 σ_R 异常增大, 碎片动量分布变窄, 电四极矩变大等^[2].

对于丰质子核, 理论也预言了许多核可能有质子晕结构, 如 ^8B , ^9C , ^{12}N , ^{17}F , ^{17}Ne , $^{26-28}\text{P}$, $^{27-29}\text{S}$ 等, 但目前只有 ^8B 的质子晕被大多数实验所确认^[3]. M.Fukuda^[4], R.E.Warner^[5] 等人测量了 ^8B 在 Be, C, Al, Si 等靶上的反应截面 σ_R , 结果都发现 σ_R 明显增大. T.Minamisono 等人发现 ^8B 的电四极矩异常增大^[6]. J.H.Kelley 等人测量 ^7Be 碎片动量分布变窄^[7]. 这些都表现出 ^8B 最后一个价质子具有扩展的空间分布, 从而导致大的质子密度分布半径-质子晕结构.

Hansen 等人于 1995 年给出核中存在质子晕结构的必要但不充分条件^[8], 即 $S^* A^{2/3} \approx 2-4\text{MeV}$, 其中 S 是核素的最后一个价质子的分离能. ^{12}N 正好是满足这个条件的一个核素, 它的最后一个质子的分离能约为 0.6MeV, $S^* A^{2/3} = 3.14\text{MeV}$. Ozawa 等人曾用高能的 ^{12}N (700MeV/u 左右) 分别轰击 Be, C 和 Al 靶, 测量相互作用截面, 结果发现 ^{12}N 有晕结构^[9]. Warner 等人利用叠层望远镜的探测器系统测量了 ^{12}N 与 Si 的反应. 测出了它的反应总截面与周围核相比有明显增大, 但它的增大比 ^8B 与其周围核的反应总截面增大相比要小^[10]. Warner 认为不管 ^{12}N 有没有奇异结构, 它的反应总截面增大主要是因为 ^{12}N 最后一个价质子的结合能小的原因.

文章描述了在兰州重离子加速器国家实验室放射性次级束流线(RIBLL)上测量 ^{12}N 在 ^{28}Si 靶上的核反应总截面, 其中 ^{12}N 束的能量为 34.9MeV/u. 实验数据补充了现有的中能区 ^{12}N 反应截面测量的空白, 同时也是对理论预言和 R.E.Warner 等人数据的检验. 本文并用修正的 Glauber 模型拟合了实验的数据, 并对 ^{12}N 的结构进行了分析.

2 实验装置及测量方法

实验是在兰州放射性束流线 RIBLL^[11] 终端上进行的. 兰州重离子加速器(HIRFL)提供的 78.6MeV/u

* 国家自然科学基金(10205019, 10475098), 中国科学院百人计划(200668)和西南大学博士基金(SWNU2005028)资助

1) E-mail: lijx@swu.edu.cn

^{14}N 初级束流, 在 RIBLL 的初级靶室轰击 $3123\mu\text{m}$ 厚的 Be 靶, 引起弹核碎裂, 产生 ^{14}N 以下多种碎片. RIBLL 设置二极磁铁磁刚度 ($B\rho$) 选择, 加 $1937\mu\text{m}$ 降能器选择^[12], 这样可以有利于提高我们所需要的粒子的纯度.

核反应总截面的测量通常采用束流衰减法^[13]. 以前在利用衰减法进行测量时, 我们一般都采用光阑来限制束流的发散. 随着 RIBLL 多年的运行和探测器升级工作的进行, 我们的束流监测探测器得到了长足的发展. 在次级靶前有两片平行板雪崩探测器 (PPAC) 来监测入射束流的入射方向, 入射角太大的粒子在数据处理中进行舍弃. 为了测量粒子在路径 T_1 - T_2 的飞行时间, 采用了具有椭球面聚焦的快塑料闪烁薄膜时间拾取探测器获取 RIB 经过的时间 t_1 与 t_2 . 厚度 $50\mu\text{m}$, 面积 $50\text{mm}\times 50\text{mm}$ 的闪烁膜中心位于椭球的一个焦点, 光电倍增管 R2083 的光阴极中心位于椭球的另一个焦点. 该 TOF 装置的时间分辨好于 200ps ^[14, 15]. 多叠层粒子鉴别望远镜是由 3 片全耗尽 Si 面垒半导体探测器与 CsI(Tl) 阻止型探测器组成. 3 片 Si 面垒半导体探测器 ΔE_1 , ΔE_2 和 ΔE_3 的厚度分别为 $1000\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$ 和 $300\mu\text{m}$, 有效面积为 $48\text{mm}\times 48\text{mm}$. CsI(Tl) 厚度 10mm , 面积 $70\text{mm}\times 70\text{mm}$. 初步推算, ^{12}N 的射程为 $2951.4\mu\text{m}$. 因此, ^{12}N 将穿透 3 片 Si 探测器, 最后停止在 CsI(Tl) 晶体中. 图 1 是实验中得到的 Si 靶前放射性束流二维鉴别图 (TOF- ΔE_1). 其中 TOF 是放射性束流 (RIB) 在 RIBLL 的第 1 焦点 T_1 和第 2 焦点 T_2 之间的飞行时间 (TOF= t_2-t_1), ΔE_1 是 RIB 在望远镜第 1 片 Si 探测器上的能量损失. 可见 ^{12}N 和主要污染物 ^{11}C 可以被清晰的分开.

在这次实验中所用的 Si 探测器的能量分辨率好于 1%.

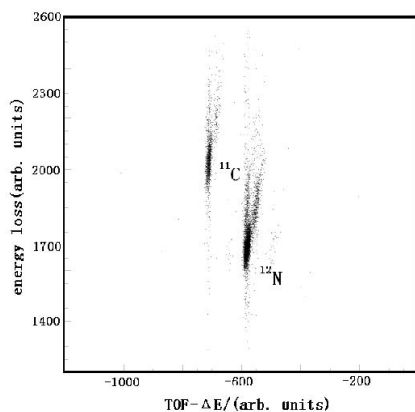


图 1 TOF- ΔE 二维关联图

3 实验结果和理论分析

实验采用束流衰减法测量 ^{12}N 的核反应截面. 实验数据是以事件列表方式 (event by event) 记录在计算机硬盘上. 数据分析程序首先在 TOF- ΔE_1 二维谱上设置选择 ^{12}N 条件 (开窗), 得到靶前粒子数 N_0 , 然后在 ΔE_2-E 双维谱上将探测到的事件分类, 区分出反应事件与未反应事件, 提取未反应的粒子数. 认为谱上能量有变化的就是已经在 Si 靶参加反应的粒子数 N_1 , 根据反应总截面的定义, 有

$$\sigma_t = \frac{1}{N_t} \ln \left(\frac{N_0}{N_0 - N_1} \right), \quad (1)$$

其中 N_t 为单位面积靶的粒子数.

最后获得的 ^{12}N 的反应总截面的实验结果是在 34.9MeV/u 的能量下, 截面值为 1714.6mbar .

反应截面实验数据一般采用 Glauber 模型来进行实验数据的拟和, 采用的 Glauber 模型进行了有限程和库仑修正的^[16].

从 Lippmann-Schwinger 方程出发, 并由半经典光学模型可知^[17], 核反应总截面是与光学势的虚部相对应

$$\sigma_R = (K/E_k) \langle \psi_k^+ | \text{Im}V | \psi_k \rangle, \quad (2)$$

式中 ψ_k 是动量为 K 的入射核的波函数, $\text{Im}V$ 是核势的虚部. 利用分波法, 并对势函数做一系列近似之后, 可以得到在高速区核反应总截面的公式

$$\sigma_R = 20\pi \int_0^\infty b db (1-T), \quad (3)$$

其中 b 是碰撞参数, 考虑有限程相互作用, 透射函数 $T(b)$ 可写为

$$T = \exp \left[\frac{\sigma_{\text{NN}}}{10} \int d^2b_1 \int d^2b_2 f(|b_1 - b_2|) \rho_z^1(b_1) \rho_z^2(|b_2 - b|) \right], \quad (4)$$

公式中有限程相互作用函数 $f(r)$ 由 $\int f d^2r = 1$ 进行归一, 而 ρ^i 是核的密度分布, ρ_z^i 由下式定义

$$\rho_z^i = \int_{-\infty}^{+\infty} dz \rho_i((b^2 + z^2)^{1/2}), \quad (i=1,2). \quad (5)$$

$\bar{\sigma}_{\text{NN}}$ 是 n-n, p-p 和 n-p 相互作用碰撞截面的平均, 可由下式计算

$$\bar{\sigma}_{\text{NN}} = \frac{N_P N_T \sigma_{\text{nn}} + Z_P Z_T \sigma_{\text{pp}} + N_P Z_T \sigma_{\text{np}} + Z_P N_T \sigma_{\text{pn}}}{A_P A_T}. \quad (6)$$

在上述推导中对核子-核子截面作了近似, 输入核子的密度分布. 若要区分中子和质子, 需要分别输入靶和炮弹的质子点密度和中子点密度, 得到透射函

数应改用下式表示:

$$T = \exp \left[\frac{1}{10} \sum_{i,j=1}^2 \sigma_{i,j} \int d^2 b_1 \int d^2 b_2 \times \right. \\ \left. f(|b_1 - b_2|) \rho_z^1(b_1) \rho_z^2(|b_2 - b|) \right], \quad (7)$$

这里 $i, j = 1$ 时表示中子, $i, j = 2$ 时表示质子.

对质子和中子的密度分布采用了双参数的费米密度分布^[18], 它可以很好地拟合没有奇异结构的核的反应总截面的实验结果, 对有奇异结构的实验结果可采用核芯加价核子的方式来进行数据拟合^[19]. 对¹²N数据, 采用了¹¹C核芯加一个价质子的密度分布形式, 可以很好的拟合实验数据. 图2中的点线给出了¹²N在Si靶上的中能核反应截面的实验数据与根据库仑修正和有限程修正后的Glauber理论^[16]计算中能区¹²N+Si的核反应总截面曲线. 图中也给出了我们以前实验的¹²N+Si数据结果、R.E.Warner测量的¹²N+Si反应截面^[10]和A.Ozawa测量的在高中能时¹²N+C反应截面^[8]的一些数据. 可以看出, 我们测得的实验结果与Warner的能区一样, 而且结果也相同, 而Ozawa测到的实验数据偏近于高能的部分.

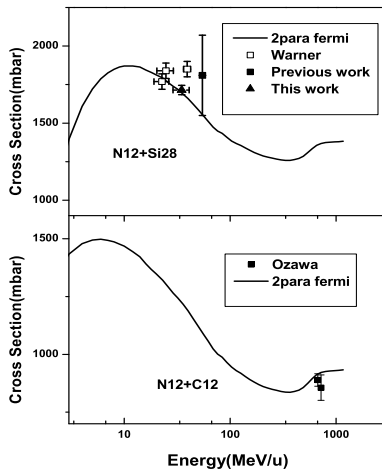


图2 对¹²N采用核芯加价核子的密度分布形式, 实验数据可以很好的拟合

图3是¹²N的核内核子密度分布. 从它的密度分布可以看出, ¹²N在其核内部, 其质子密度分布相对于中子密度分布有一个很大的弥散.

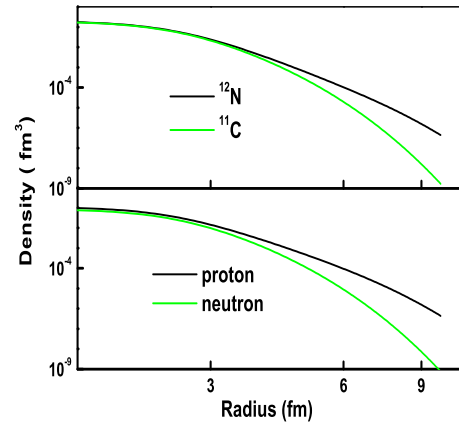


图3 ¹²N的核内密度分布

4 讨论

本实验测量的反应截面数据与R.E.Warner的数据相比, 我们实验测量的反应截面值与他的实验数据相同. 通过Glauber模型的计算, 输入唯像的双参数的核芯加价核子费米密度分布, 表明¹²N是一个晕核. 但是影响反应截面还有其他的原因, 核形变也可能造成核反应截面的变化, 同时, 实验中的测量误差也是一个不可忽视的因素.

目前, 对于¹²N引起反应截面的实验数据很少, 在中能区仅有R.E.Warner和RIBLL组的实验数据. 为了深入研究¹²N的性质, 必须做更多的实验, 积累较多的实验数据. 同时也需要从其他角度观察它, 如电四极矩、碎片动量分布等, 以便进一步分析这些核的结构.

作者感谢中国科学院近代物理研究所RIBLL组和高能少体组在实验过程中的指导和参与, 感谢北京大学张双全博士在理论计算上的讨论.

参考文献(References)

- Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676—2679
- Tanihata I. Nucl. Phys., 1999, **A654**: 235c—251c
- CHEN Fen-Ce, CHEN Bao-Qiu. Nucl. Phys. Rev., 2000, **17**(2): 82—86(in Chinese)
(陈奋策, 陈宝球. 原子核物理评论, 2000, **17**(2): 82—86)
- Fukuda M, Mihara M, Fukao T et al. Nucl. Phys., 1999, **A656**: 209—228
- Warner R E, Kelley J K, Zecher P et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: 1166—1170
- Minamisono T, Ohtsubo T, Minami I et al. Phys. Rev. Lett., 1992, **69**: 2058—2061
- Kelley H, Austin S M, Azhari A et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**: 5020—5023
- Hansen P G, Jensen A S, Jonson B. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1995, **45**: 591—634
- Ozawa A, Tanihata I, Kobayashi T et al. Nucl. Phys., 1995, **A583**: 807—810

- 10 Warner R E, Thirumurthy H, Woodroffe J et al. Nucl. Phys., 1998, **A635**: 292—304
- 11 ZHAN W L, GUO Z Y, LIU G H et al. Science in China (Series A), 1999, **42**(5): 528—536
- 12 GUO Z Y, ZHAN W L, LIU G H et al. ACTA Physica Sinica (Overseas Edition), 1999, **8**(1): 21—26
- 13 LI Jia-Xing, XIAO Guo-Qing, GUO Zhong-Yan et al. HEP & NP, 2004, **28**(12):1256—1260 (in Chinese)
(李加兴, 肖国青, 郭忠言等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(12): 1256—1260)
- 14 ZHAO Y X, ZHAN W L, GUO Z Y et al. Nucl. Instrum. Methods, 1995, **A355**: 464—468
- 15 LI Jia-Xing, ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan et al. HEP & NP, 1999, **23**(3): 231—236(in Chinese)
- (李加兴, 詹文龙, 郭忠言等. 高能物理与核物理, 1999, **23**(3): 231—236)
- 16 Charagi S K, Gupta S K. Phys. Rev., 1990, **C41**: 1610—1618
- 17 Lalazissis G A, Raman S. Phys. Rev., 1998, **C58**: 1467—1472
- 18 LI Jia-Xing, GUO Zhong-Yan, XIAO Guo-Qing et al. Acta Physica Sinica, 2003, **52**(1): 58—62(in Chinese)
(李加兴, 郭忠言, 肖国青等. 物理学报, 2003, **52**(1): 58—62)
- 19 LI Jia-Xing, XIAO Guo-Qing, GUO Zhong-Yan et al. HEP & NP, 2004, **28**(10): 1050—1054 (in Chinese)
(李加兴, 肖国青, 郭忠言等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(10): 1050—1054)

Study of the Directly Break-up Reaction Induced by $^{12}\text{N}^*$

LI Jia-Xing¹⁾

(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract ^{14}N of 78.6MeV/u was used as primary beam to bombard on Be target to produce RIB ^{12}N of 34.9MeV/u on RIBLL (Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou). The total reaction cross section of ^{12}N on Si target was measured by directly break-up reaction. And the calculation with micro Glauber model is consistent with the experimental results. It is found that inside ^{12}N , compared with its neutron density, the proton density distribution has a larger diffusion.

Key words Glauber model, total reaction cross section, time of flight

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10205019, 10475098), One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences (200668) and Doctoral Foundation of Southwest University(SWNU2005028)

1) E-mail: lijx@mail.swu.edu.cn