

质子滴线核 ^{12}N 在 ^{28}Si 靶上的核反应总截面测量*

宁振江 李加兴 郭忠言 詹文龙 王建松 肖国青 王全进 王金川 王 猛 王建峰 陈志强

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2000 年 7 月 24 日收到, 2000 年 10 月 21 日收到修改稿)

描述了 50.4 MeV/u 的 ^{12}N 和 42.3 MeV/u 的 ^{13}N 次级放射性束在 ^{28}Si 靶上引起的核反应总截面 σ_r 实验研究, 结果发现 ^{12}N 的反应总截面 σ_r 比其相邻同位素核 ^{13}N 有着异常的增大. 这可能是核形变及核子对效应造成的, 试验中的测量误差也不可忽视. 利用微观 Glauber 模型计算了 ^{12}N 在 ^{28}Si 靶上的核反应总截面, 并与实验结果做了比较, 发现理论计算与实验结果拟合较好.

关键词: 质子晕, 反应截面

PACC: 2570; 2587

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, 放射性束流引起相互作用截面 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. 因为具有晕态 (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. Tanihata 等^[1] 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. 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]. Fukuda^[4], Borcea 等^[5], Warner 等^[6] 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. Minamisono 等^[7] 发现 ^8B 的电四极矩异常增大. Kelley 等^[8] 测量 ^7Be 碎片动量分布变窄. 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^[9] 给出奇异核中存在质子晕结构的必要但不充分条件: $SA^{2/3} \approx 2-4\text{MeV}$, 其中 S 是核素的最后一个价质子的分离能. 因此, 具有低分离能价质子的丰质子奇异核引起了人们很大的兴趣. 而 ^{12}N 是其中一个符合这个条件的核素, 它的最后一个价质子的分离能大约仅为 0.6 MeV. Warner 等^[10] 通过测量能量约为 40 MeV/u 的 ^{12}N , ^{17}Ne 等在 Si 靶上的中能核反应总截面, 也发现 ^{12}N 的 σ_r 远大于相似能量下 ^{12}C 在 ^{nat}Si 靶上给出的核反应截面测量值.

本文描述在中国科学院兰州重离子加速器国家实验室放射性次级束流线 (RIBLL) 上测量的 ^{12}N , ^{17}F , ^{17}Ne 等轻质子滴线核在 ^{28}Si 靶上的核反应总截面, 其中 ^{12}N 和 ^{13}N 束的能量分别为 50.4 和 42.3 MeV/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 Warner 等的数据的检验.

2 实验装置与测量方法

实验是在中国科学院兰州重离子加速器放射性束流线^[11] (RIBLL) 终端上进行的. 由中国科学院兰州重离子加速器 (HIRFL) 提供的 80 MeV/u ^{20}Ne 初级束流, 在 RIBLL 的初级靶室轰击 3 mm 厚度的 Be 靶, 引起弹核碎裂, 产生质量数在 ^{20}Ne 以下各种

* 国家杰出青年基金 (批准号: 19825115), 国家自然科学基金 (批准号: 19735010, 19735051) 资助的课题.

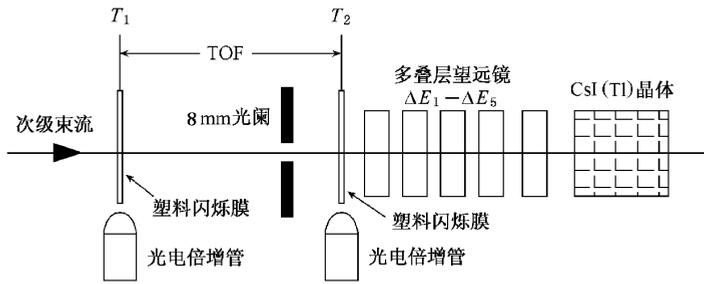


图 1 反应总截面测量探测器布局图

碎片. 为了同时选择多种次级束流, RIBLL 仅设置二极磁铁磁刚度 ($B\rho$) 选择, 而不加降能器选择^[12].

核反应总截面 σ_r 的测量采用束流衰减法. 图 1 给出了该实验的探测器布局. 图 1 中最前面的 $\phi 8$ mm 光阑是限制束流发散度的. 为了测量粒子在路径 T_1-T_2 的飞行时间我们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放射性束流经过的时间 t_1 与 t_2 . 厚度为 $50\mu\text{m}$, 面积为 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 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 200 ps ^[13]. 多叠层粒子鉴别望远镜是由 5 片全耗尽 Si 面垒半导体探测器与 CsI(Tl) 阻止型探测器组成. 5 片 Si 面垒半导体探测器 $\Delta E_1, \Delta E_2, \Delta E_3, \Delta E_4, \Delta E_5$ 的厚度都为 $300\mu\text{m}$, 有效面积为 $48\text{ mm} \times 48\text{mm}$. CsI(Tl) 厚度为 10mm , 面积 $70\text{mm} \times 70\text{mm}$. 初步推算, ^{12}N 的射程为 3471mm . 因此, ^{12}N 将穿透 5 片 Si 探测器, 最后停止在 CsI(Tl) 中. 图 2 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

放射性束流在 RIBLL 的第 1 焦点 T_1 和第 2 焦点 T_2 之间的飞行时间 ($\text{TOF} = t_2 - t_1$). ΔE_1 是 RIB 在望远镜第 1 片 Si 探测器上的能量损失. 可见多种次级放射性核束流同时进入探测装置, 不同的同位素在图 2 中可以被清楚地鉴别.

在这次实验中测量了奇异核束流 $^{12}\text{N}, ^{17}\text{F}, ^{17}\text{Ne}$ 在第二片 Si 靶上的反应总截面, 同时也测量了 $^{13}\text{N}, ^{18}\text{F}, ^{18}\text{Ne}$ 的反应截面. 出射粒子通过 $\Delta E-E$ 方法鉴别. 实验中所用的 Si 探测器的能量分辨率好于 1% .

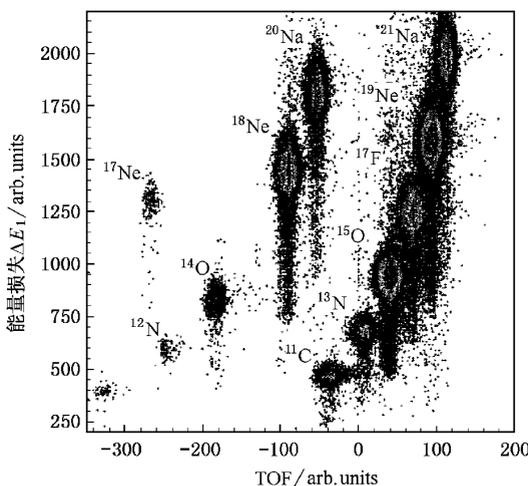
3 实验结果与理论分析

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. 获取数据的计算机采用连接在网络上的双 CPU Windows NT 工作站. 编写程序包括 KSC3929-Z1B 在 Windows NT 下的驱动器 (Driver) 和上述描述的获取程序. 计算机获取程序由 Visual C++ 编制, 采用 NT 窗口界面, 人机交互方式^[14]. 分析程序用 Microsoft Fortran Power Station V4.0 编写, 以 CERN 的 physics analysis workstation (PAW) 为工作平台, 连接 CERNLIB.PAW. 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 二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

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

其中 N_t 为单位面积靶的粒子数.

从实验数据分析中得到的 ^{12}N 和 ^{13}N 的反应截

图 2 TOF- ΔE_1 二维关联谱

面 σ_r 结果列于表 1.

表 1 实验测量的 ^{12}N 和 ^{13}N 的反应截面 σ_r

核	$\overline{E_{in}}(\text{MeV/u})$	σ_r/mb
^{12}N	50.4	1935 ± 138
^{13}N	42.3	1627 ± 94.9

可以看出,其中 ^{12}N 的反应截面比其相邻同位素核 ^{13}N 明显的大.

利用 Glauber 模型求解核反应总截面时,需要输入核物质的密度分布参数.我们在计算过程中是首先采用相对论平均场理论(RMF)得出待测奇异弹核的密度分布,而稳定靶核的核子密度分布采用文献 15 给出的高斯密度分布参数.

从 Lippmann-Schwinger 方程出发,并由半经典光学模型可知,核反应总截面是与光学势的虚部相对应^[16,17]

$$\sigma_r = (K/E_k) \psi_k^+ | \text{Im}V | \psi_k, \quad (1)$$

式中的 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,我们可以得到在 高能区核反应总截面的公式

$$\sigma_r = 20\pi \int_0^\infty b db (1 - T), \quad (2)$$

其中 b 是碰撞参数,考虑有限力程相互作用,透射函数 $T(b)$ 可写为

$$T = \exp \left[- \frac{\sigma_{NN}}{10} \int d^2 b_1 \int d^2 b_2 f(|b_1 - b_2|) \cdot \rho_z^1(b_1) \rho_z^2(|b_2 - b|) \right], \quad (3)$$

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

$$\rho_z^i = \int_{-\infty}^{+\infty} dz \rho_i((b^2 + z^2)^{1/2}) \quad (i = 1, 2), \quad (4)$$

$\overline{\sigma_{NN}}$ 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:

$$\overline{\sigma_{NN}} = \frac{N_p N_T \sigma_{nn} + Z_p Z_T \sigma_{pp} + N_p Z_T \sigma_{np} + Z_p N_T \sigma_{np}}{A_p A_T}. \quad (5)$$

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以下式子表示:

$$T = \exp \left[- \frac{1}{10} \sum_{i,j=1}^2 \sigma_{ij} \int d^2 b_1 \int d^2 b_2 f \right.$$

$$\left. \cdot (|b_1 - b_2|) \rho_z^1(b_1) \rho_z^2(|b_2 - b|) \right], \quad (6)$$

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

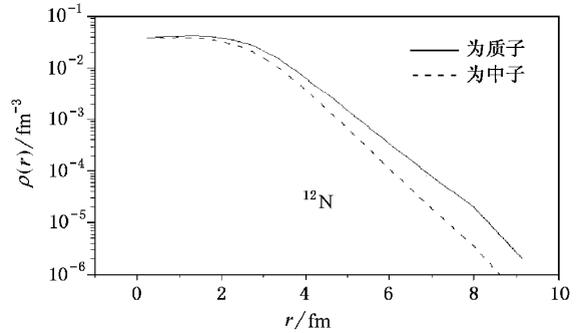


图 3 RMF 得出的 ^{12}N 的中子和质子密度分布曲线

图 3 给出了由 RMF 计算得出的 ^{12}N 的中子和质子密度分布曲线. ^{12}N 是质子滴线核,由于库仑排斥,相对于中子密度分布而言,质子的密度分布要松散一些.

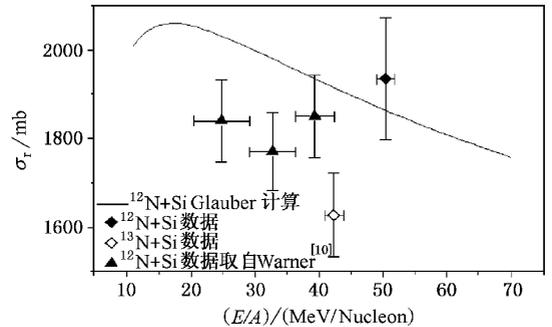


图 4 ^{12}N 在 Si 靶上的反应截面测量值与 Glauber 模型计算结果
菱形点为本实验的数据,三角形点是取自 Warner 的数据

图 4 给出了 ^{12}N 及其相邻同位素 ^{13}N 在 Si 靶上的中能核反应截面的实验数据与根据库仑修正后的 Glauber 理论^[15]计算中能区 $^{12}\text{N} + \text{Si}$ 的核反应总截面曲线.图 4 中也给出了 Warner 测量的 $^{12}\text{N} + \text{Si}$ 反应截面的一些数据^[10].图 4 中实线是由 Glauber 模型得出的理论计算曲线,其中的密度分布参数取自图 3.这次实验中,次级束流的 ^{12}N 事例比较少,导致截面统计误差相对较大.图 4 中测量值的横向误差棒给出了粒子可能的能量范围(从靶后粒子出射能量值到靶前粒子入射能量值).

4 讨 论

本实验测量的反应截面数据与 Warner 的数据相比, 我们实验测量的反应截面值偏大, 这可能是实验条件的差异和测量方法不同造成. 从我们的 ^{12}N 和 ^{13}N 的反应截面数据观察, 在相近的能量下, ^{12}N 的反应截面比 ^{13}N 的约高 20%, 可能表明质子滴线核 ^{12}N 具有质子晕分布. 但是导致反应截面的异常增大的原因仍然不是很清楚, 造成反应截面增大的原因十分复杂, 核形变及核子对效应也可能造成核反应截面的异常增大, 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 ^{12}N 引起反应截面的实验数据很少, 仅有 Warner 和本实验数据. 为了深入研究 ^{12}N 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.

根据核反应截面测量结果, 我们将通过 Glauber 模型或 BUU 模型计算提取核子密度分布和核物质的均方根半径等信息, 以便进一步分析这些核的奇异结构. 一个更精细的符合测量实验也在计划之中.

作者十分感谢中国科学院兰州重离子加速器国家重点实验室提供稳定的初级束流和放射性束流.

-
- [1] Tanihata, H. Hamagaki, O. Hashimoto *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985) 2626.
- [2] Tanihata, *Nucl. Phys.*, **A654**(1999) 235.
- [3] F. C. Chen, B. Q. Chen, *Nucl. Phys. Rev.*, **17**(2000) 82 [in Chinese] [陈奋策、陈宝秋, 原子核物理评论, **17**(2000) 82].
- [4] M. Fukuda, M. Mihara, T. Fukao *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A656**(1999) 209.
- [5] C. Borcea, F. Carstoiu, F. Negoita *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A616**(1997) 231.
- [6] R. E. Warner, J. H. Kelley, P. Zecher *et al.*, *Phys. Rev.*, **C52**(1995) 1166.
- [7] T. Minamisono, T. Ohtsubo, I. Minami *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **69**(1992) 2058.
- [8] H. Kelley, S. M. Austin, A. Azhari *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **77**(1996) 5020.
- [9] P. G. Hansen, A. S. Jensen, B. Jonson, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, **45**(1995) 591.
- [10] R. E. Warner, H. Thirumurthy, J. Woodroffe *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A635**(1998) 292.
- [11] W. L. Zhan, Z. Y. Guo, G. H. Liu *et al.*, *Science in China (Series A)*, **42**(1999) 529.
- [12] Z. Y. Guo, W. L. Zhan, G. H. Liu *et al.*, *Acta Phys. Sin. (Overseas Edition)*, **8**(1999) 21.
- [13] Y. X. Zhao, W. L. Zhan, Z. Y. Guo *et al.*, *Nucl. Instr. & Meth.*, **A355**(1995) 464.
- [14] W. L. Zhan, Z. Y. Sun, Z. Y. Guo *et al.*, *Nucl. Tech.*, **23**(2000) 11 [in Chinese] [詹文龙、孙志宇、郭忠言等, 核技术, **23**(2000) 11].
- [15] S. K. Charagi, S. K. Gupta, *Phys. Rev.*, **C41**(1990) 1610.
- [16] G. A. Lalazissis, S. Raman, *Phys. Rev.*, **C58**(1998) 1467.
- [17] B. Q. Chen, Z. Y. Ma *et al.*, *J. Phys.*, **24**(1998) 97.

MEASUREMENT OF TOTAL REACTION CROSS SECTION FOR EXOTIC LIGHT PROTON-RICH NUCLEUS $^{12}\text{N}^*$

NING ZHEN-JIANG LI JIA-XING GUO ZHONG-YAN ZHAN WEN-LONG
WANG JIAN-SONG XIAO GUO-QING WANG QUAN-JIN WANG JIN-CHUAN
WANG MENG WANG JIAN-FENG CHEN ZHI-QIANG

(*Institute of Modern Physics , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 ,China*)

(Received 24 July 2000 ; revised manuscript received 21 October 2000)

ABSTRACT

Measurements of the total reaction cross section for proton drip line nucleus ^{12}N at about 50.4 MeV/u on Si target were performed on RIBLL. Compared with its neighbor ^{13}N , large enhancement of total reaction cross section σ_r for ^{12}N is observed. This might be caused by nuclear deformation and nucleon pair effect, and the experimental inaccuracy should not be neglected. The σ_r of ^{12}N calculated by using a microscopic Glauber model is in agreement with the experimental results.

Keyword : proton halo , cross section

PACC : 2570 , 2587

* Project supported by the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholar of China (Grant No. 19825115), and by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 19735010 and 19735051).