

# 质子滴线核 $^{17}\text{Ne}$ 在 Si 靶上反应 总截面的测量\*

李加兴<sup>1)</sup> 李琛 郭忠言 肖国青 詹文龙  
王建松 孙志宇 王猛 陈立新 毛瑞士 胡正国  
(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 描述了在兰州放射性次级束流线上用  $80\text{MeV/u}$  的  $^{20}\text{Ne}$  轰击 Be 靶产生出理论上预言有奇异结构的  $^{17}\text{Ne}$  的次级束流,并用它轰击 Si 靶,测量它的反应总截面并与其相邻的核相比较,发现截面值没有增大的现象. 利用微观的 Glauber 模型进行了计算,理论计算和实验结果符合很好,确认其没有奇异结构.

**关键词** Glauber 模型 反应总截面 双参数费米密度分布函数

## 1 引言

在应用放射性束流对奇异核结构与反应机制的研究中,放射性束流对相互作用截面  $\sigma_1$  (高能区) 和反应总截面  $\sigma_R$  (中低能区) 测量有着特殊的重要性. 因为具有晕结构核的一个典型的物理现象就是其  $\sigma_1$  或  $\sigma_R$  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  $^{11}\text{Li}$  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  $^{11}\text{Li}$  为具有奇异结构的核,即中子晕核<sup>[1]</sup>. 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  $^6\text{He}$ ,  $^{11}\text{Li}$ ,  $^{11}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{Be}$ ,  $^{17}\text{B}$ ,  $^{19}\text{B}$ ,  $^{19}\text{C}$  等确实表现出晕结构特征:  $\sigma_1$  或  $\sigma_R$  异常增大,碎片动量分布变窄,电四极矩变大等<sup>[2]</sup>.

对于丰质子核,理论也预言了许多核可能有质子晕结构,如  $^8\text{B}$ ,  $^9\text{C}$ ,  $^{12}\text{N}$ ,  $^{17}\text{F}$ ,  $^{17}\text{Ne}$ ,  $^{26-28}\text{P}$ ,  $^{27-29}\text{S}$  等,但目前只有  $^8\text{B}$  的质子晕被大多数实验所确认<sup>[3]</sup>.

M. Fukuda<sup>[4]</sup>, R. E. Warner<sup>[5]</sup> 等人测量了  $^8\text{B}$  在 Be, C, Al, Si 等靶上的反应截面  $\sigma_R$ , 结果都发现  $\sigma_R$  明显增大. T. Minamisono 等人发现  $^8\text{B}$  的电四极矩异常增大<sup>[6]</sup>. J. H. Kelley 等人测量  $^7\text{Be}$  碎片动量分布变窄<sup>[7]</sup>. 这些都表现出  $^8\text{B}$  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.

$^{17}\text{Ne}$  最外层两个质子的分离能仅为  $0.94\text{ MeV}$  左右,目前也被认为可能具有质子晕结构,它的外层具有两个价质子构成的质子晕. Ozawa 测了  $A = 17$  几个核的相互作用截面<sup>[8]</sup>,发现  $^{17}\text{Ne}$  的均方根半径比其邻近核  $^{17}\text{F}$  和  $^{17}\text{N}$  都要高 10% 左右. Zhukov 和 Thompson 用空间配位模型计算得出,  $^{17}\text{Ne}$  的一个价质子为晕核子的可能性为 73%<sup>[9]</sup>. Warner 等人测量了  $^{17}\text{Ne}$  与 Si 的反应总截面<sup>[10]</sup>,较其相邻的核素而言,  $^{17}\text{Ne}$  的半径有增大的趋势,但比已确认的  $^8\text{B}$  比其相邻核的增长趋势要小.

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上(RIBLL)上测量  $^{12}\text{N}$ ,  $^{17}\text{F}$ ,  $^{17}\text{Ne}$  等轻质子滴线核等几条同位素链在  $^{28}\text{Si}$  靶上的核反应总截

2004-03-26 收稿

\* 国家自然科学基金(10205019, 10105011), 国家基础研究发展规划项目(G2000077401, G2000077404), 国家基金委创新研究群体科学基金(10221003)资助

1) E-mail: lijx@impcas.ac.cn

面,其中 $^{17}\text{Ne}$ 束的能量为55.14MeV/u. 实验数据补充了现有的中能区 $^{17}\text{Ne}$ 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.

## 2 实验装置及测量方法

实验是在 RIBLL<sup>[11]</sup>终端上进行的. 兰州重离子加速器(HIRFL)提供的80MeV/u $^{20}\text{Ne}$ 初级束流,在 RIBLL的初级靶室轰击3mm厚的Be靶,引起弹核碎裂,产生 $^{20}\text{Ne}$ 以下各种碎片. 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,不加降能器选择<sup>[12]</sup>.

核反应总截面的测量采用束流衰减法<sup>[13]</sup>. 最前面有一个 $\phi 12\text{mm}$ 光阑是限制束流发散度的,同时紧贴在叠层望远镜的前面还有一个 $\phi 8\text{mm}$ 的光阑,这两个光阑使得束流在叠层望远镜探测器中的几何发散度为 $6^\circ$ ,减小了因为束流发散的原因而引起的测量误差. 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 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 $200\text{ps}$ <sup>[14,15]</sup>. 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 $\Delta E_1, \Delta E_2, \Delta E_3, \Delta E_4$ 和 $\Delta E_5$ 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10mm,面积 $70\text{mm} \times 70\text{mm}$ . 初步推算, $^{17}\text{Ne}$ 的射程为 $2461.4\mu\text{m}$ . 因此, $^{17}\text{Ne}$ 将穿透5片 Si 探测器,最后停止在 CsI(Tl)中. 图1是实验中得

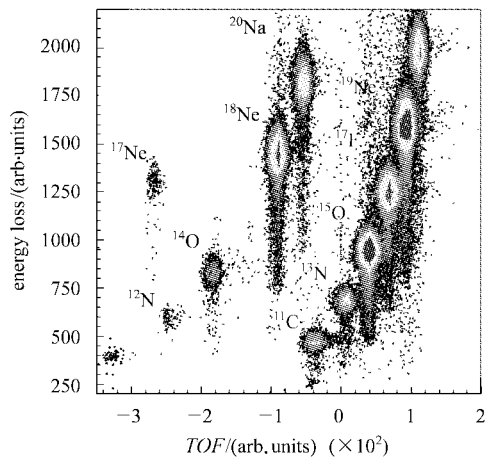


图1 TOF- $\Delta E_1$  二维关联谱

到的 Si 靶前放射性束流二维鉴别图( $\text{TOF}-\Delta E_1$ ). 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( $\text{TOF} = t_2 - t_1$ ),  $\Delta E_1$  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,不同的同位素在图中可以被清楚地鉴别.

在这次实验中测量了奇异核束流 Be, B, C, N, O, F 和 Ne 等同位素链在 Si 靶上的反应总截面. 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 实验结果和理论分析

实验采用束流衰减法测量 $^{17}\text{Ne}$ 的核反应截面. 实验数据是以事件列表方式记录在计算机硬盘上. 数据分析时首先在  $\text{TOF}-\Delta E_1$  二维谱上设置选择 $^{17}\text{Ne}$ 条件(开窗),得到靶前粒子数 $N_0$ ,然后在 $\Delta E_2-E$ 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.

我们把从实验数据分析中得到的 Ne 同位素链的反应截面 $\sigma_R$ (mb)结果利用半经验的 SHEN 公式<sup>[16]</sup>对束流能量(30MeV/u)进行归一后列于图2中. 从图中可以看出, $^{17}\text{Ne}$ 的实验结果并没有给出奇异的增大,比其相邻的 $^{18}\text{Ne}$ 的结果要偏小. 但是还需要进行理论的分析来判断 $^{17}\text{Ne}$ 是否有奇异结构.

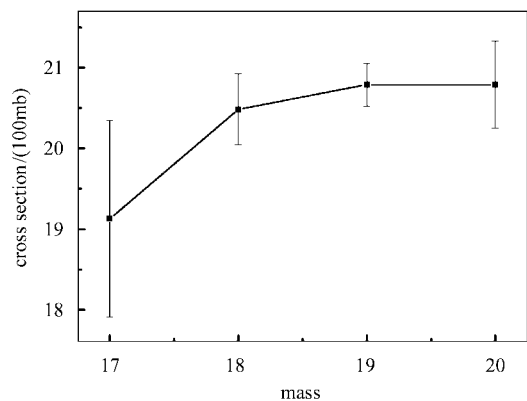


图2 对实验所得的 Ne 同位素与 Si 反应总截面值用 SHEN 公式对能量(30MeV/u)进行归一化后的结果图

我们对 Glauber 模型进行了有限程和库仑修正,并输入了双参数的费米密度分布,它可以很好地拟合没有奇异结构的核的实验反应总截面.

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<sup>[17]</sup>:

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

式中  $\psi_K$  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,我们可以得到在高中能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

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

公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  $\rho_z^i$  是核的密度分布,  $\rho_z^i$  由下式定义

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

$\bar{\sigma}_{NN}$  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

$$\bar{\sigma}_{NN} = \frac{N_p N_T \sigma_{nn} + Z_p Z_T \sigma_{pp} + N_p Z_T \sigma_{np} + Z_p N_T \sigma_{np}}{A_p A_T}. \quad (6)$$

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

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

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

图 3 给出了  $^{17}\text{Ne}$  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<sup>[18]</sup> 计算中能区  $^{17}\text{Ne} + \text{Si}$  的核反应总截面曲线. 图中也给出了 R. E. Warner 测量的  $^{17}\text{Ne} + \text{Si}$  反应截面<sup>[10]</sup> 和 A. Ozawa 测量的在高中能时  $^{17}\text{Ne} + \text{C}$  反应截面<sup>[8]</sup> 的一些数据. 可以看出,我们测得的实验结果与 Warner 的能区相近,而 Ozawa 测到的实验数据偏近于高能的部分. 因为我们输入的质子密度分

布形式与中子的密度分布相同,由此可推知  $^{17}\text{Ne}$  没有什么奇异的结构.

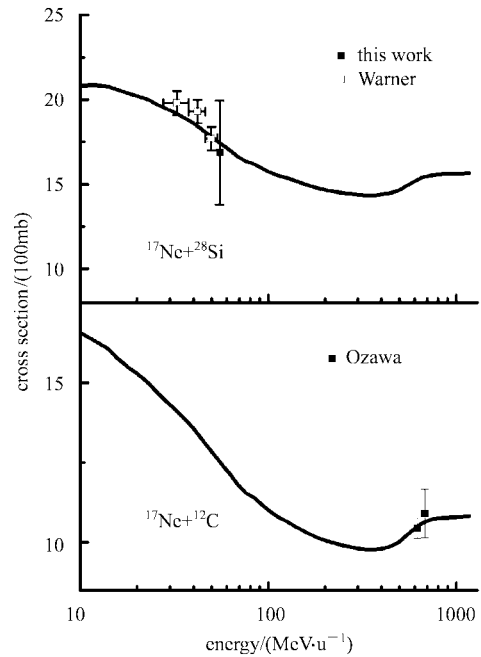


图 3 利用双参数费米密度分布代入 Glauber 模型所得的激发曲线与  $^{17}\text{Ne}$  实验数据的拟合

## 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基本与他的实验数据相同. 从我们的  $^{17}\text{Ne}$  和其相邻的同位素的反应截面数据观察,  $^{17}\text{Ne}$  的反应截面比  $^{18}\text{Ne}$  的低约 10%, 并从 Glauber 模型的拟合结果发现质子滴线核  $^{17}\text{Ne}$  没有质子晕分布. 但是影响反应截面还有其他的原因,核形变及核子对效应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  $^{17}\text{Ne}$  引起反应截面的实验数据很少,在中能区仅有 R. E. Warner 和本实验数据. 为了深入研究  $^{17}\text{Ne}$  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结构.

## 参考文献 (References)

- 1 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676—2679
- 2 Tanihata I. Nucl. Phys., 1999, **A654**: 235c—251c
- 3 CHEN Fen-Ce, CHEN Bao-Qiu. Nucl. Phys. Rev., 2000, **17**(2): 82—86(in Chinese)  
(陈奋策,陈宝秋. 原子核物理评论, 2000, **17**(2): 82—86)
- 4 Fukuda M, Mihara M, Fukao T et al. Nucl. Phys., 1999, **A656**: 209—228
- 5 Warner R E, Kelley J K, Zecher P et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: 1166—1170
- 6 Minamisono T, Ohtsubo T, Minami I et al. Phys. Rev. Lett., 1992, **69**: 2058—2061
- 7 Kelley H, Austin S M, Azhari A et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**: 5020—5023
- 8 Ozawa A, Kobayashi T, Sato H et al. Phys. Lett., 1994, **B334**: 18—22
- 9 Zhukov M V, Thompson I J. Phys. Rev., 1995, **C52**: 3505—3508
- 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. High Energy Phys. and Nuclear Phys., 2004, **28**(12):1256 (in Chinese)  
(李加兴,肖国青,郭忠言等. RIBLL 组关于奇异核的实验研究. 高能物理与核物理, 2004, **28**(12):1256)
- 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. High Energy Phys. and Nuclear Phys., 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 SHEN W et al. Nucl. Phys., 1989, **A491**:130—146
- 17 Lalazissis G A, Raman S. Phys. Rev., 1998, **C58**: 1467—1472
- 18 Charagi S K, Gupta S K. Phys. Rev., 1990, **C41**: 1610—1618

### Measurement of Total Reaction Cross Section of the Proton Drip-Line Nucleus $^{17}\text{Ne}$ on Si Target \*

LI Jia-Xing<sup>1)</sup> LI Chen GUO Zhong-Yan XIAO Guo-Qing ZHAN Wen-Long  
WANG Jian-Song SUN Zhi-Yu WANG Meng CHEN Li-Xin  
MAO Rui-Shi HU Zheng-Guo

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

**Abstract**  $^{20}\text{Ne}$  was used as primary beam to bombard Be target to produce RIB  $^{17}\text{Ne}$ , which is a candidate of proton halo nuclei in theoretical prediction. The total reaction cross section of  $^{17}\text{Ne}$  on Si target was measured. No enhancement was observed compared with that of its neighbors. The calculation with modified Glauber model is consistent with the experimental results. No exotic structure of  $^{17}\text{Ne}$  is confirmed.

**Key words** Glauber model, total reaction cross section, Fermi-density-distribution with two parameters

Received 26 March 2004

\* Supported by National Natural Science Foundation of China(10205019,10105011), Major State Basic Research Development Program(C2000077401, C2000077404) and NSFC for Innovative Research Group(10221003)

1) E-mail: lijx@impcas.ac.cn