

## 奇异核的实验研究\*

李加兴<sup>1)</sup> 肖国青 郭忠言 詹文龙 孙志宇 王猛  
王金川 胡正国 李琛 陈立新 毛瑞士

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 总结了兰州放射性束实验小组在兰州放射性次级束流线上近几年来利用产生的放射性束流,轰击 Si 或 C 等靶子,测量它的反应总截面.并利用经验公式将这些结果归一到相同的能量和靶子,与其相邻的核相比较,发现了<sup>9</sup>C, <sup>11</sup>Be, <sup>14</sup>Be, <sup>8</sup>B, <sup>14</sup>B 和 <sup>12</sup>N 等核素的反应总截面值有奇异增大的现象.利用微观的 Glauber 模型进行了计算,对有奇异结构的核采用核芯加价核子的密度分布形式,理论计算和实验结果符合得很好,可以给出奇异核的弥散的密度分布.

**关键词** Glauber 模型 反应总截面 双参数的费米密度分布

### 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,对放射性束流引起相互作用截面  $\sigma_I$  (高能区) 和反应总截面  $\sigma_R$  (中低能区) 的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  $\sigma_I$  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<sup>11</sup>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<sup>11</sup>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<sup>6</sup>He, <sup>11</sup>Li, <sup>11</sup>Be, <sup>14</sup>Be, <sup>17</sup>B, <sup>19</sup>B, <sup>19</sup>C 等核确实表现出晕结构特征: $\sigma_I$  或  $\sigma_R$  异常增大,碎片动量分布变窄<sup>[2]</sup>,电四极矩变大等<sup>[3]</sup>.

中国科学院近代物理研究所兰州放射性束流线的建立使得我国在利用中低能的反应总截面来寻找具有奇异结构的核成为可能.本文描述在兰州重离子加速器国家实验室放射性次级束流线(RI-BLL)上测量的<sup>9</sup>C, <sup>11</sup>Be, <sup>14</sup>Be, <sup>8</sup>B, <sup>14</sup>B 和 <sup>12</sup>N 等核素几

条同位素链在<sup>28</sup>Si 或 <sup>12</sup>C 靶上的核反应总截面.实验数据补充了现有的中能区许多核反应截面测量的空白,同时还首次发现了<sup>9</sup>C 具有奇异结构.本文并用修正的 Glauber 模型拟合了实验的数据.

### 2 实验方法

测量核反应截面的方法各有不同,通常使用的有弹性散射的角分布测量法、束流透射法<sup>[1,5]</sup>和 $4\pi$ - $\gamma$ 符合法<sup>[6,7]</sup>等.角分布测量法可以通过光学模型拟合弹性散射的角分布来推出  $\sigma_R$ , 这种方法是光学模型依赖的而且必须知道光学势,被广泛应用于稳定核.对于奇异核,由于放射性核束(RIB)的能量分辨率低,很难区分弹性散射和非弹性散射,因此很少用这种方法来获得奇异核的  $\sigma_R$ .束流透射法是测量反应中没有发生反应的事件, $4\pi$ - $\gamma$ 符合法是测量发生了核反应的事件,两者都可以得到核反应总截面.

束流透射法也叫束流衰减法,它不依赖于模型,直接测量  $N_0$  个人射粒子经过厚度为  $N_1$  (每单位面积的靶原子数)的靶后透射粒子数目  $N$ , 可得出核反应总截面的表达式

2004-03-24 收稿

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

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

$$\sigma_R = \frac{1}{N_t} \ln \frac{N_0}{N}. \quad (1)$$

在实验测量过程中,靶前放一组探测器用来鉴别入射粒子,统计入射粒子的数目  $N_0$ ,靶后放有一组粒子鉴别探测器,以鉴别、统计透射过靶(没有反应)的粒子数  $N$ . 为了弥补在束流输运过程中造成的粒子损失带来的误差,可用空靶实验进行校正.

我们采用透射法测了一系列核素在中能区下的反应总截面(探测器布局图见图 1). 通常利用 LISE 或 MOCADI 程序进行束流产额和传输的计算,根据计算结果选择实验中使用的初级束流和磁刚度的设置. 在初级靶室  $T_0$  处,由初级束轰击初级靶,弹核碎裂,产生弹核以下所有同位素碎片. 设置 RIBLL 磁刚度-降能器 ( $B\rho - dE/dx$ ),选择一组实验所需的次级束. 在初级靶前,用一个穿透式法拉第筒在线测量初级束流的流强. 次级束粒子的飞行时间是由  $T_1$  和  $T_2$  处(间隔约为 17m)的闪烁膜探测器<sup>[8]</sup>提供的(飞行时间  $TOF = T_2 - T_1$ ). 此外在第一聚焦点  $T_1$  处有两块 PPAC 探测器,在散焦点  $C_2$  处放置了一块 PPAC. 这样结合飞行时间和磁刚度构成大动态范围、大立体角、高计数能力、高探测效率的探测器系统可以精确地测量束流的能量,并使我们所选择的放射性束以最优的状态传输. 第二聚焦点  $T_2$  处反应总截面测量探测器的分布如图 1 所示. 图中的光阑是为了限制束流的发散度. 多叠层望远镜是由 5 个金硅面垒半导体探测器加 CsI(Tl)阻止型探测器组成. 由于有足够长的飞行时间,入射粒子由  $TOF$  和  $\Delta E_1$  就可以很好地鉴别. 同时,在多叠层望远镜前也有一光阑,使得束流在望远镜的探测器中的几何发散度很小. 在望远镜前还有两块可以测量位置的 PPAC 探测器,作为调束时使用,并在数据处理时粒子鉴别和追踪束流的径迹.

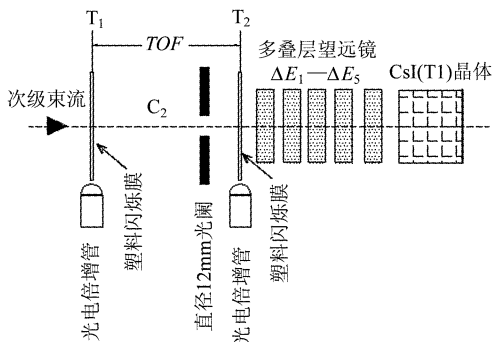


图 1 反应总截面测量探测器布局图

### 3 实验结果及简单分析

在实验所得的粒子鉴别图上对指定的放射性束 (RIB) 加窗,在后续探测器上计数反应和没有参加反应的粒子,积累后提取出它的反应总截面,图 2 是对  $N=3$  的同中子数核素链的反应总截面的测量结果. 在几次实验中,我们使用了  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  和  $^{20}\text{Ne}$  等初级束,共得到包括  $^6\text{Li}$ ,  $^{7,9,11,12,14}\text{Be}$ ,  $^{8,10-15}\text{B}$ ,  $^{11-14}\text{C}$ ,  $^{12-15}\text{N}$ ,  $^{14-17}\text{O}$ ,  $^{17-19}\text{F}$ ,  $^{17-20}\text{Ne}$  等三十几个同位素,几条同位素链的反应总截面,其中包括最感兴趣的核  $^{11}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$ ,  $^{14}\text{B}$ ,  $^{12}\text{N}$ ,  $^{17}\text{F}$  和  $^{17}\text{Ne}$ . 为了便于比较,我们把 Li, Be, B, C, N, O, F 和 Ne 同位素链的所有截面数据利用半经验的 SHEN 公式<sup>[9]</sup>对束流的能量 (30MeV/u) 和靶子 (Si) 进行了归一并绘于图 3 中,且给出了统计误差. 由图 3 可以看出,  $^{14}\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$ ,  $^{14}\text{B}$ ,  $^{12}\text{N}$ ,  $^{17}\text{F}$  的截面值明显比其相邻核有异常的增大,  $^9\text{C}$  的截面值也有异常的增大. 但要确定它们是否具有奇异结构的核,还需要从理论计算上进行验证.

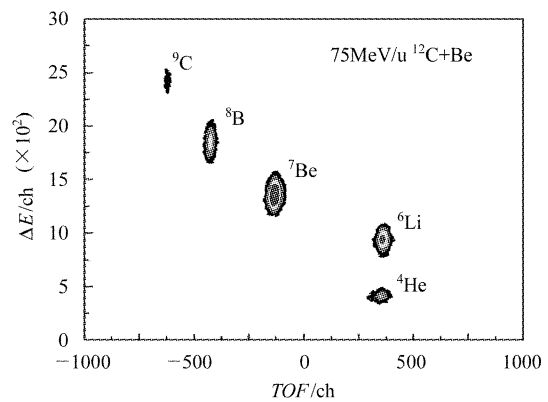


图 2  $N=3$  的同中子数链的反应总截面的测量

在理论上常用 Glauber 模型来拟合反应总截面. 从 Lippmann-Schwinger 方程出发,并由半经典光学模型可知,核反应总截面与光学势的虚部相对应<sup>[10]</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,并对势函数作一系列近似之后,可以得到高能区核反应总截面的公式

$$\sigma_R = 2\pi \int_0^\infty b db (1 - T), \quad (3)$$

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

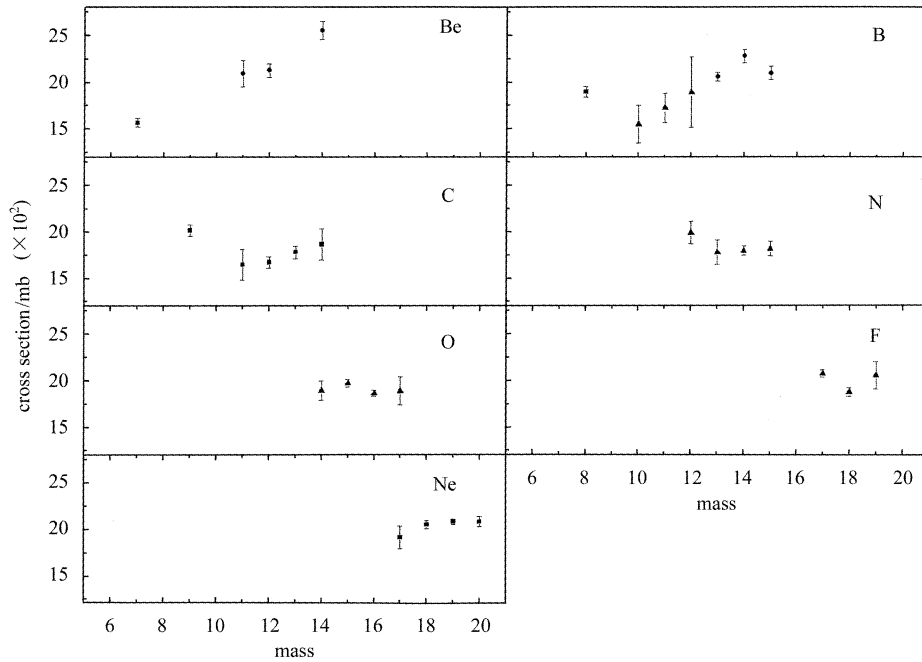


图 3 各核素的反应总截面值用 SHEN 公式对靶(Si)和能量(30MeV/u)进行归一化后的结果图  
图中纵坐标为截面值,横坐标为核的质量数.

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

公式中有限程相互作用函数  $f(r)$  由  $\int f d^2 r = 1$  进行归一, 而  $\rho^i$  是核的密度分布,  $\sigma_{NN}$  是 n-n, p-p 和 n-p 相互作用碰撞截面的平均.

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密度和中子密度, 得到透射函数应改用下式表示

$$T = \exp\left[\frac{1}{10} \sum_{i,j=1}^2 \sigma_{ij} \int d^2 b_1 \int d^2 b_2 f(|b_1 - b_2|) \cdot \rho_Z^1(b_1) \rho_Z^2(|b_2 - b|)\right], \quad (5)$$

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

利用考虑了有限程修正的 Glauber 模型, 输入双参数的费米密度分布拟合这些实验数据, 并对每种核子都采用相同的密度分布. 其密度分布形式由下式确定:

$$\rho(r) = \rho_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r-c}{a}\right)\right]^{-1}. \quad (6)$$

我们发现除  $^9\text{C}$ ,  $^{11}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$ ,  $^{14}\text{B}$  和  $^{12}\text{N}$  之外, 对所有其他核素, 从中能到高能都拟合得很好. 但对这几个核素, 中能区实验数据点明显高出拟合曲线, 这可能

预示  $^9\text{C}$ ,  $^{11}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$ ,  $^{14}\text{B}$  和  $^{12}\text{N}$  有奇异结构. 将它们考虑为核芯加价核子结构模式来进行拟合, 结果发现数据点与计算曲线很好地一致. 由此提取的核半径比其相邻核大许多. 以  $^{12}\text{N}$  为例, 利用  $^{11}\text{C}$  作为核芯, 并加一个具有弥散结构的价质子在外围作为  $^{12}\text{N}$  的密度分布, 可以很好地拟合反应总截面. 其核内部的质子密度分布半径比中子密度分布半径也表现出一个很大的弥散, 如图 4 所示, 这说明  $^{12}\text{N}$  有奇异的晕结构. 用 Glauber 模型拟合的结果可以很好地与实验值相符, 如图 5 所示.

从我们的实验数据和理论分析结果表明,  $^9\text{C}$ ,  $^{11}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$ ,  $^{14}\text{B}$  和  $^{12}\text{N}$  可能有奇异结构,  $^{17}\text{Ne}$  没有

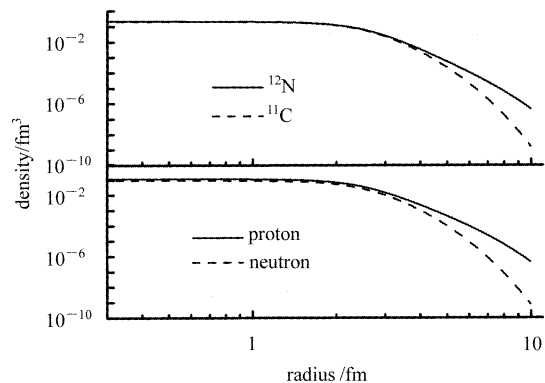


图 4  $^{12}\text{N}$  的核内密度分布

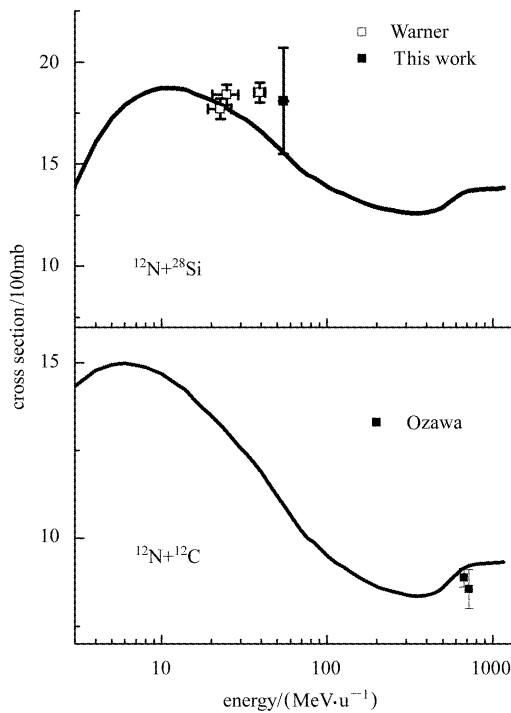


图 5 对 $^{12}\text{N}$ 采用核芯加具有弥散结构的价核子的密度分布形式对实验结果可以很好地拟合

发现晕结构特征, $^{17}\text{F}$ 的截面值比其相邻的核有增大的趋势,但理论分析发现它没有弥散很大的结构,这可能是具有皮核结构的特征,下一步将对它作进一步的理论分析.希望在以后的实验中进行核心和出射粒子的动量分布符合测量,从另外的角度验证我们的实验结果.

## 4 讨论

在近几年内,RIBLL实验组通过多次实验关于对反应总截面测量的结果和理论分析,得出很多核都可能具有奇异结构.但对于测量的反应总截面的实验值,基本是每个核只有一个能量点的值,相对于激发曲线来说,有一定的局限性.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.随着RIBLL各种探测器的顺利研制和完善,可以从碎片的动量分布宽度和弹性散射等方面进一步对这些结果进行验证.

## 参考文献 (References)

- 1 Tanihata I et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676—2679
- 2 Kelley H et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**: 5020—5023
- 3 Tanihata I. Nucl. Phys., 1999, **A654**: 235c—251c
- 4 ZHAN W L, GUO Z Y, LIU G H et al. Science in China (Series A), 1999, **42**(5): 528—536
- 5 Warner R et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: 1166—1170
- 6 Saint-Laurent M et al. Z. Phys., 1989, **A332**: 457—465
- 7 Mittig W et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **59**: 1889—1891
- 8 ZHAO Y X et al. Nucl. Instr. & Meth, 1995, **A355**: 464—468
- 9 SHEN W et al. Nucl. Phys., 1989, **A491**: 130—146
- 10 Charagi S K, Gupta S K. Phys. Rev., 1990, **C41**: 1610—1618

## Experimental Study of the Exotic-Nuclei \*

LI Jia-Xing<sup>1)</sup> XIAO Guo-Qing GUO Zhong-Yan ZHAN Wen-Long SUN Zhi-Yu WANG Meng  
WANG Jin-Chuan HU Zheng-Guo LI Chen CHEN Li-Xin MAO Rui-Shi  
(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** These years the RIBLL(Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou) group have measured many nuclei's total reaction cross sections, which is the most popular and simple way to identify the exotic nuclei. The experiments were completed by using transparency method. The experimental results of different nuclei at different energies were converted into the same energy (30MeV/nucleon) and same target (silicon) by Shen's formula. With comparing to their neighbors, we found that  $^9\text{C}$ ,  $^{11}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$ ,  $^{14}\text{B}$  and  $^{12}\text{N}$ 's results show larger ones. The Glauber model was used to calculate the total reaction cross sections, and 2-para-Fermi density distribution was introduced. For the exotic nuclei, a core plus exotic nucleons density distribution was used. The theoretical results are consistent with the experimental ones.

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

---

Received 24 March 2004

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (10205019, 10105011), Major State Basic Research Development Program (G2000077401, G2000077404), NSFC for Distinguished Research Group

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