

80MeV/u ^{20}Ne 轰击 ^9Be 碎裂产物 反应总截面的测量*

李加兴 郭忠言 肖国青 詹文龙 孙志宇 王建松
田文栋 王猛 陈志强 王武生 宁振江 王建峰 毛瑞士
(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 介绍了用透射法测量中能区 ^{20}Ne 打 ^9Be 靶碎裂产生的次级束与 Si 靶作用的核反应总截面的方法, 以及实验的探测器布局、实验过程和实验结果. 并对理论上预言有奇异结构的核 ^{12}N , ^{17}Ne 和 ^{17}F 的实验结果与其相邻核进行了比较.

关键词 反应总截面 透射法 放射性束流

1 引言

核反应总截面是中、低能核反应研究的一个基本物理量, 通过实验测量它随入射粒子的能量、核子的质量数、核中的质子数、以及弹核和反应系统的同位旋等的变化曲线可以提取许多反映原子核整体特性, 如核的物质密度分布、质子与中子的密度分布、形变和核内相互作用势, 以及介质中核子-核子碰撞截面等许多信息. 这些信息对核技术的应用也是非常重要的. 近年来, 加速器和放射性束流技术的发展为核物理研究开辟了广阔的同位旋空间, 大大促进了对奇异核反应的反应总截面的理论和实验研究. 在中能区域, 反应总截面对核的奇异结构更加灵敏, 因此放射性核束反应总截面的测量成为人们非常关注的实验方法之一.

1985 年, I. Tanihata 等人在 LBL 首先用 790MeV/u ^{11}B 弹核碎裂产生 ^8He , ^6He , ^{11}Li 等放射性束流, 使之与 Be, C, Al 靶反应, 利用透射法测量相互作用截面 σ_1 , 并推出核子密度分布半径. 实验发现, ^{11}Li 具有异常大的相互作用截面和密度分布半径, 即中子晕结构^[1]. 这是使用放射性束流的先驱实验之一, 它促进了放射性束物理的研究和放射性束装置的发展. 从此, 一些重离子放射性束流装置如 LISE/LISE3, FRS, A1200/A1900, RIPS, RIBLL 等先后投入运行, 使 RIB 物理研究和中子晕核的研究取得长足发展. 理论预言的中子晕核, 如 ^6He , ^{11}Li , ^{11}Be , ^{14}Be , ^{19}C 等, 都得到了实验的验证和认同.

2001-08-21 收稿

* 国家杰出青年基金, 国家自然科学基金(19825115, 19735010)和 973 国家重点基础研究发展规划(G2000077401, G2000077404)

在质子晕核研究方面,理论学家也预言了一些质子晕结构的最佳候选核,如 ${}^8\text{B}$, ${}^{12}\text{N}$, ${}^{17}\text{F}$, ${}^{17}\text{Ne}$, ${}^{26}\text{P}$, ${}^{27-29}\text{S}$ 等.由于库仑力的屏蔽作用,给实验增加了难度,目前只有 ${}^8\text{B}$ 被多数实验确认是质子晕核. ${}^8\text{B}$ 的特征是电四极矩增大^[2],碎片的动量分布变窄^[3,4],以及在中低能时核反应总截面的增大^[5,6].但 I. Tanihata 等^[7]利用高能(790 MeV/u)的核束测得相互作用截面(σ_1)与其相邻的同位素相比没有明显增大.理论预言的其他具有质子晕的核,实验数据很少,几乎没有达到共识.

一般认为,非稳定核的价核子分离能小于 1 MeV 时,价核子可能呈现扩展的空间分布——晕^[8],这使得具有晕结构的放射性核具有下面一些明显特征:

- 1) 扩展的物质空间分布,使得物质相互作用的几率增大,因此相互作用截面或反应总截面异常增大;
- 2) 根据测不准关系式,很大的空间分布半径应该说明其很窄的动量分布,即碎裂产物的动量分布宽度很窄;
- 3) 扩展的电荷空间分布应使得其电四极矩增强.

由前所述,实验测量核电四极矩,碎片动量分布以及核反应总截面是研究晕核性质常用的方法.电四极矩和反应截面增大,碎片动量分布变窄是晕核的明显特征.而利用透射法进行反应截面测量是研究晕核最简便、最可靠、最被频繁采用的实验方法.我们也采用透射法测量质子滴线核中比较有争议的 ${}^{12}\text{N}$, ${}^{17}\text{F}$ 和 ${}^{17}\text{Ne}$ 在 Si 靶上引起反应的总截面 σ_R ,进而推出它们的密度分布半径.

2 实验

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^[1,5]和 $4\pi-\gamma$ 符合法等^[9,10].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 σ_R ,这种方法是光学模型依赖的,被广泛应用于稳定核.对于奇异核,因为放射性核束(RIB)大的能量色散会导致能量分辨较差,增加了区分弹性散射和非弹性散射难度,因此很少用这种方法来获得奇异核的 σ_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. $4\pi-\gamma$ 符合法克服了透射法测量核反应总截面无法彻底解决弹散射和库仑激发的问题,但对 γ 探测器的数量、大小和探测效率的要求非常高,另外还要有附加装置来消除任何形式的 γ 本底对探测器的影响,因此限制了它在奇异核反应截面测量中的应用.同时, γ 探测器的造价不菲,也是限制它广泛应用的一个重要因素.

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 个入射粒子经过厚度为 N_T (每单位面积的靶原子数)的靶后的透射粒子数目 N ,可得出核反应总截面的表达式:

$$\sigma_R = \frac{1}{N_T} \ln\left(\frac{N_0}{N}\right). \quad (1)$$

1999年9月到10月间,我们采用透射法测量了一系列核素在中能下的反应总截面.实验

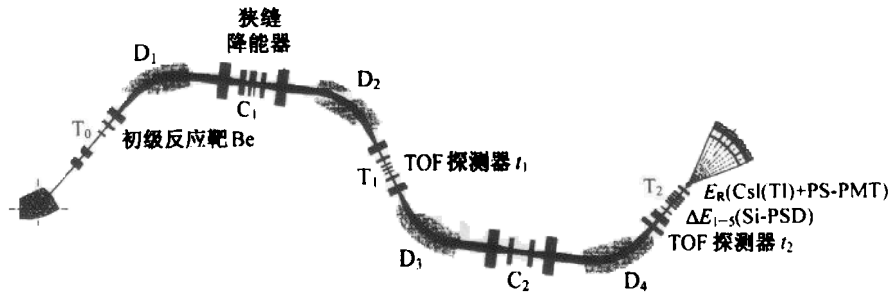


图1 RIBLL上反应总截面测量实验布局

是在兰州重离子加速器国家实验室(HIRFL)的放射性束流线(RIBLL)^[11]上进行的. 图1给出了整个RIBLL次级束流线的探测器布局. 在初级靶室T₀处,由能量为80MeV/u的初级束²⁰Ne轰击3mm厚的Be靶,²⁰Ne碎裂,产生弹核²⁰Ne以下所有同位素碎片.通过设置RIBLL磁刚度-降能器,选择一组实验所需的次级束^[12].在本次实验中我们没有放入降能器,以同时测量多种RIB的实验结果,便于比较,同时也可以缓解束流时间紧张的状况.在初级靶前,用一个穿透式法拉第筒在线监测初级束流的强度.次级束粒子的飞行时间由T₁和T₂处(间隔约为17m)的闪烁膜探测器^[13]提供,即 $TOF = t_2 - t_1$, t_2, t_1 分别是粒子经过T₁和T₂的时间.在第一散焦点C₂处放置一大面积纵向场双叠层气体电离室,该电离室作为 ΔE 探测器可与Si探测器组合成望远镜系统,再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^[14].第二聚焦点T₂处反应总截面测量探测器的分布如图2所示.图中 $\phi 12$ 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 ΔE_1 就可以很好地鉴别.同时,在多叠层望远镜前也有一光阑,孔径为 $\phi 8$,使得束流在望远镜探测器中的几何发散度为6°.由于第一片Si靶是用来鉴别次级束粒子的,即用来筛选炮弹的,因此,我们在这次实验中主要测量了奇异核束流在第二片Si靶上的反应总截面,其后的出射粒子通过 $\Delta E - E$ 方法鉴别.粒子鉴别结果如图3所示.

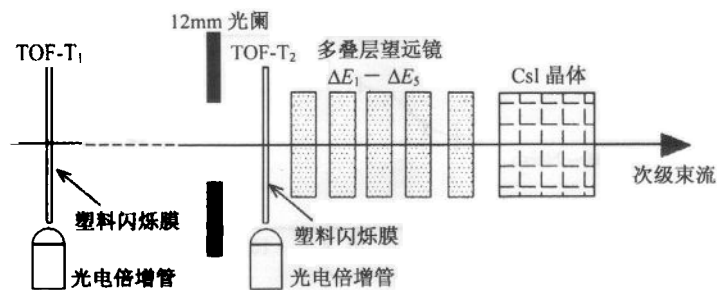


图2 实验中使用的TOF望远镜和粒子鉴别望远镜

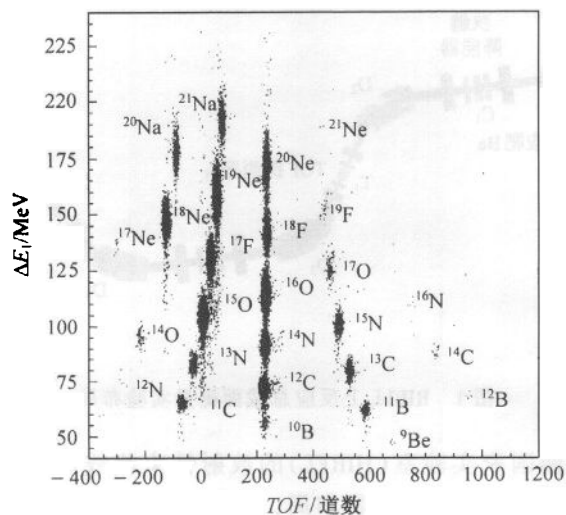
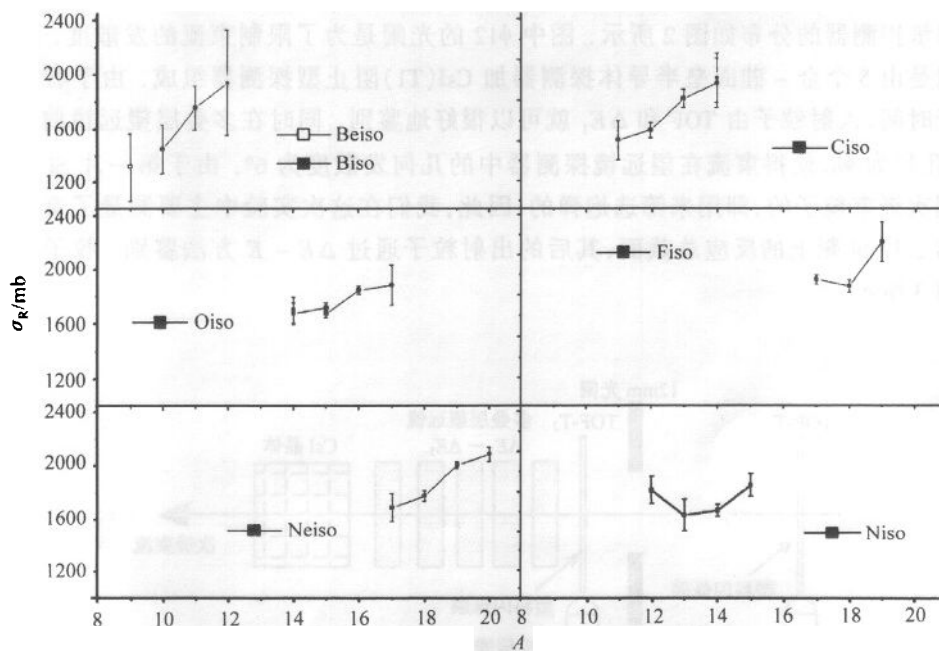


图 3 RIB 粒子鉴别图

3 实验结果

在粒子鉴别图上对指定的 RIB 加窗,在后续探测器上计数反应和没有参加反应的粒子,积累后提取出包括 ^9Be , $^{10-12}\text{B}$, $^{11-14}\text{C}$, $^{12-15}\text{N}$, $^{14-17}\text{O}$, $^{17-19}\text{F}$, $^{17-20}\text{Ne}$ 等二十几个同位素,几

图 4 从实验数据提取的 B,C,N,O,F 和 Ne 同位素在 Si 靶上的 σ_R -A 曲线

条同位素链的反应总截面和数据的统计误差,其中包括我们最感兴趣的核 ^{12}N , ^{17}F 和 ^{17}Ne .将B,C,N,O,F和Ne同位素链的截面数据绘于图4中,并给出了统计误差.

由图中可以看出,我们感兴趣的核 ^{12}N 的反应截面较其相邻核 ^{13}N 明显增大, ^{17}F 比相邻的核 ^{18}F 的截面增大. ^{17}Ne 没有看出增大迹象.

4 结果分析和讨论

Glauber模型是拟合反应总截面的理论中较常用的一种.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^[15].

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

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,可以得到在高速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

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

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

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

σ_{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

$$\sigma_{NN} = \frac{N_p N_T \sigma_{nn} + Z_p Z_T \sigma_{pp} + N_p Z_T \sigma_{np} + Z_p N_T \sigma_{np}}{A_p A_T}$$

在上述推导中对核子-核子截面做了近似,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

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

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

我们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本实验中的数据,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,

$$\rho(r) = \rho_0 \left[1 + \exp \left(\frac{r - c}{a} \right) \right]^{-1}. \quad (8)$$

我们发现,除 ^{12}N 之外,对所有其他核素,从中能到高能都拟合得很好.但对 ^{12}N ,中能下实验数据点明显高出拟合曲线,这可能预示 ^{12}N 有奇异结构.将 ^{12}N 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,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 5 所示. 这说明 ^{12}N 很可能有奇异的晕结构. 对 ^{17}F 而言,尽管其反应截面实验值有增大的迹象,但我们用上述方法进行理论分析,实验点与理论曲线很好符合,没有发现奇异迹象. 而对 ^{17}Ne ,它的反应截面实验结果没有增大,与其他正常核一样.

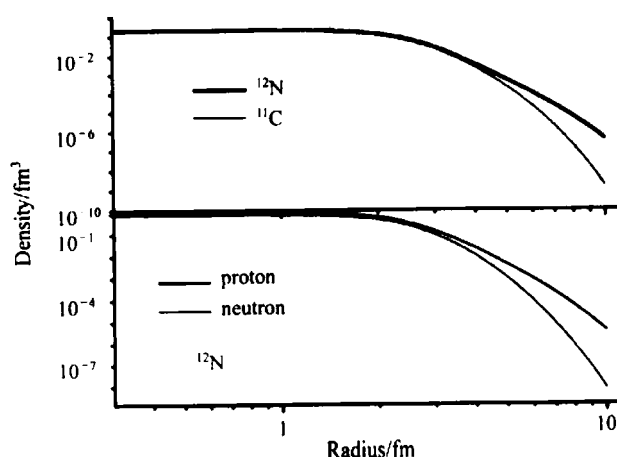


图 5 ^{12}N 与其核芯 ^{11}C 的物质密度分布的比较及 ^{12}N 内质子和中子的密度分布

因此,从我们的实验数据和分析结果表明, ^{12}N 可能有晕结构, ^{17}F 和 ^{17}Ne 没有发现晕结构特征. 我们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.

作者衷心感谢兰州重离子加速器国家实验室的工作人员为本实验提供的初级和次级放射性束流.

参考文献 (References)

- 1 Tanihata I et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**:2626
- 2 Minamisono T et al. Phys. Rev. Lett., 1992, **69**:2058
- 3 Schwab W et al. Z. Phys., 1995, **A350**:283
- 4 Kelley J H et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**:5020
- 5 Warner R F et al. Phys. Rev., 1995, **C52**:1166
- 6 Negoita F et al. Phys. Rev., 1996, **C54**:1787
- 7 Tanihata I et al. Phys. Lett., 1988, **B206**:592
- 8 Anne R et al. Phys. Lett., 1990, **B250**:19
- 9 Saint-Laurent M G et al. Z. Phys., 1989, **A332**:457
- 10 Mittag W et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **59**:1889
- 11 ZHAN Wen-Long et al. Radioactive Ion Beam in Lanzhou, The 1st Asia Particle Accelerator Conference (APAC 98), March 23—27, 1998, KEK, Tsukuba, Japan.
- 12 GUO Zhong-Yan et al. Acta Physica Sinica (Overseas Edition), 1999, **8**(1):26
- 13 ZHAO You-Xiong et al. Nucl. Instr. Meth., 1995, **A355**:464.
- 14 LI Jia-Xing et al. Nuclear Techniques., 2001, **24**(4):309(in Chinese)

(李加兴等. 核技术, 2001, 24(4):309)

15 Lalazissis G A et al. Phys. Rev., 1998, C58:1467

Measurement of Total Cross Sections of Nuclei Produced by ^{20}Ne Bombing at ^9Be Target *

LI Jia-Xing GUO Zhong-Yan XIAO Guo-Qing ZHAN Wen-Long SUN Zhi-Yu
WANG Jian-Song TIAN Wen-Dong WANG Meng CHEN Zhi-Qiang
WANG Wu-Sheng NING Zhen-Jiang WANG Jian-Feng MAO Rui-Shi
(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

Abstract The measurement of total reaction cross section is of great importance in studying the structure and reaction mechanisms of exotic nuclei produced by radioactive nuclear beam (RNB). The measurements of the total reaction cross section of fragments produced by ^{20}Ne (80MeV/u) + ^9Be (3mm) on Si target at intermediate energies were performed on RIBLL by using the transmission method which is the most convenient and credible method in use. The setting-up of the telescope detectors is introduced. And the experimental procedure and experimental results are also described. From the results, we can see the trends of the total cross sections with neutron number in each nuclear isotope chain. The results for some exotic nuclei predicted by theories, such as ^{12}N , ^{17}F and ^{17}Ne , are compared with those of their neighbors. And our results show that ^{12}N has an exotic structure, but ^{17}F and ^{17}Ne have not.

Key words total reaction cross section, transmission method, radioactive ion beam

Received 21 August 2001

* Supported by National distinguished Youth Foundation and National Natural Science Foundation of China (19825115, 19735010), Major State Basic Research Development Program (G2000077401, G2000077404)