

一个奇异核反应总截面的探测系统及其应用^{*}

蔡翔舟 冯 军 沈文庆 方德清 王建松 马余刚

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

诸永泰 李松林 苟全补 吴和宇 靳根明 詹文龙 郭忠言 肖国青

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 评述了现有的奇异核反应总截面测量方法,介绍了一套简单可行的测量中能区奇异核反应总截面的探测装置,并对实验的能量刻度、粒子鉴别以及实验结果进行了阐述和讨论.

关 键 词 放射性次级束 核反应总截面 探测系统

分 类 号 O571.1

1 引言

近年以来,大量高强度、高品质的放射性奇异核次级束流的获得,为核物理的研究提供了新的维度-同位旋,从而突破了传统核物理研究主要集中在 β 稳定线的限制,使之可以观测到远离稳定核区域的核所特有的奇异现象,并且能对现今通过稳定核研究而建立起来的模型理论进行检验.核反应总截面不但是表征核反应和原子核特征的一个基本量,而且也是现有奇异核束流条件下少数几个易于直接测量的物理量之一,因此,奇异核反应总截面的测量具有特殊的重要性.利用丰中子奇异核进行核反应总截面测量的一个重要成果是发现了 ^{11}Li 、 ^{11}Be 和 ^{14}Be 等是中子晕核^[1~4],打开了研究弱束缚系统的新领域.中子晕核的中子分布远超出了质子分布,由一个核芯和外面松弛相连的1~2个中子组成,核芯外中子同核芯的联系很弱,这可以从这些核的中子分离能的实测值得到证实.此外,用中能区核反应总截面实验数据还可探讨核物质的态方程对同位旋的依赖性 & 介质中的核子-核子碰撞截面^[5].

但是,在奇异核反应总截面的测量中,也存在着不少困难,不同能区、不同核的数

据还有空白,需要进行测量;现有的实验数据之间以及有的实验数据和理论计算之间还存在着较大差别.因此,发展具有高实验精度的新的测量方法,对解决这些困难十分重要.

2 现有奇异核反应总截面的测量方法

世界上不同的研究小组都进行了一些奇异核反应总截面的测量^[1,6~13].Tanihata小组^[1,6,7]在美国LBL的高能放射性束流线上,进行了790 MeV/u的He、Be、B和Li同位素系列束流分别轰击Be、C和Al靶的相互作用截面测量.实验采用透射法,靶前和靶后探测系统都由多丝正比探测器组和塑料闪烁探测器组构成,在靶前利用飞行时间、多丝正比探测器中的轨迹和塑料闪烁探测器中的能量损失三者结合来确定粒子的种类,实现靶前粒子的鉴别.束流和靶反应后,经磁分析系统偏转一定的角度,将主束同反应产物初步分开,再由靶后望远镜进行能量测量和粒子鉴别.测量出入射粒子数 N_0 和没有参加反应的出射粒子数 N_1 ,则 $N=N_0-N_1$ 即是参加反应的粒子个数,从中可以提取出反应总截面值.该实验的测量方法思路简单,将主束偏离可以降低靶后粒子鉴别的难度,

■ 收稿日期:1998-09-03.

* 国家杰出青年科学研究基金(项目号19625513)资助.

但是附加的磁偏转系统也使束流在靶后的飞行距离增加. 由于束流本身存在一定的发射角以及粒子在靶中的多重库仑散射和核弹性散射, 因此要求靶后的探测器面积足够大才能很好地降低漏计数的误差.

Warner 小组^[8~10]测量了 20~60 MeV/u 的奇异核 B、He、Li 和 Be 同位素轰击 Si 靶的反应总截面. 实验装置包括飞行时间探测器、两片平行板雪崩计数器和 5 组 Si 探测器, 前两部分用来选择准直的束流, 每组 Si 探测器由薄的(100 μm)和厚的(1 mm)各一片组成, 其中薄的 Si 探测器直接作为靶子使用, 通过测量在靶后探测器中的能量损失, 由能损和总能量的关联谱求出反应几率, 从而提取出反应总截面. 装置中每一组内薄的那片 Si 探测器均可直接作为靶子, 把前面的探测器当作降能片, 因此该实验能同时测量能量范围在 20~60 MeV/u 之间的反应总截面. 但是束流在靶后探测器内反应带来的误差十分复杂.

Blank 小组^[11,12]测量了 80 MeV/u 的一系列丰中子 Li 同位素轰击各种低 Z 和高 Z 靶的相互作用截面. 实验使用位置灵敏探测器优化束流在探测器阵列中的位置, 靶前放一片塑料闪烁器计量入射粒子的数目, 靶后有 5 片塑料闪烁器测能损和延迟 β 粒子发射. 由于束流同探测器的反应, 实际进入靶的粒子数要低于测量值, 导致测得的截面值偏低; 对于延迟 β 粒子衰变, β 粒子的能量约为十几个 MeV, 几乎都能被探测, 但电子散射的影响也使所测量值偏低. 实验中每一种束流同时用一片塑料闪烁器作为靶, 通过测量对上述影响作了一定的校正.

M G Saint-Laurent 等^[13]用 80 MeV/u 的各种丰中子核轰击不同靶, 利用 4π - γ 法测量伴随核反应产生的 γ 射线. 该方法对 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.

3 实验原理描述和数据处理

综合考虑以上各种实验方法的特点, 我们建立了一套简单测量中能区奇异核反应总截面的探测系统. 本实验在中科院近代物理研究所的兰州放射性离子束流线(RIBLL)上进行, 初级束为 60 MeV/u ^{18}O , 流强 30 nA, 产生靶为 2 mm 的 ^9Be 靶. 次级束经两次磁偏转后选择出需要的核, 束流能量约为 40 MeV/u. 利用产生的次级束 ^{17}N 和 ^{16}C 打 1 mm ^{12}C 靶测量了反应总截面, ^{17}N 和 ^{16}C 束流的纯度均达到 90% 以上. 在另一轮实验中, 放宽磁偏转的限制, 使各种同位素同时进入反应靶室, 通过离线数据处理分别提取了各种入射粒子的核反应总截面. 图 1 是束流能损和飞行时间的关联图, 可以看出能很好地分开各个粒子.

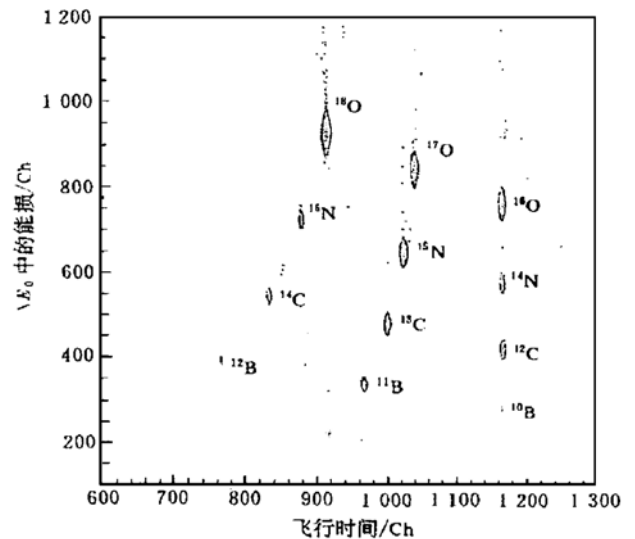


图 1 束流的能损和飞行时间关联图

实验采用透射法^[1,8], 探测器布局如图 2 所示, 靶前 $\Phi 12$ mm 的光阑用于限制次级束流斑点大小, 靶前放置由塑料闪烁探测器和加速器高频信号组成的飞行时间(TOF)探测器和 300 μm 的 Si 半导体探测器 ΔE_0 , 靶后望远镜由 3 个厚度分别为 300 μm 、580 μm 和 1 000 μm , 分辨好于 2% 的透射型半导体 Si 探测器(ΔE_1 、 ΔE_2 、 ΔE_3)和分辨为 0.5%~1% 的全阻止 CsI 探测器组成. 我们用粒子在两个 Si 探测器(如 ΔE_0 和 ΔE_1 、 ΔE_1 和

ΔE_2 、 ΔE_2 和 ΔE_3 探测器对)中的穿透点能量来刻度探测器. Si 探测器近似无窗, 可把两个 Si 探测器看作一层, 用能损程序 TRIM96 分别计算出当粒子正好完全阻止在该层硅中的能量 E 和第二个 Si 探测器中的能量损失 E_{n+1} ($n=0, 1, 2$), $E_n = E - E_{n+1}$ 就是粒子在 ΔE_n 中的能损. 从实验得到的 $\Delta E_n - \Delta E_{n+1}$ 散点图上可方便地读出穿透点能量 E_n 和 E_{n+1} 对应的道数 Ch_n 和 Ch_{n+1} , 对于多种粒子就能得到多对能量-道数对应点, 从而分别完成 ΔE_n 和 ΔE_{n+1} 的能量刻度. 其中对 ΔE_1 和 ΔE_2 的两次刻度可用来互相检验, 检验结果证明, 对于不同粒子, 两者的刻度系数能很好地统一. ΔE_0 探测器可在空靶的情况下实现刻度. 用 TRIM96 还能通过粒子在探测器 ΔE_0 里的能损再构出粒子的总能量, 进而得到精确的反应入射能.

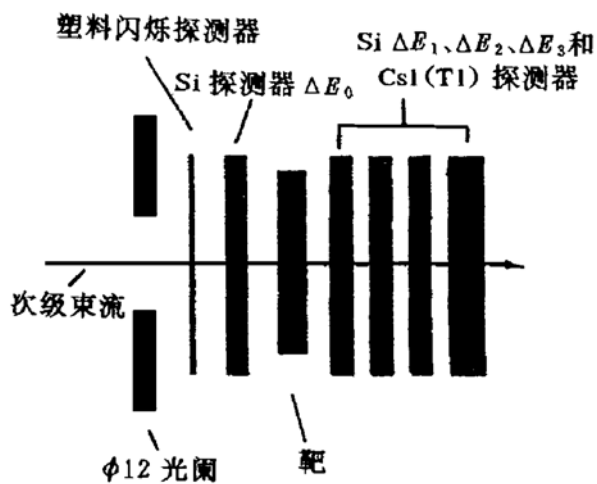


图 2 实验探测器布局

在得到真实可信的能量刻度后, 我们进行了靶前和靶后的粒子鉴别. 靶前由 TOF 和 ΔE_0 结合 RIBLL 上包含磁刚度 $B\rho$ 的磁分析器实现, 靶后采取 $\Delta E-E$ 望远镜法, 使用公式 $\Delta E \times E \propto A \times Z^2$ 进行粒子鉴别. 理论上在现有的探测器分辨率下可将 $Z < 30$ 的元素和 $A < 45$ 的同位素分开. 但考虑到不同的实验条件下各种误差因素所起作用的大小不同, 单个 $\Delta E-E$ 探测系统往往误差太大而不能达到目的, 所以我们的靶后望远镜是一套三重鉴别系统, 分别利用 1 个、2 个和 3 个 ΔE 作

为 $\Delta E-E$ 探测器, 得到 3 个独立的鉴别器运算. 当这些运算得出一致的结果时, 才作为一种粒子被鉴别, 从而保证精确地鉴别粒子.

通过粒子鉴别, 求出入射粒子数 N_{in} 与未反应的出射粒子数 N_{out} , 并通过以下公式计算反应总截面^[1]:

$$\sigma_t = \frac{A}{N_A t} \ln \left[\frac{\gamma_0}{\gamma} \right], \quad (1)$$

其中, A 为靶核数, N_A 是阿佛加德罗常数, t 是靶厚, 单位 g/cm^2 , γ 和 γ_0 分别是有靶和空靶情况下的 N_{out}/N_{in} . 在提取反应总截面时, 为了消除系统误差及入射粒子在探测器中引起反应带来的误差, 采用空靶和有靶测量交替进行, 利用空靶来对有靶的情况下粒子进行修正. 由于实验中没有使用降能片, 空靶和有靶的情况下粒子进入靶后探测器的能量不一致. 我们将靶后的第一块 Si 探测器作为反应靶, 通过理论计算得到粒子轰击探测器 Si 靶的反应总截面随能量变化的曲线, 从而对没有使用降能片的影响作了一定的校正.

4 中能和相对论能区反应截面的比较

在现有的奇异核反应总截面数据中, 中能和相对论能区的截面数据存在着较大的差别, 而且很难用同一种理论模型来很好地拟合. 对于有些核, 例如 8B , 中能实验^[8]测量到了核反应总截面的明显增加, 表明了质子晕的存在, 高能实验^[14]却没发现质子晕的存在, 这是值得重点探讨的. 如图 3 所示, A Ozawa 等^[15]用相对论能区的截面值再构出相互作用势垒的参数值, 然后使用 Glauber 模型计算出的中能区截面值普遍低于实验值, 对于有晕结构的核这种差别更加明显. 另外, 8He 、 ^{14}Be 、 9C 、 ^{10}C 、 ^{12}N 、 ^{13}N 、 ^{13}O 和 ^{14}O 等核在中能区的截面值还只有一个实验点, 需要一批更精确的中能数据, 这对实验测量提出了新的要求. 本实验利用一套简单的测量中

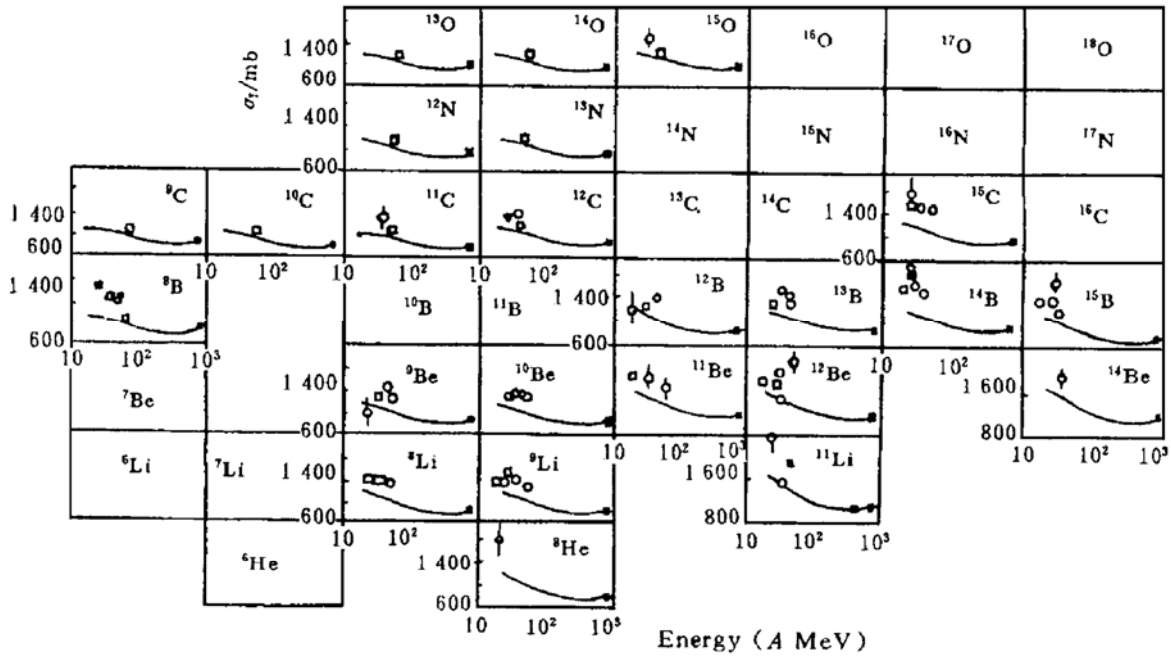


图 3 不同同位素系列弹核轰击 C 靶的 σ_1 的能量激发函数

能区奇异核反应总截面的实验方法，测量了从 Li 同位素到 F 同位素，包括丰中子到丰质子核，轰击 ^{12}C 靶的反应总截面。从实验数据中首先提取了 ^{12}C 轰击 ^{12}C 靶的反应总截面，如图 3 中实心正方形所示。可以看出，该结果同以前的实验结果能较好地符合。其余核的截面数据正在进一步的提取之中。这批中能数据能补充现有的奇异核反应总截面的空白，并可利用该数据来对现有的互相矛盾的数据进行检验。在中能区，核子-核子碰撞和核介质影响的增强导致核反应总截面对核物质分布的尾巴具有更大的敏感性。利用加入

分离能的 Glauber 模型^[16~18]，提取核半径和核内核子分布，能够对中子皮和中子晕现象进行研究；中能反应总截面对核子-核子碰撞截面(σ_{NN})比高能区更为敏感，结合考虑介质效应的 σ_{NN} ，公式^[19]对实验结果进行了理论分析。本次实验数据量大，覆盖的核比较全，因此从中可以选择不同的同位素系列、同量异位素以及相同中质比的核来研究总截面的变化情况，并利用 BUU 等核输运理论等^[5, 20~23]研究核物质态方程和介质中的核子-核子相互作用截面和同位旋的依赖关系，可以发现一些有趣的物理现象。

参 考 文 献

- 1 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O *et al.* Measurements of Interaction Cross Sections and Nuclear Radii on the Light p-shell Region. *Phys Rev Lett*, 1985, 55: 2 676~2 679
- 2 Fukuda M, Ichihara T, Inabe N *et al.* Neutron Halo in ^{11}Be Studied Via Reaction Cross Sections. *Phys Lett*, 1991, B268: 339~344
- 3 Kitagawa H, Tajima N, Sagawa H. Reaction Cross Sections and Radii of $A = 17$ and $A = 20$ Isobars. *Z Phys*, 1997, A358: 381~387
- 4 Bai X H, Hu J M. Neutron Halo in Light Nuclei. *Phys Lett*, 1997, B395: 151~156
- 5 Ma Y G, Shen W Q, Feng J *et al.* Study of the Total Reaction Cross Section Via Reaction Dynamical Model. *Phys Rev*, 1993, C48: 850~856
- 6 Tanihata I, Kobayashi T, Yamakawa O *et al.* Measurement of Interaction Cross Sections Using Isotope Beams of Be and B and Isospin Dependence of the Nuclear Radii. *Phys Lett*, 1988, B206: 592~596
- 7 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O *et al.* Measurements of Interaction Cross Sections and Radii of He Isotope. *Phys Lett*, 1985, B160: 380~384
- 8 Warner R E, Kelley J N, Zecher P *et al.* Evidence for a Proton Halo in ^8B : Enhanced Total Reaction Cross Sections at 20 to 60 MeV/nucleon. *Phys Rev*, 1995, C52: 1 166~1 170

- 9 Warner R E, Patty R A, Voyles P M *et al.* Total Reaction and 2n-removal Cross Section of 20~60 A MeV $^{4,6,8}\text{He}$, $^{6\sim 9,11}\text{Li}$, and ^{10}Be on Si. *Phys Rev*, 1996, C54: 1 700~1 709
- 10 Warner R E, Wilschut H W, Rulla W F *et al.* Average Reaction Cross Sections for 74 to 112 MeV α Particles on ^{127}I and ^{133}Cs . *Phys Rev*, 1991, C43: 1 313~1 317
- 11 Blank B, Gaimard J J, Geissel H *et al.* Total and 2n-removal Cross Sections of the Neutron-rich Isotopes $^{8,9,11}\text{Li}$. *Nucl Phys*, 1993, A555: 408~434
- 12 Blank B, Gaimard J J, Geissel H *et al.* Reaction Cross Section Measurements of the Neutron-rich Isotope $^{8,9,11}\text{Li}$ at 80 MeV/nucleon. *Z Phys*, 1991, A340: 41~50
- 13 Saint-Laurent M G, Anne R, Bazin D *et al.* Total Cross Sections of Reactions Induced by Neutron-rich Light Nuclei. *Z Phys*, 1989, A332: 457~465
- 14 Obuti M M, Kobayashi T, Hirata D *et al.* Interaction Cross Section and Interaction Radius of the ^8B Nucleus. *Nucl Phys*, 1996, A609: 74~90
- 15 Ozawa A, Tanihata I, Kobayashi T *et al.* Interaction Cross-sections and Radii of Light Nuclei. *Nucl Phys*, 1996, A608: 63~76
- 16 Feng J, Shen W Q, Ma Y G *et al.* The Separation Energy Dependence of the Nuclear Reaction Cross Section. *Phys Lett*, 1993, B305: 9~12
- 17 Shen W Q, Wang B, Feng J *et al.* Total Reaction Cross Section for Heavy-ion Collisions and Its Relation to the Neutron Excess Degree of Freedom. *Nucl Phys*, 1989, A491: 130~146
- 18 Feng J, Shen W Q, Ma Y G. 中子分布弥散度对反应总截面的影响. *高能物理与核物理*, 1994, 18(2): 97~101
- 19 Cai X Z, Feng J, Shen W Q *et al.* In-medium Nucleon-nucleon Cross Section and Its Effect on Total Nuclear Reaction Cross Section. *Phys Rev*, 1998, C58: 572~575
- 20 Bertsch G, Brown G E, Koch V *et al.* Pion Collectivity in Relativistic Heavy-ion Collisions. *Nucl Phys*, 1988, A490: 745~755
- 21 Li Baoan. In-medium Cross Section and Disappearance of Flow. *Phys Rev*, 1993, C48: 2 415~2 418
- 22 Aichelin J. "Quantum Molecular Dynamics" a Dynamical Microscopic n-Body Approach to Investigate Fragment Formation and the Nuclear Equation of State in Heavy-ion Collisions. *Phys Rep*, 1991, 202: 233~360
- 23 Ma Y G, Shen W Q, Feng J *et al.* A Novel Path to Study the Total Reaction Cross Sections. *Phys Lett*, 1993, B302: 386~389

A Detector System Used for the Measurement of Total Reaction Cross Section and Its Application to Study on Nuclear Structure of Exotic Nuclei

Cai Xiangzhou Feng Jun Shen Wenqing Fang Deqing Wang Jiansong Ma Yugang
(*Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

Zhu Yongtai Li Songlin Gou Quanbu Wu Heyu Jin Genming
Zhan Wenlong Guo Zhongyan Xiao Guoqing

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

Abstract The present status of experimental studies of the total reaction cross sections of exotic nuclei are reviewed. A detector system used for measuring the total reaction cross section of radioactive ions is described. The energy calibration of detectors, particle identification and possible experimental results are discussed.

Key words radioactive secondary beams total nuclear reaction cross section detector system

Classifying number O571.1