

放射性核束引起反应中轻带电粒子 发射的同位旋效应*

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

摘要 研究了 69MeV/u ^{36}Ar 轰击 Be 靶的碎裂产物与 Si 靶反应引起的前角区轻带电粒子的发射产额与原子核同位旋、原子核序数的关系。发现前角区轻带电粒子发射产额对于丰质子核的结构非常敏感,与同位旋存在一种指数关系。因此可以把前角区轻带电粒子发射产额作为探测丰质子核结构的一种手段,也是一种新的验证一个核是否具有质子晕结构的实验证据。

关键词 放射性核束 轻带电粒子 同位旋 质子晕

1 引言

原子核的同位旋效应对原子核结构及核反应机制研究有着非常重要的意义,比如用 Vlasov 理论研究表明,同位旋效应使原子核的巨共振强度分布的峰位能量有微小的位移,其大小随同位旋 $I = (N - Z)/A$ 的增大而增大^[1]。核态方程中的同位旋相关部分对研究中子星的形成与演化有着重要的意义,因此李保安、张丰收、陈列文等人发展了同位旋相关的核反应输运理论,通过研究中能重离子核反应中各种集体流的同位旋效应来探索介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面及与同位旋相关的新的反应机制等^[2,3]。马余刚等人研究了同位旋效应对轻带电粒子产额比的影响,发现轻带电粒子产额比是同位旋的敏感观测量,认为有可能从轻粒子的产额比中提取同位旋相关的核态方程^[4]。

因此原子核的同位旋效应研究成了目前核物理、放射性束物理研究领域中的一个热门课题。在实验研究方面,用稳定核作炮弹的中能重离子碰撞反应,通过不同的弹靶组合形成系统的同位旋差别是很有限的。放射性束物理和放射性束流装置为核物理实验研究扩展了广阔的同位旋空间,用放射性核束可以得到较大的同位旋自由度。但是由于技术的原因,现有的放射性束流装置还不足以进行同位旋效应对核反应中的集体流的影响这样复杂实验的研究。

2001-08-09 收稿

* 国家杰出青年基金(19825115),中国科学院九五重大基金,国家重点基础研究发展规划(G2000077401, G2000077404),国家自然科学基金(10105011, 19735010)资助

本文主要在实验方面对中能放射性核束引起的核反应中轻带电粒子发射的同位旋效应进行了研究. 这是一个目前比较容易做到却又具有一定科学意义的研究内容.

2 实验装置和程序

实验是在兰州重离子加速器国家实验室 (HIRFL) 的放射性次级束流线 (RIBLL⁵¹) 终端完成的. 从 HIRFL K540 回旋加速器中引出能量 69MeV/u、强度约 50enA 的初级束流³⁶Ar, 轰击 1mm 厚初级 Be 靶, 其弹核碎裂产物被 RIBLL 按磁刚度和能量损失分离选择⁶, 得到 $Z \leq 18$ 的多种放射性核束. 一个由 4 片 Si 和闪烁探测器构成的粒子鉴别探测望远镜系统, Tel1—Tel4 分别为厚度 150, 150, 700 和 2000 μm ORTEC 灵敏面积为 $\phi 15$ 的金硅面垒探测器, 总厚度为 3mm, 置于 $\phi 8$ 的光阑后. 62cm 后是一个厚度 10mm, 面积为 70mm \times 70mm 的 CsI 晶体, 由光敏面积为 60mm \times 55mm 的位置灵敏光电倍增管读出. 该望远镜位于 RIBLL 的最后焦点 T_2 . 在 Tel1 的前面放有一个时间拾取探测器 t_2 ¹⁷, 在 RIBLL 中间焦点 T_1 放着一个同样时间拾取探测器 t_1 , 它们构成飞行时间望远镜, 测量次级束流粒子飞行时间 (TOF). 通过 TOF 与望远镜中第一块金硅面垒探测器 Tel1 测到的 ΔE , 我们可以鉴别不同的放射性核束. 放射性束流经过该组探测系统时, 它们本身及其在硅探测器中反应产生的重产物都被 3mm 的硅探测器所阻止, 最后到达 CsI(Tl) 探测器并被探测到的只有高能轻带电粒子, 从而各种高能轻带电粒子被实验记录.

3 数据处理

从飞行时间望远镜测量的 TOF 和粒子鉴别望远镜中 Tel1 测量的能量损失的二维图上, 可以很好地鉴别各种次级入射粒子, 望远镜中的后续 Si 探测器 Tel2, Tel3, Tel4 当作靶, 它们也同时鉴别出粒子经过 Tel2, Tel3 和 Tel4 3 块硅探测器时与其发生反应产生的各种反应产物. 它们之中只有能量较高的轻带电粒子, 才能穿透所有 Si 探测器, 并将能量沉

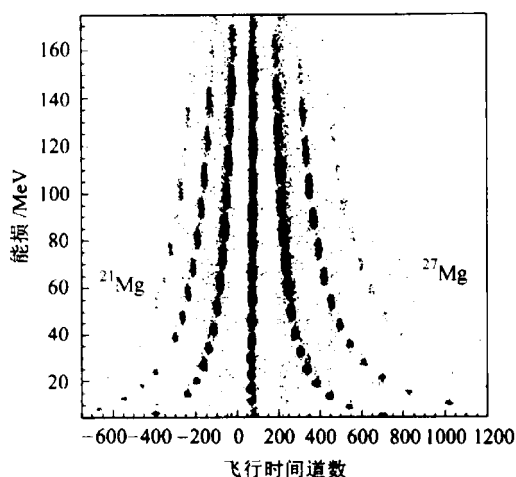


图 1 实验中 T_2 探测器布局示意图

积到碘化铯探测器中. 所有的探测器都放在束流中心线上, 因此所探测到的轻带电粒子是在比较小的前角范围内, 这些产物大多是从类弹碎片中发射出来的, 包括直接碎裂产物.

图 1 是 69MeV/u³⁶Ar 在 1mm Be 靶上碎裂, 经 RIBLL 磁刚度选择后在 T_2 得到的各种放射性束飞行时间和 Tel1 上能损的二维图. 图中标出了 Mg 同位素系列各个核的选择示意图. 我们分别在对应核素上开窗, 然后再对飞行时间和 Tel1 投影, 高斯拟合后得到半高全宽作为椭圆的两个轴. 由该开窗选择次级束流粒子与

CsI(Tl)探测到的粒子符合,得到该束流与 Si 靶反应产生的轻粒子.

对于选定的核,我们观察它在 CsI(Tl)探测器中的能谱.对零点道上的峰进行高斯拟合,得到背景噪声的位置,当信号落在背景噪声范围之外,则认为这是一个轻带电粒子的信号.如图 2, ^{24}Mg 的一维能谱上,我们看到箭头所指的位置即是区分信号与噪声的临界位置.我们知道除了带电粒子之外,中子和 γ 射线也会激活 CsI(Tl)探测器,但是因为我们的 CsI(Tl)晶体只有 10mm 厚,因此被中子激活的效率较低.对于 γ 射线,我们通过前面几个探测器的符合,可以排除对 γ 射线的误判.因此将中子和 γ 射线误判为带电粒子的几率是很小的,而质量较大的重碎片和次级粒子本身都被阻止在第四块硅探测器里面了,这表明我们对轻带电粒子的鉴别是正确的.

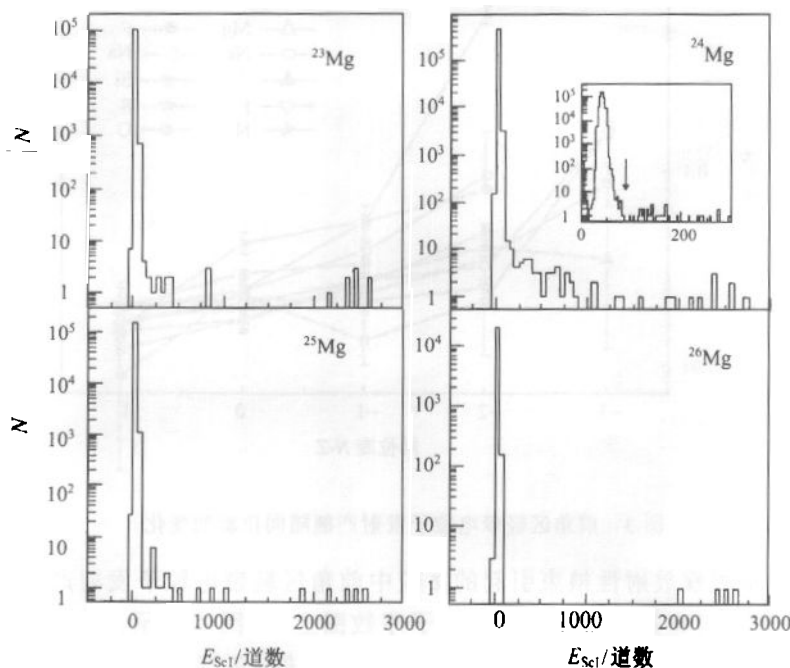


图 2 $^{23-26}\text{Mg}$ 沉积在碘化铯中的能量一维谱

在 ^{24}Mg 的图中有一幅小图显示如何区分轻带电粒子信号.

4 结果与讨论

按照上述方法分析试验数据,我们得到了 N, O, F, Ne, Na, Mg, Al, Si, P 和 S 等元素的同位素链与 Si 靶反应产生的轻带电粒子的产额,由此研究了不同同位旋、不同的原子序数对轻带电粒子发射产额的影响.

图 3 给出了不同的炮弹轰击硅靶后在前角度发射轻带电粒子的产额随同位旋的变化关系.图中用实线相连的不同符号分别代表不同的同位素链.从图中可以看出总的趋势是,对于每一同位素链,前角区发射轻带电粒子的产额随着同位旋的增大而减少,并且其变化趋势与 Z 有关, Z 越小变化幅度越大.这说明核的原子序数越小,其丰质子核的外

层质子越容易被剥掉,即发生直接碎裂反应的几率就比较大,这与原子核的一般理论完全相符.同时也看出,对于质子滴线核 ^{12}N ,轻带电粒子产额突然明显增加,这可能表明它有奇异晕结构,使得反应截面明显增大.这一结果与我们通过 ^{12}N 在Si上引起反应截面实验数据一致,即 ^{12}N 的反应截面和密度分布半径要比相邻核明显的大⁸.对于质子滴线核 ^{17}F 的轻粒子产额没有观察到异常变化.这个结果与我们得到的它引起反应截面的实验结果也一致.对于 ^{17}F ,我们观测到反应截面有些增大,但提取的密度分布半径没有增大,没有观测到晕结构特征.因此,前角区轻带电粒子产额是否突然增大也许是判断该核是否具有奇异晕结构的一种方法.

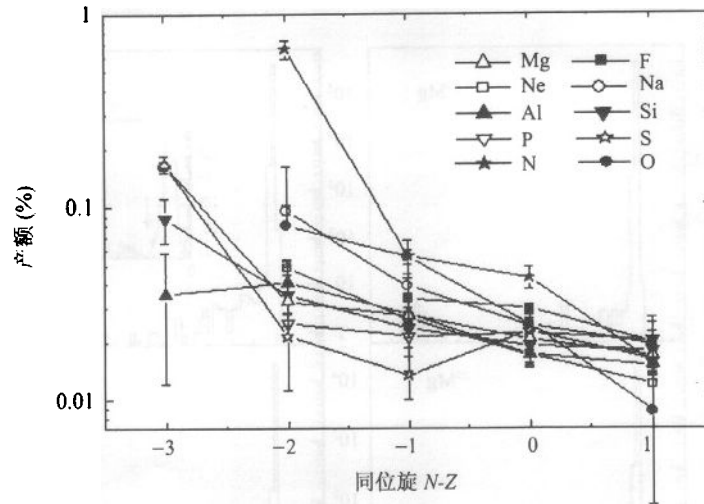


图3 前角区轻带电粒子发射产额随同位旋的变化

为了进一步观察放射性核束引起的反应中前角区轻带电粒子发射产额随原子核序数的变化,我们将实验数据绘在产额-原子序数图上,如图4所示.并将相同同位旋数据用相同符号表示,并用实线连接.纵观这些实验数据,它们基本分布在相对产额0.01%—0.1%区域,只有 ^{12}N 明显高出,达到0.5%以上.对于 ^{12}N ,得到的反应截面实验数据表明是质子晕核.从图4上也可以看出,质子晕核引起反应前角度轻粒子产额有明显增大.

从图4我们还看到,随着原子序数的增大,轻粒子产额减小.而且同位旋的值越小,其变化越大.同时还可以在 $Z=8-14$ 范围内看到比较明显的奇偶效应,在这范围之外不明显可能是因为实验数据比较少,误差比较大造成.

我们进一步考察同位旋相关量 $I=(N-Z)/A$ 与放射性核束引起反应的前角区轻带电粒子发射产额的定量关系,如图5所示.我们发现,用二次指数衰减函数可以大致拟合实验数据,得到拟合关系如下:

$$Y = 1.28 \times 10^{-5} \exp(-x/0.032) + 1.89 \times 10^{-4} \exp(-x/3.95). \quad (1)$$

这说明放射性核束反应引起的前角区轻带电粒子发射产额与同位旋有着某种定量关系.但其中所代表的物理意义还有待进一步深入地研究.

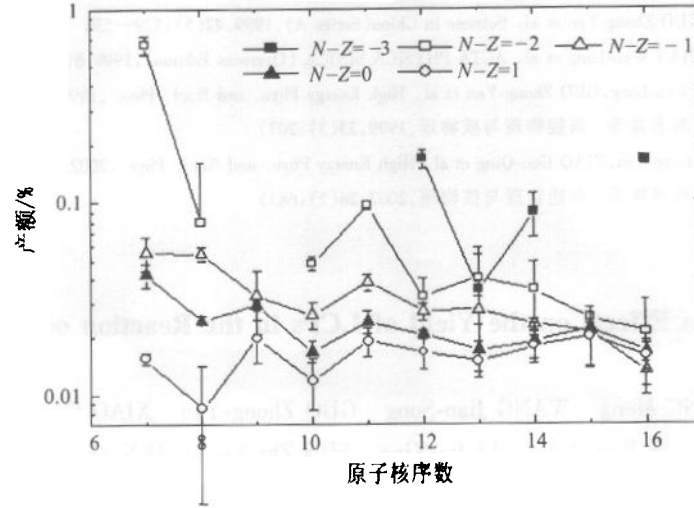


图 4 前角区轻带电粒子发射产额随原子核序数的变化

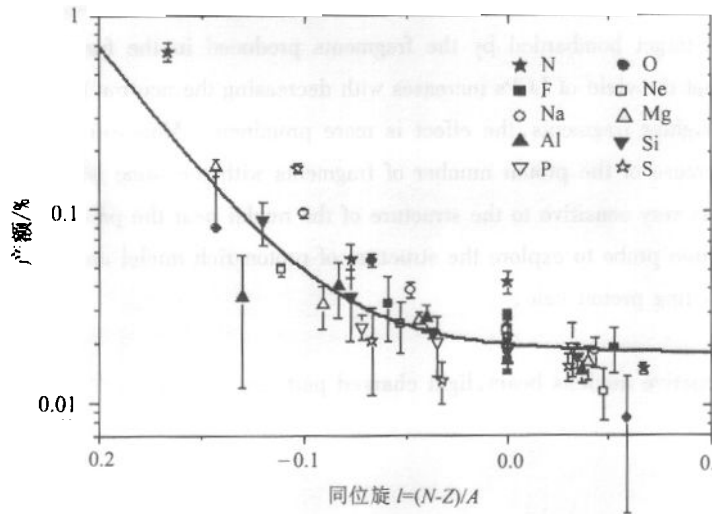


图 5 前角区轻带电粒子发射产额随同位旋相关量 $I=(N-Z)/A$ 的变化

我们的实验研究表明,从放射性次级束引起反应前角度发射轻带电粒子产额测量结果分析,质子滴线核 ^{12}N 的轻粒子产额异常增大, ^{17}F 没有增大,这与我们的反应截面实验结果一致.因此,我们认为,测量奇异核引起反应前角度发射轻粒子产额可能是验证质子晕核的一种较灵敏的方法.

参考文献 (References)

- 1 WANG J S, SHEN W Q, CAI Y H et al. *European Physical Journal*, 2000, **A7**:355
- 2 LI B A, KO C M. *Phys. Rev.*, 1998, **C57**:2065
- 3 CHEN L W et al. *Phys. Lett.*, 1999, **459B**:21

- 4 MA Y G, SU Q M, SHEN W Q et al. *Phys. Rev.*, 1999, **C60**:24607
- 5 ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan et al. *Science in China(Series A)*, 1999, **42**(5):529—536
- 6 GUO Zhong-Yan, ZHAN Wen-Long et al. *ACTA PHYSICA SINICA (Overseas Edition)*, 1999, **8**(1):21—26
- 7 LI Jia-Xing, ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 1999, **23**(3):207(in Chinese)
(李加兴, 詹文龙, 郭忠言等. 高能物理与核物理, 1999, **23**(3):207)
- 8 LI Jia-Xing, GUO Zhong-Yan, XIAO Guo-Qing et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2002, **26**(7):683(in Chinese)
(李加兴, 郭忠言, 肖国青等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(7):683)

Isospin Effects on the Yield of LCPs in the Reaction of RNB^{*}

WANG Meng WANG Jian-Song GUO Zhong-Yan XIAO Guo-Qing
ZHAN Wen-Long LI Jia-Xing SUN Zhi-Yu CHEN Zhi-Qiang
WANG Wu-Sheng TIAN Wen-Dong MAO Rui-Shi

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

Abstract The yield of light charged particles (LCPs) emitted at forward angles is investigated in the reactions of Si target bombarded by the fragments produced in the fragmentation of 69 AMeV ³⁶Ar. It is found that the yield of LCPs increases with decreasing the neutron number of fragment isotopes, and for the lighter fragments, the effect is more prominent. Moreover the yield of LCPs decrease with the increase of the proton number of fragments with the same isospin. It indicates that the yield of LCPs is very sensitive to the structure of the nuclei near the proton drip-line. It can be regarded as a possible probe to explore the structure of proton-rich nuclei and a new way to provide an evidence for existing proton halo.

Key words radioactive nucleus beam, light charged particles, isospin, proton halo

Received 9 August 2001

* Supported by National Natural Science Fund for Distinguished Young Scholar(19825115), Major State Fund of Chinese Academy of Science, Major State Basic Research Development program(G2000077401, G2000077404), National Natural Science Foundation of China(10105011, 19735010)