

ΔE -E 望远镜在 ${}^9\text{C}$ 碎裂反应上的应用

金仕伦^{1,2}, 王建松¹, 王 猛¹, 胡正国¹, 张雪荧¹, 陈若富¹, 王 琦¹, 陈志强¹, 黄美容^{1,2},
郑 川¹, 杨彦云¹, 严鑫帅¹, 袁小华¹, 韩建龙¹, 马 朋¹, 付 芬¹, 胡 强¹

(1. 中国科学院 近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:为研究 ${}^9\text{C}$ 的晕核结构,一套 ΔE -E望远镜探测器应用在兰州放射性次级束流线(RIBLL)上进行的 ${}^9\text{C}$ 碎裂反应实验中,用来测量反应中产生的碎片。为解决 ΔE -E望远镜中硅条的干扰问题及硅条和CsI的能量刻度,利用硅条的感应信号对重离子在硅条上产生的饱和信号进行能量刻度,并通过模拟程序与事例得到的刻度点对CsI(Tl)晶体进行能量刻度。同时使用在硅条和CsI(Tl)晶体上的位置信息对反应物径迹进行重建,从而得到同一离子在硅条与CsI(Tl)晶体上信号的符合,并得到了最终的有效物理事件。

关键词: ΔE -E望远镜;硅条饱和信号;CsI(Tl)晶体刻度;径迹拟合

中图分类号:TL816.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2012)04-0385-05

Application of ΔE -E Telescope in ${}^9\text{C}$ Fragmentation Reaction

JIN Shi-lun^{1,2}, WANG Jian-song¹, WANG Meng¹, HU Zheng-guo¹, ZHANG Xue-ying¹,
CHEN Ruo-fu¹, WANG Qi¹, CHEN Zhi-qiang¹, HUANG Mei-rong^{1,2},
ZHENG Chuan¹, YANG Yan-yun¹, YAN Xin-shuai¹, YUAN Xiao-hua¹,
HAN Jian-long¹, MA Peng¹, FU Fen¹, HU Qiang¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For studying the halo structure of ${}^9\text{C}$, a set of ΔE -E telescope detector was applied in the experiment of ${}^9\text{C}$ fragmentation reaction carried out at the facility of Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou (RIBLL). The detector was used to measure the fragments produced in the reaction. The principal aim is to solve the crosstalk between silicon strips and the energy calibration of silicon strip and CsI(Tl) crystal. Using the induced signal of the saturated signal produced by heavy ion punching through the silicon strip, the deposited energy was calibrated. Combining the simulated result and experimental data, a series of energy points were obtained to calibrate the CsI(Tl) crys-

收稿日期:2010-12-09;修回日期:2011-02-25

基金项目:973 计划资助项目(2007CB815001);中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KJ9X2-YW-N44);中国科学院百人计划资助项目(0910020BR0, Y010110BR0);国家自然科学基金资助项目(10605033, 10705036, 10925526, 11075190, 11005127, 11075189)

作者简介:金仕伦(1984—),男,甘肃兰州人,硕士研究生,粒子物理与原子核物理专业

tal. The ion track was reconstructed by position information both in silicon strip and in CsI(Tl) crystal which were coincident with each other for one ion. Finally, the real physics event was obtained.

Key words: ΔE -E telescope detector; saturated signal of Si strip; CsI(Tl) crystal calibration; track reconstruction

^9C 是目前唯一确定的由单质子晕核 ^8B 加1个质子组成的质子滴线核,也是研究天体物理关键过程和生物效应感兴趣的核素。本文拟通过对 ^9C 碎裂产物进行完全运动学测量,得到反应截面、碎片的动量分布及 γ 关联的碎片动量分布,验证 ^9C 是否为晕核,确定是单质子晕还是双质子晕,得到 ^9C 低位态的一些结构信息,以为天体物理和生物学上的应用提供有用的数据。

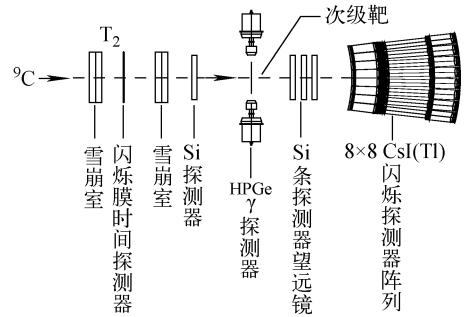


图1 T_2 靶室内探测器结构

Fig. 1 Detector structure in T_2 target chamber

1 实验

实验在兰州重离子加速器国家实验室(HIRFL)的放射性束流线(RIBLL)I终端上进行^[1]。利用HIRFL提供的能量为80.115 MeV/u的 ^{12}C 作为初级束,轰击4 171 μm 厚初级 ^9Be 靶,其弹核碎裂反应产物在RIBLL I上进行分离和鉴别。对次级产物的分离是通过二极磁铁的设置及 C_1 处一厚1 112 μm 的Al降能器实现的,对次级产物的鉴别采用 $B\rho+(\text{TOF}-\Delta E)$ 与 $B\rho+(\Delta E-E)$ 联合鉴别方法,该方法利用4个 57° 的二极磁铁、17 m长的飞行距离和 0° 角多重望远镜探测器系统,TOF是由两个相距17 m、直径45 mm、厚度50 μm 的塑料闪烁薄膜BC-400闪烁薄膜组成,两个TOF闪烁膜分别放置于RIBLL I的 T_1 和 T_2 处,在 T_2 处安放2个相隔48.6 cm的位置灵敏平行板雪崩探测器(PPAC),后面安放一厚325 mm的方硅。方硅后的次级靶为厚43 mg/cm^3 的C靶,在次级靶后为 ΔE -E望远镜,具体布局示于图1。

2 探测器结构

ΔE -E望远镜是在核物理实验中测量带电粒子的常用探测器。以前使用的望远镜主要是单个的,随实验要求的提高,实验需得到更精确信息,需进行多重关联测量,因此,发展多单元望远镜系统成为核物理探测器发展的新趋势,国外有MUST2^[2]、HiRA^[3]等。本文的 ΔE -E望远镜由1块 40×40 的硅条探测器和 8×8 的

CsI(Tl)阵列探测器组成。硅条探测器由正反各40条宽为1 mm、厚度为1 000 μm 的硅条组成。带电粒子穿过硅条耗尽层形成电子空穴对,在外加电场作用下,电子空穴向两极漂移,输出信号,通过前置放大器和主放得到与能损 ΔE 对应的电信号。E探测器由 8×8 单元块的CsI(Tl)晶体组成^[4]。每个晶体使用光电倍增管单独读出,晶体由中国科学院近代物理研究所生产,前表面为21 mm \times 21 mm,后表面为23.1 mm \times 23.1 mm,光电倍增管为R1213型,由Hamamatsu公司生产,其光响应波长为300~650 nm、敏感波长峰值为420 nm、上升时间为1.9 ns、渡越时间为21 ns、打拿极数为10、增益为 6.7×10^5 、光阴极灵敏度为105 mA/lm、阳极灵敏度为60 mA/lm。由于光电倍增管的光阴极表面是 $\phi 19$ mm的圆面,与晶体表面不匹配。用航空有机玻璃制作光导,光导的侧面用Teflon进行包裹,通过测试发现,在增加光导后,闪烁体的分辨率没有明显变差。实验中,将硅条摆放在距靶65 mm处,CsI(Tl)晶体摆放在距靶388 mm处,覆盖的 θ 为 $-13^\circ\sim 13^\circ$, φ 为 $0^\circ\sim 360^\circ$,覆盖的立体角为244 msr。

3 实验数据分析

本实验研究 ^9C 碎裂反应,由于入射离子

除 ^{12}C 外, 还有 ^8B 、 ^7Be 、 ^6Li , 这些离子与反应产生的碎片均会进入 ΔE -E 望远镜, 所以, 在 ΔE -E 谱上有多种类型的离子, 本文主要目的是鉴别这些离子。实验数据在 ROOT 框架进行分析, 将原始实验数据转化成 tree 格式的数据。每个 Branch 对应 1 个探测器获取的数据, 通过对硅条探测器数据和 CsI(Tl) 晶体分别处理, 最后得到二维 ΔE -E 谱。

3.1 硅条信号的处理

硅条上信号面临两个主要问题, 分别为信号饱和和与相邻硅条间信号的感应。产生饱和的原因是硅条获取的信号太大, 超过了电子学输出范围, 从而输出某个不反映信号大小的确定数字。实验中, 正面硅条的超界道数为 2 400 左右, 背面硅条的超界道数为 3 700 左右(图 2)。硅条上产生感应的原因为每根硅条表面都与相邻的硅条表面构成电容, 当离子打在某条硅上时, 附近的硅条会感生信号^[5], 集成前置电荷灵敏放大器同时也会产生感应信号。图 3 所示为 1 个离子打在硅条上, 附近硅条产生的感应。饱和问题通过用饱和硅条在邻近条上产生的感应信号来处理, 因饱和信号在邻近硅条产生的感应信号与原信号成比例, 且在电子学输出范围内, 故可很好地用来表征原信号。图 4 为处理后的正面和背面硅条的 ΔE -CH 谱。需注意, 对于背面硅条, 在产生信号硅条的紧邻硅条的感应信号也发生了饱和, 所以, 要用相隔两条的硅条信号来处理, 因此, 只使用背面硅条的位置信息, 而不用来刻度能量(图 4b)。对于正面硅条, 其信号饱和的硅条紧邻的硅条感应信号可很好地进行能量刻度(图 4a)。在反应中产生的如 p、 α 等能量较低的离子, 在硅条上产生的信号均不会饱和, 可直接用该硅条自身的信号计算能量。在实验结束后用不同能量的质子

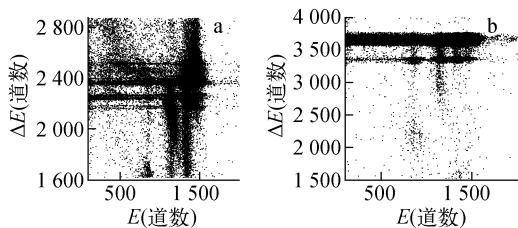


图 2 正面(a)与背面(b)硅条饱和的信号

Fig. 2 Saturated signals of front (a) and back (b) Si strip

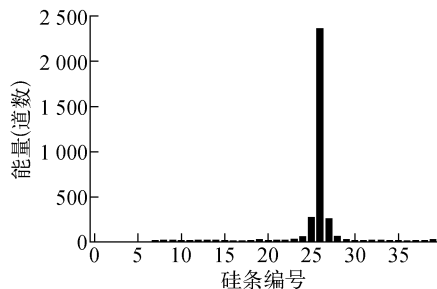


图 3 硅条上产生的 1 个信号及其感应信号

Fig. 3 One signal and its induced signals in Si strip

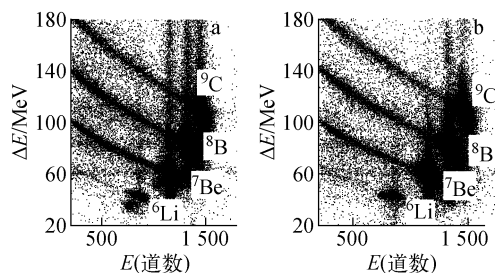


图 4 经过刻度的正面(a)和背面(b)硅条信号

Fig. 4 Front (a) and back (b) Si strip signals after calibration

束作刻度点, 质子束的沉积能量信号并未饱和, 所以, 可得到通过硅条本身信号刻度的系数。对于这两种处理方法得到的信号是否一致, 需选择 1 800~2 000 道的信号进行检验, 这个区间信号本身未饱和, 又有较明显的感应信号, 适宜用来检验, 图 5 为两种方法得到的信号差值的分布, 通过高斯拟合可看出差异可接受。需指出, 有些离子打在两硅条之间, 两硅条均会产生信号, 若把小信号当作大信号的感应信号, 则将发生较大偏差, 这样的事例均被剔除。

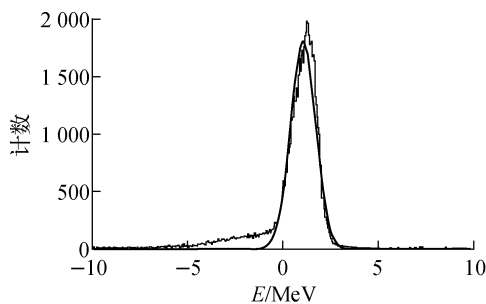


图 5 用两种不同方法刻度硅条信号值的差的高斯拟合

Fig. 5 Gaussian fitting of Si signal value difference in two different methods

3.2 CsI(Tl)晶体的信号处理

CsI(Tl)的信号与能量的关系是非线性的,且同时与原子核的质量数 A 和电荷数 Z 相关。在中能区,重离子在 CsI(Tl)中光输出 L 与能量 E 之间的关系近似满足经验公式^[6]:

$$L(E, A, Z) = a_0 + a_1 \left(E - a_2 AZ^2 \ln \frac{E + a_2 AZ^2}{a_2 AZ^2} \right) \quad (1)$$

该公式满足条件为 $Z < 18$ 且能量在 $2 \sim 77$ MeV/u内。要得到公式中的 a_0, a_1, a_2 3个系数,须先通过对已知点进行拟合。在实验结束后,使用⁹C、⁸B、⁷Be、⁶Li、³He、⁴He在不同能量下进行刻度,发现对大部分晶体取得了很好的拟合效果并得到了相应的拟合系数(图6)。对放置在边角的晶体,因束斑较集中,故无刻度点打在上面,导致无法刻度,然而,在实验中又存在反应产生碎片打在这些晶体上,故需对该晶体进行刻度。对此,先使用SRIM模拟程序得到不同离子的 $\Delta E-E$ 谱,然后与该晶体上反应碎片的 $\Delta E-CH$ 谱进行比对,判定反应碎片的种类后确定某一 ΔE 值,则分别得到相应 E 值和 CH 值,从而相当于得到了1个刻度点,图7示出 $\Delta E-E$ 谱与实际的 $\Delta E-CH$ 谱。这种方法只能在有限的能量范围、固定离子种类中使用,所得出的拟合系数在拟合其他离子时效果并不好,但由于这些晶体上只有这类离子,所以该方法可适用。

4 离子的径迹重建与鉴别

4.1 径迹的重建

实验中PPAC(位置灵敏平行板雪崩探测器)的作用是用来确定靶点,通过靶点与硅条上

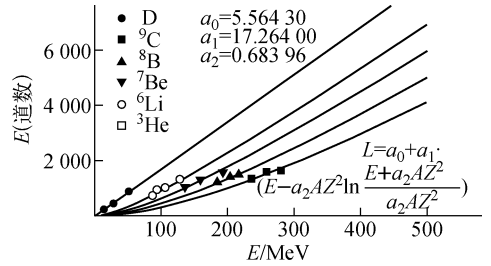
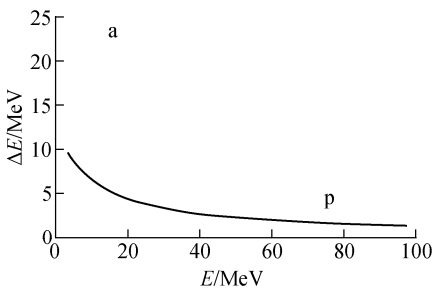


图6 CsI晶体的拟合系数

Fig. 6 Fitting parameters of CsI crystal

的信号拟合出径迹,从而判定CsI(Tl)晶体中与硅条上相对应的点,确定不同的碎片(图8)。本实验中所使用的PPAC在实验过程发生了问题,不能提供信号。所以,无法得到反应的靶点,故提出仅通过硅条信号和CsI(Tl)晶体信号来判定离子径迹以及确定2个探测器上互相对应的信号,从而确定某一碎片的 $\Delta E-E$ 。方法如下:对打出了2个碎片的反应在硅条上会获得2个信号,在CsI(Tl)晶体上也会获得2个信号,将这2对信号可能产生的两种径迹回归到靶面,理想状态下,真事例的2个离子的径迹最后应回归到靶上的某点,但由于探测器的位置分辨原因,通常2条径迹不能回归到1点,但明显小于错误的径迹拟合,图9示出当有2个碎片产生时正确径迹与错误径迹回归到靶点的差异。对于打出3或4个碎片的反应,可能的径迹组合分别为6和24种,找出其中回归到靶点面积最小的组合,认为其是正确的径迹,从而得到各种碎片的位置及 $\Delta E-E$ 。

4.2 离子鉴别

通过SRIM模拟程序计算出了反应所需的p、D、T、³He、⁴He、⁶He、⁸He、⁶Li、⁷Li、⁷Be、⁸B、⁹C

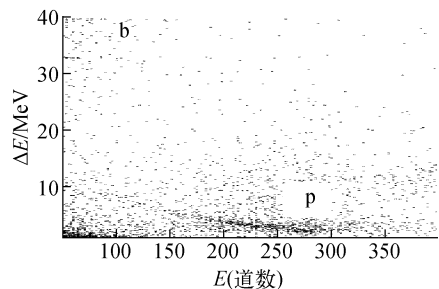


图7 质子的 $\Delta E-E$ 谱与 $\Delta E-CH$ 谱

Fig. 7 $\Delta E-E$ spectrum and $\Delta E-CH$ spectrum of proton

a—SRIM程序模拟质子 $\Delta E-E$ 谱; b—晶体中质子 $\Delta E-CH$ 谱

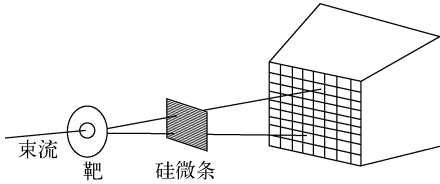


图 8 反应产物的径迹

Fig. 8 Track of fragment

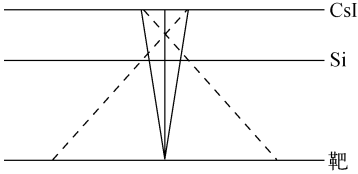


图 9 回归到靶点的正确与错误径迹差异

Fig. 9 Correct and wrong tracks to regress target

实线为回归到靶面的正确的径迹;
虚线为回归到靶面的错误的径迹

的 ΔE -E 谱(图 10)。然后通过式(1)计算得到每块晶体对应的 ΔE -CH 谱。在数据处理过程中,计算每个离子在 ΔE -CH 上到每条线的距离,距离最短的线即被视为该离子的种类。

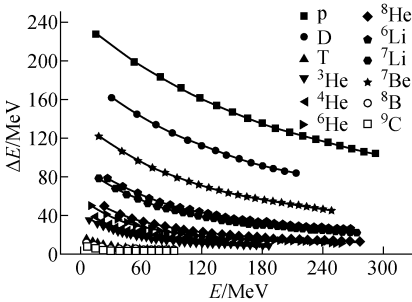


图 10 模拟各种离子的 ΔE -E 谱

Fig. 10 Simulated ΔE -E spectra of different ions

至此,已可得到每个事例产生的碎片、每个碎片在硅条和 CsI(Tl) 晶体上位置、 ΔE 值与 E 值(图 11)、离子的种类。这些信息构成了 1 个物理事件。设计了 1 个 tree 结构,将上述物理量填进去,未来可用新的 tree 进行物理分析。

5 结论

通过在实验中的应用, ΔE -E 望远镜表现出具有良好的覆盖范围与位置分辨。在面对硅条信号超界与部分 CsI(Tl) 晶体无刻度点的问

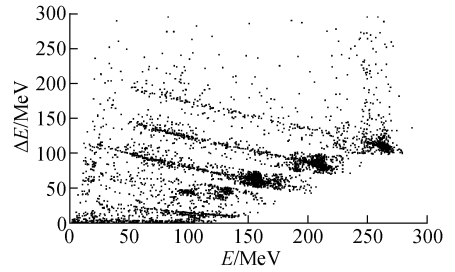


图 11 反应产物的 ΔE -E 谱

Fig. 11 ΔE -E spectrum of fragment

题时,通过处理得到了较好的能量值。在用于定位反应靶点的 PPAC 不能工作时,仅通过对 ΔE -E 望远镜上信号的位置进行径迹重建即得到了匹配的 ΔE -E 信号,最终得到有效物理事件,用于进行下一步的物理分析。

参考文献:

- [1] 詹文龙,郭忠言,刘冠华,等. 兰州重离子放射性束线[J]. 中国科学 A,1999,4(5):529-536.
ZHAN Wenlong, GUO Zhongyan, LIU Guanhua, et al. Radiocative ion beam line in Lanzhou [J]. Science in China A, 1999, 4(5): 529-536 (in Chinese).
- [2] POLLACCO E, BEAUMEL D, ROUSSEL-CHOMAZ P, et al. MUST2: A new generation array for direct reaction studies[J]. Eur Phys J A, 2005, 25(S1): 287-288.
- [3] WALLACE M S, FAMIANO M A, van GOETHEM M J, et al. The high resolution array (HiRA) for rare isotope beam experiments[J]. Nucl Instrum Methods A, 2007(583): 302-312.
- [4] 姚向武,杨彦云,王建松,等. 8×8 CsI(Tl) 探测器阵列研制[J]. 原子能科学技术,2010,44(3): 358-361.
YAO Xiangwu, YANG Yanyun, WANG Jian-song, et al. Development of 8×8 CsI(Tl) array detector[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(3): 358-361(in Chinese).
- [5] HIROKAZU I, MANOBU T, SHOJI O. Detector capacitance of silicon microstrip detector[J]. Nucl Instrum Methods A, 1992, 313(1-2): 31-36.
- [6] FOMICHEV A S, DAVID I, LUKYANOV S M, et al. The response of a large CsI(Tl) detector to light particles and heavy ions in the intermediate energy range[J]. Nucl Instrum Methods A, 1994, 344(2): 378-383.