

文章编号: 1007-4627(2015)01-0080-04

碳离子肿瘤治疗中弹核碎裂反应测量系统的研制

徐治国^{1, 2}, 段利敏¹, 胡正国¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了评估弹核碎裂反应在碳离子肿瘤治疗中产生的影响, 中国科学院近代物理研究所建立了一套探测器系统用来测量相关反应产物。这套探测系统包括起始探测器、水靶系统、带电粒子鉴别系统和 neutron 测量系统。利用中国科学院近代物理研究所 250 MeV/u $^{12}\text{C}^{6+}$ 束打 50 mm 水靶的实验在束测试了这套系统的性能。实验结果表明, 通过 $\Delta E-E$ 和 TOF- ΔE 两种粒子鉴别方法这套探测系统清楚地区分了 H, He, Li, Be, B 和 C 等元素。通过计算不同 Z 值带电碎片的微分截面得到了这些带电碎片(本工作给出元素 H 和 He)相应的角分布。这套探测系统中的带电粒子测量系统性能达到了设计的预期目标。

关键词: 弹核碎裂; 重离子肿瘤治疗; $^{12}\text{C}^{6+}$ 碎片测量

中图分类号: O571.43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.01.080

1 引言

由于有 Bragg 峰的存在, 使用能量 100 ~ 400 MeV/u 的碳离子治疗肿瘤相比光子有较明显的优势。相比于质子, 碳离子有更小的横向发散、和更高的峰坪比^[1]。加之碳离子具有比光子和质子更高的相对生物学效应, 相同剂量的照射会得到更好的治疗效果。所以使用碳离子治疗癌症是放射治疗方法的最佳选择。肿瘤治疗过程中, 绝大部分碳离子与组织细胞原子发生弹性或非弹性散射, 损失其全部能量。但是小部分碳离子会发生弹核碎裂反应, 产生较轻的带电粒子, 如 B, Be, Li, He 和 H 的同位素, 它们有较长射程和较大的横向分布, 在 Bragg 峰后形成一个尾巴, 对肿瘤后面的健康组织造成伤害^[2]。这些影响可以通过测量碳离子与人的机体发生反应所产生带电粒子碎片的微分截面来估算。另外, 在肿瘤治疗过程中碳离子的碎裂反应产生的中子也会对病人的正常器官造成伤害, 中子通量也是研究者感兴趣的信息。在制定临床治疗计划时必须依据实验数据准确估算碎裂反应的影响, 这就需要通过实验测量相关数据^[3]。日本 NIRS 测量了 290 MeV/u $^{12}\text{C}^{6+}$ 离子在水中碎裂的碎片空间分布^[4], 德国 GSI 测量了 200, 270 和 400 MeV/u $^{12}\text{C}^{6+}$ 离子在水中碎裂的碎片空间分布^[5]。中国科学院近代物理研究所利用碳离子治疗肿瘤的能区在 100 ~ 400 MeV/u, 深度是 2.5 ~ 25 cm。需要

对 2.5 ~ 25 cm 的相关数据详细测量。这就需要建立一套探测系统来实现相关数据的详细测量。

2 探测器系统和靶系统

中国科学院近代物理研究所研制的这套探测器系统包括起始探测器、水靶系统、带电粒子鉴别系统和 neutron 测量系统。本文主要介绍其中的带电离子测量鉴别系统及水靶系统。为了测量碎裂反应的影响, 首先需要这套系统能够鉴别碎裂产物的粒子种类, 同时测量不同产物的微分截面或通量。为了实现带电粒子的 Z 鉴别, 这套系统采用了 TOF- ΔE 和 $\Delta E-E$ 两种鉴别方法。由于水在人体组织中占 75% 以上^[6], 是最好的类人体组织物质, 被放射医学界广泛认可。为了很好地模拟人体, 我们也设计制作了厚度精确可调的水靶系统, 做为人体组织等效物在实验中使用。

实验探测系统布局图如图 1 所示。其中水靶摆放在在治疗床(束流靶点)的位置, 起始探测器摆放在水靶上游 50 cm, 水靶和起始探测器之间是一个多页准直器。 $\Delta E-E$ 望远镜系统摆放在在距离靶中心约 3 m 处, 中子探测系统紧跟望远镜系统。起始探测器由两个闪烁体探测器组成, 其中一个闪烁体作为起始时间探测器, 一个作为 Veto 探测来限制束流入射位置。两个探测器均选用厚 2 mm、面积为 51 mm×51 mm 的 BC408 塑料

收稿日期: 2014-02-17; 修改日期: 2014-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11079046, 11205223)

作者简介: 徐治国(1980-), 男, 陕西岐山人, 助理研究员, 博士, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: xuzg@impcas.ac.cn。

闪烁体加光导由光电倍增管 (PMT) 读出信号。Veto 探测器中间钻有一个 $\phi 10\text{ mm}$ 圆孔，孔外的束流将全部通过反符合被否决掉，同时通过两个探测器计数率的比值可以判断束流中心是否偏离探测系统的中心位置。 ΔE - E 望远镜系统固定在一个既可以沿横向移动又可以旋转的移动平台上，移动平台通过电机远程控制自动调节望远镜系统的测量角度。 ΔE 探测器使用 $\phi 50\text{ mm}$ ，厚 10 mm 的 BC408 配合光导制作而成，使用 PMT 读出。能量探测器使用 $\phi 60\text{ mm}$ 、长 250 mm 的 BGO 晶体制作而成^[7]，使用光敏二极管 (PD) 读出。为了减少能量泄漏，能量探测器的尺寸比 ΔE 探测器大。 ΔE - E 望远镜系统放置在一个可以旋转和水平移动的移动平台上，平台的移动精度能够达到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。 ΔE 与起始探测器相结合就可以组成 ΔE -TOF 粒子鉴别系统。水靶长度 60 cm 、宽度 50 cm 、高 48.5 cm 。入射窗和出射窗均采用 PMMA 塑料制成，入射窗厚度 1 mm ， $\phi 55\text{ mm}$ ；出射窗 $32\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ ，厚度 2 mm 。水靶的有效厚度 $0 \sim 28\text{ cm}$ 可调，调节精度可以达到 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。水靶厚度通过丝杆、电机由电机控制器远程控制调节。

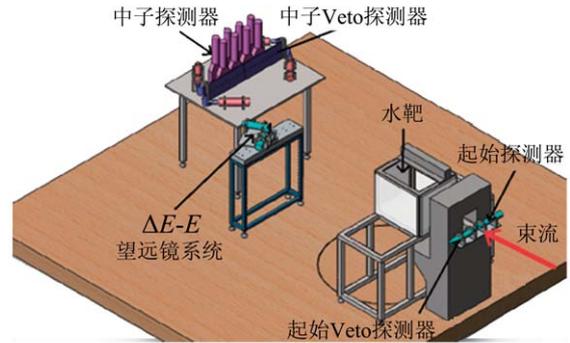


图 1 (在线彩图) 实验探测器及靶系统布局图

3 电子学系统

为了能够充分利用有限的束流时间获得尽可能多的信息，这套系统把中子的测量与带电粒子的测量有机地结合在了一起，在不增加束流时间的前提下实现了中子通量的测量。实验中的电子学逻辑如图 2 所示，中子信号与带电粒子信号经过或逻辑符合后与起始探测器经过与逻辑符合作为数据采集系统的 Trigger 信号。为了能够

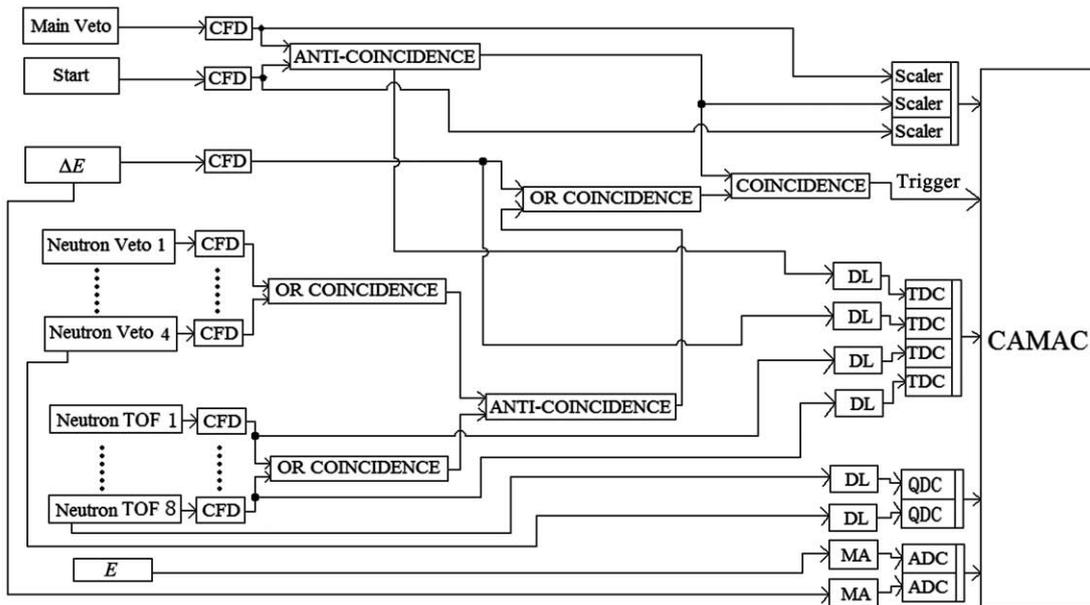


图 2 实验电子学逻辑框图

把两组探测器结合在一起，电子学中进入 TDC 和 QDC 的信号全都使用了线性延迟模块。

4 在束实验测量结果

图 3 为 $250\text{ MeV/u }^{12}\text{C}^{6+}$ 打 50 mm 水靶得到的 ΔE -TOF 二维散点图，其中测量角度为 2° 。通过 ΔE -TOF 的粒子鉴别方法清楚地区分了不同 Z 值的粒子。

其中 X 轴为粒子从起始时间探测器到 ΔE 探测器的飞行时间， Y 轴为粒子在 ΔE 上的能量损失。 ΔE 探测器的道数对应于能量损失 dE/dx ，结果与 Bethe-Block 公式计算的能量损失随 Z 值变化趋势一致。测量结果证明选择 10 mm 厚的 BC408 是比较合理的。为了更好地实现对带电粒子鉴别，实验中同时使用了 ΔE - E 探测器望远镜的粒子鉴别方法。图 4 为使用 ΔE - E 方

法得到的二维散点图, 其中X轴为大块BGO 晶体得到的能量信号, Y轴为塑料闪烁体得到的能量损失信号。由于BGO中最大能量沉积超过 2 GeV, 普通PMT的动态范围无法满足要求, 在此我们采用了PD来读出BGO的光信号, 希望能有好的能量分辨与线性响应。从图4的散点图可以看到, 各元素可以清晰地分开, 但Li, Be, B, C的总能量基本没有变化。对这一现象, 我们分析主要有两个原因, 一是厚靶导致高Z粒子的单核能比低Z粒子的小(薄靶反应中, 类弹碎片的单核能基本相等, 随着靶厚度的增加, 高Z碎片的单核能降低的更快); 二是BGO本身的光输出具有非线性, 单位能量沉积输出的光子数, 与能量沉积密度成反比关系。PD是否也带入非线性还需要我们进一步的验证。

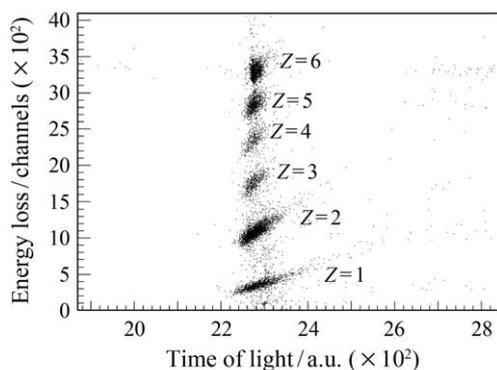


图 3 250 MeV/u ¹²C⁶⁺ 打 50 mm 水靶的 ΔE-TOF 二维散点图

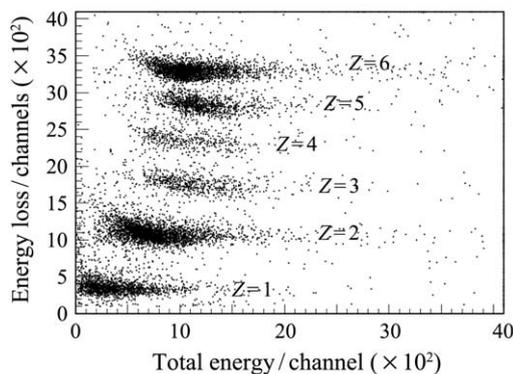


图 4 250 MeV/u ¹²C⁶⁺ 打 50 mm 水靶的 ΔE-E 二维散点图

治疗计划系统需要通过不同Z值带电粒子碎片的微分截面数据对治疗计划的剂量模拟系统的算法进行修正。弹核碎裂反应微分截面为

$$\sigma(\theta, \phi) = \frac{dN'}{IN_s d\Omega}, \quad (1)$$

其中: N_s 为单位面积上的靶核数; $d\Omega$ 是探测器有效面积对应的立体角; dN' 是单位时间内出射至 $d\Omega$ 的离子数; I 为单位时间内的入射离子束^[8]。起始探测器与相应的Veto探测器符合信号为 I , 从二维谱上鉴别出的不同Z值粒子的计数为 dN' , 经过实验测量得到的 250 MeV/u ¹²C⁶⁺ 打 50 mm 水靶产生的H和He的元素的角分布如图5所示, 每个角度的统计误差均好于12%。

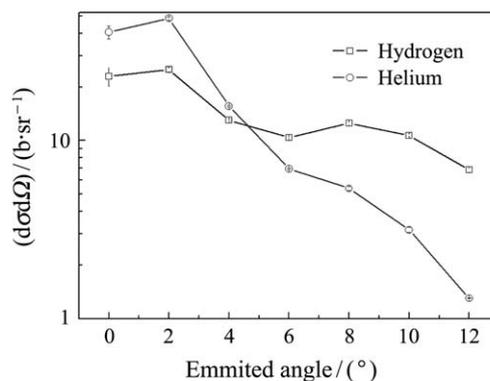


图 5 250 MeV/u ¹²C⁶⁺ 打 50 mm 水靶 H 和 He 元素的角分布

5 结论

中国科学院近代物理研究所研制了一套包括起始探测器、水靶、带电粒子与中子探测器的系统, 用来测量碳离子肿瘤治疗中弹核碎裂反应产生的带电粒子碎片与中子的截面。在 250 MeV/u ¹²C⁶⁺ 束流测试实验中, 各系统工作正常, 实现了 ΔE-TOF 和 ΔE-E 两种方法的元素鉴别, 并给出了 H, He 元素的微分截面。中子数据目前还在分析中。由于该系统目前只有一套 ΔE-E 望远镜, 截面测量的效率与统计精度较低, 下一步计划增加 2 套 ΔE-E 望远镜, 用来提高碎片的截面测量精度。

参考文献:

- [1] DIETER S, THILO E, DANIELA S. REVIEWS OF MODERN PHYSICS, 2010, **82**: 383.
- [2] TOSHITO T, KODAMA K, SIHVER L, *et al.* PHYSICAL REVIEW C, 2007, **75**: 054606.
- [3] DUDOUET J, JULIANI D, LABALME M, *et al.* PHYSICAL REVIEW C, 2007, **88**: 024606.
- [4] NARUHIRO M, MASATAKA K, HITOMI S, *et al.* Phys Med Biol, 2005, **50**: 3393.
- [5] HAETTNER E, IWASE H, SCHARDT D. 2006, **122**: 485.
- [6] Body water[EB/OL].[2014-03-01]. http://en.wikipedia.org/wiki/Body_water, 2014.
- [7] NARUHIRO M, AKIFUMI F, MASATAKA K, *et al.* Phys Med Biol, 2003, **48**: 1605.

- [8] LU Xiting, JIANG Dongxing, YE Yanlin. Nuclear Physics 2000: 238. (in chinese)
[M]. 2nd edition, Beijing: Atom Energy Publishing House, (卢希庭, 江栋兴, 叶沿林. 原子核物理[M]. 第二版, 北京: 原子能出版社, 2000: 238.)

A Detector System for Measurement of Projectile Breakup Reaction in Carbon Ion Tumour Therapy

XU Zhiguo^{1, 2, 1)}, DUAN Limin¹, HU Zhengguo¹

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

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

Abstract: For estimating the influence of the projectile breakup reaction on carbon ion tumour therapy, a detector system was built by IMP(Institute of Modern Physics), Chinese Academy of Sciences(CAS), and used to detect the results of the reaction. The system is composed of start detector, water target system, charged fragments detector system and neutron detector system. The performance of the detector system was tested in the experiment of 5 cm thick water target bombarded by 250 MeV/u carbon beam. The results reveal that the charged fragments, such as elements H, He, Li, Be, B and C, were identified clearly by $\Delta E-E$ and ΔE -TOF techniques. The angular distributions of some charged fragments were obtained by calculating the charge-changing cross-sections of the fragments(*e.g.* elements H and He isotopes in our work). The test results prove that the charged fragment detector system achieves the design aim.

Key words: projectile breakup; heavy ion therapy; $^{12}\text{C}^{6+}$ fragmentation

Received date: 17 Feb. 2014; **Revised date:** 28 Feb. 2014

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11079046, 11205223)

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

<http://www.npr.ac.cn>