

文章编号: 1007-4627(2017)04-0768-05

一种大型位置灵敏平行板雪崩计数器

周远杰^{1,2}, 马朋^{1,2,†}, 王建松², 段利敏², 杨贺润², 胡荣江², 鲁辰桂², 张俊伟^{1,2}, 肖志刚³,
王仁生³, 张嫣³, 黄艳³, 吕黎明³, 程文静³, 易晗³

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

3. 清华大学物理学院, 北京 100084)

摘要: 中国科学院近代物理研究所气体探测器组研制了一种大型位置灵敏的平行板雪崩计数器(PPAC)。它主要由中心阴极和 X, Y 位置阳极构成, 灵敏面积为 244 mm×284 mm, 阴极为双面镀金 1.5 μm 厚的 Mylar 膜, 阳极为直径 20 μm, 间距 1 mm 的镀金钨丝。位置读出选用延迟块读出法。这种探测器经测试在灵敏面积内位置分辨小于 4 mm, 时间分辨为 0.42 ns, 已在兰州放射性束流线(RIBLL)上清华大学的核反应实验中使用。该实验中使用了主束 ⁴⁰Ar 直接轰击 Au 靶, 产生裂变碎片, 使用了 4 个这种大型位置灵敏的 PPAC, 用来探测裂变碎片的飞行时间和速度, 实验表明, PPAC 对裂变碎片有 90.3% 的效率, 给出了裂变碎片的位置分布, 为理论分析工作提供了非常好的实验数据。

关键词: 平行板雪崩计数器(PPAC); 大型位置灵敏探测器; 裂变碎片

中图分类号: O481.4

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.34.04.768

1 引言

核物质的状态方程是表征核物质性质的一个基本量, 核核碰撞是研究核物质的状态方程的一个重要手段, 是目前世界上核物理研究的热点之一。测量核核碰撞后裂变产物分布, 研究核反应动力学过程, 从而研究核物质的状态方程。清华大学肖志刚教授领导的团队希望通过测裂变碎片的速度信息来验证对称能公式, 并在兰州放射性束流线(RIBLL)上完成了一个碎裂反应实验。实验中利用 30 MeV/u 的 ⁴⁰Ar 束流轰击 Au 靶, 产生裂变碎片和各种轻粒子。通过探测裂变碎片的飞行时间和位置, 从而得到裂变碎片的动量信息。

实验所需要的主要探测器有平行板雪崩计数器(PPAC)、Si 探测器和 CsI 闪烁体探测器。PPAC 是一种传统的工作在雪崩区的气体探测器是一种很好的探测重带电粒子的工具^[1, 2]。在核物理实验中, 它常用于重离子探测中的时间和位置测量。PPAC 具有许多优越的性能: 很好的定时性能, 允许较高的计数率, 能达到 $10^3 \sim 1^5$ 个/s; 对裂变碎片的探测效率高^[3]; 较小的辐射损伤; 探测器工作气压可调, 适合探测不同

类型、不同能量的粒子^[3, 4]; 具有成本低廉, 使用方便等优点^[5-7]。RIBLL 是在中国科学院近代物理研究所建成的一条放射性束流线装置。自 1997 年投入运行以来, RIBLL 充分利用兰州重离子研究装置(HIRFL)产生的 ¹²C, ¹³C, ¹⁶O, ²⁰Ne, ³⁶Ar, ⁴⁰Ar, ⁵⁸Ni 等初级束, 完成了长时间的多种束流实验。PPAC 是 RIBLL 一种常用的气体探测器, 用来监测束流和探测粒子位置信息。RIBLL 中有 PPAC 的较为稳定的读出系统和气路, 使用方便, 因此 PPAC 成为此实验选用的探测器。而考虑到实验中裂变碎片在一个较广的空间立体角范围内分布, 为了尽可能多地探测到裂变碎片事例, 我们研制了一种 244 mm×284 mm 大位置灵敏的 PPAC 探测器, 使用 α 源和放射性束流对 PPAC 进行了性能测试; 在整个核反应实验过程中, PPAC 探测器工作稳定、位置分辨、时间分辨以及对裂变碎片的探测效率都达到了预期的实验要求。

2 结构与工作原理

大型位置灵敏 PPAC 的结构如图 1 所示, 探测器内部结构由 3 个框组成, 每个框之间都保持平行以确保

收稿日期: 2017-02-16; 修改日期: 2017-11-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2014CB845405); 国家自然科学基金资助项目(11205221, 11205209, 11305232, 11375246);

作者简介: 周远杰(1990-), 男, 重庆人, 硕士研究生, 从事粒子物理与原子核物理专业; E-mail: zhouyuanjie@impcas.ac.cn

† 通信作者: 马朋, E-mail: mapeng@impcas.ac.cn.

电场均匀。阴极由 1.5 μm 厚的双面镀金 Mylar 膜构成，将 Mylar 膜均匀展开并用不导电的胶粘在环氧树脂框架上就组成了阴极平面。阳极由镀金钨丝构成，丝的直径为 20 μm，间距为 1 mm。X 阳极面上有 284 根丝，Y 阳极面上有 244 根丝，因此构成了 284 mm×244 mm 的灵敏面积。阳极面与阴极面的间距固定为 3 mm。

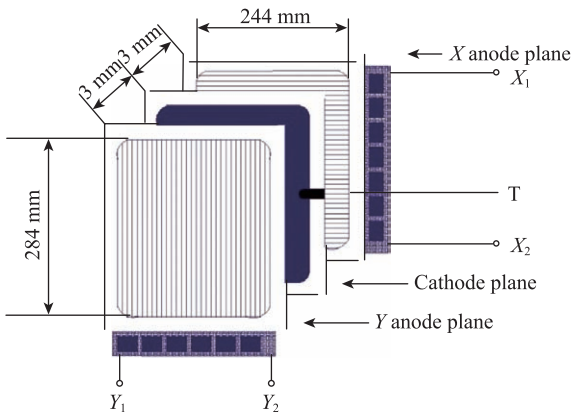


图 1 PPAC 结构

阳极面上用延迟块读出，为了节省读出电子学，并减少信号读出时衰减，我们将每 4 根丝焊在一个焊点上，相邻焊点之间接入一个延迟单元，每个单元的延迟时间为 4 ns，匹配阻抗为 50 Ω。每个延迟块有 10 个延迟单元，因此 X 阳极面上有 7 个延迟块，Y 阳极面上有 6 个延迟块。信号从阳极面的两端读出，得到信号 X₁, X₂, Y₁, Y₂。位置可以由

$$x = k_X(X_1 - X_2) + b_X,$$

$$y = k_Y(Y_1 - Y_2) + b_Y,$$

计算得到，这里 k_X, b_X, k_Y, b_Y 由阳极读出电子学决定，需要将它们刻度出来才能够得到 X, Y 的位置信息。时间信号直接由阴极读出。

入射窗和出射窗由 1.5 μm 的 Mylar 膜构成，用来封装 PPAC 探测器和工作气体。由于灵敏面积较大，我们在入射窗和出射窗使用直径为 200 μm 的鱼线做支撑，使膜受力均匀。因为入射窗和出射窗的由厚度为 1.5 μm 的 Mylar 膜组成，通过气压测试，探测器能承受的气压大概为 1000 Pa。为了让探测器工作稳定，而且要使阴阳极信号的信噪比尽量高，我们选择探测器的工作气压为 450 Pa。通过用 ²⁵²Cf 源对探测器进行测试，我们发现 450 Pa 的气压满足我们的条件。在实验过程中，探测器工作的气路图如图 2 所示，真空计探测到 PPAC 出气端气压值，电磁阀探测到 PPAC 进气端的气压，这两个气压不断反馈平衡使气压稳定在控制表头选定需要工

作的气压值，并通过电磁阀的气压值来控制进气速度，从而达到控制 PPAC 气压的目的，真空计放在出气端控制系统更容易稳定。

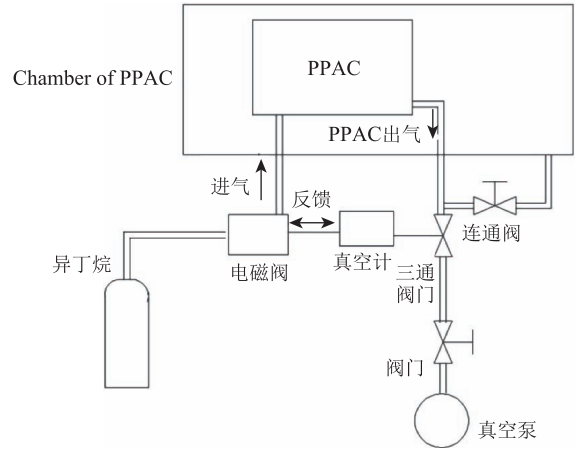


图 2 PPAC 工作气路图

由于真空计和电磁阀对气压控制的精确度问题，工作气压常在 400 ~ 450 Pa 内浮动。我们选择的工作气体为异丁烷，阴极的负高压为 -500 V 以获得充分大的信号而不至于打火。

3 实验室测试

在实验室 1 Pa 的真空靶室中，我们用 α 源对 PPAC 进行了测试。PPAC 的工作气体为 450 Pa 异丁烷，阴极负高压为 -590 V。

PPAC 后端放置一个 Si 探测器，前端放置 ²³⁹Pu 的 α 放射源，这样我们可以得到很多 PPAC 和 Si 探测器都发生点火的事件，以便测试 PPAC 的时间分辨和探测效率等信息，如图 3 所示。

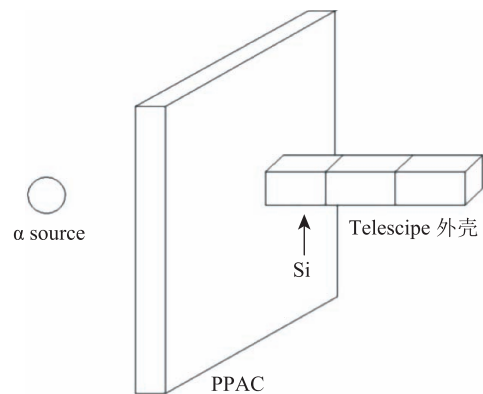


图 3 实验室测试探测器摆放

3.1 时间分辨

由于 Si 探测器的时间分辨比较差，我们使用两套相同的 PPAC 测试其时间分辨。每个探测器分别给出一

个 PPAC 的时间信号，两个时间信号进行时间相减，得到图 4，计算得到 PPAC 的时间分辨 σ 为 0.42 ns (考虑到 2 个 PPAC，除以了 $\sqrt{2}$)，满足实验的需求。

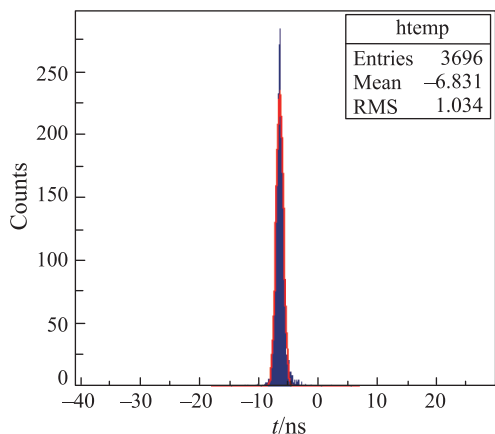


图 4 (在线彩图) PPAC 时间分辨

3.2 位置分辨

阳极丝间距为 1 mm，为了节省读出电子学，我们将 4 根丝焊接在一个焊盘上，每个读出焊点之间的距离为 4 mm。如图 5 所示为 X 和 Y 方向上位置图，上下两个图横坐标分别为 X 和 Y 方向上的一维位置谱，纵坐标均为事件数，可以看到每个焊盘上面的信号对应位置信号上面的一个峰，在位置谱上能够分辨出相邻两个峰，所以我们认为位置分辨已经达到了 4 mm。

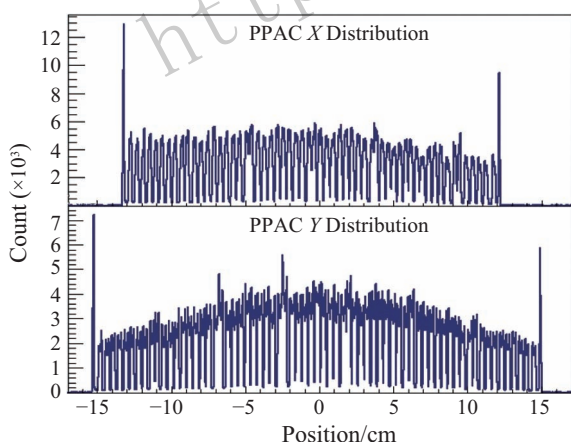


图 5 X 和 Y 位置图

我们将一张 A4 纸中间镂空处 IMPCAS 的字样，贴在 PPAC 入射窗表面，由于 α 粒子不能穿透 A4 纸，所以在 A4 纸挡住的部分，探测器不会有正常的点火事件，这样 α 粒子只能从镂空的 IMPCAS 文字中间穿过，探测器的位置二维谱应当呈现出一个 IMPCAS 的字样，通过这种方法成像得到如图 6 所示。

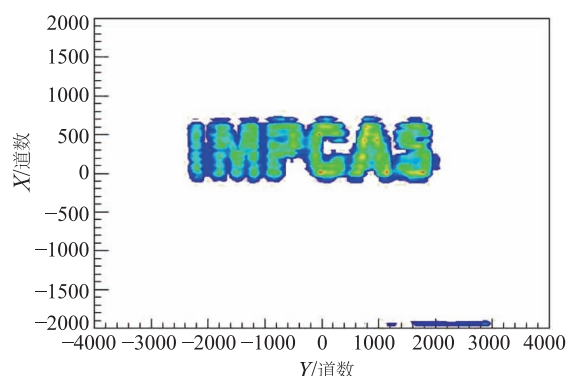


图 6 (在线彩图) IMPCAS 成像

图 6 展示的是 PPAC 测试得到的二维原始数据谱，每道对应 0.05 mm，探测器可以清晰地对这个镂空文字进行成像，说明探测器对 α 粒子点火的位置信息分辨得比较准确，也说明它有较强的位置分辨。

4 束流实验

束流实验中，PPAC 用来测量裂变碎片的时间和位置信息，PPAC 的工作在 10^{-4} Pa 的真空靶室，工作气体为异丁烷，气压为 450 Pa。由于探测器的探测目标为裂变碎片，对轻粒子的探测考虑的不多，为了使探测器正常工作且不打火，我们让探测器的阴极负高压为 -500 V。探测器摆放如图 7 所示。

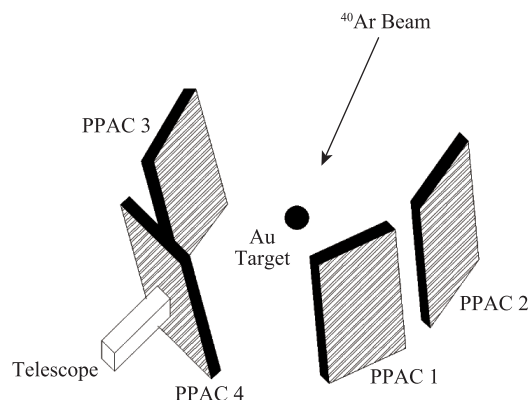


图 7 束流实验探测器摆放

实验中用了 4 个大型位置灵敏的 PPAC 探测器来测量 30 MeV/u 的 ^{40}Ar 束流轰击 Au 靶的裂变碎片，其中一个 PPAC (PPAC 4) 探测器后面放置了一个 3 叠层的望远镜，望远镜由两个 50 μm 金硅面垒探测器和一个 20 mm \times 20 mm \times 40 mm 的 CsI 闪烁体探测器构成。

4.1 对裂变碎片的探测效率

北京大学物理学院在 RIBLL 上用这种方法测试过 PPAC 对各种轻粒子的探测效率^[8]。但是由于 ΔE -E 的粒子鉴别方法对核子数较大的裂变碎片没有办法区

分, 我们只能通过后面的 Si 探测器来区分较重的裂变碎片, 而无法鉴别裂变碎片的种类。由于裂变碎片质量比较大, 由 Bethe-Bloch 公式^[9]可知其在半导体 Si 中沉积的能量远大于轻粒子, 所以我们认为裂变碎片并没有穿过第一个金硅面垒探测器。故我们可以用公式

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{PPAC}}}{N_{\text{Si1}}}$$

来计算 PPAC 对裂变碎片的探测效率, 上式中 N_{Si1} 为第 2 个 Si 上没有点火但是第 1 个 Si 上点火的事件数, 用来区分出裂变碎片, N_{PPAC} 为 Si 上点火且 PPAC 上点火的事件数。由于裂变碎片的质量较大, 望远镜无法区分碎片种类, 所以只能给出一个总的裂变碎片的探测效率。通过实验数据由上述算法得到该大型位置灵敏的 PPAC 对裂变碎片的探测效率为 90.3%。

4.2 PPAC 探测裂变碎片的运动方向

在实验过程中, 束流轰击 Au 靶产生裂变碎片, 裂变碎片是两个或者以上, 根据动量守恒原理, 两个裂变碎片在 Y 方向上应该会一个朝上飞, 另一个朝下飞, 我们使用 PPAC 的两体符合信号中 PPAC1 和 PPAC2 的 Y 方向的关联图, 来大致观察一下裂变碎片的运动方向, 如图 8 所示。

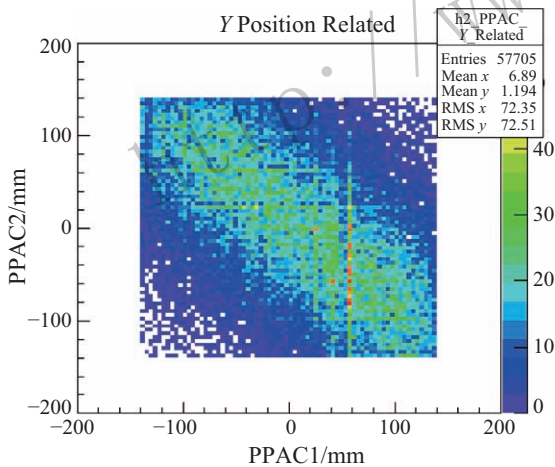


图 8 (在线彩图) PPAC1 和 PPAC2 的 Y 方向关联图

由于靶点在 Y 方向大概位于 PPAC 的灵敏区域的中心, 图中可以看出 PPAC1 和 PPAC2 测到的大部分事件是有关联的, PPAC1 测到 Y 正方向的裂变碎片时, PPAC2 会测到 Y 负方向的裂变碎片, 满足动量守恒原理, 从而验证了 PPAC 工作处于正常状态。

4.3 实验后期理论分析

实验中用 9 套 Si 探测器组成的望远镜系统加上 4 套 PPAC 探测器来对轻带电粒子及裂变碎片进行粒子鉴别, 轻核的粒子鉴别由 Si 望远镜系统给出, 大范围的重的裂变碎片分布由 PPAC 给出。实验结束后, 实验数据的后期物理分析由清华大学肖志刚教授领导的团队进行, 分析结果将陆续发表, 最近的一篇见文献^[10]。

5 总结与展望

PPAC 在使用过程中还有一些问题。例如, PPAC 使用的前置放大器是 FTA820 插件, 插件放置在整个靶室外, 探测器到前置放大器之间大概有 4 m 距离, 增加了信噪比。随着电子学集成化发展, 可以考虑在 PPAC 外壳附近制作小型的前置放大器, 缩短探测器和前放的距离, 另外, PPAC 为了节省电子学使用的是 4 根丝焊接到一起读出, 电子学集成化之后丝可以不用焊接到一起, 增加 LC 延迟模块, 提高位置分辨。总体来说, 整个实验过程中, 这种大型 PPAC 探测灵敏面积大, 具有良好的位置分辨和时间分辨, 对裂变碎片探测效率较高, 性能稳定, 辐射损伤较小, 可以长时间在束流实验下使用。在实验过程中, PPAC 的位置分辨好于 4 mm, 时间分辨 0.42 ns, 探测效率也在 9% 以上, 达到了实验要求, 给出了非常精确的裂变碎片的位置信息, 为理论分析工作提供了非常好的实验数据。

参考文献:

- [1] KEUFFEL J W. 1949, Rev Sci, 1949, **20**: 202.
- [2] PIDD R W, MANDANSKY L. Phys Rev, 1949, **75**: 627.
- [3] HEMPEL G, HOPKINS F, SCHATZ G. Nucl Instr Meth A, 1975, **131**: 4450.
- [4] KUMAGAI H, OZAWA A. Nucl Instr Meth A, 2001, **470**: 562.
- [5] FREEMAN C G, HERRICK D M, BRYAN D C, *et al.* Nucl Instr Meth A, 1994, **357**: 450.
- [6] BHATTACHARYA P, BASU P, CHATTERJEE M I. Nucl Instr Meth A, 1989, **276**: 583.
- [7] KUMAGAI H, OZAWA A, FUKUDA N, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2001, **470**: 562.
- [8] HUA Hui, JIANG Dongxing, LI Xiangqing, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2002, **481**: 160.
- [9] FANO U. Ann Rep Nucl Sci, 1963, **13**: 1.
- [10] ZHANG Yan, TIAN Junlong, CHENG Wenjing, *et al.* Phys Rev C, 2017, **95**: 041602.

A Large Position-sensitive PPAC

ZHOU Yuanjie^{1,2}, MA Peng^{1,2,†}, WANG Jiansong², DUAN Limin², YANG Herun², HU Rongjiang², LU Chengui²,
ZHANG Junwei², XIAO Zhigang³, WANG Rensheng³, ZHANG Yan³, HUANG Yan³,
LÜ Limin³, CHEN Wenjing³, YI Han³

(1. *University of Chinese Science Academy, Beijing 100049, China;*

2. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*

3. *Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084 China*)

Abstract: A kind of large position sensitive parallel plate avalanche counter(PPAC) was developed at Gas Detector Research Group, Institute of Modern Physics of CAS. Each of the detector with large sensitive area of 244 mm×284 mm, consists of one central cathode, X anode and Y anode. The cathode plane in the middle of detector is a 1.5 μm thick Mylar foil coated with a thin Au-layer on both sides. The position resolution of the PPAC is better than 4 mm, and the time resolution is 0.42 ns. The detectors were used in the fission experiment with 30MeV/u ⁴⁰Ar beam bombarding on a gold target to measure the velocity of the fission fragments at Radioactive Ion Beam Line In Lanzhou(RIBLL). Four PPACs were used and the experiment result showed that a rather high detection efficiency (90.3%) is achieved. The position distribution of fission fragments is given by PPACs, which provides very good experimental data for further theoretical analysis.

Key words: PPAC; large position-sensitive detector; fission fragment

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

Received date: 16 Feb. 2017; **Revised date:** 24 Nov. 2017

Foundation item: National Basic Research Program of China(973 Program)(2014CB845405); National Natural Science Foundation of China(11205221, 11205209, 11305232, 11375246)

† **Corresponding author:** MA peng, E-mail: mapeng@impcas.ac.cn.