

用于垒下重离子熔合裂变研究的 二维位置灵敏探测器

谭继廉 张金霞 靳根明

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

张焕乔 钱 兴 刘祖华 许谨诚

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

1995-12-12 收稿

摘 要

描述了用于近垒和垒下重离子熔合裂变实验的主要探测器——二维位置灵敏雪崩室(BPAC)的结构、工作原理及性能,给出了利用BPAC探测到的84MeV (E_{cm}) $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 反应中不同碎片角区的碎片折叠角分布,并从中区分了转移裂变和复合核裂变的碎片角分布,从而证明转移裂变不是导致碎片角分布各向异性异常的原因.同时,实验结果支持了预平衡裂变模型对碎片角分布异常现象的解释.

关键词 熔合裂变, 位置灵敏雪崩室, 碎片角分布.

1 引 言

近年来,在重离子引起的近垒和垒下裂变的研究中,发现了裂变碎片角分布的异常现象^[1],并对其产生原因给出了不同的解释.这些解释大都是基于单举测量的结果,而且假定裂变碎片都来自于复合核裂变.单举测量裂变碎片角分布,其结果仅得到了各种反应机制,例如转移裂变、复合核裂变等产生的裂变碎片角分布的总和.这就增加了实验数据分析的难度和不可靠性.实际上,利用U、Th和Np这些易裂变核作为靶核的反应中,转移裂变的贡献可能很大,将这一部分贡献与纯复合核裂变的贡献分开是非常重要的.不同反应机制产生的裂变核具有不同线性动量转移(或反冲速度),其两裂变碎片的夹角(折叠角)也就具有相应的差别.根据两裂变碎片折叠角的差别就能区分其裂变核的产生机制.这也就有可能更可靠地解释裂变碎片各向异性随质心系能量的变化在垒下5MeV附近呈现一个峰结构的异常现象.

平行板雪崩计数器(PPAC)以其优良的定时特性,容易制作,可做成大灵敏面积,工作可靠,可承受高计数率,可不考虑辐射损伤等优点,在核物理实验中得到越来越广

泛的应用, 成为核物理实验中作定时测量的一种重要手段. 根据核反应产物角分布测量的需要, PPAC 又被发展成为一维或两维位置灵敏的大面积探测器. 这种探测器非常适合用来精确测定裂变碎片的折叠角, 为研究重离子引起的近垒及全下裂变碎片角分布异常现象提供了良好条件.

2 结构、电场分布

两维位置灵敏雪崩室(BPAC)的灵敏面积为 $250\text{mm} \times 200\text{mm}$, 由阳极 A、栅极 K、G 和阴极 C 四个电极组成, 极间距分别为 S_1, S_2, S_3 (如图 1 所示). 阳极为 $1.5\mu\text{m}$ 厚的镀金薄膜, 阴极由 PCB 制成, K 极由平行且均布的镀金钨丝组成, 丝距 1mm , 每 4 个丝分为一组, 并依次焊到一 LC 延迟线的各个抽头, 用以读出 x 位置. G 极的结构与 K 极同, 只是丝距为 0.5mm , 用以读出 y 位置. 如果在各电极上加一电压, 探测器内的电场分布是比较复杂的, 为使讨论简化而又不失去一般性, 我们假定各极电位 $V_A > V_K > V_G > V_C$, 整个 BPAC 可看成由 3 个电容器构成, 由各极上的面电荷密度, 每个电容器单位面积上的电容值^[2]可以推出探测器灵敏体积内任一点的电场强度

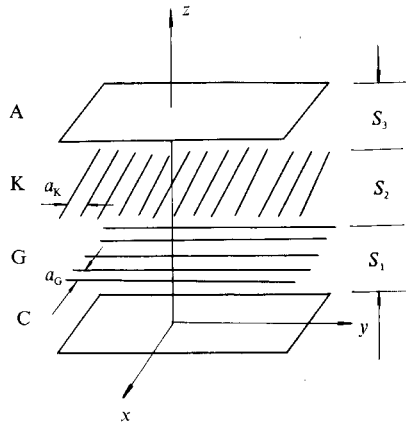


图 1 BPAC 结构示意图

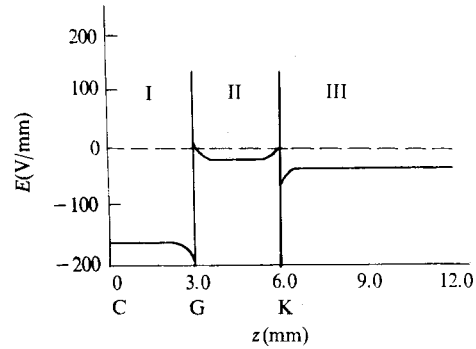


图 2 BPAC 内的电场强度分布

$$E_x = \frac{2\pi\sigma_G \sin(2\pi x / a_K)}{\sin^2(\pi x / a_G) + \sinh^2(\pi(z - S_1) / a_G)}, \quad (1)$$

$$E_y = \frac{2\pi\sigma_K \sin(2\pi y / a_K)}{\sin^2(\pi y / a_K) + \sinh^2(\pi(z - S_1 - S_2) / a_K)}, \quad (2)$$

$$E_z = -2\pi\sigma_A + 2\pi\sigma_C + \frac{\pi\sigma_G \sinh(2\pi(z - S_1) / a_G)}{\sin^2(\pi x / a_G) + \sinh^2(\pi(z - S_1) / a_G)} + \frac{\pi\sigma_K \sinh(2\pi(z - S_1 - S_2) / a_K)}{\sin^2(\pi y / a_K) + \sinh^2(\pi(z - S_1 - S_2) / a_K)}, \quad (3)$$

其中 $\sigma_A, \sigma_K, \sigma_G, \sigma_C$ 分别为 A、K、G、C 各极上的净面电荷密度, a_K, a_G 分别为 K 极和 G 极上的丝距. 我们研制的 BPAC, S_1, S_2, S_3 分别取 3、3、6mm, A、K、G、C 各

电极电压分别为 +310、+70、0、-510V, 经计算得 BPAC 内的电场强度(如图 2 所示). 从图 2 可见, 在离丝较远($\varphi 100\mu\text{m}$ 以外)的很大范围内, 电场是均匀场, 按其值分为强、弱、中三区, 分别用 I、II、III 表示, 其中 I 和 III 区为雪崩区, II 为漂移区. 在丝附近很小范围内电场很强而且是突变的.

如果不考虑丝平面与平板电极的差异, 则 BPAC 任意一区例如 G—C 区的电场强度为:

$$E_{0GC} = (V_G - V_C) / S_1, \quad (4)$$

根据上述计算, 实际上该区电场为:

$$E_{GC} = k(V_G - V_C) / S_1 = k E_{0GC}, \quad (5)$$

其中

$$k = 1 / [1 + a_G / 2\pi S_1 \ln(a_G / 2\pi\rho_G)], \quad (6)$$

ρ_G 为 G 极丝径. 由(6)式可见, $E_{GC} < E_{0GC}$, 其比例系数为 k , 称电场屏蔽因子, 其值随丝距的减小而增大, 随丝径和极间距的增大而增大. 计算表明, 当其他条件不变时, 如果丝距由 0.5mm 增加到 3mm, 则 k 由 0.948 减小到 0.619. 由此可见, 只有当丝距很小时才能用两带电平行板间的电场来近似描述由平板和丝平面所构成区域的电场.

用同样方法可以导出两个相互平行的丝平面, 例如 K 极和 G 极之间的电场屏蔽因子

$$k' = 1 / [1 + a_G / 2\pi S_2 \ln(a_G / 2\pi\rho_G) + a_K / 2\pi S_2 \ln(a_K / 2\pi\rho_K)], \quad (7)$$

其中 ρ_K 为 K 极丝的丝径. 可见在同样条件下 $k' < k$.

3 探测器的工作原理及性能调试结果

3.1 工作原理

当带电粒子穿过 A 极进入探测器灵敏体积内时, 会损失自身的部分能量并在其径迹上产生初始电子—离子对. 电子在强电场作用下向阳极运动过程中会产生电子倍增即雪崩过程, 其所形成的电子云在向阳极运动过程中, 会在各电极上感应产生电荷而形成信号. 在栅极 K 和 G 上产生的信号经延迟线引出可分别得到入射离子的 x 和 y 二维位置, C 极和 A 极信号可用来定时和作能损测量.

3.2 工作气体和工作气压的稳定

采用流气工作方式, 将探测器置于真空度好于 10^{-1}Pa 的真空室(或靶室内)探测器通过连接管道和气体源, 气体自动稳压系统和真空泵相连. 气体稳压系统由绝对气压表(带压阻式传感器)阀门控制单元和电磁阀组成. 当探测器内压力发生变化时, 控制系统会馈送电流信号到电磁阀, 后者可调节进气量从而达到稳压的目的. 对其容积和抽速满足一定关系的系统, 气压的相对变化可控制在 1% 以内.

曾先后用异丁烷、异丁烯、正庚烷和正戊烷调试过探测器的性能, 都得到了令人满意的结果.

3.3 工作电压的选择及位置分辨

有三种工作方式可供选择:

(1) “正向”加电压: 从 C 极到 A 极电压逐渐升高(C: -470V , G: 0V , K: $+80\text{V}$, A: $+350\text{V}$), 雪崩产生的电子将向 A 极运动, 据前所述, 从 C 极将输出一快的正脉冲(上升时间 T_r 为 $3-4\text{ns}$)可作定时信号; A 极输出较慢的负脉冲($T_r \approx 15\text{ns}$)并且较 C 极信号延迟约 40ns , 它可作入射粒子能损信号; 从栅极 G 和 K 输出的都是双极性脉冲, 可用延迟线读出 x 、 y 两维位置.

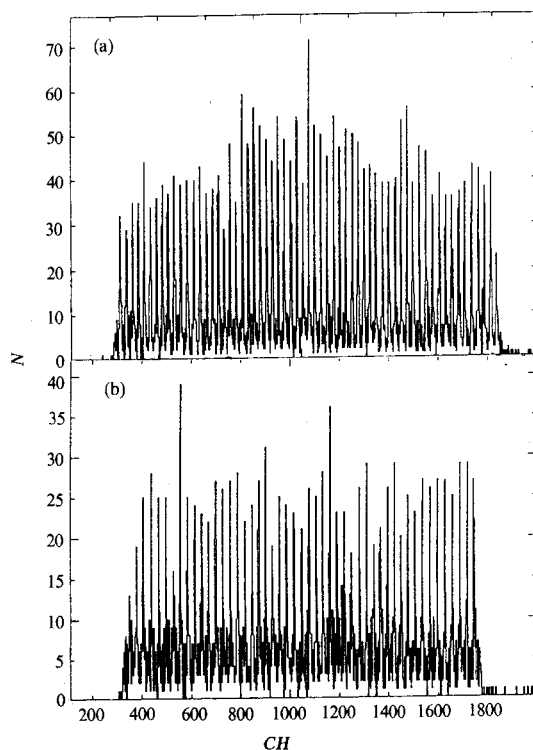


图3 用BPAC测得的位置谱

(a) x 位置; (b) y 位置.

(2) “反向”加电压: 从 A 极到 C 极电压逐渐升高(A: -600V , K: -40V , G: 0V , C: $+180\text{V}$), 此时的电场指向, 电子-离子对运动方向及各电极上产生的脉冲极性和时序正好与第(1)种工作方式相反. 一个典型的位置谱如图3所示. 这两种工作方式, K 极电压的变化将强烈地影响各电极输出信号的幅度.

(3) 各极所加的电压: A: -320V , K: $+320\text{V}$, G: 0V , C: $+460\text{V}$ 这实际上将 BPAC 分成两个独立的探测器 C—G 和 G—K—A. 在 G—K—A 内, G—K 和 K—A 两个区域的电子都向 K 极运动, K 极输出负信号, 因两区域气隙不相等, 信号上升时间会相差几 ns, 但仍可测量位置. A 极和 G 极输出正脉冲, C 极输出负脉冲. 究竟采取

哪种工作方式,要视物理实验的具体情况而定.

3.4 时间分辨

采用飞行时间的方法测量 BPAC 的时间分辨,将一个 PPAC 置于 BPAC 前 60mm 处,让 ^{252}Cf 裂变源的碎片穿过该两个探测器,由 PPAC 拾取开始时间,由 BPAC 拾取停止时间.由测到的飞行时间谱可得到对 ^{252}Cf 较轻一组碎片的时间分辨为 680ps (FWHM),考虑到电子学和零定时探测器的贡献, ^{252}Cf 本身质量和能量的展宽及 BPAC 内部延迟的涨落因素的影响, BPAC 本征时间分辨为 290ps.

3.5 能量分辨

按第(1)种工作方式,由 A 极引出的 ^{252}Cf 的能损分辨 $\delta(\Delta E) / \Delta E \sim 30\%$.

4 BPAC 用于近垒及垒下熔合裂变的实验研究

BPAC 在低、中能重离子核反应机制研究中得到了广泛的应用.例如近垒及垒下重

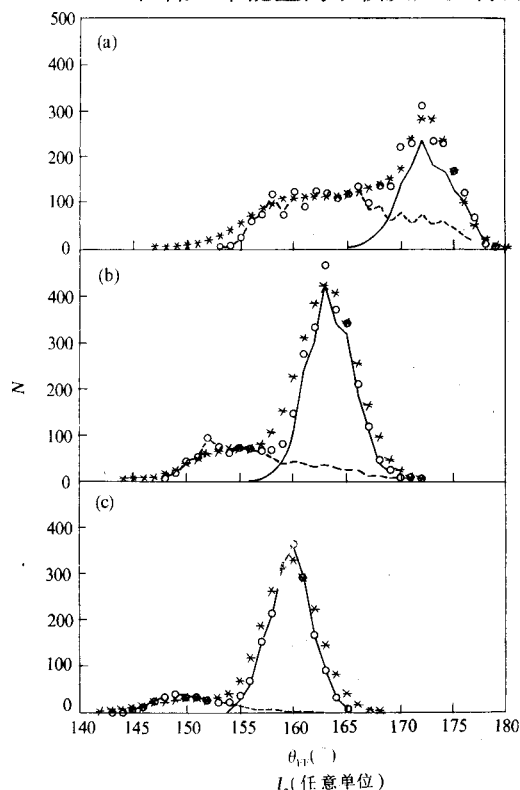


图4 84MeV $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ 不同碎片角区的折叠角分布

*和 \circ 分别是实验点和 Monte-Carlo 模拟点^[3],虚线和实线分别对应于转移裂变和复合核裂变的折叠角模拟分布,(a)、(b)、(c)分别对应于 $10^\circ - 20^\circ$, $40^\circ - 50^\circ$, $70^\circ - 80^\circ$ 的角区.

离子熔合裂变反应机制的研究.中国原子能研究院的张焕乔组 1987 年使用云母探测器测量裂变碎片角分布,发现碎片各向异性随质心系能量的变化在垒下 5MeV 附近呈现一个峰结构异常.实现纯复合核裂变下碎片角分布测量,对于裂变碎片角分布各向异性异常的研究是很重要的,为此目的,可采用角关联技术.本文所述的 BPAC 就特别适用于裂变碎片角关联的测量,而且还可以利用时间信号,通过运动学重构得到有关裂变碎片质量分布的信息.实验是在中国原子能研究院的 HI-13 串列加速器上进行的.使用两个 BPAC,一个在前角,实验系 $10^\circ - 90^\circ$,另一个置于后角, θ_{Lab} 为 $75^\circ - 155^\circ$ 实验中使用两块碎片的时间符合信号作数据获取系统的开门信号,记录两体符合事件,经数据处理表明,实验是成功的,通过折叠角技术区分了转移裂变和复合核裂变,实现在复合核裂变下碎片角分布的测量.图 4 是质心系能量 84MeV 的 ^{16}O 轰击 ^{232}Th 靶在不同碎片角区下的碎片角分布.

由图可见, 折叠角由两种成分组成, 小角对应于转移裂变, 而大角对应于复合核裂变成分. 从图中还可见, 在大角区($70^\circ - 80^\circ$)两种成分的折叠角相差最大, 转移裂变峰在 150° 左右, 而复合核裂变在 160° 左右, 随着碎片角度的减小, 折叠角逐渐向 180° 移动, 两者的差也就越来越小. Monte-Carlo 模拟分布和实验测量分布相一致, 表明以上对两种反应成分的分析是正确的. 到目前为止, 我们已经用 BPAC 成功地测量了 $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$, $^{11}\text{B} + ^{238}\text{U}$, $^{12}\text{C} + ^{237}\text{Np}$, $^{16}\text{O} + ^{237}\text{Np}$, $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ 等反应系统近垒及垒下裂变碎片角分布和角关联. 实验结果表明, 扣除转移裂变, 碎片各向异性异常依然存在, 由此可得出结论: 转移裂变不是观测到的碎片角分布各向异性异常的唯一原因.

实验结果还显示出近垒及垒下熔合裂变碎片角分布各向异性与入射道质量不对称性 α 有关(见文献[4]中图 2). 对于 $\alpha > \alpha_{\text{BG}}$ (临界值) 的反应系统($^{11}\text{B} + ^{238}\text{U}$, $^{11}\text{B} + ^{237}\text{Np}$ 和 $^{12}\text{C} + ^{237}\text{Np}$), 其实验结果与鞍点模型计算结果一致, 说明其熔合裂变过程经历了球形复合核阶段, 可用鞍点过渡态理论描述. $\alpha < \alpha_{\text{BG}}$ 的反应系统($^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$, $^{19}\text{F} + ^{232}\text{Th}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$) 的实验碎片角分布各向异性明显大于鞍点模型的计算值, 说明其熔合裂变过程未经历完全平衡的复合核阶段, 对入射道保持某种记忆. 文献[4]提出的预平衡裂变模型成功地解释了近垒及垒下重离子熔合裂变碎片角分布各向异性异常.

总之, BPAC 已成功地用于近垒及垒下重离子熔合裂变的实验研究, 并为解释碎片角分布各向异性异常提供了可靠的证据.

参 考 文 献

- [1] 张焕乔, 高能物理与核物理, **16**(1992)826.
- [2] M. Morse *et al.*, Methods of Theoretical Physics, Pat **2**(1953)1234.
- [3] 钱 兴, 高能物理与核物理, **18**(1994)385.
- [4] 刘祖华、张焕乔、许谨诚等, 高能物理与核物理, **20**(1996)107.

Bi-dimension Position Sensitive Detector Used in the Study of Fusion Fission of Heavy Ions at the Sub-Coulomb Barrier Energy Region

Tan Jilian Zhang Jinxia Jin Genming

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

Zhang Huanqiao Qian Xing Liu Zuhua Xu Jincheng

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Received 12 December 1995

Abstract

The structure, operation principle and performance of the bi-dimension position sensitive avalanche chamber (BPAC) used in the study of fusion fission induced by heavy ions at the near and sub-Coulomb barrier energy region are described.

The fold angle distribution of fragments in different angle region for 84MeV (E_{cm}) $^{16}\text{O} + ^{232}\text{Th}$ reaction system was obtained by using BPAC, from which the angle distribution of transfer-fission fragments has been distinguished from that of compound nucleus fission fragments. It is thereby certified that transfer-fission is not the reason of anomalous anisotropies of fragment angle distribution. Meanwhile experimental results supported the preequilibrium fission model, in frame of which the anomalous anisotropies of fragment distribution was explained.

Key words fusion fission, position sensitive avalanche chamber, angle distribution of fragments.