

25MeV / u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中轻粒子的在平面和出平面发射*

贺智勇 李祖玉 段利敏 靳根明 吴和宇
戴光曦 李占奎 张保国 文万信 漆玉金

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1995-04-27 收稿

摘 要

利用两裂片符合下的轻粒子测量,研究了 25MeV / u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中轻粒子的在平面和出平面发射. 对于中速 p, d, t, α 粒子, 观测到粒子在平面发射几率增大, 这表明该反应中存在旋转效应. 该现象随着粒子质量增大和碰撞参数增大而变得更加明显. 同时也观测到类弹粒子主要为在平面发射.

关键词 反应平面, 在平面发射, 出平面发射, 旋转效应, 碰撞参数.

1 引 言

近十年来, 中高能重离子碰撞中核物质集体流的研究是一个很热门的课题^[1-3], 人们通过实验测量集体流来提取有关核物态方程和媒介内核子-核子碰撞截面的重要信息^[4,5]. 其中, 核物质在平面流的大小体现了原子核内部吸引的平均场和排斥的核子-核子相互作用之间的竞争. 高能区在平面流为正流, 表示排斥的两体相互作用占主导; 中能区在平面流为负流, 表明吸引的平均场占主导. 在某一能量下在平面流消失(为零), 则说明了平均场和两体相互作用达到平衡. 另一方面, 核物质的出平面流反映了粒子的发射机制. 在高能区观察到出平面发射的粒子多于在平面发射的粒子, 表明了重离子碰撞中的出平面挤出(squeeze-out)效应^[6]. 反之在中能区, 如 35MeV / u $^{40}\text{Ar} + ^{51}\text{V}$ 反应中, 观测到粒子的在平面发射占主导, 这表明参加者部分存在着旋转效应^[7]. 最近的 35—79MeV / u $^{64}\text{Zn} + ^{58}\text{Ni}$ 实验研究表明, 在中能重离子碰撞中, 随着束流能量的增加, 质子和 α 逐渐由在平面发射转向出平面发射, 并在某一能量(约 50—60MeV / u)处, 两者达到一致, 即各向同性发射^[8]. 在 10—35MeV / u 间, 这方面的研究不多. 针对该能量下是否存在旋转效应? 在不同碰撞参数下有何变化等问题, 本文以 25MeV / u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应为例从实验上进行探讨.

* 国家自然科学基金和中国科学院基金资助.

2 实验概况

实验是在兰州 HIRFL 的大散射靶室上进行的, 采用 25MeV / u 的 ^{40}Ar 束轰击 ^{197}Au 靶, 束流强度为 10nA. 在前角区安装了 13 套 $\Delta E-E$ 望远镜探测器阵列, 用来探测带电粒子和轻碎片. 该阵列距靶心 580mm, 阵列中心与束流方向夹角为 20° , 最大夹角 27° , 最小夹角 13° . 阵列中心方位角处于 0° . 其中每套均由一块 $300\mu\text{m}$ 厚的硅片做 ΔE 测量加一块 50mm 厚的 BGO 做 E 测量, 有效探测面积为 $\phi 17\text{mm}$. 实验中采用 $\Delta E-E$ 方法鉴别粒子, 分辨出 p, d, t, α 等轻粒子和 Li, Be, B, C 等轻碎片.

此外在中角 $\theta_{\text{lab}} = 30^\circ - 90^\circ$ 处围绕靶对称地安装了 4 块大面积的位置灵敏 PPAC 探测反应中出射的两裂片. 4 块 PPAC 几乎包围了方位角 φ 从 0° 到 360° , 其中 1 号为 $52^\circ - 128^\circ$, 2 号为 $147^\circ - 210^\circ$, 3 号为 $232^\circ - 308^\circ$, 4 号为 $-26^\circ - 26^\circ$. PPAC 能对碎片进行精确的时间和位置 (r, θ, φ) 测量, 并探测碎片的能损 ΔE .

3 轻粒子的在平面和出平面发射

目前有许多种确定反应平面的方法^[9], 本文采用裂变平面法. 由两个裂片确定的反应平面的方位角 Φ 定义为^[10]:

$$\Phi = \frac{1}{2} (\varphi_i + \varphi_e + 180^\circ), \quad (1)$$

式中 φ_i 和 φ_e 分别为两裂片的方位角. 然后根据轻粒子相对于反应平面的方位角 Φ 来确定粒子是在平面发射还是出平面发射, 即: $|\Phi - 90^\circ| < 25^\circ$ 或 $|\Phi + 90^\circ| < 25^\circ$ 的粒子为出平面发射; $|\Phi| < 25^\circ$ 或 $|\Phi - 180^\circ| < 25^\circ$ 的粒子为在平面发射. 选取 25° 的范围是为了有较好的统计.

图 1(a) 给出了在两裂片符合下 13 单元望远镜测到的 p, d, t, α 的总速度谱, 其中 α 粒子实线的计数除以 4, 以便于和 p, d, t 粒子对比, 速度 Y 定义为:

$$Y = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{1+\beta}{1-\beta} \right]. \quad (2)$$

从图可以清楚地看到, 实验中没有探测到 $Y / Y_p < 0.3$ 的类靶源发射的轻粒子 (Y_p 为弹核速度), 这是由于这部分低能粒子全阻止在 $300\mu\text{m}$ 厚的 ΔE 探测器中. 为了区分类弹碎片出射的轻粒子 (简称类弹粒子) 和中速粒子,

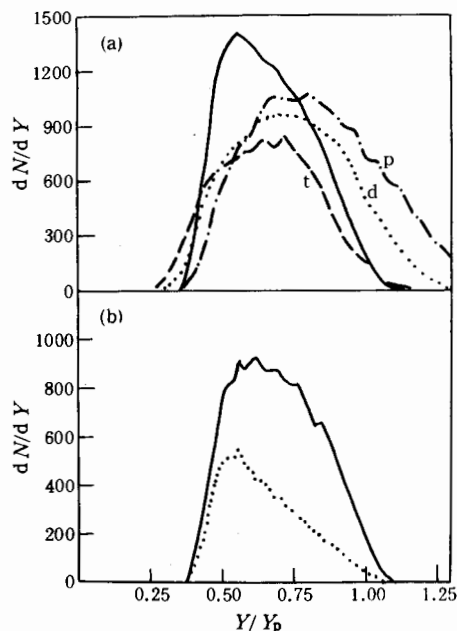


图 1 (a) 两裂片符合下的轻粒子速度谱;
(b) 在平面(实线)和出平面发射(虚线)的 α 粒子速度谱

根据快度把粒子分为两组: 类弹粒子组($Y/Y_p > 0.7$)和中速粒子组($0.3 \leq Y/Y_p \leq 0.7$). 集体流研究中感兴趣的是来自于参加者的中速粒子组, 本文同时也对比地研究类弹粒子组. 图 1(b) 给出了在平面发射和出平面发射的 α 快度谱. 在平面发射的 α 粒子明显地多于出平面发射的 α 粒子, 类弹粒子组更加突出. 为了较详细地研究粒子的在平面和出平面发射规律, 定义出平面率 R 为^[6]:

$$R = \frac{N(90^\circ) + N(-90^\circ)}{N(0^\circ) + N(180^\circ)} = \frac{N_{\text{out}}}{N_{\text{in}}} \quad (3)$$

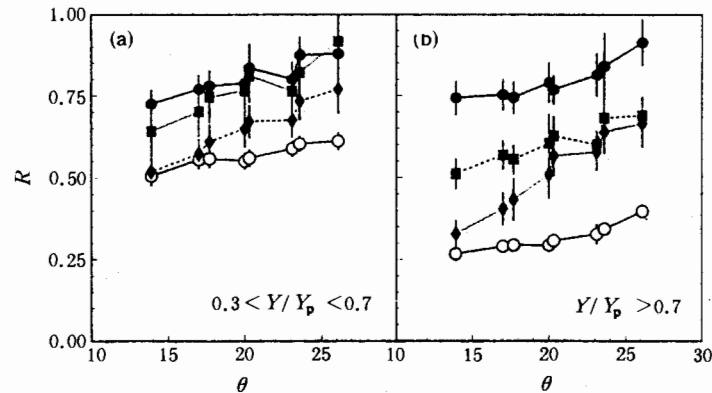


图 2 轻粒子的出平面率 R 随 θ 角的变化规律

● p, ■ d, ◆ t, ○ α

图 2 显示了轻粒子的出平面率随 θ 角的变化规律. 图 2(a) 为中速粒子组, p、d、t、 α 粒子在 $\theta = 13^\circ - 27^\circ$ 处 R 均小于 1, 在平面发射的轻粒子多于出平面发射的轻粒子. 在我们研究的 25MeV/u 能量下, 核相互作用以吸引的平均场占主导. 利用 BUU 方程对中能区 Ar+Al 反应进行的研究表明: 核平均场效应导致核子(质子和中子)在平面发射增多^[1]. 另一方面, 一个带有大角动量的核在退激发射时亦会导致粒子在平面发射增多(旋转效应), 在 35MeV/u 的 Ar+V 反应中已观测到系统的旋转效应导致轻粒子在平面发射增多^[7]. 因此, 我们观测到的轻粒子在平面发射增多, 是由于核内吸引的平均场作用使反应系统围绕着垂直于反应平面的轴旋转, 而导致系统退激时在反应平面内发射大量轻粒子. 这和高能区的挤压现象相反, 高能区反应系统高度压缩导致出平面发射的粒子增多.

图 2(a) 清楚地显示出随着粒子质量的增重, R 变小, 旋转效应增强. 轻粒子的在平面集体流研究中也同样观测到了这种现象, 即粒子越重在平面集体流越强^[1,2]. 这是由于轻粒子在核内的运动包括随机的热运动和有序的集体运动, 随机的热运动削弱了轻粒子的集体运动. 粒子越重, 热运动的影响越小, 观测到的集体效应越强. 因此, α 粒子比质子更适合于研究反应中的集体运动. (a) 图中亦显示出随着 θ 角增大, R 值稍有增加.

图 2(b) 为类弹粒子出平面率 R 的变化规律. 与中速粒子比, 类弹粒子的 R 值更远离 1, 即类弹粒子主要集中在反应平面内发射, 出平面发射较少, 类弹粒子的这种在平

面发射占主导现象, 是由于类弹碎片没有和靶融合, 而在反应平面内发射出轻粒子. 随着粒子变轻, 类弹粒子的出平面发射有所增加, α 粒子的 R 值为 0.3, 而质子的 R 值达 0.8. 这同样也是由于轻粒子的随机的热运动和各向同性蒸发的影响, 粒子越轻, 出平面蒸发的轻粒子越多. 在 25MeV /u Ar+Au 粒子-粒子关联实验中, 我们观测到类弹碎片中有处于激发态的不稳定轻核(如: 处于 3.04MeV 激发态的 ^8Be 核和处于 4.63MeV 激发态的 ^7Li 核), 表明尽管类弹碎片没有和靶融合, 但内部同样被激发了, 即类弹碎片中的轻粒子也有强烈的随机热运动.

4 粒子各向异性发射随碰撞参数的变化

本文利用线性动量转移(LMT)来估计碰撞参数, 周边碰撞中 LMT 较小并趋于 0, 中心碰撞中 LMT 较大并趋于 1. 每个事件的 LMT 值由两裂片的质量、速度和方向来得到. 图 3 显示了 LMT 分别为 0.45, 0.6 和 0.8 时的 α 粒子快度谱. 在中心碰撞下, α 粒子主要来自参加者源的中速粒子和前平衡发射粒子, $Y/Y_p > 0.7$ 的类弹粒子较少. 在半周边碰撞下(LMT=0.45), 类弹粒子明显地增多. p 和 α 粒子在不同 LMT 值下的比值 R 显示在图 4 中, d、t 的 R 值因介于 p 和 α 之间而未列出. 由于 PPAC 探测角度范围的限制, LMT < 0.4 的周边碰撞事件测得较少. 本文主要分析半周边、半中心和中心碰撞事件.

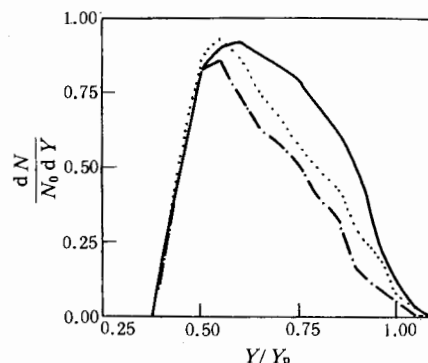


图 3 不同 LMT 值下的 α 粒子快度谱
— LMT=0.45,LMT=0.6,
- · - · - LMT=0.8.

对于中速粒子(图 4(a)), 在中心碰撞中(LMT ≥ 0.75), R 值约在 1 左右, 即反应系统不存在旋转现象, 粒子是方位角各向同性发射. 随着 LMT 的变小(碰撞参数增大),

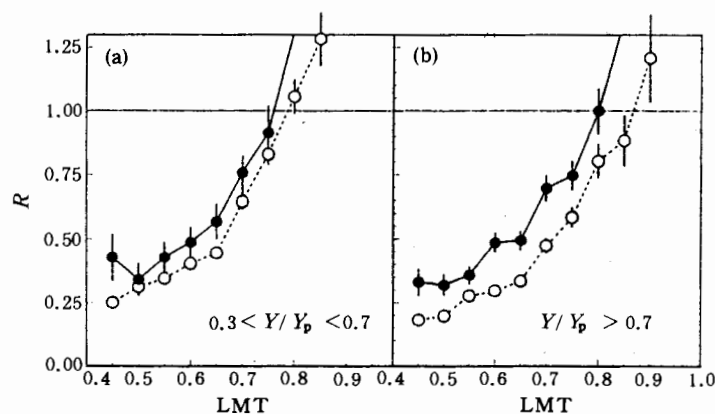


图 4 出平面率 R 随线性动量转移的变化

● p, ○ α

R 值急剧下降, 表明随着碰撞参数的增大系统的旋转效应增强, 这是因为碰撞参数增大, 系统的转动能增大. 当 $LMT < 0.6$ 时, $R < 0.5$, 粒子主要为在平面发射, 反应系统在半中心半周边碰撞中存在着很强的旋转效应. 旋转效应随碰撞参数的这一变化规律与轻粒子的在平面集体流类似. 在中心碰撞中轻粒子的集体流很小, 随着碰撞参数增大集体流增大, 在半中心半周边碰撞中集体流最大, 在周边碰撞中又变小了. 因此, 半中心半周边碰撞下的核反应最适合于对集体流和旋转效应的研究.

$Y/Y_p > 0.7$ 的高速粒子(图 4(b)) 在中心碰撞下主要来自于前平衡发射的高能粒子, 类弹粒子较少, R 值约在 1 附近, 粒子近似地各向同性发射. 随着碰撞参数增大, 类弹粒子明显增多, 在半周边碰撞中($LMT < 0.45$), α 粒子的出平面发射率小于 0.2, 即 α 粒子几乎全为在平面发射.

5 结 论

利用 4 块 PPAC 探测裂片和 13 单元望远镜阵列探测轻粒子, 测量了 $25\text{MeV}/u$ $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应裂变过程中轻粒子的出平面发射与在平面发射之比率. 实验观测到随着碰撞参数的增大, 类弹碎片发射的粒子增多, 且它们主要集中于在平面发射. 对于来自参加者源的中速粒子, 由于发射源在反应平面内的旋转而导致在平面发射粒子增多. 在中心碰撞中, 反应系统的旋转效应不明显, 随着碰撞参数增大, 旋转效应增强, 且随着粒子质量的增大, 旋转效应更加强烈, 即 α 粒子的旋转效应强于质子.

参 考 文 献

- [1] J. P. Sullivan *et al.*, *Phys. Lett.*, **B249** (1990) 8.
- [2] 贺智勇等, 高能物理与核物理, **18** (1994) 800.
- [3] 贺智勇, 核物理动态, **12** (1995) 26.
- [4] 贺智勇等, *Chinese Journal of Nuclear Physics*, **16** (1994) 313.
- [5] H. M. Xu, *Phys. Rev. Lett.*, **67** (1991) 2769.
- [6] H. H. Gutbrod *et al.*, *Phys. Rev.*, **C42** (1990) 640.
- [7] W. K. Wilson *et al.*, *Phys. Rev.*, **C41** (1990) R1881.
- [8] R. Popescu *et al.*, *Phys. Lett.*, **B311** (1994) 285.
- [9] 贺智勇等, *Chinese Journal of Nuclear Physics*, **16** (1994) 207.
- [10] M. B. Tsang *et al.*, *Phys. Rev.*, **C44** (1991) 2065.
- [11] Y. G. Ma *et al.*, *Phys. Rev.*, **C48** (1993) 1492.

In-Plane and Out-of-Plane Emission of Light Charged Particles From $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ Collisions at 25MeV / u

He Zhiyong Li Zuyu Duan Limin Jin Genming Wu Heyu
Dai Guangxi Li Zhankui Zhang Baoguo Wen Wanxin Qi Yujin

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

Received 27 April 1995

Abstract

The in-plane and out-of-plane emission of light particles from $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ collisions at 25MeV / u was studied by means of coincidence measurement of light particles with two fission fragments. An in-plane enhancement was observed for mid-rapidity p, d, t, α particles, indicating a rotation effect in this reaction system. This enhancement becomes more obvious with the increase of mass of the particles, or with the increase of the impact parameters. It was also found that in-plane emission is dominant for projectile-like particles.

Key words reaction plane, in-plane emission, out-of-plane emission, rotation effect, impact parameter.