

核-核碰撞中不稳定轻核的 方位角各向异性发射^{*}

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

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(1995 年 6 月 22 日收到; 1995 年 7 月 24 日收到修改稿)

利用符合的粒子-粒子关联测量, 研究了 $25 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中不稳定轻核的在平面发射和出平面发射. 对于中速的不稳定轻核, 观测到在平面发射几率增大, 这表明该反应系统中存在旋转效应. 该现象随碰撞参数增大更为强烈, 而随着不稳定核激发态能量的升高稍有变弱.

PACC: 2586; 2475; 2570

1 引 言

中能核-核碰撞研究是当前核物理研究的前沿领域. 中能区 (10—100 MeV/u) 核相互作用逐渐由吸引的平均场占主导过渡至排斥的核子-核子相互作用占主导, 这更有利于人们深入了解核物质在高激发高压下的特性. 中能区核-核碰撞中的衰变产物, 不仅有 n, p, d, t, α 等轻粒子, 还有大量中等质量碎片 (IMF), 也包括不稳定轻核. 这些核子和集团在反应平面内的集体运动正好体现了核相互作用的过渡性, 对它们的研究能提供有关核-核碰撞动力学、核物态方程 (EOS) 和媒质内核子-核子碰撞截面等重要信息^[1,2]. 最近, 人们通过测量在平面流^[3]和出平面流 (即方位角分布)^[4], 大量研究了轻粒子的集体运动. 其中, 中高能区排斥的核子-核子相互作用占主导, 在平面流为正流; 中低能区吸引的平均场作用占主导, 在平面流为负流. 而轻粒子的出平面方位角分布则表现为: 中能区粒子的在平面发射占主导, 而高能区粒子的出平面发射占主导.

然而, 对不稳定轻核 (如 $^6\text{Li}^*, ^7\text{Li}^*, ^8\text{Be}^*$ 等) 的在平面流和出平面流的研究却很少. 由于不稳定轻核会迅速衰变成几个稳定粒子而无法在实验中直接探测到, 至今国际上仍无这方面的实验研究. 同时, 不稳定轻核实际上是处于激发态的 IMF, 系统地研究它们的在平面和出平面发射也可帮助我们进一步探讨高激发核物质的衰变性质、IMF 和多重碎裂的发射机制、甚至奇异核的发射机制等. 本文通过用裂变碎片符合下的粒子-粒子关联方法, 研究了不稳定轻核的在平面发射和出平面发射.

^{*} 国家自然科学基金和中国科学院基金资助的课题.

2 实验概况

实验是在兰州重离子加速器(HIRFL)的大散射靶室上进行的,采用 25 MeV/u 的 ^{40}Ar 束轰击 ^{197}Au 靶. 实验中束流强度 10 nA. 在前角区安装一套由 13 个 ΔE -E 望远镜组成的探测器阵列关联测量不稳定轻核衰变成的两个粒子. 该阵列距靶心 580 mm, 阵列中心与束流方向夹角 20° , 最大夹角 27° , 最小夹角 13° . 阵列中心方位角处于 0° . 其中每一套望远镜均由一块 300 μm 厚的硅片作 ΔE 测量加一块 50 mm 厚的 BGO 做 E 测量, 有效探测面积为 $\phi 17$ mm. 相邻两套探测器的夹角(相对于靶子)为 3° , 最远两套的夹角 13° . 实验中采用 ΔE -E 方法鉴别粒子, 结果表明该阵列能分辨出 p, d, t, α 等轻粒子和 Li, Be, B, C 等轻碎片.

此外中角 θ_{lab} 在 30° 至 90° 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° 至 128° , 2 号为 147° 至 210° , 3 号为 232° 至 308° , 4 号为 334° 至 26° . PPAC 能对碎片进行精确的时间和位置(r 、 θ 、 φ)测量, 并能探测碎片的能损 ΔE . 实验中只记录和分析四体事件: 两个轻粒子和两个裂变碎片.

3 类弹碎片和中速碎片中的不稳定轻核

由于 13 单元望远镜阵列处于 $\theta_{\text{av}} = 20^\circ$, 探测到的碎片中既有能量高的类弹碎片, 也有能量较低的中速碎片. 我们根据两关联粒子的能量和, $E_1 + E_2$, 把碎片分为两组: 中速碎片 ($0.25 \leq \frac{E_1 + E_2}{25(A_1 + A_2)} \leq 0.6$) 和类弹碎片 ($0.6 < \frac{E_1 + E_2}{25(A_1 + A_2)} < 1$). 其中, A_1 和 A_2 分别为两粒子的质量数, 25(MeV/u) 为束流能量. 下面便对比地研究这两组碎片中不稳定轻核的各向异性发射.

目前有多种确定反应平面的方法^[5], 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^[6]

$$\Phi = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2 + 180^\circ), \quad (1)$$

此处 φ_1 和 φ_2 分别为两裂片的方位角, 然后根据关联粒子对相对于反应平面的方位角 φ 来确定粒子对为在平面发射还是出平面发射, 即 $|\varphi \pm 90^\circ| < 15^\circ$ 的粒子为出平面发射; $|\varphi| < 15^\circ$ 或 $|\varphi - 180^\circ| < 15^\circ$ 的粒子为在平面发射.

图 1 显示了在平面和出平面发射的 d- α 关联函数谱. 其中, 两粒子的相对动量 $q = \mu |p_2/m_2 - p_1/m_1|$, ($\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$, m_1 , m_2 和 p_1 , p_2 分别为两粒子的质量和动量). 符合谱中 $q \sim 40$ MeV/c 的峰对应于 2.186 MeV 的 ^6Li 激发态的衰变. 为了从符合谱中扣除本底来提取不稳定核 $^6\text{Li}^*$ 的产额, 定义两粒子关联函数 $R(q)$ ^[7] 为

$$\sum Y_{12}(q) = C_{12}[1 + R(q)] \sum Y_1(p_1) Y_2(p_2), \quad (2)$$

其中, $Y_i(p_i)$ 为单举产额, $\sum Y_1(p_1) Y_2(p_2)$ 表示归一化函数. 对于在平面和出平面发射的

粒子对,使用相同的归一化函数. C_{12} 为归一化系数,保证在较大的 q 值(无关联)时 $R(q) = 0$. 由于粒子的方位角各向异性发射, $C_{12}^{\text{out}} \neq C_{12}^{\text{in}}$. 由此,不稳定核的产额 Y_c 为

$$Y_c = Y_{12} - C_{12}[1 + R_b(q)] Y_1 Y_2, \quad (3)$$

此处, $R_b(q)$ 为本底关联函数. 图 1(b) 显示了在平面发射的 $d-\alpha$ 关联函数, 图中的虚线即为本底关联函数 R_b . 而出平面和在平面发射的本底产额 $Y_b = C_{12}[1 + R_b(q)] Y_1 Y_2$ 则见图 1(a) 的虚线所示.

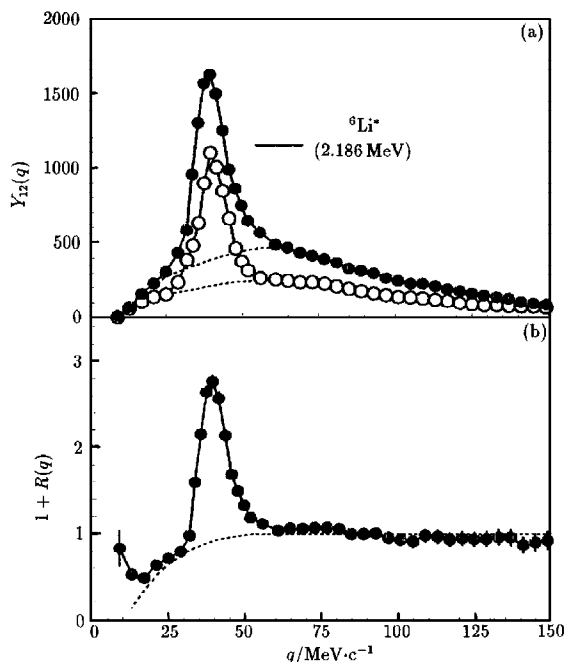


图 1 (a) 在平面发射(实心圆点)和出平面发射(空心圆点)的 $d-\alpha$ 符合谱; (b) 在平面发射的 $d-\alpha$ 关联函数. 图中虚线为本底谱, 实线为实验点间的连线

从图 1 中可以看到, 在平面发射的 $^6\text{Li}^*$ 峰明显高于出平面发射峰. 参照轻粒子的研究^[4,8], 定义不稳定核的出平面发射与在平面发射比为

$$R = \frac{\sum Y_c^{\text{out}}}{\sum Y_c^{\text{in}}} = \frac{\sum (Y_{12}^{\text{out}} - Y_b^{\text{out}})}{\sum (Y_{12}^{\text{in}} - Y_b^{\text{in}})}. \quad (4)$$

图 2 显示了比值 R 随不稳定轻核的激发态能量 E_{un}^* 的变化趋势. 图中 ^8Be 基态、 ^9Be 激发态(2.43 MeV)和 ^8Be 激发态(3.04 MeV)的产额比取自 $\alpha-\alpha$ 关联函数($^8\text{Be}_{\text{g.s.}} \rightarrow \alpha + \alpha$, $^9\text{Be}^* \rightarrow \alpha + \alpha + n$, $^8\text{Be}^* \rightarrow \alpha + \alpha$), 而 ^7Li 激发态(4.63 MeV)来自 $t-\alpha$ 关联测量($^7\text{Li}^* \rightarrow \alpha + t$). 对于中速的不稳定轻核(实心圆点), R 值均小于 1, 说明在平面发射的不稳定核明显多于出平面发射数(约两倍). 在我们研究的 25 MeV/u 能量下, 核相互作用以吸引的平均场占主导. 对核子(质子和中子)的理论研究表明^[9], 核平均场效应导致核子

的在平面发射增多. 此外, 一个带有大角动量的核, 在退激发时, 亦会导致粒子在平面发射的增多(旋转效应), 在 35 MeV/u 的 $\text{Ar} + \text{V}$ 反应中已观测到系统的旋转效应导致轻粒子的在平面发射增强^[4]. 因此, 我们观测到的不稳定核在平面发射增强, 是由于核内吸引的平均场作用使反应系统发生旋转, 系统退激时在反应平面向方向发射大量不稳定核. 相反, 在 100 MeV/u 以上)观测到轻粒子的出平面发射增多^[8], 这是由于反应系统高度压缩导致挤压现象. 高能区不稳定核是否也能观测到挤压现象, 如何随能量从旋转现象过渡至挤压现象, 有待于进一步的研究.

从图 2 可见, 比值 R 随不稳定核的质量增加变化不大. 但轻粒子(p, d, t, α)的在平面流和出平面流随着粒子质量的减小而显著变小^[3,4,8]. 这是由于核内随机的热运动削弱了轻粒子的这种集体运动, 粒子越重, 热运动的影响越小^[3]. 因此, IMF 和不稳定轻核适合于研究集

体流,而轻粒子更适合于研究热运动.图2亦显示了中速不稳定核的 R 值随激发态能量的增加而略有增大,即出平面发射数略有增多.这可能说明了处于高激发态的不稳定核来自于反应系统衰变的较早期.进一步的解释有待于理论的深入研究.

对于类弹的不稳定轻核, R 约为 0.3 左右(图2中空点),在平面发射占绝对主导,而且 R 值随着激发态能量的升高,有保持不变的趋势.由于类弹碎片没有和靶核熔合,它们的出射方向应该在反应平面内.类弹碎片中观测到高激发态的不稳定轻核,说明类弹碎片内部也受到靶核的作用而被激发.

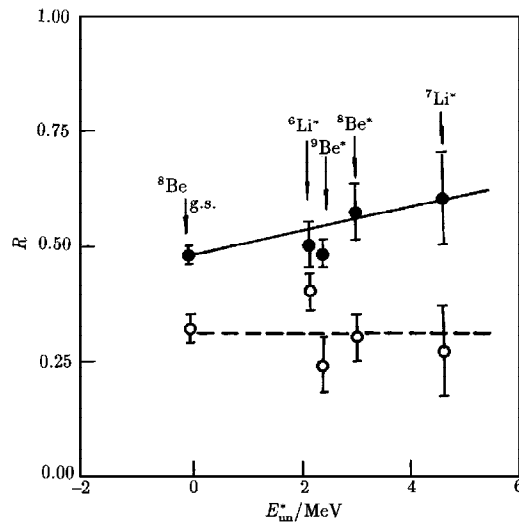


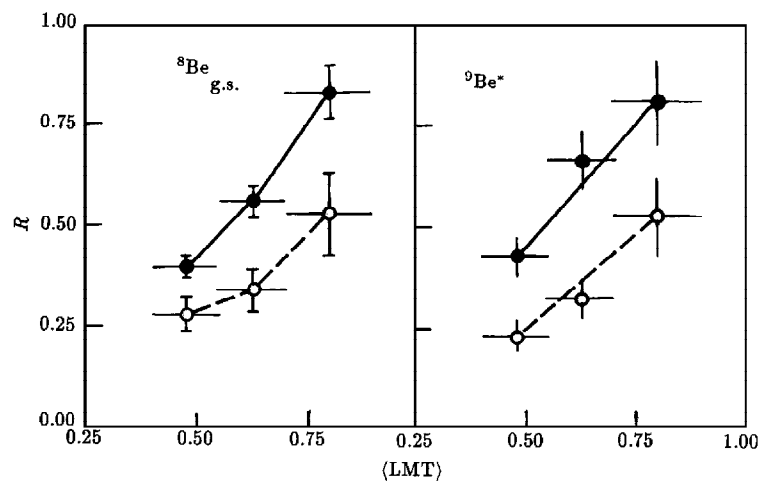
图2 出平面发射与在平面发射的比率 R 随不稳定核的激发态能量 E_{cm}^* 的变化

4 中心碰撞和周边碰撞下的不稳定轻核

轻带电粒子的在平面流和旋转效应(或挤压效应)随碰撞参数变化而变化.为了研究不稳定轻核的旋转效应随碰撞参数的变化,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 根据把两裂片的速度和方向转换成反冲速度来得到^[10].由于 PPAC θ 角的限制,实验只探测了 $\text{LMT} \geq 0.4$ 的中心碰撞和半周边碰撞事件.

图3显示了不稳定核 $^8\text{Be}_{\text{g.s.}}$ 和 $^9\text{Be}^*$ 的 R 值随 LMT 的变化趋势.对于中速不稳核(实心圆点),中心碰撞($\text{LMT} \geq 0.7$) R 值接近于 1,即不稳定核近似地各向同性发射,反映了中心碰撞下反应系统的旋转效应较小.随着 LMT 的减小(即碰撞参数的增大), R 值迅速下降.在半周边碰撞下($\text{LMT} = 0.4-0.55$), R 约为 0.4,在平面发射的不稳定核占主导.对于类弹不稳核(空心圆点), R 值随着 LMT 的增加也略有增加.

随着碰撞参数的增大,中速不稳核的 R 值减小,系统的旋转效应变得更强烈.这是由于碰撞参数越大,系统的转动惯量和角动量越大,而导致旋转效应更强烈.不稳核的这一规律与轻粒子的在平面流和出平面流类似,即在中心碰撞下轻粒子的集体流很小,随着碰撞参数增大,集体流增大.在半周边碰撞中集体流最大,在周边碰撞下集体流又变小了.因此,半周边碰撞下的核反应,最适合于研究集体流和旋转效应.

图3 比值 R 随 LMT 的变化

5 结 论

利用 4 块 PPAC 探测两裂片和 13 单元望远镜阵列关联测量不稳定轻核衰变成的两个轻粒子,研究了 $25\text{ MeV/u } {}^{40}\text{Ar} + {}^{197}\text{Au}$ 反应中不稳定轻核的在平面发射与出平面发射的比率 R . 实验观测到类弹不稳核主要集中于在平面发射,且比值 R 随不稳核的激发态能量变化不大. 对于中速的不稳核,由于发射源在反应平面内的旋转而导致在平面发射增多. 在中心碰撞下,反应系统的旋转效应较小,随着碰撞参数增大,旋转效应增强. 旋转效应随着不稳核的质量变化不大,而随着不稳核的激发态能量增加而略有减弱.

- [1] H.M. Xu, *Phys. Rev. Lett.*, **67**(1991), 2769.
- [2] Zhi-yong He *et al.*, *Chinese Journal of Nuclear Physics*, **16**(1994), 313.
- [3] J.P. Sullivan *et al.*, *Phys. Lett.*, **B249**(1990), 8.
- [4] W.K. Wilson *et al.*, *Phys. Rev.*, **C41**(1990), R1881.
- [5] Zhi-yong He *et al.*, *Chinese Journal of Nuclear Physics*, **16**(1994), 207.
- [6] M.B. Tsang *et al.*, *Phys. Rev.*, **C44**(1991), 2065.
- [7] J. Pochodzalla *et al.*, *Phys. Rev.*, **C35**(1987), 1695.
- [8] H.H. Gutbrod *et al.*, *Phys. Rev.*, **C42**(1990), 640.
- [9] Y.G. Ma *et al.*, *Phys. Rev.*, **C48**(1993), R1492.
- [10] G. Klotz-Engmann *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A499**(1989), 392.

AZIMUTHALLY ANISOTROPIC EMISSION OF UNSTABLE LIGHT NUCLEI IN NUCLEUS-NUCLEUS COLLISIONS

HE ZHI-YONG LI ZU-YU JIN GEN-MING DUAN LI-MIN DAI GUANG-XI
WU HE-YU ZHANG BAO-GUO WEN WAN-XIN QI YU-JIN LUO QING-ZHEN

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

(Received 22 June 1995; revised manuscript received 24 July 1995)

ABSTRACT

The in-plane and out-of-plane emission of unstable light nuclei was measured in the reaction of $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ at energy 25 MeV/u by means of extensive particle-particle correlation. An in-plane enhancement is observed for mid-rapidity unstable light nuclei, indicating a rotational effect exists in this reaction system. This in-plane enhanced emission becomes stronger with increasing of impact parameter, but becomes a little weaker with increasing of energy of the excited state.

PACC: 2586; 2475; 2570