

# 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应碎片和 轻带电粒子的方位角关联\*

王金川 詹文龙 郭忠言 郝鸿飞 周建群 赵有雄

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 在 25MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$  反应的在平面和出平面大角度关联测量中,提取了碎片和  $\alpha$  粒子之间的方位角关联函数和方位角非对称性因子.  $\phi = 90^\circ$  时,方位角关联函数呈现为最小值,表明在集体类转动效应影响下,反应产生的轻带电粒子和碎片优先在反应平面内发射. 随着关联对质量的增加,在平面关联粒子的发射相对于束流轴不对称性逐渐增大. 随着关联对质量的增加,相继衰变和粒子末态相互作用对  $\phi = 0^\circ$  的关联粒子对方位角关联函数值的影响逐渐降低并直至消失,同时集体转动效应增强,方位角非对称性增加.

**关键词** 碎片 轻带电粒子 方位角关联

## 1 引言

中能区是一个由吸引的平均场相互作用起主要作用向排斥的核子-核子相互作用占主导地位的过渡区域. 在几十 MeV/u 中能区的低端,平均场相互作用仍然起着十分重要的作用. 周边碰撞和半周边半中心碰撞的碎片发射中既含有类似于低能时的转移反应、非弹性碰撞及深部非弹性碰撞的成分,又含有类似于高能时的各种碎裂机制成分. 与低能情况相比,出射反应产物的多重性增加,原始激发产物通过发射中子、轻带电粒子等方式退激<sup>[1,2]</sup>. 随着实验探测设备的进一步完善,特别是  $4\pi$  探测器的投入使用,人们更加深入地研究反应机制的演化过程,符合测量也扩展到了出平面-在平面碎片-轻粒子、碎片-碎片甚至  $4\pi$  立体角内的反应产物之间<sup>[3]</sup>. 人们在方位角关联的符合实验中观测到了平均场引起的发射体的类转动集体效应导致反应平面内的粒子优先发射的现象<sup>[4-6]</sup>. 随着入射能量的增加,核子-核子相互作用越来越不受 Pauli 不相容原理的影响,方位角各向分布从各向异性逐渐趋于各向同性<sup>[7]</sup>. 当入射能量更高时,核子-核子相互作用占主导地位,碰撞时核受到高度压缩,出现了出平面挤出效应(Squeeze-Out Effect),使出平

1999-12-30 收稿

\* 国家自然科学基金资助(19475054)

面发射的粒子多于在平面发射的粒子<sup>[8]</sup>. 这表明反映集体运动的方位角关联可以给出过渡能区重离子反应机制变化的重要信息<sup>[4-11]</sup>. 理论上人们用多种理论模型(如扩展经典动力学模型、BUU模型等)对中能区低端方位角分布的各向异性特征进行了研究<sup>[5,9,10]</sup>. 上述这些理论研究使我们对中能区重离子核反应的出射粒子方位角非对称性的动力学来源及其它反应机制有了进一步的了解.

本实验对于 25MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$  反应体系, 通过在平面和出平面的  $\alpha$  粒子和碎片关联符合测量, 提取了方位角关联函数, 给出了方位角非对称因子与关联粒子质量的关系, 以进一步了解非平衡的出射成分和反应平面的关系, 研究在平面与出平面粒子发射分布规律, 探讨它们的动力学来源.

## 2 实验简况

实验是在兰州重离子加速器(HIRFL)的 TR4 终端上完成的. 使用 25MeV/u 的  $^{40}\text{Ar}$  轰击厚度为  $3.936\text{mg}/\text{cm}^2$  的  $^{115}\text{In}$  靶. 束流强度为 10—15nA. 此次实验在前中角区安排了 6 套多叠层望远镜用于测量出射的碎片和轻带电粒子, 实验总体布局和探测器的详细构成见文献[12,13]. 与本文有关的探测器安排如图 1 所示. 对于所有的符合事件, 以多叠层粒子探测器 PSD1 所记录的  $\alpha$  粒子或碎片为符合的基准, 将 PSD1 探测器方向和束流轴构成的反应平面的方位角定义为  $\phi = 0^\circ$ ; 则在反应平面内和 PSD1 在束流轴两侧对称放置的 PSD2 所探测到的符合粒子的方位角为  $\phi = 180^\circ$ ; 相应地, 出平面粒子探测器 PHI 所记录到的符合粒子方位角为  $\phi = 90^\circ$ . 这 3 组探测器的探测极角都安排为  $\theta = 15^\circ$ , 都处于大于擦边角( $\theta_{gr} = 6.5^\circ$ )的中角区, 此角度下的准弹和熔合产物很少, 大部分是来自于参加者的中速成分或深部非弹性碰撞机制的耗散碎裂碰撞产物, 适合于方位角关联中非平衡粒子的发射研究.

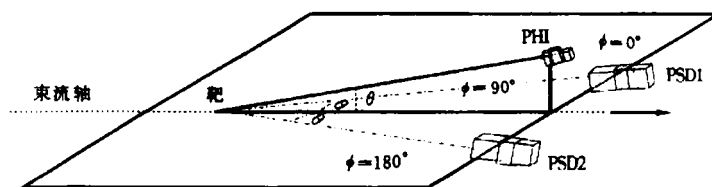


图1 实验装置示意图

## 3 碎片和轻带电粒子的在平面和出平面大角度关联

碎片-轻粒子、碎片-碎片之间的方位角关联对集体运动非常灵敏, 是一个研究出射粒子发射机制的重要观察量<sup>[4,5,7,9,10,14]</sup>. 方位角关联一般通过提取粒子的方位角关联函数进行研究. 根据图 1 探测器的实际安排, 粒子 1 和 2 之间方位角关联函数采取如下形式<sup>[5,14]</sup>:

$$R_c(\theta_1, \theta_2, \phi_1 - \phi_2) = \frac{\sigma(1,2)}{\sigma(1)\sigma(2)} = \frac{\int_1 \int_2 dE_1 dE_2 \sigma_{12}(E_1, E_2, \theta_1, \theta_2, \phi_1 - \phi_2)}{\int_1 dE_1 \sigma_1(E_1, \theta_1) \int_2 dE_2 \sigma_2(E_2, \theta_2)}, \quad (1)$$

积分号里  $\sigma_{12}(E_1, E_2, \theta_1, \theta_2, \phi_1 - \phi_2) = \frac{d^4 \sigma_{12}}{dE_1 d\Omega_1 dE_2 d\Omega_2}$ ;  $\sigma_1(E_1, \theta_1) = \frac{d^2 \sigma_1}{dE_1 d\Omega_1}$ ;  $\sigma_2(E_2, \theta_2) = \frac{d^2 \sigma_2}{dE_2 d\Omega_2}$ . 这里  $\sigma(1)$  和  $\sigma(2)$  代表粒子 1, 2 的单举截面(产额);  $\sigma(1, 2)$  表示粒子 1, 2

间相应的符合截面(产额), 能谱积分的下限在图 2 的图注中给出. 由于在式(1)中分子分母同时出现某一特定组合的符合和单举数据, 故诸如探测器的放置位置、立体角及能量刻度等因素所带来的实验不确定性不影响方位角关联函数  $R_c$  的结果, 这些因素带来的误差可以忽略不计,  $R_c$  的误差主要来自截面(产额)数据的实验统计误差, 为 10% 以下.

在图 2, 3 中给出了  $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$  反应的碎片 ( $Z_f = 3-15$ ) 与  $\alpha$  粒子的方位角关联函数. 在图 2 中,  $\theta_f = 15^\circ$ ,  $\phi_f = 0^\circ$ , 与之关联的  $\alpha$  粒子的  $\theta_\alpha = 15^\circ$ ,  $\phi_\alpha$  分别取  $0^\circ, 90^\circ$  及  $180^\circ$ . 图 3 中  $\theta_\alpha = 15^\circ$ ,  $\phi_\alpha = 0^\circ$ ,  $\phi_f$  分别取  $0^\circ, 90^\circ$  及  $180^\circ$ . 由于出平面探测器 PHI 的构型及探测器的面积大小与在平面探测器 PSD 有所差别, 故在做关联函数  $R_c$  及下面求方位角非对称性  $A_\phi$  时必须进行几何探测效率和立体角的校正.

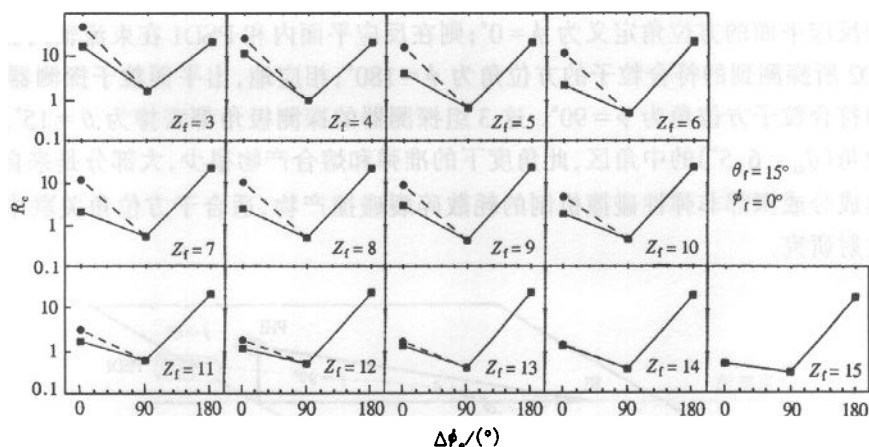


图 2 按式(1)定义的与碎片关联的  $\alpha$  粒子的  $R_c$  随  $\phi_\alpha$  的变化关系

粒子能量积分阈:  $E_\alpha > 18.5\text{MeV}$ ,  $\frac{E_f}{2Z_f} > 4.5\text{MeV}$ .

---●--- 能量积分时不附加额外条件, —■— 能量积分时外加相对动能的选择条件.

在文献[15]中我们研究了在邻近小角度几何条件下碎片和轻粒子的能量关联, 观察到了相继衰变现象的存在. 由于  $R_c$  受粒子非束缚态系统的相继衰变及末态相互作用影响后会发生变化和偏离, 特别是当两粒子的相对动量较小的时候更是如此<sup>[5,16]</sup>. 故对图 2, 3,  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = 15^\circ$  的 PSD1 探测器中  $Z_f = 3-15$  的碎片和后面的 CsI(Tl) 阵列中  $\alpha$  粒子之间的  $R_c$ , 在分析处理时分了两种情况, 一种是在能量积分时不附加额外的条件, 得到的结果如图中虚线连接的实心圆点所示; 另一种情况是在能量积分时通过在相对动能谱中

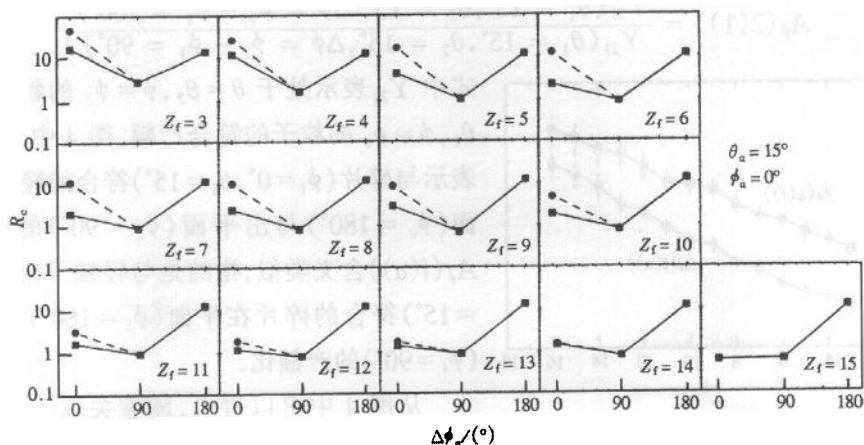


图 3 与  $\alpha$  粒子关联的碎片的  $R_c$  随  $\phi_i$  的变化关系

---●--- 能量积分时不附加额外条件, —■— 能量积分时外加关联粒子的相对动能的选择条件.

附加粒子间相对动能的选择条件, 排除与相继衰变及末态相互作用相联系的那些相对动能值, 得到的结果用实线连接的实心方点所示. 根据  $\alpha$  粒子和碎片相对动能谱所作的选择条件为  $E_{rel} > E_0$ ,  $E_0$  对  $Z_f = 3-7$  的碎片分别等于 5.0, 4.5, 6.8, 7.0, 6.0 MeV.

图 2, 3 的轻粒子和碎片的  $R_c$  都是出平面  $\phi = 90^\circ$  时最小, 表明轻粒子和碎片优先在反应平面内发射, 这是核内平均场引起的集体转动效应起作用的结果, 相互吸引的平均场作用使反应区域围绕着垂直于反应平面的轴旋转, 在旋转过程中, 反应的各个阶段产生的粒子在反应平面内的发射占优势. 这与高能时反应系统受到压缩后出平面发射粒子增多的挤出效应正好相反. 随着关联粒子对质量的增大, 在平面与出平面的关联函数值差别加大, 在平面发射的轻粒子和碎片的数目占的比重越大, 集体转动效应越明显, 粒子的方位角各向异性发射的特征愈突出. 对比两图可以看到, 当固定碎片时, 与碎片符合的轻粒子的方位角各向异性发射的特征比固定轻粒子时与轻粒子符合的碎片的相应特征更加明显. 图 2 还显示出在反应平面内束流轴两侧的  $\alpha$  粒子, 随着关联碎片的  $Z_f$  的增大, 从左右两边粒子发射截面处于同一数量级逐渐变化到粒子越来越倾向于向与碎片相反的一侧发射截面占优势, 这与文献 [17, 18] 以束流轴为基准, 在碎片同异侧与碎片符合的中角区轻粒子产额比存在着左右不对称性的现象相一致. 在图 3 中与轻粒子符合的碎片也表现出了类似的特征. 这两个图中方位角  $\phi = 0^\circ$  的碎片和轻粒子的  $R_c$ , 在不考虑邻近小角度几何条件下相继衰变和末态相互作用的影响后, 会更加准确反映粒子的方位角各向异性发射的特征, 结果如图中实线所示. 可以看出, 随着关联碎片质量的加重, 相继衰变和粒子末态相互作用的影响逐渐减弱直至消失. 这与文献 [15] 的在两体相继衰变中, 碎片与轻带电粒子关联的几率随着碎片质量的增加而减小的结论相一致.

为了对方位角各向异性的粒子发射特征有一个准确的描述, 我们定义一个反映集体转动效应的特征量——方位角非对称因子 (即在平面与出平面的出射粒子发射比) 来具体描述上述反应平面内粒子的优先发射现象, 对于和粒子 1 方位角关联的粒子 2, 方位角非对称因子可以表示为

$$A_p(2(1)) = \frac{Y_{21}(\theta_1 = 15^\circ, \theta_2 = 15^\circ, \Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = 180^\circ)}{Y_{21}(\theta_1 = 15^\circ, \theta_2 = 15^\circ, \Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = 90^\circ)}, \quad (2)$$

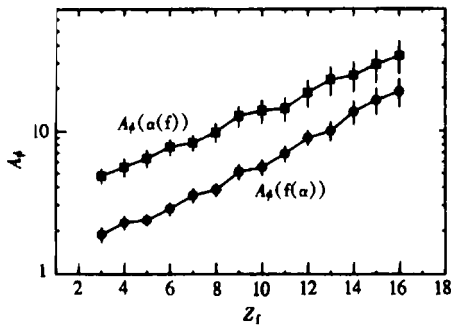


图 4 25MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$  反应中方位角非对称因子  $A_p$  与  $Z_f$  的关系

图中  $A_p(\alpha(f))$  对应碎片处于  $\theta_f = 15^\circ, \phi_f = 0^\circ$ ,  $\alpha$  粒子处于  $\theta_\alpha = 15^\circ, \phi_\alpha = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ;  
 $A_p(f(\alpha))$  对应  $\alpha$  粒子处于  $\theta_\alpha = 15^\circ, \phi_\alpha = 0^\circ$ , 碎片处于  $\theta_f = 15^\circ, \phi_f = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ .

式中  $Y_{21}$  表示处于  $\theta = \theta_2, \phi = \phi_2$  的粒子与  $\theta = \theta_1, \phi = \phi_1$  的粒子的符合产额, 图 4 中  $A_p(\alpha(f))$  表示与碎片 ( $\phi_f = 0^\circ, \theta_f = 15^\circ$ ) 符合的轻粒子在平面 ( $\phi_\alpha = 180^\circ$ ) 与出平面 ( $\phi_\alpha = 90^\circ$ ) 的产额比,  $A_p(f(\alpha))$  含义类似, 指的是与轻粒子 ( $\phi_\alpha = 0^\circ, \theta_\alpha = 15^\circ$ ) 符合的碎片在平面 ( $\phi_f = 180^\circ$ ) 与出平面 ( $\phi_f = 90^\circ$ ) 的产额比.

从图 4 中可以看出, 随着关联碎片质量的加重, 由于集体转动效应的增强, 方位角非对称性在增加, 在平面发射的轻粒子或碎片越来越占主要部分, 特别是那些  $Z_f$  靠近入射弹核的类弹碎片, 方位角非对称性就更大一些, 这预示着这些类弹碎片和靶核没有融合, 导致倾向于在平面发射粒子. 对于质量较轻的碎片, 由于它们来自于弹靶核重叠区域较多的反应区域, 反应的剧烈程度加强, 出射粒子的方向性减弱, 方位角非对称性低于类弹碎片时的值. 这些特点与图 2, 3 中表现出的趋势是一致的.

## 4 小结

在 25MeV/u 的  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$  反应的在平面和出平面大角度关联测量中, 提取了碎片 ( $Z_f = 3-15$ ) 与  $\alpha$  粒子之间的方位角关联函数以及方位角非对称因子. 在  $\phi = 90^\circ$  时, 方位角关联函数呈现最小值, 这表明在吸引的核平均场作用下集体类转动效应的影响下, 反应过程中产生的轻粒子和碎片优先在反应平面内发射; 随着符合关联对质量的增加, 在平面符合粒子的发射在束流轴两侧的左右不对称性逐渐增大, 粒子越来越优先向被符合对象的异侧一方发射, 这种非对称性可能是在反应初始阶段建立起来的<sup>[18]</sup>; 随着关联对质量的增加, 相继衰变和粒子末态相互作用对  $\phi = 0^\circ$  的关联粒子对的小角度方位角关联函数值的影响逐渐降低并直至消失, 当去掉相继衰变和粒子末态相互作用的影响后, 得到了  $\phi = 0^\circ$  的关联粒子对对小角度的比较真实的方位角关联函数值; 粒子方位角各向异性发射的特征对关联粒子对的质量有较强的依赖关系, 即随着关联粒子对的质量增加, 方位角非对称性在增加, 集体转动效应增强, 在平面发射的粒子增多, 出平面的粒子发射减少.

感谢 HIRFL 的全体人员为本实验提供品质良好的  $^{40}\text{Ar}$  离子束及 NIM 库等提供的优良服务.

## 参考文献(References)

- 1 Tamain B et al. GANIL P97 36/LPCC 97 18, 1997
- 2 Guerreau D. Nucl. Phys. , 1985, **A447**:37c
- 3 Reisdorf W et al. Nucl. Phys. , 1997, **A612**:493
- 4 Benchekroun D et al. Z. Phys. , 1997, **A356**:411
- 5 Wada R et al. Nucl. Phys. , 1992, **A548**:471
- 6 SHEN W Q et al. Nucl. Phys. , 1993, **A551**:333
- 7 Pawlowski P et al. Z. Phys. , 1997, **A357**:387
- 8 Gutbrod H H et al. Phys. Rev. , 1990, **C42**:640
- 9 SHEN W Q et al. Phys. Rev. , 1997, **C56**:1996; Ma Y G et al. Phys. Rev. , 1993, **C48**:R1492
- 10 Wilson W K et al. Phys. Rev. , 1995, **C51**:3136
- 11 HE Zhi-Yong et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. , 1996, **20**(1):8(in Chinese)  
(贺智勇等. 高能物理与核物理, 1996, **20**(1):8)
- 12 WANG Jin-Chuan et al. Nucl. Instr. Meth. , 1996, **A368**:473
- 13 WANG Jin-Chuan et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. , 2000, **24**(1):41(in Chinese); Acta Physica Sinica, 2000, **49**(5):872(in Chinese)  
(王金川等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(1):41; 物理学报, 2000, **49**(5):872)
- 14 Field D J et al. Phys. Rev. , 1986, **C34**:536
- 15 WANG Jin-Chuan et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. , 2001, **25**(2):115(in Chinese)  
(王金川等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(2):115)
- 16 XI Hong-Fei et al. Nucl. Phys. , 1993, **A552**:281
- 17 LUO Yong-Feng. The Investigation of Emission of Light Particles in the Reaction of 25 MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ . Master Degree Thesis. Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, 1995(in Chinese)  
(罗永峰. 25MeV/u  $^{40}\text{Ar}$  轰击  $^{115}\text{In}$  靶反应中轻粒子发射研究. 硕士论文, 中国科学院近代物理研究所, 1995)
- 18 LIU Xin, JIANG Dong-Xin, Lee S M. Chin. Phys. Lett. , 1998, **15**:486

## Azimuthal Correlations of Fragments with Light Charged Particles in Reaction of $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}^*$

WANG Jin-Chuan ZHAN Wen-Long GUO Zhong-Yan XI Hong-Fei

ZHOU Jian-Qun ZHAO You-Xiong

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

**Abstract** The large angle correlations for in-plane and out-of-plane have been measured for the pairs of the fragments and light charged particles (LCPs) in the reaction of  $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ . The azimuthal correlation functions and the azimuthal asymmetry factors were obtained. The azimuthal correlation functions of all pairs between fragments and  $\alpha$  particles are of minimum value in  $\phi = 90^\circ$  plane. It indicates that the LCPs and fragments formed in the reaction exhibit an enhanced emission in the reaction plane due to collective rotation-like effect induced by attractive mean field. The more heavier the masses of the coincident LCPs and fragments are, the more stronger the left-right asymmetries of the coincident particles with respect to the beam direction in the reaction plane are, the more preferential the particle emission to the direction opposite to the coincident reaction products is. Along with the increase of the mass of the coincident LCPs and fragments, the influences of the sequential decay and particle final state interactions on the azimuthal correlation functions of the correlated pairs in the  $\phi = 0^\circ$  plane decrease and vanish at last, the collective rotation-like effect is enhanced, and the azimuthal asymmetries increase.

**Key words** fragment, light charged particle, azimuthal correlation

---

Received 30 December 1999

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19475054)