

25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应碎片和 轻带电粒子能量关联*

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 通过对 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应 $\theta_{\text{lab}} = 15^\circ$ 的邻近几何条件下的轻带电粒子和出射碎片之间的关联测量, 观察到了两体相继衰变机制的存在. 其中, 轻带电粒子和碎片的关联角度谱在小角度成峰, 最可几角度约 2° 左右; 轻带电粒子能谱峰位, 随关联对的质量增加而逐渐增高; 质量较轻的原始产物容易受到激发, 通过发射轻带电粒子而衰变成轻中等质量碎片. 在两体相继衰变中, 原始激发产物发射重质量的轻带电粒子的产额或几率要大于质量轻的轻带电粒子, 具体测量发现, 与轻带电粒子 ^1_1H , ^2_1H , ^3_1H 和 α 粒子关联的碎片 ($Z_f = 4-14$) 总的产额比为 1:1.3:1.78:7.57.

关键词 碎片 轻带电粒子 关联测量

1 引言

根据碰撞参数 b 的大小, 重离子核碰撞可分为周边碰撞和中心碰撞. 在低能重离子核反应中, 周边碰撞和半周边半中心碰撞导致弹核与靶核发生的非弹性碰撞或深部非弹性碰撞等机制, 随着轰击能升高碎裂反应和多重碎裂反应会与之竞争. 在这些反应进行过程中可能发射轻粒子, 而产生的初级激发产物也会通过发射轻粒子等进行衰变. 通过在平面与出平面小角度和大角度的轻粒子-碎片及碎片-碎片的关联符合测量, 不但可以研究原始激发产物的相继衰变现象^[1-3], 而且可以研究出射轻粒子及碎片的方位角各向异性的空间分布, 提取相应的方位角关联函数, 研究出射粒子在平面和出平面的发射规律^[4-9], 了解非平衡成分の出射粒子与反应平面及一些碰撞参量(如弹核入射能和碰撞参数等)的关系. 这些研究将有利于进一步搞清反应过程的动力学特征并了解反应区域的时空演化, 探究高激发核物质的形成机制、内部特性和衰变过程等^[1-14].

为了加深对几十 MeV/u 的费米能区的重离子核反应机制的了解, 特别是对此能区碎片和轻带电粒子发射的动力学特性的研究, 我们利用在平面和出平面所放置的几套多叠

1999-12-16 收稿

* 国家自然科学基金(19475054)资助

层探测器对 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应的出射碎片和轻带电粒子(LCP)在邻近几何条件和大角度关联的条件下进行了符合测量,研究了此反应的碎片和 LCP 之间的能量关联,提取了碎片和 LCP 之间的方位角关联函数,对在平面和出平面的粒子发射规律有了一个初步认识. 本文给出了碎片和 LCP 在邻近几何条件下符合测量结果,对相继衰变等反应机制的变化规律进行了探讨. 文献[15]将给出此实验在平面和出平面大角度关联条件下粒子的发射规律.

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}Ar 轰击厚度为 3.936mg/cm^2 的 ^{115}In 靶. 束流强度为 $10\text{--}15\text{nA}$. 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 LCP, 实验总体布局和探测器的详细构成见文献[13—15]. 用于邻近几何条件下碎片和 LCP 关联研究的对数密度多叠层探测器系统^[16]的探测角 $\theta_{\text{lab}} = 15^\circ$, 其结构由纵向气体电离室(IC)^[17]、大面积双维位置灵敏 Si 探测器(PSSD)、PIN 型 Si 大面积光敏二极管 (SPD) 及 16 单元的 CsI(Tl) 晶体 + 光二极管读出装置阵列组成, 距离靶心 30cm , 如图 1 所示. PSSD 可对达到和穿过第二级 ΔE 的碎片等粒子给出位置信号. 综合考虑点火的闪烁体单元所占的比例以及阵列单元间的死区, CsI(Tl) 闪烁体阵列的几何探测效率大约为 20% 左右.

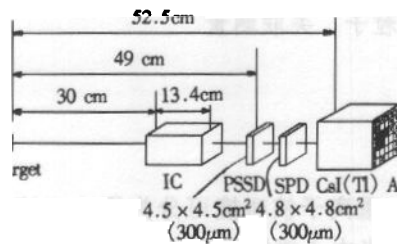


图 1 对数密度多叠层探测器系统结构

最后一级 16 单元 CsI(Tl) 闪烁体阵列中颜色较深的 5 个单元为正常点火工作的单元, 编号依次为 No. 1603, 1604, 1606, 1607, 1612. 颜色较浅的为其余 11 个单元.

3 碎片和轻带电粒子邻近几何条件下的能量关联

3.1 关联角度的确定方法和角度谱

如图 1 所示, 我们用位于 $\theta_{\text{lab}} = 15^\circ$ 的对数密度多叠层探测器系统进行碎片和 LCP 在邻近几何条件下的能量关联研究. 碎片取 $Z_i \geq 4$, LCP 包括质子、氘、氚和 α 粒子. 符合事件按如下方法选择: 如果探测碎片的 PSSD 或 SPD 探测器和探测 LCP 的 CsI(Tl) 闪烁体阵列探测器 (5 个有计数的单元中任意一个) 同时点火, 则此符合事件被记录下来. 在离

线分析处理时,对每一个符合事件重新构成,此再构事件包括碎片的种类、能量、在 PSSD 中的位置及 LCP 的种类、能量、点火的闪烁体阵列的单元号数等再分类参量信息. 在再构事件的基础上,得到 LCP 点火的闪烁体阵列单元在 PSSD 上的中心位置,再利用碎片的位置信号,换算出它们之间的相对夹角. 图 2 左边从上到下给出了 α 粒子、氦、氖、质子与 $Z_f = 4, 5, 6$ 的碎片的关联角度谱,4 种 LCP 关联角度谱都是在小角度成峰, LCP 与碎片的关联大部分在 4° 以下,最可几角度在 2° 左右. 图 2 右边给出了 α 粒子与三组碎片 ($Z_f = 4, 5, 6$; $Z_f = 7, 8, 9$; $Z_f > 9$) 的关联角度谱,它们表现出与图 2 左边类似的特征. 从图中可看出,小角度邻近几何条件下的 LCP 和碎片的关联几率随着 LCP 的质量的加重而增强,随碎片质量的增加而减小.

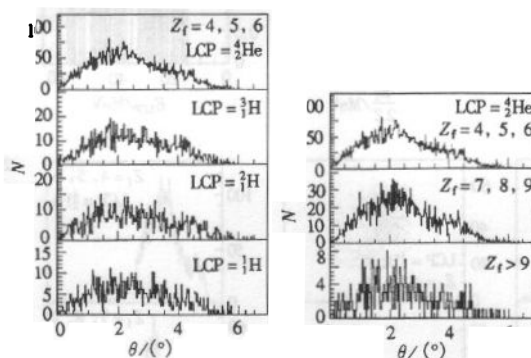


图 2 邻近小角度几何条件下符合事件的 LCP 与碎片之间的关联角度谱

3.2 邻近几何条件下能量关联结果

当一个受激发的原始反应产物的激发能超过其可能的衰变道的阈能时,它可由这种反应道衰变成两个次级产物,如 LCP 和中等质量碎片(IMFs)等. 从三体运动学分析可知,以运动的原始产物的速度矢量的末端为中心,衰变产物的平均速度矢量末端将画出一个球面同心圆,平均速度矢量半径的大小等于它们各自的平均质心速度,这样在实验室系中原始发射体飞行方向附近的邻近几何条件下就可探测到对应于在原始发射体系统中次级产物向前半球和向后半球发射的两个分量,次级产物的能谱会在能量关联图上显示出明显分开的两个部分,在对应的 LCP 的能谱上会产生两个能量分量分别对应着 LCP 的向前和向后发射.

图 3 给出了 $\theta_{\text{lab}} = 15^\circ$ 的三组出射碎片 ($Z_f = 4, 5, 6$; $Z_f = 7, 8, 9$; $Z_f > 9$) 与其后的 CsI(Tl)阵列探测器探测到的邻近小角度 LCP 的能量关联图及对应的能谱,相对关联角度根据图 2 取 4° 以下. 其中图 3(a), (b), (c), (d) 中 LCP 分别为质子、氦、氖及 α 粒子,从能量关联散布图上可以清楚地分出两个部分,在对应的 LCP 能谱上可看到相应的两个分量,分别代表 LCP 在原始发射体质心系中的向前和向后发射,这是两体相继衰变的明显标志. 由于探测器探测阈的影响, α 粒子的低能分量只测到了一部分. 从图 3 的与 $Z_f = 4, 5, 6$ 出射碎片两体符合的 LCP 能谱中可以看出,关联质子的低能分量占优势,这主要是

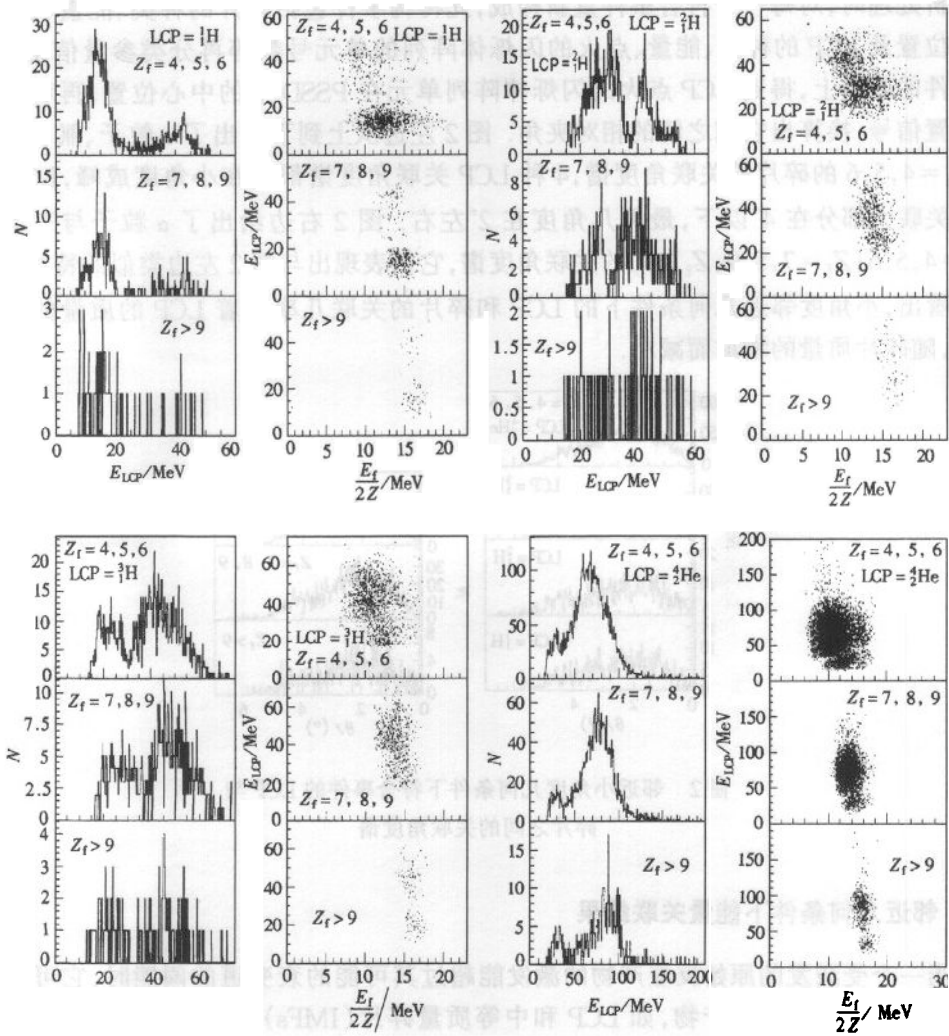


图 3 邻近的 CsI(Tl)阵列探测器探测到的 LCP 与 15° 出射的三组碎片的能量关联图及对应的轻带电粒子的能谱

(a), (b), (c), (d) 中 LCP 分别为质子、氘、氦和 α 粒子, 点火的 CsI(Tl) 阵列探测器单元如图 1 所示.

由于高能质子大部分在前几级 ΔE 的能损太小且有些高能质子可穿过 CsI(Tl) 阵列探测器而致. 从图 4 $\Delta E_3 - E_f$ 关联散布图中可以清楚地看到质子的高能部分没有被测全. 随着 LCP 质量的加重, 图 3 中 LCP 的高能成分逐渐增加, 而低能部分逐渐降低, 到 α 粒子时低能部分只占很小一部分, 这主要是低能部分的 α 粒子大部分被阻止在图 1 中 CsI(Tl) 阵列探测器前面的前几级 ΔE 能量探测器中的缘故. 图 3 不难发现, LCP 的能量峰位随着碎片组质量的增加, 向能量高的方向逐渐移动. 为了对两体相继衰变有进一步了解, 图 5 给出 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应 15° 与其后邻近小角度探测到的 LCP 关联的碎片产额 (Y_{sp}), 从图中看出, 在两体相继衰变中, 碎片与 LCP 关联的几率随着碎片质量 Z_f 的增加而减小, 即质量较轻的原始产物容易受到激发, 通过发射 LCP 衰变成轻的 IMFs; 同时可

以看出, 原始激发产物发射质量重的 LCP 的产额或几率要大于质量轻的 LCP, 如在我们的实验中, 与 ^1H , ^2H , ^3H 和 α 粒子关联的碎片总的相对产额比为 1:1.3:1.78:7.57.

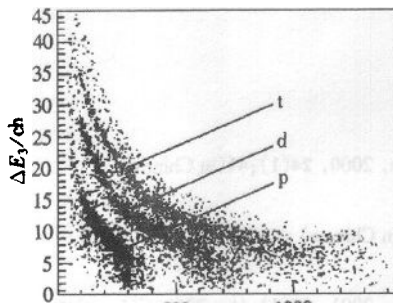


图 4 探测器 SPD 与其后的 CsI(Tl) 阵列探测器的某个单元的 $Z = 1$ 同位素的 $\Delta E_3 - E_1$ 关联散布图(单举数据谱)

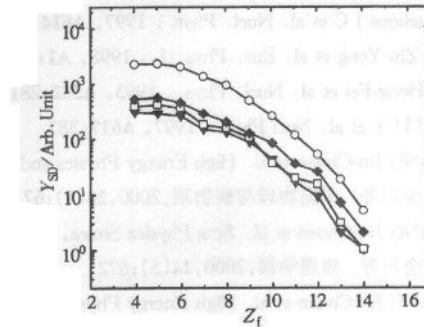


图 5 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应的两体相继衰变中与其后邻近小角度探测到的 LCP 相关联的 $\theta_{\text{lab}} = 15^\circ$ 的碎片产额
 \circ — ^1H ; \bullet — ^2H ; \square — ^3H ; \blacktriangledown — α .

4 小结

在 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ 反应研究中, 我们在中角区 15° 利用对数密度多叠层探测器系统进行了邻近小角度几何条件下 LCP 和出射碎片之间的关联测量. 得到了 LCP (质子、氘、氚和 α 粒子) 和碎片的能量关联散布图及相应 LCP 的能谱, 观察到了两体相继衰变机制的存在. 在两体相继衰变中, LCP 和碎片的关联角度谱在小角度成峰, 最可几的角度大约在 2° 左右; LCP 能谱的能量峰位随关联碎片组质量的增加而向能量高的方向有一定的移动; 质量较轻的原始产物容易受到激发, 通过发射 LCP 而衰变成轻 IMFs, 即碎片和 LCP 的关联几率随碎片质量的增加而减小; 在两体相继衰变中, 原始激发产物发射重质量的 LCP 的产额或几率要大于质量轻的 LCP, 具体测量发现, 与 ^1H , ^2H , ^3H 和 α 粒子关联的碎片 ($Z_f = 4-14$) 总的产额比为 1:1.3:1.78:7.57.

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

参考文献 (References)

- 1 Magiera A et al. Phys. Rev., 1998, C57:749
- 2 Gonthier P L et al. Phys. Rev., 1991, C43:R1504
- 3 Steckmeyer J C et al. Nucl. Phys., 1989, A500:372
- 4 Pawlowski P et al. Z. Phys., 1997, A357:387
- 5 Benchekroun D et al. Z. Phys., 1997, A356:411
- 6 SHEN W Q et al. Phys. Rev., 1997, C56:1996

- 7 Wilson W K et al. Phys. Rev. , 1995, **C51**:3136
- 8 HE Zhi-Yong et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1996, **20**(1):394(in Chinese)
(贺智勇等. 高能物理与核物理, 1996, **20**(1):394)
- 9 Angélique J C et al. Nucl. Phys. , 1997, **A614**:261
- 10 HE Zhi-Yong et al. Eur. Phys. J. , 1998, **A1**:61
- 11 XI Hong-Fei et al. Nucl. Phys. , 1993, **A552**:281
- 12 WU H Y et al. Nucl Phys. , 1997, **A617**:385
- 13 WANG Jin-Chuan et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2000, **24**(1):41(in Chinese)
(王金川等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(1):673)
- 14 WANG Jin-Chuan et al. Acta Physica Sinica, 2000, **24**(5):872(in Chinese)
(王金川等. 物理学报, 2000, **24**(5):872)
- 15 WANG Jin-Chuan et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2001, **25**(1):16—22(in Chinese)
(王金川等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(1):16—22)
- 16 WANG Jin-Chuan et al. Nucl. Instr. Meth. , 1996, **A368**:473
- 17 WANG Jin-Chuan et al. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1994, **14**(3):135(in Chinese)
(王金川等. 核电子学与探测技术, 1994, **14**(3):135)

Energy Correlations between Fragments and Light Charged Particles in Reaction of 25MeV/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 correlations between the emitted fragments at $\theta_{\text{lab}} = 15^\circ$ and the light charged particles(LCPs) at the close geometry configuration in the reaction of 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{115}\text{In}$ were measured. The energy correlations between fragments ($4 \leq Z_f \leq 14$) and the LCPs including proton, deuterium, tritium and α particle as well as the energy spectra of the LCPs were obtained. The result shows the existence of sequential decay mechanism. It is found that the peak position of angular correlation is at the small angles and the most probable correlation angle is at 2° or so; The peak positions of the two components in the energy spectra of LCPs increase gradually with the mass of correlated partner; The lighter primary products are more easier to be excited and decay to IMFs and the LCPs. In the sequential decay, the yield of the LCPs with more heavier mass is higher than that of the lighter LCPs. The result reveals that the total correlation yield ratios summed over the fragments of $Z_f = 4-14$ are 1:1.3:1.78:7.57 for proton, deuterium, tritium and α particles, respectively.

Key words fragments, light charged particles, correlation measurement

Received 16 December 1999

* Supported by National Nature Science Foundation of China(19475054)