

600 MeV⁴⁰Ar + ¹⁹⁷Au 反应碎片角分布

刘国兴 陈克良 于 暹 郑纪文 金卫阳 孙彤玉

吴定清 赵莉莉 张 翔 尹新民 秦 芝

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1994-03-23 收稿

摘 要

在 4π 立体角范围内收集反应产物,采用离束 γ 射线测量方法测量了600MeV ⁴⁰Ar + ¹⁹⁷Au 反应的给定质量数的碎片角分布.讨论了中能重离子反应碎片角分布特征和产生碎片的反应机制.

关键词 离束 γ 射线测量,碎片角分布,中等质量碎片.

1 引 言

进入八十年代以来,人们对中能区(10—100MeV/u)重离子核碰撞研究产生了很大的兴趣,这是因为中能区是一个由平均场一体耗散到核子-核子碰撞多体耗散的过渡能区,在这两种不同碰撞机制之间没有明确的界限,它们之间的并存和逐步过渡使反应机制变得十分复杂.中能区核碰撞行为反映了这种过渡性质.

中能重离子核反应研究有许多方面,高激发核的形成,鉴别和衰变性质的研究是当今中能重离子核反应最活跃的前沿领域.最近, Egido 等^[1]详细地评述了这个研究领域的进展.实验上测量中能重离子反应碎片角分布对于了解核反应特性和考察产生碎片的反应机制是很重要的.但是,令人遗憾的是,到目前为止这方面的工作还很少,更没有建立起理论模型,以很好地描述中能重离子反应碎片角分布.已经发表了有 86MeV/u ¹²C + ¹⁹⁷Au^[2], 85MeV/u ¹²C + ²³⁸U^[3] 和 16MeV/u ³²S + ¹⁹⁷Au^[4] 等反应的碎片角分布测量.这些工作都是在 4π 立体角范围内收集反应产物,采用离束 γ 射线测量方法获得给定质量数 A 的碎片角分布的.离束 γ 射线方法的主要优点是,观测的碎片质量数可以覆盖核素图相当大的区域,有利于产生碎片反应机制的分析.

本工作在 4π 立体角范围内收集 600MeV⁴⁰Ar + ¹⁹⁷Au 反应产物,采用离束 γ 射线方法获得了作为时间函数的一系列 γ 射线谱,根据特征 γ 射线能量,强度和衰变半寿命指定核素,从而得到给定质量数的碎片角分布,目的在于研究中能重离子核反应碎片角分布特征以及产生碎片的反应机制.

2 实验方法

实验是在中国科学院近代物理研究所大型重离子加速器(HIRFL)上进行的。 ^{40}Ar 离子束能量为 25MeV/u 。一个直径为 20cm ,长为 340cm 柱形散射室与加速器管道相连接。束流进入散射室前经过一个长 15cm 的准直器,准直器内设置两个由石墨做成的光栏,光栏孔径为 $\phi 8\text{mm}$ 。金靶厚度为 1.190mg/cm^2 ,放在散射室中心且与人射束流方向垂直。在散射室末端接法拉第筒,它与电流积分器相连,测量束流强度。散射室中心部位有一个直径为 9.4cm ,长为 16cm 反应产物收集筒,圆筒内壁固定铝收集箔,厚度为 14.0mg/cm^2 ,根据计算它完全能阻止来自靶子的反应产物。

照射后,取下收集箔按与人射束流方向所成角度切割做成样品,开始对样品进行离束 γ 射线谱测量。使用四套HPGe γ 射线探测器和ORTEC 919多道脉冲分析器及数据获取系统。HPGe γ 射线谱仪对 ^{60}Co 1.3320 MeV γ 射线的能量分辨为 $1.90\text{--}2.20\text{keV}$ 。(FWHM),测量是在直角几何条件下进行的,样品与探测器之间的距离为 2cm 。为了减少本底,样品和HPGe γ 射线探测器放在 $0.60 \times 0.60 \times 0.60\text{m}^3$ 的铅屏蔽室中,铅室中有放样品的支架。使样品放置保证重复测量的几何条件。用 ^{152}Eu 源对HPGe γ 射线谱仪进行能量校准。用中国原子能科学研究院提供的一组标准源, ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba 和 ^{137}Cs 对HPGe γ 射线谱仪做探测效率的校准。样品测量以循环方式进行。若第一循环中有效测量时间是 1h ,下一个循环的测量时间是上次的 $1.5\text{--}2$ 倍,依此类推。最长的测量时间是 12.5h 。为了覆盖尽可能多的核素半寿命,整个测量持续6周。每个样品获取16个 γ 射线谱。

3 实验结果及讨论

3.1 γ 射线谱分析和核素的指定

γ 射线谱分析的目的是从测量的一系列复杂 γ 射线谱中根据特征 γ 射线能量,强度和衰变半衰期指定放射性核素。在中国科学院近代物理研究所VAX-8350计算机上使用LEONE程序分析 γ 射线谱,并计算了光电峰面积。然后寻找出一系列 γ 射线谱中的特征 γ 射线,以便构成该条 γ 射线的强度随时间变化的衰变曲线。构成衰变曲线所需要的时间是取照射结束到该 γ 射线谱测量时间中点经历的时间。我们假定测量时间内 γ 射线的平均强度是测量时间中点的瞬时强度,由于本工作所涉及的核素半衰期比单次测量时间长得多,毫无疑问,这个假设是成立的。这样,根据特征 γ 射线的能量、强度和衰变半衰期,参照Reus等^[1]编制的按 γ 射线能量次序排列的核素表来指定核素的质量数。这里,绝对强度小于5%的 γ 射线不加考虑,同一核素由它的几条 γ 射线计算得到的衰变率应该在误差范围内一致。衰变曲线的分解应是唯一的,如果存在多重指定,则该条 γ 射线的分析结果应舍去,如果由一条或几条强度不很大的 γ 射线指定了一个核素,而该核素最强的 γ 射线未被观测到,那么这个结果也必须舍去。所以根据这些原则指定的核素都是正确无疑的。

3.2 碎片角分布

对于某一给定质量数的碎片,可以根据下式计算微分截面,

$$W(\theta_L) = \frac{A(\theta_L)e^{\lambda(t_1+t_2)}}{n\varepsilon_r\eta_r d\Omega(\theta_L)(1 - e^{-\lambda t_3}) \int_0^{t_1} \phi(t)e^{\lambda t} dt}, \quad (1)$$

其中 $A(\theta_L)$ 是在 θ_L 角测量时间内特征 γ 射线峰的计数、 n 是单位面积的靶核数, ε_r 是特征 γ 射线的强度, η_r 是特征 γ 射线的探测效率, $d\Omega(\theta_L)$ 是在 θ_L 角处收集箔对靶子张开的立体角. $\phi(t)$ 是随时间变化的束流强度. t_1 是照射时间, t_2 是照射结束到开始测量的时间, t_3 是测量时间.

图 1 给出了 600MeV⁴⁰Ar + ¹⁹⁷Au 反应在实验室系统中的碎片角分布. 若以 A_f 表示碎片质量数,从图 1 可以看出,对于 $A_f < 52$ 的碎片,本工作观测到的最轻的碎片是 ⁷Be, 然后是 ²⁴Na 和 ²⁸Mg, 其中 ²⁴Na 有相当高的产额. 这些碎片在实验室系统的角分布有相同的形状,在向前方向成峰. 微分截面随角度的增加而很快地减少. 当 $\theta_L > 90^\circ$ 时,微分截面几乎不随角度变化. 对于 $A_f = 52-160$ 的碎片,角分布在实验室系统也是在向前方向成峰. $\theta_L = 90^\circ$ 微分截面最小, $\theta_L > 90^\circ$ 微分截面随角度增加略有增加. 对于 $A_f > 160$ 的碎片,实验室系统的角分布是在向前方向成峰,当 $\theta_L > 90^\circ$ 时,微分截面不随角度变化.

为了考察中能重离子产生碎片的反应机制,需要把实验室系统中的碎片角分布转换到质心坐标系中. 为此,我们假定,碎片在实验室系中的末速度, $V_f = V + v$, V 是在运动坐标系中与束流方向成 θ_{cm} 碎片的速度, v 是质心速度,它在垂直和平行于束流方向的分量分别是 v_{\parallel} 和 v_{\perp} . 由于碎片在实验室系统的角分布在向前方向成峰的性质,假定 $v_{\perp} = 0$, 于是有,

$$X = \frac{v_{\parallel}}{V}, \quad (2)$$

实验上通常由积分实验室系碎片角分布提取 X

$$X = (F - B)/(F + B),$$

$$F = 2\pi \int_0^{\pi/2} W(\theta_L) \sin \theta_L d\theta_L, \quad B = 2\pi \int_{\pi/2}^{\pi} W(\theta_L) \sin \theta_L d\theta_L. \quad (3)$$

根据方程 (3) 将实验室系统碎片角分布转换到质心坐标系中. 图 2 给出了 600MeV⁴⁰Ar + ¹⁹⁷Au 反应在质心坐标系中的碎片角分布,图中的实线是用手光滑的实验点连线. 从图 2 可以看出,对于 $A_f > 160$ 的碎片,在质心坐标系中角分布是关于 $\theta_{cm} = 90^\circ$ 非

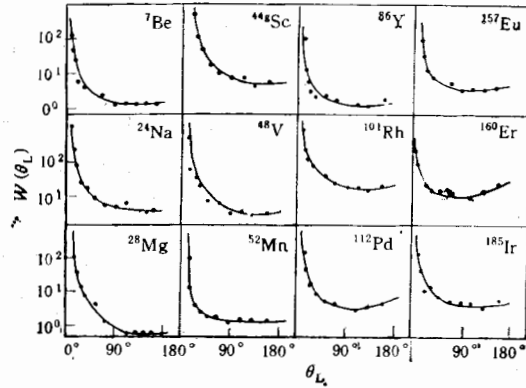


图 1 600MeV⁴⁰Ar + ¹⁹⁷Au 反应在实验室系统中的碎片角分布
实线是用手光滑的实验点连线。

对称的,在向前方向成峰,表现重的蒸发余核的特征^[6]。这些碎片是在组合核还没有建立起统计平衡的非全熔合反应中产生的^[7]。当弹核能量较低时这些碎片产生于中心碰撞,弹核能量较高时($>35\text{MeV/u}$)产生于周边碰撞。对于 $A_f = 60-160$ 的碎片,在运动坐标系中,角分布是关于 $\theta_{\text{cm}} = 90^\circ$ 对称的,这是裂变过程和有快时标的准裂变及快裂

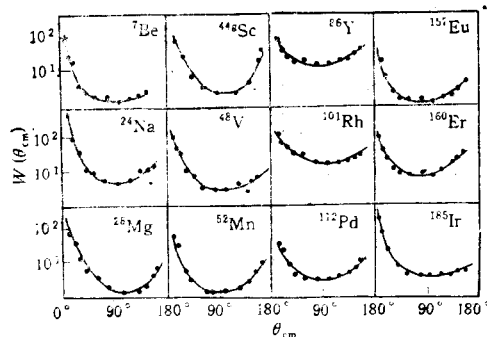


图2 $600\text{MeV}^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应在质心坐标系中的碎片角分布

变过程碎片角分布的特征。 $A_f < 60$ 是中等质量碎片,在质心坐标系中角分布是关于 $\theta_{\text{cm}} = 90^\circ$ 非对称的,碎片质量数愈轻,角分布愈是在向前方向成峰。在中能重离子反应中,中等质量碎片的来源是什么?这个问题至今还在讨论中,通过广泛地实验研究,中等质量碎片的严格定义是反应产物在 ^4He 和裂变碎片之间,而又与弹核,靶核没有明显关系的碎片,并且认为中等质量碎片是来自两体衰变,产生中等质量碎片的主要反应道是^[8]:

(1)准弹和深部非弹性碰撞反应,(2)非完全熔合反应,(3)复合核两体衰变。当然大多数中等质量碎片来自两体衰变这一事实并不意味着没有其它反应机制的贡献,中等质量碎片作为集团蒸发^[9]和多重碎裂产物^[10]也不是没有可能的。本工作在 $600\text{MeV}^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中观测到的较轻的中等质量碎片,如 ^7Be , ^{24}Na 和 ^{28}Mg 可以认为是弹核的碎裂,如果假定是这种反应机制,这类碎片都在前角区($\theta_L < 30^\circ$)发射。它们可分为三种类型:一是具有弹核速度的碎片,二是碎片的速度相当弹核线性动量全部转移给弹核加靶核系统的速度,三是碎片的速度介于前两种碎片中间速度,这种碎片产生于组合体系统局部高激发区。质量数接近弹核质量的类弹碎片如 ^{44}Sc ,也有可能来自少数核子直接转移反应。从实验的碎片角分布特征来看,在中能重离子反应中,由于开放的反应很多,不能认为那一种反应机制是产生中等质量碎片唯一的反应机制。因为我们指出的一些反应机制都会对产生中等质量碎片有贡献。这样,在目前这类实验还很少的情况下,试图建立起一种理论模型很好描述测量的中能重离子反应碎片角分布就显得困难了。

作者对戴光曦研究员对本工作的关心,提出宝贵意见和有益的讨论表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] J.L. Egido et al., *J. Phys. G.Nucl. Part. Phys.*, **19**(1993)1.
- [2] K.Aleklett et al., *Phys. Rev.*, **C33** (1986)885.
- [3] R.H. Kraus et al., *Nucl. Phys.*, **A342**(1985)525.
- [4] W. Loveland et al., *Phys. Rev.*, **C41**(1990)973.
- [5] U. Reus, W.Westmeier, *Atomic Data and Nuclear Data Table*, **29**(1983)1.
- [6] M.F. Rivet et al., *Phys. Rev.*, **C34**(1986)1282.
- [7] G. Bizard et al., *Z. Phys.*, **A323**(1986) 459.
- [8] L.G. Morett et al., *Nucl. Phys.*, **A488**(1988)337c.
- [9] B. Faure et al., XXVI Bormio Meeting 1988, P. 109.
- [10] A.D. Panagiotou et al., *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984)496.

Fragment Angular Distributions of the 600 MeV $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ Reaction

Liu Guoxing Cheng Keliang Yu Xian Zheng Jiwen Jin Weiyang
Sun Tongyu Wu Dingqing Zhao Lili Zhang Xiang
Yin Xinmin Qin Zhi

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

Received 23 March 1994

Abstract

The angular distributions of the fragments in the range of 4π solid angle for the 600 MeV $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ reaction have been measured using the beam-off γ -ray spectroscopy technique. The features of the fragment angular distributions and the reaction mechanisms of the production of fragments have been discussed.

Key words beam-off γ -ray measurement, fragment angular distribution, intermediate mass fragment.