

重离子核反应机制研究进展*

江 栋 兴 钱 兴

(北京大学技术物理系, 北京大学重离子物研究所 北京 100871)

摘 要 近年来,北京大学技术物理系开展了重离子特别是中能重离子核反应机制方面的研究工作,且取得了一些进展.

关键词 中能重离子碰撞 线动量转移 热核形成及衰变 能量耗散 方位角关联

1 引 言

重离子束的应用极大地增加了可研究核反应体系的数目,产生了十分丰富的新现象.现代核物理研究已集中到对极端状态(热密、高自旋及奇异中子质子数目比等)下原子核性质的研究.该系充分利用国内外大型实验设备,广泛开展国内外合作研究,集中开展了中能(10~100MeV/u)重离子核反应机制、热核(核温度 $\geq 3\text{MeV}$)形成及衰变性质的研究工作,取得了一些进展.

2 中能重离子碰撞的能量耗散及热核的激发能

近年来,人们从理论和实验两方面对中能重离子核反应中形成的热核进行了广泛研究.其中,最基本的任务是正确指定原子核的总激发能或核温度.

2.1 线动量转移(LMT)测量

它通过测定两符合裂变碎片的折叠角或蒸发残核的反冲速度,在一定模型假定下得到弹核向类靶体系转移的线动量,进而获得类靶核的激发能.为此,普遍使用的理论模型是非完全熔合模型,即假定弹核一部分与靶核发生熔合形成一个高度激发的类靶核体系,而弹核的其余部分则继续以初始速度沿原始方向飞出,形成作为“旁观者”的类弹碎

片.于是

$$LMT = \frac{V_{\parallel}}{V_0} \frac{1}{1 + \frac{m_P}{m_T} (1 - \frac{V_{\parallel}}{V_0})}$$

$$E^*(LMT) = E_p \times LMT \frac{m_T}{m_T + LMT \times m_P} \cdot \sqrt{1 - (V_p/c)^2 + Q(LMT)}$$

式中, V_{\parallel} 为类靶核的反冲速度, V_0 相应于完全熔合时的 V_{\parallel} , m_P 和 m_T 分别为弹靶核质量, V_p 和 E_p 分别为弹核的速度及动能, $Q(LMT)$ 为相应非完全熔合过程反应 Q 值.

我们利用折叠角技术测得 50MeV/u $^{12}\text{C} + ^{197}\text{Au}$ 和 ^{209}Bi 反应的 LMT 分布^[1].最可几 LMT 值与 50MeV/u ^{12}C 的系统学结果相符.结果表明 LMT 的最可几值还与靶核的质量有关.LMT 分布为一非对称分布,在 0.3 附近有一小的突起,表明对 ^{12}C 这样的 α 结构核,在高达 50MeV/u 的能量, α 集团转移过程仍是明显的.

为了了解线动量及能量耗散的动力学过程,对 50MeV/u $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 反应进行了 BUU (Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck) 计算^[1].对于碰撞参数 $b=7.0\sim 8.5\text{fm}$ 的周边碰撞,弹靶核粘在一起形成合成体系,伴随大量核子交换,合成体系同时发生转动.80fm/c 时,在负偏转方向出现一类弹碎片,约 200fm/c 时,合成体系的粒子发射已由向前发射过渡到了各向同性发射,但类靶体系内部的核子分布尚未达成均匀分布.这图象与低能区深

* 国家科委基础研究项目、国家自然科学基金、国家教委博士点基金及核工业科学基金的资助课题,并得到兰州重离子加速器、北京串列加速器国家实验室的支持.

部非弹性碰撞过程十分相似,平均场仍有大的影响.对于 $b \leq 5.5 \text{ fm}$ 的中心碰撞,完全不出现大的类弹碎片发射,未能导致完全线动量转移的原因是平衡前粒子发射.无论周边还是中心碰撞,碰撞过程的图象都明显不同于非完全熔合模型,而且经过 $200 \text{ fm}/c$ (即约 $0.67 \times 10^{-21} \text{ s}$) 的时间,合成体系仍未达到完全平衡.

2.2 热核的轻粒子发射测量

对于入射能量较高而有颇为对称的反应体系,二元裂变只占总裂变几率中的很小部分,折叠角技术的适用性受到置疑.可见,通过对轻粒子发射的测量来指定热核的激发能就成为更一般的方法.在各种轻粒子中,中子发射特别令人感兴趣,因为它更独立于具体的出射道,而且对于重核,中子多重性明显超过轻荷电粒子.所以,中子多重性成为能量耗散程度的“过滤器”.利用载 Gd 的 4π 液闪探测器系统研究了 $27 \sim 77 \text{ MeV}/u$ $^{40} \text{ Ar}$ 及 $32 \text{ MeV}/u$ $^{86} \text{ Kr}$ 轰击 $^{197} \text{ Au}$ 、 $^{232} \text{ Th}$ 等重靶核的反应体系,得到的主要结果有:(1) 单举中子多重性 (M_n) 分布具有十分相似的形状:相应周边碰撞的低中子多重性峰和相应于中心碰撞的高 M_n 的类高斯形峰,而且具有大致相同的相对份额.显然,利用不同 M_n 范围“开窗”就可以研究各种观测量随碰撞剧烈程度的变化^[2].(2) 虽然相应于中心碰撞的最可几 M_n 要随靶核的质量数 (A) 和电荷数 (Z) 而变化,但用统计模型从最可几 M_n 值计算得到的激发能却与 A 和 E 无关,而且 E^* 值要比由 LMT 值从非完全熔合模型所得值低得多^[3].(3) 由中心碰撞的最可几 M_n 及相应轻荷电粒子多重性,所得 E^* 不随 $^{40} \text{ Ar}$ 的能量进一步增加而提高,表明 $27 \sim 77 \text{ MeV}/u$ $^{40} \text{ Ar}$ 沉积的热化激发能都约为 650 MeV 及相应核温度约为 5 MeV ^[4]. 而用相同方法得到 $32 \text{ MeV}/u$ $^{86} \text{ Kr} + ^{197} \text{ Au}$ 反应中类靶核热化激发能都高达 1 GeV ,核温度接近 6 MeV ^[5]. 这表明在中能重离子碰撞中能量耗散具有明显的入射道效应,压缩、形变及热化等多类激发

能之间的分配是不同的.由此可知,在相同速度下使用更重的弹核,可以更为有效地加热原子核.

3 热核的衰变性质

3.1 中等质量碎片(IMF)发射

中等质量碎片 ($Z \geq 3$) 发射是热核的重要衰变道.研究 IMF 能得到有关核反应过程及热密核物质的重要信息,特别是能提供热密核物质是否发生液气相变,出现多重碎裂的新衰变方式的实验证据.

为此测量了 $25 \text{ MeV}/u$ $^{40} \text{ Ar} + ^{159} \text{ Tb}$ ($^{nat} \text{ Ag}$) 反应过程中发射的单举 IMF 能谱及角分布^[6,7].实验发现有两种 IMF 成分:热核的蒸发及非平衡发射.由运动源蒸发模型拟合后角度 (115° 和 155°) 的 IMF 能谱,相同源参数 (对 $^{159} \text{ Tb}$ 和 $^{nat} \text{ Ag}$ 靶:源速度分别为 1.10 cm/ns 和 1.41 cm/ns ;核温度分别为 5.6 MeV 和 6.6 MeV) 能拟合好 $3 \leq Z \leq 9$ 的所有 IMF 后角度能谱,表明它们都来自相同运动源的蒸发.利用 GEMINI 统计蒸发程序能够重现这类 IMF 的 Z 分布及后角区角分布.在前角区,IMF 能谱显示有一丰富的高能成分,随着出射角增大,其强度逐渐减弱并在后角度完全消失,这是一种非平衡发射.它在总的 IMF 发射中占优势.目前,其产生机制尚未完全弄清.

对 44 和 $77 \text{ MeV}/u$ $^{40} \text{ Ar} + ^{197} \text{ Au}$ 反应,完成了 IMF 与相连系中子多重性的关联测量.将 IMF 分类成分别来自周边及中心碰撞的两种成分.利用研究轻荷电粒子发射时用过的分析方法^[4],定义 IMF 的微分多重性

$$\frac{d^2 M_{\text{IMF}}}{d\Omega_{\text{IMF}} dM_n} = \frac{N_{\text{IMF}}}{N_{\text{incld}} \Omega_{\text{IMF}}} \Big|_{M_n = \text{定}}$$

即等于 M_n 一定时,单举事件数目 N_{incld} 与单位立体角测得某种 IMF 数目 $N_{\text{IMF}}/d\Omega_{\text{IMF}}$ 之比值.对于来自周边碰撞的 IMF,其微分多重性随 M_n 的变化皆为钟罩形,随着 IMF 的 Z 值偏离弹核 Z_p 值愈远,相应分布的 M_n 最可

几值就变大,分布宽度也变宽.对于中心碰撞的 IMF,相应的变化关系则完全不同.44MeV/u 时, $Z=4$ 的 IMF 微分多重性随 M_n 而线性增加,当 $M_n \geq 20$ 时,保持一常数,这表明 $M_n \geq 20$ 并不具有更高激发能而主要反映热核退激过程的统计涨落;但在 77MeV/u 时, M_n 超过 20 之后,微分多重性仍随 M_n 连续增加,直到一个更高的 M_n 值.这说明 77MeV/u 时产生的热核具有更高的激发能.可见,IMF 多重性可以用作探测更热原子核的新探针^[8].

3.2 二元裂变衰变道的逐渐消失

系统研究了 27, 35, 44 和 77MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{232}\text{Th}$ 反应中两关联裂变碎片总动能 E_{sum} 与折叠角 θ_{FF} 间的关系以及裂变碎片的方位角关联^[9]. 所得实验结果的合理解释要求随着入射能量增加,裂变将伴随一至多个 IMF 发射.考虑到 IMF 发射密切连系于能量沉积,因而对于一定的入射能量 IMF 的产生几率会随 LMT 增加.在 27MeV/u 时,IMF 产额还相当低, E_{sum} 与 θ_{FF} 关系具有二元裂变特征, $\Delta\Phi \neq 180^\circ$ 的裂变碎片关联产额也很小.35MeV/u 时,相当部分的中心碰撞会发射 IMF,但仍有不少的二元裂变,故在 E_{sum} 与 θ_{FF} 关联图中,在 $\theta_{\text{FF}} \geq 115^\circ$ 区域符合二元裂变图像,对 θ_{FF} 更小时,其关联完全消失且因只探测了三个碎片中的二个,故 E_{sum} 系统地低于二元裂变预期值.44MeV/u 时, $\Delta\Phi = 60^\circ$ 和 120° 的关联产额在 $\theta_{\text{FF}} \leq 120^\circ$ 的高 LMT 区,已增加到 $\Delta\Phi = 180^\circ$ 关联产额的 $1/4 \sim 1/2$. 而 77MeV/u 时,出平面与在平面关联产额几乎不再有什么差别,而 E_{sum} 与 θ_{FF} 关系只有在周边碰撞区域才符合二元裂变.

3.3 裂变与重残核产生间的竞争^[9]

对于 44 和 77MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{232}\text{Th}$ 反应中产生的重碎片产物,利用飞行时间及能量二维谱在前角区,清楚地鉴别出两种组分,其质量数分别集中在 105u 和 150u 附近,分别相应为通常裂变和重残核.对于裂变组分前面已对它作过分析,而重残核成分具有以下

主要特征:(1)仅限于前角区发射并在束流方向附近成峰.(2)连系着高的中子多重性($M_n = 30 \pm 2$)表明它们来自中心碰撞过程.(3)具有高至 150MeV 的宽能谱,但其最可几能量并不符合于高 LMT 值,而降至实验探测阈(约 20MeV)附近,因而相当部分的重残核未被探测到.它们产生截面的下限由 44MeV 时的 280mb 增加至 77MeV 的 640mb,而相应的熔合裂变截面则由 1310mb 降至 930mb.由此,可以预计在重残核产生与折叠角分布中高 LMT 峰的消失之间也有必然联系:当入射能量增加时,由于轻粒子及 IMF 发射,类靶核将损失愈来愈多的质量和电荷,以致对于较慢的裂变过程,其位垒提高,从而有利于重残核的产生.而且,由于 IMF 以非平衡发射成分为主,向前角区聚集,从而显著地减小重残核的动能,使其最可几能量接近甚至低于实验探测阈值.这也解释了这些重残核既有宽能谱和低的最可几值而又具有相应中心碰撞的中子多重性.

4 近垒及垒下重离子熔合反应^[10]

利用叠靶照射后进行离线 γ 测量技术首次得到垒上 10MeV 至垒下 5MeV 能区 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中八个核素及同质异能态生成的激发函数.为了用 CCFUS 耦合道计算程序及 CASCADE 统计蒸发程序重现实验数据,仅考虑 ^{12}C 基态及第一激发态以及 ^{93}Nb 四个激发态的耦合道效应还不足以解释熔合截面的增强,而必须加入 α 转移道的影响.这似乎预示 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应体系在垒下及近垒区存在明显的 α 转移过程.

在近垒及垒下(25.0~40.5MeV)能区,测量了 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应的 2n/3n 分截面比.由于它是复合核 ^{109}Ag 的主要衰变道,约占总截面的(50~65)%,实验精度高,对于生成 ^{109}Ag 的入射道角动量分布形状相对不灵敏,在高斯型分波分布假定下由 CASCADE 统计模型计算提取了近垒及垒下能区 $^{12}\text{C} + ^{93}\text{Nb}$ 反应

体系平均角动量(L)随质心系能量 E_{cm} 的变化关系.

参 考 文 献

- 1 江栋兴等. 高能物理与核物理, 1992, 16(6):556
- 黄小临, 江栋兴等. 高能物理与核物理, 1994, 18(2):154
- 2 Galin J Jahnke U. J. Phys. G: Nucl. Phys., 1994, 20:1105
- Guerreau D, 江栋兴等. 高能物理与核物理, 1990, 14(6):537
- 3 Zott B, et al. Z. Phys, 1993, A346:201
- 4 Jiang Dongxing, et al. Nucl. Phys., 1989, A503: 560
- 5 Crema E, et al. Phys. Lett., 1991, B258: 266
- 6 Jiang Dongxing, Qian Xing, et al. Chinese J. Nucl. Phys., 1995, 17(3)
- 7 钱兴, 江栋兴等. 高能物理与核物理, 1995, 19(10)
- 8 江栋兴. CCAST-WL Workshop Series, 1995, 44:231.
- 9 Schwinn E, et al. Nucl. Phys. 1994, A568:169
- 10 钱兴, 江栋兴等. 高能物理与核物理, 1995, 19(7):603
- Qian Xing, Jiang Dongxing, et al. Chinese J. Nucl. Phys., 1995, 17(2):118

Progress in Research on the Mechanisms of Reaction Induced by Heavy Ions

Jiang Dongxing Qian Xing

(Department of Technical Physics, Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract The recent progress is presented concerning some studies on the mechanisms of nuclear reactions induced by heavy ions at the department of technical physics of Peking University.

Key Words intermediate energy heavy ion collision linear momentum transfer hot nucleus formation and decay energy dissipation azimuthal correlation

(上接第 39 页)

Peking University since 1987. The function, application and improvement work of the machines are described separately in this paper.

Key Words electrostatic accelerator applicatoin improvement