

# $^{12}\text{C}(50\text{MeV}/u) + ^{209}\text{Bi}$ 反应中线性动量耗散机制研究\*

江 栋 兴

(北京大学技术物理系 北京 100871)

**摘 要** 本文介绍  $^{12}\text{C}(50\text{MeV}/u) + ^{209}\text{Bi}$  核反应中线性动量转移 LMT 分布的实验测定及结果. 利用 BUU 方程对该碰撞过程进行了动力学模拟计算. 对理论计算所得 LMT 分布和实验分布进行了比较和讨论.

**关键词** LMT, BUU 方程, 核碰撞.

## 1 引 言

近年来,人们对研究高温核的形成和性质表现出极大兴趣<sup>[1]</sup>,促使人们寻求“加热”原子核的更有效方法以及更深入地探索碰撞过程中线性动量耗散动力学过程. 线性动量转移是一个重要物理量,它可作为衡量碰撞过程剧烈程度的一种“过滤器”,并将反应过程及反应产物进行分类. 因而,线性动量转移及其耗散机制成为研究中能重离子核反应的基础.

线性动量转移的实验测定,通常是由碰撞过程中反冲核的反冲速度得到的. 对于轻反应体系,合成体系主要经过发射  $n, p, \alpha$  等轻粒子而退激形成蒸发残核,可以直接测定其反冲速度;对于像本文研究的  $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$  重反应体系,合成核的主要衰变方式是二元裂变,测定互补裂变碎片的关联角也可得到线性动量转移的信息<sup>[2]</sup>. 在忽略横向线性动量转移时,只需测得两个互补裂变碎片出射方向与束流方向的夹角  $\theta_A$  和  $\theta_B$ , 用公式  $v_R = v_F/2 \cdot \sqrt{-TK/1 - TK/4}$  就可得到裂变核的反冲速度,式中  $K = 1/\text{tg}\theta_A + 1/\text{tg}\theta_B$ ;  $T = \text{tg}(\theta_A + \theta_B)$ . 对称裂变时,即  $v_F = \sqrt{2\langle E_K \rangle/A}$ , 其中裂变碎片平均总动能  $\langle E_K \rangle$  可由系统学给出,  $\langle E_K \rangle = 0.119Z^2/A^{1/3} + 7.3 \text{ MeV}$ .  $A$  和  $Z$  代表裂变核的质量数和原子序数. 可见,折叠角的大小直接反映裂变核反冲速度的大小,反冲速度愈大,则  $\theta_A + \theta_B$  愈小. 对于周边碰撞引起转

移裂变,折叠角稍小于  $180^\circ$ .

## 2 实 验

实验工作是在兰州重离子研究装置 (HIRFL) 的  $\phi 1.5\text{m}$  大靶室实验终端上,与近代物理研究所合作完成的. 实验细节和结果已在别处发表<sup>[3]</sup>,这里仅作简要叙述.  $50\text{MeV}/u$   $^{12}\text{C}^{6+}$  束轰击厚度为  $1.034\text{mg}/\text{cm}^2$  的  $^{209}\text{Bi}$  靶. 靶上束流约  $10\text{enA}$ ,束斑约  $6\text{mm}$ . 在束流两边,距靶约  $40\text{cm}$  处放置两个双棚雪崩室 (DGAC),用于探测反冲核裂变产生的两个互补碎片. 每个 DGAC 具有活性面积  $20 \times 30\text{cm}^2$ ,复盖探测角范围分别为  $52.5^\circ \sim 92.5^\circ$  和  $-47.5^\circ \sim -87.5^\circ$ . 对每个入碎片, DGAC 可给出时间、能量损失和  $X, Y$  二维位置的信号.

对于对称裂变,从测得互补裂变碎片散射角  $\theta_A$  和  $\theta_B$ ,得到裂变核的反冲速度. 在非完全熔合模型假设下,并假定裂变碎片的后继粒子蒸发过程不改变反冲速度,则可求得逐个事件的线性动量转移  $\text{LMT} = A_T/A_P \cdot v_R/v_P - v_R$ , 它实际代表弹核初始线性动量转移给靶核的份额. 式中  $A_P$  和  $A_T$  分别是弹靶核的质量数,  $v_P$  为弹核初始速度. 图 1 显示由此得到的线性动量转移分布. 这是一个不对称分布,其最可几线性动量转移为  $56.8\%$ ,相应的每个  $^{12}\text{C}$  核子转移给靶核的线性动量为  $173\text{MeV}/c$ . 另外,用双高斯拟合,表明除了中心碰撞组分外,在 LMT 约为  $0.3$  处,存在一小的擦边碰撞成分.

\* 国家教委博士基金和兰州重离子加速器国家实验室资助课题

的确,利用实验中在  $34^\circ$  方向探测到的  $\alpha$  粒子“开门”,挑选线性动量转移分布,由于这些  $\alpha$  粒子主要来自合成核的蒸发即相应于更剧烈的碰撞过程,则可将这一擦边碰撞成分去除,剩下一个相当对称的 LMT 分布.当然,为了更详细更定量了解线性动量转移,需要更为完全的符合实验,譬如互补裂变碎片与类弹核符合和它们与轻粒子发射的符合测量.

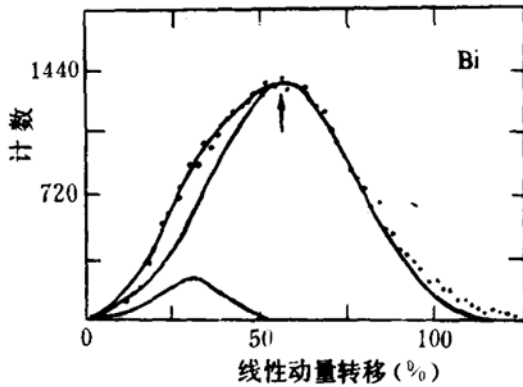


图 1 50MeV/u 的  $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$  反应的 LMT 分布.黑点是实验值,细线为实验分布双高斯拟合

### 3 LMT 耗散动力学的 BUU 计算

中能重离子(几十 MeV/u)引起反应时,弹靶核子相对运动的波长接近或小于核子间距离,其运动动能接近或大于弹核中核子的费米能量,这些特征决定中能重离子碰撞的耗散机制具有由低能至高能的过渡性质.在处理它的任何成功理论框架中,必须同时包含平均场效应和核子-核子级联碰撞效应. BUU 方程可以作为研究 LMT 耗散动力学的合适基础.

BUU 方程描述相空间分布函数  $f(r, p, t)$  在平均场和核子-核子碰撞作用下随时间的变化. 它可写为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial f}{\partial r} - \nabla U \cdot \frac{\partial f}{\partial p} \\ &= - \int \frac{d^3 p_2 d^3 p_1' d^3 p_2'}{(2\pi)^6} \sigma_{nn} v_{12} \\ & \cdot [ff_2(1-f_1')(1-f_2') - f_1'f_2'(1-f)] \\ & \cdot (1-f_2) \cdot \delta^3[p+p_2-p_1'-p_2'] \end{aligned}$$

其中,  $U$  为密度相关平均场,  $\sigma_{nn}$  为核子-核子碰撞截面,  $v_{12}$  为两碰撞核子的相对速度,  $(1-f_1)$  为泡里阻塞项. 在我们的计算中<sup>[4]</sup>, 平均场选用  $U(\rho) = -356(\rho/\rho_0) + 303(\rho/\rho_0)^{7/6}$ ,  $\sigma_{nn}$  则用自由核子碰撞截面的实验值, 忽略在核中介质效应的影响.

可以区分两类过程: 对于中心碰撞, 弹核完全进入靶核, 除了发射粒子外, 不出现任何碎片产物, 线性动量的不完全转移应归为预平衡粒子发射. 对大碰撞参数 ( $b=7.0$  和  $8.5$  fm),  $40\text{fm}/c$  时, 弹靶核粘在一起形成了一个合成体系, 它转动并允许弹靶核间核子交换, 在  $80\text{fm}/c$  时, 除在束流方向的粒子发射和出现一类靶核外, 在负偏转角方向出射一类弹碎片. 这样的图像既不符合非完全融合也不符合参加者-旁观者模型, 确十分类似于在更低能区观察到的所谓深部非弹反应.

关于反应的平衡时间: 从图 1 看到, 在  $200\text{fm}/c$ , 即约  $6.6 \times 10^{-22}\text{s}$  以前, 粒子发射主要是沿束流方向的. 计算结果表明: 虽然在  $200\text{fm}/c$  时, 粒子发射已近各向同性, 但弹核子在靶核内的分布仍未形成均匀分布. 为节省计算时间, 我们未继续计算. 图 2 展示不同碰撞参数时, 计算所得 LMT 随时间的变化. 对于确定碰撞参数, LMT 开始随时间急剧上升, 在大约  $60\text{fm}/c$  时, 几乎达到其最大值, 其后只有少许涨落, 这似乎表明: LMT 在很短时间 (约  $2 \times 10^{-22}\text{s}$ ) 内就已达到平衡. 图中也清楚表明: 即使对于  $b=1\text{fm}$  的中心碰撞, LMT 的平衡值也仅约  $0.75\text{fm}/c$ , 而未发生完全线性动量转移.

从 LMT 平衡值随碰撞参数的变化关系, 可得到如图 3 中实线所示的 LMT 分布. 为便于比较和讨论, 图中同时给出由点组成的 LMT 实验分布. 虽然两者在形状和极大值位置都相同, 但两者在定性和趋势上的符合是可以接受的. 实际上, 实验 LMT 分布是通过合成体系对称裂变衰变道测得的, 其形状和极大值位置必然会受到对称裂变几率随 LMT 变化的影响. 现已证实<sup>[5]</sup>, M. Conjeaud 等人在通过裂

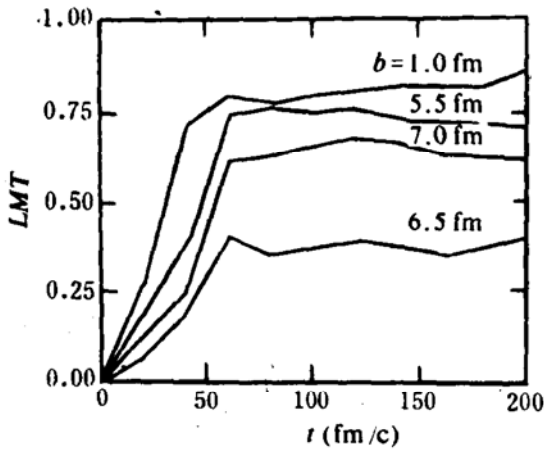


图 2 50MeV/u 的<sup>12</sup>C+<sup>209</sup>Bi反应,不同碰撞参数下,LMT 随时间的变化关系

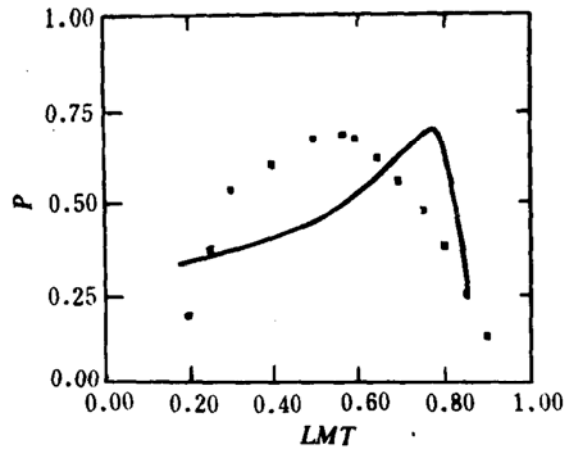


图 3 50MeV/u 的<sup>12</sup>C+<sup>209</sup>Bi 反应中 LMT 分布. 实线为 BUU 计算结果,点为实验值

变碎片折叠角方法研究 31 ~ 44MeV/u 的 <sup>40</sup>Ar + <sup>232</sup>Th 反应时,发现在 40MeV/u 附近,相应于中心碰撞组分的消失<sup>[6]</sup>是由于高激发核二元裂变为其它衰变方式(如多元裂变、多重碎裂等)所代替.为了从实验上测得尽可能少受具体衰变道的畸变影响的 LMT 分布,有必要发展新的实验技术和建立新的测量装置,譬如建立 4π 中子荷电粒子探测装置以测量反应过程蒸发粒子多重性.在理论计算方面, BUU 计算的 LMT 分布只是入射道的作用结果,为了与实验 LMT 分布比较,需要进一步研究在高激发能区(>300MeV)原子核多种衰变

方式的竞争,系统了解高激发、高自旋原子核的衰变性质.

### 参 考 文 献

- 1 Jiang Dongxing, et al. Nucl. Phys., 1989, A503 : 506
- 2 Voila V E. Nucl. Phys., 1987, A471 : 53C
- 3 江栋兴等.高能物理与核物理,1992,16(6) : 556
- 4 黄少临等.高能物理与核物理,1993,17(8)
- 5 Guerreau D, 江栋兴等.高能物理与核物理,1990, 14(6) : 535
- 6 Conjeaud M, et al. Phys. Lett., 1985, 159B : 244

## Study of LMT Mechanism in <sup>12</sup>C(50MeV/u) + <sup>209</sup>Bi Reaction

Jiang Dongxing

(Department of Technique Physics, Beijing university, Beijing 100871)

**Abstract** The experimental measurements and results of LMT distribution in <sup>12</sup>C(50MeV/u) + <sup>209</sup>Bi reaction are reported. By using BUU equation for nucleus - nucleus collision process, the dynamic imitation calculation is made. The theoretical calculated LMT distribution is compared with the experimental one and some discussion has been reviewed.

**Key Words** LMT, BUU equation, nuclear collision.