

30MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应中中等 质量碎片的发射时标*

李祖玉 王宏伟 贺智勇 段利敏
张保国 戴光曦 符彦飏 靳根明

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 采用强度干涉技术,研究了 30MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应中 IMF-IMF 关联的实验结果. 利用三体弹道模型从约化速度关联函数提取了中等质量碎片的发射时间. 中等质量碎片的平均发射时间随其能量而变化,从低能时的约 300fm/c 下降到高能时的约 100fm/c. 扣除类弹碎片的贡献后,得到此反应发射中速中等质量碎片的平均发射时间约为 250fm/c. 表明此反应发射的中等质量碎片主要来自于相继两体衰变.

关键词 约化速度关联函数 三体弹道模型 中等质量碎片 发射时间

1 引言

中能重离子研究(10—100MeV/u)的主要目的之一是探索在高能量高密度下核物质的性质. 高温、高密度的核物质的主要衰变模式是发射中等质量碎片(IMF)^[1-3]. IMF的发射研究可提供关于激发核时空程度的有价值的知识. 在高入射能时($E/A > 100\text{MeV}$),碎片的发射时间很短,意味着热核瞬时多重碎裂. 在低轰击能下($E/A < 10\text{MeV}$),碎片产生于全融合或非完全融合,是标准的复合核衰变. 而对于中能区,核-核之间的相互作用是复杂的,由吸引的平均场相互作用占主导向排斥的核子-核子相互作用过渡,中等质量碎片发射机制既有平衡发射也有非平衡发射,中等质量碎片发射从跟随衰变变化到瞬时发射. 因此,在中能区研究 IMF 的发射时标是重要的,它是发射源时空程度的直接量度,是区别跟随衰变和多重碎裂的直接标志.

目前提取 IMF 发射时间的最有效办法是通过小角关联技术,测量反应中出射的两碎片,利用干涉学原理来提取^[4-6]. 利用这一方法,测量了 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中轻粒子^[7,8]和轻碎片^[9]的发射时间以及 30MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ 反应中 IMF 的发射时间^[10]. 本文

1997-07-25收稿

* 国家自然科学基金(19675053)资助

则报道 30MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应中 IMF 的发射时间测量, 并研究 IMF 发射时间随碎片能量的变化规律.

2 实验概况

实验是在兰州重离子加速器(HIRFL)的大筒型散射室上完成的. 采用 30MeV/u 的 ^{40}Ar 束轰击 $407\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 厚的 $^{\text{nat}}\text{Ag}$ 靶, 其束流强度约 10—20nA. 反应中出射的碎片由安置在前角区的一套密集六角排列的 13 单元 ΔE - E 望远镜阵列探测器^[11]来进行关联测量. 该阵列探测器距靶心 650mm, 阵列中心与束流方向夹角 $\theta = 17^\circ$, 最大夹角 22° , 最小夹角 11° , 相邻两套探测器的夹角为 3° , 最远两套的夹角为 11° . 该阵列探测器中每一套望远镜均由一块 $200\mu\text{m}$ 厚的 Si 作为 ΔE 测量, 后接一个 50mm 厚的 BGO 作为 E 测量, 其有效探测面积为 $\phi 17\text{mm}$. ΔE 探测器的能量校准是采用 ThC-ThC' α 源以及精密脉冲发生器, 而对于 BGO 探测器的能量校准, 则采用碎片在 $\Delta E(\text{Si})$ 探测器中的能量损失结合粒子的能量-射程表反推求得. 实验采用传统的 ΔE - E 方法鉴别粒子. 结果表明, 该阵列探测器能清楚地分辨出氢的同位素以及 $3 \leq Z \leq 13$ 的中等质量碎片, 对于 $Z > 13$ 的碎片, 由于探测器的能量阈较高而没有记录. 在离线分析中, 此探测器测量轻粒子和 IMF 的能量阈分别为: $4.8(^1\text{H})$ 、 $19(^4\text{He})$ 、 $38(^7\text{Li})$ 、 $58(^9\text{Be})$ 、 $80(^{11}\text{B})$ 、 $103(^{12}\text{C})$ 、 $130(^{14}\text{N})$ 、 $158(^{16}\text{O})$ 、 $193(^{19}\text{F})$ 、 $222(^{20}\text{Ne})$ 、 $258(^{23}\text{Na})$ 、 $290(^{24}\text{Mg})$ 和 $329(^{27}\text{Al})$ MeV.

3 实验测量的关联函数和发射时间

对于两体关联事件, 关联函数 R 定义为^[4-6]:

$$\Sigma Y_{12}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = C_{12}[1 + R(\zeta)]\Sigma Y_1(\mathbf{p}_1)Y_2(\mathbf{p}_2), \quad (1)$$

其中 $Y_{12}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ 表示符合产额, $Y_i(\mathbf{p}_i)$ 表示单举产额, $\Sigma Y_{12}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ 表示归一化函数, C_{12} 为归一化系数, 以保证在大 ζ 值时(即无关联情况下) $R(\zeta) = 0$, 这里 $\zeta = q$ 或 V_{red} , q 为相对动量, V_{red} 是约化速度, 定义为:

$$V_{\text{red}} = \left| \mathbf{p}_1/m_1 + \mathbf{p}_2/m_2 \right| / \sqrt{Z_1 + Z_2}, \quad (2)$$

其中 m_1 , m_2 , Z_1 , Z_2 , \mathbf{p}_1 , \mathbf{p}_2 分别为两 IMF 的质量、电荷和动量. 图 1 分别显示了 30MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应中测得的 Li-Li、Li-Be、Li-B 以及 $3 < Z_1 \leq 12$, $3 < Z_2 \leq 12$ 关联事件的相对动量关联函数(图(a))和约化速度关联函数(图(b)).

从图 1 中可以看出, 关联函数在低的 q 或 V_{red} 值处均成反关联, $R < 0$. 这是由于低 q 或 V_{red} 值的两碎片产生于一个短的时间间隔, 两碎片的空间距离很小, 强的库仑排斥作用使 R 为负值, 从关联函数的反关联程度便可导出这些 IMF 的发射时间. 从图 1(a)可以看出, 碎片质量不同, 相对动量关联函数在低 q 值处的反关联程度也不同, 碎片 Z 值越大, 库仑排斥越大, 关联函数 $1 + R(q)$ 在低 q 值处的上升变慢. 而约化速度关联函数 $1 + R(V_{\text{red}})$ 在低 V_{red} 处反关联程度对不同的碎片却几乎相同(图 1(b)). 这表明可以累加不同 Z 值的 IMF

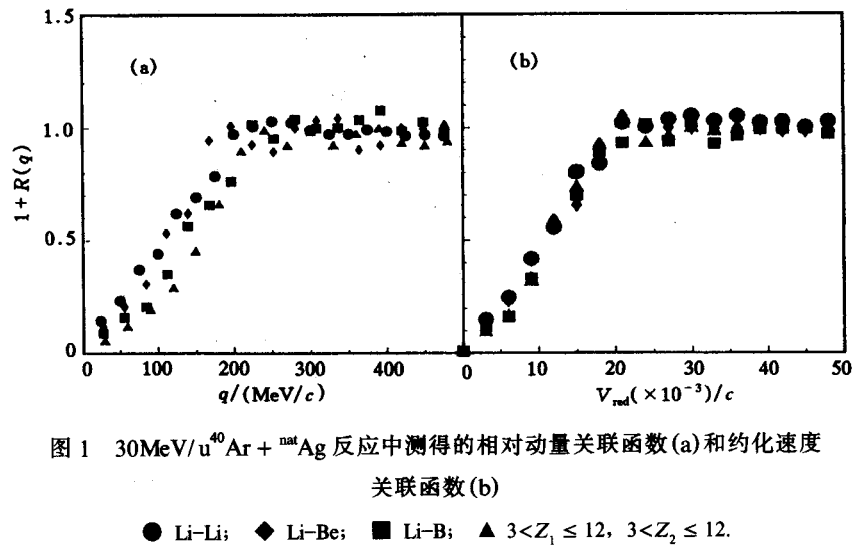


图 1 30MeV/u⁴⁰Ar + ^{nat}Ag 反应中测得的相对动量关联函数(a)和约化速度
关联函数(b)

● Li-Li; ◆ Li-Be; ■ Li-B; ▲ 3 < Z₁ ≤ 12, 3 < Z₂ ≤ 12.

关联事件, 它可大大提高统计精度, 但对分辨的影响很小. 这充分说明了约化速度用于 IMF 关联函数的优越性. 约化速度关联函数的理论论证还可参考文献 [12]. 下面的 IMF 发射时间提取均采用约化速度关联函数方法.

为了从实验测量的关联函数提取碎片的发射时间, 采用了改进的三体弹道模拟程序 MENEKA^[6, 13, 14]. 该程序认为粒子均来自一个半径为 r 的源的表面发射, 两粒子发射的时间差 t 通过指数分布几率 $p(t) \propto e^{-t/\tau}$ 随机抽样产生, 此处 τ 为粒子平均发射时间并可自由给定. 发射粒子的能量通过实验测量的能谱抽样给出. 三体 (发射的两粒子以及发射源) 相互受库仑力和核力的作用会使粒子的轨道和速度发生变化, 从而使粒子对的相对动量发生变化. 该程序还考虑了探测器阵列的几何条件和探测阈等的影响.

4 实验结果

实验中探测器阵列置于前角区 $\theta_{av} = 17^\circ$, 而前角区出射的 IMF 有多种成份. 低能碎片可能来自于类靶平衡核热蒸发, 高能碎片可能来自于类弹碎片, 而中等质量碎片可能来自于非平衡发射过程.

图 2 显示了不同碎片能量为 $((E_1 + E_2) / (A_1 + A_2))$ 时的 IMF ($3 < Z_1 \leq 12, 3 < Z_2 \leq 12$) 关联函数, 图 2(a) 为能量最低的一组 5—10 MeV/u, 得到的平均发射时间约为 300 fm/c. 这几百 fm/c 量级的发射时间与复合核衰变的统计模型预言的时间标度是一致的^[15, 16], 例如文献 [16] 模型预言, 从激发能 700 MeV 的重核中 ($A = 226, Z = 93$) 发射出两个碳碎片的平均时间间隔 $\tau \approx 300$ fm/c. 随着 IMF 能量增加, 发射时间下降很快, 在 10—13 MeV/u 能量下 (图 2(b)), IMF 平均发射时间约 200 fm/c, 但发射时间仍接近于统计理论预言值. 当碎片能量继续升高至 15—17, 17—20 和 20—35 MeV/u 时 (图 2(d)、(e)、(f)), 发射时间下降至约 100 fm/c, 这些快速发射出的高能 IMF, 不可能来自于完全平衡的重余核的统计发射, 这些时间却与动力学模型预言值^[17, 18]相一致. 图 3 显示了碎片发射时间随碎片能量

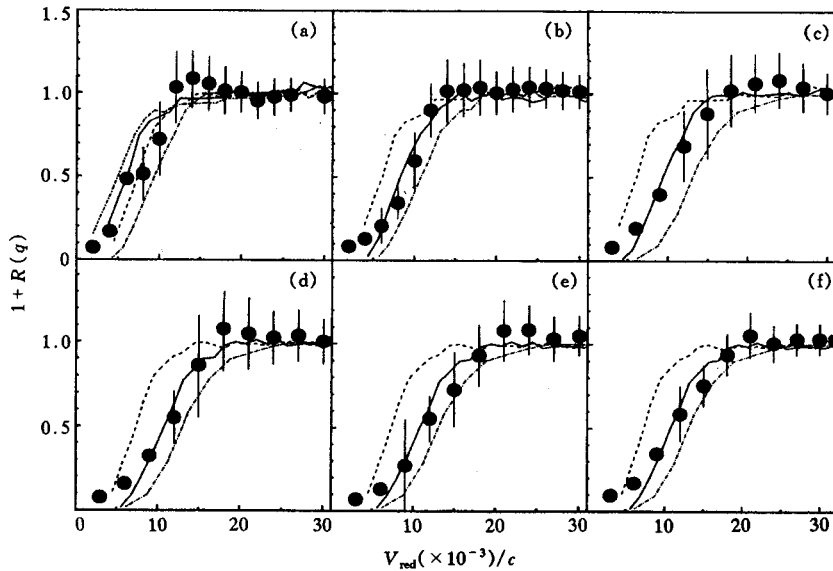


图 2 不同能量下 IMF 关联函数
曲线为 MENEKA 程序的理论计算结果

- (a) 5—10MeV/u, $\cdots\cdots\cdots$ 150fm/c, $----$ 300fm/c, $——$ 600fm/c, $\cdots\cdots\cdots$ 900fm/c;
 (b) 10—13MeV/u, $\cdots\cdots\cdots$ 100fm/c, $——$ 200fm/c, $----$ 600fm/c;
 (c) 13—15MeV/u, $\cdots\cdots\cdots$ 50fm/c, $——$ 150fm/c, $----$ 600fm/c;
 对 (d) 15—17MeV/u, (e) 17—20MeV/u,
 (f) 20—35MeV/u, $\cdots\cdots\cdots$ 50fm/c, $——$ 100fm/c, $----$ 300fm/c.

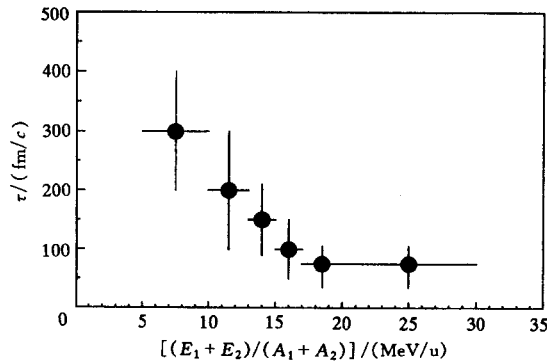


图 3 IMF 发射时间随 IMF 的每核子能量的变化规律

的变化规律.

为了得到 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应中中速 IMF 的平均发射时间, 必须扣除类弹碎片的贡献, 我们将能量为 $E_1/A_1 + E_2/A_2 \geq 40\text{MeV/u}$ 的高能碎片认为是类弹碎片, 而能量 $E_1/A_1 + E_2/A_2 < 40\text{MeV/u}$ 的碎片则是中速成份. 图 4 显示了扣除类弹碎片贡献后中速碎片的约化速度关联函数. 比较实验点和理论曲线可知, $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应中, 中速 IMF 的平均发射时间约为 250fm/c . 这个时间长于表征发生多重碎裂的发射时间 (约 100fm/c), 表明在这束流能量下还未进入多重碎裂能区. 但这个发射时间又小于较低能量

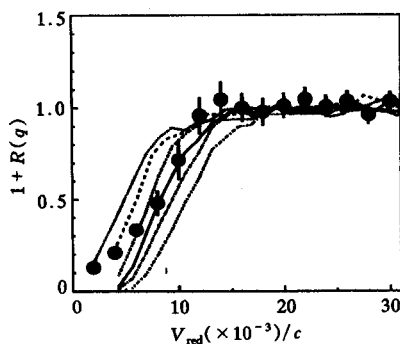


图 4 中等速度 IMF 的约化速度关联函数

----- 100fm/c, ---- 150fm/c, —— 200fm/c, - · - · - 300fm/c, - - - - 600fm/c, ····· 900fm/c.

和较重反应系统 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中的发射时间(约 $300\text{--}600\text{fm/c}$)^[9]. 显示出此反应 IMF 发射时间明显变短, 但仍未进入多重碎裂能区.

5 总结

本文给出了 $30\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{107}\text{Ag}$ 反应中 IMF 关联函数的实验结果. 结合三体弹道模型从 IMF 约化速度关联函数中提取了 IMF 的平均发射时间. 实验结果表明, IMF 发射时间随 IMF 能量的增加而缩短, 低能 IMF 主要来自于平衡热核的统计蒸发过程, 相应的发射时间较长, 约 300fm/c , 高能 IMF 大多来自于非平衡发射过程, 其发射时间较短约 100fm/c , 这与动力学模型预言值相一致. 在扣除类弹碎片的贡献后, 得到此反应发射中速 IMF 的平均发射时间约为 250fm/c . 表明此反应 IMF 主要来自于相继两体衰变, 仍未进入多重碎裂能区.

感谢 A. Elmaani, E. Bauge, N. N. Ajitanand, Weidong Jiang 提供了 MENEKA 计算程序.

参 考 文 献

- [1] Harris J W et al. Nucl. Phys., 1987, **A471**:241C—252C
- [2] de Souza R T et al. Phys. Lett., 1991, **B268**:6—11
- [3] Bowman D R et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **67**:1527—1530
- [4] Trockel R et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **59**:2844—2847
- [5] Kim Y D et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **67**:14—17
- [6] Bauge E et al. Phys. Rev. Lett., 1993, **70**:3705—3708
- [7] He Zhi Yong et al. Chinese Physics Letters, 1995, **12**(9): 521—523
- [8] He Zhi Yong et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1996, **20**(7):596—600
(贺智勇等. 高能物理与核物理, 1996, **20**(7): 596—600)
- [9] He Zhi Yong et al. Nucl. Phys., 1997, **A620**:214—228
- [10] He Zhi Yong et al. Acta Physica Sinica (in Chinese), 1997, **46**(7):1312—1318
(贺智勇等. 物理学报, 1997, **46**(7): 1312—1318)

- [11] Li Zu Yu et al. Nucl. Instr. and Meth., 1996, A373:198—201
- [12] Kim Y D et al. Phys. Rev., 1992, C45:387—395
- [13] Elmaani A et al. Nucl. Instr. and Meth., 1992, A313:401—412
- [14] Elmaani A et al. Phys. Rev., 1993, C47:1321—1324
- [15] Gelbke C K Nucl. Phys., 1992, A538:65C—74C
- [16] Friedman W A et al. Phys. Rev., 1990, C42:667—673
- [17] Peilert G et al. Phys. Rev., 1989, C39:1402—1419
- [18] Boal D H, Glosli J N. Phys. Rev., 1988, C37:91—100; 1990, C42:R502—R505

Time Scale for Emission of Intermediate Mass Fragments in $E/A = 30\text{MeV } ^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ Reaction *

Li Zuyu Wang Hongwei He Zhiyong Duan Limin
Zhang Baoguo Dai Guangxi Fu Yanbiao Jin Genming
(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract Fragment-fragment correlation functions have been measured in $E/A = 30$ MeV $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ reaction via the technique of intensity interferometry. Emission times of intermediate mass fragments have been extracted from reduced velocity correlation functions by using the threebody trajectory model. The average emission time of intermediate mass fragments varies with the energy of fragments. It decreases from about 300fm/c for low energy fragments to about 80 fm/c for energetic fragments. After subtracting the contribution of projectile-like fragments, average emission times of mid-rapidity fragments are of the order of 250 fm/c for this reaction. It indicates that intermediate mass fragments emitted in this reaction mainly come from sequential binary decays.

Key words reduced velocity correlation function, three body trajectory model, intermediate mass fragment, emission time

Received 25 July 1997

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19675053)