

25 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中 高激发热核的时空演化^{*}

贺智勇 靳根明 李祖玉 段利敏 戴光曦 吴和宇

张保国 文万信 漆玉金 罗清政 王宏伟 王素芳

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(1997 年 8 月 4 日收到; 1997 年 9 月 18 日收到修改稿)

报道了 25 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中从两粒子相对动量关联函数提取的发射时间随空间大小演化的规律. 结果表明, 即使发射源质量数减小 50%, 对计算的关联函数及提取的发射时间影响仍然很小. 在短发射时间 ($\tau \leq 100 \text{ fm}/c$) 情况下, 较小的核物质密度, 导致提取的发射时间变小. 因此, 在正常核物质密度参数下提取的 τ 值可作为发射时间的上限值. 在长发射时间 ($\tau \geq 300 \text{ fm}/c$) 情况下发射时间不随空间大小变化, 提取的 τ 即为实际的发射时间.

PACC: 2570; 2587; 2590

1 引 言

高激发热核在退激时将发射大量轻粒子和中等质量碎片 (IMF) ($Z \geq 3$). 测量这些产物的发射时间及其发射源的空间大小, 可以用来探索高激发热核的内部特性和衰变规律. 例如, 通过测量发射空间的大小, 可以研究热核衰变时的压缩-膨胀现象; 测量轻粒子的发射时间, 可以了解轻粒子是来自于前平衡发射还是来自于热核的蒸发; 测量 IMF 的发射时间, 可以判断 IMF 的发射机制乃至多重碎裂的发生. 另一方面, 两粒子的相对波函数受短程核相互作用和长程库仑力的影响, 影响的大小主要取决于粒子的时-空分离, 因此, 两粒子相对动量关联函数可以用来研究发射源的时-空演化^[1,2]. 例如, 在零寿命假设下可以提取出发射空间的大小^[3]; 在固定发射空间的情况下可提取发射时间的大小^[4]. 我们已经利用固定发射空间提取发射时间的方法, 研究了不同轰击能量、不同反应系统中轻粒子和 IMF 发射时标的变化规律^[5-9]. 本文则以 25 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中出射的轻粒子为例, 研究发射空间的变化对提取发射时间的影响.

2 实验概况

实验是在兰州重离子加速器 (HIRFL) 的大散射室 (长 6 m, 直径 2.4 m) 上进行的, 采

^{*} 国家自然科学基金及中国科学院重点项目基金资助的课题.

用 25 MeV/u 的 ^{40}Ar 束轰击 ^{197}Au 靶, 该反应能产生温度达 5 MeV 和激发能高达 4 MeV/u 的高激发热核^[10]. 实验中束流强度为 10 nA, 在前角区安装一套有 13 个 ΔE -E 望远镜组成的阵列探测器系统, 进行带电粒子的关联测量^[11]. 该阵列距靶心 580 mm, 阵列中心与束流方向夹角 20° . 其中每一套 ΔE -E 均由一块 300 μm 厚的硅片作 ΔE 测量加一块 50 mm 厚的 BGO 作 E 测量, 有效探测面积为 $\phi 17\text{ mm}$. 相邻两套探测器的夹角(相对于靶子)为 3° , 最远两套的夹角为 13° . 实验中采用 ΔE -E 方法鉴别粒子, 结果表明该阵列能分辨出 p, d, t, α 等轻粒子和 Li, Be, B, C 等 IMF.

3 结果分析与讨论

两粒子关联函数 $1 + R(q)$ 定义为

$$\Sigma Y_{12}(P_1, P_2) = (1 + R(q)) \Sigma Y_1(P_1) Y_2(P_2). \quad (1)$$

其中 $q = \mu |(P_1/m_1 - P_2/m_2)|$ 为两个关联粒子之间的相对动量, $Y_{12}(P_1, P_2)$ 表示两个关联粒子相对动量为 q 的符合产额, $Y_i(P_i)$ 表示单举产额, $\Sigma Y_1(P_1) Y_2(P_2)$ 表示归一化函数. 为了提取轻粒子发射时间, 我们采用了一个改进的三体弹道模拟程序 MENEKA^[12]. 该模型认为粒子均来自于一个半径为 R 的源的表面发射, 两粒子发射的时间差 t 通过指数分布概率 $P(t) \propto e^{-t/\tau}$ 随机抽样产生, 此处 τ 为粒子的平均发射时间并可自由给出. 粒子发射时的能量通过实验测得的能谱抽样给出, 这样减小了发射源速度和源温度误差的影响. 三体(发射的两个粒子以及发射源)相互受库仑力和核力的作用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. 该模型还考虑了探测器阵列的接受和筛选.

3.1 关联函数随发射空间大小的变化

发射源的半径 R 取为 $R = rA^{1/3}$, 其中 A 为发射源的质量数, r 为核半径参量(与核密度有关). 对发射源质量数 A 和电荷 Z 的变化, 引入系数 k ($k \leq 1$),

$$\begin{aligned} A &= k(A_p + A_T) = kA_0, \\ Z &= k(Z_p + Z_T) = kZ_0, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 A_p 和 A_T 分别为弹核和靶核质量数, Z_p 和 Z_T 分别为弹核和靶核电荷. 图 1 显示了 A 分别为 A_0 , $0.7A_0$ 和 $0.5A_0$ 时用 MENEKA 程序计算的 25 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中 p-d 关联函数, 计算中 r 取为 $r_0 = 1.44\text{ fm}$. 从图 1 可见无论是较短的发射时间(图 1(a))还是较长的发射时间(图 1(b)), 关联函数对源的质量数不是很灵敏. 即使质量数减少 50%, 关联函数变化仍很小.

图 2 显示了核半径参量 r 分别为 r_0 的 1, 2, 3 倍时($r_0 = 1.44\text{ fm}$), 不同发射时间 τ 下的 p-d 关联函数, 计算中 A 取为 $0.7A_0$ 值. 对较短的发射时间 $\tau = 30\text{ fm}/c$ (图 2(a)), 关联函数对 r 的变化很灵敏. 当 $r = r_0$ 时(正常的核物质密度), p-d 关联函数的反关联程度最强烈, 随着 r 值的增大, 反关联程度变弱. 这是由于当发射两粒子的时间间隔很短时, 发射源空间越大, 两关联粒子间的距离越大, 因此, 两粒子的库仑排斥力越弱, 导致反关联

程度越弱. 当 $r=3r_0$ (即一个膨胀的发射源) 时, p - d 关联函数在小 q 值处已变得很陡了.

随着发射时间变长, 关联函数对 r 的灵敏性也逐渐变小. 当 $\tau=100\text{ fm}/c$ 时, 随着 r 的增加, p - d 关联函数的反关联程度仍逐渐变弱; 但当 $\tau=300\text{ fm}/c$ 时, 随着 r 的增加, 关联函数几乎不变. 显然, 在较长发射时间情况下, 先后发射的两粒子间的距离主要取决于发射两粒子的时间间隔, 而对源的大小 (即两粒子的发射起点) 依赖不大. 因此, 两粒子和源之间的库仑力也主要取决于发射时间, 而对源的大小不灵敏.

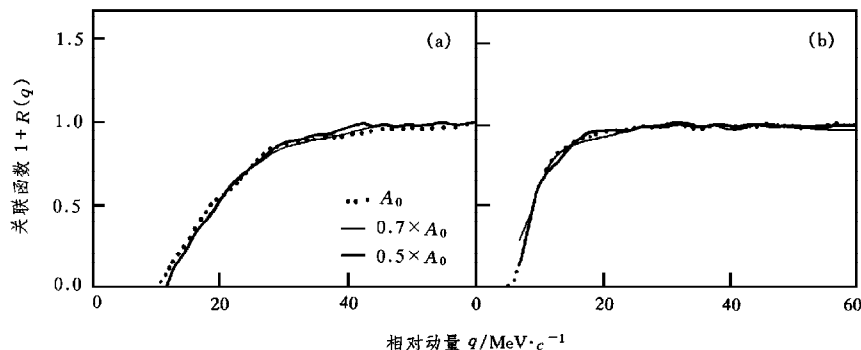


图 1 25 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中不同质量数 A 下的 p - d 关联函数 (a) $\tau=30\text{ fm}/c$, (b) $\tau=300\text{ fm}/c$

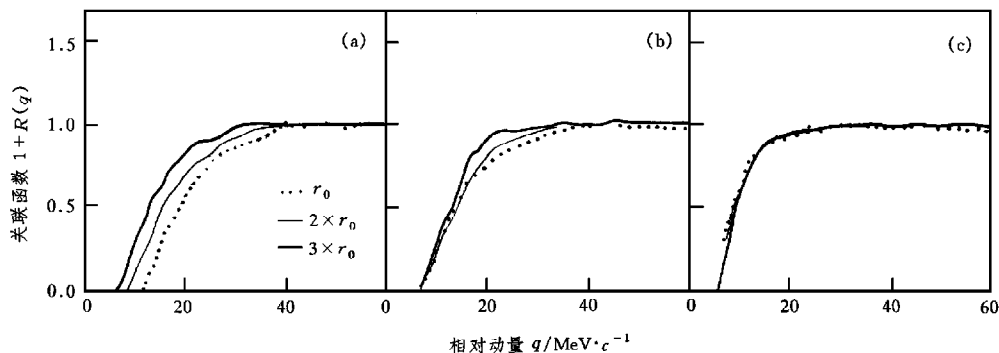


图 2 不同半径参量 r 下的 p - d 关联函数 (a) $\tau=30\text{ fm}/c$, (b) $\tau=100\text{ fm}/c$, (c) $\tau=300\text{ fm}/c$

综合图 1 和图 2 可知, 发射空间对关联函数的影响主要来自于发射源的核物质密度, 而几乎不依赖于源的质量数. 较小的核物质密度 (即膨胀的发射源) 导致关联函数的反关联程度变弱. 关联函数对空间的依赖性在较短的发射时间 (如 $\tau \leq 100\text{ fm}/c$) 情况下较明显, 在较长的发射时间情况下则消失了.

3.2 发射空间大小对提取的发射时间的影响

图 3 显示了 p - d 关联对的能量和分别为 14—47, 47—80 及 80—150 MeV 时实验测量的 p - d 关联函数. 图中的曲线分别代表在不同的发射时间 τ 值下 MENEKA 模拟出的 p - d 关联函数, 其中, 计算中固定 $A=0.7A_0$ 和 $r=r_0$ 不变. 与发射空间的影响类似, 随着发

射时间的变长, 关联函数的反关联程度变弱. 图 3(a) 为能量最高的一组 $E_1 + E_2 = 80\text{—}150\text{ MeV}$ 的 p-d 关联函数, 比较实验点和理论计算结果可知, 这些高能轻粒子的发射时间约在 $100\text{ fm}/c$ 左右. 图 3(b) 和图 3(c) 分别为 $E_1 + E_2 = 47\text{—}80\text{ MeV}$ 和 $E_1 + E_2 = 14\text{—}47\text{ MeV}$ 的 p-d 关联函数, 这两组能量下提取的发射时间约为 $\tau \approx 150\text{ fm}/c$ 和 $\tau \geq 300\text{ fm}/c$. 可见, 粒子发射的时间随着粒子能量的增加而缩短, 表明高能粒子是在早期发射.

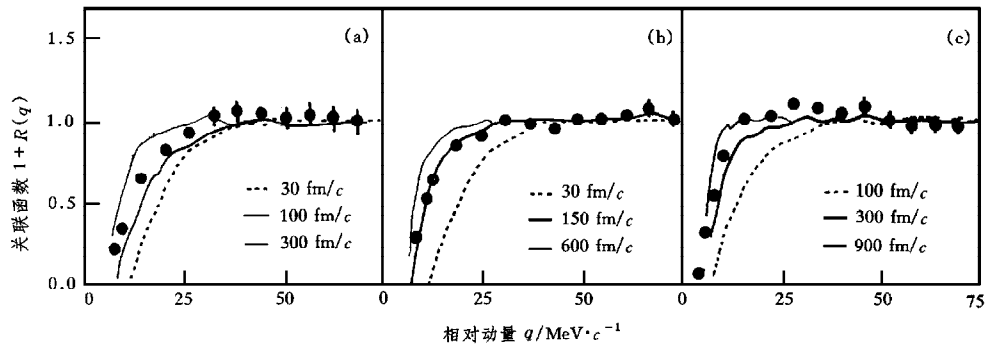


图 3 不同粒子能量下的 p-d 关联函数 (a) $E_1 + E_2 = 80\text{—}150\text{ MeV}$, (b) $E_1 + E_2 = 47\text{—}80\text{ MeV}$, (c) $E_1 + E_2 = 14\text{—}47\text{ MeV}$

为了探讨发射空间对提取的发射时标的影响, 计算了在各种 r 值下的 p-d 关联函数. 图 4 显示了从 p-d 关联函数实验数据中提取出的发射时间和空间的关联图. 图中的实心

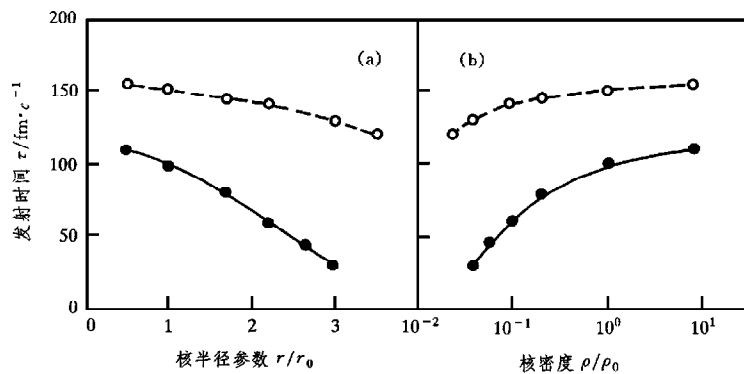


图 4 提取的发射时间随核半径参数 r 和核物质密度 ρ 的演化 ● 为 $E_1 + E_2 = 80\text{—}150\text{ MeV}$, ○ 为 $E_1 + E_2 = 47\text{—}80\text{ MeV}$

圆点为从高能组 $E_1 + E_2 = 80\text{—}150\text{ MeV}$ 中提取出的时-空演化图, 由于高能粒子的发射时间较短, 提取的发射时间 τ 值随半径参数 r 的变化很大, 从 $r = r_0$ 的 $100\text{ fm}/c$ 下降至 $r = 3r_0$ 的 $30\text{ fm}/c$. 而对于中能组 $E_1 + E_2 = 47\text{—}80\text{ MeV}$ (图中的空心圆点), τ 值随 r 值变化很小, 从 $r = r_0$ 的 $150\text{ fm}/c$ 下降至 $r = 3.5r_0$ 的 $120\text{ fm}/c$. 即无论核系统是否有压缩-膨胀效应, 提取出的发射时间约在 $120\text{—}150\text{ fm}/c$. 对于低能组 $E_1 + E_2 = 14\text{—}47\text{ MeV}$,

$\tau \geq 300 \text{ fm}/c$, τ 值随 r 值的变化而保持不变.

图 4(b) 为发射时间随核物质密度 ρ 的演化图, 其中, $\rho/\rho_0 = (r_0/r)^3$. 与图 4(a) 相同, 高能组提取出的 τ 随 ρ 变化较大, 而中能组提取出的 τ 随 ρ 变化较小. 对高能组, 当 ρ 减小 (即核物质膨胀) 时, τ 值减小, 从 $\rho = \rho_0$ 的 $100 \text{ fm}/c$ 变化至 $\rho = 0.1\rho_0$ 的约 $60 \text{ fm}/c$. 从图 4(b) 的结果还可看出, 当 ρ 变大且 $\rho \geq \rho_0$ (即核物质压缩) 时, τ 值几乎保持不变. 因此, 在正常核物质密度下提取出的发射时间为其上限值, 当核物质存在压缩-膨胀现象时, 得到的发射时间小于或等于此值.

4 结 论

本文通过分析 $25 \text{ MeV}/u$ $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中 p - d 关联函数的实验结果, 讨论了高激发核衰变中发射源的时-空演化. 发射空间对关联函数的影响主要来自于发射源的核物质密度的影响, 而几乎不依赖于源的质量数. 当发射时间较短 ($\tau \leq 100 \text{ fm}/c$) 时, 从关联函数提取出的发射时间随核物质密度的减小 (即发射源膨胀) 而减小; 在正常核物质密度下提取的发射时间为真实发射时间的上限值. 当发射时间较长时, 提取出的发射时间随核物质密度变化很小, 在正常核物质密度下提取出的值即为实际的发射时间值.

感谢法国 LPC 研究所的 A. Elmaani, E. Bauge, N. N. Ajitanand 提供了 MENEKA 计算程序.

- [1] R. Hanbury-Brown, R. Q. Twiss, *Nature*, **178**(1956), 1046.
- [2] S. E. Koonin, *Phys. Lett.*, **B70**(1977), 43.
- [3] Hongfei Xi *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A552**(1993), 281.
- [4] E. Bauge *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **70**(1993), 3705.
- [5] Zhiyong He *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A620**(1997), 214.
- [6] Zhiyong He *et al.*, *Eur. Phys. J.*, **A1**(1998), 61.
- [7] Zhiyong He *et al.*, *Chin. Phys. Lett.*, **12**(1995), 521; **13**(1996), 168.
- [8] He Zhi-yong *et al.*, *Acta Physica Sinica*, **46**(1997), 1312(in Chinese).
- [9] He Zhi-yong *et al.*, *High Energy Physics and Nuclear Physics*, **20**(1996), 8; 596(in Chinese).
- [10] H. Wu *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A617**(1997), 385.
- [11] Zuyu Li *et al.*, *Nucl. Inst. Meth.*, **A373**(1996), 198.
- [12] A. Elmaani *et al.*, *Nucl. Inst. Meth.*, **A313**(1992), 401.

SPACE-TIME EVOLUTION OF HIGHLY EXCITED NUCLEUS FROM $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ REACTIONS AT 25 MeV/NUCLEON*

HE ZHI-YONG JIN GEN-MING LI ZU-YU DUAN LI-MIN DAI GUANG-XI

WU HE-YU ZHANG BAO-GUO WEN WAN-XIN QI YU-JIN

LUO QING-ZHENG WANG HONG-WEI WANG SU-FANG

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

(Received 4 August 1997; revised manuscript received 18 September 1997)

ABSTRACT

The emission time extracted from two-particle relative-momentum correlation functions has been studied as a function of the spatial extent of the source for $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ reaction at 25 MeV/u. Reduction of $\sim 50\%$ in the mass number of the source has a very small effect on the calculated correlation functions and the extracted emission time. For the cases of short emission time τ ($\tau \leq 100 \text{ fm}/c$), use of a smaller nuclear density would lead to somewhat smaller assignment for τ ; therefore, these τ values extracted in the normal nuclear density can be taken as upper limits of τ values. For the cases of long emission time ($\tau \geq 300 \text{ fm}/c$), the emission times do not vary with the size of the source and these τ values can be taken as the real values.

PACC: 2570; 2587; 2590

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China.