

# 中能区 $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中轻粒子的 发射时间测量\*

贺智勇 段利敏 李祖玉 靳根明 罗清政 吴和宇  
张保国 文万信 漆玉金 党秉荣 戴光曦

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1995-01-24 收稿

## 摘 要

本文报道了  $25\text{MeV}/u$   $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$  反应中粒子-粒子关联函数的实验结果. 利用三体弹道模型从关联函数提取了轻粒子发射时间. 轻粒子的平均发射时间随粒子能量而变化, 从低能时的约  $300\text{fm}/c$  下降至高能时的约  $100\text{fm}/c$ .

**关键词** 关联函数, 三体弹道模型, 发射时间.

## 1 引 言

中能区核-核碰撞过程中粒子的发射时间可以用来检验各种反应机制, 例如, 可以了解粒子是来自于完全热平衡核的平衡发射还是来自于部分平衡核的前平衡发射; 碎片是来自于核的瞬发多重碎裂还是相继衰变; 不同质量的粒子有无先后发射次序; 不同发射源发射时间有无差别以及热核的寿命及其衰变等. 七十年代, S. E. Koonin 便已提出通过小相对动量关联质子的关联测量来研究核碰撞中质子的发射时间与空间信息<sup>[1]</sup>. 至今, 人们已进行了大量的双质子关联函数测量, 并得知发射空间在  $10\text{fm}$  量级甚至更短. 可是, 对于较重的粒子如  $d, t, \alpha$  以及  $Z \geq 3$  的中等质量碎片 (IMF) 的关联函数, Koonin 模型便暴露出了它的局限性和困难, 因此到目前为止关于  $d, t, \alpha$  的发射时间的数据很少, 故需要有更实用的理论模型来研究这些粒子的发射时间.

最近, 人们提出用经典的三体弹道模型来研究 IMF 的关联函数<sup>[2, 3]</sup>. 该模型研究了三体 (两发射粒子和母核) 在库仑力和核力影响下的运动轨道, 从而模拟出在不同的发射时间下粒子的关联函数. 实验测量结合模型计算表明, 在中能重离子碰撞中 IMF 的发射时间接近于  $100\text{fm}/c$ . 本文将三体弹道模型应用到中能区轻粒子的研究中, 通过对小相对动量关联粒子的关联测量来研究中能区轻粒子的发射时间.

\* 国家自然科学基金和中国科学院留学经费择优支持基金资助.

## 2 实验概况

实验是在兰州 HIRFL 加速器的大散射靶室上进行的, 用束流强度约 10 nA 的 25 MeV/u 的  $^{40}\text{Ar}$  束轰击  $^{197}\text{Au}$  靶. 在前角区安装一套由 13 个  $\Delta E - E$  望远镜组成的阵列探测系统进行带电粒子的关联测量. 该阵列距靶心 580 mm, 阵列中心与束流方向夹角  $20^\circ$ . 其中每一套  $\Delta E - E$  均由一块  $300 \mu\text{m}$  厚的硅片作  $\Delta E$  测量加一块 50 mm 厚的 BGO 做  $E$  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  $3^\circ$ , 最远两套的夹角为  $13^\circ$ . 实验中采用  $\Delta E - E$  方法鉴别粒子, 结果表明该阵列能分辨出 p, d, t,  $\alpha$  等轻粒子和 Li, Be, B, C 等 IMF.

## 3 实验测量的关联函数

两粒子关联函数  $1 + R(q)$  定义为:

$$\sum Y_{12}(p_1, p_2) = (1 + R(q)) \sum Y_1(p_1) Y_2(p_2), \quad (1)$$

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,  $\sum Y_1(p_1) Y_2(p_2)$  表示归一化函数, 其构成方法如文献 [4] 中所述.

图 1 给出了 25 MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$  实验中  $\theta = 20^\circ$  处测到的轻带电粒子的关联函数. 图 1 (a) 给出了质子-质子 (p-p) 的关联函数. 在  $q = 20 \text{ MeV}/c$  处, p-p 关联函数有一个突起, 这是因为两质子相对动量很低, 受库仑和核相互作用, 两质子相对运动波函数中吸引的 S 波使 p-p 关联函数在  $q = 20 \text{ MeV}/c$  处突起. 粗略地讲, 可以认为该突

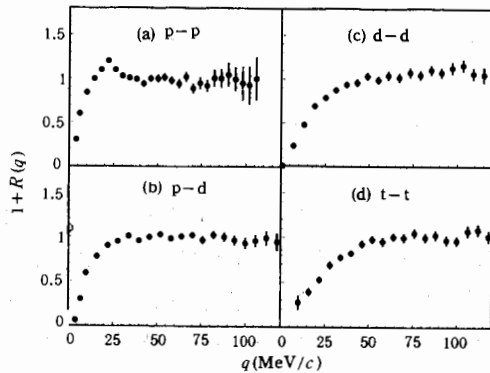


图 1 25 MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$  实验中的轻粒子关联函数

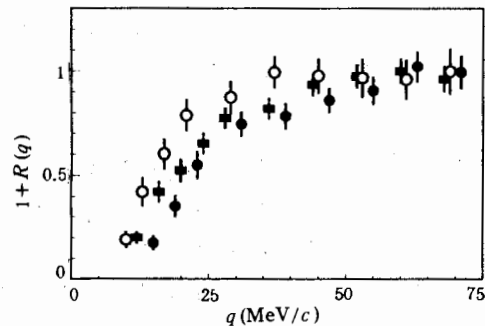


图 2 t-t 关联函数与两个关联氚粒子能量和  $E_1 + E_2$  的关系

符号  $\phi$ ,  $\blacksquare$ ,  $\blacklozenge$  分别对应  $E_1 + E_2$  为 20—60 MeV, 60—100 MeV, 100—170 MeV.

来自于非稳态<sup>3</sup>He核的衰变. 实验结果和计算也表明该突起是来自于前平衡发射成分, 而不是平衡核蒸发成分<sup>[5]</sup>. 图1(a)间接地显示了在束流能25 MeV/u下前角区前平衡发射成分的存在.

图1(b)(c)(d)给出p-d, d-d, t-t的关联函数, 这些关联粒子对不可能来自于某一非稳态核的衰变, 其关联函数不存在明显的突起或成峰结构. 从图中可以看出, 这些关联函数在低 $q$ 值时均呈反关联. 这是由于低 $q$ 值的两粒子产生于一个短的时间间隔, 强库仑排斥作用使 $R(q)$ 为负值, 关联函数 $1+R(q)$ 在低 $q$ 时呈反关联. 反过来, 从这些关联函数的反关联程度便可得知这些粒子对的发射时间.

图2给出t-t关联函数与两个关联氚粒子的能量和( $E_1+E_2$ )的关系. 三组数据分别为在 $E_1+E_2=20-60$  MeV,  $60-100$  MeV及 $100-170$  MeV时的关联函数, 图中清楚地显示了随着关联粒子对能量增高, 关联函数的反关联程度增加, 表明高能粒子对发射于一个更短的时间间隔, 受的库仑作用更强.

#### 4 发射时间的提取

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<sup>[2,7,8]</sup>. 该模型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 $\tau$ 为粒子的平均发射时间并可自由给定. 粒子发射时的能量通过实验测得的能谱抽样给出. 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. 该模型还考虑了探测器阵列的接收和筛选.

图3显示了两个关联氘的能量和 $E_1+E_2$ 分别为 $20-56$  MeV,  $56-90$  MeV及 $90-150$  MeV时的d-d关联函数. 而五条曲线分别代表在不同 $\tau$ 值下理论模拟出的关联函数: 反关联程度最强的曲线为 $\tau=30$  fm/c, 然后从右至左依次为100, 200, 300, 600 fm/c. 图3(a)为能量最高的一组 $E_1+E_2=90-150$  MeV的d-d关联函数, 这些高能氘主要来自于前平衡发射和类弹碎片发射. 比较实验点和理论计算可知, 这些高能氘粒子的平均发射时间约在100 fm/c左右. 在25 MeV/u  $^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$ 反应中,  $^{40}\text{Ar}$ 束穿过 $^{197}\text{Au}$ 靶的“穿越时间” $T$ :

$$T_{\text{穿越}} \equiv \text{靶半径} / \text{束流速度} \sim 30 \text{ fm}/c (1 \times 10^{-22} \text{ s}),$$

可见, 其平均发射时间快接近于穿越时间了.

图3(c)为能量最低的一组( $E_1+E_2=20-56$  MeV)的d-d关联函数. 这些低能氘粒子主要来自于达到平衡的类靶余核产物<sup>[5]</sup>, 其平均发射时间略长于300 fm/c ( $1 \times 10^{-21}$  s). 该发射时间略快于低能下轻粒子从复合核蒸发的时间: 人们在140 MeV  $^{16}\text{O}+^{197}\text{Au}$ 反应中测得质子的发射时间为300—1500 fm/c<sup>[6]</sup>. 能量 $E_1+E_2=56-90$  MeV一组的d-d关联函数显示于图3(b)中, 其平均发射时间在100—200 fm/c. 从图3的结果可见, 粒子发射的时间随着粒子能量的增加而缩短, 从低能蒸发粒子的300 fm/c缩短至高能粒子的约100 fm/c.

图4给出了p-d关联函数及其发射时间随两粒子能量和 $E_1+E_2$ 的变化关系. 与

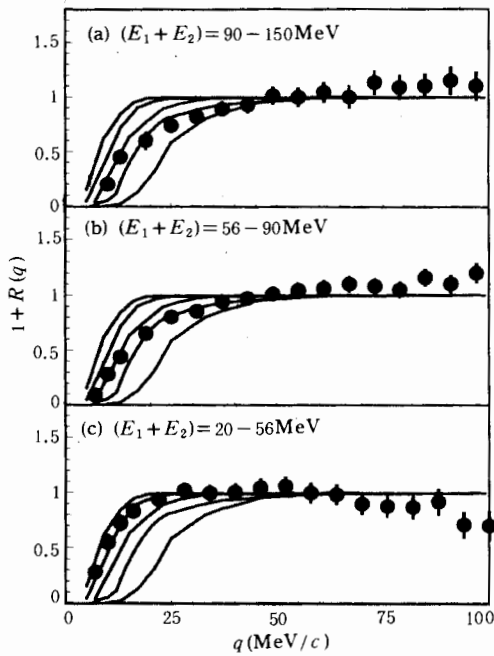


图 3 d-d 关联函数及其发射时间与  $E_1 + E_2$  的关系

曲线从左至右依次为  $\tau = 600, 300, 200, 100, 30 \text{ fm/c}$  的计算结果,  $\blacklozenge$  为实验计算结果.

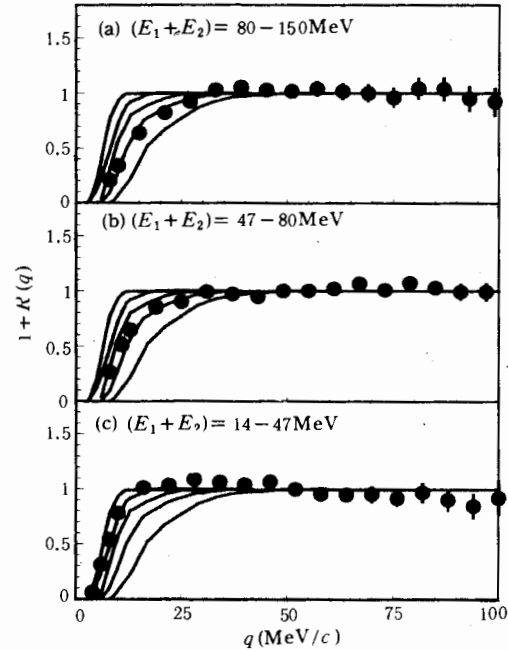


图 4 p-d 关联函数及其发射时间与  $E_1 + E_2$  的关系

曲线说明同图 3.

d-d 关联类似, 高能组  $E_1 + E_2 = 80 - 150 \text{ MeV}$  粒子的平均发射时间约  $100 \text{ fm/c}$ . 随着粒子能量降低, 粒子发射时间变慢. 对于低能组  $E_1 + E_2 = 14 - 47 \text{ MeV}$  的粒子, 其平均发射时间达  $300 \text{ fm/c}$  (图 4 (c)). 我们同时也研究了 t-t 关联中氘发射时间随粒子能量的关系, 得到了与 p-d 和 d-d 关联非常类似的结果<sup>[9]</sup>. 这说明粒子的发射时间与粒子能量有关, 与粒子种类无关. 实验上不可能精确地测知哪种粒子更易发射.

## 5 结 论

本文给出了  $25 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$  反应中 p-p, p-d, d-d, t-t 关联函数的实验结果. p-p 关联函数在  $q = 20 \text{ MeV/c}$  处突起, 表明了这些质子来源于反应早期的前平衡发射. p-d, d-d, t-t 关联函数在小  $q$  值处呈反关联. 结合三体弹道模型从这些反关联的粒子-粒子关联函数中提取了粒子的平均发射时间. 粒子发射时间随粒子能量增加而缩短. 高能粒子大多来自于前平衡发射及类弹碎片, 其发射时间达  $100 \text{ fm/c}$  之快. 而低能粒子主要来自于平衡热核的蒸发过程, 相应的发射时间较长, 达  $300 \text{ fm/c}$ . 随着热核本身激发能的增加, 发射粒子的平均能量上升. 本文测得的发射时间对了解热核的寿命及其衰变具有宝贵的参考价值. 粒子-粒子关联测量是探索核反应时钟的一种有

力的方法.

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

### 参 考 文 献

- [ 1 ] S. E. Koonin, *Phys. Lett.*, **B70** (1977) 43.
- [ 2 ] E. Bauge *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **70** (1993) 3705.
- [ 3 ] D. R. Bowman *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **70** (1993) 3534.
- [ 4 ] 郝鸿飞等, 高能物理与核物理, **17** (1993) 268.
- [ 5 ] W. G. Gong *et al.*, *Phys. Lett.*, **B246** (1990) 21.
- [ 6 ] P. A. Deyong *et al.*, *Phys. Rev.*, **C39** (1989) 128.
- [ 7 ] A. Elmaani *et al.*, *Nucl. Inst. and Meth.*, **A313** (1992) 401.
- [ 8 ] A. Elmaani, John M. Alexander, *Phys. Rev.*, **C47** (1993) 1321.
- [ 9 ] He Zhiyong *et al.*, *Chinese Physics Letter*, **V12** (1995) 521.

## Emission Time Measurements of Light Particles from $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ Collisions in Intermediate Energies

He Zhiyong    Duan Limin    Li Zuyu    Jin Genming  
Luo Qingzheng    Wu Heyu    Zhang Baoguo    Wen Wanxin  
Qi Yujin    Dang Bingrong    Dai Guangxi

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

Received 24. January 1995

### Abstract

Particle-particle correlation functions have been measured for  $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$  collisions at  $E = 25 \text{ MeV/u}$ . Emission time of light particles has been extracted from correlation functions using the three-body trajectory model. The average emission time varies with the energy of particles. It decreases from about 300 fm/c for low energy particles to about 100 fm/c for energetic particles.

**Key words** correlation function, three-body trajectory model, emission time.