

轻粒子发射时间随测量角的变化*

柳永英 王素芳 段利敏 靳根明 朱海东 张保国 文万信
李祖玉 贺智勇 王宏伟 肖志刚 吴和宇 魏志勇

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 利用小相对角关联方法测量了 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中关联出射的轻粒子. 通过与三体弹道模型比较, 从关联函数提取了轻粒子的发射时间. 结果表明, 轻粒子的发射时间随粒子能量的升高而降低, 从低能的约 $600\text{fm}/c$ 下降至高能的约 $50\text{fm}/c$. 将此数据与 $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中的发射时间进行了比较, 发现随着实验室系角度的增加, 提取的轻粒子的发射时间变长, 并认为其原因在于随发射角度的增加, 前平衡发射成份越来越少, 平衡发射成份增加.

关键词 关联函数 三体弹道 发射时间 实验室系角度

1 引言

众所周知, 中能重离子碰撞由于其过渡(从低能到高能)的性质, 使其具有很大的复杂性. 碰撞过程中观测到了低能反应中所没有的许多新的现象, 如大量的中等质量碎片(IMF)发射, 这一现象与高激发核的衰变模式及寿命具有密切的关系. 过去人们在判断高激发核的衰变模式是否发生质的转变, 如是否产生了多重碎裂, 其寿命如何, 大都是以发射 IMF 的多重性为依据的, 这些判断都是非直接的. 如果测出其发射时间标度, 用时间标度判断多重碎裂的产生和高激发核的寿命就更为直接. 为此, 近几年来利用小角关联的办法, 对某些系统的粒子发射时标进行了实验测量^[1-5], 发现随着激发能的增加, 高激发核发射粒子的时间间隔减小, 直至同时发射多重碎裂. 此外, 也探讨了这种测量结果的可靠性^[2]. 这些测量大都是在实验室的前角进行的, 其发射粒子中包含了较多的前平衡发射, 得出的发射时标可能更多地反映前平衡的发射, 如果在较大角度对发射粒子进行研究, 可能会提供关于高激发核衰变过程的更多信息, 为确定高激发核寿命和多重碎裂的产生机制提供更多更可靠的依据. 为此, 我们对 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ 的粒子发射时标进行了研究, 并通过与 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中的粒子发射时标进行比较, 讨论了测量角度的不同对发射时标的影响.

2001-11-28 收稿

* 国家自然科学基金(19775054), 中国科学院九五重大项目(KJ95T-03)和中国科学院九五基础性研究重点科学基金资助

2 实验概况

实验是在兰州重离子回旋加速器(HIRFL)的大筒型通用散射室上完成的. 选用的束流为 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar}$, 靶为 ^{93}Nb , 厚度为 $612\mu\text{g/cm}^2$. 实验详细布局见文献[6]. 用于粒子关联测量的 13 单元的望远镜探测器阵列的中心与束流方向的夹角为 31° , 其最远的两套望远镜夹角 12.5° , 最近的两套望远镜夹角 3.53° , 有效探测面积的直径为 $\Phi 17\text{mm}$, 距离靶 58cm , 中心方位角处于 $\varphi = 0^\circ$. 每个阵列单元均由一块厚度为 $200\mu\text{m}$ 的 Si 半导体和一块 5cm 厚的 BGO 晶体组成. 实验中采用 $\Delta E - E$ 方法鉴别粒子. 结果表明该阵列对于轻同位素以及所测量到的其它元素可以较清楚地分开.

3 实验结果

实验中提取的两粒子关联函数 $1 + R(q)$ 定义为^[7]

$$\sum Y_{i2}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = C_{i2}[1 + R(q)] \sum Y_i(\mathbf{p}_1) Y_i(\mathbf{p}_2), \quad (1)$$

其中 $Y_{i2}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ 为符合产额, $Y_i(\mathbf{p}_i)$ 为单举产额, $i = 1, 2$, $\sum Y_{i2}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ 为归一化函数, C_{i2} 为归一化系数, 以保证在大 q 值时(即无关联情况下) $R(q) = 0$, 这里 q 为相对动量, 定义为

$$q = \mu |(\mathbf{p}_1/m_1 - \mathbf{p}_2/m_2)|, \quad (2)$$

其中 $\mu = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ 为约化质量, $m_1, m_2, z_1, z_2, \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$, 分别为两粒子的质量、电荷和动量. 为了提取发射时间, 我们采用了一个改进的三体弹道 MENEKA 程序^[8-10], 这一模型认为粒子均来自于一个半径为 R 的源表面发射, 两粒子发射的时间间隔 t 根据指数分布几率 $P(t) \propto e^{-t/\tau}$ 随机抽样产生, 其中 τ 为粒子的平均发射时间, 可自由给定. 两粒子以及反冲核三体之间相互受短程核力和长程库仑力的影响, 会使粒子的轨道和速度发生变化, 从而使粒子的相对动量发生变化.

3.1 发射时间提取及其与粒子能量的关系

图 1 上部圆点显示了 d-d 的关联函数, 下部圆点显示了 p-d 的关联函数. 图中 4 条实线分别代表在不同 τ 值下理论模拟出的关联函数: 反关联强度最强的曲线为 $\tau = 100\text{fm}/c$, 然后从右至左依次为 $300, 400$ 和 $500\text{fm}/c$, 这是由于发射时间 τ 越小, 发射两粒子间的时间间隔越短, 受的库仑力越大, 而导致反关联程度越强. 比较实验点和理论计算, 从 d-d 关联函数提取粒子的平均发射时间为 $500\text{fm}/c$, 从 p-d 关联函数提取的粒子的平均发射时间近似为 $400\text{fm}/c$. 在此提取的轻粒子的发射时间均长于在 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中在 $\theta = 20^\circ$ 提取的轻粒子的平均发射时间($100-300\text{fm}/c$)^[11].

为了进一步研究发射时间随粒子能量的变化规律, 我们按两关联粒子的能量之和分段, 分别提取了高能粒子和低能粒子的发射时间. 由于统计的原因, 对 d-d 关联函数只分了两段. 图 2 上部显示了两个关联氘的能量和 $E_1 + E_2 > 65\text{MeV}$ 时的 d-d 关联函数

谱. 比较实验点和理论曲线可知, 这些高能氩粒子的平均发射时间略长于 $50\text{fm}/c$. 在 $25\text{MeV}/u$ $^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中, ^{40}Ar 弹核穿过靶核 ^{93}Nb 的穿越时间为

$$T_u \approx \text{靶核直径}/\text{弹核速度} \approx 29.5\text{fm}/c \approx 1 \times 10^{-22} \text{ s},$$

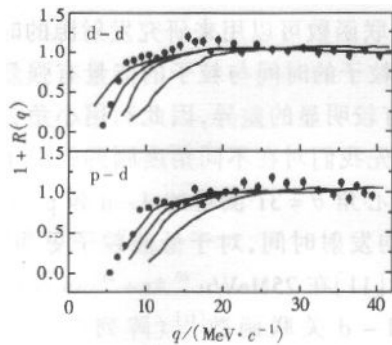


图 1 $25\text{MeV}/u$ $^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中 $d-d, p-d$ 关联函数及其发射时间曲线从左至右依次为 $\tau = 500, 400, 300, 100\text{fm}/c$ 的计算结果, \blacktriangle 为实验结果.

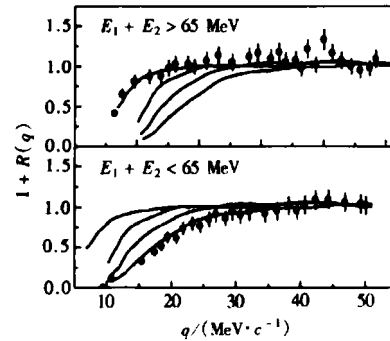


图 2 $25\text{MeV}/u$ $^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中高、低能 $d-d$ 关联函数及其发射时间曲线从左至右依次为 $\tau = 600, 300, 100, 50\text{fm}/c$ 的计算结果, \blacktriangle 为实验结果.

可见, 其平均发射时间接近于穿越时间. 这表明, 弹核靶核刚结合起来之时, 这些高能粒子就直接发射出来了, 也就是说这些高能粒子主要来自于前平衡发射和类弹片的发射.

图 2 下部为低能量组 ($E_1 + E_2 < 65\text{MeV}/u$) 的 $d-d$ 关联函数, 其平均发射时间约为 $600\text{fm}/c$. 短于 P. A. Deyoung 等人在 140MeV $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 反应中测得质子的发射时间 $300-1500\text{fm}/c$ ^[12], 但具有近似相同的量级. 就是说在我们实验条件下测得的发射时间快于低能下轻粒子从复合核蒸发的时间, 说明这些低能氩粒子主要来自于达到平衡的类复合核的余核裂变产物.

我们同时按能量段提取了 $p-d$ 关联中轻粒子的发射时间, 得到了和 $d-d$ 关联类似的结果. 图 3 显示了两个关联粒子的能量和 $E_1 + E_2 < 45\text{MeV}$, $45\text{keV} < E_1 + E_2 < 65\text{MeV}$ 和 $E_1 + E_2 > 65\text{MeV}$ 时的 $p-d$ 关联函数谱. 由图 3 中高能组 $p-d$ 关联函数提取到的

高能粒子的平均发射时间约为 $50\text{fm}/c$; 由中能组关联函数提取到的粒子的发射时间为 $200\text{fm}/c$. 图 3 下部为低能量组的 $p-d$ 关联函数, 其平均发射时间略长于 $500\text{fm}/c$.

从以上结果可以看出, 从 $d-d$ 和 $p-d$ 关联函数提取的轻粒子的发射时间非常接近, 也明显看出轻粒子的发射时间随两粒子能量之和的增加而缩短, 说明轻粒子的发射时间与其能量密切相关, 而与粒子种类关系不大, 但该方法不能精确确定哪种粒子更易发射.

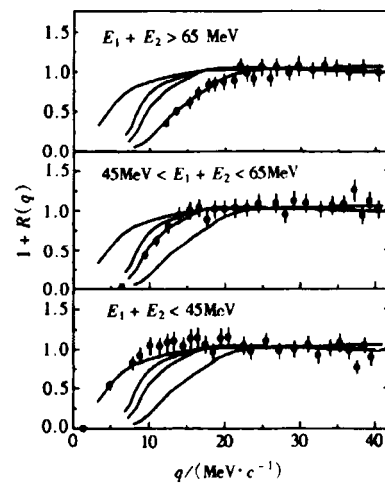


图 3 $25\text{MeV}/u$ $^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中 $p-d$ 关联函数及其发射时间曲线从左至右依次为 $\tau = 500, 300, 200, 50\text{fm}/c$ 的计算结果, \blacktriangle 为实验结果.

原因在于轻粒子发射存在于高激发核的整个衰变过程中,其相对发射几率不甚大.

3.2 发射时间随实验室角度的变化

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,其影响的大小主要取决于粒子的时-空分离,因此,两粒子的相对动量关联函数可以用来研究发射源的时-空演化^[13,14].同时,从前面的实验结果中还看到,发射粒子的时间与粒子的能量有强烈的关联.众所周知,不同机制发射粒子的能量和角分布有较明显的差异,因此利用小角关联粒子的关联函数可以较深入地研究粒子发射机制.首先我们对在不同角度测到的粒子关联函数的对比,从前面给出的结果可以看出,在阵列中心角 $\theta = 31^\circ$ 测得的 d-d 和 p-d 的平均发射时间略长于文献[11]在 $\theta = 20^\circ$ 时测得的平均发射时间,对于低能粒子更为明显.

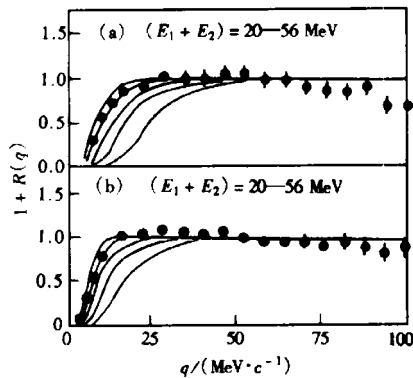


图 4 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中的 d-d 关联函数(a)和 p-d 关联函数(b) 图中曲线从左至右依次为 $\tau = 600, 300, 200, 100, 30\text{fm}/c$ 的计算结果, + 为实验结果

图 4(a)为文献[11]在 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中提取的低能组 d-d 关联函数^[11](阵列中心角 $\theta = 20^\circ$),提取的发射时间为 300fm/c,图 4(b)为低能组 p-d 关联函数^[11],提取的发射时间亦为 300fm/c,而本文对 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中在 $\theta = 31^\circ$ 时低能组 d-d 和 p-d 关联函数提取的发射时间分别为 600 和 500fm/c,均长于文献[11]在 $\theta = 20^\circ$ 时测得的平均发射时间.这里要指出的是,尽管在 $^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中测量角只在实验室 31° ,但由于反应系统与 $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 相比,对应的质心系角度更大于 $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 实验室 20° 角对应的质心系角度.比较这两个结果,能够得到这样的结论:随着实验室系角度的增加,更确切地说是质心系角度的增加,提取的发射时间将越来越长.对于这种现象我们给出的可能解释

为:弹核与靶核相碰时,它或者和靶核融为一体,形成复合核,或者一部分与靶核形成一个复合体系,另一部分(类弹碎片)则以接近弹核的速度飞离.弹核与靶核碰撞后会形成一个复合体系,从非平衡状态向平衡过渡时会产生平衡前发射.达到平衡的复合体系再经过相继衰变达到一个稳定的余核.从弹靶核相碰到复合体系达到热力学统计平衡的弛豫时间约 10^{-20}s 量级,而级联衰变过程(Cascade)是一种较慢的衰变过程,至衰变完成需 $10^{-18} - 10^{-16}\text{s}$.在弹靶核碰撞的中期形成的复合体系,初期具有一定的人射道“记忆”效应,因此其发射粒子在质心系中是各向异性发射,集中于前角区.而达到平衡的复合体系发射的粒子能谱呈现麦克斯韦分布,且发射是各向同性,发射粒子的速度也较慢.因此,在前角收集到的关联粒子对既包含有前平衡发射,也包含平衡发射成份,且前平衡成份占主导.由于前平衡发射的贡献随角度的增加而迅速减少,因此在中后角所探测到的粒子主要来自于平衡发射的贡献.而从时间上看,这些早期发射的粒子来源于高激发的复合体系,发射密度较大.随着时间的延长,复合体系激发能逐渐降低,发射速度放慢.所以对于平衡前发射的粒子,其能量较高,发射时标短,关联函数呈现了较强的关联性,而平衡后发射的粒子能量稍低,发射时标长,关联性较弱.而随着实验室系角度的增大,前平衡

成份越来越少,平衡成份越来越多,关联性越来越弱以至消失,所以在中后角提取的平均发射时间要长于在前角区提取的结果.虽然前角区也存在平衡后发射的粒子,但由于受平衡前发射的粒子(低能部分)的影响,测得的发射时标仍较短.而后角(大角)发射粒子基本不受前平衡发射的影响,所以在在大角度测得的发射时标更能较真实地反映平衡发射时标,即热核寿命.

4 结论

本文给出了 $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中 $d-d$, $p-d$ 关联函数的实验结果.结合三体弹道模型从关联函数中提取了轻粒子的平均发射时间.结果表明随着粒子能量的升高,轻粒子的发射时间间隔缩短,从低能粒子的约 $600\text{fm}/c$ 下降至高能的约 $50\text{fm}/c$.这表明高能粒子大多来自于复合体系的前平衡发射及类弹碎片,而低能粒子主要来自于平衡核的蒸发过程.并通过比较不同实验室系角度下得到的发射时间,我们看到,随着测量角度的增加,测得的粒子发射时间间隔逐渐增大,其可能的解释如下:由于随着实验室系角度的增加,前平衡成份越来越少,平衡成份占的比份越来越多,平衡系统的激发能较平衡前(局部平衡)的低,且随粒子的发射,激发能又进一步降低,其衰变粒子的能量也降低,发射时间间隔增加.因此,相应地在中后角区提取的轻粒子的发射时间要长于前角区提取的结果.

参考文献 (References)

- 1 Elmaani A, Ajitanand N N, Alexander J M et al. *Phys. Rev.*, 1991, **C43**:R2474—2478
- 2 Elmaani A, Alexander Jhon M, Ajitanand N N et al. *Phys. Rev.*, 1994, **C49**:284—297
- 3 JIN Gen-Ming, HE Zhi-Yong. *Nuclear Physics Review*, 1998, **15**(1):1—9 (in Chinese)
(靳根明, 贺智勇. *原子核物理评论*, 1998, **15**(1):1—9)
- 4 HE Zhi-Yong, JIN Gen-Ming, LI Zu-Yu et al. *Acta Phys. Rev.*, 1998, **57**(4):1824—1831
- 5 XI Hong-Fei, ZHAN Wen-Long, ZHU Yong-Tai et al. *Nucl. Phys.*, 1993, **A552**:281—292
- 6 DUAN Li-Min, WANG Su-Fang, ZHANG Bao-Guo et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 1998, **22**(9):780—786 (in Chinese)
(段利敏, 王素芳, 张保国等. *高能物理与核物理*, 1998, **22**(9):780—786)
- 7 Pochodzalla J, Gelbke C K, Lynch W G et al. *Phys. Rev.*, 1987, **C35**:1695—1719
- 8 Elmaani A, Ajitanand N N, Ethvignot T et al. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1992, **A313**:401—412
- 9 Elmaani A, Alexander Jonn M. *Phys. Rev.*, 1993, **C47**:1321—1324
- 10 Bauge E, Elmaani A, Lacey Roy A et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**:3705—3708
- 11 HE Zhi-Yong, DUAN Li-Min, LI Zu-Yu et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 1996, **20**(1):8—12 (in Chinese)
(贺智勇, 段利敏, 李祖玉等. *高能物理与核物理*, 1996, **20**(1):8—12)
- 12 de Young P D, Gordon M S, LU Xiu-Qin et al. *Phys. Rev.*, 1989, **C39**:128—131
- 13 Hanbury-Brown R, Twiss R Q. *Nature*, 1956, **178**:1046—1048
- 14 Koonin S E. *Phys. Lett.*, 1977, **B70**:43—47

Emission Time of Light Particles with Respect to Measurement Angle

LIU Yong-Ying WANG Su-Fang DUAN Li-Min JIN Gen-Ming ZHU Hai-Dong

ZHANG Bao-Guo WEN Wan-Xin LI Zu-Yu HE Zhi-Yong

WANG Hong-Wei XIAO Zhi-Gang WU He-Yu WEI Zhi-Yong

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

Abstract Particle - particle correlation functions at small correlation angle have been measured for $^{40}\text{Ar} + ^{93}\text{Nb}$ collision at $E = 25\text{MeV/u}$. Based on three-body trajectory calculation the emission time scale of light particles has been extracted from correlation function of two particles at small relative momentum. The mean emission time scale decreases with increasing sum of the kinetic energies of the particles in a correlated pair. It decreases from about 500 fm/c for low energy particles to about 50 fm/c for high-energy particles. And the extracted emission time scales from larger detection angle are longer than that extracted from the data obtained at small detection angle, which can be explained as the more particles emitted from equilibrated system.

Key words correlation function three-body trajectory, emission time, laboratory angle

Received 28 November 2000

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19775054), Major Subject of The Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03) and 95 Basic Research Major Sciences Foundation of The Chinese Academy of Sciences