

干涉学在高激发核性质研究中的应用*

靳根明 贺智勇

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 简单介绍了干涉学的发展历史,综述了利用粒子关联(干涉)测量高激发核衰变中轻粒子和中等质量碎片的发射时标、发射次序以及核温度的实验结果.这些结果表明,热核由相继衰变逐渐向多重碎裂的过渡.

关键词 干涉学 粒子关联 热核 发射时标 中等质量碎片

分类号 O571.4

1 前 言

强度干涉学技术(Intensity interferometry)也叫 Hanbury-Brown/ Twiss (HBT)效应.早在本世纪 50 年代, Hanbury-Brown 和 Twiss 等人就用强度干涉学技术来测量天体物体的大小^[1]. 与传统的幅度干涉(Amplitude interferometry)相比,强度干涉的优越之处是能减少两个干涉粒子间相漂移(Phase shift)的影响,这在天体测量中是相当重要的. 尽管强度干涉技术最初是用光子作为探测粒子,但很快被推广到其它玻色子和费米子. 应用到原子核物理中的第一个实验是 1959 年 Goldhaber 等人进行的基本粒子碰撞方面的关联实验^[2]. 目前,干涉学技术已应用到核物理研究中的许多领域中. 例如,从相对论重离子碰撞中的夸克-胶子-等离子体探测到中低能重离子碰撞中的粒子和碎片的关联测量. 70 年代, S. E. Koonin 便提出通过小相对动量相干质子的关联测量来研究核碰撞中质子的发射时间和空间信^[3]. 至今,人们已进行了大量的双质子关联函数的测量,并得知它的发射源的空间大小. 但是,对于较重的粒子,如 d、t、 α 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、 α 的发射时间的测量数据很少. 最近,人们提出利

用经典的三体弹道模型来计算和研究较重的粒子的关联函数^[4,5],该模型依据三体(两发射粒子和发射源)在库仑力和核力的作用下的运动轨道,模拟出在不同的发射时间间隔时,两个粒子的关联函数,并通过较高入射能的实验数据与理论计算结果的比较,从而得到中能重离子碰撞中 IMF 的发射时间. 本文将介绍强度干涉学技术在高激发热核性质研究中的应用.

由于中能重离子核反应的特点,使得热核研究成为了当前核物理研究的前沿领域之一. 热核研究的主要内容包括:(1)热核的形成,(2)热核的寿命,(3)热核的衰变性质. 到目前为止,从实验和理论两个方面对热核进行了许多研究,以图确定热核的形成、寿命和性质. 但是,由于中能重离子碰撞的复杂性,除了已确定在中能重离子碰撞中形成了热核外,热核的寿命及其性质仍是有待深入研究的问题. 这两个问题的最后解决可能都要与时间的测定联系在一起. 热核寿命的确定与时间测量的密切关系自不待言,热核的衰变性质的确定与时间的测量也有密不可分的联系. 近几年,在中能重离子碰撞中观测到热核的多重碎裂这一重要现象,但是,热核具有多高激发能才发生多重碎裂,以及随着热核激发能的增加,热核衰变是如何由相继衰变(包括粒子蒸发)过渡到多重碎裂? IMF 发射是热

* 国家自然科学基金资助课题,课题编号 18975045、19175053 和 19675053.
1997 - 11 - 20 收稿.

核研究中发现的另一个重要现象,它的来源及性质也是近年来广泛研究的问题.同时,利用 IMF 的关联测量来确定热核的多重碎裂乃至液-气相变.这些问题可能都要通过对中能重离子碰撞中各种产物的发射时间(时标)的测量来最后确定.

利用干涉学方法可以对这些问题的许多方面进行研究.例如,利用两粒子关联函数可以测量高激发热核衰变中轻粒子和中等质量碎片的发射时间和发射次序,进而探索多重碎裂机制,以及高激发核形成和衰变中的输运过程;利用非稳态粒子态布居可以测量核温度,为热核激发能和核温度测量以及核液-气相变提供一些实验数据.下面将详细讨论这些问题.

2 高激发热核的发射时标研究

实验上测量高激发热核衰变中轻粒子和中等质量碎片发射时标,是通过在小相对角内关联测量两个粒子,即利用热核发射出的两个粒子产生的干涉来完成.由于热核在小相对角内发射的两个粒子受短程核力和长程库仑力的影响,而导致两粒子相对速度发生变化,这些不同的力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高激发核的时空演化.

两粒子的关联函数 $1+R(q)$ 定义为

$$\sum Y_{12}(p_1, p_2) = C_{12} [1 + R(q)] \cdot \sum Y_1(p_1) Y_2(p_2),$$

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, $Y_{12}(p_1, p_2)$ 表示两个关联粒子的相对动量为 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. C_{12} 为归一化系数,以保证在大 q 值时(无关联的情况下) $R(q) = 0$. 由上式可得关联函数为

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

为了获得粒子的发射时标,首先假设它们的发射几率遵循 $P \propto e^{-t/\tau}$ 的规律,并由此提出了相应的模型,例如近几年提出的三体弹道模型对出射粒子的发射时间进行模拟,并与实验上测到的粒子关联函数进行比较,以确定实际的发射时间.但是,由于在模拟中考虑到了核力和库仑力的作用,粒子发射的地点,即粒子发射时与发射体的中心距离以及发射体的质量会有一些的关系.因此,在利用粒子关联函数研究其发射时标时,有必要探讨其发射空间的影响.这也是可以利用粒子关联函数研究发射体时空演化的原因.

2.1 轻粒子的发射时标

轻粒子包括中子和带电粒子(p、d、t 和 α 等).对中子而言,由于两中子之间只受短程吸引的核力作用,而没有长程的库仑排斥力作用,理论上较容易解释两中子关联函数.然而,实验上测量却很困难,主要是探测效率问题,因此,至今很少有关于两中子关联函数及其中子发射时间测量的数据.最近, N. Colonna 等人研究了低能区的 $130 \text{ MeV } ^{18}\text{O} + ^{26}\text{Mg}$ 反应中的中子从复合核(即 ^{44}Ca 核,激发能约 100 MeV)的发射时间为 $1100 \pm 100 \text{ fm}/c$,发射源的半径为 $4.4 \pm 0.3 \text{ fm}$ ^[6].

与中子不同,带电粒子之间除了受短程吸引的核力作用外,还有长程的库仑排斥力作用.目前,国际上轻带电粒子发射时标的研究主要集中在较低能区,通过测量轻粒子发射时标来探索高激发核寿命的变化规律.例如, P. A. Deyoung 等人测得低能区 5 和 $8.5 \text{ MeV}/u$ $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 反应中质子从复合核的蒸发时间为 $1500 \text{ fm}/c$ 左右,与低能区测得中子发射时间相一致^[7].紧接着,人们在稍高能区 14 和 $16 \text{ MeV}/u$ $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ 反应和 $17 \text{ MeV}/u$ 的 $^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应中,观测到随着入射能量的升高,轻粒子发射时间下降很快,在 $17 \text{ MeV}/u$ 能量下轻粒子发射时间约 $300 \text{ fm}/c$ ^[8,9].由于这些实验采用简单的单举测量方法,无法提取不同衰变机制下的轻粒子的发射时间,同时也没有系统地研究发射时间

随粒子质量和粒子能量的变化规律. 为此, 我们在兰州重离子加速器上选择 25 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应进行了研究^[10~14].

实验中, 安装了 4 块大面积位置灵敏气体探测器在靶的上、下、左、右四方测裂变碎片, 同时用 13 套密集排列的望远镜在前角关联测量轻粒子^[15]. 实验观测到, 轻粒子的发射时标随着粒子能量变化很大, 从高能粒子的发射时间小于 100 fm/c 变化至低能粒子的发射时间长于 300 fm/c , 表明不同能量的粒子来自于不同的发射源, 高能粒子中前平衡成分占主导, 而低能粒子主要来自于热平衡核的发射^[10]. 对于高能粒子, 其小于 100 fm/c 的发射时间可以和动力学模型预言的时间相比; 而对于低能粒子, 300 fm/c 以上的发射时间与平衡核预言的时间接近. 对于不同质量的轻粒子(如 p、d、t), 发射时间及其变化规律都差不多. 此外, 还观测到在反应平面内发射的轻粒子发射时间略快于出平面发射的轻粒子, 这主要是在平面发射的轻粒子包括有来自于前平衡发射成分和类弹碎片成分^[11].

对于裂变过程发射的轻粒子, 其发射时标的变化规律与其它过程的类似. 尽管非对称裂变过程比对称过程快得多, 但裂变中出射的轻粒子发射时间与裂变碎片的非对称性关系不大, 而主要取决于粒子的能量和发射来源^[14]. 对于来自于前平衡过程的高能粒子, 发射时标可快至 50 fm/c 左右, 而来自于热核蒸发和裂变碎片发射的低能粒子, 其发射时间长达 $1\ 000 \text{ fm/c}$.

2.2 中等质量碎片的发射时标

中能重离子核反应中观察到了大量中等质量碎片(IMF) ($Z \geq 3$) 的发射, 且随着轰击能量的提高, 其产额迅速增加. 人们认为这些 IMF 可能来自于核系统的多重碎裂机制——核系统同时碎裂成几块碎片的衰变. 由于低能区 IMF 的发射是通过相继衰变发射的, 是一种较慢的衰变过程, 如何区分这两种衰变机制及研究相继衰变向多重碎裂的过渡, 是研究 IMF 发射机制的一个关键问题. 因此,

作为一种区分这两种机制的可能工具之一, 测量 IMF 发射时间在近几年成为一个热门的课题.

IMF 发射时间可以通过两碎片相对速度的关联函数来提取. 在 $E > 50 \text{ MeV/u}$ 能区, 大量的实验均观测到 IMF 的发射时间很短, 表明该能区 IMF 可能为多重碎裂发射. 例如, E. Bauge 等人在 55 、 65 和 75 MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中观测到 IMF 的发射时间很短, 约 100 fm/c ^[16]. D. Fox 等人在 50 、 80 和 110 MeV/u $^{36}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中观测到 IMF 的发射时间更短, 约 75 fm/c ^[17]. 而在 50 MeV/u 以下的较低能区, 由于 IMF 的发射数目减少, 两碎片关联的难度增大, 至今所得实验数据很少, 而且不同的实验所得结论差别较大. 例如: 35 MeV/u $^{36}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中测得的 IMF 发射时间为 150 fm/c , 接近于多重碎裂过程中的发射时间^[18], 而 35 MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{93}\text{Nb}$ 反应中测得 IMF 发射时间约 400 fm/c , 表明 IMF 来自于相继衰变过程.

如何解释在相同束流能量下测得不同 IMF 发射时标的实验结果? 一种可能的解释是 IMF 发射时间和发射机制不但与束流能量有关, 而且与反应系统的大小有关; 另一个原因是在同一反应中不同发射源来的 IMF, 其发射时间不同. 为了区分 IMF 发射源, 一种常见的方法是通过 4π 探测器测量, 利用事件多重性对实验数据进行碰撞参数分类. 利用这种方法, D. R. Bowman 等人研究了 50 MeV/u $^{129}\text{Xe} + ^{\text{nat}}\text{Cu}$ 反应中 IMF 的发射源, 观测到周边碰撞中 IMF 来自类弹、类靶和中速三个源, 而中心碰撞中 IMF 来自一个单源的各向异性发射. 并观测到中心碰撞中 IMF 发射时间约 100 fm/c , 而周边碰撞中类弹源来的 IMF, 其发射时间长于 200 fm/c ^[19].

在没有 4π 探测器作碰撞参数分类的情况下, 通过研究不同能量下 IMF 的发射时间, 可以探讨不同发射源来的 IMF 发射时间. 我们在 30 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ 反应中观测到 IMF 发射时间随碎片能量的增加而下

降,从类靶源来的低能碎片的发射时间约 500 fm/c,而对中速碎片,其发射时间缩短为约 100 fm/c^[20]. 这一变化规律与轻粒子类似. 在扣除类弹碎片以后,得到的 IMF 平均发射时间约 200 fm/c. 图 1 显示了非对称系统中出射的 IMF 发射时间随束流能量的变化规律^[13,20]. 图中清楚地显示了中能区重反应系统中随束流能量的升高,IMF 发射机制从相继衰变向多重碎裂的过渡,这一过渡能区约在 35~45 MeV/u 间,略低于⁸⁴Kr+⁹³Nb 系统观测到的过渡能区值(45~50 MeV/u),这表明过渡能区位置与反应系统有关.

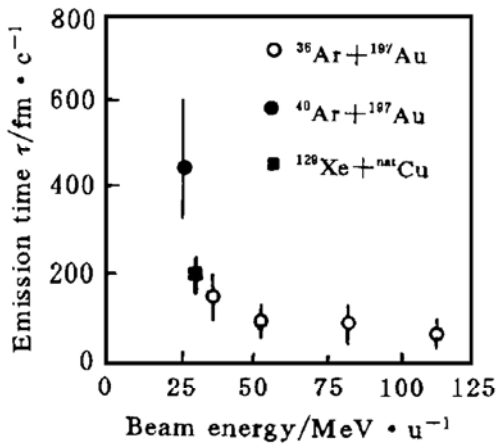


图 1 中等质量碎片发射时间随束流能量的演化

2.3 发射源大小对发射时标测量的影响

正如前面所述,两粒子关联函数可用来

研究高激发核的时-空演化,即在固定发射源大小情况下可提取发射时标,因此,有必要了解源的大小对提取发射时标的影响. 假设粒子是从一个半径为 $R=r_0A^{1/3}$ 的源表面发射,其中 A 为发射源的质量数, r_0 为核半径参量(与核密度有关). 我们研究了 25 MeV/u ⁴⁰Ar+¹⁹⁷Au 反应和 30 MeV/u ⁴⁰Ar+¹⁵⁹Tb 反应中出射的轻粒子和中等质量碎片,观测到发射源质量数 A 的大小几乎不影响提取的发射时间的大小. 发射空间对发射时标测量的影响主要来自于核半径参量 r_0 ^[21,22]. 图 2 显示了 30 MeV/u ⁴⁰Ar+¹⁵⁹Tb 反应中,从 IMF 关联函数实验数据中提取出的发射时间随核半径参量 r_0 和核物质密度 ρ 的演化图. 当发射时间很短,如 $\tau < 100$ fm/c 时,提取的发射时间随半径参量 r_0 的增大(或核物质密度的减少)而减少,当发射时间较长时, $\tau > 200$ fm/c,发射时间几乎不随核半径参量变化. 由于相继衰变过程中 IMF 发射时间较长,在正常核物质密度($\rho=\rho_0$)下提取的 τ 值即为其发射时间,而多重碎裂过程中,IMF 发射时间很短,在正常核物质密度下提取的发射时间 τ 为其上限值,其实际值将小于此值. 因此,通过固定发射空间,在正常核物质密度下提取的 IMF 发射时标,可用来研究 IMF 发射机制的演变.

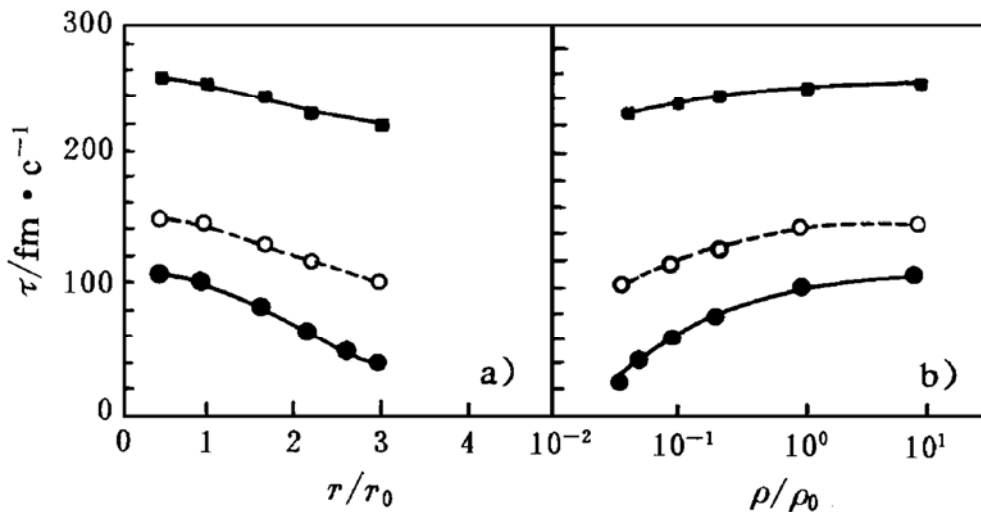


图 2 30 MeV/u ⁴⁰Ar+¹⁵⁹Tb 反应中 IMF 发射时间 τ 随核半径 r 和核物质密度的演化

3 高激发热核发射粒子的次序

高激发热核退激发时要发射许多轻粒子和 IMF，研究它们的发射次序对于研究热核退激发中的动力学过程和输运过程也是很有帮助的。同时，测量 IMF 间的发射次序还可用于探索其发射机制，即多重碎裂来的 IMF 属于瞬发过程，相同速度的 IMF 的发射不分先后次序，而相继发射来的 IMF 来自相继过程，速度相同但种类不同的 IMF 之间有先后发射之分，其次序与 IMF 在热核中的结构效应和平衡状态有关。目前，测量发射次序的结果还相当少。实验上测量发射次序仍是采取小相对角内两粒子关联测量方法，即利用粒子间核力和库仑排斥力的作用，根据两粒子间的速度差来确定粒子发射的先后次序，其物理图像如下：如果第一个粒子以速度 v_1 首先发射，而第二个粒子以速度 v_2 随后发射，当 $\Delta v = v_1 - v_2 > 0$ 时，这两个粒子有可能被两个夹角很小的探测器同时探测到；当 $\Delta v = v_1 - v_2 < 0$ 时，由于两粒子之间库仑力的作用，这两个粒子则没有可能同时被两个夹角很小的探测器同时探测到。如果第二个粒子先发射，则情况相反。因此，在速度差谱中， $\Delta v = v_1 - v_2 > 0$ 的部分相应于第一个粒子先发射， $\Delta v = v_1 - v_2 < 0$ 的部分相应于第二个粒子先发射，而且通

过与模拟结果的比较可确定每个粒子首先发射的几率。

3.1 轻粒子和 IMF 间的发射次序

目前有两个实验对此进行了研究。首先，C. J. Gelderloos 等人测量了 $34 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{\text{nat}}\text{Ag}$ 反应中出射的高能 d 粒子和 Li 碎片，观测到直接发射来的高能粒子在 Li 碎片之前发射，其中高能 d 粒子的发射时间约 $30 \sim 60 \text{ fm/c}$ ，而 Li 碎片的发射时间约 120 fm/c 。紧接着，我们通过用 4 块大面积位置灵敏的气体探测器测裂变碎片，用 13 单元望远镜阵列关联测量轻粒子 (p、d、t) 和 Li 碎片，研究了 $25 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中高激发裂变核衰变中轻粒子和碎片间的发射次序^[23]。与 C. J. Gelderloos 的结果类似，该系统出射的高能轻粒子比碎片先发射。

对于低能轻粒子和低能碎片间的发射次序，却观测到了碎片比轻粒子先发射的退激过程。该结果表明，高激发热核通过发射轻粒子和碎片来退激，随着轻粒子和碎片的发射，热核激发能下降，因此，在热核退激的初期，既有轻粒子发射又有碎片发射，在退激后期，由于激发能下降则只有轻粒子发射。作为例子，图 3 显示了 $25 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中 d-Li 关联的速度谱及发射次序，图中曲线为三体弹道模型 MENEKA 的拟合结果。

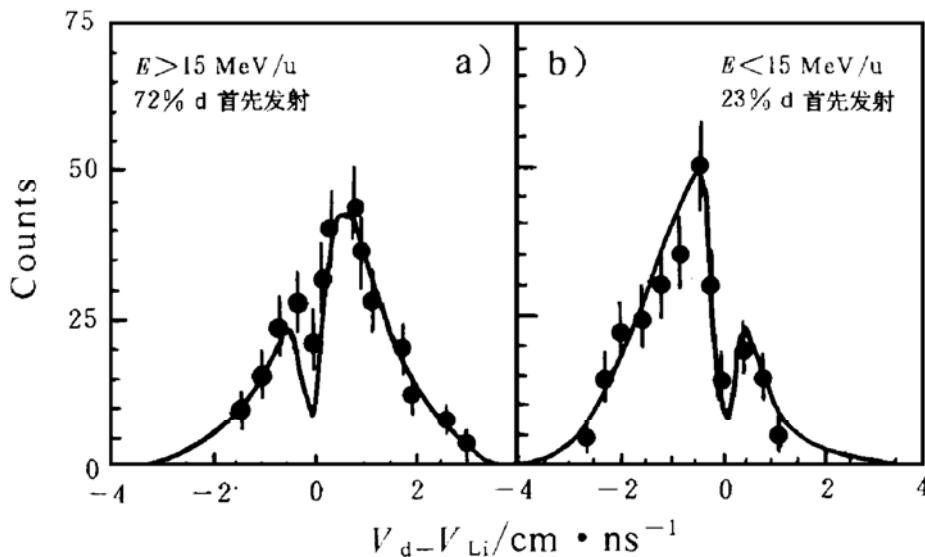


图 3 $25 \text{ MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中高能 (a) 和低能 (b) d-Li 关联速度差谱及其发射次序

3.2 轻粒子之间的发射次序

我们研究 p、d、t 等轻粒子间的发射次序后发现,前角出射的轻粒子,不论是来自于前平衡发射,还是来自于热核退激过程,其发射次序没有明显的差别,即没有哪种粒子有优先发射的趋势.此外,无论是轻粒子之间还是轻粒子和碎片之间,其发射次序与裂变中观察到的非对称性关系不大,即对称裂变和非对称裂变中观察到的结果差不多^[24].

3.3 中等质量碎片之间的发射次序

不同电荷的 IMF 之间的发射次序可以用于探讨 IMF 的发射机制.至今,只有 E. W. Cornell 等人研究了 70 MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 反应中 Be 和 C 碎片间的发射次序^[25].结果表明,在相同速度的 Be 碎片和 C 碎片之间,C 碎片先于 Be 碎片发射.利用 Be-C 关联的相对速度关联函数还提取了 Be 和 C 碎片的发射时间,前者约 100 fm/c,后者约为 50 fm/c.如此短的发射时间,表明这些 IMF 来自于多重碎裂发射过程,而 C 比 Be 先发射,表明这些 IMF 来自于一个热平衡衰变源中的冷却过程,碎片间的发射次序与这些碎片在热平衡源中的结构效应有关.值得一提的是,多重碎裂是否来自于一个热平衡过程,以及多重碎裂是动力学过程还是统计过程,仍是一个有待深入研究的课题,需要大量的实验和理论计算来论证.

4 用非稳态粒子布居态测核温度

目前,中能区测量高激发热核的核温度有三种方法:粒子动能谱、非稳态粒子态布居和同位素产额比.由于中能区集体运动的影响,粒子动能谱主要适用于中低能后角测量的实验.在扣除处于激发态的重碎片二次衰变的贡献后,非稳态粒子态布居和同位素产额比方法都适用于中能区高激发热核的核温度测量.由于非稳态粒子是通过关联测量非稳态粒子衰变产生的两个稳定粒子来测量,因此,利用非稳态粒子态布居方法测定核温

度的关键是对两粒子关联函数的测量.

假设复合体系与子体系(不稳定粒子)之间达到了动力学和化学平衡,子体系处于不同激发态的几率不仅与激发态的自旋有关,而且与激发态的能量有关. J. Pochodzalla 等人^[26]基于热力学模型,对两个互不重叠的较窄激发态得到的相对态布居 f_{12} 与温度的关系如下:

$$f_{12} = \frac{2J_2 + 1}{2J_1 + 1} e^{-(E_2 - E_1)/T},$$

其中, J_1 、 J_2 和 E_1 、 E_2 分别为两激发态的自旋和能量, f_{12} 则由实验测定. 根据上述关系则可得平衡发射体的温度.

实验上测得的关联函数包含有两部分关联粒子的贡献,即非稳态粒子的衰变产物和发射体直接发射的产物粒子,而感兴趣的只是非稳态粒子衰变产物的关联函数.因此,必须将发射体直接发射的相应粒子的关联函数作为本底加以扣除.

由于其它一些发射粒子衰变的影响(所谓的边馈效应)以及非稳态粒子本身的级联衰变,实验测得的非稳态粒子的态布居比,并非初始的态布居比,对此不作任何修正时所得到的核温度只能是发射体温度的下限.

另外,根据相对态布居与温度的关系式可以看出,随着核温度的增加,相对态布居将趋于饱和值,此时所得到的核温度则具有很大的误差,也就是说这一方法不再适用.

4.1 核温度与束流能量的关系

图 4 显示了 30~200 MeV/u 能区,一系列反应中从 ^4He 、 ^5Li 和 ^8Be 碎片的非稳态粒子态布居中提取出的核温度^[27].提取出的核温度约为 3~6 MeV,远远小于从粒子动能谱中提取的温度.从图 4 中可以看出,随着束流能量的增大,提取的核温度逐渐升高.

4.2 核温度与碰撞参数的关系

图 4 中显示的为没有碰撞参数分类的单举测量结果,提取的核温度为各种碰撞参数(中心碰撞和周边碰撞)的平均值.由于有碰撞参数分类的态布居测核温度,需要束流强

度大和很高的统计计数,至今,只有两个实验进行了不同碰撞参数下的态布居测核温度. F. Zhu 等人^[28]通过测量¹⁰Be 碎片激发态的相对态布居得到了 35 MeV/u ⁴⁰Ar+¹⁹⁷Au 反应中的核温度,其中碰撞参数用带电粒子多重性来分类. 结果表明,在中心碰撞中反应系统达到局部热平衡,中心碰撞更适合于用态布居方法测核温度.

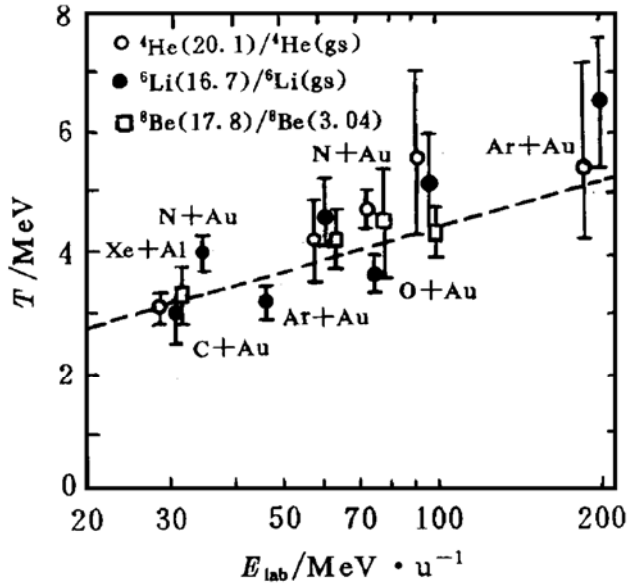


图 4 态布居提取的核温度
随束流能量的演化

在另一实验中,我们利用线性动量转移对碰撞参数分类,通过测量⁸Be 碎片的相对态布居得到了 25 MeV/u ⁴⁰Ar+¹⁹⁷Au 反应中中心碰撞和周边碰撞中的核温度,观测到发射温度随碰撞参数而稍有变化,从中心碰撞的 4 MeV 变化至周边碰撞的 3.8 MeV. 在周边碰撞中,观测到发射温度随粒子能量的增加而升高^[29,30].

5 结 论

由于强度干涉的优越点,使得它不仅在天体测量中有相当重要的应用,而且很快被推广到核物理研究中的许多领域,例如,从相对论重离子碰撞中的夸克-胶子-等离子体探测到中低能重离子碰撞中的粒子和碎片的关联测量. 通过小相对动量相干粒子的关联测

量来研究核碰撞中粒子的发射时间和发射源的时间-空间演化过程,乃至发射源的温度信息.

本文综述了利用粒子关联测量来研究高激发热核性质及衰变中轻粒子和中等质量碎片的发射时标、发射次序,以及核温度的实验结果. 轻粒子的发射时标随着粒子能量的变化而明显不同,这表明不同能量的粒子来自于不同的发射源,即不同的发射源其发射时标不同. 中等质量碎片的发射时标随束流能量升高而下降,其发射机制逐渐由相继衰变向多重碎裂过渡,此过渡能区与反应系统有关. 通过测量轻粒子和碎片的发射次序观察到高激发热核衰变中能量高的碎片在低能轻粒子之后发射,能量低时则相反. 这可能表明在热核衰变过程中,中等质量碎片产生于衰变的较早期阶段. 利用非稳态粒子态布居可以测量中能重离子碰撞中形成的热核的温度,态布居测得的核温度随着束流能量的升高而上升,随着碰撞参数的增大而稍有下降.

我们实验组的下列同志参加了本文的部分工作: 李祖玉、吴和宇、段利敏、王宏伟、张保国、罗清政、漆玉金、文万信、王素芳、戴光曦和肖志刚.

参 考 文 献

- 1 Hanbury Brown R, Twiss R Q. Correlation between Photons in Two Coherent Beams of Light. *Nature*(London), 1956, 177: 27~29; Hanbury Brown R, Twiss R Q. A Test of a New Type of Stellar Interferometer on Sirius. *Nature*(London), 1956, 178: 1046~1048; Hanbury Brown R, Twiss R Q. The Question of Correlation between Photons in Coherent Light Rays. *Nature*(London). 1956, 178: 1447~1450
- 2 Fowler W B, Goldhaber S, Hoang T F et al. Pion-pion Correlations in Antiproton Annihilation Events. *Phys Rev Lett*, 1959, 3: 181~183
- 3 Koonin S E. *Phys Lett*, 1977, B70: 43
- 4 Bauge E, Elmaani A et al. Observation of a Saturation in the Time Scale for Multifragment Emission in Symmetric Heavy-ion Collision. *Phys Rev Lett*, 1993, 70: 3705~3708

- 5 Bowman D R, Peaslee G F, Carlin N et al. Sources and Emission Time Scales in $E/A = 50$ MeV $^{129}\text{Xe} + ^{\text{nat}}\text{Cu}$ Reactions. *Phys Rev Lett*, 1993,70:3534~3537
- 6 Colonna N, Bowman D R, Celano L et al. Measurement of Compound Nucleus Space-time Extent with Two-neutron Correlation Functions. *Phys Rev Lett*, 1995,75:4190~4193
- 7 Deyoung P A, Gelderloos C J, Kortering D et al. Partial-particle Correlations and Lifetimes of Composite Nuclei: New Tests for the Evaporation Model and for Statistical Equilibration. *Phys Rev*, 1990,C41:R1885~1889
- 8 Elmaani A, Ajitanand N N, Alexandr J M et al. Characterization of very Highly Excited Composite Nuclei: Temperature, Spin Zone, Radial Extent, and Lifetime Scale of 10^{-22} s. *Phys Rev*, 1991,C43:R2474~2478
- 9 Elmaani A, Alexander John M, Ajitanand N N et al. Lifetimes of Well Characterized Hot Nuclei Via Small-angle Particle-particle Correlations; $^{40}\text{Ar} + \text{Ag}$ ($E/A = 7.8$ and 17 MeV). *Phys Rev*, 1994,C49:284~297
- 10 贺智勇, 段利敏, 李祖玉等. 中能区 $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中轻粒子的发射时间测量. *高能物理与核物理*, 1996,20:8~12
- 11 贺智勇, 靳根明, 李祖玉等. 热核衰变中轻粒子的发射时间. *高能物理与核物理*, 1996,20:596~600
- 12 He Zhiyong, Duan Limin, Li Zuyu et al. Triton-triton Correlation and Emission Times in Intermediate Energy Nucleus-nucleus Collision. *Chin Phys Lett*, 1995,12:521~523; He Zhiyong, Jin Genming, Li Zuyu. Evolution from Sequential Decay to Simultaneous Multifragmentation with Increasing Beam Energy. *Chin Phys Lett*, 1996,12:168~171
- 13 He Zhiyong et al. *Phys Rev*, 1997,A620:214
- 14 He Zhiyong, Jin Genming, Li Zuyu et al. The Emission Time Scales for Light Charged Particles from Symmetric and Asymmetric Fission Process for $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ at 25 MeV/u. *Phys Rev, C* (in press)
- 15 Li Zuyu, Jin Genming, He Zhiyong. A BGO Detector Array and Its Application in Intermediate Energy Heavy Ion Experiments. *Nucl Instr and Meth*, 1996,A373:198~201
- 16 Bauge E, Elmaani A, Lacey Roy A et al. Observation of a Saturation in the Time Scale for Multifragment Emission in Symmetric Heavy-ion Collisions. *Phys Rev Lett*, 1993,70:3704~3712
- 17 Fox D, De Souza R T. Extraction of the Multifragmentation Time Scale in Intermediate Energy Heavy-ion Reactions. *Phys Rev*, 1993,C47:R421~425
- 18 Kim Y D, De Souza R T, Bowman D R et al. Time Scale for Emission of Intermediate-mass Fragments in $^{36}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ Collisions at $E/A = 35$ MeV. *Phys Rev Lett*, 1991,67:14~17
- 19 Bowman D R, Peaslee G F, Carlin N. Sources and Emission Time Scales in $E/A = 50$ MeV $^{129}\text{Xe} + ^{\text{nat}}\text{Cu}$ Reactions. *Phys Rev Lett*, 1993,70:3534~3537
- 20 贺智勇, 李祖玉, 段利敏. 30 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ 反应中等质量碎片的发射时标与发射机制. *物理学报*, 1997,46:1312~1317
- 21 贺智勇, 靳根明, 李祖玉等. 25 MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中高激发热核的时空演化. *物理学报*, 1998,47
- 22 贺智勇等. *高能物理与核物理*, 1998,22
- 23 Gelderloos C J, Alexander John M, Ajitanand N N. Time Relationships between Direct Particle Emission and Fragmentation: A Probe for Nuclear Expansion Prior to Fragment Freeze-out. *Phys Rev Lett*, 1995,75:3082~3085
- 24 He Zhiyong, Li Zuyu, Jin Genming et al. The Emission Order of Light Particles and Light Fragments from Hot Nuclei Followed by Binary Fission. *Z Physik A* (in press)
- 25 Cornell E W, Hamilton T M, Fox D. Investigating the Evolution of Multifragmenting Systems with Fragment Emission Order. *Phys Rev Lett*, 1996,77:4508~4511
- 26 Pochodzalla J, Gelbke C K, Lynch W G et al. Two-particle Correlations at Small Relative Momenta for ^{40}Ar -induced Reactions on ^{197}Au at $E/A = 60$ MeV. *Phys Rev*, 1987,C35:1695~1719
- 27 Schwarz C, Gong W G, Carlin N et al. Emission Temperatures from Widely Separated States in ^{14}N and ^{129}Xe Induced Reactions. *Phys Rev*, 1993,C48:676~687
- 28 Zhu F et al. *Phys Rev*, 1992,B282:299
- 29 贺智勇, 李祖玉, 段利敏. 态布居测热核的核温度及其与碰撞参数的关系. *物理学报*, 1997,46:35~41
- 30 Li Zuyu, He Zhiyong, Duan Limin et al. Impact Parameter Selected Nuclear Temperature of Hot Nuclei from Excited State Populations for $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ Reactions at $E/A = 25$ MeV. *Z Physik A*, 1997, (in press)

Application of Interference to Study on Highly Excited Nuclei

JIN Genmig HE Zhiyong

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

Abstract A brief introduction of interference development has been made. The experi-

mental results of the time scale, emission order and temperature of light charged particles and intermediate mass fragments emitted from hot nuclear systems have been reviewed. These results indicate the transition from sequential decay to multifragmentation for hot nuclear decay.

Key Words interference particle correlation hot nuclei emission time scale intermediate mass fragment

(上接第 37 页)

Improvement of Model Sputter Negative Ion-source

WANG Xianyi LI Zhengfang

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

Abstract Since 1995, the sputter ion source has been tested on the 2 MV tandem accelerator in the Institute of Modern Physics. During the experiment some important improvements on the source were performed. The running procedure has been progressively perfect. With this source, the stable Li, C, O ion beams can be delivered by the accelerator for long period.

Key Words sputter ion source insulated flange ionizer cathode load