

高激发核相继裂变的限制

靳根明

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 高温核衰变是当前中能重离子核物理中研究最热烈的课题. 理论上对高温核的衰变进行了各种预言, 相继裂变就是其中之一. 本文从有关核裂变的时间尺度、裂前中子发射、裂变截面等随激发能的变化和多重碎裂的实验结果以及复杂碎片发射时间的实验结果分析了对高温核相继裂变的限制, 提出了从复杂粒子蒸发向多重碎裂过渡的可能性.

关键词 高温核, 裂变, 相继裂变, 多重碎裂, 复杂粒子.

1 引 言

在中能重离子引起的反应中能产生高激发的核已是大家都熟悉的事实了. 高激发核的衰变方式直到现在仍然是一个热门课题, 使得许多核物理学家为此花费了大量的精力和资金, 以期彻底了解其中的奥秘.

由于实验上发现中能重离子碰撞的产物中除了轻粒子以外, 还存在着中等质量碎片(IMF), 许多理论家对高激发核的衰变进行了各种假设. 例如, 液气平衡理论: 认为核激发很高时会形成热的核蒸气, 它冷凝时可以产生 IMF, 并预言 IMF 的质量分布遵循幂指数的规律; 统计多重碎裂理论: 它认为高激发核可以以统计规律分裂为大小不同的碎片; 冷碎裂理论则认为, 核象钢化玻璃一样, 在高速离子的撞击下可以碎成许多块; 动力学理论把两个核之间的碰撞用包含碰撞项的核物质平均场理论进行数值计算, 发现也可以产生 IMF; 渗透模型: 它把核想象为核子的聚合物, 核子与核子之间是由键相连接, 在核温升高时, 键断裂的数目增多, 可以得到不同的集团. 这些集团在临界温度时则消失. 除了上述这些假设外, 有人则认为高激发核衰变中之所以出现 IMF, 是由于核相继两体裂变的结果⁽¹⁾. 核的裂变, 在他们的假设中可以是非对称, 甚至是非常不对称的, 并用这

种假设解释了一些实验结果.

总之, 上面的假设可以分为两类: 高激发核的衰变是通过相继两体裂变完成的, 或者它的衰变是通过多重碎裂完成的. 那么, 究竟哪种过程更可能, 是否可以进行相继裂变呢? 现在我们从实验的角度对高激发核的衰变进行一些考察.

2 与裂变相关的一些结果

2.1 裂变截面随激发能的增加而减少

对重核而言, 在较低激发能下, 裂变是主要的退激方式. 低能重离子反应的许多实验事实都证明了这一点. 但随着激发能的增加, 则发现裂变截面反而减少. 例如, ^{40}Ar 、 ^{64}Ni 及 ^{84}Kr 等重离子轰击 ^{232}Th 或者 ^{238}U 及 ^{197}Au 时, 入射能量从 20MeV/u 升高到 44MeV/u 时, 中心碰撞的两体裂变截面则从 $\sim 1400\text{mb}$ 下降到 $\sim 500\text{mb}$ 以下⁽²⁾. 约 800MeV 的 ^{32}S 轰击 ^{232}Th 时, 测得的裂变截面只有 $\sim 1700\text{mb}$, 远小于按照几何尺寸计算的裂变截面 ($\sim 3700\text{mb}$). 在 $^{40}\text{Ar} + ^{232}\text{Th}$ 、 ^{197}Au 反应中, 随着入射能量的进一步升高, 中心碰撞的裂变截面继续减少, 入射能为 77MeV/u 时, 中心碰撞的两体裂变截面几乎完全消失⁽³⁾. 最近发表的 29MeV/u ^{208}Pb 轰击 ^{197}Au 的实验结果表明⁽⁴⁾, 对中心碰撞而

言, 其反应产物只有 IMF 和相关的轻粒子. 这时对应中心碰撞沉积在系统中的能量达到 7.2MeV/u.

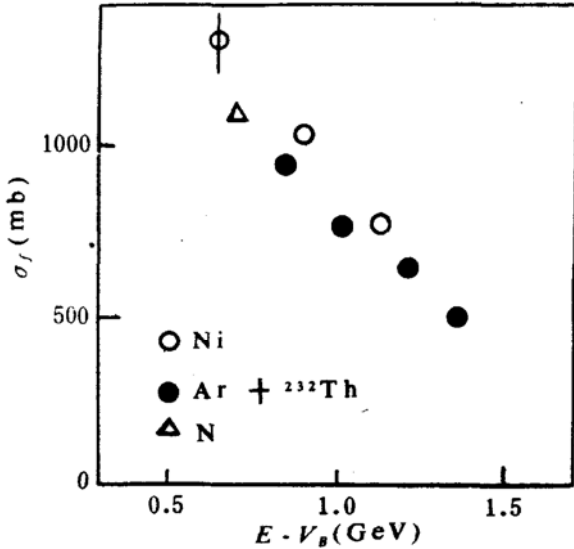


图 1 N、Ar、Ni + ^{232}Th 的中心碰撞裂变截面随入射能的变化

另一方面, 实验上观测到的反应中出射的轻粒子数目则随激发能的增加而迅速增加, 即使激发能不是太高, 出射的中子数也远远大于根据传统的统计蒸发理论估计的数值. 例如, 在 $^{60}\text{Ni} + ^{100}\text{Mo}$ 反应中 (10.9MeV/u), 中心碰撞裂前出射的中子数达 8.5, 而统计理论只预言了其中的 1/4. 对更高激发能来说, 出射中子数就更多了. 例如, $^{40}\text{Ar} + ^{232}\text{Th}$ 反应中, 对中心碰撞而言, 27MeV/u 入射能时发射中子数为 31, 35MeV/u 时为 33, 44MeV/u 时为 35, 77MeV/u 时为 36^[3]. 在 32MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 反应中平均发射的中子高达 40 个, 而 29MeV/u $^{208}\text{Pb} + ^{197}\text{Au}$ 反应中^[4], 每次中心碰撞平均发射高达 78 个中子, 这占了系统总中子数的约 1/3. 利用传统蒸发理论是难以预言这么多裂前蒸发中子的. 值得指出的是, 上面所说的中子都是来自平衡发射, 不包括预平衡发射. 因为在测量中所用的 4π 中子探测器只对低能中子有较高的探测效率 (~80%), 而对较高能量的

中子 (预平衡发射的中子大都具有较高的能量), 则效率很低 ($\leq 20\%$).

2.2' 裂变是集体自由度平衡过程, 达到断裂需要很长的时间, 断裂时的激发能却较低

近几年来, 对裂变的时间标度进行了许多研究, 发现激发核达到断点所需要的时间

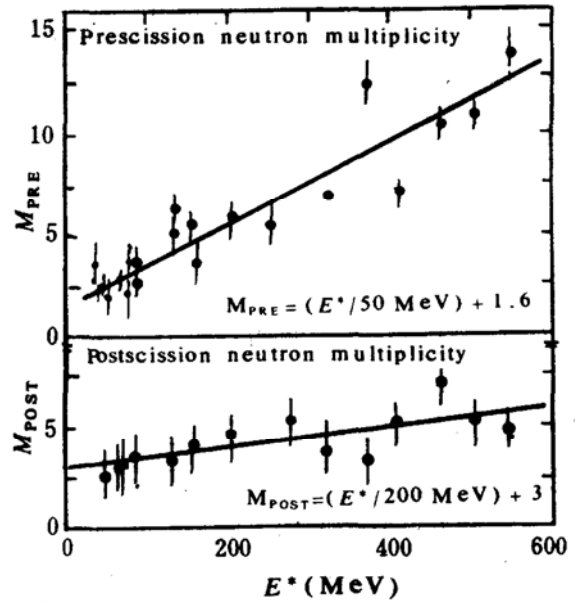


图 2 激发核裂变前 (上图) 和裂变后 (下图) 发射中子的数目随激发能的变化. 图中数据点为实验结果. 直线为拟合曲线, 其表达式已写在图中

较长, 在 $5 \times 10^{-21} \sim 2 \times 10^{-20}$ s 范围内 (图 3), 而断裂时核所剩余的激发能不是很高, 一般在 100MeV ~ 150MeV, 有时甚至低至约 60MeV, 因此裂变后碎片所能发射的中子数很有限, 只有 4~5 个; 而且很少发射带电粒子. 例如, M. Gonin 等人通过对 $^{60}\text{Ni} + ^{100}\text{Mo}$ 反应中发射中子的仔细探测和推导, 得出裂变前和裂变后发射的中子数. 结果表明, 当激发能分别为 251 和 293MeV 时, 裂变前发射的中子分别为 6.1 和 8.5 个, 而裂变后发射的中子分别为 3.6 和 4.5 个. 断裂时的激发能几乎相同, 近似为 140MeV. 在另外一个实验中, 832MeV ^{32}S 轰击 ^{197}Au 和 ^{232}Th , 测得裂变前发射的中子分别为 13 和 19 个 (相应于 100% 的线性动量转移), 而断裂后所发射的

总中子数只有 6 左右. 据此他们推断断裂时所剩激发能只有 $\sim 60\text{MeV}$, 还得出达到断裂的时间在 $5 \times 10^{-21} \sim 3 \times 10^{-20}\text{s}$, 与裂变的非对称及激发能有关.

在 D. Hilscher^[6] 等人利用 838MeV 的 ^{32}S 轰击 $^{144,145}\text{Sm}$ 测量了反应中发射的中子, 由裂变后发射的中子数推出断裂时的剩余激发

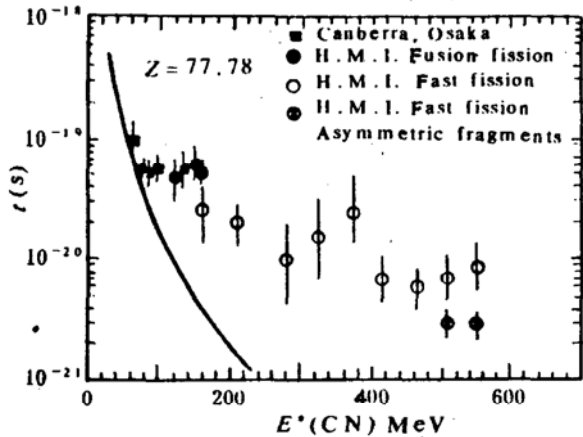


图 3 裂变的时间标度随激发能的变化. 图中带有误差线的数据点为几个实验的结果. 非对称裂变实际上是一种深度非弹过程. 曲线是按统计理论计算的中子发射时间标度随激发能的变化

能只有 $50 \sim 60\text{MeV}$, 而且与初始的激发能没有依赖关系. 这说明在核达到断裂前已由粒子发射带走了大多数激发能, 而且激发越高, 裂变前发射的粒子越多. 在这两个实验中还发现, 决定裂变时间的主要是裂前最后蒸发的两三个中子, 也就是说, 核接近断裂时激发能较低, 蒸发一个中子所需要的时间较长. 反过来也说明大多数激发能都是在平衡后的极短时间内由蒸发粒子而耗散掉.

除了上面谈到的两个实验外, 还有许多低入射能的实验结果证明在裂变后发射的中子数基本上不随裂变核的初始激发能变化, 大都在 5 个在右, 而裂变前发射的中子数随激发能的增加而迅速增加. 当激发能达 500MeV (按照非完全熔合模型计算) 时, 裂前发射中子数达到 ~ 15 个, 甚至更多. 例如, 在 $^{84}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 反应中^[6] 得出的对应不同激发能的蒸发中子数如表 1. 从表中可以看出, 蒸发中子数随激发能的变化. 如果扣除裂后发射的中子 (5 个), 裂前发射中子的数目随激发能的变化是相当快的.

表 1 $^{84}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 反应中发射中子的多重性

(M_n)	18.3 ± 0.9	24.6 ± 1.2	30.1 ± 1.5	36.2 ± 1.8	40.5 ± 2.0
U_n/U_{FMR}	0.45	0.60	0.70	0.81	0.90
E^* (MeV)	300 ± 40	480 ± 60	670 ± 90	860 ± 130	1030 ± 150

2.3 裂变碎片的质量分布随激发能的增加而变宽

我们知道, 自发裂变的质量分布是非对称的, 且每组的分布宽度不是非常大. 当入射粒子的质量和能量增加时, 其引起的裂变碎片质量分布变为对称, 这主要是由于角动量效应的结果. 因为在 γ 引起的裂变中, 即使 γ 能量高达 $\sim 20\text{MeV}$, 其裂变碎片质量分布仍然是非对称的. 但当入射重离子的能量增加到很高时, 裂变碎片质量分布宽度变得很

宽. 例如, $^{84}\text{Kr} + ^{232}\text{Th}$ 反应中测得的碎片质量分布, 在 30MeV/u 时对应中心碰撞就跨越了 $A=40 \sim 150$ 的范围, 而对周边碰撞其范围仅限于 $A=80 \sim 140$ 之内. 在 $^{32}\text{S} + ^{232}\text{Th}$ 反应中, 裂变碎片质量分布也在 $A=50 \sim 150$ 范围内, 低质量端甚至延伸到 $A=40$ 以下, 此反应中周边碰撞引起的裂变碎片的质量却分布在很窄的范围.

这些结果表明, 虽然在高激发能时, 由于角动量的关系使得裂变碎片质量分布在总

体上仍保持对称形式, 但分布宽度加大, 而且向低质量端移动. 这与前面说的激发能升高裂前发射粒子增多是一致的.

总之, 在入射能较高的反应中, 直接测量碎片质量的实验很少, 大都是从碎片的速度和夹角推出碎片的质量或 Z 的, 而且数据较少, 况且是否有三重碎裂或 IMF 发射的干扰还需进行仔细分析. 因此, 评价裂变碎片质量分布存在着许多困难, 但其分布向低质量方向移动是明显的.

3 关于多重碎裂的实验结果

由于在理论上预言热核可以发生多重碎裂, 产生两个或两个以上的碎片, 因此, 近几年许多核物理学家都在积极地通过各种途径和方法企图在实验上找到多重碎裂的证据. 根据几年来的实验结果, 大致可以认为当沉积在核中的能量达到 7MeV/u 时, 就会出现真正的多重碎裂, 也就是说, 这时核完全解体了. 但也有人认为即使这样, 也不能肯定解体的过程是多重碎裂或是相继裂变, 因为实验上不能给出直接的证据.

在过去的实验中, 有人就发现, 当 ^{40}Ar 离子的能量达到 35MeV/u 时, 对大多数反应系统来说, 其融合就消失了⁽⁷⁾. 并由此得出了 ^{40}Ar 离子轰击各种靶核达到“融合消失”的入射能, 在他们的估计中, 假定了 $E^* = \frac{A_{CN}T^2}{8}$. 在以后我们的实验中, 例如 $^{40}\text{Ar} + ^{27}\text{Al}$ ($25 \sim 85\text{MeV/u}$), 经过深入细致的分析, 发现当 ^{40}Ar 离子的能量 $> 30\text{MeV/u}$ 时, 反应中发射带电粒子的多重性比低入射能时有较大的增加, IMF 的多重性在 30MeV/u 附近也有明显的上升. 作者认为, 在这些能量附近可能开始了多重碎裂过程. 在 30MeV/u 和 60MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应中⁽⁸⁾, 作者发现在 60MeV/u 时, 中心碰撞出射的三重碎片质量分布的中心位置远低于 30MeV/u 时的质量分布中心

位置. 对于测到的三重碎片事件而言, 其两两之间的相对速度分布、相关夹角等物理量, 两个能量下有显著的差别, 60MeV/u 时这些量显著地比在 30MeV/u 时的宽. 根据与理论模拟进行的比较, 作者认为, 在 30MeV/u 时发射的三重碎片可以说主要是来自相继裂变, 但 60MeV/u 时就不能下这样的结论. 在 45MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 反应的研究中, 也测到了大量的发射多重碎片的事件, 其中有的多重性为 5, 6 甚至为 7. 经过相对速度分析, 认为这些事件中发射的几个碎片都是同时出射的. 甚至在 838MeV $^{32}\text{S} + ^{197}\text{Au}$ 、 ^{232}Th 反应中, 也发现多重碎片发射事件. 虽然还不能确定这些事件是相继裂变还是同时碎裂, 但至少说

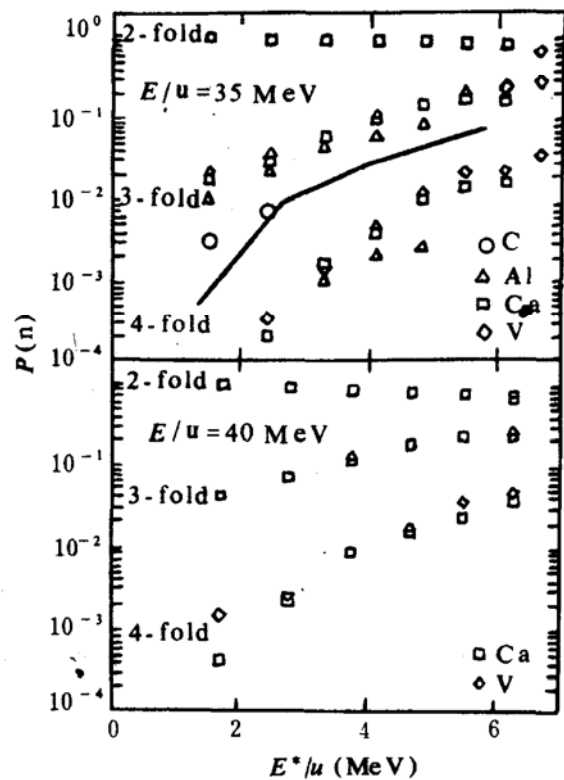


图 4 2、3、4 重碎片发射事件几率与激发能的关系. 反应系统为 $^{131}\text{La} + \text{C}, \text{Al}, \text{Ca}, \text{V}$. 入射能量标在图中. 图中实线是按照相继裂变模型计算的三重碎片发射事件的几率随激发能的变化

明两体裂变已开始由多重碎片发射事件所取代.

在 $35 \sim 55 \text{ MeV/u}^{131}\text{La} + ^{12}\text{C}$ 、 ^{27}Al 、 ^{40}Ca 、 ^{51}V 、 Cu 和 ^{139}La 反应研究中^[9], 作者声称观察到了多重碎裂事件. 经过分析得出了以下几点结论: (1) 随着入射能的升高, 多重碎裂事件的几率明显增加; (2) 对所有靶子和入射能, 其多重碎裂事件的有关性质是相似的. 这表明产生这些事件的源主要取决于弹核从靶核上拾取的核子数, 而与靶核性质较少关系; (3) 多重碎裂事件的比率随激发能增加, 一直到激发能达 $6 \sim 8 \text{ MeV/u}$. 这与 Bondorf 及 Gross 等人预言的在 $T \approx 5 \text{ MeV}$ (对 $A=100 \sim 130$) 发生突变的现象不同.

Yennolle 等人利用 ^3He 轰击 Ag 靶时, 发现当入射能大于 1 GeV 时, 其 IMF 发射的性质与低能时不同. 例如, 在其能谱中, 库仑位垒向低能端移动; 发射的 IMF 的总动能可达 400 MeV , 这比相继两体裂变发射的 IMF 的总动能高许多. 这说明, 在入射能 $\geq 1 \text{ GeV}$ 时, 发生了真正的多重碎裂. 前面也提到过, $29 \text{ MeV/u}^{208}\text{Pb}$ 轰击 ^{197}Au , 对应中心碰撞所观察到的产物都分布在低 Z 区, 两体裂变早已消失. 这说明高温核在 $e^* = 7 \text{ MeV/u}$ 时, 早已解体, 不可能有较大余核存在.

上面的实验结果表明, 所有多重碎裂或碎片发射事件都发生在很高激发能的情况下, 其母核的激发能大都达到了 $3 \sim 4 \text{ MeV/u}$ 以上, 这时高温核温度也在 5 MeV 以上. 在能量比较低时, 虽然也有实验结果表明测到了三重或四重碎片发射事件, 但发射的几率很小, 而且也都认为是所谓的相继发射的结果.

4 高温核衰变中对相继裂变的限制

根据裂变的有关实验结果, 我们可以看出, 相继发生裂变的几率是很小的. 其原因如下: (1) 两体裂变是一个慢过程. 正如前

面提到的, 由于裂变是集体自由度的平衡, 因此无论如何, 达到断裂的时间大致在 10^{-20} s , 而蒸发粒子则是一个统计过程, 发射时间则随着温度的升高而很快缩短, 即在裂变之前会发射大量的核子和复杂粒子乃至 IMF. 例如, 根据统计蒸发模型计算, 高温核蒸发中子的宽度为 $\Gamma_n = \frac{2mR}{\pi\hbar^2} T^2 e^{-B_n/T}$, (m 是子质量, R 核半径, T 核温度), 又 $\tau_n = \hbar/\tau\Gamma_n$, 所以我们可以估计出蒸发中子的时间标度随温度的变化: $T = 1 \text{ MeV}$ 时, $\tau_n = 4.2 \times 10^5 \text{ fm/c}$, $T = 5 \text{ MeV}$ 时, $\tau_n = 45 \text{ fm/c}$. 这时中子蒸发的时间远远小于裂变所需时间, 也就是说, 在达到裂变的过程中可以发射许多中子. 根据 Bohr-Wheeler 理论可推导出发生裂变的速率 $\frac{dN}{dt} = \frac{\omega_0}{2\pi} e^{-B_f/T}$ (B_f 是鞍点势能, $\omega_0/2\pi$ 是裂变位垒后的势能极小值处集体运动的经典频率). 这意味着裂变的时间标度不会小于 $5 \times 10^{-21} \text{ s}$. 这使得在裂变的过程中有相当多的中子发射, 高温核的激发能损失很多, 当达到裂变断点时, 核的激发能已经变得相当低, 即使发生裂变, 碎片的激发能已低得不可能再发生裂变. (2) 实验结果表明, 核断裂时的激发能很小, 这与上面的推论是一致的. 由于裂变核在断裂时的激发能仅有 $\sim 100 \text{ MeV}$ (包括转动激发在内), 假如发生了裂变, 那么形成的两个碎片的质量大约在 ~ 100 . 对于这个质量范围的核, 能够发生裂变的激发能要远高于 50 MeV . 这一点在低能重离子实验中早就证明了.

近来对核裂变行为及对核子发射研究结果都说明, 高温核发生相继裂变的可能性是很小的. 但是, 对多重碎裂研究的实验和理论的结果都表明, 只有当核的激发能达到一定程度后才能出现多重碎裂现象. 例如, 理论上对 ^{12}C 及 ^{40}Ar 离子引起多重碎裂的入射能量预言的结果是: 当 ^{12}C 的能量达到 200 MeV/u 时才开始出现多重碎裂, ^{40}Ar 的能量达 50 MeV/u 时才开始能在 ^{197}Au 核上引起

多重碎裂现象. 那么, 激发能没有达到那么高, 但裂变截面又在减少, 这时究竟发生哪些可能的衰变形式呢?

我们认为, 当核的激发能升高时, 复杂粒子的发射是继轻粒子蒸发、裂变(对重核)后逐渐开放的一种反应道. 复杂粒子的发射几率会随着核温度的上升而增大, 发射时间标度也会随着温度的上升而减小. 现在已有实验证明, $^{36}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ (35MeV/u) 反应中发射 Be、B 和 C 的时间标度在 $100 \sim 200\text{fm/c}^{(10)}$. 这要早于达到断裂的时间, 由于复杂粒子的发射, 再加上轻粒子的发射, 使得激发核会在很短时间内耗散大部分激发能, 从而使裂变几率下降. 当然, 对很重的激发核, 在发射了一个或两个复杂粒子以后,

还可能发生裂变, 这可能就是那些称之为连续裂变的三重碎片发射事件的一个重要来源. 例如, 前面提到的 $30\text{MeV/u}^{40}\text{Ar}$ 轰击 ^{197}Au 的实验, 仔细分析一下, 不难发现在每个三重碎片发射事件中, 都有一个质量很轻 ($A \approx 20$) 的碎片, 而且第一次就发射轻碎片的事件占全体三重碎片发射事件的 $\sim 50\%$ (按照作者的分析). 结合复杂碎片发射时间的测量结果, 我们有理由认为, 所谓的相继裂变很可能是热核先蒸发一个复杂粒子(当然其质量数较大)然后发生裂变的一种过程. 有人把复杂粒子发射过程作为非对称裂变处理, 只能是一种处理手段, 并不能代表其物理过程, 因为没有考虑核温度对粒子蒸发及裂变时间标度的影响.

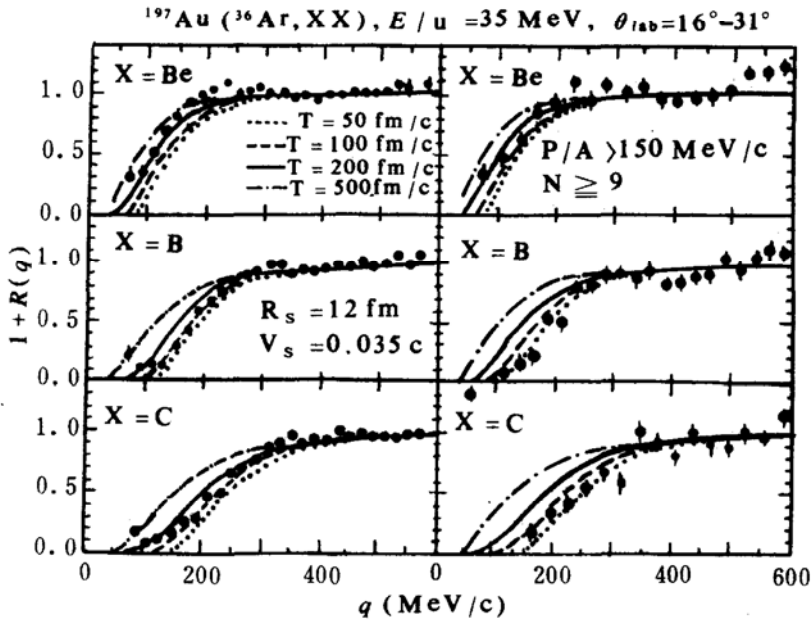


图 5 两个复杂粒子在小相对动量时的关联函数. 左边为单举测量结果, 右边为条件关联数据. 曲线为理论计算结果. 理论与实验数据比较后可以看出发射时间标度在 $\tau = 100 \sim 200\text{fm/c}$

为了确定高温核衰变性质随激发能的变化, 关键问题可能是要知道复杂粒子或中等质量碎片以及轻粒子发射的时间标度. 现在已经有人利用粒子关联技术对它们的时间标度进行了测量, 但数据还不是很多, 特别是

复杂粒子的发射时标的的数据还相当缺乏. 因此, 在实验上更多地对复杂粒子的发射截面及其与裂变截面的关系、随激发能的变化、轻粒子发射多重性、余核质量分布及其随能量的变化等问题进行深入细致的研究, 才能进

一步确定高温核衰变过程随激发能的发展.

参 考 文 献

- 1 Moretto G, et al. LBL Preprint 88
- 2 Volant C, et al. Phys. Lett., 1987, 195B: 22
- 3 Jiang Dongxing, et al. Nucl. Phys., 1989, A503: 560
- 4 Piaseki E, et al. Phys. Rev. Lett., 1991, (66): 1291
- 5 Hilscher D, et al. Phys. Rev. Lett., 1989, (62): 1099
- 6 Crema E, et al. Phys. Lett., 1991, 258: 266
- 7 Auger G, et al. Phys. Lett., 1985, 169B: 161
- 8 Bizard G. LPCC91-06
- 9 Blumenfeld Y, et al. Phys. Rev. Lett., 1991, (66): 567
- 10 Kim Y D, et al. Phys. Rev. Lett., 1991, (67): 14

Limit to Sequential Fission of Highly Excited Nucleus

Jin Genming

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

Abstract Sequential fission is one of the several kinds of theoretical production for hot nucleus decay. By analysing relevant experimental results such as fission time scale, pre-scission neutron emission, fission cross sections and their variation with excitation energy, the results of multifragmentation and the time scale of complex fragment emission, a limit to the sequential fission of the hot nucleus is suggested in this paper. A transition from intermediate mass fragment evaporation to multifragmentation seems a possible evolution of the hot nucleus decay with excitation energy.

Key Words high-temperature nuclei, fission, sequential fission, multifragmentation, intermediate mass fragment.