

用中子球测量重离子碰撞中 单举中子多重性

D. Guerreau 江栋兴¹⁾ J. Galin H. Doubre J. Pouthas
(GANIL, Caen, France)

M. Morjean J. Fréchet J. L. Charvet Y. Patin,
B. Lott Y. Pranal C. Magnago J. L. Uzureau
(Centre d'Etudes de Bruyères-Le-Châtel, France)

U. Jahnke G. Ingold
(Hahn-Meitner-Institut, Berlin, F.R.G.)

D. Jacquet
(Institut de Physique Nucléaire, ORSAY, France)

摘 要

本文介绍用中子球探测器测量重离子核反应中的单举中子多重性分布。给出在 27、35、44 和 77 MeV/u 四个轰击能量下 $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$, $^{40}\text{Ar} + ^{232}\text{Th}$ 两个反应体系的实验结果。单举中子多重性分布反映了在反应过程中不同耗散程度的碰撞的相对贡献。

一、引 言

在关于中能重离子核反应的众多研究中,观测碰撞过程的能量耗散是十分重要的,它能提供有关反应机制的重要信息。从仅有一个或少数几个核子转移的擦边碰撞到激烈相互作用的中心碰撞,对于重靶核体系,无论什么反应机制,能量耗散都倾向于发射出中子。在一级近似下,反应过程的中子多重性可成为碰撞激烈程度的量度^[1,2]。所以测量重离子碰撞中子多重性已成为研究重离子反应机制的一个重要手段。本文介绍用中子闪烁球测量重离子碰撞中单举中子多重性的实验结果。

二、中子闪烁球探测器

中子闪烁球探测器已有30多年历史。过去它已成功用于诸如自发裂变及中子诱发裂

本文1989年2月21日收到。

¹⁾ 作者作为法国 CNRS 聘任的外国研究员在 GANIL 工作,永久通讯地址是:北京大学技术物理系。

变的中子多重性测量^[3,4]、 $(n, xn)x = 1, 2, 3$ 的截面测量^[5]、光核截面测量^[6]以及作为 γ 探测器对周期表中各元素的中子俘获截面的系统研究^[7]等许多领域。在所有这些应用中, 这种探测器都是与荷电粒子束流离线工作的。自 80 年代初开始, 它作为加速器束流管线的一个终端设备应用于核反应机制的在线研究。

本实验所用的中子闪烁球^[8]是由 1 米直径的两个半球组成, 外围安置 12 个光电倍增管。内部充以载天然 Gd (重量比为 0.4%) 的液体闪烁体, 灵敏体积为 500 升。在闪烁球中心有一圆柱形小靶室, 其中可以安置些半导体探测器以同时测量荷电粒子或碎片。图 1 中的插图是中子闪烁球的几何结构示意图。

束流轰击靶产生的快中子经过与液体闪烁体中的氢等轻核发生弹性碰撞, 在几十纳秒 (ns) 内损失其绝大部分能量, 然后在液体闪烁体内扩散并最终与闪烁体分子达成热平衡。在其扩散过程中有可能被 Gd 原子核所俘获 (天然 Gd 含有热中子俘获截面分别为 6.1×10^4 和 2.5×10^5 巴恩的两个同位素 ^{155}Gd 和 ^{157}Gd , 其丰度分别为 15% 和 16%)。Gd(n, γ) 反应平均地放出总能量约 8MeV 的三个 γ 光子, 并以非常高的效率被闪烁体所探测。我们用改进的 Monte-Carlo 程序 DENIS2^[9] 模拟这种探测器中中子慢化、被俘获以及最后俘获 γ 被探测的过程。图 2 给出我们所用中子球探测器的中子俘获

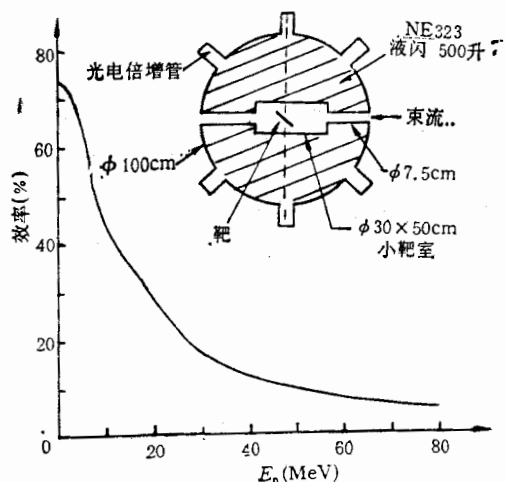


图 1 中子探测效率随其能量的变化关系

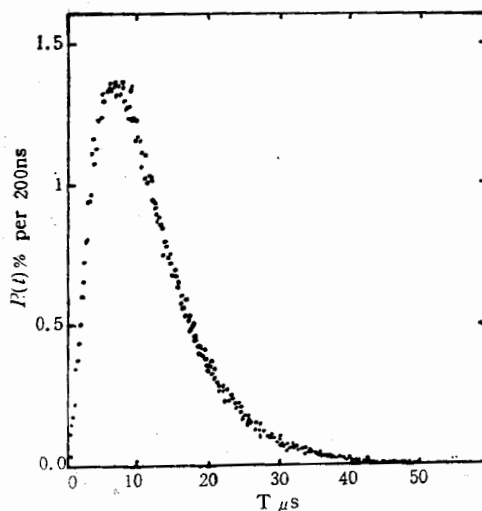


图 2 中子俘获几率的时间分布

几率时间分布。最可几俘获时间约为 7 微秒, 在 1-35 微秒时间间隔内约有 98% 的中子俘获几率。可见, 这种探测器具有相当慢的时间响应, 要求对束流的时间结构进行调制, 譬如每 50 微秒在靶上有一束流脉冲, 每个束流脉冲持续 1 微秒或稍短些。另外, 在实验中还需限制每个束流脉冲的流强, 使得束流脉冲发生核反应的几率约为 3%。图 1 给出模拟所得探测器的中子探测效率随中子能量的变化关系。模拟时假定中子是从探测器中心各向同性地向四周发射的。计算的探测效率已经调整到用 ^{252}Cf 源所得的实验效率值 72% 可以看到, 我们的中子球对 15MeV 中子, 探测效率约为 35%。

在中能重离子核反应中, 类弹核产物具有邻近弹核的速度, 它发射的中子具有很高能

量而且集中于向前方向,在我们所用探测器几何结构条件下,其探测效率变得很低.所以,我们选用 $\text{Ar} + \text{Au}$ 和 $\text{Ar} + \text{Th}$ 这种极不对称的反应体系,这时主要是类靶核产物发射中子,而且即使对于大动量转移的中心碰撞,类靶核产物的反冲速度仍足够地低以致对其发射的中子,探测器仍保持有较高的探测效率.

三、结果与讨论

本文给出的实验结果是在法国国立重离子大加速器 (GANIL) 上完成的. 27, 35, 44 和 77MeV/u 的 Ar 束经过高性能快速斩束器调制成每 50 微秒一束流脉冲. 利用加速器高频信号、斩束器信号及中子球探测器的瞬时信号(主要由瞬发 γ 及快中子所产生的反冲质子在探测器中引起的)的三重符合(分辨时间约 20 纳秒)输出作为数据获取系统的触发信号. 在持续时间为 48 微秒的第一个计数门内记录 12 个光电倍增管的信号,并在第二个 48 微秒持续时间内记录本底. 图 3 为 27, 35 和 44MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应的单举中子多重性分布,纵坐标所示的分布几率未经探测器探测效率校正. 为定性地看看探测效率对单举中子多重性分布的影响,图中还给出用灵敏体积为 1500 升的大中子球探测器(它来自 HMI, Berlin, FRG) 在 44 和 77MeV/u 两个能量点对同样反应体系测得的单举

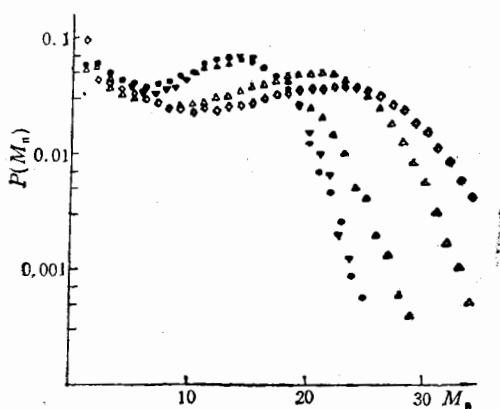


图 3 中子多重性的几率分布

- Ar + Au
- ▼ 27MeV/u det. vol
 - 35MeV/u 500 l
 - ▲ 44MeV/u
 - △ 44MeV/u 1500 l
 - ◇ 77MeV/u

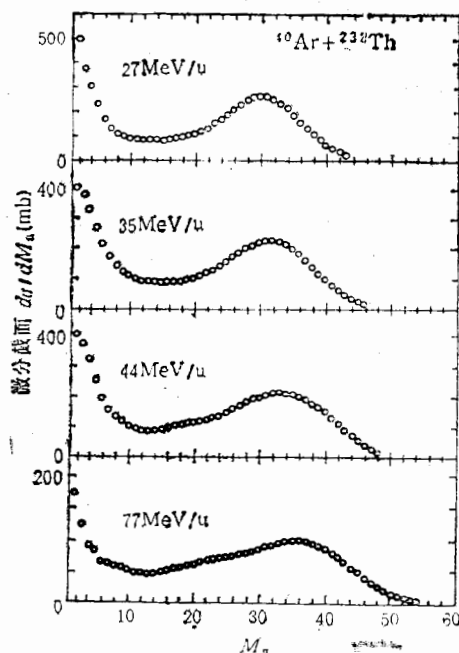


图 4 中子多重性的微分截面分布

中子多重性分布. 两个探测器对 44MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应所得单举中子多重性分布形状是相似的,而且对于相应于中心碰撞发射的中子多重性进行探测效率校正后,其结果是相符的. 图 4 则为 27, 35, 44 和 77MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{232}\text{Th}$ 反应体系经过探测效率校正后的单举中子多重性分布.

单举中子多重性分布提供各种激烈程度的核间碰撞相对贡献的概貌. 对于所研究能

层的两个体系,单举中子多重性分布都具有两个组分:低中子多重性相应的擦边碰撞和高中子多重性相应的中心碰撞.中子多重性可以用作一种有效的碰撞激烈程度过滤器,将擦边碰撞和中心碰撞分开来对其耗散机制及产物的衰变作详细研究^[10,11].以前人们用过轻荷电粒子和裂变碎片关联角等过滤器^[12].如M. Conjeaud等人通过测量裂变碎片关联角的方法研究了31—44MeV/u⁴⁰Ar+²³²Th反应体系.图5代表他们所得四个能量点的裂变碎片

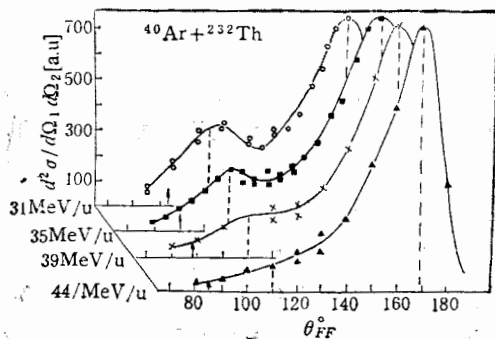


图5 在四个轰击能量下 Ar + Th 体系的裂变碎片关联角分布,引自 [12]

片双微分截面随碎片关联角的变化关系.轰击能量小于 40MeV/u时,其变化曲线都具有两个组分即在 $\theta_{FF} \approx 170^\circ$ 附近的峰相应于小线性动量转移引起的“冷”裂变和在 $\theta_{FF} \approx 100^\circ$ 附近的峰相应于大线性动量转移引起的“熔合”裂变.随着弹核能量的增加,“冷”裂变峰几乎不变,而“熔合”裂变组分则相当突然地在 40MeV/u 附近消失.目前尚不清楚:这是入射道效应即已达到临界温度,“熔合”核无法形成,还是出射道效应即形成的残核不再以二元裂变衰

变?从单举中子多重性实验结果可知,即使 77MeV/u Ar 轰击 Th 时,中心碰撞组分依然存在.既然相应的二元裂变峰消失了,相应于这部分的截面是什么?利用中子球探测器进行中子多重性与裂变碎片、蒸发残核或中等重碎片间的关联测量或许会提供更多的信息.

轰击能量从 27 到 77MeV/u 约增加三倍,对给定体系,其单举中子多重性分布无论其形状、低和高中子多重性组分相对贡献还是高中子多重性组分相应的峰位值都只有很小的变化.例如 ⁴⁰Ar + ²³²Th 体系,相应于中心碰撞的中子多重性分别为 30、31、33 和 36.在一级近似下,这似乎表明弹核 Ar 与靶核的能量耗散已达饱和,提高 Ar 束的能量已不再能有效地增加“熔合”核的激发能.当然,更确切的信息应通过测定与给定线动量转移(对 Ar + Au 和 Ar + Th 这样的重体系,可以从测定相符合的两碎片之关联角来推出)相联系的中子多重性来得到.的确,对于 27、35 和 44MeV/u 三个能量点,中子多重性的饱和值在 5% 以内是相同的^[13].这样的饱和效应不太可能由轻荷电粒子的竞争发射来解释,事实上,轻荷电粒子多重性也具有类似的饱和效应^[14](至少到 44MeV/u 是这样,77MeV/u 的实验数据分析尚未结束).这是否意味着中等重碎片 ($z \geq 3$) 的发射几率有明显增加?当然也可能是弹核 Ar 转移给靶核的线动量已达到饱和,若是如此,要显著提高中子多重性即要产生更热的核(核温度超过 5MeV)选用 Ni、Kr 甚至 Au 这些更重的弹核或许是令人感兴趣的.

用中子球测核反应过程的单举中子多重性还提供得到总反应截面的一种方法.事实上,通过同时监测弹核在靶上的卢瑟福散射则可将单举中子多重性的几率分布转换成绝对标度的分截面 $\sigma(^{40}\text{Ar}, xn)$, 于是 $\sum_{x=1} \sigma(^{40}\text{Ar}, xn)$ 则是总反应截面的近似值.当然这里排除了只发射 γ 射线或荷电粒子的那些反应过程亦即忽略了碰撞过程中能量耗散低于

中子结合能的所有过程. 对于较高能量和不太缺中子的反应体系, 这样的忽略或许是允许的, 更何况在必要的情形可以对这部分反应截面进行修正. 遗憾的是, 在我们的实验中未能仔细控制在 Au 和 Th 靶上轻元素(如 ^{12}C 等)的可能沾污, 因而难以用这方法得到可靠的总反应截面值.

参 考 文 献

- [1] J. Galin, *Nucl. Phys.*, **A447**(1985), 519c.
 [2] U. Jahnke et al., *Phys. Rev. Lett.*, **50**(1983), 1246.
 [3] D. C. Hoffman et al., *Phys. Rev.*, **C21**(1980), 637.
 [4] M. Soleilhac et al., *J. Nucl. Energ.*, **23**(1969), 257.
 [5] L. R. Veaser et al., *Phys. Rev.*, **C16**(1977), 1792.
 [6] A. Leprêtre et al., *Nucl. Phys.*, **A367**(1981), 237.
 [7] S. K. Gupta et al., *Nucl. Instr.*, **148**(1978), 77.
 [8] J. Fréchaud, *Nucl. Instr. Meth.*, **135**(1976), 511.
 [9] J. Poitou et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **114**(1974), 113.
 N. Prot, GANIL, RS8702.
 [10] M. Morjean et al., *Phys. Lett. B*, **203**(1988), 215.
 [11] J. Galin, Talk Presented at the 3th Conference on Nucleu-Nucleu Collision, July 6—11, 1988, Saint-Malo, France.
 [12] M. Conjeaud et al., *Phys. Lett.*, **159B**(1985), 244.
 D. Jacquet et al., *Phys. Rev.*, **C32**(1985), 1594.
 [13] D. X. Jiang (江栋兴) et al., Contribution of the 3th Conference on Nucleu-Nucleu Collision, July 6—11, 1988, Saint-Malo, France.
 D. Guerreau et al., Talk Presented at the RIKEN- IN_2Ps Symposium on Heavy-Ion Collisions October 11—15, 1987, Shimoda, Japan.
 [14] D. X. Jiang (江栋兴) et al., Saturation of the thermal energy deposited in Au and Th nuclei by Ar projectiles between 27—77 MeV/u. GANIL, p. 9813, *Nucl. Phys.*, 待发表.

INCLUSIVE NEUTRON MULTIPLICITY IN HEAVY-ION COLLISION MEASURED BY A 4π NEUTRON DETECTOR

D. GUERREAU JIANG DONGXING J. GALIN H. DOUBRE J. POUTHAS

(GANIL, Caen, France)

M. MORJEAN J. FRÉCHAUD J. L. CHARVET Y. PATIN B. LOTT Y. PRANAL

C. MAGNAGO J. L. UZUREAU

(Centre d'Etudes de Bruyères-Le-Châtel, France)

U. JAHNKE G. INGOLD

D. JACQET

(Hahn-Meitner-Institut, Berlin, F. R. G.)

(Institute de Physique Nucléaire, ORSAY, France)

ABSTRACT

The inclusive neutron multiplicity distribution in the heavy-ion reactions measured by a 4π neutron detector is presented in this paper. Results for $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ and $^{40}\text{Ar} + ^{232}\text{Th}$ at 27, 35, 44 and 77 MeV/u are displayed. The distribution provides an overview on the reaction characteristics concerning the relative strength of contributions according to their degree of dissipation.