

中能重离子反应破碎过程的统计描述*

萨本豪 郑玉明 张孝泽

(中国原子能科学研究院,北京)

摘 要

本文把原适用于高能重离子反应破碎过程的统计模型,推广应用于中能重离子反应的低能端.具体计算了 $^{12}\text{C}(35\text{MeV}/n) + ^{63}\text{Cu}$ 反应中形成的复合系统 $^{75}\text{Ge}^*$ 的破碎过程,很好地解释了碎块质量分布的实验数据;碎块同量异位素分布,也得到了较好的再现.

一、引 言

众所周知,中高能重离子反应是当今原子核物理的一个重要的发展前沿,广泛吸引着世界上的理论物理学家和实验物理学家.这不仅因为它们的反应动力学截然不同于低能重离子反应,更因为人们热衷于探索核物质的新形态.人们期待着揭露可能寓于其中的液气相变和退禁闭相变.

一般把人射能量(每核子)小于和等于10 MeV的重离子反应划归为低能领域;在此领域内平均场理论取得了很大成功.相反地,在高中能重离子反应(每核子的人射能量 ≥ 200 MeV)领域,两体动力学(即核子-核子碰撞)则占主导地位.对于能量界中的中能重离子反应来说,一体机制和两体机制都不容忽略.

但是,从描写反应产物的各种分布(如质量分布,同量异位素分布等)角度来看,也就是说从反应后期形成的处于激发状态的复合核系统的解体(破碎)来看,要不要对低能、中能和高中能重离子反应,作截然的区别呢?这是很值得研究的课题,本文的结果表明,原为高中能重离子反应建立起来的统计模型^[1-3],同样可成功地用于中能重离子反应,甚至它的低能端.

在最近发表的文章[4]中,给出了 $^{12}\text{C}(35\text{MeV}/n) + ^{63}\text{Cu}$ 反应的碎块质量分布和同量异位素分布的实验数据.该文作者发现:无论用级联蒸发模型^[5]或者杂种预平衡模型(Hybrid Preequilibrium Model)^[6],也无论假设复合核系统是由靶核加来自弹核的 ^6Li , ^9Be 或 ^{12}C 构成的,一概不能重复数据.从而该文作者认为,碎裂机制(disassembly)可能在这过程中起了重要的作用.

本文把我们发展起来的统计模型和蒙特卡罗技巧^[7]应用到属于中能领域低能端的上

* 国家自然科学基金资助课题.
本文于1988年8月3日收到.

述反应,得到了与实验相当符合的结果.

二、模 型

大家知道,从几何模型看来,弹核和靶核的交迭区,是决定于碰撞参数;一般实验所测得的末态产物,显然是对应于各种碰撞参数平均的结果.相应地,理论结果也应该先对碰撞参数平均后,才能与实验相比较.这儿我们为了简单起见,先根据弹核和靶核几何,如下平均得一个碰撞参数

$$\bar{b} = \int_0^{b_{\max}} b^2 db / \int_0^{b_{\max}} b db = \frac{2}{3} b_{\max} \quad (b_{\max} = R_P + R_T), \quad (1)$$

以该平均碰撞参数下的理论结果与实验相比较,上式中 R_P 和 R_T 分别是弹核和靶核的半径.

由于考虑的是中能区甚至它的低能端,入射能量不是太高,因此可以想像:弹核打到靶核后,坐落于交迭区的那部分弹核的核子将与靶核一起构成复合系统;其余的弹核核子则成了旁观者.在经历了能量交换和膨胀之后,复合系统将在一定的总激发能和破碎体积 (freeze-out volume) 下解体,从而导致了可与实验比较的各种理论结果.

来自于弹核(质量数为 A_P) 的核子数,可用 Swiatecki 的近似公式^[7]来计算;代入以上求得的 $\bar{b} = 4.764$ fm 以及靶核的质量数 A_T 、 R_T 、 A_P 和 R_P 后,得到的结果约为 6. 这说明:平均地说来,弹核转移一个 ${}^6\text{Li}$ 到靶核以构成复合系统 ${}_{32}^{60}\text{Ge}^*$.

接着我们就用微正则系综 Metropolis 抽样技巧^[8]来描写 ${}_{32}^{60}\text{Ge}^*$ 的破碎过程;这儿用到的参数有:系统总激发能 $E^* = 150$ MeV, 表征系统破碎体积的参数 $R_{T0} = 2.05$ fm; 另外,对碎块间的库仑相互作用,采用了文献 [9] 的近似办法.

三、结果和讨论

用上面所述的办法得到的碎块质量分布绘在图 1 中(其中的锯齿线),有误差棒的点是数据,实心点和空心点分别是级联蒸发和预平衡发射计算的结果.显然我们的结果,比后两者与实验符合得更好;特别是质量数小于 45 以下的结果也得到了解释,另外中等质量区产额指数下降后又拐向上升的实验事实也得到了说明.以上事实表明:对于质量数小于 45 的产物来说,不仅要考虑蒸发模式^[2,10],还要考虑双裂变模式^[2,10],甚至多破碎^[2,10]模式.

从图 1 也看到:以上理论处理,对于大质量端(如质量数大于 60),还说明得不够好.这主要是因为我们模型未包括弹性道;另外,要改善这区域与实验符合的状况,恐怕也得对边缘碰撞的极端情形作些特殊考虑.

图 2 给出了 $A_f = 51$ 碎块的同量异位素相对产额分布的理论结果(锯齿线),实线和虚线分别对应于对碎块库仑相互作用采用和不采用近似的结果.实心点是度规到 (scaled to) $A_f = 51$ 的实验结果. Z_P 是最可几电荷^[11], 对库仑作和不作简化的 Z_P 的理论结果分别为 23.74 和 23.59; 实验文章 [4] 中所用的拟合值是 23.86, 符合得相当好.

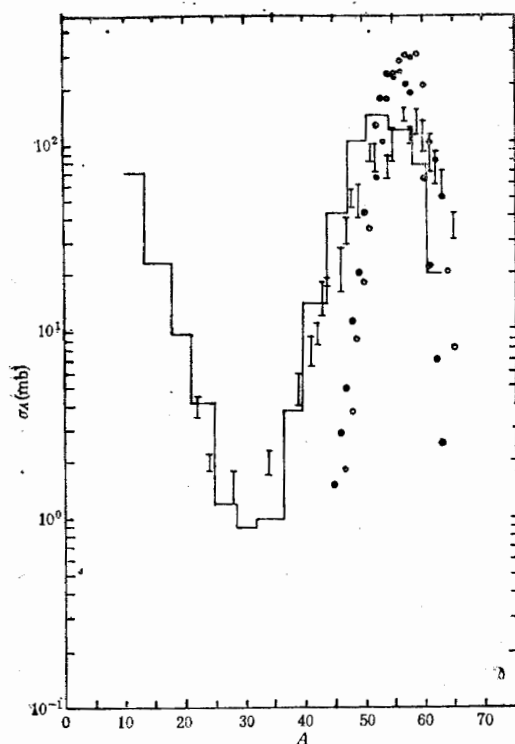


图 1 $^{12}\text{C}(35\text{ MeV}/n) + ^{63}\text{Cu}$ 反应的
碎块质量分布

I: 数据, 取自文献 [4], ●: 级联蒸发计算
结果^[5], ○: 预平衡发射计算结果^[6], —: 本文结果

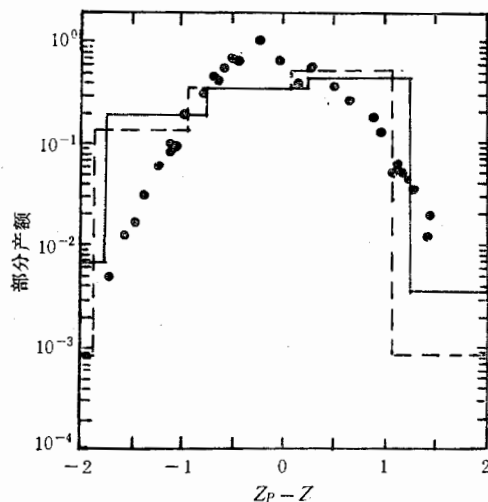


图 2 与图 1 同样的反应中碎块 $A_f = 51$ 的
电荷色散

●: 数据, 取自文献 [4], —: 含库仑简化的
本文结果, ---: 不含库仑简化的结果

从图 2 看到: 对于同量异位素分布, 理论与实验符合的程度也还可以, 对库仑作与不作简化的结果非常靠近. 理论分布峰的位置决定于质量数为 51 的同量异位素的自然最大丰度—— ^{51}V ; 也就是说决定于同位素表, 因而是相当有道理的.

图 3 给出了入射能量分别为 $^{35}\text{MeV}/n$ 和 $^{86}\text{MeV}/n$ 的 $^{12}\text{C} + ^{63}\text{Cu}$ 反应中碎块质量分布的实验结果 (图中的实线和虚线), 以及复合系统 ($^{90}\text{Ge}^*$) 总激发能分别为 150 MeV 和 180 MeV 的相应理论结果. 两种能量的理论与实验符合的情况非常相近, 虽然两者的入射能量相差一倍多, 但复合系统的总激发能却只相差五分之一左右; 这是因为平均碰撞参数 $\bar{b} = \frac{2}{3}(R_P + R_T)$ 是相当大的, 因而作用实际上并不非常剧烈, 所以能量转移的差别, 并不像入射能量差别那般悬殊. 当然进一步探求总激发能这个模型参数与入射能量的具体关系, 是很有意义的新课题.

总之, 我们原先对高能重离子核反应所设计的统计模型和蒙特卡罗技巧, 也能有效地推广应用于中能重离子反应甚至它的低能端. 看来只要能用几何模型, 恰当地描写了反应中形成的复合系统之后, 用我们的办法描写复合系统破碎后产物的各种分布, 都可能取得与实验数据的较好符合. 不管是高能重离子反应还是中能重离子反应, 情况都差不多.

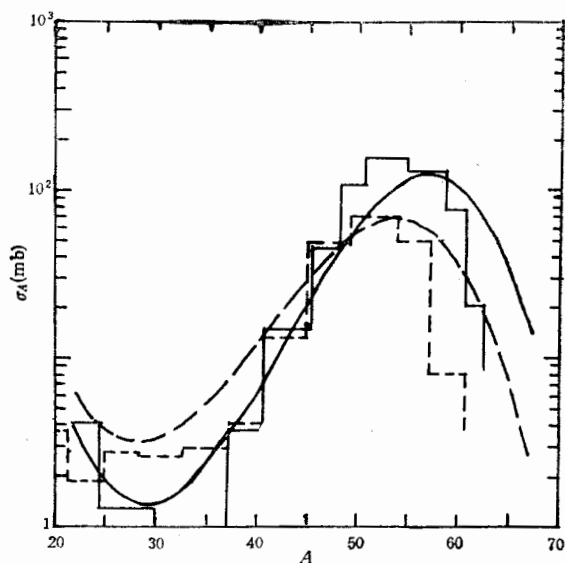


图3 与图1相同的反应但入射能量不同情况下的碎块质量分布
 ——: 入射能量为 35 MeV/n 的数据^[4], ---: 入射能量为 86 MeV/n 的数据^[4],
 实锯齿线: $E^* = 150$ MeV 的本文结果, 虚锯齿线: $E^* = 180$ MeV 的本文结果

参 考 文 献

- [1] J. Randrop and S. E. Koonin, *Nucl. Phys.*, **A356**(1981), 223.
 G. Fai and J. Randrop, *Nucl. Phys.*, **A381**(1982), 557.
 S. E. Koonin and J. Randrop, *Nucl. Phys.*, **A474**(1987), 173.
- [2] Sa Ben-Hao and D. H. E. Gross, *Nucl. Phys.*, **A437**(1985), 643;
 D. H. E. Gross and Zhang Xiao-Ze, *Phys. Lett.*, **B161**(1985), 47;
 D. H. E. Gross, Zhang Xiao-Ze and Xu Shu-Yan, *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 1544.
- [3] J. Bondorf et al., *Nucl. Phys.*, **A443**(1985), 321;
 J. Bondorf et al., *Nucl. Phys.*, **A444**(1985), 460;
 H. W. Barz et al., *Nucl. Phys.*, **A448**(1985), 753.
- [4] S. Y. Cho, Y. H. Chung, N. T. Porile and D. J. Morrissey, *Phys. Rev.*, **C36**(1987), 2349.
- [5] I. Dostrovsky, Z. Fraenkel and G. Friedlander, *Phys. Rev.*, **116**(1959), 683.
- [6] M. Blann, *Nucl. Phys.*, **A213**(1973), 570.
- [7] J. Gosset et al., *Phys. Rev.*, **C16**(1977), 629;
 D. J. Morrissey et al., *Phys. Rev.*, **C18**(1978), 2288.
- [8] Zhang Xiao-ze et al., *Nucl. Phys.*, **A461**(1987), 641, 668.
- [9] 张东、萨本豪、张孝泽与金星南, 高能物理与核物理, **13**(1989), 62.
- [10] Zheng Yu-Ming, et al., *Phys. Lett.*, **B194**(1987), 183.
- [11] 卢兆启、萨本豪, D. H. E. Gross 和郑玉明, 高能物理与核物理, **12**(1988), 75.

STATISTICAL MODEL FOR THE DISASSEMBLY PROCESSES OF MEDIUM ENERGY HEAVY-ION REACTIONS

SA BENHAO ZHENG YUMING AND ZHANG XIAOZE
(*Institute of Atomic Energy, Beijing, China*)

ABSTRACT

A statistical model and corresponding Monte Carlo technique, worked out for high energy heavy-ion reaction originally, have been extended to cover the disassembly processes of nuclei created in medium energy heavy-ion reactions. The theoretical results of fragment mass yield distribution and charge dispersion out of the disassembly processes of ${}^{62}_{32}\text{Ge}^*$ formed in ${}^{12}_6\text{C}$ (35 Mev/n) + ${}^{63}_{29}\text{Cu}$ meet the data reasonably good.