

中高能核反应的新进展

陆中道

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 简介了中高能核反应中四个基本问题方面的新进展. 它们是热化与统计热平衡、气化与相变、瞬时碎裂、阈下 K^+ 产生与 K^+/π^+ 增强.

关键词 中高能核反应 新进展

中高能核反应具有与低能核反应不同的特性和反应机制, 和相对论性核碰撞相比, 又具有实验上易实现性的特点, 因而近年来受到广泛的兴趣和研究, 无论在实验上还是在理论上都取得了较大的进展. 兰州重离子加速器的建成和北京串列加速器的扩建, 将为我国科学工作者开展这个领域的研究提供有力的实验工具. 中国原子能研究院在热核衰变的理论研究中, 也取得了一些可喜的成绩.

1 热化与统计热平衡

在低能核反应中, 入射核进入靶核, 经过一段时间后, 将形成在能量上处于统计热平衡的复合系统, 通常叫做“复合核”. 那么, 中能和高能核反应中, 是否也能形成在能量上处于统计热平衡的复合系统? J. Guggenon 等人^[1]在80年代初首先研究了这个问题. 他们研究了核反应中反应体的初末态关联, 发现在末态组态中仍然保留着较大部分的初态组分, 因此认为反应不够充分, 核系统没有充分热化, 反应体没有达到统计热平衡. 后来, J. Aichelin 等人^[2]利用 QMD 模型也研究了这个问题. 他们计算了出射粒子的快度分布, 结果发现即使在中心碰撞下仍存在类弹成分和类靶成分. 因此也认为反应不充分, 反应体未充分热化, 没有达到统计热平衡. 最近, L. G. Morretto 等人^[3]对每核子入射能量为 60 MeV 的 $^{197}\text{Au} + ^{27}\text{Al}$ 、 ^{51}V 、 ^{nat}Cu 核反应中二体至五

体衰变分析表明, 衰变几率都只跟“源”的激发能有关, 且具有 $E^{1/2}$ 线性依赖关系 (图1).

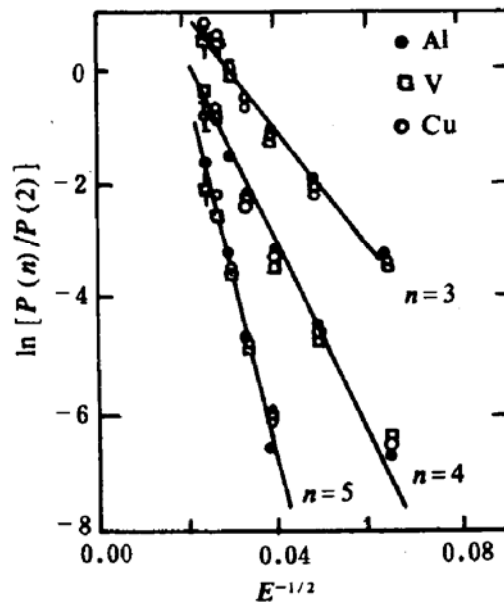


图1 衰变几率(相对于二体衰变)随激发能的变化

这种依赖关系只有在源到达统计热平衡下才具有. 这表明源的形成和源的衰变无关, 是种统计衰变过程. 弹核和靶核在反应中首先发生熔合(不完全熔合), 形成统计热平衡的复合系统——“源”, 然后衰变, 发射粒子. 衰变几率跟“源”激发能的 $E^{1/2}$ 线性依赖关系也已被其它一些实验所证实. 例如, J. Pouliot 等人^[4]在分析 50 MeV/u 的 $^{197}\text{Au} + ^{16}\text{O}$ 实验时, 也发现了这个关系. 中国原子能院利用微动力学模拟研究了 $^{40}\text{Ca}(35\text{MeV/u}) + ^{40}\text{Ca}$ 的

反应^[5], 计算显示在对心碰撞下也能达到统计热平衡. 可以认为, 热化和热化程度, 反应体——“源”的大小和入射能量、弹核和靶核大小以及碰撞参数等会有很大关系.

2 气化和相变

实验发现在较高入射能量($>35\text{MeV/u}$)下, 核反应中将出现中等质量碎块(IMF, $Z \geq 3$), 粒子分布呈负幂指数 e^{-x} 规律. 因此, 有人认为是液气相变的看法现已被否定.

但经过后来仔细的研究表明, 发射粒子谱和碰撞参数有关. 对心碰撞和擦边碰撞具有不同的粒子谱, 在对心碰撞下, 由于参与碰撞的核子多, 碰撞激烈, 产生较多的轻粒子; 相反, 在擦边碰撞下, 基本保留着弹核(类弹)和靶核(类靶)两大块. 介于这两者之间的碰撞, 将产生较多的 IMF. 而实验测量的结果是碰撞参数的平均, 平均下粒子的分布呈负幂指数规律. 因此认为是液气相变的看法现已被否定.

最近几年进一步的研究发现, 反应中发

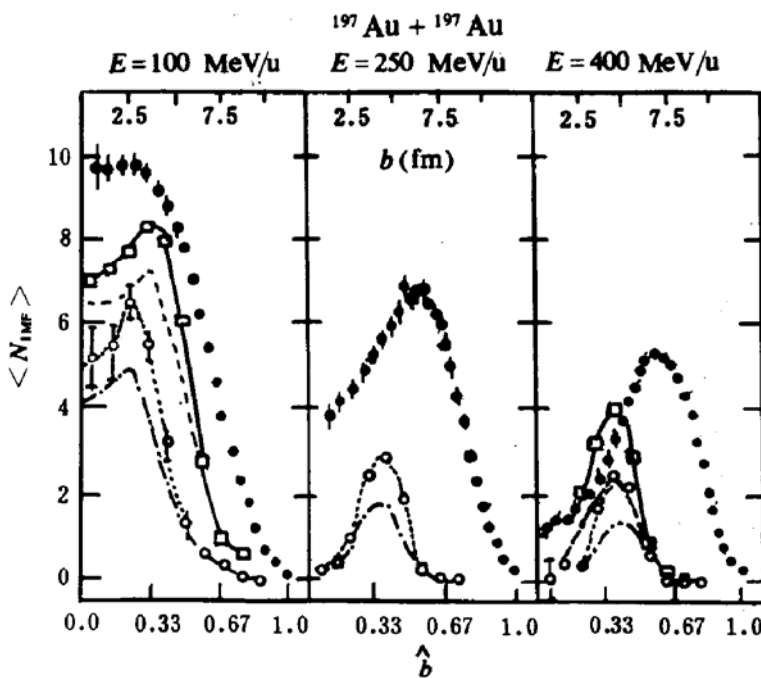


图2 平均 IMF 数随入射能和碰撞参数的变化. \bullet 为实验数据, \circ 为 QPD 计算数据, \cdots 和 $- - -$ 为 W/filter 计算数据, \square 为 QMD 计算数据

射的粒子谱和入射能量有非常密切的关系. 在入射能量小于 100MeV/u 时, IMF 的数目随入射能量增加而增加, 但当入射能量大于 100MeV/u 时, IMF 的数目反而随入射能量增加而减少, 反应将产生大量的轻粒子, 呈现出所谓“气化”现象. 这种气化现象已经被很多实验所证实. 例如, M. B. Tsang 等人^[6] 在入射能量为 100 、 250 和 400MeV/u 的 $^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 实验中发现, 在中心碰撞下, IMF 数目随入射能量增加而减少. 在 100MeV/u 时,

IMF 的数目最多. 在 400MeV/u 时, 系统获得的能量最多, 气化现象最严重, 平均 IMF 数目最少(图2). 入射能量为 100MeV/u 是关于 IMF 产生的转折点, 在该点附近, IMF 数目达极大值. 这一现象在这个实验中也得到证实, 而且主要由对心碰撞(小 b) 下产生, 形成一个很高的峰. 在入射能量大于 100MeV/u 的条件下, IMF 的分布仍有峰, 但随入射能量增加而减低, 且峰的位置移向大的碰撞参数. 这表明碰撞参数增大, 反应体变小, 虽然每核子入

射能量增大,但热化程度减弱,气化程度也相应减小.那么这种气化现象是否是种相变?现在还没有肯定或否定的结论,需要作进一步的仔细研究.

3 瞬时碎裂

热核如何衰变又是一个令人非常感兴趣的问题.两个核经过碰撞压缩后,形成高温高密的热核,然后热核经历膨胀,最后衰变解体.那么在膨胀过程中发生什么变化,最后又是如何解体的呢?目前在理论上主要有两种模型解释.一种是连续发射(sequential emission)模型,另一种是统计碎裂(statistical multifragmentation)模型.连续发射模型认为处于激发状态的复合系统,经过一段弛豫时间后,一步步、一块块地发射粒子和碎块.而统计碎裂模型认为是整体同时破裂(simultaneous breakup).那么,哪一种模型能说明实验呢?最近 V. Lips 等人^[7]的实验分析给出了较明确的回答.他们研究了 $\alpha(3.6\text{ GeV/u}) + ^{197}\text{Au}$ 反应,在分析 IMF 之间的相对角度关联和相对速度关联时,同时使用了连续发射模型和统计碎裂模型,结果发现只有统计碎裂模型才能很好地解释实验.表明热核的碎裂是突发的、同时的过程.图3表示了 IMF 的相对角分布(以 IMF 之间的相对角度作变量).大相对角度下的常数(纵坐标已除 $\sin\theta_{rel}$)表示了分布的各向同性,是“统计”下的碎裂.统计碎裂模型是中国原子能院基金组(由萨本豪研究员领导)^[8-10]和 Gross 教授^[11]在80年代初期首先提出的.模型采用系综统计抽样法研究热核的衰变过程.这个模型假定核反应系统首先形成一个处于统计热平衡的热核,然后热核在内部压力下膨胀,使核密度降低,最后同时碎裂.这个模型的成功解释实验,也说明了反应体在碎裂之前一刻仍统计平衡状态,反应是“热碎裂(thermal multifragmentation)”.从图可看出,中等质量碎块的相对角分布中有小角度压低现象.这是

由于存在较大的库仑力,互相排斥所致.

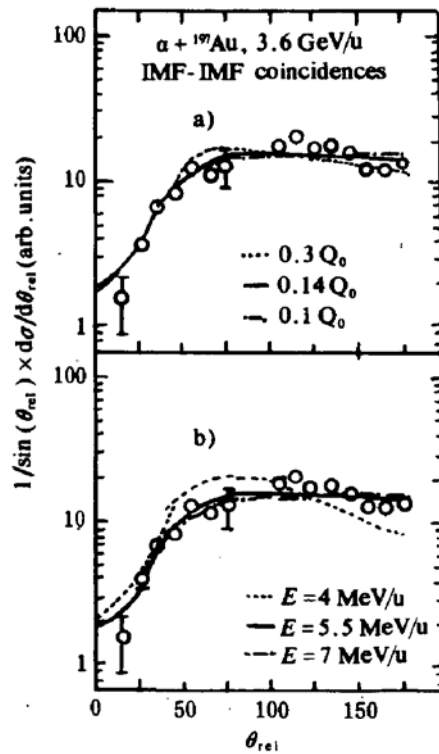


图3 IMF 的相对角度分布.圆点为实验点,实线为瞬时碎裂模型计算结果.a)固定激发能变核密度,b)固定核密度变激发能

4 阈下 K^+ 产生与 K^+/π^+ 增强

最近, D. Miskowiec 等^[12]在研究 $1\text{ GeV/u } ^{197}\text{Au} + ^{197}\text{Au}$ 反应的阈下 K^+ 生成时(自由 N-N 碰撞的 K^+ 产生的阈能为 1.58 GeV/u ,因此 1 GeV/u 的能量远低于该值),发现阈下 K^+ 介子产生随碰撞中心度的增加而迅速增加.虽然实验发现, π^+ 介子的产生同时随碰撞中心度的增加而增加,但是两者的产生率不等, K^+ 产生更快.因此,它们的比率呈现随碰撞中心度的增加而不断增加的趋势(图4).原因何在?研究表明,次级散射起着关键性作用.在 高能核碰撞中,核子间的碰撞将造成核子激发.随着碰撞中心度的提高,碰撞几率不断增加,造成大量的核子激发.与此同时,这些激发核子间以及激发核子与核子间的碰撞也不断增多.这些次级碰撞将通过散射 $\Delta N \rightarrow K\Lambda N$ 和 $\Delta\Delta \rightarrow K\Lambda N$ 产生更多的 K^+ 介子.在

相对论性重离子碰撞中, K^+/π^+ 比率随参与碰撞的粒子数的增加而增加常作为夸克-胶子等离子体(QGP)的一个可能讯号而加以研究. 在能量相对比较低的重离子碰撞中, 同样有 K^+ 介子的阈下生成及 K^+/π^+ 比率随参与碰撞的粒子数的增加而增加. 这个比率的增加是否意味着是中高能核反应和相对论性重离子碰撞中普遍存在的现象, 引起了物理学家的关注和兴趣.

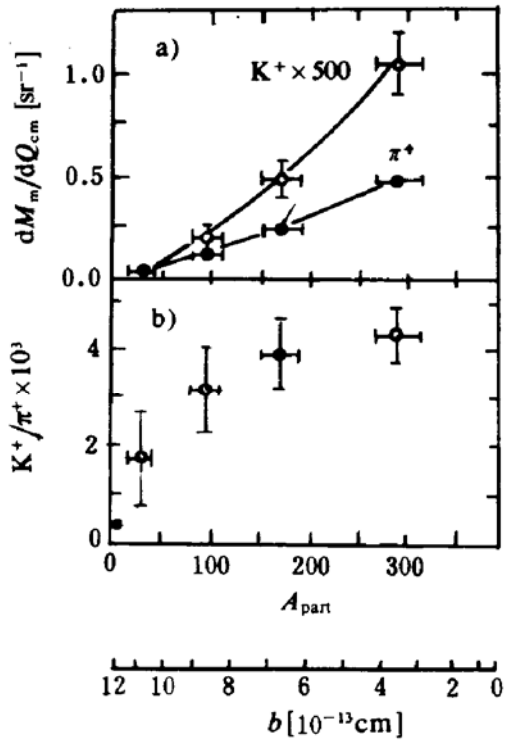


图4 K^+ 和 π^+ 的多重数随碰撞核子数和碰撞参数的变化. a) 为它们的多重数, b) 为它们的比率

上面就中高能重离子碰撞中的几个重要问题所取得的最新进展作了简单介绍. 这些问题是基本的, 关系到中高能核反应机制和高温高密核物质的状态与性质. 因此需要作进一步的研究. 文中虽然谈及一些理论进展, 但都不是动力学理论, 需在动力学基础上加以研究. 原子能院正在国家基金的资助下, 与国内外同行共同开展这方面的研究. 正像文前所说的那样, 中高能核反应具有和低能核反应不同的特性和反应机制而吸引着科学家们的兴趣; 同时和相对论性核碰撞相比, 它又具有实验上易实现的优越性. 因此在科学家们的共同努力下将会取得更大的进展.

参 考 文 献

- 1 Gugnion J, et al. Nucl. Phys., 1981, A352:505
- 2 Aichelin J, et al. Phys. Rev., 1988, C37:2451
- 3 Moretto L G, et al. Phys. Rev. Lett., 1993, 71:3935
- 4 Pouliot J, et al. Phys. Rev., 1993, C48:2514
- 5 Sa Ben-Hao, et al. Phys. Rev., 1994, C50:2614
- 6 Tsang M B, et al. Phys. Rev. Lett., 1993, 71:1502
- 7 Lips V, et al. Phys. Rev. Lett., 1994, 72:1604; Phys. Lett., 1994, B338:141
- 8 Sa Ben-Hao, Gross D H E. Nucl. Phys., 1985, A437:643
- 9 Sa Ben-Hao, et al. Phys. Rev., 1989, C40:2860
- 10 Sa Ben-Hao, et al. Nucl. Phys., 1987, A461:641
- 11 Gross D H E. Nucl. Phys., 1985, A428:313c
- 12 Miskowicz D, et al. Phys. Rev. Lett., 1994, 72:3650

New Development in Intermediate and High Energy Reaction

Lu Zhongdao

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract The new development of four problems in intermediate and high energy reaction is briefly commented. The four problems are thermalization and statistically thermal equilibrium, evaporation and phase transition, simultaneous breakup and subthreshold K^+ production and K^+/π^+ enhancement.

Key Words intermediate and high energy reaction new development