

中能重离子核反应和极端条件下原子核性质的研究

诸永泰

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 中能区([10~100]MeV/u)是一个由平均场相互作用向核子-核子相互作用的过渡区.在这两种不同的碰撞机制之间没有明确的分界线.它们之间的并存和逐步过渡使反应机制变得相当复杂,在实验上和理论上的研究都是十分有意义的,是当前核物理的前沿领域.

弹核碎裂和中等质量碎片的发射是研究反应机制变化的重要课题.对热核的形成和衰变的研究,可以拓宽人们对极端条件下核物质运动规律的认识.放射性核次级束流传输线的建立将提供用放射性核进行总反应截面、弹性碰撞和其它反应过程研究的可能性.

关键词 弹核碎裂, 热核的形成, 热核性质, 奇异核.

1 引言

1982年,在成都的第五次全国核物理会议上,笔者曾作过一个“低能重离子相互作用”的报告.近十年来,和国际上一样,我国

重离子核物理研究得到了飞速的发展.1988年,兰州重离子研究装置(HIRFL)投入运行,标志着我国已进入中能重离子核物理研究的新领域.

表1给出了中能区核-核碰撞的特点.

表1 中能区核-核碰撞的特点

	低能	中能	高能
能量	<10MeV/u	10MeV/u至几百MeV/u	>GeV/u
相对运动速度	$\ll V_F$	$> V_F$	$\gg V_F$
泡里原理限制	强	减弱	消失
n 相对运动波长	$> r_{nn}$	$\approx r_{nn}$	$\ll r_{nn}$
平均场作用	为主	减小	消失
n-n 碰撞		开始起作用	为主
作用时间	$> \tau_{relax}$	$< \tau_{relax}$	$\ll \tau_{relax}$
相互作用	一体耗散	过渡区	两体耗散

中能区是由平均场相互作用向核子-核子相互作用过渡的能区.平均场效应逐渐消失,而核子-核子碰撞则占据越来越重要的地位.但是,在这两种不同的碰撞机制之间没有明确的分界线.它们之间的并存和逐步过渡使反应机制变得相当复杂,在实验和理论上的研究都是十分有意义的.

图1为核反应相图,大致给出了反应机制与碰撞参量和轰击能量的关系.

2 弹核碎裂

在低能时,最周边的碰撞导致转移反应.随着轰击能的增高,碎裂过程变得越来越重

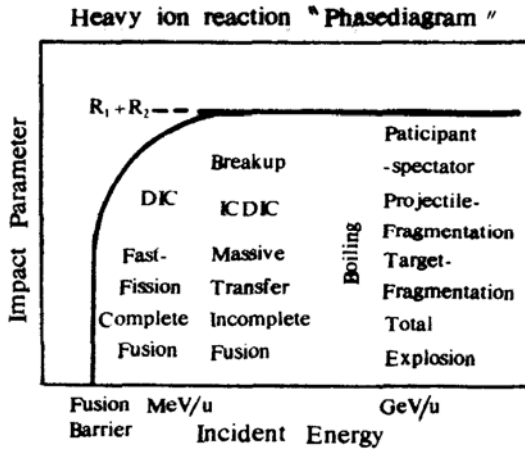


图 1 核反应相图

要.在能量不太高的中能区相应的反应机制见表 2. 八十年代中, 对中能区类弹碎片的产

表 2 中能区相应的反应机制

碰撞参量	反应机制	反应产物
小	全熔合	$(a+A+T) \Rightarrow C^*$
中	非全熔合	$a, (A+T)^*$
大	非完全深部非弹	a, A', T'
擦边	弹性碎裂	a, A', T'

生已有不少研究. 实验室系中的碎片能谱可以在假定弹核参考系中动量分布为高斯分布的基础上获得. 考虑平行动量和横向动量, 则质量为 A_F 的碎片的双微分截面为^[1]:

$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = N\sqrt{2A_F E} \exp\left[-A_F \left(\frac{E \sin^2 \theta}{\sigma_{\perp}^2} + \frac{E \cos^2 \theta + \bar{E} - 2\sqrt{E\bar{E}} \cos \theta}{\sigma_{\parallel}^2} \right) \right]$$

式中: A_F 为碎片质量, E 为实验室系碎片动能, \bar{E} 是对应于碎裂部分的能量分布的最可几值, θ 为实验室系碎片出射角, σ_{\parallel} 和 σ_{\perp} 分别为碎片的平行动量分布宽度和横向动量分布宽度. N 是归一化常数.

较早地, 人们沿用高能情况下的 Goldhaber 理论解释中能区速度接近束流速度的, 具有一定动量分布宽度的类弹碎片的动量分布, 并且提取了约化动量宽度 σ_0 , 它虽小于高能下的 90MeV/c, 但可以使用动量球模型的分析加以解释^[2]. 碎片的动量分布宽度 σ 与碎片质量 A_F 的关系^[3]:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \frac{A_F(A_p - A_F)}{A_p - 1}$$

式中: σ_0 为约化动量分布宽度, 它与碎片质量无关, 由费米运动所决定. σ_0 与核内核子的费米运动相关, 如果弹核内核子动量的均方值为 $(3/5)p_F^2$, 则 $\sigma_0 = P_F / \sqrt{5}$.

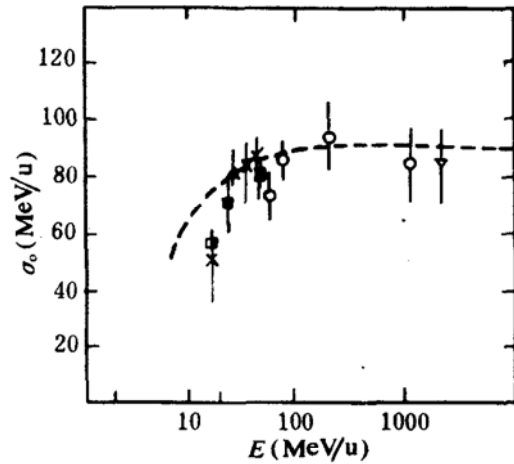


图 2 σ_0 与轰击能量的关系

对不同弹核的 σ_0 与轰击能量的关系显示在图 2 中, 图中也给出了我们的结果. 但是, 中能下的碎裂并非象高能下的纯碎裂. 对于接近弹核的类弹碎片, 转移反应贡献了更接近束流速度的最佳 Q 值的动量分布部分^[4], 而动量分布的非对称部分还有低能尾巴的存在. 这说明平均场相互作用并未完全让位于核子-核子相互作用, 非弹性的激发

甚至深度的耗散依然存在.

人们为了分开这些不同机制的贡献, 广泛地使用了有选择的符合测量方法. 在探测轻粒子的同时, 在擦边角附近测量类弹碎片, 测量轻粒子与类弹碎片的关联, 证明了平均场相互作用和核子-核子相互作用的竞争.

实验结果表明, 类弹碎片大部分可能来源于激发的初始发射体的相继衰变; 所谓的弹核碎裂在 60MeV/u 时还类似于低能下的机制, 而并非高能时的“参加者-旁观者”机制, 更多的是以转移反应和非弹性激发后的相继衰变为其特征. 我们曾用 (10~20) MeV/u ^{20}Ne 轰击不同的靶, 证实了一种新的重离子核反应机制(非完全深部非弹性碰撞的存在), 发现除了类弹耗散之后的相继裂开之外, 还包括有弹核的瞬时裂开, 并且非转移部分的动量谱可在 Goldhaber 理论上用动量球模型加以解释^[5]. 1991 年, 我们进行了 46.7MeV/u 的 ^{12}C 轰击 ^{58}Ni 、 ^{115}In 和 ^{197}Au 的实验, 研究了弹核碎裂和转移的竞争^[6], 得到了碎裂和转移产物的平行动量分布宽度, 提取的碎裂产物的约化平行动量分布宽度 σ_0 约为 80MeV/c. 这个值与高能时的 σ_0 值很接近, 并且对不同的反应系统, σ_0 值都比较接近. 转移部分的约化动量分布宽度 σ_0 比弹核碎裂的动量分布宽度要小, 并对靶核有一定的依赖关系.

中能区碎裂的特征未能得到满意的解释, 还需要进行深入的研究.

3 热核的形成和热核性质

在较小碰撞参量的低能重离子碰撞中, 弹核和靶核相互作用, 发生强烈的耗散, 相对运动动能转变为核物质的内部激发能. 随着轰击能量的升高, 在中能重离子碰撞中可形成具有高激发能的热核. 文献[7]中详细地评述了热核的形成和衰变. 这是一个十分有兴趣的研究领域. 热核的研究能给出高温核物质的性质. 在不同的实验室里人们作了大

量的努力, 希望能达到高激发核的最高核温度和激发能的极限. 但是, 在中能区由于碰撞时间短和耗散的能量大, 热核系统的形成和冷却之间存在动力学竞争, 这可能限制激发能的继续升高.

在融合-裂变反应中, 可以通过裂变碎片折叠角的测量来确定线性动量的转移和激发能. 但是, 对不同弹核的一系列实验表明, 线性动量转移存在一个饱和值约 180MeV/c·u, 这将限制激发能的继续升高.

1985 年, M.Conjeaud^[8]利用测量裂变碎片折叠角的方法研究了 31、35、39 和 44MeV/u $^{40}\text{Ar}+^{232}\text{Th}$ 反应(见图 3), 大折叠角处的峰对应于小线性动量转移(周边碰撞), 折叠角分布中高线性动量转移峰(相应于中心碰撞)随轰击能量增加而逐渐消失. 当时, 人们认为在 40MeV/c 以上融合消失了, 不可能形成更高激发能的复合核. 但是, 实际上高线性动量转移峰消失只能说明中心碰撞中两体裂变的消失. 这可用裂变、多重碎裂和轻粒子或粒子结团发射间的动力学竞争来解释. 在导致高温核物质的中心碰

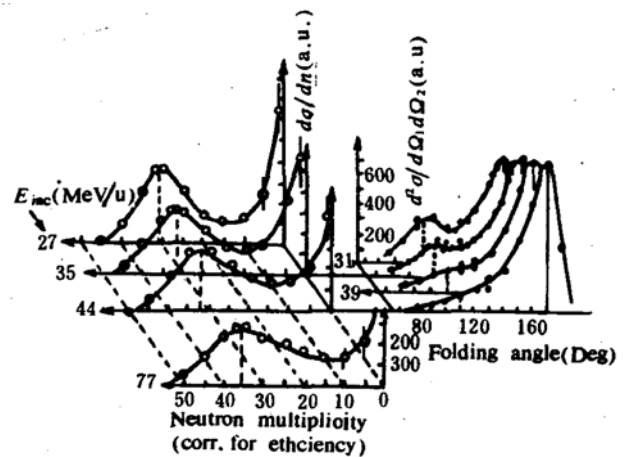


图3 $^{40}\text{Ar}+^{232}\text{Th}$ 反应中的碎片折叠角分布和中子多重性分布

撞中, 粒子蒸发的特征时间 ($\sim 10^{-22}\text{s}$, $T=5\text{MeV}$ 时) 小于系统达到裂变断点的时

间($\sim 2 \times 10^{-21}$ s), 而随着激发能的增高和非平衡的轻粒子或粒子结团发射的增加, 系统变轻, 裂变位垒增高, 裂变几率变小, 裂变道禁闭而继续蒸发粒子, 产生重余核. 1988年, Jahnke^[9]采用 4π 中子探测器测量了(27~77)MeV/u $^{40}\text{Ar}+^{232}\text{Th}$ 反应中的中子多重性(见图 3), 发现在所有轰击能量下, 中子多重性分布中明显存在着两个分别与中心碰撞和周边碰撞相对应的峰. 在所研究的能量范围内, 中子多重性谱的形状、中心碰撞峰的强度和与周边碰撞的相对强度均未发生明显变化. 轰击能量增加时, 融合-裂变虽然消失, 但能量耗散仍然存在. 在折叠角分布中, 高线性动量转移峰的消失只与热核系统的衰变性质有关.

由中子多重性 M_n 和轻带电粒子多重性 M_{lcp} 可以计算激发能 E^* , 每个中子带走的能量为 B_n+2T , 共有 M_n 次, 每个轻带电粒子带走的能量为 $B_{lcp}+2T+V_{lcp}$, 共有 M_{lcp} 次, 这里 B_n 和 B_{lcp} 为中子和轻带电粒子的结合能, V_{lcp} 为库仑位垒, 当然核温度 T 要逐步按 $E^* = A/10 \times T^2$ 来计算. 对 $^{40}\text{Ar}+^{232}\text{Th}$ 所得到的结果显示在图 4 中^[10], 激发能可达 650MeV, 相应的核温度为 5MeV. 在轰击能量高于 30MeV/u 时, 逐步出现饱和现象. 图 5 给出了在不同弹核的实验中所得到的最高的单核子激发能与融合系统质量的关系, 由质量为 60 时的 6.5MeV/u 到质量为 300 时的 3MeV/u, 相应的核温度为 7MeV 和 4.5MeV. 实验值与用热液滴模型和软的核状态方程($K=220\text{MeV}$)的计算结果进行了比较. 从图可以看出, 用更重的弹核来加热核物质更为有效, 可得到更高的激发能. 为了进一步研究入射道效应的影响, 最近在 GANIL 完成了 29MeV/u $^{208}\text{Pb}+^{197}\text{Au}$ 的实验^[11], 所得到的中子多重性分布与 $^{40}\text{Ar}+^{232}\text{Th}$ 的结果相类似, 但是经效率修正后, M_n 峰位为 78, 几乎为全系统中子数的 1/3. 系统过剩中子的全部发射, 说明所有的带电产物的 $N/Z \ll 1$, 这意味着系统已经瓦解为很轻的

碎片. 这种解离过程占总截面的 1/4. 碰撞参量小于 6fm 的碰撞全部导致系统的解离. 在能量不太高的 Pb+Au 碰撞中(29MeV/u), 系统的激发能可达 7.3MeV/u, 并引起系统的解离, 这是以前所没有预料到的, 这似乎表明在这样的激发能下已经接近系统稳定性的极限.

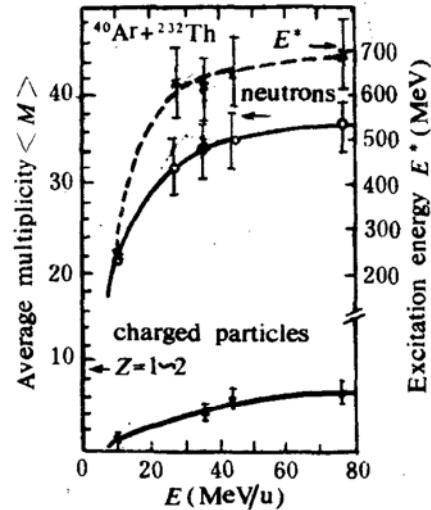


图 4 $^{40}\text{Ar}+^{232}\text{Th}$ 系统激发能与轰击能量的关系

轻带电粒子、中子、 γ 的测量和反冲余核或裂变碎片之间的关联测量可提供关于热核激发能的信息. 为此人们设计和建造了 4π 中子和带电粒子的测量系统. 测定热核温度的另一个方法是基于费米气体模型的基础上的, 它要求测量蒸发两个不同的结团所形成的激发态的相对布居. 对于同一种粒子的不同能量态, 发射几率比可以写成:

$$R = \frac{P_1}{P_2} = \frac{2J_1 + 1}{2J_2 + 1} \exp\left(-\frac{E_1^* - E_2^*}{T}\right)$$

其中: J 和 E^* 为该能级的自旋和激发能. 由此可以得出有关核温度的信息. 在 46.7MeV/u 的 $^{12}\text{C}+^{58}\text{Ni}$ 、 ^{197}Au 的实验中, 为了提取核温度, 我们用轻带电粒子小角关联的方法重点研究了 $^5\text{Li}_{g.s.}/^5\text{Li}_{16.66\text{MeV}}$.

${}^6\text{Li}_{g.s.}/{}^6\text{Li}_{2.186\text{MeV}}$ 及 ${}^8\text{Be}_{g.s.}/{}^8\text{Be}_{3.04\text{MeV}}$ [12] 三种非稳定粒子不同激发能级的相对布居数的比值和核温度. 核温度与靶核基本无关.

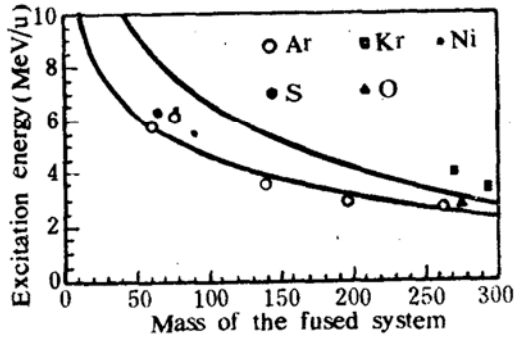


图5 用不同弹核得到的最高的单核子激发能与熔合系统质量的关系

在中能重离子核反应中也观察到了大量的中等质量碎片(IMF)的发射, 随着轰击能量的增高, 其产额迅速增加. 从角分布的运动学分析可知, 它们来源于激发的核物质系统. 产物的元素分布[13]可以用 Z 的指数方程来描述. 这里人们试图用它来证明液-气相变的存在. 但是这一指数分布关系并不是液-气相变的唯一判据, 基于高激发核物质系统的统计蒸发理论也能对产物的元素分布作出解释. 所以, 对中等质量碎片发射的研究尚在继续深入之中.

4 奇异核引起的反应中极限核物质性质和反应机制的研究

迄今为止所进行的核反应研究, 绝大多数是使用稳定核素的弹核和靶核. 在中能重离子核反应中产生大量的远离 β 稳定线的新核素. 近来, 在一些实验室中开始在中能区使用奇异放射性核束流. 它被有效地用于丰中子和缺中子核素的生成和性质的研究. 到目前为止, 已发现了近百种新核素, 基本上填满了 $Z < 10$ 滴线内的同位素, 发现了几种新的核衰变方式, 确定了一大批核素的质量; 用奇异核次级束流进行了核反应总截面

测量, 由反应总截面可提取相互作用半径. 在中子滴线附近得到的相互作用半径值比稳定线附近的值要大得多[14]. 这说明滴线附近的原子核的结构确实发生了变化. 原子核的大小不仅与核内的核子数有关, 而且与同位旋之间存在密切的关系. 结合松散的外层中子在空间分布上形成了中子晕, 这种假设在 ${}^{11}\text{Li}$ 引起的反应中得到了证实, ${}^{11}\text{Li}$ 反常大半径的发现是激动人心的结果. 如果次级束流强度足够大的话, 用奇异放射性核束还可以研究其它反应机制, 诸如: 弹性散射、转移、弹核碎裂和非完全熔合等. 这类研究将提供有关远离稳定线核素性质的新知识.

可以期望, 奇异核研究能增加核反应的人射道, 系统地研究的新维度 I_1 (同位旋), 同时也可对远离 β 稳定线核素的性质及现有核理论模型的普适性进行更深层次的研究.

5 结束语

中能重离子核反应的研究虽然历史并不长, 但是已取得了大量的实验结果, 揭示了在这一能区核物质运动的新的规律, 这是多年来低能核物理研究和相对论重离子物理研究的延伸和发展. 它提供了研究远离束缚核稳定态条件下的核物质性质的可能性. 但是, 还有许多问题没有解决, 人们正在探索束缚态核物质的极限条件, 这在理论上和实验上都是很有意义的. 另外, 中能重离子核反应的研究还会对天体物理、凝聚态物理和相对论重离子物理的研究产生深远的影响.

本文中所引的[6]、[12]是在中国科学院近代物理研究所的 HIRFL 上完成的, 该工作的主要参加者还有詹文龙、郭忠言、尹淑芝、胡晓庆、周建群等, 我们借此机会向 HIRFL 和公共实验室的全体人员表示感谢.

参 考 文 献

- 1 Van Bibber K, et al. Phys. Rev. Lett., 1979, 43:840

- | | |
|--|---|
| 2 Pruneau C, et al. Nucl. Phys., 1989, A500:168 | 8 Conjeaud M, et al. Phys. Lett., 1985, B159:244 |
| 3 Goldhaber A S. Phys. Lett., 1974, 53B:306 | 9 Jahnke U, et al. Ann. Report HMI 1988, 62 |
| 4 Rami F, et al. Z. Phys., 1984, A318:239 | 10 Jiang D X, et al. Nucl. Phys., 1989, A503:560 |
| 5 Zhu Yongtai, et al. Nucl. Phys., 1988, A488: 409C | 11 Piasecki E, et al. Phys. Rev. Lett., 1991, 66:1291 |
| 6 刘冠华等. 本会议报告, 1991 | 12 郝鸿飞等. 本会议报告, 1991 |
| 7 Guerreau D. Lectures given at Intern. Sch. on Nucl. Phys., "Nuclear Matter and Heavy Ion Collisions", les Houches, 1989, 187 | 13 Chitwood C B, et al. Phys. Lett., 1983, 131B:289 |
| | 14 Tanihata I. Nucl. Phys., 1988, A488: 113C |

Study on Intermediate Energy Heavy Ion Reactions and Characters of Nucleus under Extreme Conditions

Zhu Yongtai

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

Abstract The intermediate energy domain ($[10\sim 100]\text{MeV/u}$) is a transitional region from the mean field interaction to the nucleon-nucleon interaction. There is no clear borderline between these two different collision mechanisms. Their coexistence and progressive transition make the reaction mechanism quite complicated in this energy region. The experimental and theoretical study on the reaction mechanism, which is fascinating and important, is a frontier of nuclear physics.

Projectile fragmentation and intermediate mass fragment emission are the important subjects of reaction mechanism study. The research of the formation and decay of the hot nuclear system can broaden and deepen the understanding of the motion of nuclear matter under extreme conditions. The secondary beam will provide the possibility for investigating the total reaction cross section, elastic scattering and other reaction processes by using the radioactive projectiles.

Key Words projectile fragmentation, formation of hot nuclear system, characters of hot nucleus, strang nucleus.