

重离子融合反应入射道效应的动力学研究*

李雪琴¹⁾ 张英逊 田俊龙 李祝霞 吴锡真 竺礼华

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 运用微观输运模型-改进的量子分子动力学模型(ImQMD),研究了弹靶质量对称体系 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$ 与弹靶质量不对称体系 $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 的重离子融合反应入射道效应及其动力学机制,并分析了复合体系的均方根半径 $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ 和形变参量 β 随时间的演化过程,结果表明质量对称的反应体系比不对称体系更容易产生形变较大的 Gd,则说明重离子融合反应中的动力学效应对大形变核的产额有很大的影响.

关键词 入射道效应 融合反应 超形变

1 引言

实验上通过低能重离子融合反应来研究高温转动原子核偶极巨共振(GDR)和高自旋超形变态(SD),发现GDR发射 γ 射线产额和超形变态布居强度与融合反应的束靶组合有关,显示出重离子融合反应中存在入射道效应.如在 ^{144}Gd 的超形变态研究中,发现在形成相同复合核条件下,弹靶对称的反应体系 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$ 布居 ^{144}Gd 超形变带的强度比弹靶不对称反应体系 $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 的高出百分之三十左右^[1].对低能重离子融合反应中的这一现象,由于统计蒸发模型不考虑前期动力学效应,认为只要形成的复合核体系相同,则它们后期的衰变过程就相同,并且也不考虑在碰撞过程中其弹靶组合因素,所以很难用复合核统计蒸发模型来解释.

A.Szanto de Toledo等人^[2]曾经运用半经典的耗散碰撞模型研究形成复合核质量数为 A 在低于100区域内重离子反应中的入射道质量不对称度,他们分别选择四组反应体系 $^9\text{Be}+^{29}\text{Si}$, $^{11}\text{B}+^{27}\text{Al}$, $^{12}\text{C}+^{26}\text{Mg}$, $^{19}\text{F}+^{19}\text{F}$ 来布局 ^{38}Ar 复合核,认为入射道质量不对称度越高的体系达到给定的平衡形变的时间越短,且与其碰撞参数无关,入射道质量不对称度在很大程度上影响融合过程中复合核的形成时间,并且也影响融合反应与其他边缘碰撞过程,比如深度非弹轨道机制的竞争度.那么,对于在形成复合核 $A \sim 150$ 区域内,是

否也有同样的动力学机制存在呢?考虑与此,我们采用一种半经典的微观经典微观输运的理论模型-改进的量子分子动力学模型(简称ImQMD)^[3],从微观动力学的角度出发考虑能量、弹靶质量不对称度以及同位旋不对称度等各种自由度对入射道效应的影响,从而给这种动力学过程的研究提供了一个新的途径.

2 理论结果及分析

通过ImQMD模型研究重离子融合反应中的入射道效应,选择了两组不同束靶组合的反应体系:1)质心系能量为 $E_{\text{cm}} = 153.5\text{MeV}$ 弹靶质量对称体系 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$;2)质心系能量为 $E_{\text{cm}} = 141\text{MeV}$ 的弹靶质量不对称体系 $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$,为了保证两个反应体系形成复合核的激发能相似,首先计算这两个反应体系在重离子融合反应的动力学过程演化到2000fm/c时Gd的同位素的平均激发能.从图1我们可以看出这两个反应体系在动力学过程生成的复合核 $^{146,147,148}\text{Gd}$ 的同位素的平均激发能比较接近.但是,剩余核 ^{145}Gd , ^{144}Gd 的平均激发能差别大一些,这是由于在复合核通过发射中子或质子等后再达到剩余核过程中,每发射一个中子将带走至少8—10MeV的分离能量(核子的平均结合能大约为6—8MeV),每次带走的能量不完全相同,所以对于剩余核 ^{145}Gd , ^{144}Gd 蒸发更多的中子后导致的平均激发能的涨落更大.

*国家自然科学基金(10175090, 10105015, 10375092, 10575092, 10575133, 10175093, 10235030, 10235020)和国家重点基础研究发展规划项目(TG2000077405, G2000077410235020)资助

1) E-mail: lixq@iris.ciae.ac.cn

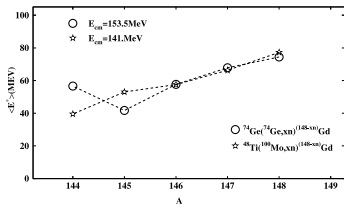


图 1 弹靶质量对称体系 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$ 和弹靶质量不对称体系 $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 产生的 Gd 的平均激发能

在保证两个不同反应体系产生 Gd 的同位素平均激发能相似的情况下, 进一步探讨重离子融合反应中动力学机制, 从射弹与靶核碰撞后基本形成复合核过程中其方均根半径 $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ 和形变参量 β 随时间的演化, 图 2, 3 中可看出, 对于弹靶质量对称体系 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$ 和弹靶质量不对称体系 $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$, 对称体系方均根半径 $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ 和形变参量 β 都大于不对称体系, (可能由于统计涨落的原因, 在后期不对称体系有可能高出对称体系) 这与其单粒子平均场的势垒有关. 对于对称体系, 射弹与靶的单粒子平均势垒一样, 融合过程中存在相互竞争, 所以核子交换过程较为缓慢; 对于不对称体系, 其射弹与靶核的单粒子平均势垒高低的差异, 所以核子从势垒高的核流向势垒低的并更早地形成复合核, 则说明对称体系更容易保持形变大的状态.

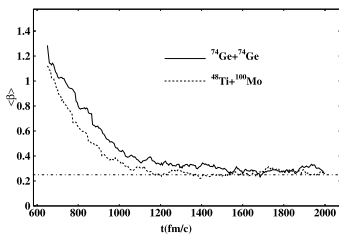


图 2 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$, $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 体系的时间演化过程中的均方根半径 $\langle r^2 \rangle^{1/2}$

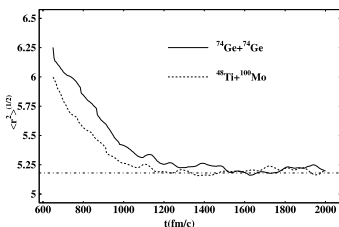


图 3 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$, $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 体系的时间演化过程中的形变参量 β

进一步分析了在 2000fm/c 时弹靶质量对称体系 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$ 和弹靶质量不对称体系 $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 产生 Gd 同位素的形变参量 β 的相对强度分布. 从图 4 初步可以看出, 在形变参量 $\beta \sim 0.23$ 时, 弹靶对称体系和弹靶不对称体系的 β 的相对产额都达到峰值, 且相对产额没有差别, 由于在 $\beta \sim 0.23$ 时, 属于正常形变核; 而

当 β 较大时, 弹靶质量对称的反应体系相对于弹靶质量不对称的反应体系更易产生 β 大于 0.6 的 Gd, 这与实验结果^[1] 是一致的. 考虑到库仑位垒的因素, 由于弹靶对称体系的库仑位垒要高于弹靶不对称体系的库仑位垒, 所以在射弹与靶核的融合过程中, 不对称体系更易融合在一起形成复合核, 而对称体系由于较大的库仑斥力的作用, 在很长一段时间内保持拉长的状态, 从而产生 β 较大的 Gd 同位素的产额更高. 又用

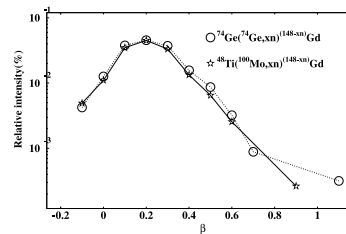


图 4 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$, $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 体系生成 Gd 同位素的形变参量 β 的相对产额

ImQMD 计算了弹靶对称体系 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$ 和弹靶不对称 $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 两个反应体系分别在质心能量 $E_{\text{cm}} = 160\text{MeV}$, $E_{\text{cm}} = 145\text{MeV}$ 情况下 (其中 $E_{\text{cm}} = 160\text{MeV}$, $E_{\text{cm}} = 145\text{MeV}$ 分别为实验^[1] 中弹靶对称体系 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$ 和弹靶不对称 $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 的入射能量, 由于实验中靶具有一定的厚度, 考虑在射弹与靶碰撞过程中有一定的能量损失, 所以之前选用的能量分别为两个反应体系中, 射弹到达靶中的位置的能量), 在 2000fm/c 时产生的 Gd, Eu 碎片的同位素产额之比 $\frac{Y_{\text{Ge+Ge}}^{\text{pri}}(A_0, Z)}{Y_{\text{Ge+Ge}}^{\text{pri}}(A_0, Z)}$ 与实验数据和统计蒸发模型 CASCADE 的数据进行比较. 其中星号以及直方图分别是 Gd, Eu 的同位素产额之比的实验数据^[1] 及统计蒸发模型 CASCADE 给出的末态的 Gd, Eu 同位素产额之比. 利用动力学过程初期的同位素产物 Gd, Eu 的产额之比来与实验进行比较, 是考虑到对于所研究 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$ 和 $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 两个反应体系分别在质心能量 $E_{\text{cm}} = 160\text{MeV}$, $E_{\text{cm}} = 145\text{MeV}$ 情况下产生的 Gd 同位素具有相似的激发能, 如表 2. 动力学给出的同位素产额 Gd, Eu 必须经过退激才能成为实验上可观测的物理量. 根据统计衰变模型, 末态同位素产额可用下式描述:

$$Y^{\text{fin}}(A, Z) = f(A_0, Z_0, E^*) Y^{\text{pri}}(A_0, Z_0). \quad (1)$$

由前面的分析知道, 对于 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$ 和 $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 两个反应体系分别在质心能量 $E_{\text{cm}} = 160\text{MeV}$, $E_{\text{cm}} = 145\text{MeV}$ 情况下产生的 Gd 同位素具有相似激发能, 对于这两个反应体系所生成的 Gd 同位素其

退激的路径是相似的. 因此, 可通过这两个反应体系的初期动力学产额之比来给出实验上相应的同位素产额之比^[4].

表2 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$ 和 $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 分别在 $E_{\text{cm}} = 160\text{MeV}$, $E_{\text{cm}} = 145\text{MeV}$ 情况下产生的 Gd 同位素的激发能

reactions	E_{cm}/MeV	E^*		
		^{148}Gd	^{147}Gd	^{146}Gd
$^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$	160	82.447368	70.234375	60.780822
$^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$	145	78.129032	67.084034	61.426230

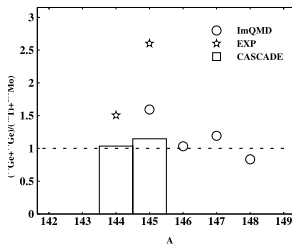


图5 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$, $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 两个反应体系形成 Gd 同位素的产额比(★实验值^[1], ○ImQMD 计算值)

图5给出了用ImQMD模型、统计蒸发模型CASCADE计算的产额比以及相应的实验数据^[1]. 可以看出, 统计蒸发模型CASCADE计算的产额比基本分布在1附近, 而实验上给出的 ^{144}Gd , ^{145}Gd 的产额比明

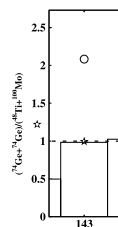


图6 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$, $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 两个反应体系形成 Eu 同位素的产额比(★实验值^[1], ○ImQMD 计算值)

显高于CASCADE的结果, 用ImQMD给出的 ^{145}Gd 的产额比高于CASCADE给出的结果. 图6给出的 ^{144}Eu 的产额比跟实验符合的很好, CASCADE给出的 ^{144}Eu 偏低, 其结果更接近于实验值, 则说明考虑到重离子融合反应过程中前期的动力学效应对形成最后剩余核的产额有很大的影响.

3 总结

本工作研究了弹靶质量对称体系 $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$ 在 $E_{\text{cm}} = 153.5\text{MeV}$ 和弹靶质量不对称体系 $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ 在 $E_{\text{cm}} = 141\text{MeV}$ 下的重离子融合反应, 动力学过程产生的剩余核Gd的平均激发能比较接近的情况下, 重离子融合反应的过程中的方均根半径 $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ 和形变参量 β 随时间的演化过程中, 对称体系的方均根半径 $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ 和形变参量 β 都高于不对称体系, 说明对称体系更容易保持形变大的状态. 在 $2000\text{fm}/c$ 时, 且质量对称的反应体系相对于质量不对称的反应体系更容易产生形变较大的Gd, 这与实验结果是相符合的, 说明重离子融合反应中存在的入射道效应, 这是统计蒸发模型所不能解释的. 在生成同一剩余核Gd的同位素的对称体系与不对称体系的产额比, 并与实验进行比较, 计算结果比CASCADE的结果更接近实验值, 说明重离子融合反应过程中前期的动力学效应对形成最后剩余核的产额有很大的影响.

参考文献(References)

- ZHU L H et al. Nuclear Physics, 1998, **A635**: 325—345
- Szanto A et al. Phys. Rev., 1996, **C54**: 3290—3293
- WANG Ning et al. Phys. Rev., 2004, **A635**: 064608; Phys. Rev., 2003, **C67**: 024604; Phys. Rev., 2004, **C69**: 034608
- Tsang M B et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 5023

Dynamic Study on Entrance-Channel Effects in Heavy-Ion Fusion Reactions*

LI Xue-Qin¹⁾ ZHANG Ying-Xun TIAN Jun-Long LI Zhu-Xia WU Xi-Zhen ZHU Li-Hua
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract The entrance-channel effects and dynamical mechanisms on the fusion reaction of $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$ and $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$ are studied with the microscopic transport model-Improved Quantum Molecular Model(ImQMD). The time evolution of the $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ and β of the compound nuclei are analyzed, and these results show that the larger deformation of the compound nuclei are more easily produced for the mass symmetry reaction system $^{74}\text{Ge}+^{74}\text{Ge}$ than that for the mass asymmetry reaction system $^{48}\text{Ti}+^{100}\text{Mo}$. The final results on the larger deformed compound nuclei are determined by this dynamical process.

Key words entrance-channel effects, fusion reaction, superdeformation

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10175090, 10105015, 10375092, 10575092, 10575133, 10175093, 10235030, 10235020) and Major State Basic Research Development Programm (TG2000077405, G2000077410235020)

1) E-mail: lixq@iris.ciae.ac.cn