

重离子反应中的集体转动 效应及反应特征*

陆中道^{1,1)} 叶 巍² 沈文庆^{2,1)}

1(中国原子能科学研究院 北京 102413)

2(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 研究了重离子反应中的集体转动效应及反应特征. 给出了反应最大碰撞参数、碰撞中心度、平均集体转动能以及转动角速度等表征反应特征的物理量. 对 $10.6\text{MeV/u } ^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al} \rightarrow ^{111}\text{In}$ 裂变反应研究表明, 该反应具有高的碰撞中心度, 集体转动能约占总激发能的 $1/3$, 系统在裂变前转动了约 8.8 圈.

关键词 重离子反应 集体转动效应 最大碰撞参数 碰撞中心度

1 引言

中子^[1,2]、质子和 α 等轻粒子发射^[3,4]以及巨共振 γ 发射的增强, 是满足一定轰击能和碰撞系统质量要求的中能重离子反应的重要特征, 包含着不同于低能复合核反应的裂变反应机制. 裂变扩散模型很好地解释了这种增强^[5-9]. 按裂变扩散模型, 中能重离子反应中的轻粒子发射增强起因于裂变的动力学过程. 裂变扩散过程的存在造成了裂变的延迟和扩散过程中的轻粒子发射.

扩散过程的快慢和轻粒子发射速率的大小主要决定于下面几个因素: 第一个因素是核系统的粘滞系数. 大粘滞系数引起扩散过程的变慢或迟滞时间的变长, 导致裂变率的减小和轻粒子发射率的增大. 第二个因素是核系统的激发能或“热浴”温度. 裂变率和轻粒子发射率都随着系统激发能或核温度的增大而增大, 但它们增大的速率是很不相同的. 轻粒子发射率随核温增大而迅速增大, 而裂变率的增大却缓慢得多. 它们只在临界温度附近有相同的衰变率^[5,6]. 高于这个温度轻粒子发射率将比裂变率以快得多的速率增大. 第三个因素是裂变位垒高度. 显然, 大的裂变位垒高度将抑制裂变而有利于轻粒子发射. 第一、二两个因素已在有关模型的讨论中进行了仔细的分析和讨论^[5-7]. 第三个因素也已在

1998-08-04收稿

* 核工业科学基金资助项目(J95A01021)

1) CCAST (World Laboratory) P. O. Box 8730, Beijing 100080

文献 [8,9] 两篇文章中进行了分析讨论. 然而除以上 3 个因素外, 还有一个重要因素制约着粒子发射和裂变率的大小以及它们之间的竞争, 这就是原子核的集体转动. 重离子反应常常带进大的角动量, 造成原子核的集体转动. 其结果是一方面大的角动量将有效地降低裂变位垒高度, 增大裂变率; 另一方面总能量分配中大的集体转动能将导致系统有效激发能的减小和核温的降低, 造成粒子发射率的减小和裂变率的减少.

本文对原子核的集体转动效应进行研究并讨论与转动有关的中能重离子反应的一些特征.

2 集体转动和反应特征量

重离子反应常常带进大的角动量. 例如, 我们对 $10.6\text{MeV/u } ^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al} \rightarrow ^{111}\text{In}$ 裂变反应的裂变扩散模型计算, 获得系统平均角动量高达 $74\hbar$ ^[8,9]. 这种大角动量是具有较高入射动量的弹核以一定的碰撞参数撞击靶核时, 由它们形成的复合系统高速转动引起的. 这种集体转动和大角动量反映了重离子反应的一些特征. 例如, 是擦边碰撞还是对心碰撞? 集体转动能在总激发能中占有多大的份额? 份额比较小, 对粒子发射影响比较小, 还是相反? 复合系统具有多大的转动速率? 它在解体前经历了很多圈转动还只是很少几圈转动等. 这些问题的澄清对重离子反应的物理图象和反应特征的认识是很有帮助的. 下面将用一些量来表征和讨论它们.

2.1 最大碰撞参数和碰撞中心度

具有动量为 p 的入射核 A 以碰撞参数 b 与静止靶核 B 碰撞, 如图 1 所示. 由此两个碰撞核组成的系统的角动量为

$$pb = l\hbar, \quad (1)$$

碰撞参数满足 $0 \leq b < R_A + R_B$, 其中 R_A 和 R_B 分别为入射核和靶核的半径. 这里, 碰撞参数和角动量都是平均的结果, 即它们是在入射方向的垂直平面上对各种可能碰撞参数的平均.

显然, 要使两个核碰撞并发生反应, 需要 $b < R_A + R_B$. 设反应允许的最大碰撞参数为 b_{\max} , 假定碰撞参数在以 b_{\max} 为半径的圆内均匀分布, 则平均角动量可写为

$$\frac{1}{\pi b_{\max}^2} \int_0^{b_{\max}} pb 2\pi b db = l\hbar, \quad (2)$$

由此得

$$b_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{l\hbar}{p}, \quad (3)$$

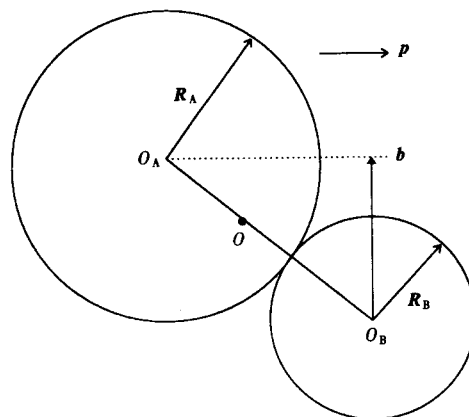


图1 两核碰撞示意图

因此最大碰撞参数是平均碰撞参数的 1.5 倍.

为表征反应的碰撞中心度,引入量

$$\gamma = \frac{b_{\max}}{R_A + R_B}, \quad (4)$$

当 $\gamma \approx 1$ 时,反应是擦边碰撞;当 $\gamma \approx 0$ 时,反应是对心碰撞.

2.2 平均集体转动能和它在总激发能中的占有率

系统的角动量是由粘合在一起的复合系统的转动引起的. 假设形成这复合系统的两个核都是刚体. 它们将绕着它们的质心 O 转动,转动动能为

$$E_{\text{rot}} = \frac{l(l+1)\hbar^2}{2I}, \quad (5)$$

其中 I 为双核系统的转动惯量,采用如图 1 所示的两核在相切时的近似计算 $I \approx \mu(R_A + R_B)^2$, μ 为两个核的约化质量.

公式(5)适用于一个具有确定角动量 $l\hbar$ 的转动系统. 对于在半径为 b_{\max} 的碰撞圆平面内各种转动系统的平均,平均转动能可由下面方法求得:

$$\bar{E}_{\text{rot}} = \frac{1}{\pi b_{\max}^2} \int_0^{b_{\max}} \frac{(pb)^2}{2I} 2\pi b db, \quad (6)$$

用平均角动量 $l\hbar$ 表示则为

$$\bar{E}_{\text{rot}} = \frac{9}{8} \cdot \frac{l(l+1)\hbar^2}{2I}. \quad (7)$$

集体转动能是系统总激发能的一部分,它的存在将减少用于内部激发(这里是激发粒子和裂变)的能量. 设系统的总激发能为 E_{ex} ($E_{\text{ex}} = T + Q$, T 为质心系动能, Q 为反应 Q 值),则平均转动能在总激发能中的占有率为

$$\beta = \frac{\bar{E}_{\text{rot}}}{E_{\text{ex}}}, \quad (8)$$

$1 - \beta$ 是用于内部激发的能量部分. β 越小,对系统的粒子发射影响越小;反之将严重影响系统的内部激发. 当 $\beta = 1$ 时,系统将只有集体转动而不能释放粒子或裂变.

2.3 平均转动角速度和转动圈数

核系统的平均转动角速度可由下式求得

$$\dot{\theta} = \frac{l\hbar}{I}, \quad (9)$$

设复合系统的平均寿命为 τ ,则系统从形成到衰变将平均转动 $\omega = \dot{\theta}\tau$ 圈.

3 计算结果

文献 [8, 9] 已成功用裂变扩散模型研究和解释了 $10.6\text{MeV/u } ^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al} \rightarrow ^{111}\text{In}$ 裂变反应中的轻带电粒子发射. 本文将继续对该反应进行研究, 用获得的一些结果和上述公式研究该反应的集体转动效应和与转动有关的反应特征.

在文献 [8, 9] 中, 用裂变扩散模型获得系统的平均角动量在 $70\hbar$ 到 $78\hbar$ 之间, 约为 $74\hbar$. 弹核带进的每核子线性动量为 $p = \sqrt{2mE_A} = 141\text{MeV}/c$. 根据 (3) 式, 该裂变反应的最大碰撞参数为 1.85fm . 用 $R = r_0 A^{1/3}$ ($r_0 = 1.23\text{fm}$) 来计算原子核的半径, 则弹核半径为 $R_A = 5.39\text{fm}$, 靶核半径为 $R_B = 3.69\text{fm}$, 两核半径和为 $R_A + R_B = 9.08\text{fm}$. 由此可以算出, 该反应的碰撞中心度为 $\gamma = 0.20$. 这意味着, 形成这个反应不可能是擦边碰撞, 也不是高度的对心碰撞, 而是介于两者之间, 靠近对心碰撞的反应. 该反应的平均碰撞参数为 1.23fm , 小于两个核的半径之差 $R_A - R_B = 1.70\text{fm}$, 靶核已完全被包含在弹核之内. 因此, 平均起来这个裂变反应是在近似对心碰撞下形成的反应. 当两核靠近相互碰撞时, 首先形成一个能量交换比较充分的复合系统, 然后复合系统形变并扩散, 越过鞍点, 最后到达断点发生裂变. 在整个形变扩散过程中有粒子释放出来.

根据 (7) 式, 可以算出复合核系统的平均转动能为 76.5MeV . 在该反应中, 核 ^{111}In 的总激发能为 $E_{\text{ex}} = 206\text{MeV}$ (其中质心系动能为 217MeV , Q 值为 -11.2MeV), 因此 $\beta = 37.1\%$. 由此可见, 在该反应中, 平均有大于 $1/3$ 的激发能分配于核系统的集体转动, 其余小于 $2/3$ 的激发能才用于核系统的内部激发, 包括扩散裂变和粒子的释放.

根据 (9) 式, 还可以算得上述反应中的平均转动角速度为 $\dot{\theta} = 27.6 \times 10^{20}\text{rad/s}$. 我们用裂变延迟时间表示系统从形成到裂变所用的时间. 根据拟合实验发射粒子多重性的裂变扩散模型计算^[8, 9], 上述反应的裂变延迟时间约为 $20 \times 10^{-21}\text{s}$. 因此系统从形成到裂变旋转了约 8.8 圈.

综上所述, 可以认为, 要形成像 $10.6\text{MeV/u } ^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al} \rightarrow ^{111}\text{In}$ 裂变反应这样的重离子反应需要有足够高的碰撞中心度, 也要有足够高的人射能量 (但也不能太高, 太高会发生碎裂), 同时原子核需要具有适度的粘滞系数 (在上述反应中, 拟合实验发射粒子多重性的裂变扩散模型计算^[8, 9]导出的粘滞系数为 $5 \times 10^{21}\text{s}^{-1}$). 这样两个核才能克服库仑排斥并有足够的亲和力粘在一起, 形成一个高速转动的复合系统. 系统在转动中拉长变形, 最后裂变. 这样的复合系统具有足够高的有效激发能, 使得系统在拉长变形过程中有较高的粒子发射率发射出粒子. 这些裂变前轻粒子的释放已不能用通常的复合核理论很好地描述, 而需要用裂变扩散理论描述. 为了更清楚地了解中能重离子反应的特征规律, 需要进一步深入地研究它们随反应系统和入射能量的变化规律.

4 小结

我们研究了重离子反应中的转动效应和与转动有关的反应特征. 给出了表征重离子反应特征的最大碰撞参数、碰撞中心度、系统平均转动能和平均角速度等计算公式. 对

10.6 MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al} \rightarrow ^{111}\text{In}$ 裂变反应计算表明, 该反应具有高的碰撞中心度, 系统是围绕质心高速转动的旋转体, 转动能占了系统总激发能的 1/3 还多, 复合系统从形成到裂变旋转了约 8.8 圈.

参 考 文 献

- 1 Hinde D J, Hilscher D, Rossner H et al. Phys. Rev., 1992, C45:1229—1259
- 2 Hilscher D et al. Ann Phys., (paris), 1992, 17:471—552
- 3 Ikezoe H, Shikazono N, Nagame Y et al. Phys. Rev., 1990, C42:342—353
- 4 Lestone J P, Leigh J R, Newton J O et al. Phys. Rev. Lett., 1991, 67:1078—1081; Nucl. Phys., 1993, A559:277—316
- 5 Lu Zhongdao, Zhang Jingshang, Feng Renfa et al. Z. Phys., 1986, A323:477—484
- 6 Lu Zhongdao, Chen Bin, Zhang Jingshang et al. Phys. Rev., 1990, C42:707—710
- 7 Lu Zhongdao, Chin J. Nucl. Phys., 1991, 13:313—316
- 8 Ye W, Shen W Q, Lu Z D et al. Z. Phys., 1997, A359:385—389
- 9 Ye W, Shen W Q, Lu Z D et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1998, 22:265—270
(叶 巍、沈文庆、陆中道等. 高能物理与核物理, 1998, 22:265—270)

Collective Rotation Effect in Heavy Ion Collision and the Characteristics of Reaction *

Lu Zhongdao^{1,1)} Ye Wei² Shen Wenqing^{2,1)}

¹(China Institute of Atomic Energy, Beijing 103413)

²(Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The effect of collective rotation and the reaction characteristics are studied for intermediate energy heavy ion Collision. The maximum impact parameter, the reaction centrality, the average collective rotation energy and the angular velocity, which characterize the heavy ion collisions, are deduced. For 10.6 MeV/u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al} \rightarrow ^{111}\text{In}$ fission reaction, it is found that this reaction has high degree of collision centrality. the average collective rotation energy is larger than one-third of the total excitation energy, and the composite nuclear system rotates about 8.8 turns before breakup.

Key words heavy ion collision, rotation effect, maximum impact parameter, reaction centrality

Received 4 August 1998

* Project J95A01021 Supported by Science Foundation of Chinese Nuclear Industry

1) CCAST (World Laboratory) P. O. Box 8730, Beijing 100080