

在 $40\text{MeV}/u$ 时 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 中 多重碎裂的同位旋效应*

张丰收^{1,2,4} 陈列文^{1,2} 明照宇^{1,2} 朱志远^{1,3}

1 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心 兰州 730000)

2 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

4 (中国高等科学技术中心 北京 100080)

摘要 利用同位旋相关的量子分子动力学模型,研究了 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 两个反应系统在入射能量 $E = 40\text{MeV}/u$ 时的多重碎裂。计算结果能与实验值定性符合。观察到两个反应系统中,中等质量碎片多重性、中子多重性、荷电粒子多重性与轻荷电粒子多重性之间的关联存在着明显的差别。另外,通过与膨胀蒸发源模型及同位旋相关的渗透模型分析结果比较,发现这种差别主要是由同位旋相关的反应动力学所造成的。

关键词 多重碎裂 同位旋效应 同位旋相关的量子分子动力学模型

1 引言

高激发态的原子核系统通过发射多个中等质量碎片(IMF)而退激的现象叫多重碎裂^[1]。对原子核多重碎裂的研究为人们认识原子核极限状态的性质提供了可能性,是人们研究远离平衡态的量子多体系统的实验室。另外,研究原子核多重碎裂能为人们提供研究碎裂的一般规律和知识,对探索有限系统的相变和临界现象有重要的理论意义。

对于原子核多重碎裂的产生机制,人们进行了大量的研究,但这些研究只局限于密度涨落导致的体积不稳定性、温度涨落所导致的热力学不稳定性及表面涨落所导致的形状不稳定性^[2-4]。随着国际上多个放射性束流装置的建成^[5-9],人们能够探索原子核体系中中子、质子不对称所导致的化学不稳定性。近来,MSU实验组通过研究在入射能量 $E = 40\text{MeV}/u$ 时 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$,观察到了多重碎裂的同位旋效应^[10]。已有静态模型,如膨胀蒸发源模型^[10]和同位旋相关的渗透模型^[11]对实验数据进行了分析,但由于静态模型计算中输入参数的不确定性及模型本身的简单性,对解释实验有一定的局

1999-01-08 收稿

* 国家自然科学基金(19609033,19875068,19847002),中国科学院基金和国家教委基金资助项目

限性. 动力学模型能够给出从初始碰撞到反应后期碎片发射的整个动力学过程, 但传统的输运理论并没有完整地包含同位旋自由度, 因此直到目前还没有使用动力学模型解释上述实验的工作.

本文基于同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型^[12], 分析了在入射能量 $E = 40\text{MeV/u}$ 时¹¹²Sn + ¹¹²Sn 和¹²⁴Sn + ¹²⁴Sn 中多重碎裂的同位旋效应, 计算结果能与实验值定性符合. 通过本文的动力学模型分析与静态模型分析结果的比较, 发现多重碎裂的同位旋相关性主要是由同位旋相关的反应动力学所导致的

2 模型和方法

本文使用的是 IQMD 模型^[12], 这个模型包含了同位旋自由度, 即同位旋相关的核子-核子碰撞截面、对称能项、库仑势及同位旋相关的泡利阻塞. 另外, 在初始化过程中也严格地区分了中子和质子. 近来, IQMD 模型已被成功地用来解释中能重离子碰撞中的一些同位旋效应^[12-15]. 在 IQMD 模型中, 核的平均场可以参数化为

$$U(\rho, \tau_z) = \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma + \frac{1}{2} (1 - \tau_z) V_C + C \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0} \tau_z + U^{\text{Yuk}}, \quad (1)$$

式中 $\rho_0 = 0.16\text{fm}^{-3}$, 即正常核物质的饱和密度; ρ , ρ_n 和 ρ_p 分别是总的、中子的和质子的相互作用密度; τ_z 是同位旋自由度的第 3 分量, 对于中子和质子分别等于 1 和 -1; V_C 代表库仑势; U^{Yuk} 为 Yukawa(表面)势. 参数 α , β 和 γ 的选择将采用所谓的软势(不可压缩系数 $K = 200\text{MeV}$). 对称能强度系数 $C = 32\text{MeV}$.

对于碰撞系统¹¹²Sn + ¹¹²Sn 和¹²⁴Sn + ¹²⁴Sn, 它们具有相同的电荷数, 但具有不同的中质比 N/Z , 即分别为 1.24 和 1.48. 在初始化过程中, 利用非线性相对论平均场理论(RMF)^[16] 得到的¹¹²Sn 和¹²⁴Sn 的中子及质子密度分布, 抽样出稳定的基态核¹¹²Sn 和¹²⁴Sn, 其中¹²⁴Sn 具有非常明显的中子皮结构. 在非线性的相对论平均场理论计算中我们使用了最新的参数 NL3^[17], 这组参数对稳定核以及远离 β 稳定线核的基态性质都能给出很好的描述.

为了构造碎片, 本文发展了一个同位旋相关的并合模型^[12,18]. 在这个改进的模型中, 首先把相对距离小于 R_0 , 同时相对动量小于 P_0 的粒子并合到一个碎片之中(这里 $R_0 = 3.5\text{fm}$, $P_0 = 300\text{MeV}/c$); 然后, 检查这个碎片是否是核数据表上存在的一种核素, 如果是则做下一步分析, 否则并合失败; 最后, 为了排除非物理的线状集团, 检查碎片是否满足条件 $R_{\text{rms}} \leq 1.14A^{1/3}$, 如果满足则最终判定为一个碎片. 这里 R_{rms} 和 A 分别为碎片的均方根半径和质量数.

3 结果和讨论

实验上常用到下列物理量: $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$, $\langle N_c \rangle$, $\langle N_k \rangle$, $\langle N_n \rangle$ 及 $\langle Z_{\text{bound}} \rangle$, $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 定义为平均中等质量碎片多重性, $\langle N_c \rangle$ 定义为平均荷电粒子多重性, $\langle N_k \rangle$ 定义为平均轻荷电粒子

(电荷数等于1或2)多重性, $\langle N_n \rangle$ 定义为平均中子多重性, Z_{bound} 定义为所有 $Z \geq 2$ 的碎片的电荷总和. 人们已经发现 $\langle N_{\text{MF}} \rangle$ 与 $\langle N_c \rangle$ 之间存在着近乎普遍的关联, 即它们之间的变化关系与反应系统的质量无关. 最近, MSU 实验组通过研究在入射能量 $E = 40 \text{ MeV/u}$ 时 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 的多重碎裂, 观察到了两个反应系统的 $\langle N_{\text{MF}} \rangle$ 和 N_c 之间的关联存在着明显的差别^[10], 这说明多重碎裂具有同位旋相关性. 事实上, 人们已经对碎片的同位素产额及产额比的同位旋效应进行了一些研究^[19-21]. 本文主要是想检验在 IQMD 模型框架下能否重复多重碎裂数据及其同位旋相关性.

在本文的计算中, 所选的事件数与碰撞参数成正比. 碰撞参数 $b = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ 和 10 fm , 对应的事件数分别为 50 到 500 个. 计算表明, $b = 10 \text{ fm}$ 时, 多重碎裂机制已基本消失, 平均中等质量碎片多重性非常小. 中等质量碎片定义为 $3 \leq Z_{\text{MF}} \leq Z_{\text{tot}}/3$ 的碎片. 图 1(a) 和 (b) 分别给出了 $b = 5 \text{ fm}$ 时两个反应系统在 $t = 200 \text{ fm/c}$, 400 fm/c 及 200 到 400 fm/c 之间平均得到的电荷分布. 可以看到, 200 fm/c 以后电荷分布已基本达到稳定, 于是可以采用时间平均技术^[12], 即以下的计算结果是对所有事件 200 fm/c 以后的不同时间点进行平均的结果.

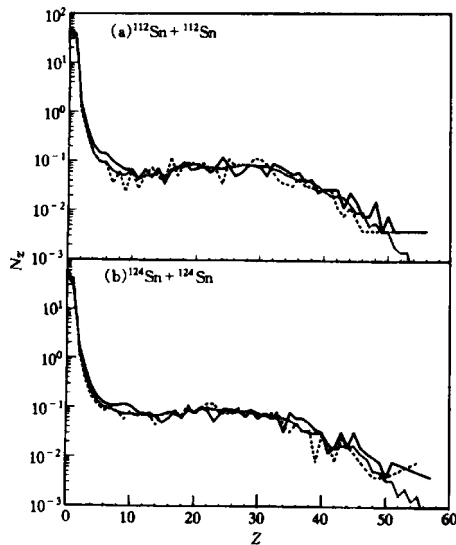


图 1 $b = 5 \text{ fm}$ 时两个反应系统在 $t = 200 \text{ fm/c}$, 400 fm/c 及 200 到 400 fm/c 之间平均得到的电荷分布

— $t = 200 \text{ fm/c}$, --- $t = 400 \text{ fm/c}$, 时间平均结果.

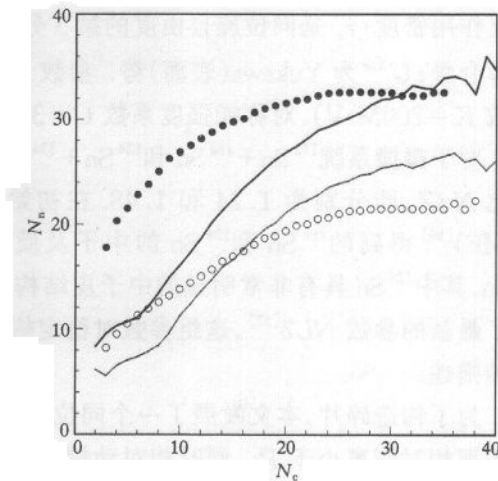


图 2 两个反应系统的平均中子多重性 $\langle N_n \rangle$ 与 N_c 之间的变化关系

● $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 实验值, ○ $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 实验值,
— $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 计算值, --- $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 计算值.

图 2 给出了平均中子多重性 $\langle N_n \rangle$ 与 N_c 之间的变化关系. 从图中可以看到, 计算结果能与实验值定性符合, 丰中子反应系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 发射的中子数系统性地大于反应系统 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 发射的中子数. 发射的中子数随 N_c 的增大而增多, 这说明随着碰撞参数的减小, 发射的中子数相应增多.

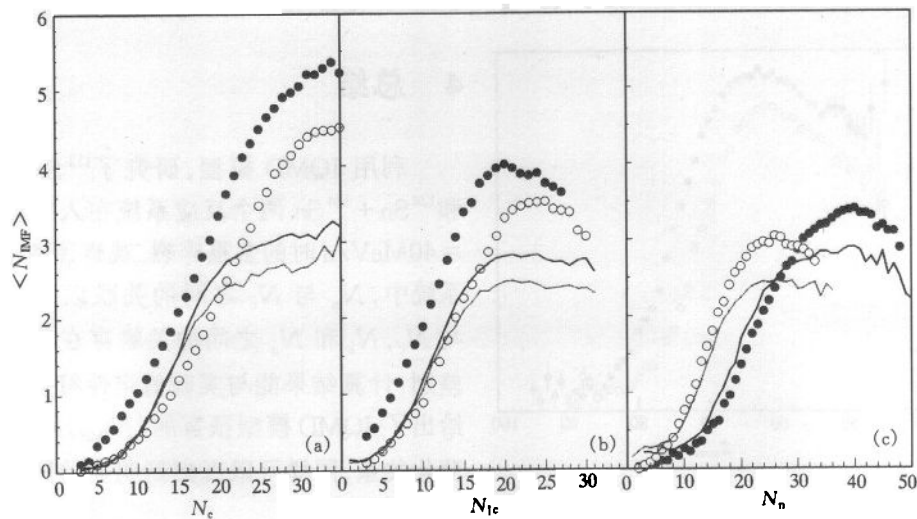


图3 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 随 N_c (a)、 N_k (b) 以及 N_n (c) 的变化关系

● $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 实验值, ○ $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 实验值, — $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 计算值, $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 计算值.

图3(a)–(c)分别给出了 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 随 N_c 、 N_k 以及 N_n 的变化关系.从图3可以清楚地看到,理论计算结果能较好地与实验值定性符合,同时对两个反应系统 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$,显示出了明显的差别.对于任意的 N_c 及 N_k ,实验值和理论计算结果都表明丰中子反应系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 发射的中等质量碎片数都系统性地大于反应系统 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 发射的中等质量碎片数,这个现象在图2(c)中当 N_n 很大时同样可以观察到.值得注意的是,当前的计算能很好地给出对应于最大 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 时的 N_c 、 N_k 或 N_n ,这是膨胀蒸发源模型和同位旋相关的渗透模型所未能给出的.

即使IQMD模型的计算结果能定性地与实验值符合,但定量上还是存在较大的差别.计算预言的两个反应系统的差值较实验值要小,尤其对于小的 N_c 或 N_k ,两个反应系统的差别基本消失,这说明在非常周边碰撞时,多重碎裂的同位旋效应已基本消失.对于 N_c 或 N_k 与 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 之间的关联,膨胀蒸发源模型的计算结果^[10]与当前的计算结果类似,而同位旋相关的渗透模型的计算结果未能体现出同位旋效应^[11].另外,理论预言的中等质量碎片数小于实验值,这主要是由于没有考虑末态的统计衰变.

实验上,人们还常研究 Z_{bound} 与 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 的关联^[22].一般来说,在中高能区, Z_{bound} 能较好地度量碰撞事件的碰撞参数, Z_{bound} 越大碰撞参数也越大,这与 N_c 恰好是互补的.图4给出了IQMD模型预言的 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 随 Z_{bound} 的变化关系,同样体现出了很明显的同位旋效应.并且,与图3的结果类似,当碰撞参数很大时(Z_{bound} 很大时),同位旋效应已基本消失.

在本文的计算中已去除了前平衡发射的轻粒子($Z \leq 2$ 的碎片).前平衡粒子定义为同时满足下列条件的碎片:与其它碎片之间的相对距离大于3.5fm;碎片中平均每核子动

能大于 8MeV;在质心系中,碎片做远离质心的运动.计算表明,前平衡粒子虽然不会改变 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 的大小,但是强烈地影响着 N_c, N_k, N_n 以及 Z_{bound} 对 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 的标度.

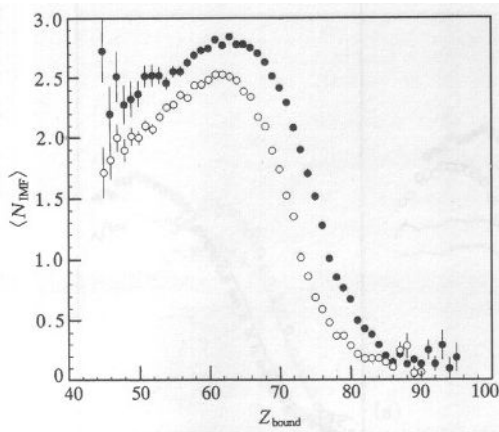


图4 IQMD模型预言的 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 随 Z_{bound} 的变化关系

● $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$, ○ $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$.

4 总结

利用 IQMD 模型,研究了 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 两个反应系统在入射能量 $E = 40\text{MeV}/u$ 时的多重碎裂.观察到两个反应系统中, N_n 与 N_c 之间的关联以及 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 与 N_c, N_k 和 N_n 之间的关联存在着明显的差别.计算结果能与实验值定性符合.同时,给出了 IQMD 模型预言的 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 随 Z_{bound} 的变化关系,同样可以观察到明显的同位旋效应.

通过与膨胀蒸发源模型及同位旋相关的渗透模型分析结果的比较,发现多重碎裂

的同位旋效应主要是由同位旋相关的反应动力学所造成的.静态的同位旋相关的渗透模型的计算结果未能体现出同位旋效应.统计的膨胀蒸发源模型能够给出同位旋效应,但是不能给出 N_c, N_k 以及 N_n 对 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 的标度. IQMD 模型虽然能很好地定性重复出实验值,但 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 的最大值与实验相差较大,这主要是由于没有考虑末态的统计衰变.

通过本文的计算及分析,发现前平衡粒子虽然不会改变 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 的大小,但是强烈地影响着 N_c, N_k, N_n 以及 Z_{bound} 对 $\langle N_{\text{IMF}} \rangle$ 的标度.另外,通过不同碰撞参数时发射中等质量碎片的分析,已观察到“neck”碎裂机制的存在迹象.本文的研究对多重碎裂同位旋效应的产生机制有了更深一步的理解.

参考文献(References)

- 1 ZHANG F S, GE L X. Nuclear Multifragmentation (in Chinese). Beijing: Science Press, 1998 (张丰收, 葛凌霄. 原子核多重碎裂. 北京: 科学出版社, 1998)
- 2 Hann D, Stocker H. Nucl. Phys., 1988, **A476**: 718—772
- 3 ZHANG F S. Z. Phys., 1996, **A356**: 163—170
- 4 CHEN L W, GE L X, ZHANG F S. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1997, **21**(11): 1018—1023 (陈列文, 葛凌霄, 张丰收. 高能物理与核物理, 1997, **21**(11): 1018—1023)
- 5 ZHAN W L, GUO Z Y, LIU G H et al. Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou, Science in China, A, 1999 (in press)
- 6 Kubo T et al. Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res., 1992, **B70**: 309—319
- 7 Geissel H et al. Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res., 1992, **B70**: 286—297
- 8 Mueller A C, Anne R. Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res., 1991, **B56/57**: 559—563
- 9 Sherrill B M et al. Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res., 1991, **B56/57**: 1106—1110
- 10 Kunde G J, Gaff S J, Gelbke C K et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**(14): 2897—2900
- 11 Kortemeyer G, Bauer W, Kunde G J. Phys. Rev., 1997, **C55**(5): 2730—2733

- 12 CHEN L W, ZHANG F S, JIN G M. *Phys. Rev.*, 1998, **C58**(4):2283—2291
- 13 CHEN L W, ZHANG X D, GE L X. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* (in Chinese), 1996, **20**(12):1091—1096
(陈列文, 张晓东, 葛凌霄. *高能物理与核物理*, 1996, **20**(12):1091—1096)
- 14 CHEN L W, GE L X, ZHANG X D et al. *J. Phys.*, 1997, **G23**:211—218
- 15 CHEN L W, ZHANG F S, ZENG X H et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* (in Chinese), 1998, **22**(11):1035—1041
(陈列文, 张丰收, 曾祥华等. *高能物理与核物理*, 1998, **22**(11):1035—1041)
- 16 ZHU Z Y, SHEN W Q, CAI Y H et al. *Phys. Lett.*, 1994, **B328**:1—4
- 17 Lalazissis G A, Konig J, Ring P. *Phys. Rev.*, 1997, **C55**(1):540—543
- 18 ZHANG F S, Suraud E. *Phys. Rev.*, 1995, **C51**(6):3201—3210
- 19 Wada R, Hildenbrand K D, Lynen U et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(18):1829—1832
- 20 Lozhkin O V, Trautmann W. *Phys. Rev.*, 1992, **C46**(5):1996—2001
- 21 Dempsey J F, Charity J F, Sobotka L G et al. *Phys. Rev.*, 1996, **C54**(4):1710—1719
- 22 Lynen, Kreutz P, Adloff J C et al. *Nucl. Phys.*, 1992, **A545**:329c—340c

Isospin Effects on Multifragmentation in Reactions of

$^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ and $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ at 40MeV/u*

ZHANG FengShou^{1,2,4} CHEN LieWen^{1,2} MING ZhaoYu^{1,2} ZHU ZhiYuan^{1,3}

1(*Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China*)

2(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

3(*Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

4(*CCAST(World Laboratory) P. O. Box 8730, Beijing 100080, China*)

Abstract Within the framework of an IQMD model, multifragmentation in reactions of $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ and $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ at 40MeV/u is investigated. The calculated results are in qualitative agreement with the experimental data. Significantly different scalings of the mean IMF multiplicities with neutron, charged-particle, light charged-particle multiplicities, and Z_{bound} are observed for the two reactions. In addition, comparing with the results of expanding evaporating source model and an isospin-dependent percolation model, it is found that the isospin dependence of multifragmentation mainly results from the isospin dependent reaction dynamics.

Key words multifragmentation, isospin effects, isospin-dependent QMD model

Received 8 January 1999

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (19609033, 19875068, 19847002), Science Foundation of The Chinese Academy of Sciences and Science Foundation of The Chinese Educational Commission