

## 轻系统多重碎裂的同位旋效应\*

陈波<sup>2</sup> 刘建业<sup>1,2</sup> 张丰收<sup>1,2</sup> 陈列文<sup>2</sup> 赵强<sup>2</sup> 左维<sup>2</sup>

1(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

2(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 利用同位旋相关的量子分子动力学模型,对 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 和 $^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}$ 系统在不同入射能量时,同位旋效应对多重碎裂的影响进行了讨论.低能区的多重碎裂由于多种同位旋相关的因素相互抵消,因此多重碎裂的同位旋效应不明显.随着能量的增加,同位旋相关的截面造成多重碎裂的明显差别.

**关键词** 同位旋相关的量子分子动力学 同位旋效应 多重碎裂

### 1 引言

随着国际上多台放射性次极束装置的建成和投入使用,人们对远离 $\beta$ 稳定线核物质的性质产生了浓厚的兴趣,同位旋效应的研究逐步成为当今的热点问题之一<sup>[1,2]</sup>.在以前的工作中曾研究过中能重离子碰撞中横向集体流同位旋效应<sup>[1]</sup>,本文主要讨论轻系统多重碎裂同位旋效应的影响.多重碎裂过程是重离子碰撞中产生的热核的重要衰变机制<sup>[3]</sup>,同BUU模型相比,量子分子动力学(QMD)较为合理地包含系统的多体效应<sup>[4]</sup>,因而能够自然地描述碰撞过程中的涨落及多重碎裂过程<sup>[5]</sup>.但传统的QMD仅用库仑势区分中子、质子,因而不能准确地描述其动力学过程.本文在同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)<sup>[1,2]</sup>基础上研究轻系统中能重离子碰撞中的密度涨落和多重碎裂的同位旋效应.

### 2 IQMD模型

#### 2.1 QMD模型

在QMD模型中,核子由高斯波包表示,系统的分布函数为高斯波包之和,

$$f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = \sum_{i=1}^n f_i(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t), \quad (1)$$

1998-12-09 收稿

\* 国家自然科学基金(19775057,19847002)中国科学院“九五”重大基础研究基金(KJ951-A1-410)和中国科学院院长基金特别资助项目

$$f_i(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = \frac{1}{(\pi \hbar)^3} \exp\{-[\mathbf{r} - \mathbf{r}_i]^2/2L - 2L[\mathbf{p} - \mathbf{p}_i]^2/\hbar^2\},$$

其中  $\mathbf{r}_i, \mathbf{p}_i$  为第  $i$  个核子的坐标和动量.  $\mathbf{r}_i, \mathbf{p}_i$  的时间演化由哈密顿方程表示,

$$\dot{\mathbf{p}}_i = -\{\mathbf{p}_i, H\}, \dot{\mathbf{r}}_i = \{\mathbf{r}_i, H\},$$

其中  $H$  包括总动能和相互作用部分. 相互作用势为 Skyrme, Coulomb 和 Yukawa 之和,

$$U = U^{\text{Sky}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{Yuk}}. \quad (4)$$

## 2.2 IQMD 模型

在 IQMD 模型中<sup>[1]</sup>, 从重离子碰撞的平均场、两体碰撞、泡利阻塞和初始化<sup>[3]</sup>着手对 QMD 进行改进.

为了研究碰撞过程平均场的同位旋效应, 即引入对称势

$$V^{\text{Sym}} = V_{0s} \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0} \tau_z, \quad \tau_z = \begin{cases} +1 & \text{中子} \\ -1 & \text{质子} \end{cases}$$

其中  $\rho_n, \rho_p$  分别为中子、质子密度,  $V_{0s}$  为对称势强度参数.

两体碰撞截面采用依据实验提取的参数化形式<sup>[6]</sup>. 对质子-中子, 中子-中子和质子-质子碰撞截面分别为

$$\sigma_{pn} = \begin{cases} -\frac{5067.4}{E^2} + \frac{9069.2}{E} + 6.9466(\text{mb}), & E \leq 40(\text{MeV}) \\ \frac{239380}{E^2} + \frac{1802.0}{E} + 27.147(\text{mb}), & 40 < E \leq 400(\text{MeV}) \\ 34.5(\text{mb}), & 400 < E \leq 800(\text{MeV}) \end{cases}$$

$$\sigma_{nn}(\sigma_{pp}) = \begin{cases} -\frac{1174.8}{E^2} + \frac{3088.5}{E} + 5.3107(\text{mb}), & E \leq 40(\text{MeV}) \\ \frac{93074}{E^2} - \frac{11.148}{E} + 22.429(\text{mb}), & 40 < E \leq 310(\text{MeV}) \\ \frac{887.37}{E} + 0.05331E + 3.5475(\text{mb}), & 310 < E \leq 800(\text{MeV}) \end{cases}$$

它们是同位旋相关的. 其中  $E$  为实验室系中每核子的入射能量.

不难发现采用从实验提取的参数化公式, 在小于 500 MeV/u 能区, p-n 的碰撞截面一般约为 n-n 或 p-p 碰撞截面的 3 倍, 表明 n-p 之间的关联更突出.

在碰撞过程中, 泡利阻塞的考虑方法是将中子、质子的阻塞分开. 显然, 在同等条件下, 中子-中子或质子-质子的阻塞要大于中子-质子间的阻塞.

除以上 3 种与同位旋相关的因素有关外, 库仑作用也是产生同位旋效应的重要因素之一. 利用 Skyrme H-F 理论抽取初始核基态的中子、质子的密度分布, 丰中子核的中子分布明显大于质子分布. 然后对基态稳定性作检验, 由均方根半径和平均结合能随时间演化的分析来选取基态坐标和动量分布, 同时确定各种势参数, 系统稳定性可保持在 400 fm/c 的范围内. 碎片的构造是用并合模型描述的.

### 3 计算结果的分析与讨论

用 IQMD 模型分别对  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  和  $^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}$  进行了比较系统地计算(都是对 100 个碰撞事件的模拟). 之所以选取这样的系统, 因为它们是总质量相同的对称系统, 且势参数完全相同. 在入射能量和碰撞参数相同时, 系统唯一的差别是由同位旋引起的. 同位旋效应包含库仑相互作用、对称势、同位旋相关的截面和泡利阻塞 4 个因素. 首先对两个系统随不同入射能量的密度涨落  $\sigma_\rho^2$  及中等质量碎片多重性  $N_{\text{IMF}} (3 \leq Z \leq 8)$  分别进行计算, 得到了它们的时间演化,

$$\sigma_\rho^2 = \langle \rho(r, t)^2 \rangle / \langle \rho(r, t) \rangle^2 - 1.0, \quad (8)$$

其中  $\rho(r, t) = \left( \frac{1}{2\pi L} \right)^{3/2} \sum_k \exp\{- (r - r_k)^2 / 2L\}$ . 为进一步说明问题, 又分别给出了核子约化动量分布四极矩  $Q_{xx}(t) / Q_{xx}(0)$  随不同能量的时间演化,

$$Q_{xx}(t) = \langle 2p_z^2 - p_x^2 - p_y^2 \rangle. \quad (9)$$

#### 3.1 密度涨落 $\sigma_\rho^2$ 及中等质量碎片多重性 $N_{\text{IMF}}$ 的对应关系

在我们研究的能区, 中等质量碎片除少部分来自深度非弹和非完全熔合外, 其它主要产生于多重碎裂. 多重碎裂是热核的重要衰变模式, 是由于核物质压缩后迅速膨胀引起大的密度涨落而造成的, 而核物质大的密度涨落是由于动力学不稳定性和化学不稳定性的交织所产生的.

图 1 是碰撞参数  $b = 0 \text{ fm}$  时,  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  和  $^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}$  系统的  $\sigma_\rho^2$  和  $N_{\text{IMF}}$  随不同入射能量的演化(时间为  $300 \text{ fm}/c$ ). 对两个系统而言,  $\sigma_\rho^2$  和  $N_{\text{IMF}}$  随着入射能量的增加, 在  $40 \text{ MeV}/u \leq E \leq 60 \text{ MeV}/u$  处均出现一个峰值, 并且峰值对应的能量相差无几; 在  $E \leq 60 \text{ MeV}/u$  时,  $N_{\text{IMF}}$  几乎相等; 在  $E \geq 60 \text{ MeV}/u$  时,  $N_{\text{IMF}}(^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}) > N_{\text{IMF}}(^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar})$ , 这是同位旋效应造成的差别, 后面还要讨论.

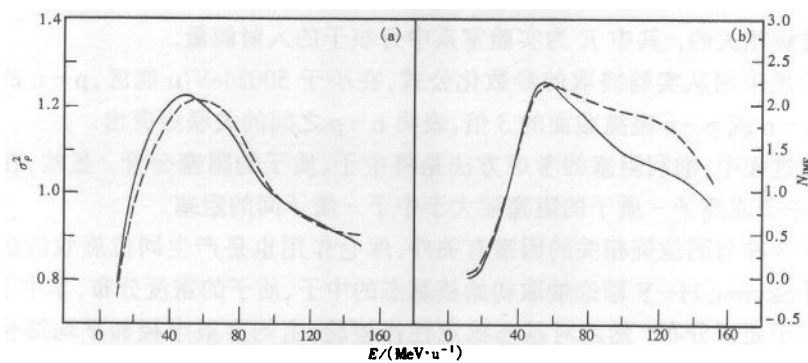


图 1  $\sigma_\rho^2$  (a) 和  $N_{\text{IMF}}$  (b) 随能量的演化

—  $^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}$ , ---  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ .

在  $40 \text{ MeV}/u \leq E \leq 60 \text{ MeV}/u$  之所以出现峰值, 是因为在低能时, 碰撞中非完全熔合

反应占了主要的分量,产生了较多的重碎块和较小的密度涨落.而在高能时,核子间的压缩碰撞非常激烈,出现大量轻粒子发射,因此密度涨落也较小.只有当能量处于中间一定值时,压缩和膨胀导致密度的涨落很大,因而有大量的中等质量碎片生成.

### 3.2 $N_{\text{MF}}$ 随不同能量的比较

图2给出了  $N_{\text{MF}}$  在不同能量下的时间演化.从图可以清楚地看到,对于能量较高的情况,同位旋自由度小的系统产生的中等质量碎片较多.在低能时,重离子碰撞反应机制中的平均场占主导地位,对于  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  和  $^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}$  两系统而言,它们的同位旋自由度  $\delta = \frac{N-Z}{A}$  分别为 0 和 0.1,对称势对于中子为排斥作用,对质子为吸引作用,故对于丰中子系统( $\delta$  大),总效果为排斥,相反库仑作用对于缺中子( $\delta$  小)系统有较强的排斥作用.而同位旋相关的核子-核子碰撞截面对于相同质量的缺中子系统有更多的 n-p 碰撞几率和能量压缩,从而表现为更多的排斥.对同位旋相差不大的系统,由于以上各种同位旋效应的竞争和交织,在低能区相互抵消,造成两个系统多重碎裂的同位旋效应相差不大.但能量较高时两体碰撞占主导地位,对于相同质量的系统,同位旋自由度大,质子-中子的数目相差也越大,这样 n-p 的碰撞对数和碰撞几率就小,导致同位旋自由度大的 n-p 关联和能量压缩就变小,  $\sigma_p^2$  变小,因而也导致  $N_{\text{MF}}$  就变小.

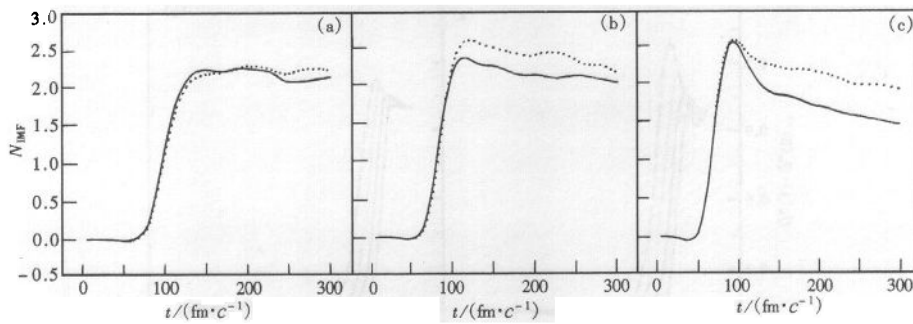


图2  $N_{\text{MF}}$  在不同能量下的时间演化

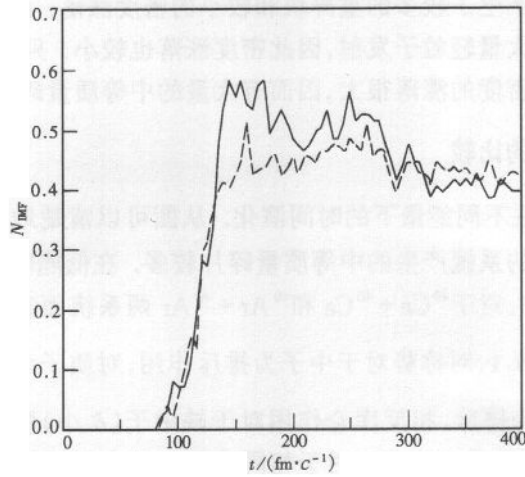
(a) 50MeV/u; (b) 70MeV/u; (c) 100MeV/u.

..... $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ , —— $^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}$ .

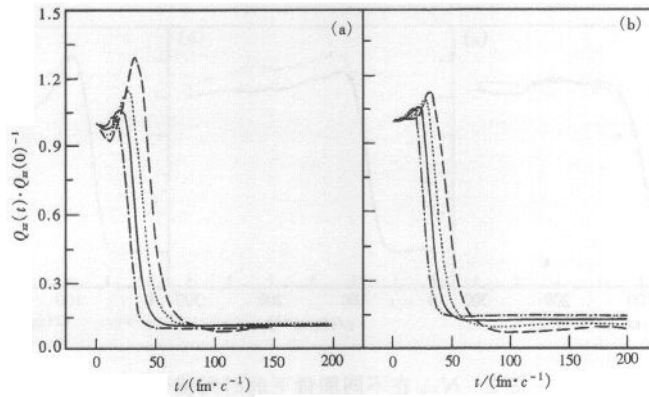
如果利用放射性的优点挑选两个同位旋差别较大的碰撞系统,如  $^{46}\text{V} + ^{40}\text{Ca}$  和  $^{46}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}$ , 其同位旋分别是 0.0 和 0.163. 如图3所示,  $N_{\text{MF}}$  的时间演化表明,在  $E = 30\text{MeV/u}$  和  $b = 0\text{fm}$  情况下,由于同位旋不同因素的竞争和交织,可以看出同位旋效应造成的差别.有关详细情况在下一篇文章中介绍.

### 3.3 $Q_{zz}(t)/Q_{zz}(0)$ 随不同入射能量的时间演化

图4给出了核子约化动量分布四极矩  $Q_{zz}(t)/Q_{zz}(0)$  的时间演化,其中  $Q_{zz}(0)$  为  $t = 0$  时的  $Q_{zz}(t)$ . 随着入射能量的增加,两系统的弛豫时间都在缩短,当入射能量到达  $150\text{MeV/u}$  时,弛豫时间约为  $40\text{fm}/c$ , 这时系统热化得很快. 当它们都达到平衡时,

图3  $N_{\text{IMF}}$ 的时间演化— $^{46}\text{V} + ^{40}\text{Ca}$ , ..... $^{46}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}$ .

$^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  系统的  $n-p$  碰撞数多, 所以随着能量的增加  $n-p$  关联作用出现明显的差别, 而  $^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}$  的变化较小且不明显.

图4  $Q_{\pi}(t)/Q_{\pi}(0)$ 在不同能量下的时间演化(a)  $^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}$ ; (b)  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ .

--- 50MeV/u, .....70MeV/u, ——100MeV/u, - · - · - 150MeV/u

## 4 小结

综上所述, IQMD 能够合理地描述中能重离子碰撞中多重碎裂的同位旋效应. 从多重碎裂的中等质量碎片多重性与核物质密度涨落随能量的对应关系可以明显看出, 由于动力学不稳定性与化学不稳定性的交织所引起的核物质密度涨落是造成多重碎裂的主要原因. 尽管我们计算的  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  和  $^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}$  系统的同位旋相差不大, 但在低能区同位旋的各种效应仍然存在, 由于多种与同位旋相关的因素相互抵消, 结果多重碎裂的同位旋

效应不明显. 随着能量的增加, 同位旋的相关核子-核子碰撞截面的作用造成了两个系统多重碎裂的明显差别. 在计算中仅选用软势和简单的对称势, 通过将多重碎裂物理观测与实验数据进行比较, 可分析和提取有关同位旋非对称核物质的状态方程和同位旋相关介质中核子-核子碰撞截面的信息.

### 参考文献(References)

- 1 CHEN LieWen, ZHANG FengShou, JIN GenMin. Phys. Rev., 1998, C58:2283; CHEN LieWen, ZHANG FengShou, ZENG XiangHua et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1998, 22: 1035 (陈列文, 张丰收, 曾祥华等. 高能物理与核物理, 1998, 22: 1035)
- 2 LI B A, KO C M, Bauer W. Inter. Jour. Mod. Phys. E., 1998, 2: 147-229
- 3 ZHANG FengShou, GE LinXiao. Nuclear Multifragmentation(in Chinese), Beijing: the Scientific Press, 1998 (张丰收, 葛凌霄. 原子核多重碎裂, 北京: 科学出版社, 1998)
- 4 Aichelin J. Phys. Rev., 1998, C37:2451
- 5 LIU J Y, GE Y C, YANG F Z. Z. Phys., 1993, A345:187; LIU J Y, ZHANG S G. Z. Phys., 1994, A348: 31; LIU H, LIU J Y. Z. Phys., 1996, A354:311
- 6 CHEN K et al. Phys. Rev., 1968, 166: 949

## Isospin Effects on Multifragmentation of Light Mass System \*

CHEN Bo<sup>2</sup>    LIU JianYe<sup>1,2</sup>    ZHANG FengShou<sup>1,2</sup>    CHEN LieWen<sup>2</sup>  
ZHAO Qiang<sup>2</sup>    ZUO Wei<sup>2</sup>

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)

**Abstract** The influence of isospin effects on the multifragmentation in the head-on collisions of the system  $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$  and  $^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar}$  for different incident energies is discussed by using isospin dependent quantum molecular dynamics model (IQMD). It is found that the intermediate mass fragment (IMF) has obvious difference at high incident energy, because the nucleon-nucleon cross section effects is major in the process of heavy ion collision. Thus, we have some opportunities to extract the information of nucleon-nucleon cross section. At low energy various isospin effects affect each other, resulting in no obvious difference in the IMF between two systems.

**Key words** isospin dependent quantum molecular dynamics, isospin effects, multifragmentation

Received 9 December 1998

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China (19775057, 19847002), Major Subject of The Chinese Academy of Sciences (KJ951-A1-410) and Special Foundation of President of The Chinese Academy of Sciences