

# $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}, ^{58}\text{Ni}$ 反应中的径向膨胀流研究\*

明照宇<sup>1,2</sup> 张丰收<sup>1,2,4</sup> 陈列文<sup>1,2</sup> 朱志远<sup>1,3</sup>

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 Boltzmann-Langevin 方程研究了  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  和  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$  两个反应系统在 53, 100, 150 和 200 MeV/u 入射能量下对心碰撞的径向膨胀流. 发现对于丰中子系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  的径向膨胀流系统性地小于稳定系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$  的径向膨胀流.

系时, 能够解释入射能量和径向膨胀流之间呈现的直线关系. 提取了出现径向膨胀流的轰击能量阈值, 发现对丰中子系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  得到的能量阈值小于稳定系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$  所得到的能量阈值.

**关键词** 同位旋相关的 Boltzmann-Langevin 方程 径向膨胀流 同位旋效应

## 1 引言

放射性核束(RNB)物理的发展, 为人们探索核物质状态方程的同位旋相关部分(即对称能)及介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面提供了可能. 通过研究远离  $\beta$  稳定线核引起的反应, 人们可以探索同位旋相关的反应动力学. 核的集体流是近十年来实验与理论核物理学家都非常感兴趣的研究课题之一<sup>[1]</sup>. 近年来, 人们在重离子近中心碰撞中还发现了所谓的径向膨胀流<sup>[2-4]</sup>. 中心碰撞具有其特殊的优越性: 阻塞、压缩以及热平衡可望达到最大程度, 初始的入射动能能够较好地储存在一个单个的“源”中, 这就大大地简化了碰撞动力学, 减弱了表面效应. 在前面的工作中, 通过采用同位旋相关的量子分子动力学模型(IQMD)<sup>[5,6]</sup> 对  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$  在不同轰击能量下对心碰撞的径向膨胀流的研究, 发现丰中子系统的径向膨胀流系统性地偏小, 这种差别主要来自于核子-核子碰撞截面的同位旋相关性而与对称能无关<sup>[7]</sup>. 这为通过实验测量同位旋相关的径向膨胀流提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面提供了一种新方法. 但是通过实验如何提取同位旋相关的原子核状态方程仍是一个悬而未决的问题. 文献[8]提出测量

2000-05-22 收稿

\* 国家自然科学基金(19875068, 19847002)、国家重点基础研究发展规划(G2000077407)和中国科学院基金资助

同位旋相关的前平衡质子和中子发射多重性的方法来提取原子核对称能,但由于目前在实验中还不能完整地测量前平衡高能发射的粒子,这一方法在目前还不现实.另一方面,随着  $4\pi$  探测器技术的进一步发展,目前实验上已能够完整测量中等质量碎片<sup>[9]</sup>的发射,这方面的实验研究已积累了大量数据,径向膨胀流就是中等质量碎片总动能中径向规则运动部分的能量.

本文利用同位旋相关的 Boltzmann-Langevin 方程 (IBLE)<sup>[10]</sup>,对丰中子系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  和稳定系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$  的径向膨胀流进行了研究,发现径向膨胀流随着入射能量的升高而增大.丰中子系统的径向膨胀流系统地小于稳定系统的径向膨胀流.提取了出现径向膨胀流的轰击能量阈值,发现此能量与反应系统的同位旋自由度相关.

## 2 理论模型

### 2.1 同位旋相关的 Boltzmann-Langevin 方程

本文采用的 IBLE 模型和 Boltzmann-Langevin 方程 (BLE)<sup>[11,12]</sup> 相比,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.在 IBLE 模型中,核的平均场可以参数化为

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

式中  $\rho_0 = 0.16 \text{fm}^{-3}$ , 即正常核物质的饱和密度;  $\rho$ ,  $\rho_n$  和  $\rho_p$  分别是总的、中子的和质子的相互作用密度;  $\tau_z$  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; 对称能强度系数  $C = 32 \text{MeV}$ ; 参数  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\gamma$  的选择将采用所谓的软势<sup>[9]</sup>, 此时  $\alpha = -356 \text{MeV}$ ,  $\beta = 303 \text{MeV}$ ,  $\gamma = 7/6$ , 对称核物质在饱和点处给出其不可压缩系数  $K = 200 \text{MeV}$ .

在 IBLE 模型中考虑了同位旋相关的核子-核子碰撞截面和同位旋相关的泡利阻塞.在碰撞项中采用了  $\sigma_{c,ng}$  和  $\sigma_{r,sp}$  两种核子-核子碰撞截面,前者与同位旋不相关,后者则与同位旋相关.核子发生碰撞后,在相空间中以核子为中心构造一个体积为  $h^3/2$  的球(考虑了自旋自由度),然后考察此体积元被其它的和具有相同的同位旋的核子所占据的几率,判断该碰撞被阻塞或部分阻塞.

对于碰撞系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  和  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$ , 它们具有相同的质量数,但具有不同的中质比  $N/Z$ , 即分别为 1.1304 和 1.0417. 在初始化过程中,利用非线性相对论平均场理论<sup>[13]</sup> 得到  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{58}\text{Fe}$  和  $^{58}\text{Ni}$  的中子及质子密度分布,抽样出各实验粒子的空间坐标和动量坐标.核子在动量空间的抽样所采取的局域费米动量可以区分中子和质子,该抽样是对稳定的基态核进行的.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<sup>[14]</sup>, 这组参数对稳定核以及远离  $\beta$  稳定线核的基态性质都能给出很好描述.

为了构造碎片,采用了改进的同位旋相关并合模型<sup>[15]</sup>.在这个模型中,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  $R_0 = 3.5 \text{fm}$ ,  $P_0 =$

300MeV/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  $R_{\text{rms}} \leq 1.14 A^{1/3}$ ,如果满足则最终判定为一个碎片. 这里  $R_{\text{rms}}$  和  $A$  分别为碎片的均方根半径和质量数. 需要指出的是,在本文所应用的同位旋相关并合模型中并没有考虑温度效应. 在有限温度时,在动量和坐标空间中核子的分布会有弥散,并合模型的参数相应会有所增加. 这方面的研究将在其它地方报道.

## 2.2 径向膨胀流

在核反应过程中,两个核在表面接触时发生核相互作用. 如果入射核的入射速度大于第一声速,则两个核的作用范围进一步扩大. 随着压缩的不断进行,入射能量一部分转化为压缩能,另一部分则转化为热能. 而压缩能  $E_{\text{com}}$  可以表示为

$$E_{\text{com}} = E(\rho) - E(\rho_0), \quad (2)$$

式中  $E(\rho_0)$  为原子核的基态能量,  $E(\rho)$  为原子核在密度为  $\rho$  时的能量. 而系统压缩能随密度的变化关系近似为二次曲线关系,即

$$E_{\text{com}} = c_1(\rho - \rho_0)^2, \quad (3)$$

其中  $c_1$  为常数.

在一定的人射能量范围内,热能和径向膨胀流的时间标尺不同,是可以区分的. 但是,在入射能量使系统达到较高温度(约 15MeV)时,热效应也可能导致体系的压缩,这种区分不成立. 在入射能量很小的情况下(入射核的速度小于等于第一声速),系统将不发生压缩膨胀过程,而发生复合核反应,这时的径向膨胀流为零值,当入射核的速度等于第一声速的点时,入射能量为径向膨胀流产生的阈值,

$$v_{\text{th}} = v_{\text{first sound}} = \sqrt{\frac{K_{A,\delta}}{9m}},$$

$K_{A,\delta}$  为质量为  $A$ , 中子过剩为  $\delta$  的原子核系统的压缩系数,它由体积部分  $K$ 、同位旋部分和表面部分等共同决定. 通过不同模型的计算,人们已逐渐认识到,当相对中子过剩  $\delta$  较小时,饱和点处核物质的  $K(\delta)$  可以较好地参数化为

$$K(\delta) = K(\delta = 0)(1 - a\delta^2), \quad (5)$$

其中  $\delta = (N - Z)/A$ ,  $a$  为正常数. 从方程(4)和方程(5)可以看出,对于非对称体系,使径向膨胀流产生的入射能量阈值和系统的同位旋自由度密切相关,丰中子系统的这个轰击能量阈值要小于稳定系统的.

假设轰击能量  $E_{\text{bom}}$  随密度  $\rho$  的变化关系为

$$\rho = b_1 E_{\text{bom}}^{1/2} + b_2,$$

$b_1, b_2$  为常数. 将(6)式代入(3)式可得压缩能  $E_{\text{com}}$  随入射能量的变化关系

$$E_{\text{com}} = c_1[(b_1 E_{\text{bom}}^{1/2} + b_2) - \rho_0]^2,$$

近似为直线关系

$$E_{\text{com}} = a_1 E_{\text{bom}} + a_2, \quad (8)$$

这里的  $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1$  是待定参数.

在反应系统的膨胀过程中,压缩能将全部转化为径向膨胀流,

$$E_{\text{com}} = E_r. \quad (9)$$

在真实的重离子对心碰撞中,碎片的平均动能 $\langle E_{\text{kin}} \rangle$ 可以分成 3 个部分,即

$$\langle E_{\text{kin}} \rangle = \langle E_{\text{ther}} \rangle + \langle E_C \rangle + \langle E_r \rangle, \quad (10)$$

其中, $\langle E_{\text{ther}} \rangle$ 表示随机的“热”的部分, $\langle E_C \rangle$ 为库仑排斥部分, $\langle E_r \rangle$ 为集体运动部分,即所谓的径向膨胀流,而前两个部分(“热+库仑”)可利用 WIX 程序<sup>[2]</sup>进行计算.

### 3 计算结果和讨论

图 1 给出了入射能量为 53, 100, 150 和 200 MeV/u 时,系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  和  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$  中碎片平均每核子总动能 $\langle \epsilon_{\text{kin}} \rangle$ 随碎片电荷  $Z$  的变化关系. 径向膨胀流的大小可以通过较重碎片( $Z \geq 3$ )的总动能减去“热+库仑”部分的动能进行平均而得到. 在这里可以清楚地看到,对于同一个碰撞系统,径向膨胀流随着入射能量的增加而增加,这与实验结果是一致的<sup>[16]</sup>.

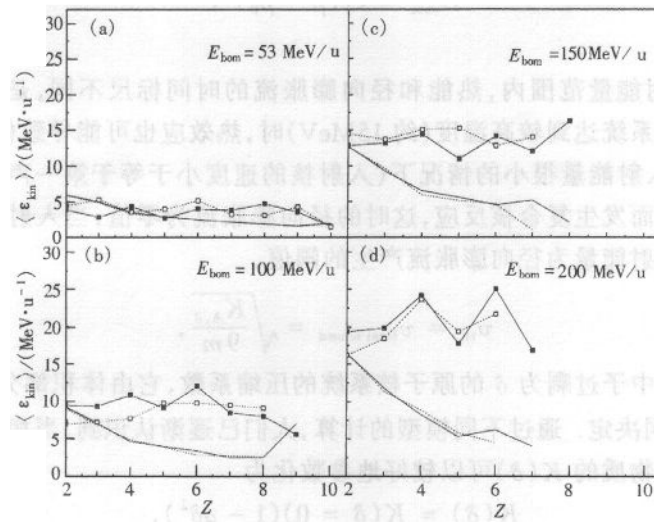


图 1 碎片平均每核子总动能 $\langle \epsilon_{\text{kin}} \rangle$ 随碎片电荷  $Z$  的变化关系

—■— $\langle \epsilon_{\text{kin}} \rangle (^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni})$ , …□… $\langle \epsilon_{\text{kin}} \rangle (^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe})$ ,  
—“热+库仑”( $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$ ), ……“热+库仑”( $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$ ).

表 1 给出了不同入射能量下所提取的系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$  和  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  的径向膨胀流及其差值  $\Delta$ . 从中可以看出,稳定系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$  产生的径向膨胀流系统性地大于丰中子系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  所产生的.

根据上面的(8)式,可以对径向膨胀流随入射能量的变化关系进行直线拟合. 图 2 给出了反应系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$  和  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  的径向膨胀流随入射能量的变化关系及其直线拟合的结果. 从图中可以发现稳定系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$  的径向膨胀流系统性地大于丰中子系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  的径向膨胀流,这和实验结果相一致. 而且从拟合结果来看,发现稳定系统

表 1 不同入射能量下的两个反应系统的径向膨胀流及其差值  $\Delta$  (单位: MeV/u)

$E_{\text{bom}}$	$^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$	$^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$	$\Delta$
	$E_r$	$E_r$	
53	1.4	1.1	0.3
100	5.7	4.9	0.8
150	8.8	7.8	1.0
200	15.7	11.8	3.9

$^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$  在以  $E_{\text{bom}} = 38.7\text{MeV/u}$  的能量入射时,它产生的径向膨胀流为零,而这个能量比丰中子系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  所需的  $E_{\text{bom}} = 36.3\text{MeV/u}$  要大. 这说明使径向膨胀流为零的最低入射能量和反应系统的同位旋自由度密切相关,而且丰中子系统的这个能量比稳定系统的要大. 这里的拟合结果和上面的讨论是一致的. 在这里的计算中,只考虑了反应的动力学过程,而对它的衰变性质没有考虑,在构造碎片时将受到一定的影响.

#### 4 小结

本文通过研究反应系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$  和  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  的径向膨胀流随入射能量的变化关系,发现径向膨胀流和反应系统的同位旋自由度密切相关,丰中子系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  的径向膨胀流系统性地小于稳定系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$  的径向膨胀流. 利用径向膨胀流随入射能量的变化关系和线形拟合结果,发现了使径向膨胀流为零的轰击能量阈值. 对于不同的反应体系,这个能量是不同的,它随同位旋自由度的变化而变化. 这将为从实验上通过测量此入射能量阈值来提取同位旋相关的原子核状态方程(对称能)提供一种新的方法.

#### 参考文献 (References)

- 1 Reisdorf W, Ritter H G. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1997, **47**:663—709
- 2 Randrup J. Com. Phys. Comm, 1993, **77**:153—166
- 3 Jeong S C. Phys. Rev. Lett., 1994, **72**(22):3468—3471
- 4 ZENG X H, GE L X. Z. Phys., 1996, **A354**:317—319
- 5 CHEN L W, ZHANG F S, JIN G M. Phys. Rev., 1998, **C58**(4):2283—2291
- 6 ZHANG F S, CHEN L W, MING Z Y et al. Phys. Rev., 1999, **C60**(6):064604
- 7 CHEN L W, ZHANG F S, JIN G M et al. Phys. Lett., 1999, **B459**:21—26
- 8 LI B A, Ko C M, REN Z Z. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**(9):1644—1647
- 9 ZHANG Feng-Shou, GE Ling-Xiao. Nuclear Multifragmentation. Beijing: Science Press, 1988, 10 (in Chinese)

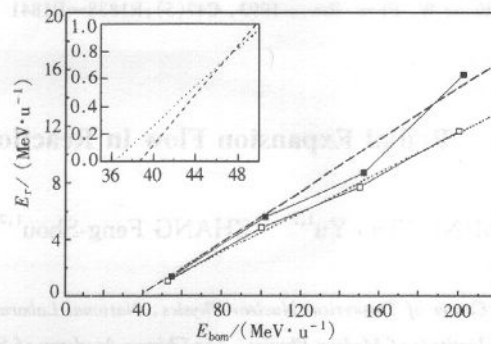


图 2 反应系统  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$  和  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  的径向膨胀流随入射能量的变化关系及其直线拟和结果  
小图为在轰击能量阈值附近的放大.

—□—  $E_r(^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe})$ , ..... 拟合结果 ( $E_r = -2.54 + 0.07 E_{\text{bom}}$ ), —■—  $E_r(^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni})$ , ..... 拟合结果 ( $E_r = -3.48 + 0.09 E_{\text{bom}}$ ).

- (张丰收, 葛凌霄. 原子核多重碎裂. 北京: 科学出版社, 1998, 10)
- 10 MING Zhao-Yu, ZHANG Feng-Shou, CHEN Lie-Wen et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2001, **25**:417 (in Chinese)  
(明照宇, 张丰收, 陈列文等. 高能物理与核物理, 2001, **25**:417)
- 11 ZHANG F S, Suraud E. *Phys. Lett.*, 1993, **B319**:35—40
- 12 ZHANG F S, Suraud E. *Phys. Rev.*, 1995, **C51**:3201—3210
- 13 ZHU Z Y. *Phys. Lett.*, 1994, **B328**:1—8
- 14 Lalazissis G A, Konig J, Ring P. *Phys. Rev.*, 1997, **C55**(1):540—543
- 15 ZHANG F S. *Z. Phys.*, 1996, **A356**:131—139
- 16 Bauer W. *Phys. Rev.*, 1993, **C47**(5):R1838—R1841

### Radial Expansion Flow in Reactions of $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$ and $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$ \*

MING Zhao-Yu<sup>1,2</sup> ZHANG Feng-Shou<sup>1,2,4</sup> CHEN Lie-Wen<sup>1,2</sup> ZHU Zhi-Yuan<sup>1,3</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)

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

4 (CCAST (World Laboratory), Beijing 100080, China)

**Abstract** By means of using an isospin-dependent Boltzmann-Langevin equation which includes isospin-dependent symmetry energy, Coulomb energy, isospin-dependent nucleon-nucleon cross sections, Pauli blocking, and initialization, the radial expansion flow of reaction systems  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Ni}$  and  $^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}$  at 53, 100, 150, and 200 MeV/u in the central collisions were studied. It has shown that the more neutron-rich system exhibits smaller radial expansion flow. It was found that the neutron-rich system had smaller threshold energy which may provide a new method to determine the isospin dependent nuclear equation of state from calculated result and linear fitting result.

**Key words** isospin dependent Boltzmann-Langevin equation, radial expansion flow, isospin effect

---

Received 22 May 2000

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (19875068, 19847002), Major State Basic Research Development Program (G2000077407) and Science Foundation of The Chinese Academy of Sciences