

# 中能重离子碰撞中前平衡核子 发射的同位旋效应\*

赵强<sup>2</sup> 郭文军<sup>2</sup> 刘建业<sup>1,2</sup> 左维<sup>1,2</sup> 王顺金<sup>1,3</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)

3 (西南交通大学现代物理研究所 成都 610031)

**摘要** 利用同位旋相关的输运理论,研究了中能重离子碰撞中丰中子和缺中子碰撞系统在较宽能区范围内前平衡发射核子的同位旋效应. 结果表明除低能区外,在100MeV/u以上核子-核子碰撞动力学效应起主要作用的能区,前平衡发射的中子-质子比仍然对介质中核子-核子碰撞截面的同位旋效应不灵敏,然而对于对称势的改变非常灵敏. 故从低能量到较高能量的较大能区内,前平衡发射的中子-质子比的理论值与实验值的比较是提取对称势形式和强度的灵敏探针.

**关键词** 前平衡发射核子 重离子碰撞 对称势

## 1 引言

由稳定核或不同中子-质子比的放射性核引起的中能重离子碰撞中,可以产生各种同位旋非对称的热激发和压缩核态. 这类核态性质和反应产物灵敏地依赖于碰撞系统的中子-质子比、对称势和核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性. 因此,通过理论计算与实验数据的比较,可以提取和建立同位旋非对称核物质状态方程<sup>[1,2]</sup>. 李保安和 R. Pak 等<sup>[3-5]</sup>通过研究集体流和平衡能量的同位旋依赖性来提取关于介质中核子-核子碰撞截面的知识. 我们通过研究中能重离子碰撞中多重碎裂同位旋效应也可以提取核子-核子碰撞截面的知识<sup>[6]</sup>. 李保安等通过研究低能区( $E \leq 100 \text{MeV/u}$ )重离子碰撞中前平衡发射核子的同位旋依赖性来提取对称势的知识<sup>[7]</sup>.

本文主要目的是在更宽能量范围内,包括核子-核子碰撞动力学起重要作用能区(45MeV—150MeV)内,利用包括 Pauli 势和动量相关势在内的同位旋相关的量子分子动力学模型(IQMD)<sup>[8]</sup>来研究重离子碰撞中前平衡发射核子的同位旋依赖性. 在重离子碰撞中,如果一个核子与其他核子的距离大于3fm,并且动量差大于300MeV/c时,可以把

2000-03-22 收稿

\* 中国科学院“百人计划”,国家自然科学基金(19775057,19847002,19775020)和中国科学院基金资助

它看作自由核子. 我们把反应体系达到平衡或近平衡前所有发射的自由核子取为前平衡核子发射. 经过计算发现, 尽管在较高能区 ( $E \geq 100 \text{ MeV/u}$ ) 核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性对重离子碰撞过程的耗散和碎片形成过程有明显的影响, 但前平衡发射中子-质子比主要依赖于对称势, 对于核子-核子碰撞截面的同位旋依赖不灵敏. 计算结果同样表明, 在  $E \geq 100 \text{ MeV/u}$  能区前平衡发射中子-质子比对于 Pauli 势、动量相关势和碰撞参数不灵敏. 故可以在较宽入射能量范围内, 通过理论计算和实验的比较提取有关对称势的知识.

## 2 理论模型和有关参数

我们利用同位旋相关的 IQMD<sup>[8]</sup> 模型来计算和分析重离子碰撞中前平衡核子发射. 在 IQMD 中势能选用

$$U = U^{\text{Sky}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{Yuk}} + U^{\text{Pauli}} + U^{\text{MDI}} + U^{\text{sym}}, \quad (1)$$

其中密度相关的 Skyrme 势  $U^{\text{Sky}}$  为

$$U^{\text{Sky}} = \alpha \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma; \quad (2)$$

$\rho$  是核子密度,  $\rho_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$  是饱和核子密度;  $U^{\text{Coul}}$  是库仑势; 表示有限核表面效应的 Yukawa 势  $U^{\text{Yuk}}$  为

$$U^{\text{Yuk}} = t_3 \frac{\exp\{-|r_1 - r_2|/m\}}{|r_1 - r_2|/m}; \quad (3)$$

动量相关势  $U^{\text{MDI}}$  为

$$U^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^2 + 1] \cdot \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2); \quad (4)$$

泡里势  $U^{\text{Pauli}}$  为

$$U^{\text{Pauli}} = V_p \left( \frac{\hbar}{p_0 q_0} \right)^3 \exp \left\{ -\frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2}{2q_0^2} - \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^2}{2p_0^2} \right\} \delta_{p_i p_j}, \quad (5)$$

其中  $\delta_{p_i p_j} = \begin{cases} +1 & \text{中子-中子或质子-质子} \\ 0 & \text{中子-质子} \end{cases}$ ; (这里要特别解释,  $U^{\text{Pauli}}$  反映核子-核子

碰撞在平均场水平的 Pauli 阻塞效应, 根据我们的工作<sup>[9]</sup>, 包括 Pauli 势的平均场较好地描述重离子碰撞过程中碎片形成的结构效应.) 对称势  $U^{\text{sym}}$  为

$$U^{\text{sym}} = C \frac{\rho_n(r) - \rho_p(r)}{\rho_0} \tau_3, \quad (6)$$

其中  $\tau_3 = \begin{cases} +1 & \text{中子} \\ -1 & \text{质子} \end{cases}$ , 对称势的强度分别取  $C = 0 \text{ MeV}$  和  $C = 32 \text{ MeV}$ . 介质中核子-核子碰撞截面为<sup>[10]</sup>

$$\sigma^{\text{med}} = \sigma^{\text{free}} \left( 1 + \lambda \frac{\rho}{\rho_0} \right), \quad (7)$$

这里  $\sigma^{\text{free}}$  是实验上自由核子-核子碰撞截面,  $\lambda = -0.2$ .

由 Skyrme-Hartree-Fock 模型在抽取原子核初态性质中确定各势参数如表 1 所示.

表 1 各种势参数

$C$ /MeV	$\alpha$ /MeV	$\beta$ /MeV	$\gamma$	$t_3$ /MeV	$T_4$ /MeV	$T_5$ /MeV $^{-2}$	$V_p$ /MeV	$\rho_0$ /MeV $\cdot c^{-1}$	$q_0$ /fm
32	-390.1	320.3	1.6667	7.5	1.57	$5 \times 10^{-4}$	30	400	5.64
0	-382	320.3	1.6667	7.5	1.57	$5 \times 10^{-4}$	30	400	5.64

### 3 计算结果和讨论

李保安等<sup>[1,7]</sup>对重离子碰撞中前平衡核子发射的同位旋相关性的研究表明,在费米能附近区域,前平衡发射中子-质子比对于同位旋对称核物质压缩系数  $K$  和介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面  $\sigma^{iso}$  不灵敏. 尽管前平衡发射中子数和质子数随  $K$  和  $\sigma^{iso}$  的改变而改变,但由于  $K$  和  $\sigma^{iso}$  对中子和质子的作用和效果相同,所以中子数与质子数之比  $N_n/N_p$  并无明显改变. 但  $N_n/N_p$  却灵敏地依赖于对称势的强度和形式,这是由于对称势使中子比质子更容易脱离体系束缚或者自由中子获得比质子更大的能量,因此丰中子系统的前平衡发射中子与质子之比的动能谱随对称势的增强而增加. 故可通过理论与实验的比较来提取有关对称势的知识.

重离子碰撞动力学和反应产物的同位旋效应灵敏地依赖于反应道入射条件,如碰撞系统的中子-质子比、入射能量、碰撞参数和系统质量. 李保安等认为要研究前平衡发射  $N_n/N_p$  对于对称势的依赖性,一定要选择核子-核子碰撞动力学效应不重要的低能区,只要入射能量大到能使核物质达到一定的压缩即可. 他们对  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  在  $E = 100\text{MeV/u}$  的计算表明,在各种碰撞参数的情况下对称势强度和函数的变化(对称势强度  $C = 0, 33\text{MeV}$  和  $33\rho/\rho_0$ )对  $N_n/N_p$  的影响几乎相同,故他们认为要研究前平衡发射核子同位旋效应对入射能量的依赖性,入射能量不应大于  $100\text{MeV/u}$ .

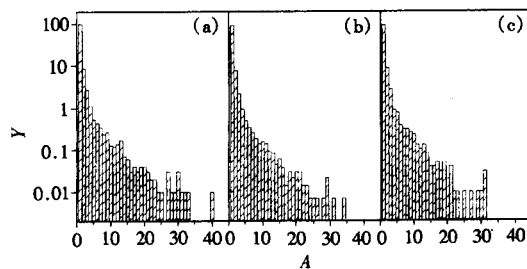


图 1 3种碰撞系统(a)  $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ ; (b)  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ ; (c)  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ , 在  $E = 120\text{MeV/u}$  和  $b = 1.0\text{fm}$  的反应产物质量分布

我们利用同位旋相关的 IQMD 模型对两种丰中子碰撞系统  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  ( $N/Z = 1.53$ ),  $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$  ( $N/Z = 1.67$ ) 和一种缺中子系统  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$  ( $N/Z = 1.11$ ) 在较宽入射能范围内  $E = 35-150\text{MeV/u}$  计算了前平衡发射核子同位旋依赖性,其中包括核子-核子碰撞动力学和碎裂机制起主导作用的能区. 图 1 给出了以上 3 种碰撞系统在  $E = 120\text{MeV/u}$  和  $b = 1.0\text{fm}$  时的反应产物质量分布  $Y$ . 这些主要由轻粒子和中等质量碎片构成的质量分布表

明  $E = 120\text{MeV/u}$  处主要为碎裂机制.

图 2 给出了 3 个碰撞系统  $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$  (上),  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  (中),  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$  (下) 对于每个碰撞系统从左至右能量为  $E = 45\text{MeV/u}$ ,  $E = 120\text{MeV/u}$ ,  $E = 150\text{MeV/u}$  和  $b = 1.0\text{fm}$  时的前平衡发射  $N_n/N_p$  的 3 种情况:

- (1)  $U^{\text{sym}}(C=32\text{MeV}) + \sigma^{\text{iso}}$  (即对称势 + 同位旋相关的核子碰撞截面), 实线;  
 (2)  $U^{\text{sym}}(C=32\text{MeV}) + \sigma^{\text{noiso}}$  (即对称势 + 同位旋无关的核子碰撞截面  $\sigma_{\text{nn}} = \sigma_{\text{pp}} = \sigma_{\text{np}}$ ), 虚线;  
 (3)  $U^{\text{sym}}(C=0\text{MeV}) + \sigma^{\text{iso}}$  (即无对称势 + 同位旋相关的核子碰撞截面), 点线.

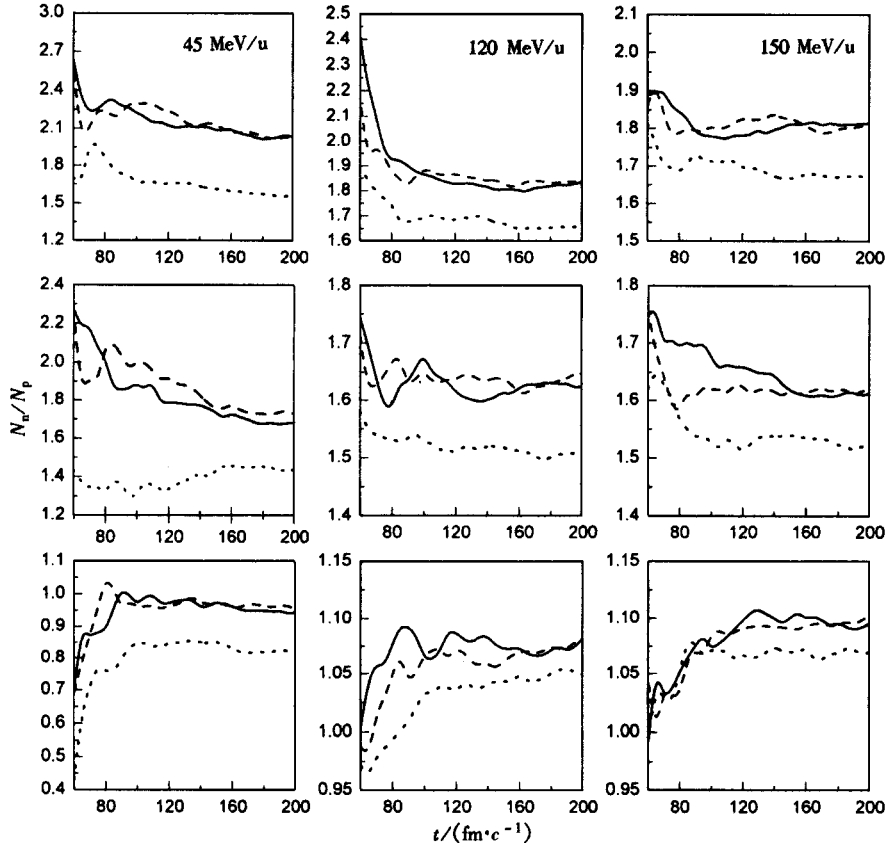


图2 碰撞系统 $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ (上),  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ (中),  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ (下)前平衡发射  $N_n/N_p$  的时间演化过程

可以看出,对于所有的人射能量,包括低能区和核子-核子碰撞动力学效应起主要作用的较高能区,  $N_n/N_p$  均都灵敏地依赖于对称势;而核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性对  $N_n/N_p$  的影响不明显. 这表明核子-核子碰撞截面在较高能区仍然对中子和质子的激发几率几乎相同. 尽管核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性对于重离子碰撞的耗散和碎裂过程的影响很明显,但对发射中子和质子的几率几乎相同. 为了表明同位旋相关的核子-核子碰撞截面对较高能区重离子碰撞的影响,图3(a)给出了 $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$  ( $E = 120\text{MeV/u}$  和  $b = 1.0\text{fm}$ )与图2相同的3种情况下 ( $U^{\text{sym}}(C = 32\text{MeV}) + \sigma^{\text{iso}}$ ,  $U^{\text{sym}}(C = 32\text{MeV}) + \sigma^{\text{noiso}}$ ,  $U^{\text{sym}}(C = 0\text{MeV}) + \sigma^{\text{iso}}$ )发射中等质量碎片多重性  $N_{\text{mf}}$  的时间演化过程. 图3(b)是相同情况下核子动量分布四极矩  $Q_{zz}$  的时间演化过程. 可以明显看出,核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性对  $N_{\text{mf}}$  和  $Q_{zz}$  的重要影响.

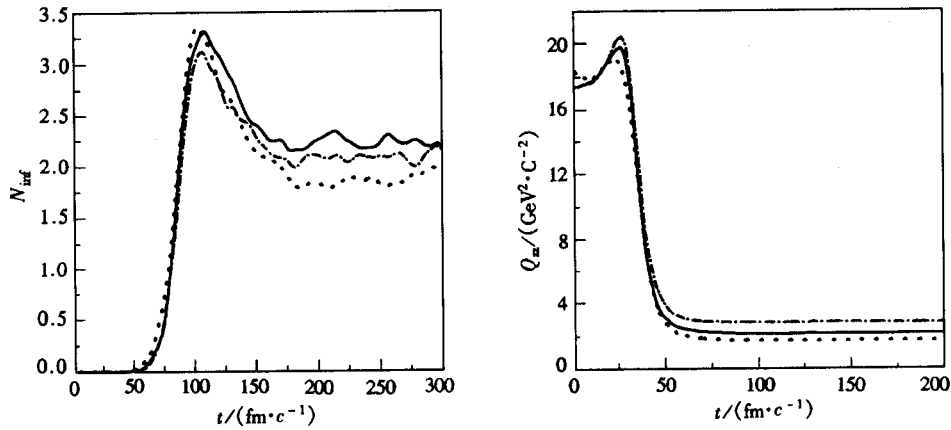


图 3 (a)中等质量碎片多重性  $N_{inf}$ 和(b)核子动量分布四极矩  $Q_{xx}$ 的时间演化过程(图中曲线说明同图 2)

从图 2 可以看到对称势对 neutron 为排斥,对 proton 为吸引. 强的对称势使 neutron 脱离束缚或者使自由 neutron 获得比 proton 更多的能量,所以丰中子系统  $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$  和  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  的前平衡发射  $N_n/N_p$  比碰撞系统初始中子-质子比  $(N_t + N_p)/(Z_t + Z_p)$  大,如图 4(a)是 3 个碰撞系统在  $E = 100\text{MeV/u}$ ,  $b = 1.0\text{fm}$ ,  $U^{sym}(C = 32\text{MeV}) + \sigma^{iso}$  情况下  $N_n/N_p$  的时间演化过程,丰中子系统  $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ ,  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  的  $N_n/N_p$  均比系统的初始值 1.53 和 1.67 大,而且  $N_n/N_p$  随着碰撞系统中子-质子比的增加而增加. 图 4(b)和(c)分别是与(a)相同情况下前平衡发射中子数  $N_n$  和质子数  $N_p$  的时间演化过程,可以看出发射中子和质子主要发生在反应前期,特别是  $N_n/N_p$  很快达到平衡. 这些结果与李保安等<sup>[1,7]</sup>和 Hilscher<sup>[11,12]</sup>在低能区的研究中所得到的结论一致.

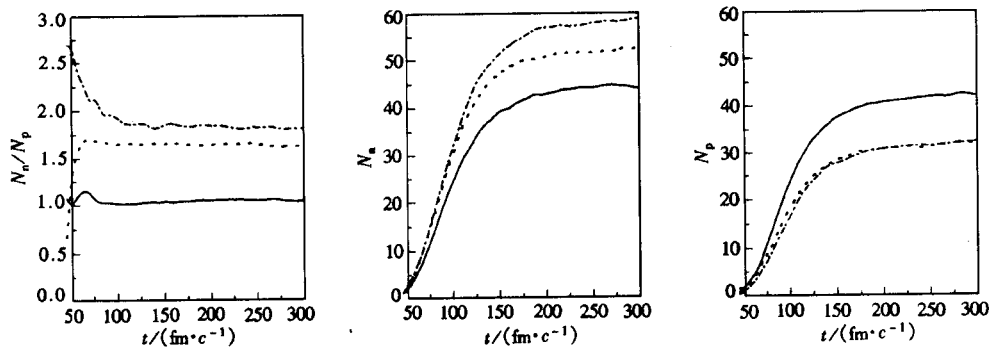


图 4 3 个系统前平衡发射  $N_n/N_p$ (a),中子数  $N_n$ (b)和质子数  $N_p$ (c)的时间演化过程  
 $-^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ ,  $\cdots^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ ,  $\text{---}^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ .

但对于缺中子碰撞系统  $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ ,我们研究发现结果与丰中子系统完全不同. 因为系统的中子数与质子数相差不多,一方面对称势对 neutron 产生排斥作用,使其中一些 neutron 脱离束缚或使自由 neutron 获得更多能量而发射;另一方面对称能对于 proton 产生吸引作用,降低其发射几率. 然而库仑作用对 proton 之间产生排斥,使 proton 获得能量而发射,故由于对称势

与库仑作用相互交织与竞争的结果,使得前平衡发射的  $N_n/N_p$  小于系统初始中子-质子比 1.11.

图 5(a)给出  $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$  系统在  $E = 150\text{MeV/u}$ ,  $b = 1.0\text{fm}$  和  $U^{\text{sym}}(C = 32\text{MeV}) + \sigma^{\text{iso}}$  时以下 3 种情况下:(1) 包括 Pauli 势和动量相关势(实线), (2) 只包括 Pauli 势(点线), (3) 不包括 Pauli 势和动量相关势(虚线), 前平衡发射  $N_n/N_p$  的时间演化过程. 这两种势对于重离子耗散和碎片形成过程具有明显的影响<sup>[13]</sup>, 但对于  $N_n/N_p$  没有明显的影响.

图 5(b), (c) 和 (d) 分别是  $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ ,  $E = 150\text{MeV/u}$  和  $C = 32\text{MeV} + \sigma^{\text{iso}}$  情况下, 碰撞参数  $b = 1.0\text{fm}$  和  $b = 5.0\text{fm}$  时的  $N_n$ ,  $N_p$  和  $N_n/N_p$  的时间演化过程, 尽管前平衡发射  $N_n$  和  $N_p$  随  $b$  的增加而减少, 但比值  $N_n/N_p$  随  $b$  的变化不大.

以上说明 Pauli 势、动量相关势和碰撞参数对中子和质子的激发几率几乎相同.

## 4 结束语

利用同位旋相关量子分子动力学计算了丰中子碰撞系统和缺中子碰撞系统在较宽能区内(45—150MeV/u)重离子碰撞前平衡发射  $N_n/N_p$ . 计算结果表明, 在整个考虑的能区内, 无论低能或者高能,  $N_n/N_p$  灵敏地依赖于对称势的强度, 但核子-核子碰撞截面的同位旋相关性激发前平衡发射中子和质子的几率几乎相同, 故对它们的比值  $N_n/N_p$  没有多大影响. 对于丰中子碰撞系统, 前平衡发射的  $N_n/N_p$  比碰撞系统初始中子-质子比  $(N_t + N_p)/(Z_t + Z_p)$  大, 而且  $N_n/N_p$  随着  $(N_t + N_p)/(Z_t + Z_p)$  的增加而增加. 但对于缺中子系统,  $N_n/N_p$  小于碰撞系统初始的  $(N_t + N_p)/(Z_t + Z_p)$ . 前平衡发射  $N_n/N_p$  对于 Pauli 势、动量相关势及碰撞参数都不灵敏. 因此, 可以在较宽的能量范围内, 通过系统的比较理论研究和实验数据较准确地来提取关于对称势强度和形式的知识.

## 参考文献 (References)

- 1 LI Bao-An, Ko Che-Ming, Bauer W. Inter. Jour. Mod. Phys., 1998, E7(2):147

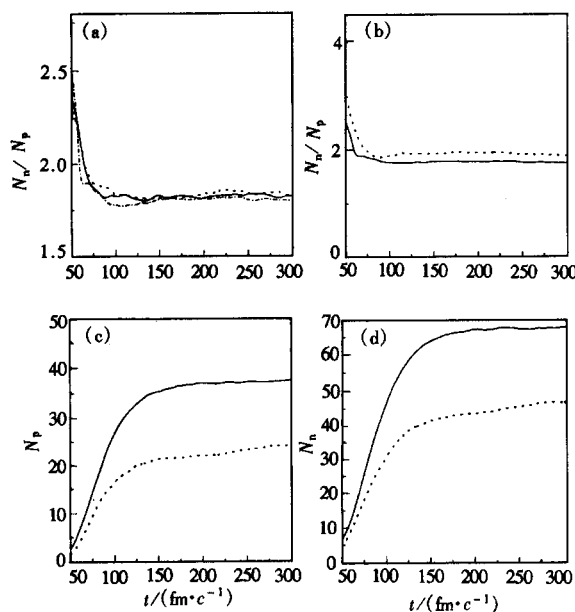


图 5 (a)前平衡发射  $N_n/N_p$  在 3 种不同势能情况下的时间演化过程, 和发射  $N_n/N_p$  (b)、质子数  $N_p$  (c) 以及中子数  $N_n$  (d) 在  $U^{\text{sym}}(C = 32\text{MeV}) + \sigma^{\text{iso}}$ ,  $b = 1.0\text{fm}$  (实线) 和  $b = 5.0\text{fm}$  (虚线) 情况下的时间演化过程

- 2 Hussein M S, Rego R A, Bertulani C A. Phys. Rep., 1991, **201**:279
- 3 LI Bao-An, REN Zhong-Zhou, Ko Che-Ming et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **76**:4492
- 4 Pak R, Beneson W, Bjark O et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:1022
- 5 Pak R, LI Bao-An, Beneson W et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:1026
- 6 LIU Jian-Ye, CHEN Bo, ZHAO Qiang et al. Nuclear Physics Review, 1999, **16**(3):165(in Chinese)  
(刘建业,陈波,赵强等. 原子核物理评论,1999,**16**(3):165)
- 7 LI Bao-Aa, Ko Che-Ming, REN Zhong-Zhou. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:1644
- 8 CHEN Lie-Wen, GE Ling-Xiao, ZHANG Xiao-Dong et al. J. Phys., 1997, **G123**:211
- 9 LIU Hang, LIU Jian-Ye. Z. Phys., 1996, **A345**:311
- 10 Rlakov D R, Wilke G, Bauer W. Phys. Rev., 1993, **C48**:1982
- 11 Hilscher D, Rossner H, Gamp A et al. Phys. Rev., 1987, **C36**:208
- 12 Polster D, Hilscher H, Rossner H. Phys. Rev., 1995, **C51**:1167
- 13 LIU Jian-Ye, ZHANG Shao-Guang. Z. Phys., 1994, **A348**:31

### Isospin Dependence of Preequilibrium Nucleon Emission in Intermediate Energy Heavy Ion Collision \*

ZHAO Qiang<sup>2</sup> GUO Wen-Jun<sup>2</sup> LIU Jian-Ye<sup>1,2</sup> ZUO Wei<sup>1,2</sup> WANG Shun-Jin<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 Science, Lanzhou 730000, China)

3 (Institute of Modern Physics, South West Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract** The isospin dependence of preequilibrium nucleon emission for the neutron-deficient colliding system and neutron-rich system has been studied in the wide beam energy region. The calculation results show that the ratio of preequilibrium emission neutrons to protons is sensitive to the symmetrical potential and insensitive to the isospin dependence of in-medium nucleon-nucleon collision cross section from low beam energy region to high energy region, in which nucleon-nucleon collision dynamics is dominant, namely the isospin dependence of in-medium nucleon-nucleon cross section excites neutron and proton to be emitted with about the same probability in wide beam energy region. At the same time, the neutrons and protons are excited to be emitted with the same probability for Pauli potential, momentum dependence interaction and impact parameter, even though their effects on preequilibrium neutron number and proton number are obvious. The ratio of preequilibrium neutrons to protons for neutron-rich colliding system is larger than the initial value of neutron-proton ratio of colliding system, but that for neutron-deficient system is less than the initial value. In this case, one can compare the theoretical results with the experimental data systematically to extract information on the symmetrical potential.

**Key words** preequilibrium nucleon emission, heavy-ion collision, symmetrical potential

---

Received 22 March 2000

\* Supported by "100 Persons Project" of CAS, NSFC (19775057, 19847002, 19775020) and Science Foundation of The Chinese Academy of Sciences