

文章编号: 1007-4627(2001)01-0021-09

# 重离子碰撞中的同位旋效应\*

刘建业<sup>1,2</sup>, 赵 强<sup>2</sup>, 左 维<sup>1,2</sup>, 杨艳芳<sup>2</sup>, 郭文军<sup>2</sup>

(1 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 根据近年来利用同位旋相关输运理论在中能重离子碰撞同位旋效应研究方面的成果, 并结合国际上在该问题上的进展, 综合介绍和分析了中能重离子碰撞中的多重碎裂、原子核阻止和前平衡发射中子-质子比的同位旋效应及其随入射道条件: 入射能量、碰撞参数、碰撞系统的质量, 特别是随中子-质子比的演化过程. 讨论了利用以上物理观测量在提取同位旋非对称核物质状态方程知识方面的可能性, 并对其发展进行了展望.

**关键词:** 多重碎裂; 原子核阻止; 前平衡核子发射; 核物质状态方程

**中图分类号:** O571.4      **文献标识码:** A

## 1 引言

由稳定核放射性束引起的中能重离子碰撞, 可以产生各种不同中子-质子比的热激发和压缩核态, 这类核态的性质和反应产物灵敏地依赖于碰撞系统的中子-质子比(同位旋)、核物质状态方程和介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性. 从中可以找寻中能重离子碰撞过程中主要对核物质状态方程灵敏或者主要对介质中核子-核子碰撞截面灵敏的物理观测量, 从而为提取和建立大跨度同位旋自由度范围内的同位旋不对称核物质状态方程提供了良好的机遇和条件. 这些知识无论对了解原子核的性质或者研究宇宙和天体演化过程都是非常重要的. 故近年来从实验和理论两个方面的比较中寻找中能重离子碰撞中主要对称势或者主要对介质中核子-核子碰撞截面灵敏的物理观测量来提取关于同位旋相关的平均场(对称势)和介质中核子-核子碰撞截面的知识<sup>[1-5]</sup>, 如 R. Pak 和 Li Bao-An 等人建议通过研究集体流和平衡能量及其椭圆流对同位旋的依赖性来提取核子-核子碰撞截面的知识<sup>[6-9]</sup>. Li Bao-An 等<sup>[1]</sup>人通过同位旋相关 BUU 方程研究发现主要在低能区( $E < 100$  MeV/u)前平衡发射中子-

质子比是提取对称势的物理观测量. 但就总的研究情况来看, 这类研究刚开始不久, 特别是介质中核子-核子碰撞截面的知识知之甚少. 倾向性的看法是介质中核子-核子碰撞截面比自由核子-核子碰撞截面小, 但考虑同位旋的依赖性后, 介质中核子-核子碰撞截面对于核物质密度的函数依赖形式和强度需要深入仔细研究. 近来, 李祝霞等对于介质中同位旋相关的两体弹性散射和介质中两体碰撞截面进行了研究<sup>[10,11]</sup>. 我们近年来利用同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)在研究和建立同位旋不对称核物质状态方程和提取介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性方面进行了许多工作<sup>[12-18]</sup>. 本文就最近研究进展结合国际动态分别就建立同位旋非对称核物质状态方程和提取介质中核子-核子碰撞截面知识方面进行一些介绍和评述.

## 2 理论模型和有关参数

同位旋依赖的量子分子动力学(IQMD)是在量子分子动力学(QMD)<sup>[19]</sup>的基础上考虑了对称势、核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性和核子-核子碰撞 Pauli 阻塞的同位旋效应. 我们在计算中除考虑以往的 Skyrme 势、Yukawa 势和库仑势外, 还考虑

收稿日期: 2000-09-20

\* 基金项目: 中国科学院百人计划; 国家973项目(G2000077400); 国家自然科学基金资助项目(19775057, 19847002和19775020); 中国科学院九五重大基础性项目(KJ951-A1-410)

作者简介: 刘建业(1937—), 男(汉族), 陕西淳化人, 研究员, 博士生导师, 从事核物理理论研究.

了 Pauli 势、动量相关的相互作用和3种不同形式的对称势<sup>[1]</sup>. 密度相关的 Skyrme 势为

$$U^{\text{Sky}} = \alpha \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^2, \quad (1)$$

其中,  $\rho_0$ 和  $\rho$  分别为饱和密度和核密度. 表示有限核表面效应的 Yukawa 势为

$$U_j^{\text{Yuk}} = t_3 \sum_{i \neq j} \frac{e^{L/m^2}}{r_{ij}/(2m)} \cdot \left\{ e^{-r_{ij}/m} \left[ 1 - \Phi \left| \frac{\sqrt{L}}{m} - \frac{r_{ij}}{2\sqrt{L}} \right| \right] - e^{r_{ij}/m} \left[ 1 - \Phi \left| \frac{\sqrt{L}}{m} + \frac{r_{ij}}{2\sqrt{L}} \right| \right] \right\}, \quad (2)$$

其中  $\Phi$  是误差函数. 动量相关的相互作用(MDI)为

$$U^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^2 + 1] \frac{\rho(r)}{\rho_0}, \quad (3)$$

泡里势为

$$U^{\text{Pauli}} = V_p \left( \frac{\hbar}{p_0 q_0} \right)^3 \exp \left\{ - \frac{(r_i - r_j)^2}{2q_0^2} - \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^2}{2p_0^2} \right\} \delta_{p_i p_j}, \quad (4)$$

其中  $\delta_{p_i p_j} = \begin{cases} +1, & \text{中子-中子或质子-质子} \\ 0, & \text{中子-质子} \end{cases}$ .

3种对称势分别为

$$U_1^{\text{sym}} = cF_1(u)\delta\tau_3, \quad (5)$$

$$U_2^{\text{sym}} = cF_2(u)\delta\tau_3 + \frac{1}{2}cF_2(u)\delta^2, \quad (6)$$

$$U_3^{\text{sym}} = cF_3(u)\delta\tau_3 - \frac{1}{4}cF_3(u)\delta^2, \quad (7)$$

其中  $\tau_3$  是核子同位旋第3分量(+1中子, -1质子),  $F_1(u)=u$ ,  $F_2(u)=u^2$ ,  $F_3(u)=u^{1/2}$ ,  $u=\rho/\rho_0$ . 中子过剩  $\delta \equiv (\rho_n - \rho_p)/(\rho_n + \rho_p) = (\rho_n - \rho_p)/\rho$ .  $\rho_n$  和  $\rho_p$  分别是中子密度和质子密度. 3种对称势的强度取  $c=0$  或 32 MeV/u. 利用 Skyrme-Hatree-Fock 理论计算得到原子核密度分布, 再利用 IQMD 的初始化程序抽取弹核和靶核的基态性质, 包括用结合能和均方半径确定相互作用势的全部参数.

### 3 原子核阻止和中等质量碎片多重性的同位旋效应

介质中核子-核子碰撞截面为<sup>[20]</sup>

$$\sigma^{\text{med}} = \sigma^{\text{free}} \left( 1 + \alpha \frac{\rho}{\rho_0} \right), \quad (8)$$

这里  $\sigma^{\text{free}}$  是实验上得到的自由核子-核子碰撞截面,  $\alpha = -0.2$ . 根据  $\sigma^{\text{free}}$  的实验值<sup>[21]</sup>, 在大约 300 MeV 以下中子-质子碰撞截面大约为中子-中子或质子-质子碰撞截面的3倍. 如果考虑核子-核子碰撞截面的这种差别, 即为核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性, 否则3种类型的核子-核子碰撞截面相等, 则不考虑核子-核子碰撞截面的同位旋相关性. 这里着重介绍和讨论通过中能重离子碰撞提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的问题, 至于同位旋无关的介质中核子-核子碰撞截面已有大量的理论计算, 在实验上主要是通过集体流和平衡能量的理论与实验比较来提取. 同位旋相关的核子-核子碰撞截面同样可以利用同位旋依赖的输运理论与实验上观测的集体流和平衡能量的比较来提取. Li Bao-An 等人最近提出通过椭圆流和平衡能量可以同时提取介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面和 Skyrme 势的不可压缩系数, 但不能同时提取对称势的知识.

#### 3.1 原子核阻止是提取核子-核子碰撞截面的灵敏观测测量

我们最近计算发现, 原子核阻止是一个新的提取中能重离子碰撞所形成的介质中核子-核子碰撞截面的灵敏探针. 原子核阻止可用两种核子动量分布的各向异性来表示:

(1) 核子横向动量与纵向的比

$$R = \frac{2}{\pi} \frac{|p_{\perp}|}{|p_{\parallel}|} = \frac{2}{\pi} \frac{\sum_i^A [p_x^2(i) + p_y^2(i)]^{1/2}}{\sum_i^A |p_z(i)|}, \quad (9)$$

(2) 核子动量分布四极矩

$$Q_{zz} = \sum_i^A [2p_x(i)^2 - p_y(i)^2 - p_z(i)^2], \quad (10)$$

其中  $p_x(i)$ ,  $p_y(i)$  和  $p_z(i)$  分别是第  $i$  个核子的动量分量,  $A=A_t+A_p$  是弹核和靶核质量之和.

原子核阻止是描述原子核反应耗散过程和决定核反应终态产物的主要物理量<sup>[22-26]</sup>. 曾有一些作者(如 S. A. Bass 等人)把同位旋自由度平衡过程当作研究原子核阻止性质的好方法<sup>[1-27-32]</sup>. 但我们利用 IQMD 在很宽能区范围(15-150 MeV/u)研究了多种不同的中子-质子比(1.0-1.67)的重离子碰撞系统(碰撞系统的质量从 40 到 248)的原子核阻止, 计算结果表明在费密能量以上能区直至 150 MeV/u, 所有碰撞系统近心碰撞的原子核阻止强烈

地依赖于介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面, 而非弱地依赖于原子核的对称势. 作为例子, 图 1 给出了两个碰撞系统<sup>112</sup>Sn+<sup>112</sup>Sn 和<sup>124</sup>Sn+<sup>124</sup>Sn, 在入射能  $E=15, 25, 35, 45, 72, 100$  和 150 MeV/u 以及碰撞参数  $b=0.0$  fm 的 3 种条件下原子核阻止  $R$  的时间演化过程. 而 3 种条件为: (1) 对称势  $U_1^{sym}$  和介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面  $\sigma'$  (实线); (2) 对称势  $U_1^{sym}$  和介质中同位旋无关的核子-核子碰撞截面  $\sigma''$  (短虚线); (3) 介质中同位旋无关的核子-核子碰撞截面  $\sigma''$  和对称势为零, 表示为  $0+\sigma'$  (点线).

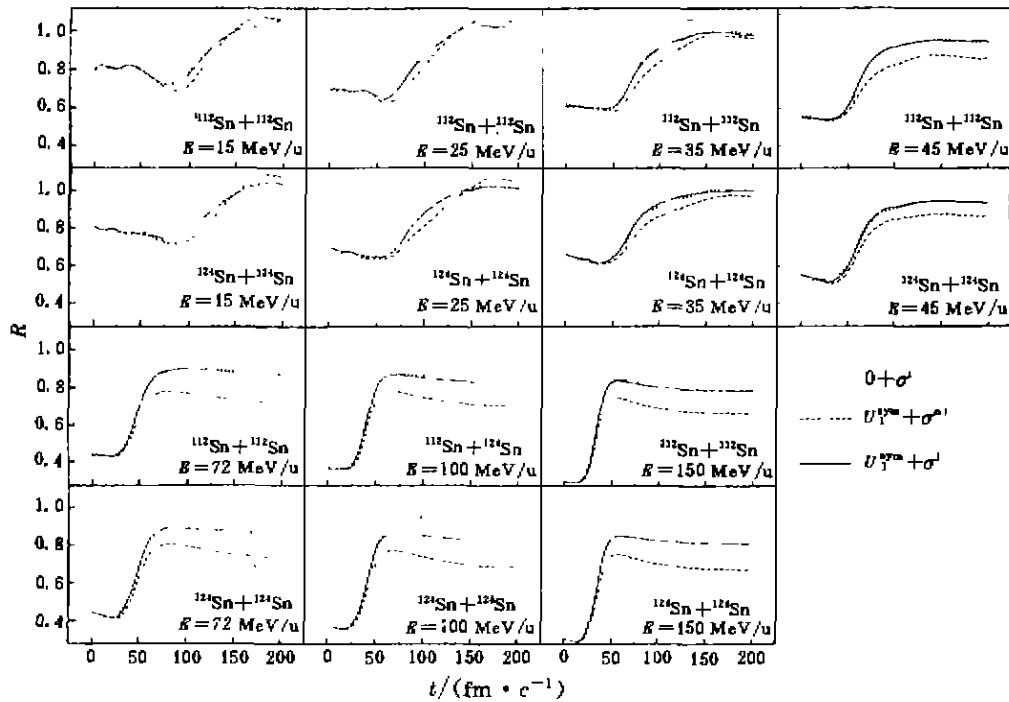


图 1 <sup>112</sup>Sn+<sup>112</sup>Sn 和<sup>124</sup>Sn+<sup>124</sup>Sn 两个碰撞系统对心碰撞中原子核阻止  $R$  在 3 种情况和 7 种能量处的时间演化过程

从图 1 可以明显看出, 在能区  $E=45-150$  MeV/u 内, 实线( $U_1^{sym}+\sigma'$ )和点线( $0+\sigma'$ )始终相距很近, 而短虚线( $U_1^{sym}+\sigma''$ )则远离实线和点线. 这就清楚地表明原子核阻止  $R$  灵敏地依赖于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性, 而非弱地依赖于对称势. 但在费米能以下能区的  $E=15, 25$  和  $35$  MeV/u, 3 条曲线相互交织区分不清, 这就表明在大约费米能以下能区原子核阻止同时依赖于平均场和核子-核子碰撞过程.

同时我们系统地研究了在该能区原子核阻止  $R$  和  $Q_{ex}$  的人射道依赖性. 图 2 给出了碰撞系统<sup>112</sup>Sn+

<sup>112</sup>Sn,  $E=100$  MeV/u, 原子核阻止  $R$  (图 2 右) 和  $Q_{ex}$  (图 2 左) 对于碰撞参数 ( $b=0, 1, 2, 3$ ) 平均值随碰撞系统质量 ( $A_t+A_p$ ) 的演化关系. 图中 4 条实心符号曲线表示 3 种对称势和没有对称势以及同位旋相关核子-核子碰撞截面  $\sigma'$ , 而 3 条空心符号曲线表示 3 种对称势和同位旋无关核子-核子碰撞截面  $\sigma''$ .

从图 2 非常明显地看出, 7 条曲线分为两组而且相距较远, 表明  $R$  和  $Q_{ex}$  非常灵敏地依赖介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性, 即这种差别主要是由  $\sigma'$  和  $\sigma''$  的不同造成的. 每一组曲线中核子碰

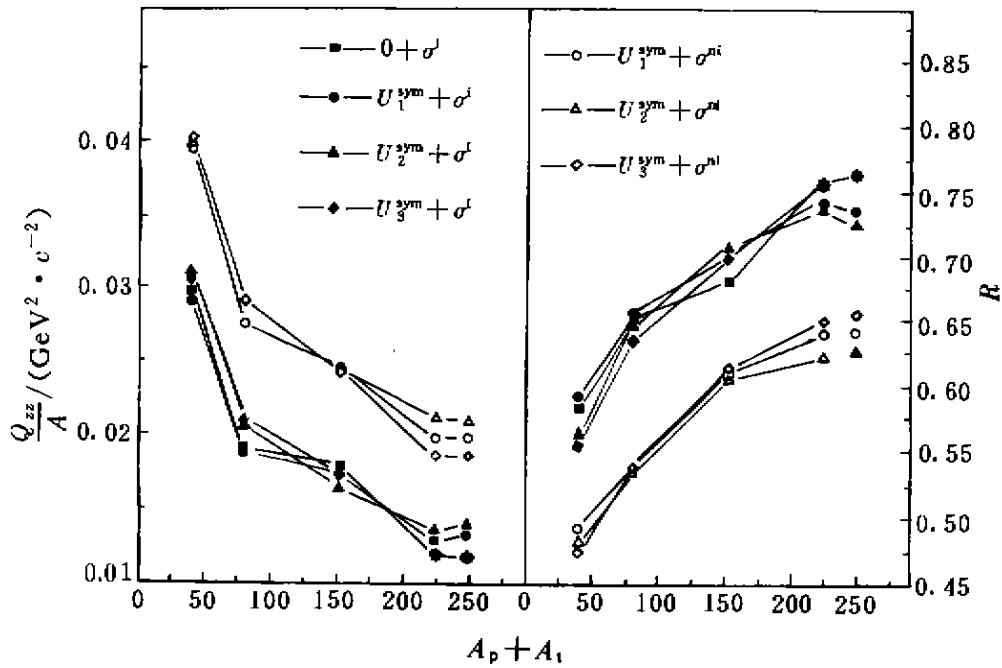


图2  $E=100 \text{ MeV/u}$  时原子核阻止  $R$ (右图)和  $Q_{zz}$ (左图)的碰撞参数平均值在7种情况下(3种对称势参看图中解释)随碰撞系统质量的演化过程

撞截面相同, 但具有不同形式的对称势(包括对称势为零). 曲线相互距离很近就表明  $R$  和  $Q_{zz}$  非常弱地依赖对称势的形式.

图2中只对小的碰撞参数求平均, 因为以上特性仅在近心碰撞条件下保持. 为此, 图3给出了碰撞系统  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  ( $E=100 \text{ MeV/u}$ , 3种条件: (1)

$U_1^{\text{sym}} + \sigma^l$ ; (2)  $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{ni}}$ ; (3)  $0 + \sigma^l$ ) 的原子核阻止  $R$  的时间演化过程. 可明显看出, 在小碰撞参数情况下, 保持以上特征, 随着  $b$  的增加, 这种特征逐渐消失. 总之, 从以上3幅图可以看出, 原子核阻止随着入射能量和碰撞参数的减小以及系统质量  $A_1 + A_2$  的增加而增加. 这里  $R$  的增加和  $Q_{zz}$  的减小

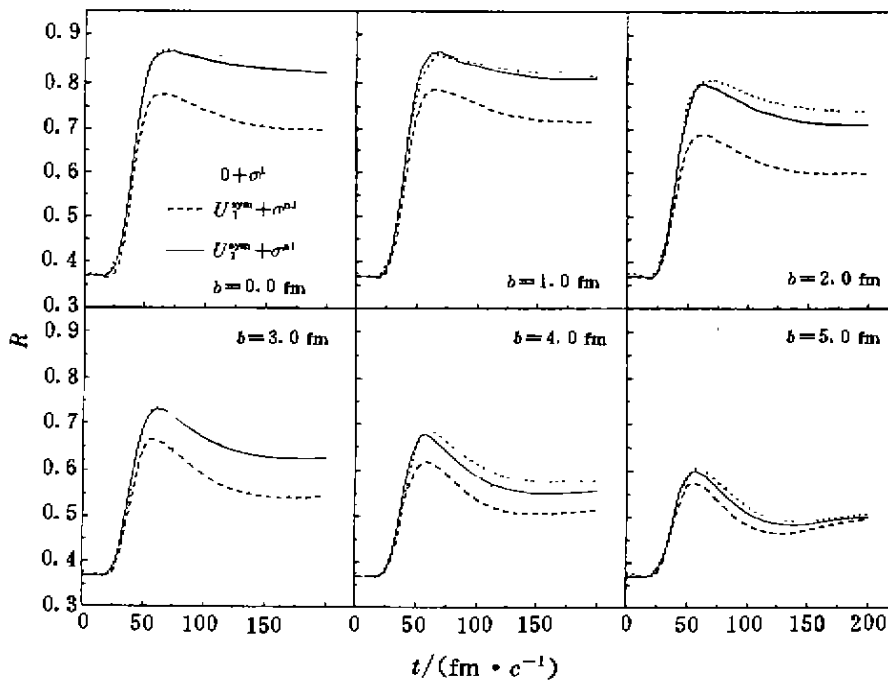


图3  $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$  在  $E=150 \text{ MeV/u}$  时与图1相同的3种情况下, 原子核阻止  $R$  对于不同碰撞参数的时间演化过程

表明原子核阻止的增加, 即原子核通过核子之间激烈的碰撞, 将纵向运动耗散转移为横向运动的几率随着  $E$  的增加和  $b$  的减小以及  $A_1 + A_2$  的增加而增加. 最后当核子动量分布接近各向同性时, 即  $R \approx 1$  和  $Q_{zz} \approx 0$  时, 即为完全阻止, 否则为部分阻止或透明.

同时计算结果表明, 原子核阻止对于质量相近的碰撞系统中子-质子比的依赖性不灵敏. 这表明核子-核子碰撞对于中子和质子而言, 将纵向动量转为横向动量的几率相差不大.

综合以上所述, 不管原子核阻止是如何依赖于入射能量、碰撞参数、碰撞系统的质量和核子-质子比, 但在费米能以上能区直至 150 MeV/u, 强烈地依赖于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性, 而非常弱地依赖于对称势, 这一重要特征始终没有改变, 对于我们计算的 11 个碰撞系统没有一个例外 (其中包括轻系统、重系统、丰中子与缺中子系统和质量对称系统与质量不对称系统).

尽管在此之前, Bass 等<sup>[27]</sup>的计算表明原子核

阻止强烈地依赖于核子-核子碰撞截面, 但他们没有指出在同一碰撞中如何依赖对称势. Bauer 等<sup>[26]</sup>的计算指出, 原子核阻止同时依赖于核子-核子碰撞截面和平均场, 但他们的研究中没有考虑对称势. 所以, 我们首次发现了原子核阻止这一特征, 并建议作为在费米能以上能区提取介质中核子-核子碰撞截面同位旋相关性的灵敏物理观测量.

### 3.2 中等质量碎片多重性 $N_{\text{mid}}$ 是提取核子-核子碰撞截面的观测量

多重碎裂过程中会产生大量中等质量碎片和大量带电粒子. 可以设想, 能否找到主要对核子-核子碰撞截面和对称势二者之一灵敏而对另一个不灵敏的物理观测量. 中能重离子碰撞中, 中等质量碎片的来源比较复杂, 我们利用 IQMD 并通过大量计算和挑选, 发现在某些特定的入射能区, 中等质量碎片多重性主要对核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性灵敏, 而对于对称势并不灵敏. 作为例子, 图 4 给出了  $^{40}\text{Ar} + ^9\text{Be}$ ,  $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$  和  $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$  3 个碰

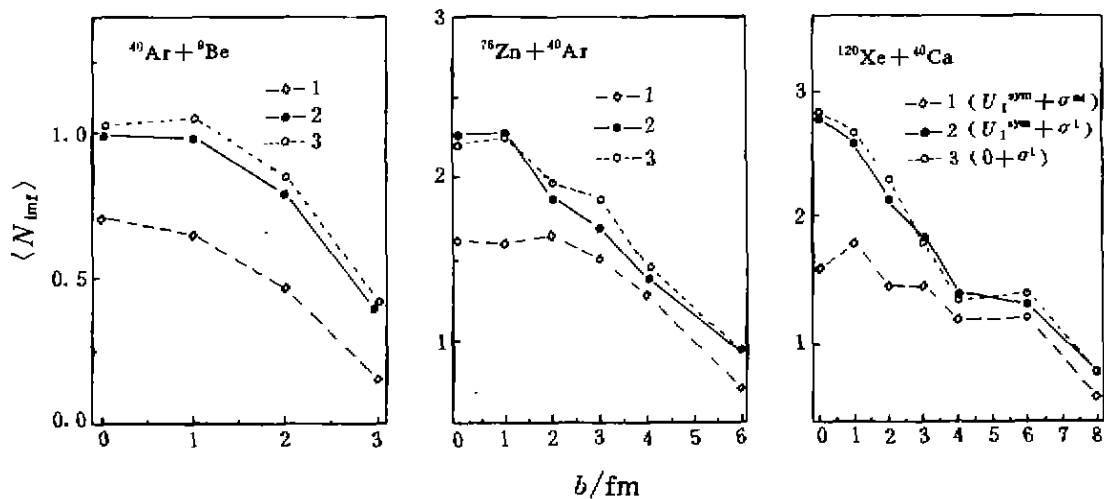


图 4  $^{40}\text{Ar} + ^9\text{Be}$ ,  $^{76}\text{Zn} + ^{40}\text{Ar}$  和  $^{120}\text{Xe} + ^{40}\text{Ca}$  3 个碰撞系统对心碰撞时的中等质量碎片多重性  $N_{\text{mid}}$  随碰撞参数的演化过程

撞系统在入射能量分别为  $E = 120, 80$  和  $100$  MeV 的对心碰撞, 在与图 1 相同的 3 种条件下,  $N_{\text{mid}}$  随碰撞参数  $b$  的演化, 即曲线 1 ( $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{m}}$ ) 远离曲线 2 ( $U_1^{\text{sym}} + \sigma^{\text{l}}$ ) 和曲线 3 ( $0 + \sigma^{\text{l}}$ ), 而曲线 2 和曲线 3 一直相距很近, 这就表明  $N_{\text{mid}}$  在被研究能区的所有碰撞参数灵敏地依赖核子-核子碰撞截面的同位旋依赖性, 而对于对称势不灵敏.

## 4 前平衡发射核子同位旋效应与对称势

同位旋非对称核物质状态方程的主要目的是提取同位旋相关平均场即对称势的知识. 至今, 关于对称势与核物质密度和同位旋的依赖函数关系及其强度的知识非常有限, 如前所说, Li Bao-An 等<sup>[1]</sup>的计算结果表明在低能区 ( $E < 100$  MeV/u) 附近,

中能重离子碰撞前平衡发射中子-质子比对于核子-核子碰撞截面很不灵敏, 主要依赖于对称势的形式和强度. 但是随着入射能量的增加情况如何变化? 特别是前平衡发射的入射道和同位旋效应都有待仔细地研究. 为此, 我们利用包含动量相关作用和泡利势的 IQMD 系统地研究了中能重离子碰撞中前

平衡发射核子的同位旋效应和入射道效应. 图5给出了3个碰撞系统 $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ (上图),  $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$ (中图)和 $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ (下图), 在入射能量  $E = 45$  MeV/u(左列), 120 MeV/u(中列)和150 MeV/u(右列)和碰撞参数  $b = 1.0$  fm 时前平衡发射中子-质子比  $N_n/N_p$  的时间演化过程.

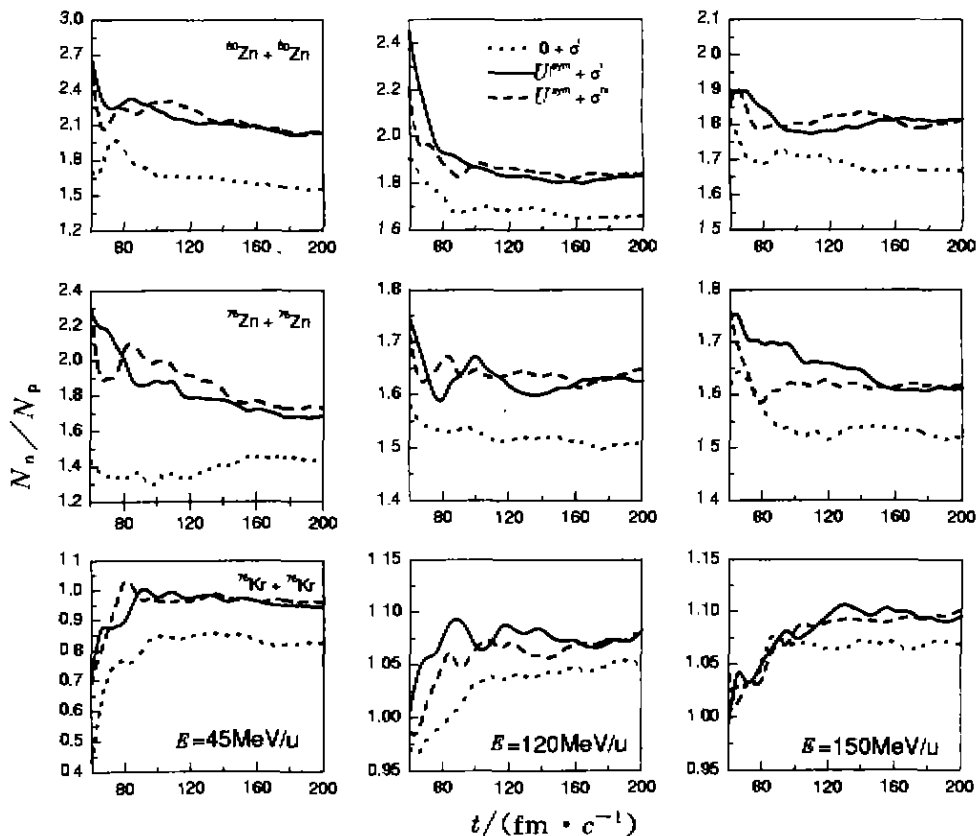


图5 3个碰撞系统前平衡发射中子-质子比  $N_n/N_p$  在与图1相同的3种情况下的时间演化过程

从图5可以明显地看出, 对于不同中子-质子比的碰撞系统, 包括缺中子系统 $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$  ( $N/Z = 1.11$ )和丰中子系统 $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  ( $N/Z = 1.53$ ),  $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$  ( $N/Z = 1.67$ )的3个能量点, 图中实线均与短虚线靠近而远离点线. 这就表明  $N_n/N_p$  灵敏地依赖对称势, 而对于核子-核子碰撞截面的依赖性并不明显, 这就把 Li Bao-An 等人在100 MeV/u以下能区发现的特征推广到150 MeV/u 能区, 从而在较宽能量范围内可以把重离子碰撞前平衡发射中子-质子比作为提取对称势知识的观测量.

我们还着重系统地研究了前平衡发射核子的同位旋和入射道的依赖性, 图6给出了3个碰撞系统在能量  $E = 120$  MeV/u 和  $b = 1.0$  fm 时前平衡发射中

子-质子比  $N_n/N_p$  (左图), 中子数  $N_n$  (中图)和质子数  $N_p$  (右图)的时间演化过程.

从左图看出, 对于丰中子系统 $^{76}\text{Zn} + ^{76}\text{Zn}$  和 $^{80}\text{Zn} + ^{80}\text{Zn}$ , 其  $N_n/N_p$  分别约为1.62和1.83, 均比两个系统的初始中子-质子比1.53和1.67大; 而对于缺中子系统 $^{76}\text{Kr} + ^{76}\text{Kr}$ ,  $N_n/N_p = 1.06$ 比它的初始值1.11小. 由于对称势对质子为排斥力而对中子为吸引力, 因为丰中子系统的中子数多, 从而对称势会使更多的中子脱离束缚或者获得比质子高的能量. 从中图可以看出, 两个丰中子系统发射中子的比率大于系统初始的中子比率, 而右图表明发射质子的比率与系统初始质子比率相当, 故导致了以上结果. 对于缺中子系统而言, 初始质子数与中

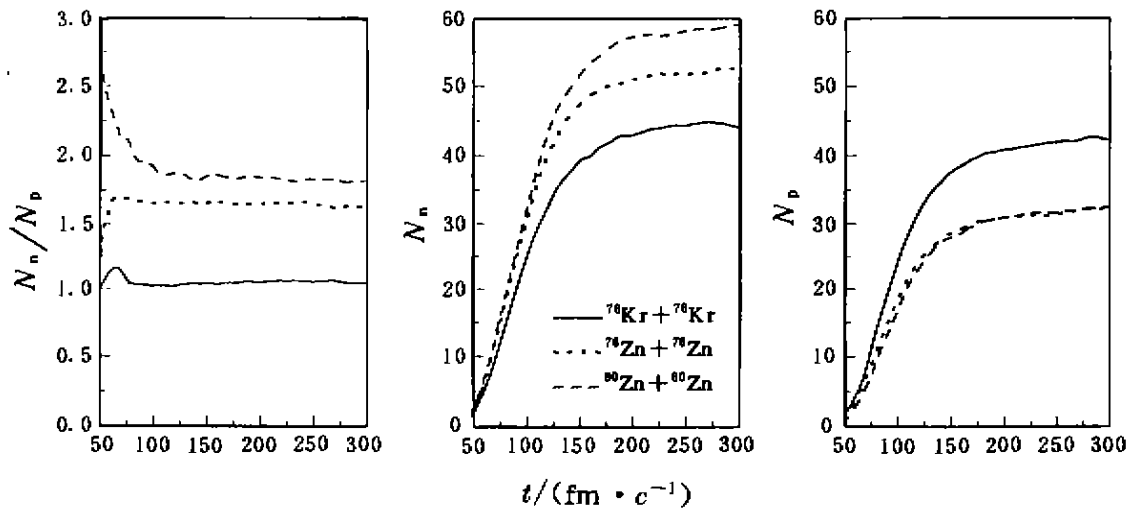


图6 与图5相同的3种碰撞系统在  $E=120$  MeV/u 和  $b=1.0$  fm 时前平衡发射中子-质子比  $N_n/N_p$ 、前平衡发射中子数  $N_n$  和质子数  $N_p$  的时间演化过程

子数相差不多,一方面对称势使更多中子发射,而另一方面库仑作用使更多质子发射,两种势竞争的结果使得发射中子数与质子数相差不多(参看中图和右图的实线),结果造成缺中子系统的  $N_n/N_p$  小于它的初始中子-质子比。总之,前平衡发射中子-质子比  $N_n/N_p$  具有明显的初始系统中子-质子比的依赖性,即同位旋效应。

## 5 讨论和展望

以上结果表明,无论原子核阻止怎样随碰撞系统的入射道条件(束流能量、碰撞参数、碰撞系统的中子-质子比和质量)而演化,在费米能量以上能区直至150 MeV/u,近心碰撞的原子核阻止始终灵敏地依赖于介质中同位旋相关的核子-核子碰撞截面的,而却非常弱地依赖于对称势的形式和强度。这表明在该能区,核子-核子碰撞动力学在将核子纵向运动耗散转移到横向运动中起了主导作用,而平均场的作用在此过程中则居次要地位。随着入射能量减小到费米能量以下能区后,原子核阻止则同时依赖于平均场和核子-核子碰撞动力学,这种过程正好与随入射能量由费米能量以上能区减小到费米能量以下能区的过程中,原子核阻止由透明或部分阻止过渡到完全阻止一致,同时碰撞系统的同位旋自由度由非平衡过渡到完全平衡(参看文献[1])。

对于重离子碰撞前平衡发射中子-质子比而言情况正好相反,即在150 MeV/u 以下能区灵敏地依赖于对称势的形式和强度,这表明对称势的作用对

于中子和质子激发几率完全不同,然而它却非常弱地依赖于介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性,这就表明核子-核子碰撞对于中子和质子有大约相同的激发几率。综上所述,原子核阻止  $R$  和  $Q_n$  是中能重离子碰撞中提取介质中核子-核子碰撞截面的,而前平衡发射中子-质子比  $N_n/N_p$  是提取对称势形式和强度的灵敏物理观测量。

至今,不同的作者找寻不同的物理观测量,如用椭圆流和平衡能量、原子核阻止、中等质量碎片多重性提取介质中核子-核子碰撞截面和利用前平衡发射中子-质子比提取对称势等,不同的物理观测量可从不同的角度和方式来提取和互相验证介质中核子-核子碰撞截面或者非对称核物质状态方程,这些物理观测量各自都有一定的局限性,如中等质量碎片多重性对核子-核子碰撞截面的依赖性随入射能量变化比较灵敏,换个能量区原有的特征就可能改变。相对而言,椭圆流、原子核阻止和前平衡发射中子-质子比在一定的能区范围内物理特征比较稳定,但由于目前对于对称势的函数形式和强度、介质中核子-核子碰撞截面的密度依赖形式等的了解有相当的局限性,还处在试探阶段。对于提取以上知识已经提出的物理观测量要继续研究它们的物理特征和确定使用它们的范围和条件,特别是它们的入射道效应和随碰撞系统的同位旋效应等,同时要继续寻找新的物理观测量,更重要的是要系统地理论计算与实验数据的比较,只有这样,才能提供更多有用的关于非对称核物质状态方程的

知识,但当前的实验数据既不系统也不完整,因此,

更多更系统的实验数据也是必需的.

### 参 考 文 献:

- [1] Li B A, Ko C M, Bauer W. Isospin Physics in Heavy-ion Collisions at Intermediate Energies [J]. *Inter Jour Mod Phys*, 1998, E7: 147—229.
- [2] Yang L B, Norbeck E, Friedman W A, *et al.* Odd-even Z Isospin Anomaly in Heavy-ion Reactions [J]. *Phys Rev*, 1999, C60: 041602-1—4.
- [3] Li B A, Ko C M. Isospin Relaxation Time in Heavy-ion Collisions at Intermediate Energies [J]. *Phys Rev*, 1999, C57: 2 065—2 067.
- [4] Li B A, Yennello S J. Isospin Nonequilibrium in Heavy-ion Collision at Intermediate Energies [J]. *Phys Rev*, 1995, C52: R1 746—R1 749.
- [5] Hussein M S, Rego R A, Bertulani C A. Microscopic Theory of the Total Reaction Cross Section and Application to Stable and Exotic Nuclei [J]. *Phys Rep*, 1991, 201: 279—334.
- [6] Li B A, Ren Z Z, Ko C M, *et al.* Isospin Dependence of Collective Flow in Heavy-ion Collisions at Intermediate Energies [J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 76: 4 492—4 495.
- [7] Pak R, Benenson W, Bjarki O, *et al.* Isospin Dependence of Collective Transverse Flow in Nuclear Collisions [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 1 022—1 025.
- [8] Pak R, Li B A, Benenson W, *et al.* Isospin Dependence of the Balance Energy [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 1 026—1 029.
- [9] Zheng Y M, Ko C M, Li B A, *et al.* Elliptic Flow in Heavy-ion Collisions near the Balance Energy [J]. *Phys Rev Lett*, 1999, 83: 2 534—2 536.
- [10] Mao Guangjun, Li Zhuxia, Zhuo Yizhong, *et al.* Study of In-medium N N Inelastic Cross Section from Relativistic Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck Approach [J]. *Phys Rev*, 1994, C49: 3 137—3 146.
- [11] Li Qingfeng, Li Zhuxia, Mao Guangjun. Isospin Dependence of Nucleon-nucleon Elastic Cross Section [J]. *Phys Rev*, 2000, C62: 014606-1—8.
- [12] Liu Jianye, Guo Wenjun, Wang Shunjin, *et al.* Nuclear Stopping as a Probe to In-medium Nucleon-nucleon Cross Section in Intermediate Energy Heavy Ion Collisions [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 82(6): 975-978.
- [13] Liu Jianye, Zhao Qiang, Wang Shunjin, *et al.* Entrance Channel Dependence and Isospin Dependence of Preequilibrium Nucleon Emission in Intermediate Energy Heavy Ion Collisions [J]. *Nucl Phys A (to be Published)*.
- [14] 赵 强、陈 波、刘建业,等. 中能重离子碰撞中同位旋相关核子-核子碰撞截面的可能观测量 [J]. *高能物理与核物理*, 2000, 24: 426—430.
- [15] 陈 波、赵 强、刘建业,等. 中能重离子碰撞中同位旋相关核子-核子碰撞截面的灵敏探针 [J]. *高能物理与核物理*, 2000, 24: 326—330.
- [16] 陈 波、刘建业、张丰收,等. 轻系统多重碎裂的同位旋效应 [J]. *高能物理与核物理*, 2000, 24: 244—249.
- [17] 陈列文、张丰收、靳根明,等. 径向膨胀流的同位旋效应 [J]. *高能物理与核物理*, 2000, 24: 153—159.
- [18] 刘建业、陈 波、赵 强,等. 中能重离子碰撞中同位旋效应的灵敏探针 [J]. *原子核物理评论*, 1999, 16: 165—168.
- [19] Aichelin J, Peilert G, Bohnet A, *et al.* Quantum Molecular Dynamics Approach to Heavy Ion Collisions: Description of the model, comparison with fragmentation data, and the mechanism of fragment formation [J]. *Phys Rev*, 1988, C37: 2 451—2 468.
- [20] Klakow D, Wilke G, Bauer W. Nuclear Flow Excitation function [J]. *Phys Rev*, 1993, C48: 1 982—1 987.
- [21] Chen K, Fraenkel Z, Friedlander G, *et al.* A Monte Carlo Simulation of Intranuclear Cascades [J]. *Phys Rev*, 1968, 166: 949—967.
- [22] Li B A, Ko C M. Excitation Functions in Central Au+Au Collisions from SIS/GSI to AGS/Brookhaven [J]. *Nucl Phys*, 1996, A601: 457—472.
- [23] Videback F, Hansen O. Baryon Rapidity Loss and Midrapidity Stacking in High Energy Nucleus-nucleus Collisions [J]. *Phys Rev*, 1995, C52: 2 684—2 693.
- [24] Bauer W. Nuclear Stopping at Intermediate Beam Energies [J]. *Phys Rev Lett*, 1988, 61: 2 534—2 537.
- [25] Busza W, Ledoux J R. Energy Deposition in High-energy Proton-nucleus Collisions [J]. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 1988, 38: 119—159.
- [26] Li B A, Wong C Y. Nuclear Stopping Power and Recoiling Nucleons [J]. *Phys Scr*, 1993, V47: 151—159.
- [27] Bass S A, Konopka J, Bleicher M, *et al.* Probing the Nature of Stopping [C]. *GSI Annual Report*, 1994: 86.
- [28] Johnston H, White T, Wigner T, *et al.* Isospin Equilibration in the Reaction  $E/A=33, 45 \text{ MeV } ^{40}\text{Ar}, ^{40}\text{Ca} + ^{58}\text{Fe}, ^{58}\text{Ni}$  [J]. *Phys Lett*, 1996, B371: 186—190.
- [29] Peilert G, Rosenhauer A, Aichelin J, *et al.* Multifragmentation, Fragment Flow, and the Nuclear Equation of State [J]. *Phys Rev*, 1989, C39: 1 402—1 419.
- [30] Ono A, Horiuchi H. Antisymmetrized Molecular Dynamics of Wave Packets with Stochastic Incorporation of the Vlasov Equation [J]. *Phys Rev*, 1996, C53: 2 958—2 972.
- [31] Johnston H, White T, Li B A, *et al.* Isotopically Resolved In-



intermediate-mass Fragment and Light Charged Particle Production from the Reactions  $^{40}\text{Ar}$  and  $^{40}\text{Ca}$  with  $^{58}\text{Fe}$  and  $^{58}\text{Ni}$  at  $E_{\text{beam}} = 33$  and  $45$  MeV/u. *Phys Rev.* 1997, C56, 1 972 – 1 982.

[32] Yennello S J, Young B, Yee J, *et al.* The Use of Radioactive Nuclear Beams to Study the Equilibration of the  $N/Z$  Degree of Freedom in Intermediate-energy Heavy-ion Reactions [J]. *Phys Lett.* 1994, B321: 15–19.

## Isospin Effects in Intermediate Energy Heavy Ion Collision \*

LIU Jian-ye<sup>1,2</sup>, ZHAO Qiang<sup>2</sup>, ZUO Wei<sup>1,2</sup>, YANG Yan-fang<sup>1</sup>, GUO Wen-jun<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:** Based on the achievements for the intermediate energy heavy ion collision in our recent work and the progresses in the world, the isospin effects and the dependence of the entrance channel conditions on them in the intermediate energy heavy ion collisions were introduced, analysed and commended. From the calculation results by using isospin dependence quantum molecular dynamics, it is clear to see that the nuclear stopping power strongly depends on the in-medium isospin dependence nucleon-nucleon cross section and weakly on the symmetry potential in the energy region from about Fermi energy to 150 MeV/u and the intermediate mass fragment multiplicity also sensitively depends on the in-medium isospin dependent nucleon-nucleon cross section and weakly on the symmetry potential in a selected energy region. But the preequilibrium emission neutron-proton ratio is quite contrary, it sensitively depends on the symmetry potential and weakly on the in-medium isospin dependent nucleon-nucleon cross section. In addition to the nuclear stopping sensitively depending on the beam energy, impact parameter and the mass of colliding system and weakly on the neutron-proton ratio of the colliding systems with about the same mass, the preequilibrium emission neutron-neutron ratio sensitively depends on the beam energy and the neutron-proton ratio of colliding system, but weakly on the impact parameter. From above results it is proposed that the nuclear stopping is a new probe to extract the information on the in-medium isospin dependence nucleon-nucleon cross section in energy region from about Fermi energy to 150 MeV/u and the preequilibrium emission neutron-proton ratio is a good probe for extracting the information about the symmetry potential from the lower energy to about 150 MeV/u.

**Key words:** nuclear stopping power; preequilibrium nucleon emission; multifragment process; isospin asymmetry equation of state; in-medium nucleon-nucleon cross section

\* Foundation item: "100 person project" of the Chinese Academy of Sciences; National 973 Subject Grant (G2000077400); NSFC (19775057, 19847002, 19775020); 95 important fundamental item (KJ951-A1-410) of the Chinese Academy of Sciences