

中能重离子碰撞中库仑相互作用对动量耗散的同位旋效应^{*}

邢永忠^{1)B)} 刘建业^{1)B)} 郭文军²⁾ 郝焕锋²⁾

¹⁾ 天水师范学院基础物理学研究所, 天水 741000)

²⁾ 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

³⁾ 兰州重离子加速器国家实验室, 兰州 730000)

(2004 年 6 月 14 日收到, 2004 年 12 月 23 日收到修改稿)

利用同位旋相关的量子分子动力学模型, 研究了中能重离子碰撞过程中的库仑相互作用对于动量耗散的同位旋效应. 计算结果表明: 由于库仑相互作用的存在, 使得碰撞过程中的化学不稳定区和力学不稳定区减小, 明显地减弱了动量耗散; 其减弱的程度与对称势的形式及强度有关, 对称势越强则动量耗散的减弱幅度越大. 动量耗散灵敏地依赖于核子-核子碰撞截面的同位旋相关性而较弱地依赖于对称势, 这一特征不论有无库仑相互作用均存在.

关键词: 中能重离子碰撞, 库仑相互作用, 动量耗散, 同位旋效应

PACC: 2570, 2587, 0260

1. 引言

中能重离子碰撞中同位旋效应的研究使得人们能够得到关于介质中核子-核子碰撞截面和同位旋相关的平均场知识^[1-9], 然而由于中能重离子碰撞过程的复杂性, 我们还远没有完全获得这一过程中单体耗散和两体碰撞的全部知识. 例如, 尽管在有关中能重离子碰撞的同位旋效应的研究中, 库仑相互作用被理所当然地包含在同位旋相关的平均场中, 但库仑相互作用对于部分可观测物理量的同位旋效应的影响却未被仔细研究. 实际上, 库仑相互作用是一个重要的同位旋非对称项, 它必然会明显地引起中能重离子碰撞过程中许多物理量的同位旋效应. 最近, Lee 和 Mekjian^[10]利用平均场理论研究指出, 库仑相互作用引起了化学不稳定区和力学不稳定区的减小, Colonna 等^[11]对于有限核的研究也指出, 库仑相互作用和表面效应减弱了不稳定区域. Gulminelli 和 Chomaz^[12]基于变量空间中分布事件的拓扑特征分析了汽-液相变并指出, 库仑相互作用造成共存区域明显地减小或压缩. 因此, 中能重离子碰撞中库仑相互作用对于动量耗散的同位旋效应必然

要产生影响. 仔细考察这一影响, 对于揭示同位旋物理和建立同位旋非对称核物质状态方程具有重要意义.

本文中, 我们利用同位旋相关的量子分子动力学 (IQMD) 模型, 通过计算核子动量的横向分量与纵向分量之比 R 以及核子动量分布的四极矩 Q 的同位旋效应, 研究了中能重离子碰撞的动力学过程中库仑相互作用对于动量耗散的影响. 结果表明: 库仑相互作用会使 R 减小而使 Q 增加, 两者的变化幅度依赖于对称势的形式和强度. 但是, 它并没有明显地改变 R 和 Q , 灵敏地依赖于两体碰撞而较弱地依赖于对称势这一特性.

2. 理论模型简介

为恰当地描述同位旋效应, 我们在描述中能重离子碰撞的量子分子动力学 (QMD) 模型的基础上, 同时考虑密度相关平均场的同位旋相关性和介质中核子-核子碰撞截面的同位旋相关性, 将 QMD 模型改进为 IQMD 模型^[13]. 在这样的 IQMD 模型中, 反应核的初始密度分布由具有参数 SKM^* 的 Skyrme-Hartree-Fock 方法计算得到 (这里 SKM^* 是 Skyrme-

^{*} 国家重点基础研究发展规划 (批准号: G2000077400) 国家自然科学基金 (批准号: 10435080, 10175080, 10447006) 和中国科学院知识创新工程重点方向项目 (批准号: KJ952-SW-N02) 资助的课题.

Hatree-Fock 方法中的一组参数名称). 通过将计算所得核的结合能和均方半径与相应的实验值比较, 由初始化的 IQMD 程序决定反应核中所有核子的初始坐标和动量. 确定相互作用势及其参数如下:

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

式中, U^{Sky} 是密度相关的 Skyrme 势, U^{Yuk} 表示 Yukawa 势, U^{MDI} 是动量相关作用, U^{Pauli} 是泡利势, U^{Coul} 为库仑势. 它们的表达式分别如下:

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

$$U^{\text{Coul}} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}, \quad (3)$$

$$U^{\text{Yuk}} = t_3 \exp\left(\frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}{m}\right) / \frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}{m}, \quad (4)$$

$$U^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^2 + 1] \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (5)$$

$$U^{\text{Pauli}} = V_p \left(\frac{\hbar}{q_0 p_0} \right)^3 \exp\left(-\frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)^2}{2q_0^2} - \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^2}{2q_0^2}\right) \delta_{p_i p_j}, \quad (6)$$

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

(1) 式中 U^{sym} 表示对称势. 在本文计算中, 我们使用下列三种不同形式的对称势^[13]:

$$U_1^{\text{sym}} = \pm 2e_a u \delta, \quad (7)$$

$$U_2^{\text{sym}} = \pm 4e_a \frac{u^2}{1+u} \delta + 2e_a \frac{u^2}{(1+u)^2} u^2 \delta^2, \quad (8)$$

$$U_3^{\text{sym}} = \pm 2e_a u^{1/2} \delta + e_a u^{1/2} \delta^2, \quad (9)$$

式中, $e_a = 32 \text{ MeV}$, $\rho \delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p}$ 为同位旋自由度.

计算中所用各种势参数请见表 1.

表 1 所选用的势参数值

势参数	MDI	NOMDI
α/MeV	-390.1	-356
β/MeV	320.3	303
γ	1.14	1.16667
t_3/MeV	7.5	7.5
m/fm	0.8	0.8
t_4/MeV	1.57	0.0
$t_5/10^{-4} \text{ MeV}^{-2}$	5	5
V_p/MeV	30	30
$p_0/\text{MeV} \cdot c^{-1}$	400	400
q_0/fm	5.64	5.64

注: MDI 和 NOMDI 分别表示考虑和不考虑动量相关作用的情形.

3. 结果与讨论

介质中同位旋相关和同位旋无关的核子-核子碰撞截面分别用 σ^{iso} 和 σ^{noiso} 来表示. 这里, σ^{iso} 表示 $\sigma_{np} > \sigma_{nn} = \sigma_{pp}$, 而 σ^{noiso} 表示 $\sigma_{np} = \sigma_{nn} = \sigma_{pp}$, 其中 σ_{np} , σ_{nn} , σ_{pp} 分别表示介质中中子-质子、中子-中子、质子-质子之间的碰撞截面. 中能重离子碰撞中的动量耗散或者原子核阻止可以用横向动量 P_\perp 与纵向动量 P_\parallel 之比 R 和核子动量分布的四极矩 Q_{zz} 来描述. 它们分别表示如下:

$$P_\perp(i) = \sqrt{P_x^2(i) + P_y^2(i)},$$

$$P_\parallel(i) = P_z(i),$$

$$R = \frac{\frac{2}{\pi} \sum_i^A |P_\perp(i)|}{\sum_i^A |P_\parallel(i)|}$$

$$Q_{zz} = \sum_i^A (2P_z^2(i) - P_x^2(i) - P_y^2(i)).$$

这里, 总质量 A 是弹核质量与靶核质量之和, 而 $P_x(i)$, $P_y(i)$ 和 $P_z(i)$ 分别为第 i 个核子动量的三个分量.

图 1 给出了冻结时间 ($t = 300 \text{ fm}/c$) 和不同对称势 (U_1^{sym} 和 U_3^{sym}) 不同核子-核子碰撞截面 (σ^{iso} 和 σ^{noiso}) 的条件下, 碰撞系统 $^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Mo}$ 在碰撞参数 $b = 2.0 \text{ fm}$ 时, R 和 $Q_{zz}/Q_{z=0}$ 作为束流能量的函数, $Q_{z=0}$ 为开始时 Q_{zz} 的取值. 图中包括了有库仑相互作用与无库仑相互作用两种情形. 从图 1 可以看到: 8 条曲线分为两组: 4 条粗线 (即曲线 A、曲线 B、曲线 C 和曲线 D) 对应于有库仑相互作用情形, 而 4 条细线 (即曲线 a、曲线 b、曲线 c 和曲线 d) 对应于无库仑相互作用的情形. 可以看出库仑相互作用明显地引起了动量耗散的减弱, 同时使得 R 减少而使 $Q_{zz}/Q_{z=0}$ 增加. 从图 1 还可以看到: 在每一组曲线 (粗线或细线) 中, 对于束流能量从 50 到 300 MeV 左右的能区, 由不同的碰撞截面 (σ^{iso} 和 σ^{noiso}) 而相同的对称势 (同为 U_1^{sym} 或 U_3^{sym}) 所引起的差别较大, 但由不同的对称势 (U_1^{sym} 和 U_3^{sym}) 而相同的碰撞截面 (同为 σ^{iso} 或 σ^{noiso}) 所引起的差别较小. 这意味着 R 和 $Q_{zz}/Q_{z=0}$ 灵敏地依赖于核子-核子碰撞截面的同位旋相关性, 而较弱地依赖于对称势. 这一特征不论有无库仑相互作用均存在. 这主要是因为在这一能区碰撞动力学主要是由核子-核子间的碰撞所支配, 碰撞的结果造成核子

的初始纵向动量转化为横向动量而使碰撞系统变热,故动量耗散主要取决于核子-核子碰撞截面.

的穿透性增加.因此, R 和 Q_z 的上述特征在核子能量在大约 300 MeV 以上的能区内逐渐消失.

为了更加明确由库仑相互作用所引起的动量耗散的减弱幅度对于对称势强度的依赖关系,在图 2 中我们给出了在有库仑相互作用和无库仑相互作用的两种情形下,碰撞系统 $^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Mo}$ 在单核子能量 $E = 100$ MeV、碰撞参数 $b = 2.0$ fm 和三种不同的对称势 U_1^{sym} , U_2^{sym} 和 U_3^{sym} 的作用下 R 的时间演化过程. 从图 2 可以清楚地看到,因为 U_1^{sym} , U_2^{sym} 和 U_3^{sym} 的不可压缩系数分别为 -27 , 61 和 -69 MeV,就它们的强度而论有关系 $U_2^{\text{sym}} > U_2^{\text{sym}} > U_3^{\text{sym}}$. 因此,图 2 中与 U_2^{sym} 相对应的曲线 B (存在库仑相互作用)与曲线 b (无库仑相互作用)之差要大于与 U_3^{sym} 相对应的曲线 C 与曲线 c 之差及与 U_1^{sym} 相对应的曲线 A 与曲线 a 之差(曲线 A 、曲线 B 、曲线 C 对应于存在库仑相互作用时的情形,而曲线 a 、曲线 b 、曲线 c 对应于无库仑相互作用时的情形). 这表明库仑相互作用对于动量耗散的影响与对称势的强度有关,对称势越强其影响就越大.不过,这里需要进一步说明的是,直到目前为止,在人们的理论研究所采用的对称势的不可压缩系数的变化范围仍然很大,只有通过理论与实验结果系统地比较研究之后才能逐步确定对称势的形式和强度.当然,在这样的研究过程中,考虑库仑相互作用的影响是必要的.

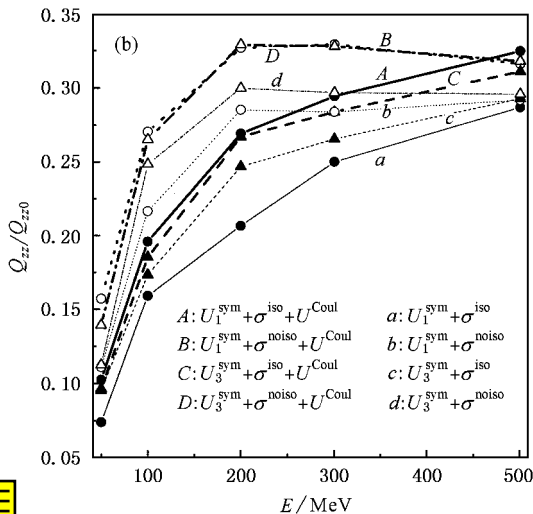
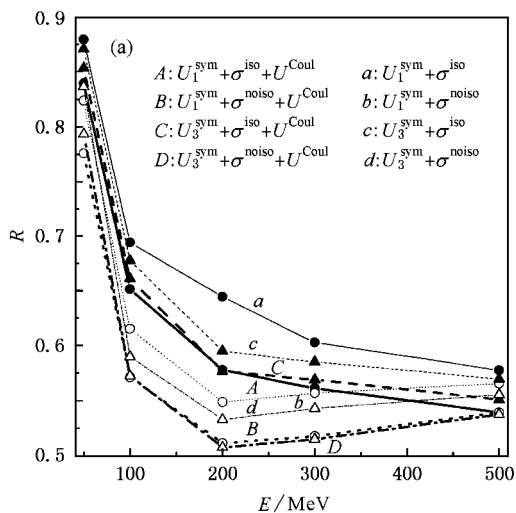


图 1 碰撞系统 $^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Mo}$ 在单核子能量 $E = 100$ MeV 和碰撞参数 $b = 2.0$ fm 时, R (a) 和 Q_z/Q_{z0} (b) 随束流能量的变化

特别是在束流能量从 100 到 300 MeV 左右的能区,曲线 A 与曲线 a (曲线 B 与曲线 b) 之间的差值明显大于曲线 C 与曲线 c (曲线 D 与曲线 d) 之间的差值,这表明由库仑相互作用引起的 R 的减小幅度和 Q_z 的增大幅度在 U_1^{sym} 条件下比在 U_3^{sym} 条件下更为明显. 由于对称势 U_1^{sym} 和 U_3^{sym} 所对应的不可压缩系数分别为 -27 和 -69 MeV,即 U_1^{sym} 的强度大于 U_3^{sym} 的强度,故由库仑相互作用所引起的动量耗散依赖于对称势的形式与强度.此外,我们还可以清楚地看到,动量耗散随束流能量的增加而减少.同时,由于在整个碰撞过程中两体碰撞的作用随束流能量的增加而增加,而平均场的作用随束流能量的增加而减小.另一方面,随束流能量的增加两碰撞核之间

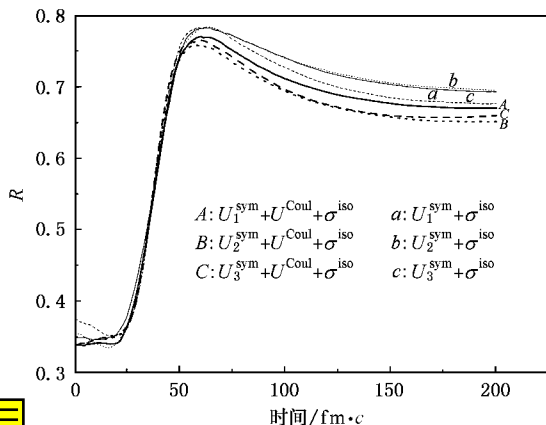


图 2 碰撞系统 $^{94}\text{Mo} + ^{94}\text{Mo}$ 在单核子能量 $E = 100$ MeV、碰撞参数为 $b = 2.0$ fm 和三种不同的对称势 U_1^{sym} , U_2^{sym} 和 U_3^{sym} 的作用下, R 随时间的变化

4. 结 论

通过上述研究,我们可以得到以下结论 (1) 库仑相互作用引起了动量耗散的减弱, (2) 动量耗散的

减弱幅度与对称势的形式和强度有关。(3) 动量耗散灵敏地依赖于核子-核子碰撞截面的同位旋相关性

而较弱地依赖于对称势,这一特征不论有无库仑相互作用均存在。

-
- [1] Li B A , Ko C M , Bauer W 1998 *Int. J. Mod. Phys. E* **7** 147
- [2] Li B A , Schroder W 2001 *Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies* (New York : Nova Science Publishers. Inc.)
- [3] Wada R , Keutgen T , Hage K *et al* 2004 *Phys. Rev. C* **69** 044610
- [4] Yennello S J , Pollacco E C , Wiatkowski K K *et al* 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 671
- [5] Pak R , Benenaon W , Bjarki O *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1022
- [6] Westfall G D 1998 *Nucl. Phys. A* **630** 27c ; Westfall G D 2001 *Nucl. Phys. A* **681** 343c
- [7] Kunde G J , Gaff S J , Gelbke C K *et al* 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 2897
- [8] Miller M L , Bjarki O , Magestro D J *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 1399
- [9] Xu H S , Tsang M B , Liu T X *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 716 ; Tsang M B *et al* 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5023 ; Li W F , Xu H S , Zhang F S 2002 *Acta Phys. Sin.* (in Chinese) **51** 1700 [李文飞、徐珊瑚、张丰收 2002 物理学报 **51** 1700]
- [10] Lee S J , Mekjian A Z 2003 *Phys. Rev. C* **68** 014608
- [11] Colonna M , Chomaz P , Ayik S *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 122701
- [12] Gulminelli F , Chomaz P H , Raduta A H *et al* 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 202701
- [13] Liu J Y , Guo W J , Wang S J *et al* 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 975 ; Liu J Y , Xing Y Z , Guo W J *et al* 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 1078 ; Liu J Y , Guo W J , Xing Y Z *et al* 2002 *Phys. Lett. B* **540** 213 ; Liu J Y , Zhao Q , Wang S J *et al* 2001 *Nucl. Phys. A* **687** 475 ; Liu J Y , Guo W J , Xing Y Z *et al* 2003 *Phys. Rev. C* **67** 024608 ; Xing Y Z , Liu J Y , Guo W J 2003 *Nucl. Phys. A* **723** 483

The isospin effects on the momentum dissipation induced by the Coulomb interaction in the process of heavy-ion collisions^{*}

Xing Yong-Zhong^{1)B)} Liu Jian-Ye^{1)2)B)} Guo Wen-Jun²⁾ Hao Huan-Feng²⁾

¹⁾*(Institute of the Fundamental Physics, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China)*

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

³⁾*(National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)*

(Received 14 June 2004 ;revised manuscript received 23 December 2004)

Abstract

The isospin effects of Coulomb interaction on the momentum dissipation in the heavy ion collisions at an intermediate energy has been studied carefully within the isospin dependent quantum molecular dynamics model. The results show that Coulomb interaction induces the reduction of momentum dissipation because it leads the shrinking of the mechanical and chemical instability domains, and the degree of reduction depends sensitively on the form and strength of symmetry potential. However, the property that the momentum dissipation depends sensitively on the isospin dependences of in-medium nucleon-nucleon cross section and insensitively on the symmetry potential, is true for the cases with and without the Coulomb interaction.

Keywords : intermediate energy heavy ion collision, Coulomb interaction, momentum dissipation, isospin effect

PACC : 2570, 2587, 0260

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. G2000077400), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10435080, 10175080, 10447006), and the Key Program of Knowledge Innovation of Chinese Academy of Sciences (Grant No. KJCX2-SW-N02).