

同位旋依赖的动量相关作用对同位旋分馏过程的影响和机理*

郭文军^{2)B)} 刘建业^{1)B)†} 邢永忠^{1)B)}

¹⁾ 天水师范学院近代物理理论研究所, 天水 741000)

²⁾ 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 兰州 730000)

³⁾ 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2004 年 7 月 29 日收到, 2004 年 9 月 6 日收到修改稿)

在同位旋相关的量子分子动力学理论的基础上, 引入同位旋自由度, 将同位旋无关的动量相关作用改造成为在同位旋相关的量子分子动力学中可用的同位旋依赖的动量相关作用. 研究了它在中能重离子碰撞中的作用和机理. 研究表明, 考虑同位旋依赖的动量相关作用后, 对同位旋分馏过程有很大的影响, 使同位旋分馏强度降低. 降低的幅度随入射能量的增加而迅速增加. 特别是动量相关作用同位旋效应与对称势的同位旋效应具有大体相同数量级, 但两者具有完全不同的动力学机理. 所以同位旋依赖的动量相关作用的研究对于定量的研究同位旋非对称核物质状态方程是重要的.

关键词: 同位旋依赖的动量相关作用, 同位旋分馏强度, 重离子碰撞

PACC: 2570

1. 引 言

放射性束的产生和应用为研究原子核反应动力学过程中的同位旋效应(同位旋物理)提供了良好的机遇^[1,2], 可以通过对中能重离子碰撞中同位旋效应的研究来提取重离子碰撞过程中同位旋相关的状态方程和介质中同位旋相关核子-核子碰撞截面的知识. 这些知识不仅对于了解原子核的性质非常重要, 而且对于研究天体演化过程, 如超新星爆炸, 中子星冷却速率均至关重要. 近年来人们从理论和实验两个方面对同位旋效应进行了深入地研究^[1-11].

在以前的工作中我们指出动量相关作用对于中能重离子碰撞过程有明显的作用. 它增强了原子核阻止, 核子发射数等作为提取同位旋相关核子-核子碰撞截面探针的作用^[12-15]. 但动量相关作用同位旋效应从未有人考虑过. 考虑了同位旋依赖的动量相关作用的 IQMD 模型, 又会对中能重离子碰撞过

程中的同位旋效应起到什么作用? 这是我们想要知道的. 近来 Gupta 和 Li 等人在 Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck(BUU)模型中给出了对称能的动量相关作用, 即引进了动量相关作用中的同位旋效应, 认为具有同位旋效应和无同位旋效应会给出完全不同的预言^[16,17]. 但 BUU 模型计算量很大, 特别在同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)中如果要套用 Gupta 的公式, 就要将单粒子波函数替换为具有高斯波包的单粒子相干波函数, 数值计算更大, 当前计算机条件很难进行. 而且 BUU 模型虽然可以给出平均物理观测的结果, 但不能给出碎片形成过程. 如何改进 IQMD 模型中的动量相关作用, 使之具有同位旋效应, 而改进的具有同位旋效应的动量相关作用对中能重离子碰撞过程, 特别是同位旋分馏过程有什么影响, 以及它的动力学机理, 这是本文所研究的内容.

我们基于 IQMD 中动量相关作用, 引进同位旋自由度, 改造成为同位旋依赖的动量相关作用, 并给

* 国家重点基础研究发展规划项目(批准号:G2000077400), 国家自然科学基金(批准号:10435080, 10447006)和中国科学院知识创新工程重点方向项目(批准号:KJ92-SW-N02)资助的课题.

† E-mail: liujy@ns.lzb.ac.cn

出了可为 IQMD 数值计算应用的公式和参数. 具体对它在同位旋分馏过程中的作用和机理进行了研究. 结果表明具有同位旋效应的动量相关作用与无同位旋效应的动量相关作用具有明显不同的预言和不同的动力学机理.

2. 具有同位旋依赖动量相关作用的 IQMD 理论

2.1. 同位旋相关的量子分子动力学

描述中能重离子碰撞反应动力学的量子分子动力学(QMD)^[18-21]模型主要包含三个主要因素:密度相关的平均场,介质中核子-核子碰撞截面和 Pauli 阻塞. 而为了恰当地描述同位旋效应 QMD 模型应该做适当的修改. 密度相关的平均场应该包含同位旋有关的对称势和库仑势,介质中核子-核子碰撞截面应该对核子-核子(核子-核子)碰撞和核子-核子碰撞加以区别,Pauli 阻塞也要对核子和核子进行区别. 另外反应最初的两个核的基态也应该包含同位旋的信息. IQMD 模型中相互作用势和参数表示为

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

U^{Sky} 是密度相关的 Skyrme 势,

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

U^{Coul} 是库仑势; U^{Yuk} 表示 Yukawa 势,

$$U^{\text{Yuk}} = t_3 \exp\left(\frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}{m}\right) / \frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}{m}. \quad (3)$$

U^{MDI} 是动量相关作用(MDI)^[20],是由 Aichelin 等人光学势参数化后到的^[19]

$$U^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^2 + 1] \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (4)$$

U^{Pauli} 是泡里势,

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

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

U^{sym} 是对称势,对称势的形式有很多种,本文使用了 2 种常用的对称势^[1,21]:

$$U_1^{\text{sym}} = cu\delta\tau_z, \quad (6)$$

$$U_2^{\text{sym}} = cu^{1/2}(\delta\tau_z - \delta^2/4),$$

其中

$$\tau_z = \begin{cases} 1 & \text{中子}, \\ -1 & \text{质子}, \end{cases}$$

这里 $c = 32\text{MeV}$ 是对称势的强度, $u \equiv \rho/\rho_0$, δ 是相

对中子过剩 $\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$, ρ , ρ_0 , ρ_n 和 ρ_p 分别是核密度、饱和密度、中子密度和质子密度. 一个经验的密度相关的介质中核子-核子碰撞截面的公式为^[22]

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

这里参数取 $\alpha \approx -0.2$ 被发现与集体流的实验数据得到很好得符合. $\sigma_{NN}^{\text{free}}$ 是实验核子-核子碰撞截面^[23].

2.2. 同位旋依赖的动量相关作用

为了描述动量相关作用中的同位旋效应,我们引入同位旋自由度,将同位旋无关的动量相关作用(4)式改造为以下两式:

$$U_n^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_n - \mathbf{p}_2)^2 + 1] \times (C_{nn}\rho_n + C_{np}\rho_p) \rho_0, \\ U_p^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_p - \mathbf{p}_2)^2 + 1] \times (C_{pp}\rho_p + C_{pn}\rho_n) \rho_0. \quad (8)$$

这里 $C_{nn} = C_{pp} = C_{\tau\tau}$, $C_{np} = C_{pn} = C_{\tau\tau'}$,且 $\tau \neq \tau'$. $C_{\tau\tau}$ 和 $C_{\tau\tau'}$ 为表征同位旋效应的两个参数. p_n 和 p_p 分别代表中子和质子的动量, p_2 代表所有其他粒子的动量. U_n^{MDI} 和 U_p^{MDI} 分别表示中子和质子的动量相关作用.(8)式表示一个中子可以与其他中子作用,同时也与周围质子作用.一个质子可以与其他质子作用,同时也与周围中子作用.将两式合并起来为

$$U_{\tau}^{\text{MDI}} = t_4 \ln^2 [t_5 (\mathbf{p}_{\tau} - \mathbf{p}_{\tau'})^2 + 1] \times (C_{\tau\tau}\rho_{\tau} + C_{\tau\tau'}\rho_{\tau'}) \rho_0. \quad (9)$$

可以看出当 $C_{\tau\tau} = C_{\tau\tau'} = 1$ 时(9)式就回到同位旋无关的动量相关作用(4)式.这里 $C_{\tau\tau}$ 和 $C_{\tau\tau'}$ 的值可以通过与 Gongy 相互作用理论计算得到的值^[16]拟合得到.

图 1 是具有同位旋依赖的动量相关作用的单粒子势随动量 k 的演化.这里的单粒子势为

$$U_{\tau}^{\text{MDI}}(\rho, k, \tau') = U^{\text{sky}} + U^{\text{sym}} + U^{\text{MDI}} \equiv U_{\tau},$$

其中

$$U^{\text{sky}} \equiv U^{\text{sky}}(\rho),$$

$$U^{\text{sym}} \equiv U^{\text{sym}}(\rho, \delta, \tau),$$

$$U^{\text{MDI}} \equiv \sum_{\tau'} U_{\tau}^{\text{MDI}}(\rho, k, \tau').$$

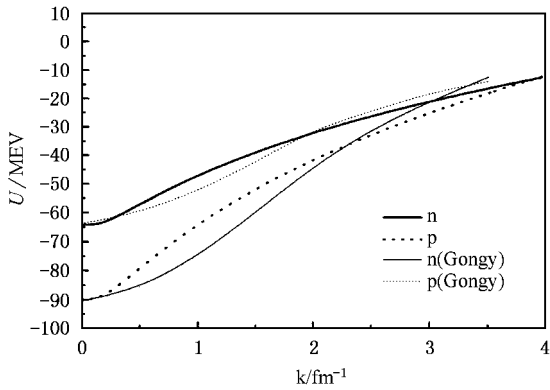


图 1 具有同位旋依赖动量相关作用的单粒子势随动量 k 的演化

图中两条细线分别是 Gongy 相互作用理论计算得到的中子和质子的单粒子势. 两条粗线分别是用 (8) 式通过与 Gongy 相互作用理论拟合得到的曲线. 图中

表 1 IMDI 中相互作用势参数

	$C_{\tau\tau}$	$C_{\tau\tau'}$	α/MeV	β/MeV	γ/MeV	T_3/MeV	T_4/MeV	T_5/MeV	V_p/MeV	$p_0(\text{MeV}/c)$	q_0/Fm
MDI	1	1	-390	320	1.14	7.5	1.57	5×10^{-4}	30	400	5.64
IMDI	0.5	1.5	-397	320	1.14	7.5	1.57	10^{-3}	30	400	5.64

3. 结果与讨论

同位旋分馏是中能重离子碰撞中气相和液相中质比的不等分配. 在本文的计算中, 选取反应产物中的中子和质子作为气相部分, 产物中电荷数在 $1 < Z$ 的碎片为液相部分, 这里 Z_n 和 Z_l 分别为炮弹和靶核的带电粒子数, 根据以上对反应产物气相和液相的划分, 我们定义同位旋分馏强度为反应产物中气相中质比与液相中质比的比值 $(N/Z)_{\text{gas}}/(N/Z)_{\text{liq}}$. 图 2 是考虑和不考虑同位旋依赖的动量相关作用情况下同位旋分馏强度随束流能量的演化. 图中两条粗线是考虑同位旋依赖的动量相关作用的结果. 两条细线是不考虑同位旋依赖的相关动量相关作用的结果. 如我们所知丰中子系统 $(N/Z)_{\text{gas}}/(N/Z)_{\text{liq}}$ 灵敏的依赖于对称势而弱的依赖于两体碰撞^[15]. 反应系统为 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$, 而碰撞参数 $b = 0.0\text{fm}$. 从图 2 可以发现三种重要特征. 1) IMDI 引起 $(N/Z)_{\text{gas}}/(N/Z)_{\text{liq}}$ 从具有 MDI 的两条细线降低为具有 IMDI 的两条粗线. 2) 被 IMDI 减少幅度, 随束流能量的增加而迅速增加. 3) 很清楚, 除 $(N/Z)_{\text{gas}}/(N/Z)_{\text{liq}}$ 灵敏的依赖于对称势的特征仍然保持以外, 由 IMDI 引起 $(N/Z)_{\text{gas}}/(N/Z)_{\text{liq}}$

可以看出通过调节 $C_{\tau\tau}$ 和 $C_{\tau\tau'}$ 的值是可以得到与 Gongy 相互作用理论比较符合的单粒子势. 在得到单势和确定参数之后, 再将具有 IMDI 的 IQMD 初始化程序利用 Skyrme-Hatree-Fock 得到的原子核基态密度通过抽取原子核基态性质, 即通过符合原子核结合能和均方半径与实验数据来确定 IQMD 的相互作用势参数如表 1.

表 1 中给出了 IMDI 中各种势参数, 其中同位旋无关的动量相关作用的势参数 $C_{\tau\tau} = 1.5$ 和同位旋依赖动量相关作用的势参数 $C_{\tau\tau'} = 0.5$ 表示中子-质子作用比中子-中子作用(质子-质子作用)强.

从我们得到的单势随动量的演化图 1 可以看出单质子势变得更为吸引而单中子势变得更为排斥. 这些特征及中子势与质子势之差的数值都大体与 Bombaci 所得结果一致(见文献 2 的 43 页), 说明 (8) 式是合理的.

$Z)_{\text{gas}}/(N/Z)_{\text{liq}}$ 变化幅度与由对称势引起的变化幅度属于同一数量级. 从而可以看到 IMDI 引入重要的同位旋效应.

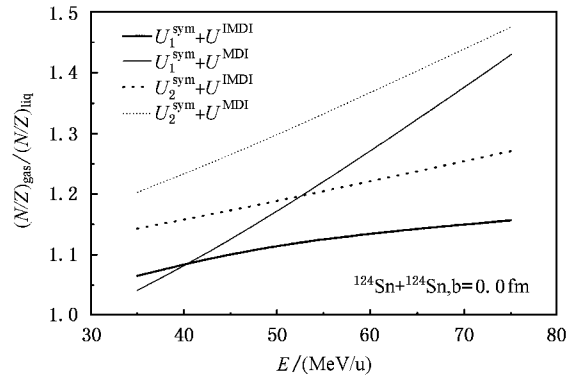


图 2 在考虑和不考虑同位旋依赖动量相关作用条件下同位旋分馏强度随系统能量的演化

为了解释以上特征, 可以从同位旋分馏过程中, 中子和质子密度相关化学势梯度演化的分析得到理解. 作为化学势的一部分, 对称势 U^{sym} 对于中子是斥力, 对于质子是吸引. 同样作为化学势的一部分, U^{IMDI} 对于中子和质子应该加以区别. 这两种同位旋依赖的势 U^{sym} 和 U^{IMDI} 对于中子和质子而言, 完全导

致到随密度的不同的化学势梯度. 然而非平衡扩张过程中的质量流由化学势区域值之差所决定. 这种差驱使碰撞系统从高化学势向低化学势直至平衡. 这种输运效应对丰中子系统会引起不稳定, 同位旋非对称核物质分离为丰中子气相和缺中子液相.

总之 U^{sym} 和 U^{MDI} 是产生同位旋分馏的两个主要动力学因素. 然而它们对于中子和质子使化学势随密度演化具有不同的化学势梯度. 这时需要指出的是在同位旋无关的动量相关作用 U^{MDI} 条件下来自平均场的同位旋效应主要来自对称势.

根据以上分析, 图 3 表示为单粒子势之差 $(U_n - U_p)/2$ 随密度 ρ/ρ_0 的演化. 这里 $U_n(\rho, k, \delta, \nu, p) \equiv U_n(\rho, k, \delta, \nu, p)$ 对于 U^{MDI} 而言, 由于同位旋无关性而在 $(U_n - U_p)/2$ 中的 U^{MDI} 之差为零. 即图中以 MDI 标示的是动量无关的, 即与 k 无关. 而 $(U_n - U_p)/2$ 中的 IMDI 表示的四条细线是动量相关的. 从图 3 很明显以 MDI 标示的粗线比以 IMDI 标示的细线高而且陡峭. 这就导致图 2 中以 MDI 标示的 $(N/Z)_{\text{gas}}, (N/Z)_{\text{liq}}$ 比以 IMDI 标示的 $(N/Z)_{\text{gas}}, (N/Z)_{\text{liq}}$ 高而且陡峭.

从图 3 同样可以明显看到, 随着动量 k 的增加, 具有 MDI 的粗线与具有 IMDI 细线之间距离随 k 增加而迅速增加. 这就导致到图 2 中由 IMDI 引起的

$(N/Z)_{\text{gas}}, (N/Z)_{\text{liq}}$ 的变化幅度随入射能量的增加而迅速增加.

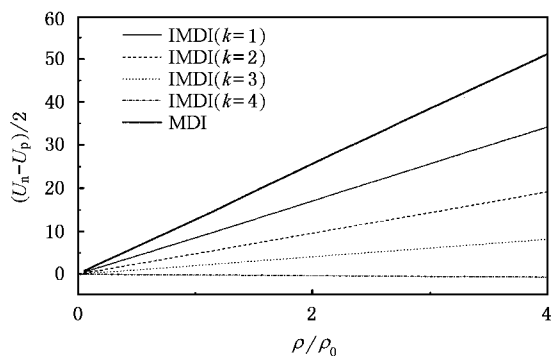


图 3 中子和质子单粒子势的差值随碰撞系统相对密度的演化

4. 结 论

通过引入同位旋自由度得到了在 IQMD 中可以进行具体计算的同位旋依赖的动量相关作用 U^{MDI} . 计算结果表明, U^{MDI} 将重要的同位旋效应带入同位旋分馏. 而且 U^{sym} 和 U^{MDI} 引起的同位旋效应都是重要的. 故中能重离子碰撞中关于同位旋依赖动量相关作用 U^{MDI} 和机理的研究对于定量研究和确定同位旋非对称核物质状态方程是重要的.

[1] Li B A, Ko C M and Bauer W 1998 *Int. J. Mod. Phys. E* **7** 147

[2] Li B A and Udo Schroder W 2001 *Isospin Physics in Heavy-Ion Collisions at Intermediate Energies* (Nova Science Publishers, Inc, New York)

[3] Wada R et al 2003 *Phys. Rev. Lett.* **68** 014608

[4] Yennello S J et al 1994 *Phys. Lett. B* **321** 14
Yennello S J et al 1994 *Nucl. Phys. A* **681** 317c

[5] Pak R et al 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1022

[6] Westfall G D 2001 *Nucl. Phys. A* **681** 27c
Westfall G D 1998 *Nucl. Phys. A* **681** 343c

[7] Pak R et al 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1022

[8] Baran V et al 2002 *Nucl. Phys. A* **703** 603

[9] Colonna M et al 1998 *Phys. Rev. C* **57** 1410
Di M et al 2001 *Nucl. Phys. A* **681** 426C

[10] Li W F et al 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1700 (in Chinese) [李文飞等 2002 物理学报 **51** 1700]

Li W F et al 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1040 (in Chinese) [李文飞等 2002 物理学报 **51** 1040]

[11] Ma Y G 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 654 (in Chinese) [马余刚 2000 物理学报 **49** 654]

[12] Liu J Y et al 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 975

[13] Liu J Y et al 2001 *Phys. Rev. C* **63** 054612
Liu J Y et al 2001 *Nucl. Phys. A* **687** 475

[14] Liu J Y et al 2002 *Phys. Lett. B* **540** 213

[15] Liu J Y et al 2003 *Nucl. Phys. A* **726** 123

[16] Das, S., Das Gupta C D, Gale C and Li Bao-An 2003 *Phys. Rev. C* **67** 034611

[17] Li B A et al 2004 *Phys. Rev. C* **68** 014608

[18] Bertsch G F and Gupta S D 1988 *Phys. Rep.* **160** 1991

[19] Aichelin J et al 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1926

[20] Aichelin J et al 1988 *Phys. Rev. C* **37** 2451

[21] Reinhard P G et al 1991 *Computation Nuclear Physics 1* (Springer-Verlag, Berlin) pp. 28—50
Danielewicz 2000 *Nucl. Phys. A* **673** 375

[22] Klakow D, Welke G and Bauer W 1993 *Phys. Rev. C* **48** 1982

[23] Alkazzov G et al 1977 *Nucl. Phys. A* **280** 365

The isospin effect of momentum-dependent interaction in heavy ion collisions^{*}

Guo Wen-Jun^{2,3)} Liu Jian-Ye^{1,2,3)†} Xing Yong-Zhong^{1,2)}

¹⁾ Department of Physics, Tianshui Normal College, Tianshui 741000, China)

²⁾ Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

³⁾ Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

(Received 29 July 2004 ; revised manuscript received 6 September 2004)

Abstract

We introduce the isospin degree of freedom into the momentum-dependent interaction to obtain an isospin and momentum dependent interaction given in a form practically usable in isospin-dependent quantum molecular dynamics model. We investigate the isospin effect of momentum-dependent interaction on the observable in the intermediate-energy heavy ion collisions. It is found that momentum-dependent interactions with and without isospin dependence lead to significant different predictions on the nuclear stopping (momentum dissipation) and isospin fractionation ratio. In particular, the momentum-dependent interaction with the isospin degree of freedom induces the reduction for the strong dependence of isospin fractionation ratio on the symmetric potential. However it does not change obviously the above feature for the isospin fractionation ratio as the good probe of symmetric potential respectively. The isospin dependence of momentum-dependent interaction is thus important for studying accurately the equation of state of isospin asymmetry nuclear matter.

Keywords : momentum dependent interaction , isospin effect , heavy ion collision

PACC : 2570

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

[†] E-mail : liujy@ns.lzb.ac.cn