第22卷 第6期
1998 年6月

高能物理与核物理
HIGH ENERGY PHYSICS AND NUCLEAR PHYSICS

Vol.22, No.6
June, 1998

中能重离子碰撞中局域势的有限程效应 *

陈列文 张丰收 曾祥华

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 在同位旋相关的量子分子动力学模型中,将零程的 Skyrme 型两体相互作用改为有限程的 Gaussian 型两体相互作用,对反应系统 ^{93}Nb(E = 400MeV/ u, b = 3fm) + ^{93}Nb 中横动量进行了计算和分析,观察到引入有限程的核力会使反应系统的横动量增强,可以部分地代替核子-核子相互作用中的动量相关.

关键词 同位旋相关的 QMD 模型 Skyrme 相互作用 有限程核力 横动量

1 引言

重离子碰撞的微观输运理论是当前理论核物理的一个十分重要的研究领域. 80 年代以来,随着束流能量进入中高能区,重离子碰撞能够产生高温高密核物质,使人们能够对极端条件下的核物质的性质进行研究,从而开创了核物理的一个新的研究领域. 相应地,理论核物理学家们也建立了不同的重离子微观输运理论,比较广泛和成功使用的有 BUU (Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck) 方程[1]、 B-L (Boltzmann-Langevin) 方程[2]、QMD(Quantum Molecular Dynamics) 模型[3]、 FMD(Fermionic Molecular Dynamcs) 模型[4]、AMD(Antisymmetric Molecular Dynamics) 模型[5]等. 不同模型对不同问题或不同侧面取得了成功,并各具优缺点. 它们的一个共同特点就是都采用了零程的 Skyrme 型有效相互作用. 然而,核力实际上应是有限程的,尤其在相对动量较高时(大于 $2k_F$),核力的有限程显得尤为重要[6]. 核力的有限程本质上反映了核力的动量相关,这可以从核力的 Fourier 变换中看出[7]. 当然,人们已经在微观输运理论中唯象地引入了动量相关势[1,8,9],但是它会导致一些非真实的物理行为[6].

作为对核力有限程效应的一个初步探讨,在同位旋相关的 QMD 模型[10](包括同位旋相关的平均场、两体碰撞及 Pauli 阻塞)中,将零程的 Skyrme 型两体有效相互作用改为有限程的 Gaussian 型两体有效相互作用. 考虑到核力的有限程反映了核力的动量相关,我们对反应系统 ^{93}Nb(E = 400MeV/ u, b = 3fm) + ^{93}Nb 中的横动量进行了分析,观察到引

1997-06-06收稿

* 国家自然科学基金(19609033)和中国科学院科学基金和国家教委留学人员科研费资助

入有限程的核力确实会使反应系统的横动量增强，可以部分地代替核力中的动量相关，从而很自然地部分引入了核子–核子相互作用中的动量相关.

2 模型及方法

在 QMD 模型中，每个核子都由相空间中的一个双 Gaussian 波包所表示，整个系统的 Wigner 分布函数为

$$f(\boldsymbol{r},\ \boldsymbol{p},\ t)=\sum_i f_i(\boldsymbol{r},\ \boldsymbol{p},\ t)=\sum_i \frac{1}{(\pi\hbar)^3}\exp\left[-\frac{(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_i(t))^2}{2L}-\frac{(\boldsymbol{p}-\boldsymbol{p}_i(t))^2\cdot 2L}{\hbar^2}\right], \tag{1}$$

Gaussian 波包宽度 $L=2.0\mathrm{fm}^2$. 在 QMD 模型中，两体和三体势分别为

$$U_{ij}^{(2)}=\int f_i(\boldsymbol{r},\ \boldsymbol{p},\ t)\,V_{ij}^{(2)}(\boldsymbol{r},\ \boldsymbol{r}')\,f_j(\boldsymbol{r}',\ \boldsymbol{p}',\ t)\,\mathrm{d}\boldsymbol{r}\mathrm{d}\boldsymbol{p}\mathrm{d}\boldsymbol{r}'\,\mathrm{d}\boldsymbol{p}', \tag{2}$$

$$U_{ijk}^{(3)}=\int f_i(\boldsymbol{r},\ \boldsymbol{p},\ t)f_j(\boldsymbol{r}',\ \boldsymbol{p}',\ t)\,f_k(\boldsymbol{r}'',\ \boldsymbol{p}'',t)\,V_{ijk}^{(3)}(\boldsymbol{r},\ \boldsymbol{r}',\boldsymbol{r}'')\ \mathrm{d}\boldsymbol{r}\mathrm{d}\boldsymbol{p}\mathrm{d}\boldsymbol{r}'\,\mathrm{d}\boldsymbol{p}'\,\mathrm{d}\boldsymbol{r}''\,\mathrm{d}\boldsymbol{p}'', \tag{3}$$

两体相互作用 $V_{ij}^{(2)}$ 包括局域部分 V_{ij}^{loc} (即零程的 Skyrme 相互作用)、Yukawa 部分 V_{ij}^{Yuk}、对称能部分 V_{ij}^{sym} 和库仑相互作用 V_{ij}^{Coul}. 相应地在 QMD 模型中，两体势为

$$U_{ij}^{(2)}=U_{ij}^{\mathrm{loc}}+U_{ij}^{\mathrm{Yuk}}+U_{ij}^{\mathrm{sym}}+U_{ij}^{\mathrm{Coul}}, \tag{4}$$

U_{ij}^{Yuk}、U_{ij}^{sym} 和 U_{ij}^{Coul} 的具体表达式见文献 [11]和 [12]. 两体 Skyrme 相互作用

$$V_{ij}^{\mathrm{loc}}=t_1\delta(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_j), \tag{5}$$

由 (2)式，得到两体 Skyrme 势为

$$U_{ij}^{\mathrm{loc}}=t_1\frac{1}{(4\pi L)^{3/2}}\exp\left[-\frac{(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_j)^2}{4L}\right]. \tag{6}$$

三体 Skyrme 相互作用

$$V_{ijk}^{(3)}=t_2\delta(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_j)\,\delta(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_k), \tag{7}$$

由 (3)式，得到三体 Skyrme 势为

$$U_{ijk}^{(3)}=\frac{t_2}{3^{3/2}(2\pi L)^3}\exp\left[-\frac{(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_j)^2+(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_k)^2+(\boldsymbol{r}_j-\boldsymbol{r}_k)^2}{6L}\right]. \tag{8}$$

在 QMD 模型中，为了探索核物质的状态方程，可引入相互作用密度

$$\rho_{\mathrm{int}}^{i}(\boldsymbol{r}_i)=\frac{1}{(4\pi L)^{3/2}}\sum_{j\neq i}\exp\left[-\frac{(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_j)^2}{4L}\right], \tag{9}$$

此时,(6)式和(8)式可以化成[13]

$$U^{\mathrm{loc}} = \alpha\left(\frac{\rho_{\mathrm{int}}}{\rho_0}\right) + \beta\left(\frac{\rho_{\mathrm{int}}}{\rho_0}\right)^{\gamma}, \tag{10}$$

式中ρ_0为基态时的饱和密度. 不同的势参数α、β和γ对应不同的核物质状态方程(EOS),最常用的有两组参数,即所谓的硬势(H)及软势(S),分别对应硬的及软的 EOS,见表 1.

表1 不考虑动量相关势时软势及硬势的势参数

α/MeV	β/MeV	γ	K/MeV	EOS
−124	70.5	2	380	H
−356	303	7/6	200	S

考虑到核力的动量相关,人们唯象地引入了动量相关相互作用[9],即

$$V_{ij}^{\mathrm{MDI}} = t_4 \ln^2[t_5(\boldsymbol{p}_i - \boldsymbol{p}_j)^2 + 1]\delta(\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_j), \tag{11}$$

它是从光学势的实部中提取出来的,式中 $t_4 = 1.57\mathrm{MeV}$, $t_5 = 5.0\times10^{-4}(\mathrm{MeV}/c)^{-2}$. 为了得到合理稳定的基态,需重新调整参数$\alpha$、$\beta$和 γ, 对应于硬势(HM)和软势(SM)的势参数见表 2.

表2 考虑动量相关势时软势及硬势的势参数

α/MeV	β/MeV	γ	K/MeV	EOS
−129.2	59.4	2.09	380	HM
−390.1	320.3	1.14	200	SM

如果将(5)式改成有限程的 Gaussian型两体相互作用,即

$$V_{ij}^{\mathrm{loc}} = t_1 \frac{1}{\Delta^3\pi^{3/2}} \exp\left[-\frac{(\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_j)^2}{\Delta^2}\right], \tag{12}$$

式中Δ表示 Skyrme 相互作用力程. 将(12)式代入(2)式,经过较复杂的运算后,可得到有限程的 Gaussian 型两体势为

$$U_{ij}^{\mathrm{loc}} = t_1 \frac{1}{\left[4\pi\left(L + \frac{\Delta^2}{4}\right)\right]^{3/2}} \exp\left[-\frac{(\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_j)^2}{4\left(L + \frac{\Delta^2}{4}\right)}\right]. \tag{13}$$

比较(13)式与(6)式可以看到,用(12)式代替(5)式后,在 QMD模型中计算两体势时,只需将 Skyrme 型的两体势中的 L简单地换成 $L + \frac{\Delta^2}{4}$即可. 对零程的 Skyrme 型的两体相互作用,即采用(5)式时,没有考虑核子-核子相互作用中的短程排斥芯性质. 采用(12)式时,相当于对排斥芯进行了模拟,Δ的值应与排斥芯的半径相当,即$\Delta \approx 0.4$—$0.6\mathrm{fm}$. 核力的

长程吸引部分主要来自于 Yukawa 势的贡献．当 L 换成 $L+\frac{\Delta^2}{4}$，$\Delta \approx 0.4$—0.6fm 时，(10)式中的 α 略有变化，为了计算方便，引入有限程的两体势后，我们仍然使用表 1 中的参数．

类似地，可以将(7)式改为有限程的 Gaussian 型三体相互作用，即

$$V_{ijk}^{(3)} = t_2\left(\frac{1}{\pi\Delta^2}\right)^3 \exp\left[-\frac{(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_j)^2+(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_k)^2}{\Delta^2}\right], \tag{14}$$

将(14)式代入(3)式，可得到有限程的 Gaussan 型三体势为

$$U_{ijk}^{(3)} = \frac{t_2}{3^{3/2}\left[2\pi\sqrt{\left(L+\frac{\Delta^2}{6}\right)\left(L+\frac{\Delta^2}{2}\right)}\right]^3}\times \exp\left\{-\frac{(\Delta^2+2L)[(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_j)^2+(\boldsymbol{r}_i-\boldsymbol{r}_k)^2]+2L(\boldsymbol{r}_j-\boldsymbol{r}_k)^2}{12\left(L+\frac{\Delta^2}{6}\right)\left(L+\frac{\Delta^2}{2}\right)}\right\}, \tag{15}$$

可见形式很复杂．一般来说，Skyrme 型的有效相互作用对三体势是一个比较好的近似，于是在模型中三体势仍然使用零程的 Skyrme 型有效相互作用．

3　计算结果及讨论

利用同位旋相关的 QMD 模型，分别在硬势(H)、软势(S)、软势加动量相关(SM)、软势加 $\Delta = 0.1$fm(S，0.1)以及软势加 $\Delta = 0.5$fm(S，0.5)等 5 种情况下，对反应系统 ^{93}Nb($E = 400$MeV/u，$b = 3$fm) + ^{93}Nb 中的横动量进行了分析．图 1 给出了 5 种情况下

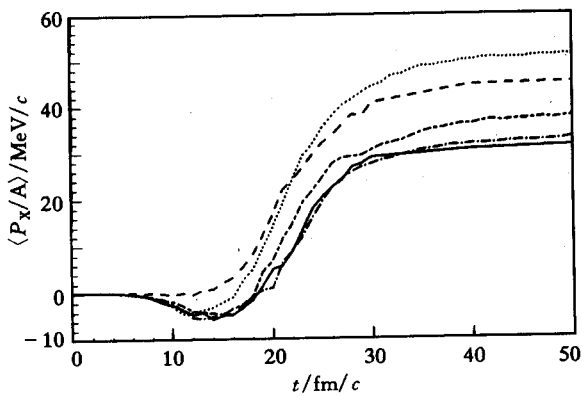

图 1　平均每核子横动量的时间演化

···· H；—— S；— — SM；·—·S，0.1；-——-S，0.5．

平均每核子横动量的时间演化．从图中可以看到，在时间演化的早期，除SM外，其余4种情况下都出现了负的横动量．这是由于时间演化的早期，弹核与靶核还未接触，吸引的平均场占主导地位，导致出现负的横动量，而考虑动量相关势时，由于弹核与靶核开始时就具有较大的相对动量，排斥的动量相关势使得反应系统未出现负的横动量．随着时间的演化，弹核与靶核开始碰撞、压缩、膨胀，产生正的横动量，当 $t = 40\mathrm{fm}/c$ 时，横动量达到饱和．从图中可以看到，在饱和区采用硬势(H)时横动量最大，软势加动量相关(SM)次

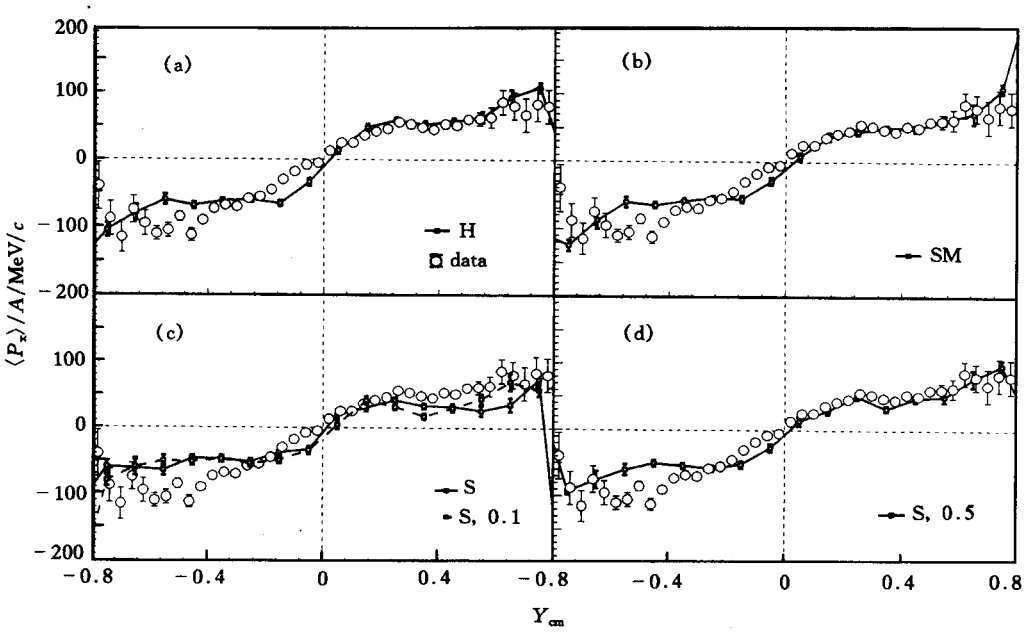

图2 不同情况下横动量的快度分布

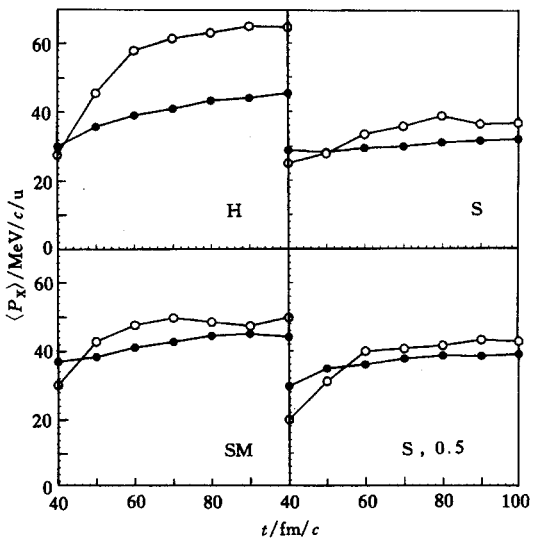

图3 自由核子(A=1，点)与轻碎片(A=2—4，空心圆)中平均每核子的横动量的时间演化

之，采用软势(S)时最小．软势加$\Delta = 0.1$fm(S，0.1)时的横动量与采用软势(S)时差不多，略有增加．软势加$\Delta = 0.5$fm(S，0.5)时较软势(S)有较大增加，但比软势加动量相关(SM)时还是要小约 8MeV/c．这说明$\Delta = 0.5$fm 时只能部分地代替动量相关．

为了与实验值进行比较，在图 2 中给出了不同情况下横动量的快度分布，图中带误差棒的大空心圆代表实验值，它们取自文献[14]．图 2(a)表示硬势(H)的情况，可以看到理论与实验基本符合，理论值比实验值略大一点．图 2(b)是软势加动量相关(SM)的情况，理论与实验符合得更好．图 2(c)中实线和虚线分别代表软势(S)及软势加$\Delta = 0.1$fm(S，0.1)的情况，理论与实验符合较差．图 2(d)表示软势加$\Delta = 0.5$fm(S，0.5)的情况，可以看到理论与实验基本符合，理论值比实验值略小一点．

在图 3 中给出了不同情况下自由核子($A = 1$，点)与轻碎片($A = 2$—4，空心圆)中平均每核子的横动量的时间演化．这里是用并合模型[15]来构造碎片的，并合半径 $R_0 = 3.5$fm，$P_0 = 260$MeV/c．从图中可以看到，在不同情况下碎片中平均每核子的横动量都大于自由核子的横动量，这与许多实验结果相一致[16—18]．

4 小结

在同位旋相关的 QMD 模型的基础上，将零程的 Skyrme 型两体相互作用换成有限程的 Gaussian 型的两体相互作用，通过采用不同的相互作用势对反应系统 ^{93}Nb($E = 400$MeV/u，$b = 3$fm) + ^{93}Nb 中横动量的分析，发现引入有限程的 Gaussian 型核力会使反应系统的横动量增大，可以部分地代替核子-核子相互作用中的动量相关部分．当有限程参数$\Delta = 0.5$fm 时，理论值与实验值基本符合．同时观察到碎片的横动量大于自由核子的横动量，这与许多实验结果是一致的．

本文是对核力有限程效应的一个初步探讨，还有许多值得改进的地方．例如，两体力采用有限程的 Gogny 力[7]，同时考虑有限程的三体力，这样就更为真实合理．当然这是一个很复杂的问题，尤其涉及到许多模型参数的确定．另外，核力的有限程对其它物理现象有何影响，这也是一个很有趣的问题．进一步的研究正在进行之中．

感谢葛凌霄老师生前的指导和讨论．

参　考　文　献

[1] Bertsch G F, Gupta S Das. Phys. Rep., 1988, **160**(4):189—233
[2] Zhang F S, Suraud E. Phys. Rev., 1995, **C51**(6):3201—3210
[3] Aichelin J. Phys. Rep., 1991, **202**(5,6):233—360
[4] Feldmeier H. Nucl. Phys., 1990, **A515**(1):147—172
[5] Ono A et al. Prog. Theor. Phys., 1992, **87**(5):1185—1206
[6] Idier D et al. Ann. Phys. Fr., 1994, **19**(2):159—263
[7] Ring P, Schuck P. The Nuclear Many-Body Problem, New York: Springer-Verlag, 1980, 172—174
[8] Schurmann B et al. Phys. Rep., 1987, **147**(1):1—85
[9] Aichelin J et al. Phys. Rev. Lett., 1987, **58**(19):1926—1929

[10] Chen Liewen et al. J. Phys., 1997, **G23**:211—218
[11] Hartnack. C Z. X. Li. Nucl. Phys., 1989, **A495**(3,4):303c—320c
[12] Zhu Quanling et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1992, **16**(7):658—665;
(朱全伶等. 高能物理与核物理, 1992, **16**(7):658—665);
Chen Liewen et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1996, **20**(12):1091—1096
(陈列文等. 高能物理与核物理, 1996, **20**(12):1091—1096)
[13] Hartnack C et al. Rapport Interne SUBATECH 96—13
[14] Ritter H G et al. Nucl. Phys., 1985, **A447**:3c—12c
[15] Zhang F S. Z. Phys., 1996, **A356**(2):163—170
[16] Bowman D R et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **67**(12):1527—1530
[17] Hubele J et al. Z. Phys., 1991, **A340**(3):263—270
[18] Peter J. In: Inter. Symp. on Heavy Ion Phys. and Its Appli., Lanzhou, China 8—12 Oct., Singapore: World Scientific, 1990. 191—201

Finite Range Effects of Local Interaction in Intermediate Energy HIC*

Chen Liewen Zhang Fengshou Zeng Xianghua

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

Abstract A finite range Gaussian 2-body interaction is applied in stead of the zero range 2-body part of the Skyrme interaction in the isospin-dependent quantum molecular dynamics model to simulate the transverse momentum in the reaction of system ^{93}Nb (E = 400MeV / u, b = 3fm) + ^{93}Nb. The results show that the finite range nuclear force enhances the transverse momentum of the reaction system and it can partly replace the momentum-dependent part of the nucleon-nucleon interaction.

Key words isospin-dependent QMD model, Skyrme interaction, finite range nuclear force, transverse momentum

Received 6 June 1997

* Project 19609033 Supported by the National Natural Science Foundation of China and Project Supported by Science Foundation of Chinese Academy