

中能重离子碰撞中平衡能同位旋效应*

陈列文^{1,2} 张丰收^{1,2,3} 靳根明^{1,2}

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 (中国高等科学技术中心 北京 100080)

摘要 利用同位旋相关的量子分子动力学模型,计算了 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 两个反应系统在不同碰撞参数下的平衡能.观察到在不同碰撞参数下丰中子反应系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 比 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 有更高的平衡能.计算结果能与实验数据定性符合.

关键词 同位旋相关的 QMD 模型 集体流 平衡能 同位旋效应

1 引言

次级束流装置在世界许多国家的相继建成并投入使用,使得放射性核束物理学成为当前核物理发展的一个主流.人们希望通过放射性核束物理学的研究来探索远离 β 稳定线核的性质以及核反应中的同位旋效应,检验传统核模型在远离 β 稳定线区的适应性,进一步发展相关的核模型.关于这方面的综述性讨论可见文献[1—4].

近来,人们在实验上和理论上对中能重离子碰撞中的同位旋效应进行了一些探索^[5—9],尤其是同位旋相关的集体流引起了极大的兴趣^[10—13].在文献[13]中利用同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型,研究了55MeV/u $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和55MeV/u $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 两个反应中的碎片流及其同位旋效应.结果表明,在不同碰撞参数下对不同类型的碎块,丰中子反应系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 比稳定核反应系统 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 有更强的集体流.同时,观察到同位旋相关的对称能与核子-核子碰撞截面都起着排斥的作用,在较低能量下,使流参数强度变小.

人们通过集体流的能量、质量及碰撞参数的相关性的研究,逐渐清楚了集体流的性质及其起因.特别是通过集体流的能量相关性的研究,发现了平衡能 E_{bal} ,在入射能量等于 E_{bal} 时反应平面内的横向集体流消失^[14].理论研究表明,横向集体流的强度及 E_{bal} 可以用来提取关于核物质的状态方程,以及介质中核子-核子碰撞截面的信息^[15—17].而研究放

1998-04-20收稿

* 国家自然科学基金(19609033),中国科学院基金项目和国家教委留学人员科研费资助

射性核引起的反应中的集体流,对探索核物质状态方程的同位旋相关部分及同位旋相关的核子-核子碰撞截面是非常有意义的.

为了探索实验上测得的平衡能同位旋效应,利用 IQMD 模型,在不同碰撞参数下计算了反应系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 的平衡能. 不难看到,这两个反应系统的差别仅仅是中质比 N/Z 不一样,前者的 N/Z 是 1.23,后者的是 1.07. 计算结果能与实验结果定性符合.

2 同位旋相关的 QMD 模型

QMD 模型本质上是经典的,因为其时间演化是由经典的正则运动方程决定的. 然而, QMD 模型同时也包含了许多重要的量子特征. 关于 QMD 模型综合性的描述可见文献 [18].

中能重离子碰撞动力学主要由平均场、两体碰撞和泡利阻塞这三个要素所支配. 因此对于一个同位旋相关的反应动力学模型至少要求这三个要素都适当地包含同位旋自由度. 另外,在弹核与靶核的初始化过程中区分中子和质子也是十分必要的. 特别对于丰中子核,初始化得到的核应具有中子皮结构,这样人们就可以通过微观输运模型来直接研究反应中的结构效应. IQMD 模型正是基于以上思想而发展起来的^[13].

在 IQMD 模型中,系统的总的相互作用势可表示为

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

其中 U^{dd} 、 U^{Yuk} 、 U^{sym} 、 U^{Coul} 和 U^{MDI} 分别表示密度相关势 (Skyrme 势)、Yukawa 势 (表面势)、对称能项、库仑势和动量相关势,不同的势参数对应不同的核物质状态方程 (EOS),最常用的有两组参数,即硬势 (H) 及软势 (S),分别对应硬的及软的 EOS. 考虑动量相关相互作用后,为了得到合理稳定的基态,需重新调整势参数,对应于硬的及软的 EOS 势参数分别称为硬势加动量相关势 (HM) 和软势加动量相关势 (SM). 以上各项的具体表达式及参数见文献 [19].

在核子-核子碰撞过程中,采用了从实验提取的参数化截面,它是同位旋相关的. 其具体形式见文献 [5]. 可以看到,当入射能量大约低于 300 MeV/u 时, n-p 的碰撞截面约为 n-n 或 p-p 碰撞截面的 3 倍. 在 IQMD 模型中,泡利阻塞是完全区分中子和质子的,其方法是:核子发生碰撞后,在相空间中以核子为中心构造一个体积为 $\hbar^3/2$ 的球 (考虑了自旋自由度, \hbar 为普朗克常数),然后考察此球被其它的和它具有相同同位旋的核子所占驻的几率,使该碰撞被阻塞或部分阻塞.

弹核与靶核的初始化过程是区分中子和质子的. 初始化过程的关键是如何得到一个合理的密度分布. 在 IQMD 模型中,首先利用 Skyrme-Hartree-Fock 方法^[20] 给出弹核与靶核的中子和质子的密度分布,然后利用 Monte-Carlo 方法分别抽样出弹核与靶核的中子和质子的径向位置. 在 QMD 模型中,径向密度为

$$\rho(r) = \sum_i \frac{1}{(2\pi L)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2 - r_i^2}{2L}\right) \frac{L}{2rr_i} \left[\exp\left(\frac{rr_i}{L}\right) - \exp\left(-\frac{rr_i}{L}\right) \right], \quad (2)$$

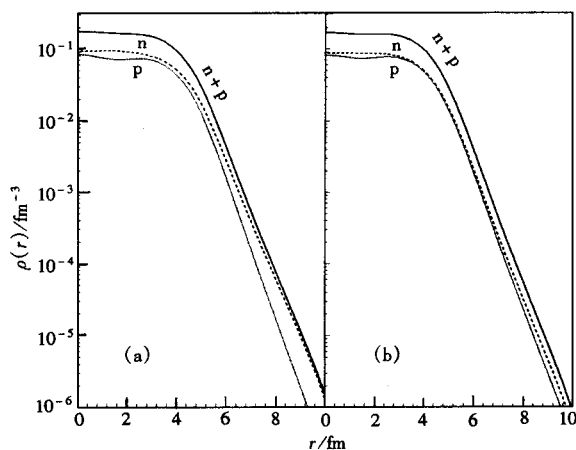


图 1 由 Skyrme-Hartree-Fock 计算得到的⁵⁸Fe(a)和⁵⁸Ni(b)的密度分布

式中 L 是 Gauss 波包宽度 (这里 $L = 2.0\text{fm}$), r_i 是第 i 个核子的径向位置. 由 Skyrme-Hartree-Fock 方法计算得到的⁵⁸Fe 和⁵⁸Ni 的密度分布见图 1. 抽样出的初始核⁵⁸Fe 和⁵⁸Ni 的密度分布可见文献 [13] 中的图 1. 可以看到, 对于丰中子核⁵⁸Fe 有一个很清楚的中子皮, 并且⁵⁸Fe 的核子密度分布比⁵⁸Ni 的核子密度分布要稍微扩展一些. 这些结果与 RMF 方法计算的结果是一致的^[10]. 核子在动量空间的抽样所采用的局域费米动量是区分中子和质子的, 即

$$p_F^j(r) = \hbar(3\pi^2\rho_j(r))^{1/3}, \quad (j = n, p) \quad (3)$$

对初始核在基态时传播的稳定性已作了详细的检验.

3 计算结果及讨论

由于吸引的核平均场与排斥的核子-核子碰撞两者之间的竞争, 当入射能量较低时 (低于平衡能), 吸引的核的平均场占优势, 反应平面内的横向集体流为负. 当入射能量较高时 (高于平衡能), 排斥的核子-核子碰撞占优势, 反应平面内的横向集体流为正. 平衡能敏感地依赖于反应系统的质量数、碰撞参数以及碰撞核的性质, 比如表面厚度^[21].

利用 IQMD 模型, 在碰撞参数 $b = 3\text{fm}$ 时, 得到了系统⁵⁸Fe + ⁵⁸Fe 和⁵⁸Ni + ⁵⁸Ni 在 80, 150 MeV/u 两个能量下横动量的快度分布, 见图 2(a) 和 (b). 所用势参数为 SM. 从图 2 可以看到, 对于两个反应系统, 当入射能量为

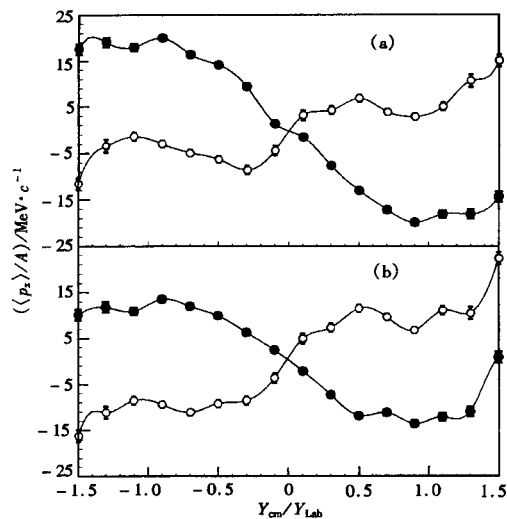


图 2 ⁵⁸Fe + ⁵⁸Fe(a)和⁵⁸Ni + ⁵⁸Ni(b)在 80(圆点)和 150(圆圈) MeV/u 两个能量下横动量的快度分布

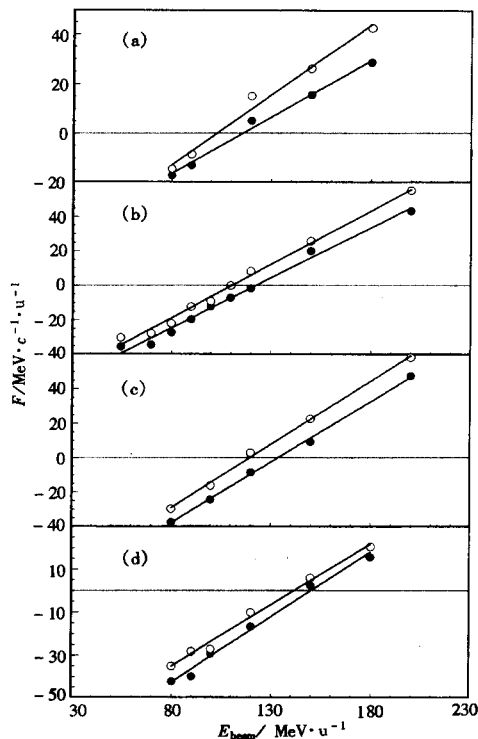


图 3 不同碰撞参数下反应系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ (圆点)和 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ (圆圈)流参数的能量相关
(a) $b = 2\text{fm}$, (b) $b = 3\text{fm}$, (c) $b = 4\text{fm}$, (d) $b = 5\text{fm}$,
直线表示线性拟合.

80MeV/u 时,在中心快速区都出现了负的坡度,此时流参数(F)为负值,对应于负的散射角.相反,当入射能量为 150MeV/u 时,流参数为正值,对应于正的散射角.这说明系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 的平衡能都介于 80 和 150MeV/u 之间.

在计算中一般用如下方法得到平衡能:通过对流参数的能量相关进行线性拟合,找出拟合的直线通过流参数为零的点,这一点所对应的能量即平衡能.图 3(a)、(b)、(c)和(d)分别给出了碰撞参数 $b = 2, 3, 4, 5\text{fm}$ 时反应系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 流参数的能量相关.所用势参数为 SM.图中实线是对流参数能量相关的线性拟合.从图中可以看到,在所给的碰撞参数下,丰中子系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 比 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 有较小的流参数,这表明丰中子系统有更吸引的核平均场.从图 3 中可以提取不同碰撞参数下的平衡能.图 4(a)给出了不同约化碰撞参数下的平衡能($b_{\text{max}} = 8\text{fm}$),包括使用势参数 SM 和 HM 的计算结果以及实验数据^[12].为了清楚起见,除使用 SM 势对 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 的计算结果以及

对 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 的实验数据以外,图 4(a)的数据都作了微小的横向移动.从图 4(a)可以看到,无论是用 SM 势还是用 HM 势,计算结果都能在趋势上与实验数据符合.随着碰撞参数的增加,平衡能近似线性增长,这与其它的计算是一致的^[22,23].另外可以看到,使用 SM 势和 HM 势计算所得到的平衡能相差不大,这暗示着平衡能对不可压缩系数不大敏感,这与 BUU 的计算结果是一致的^[24].

从图 4(a)还可以看到,无论是用 SM 势还是用 HM 势, IQMD 的计算结果系统性地大于实验结果.然而,这里更重要的是平衡能的同位旋效应.图 4(b)给出了系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 的平衡能差值 δE_{bal} ,可以看到计算结果在误差范围内与实验数据符合.为了清楚起见,图 4(b)对 HM 势的结果作了微小的横向移动.

事实上,文献 [13] 中用 IQMD 模型计算的不同碎片的流参数也都系统性地大于实验值,但其同位旋效应也能与实验结果定量符合.造成计算结果系统性地大于实验结果的原因可能主要是由于初始核的较低的饱和密度.从文献 [13] 中图 1 可以看到初始核 ^{58}Fe 和 ^{58}Ni 的最大密度大约都是 0.12fm^{-3} ,小于正常核物质的饱和密度 (0.16fm^{-3}),而我们知道核物质状态方程的同位旋非相关部分在低于饱和密度时是吸引的.其实,从方程 (2) 可以看到,在 QMD 模型中,径向密度是与 Gauss 波包宽度 L 相关的.即使核子的径向位置

是合理的, 但由方程(2)得到的径向密度与实际的径向密度会存在一些偏差, 而且 L 越大, 偏差也越大. 如何抽样核子的径向位置而使由方程(2)得到的径向密度趋近于真实的径向密度, 这是值得进一步探讨的, 我们将在后继的工作中对这一问题进行研究. 幸运的是, 这个问题并不会影响研究集体流及平衡能的同位旋相关性, 因为抽样出的初始核 ^{58}Fe 具有一个清楚的中子皮结构, 而 ^{58}Ni 没有皮结构. IQMD 模型计算的碎块流及平衡能的同位旋相关性能与实验结果定量符合, 这表明 IQMD 模型对同位旋自由度的考虑是合理的.

4 小结

在 IQMD 模型中, 考虑了同位旋相关的库仑能、对称能、核子-核子碰撞截面及泡利阻塞. 另外在初始化时, 核子在相空间中的抽样是区分中子和质子的.

利用 IQMD 模型, 计算了 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 两个反应中的平衡能. 计算结果表明, 在不同碰撞参数下, 丰中子反应系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 比 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 有更高的平衡能, 计算值与实验结果在趋势上符合. 计算得到的平衡能系统性地大于实验值, 但其同位旋相关性能与实验结果定量符合.

平衡能的同位旋相关性主要是由对称能和同位旋相关的核子-核子碰撞截面等因素共同决定的. 本工作对核物质状态方程的同位旋相关部分作了些探索. 另外, 从本文的分析中也可以看到, 研究集体流及平衡能的同位旋相关性对于探索同位旋相关的反应动力学是非常有意义的.

参 考 文 献

- Bertulani C A et al. Phys. Rep., 1993, 226(6):281—376
- Zhukov M V et al. Phys. Rep., 1993, 231:151—199
- Tanihata I. Prog. Part. Nucl. Phys., 1995, 35:505
- Li B A, Ko C M, Bauer W. Preprint MSUCL-1078(1997)
- Chen Liewen, Zhang Xiaodong, Ge Lingxiao. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1996, 20(12):1091—1096
(陈列文, 张晓东, 葛凌霄. 高能物理与核物理, 1996, 20(12):1091—1096)
- Kunde G J et al. Phys. Rev. Lett., 1996, 77(14):2897—2900
- Li B A, Ko C M, Ren Z Z. Phys. Rev. Lett., 1997, 78(9):1644—1647

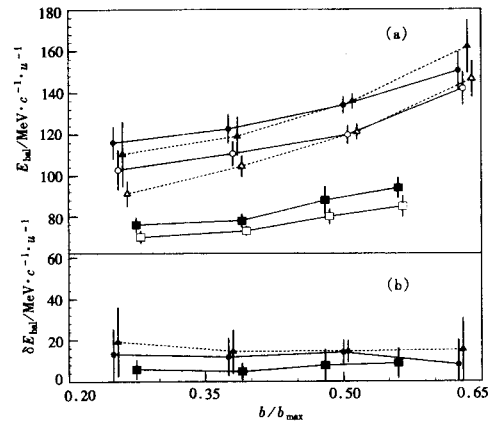


图 4 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 的平衡能和平衡能的差值

(a) 不同约化碰撞参数下的平衡能

■ $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$, 实验数据; ● $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$, IQMD, SM;
▲ $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$, IQMD, HM; □ $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$, 实验数据;
○ $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$, IQMD, SM; △ $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$, IQMD, HM.

(b) $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 平衡能的差值

■ 实验数据; ● IQMD, SM; ▲ IQMD, HM.

- 8 Li B A, Yennello S J. *Phys. Rev.*, 1995, **C52**(4):R1746—R1749
- 9 Chen L W et al. *J. Phys.*, 1997, **G23**:211—218
- 10 Li B A et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(24):4492—4495
- 11 Pak R et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(6):1022—1025
- 12 Pak R et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(6):1026—1029
- 13 Chen Liewen, Zhang Fengshou, Zeng Xianghua et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* (in Chinese). 1998, **22**(11):1035
(陈列文, 张丰收, 曾祥华等. *高能物理与核物理*, 1998, **22**(11):1035)
- 14 Krofcheck D et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **63**(19):2028—2031
- 15 Danielewicz P, Odyniec G. *Phys. Lett.*, 1985, **B157**(2,3):146—150
- 16 Xu H M. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **67**(20):2769—2772
- 17 Zhou H B et al. *Nucl. Phys.*, 1994, **A580**:627—642
- 18 Aichelin J. *Phys. Rep.*, 1991, **202**(5,6):233—360
- 19 Chen Liewen, Zhang Fengshou, Zeng Xianghua. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* (in Chinese), 1998, **22**(6):538
(陈列文, 张丰收, 曾祥华. *高能物理与核物理*, 1998, **22**(6):538)
- 20 Reinhard P G. In: *Computational Nuclear Physics 1.*, Germany: Springer-Verlag, 1991, 28—50
- 21 Klakow D, Welke G, Bauer W. *Phys. Rev.*, 1993, **C48**(4):1982—1987
- 22 Soff S et al. *Phys. Rev.*, 1995, **C51**(6):3320—3325
- 23 Pak R et al. *Phys. Rev.*, 1996, **C54**(5):2457—2462
- 24 Bauer W. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **61**(22):2534—2537

Isospin Effects on Balance Energy in HIC at Intermediate Energies *

Chen Liewen^{1,2} Zhang Fengshou^{1,2,3} Jin Genming^{1,2}

1 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000)

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

3 (CCAST (World Laboratory) Beijing 100080)

Abstract Within the framework of an isospin-dependent quantum molecular dynamics model, the balance energy has been calculated for reaction systems $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ and $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ at different impact parameters. It is shown that the balance energy of the neutron-rich system $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ is higher than that of the system $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$, which could be in qualitative agreement with the results of the experiments.

Key words isospin-dependent QMD model, collective flow, balance energy, isospin effect

Received 20 April 1998

* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19600933), the Science Foundation of the Chinese Academy of Sciences, and the Science Foundation of the Chinese Educational Commission