

中能重离子碰撞中集体流的同位旋效应*

陈列文 张丰收 曾祥华 靳根明

(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的基础上,利用 Skyrme-Hartree-Fock 计算所得的中子、质子密度,同时利用费米气体模型得到相应的中子、质子费米面,抽样出稳定的 ^{58}Fe 和 ^{58}Ni 初始核.仔细研究了 $55\text{MeV}/u$ $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和 $55\text{MeV}/u$ $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 两个反应中集体流的同位旋效应.在不同碰撞参数下对不同类型的碎块,观察到丰中子反应系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 比 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 有更强的集体流,并能与实验结果定性符合.同时,研究了同位旋相关的对称能与核子-核子碰撞截面对集体流的影响.

关键词 同位旋相关的 QMD 模型 集体流 同位旋效应

1 引言

近十年来,随着次级束流装置在世界许多国家相继建成,次级束流得到了应用,为重离子物理开辟了一个新的研究领域-放射性核束(RNB)物理学.这就使得人们对同位旋自由度的研究提到了一个新的高度.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核子前平衡发射的同位旋效应^[5-7]以及同位旋自由度的平衡与非平衡的研究^[8,9],尤其是对同位旋相关的集体流的研究引起了极大的兴趣^[10-12].集体流是人们在中能重离子碰撞中发现的一种集体现象.人们已逐步清楚了集体流的能量、质量及碰撞参数的相关性.特别是通过集体流的能量相关性的研究,人们发现了平衡能 E_{bal} ,在入射能量为 E_{bal} 时反应系统的横向集体流消失.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,以及核子-核子碰撞截面的信息^[13-15].而研究放射性核引起的反应中的集体流,对提取同位旋相关的核物质状态方程是非常有意义的.

人们利用同位旋相关的 BUU 方程,发现了集体流的同位旋相关性,并为实验所证实.该方程能够证明在平衡能以下,由较丰中子核引起的反应具有较强的横向集体流^[10],并将这种现象解释为同位旋相关的核子-核子碰撞截面和同位旋相关的平均场等机制间的竞

1997-11-18收稿

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

争所造成的,但没有给出各机制间的相对重要性.另外,BUU方程未能包括高阶关联效应,因此不能从物理上正确地描述碎块的集体流.

为了探索实验上测得的集体流的同位旋效应,在原来的量子分子动力学(QMD)模型的基础上^[16-18],发展了一个同位旋相关的QMD模型,称之为IQMD模型.利用IQMD模型,研究了 $55\text{MeV}/u$ $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和 $55\text{MeV}/u$ $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 两个反应中的集体流及其同位旋效应.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.计算结果与实验结果定性符合.

2 同位旋相关的量子分子动力学模型(IQMD)

关于QMD模型较详细的一般性描述可参见文献[18].下面主要介绍IQMD模型中的一些主要思想.

大家知道,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括同位旋自由度.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.IQMD模型正是基于以上思想而发展起来的.下面就从平均场、两体碰撞、泡利阻塞以及初始化这四个方面对IQMD模型作一简单的介绍.

2.1 平均场

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].

2.2 两体碰撞

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 $300\text{MeV}/u$ 时, n - p 的碰撞截面约为 n - n 或 p - p 碰撞截面的3倍.

2.3 泡利阻塞

在IQMD模型中,泡利阻塞效应的考虑方法是: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 $h^3/2$ 的球(考虑了自旋自由度, h 为普朗克常数),然后考察此球被其它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.可见在IQMD模型中,泡利阻塞是完全区分中子和质子的.

2.4 初始化

在 IQMD 模型中,弹核与靶核的初始化过程是区分中子和质子的. 在初始化过程中关键是如何得到一个合理的密度分布. 大家知道, Skyrme-Hartree-Fock 方法对于稳定核和丰中子核都给出了一个合理的密度分布^[20]. 在 IQMD 模型中,首先利用 Skyrme-Hartree-Fock 方法^[21]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空间坐标. 在本文中,抽样出的初始核 ^{58}Fe 和 ^{58}Ni 的密度分布见图 1. 从图 1 中可以看到,丰中子核 ^{58}Fe 有一个很清楚的中子皮,并且 ^{58}Fe 的核子密度分布比 ^{58}Ni 的核子密度分布要稍微更扩展一些. 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

$$p_{\text{F}}^i(\mathbf{r}) = \hbar(3\pi^2\rho_i(\mathbf{r}))^{1/3}, \quad (i = n, p) \quad (2)$$

初始核在基态时传播的稳定性已作了详细的检验.

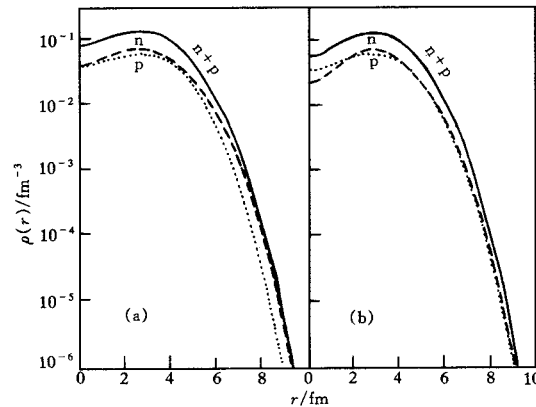


图1 ^{58}Fe (a)和 ^{58}Ni (b)初始核的密度分布

3 计算结果及讨论

利用上述的 IQMD 模型,我们计算了 $55\text{MeV}/u$ $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和 $55\text{MeV}/u$ $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 两个反应系统中的集体流(所用势参数为 SM). 在图 2(a), (b), (c)中分别给出了不同约化碰撞参数 b/b_{max} ($b_{\text{max}} = 8\text{fm}$)下,两个反应系统的 $Z = 3, 2, 1$ 的三种碎块的流参数 (F) 计算值和实验值. 这里碎块的选取用的是并合模型,并合半径 $R_0 = 2.4\text{fm}$ 和 $P_0 = 200\text{MeV}/c$ ^[22],为了排除非物理集团,对不同碎块的中子数 N 进行了限制: $Z = 1, N = 0-2$; $Z = 2, N = 1-6$; $Z = 3, N = 2-8$. 图中实验值是从约化碰撞参数的上限提取出来的^[11]. 计算表明以上三种碎块的多重性及横动量大约在 $t = 140\text{fm}/c$ 时都已基本上达到饱和,于是图 2 中的计算结果都是取 500 个事件中 $t = 150-200\text{fm}/c$ 中 6 个时间点共 3000 个数据点的结果,图中给出的误差为提取流参数时的拟合误差. 从图 2 中可以看到,计算结果与实验结果在趋势上能够较好地符合,尤其两个反应系统的差别非常明显地体现出了集体流的同位

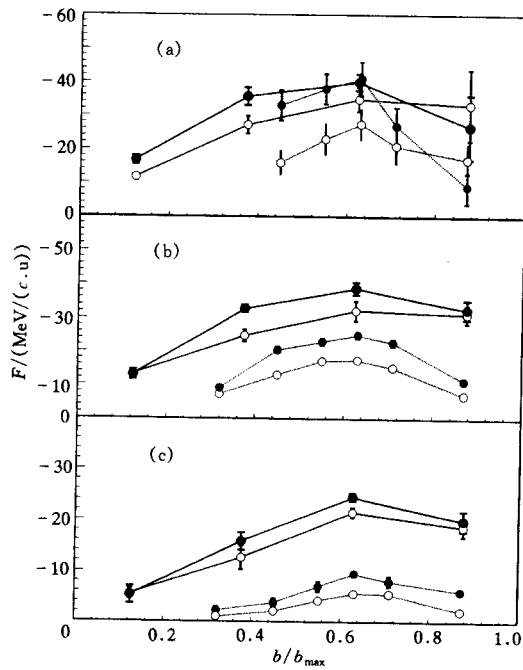


图 2 不同约化碰撞参数下反应系统

 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ (圆点) 和 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$

(圆圈) 的不同碎块的流参数

— 计算值, 实验值.

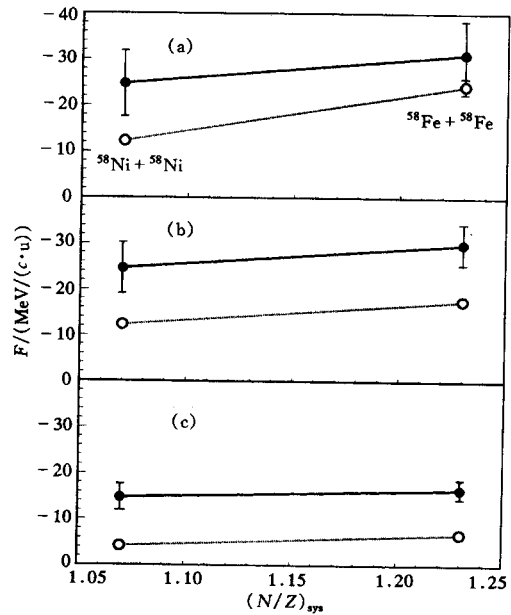
(a) $Z = 3$; (b) $Z = 2$; (c) $Z = 1$.

图 3 不同碎块的流参数与碰撞

系统的 N/Z 的关系

—●— 计算值, ...○... 实验值.

(a) $Z = 3$; (b) $Z = 2$; (c) $Z = 1$.

旋相关性, 较丰中子核引起的反应具有较强的横向集体流. 在较大碰撞参数时, 对 $Z = 3$ 的碎块计算结果和实验结果都出现了一个交叉, 这可能是由于在较大碰撞参数时, 核子-核子碰撞的几率已很小, 库仑相互作用越来越重要, 反应系统 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 较 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 对较重碎块有更强的库仑排斥. 另外, 从图中可以看到, 碎块越重集体流越强, 这与实验结果和其它计算结果是一致的^[11, 19, 23-25]. 为了更清楚地观察集体流与碰撞系统的 N/Z 的关系, 在图 3(a), (b), (c) 中分别给出 $Z = 3, 2, 1$ 三种碎块的流参数的计算值和实验值与碰撞系统的 N/Z 的关系. 计算时假设了事件数与碰撞参数成正比. 从图 3 中可以看到, 计算值与实验值在趋势上符合得很好, 这表明在 IQMD 模型中对同位旋自由度的考虑是恰当的.

为了探索集体流的同位旋效应, 研究对称能与核子-核子碰撞截面对集体流的影响是必要的. 当入射能量 $E = 55\text{MeV}/u$, 碰撞参数 $b = 5\text{fm}$ 时, 在对称能强度系数 $C = 0$ 及 32MeV , 碰撞截面取非同位旋相关的 Cugnon 参数化截面 (σ_{Cug}) 和同位旋相关的从实验提取的参数化截面 (σ_{exp}) 等不同情况下, 计算了 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 两个反应系统中的集体流. 图 4 给出了不同情况下平均每核子横动量的速度分布. 从图 4 中可以看到, 系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 比系统 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 具有更强的横向集体流. 为了得到一个定量的结果, 我们提取了不同情况下的流参数, 即约化质心系速度中心区横动量分布的斜率, 结果见表 1, 表中

给出的误差为线性拟合的统计误差. 从表 1 中可以看到, 从实验提取的同位旋相关的参数化核子-核子碰撞截面和对称能都使流参数的强度减小, 亦即它们都起到排斥的作用, 而且核子-核子碰撞截面对流参数的影响较大. 同时可以看到, σ_{exp} 对系统 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 的影响较大, 而对系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 的影响相对小一些, 这可以解释为: 当 $b = 5\text{fm}$ 时, 两系统在碰撞过程中重叠体积中的核子数是基本相等的, 但对于 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 中子数较多, 对于 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 中子数和质子数基本相等, 而采用 σ_{exp} 时, n-p 的碰撞截面约为 n-n 或 p-p 碰撞截面的 3 倍, 从而重叠体积中系统 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 的核子碰撞数较多, 导致更强的排斥. 另外, 还可以看到对称能对系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 的影响较大, 而对系统 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 影响很小, 这是由于前者中子和质子的密度分布差别较大, 而后者差别很小所导致的. 当 $C = 0$ (无对称能) 和采用 σ_{Cug} 时, 两系统流参数的差别主要来自 ^{58}Fe 更扩展的密度分布和库仑势的影响.

从上述的分析可以看到, 集体流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, 另外, 还与能量及碰撞参数等因素有关.

表 1 $E = 55\text{MeV}/u$, $b = 5\text{fm}$ 时, 反应系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 在不同情况下的流参数

反应系统	$C = 0$ 及 σ_{Cug}	$C = 0$ 及 σ_{exp}	$C = 32\text{MeV}$ 及 σ_{exp}
$^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$	$-34.8 \pm 2.14\text{MeV}$	$-29.1 \pm 1.12\text{MeV}$	$-27.9 \pm 1.24\text{MeV}$
$^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$	$-33.8 \pm 1.96\text{MeV}$	$-24.5 \pm 0.68\text{MeV}$	$-24.1 \pm 1.49\text{MeV}$

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区分了中子和质子.

利用以上的 IQMD 模型, 计算了 $55\text{MeV}/u$ $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ 和 $55\text{MeV}/u$ $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 两个

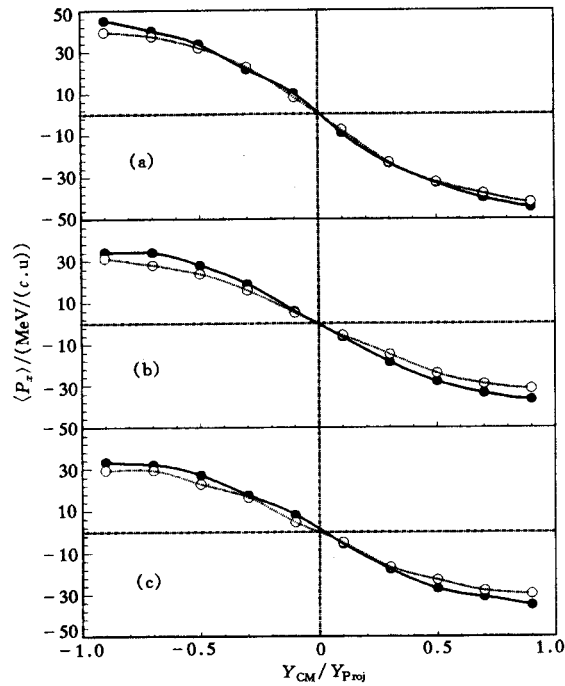


图 4 不同情况下反应系统 $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ (圆点) 和 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ (圆圈) 中平均每核子横动量的快度分布
碰撞参数 $b = 5\text{fm}$.

(a) $C = 0, \sigma_{\text{Cug}}$; (b) $C = 0, \sigma_{\text{exp}}$; (c) $C = 32\text{MeV}, \sigma_{\text{exp}}$.

反应中的集体流并探讨了其同位旋效应. 计算结果表明, 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 $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 有更强的集体流, 并能与实验结果定性符合. 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, 在平衡能以下, 使流参数强度变小.

集体流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. 本工作试图对核物质状态方程的同位旋相关部分作些探索. 同位旋相关的平衡能正在分析之中.

参 考 文 献

- [1] Bertulani C A et al. Phys. Rep., 1993, **226**(6):281—376
- [2] Zhukov M V et al. Phys. Rep., 1993, **231**:151—199
- [3] Tanihata I. Prog. Part. Nucl. Phys., 1995, **35**:505
- [4] Li B A, Ko C M, Bauer W. Preprint MSUCL-1078 (1997)
- [5] 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)
- [6] Kunde G J et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**(14):2897—2900
- [7] Li B A, Ko C M, Ren Z Z. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**(9):1644—1647
- [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] Danielewicz P, Odnyc G. Phys. Lett., 1985, **B157**(2,3):146—150
- [14] Xu H M. Phys. Rev. Lett., 1991, **67**(20):2769—2772
- [15] Zhou H B et al. Nucl. Phys., 1994, **A580**:627—642
- [16] Hartnack C, Li Z X. Nucl. Phys., 1989, **A495**(3,4):303c—320c
- [17] Zhu Quanling, Ge Lingxiao, Li Zhuxia. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1992, **16**(7):658—665
(朱全伶, 葛凌霄, 李祝霞. 高能物理与核物理, 1992, **16**(7):658—665)
- [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—544
(陈列文, 张丰收, 曾祥华. 高能物理与核物理, 1998, **22**(6):538—544)
- [20] Wen Wanxing, Jin Genming, Zhong Jiquan. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese) 1996, **20**(2):148—152
(文万信, 靳根明, 钟纪泉. 高能物理与核物理, 1996, **20**(2):148—152)
- [21] Reinhard P G. In: Computational Nuclear Physics 1., Germany: Springer-Verlag, 1991. 28—50
- [22] Zhang F S, Suraud E. Phys. Rev., 1995, **C51**(6):3201—3210
- [23] Bowman D R et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **67**(12):1527—1530
- [24] Hubele J et al. Z. Phys., 1991, **A340**(3):263—270
- [25] Peter J. In: Inter. Symp. on Heavy Ion Phys. and Its Appli., Lanzhou, China 8—12 Oct., Singapore: World Scientific, 1990. 191—201

Isospin Effects on Collective Flow in HIC at Intermediate Energies*

Chen Liewen Zhang Fengshou Zeng Xianghua Jin Genming

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

Abstract Based on an isospin-dependent quantum molecular dynamics model, the neutron and proton density calculated from Skyrme-Hartree-Fock theory, along with the neutron and proton Fermi momenta calculated from Fermi gas model, are used to sample stable initial nuclei, ^{58}Fe and ^{58}Ni . The isospin effects on collective flow in reaction systems $55\text{MeV/u } ^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ and $55\text{MeV/u } ^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ are studied in detail. At different impact parameters for different types of fragments, it is shown that the neutron-rich system $^{58}\text{Fe} + ^{58}\text{Fe}$ has stronger collective flow than the system $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$, which could qualitatively agree with the results of the experiments. Meanwhile, the effects of both isospin-dependent symmetry energy and nucleon-nucleon cross sections on collective flow are studied.

Key words isospin-dependent QMD model, collective flow, isospin effects

Received 18 November 1997

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