

挤出流的同位旋效应*

张丰收^{1,2,4} 陈列文^{1,2} 李文飞^{1,2} 朱志远^{1,3}

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(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

4(中国高等科学技术中心 北京 100080)

摘要 在同位旋相关的量子分子动力学模型框架下,研究了碰撞系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ 的挤出流及其同位旋效应.发现丰中子系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 表现出较小的挤出流,挤出流的这种同位旋相关性主要是由核子-核子碰撞截面的同位旋相关性所决定的,只与对称能微弱相关.

关键词 同位旋效应 挤出流 同位旋相关的量子分子动力学模型

人们研究重离子碰撞的主要目的之一就是提取高温高密核物质的状态方程以及介质中的核子-核子碰撞截面的信息^[1-3].大量的研究表明,重离子碰撞中的集体流现象为人们提取以上信息提供了良好的条件.在以前我们主要讨论了在平面集体流现象及其同位旋效应^[4,5],这里将研究垂直于反应平面的集体流现象,即出平面的挤出流及其同位旋效应.同平面集体流相比,挤出流特别令人感兴趣,这是因为垂直于反应平面的方向是唯一的一个不受弹靶余核阻碍而能够直接逃逸核物质的方向,这样提取的关于高温高密核物质的信息受到的干扰也就很小.出平面的挤出流已被流体动力学模型^[6]和其他微观模型^[7-9]所预言.通过对挤出流进行系统地研究,发现其性质与在平面的定向流非常相似^[10-12].随着放射性核束(RNB)物理的发展,人们能够研究远离 β 稳定线核引起的反应,从而为研究挤出流的同位旋效应提供了条件.人们期望通过研究挤出流的同位旋效应来探索介质中的核子-核子碰撞截面的同位旋相关性.

本文利用同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型研究了反应系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ 在不同入射能量及碰撞参数下的挤出流,发现挤出流存在强烈的同位旋相关性.同传统的量子分子动力学(QMD)模型相比,IQMD模型精确地包含了同位旋自由度,即同位旋相关核子-核子碰撞截面、对称能项、库仑势及同位旋相关的泡利阻塞.另外在初始化过程中也严格地区分了中子和质子.近来,IQMD模型已被成功地用来解释中能重离子碰撞中的一些同位旋效应^[4,5,13-15].在IQMD模型中原子核的平均场可以

2000-04-06 收稿

* 国家自然科学基金(19875068,19847002),国家重点基础研究发展规划(G2000077407)和中国科学院基金资助

用下式描述:

$$U(\rho, T_z) = \alpha(\rho/\rho_0) + \beta(\rho/\rho_0)^\gamma + \frac{1}{2}(1 - T_z)V_c + C \frac{(\rho_n - \rho_p)}{\rho_0} T_z + U^{\text{Yuk}}, \quad (1)$$

式中, ρ_0 是正常核物质密度, ρ, ρ_n, ρ_p 分别是总的、中子的和质子的相互作用密度; T_z 是同位旋自由度的 z 分量, 对于质子和中子, 相应的 T_z 为 -1 和 $+1$; V_c 和 U^{Yuk} 分别为库仑势和有限程的 Yukawa 表面作用势; 参数 α, β, γ 选用了不可压缩系数 $K = 200\text{MeV}$ 的所谓的软势; 对称能强度 $C = 32\text{MeV}$. 在 IQMD 模型的初始化过程中, 使用了非线性的相对论平均场(RMF)理论计算的中子和质子密度^[16], 再用 Monte - Carlo 方法对 ^{124}Sn 和 ^{124}Ba 的基态进行抽样, 同时消除了非物理的集体转动.

在 IQMD 模型中, 使用了从实验提取的参数化的核子 - 核子碰撞截面 $\sigma_{\text{exp}}^{[17]}$, 其具体形式为

$$\sigma_{\text{pn}} = \begin{cases} -\frac{5067.4}{E^2} + \frac{9069.2}{E} + 6.9466(\text{mb}) & E \leq 40(\text{MeV}), \\ \frac{239380}{E^2} + \frac{1802.0}{E} + 27.147(\text{mb}) & 40 < E \leq 400(\text{MeV}), \\ 34.5(\text{mb}) & 400 < E \leq 800(\text{MeV}). \end{cases}$$

$$\sigma_{\text{nn}}(\sigma_{\text{pp}}) = \begin{cases} -\frac{1174.8}{E^2} + \frac{3088.5}{E} + 5.3107(\text{mb}) & E \leq 40(\text{MeV}), \\ \frac{93074}{E^2} - \frac{11.148}{E} + 22.429(\text{mb}) & 40 < E \leq 310(\text{MeV}), \\ \frac{887.37}{E} + 0.05331E + 3.5475(\text{mb}) & 310 < E \leq 800(\text{MeV}), \end{cases} \quad (2)$$

它们是同位旋相关的, 其中 E 为实验室系中核子的入射能量. 在 $300\text{MeV}/u$ 以下能区, 由其给出的 n - p 的碰撞截面一般约为 n - n 或 p - p 碰撞截面的 3 倍. 采用这样的截面, 可以把 n - p 之间的关联突出出来, 更符合实际情况. 另外, 在 IQMD 模型中, 还可使用大家所熟知的 Cugnon 的参数化截面 σ_{Cug} , 它是同位旋非相关的^[18,19]. 对弹性道, 其形式为

$$\sigma_{\text{nn}} = \begin{cases} 55 & \sqrt{S} \leq 1.8993, \\ \frac{35}{1 + 100(\sqrt{S} - 1.8993)} + 20 & \sqrt{S} > 1.8993. \end{cases} \quad (3)$$

其中, \sqrt{S} 是质心系能量.

在 IQMD 模型中, 反应平面为 x - z 平面 (z 方向为束流方向). 可定义方位角 $\Phi = \arctan(p_y/p_x)$, 其中 p_x, p_y 分别为质心系中核子动量的 x 分量和 y 分量. 重离子碰撞中发射的中间快度粒子的方位角分布可用二阶勒让德多项式^[10-12]拟合,

$$dN/d\Phi = c(1 + a_1 \cos(\Phi) + a_2 \cos(2\Phi)) \quad (4)$$

如果系数 $a_2 < 0$, 则说明存在垂直于反应平面的挤出流. 为了定量地表示挤出流, 可以定义挤出流参数 R_N , 即

$$R_N = \frac{dN/d\Phi(90^\circ) + dN/d\Phi(-90^\circ)}{dN/d\Phi(0^\circ) + dN/d\Phi(\pm 180^\circ)} = \frac{1 - a_2}{1 + a_2}, \quad (5)$$

如果 $R_N > 1$, 则说明存在垂直于反应平面的挤出流.

图 1 给出了 IQMD 模型计算得到的 $b = 4\text{fm}$ 时不同入射能量下反应体系 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ 的挤出流参数 R_N . 在计算中, 中间快度范围选为约化质心快度 $(y/y_{\text{proj}})_{\text{cm}} \in [-0.25, 0.25]$. 我们限制核子的横动量 p_t 大于 0.5 倍炮弹的入射动量 p_{proj} , 这里横动量为 $p_t = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$, 这样给出的挤出流比较明显^[9]. 图中给出的误差为用(4)式拟合时的统计误差. 从图 1 中可以看到, 挤出流参数 R_N 随着入射能量的增大而增大, 最后趋于饱和, 这与实验结果是完全一致的^[10]. 同时可以发现, 丰中子反应系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 的挤出流系统性地小于反应系统 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ 的挤出流, 在轰击能量为 350MeV/u 时挤出流参数 R_N 相差 0.05. 这种差别在入射能量很高时将变得很小, 这可能是由于能量很高时核子-核子碰撞截面的同位旋相关性逐渐消失造成的. 图 2 给出了 IQMD 模型计算得到的入射能量 $E = 350\text{MeV/u}$ 时不同碰撞参数下反应体系 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ 的挤出流参数 R_N . 图中给出的误差为用(4)式拟合时的统计误差. 再一次观察到丰中子反应系统的挤出流系统性地小于反应系统 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ 的挤出流. 同时还可以看到, R_N 随着碰撞参数的增大而增大, 到达某一碰撞参数 ($b = 6\text{fm}$) 时 R_N 达到最大, 对 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 体系, $R_N = 0.08$, 对 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ 体系, $R_N = 0.15$, 两个体系挤出流的差别也达到最大 (0.07). 随着碰撞参数的增加, 挤出流再逐渐减小, 其差别也逐渐减小. 这与 $\text{Au} + \text{Au}$ 的实验数据符合得很好, 400MeV/u 的 $\text{Au} + \text{Au}$ 实验表明 R_N 大约在 $b = 6\text{fm}$ 时出现最大值^[8]. 这种现象与膨胀阴影机制 (expansion shadowing scenario) 是一致的^[7], 即在碰撞中心区域, 被压缩核物质的膨胀在反应平面内会受到较冷的旁观者余核的阻碍.

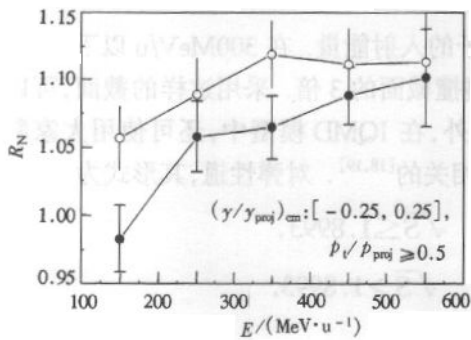


图 1 IQMD 模型预言的 $b = 4\text{fm}$ 时不同入射能量下 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ (●) 和 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ (○) 的挤出流参数 R_N

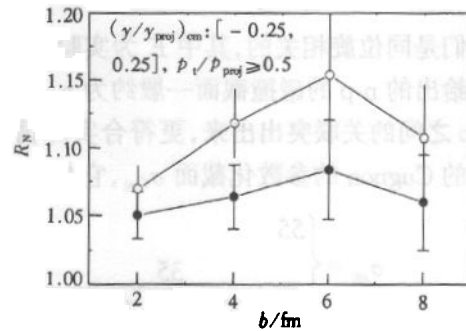


图 2 IQMD 模型预言的入射能量 $E = 350\text{MeV/u}$ 时不同碰撞参数下 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ (●) 和 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ (○) 的挤出流参数 R_N

为了进一步探索挤出流同位旋相关性的形成机制, 在图 3 中给出了采用不同对称能强度 C 和核子-核子碰撞截面的参数化形式, 入射能量 $E = 350\text{MeV/u}$ 和碰撞参数 $b = 6\text{fm}$ 时, 反应系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ 的中间快度核子的方位角分布. 同时还在图中还给出了用(4)式拟合的结果, 即 a_1 和 a_2 . 从图 3 中可以看到, 对称能使 a_2 略有减小 (变得更负, 挤出流更强), 而同位旋相关实验的核子-核子碰撞截面的使用更强烈地使

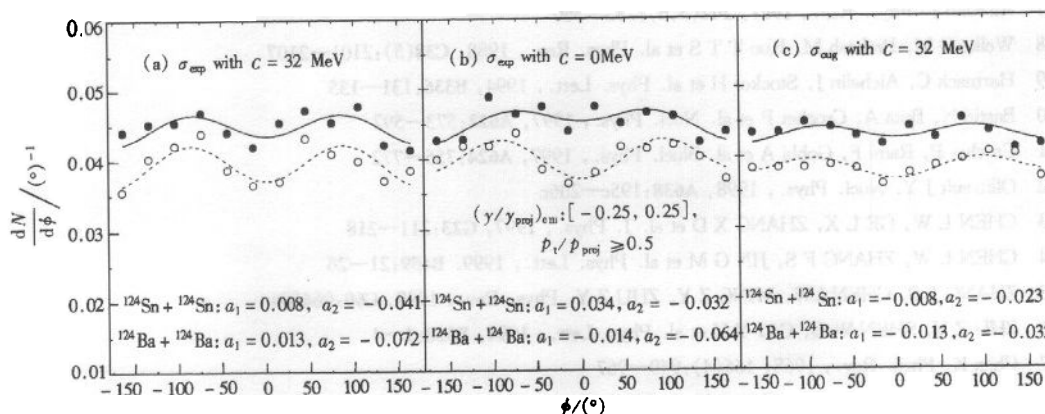


图3 采用不同对称能强度 C 和核子-核子碰撞截面的参数化形式,入射能量 $E = 350\text{MeV/u}$ 和 $b = 6\text{fm}$ 时反应 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ (●) 和 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ (○) 的核子的方位角分布
图中给出了用(2)式拟合的结果(——表示 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 的拟合结果,……表示 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ 的拟合结果)以及相应的 a_1 和 a_2 。

a_2 变得更负. 为了更清楚地看到对称能和核子-核子碰撞截面的同位旋相关性对挤出流的影响,在图4中给出了不同情况下的挤出流参数 R_N . 可以清楚地看到,对称能以及同位旋相关的核子-核子碰撞截面都使挤出流参数 R_N 增加,但增加的程度不同,对称能使 R_N 增加 0.02,而同位旋相关的核子-核子碰撞截面使 R_N 增加 0.07,这就是说,同位旋相关的核子-核子碰撞截面对挤出流的影响要比对称能对挤出流的影响大得多.

从上面的讨论可知,挤出流的同位旋相关性主要是由于核子-核子碰撞截面的同位旋相关性所决定的. 仅与对称能微弱相关. 利用放射性核束研究同位旋相关的挤出流为最终确定核子-核子碰撞截面的同位旋相关性提供了一种可能的途径.

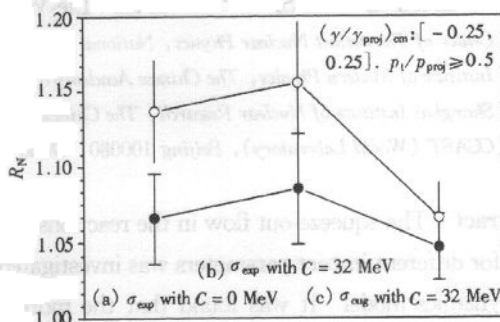


图4 采用不同对称能强度 C 和核子-核子碰撞截面的参数化形式,入射能量 $E = 350\text{MeV/u}$ 和 $b = 6\text{fm}$ 时反应 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ (●) 和 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ (○) 的挤出流参数 R_N

参考文献 (References)

- 1 ZHANG F S, GE L X. Nuclear Multifragmentation, Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
(张丰收, 葛凌霄. 原子核多重碎裂, 北京: 科学出版社, 1998)
- 2 ZHANG F S. Z. Phys., 1996, **A345**:163—170
- 3 ZHANG F S, Suraud E. Phys. Lett., 1993, **B319**:35—41
- 4 CHEN L W, ZHANG F S, JIN G M. Phys. Rev., 1998, **C58**(40):2283—2291
- 5 CHEN L W, ZHANG F S, ZHU Z Y. Phys. Rev., 2000, **C61**:067601
- 6 Scheid W, Müller H, Greiner W. Phys. Rev. Lett., 1974, **32**(13):741—745

- 7 Aichelin J. *Phys. Rep.*, 1991, **202**(5,6):233—360
- 8 Welke G M, Prakash M, Kuo T T S et al. *Phys. Rev.*, 1988, **C38**(5):2101—2107
- 9 Hartnack C, Aichelin J, Stocker H et al. *Phys. Lett.*, 1994, **B336**:131—135
- 10 Bastid N, Buta A, Crochet P et al. *Nucl. Phys.*, 1997, **A622**:573—592
- 11 Crochet P, Rami F, Gobbi A et al. *Nucl. Phys.*, 1997, **A624**:755—772
- 12 Ollitrault J Y. *Nucl. Phys.*, 1998, **A638**:195c—206c
- 13 CHEN L W, GE L X, ZHANG X D et al. *J. Phys.*, 1997, **G23**:211—218
- 14 CHEN L W, ZHANG F S, JIN G M et al. *Phys. Lett.*, 1999, **B459**:21—26
- 15 ZHANG F S, CHEN L W, MING Z Y, ZHU Z Y. *Phys. Rev.*, 1999, **C60**:064604
- 16 ZHU Z Y, SHEN W Q, CAI Y H et al. *Phys. Lett.*, 1994, **B328**:1—4
- 17 Chen K. *Phys. Rev.*, 1968, **166**(4):949—967
- 18 Cugnon J, Mizutani T, Vandermeulen J. *Nucl. Phys.*, 1981, **A352**:505—534
- 19 Bertsch G F, Gupta S Das. *Phys. Rep.*, 1988, **160**(4):189—233

Isospin Dependence of Squeeze-out Flow*

ZHANG Feng-Shou^{1,2,4} CHEN Lie-Wen^{1,2} LI Wen-Fei^{1,2} ZHU Zhi-Yuan^{1,3}

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

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

³(Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

⁴(CCAST (World Laboratory), Beijing 100080, China)

Abstract The squeeze-out flow in the reactions of $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ and $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ at different energies for different impact parameters was investigated by means of isospin-dependent quantum molecular dynamics model. It was found that the more neutron-rich system ($^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$) exhibited weaker squeeze-out flow. This isospin dependence of the squeeze-out flow is shown to mainly result from the isospin dependence of nucleon-nucleon cross section and the symmetry energy. Meanwhile, it is indicated that the squeeze-out flow depends strongly on the impact parameter and incident energy.

Key words isospin effect, squeeze-out flow, isospin-dependent QMD model

Received 6 April 2000

* Supported by National Natural Science Foundation of China(19875068,19847002), Major State Basic Research Development Program (G2000077407) and Science Foundation of The Chinese Academy of Sciences