

中能重离子反应中的在平面流和椭圆流*

张虎勇^{1,1)} 马余刚¹ 余礼平¹ 沈文庆^{1,2} 蔡翔舟¹
方德清¹ 胡鹏云¹ 钟 晨¹ 韩定定³

1(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

2(宁波大学物理系 宁波 315000)

3(华东师范大学电子科学系 上海 200062)

摘要 利用同位旋相关的量子分子动力学模型研究了 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 系统在能量从 30 MeV/u 到 150 MeV/u 的在平面流和椭圆流. 发现随着入射能量的增加, 在平面流出现从负到正的跃迁, 而椭圆流则随入射能量的增大而减少并且出现从正到负的跃迁. 椭圆流和在平面流对于入射能量和碰撞参数较为敏感, 相反对于对称能和核态方程却不太敏感. 最后对于不同质量的碎块的依赖性关系我们还作了进一步仔细的研究.

关键词 同位旋相关的量子分子动力学模型 核态方程 在平面流 椭圆流

1 引言

研究中高能重离子碰撞的目的之一是设法建立核物质的状态方程, 因此需要研究对状态方程敏感的可观测量. 在平面流和椭圆流都是反应过程中的集体流效应, 而且都是实验可观测量. 在反应过程初期, 由于系统被压缩, 导致核物质系统密度不均匀, 即存在一个密度的梯度. 这样会产生一个力, 这个力在一定范围内表现为排斥, 导致系统的膨胀. 在系统膨胀过程中, 粒子沿在平面内横向优势发射便形成在平面流, 粒子沿方位角分布空间的优势发射便形成椭圆流. 因而, 对于在平面流和椭圆流的分析能够获得有关核物质的被压缩程度以及核物质状态方程的信息^[1-11].

通常地, 重离子碰撞过程中产生的集体流是随原子核的平均势场和核子-核子碰撞截面而影响的. 在中能重离子碰撞过程中, 能量在几十 MeV/u, 碰撞动力学中起主导地位的是吸引的原子核平均势场, 由于泡利原理, 核子-核子散射被阻塞. 作为一个结果, 反应平面中核子的在平面流是负的. 随着能量的上升, 排斥的核子-核子散射变得重要, 负

2000-12-22 收稿

* 国家杰出青年基金(19725521), 国家自然科学基金(19705012), 上海市科技启明星计划(97QA14038)和中国科学院院长基金和国家基础研究发展规划(G200077400)资助

1) E-mail: Zhanghy@sinr.ac.cn

向流会减少. 在一定的入射能量下, 出现了平面内的集体流的消失, 此时的能量点为核势吸引部分和排斥部分的平衡能.

本文基于同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型, 分析了入射能量从 30MeV/u 到 150MeV/u 的 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 系统产生的在平面流和椭圆流, 同时采用不同的碰撞参数、不同势场、不同的对称能系数以及不同碎块对于椭圆流和集体流进行进一步的研究. 发现在平面流和椭圆流对于核态方程和对称能不太敏感, 但是随能量和碰撞参数有较为明显的关系, 对于不同碎块的椭圆流和在平面流的研究表明对于椭圆流和在平面流重核所起的作用与轻核相比显得作用更大.

2 模型与方法

在 QMD 模型^[12]中, 核子由一定宽度的高斯波包表示, 波包的是中心随时间演化的, 波包的宽度被认为是一个常数, 系统的分布函数为高斯波包之和,

$$f(r, p, t) = \sum_{i=1}^n f_i(r, p, t), \quad (1)$$

$$f_i(r, p, t) = \frac{1}{(\pi\hbar)^3} \exp\{-[r - r_i]^2/2L - 2L[p - p_i]^2/\hbar^2\},$$

其中 r_i, p_i 为第 i 个核子的坐标和动量, r_i, p_i 的时间演化由哈密顿方程来表示,

$$\dot{p}_i = -\{p_i, H\}, \quad \dot{r}_i = \{r_i, H\}, \quad (2)$$

其中 H 包括总动能和相互作用部分. 相互作用势为 Skyrme, Coulomb 和 Yukawa 之和,

$$U = U^{\text{Sky}} + U^{\text{Coul}} + U^{\text{Yuk}}. \quad (3)$$

在 IQMD 模型中, 从同位旋的自由度, 即同位旋相关的核子-核子碰撞截面、对称能项、库仑势以及同位旋相关的泡利阻塞等方面着手对 QMD 进行改进. 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^[13,14]. 在 IQMD 模型中, 核的平均势可以参数化为

$$U(\rho, \tau_z) = \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) + \beta \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\gamma + \frac{1}{2}(1 - \tau_z) V_c + C \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0} \tau_z + U^{\text{Yuk}}, \quad (4)$$

式中 $\rho_0 = 0.168\text{fm}^{-3}$, 即正常核物质的饱和密度, ρ, ρ_n 和 ρ_p 分别是总的、中子的和质子的相互作用密度, τ_z 是具有同位旋自由度的第三分量, 对于中子和质子, 它们分别等于 1 和 -1; V_c 代表库仑势; U^{Yuk} 为 Yukawa(表面)势. 参数 α, β 和 γ 的选择将采用所谓的软势(不可压缩系数 $K = 200\text{MeV}$). 核子-核子碰撞截面采用参数化的实验截面^[15], 对质子-中子(σ_{np})和质子-质子或中子-中子(σ_{nn})进行了仔细的区分.

我们通过非线性的相对论平均场理论(RMF)得到 ^{40}Ca 系统的中子质子的密度分布. 通过核子初始化程序(对均方根半径和平均结合能随时间演化的分析来选取基态坐标和动量分布, 同时确定势的参数)得到稳定的核, 从中选取一个稳定的 ^{40}Ca 基态核作为反应核的初始化.

IQMD 模型与 BUU 模型相比, 有一个较大的优点是: IQMD 模型能够用于处理多体问题, 能够提供一些碰撞动力学和碎裂过程的重要信息, BUU 模型对于处理单体问题较为

理想,而不能用于处理团簇问题.文中我们采用的是 IQMD 模型,对于团簇采用粗粒化模型,在粗粒化模型中如果粒子的相对动量小于 p_0 ,相对距离小于 R_0 ,我们认为是属于同一团簇.采用 $R_0 = 2.4\text{fm}$, $p_0 = 200\text{MeV/u}$,同时还要排除非物理上的一些团簇.

3 计算与分析

实验上表现在平面流的物理观测量主要有反应平面内每核子的平均横动量和流角.在本文中选用反应平面内每核子的平均横动量来研究在平面流,流的大小定义为反应平面内每个核子的平均横动量 $\langle P_x \rangle / A$ 对快度 Y_{CM} 的斜率与快度大小的乘积.

在计算中,以 z 轴方向为入射粒子的方向,反应平面为 $x - z$ 平面,椭圆流是通过下面公式计算得到的,

$$V_2 = \left\langle \frac{P_x^2 - P_y^2}{P_x^2 + P_y^2} \right\rangle$$

它对应的是横向动量分布的二级傅里叶系数^[16].当 $V_2 > 0$,说明了椭圆流以集体转动为特征, $V_2 < 0$ 说明了椭圆流以垂直于反应平面的挤出流为特征, $V_2 = 0$ 说明了在方位角分布空间的各向同性分布.

用 IQMD 模型对 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 系统进行了系统的计算(都是一千个事件的模拟).计算中由于碎片在 $120\text{fm}/c$ 以后产物已基本稳定,对于 $120\text{fm}/c$ 到 $200\text{fm}/c$ 5 个不同时刻分别求和取平均,因此实际结果对应 5000 个统计平均的“事件”.然后取中间快度范围 ($-0.25 \leq Y_{\text{CM}} \leq 0.25$) 的粒子来进行分析.对该系统分别在不同入射能量、不同碰撞参数、不同势场、不同的对称能以及不同反应截面下进行了研究.

图 1 是在平面流和椭圆流随着碰撞参数的依赖性关系,采用的势场是软势,入射能量为 50MeV/u .图中椭圆流随着碰撞呈上升的趋势,而在平面流出现是负向的增长.到非常周边碰撞的情况下,由于两核几乎不发生重叠,反应的核子数目相对比较少,非常周边碰撞的反应机制与中心碰撞的反应机制会有所不同,反应以库仑相互作用为主,产生的在平面流有可能会发生逆转,这种现象也在实验中观察到.图中误差均为统计误差(下同).

对于在平面流和椭圆流对能量的依赖性见图 2,我们采用两种不同的势场,碰撞参数为 2fm .图中可以明显看出势场对于 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 系统并没有太多的影响.从文献[17]中可以知道对于组合系统的质量数为 80 左右,势场对于系统就显得不太敏感,这与本文的结果相一致,当采用组合系统的质量数增大^[18]或变小时势场对于系统会有较大的影响.但由于文献[17]中采用的是 BUU 模型,与本文不一致,因此不同模型得到的平衡能可能还存在着一定的差异.图中还可以进一步地知道,椭圆流随着入射能量的增加反而减少,即集体转动趋于减弱,而在平面流却相反,说明了以吸引的平均场为主转换到排斥的核势为主的变化.平衡能大约都在 110MeV/u 左右.

在核的势场中,对称能也是重要的一项,图 3 是在不同对称能下的椭圆流和在平面流与入射能量的依赖性关系,我们分别取对称能系数为 0GeV , 0.2GeV 和 0.32GeV ,碰撞参数为 $b = 2\text{fm}$,软势情况下进行的研究,对称能对于椭圆流和在平面流没有太大的影响,呈现

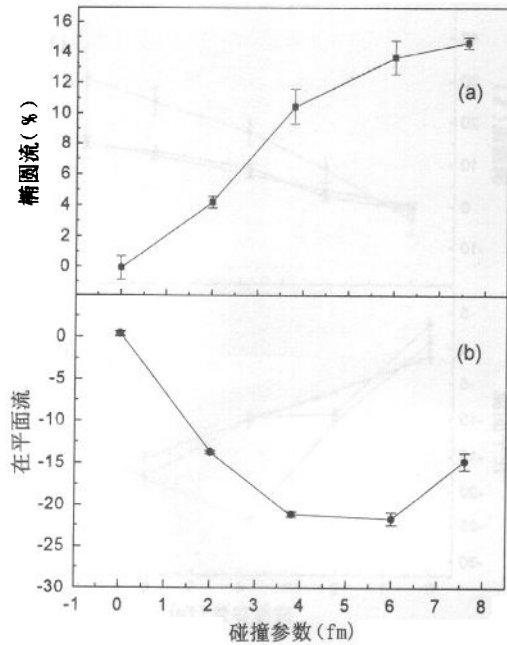


图 1 椭圆流(a)与在平面流(b)随碰撞参数的依赖性

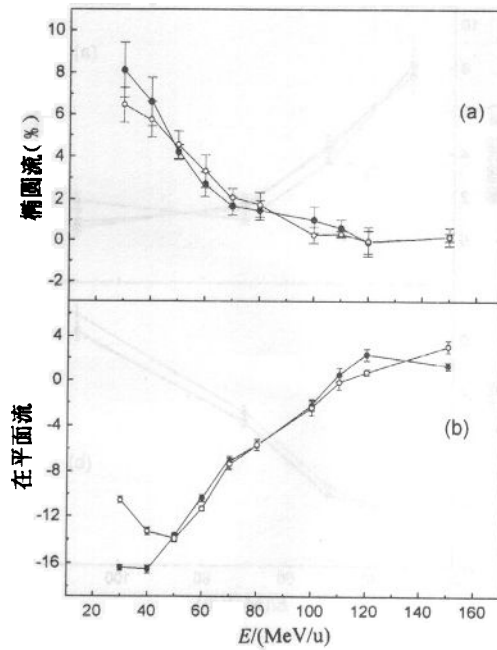


图 2 椭圆流(a)和在平面流(b)随入射能量的依赖性
● 软势下的值,○硬势下的值.

相同的趋势. 这是因为 ^{40}Ca 是一个对称系统,对称能项的作用不大. 从图中还可以看出,在平面流随着入射能量呈上升趋势,并出现在平向流从负到正的跃迁,并且几乎在相同平衡能点附近出现在平面流的消失. 对于椭圆流,随着入射能量不断减小,同样在几乎相同的能量时出现椭圆流的消失. 从而可以知道对称能对于 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 系统并不太敏感,对于中质比较大的核系统,对称能会起较大的作用.

因为 IQMD 模型与 BUU 模型相比,有一个较大的优点是: IQMD 模型能够用于处理多体问题,能够提供一些碰撞动力学和碎裂过程的重要信息,所以在 IQMD 模型下进行了不同碎块的椭圆流和在平面流的研究. 首先根据电荷 $Z = 0, 1, 2$ 把碎块分成三类,如图 4 所示. 由于区分了电荷,使得粒子的统计数目不够,有一定的涨落存在. 但从图中还是可以看到,重碎片核的椭圆流和在平面流的绝对值较大,为了更加能够清楚地看到重碎片核与轻碎片核对于椭圆流和在平面流的影响. 把碎块分成 3 个区间,其目的是为了减少碎块的统计涨落(图 5). 图 5 中可以清楚地看出在平面流和椭圆流的绝对值随电荷数的增加而增加,也就是说重的碎块的椭圆流和在平面流比轻碎块的椭圆流和在平面流相比显得要大. 对于同一碎块,它的椭圆流和在平面流的绝对值随碰撞参数的增大而增大,到非常周边碰撞的条件下,椭圆流和在平面流对于重的碎块有反常现象. 从图 1 和图 5 中,还可以进一步知道,核反应过程中重碎片核对于反应过程中的平均的椭圆流和在平面流的贡献相对于轻碎片核起了较大的作用.

为了进一步了解椭圆流中重碎片核与轻碎片核所起的作用,我们研究了不同碎块的

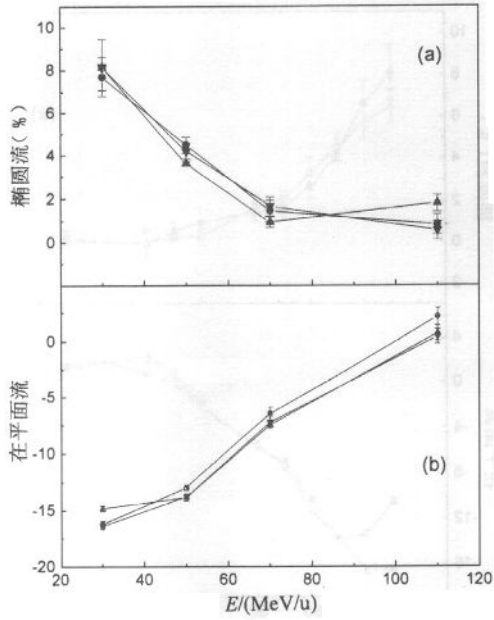


图 3 不同对称能下的椭圆流(a)和在平面流(b)与入射能量的依赖性
 ● 对称能系数 0GeV, ▲ 对称能系数 0.20GeV,
 ▼ 对称能系数 0.32GeV.

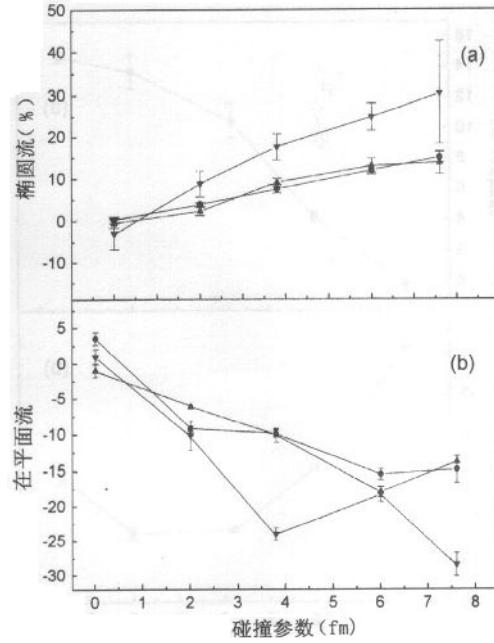


图 4 不同碎块的椭圆流(a)和在平面流(b)与碰撞参数的依赖性
 ● $Z=0$ 的粒子, ▲ $Z=1$ 的粒子,
 ▼ $Z=2$ 的粒子.

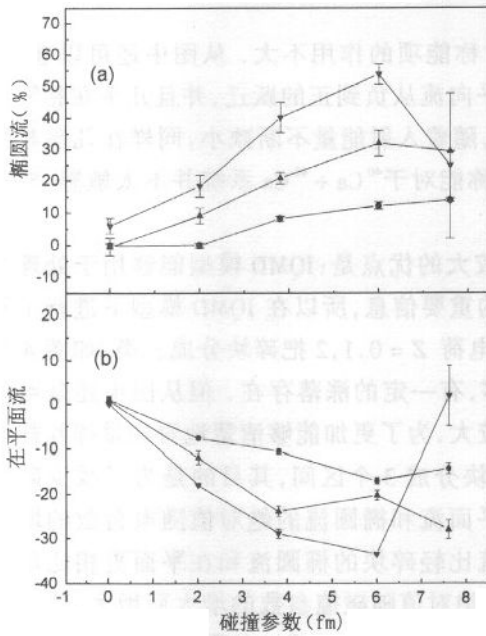


图 5 不同碎块的椭圆流(a)和在平面流(b)与碰撞参数的依赖性
 ● $Z=0$ 和 1 的粒子总和, ▲ $Z=2, 3$ 和 4 的粒子总和,
 ▼ $Z \geq 5$ 的粒子总和.

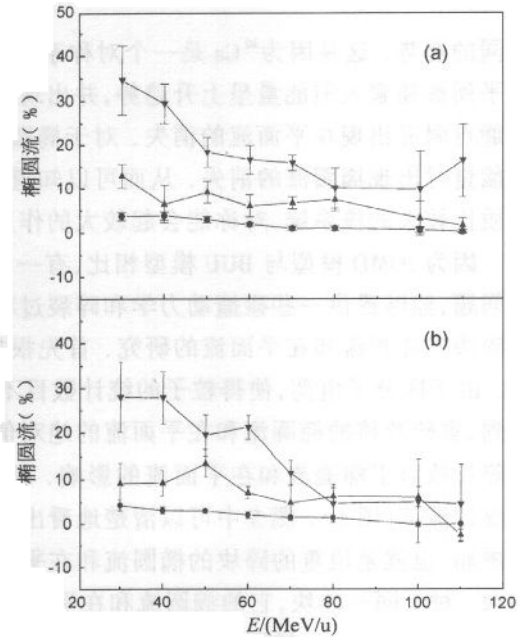


图 6 不同碎块的椭圆流与入射能量的依赖性
 (a) 软势下的结果; (b) 硬势下的结果.
 ● $Z=0$ 和 1 的粒子总和, ▲ $Z=2, 3$ 和 4 的粒子总和,
 ▼ $Z \geq 5$ 的粒子总和.

椭圆流的激发函数如图 6 所示. 发现在软势和硬势的条件下, 重碎片核的椭圆流比轻碎片核的椭圆流显得更大. 随着入射能量的增加, 椭圆流逐渐变小, 到能量较大的时候, 不同质量的碎块之间的椭圆流之间的差别就显得不太明显, 产生这种情况的原因可能是随着能量的增大, 产生质量较小的碎片的数目变的更多, 质量较大的碎片的平均质量变小, 它们之间的区别变小. 图 6 得到与图 5 相一致的结果.

4 小结

利用 IQMD 模型, 研究了 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 反应系统在不同入射能量、不同碰撞参数、不同势场、不同对称能在平面流和椭圆流的情况. 发现在平面流和椭圆流对于入射能量的依赖性关系能够比较好的反映出来, 而且还可以从能量依赖性关系图中得到平衡能. 除了非常周边的反应外, 碰撞参数的依赖性关系也反映得较好. 非常周边反应由于二核重叠少等原因, 参与反应的核子数目较少, 而且反应机制也不太一样, 可能会发生逆转的现象. 对于不同势场、对称能的情况, 椭圆流和在平面流没有太大的影响, 产生不太明显的原因可能与反应系统质量组合数、系统的中子质子比有一定的关系. 对于不同碎块的椭圆流和在平面流的研究, 表明重碎片的椭圆流和在平面流与轻碎片的椭圆流和在平面流的相比, 重碎片所起的作用更大. 通过理论计算和实验数据的比较, 有可能从在平面流和椭圆流中提取有关核态方程的信息, 同时还可以促进理论本身的进一步不断发展.

参考文献 (References)

- 1 Peter J et al. Nucl. Phys., 1990, **A519**:127c—135c
- 2 Ollivier C A et al. Phys. Rev., 1990, **C42**:R10—R18
- 3 Krofcheck D et al. Phys. Rev., 1992, **C46**:1416—1424
- 4 Klakow D et al. Phys. Rev., 1993, **C48**:1982—1989
- 5 MA Y G et al. Phys. Rev., 1993, **C48**:R1492—R1496
- 6 MA Y G et al. Z. Phys., 1993, **A344**:469—474
- 7 MA Y G et al. Phys. Rev., 1995, **C51**:3256—3263
- 8 ZHENG Y M et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**:2534—2537
- 9 CHEN L W et al. Phys. Rev., 1998, **C58**:2283—2291
- 10 Appelshauser H et al. Phys. Rev., 1998, **C80**:4136—4144
- 11 Danielewicz P et al. Phys. Rev., 1998, **C81**:2438—2441
- 12 Aichelin J. Phys. Rep., 1990, **202**:233—240
- 13 CHEN I W, ZHANG X D, GE L X. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1998, **20**:109—114 (in Chinese)
(陈列文, 张晓东, 葛凌霄. 高能物理与核物理, 1998, **20**:109—114)
- 14 CHEN B, LIU J Y, ZHANG F S et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, **24**:244—249 (in Chinese)
(陈波, 刘建业, 张丰收等. 高能物理与核物理, 2000, **24**:244—249)
- 15 CHEN K et al. Phys. Rev., 1968, **C166**:949—958
- 16 Voloshin S A. Phys. Rev., 1997, **C55**:R1630—R1637; Poskanzer A M, Voloshin S A. Phys. Rev., 1998, **C58**:1671—1678
- 17 Westfall G D et al. Phys. Rev. Lett., 1993, **71**:1986—1989
- 18 ZHANG H Y, MA Y G, YU L P et al. Submitted to Chinese Physics Letter (accepted)

Directed and Elliptic Flow in Heavy Ion Collisions

ZHANG Hu-Yong¹ MA Yu-Gang¹ YU Li-Ping¹ SHEN Wen-Qing^{1,2}

CAI Xiang-Zhou¹ FANG De-Qing¹ HU Peng-Yun¹ ZHONG Chen¹ HAN Ding-Ding³

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

2(Department of Physics, Ningbo University, Ningbo 315000, China)

3(Department of Electron Engineering, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract The directed and elliptic flow in collisions of $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ at energies from 30MeV/nucleon to 150MeV/nucleon is well studied in an isospin-dependent quantum molecule dynamics model (IQMD). With increasing incident energy, the directed flow rises from the negative to the positive and the elliptic flow shows decrease with increasing incident energy. The directed flow and the elliptic flow are sensible of the impact parameter and incident energy but they are not very sensible of systematic energy. The directed flow and the elliptic flow are also not very sensible of the EOS because of the combined systematic mass. Systematic studies of the cluster mass dependence are also carefully performed and the elliptic flow of heavy cluster mass is larger than that of light cluster mass. The difference of elliptic flow between the heavy cluster mass and the light one will be not very obvious with increasing incident energy because of large number of light cluster mass.

Key words isospin-dependent quantum molecular dynamics, equation of state, directed flow, elliptic flow

Received 22 December 2000

* Supported by National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (19725521), National Natural Science Foundation of China (19705012), Shanghai Science and Technology Development Funds (97QA14038) and Special Foundation of President of The Chinese Academy of Sciences and Major State Basic Research Development Program (G200077400)