

中能重离子碰撞中的各向异性流标度*

颜廷志^{1,2} 马余刚^{1;1)} 蔡翔舟¹ 陈金根¹ 方德清¹ 郭威^{1,2} 马春旺^{1,2}
马二俊^{1,2} 沈文庆¹ 田文栋¹ 王鲲¹

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)
2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 用同位旋相关的量子分子动力学 (IQMD) 模型, 研究了 25MeV/A 的 $^{86}\text{Kr}+^{124}\text{Sn}$ 碰撞系统在较大碰撞参数下的轻碎片的各向异性流 (v_2 和 v_4), 发现横向动量依赖的椭圆流 (v_2) 存在对轻碎片核子数的标度律 (number-of-nucleon scaling) 现象, 以及不同轻碎片的 v_4/v_2^2 比值都近似等于一个常数 0.5. 这种标度律现象可以用核子层次碎片形成的组合 (coalescence) 模型来解释.

关键词 各向异性流 核子数标度 量子分子动力学模型 组合机制

各向异性流的研究是近期中高能重离子碰撞中的一个研究热点, 在理论和实验上都取得了不少成果, 尤其是定向流 (v_1) 和椭圆流 (v_2) 对碰撞能量、碰撞系统、同位旋、碰撞参数等的依赖性研究进一步加深了对集体流的产生和性质的认识^[1-6]. 近期, 美国布鲁克海文国家实验室相对论重离子对撞机 (RHIC) 的极端相对论能区 Au+Au 碰撞实验表明: 对不同的介子和重子, 椭圆流的横向动量分布存在对强子组分夸克数目的标度律 (NCQ scaling) 现象^[7]. 这说明在碰撞早期的强子形成过程中部分子自由度起主要作用. 很多学者用夸克组合机制来解释这种现象^[8, 9]. 而中能重离子碰撞中也常用组合机制来解释轻碎片的形成^[10-12]. 但是对不同碎片各向异性流的系统理论研究还很少. 本工作研究了中能重离子碰撞中不同轻碎片的各向异性流 v_2 和 v_4 的横向动量 (p_t) 依赖性, 并发现椭圆流存在对碎片核子数的标度律现象.

对粒子的方位角分布进行傅立叶展开可得到下式^[1]:

$$\frac{dN}{d\phi} \propto 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos(n\phi), \quad (1)$$

其中 ϕ 为方位角, 为碎片的横向动量 p_t ($p_t = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$) 与反应平面之间的夹角. 第一个系数 v_1 表征定向流,

$v_1 = \langle \cos \phi \rangle = \left\langle \frac{p_x}{p_t} \right\rangle$; 第 2 个系数 v_2 表征椭圆流,

$$v_2 = \langle \cos(2\phi) \rangle = \left\langle \frac{p_x^2 - p_y^2}{p_t^2} \right\rangle, \quad (2)$$

而第 4 个系数 v_4 可表示为

$$v_4 = \left\langle \frac{p_x^4 - 6p_x^2 p_y^2 + p_y^4}{p_t^4} \right\rangle. \quad (3)$$

采用的模型是同位旋相关的量子分子动力学 (IQMD) 模型. 它是一种多体核子输运理论模型, 是在 QMD 模型的基础上发展起来的. QMD 模型包括以下几个主要部分: 靶和炮弹核子的初始化、核子在相互作用平均场和两体碰撞作用下的演化、泡利阻塞效应等. 关于 QMD 理论模型的详细阐述可参见文献[13]. IQMD 模型对同位旋自由度进行了仔细的考虑, 体现在相互作用平均场、两体碰撞和泡利阻塞等方面^[14-17], 能较好的描述从中能到 2A GeV 能量范围内的重离子碰撞中的碎片形成、动力学涨落及原子核多重碎裂等现象.

选择的碰撞系统为 $^{86}\text{Kr}+^{124}\text{Sn}$, 碰撞能量为 25MeV/A, 碰撞参数为 7—10fm. 共模拟了 50000 个事件. 以下的结果都是从 200fm/c 时刻提取的. 图 1(a) 给出了中间快度轻碎片的椭圆流 (v_2) 对横向动量 (p_t) 的依赖性关系. 从图中可以看出椭圆流是正的 ($v_2 > 0$), 而且 v_2 值随着 p_t 的增加而增加. 这说明轻

* 国家自然科学基金(10135030, 10405032, 10405033, 10505026)和上海市科技发展基金(06JC14082, 05XD14021, 03QA14066)资助
1) E-mail: yigma@sinap.ac.cn

碎片的发射倾向于在平面发射,而且横向动量越大的粒子越是倾向于在平面发射.与RHIC能区相比,椭圆流对 p_t 的依赖行为是相似的,但是它们的产生机制却有很大的不同.在中能区,正的椭圆流主要是由集体转动导致的^[18–21],是吸引的平均场起主要作用;而在RHIC能区,在碰撞过程中弹核和靶核的重叠区域由于相空间的急剧压缩而引起强烈的向外的压力,从而导致了正的椭圆流^[7].图1(b)显示了每核子的椭圆流对每核子的横向动量的分布性质.可以看出在 $p_t/A < 0.25 \text{ GeV}/c$ 范围内对不同的轻碎片它们的曲线基本重合,这表明椭圆流存在着对碎片核子数的标度律.这与RHIC中发现的椭圆流对强子的组分夸克数目的标度律现象是相似的^[7].

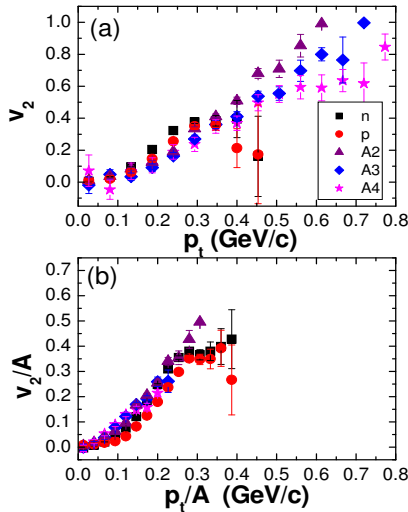


图1 (a) 椭圆流对横向动量(p_t)的依赖性: 方块表示中子, 圆点表示质子, 三角形、菱形和星形分别对应质量为2, 3和4的碎片; (b) 每核子的椭圆流对每核子的横向动量(p_t)的分布. 各图标与(a)中对应相同.

RHIC的实验数据还揭示了一个标度律关系: $v_n(p_t) \sim v_2^{n/2}(p_t)$ ^[22], 这种关系遵守一种简单夸克组合机制. 如果分别以 $v_{n,q}$, $v_{n,M}$ 和 $v_{n,B}$ 来表示夸克、介子和重子的各向异性流, 在忽略比 v_4 更高阶的各向异性流的情况下, Kolb等人得到如下关系式^[23, 24]:

$$\frac{v_{4,M}}{v_{2,M}^2} \approx \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \frac{v_{4,q}}{v_{2,q}^2}, \quad (4)$$

$$\frac{v_{4,B}}{v_{2,B}^2} \approx \frac{1}{3} + \frac{1}{3} \frac{v_{4,q}}{v_{2,q}^2}. \quad (5)$$

由以上两式可以看出, 如果夸克的各向异性流遵守标度律关系, 那么介子、重子的各向异性流也将遵守标度律关系. RHIC实验上得到的介子的该比值为1.2^[25].

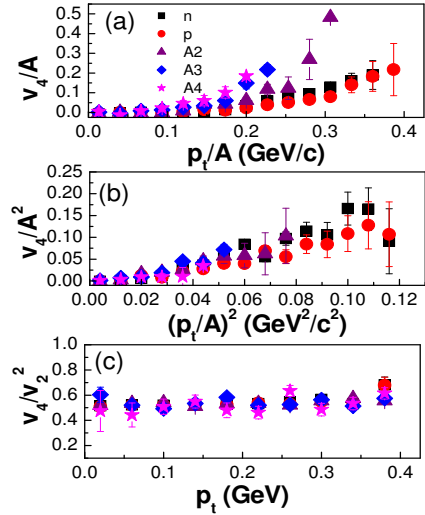


图2 (a) 不同轻碎片的 $v_4/A \sim p_t/A$: 中子(方块), 质子(圆点), $A=2$ (三角形), $A=3$ (菱形), $A=4$ (星形); (b) v_4/A^2 作为 $(p_t/A)^2$ 的函数; (c) 不同轻碎片的 v_4/v_2^2 对 p_t 的分布

鉴于以上标度律关系, 而且在中能区理论和实验上都还没有高阶的各向异性流的研究, 所以本工作对于高阶流 v_4 的研究是很有意义的. 图2给出 v_4 的行为和特征. 类似 $v_2/A \sim p_t/A$ 一样, 给出 v_4/A 作为 p_t/A 的函数的分布, 如图2(a)所示. 可见对不同的碎片其 v_4/A 是正值, 而且随着 p_t/A 的增加而增加, 但是它们的分布比较分散, 没有像椭圆流那样趋于一致, 也就是说没有像椭圆流那样简单地存在对碎片核子数的标度律. 但是在 $v_4/A^2 \sim (p_t/A)^2$ (图2(b))中, 可以看到不同碎片的分布基本趋于重合了, 说明 v_4/A^2 和 $(p_t/A)^2$ 之间存在标度. 这是因为在研究的 p_t 范围内不同碎片的 v_4/v_2^2 都近似为一个常数0.5(如图2(c)所示), 而 v_2/A 标度于 p_t/A , 故 v_4/A^2 标度于 $(p_t/A)^2$. 由于核子层次的组合与夸克层次的组合是相似的, 故假设介子(方程(4))和重子(方程(5))的标度规律也适用于质量数为2和3的碎片, 则对 $A=2$ 的碎片: $1/4 + 1/2 \times 1/2 = 1/2$, 对 $A=3$ 的碎片: $1/3 + 1/3 \times 1/2 = 1/2$, 刚好等式成立! 在极端相对论重离子碰撞中当产生的核物质达到热平衡时, 物质的演化遵守理想流体力学的规律, 理论预言的强子的 v_4/v_2^2 刚好也是 $1/2$ ^[26]. 当然在这两个能区涉及到的物理是很不一样的, 因此需要进一步探讨它们的内在规律.

本工作用IQMD模型模拟了 $25 \text{ MeV}/A$ $^{86}\text{Kr} + ^{124}\text{Sn}$ 碰撞系统在7—10fm碰撞参数下的反应, 研究了轻碎片的各向异性流 v_2 和 v_4 对横向动量 p_t 的分布行为. 结果表明: v_2 和 v_4 都是正的, 且都随着 p_t 的增加

而增加; 类似RHIC能区椭圆流的组分夸克数目标度律, 中能区的椭圆流存在对碎片核子数的标度律现象; 高阶流 v_4 存在 v_4/A^2 对 $(p_t/A)^2$ 的标度现象, 且对不同

的轻碎片比值 v_4/v_2^2 都近似是一个常数0.5. 这些标度现象应该是核子层次碎片形成的组合机制的结果. 我们建议在中能重离子碰撞中进行这类的实验研究.

参考文献(References)

- 1 Voloshin S, ZHANG Y, Z. Phys. C, 1996, **70**: 665
- 2 Danielewicz P, Lacey R A et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**: 2438
- 3 ZHANG B, Gyulassy M, Ko C M. Phys. Lett., 1999, **B455**: 45
- 4 Kolb P F, Sollfrank J et al. Phys. Rev., 2000, **C62**: 054909
- 5 ZHENG Y, Ko C M, LI B A et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**: 2534
- 6 Lukasik J et al(INDRA-ALDAIN Collab.). Phys. Lett., 2004, **B608**: 223
- 7 Adams J et al. Phys. Rev. Lett., 2005, **95**: 122301
- 8 LIN Z W, Ko C M. Phys. Rev. Lett., 2002, **89**: 202302; Greco V, Ko C M, Lévai P. Phys. Rev., 2003, **C68**: 034904
- 9 CHEN J H, MA Y G, MA G L et al. arXiv:nucl-th/0504055
- 10 Aves T C, Poggi G, Gelbke C K et al. Phys. Rev., 1981, **C24**: 89
- 11 Mekjian A Z. Phys. Rev. Lett., 1977, **38**: 640
- 12 Hagel K, Wada R, Cibor J et al. Phys. Rev., 2000, **C62**: 034607
- 13 Aichelin J. Phys. Rep., 1991, **202**: 233
- 14 MA Y G, SHEN W Q. Phys. Rev., 1995, **C51**: 710
- 15 LIU J Y, YANG Y F, ZUO W et al. Phys. Rev., 2001, **C63**: 54612
- 16 WEI Y B, MA Y G, SHEN W Q et al. Phys. Lett., 2004, **B586**: 225; J. Phys. G, 2004, **30**: 2019
- 17 MA Y G, WEI Y B et al. Phys. Rev., **C73**: 014604
- 18 Reisdorf W, Ritter H G. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1997, **47**: 663
- 19 SHEN W Q, Péter J, Bizard G et al. Nucl. Phys., 1993, **A551**: 333
- 20 MA Y G et al. Phys. Rev., 1993, **C48**: 1492; Z. Phys., 1993, **A344**: 469; Phys. Rev., 1995, **C51**: 1029; Phys. Rev., 1995, **C51**: 3256
- 21 HE Z Y, Angelique J C, Auger A et al. Nucl. Phys., 1996, **A598**: 248
- 22 Adams J et al(STAR Collab.). Phys. Rev. Lett., 2004, **92**: 062301
- 23 Kolb P F, CHEN L W, Greco V et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 051901
- 24 CHEN L W, Ko C M, LIN Z W. Phys. Rev., 2004, **C69**: 031901
- 25 Oldenburg M D(STAR Collab.). J. Phys. G, 2005, **31**: S437
- 26 Borghini N, Ollitrault J Y. nucl-th/0506045

Scaling of Anisotropic Flow in Intermediate Energy Heavy Ion Collisions*

YAN Ting-Zhi^{1,2} MA Yu-Gang^{1,1)} CAI Xiang-Zhou¹ CHEN Jin-Gen¹ FANG De-Qing¹
 GUO Wei^{1,2} MA Chun-Wang^{1,2} MA Er-Jun^{1,2} SHEN Wen-Qing¹
 TIAN Wen-Dong¹ WANG Kun¹

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, Shanghai 201800, China)

²(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Anisotropic flows (v_2 and v_4) of light nuclear clusters are studied by Isospin-Dependent Quantum Molecular Dynamics model for the system of $^{86}\text{Kr}+^{124}\text{Sn}$ at 25MeV/ A and large impact parameters. Number-of-nucleon scaling of the elliptic flow (v_2) is demonstrated for the light fragments up to $A=4$, and the ratio of v_4/v_2^2 shows a constant value of 1/2. It can be understood by the coalescence mechanism in nucleonic degree of freedom for the cluster formation.

Key words anisotropic flow, number-of-nucleon scaling, IQMD, coalescence mechanism

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10135030, 10405032, 10405033, 10505026) and Shanghai Development Foundation for Science and Technology (06JC14082, 05XD14021, 03QA14066)

1) E-mail: ygma@sinap.ac.cn