

高能重离子碰撞中的集体流与空间 - 动量关联*

霍雷^{1,2,1)} 张卫宁^{1,2} 陈相君² 张景波² 唐圭新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(哈尔滨工业大学理论物理教研室 哈尔滨 150001)

摘要 高能重离子碰撞中,末态粒子的侧向流与椭圆流间存在方位角集体关联,该关联对反应中集体流的性质反映敏感.碰撞时,系统在坐标空间的演化与动量空间的演化过程相互影响,表现出明显的空间 - 动量关联.不同事件中椭圆流形式的差别与此空间 - 动量关联有关,反映了系统演化过程的涨落.

关键词 方位角分布 集体流 空间 - 动量关联

1 引言

高能重离子碰撞中,末态粒子的集体流是探索相互作用区域热密核物质性质的重要实验观测量^[1].实验上,集体流的存在首先在 BEVALAC 的 4π 探测器 Plastic Ball 以及 Streamer Chamber 上得到证实.随后,在 SIS/BEVALAC, AGS, SPS 以及 RHIC 等不同能量区域进行的重离子碰撞实验中,均观测到了集体流^[2,3].研究表明,集体流不仅依赖于核物质态方程的压缩系数,还与相互作用的动量相关性以及介质中核子 - 核子散射截面的变化等因素有关.最近的研究指出^[4,5],有关 QGP 的产生及其强子化过程引起的态方程软化等信息也会对末态粒子的集体流效果产生影响.

核物质集体流通常可以分为各向同性的集体径向流以及横向非对称的侧向流和椭圆流.侧向流和椭圆流存在于非对心碰撞中,目前人们广泛使用的分析方法就是对末态粒子的方位角分布作傅里叶级数展开^[6,7].分析时,虽然反应平面是对每一个碰撞事件分别确定的,但末态粒子的方位角分布仍需要将大量事件叠加在一起得到,这样做尽管减小了单个事件中粒子数有限带来的统计涨落的影响,但有关反应的一些重要信息也可能在平均过程中消失

了.侧向流与椭圆流都是反应中集体效应的体现,但二者特征表现明显的快度区域不同,以往的研究中人们一般对二者是在不同快度区域分别进行测量和分析的,对它们可能存在的关联则讨论较少.本文将从末态粒子方位角集体关联角度研究重离子碰撞中侧向流和椭圆流间的联系,并通过对 QMD 模拟事件的分析,讨论不同事件中集体流效果的涨落,进而讨论碰撞时相互作用区域演化过程中的空间 - 动量关联.

2 方位角集体关联

在以束轴方向为 z 轴的任一坐标系中,可以将末态粒子方位角 ϕ 的分布函数写成傅里叶级数形式^[7]:

$$\rho(\phi) = \frac{a_0}{2\pi} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (x_n \cos n\phi + y_n \sin n\phi) \right], \quad (1)$$

式中 a_0 为归一化常数, x_n, y_n 描写了反应的横向非对称性,其值还与快度等参量有关.人们通常感兴趣的是 $n = 1, 2$ 两项,它们分别描述了反应中的侧向流和椭圆流.

利用方程(1),可以对每一事件计算末态粒子的 $\cos n\phi$ 和 $\sin n\phi$ 的平均值,进而得到 x_n, y_n 的测量值.在一定快度范围内有:

2002 - 03 - 06 收稿

* 哈尔滨工业大学校基金(HIT.1999.015)资助

1) E-mail: huo@phy5.hit.edu.cn

$$x_n = \langle \cos n\phi \rangle = \frac{1}{N_n} \sum_{\mu=1}^{N_n} \cos n\phi_{\mu},$$

$$y_n = \langle \sin n\phi \rangle = \frac{1}{N_n} \sum_{\mu=1}^{N_n} \sin n\phi_{\mu},$$

式中 N_n 为相应快度范围内的粒子总数, ϕ_{μ} 为第 μ 个粒子的方位角. 进一步可以写出:

$$r_n = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}, \quad (2)$$

$$\alpha_n = \frac{1}{n} \arctan \frac{y_n}{x_n}. \quad (3)$$

其中 $n\alpha_n$ 给出了 (x_n, y_n) 的方向, 结合 x_n 与 y_n 的符号, $n\alpha_n$ 可确定在 $0-2\pi$ 之间. α_n 表征了每一事件中与 n 相应的横向流的倾向性出射方向. 可以用矢量

$$\mathbf{Q}_n = r_n \cos \alpha_n \mathbf{e}_x + r_n \sin \alpha_n \mathbf{e}_y, \quad (4)$$

描述横向流, 实际上, 与 n 相应的横向流的方向是以 $\frac{2\pi}{n}$ 为模的. 由于反应平面为事件的对称面, 理论上, 侧向流应位于反应平面内, 因此 \mathbf{Q}_1 与束轴决定的平面即为事件的估计反应平面 (这与横向动量分析方法确定事件反应平面^[8]相一致). 对正的椭圆流, \mathbf{Q}_2 位于反应平面内; 对负的椭圆流 (亦称挤压效应), \mathbf{Q}_2 与反应平面垂直.

在有限多重数事件中, 即使不存在横向非对称流, 统计涨落的存在也将使事件中粒子的方位角分布呈现一定的非对称性, 给出有限的 r_n 值及相应的方位角 α_n . 涨落不仅使事件的估计反应平面与其真实反应平面并不完全一致, 各事件中椭圆流的方向与事件的反应平面间也不是简单的平行或垂直关系, 而将出现离散. 由于椭圆流正负的定义取决于其方向与反应平面间的相对取向, 涨落的存在为椭圆流的分析带来了额外的困难.

对于一个具体事件, 利用方程(4)可以分别测量其侧向流与椭圆流效果, 二者在横向上的夹角可以表示为⁹:

$$\beta = \arccos \left(\frac{\mathbf{Q}_1 \cdot \mathbf{Q}_2}{|\mathbf{Q}_1| |\mathbf{Q}_2|} \right). \quad (5)$$

QMD 模型已广泛地用于高能重离子碰撞的研究中^[1], 用该模型模拟产生的末态质子作为样本进行分析. 图 1 给出了 600 A MeV Au + Au 碰撞的 QMD 模拟事件中归一化的 β 分布 (M 为事件数), 事件的碰撞参数取为 6 fm. 计算 \mathbf{Q}_1 时, 质子的相对快度区域取为 $|y| > 0.3$; 计算 \mathbf{Q}_2 时, 快度取为 $|y| < 0.25$.

这样做不仅粒子间的自相关效应自动消除了, 也可以减小实际碰撞中其他关联效应 (如实验中存在的 HBT 关联等) 对椭圆流与侧向流间方位角关联的影响.

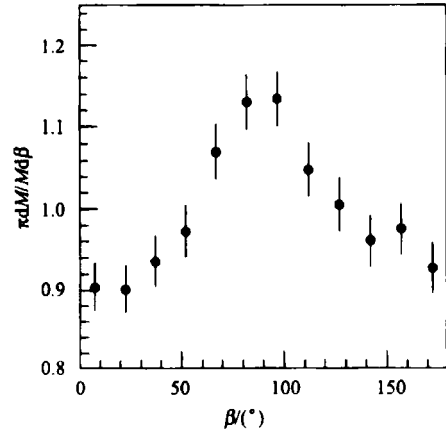


图 1 椭圆流与侧向流间夹角的分布

如果反应中不存在横向的非对称流, β 的分布将是均匀的. 从图 1 中可以看出, 反应中椭圆流与侧向流间存在着明显的方位角关联. 分布在 $\beta = 90^\circ$ 处出现明显的峰, 明确地指出平均而言该反应中的椭圆流为负, 即存在挤压效应. 如果反应中的平均椭圆流为正, 峰将出现在 $\beta = 0^\circ$ 和 $\beta = 180^\circ$ 处^[7]. 因此, 碰撞事件中 β 的分布可以描述反应中有关横向非对称流的信息.

3 流效果的涨落

根据椭圆流方向与反应平面的相对取向, 人们将椭圆流区分为正负两种形式, 但由于涨落的存在, 事件中椭圆流的方向可能既不在反应平面内, 也不与反应平面垂直. 从图 1 中可以看出, 在 β 远离峰值 (特别是偏离达 90°) 的地方, 事件出现的几率并不为零.

为清晰地反映不同事件中流效果的涨落, 将事件按夹角 β 的大小分成 (a) 和 (b) 两组:

(a) 椭圆流方向与反应平面的夹角小于 45° , 即: $0^\circ < \beta < 45^\circ$ 或 $135^\circ < \beta < 180^\circ$;

(b) 椭圆流方向与反应平面的夹角大于 45° , 即: $45^\circ < \beta < 135^\circ$.

图 2 分别给出了 (a) 和 (b) 两组事件中, 中间快度区域末态质子的方位角分布, 所用数据仍为前面 600 A MeV Au + Au 碰撞的 QMD 模拟数据. 图中的数据是以 \mathbf{Q}_1 和束轴方向确定的估计反应平面为 xoz

面的计算结果. 可以看出, 对于椭圆流方向与反应平面的夹角小于 45° 的事件, 椭圆流平行于反应平面的分量大于其垂直分量, 这样的事件中, 末态粒子倾向于在反应平面内出射, 椭圆流表现为正; 当事件中椭圆流方向与反应平面的夹角大于 45° 时, 椭圆流垂直于反应平面的分量大于其平行分量, 事件中末态粒子倾向于沿垂直于反应平面的方向出射, 椭圆流表现负. 两组事件中椭圆流的性质存在明显的差别, 在以往的分析中, 由于是将不同事件直接叠加后取平均, 此差别被掩盖了.

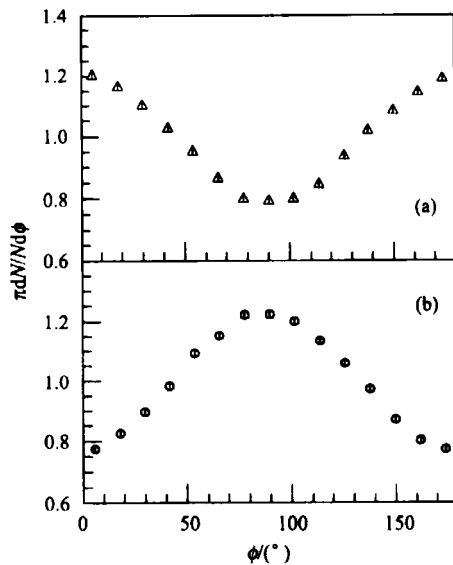


图 2 QMD 模拟事件中末态质子的方位角分布

估计反应平面的离散被认为是影响集体流测量精度的一个重要因素^[10]. 由于事件的多重数有限等因素的影响, 事件的估计反应平面与真实反应平面通常并不一致, 其方位角存在一个偏离 $\delta\phi$. 反应平面的离散可以利用子事件方法加以估计^[8], 其具体过程是: 将每一个事件随机分成两个子事件, 使每个子事件包含的粒子数为原事件的一半, 再利用方程 (4) 分别计算两个子事件的 Q_1 矢量, 进而可以分别得到两个子事件的估计反应平面及它们的夹角 ϕ_{12} , 于是 ϕ_{12} 的平均值的一半即为原碰撞事件估计反应平面离散的估计结果. 图 3 给出了用子事件方法计算出的归一化的 ϕ_{12} 分布, 图中的 \triangle 和 \circ 分别是对 (a), (b) 两组事件的计算结果. 可以看出, 两者的分布基本相同, 即两组事件的反应平面离散并无明显差别. 这就是说, 反应平面的离散并不是造成两组事件中椭圆流形式出现明显差别的主要原因. 实际上, 对估计反应平面的离散进行修正, 通常只是修正了流的大小, 并不能改变椭圆流的正负^[11].

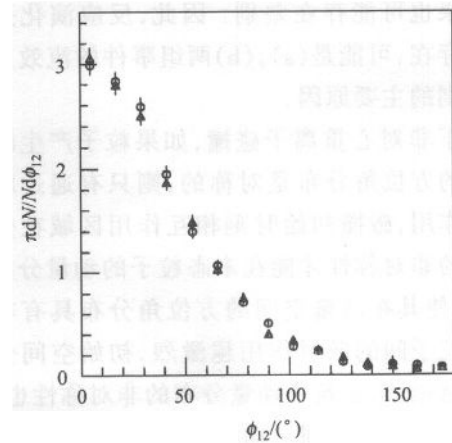


图 3 模拟事件的估计反应平面的离散
 \triangle 和 \circ 分别对应于 (a) 和 (b) 两组事件的计算结果.

4 空间-动量关联

高能重离子碰撞中形成的横向非对称流反映了核物质态方程的性质. Ollitrault 指出^[12], 椭圆流与碰撞初始时相互作用区域空间分布的非对称性密切相关. 在非对心高能重离子碰撞中, 一方面, 碰撞初期的挤压效果及旁观者的屏蔽效应使得高压核物质倾向于沿垂直于反应平面的方向出射; 另一方面, 相互作用区域空间分布的横向非对称性使得横向压力梯度的方位角分布也是非对称的, 反应平面内的压力梯度较大, 导致核物质在反应平面方向上的膨胀更加明显, 粒子在系统的演化过程中产生倾向于在反应平面内出射的趋势. 实验上观测到的椭圆流正是这两方面共同作用的结果, 平均而言, 在 BEVALAC 能量下, 前者的作用大于后者, 末态粒子倾向于沿垂直于反应平面的方向发射, 椭圆流平均表现为负.

对于 600A MeV Au + Au 碰撞的 QMD 模拟事件, 平均而言, 反应的椭圆流为负. 但从图 3 中我们已经看到, 当把事件按方位角集体关联效果分成为 (a), (b) 两组时, 两组事件的椭圆流形式存在明显的差别, 造成这种差别的主要原因不是估计反应平面的离散. 我们进一步分析了两组事件中质子的横质量谱以及事件的多重数分布等, 其结果也无明显差别. 模拟事件中, 碰撞参数是固定的, 两组事件的初始条件相同. 在系统的演化过程中, 相互作用区域空间分布的横向非对称性将逐渐减弱, 这种演化过程显然与反应区域相互作用的激烈程度有关. 由于涨落的存在, 尽管碰撞的初始条件相同, 不同事件的

演化结果也可能存在差别. 因此, 反应演化过程中涨落的存在, 可能是(a), (b)两组事件的流效果存在明显差别的主要原因.

对于非对心重离子碰撞, 如果粒子产生时在动量空间的方位角分布是对称的, 则只有通过粒子间的相互作用, 碰撞初始时刻相互作用区域在坐标空间分布的非对称性才能在末态粒子的动量分布上得到反映, 使其在动量空间的方位角分布具有非对称性^[13]. 粒子间的散射作用越激烈, 初始空间分布非对称性越强, 末态粒子动量分布的非对称性也越大, 反应过程的这种空间-动量关联必将在椭圆流上得到反映.

在 QMD 模型的模拟事件中, 可以直接记录每一个末态粒子在冻结时刻的坐标, 与动量空间椭圆流的计算类似, 我们可以用下式来直接计算反应在冻结时刻每一事件的空间非对称性^[14]:

$$\delta = \frac{R_y^2 - R_x^2}{R_y^2 + R_x^2},$$

式中 $R_x = \langle x^2 \rangle^{1/2}$ 和 $R_y = \langle y^2 \rangle^{1/2}$, 它们描写了反应冻结时, 相互作用区域的横向线度. 碰撞初始时刻, 参与者区域的 δ 值主要取决于反应的碰撞参数, 随着反应的进行, 相互作用区域开始膨胀, 在反应平面方

向的膨胀效果越强, 冻结时刻的 δ 值越小. 图 4 给出了 600 A MeV Au + Au 碰撞的 QMD 模拟事件的 δ 分布, 图中的实线和虚线分别对应前面讨论的(a), (b)两组事件.

可以看出, 两组事件的 δ 分布存在明显差别, 平均而言, 对于椭圆流和反应平面间的夹角 β 小于 45° 的事件, 反应冻结时其空间分布的非对称性小于(b)组事件, 其平均值分别为: (a) 0.006 ± 0.001 , (b) 0.075 ± 0.001 . 这表明(a)组事件的相互作用区域在反应平面方向的膨胀效果更强, 大于(b)组事件, 结果使(a)组事件的椭圆流表现为正, 与图 2 中的结果定性一致. 比较图 2 和图 4 可知, 碰撞中, 末态粒子的集体流与相互作用区域的演化过程有关, 存在着明显的空间-动量关联. 对椭圆流与侧向流间方位角集体关联的研究, 可以帮助我们了解有关反应演化过程的细致信息.

5 结论

末态粒子的横向非对称流是探索极端条件下核物质性质, 获取核物质状态方程的重要实验观测量, 流的存在使末态粒子的方位角分布具有非对称性. 对侧向流与椭圆流间方位角集体关联的研究表明, 不同事件中椭圆流的大小和方向均存在明显的涨落. 通过粒子间的相互作用, 碰撞初始时刻相互作用区域在坐标空间分布的非对称性才能在末态粒子的动量分布上得到反映, 使末态粒子在动量空间的方位角分布具有非对称性. 粒子间的散射作用越激烈, 初始空间分布非对称性越强, 末态粒子动量分布的非对称性也越大, 反应中椭圆流的形式与反应过程的这种空间-动量关联密切相关. 对反应中侧向流和椭圆流间方位角关联的研究, 可以了解有关反应中相互作用区域演化过程的涨落信息, 更好地理解核环境中强子的行为.

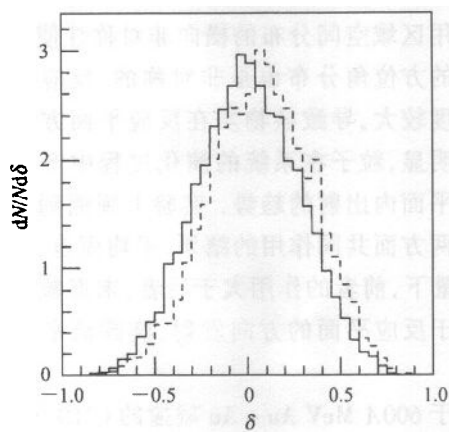


图 4 QMD 模拟事件中 δ 分布

参考文献 (References)

- 1 Peilert G, Stocker H, Greiner W. *Rep. Prog. Phys.*, 1994, **57**: 533—602
- 2 Partlan M D, Albergo S, Brady F P et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**: 2100—2103
- 3 Pinkenburg C, Ajitanand N N, Alexander J M et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**: 1295—1298
- 4 Sorge H. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**: 2309—2312
- 5 Danielewicz P, Lacey R L, Gosiaux P B et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**: 2438—2441
- 6 Barrette J, Bellwied R, Bennett S et al. *Phys. Rev.*, 1997, **C55**: 1420—1430
- 7 HUO Lei, ZHANG Wei-Ning, CHEN Xiang-Jun et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2001, **25**: 856—871 (in Chinese)
- 8 Danielewicz P, Odyniec G. *Phys. Lett.*, 1985, **B157**: 146—150
- 9 HUO Lei, ZHANG Wei-Ning, CHEN Xiang-Jun et al. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**: 355—357
- 10 Danielewicz P, Ströbele H, Odyniec G et al. *Phys. Rev.*, 1988, **C38**: 120—134
- 11 Poskanzer A M, Voloshin S A. *Phys. Rev.*, 1998, **C58**: 1671—1678
- 12 Ollitrault J Y. *Phys. Rev.*, 1993, **D48**: 1132—1139; *Phys. Rev.*, 1993, **D48**: 1390—1408
- 13 Kolb P F, Huovinen P, Heinz U et al. *Phys. Lett.*, 2001, **B500**: 232—240
- 14 Heiselberg H, Levy A. *Phys. Rev.*, 1998, **C59**: 2716—2727

Collective Flow and the Space-Momentum Correlation in High Energy Heavy Ion Collisions

HUO Lei^{1,2,1)} ZHANG Wei-Ning^{1,2} CHEN Xiang-Jun² ZHANG Jing-Bo² TANG Gui-Xin²

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

²(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract The transverse flow in heavy ion collisions can be characterized by the azimuthal anisotropy of the final state particles. A clear signature of the azimuthal correlation between directed and elliptic flow is evidenced in the model calculations. It is found that the azimuthal correlation is sensitive to the type of elliptic flow. The collective transverse expansion in coordinate space affects the azimuthal distributions of the final state particles in momentum space and the space-momentum correlation would develop. The study indicates that the behaviour of elliptic flow in different events depends on the evaluation of event-by-event dynamical fluctuations.

Key words azimuthal distribution, collective flow, space-momentum correlation

Received 6 March 2002

* Supported by Science Foundation of Harbin Institute of Technology (HIT. 1999. 015)

1) E-mail: huo@phy5.hit.edu.cn