

高能重离子碰撞中的横向非对称流

霍 雷¹⁾ 张卫宁 陈相君 张景波 唐圭新

(哈尔滨工业大学理论物理教研室 哈尔滨 150001)

摘要 对末态粒子方位角分布的研究可以获得反应中有关横向非对称流的信息. 研究了碰撞中侧向流与椭圆流间的方位角关联, 给出了一种定量测量反应中椭圆流大小的方法, 该方法的计算结果可以有效地消除估计反应平面离散的影响.

关键词 方位角分布 侧向流 椭圆流

1 引言

高能重离子碰撞是在实验室中产生和系统研究处于高温、高密度、高压等极端条件下核物质性质的重要途径. 理论计算表明, 碰撞中形成的压力梯度将导致末态核物质的集体有序运动, 形成核物质的集体流. 目前, 高能重离子碰撞中集体流的存在已为大量的实验结果所证实^[1,2]. 人们期望从对末态集体流的研究中, 可以了解处于极端条件下核物质的性质, 获得有关核物质状态方程的信息. 最近的 QCD 点阵计算指出^[3], 接近 QGP 相变温度时, 系统能量密度的增加速度高于压力的增加速度, 核物质的态方程将出现一个软点. 末态粒子的集体流对压力的变化反映敏感, 态方程的软化必然引起流效果的变化, 这使得对流的研究更受到了广泛的关注^[4].

核物质集体流通常可以分为各向同性的集体径向流(radial flow), 反应平面内的侧向流(directed flow)和椭圆流(elliptic flow). 在对心碰撞中, 末态粒子的方位角分布是对称的, 只存在径向流. 对于非对心碰撞, 每个事件存在一个反应平面(两个核的相对运动方向与它们的质心连线所构成的平面), 末态粒子相对此平面的方位角分布一般是非对称的. 侧向流是指末态粒子倾向于沿反应平面内某特定方向出射的特征, 由于动量守恒, 质心系中, 向前发射与向后发射的粒子的侧向流方向相反. 椭圆流是将末态粒子的横向分布用一个椭圆描述, 椭圆的长轴方向称为椭圆流的方向, 它在中间快度区域表现最为明显. 如果用傅立叶级数描述末态粒子相对于反应平面的方位角分布, 其一次谐波对应于

2000-10-08 收稿

* 国家自然科学基金(19875012)和哈尔滨工业大学校基金(HIT.1999.015)资助

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

侧向流,而二次谐波对应于椭圆流.对实验数据的分析结果指出^[1],在入射束能为 1GeV 左右的重离子碰撞中,末态的侧向流表现得最为明显,能量更高,侧向流效果变弱.在 Bevalac 能量下,椭圆流的方向通常与反应平面垂直,称之为挤压效应^[5].最近的研究指出,在 AGS 及 SPS 能量下,椭圆流方向将与侧向流位于同一平面内^[6].人们认为,非对称流特征的这些变化,可能与火球演化过程中的平均场效果,态方程的软化,以及 QGP 的形成等现象有关^[7].

2 横向非对称流

非对心的高能重离子碰撞中,末态粒子方位角分布的非对称性是反应的重要实验观测测量.考虑到反应平面为事件的对称面,在一定的快度范围内,末态的方位角分布可以写成傅立叶余弦级数^[8]:

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

式中 ϕ 为末态粒子运动方向相对于反应平面的方位角, a_0 为归一化常数, v_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,称之为横向非对称流. $v_1 \neq 0$ 表明事件中存在位于反应平面内的侧向流, v_2 则描述了反应中的椭圆流效果.由于反应平面为事件的对称面,理论上椭圆流只有两个可能的方向, $v_2 > 0$ 表明椭圆流与侧向流位于同一平面内,称为正的椭圆流; $v_2 < 0$ 表明椭圆流与侧向流所在平面垂直,对应于挤压效应,或称之为负的椭圆流.原则上,末态观测量如横动量,能量,粒子数等的方位角分布均可表示成方程(1)的形式,但为明确起见,本文以粒子数为例进行讨论,此时 $\rho(\phi)$ 为粒子数密度的方位角分布.

在实际碰撞中,事件的反应平面是未知的,但在以入射束方向为 z 轴的任一坐标系中,仍然可以将末态粒子的方位角分布函数写成傅立叶级数形式:

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

式中 ψ 为此坐标系中末态粒子的方位角.相应的系数可以对方程(2)积分得到:

$$x_n = \langle \cos n\psi \rangle = \frac{1}{a_0} \int_0^{2\pi} \rho(\psi) \cos(n\psi) d\psi$$

$$y_n = \langle \sin n\psi \rangle = \frac{1}{a_0} \int_0^{2\pi} \rho(\psi) \sin(n\psi) d\psi$$

尽管 x_n, y_n 与横向分布的非对称性有关,但用惯用的 v_n 描写横向非对称流是方便的.方程(1)相比较,马上可以写出

$$|v_n| = \sqrt{x_n^2 + y_n^2},$$

以及

$$\alpha_n = \frac{1}{n} \arctan \frac{y_n}{x_n}. \quad (4)$$

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 $0 \sim 2\pi$ 之间. α_n 表征

了与 n 相应的横向流的倾向性出射方向,实际上,与 n 相应的横向流有 n 个取极大的方向,第 m 个 ($m = 1, 2, \dots, n$) 极大的方位角为 $\alpha_n + (m-1)\frac{2\pi}{n}$, 换句话说,与 n 相应的横向流的方向是以 $\frac{2\pi}{n}$ 为模的.

侧向流位于反应平面内,因此 α_1 给出了对事件反应平面方位角的测量. 椭圆流关于反应平面对称的,人们认为它形成于碰撞的早期阶段,因而可能是探索极端条件下核物质性质的更好的物理观测量^[9]. 尽管在 $n = 2$ 时,由方程(3)和(4)可以得到 v_2 的模及椭圆流的方向,但由于 α_2 并不是相对于反应平面的方位角,仅由椭圆流本身是无法判定 v_2 正负的.

3 横向集体关联

前一节的讨论是建立在连续分布基础上的,对于实际的高能重离子碰撞,由于事件多重数有限性等因素的影响,不同事件的分析结果将存在明显的涨落. 研究横向非对称流时,人们一般利用横向动量分析法估计实验事件的反应平面^[10]. 对任一事件,可以构造一个矢量:

$$Q = \sum_{\mu=1}^N \omega_{\mu}(y) p_{\mu}^{\perp}, \quad (5)$$

式中 N 为末态粒子总数, p_{μ}^{\perp} 为第 μ 个末态粒子的横向动量, y 为质心坐标系中末态粒子快度与入射核的快度之比, ω_{μ} 是一个与快度等因素有关的权重因子,有不同的定义方式,本文分析中,我们将 ω_{μ} 取为

$$\omega_{\mu}(y) = \begin{cases} \frac{1}{|p_{\mu}^{\perp}|} & \text{if } y > 0.3, \\ 0 & \text{if } |y| \leq 0.3, \\ -\frac{1}{|p_{\mu}^{\perp}|} & \text{if } y < -0.3. \end{cases}$$

这样,矢量 Q 的方位角实际上就是 α_1 . 由于将质心系中向前发射的粒子与向后发射的粒子迭加在一起计算,并剔除了侧向流效果较小的中间快度区域的粒子,提高了结果的敏感性. 矢量 Q 的方向就是事件中侧向流方向在横向上的投影,它与入射束方向构成的平面就是事件的估计反应平面,为表述方便,以后我们将直接称 Q 的方向为该事件中的侧向流方向.

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给出有限的 v_n 值及相应的方位角 α_n , 使事件中粒子的方位角分布呈现一定的非对称性. 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再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.

对有限多重数的事件,测量到的侧向流与椭圆流的方向均存在统计涨落,但如果反应

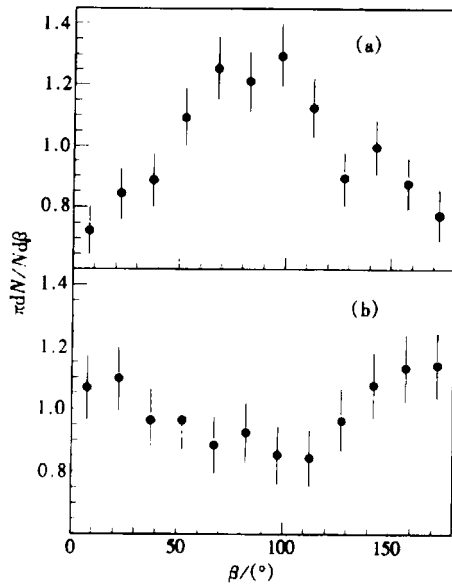


图 1 椭圆流与侧向流间夹角分布

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(a) 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, 明确地指出该反应中的椭圆流为负, 即存在挤压效应. 如果反应中的椭圆流为正, 峰将出现在 $\beta = 0^\circ$ 和 $\beta = 180^\circ$ 处. 图 1(b) 是用 RQMD 模型模拟的 8 A GeV Au + Au 碰撞事件中质子的 β 分布, 事件的碰撞参数范围也为 $5 < b < 8 \text{ fm}$, 反应中正的椭圆流效果清晰可见. 图 1(b) 中的分布较 (a) 平坦, 表明 8 A GeV 的 Au + Au 碰撞中的流效果较 600 A MeV 碰撞的要弱, 这与实验结果是一致的^[9]. 从图 1 中还可以看出, 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, 涨落的存在导致个别事件中椭圆流的正负表现为与反应的平均结果相反.

值得提出的是, 由于 β 的计算不涉及事件真实反应平面的取向, 此分析方法可以直接用于实验数据的分析中, 了解实际碰撞中横向非对称流的效果, 特别是椭圆流的正负情况.

4 椭圆流的测量

对反应中椭圆流的定量描述需要计算 v_2 的值, 考虑到涨落的因素, 人们通常计算的是相同碰撞参数事件中 v_2 的统计平均值. 具体做法是^[8]: 以估计反应平面为坐标系的 xoz 面, 将不同事件迭加在一起, 计算 $\cos 2\psi$ 的平均值 (或用方程 (1) 拟合), 得到椭圆流的测量值 v_2' . 由于估计反应平面与事件的真实反应平面的取向并不一致, 估计反应平面的离散将使测量到的方位角分布的非对称程度降低. 在以估计反应平面为 xoz 面的坐标系中, 设事件真实反应平面的方位角为 ϕ_r , 则有 $\phi = \psi - \phi_r$, 代入方程 (1), 则 $\cos 2\psi$ 和 $\sin 2\psi$ 的平均值可分别写为:

中存在横向非对称流, 对大量事件, 二者间的夹角 β 将呈一定的统计分布, 因此, 对碰撞事件中 β 分布的研究可以得到反应中有关横向非对称流的信息. 由于 (R)QMD 模型已广泛地用于高能重离子碰撞的研究中^[11,12], 我们用模型计算产生的末态质子作为样本, 来检验用 β 分布研究横向流的方案的有效性 (实际上, 也可以根据方程 (2), 用蒙特卡罗方法产生模拟事件直接进行分析). 图 1(a) 给出了 600 A MeV Au + Au 碰撞的 QMD 模拟事件中归一化的 β 分布 (N 为事件数). 图中, 事件的椭圆流和侧向流方向分别由方程 (4) 和 (5) 给出. 计算椭圆流时, 质子的快度区域取为 $|y| < 0.3$. 这样做不仅可以更好地反映出椭圆流效果, 而且在计算夹角 β 时, 粒子间的自相关效应也自动消除了.

$$x_2 = \langle \cos 2\psi \rangle = v_2 \cos 2\phi_r, \quad (6)$$

$$y_2 = \langle \sin 2\psi \rangle = v_2 \sin 2\phi_r. \quad (7)$$

进一步,假定末态粒子的方位角 ψ 与事件真实反应平面的方位角 ϕ_r 间是统计独立的^[8], 对不同事件取平均后, $\langle y_2 \rangle = 0$, 而

$$\langle x_2 \rangle = v'_2 = \langle v_2 \rangle \langle \cos 2\phi_r \rangle. \quad (8)$$

对估计反应平面的离散进行修正后,由椭圆流的测量值 v'_2 可以得到修正值 $\langle v_2 \rangle$. 修正因子 $\langle \cos 2\phi_r \rangle$ 的值可以利用实验数据加以估计,其大小与事件的多重数,碰撞能量及流效果的强弱等因素有关,其值越小,估计反应平面的离散对测量结果的影响越大.

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,如图1所示. 对于一个事件,当计算的椭圆流方向与反应平面的夹角小于 45° 时,椭圆流平行于反应平面的分量大于其垂直分量,可以认为此时该事件的椭圆流为正, $v_2 > 0$. 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,此事件中的椭圆流为负. 这样,以事件的估计反应平面为坐标系的 xoz 面,由方程(6)和(7)就可以计算出每一事件的椭圆流:

$$v_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \text{sign}(x_2). \quad (9)$$

在(9)式中,估计反应平面与真实反应平面的夹角 ϕ_r 不再出现,估计反应平面离散的影响在一定程度上被消除了. 由方程(7)可以看出,当 $|\phi_r| < 45^\circ$ 时, v_2 与 x_2 符号严格相同,估计反应平面离散对(9)式的计算结果没有影响. 对于入射束能为 1GeV 左右的重离子碰撞,例如,对 600A MeV 的 $\text{Au} + \text{Au}$ 碰撞实验,由横向动量分析得到的估计反应平面的离散 $\langle \phi_r^2 \rangle^{1/2}$ 仅为 18° 左右. $|\phi_r| > 45^\circ$ 的事件很少,将方程(9)的结果对不同事件取平均,可以方便地完成对反应中椭圆流的测量,详细的讨论见参考文献[5].

对于更高能量的碰撞,由于侧向流相对变弱,估计反应平面的离散增大. 反应平面的离散可能接近甚至超过 45° , 这种情况在 AGS 的 E895 实验中就已出现^[9]. 由于理论模型的模拟事件中,每一事件的反应平面都是已知的,将不同事件按真实反应平面取向一致进行迭加后,可以直接计算出反应中椭圆流的大小,因而可以利用模拟事件做一分析. 对碰撞参数为 $5 < b < 8\text{fm}$ 范围内的 8A GeV $\text{Au} + \text{Au}$ 碰撞的 RQMD 模拟事件,在 $|y| < 0.3$ 的中间快速度区域内,利用真实反应平面直接计算得到其椭圆流为 $v_2 = 0.024 \pm 0.001$, 这可以看成是模拟反应中质子椭圆流的真实值. 采用以往对实验数据的分析方法,用方程(5)对每一事件的反应平面进行估计,再以估计反应平面为坐标系的 xoz 面,将不同事件迭加在一起,可以得到: $v'_2 = \langle \cos 2\psi \rangle = 0.0095 \pm 0.0002$, 结果明显偏低,估计反应平面离散的影响显著增加. 用方程(9)直接计算不同事件的 v_2 值,图2给出了模拟反应中质子的归一化 v_2 分布,可以看出,不同事件的 v_2 值存在明显的涨落. 尽管估计反应平面的离散较大,但由图中的数据,得到反应中 v_2 的平均值为 0.026 ± 0.002 , 与利用真实反应平面得到的结果基本一致,估计反应平面离散的影响仍然被有效地消除了.

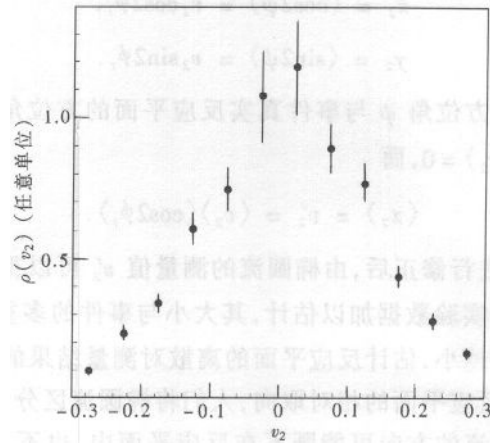


图 2 模拟事件中质子的归一化 t_2 分布

5 结论

高能重离子碰撞中,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.对末态粒子的方位角分布的分析是研究反应中的横向非对称流,特别是椭圆流的主要方法,在入射束能为(1—11) AGeV 的重离子碰撞中,椭圆流会发生由垂直于反应平面到平行于反应平面的转化.本文给出了利用方位角集体关联研究横向非对称流的方法,该方法可以清晰地指出反应中椭圆流的形式.由于事件多重数有限等因素的影响,不同事件中椭圆流的大小和方向均存在明显的涨落,分析表明,利用末态粒子的方位角分布可以直接对单个事件的椭圆流进行估计.对模型模拟事件的计算指出,此方法的分析结果不仅可以反映出不同事件中椭圆流效果的涨落,还可以有效地消除估计反应平面离散等因素的影响.

参考文献 (References)

- 1 Kampert K H. J. Phys., Nucl. Part. Phys., 1989, **G15**:691—740
- 2 Partlan M D, Albergo S, Brady F P et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**:2100—2103
- 3 Danielewicz P, Lacey R L, Gossiaux P B et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**:2438—2441
- 4 Sorge H. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:2309—2312
- 5 HUO Lei, ZHANG Wei-Ning, CHEN Xiang-Jun et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1999, **23**:1177—1182 (in Chinese)
(霍雷,张卫宁,陈相君等.高能物理与核物理,1999, **20**:1177—1182)
- 6 Kahana D E, Pang Y, Shuryak E. Phys. Rev., 1997, **C56**:481—485
- 7 Ollitrault. Nucl. Phys., 1998, **A638**:195c—206c
- 8 Barrette J, Bellwied R, Bennett S et al. Phys. Rev., 1997, **C55**:1420—1430
- 9 Pinkenburg C, Ajitanand N N, Alexander J M et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**:1295—1298
- 10 Danielewicz P, Odnyc G. Phys. Lett., 1985, **B157**:146—150
- 11 Peilert G, Stocker H, Greiner W. Rep Prog. Phys., 1994, **57**:533—602
- 12 Sorge H. Phys. Rev., 1995, **C52**:3291—3314

Anisotropic Transverse Flow in High Energy Heavy Ion Collisions

HUO Lei¹⁾ ZHANG Wei-Ning CHEN Xiang-Jun ZHANG Jing-Bo TANG Gui-Xin

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

Abstract The anisotropy of the azimuthal distributions of the final state particles from nucleus-nucleus collisions is studied within the microscopic transport approach. 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 magnitude and type of transverse flow. The second Fourier coefficients of the azimuthal distribution can be calculated on an event-by-event basis. In order to obtain a statistically relevant measurement, the elliptic flow of the collisions can be determined by further averaging over many events. Using this method of analysis, the influence of the azimuthal dispersion of the estimated reaction plane to the measured results of elliptic flow can be removed.

Key words azimuthal distribution, directed flow, elliptic flow

Received 8 October 2000

* Supported by National Natural Science Foundation of China(19875012) and the Science Foundation of Harbin Institute of Technology (HIT.1999.015)

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