

600A MeV Au+Au 碰撞的挤压效应分析*

霍雷 张卫宁 陈相君 张景波 刘亦铭

(哈尔滨工业大学理论物理教研室 哈尔滨 150001)

D. Keane H. Liu

(Department of Physics, Kent State University, Kent, Ohio 44242)

摘要 对 600A MeV Au+Au 碰撞实验的挤压效应进行了研究. 在方位角分布分析的基础上, 完成了对挤压效应的定量测量, 有效地消除了估计反应平面离散对测量结果的影响.

关键词 反应平面 方位角分布 挤压效应

1 引言

高能重离子碰撞研究的主要目的就是探索处于高温、高密度、高压等极端条件下核物质的性质. 研究碰撞早期高密度阶段核物质性质的关键是寻找一个在碰撞的早期阶段形成, 对核物质的压缩特性较为敏感, 并能保持到碰撞末态为实验所测量的物理观测量^[1,2]. 核流体动力学模型及核输运模型的计算均表明^[3,4], 碰撞末态核物质的集体有序运动, 即核物质的集体流, 就是一种能够直接与反应达到高密度时核物质的压缩势能相联系的物理观测量. 迄今为止, 集体流的存在已为大量的实验结果所证实, 成为研究核-核碰撞系统向平衡态的演变过程, 探索极端条件下核物质的性质, 理解相对论重离子反应机制的重要手段^[1,5,6].

核物质集体流通常可以分成为反应平面内的集体侧向流^[1]、垂直于反应平面的挤压效应^[7]和各向同性的集体径向膨胀^[8]. 由于冷的旁观者物质主要集中在反应平面内, 粒子垂直于反应平面的发射受人射核及靶核旁观者再散射等因素影响较小, 这为研究处于极端条件下核物质性质提供一条较好的途径^[7,9]. 近年来, 对挤压效应的研究受到了广泛的关注^[10-13]. 本文利用方位角分布分析方法对 600A MeV Au + Au 碰撞实验的挤压效应进行研究, 在此基础上, 发展了一种定量测量实验事件的挤压比值的方法, 此方法有效地消除了估计反应平面离散的影响, 可以直观地反应出不同事件中挤压效应的统计涨落.

1998-10-13收稿

* 国家自然科学基金和哈尔滨工业大学校科研基金资助项目

2 方位角分布的非对称性

实验研究上发现,在中间快度区域,末态粒子倾向于沿垂直于反应平面的方向出射,证实了挤压效应的存在。对挤压效应做定量分析时,通常利用中间快度区域末态粒子方位角分布的非对称性完成,普遍使用的参量是挤压比值 $R^{[7,9]}$,它定义为垂直于事件反应平面方向发射的粒子数与在反应平面方向上发射的粒子数之比,即

$$R = \frac{\left(\frac{dN}{d\phi}\right)_{\phi=90^\circ} + \left(\frac{dN}{d\phi}\right)_{\phi=270^\circ}}{\left(\frac{dN}{d\phi}\right)_{\phi=0^\circ} + \left(\frac{dN}{d\phi}\right)_{\phi=180^\circ}}, \quad (1)$$

式中, ϕ 为末态粒子相对于事件反应平面的方位角。数据分析表明,末态粒子归一化的方位角分布函数可以写为^[9-12]:

$$\frac{dN}{d\phi} = a_0[1 + a_1\cos(\phi) + a_2\cos(2\phi)], \quad (2)$$

式中 a_1 与反应平面内的侧向流有关, a_2 则描述了垂直于反应平面的挤压效应。根据方程(2),挤压比值可以写为^[9,10]

$$R = \frac{1 - a_2}{1 + a_2}. \quad (3)$$

为完成对实验数据的挤压比值的计算,首先需要确定事件的反应平面。对于非零碰撞参数的核-核碰撞,反应平面指的是由入射束方向和两个核中心连线所确定的平面。实验上可以通过对同一事件中发射的所有末态粒子的横向动量求和,构造出一个矢量^[14]:

$$\mathbf{Q} = \sum_{\mu=1}^N \omega(\mu) \mathbf{p}_t(\mu), \quad (4)$$

式中 N 为事件中发射的末态粒子总数, $\mathbf{p}_t(\mu)$ 是第 μ 个末态粒子的横向动量, $\omega(\mu)$ 是一个与粒子动量有关的权重因子。如果用 $y'(\mu)$ 表示质心坐标系中末态粒子的速度与入射核的

速度之比,即 $y'(\mu) = \left(\frac{y(\mu)}{y_{\text{beam}}}\right)_{\text{cm}}$,通常可以取^[14]

$$\omega(\mu) = \begin{cases} 1, & y'(\mu) > \delta, \\ 0, & |y'(\mu)| \leq \delta, \\ -1, & y'(\mu) < -\delta. \end{cases}$$

矢量 \mathbf{Q} 与入射束方向构成的平面通常称为事件的估计反应平面,并将其定义为 x_0z 平面。 δ 的选择主要是为了排除中间快度区域的粒子,提高确定反应平面的敏感程度,一般取其为 0.3。实际分析中,将不同事件按估计反应平面方向一致迭加在一起,根据末态粒子相对于估计反应平面的方位角分布,利用方程(2)拟合分析,得到 a_2 的测量值。

图 1 给出了 600A MeV Au + Au 碰撞的 TPC 实验,中间快度区域末态粒子的归一化

方位角分布,有关该实验的详细描述可参考文献 [2, 6, 8]. 图中的数据包括了质量数为 $A = 1-4$ 的末态粒子,分析时粒子的快度间隔取为 $-0.15 < y' < 0.15$. 可以看出,在 $\phi = 90^\circ$ 和 $\phi = 270^\circ$ 区域附近出现了两个明显的峰,清晰地表明了该实验中挤压效应的存在. 图中的曲线为 (2) 式的拟合曲线,拟合结果为 $a_1 = 0.034 \pm 0.004$, $a_2 = -0.103 \pm 0.004$. 利用 (3) 式,得到实验数据的挤压比值为 $R = 1.230 \pm 0.010$.

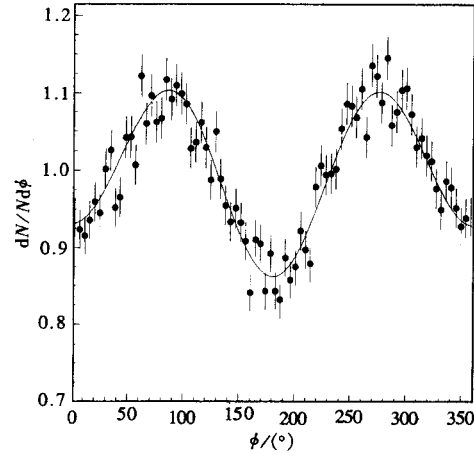


图1 末态粒子的方位角分布

由于碰撞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非对称程度下降. 假定估计反应平面与真实反应平面的夹角为 α , 则对估计反应平面的离散修正后,可以得到 a_2 的修正值 a_2' , 二者间的关系满足^[13, 15]

$$a_2 = a_2' < \cos 2\alpha > . \quad (5)$$

可以看出,反应平面的离散对挤压的测量产生较大影响. 利用实验数据,可以对 $\langle \alpha^2 \rangle^{1/2}$ 或 $\langle \cos \alpha \rangle$ 进行估计^[14]. 对 Au + Au 碰撞实验, $\langle \alpha^2 \rangle^{1/2}$ 值约为 18° . 由 (5) 式可知, a_2' 的值约为 -0.127 , 估计反应平面的离散使 (2) 式的分析结果较修正后的结果偏低约 19%.

3 单个事件的挤压比值

为了消除估计反应平面离散的影响,我们对末态粒子的方位角分布函数作进一步的分析. 对于碰撞事件,假设在以估计反应平面为 xoz 平面的坐标系中,事件真实反应平面的方位角为 α , 而末态粒子的方位角为 ψ , 则有 $\phi = \psi - \alpha$. 而方程 (2) 应写为:

$$\frac{dN}{d\phi} = a_0 [1 + a_1 \cos(\psi - \alpha) + a_2 \cos 2(\psi - \alpha)]. \quad (6)$$

利用上式,分别计算 $\cos 2\psi$ 和 $\sin 2\psi$ 的平均值,可以得到:

$$c_1 = \langle \cos 2\psi \rangle = \frac{1}{2} a_2 \cos 2\alpha , \quad (7)$$

$$c_2 = \langle \sin 2\psi \rangle = \frac{1}{2} a_2 \sin 2\alpha , \quad (8)$$

这样,可以写出: $|a_2| = 2\sqrt{c_1^2 + c_2^2}$. (9)

对于高能重离子碰撞实验, (9) 式中 c_1 和 c_2 的值可以直接由实验数据直接得出:

$$c_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos 2\psi_i ; \quad c_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin 2\psi_i .$$

其中 n 为中间快度区域附近一定快度间隔内末态粒子的总数. 利用 (9) 式,对每一碰撞事件可以计算出一个 $|a_2|$ 值,而估计反应平面与真实反应平面的夹角 α 在 (9) 式中不再出现,

就是说,估计反应平面离散的影响被自动消除了.对于相同碰撞参数的事件,将(9)式的结果对事件数取平均,由式(3)就可以得到碰撞实验的挤压比值了.

值得提出的是,由于统计涨落的存在,对不同事件,不仅 a_2 的大小,甚至其符号也可能发生变化,而式(9)并不能反映出 a_2 的符号.为了说明不同事件结果的涨落,用蒙特卡罗方法直接按式(6)的分布产生模拟事件进行分析.在蒙特卡罗事件中, α 值取为 18° ,由(7)式可以看出,此时 a_2 的符号与 c_1 的符号相同.结合(9)式,就可以对每一个事件同时给出 a_2 的模和符号.计算结果如图2所示,图中的分布宽度反映了不同事件的统计涨落.图2(a)~(d)中事件的多重数(n)均取为30,事件的总数为40000, a_1 的输入值为0, a_2 的输入值分别取为0, -0.1, -0.3和-0.5.计算出的 a_2 的平均值分别为 0.002 ± 0.002 , -0.099 ± 0.002 , -0.304 ± 0.002 和 -0.517 ± 0.002 .这表明,尽管不同事件的结果涨落较大,但如果能确定每一事件 a_2 的符号, a_2 的平均值与真实值仍符合得很好.不同事件 a_2 值的涨落主要受事件多重数的影响,图2(a')~(d')给出了 $n=80$ 时(其它条件不变) a_2 的分布,涨落明显变小.

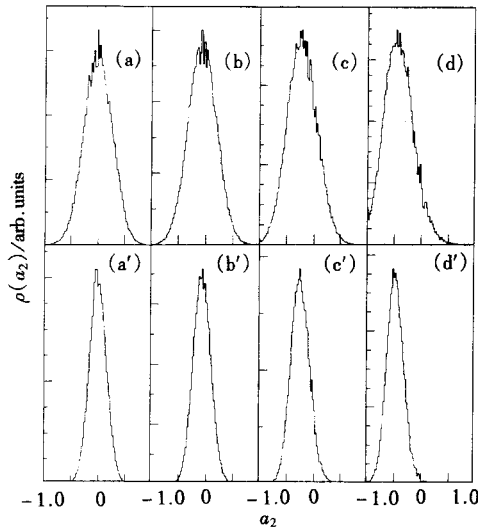


图2 a_1 取固定值时蒙特卡罗事件的 a_2 分布

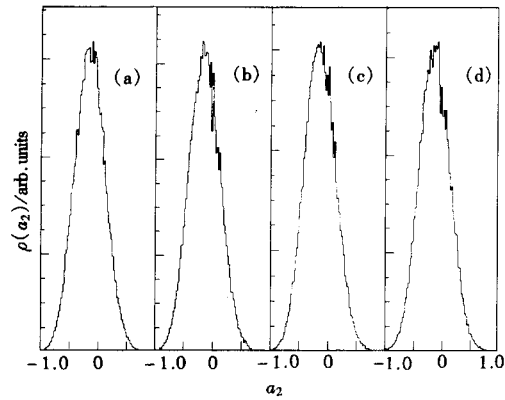


图3 a_1 取不同值时蒙特卡罗事件的 a_2 分布

图3(a)~(d)给出了蒙特卡罗事件中, a_1 取不同值时, a_2 的计算结果.图中事件的多重数(n)仍为30,事件的总数为40000,模拟时 a_2 的输入值均取为-0.2,而 a_1 的输入值分别取为0, 0.1, 0.3和0.5.计算出的 a_2 的平均值分别为 -0.196 ± 0.002 , -0.196 ± 0.002 , -0.195 ± 0.002 和 -0.199 ± 0.002 .可以看出, a_1 值的不同对 a_2 平均值的计算并无明显的影响,就是说这种方法的计算结果基本不受侧向流的影响.

4 数据分析

对于实验数据,尽管事件的估计反应平面与真实反应平面间的夹角 α 是一个随机变

量,但只要 $\alpha < 45^\circ$, 式(7)中 c_1 的符号就仍然与 a_2 的符号相同,而一般的高能重离子碰撞实验均满足对 α 的这种要求. 对于 600A MeV Au + Au 碰撞的实验数据, $\langle \alpha^2 \rangle^{1/2} \approx 18^\circ$, 因此在估计反应平面为 xOz 平面的坐标系中, 式(9)可以合理地写成为

$$a_2 = 2\sqrt{c_1^2 + c_2^2} \text{ sign}(c_1). \quad (10)$$

由于 QMD 模型的模拟事件中, 事件的反应平面是已知的, 因而可以用来对前面的分析方法加以检测. 对 600A MeV Au + Au 碰撞的 QMD 模拟数据, 将不同事件按真实反应平面取向一致进行迭加, 在中间快速区域, 用式(2)直接拟合, 得到 $a_2 = -0.118 \pm 0.003$, 这可以看成是模拟碰撞中 a_2 的真实值. 按照以往对实验数据的分析方法, 我们先用方程(4)计算模拟事件的估计反应平面, 再将不同事件的估计反应平面方向取为一致, 用式(2)进行分析, 计算得到的结果为 -0.084 ± 0.003 , 估计反应平面的离散使结果明显偏低. 如果利用式(10)计算, 得到 a_2 的平均值为 -0.122 ± 0.005 , 与利用真实反应平面计算到的结果基本一致, 估计反应平面离散的影响被消除了.

图 4 给出了对于 600A MeV Au + Au 碰撞的实验事件中, 按式(10)计算出的 a_2 值的分布. 对该实验, 根据图中的数据, 得到 a_2 的平均值为 -0.129 ± 0.006 , 相应的挤压比值为 1.296 ± 0.016 . 与式(2)的拟合结果对估计反应平面离散修正后的值基本一致, 反应平面离散的影响在这里被有效地消除了. 另外, 图 4 还直观地反映出了不同事件 a_2 值的统计涨落, 由图中数据, 得到不同事件 a_2 的离散 $\sigma = 0.58$.

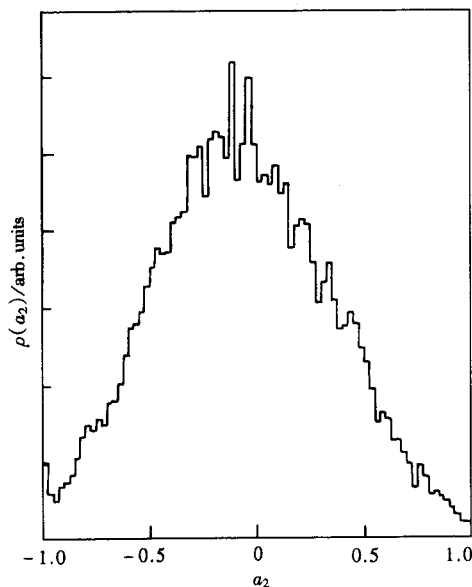


图4 实验事件的 a_2 分布

5 结论

相对论重离子碰撞中, 挤压效应是获取反应区域内处于极端条件下的核物质信息的有效手段. 利用末态粒子的方位角分布可以很好地对挤压效应进行研究, 但通常的分析中, 由于每一事件多重数的有限, 估计反应平面的离散使得对方位角分布非对称性的计算结果低于真实值. 本文使用的挤压效应测量方法, 不仅有效地消除了估计反应平面离散的影响, 可以对不同碰撞事件的挤压效果单独计算, 还能够直接反映出事件多重数有限引起的挤压效应的统计涨落. 对于 600A MeV Au+Au 碰撞实验, 以往分析方法得到的计算结果为 $a_2 = -0.103 \pm 0.004$, 相应的挤压比值为 $R = 1.230 \pm 0.010$. 利用新的分析方法, 得到 $a_2 = -0.129 \pm 0.006$, 相应的挤压比值为 1.296 ± 0.016 .

参 考 文 献

- 1 Kampert K H. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 1989, **15**:691—740
- 2 Wang S, Lisa M A, Albergo S et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **75**:3911—3914
- 3 Stöcker H, Maruhn J A, Greiner W. Phys. Rev. Lett., 1980, **44**:725—728
- 4 Aichelin J, Hartnack C, Bohent A et al. Phys. Lett., 1989, **B224**:34—44
- 5 Gutbrod H H, Poskanzer A M, Ritter H G. Rep. Prog. Phys., 1989, **52**:1267—1328
- 6 Huo Lei, Liu Yiming, Zhang Weining et al. High Energy phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1996, **20**: 812—818
(霍雷, 刘亦铭, 张卫宁等. 高能物理与核物理, 1996, **20**: 812—818)
- 7 Gutbrod H H, Kampert K H, Kolb B W et al. Phys. Lett., 1989, **B216**:267—271
- 8 Lisa M A, Albergo S, Bieser F et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**:2662—2665
- 9 Gutbrod H H, Kampert K H, Kolb B W et al. Phys. Rev., 1990, **C42**:640—651
- 10 Venema L B, Braak H, Löhner H et al. Phys. Rev. Lett., 1993, **71**:835—838
- 11 Bass S A, Hartnack C, Stöcker H et al. Phys. Rev. Lett., 1993, **71**:1144—1147
- 12 Ollitrault J Y, Saclay C E. Nucl. Phys., 1995, **A590**:561c—564c
- 13 Barrette J, Bellwied R, Bennett S et al. Phys. Rev., 1997, **C56**:3254—3264
- 14 Danielewicz P, Odyniec G. Phys. Lett., 1985, **B157**:146—150
- 15 Demoulin M, L'Hôte D, Alard J P. Phys. Lett., 1990, **B241**: 476—480

Squeeze-out in Au + Au Collisions at 600A MeV *

Huo Lei Zhang Weining Chen Xiangjun Zhang Jingbo Liu Yiming

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

D. Keane H. Liu

(Department of Physics, Kent State University, Kent, Ohio 44242)

Abstract Squeeze-out of nuclear matter in Au + Au collisions at 600A MeV are studied. Based on azimuthal distribution analysis, a new type of analysis is presented to measured the squeeze-out quantitatively. The influence of dispersion of the azimuthal angle of the estimated reaction plane to the measurement results can be removed.

Key words reaction plane, azimuthal distribution, squeeze-out

Received 13 October 1998

* Project Supported by National Natural Science Foundation of China and the Science Foundation of Harbin Institute of Technology