

用阶乘矩技术提高相对论重离子碰撞实验 数据样本中 QGP 事件比例的方法*

程庆华¹⁾ 胡源 刘连寿

(华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430079)

摘要 在相对论重离子碰撞中形成 QGP 时,与之相伴随的有一些非 QGP 背景事件.把末态(方位角、快度)二维相空间中阶乘矩剧烈上翘的消失与一些普遍认为的 QGP 信号(如 K/π 比的上升)联系起来讨论,提出了一种从实验数据中挑选候选的 QGP 事件的方法.用 Mont-Carlo 模拟表明,这种方法有效地提高了挑选出来的子样本中 QGP 事件的信噪比.

关键词 相对论重离子碰撞 QGP 信号 阶乘矩

近期在 CERN-SPS 上完成了入射能量为 160A GeV 的铅-铅碰撞,几年内更高能量的金-金和铅-铅碰撞将在 Brookhaven(RHIC)和 CERN(LHC)上实现,在这种超相对论性能量下,新的物质形态夸克胶子等离子体(QGP)的形成将极有可能实现,因此我们关注的问题将从“QGP 是否形成”转到“怎样从背景中识别 QGP 事件”上来.

由于超相对论性重离子碰撞的高度复杂性,甚至在达到了人们预期的 QGP 相变临界能量的实验中,相变也不是在每个事件中都实现了.没有相变的复杂的核碰撞事件仍然存在,形成 QGP 事件的背景.任何一个可以作为 QGP 信号的特征物理量,在对整个事件样本求平均后,至少部分地抹杀了其特性.即使我们逐个事件地测量这些特征量并研究其分布,非 QGP 背景事件仍干扰 QGP 事件的观测,因此,寻找从超相对论重离子碰撞实验数据中挑选 QGP 事件候选者的有效途径是值得研究的,本文为实现这一目的提出了一种可能的方法.

若把 K/π 比上升作为 QGP 形成的信号,粗略估计^[1],在中心快度区,非 QGP 事件 K/π 比的平均值 $\langle R_{K/\pi} \rangle$ 约为 0.14,而 QGP 事件 K/π 比的平均值几乎是非 QGP 事件的两倍;在 CERN-SPS 或更高的能量下, K/π 比分布的相对宽度 $\sigma(R_{K/\pi})$ 和 K/π 比平均值 $\langle R_{K/\pi} \rangle$ 的比值 $\sigma(R_{K/\pi})/\langle R_{K/\pi} \rangle$ 约为 0.3.

设非 QGP 事件和 QGP 事件的 K/π 比均为高斯分布,取如下参数:

1998-07-28 收稿

* 国家自然科学基金资助项目

1) 永久通信处:荆州师范专科学校物理系 434100

$$\langle R_{K/\pi} \rangle^{\text{non-QGP}} = 0.14, \quad \langle R_{K/\pi} \rangle^{\text{QGP}} = 0.25, \quad \sigma(R_{K/\pi}) / \langle R_{K/\pi} \rangle = 0.3, \quad (1)$$

得到 QGP 事件占总事件比例 ρ_{QGP} 为 20%、33%、50% 的三种典型情况下的混合事件样本的 K/π 比分布, 如图 1. 从图上可以看出: 混合事件样本的 K/π 比分布形状主要由非 QGP 事件决定, 只有在 ρ_{QGP} 达到 50% 时, 分布才有一形如肩膀的地方. 这个肩部结构可以被用来构造 QGP 事件子样本. 对于 $\rho_{\text{QGP}} = 50\%$ 的样本, 用肩部结构所在的位置 $R_{\text{cut}} = 0.22$ 切割样本, 取 $R_{K/\pi} > R_{\text{cut}}$ 的部分, 就可以得到一个“富 QGP 事件”子样本. 在这个子样本中, QGP 事件的比例从 50% 上升到了 95.5%, 但丢失的 QGP 事件达到 33.6%. 当 ρ_{QGP} 降低到 33% 或 20% 时, 混合事件样本的 $R_{K/\pi}$ 分布没有明显的肩部结构, 因而用 K/π 比的分布切割出富 QGP 事件子样本的方法失效.

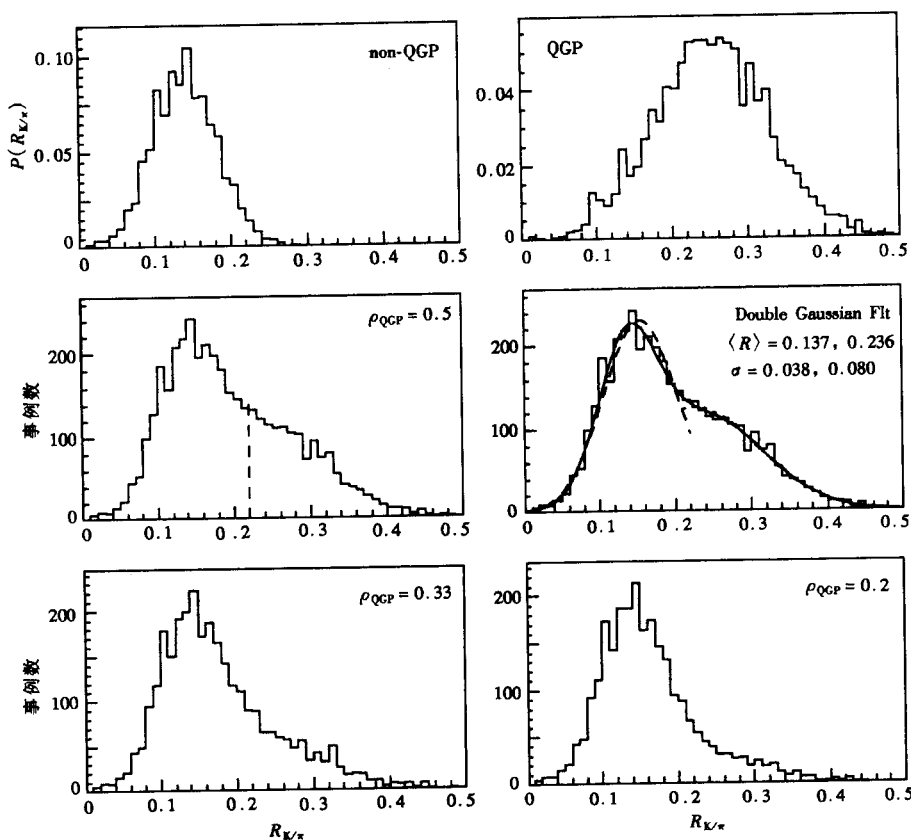


图1 非QGP事件、QGP事件及混合事件样本的 K/π 比分布

虚线为按 K/π 比切割QGP事件子样本的切割点.

为了提高挑选 QGP 事件的效率, 我们采用了一个简单的几何考虑. 众所周知, 常见能量下的重离子碰撞可以看作大量基元碰撞过程的迭加, 而形成 QGP 的必要条件是在高温高密度时各种基元碰撞熔为一个整体. 所以, 若我们能找到一个判别末态粒子是来自一个独立的系统, 还是来自于大量基元碰撞迭加的系统的标准, 就可以利用这个标准来提高 QGP 事件子样本的纯度.

高维阶乘矩分析可以作为以上标准^[2,3]. q 阶阶乘矩 F_q 定义如下^[4]:

$$F_q(M) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\langle n_m(n_m-1)\cdots(n_m-q+1) \rangle}{\langle n_m \rangle^q}. \quad (2)$$

这里将相空间分成了 M 个子区域, n_m 是第 m 个子区域中的多重数, $\langle \dots \rangle$ 表示对所有事件求平均(即所谓“纵向平均”). 研究表明^[2], 在二维 (η, ϕ) 或 (y, ϕ) 和三维 (η, p_t, ϕ) 或 (y, p_t, ϕ) 相空间, 若存在大量的基元碰撞迭加, 则核-核碰撞 $F_q(M)$ 和 M 的双对数曲线将剧烈上翘, 反之, 若碰撞熔为一个整体, 则核-核碰撞的 $\ln F_q(M) - \ln M$ 曲线的上翘消失.

基于上述分析, 我们提出了如下的从整个实验数据样本中挑选富 QGP 事件子样本的方法:

(1) 对 K/π 比 $R_{K/\pi}$ 和高维二阶阶乘矩 $F_2(M)$ 联合进行单事件分析.

(2) 为了去掉横动量守恒的影响^[5], 丢掉 $\ln F_2 - \ln M$ 中 $M_y < 2$ 的点, 保留下来的第一个点用 M_0 表示, 以 $\ln M_0$ 为原点作坐标变换:

$$x = \ln M - \ln M_0, \quad y = \ln F_2(M) - \ln F_2(M_0). \quad (3)$$

再作二次拟合:

$$y = ax^2 + bx, \quad (4)$$

用拟合的二次系数 a 来描述 $\ln F_2 - \ln M$ 曲线上翘程度的特性.

(3) 对混合事件样本分别以 $R_{K/\pi}$ 和上翘系数 a 为自变量作几率函数的散点图, 通过散点图的投影即可得到 $R_{K/\pi}$ 和 a 分布.

富 QGP 事件子样本可用如下的方法挑选:

方法 A: 若 $R_{K/\pi}$ 比的分布有双峰或一个峰带肩形结构, 取双峰的分界或肩形结构中的 $R_{K/\pi}^{\text{cut}}$ 切割, 用割下的 $R_{K/\pi} > R_{K/\pi}^{\text{cut}}$ 部分构成富 QGP 事件子样本.

方法 B: 若上翘系数 a 的分布存在双峰或一个峰带肩形结构, 取双峰的分界或肩形结构的 a^{cut} 切割, 用切割出的 $a < a^{\text{cut}}$ 部分构成富 QGP 事件子样本.

方法 C: 在混合事件样本以 $R_{K/\pi}$ 和上翘系数 a 为自变量的几率函数散点图中, 找出小 $R_{K/\pi}$ 和大 a 的事件分布密集部位, 这个密集部位主要由非 QGP 事件组成. 用等高图上这个部位的最高几率点为中心, 取适当的长短轴作椭圆尽可能精确地覆盖这个部位. 切割掉这个椭圆后, 剩下的部分构成富 QGP 事件子样本.

我们建立了一个简单的模型^[2]做 Monte Carlo 模拟, 在这个模型中, 一个核-核碰撞事件由 N 个基元碰撞迭加而成. 用 N 个二维随机级联 α 模型模拟一个核-核碰撞事件^[6], 每个 α 模型与 N 个基元碰撞中的一个相对应. 考查的中心碰撞区取为 $(0, 1) \times (0, 1)$. 对 N 个基元碰撞, 在方向 b (“横向”) 的分布区域均为 $(0, 1)$, 与中心碰撞区重合; 在方向 a (“纵向”), 将第 i 个基元碰撞 ($i = 1, 2, \dots, N$) 的中心部分随机地取为 $((1 - \omega)/2, (1 + \omega)/2)$. 分布宽度为 $1 + \omega$. $0 < \omega \leq 1$ 是一个确定的参数. 不同的 N 个基元碰撞落在区域 $(0, 1) \times (0, 1)$ 中的末态粒子迭加在一起构成核-核碰撞的一个事件. 模型中的参数取为 $\alpha = 0.5$, $\omega = 1$.

取非 QGP 核-核碰撞事件的基元碰撞数 $N = 100$, 候选的 QGP 事件 $N = 1$; 每个单事件的末态带电多重数 $n_{ch} = 1000$, 用 2000 个非 QGP 事件和 2000 个候选的 QGP 事件混合构成一个 $\rho_{\text{QGP}} = 50\%$ 的样本, 在 2000 个候选的 QGP 事件中随机地取 1000 和 500 个事件, 分别和 2000 个非 QGP 事件混合得 $\rho_{\text{QGP}} = 33\%$ 、 $\rho_{\text{QGP}} = 20\%$ 两个样本. 在上面的三个样本中取 $\rho_{\text{QGP}} = 50\%$ 和 $\rho_{\text{QGP}} = 20\%$ 的两个样本, 分别用方法 A、方法 B、方法 C 得富 QGP 事件子样本, 其结果如图 1—3 和表 1.

表1 三种不同方法得到的富QGP事件子样本中QGP事件所占比例 (ρ_{QGP})和丢失QGP事件的比例

Method	$\rho_{\text{QGP}}(\text{original})=50\%$			$\rho_{\text{QGP}}(\text{original})=20\%$	
	A	B	C	B	C
$\rho_{\text{QGP}}(\text{sub-sample})$	95.5%	98.2%	98.6%	98.3%	94.7%
Lost QGP events	33.6%	3.8%	2.5%	7.4%	2.8%

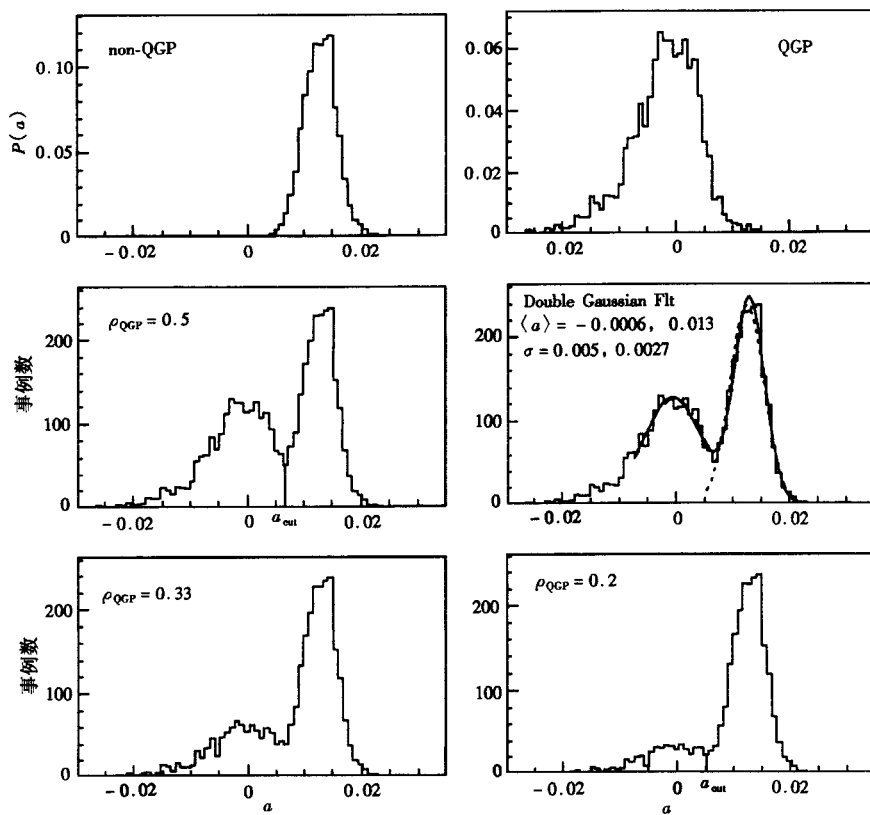


图2 非QGP事件、QGP事件及混合事件样本的 $\ln F_2 - \ln M$ 上翘系数 a 的分布
虚线为按 a 切割 QGP 事件子样本的切割点.

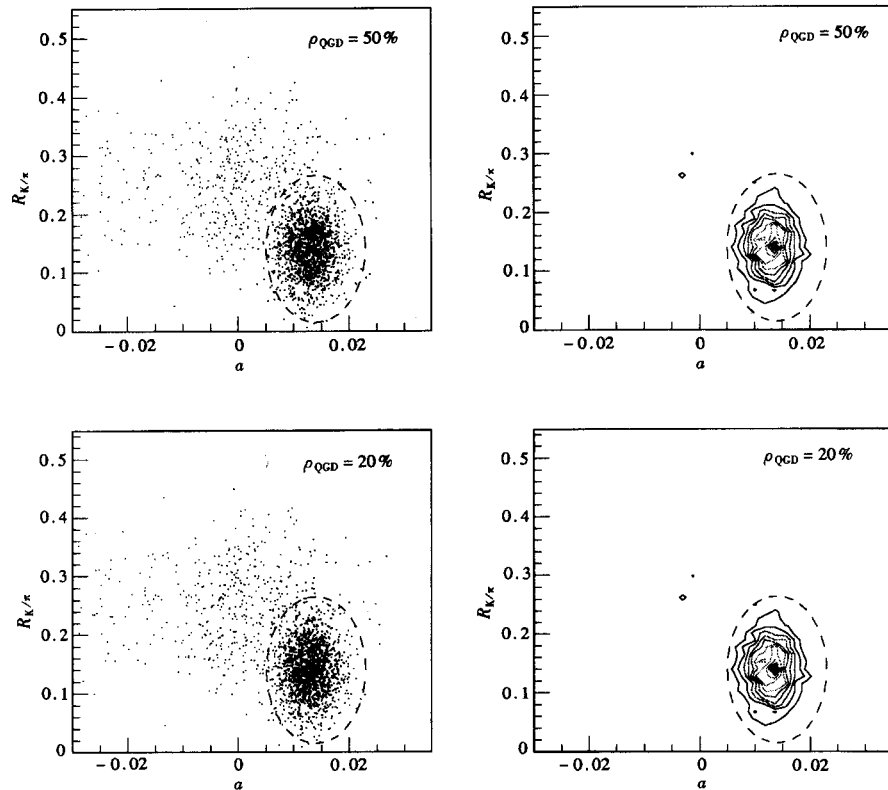


图3 混合事件样本的以 a 和 $R_{K/\pi}$ 比为自变量的几率函数的散点图和等高图

虚线为切割QGP事件子样本的椭圆, $x_0=0.014$; $R_x=0.009$; $y_0=0.140$; $R_y=0.125$.

从上述表 1 和图 1—3 中可得到如下结果:

(1) 当混合事件中 $\rho_{\text{QGP}} \geq 30\%$ 时, $R_{K/\pi}$ 分布无明显的肩形结构, 用方法 A 挑选富 QGP 事件子样本失败. 但是, 当基元碰撞数 N 足够大时, 即使 ρ_{QGP} 很低, 用 $\ln F_2 - \ln M$ 曲线上翘系数 a (方法 B) 和把 $R_{K/\pi}$ 和 a 同时考虑 (方法 C) 来挑选富 QGP 事件子样本仍然有效. (我们曾用不同的 N 做过模拟, 随着 N 的增加, a 的分布向大 a 处移动且越来越窄, 故方法 B 和方法 C 在 $N \geq 100$ 时仍适用).

(2) 用方法 B 和方法 C 得到的候选的 QGP 事件子样本中 QGP 事件所占比例高于方法 A 得到的结果, 而丢失的 QGP 事件比大大地低于方法 A 的结果, 这表明方法 B 和方法 C 比方法 A 挑选 QGP 事件候选者更有效.

(3) 用二维椭圆切割 (方法 C) 得到的 QGP 事件子样本中 QGP 事件比和用一维 a 分布切割 (方法 B) 结果几乎相等, 但二维切割丢失的 QGP 事件比比一维切割更少.

在这篇文章中我们对从相对论重离子碰撞事件样本中挑选富 QGP 事件子样本作了较为详细的讨论. 基于一种简单的几何考虑, 把高维阶乘矩双对数图上翘消失与否用来从整个事件样本中挑选富 QGP 事件子样本. 用上翘系数 a 和把 a 与 $R_{K/\pi}$ 结合起来考虑比仅用 $R_{K/\pi}$ 挑选 QGP 事件候选者效果更好.

本文提出的方法不仅适用于 CERN-SPS 能量下的重离子碰撞系统, 也适用于未来

的 Brookhaven-RHIC 和 CERN-LHC 上的超相对论重离子碰撞系统. 对比不同能量, 不同碰撞中心度的重离子碰撞事件中, 以 a 和 $R_{K/\pi}$ 为自变量的几率函数的散点图可以提供关于系统热化和相变的有用信息.

感谢吴元芳和刘峰的帮助和讨论.

参 考 文 献

- 1 Stock R. in Proceedings of the QM95 Pre-conference Workshop on Physics with the Collider Detectors at RHIC and the LHC, eds Thomas J and Hallman T, UCRL-ID-121571
- 2 Liu Lianshou, Hu Yuan, Deng Yue. Phys. Lett., 1996, **B388**:10
- 3 Liu Feng, Liu Lianshou. Chinese Phys. Lett., 1998, **15**:10
- 4 Bialas A, Peschanski R. Nucl. Phys., 1986, **B273**:703; 1998, **B308**:851
- 5 Liu Lianshou, Zhang Yang, Deng Yue. Z. Phys., 1997, **C73**:535
- 6 Zhang Yonghe, Liu Lianshou, Zhang Xianze. Science in China, 1994, **A37**:840; Wu Yuanfang, Liu Lianshou. Science in China, 1995, **A38**:435

An Algorithm for Increasing the Ratio of QGP Candidate Events in Relativistic Heavy Ion Collision Data Sample Using Factorial Moment Technique *

Cheng Qinghua¹⁾ Hu Yuan Liu Lianshou

(Institute of Particle Physics, Huazhong Normal University, Wuhan 430079)

Abstract The formation of quark-gluon plasma (QGP) in relativistic heavy ion collision, is expected to be accompanied by a background of ordinary collision events without phase transition. In this short note an algorithm is proposed to select the QGP candidate events from the whole event sample. This algorithm is based on a simple geometrical consideration together with some ordinary QGP signal, e.g. the increasing of K/π ratio. This algorithm increases the "signal to noise ratio" of QGP events in the selected sub-sample in shown explicitly by using Monte-Carlo simulation.

Key words relativistic heavy ion collision signal of QGP formation factorial moments K/π ratio

Received 28 July 1998

* Project Supported by National Natural Science Foundation of China

1) Permanent address: Physics Department, Jingzhou Teacher's College