

文章编号: 1007-4627(2016)04-0414-08

RHIC 和 LHC 能区两粒子关联函数研究

司瑞芳¹, 刘福虎²

(1. 吕梁学院汾阳师范分校数学与科学系, 山西 汾阳 032200;

2. 山西大学理论物理研究所, 太原 030006)

摘要: 应用多源热模型研究了相对论性重离子对撞机 (RHIC) 上 PHENIX 合作组测得的每核子对质心能量 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的氩-金 (d+Au) 碰撞中快度长程方位角关联, 和大型强子对撞机 (LHC) 上 CMS 合作组测得的质心能量 $\sqrt{s} = 0.9, 2.36, 7$ TeV 的质子-质子 (p+p) 碰撞中高多重数短程快度关联, 在误差范围内模型结果很好地重现了实验数据。用 4 个参数分析了长程方位角关联, 结果表明, 参数可以清楚地显示出脊结构的变化趋势, 说明脊结构与集体效应、流体力学流效应、粒子对的横动量及信号等有关。用 3 个参数分析了小系统高多重数短程快度关联, 结果表明, 参数 σ 和 c_3 与能量相关, 能量越大, 两粒子越靠近, 关联越强。

关键词: 多源热模型; 长程方位角关联; 短程快度关联

中图分类号: O572.25 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.04.414

1 引言

相对论性重离子碰撞有动量、快度、熵、多重数、相变、相图等丰富的研究内容。多粒子产生和关联是重要的实验现象和观测手段。文献[1]对低横动量 (p_T) 粒子近边 ($\Delta\varphi \approx 0$) 长程 ($2.0 < |\Delta\eta| < 4.8$) 高多重数事件关联的研究, 激发了人们对高能小系统的高多重数事件物理本质的探究。高能小系统的高多重数事件的能量密度可达到较大核碰撞系统产生的能量密度, 并发现新物理[2-5]。

继第一次研究高多重数事件两粒子长程方位角关联并观测到脊结构[1]之后, 人们在 $p_T = 1 \sim 5$ GeV/c 的粒子的长程方位角关联中观测到了许多新特征[6-7]。例如, 在 Au+Au 碰撞中观测到了近边脊结构[6,8], 在中心质子-铅 (p+Pb) 碰撞中观测到了双脊结构, 而在边缘 p+Pb 碰撞中则只有远边脊出现[9]。ALICE 和 ATLAS 合作组则寻找中心碰撞和边缘碰撞的不同[9-10]。

质子(氩)-核 (p(d)+A) 碰撞系统作为质子-质子(p+p)碰撞系统和核-核 (A+A) 碰撞系统之间的过渡系统, 已有初态核效应, 但高温高密的夸克-胶子等离子体 (Quark-Gluon Plasma) 并不总是出现。同时, p(d)+A 碰撞为高密度部分子饱和和量子色动力学 (QCD) 研究提供了有利的环境, 并为解释 A+A 碰撞结果提

供了基础测量[11-12]。ATLAS 合作组测量了大型强子对撞机 (LHC) 上每核子对质心能量 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV 的 p+Pb 碰撞中的长程方位角关联[9]。之前在相对论性重离子对撞机 (RHIC) 能区的 d+Au 碰撞研究中, 基于类喷柱关联的研究而忽略了基础事件的测量, 并没有发现近边长程结构[8,13-15]。

用 MC-Glauber 模型计算的 RHIC 能区 d+Au 碰撞和 LHC 能区 p+Pb 碰撞的参与核子的初始空间各向异性率 (ε_2) 相似[16]。为了单纯地与文献[9]的数据分布形状进行比较, PHENIX 合作组用 d 代替 p, 且入射核的每核子能量比 LHC 上 p+Pb 碰撞的 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV 降低了许多, 用相似的分析方法测量了 RHIC 上 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 d+Au 碰撞中快度 [$0.48 < |\Delta\eta| < 0.7$] 长程方位角关联数据[12]。

有许多模型解释方位角长程关联脊结构, 如多重部分子相互作用[17], 部分子饱和[18], 末态集体扩散[19], 传导部分子相互作用[20], 源于高密系统的集体效应[21-22], 流体力学的流效应[7], 胶子饱和[23]等等, 但仍然没有关于脊结构形成的确切结论。多源热模型[24]曾被用于分析 LHC 上 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV 的 p+Pb 碰撞中的长程方位角关联。

在以前有关多源热模型的应用中, 我们曾分析了 LHC 及以下能区核碰撞中末态产物的方位角[25-26],

收稿日期: 2016-02-11; 修改日期: 2016-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11575103)

作者简介: 司瑞芳(1979-), 女, 山西交城人, 硕士研究生, 讲师, 从事粒子物理和核物理研究; E-mail: 654525027@qq.com。

赙快度^[27-28], 多重数^[29-30], 横动量^[31-32], 横能^[33-34]等多个观测量的分布。本文将用同一模型着重分析RHIC上PHENIX合作组测得的 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV的d+Au碰撞中的快度长程方位角关联^[12]。作为多源热模型进一步应用的尝试, 本文同时分析LHC上CMS合作组第一次测得的质心能量 $\sqrt{s} = 0.9, 2.36, 7$ TeV的p+p碰撞中的高多重数短程赙快度关联^[1]。

2 多源热模型描述方位角关联

多源热模型^[24]将高能碰撞过程看作是多个源的相互作用过程, 在一个或两(多)个主源中包括一个或两(多)个发射点(子源), 两发射点分别产生“触发”(“trigger”)粒子和“关联”(“associated”)粒子。以 oz 为入射轴, 关联粒子的横动量为 ox 轴, 在触发粒子的静止参考系, 粒子各向同性发射, 其动量分量 p'_x, p'_y 可用高斯分布

$$g(p'_{x,y}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{p'^2_{x,y}}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

描写。当两散射粒子之间有振荡和其他相互作用时, 最后的动量分布将不再是标准的高斯分布。在考虑了相对论效应的平均效果后, 实验室系的动量分量与静止系的动量分量之间可用简单的线性关系描写

$$p_x = a_x p'_x + b_x \sigma, \quad p_y = a_y p'_y + b_y \sigma. \quad (2)$$

其中 $a_{x,y}$, $b_{x,y}$ 代表发射源的振荡强度, 缺省值分别为1和0, 表示没有振荡和相互作用的各向同性的散射。 σ 代表初始动量分量的分布宽度。物理上要求, $a_{x,y} > 1$ 和 $a_{x,y} < 1$ 分别表示源在 x, y 方向的扩散和在 x, y 方向的压缩, $b_{x,y} > 0$ 和 $b_{x,y} < 0$ 分别表示源沿 x 和 y 轴正向和负向的移动。在方位角关联分析中, $b_{x,y}$ 表示第一子源(触发粒子)相对第二子源(关联粒子)的靠近 > 0 和远离 < 0 。为计算方便, 常用蒙特卡罗模拟计算中的高斯分布对应的离散值 $p'_{x,y} = \sigma \sqrt{-2\ln r_{1,3}} \cos(2\pi r_{2,4})$ 代替式(2)中的 p'_x, p'_y , 其中 $r_{1,2,3,4}$ 是 $[0,1]$ 间均匀分布的随机数。所以最后的动量分量可表示为

$$\begin{aligned} p_x &= a_x \sigma \sqrt{-2\ln r_1} \cos(2\pi r_2) + b_x \sigma, \\ p_y &= a_y \sigma \sqrt{-2\ln r_3} \cos(2\pi r_4) + b_y \sigma. \end{aligned} \quad (3)$$

根据横动量的两个分量, 触发粒子的方位角为 $\phi = \arctan(p_y/p_x)$ 。多源热模型对关联问题研究的坐标系选择, 导致 $\phi_{\text{assoc}} = 0$, 因此 $\Delta\phi = \phi_{\text{trig}} - \phi_{\text{assoc}} = \phi_{\text{trig}}$, 可知触发粒子和关联粒子的相对方位角,

$$\Delta\phi = \arctan\left[\frac{\sqrt{-2\ln r_3} \cos(2\pi r_4)}{a_x \sqrt{-2\ln r_1} \cos(2\pi r_2) + b_x}\right], \quad (4)$$

其中 a_y 和 b_y 取缺省值。利用数值计算可得到 $\Delta\phi$ 的统计分布 $f(\Delta\phi)$ 。

在关联函数的定义式 $C(\Delta\phi) = S(\Delta\phi)/B(\Delta\phi)$ 中^[9], $S(\Delta\phi)$ 代表信号分布, $B(\Delta\phi)$ 代表本底分布。在多源热模型的假设中, 本底分布来源于各向同性的混合事件, 所以可以认为关联函数与信号分布成比例, 同时多源热模型利用蒙特卡罗计算所得的 $f(\Delta\phi)$ 也应与 $C(\Delta\phi)$ 或者 $S(\Delta\phi)$ 成正比例关系, 于是有^[24]:

$$C(\Delta\phi) = c_1 S(\Delta\phi) = c_2 f(\Delta\phi). \quad (5)$$

文献[9]中用单位触发产额 $Y(\Delta\phi)$ 描写最后的关联强度, 其中 b_{ZYAM} 与本底相关。

$$Y(\Delta\phi) = \frac{\int B(\Delta\phi) d\Delta\phi}{\pi N_a} \cdot C(\Delta\phi) - b_{\text{ZYAM}}. \quad (6)$$

在多源热模型中, 关联强度的最后表达式^[24]为

$$Y(\Delta\phi) = c_3 f(\Delta\phi) + b_0. \quad (7)$$

上述表达式(5)和(7)中的 c_1, c_2, c_3 均是比例系数。

图1是PHENIX合作组测得的RHIC上 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV的d+Au碰撞中, 中心碰撞和边缘碰撞的方位角关联数据(分别用圆圈和菱形表示)^[12]及用多源热模型拟合的结果(分别用实线和点虚线表示)。图(a~d)为4个不同的横动量区间的结果, 其中一个粒子的横动量始终在区间 $[0.5, 0.75]$ GeV/c, 另一个粒子的横动量依次在区间 $[0.5, 0.75]$, $[1, 1.25]$, $[1.5, 2]$ 和 $[2, 2.5]$ GeV/c。为了将源于共振、玻色-爱因斯坦关联、喷柱碎裂的小角关联贡献最小化, 以增加关联对赙快度范围的敏感性, 特将粒子对的相对赙快度限制在 $0.48 < |\Delta\eta| < 0.7$ 范围。拟合实验数据用到的参数 a_x, b_x, c_3, b_0 的值和相应的卡方每自由度(χ^2/NDF)的值见表1。可以看出, 在多数情况下, 多源热模型近似地重现了实验数据。

图2是图1中中心碰撞和边缘碰撞的关联函数的差值, 按4个不同的横动量区间分别给出。空心圆圈是PHENIX合作组测得的实验数据, 实线是用多源热模型拟合得到的结果。拟合实验数据用到的参数值和相应的 χ^2/NDF 值见表1。在多数情况下, 多源热模型近似地重现了实验数据。

文献[24]引用的ATLAS合作组的数据^[9], 脊的高度随横动量增加明显增加, 中心碰撞是双脊结构, 且总是远边脊相对近边脊要高一些, 而边缘碰撞只有远边脊结构, 且始终保持中心碰撞的远边脊高于边缘碰撞的。

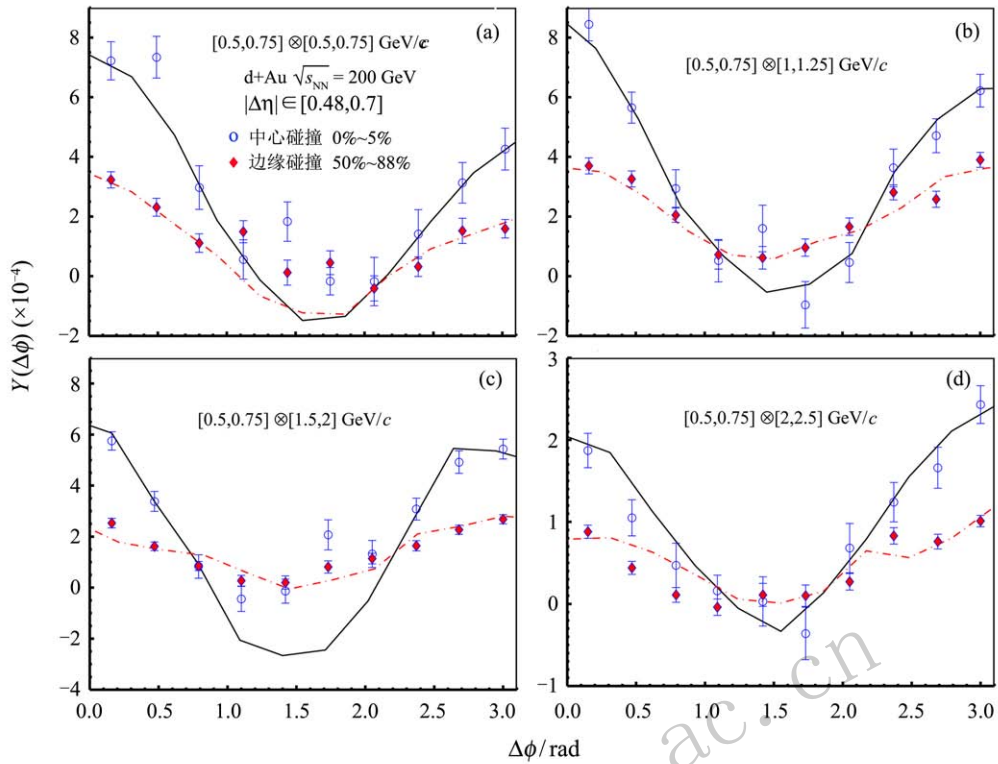


图 1 (在线彩图) $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 d+Au 碰撞中的长程方位角关联
(a)~(d) 代表 4 个不同的横动量区间的结果, 其中空心圆圈和实心菱形分别为中心碰撞和边缘碰撞的实验数据(来自 PHENIX 合作组^[12]), 实线和点虚线分别为多源热模型对中心碰撞和边缘碰撞数据拟合的结果。

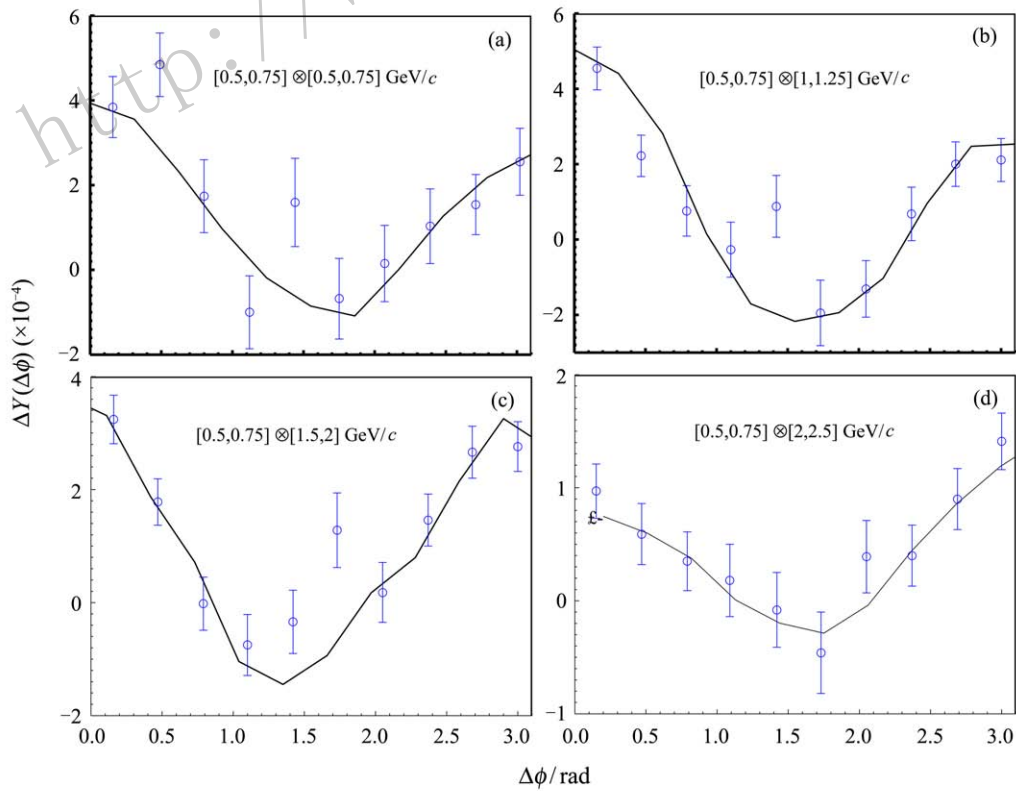


图 2 (在线彩图) 同图1, 但给出的是与中心碰撞和边缘碰撞差值的比较

表 1 多源热模型拟合 RHIC 上 PHENIX 合作组测得的 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV d+Au 碰撞中程方位角关联图 1~4 用到的参数值及 χ^2/NDF 值

类型	a_x	b_x	c_3	b_0	χ^2/NDF
图1(a)中心碰撞	1.063 ± 0.005	0.020 ± 0.003	38.00 ± 0.50	-58.36 ± 0.04	4.573
图1(b)中心碰撞	1.034 ± 0.003	0.007 ± 0.002	78.00 ± 0.30	-120.9 ± 0.02	3.684
图1(c)中心碰撞	1.032 ± 0.001	0.003 ± 0.002	91.00 ± 0.10	-141.40 ± 0.01	32.934
图1(d)中心碰撞	1.035 ± 0.003	-0.007 ± 0.002	22.00 ± 0.20	-34.00 ± 0.20	1.329
图1(a)边缘碰撞	1.032 ± 0.002	0.009 ± 0.003	38.49 ± 0.20	-60.53 ± 0.03	3.599
图1(b)边缘碰撞	1.014 ± 0.001	-0.0007 ± 0.0001	70.00 ± 0.10	-109.20 ± 0.02	4.302
图1(c)边缘碰撞	1.014 ± 0.001	-0.002 ± 0.001	53.50 ± 0.10	-83.70 ± 0.02	3.231
图1(d)边缘碰撞	1.009 ± 0.001	-0.001 ± 0.001	33.20 ± 0.20	-52.40 ± 0.03	13.090
图2(a)差值	1.028 ± 0.002	0.007 ± 0.001	45.54 ± 0.04	-71.25 ± 0.02	2.685
图2(b)差值	1.027 ± 0.001	0.006 ± 0.001	73.20 ± 0.20	-115.80 ± 0.01	6.139
图2(c)差值	1.028 ± 0.001	0.003 ± 0.002	53.04 ± 0.10	-83.40 ± 0.04	5.811
图2(d)差值	1.028 ± 0.002	-0.013 ± 0.002	14.54 ± 0.20	-22.70 ± 0.03	0.869
图3(a)中心碰撞	1.032 ± 0.002	-0.009 ± 0.001	73.00 ± 0.10	-113.96 ± 0.05	2.528
图3(b)中心碰撞	1.034 ± 0.002	0.003 ± 0.002	77.50 ± 0.03	-120.00 ± 0.03	3.341
图3(a)边缘碰撞	1.016 ± 0.002	-0.008 ± 0.001	46.80 ± 0.20	-73.20 ± 0.02	1.321
图3(b)边缘碰撞	1.017 ± 0.001	0.008 ± 0.001	59.5 ± 0.02	-92.80 ± 0.02	9.717
图4(a)差值	1.028 ± 0.002	-0.002 ± 0.001	43.54 ± 0.05	-68.65 ± 0.05	2.366
图4(b)差值	1.027 ± 0.002	0.009 ± 0.001	45.54 ± 0.05	-71.14 ± 0.02	1.449

本文引用的PHENIX合作组的数据^[12], 在中心碰撞和边缘碰撞中出现的均是双脊结构, 中心碰撞中出现的近边和远边脊都要比边缘碰撞的高, 只是在中心碰撞中, 近边脊占优势, 而在边缘碰撞中则是远边脊占优势。在各个类型的数据中所得 a_x 参数均近似相等, 微小的不同信号可能是由误差导致的, 且中心碰撞的 a_x 均大于边缘碰撞的 a_x , 与文献[24]表 1 对应数据一致, 而 b_x 的表现则明显不同。在文献[24]表 1 中, 全部的 $b_x < 0$, 说明在所有的横动量区间远边脊相对近边脊要高一些。本文 b_x 随横动量增加进行有规律的变化。首先在同一类型碰撞中, b_x 随横动量的增加由正数变成负数, 拟合的脊结构也由近边脊过渡到远边脊, 说明第一子源相对第二子源由靠近变为远离, 即“触发”粒子的源由沿 x 轴正向朝向“关联”粒子的源移动(此时集体效应起主要作用), 变为沿 x 轴负向背离“关联”粒子的源移动(此时集体效应和粒子对关联均起主要作用)。在中心碰撞中以近边脊为主, 只在[2,2.5] GeV/c 区间才出现远边脊, 在边缘碰撞中以远边脊为主, 只在[0.5,0.75] GeV 区间保持了近边脊结构。在横动量最小的[0.5,0.75] GeV/c 区间, 中心碰撞和边缘碰撞都只出现了近边脊, 但中心碰撞的近边脊要大于边缘碰撞的。在横动量最大的[2,2.5] GeV/c 区间, 中心碰撞和边缘碰撞均只出现了远边脊, 同样是中心碰撞的远边脊大于边缘碰撞的。可见, 在低横动量区, 主要呈现集体效应, 而在高横动量区, 同时呈现集体效应和粒子对关联。在不同碰撞参数的事例中和在不同的横动量区间, 集体效应和粒子对关

联的贡献相互竞争, 最终使得两粒子关联呈现出了丰富的实验现象, 并使得对两粒子关联的解释变得复杂起来。PHENIX 中心碰撞数据^[12]有明显多于 ATLAS 中心碰撞数据^[9]的近边结构, 这也许是文献[12]提到的无法完全排除近边喷柱贡献导致的, 但实际上关于喷柱如何对脊的形成产生影响还不清楚, 因此事实如何尚不得而知。在多源热模型框架内, 可以肯定近边脊主要是集体效应的贡献, 而远边脊则不仅来自于集体效应还有关联粒子对高横动量的贡献。

在 ATLAS 合作组关于中心碰撞与边缘碰撞的差值中, 出现的两脊关于 $\pi/2$ 几乎完全对称, 所得参数与其他类型相似(见文献[24]中的表 1), a_x 几乎不变, 但 b_x 有由负而正微小变化, 且随横动量增加, 由远边脊过渡到两脊相等, 再到近边脊出现, 说明中心碰撞和边缘碰撞远边脊的差距大于近边脊的差距, 随横动量增加, 远边脊的差距在减小, 近边脊的差距在增大, 直到脊结构由远边完全过度到近边。图 2 中分析的 PHENIX 实验数据也出现两脊, 但两脊的相对高度有明显的变化, 由近边脊过度到远边脊, 只有在图 2(c) 中关于 $\pi/2$ 近似对称。所得参数也与文献[24]中的表 1 相似, a_x 几乎不变, 但 b_x 却是由正而负, 与本数据中中心碰撞所得参数具有一致的变化趋势。脊的变化同上完全相反, 随横动量增加由近边脊过度到远边脊, 即随横动量增加, 近边脊的差距在减小, 远边脊的差距在加大, 且过渡比较突兀, 没有 ATLAS 实验数据的缓和。这也是本文引用的数据的横动量区间选的比较少, 且不是连续变化的缘故。在

文献[9]和[12]中均指出, 中心碰撞和边缘碰撞最终有相同的表现, 并可用函数 $1 + 2a_2 \cos(2\Delta\phi)$ 描写, 画出的拟合曲线在误差范围内基本吻合。可以预见, 在抵消了中心碰撞和边缘碰撞的一些共同性质以后, 依然有脊出现, 且可用分析方位角流效应的相似公式描写, 说明脊的结构中, 集体流效应可能对脊的形成也有一定的作用, 且以二阶流的贡献为主。

图 3 是 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 d+Au 中心碰撞和边缘碰撞中, 在相同横动量区间[1.25, 1.5] GeV/c 内, 带同种电荷的粒子对 (a) 和带异种电荷的粒子对 (b) 相应的实验数据 (圆圈和菱形[13]) 和拟合结果 (实线和点虚线) 的比较。对图 3(a) 而言, 中心碰撞和边缘碰撞中出现的均是远边脊, 且中心碰撞的结果大于边缘碰撞的; 对图 3(b) 而言, 中心碰撞和边缘碰撞中出现的均是近边脊, 且中心碰撞的结果大于边缘碰撞的。这说明, 粒子对带同种电荷时两散射子源相对远离, 出现远边脊, 粒子对带异种电荷时两散射子源相对靠近, 出现近边脊; 两散射源之间的相对远近和粒子对的带电选择也对近边和远边脊有决定性的贡献。很明显, 关联研究中脊结构的出现, 是一个复杂的物理现象, 值得我们进一步研究。

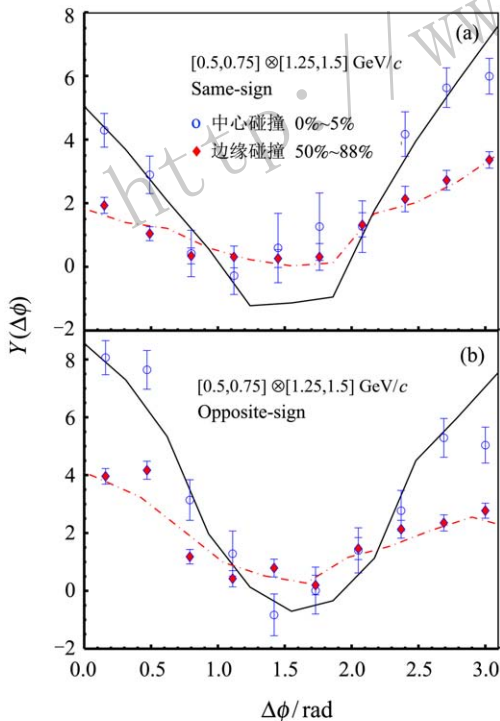


图 3 (在线彩图) 同图1, 但给出的是与另一组数据^[12] 的比较, 且(a)和(b)分别表示带同种和异种电荷的粒子对的结果

图 4 是图 3 中中心碰撞和边缘碰撞的差值, 按带同

种电荷的粒子对 (a) 和带异种电荷的粒子对 (b) 两种情况给出。圆圈是 PHENIX 合作组测得的实验数据, 实线是用多源热模型拟合得到的结果。拟合实验数据用到的参数值和相应的 χ^2/NDF 值见表 1。可以看出, 多源热模型近似地重现了实验数据。

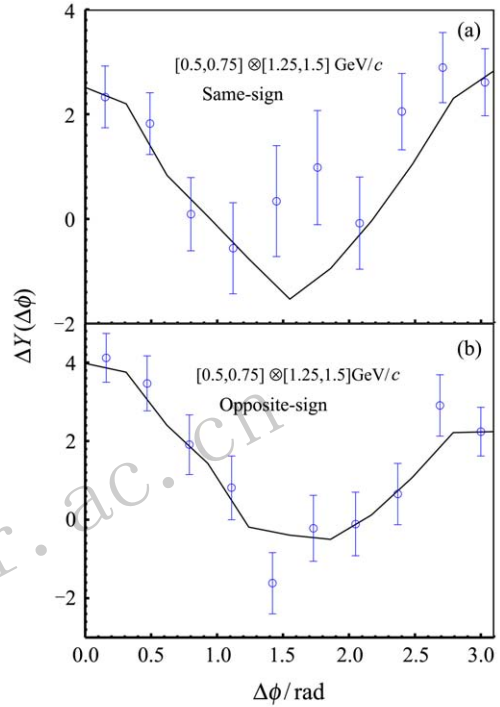


图 4 (在线彩图) 同图3, 但给出的是中心碰撞和边缘碰撞差值的比较

3 多源热模型描述赝快度关联

在多源热模型中, 在纵向快度空间, 发射源按一定规律(如单热化柱, 或双热化柱, 或中心源加领头粒子修正)随机分布在各个点(设快度为 y_x)。在发射源静止系, 粒子各向同性发射, 其赝快度 η 的分布近似为以 y_x 为中心, 以 σ 为宽度的高斯函数^[35]。我们有解析表达式和蒙特卡罗离散值表达式:

$$h(\eta, y_x) = \frac{1}{2\cosh^2(\eta - y_x)} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\eta - y_x)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (8)$$

$$\eta = \sigma\sqrt{-2\ln r_5} \cos(2\pi r_6) + y_x, \quad (9)$$

其中 $r_{5,6}$ 是 [0,1] 间均匀分布的随机数, $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$ 由发射角 θ 决定。多源热模型研究关联问题时, 由于坐标系的选择, 有 $\eta_{\text{assoc}} = 0$, 所以 $\Delta\eta = \eta_{\text{trig}} - \eta_{\text{assoc}} = \eta_{\text{trig}}$ 。于是在多源热模型中, 触发粒子和关联粒子的相对赝快度值为

$$\Delta\eta = \sigma\sqrt{-2\ln r_5} \cos(2\pi r_6) + y_x, \quad (10)$$

相对赝快度分布 $f(\Delta\eta)$ 可由统计方法得到, 仍为高斯型。一般地, 取 $y_x = 0$ 。

在文献[1]中, 对最小偏差和高多重数触发碰撞而言, $\Delta\eta - \Delta\phi$ 的两粒子关联函数 $(\Delta\eta, \Delta\phi)$ 遍及所有的多重数区间。以 $S_N(\Delta\eta, \Delta\phi)$ 表示信号分布, $B_N(\Delta\eta, \Delta\phi)$ 表示本底分布, 用每个区间的径迹多重数 $(\langle N \rangle - 1)$ 表示信号分布相对本底分布的权重 ($\langle N \rangle$ 为每个多重数区间的平均多重数), 则通过对 $\Delta\phi$ 方向积分, 得到在 $\Delta\eta$ 方向的一维赝快度关联函数, 分别见式(11)和(12):

$$R(\Delta\eta, \Delta\phi) = \left\langle (\langle N \rangle - 1) \left(\frac{S_N(\Delta\eta, \Delta\phi)}{B_N(\Delta\eta, \Delta\phi)} - 1 \right) \right\rangle_{\text{bins}}, \quad (11)$$

$$R(\Delta\eta) = \left\langle (\langle N \rangle - 1) \left(\frac{S_N(\Delta\eta)}{B_N(\Delta\eta)} - 1 \right) \right\rangle_{\text{bins}}. \quad (12)$$

基于本底分布的各向同性特征, 可将本底分布看作常数。从经验上看, 可以认为关联函数与信号分布成正比, 并与多源热模型中赝快度关联的高斯分布成正比。为与多源热模型方位角关联保持形式上的一致, 将式(12)尖括号隐去不写, 并将有关的系数重新写成 c_3 和 b_0 。我们有:

$$S(\Delta\eta) = c_1 f(\Delta\eta), \quad (13)$$

$$R(\Delta\eta) = \langle (\langle N \rangle - 1) (c_2 S_N(\Delta\eta) - 1) \rangle_{\text{bins}}, \quad (14)$$

$$R(\Delta\eta) = c_3 f(\Delta\eta) + b_0. \quad (15)$$

c_3 和 b_0 是与碰撞系统多重数相关的参数, 其中 c_3 与信号多重数相关, 可用来定性说明粒子对的关联强度或关联源的尺寸, 而 b_0 与本底多重数相关。通过调节参数 c_3, b_0, σ 可重现 $\sqrt{s} = 0.9, 2.36, 7$ TeV p+p 碰撞高多重数短程赝快度关联分布。

图5 实心点是LHC上CMS合作组测得的 $\sqrt{s} = 0.9, 2.36, 7$ TeV p+p 碰撞中高多重数短程赝快度关联的数据^[1], 实线是多源热模型拟合的赝快度关联曲线。赝快度关联表现为单纯的单峰高斯分布, 多源热模型的结果与实验数据^[1]符合得很好。计算用到的参数值在表2列出。可以看出, 随着能量的增加, σ 减小, c_3 变大, 二者之间呈现负相关性, 变化趋势与独立结团模型(ICM)一致^[1]。这说明, 随着能量增加, 两粒子相对距离变小, 相关源的半径变小, 粒子对的关联变强。但在多源热模型中缺少关于源半径的相关描述, 因此无法从参数得到关于源的更多信息, 且由于数据变化单一, 也无法得到关于赝快度关联的更多信息。

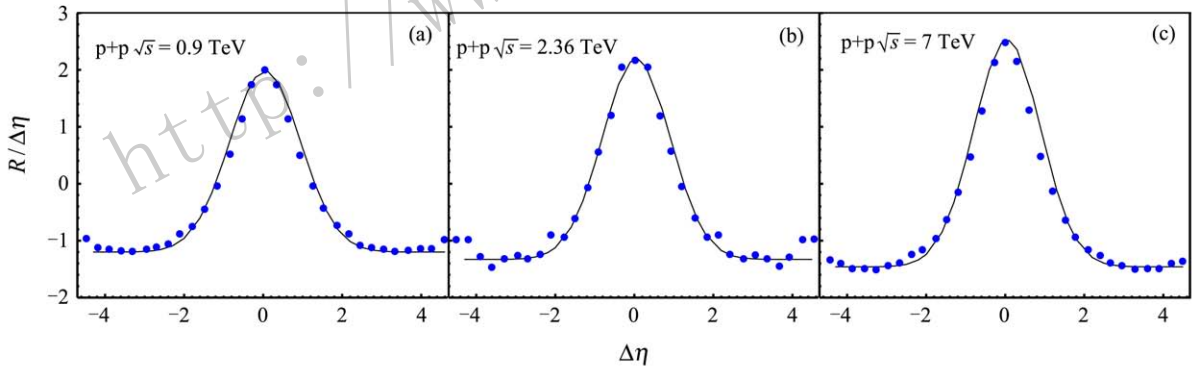


图5 (在线彩图) $\sqrt{s} = 0.9, 2.36, 7$ TeV 的 p+p 碰撞中的高多重数短程赝快度关联
实心点为 CMS 合作组测得的实验数据^[1], 实线为多源热模型拟合的结果。

表2 多源热模型拟合 LHC 上 CMS 合作组测得的 $\sqrt{s} = 0.9, 2.36, 7$ TeV p+p 碰撞中短程赝快度关联图5用到的参数值及 χ^2/NDF 值

\sqrt{s}/TeV	σ	c_3	b_0	χ^2/NDF
0.9	0.90 ± 0.02	0.72 ± 0.03	1.20 ± 0.05	2.98
2.36	0.86 ± 0.03	0.76 ± 0.02	1.33 ± 0.06	4.58
7	0.85 ± 0.02	0.85 ± 0.03	1.46 ± 0.08	5.79

4 结论

本文用多源热模型分析了 RHIC 上 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$

GeV d+Au 碰撞中的快度长程方位角关联和 LHC 上 $\sqrt{s} = 0.9, 2.36, 7$ TeV p+p 碰撞中的高多重数短程赝快度关联, 在误差范围内模型结果与 PHENIX 和 CMS 合作组测得的实验数据相符合, 表明多源热模型可以用于分析 RHIC 和 LHC 能区的长程方位角关联和短程赝快度关联。

在长程方位角关联研究中, a_x 体现集体效应, b_x 描写脊结构的变化趋势, c_3 说明信号与本底的相关比例, b_0 只与本底相关, 没有显示出特别的物理意义。特

别地, $|b_x|$ 表示同组数据中近边和远边脊的相对高低, 其值越大脊越高, 但其不能用来比较两组数据中脊的绝对高度。 $b_x > 0$ 代表两相关粒子相互靠近, 这时近边脊出现, 这种情况主要出现在中心碰撞和低横动量的粒子对关联中, 也出现在带异种电荷的粒子对的关联中, 可能主要源于集体效应的贡献。 $b_x < 0$ 表示两相关粒子相互远离, 这时远边脊出现, 这种情况主要出现在边缘碰撞和高横动量的粒子对中, 也出现在带同种电荷的粒子对的关联中, 显示出脊的出现与系统的集体效应、流体力学流效应、粒子对的带电符号选择及横动量的高低、以及两相关粒子的相对远近均有明显的相关性。与文献[24]比较, 本文除了获得了一致的结论外, 还对影响脊结构形成的相关因素有了更清楚的了解, 这也说明脊结构有着复杂的物理机制, 值得进一步研究。

在短程赓快度关联研究中, 参数 σ 和 c_3 分别表征粒子对的相对距离及关联强度, b_0 与本底多重数相关, 没有显示出特别的物理意义。我们虽然得到了参数 σ 和 c_3 与能量的微弱的相关性, 即能量越高, 粒子对关联越强, 粒子对中两粒子相对靠得更近一些, 但由于缺少更多更深入的模型分析, 没能得到更多有用的结论。

总之, 多源热模型可以用于分析粒子对的长程方位角关联和短程赓快度关联。本文工作是对多源热模型应用的有益拓展。在今后的工作中, 我们期望将多源热模型推广到其他关联如多重数关联的研究中, 并对信息丰富的方位角关联进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] KHACHATRYAN V, SIRUNYAN A M, TUMASYAN A, *et al.* (CMS Collaboration). *J High Energy Phys*, 2010, **2010**(09): 091.
- [2] ALVER B, BACK B B, BAKER M D, *et al.* arXiv: nucl-ex/0709.4008, 2007.
- [3] CUNQUEIRO L, DIAS DE DEUS J, PAJARES C. arXiv: hep-ph/0806.0523, 2009.
- [4] LUZUM M, ROMATSCHKE P. arXiv: nucl-th/0901.4588v2, 2010.
- [5] BOZEK P. arXiv: nucl-th/0911.2392, 2010.
- [6] ABELEV B I, AGGARWAL M M, AHAMMED Z, *et al.* arXiv: nucl-ex /0903.2811, 2009.
- [7] ABELEV B I, AGGARWAL M M, AHAMMED Z, *et al.* arXiv: hep-ex/0912.3977v2, 2010.
- [8] ABELEV B I, AGGARWAL M M, AHAMMED Z, *et al.* (STAR Collaboration). *Phys Rev C*, 2009, **80**(6): 064912.
- [9] AAD G, ABAIYAN T, ABBOTT B, *et al.* arXiv: hep-ex/1212.5198v3, 2013.
- [10] ABELEV B, ADAM J, ADAMOVA D, *et al.* (ALICE Collaboration). *Phys Lett B*, 2013, **719**(1-3): 29.
- [11] SALGADO C A, ALVAREZ-MUÑIZ J, ARLEO F, *et al.* *J Phys G*, 2012, **39**(1): 015010.
- [12] ADARE A, AIDALA C, AJITAN N N, *et al.* arXiv: nucl-ex/1303.1794v2, 2014.
- [13] ADARE A, AFANASIEV S, AIDALA C, *et al.* (PHENIX Collaboration). *Phys Rev Lett*, 2011, **107**(17): 172301.
- [14] ADLER S S, AFANASIEV S, AIDALA C, *et al.* (PHENIX Collaboration). *Phys Rev C*, 2006, **73**(5): 054903.
- [15] ADLER S S, AFANASIEV S, AIDALA C, *et al.* (PHENIX Collaboration). *Phys Rev Lett*, 2006, **96**(22): 222301.
- [16] ALVER B, BAKER M, LOIZIDES C, STEINBERG P. arXiv: nucl-ex /0805.4411v1, 2008.
- [17] RYSKIN M G, MARTIN A D, KHOZE V A. *J Phys G*, 2011, **38**(8): 085006.
- [18] DUMITRU A, DUSLING K, GELIS F, *et al.* *Phys Lett B*, 2011, **697**(1): 21.
- [19] AVSAR E, FLENSBURG C, HATTA Y, *et al.* *Phys Lett B*, 2011, **702**(5): 394.
- [20] ALDERWEIRELDT S, VAN MECHELEN P. arxiv: hep-ph/1203.2048v2, 2012.
- [21] BOZEK P. *Phys Rev C*, 2012, **85**(1): 014911.
- [22] WERNER K, KARPENKO I, PIEROG T. *Phys Rev Lett*, 2011, **106**(12): 122004.
- [23] MCLERRAN L. arXiv: hep-ph/0807.4095v1, 2008.
- [24] LIU Fuhu, TIAN Tian, GAO Yaqin, *et al.* *Adv High Energy Phys*, 2014, **2014**: 296145
- [25] FAKHRADDIN S, RAHIM M A, LIU Fuhu. *Nucl Phys A*, 2011, **858**(1): 95.
- [26] LIU Fuhu, MA Yinqun, DUAN Maiying. *Chin Phys*, 2005, **14**(12): 2458.
- [27] LIU Fuhu, GAO Yaqin, TIAN Tian, *et al.* *Adv High Energy Phys*, 2014, **2014**: 725739.
- [28] LI Baochun, WANG Yazhou, LIU Fuhu, *et al.* *Phys Rev D*, 2014, **89**(5): 054014.
- [29] LIU Fuhu. *Nucl Phys A*, 2008, **810**(1-4): 159.
- [30] LIU Fuhu, LI Junsheng. *Phys Rev C*, 2008, **78**(4): 044602.
- [31] LIU Fuhu. *Nucl Phys A*, 2008, **808**(1-4): 160.
- [32] ZHAO Hong, LIU Fuhu. *Adv High Energy Phys*, 2015, **2015**: 137058.
- [33] LV Qiwen, LIU Lingling, LIU Fuhu, *et al.* *J Kor Phys Soc*, 2011, **59**(4): 2684.
- [34] LV Qiwen, WEI Huarong, RAHIM MAGDA A, *et al.* *Nucl Phys Rev*, 2012, **29**(1): 25.
- [35] LIU Fuhu. *Phys Rev D*, 2000, **63**(3): 032001.

On Correlation Functions of Two Particles at RHIC and LHC Energies

SI Ruifang^{1,1)}, LIU Fuhu²

(1. Department of Mathematics and Science, Fenyang Normal Campus Lvliang College, Fenyang 032300, Shanxi, China;
2. Institute of Theoretical Physics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The multi-source thermal model is used in this paper to analyze the long-range azimuth correlation in deuteron-gold (d+Au) collisions at center-of-mass energy per nucleon pair $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV measured by the PHENIX Collaboration at the relativistic heavy ion collider (RHIC), and the short-range pseudorapidity correlation in high multiplicity event in proton-proton (p+p) collisions at center-of-mass energy $\sqrt{s} = 0.9, 2.36, 7$ TeV measured by the CMS Collaboration at the large hadron collider (LHC). The modeling results are in approximately agreement with the experimental data in error ranges. Four parameters are used in the analysis of long-range azimuth correlation, which show that the parameters describe the change trend of ridge structure. The ridge structure is related to the collective effect, hydrodynamic flow effect, transverse momentum and signal of particle pair, and so forth. Three parameters are used in the analysis of the short-range pseudorapidity correlation in high multiplicity event in small system, which show that the parameters σ and c_3 are related to collision energy. Large collision energy results in strong correlation due to close distance between particles.

Key words: multi-source thermal model; long-range azimuth correlation; short-range pseudorapidity correlation

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 11 Feb. 2016; **Revised date:** 22 Mar. 2016

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11575103)

1) E-mail: 654525027@qq.com.