

# 质心能量 200 GeV d+Au 碰撞粒子 横动量谱的 Tsallis 统计分析

朱银莹, 邵明

(中国科学技术大学近代物理系, 安徽合肥 230026)

**摘要:** 用基于非广延热力学 Tsallis 统计的爆炸波 (Tsallis blast-wave, TBW) 模型研究了 RHIC 能区 200 GeV 质心能量氘核-金核 (d+Au) 碰撞系统中心快度区和前(后)向快度区轻强子和 J/Ψ 的横动量谱。在全动量区间, TBW 模型可以很好地描述粒子谱。分析结果表明, 200 GeV d+Au 中心碰撞中平均径向流不为零, 其大小介于同能量的质子-质子 (p+p) 与金核-金核 (Au+Au) 碰撞系统之间, d+Au 碰撞中存在显著的冷核物质 (cold nuclear matter, CNM) 效应。J/Ψ 在中心快度区径向流为零, 而在后向快度区具有非零的径向流, 可能预示在 d+Au 碰撞系统中已探测到色玻璃凝聚 (color glass condensate, CGC) 效应。

**关键词:** 相对论重离子碰撞; d+Au 碰撞系统; TBW 模型; 冷核物质效应; 径向流

**中图分类号:** O572.21      **文献标识码:** A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.12.007

**引用格式:** Zhu Yinying, Shao Ming. Study on the transverse-momentum spectra in 200 GeV d+Au collisions with the Tsallis statistics[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(12): 1001-1006.

朱银莹, 邵明. 质心能量 200 GeV d+Au 碰撞粒子横动量谱的 Tsallis 统计分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(12): 1001-1006.

## Study on the transverse-momentum spectra in 200 GeV d+Au collisions with the Tsallis statistics

ZHU Yinying, SHAO Ming

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The blast-wave model based on the Tsallis statistics (TBW model) was used to study the particle production in 200 GeV d+Au collisions at RHIC. Light hadrons and J/Ψ transverse-momentum spectra at both mid-rapidity and forward/backward rapidity were analyzed. It was found that a non-zero radial flow for light hadrons, indicating a strong cold nuclear matter (CNM) effect in d+Au collisions. J/Ψ shows a finite radial flow at the backward rapidity. This result may imply the onset of initial state color glass condensate (CGC) in the d+Au collision system.

**Key words:** relativistic heavy ion collision; d+Au collision; TBW model; cold nuclear matter effect; radial flow

收稿日期: 2014-03-20; 修回日期: 2014-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(U1232206)资助.

作者简介: 朱银莹, 女, 1988年生, 硕士. 研究方向: 高能核物理. E-mail: zhuyiny@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 邵明, 博士/副教授. E-mail: swing@ustc.edu.cn

## 0 引言

高能重离子碰撞的主要目标是寻找和研究相对论核-核碰撞中产生的退禁闭相强相互作用物质. 核-核碰撞末态产物包含了系统碰撞演化各个阶段的混合信息, 如末态的热核物质效应和初态的冷核物质效应. 因此, 作为核-核碰撞系统的参照, 质子-质子(p+p)碰撞和质子-核碰撞(p+A)的测量是必不可少的, 通过它们可以进一步了解核-核碰撞产生新物质形态的性质. p+A 碰撞系统的数据作为核-核碰撞的参考, 有助于分析重离子碰撞中的冷核物质效应, 将初态效应(在 p+A 碰撞中可见)与末态效应(核-核碰撞中可见)加以区分. 此外, 还可用于验证微扰量子色动力学(quantum chromodynamic, QCD)计算, 并为研究特定的 QCD 理论预言——如色玻璃凝聚(color glass condensate, CGC)——提供一个研究平台.

在 p+A 碰撞中存在多种形式的初态效应, 如克朗宁效应(Cronin effect)、核遮蔽效应(nuclear shadowing)和胶子饱和效应(gluon saturation)等. 克朗宁效应主要来自初态的部分子多次散射, 核遮蔽效应则反映了核素部分子分布函数(PDF)相对于核子 PDF 的压低, 胶子饱和效应预计发生在小动量分数  $x(x < 0.001)$  的情形下. 核-核碰撞和 p+A 碰撞中均存在这些初态效应, 但 p+A 碰撞中更易于观测, 因其不存在核-核碰撞中的末态热核物质效应.

CGC 是高能(小  $x$ )QCD 的一个有效理论, 它将微扰 QCD 的应用延伸到胶子致密系统, 在这个系统中, 胶子的密度达到饱和, 小  $x$  的胶子紧密地排列在一起, 部分子间的强相互作用变弱, 即  $\alpha_s \ll 1$ . 这个弱耦合系统即为 CGC.

末态粒子的产额和动量谱可以作为高能核物理中重大发现的基础. 重离子碰撞中, 普遍认为末态粒子的横动量谱对碰撞演化过程中的动力学特征较敏感. 例如通过适当的理论模型, 可以获取碰撞体系的

热力学特征参数, 如末态粒子冻出温度、径向集体流等.

相对论核-核碰撞的末态粒子横动量谱分布可用含有温度  $T$ 、集体流速  $\beta$  的玻尔兹曼-吉布斯爆炸波(Boltzmann-Gibbs blast-wave, BGBW)模型来描述. 然而, BGBW 模型是存在局限性的. 由于普遍认为平衡统计在高横动量区不适用, 因此, 在理想流体力学中模拟核-核碰撞一般局限于低横动量区( $p_T < 1 \text{ GeV}/c$ ), 其横能量分布近似为玻尔兹曼(指数)形式. 高横动量区的粒子产额主要由非平衡或硬散射过程主导, 其分布具有幂指数特征. 玻尔兹曼分布适用的前提是假设了局域热平衡, 因此使用 BGBW 模型进行数据分析时需要高横动量的截断. 此外, BGBW 模型也缺少一个非广延量来描述由非平衡的 p+p 碰撞(或边缘 A+A 碰撞)到近平衡的中心 A+A 碰撞的演化. 随着非广延统计的发展和成功应用, Tsallis 统计越来越多地被用来解释相对论核-核碰撞的末态粒子产生. Tsallis 统计引入了一个表征非平衡度的参数  $q$ , 用来描述系统偏离热力学平衡的程度. 基于非广延 Tsallis 统计的爆炸波(Tsallis blast-wave, TBW)模型已成功地对相对论重离子对撞机(RHIC)上 Au+Au 碰撞、p+p 碰撞数据<sup>[1-3]</sup>以及中横动量区的多奇异强子数据<sup>[4-5]</sup>进行了系统分析, 克服了很多 BGBW 模型中的问题, 得到了具有物理意义的结果. 本文将采用 TBW 模型来分析 RHIC 上 200 GeV 质心能量 d+Au 碰撞系统的末态粒子谱.

## 1 分析方法

BGBW 模型中考虑了相对论重离子碰撞中末态粒子产生的热力学性质和纵向和横向的集体流, 推广到 TBW 模型只需将玻尔兹曼统计分布用 Tsallis 统计分布代替, 再嵌入 BW 模型的流体力学框架中. 我们遵循文献[6]中的爆炸波模型方案, 得到下面已被很多学者用于拟合相对论重离子碰撞实验数据的横动量谱公式<sup>[1-2, 4-5, 7-9]</sup>:

$$\frac{dN}{m_T dm_T} \propto m_T \int_{-Y}^Y \cosh(y) dy \int_{-\pi}^{+\pi} d\varphi \int_0^R r dr \left[ 1 + \frac{q-1}{T} (m_T \cosh(y) \cosh(\rho) - p_T \sinh(y) \cos(\varphi)) \right]^{-\frac{1}{q-1}} \quad (1)$$

式中,  $Y$  是碰撞系统束流快度(因此所有末态粒子只能产生于  $(-Y, +Y)$  区间内),  $m_T$  和  $p_T$  是粒子的

横质量和横动量,  $q$  是表征系统的非平衡度参数,  $q \rightarrow 1$  时 Tsallis 统计分布回到常见的平衡态热力学

玻尔兹曼分布,  $\rho = \tanh^{-1} \left[ \beta_s \left( \frac{r}{R} \right)^n \right]$  是沿着横平面径向 ( $r$ ) 以  $n$  次方增长的流型, 在碰撞中心处为 0, 在核硬球边缘  $R$  处为  $\beta_s$ ,  $\langle \beta \rangle = \frac{2}{n+2} \beta_s$  是平均径向流. 不同于 BGBW 模型, 式(1)中沿快度  $y$  和方位角  $\varphi$  的积分不能分离为文献[6]中的两个贝塞尔函数, 因此通常采用数值计算式(1)的积分, 然后对实验数据进行拟合, 得到末态粒子冻出温度  $T$ 、平均径向流  $\langle \beta \rangle$  和系统非平衡度  $q$  这 3 个参数.

在具体的拟合过程中, 为符合通常的实验数据格式, 横坐标采用横动量  $p_T$ , 纵坐标则是粒子的不变产额  $\frac{d^2 N}{2\pi p_T dp_T dy}$ . 在拟合计算程序中, 使用 ROOT 软件包的 TMinuit 程序来实现最小卡方 ( $\chi^2$ ) 拟合.

## 2 结果与讨论

RHIC 上多个国际合作组发布了一系列 200 GeV 质心能量 d+Au 碰撞末态粒子横动量谱的测量结果, 包括 STAR 实验中心快度区的  $\pi^\pm, K^\pm, p, \bar{p}, K^*, K^{*0}, \Delta^{++}, \Sigma^*$  [10-13]、PHENIX 实验前(后)向快度区的  $J/\Psi$  [14] 以及 BRAHMS 实验前向快度区  $\pi^\pm, K^\pm, p$  和  $\bar{p}$  [15]. 图 1 是 STAR 中心快度区中心度 0~20% 粒子横动量谱的 TBW 分析结果, 图 1(a) 为介子数据, 图 1(b) 为重子数据, 实线是 TBW 拟合曲线, 拟合范围为  $p_T < 3 \text{ GeV}/c$ , 符号代表数据

点. 在图 1(a) 中, 粒子种类后的标注 “\_tpc” 表示 STAR 实验时间投影室 (TPC) 的测量结果, 后缀 “\_tof” 则表示飞行时间探测器 (TOF) 的测量结果. 所有的介子横动量谱共同参与 TBW 模型方程(1)的拟合, 拟合参数结果和卡方值  $\chi^2/n\text{DOF}$  列在表 1 中, 其中, “最小无偏” 表示数据分析时不区分碰撞中心度.  $\langle \beta \rangle, T$  和  $q$  是所有介子的共有参数, 除这 3 个共有参数之外, 每一个粒子还具有自己的归一化参数, 故在进行最小卡方拟合时, 11 种介子横动量谱在 TBW 函数拟合时共受到 3+11 个约束. 图 1(b) 是对重子的分析结果. 从  $\chi^2/n\text{DOF}$  可以看出, TBW 拟合曲线与介子和重子实验数据都符合程度得很好, 卡方均在 1 附近, 说明了在 200 GeV 质心能量 d+Au 碰撞中应用 TBW 模型的可行性. 从  $q$  值可以看出, 介子和重子的偏离平衡程度  $q$  均显著偏离 1, 与同样能量下 p+p 碰撞实验数据分析结果类似 [1-2], 且在误差范围内随中心度几乎无变化. 从  $\langle \beta \rangle$  来看, 由中心碰撞 (0~20%) 到边缘碰撞 (40%~100%), 介子和重子的径向流  $\langle \beta \rangle$  均略有降低, 与碰撞厚度随中心度变化趋势一致.

由表 1 还可看出, d+Au 碰撞中心快度区粒子谱具有明显非零的平均径向流. 将此结果与同能量 Au+Au 及 p+p 碰撞系统进行比较 (Au+Au 和 p+p 结果见表 2 [1-2]), 可见 d+Au 系统末态粒子的平均径向流介于 p+p 系统 (其径向流为 0) 与 Au+Au 系统之间, 明显小于 Au+Au 中心碰撞的平均径向流,

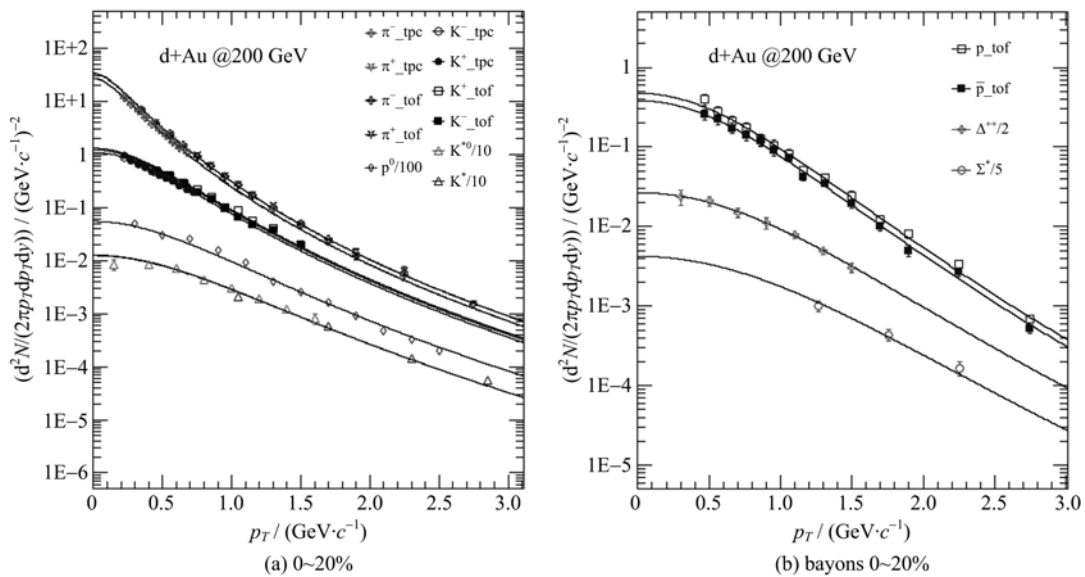


图 1 STAR 实验 d+Au 碰撞中心快度区中心度 0~20% 介子谱和重子谱的 TBW 分析结果

Fig. 1 Results of TBW fit to the meson and baryon transverse-momentum spectra measured by the STAR experiment at mid-rapidity in 0~20% central d+Au collisions

表 1 STAR 实验中心快度区介子谱和重子谱 TBW 拟合结果参数表

Tab. 1 TBW fit parameters of the meson and baryon spectra measured by the STAR experiment at mid-rapidity

碰撞 中心度	介子				重子				
	$\langle\beta\rangle$	T	q	$\chi^2/n\text{DOF}$	$\langle\beta\rangle$	T	q	$\chi^2/n\text{DOF}$	
0~20%	0.3296±0.0189	0.0811±0.0017	1.0998±0.0033	85.92/102	0.3633±0.0396	0.0537±0.0426	1.0801±0.0225	19.68/31	
20%~40%	0.3217±0.0187	0.0790±0.0016	1.0994±0.0031	120.91/104	0.3483±0.0425	0.0660±0.0412	1.0715±0.0208	21.13/31	
40%~100%	0.2403±0.0284	0.0841±0.0015	1.0984±0.0033	99.94/104	0.3400±0.0373	0.0294±0.0344	1.0904±0.0183	27.60/31	
最小无偏	0.2947±0.0201	0.0819±0.0015	1.0996±0.0030	104.99/106	0.3861±0.0590	0.0112±0.0086	1.1002±0.0088	28.85/36	

表 2 200 GeV Au+Au 和 p+p 碰撞的 TBW 分析参数值<sup>[1-2]</sup>

Tab. 2 TBW fit parameters of the particle spectra in 200 GeV Au+Au and p+p collisions<sup>[1-2]</sup>

		$\langle\beta\rangle$	T	q	$\chi^2/n\text{DOF}$
		Au+Au 碰撞	0~10%	0.470±0.009	0.122±0.002
	10%~20%	0.475±0.008	0.122±0.002	1.015±0.005	119/127
	20%~40%	0.441±0.009	0.124±0.002	1.024±0.004	159/127
	40%~60%	0.282±0.017	0.119±0.002	1.066±0.003	165/135
	60%~80%	0±0.05	0.114±0.003	1.086±0.002	138/123
p+p 碰撞	介子	0	0.089±0.004	1.100±0.003	53/66
	重子	0	0.097±0.010	1.073±0.005	55/73

表 3 PHENIX 实验 J/Ψ 横动量谱 TBW 拟合结果参数表

Tab. 3 TBW fit parameters of the J/Ψ spectra measured by the PHENIX experiment

快度区间	$\langle\beta\rangle$	T	q	$\chi^2/n\text{DOF}$
-2.2 < y < -1.2	0.260±0.016	0.086±0.032	1.059±0.006	75.51/122
y  < 0.35	0.002 <sup>+0.553</sup> <sub>-0.002</sub>	0.151±0.034	1.084±0.007	44.80/53
1.2 < y < 2.2	0.106±0.105	0.241±0.044	1.044±0.004	93.72/127

这表明 d+Au 碰撞的径向流主要来源于冷核物质效应. Au+Au 碰撞中不仅存在冷核物质效应,还存在强的末态热核物质效应,从而形成更强的径向流.

相对论核-核碰撞中,针对反应体系类似爆炸膨胀的流体力学演化过程,径向流流型参数 n 常取为 1. 图 1 中的 TBW 拟合即取 n=1,此时  $\langle\beta\rangle = \frac{2}{3}\beta_s$ , 距离系统中心越远,膨胀径向流越大(类似宇宙学中的哈勃膨胀),在核硬球表面达到最大  $\beta_s$ . 为研究 d+Au 与 Au+Au 碰撞可能存在的区别,我们还采用了另一种径向流流型, n=0,即碰撞系统中不存在爆炸波,各处径向流均相等,  $\langle\beta\rangle = \beta_s$ . 分析表明, TBW 拟合对 n 取值不敏感,参数结果与不同径向流流速分布以及横动量拟合区间无明显依赖关系,因此本文所有结果均用 n=1.

图 2 是 PHENIX 实验前向快度区 (1.2 < y < 2.2) 的 J/Ψ 横动量谱的 TBW 分析结果,实线是 TBW 模型拟合曲线,符号代表数据点,拟合中无横动量限制. 考虑到统计量限制,所有碰撞中心度的数据统一进行 TBW 拟合,得到的参数如表 3 所列. 从

图 2 可以看出, TBW 模型较好地拟合了 J/Ψ 实验数据,且不依赖于碰撞中心度. 需要指出的是,由于 J/Ψ 数据实验误差较大(主要来自低统计量),拟合

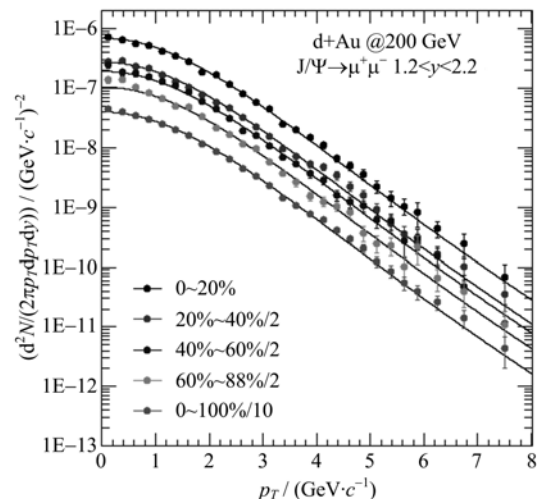


图 2 PHENIX 实验 d+Au 碰撞系统前向快度区 1.2 < y < 2.2 的 J/Ψ 粒子谱的 TBW 分析结果

Fig. 2 Results of TBW fit to the J/Ψ transverse-momentum spectra measured by the PHENIX experiment at forward-rapidity in d+Au collisions

参数误差比轻强子要大。

图 3 展示了 200 GeV d+Au 碰撞不同快速度区间 J/Ψ 的平均径向流参数  $\langle\beta\rangle$ , 轻强子的 TBW 拟合结果也显示在图中. 图 3 中快速度  $y=0$  处有 5 个数据点, 其中, 4 个来自 STAR 实验不同碰撞中心度的介子拟合结果, 1 个来自 PHENIX 的 J/Ψ, 前向/后向快速度区 ( $1.2 < y < 2.2$  和  $-2.2 < y < -1.2$ ) 各有 1 个 J/Ψ 数据点. 由图 3 可见, 重味介子 J/Ψ 在中心快速度区径向流为零, 与 Au+Au 中的 TBW 拟合结果一致<sup>[5]</sup>, 表明在中心快速度区 J/Ψ 产生过程中初、末态冷核物质效应均较弱. 但在后向快速度区, J/Ψ 具有显著非零的平均径向流 ( $16\sigma$ ). 对比后向快速度区和中心快速度区, 末态效应及初态散射 (克罗宁效应) 影响无明显改变, 而胶子动量分数  $x$  显著减小至约  $1 \times 10^{-3}$ , 因此很可能是 CGC 效应影响使得后向快速度区存在非零的径向流. RHIC 能区 200 GeV 的 d+Au 碰撞中 J/Ψ 主要通过胶子-胶子融合产生, 在 J/Ψ 的后向快速度区 (入射金核方向), 金核中胶子应具有较小动量分数  $x$ , 若此时 CGC 效应已较明显, 则金核中的胶子密度达到饱和, 氦核内胶子可能与多个小  $x$  金核内胶子碰撞, 这样的碰撞可以看作是多次碰撞, 多次碰撞会导致末态粒子横向动量增加, 从而产生等效的非零径向流. 所以, 后向快速度区观察到 J/Ψ 非零的平均径向流  $\langle\beta\rangle$ , 可能表明 d+Au 碰撞中已探测到 CGC 效应.

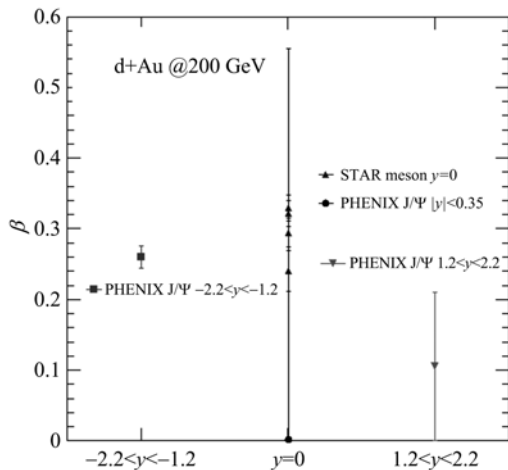


图 3 不同快速度区间 J/Ψ 的平均径向流  $\langle\beta\rangle$

Fig. 3 The average radial flow of J/Ψ at different rapidity regions

从另一角度来看, CGC 效应会改变胶子横动量分布. 相对论重离子碰撞中重核内胶子横动量分布如图 4 所示<sup>[16]</sup>, 虚线是无 CGC 效应时胶子的横动量分布, 大部分胶子的横动量  $k_T \sim 0$ ; 实线则是 CGC

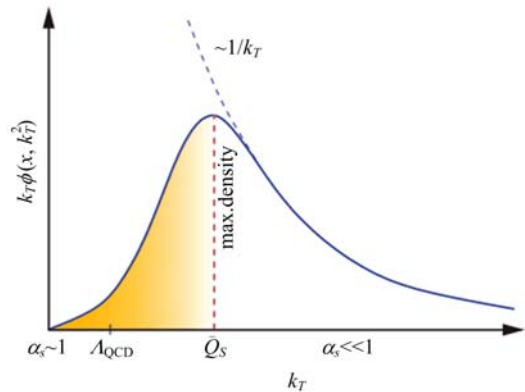


图 4 相对论重离子碰撞中重核内胶子横动量分布

Fig. 4 Gluon transverse-momentum distribution in heavy-nuclei in relativistic heavy-ion collisions

模型计算给出的胶子横动量分布, 处于这种情形下的大部分胶子具有较高的横向动量  $k_T \sim Q_s$  ( $Q_s$  为 CGC 效应的特征参数). 这种情形下通过胶子-胶子融合产生的 J/Ψ 粒子将会导致横向动量的增加, 在末态形成非零的径向流.

### 3 结论

我们的研究表明, TBW 模型可以很好地描述 RHIC 上 200 GeV 质心能量的 d+Au 碰撞系统. 从获得的物理参数发现 200 GeV d+Au 碰撞中轻强子的平均径向流不为零, 介于同能量的 p+p 与 Au+Au 碰撞系统之间, 明显小于 Au+Au 碰撞中的平均径向流, 说明 d+Au 碰撞存在显著的冷核物质效应. J/Ψ 粒子在后向快速度区平均径向流不为零, 表明在 RHIC 能区的 d+Au 碰撞系统中可能已探测到 CGC 效应. 这些研究结果有助于深入理解 J/Ψ 的产生机制以及 d+Au 碰撞中的冷核物质效应.

#### 参考文献 (References)

[1] Tang Zebo, Xu Yichun, Ruan Lijuan, et al. Spectra and radial flow in relativistic heavy ion collisions with Tsallis statistics in a blast-wave description[J]. Phys Rev C, 2009, 79: 051901.

[2] Tang Zebo, Yi Li, Ruan Lijuan, et al. The statistical origin of constituent-quark scaling in QGP hadronization[J]. Chin Phys Lett, 2013, 30: 031201.

[3] Jiang Kun, Zhu Yinying, Liu Weitao, et al. Onset of radial flow in p+p collisions[DB/OL]. arXiv.org: arXiv:1312.4230.

[4] Adcox K, et al (PHENIX Collaboration). Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus

- collisions at RHIC; Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration[J]. Nucl Phys A, 2005, 757: 184-283.
- [5] Shao M, Yi L, Tang Z, et al. Examination of the species and beam energy dependence of particle spectra using Tsallis statistics[J]. J Phys G, 2010, 37: 085104.
- [6] Arsene I, et al (BRAHMS Collaboration). Quark-gluon plasma and color glass condensate at RHIC? The perspective from the BRAHMS experiment[J]. Nucl Phys A, 2005, 757: 1-27.
- [7] Ouerdane D. Charged pion and kaon production in central Au + Au collision at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV[D]. Copenhagen: Niels Bohr Institute, 2003.
- [8] Bearden I G, et al (BRAHMS Collaboration). Nuclear stopping in Au + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV [J]. Phys Rev Lett, 2004, 93: 102301.
- [9] Cronin J W, Frisch H J, Shochet M J, et al. Production of hadrons at large transverse momentum at 200, 300, and 400 GeV[J]. Phys Rev D, 1975, 11: 3 105-3 123.
- [10] Abelev B, et al (STAR Collaboration). Systematic measurements of identified particle spectra in pp, d+Au and Au + Au collisions from STAR[J]. Phys Rev C, 2009, 79: 034909.
- [11] Adams J, et al (STAR Collaboration). Identified hadron spectra at large transverse momentum in p+p and d+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV[J]. Phys Lett B, 2006, 637:161-169.
- [12] Adams J, et al (STAR Collaboration). Pion, kaon, proton and anti-proton transverse momentum distributions from p+p and d+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV[J]. Phys Lett B, 2005, 616: 8-16.
- [13] Abelev B I, et al (STAR Collaboration). Hadronic resonance production in d+Au collisions at 200 GeV at RHIC[J]. Phys Rev C, 2008, 78: 044906.
- [14] Adare A, et al (PHENIX Collaboration). Transverse-momentum dependence of the  $J/\Psi$  nuclear modification in d+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV[J]. Phys Rev C, 2013, 87: 034904.
- [15] Yang Hongyan. Particle production in d+Au and p+p collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV[D]. Bergen, Norway: University of Bergen, 2007.
- [16] Accardi A, Albacete J L, Anselmino M, et al. Electron ion collider: The next QCD frontier [DB/OL]. arXiv.org; arXiv:1212.1701.

(上接第 1000 页)

- [20] Han Yuyan, Cao Liang, Xu Faqiang, et al. Preparation and investigation on the formation mechanisms of organic single crystal nanostructures of PTCDA[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61: 078103. 韩玉岩,曹亮,徐法强,等. 茚四甲酸二酐有机单晶纳米结构的制备及形成机理的研究[J]. 物理学报, 2012, 61:078103.
- [21] Dubrovskii V G, Sibirev N V, Cirilin G E, et al. Gibbs-Thomson and diffusion-induced contributions to the growth rate of Si, InP, and GaAs nanowires [J]. Phys Rev B, 2009, 79(20): 205316.
- [22] Ferguson A J, Jones T S. Photophysics of PTCDA and Me-PTCDI thin films; Effects of growth temperature [J]. J Phys Chem B, 2006, 110(13): 6 891-6 898.
- [23] Mobus M, Karl N. The growth of organic thin-films on silicon substrates studied by X-ray reflectometry [J]. Thin Solid Films, 1992, 215(2): 213-217.
- [24] Mobus M, Karl N. Structure of perylene-tetracarboxylic-dianhydride thin-films on alkali-halide crystal substrates [J]. J Cryst Growth, 1992, 116: 495-504.
- [25] Bulovic V, Burrows P E, Forrest S R, et al. Study of localized and extended excitons in 3, 4, 9, 10-perylenetetracarboxylic dianhydride (PTCDA). 1. Spectroscopic properties of thin films and solutions [J]. Chem Phys, 1996, 210(1-2): 1-12.
- [26] Heutz S, Ferguson A J, Rumbles G, et al. Morphology, structure and photophysics of thin films of perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic dianhydride [J]. Org Electron, 2002, 3(3-4): 119-127.
- [27] Kwong C Y, Djuricic A B, Roy V L, et al. Influence of the substrate temperature to the performance of tris (8-hydroxyquinoline) aluminum based organic light emitting diodes [J]. Thin Solid Films, 2004, 458(1-2): 281-286.
- [28] Brinkmann M, Biscarini F, Taliani C, et al. Growth of mesoscopic correlated droplet patterns by high-vacuum sublimation [J]. Phys Rev B, 2000, 61(24): 16 339-16 342.
- [29] Higginson K A, Zhang X M, Papadimitrakopoulos F. Thermal and morphological effects on the hydrolytic stability of aluminum tris(8-hydroxyquinoline) (Alq<sub>3</sub>) [J]. Chem Mater, 1998, 10(4): 1 017-1 020.