

高能重离子碰撞中带电粒子分布性质的研究

王佳琪,李保春*

(山西大学 物理电子工程学院,山西 太原 030006)

摘要:本文使用修正后的参与者夸克模型研究了高能重离子碰撞中带电粒子的分布,分析了其中所反映的系统性质。基于多个碰撞能量的 Au + Au, Cu + Cu, Pb + Pb 以及 Xe + Xe 碰撞的对比分析,修正模型能够有效地构建出实验中不同碰撞中心度的带电粒子横动量谱的标度特征,计算出了系统的温度 T , 熵指数 n 和修正参数 a_0 。研究发现:在多数情况下,中心碰撞的 n 比边缘碰撞得更大, a_0 不为 1 且在不同碰撞中心度下无明显变化。研究还表明:温度与碰撞中心度正相关,碰撞系统的非平衡度随着碰撞能量的增大而升高。这些性质对于理解高能核碰撞过程和其中的带电粒子生成具有重要的参考价值。

关键词:高能重离子碰撞;粒子分布性质;参与者夸克模型;碰撞过程

中图分类号:O572.2 文献标志码:A 文章编号:0253-2395(2024)01-0179-08

Reserch on the Distribution Properties of Charged Particles in High-energy Heavy Ion Collisions

WANG Jiaqi, LI Baochun*

(School of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In this paper, charged-particle spectra in high-energy heavy ion collisions are analyzed by an improved participant quark model, and the properties reflected in the system are analyzed. Based on the comparative analysis of Au + Au, Cu + Cu, Pb + Pb and Xe + Xe collisions with multiple collision energies, the modified model can effectively construct the scaling characteristics of the transverse momentum spectra of charged particles with different collision centralities in the experiment, and calculate the system temperature T , entropy index related n and revised index a_0 . It is discovered that in most instances, the n of the central collisions are even larger than those of the edge, and the value of a_0 is not equal to 1 and does not change in obviously different collision centralities. Moreover, the analysis reveals that the temperature is positively related to the collision centrality and the non-equilibrium degree of the collision system increases with the collision energy. These properties are significant references for understanding of the process of high-energy nuclear collisions and the generation of charged particles.

Key words: high-energy heavy ion collision; particle distribution properties; participant quark model; process of high-energy collisions

0 引言

在 高能核核 ($A+A$) 碰撞时,发生碰撞的一瞬间会立马形成温度极高的极端环境。在该环

境中,发生量子色动力学(QCD)相变,夸克物质摆脱束缚形成新形态,即夸克胶子等离子体(QGP)^[1-2]。然后碰撞系统可能经历了流体力学演化,演化最终会产生大量的粒子。在演

收稿日期:2022-10-31;接受日期:2023-03-10

基金项目:国家自然科学基金(11575103);山西省自然科学基金(202103021224036)

作者简介:王佳琪(1997-),女,山西晋中人,硕士研究生,研究方向为高能核碰撞。E-mail:1147425374@qq.com

* 通信作者:李保春(LI Baochun),E-mail:s6109@sxu.edu.cn

引文格式:王佳琪,李保春.高能重离子碰撞中带电粒子分布性质的研究[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(1):179-186. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023048

化过程中至少要经过三个主要阶段:初始阶段、化学冻结阶段和动力学冻结阶段,产生的粒子本质不同,则经历不同的演化历程,因此表现出的行为也是不一样的。QCD理论描述的是强相互作用,它以夸克与胶子为其基本粒子。QGP的特点是人们热衷的话题。实验虽然不能探测碰撞系统的演化过程,但相对论性重离子对撞机(RHIC)^[3-5]和大型强子对撞机(LHC)^[6-7]的不同实验合作组通过实验可以测量高能重离子碰撞产生的粒子的横动量谱,然后从粒子 p_T 谱中提取与碰撞系统有关的信息,进而可以研究粒子的产生机制,以及深入了解碰撞过程和碰撞系统的动力学冻结信息。过去,为了探索QCD的本质,RHIC和LHC的不同合作组做了大量的测试,并得出了很多数据,涉及多种碰撞能量、中心度以及不同类型碰撞的高能重离子碰撞。

强子谱的计算包括夸克模型^[8]和格点QCD^[9]。夸克模型主要是通过构造夸克之间的相互作用势来研究强子的质量、宽度等性质,格点QCD是根据第一性原理研究强子的性质。大部分模型对于强子 p_T 谱的研究都是建立在强子的基础上,只有一部分模型是在夸克水平上,以夸克为基本粒子进行研究。此外,对于较宽的谱,一般至少需要采用双组分分布函数或者是多组分分布函数。在二分量函数中^[10],第一分量描述的是低 p_T 区的粒子谱,它得出的这部分贡献来自于软激发过程。第二个分量描述了中、高横动量区的粒子谱,反映了硬散射过程的贡献。由于高能碰撞的粒子谱具有相似性^[11-12],软过程和硬过程可能表现出相似的特征,如具有相似的参与夸克。

根据对二分量函数的研究,可以认为软过程是由海夸克与胶子共同贡献的,而硬过程主要由价夸克贡献的。软过程和硬过程的贡献可以同时用一个反映参与夸克贡献的统一函数表示出。为了同时描述包含极低 p_T 区域和极高 p_T 区域的横动量谱,人们期望用统一的函数来系统化各种粒子的横动量谱。事实上,在夸克或参与者夸克层次的多源热模型框架下^[13],每个贡献者夸克对强子横动量谱的贡献都服从修正的类Tsallis-Pareto-type(TP-like)函数,强子

是两个或多个参与者夸克的卷积,该方法已被用于研究200 GeV、2.76和13 TeV的 $p+p$ 碰撞中产生的多种强子的 p_T 谱^[14]。通过有效温度 T 、幂指数 n 、修正指数 a_0 等主要模型量,研究了所考虑的卷积函数的局部行为。

本文使用了TP-like函数及其卷积,尝试拟合了高能重离子对撞时所产生的带电粒子的 p_T 谱。模型结果与实验数据进行了具体细致的对比分析。采用的数据包括:STAR合作组实验得出的 $\sqrt{s_{NN}}=7.7、11.5、14.5、19.6、27、39$ 和62.4 GeV的多种碰撞中心度百分比区间的Au+Au碰撞的带电粒子数据^[15],PHOBOS实验组测得 $\sqrt{s_{NN}}=130$ 和200 GeV的多种碰撞中心度百分比区间的Au+Au碰撞的带电粒子数据以及 $\sqrt{s_{NN}}=62.4$ 和200 GeV的多种碰撞中心度百分比区间的Cu+Cu碰撞的带电粒子数据^[16-18],ALICE实验组测得 $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ 和5.02 TeV的多种碰撞中心度百分比区间的Pb+Pb碰撞和 $\sqrt{s_{NN}}=5.44$ TeV的多种碰撞中心度百分比区间的Xe+Xe碰撞的带电粒子数据^[19-20]。通过模型研究这些实验数据的分布情况及性质,进一步了解碰撞能量、碰撞系统、碰撞中心度等与带电粒子横动量谱的关联。基于这些性质的讨论分析,有助于理解高能核碰撞产生的多粒子系统及其演化过程,为相关的模型研究和实验研究提供参考。

1 参与者夸克模型描述强子的 p_T 谱

强子是由夸克组成的。在夸克水平的多源热模型框架下^[13],假设每个参与夸克在源静止坐标中是各向同性的,强子的横动量是由各个参与夸克贡献的。多源热模型的粒子出射和事件样本不同,假设了一个或多个源发射粒子。在给定的事件样本中,具有相同源温度的粒子是由相同的机制产生的,被认为是由相同的源发射的。本文拟研究夸克层次上具有不同中心度和较大横动量范围内的横动量谱。TP函数^[21-24]可以表示为以下形式:

$$f(p_T) = p_T \times \frac{A(n-1)(n-2)}{nT[nT+m_0(n-2)]} \times \left(1 + \frac{m_T - m_0}{nT}\right)^{-n}, \quad (1)$$

其中,幂指数 n 与熵指数 q 相关, $n = q/(q - 1)$ 可以用来衡量所考虑源的非平衡程度。 T 是有效温度,描述了所考虑源的激发程度。 A 是归一化常数, m_0 为静止质量, $m_T = \sqrt{p_T^2 + m_0^2}$ 是横向质量。该函数可以经验性地同时描述指数型的低横动量区和幂律型的高横动量区^[20], 可以被简化为以下形式^[25-28]:

$$f(p_T) = C \times p_T \times \left(1 + \frac{m_T - m_0}{nT}\right)^{-n}, \quad (2)$$

这里 C 是归一化常数, 与 T 、 m 以及 n 相关。

上述函数预期可以较好地再现出低 p_T 和高 p_T 区域的横动量谱。然而研究发现, 在许多情况下它不能准确地描述整个 p_T 范围内的谱, 特别是该式不能很好地解释低 p_T 区域的粒子谱。为了进一步解决这个问题, 可以对该函数进行修正, 形式为:

$$f(p_T) = C \times p_T^{a_0} \times \left(1 + \frac{m_T - m_0}{nT}\right)^{-n}, \quad (3)$$

该式中的 a_0 是一个校正因子, 它代表一个无量纲的量。修正后的函数可以再现整个 p_T 范围内的横动量谱。修正后的式(3)被称为 TP-like 函数。

基于上述的粒子分布函数, 假设第 i 个参与者夸克对 p_T 的贡献为 p_{Ti} , 则该夸克对强子谱的贡献为:

$$f_i(p_{Ti}) = C_i \times p_{Ti}^{a_0} \times \left(1 + \frac{\sqrt{p_{Ti}^2 + m_{0i}^2} - m_{0i}}{nT}\right)^{-n}, \quad (4)$$

其中, m_{0i} 是第 i 个参与者夸克的组成质量。强子一般由两个及以上夸克构成。介子的组成夸克为 $i=1, 2$, 对于重子, $i=1, 2, 3$ 。

介子的横动量分布是由两个夸克贡献的, 横动量谱为 TP-like 函数的卷积^[14], 即

$$f(p_T) = \int_0^{p_T} f_1(p_{12}) f_2(p_T - p_{12}) dp_{12} = \int_0^{p_T} f_2(p_{12}) f_1(p_T - p_{12}) dp_{12}, \quad (5)$$

其中, $f_1(p_{12})$ 和 $f_2(p_{12})$ 分别代表夸克 1 和夸克 2 所满足的概率密度函数。

重子横动量分布是三个贡献者夸克的卷积, 即

$$f(p_T) = \int_0^{p_T} f_{12}(p_{12}) f_3(p_T - p_{12}) dp_{12} = \int_0^{p_T} f_3(p_{12}) f_{12}(p_T - p_{12}) dp_{12}, \quad (6)$$

其中, $f_{12}(p_{12})$ 是由前两个参与者夸克对应的分布函数, $f_3(p_{12})$ 代表夸克 3 满足的概率密度函数。式(5)和式(6)是在夸克或者部分子水平上分别描述介子的横动量谱和重子的横动量谱。以上两式可以近似地再现整个 p_T 范围内的强子横动量谱。

在 高能重离子碰撞中产生的带电粒子主要是 $\pi^+(\pi^-)$, $K^+(K^-)$ 以及 $p(\bar{p})$, 带电粒子谱可以是这些粒子在中快速度区的总和, 即

$$f(p_T) = \sum_i f(p_{Ti}), \quad (7)$$

这里, $i = \pi^+(\pi^-)$, $K^+(K^-)$ 以及 $p(\bar{p})$, 考虑到自旋和反粒子, 它们的简并因子为: $g_\pi = g_K = 2$ 、 $g_p = 4$, 三者对带电粒子谱的贡献比例为 2:2:4。

2 实验结果的模型分析

图 1 为相对论性重离子对撞机上的束流能量扫描 (Beam Energy Scan at Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC-BES) 项目中多个 $\sqrt{s_{NN}}$ 、多个中心度 Au + Au 碰撞中的带电粒子的 $(1/2\pi p_T) d^2N/dp_T dy$, 涉及的碰撞能量范围为 7.7 GeV~200 GeV。图中不同形状的图标对应于不同碰撞中心度百分比区间的实验测量结果^[15-17], 这些实验结果由 STAR 与 PHOBOS 实验组测量的, 不同颜色的线对应于修正模型的计算结果。模型结果与实验数据基本一致。

图 2 是碰撞能量为 62.4 和 200 GeV 的多个中心度 Cu+Cu 碰撞中的带电粒子的 p_T 谱。图中不同形状的图标对应于多种碰撞中心度百分比区间的实验测量结果^[18], 这组实验结果取自 STAR 与 PHOBOS 合作组, 不同颜色的线对应于修正模型的计算结果。模型结果与实验数据基本一致。图 1, 图 2 和图 3 展示了碰撞能量为 2.76 以及 5.02 TeV 下多种中心度区间的 Pb+Pb 碰撞中产生的带电粒子 p_T 谱, 图 4 为碰撞能量为 5.44 TeV 的多种中心度区间的 Xe+Xe 碰撞中产生的带电粒子 p_T 谱。这两组实验结果

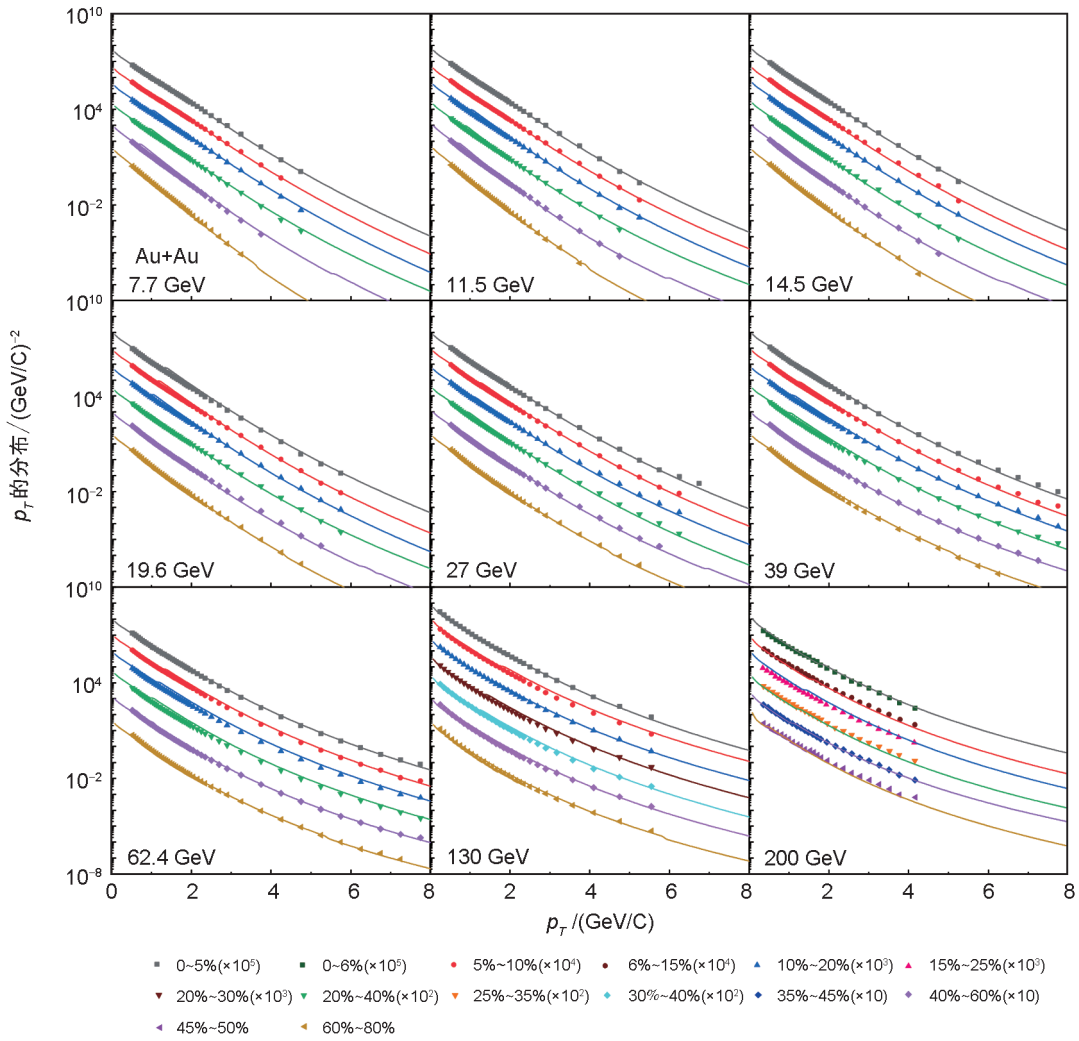


图1 碰撞能量为 $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 \sim 62.4, 130, 200$ GeV 的 Au+Au 碰撞的带电粒子横动量 p_T 分布^[15-17]

Fig. 1 Transverse momentum p_T distribution of charged-particles in Au + Au collisions at collision energies $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 \sim 62.4, 130, 200$ GeV^[15-17]

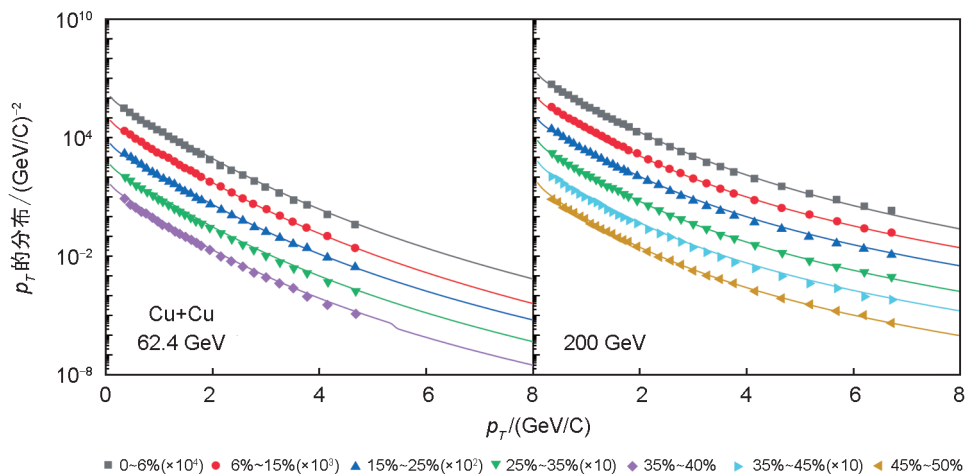


图2 碰撞能量为 $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ 和 200 GeV 的 Cu+Cu 碰撞的带电粒子横动量 p_T 分布^[18]

Fig. 2 Transverse momentum p_T distribution of charged-particles in Cu + Cu collisions at collision energies $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ and 200 GeV

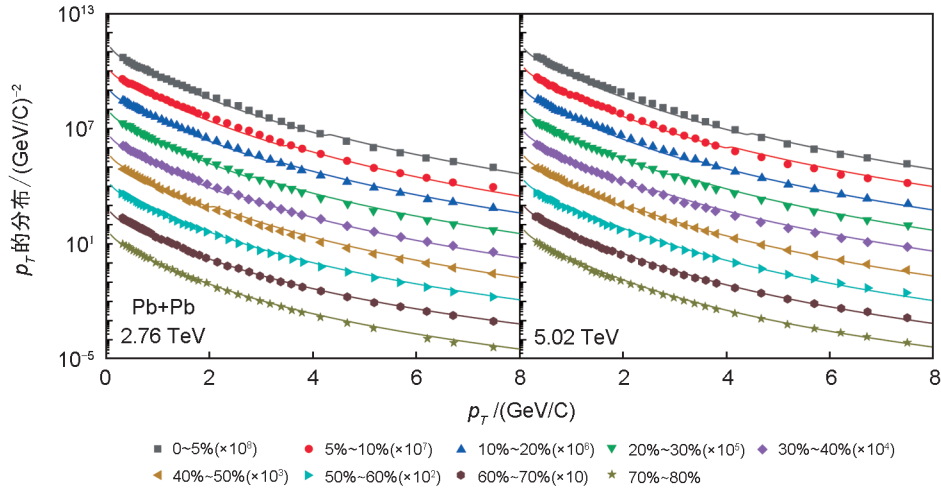


图3 碰撞能量为 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ 和 5.02 TeV 的 Pb + Pb 碰撞的带电粒子横动量 p_T 分布^[19]

Fig. 3 Transverse momentum p_T distribution of charged-particles in Pb + Pb collisions at collision energies $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ and 5.02 TeV

表1 不同强子的夸克结构

Table 1 Quark structures of different hadrons

强子	π^+	π^-	K^+	K^-	p	\bar{p}
夸克组成	$u\bar{d}$	$d\bar{u}$	$u\bar{s}$	$s\bar{u}$	uud	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$

表2 夸克的组分质量^[29]

Table 2 The constituent masses of quarks

夸克种类	u	d	c	s	t	b
组分质量	310 MeV	310 MeV	1.6 GeV	500 MeV	174 GeV	4.6 GeV

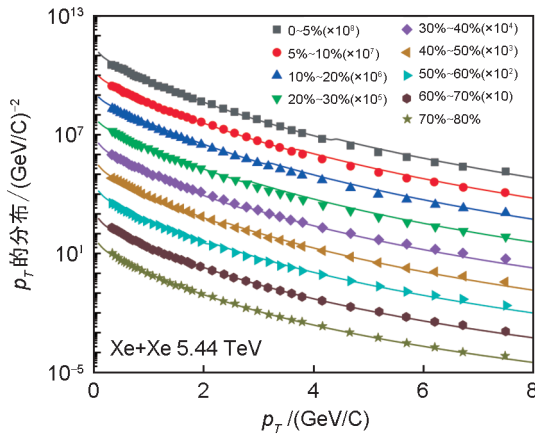


图4 碰撞能量为 $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV 的 Xe+Xe 碰撞的带电粒子横动量 p_T 分布^[20]

Fig. 4 Transverse momentum p_T distribution of charged-particles in Xe + Xe collisions at collision energy $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV

由 ALICE 合作组提供的^[19-20]。表1和表2分别给出了不同粒子的夸克结构以及这些夸克的组分质量^[29]。表3给出了图1-4的模型参数。

从表中可以看出,温度参数 T 的主要趋势为:随着碰撞中心度的增大而升高,说明碰撞中心度越高,多粒子系统的激发程度越高。TP 函数中 $a_0=1$,其结果可以分别单独解释指数型低横动量区或幂律型高横动量区的 p_T 谱,但是很多时候较难准确同时解释整个 p_T 谱(同时含低横动量区和高横动量区)。校正因子 a_0 为负值说明共振产生的轻粒子的贡献增大,这种情况主要发生在核碰撞参加者集团内,它与碰撞中心度无强的依赖关系。当碰撞能量变化较大时,参加者碰撞激烈程度增大, a_0 会出现明显的变化。表中可以看出不同碰撞能量和不同碰撞中心度下的 a_0 值,其绝对值大小反映了共振产生的轻粒子的贡献率。参数 $n=q/((q-1))$ 中的 q 都在1附近, q 值的主要变化趋势是随着碰撞能量升高,这是因为多粒子系统激发度高,非平衡度的增大。

3 结论

本文采用夸克层次的多源热模型或者参与者夸克模型研究了不同碰撞能量、不同碰撞系统、不同中心度等的高能重离子碰撞的带电粒子谱。由于模型中的基本单元是夸克,我们综合考虑了每个贡献者夸克对强子横动量谱的影响。由于介子是由2个夸克组成的,则它的横动量谱是两个对应函数的卷积;同理,对于质子,它是由3个夸克组成的,因此质子的横动量谱是三个对应函数的卷积。通过模型研究,我

表3 图1—图4对应的模型参数值

Table 3 Values of model parameters taken in Figures 1–4

碰撞系统及能量	中心度/%	T/GeV	a_0	n	碰撞系统及能量	中心度/%	T/GeV	a_0	n
Au + Au 7.7 GeV	0~5	0.222	-0.25	35	Au + Au 130 GeV	0~5	0.256	-0.34	16
	5~10	0.221	-0.25	35		5~10	0.252	-0.34	14.5
	10~20	0.218	-0.25	35		10~20	0.252	-0.34	14
	20~40	0.208	-0.25	30		20~30	0.252	-0.34	14
	40~60	0.194	-0.25	30		30~40	0.252	-0.34	14
	60~80	0.175	-0.25	30		40~60	0.252	-0.34	13
Au + Au 11.5 GeV	0~5	0.214	-0.25	30	Au + Au 200 GeV	60~80	0.25	-0.34	12
	5~10	0.214	-0.25	29		0~6	0.242	-0.34	12
	10~20	0.209	-0.25	28.5		6~15	0.241	-0.34	12
	20~40	0.195	-0.25	23.5		15~25	0.24	-0.34	12
	40~60	0.180	-0.25	23		25~35	0.24	-0.34	11
	60~80	0.175	-0.25	23		35~45	0.24	-0.34	10
Au + Au 14.5 GeV	0~5	0.215	-0.25	30	Cu + Cu 62.4 GeV	45~50	0.239	-0.34	10
	5~10	0.214	-0.25	30		0~6	0.243	-0.34	16
	10~20	0.21	-0.25	28		6~15	0.241	-0.34	16
	20~40	0.199	-0.25	25		15~25	0.238	-0.34	14
	40~60	0.19	-0.25	23		25~35	0.235	-0.34	14
	60~80	0.184	-0.25	23		35~40	0.234	-0.34	13
Au + Au 19.6 GeV	0~5	0.221	-0.25	30	Cu + Cu 200 GeV	0~6	0.247	-0.34	10
	5~10	0.215	-0.25	30		6~15	0.246	-0.34	9
	10~20	0.214	-0.25	30		15~25	0.245	-0.34	8.5
	20~40	0.211	-0.25	26		25~35	0.245	-0.34	8.5
	40~60	0.205	-0.25	26		35~45	0.237	-0.34	8
	60~80	0.2	-0.25	26		45~50	0.235	-0.34	8
Au + Au 27 GeV	0~5	0.226	-0.25	28	Pb + Pb 2.76 TeV	0~5	0.345	-0.4	8.5
	5~10	0.224	-0.25	28		5~10	0.332	-0.35	8.5
	10~20	0.217	-0.25	26		10~20	0.322	-0.35	7.5
	20~40	0.215	-0.25	26		20~30	0.313	-0.35	7
	40~60	0.212	-0.25	24		30~40	0.312	-0.35	7
	60~80	0.208	-0.25	22		40~50	0.308	-0.35	7
Au + Au 39 GeV	0~5	0.23	-0.25	24	Pb + Pb 5.02 TeV	50~60	0.307	-0.35	6
	5~10	0.228	-0.25	23.5		60~70	0.305	-0.35	5.5
	10~20	0.227	-0.25	22		70~80	0.305	-0.35	5.5
	20~40	0.225	-0.25	21		0~5	0.345	-0.35	8
	40~60	0.223	-0.25	19		5~10	0.342	-0.35	7.5
	60~80	0.22	-0.25	18		10~20	0.333	-0.35	7.5
Au + Au 62 GeV	0~5	0.232	-0.25	17	Xe + Xe 5.44 TeV	20~30	0.328	-0.35	7.5
	5~10	0.23	-0.25	17		30~40	0.321	-0.35	7
	10~20	0.228	-0.25	16		40~50	0.318	-0.35	7
	20~40	0.223	-0.25	15		50~60	0.316	-0.35	7
	40~60	0.22	-0.25	14		60~70	0.315	-0.35	6.5
	60~80	0.216	-0.25	13		70~80	0.315	-0.35	6

们定量分析了STAR, PHOBOS以及ALICE实验组的实验数据,模型再现了碰撞能量从7.7 GeV到5.44 TeV的Au + Au碰撞、Cu + Cu碰撞、Pb + Pb碰撞以及Xe + Xe碰撞产生的带电粒子(π^\pm , K^\pm , $p(\bar{p})$)的横动量谱,并且考虑了不同的碰撞中心度。对比研究发现,每个夸克对强子横动量谱的贡献都能很好地满足修正函数。对于不同碰撞能量以及不同碰撞中心度的带电粒子,模型都从夸克层次提取到了相关的温度参数 T 、幂指数 n 以及修正指数 a_0 。修正指数 a_0 描述了带电粒子横动量谱在极低 p_T 区的符合程度,研究结果表明该值不等于1,证明TP-like函数中的修正指数 a_0 是必需的,模型修正方案可行。从参数表中可以看出, a_0 与碰撞中心度、碰撞能量均无太大关系。研究还发现温度与碰撞中心度正相关。在中心碰撞中,我们得到了比边缘碰撞更大的 T ,这意味着在中心碰撞处有更高的激发态,更接近于平衡态。这归因于在中心碰撞处,有更多的核子进行了激烈的对撞,使得更多能量沉积。幂指数 $n = q/(q - 1)$,熵指数 q 一般表征平衡或者非平衡态, $q=1$ 是代表平衡态。在本工作中 q 都接近于1,说明所考虑的碰撞都接近平衡态。特别地,从中心碰撞到边缘碰撞,随着碰撞能量的增加, q 值逐渐增大,这说明碰撞系统在高能下会逐渐偏离平衡态。本文通过模型研究,结合强子的夸克结构分析了不同碰撞能量、不同碰撞中心度、不同碰撞类型的高能核碰撞中的带电粒子的分布性质,并与实验结果进行了比较,所得到的性质可以反映出碰撞过程、粒子生成等的相关信息。随着国际上高能核碰撞实验的逐步深入,粒子谱的实验结果越来越丰富,相关的模型研究也可逐步推进,解释更多的实验现象,如:椭圆流、赝快度等。同时,结合实验分析可以完善高能核碰撞末态多源出射的统计模型,为实验测量和实验方案的设计提供方向。

参考文献:

- [1] ADAMS J, AGGARWAL M M, AHAMMED Z, *et al.* Experimental and Theoretical Challenges in the Search for the Quark-gluon Plasma: The STAR Collaboration's Critical Assessment of the Evidence from RHIC Collisions[J]. *Nucl Phys A*, 2005, **757**(1-2): 102-183. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2005.03.085.
- [2] COLLINS J C, PERRY M J. Superdense Matter: Neutrons or Asymptotically Free Quarks?[J]. *Phys Rev Lett*, 1975, **34**(21): 1353-1356. DOI: 10.1103/physrevlett.34.1353.
- [3] READON P J. The Relativistic Heavy Ion Collider Project at Brookhaven[J]. *Nucl Phys A*, 1988, **478**: 861-873. DOI: 10.1016/0375-9474(88)90923-2.
- [4] JIANG Z F, CAO S S, WU X Y, *et al.* Longitudinal Distribution of Initial Energy Density and Directed Flow of Charged Particles in Relativistic Heavy-ion Collisions[J]. *Phys Rev C*, 2022, **105**(3): 034901. DOI: 10.1103/physrevc.105.034901.
- [5] CHEN J, DENG J, TANG Z B, *et al.* Nonequilibrium Kinetic Freeze-out Properties in Relativistic Heavy Ion Collisions from Energies Employed at the RHIC Beam Energy Scan to those Available at the LHC[J]. *Phys Rev C*, 2021, **104**(3): 034901. DOI: 10.1103/physrevc.104.034901.
- [6] SINGHA, SRIVASTAVA P K, DEVI G, *et al.* Production and Enhancement of (Multi-) Strange Hadrons in Au + Au at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV RHIC Energy and Pb + Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV LHC Energy[J]. *Phys Rev C*, 2023, **107**(2): 024906. DOI: 10.1103/physrevc.107.024906.
- [7] YANG P P, DUAN M Y, LIU F H, *et al.* Analysis of Identified Particle Transverse Momentum Spectra Produced in pp , p -Pb and Pb-Pb Collisions at the LHC Using TP-like Function[J]. *Symmetry*, 2022, **14**(8): 1530. DOI: 10.3390/sym14081530.
- [8] GODFREY S, ISGUR N. Mesons in a Relativized Quark Model with Chromodynamics[J]. *Phys Rev D Part Fields*, 1985, **32**(1): 189-231. DOI: 10.1103/physrevd.32.189.
- [9] BORSÁNYI S, FODOR Z, HOELBLING C, *et al.* Full Result for the QCD Equation of State with 2+1 Flavors[J]. *Phys Lett B*, 2014, **730**: 99-104. DOI: 10.1016/j.physletb.2014.01.007.
- [10] LIU F H, GAO Y Q, TIAN T, *et al.* Unified Description of Transverse Momentum Spectrums Contributed by Soft and Hard Processes in High-energy Nuclear Collisions[J]. *Eur Phys J A*, 2014, **50**(6): 94. DOI: 10.1140/epja/i2014-14094-9.
- [11] SARKISYAN E K G, SAKHAROV A S. Relating Multihadron Production in Hadronic and Nuclear Collisions[J]. *Eur Phys J C*, 2010, **70**(3): 533-541. DOI: 10.1140/epjc/s10052-010-1493-1.
- [12] MISHRA A N, ORTIZ A, PAIĆ G. Intriguing Similarities of High- p_T Particle Production Between pp and A - A Collisions[J]. *Phys Rev C*, 2019, **99**(3): 034911. DOI:

- 10.1103/physrevc.99.034911.
- [13] LIU F H, Unified Description of Multiplicity Distributions of Final-state Particles Produced in Collisions at High Energies [J]. *Nucl Phys A*, 2008, **810**(1-4): 159-172. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2008.06.014.
- [14] YANG P P, LIU F H, SAHOO R. A New Description of Transverse Momentum Spectra of Identified Particles Produced in Proton-proton Collisions at High Energies[J]. *Adv High Energy Phys*, 2020, **2020**: 1-16. DOI: 10.1155/2020/6742578.
- [15] ADAMCZYK L, ADAMS J R, ADKINS J K, *et al.* Beam Energy Dependence of Jet-quenching Effects in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 11.5, 14.5, 19.6, 27, 39,$ and 62.4 GeV [J]. *Phys Rev Lett*, 2018, **121**(3): 032301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.032301.
- [16] ADLER C, AHAMMED Z, ALLGOWER C, *et al.* Centrality Dependence of High- p_T Hadron Suppression in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **89**(20): 202301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.202301.
- [17] BACK B B, BAKER M D, BARTON D S, *et al.* Charged Hadron Transverse Momentum Distributions in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV[J]. *Nucl Lett B*, 2003, **117**: 77-79. DOI: 10.1016/S0920-5632(03)90493-2.
- [18] ALVER B, BACK B B, BAKER M D, *et al.* System Size and Centrality Dependence of Charged Hadron Transverse Momentum Spectra in Au + Au and Cu + Cu Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ and 200 GeV[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **96**(21): 212301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.212301.
- [19] ACHARYA S, ACOSTA F T, ADAMOVA D, *et al.* Transverse Momentum Spectra and Nuclear Modification Factors of Charged Particles in pp , p -Pb and Pb-Pb Collisions at the LHC [J]. *J High Energy Phys*, 2018, **2018**(11): 13. DOI:10.1007/JHEP11(2018)013.
- [20] ACHARYA S, ACOSTA F T, ADAMOVA D, *et al.* [ALICE Collaboration], Transverse Momentum Spectra and Nuclear Modification Factors of Charged Particles in Xe-Xe Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV [J]. *Physics Letters B*, 2019, **788**: 166. DOI: 10.1016/j.physletb.2018.10.052.
- [21] ZHENG H, ZHU L L, BONASERA A. Systematic Analysis of Hadron Spectra in $p+p$ Collisions Using Tsallis Distributions[J]. *Phys Rev D*, 2015, **92**(7): 074009. DOI: 10.1103/physrevd.92.074009.
- [22] TSALLIS C. Possible Generalization of Boltzmann-Gibbs Statistics[J]. *J Stat Phys*, 1988, **52**(1): 479-487. DOI: 10.1007/BF01016429.
- [23] BIRÓ T S, PURCSEL G, ÜRMÖSSY K. Non-extensive Approach to Quark Matter[J]. *Eur Phys J A*, 2009, **40**(3): 325. DOI: 10.1140/epja/i2009-10806-6.
- [24] ZHENG H, ZHU L L. Can Tsallis Distribution Fit All the Particle Spectra Produced at RHIC and LHC? [J]. *Adv High Energy Phys*, 2015, **2015**: 1-9. DOI: 10.1155/2015/180491.
- [25] KHACHATRYAN V, SIRUNYAN A M, TUMASYAN A, *et al.* Transverse-Momentum and Pseudorapidity Distributions of Charged Hadrons in pp Collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 2.36 TeV[J]. *J High Energy Phys*, 2010, **2010**(2): 41. DOI: 10.1007/JHEP02(2010)041.
- [26] CHATRCHYAN S, KHACHATRYAN V, SIRUNYAN A M, *et al.* Study of the Inclusive Production of Charged Pions, Kaons, and Protons in pp Collisions at $\sqrt{s} = 0.9, 2.76,$ and 7 TeV[J]. *Eur Phys J C*, 2012, **72**(10): 2164. DOI: 10.1140/EPJC/S10052-012-2164-1.
- [27] CHATRCHYAN S, KHACHATRYAN V, SIRUNYAN A M, *et al.* Study of the Production of Charged Pions, Kaons, and Protons in pPb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV[J]. *Eur Phys J C*, 2014, **74**(6): 2847. DOI: 10.1140/EPJC/S10052-014-2847-x.
- [28] SIRUNYAN A M, TUMASYAN A, ADAM W, *et al.* Measurement of Charged Pion, Kaon, and Proton Production in Proton-proton Collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV[J]. *Phys Rev D*, 2017, **96**(11): 112003. DOI: 10.1103/PhysRevD.96.112003.
- [29] ROBSON B A. Generation Model of Particle Physics with Excited Rishon States[J]. *J High Energy Phys*, 2019, **5**(1): 140-148. DOI: 10.4236/jhepgc.2019.51006.