

200 GeV 的 Au+Au 碰撞中粲奇异介子的动力学冻结性质

白慧,李保春*

(山西大学 物理电子工程学院,山西 太原 030006)

摘要:本文对200 GeV的Au+Au碰撞中粲奇异介子 D_s^\pm 的横动量谱进行了模型研究。利用非广延Tsallis统计模型、冲击波模型和Tsallis冲击波模型分析了不同碰撞中心度的粒子分布,并与实验结果进行了比较和讨论,给出了解释了模型各自适用的横动量范围以及其中的动力学冻结参数。非广延参数 q 和动力学冻结温度随中心度百分比的升高而升高,平均径向流随中心度百分比的升高而降低。与边缘碰撞相比,中心碰撞的热化火球寿命较长,具有更长的演化时间。 D_s^\pm 的动力学冻结时间早于轻强子,具有较小的径向流速,和较高动力学冻结温度。由于质量较大,产生于碰撞更早期,携带着夸克胶子等离子体(Quark-Gluon Plasma, QGP)的相关信息。这些冻结性质有助于加深我们对高能核碰撞中反应体系演化的理解。

关键词:高能核-核碰撞;Tsallis冲击波模型; D_s^\pm 粒子谱;动力学冻结

中图分类号:O572.2

文献标志码:A

文章编号:0253-2395(2025)03-0550-08

Kinetic Freeze-out Properties of Charm-strange Mesons in Au+Au Collisions at 200 GeV

BAI Hui, LI Baochun*

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

Abstract: The transverse momentum spectra of charm-strange meson D_s^\pm by model research in Au + Au collisions at 200 GeV is studied. The non-extensive Tsallis statistic model, Blast-wave model and Tsallis Blast-wave model are applied to analyze the particle distributions in various centrality bins. They are compared with the STAR experiment results. The appropriate range of the transverse momentum and the kinetic freeze-out parameters in each model are studied. The non-extensive parameter q and the kinetic freeze-out temperature rise with the centrality percentage. The mean radial flow decreases with the centrality percentage. Fireballs produced in central collisions survive longer and have a longer evolution time than those produced in peripheral collisions. Compared with the light hadrons, D_s^\pm freeze out earlier and has smaller radial velocity and higher kinetic freeze-out temperature. Particles are created in earlier stage due to the larger mass and carry the information of Quark-Gluon Plasma (QGP). These freeze-out properties can help us to better understand the evolution of the matter in high-energy nucleus collisions.

Key words: nucleus-nucleus collision at high energies; Tsallis Blast-wave model; D_s^\pm spectra; kinetic freeze-out

0 引言

位于美国布鲁克海文国家实验室的相对论

重离子对撞机(Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC)^[1-3]和瑞士日内瓦欧洲粒子物理研究所的大型强子对撞机(Large Hadron Collider,

收稿日期:2023-04-27;接受日期:2023-09-12

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:白慧(1996—),女,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为高能核碰撞物理。E-mail:baihui939747536@outlook.com

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

引文格式:白慧,李保春.200 GeV 的 Au+Au 碰撞中粲奇异介子的动力学冻结性质[J].山西大学学报(自然科学版),2025,48(3):550-557. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023147.

LHC)^[4-6]的重离子对撞项目主要研究集中在高温高密下的强相互作用和量子色动力学(Quantum Chromodynamics, QCD)的研究。在极高温和极高能量密度的极端环境下,碰撞产生了自由态的夸克和胶子体系。它是一种新的物态——夸克胶子等离子体(Quark-Gluon Plasma, QGP)^[7]。这些QGP仅存在于碰撞初始阶段很短的时间内,之后碰撞系统会迅速转变为强子气体系统。在过去的几十年间,RHIC和LHC上的实验组测量的基于轻味探测的实验数据已经证明,这样的高能重离子碰撞中产生了强耦合夸克胶子等离子体(strongly-coupled Quark-Gluon Plasma, sQGP)。最重要的证据是来自中心碰撞产生的不同可测量强子(包括多奇异强子: ϕ 和 Ω)的强椭圆流和大的高横动量产额抑制。

重味夸克(粲夸克、底夸克)由于质量($m_c \simeq 1.27$ GeV、 $m_b \simeq 4.18$ GeV)较大的缘故,主要产生于极端相对论性高能强子和核碰撞的早期阶段^[8-10],经由部分子与部分子硬散射过程产生。这些过程绝大多数包含了通过胶子融合($gg \rightarrow c\bar{c}/b\bar{b}$)和夸克-反夸克湮灭($q\bar{q} \rightarrow c\bar{c}/b\bar{b}$)的重味夸克生成。所以,产生于这些隐和开的粲、底味夸克的强子被认为是探测高能强子碰撞与核-核碰撞实验中所出现的热密物质系统的动力学机制的至关重要的探针。在时间尺度上,粲夸克的形成时间比产生QGP的时间更短,随后遍历QGP物质的整个演化。它们的热弛豫时间(约 $1.6 \times 10^{-23} \sim 3.3 \times 10^{-23}$ s),与QGP寿命相当,携带着介质的热力学和输运性质的信息。在这些介质冷却过程中,粲夸克能够强子化为不同的开粲强子,比如: D^0 、 D_s^\pm 、 Λ_c^\pm 等粒子。在横动量方面,由于能量损失和径向流,粒子产生的修正对于部分子sQGP相的重味夸克动力学是敏感的。在方位角方面,由于各项异性流,这样的修正对于部分子sQGP相的重味夸克动力学也是敏感的。分析含重味夸克末态强子的横动量分布是研究高能核碰撞形成系统的相关性质的重要手段。在QGP演化中,奇异夸克大量产生,它们的质量与介质的温度相当,与火球处于化学平衡态。重离子碰撞相比于 $p+p$ 碰撞,由于QGP

中奇异夸克数量的增加,如果通过夸克重组来强化,开粲奇异介子 D_s^\pm 的产生会增加。

由于在碰撞系统的整个演化过程中持续发生多部分子的相互作用,这使得系统初始状态相关的绝大部分信息被丢失。碰撞系统的末态行为可以通过测量产生粒子的数量和特性以及它们的能量和动量谱来获得。末态强子信息对于了解高能碰撞中粒子生成的机理和所产生物质的本质是非常有效的。在碰撞中存在两个标志性的系统冻结^[11-13]:化学冻结和动力学冻结。碰撞过程中,物质系统首先达到化学平衡,然后通过膨胀冷却下来,接着非弹性碰撞停止,此时发生了化学冻结。在这一阶段后,粒子的成分比例不再发生变动,但粒子继续相互作用,直至强子间的弹性碰撞停止,粒子的横动量谱保持不变。当这种情形出现时说明碰撞系统发生了动力学冻结。所以,由高能碰撞实验产生的末态粒子的横动量谱是研究粒子动力学冻结相关性质的重要数据^[14-15]。

RHIC中的STAR合作组使用了高精度硅探测装置首次测量出 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV的Au+Au碰撞所产生的含粲奇异介子 D_s^\pm ^[8-10]。在本文中,我们应用三种热力学模型来研究3个不同碰撞中心度区间的中心快度区的 D_s^\pm 介子的横动量 p_T 谱。对三种不同的模型结果与实验数据分别做了对比研究,讨论了高能核-核碰撞中 D_s^\pm 粒子系统的动力学冻结性质。在分析粒子谱时,非广延Tsallis统计模型、冲击波模型和Tsallis冲击波模型各有特点,每种模型所适用的横动量范围不尽相同,涉及的物理意义也不同。通过模型的比较研究可以进一步检验模型的有效性,讨论其随着不同碰撞中心度百分比的变化情况,分析碰撞系统演化相关的性质。本文采用不同的热力学统计模型分析了横动量在1.48 GeV~6.12 GeV范围内的 D_s^\pm 粒子分布。通过模型结果与实验数据的比照分析,讨论了含粲介子 D_s^\pm 对应的模型参数,分析了在不同中心度区间的粒子动力学冻结情况。其结果有助于我们进一步理解高能碰撞中粲奇异介子 D_s^\pm 的相关特性以及其中产生机理。

1 理论模型

在过去的很多研究工作中,非广延 Tsallis 统计模型和冲击波模型常被用来研究高能核碰撞中的末态粒子分布。非广延 Tsallis 统计模型考虑了反应体系的温度、化学势、平衡性等热力学性质,可以描述一些高横动量区的横动量分布。以前的研究证明,经过修正后的 Tsallis 模型可以很好地满足热力学自洽性。冲击波模型考虑了大量粒子所表现出的集体流效应,然而对有些横动量谱描述得不是很好,尤其是横动量范围较大时。Tsallis 冲击波模型是两种模型的有机结合,一定程度上包含了两种模型的优点。

1.1 非广延 Tsallis 统计模型

非广延 Tsallis 统计方法广泛应用于 $p+p$ 碰撞、 $p+A$ 碰撞和 $A-A$ 碰撞中末态粒子分布的研究中^[16-19]。其中的粒子分布函数可以认为是玻尔兹曼-吉布斯指数分布函数形式的一种有效延伸。指数函数形式被改为幂函数形式,故能较好地描述高横动量范围的粒子分布。一般情况,关于有效温度 T (即 Tsallis 温度)、非广延参数 q 的 Tsallis 分布函数为:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_T dp_T dy} = C_q \left(1 + (q-1) \frac{m_T}{T} \right)^{-\frac{1}{q-1}}, \quad (1)$$

$$m_T = \sqrt{m_0^2 + p_T^2}, \quad (2)$$

其中 N 代表总粒子数, N_{ev} 为碰撞事件数, C_q 是归一化常数, m_T 代表横质量, m_0 为粒子质量。这里的有效温度 T 与动力学冻结温度 T_{kin} (发生动力学冻结时的温度) 的近似关系为:

$$T = T_{kin} + \frac{1}{2} m_0 \langle \beta \rangle^2, \quad (3)$$

其中 $\langle \beta \rangle$ 是平均径向流。

满足热力学自洽性的 Tsallis 分布函数形式为:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_T dp_T dy} = C_q m_T \cosh(y) \left(1 + (q-1) \frac{m_T \cosh(y) - \mu}{T} \right)^{-\frac{q}{q-1}}, \quad (4)$$

上式考虑到了快度 y 和化学势 μ 。而在碰撞的中心快度区域 $y=0$, 分布函数简化为:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_T dp_T dy} = C_q m_T \left(1 + (q-1) \frac{m_T - \mu}{T} \right)^{-\frac{q}{q-1}}. \quad (5)$$

当处理 RHIC 能区的相关问题时,一般需要考虑与碰撞中心度百分比相关的有限化学势 μ 。而在 LHC 能区,反应系统化学冻结时由于正反粒子等量产生,重子化学势近似为零,可以忽略。粒子分布函数也可以写为:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_T dp_T dy} = C_q m_T \left(1 + (q-1) \frac{m_T}{T} \right)^{-\frac{q}{q-1}}. \quad (6)$$

1.2 冲击波模型

冲击波模型最初的理论基础可以认为是源于 Landau 和 Hagedorn 的碰撞理论。强子产生于快速移动火球的发射和强子流的流体动力学演化。碰撞后的系统可视作一个热化火球,这个火球会经历快速膨胀、强子化,然后冷却出射。集体性表现(连续强子流的集体运动或构型空间中离散团的集合)是多粒子的一个显著特征。冲击波模型是研究热化火球特性的常见模型之一^[20-24]。模型中假设粒子在动力学冻结温度会局部发生热化,以相同的集体流速运动。粒子的动量分布函数为:

$$E \frac{d^3N}{d^3p^3} \propto \int d^3\sigma_\mu p^\mu \exp\left(-\frac{p^\mu u_\mu}{T_{kin}}\right), \quad (7)$$

其中 T_{kin} 为动力学冻结温度,粒子动量 $p_\mu = (m_T \cosh y, p_T \cos \phi, p_T \sin \phi, m_T \sinh y)$, 粒子速度 $u_\mu = \cosh \rho (\cosh \eta, \tanh \rho \cos \phi_r, \tanh \rho \sin \phi_r, \sinh y)$, y 为粒子快度。

由上式,可以得出横动量分布函数为:

$$\frac{dN}{p_T dp_T} = \frac{dN}{m_T dm_T} \propto \int_0^R r dr m_T I_0\left(\frac{p_T \sinh \rho}{T_{kin}}\right) K_1\left(\frac{m_T \cosh \rho}{T_{kin}}\right). \quad (8)$$

由此,可得到一个与动力学冻结温度 T_{kin} 和平均径向流速 $\langle \beta \rangle$ 有关的分布函数形式。式中的物理量的计算如下:

$$\rho = \tanh^{-1} \beta, \quad (9)$$

$$\beta = \beta_s \left(\frac{r}{R} \right)^n, \quad (10)$$

$$\langle \beta \rangle = \frac{2}{(2+n)} \beta_s, \quad (11)$$

其中 ρ 是火球的横向膨胀速度, β 是径向流速, R 是火球的半径, r/R 是对热化源的相对半径位置, β_s 是在 $r=R$ 位置(即火球表面)的径向流速, n 是描述流速特征的指数, I_0 和 K_1 是修正贝塞尔函数。

1.3 Tsallis冲击波模型

前两种模型结合被称为Tsallis冲击波模型^[24-27]。在冲击波模型中的分布函数加入非广延参数 q ,可以用来描述系统的不平衡程度。这样可以得到一个关于动力学冻结温度 T_{kin} 、平均径向流速 $\langle\beta\rangle$ 以及非广延参数 q 的函数,其粒子横质量分布为:

$$\frac{dN}{m_T dm_T} \propto m_T \int_{-Y}^{+Y} \cosh y dy \int_{-\pi}^{+\pi} d\Phi \int_0^R r dr \left(1 + \frac{q-1}{T_{\text{kin}}} \left(\frac{m_T \cosh y \cosh \rho - p_T \sinh \rho \cos \Phi}{p_T \sinh \rho \cos \Phi} \right) \right)^{-\frac{q}{q-1}}, \quad (12)$$

$$\rho = \tanh^{-1} \left[\beta_s \left(\frac{r}{R} \right)^n \right], \quad (13)$$

$$\langle\beta\rangle = \frac{2}{(2+n)} \beta_s. \quad (14)$$

当 $q-1$ 接近于零时,Tsallis冲击波分布函数(公式(12))可退化为冲击波模型的分布函数(公式(8))^[8]。Tsallis冲击波模型与前两种模型所使用的主要物理量基本一致。不同之处在于,函数中引入了两个与粒子运动相关的物理量:粒子的速度 y 、发射粒子与粒子源之间的方位角差 Φ 。

2 三种热力学模型中的横动量分布

选用不同的热力学模型研究粒子分布可以对比研究碰撞系统的动力学冻结性质。通过非广延Tsallis统计模型能得到碰撞系统中多强子体系的不平衡程度和有效温度。通过冲击波模型可以将平均径向流速和动力学冻结温度这两种重要的物理量提取出来。Tsallis冲击波模型中可以得到不平衡程度、平均径向流速和动力学冻结温度的三种与动力学冻结相关的物理量。该模型可以用于研究低、高横动量区产生的强子的粒子分布。

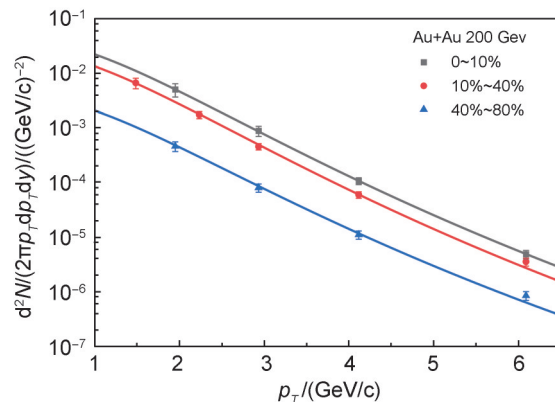


图1 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV的Au + Au碰撞中3种不同中心度区间的 D_s^\pm 介子的横动量分布(实验数据来自STAR实验组^[10],用符号表示。实线为非广延Tsallis统计模型结果。)

Fig. 1 Transverse momentum distributions of D_s^\pm for three centrality classes in Au + Au collision at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV (The symbols correspond to the experimental data from STAR experiment collaboration^[10]. The solid lines represent model results of the non-extensive Tsallis distribution.)

2.1 非广延Tsallis统计模型中的 D_s^\pm 介子分布

本节采用非广延Tsallis统计模型研究了200 GeV横动量范围为1.48 GeV~6.12 GeV的 D_s^\pm 介子的 p_T 分布。在图1中,方块、圆点、三角等符号分别代表RHIC上STAR合作组测得的碰撞中心度区间0~10%、10%~40%、40%~80%的实验数据^[10]。模型结果是通过非广延Tsallis分布函数(公式(5))拟合实验数据得到的,对应的 χ^2/dof 和模型参数见表1。从图中可以看出,非广延Tsallis统计模型结果与 D_s^\pm 的 p_T 谱符合程度较高。模型中,非广延参数 q 、有效温度 T 和化学势 μ 的具体值和变化趋势如图2所示。非广延参数 q 随着碰撞中心度百分比的增加而升高。这说明,当越接近于中心碰撞, D_s^\pm 介子系统越趋于平衡态。有效温度 T 随着碰撞中心度百分比的升高而降低。这说明,越接近中心碰撞,由于碰撞更激烈, D_s^\pm 介子系统热运动加强。

2.2 冲击波模型中的 D_s^\pm 介子分布

采用冲击波模型分析 D_s^\pm 介子在横动量范围为1.48 GeV~6.12 GeV的粒子谱,结果如图3所示。模型结果是通过公式(8)拟合实验数据得到的,对应的 χ^2/dof 和模型参数见表2。从

表1 非广延 Tsallis 统计模型提取出的 D_s^\pm 介子动力学冻结参数

Table 1 Kinetic freeze-out parameters of D_s^\pm mesons extracted from non-extensive Tsallis model

中心度	q	T/GeV	μ/GeV	χ^2/dof
0~10%	1.072 ± 0.002	0.196 ± 0.003	0.100 ± 0.030	0.021
10%~40%	1.073 ± 0.002	0.188 ± 0.003	0.090 ± 0.030	1.181
40%~80%	1.081 ± 0.004	0.182 ± 0.003	0.080 ± 0.035	2.251

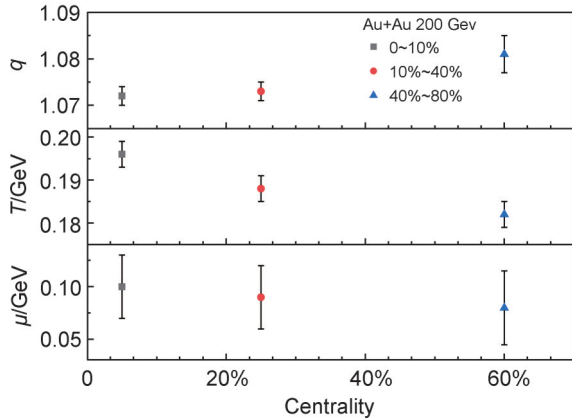


图2 非广延 Tsallis 统计模型的 D_s^\pm 介子的热力学性质

Fig. 2 Thermodynamic properties of D_s^\pm mesons in the non-extensive Tsallis model

χ^2/dof 值来看,冲击波模型不适用。参数值是近似的,在图4中,平均径向流速 $\langle\beta\rangle$ 介于0.345到0.410,从边缘碰撞到中心碰撞增大,流效应更加明显。该结果表明:这样的多粒子系统在中心碰撞的情形下膨胀速度会更快。动力学冻结温度 T_{kin} 随中心度百分比增大而升高。在高中心度碰撞中产生了较长寿命的火球, D_s^\pm 介子在介质中经历更长的演化过程,导致动力学冻结相对于边缘碰撞稍有延迟。

2.3 Tsallis 冲击波模型中的 D_s^\pm 介子分布

通过非广延 Tsallis 统计模型和冲击波模型的结合得到了 Tsallis 冲击波模型,它能够用来描述非平衡态碰撞系统中的现象。图5为 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ GeV 的 Au + Au 碰撞的 D_s^\pm 介子横动量 p_T 分布。模型结果是通过公式(12)拟合实验数据得到的,对应的 χ^2/dof 和模型参数见表1。从图5和表4的 R^2 可以看出, Tsallis 冲击波模型的结果对实验数据的描述无论是低横动量区还是高横动量区都优于前两个模型。在3个不同的中心度区间, Tsallis 冲击波模型结果与实验数据的符合程度都较高。由此得到的相

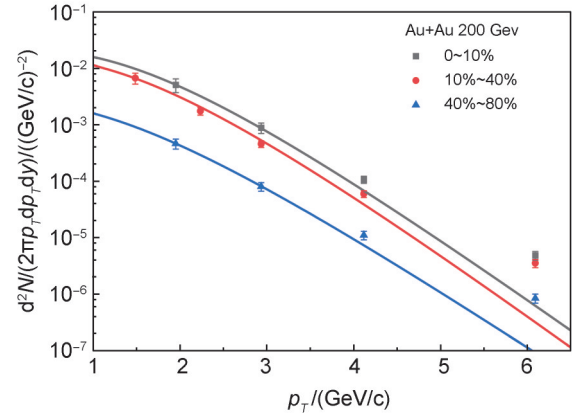


图3 在 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ GeV 下 Au + Au 碰撞中3种不同中心度区间的 D_s^\pm 介子的横动量分布 (实验数据来自 STAR 实验组^[10],用符号表示。实线为冲击波模型结果。)

Fig. 3 Transverse momentum distributions of D_s^\pm for three centrality classes in Au + Au collision at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ GeV (The symbols correspond to the experimental data from STAR experiment collaboration^[10]. The solid lines are model results of Blast-wave model.)

表2 冲击波模型提取出的 D_s^\pm 介子动力学冻结参数

Table 2 Kinetic freeze-out parameters of D_s^\pm mesons extracted from Blast-wave model

中心度	$T_{\text{kin}}/\text{GeV}$	$\langle\beta\rangle/c$	χ^2/dof
0~10%	0.245 ± 0.002	0.410 ± 0.005	9.780
10%~40%	0.246 ± 0.002	0.390 ± 0.005	7.270
40%~80%	0.287 ± 0.003	0.345 ± 0.010	7.990

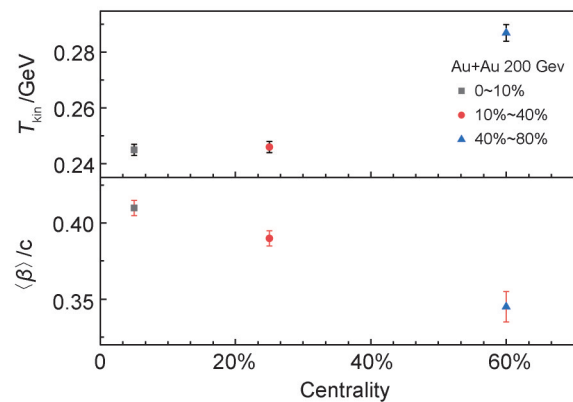


图4 冲击波模型中的 D_s^\pm 介子动力学冻结参数

Fig. 4 Kinetic freeze-out parameters of D_s^\pm mesons in Blast-wave model

关的动力学冻结参数更加准确,其值随中心度百分比的变化如图6所示。平均横径向流速 $\langle\beta\rangle$ 的变化趋势与冲击波模型的情况相同,具体值在0.230 GeV~0.267 GeV,比冲击波模型的

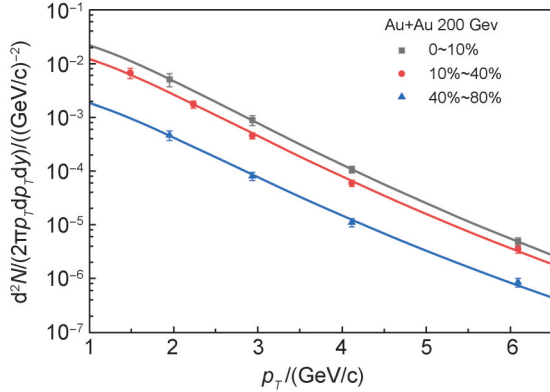


图5 在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 下 Au + Au 碰撞中3种不同中心度区间的 D_s^\pm 介子的横动量分布 (实验数据来自 STAR 实验组^[10], 用符号表示。实线为 Tsallis 冲击波模型结果。)

Fig. 5 Transverse momentum distributions of D_s^\pm for three centrality classes in Au + Au collision at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV (The symbols correspond to the experimental data from STAR experiment collaboration^[10]. The solid lines are model results of Tsallis Blast-wave model.)

值 (0.345 GeV~0.410 GeV) 整体偏小大约 1/3。动力学冻结温度 T_{kin} 的变化趋势与冲击波模型的情况相同, 在对心碰撞中 D_s^\pm 获得了更大的径向集体运动, 具体值在 0.118 GeV~0.122 GeV 之间, 比冲击波模型的值 (0.245 GeV~0.287 GeV) 整体偏小大约 1/2。两个模型都显示: 中心碰撞所形成的热化火球的寿命较长, 由于质量较大, D_s^\pm 介子系统在碰撞介质中演化过程更长, 动力学冻结时刻比边缘碰撞晚。非广延参数 q 随中心度百分比的增大而升高, 其数值也与非广延 Tsallis 统计模型中的值接近, 进一步验证了非广延 Tsallis 统计模型对分析高能碰撞粒子行为的有效性。这一结论表明, 由于在热化火球在动力学冻结时刻的系统演化的时间非常短, 系统非平衡度没有发生明显变化。

图7比较了非广延 Tsallis 统计模型和 Tsallis 冲击波模型的动力学冻结温度 T_{kin} 。通过公

表3 Tsallis 冲击波模型提取出的 D_s^\pm 介子动力学冻结参数
Table 3 Kinetic freeze-out parameters of D_s^\pm mesons extracted from Tsallis Blast-wave model

中心度	q	T_{kin}/GeV	$\langle\beta\rangle/c$	χ^2/dof
0~10%	1.071 ± 0.002	0.118 ± 0.002	0.267 ± 0.002	0.015
10%~40%	1.074 ± 0.003	0.120 ± 0.002	0.253 ± 0.002	0.755
40%~80%	1.081 ± 0.004	0.122 ± 0.002	0.230 ± 0.004	1.157

表4 非广延 Tsallis 统计模型和 Tsallis 冲击波模型描述中的 R^2 值

Table 4 R^2 values of descriptions in non-extensive Tsallis model and Tsallis Blast-wave model

中心度	R^2	
	non-extensive Tsallis model	Tsallis Blast-wave model
0~10%	0.992	0.997
10%~40%	0.983	0.995
40%~80%	0.978	0.990

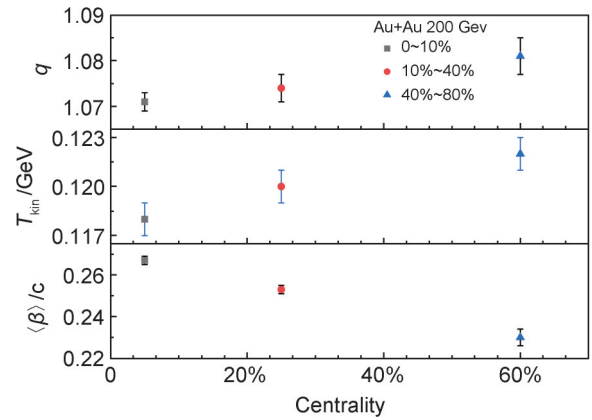


图6 Tsallis 冲击波模型的 D_s^\pm 介子动力学冻结参数
Fig. 6 Kinetic freeze-out parameters of D_s^\pm mesons in Tsallis Blast-wave model

式(3)可以近似计算出非广延 Tsallis 统计模型的 T_{kin} 。从图中可以看出, 非广延 Tsallis 统计模型的 T_{kin} 比 Tsallis 冲击波模型的整体偏大约 0.01 GeV。所以, 通过非广延 Tsallis 分布的有效温度, 再利用转换公式也可以近似计算动力学冻结温度。

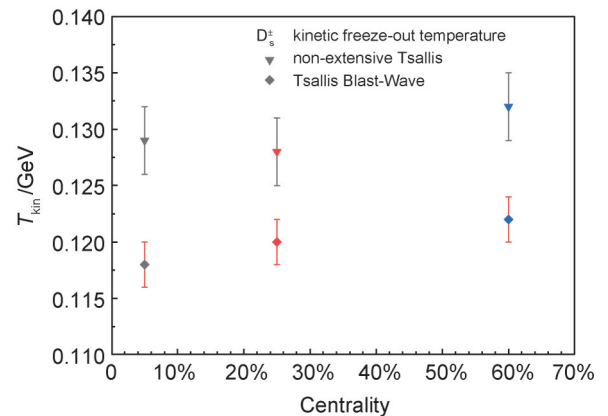


图7 非广延 Tsallis 模型与 Tsallis 冲击波模型中动力学冻结温度 T_{kin} 的比较

Fig. 7 Comparison of kinetic freeze-out temperature T_{kin} in non-extensive Tsallis model and Tsallis Blast-Wave model

我们对 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 Au + Au 碰撞 3 个中心度区间所产生的含粲奇异粒子 D_s^\pm 的横动量分布进行了研究。实验数据的横动量 p_T 的范围为 1.48 GeV~6.12 GeV。非广延 Tsallis 统计模型、冲击波模型和 Tsallis 冲击波模型对粒子谱的横动量范围的适用情况并不相同。对比发现,冲击波模型不是很适用于该横动量范围。当 p_T 超过 4 GeV 时,模型结果与实验数据有一定的差距。利用模型得到的动力学冻结参数去分析粒子系统冻结特征的精度相对有限,其参数变化趋势具有参考价值。而非广延 Tsallis 统计模型和 Tsallis 冲击波模型对粒子谱的描述较好,其模型参数更可靠,可用于进一步的研究分析。

在非广延 Tsallis 统计模型对 D_s^\pm 的粒子谱的研究中发现,非广延参数 q 随中心度百分比的增大而升高。在高中心度碰撞中,该碰撞反应系统会更加趋向于平衡态。有效温度 T 随着中心度百分比的升高而减小。在相同碰撞条件下, D_s^\pm 的有效温度 T 比轻强子的有效温度大^[18]。这是由于质量较大, D_s^\pm 粒子系统在反应中更早出现动力学冻结。化学势随着中心度百分比的升高而增大,但由于碰撞能量较高,对粒子的动力学冻结造成的影响较小。

Tsallis 冲击波模型是在冲击波模型中嵌入了 Tsallis 统计,是两种模型的一种结合。Tsallis 冲击波模型和冲击波模型得到的动力学冻结参数随中心度的变化趋势相近,但具体数值有差别。平均径向流 $\langle\beta\rangle$ 随中心度百分比的增大而降低,动力学冻结温度 T_{kin} 随中心度百分比的增大而升高。与末态轻强子相比, D_s^\pm 的动力学冻结温度 T_{kin} 数值更大^[24],这与用非广延 Tsallis 统计模型研究得出的有效温度 T 高于轻强子的结论一致。非广延参数 q 随中心度百分比的增大也在升高。相比于边缘碰撞,中心碰撞中产生了较长寿命的火球。相比于在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 Au + Au 碰撞中产生的其他末态轻强子, D_s^\pm 粒子获得了较小的径向流速,动力学冻结时的温度也更高一些。

3 结论

本文通过不同的热力学统计模型对比分析

了高能碰撞中粲奇异介子 D_s^\pm 的分布,解释了对应的实验结果,并详细讨论了非广延参数、平均径向流、有效温度、动力学冻结温度等的变化情况及其关联意义。研究表明, D_s^\pm 粒子体系随热化火球介质经历的演化时间更短,冻结时间更早^[19]。在核碰撞所产生的粒子中,粲奇异介子 D_s^\pm 由于含有粲夸克、奇异夸克,其质量较大。它们产生于碰撞的更早期,经过了 QGP 演化的多个不同的阶段,是高能碰撞系统中物质演化研究中的一个重要的探针。由于 D_s^\pm 粒子的这些特殊性,论文通过模型研究得到了关于粒子系统的部分性质,有助于进一步讨论和理解高能核碰撞中含粲强子系统的热力学性质及其产生过程。本工作得到的粒子产生信息相对有限,下一步可以结合碰撞过程分析其中的热力学性质以及 QGP 中粲夸克和奇异夸克的聚合。

参考文献:

- [1] GYULASSY M, MCLERRAN L. New Forms of QCD Matter Discovered at RHIC[J]. *Nucl Phys A*, 2005, **750** (1): 30-63. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2004.10.034.
- [2] COLLABORATION S, ADAMS J, AGGARWAL M M, *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.
- [3] KOSARZEWSKI L. Open and Hidden Heavy Flavor Measurements at RHIC[J]. *EPJ Web Conf*, 2022, **274**: 05007. DOI: 10.1051/epjconf/202227405007.
- [4] EVANS L, BRYANT P. LHC Machine[J]. *J Inst*, 2008, **3** (8): S08001. DOI: 10.1088/1748-0221/3/08/S08001.
- [5] ACHARYA S, ADAMOVA D, ADLER A, *et al.* Accessing the Strong Interaction Between Λ Baryons and Charged Kaons with the Femtoscopy Technique at the LHC[J]. *Phys Lett B*, 2023, **845**: 138145. DOI: 10.1016/j.physletb.2023.138145.
- [6] NEKRASOV M L. Pp Elastic Scattering at ISR and LHC Energies[J]. *Phys Rev D*, 2023, **108**(3): 034028. DOI: 10.1103/physrevd.108.034028.
- [7] CUNQUEIRO L, SICKLES A M. Studying the QGP with Jets at the LHC and RHIC[J]. *Prog Part Nucl Phys*, 2022, **124**: 103940. DOI: 10.1016/j.pnpnp.2022.103940.
- [8] ADAM J, ADAMCZY L, ADAMS J R, *et al.* Centrality and Transverse Momentum Dependence of D^0 -Meson Pro-

- duction at Mid-Rapidity in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV [J]. *Phys Rev C*, 2019, **99**(3): 034908. DOI: 10.1103/PhysRevC.99.034908.
- [9] NASIM M. Measurements of D_s^\pm -meson Production in Au + Au Collisions at $s_{NN}=200$ GeV in STAR[J]. *Nucl Phys A*, 2016, **956**: 509–512. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2016.02.058.
- [10] ADAM J, ADAMCZY L, ADAMS J R, *et al.* Observation of D_s^\pm/D^0 Enhancement in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV[J]. *Phys Rev Lett*, 2021, **127**(9): 092301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.092301.
- [11] WAQAS M, LI B C. Kinetic Freeze-out Temperature and Transverse Flow Velocity in Au-Au Collisions at RHIC-BES Energies[J]. *Adv High Energy Phys*, 2020, **2020**: 1–14. DOI: 10.1155/2020/1787183.
- [12] MOTORNENKO A, STEINHEIMER J, VOVCHENKO V, *et al.* Ambiguities in the Hadro-chemical Freeze-out of Au+Au Collisions at SIS18 Energies and How to Resolve Them[J]. *Phys Lett B*, 2021, **822**: 136703. DOI: 10.1016/j.physletb.2021.136703.
- [13] LIU H J, CHENG H G, FENG Z Q, Collective Flows of Clusters and Pions in Heavy-Ion Collisions at GeV Energies[J]. *Phys Rev C*, 2023, **108**: 024614. DOI: 10.1103/PhysRevC.108.024614.
- [14] PAN C Y, ZHENG S H, YANG M M, *et al.* Nonthermal Distributions of Charmed Hadrons in Relativistic Heavy-ion Collisions[J]. *Phys Rev C*, 2023, **108**(3): 034903. DOI: 10.1103/physrevc.108.034903.
- [15] SINHA P, BAIRATHI V, GOPAL K, *et al.* Effect of Nuclear Structure on Particle Production in Relativistic Heavy-ion Collisions Using a Multiphase Transport Model[J]. *Phys Rev C*, 2023, **108**(2): 024911. DOI: 10.1103/physrevc.108.024911.
- [16] TAO J Q, WU W H, WANG M, *et al.* The Novel Scaling of Tsallis Parameters from the Transverse Momentum Spectra of Charged Particles in Heavy-ion Collisions[J]. *Particles*, 2022, **5**(2): 146–156. DOI: 10.3390/particles5020013.
- [17] GAO Y, ZHENG H, ZHU L L, *et al.* Description of Charged Particle Pseudorapidity Distributions in Pb+Pb Collisions with Tsallis Thermodynamics[J]. *Eur Phys J A*, 2017, **53**(10): 197. DOI: 10.1140/epja/i2017-12397-y.
- [18] PATRA N R, MOHANTY B, NAYAK T K. Centrality, Transverse Momentum and Collision Energy Dependence of the Tsallis Parameters in Relativistic Heavy-ion Collisions[J]. *Eur Phys J Plus*, 2021, **136**(6): 702. DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-01660-0.
- [19] AJAZ M, AL KARIM HAJ ISMAIL A, WAQAS M, *et al.* Pseudorapidity Dependence of the Bulk Properties of Hadronic Medium in pp Collisions at 7 TeV[J]. *Sci Rep*, 2022, **12**: 8142. DOI: 10.1038/s41598-022-11685-9.
- [20] RATH R, KHUNTIA A, SAHOO R, *et al.* Event Multiplicity, Transverse Momentum and Energy Dependence of Charged Particle Production, and System Thermodynamics in pp Collisions at the Large Hadron Collider [J]. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2020, **47**(5): 055111. DOI: 10.1088/1361-6471/ab783b.
- [21] RISTEA O, RISTEA C, JIPA A. Study of Strange Particle P_T Spectra in Relativistic Heavy-ion Collisions with Blast-wave Model[J]. *Int J Mod Phys E*, 2022, **31**(9): 2250090. DOI: 10.1142/s0218301322500902.
- [22] 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.
- [23] ADAMCZYK L, ADKINS J K, AGAKISHIEV G, *et al.* Bulk Properties of the Medium Produced in Relativistic Heavy-ion Collisions from the Beam Energy Scan Program[J]. *Phys Rev C*, 2017, **96**(4): 44904. DOI: 10.1103/PhysRevC.96.044904.
- [24] RISTEA O, JIPA A, RISTEA C, *et al.* Study of the Freeze-out Process in Heavy Ion Collisions at Relativistic Energies[J]. *J Phys: Conf Ser*, 2013, **420**: 012041. DOI: 10.1088/1742-6596/420/1/012041.
- [25] GU J B, LI C Y, WANG Q, *et al.* Collective Expansion in pp Collisions Using the Tsallis Statistics[J]. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2022, **49**(11): 115101. DOI: 10.1088/1361-6471/ac9074.
- [26] WAQAS M, PENG G X, LIU F H, *et al.* Particle Species and Energy Dependencies of Freeze-out Parameters in High-energy Proton-proton Collisions[J]. *Eur Phys J Plus*, 2022, **137**(9): 1041. DOI: 10.1140/epjp/s13360-022-03189-2.
- [27] CHE G R, GU J B, ZHANG W C, *et al.* Identified Particle Spectra in Pb-Pb, Xe-Xe and p-Pb Collisions with the Tsallis Blast-wave Model[J]. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2021, **48**(9): 095103. DOI: 10.1088/1361-6471/ac09dc.