



高能核物理实验国际合作研究近期代表性成果

张晓明 周代翠

Experimental Overview of Recent Research Highlights on International Cooperation in High-energy Nuclear Physics

ZHANG Xiaoming, ZHOU Daicui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC79>

引用格式:

张晓明, 周代翠. 高能核物理实验国际合作研究近期代表性成果[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(3):391–405. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC79

ZHANG Xiaoming, ZHOU Daicui. Experimental Overview of Recent Research Highlights on International Cooperation in High-energy Nuclear Physics[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(3):391–405. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC79

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[相对论重离子碰撞中手征磁效应寻找的现状\(英文\)](#)

Status of the Chiral Magnetic Effect Search in Relativistic Heavy-ion Collisions

原子核物理评论. 2018, 35(3): 225–242 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.03.225>

[相对论重离子碰撞手征电荷分离效应的研究](#)

Study of Chiral Charge Separation Effect in Relativistic Heavy Ion Collisions

原子核物理评论. 2017, 34(3): 557–562 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.557>

[手征胶子修正夸克平均场模型](#)

Pion and Gluon Corrections on Quark Mean Field Model

原子核物理评论. 2017, 34(3): 493–498 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.493>

[强电场对夸克胶子等离子体中粲夸克偶素演化的影响\(英文\)](#)

Effect of Strong Electric Field on the Evolution of Charmonium in Quark Gluon Plasma

原子核物理评论. 2019, 36(3): 278–288 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.03.278>

[相对论重离子碰撞的输运模型研究](#)

Transport Model Studies on Relativistic Heavy-ion Collisions

原子核物理评论. 2017, 34(3): 370–373 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.370>

[利用HIRFL高能重离子束的核能材料辐照损伤研究](#)

Study of Radiation Damage of Materials Candidate to Advanced Nuclear Energy Systems by Utilizing High-Energy Heavy Ions at HIRFL

原子核物理评论. 2017, 34(4): 803–810 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.04.803>

文章编号: 1007-4627(2020)03-0391-15

高能核物理实验国际合作研究近期代表性成果

张晓明, 周代翠

(华中师范大学物理科学与技术学院, 武汉 430019)

摘要: 高能核物理实验的主要物理目标是在极端高温度和能量密度条件下研究核物质新形态-夸克-胶子等离子体的产生及演化特性。深入揭示当前物质世界的深层次结构, 以及强核力相互作用在高温、高密多粒子体系中的行为、特性。探寻在此极端条件下的新物理现象。本工作概述我国所参与的主要高能核物理实验国际合作研究项目及其物理目标。介绍我国在国际合作研究中所做出的近期代表性成果, 以及我国在该领域研究中的新物理探究方面所取得的典型成就。并对高能核物理下一步的研究发展方向做出展望。

关键词: 高能重离子碰撞实验物理; QCD 相图与相结构; 夸克-胶子等离子体; 小系统碰撞; 手征磁与手征涡旋; 相干光子产生

中图分类号: O571.53

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC79

1 引言

高能核物理实验的主要物理目标是通过高能重离子碰撞, 在极端高温或高净重子数密度条件下, 研究存在于初期宇宙的原初物质形态-夸克-胶子等离子体(亦称为夸克物质)的产生及演化特性^[1]。夸克物质被认为存在于大爆炸后几微秒(μs)的早期宇宙, 以及当前宇宙中致密星体(如中子星)的内部^[2]。对夸克物质性质的研究, 不仅将有助于了解早期宇宙的演化历史; 还将深刻揭示当前物质世界的深层次结构, 以及强核力相互作用在高温、高密多粒子体系中的行为、特性; 并对现行的宇宙学观测提供重要限定。

本文将介绍当前我国所参与的主要高能核物理实验国际合作研究项目、在国际合作中所做出的贡献和近年来所取得的代表性研究成果。第2节介绍高能核物理实验研究的物理背景和目标, 以及我国所参与的正在进行和将要启动的主要重离子国际合作研究项目。第3节为我国在对夸克物质性质的国际合作中, 利用对夸克物质性质的不同类型的探针信号的实验观测, 对认识其在LHC和RHIC能区的产生、演化和内部输运特性等方面所取得的近期代表性成果。第4节列举了我国在高能核物理实验研究领域的新物理探寻中所取得的典型成果。最后对高能核物理实验国际合作研究做出总结与展望。

2 高能核物理实验

2.1 夸克-胶子等离子体

原子核内的核子(质子与中子)由部分子(夸克和胶子)所构成。它们之间通过强核力交换进行相互作用。其性质由量子色动力学^[3](QCD)描述。QCD是具有 $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$ 对称性的非阿贝尔规范理论。这导致传播强核力相互作用的胶子具有自相互作用, 与传播电磁相互作用的光子不同。这一特性使得真空可被视为部分子所携带的色荷(color charge)的“顺磁介质”^[4]。即在通常条件下, 部分子间相互作用能标(虚度)较小, 真空表现为色导体。其内不存在自由的色荷。夸克、胶子被束缚在强子体系中, 通常称为“夸克囚禁”。而当部分子间相互作用虚度增大时, 其跑动耦合常数减小^[5-6]。部分子将打破强子体系的束缚, 形成由自由的夸克和胶子构成的夸克物质这一核物质新形态。QCD跑动耦合常数随相互作用虚度增大而减小的特性也被称为强核力相互作用的渐进自由性^[7]。

2.2 高能重离子碰撞

基于渐进自由, 通过高能重离子碰撞, 对普通核物质进行不断“加温”或“压缩”, 以达到发生色退禁闭相变的极端条件, 为在实验室条件下对夸克物质性质的研究

收稿日期: 2020-04-28; 修改日期: 2020-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11805079, 11775097); 科技部重点研发计划项目(2018YFE0104700, 2018YFE0104800); 财政部稳定支持研究经费资助项目(WDJC-2019-16); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CCNU18ZDPY04)

作者简介: 张晓明(1983-), 男, 湖北黄冈人, 副教授, 博士, 从事粒子物理与原子核物理研究;

E-mail: xiaoming.zhang@mail.ccnu.edu.cn.

供了独特途径。以极端相对论条件下的高能重离子碰撞为例,如图1所示,其过程可大致分为如下几个阶段[8]。

(a) 将进行对撞的原子核加速到接近于光速,由于洛伦兹收缩效应,在实验室坐标系中高速运动的原子核呈现“薄圆盘”式结构。

(b) 碰撞过程中,它们迅速穿透对方,并把各自携带的巨大能量沉积在极小的碰撞区域内。使碰撞区域内的能量密度急剧上升,达到发生从普通强子物质到色退禁闭的夸克物质的QCD相变阈值。

(c) 随后产生的夸克物质在其内部压力的作用下,不断膨胀、冷却,并最终恢复成为强子气系统。

(d) 随着系统温度的进一步降低,强子气系统解体。形成可被实验所观测的各类末态粒子。

基于产生机制的不同,所被观测的末态粒子可分为两类。

· 源于由碰撞初期、夸克物质形成之前的部分子间硬散射过程中产生的粒子。它们被称为夸克物质的硬探针信号。

· 源于夸克物质组份部分子所形成的粒子。它们直接经受了夸克物质的演化,是夸克物质的软粒子信号。

实验中通过对此两类信号探针的综合研究,以实现对照克物质性质的标定。

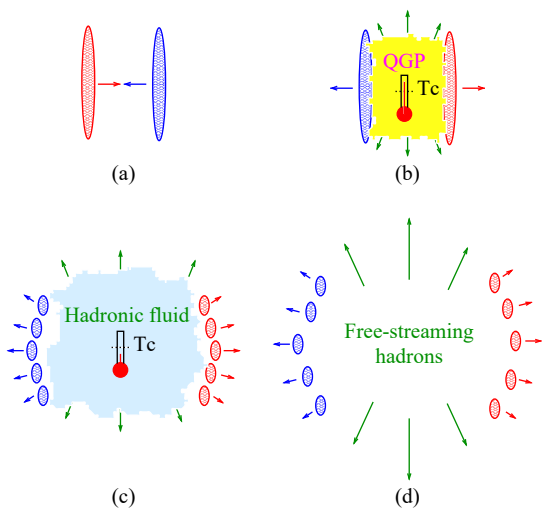


图1 (在线彩图) 极端相对论重离子碰撞过程中各演化阶段示意图[8]

2.3 主要国际合作项目

图2所示的QCD相图,总结了色退禁闭相变随系

统温度(T)和净重子数密度(可由净重子化学势, μ_B ,表征)的演化特性。

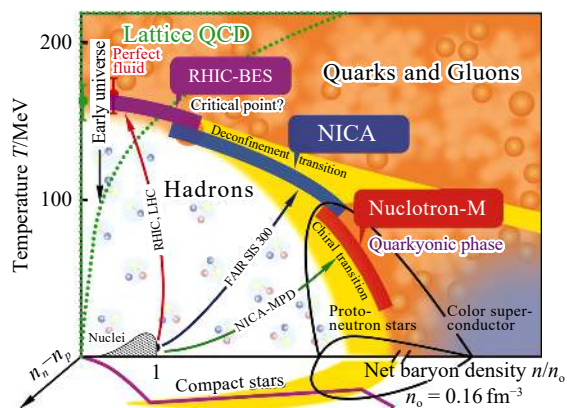


图2 (在线彩图)QCD相图

在欧洲核子研究中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)和美国布鲁克海文国家实验室(BNL)的相对论重离子对撞机(RHIC)上所进行的高能重离子碰撞实验,其每核子-核子两体碰撞质心系能量($\sqrt{s_{NN}}$)分别为几个TeV和几百GeV。在此条件下,碰撞系统将沿相图中的温度轴(纵轴)的路径发生退色禁闭相变。所形成的夸克物质更接近于初期宇宙 $\mu_B \rightarrow 0$ 的条件。我国主要通过参加LHC上的ALICE和LHCb合作组,以及RHIC上的STAR合作组,开展对在此“高温低密”条件下所形成的夸克物质性质的国际合作实验研究^①。主要物理目标是通过对夸克物质的硬探针和软粒子信号的综合研究,理解夸克物质内部的热力学和流体动力学演化特性,揭示硬部分子在夸克物质内的输运特性和强子化特性。在此基础上:精确标定夸克物质内部关键特性参量,如温度、能量密度、粘滞系数与熵的比值(η/s)等,及其演化特性。拓展对在高温、高密多粒子体系中强相互作用核力行为、特性的认识。

当碰撞能量减小时,相变路径将向相图的高重子数密度方向移动。系统的 μ_B 增大,相变过程将演变为通过对核物质的“挤压”实现,这时所形成的夸克物质特性更趋于现今宇宙中的致密星体内部。刚启动运行的德国亥姆霍兹重离子研究中心(GSI)的反质子与离子对撞机(FAIR)和正在筹建的俄罗斯Dubna联合核物理研究所(JINR)的离子同步加速对撞机(NICA),将在 $\sqrt{s_{NN}}$ 为几个到十几GeV的范围内对夸克物质开展研究。主要

^① 我国参与ALICE(A Large Ion Collider Experiment)国际合作组的主要单位有:华中师范大学、中国科学技术大学、复旦大学和中国原子能研究院;参与LHCb实验国际合作组的主要单位有:清华大学、中国科学院大学、华南师范大学、华中师范大学和武汉大学;参与STAR(Solenoidal Tracker at RHIC)实验国际合作组的主要单位有:华中师范大学、复旦大学、湖州师范学院、中国科学院近代物理研究所、中国科学技术大学、山东大学、中国科学院应用物理研究所和清华大学。此外,北京大学和复旦大学参与了RHIC的PHENIX(Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment)国际合作组,正筹划其进一步的探测器升级项目。

物理目标是在此“低温高密”条件下，揭示夸克物质的状态方程及其特性，探索QCD相图在此区域的丰富相结构，并对手征对称性、手征恢复等基础前沿问题予以研究。我国主要通过参与FIAR的CBM实验和NICA的MPD实验，开展相关国际合作研究^①。在上述国际合作研究项目中，我国已经或正在积极投身对其前期大型科学实验装置的设计、研发与建造等多项关键环节，并做出了卓越的贡献。

QCD相图的另一重要特征是，当 μ_B 由大减小的过程中，普通强子物质到夸克物质的相变过程会从一个一阶相变演变为平滑过渡(cross over)。对此相变特性转变临界点的寻找与精确标定，以及对在此临界区域内相变行为、特征的研究，将极大提升对QCD相图、相结构的理解，深入揭示QCD相变特性。这是当前高能核物理领域研究的热点课题，也是RHIC正在进行的能量扫描计划和将要运行的NICA的重要物理目标。

此外，我国在高能核物理领域，也有一系列基于自主研发的已启动或将运行的重离子实验项目^②。它们将在高能核物理国际合作研究的战略框架下，发挥各自特色优势，在基础前沿研究领域，做出与我国国际地位相称的贡献。

3 夸克物质性质研究的近期代表性成果

3.1 末态粒子方位角各向异性

夸克物质自身的演化将导致其内部组份部分子间的集体关联，对此关联行为的研究，可充分揭示夸克物质的状态方程特性及其流体动力学演化特征^[9]。由夸克物质在垂直于碰撞束流方向(横向)上的膨胀行为所导致的其组份部分子的集体运动，将使末态粒子在中等横动量(p_T)区间的产额增强，这被称为径向流(radial flow)效应^[10]。对径向流的研究，不仅能对碰撞系统的运动学冻结温度、膨胀速度等特征参量进行有效标定^[11]，还能对深入理解夸克物质内软-硬过程相互作用特性^[12]以及夸克物质中部分子强子化特性提供重要帮助^[13]。

夸克物质的流体动力学演化同时还受入射原子核初始态部分子分布、逐碰撞事件的涨落行为和其自身内部压力梯度分布各向异性的影响，产生末态粒子动量分布上的方位角各向异性^[14]。对末态粒子方位角相对于碰撞

事件反应平面(平行于束流方向且经过两入射原子核中心的平面)的分布做傅立叶展开(Fourier expansion):

$$E \frac{d^3\sigma}{d^3p} = \frac{d^2\sigma}{2\pi p_T dp_T dy} \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n \cos(\varphi - \Psi_R) \right], \quad (1)$$

φ 和 Ψ_R 分别为末态粒子方位角和事件反应平面角，各阶展开项系数， v_n ，被称为各阶的各向异性流(anisotropic flow)参数^[15]。其中第二项系数， v_2 ，被称为椭圆流(elliptic flow)参数，它反映了在夸克物质演化过程中，由初始位形空间压力梯度的非均匀性导致的末态粒子在垂直和平行于反应平面方向上产额的差别，即末态粒子动量空间方位角分布的非均匀性^[16]。在重离子碰撞末态观测到显著的 $v_2 > 0$ 是判定夸克物质形成的重要判据之一^[17]。更高阶的各向异性流参数则与碰撞系统初条件及其逐事件涨落特性，系统运动学和化学等冻结条件，和夸克物质内部粘滞性、状态方程等信息相关^[18]。

图3为STAR实验在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV的金核-金核(Au+Au)碰撞中所观测的质子(p)、 π 介子、 ϕ 介子和 Ω 超子的 v_2 的 p_T 分布^[19]。对于不同类型的粒子，均在中等 p_T 区间观测到显著的 $v_2 > 0$ 。由于 ϕ 介子较小的相互作用截面，强子气中的相互作用对其 v_2 的影响可忽略^[20]。此处观测到 ϕ 介子的显著 v_2 主要由夸克物质演化过程中部分子层次上的相互作用所导致。这是对RHIC能区夸克物质信号的再次重要确认。

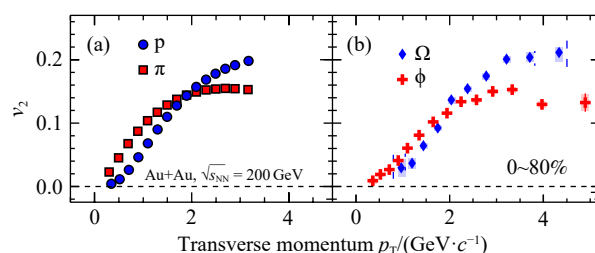


图3 (在线彩图)STAR实验在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV的Au+Au碰撞中所观测的p、 π 、 ϕ 和 Ω 的 v_2 的 p_T 分布^[19]

图4为ALICE在 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV不同对心度的铅核-铅核(Pb-Pb)碰撞中组份夸克数(n_q)标度下所观测的 $\pi^\pm$ 、 $K^\pm$ 、 K_S^0 和 ϕ 介子，以及p和 Λ 重子的 v_2 的 p_T 分布^[21]。由于 v_2 与初始碰撞几何的非对称性相关，

① 我国参与CBM(Compressed Baryonic Matter)实验国际合作组的主要单位有：三峡大学、华中师范大学、清华大学、重庆大学、中国科学技术大学和中国科学院近代物理研究所；参与MPD(Multi-Purpose Detector)实验国际合作组的主要单位有：华中师范大学、湖州师范学院、中国科学院高能物理研究所、中国科学院近代物理研究所、山东大学、中国科学院应用物理研究所、三峡大学、清华大学、南华大学和中国科学技术大学。

② 我国已启动或将运行的主要重离子实验项目有：中国科学院近代物理研究所兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)、高强度重离子加速装置(HIAF)以及刚获批的CEE研究项目。

这将使半对心碰撞中的 v_2 大于对心与边缘碰撞。做为 LHC 能区夸克物质信号的重要判据之一, 图 4 所示的各类粒子不仅在低和中等 p_T 区间具有显著的 v_2 , 且其从对心、半对心到边缘碰撞的演变趋势也与由初始碰撞几何所导致的夸克物质流体动力学演化特性相符。当夸克物质中部分子以联并 (coalescence) 方式进行强子化时, 所形成的末态重子和介子的 v_2 将在中等 p_T 区间符合各自对 n_q 的标度性 [22]。但此标度性在对心和边缘碰撞中只近似成立, 表明除部分子联并外的其它物理机制, 如

径向流效应, 对末态粒子的产生也具有不可忽略的影响。这在低 p_T 区间所观测到的各类粒子的 v_2 呈现出随质量的反序列性特征上得到了映证。在低 p_T 区间, 质量越大的粒子具有更小的 v_2 , 质量相近的 p 与 ϕ 介子的 v_2 值也相似。径向流使末态粒子的方位角分布趋于各向同性, 与 v_2 间存在反关联 [13], 且此效应与粒子质量正相关。即相同条件下, 更重的粒子将获得更大的径向流, 这与在低 p_T 区间粒子间 v_2 呈现的随质量的反序列性特征相符。

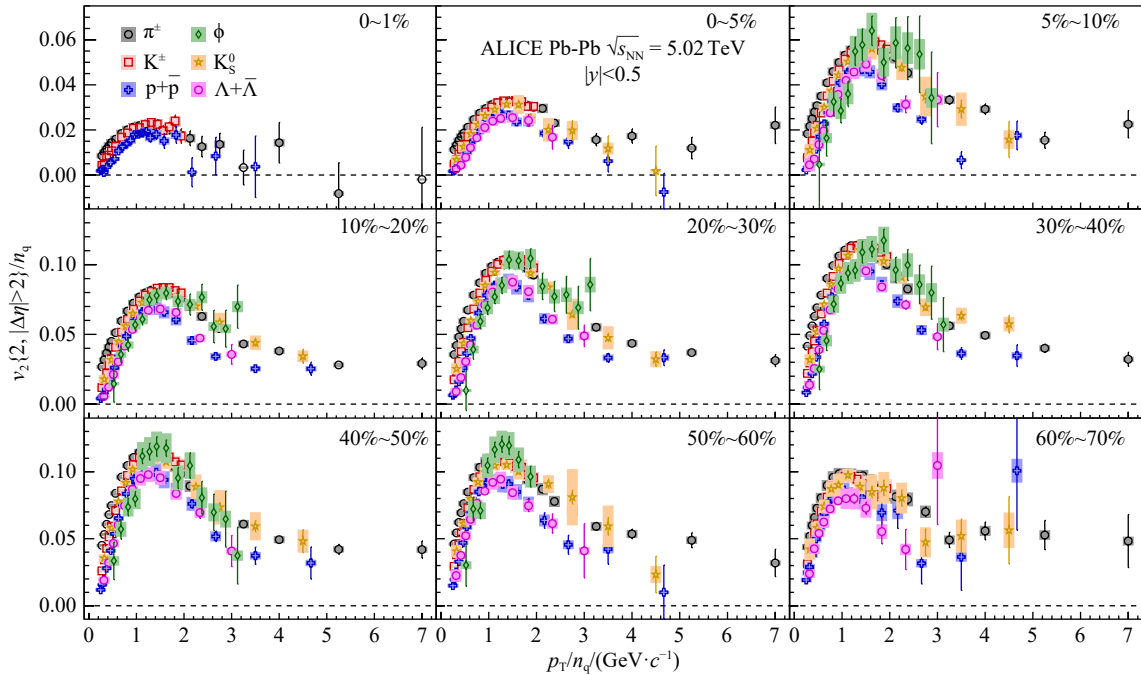


图 4 (在线彩图)ALICE 在 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV 不同对心度的 Pb-Pb 碰撞中 n_q 标度下所观测的 $\pi^\pm$ 、 $K^\pm$ 、 K_S^0 和 ϕ 介子, 以及 p 和 Λ 重子的 v_2 的 p_T 分布 [20]

3.2 喷注核修正与喷注化学组份

喷注 (jet) 是由碰撞初期硬散射过程所产生的出射部分子 (硬部分子) 碎裂所形成的高能粒子束。硬散射过程中的大虚度交换导致其具有较短的形成时间 (formation time), 使得出射硬部分子的产生早于夸克物质的形成 [23]。在随后穿越夸克物质的过程中, 硬部分子将与其发生从 MeV 到 GeV 量级的大的范围的能、动量交换 [24-25]。对喷注的观测, 为在大的虚度标度范围中对夸克物质内强核力相互作用特性的研究, 和对夸克物质内部结构的层析分析提供了独特途径 [26]。在具有 TeV 能标的 LHC 能区, 硬过程相互作用截面比 RHIC 能区高出数个量级 [27], 为对喷注这类夸克物质信号的硬探针的研究提供了优良契机。

由于 QCD 的 $2 \rightarrow 2$ 过程在硬散射中占主导 [28], 基于动量守恒, 其出射硬部分子将产生一对在方位角上“

背对背”的喷注。因此, 可在末态选择一个高 p_T 的触发粒子 (trigger particle), 对喷注进行标记。在触发粒子方位角的同向 (nearside) 和背对方向 (awayside) 上分别测量其与伴随粒子 (associate particle) 间的关联函数, 并对由夸克物质演化所导致的全局关联 (见 3.1 节) 进行减除, 得到喷注粒子的关联函数 [29]。喷注内伴随粒子产额可由对此关联函数方位角分布积分得到。实验中, 可观测在重离子 (AA) 碰撞中与在质子-质子 (pp) 碰撞中 (即认为没有夸克物质产生的条件下) 触发粒子所标记喷注内伴随粒子产额比,

$$I_{AA} = \frac{1/N_{AA}^{\text{trig}} \cdot Y_{AA}^{\text{assoc}}}{1/N_{pp}^{\text{trig}} \cdot Y_{pp}^{\text{assoc}}}, \quad (2)$$

$N_{AA(pp)}^{\text{trig}}$ 和 $Y_{AA(pp)}^{\text{assoc}}$ 分别代表 AA(pp) 碰撞中触发粒子数和其所标记喷注内伴随粒子产额。该比值反映了夸克物质对喷注内粒子的产生的核修正, 是研究硬部分子在

夸克物质内输运特性的重要实验观测量^[30]。

图5为ALICE在 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV最对心的10%的Pb-Pb碰撞中, 触发粒子横动量(p_T^{trig})在8~16 GeV/c范围内, 所观测到的其同向和背对方向上的 I_{AA} 随伴随粒子横动量(p_T^{assoc})的分布^[31]。图中对比了双强子关联(黑)与 π^0 -强子关联(红)的观测结果。高 p_T^{assoc} 区间, 两者在误差范围内一致, 且 π^0 -强子关联将观测拓展至了更低的 p_T^{assoc} 区间。结果显示, 在触发粒子同向上 $I_{AA} > 1$, 这是由于硬部分子在夸克物质内的能量损失^[32-33]使得在Pb-Pb碰撞中触发粒子在其同向所标记的原初硬部分子 p_T 大于在pp碰撞中与其具有相同 p_T^{trig} 的触发粒子所标记的原初硬部分子。在Pb-Pb碰撞中, 触发粒子同向的伴随粒子源自更硬的部分子的碎裂, 故其产额更大。但这一特性并不能较好地被输运模型所描述^[34]。触发粒子背对方向上的 I_{AA} 在高 p_T^{assoc} 区间压低, 而在低 p_T^{assoc} 区间增强。反映了触发粒子背对方向所标记喷注内能量从高 p_T 粒子向低 p_T 粒子的流动特性, 体现了硬部分子在夸克物质内的能量重分布行为。理论研究表明, 仅考虑能量损失效应并不能完全描述实验观测的能量重分布特性^[35-36]。硬部分子与夸克物质介质间的激发效应对低 p_T^{assoc} 区间的增强行为起到关键作用^[37]。

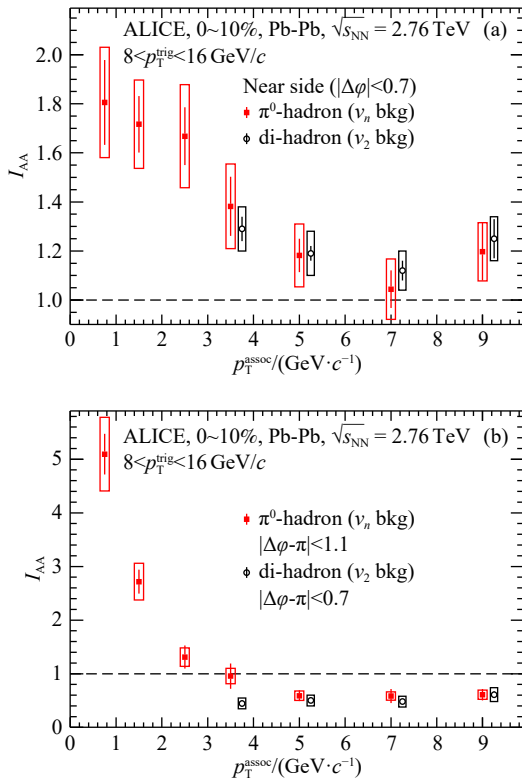


图5 (在线彩图)ALICE在 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV最对心的10%的Pb-Pb碰撞中所观测的触发粒子同向(a)和背对方向(b)的 I_{AA} 随 p_T^{assoc} 的分布^[31]

喷注与介质的激发表现为^[38-39]: 硬部分子将能量沉积到夸克物质中时, 会改变夸克物质内组份部分子在定域内的流体运动行为; 被转移的能量也会受到夸克物质介质的反作用, 趋于参与夸克物质的集体运动演化。此过程的重要特征是大虚度交换的硬过程和小虚度交换的软过程间的相互作用。软过程难以从第一性原理出发而不能运用微扰量子色动力学(pQCD)进行研究。对喷注-介质激发的研究将对理解强相互作用在高温、高密度多粒子体系中小虚度交换条件下的特性和行为提供重要帮助。硬部分子的簇射与夸克物质介质间的相互作用, 也将改变其碎裂特性, 影响喷注内强子的产生^[40]。

图6为ALICE在 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV最对心的10%的Pb-Pb碰撞中, 在 $p_T > 10$ (红)和 > 20 (蓝)GeV/c的喷注内, 所分别观测的奇异重子-介子产额比(Λ/K_S^0)。喷注内的 Λ/K_S^0 对喷注横动量(p_T^{jet})并无显著的依赖性。在中等 p_T 区间, 喷注内的 Λ/K_S^0 的增强相对于单举(inclusive)观测(黑)被抑制。但其较高 p_T 区间的观测结果, 仍存在一定的增强现象。单举观测中的增强源于径向流, 但目前尚不明确喷注内观测到的中等 p_T 区间 Λ/K_S^0 的相对增强是否源于径向流效应。强子化过程的联并机制也可导致中等 p_T 区间的 Λ/K_S^0 的增强。由于径向流效应会产生质量序列性, 而联并机制将对重子和介子产生不同的影响^[41-64](见第3.1节)。因此, 进一步的研究需要对质量相近的重子和介子(如p与 ϕ)在喷注内的产生特性进行观测。这将了解喷注内粒子的产生是否也受径向流或联并效应的影响提供重要帮助。此外, 新近研究还表明, 喷注-介子激发也将对喷注内重子与介子的产生造成影响^[40], 此类研究也将为深入认识喷注-介子激发起到关键帮助。

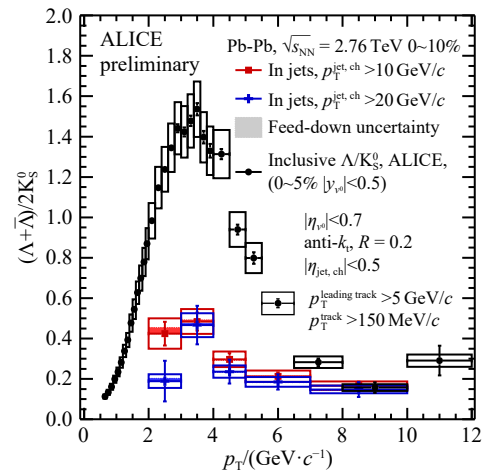


图6 (在线彩图)ALICE在 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV最对心的10%的Pb-Pb碰撞中, $p_T > 10$ 和 > 20 GeV/c的喷注内, 所观测的 Λ/K_S^0

3.3 重夸克的输运特性

作为一类硬部分子, 重夸克(粲、底夸克)产生于夸克物质形成前(见第 3.2 节)。它们较大的质量($m_c \simeq 1.5 \text{ GeV}/c^2$, $m_b \simeq 4.5 \text{ GeV}/c^2$)不仅能更好地保证 pQCD 理论对其产生截面计算的有效性; 同时, 由于其质量远大于夸克物质的温度(约几百 MeV)^[42], 夸克物质组份部分子间相互作用对其产额的贡献可忽略不计。重离子与核子-核子碰撞末态所观测到的重夸克的产生特性的差别均源于核效应。因此, 重夸克是标定夸克物质信号、研究夸克物质性质的极其优良的探针。

在穿越夸克物质的过程中, 重夸克将以弹性(碰撞)和非弹性(诱导胶子辐射)两种方式与夸克物质发生相互作用, 损失能量, 并记录其内部信息^[43–46]。对重夸克能量损失特性及其与夸克物质介质相互作用机制的实验研究将揭示部分子能量损失对色荷和质量的依赖特性^[47]。核压低因子, R_{AA} , 是用以标定能量损失效应的重要实验观测量。其定义为, 在归一到每核子-核子两体碰撞条件下的重离子碰撞中与 pp 碰撞中末态粒子间的产额比,

$$R_{AA}(p_T) = \frac{1/N_{AA}^{ev} dN_{AA}/dp_T}{\langle T_{AA} \rangle \times d\sigma_{pp}/dp_T}, \quad (3)$$

N_{AA}^{ev} 为重离子碰撞事件数, $\langle T_{AA} \rangle$ 为平均核重叠函数^[48], dN_{AA}/dp_T 和 $d\sigma_{pp}/dp_T$ 分别为重离子和 pp 碰撞中末态粒子的 p_T 微分产额与微分产生截面。如果没有任何核效应 $R_{AA} = 1$, 部分子的能量损失将使 $R_{AA} < 1$ 。能量损失越强, R_{AA} 的压低越显著。

此外, 由于能量损失, 将使一部分重夸克将绝大部分能量沉积在夸克物质中。这会导致其在夸克物质中热化, 并参与夸克物质的集体运动。表现为末态重夸克粒子的 $v_2 > 0$ 。在中等和高 p_T 区间, 重夸克粒子的 v_2 还反映了重夸克在夸克物质中强子化过程的联并行为^[51–52], 以及其能量损失对在夸克物质内穿越路径长度的依赖特性^[53–54]。

图 7 为 ALICE 在 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$ 的 Pb-Pb 碰撞中, 0~10% 和 20%~40% 的对心度下, 对前向快度区 ($2.5 < y < 4$) 重夸克衰变缪子 ($\mu^\pm \leftarrow \text{HF}$) 的 R_{AA} ^[49] (a) 和 v_2 ^[50] (b) 的 p_T 分布的观测。在 0~10% 的对心碰撞中观测到了高 p_T 区间 $\mu^\pm \leftarrow \text{HF}$ 的强核压低。由于重夸克在重离子碰撞中的产生同时受核初态效应(如胶子饱和、内禀横动量增宽等)与核末态效应(即夸克物质效应)的影响。为了进一步确认导致此强核压低的物理机制, ALICE 还对 $\mu^\pm \leftarrow \text{HF}$ 在质子-铅核 (p-Pb) 碰撞中的核修正因子进行了观测^[55]。结果显示, p-Pb 碰撞中

$\mu^\pm \leftarrow \text{HF}$ 产额在高 p_T 区间并无显著的核修正。表明 Pb-Pb 碰撞所观测到的强核压低源于夸克物质效应。通过比较压低强度的实验观测与理论预言^[56–62], 进一步表明重夸克在夸克物质中经受了强的能量损失。与此相自洽的是在 20%~40% 的半对心碰撞中所观测到的 $\mu^\pm \leftarrow \text{HF}$ 的 $v_2 > 0$ ^[50]。表明由于显著的能量损失效应, 使得部分重夸克已在夸克物质中热化。图 8 是 STAR 实验组在 $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ 的 10%~40% 半对心 Au+Au 碰撞中所观测到的 D^0 介子在横能 ($m_T - m_0$) 与 n_q 标度下的 v_2 ^[63], 其中 $m_T = \sqrt{p_T^2 + m_0^2}$, m_0 为强子的质量。其结果符合由奇异介子 (K_s^0 、 Λ) 和多奇异重子 (Ξ^-) 的 v_2 所建立的标度性。表明 D^0 介子的 v_2 源于粲夸克在夸克物质中部分子层次的相互作用^[41–64]。此结果是对粲夸克在夸克物质内热化行为的进一步确认。此外, LHC 第一期运行阶段 (2009–2013 年) 的研究还表明, 各类理论模型难以对 D 介子的 R_{AA} 和 v_2 进行同时描述^[65]。在具有更大数据统计量和更高探测精度的 LHC 的第二期运行阶段 (2015–2018 年) 中的进一步研究中发现, 考虑粲夸克的碰撞能量损失与强子化过程的联并行为对同时描述 D 介子的 R_{AA} 和 v_2 , 尤其是低 p_T 区间的 R_{AA} 和 v_2 , 起着关键作用^[66]。

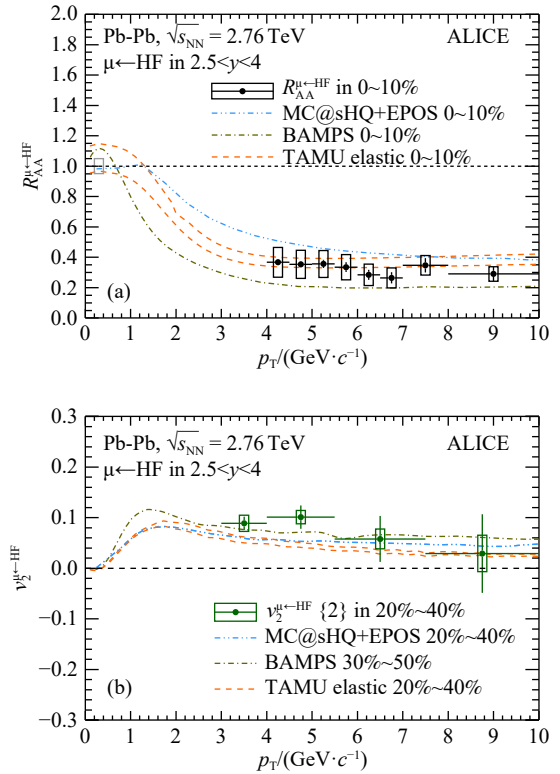


图 7 (在线彩图)ALICE 中所观测到的在 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$ 的 Pb-Pb 碰撞中 0~10% 和 20%~40% 的对心度下前向快度区 ($2.5 < \eta < 4$) 重夸克衰变缪子 ($\mu^\pm \leftarrow \text{HF}$) 的 R_{AA} ^[49] (a) 和 v_2 ^[50] (b) 的 p_T 分布

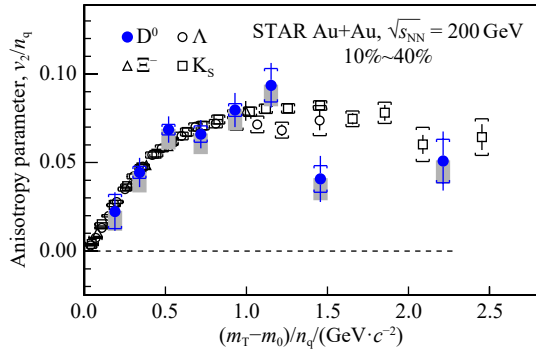


图 8 (在线彩图)STAR 实验组在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 对心度为 10%~40% 的 Au+Au 碰撞中所观测的 D^0 介子在 $m_T - m_0$ 与 n_q 标度下的 v_2 , 及其与奇异 (K_S^0 、 Λ) 与多奇异 (Ξ^-) 强子的比较 [63]

图 9 为 ALICE 在 LHC 第二期运行阶段进一步对源自底夸克强子衰变的非瞬时 D^0 介子和源于粲夸克强子化的瞬时 D^0 介子间 R_{AA} 比值的实验观测 [67]。结果表明, 非瞬时 D^0 介子的 R_{AA} 相对于瞬时 D^0 介子在中等和高 p_T 区间有增强的迹象。暗示了具有更大质量的底夸克在夸克物质中的能量损失小于粲夸克。这是对重夸克能量损失对其质量依赖性的重要实验限定。此 R_{AA} 比值在中等 p_T 区出现的峰值, 一方面可解释为衰变运动学效应, 但也暗示了底夸克在夸克物质中存在一定的热化自由度, 并在强子化过程中具有联并行为。在 RHIC 能区的新近研究中, 观测到了底夸克强子衰变电子的 R_{AA} 相对与粲强子衰变电子的显著增强, 及其在中等 p_T 区间的 $v_2 > 0$ 的现象 [68]。这与 LHC 能区的观测结果自洽, 再次确认了对底夸克在夸克物质中的能量损失特性和热化行为。

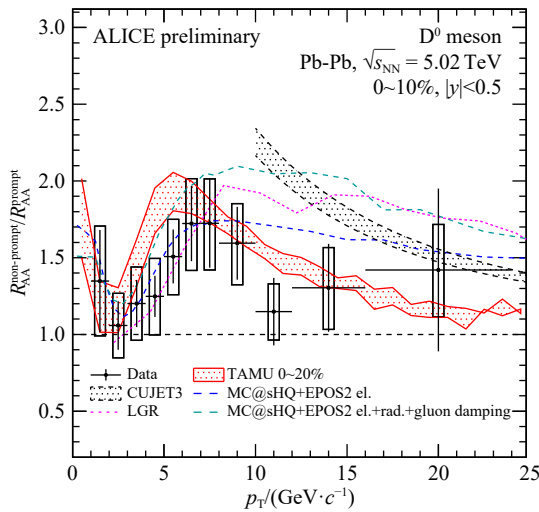


图 9 (在线彩图)ALICE 在 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV 对心度为 0~10% 的 Pb-Pb 碰撞中所观测的非瞬时与瞬时 D^0 介子 R_{AA} 的比值随 p_T 的分布 [67]

在夸克物质内的热核环境中, 奇异夸克和夸克偶极子对 (di-quark) 的产额将增强。使得热化的重夸克分别与它们结合形成奇异重夸克介子 (如 D_s^+) 和重夸克重子 (如 Λ_c^+) 的概率增大。导致在重离子碰撞中, 上述类型粒子与非奇异重夸克介子 (如 D^0 、 $D^\pm$ 等) 的产额比较之 pp 碰撞的增强。图 10 为 STAR 实验组在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 Au+Au 碰撞中对 Λ_c^+ 与 D^0 (a) 和 D_s^+ 与 D^0 (b) 间的产额比的观测 [69]。结果显示, 实验观测均相对于由 Pythia 6 [28] 给出的 pp 碰撞参考基准有明显的增强现象。这为确认聚夸克强子化过程中的联并行为提供了直接的实验判据。在 ALICE 的新进研究中观测到小系统 (pp

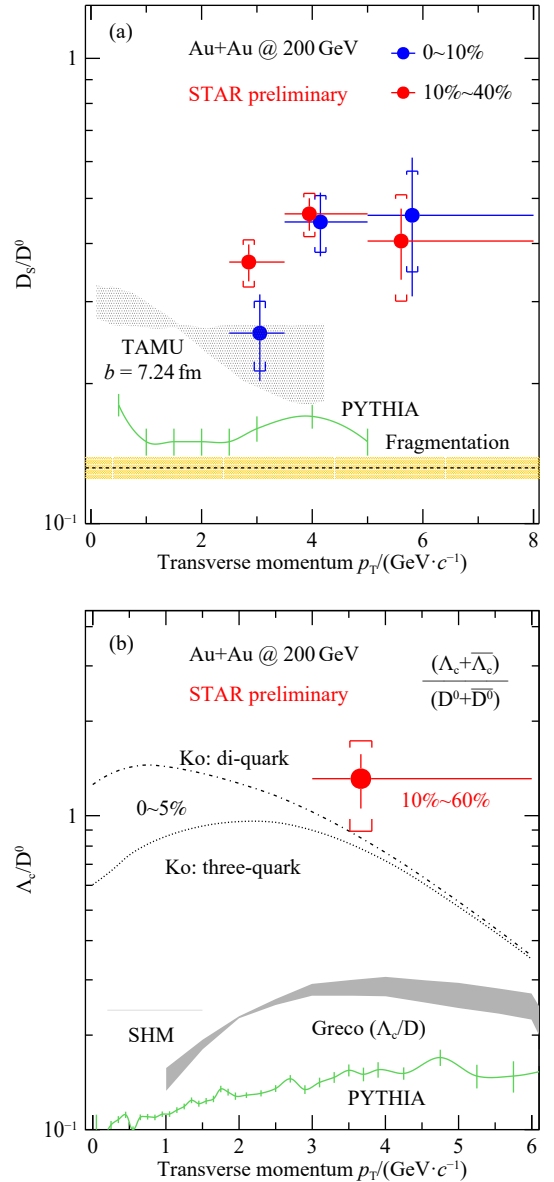


图 10 (在线彩图)STAR 实验组在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 Au+Au 碰撞中所观测的 Λ_c^+ 与 D^0 (a) 和 D_s^+ 与 D^0 (b) 的产额比随 p_T 的分布 [69]

和 pA) 碰撞末态也存在类似于重离子碰撞中的 Λ_c^+ 和 D_s^+ 相对于非奇异 D 介子产额比的增强现象^[70]。表明粲夸克在小系统碰撞中的碎裂函数与正、负电子对撞 (e^-e^+) 和电子-质子 (ep) 对撞实验中的观测存在差异。虽然考虑强子化过程中的色重联机制^[71–73]能对实验观测进行一定程度的描述, 但也不排除小系统末态存在新物理的可能性。关于此内容, 将在第 3.5 节中做进一步介绍。

3.4 重夸克偶素的产生

重夸克偶素(quarkonium) 主要包含由粲夸克对 ($c\bar{c}$) 构成的 J/ψ 和 $\psi(2S)$, 以及由底夸克对 ($b\bar{b}$) 构成的 $\Upsilon(1S)$ 、 $\Upsilon(1S)$ 和 $\Upsilon(3S)$ 。它们在夸克物质中的产生对系统的温度极其敏感^[74], 不仅是夸克物质信号的重要判据^[75], 也被视为精确标定夸克物质内部温度的“温度计”^[76]。早期的观点认为, 重夸克偶素在夸克物质内的色力场中受色德拜屏蔽 (Debye screening) 效应的影响而离解, 导致末态重夸克偶素产额的压低^[77]。随后的研究表明, 如果碰撞能量升高, 系统内重夸克密度将增大, 会使重夸克以重组的方式形成重夸克偶素^[78–79]。此效应将与色德拜屏蔽效应“竞争”, 导致重夸克偶素产额的相对增强。

图 11 中比较了 RHIC 能区 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 Au+Au 碰撞中和 LHC 能区 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV 的 Pb-Pb 碰撞中所观测的 J/ψ 的 R_{AA} 随参与碰撞核子数 (N_{part}) 的分布^[80]。在 RHIC 能区的实验结果显示, J/ψ 的 R_{AA} 随 N_{part} 的增加 (即从边缘到对心碰撞) 而减小。表明随着碰撞对心度的增大, 所形成夸克物质的能量密度和温度升高, 色德拜屏蔽增强, 导致 J/ψ 越来越显著的产额核压低。而 LHC 能区中所观测的 J/ψ 的 R_{AA} 在半对心和对心碰撞中并不随 N_{part} 显著变化。表明在 LHC 能区, 由于其

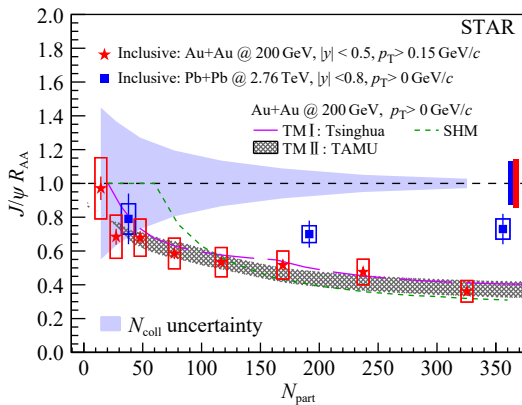


图 11 (在线彩图) STAR 实验组在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 Au+Au 碰撞中所观测的 J/ψ 的 R_{AA} 随参与碰撞核子数 (N_{part}) 的分布^[80], 及其与 LHC 能区在 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV 的 Pb-Pb 碰撞中观测结果的对比

$\sqrt{s_{NN}}$ 高出 RHIC 能区约 15~30 倍, 及其较之 RHIC 能区的 Au+Au 碰撞更重的 Pb-Pb 碰撞体系, 产生的夸克物质的质温和能量密度更大, 且粲夸克的产额也更高, 重组机制对在此条件下 J/ψ 的产生起着重要作用。通过对比 RHIC 和 LHC 能区 J/ψ 的 R_{AA} , 为精确标定不同能区所形成的夸克物质的特性提供了重要的实验限定。

3.5 小系统碰撞中的新物理现象

在传统的研究中, 对 pp 和 pA 这类小系统碰撞的实验研究, 主要是为在重离子碰撞中对夸克物质性质的研究提供参考基准。pp 碰撞对应于没有任何核效应的条件。而对 pA 碰撞研究的目的是了解冷核物质效应 (如核修正的部分子分布函数等) 对末态观测量的影响, 从而在重离子碰撞中对由夸克物质产生的热核效应予以明确标定 (见第 3.3 节)。但在新近的研究中发现, 在小系统碰撞, 尤其是高多重数小系统碰撞的末态, 观测到了一系列新物理现象。这促使对目前所认识的小系统碰撞中的初、末态效应进行重新审视^[81]。图 12 为 ALICE 在不同系统碰撞中所观测的 K_s^0 介子和 Λ 、 $\Xi^\pm$ 以及 $\Omega^\pm$ 超子相对于 $\pi^\pm$ 介子的产额比随中心快度区 ($|\eta| < 0.5$) 平均带电粒子多重数密度 ($\langle dN_{ch}/d\eta \rangle$) 的分布^[82]。结果显示, 不同系统碰撞末态粒子间的产额比随 $\langle dN_{ch}/d\eta \rangle$ 的演化呈现出“平滑过渡”的特性, 且此特性并不能被仅考虑强子化机制的各类模型描述。这暗示了不同系统碰

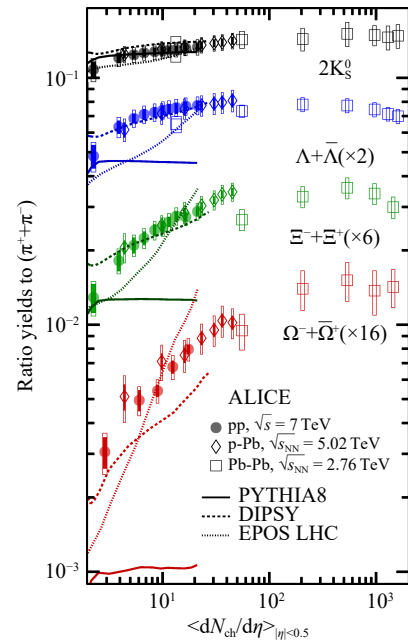


图 12 (在线彩图) ALICE 在不同系统碰撞中所观测的各类强子相对于 $\pi^\pm$ 的产额比随中心快度区 ($|\eta| < 0.5$) 平均带电粒子多重数密度 ($\langle dN_{ch}/d\eta \rangle$) 的分布^[82]

撞末态粒子的产生机制可能随 $\langle dN_{\text{ch}}/d\eta \rangle$ “连续演变”。

在重离子碰撞中，由夸克物质流体动力学演化引起的末态粒子集体关联所导致的 $v_2 > 0$ ，是判定夸克物质信号的重要判据之一（见第3.1节）。但在LHC能区高多重数的pp碰撞[83–86]和p-Pb碰撞[87–91]以及RHIC能区的轻核碰撞[92–94]中也观测到了末态粒子的 $v_2 > 0$ 。且在不同系统碰撞中所观测的 v_2 也体现出了一定的随事件平均带电粒子多重数 ($\langle N_{\text{ch}} \rangle$) 的渐变行为[95]。虽然通过考虑初态部分子间的关联行为能对上述现象进行解释[96–99]，但也不排除高多重数小系统碰撞末态存在流体动力学演化的可能[100–105]。除集体关联外，由喷注碎裂（见第3.2节）或粒子衰变所导致的非流(non-flow)关联行为也可使得末态粒子的 $v_2 > 0$ 。而在小系统碰撞中，非流关联效应较之重离子碰撞更为显著[106]。因此，要确认小系统碰撞中末态粒子间是否存在集体关联行为，对非流关联的有效减除尤为重要。图13为ATLAS实验在pp和p-Pb碰撞中所观测的二阶4粒子关联累积矩 ($c_2\{4\}$) 随 $\langle N_{\text{ch}} \rangle$ 的分布[107]。较之引入粒子间的快度间隔[95]，多粒子关联累积矩能更为有效地扣除非流关联对末态粒子方位角各向异性的影响[108]。对于4粒子关联，其累积矩 ($c_n\{4\}$) 与对应流参数 ($v_n\{4\}$) 的关系为

$$v_n\{4\} = \sqrt[4]{-c_n\{4\}}. \quad (4)$$

若观测到 $c_n\{4\} < 0$ ，则明确表明末态粒子间存在着集体关联行为。在图13所对应的研究中，单个碰撞事件中的关联粒子分别取自于3个独立子事件(subevent, 分别以a、b和c标记)，

$$c_n^{2a|b,c}\{4\} = \left\langle \left\langle e^{in[(\varphi_1^a - \varphi_3^b) + (\varphi_2^a - \varphi_4^c)]} \right\rangle \right\rangle - 2 \left\langle \left\langle e^{in(\varphi_1^a - \varphi_3^b)} \right\rangle \right\rangle \left\langle \left\langle e^{in(\varphi_2^a - \varphi_4^c)} \right\rangle \right\rangle, \quad (5)$$

1~4为关联粒子标号， $\langle \rangle$ 表示对单个事件中的逐关联4粒子以及逐事件求平均。运用公式(5)能进一步压低粒子对(粒子1与3、2与4)间的非流关联。如图13所示，在 $\langle N_{\text{ch}} \rangle > 60$ (40) 的高多重数pp(p-Pb)碰撞中，观测到了显著的 $c_2\{4\} < 0$ ，表明在此条件下末态粒子间确实存在集体关联行为。此外，PHENIX实验组的新近研究结果也暗示了高多重数小系统末态有夸克物质形成的可能性[109]。

图14为ALICE在 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 8.16$ TeV 对心度为0~20%的p-Pb碰撞中所观测的前向快度区 $\mu^\pm$ 的 v_2 随 p_T 的分布[66]。研究中综合运用两粒子关联函数[110]和两粒子累积矩[111]两种方法对 $\mu^\pm$ 的 v_2 进行了测量，且得到了一致的结果。在利用边缘碰撞事件对非流关联进行估计

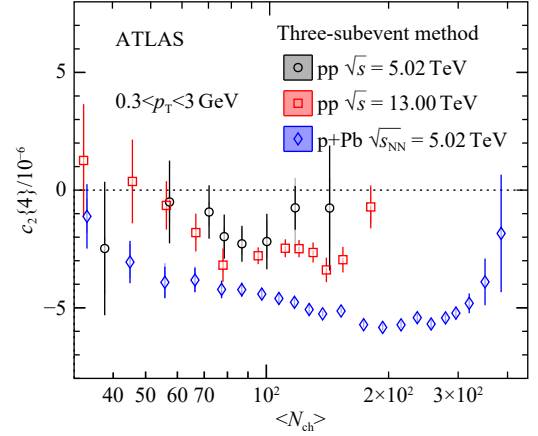


图13 (在线彩图)ATLAS实验在pp和p-Pb碰撞中所观测的末态粒子 $c_2\{4\}$ 随 $\langle N_{\text{ch}} \rangle$ 的分布[107]

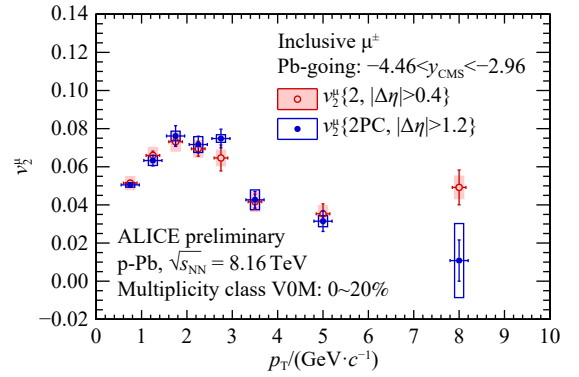


图14 (在线彩图)ALICE在 $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 8.16$ TeV 对心度为0~20%的p-Pb碰撞中所观测的前向快度区 $\mu^\pm$ 的 v_2 随 p_T 的分布[66]

和减除的基础上，研究中还通过引入粒子间的快度间隔对非流关联的影响进行了进一步压低。在ALICE的前向快度区， $p_T > 2$ GeV/c的 $\mu^\pm$ 主要源自于 $\mu^\pm \leftarrow$ HF的贡献[110]。此研究结果确认了在高多重数的p-Pb碰撞末态夸克的 $v_2 > 0$ ，并暗示了重夸克在高多重数小系统碰撞中可能存在着类流体动力学集体关联行为。

4 重离子碰撞中代表性新热点物理课题

4.1 QCD相变临界点的寻找

图2所示的QCD相图的重要特征之一，是当系统的 μ_B 由大变小的过程中，普通强子物质到夸克物质的转化将从一阶退色禁闭相变演变为平滑过渡（见第2.3节）。对此相变特性转变临界点的寻找，将极大扩展对QCD相图、相结构的理解。其最终研究结果也必将成为对基本物理规律再度深入认识的里程碑。

理论研究表明，若此临界点存在，当系统进入临界区域时，系统内粒子关联长度和涨落效应将极具增强，导致末态粒子多重数或 $\langle p_T \rangle$ 在临界点附近的非单调行

为^[112]。在 STAR 实验正在进行的能量扫描项目中的一系列研究均观测到系统序参量的非单调行为^[113–116]，对 QCD 相图中存在此相变特性转变的临界点做出了重要确认。图 15 为 STAR 实验在能量扫描项目中新近观测到的对心度分别为 0~5% 和 70%~80% 的对心与边缘 Au+Au 碰撞中净质子数高阶涨落矩 ($\kappa\sigma^2$) 随 $\sqrt{s_{NN}}$ 的分布。结果显示，在对心度为 0~5% 的对心碰撞中 (即期待有 QCD 相变发生的条件下)， $20 < \sqrt{s_{NN}} < 30$ GeV 的区域内 $\kappa\sigma^2$ 呈现出显著的非单调行为。而此非单调行为并未在对心度为 70%~80% 的边缘碰撞中 (即在期待没有 QCD 相变发生的条件下) 被观测到。表明系统极有可能在 $\sqrt{s_{NN}} = 20 \sim 30$ GeV 的条件下已经进入了 QCD 相变特性转变的临界区域。

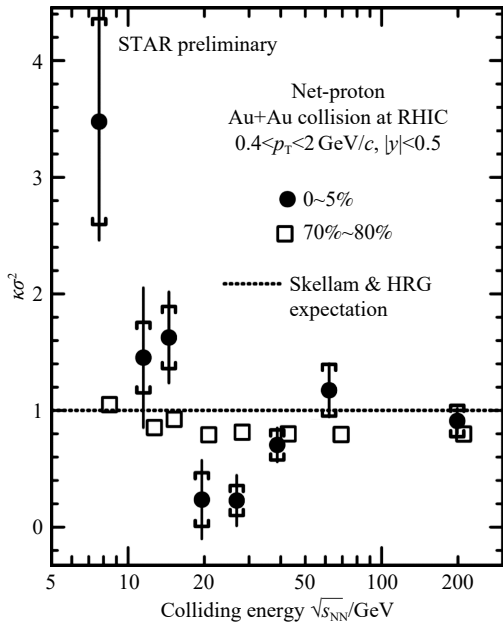


图 15 STAR 实验在能量扫描项目中新近观测到的对心度分别为 0~5% 和 70%~80% 的对心与边缘 Au+Au 碰撞中净质子数高阶涨落矩 ($\kappa\sigma^2$) 随 $\sqrt{s_{NN}}$ 的分布

4.2 手征磁与手征涡旋

半对心的高能重离子碰撞，不仅会导致碰撞系统初始几何空间中的各向异性 (见第 3.1 节)，其旁观体 (即未参与碰撞的核残余部分) 由于其自身所带电荷，在高速运动中将在碰撞初期产生极强的磁场^[117–118]。在此强磁场的作用下夸克的手征性将沿磁场方向发生翻转，被称为手征磁效应。此效应将导致末态所观测的正、反粒子在沿磁场方向上具有相反的各向异性。末态粒子在特定方向上的各向异性由式 (1) 中傅立叶展开的第一项系数， v_1 ，即直接流 (direct flow) 参数表征。因此，手征磁效应将导致末态正、反粒子的 v_1 的差别，并使其 v_1 间的差值 (Δv_1) 随快度单调变化^[119]。

此强磁场产生于碰撞初期，并随时间迅速衰减。对于胶子与轻夸克 (u、d 和 s 夸克)，它们虽然也可产生在碰撞初期的硬散射过程中，但其绝大部分源于夸克物质的组份部分。而重夸克只产生于碰撞初期的硬散射过程中 (见第 3.3 节)。因此，重夸克是对此强磁场效应更为敏感的探针^[120]。图 16 为 STAR 实验在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 Au+Au 碰撞中所观测的 D^0 与 $\bar{D}^0$ 介子的 v_1 (a) 及其对应的 Δv_1 (b) 随快度 (y) 的分布^[121]。结果显示，较之 $K^\pm$ 介子， D^0 与 $\bar{D}^0$ 间的 Δv_1 随 y 存在着显著的单调变化，且与含有磁场效应的理论模型预言相符。此研究对了解强磁场效应及其性质，以及对深入认识夸克物质初始几何特性和重夸克在夸克物质中的其输运特性提供了极为重要的实验限定。

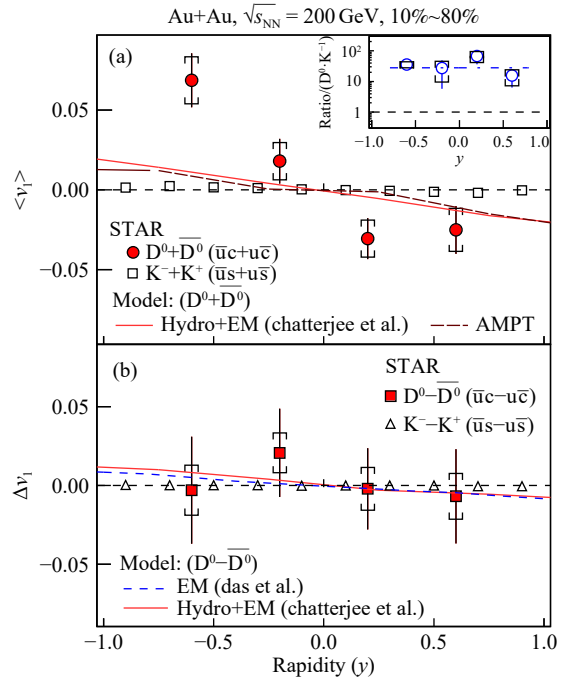


图 16 (在线彩图) STAR 实验在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 Au+Au 碰撞中所观测的 D^0 与 $\bar{D}^0$ 的 v_1 (a) 及其对应的 Δv_1 (b) 随快度 (y) 的分布，并与对 $K^\pm$ 介子观测结果的比较^[121]

此外，半对心碰撞所形成的夸克物质中的强涡旋也将导致其内部部分手征性的变化，被称为手征涡旋效应^[122]。它将导致系统内粒子的整体极化^[123]。对于 Λ 超子而言，其反粒子 ($\bar{\Lambda}$) 将比其具有更强的极化效应^[124]。图 17 为 STAR 实验在 20%~50% 的半对心 Au+Au 碰撞中所观测的 Λ 与 $\bar{\Lambda}$ 超子沿系统角动量方向 ($\hat{J}_{sys}$) 的平均极化强度，

$$\bar{P} = \langle \mathcal{P} \cdot \hat{J}_{sys} \rangle, \quad (6)$$

随 $\sqrt{s_{NN}}$ 的分布^[125]，其中 $\mathcal{P}$ 为极化矢量。结果显示，

$\bar{\Lambda}$ 相对于 Λ 的极化更为显著。这与手征涡旋的理论预言相符。且此效应在后续更为深入的对 p_T 的微分研究中得到了进一步的确认^[126]。此研究不仅为认识在强涡旋场中的手征对称性恢复提供了关键的实验参考,也为对理解夸克物质的流体动力学特性与夸克-胶子间在多粒子体系内的强核力相互作用特性提供了重要的实验限定。

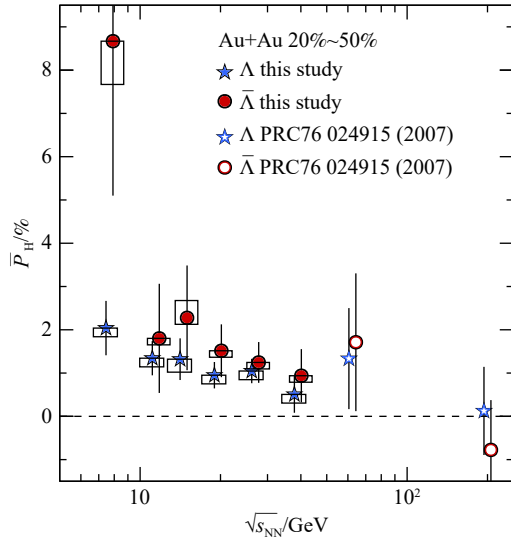


图 17 (在线彩图)STAR 实验在 20%~50% 的半对心 Au+Au 碰撞中所观测的 Λ 与 $\bar{\Lambda}$ 超子的极化强度($\bar{P}$)随 $\sqrt{s_{NN}}$ 的分布^[125]

4.3 轻核的产生研究

作为另一个重要的基本物理对称性,CPT^①反演被认为在所以过程中均守恒^[127-129]。ALICE在对 ${}^3\text{He}$ 与 ${}^3\bar{\text{He}}$ 间的质荷比(mass-to-charge ratio)和对其结合能的研究中验证了在强核力环境中CPT变换的守恒性^[130]。近期STAR实验将此研究进一步推广到了含有奇异夸克组份的 ${}^3_\Lambda\text{He}$ 超核。如图18所示,为STAR实验在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV的Au+Au碰撞中对 ${}^3_\Lambda\text{He}$ 与 ${}^3_\Lambda\bar{\text{He}}$ 间质荷比差值的观测^[131]。研究显示, ${}^3_\Lambda\text{He}$ 与 ${}^3_\Lambda\bar{\text{He}}$ 间质量的

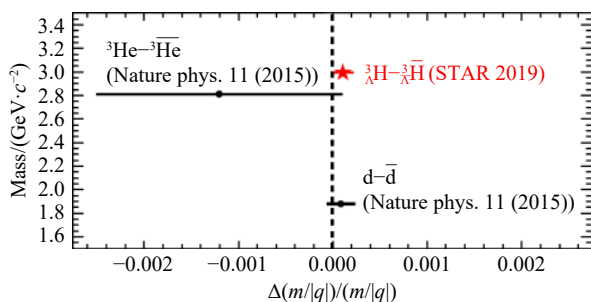


图 18 (在线彩图)STAR 实验在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 Au+Au 碰撞中对 ${}^3_\Lambda\text{He}$ 与 ${}^3_\Lambda\bar{\text{He}}$ 间质荷比差值的观测^[131]

①CPT: 电荷(charge)、宇称(parity)和时间(time)。

相对差值 $\Delta m/m = [1.1 \pm 1.0(\text{stat.}) \pm 0.5(\text{syst.})] \times 10^{-4}$ 。在误差范围内可认为此两者间质量并无差别。符合CPT变换的守恒性。确认在强核力环境中,CPT守恒对于 ${}^3_\Lambda\text{He}$ 超核仍然成立。对 ${}^3_\Lambda\text{He}$ 在核环境中的产生的研究,还将对认识超核与核子间的相互作用特性提供重要的实验限定^[132-133],以及对了解致密星体(如中子星)内部可能存在的奇异夸克物质的性质提供关键帮助^[134]。

4.4 光子相互作用

高能物理实验的主要研究手段是通过加速器所提供的强电磁场,将不同种类的带电粒子或原子核加速到足够高的能量,并将其束流限定在有限区域内,使其对撞。通过研究末态粒子的产生特性,进而了解在高压条件下粒子间的相互作用机制及其特性。而对于如光子这类中性粒子,因为无法通过电磁场对其行为进行有效约束,使得难以对光子-光子对撞开展实验研究。但在重离子碰撞过程中,两个带电原子核相互接近时,将在其间形成极强的电场,从而激发出所对应的场粒子——光子。为实现光子-光子对撞提供了独特的契机^[135]。

ALICE在Pb-Pb碰撞中观测到了 J/ψ 产额在超边缘碰撞中显著的超出(exceed)现象^[136]。此超出产额被确认为是相干光子的产生(coherent photo-production)的贡献,证实了高能重离子碰撞过程将诱发光子-光子对撞。图19为STAR实验在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV的Au+Au碰撞中和 $\sqrt{s_{NN}} = 193$ GeV铀核-铀核(U+U)碰撞中所观测的 J/ψ 的 R_{AA} 随 p_T 的分布^[137]。在极低的 p_T 区间,研究结果显示, J/ψ 产额具有显著的超出。此超出产额远高于由强子相互作用以及冷核物质效应所诱导的产额增强。且其在 $p_T < 0.1$ GeV/c区域内的不变产生截面对碰撞对心度没有依赖性,并与相干光子产生的理论

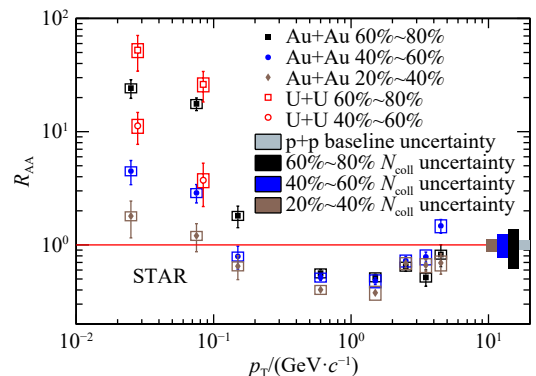


图 19 (在线彩图)STAR 实验在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 的 Au+Au 碰撞中和 $\sqrt{s_{NN}} = 193$ GeV 的铀核-铀核(U+U)碰撞中所观测的 J/ψ 的 R_{AA} 随 p_T 的分布^[137]

预言相符。上述所观测到的超出 J/ψ 的产生特性为深入认识光子-光子碰撞特性提供了实验途径, 也为对认识核修正的部分子分布函数在极小 Bjorken 动量分数 (Bjorken- x) 区间的特性提供了重要实验限定^[138]。

5 总结与展望

本文简要介绍了高能核物理实验研究的物理背景, 以及对我国正在参与的主要国际合作研究项目及其物理目标。列举了我国在 RHIC 和 LHC 能区的国际合作研究中对夸克物质性质研究的近期代表性成果, 以及对重离子碰撞中新物理研究方面近期所取得的典型性成果。

在 LHC 能区观测到不同类型强子 v_2 在低 p_T 区间 n_q 标度的破坏。体现了径向流效应对 v_2 的影响。在 π^0 -强子关联中, 触发 π^0 背对方向上 I_{AA} 在低 p_T 区间的增强表明在此区域内可能存在显著的喷注-介质激发。而此激发效应也极有可能是导致喷注内奇异重子 (Λ)-介子 (K_S^0) 产额比在低 p_T 区间相对增强的原因。在对重夸克的研究中发现, 弹性碰撞能量损失和强子化过程中的联并行为对 LHC 能区, 低和中等 p_T 区间的末态重夸克粒子产生具有重要影响。在低和中等 p_T 区间重夸克粒子的显著的 v_2 , 表明部分粲夸克在夸克物质发生了热化。此热化行为也被 RHIC 能区所观测到的 D^0 与奇异强子的 v_2 在低和中等 p_T 区间的 $m_T - m_0$ 与 n_q 的标度性所证实。在 RHIC 能区, 通过对底夸克强子衰变电子的研究, 还表明质量更大的底夸克也有在夸克物质内发生热化的迹象。通过对比 RHIC 和 LHC 能区对粲夸克偶素 J/ψ 的 R_{AA} 的实验观测, 表明在碰撞能量更高的 LHC 能区, 除了经受由色德拜屏蔽所导致的离解以外, 重组效应也对 J/ψ 的产生的影响也非常重要。

在 RHIC 能区所进行的能量扫描计划中, 所观测到的净质子数涨落高阶矩在 $\sqrt{s_{NN}} = 20 \sim 30$ GeV 区域内的非单调行为, 表明系统在此区间内已进入从一阶相变到平滑过渡转化的相变临界区域。重离子碰撞过程中还会产生极强的磁场以及涡旋效应, 物理中的基本对称性 (如手征对称性) 会在此极端条件下改变或恢复。与此相关的研究为深入认识极端条件下基本物理规律的特性提供了重要手段。通过对 ^3He 在重离子碰撞中的产生的高精度观测, 确认了 CPT 变换的守恒性在强核力环境中对含有奇异夸克组份的超核仍成立。此外, 对超出 J/ψ 的研究, 不仅为研究光子-光子碰撞提供了重要途径, 还将为对极低 Bjorken 动量分数区间的核修正部分子分布函数提供重要的实验限定。

与此同时, LHC 能区的 ALICE 和 LHCb 合作组正

在进行对其探测器的重要升级。ALICE 探测器升级的主要物理目标是对夸克物质的稀有粒子信号进行精确观测, 对夸克物质性质做出更为精确的标定。同时也将对小系统碰撞末态粒子的产生机制做出更为细致的研究, 为此提供更强的实验限定。LHCb 实验将在升级后对重离子碰撞、小系统碰撞以及固定靶碰撞做出更为深入的研究。为深入认识从小系统碰撞到重离子碰撞的演变中导致末态粒子的产生的物理机制做更为详实的研究。并将对核修正的部分子分布函数特性做出更为深入的研究。RHIC 能区的能量扫描第二期运行计划和正在筹建之中的 NICA, 将对 QCD 相图中的相变临界点进行更为严格的标定, 并对临界区域内 QCD 相变的特性做出更为深入的研究。此外, NICA 和已经开始运行的 FAIR 将对 QCD 相图在高净重子数密度条件下的丰富相结构进行深入探索。

参考文献:

- [1] BHATTACHARYA T, BUCHOFF M I, CHRIST N H, et al. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 082001.
- [2] WITTEN E. *Phys Rev*, 1984, D30: 272.
- [3] FRITZSCH H, GELL-MANN M, LEUTWYLER H. *Phys Lett*, 1973, B47: 365.
- [4] BRAUN-MUNZINGER P, WAMBACH J. *Rev Mod Phys*, 2009, 81: 1031.
- [5] GROSS D J, WILCZEK F. *Phys Rev Lett*, 1973, 30: 1343.
- [6] POLITZER H D. *Phys Rev Lett*, 1973, 30: 1346.
- [7] BETHKE S. *Prog Part Nucl Phys*, 2007, 58: 351.
- [8] HANDS S. *Contemporary Physics*, 2001, 42: 209.
- [9] HUOVINEN P, KOLB P F, HEINZ U W, et al. *Phys Lett*, 2001, B503: 58.
- [10] SCHNEDERMANN E, HEINZ U W. *Phys Rev Lett*, 1992, 69: 2908.
- [11] JAISWAL A, KOCH V. arXiv: 150805878, 2015.
- [12] ADAM J, ADAMOVIĆ A D, AGGARWAL M M, et al. *Phys Rev C*, 2016, 93: 034916.
- [13] ADAMCZYK L, ADAMS J R, ADKINS J K, et al. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 062301.
- [14] OLLITRAULT J Y. *Phys Rev*, 1992, D46: 229.
- [15] POSKANZER A M, VOLOSHIN S A. *Phys Rev*, 1998, C58: 1671.
- [16] VOLOSHIN S A, POSKANZER A M, SNELLINGS R. *Relativistic Heavy Ion Physics*[M]. Landolt-Boernstein: Springer-Verlag, 2010: 5.
- [17] AAMODT K, ABELEV B, ABRAHANTES A, et al. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 252302.
- [18] AAMODT K, ABELEV B, ABRAHANTES A, et al. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 032301.
- [19] ADAMCZYK L, ADKINS J K, AGAKISHIEV G, et al. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 062301.
- [20] HIRANO T, HEINZ U W, KHARZEEV D, et al. *Phys Rev*, 2008, C77: 044909.

- [21] ACHARYA S, ACOSTA F T, ADAMOVIĆ D, et al. *JHEP*, 2018, 09: 006.
- [22] MOLNAR D, VOLOSHIN S A. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 092301.
- [23] GYULASSY M, WANG X N. *Nucl Phys*, 1994, B420: 583.
- [24] GYULASSY M, PLUMER M. *Phys Lett*, 1990, B243: 432.
- [25] BAIER R, DOKSHITZER Y L, PEIGNE S, et al. *Phys Lett*, 1995, B345: 277.
- [26] APPEL D A. *Phys Rev*, 1986, D33: 717.
- [27] COLLABORATION A, CARMINATI F, FOKA P, et al. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2004, 30: 1517.
- [28] SJOSTRAND T, MRENN A, SKANDS P Z. *JHEP*, 2006, 05: 026.
- [29] AAMODT K, ABELEV B, ABRAHANTES A, et al. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 092301.
- [30] ZHANG H, OWENS J F, WANG E, et al. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 212301.
- [31] ADAM J. *Phys Lett B*, 2016, 763: 238.
- [32] WANG X N, GYULASSY M, PLUMER M. *Phys Rev*, 1995, D51: 3436.
- [33] PESHIER A. *Phys Rev Lett*, 2006, 97: 212301.
- [34] PAL S, BLEICHER M. *Phys Lett B*, 2012, 709: 82.
- [35] ZAPP K C, KRAUSS F, WIEDEMANN U A. *JHEP*, 2013, 03: 080.
- [36] LIU Z Q, ZHANG H, ZHANG B W, et al. *Eur Phys J*, 2016, C76: 20.
- [37] XU J, KO C M. *Phys Rev*, 2011, C83: 034904.
- [38] CHEN W, CAO S, LUO T, et al. *Phys Lett B*, 2018, 777: 86.
- [39] TACHIBANA Y, CHANG N B, QIN G Y. *Phys Rev*, 2017, C95: 044909.
- [40] CHEN W. The Medium Modification of Jet Fragmentation Function and Baryon-to-meson Ratio in Jet[C]//Quark Matter, November 3-9, 2019, Wuhan, China.
- [41] NASIM M. *Phys Rev C*, 2014, 89: 034909.
- [42] ADAM J, ADAMOVIĆ D, AGGARWAL M M, et al. *Phys Lett B*, 2016, 754: 235.
- [43] DOKSHITZER Y L, KHARZEEV D. *Phys Lett B*, 2001, 519: 199.
- [44] BAIER R, DOKSHITZER Y L, MUELLER A H, et al. *Nucl Phys B*, 1997, 484: 265.
- [45] DJORDJEVIC M, GYULASSY M. *Nucl Phys A*, 2004, 733: 265.
- [46] GOSSIAUX P, AICHELIN J, GOUSSET T, et al. *J Phys G*, 2010, 37: 094019.
- [47] ARMESTO N, DAINESE A, SALGADO C A, et al. *Phys Rev D*, 2005, 71: 054027.
- [48] MILLER M L, REYGERS K, SANDERS S J, et al. *Ann Rev Nucl Part Sci*, 2007, 57: 205.
- [49] ABELEV B, ADAM J, ADAMOVIĆ D, et al. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 112301.
- [50] ADAM J, ADAMOVIĆ D, AGGARWAL M M, et al. *Phys Lett B*, 2016, 753: 41.
- [51] GRECO V, KO C, RAPP R. *Phys Lett B*, 2004, 595: 202.
- [52] ANDRONIC A, BRAUN-MUNZINGER P, REDLICH K, et al. *Phys Lett B*, 2003, 571: 36.
- [53] GYULASSY M, VITEV I, WANG X. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 2537.
- [54] SHURYAK E. *Phys Rev C*, 2002, 66: 027902.
- [55] ACHARYA S, ADAMOVIĆ D, AGGARWAL M M, et al. *Phys Lett B*, 2017, 770: 459.
- [56] NAHRGANG M, AICHELIN J, GOSSIAUX P B, et al. *Phys Rev C*, 2014, 89(1): 014905.
- [57] WERNER K, KARPENKO I, PIEROG T, et al. *Phys Rev C*, 2010, 82: 044904.
- [58] WERNER K, KARPENKO I, BLEICHER M, et al. *Phys Rev C*, 2012, 85: 064907.
- [59] HE M, FRIES R J, RAPP R. *Phys Lett B*, 2014, 735: 445.
- [60] UPHOFF J, FOCHLER O, XU Z, et al. *Phys Rev C*, 2011, 84: 024908.
- [61] FOCHLER O, UPHOFF J, XU Z, et al. *J Phys G*, 2011, 38: 124152.
- [62] UPHOFF J, FOCHLER O, XU Z, et al. *Phys Lett B*, 2012, 717: 430.
- [63] ADAMCZYK L, ADKINS J K, AGAKISHIEV G, et al. *Phys Rev Lett*, 2017, 118(21): 212301.
- [64] CHEN J, MA Y, MA G, et al. *Phys Rev C*, 2006, 74: 064902.
- [65] ANDRONIC A, ARLEO F, ARNALDI R, et al. *Eur Phys J C*, 2016, 76(3): 107.
- [66] TANG S. Recent Results on Azimuthal Anisotropies of Open Heavyflavour Particles with ALICE at the LHC[C]//Quark Matter, November 3-9, 2019, Wuhan, China.
- [67] THOMAS D. Beauty production with ALICE at the LHC[C]//Quark Matter, November 3-9, 2019, Wuhan, China.
- [68] SI F, CHEN X L, ZHANG S H, et al. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(3): 685. (in Chinese)
(司凡, 陈小龙, 张生辉, 等. *原子核物理评论*, 2020, 37(3): 685.)
- [69] ZHOU L. *Nucl Phys A*, 2017, 967: 620.
- [70] INNOCENTI G M. Latest D and Λ_c^+ Results in pp and Pb-Pb Collisions with ALICE at the LHC[C]//Quark Matter, November 3-9, 2019, Wuhan, China.
- [71] ORTIZ VELASQUEZ A, CHRISTIANSEN P, CUAUTLE FLORES E, et al. *Phys Rev Lett*, 2013, 111(4): 042001.
- [72] BIERLICH C, CHRISTIANSEN J R. *Phys Rev D*, 2015, 92(9): 094010.
- [73] BIERLICH C. Colour Reconnections in pp collisions[C]//Parton Radiation and fragmentation from LHC to FCC-ee. [S.l.: s.n.], 2017: 149.
- [74] MATSUI T, SATZ H. *Phys Lett B*, 1986, 178: 416.
- [75] ALESSANDRO B, ALEXA C, ARNALDI R, et al. *Eur Phys J*, 2005, 39: 335.
- [76] SATZ H. *Int J Mod Phys*, 2013, 28: 1330043.
- [77] SATZ H. *J Phys G*, 2006, 32: 25.
- [78] THEWS R L, SCHROEDTER M, RAFELSKI J. *Phys Rev C*, 2001, 63: 054905.
- [79] BRAUN-MUNZINGER P, STACHEL J. *Phys Lett*, 2000, B490: 196.

- [80] ADAM J, ADAMCZYK L, ADAMS J R, et al. *Phys Lett B*, 2019, 797: 134917.
- [81] NAGLE J L, ZAJC W A. *Ann Rev Nucl Part Sci*, 2018, 68: 211.
- [82] ADAM J, ADAMOVIĆ D, AGGARWAL M M, et al. *Nature Phys*, 2017, 13: 535.
- [83] KHACHATRYAN V, SIRUNYAN A M, TUMASYAN A, et al. *JHEP*, 2010, 09: 091.
- [84] AAD G, ABBOTT B, ABDALLAH J, et al. *Phys Rev Lett*, 2016, 116(17): 172301.
- [85] AABOUD M, AAD G, ABBOTT B, et al. *Phys Rev C*, 2017, 96(2): 024908.
- [86] AABOUD M, AAD G, ABBOTT B et al. *Eur Phys J C*, 2017, 77(6): 428.
- [87] CHATRCHYAN S, KHACHATRYAN V, SIRUNYAN A M, et al. *Phys Lett B*, 2013, 718: 795.
- [88] ABELEV B, ADAM J, ADAMOVIĆ D, et al. *Phys Lett B*, 2013, 719: 29.
- [89] AAD G, ABAJYAN T, ABBOTT B, et al. *Phys Rev Lett*, 2013, 110(18): 182302.
- [90] AAD G, ABBOTT B, ABDALLAH J, et al. *Phys Rev C*, 2014, 90(4): 044906.
- [91] KHACHATRYAN V, SIRUNYAN A M, TUMASYAN A, et al. *Phys Rev Lett*, 2015, 115(1): 012301.
- [92] ADARE A, AIDALA C, AJITANAND N N, et al. *Phys Rev Lett*, 2015, 114(19): 192301.
- [93] ADAMCZYK L, ADKINS J K, AGAKISHIEV G, et al. *Phys Lett B*, 2015, 747: 265.
- [94] ADARE A, AFANASIEV S, AIDALA C, et al. *Phys Rev Lett*, 2015, 115(14): 142301.
- [95] ACHARYA S, ADAMOVIĆ D, ADHYA S P, et al. *Phys Rev Lett*, 2019, 123(14): 142301.
- [96] ZHANG C, MARQUET C, QIN G Y, et al. *Phys Rev Lett*, 2019, 122(17): 172302.
- [97] DUSLING K, VENUGOPALAN R. *Phys Rev D*, 2013, 87(9): 094034.
- [98] DUSLING K, VENUGOPALAN R. *Phys Rev D*, 2013, 87(5): 054014.
- [99] DUSLING K, VENUGOPALAN R. *Phys Rev D*, 2013, 87(5): 051502.
- [100] ADAM J, ADAMOVIĆ D, AGGARWAL M M, et al. *Phys Lett*, 2016, B758: 389.
- [101] SCHENKE B, VENUGOPALAN R. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 102301.
- [102] ABELEV B B, ADAM J, ADAMOVIĆ D, et al. *Phys Lett B*, 2014, 728: 25.
- [103] BOZEK P, BRONIEWSKI W. *Phys Rev C*, 2013, 88(1): 014903.
- [104] BOZEK P, BRONIEWSKI W. *Phys Lett B*, 2013, 718: 1557.
- [105] BOZEK P. *Phys Rev C*, 2012, 85: 014911.
- [106] AABOUD M, AAD G, ABBOTT B, et al. *Phys Rev C*, 2018, 97(2): 024904.
- [107] KHACHATRYAN V, SIRUNYAN A M, TUMASYAN A, et al. *Phys Lett B*, 2017, 765: 193.
- [108] BORGHINI N, DINH P M, OLLITRAULT J Y. *Phys Rev C*, 2001, 63: 054906.
- [109] AIDALA C, AKIBA Y, ALFRED M, et al. *Nature Phys*, 2019, 15(3): 214.
- [110] ADAM J, ADAMOVIĆ D, AGGARWAL M M, et al. *Phys Lett B*, 2016, 753: 126.
- [111] BILANDZIC A, CHRISTENSEN C H, GULBRANDSEN K, et al. *Phys Rev C*, 2014, 89(6): 064904.
- [112] STEPHANOV M. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 052301.
- [113] ADAM J, ADAMCZYK L, ADAMS J R, et al. *Phys Rev C*, 2019, 99(6): 064905.
- [114] ADAMCZYK L, ADAMS J R, ADKINS J K, et al. *Phys Lett B*, 2018, 785: 551.
- [115] ADAMCZYK L, ADKINS J K, AGAKISHIEV G, et al. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 032302.
- [116] AGGARWAL M M, AHAMMED Z, ALAKHVERDYANTS A V, et al. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 022302.
- [117] SKOKOV V, ILLARIONOV A, TONEEV V. *Int J Mod Phys A*, 2009, 24: 5925.
- [118] BZDAK A, SKOKOV V. *Phys Lett*, 2012, B710: 171.
- [119] DAS S K, PLUMARI S, CHATTERJEE S, et al. *Phys Lett*, 2017, B768: 260.
- [120] GURSOY U, KHARZEEV D, RAJAGOPAL K. *Phys Rev*, 2014, C89(5): 054905.
- [121] ADAM J, ADAMCZYK L, ADAMS J R, et al. *Phys Rev Lett*, 2019, 123(16): 162301.
- [122] KHARZEEV D, LIAO J, VOLOSHIN S, et al. *Prog Part Nucl Phys*, 2016, 88: 1.
- [123] TAKAHASHI R, MATSUO M, ONO M, et al. *Nature Phys*, 2016, 12: 52.
- [124] BECATTINI F, KARPENKO I, LISA M, et al. *Phys Rev*, 2017, C95(5): 054902.
- [125] ADAMCZYK L, ADKINS J K, AGAKISHIEV G, et al. *Nature*, 2017, 548: 62.
- [126] ADAM J, ADAMCZYK L, ADAMS J R, et al. *Phys Rev Lett*, 2019, 123(13): 132301.
- [127] SCHWINGER J S. *Phys Rev*, 1951, 82: 914.
- [128] LUDERS G. *Annals Phys*, 1957, 2: 1.
- [129] BELL J S. *Proc Roy Soc Lond*, 1955, A231: 479.
- [130] ADAM J, ADAMOVIĆ D, AGGARWAL M M, et al. *Nature Phys*, 2015, 11(10): 811.
- [131] ADAM J, ADAMCZYK L, ADAMS J R, et al. *Nature Phys*, 2020, 16(4): 409.
- [132] LATTIMER J, PRAKASH M. *Science*, 2004, 304: 536.
- [133] ABELEV B I, AGGARWAL M M, AHAMMED Z, et al. *Science*, 2010, 328: 58.
- [134] CHATTERJEE D, VIDANA I. *Eur Phys J*, 2016, A52(2): 29.
- [135] BERTULANI C A, KLEIN S R, NYSTRAND J. *Ann Rev Nucl Part Sci*, 2005, 55: 271.
- [136] ADAM J, ADAMOVIĆ D, AGGARWAL M M, et al. *Phys Rev Lett*, 2016, 116(22): 222301.
- [137] ADAM J, ADAMCZYK L, ADAMS J R, et al. *Phys Rev Lett*, 2019, 123(13): 132302.
- [138] ESKOLA K J, PAAKKINEN P, PAUKKUNEN H, et al. *Eur Phys J C*, 2017, 77(3): 163.

Experimental Overview of Recent Research Highlights on International Cooperation in High-energy Nuclear Physics

ZHANG Xiaoming¹⁾, ZHOU Daicui

(College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430019, China)

Abstract: Aim of the high-energy nuclear physics experiments is to investigate the production and evolution properties of a new nuclear matter state - the Quark-Gluon Plasma under the extreme conditions of high temperature and energy density. This study brings the unique insight into understanding the deep structure of the current material world and the properties of the strong nuclear force in such ultra hot and dense multi-particle system. It also provides the important opportunity to explore new physics phenomenons under such extreme conditions. In this paper, the main international high-energy nuclear physics experimental projects that China has participated and their physics goals are briefly outlined. The recent highlights of the achievements on investigating the properties of the Quark-Gluon Plasma and on exploring the new physics phenomenons in high-energy heavy-ion collisions made by China are overviewed. The perspective on the experimental research projects for high-energy nuclear physics to the future is given as well.

Key words: high-energy heavy-ion collision experiment; QCD phase diagram and phase structure; Quark-Gluon Plasma; small system collision; chiral magnetic and chiral vortical effect; coherent photo-production

Received date: 28 Apr. 2020; **Revised date:** 16 May 2020

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11805079, 11775097); National Key Research and Development Program of China(2018YFE0104700, 2018YFE0104800); Ministry of Finance Stably Support Research Funds of China(WDJC-2019-16); Fundamental Research Funds for the Central Universities of China(CCN18ZDPY04)

1) E-mail: xiaoming.zhang@mail.ccnu.edu.cn.