

LHCb实验上核物质效应的重味探针研究进展

陈缮真¹, 朱相雷^{2*}

1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

2. 清华大学工程物理系, 北京 100084

* 联系人, E-mail: zhux@tsinghua.edu.cn

2024-09-01 收稿, 2024-11-27 修回, 2024-12-03 接受, 2024-12-04 网络版发表

国家自然科学基金(12061141007)资助

摘要 相对论重离子碰撞实验的首要物理目标是产生极端高温高密的夸克胶子等离子体新物态并研究其性质. 重味强子是碰撞中产生的热密核物质性质和强相互作用非微扰特性的重要实验探针. 与之相关的多个实验观测量, 比如核修正因子和粒子产额比, 表现出对热密核物质效应的敏感性. 然而, 基于它们来定量提取热密核物质性质还需要对碰撞中的冷核物质效应进行定量限定. LHCb实验参与了LHC上重离子碰撞数据获取, 在其独特的前向快度区系统地测量了质子-铅核等碰撞中多种粲、底强子和重夸克偶素的核修正因子以及多种重味强子的产额比, 对核物质效应和重味夸克强子化机制进行了深入研究. 本文将介绍LHCb实验在这些研究中取得的新进展和未来研究方向.

关键词 大型强子对撞机, LHCb实验, 相对论重离子碰撞, 夸克胶子等离子体, 核物质效应, 重味

高能物理的核心任务是探索物质的基本组成及其相互作用. 20世纪粒子物理学实验已在核子等强子内部发现了组成物质世界的基本粒子——夸克. 但是实验上还从未发现脱离强子束缚的自由夸克, 这被称为“夸克禁闭”. 量子色动力学(quantum chromodynamics, QCD)是描述夸克之间强相互作用力的基本理论, 虽然它无法严格解释“夸克禁闭”现象, 但其格点规范理论预言当体系的温度达到约 1.8×10^{12} K时, 夸克和胶子(强相互作用的规范玻色子)将解除禁闭而直接形成一种新的物质形态——夸克胶子等离子体(quark-gluon plasma, QGP)^[1]. 该热密新物态可能存在于早期宇宙或者致密天体内部. 李政道先生等人在20世纪70年代提出, 可通过相对论性(高能)重离子碰撞在原子核大小的空间内改变真空性质, 实现对称性恢复和解禁闭相变, 产生QGP^[2-4]. 此后, 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)和欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)相继于2000和2010年开始进行相对论重离子碰撞实验, 目的是在实验室中产生QGP并研究它的性质.

重离子碰撞中产生的QGP火球体积与重核相当且快速膨胀冷却, 在约10 fm/c之内就将强子化为大量末态强子并被探测器记录, 实验上需要在末态粒子中寻找对碰撞早期QGP物态敏感的观测量来研究QGP的产生和性质. RHIC和LHC上已获得了碰撞中产生QGP新物态的多项实验证据, 目前正在开展QGP物态性质的定量实验研究^[5]. 重味夸克(c和b)具有较大质量, 只能在碰撞早期的部分子(夸克或胶子)硬散射过程中产生. 然后它们经历热密QGP介质的整个膨胀演化过程并与其中的部分子发生频繁散射, 最后由于穿出介质或者跟随QGP介质一起发生强子化而转变为重味强子. 这些重味强子的动量分布、产额或者产额比值等都携带

引用格式: 陈缮真, 朱相雷. LHCb实验上核物质效应的重味探针研究进展. 科学通报, 2025, 70: 70–82

Chen S, Zhu X. Advances in the studies of nuclear matter effects using heavy-flavor particles as probes at LHCb (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 70–82, doi: 10.1360/TB-2024-0938

着丰富的热密QGP物态的信息,是定量研究QGP物态性质的敏感实验探针^[6].

高能质子-质子碰撞中也会产生重味强子,但由于质子体积较小,一般认为该碰撞不会产生热密QGP核物质.因此,可以将核-核(A-A)碰撞中重味强子的横动量(p_T)谱与相同能量下质子-质子碰撞中的微分截面进行对比来研究热密核物质效应,可定义核修正因子^[7]

$$R_{AA}(p_T) \equiv \frac{dN_{AA}(p_T)/dp_T}{\langle N_{coll} \rangle / \sigma_{pp}^{inel} \cdot d\sigma_{pp}(p_T)/dp_T}, \quad (1)$$

其中, $\langle N_{coll} \rangle$ 是重离子碰撞中平均的核子-核子非弹性碰撞数, σ_{pp}^{inel} 是该能量下的质子-质子非弹性散射截面.如果重离子碰撞中没有产生QGP,核-核碰撞可视为核子-核子碰撞的叠加,核修正因子应该等于1.而RHIC和LHC的重离子碰撞实验中观测到粲和底强子或它们的衰变产物的 R_{AA} 在高 p_T 都小于1(也称产额压低)^[7,8],表明初始高 p_T 的重味夸克在穿过QGP介质时由于频繁的部分子散射而损失了能量.重味夸克输运模型可以利用这些测量结果提取重味夸克在QGP介质中的空间扩散系数^[9-11].实验上还发现 J/ψ 和 Υ 等重夸克偶素也存在产额压低,且压低程度随束缚能减小而增大,呈现“顺次熔解”现象^[12-14],这是由于QGP中的色屏蔽效应或部分子散射导致束缚能较小的态更容易在其中发生熔解^[6].另一方面,初始产生的重味夸克和反夸克在与热密介质中的部分子频繁散射后也可能在相空间上接近而重新产生束缚态,这会增加重夸克偶素产额,因此测量到的核修正因子反映了两种机制竞争的结果^[15,16].

基于重味探针的热密核物质效应的定量研究依赖于细致的理论计算.这些理论通常需完整考虑初始硬部分子散射过程中重味夸克对的产生、重味夸克或夸克对在热密介质中的输运、重味夸克强子化和重味强子与其他强子的散射等过程^[6].为了精确提取热密介质的输运性质,还必须对硬散射初态、重味夸克强子化机制和强子散射过程对核修正因子等实验观测量的影响进行深入的实验和理论研究.通常采取的方法是在相同能量的质子-核(p-A)碰撞中测量重味强子的核修正因子,定义为

$$R_{pA}(p_T) \equiv \frac{d\sigma_{pA}(p_T)/dp_T}{A \cdot d\sigma_{pp}(p_T)/dp_T}, \quad (2)$$

其中, A 是原子核的质量数.因为质子-核碰撞的反应系统尺寸较小,一般认为不会产生退禁闭的QGP物态,但反应初态中有核参与,反应末态粒子多重数相对较大,

可在其中对初态、强子化以及强子散射等阶段的冷核物质效应进行研究.近年来,人们在高多重数的质子-质子和质子-核碰撞(统称为小系统碰撞)中也观测到了集体流等多种QGP信号,目前正在这些小系统碰撞中寻找更多的热密核物质效应的证据来判定是否产生了QGP“液滴”,这已成为高能核物理领域重要的研究课题之一^[5].

LHCb是LHC上4个大型物理实验之一,设计用来进行味物理、CP破坏和超出标准模型新物理寻找等粒子物理实验研究^[17,18].有别于其他LHC实验,LHCb探测器专为底强子测量优化,是一个单臂前向探测器.它有着独特的前向赝快度覆盖($2 < \eta < 5$),并有着极高的顶点重建精度、极佳的粒子鉴别和缪子探测触发系统.它还具有快速的数据获取和在线事例重建能力,使得复杂的重味强子重建和筛选可以在线进行.这使得LHCb实验非常擅长进行底和粲强子以及重夸克偶素测量.LHCb实验自运行以来,在LHC的第一和第二运行阶段(2010~2018年)收集了总积分亮度约为 9 fb^{-1} 、质心系能量最高为13 TeV的质子-质子(p-p)对撞数据,并参与了重离子碰撞数据获取,为LHC上其他重离子对撞实验在前向赝快度测量区间提供了重要补充,并在重味强子测量方面也展现出其独特性.

LHCb实验分别在2013和2016年共采集了两次p-Pb对撞数据,核子-核子质心系能量($\sqrt{s_{NN}}$)分别是5.02和8.16 TeV,采集到的数据的积分亮度分别是2和34 nb^{-1} .考虑到质子-铅核碰撞的前后向不对称性,LHCb上的p-Pb对撞有两种模式,分别是质子束流由顶点探测器射向LHCb的前向(Forward)对撞模式和铅核束流由顶点探测器射向LHCb的后向(Backward)对撞模式.由于质子和铅核束流能量不同,核子-核子质心系在实验室系下的快度为0.465(以质子束流方向为正).因此,在前向和后向对撞模式下,p-Pb对撞核子-核子质心系下的快度(记为 y^*)测量区间分别是 $1.5 < y^* < 4.0$ 和 $-5.0 < y^* < -2.5$.LHCb实验还在2015和2018年采集了两次Pb-Pb对撞数据,核子-核子质心系能量是5.02 TeV,采集到的数据的积分亮度分别是10和210 μb^{-1} ,末态重味强子测量的快度区间为 $2.0 < y < 4.5$.除对撞外,LHCb也进行了固定靶重离子碰撞取数.LHCb实验具有用于刻度亮度测量的气体靶系统(System for Measuring the Overlap with Gas, SMOG)^[19].利用从顶点探测器射入LHCb的单侧束流(质子或铅核),在对侧无束流时与充入顶点探测器的惰性气体核(He/Ne/Ar)反应,可获得核子-核子

质心系能量在55~110 GeV之间的重离子碰撞数据。

本文将介绍LHCb实验近年来基于质子-铅核、铅核-铅核和质子-质子对撞数据,在核物质效应的重味粒子探针研究中取得的最新进展。首先介绍粲强子和底强子产生过程中的初态核物质效应研究进展,然后讨论重夸克偶素产生过程中的核物质效应,最后介绍重味夸克强子化过程的核物质效应实验研究结果。

1 粲和底强子产生中的初态核物质效应研究

初态核物质效应主要源于原子核内部的夸克-胶子结构与孤立核子存在差别,这种效应可用核部分子分布函数(nuclear parton distribution functions, nPDFs)来定量描述^[20~22]。此外,还可能多重散射^[23]和能损^[24]等其他初态核物质效应。在共线因子化理论框架下, nPDFs是部分子动量分数 x 和部分子散射过程的动量转移 Q^2 的函数。与孤立核子相比,在小 x 处($x \leq 0.1$),部分子密度由于核遮蔽效应而减少;当 x 在0.1~0.3附近时,部分子密度由于反遮蔽而变大^[25]。nPDFs随 x 的这一变化规律可表现在质子-核碰撞末态不同快度和横动量区间的粒子产生截面中。 x 和 Q^2 这些部分子层次的物理量不能在碰撞中直接测量,但实验上可用末态粒子的运动学变量近似,可定义

$$x_{\text{exp}} \equiv 2 \frac{\sqrt{p_T^2 + M^2}}{\sqrt{s_{\text{NN}}}} e^{-y^*}, \quad (3)$$

$$Q_{\text{exp}}^2 \equiv p_T^2 + M^2, \quad (4)$$

其中, p_T 和 M 是末态粒子的横动量和质量。LHCb独特的前向快度覆盖、最低至0的横动量测量范围、固定靶碰撞以及多种粒子的测量能力,使得它可在非常大的 x 和 Q^2 范围探测核部分子分布函数(图1)。尤其是前向质子-铅核碰撞可对低 Q^2 的小 x 区域进行探测(最低至约 10^{-5} ~ 10^{-6}),是寻找胶子数量达到饱和的色玻璃凝聚(color glass condensate, CGC)^[26]这一QCD物态的理想场所。

重味夸克因其较大的质量只在初态部分子硬散射过程中产生,可用微扰QCD计算,理论计算不确定性小,因此重味强子核修正因子是核部分子分布函数尤其是胶子nPDF的敏感实验探针。LHCb探测器擅长进行粲和底强子重建,其高精度的顶点重建能力使得它能够有效区分碰撞主顶点和粲、底强子衰变的次级顶点,显著提高信噪比的同时还能区分出直接产生于碰撞的瞬发(prompt)粲强子。LHCb实验在2017年发表

了 $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$ TeV质子-铅核碰撞的瞬发 D^0 介子核修正因子的测量结果^[27](图2(a)和(b))。在后向快度区间内($-4.0 < y^* < -2.5$, 图2(a)), D^0 介子核修正因子在整个测量的横动量区间(< 10 GeV/c)内均约为1。但在前向快度区间($2.5 < y^* < 4.0$, 图2(b)),该因子在整个测量的横动量区间都小于1,且随横动量减小到0而降低至约0.6,清晰显示粲强子产生过程中核物质效应的存在。这些数据与基于核部分子分布函数^[20,28]的HELAC理论计算^[29~31]以及两种基于CGC理论的QCD计算^[32~34]进行了比较,其中HELAC计算采用了领头阶和次领头阶EPS09^[20]和nCTEQ15^[28]三种nPDFs。在后向快度区,实验数据与基于EPS09的HELAC理论计算符合较好;在前向快度区,不同nPDFs的HELAC理论和两个CGC理论的计算结果与实验数据在误差范围内符合得都比较好,但LHCb数据的误差显著小于理论计算,能够为小 x 区域的nPDFs提供较强的实验限制。理论家针对该LHCb的 D^0 实验结果对nPDFs进行了贝叶斯重权分析,显著降低了nPDFs在小 x 区域的不确定性,发现在铅核的小 x 区域($\sim 10^{-5}$)存在胶子遮蔽^[35]。

最近, LHCb实验发表了 $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$ TeV质子-铅核碰撞的瞬发 D_s^+ 和 D^+ 介子的核修正因子^[36](图2(c))。在前向快度区,新数据与 D^0 介子的结果符合较好,表明该区域 D 介子压低是由与粲夸克强子化无关的初态核物质效应导致。这些数据与基于最新的EPPS16^[35,37]和nCTEQ15的nPDFs的HELAC理论计算以及CGC理论计算都符合较好,进一步确认该压低主要源于铅核内小 x 区间的胶子遮蔽这一初态部分子分布的改变。值得注意的是,在后向快度区间, D^+ 介子的核修正因子在整个横动量区间都系统地低于 D_s^+ 介子(达到1~3个标准偏差),预示该快度区可能还存在与粲夸克强子化相关的核物质效应,这将在第3节进一步讨论。

LHCb实验近期发表了第二运行阶段获取的 $\sqrt{s_{\text{NN}}}=8.16$ TeV质子-铅核碰撞的瞬发粲强子产生测量结果^[38,39]。更高的数据统计量使得这些结果成为目前最精确的重离子碰撞粲强子测量,可以细致研究粲强子核修正因子随快度和横动量的变化,并在更小的 x 下精确检验最新的nPDFs以及CGC的冷核物质理论计算。其中8.16 TeV的瞬发 D^0 核修正因子实验结果^[38](图3),在前向快度区,与5.02 TeV的 D^0 数据基本一致;但在后向快度区,新结果稍低,这是由于8.16 TeV能量下相同 D^0 运动学区间对应的初态部分子的 x 更小(见式(3)),且

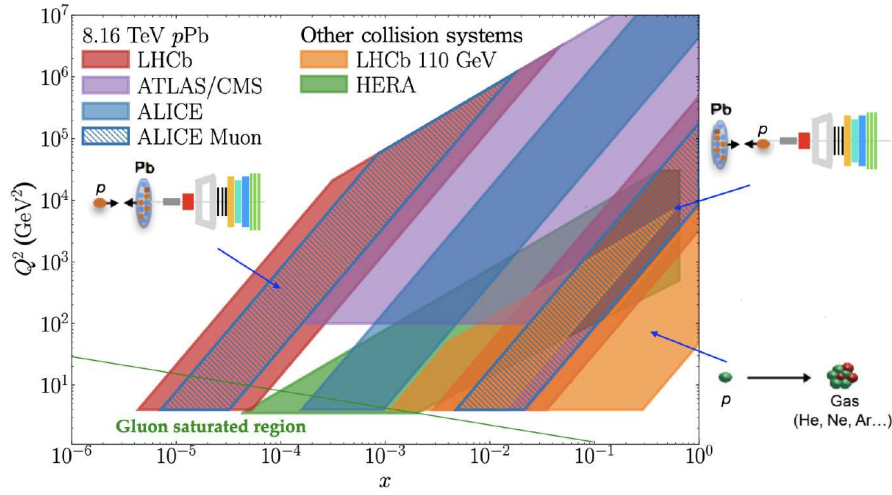


图 1 LHCb实验上 $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV质子-铅核碰撞以及 $\sqrt{s_{NN}}=110$ GeV质子-气体靶碰撞实验对核部分子分布函数的 x 和 Q^2 探测范围

Figure 1 LHCb acceptance for nuclear parton distribution functions in terms of Bjorken- x and Q^2 for $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV proton-lead collisions and for $\sqrt{s_{NN}}=110$ GeV proton gas-target experiments

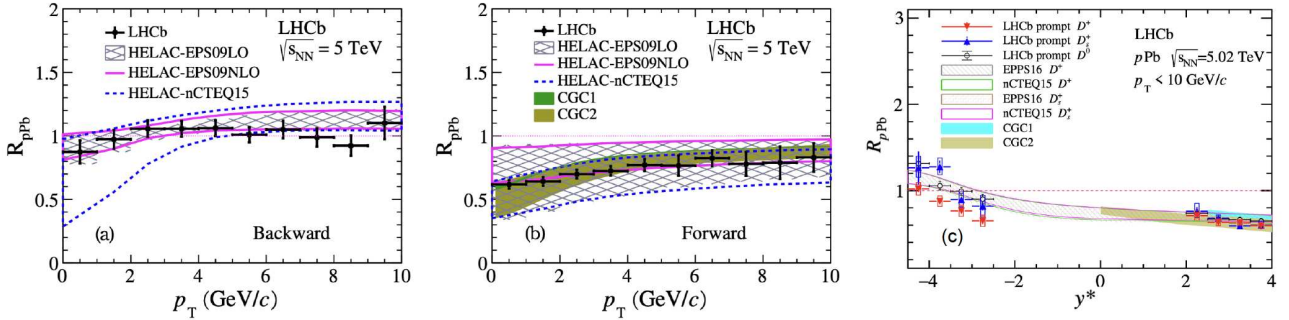


图 2 $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV质子-铅核碰撞中瞬发 D^0 在后向(a)和前向(b)快度区的核修正因子随横动量的变化, 以及瞬发 D_s^+ 、 D^+ 和 D^0 核修正因子随快度的变化(c), 并与采用不同核部分子分布函数^[20,28,35,37]的HELAC理论计算^[29-31]以及两种CGC理论计算^[32-34]结果做比较。图片来自参考文献^[27,36]

Figure 2 The nuclear modification factor for prompt D^0 mesons as a function of transverse momentum in backward (a) and forward (b) rapidities in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, and the nuclear modification factors for prompt D_s^+ , D^+ , and D^0 as a function of rapidity (c), compared with the HELAC calculations^[29-31] with different nPDFs^[20,28,35,37] and two different CGC calculations^[32-34]. Images from Refs. ^[27,36]

nPDF相比PDF在该 x 范围(接近反遮蔽区)随 x 增大而迅速增大^[38]。基于最新的nPDFs的理论计算, 在前向快度区, 总的来说与数据符合较好, 但在低 p_T ($p_T < 1$ GeV/c)略高于实验数据。这可能预示在小 x 处存在更强的胶子遮蔽效应, 也可能暗示存在其他初态核物质效应, 例如完全相干能损(fully coherent energy loss, FCEL)^[24], 进一步压低了较低 p_T 的粲强子产生。另一方面, CGC理论在其适用的前向低 p_T 区(对应小 x 和低 Q^2 的胶子饱和区)与实验数据符合较好。在后向快度区, 中低 p_T 下的实验数据与nPDFs计算符合较好; 但在高 p_T (> 6 GeV/c)和 $-3.5 < y^* < -2.5$ 快度区, 数据以2.0~3.8个标准偏差低于

nPDFs理论计算结果, 并且 $y^* > -3.0$ 时, 高 p_T 的核修正因子也小于1。这一后向快度区高 p_T 的 D^0 额外压低与重离子碰撞中观测到的高横动量下粲强子产额压低类似, 可能是由粲夸克与(热密或冷)核物质中的部分子多重散射引起的额外能量损失导致。8.16 TeV质子-铅核碰撞中 D_s^+ 和 D^+ 的核修正因子测量结果^[39]也在前向与nPDFs和CGC理论计算符合较好, 而在后向快度的高横动量区同样都显示出低于nPDFs计算的额外压低, 这进一步确认了前向快度区的胶子遮蔽等初态核物质效应的存在, 以及后向快度区可能存在类似部分子能损的额外的核物质效应。

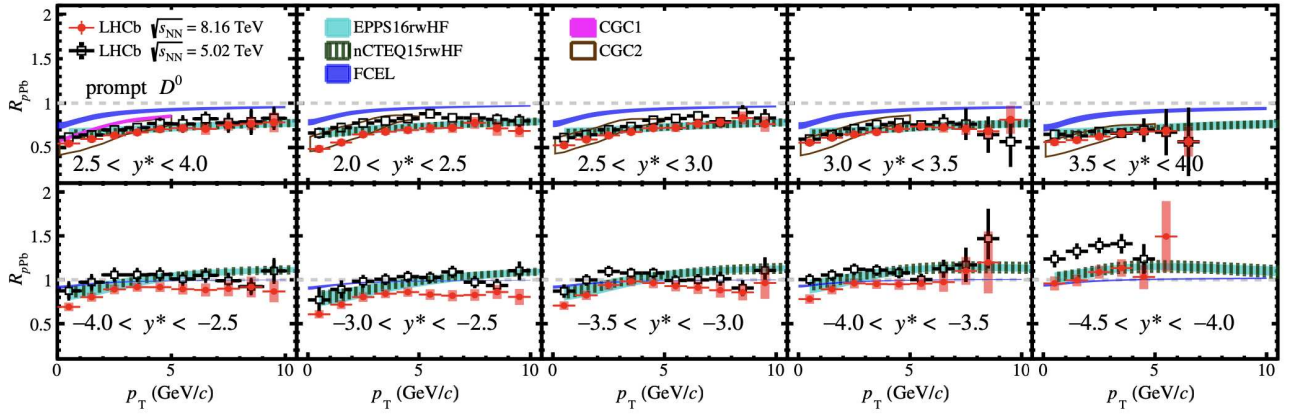


图3 $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV质子-铅核碰撞瞬发 D^0 在不同快度区间的核修正因子随横动量的变化, 并与采用不同核部分子分布函数^[28,35,37]的HELAC理论计算^[29-31]、FCEL理论计算^[24]以及两种CGC理论计算^[32-34]结果做比较。上排和下排分别是前向和后向不同快度区间的结果。图片来自文献^[38]

Figure 3 The nuclear modification factor for prompt D^0 mesons as a function of transverse momentum at different rapidity intervals in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV, compared with the HELAC calculations^[29-31] with different nPDFs^[28,35,37], FCEL calculations^[24] and two different CGC calculations^[32-34]. The top and bottom rows show results for different rapidity intervals in forward and backward collisions, respectively. Image from Ref. ^[38]

由于底强子的质量较大, 在质子-铅核碰撞中测量其核修正因子可探测较大 Q^2 的核部分子分布函数。LHCb实验测量了 $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV质子-铅核碰撞中 B^+ 和来自底强子衰变的非瞬发 J/ψ 的核修正因子^[40,41] (图4)。两个结果符合较好, 在前向低 p_T 都小于1, 显示核遮蔽效应的存在, 与nPDFs理论计算符合较好。而在后向快度区, 两者在误差范围内都与1符合, 也与nPDFs计算符合, 反遮蔽效应不明显。

2 重夸克偶素产生中的核物质效应研究

重夸克偶素是重味夸克和其反夸克组成的强相互作用束缚态。夸克胶子等离子体中的色屏蔽效应改变了夸克反夸克之间的相互作用, 使得它们解除束缚而在QGP中“熔解”, 最终在重离子碰撞中出现重夸克偶素产额压低(即核修正因子小于1), 这是较早提出的重离子碰撞中产生QGP的信号之一^[42]。不同的重夸克偶素态具有不同的束缚能, 在QGP中发生熔解的温度不同, 在重离子碰撞中产额压低的程度也不同, 因此它们长期以来被视为QGP的“温度计”^[43]。另一方面, 重味夸克和反夸克与QGP介质中的部分子发生的频繁散射也有可能使得它们再次相遇重新形成束缚态, 尤其在LHC能量下, 每次重离子碰撞中都会产生多对重味夸克反夸克, 大大增加了这种重新产生的概率^[15,16]。这一机制也会大幅增加多重味强子如 B_c 、 Ξ_{cc} 、 Ω_{ccc} 等稀有

粒子的产率^[44-46]。除了这些与QGP相关的热核物质效应之外, 重夸克偶素产生也会受到与重味强子产生类似的核部分子分布函数等核物质效应影响。在强子化之后的强子演化阶段, 重夸克偶素也可能跟轻强子发生散射而转变为重味介子对。LHCb实验可在质子-铅核以及质子-质子碰撞中对这些效应进行研究。

LHCb实验具有高精度的顶点重建能力, 可清晰区分碰撞直接产生的瞬发的 J/ψ 以及由底强子衰变而来的非瞬发的 J/ψ , 并分别测量它们的核修正因子。其中 $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV质子-铅核碰撞非瞬发 J/ψ 的核修正因子见图4, 而瞬发 J/ψ 粒子的实验结果^[41]见图5(a)和(b)。与粲强子类似, 瞬发 J/ψ 在前向快度区间内产额大幅压低, 尤其在低横动量, 其压低程度可达约50%, 但在高横动量, 压低现象逐渐消失。在后向快度区间内, 低横动量范围内 J/ψ 粒子的产生也有压低现象, 但整体核修正因子接近于1。这些数据与基于核部分子分布函数nPDFs的HELAC^[29-31]和CGC^[32,33]等理论计算符合较好, 尤其是在前向观测到的显著压低也意味着在铅核的小 x 区域($\sim 10^{-5}$)存在胶子遮蔽^[35]。

LHCb实验还测量了 $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV质子-铅核碰撞 $\Upsilon(1S)$ 、 $\Upsilon(2S)$ 、 $\Upsilon(3S)$ 和 $\psi(2S)$ 粒子的核修正因子^[47,48]。对于 $\Upsilon(1S)$ 粒子(图5(c)), 与瞬发 J/ψ 结果类似, 在前向快度区, 其核修正因子整体被压低大约30%, 在低横动量范围内, 其压低程度甚至可达约50%。而在后

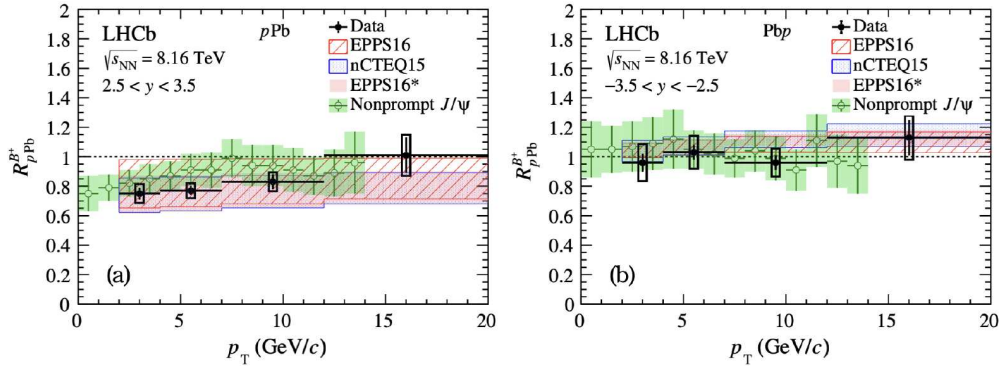


图 4 $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV 质子-铅核碰撞前向(a)和后向(b)快度区 B^+ 介子和非瞬发(来自底强子衰变) J/ψ 的核修正因子随横动量的变化, 并与基于多个核部分子分布函数^[28,35,37]的HELAC理论计算^[29-31]结果进行比较. 图片取自文献^[40]

Figure 4 The nuclear modification factors for B^+ mesons and non-prompt J/ψ (from bottom hadron decays) as a function of transverse momentum in forward (a) and backward (b) rapidities in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV, compared with the HELAC calculations^[29-31] with different nPDFs^[28,35,37]. Images from Ref. ^[40]

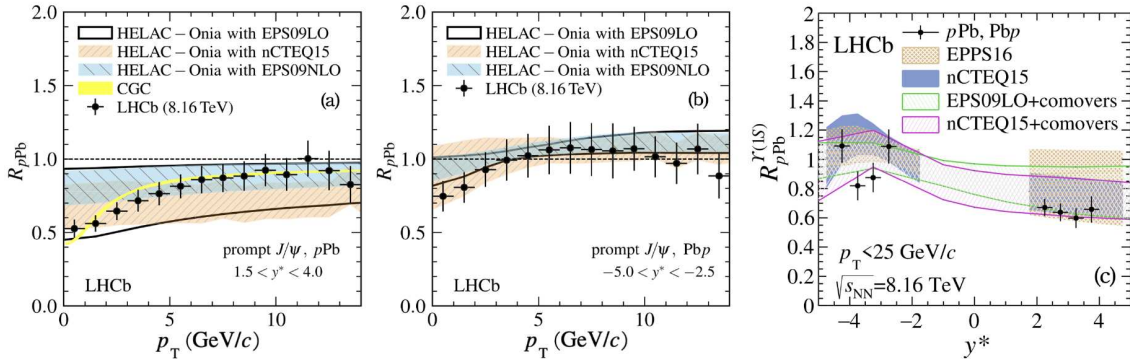


图 5 $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV 质子-铅核碰撞前向(a)和后向(b)快度区瞬发 J/ψ 粒子的核修正因子随横动量的变化, 并与基于多个核部分子分布函数^[20,28]的HELAC理论计算^[29-31]和CGC理论计算^[32,33]结果进行比较, 图片取自文献^[41]. $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV 质子-铅核碰撞 $Y(1S)$ 粒子的核修正因子随快度的变化(c), 并与HELAC理论和同行粒子模型组合计算^[49,50]进行比较. 图片取自文献^[47]

Figure 5 The nuclear modification factors for prompt J/ψ as a function of transverse momentum, in forward (a) and backward (b) rapidities in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV, compared with the HELAC calculations^[29-31] with different nPDFs^[20,28] and CGC calculations^[32,33], images from Ref. ^[41]. The nuclear modification factors for $Y(1S)$ as a function of rapidity (c) in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV, compared with the HELAC calculations with and without comover interactions^[49,50], image from Ref. ^[47]

向快度区, 在不确定度范围内核修正因子接近1. 对于激发态的 $Y(2S)$ 、 $Y(3S)$ 和 $\psi(2S)$ 粒子, 它们的核修正因子相对于基态粒子显示出更强烈的压低. 为更清楚地显示它们的额外压低, 可考察 $Y(nS)$ 对 $Y(1S)$ 核修正因子的复比(double ratio, 图6(a))以及 $\psi(2S)$ 对 J/ψ 核修正因子的复比(图6(b)). 这些复比的结果显示, $Y(2S)$ 在前向和后向快度区出现了额外的压低, 而 $Y(3S)$ 的额外压低程度更是高于 $Y(2S)$, 且在后向快度区的额外压低更为明显. $\psi(2S)$ 相对于 J/ψ 在后向快度区也表现出更为显著的额外压低. 这些激发态粒子的额外压低超出了基

于核部分子分布函数等初态核物质效应的理论预言, 但可以被同行粒子(comover)这一末态相互作用模型^[49,50]描述. 在前向快度区, CGC理论也可以通过引入同行的软胶子相互作用并适当调整能标 Λ 来解释 $\psi(2S)$ 相对于 J/ψ 的额外压低^[51]. 尽管理论上不能确定同行粒子是部分子还是强子, 但这些额外压低表明末态强子或部分子散射对重夸克偶素产生具有显著影响.

为了更精确地研究末态效应对重夸克偶素产生的影响, LHCb 实验测量了 $\sqrt{s}=13$ TeV 质子-质子碰撞中 $\psi(2S)$ 和 J/ψ 粒子截面比随事例末态粒子多重数的变化^[52](图6(c)). 结果显示来自底强子衰变的非瞬发粒子

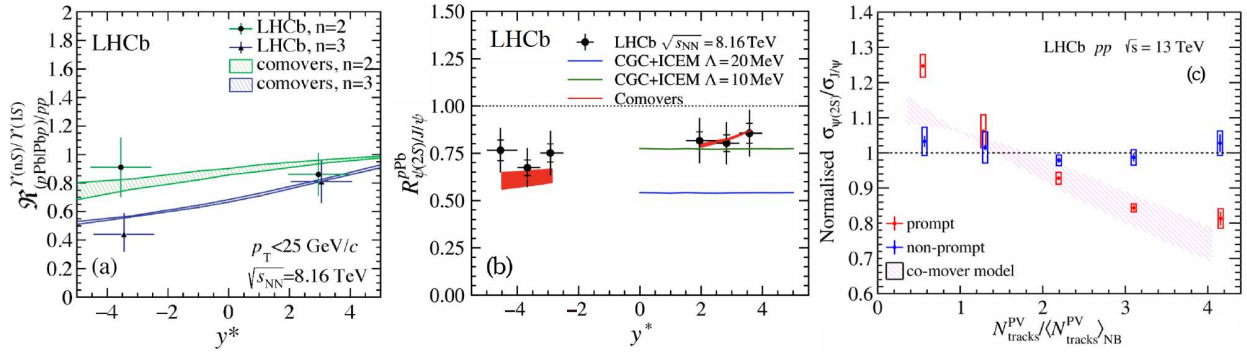


图 6 $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV 质子-铅核碰撞 $Y(nS)$ 对 $Y(1S)$ (a) 和瞬发 $\psi(2S)$ 对 J/ψ (b) 核修正因子的复比随快度的变化, 并与同行粒子模型^[49,50]和引入了同行软胶子相互作用的 CGC 模型在不同能标 Λ 下的计算结果^[51] 进行比较, 图片取自文献^[47,48]. (c) $\sqrt{s} = 13$ TeV 质子-质子碰撞瞬发以及非瞬发 $\psi(2S)/J/\psi$ 截面比随事例多重数的变化, 并与同行粒子模型^[50] 的瞬发比值计算结果进行比较, 事例多重数用参与顶点拟合的径迹数代表, 并用无偏差事例的平均多重数进行归一, 纵坐标已用该能量下相应成分的总截面比进行归一, 图片来自文献^[52]

Figure 6 The double ratio of nuclear modification factors of $Y(nS)$ to $Y(1S)$ (a) and prompt $\psi(2S)$ to J/ψ (b) as a function of rapidity in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV, compared with the comover model calculations^[49,50] and with a CGC soft gluon interaction model calculations at different energy scales^[51], images from Refs. ^[47,48]. (c) The cross-section ratio of prompt and non-prompt $\psi(2S)$ to J/ψ as a function of event multiplicity in $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collisions, compared with the comover model calculations^[50] for prompt ratios. Event multiplicity is represented by the number of tracks participating in the vertex fit and normalized by the average multiplicity of unbiased events. The y -axis has been normalized by the total cross-section ratio of the corresponding components at this energy, image from Ref. ^[52]

截面比值不随多重数变化, 而直接由碰撞产生的瞬发粒子截面比随多重数增大显著下降。该瞬发粒子比的变化趋势与同行粒子相互作用模型^[50] 预言基本相符, 表明即使在质子-质子碰撞中, 部分子或强子散射等末态效应对瞬发夸克偶素产生也具有显著影响。最近的理论计算^[53] 假设高多重数事例中产生了 QGP 液滴以及夸偶素与 QGP 中部分子非弹性散射导致其离解, 能够同时描述实验观测到的夸偶素截面比的多重数以及横动量依赖, 暗示在高多重数质子-质子碰撞事例中很可能有 QGP 液滴产生。

3 重味夸克强子化中的核物质效应研究

重味夸克的强子化是非微扰的软过程, 可用参数化的碎裂函数来描述, 其参数可由正负电子对撞、电子-质子散射实验中相关测量来确定。如果假设碎裂函数与具体的重味夸克产生过程无关, 可直接将其应用到质子-质子、质子-铅核和重离子碰撞过程中产生的重味夸克强子化, 描述末态重味强子产生。在重离子碰撞中, 重味夸克产生于碰撞早期的部分子硬散射, 之后经历热密火球的整个演化过程。它们在热密介质中的能损或跟介质部分子多重散射可能使它们与介质达到部分热化。火球膨胀冷却到临界温度时, 其中的轻夸克主要通过夸克重组机制强子化, 导致末态中等横动量区重子相对介子的产额增强现象(相对于同能量的质

子-质子碰撞)^[54]。重味夸克在热密火球发生强子化的同时也可能与相空间接近的轻夸克通过重组机制发生强子化。RHIC 上的金核-金核碰撞和 LHC 上的铅核-铅核碰撞都在中等横动量区观测到显著的粲重子 Λ_c 相对介子 D^0 的产额增强^[55,56], 这可以由粲夸克的重组和统计强子化等模型解释^[11,57,58]。

对于小系统碰撞, ALICE 实验 $\sqrt{s}=5.02$ TeV 质子-质子碰撞的 Λ_c^+/D^0 截面比结果^[59] 表现出明显的横动量依赖, 随横动量降低该比值显著增大, 远大于 PYTHIA 等基于碎裂强子化的模型预言。该结果与加入色重连接的 PYTHIA 模型^[60,61]、考虑了重组机制的强子化模型^[62] 和考虑了相对论夸克模型中粲重子激发态的统计强子化模型^[63] 计算符合较好。ALICE 实验的 $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV 质子-铅核碰撞中 Λ_c^+/D^0 截面比在中等横动量比质子-质子略大, 随横动量增大而下降, 还在低横动量表现出清晰的上涨趋势(图 7(a)), 这与轻味夸克组成的重子介子比的实验结果相似。这些实验结果暗示重组机制可能对质子-质子以及质子-铅核碰撞中粲夸克的强子化也起着重要作用。

LHCb 实验在 2019 年发表了在前向和后向快度区测量的 $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV 质子-铅核碰撞中的瞬发 Λ_c^+/D^0 截面比^[64](图 7(a)), 发现前向和后向快度的结果在误差范围内一致, 在高横动量与 ALICE 中心快度结果接近,

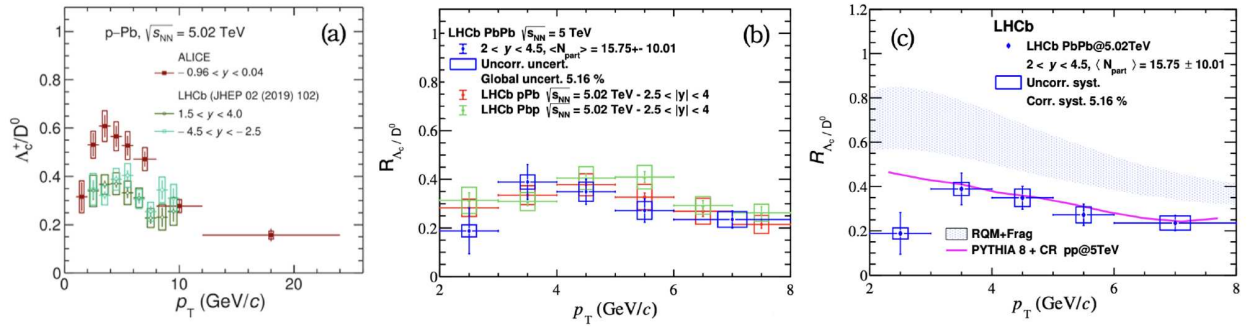


图 7 (a) ALICE和LHCb实验 $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV质子-铅核碰撞中粲重子和介子 Λ_c^+/D^0 截面比, 图片取自文献[59]. LHCb实验 $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV偏心铅核-铅核碰撞中 Λ_c^+/D^0 产额比以及质子-铅核数据[64](b)、色重连接PYTHIA[60,61]和统计强子化模型[63]理论计算的比较(c), 图片取自文献[65]
Figure 7 (a) The charm baryon-to-meson cross-section ratio Λ_c^+/D^0 in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV from ALICE and LHCb experiments, image from Ref. [59]. The yield ratio of Λ_c^+/D^0 in peripheral lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV from the LHCb experiment, and comparison with proton-lead collisions data[64] (b) and PYTHIA calculations[60,61] with color reconnections and statistical hadronization model calculations[63] (c), images from Ref. [65]

但在中低横动量低于ALICE实验在中心快度的结果. LHCb实验还测量了周边(65%~90%) $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV铅核-铅核碰撞中前向快度区的 Λ_c^+/D^0 产额比[65](图7(b)). 该数据与LHCb质子-铅核实验结果在误差范围内符合较好, 且与同能量质子-质子碰撞的加入色重连接的PYTHIA模型结果[60,61]符合较好, 但是小于统计强子化模型[63]计算结果(图7(c)). 需要指出的是, 该统计强子化模型在中心快度区计算结果与ALICE实验的质子-质子和质子-铅核碰撞实验数据符合较好. LHCb实验还测量了 $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV质子-铅核碰撞中前后向快度区的 Ξ_c^+/D^0 产生截面比[66], 数据与加入色重连接的PYTHIA计算符合更好, 但低于ALICE更高能量下 $\sqrt{s}=13$ TeV质子-质子碰撞实验结果. 目前还没有理论模型能同时解释ALICE和LHCb在质子-质子、质子-铅核和偏心铅核-铅核碰撞中的粲重子介子比实验结果, 实验上也需要进行更多精确系统的测量来确认这些粲重子介子产额比值的快度依赖性.

奇异性增强是相对论重离子碰撞中产生夸克胶子等离子体的重要实验信号之一[67]. 碰撞中增强的奇异夸克产生以及QGP的重组强子化机制造成末态奇异强子相对于其他轻强子的产额增强[68,69]. 如果碰撞中粲夸克也通过与轻夸克重组发生强子化, 奇异性增强也将造成反应末态奇异强子 D_s^+ 产额相对 D^+ 或 D^0 存在增强, 考虑到不同强子束缚能的差别造成的顺次重组强子化可能会使 D_s^+ 产额增强幅度更大[57]. STAR和ALICE实验在金核-金核碰撞和铅核-铅核碰撞中观测

到了显著的 D_s^+/D^0 产额增强, 与重组模型计算结果符合较好[70,71]. 另一方面, ALICE在高多重数小系统(质子-质子或质子-铅核)碰撞中也观测到了轻奇异强子产额增强[72]. 尽管小系统中奇异性增强机制仍然不明确, 但如果小系统中粲夸克也能通过重组机制强子化, 奇异性增强将造成 D_s^+ 强子产额相对 D^+ 或 D^0 存在增强. 目前ALICE实验尚未在质子-铅核碰撞中观测到 D_s^+ 强子产额增强[73].

LHCb实验测量了 $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ 和8.16 TeV质子-铅核碰撞中的 D_s^+ 和 D^+ 粒子的产生. 在5.02 TeV[36], 质子-铅核碰撞的前向快度区 D_s^+/D^+ 截面比与质子-质子碰撞的截面比在误差范围内一致; 但在后向快度区, 该截面比略大于前向和质子-质子碰撞的结果. 考虑到后向快度区的带电粒子的单位快度产额大于前向[74], 前后向 D_s^+/D^+ 截面比的差别预示其可能与局域粒子多重数有关. 随后, LHCb实验在更高统计量的 $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV的质子-铅核碰撞中系统测量了不同运动学区间中该截面比随事例多重数的变化[39](图8(a)). 结果显示, 在所有LHCb测量的运动学区间, D_s^+/D^+ 截面比都随多重数增加而显著增大, 尤其在后向快度区的低横动量区间, 增强趋势更加显著. LHCb数据与ALICE中心快度区的结果在误差范围内相符, 在高多重数区间与ALICE铅核-铅核碰撞结果误差范围内相符, LHCb的精确测量首次确认了高多重数事例中存在 D_s^+ 相对 D^+ 的产额增强. 实验数据(尤其是在较低横动量下)显著高于正负电

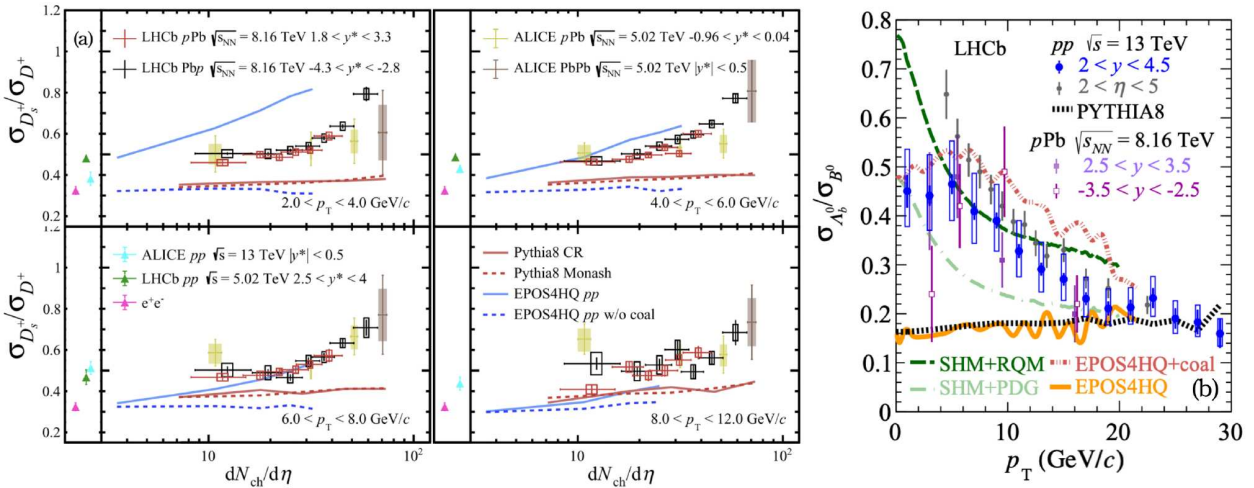


图 8 (a) $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV 质子-铅核碰撞中不同运动学区间的 D_s^+/D^+ 截面比随事例多重数的变化, 并与ALICE、LHCb、正负电子对撞数据以及PYTHIA和EPOS4HQ等理论计算进行比较, 图片取自文献[39]。 (b) LHCb实验质子-质子、质子-铅核碰撞中底重子 Λ_b^0 和介子 B^0 的截面比随横动量的变化, 并与PYTHIA、统计强子化和EPOS4HQ模型进行比较, 图片取自文献[79]

Figure 8 (a) The D_s^+/D^+ cross-section ratio as a function of event multiplicity at different kinematic regions in proton-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV, and comparisons with ALICE, LHCb, e^+e^- data and PYTHIA, EPOS4HQ theoretical calculations, image from Ref. [39]. (b) The cross-section ratios of bottom baryon Λ_b^0 to bottom meson B^0 as a function of transverse momentum in proton-proton and proton-lead collisions from the LHCb experiment, compared with PYTHIA, statistical hadronization model and EPOS4HQ model calculations, image from Ref. [79]

子对撞数据, 也高于几乎不随多重数变化的PYTHIA计算结果, 但与考虑了重组强子化机制的EPOS4HQ模型[75,76]结果定性符合。这表明重组强子化机制在较低横动量和高多重数区间变得越来越重要, 这一现象暗示在高多重数事例中很可能有QGP液滴产生。

底夸克在质子-质子和重离子碰撞中的强子化机制也可以用相应的重子介子比 Λ_b^0/B^0 和介子-介子比 B_s^0/B^+ 来研究。CMS实验测量了铅核-铅核碰撞中的 B_s^0/B^+ 产额比[77]。尽管统计误差较大, 测量显示对心碰撞中该比值大于LHCb实验测量到的质子-质子碰撞 B_s^0/B^+ 截面比。LHCb实验系统测量了 $\sqrt{s} = 13$ TeV 质子-质子碰撞中 B_s^0/B^+ 截面比随多重数的变化[78], 发现在低横动量区间 (<6 GeV/c) 该截面比随事例多重数增大而增大的迹象, 与考虑色重连接的PYTHIA计算结果符合较好。而在高横动量区间, B_s^0/B^+ 结果并未表现出显著的随多重数的变化, 且与正负电子对撞实验中的数据符合较好。与 D_s^+/D^+ 随多重数变化的结果类似, 该测量结果定性符合高多重数事例中重组强子化开始变得重要和奇异性增强的预期。LHCb实验还在质子-质子和质子-铅核碰撞中测量了底重子介子比 Λ_b^0/B^0 [40,79](图8(b)), 结果显示在这些不同的碰撞系统和测量的运动学区间中, 该比

值在误差范围内基本一致, 都随横动量增大而变小, 并在较高横动量与正负电子碰撞实验结果和PYTHIA一致。数据与考虑了相对论夸克模型中的底重子激发态衰变的统计强子化模型[80]以及考虑了重组机制的EPOS4HQ模型[75,76]计算符合较好, 暗示重组机制在底夸克强子化中也可能起重要作用。

4 总结与展望

LHCb实验以其独特的前向快度覆盖以及优秀的重味粒子测量能力在核物质效应的重味探针方面做出了多项重要研究成果。本文综述了基于质子-质子、质子-铅核、铅核-铅核碰撞数据取得的一些最新结果。在质子-铅核碰撞中精确测量粲强子和底强子的核修正因子, 显著限定了小x区胶子部分子分布函数, 精确检验nPDFs以及CGC理论计算; 发现后向快度区高横动量存在额外的粲强子产额压低, 暗示可能存在其他末态核物质效应。在质子-铅核以及高多重数质子-质子碰撞中发现激发态重夸克偶素产额相对基态存在额外压低, 表明末态部分子或强子散射对重夸克偶素产生具有重要影响。粲重子介子比在质子-铅核前后向和周边铅核-铅核碰撞中几乎一致, 在LHCb覆盖的前向快度区尚未看到明显的粲重子产额增强, 但在高多重数质子-铅核碰撞事例中发现了显著的奇异粲介子产额增

强, 为理解粲夸克强子化机制和小系统碰撞反应动力学提供了重要参考. 质子-铅核以及质子-质子碰撞中底重子和介子截面比基本一致, 在低横动量显著高于正负电子对撞机结果, 表明底夸克强子化会随碰撞环境变化而发生显著改变. 本文未讨论但LHCb实验还利用奇特强子态进行核物质效应研究, 同时帮助理解奇特态结构; 还在特有的固定靶碰撞中进行了多项粲强子和粲偶素产生测量, 验证该模式下LHCb探测器性能并研究RHIC能区重离子碰撞中的核物质效应.

展望未来, LHCb实验将对第一和第二运行阶段已获取的实验数据开展更多、更深入的重味探针测量, 力图通过实验手段更深刻地理解小系统碰撞中的核物质效应, 比如通过测量 $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV质子-铅核碰撞中粲强子 Λ_c^+ 和 D^* 的产生, 进一步研究初态核物质效应;

继续在质子-质子和质子-铅核碰撞中测量各种粲强子截面比随事例多重数的变化, 进一步研究重味夸克强子化机制; 在质子-质子、质子-铅核以及周边铅核-铅核碰撞中测量重夸克偶素产额比随多重数的变化, 进一步研究末态散射对重夸克偶素产生的影响; 在高多重数事例中测量重味强子的方位角各向异性集体流, 进一步寻找QGP液滴的实验信号等. 随着LHC第三运行阶段的重启, LHCb探测器在第一期升级后已能够对半中心铅核-铅核碰撞进行重建, 升级的固定靶系统也显著提升了事例率, 预期将会收集更多重离子对撞和固定靶碰撞数据. 利用这些数据, LHCb实验将能够进行更系统、更精确的重味强子相关实验测量, 加深对核物质效应的理解, 最终更好地理解强相互作用和物质的微观结构.

参考文献

- 1 Bazavov A, Ding H T, Hegde P, et al. Chiral crossover in QCD at zero and non-zero chemical potentials. *Phys Lett B*, 2019, 795: 15–21
- 2 Lee T D, Wick G C. Vacuum stability and vacuum excitation in a spin-0 field theory. *Phys Rev D*, 1974, 9: 2291–2316
- 3 Lee T D. A Possible New Form of Matter at High Density. In: Report of the Workshop on BeV/Nucleon Collisions of Heavy Ions—How and Why. Brookhaven National Laboratory, 1974. 1
- 4 Lee T D. Relativistic heavy ion collisions and future physics. In: Bars I, Chodos A, Tze C H, eds. Symmetries in Particle Physics. Berlin: Springer, 1984. 93
- 5 Arslanok M, Bass S A, Baty A A, et al. Hot QCD White Paper. 2023, arXiv: 2303.17254
- 6 Zhao J, Zhou K, Chen S, et al. Heavy flavors under extreme conditions in high energy nuclear collisions. *Prog Part Nucl Phys*, 2020, 114: 103801
- 7 STAR Collaboration. Centrality and transverse momentum dependence of D^0 -meson production at mid-rapidity in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV. *Phys Rev C*, 2019, 99: 034908
- 8 ALICE Collaboration. Measurement of beauty production via non-prompt D^0 mesons in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV. *J High Energy Phys*, 2022, 2022(12): 126
- 9 Cao S, Luo T, Qin G Y, et al. Linearized Boltzmann transport model for jet propagation in the quark-gluon plasma: Heavy quark evolution. *Phys Rev C*, 2016, 94: 014909
- 10 Li S, Liao J. Data-driven extraction of heavy quark diffusion in quark-gluon plasma. *Eur Phys J C*, 2020, 80: 671
- 11 He M, Rapp R. Hadronization and charm-hadron ratios in heavy-ion collisions. *Phys Rev Lett*, 2020, 124: 042301
- 12 STAR Collaboration. Measurement of inclusive J/ψ suppression in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV through the dimuon channel at STAR. *Phys Lett B*, 2019, 797: 134917
- 13 STAR Collaboration. Measurement of sequential suppression in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV with the STAR experiment. *Phys Rev Lett*, 2023, 130: 112301
- 14 CMS Collaboration. Measurement of nuclear modification factors of $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$, and $\Upsilon(3S)$ mesons in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV. *Phys Lett B*, 2019, 790: 270–293
- 15 Zhou K, Xu N, Xu Z, et al. Medium effects on charmonium production at ultrarelativistic energies available at the CERN Large Hadron Collider. *Phys Rev C*, 2014, 89: 054911
- 16 Du X, Rapp R. Sequential regeneration of charmonia in heavy-ion collisions. *Nucl Phys A*, 2015, 943: 147–158
- 17 LHCb Collaboration. The LHCb detector at the LHC. *J Inst*, 2008, 3: S08005
- 18 LHCb Collaboration. LHCb detector performance. *Int J Mod Phys A*, 2015, 30: 1530022
- 19 LHCb Collaboration. Precision luminosity measurements at LHCb. *J Inst*, 2014, 9: P12005
- 20 Eskola K J, Paukkunen H, Salgado C A. EPS09—A new generation of NLO and LO nuclear parton distribution functions. *J High Energy Phys*, 2009, 2009(4): 065

- 21 de Florian D, Sassot R. Nuclear parton distributions at next to leading order. [Phys Rev D](#), 2004, 69: 074028
- 22 Hirai M, Kumano S, Nagai T H. Determination of nuclear parton distribution functions and their uncertainties at next-to-leading order. [Phys Rev C](#), 2007, 76: 065207
- 23 Kang Z B, Vitev I, Wang E, et al. Multiple scattering effects on heavy meson production in p+A collisions at backward rapidity. [Phys Lett B](#), 2015, 740: 23–29
- 24 Arleo F, Jackson G, Peigné S. Impact of fully coherent energy loss on heavy meson production in pA collisions. [J High Energy Phys](#), 2022, 2022(1): 164
- 25 Armesto N. Nuclear shadowing. [J Phys G-Nucl Part Phys](#), 2006, 32: R367–R393
- 26 Gelis F, Iancu E, Jalilian-Marian J, et al. The color glass condensate. [Annu Rev Nucl Part Sci](#), 2010, 60: 463–489
- 27 Aaij R, Adeva B, Adinolfi M, et al. Study of prompt D^0 meson production in pPb collisions at $D_s^+ = 5$ TeV. [J High Energy Phys](#), 2017, 2017(10): 090
- 28 Kovařík K, Kusina A, Ježo T, et al. nCTEQ15: Global analysis of nuclear parton distributions with uncertainties in the CTEQ framework. [Phys Rev D](#), 2016, 93: 085037
- 29 Lansberg J P, Shao H S. Towards an automated tool to evaluate the impact of the nuclear modification of the gluon density on quarkonium, D and B meson production in proton–nucleus collisions. [Eur Phys J C](#), 2017, 77: 1
- 30 Shao H S. HELAC-Onia: An automatic matrix element generator for heavy quarkonium physics. [Comput Phys Commun](#), 2013, 184: 2562–2570
- 31 Shao H S. HELAC-Onia 2.0: An upgraded matrix-element and event generator for heavy quarkonium physics. [Comput Phys Commun](#), 2016, 198: 238–259
- 32 Ducloué B, Lappi T, Mäntysaari H. Forward J/ψ production in proton-nucleus collisions at high energy. [Phys Rev D](#), 2015, 91: 114005
- 33 Ducloué B, Lappi T, Mäntysaari H. Forward J/ψ and D meson nuclear suppression at the LHC. [Nucl Part Phys Proc](#), 2017, 289-290: 309–312
- 34 Ma Y Q, Tribedy P, Venugopalan R, et al. Event engineering studies for heavy flavor production and hadronization in high multiplicity hadron-hadron and hadron-nucleus collisions. [Phys Rev D](#), 2018, 98: 074025
- 35 Kusina A, Lansberg J P, Schienbein I, et al. Gluon shadowing in heavy-flavor production at the LHC. [Phys Rev Lett](#), 2018, 121: 052004
- 36 LHCb Collaboration. Measurement of prompt D^+ and D_s^+ production in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. [J High Energy Phys](#), 2024, 2024(1): 070
- 37 Eskola K J, Paakkinen P, Paukkunen H, et al. EPPS16: Nuclear parton distributions with LHC data. [Eur Phys J C](#), 2017, 77: 163
- 38 LHCb Collaboration. Measurement of the prompt D^0 nuclear modification factor in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV. [Phys Rev Lett](#), 2023, 131: 102301
- 39 LHCb Collaboration. Observation of strangeness enhancement with charmed mesons in high-multiplicity pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV. [Phys Rev D](#), 2024, 110: L031105
- 40 LHCb Collaboration. Measurement of B^+ , B^0 and A_b^0 production in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV. [Phys Rev D](#), 2019, 99: 052011
- 41 LHCb Collaboration. Prompt and nonprompt J/ψ production and nuclear modification in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV. [Phys Lett B](#), 2017, 774: 159–178
- 42 Matsui T, Satz H. J/ψ suppression by quark-gluon plasma formation. [Phys Lett B](#), 1986, 178: 416–422
- 43 Mocsy Á, Petreczky P. Color screening melts quarkonium. [Phys Rev Lett](#), 2007, 99: 211602
- 44 He H, Liu Y, Zhuang P. Ω_{ccc} production in high energy nuclear collisions. [Phys Lett B](#), 2015, 746: 59–63
- 45 Zhao J, He H, Zhuang P. Searching for Ξ_{cc}^+ in relativistic heavy ion collisions. [Phys Lett B](#), 2017, 771: 349–353
- 46 Wu B, Tang Z, He M, et al. Recombination of B_c mesons in ultrarelativistic heavy-ion collisions. [Phys Rev C](#), 2024, 109: 014906
- 47 LHCb Collaboration. Study of Υ production in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV. [J High Energy Phys](#), 2018, 2018(11): 194
- 48 LHCb Collaboration. Prompt and nonprompt $\psi(2S)$ production in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=8.16$ TeV. [J High Energy Phys](#), 2024, 2024(4): 111
- 49 Ferreiro E G, Lansberg J P. Is bottomonium suppression in proton-nucleus and nucleus-nucleus collisions at LHC energies due to the same effects? [J High Energy Phys](#), 2018, 2018(10): 94
- 50 Ferreiro E G. Excited charmonium suppression in proton–nucleus collisions as a consequence of comovers. [Phys Lett B](#), 2015, 749: 98–103
- 51 Ma Y Q, Venugopalan R, Watanabe K, et al. $\psi(2S)$ versus J/ψ suppression in proton-nucleus collisions from factorization violating soft color exchanges. [Phys Rev C](#), 2018, 97: 014909
- 52 LHCb Collaboration. Multiplicity dependence of $\sigma_{\psi(2S)}/\sigma_{J/\psi}$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. [J High Energy Phys](#), 2024, 2024(5): 243
- 53 Bai Y, Chen B. Probing QGP droplets with charmonium in high-multiplicity proton–proton collisions. [Eur Phys J C](#), 2024, 84: 1193
- 54 Minissale V, Scardina F, Greco V. Hadrons from coalescence plus fragmentation in AA collisions at energies available at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider to the CERN Large Hadron Collider. [Phys Rev C](#), 2015, 92: 054904
- 55 STAR Collaboration. First measurement of Λ_c baryon production in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. [Phys Rev Lett](#), 2020, 124: 172301
- 56 ALICE Collaboration. Constraining hadronization mechanisms with A_c^+/D^0 production ratios in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. [Phys Lett B](#), 2023, 839: 137796
- 57 Zhao J, Shi S, Xu N, et al. Sequential coalescence with charm conservation in high energy nuclear collisions. 2018, arXiv: [1805.10858](#)

- 58 Cho S, Sun K J, Ko C M, et al. Charmed hadron production in an improved quark coalescence model. *Phys Rev C*, 2020, 101: 024909
- 59 ALICE Collaboration. Λ_c^+ production in pp and in p -Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. *Phys Rev C*, 2021, 104: 054905
- 60 Christiansen J R, Skands P Z. String formation beyond leading colour. *J High Energy Phys*, 2015, 2015(8): 003
- 61 Bierlich C, Gustafson G, Lönnblad L, et al. Effects of overlapping strings in pp collisions. *J High Energy Phys*, 2015, 2015(3): 148
- 62 Minissale V, Plumari S, Greco V. Charm hadrons in pp collisions at LHC energy within a coalescence plus fragmentation approach. *Phys Lett B*, 2021, 821: 136622
- 63 He M, Rapp R. Charm-baryon production in proton-proton collisions. *Phys Lett B*, 2019, 795: 117–121
- 64 LHCb Collaboration. Prompt Λ_c^+ production in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. *J High Energy Phys*, 2019, 2019(2): 102
- 65 LHCb Collaboration. Measurement of the Λ_c^+ to D^0 production ratio in peripheral PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. *J High Energy Phys*, 2023, 2023(6): 132
- 66 LHCb Collaboration. Measurement of Ξ_c^+ production in p Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV at LHCb. *Phys Rev C*, 2024, 109: 044901
- 67 Rafelski J, Müller B. Strangeness production in the quark-gluon plasma. *Phys Rev Lett*, 1982, 48: 1066–1069
- 68 STAR Collaboration. Strangeness enhancement in Cu-Cu and Au-Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 072301
- 69 ALICE Collaboration. Multi-strange baryon production at mid-rapidity in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. *Phys Lett B*, 2014, 728: 216–227
- 70 STAR Collaboration. Observation of D_s^+ / D^0 enhancement in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. *Phys Rev Lett*, 2021, 127: 092301
- 71 ALICE Collaboration. Measurement of prompt D_s^+ -meson production and azimuthal anisotropy in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. *Phys Lett B*, 2022, 827: 136986
- 72 ALICE Collaboration. Enhanced production of multi-strange hadrons in high-multiplicity proton–proton collisions. *Nat Phys*, 2017, 13: 535–539
- 73 ALICE Collaboration. Measurement of prompt D^0 , D^+ , D^{*+} , and D_s^+ production in p–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. *J High Energy Phys*, 2019, 2019(12): 092
- 74 LHCb Collaboration. Measurement of the nuclear modification factor and prompt charged particle production in p -Pb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5$ TeV. *Phys Rev Lett*, 2022, 128: 142004
- 75 Zhao J, Aichelin J, Gossiaux P B, et al. Heavy flavor as a probe of hot QCD matter produced in proton-proton collisions. *Phys Rev D*, 2024, 109: 054011
- 76 Zhao J, Aichelin J, Gossiaux P B, et al. Heavy-flavor hadron production in relativistic heavy ion collisions at energies available at BNL RHIC and at the CERN LHC in the EPOS4HQ framework. *Phys Rev C*, 2024, 110: 024909
- 77 CMS Collaboration. Observation of B_s^0 mesons and measurement of the B_s^0 / B^+ yield ratio in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. *Phys Lett B*, 2022, 829: 137062
- 78 LHCb Collaboration. Evidence for modification of b quark hadronization in high-multiplicity pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 061901
- 79 LHCb Collaboration. Enhanced production of Λ_b^0 baryons in high-multiplicity pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Phys Rev Lett*, 2024, 132: 081901
- 80 He M, Rapp R. Bottom hadrochemistry in high-energy hadronic collisions. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 012301

Summary for “LHCb实验上核物质效应的重味探针研究进展”

Advances in the studies of nuclear matter effects using heavy-flavor particles as probes at LHCb

Shanzhen Chen¹ & Xianglei Zhu^{2*}

¹ Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

² Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

* Corresponding author, E-mail: zhux@tsinghua.edu.cn

One of the key tasks of high-energy physics is to explore the fundamental composition of matter and its interactions. Bound quarks and gluons were discovered in the 20th century; however, free quarks and gluons have never been observed. This phenomenon is known as “quark confinement” which is one of the fundamental problems in modern physics. Quantum chromodynamics (QCD) is the fundamental theory describing the strong interactions between quarks and gluons, and it predicts that at sufficiently high temperatures, quarks and gluons will be deconfined and form a new state of matter known as the quark-gluon plasma (QGP). This hot and dense state of matter may have existed in the early universe or inside dense celestial bodies.

The only way to produce and study the QGP state in the laboratory is through relativistic heavy-ion collisions. Heavy quarks (charm and bottom quarks) have larger masses and can only be produced in the early stages of collision through hard parton scattering processes. They then undergo the entire evolution of the hot and dense QGP state, experiencing frequent scattering with light partons (light quarks or gluons), and eventually become heavy-flavor hadrons either by escaping the medium or by hadronizing along with the QGP medium. The momentum distribution, yield, or cross-section ratios of these heavy-flavor hadrons carry rich information about the QGP state and serve as good experimental probes for the quantitative study of the properties of the hot and dense QGP state.

The LHCb experiment, with its unique forward rapidity coverage and excellent capability in measuring heavy-flavor particles, has made numerous significant contributions in the studies of nuclear matter effects with heavy-flavor probes. This article reviews some of the latest results obtained from proton-proton, proton-lead, and lead-lead collision data. Precise measurements of the nuclear modification factors for charm and bottom hadrons in proton-lead collisions have significantly constrained the gluon parton distribution functions at small x , rigorously testing the predictions based on nuclear parton distribution functions and the color glass condensate theory. An additional suppression of charm hadron production at high transverse momentum has been observed in the backward rapidity region, suggesting the presence of additional nuclear matter effects. A suppression of excited heavy quarkonium states relative to the ground state production has been found in proton-lead and high-multiplicity proton-proton collisions, indicating that comover scattering has a significant impact on heavy quarkonium production. The charm baryon-to-meson ratio is found to be almost consistent in forward and backward proton-lead collisions and peripheral lead-lead collisions within the LHCb forward rapidity coverage, with no significant enhancement of charmed baryon production observed. However, a substantial enhancement of strange-charm meson production has been discovered in high-multiplicity proton-lead collisions, providing important insights for understanding the hadronization mechanism of charm quarks and the reaction dynamics in small-system collisions. The cross-section ratio of bottom baryon to meson in both proton-lead and proton-proton collisions is found to be essentially consistent, and significantly higher at low transverse momentum than results from electron-positron colliders, indicating that bottom quark hadronization is subject to changes in different collision environments.

The LHCb experiment will explore further the heavy-flavor probes of the nuclear matter effects in small-system collisions with the current datasets. With the restart of the Run-III of the LHC, the LHCb detector, after its phase-I upgrade, is now capable of reconstructing semi-central lead-lead collisions and collect more heavy-ion collision data. Utilizing this data, the LHCb experiment will be able to perform more precise measurements of heavy-flavor hadrons, deepen the understanding of nuclear matter effects, and ultimately gain a better understanding of the strong interaction and the structure of matter.

Large Hadron Collider, LHCb experiment, relativistic heavy-ion collision, quark-gluon plasma, nuclear matter effect, heavy flavor

doi: [10.1360/TB-2024-0938](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0938)