

喷注修改和介质响应 - 理论概述

Daniel Pablos^{1,*}

¹Instituto Galego de Física de Altas Enerxías IGFAE, Universidade de Santiago de Compostela, E-15782 Galicia-Spain

Abstract. 本文包含了对第十二届高能核碰撞中的强子和电磁探针国际会议 (Hard Probes 2024) 上展示的演讲内容中喷注淬火物理当前状况和挑战的总结及个人见解, 该会议于 2024 年 9 月在日本长崎举行。

1 介绍

喷气流是高能部分子在硬散射过程中产生的虚实演化结果, 形成的一束准直的强子喷流。当它们穿过一个去禁闭的 QCD 介质 (如大型强子对撞机和相对论重离子对撞机中的重离子碰撞形成的夸克-胶子等离子体) 时, 许多特性与质子-质子碰撞中测量到的特性相比发生了显著改变。这组现象通常被称为喷注抑制, 它使我们能够通过将模型与实验数据进行比较来推断出关于夸克-胶子等离子体的独特信息。这些变化中最突出且最被确立的是高 p_T 喷流产率的减少 [1], 以及在喷流轴周围软粒子数量的增加 [2]。这些观测结果与由于存在脱禁闭的 QCD 物质而在弱耦合 [3] 和强耦合 [4] 下预期的能量损失计算一致。通过能量-动量守恒, 当喷流被介质修改时, 人们期望介质也会因其与喷流的相互作用而发生改变。这种介质的反作用被称为中等响应, 并主要使用两种不同的框架进行建模。对于通过与介质成分弹性散射传递足够高的动量的情况, 需要考虑反冲粒子的动力学, 这些粒子可以进一步与介质重新相互作用。这些物理现象探测了 QGP 的短距离、微扰结构。而对于那些非微扰性质较低的动量转移, 或者直接因为较软喷流部分子的热化, 预计会激发水动力涡流, 从而探测 QGP 的长波长特征。

近年来迈出的一个关键步骤是将能量损失计算从静态的 QGP 砖块设置扩展到更现实的情景中, 在这些情景下考虑了介质的动力学特性。

确实, 使用喷注观测量寻找流动 QGP 的时空演化的实验证据是喷注抑制物理的关键目标之一。

*e-mail: daniel.pablos@usc.es

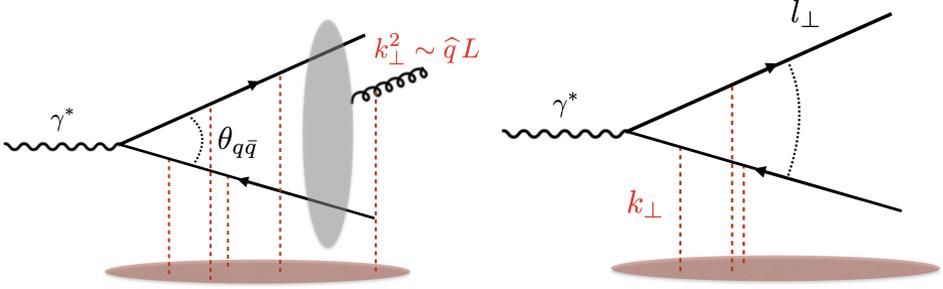


Figure 1. 色单态二聚体的草图，由高虚动量喷注演化产生，并与介质（红色块）相互作用。左侧：在时间 L 期间通过多次软散射产生的受激胶子辐射具有 $k_\perp^2 \sim \hat{q}L$ 阶的离壳性。为了使发射能够分辨出单个二聚体电荷，二聚体的角度需要是 $\theta_{q\bar{q}} > \theta_c \sim 1/\sqrt{\hat{q}L^3}$ 。正确给定的与介质交换的 k_\perp 只能在其波长足够小的情况下解决具有横向动量 l_\perp 的短寿命高虚性偶极子，因此 $k_\perp > l_\perp$ 。这一事实限制了淋浴早期阶段潜在的修改只能来自较少见的大动量交换。

在这次会议上，我们见证了一些朝这个方向发展的令人兴奋的进步，比如关于局部介质流动和梯度对刺激性胶子辐射 [5–9] 的新计算，以及预测导致喷注偏转在特定方向上的漂移效应 [10–13]。

自然地，人们也期望喷注诱导的尾迹演化受到介质动力学的影响 [14]。

我们需要在真实数据中寻找这些影响以充分利用喷注的断层成像潜力，

并通过这种方式获得进一步证据来支持和补充我们当前对类流体 QGP 演化的理解。

2 喷流演化

众所周知，喷流不仅仅是一组在壳上的电荷。从真空物理学中人们了解到，喷流最好被理解为一组色相关双极子的集合。在介质中，高能喷流也会发展出一种高虚度、类似于真空的演化，并与该介质相互作用。迄今为止，真空和介质尺度之间的相互作用仍然是一个巨大的理论挑战，这个问题必然受到色相干物理的影响。

典型的真空示例涉及从部分子偶极子连续发射软胶子。软辐射的波长 λ 只有在其小于形成时刻 τ_f 时偶极子两个色荷之间的距离 d 才能分辨出这两个色荷的存在。这一条件立即意味着，为了使软胶子有效地从偶极子的一条腿上发射出来，其发射角度必须小于偶极子的张开角 $\theta < \theta_{q\bar{q}}$ 。沿着这个推理继续到部分子淋浴中的进一步辐射导致所谓的角排序现象，这是喷注演化的概率蒙特卡罗方法的基础。

在介质中，类似的简化推理使我们能够理解颜色相干性在喷注抑制中的作用。通过多次软散射产生的受激发射的波长，在具有横向动量 $k_\perp^2 \sim \hat{q}L$ 的长度为 L 的介

质中,只有当天线的角度大于某个临界相干角时,才能在最大可能形成时间 $\tau_f \sim L$ 下分辨出单个电荷,即: $\theta_{q\bar{q}} > \theta_c \sim 1/\sqrt{\hat{q}L^3}$ (见图 1 左侧的草图)。这意味着一个角度小于 θ_c 的偶极子只会对其总电荷产生介质诱导发射。显然,获得对介质中颜色相干性物理现象越来越精确的理解对于更准确的现象学研究是不可或缺的。迄今为止,在许多模型 [15–17] 中已经实现了主导效应,显示出在几乎所有可观测量上的显著影响。

相干效应也在喷注演化的高虚质量阶段潜在修改中发挥作用。并非所有的动量转移都能解析具有横向动量 l_\perp 的短寿命高度虚双极子;只有那些带有 $k_\perp > l_\perp$ 转移的才能做到(参见图 1 右侧的草图)。由于高动量转移相对罕见,这意味着有效 \hat{q} 随着双极子 [18] 的虚质量增加而减少。包含所谓的修正相干效应导致了在喷注早期类似真空演化的过程中介质修改分裂函数影响的减轻。研究表明,在 JETSCAPE 中的 MATTER+LBT 设置内,这些考虑改善了单个包含强子和单个包含喷注抑制 [19–21] 的同时描述。当不包括时,喷注中领先粒子的刺激辐射过多转化为对单个包含强子来说过低的 R_{AA} 值。真空尺度与介质尺度之间的相互作用的重要性也通过最近使用 MARTINI [22, 23] 的研究得到了强调,研究表明考虑类似真空分裂的有限形成时间大大改善了几种喷注可观测量的描述。

研究由于介质相互作用而导致的喷注簇射修改的一种非常便捷的方法是使用 Lund 平面,该平面将喷注内部分裂密度作为其角度 θ 和横向动量 k_\perp 的函数进行映射。特别地,在不同的能量尺度 k_\perp 上执行切割允许我们在一定程度上解开不同物理机制所起的作用 [24]。研究那些高于某个高 k_\perp -切割的分裂的角度分布精确探测了在高虚性阶段的潜在修改,而较低值的 k_\perp 对相干物理和来自介质响应的半硬回撞更为敏感。这项正在进行的测量有可能实验上访问到真空样喷注演化的规模。在更正式的目标下使用 Lund 平面也是自然的,旨在基于有效场论技术开发一个用于喷注淬火的框架,如最近的努力 [25, 26] 中概述的那样,在那里利用了经历 DGLAP 演化的类真空硬准直模式与封装在威尔逊线关联中的介质修改准直软模式之间的尺度分离。

3 中等响应

我们已经看到了一些关于介质中色相干性和喷注物理的例子,因此自然会问这些效应在介质响应现象中扮演了什么角色。通常认为,喷注部分与介质成分之间的弹性散射发生时,就像喷注部分是一个从无限远处来的本征粒子一样。然而我们知道它们通常是偶极子的一部分。因此,只要由于多次软散射偶极子尚未去相干,半硬弹性散射就不能说是被偶极子的一条腿触发的,并且必须考虑量子干涉效应。这个简单的考虑具有潜在广泛的现象学应用,第一步已经在 [27] 中迈出。表明在介质部分(一个夸克)的反冲能量远小于偶极子的能量,但远大于介质粒子静止质量的情况下,其角度被限制为小于偶极子的开启角(对于色单

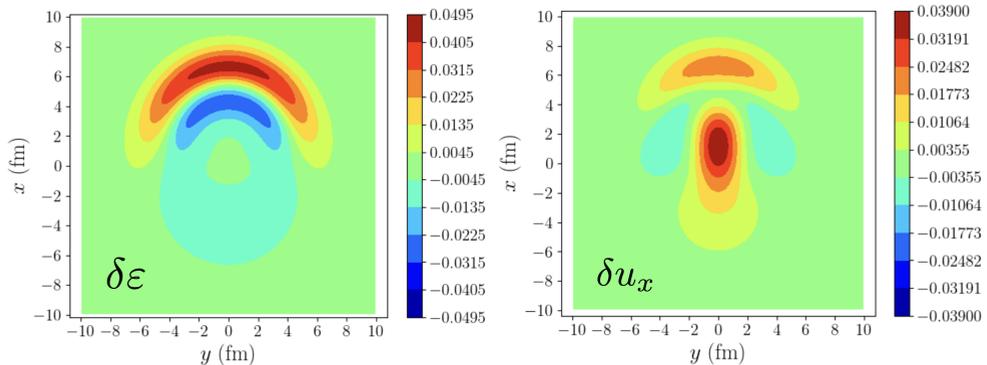


Figure 2. 由高能夸克在粘滞性 QGP 中沉积能量和动量所引起的流体扰动的横向剖面，在最后一次沉积后 6 fm/c。左侧：能量密度扰动 $\delta\varepsilon$ ，主要对应于声波模式，具有类似马赫锥的波前。它们携带很少的动量，并在冻结时间导致各向同性的粒子产生。右侧：高能夸克传播方向的速度扰动 δu_x 。它们主要对应于扩散尾迹贡献，携带着大部分动量。它们导致在冻结时间（相对于未受扰动的背景）沿喷注方向粒子过剩，并在相反方向上出现相应不足。图取自 [36]。

态偶极子)，这与上述讨论的真空中软胶子发射示例非常相似。此外，这意味着偶极子的实际碰撞能量损失实际上取决于它的亚结构，如 $\hat{e} \equiv dE/dx \sim \log \theta_{q\bar{q}}$ 所示。这种效应是已知的第一个关于色相干性和介质响应之间关系的效果，并且尚未在模型中实现。

人们认为，反冲的动力学对喷注淬火现象学具有重要意义。我们最近发现，在能量-能量关联器 (EEC) 可观测量 [28, 29] 中观察到的大角度增强中，它们可能是最大贡献者。这根据包括介质诱导辐射和反冲在内的模型得出，如 LBT[30–33] 和 JEWEL，这些模型开辟了新的方式来约束介质响应物理占主导地位的尺度。在多个显著特性中，EEC 峰值的位置在某种程度上保留了喷注产生时的尺度信息，这使得可以采取一种程序来消除某些选择偏差效应 [34, 35]，从而能够更直接地确定我们所追求的真实介质诱导修改。

介质响应效应的另一种表现方式是通过喷流穿过流动的 QGP 时激发的水动力尾迹。它们由于源项将能量和动量注入到介质中的水动力运动方程中而产生。能量密度 $\delta\varepsilon$ 的扰动以声波的形式传播，对于超音速喷流而言，结果是形成马赫锥结构（见图 2 的左面板）。这些模式携带非常少的动量。沿着喷流方向的动量扰动（与 δu 成比例），导致所谓的扩散尾迹结构，这是最具有现象学意义的，因为它携带着大部分动量。这些模式描述的是移动流体在喷流后方的位置，那里产生了扰动，并经历了一个带有旋度的回流运动（见图 2 的右面板）。

流体动力学尾迹对大多数可观测量的影响需要使用冻结超曲面上的 Cooper-Frye 程序进行常规映射, 将流体变量与粒子自由度联系起来。很容易看出, 声波带来的贡献会产生具有相当各向同性角度分布的软粒子, 而扩散尾迹的贡献则导致相对于未受扰动的流体 (实验中通常减去的不相关背景) 在喷注方向上的软强子过剩和相反方向 (横向平面内) 的减少。在这种情况下, 过剩和减少 (相对于不相关的背景) 可以从那些受到喷注注入动量影响的流体单元所经历的速度增加来理解——虽然在流体单元的静止框架中粒子产生是各向同性的, 但在实验室框架中进行速度变换会根据流体单元的速度方向和大小引入优选的方向。

自然, 这种相对于喷流方向的过剩和损耗也在考虑能量-动量守恒的有效动力学理论实现中观察到, 例如 [37, 38]。喷流部分子与夸克-胶子等离子体成分之间的弹性散射导致一个沿随机方向移动 (在静态介质中) 的热部分子被优先沿喷流方向移动的反冲部分子所替代。总体而言, 这使得沿着喷流方向的部分子过剩和与其相反方向的部分子损耗形成净效应。

在这次会议上, 我们看到了一些新的提案, 用于研究喷流诱发的水动力尾迹的动力学。由喷流内三重粒子的能量加权角度分布组成的三点能量相关器 (EEEC) 可观测量显示出对尾迹存在与否的显著依赖性, 在三角形 [39] 的等边区域中尤其明显。由于远离受 QCD 共线奇异性主导的小角度区域, 形成挤压状的三角形, 因此该区域在真空中相对不活跃。虽然 EEC 可观测量可以识别潜在动力学的角度尺度, 但 EEEEC (以及更高点的相关器) 可用于绘制出这些动力学本身。

另一个新提议围绕分析多个尾流的想法展开。在过去的几年里, 我们了解到, 在其类似真空的演化过程中经历更活跃碎裂的喷注结构往往会比那些具有较不活跃且因此更为狭窄碎裂模式的结构受到更多的抑制。那么问题就变成了是否可以分析由于多种结构被淬灭而产生的尾流特征。虽然这在典型喷注中的个别部分子层面上进行会极其复杂, 但 ATLAS [40, 41] 开创的新程序通过仅使用纤细的小 R 喷注来重建大 R 喷注使这一想法成为可能。通过对大 R 喷注内软粒子的角度分布作为两个纤细分喷注角度分离的函数进行研究, 实际上是在观察具有不同重叠程度的两个尾流的形状 [42, 43]。这开启了实验性地研究它们干涉图案及其与背景流动耦合的可能性, 取决于它们相对于碰撞事件平面的方向。

4 smoking gun

虽然很明显许多显示出在喷流方向周围软粒子过剩的可观测量受到介质反应物理的影响, 但同样正确的是, 由介质引起的辐射也导致了快速扩展到大角度的湍流级联软量子。这两种产生软粒子机制导致类似定性图像的程度, 在所谓的 CMS [44] 所说的缺失- p_T 可观测量中得到了很好的体现。这一非常差异化的可观测量解剖了作为相对于双喷流轴的角度函数, 主导和次级喷流半球之间的动量不平衡, 并以带电轨迹的 p_T 进行分箱。无论是湍流级联图像 [45] 还是水动力尾

迹轮廓 [46], 都与实验数据在定性上呈现出令人满意的吻合, 特别是在需要转向相当大的角度以恢复双喷流系统的动量平衡方面。

中等响应的独特之处在于, 即在其他机制中不存在的现象是流体所经历的阻力相反方向上的耗尽。第一次实验探索大约始于 5 年前, 使用了玻色子-喷注系统。玻色子-喷注系统的最大优势在于, 从淬火喷注反弹的无色玻色子 (光子或 Z) 不会向等离子体损失能量, 因此玻色子半球不包含任何潜在的尾迹或其他被淬火或未被淬火的强子结构, 这些都可能与信号重叠: 相对于非相关背景, 在玻色子半球 (在横向平面上与淬火喷注相反) 中出现产量减少。首次使用 Z -强子关联 [47] 进行搜索时没有校正来自多分子相互作用的污染。更近期的搜索使用了光子-喷注集合 [48, 49], 由于施加了喷注 p_T 切割, 因此灵敏度有限, 尽管目前的不确定程度并未排除测量到耗尽现象的可能性。

一个新的 (初步) 测量由 CMS [50, 51] 在长崎举行的 Hard Probes 会议上提出, 有望成为首次明确证明 QGP 对喷射通过响应的证据。带电强子相对于 Z -玻色子的方位角分布显示了明显的增强, 在未测量的喷射方向上以及沿 Z 方向的清晰耗尽中都是如此。实验结果与四种具有相当不同的物理成分的不同模型进行了对比。只有那些包含介质响应 (无论是水动力尾流还是弹性散射后的反冲) 的模型才能成功再现数据。此外, 发现 Z 半球中的耗尽现象位于 Z 的快速性附近, 这再次仅被包含介质响应的模型所很好地再现。QGP 在喷射方向上受到的拉伸意味着尾流实际上应该围绕未测量喷射的方位角和快速性定向。然而, 由于动力学约束 (即触发相当高能 Z), Z 和反冲喷射都倾向于位于中快速度附近。独特的扩散尾流效应也可以通过使用数量更多的双喷注样本揭示, 在这种情况下, 可以通过设置双喷注系统之间的不同快速度间隙来设计两个尾流的重叠 [52]。

在一个非常复杂的领域, 如重离子碰撞中, 人们并不经常遇到与特定物理机制密切相关的明显区分的定性效应。从理论角度看, 可以认为介质响应必须存在, 仅仅是因为能量-动量守恒, 但事先不清楚这些效应是否实际上可以在实验中测量到, 或者它们是否会因其他效应而被掩盖。如果得到证实, 这种新的 Z -强子相关性测量就代表了介质响应现象学重要性的实验证据。甚至更重要的是, 通过调整模型以获得 Z 边侧的正确耗尽量, 也可以得出由于介质响应而在喷注边侧引起的关联增强量, 从而限制潜在的替代粒子产生机制的贡献空间。

5 结论

新计算方法的出现, 量化了流动 QGP 性质对喷流辐射和展览的影响, 使我们比以往任何时候都更接近真正的喷流断层成像时代。对我们理解真空与介质尺度相互作用的发展至关重要, 以提供完整的图景。这包括确定早期类似于真空分裂的潜在修改以及改进描述色相干效应的精度。如果得到证实, 新的 CMS 测量 Z -强子关联可以成为喷流淬火物理学的一个里程碑。此时, 介质响应物理将成为

实验上证明其对现象学重要性的内容。很明显，为了在模型中一致地将反弹动力学与水动态涡流结合在一起，还需要进一步的工作。只有通过包含最先进的介质诱导辐射和介质响应实现的模型，才能对可观测量进行真正有意义的解释，并就 QGP 的本质做出稳健的声明。

致谢

DP 由欧盟的地平线 2020 计划通过玛丽居里资助协议 No 101155036 (AntScat) 资助，由欧洲研究理事会项目 ERC-2018-ADG-835105 YoctoLHC 资助，由西班牙国家研究机构通过项目 PID2020-119632GB-I00 资助，由 Xunta de Galicia (CIGUS Network) 和欧盟资助，并由卓越单位玛丽亚·德·梅策托项目 CEX2023-001318-M 资助。

References

- [1] G. Aad et al. [ATLAS], *Phys. Lett. B* 846 (2023), 138154 doi:10.1016/j.physletb.2023.138154 [arXiv:2303.10090 [nucl-ex]].
- [2] G. Aad et al. [ATLAS], *Phys. Rev. C* 100 (2019) no.6, 064901 [erratum: *Phys. Rev. C* 101 (2020) no.5, 059903] doi:10.1103/PhysRevC.100.064901 [arXiv:1908.05264 [nucl-ex]].
- [3] J. P. Blaizot, F. Dominguez, E. Iancu and Y. Mehtar-Tani, *JHEP* 01 (2013), 143 doi:10.1007/JHEP01(2013)143 [arXiv:1209.4585 [hep-ph]].
- [4] P. M. Chesler and K. Rajagopal, *JHEP* 05 (2016), 098 doi:10.1007/JHEP05(2016)098 [arXiv:1511.07567 [hep-th]].
- [5] M. V. Kuzmin, X. Mayo López, J. Reiten and A. V. Sadofyev, *Phys. Rev. D* 109 (2024) no.1, 014036 doi:10.1103/PhysRevD.109.014036 [arXiv:2309.00683 [hep-ph]].
- [6] X. Mayo López, These proceedings.
- [7] J. Barata, C. A. Salgado and J. M. Silva, *JHEP* 12 (2024), 023 doi:10.1007/JHEP12(2024)023 [arXiv:2407.04774 [hep-ph]].
- [8] J. M. Silva, These proceedings.
- [9] C. A. Salgado, These proceedings.
- [10] J. Bahder, H. Rahman, M. D. Sievert and I. Vitev, [arXiv:2412.05474 [nucl-th]].
- [11] J. Bahder, These proceedings.
- [12] R. J. Fries, These proceedings.
- [13] T. Luo, These proceedings.

- [14] Y. Tachibana and T. Hirano, Phys. Rev. C 93 (2016) no.5, 054907 doi:10.1103/PhysRevC.93.054907 [arXiv:1510.06966 [nucl-th]].
- [15] Z. Hulcher, D. Pablos and K. Rajagopal, JHEP 03 (2018), 010 doi:10.1007/JHEP03(2018)010 [arXiv:1707.05245 [hep-ph]].
- [16] P. Caucal, E. Iancu and G. Soyez, JHEP 10 (2019), 273 doi:10.1007/JHEP10(2019)273 [arXiv:1907.04866 [hep-ph]].
- [17] Y. Mehtar-Tani, D. Pablos and K. Tywoniuk, Phys. Rev. D 110 (2024) no.1, 014009 doi:10.1103/PhysRevD.110.014009 [arXiv:2402.07869 [hep-ph]].
- [18] A. Kumar, A. Majumder and C. Shen, Phys. Rev. C 101 (2020) no.3, 034908 doi:10.1103/PhysRevC.101.034908 [arXiv:1909.03178 [nucl-th]].
- [19] A. Kumar et al. [JETSCAPE], Phys. Rev. C 107 (2023) no.3, 034911 doi:10.1103/PhysRevC.107.034911 [arXiv:2204.01163 [hep-ph]].
- [20] A. Kumar, These proceedings.
- [21] P. M. Jacobs, These proceedings.
- [22] R. Modarresi-Yazdi, S. Shi, C. Gale and S. Jeon, [arXiv:2407.19966 [hep-ph]].
- [23] S. Shi, These proceedings.
- [24] L. Cunqueiro, D. Pablos, A. Soto-Ontoso, M. Spousta, A. Takacs and M. Verweij, Phys. Rev. D 110 (2024) no.1, 014015 doi:10.1103/PhysRevD.110.014015 [arXiv:2311.07643 [hep-ph]].
- [25] Y. Mehtar-Tani, F. Ringer, B. Singh and V. Vaidya, [arXiv:2409.05957 [hep-ph]].
- [26] Y. Mehtar-Tani, These proceedings.
- [27] D. Pablos and S. Sanjurjo, Phys. Rev. D 110 (2024) no.11, L111502 doi:10.1103/PhysRevD.110.L111502 [arXiv:2406.08550 [hep-ph]].
- [28] V. Chekhovsky et al. [CMS], [arXiv:2503.19993 [nucl-ex]].
- [29] J. Viinikainen, These proceedings.
- [30] Z. Yang, Y. He, I. Moulton and X. N. Wang, Phys. Rev. Lett. 132 (2024) no.1, 1 doi:10.1103/PhysRevLett.132.011901 [arXiv:2310.01500 [hep-ph]].
- [31] Z. Yang, These proceedings.
- [32] W. J. Xing, S. Cao, G. Y. Qin and X. N. Wang, Phys. Rev. Lett. 134 (2025) no.5, 052301 doi:10.1103/PhysRevLett.134.052301 [arXiv:2409.12843 [hep-ph]].
- [33] W. J. Xing, These proceedings.
- [34] C. Andres, J. Holguin, R. Kunnawalkam Elayavalli and J. Viinikainen, Phys. Rev. Lett. 134 (2025) no.8, 082303 doi:10.1103/PhysRevLett.134.082303 [arXiv:2409.07514 [hep-ph]].

- [35] C. Andrés, These proceedings.
- [36] J. Casallerrey-Solana, J. G. Milhano, D. Pablos, K. Rajagopal and X. Yao, JHEP 05 (2021), 230 doi:10.1007/JHEP05(2021)230 [arXiv:2010.01140 [hep-ph]].
- [37] Y. He, T. Luo, X. N. Wang and Y. Zhu, Phys. Rev. C 91 (2015), 054908 [erratum: Phys. Rev. C 97 (2018) no.1, 019902] doi:10.1103/PhysRevC.91.054908 [arXiv:1503.03313 [nucl-th]].
- [38] Y. Mehtar-Tani, S. Schlichting and I. Soudi, JHEP 05 (2023), 091 doi:10.1007/JHEP05(2023)091 [arXiv:2209.10569 [hep-ph]].
- [39] H. Bossi, A. S. Kudinoor, I. Moulton, D. Pablos, A. Rai and K. Rajagopal, JHEP 12 (2024), 073 doi:10.1007/JHEP12(2024)073 [arXiv:2407.13818 [hep-ph]].
- [40] G. Aad et al. [ATLAS], Phys. Rev. Lett. 131 (2023) no.17, 172301 doi:10.1103/PhysRevLett.131.172301 [arXiv:2301.05606 [nucl-ex]].
- [41] M. Rybar, These proceedings.
- [42] A. S. Kudinoor, D. Pablos and K. Rajagopal, [arXiv:2501.18683 [hep-ph]].
- [43] A. S. Kudinoor, These proceedings.
- [44] V. Khachatryan et al. [CMS], JHEP 01 (2016), 006 doi:10.1007/JHEP01(2016)006 [arXiv:1509.09029 [nucl-ex]].
- [45] J. P. Blaizot and Y. Mehtar-Tani, Int. J. Mod. Phys. E 24 (2015) no.11, 1530012 doi:10.1142/S021830131530012X [arXiv:1503.05958 [hep-ph]].
- [46] J. Casallerrey-Solana, D. Gulhan, G. Milhano, D. Pablos and K. Rajagopal, JHEP 03 (2017), 135 doi:10.1007/JHEP03(2017)135 [arXiv:1609.05842 [hep-ph]].
- [47] A. M. Sirunyan et al. [CMS], Phys. Rev. Lett. 128 (2022) no.12, 122301 doi:10.1103/PhysRevLett.128.122301 [arXiv:2103.04377 [hep-ex]].
- [48] G. Aad et al. [ATLAS], Phys. Rev. C 111 (2025), 044909 doi:10.1103/PhysRevC.111.044909 [arXiv:2408.08599 [nucl-ex]].
- [49] Y. Go, These proceedings.
- [50] [CMS], CMS-PAS-HIN-23-006.
- [51] Y. J. Lee, These proceedings.
- [52] D. Pablos, Phys. Rev. Lett. 124 (2020) no.5, 052301 doi:10.1103/PhysRevLett.124.052301 [arXiv:1907.12301 [hep-ph]].