PROCEEDINGS OF SCIENCE

重离子碰撞中的软硬贝叶斯推断

Lipei Du[a, b, *] **代表 JETSCAPE 合作组**

[a]加利福尼亚大学伯克利分校物理系，美国加利福尼亚州伯克利，邮编 *94720*[b]劳伦斯伯克利国家实验室核科学部，美国加利福尼亚州伯克利，邮编 *94720*

电子邮箱：ldu2@lbl.gov

arXiv:2611.27971v1 [nucl-th] 20 Nov 2026

喷注淬火的贝叶斯分析通常利用通过软部门标定获得的固定夸克-胶子等离子体（QGP）背景来约束喷注-介质相互作用参数。这种方法忽略了介质中的不确定性，并阻止硬观测量对其性质提供额外约束。我们在 $\sqrt{s_{NN}}$ =2.76 TeV 的铅-铅碰撞中，使用简化的三参数空间开展序贯贝叶斯推断，研究这些影响。我们将介质的初始归一化和核子宽度与喷注-介质耦合一同改变，并结合 JETSCAPE 介质演化与 MATTER+LBT 对高-p_T 强子和包容喷注抑制的计算。我们首先仅使用硬观测量约束全部三个参数，然后通过序贯推断纳入投影软扇区后验。我们发现，硬观测量对介质性质敏感，并显示出与喷注-介质耦合之间的显著相关性，反映了它们对喷注淬火的补偿效应。将软部门信息传播进去后，相对于固定介质提取，首选耦合发生了偏移，而这一更新主要由强子抑制测量驱动。尽管仅基于硬观测量的推断与序贯推断所偏好的介质参数和耦合存在显著差异，但二者的抑制预测在很大一部分测量范围内仍然相近。这些发现凸显出，仅凭包容抑制测量，很难区分夸克胶子等离子体介质的变化与微观喷注-介质相互作用强度的变化。

第 *13* 届国际高能核碰撞硬探针与电磁探针会议（*HardProbes2026*），*2026*年*6*月*21*日至*26*日，美国田纳西州纳什维尔

*报告人

© 版权归作者所有，依据知识共享署名-非商业性使用-禁止演绎 4.0 国际许可协议（CC BY-NC-ND 4.0）条款。文本和数据挖掘、人工智能训练及类似技术用于商业目的的所有权利均予保留。ISSN 1824-8039。由 SISSA Medialab 出版。

1. 动机与贝叶斯设定

软观测量约束夸克胶子等离子体介质，而硬探针同时取决于其演化以及高能部分子与介质之间的相互作用 [1]。喷注淬火的贝叶斯分析通常使用来自独立标定的固定介质背景，而不传播其不确定性 [2–4]。我们在 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV 的铅-铅碰撞中研究其影响，将现有的 JETSCAPE 软扇区后验 [5, 6]与 MATTER+LBT 对强子和喷注抑制的计算相结合 [4, 7]。

我们在一个简化的三参数空间中开展研究：TRENTo 归一化因子 N 控制初始密度尺度；核子宽度 w 影响横向几何结构；喷注-介质耦合α_s则控制输运系数 $\hat{q}$ 中的软尺度相互作用强度。它们的先验范围分别为 $N \in [10, 20]$, $w \in [0.5, 1.5]$ fm、 $\alpha_s \in [0.1, 0.5]$。硬数据集包含 17 组强子和包容性喷注 R_{AA} 测量，共有 206 个数据分箱。

在 (N, w, α_s) 空间中的 40 个设计点上，我们使用选定的 (N, w) 生成逐事件介质背景，随后通过 MATTER+LBT 对硬部分子进行抽样并传播，所用参数对应于 α_s [7–9]。高斯过程模拟器对所得的强子和喷注 R_{AA} 预测进行插值 [10]。高斯似然包含模拟器预测协方差和对角实验方差，但不包含额外的模型差异项。

假设在给定模型参数的条件下，软数据集与硬数据集（D_{S} 和 D_{H}）条件独立，则这一简化参数空间中的序贯后验为 [11]

$$p^{\mathrm{red}}_{\mathrm{seq}}(N, w, \alpha_s \mid D_{\mathrm{S}}, D_{\mathrm{H}}) \propto \mathcal{L}^{\mathrm{red}}_{\mathrm{H}}(D_{\mathrm{H}} \mid N, w, \alpha_s)\, p_{\mathrm{S}}(N, w \mid D_{\mathrm{S}})\, \pi_J(\alpha_s). \tag{1}$$

这里， p_{S} 是完整软扇区后验在（N， w）上的投影，而 π_J 是 α_s的先验。因此，硬数据会更新受软数据约束的介质分布，同时约束该分布与 α_s之间的相关性。为单独考察软信息的作用，我们还进行了仅硬可观测量推断：在宽先验下改变全部三个参数，使用相同的硬数据似然，但不施加p_{S}。为体现传统的固定介质方法，我们还在选定值下固定（N， w），仅改变 α_s进行推断。

在硬可观测量计算中，其他介质参数和喷注扇区参数保持固定。固定的喷注参数来自先前的一次校准 [4]，该校准采用了不同的介质背景 [12]，因此在当前设置下可能不再是最优参数。由此得到的推断隔离了保留的参数相关性，而非提供完整的软硬联合校准。

2. 结果与讨论

在宽泛的介质先验下，仅硬可观测量推断倾向于较低的 N和较大的 w [图1(a)]，均值分别为 $N = 10.17$和 $w = 1.39$ fm。二者均接近先验边界，表明的是偏好方向，而非对介质的精确测定。投影软后验则中心位于$(N, w) \simeq (14.7, 1.03\ \mathrm{fm})$附近。综合这些约束后，序贯后验在软分布的低$N$尾部选取$(N, w) \simeq (12.48, 1.01\ \mathrm{fm})$。鉴于上文讨论的受限模型自由度，这一偏移不应被解释为与模型无关的软–硬张力。

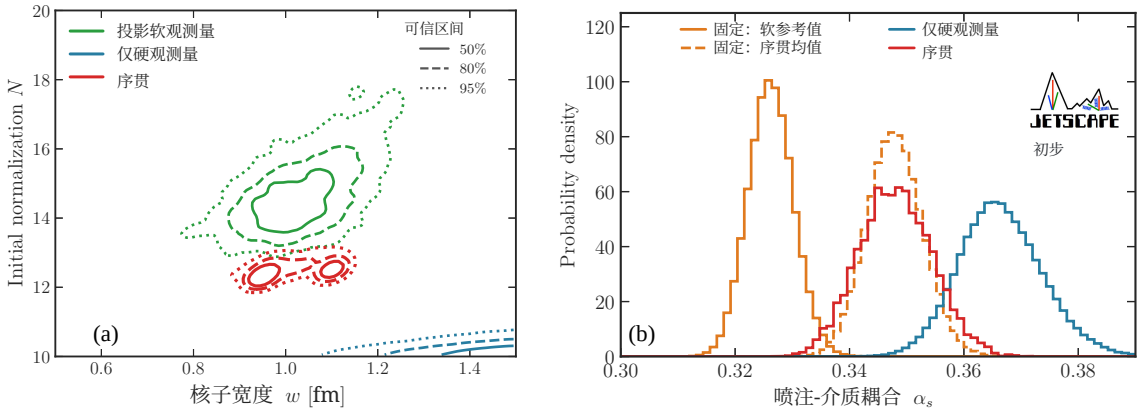


图 1： (a) 投影软观测量、宽先验硬观测量独立后验分布和序贯后验分布在 $(w,\ N)$ 平面上的分布。实线、虚线和点线轮廓分别围成 50%、80% 和 95% 的可信区间。(b) 硬观测量独立推断和序贯推断得到的耦合后验分布，以及在软参考背景和序贯均值背景下的固定介质提取结果。

将介质固定在软扇区最大后验值(N, w) = (14.2,1.12 fm)处，得到后验均值$\alpha_s = 0.326$，以及第16–84百分位区间 [0.322,0.330]。仅硬可观测量推断与序贯推断分别给出0.367（[0.359,0.374]）和0.348（[0.342, 0.355]）。将介质固定在序贯均值（橙色虚线）处同样给出 $\alpha_s \simeq 0.348$，但这一结果与序贯结果（红色实线）的一致并不意味着条件化与边缘化等价。

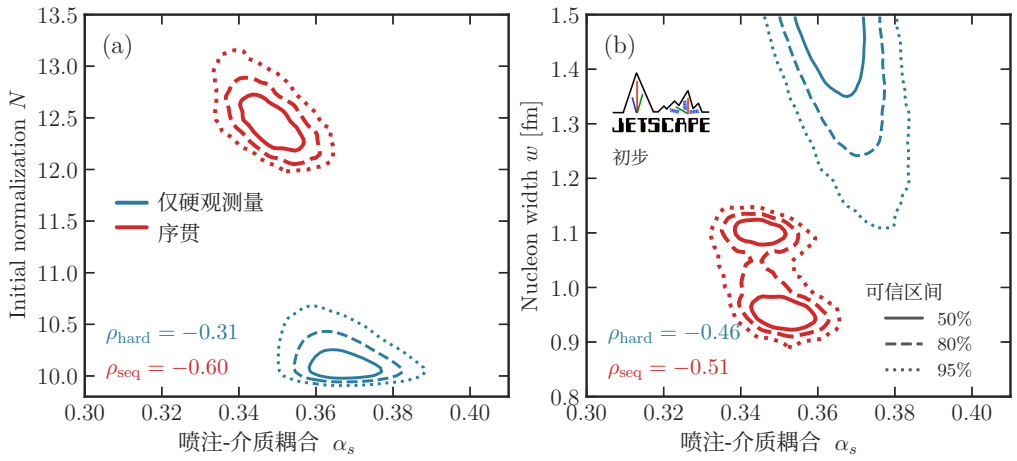


图 2： 硬观测量独立推断和序贯推断中的介质–耦合相关性：α_s 与 (a) N和 (b) w的关系。实线、虚线和点线轮廓分别围成 50%、80% 和 95% 的可信区间；ρ 为皮尔逊相关系数。

图2展示了介质–耦合补偿。增大 N 会提高特征介质密度和温度，因此用较小的 α_s也能实现相近的抑制，反之亦然。这种反相关在仅硬可观测量推断中已经存在。在序贯后验中，$\rho(\alpha_s,\ N) \simeq -0。60$ 和 $\rho(\alpha_s,\ w) \simeq -0。51$。后者也反映了横向变化

几何结构以及高能部分子所经历的路径，而非对密度进行简单缩放。固定背景可从耦合提取中排除这些补偿方向。

分步序贯更新表明，强子抑制测量使 N 向较低值移动，并使 α_s趋于局域化；相比之下，纳入的喷注测量对介质后验分布的影响较弱。强子谱陡峭下降，因此领先强子的抑制对部分子能量损失十分敏感，而重建喷注则可能将部分重新分布的喷注簇射能量保留在喷注锥内。不同的运动学覆盖范围和实验不确定性也有所影响，这与早期 JETSCAPE 分析中发现的观测量选择依赖性一致 [4, 13]；但这并不能证明强子和喷注测量之间存在普遍的优先级关系。

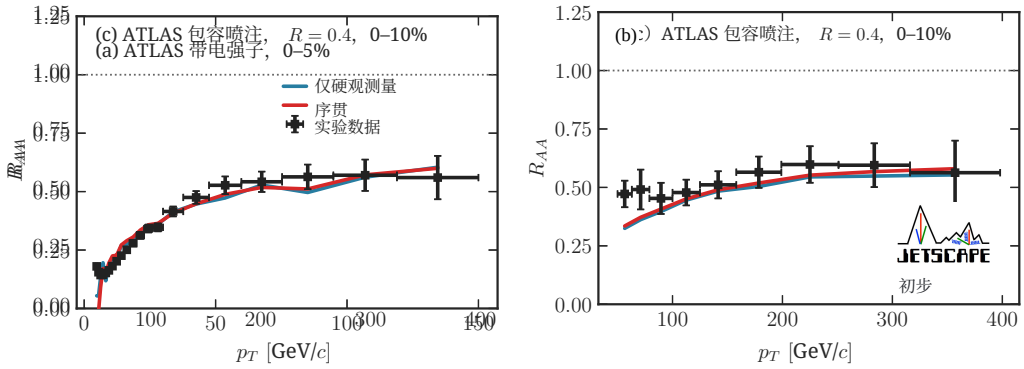


图3： 在 $\sqrt{s_{NN}}$ = 2.76 TeV下，仅硬观测量与序贯 R_{AA} 的代表性预言：(a) 0–5% [14]中的ATLAS带电强子，以及(b) 0–10% [15]中 R = 0.4的ATLAS包容喷注。线条所示为后验中位数。

测量观测量所受的影响如图3所示。尽管 N、 w和 α_s发生了显著变化，仅硬观测量推断与序贯推断仍预言相近的 R_{AA} ，覆盖所示运动学范围的大部分。最大的可见差异出现在低 p_T 处的带电强子上。包容抑制对部分子产生点、轨迹和簇射历史取平均，因此不同的介质构型与相互作用强度可以产生相当的净淬火。这是图2中关联的可观测表现：仅凭包容抑制测量，难以区分夸克胶子等离子体介质的变化与喷注与介质相互作用强度的变化。

3. 结论与展望

将软过程扇区约束传播到硬探针推断中，会改变偏好的介质构型和喷注-介质耦合。由于硬观测量约束的是相互关联的介质与相互作用方向，固定介质得到的是一种条件耦合提取，而非对允许的介质不确定性进行传播。不同后验分布给出的抑制预测相近，这进一步凸显了区分介质演化与微观相互作用强度的困难。未来需要进行更高维标定，以确定在允许固定模型参数重新调整时，这些发现会如何变化，并评估对软硬过程观测量的同时描述。

致谢

本研究部分得到美国能源部科学办公室核物理办公室的支持，合同编号为 DE-AC02-05CH11231；此外，还通过 JETSCAPE 合作组获得美国国家科学基金会的资助，项目编号为 OAC-2004571 和 OAC-2514008。ChatGPT（GPT-6）用于协助润色语言。

参考文献

[1] *K. M. Burke* 等 [*JET*合作组], 从高能重离子碰撞中的喷注淬火提取喷注输运系数，物理评论 *C 90 (2014) 014909*。[2] *S. Cao* 等 [*JETSCAPE*], 利用贝叶斯参数估计，根据包容强子抑制测量确定喷注输运系数 $\hat{q}$，物理评论 *C 104 (2021)*024905 [*arXiv:2102.11337*]。[3] *M. Xie*、*W. Ke*、*H. Zhang* 和 *X.-N. Wang*，基于信息场的喷注输运系数全局贝叶斯推断，物理评论 *C 108 (2023) L011901*。[4] *R. Ehlers* 等 [*JETSCAPE*], 利用包容喷注和强子抑制测量对喷注淬火进行贝叶斯推断分析，物理评论 *C 111 (2025)* 054913 [*arXiv:2408.*08247]。[5] *D. Everett* 等 [*JETSCAPE*], 对量子色动力学物质的输运系数进行多系统贝叶斯约束，物理评论 *C 103 (2021)* 054904 [*arXiv:2011.*01430]。[6] *D. Everett* 等 [*JETSCAPE*], 利用数据驱动模型平均对量子色动力学物质的输运性质施加唯象约束，物理评论快报 *126 (2021) 242301*[*arXiv:2010.*03928]。[7] *A. Kumar* 等 [*JETSCAPE*], 多阶段方法中的包容喷注和强子抑制，物理评论 *C 107 (2023)* 034911 [*arXiv:2204.*01163]。[8] *J. H. Putschke* 等，*JETSCAPE*框架，*arXiv:1903.07706 (2019)*。[9] *A. Kumar* 等 [*JETSCAPE*], *JETSCAPE*框架：$p+p$ 结果，物理评论 *C 102 (2020) 054906*。

[10] W. Fan 等 [JETSCAPE], 改进多阶段方法中强子和包容喷注抑制研究的贝叶斯校准的新指标，*Phys. Rev. C* **109** (2024) 064903。

[11] L. Du，利用相关重离子数据集进行序贯贝叶斯推断，*Phys. Lett. B* **883**(2026) 141159 [arXiv:2605.17868]。

[12] J. E. Bernhard、J. S. Moreland 和 S. A. Bass，夸克-胶子等离子体的特定剪切黏度和体黏度的贝叶斯估计，*Nature Phys.***15** (2019) 1113–1117。

[13] L. Du 代表 JETSCAPE 合作组，使用贝叶斯推断与 *JETSCAPE* 对喷注淬火进行多观测量分析，核物理学 *A***1060** (2025) 123100。

[14] G. Aad 等 [ATLAS], *Pb* 中带电粒子谱的测量+在大型强子对撞机的 $\sqrt{s_{NN}}$ = 2。76 *TeV Pb-Pb* 碰撞中使用大型强子对撞机上的 *ATLAS* 探测器，高能物理学杂志 **09** (2015) 050[arXiv:1504。04337]。

[15] G. Aad 等 [ATLAS], *Pb-Pb* 碰撞中喷注的核修正因子测量+，使用 *ATLAS* 探测器在 $\sqrt{s_{NN}}$ = 2。76 *TeV* 能量下，物理评论快报 **114** (2015) 072302[arXiv:1411.2357]。