质子-质子碰撞中双喷注快度不对称性的PYTHIA模型研究

高艺航

华中师范大学

2026年10月20日，武汉

Spicy Gluon 2026

喷注和喷注淬火

- **喷注:** 硬散射过程产生的高能部分子强子化后的准直粒子束流。

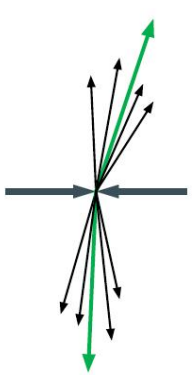
- 在重离子碰撞中, 部分子喷注穿过夸克-胶子等离子体时发生能量损失, 这一现象被称为 **喷注淬火。**

➡喷注可以作为研究QGP性质的探针。

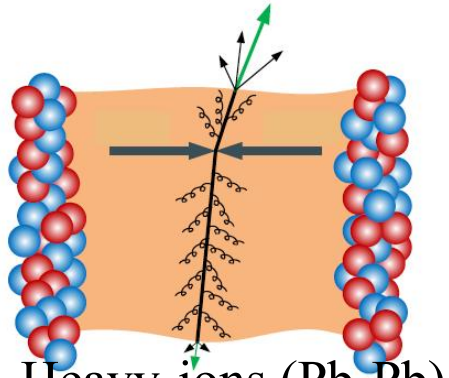
- ALICE通过强子-喷注关联测量了半单举反冲喷注产额随喷注横动量的分布

  → 中高横动量产额降低（能量损失）

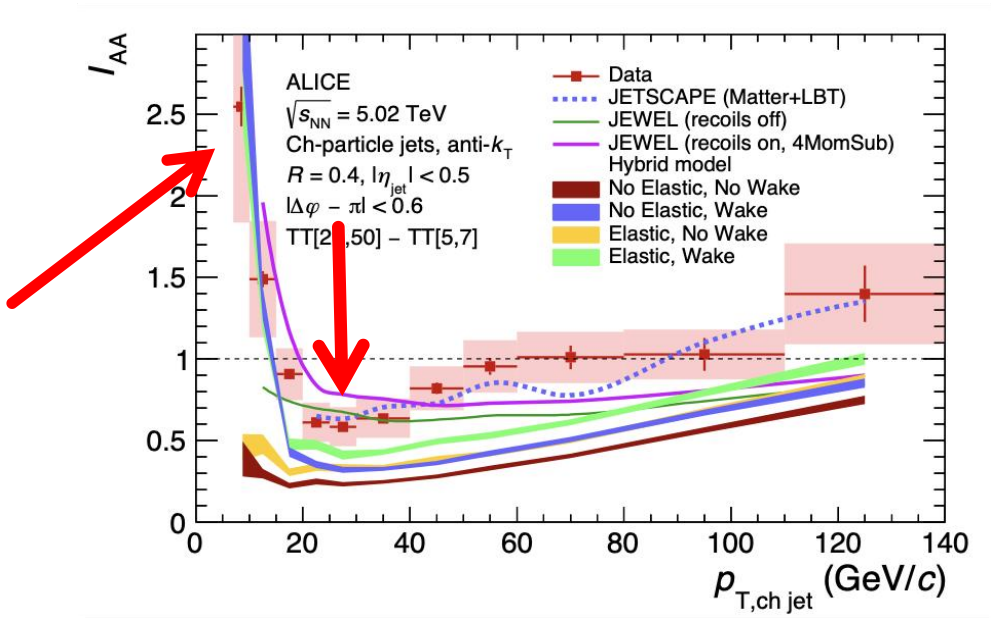
  → **低横动量产额增强** （介质响应/部分子簇射？）



pp

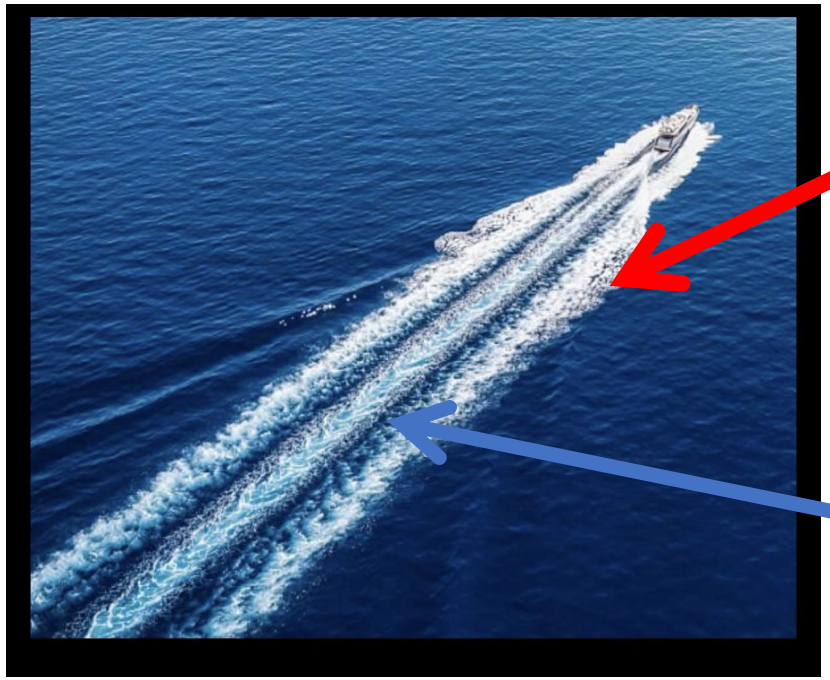


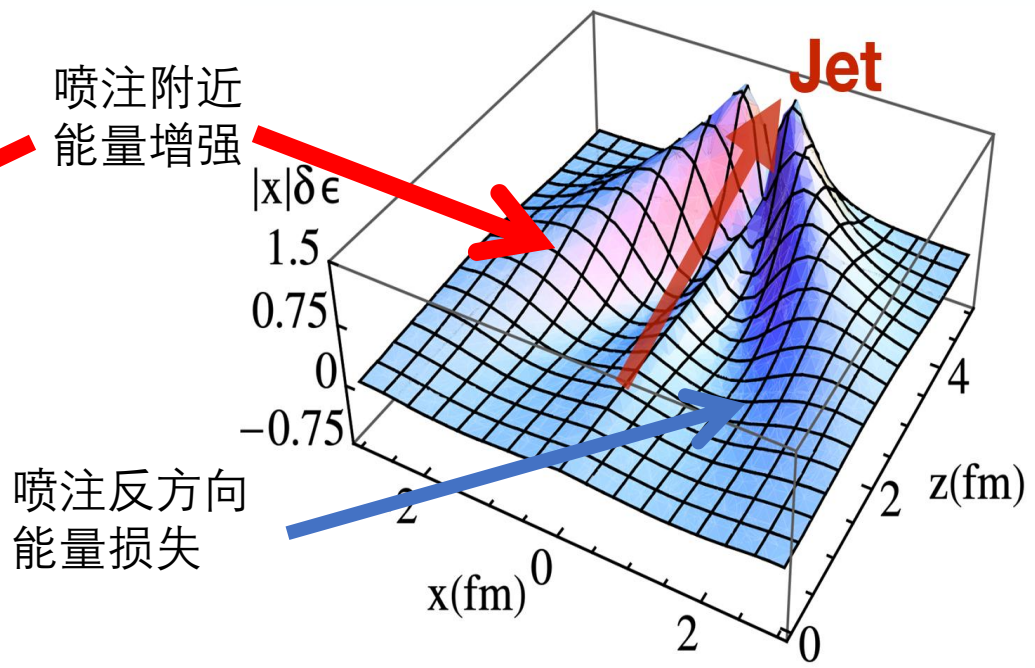
Heavy-ions (Pb-Pb)



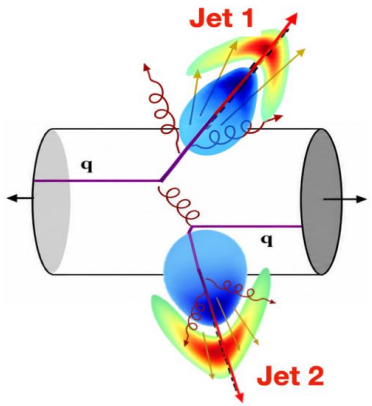
喷注介质响应

- 喷注沉积在介质中的能量和动量会激发局域介质的集体响应，产生两种关键物理信号:
  - 马赫锥声波激发：高速部分子在QGP中超声速运动，激发类似冲击波的结构，使喷注侧向伴随粒子**产额显著增强**。
  - **耗散尾流效应**：基于能动量守恒，喷注向前输运能量后，在喷注运动的反方向会出现介质粒子**产额减少**的尾流区域。

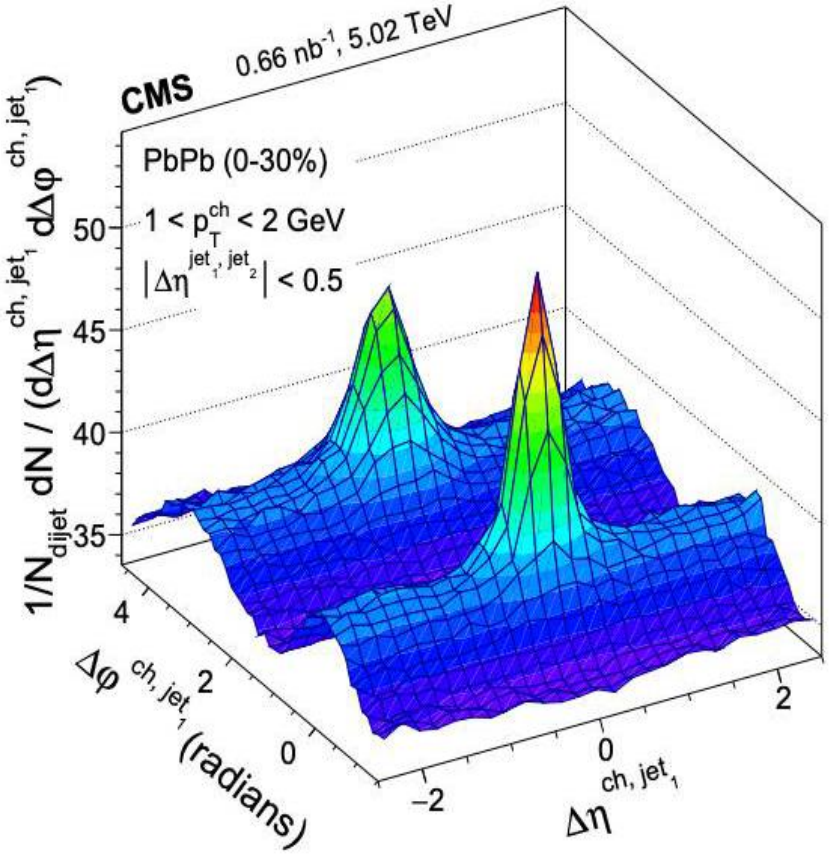




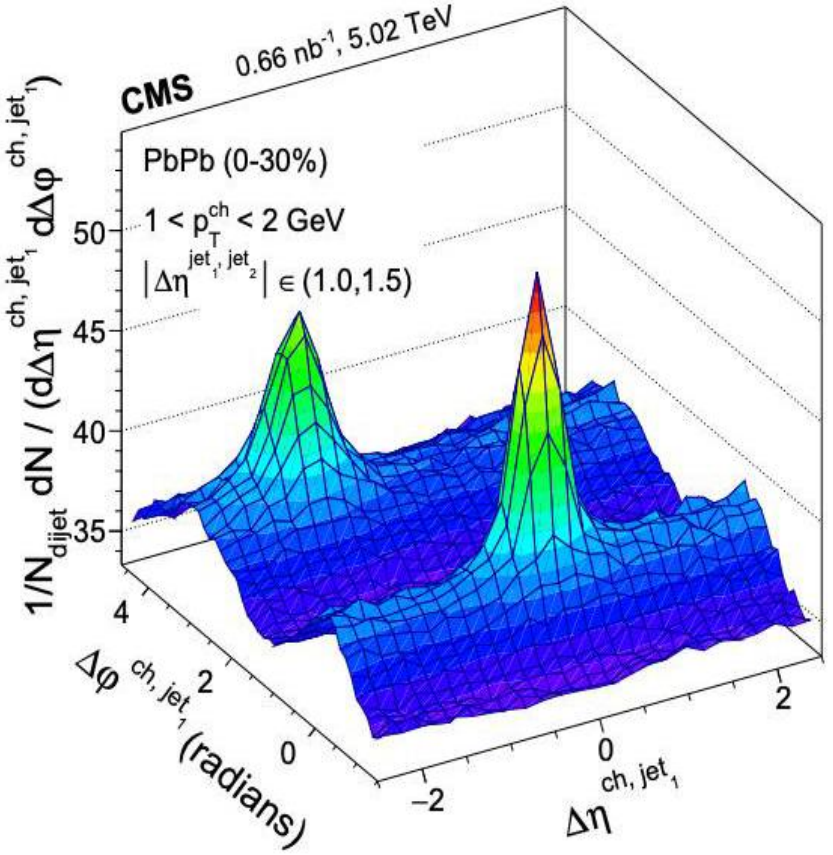
CMS利用双喷注观测扩散尾流

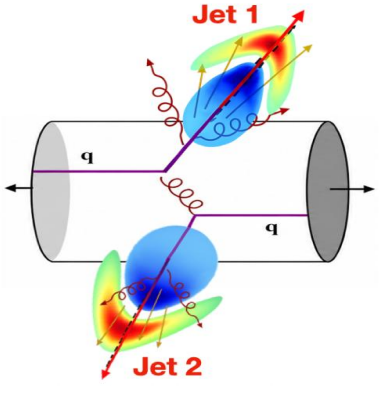


R^{sym}: $|\Delta\eta^{jet1,jet2}|<0.5$



R^{asym}:$|\Delta\eta^{jet1,jet2}| \in (1.0, 1.5)$

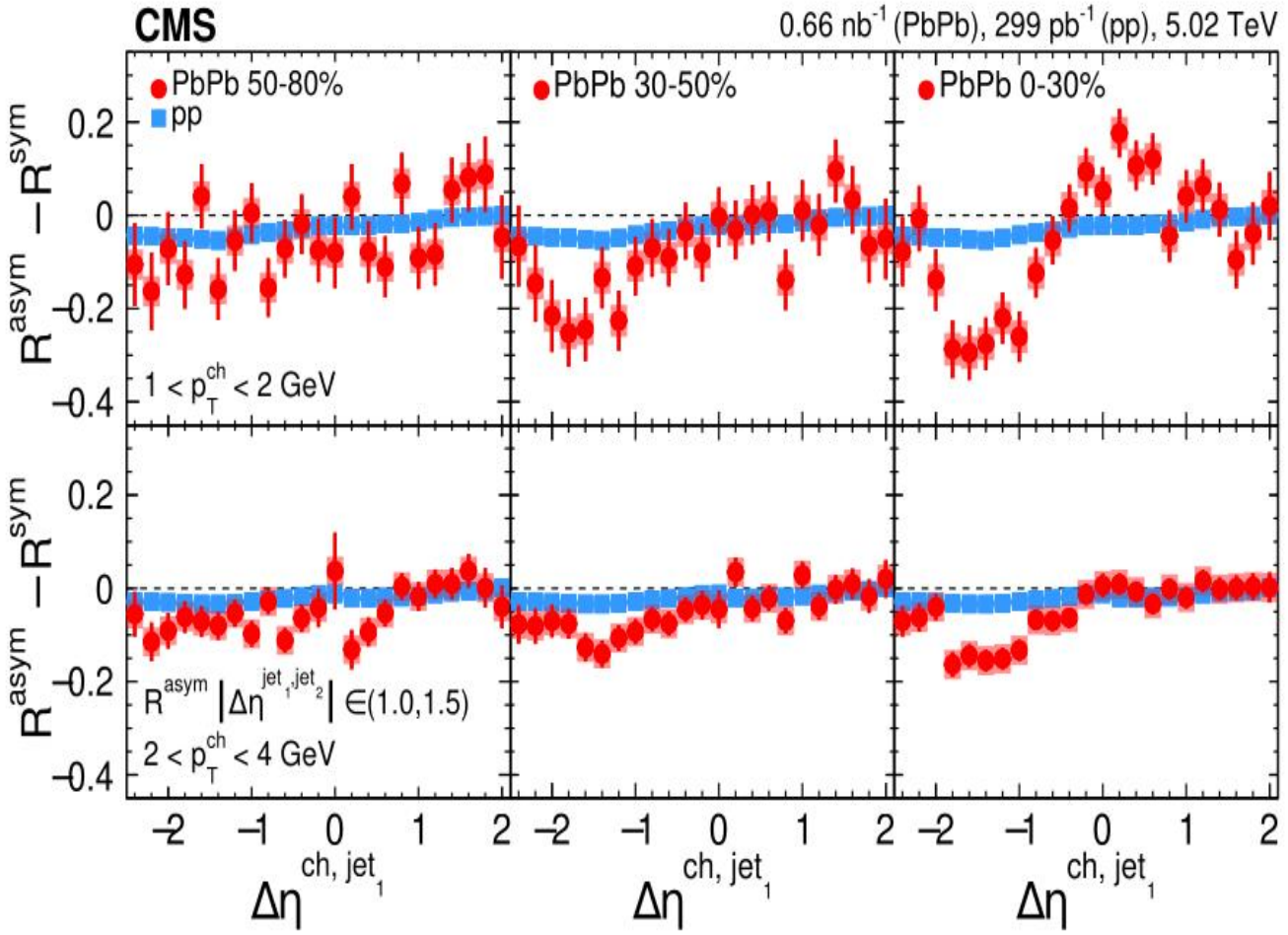




$$N_{AA} = \int d\Delta\phi \left[\frac{dN_{AA}}{d\Delta\phi d\Delta\eta}\right]$$

$$R^{asym} - R^{sym} = N_{AA}(1.0 < |\Delta\eta_{jet1,jet2}| < 1.5) - N_{AA}(|\Delta\eta_{jet1,jet2}| < 0.5)$$

CMS利用双喷注事件观测到扩散尾流



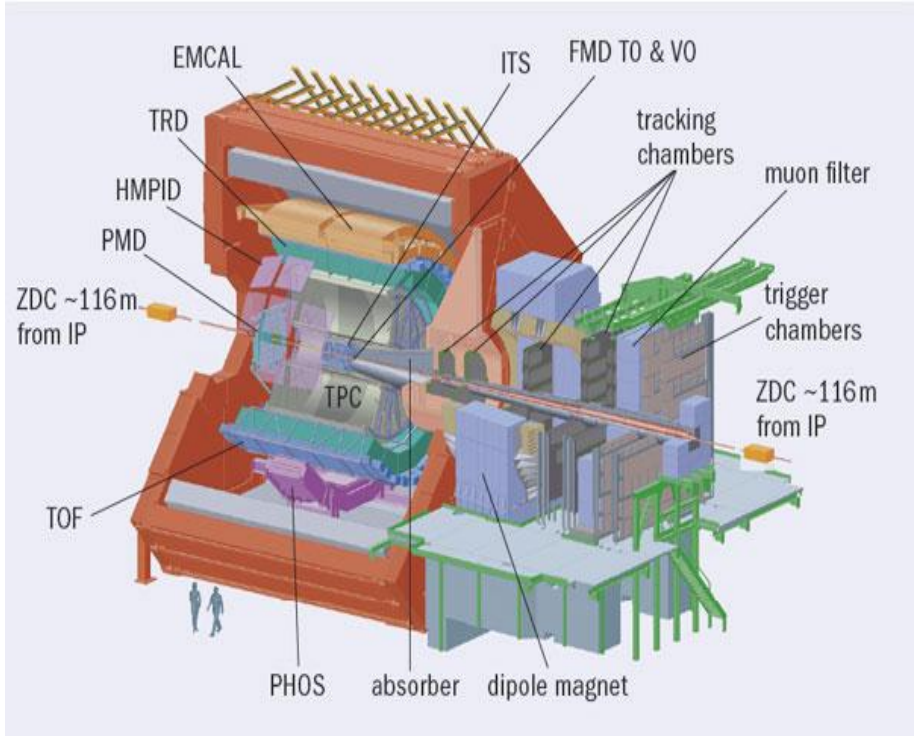
- CMS利用5.02TeV的pp和pb-pb数据绘制的dijet事件的hadron-jet关联的$\Delta\eta$图。
- pp的差值在误差范围内基本趋于0，可以为研究pb-pb快度不对称性提供基线参考。
- 在最中心pb-pb碰撞观察到明显的耗散尾流信号，且该信号随强子横动量增高而减弱。

https://arxiv.org/abs/2602.19431v2

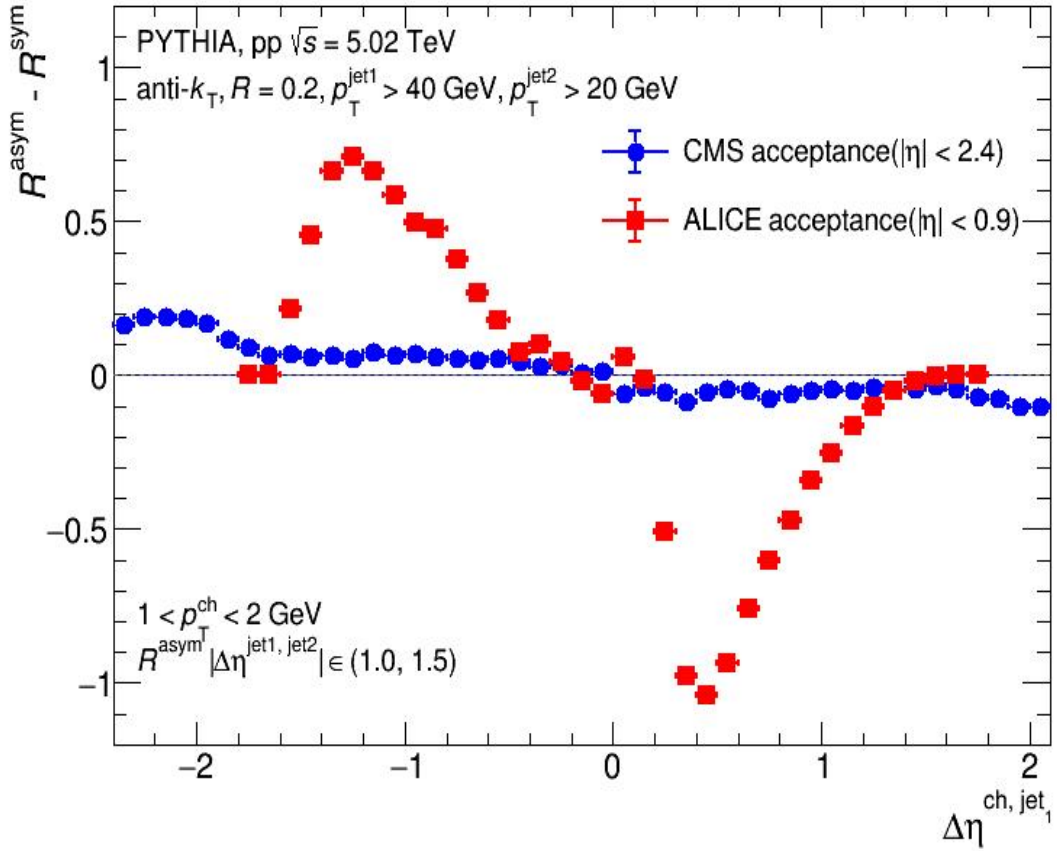
$$R^{asym} - R^{sym} = N_{AA}(1.0 < |\Delta\eta_{jet1,jet2}| < 1.5) - N_{AA}(|\Delta\eta_{jet1,jet2}| < 0.5)$$

→ *能否用PYTHIA模拟pp碰撞为ALICE实验识别喷注诱导扩散尾流信号提供必要的基准参照?*

探测器接受度对快度关联不对称性的影响



- 用PYTHIA模拟ALICE和CMS接受度下的$\Delta\eta$图

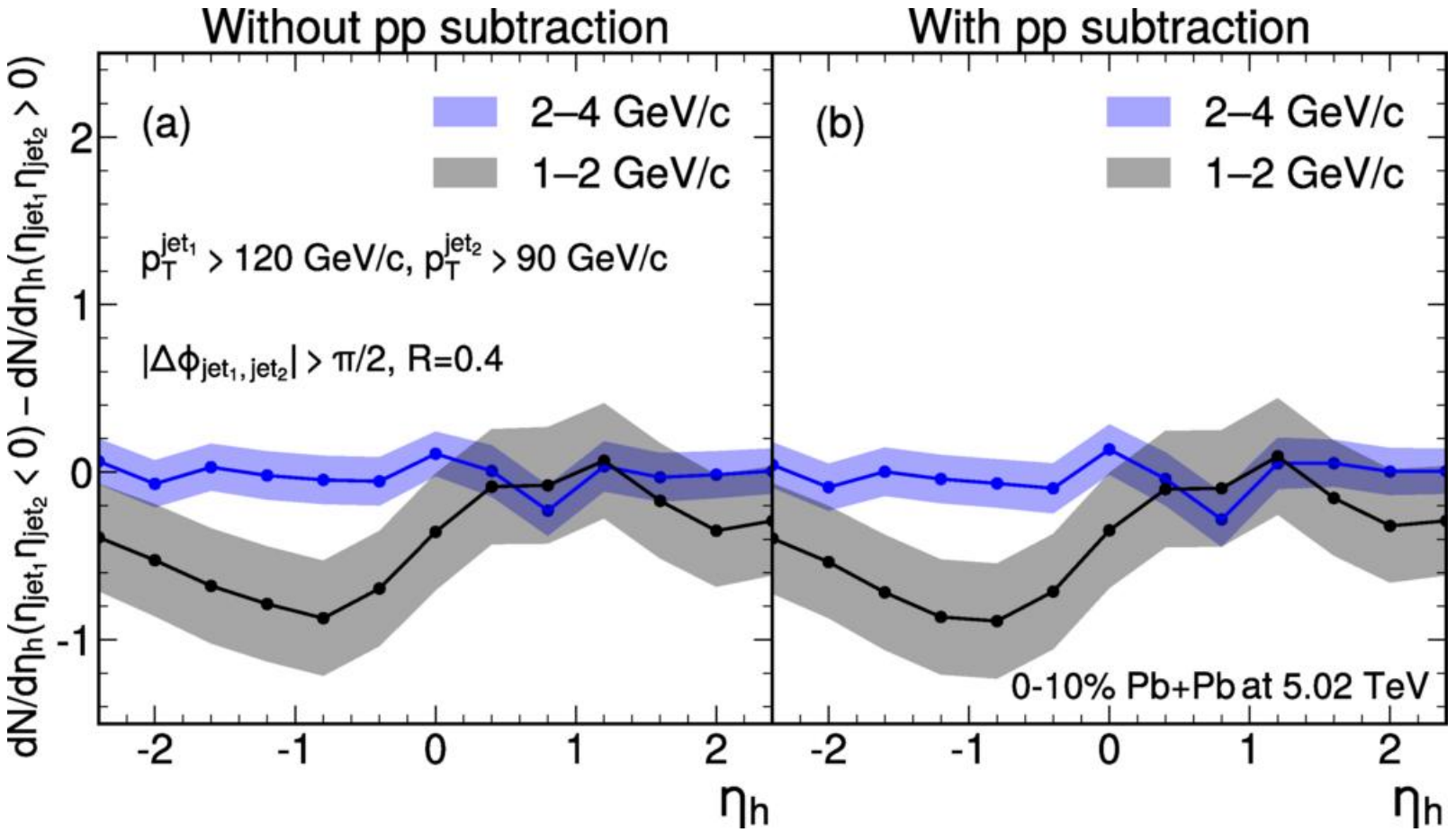


→ALICE的结果远大于CMS的差值，差异来源于接受度的限制（ALICE:|η|<0.9）
→ALICE不能利用$\Delta\eta$图进行快度不对称性研究

$$R^{asym} - R^{sym} = N_{AA}(1.0 < |\Delta\eta_{jet1,jet2}| < 1.5) - N_{AA}(|\Delta\eta_{jet1,jet2}| < 0.5)$$

利用双喷注研究快度不对称性

- 理论学家预言我们可以利用di-jet事件中的hadron-jet关联，通过观测η_h分布来提取扩散尾流信号。

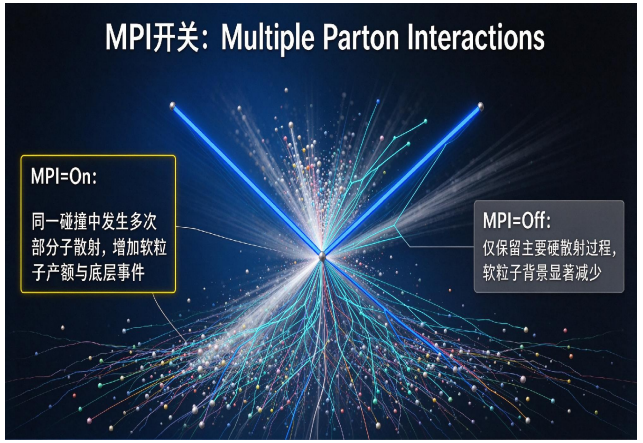


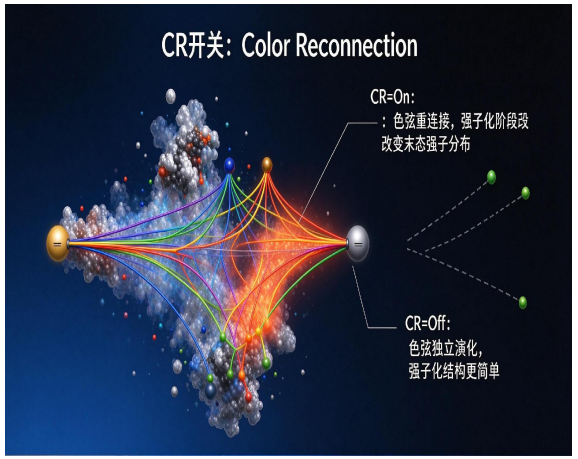
https://arxiv.org/abs/2508.04194v1

- 需要$\eta_{jet1}>0$,根据$\eta_{jet1}\times\eta_{jet2}$的乘积分为两类：
  - **same sign**：$\eta_{jet1}\times\eta_{jet2}>0$
  - **opposite sign**：$\eta_{jet1}\times\eta_{jet2}<0$
- 在低强子横动量区间观测到明显的耗散尾流信号。

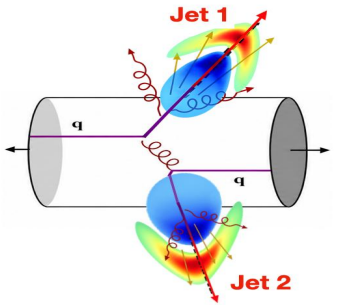
模型基本设置

- PYTHIA 设置：
  - 开关: MPI:on;　CR:on
  - tune: Monash2013

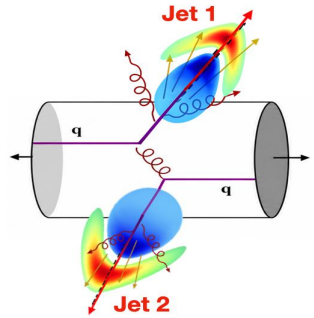




- 分析设置：
  - hadron: $|\eta_h| < 0.9$, $p_T^{hadron} > 0.15$GeV/c
  - **Charged-**particle jets, anti-k_T, $\boldsymbol{R = 0.2}$, $|\eta_{jet}| < 0.9 - R$,$p_T^{jet} >$ 5 GeV/c
  - 背对背: $|\Delta\phi_{jet1,jet2}| > \frac{\pi}{2}$
  - $p_T^{jet1} > 40$ GeV/c , $p_T^{jet2} > 20$ GeV/c
  - $\eta_{jet1} > 0$ ； **same sign**:$\eta_{jet1} \times \eta_{jet2} > 0$;**opposite sign**:$\eta_{jet1} \times \eta_{jet2} < 0$
  - $|\Delta\phi_{h,jet1}| < \frac{\pi}{2}$
- 观测量：
  - 双喷注事件中喷注-强子关联的介质修正：
  - 快度不对称性：

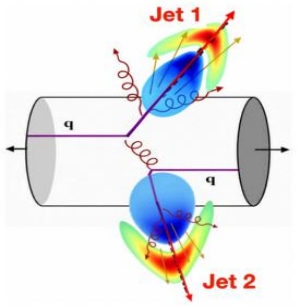


$$N_{AA}(\eta, \Delta\phi) = \frac{1}{N_{pairs}^{dijet}} \frac{dN_{AA}}{d\eta d\Delta\phi}$$

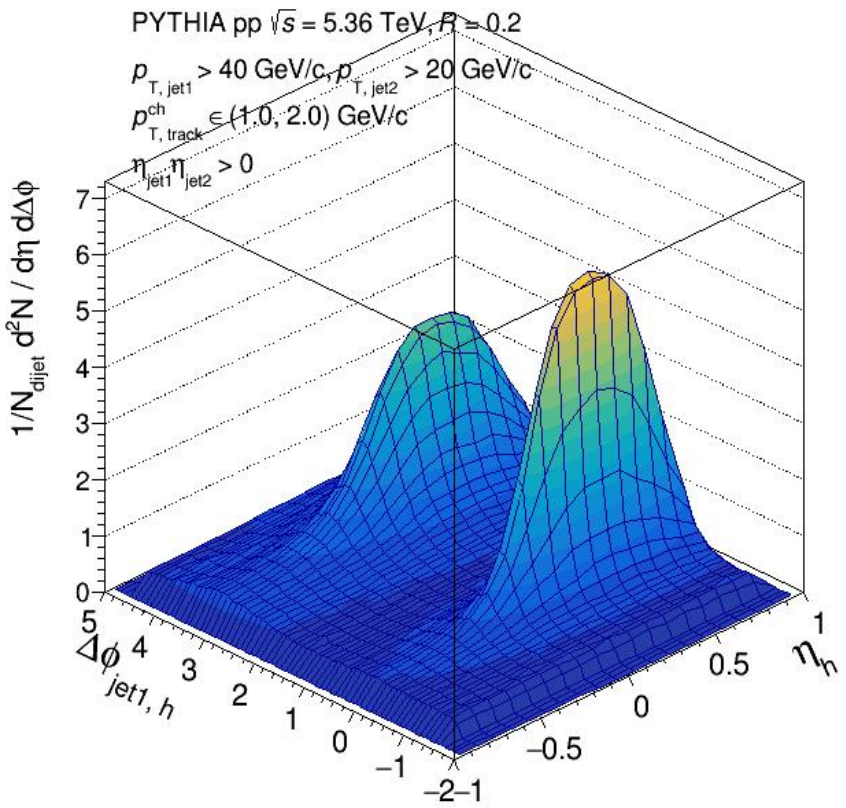


$$N_{AA}(\eta_{jet1}\eta_{jet2} < 0) - N_{AA}(\eta_{jet1}\eta_{jet2} > 0)$$

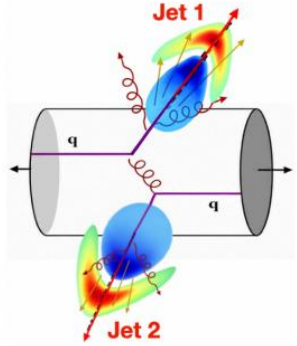
二维关联图

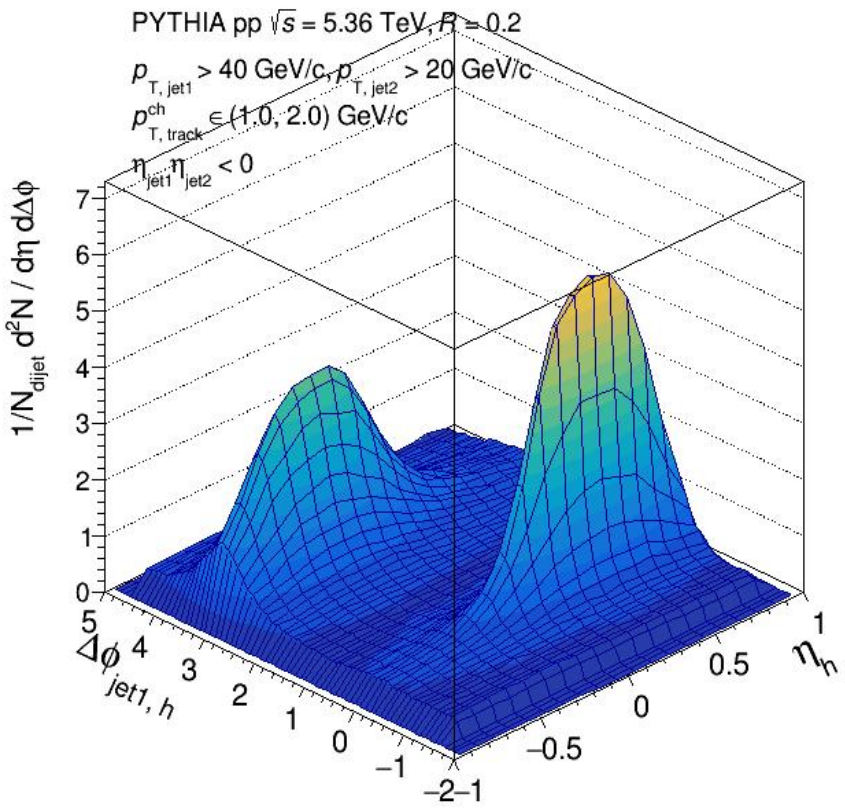


$\eta_{jet1} \times \eta_{jet2} > 0$



$\eta_{jet1} \times \eta_{jet2} < 0$

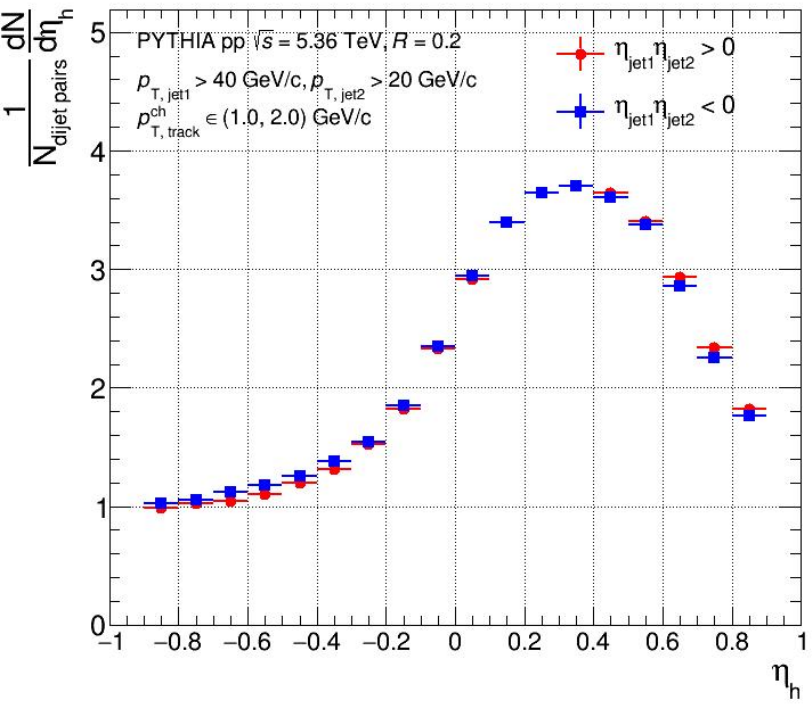




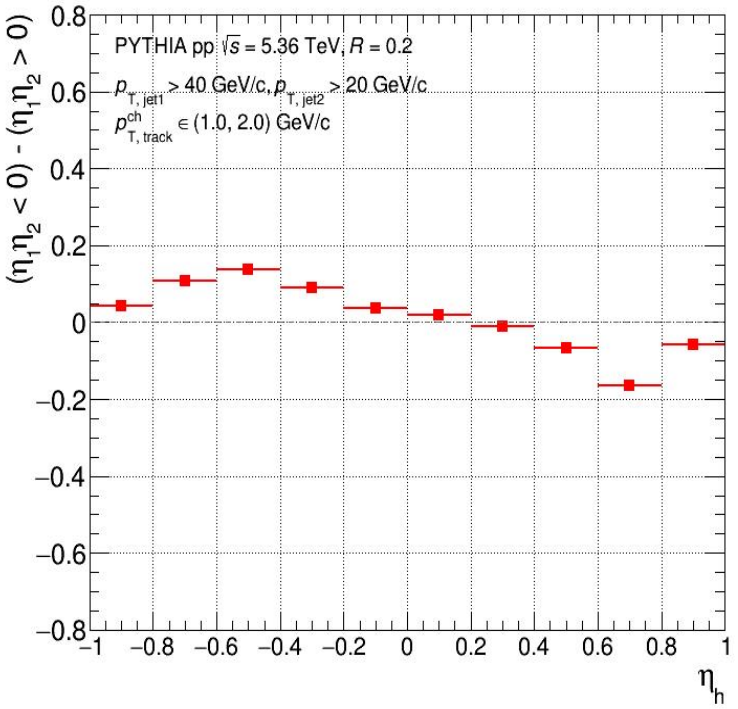
- 通过二维图能明显地看到峰偏移

PYTHIA模拟的η_h分布图和差值图

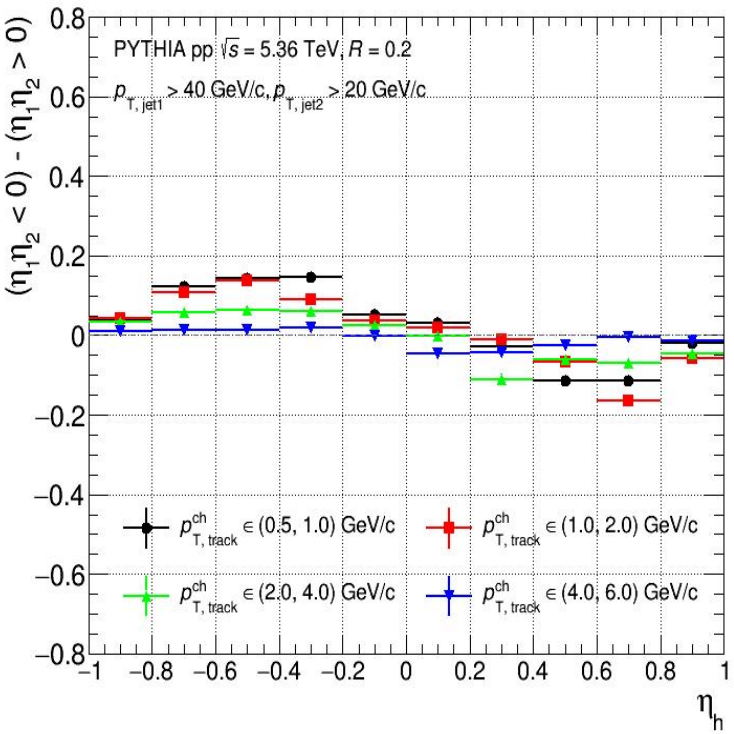
- same sign 和opposite sign的η_h图



- trackpt$\epsilon(1.0, 2.0)$的差值图



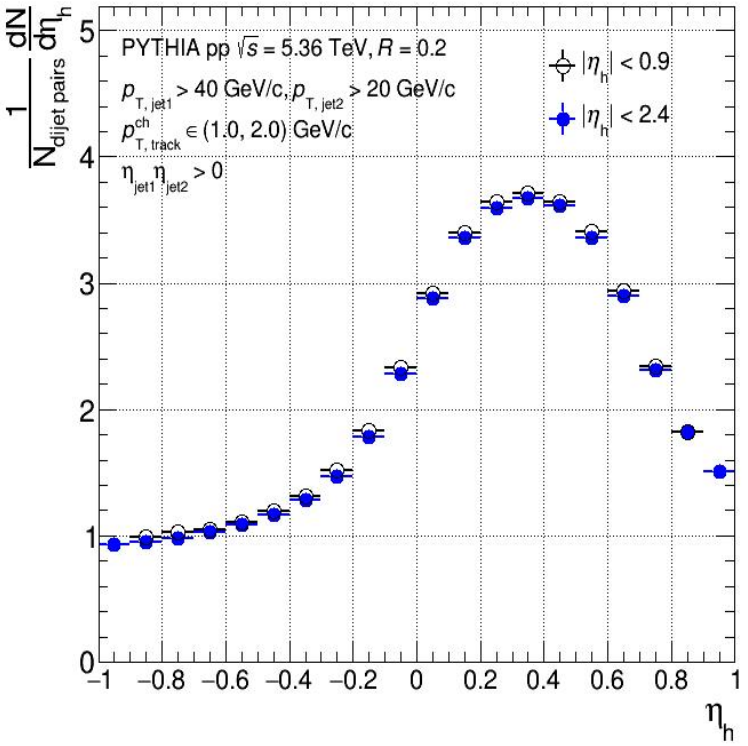
- 不同trackpt区间的差值图

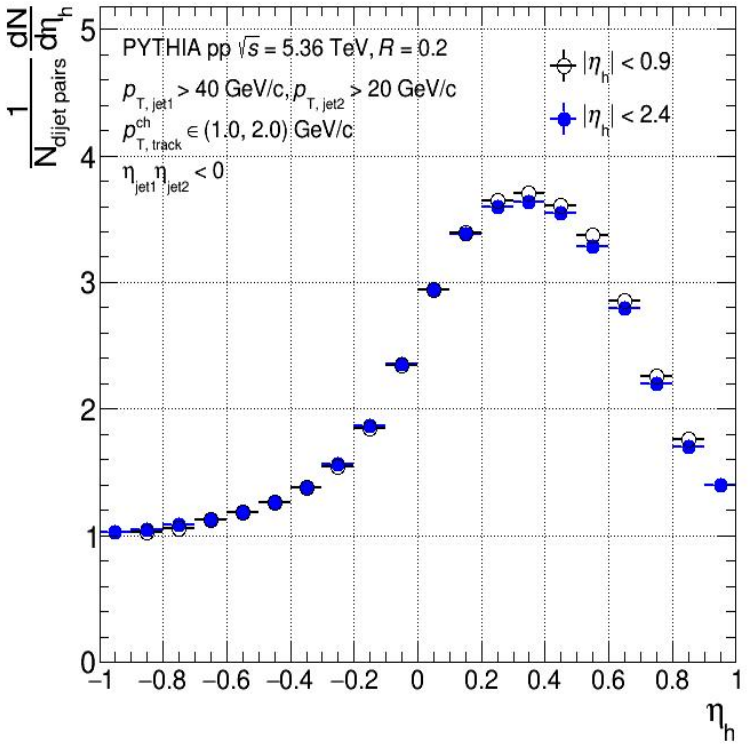


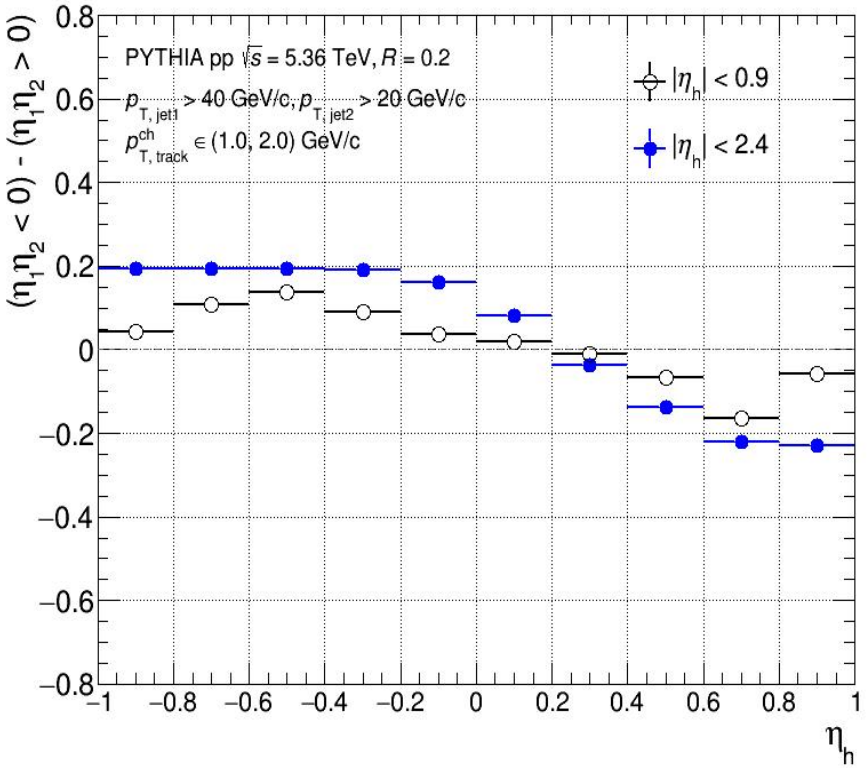
- 通过我们模拟结果的差值图可以看出pp的差值图数值都很小。

探测器接受度对η_h的影响

- ALICE和CMS的探测器接受度不同，基于PYTHIA产生的样本，施加两种探测器赝快度截断，分别模拟CMS和ALICE的接收范围。



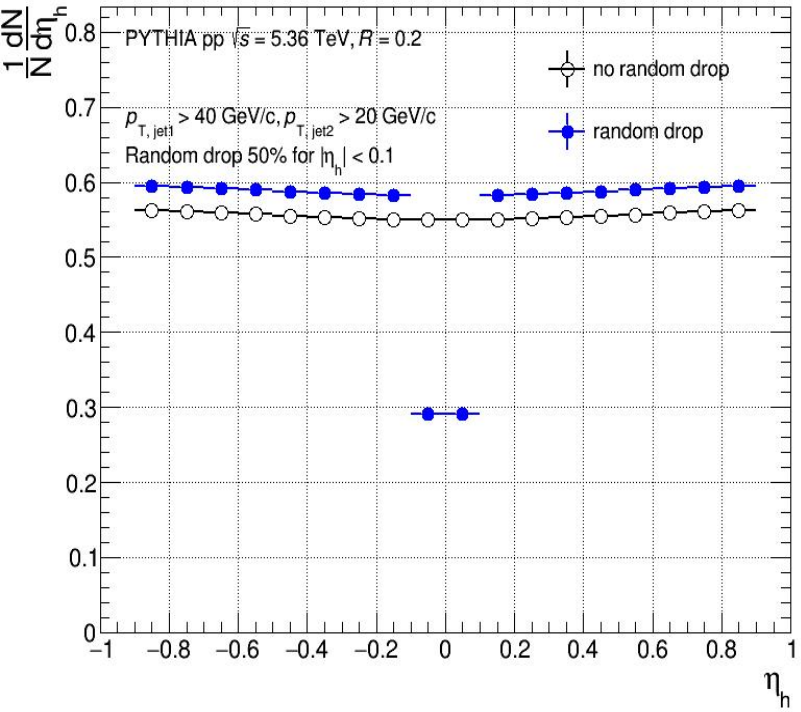


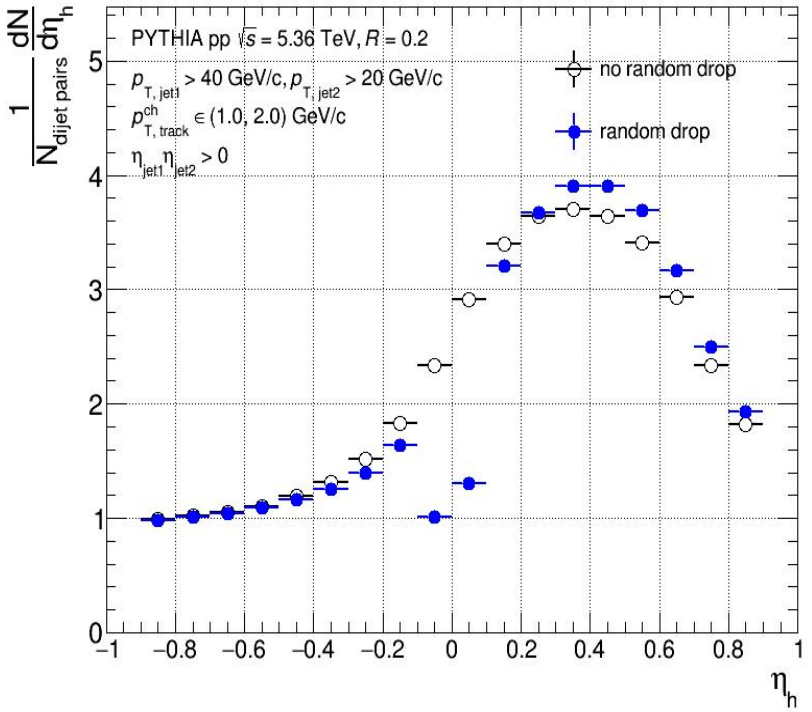


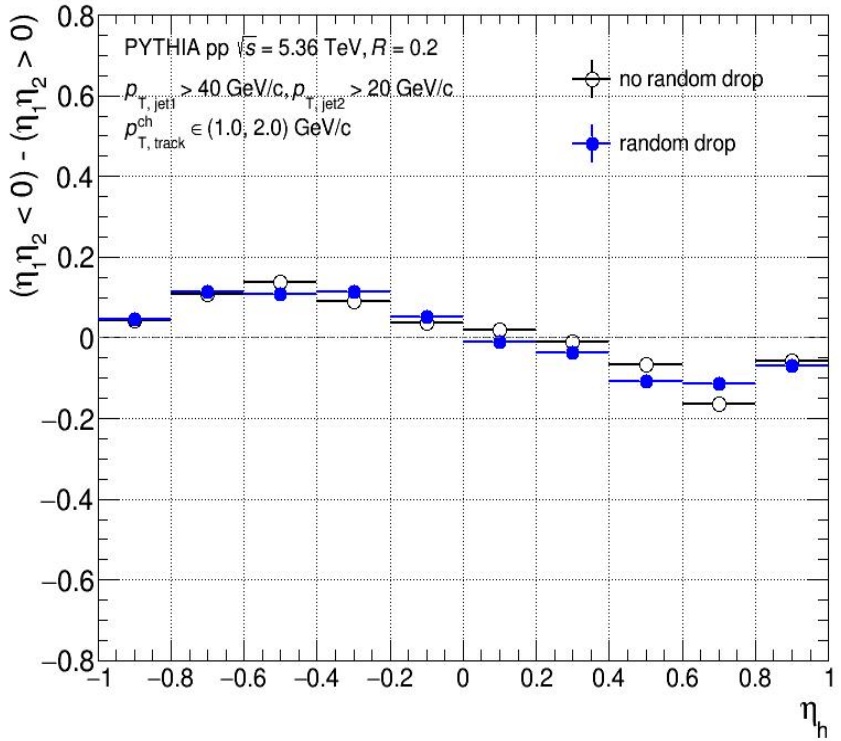
- 根据模拟结果可以得出结论，ALICE和CMS均可利用η_h作为快度不对称的观测量。

探测器效应：随机丢弃

- 因为实验上的探测器响应不均匀，为了更接近实验上的接受度，我们对hadroneta在（-0.1，0.1）范围内的粒子进行了随机丢弃



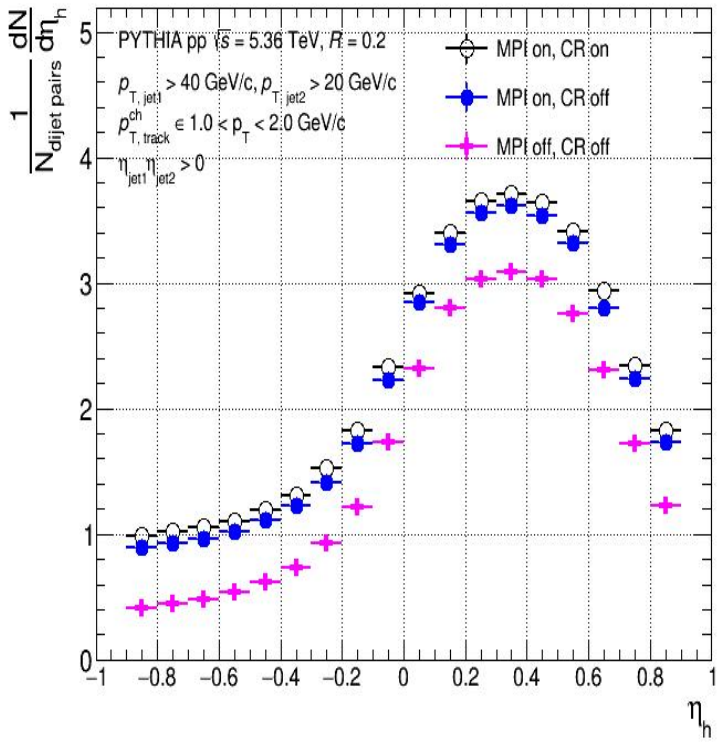


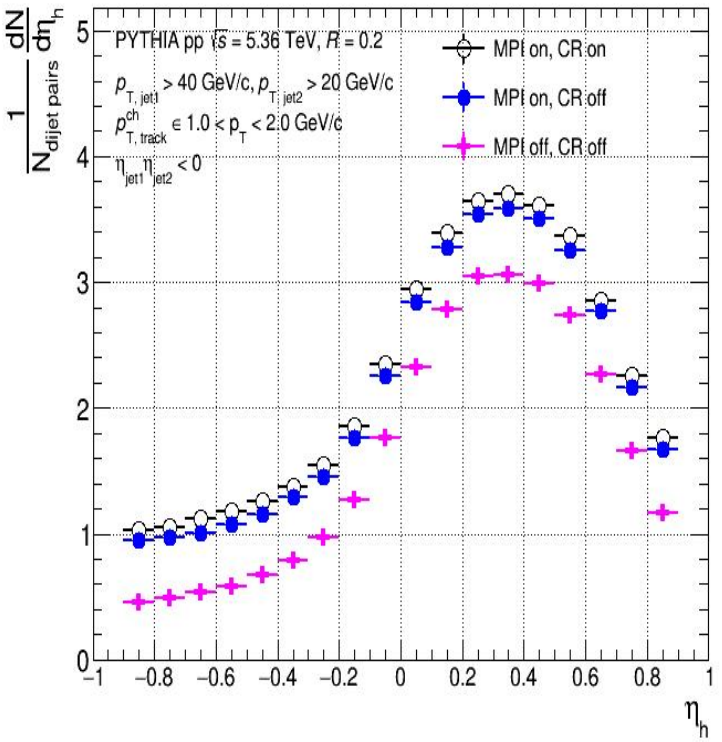


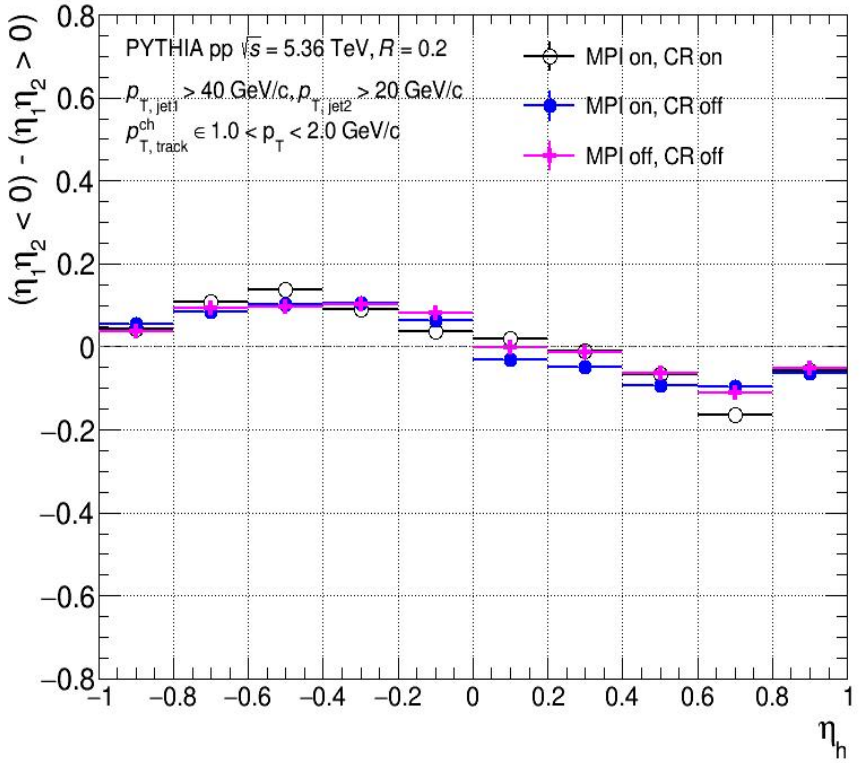
- 随机丢弃不会影响差值图

改变开关

- PYTHIA中的MPI和CR开关会影响产额，通过改变其开关状态来探究它们对差值是否有影响。



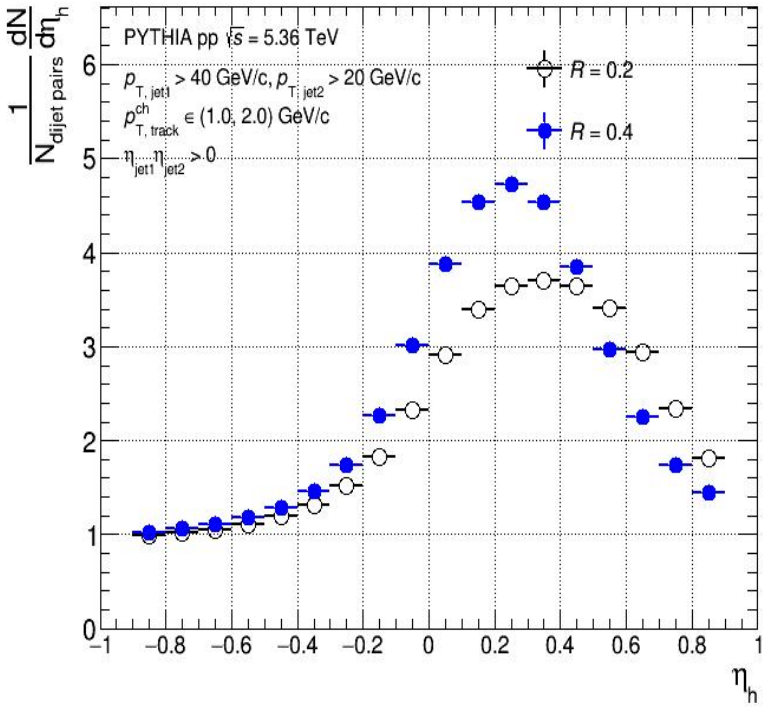


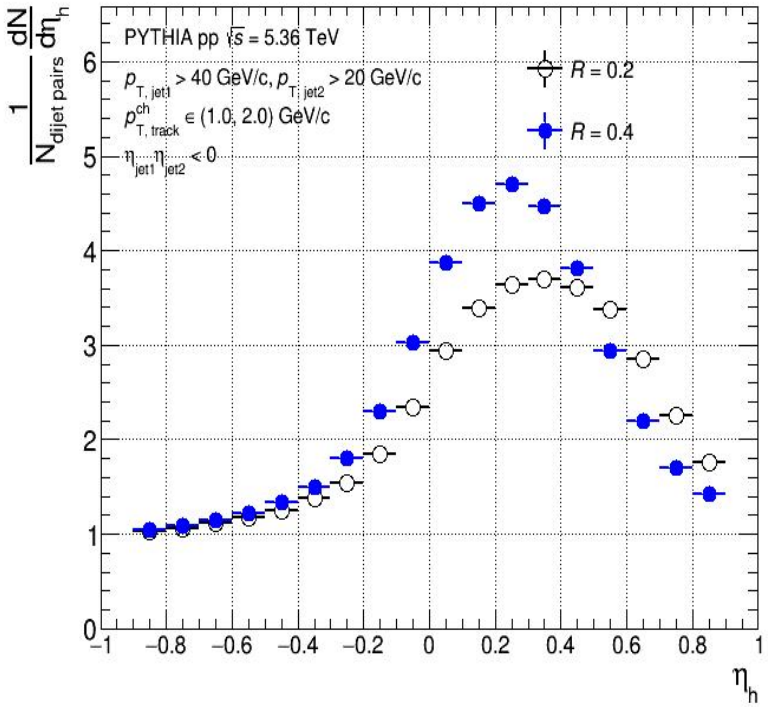


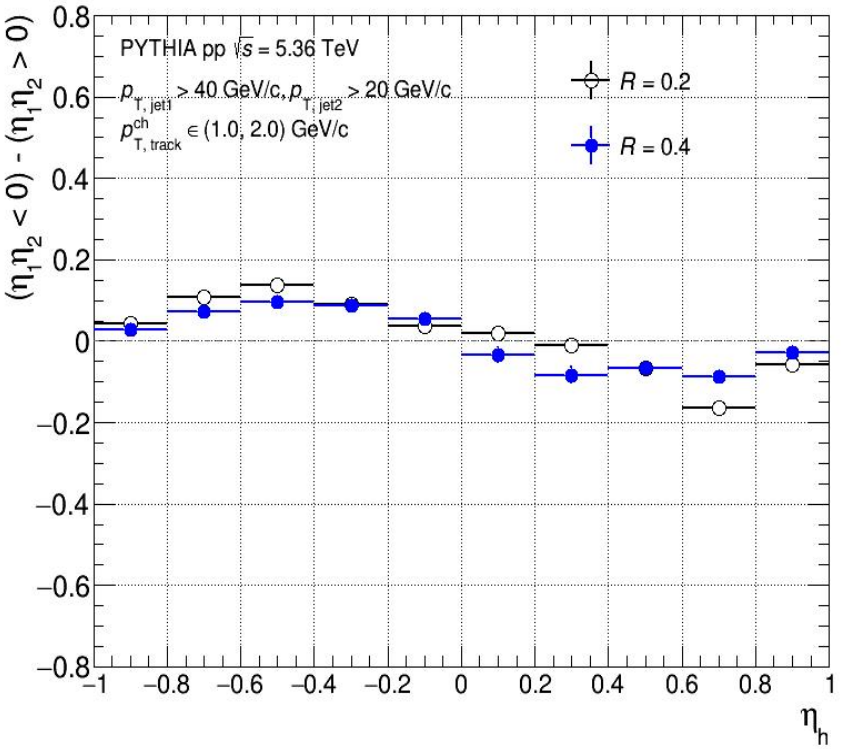
- MPI和CR会影响产额，但并不会影响差值。

改变JetR

- R是反k_T算法的关键参数，喷注的半径会影响喷注的产额，我们模拟了jetR=0.2和0.4的事件



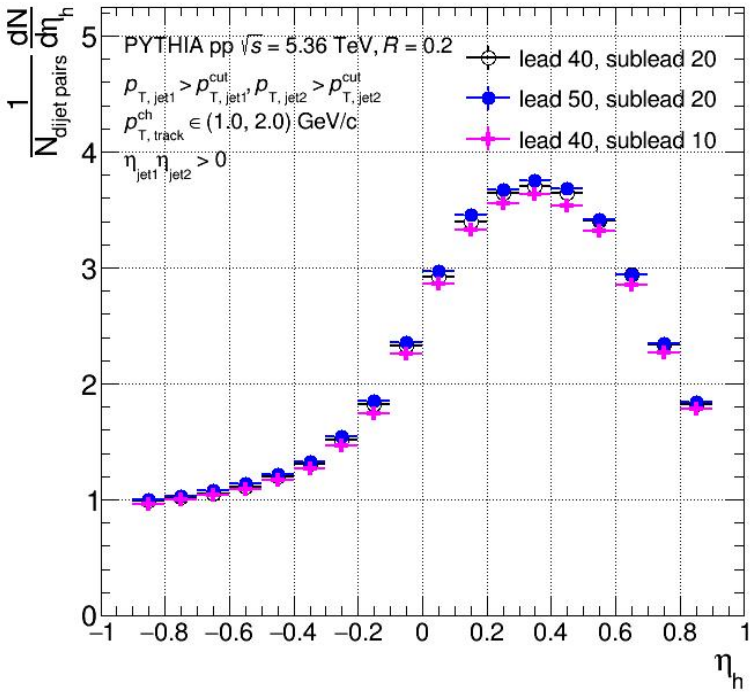


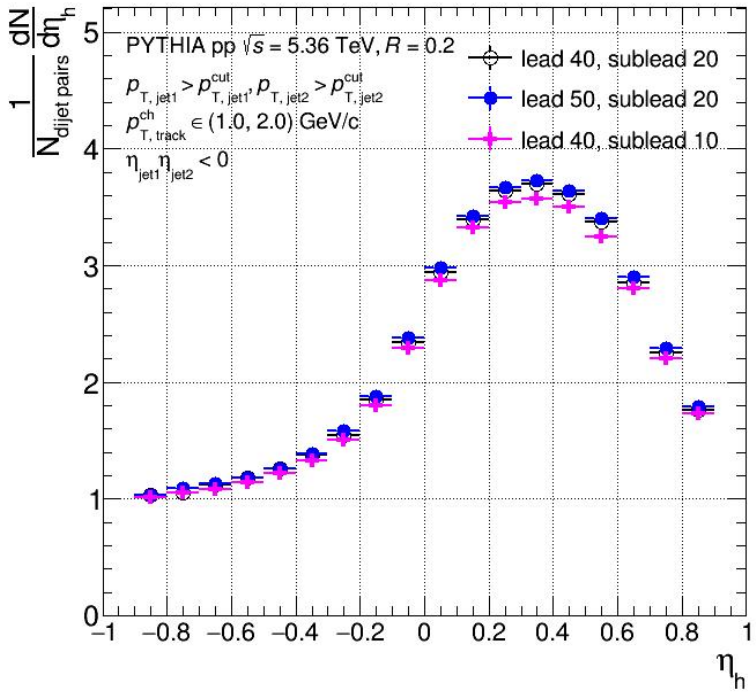


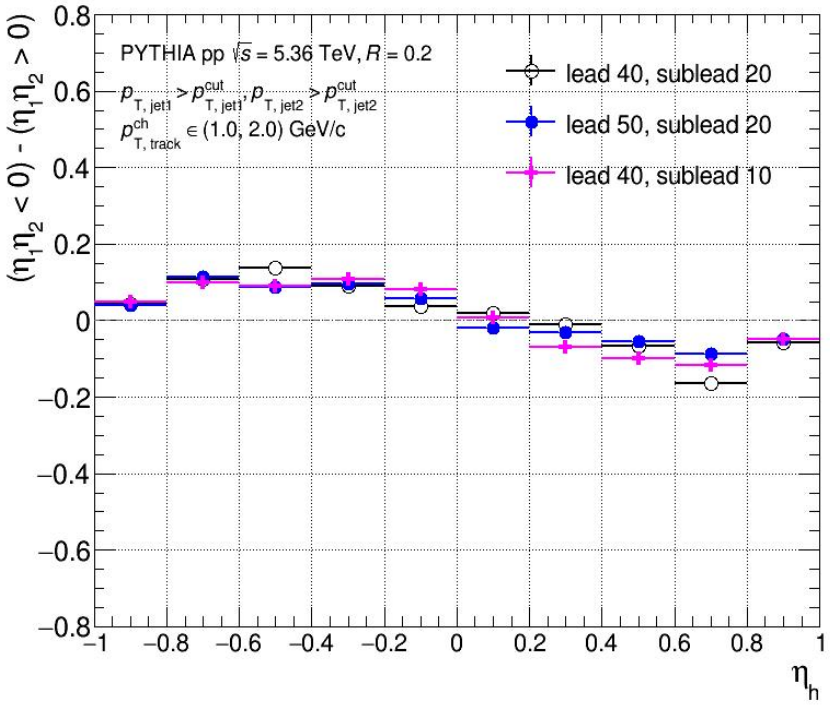
- 喷注半径也不影响差值图

改变Jet pt cut

- 我们还想知道ptcut是否会对结果产生影响，所以对比了(40, 20), (50, 20)和(40, 10)这三组的结果





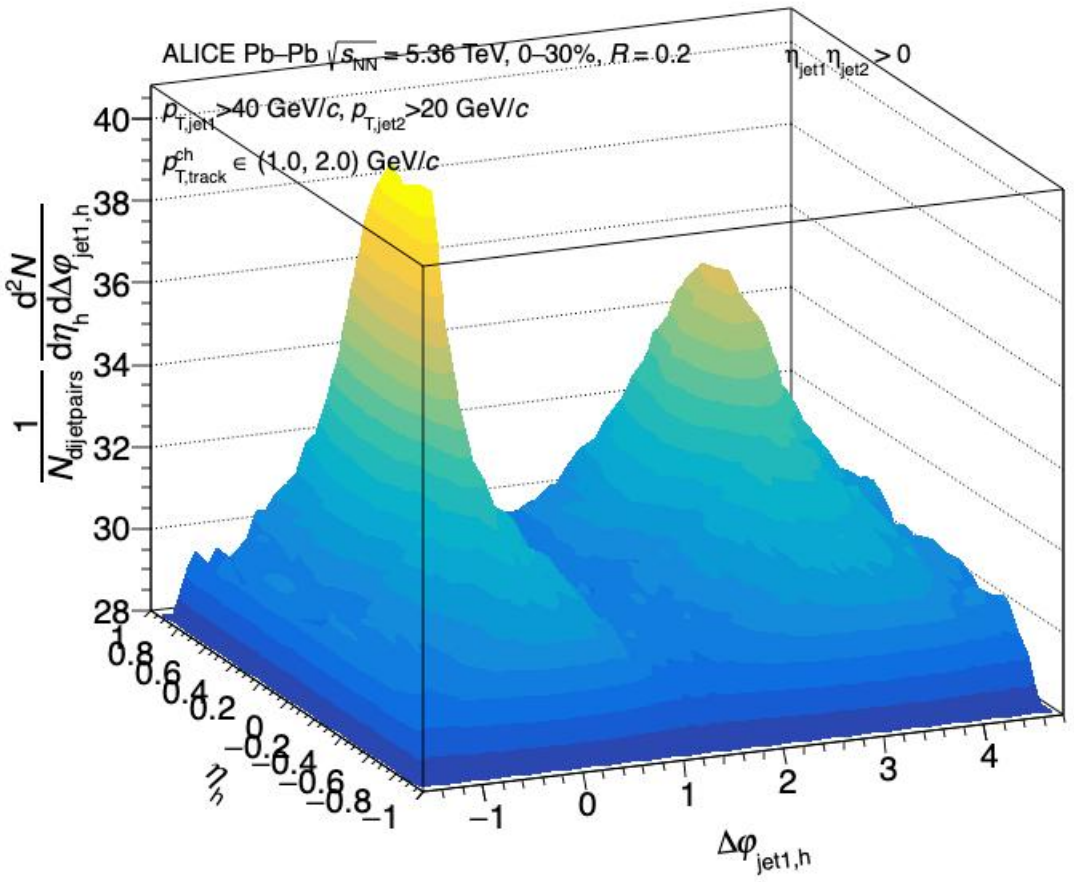


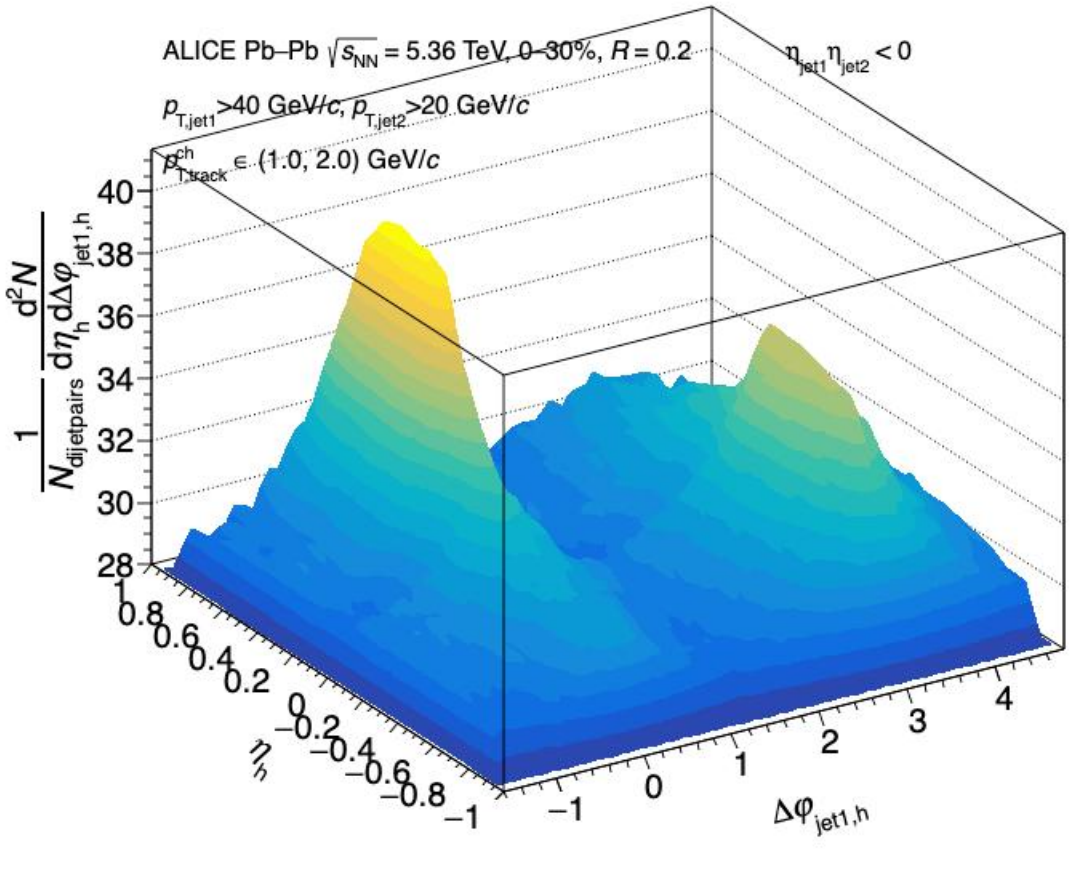
- ptcut也不影响差值图

- 基于以上所有的研究可以得出结论：利用双喷注快度不对称研究介质响应具有稳健性，可以进行实验数据分析。

ALICE对快度不对称性的研究

- 目前ALICE已经通过di-jet中的hadron-jet关联来分析实验数据中的快度不对称性。





总结和展望

总结

- 我们通过PYTHIA研究了CMS和ALICE探测器接受度下的$\Delta\eta$差值图，发现ALICE不能通过$\Delta\eta$来研究耗散尾流效应。
- 但η_h的结果在CMS和ALICE的接受度下保持一致，可以作为我们研究快度不对称性的观测量。
- 通过改变探测器接受度的范围，模拟探测器响应进行随机丢弃，改变PYTHIA的开关，jet R，jet pt cut 等对dijet事件中的hadron-jet关联的η_h进行测量，发现这些因素并不影响快度不对称性，反映该观测量可以在实验数据中分析。

展望

- 利用Angantyr 模拟Pb-Pb碰撞，与pp基线对比来研究背景对耗散尾流信号提取的影响。
- 结合ALICE实验数据开展介质响应研究。
- 本模拟结果将为ALICE实验的测量提供重要基线参考。

Thanks for your attention!