



公立大学法人
国際教養大学
Akita International University



ハードプローブ関連

橘 保貴

第39回Heavy Ion Cafe & 第35回Heavy Ion Pub 合同研究会「ポストQM2022」

2022年4月30日, 名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所

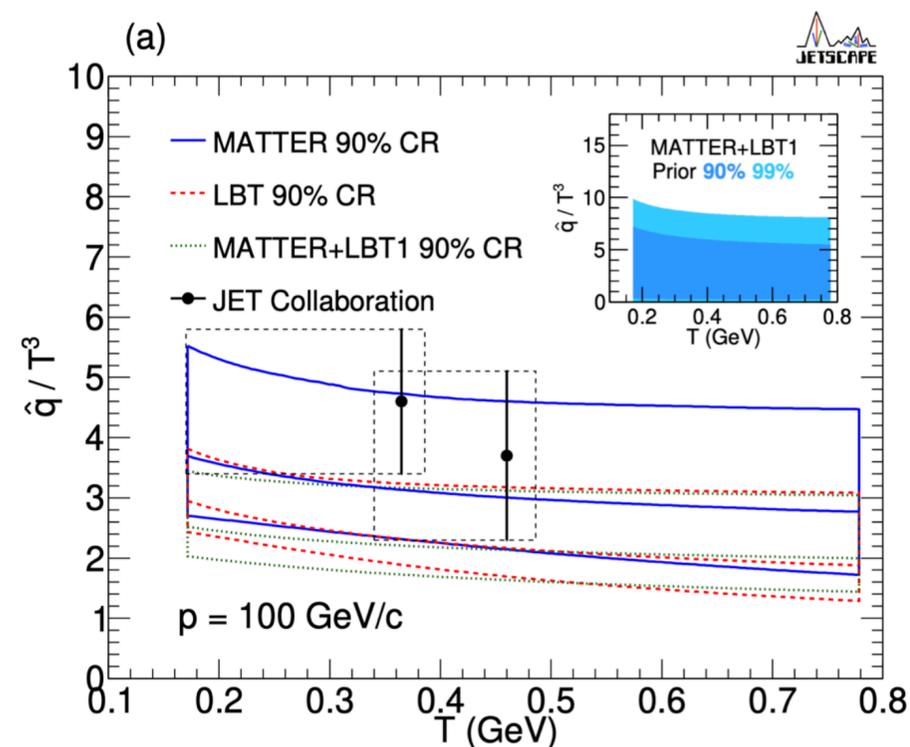
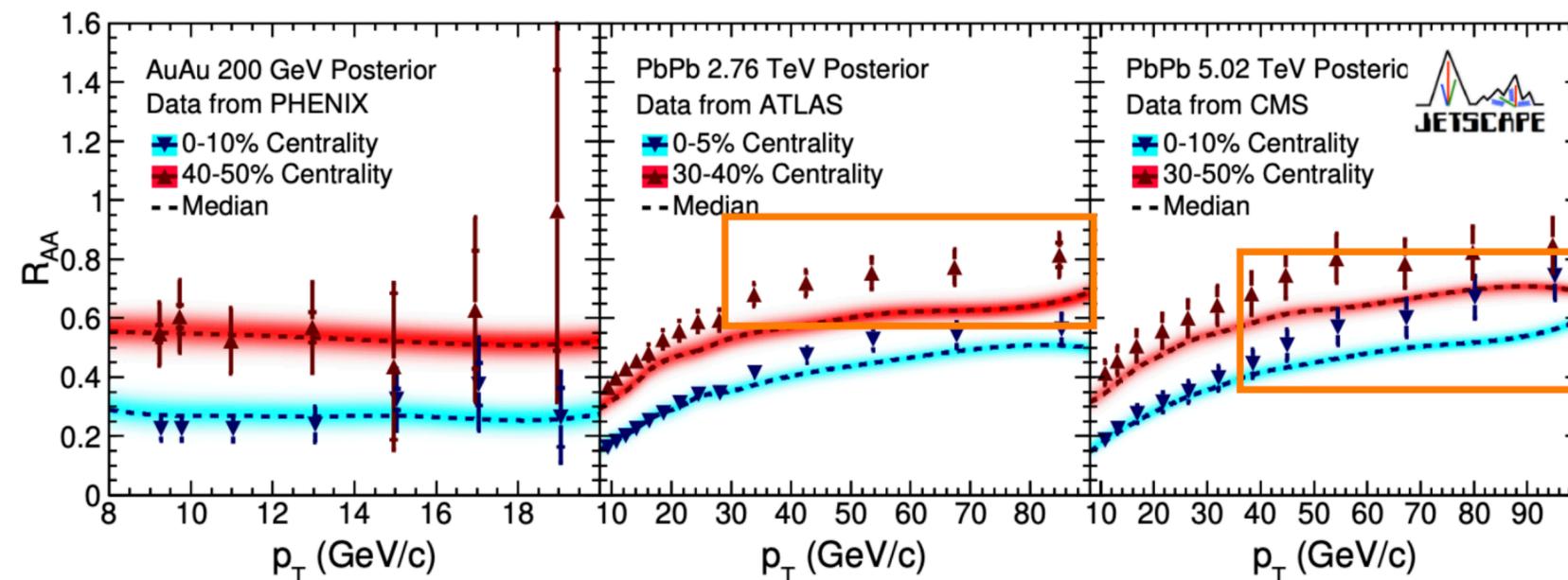
High- p_T 粒子 & ジェット [理論]

High- p_T & ジェットエネルギー損失

● ベイズ統計による \hat{q} の抽出

Talk by R. Ehlers (JETSCAPE)

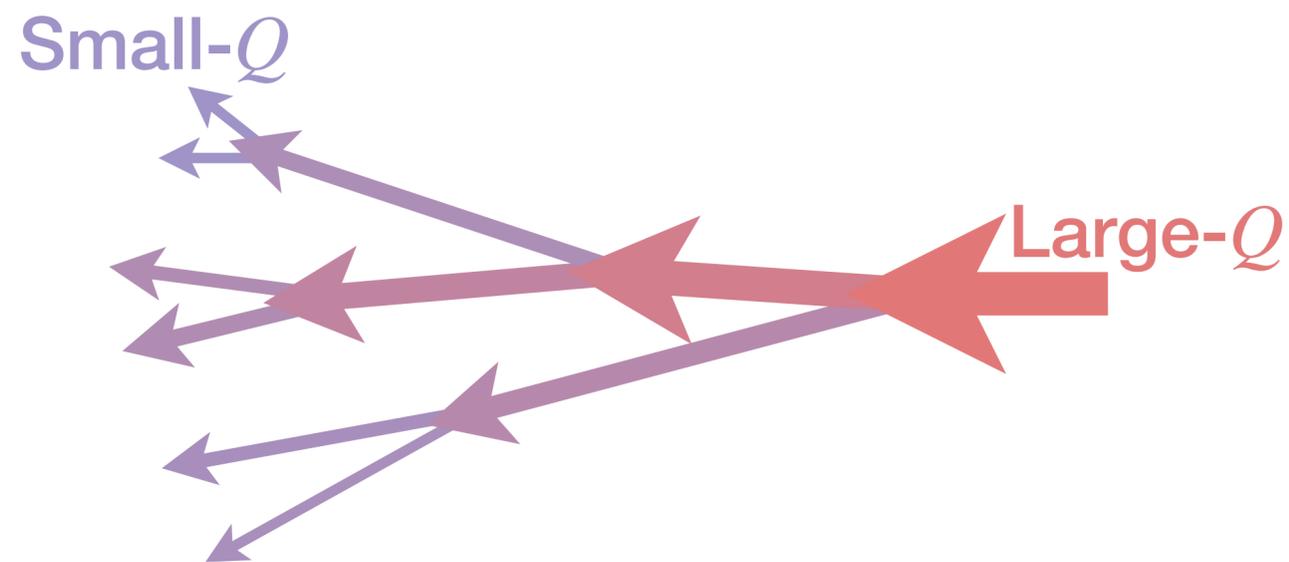
- \hat{q} : パarton-媒質間相互作用の強さ
- 実験データを理論MC計算でフィット
- ベイズ統計で広いパラメータ空間をカバー
- 理論MC: JETSCAPE (MATTER+LBT模型)
- 実験: High- p_T 粒子 R_{AA} @RHIC&LHC
- JETコラボレーションと一致
- High- p_T @LHCのズレ



← 緑: フル計算 (MATTER+LBT)

High- p_T & ジェットエネルギー損失

- 媒質効果の抑制 @ large- Q^2 [$Q^2 = p^\mu p_\mu - m^2$: virtuality (off-shellness)]

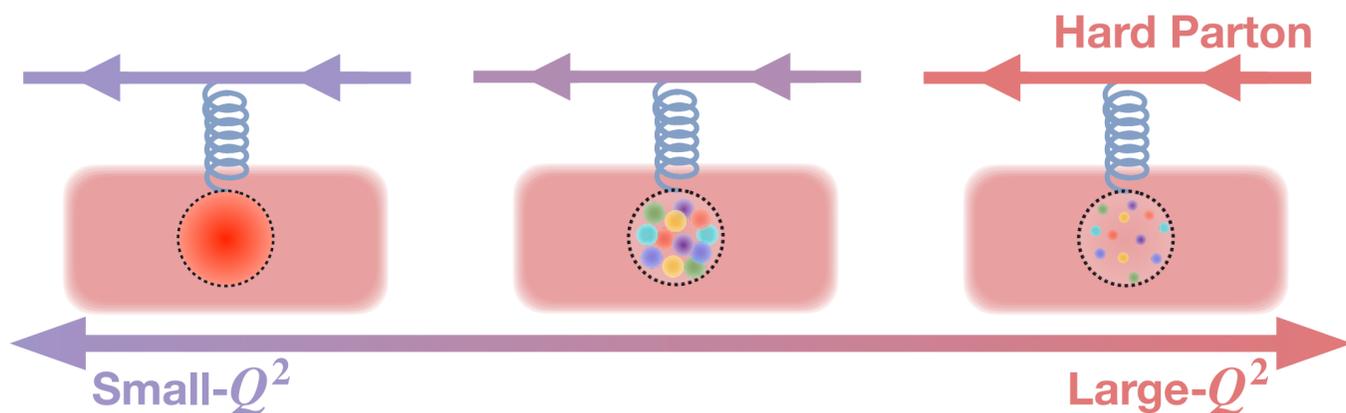


- コヒーレンス効果 (解像度)

Mehtar-Tani, Salgado, Tywoniuk, PLB707, 156-159 (2012), Casalderrey-Solana, E. Iancu, JHEP08, 015 (2011)

- QGP媒質粒子分布のスケール発展

Kumar, Majumder, Shen, PRC101, 034908 (2020)



JETSCAPE Talk by YT (JETSCAPE)

Large- Q^2 :

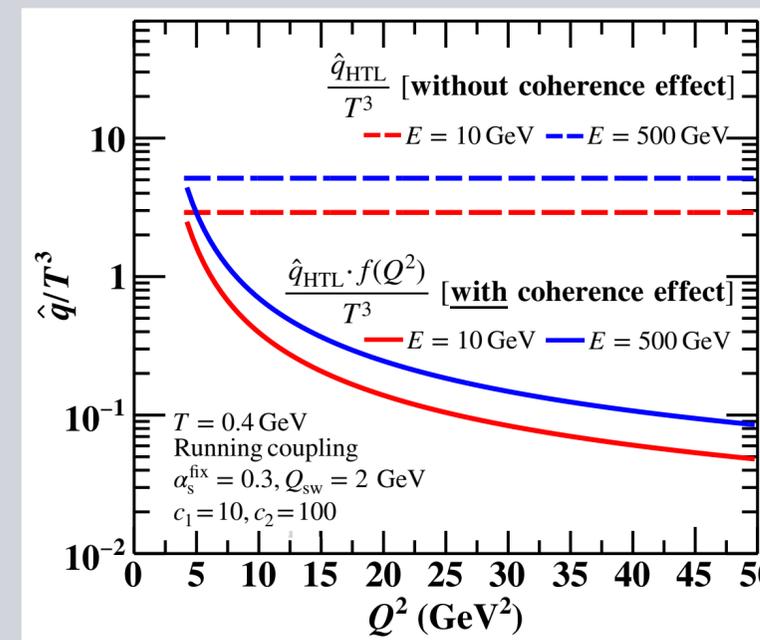
コヒーレンス効果入

Small- Q^2 :

On-shell Transport

媒質応答:

Recoils



LIDO Talk by Weiyao Ke

Large- Q^2 : 真空シャワー (Pythia8)

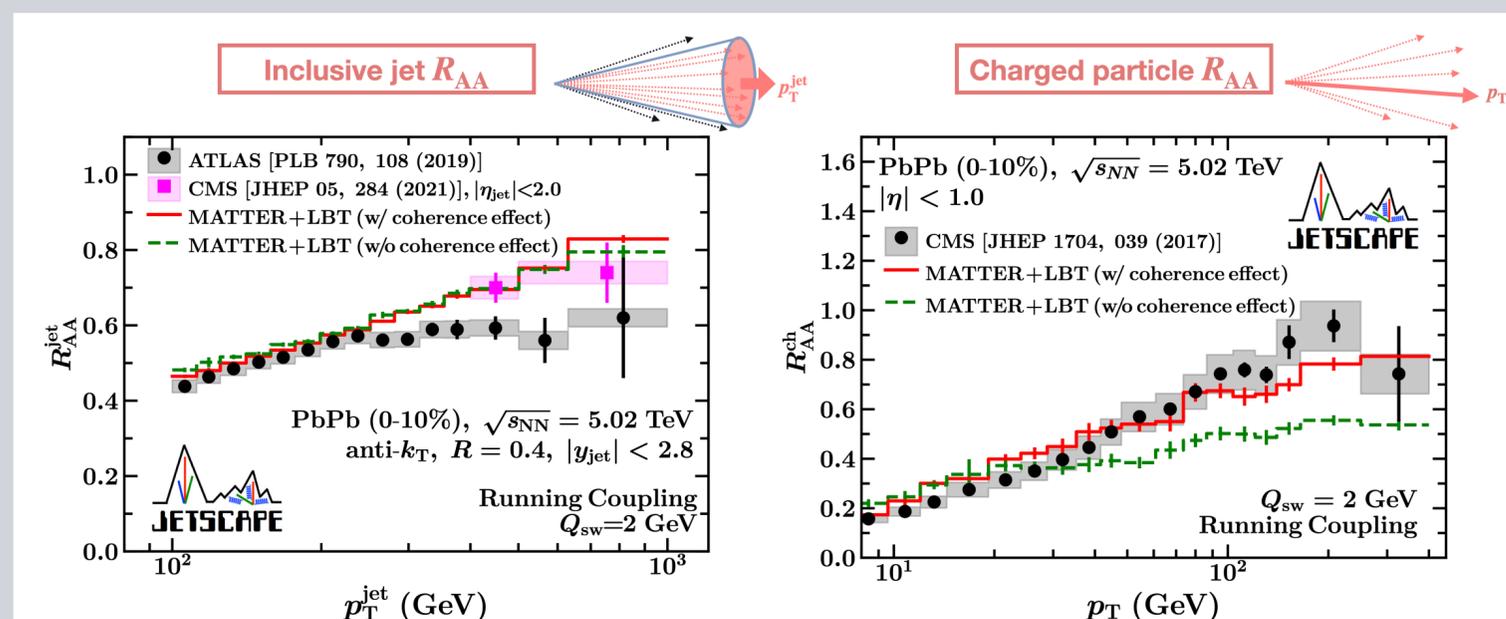
Small- Q^2 : On-shell Transport

媒質応答: Cooper-Frye+摂動

High- p_T & ジェットエネルギー損失

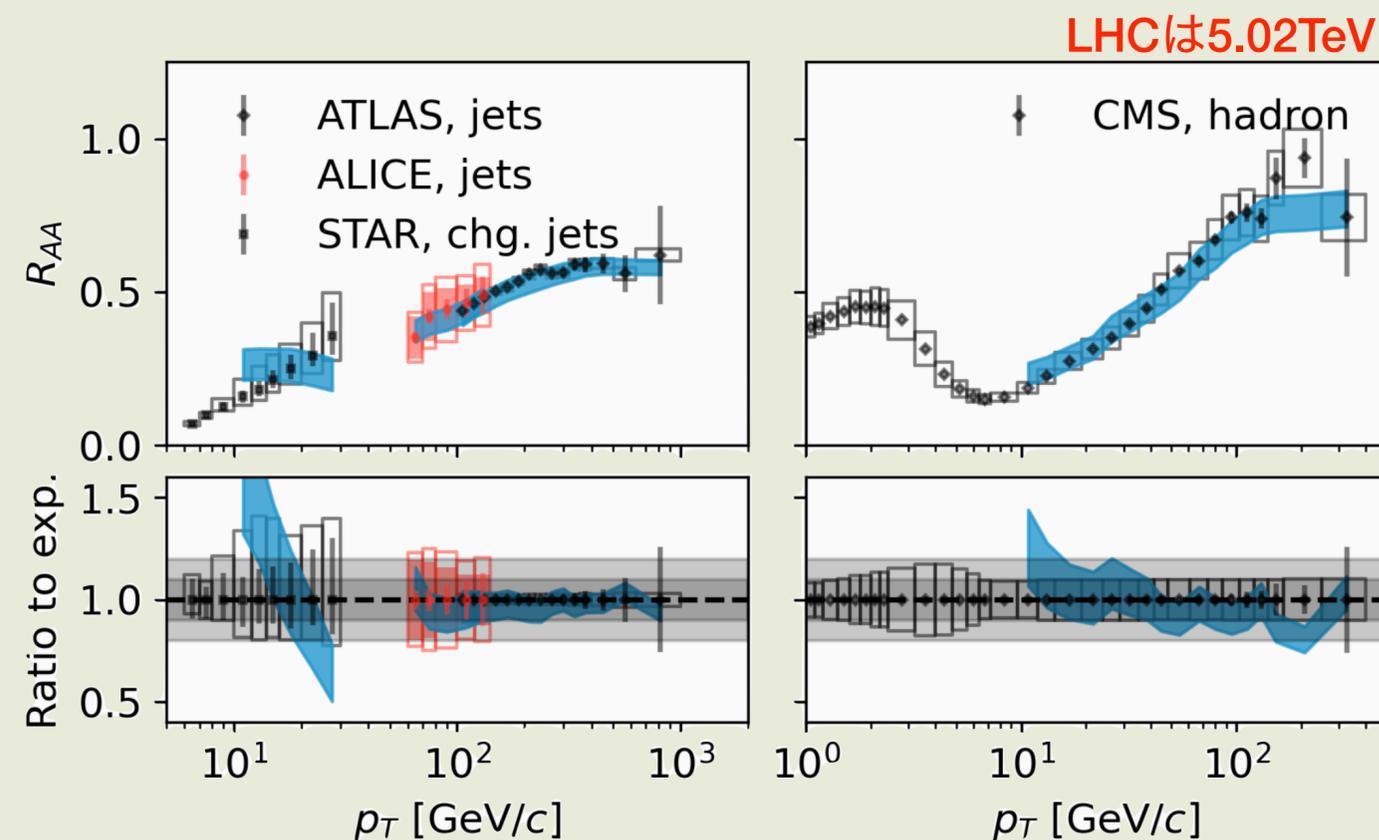
- 媒質効果の抑制@large- Q^2 [$Q^2 = p^\mu p_\mu - m^2$: virtuality (off-shellness)]

JETSCAPE Talk by YT (JETSCAPE)



↑赤がコヒーレンス(抑制)効果入

LIDO Talk by Weiyao Ke

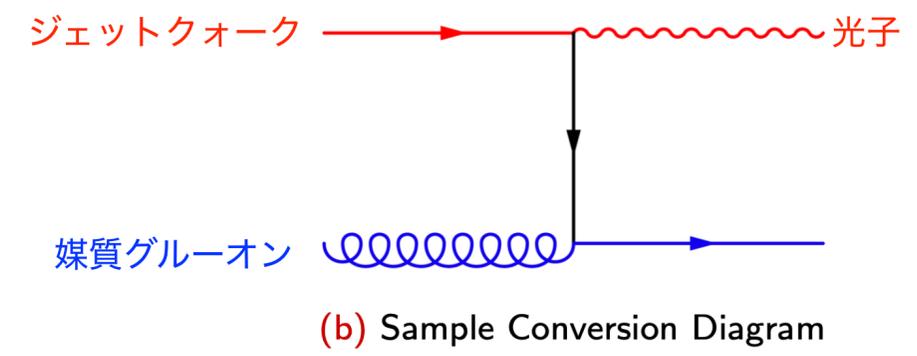
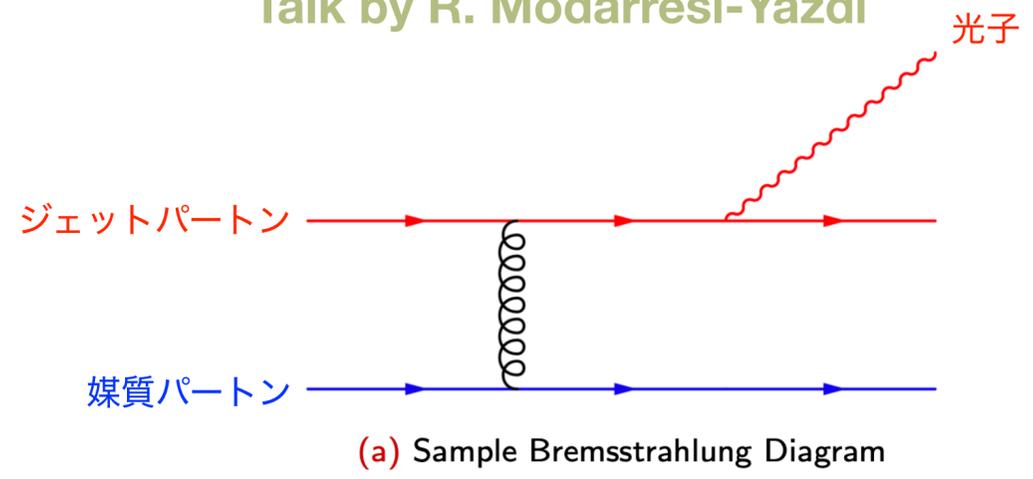


- Large- Q^2 での媒質効果抑制によってジェットとhigh- p_T 粒子の R_{AA} を同時に記述
- 特にhigh- p_T 粒子の R_{AA} が抑制効果に敏感

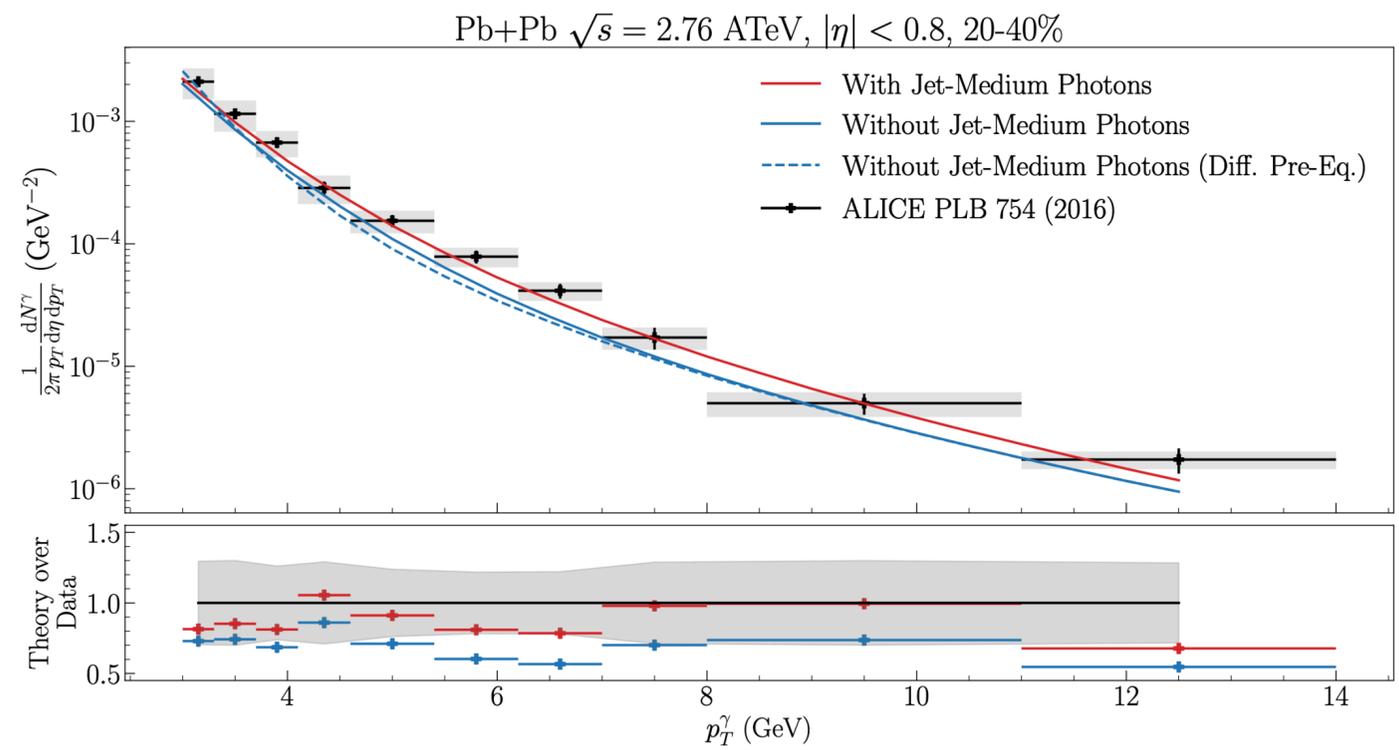
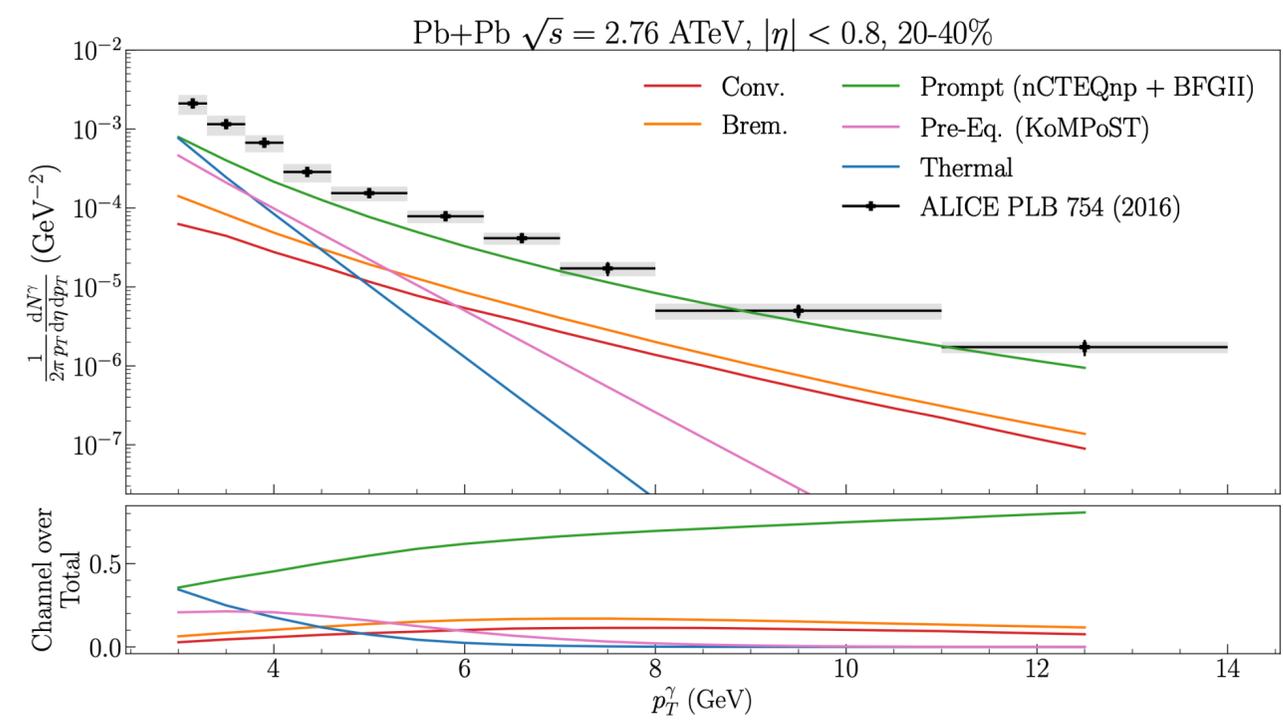
ハードパートン (ジェット) からの光子放射

● 媒質効果による光子放射

Talk by R. Modarresi-Yazdi



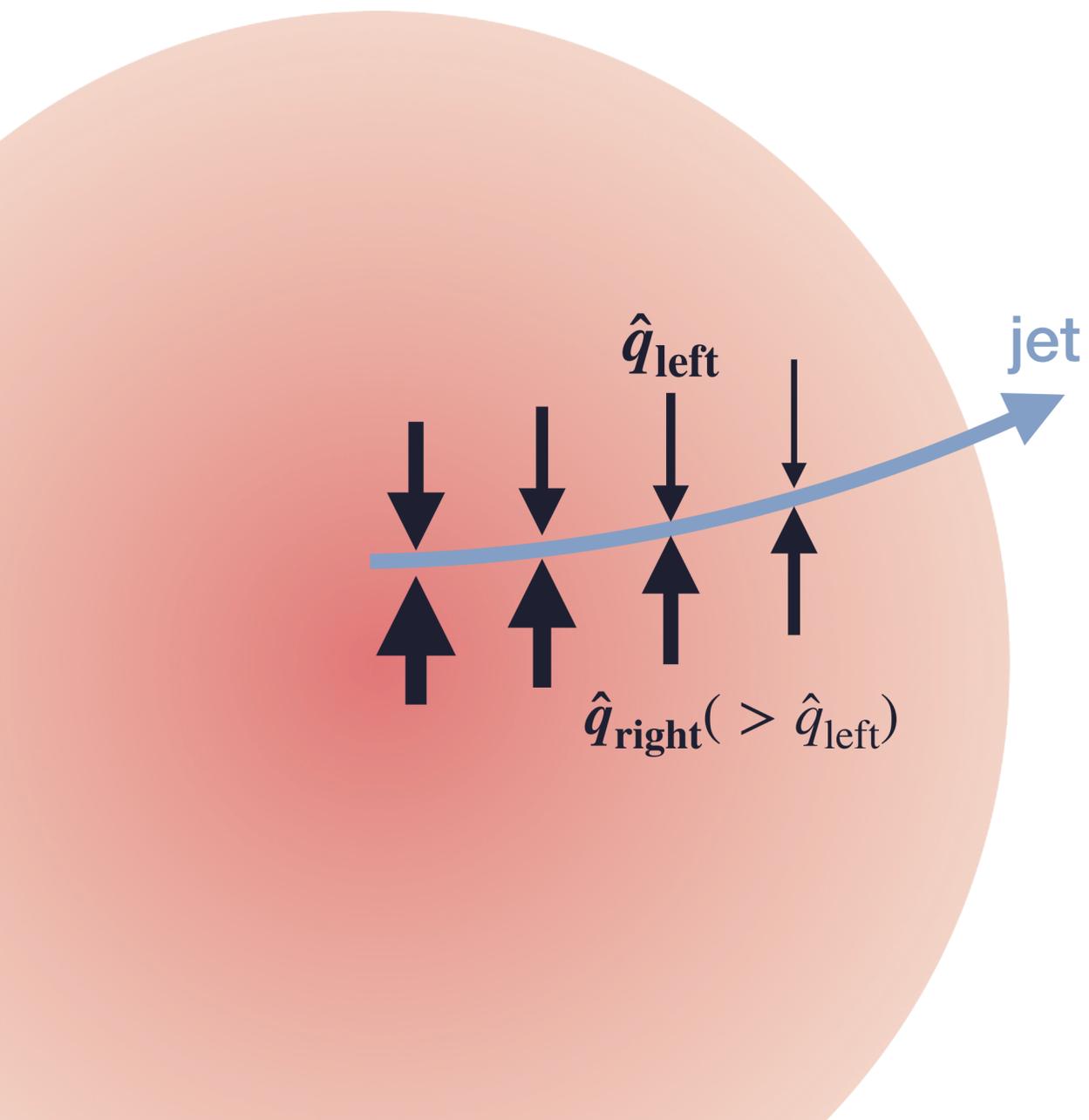
- MARTINI に実装
- 30%ほどの寄与
- 「ハドロン化の無い」新しいプローブ



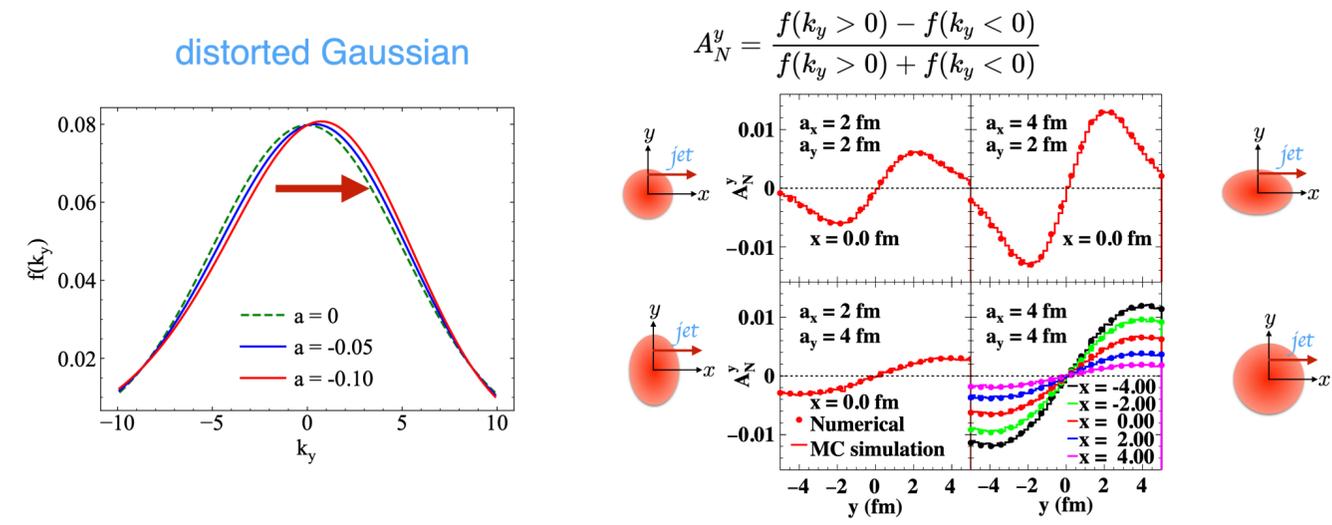
媒質勾配トモグラフィ

● \hat{q} 勾配によるジェット軌道の逸れ

Talk by Y. He



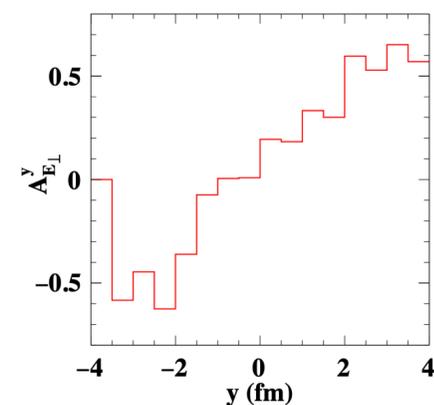
- 歪んだガウスブロードニングでの見積



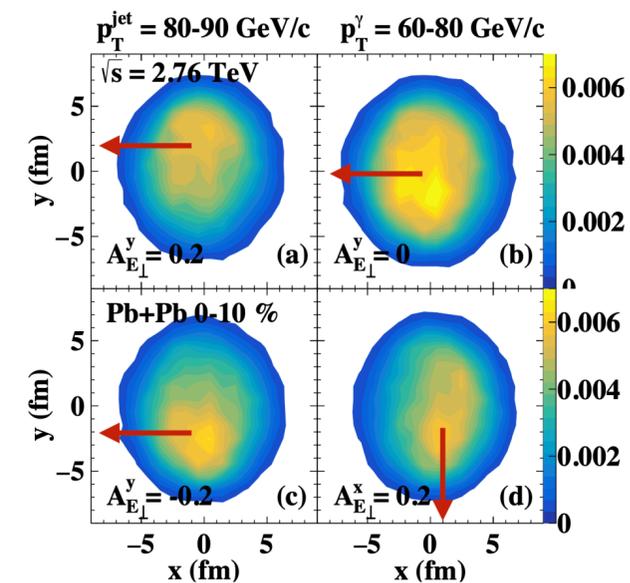
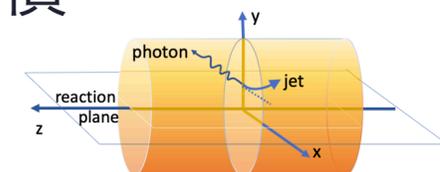
- MC計算 (LBT) での見積

transverse energy asymmetry:

$$A_{E_{\perp}}^{\vec{n}} = \frac{\int d^3r d^3k f(\vec{k}, \vec{r}) \vec{k} \cdot \vec{n}}{\int d^3r d^3k f(\vec{k}, \vec{r}) |\vec{k} \cdot \vec{n}|}$$



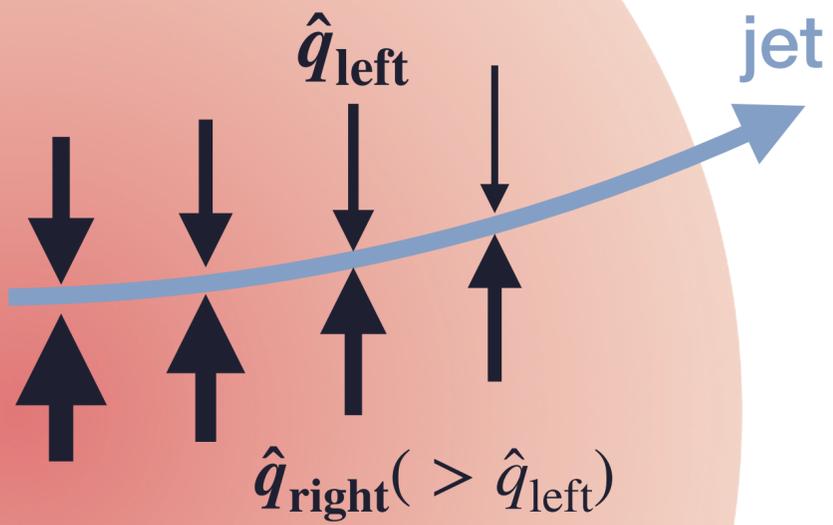
LBT+CLVisc hydro $p_T > 3$ GeV/c



媒質勾配トモグラフィ

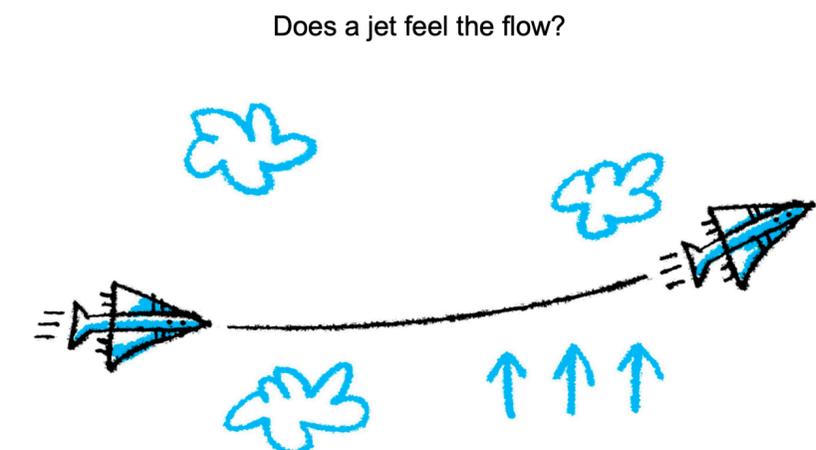
- \hat{q} 勾配によるジェット軌道の逸れ

Talk by Y. He

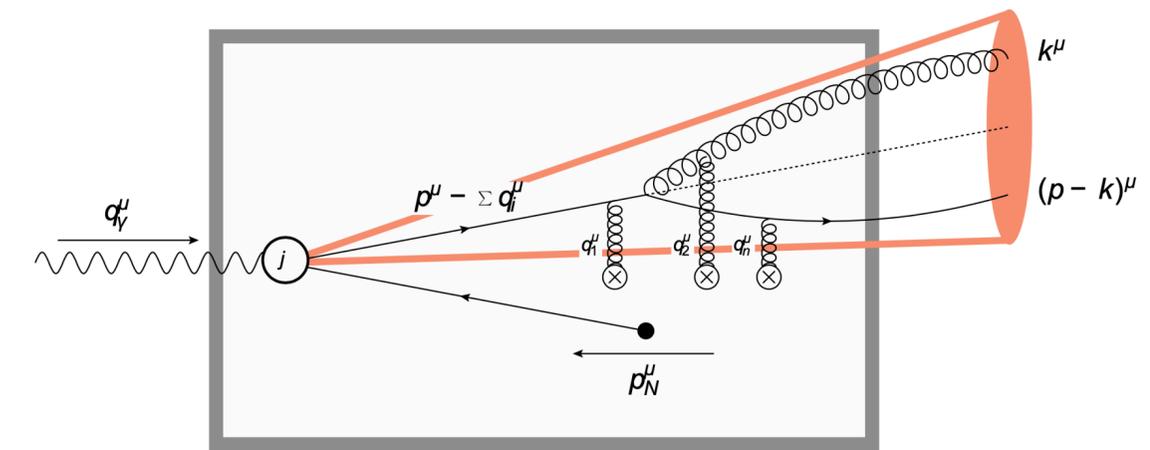


- ブロードニング, 放射へのフローの影響

Talk by A. Sadofyev



- GLV (BDMPS-Zは準備中) へフロー効果導入

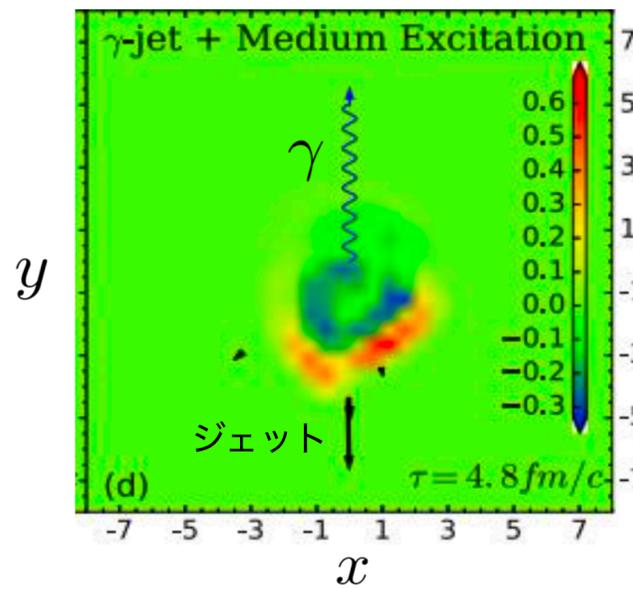


- 軌道の逸れ, 非対称ブロードニング

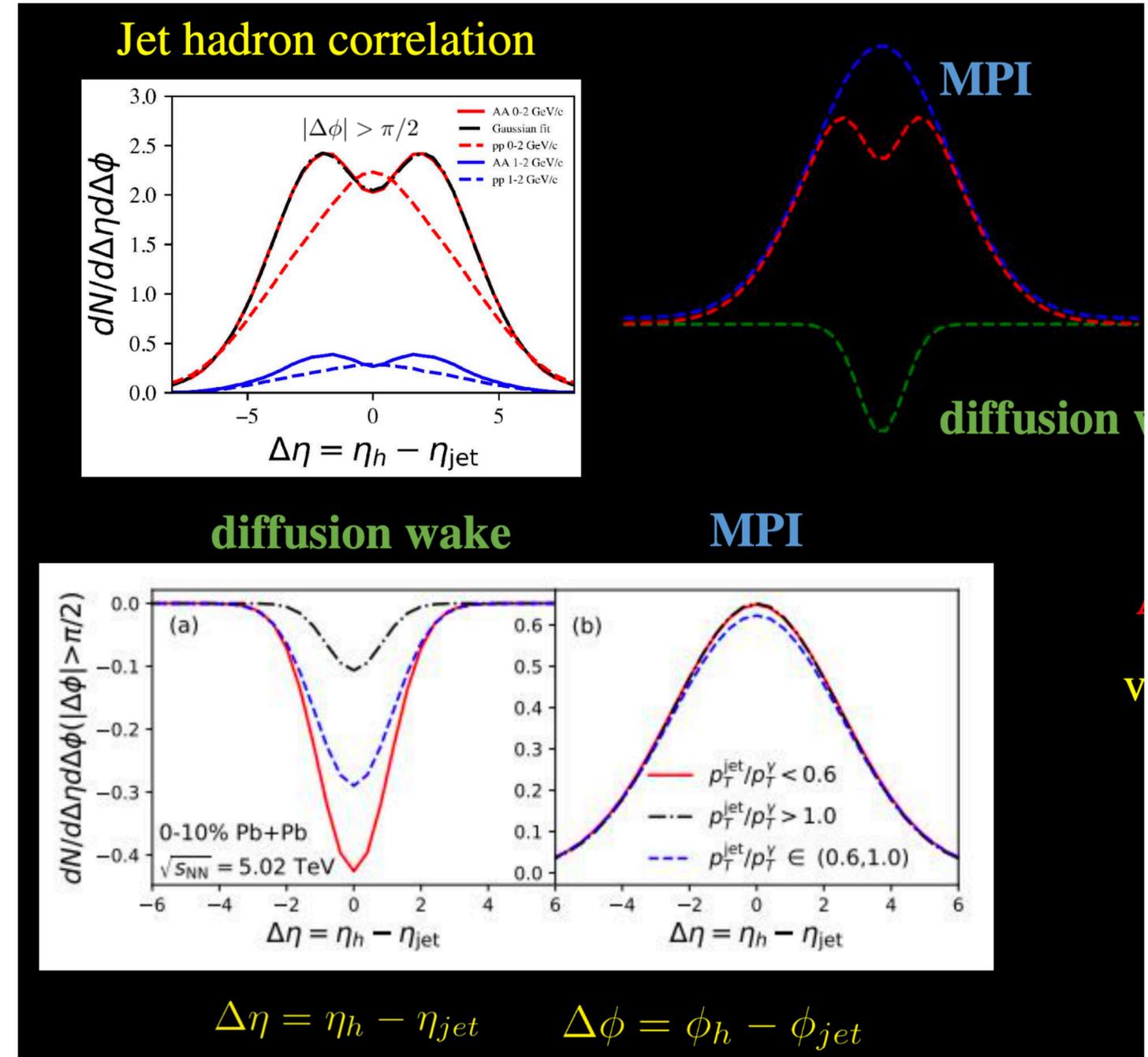
流体的媒質応答

● ジェットとは逆方向での媒質効果 in γ -ジェットイベント Talk by C. Wei

- 流体+ジェット計算 (CoLBT-hydro)
- γ -ジェット対生成イベント



- ジェットは媒質をジェット方向に押す
- γ 側 (ジェットの反対) では粒子が減る



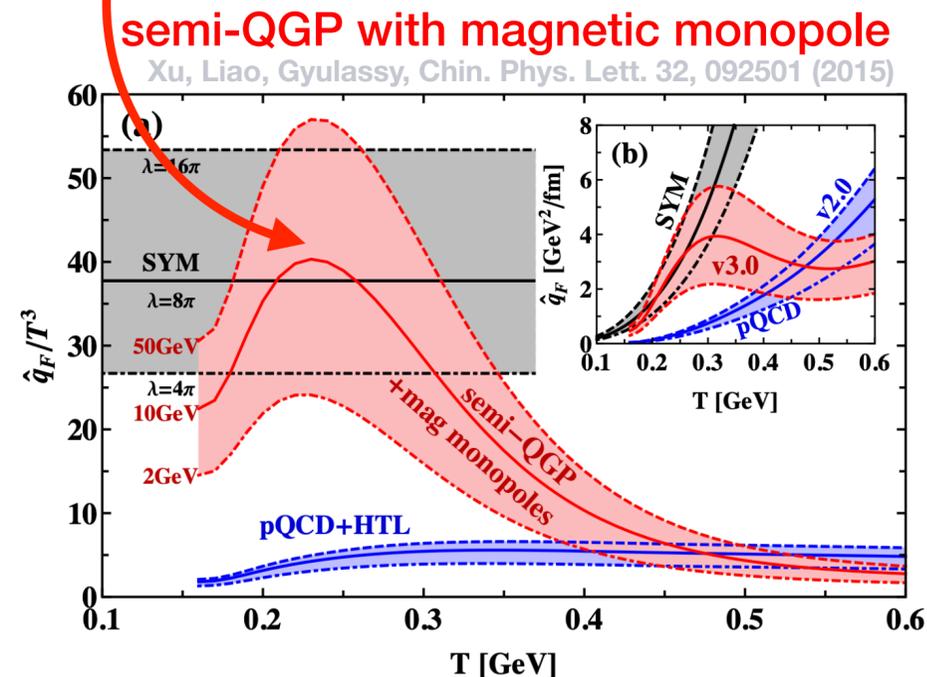
\hat{q} の格子QCD計算

● (2+1)フレイバー \hat{q} @Lattice Talk by A. Kumar

- \hat{q} 内の field correlator を MILCコードで計算

- 閉じ込めに向かって減衰

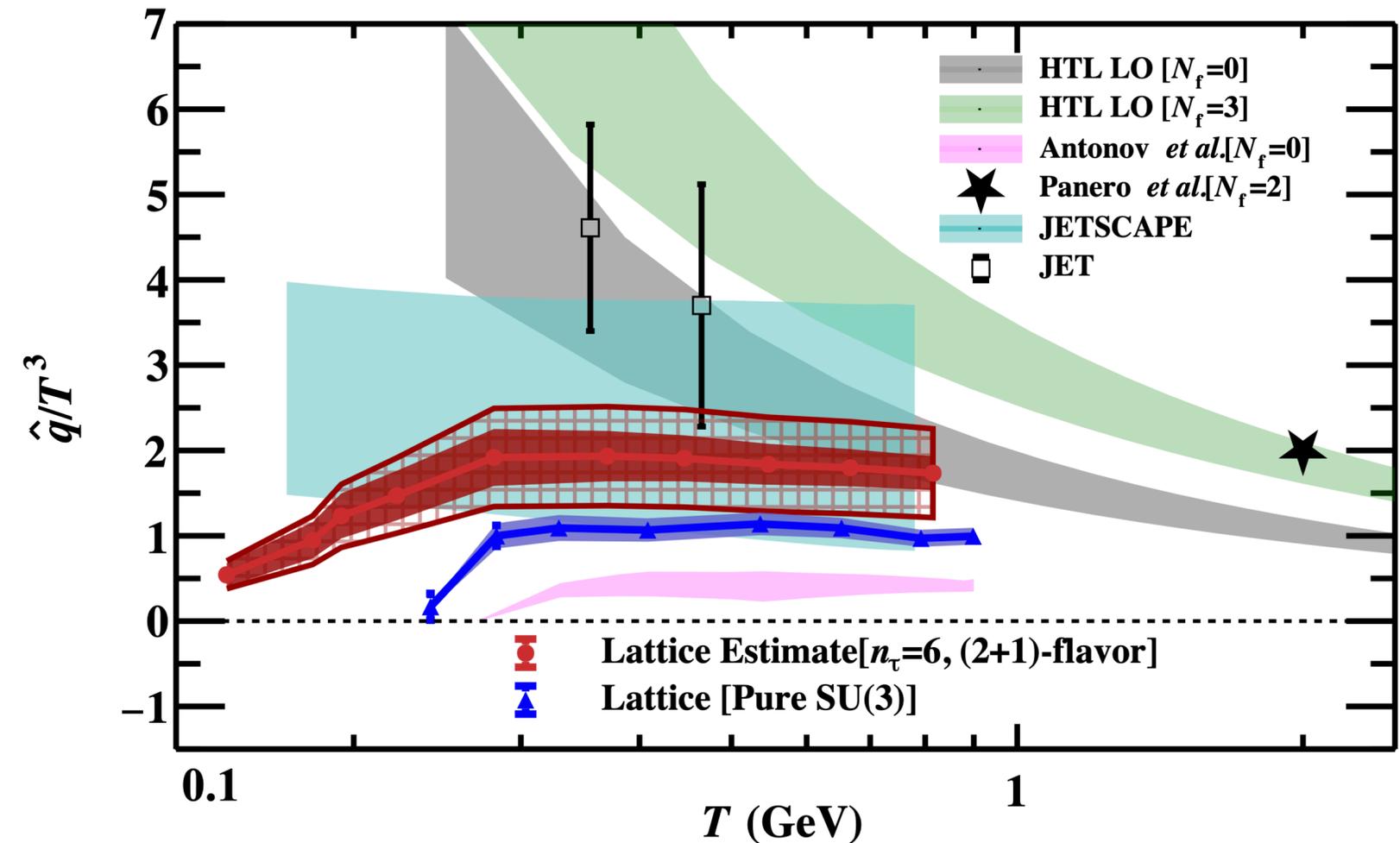
- T_c 付近のbump構造なし



$$\hat{q} = \frac{\alpha_s}{N_c} \int \frac{dy^- d^2y_\perp}{(2\pi)^3} d^2k_\perp e^{-i\frac{k_\perp^2}{2q}y^- + i\vec{k}_\perp \vec{y}_\perp} \times \langle M | \text{Tr}[F^{+\perp}(y^-, y_\perp) F_\perp^+(0)] | M \rangle$$

Non-perturbative part

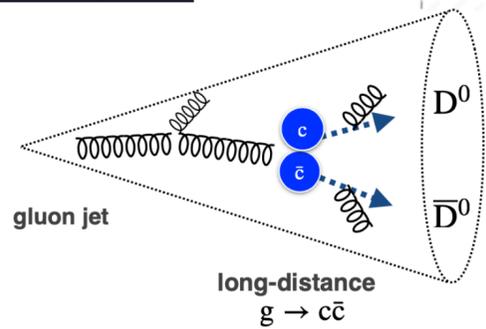
(Lattice QCD)



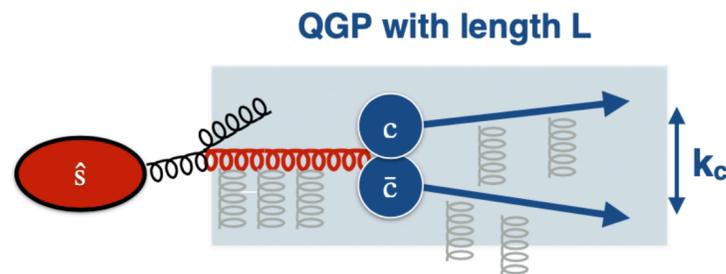
媒質効果による $g \rightarrow c\bar{c}$ 分岐増幅

● $g \rightarrow c\bar{c}$ 分岐プロセス Talk by R. Modarresi-Yazdi

- ジェット内部の $D^0\bar{D}^0$ ペアとして観測



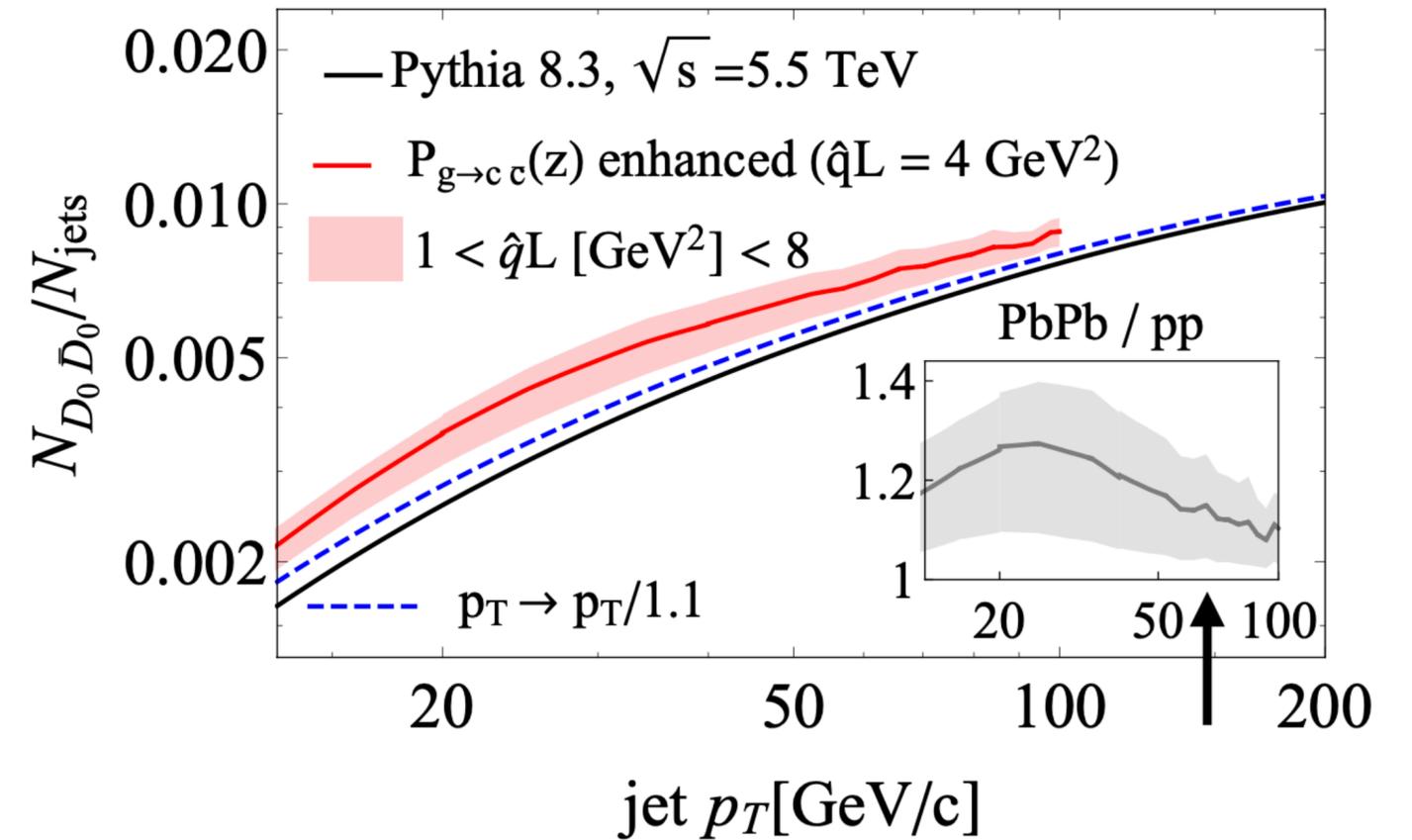
- 媒質効果 (\hat{q} , k_\perp -broadening) で増幅



- $\hat{q}L$ 入り分岐関数 $P_{g \rightarrow c\bar{c}}$ をPythiaの結果に埋め込み

$$w_{g \rightarrow c\bar{c}}^{med}(E_g, k_c^2, z) = 1 + \frac{\left(\frac{1}{Q^2} P_{g \rightarrow c\bar{c}}\right)^{med}(E_g, k_c^2, z)}{\left(\frac{1}{Q^2} P_{g \rightarrow c\bar{c}}\right)^{vac}(k_c^2, z)}$$

青点線 (エネルギー損失入りの見積) と比較



- 増幅の効果 (小だが) が見える

媒質誘起グルーオン放射率

● 最近のグルーオン誘導放射での発展

Plenary talks by J. Brewer and J. Ghiglieri

- 多重 soft 散乱 (LPM) 領域: **BDMPS-Z**

Baier Dokshitzer Mueller Peigne Schiff, Zakharov (1995-97)

- 単 hard 散乱 (N=1) 領域: **GLV**

Gyulassy, Livai, Vitev (2000)

- 多重 soft + Molière 散乱 (rare, hard):

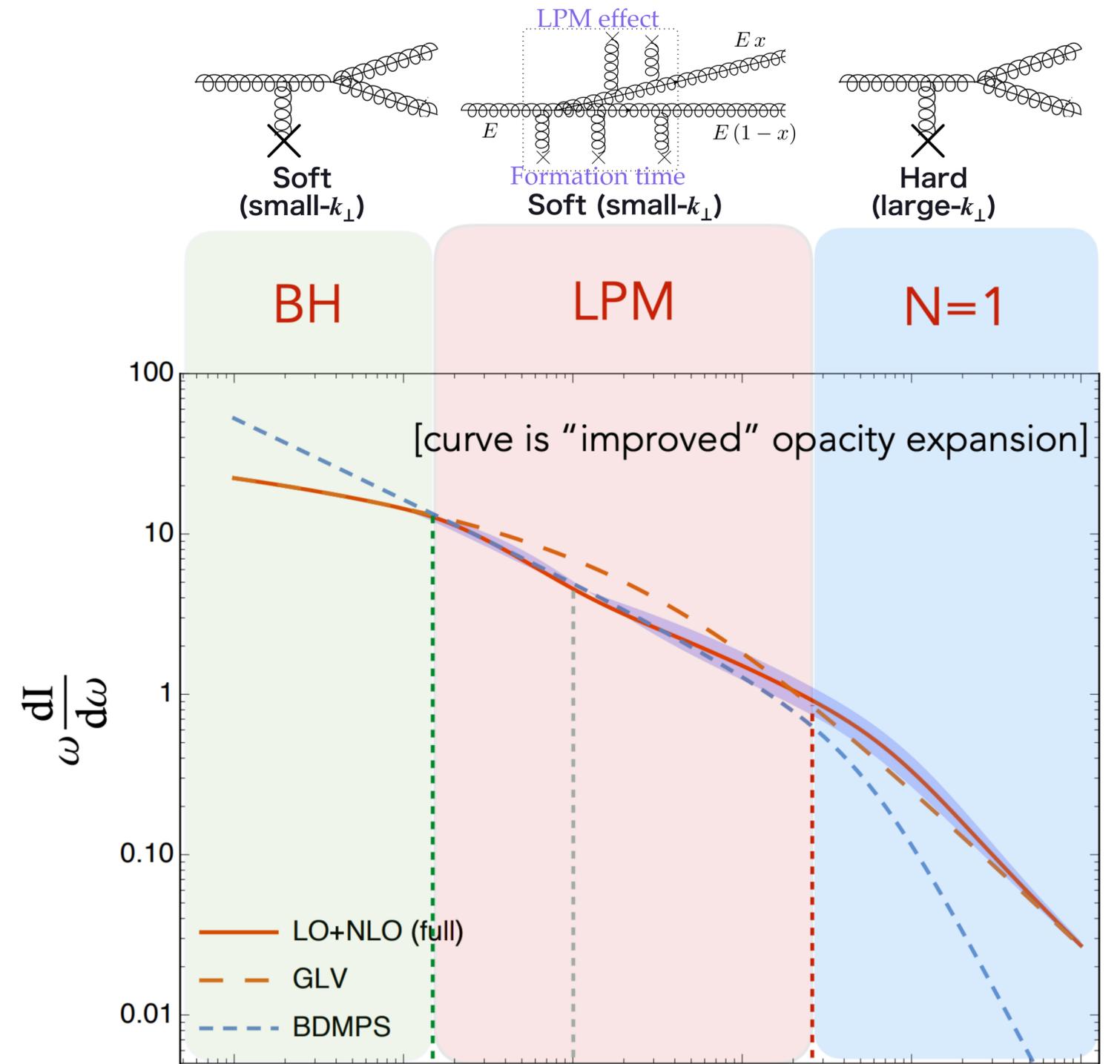
Improved Opacity Expansion

Mehtar-Tani and Tywoniuk, JHEP 06, 187 (2020)

- EQCDの非摂動散乱カーネルを用いた計算

Electrostatic, 低エネルギー有効場理論 Talks by I. Soudi and P. Schicho

- 膨張する媒質中での計算 Talks by C. Andres, S. Adhya

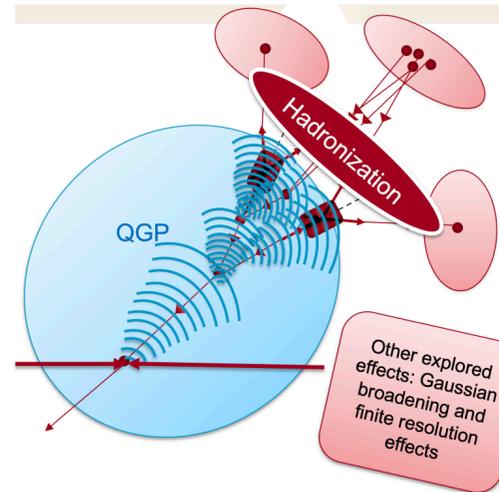


Tywoniuk QM'19

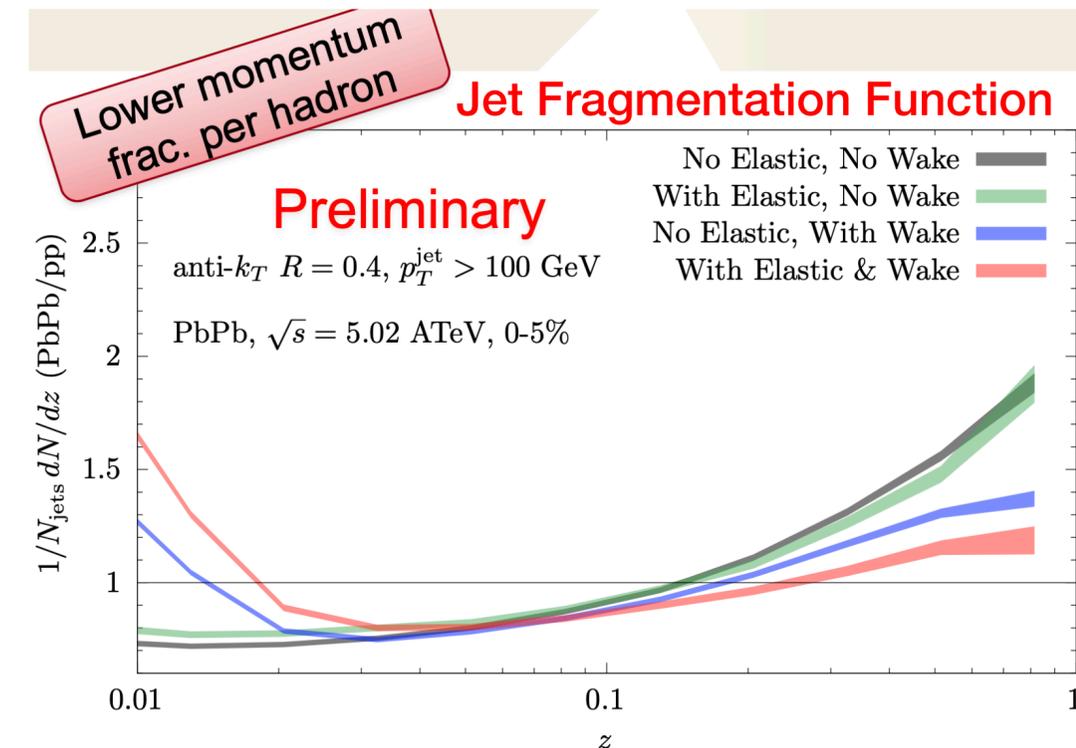
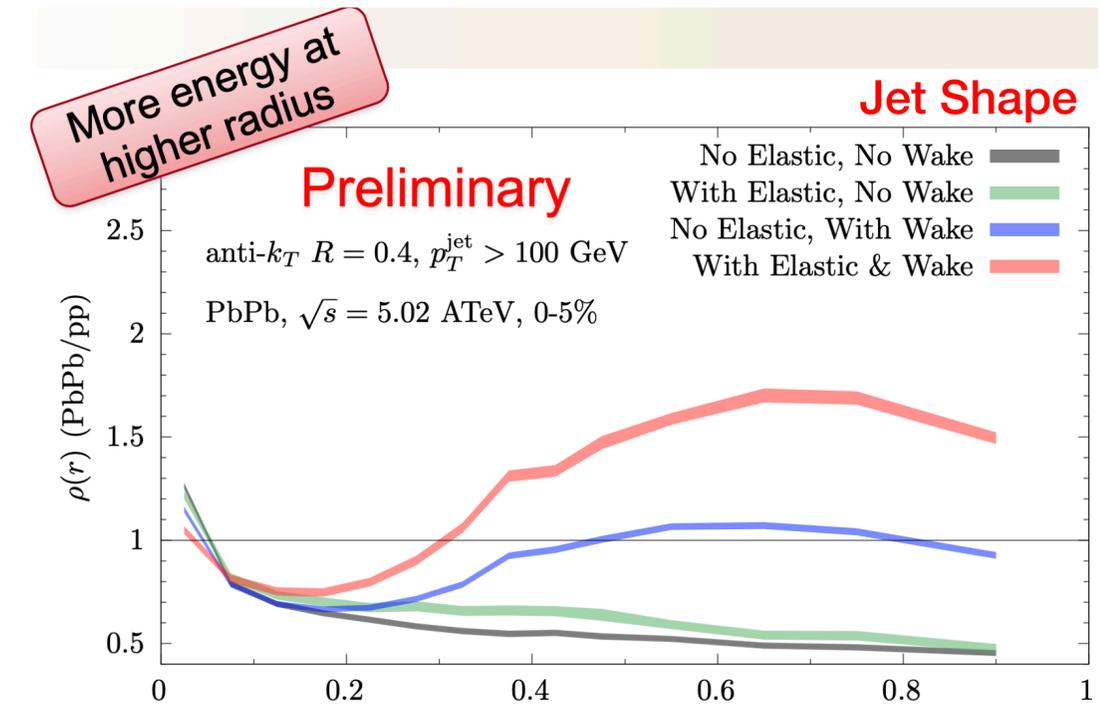
Molière 散乱を含むAdS/CFTのMC模型拡張

● Molière + ハイブリッド模型

Talks by Z. Hulcher



- ハイブリッド模型: AdS/CFT+Pythia8
- 媒質誘起パートン放射なし (double counting?)
- 媒質応答: Cooper-Frye+摂動
- Molière散乱: 摂動ハード弾性散乱
- 反跳媒質パートン \rightarrow recoil と負の媒質応答
- ハード弾性散乱の効果は媒質応答を通して顕著になる
- 増幅@大角度, ソフト

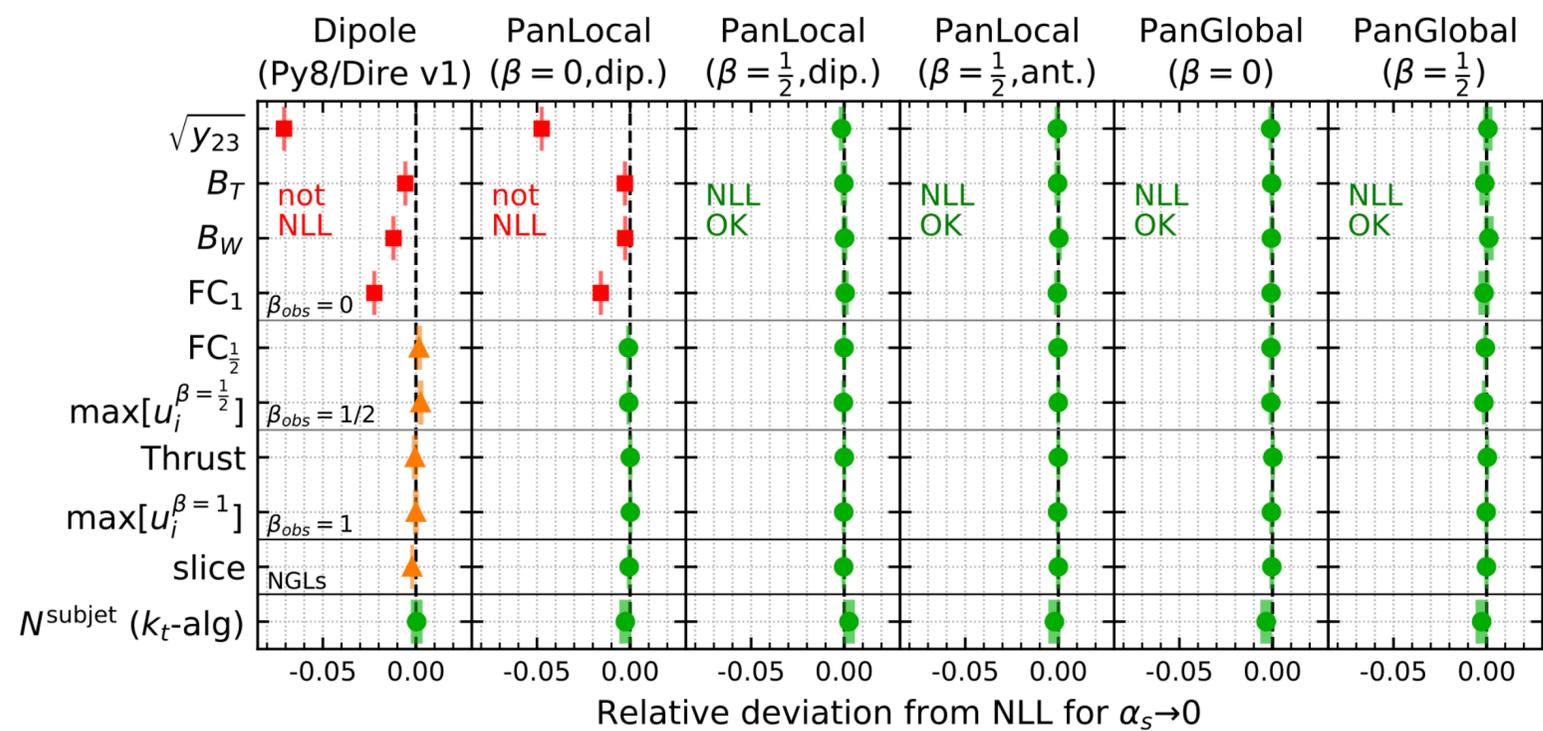


ジェット-媒質相互作用評価のためのベースライン

● PanScales (NLL真空パートンシャワー)

Talk by A. Soto-Ontoso

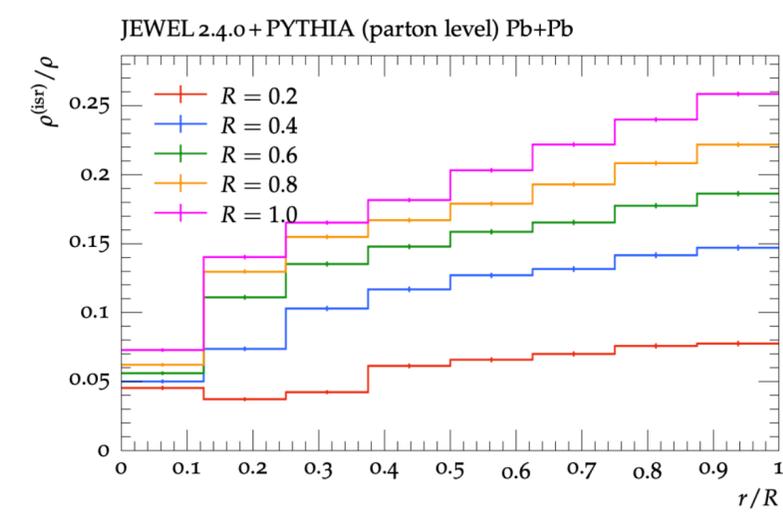
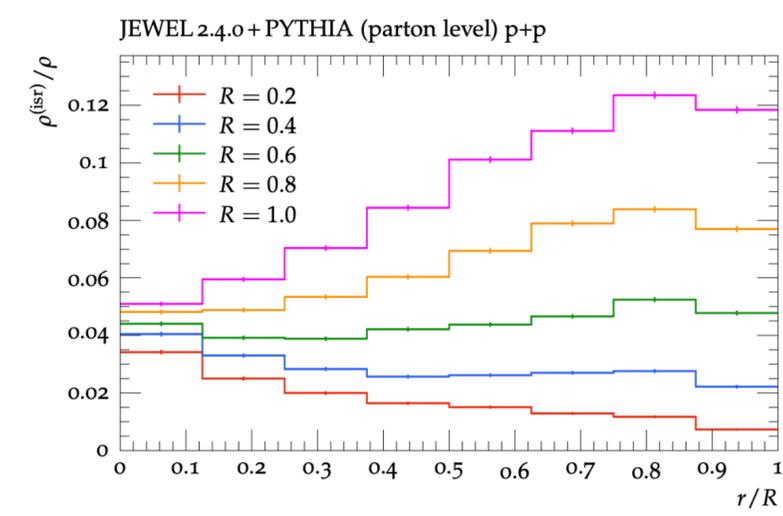
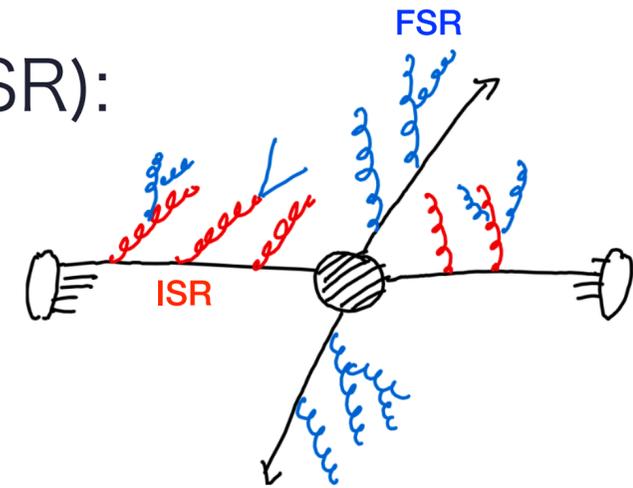
- MCで再現できない観測量の存在 (girthなど)



- PanScale は NLLの精度を実現
- 時間順序シャワー ($\beta = 1$) 対応に拡張中 (時間発展媒質中のシミュレーションに必要)

● ISRからの寄与の評価 Talk by K. Zapp

- Initial State Radiation (ISR): 入射パートンからの放射
- JEWEL でのISR寄与評価

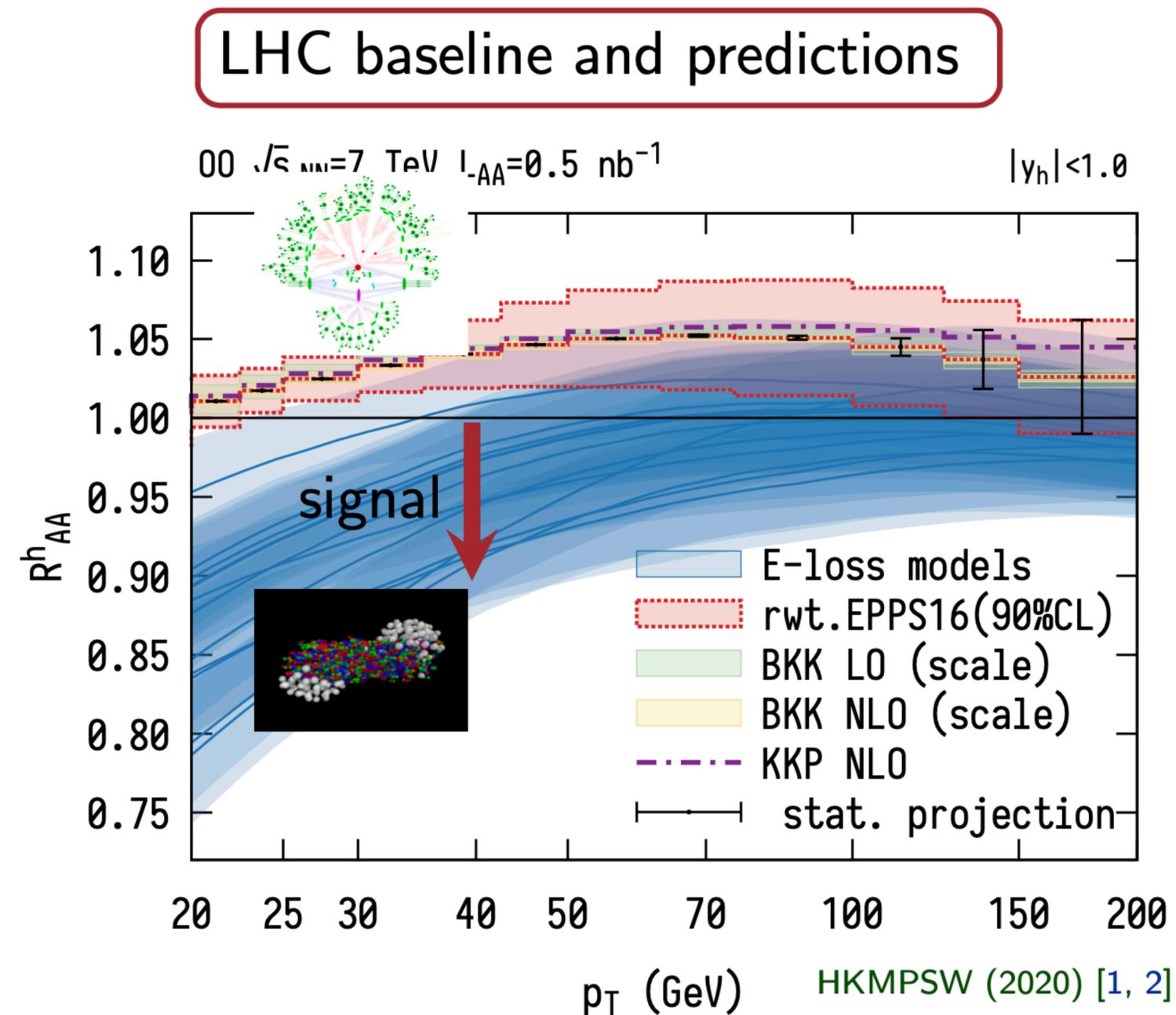


- コーン大のジェットで大角度で10%ほど寄与
- 媒質応答と似た寄与の仕方

ジェット-媒質相互作用評価のためのベースライン

● 00衝突でのエネルギー損失測定可能性の評価 Talk by A. Mazeliauskas

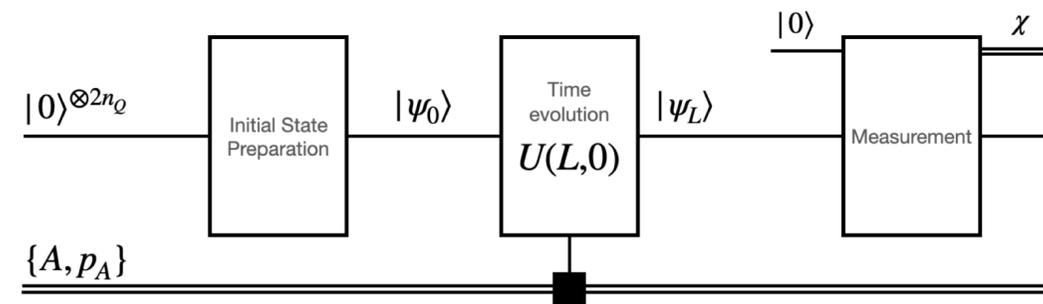
- nPDFなどの不確かさ
- R_{AA}^h @00 でジェット-媒質相互作用は見えるか？
- $p_T < 50$ GeVでは媒質効果が見えそう



その他

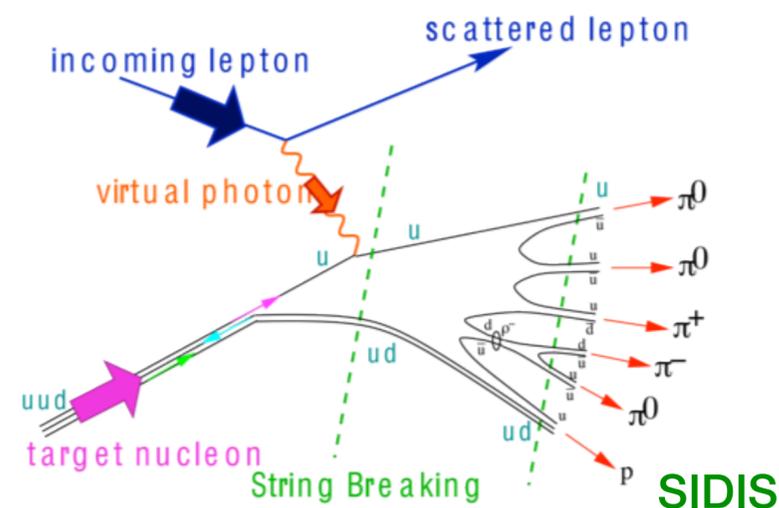
● 量子コンピュータによるジェット計算 Talk by J. Barata

- 量子計算によるジェット発展シミュレーションの手法の提案



● ジェットナローイング@eA SI(semi-inclusive)DIS Talk by W. Horowitz

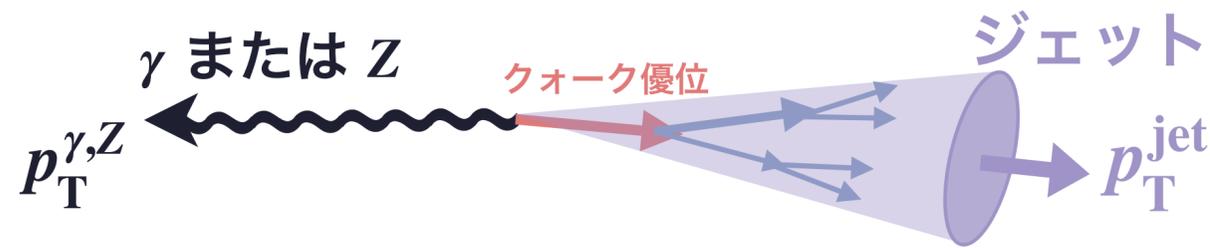
- 実験データはナローイング, TWIST4計算はブロードニング
- Opacity 展開ではNLOでナローイングが出る



High- p_T 粒子 & ジェット [実験]

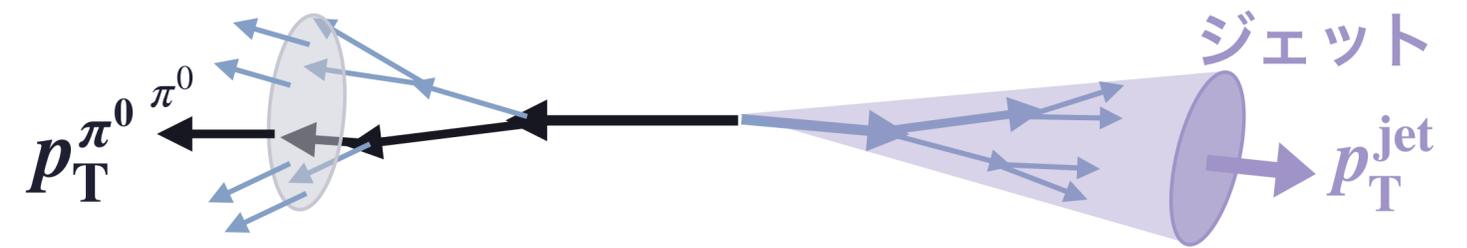
タグ付きジェット

● γ/Z -ジェットイベント

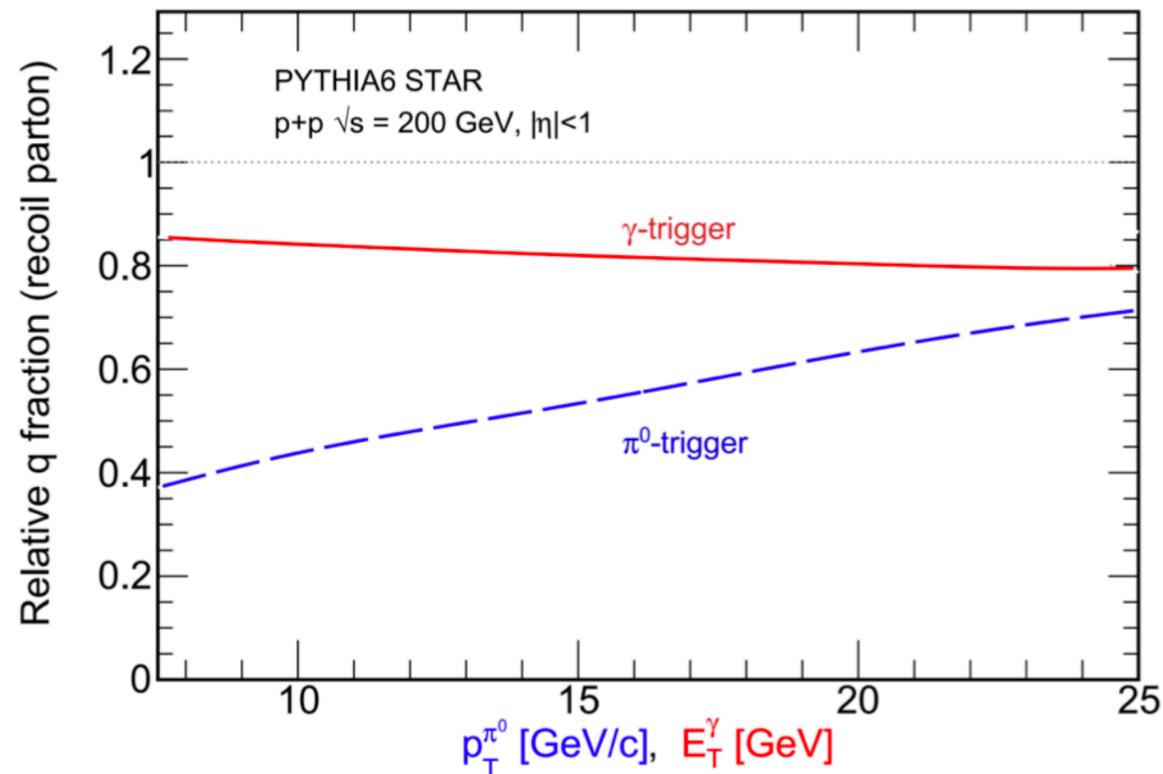


- γ, Z は媒質と相互作用しない
($p_T^{\gamma,Z} - p_T^{jet} \sim$ ジェットのエネルギー損失)
- クォークジェットが優位

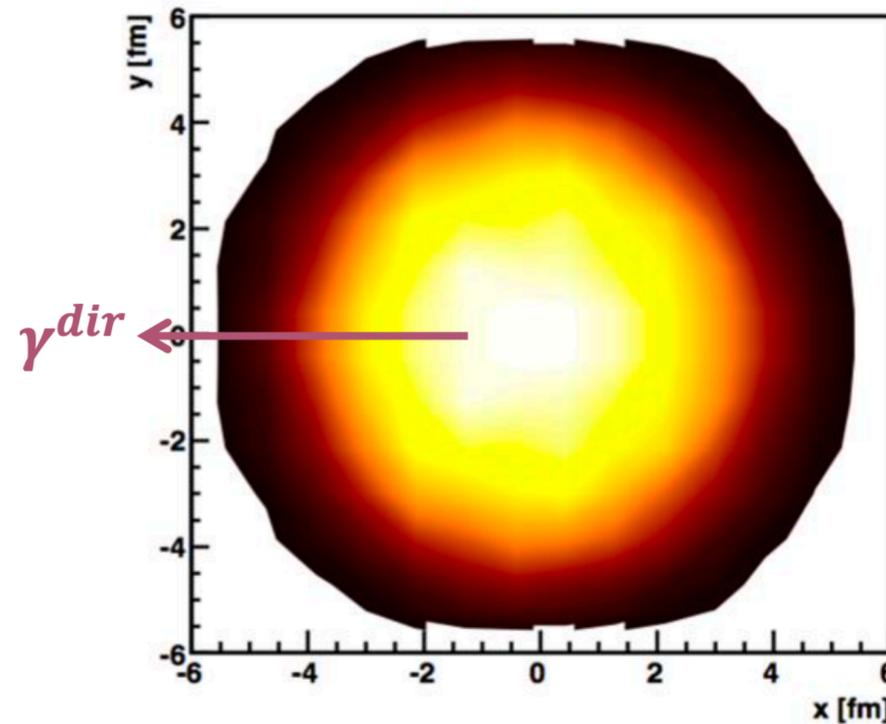
● π^0 -ジェットイベント



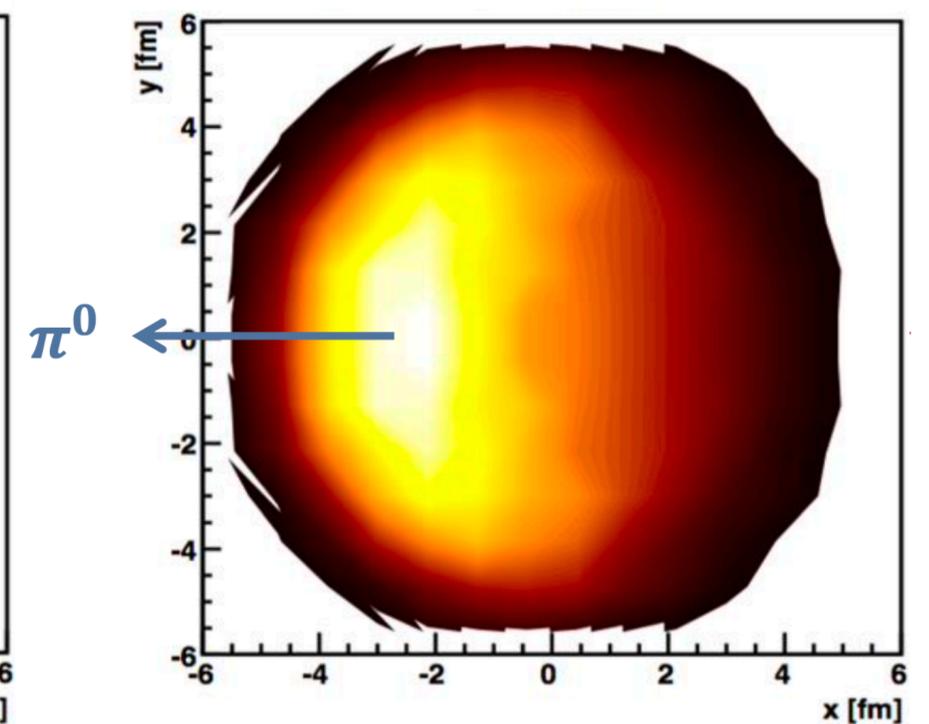
- エネルギー損失とハドロニ化



γ_{dir} Trigger



Hadron Trigger

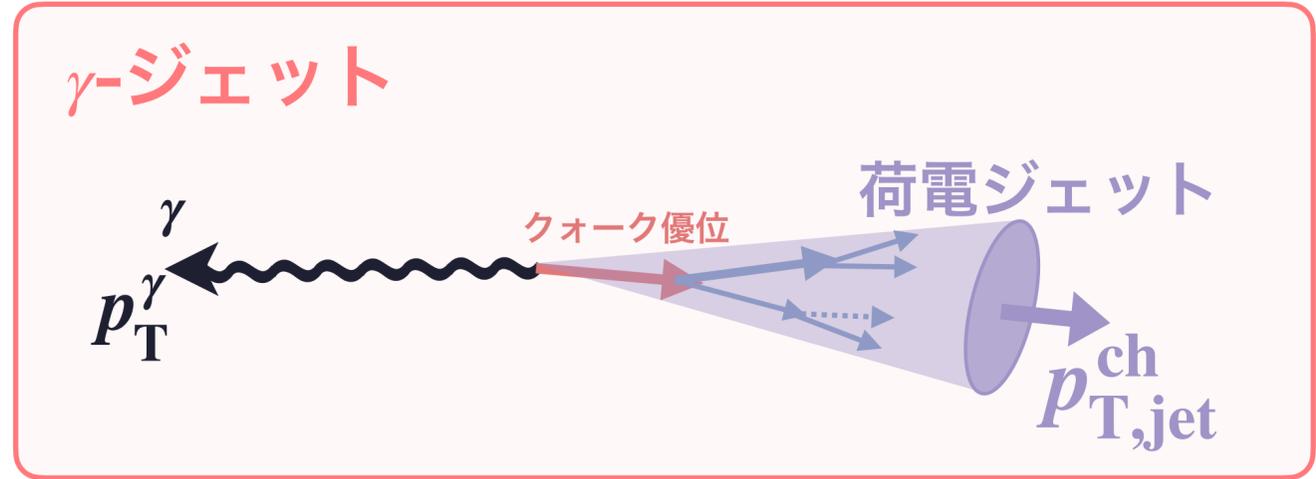
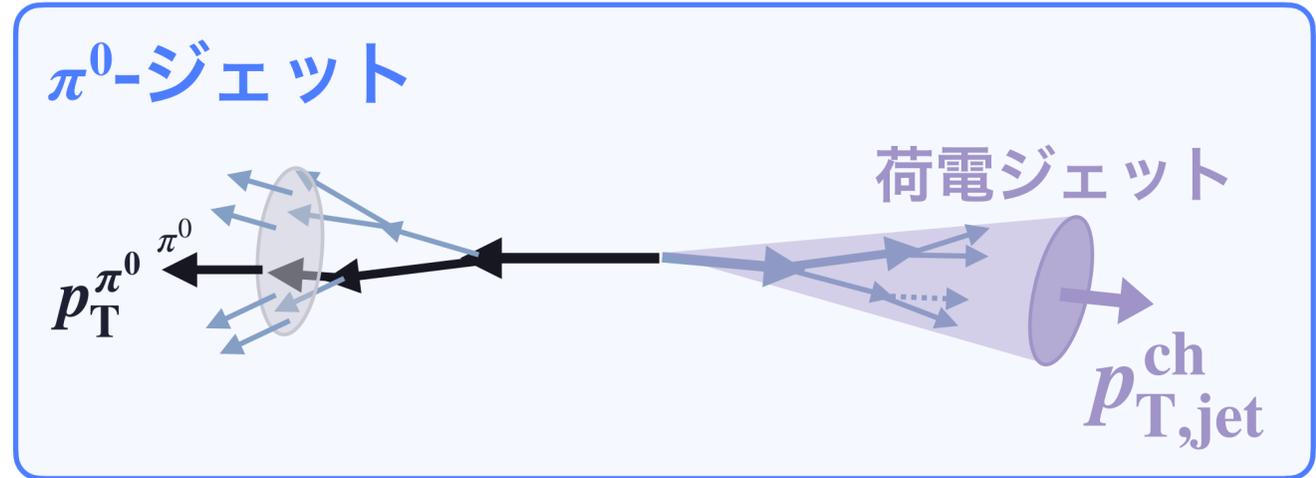
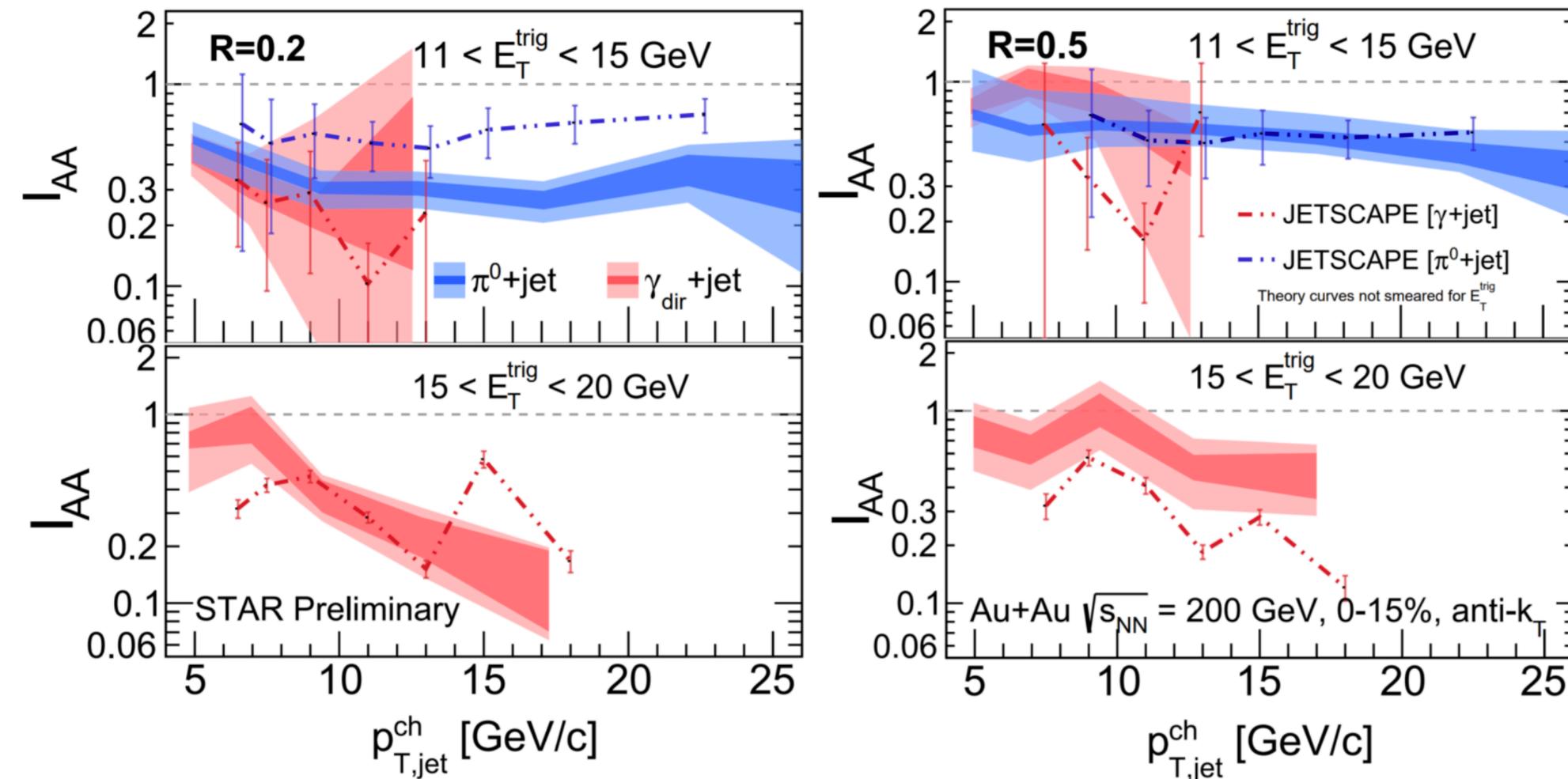


Talk by D. Anderson [STAR]

タグ付きジェット

● γ -ジェット相関と π^0 -ジェット相関 in AuAu@200 GeV

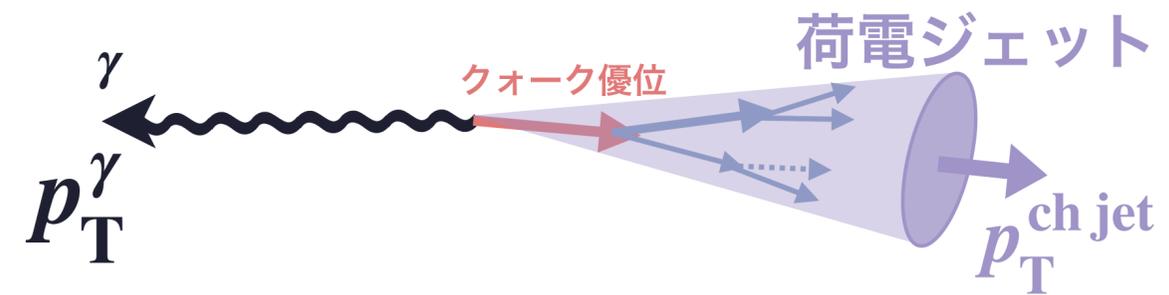
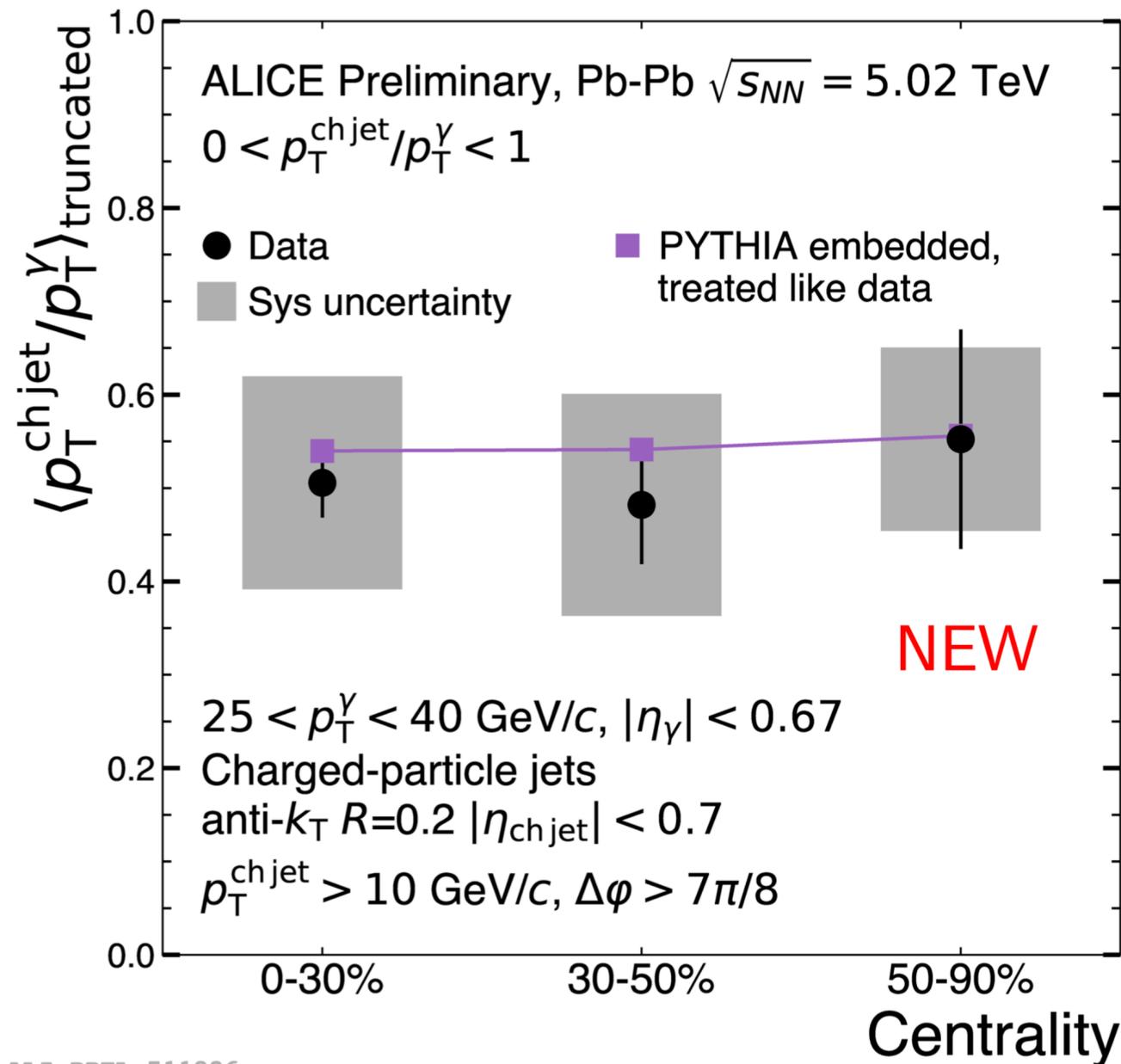
Talk by D. Anderson [STAR]



- 媒質効果 (エネルギー損失) は見えている
- γ と π^0 の差を見るにはまだ統計が足りない?

タグ付きジェット

● γ -ジェット 相関 in PbPb @5.02 TeV Talk by A. Liu [ALICE]

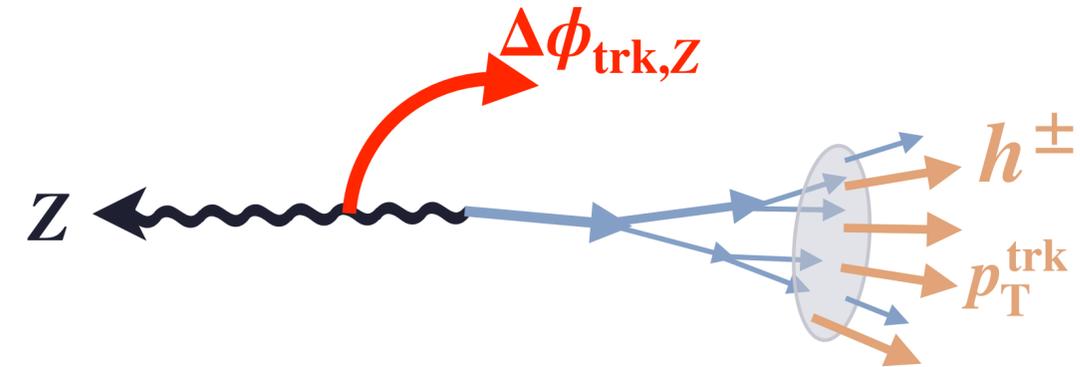
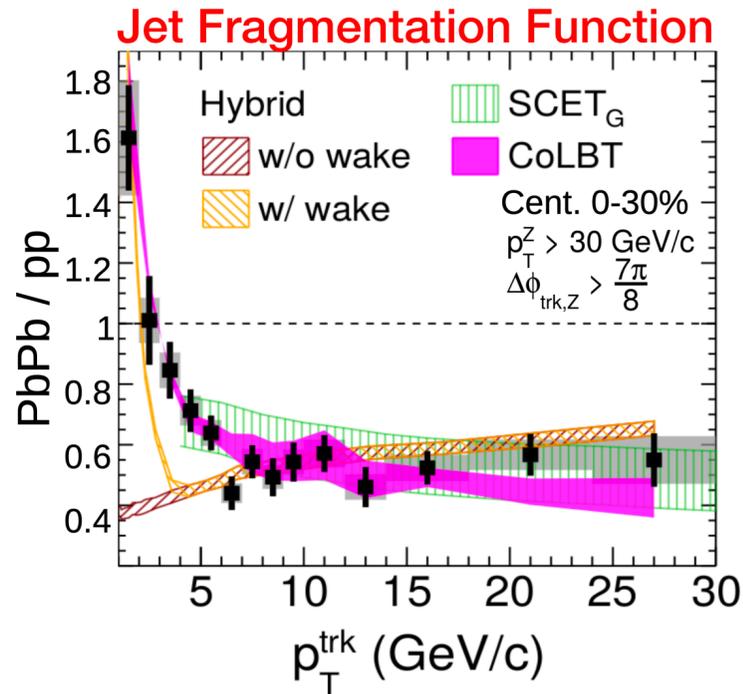


- γ -『荷電』ジェット p_T 比
(真空のLOでも $p_T^{\text{chjet}}/p_T^\gamma < 1$)
- Centrality 依存性なし
- Pythia とコンシステント

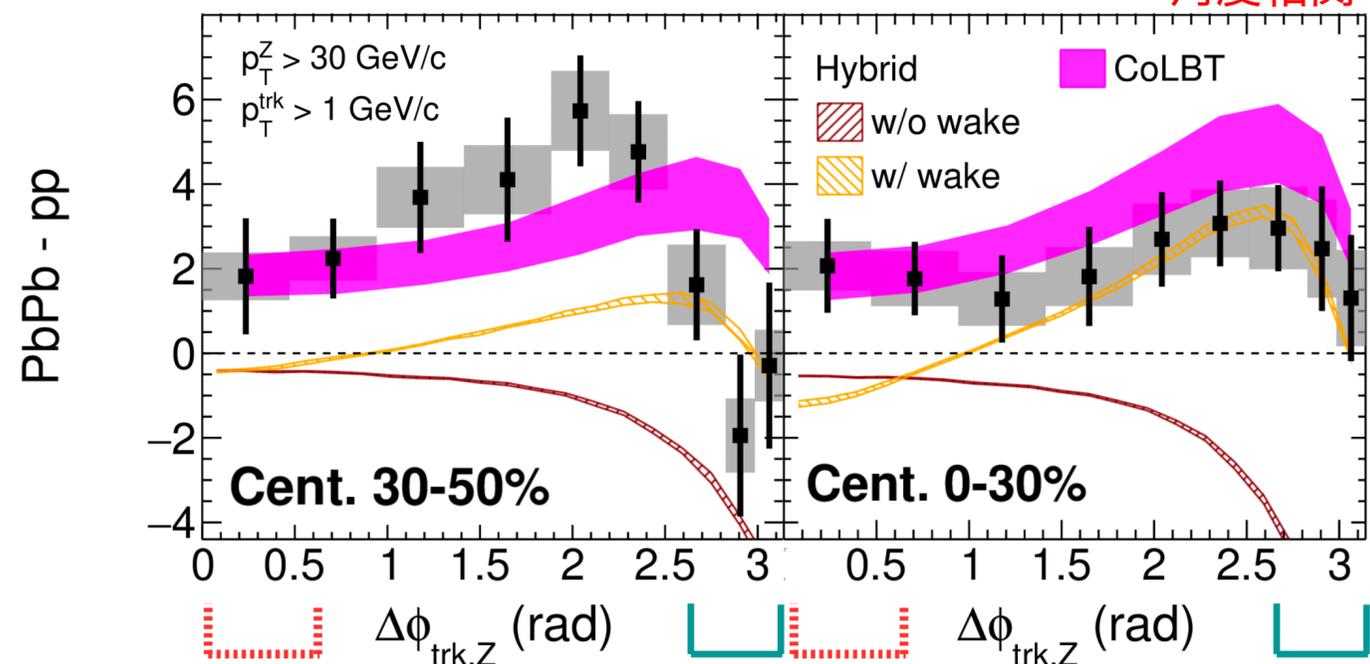
ALI-PREL-511826

タグ付きハドロン

● Z-ハドロン相関 in PbPb @ 5.02 TeV Talk by K. Tatar [CMS]



角度相関

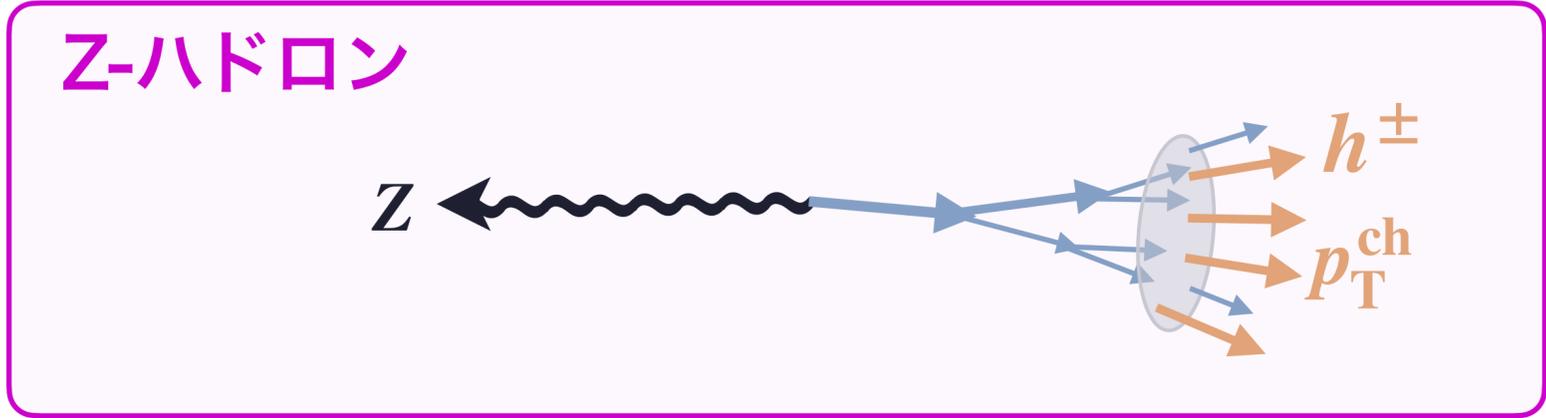
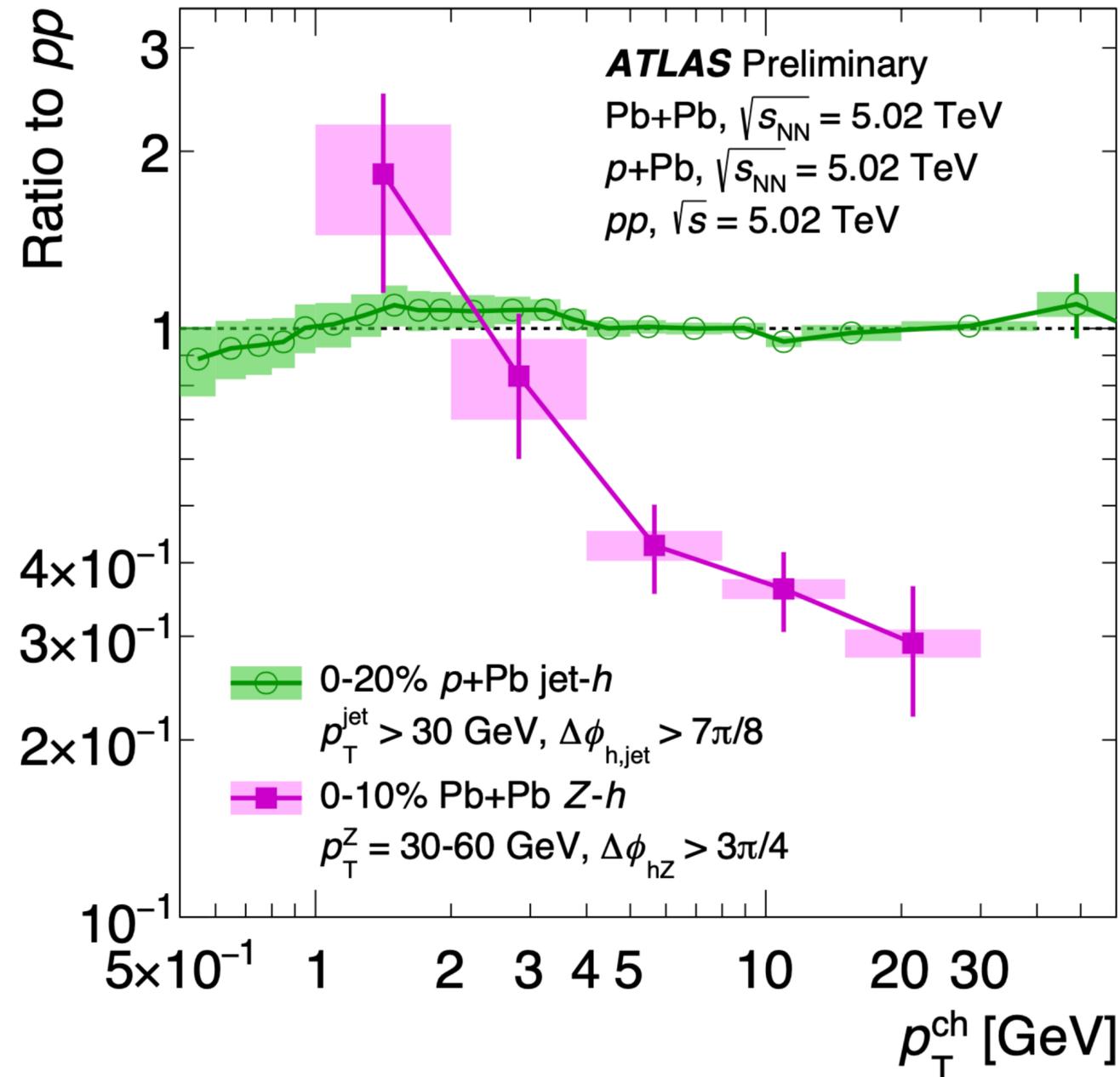


- ハード↘, ソフト↗
- ブロードニング
- 媒質応答の寄与が説明
- しかしCentrality依存性は逆の振る舞い？

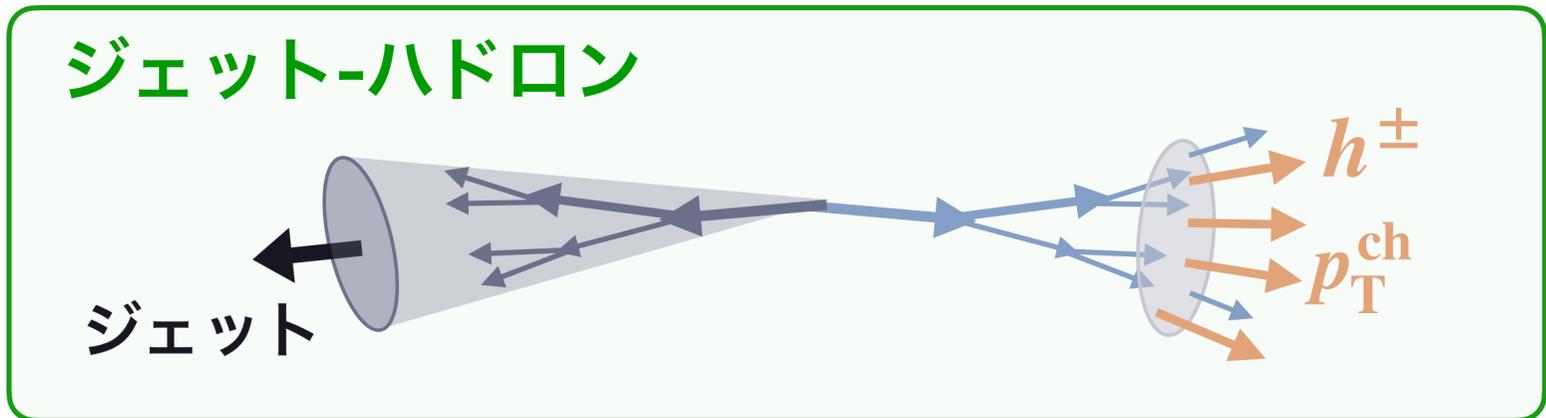
タグ付きハドロン

● Z-ハドロン相関 in PbPb と ジェット-ハドロン相関 in pPb @5.02 TeV

Talk by C. McGinn [ATLAS]



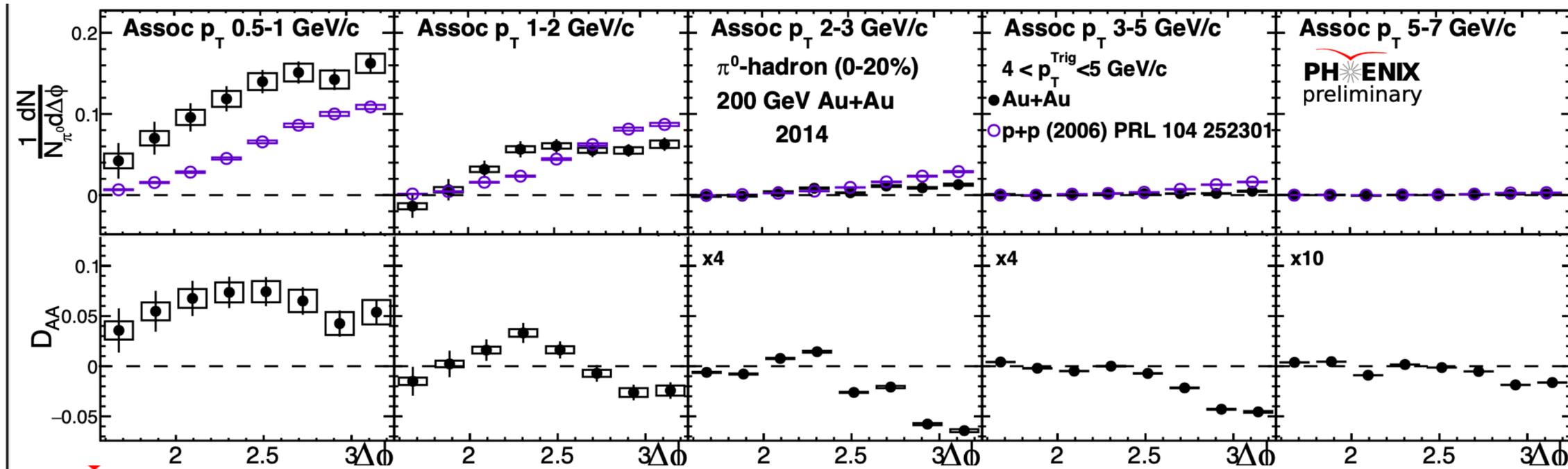
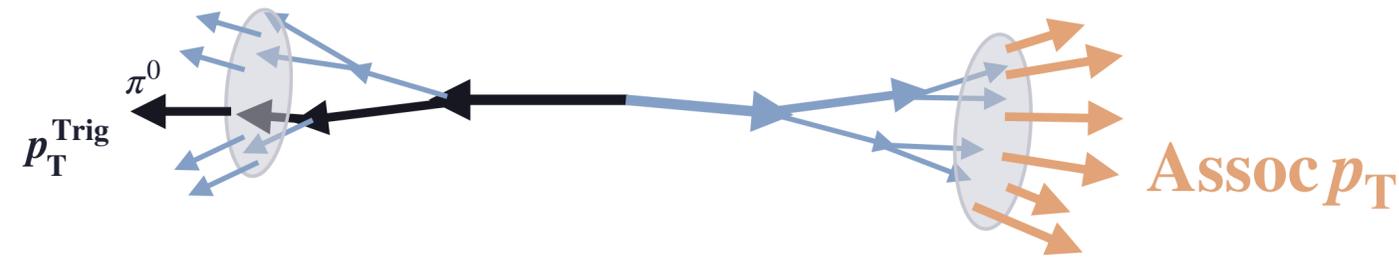
- Zの反対側のハドロンはPbPbでソフトに (エネルギー損失, CMSと同じ振る舞い)



- jet-ハドロンは pPb と ppでコンシステント

タグ付きハドロン

● π^0 -ハドロン相関 in AuAu@200 GeV Talk by M. Connors [PHENIX]

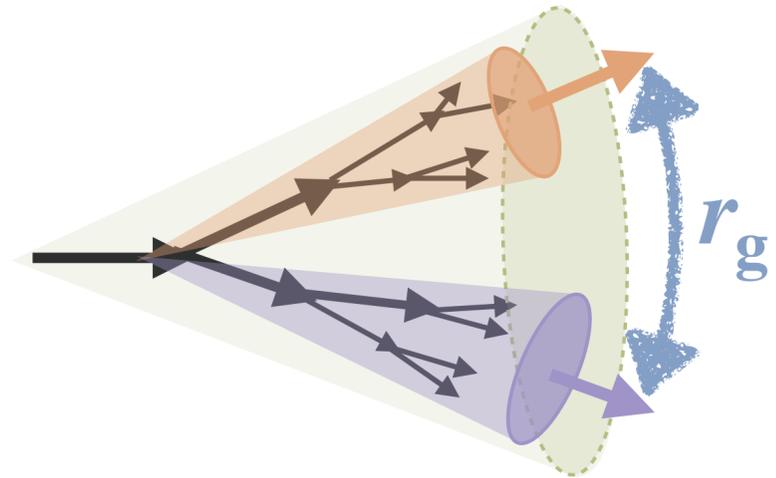


$$D_{AA} = Y_{AA} - Y_{pp}$$

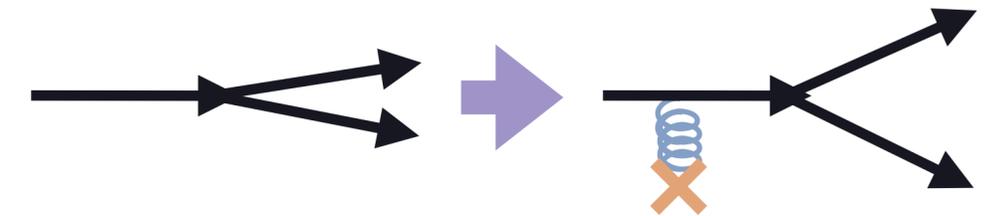
- Low- p_T でCMS Z-ハドロンと同じ振る舞い
- p_T 依存性が見える

ジェット内部構造

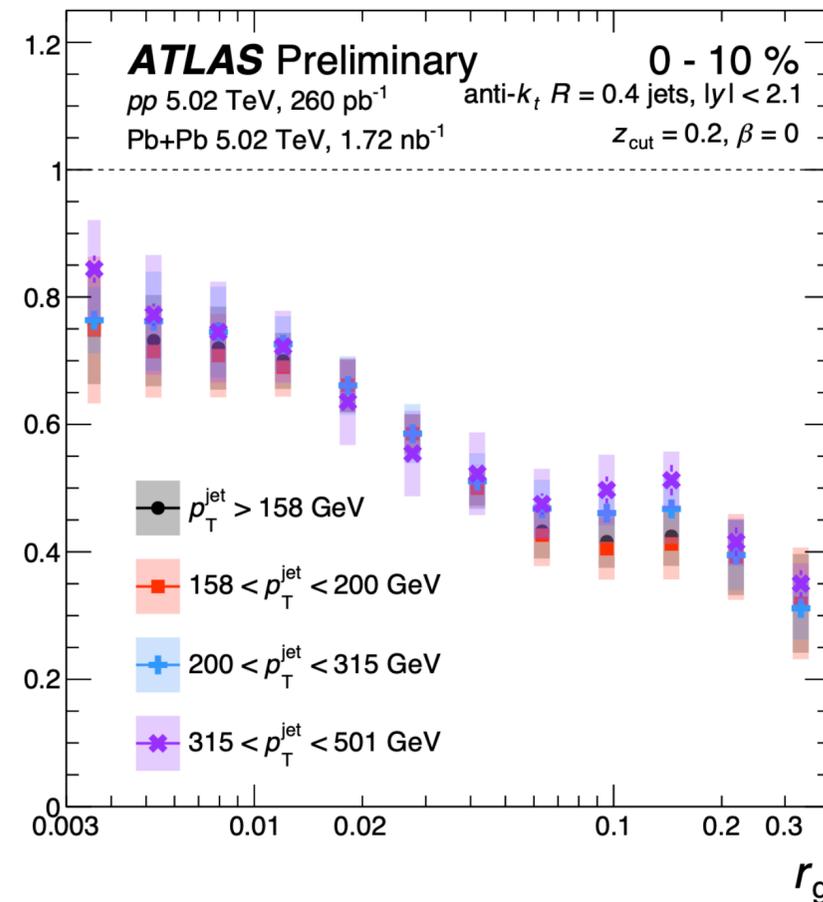
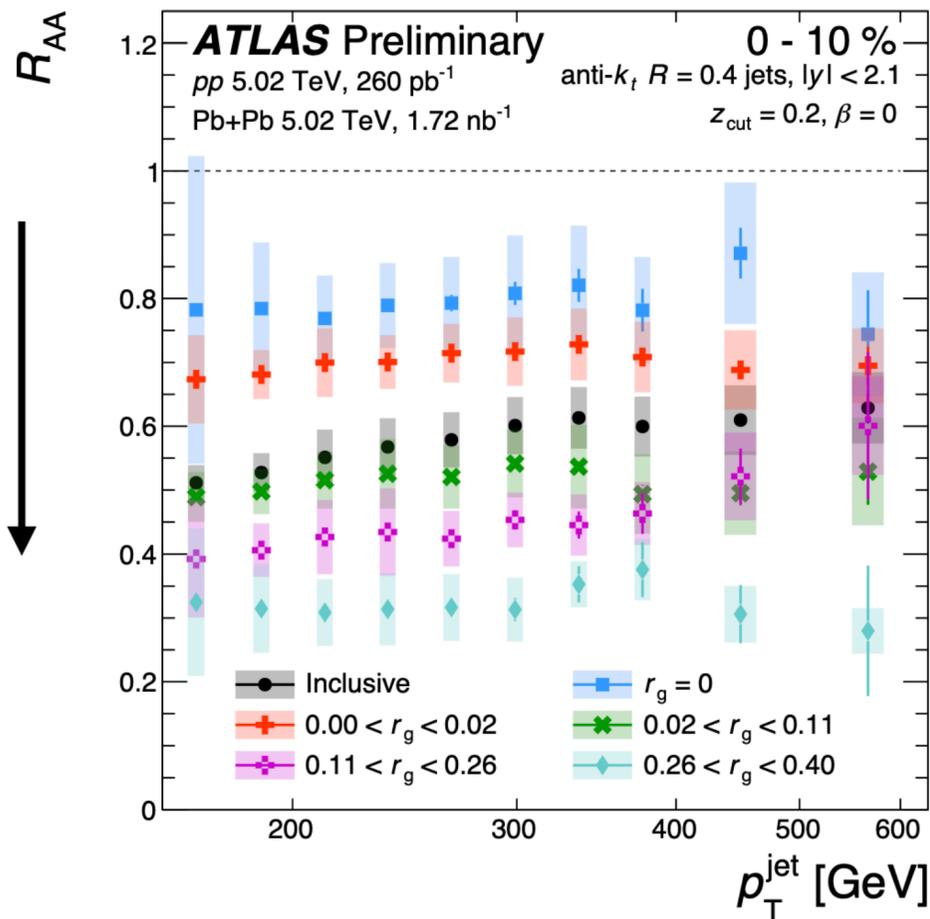
● Groomed サブジェット間角度 in PbPb@5.02 TeV Talk by A. M. Sickles [ATLAS]



- ナイーブには
媒質効果 → 分岐ブロードニング



large r_g jets
more
suppressed



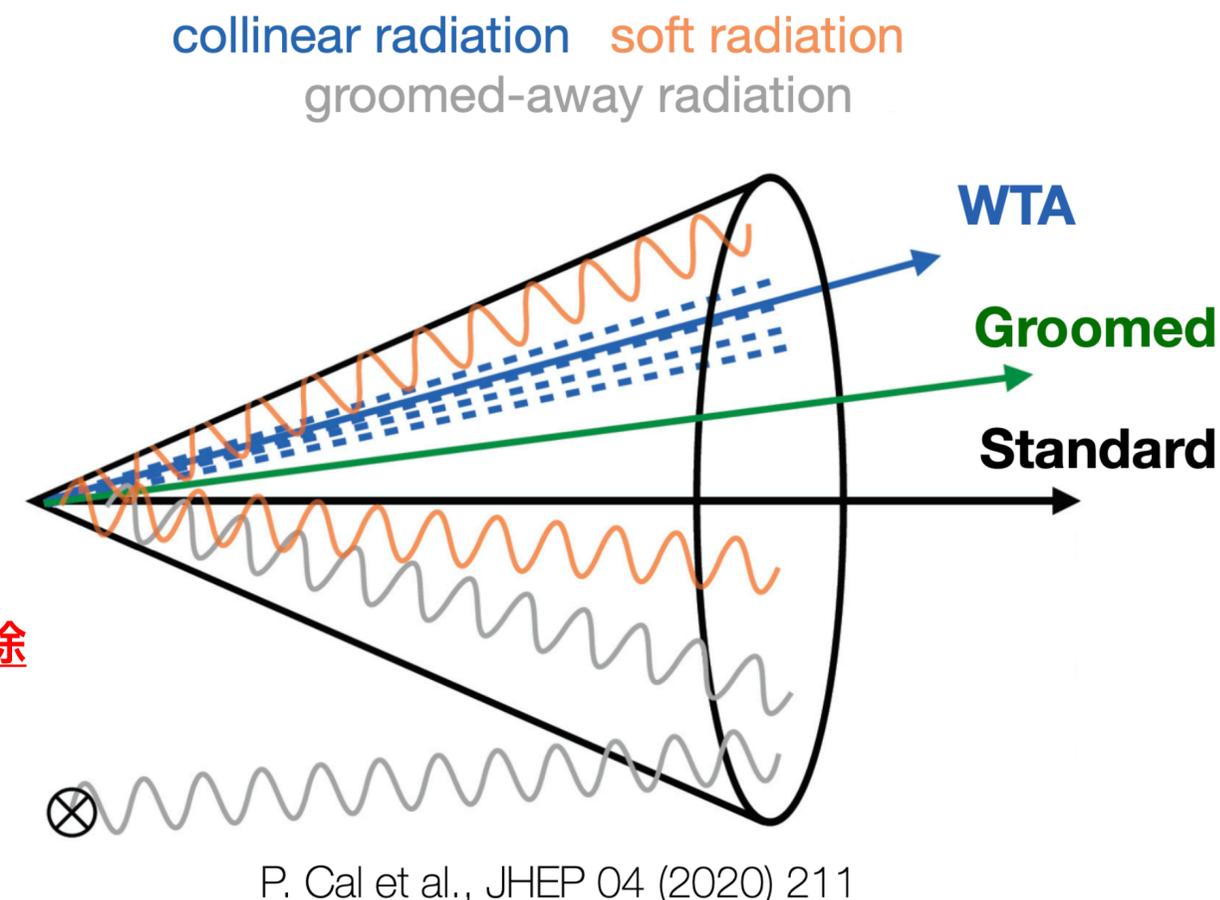
- 分岐ナローイング
 - ブロード: エネルギー損失大
 → ナロージェットの割合増

ジェット内部構造

● ジェット内部構造を特徴づける様々な角度 in PbPb@5.02 TeV

Talk by R. Cruz-Torres [ALICE]

- Standard axis: ソフトな要素も全部含む
coordinates in (y, φ) of jet clustered with anti- k_T algorithm and combined with E-Scheme
- Groomed axis: ソフトな要素の寄与を抑制
standard axis of groomed (with Soft Drop) jet
- Winner-Takes-All (WTA) axis: ソフトな要素の寄与を強く排除
 - recluster jet with CA algorithm
 - 2 \rightarrow 1 prong combination by taking direction of harder prong and $p_{T, \text{tot}} = p_{T, 1} + p_{T, 2}$
 - Resulting axis insensitive to soft radiation at leading power

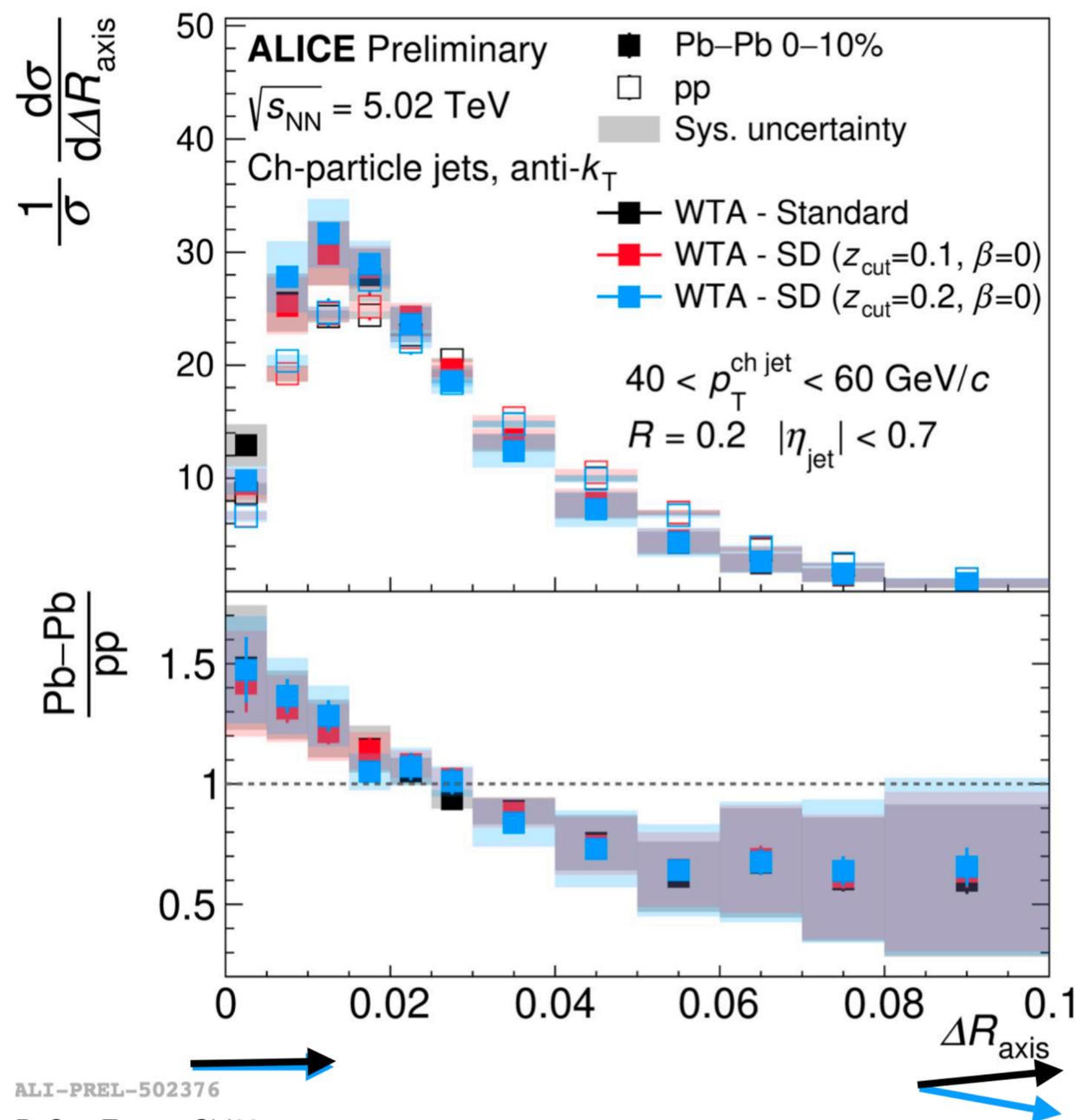


Substructure observable: $\Delta R_{\text{axis}} = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (\varphi_2 - \varphi_1)^2}$ between two axes

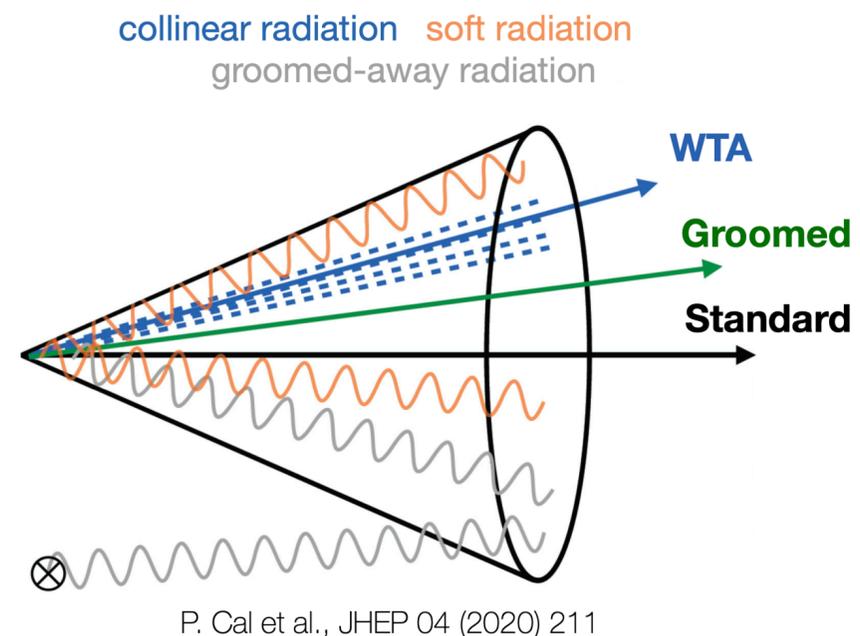
ジェット内部構造

● ジェット内部構造を特徴づける様々な角度 in PbPb@5.02 TeV

Talk by R. Cruz-Torres [ALICE]



ALI-PREL-502376
 R. Cruz-Torres - QM22



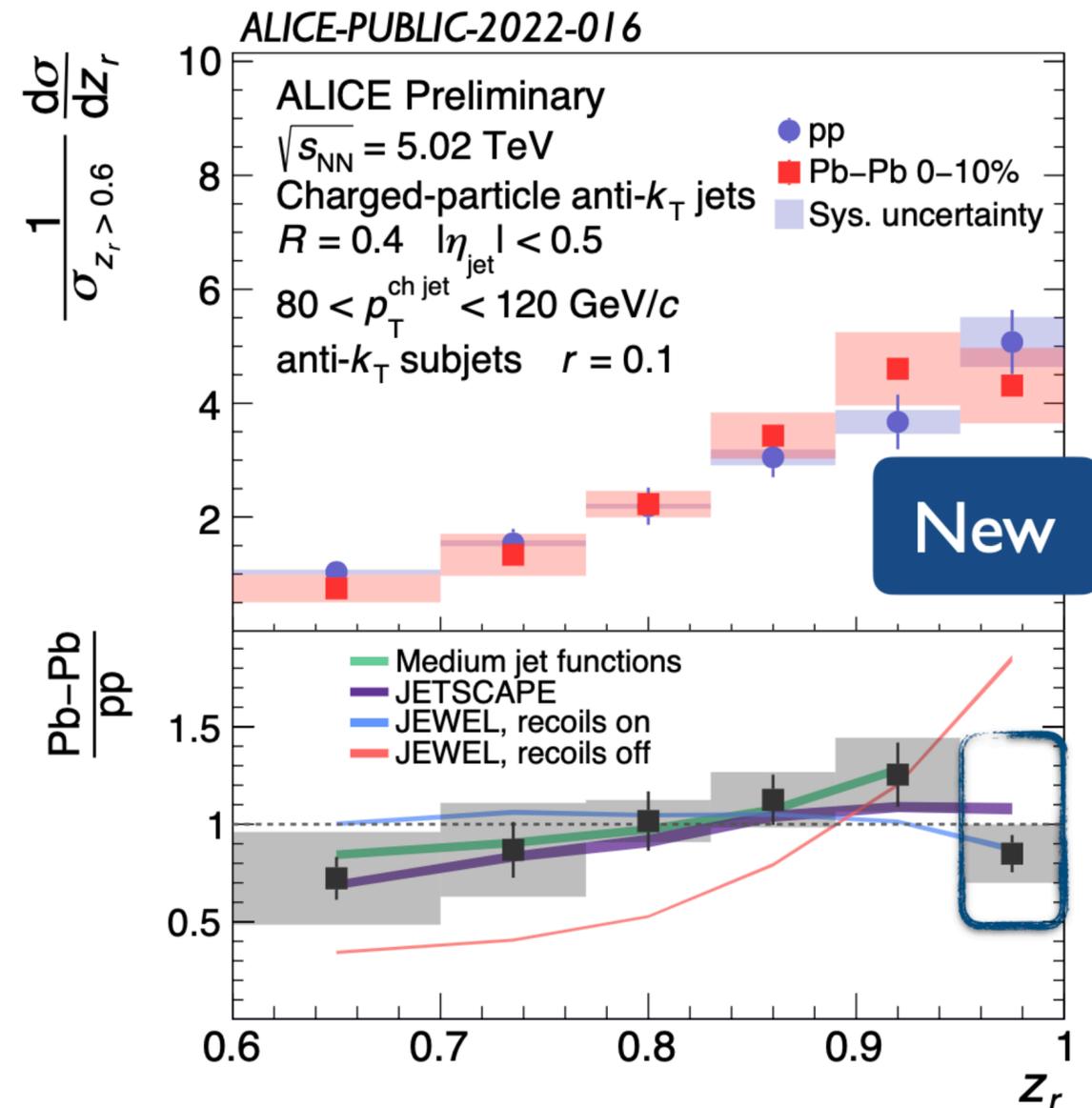
- Grooming (SD) はジェット方向をあまり変えない
- ナローイングを示唆
- ブロード: エネルギー損失大
 → ナロージェットの割合増

ジェット内部構造

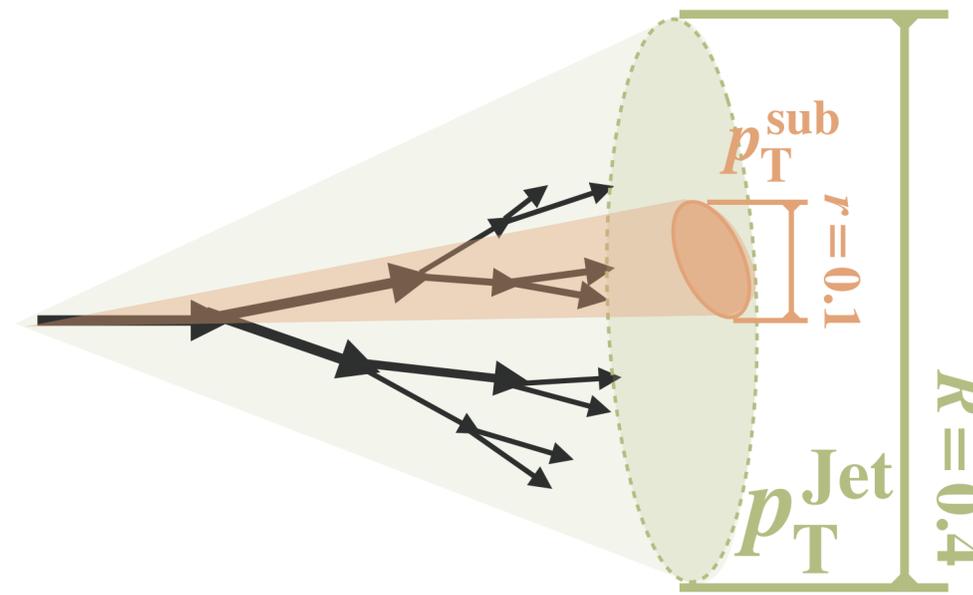
● サブジェットフラグメンテーション in PbPb@5.02 TeV

Talk by J. Mulligan [ALICE]

Leading subjects



- ジェット内の粒子で小さいジェットをクラスタリング



$$z_r = \frac{p_T^{sub}}{p_T^{Jet}}$$

- Large- z_r ヘシフト (ジェットの芯が残る)
- しかし $z_r \sim 1$ では suppression

クォークジェット・グルーオンジェット比

● ジェット電荷 in PbPb@5.02 TeV Talk by O. Evdokimov [CMS]

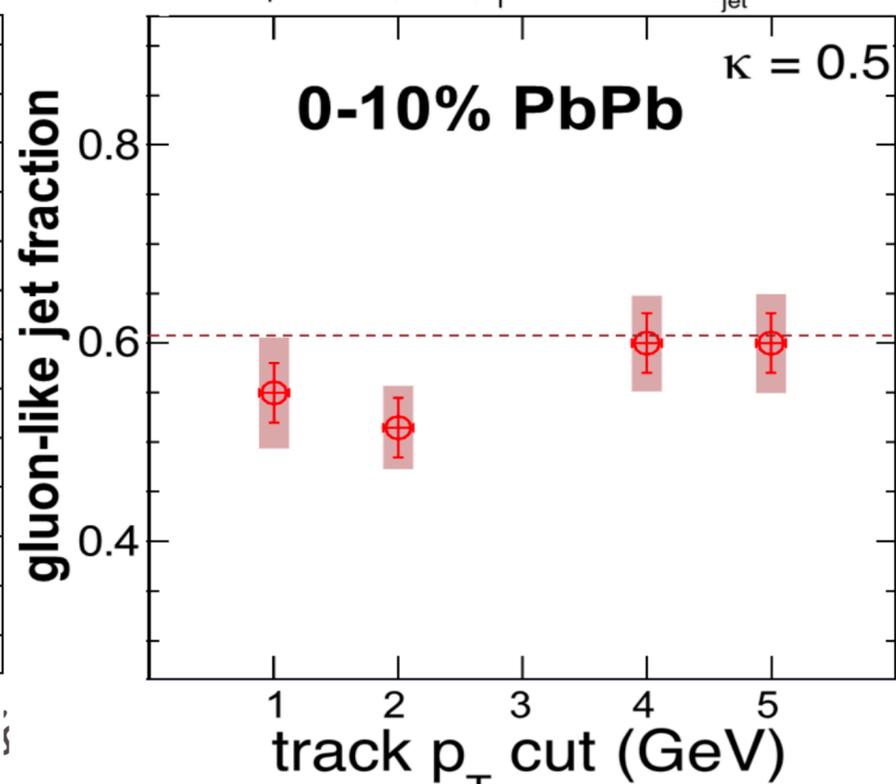
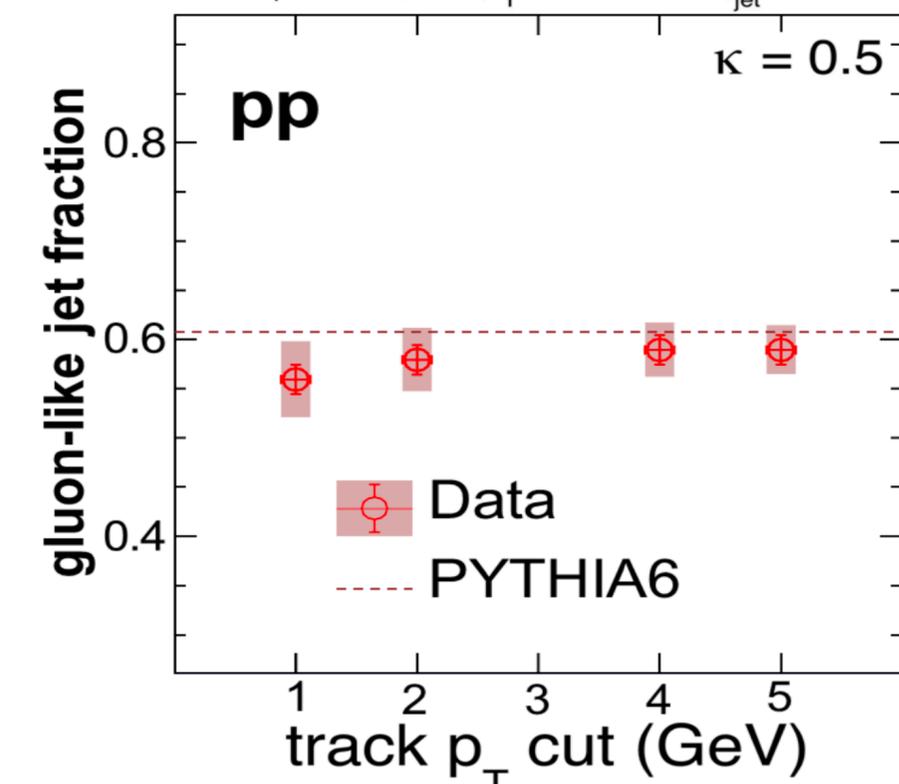
Jet Charge:

$$Q^\kappa = \frac{1}{(p_T^{\text{jet}})^\kappa} \sum q_i (p_T^i)^\kappa$$

- Q^κ は親パートンのフレーバーに敏感
- Q^κ 測定とMCの結果からクォークジェット、グルーオンジェットの比率を抽出

CMS pp 27.4 pb⁻¹ (5.02 TeV)
anti- k_T R=0.4 jets, $p_T > 120$ GeV, $|\eta_{\text{jet}}| < 1.5$

CMS PbPb 404 μb^{-1} (5.02 TeV)
anti- k_T R=0.4 jets, $p_T > 120$ GeV, $|\eta_{\text{jet}}| < 1.5$



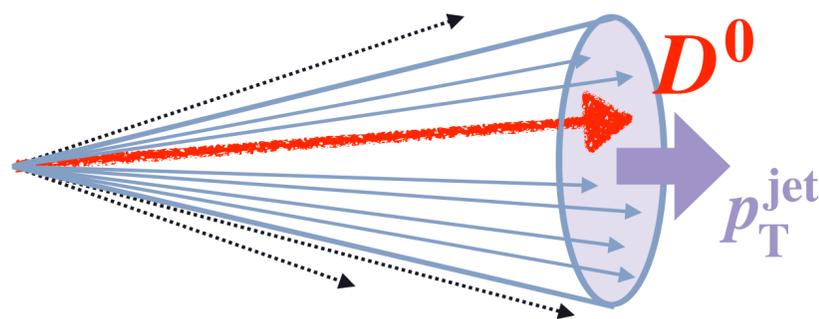
- 媒質効果は見られず
- 分岐ナローイングと反する？
(グルーオンジェットが減るはず)

重クォークジェットなど [実験]

チャームを含むジェット

● D^0 -ジェット in PbPb@5.02 TeV

- D^0 (の崩壊 $K^+\pi^-$) 入りジェット

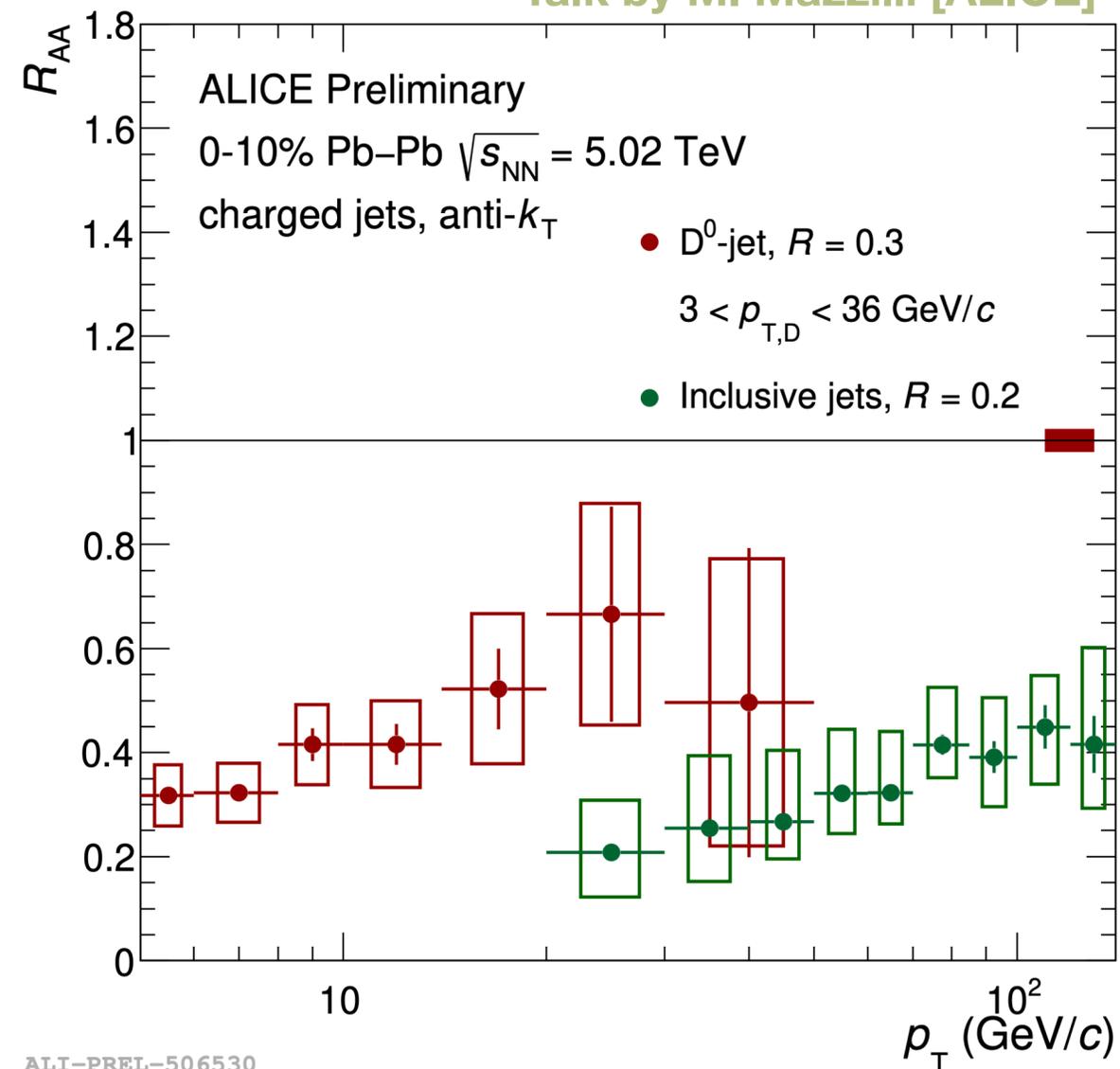


- Inclusiveよりエネルギー損失小
- 媒質の拡散効果→より大角度に

荷電* D^0 -ジェット R_{AA}

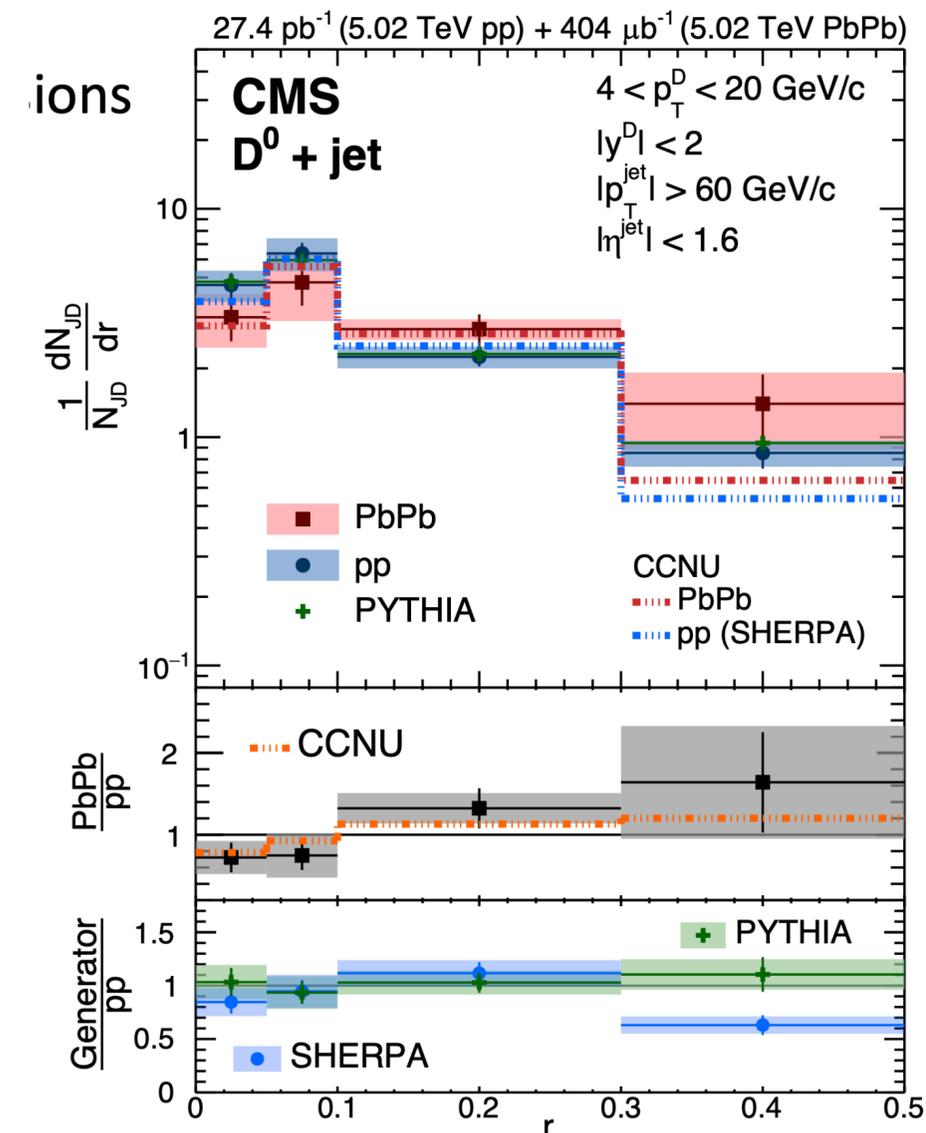
* $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$ でジェット構築

Talk by M. Mazzilli [ALICE]



ジェット内 D^0 のr 分布

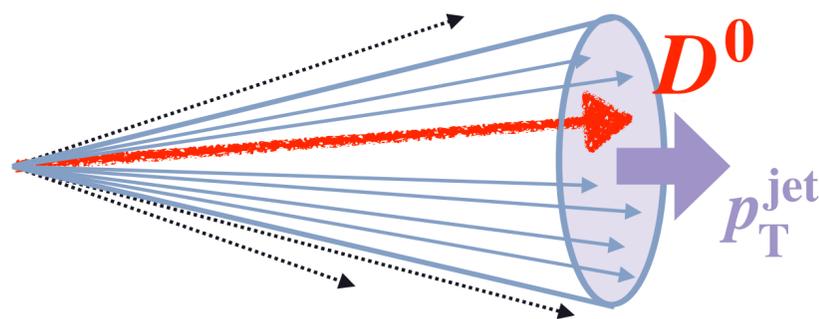
Talk by M. Stojanovic [CMS]



チャームを含むジェット

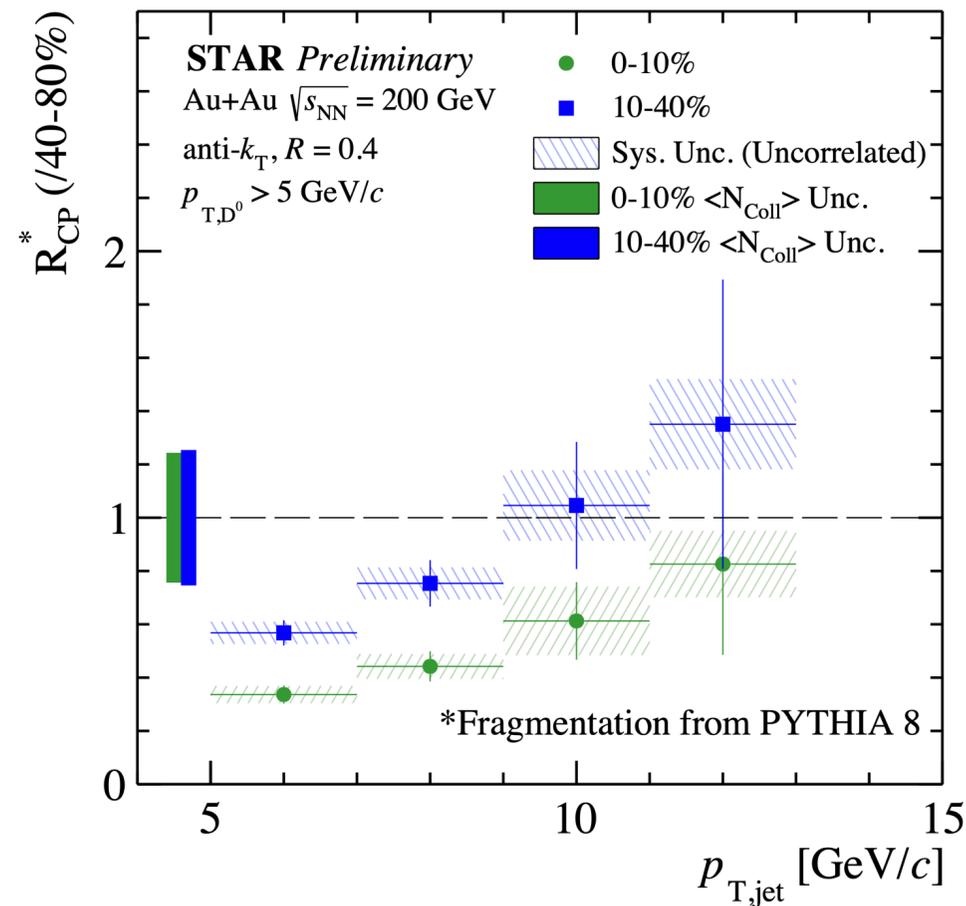
● D^0 -ジェット in AuAu@200 GeV Talk by D. Roy [STAR]

- D^0 (の崩壊 $K^+\pi^-$) 入りジェット

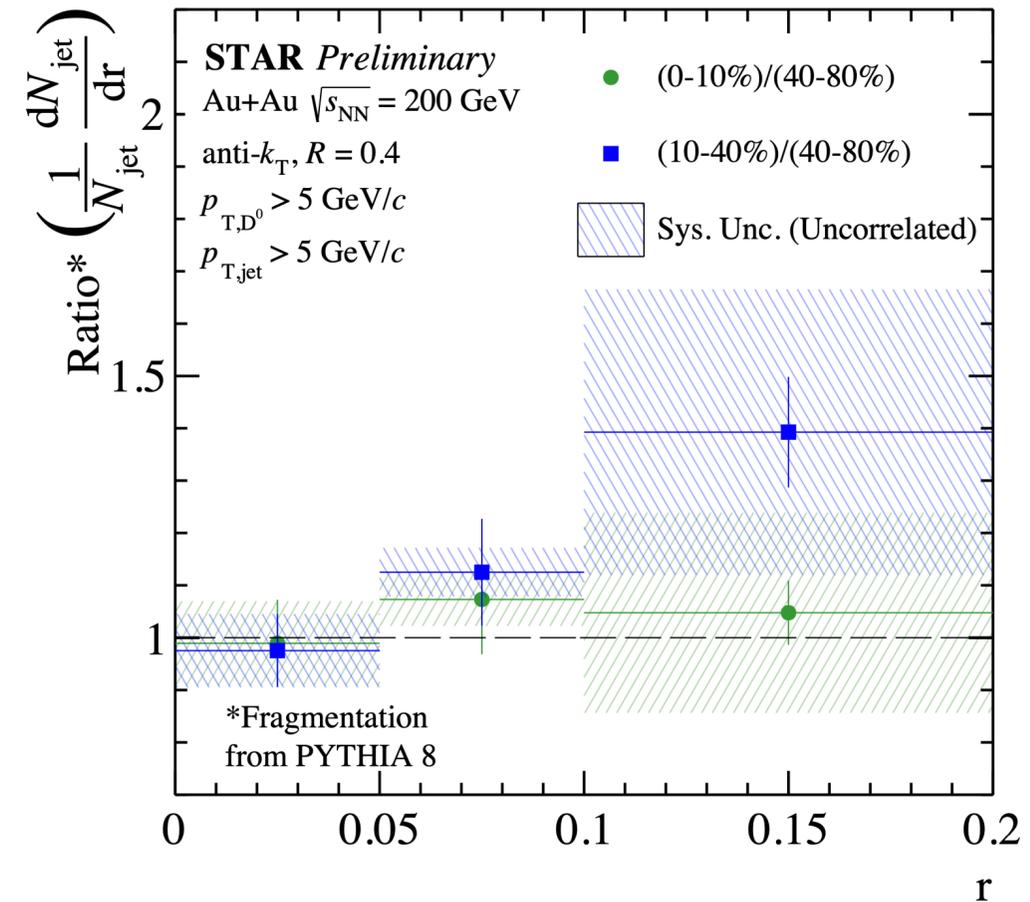


- CMSと同様のジェット内部分布変化

(フル) D^0 -ジェット R_{CP}



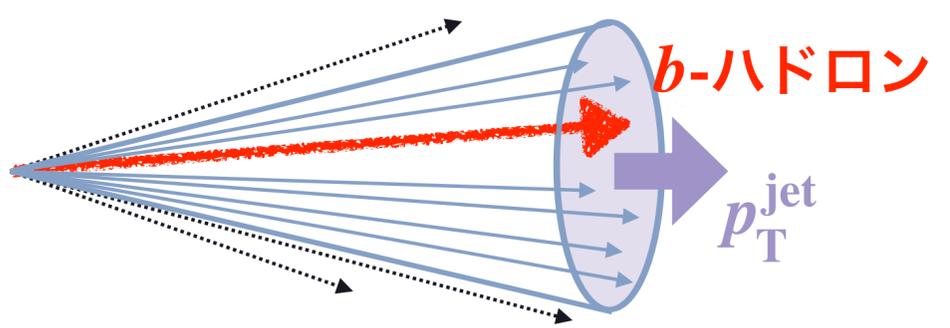
ジェット内 D^0 のr分布



ボトムを含むジェット

● b -ジェット in PbPb@5.02 TeV

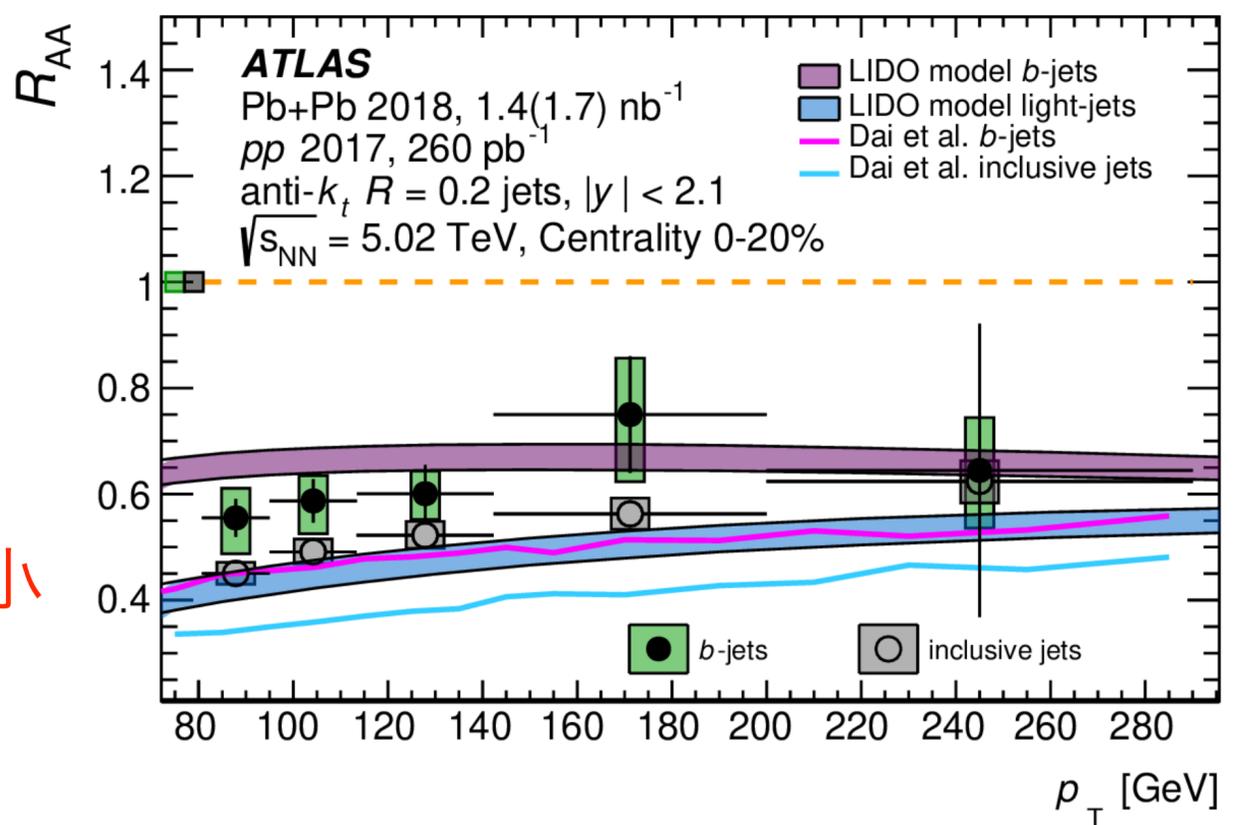
- b -ハドロン入りジェット



- Inclusiveよりエネルギー損失小
- 内部構造変化はより顕著

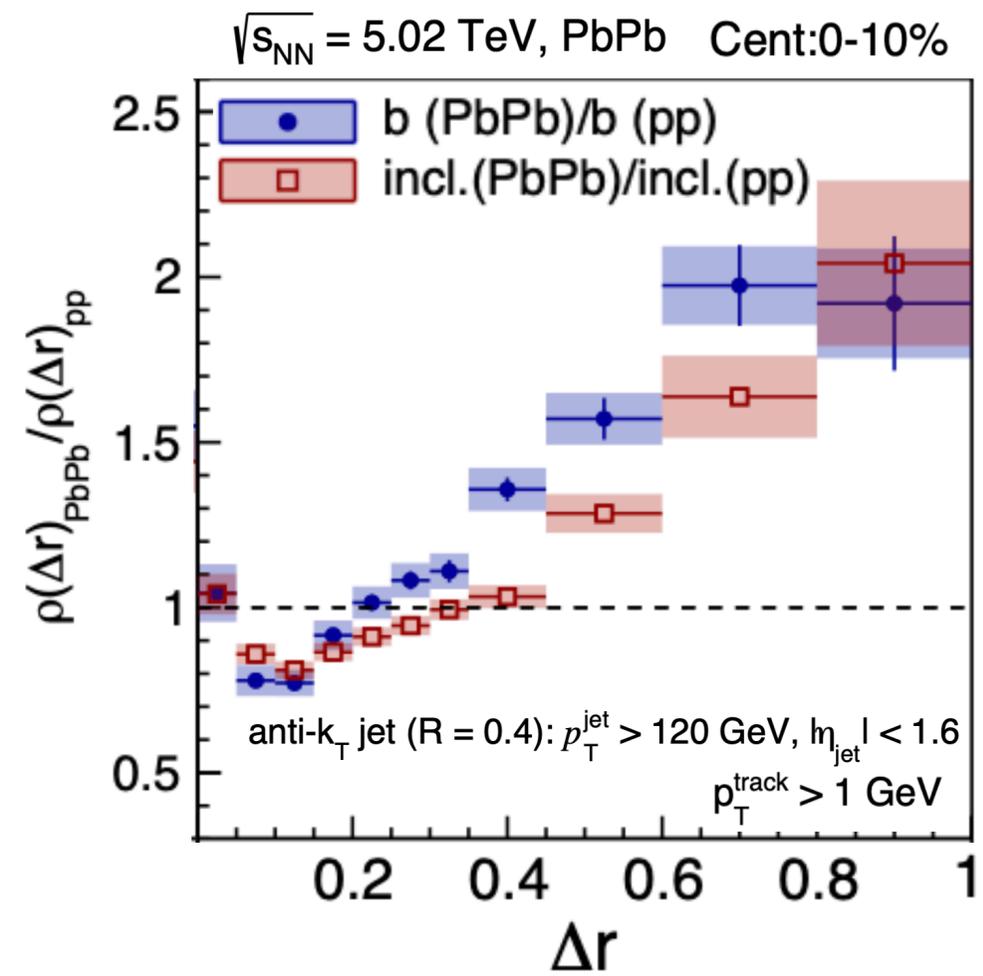
b -ジェット R_{AA}

Talk by S. Tapia Araya [ATLAS]



b -ジェット内 h^\pm の r 分布

Talk by X. Wang [CMS]



まとめ

● High- p_T 粒子 & ジェット[理論]

- High-virtuality phase での相互作用抑制→High- p_T 粒子&ジェット R_{AA} を説明
- 現象論: パートンの光子放射, $g \rightarrow c\bar{c}$ 分岐, 勾配トモグラフィ, 流体媒質応答
- 理論発展: latticeでの \hat{q} 計算, Molière 散乱, 量子計算など
- ベースライン: NLLパートンシャワー, ISR, nPDF in 00など

● High- p_T 粒子 & ジェット[実験]

- タグ付き (γ, Z, π^0) ジェット: フレーバー (g, q), 通過距離依存性
- 内部構造: 分岐ナローイング, ブロードジェットの強い抑制
- ジェット電荷: クォーク・グルーオンジェット比

● 重クォーク

- 重クォークジェット: エネルギー損失, 内部構造変化の質量依存性
- バリオン中間子比: ハドロン化での媒質効果 (recombinationなど)