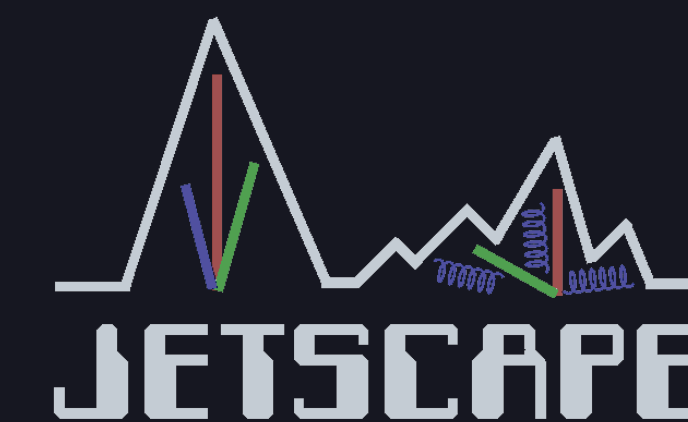




公立大学法人  
国際教養大学  
Akita International University



# 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

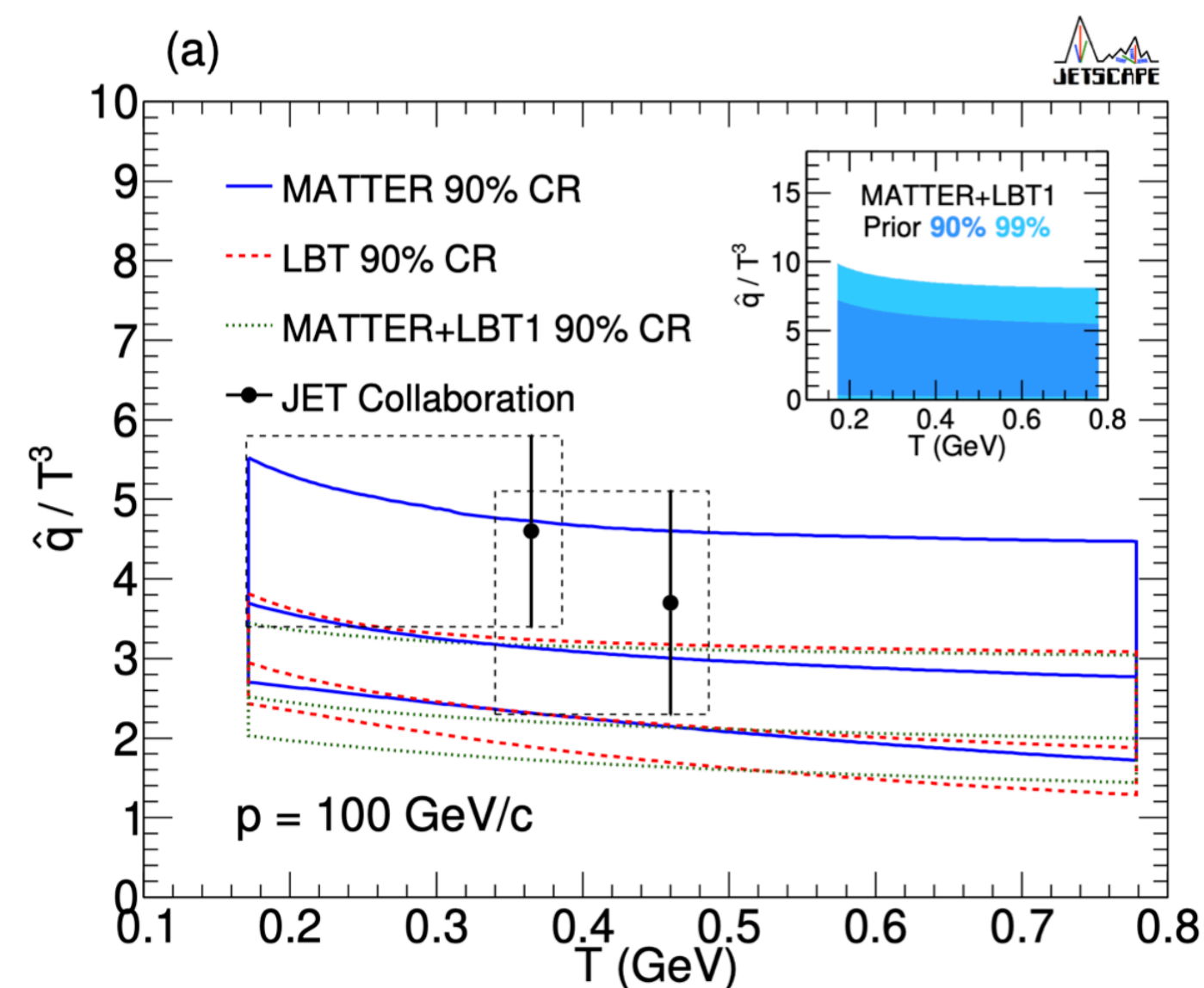
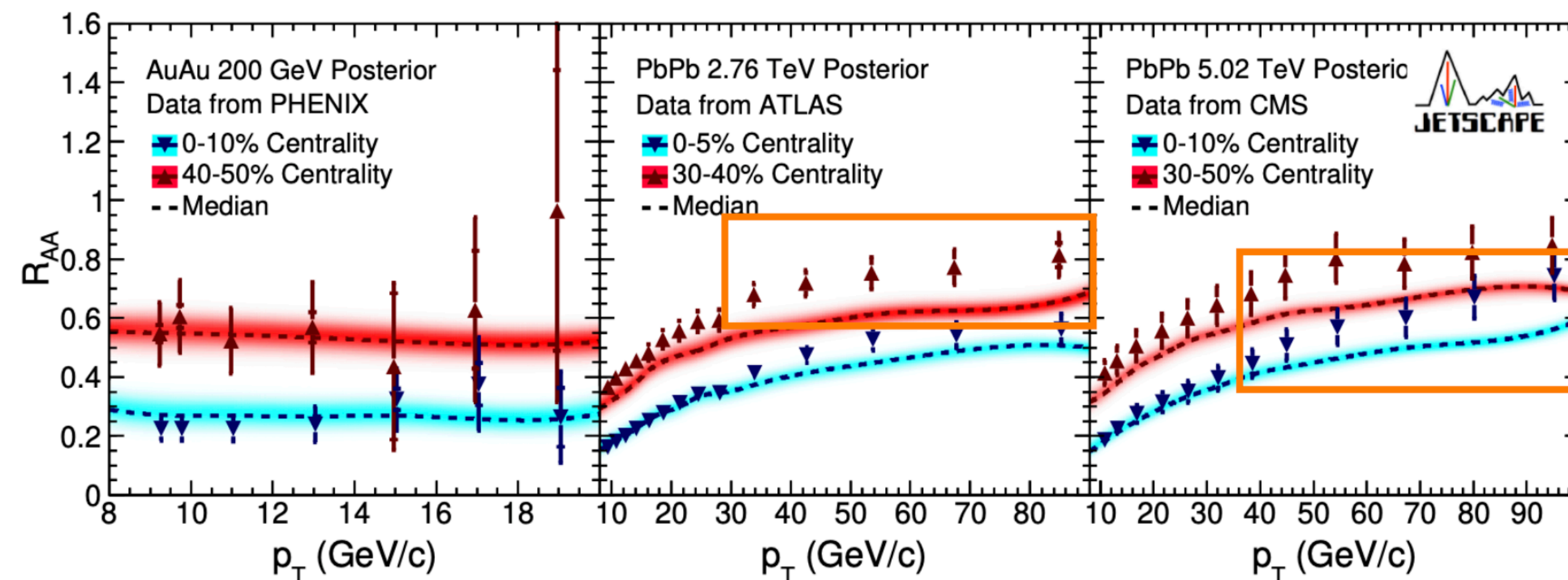
# High- $p_T$ 粒子 & ジェット [理論]

# 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)

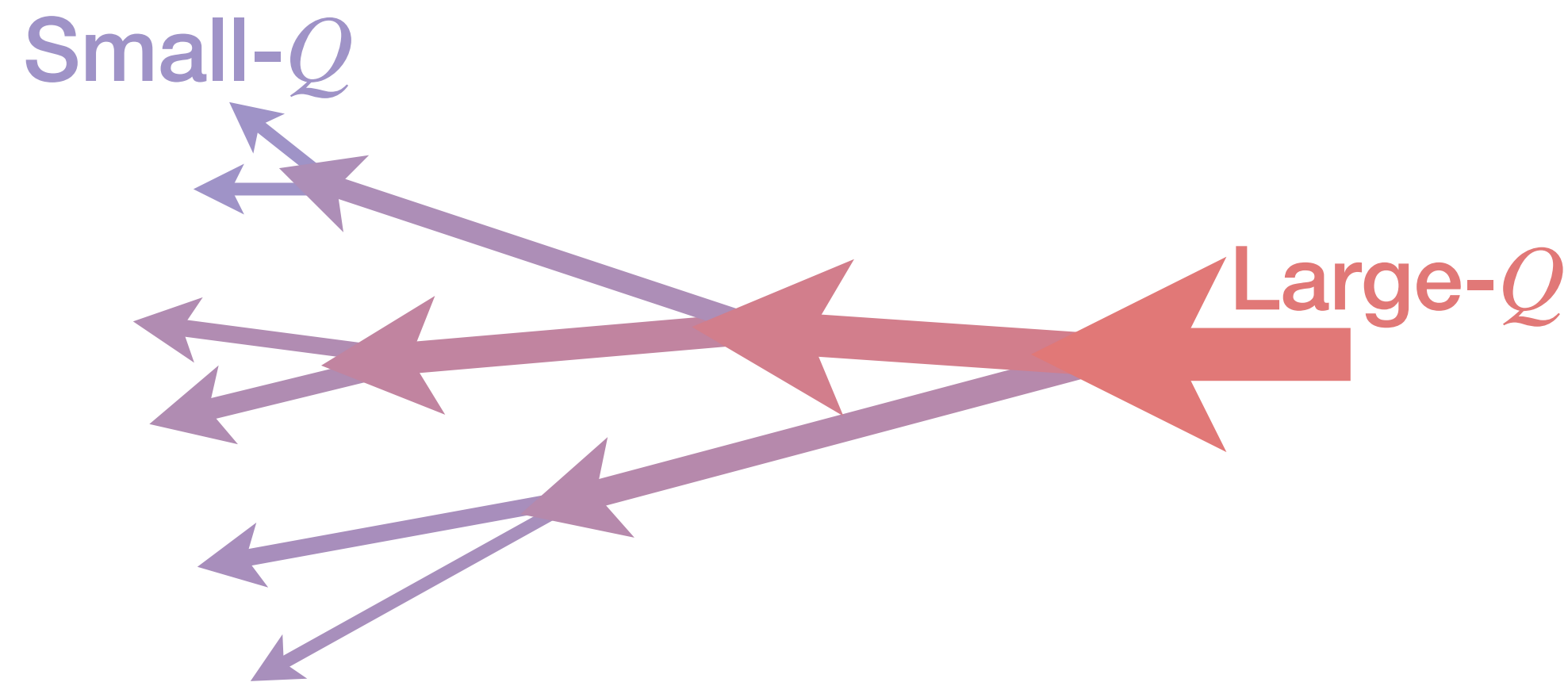
- $\hat{q}$ : パarton-媒質間相互作用の強さ
- 実験データを理論MC計算でフィット
- ベイズ統計で広いパラメータ空間をカバー
- 理論MC: JETSCAPE (MATTER+LBT模型)
- 実験: High- $p_T$  粒子  $R_{AA}$  @RHIC&LHC
- JETコラボレーションと一致
- High- $p_T$  @LHCのズレ



← 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)]

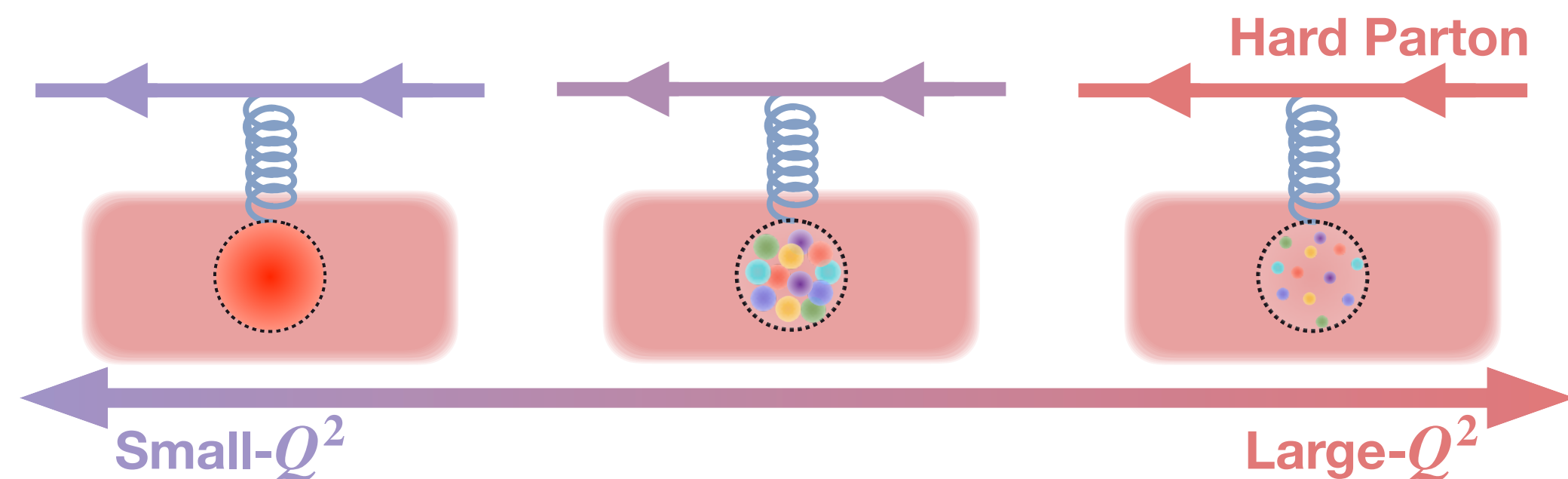


- コヒーレンス効果 (解像度)

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- $Q^2$ :

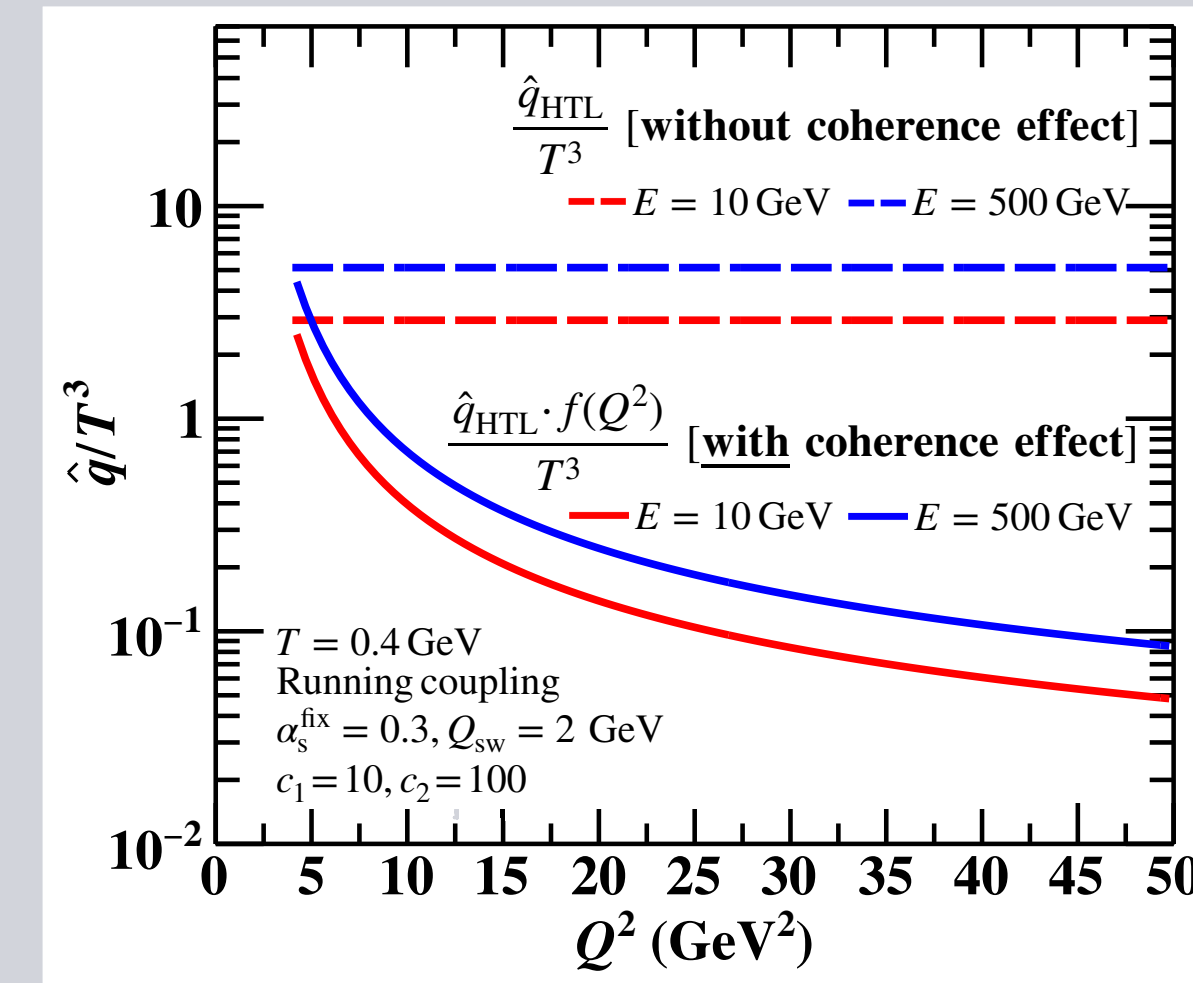
コヒーレンス効果入

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)

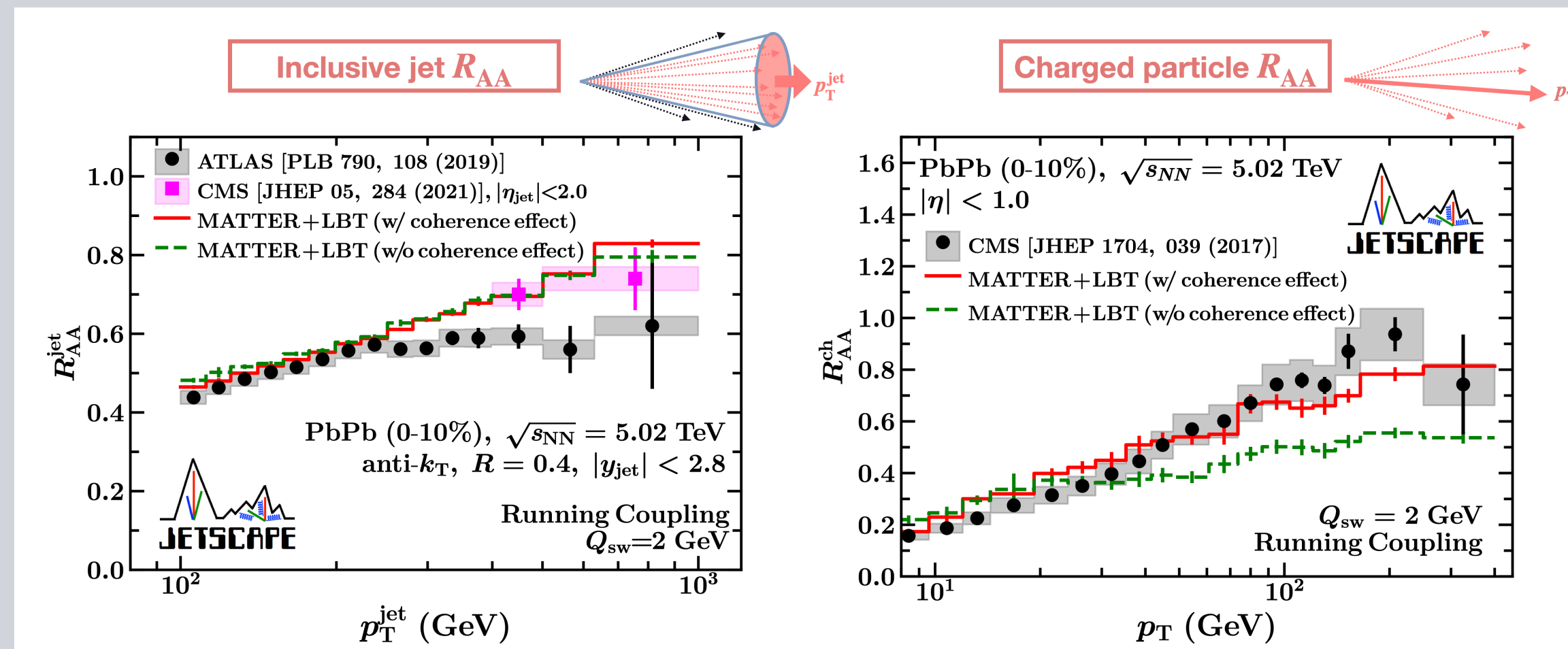
Small- $Q^2$ : On-shell Transport

媒質応答: Cooper-Frye+摂動

# High- $p_T$ & ジェットエネルギー損失

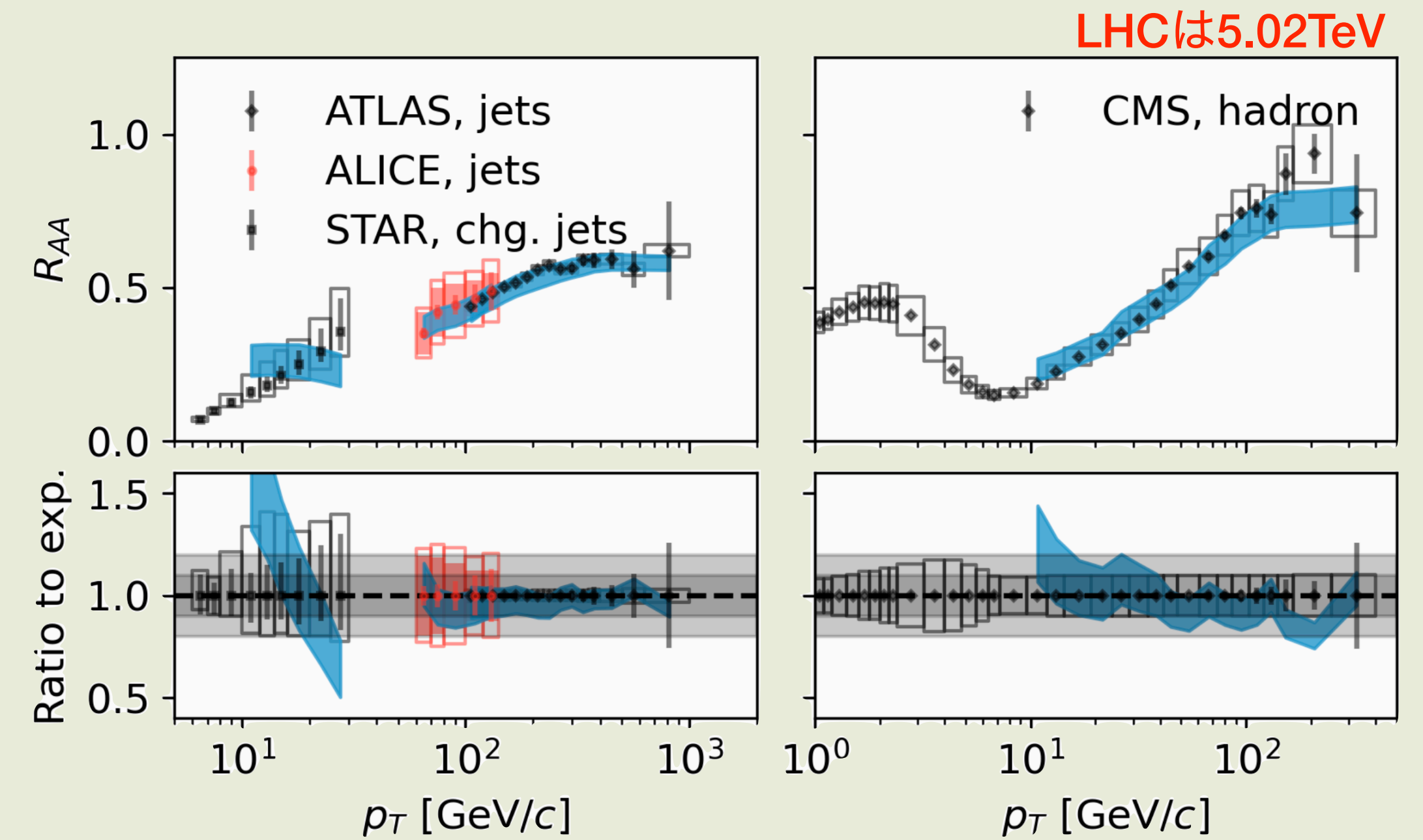
- 媒質効果の抑制@large- $Q^2$  [ $Q^2 = p^\mu p_\mu - m^2$ : virtuality (off-shellness)]

## JETSCAPE Talk by YT (JETSCAPE)



↑赤がコヒーレンス(抑制)効果入

## LIDO Talk by Weiyao Ke

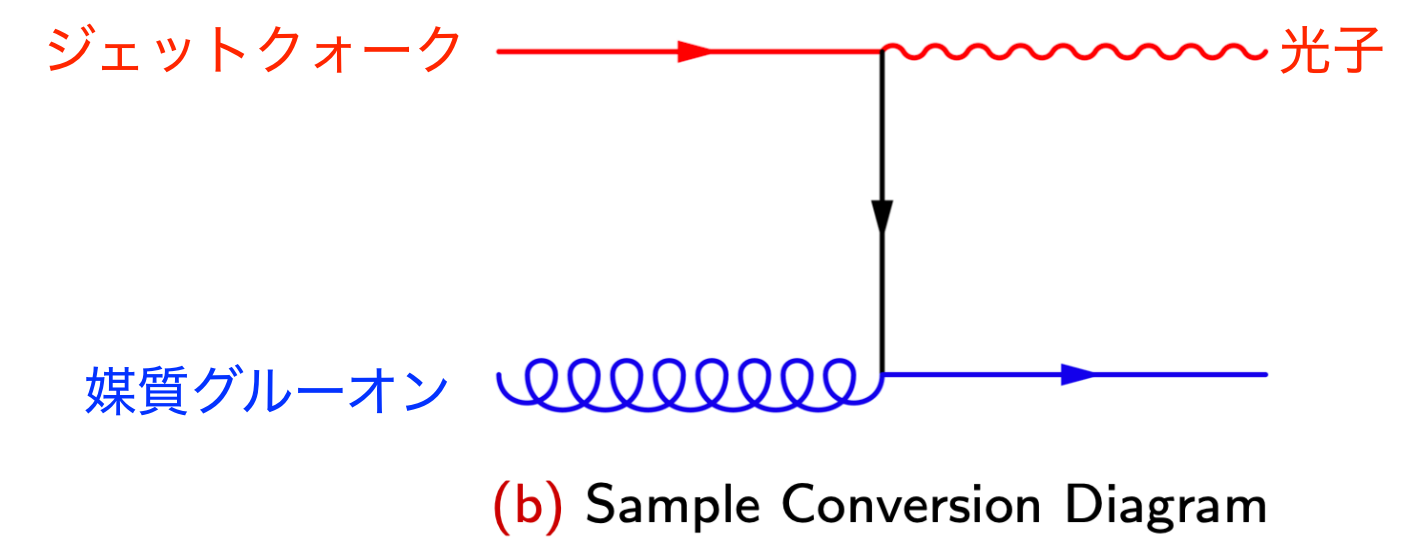
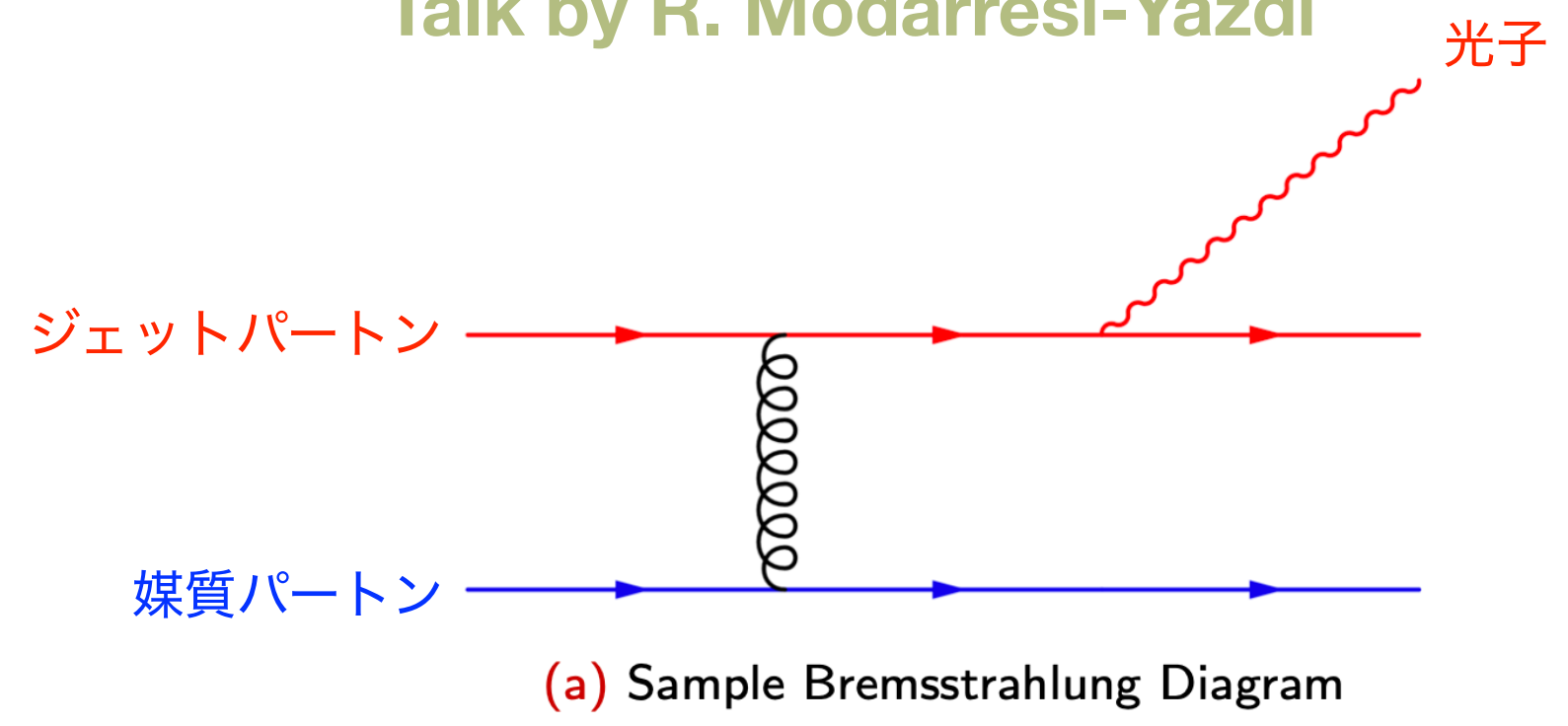


- Large- $Q^2$ での媒質効果抑制によってジェットとhigh- $p_T$ 粒子の $R_{AA}$ を同時に記述
- 特にhigh- $p_T$ 粒子の $R_{AA}$ が抑制効果に敏感

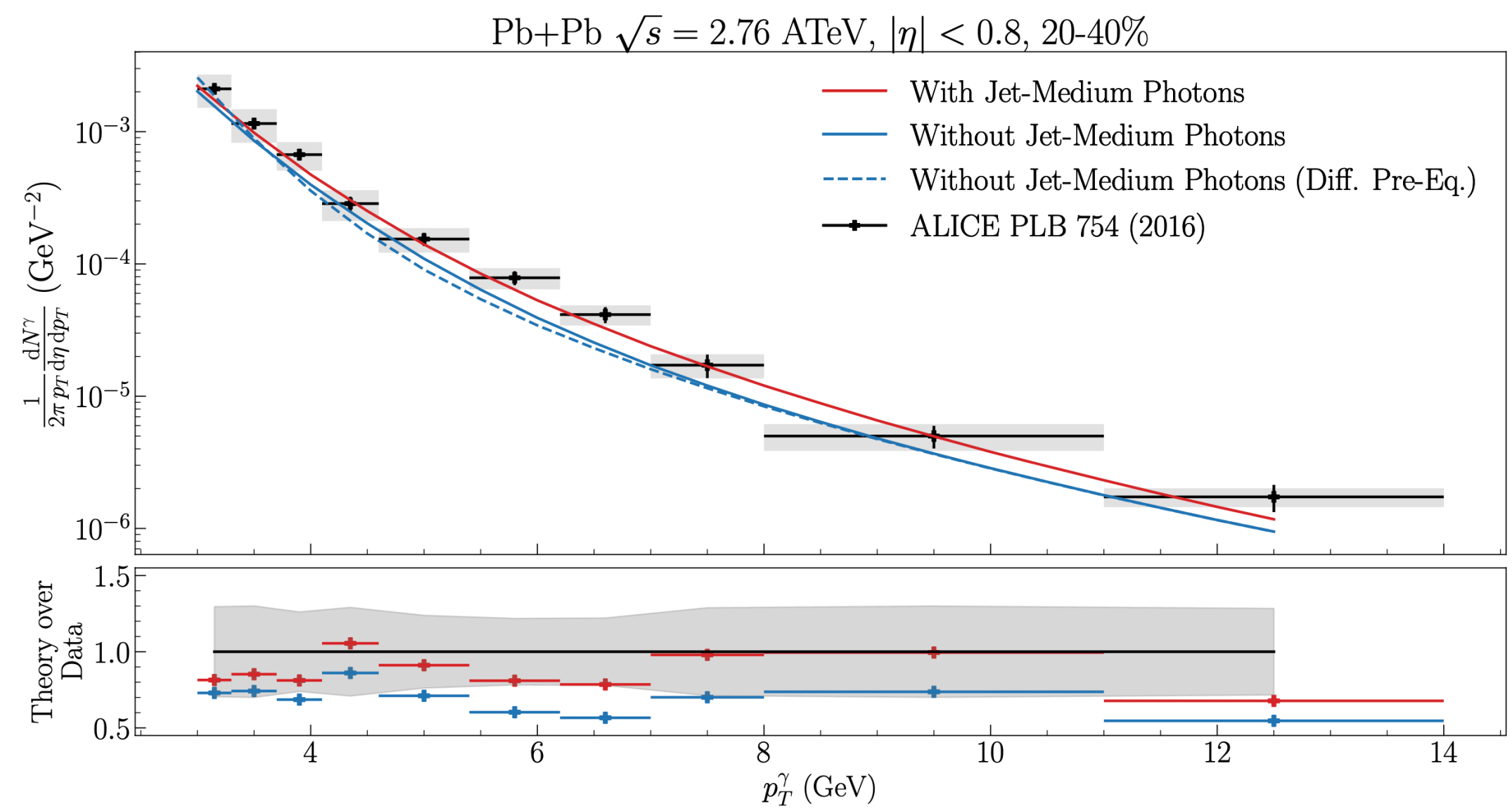
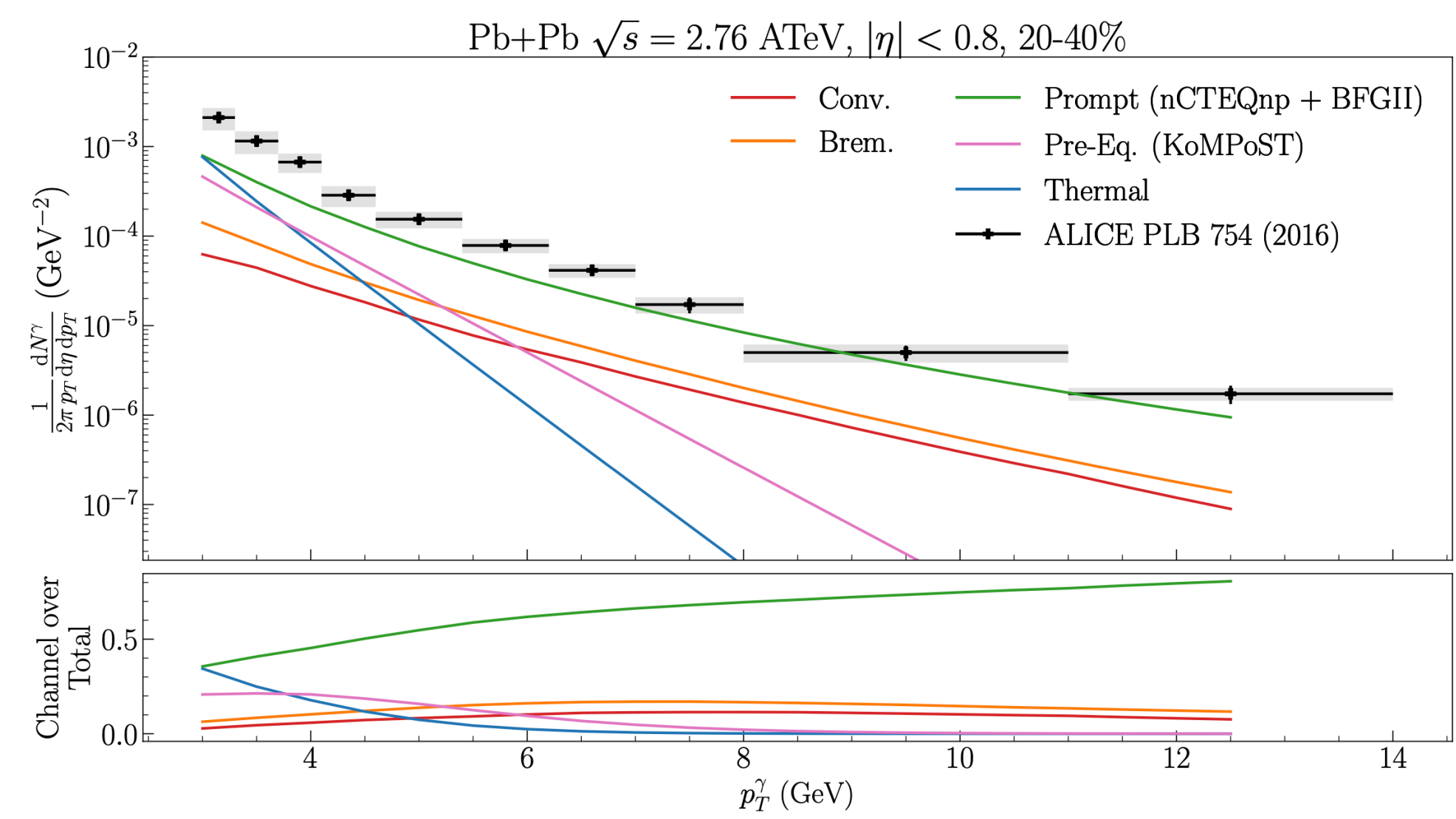
# ハードパートン (ジェット) からの光子放射

## ● 媒質効果による光子放射

Talk by R. Modarresi-Yazdi



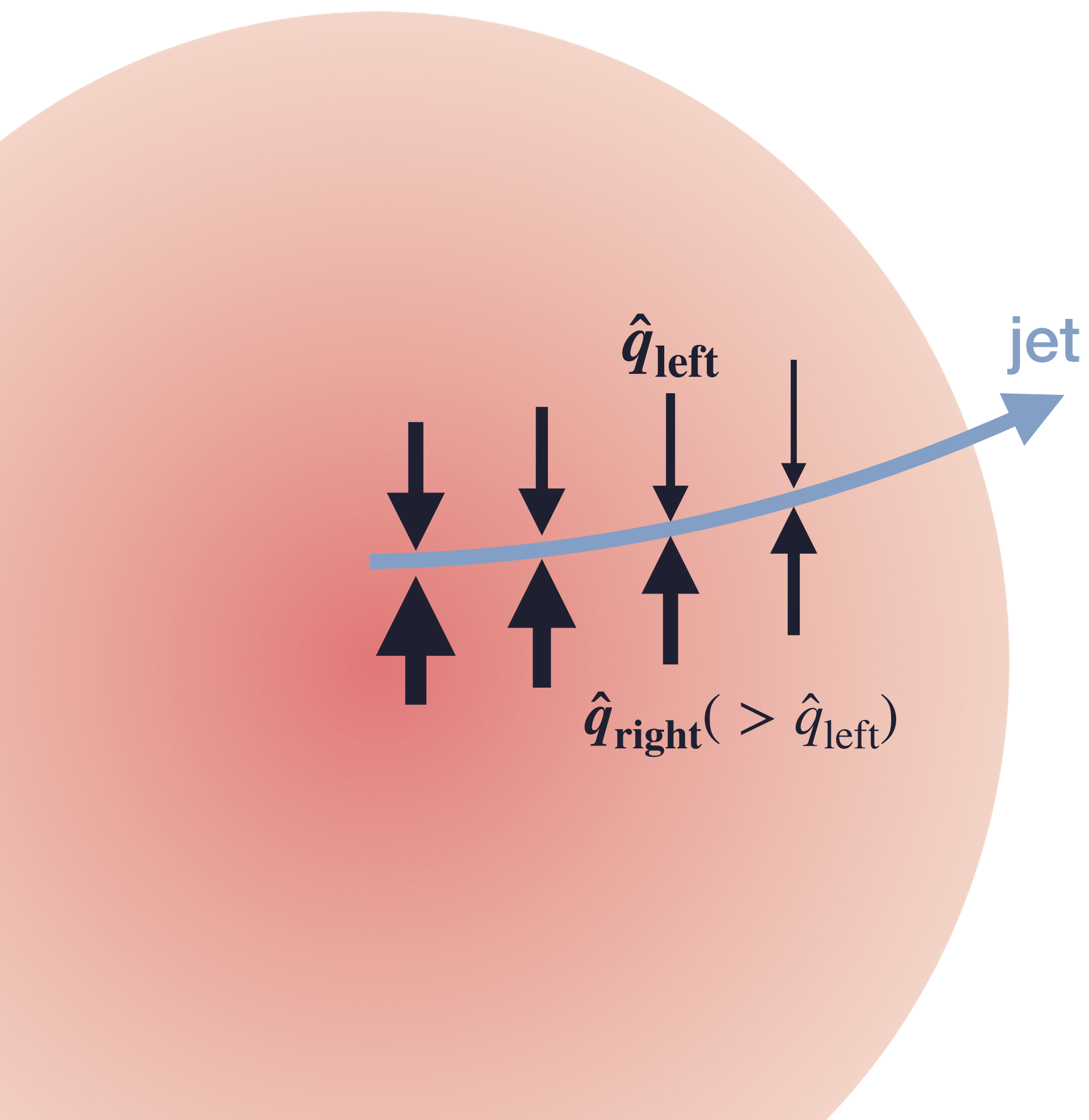
- MARTINI に実装
- 30%ほどの寄与
- 「ハドロン化の無い」新しいプローブ



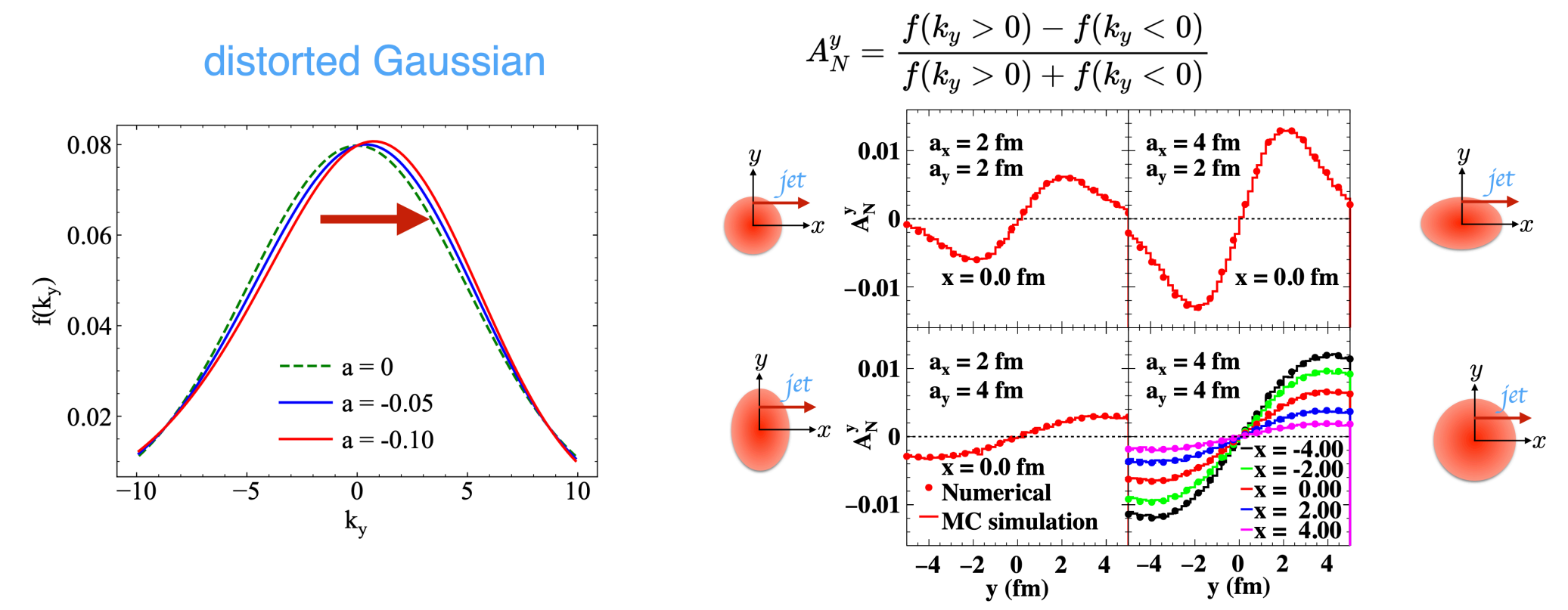
# 媒質勾配トモグラフィ

## ● $\hat{q}$ 勾配によるジェット軌道の逸れ

Talk by Y. He



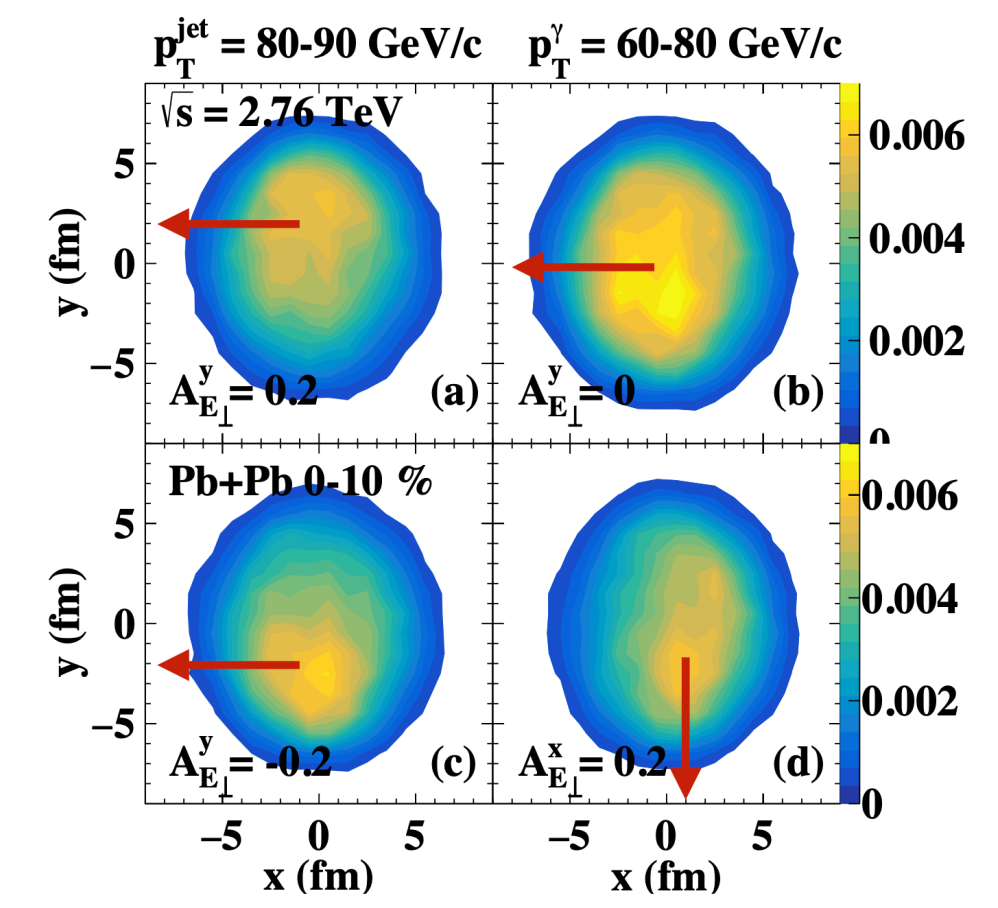
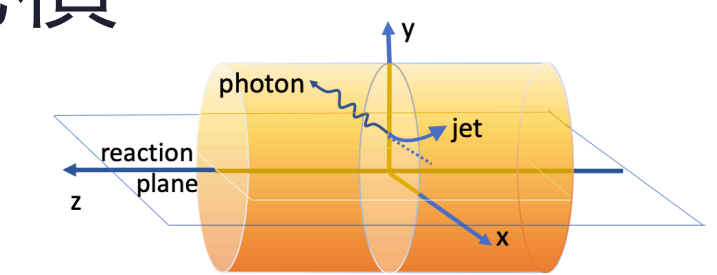
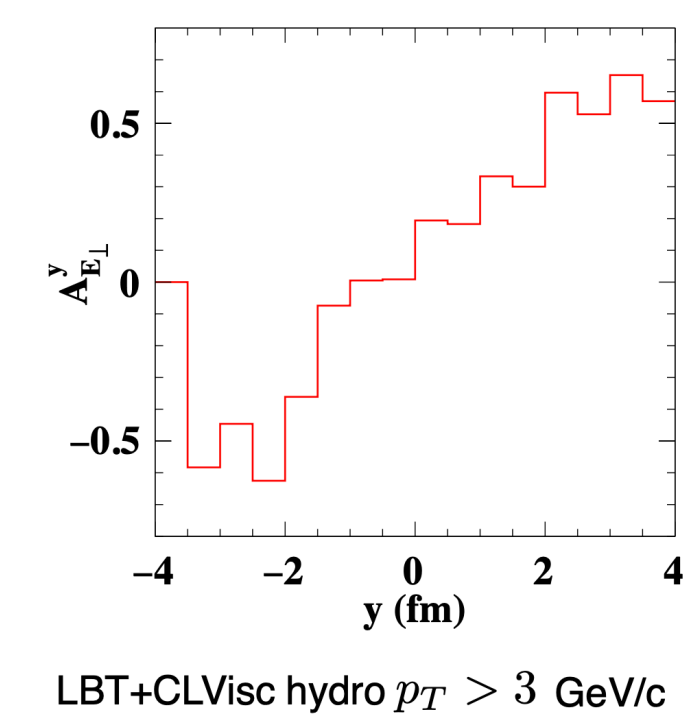
## - 歪んだガウスブロードニングでの見積



## - MC計算 (LBT) での見積

transverse energy asymmetry:

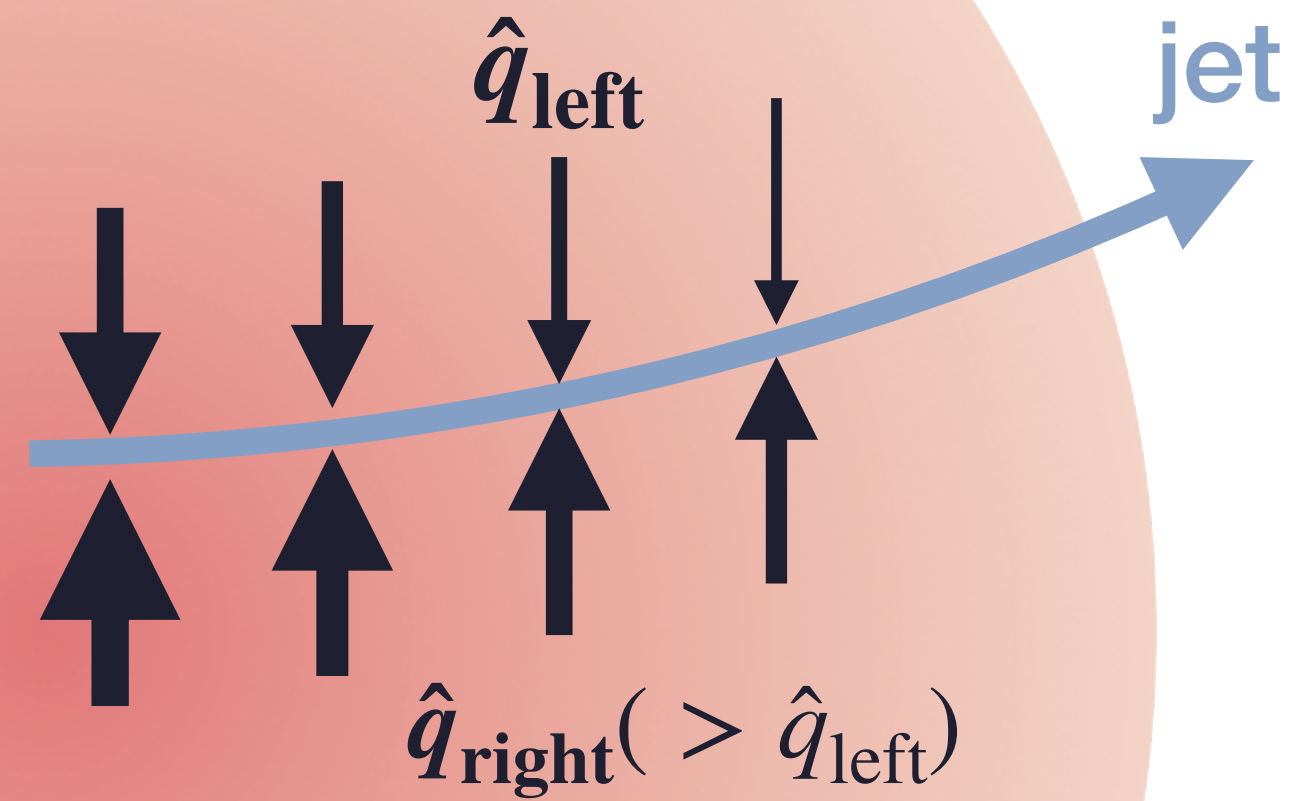
$$A_{E_{\perp}}^{\vec{n}} = \frac{\int d^3r d^3k f(\vec{k}, \vec{r}) \vec{k} \cdot \vec{n}}{\int d^3r d^3k f(\vec{k}, \vec{r}) |\vec{k} \cdot \vec{n}|}$$



# 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

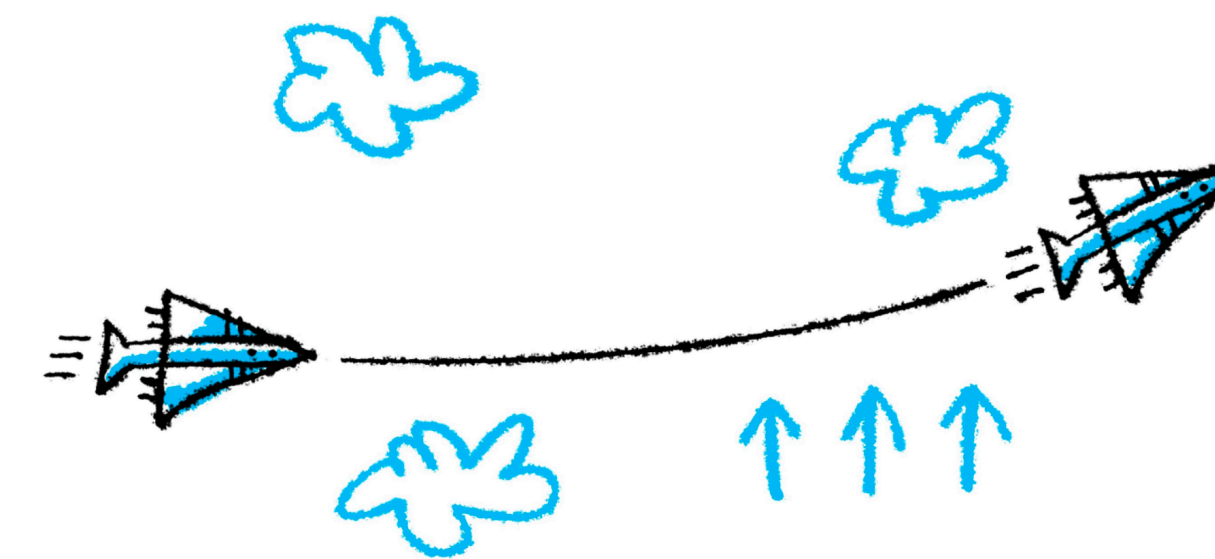
Talk by Y. He



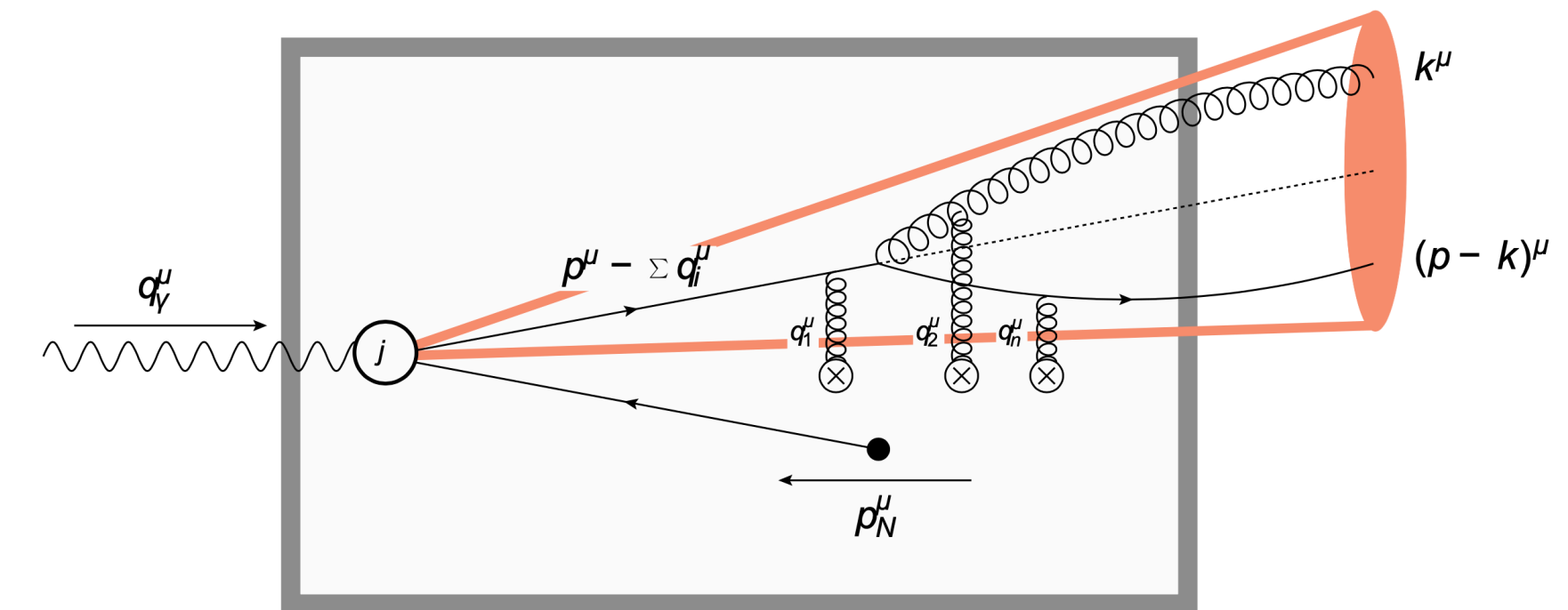
- ブロードニング, 放射へのフローの影響

Talk by A. Sadofyev

Does a jet feel the flow?



- GLV (BDMPS-Zは準備中) へフロー効果導入



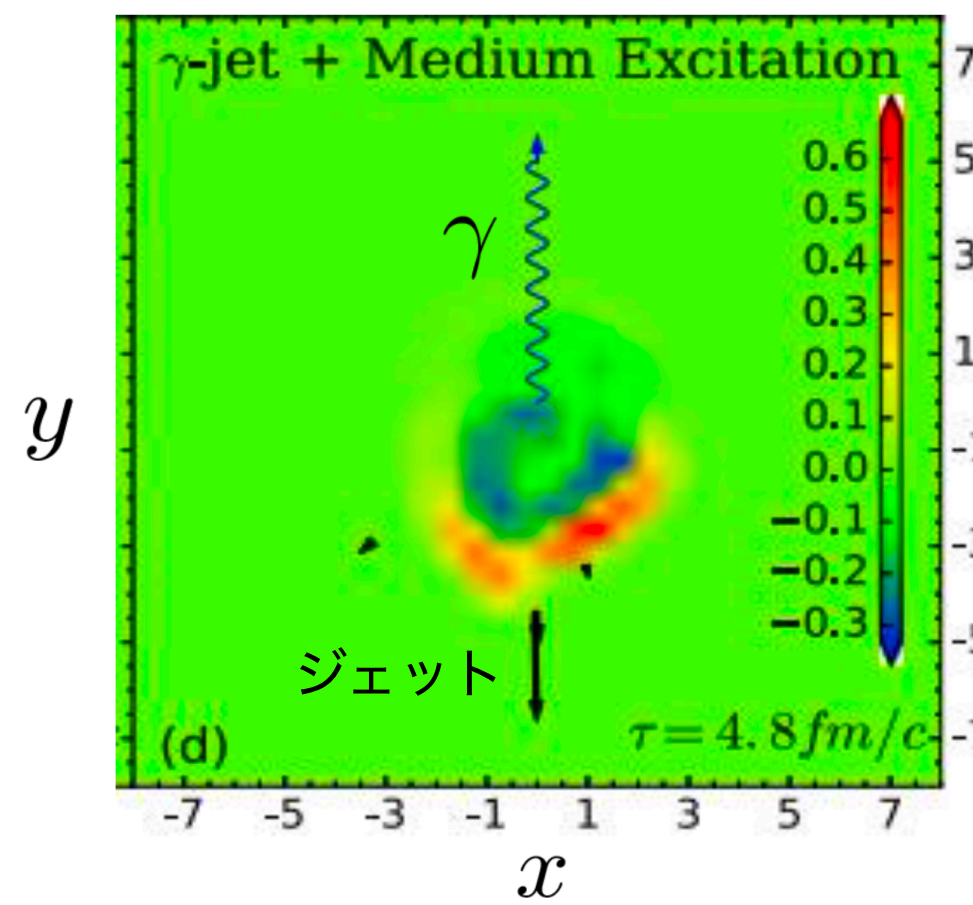
- 軌道の逸れ, 非対称ブロードニング



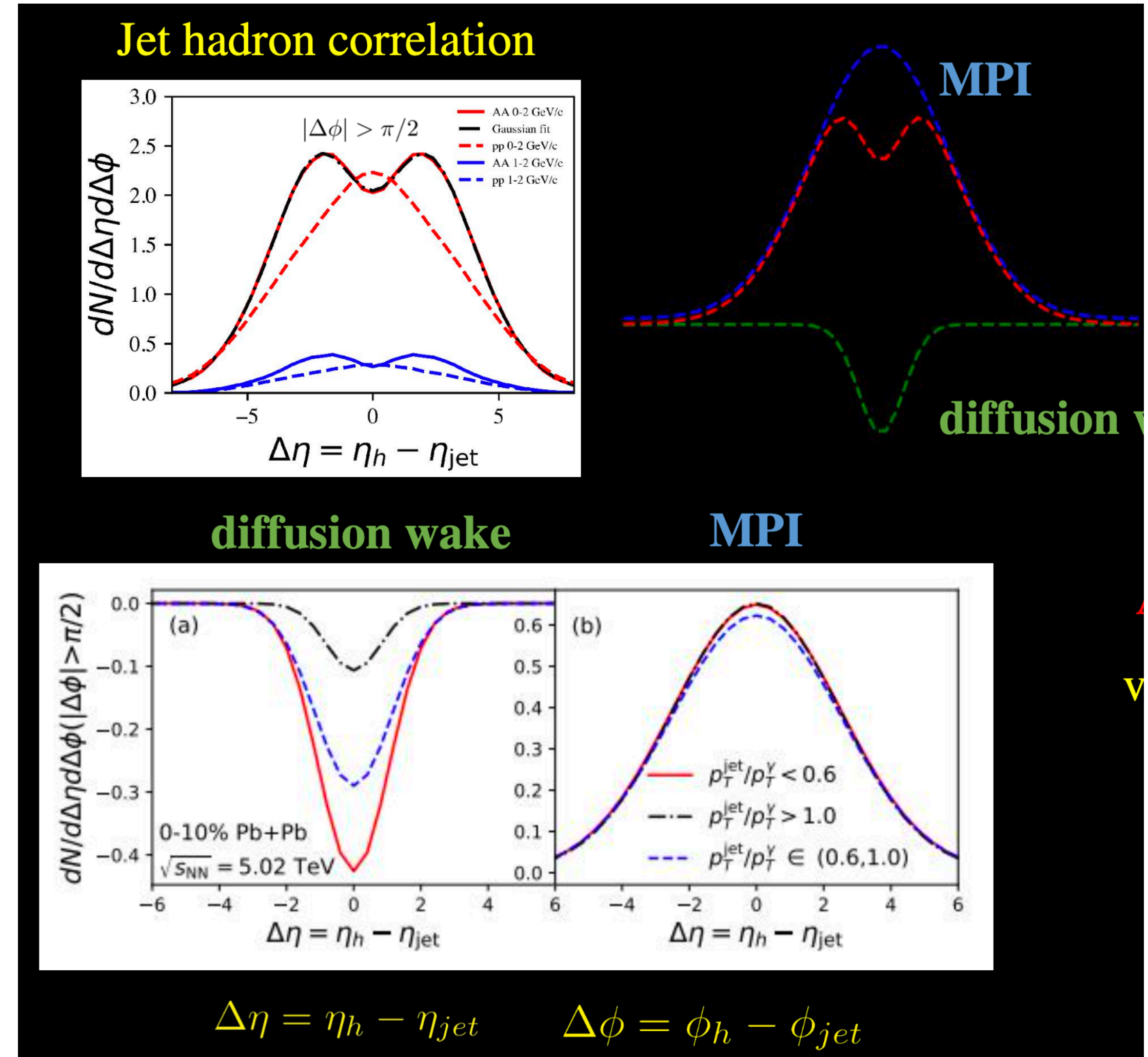
# 流体的媒質応答

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

- 流体+ジェット計算 (CoLBT-hydro)
- $\gamma$ -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
- $\gamma$  側 (ジェットの反対) では粒子が減る



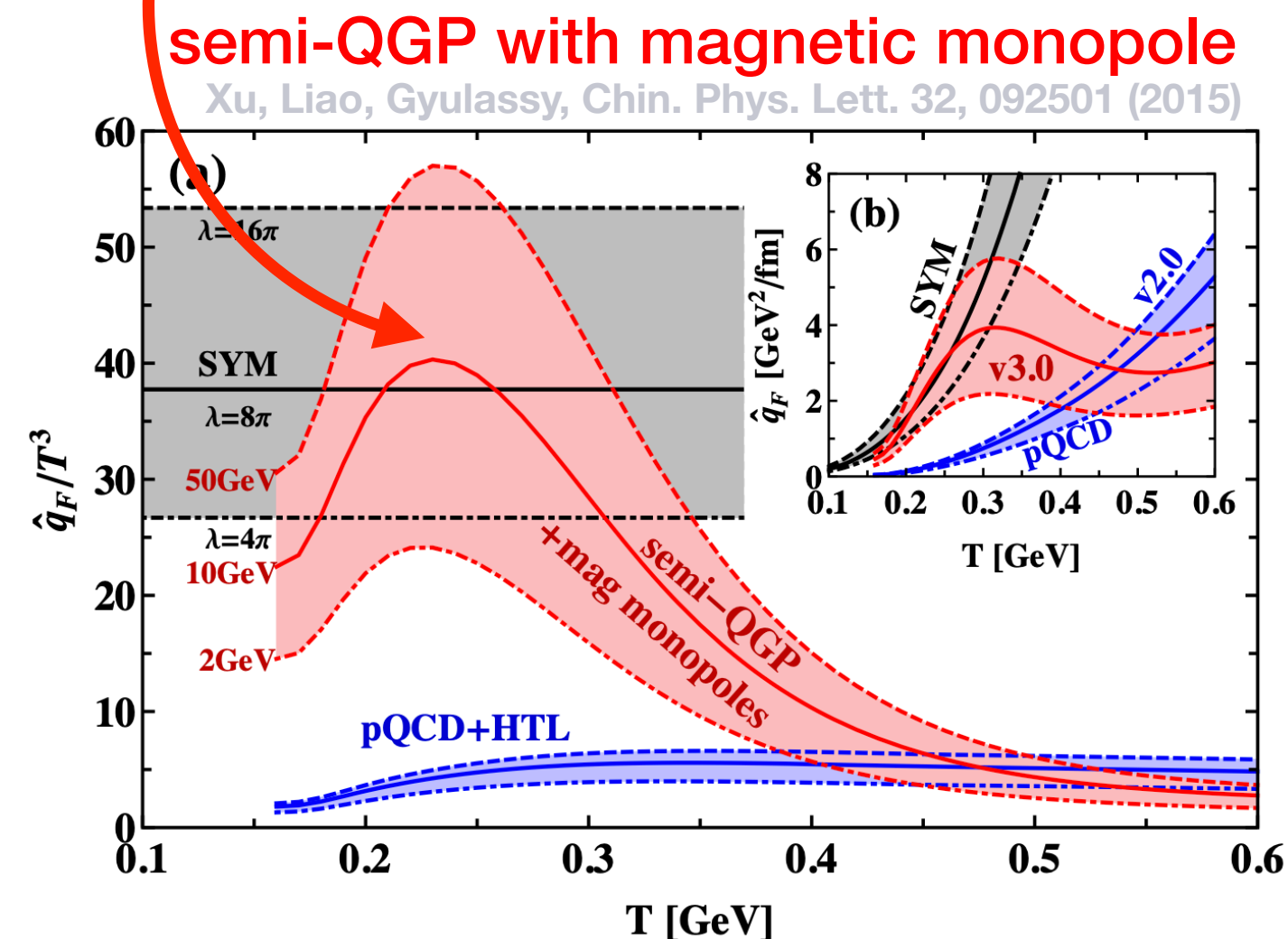
# $\hat{q}$ の格子QCD計算

● (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

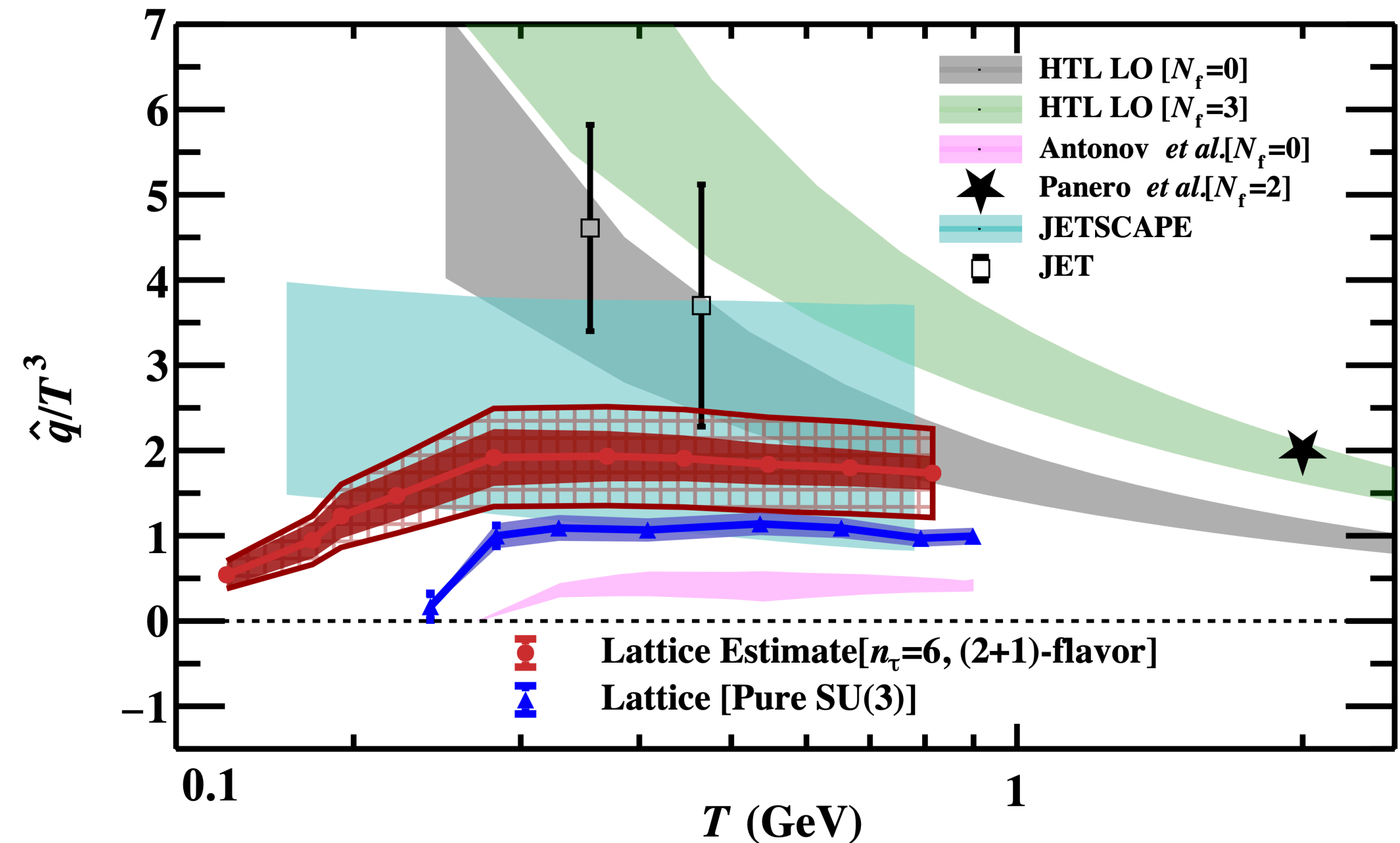
-  $T_c$  付近の bump 構造なし



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

Non-perturbative part

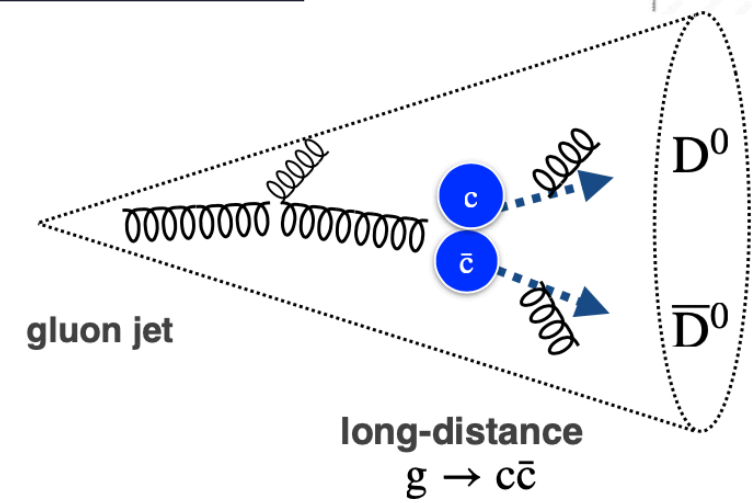
(Lattice QCD)



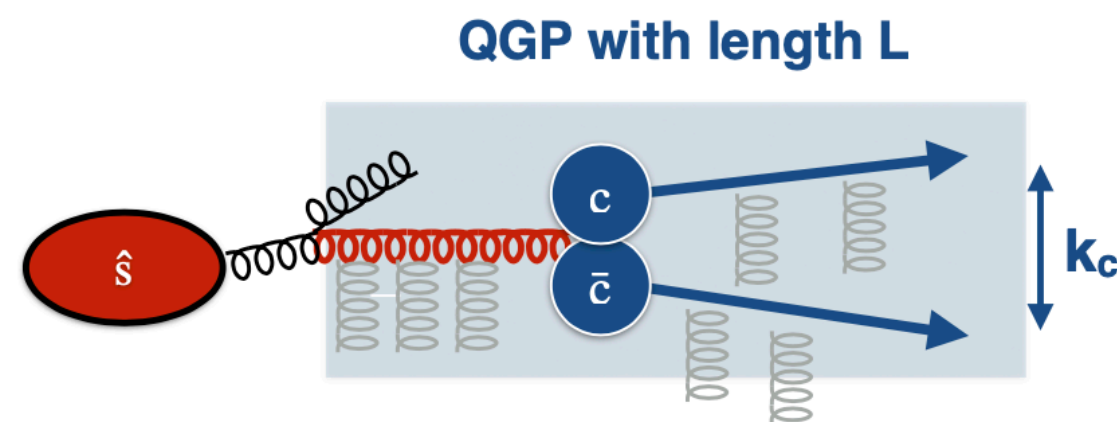
# 媒質効果による $g \rightarrow c\bar{c}$ 分岐増幅

●  $g \rightarrow c\bar{c}$  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



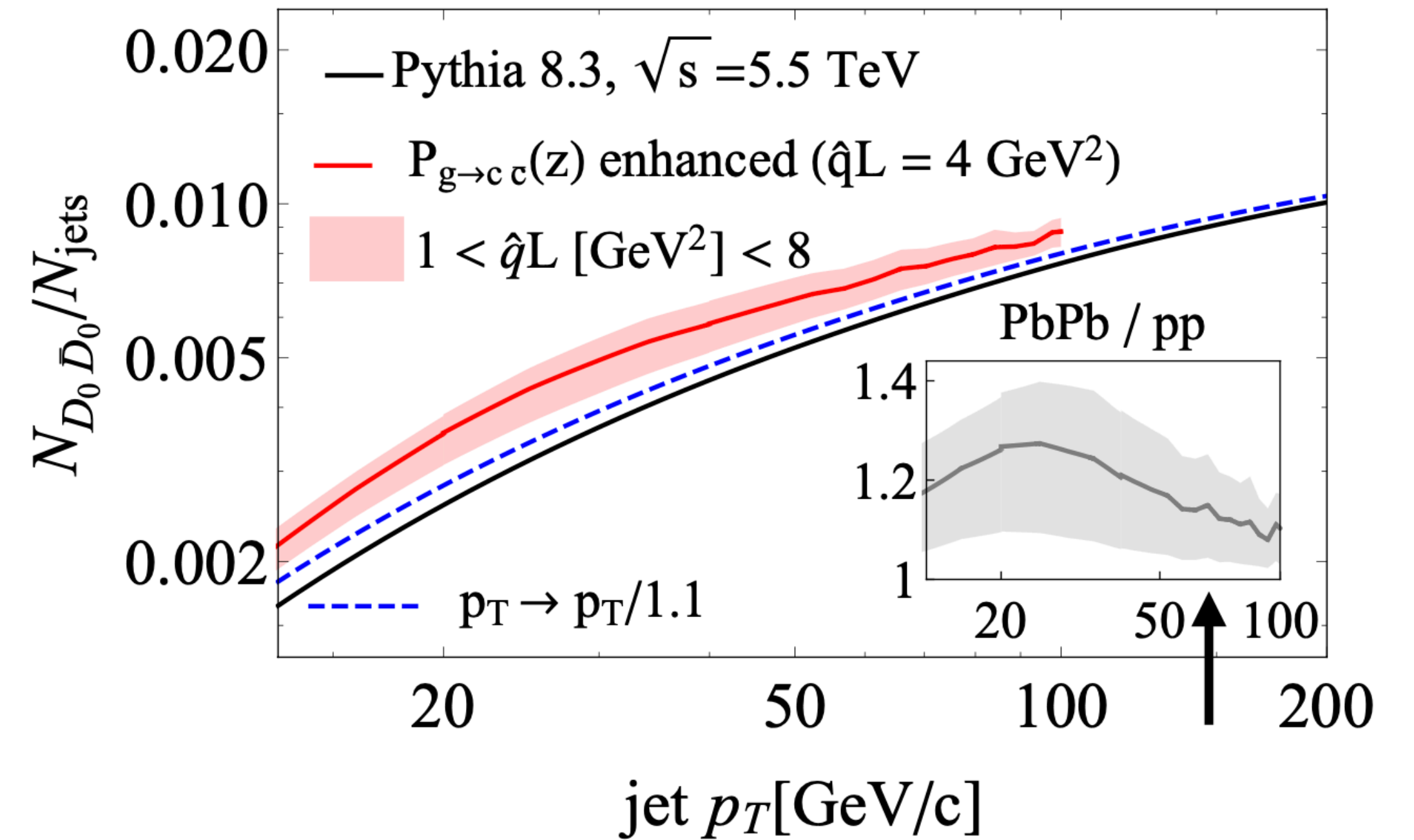
- 媒質効果 ( $\hat{q}$ ,  $k_{\perp}$ -broadening) で増幅



- $\hat{q}L$  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):

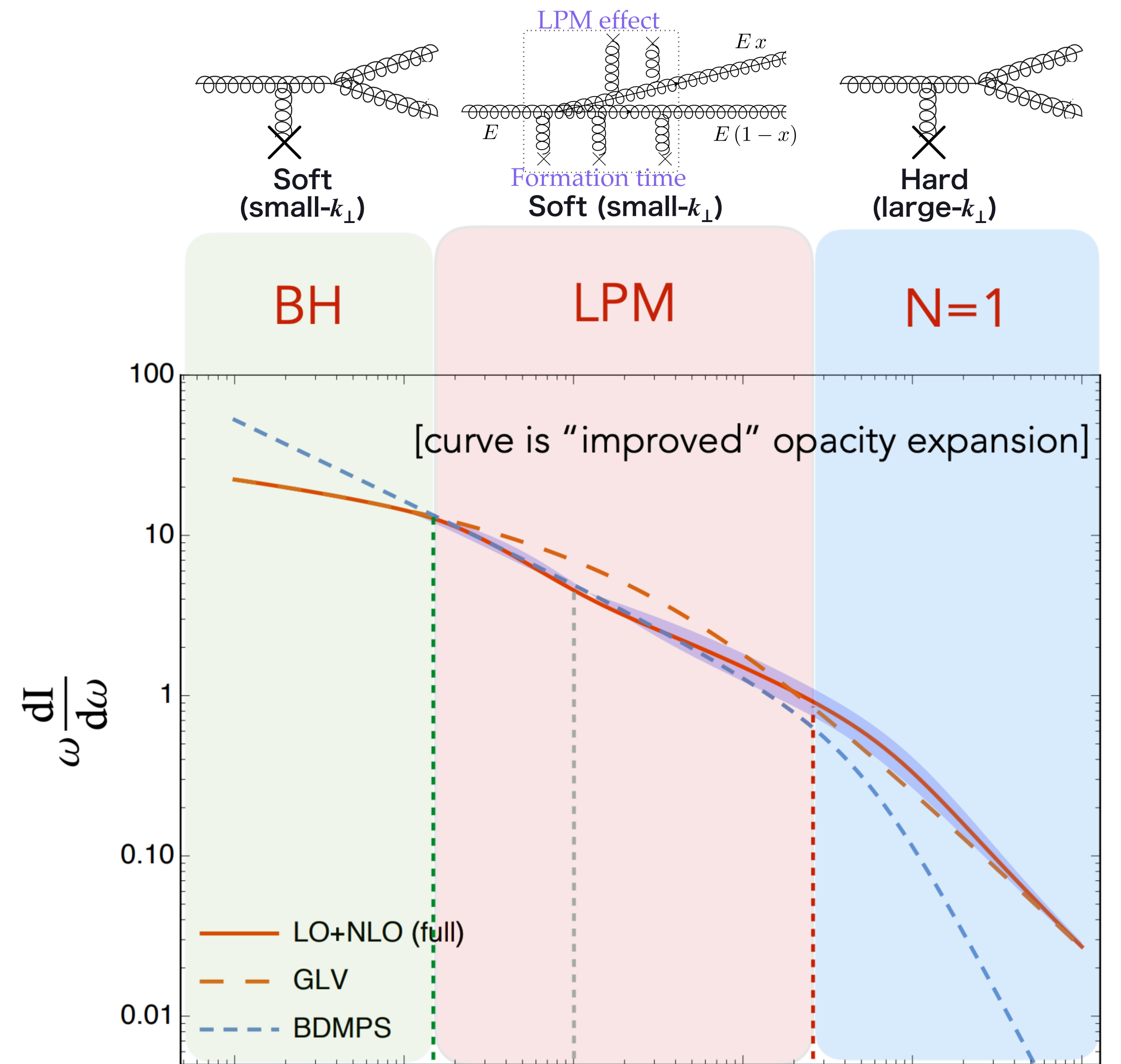
**Improved Opacity Expansion**

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

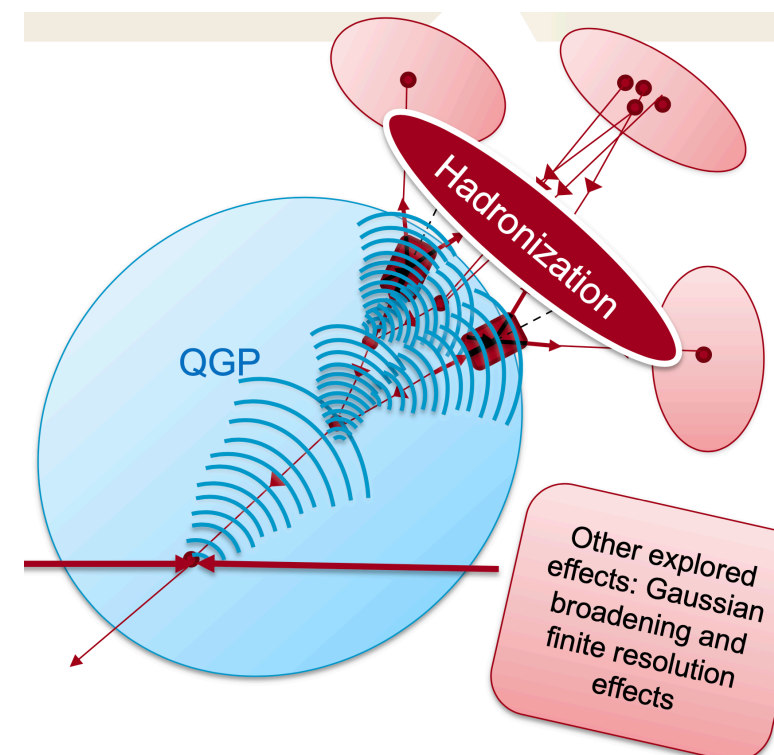


Tywoniuk QM'19

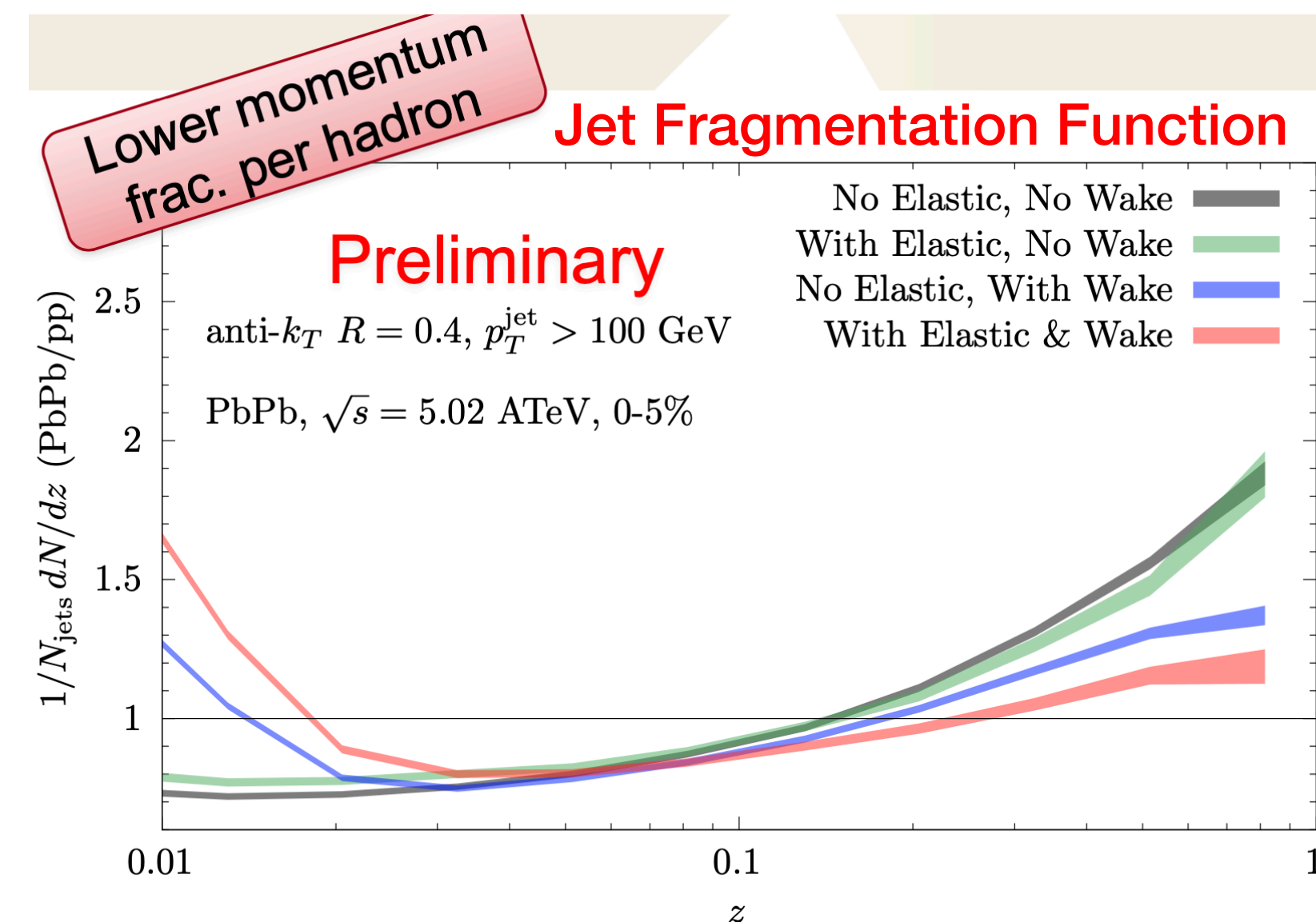
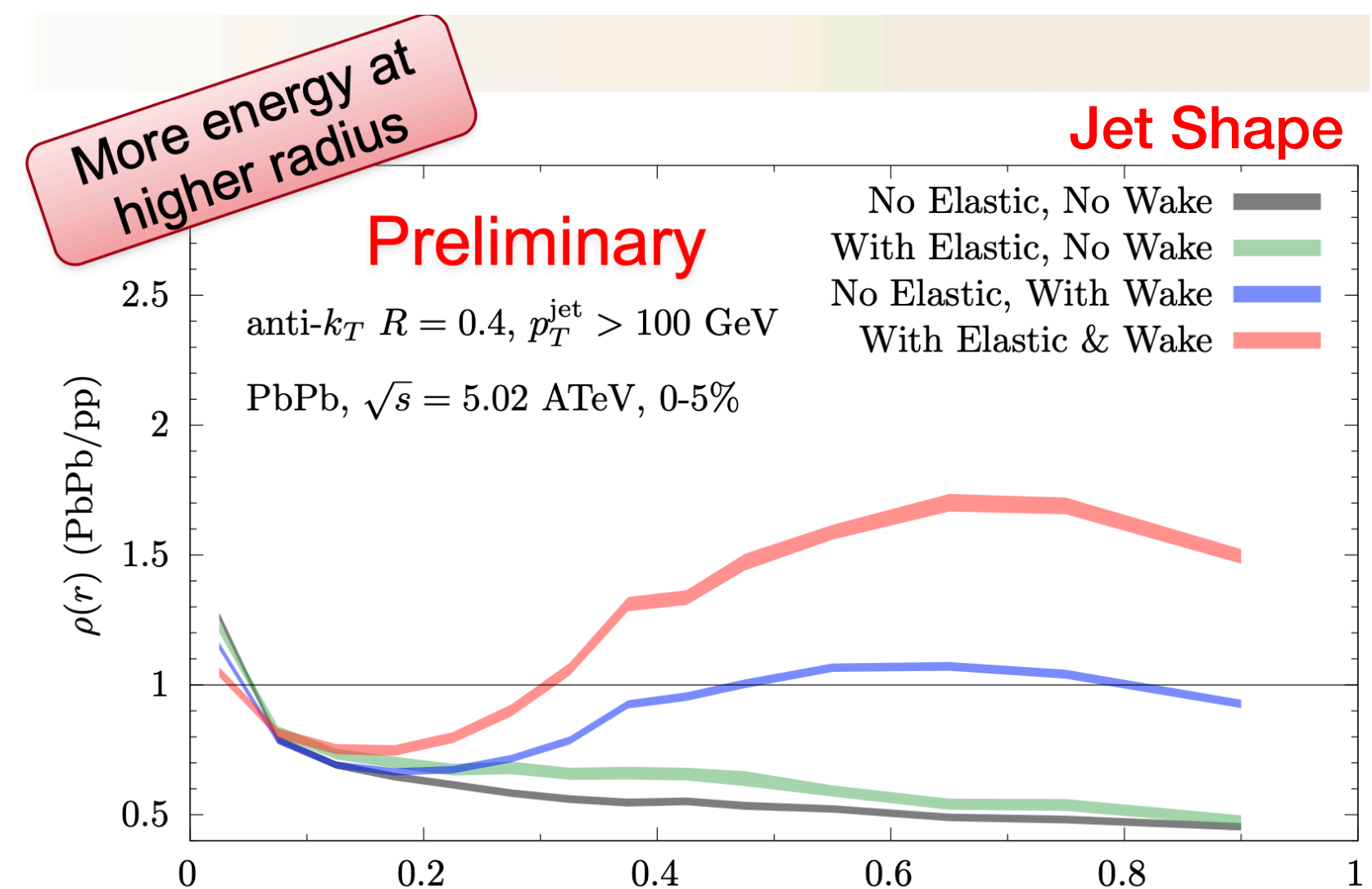
# Molière 散乱を含むAdS/CFTのMC模型拡張

## ● 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

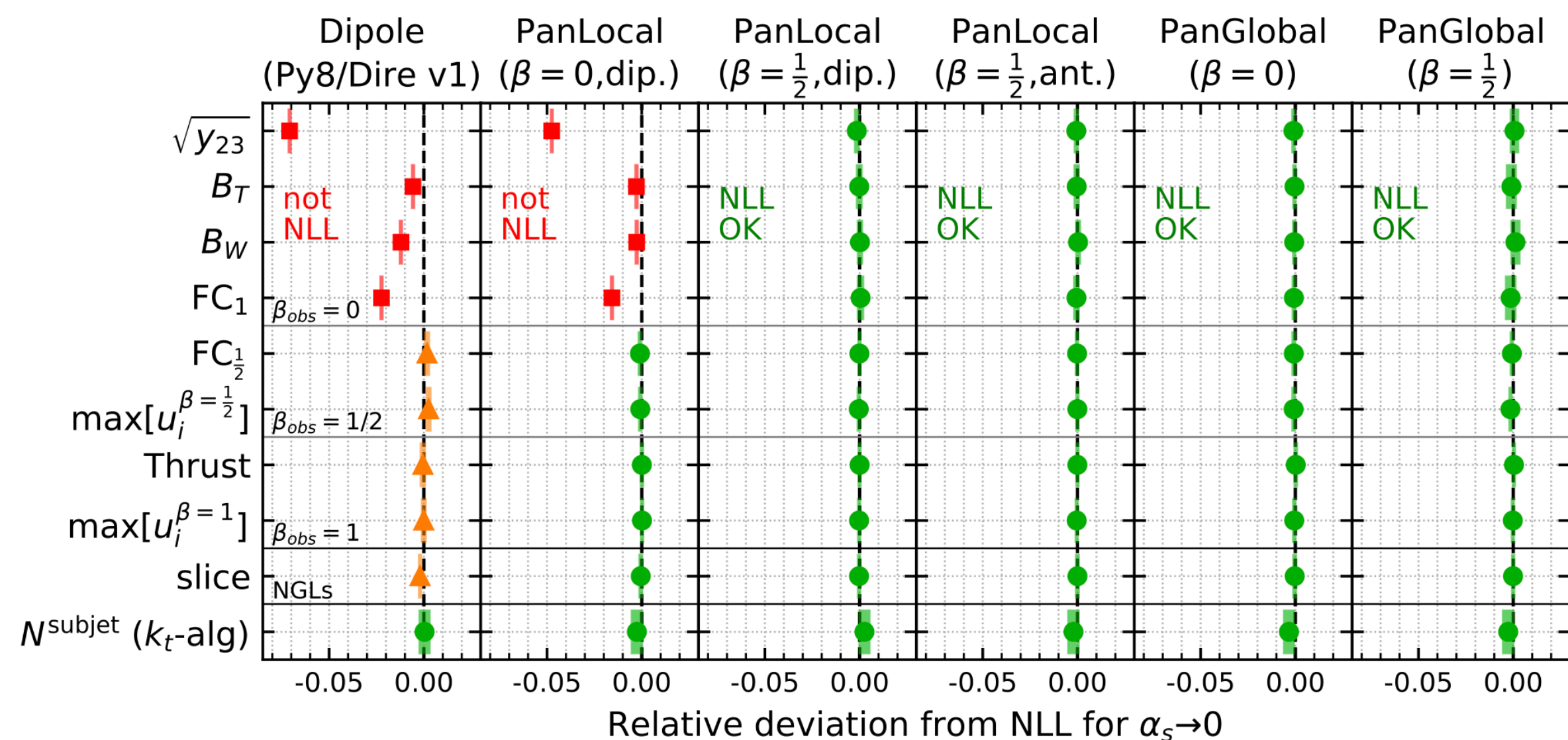


# ジェット-媒質相互作用評価のためのベースライン

## ● PanScales (NLL真空パートンシャワー)

Talk by A. Soto-Ontoso

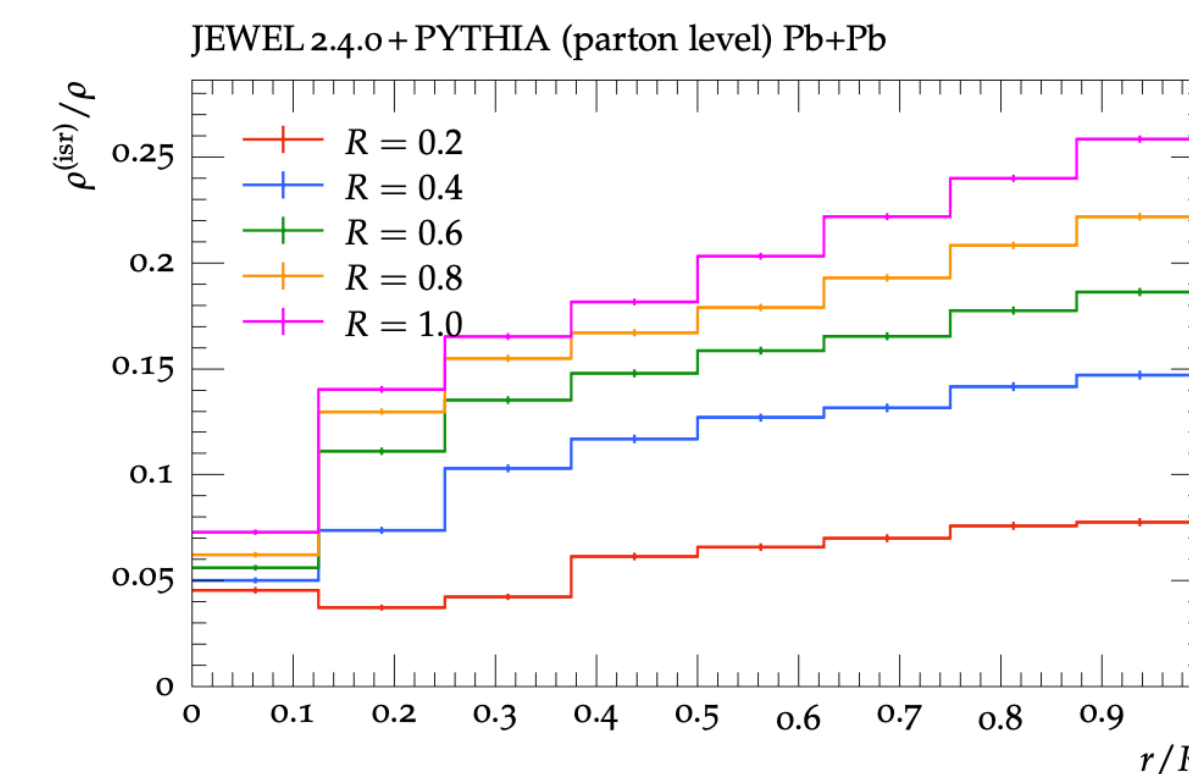
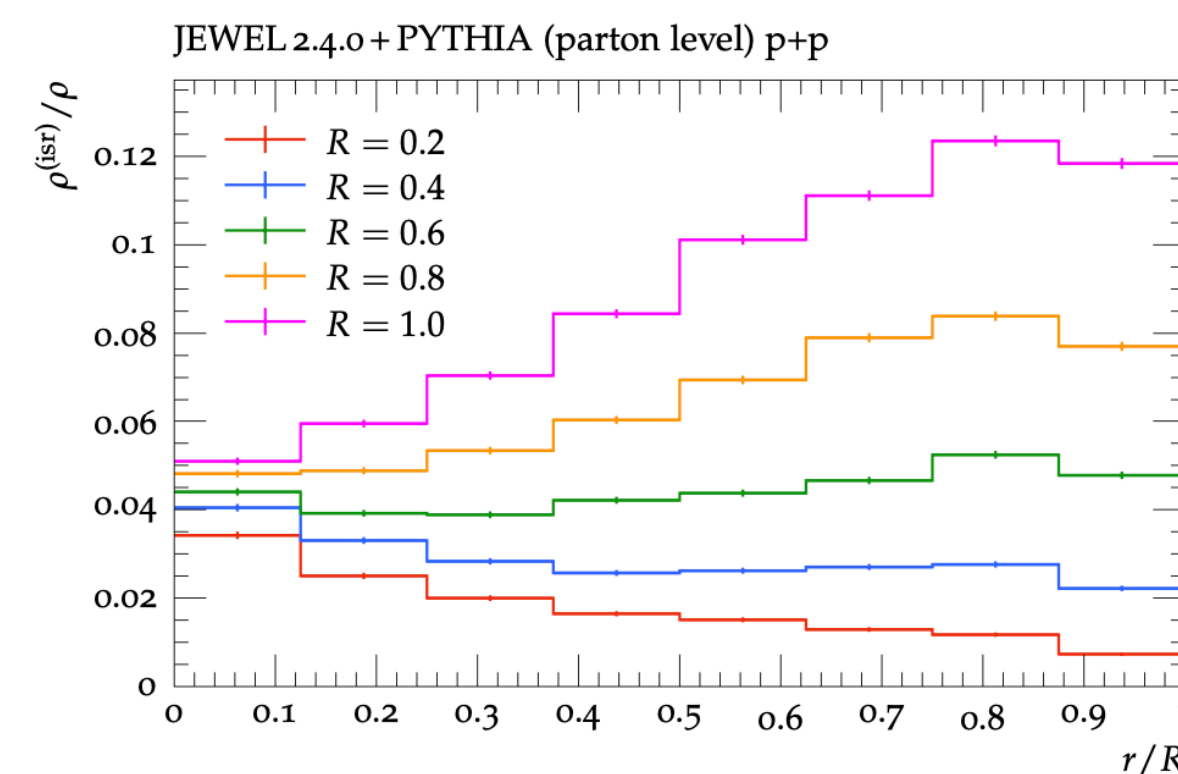
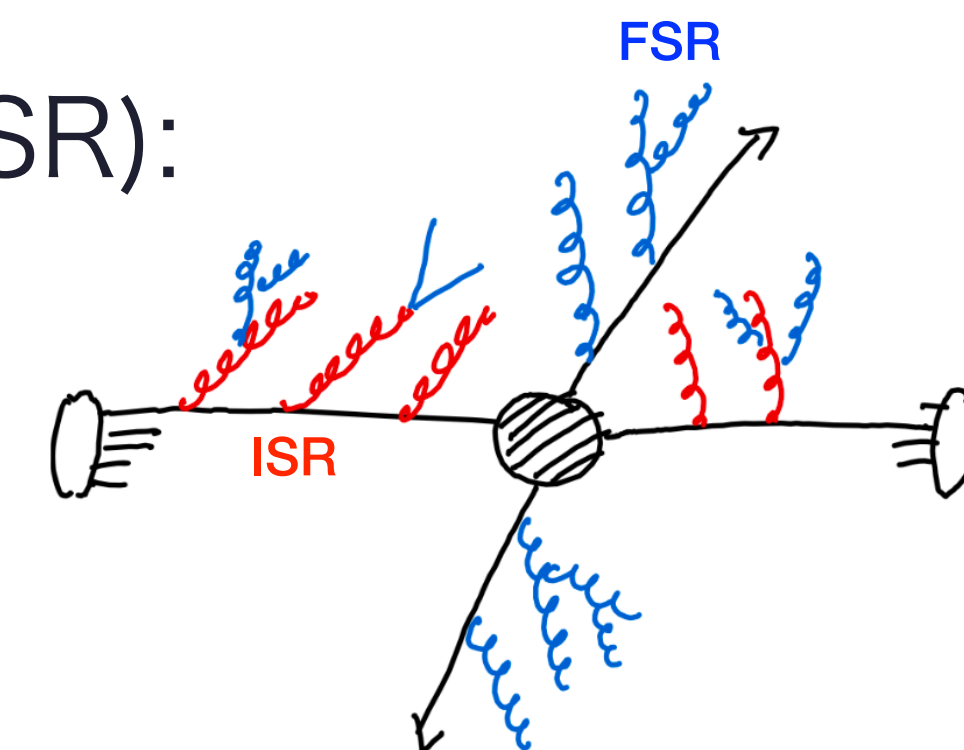
- MCで再現できない観測量の存在 (girthなど)



- 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

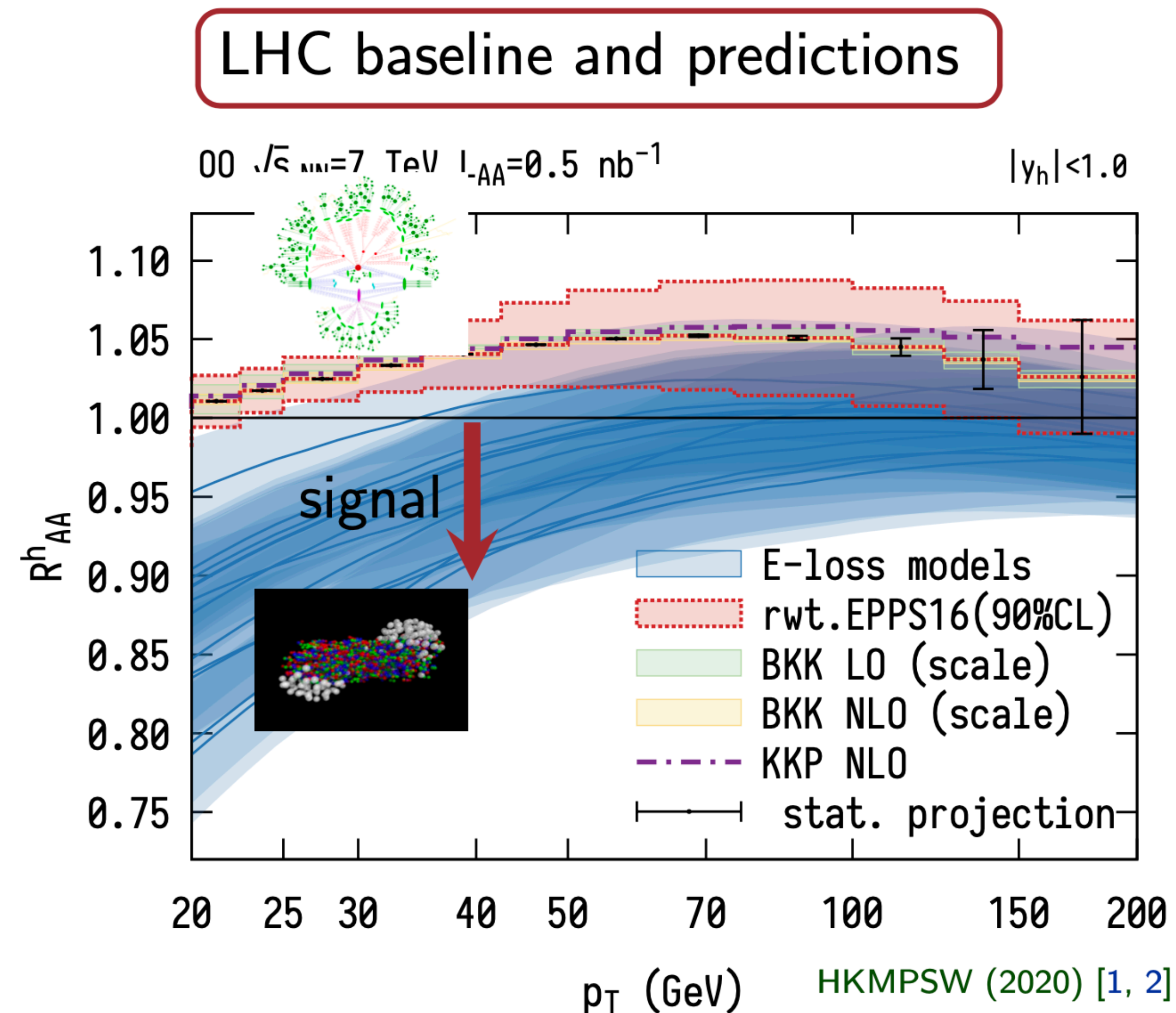


- コーン大のジェットで大角度で10%ほど寄与
- 媒質応答と似た寄与の仕方

# 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

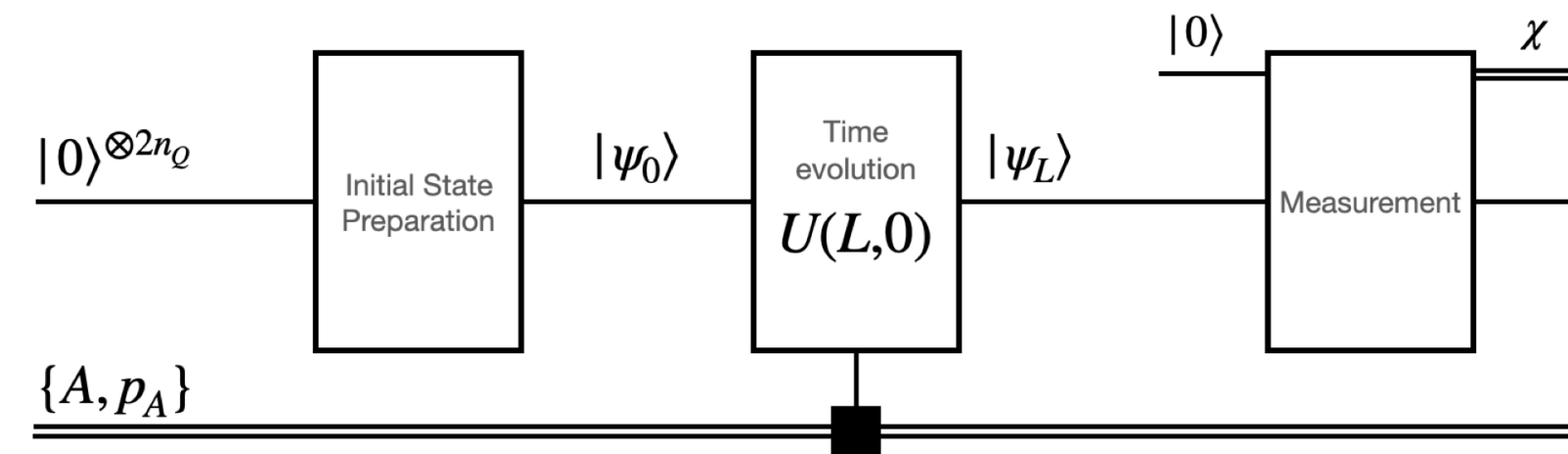
- nPDFなどの不確かさ
- $R_{AA}^h$ @00 でジェット-媒質相互作用は見えるか？
- $p_T < 50 \text{ GeV}$ では媒質効果が見えそう



# その他

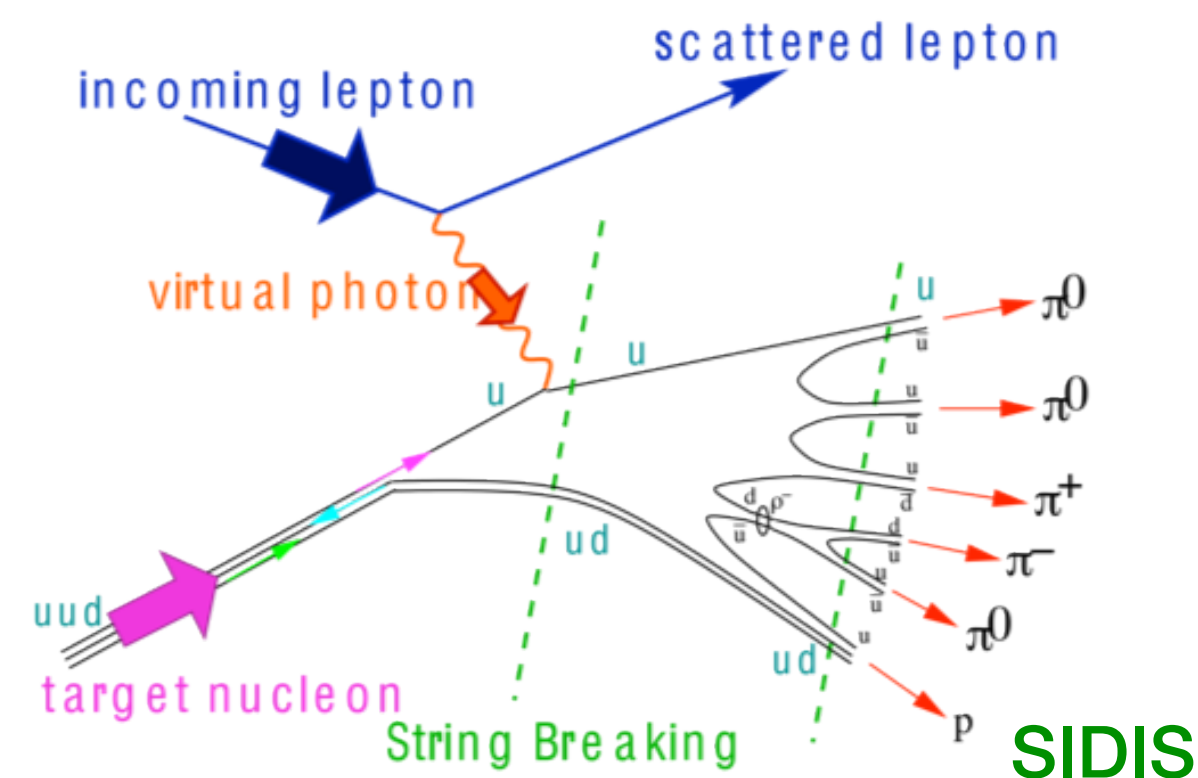
## ● 量子コンピュータによるジェット計算 Talk by J. Barata

- 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

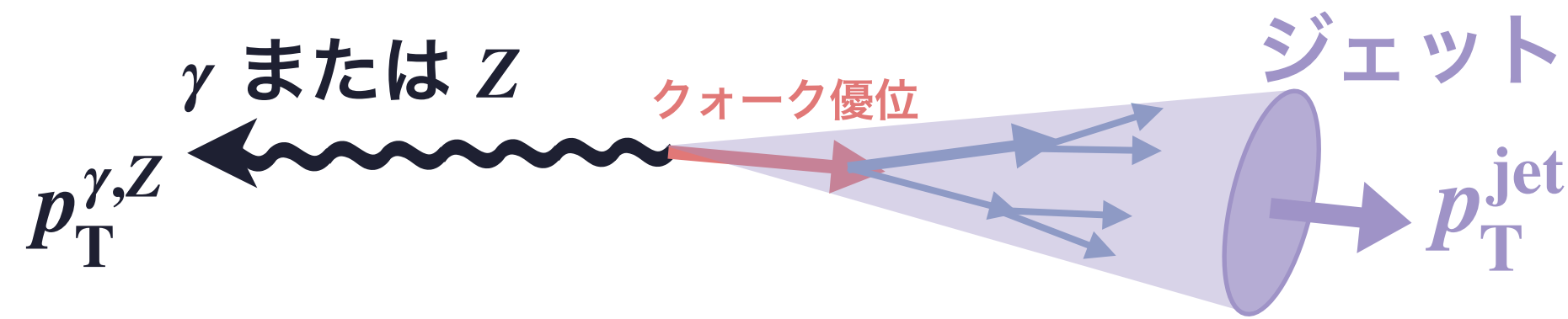




# High- $p_T$ 粒子 & ジェット [実験]

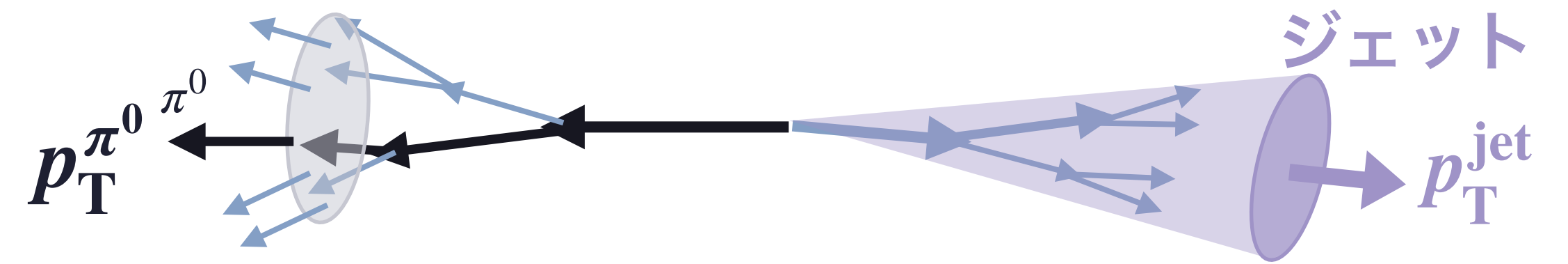
# タグ付きジェット

## ● $\gamma/Z$ -ジェットイベント

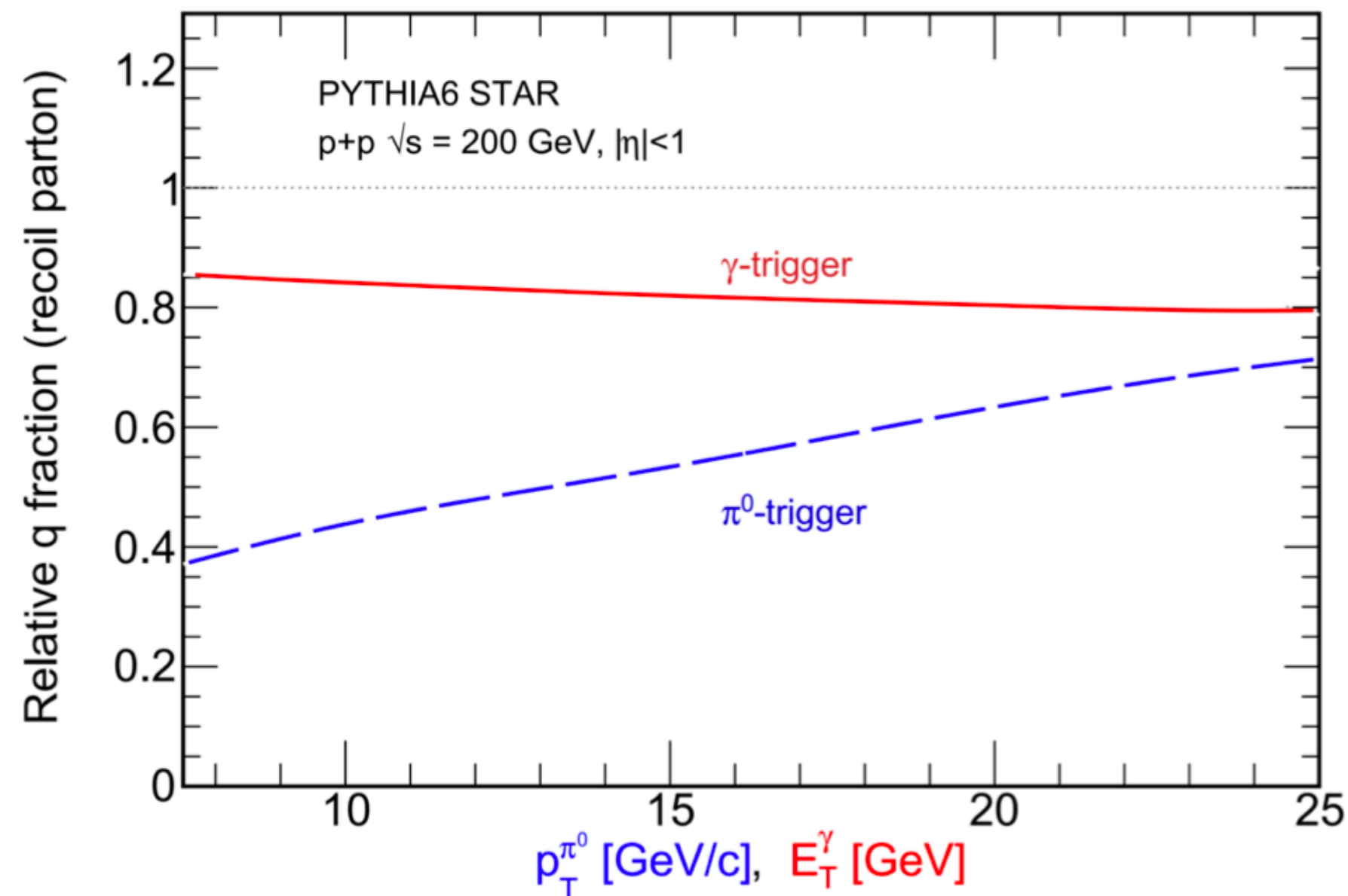


- $\gamma, Z$  は媒質と相互作用しない  
( $p_T^{\gamma,Z} - p_T^{jet} \sim$  ジェットのエネルギー損失)
- クォークジェットが優位

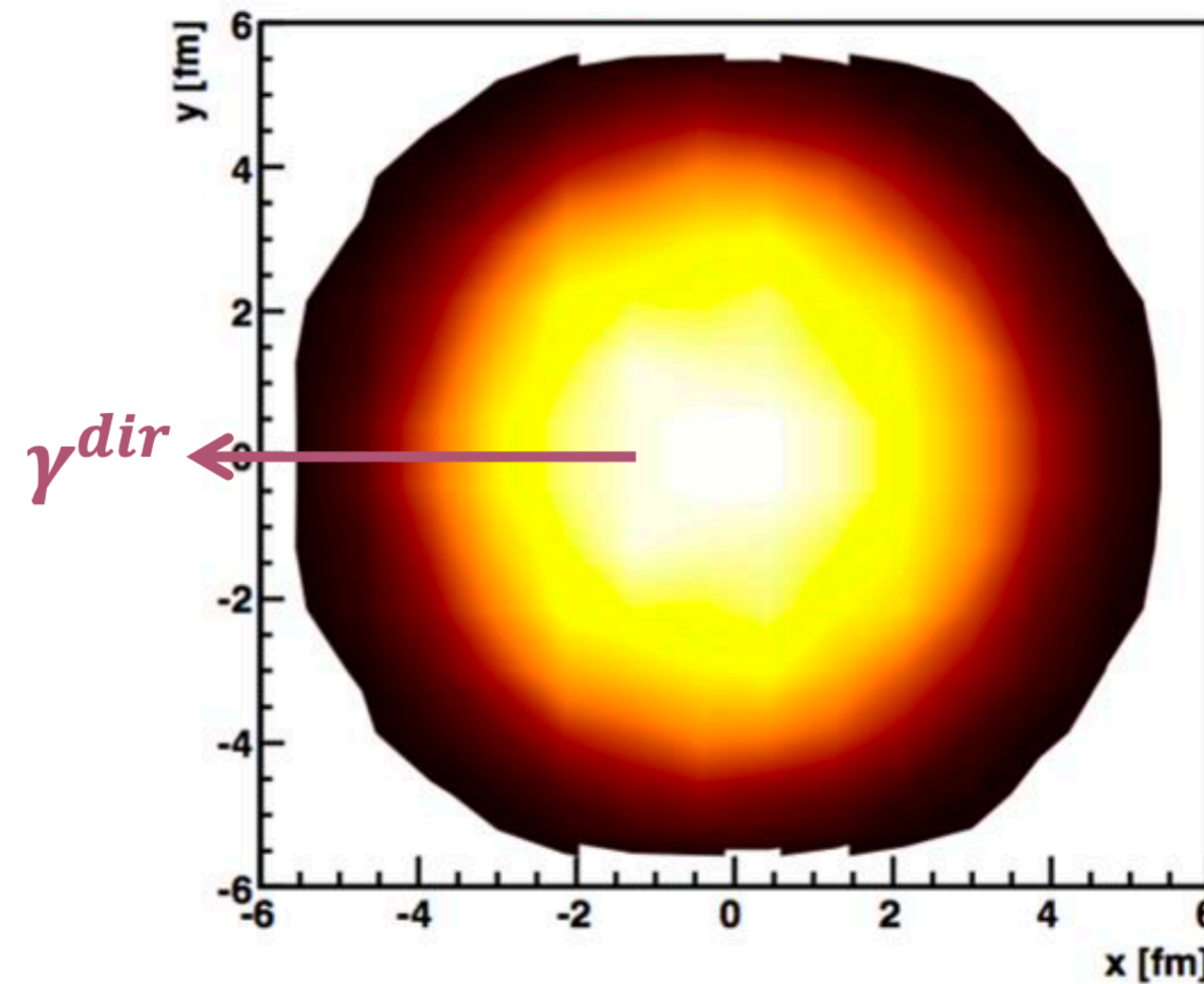
## ● $\pi^0$ -ジェットイベント



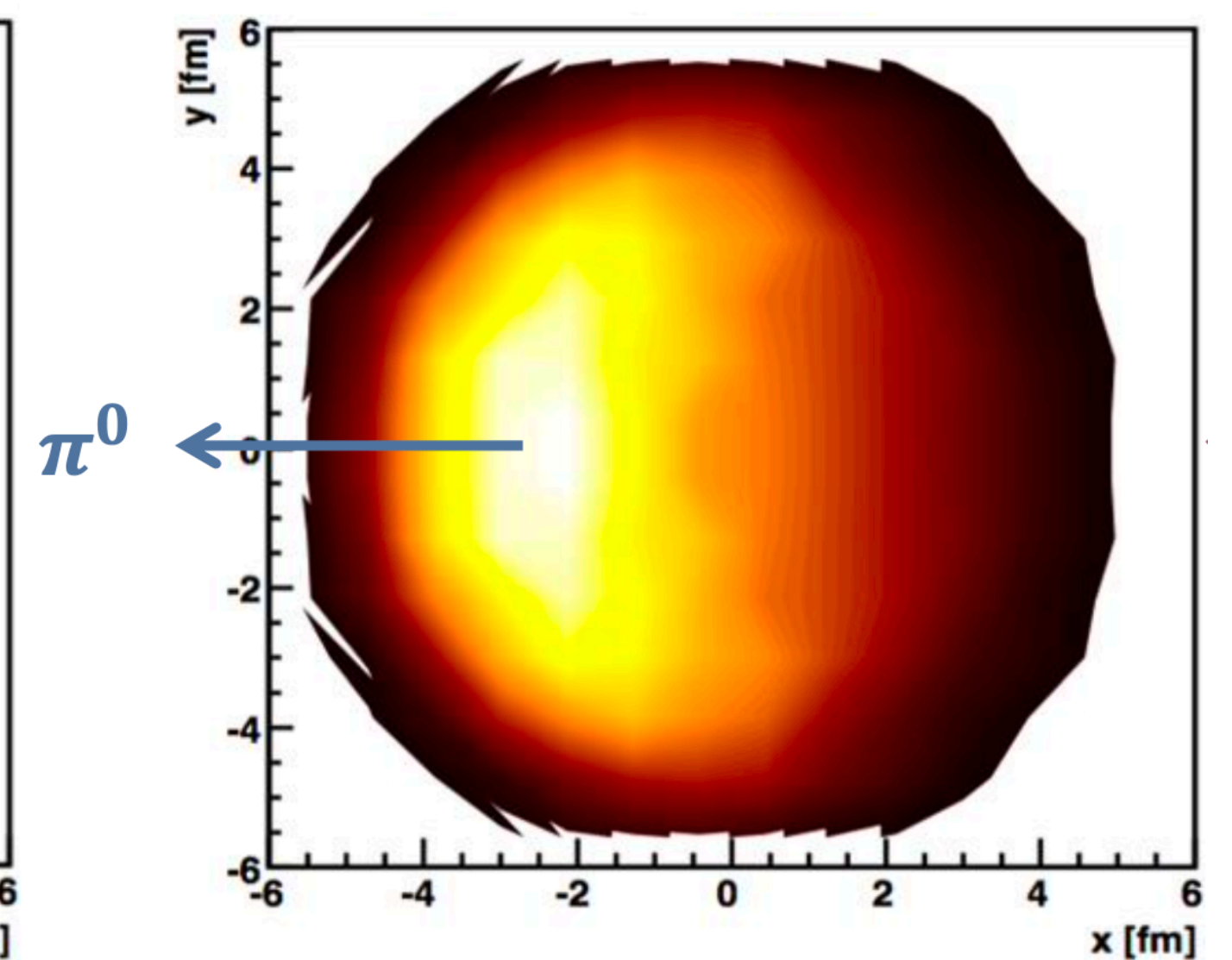
- エネルギー損失とハドロニ化



$\gamma_{dir}$  Trigger



Hadron Trigger

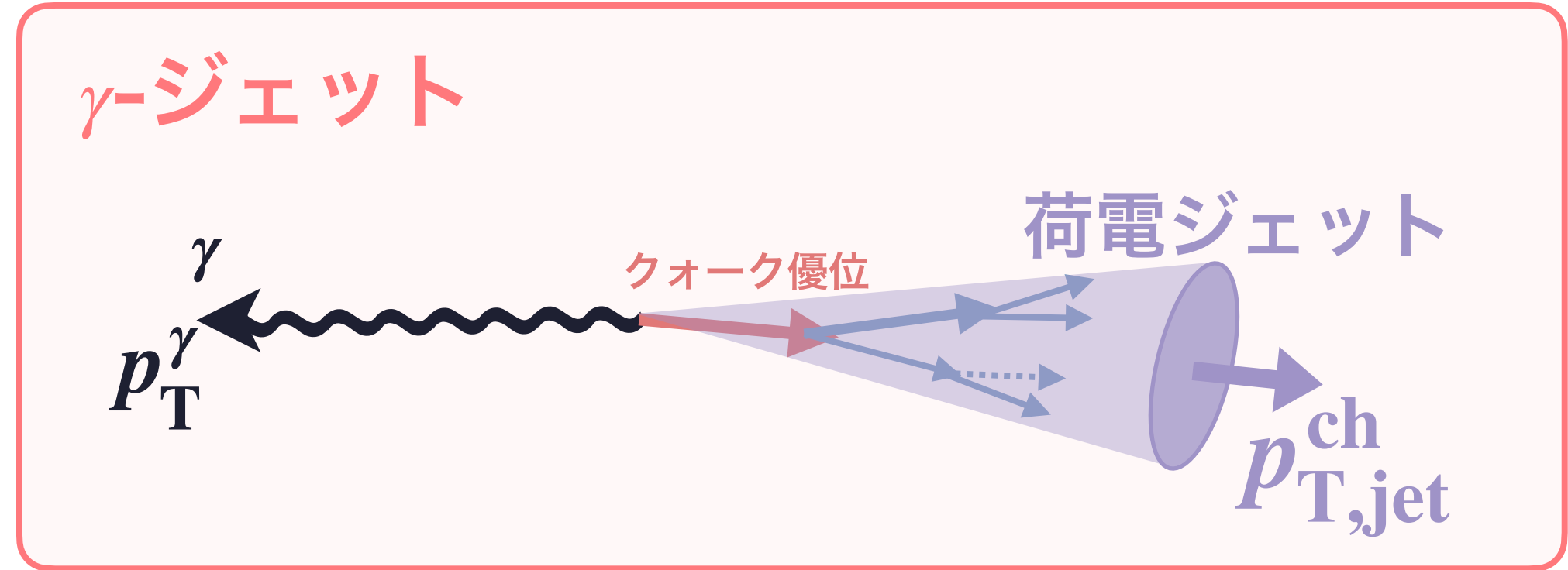
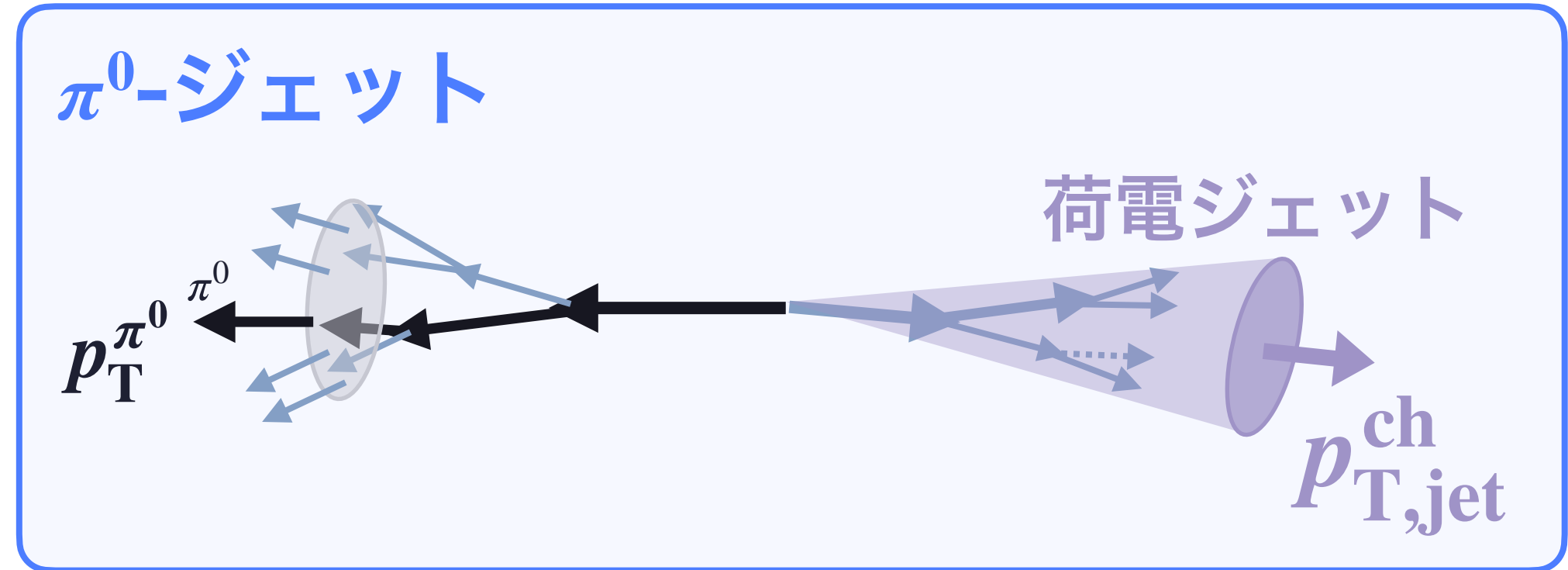
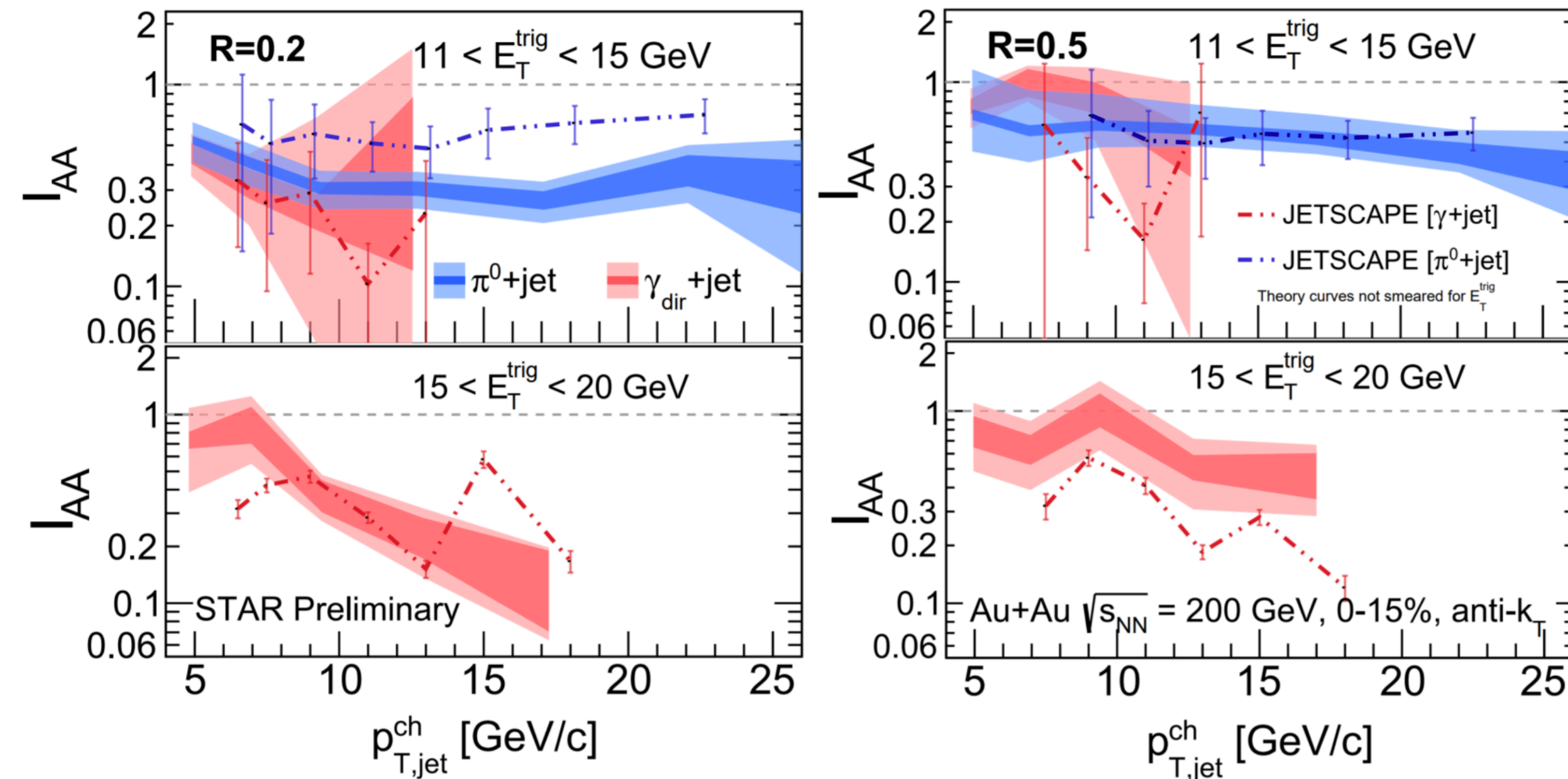


Talk by D. Anderson [STAR]

# タグ付きジェット

## ● $\gamma$ -ジェット相関と $\pi^0$ -ジェット相関 in AuAu@200 GeV

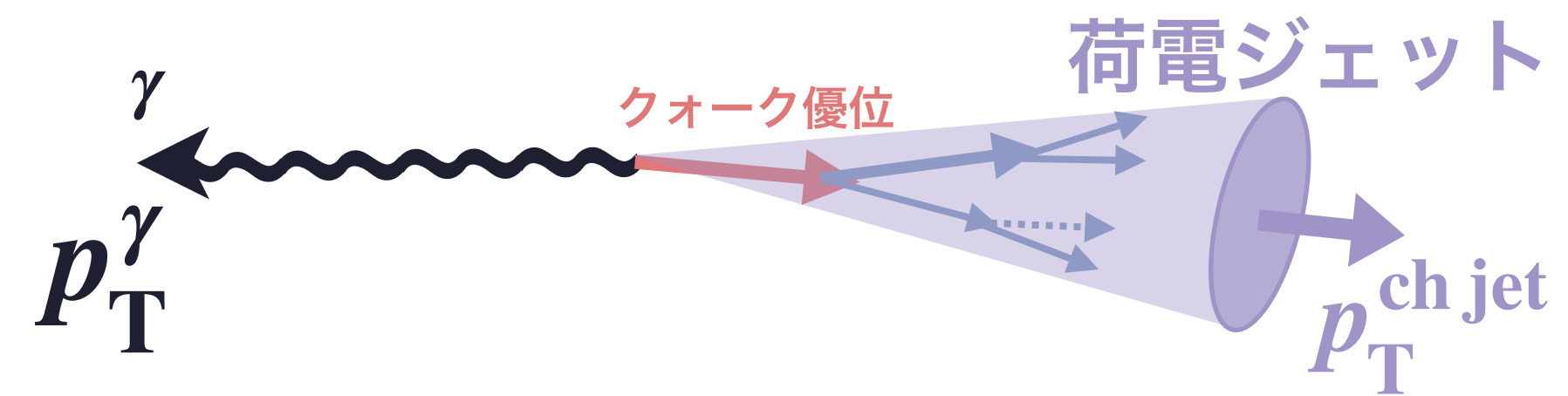
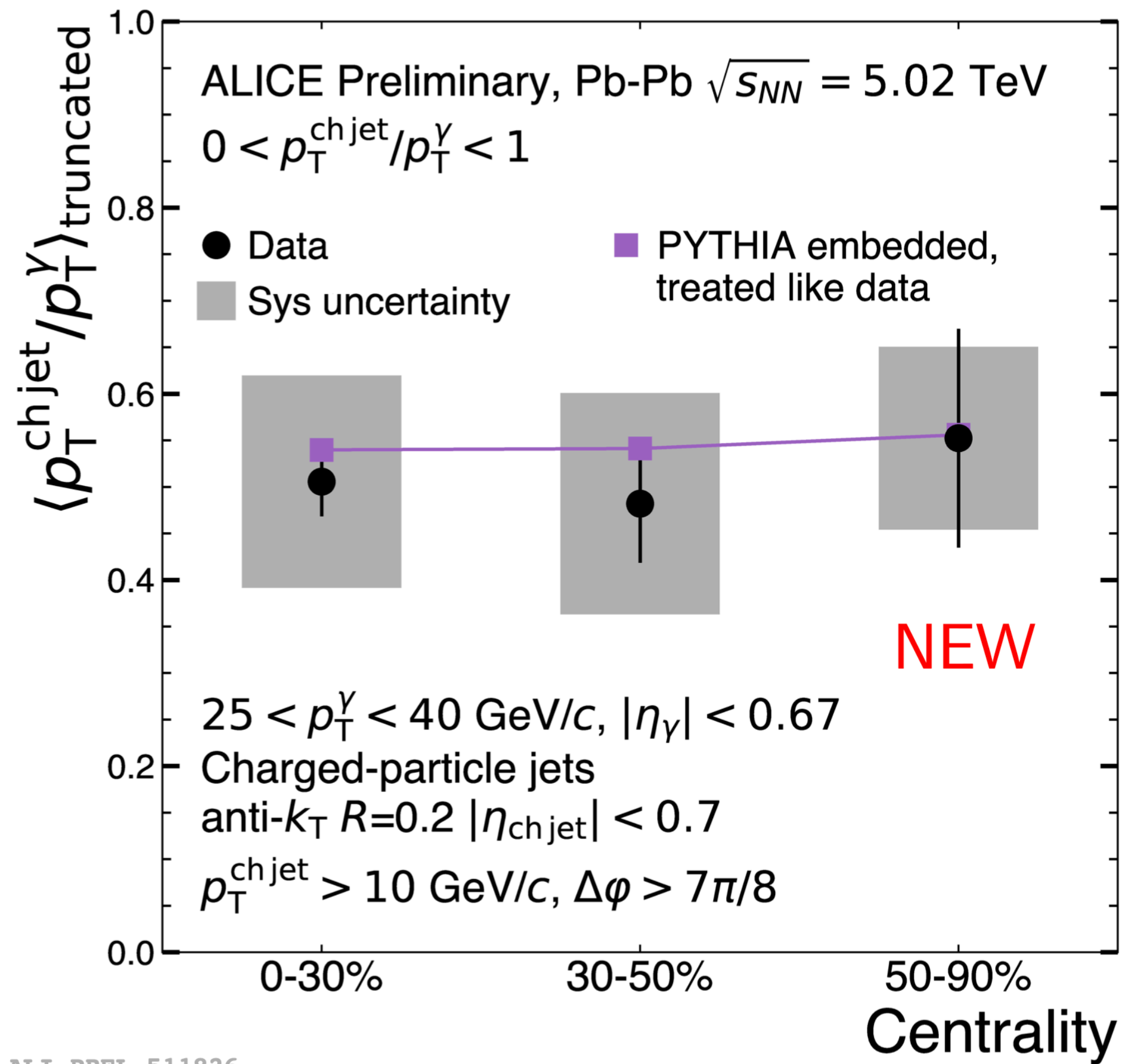
Talk by D. Anderson [STAR]



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

# タグ付きジェット

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

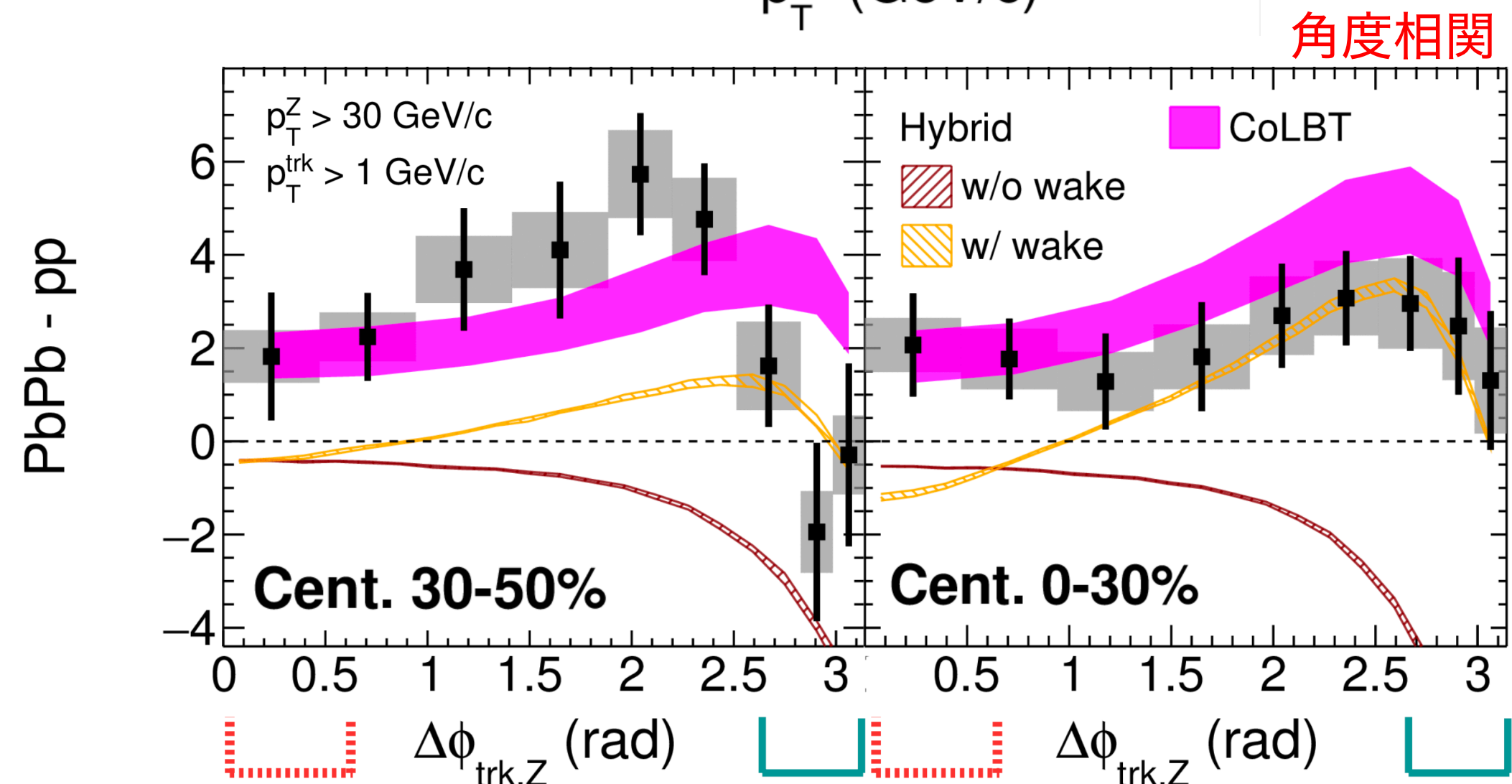
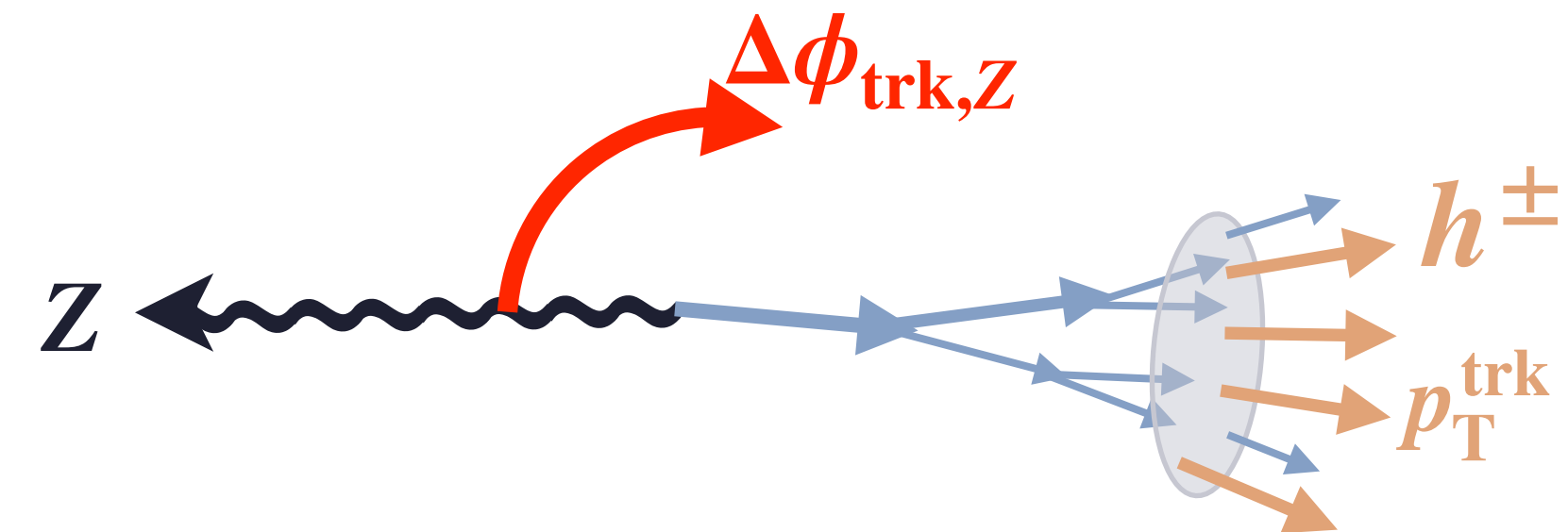
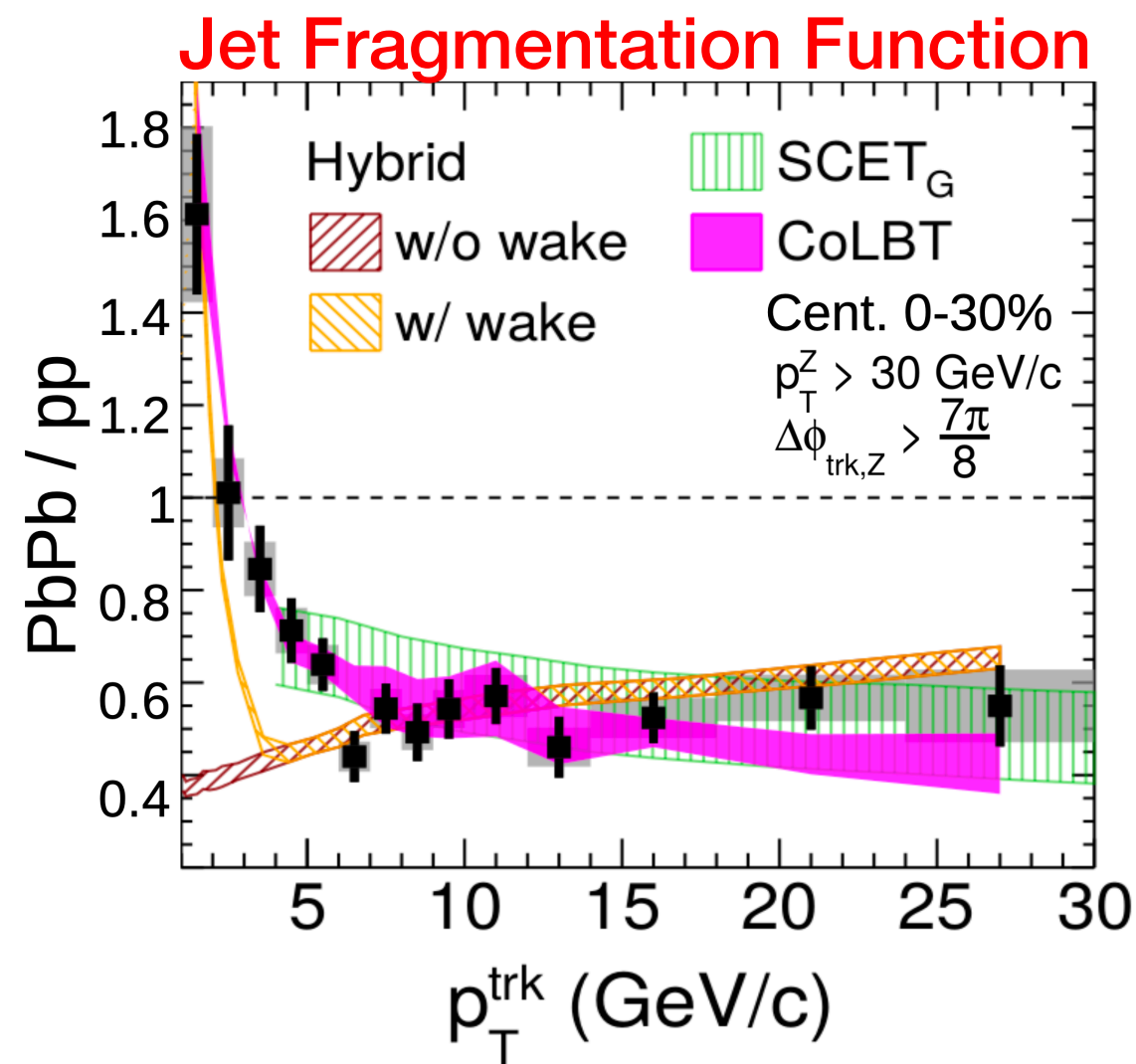


- $\gamma$ -『荷電』ジェット  $p_T$  比  
(真空のLOでも  $p_T^{\text{chjet}}/p_T^\gamma < 1$ )
- Centrality 依存性なし
- Pythia とコンシステント

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]

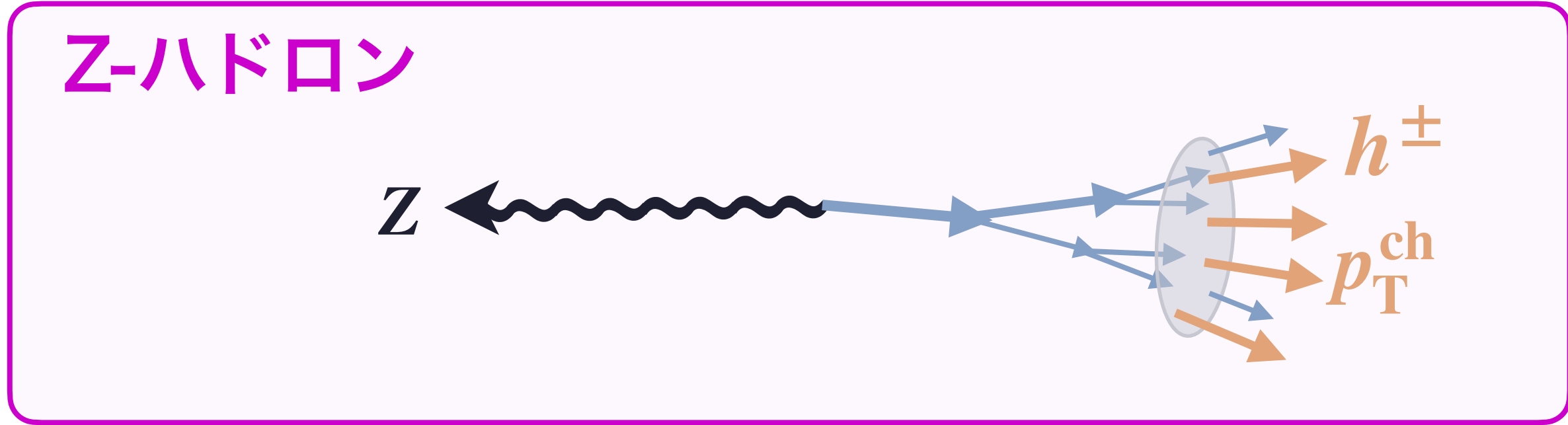
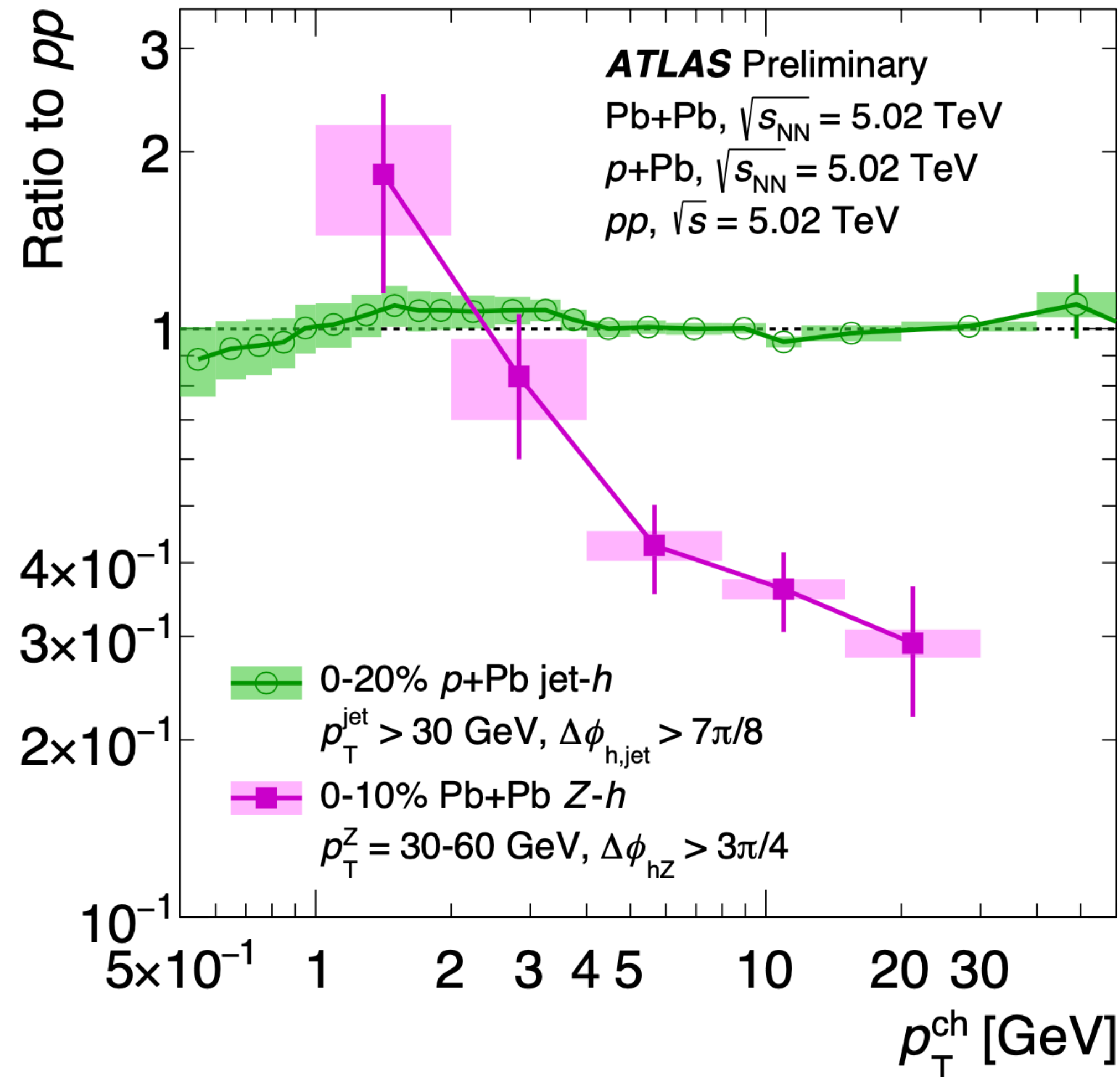


- ハード↘, ソフト↗
- ブロードニング
- 媒質応答の寄与が説明
- しかしCentrality依存性は逆の振る舞い？

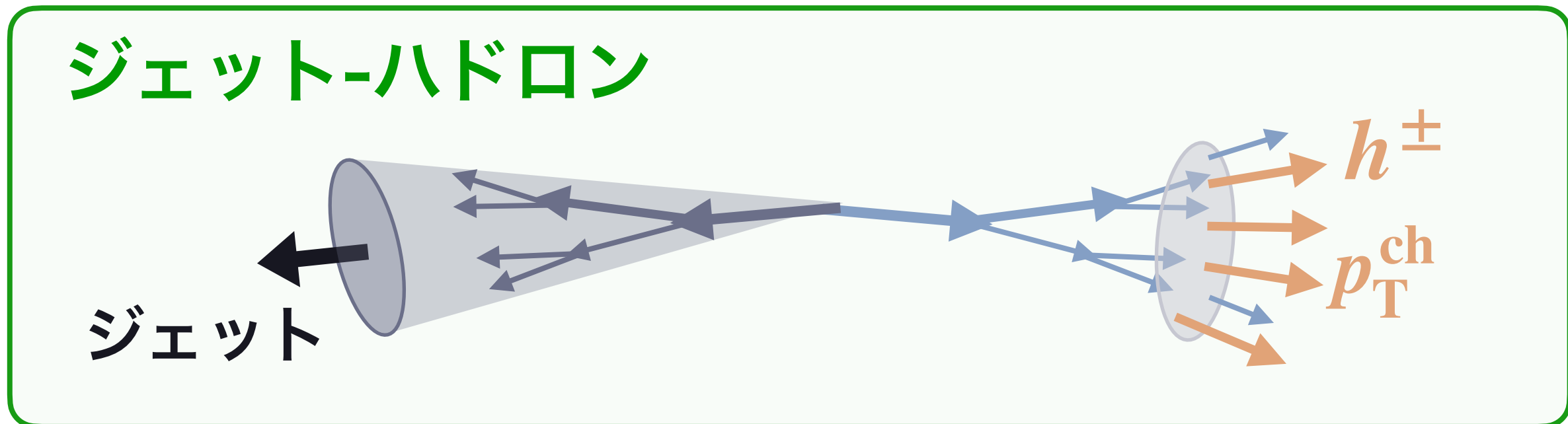
# タグ付きハドロン

## ● 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]



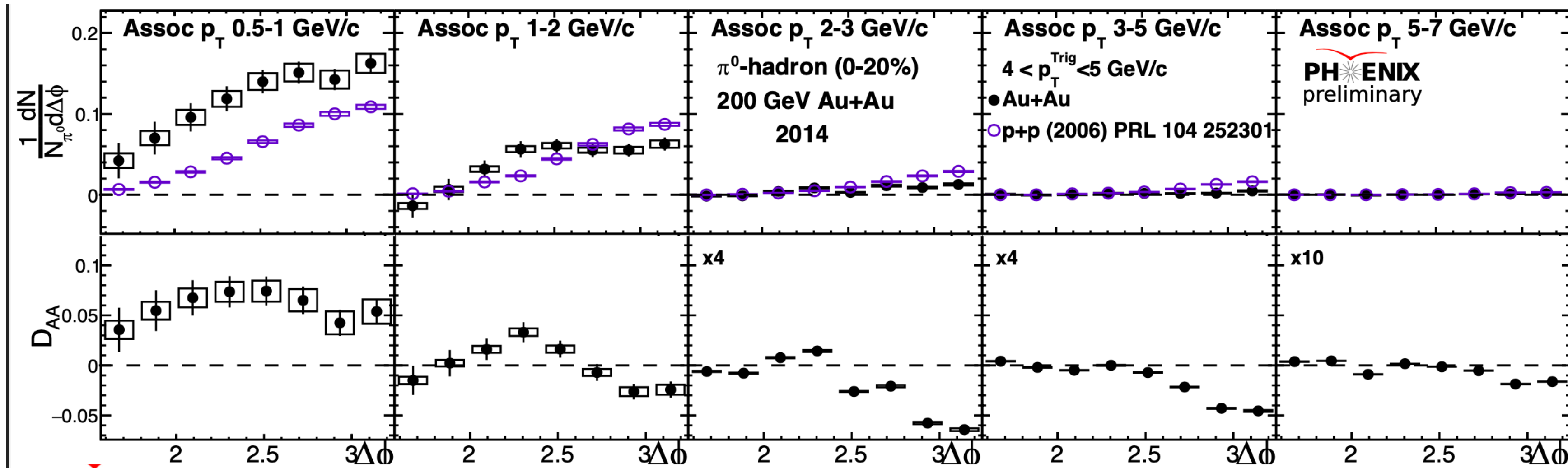
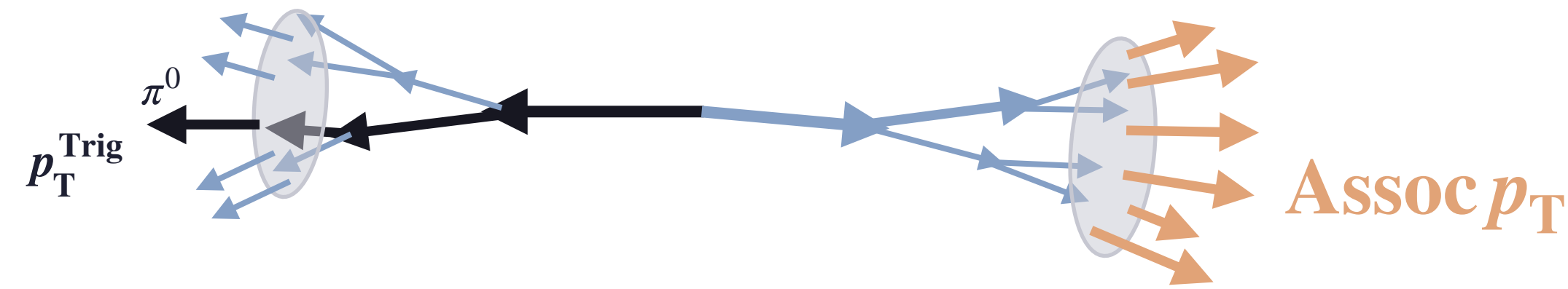
- Zの反対側のハドロンはPbPbでソフトに  
 (エネルギー損失, CMSと同じ振る舞い)



- 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

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

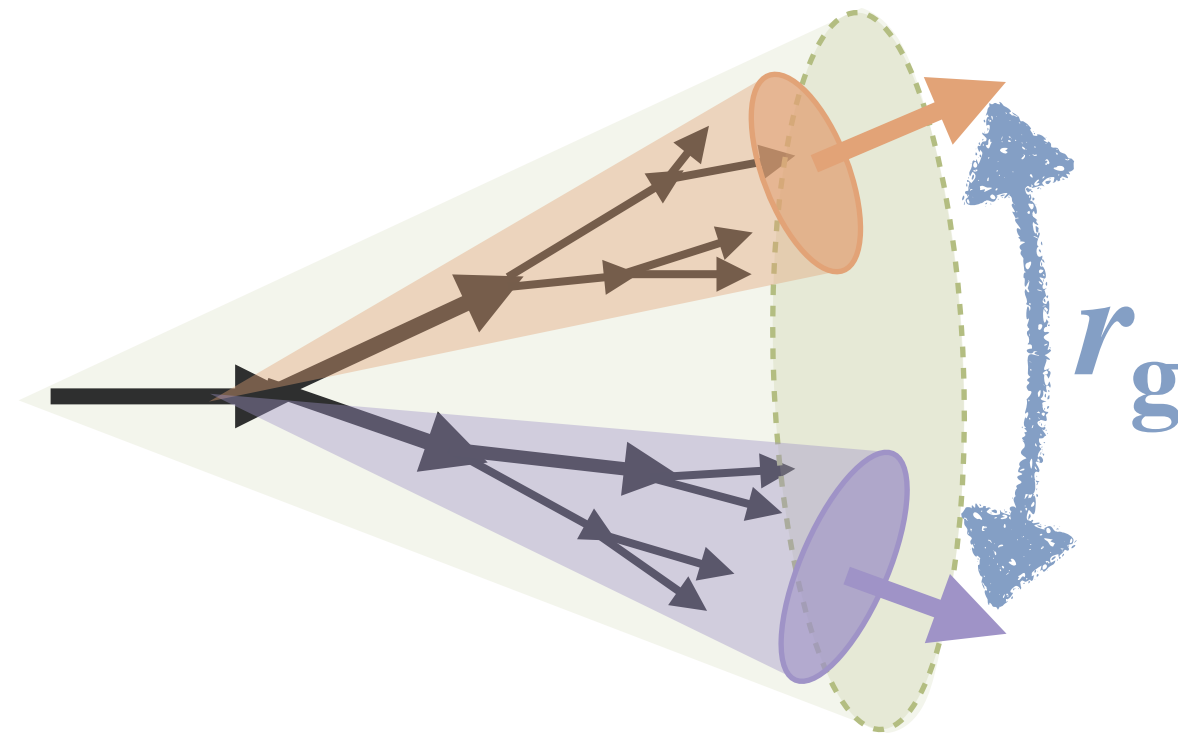


$$D_{AA} = Y_{AA} - Y_{pp}$$

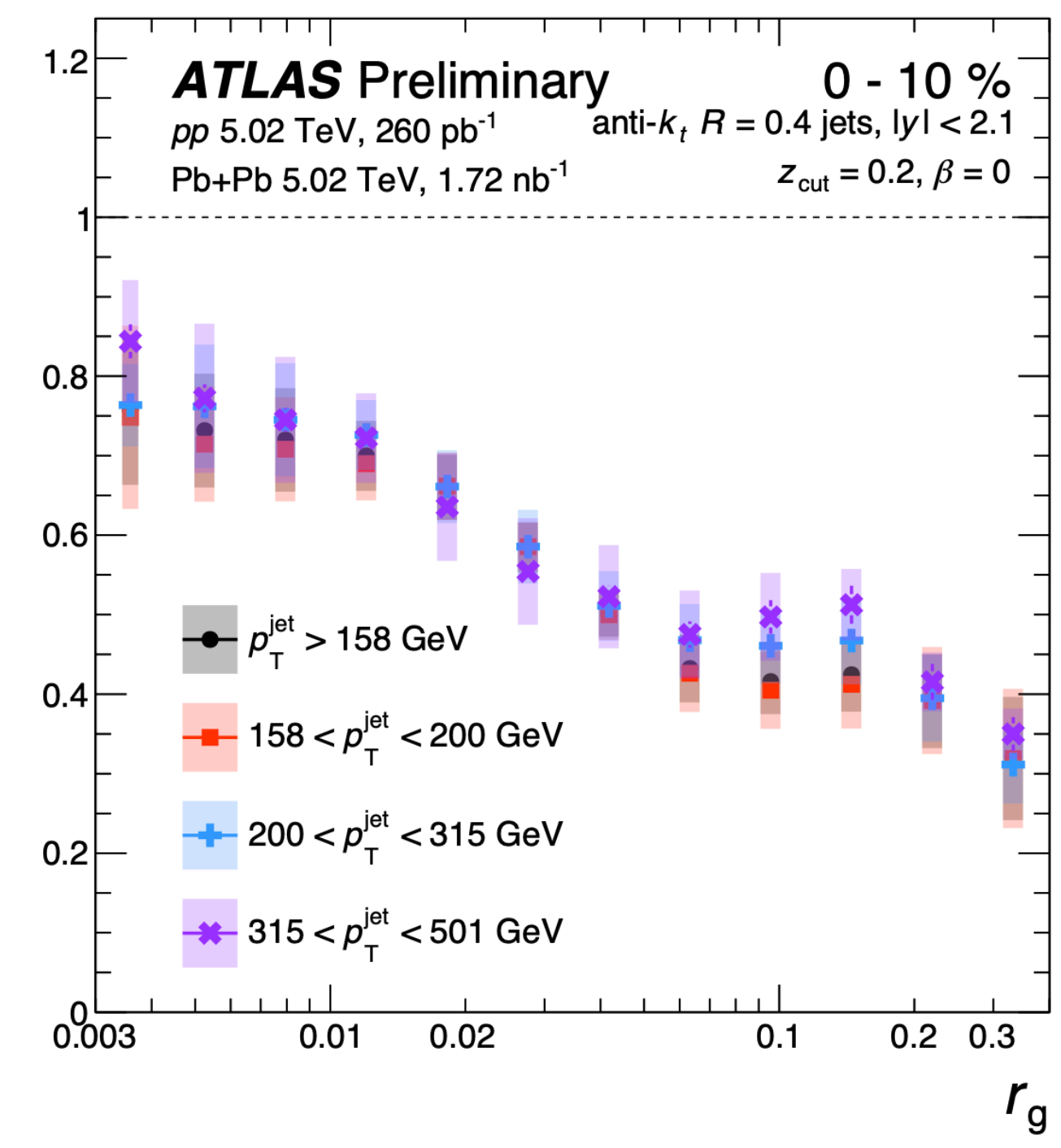
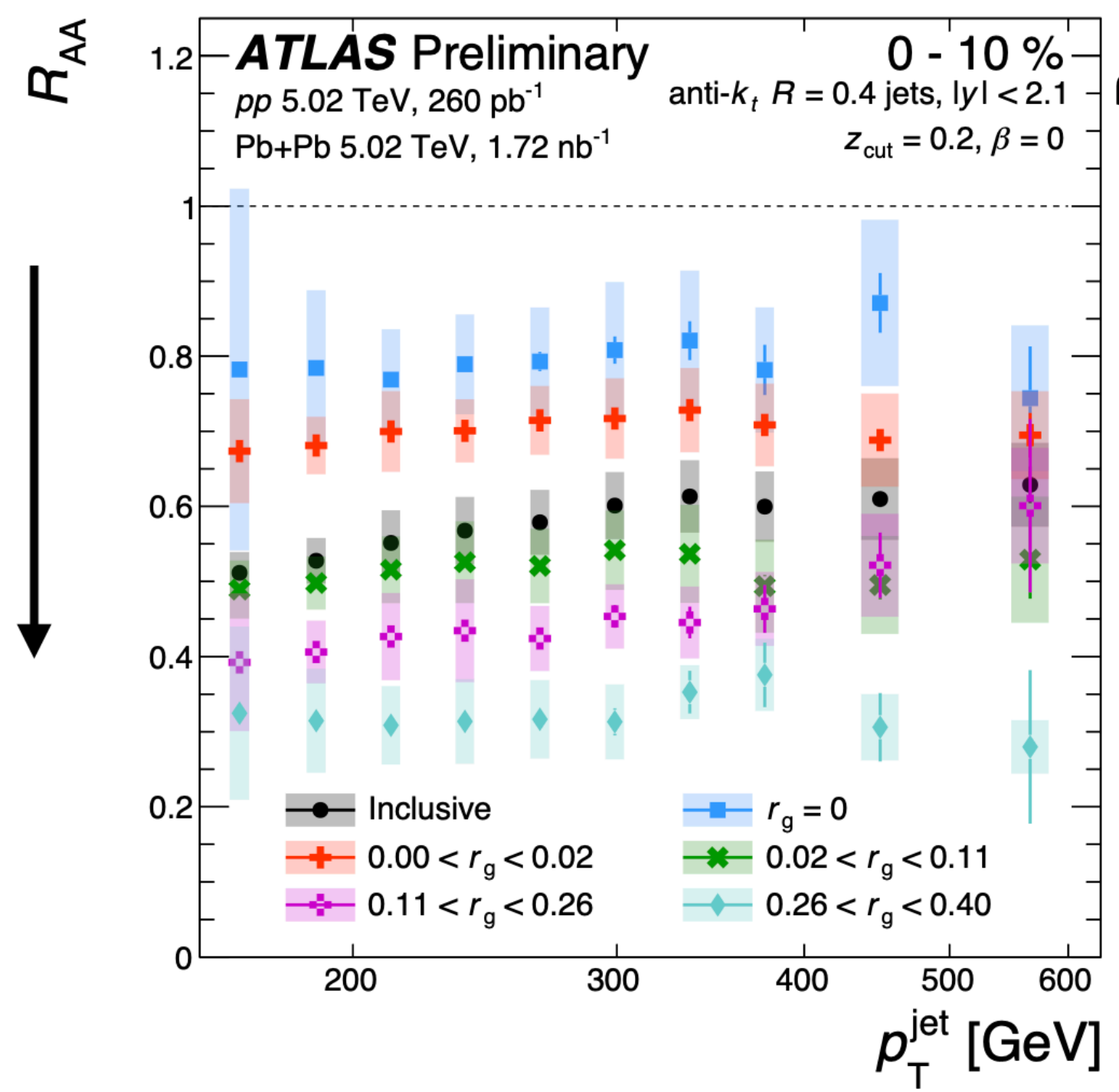
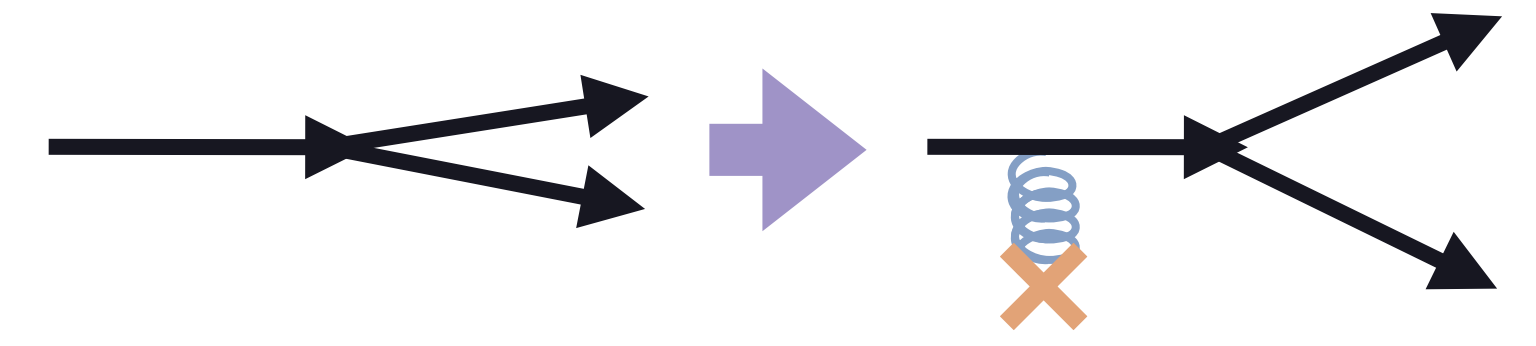
- Low- $p_T$  でCMS Z-ハドロンと同じ振る舞い
- $p_T$  依存性が見える

# 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



- 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

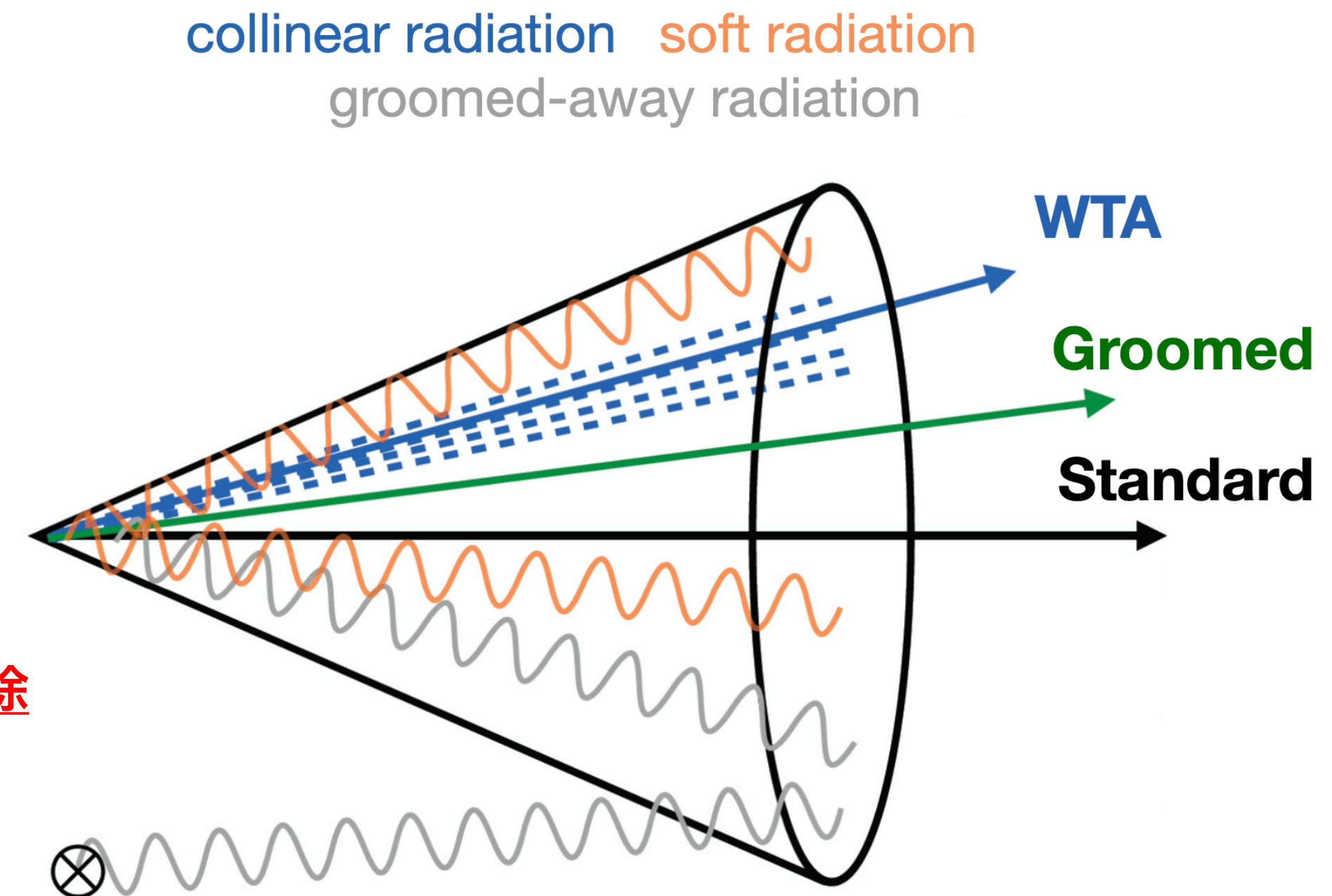


# ジェット内部構造

## ● 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  $(y, \varphi)$  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



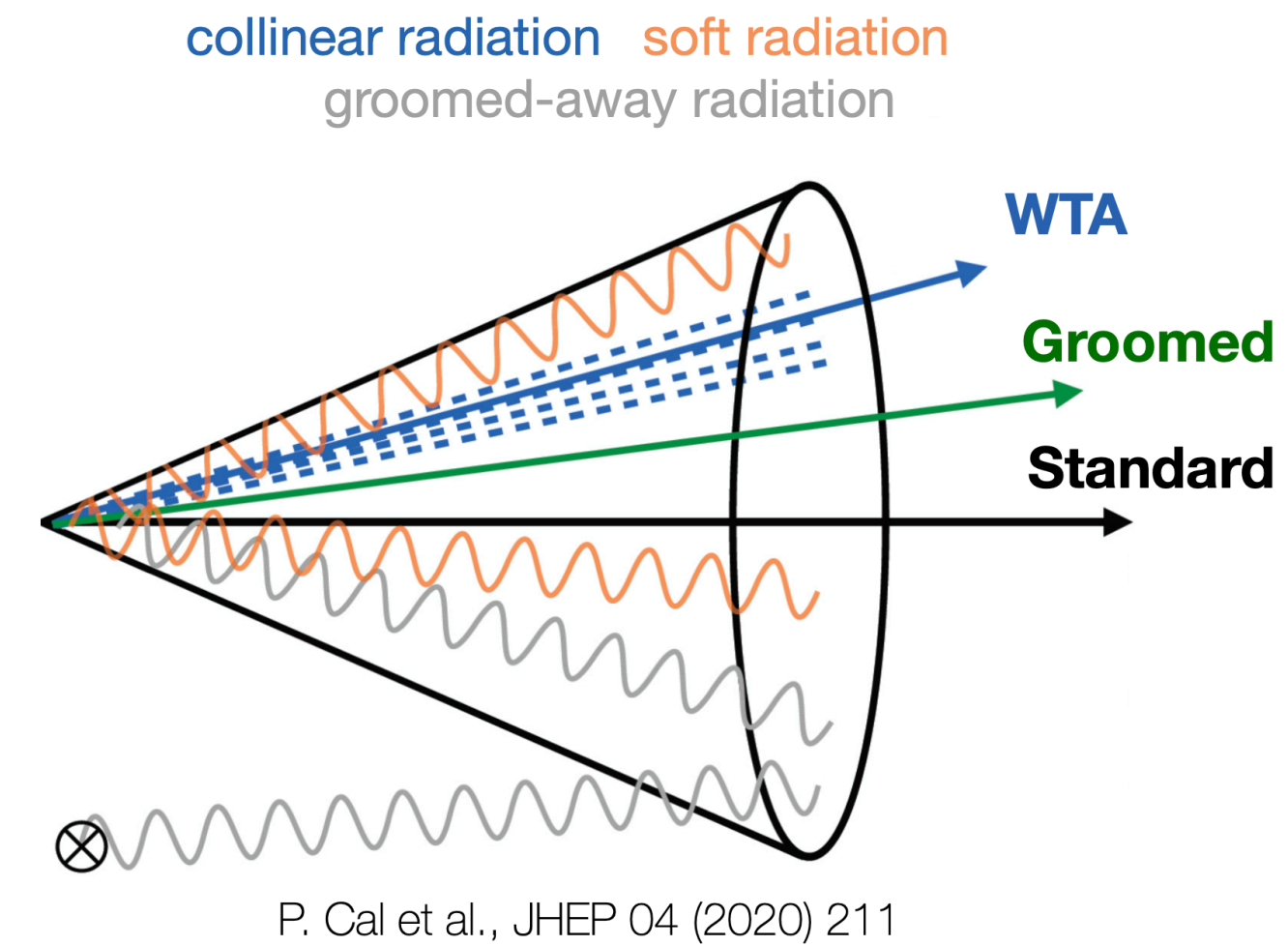
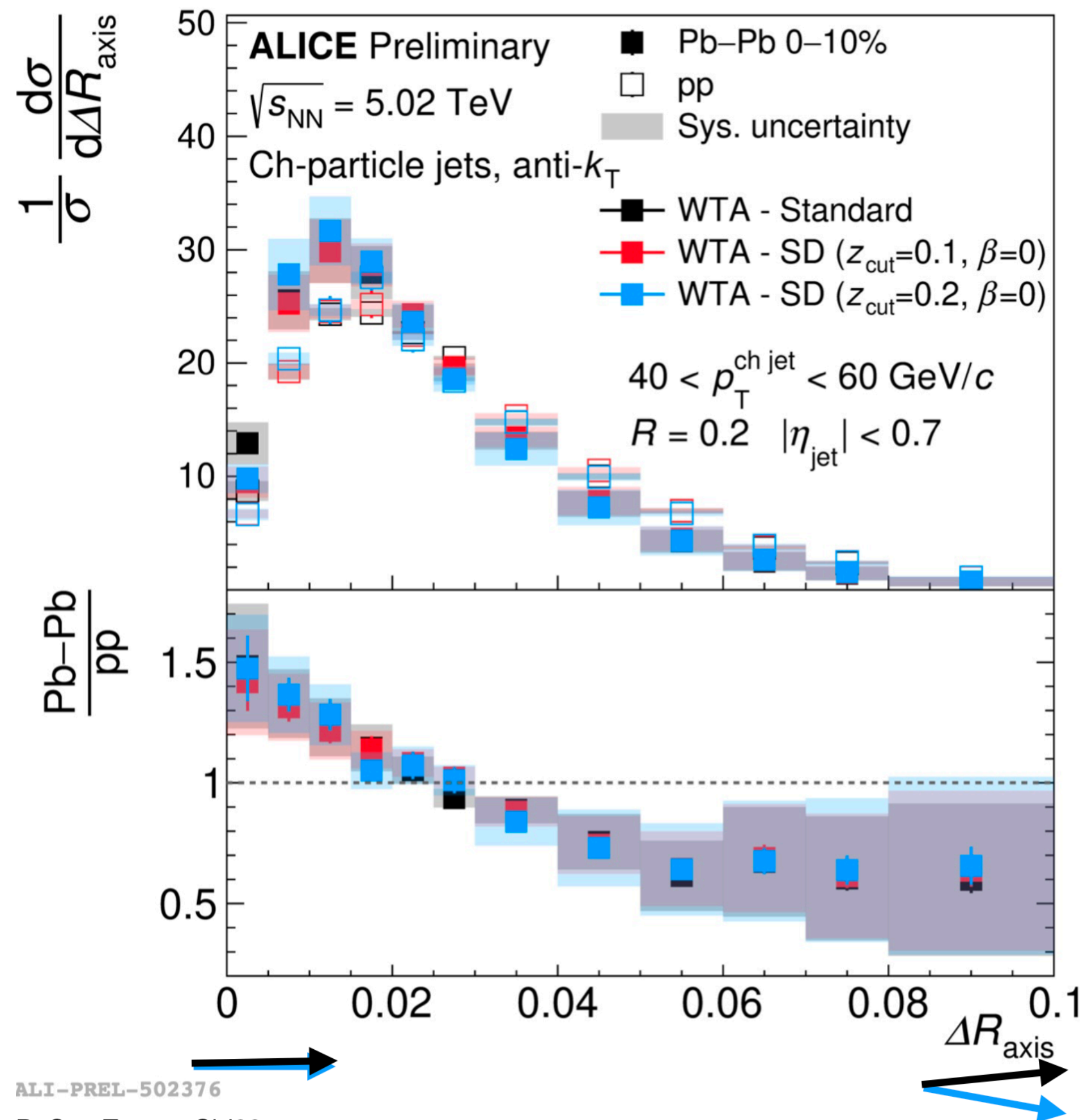
P. Cal et al., JHEP 04 (2020) 211

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

# 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]



- 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

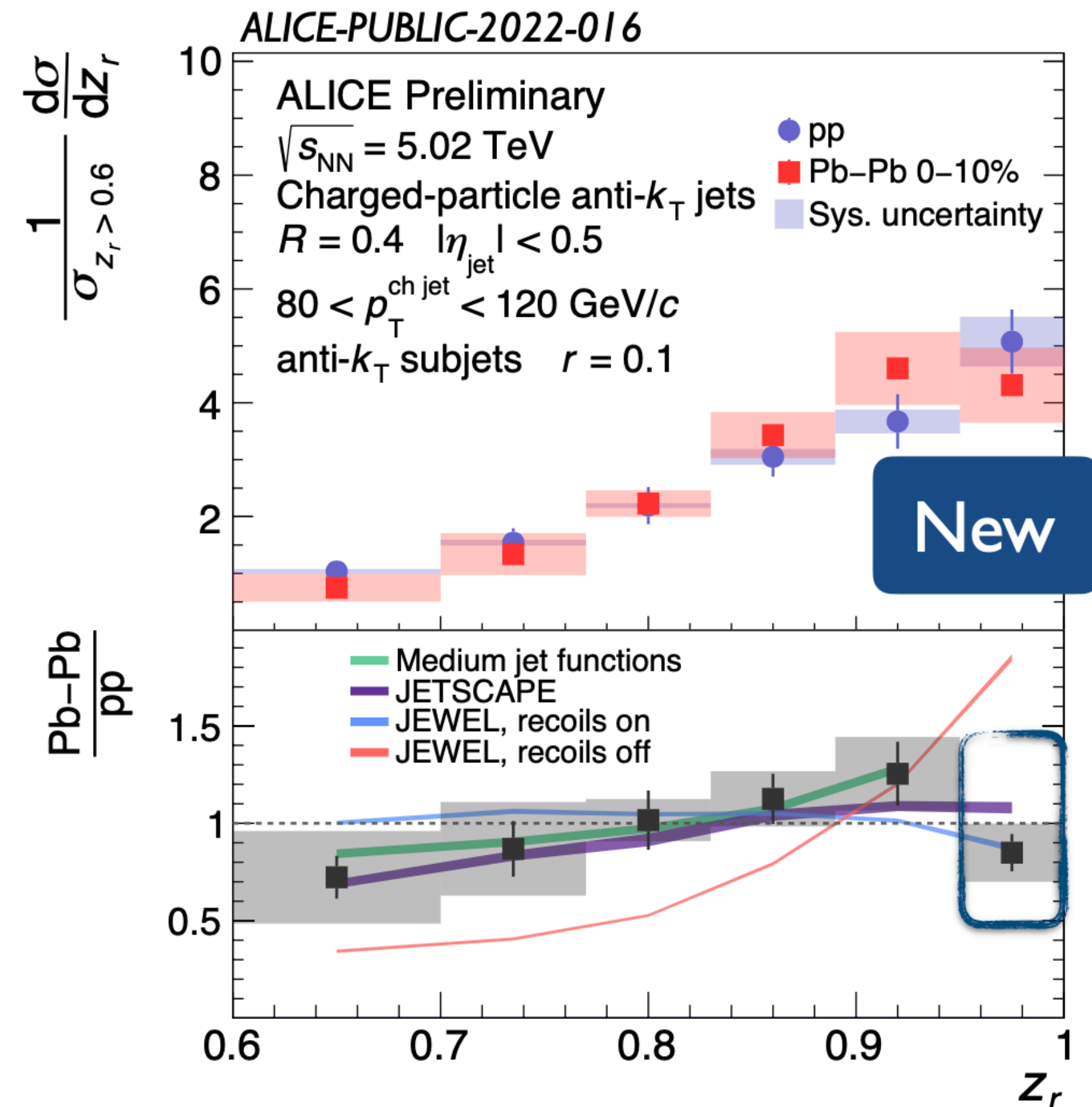
ALI-PREL-502376  
 R. Cruz-Torres - QM22

# ジェット内部構造

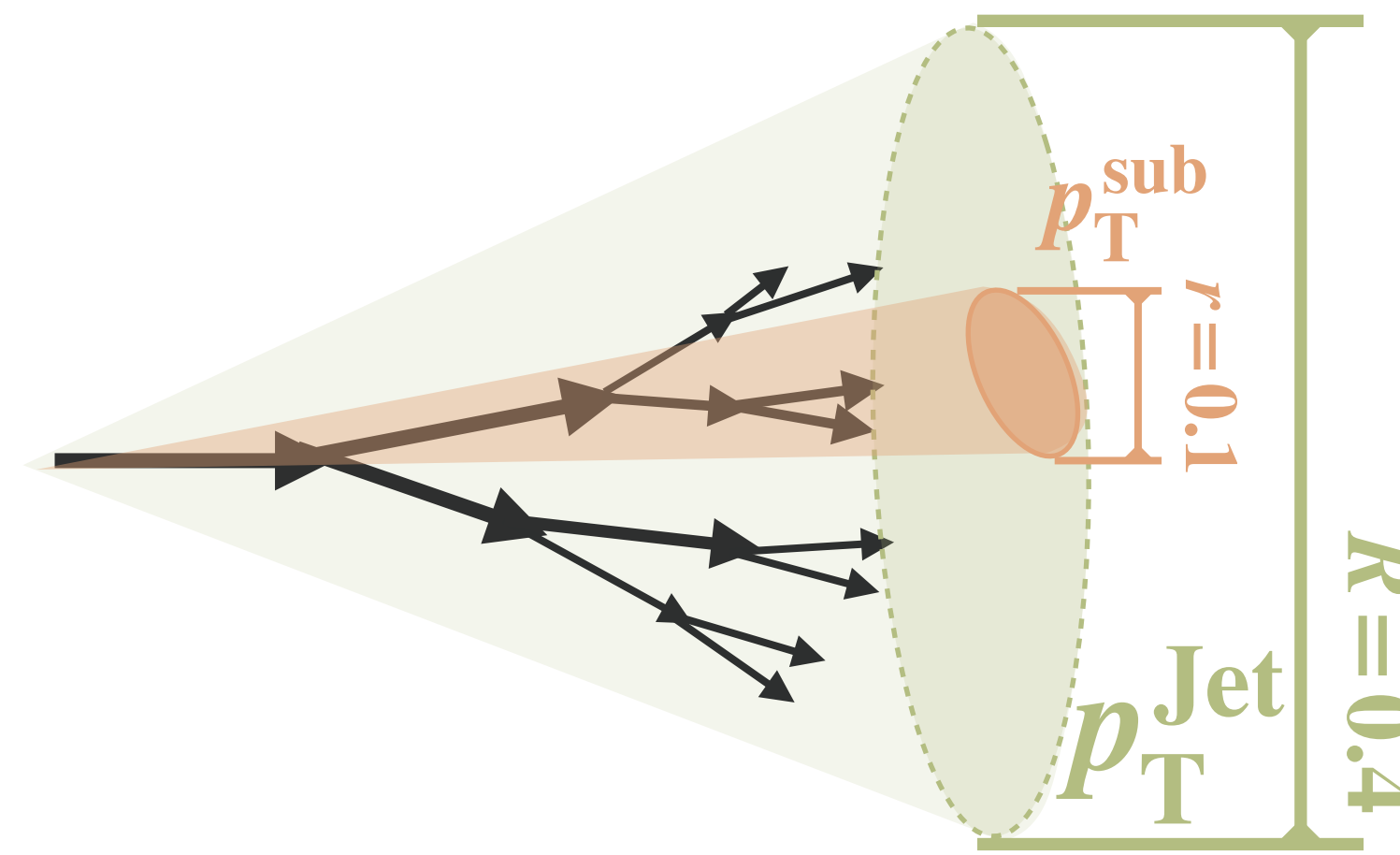
## ● サブジェットフラグメンテーション in PbPb@5.02 TeV

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- $z_r$  へシフト (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]

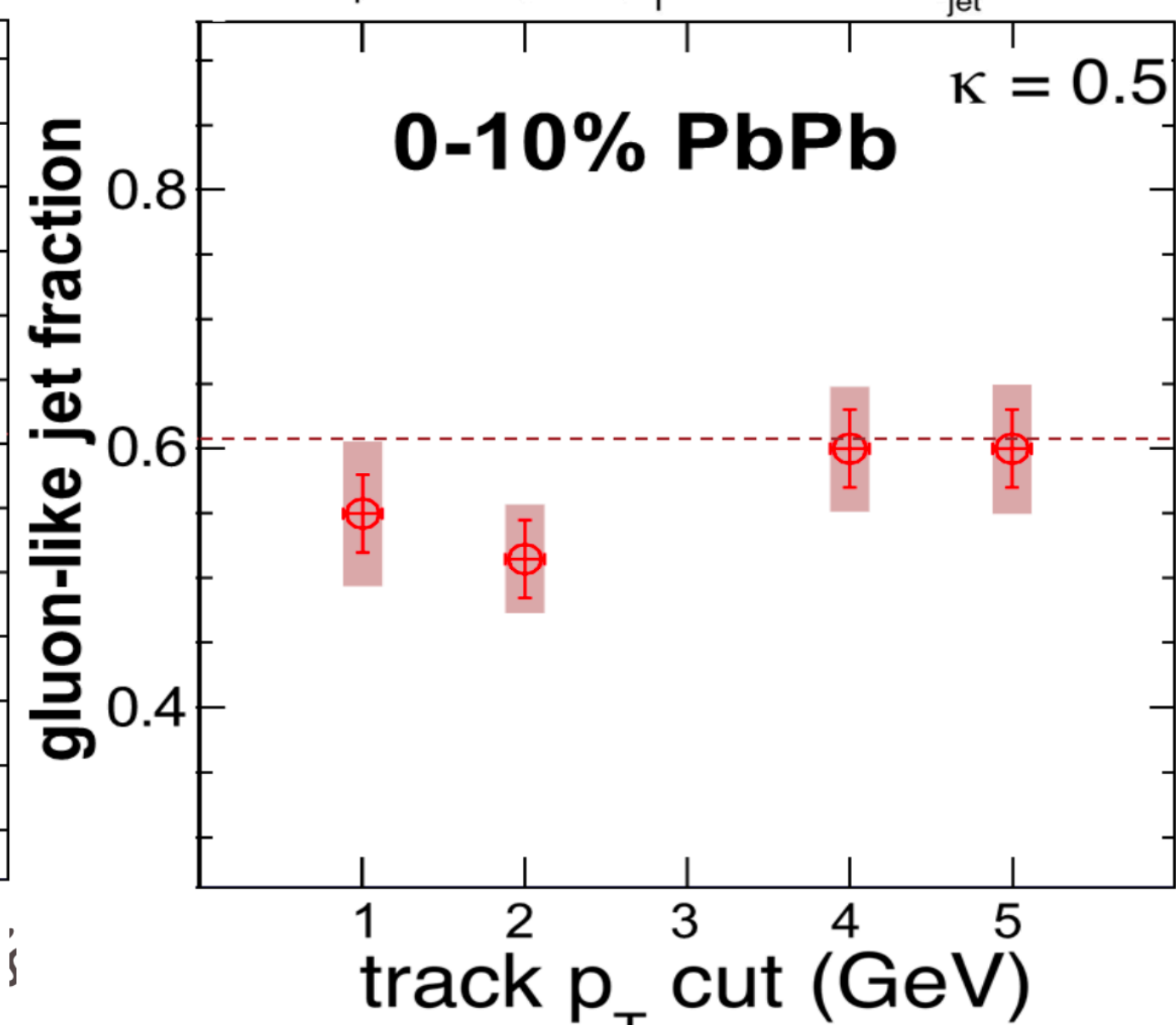
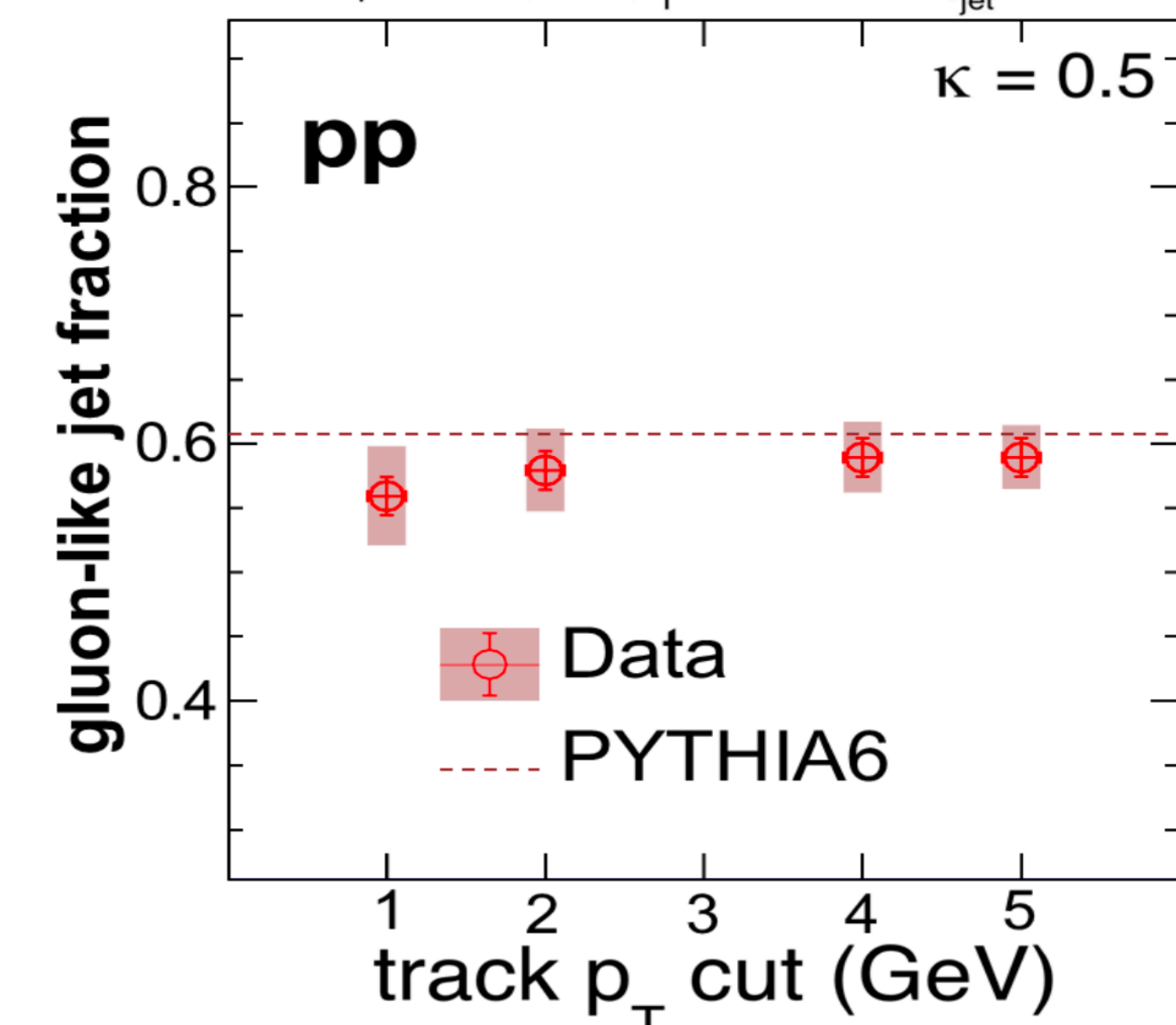
Jet Charge:

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

- $Q^\kappa$  は親パートンのフレーバーに敏感
- $Q^\kappa$  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<sup>-1</sup> (5.02 TeV)  
anti- $k_T$  R=0.4 jets,  $p_T > 120$  GeV,  $|\eta_{\text{jet}}| < 1.5$

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



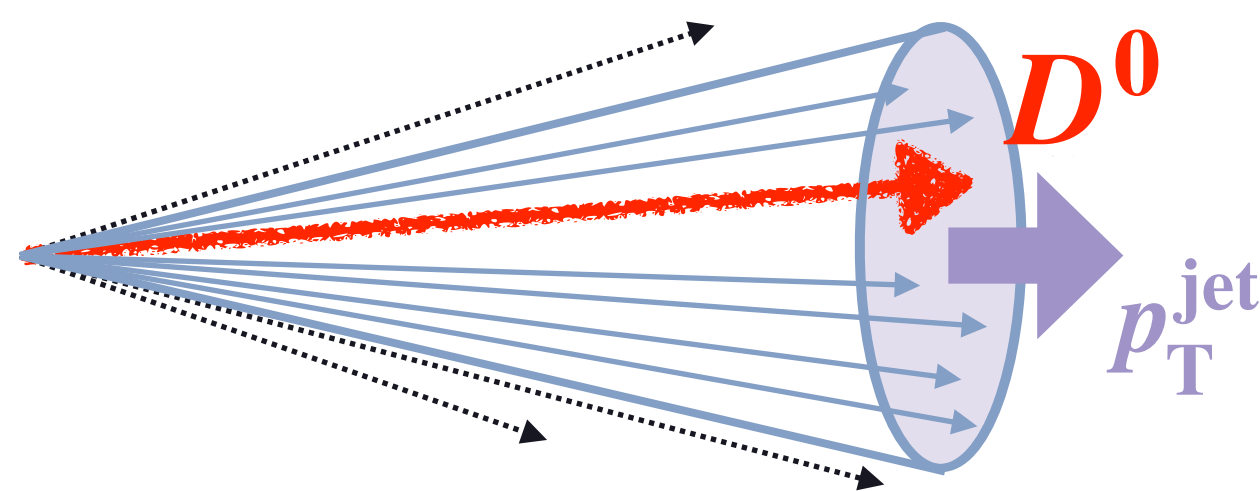
- 媒質効果は見られず
- 分岐ナローイングと反する？  
(グルーオンジェットが減るはず)

# 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



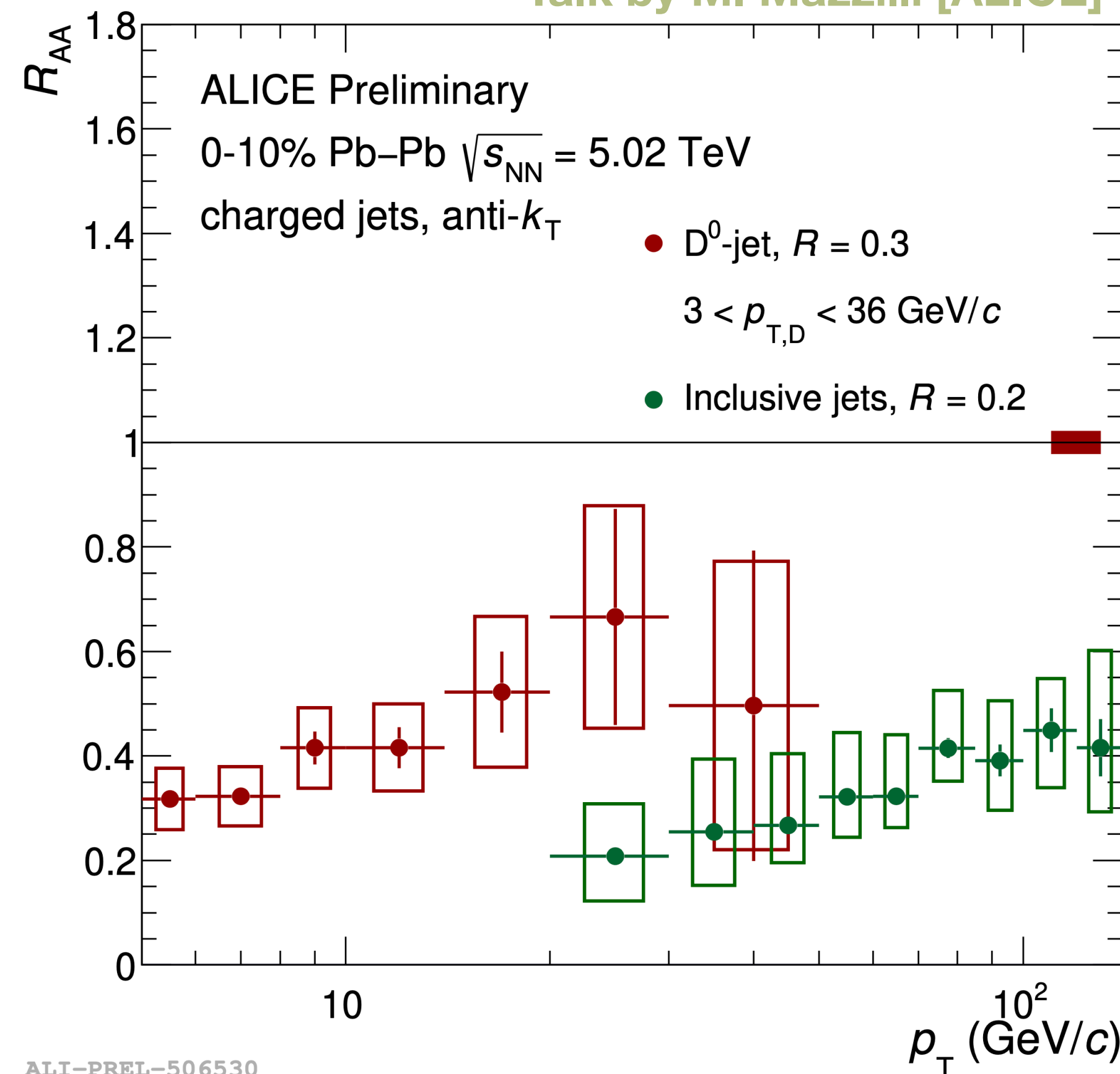
- Inclusiveよりエネルギー損失小

- 媒質の拡散効果→より大角度に

### 荷電\* $D^0$ -ジェット $R_{AA}$

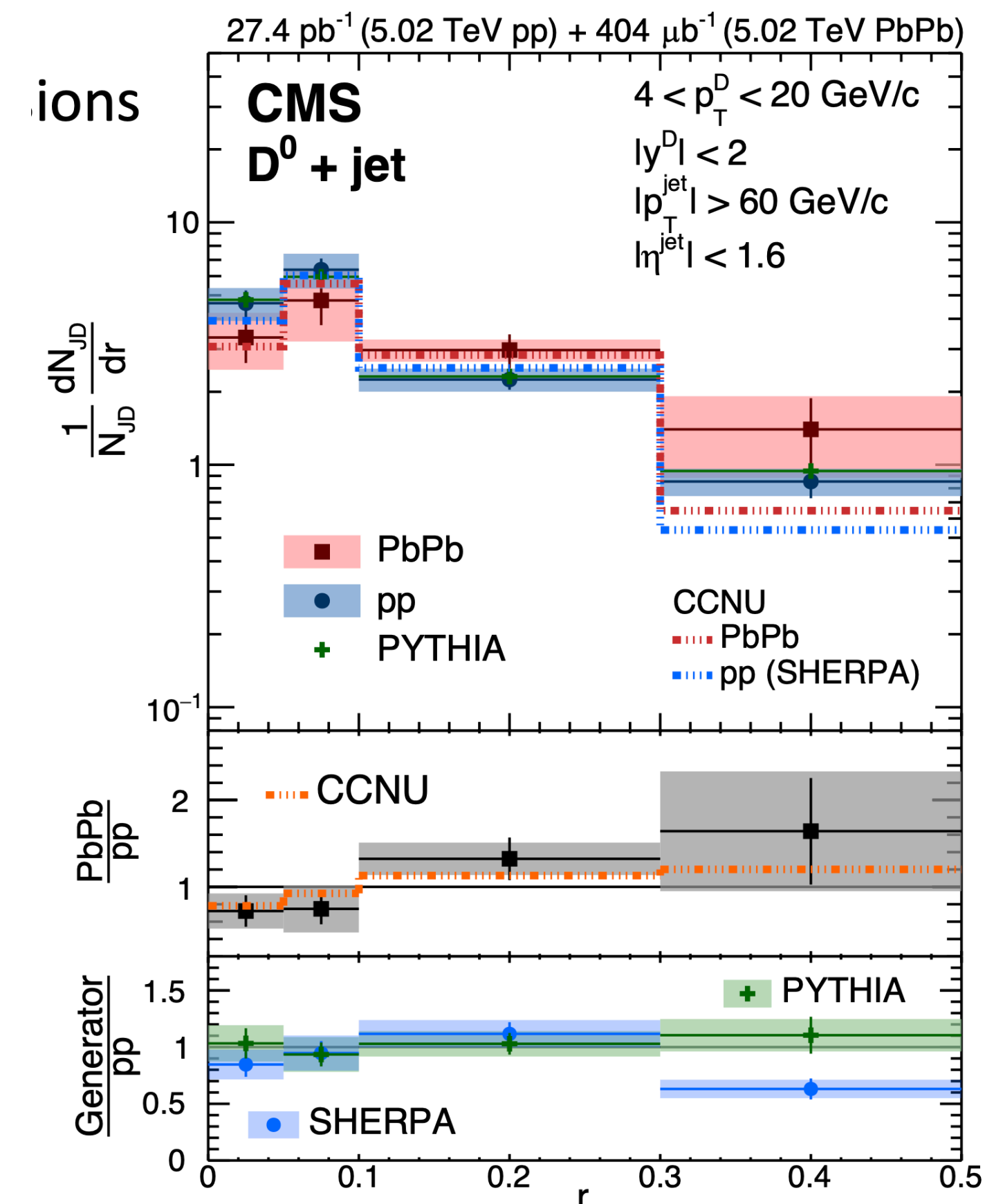
\* $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$  でジェット構築

Talk by M. Mazzilli [ALICE]



### ジェット内 $D^0$ のr分布

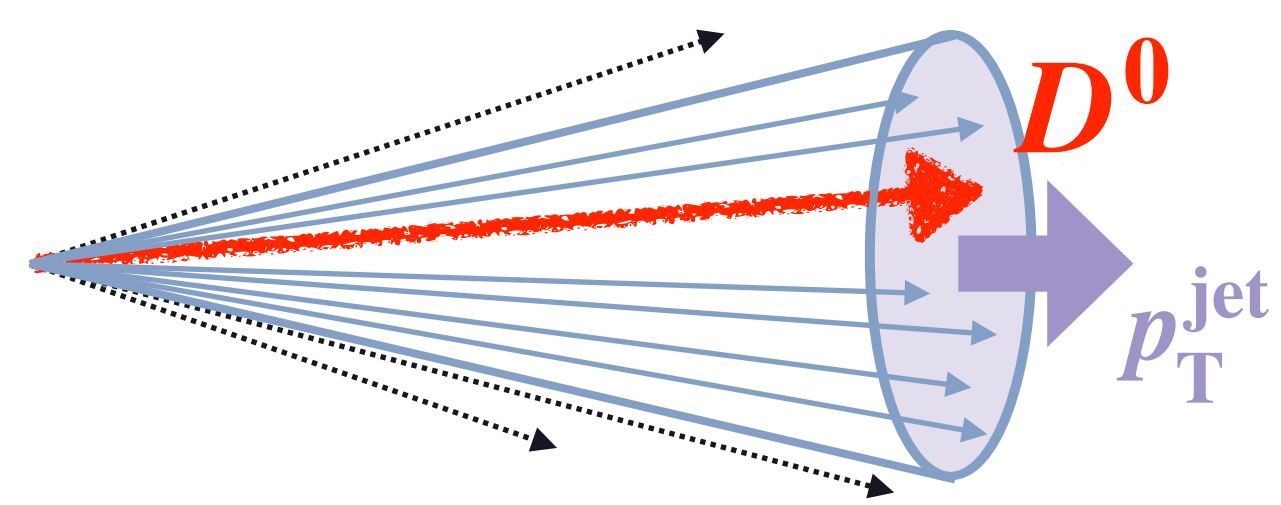
Talk by M. Stojanovic [CMS]



# チャームを含むジェット

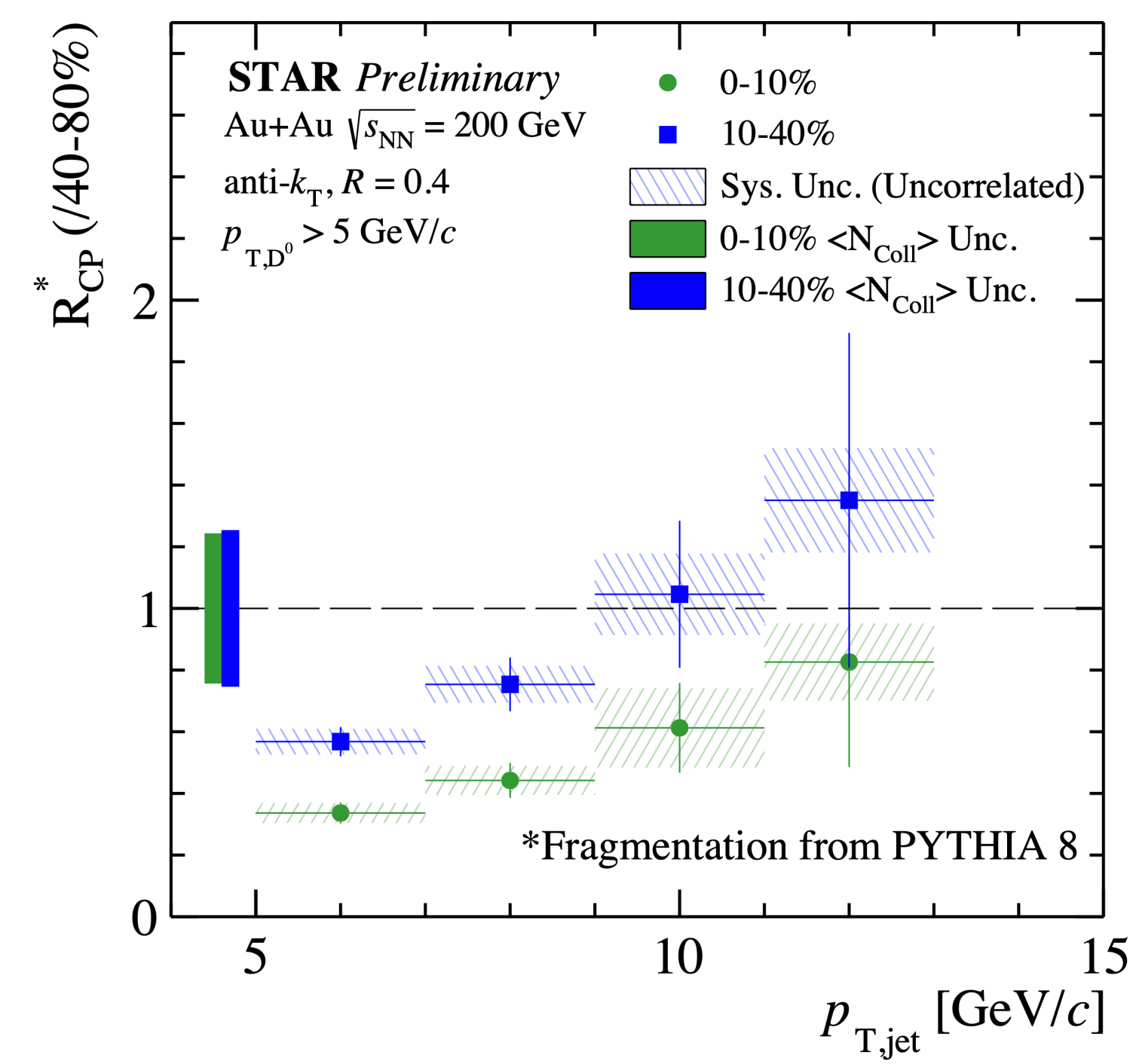
●  $D^0$ -ジェット in AuAu@200 GeV Talk by D. Roy [STAR]

-  $D^0$  (の崩壊 $K^+\pi^-$ ) 入りジェット

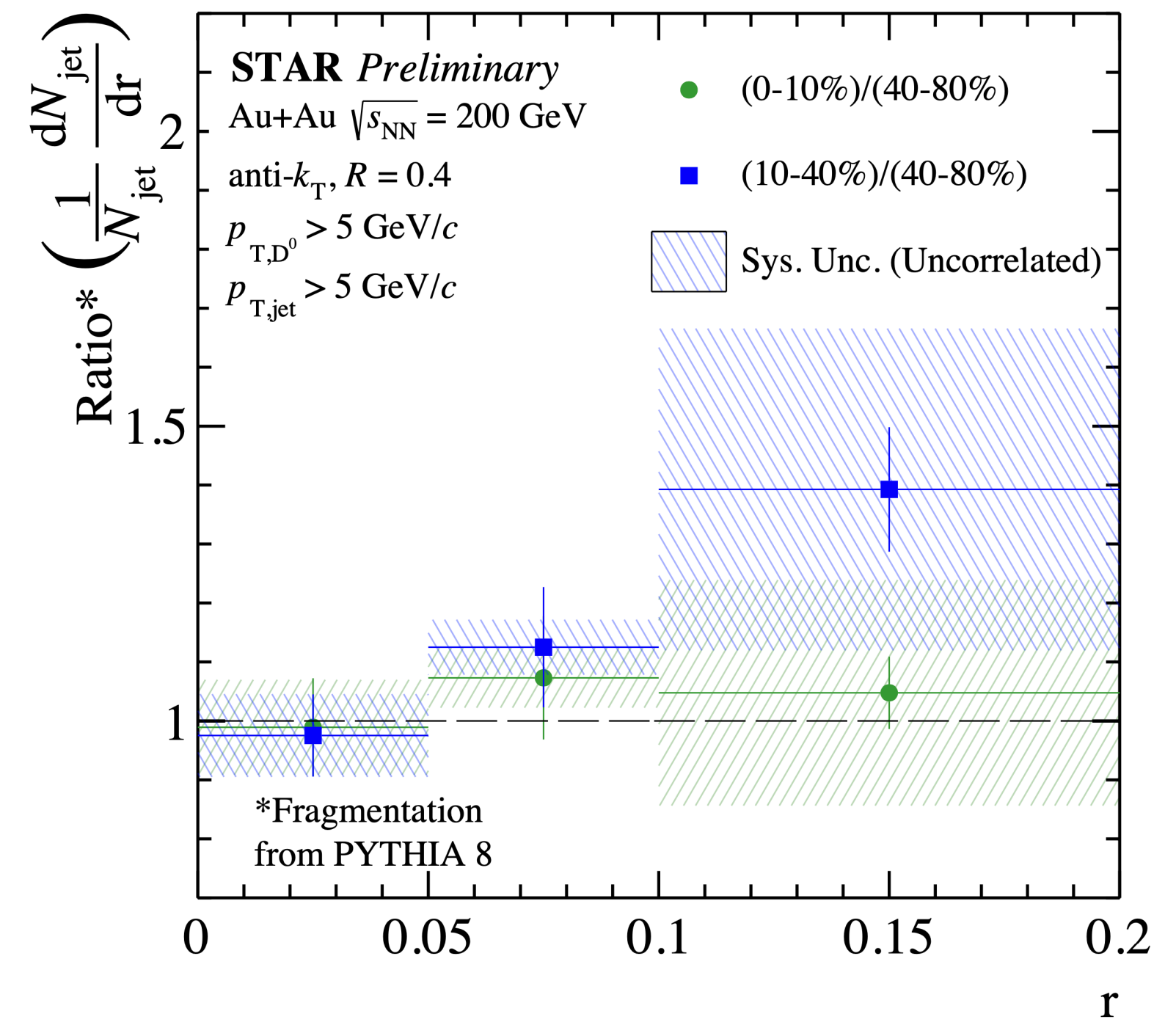


- CMSと同様のジェット内部分布変化

(フル)  $D^0$ -ジェット  $R_{CP}$



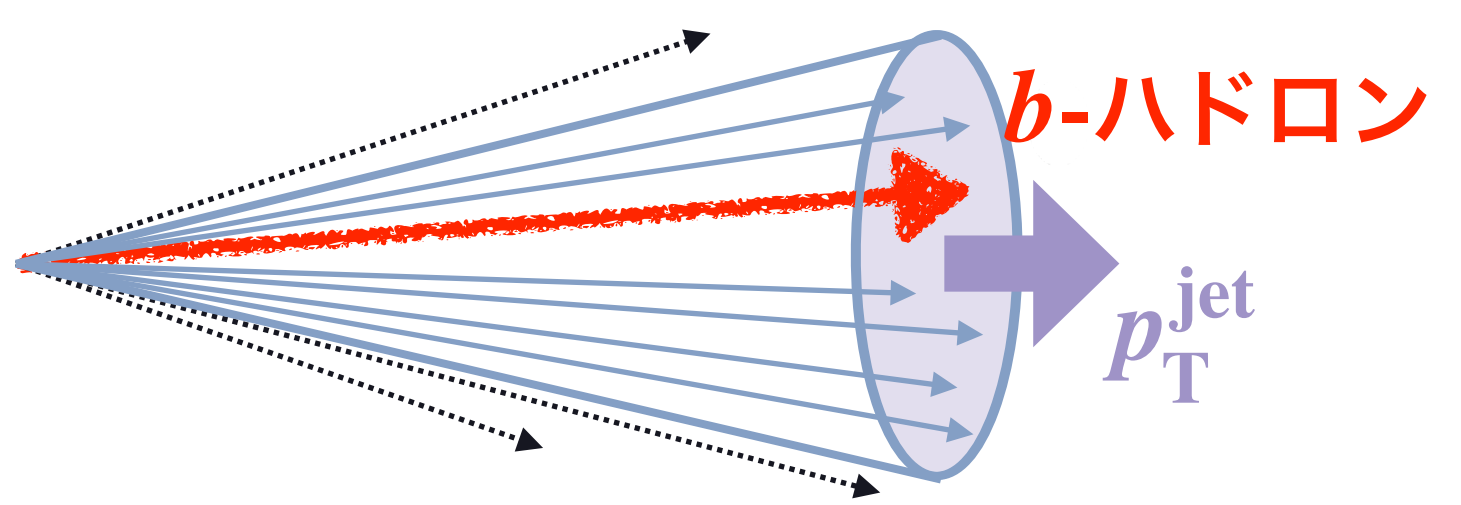
ジェット内 $D^0$ のr分布



# ボトムを含むジェット

## ● $b$ -ジェット in PbPb@5.02 TeV

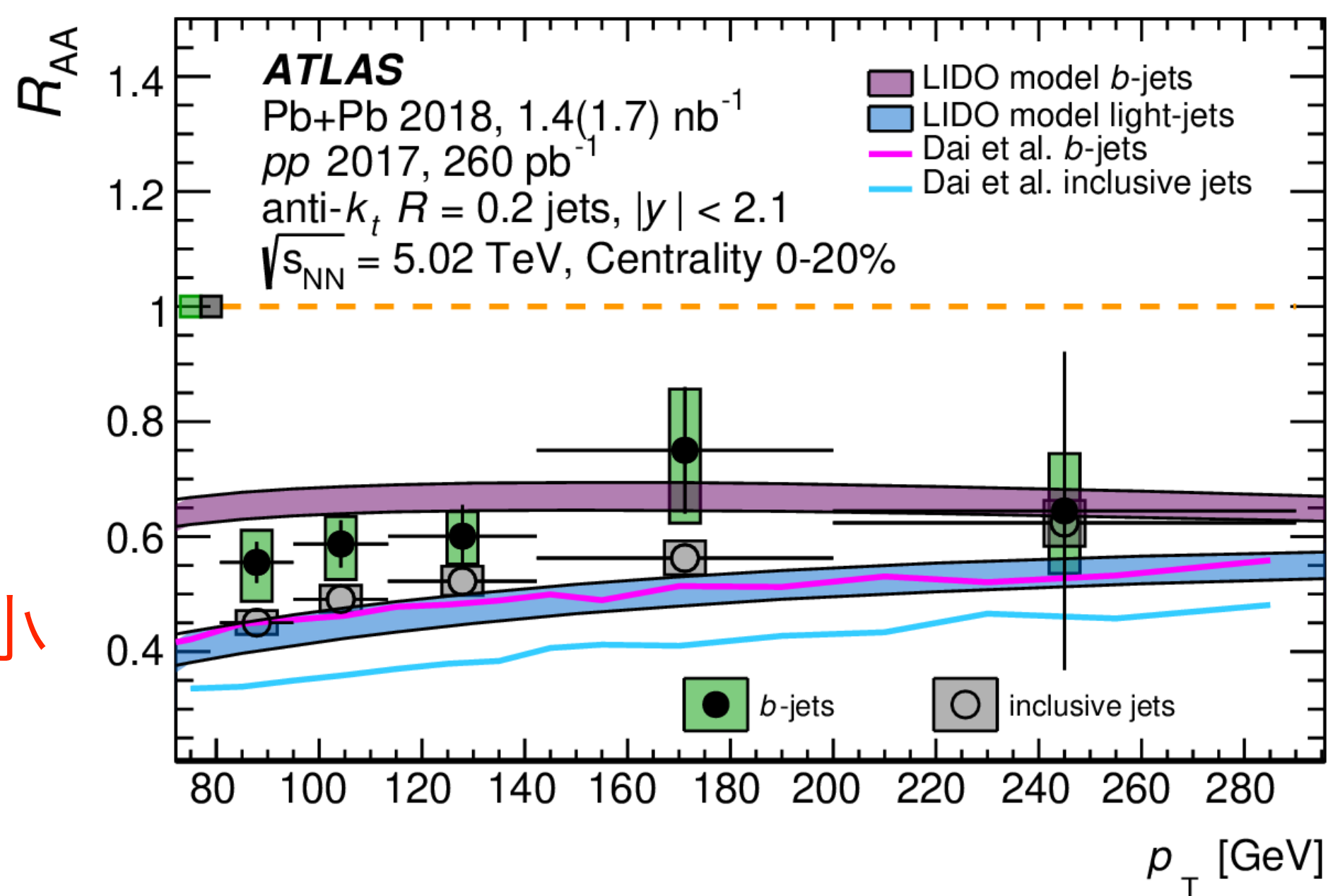
-  $b$ -ハドロン入りジェット



- Inclusiveよりエネルギー損失小
- 内部構造変化はより顕著

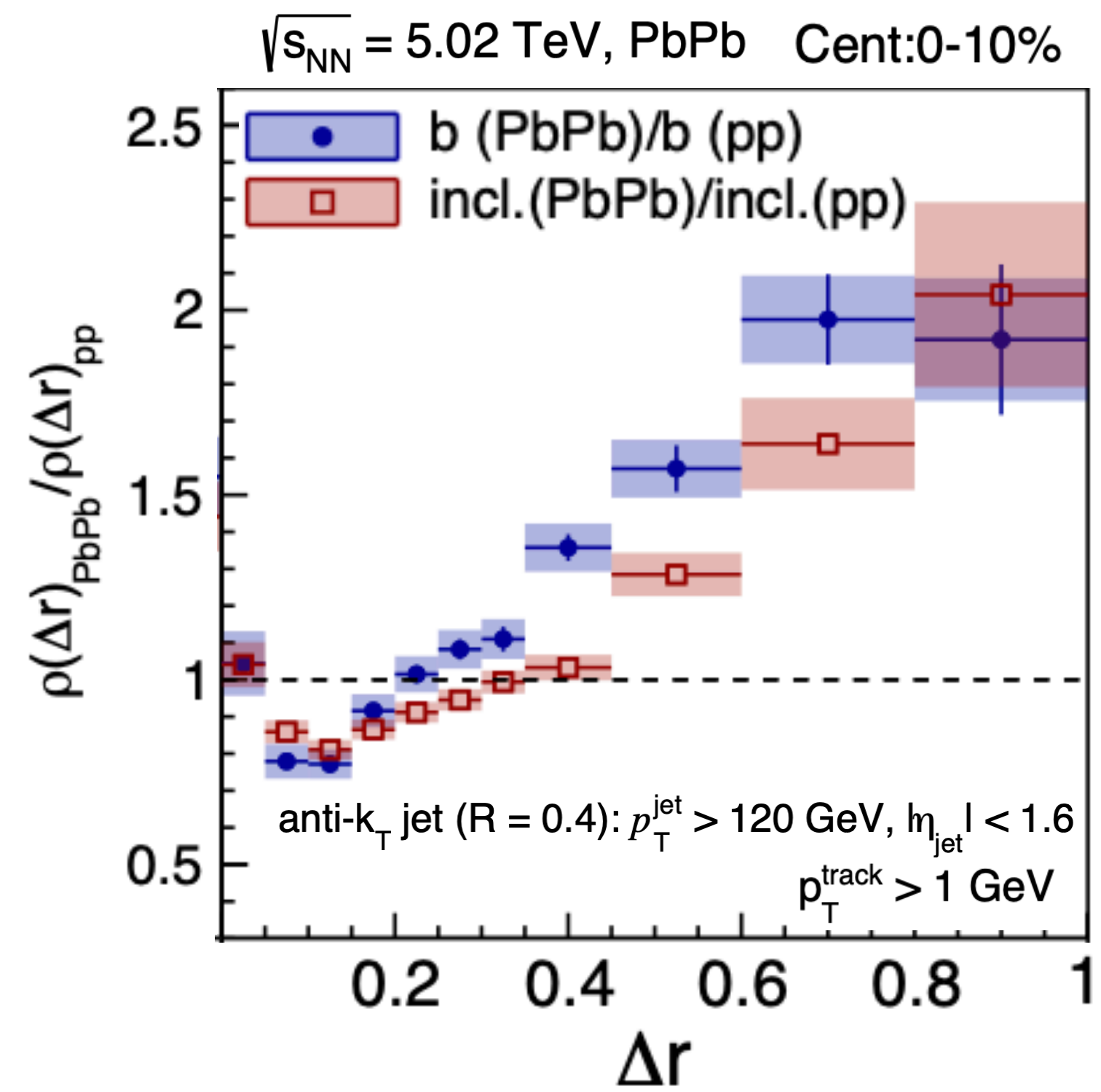
$b$ -ジェット  $R_{AA}$

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 ( $\gamma, Z, \pi^0$ ) 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)