光子・レプトン対・ハード測定

関畑 大貴 (東大CNS)

重イオン衝突の時空発展の理解に向けた理論・実験合同研究会

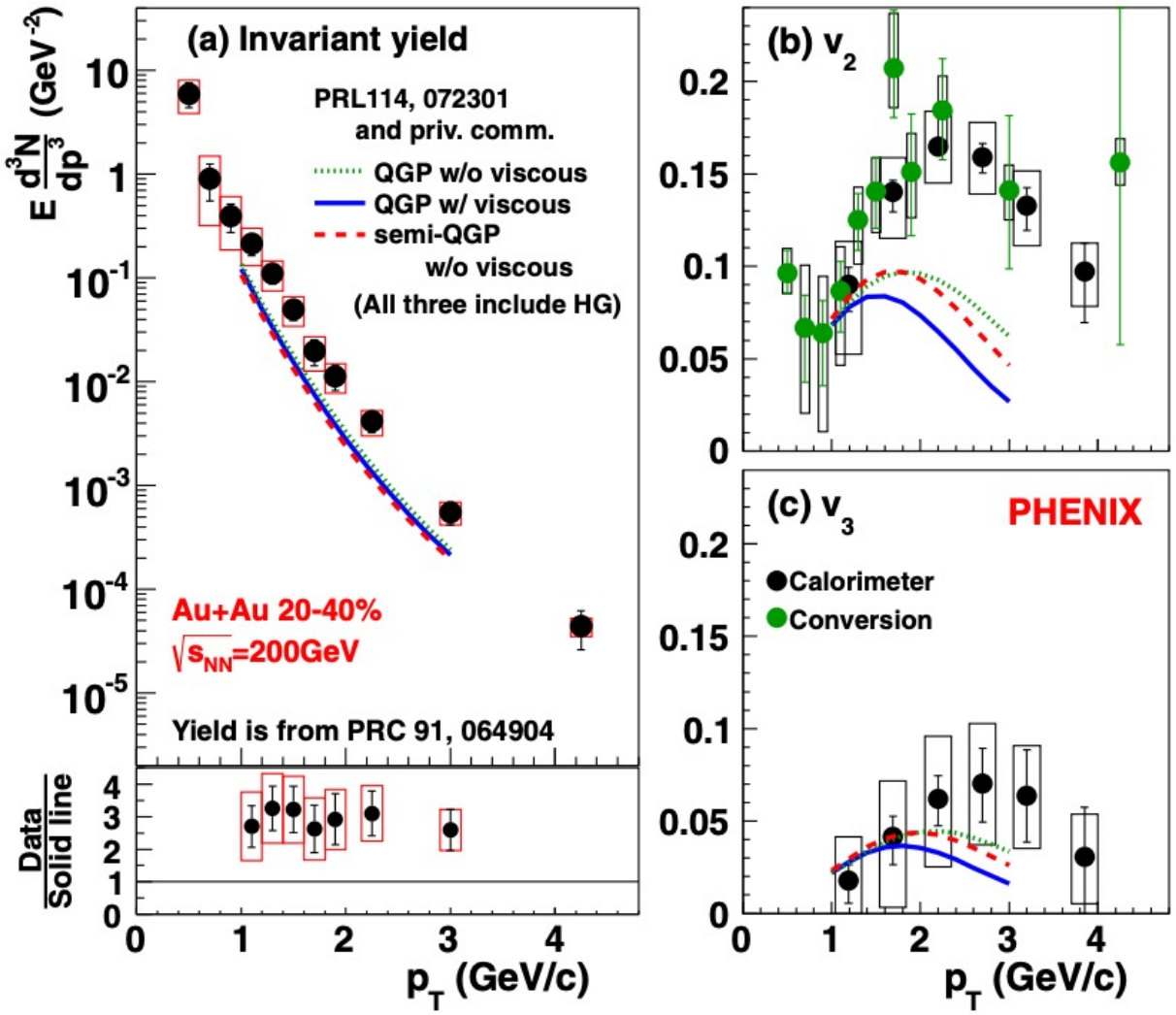
2021年9月24日

目次

- 光子・レプトン対
  - 熱光子パズル
  - 熱的レプトン対 (NA60 and HADESより)
- ジェット
  - 抑制
  - フレーバー選択(dead cone effect for charm jets)
  - 形状
- 重クォーク・クォーコニア
  - Λ_c/D 比
  - X(3872) : hadronic molecular or tetra quark state ?

Photon and dilepton

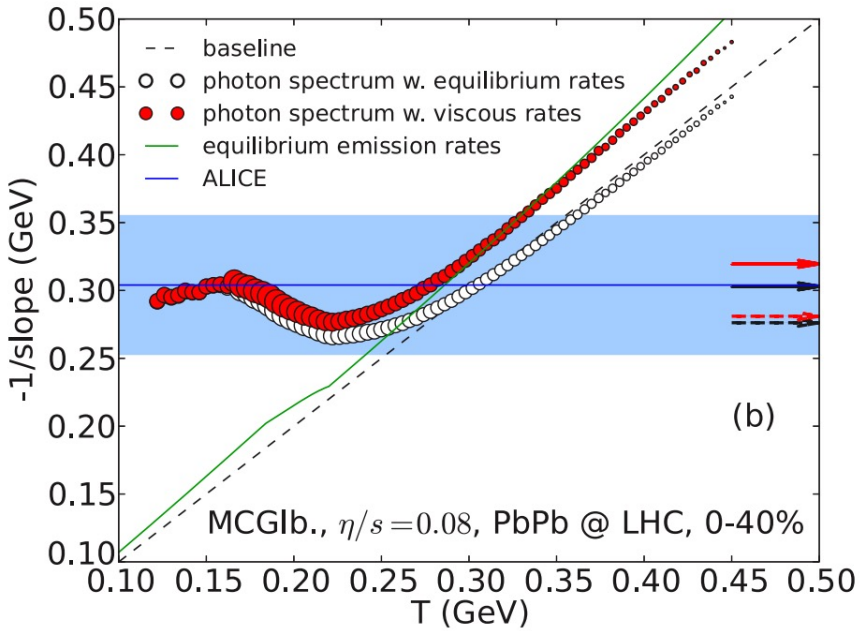
direct photon puzzle



Phys. Rev. C 94, 064901

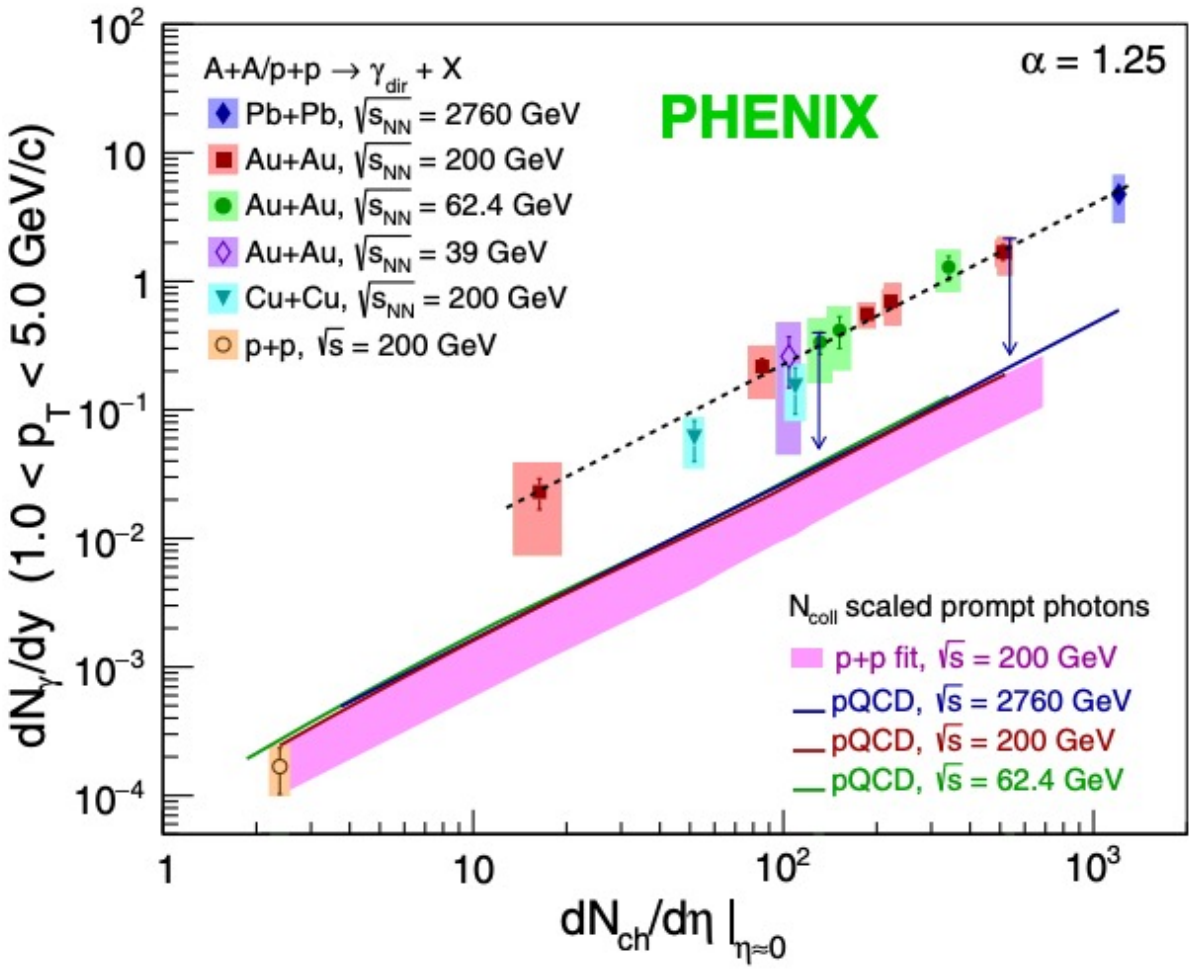
- 矛盾する２つの測定量
  - 大きな生成量：初期高温状態からの熱輻射
  - 大きなv_2：冷えたハドロンガスからの熱輻射

  (LHC-ALICEでも誤差が大きいが類似の結果)
- 最近では、膨張速度が大きなハドロンガスからの熱輻射光子が青方偏移したと考えられている



Phys. Rev. C 89, 044910

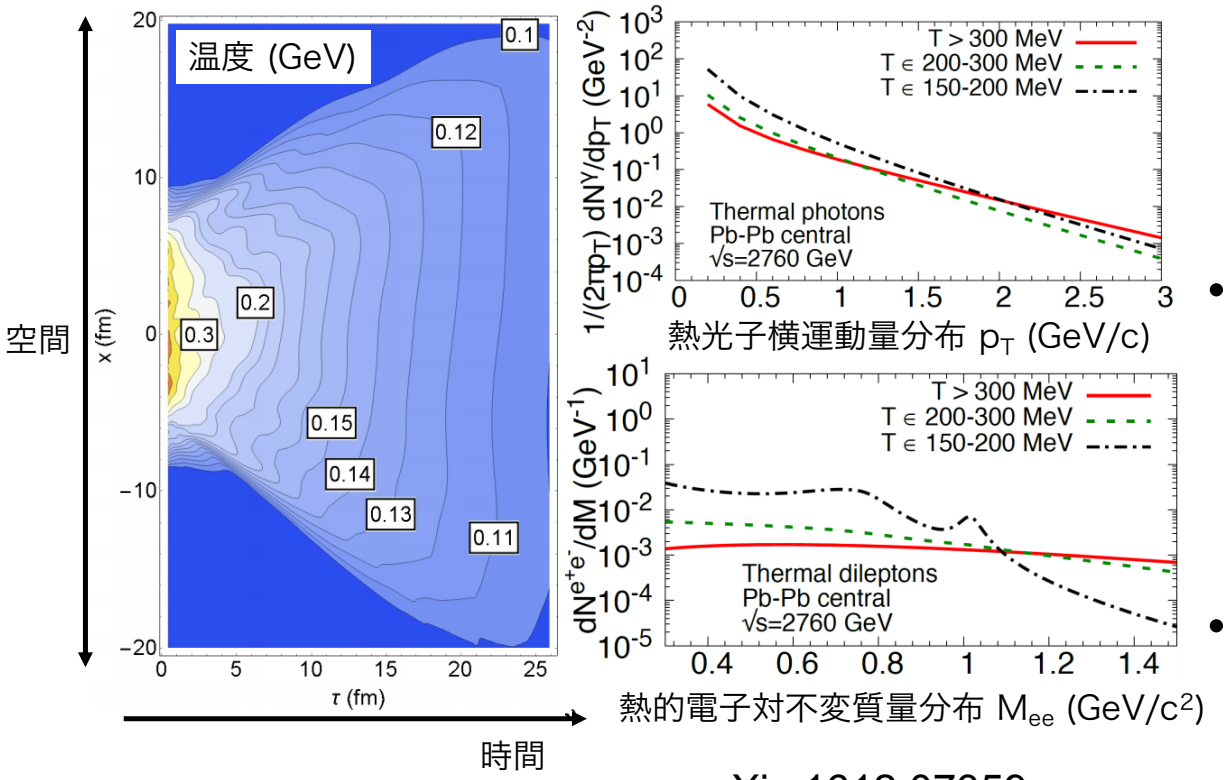
Scaling of direct photons



Phys. Rev. Lett. 123, 022301

- 矛盾する２つの測定量
  - 大きな生成量：初期高温状態からの熱輻射
  - 大きなv_2：冷えたハドロンガスからの熱輻射
- 最近では、膨張速度が大きなハドロンガスからの熱輻射光子が青方偏移したと考えられている。
- 直接光子生成量は、粒子多重度のべき乗に比例する。
  - $dN_\gamma/dy \propto (dN_{ch}/d\eta)^{1.25}$
  - この結果も熱輻射光子起源が、初期高温状態によらず、反応後期の冷えた段階からが支配的であることを示唆している。
- これらを逆手に取って、ハドロン化の際に光子放出を伴う再結合模型への構築

New probe : thermal dileptons



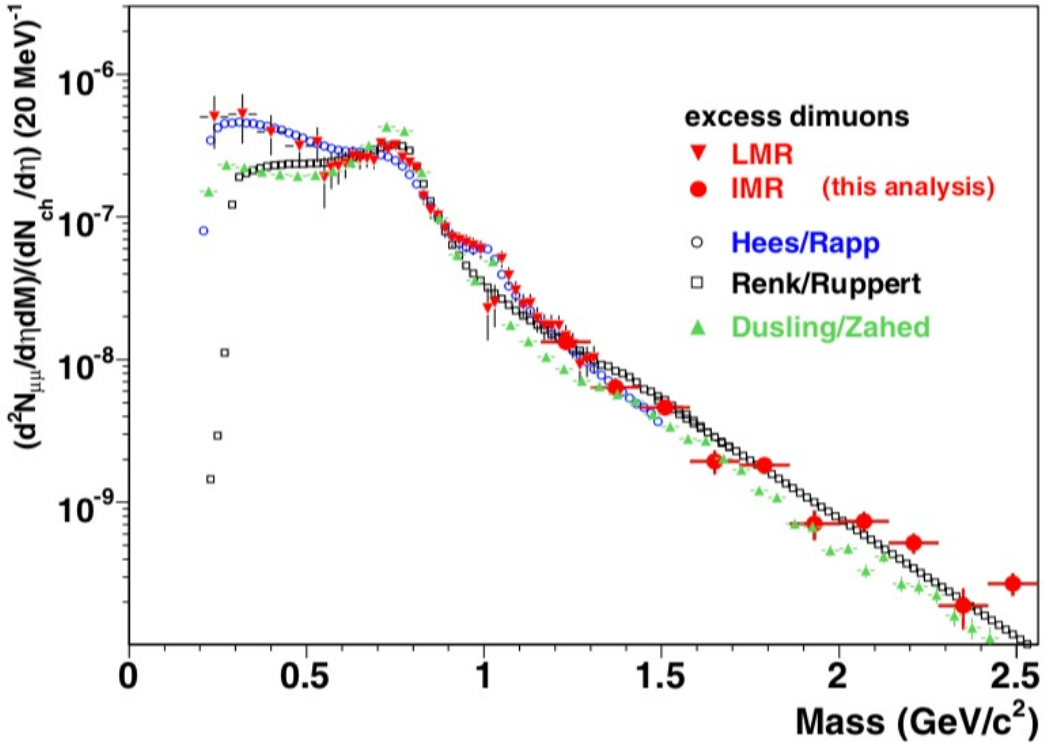
arXiv:1612.07359

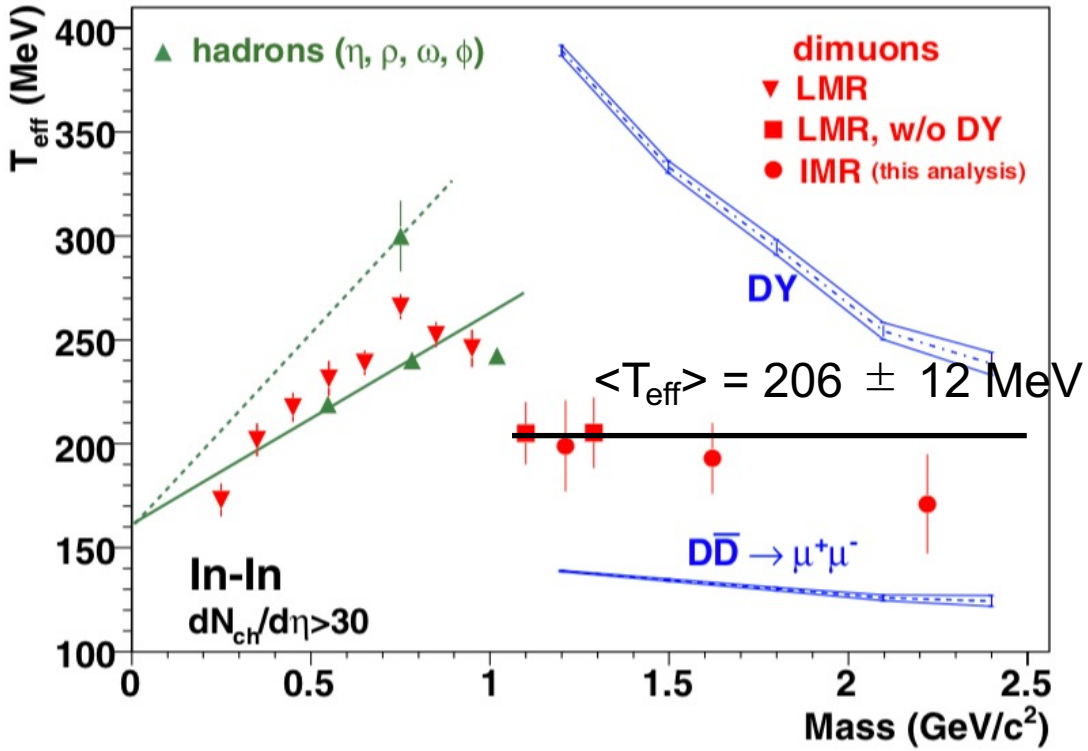
- 熱光子
  - 実は、熱光子の運動量分布は青方偏移して、高温状態、ハドロン相近傍の区別がつかない
  - 熱光子パズル (大きな収量、大きなv_2)
- 新たなチャンネル：熱的電子対
  - GeV/c^2領域の電子対からQGP相の高温状態に到達する。
- 一方で、ハドロン化に伴う光子生成
  - 電磁プラズマの中性化に伴う光子生成と同様
  - クォーク再結合模型の改善
  - ハドロン相近傍の熱輻射が多いことを利用

NPA 967 (2017) pp.704-707

Thermal dileptons in NA60

Eur. Phys. J. C (2009) 61: 711-720
Eur. Phys. J. C (2009) 59: 607-623



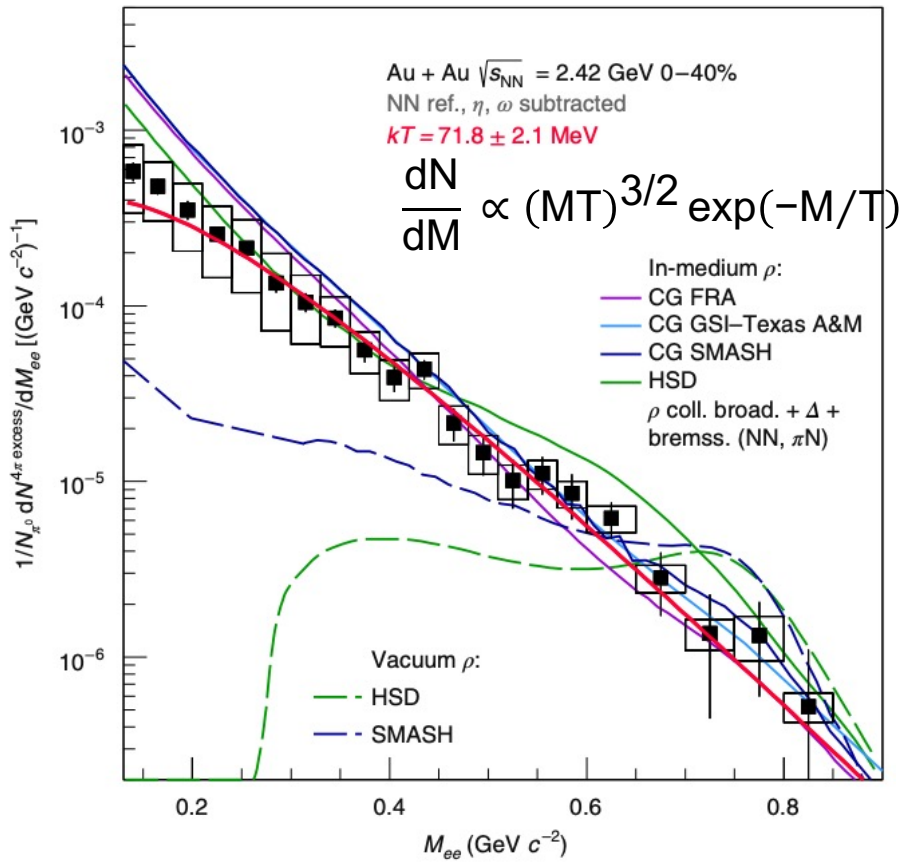


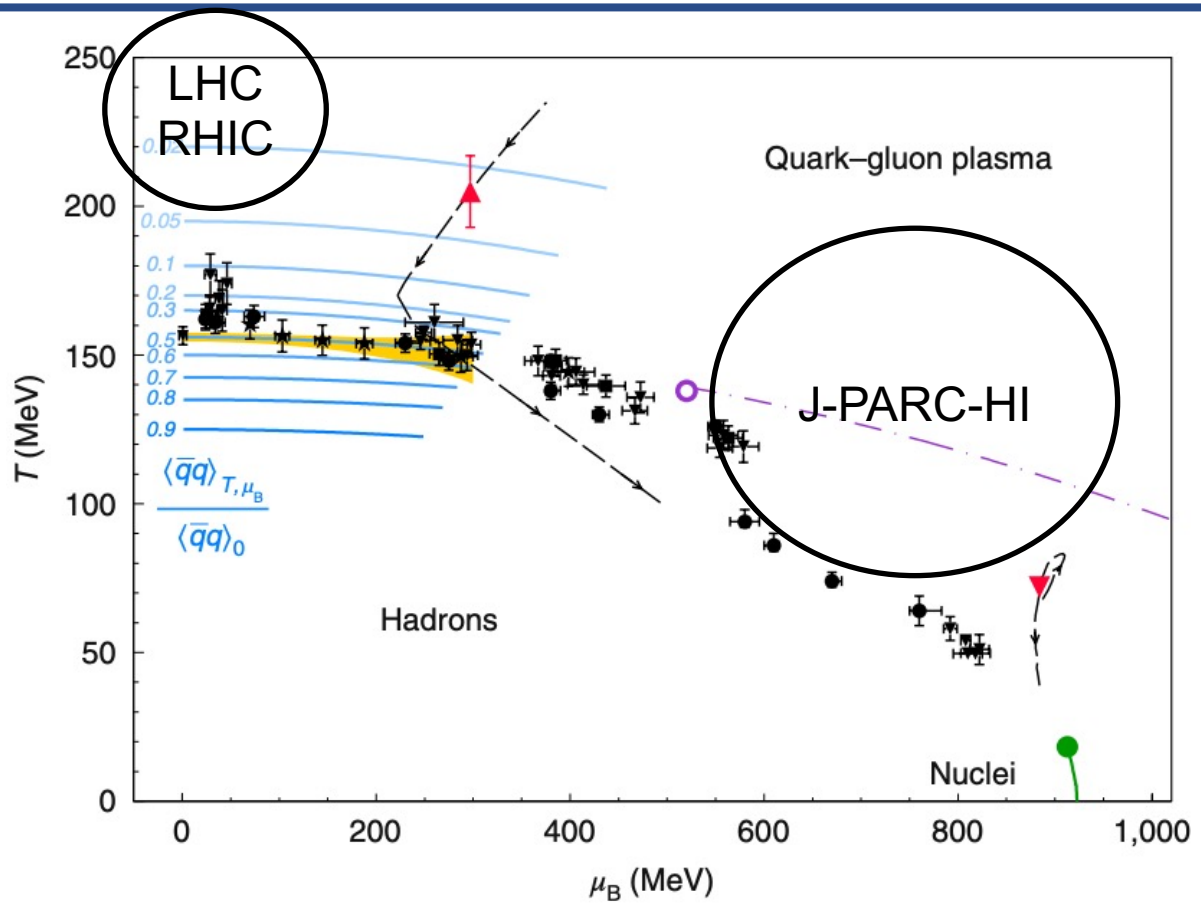
T_{eff} : m_T spectraの傾き $dN/dm_T \propto \exp(-m_T/T_{eff})$

- 熱輻射ミューオン対を初測定@SPS (チャームの生成が少ないことが利点)
- $M_{\mu\mu} > M_{\phi}$ の領域で、T_{eff}が一定
  - その生成起源が流速が発達する前の反応初期段階(partonic phase)であることを意味する

Thermal dileptons in HADES

Nature Phys. 15 (2019) 10, 1040-1045

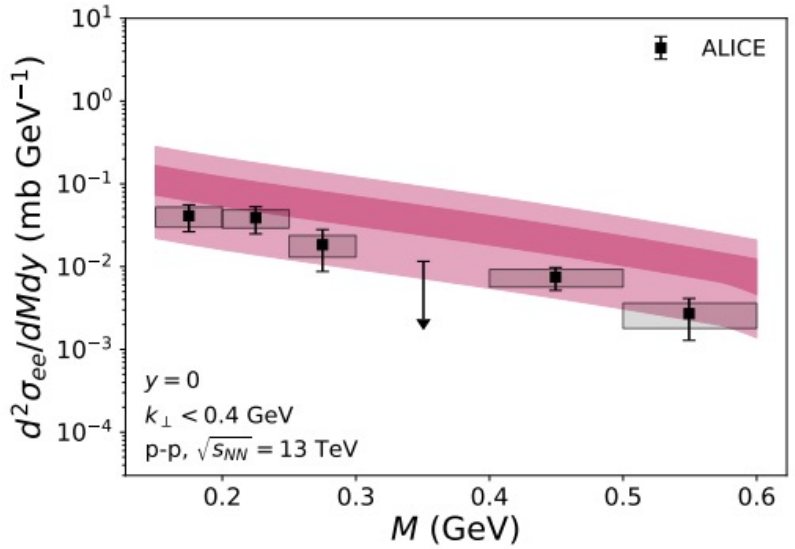


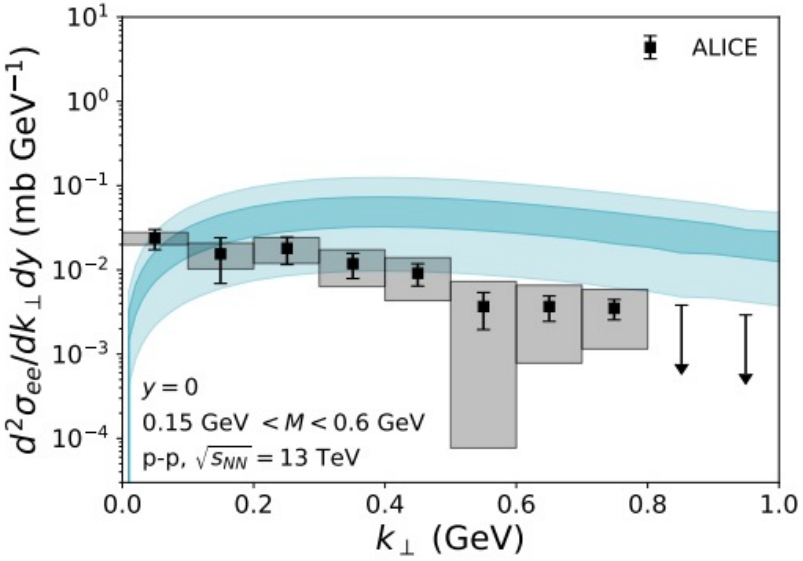


- Au+Au at $\sqrt{s_{NN}}$ = 2.42 GeV : T = 72 MeV
- LHC-Run3,4やJ-PARC-HIでの一番の醍醐味
  - たくさんの統計量が必要なことと、チャームハドロン除去が鍵

Low-$p_{T,ee}$ dielectron excess

Phys. Rev. Lett. 127, 042302 (2021)
arXiv:2104.07050

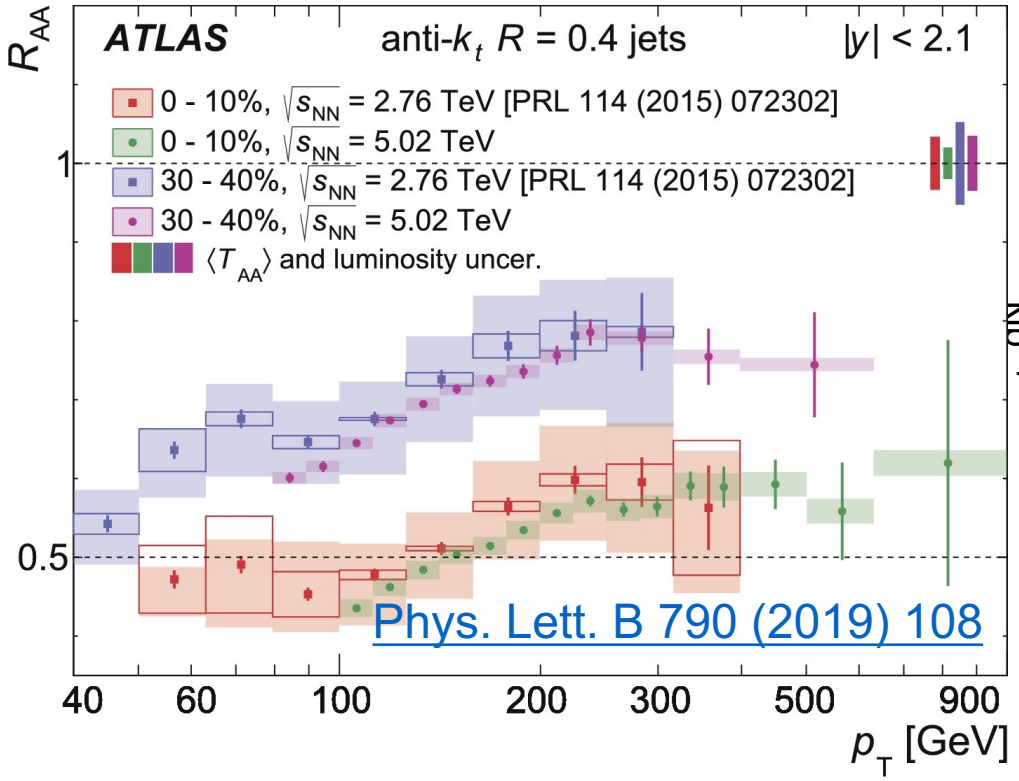


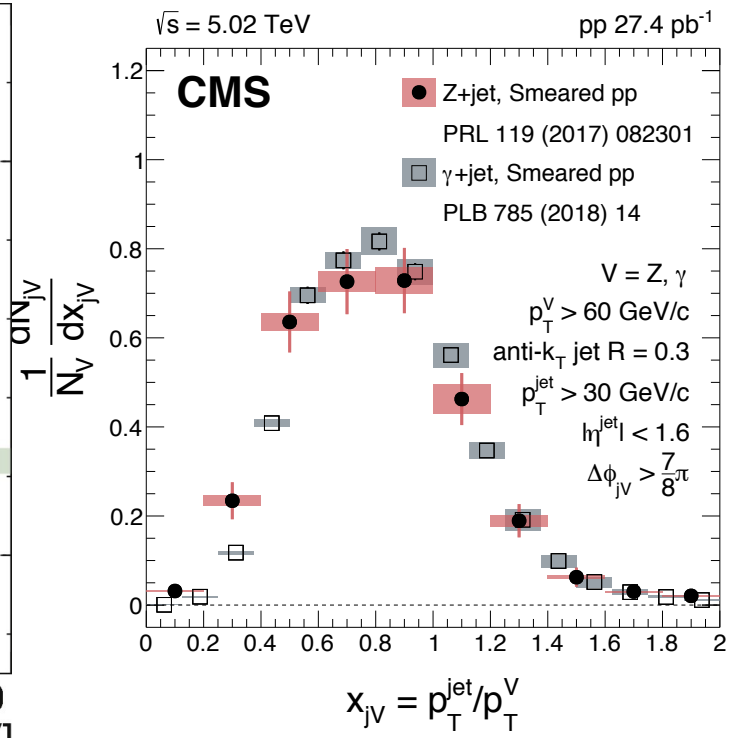


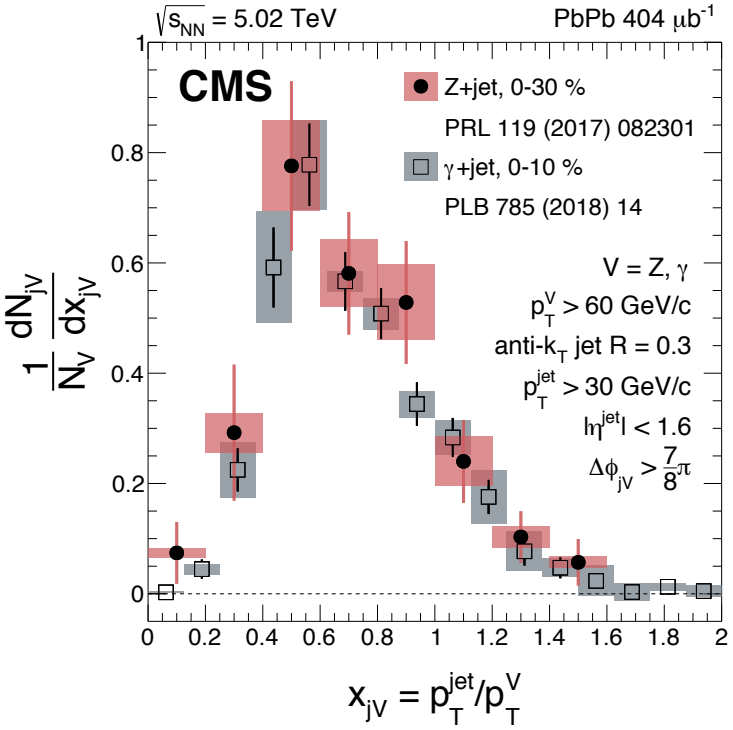
- CERN ISR AFSでの低横運動量電子対の増大
  - 30年以上経っても説明がついていない
  - 追実験もなかった
  - LEP-DELHIでの低エネルギー光子の増大
- ALICEの低地場データ(B = 0.2 T)
  - 新たな運動学領域を開拓
  - $p_{T,ee}$ < 0.4 GeV/cの電子対の増大を観測
- グルーオン飽和からのグルーオン融合(gg→qq̄)で再現可能
  - 一時的にメソンのような状態を作り、レプトン対に対消滅する

Jet

Jet quenching

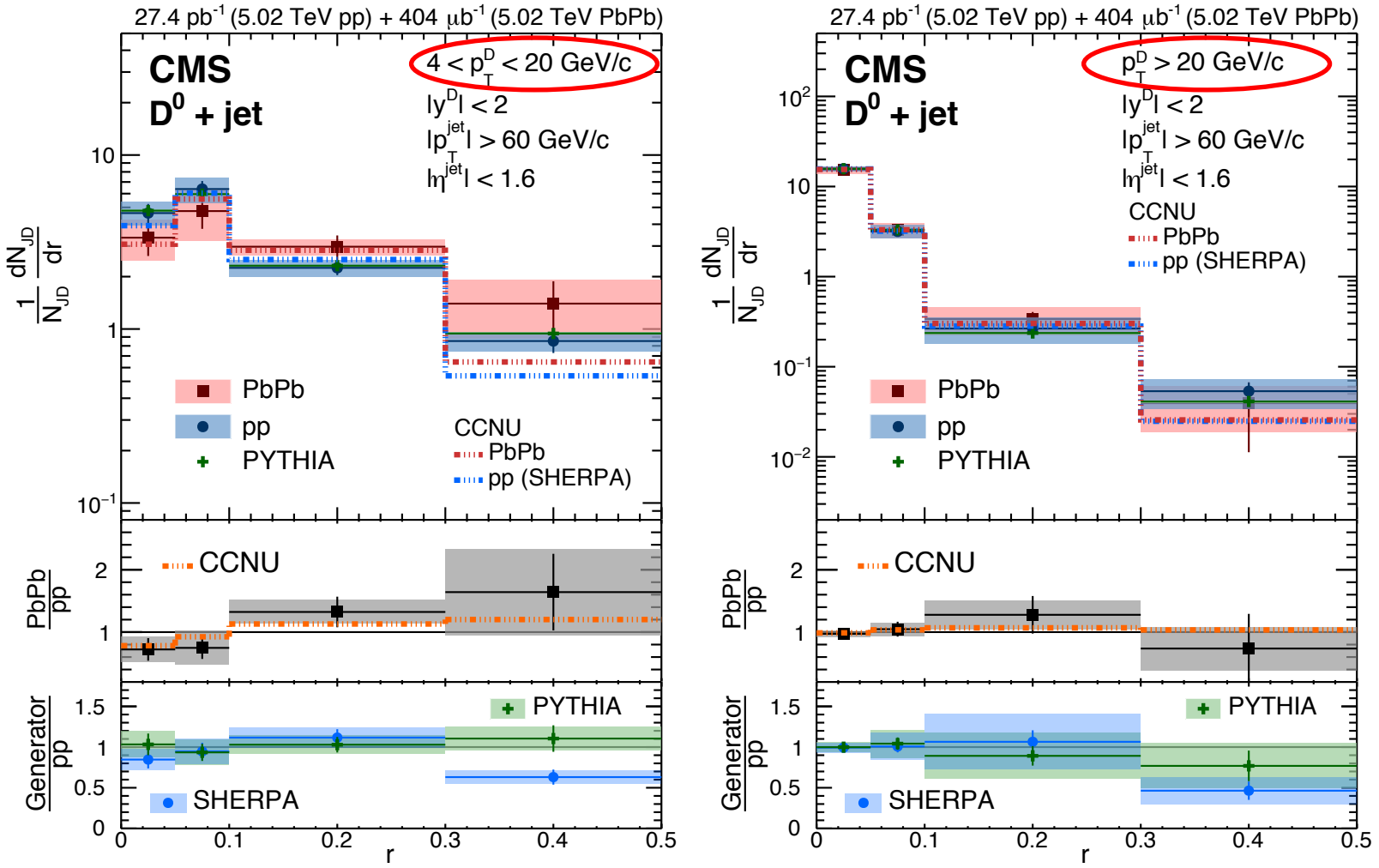






- p_T~1 TeVまでのジェット抑制を観測
  - R_{AA}だけでなく、エネルギー損失しない電弱ボソンとの相関
- 流行りはその内部構造へと移った。

Charm quark diffusion with D-tagged jets



横軸：ジェット軸とD mesonの距離

- Pb-Pbとpp衝突を比較すると、ジェット中の低横運動量D中間子は、ジェット軸から離れたところに分布

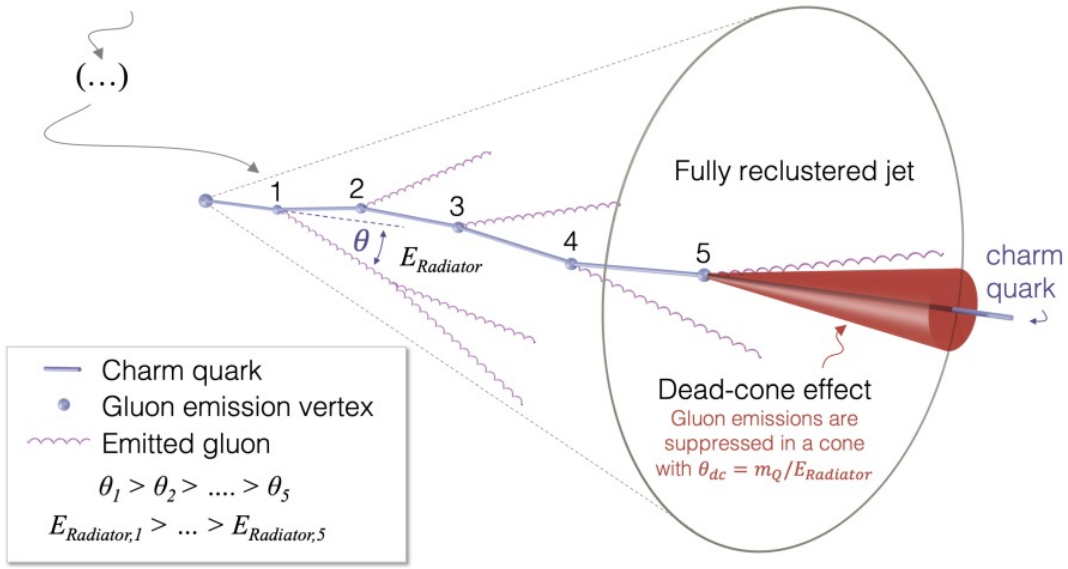
rが大きいところでPbPb/pp比が増加

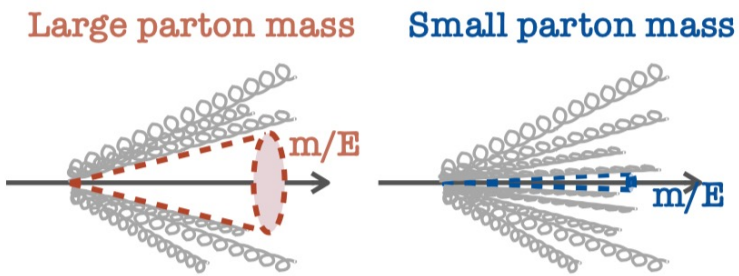
- 高横運動量では変化なし
- QGP中でのチャームクォークの拡散

[Phy. Rev. Lett. 125 (2020) 102001]

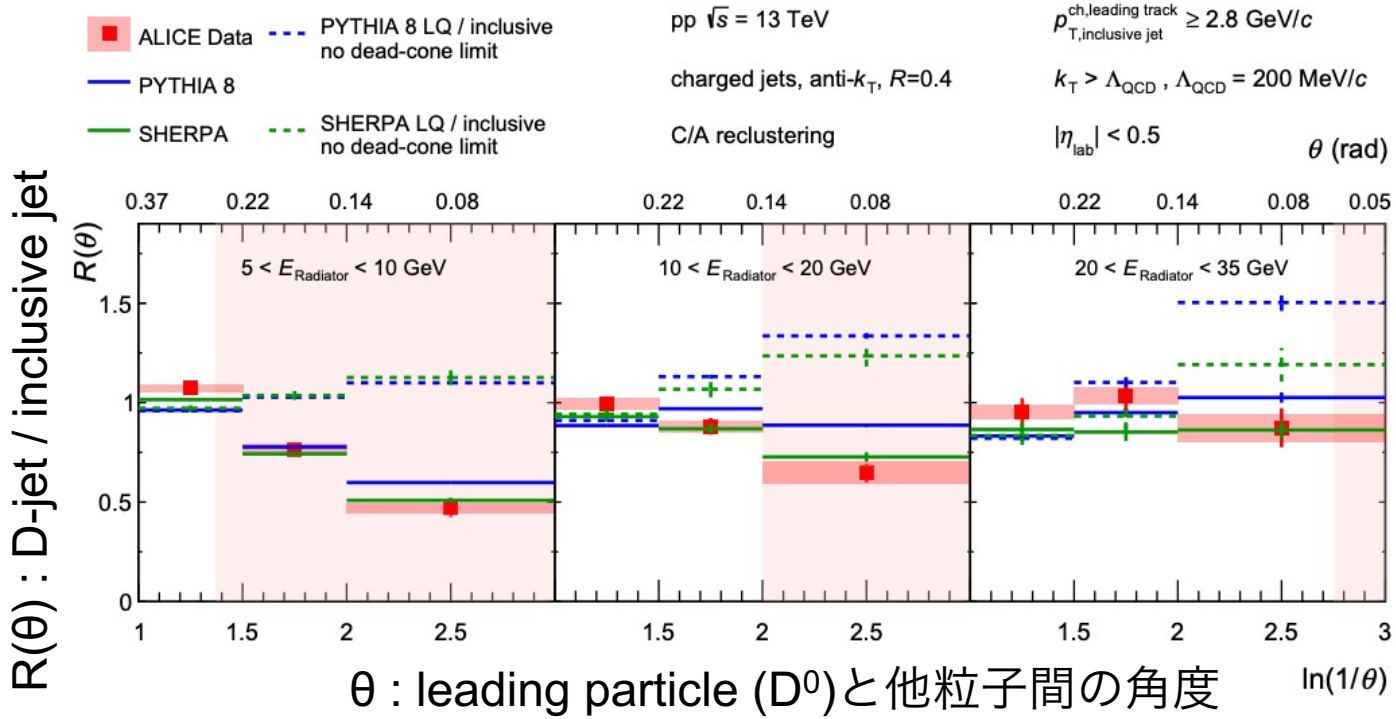
Dead cone effect with charm jets

arXiv:2106.05713





$\theta_{dc} < m_q/E_{radiator}$へのグルーオン放射の抑制



θ : leading particle (D^0)と他粒子間の角度

- D-jetの場合には、D^0から小角度にいるハドロンが減少する
  - dead cone effectを初観測

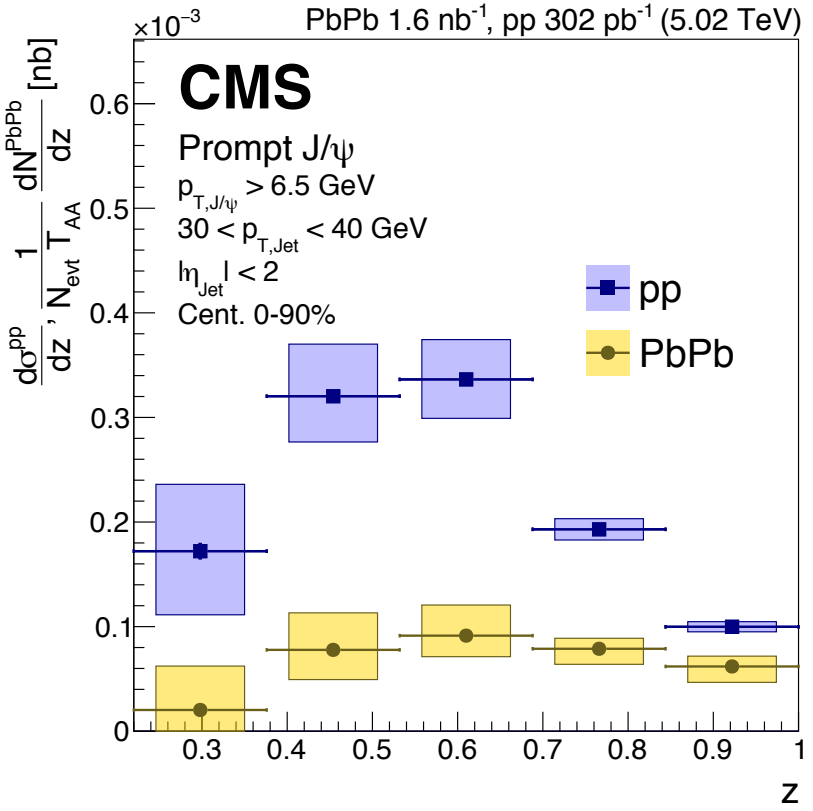
Prompt J/ψ in jet

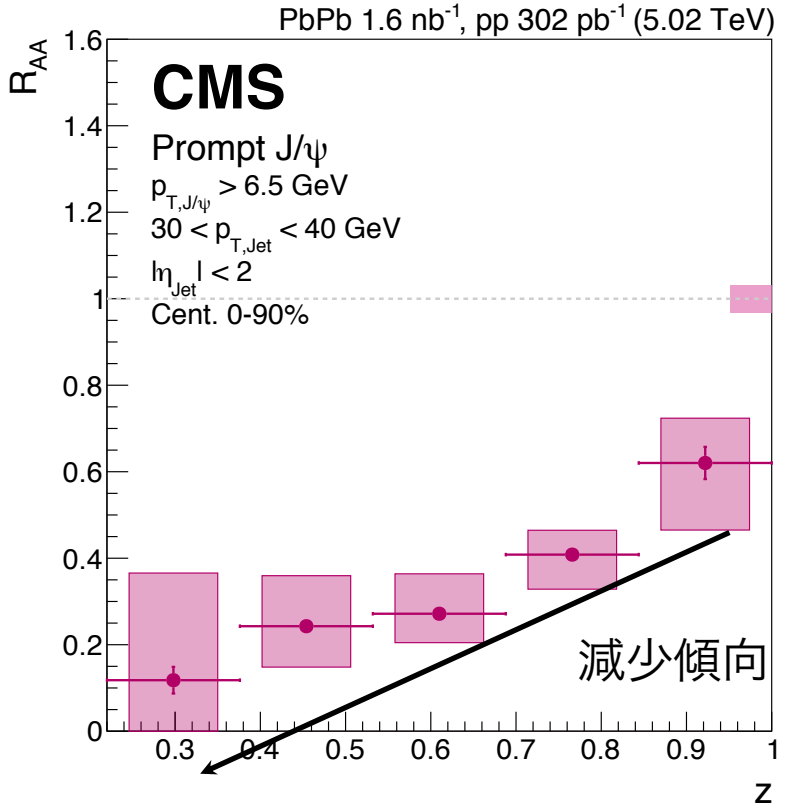
arXiv:2106.13235

$$z = \frac{p_T^{J/\psi}}{p_T^{jet}}$$

大きなz : jet中でJ/ψが持ち出す運動量が大きい
→jet中の粒子数が少ない

小さなz : その逆

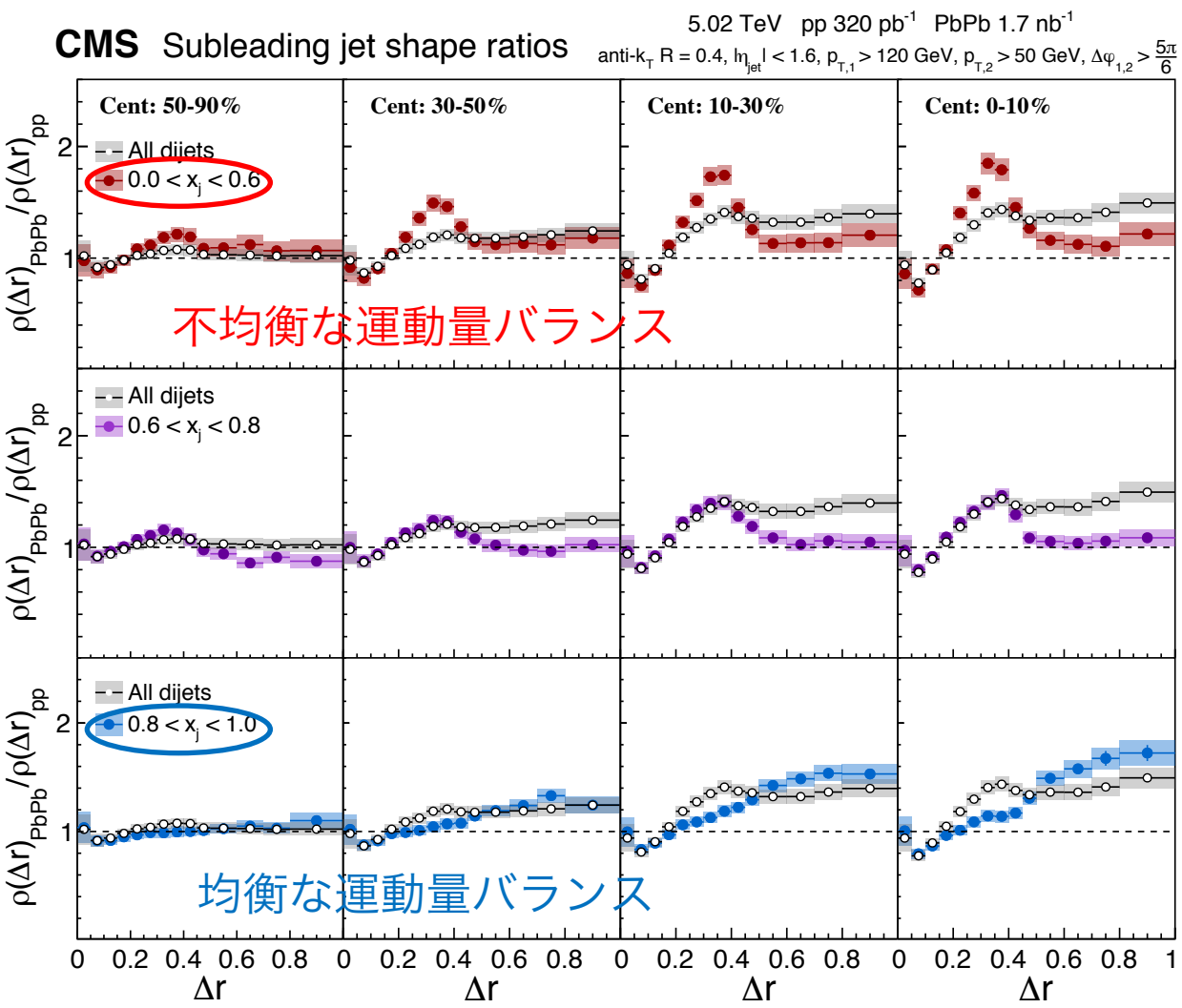




- R_{AA}を見ると、周りにハドロンがたくさんいる (zが小さい) J/ψが強く抑制される。
  → J/ψ中間子の抑制を記述するためには、jet activityも組み込む必要あり。

Jet shape via dijets

JHEP 05 (2021) 116



$$\Delta r = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$$

- どのような運動量の粒子がジェット軸から離れた場所にどれだけ分布しているかを表す量

- ジェット対の運動量バランスを区切ることで、通過距離依存性を見る

$$x_j = p_{\mathrm{T}}^{\mathrm{subleading}} / p_{\mathrm{T}}^{\mathrm{leading}}$$

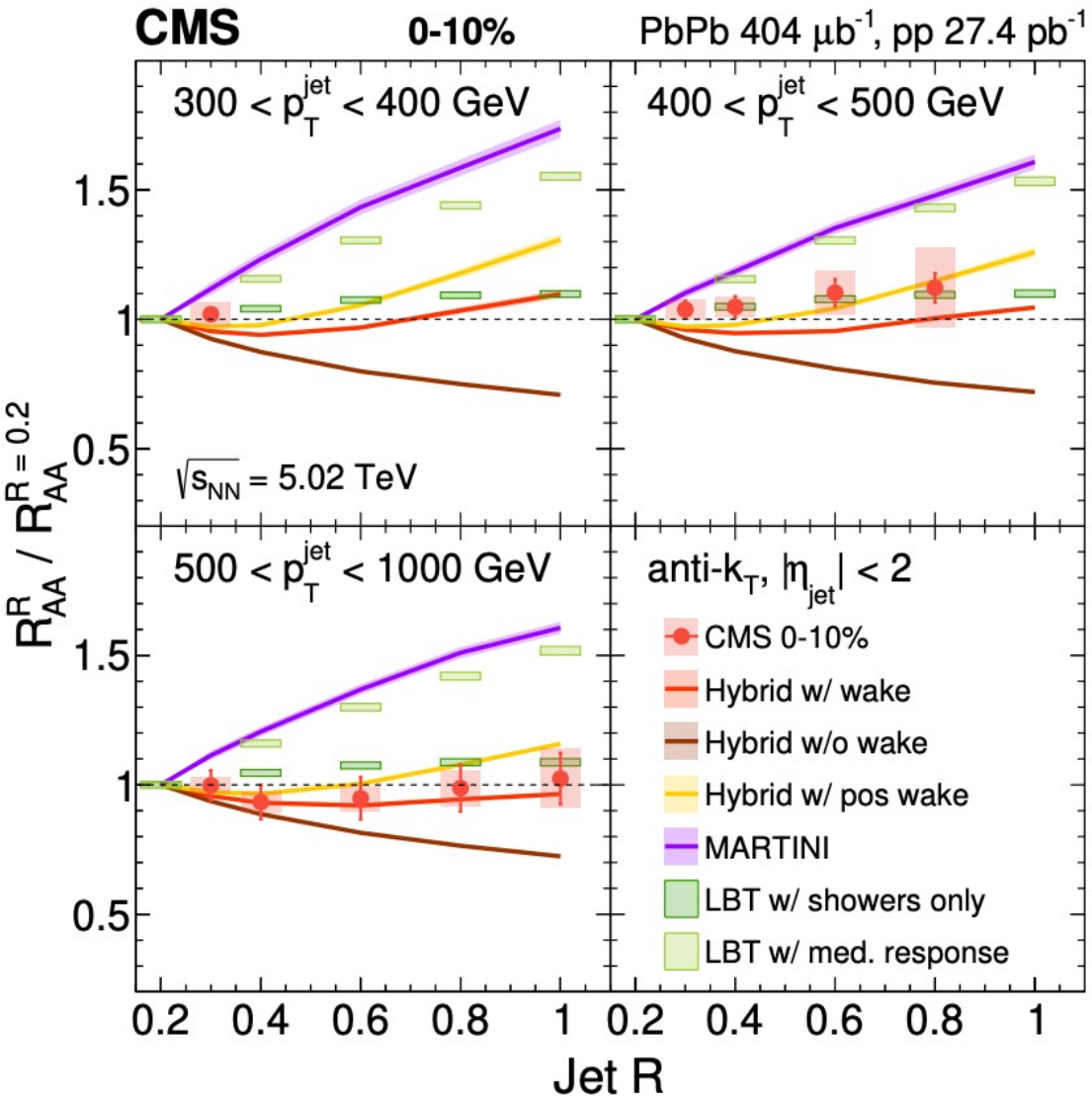
  - 小さいx_j : QGP表面でのdijet生成
  - 大きなx_j : QGP中心部

(測定上、3 jets生成も含む)

  - 赤・紫の$\Delta r > 0.4$でのへこみは、pp衝突での3 jets事象が分母にあるから。

Radius scan of jet energy loss

JHEP 05 (2021) 284

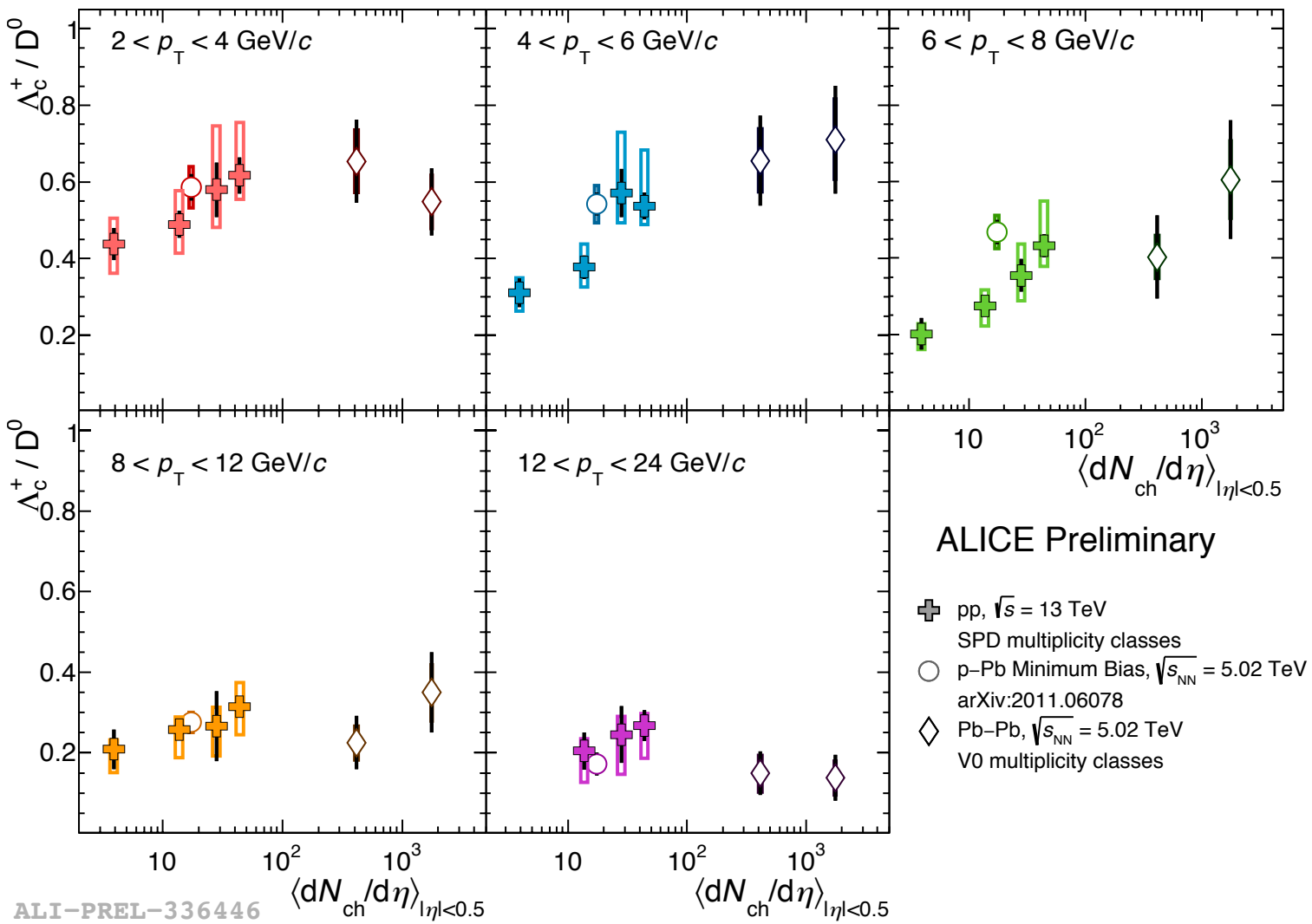


- R = 1.0までのジェットを初測定
- 超高横運動量ジェットの抑制度合の比は半径に依存しない
- QM2019からデータ点が変わった??
  - why?

Heavy flavor and quarkonia

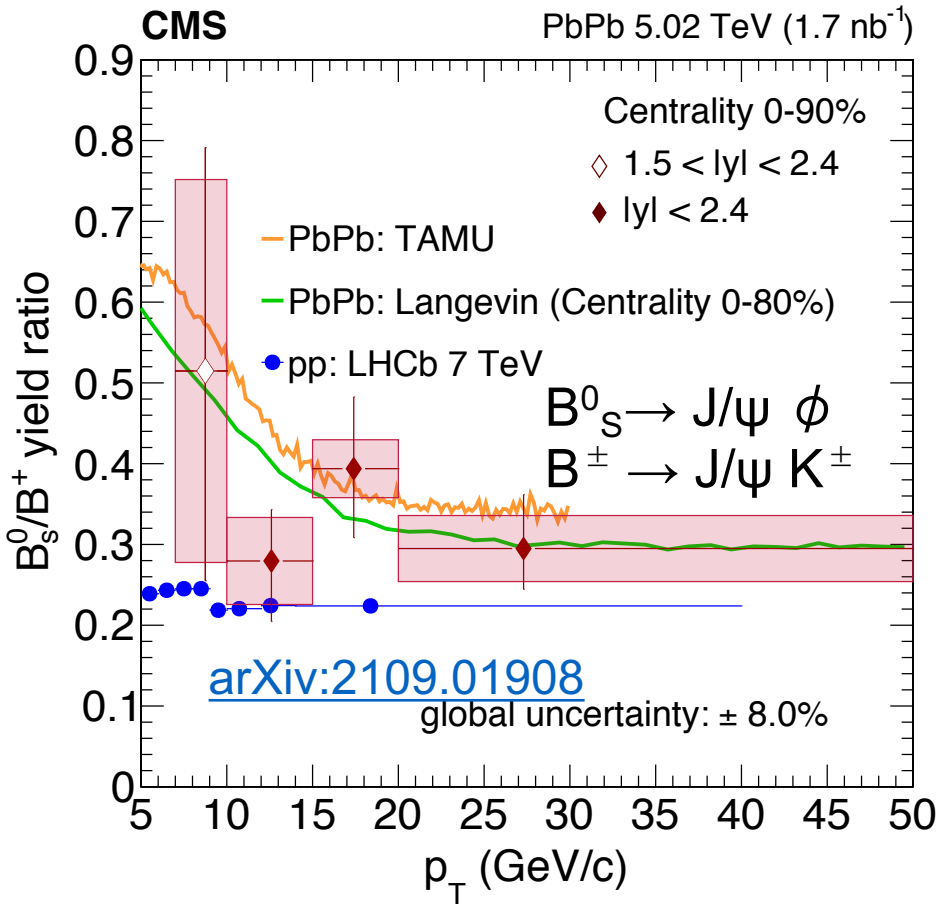
Charmed baryon/meson ratio

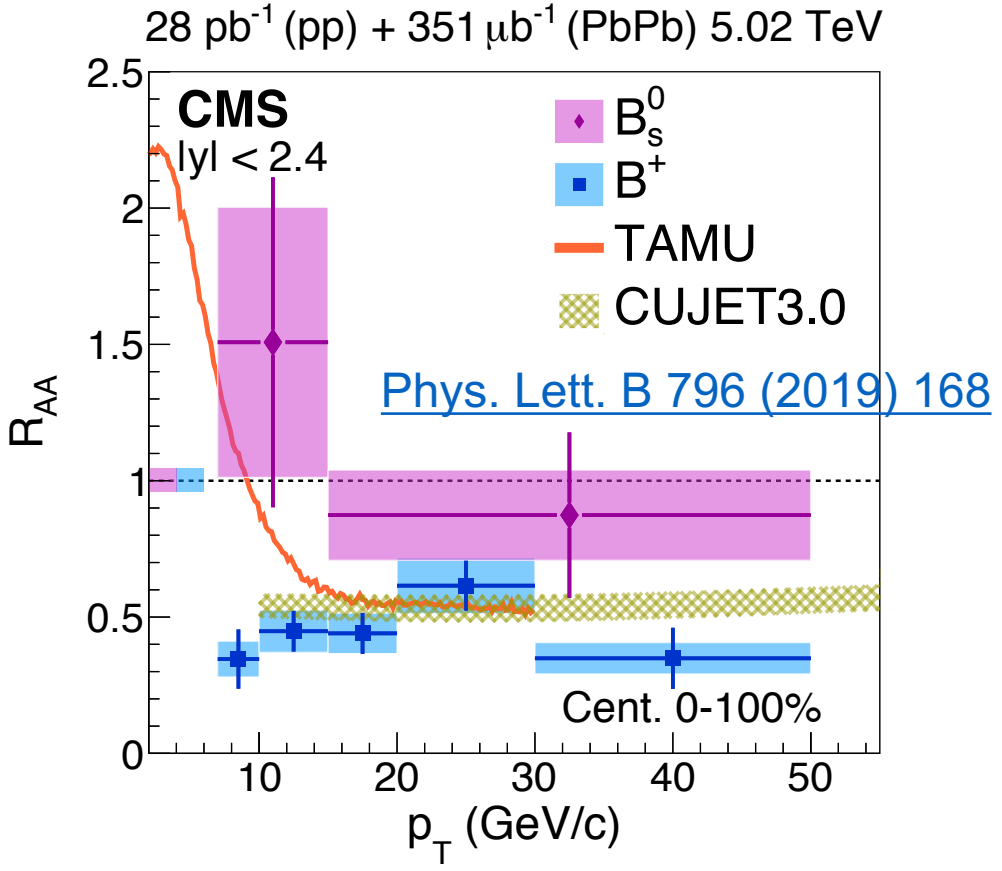
arXiv:2011.06078
arXiv:2106.08278



- 異なる衝突系にわたるΛ_C^+/D^0 比の荷電粒子多重度依存性
- e^+e^-衝突ではΛ_C^+/D^0~0.1
  - ハドロン衝突では
    バリオンを作りたがる
- ppからPb-Pbへ滑らかな変化
  - 再結合模型でどう見える？

coalescence of beauty and strange quarks

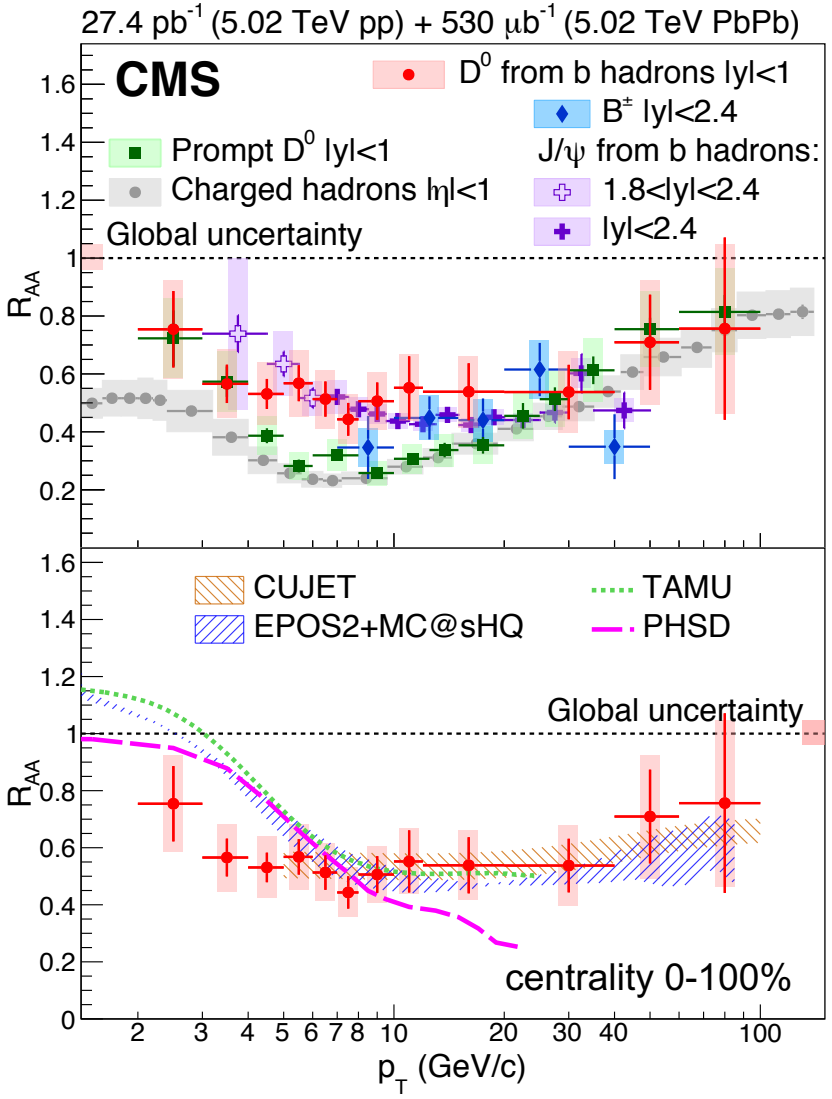


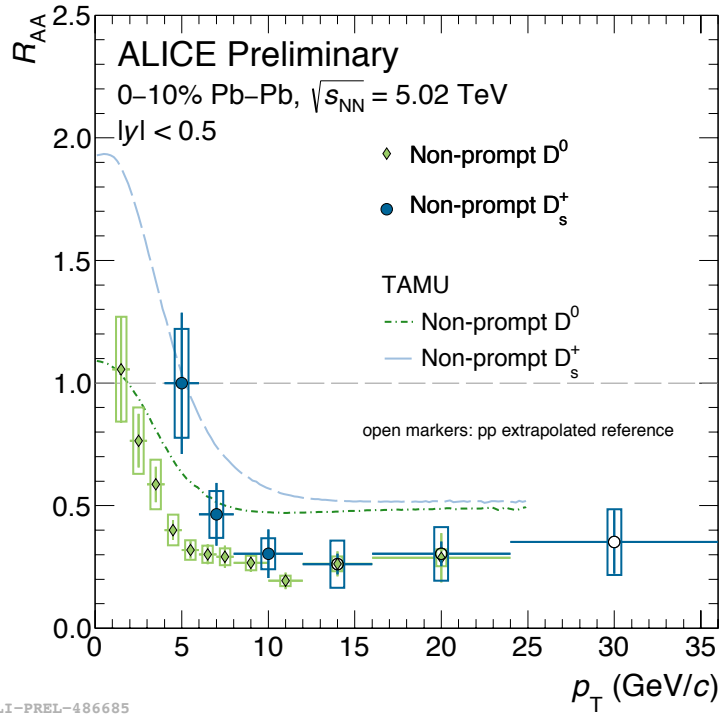


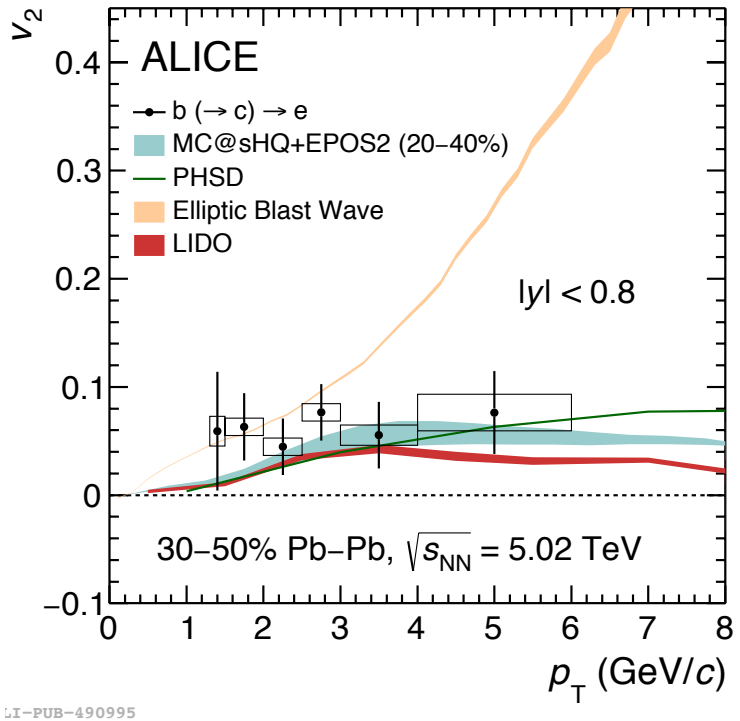
- 重イオン衝突でB^0_Sの初測定
- B^0_S/B^+比がpp衝突での結果から大きく増加する(bとsの再結合)と期待される低横運動量が大切

Beauty hadron

Phys. Rev. Lett. 123 (2019) 022001





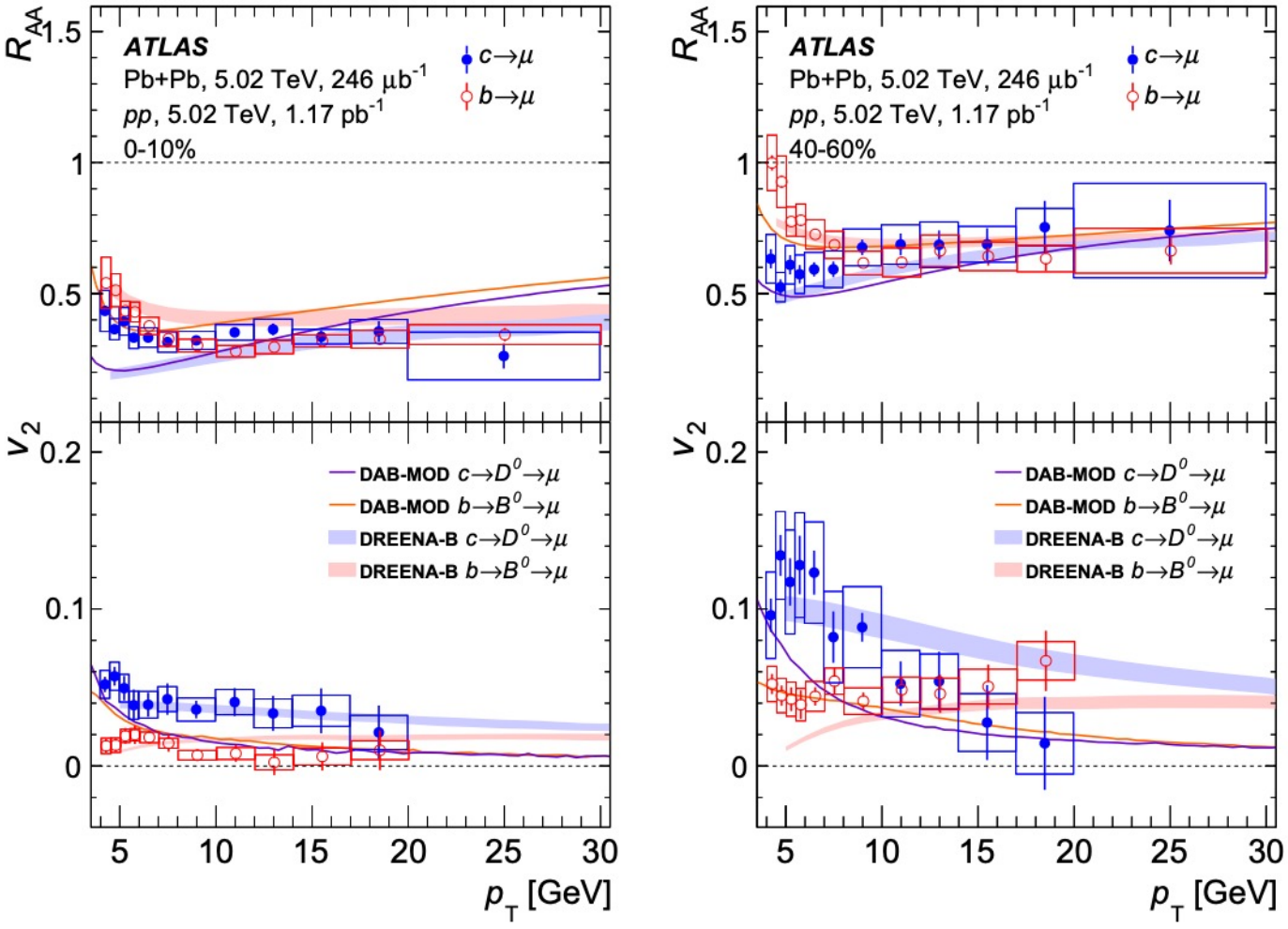


Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 162001

- bハドロンはまだ実験的困難が大きい
  - 崩壊物(D, J/ψ, e, μ)を駆使する(Run3以降の醍醐味)
- $v_2^{b\to e} > 0$ (NEW)
- 理論模型への制限には低い運動量での測定が必要

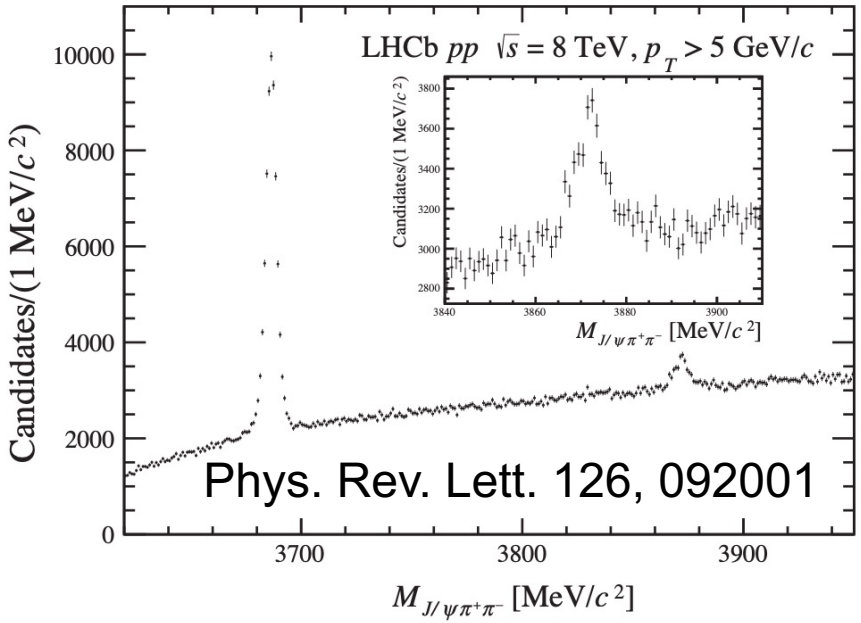
HF起源ミューオンのR_{AA} と v_2

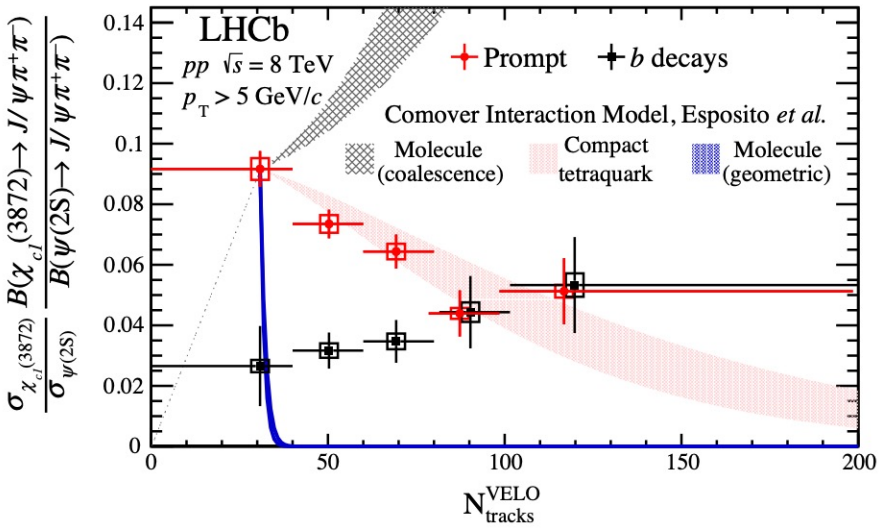
arXiv:2109.00411

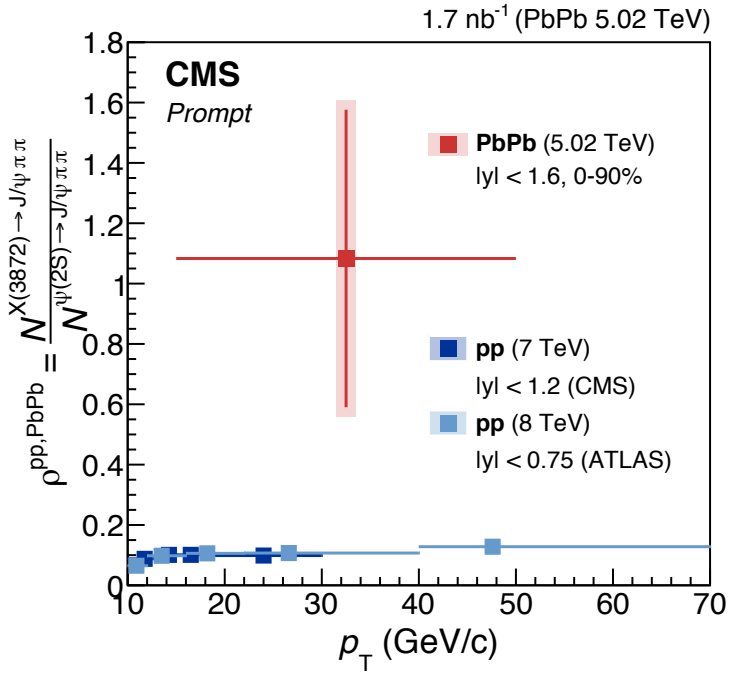


- LS1中に新たにシリコンピクセル検出器を導入(IBL : Insertable B-layer) ATLAS
  - b quark起源粒子の選別性能向上
- $v_2^{b\to\mu} > 0$ (NEW)
  - 低横運動量が欲しい
- 流体膨張する系でのグルーオン放射と衝突によるエネルギー損失を記述する理論模型
  - R_{AA}とv_2を同時に再現できない

X(3872)







arXiv:2102.13048

- LHCでのX(3872)の初測定

- 生成粒子数×崩壊分岐比の荷電粒子多重度依存性(LHCb)は、cc̄uūのtetra quarkとする模型と一致する。
(X(3872)はtetra quark stateです、とは言ってない。)

まとめ

- 光子・レプトン対
  - 衝突初期状態に遡るユニークなプローブ
  - 熱光子の青方偏移による初期高温状態に到達する困難さ
  - それを解決する熱輻射レプトン対 (重ハドロン除去が鍵)
- ジェット
  - p_T ~ 1 TeVまで抑制
  - その内部構造と媒質応答が今の流行り
- 重クォーク・クォーコニア
  - charm hadronの結果は出揃いつつある(今後は統計誤差の削減)
  - beauty hadron測定に関しては、統計量と衝突点決定精度向上に期待
  - 低横運動量での高精度な測定が必須

backup