

電磁プローブ・重フレーバ・ジェット の実験的まとめ

関畑 大貴(東大CNS)

post QM2019

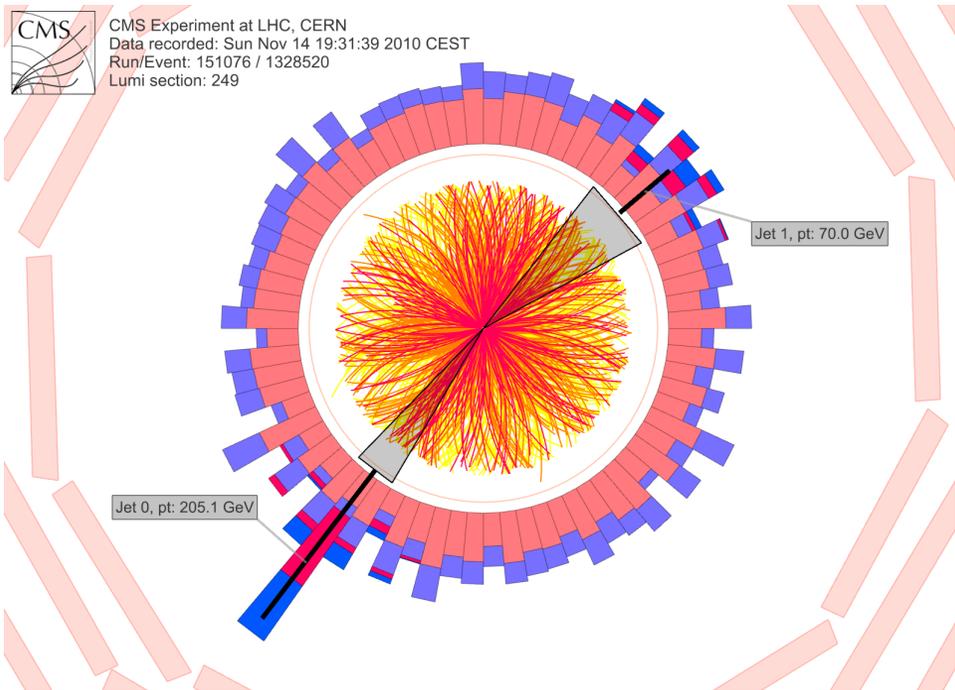
2019/12/22, Sun

Parallel session overview

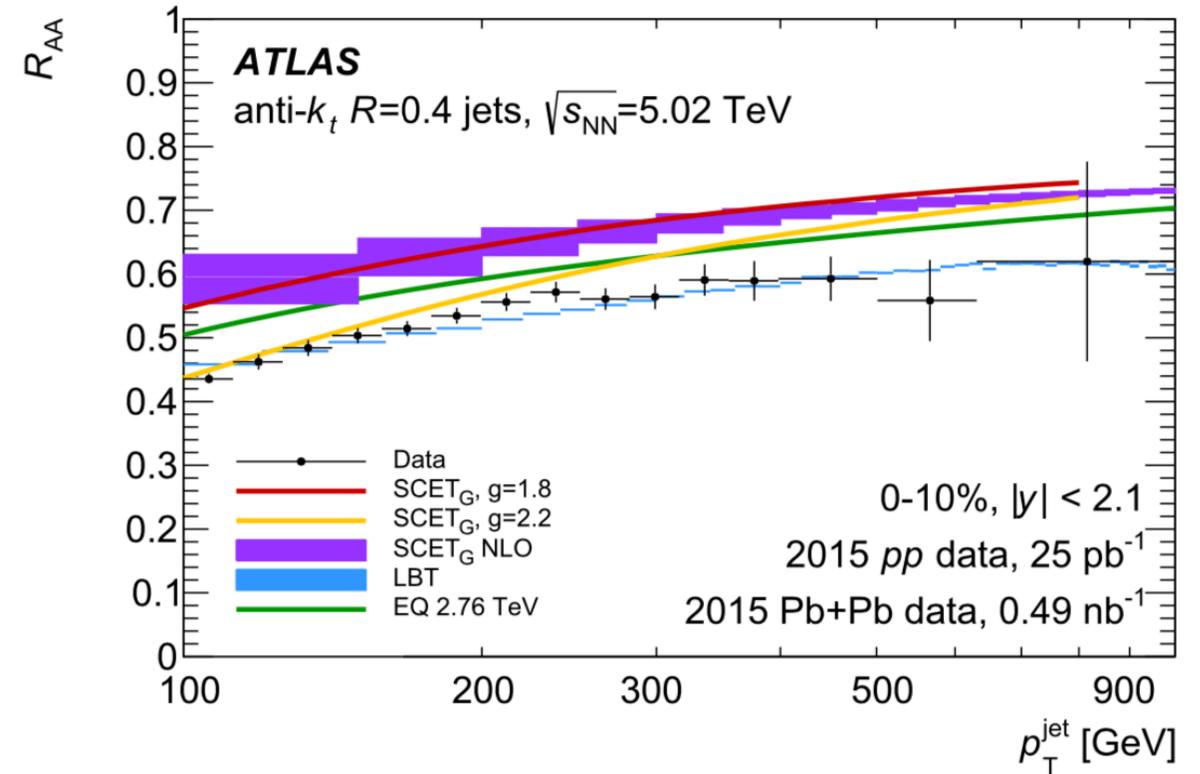
	BALL ROOM 1 3rd Floor	BALL ROOM 2 3rd Floor	BALL ROOM 3 3rd Floor	HONGKONG ROOM 2nd Floor
TUESDAY AM1	COL I	JET I	SMA I	EM I
TUESDAY AM2	CP I	SMA II	HF I	QCD I
TUESDAY PM1	COL II	CHI I	HF II	NTH I
TUESDAY PM2	COL III	INI I	HF III	FAC
WEDNESDAY AM1	CP II	JET II	COL IV	NTH II
WEDNESDAY AM2	SMA III	JET III	CHI II	QCD II
WEDNESDAY PM1	CHI III	JET IV	SMA IV	INI II
WEDNESDAY PM2	QCD III	HF IV	EM II	QMA

<https://indico.cern.ch/event/792436/>

- TeV領域のジェット抑制
- 電弱ボソン-ジェット相関
- ジェットの内部構造
- Dead-cone効果の初測定



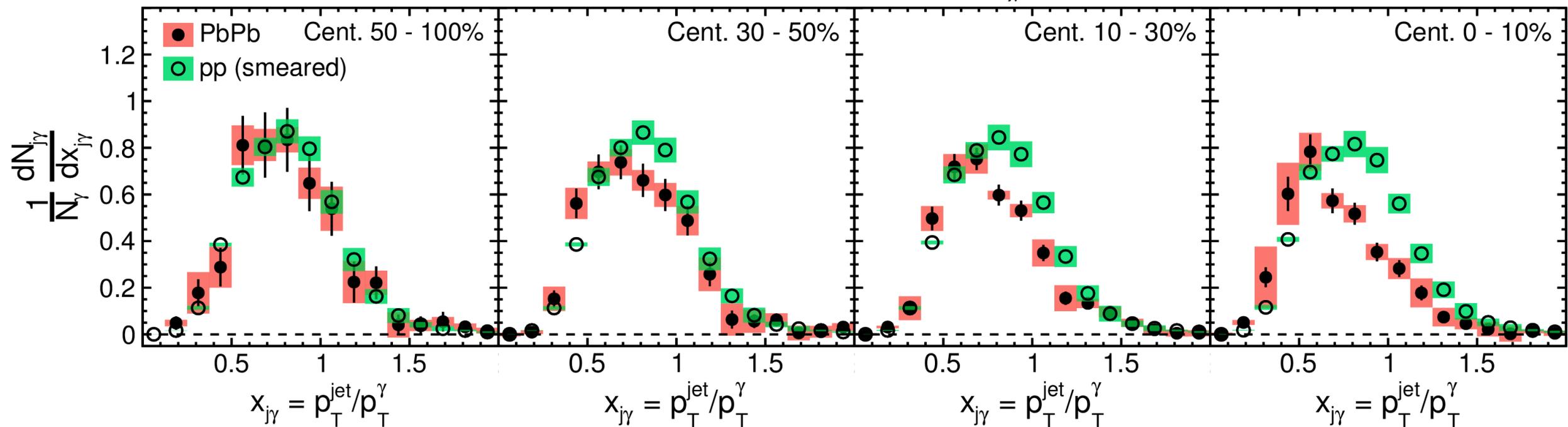
Physics Letters B 790 (2019) 108–128



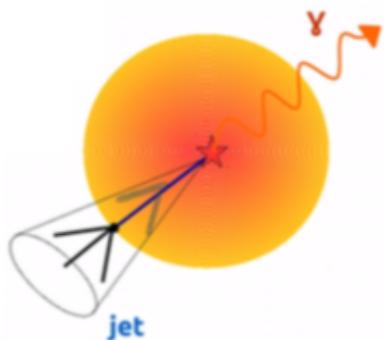
- ~TeV領域までジェットが抑制されていることを初測定した。
- ここまでジェットエネルギーが大きいと underlying event と容易に区別可能

ジェット抑制 + 電弱ボソン γ/Z

CMS anti- k_T jet $R = 0.3$, $p_T^{\text{jet}} > 30$ GeV/c, $|\eta^{\text{jet}}| < 1.6$, $|\eta^\gamma| < 1.44$, $p_T^\gamma > 60$ GeV/c, $\Delta\phi_{j\gamma} > \frac{7\pi}{8}$ $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ TeV, PbPb 404 μb^{-1} , pp 27.4 pb^{-1}

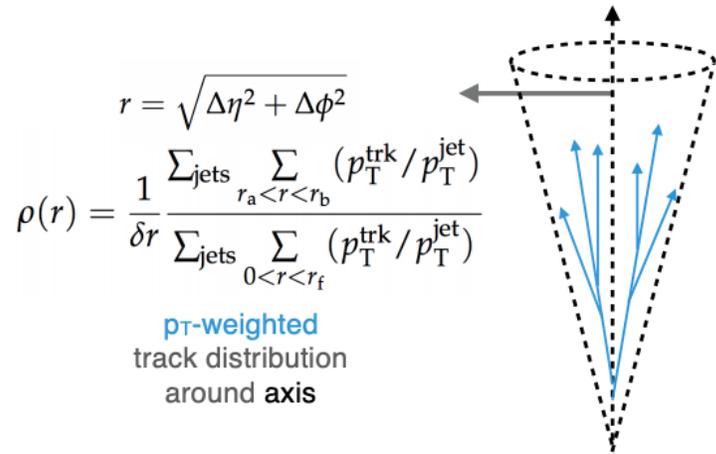


Phys. Lett. B 785 (2018) 14



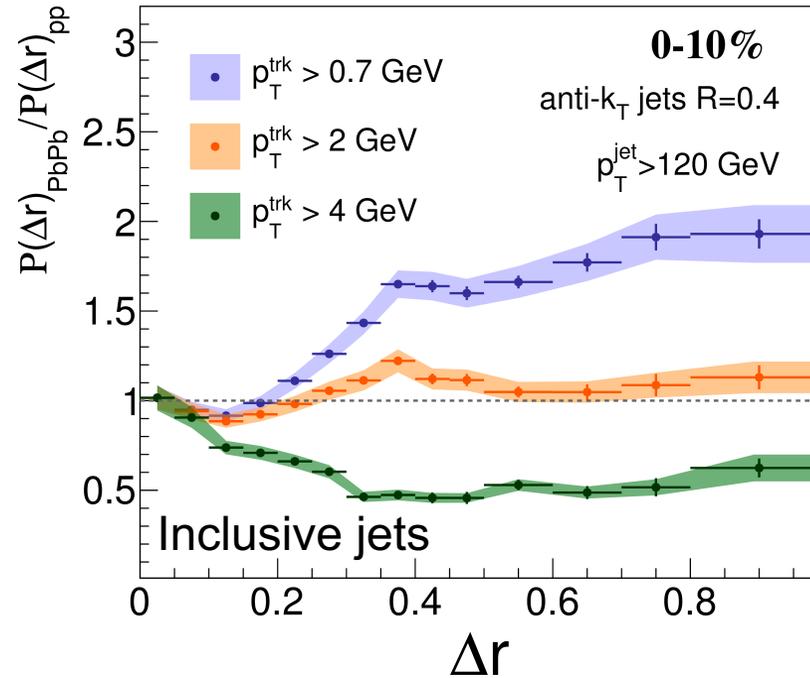
- 初期の硬散乱の運動学を光子でコントロール
- エネルギー損失量の絶対値を決定
- 粒子多重度が高くなるにつれて $\langle x_{j\gamma} \rangle$ が左へシフト

ジェットの形状

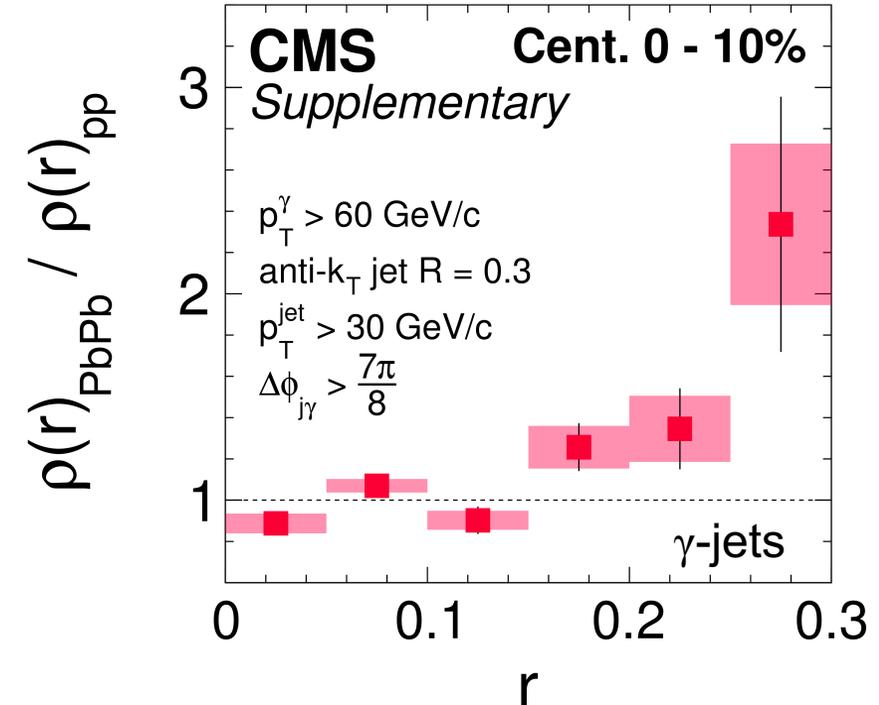


どのような運動量の粒子がジェット軸からどれだけ離れた場所に分布しているかを表す量

CMS Supplementary JHEP 05(2018) 006
 PbPb 404 μb^{-1} (5.02 TeV) pp 27.4 pb^{-1} (5.02 TeV)



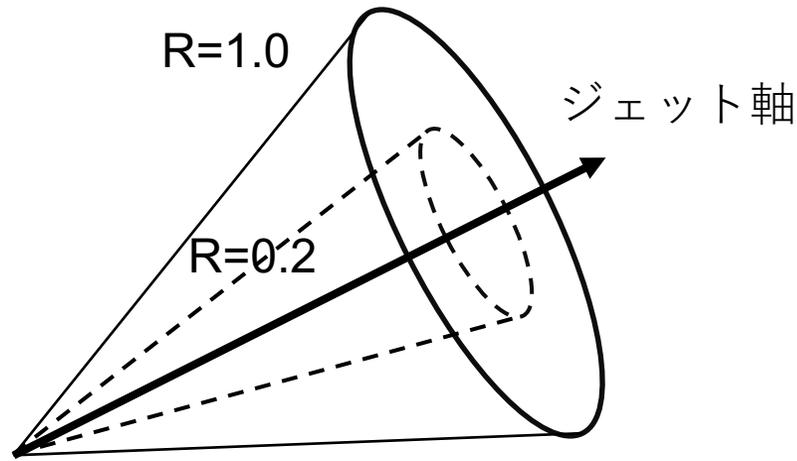
$\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02 \text{ TeV}$
 pp 27.4 pb^{-1} , PbPb 404 μb^{-1}



Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 152001

- 中心衝突では、ソフトな粒子は大角度に分布する。
- γ -jetをタグすることでLHCエネルギー領域ではクォーク起源ジェットが多いサンプルを選択。

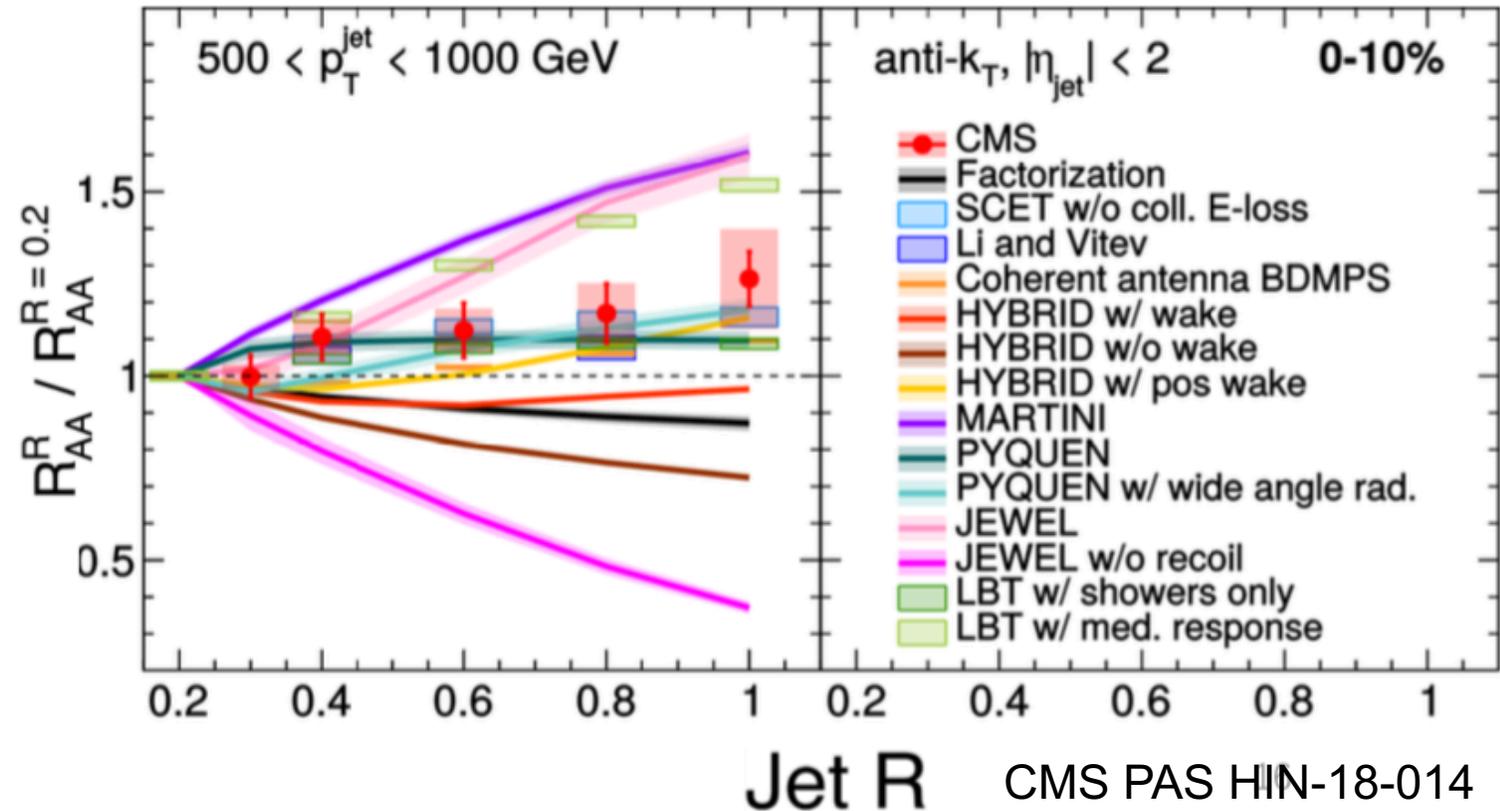
大きな半径のジェット R_{AA} : 半径走査



失ったエネルギーの回復

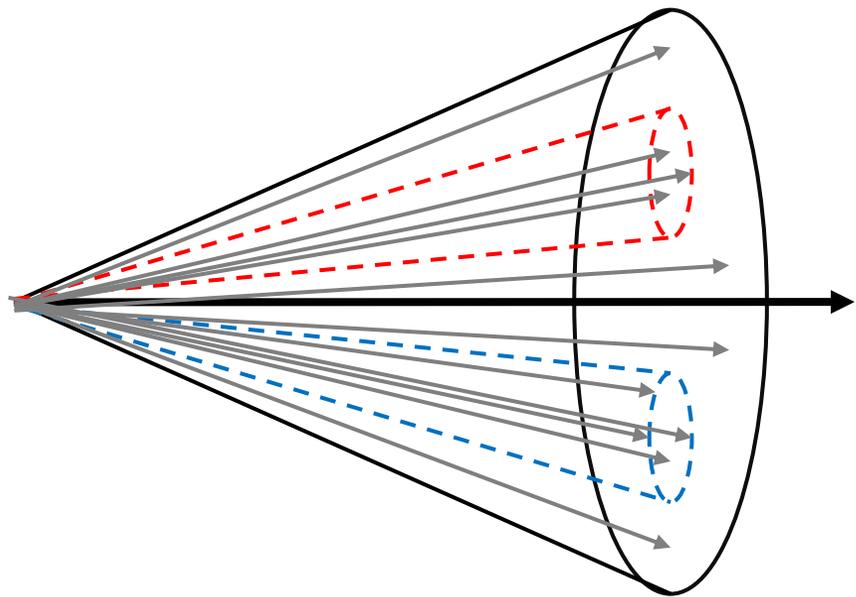
vs.

大半径ジェットのエネルギー損失



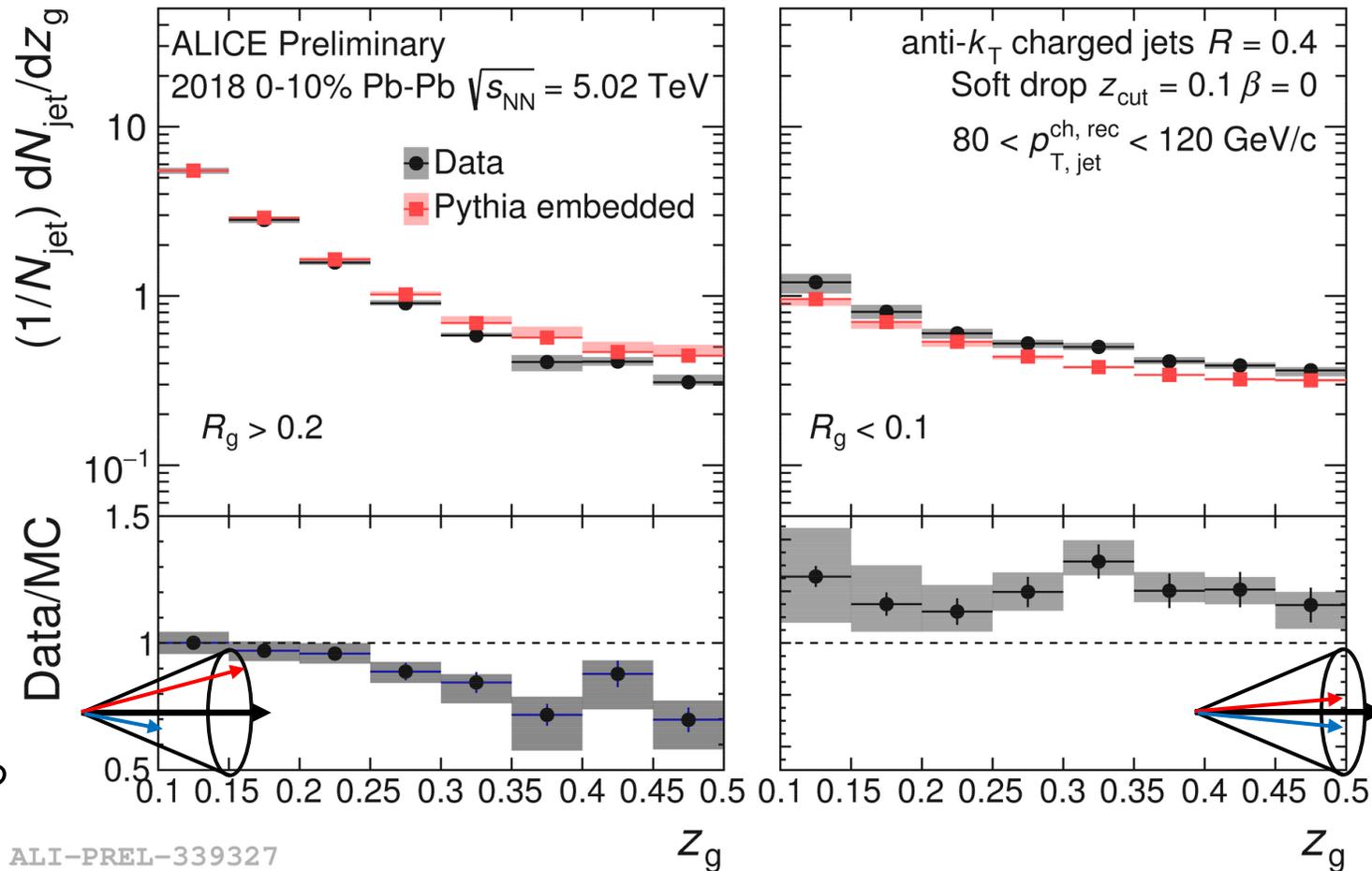
- $R=1.0$ までのジェットを初測定
- 大きなコーン半径では、エネルギーが回復している？
- 数多ある理論モデルへの強力な制限

ジェットの内部構造 : grooming



大きなジェット内部で大角度にいるソフトな粒子を取り除き、パートンシャワー初期の2つの硬成分(sub jets)に分ける

運動量バランス : $z_g = \frac{p_{T2}}{p_{T1} + p_{T2}}$
 sub jet間の η - ϕ 面内距離 : R_g



ALI-PREL-339327

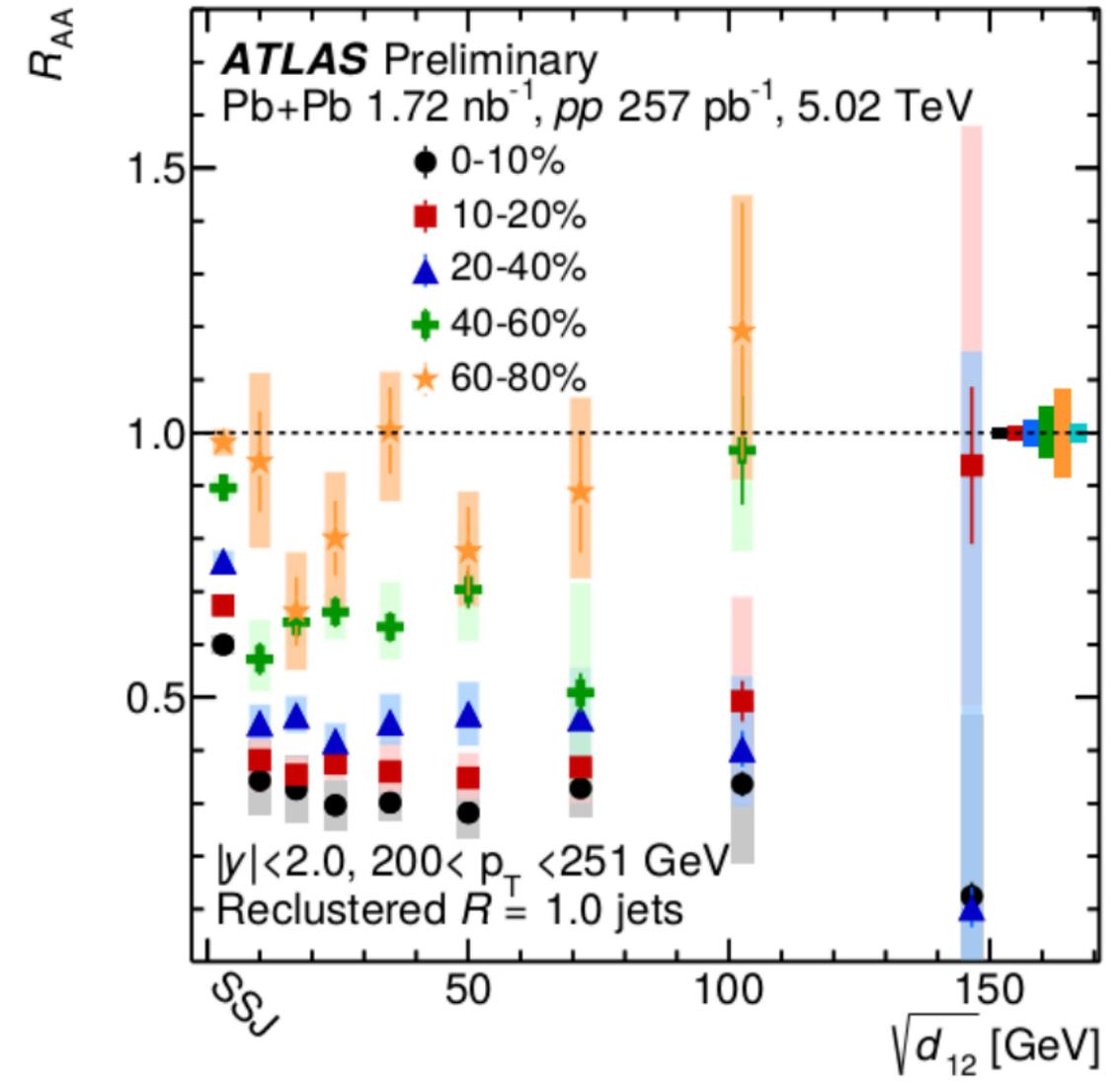
バランスした大角度subjetの抑制

小角度sub jetの増大

ジェットの内部構造：分離スケール

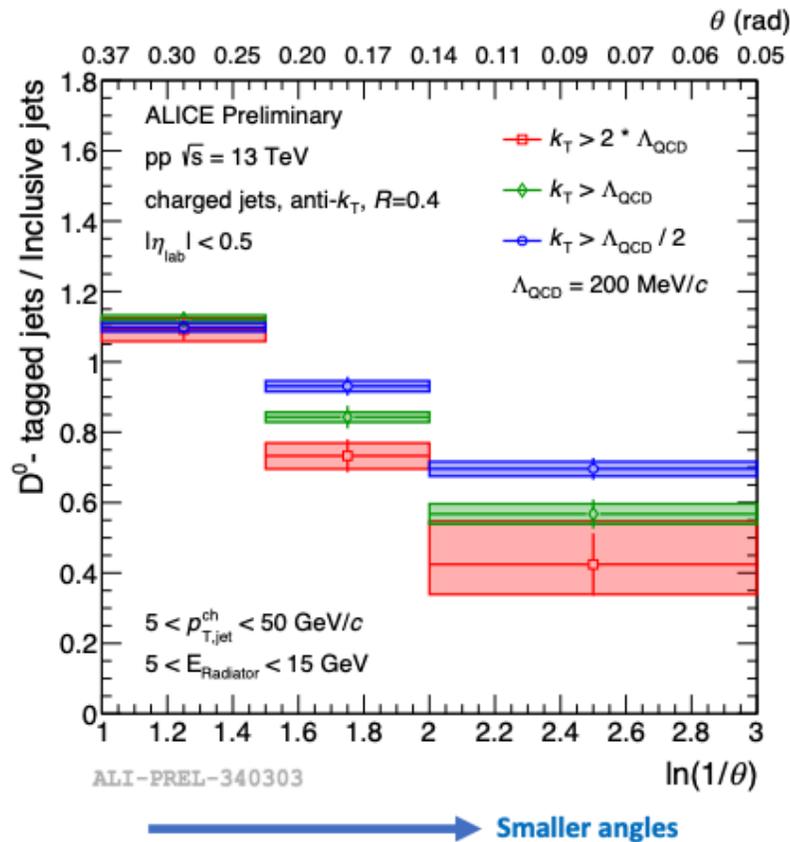
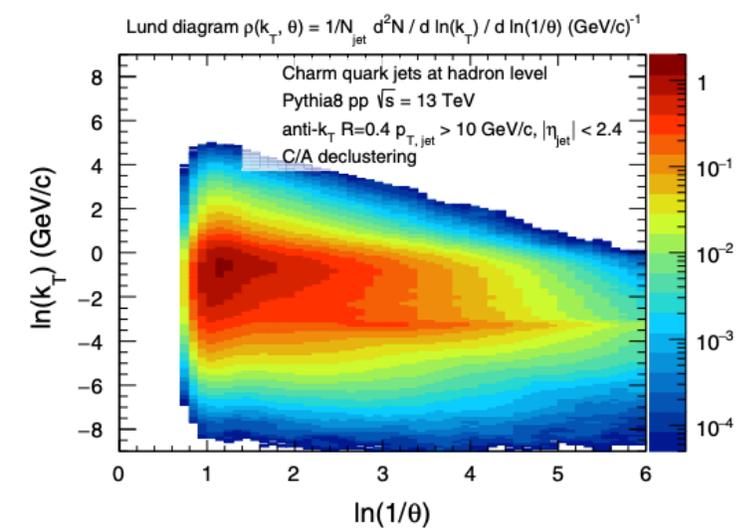
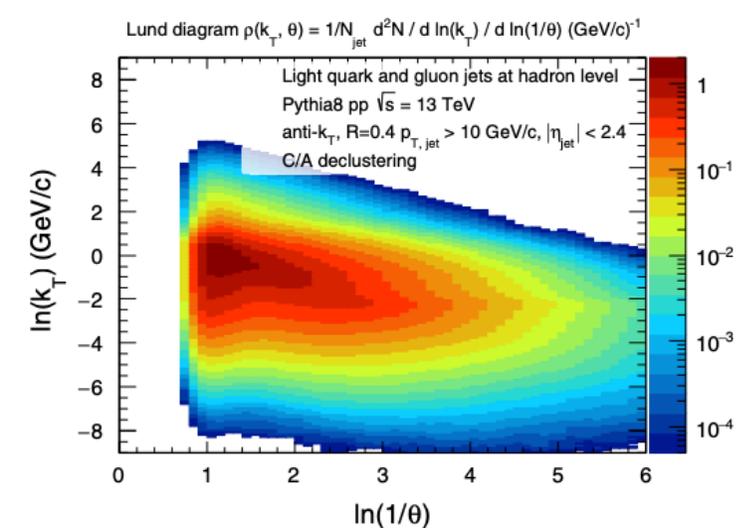
$$\sqrt{d_{12}} = \min(p_{T1}, p_{T2}) \times \Delta R_{12}$$

- SSJ : single sub jet ($\sqrt{d_{12}} = 0$)
- 内部構造をもつジェットの方がより強く抑制される
- SSJ以外、 $\sqrt{d_{12}}$ 依存性はない。

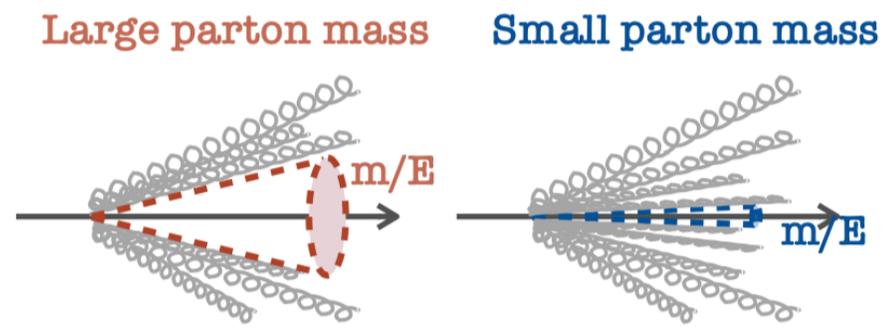


D⁰-ジェットを使用したdead-cone効果の初測定

PHYSICAL REVIEW D 99, 074027 (2019)

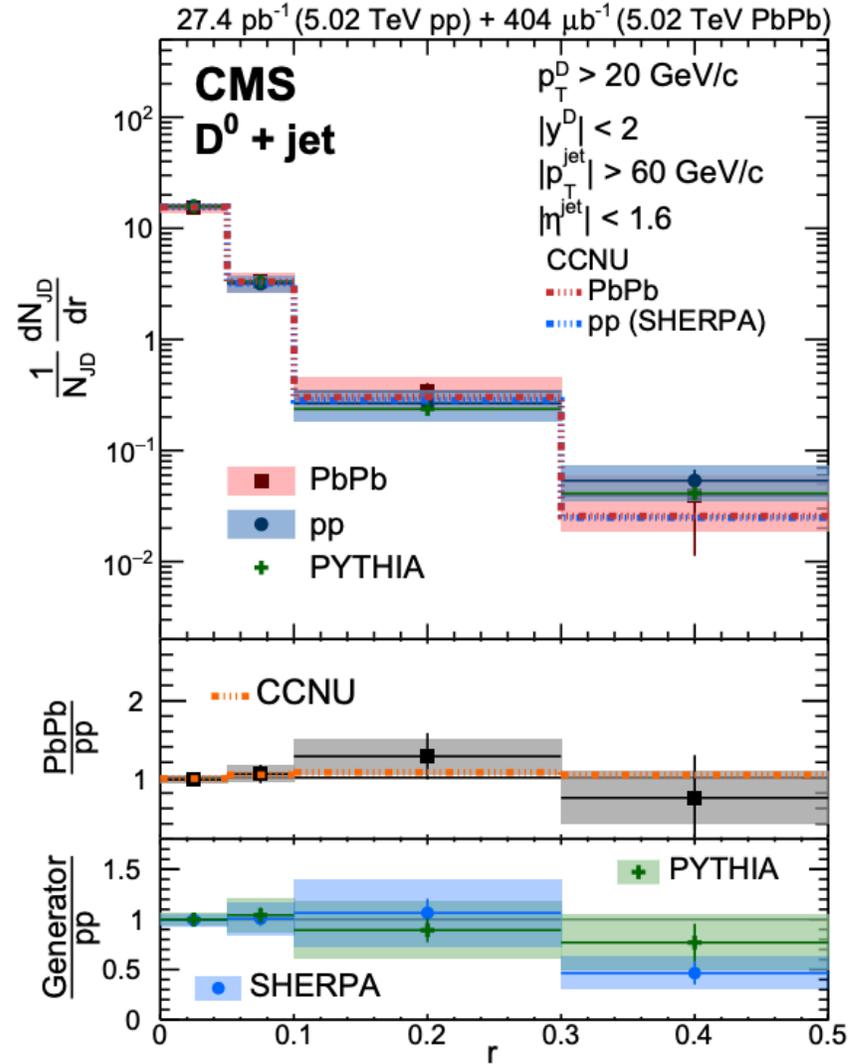
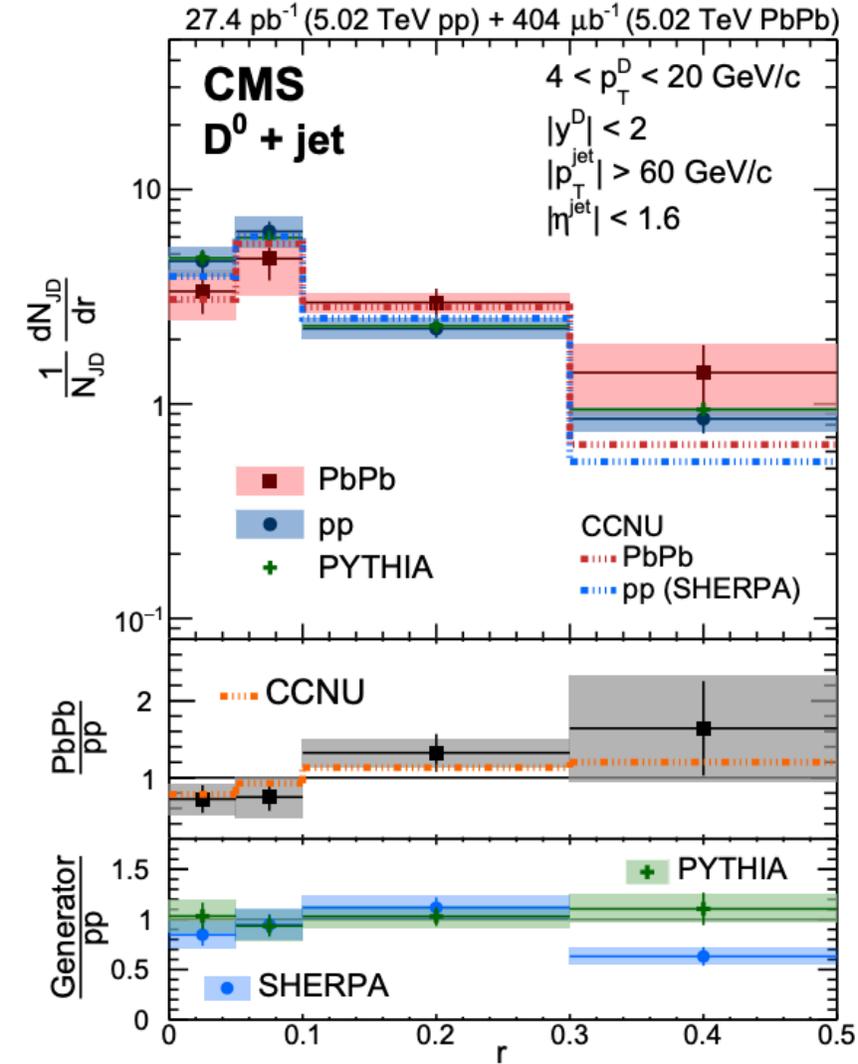


- Dead-cone効果の初測定
- E_{radiator} が大きいと、小角度に分離される sub jet の量が減少
 - $\theta < M_q/E_q$ による



$\theta < M_q/E_q$ での放射抑制
 Dead-cone効果：
 重クォークはグルーオンを進行方向に放射しにくい

D⁰-ジェットを使用したcの拡散(radial profile)



- D中間子の低横運動量領域では、rが大きいところに広く分布する。
- QGP中でのチャームのエネルギー損失と拡散の理論モデルへの制限

$$\frac{1}{N_{JD}} \frac{dN_{JD}}{dr} = \frac{1}{N_{JD}} \frac{1}{\Delta r} \frac{N_{JD}|_{\Delta r}}{(\alpha \epsilon)'} ,$$

$$r = \sqrt{\Delta\phi_{JD}^2 + \Delta\eta_{JD}^2}$$

ジェット軸とD中間子との距離

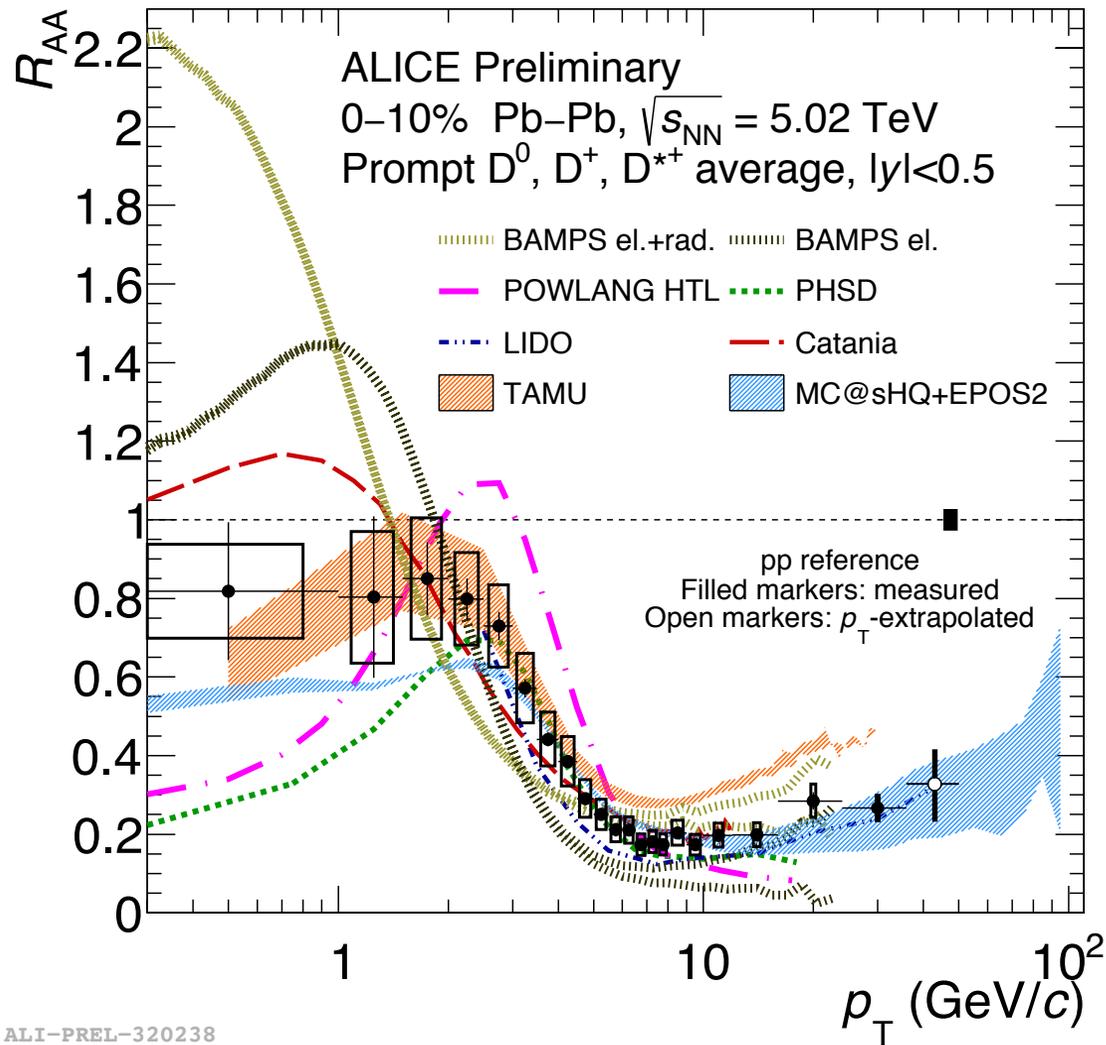
arXiv:1911.01461

Jetの小まとめ

- ~TeV領域までジェット抑制
- 単なる R_{AA} だけでなく電弱ボソンでタグしたり、その内部構造に注目
- 半径走査：大きな半径のジェットの損失エネルギーの回復？
- 太いジェットをグルーミングすることによってDead-cone効果初測定
- 複雑な内部構造をもつジェットの方が強く抑制される

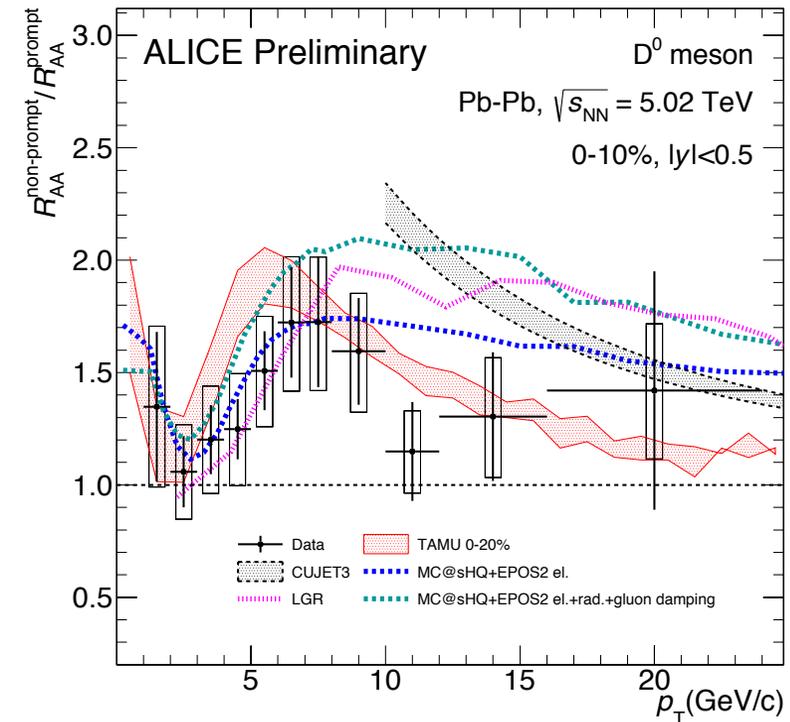
- エネルギー損失
- フロー
- ストレンジネスの有無
- バリオン対メソン比
- 小さい系
- $X(3872)$ ($= \chi_{c1}(3872)$)

HF : D中間子のエネルギー損失



ALI-PREL-320238

- $p_T=0$ までのD中間子達を初測定
- チャームクォークのエネルギー損失と初期効果に対する制限
- 全チャーム断面積へも制限

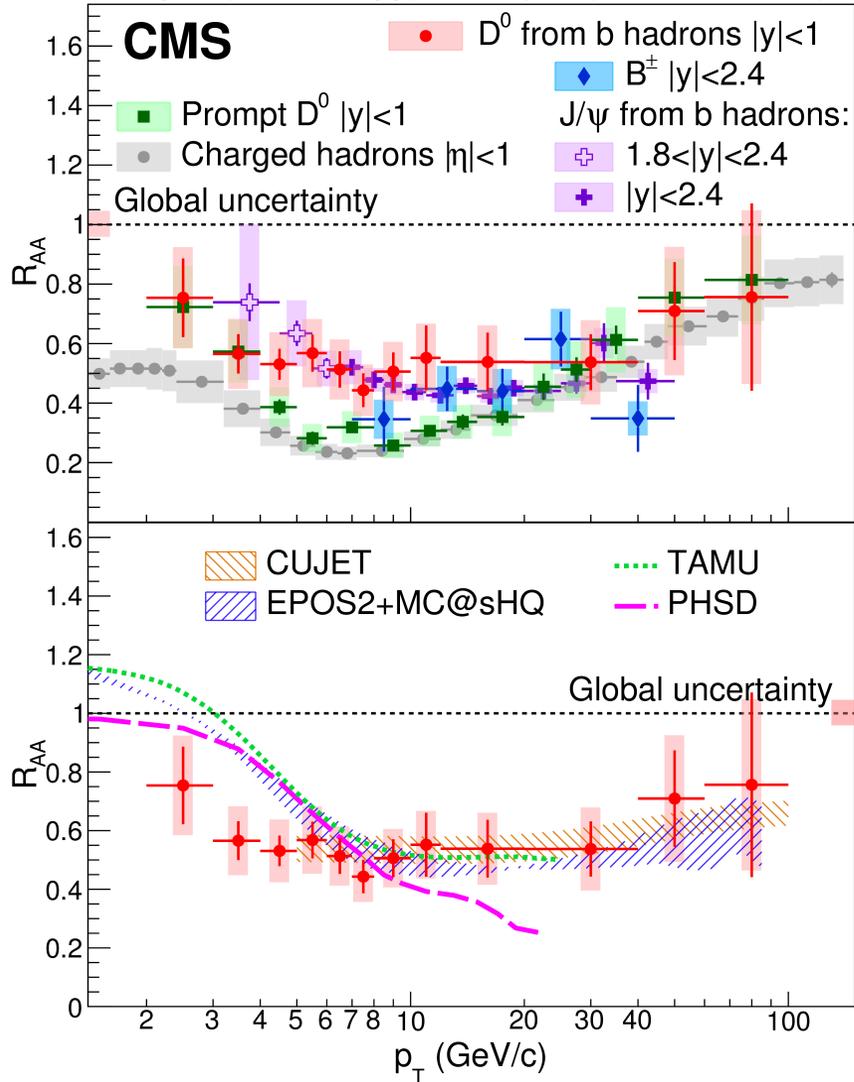


ALI-PREL-332624

HF : エネルギー損失のフレーバ依存性

27.4 pb⁻¹ (5.02 TeV pp) + 530 μb⁻¹ (5.02 TeV PbPb)

Phys. Rev. Lett. 123 (2019) 022001
PRL 119 (2017) 152301

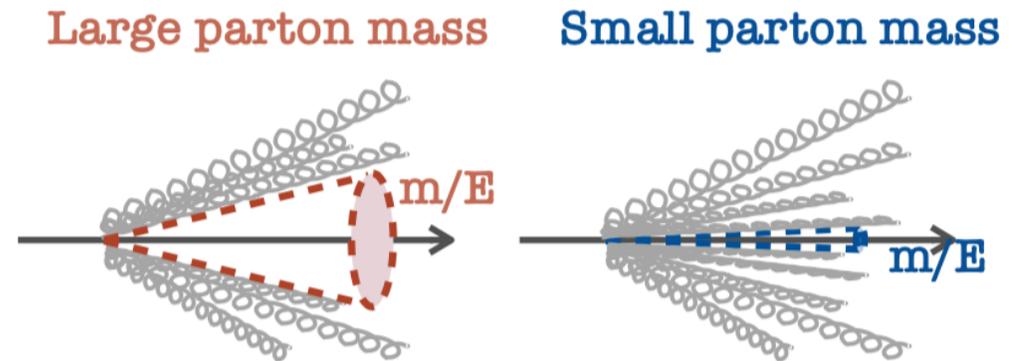


- 低横運動量:

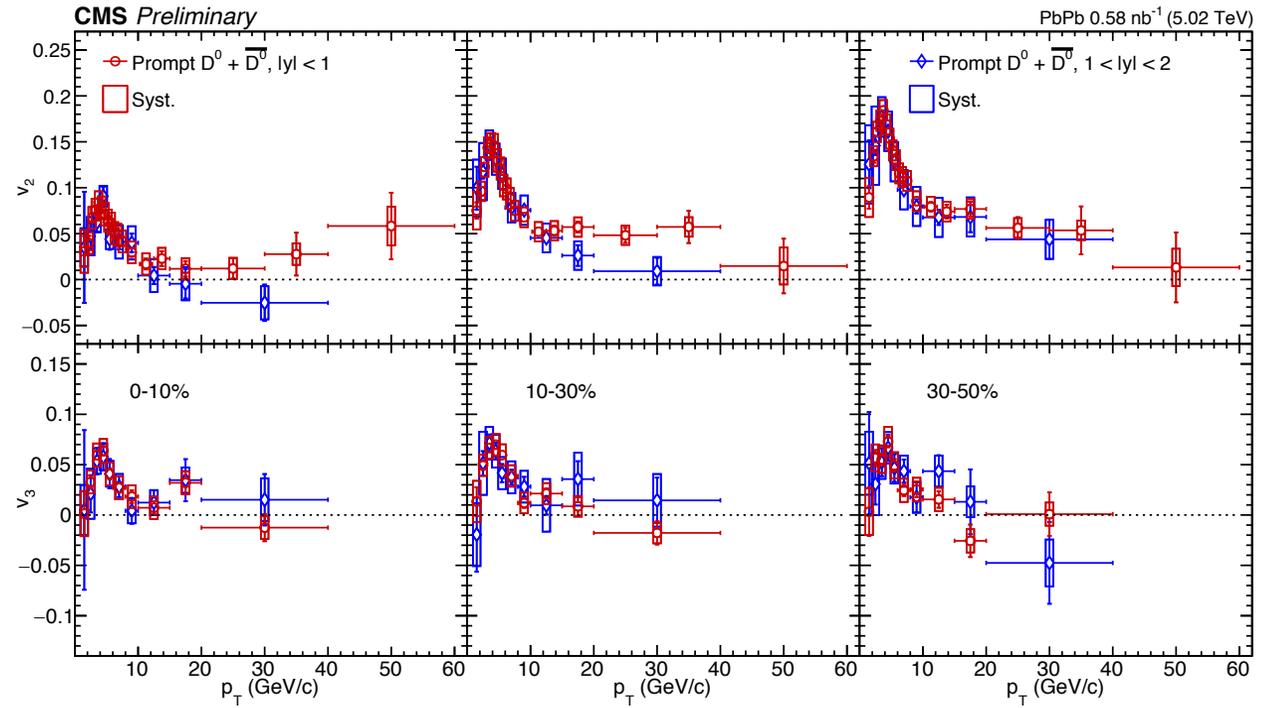
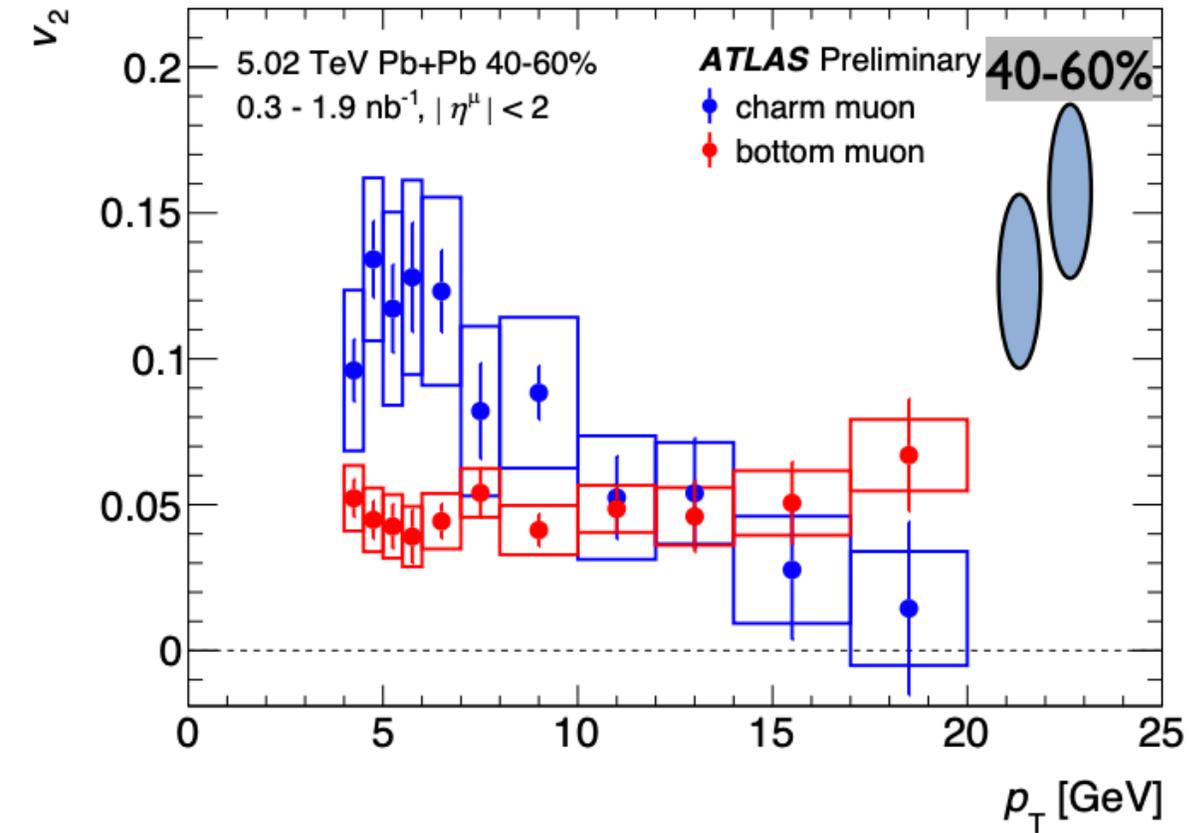
$$R_{AA}(b) \sim R_{AA}(c) > R_{AA}(\text{light})$$

- 中間横運動量:

$$R_{AA}(b) > R_{AA}(c) \sim R_{AA}(\text{light})$$



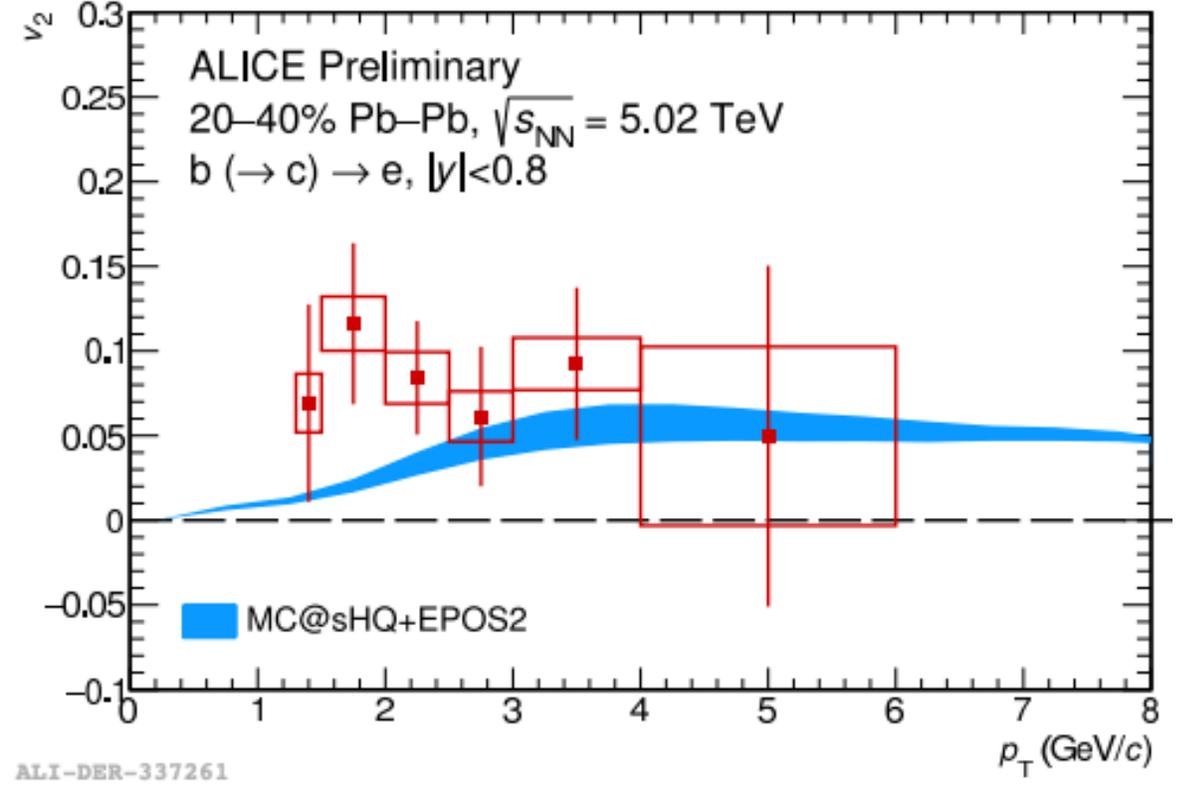
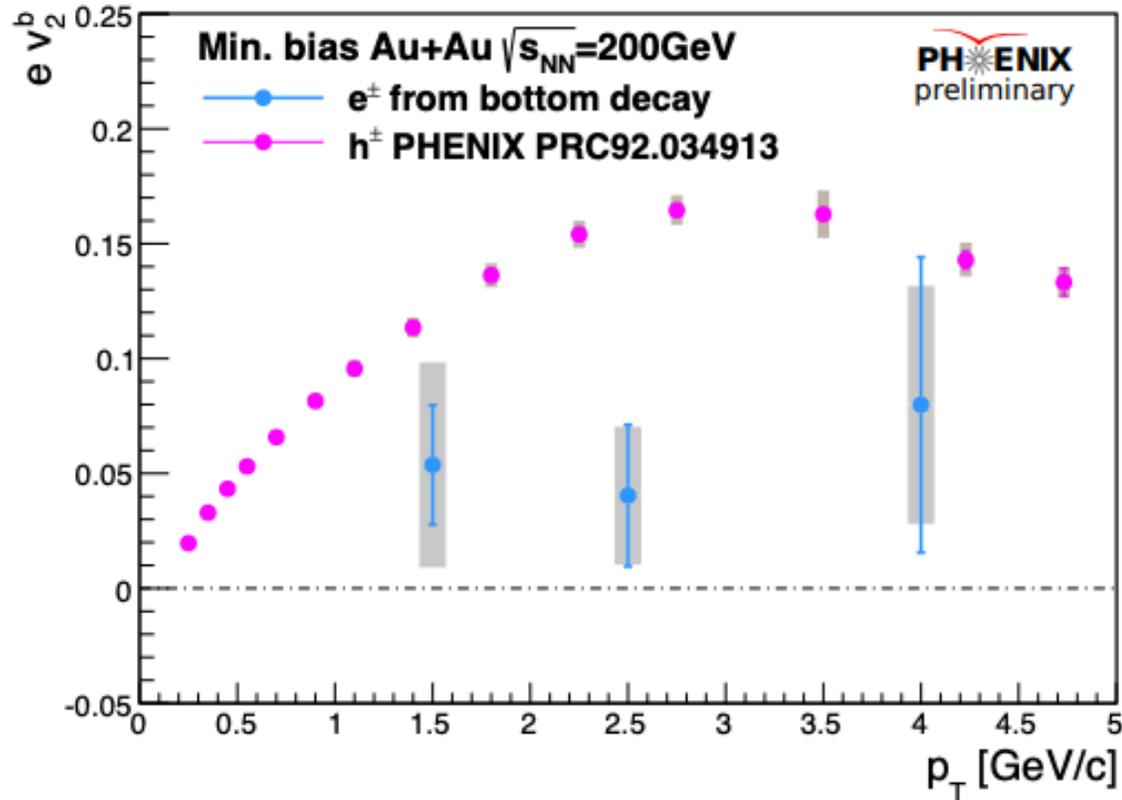
HF: チャームハドロンのフロー



CMS-PAS-HIN-19-008

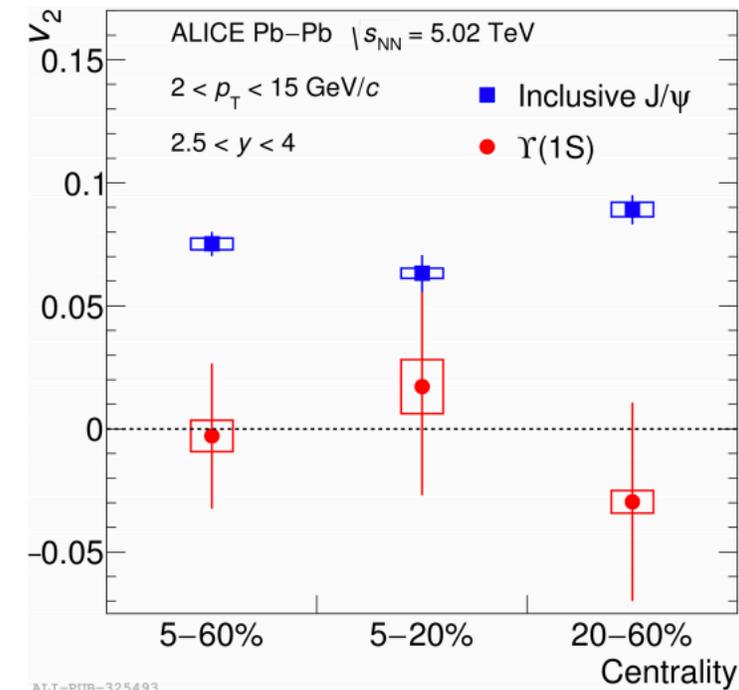
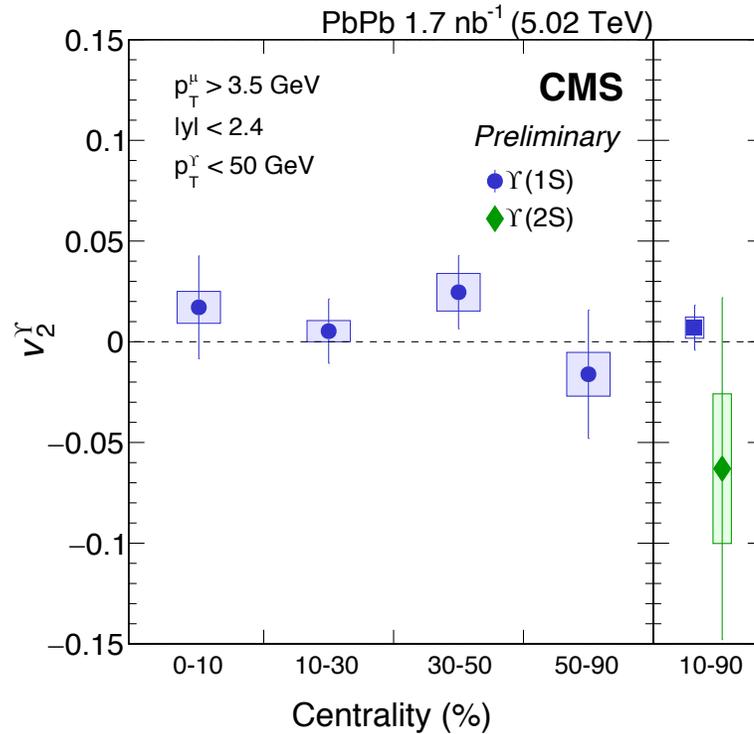
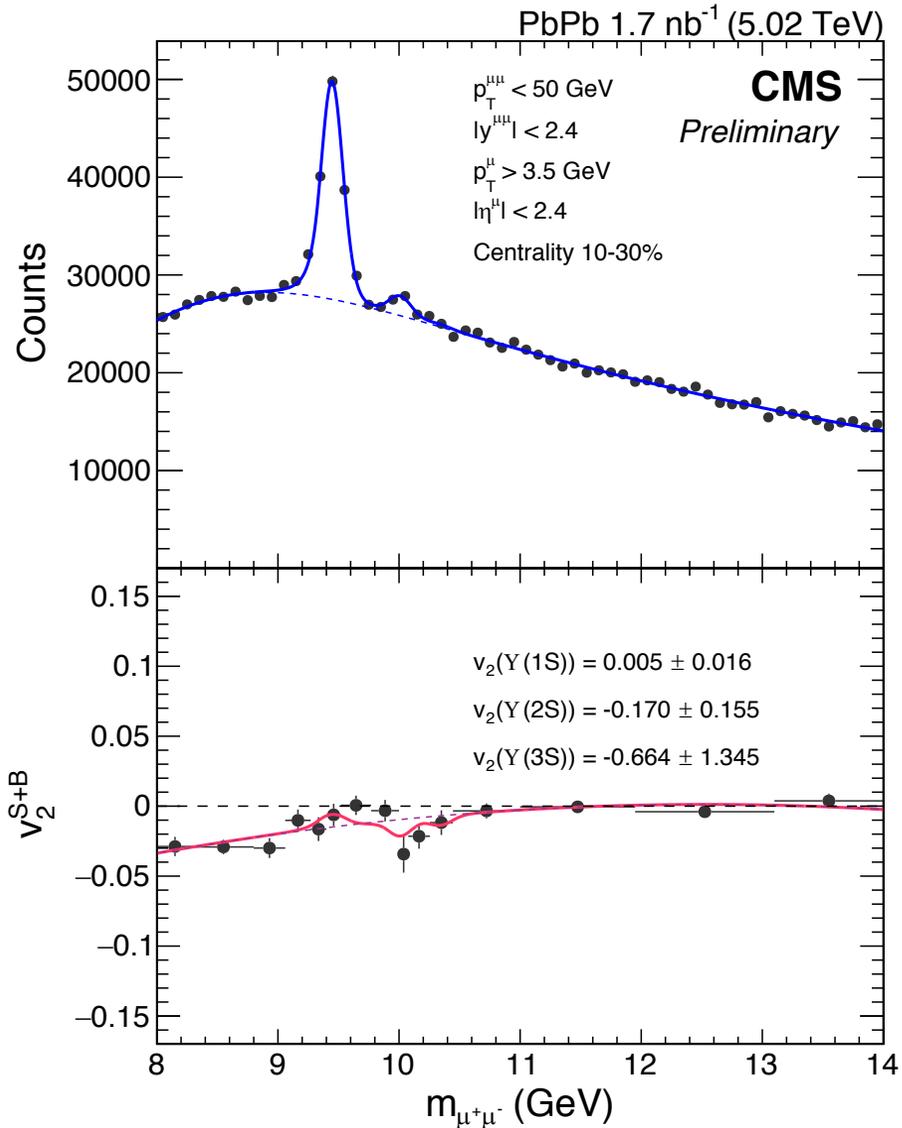
- ATLASでもHF $\rightarrow\mu$ を広い運動量領域で測定した
- Prompt D⁰の v_n も $p_T=2$ GeV/cまで測定した

HF: ビューティハドロンのフロー



- LHCとRHICともにopen bクォークのnon-zero v_2 を観測した。
- PHENIXでも1.1 σ の優位度
- STARでも同様

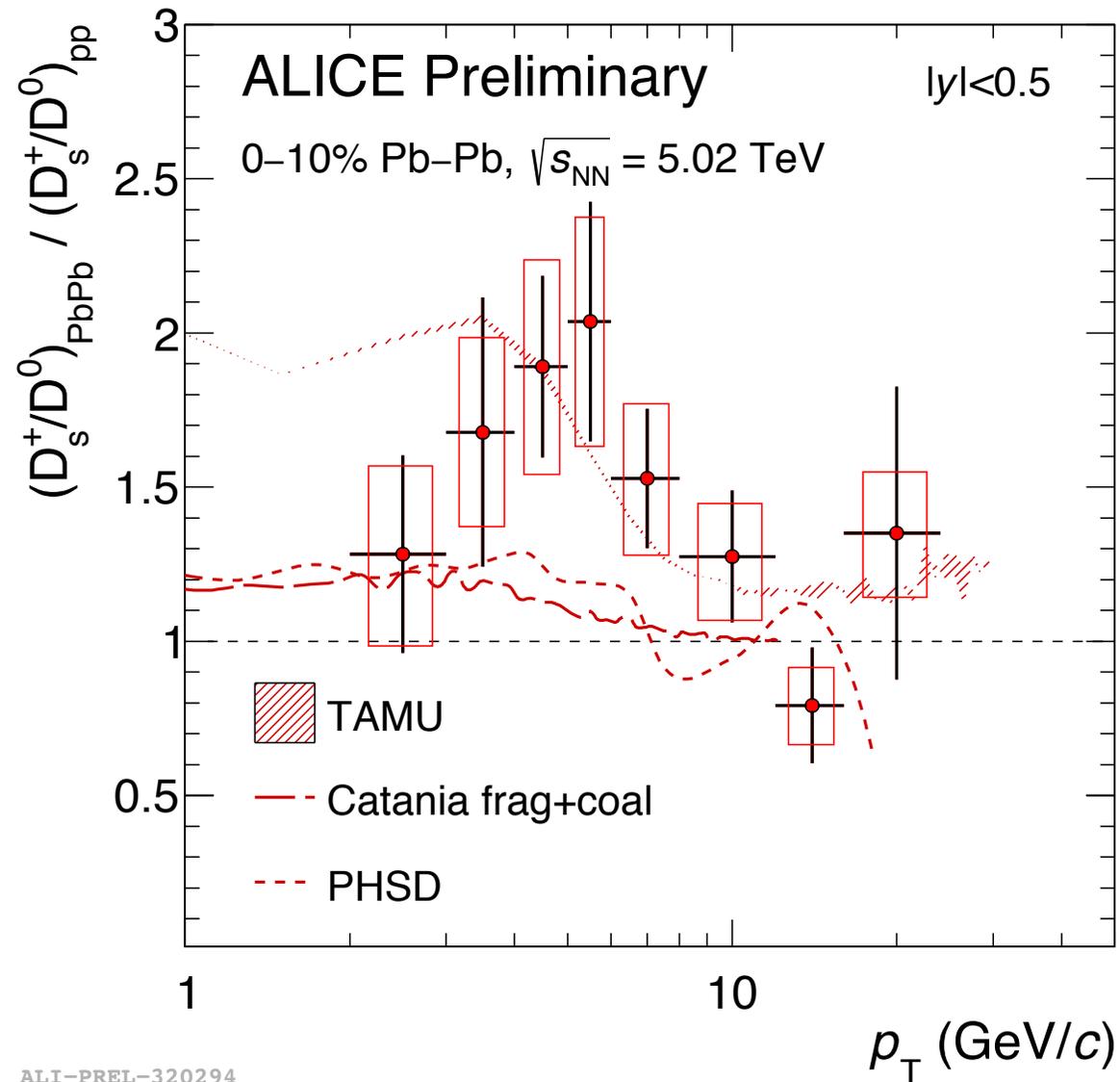
Quarkonia : Υ (nS) のプロー初測定



arXiv:1907.03169

- J/psi $v_2 \sim 0.07$
- $\Upsilon(1S)$ の $v_2=0$
- $\Upsilon(2S)$ の $v_2=0$

HF : D_S^+/D^0 比

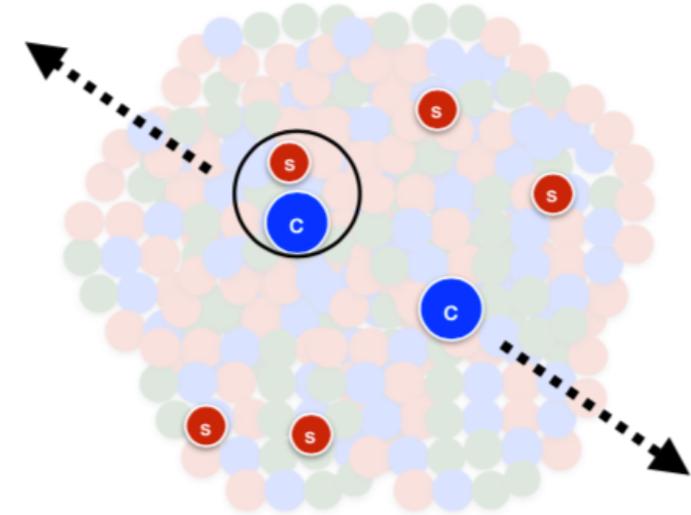


ALI-PREL-320294

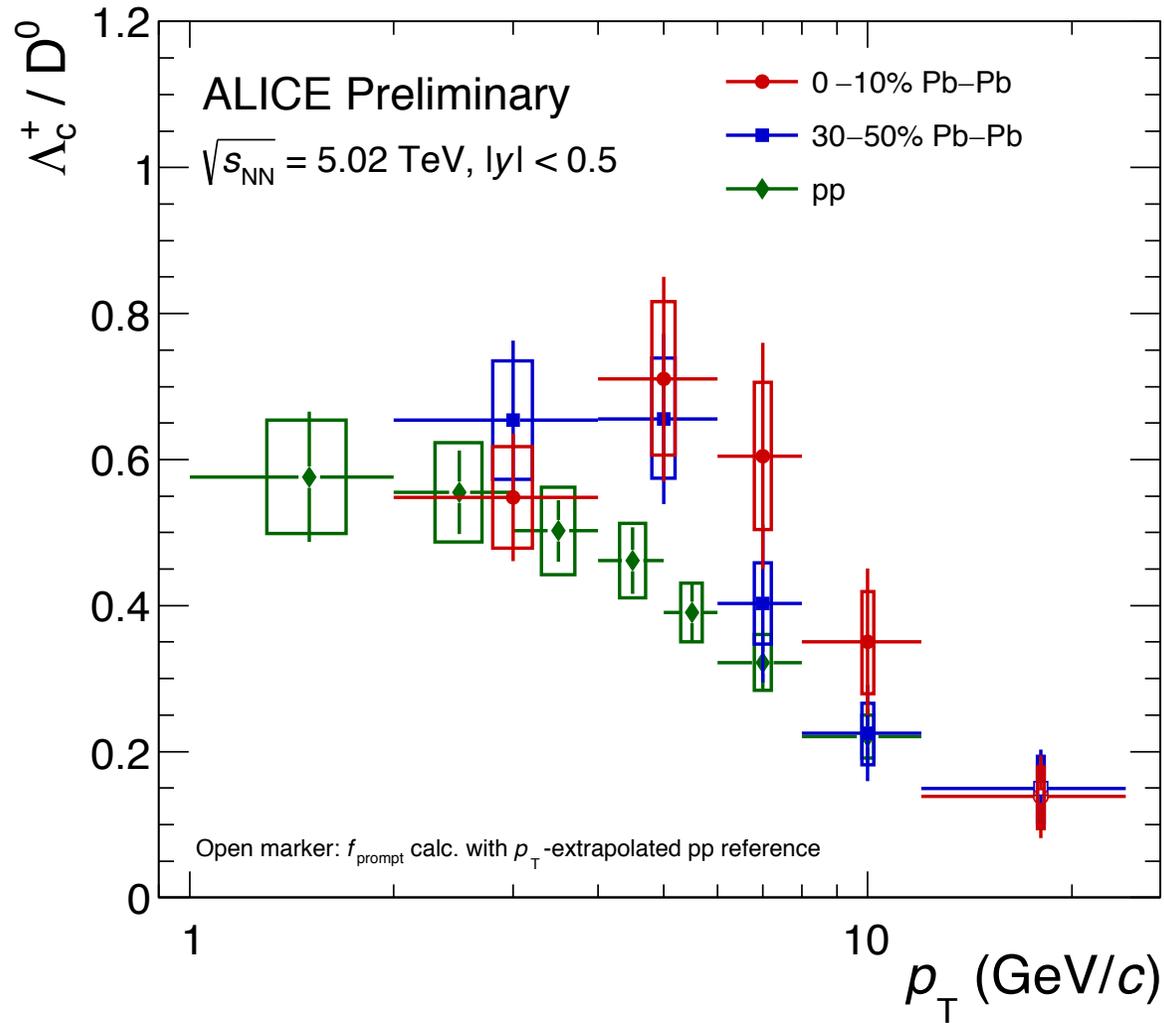
AA衝突ではppと比較して

- ストレンジネスの増加と
- sとcとの融合

によって D_S^+/D^0 比は増加すると期待

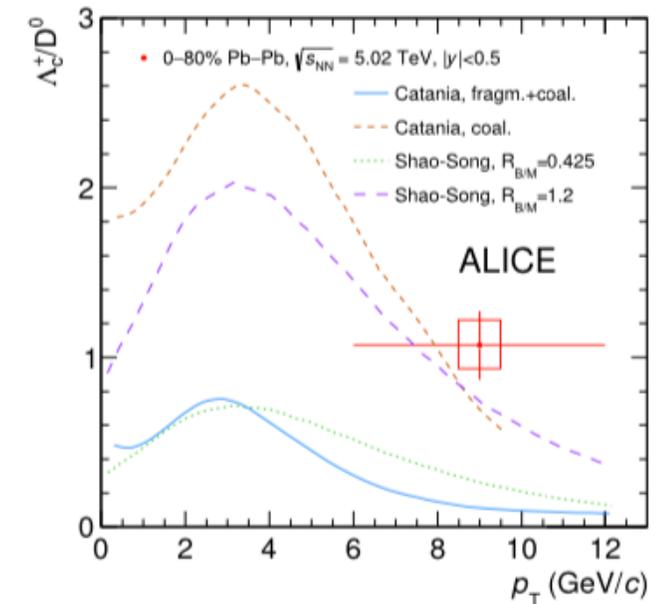


HF : Λ_c^+ / D^0 比



- チャームクォークの融合によって、バリオン対メソン比の増加
- $4 < p_T < 8 \text{ GeV/c}$ で pp での比よりも大きな比を観測した。
- 2015年データから粒子多重度依存性と低横運動量へ拡張

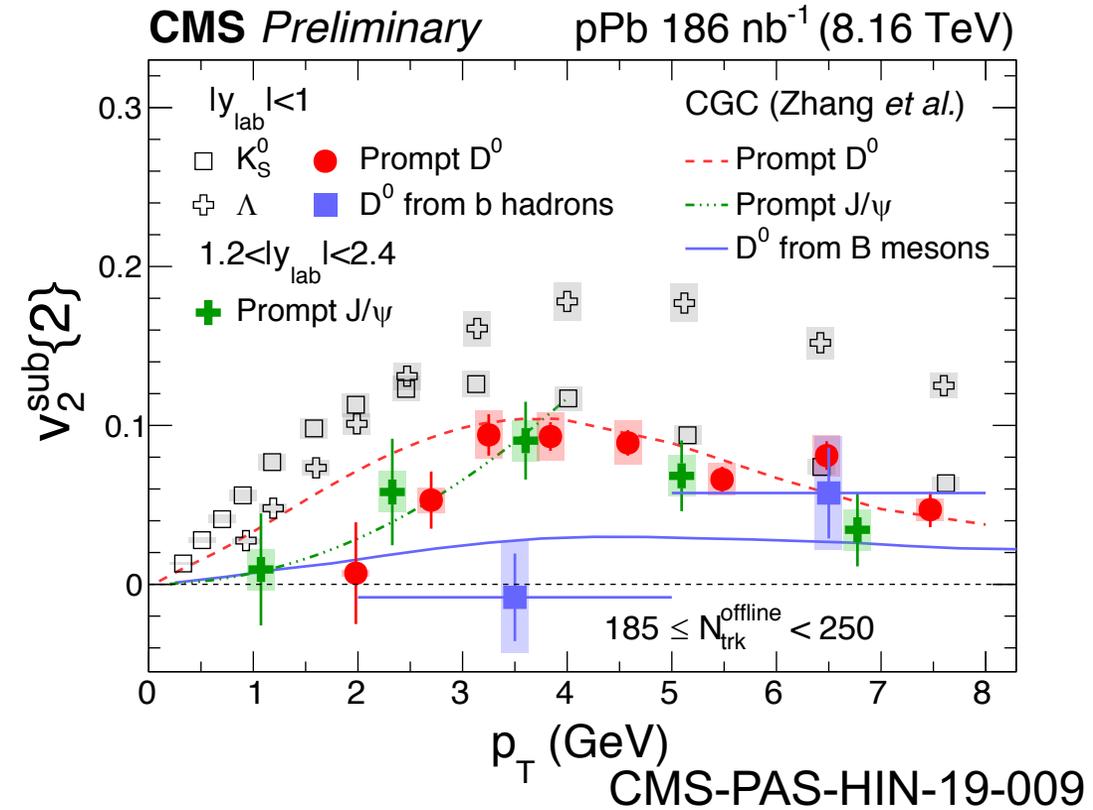
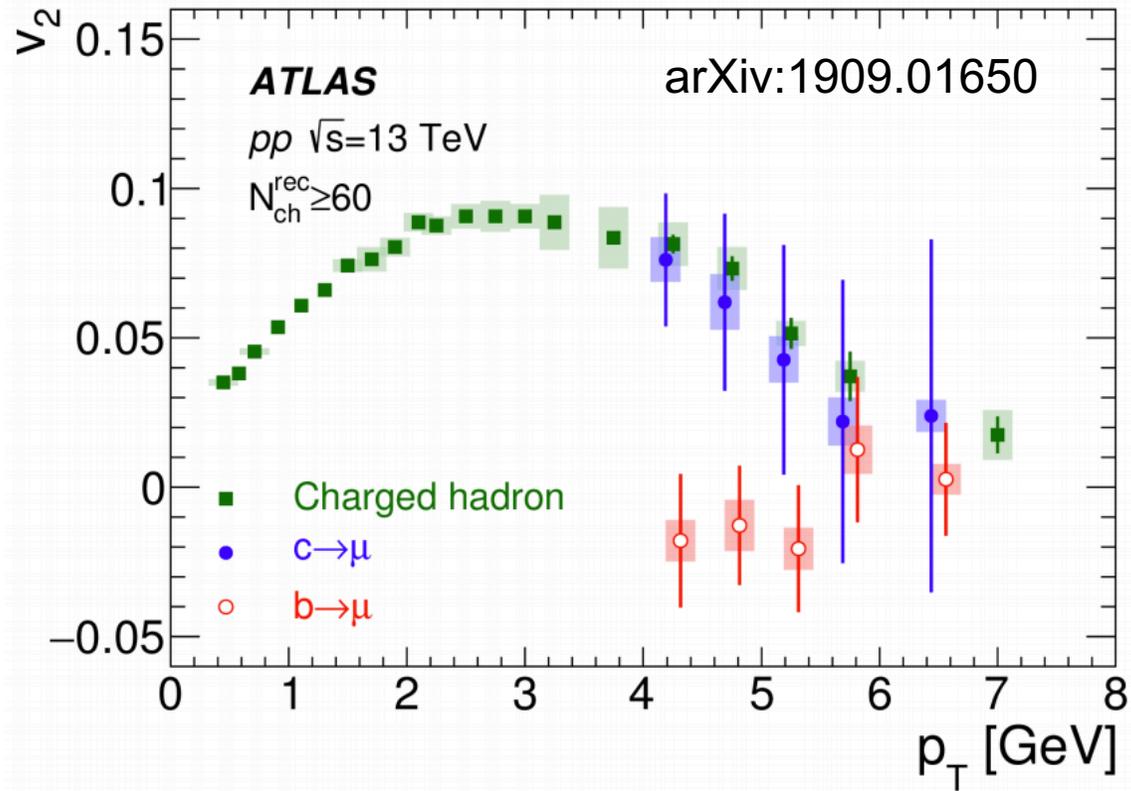
(PLB 793 (2019) 212-223)



チャームセクターでのバリオン対メソン比増加

ALI-PREL-323761

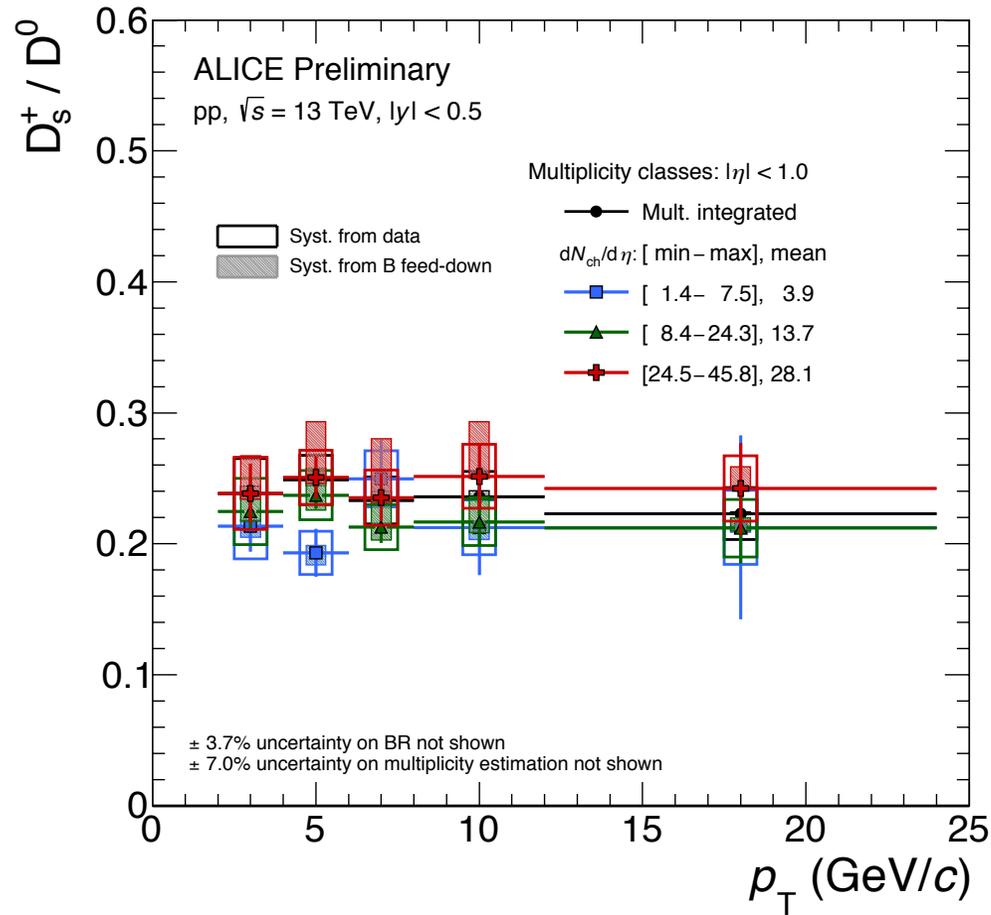
HF : 小さな系での重ハドロンの v_2



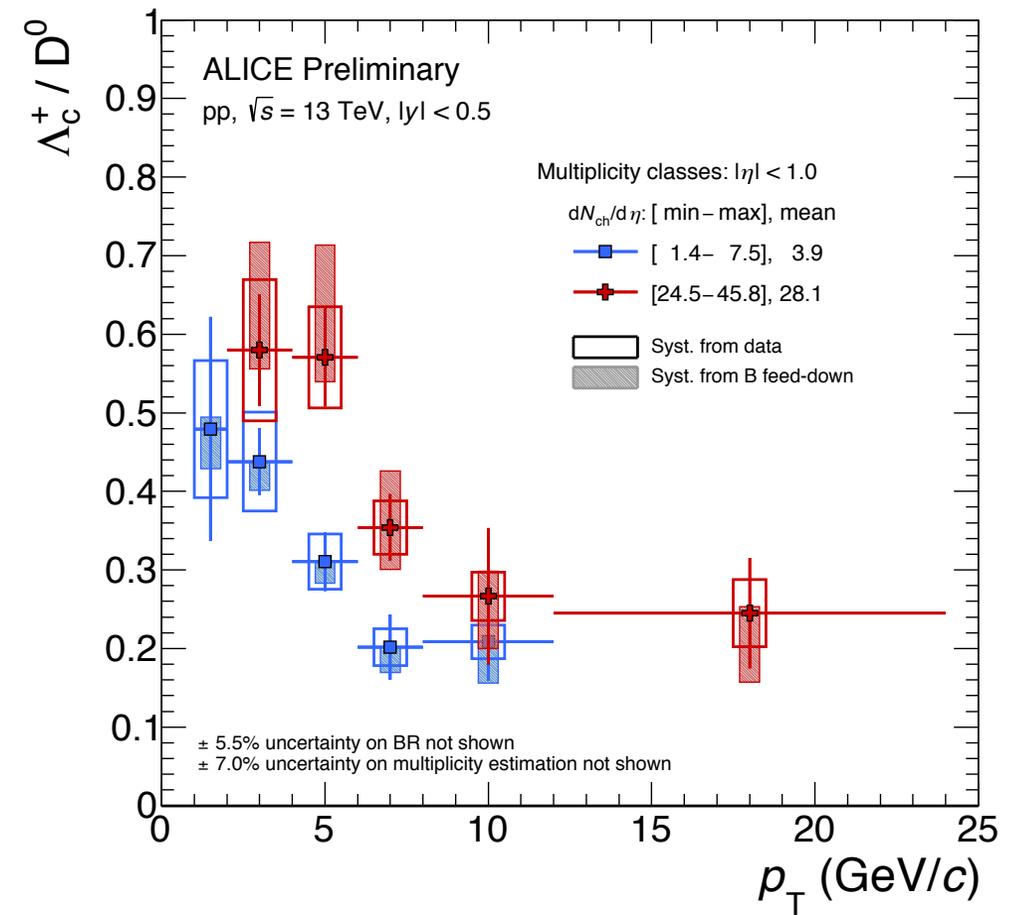
高粒子多重度事象(HM)において:

- チャームハドロンの $v_2 > 0$
- ビューティハドロンの $v_2 = 0$

HF : 小さな系での D_S^+/D^0 比・ Λ_C^+/D^0 比



ALI-PREL-336402

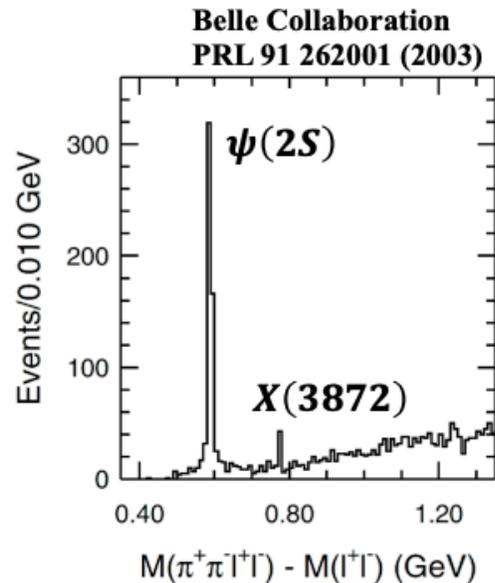


ALI-PREL-336418

- D_S^+/D^0 比 : 誤差の範囲内で変化なし(系統的に高粒子多重度事象で増加?)
- Λ_C^+/D^0 比 : LMからHMへ顕著に増加

Quarkonia : X(3872) (= $\chi_{c1}(3872)$)

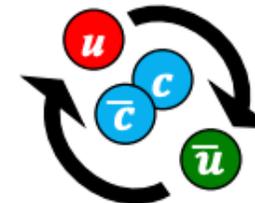
- Belleで2003年に初測定
- CDFとLHCbにより量子数 $J^{PC}=1^{++}$ を決定
- 未だ内部構造は不明
 - $D^0-\bar{D}^{*0}$ 分子 : $X(3872) \simeq D^0(1875) + \bar{D}^{*0}(2007)$ 質量が近い
 - compact tetraquark
 - Hybrid : ccのまわりにuuが回っているような状態



Compact tetraquark/pentaquark



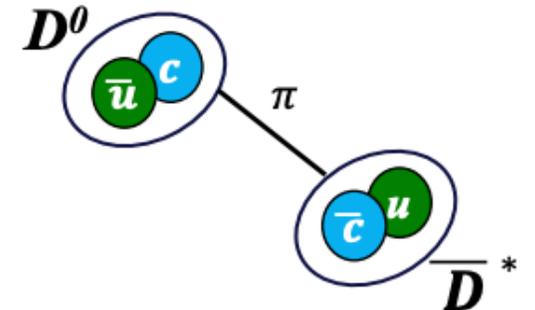
Diquark-diquark
PRD 71, 014028 (2005)
PLB 662 424 (2008)



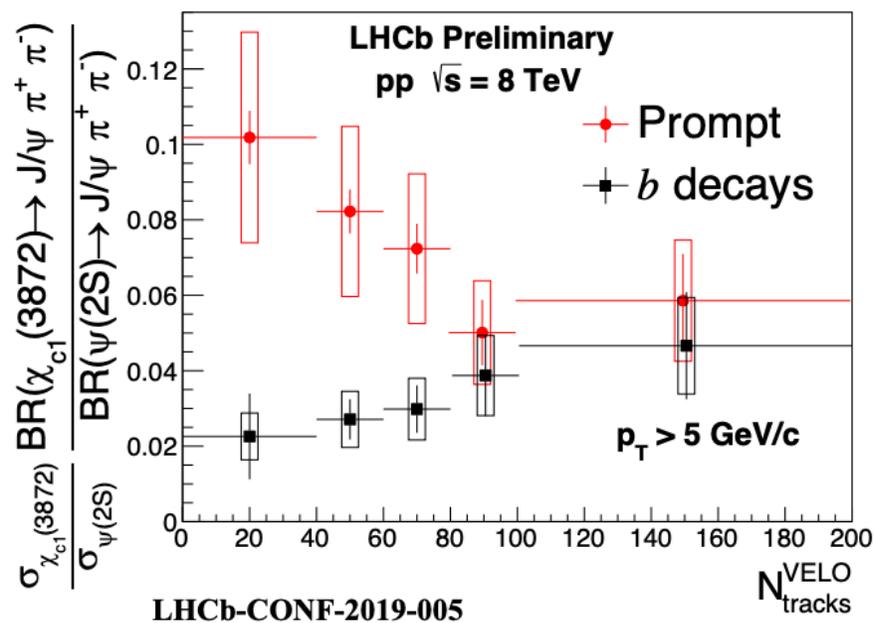
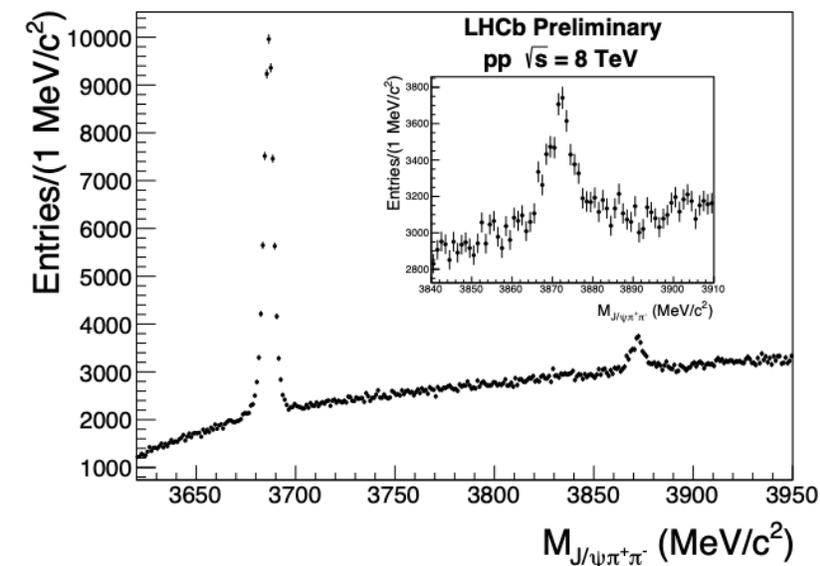
**Hydrocharmonium/
adjoint charmonium**
PLB 666 344 (2008)
PLB 671 82 (2009)

Hadronic Molecules

PLB 590 209 (2004)
PRD 77 014029 (2008)
PRD 100 0115029(R) (2019)



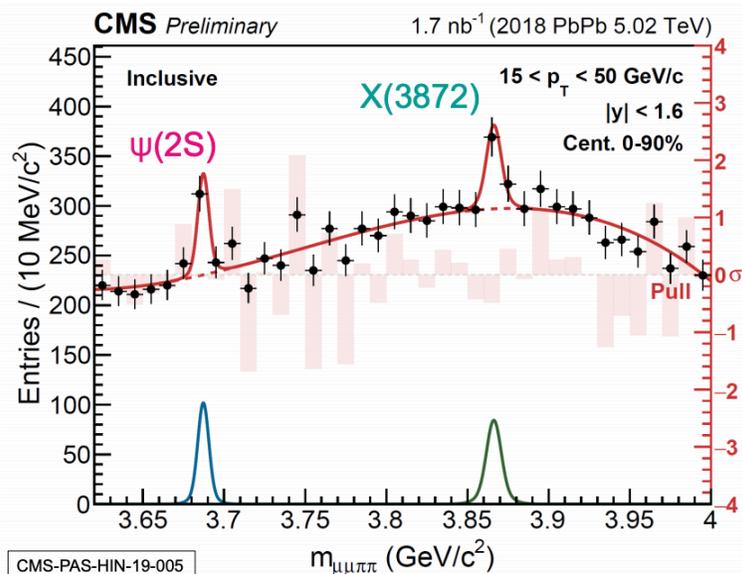
Quarkonia : X(3872) ($= \chi_{c1}(3872)$)



$$R = \frac{N_{X(3872)}^{(Corr)}}{N_{\psi(2S)}^{(Corr)}}$$

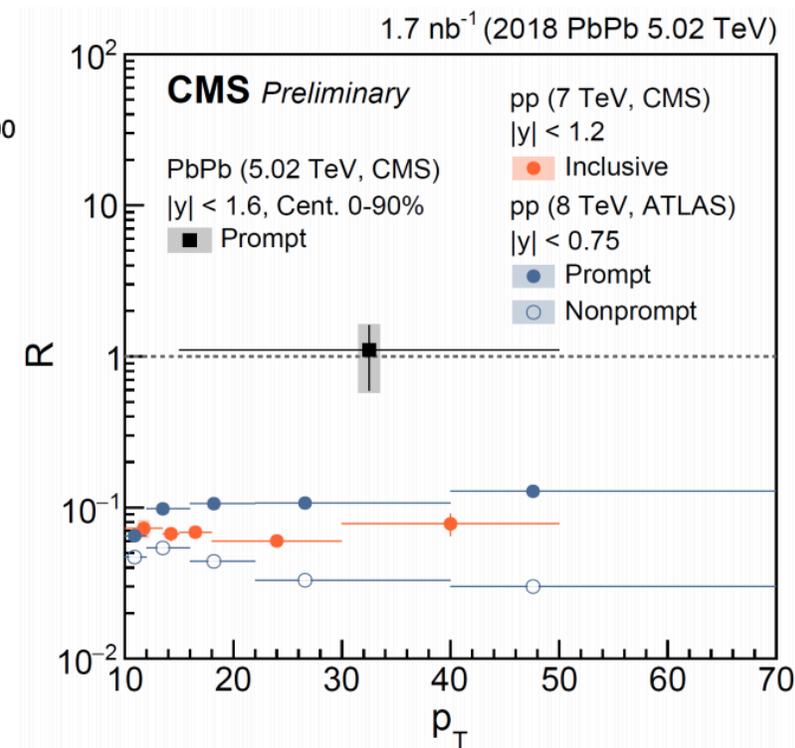
In PbPb collisions:

$$R = 1.10 \pm 0.51 \text{ (stat.)} \pm 0.53 \text{ (syst.)}$$



RはAA衝突でクォークの融合で、pp衝突と比較して、増加が期待される。

QM19では増加の”ヒント”が観測された。Run3でのより低い運動量領域と統計量に期待

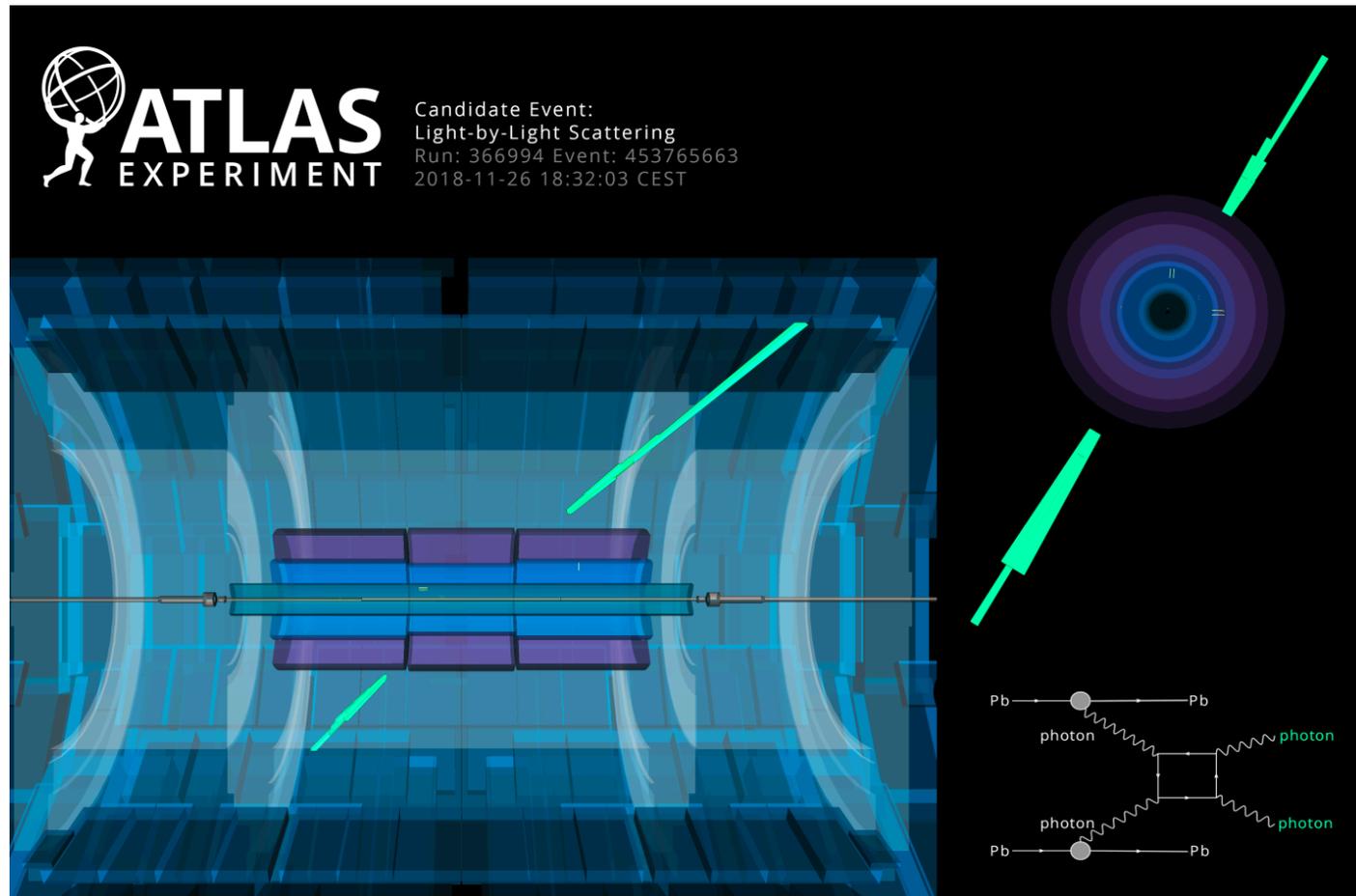
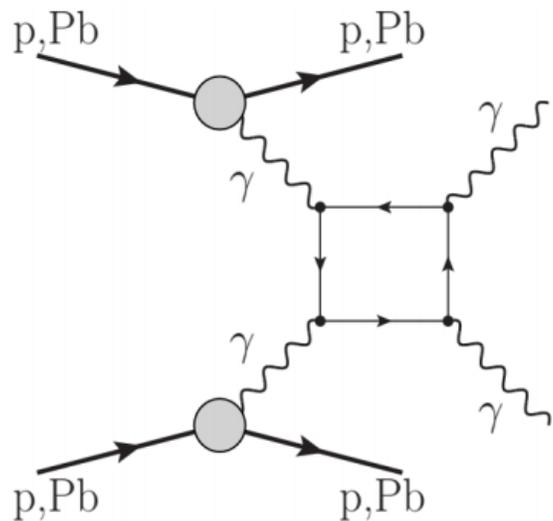


HFの小まとめ

- D中間子を $p_T=0$ GeV/cまで初測定
- prompt D,J/psi, non-prompt D,J/psi, 全構成Bによってエネルギー損失のフレーバ依存性に対してさらに制限
- AA衝突では、c/bともに $v_2>0$
- 高粒子多重度の小さい系で Λ_c/D^0 比が増加：cと軽クォークとの融合
- 高粒子多重度の小さい系では、 $v_2^c>0$, $v_2^b = 0$
- $\chi_{c1}(3872)$ をPb-Pb衝突で初測定： $D^0-\bar{D}^{*0}$ 分子？

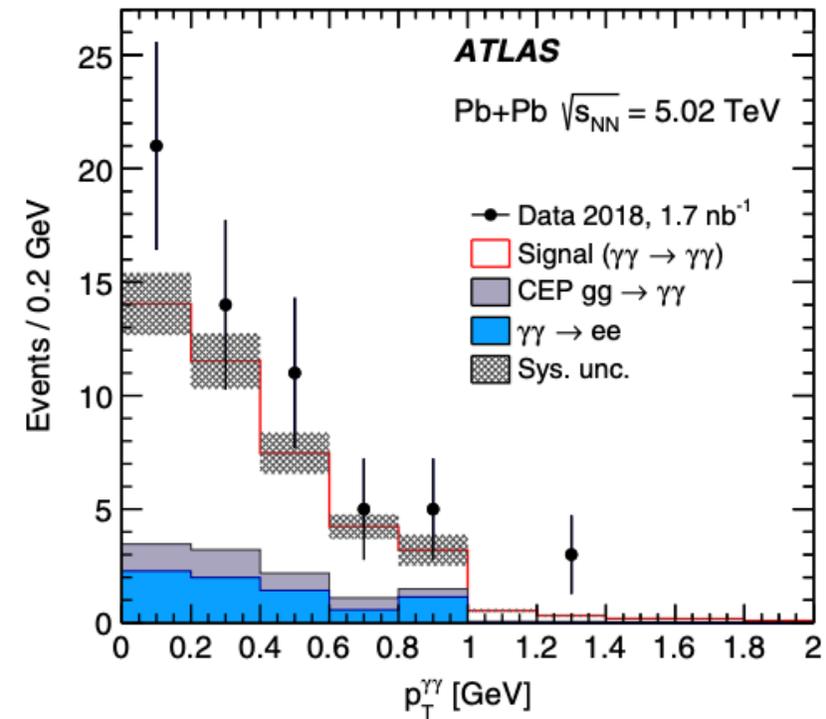
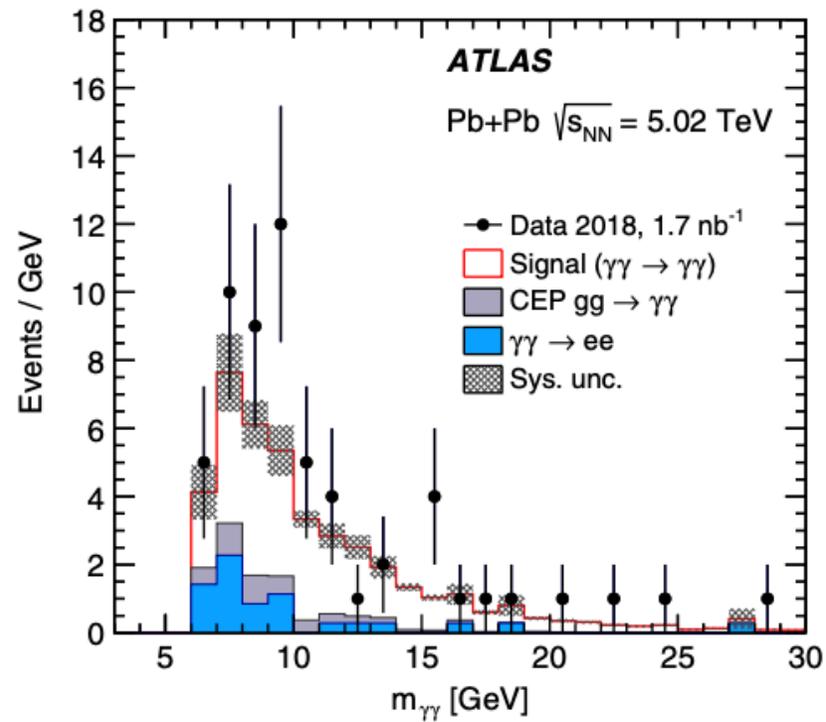
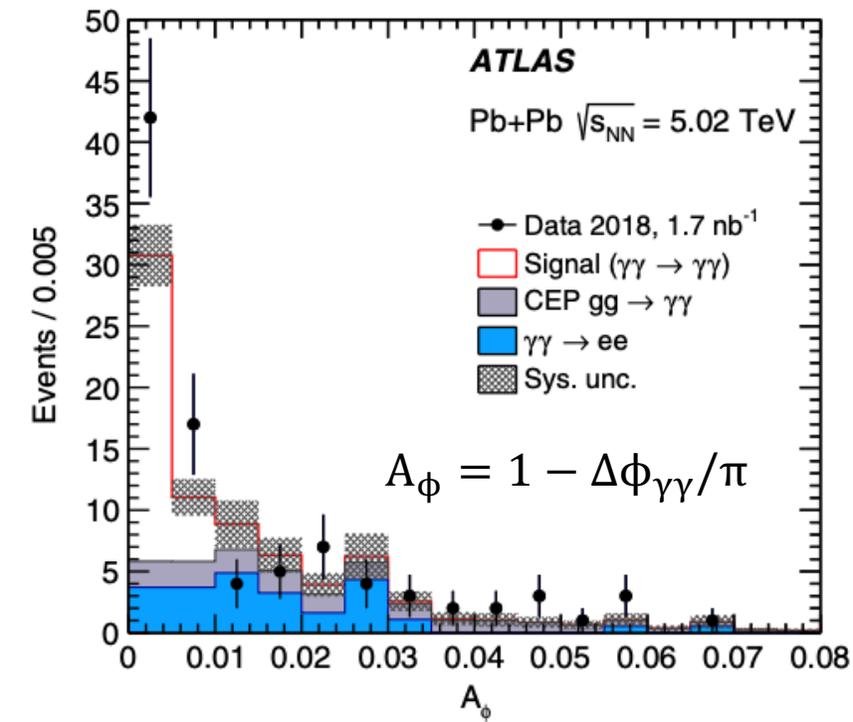
- UPC
- 高密度領域からの結果HADES
- 様々な衝突系での直接光子
- ソフトな電子対
- 電弱ボソンによるnPDFへの制限

超周辺衝突での光子光子散乱



- 2015年のデータ : Nature Phys 13, 852–858 (2017)
- 2018年のデータ : Phys. Rev. Lett. 123, 052001

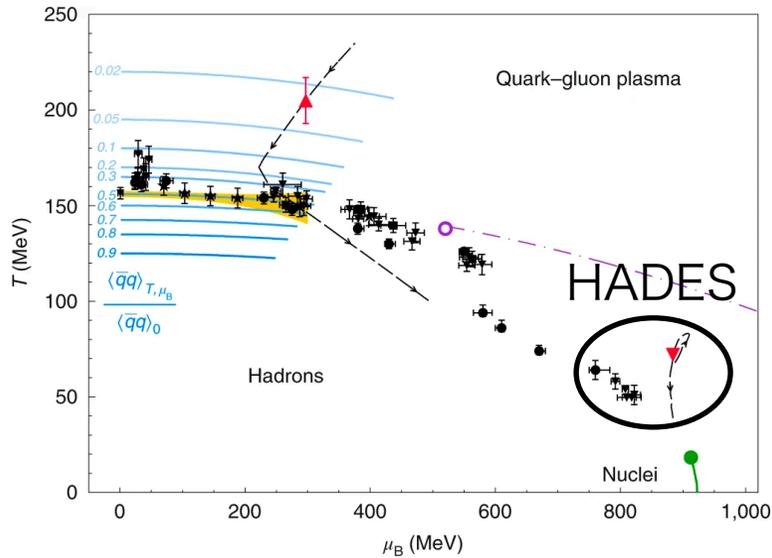
超周辺衝突での光子光子散乱



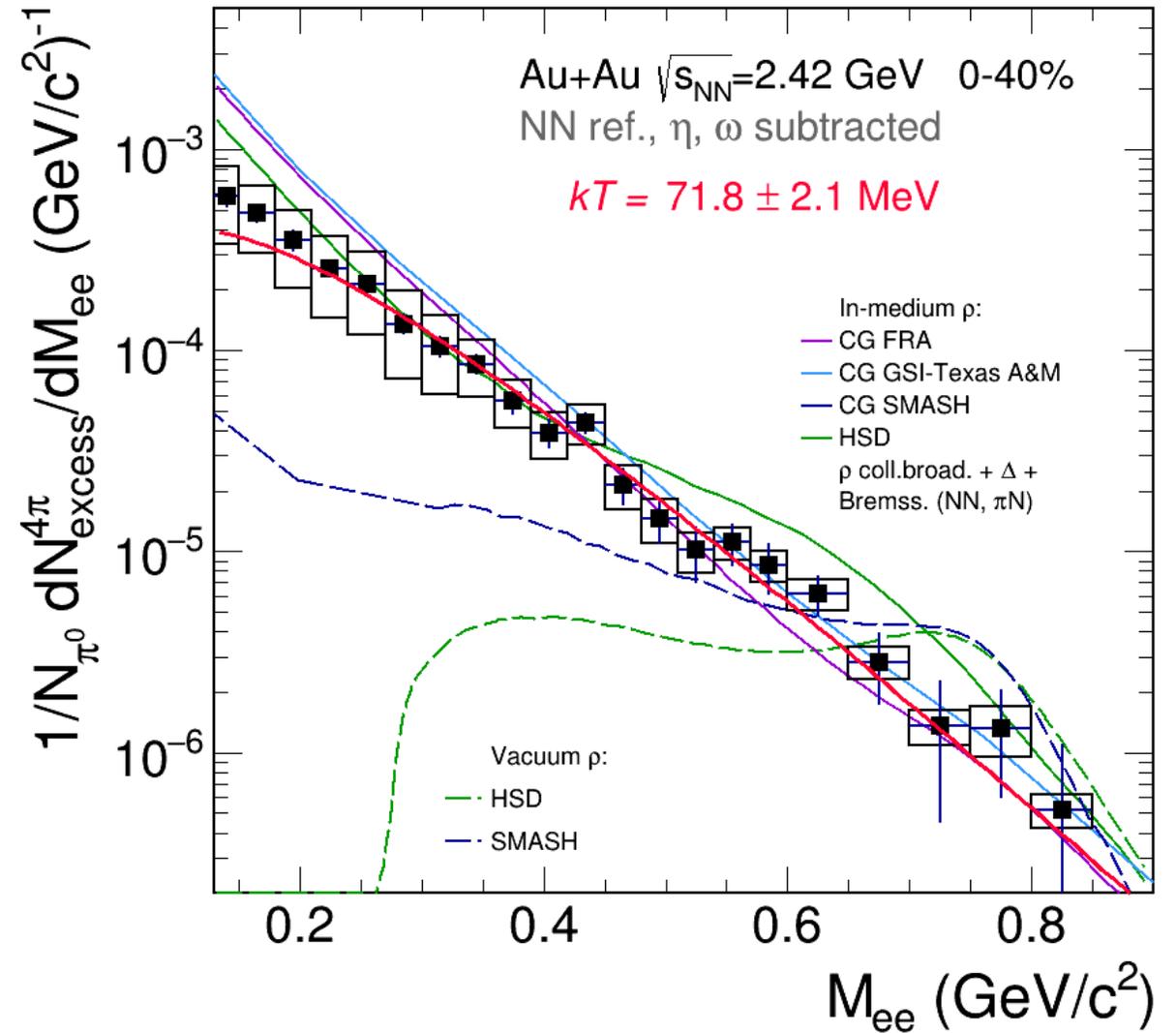
- 信号領域 $A_\phi < 0.01$ (back to back)
- 59信号事象・12背景事象を観測
- $\sigma = 78 \pm 13(\text{stat}) \pm 7(\text{syst}) \pm 3(\text{lumi}) \text{ nb}$

電子対測定@HADES at $\sqrt{s_{NN}} = 2.42$ GeV

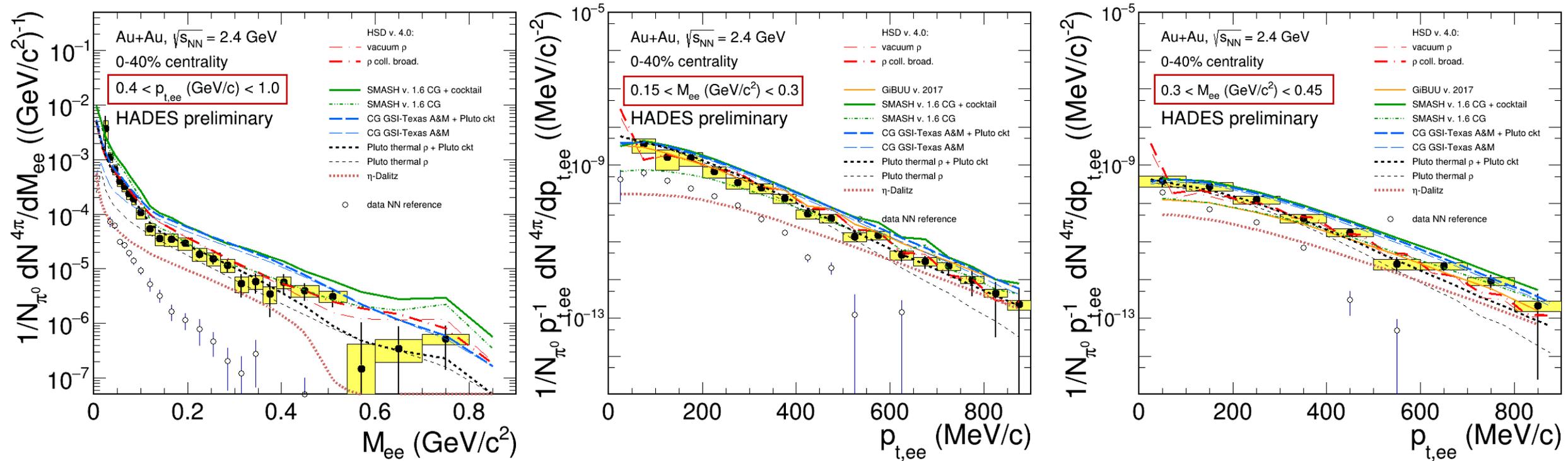
[HADES Collab., Nature Physics 15 (2019) 1040]



- RICH・TOFなどで電子測定に特化
- $dN/dM_{ee} \propto \exp(-M_{ee}/T)$
- 熱的電子対初測定 $T = 72 \pm 2$ MeV



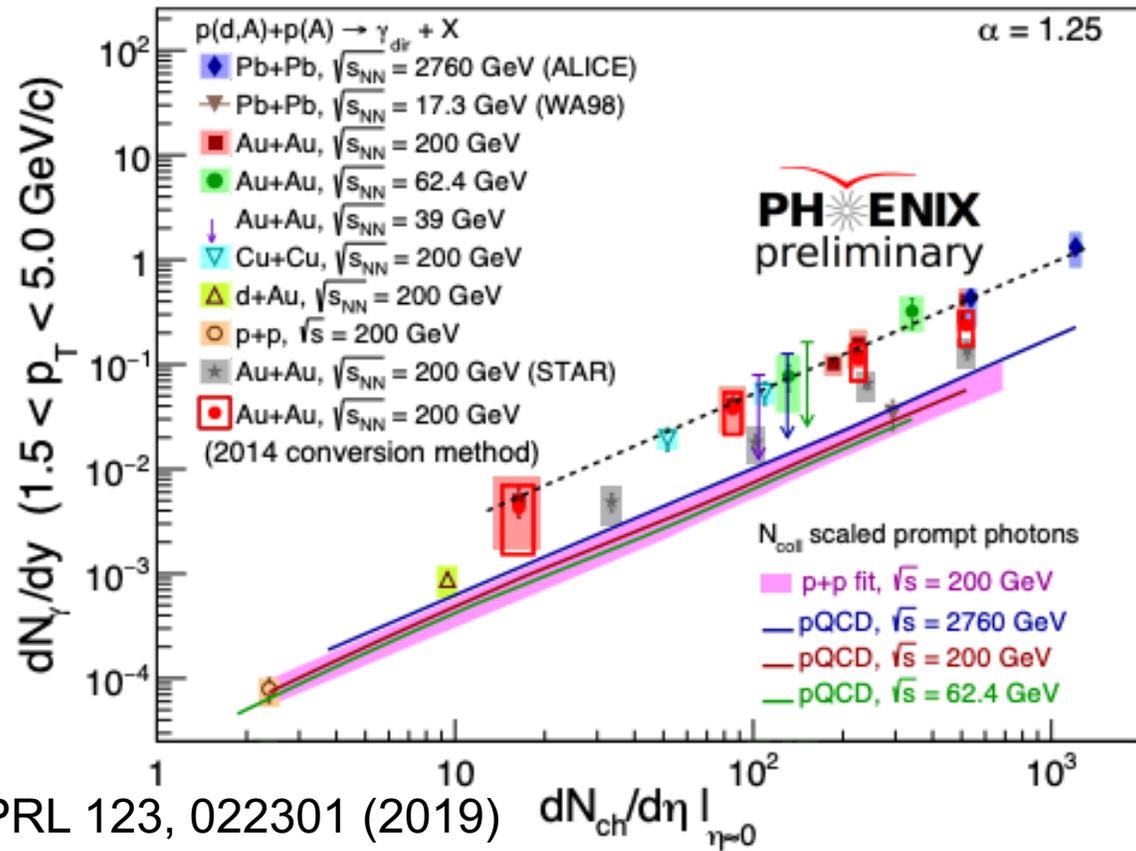
電子対測定@HADES at $\sqrt{s_{NN}} = 2.42$ GeV



- Mass, p_T sliceしても誤差が小さく、理論モデルを取捨選択するのに最適

[HSD: Phys. Rev. C 87, 064907 (2013),
 GiBUU: J.Phys.Conf.Ser. 612 (2015) 012039,
 SMASH: arXiv:1711.10297 [nucl-th],
 CG GSI-Texas A&M: Eur. Phys. J. A, 52 (2016) 131,
 Pluto: PoS ACAT (2007) 076]

様々な系での直接光子



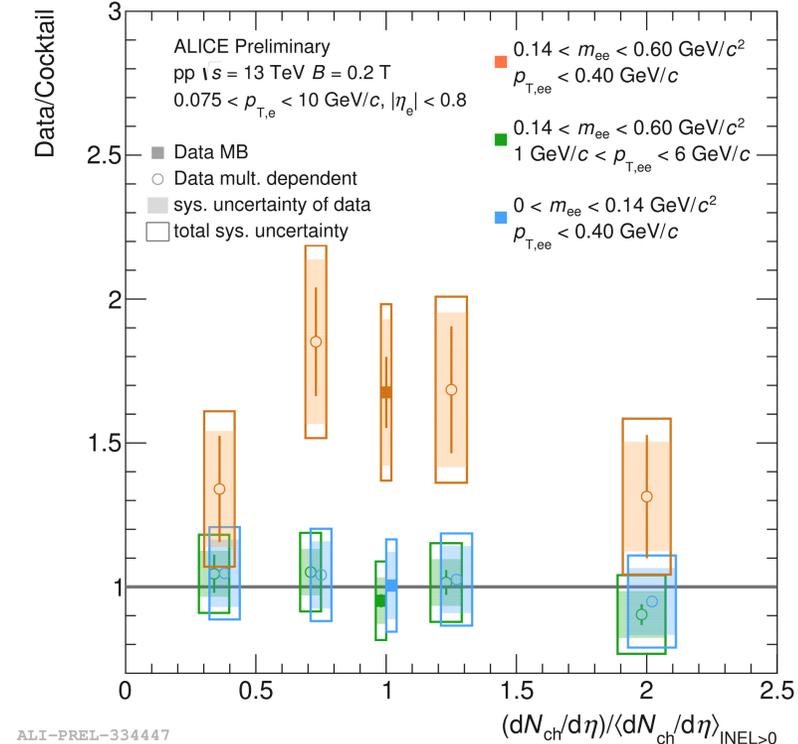
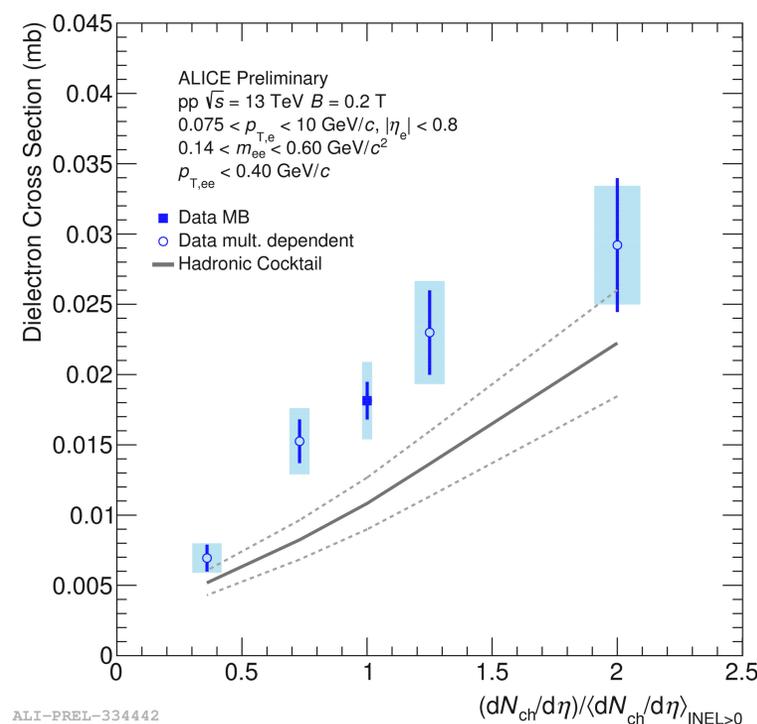
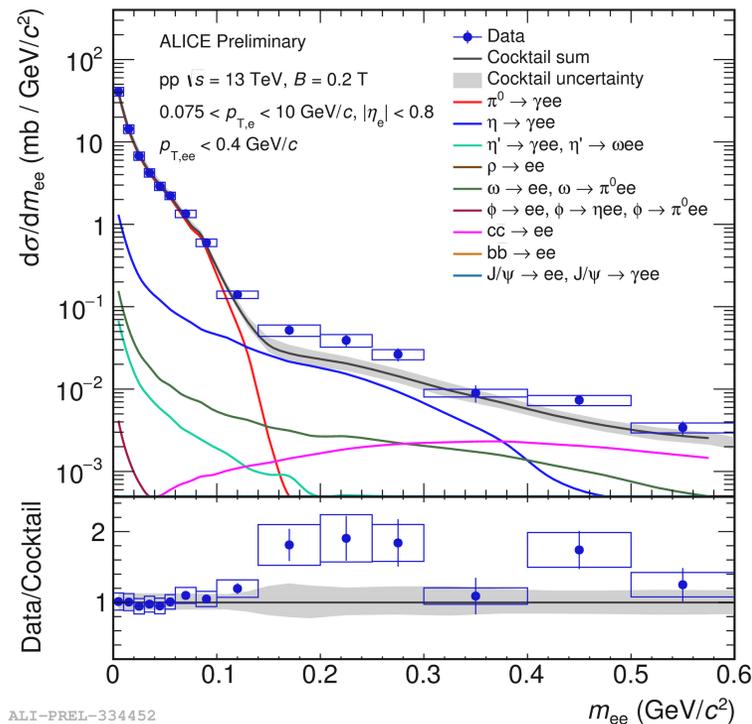
- 直接光子のスケーリング
-起源はハドロオン相に近いところ
- 赤丸：2014年の新データ ($\gamma \rightarrow ee$)
- 過去の全結果と一致
- 統計誤差も低減
- $dN_{ch}/d\eta \sim 10$ から熱放射の始まりがありそう
→周辺衝突の結果に期待

Universal scaling behavior in all A+A systems

$$dN_{\gamma}/dy = A \times (dN_{ch}/d\eta)^{\alpha} \quad \alpha = 1.25 \pm 0.02$$

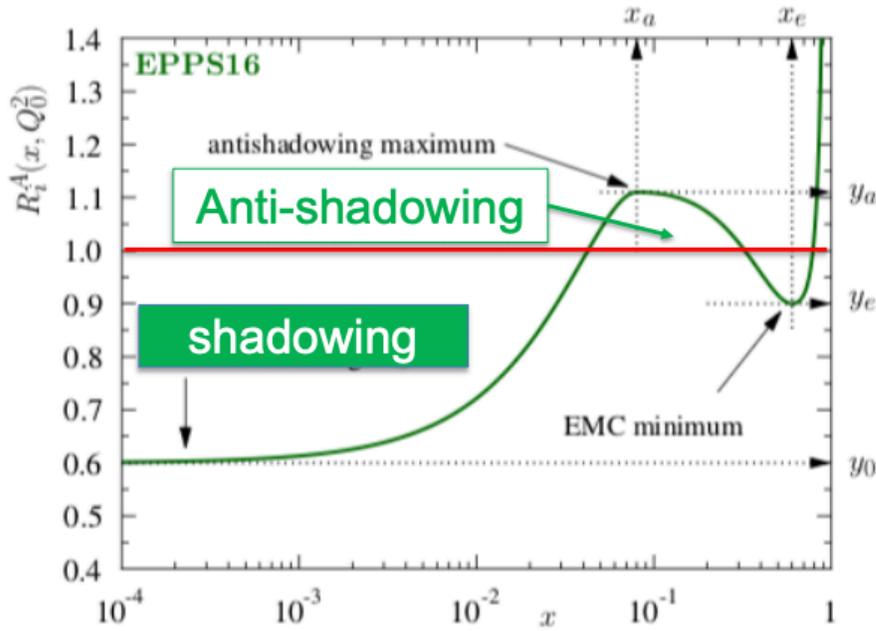
Source of photons must be similar

小さい系での電子対 in pp at 13 TeV (B=0.2T)



- ソフトな電子対が $m_{ee} > 140$ MeV で既知ハドロンの和によって説明されない超過成分
- 断面積が粒子多重度に対して比例
- π^0 領域 ($0.4 < p_{T,ee}$ GeV/c) と η 領域 ($1 < p_{T,ee} < 6$ GeV/c) では既知ハドロンの和と一致

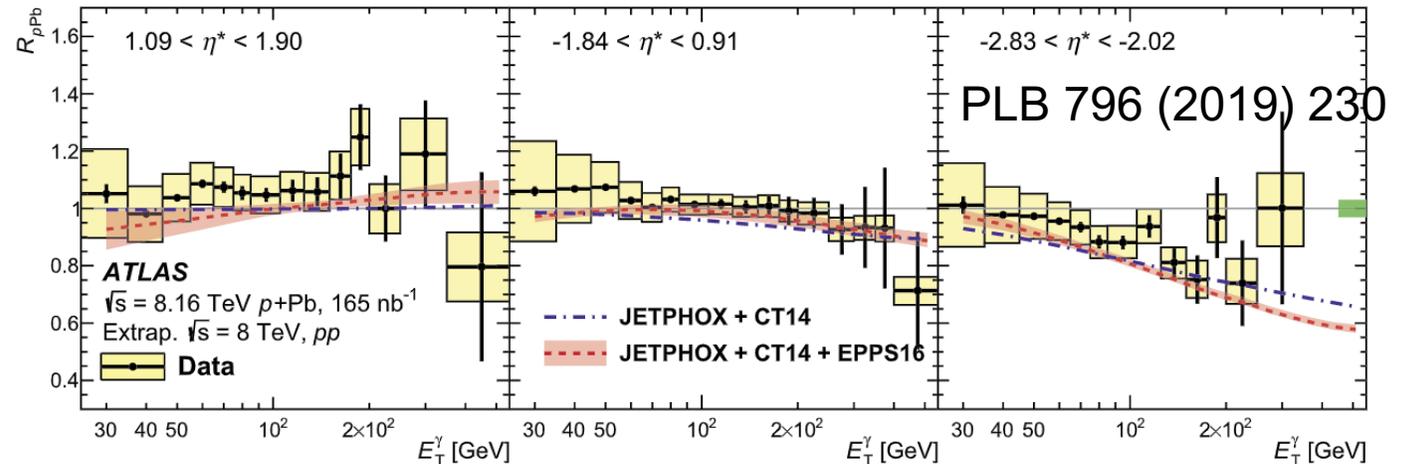
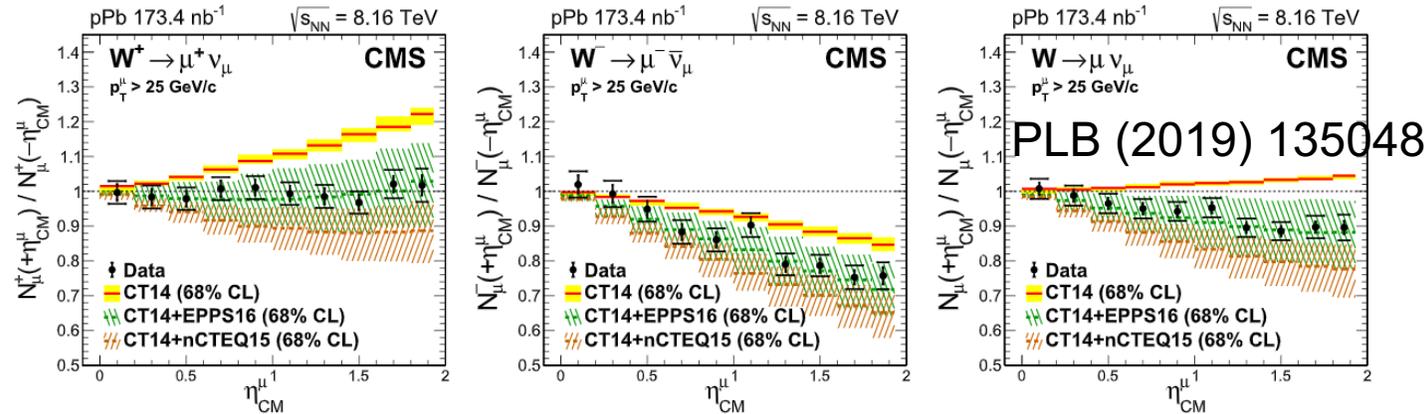
Constrains to nPDF with $\gamma/W/Z$ in pPb collisions



W in 8.16 TeV pPb

Z in 5.02 TeV pPb

Drell-Yan in 8.16 TeV pPb



• nPDF : modified parton distribution function in the bound nucleons

– not same as free nucleon PDF

$$f_i^{P/A}(x, Q^2) \equiv R_i^A(x, Q^2) f_i^P(x, Q^2)$$

Nuclear modification (under R_i^A)
Free proton baseline (CT14NLO) (under f_i^P)

• EPPS16への制限
Eur. Phys. J. C (2017) 77:163

EMの小まとめ

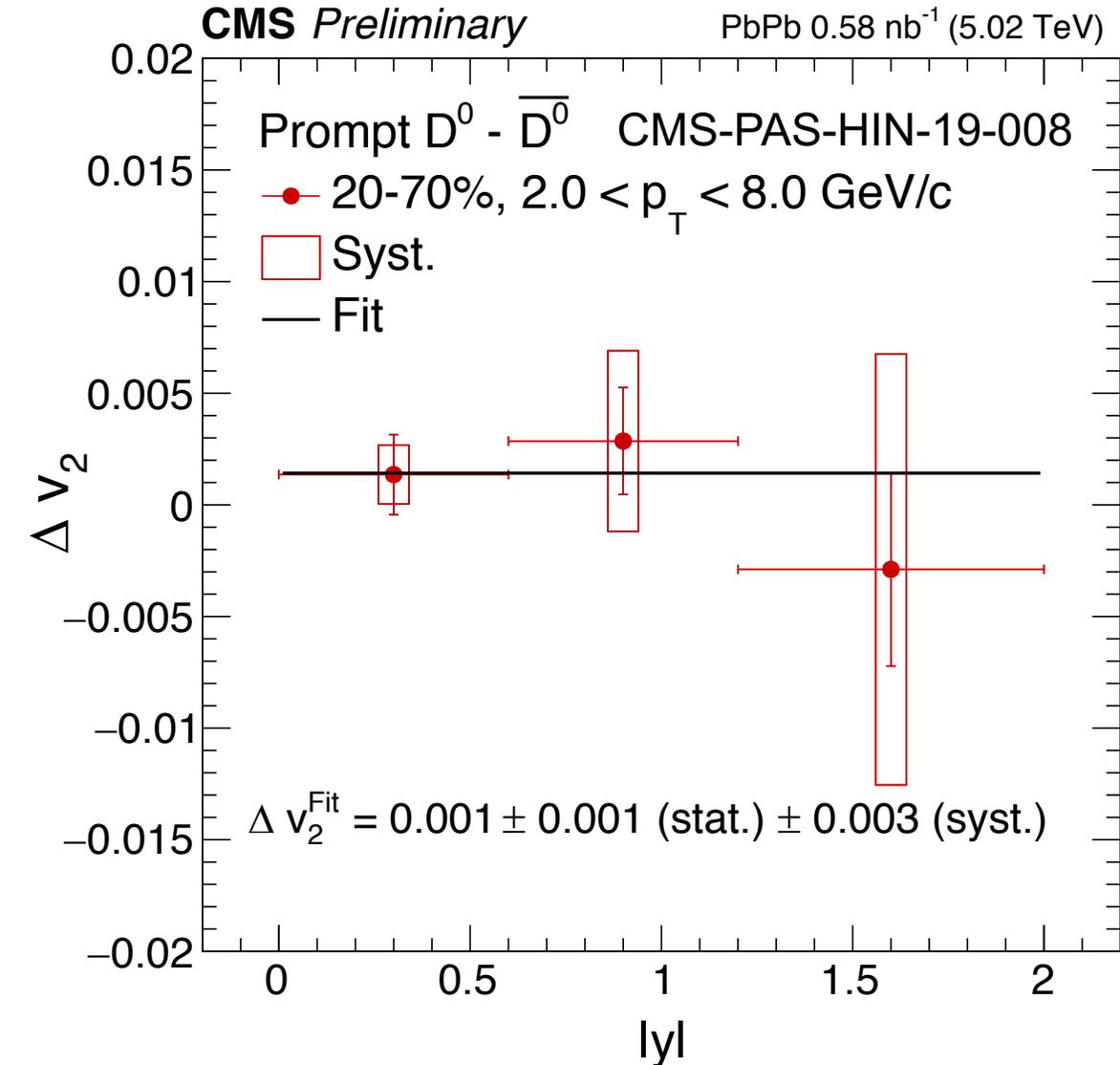
- UPCでの光子光子散乱がより確固たるものになった
- 高密度領域HADESの電子対不変質量分布より $T=72\pm 2\text{MeV}$
- 低横運動量電子対($0.14 < m_{ee} < 0.6 \text{ GeV}/c^2$)のカクテルからの超過成分
- PHENIXの様々な系での直接光子のさらなる改善(conversion)
- 電弱ボソン測定がnPDF調整(EPPS16)へ大きく貢献

まとめ

- Jet:
 - TeV領域までジェット抑制
 - 単なる R_{AA} だけでなく電弱ボソンでタグしたり、その内部構造に注目し、半径走査、2sub-jetsのバランス・距離の違いを研究
 - 太いジェットをグルーミングすることによってDead-cone効果初測定
- HF:
 - D中間子を $p_T=0$ GeV/cまで初測定
 - prompt D,J/psi, non-prompt D,J/psi, 全構成Bによってエネルギー損失のフレーバ依存性に対してさらに制限
 - 高粒子多重度の小さい系で Λ_c/D^0 比が増加：cの再結合
 - $\chi_{c1}(3872)$ をPb-Pb衝突で初測定： $D^0-\bar{D}^{*0}$ 分子？
- EM:
 - UPCでの光子光子散乱がより確固たるものになった
 - 高密度領域HADESの電子対不変質量分布より $T=72\pm 2$ MeV
 - 低横運動量電子対($0.14 < m_{ee} < 0.6$ GeV/c²)のカクテルからの超過成分

backup

HF : prompt- D^0 中間子の v_2 を使用した強磁場探索



- 前ページCMSのprompt D_0 の v_2 を利用した強磁場探索
- 磁場の寿命 ~ 0.1 fm/c
Phys. Rev. C 98, 055201 (2018)
- 初期の硬散乱起源のprompt Dの方位角分布が感度をもつ
- 今のところ、0の無矛盾