

ALICE実験での 電子対の結果と展望

関畑 大貴 (東大CNS)

Heavy Ion Pub

2021年5月28日

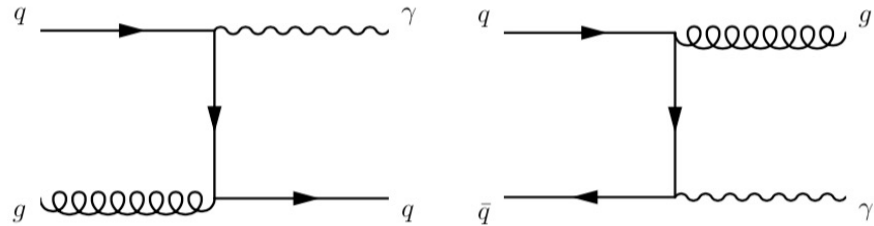
References:

[arXiv:2005.14522](https://arxiv.org/abs/2005.14522) (submitted to PRL)
[Phys. Rev. C102\(2020\)055204](https://arxiv.org/abs/2005.14522)
[Phys. Lett. B 788 \(2019\) 505](https://arxiv.org/abs/1809.064)
[Phys. Rev. C 99, 024002](https://arxiv.org/abs/1809.064)
[JHEP 1809 \(2018\) 064](https://arxiv.org/abs/1809.064)

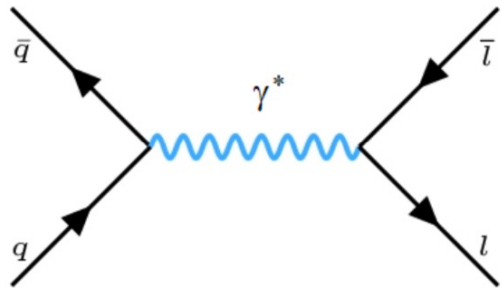
[arXiv:2104.07050](https://arxiv.org/abs/2104.07050)
[arXiv:2103.16623](https://arxiv.org/abs/2103.16623)
[Phys. Lett. B 814 \(2021\) 136114](https://arxiv.org/abs/2103.16623)
[arXiv:1812.02820](https://arxiv.org/abs/1812.02820)



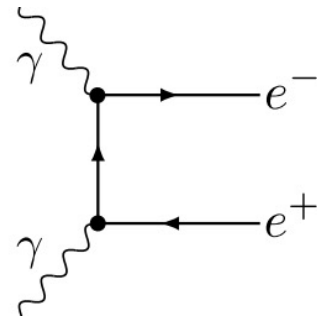
物理的動機



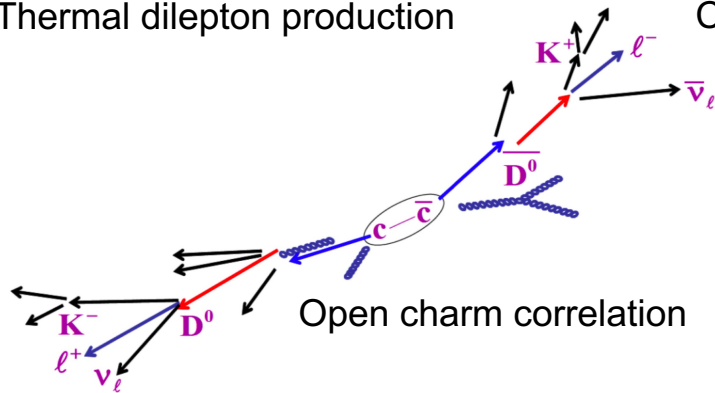
Direct photon productions



Thermal dilepton production



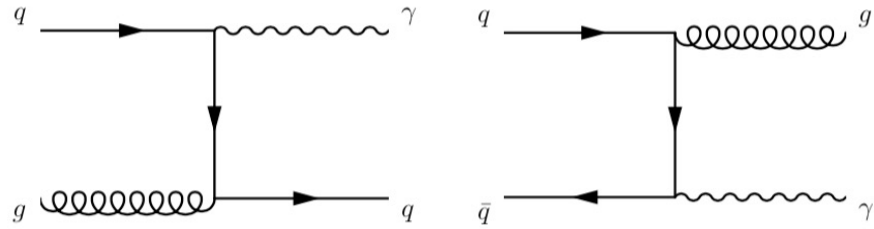
Coherent photoproduction



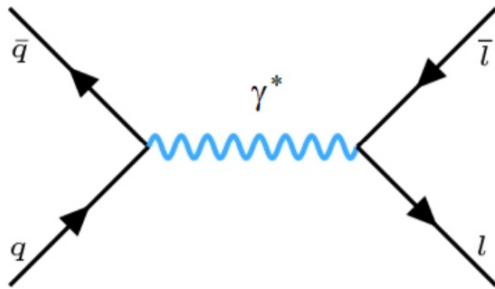
Open charm correlation

- 低質量領域 : $m_{ee} < 1.1 \text{ GeV}/c^2$
 - 熱輻射仮想光子 ($m_{ee} \rightarrow 0$ 極限)
 - ベクトル中間子を通じたカイラル対称性の部分的回復
- 中間質量領域 : $1.1 < m_{ee} < 2.7 \text{ GeV}/c^2$
 - 熱輻射電子対
 - 重クォーク起源電子対の(脱)相関
 - かすり衝突での干渉光生成
- 高質量領域 : $2.7 \text{ GeV}/c^2 < m_{ee}$
 - J/ ψ 中間子
 - Drell-Yan過程

(私の考える)電磁プローブの意義



Direct photon productions



Thermal dilepton production

- 色荷をもたず、強い相互作用をしない
 - 生成された時点での情報をもたらす
 - QGP相に対して透過的
 - 流体膨張するQGP相の初期状態特定 (ALICEの強み)
- 実験的な困難
 - 全段階から電磁放射されるので、背景事象との戦い
 - 信号は既知成分との差として測定する

ATLAS, CMS, LHCbの強みとして:

- Z/W/ γ でパートン分布関数を決定
- Z/ γ -Jet抑制と組み合わせることで、エネルギー損失しない基準値

ALICE検出器

- Inner Tracking System
 - Vertexing
 - Tracking
 - PID

- Time Projection Chamber
 - Tracking
 - PID

- Time of Flight
 - PID

- V0 at forward rapidity
 - Triggering
 - Multiplicity estimator

Collision systems

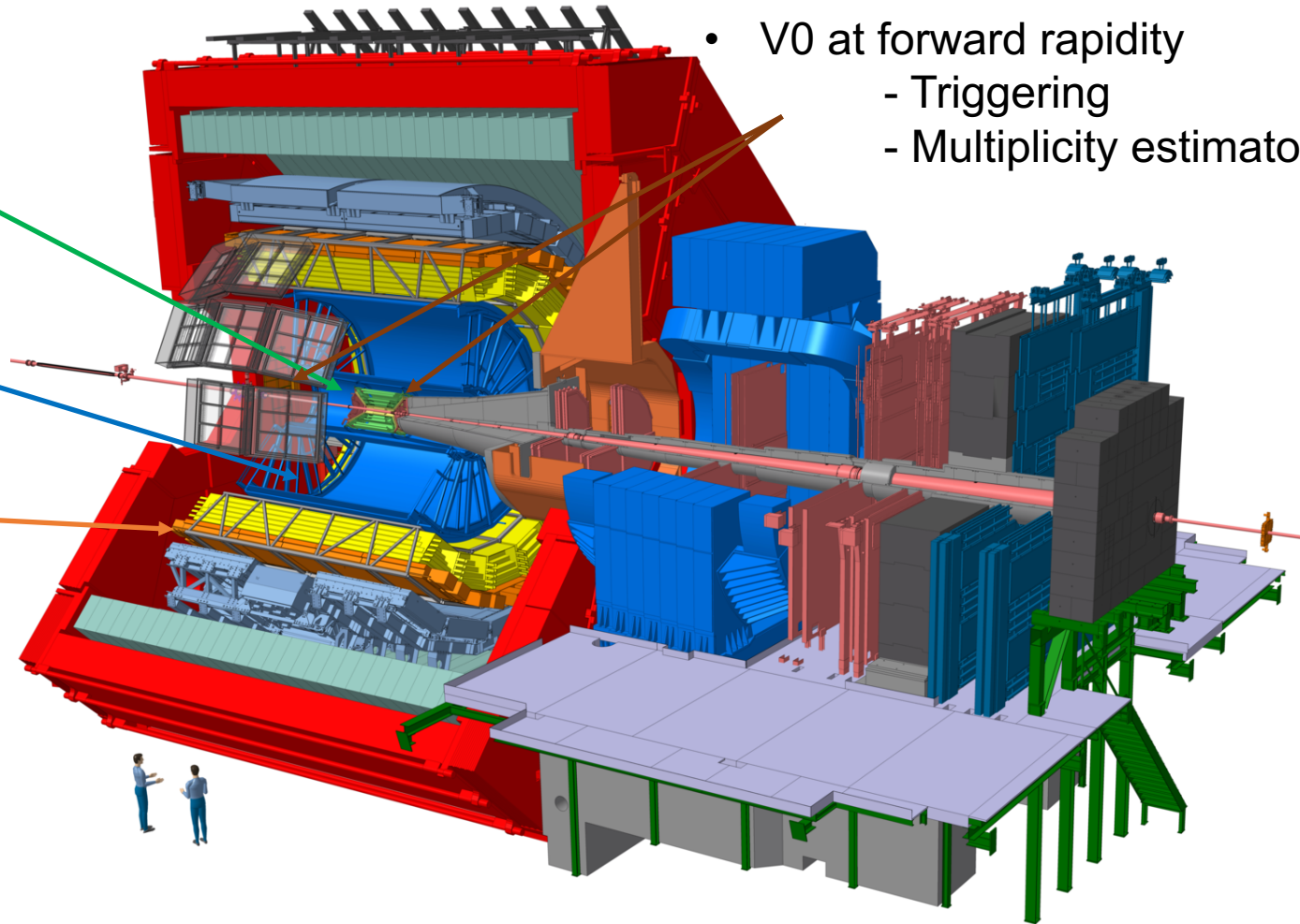
pp $\sqrt{s} = 13$ TeV Minimum Bias + high multiplicity

pp $\sqrt{s} = 13$ TeV with $B = 0.2$ T

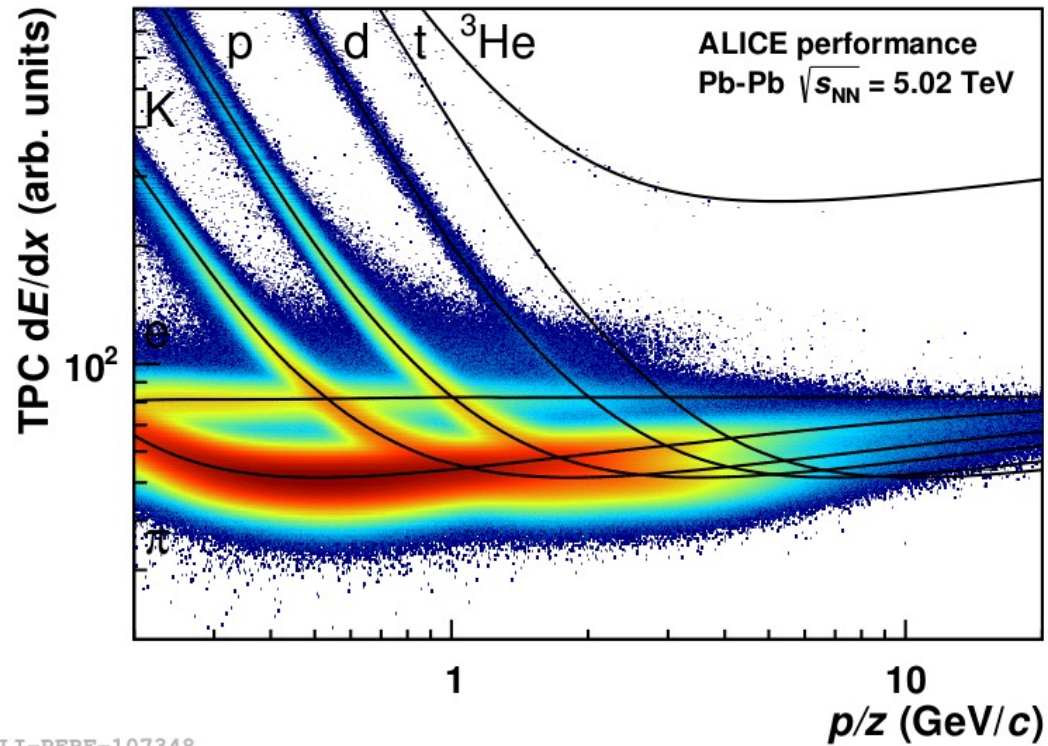
pp $\sqrt{s} = 5.02$ TeV

p-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV

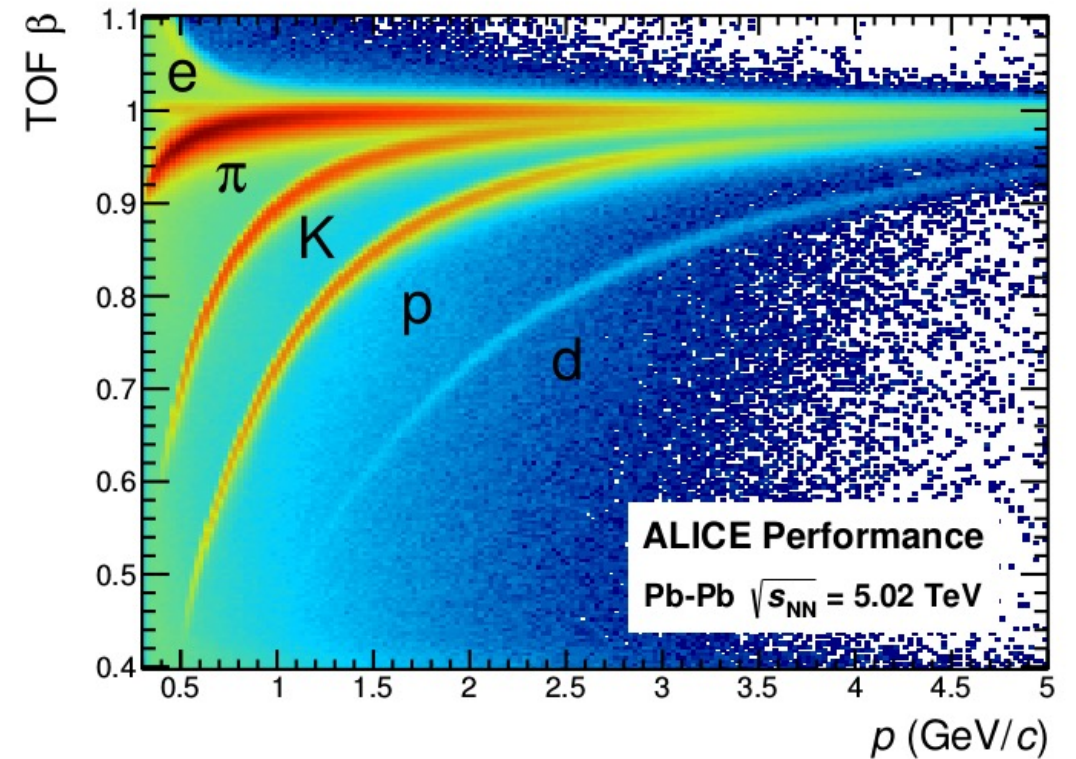
Pb-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV



粒子識別性能

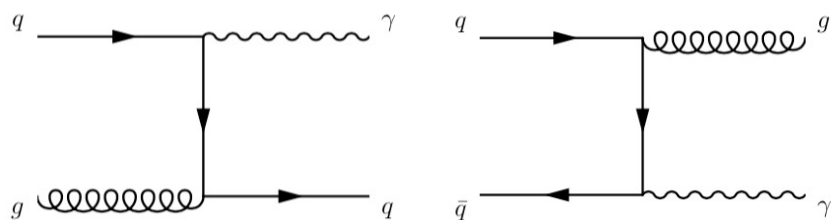
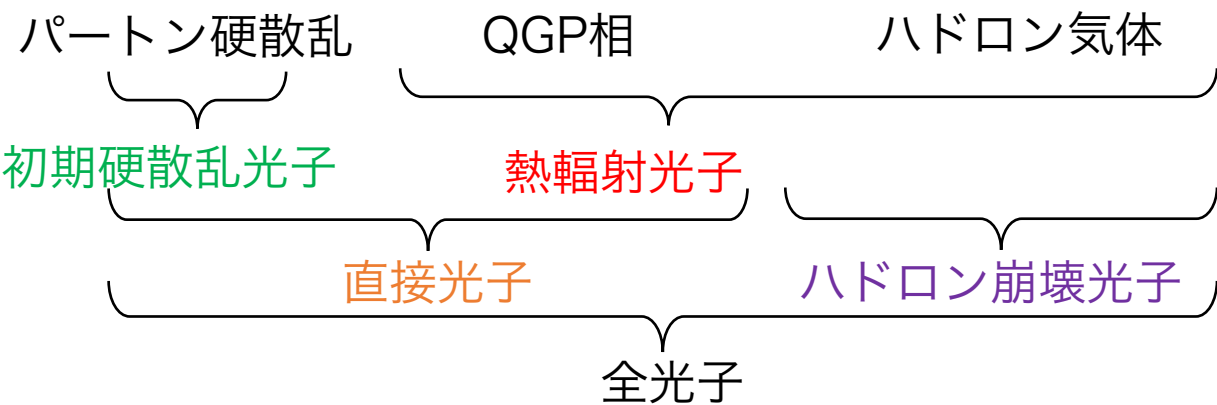
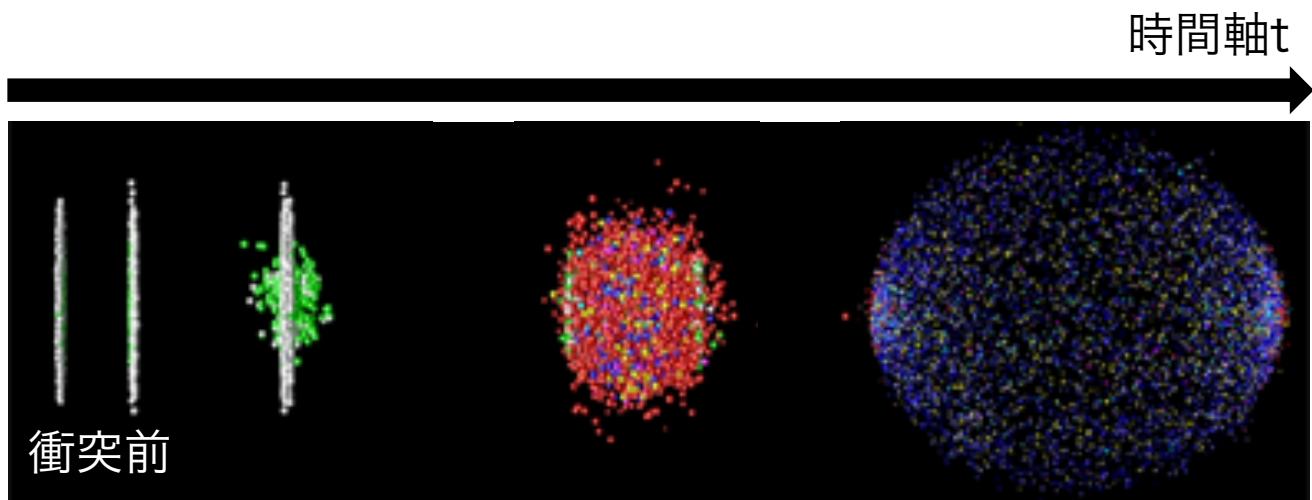


ALI-PERF-107348



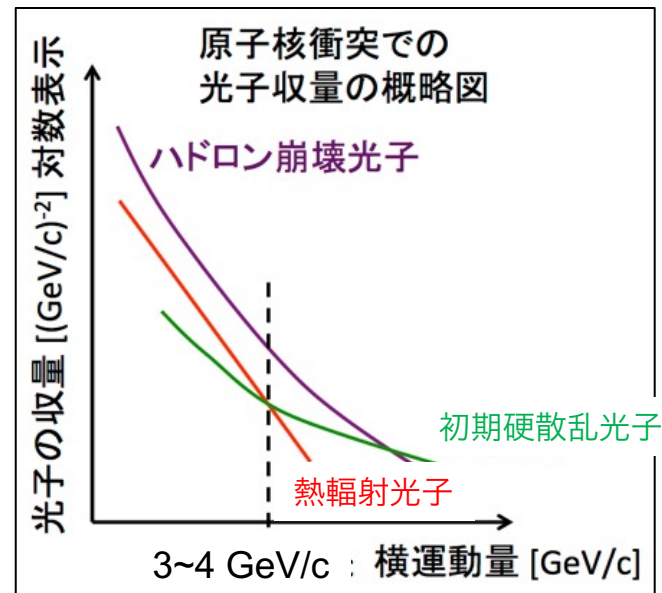
- 異なる手法を使って、異なる運動量領域を覆う。
- LHC加速器実験の中でも、強い粒子識別能力をもつ。
- 本講演では、電子に着目する。

熱(仮想)光子に関する結果

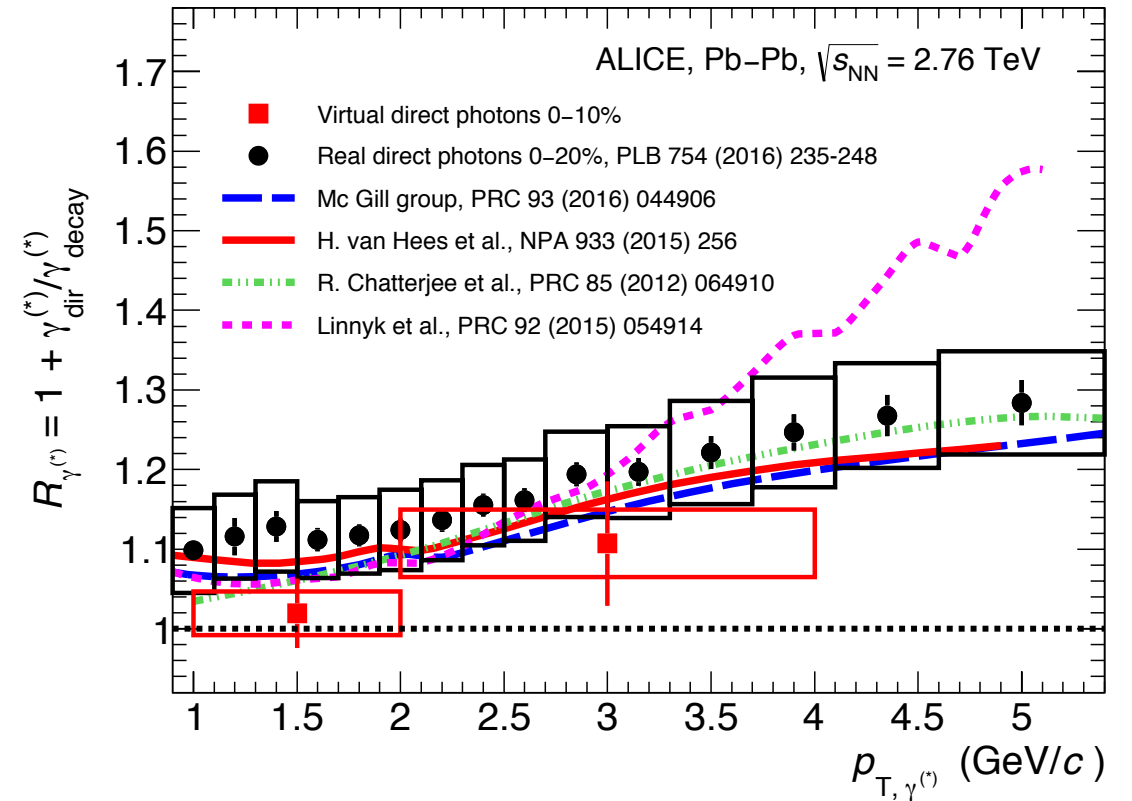
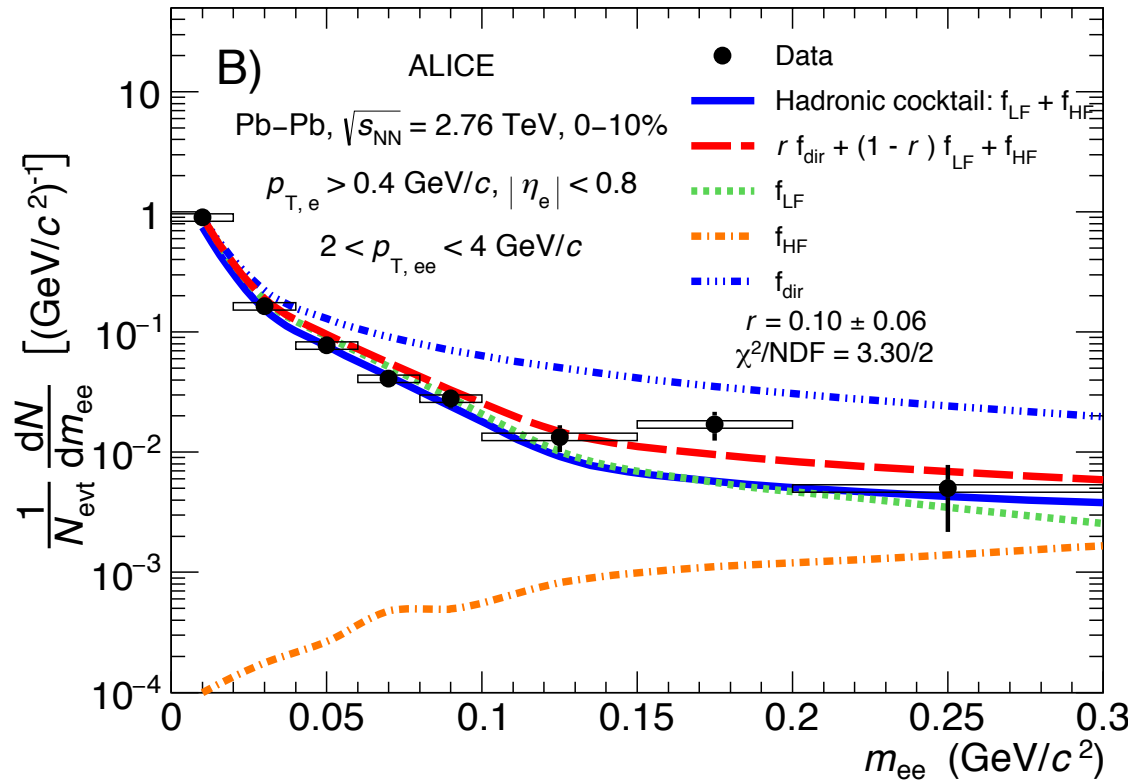


直接光子生成

- 実験的に測定するのは全光子
- 直接光子：生成された時点の状態を保持
 - 熱輻射
 - 初期硬散乱
- ハドロン崩壊光子が約90%を占める

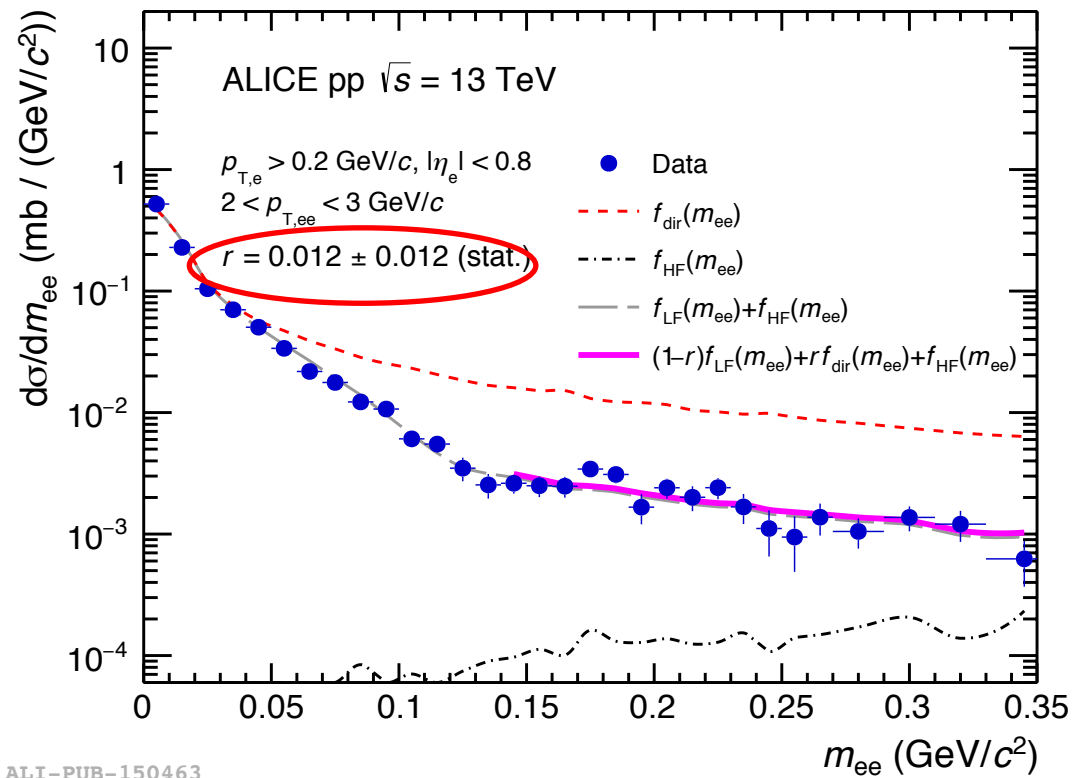


仮想光子生成 Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV

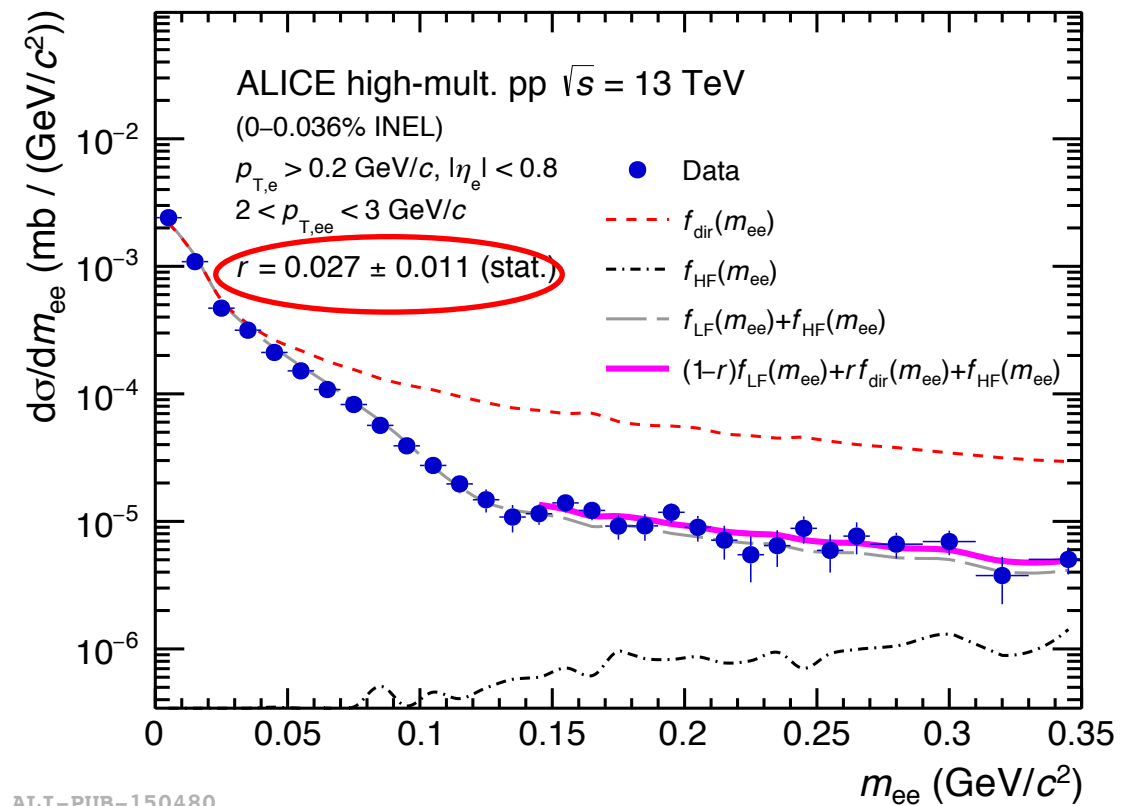


- 実光子と相補的な手法 ($m_{ee} \rightarrow 0$ 極限)
- ハドロン崩壊起源電子対を超えた成分：直接仮想光子
- 統計を蓄積することが必須 → 2018年のPbPbデータに期待

r : 直接光子と全光子の比
 R_γ : 全光子と崩壊光子の比



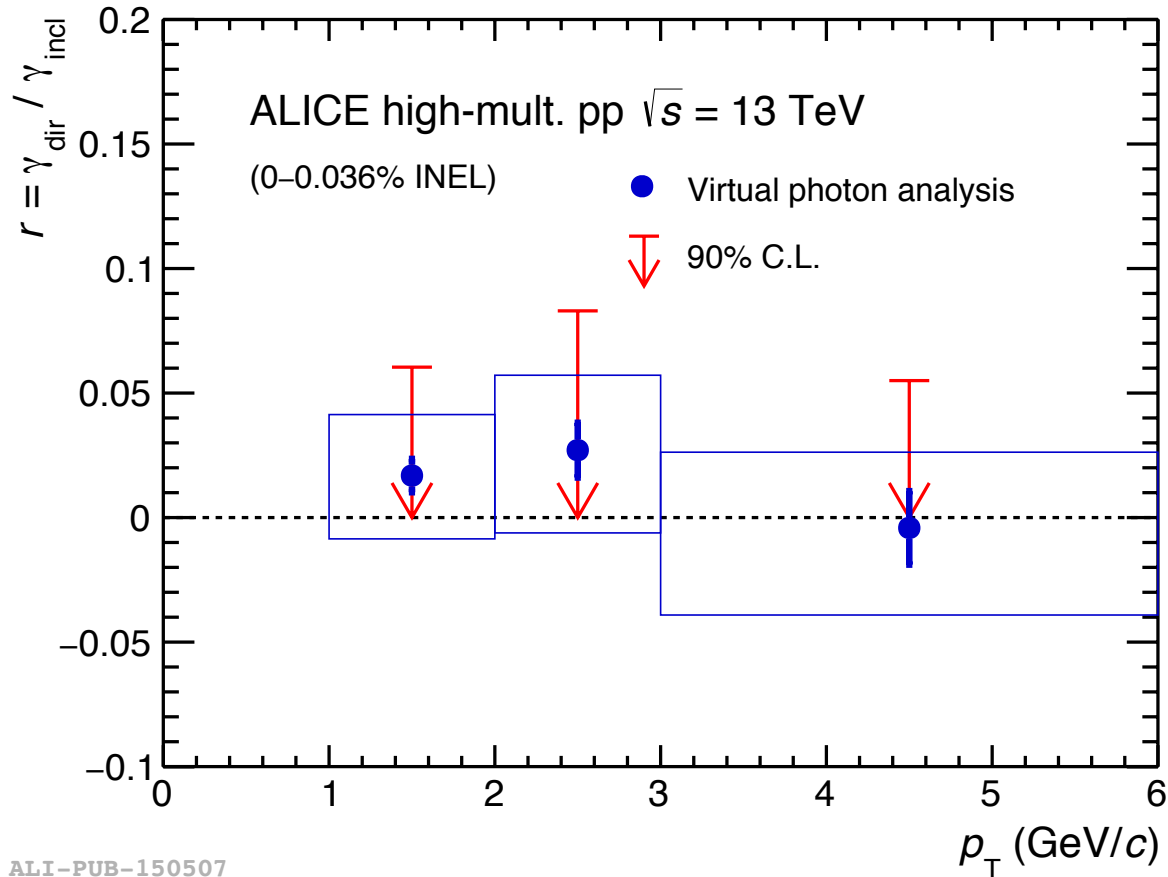
ALI-PUB-150463



ALI-PUB-150480

- 最小バイアスデータ : null consistent
- 高粒子多重度事象 : 統計的優位度 $\sim 2.5\sigma$
- 上図の結果は2016 dataのみ。今後の解析(2016+17+18)に期待。

r : 直接光子と全光子の比

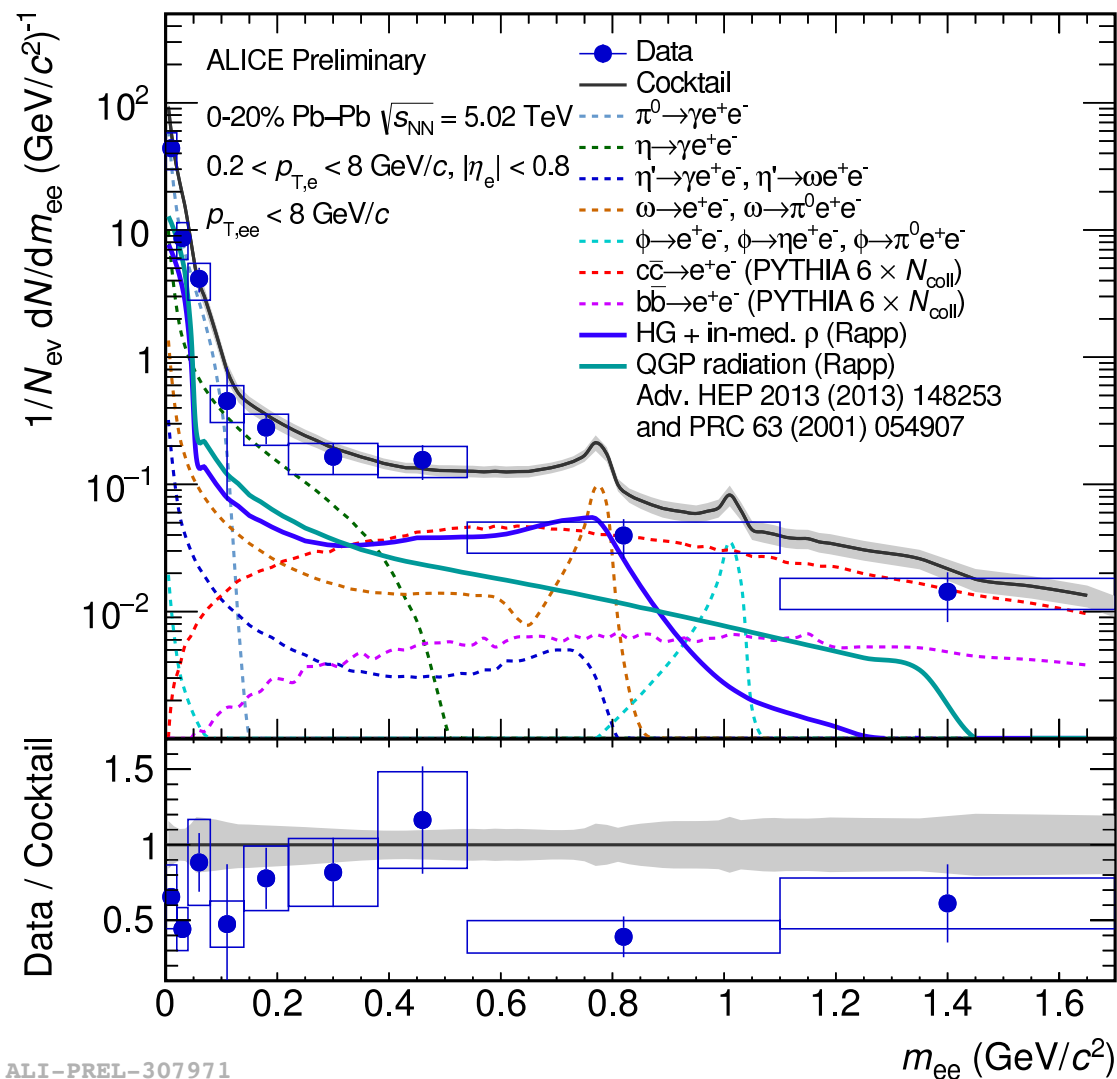


ALI-PUB-150507

Data sample	$1 < p_{T,ee} < 2$ GeV/c	$2 < p_{T,ee} < 3$ GeV/c	$3 < p_{T,ee} < 6$ GeV/c
Minimum bias	0.057	0.072	0.023
High multiplicity	0.060	0.083	0.055
pQCD	0.003	0.007	0.013

- 高粒子多重度事象：統計的に優位
- 系統誤差が大きい
 - η/π^0 の m_T scalingが原因(後述)
- 理論模型と比較しながら、小さい系での熱輻射光子を探索中。

電子対生成 central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV



- 2015年のPb-Pb衝突からの結果 (0-20%)

- 熱的電子対を含む計算と誤差の範囲で一致

- 新たなチャンネル：熱的電子対

- 実は、熱輻射光子は青方偏移している

- GeV/c²領域の電子対からQGP相の初期高温状態に到達する。

- チャームハドロン起源電子が主背景事象

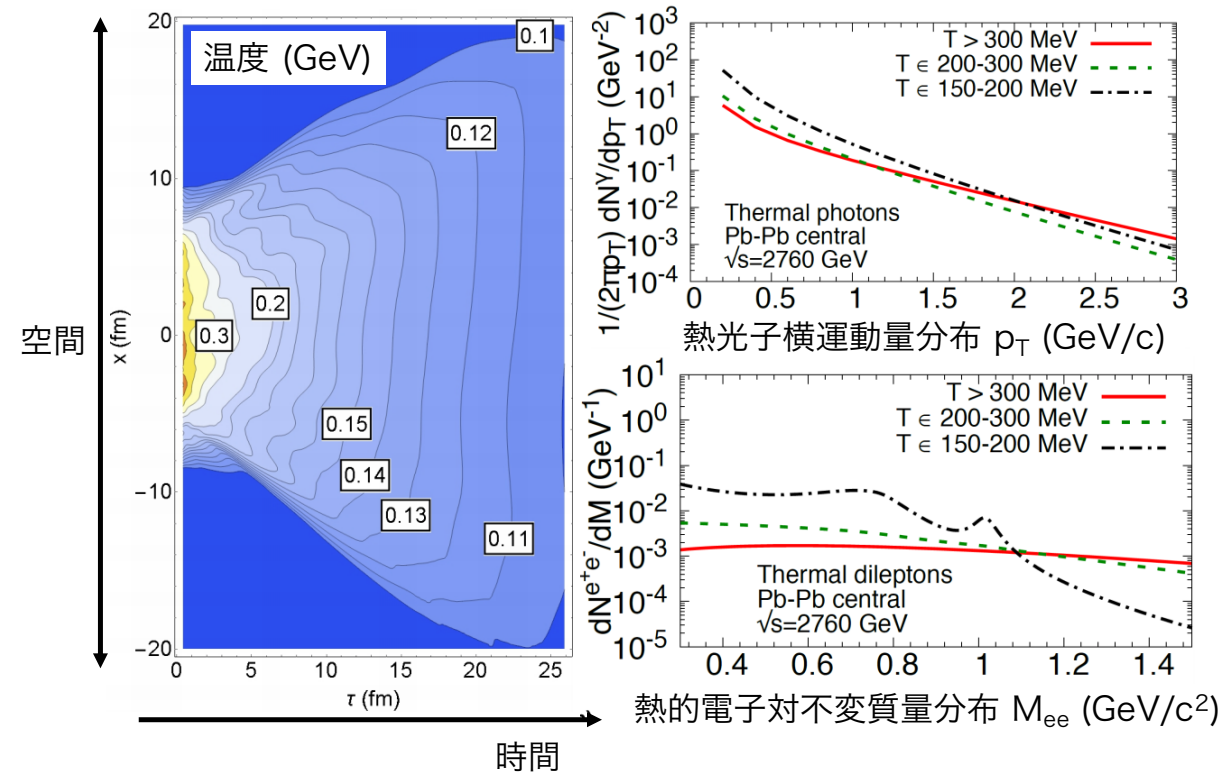
- ハドロン化に伴う光子生成

- 電磁プラズマの中性化に伴う光子生成と同様

- クォーク再結合モデルの改善

ALI-PREL-307971

熱光子の困難さを改善する熱的電子対



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

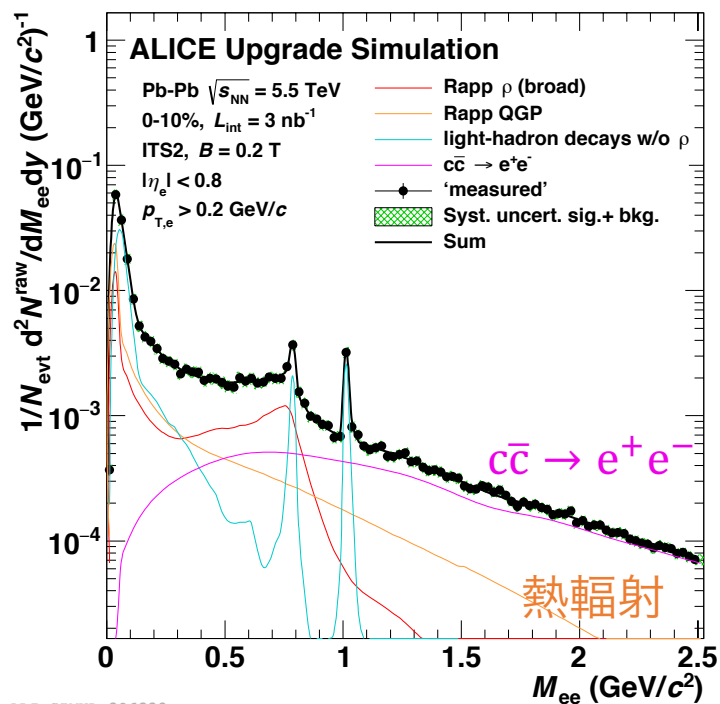
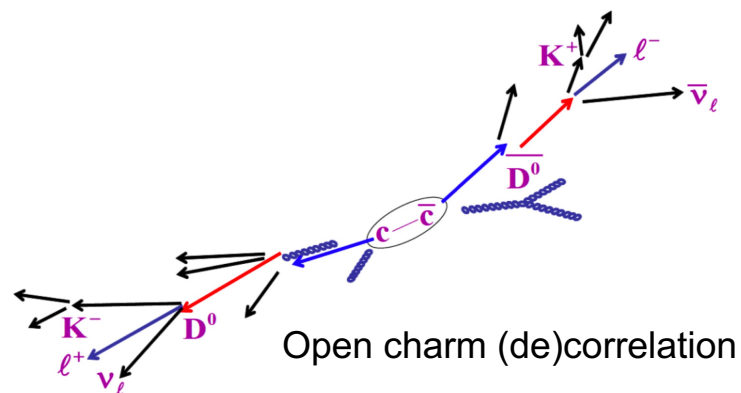
- GeV/c²領域の電子対からQGP相の**高温状態**に到達する。

- 一方、光子の意義は、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
- クォーク再結合モデルの改善
- 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

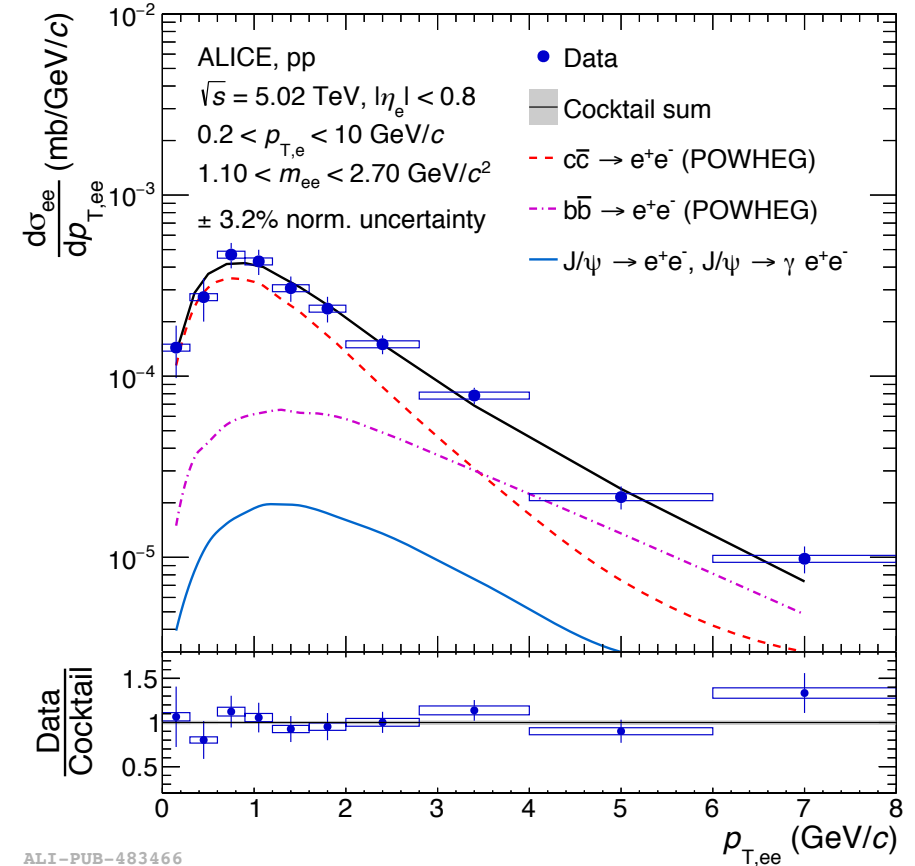
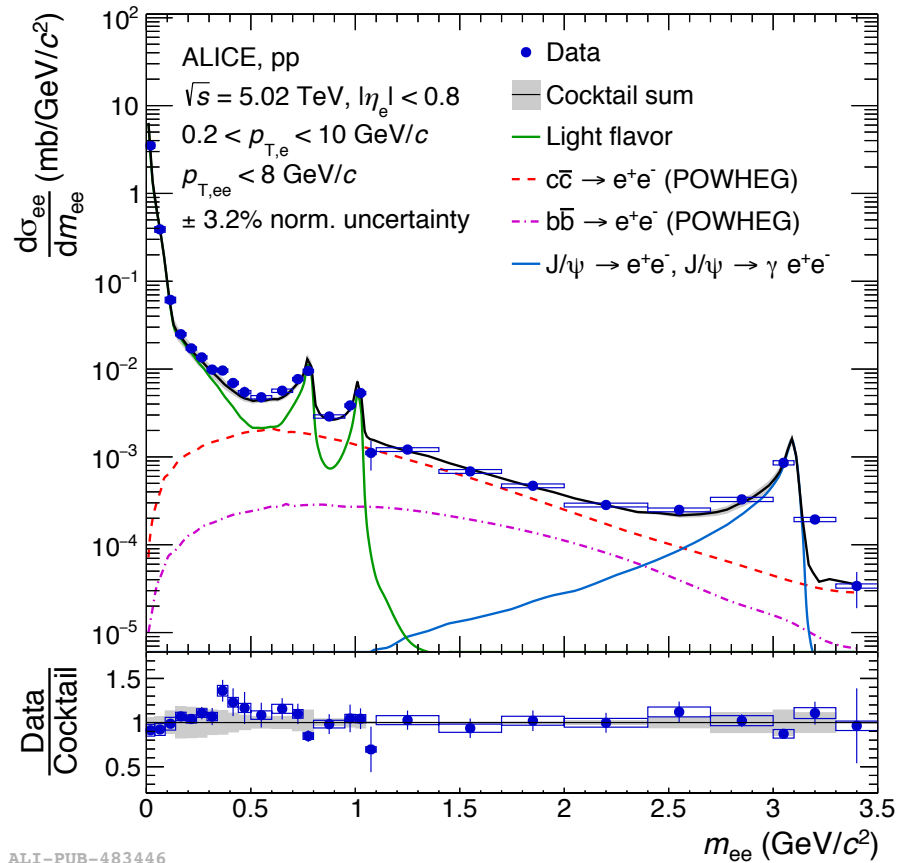
重クォークに関する結果



ALI-SIMUL-306839

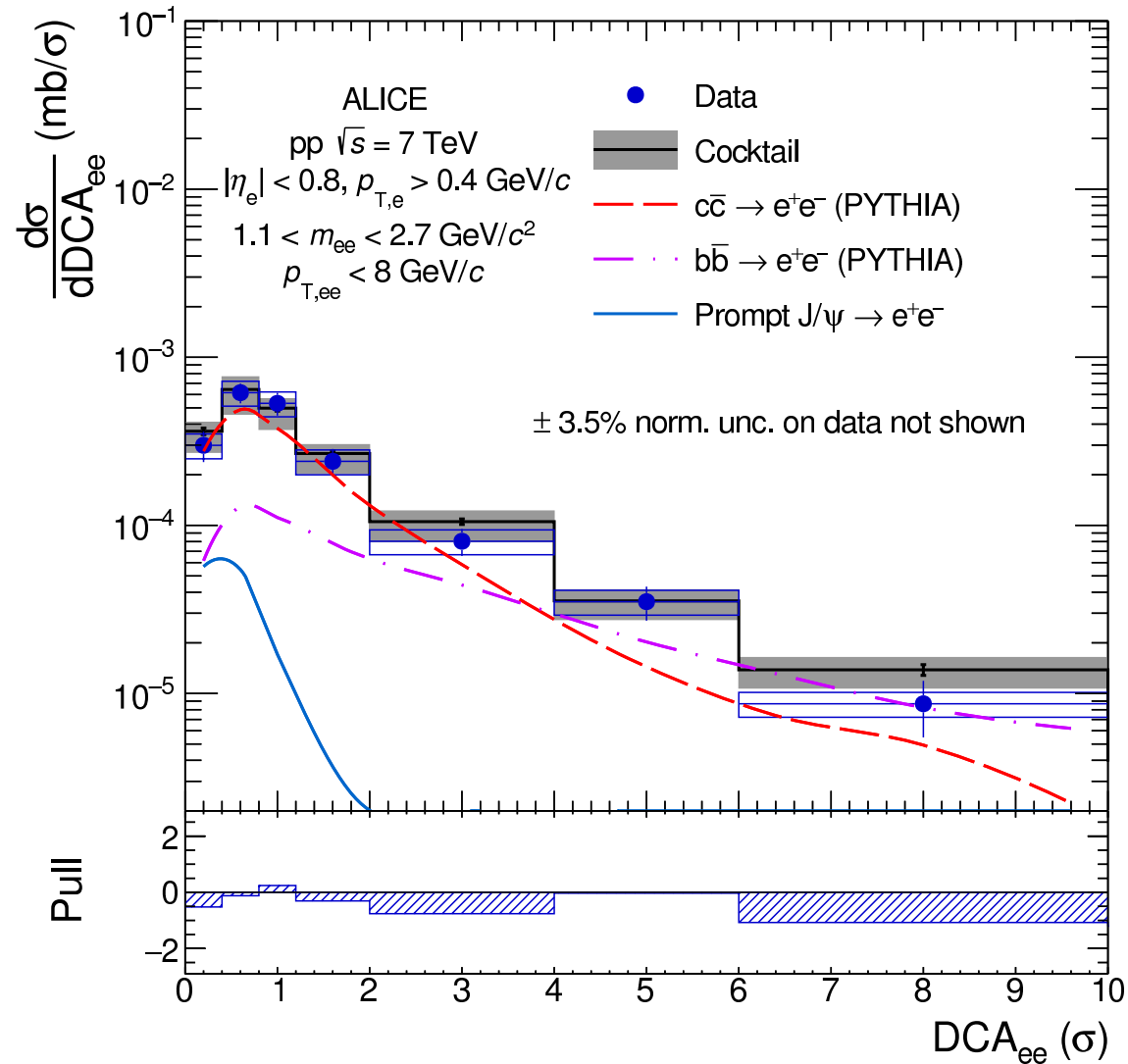
- 重ハドロンの半レプトン崩壊起源電子対
- その角度相関が不変質量・運動量分布に現れる。
 - ppをベースライン(ほぼ反対方向)
 - QGP中でどれだけ拡散されるか
(相関が失われるか)
- 熱的電子対にとっては背景事象
- 長寿命の特徴を活かして、衝突点からの距離で判別する。
 - D meson : $c\tau \sim 150 \mu\text{m}$
 - B meson : $c\tau \sim 500 \mu\text{m}$

Dielectron production in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV



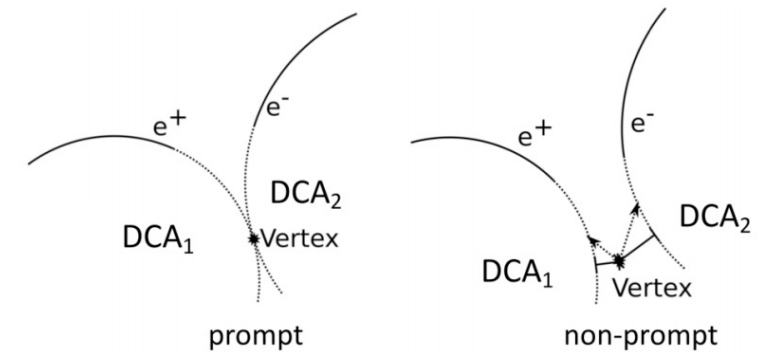
- 同エネルギーpPb, PbPb衝突のためのベースライン測定
- 特に重クォーク生成断面積を測定したのが有意義

DCA analysis in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV



- 特に、Run1データでは、従来の
 - 電子対不変質量分布
 - 横運動量分布
 に加えて、DCA分布を初測定した。
- 将来のDCA解析による重ハドロン起源電子除去の可能性を示した。

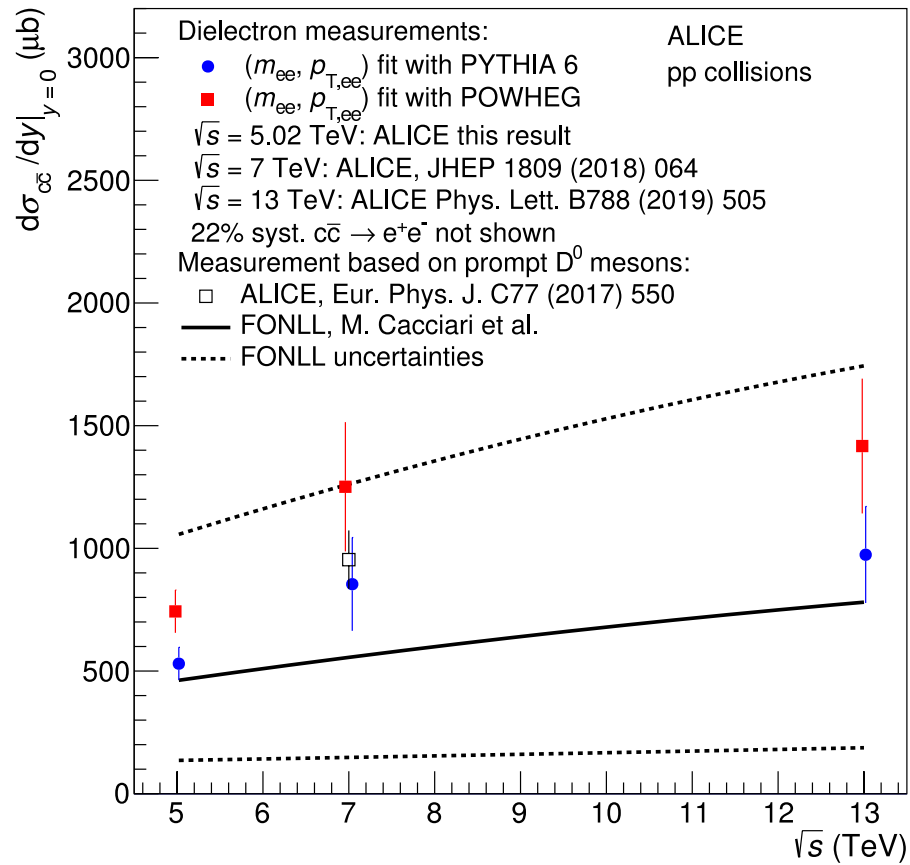
D meson : $c\tau \sim 150 \mu\text{m}$
B meson : $c\tau \sim 500 \mu\text{m}$



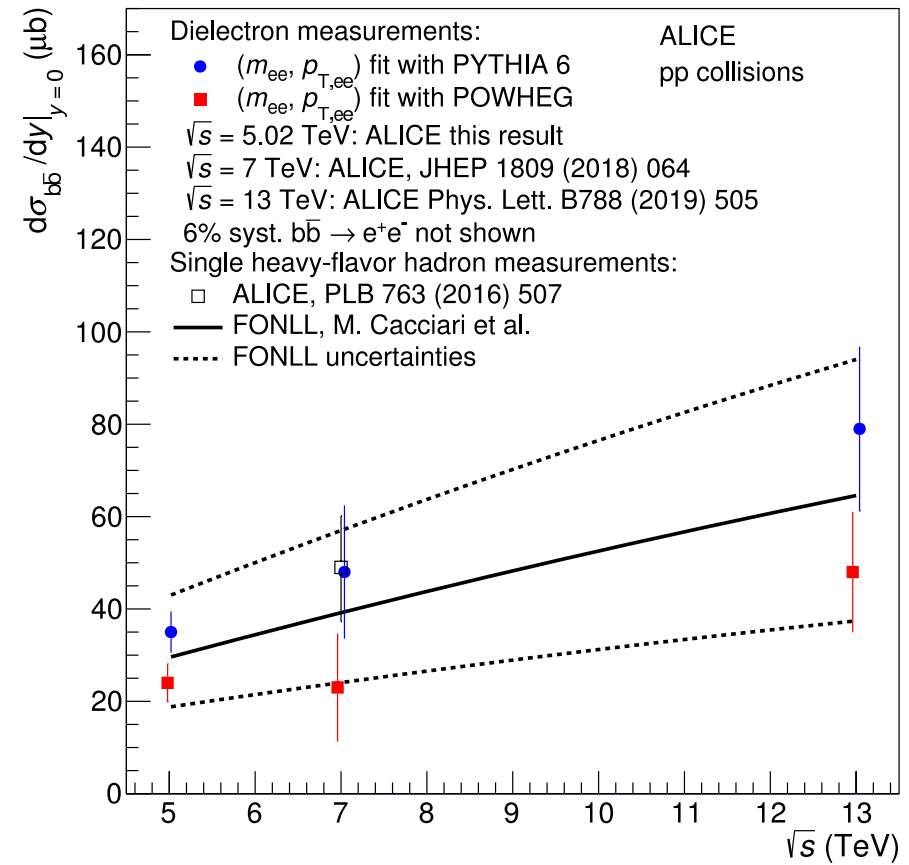
$$\rightarrow DCA_{ee} = \sqrt{\frac{DCA_1^2 + DCA_2^2}{2}}$$

$$\rightarrow DCA_{ee}(\text{thermal}) \gg DCA_{ee}(\text{HF})$$

HF production cross sections in pp collisions at different energies



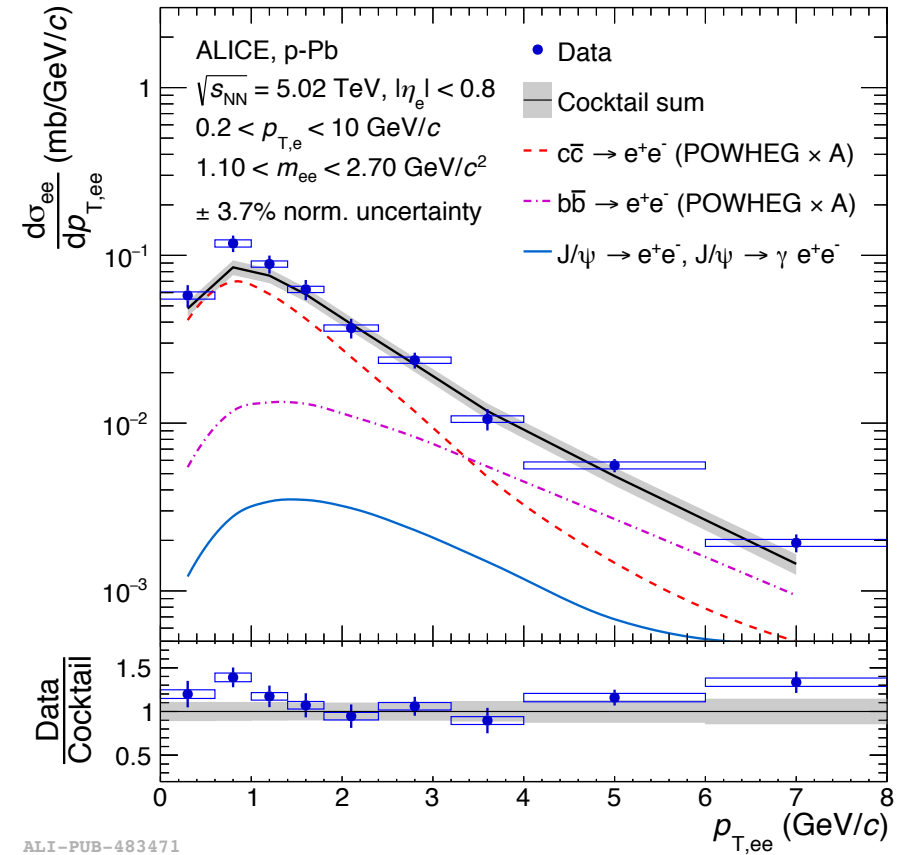
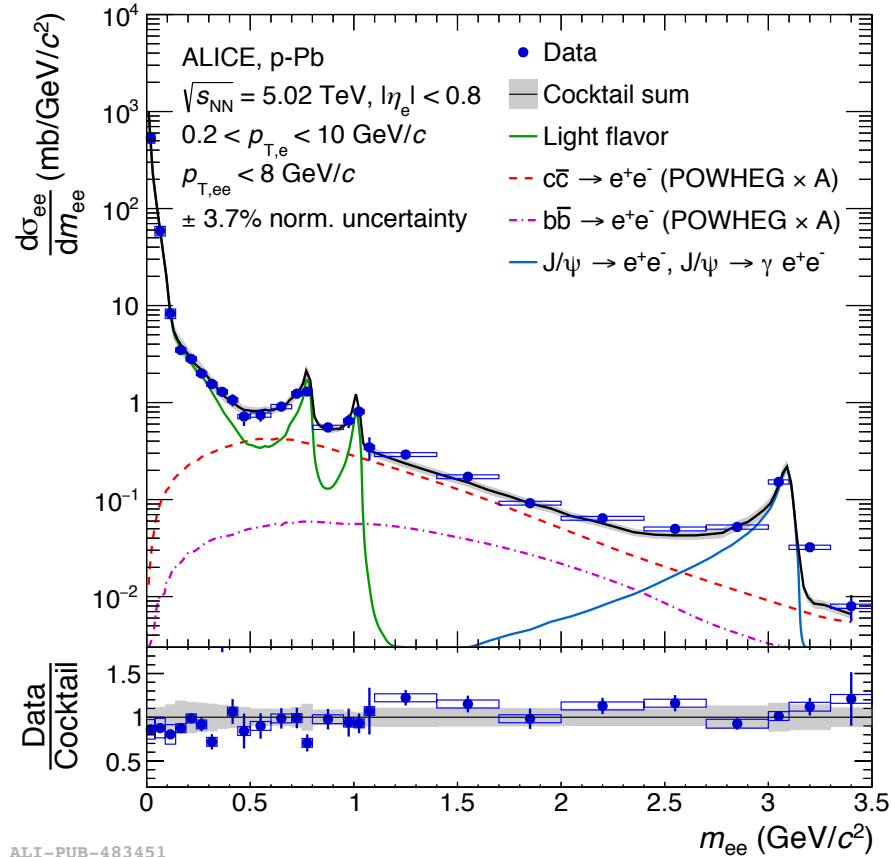
ALI-PUB-347495



ALI-PUB-347500

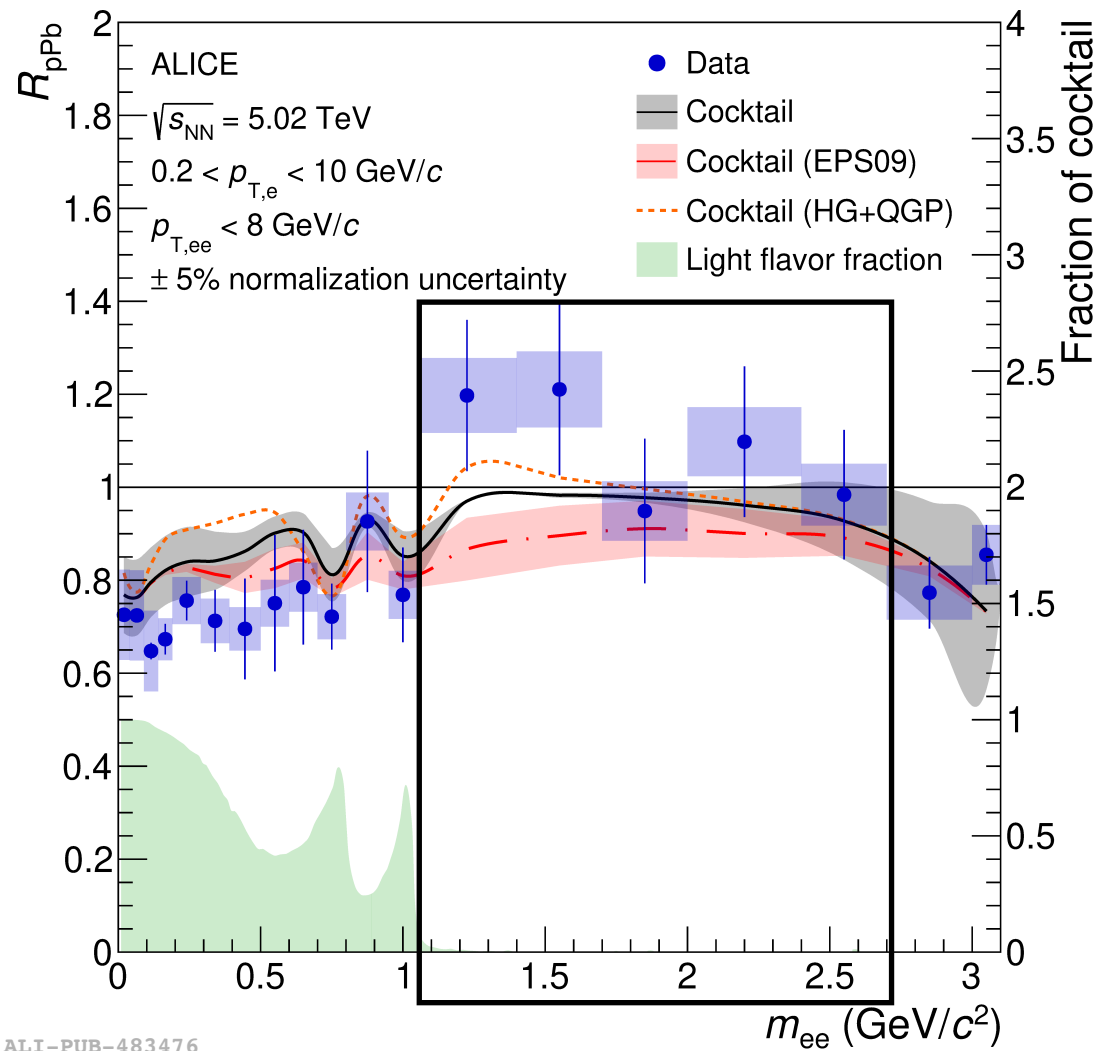
- D中間子測定、単電子 $b \rightarrow (c \rightarrow) e$ 測定の結果とよく一致(at 7 TeV)。
- (大きな誤差の範囲で)FONLLと衝突エネルギー依存性も再現。

Dielectron production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV



- 重クォーク起源電子対カクテルは、pp衝突での実測値を質量数A倍したものの。

R_{pPb} of dielectron in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV

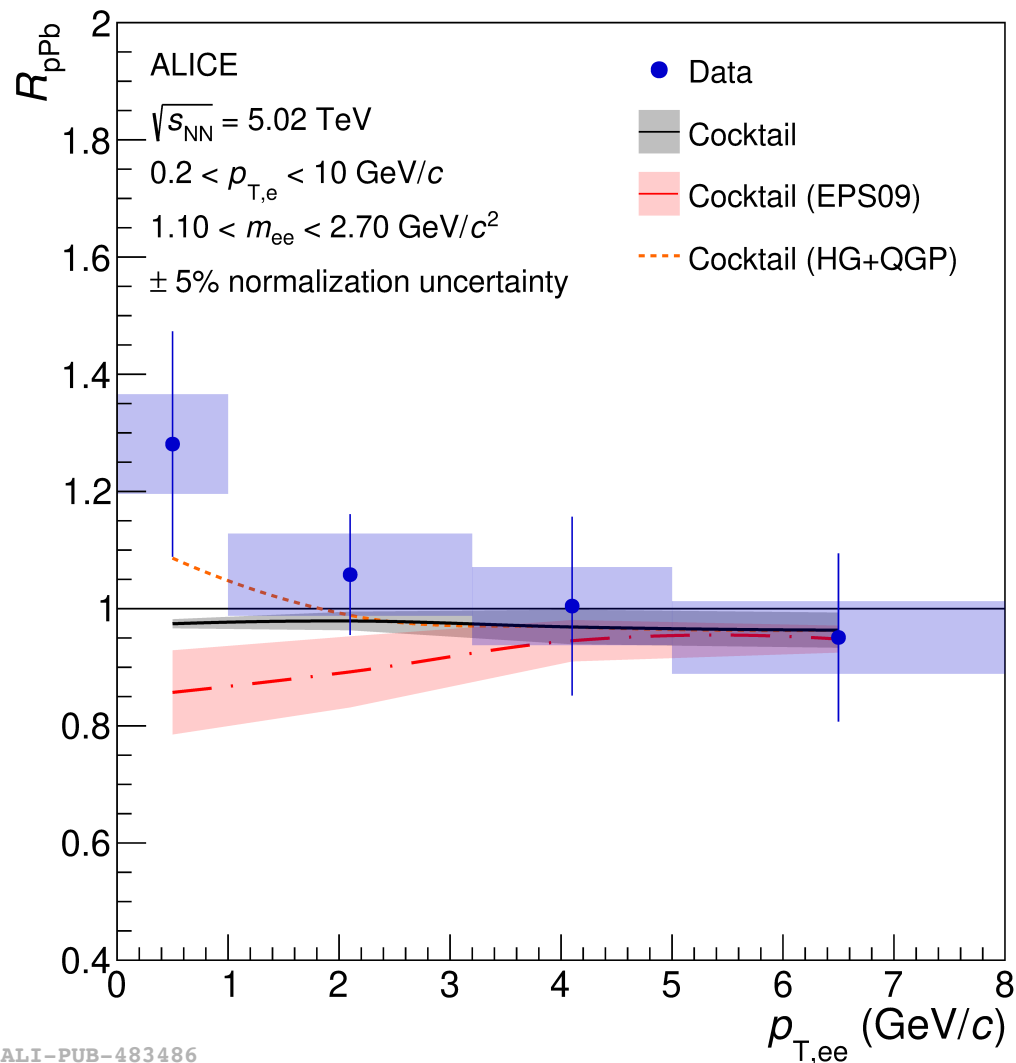


- 初のデータ点同士で割り算した R_{pA}
- $1.1 < m_{ee} < 2.7$ GeV/c²では、**shadowing (EPS09)**ではなく、**thermal radiation(HG+QGP)**を好む。

ALI-PUB-483476

$$R_{pPb}(m_{ee}) = \frac{1}{A} \frac{d\sigma_{ee}^{pPb}/dm_{ee}}{d\sigma_{ee}^{pp}/dm_{ee}}$$

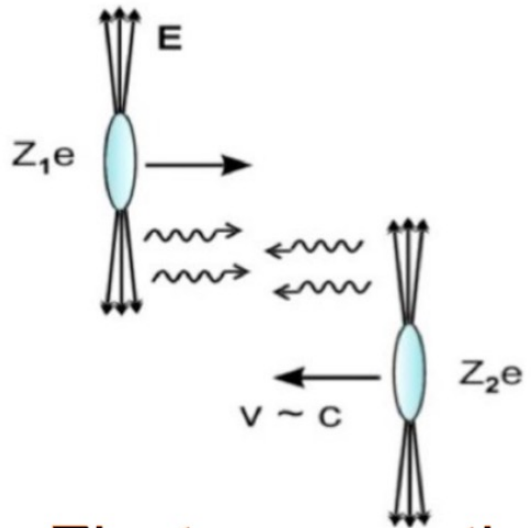
R_{pPb} of dielectron in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV



ALI-PUB-483486

- 初のデータ点同士で割り算した R_{pA}
- $1.1 < m_{ee} < 2.7$ GeV/c²では、**shadowing (EPS09)**ではなく、**thermal radiation(HG+QGP)**を好む。
- 横運動量の関数として見ても、**thermal radiation**と一致。
- まだ誤差が大きいのので、将来のDCA解析によるチャームハドロン起源電子除去に期待。
 - shadowingで減る or
 - thermal radiationで増える

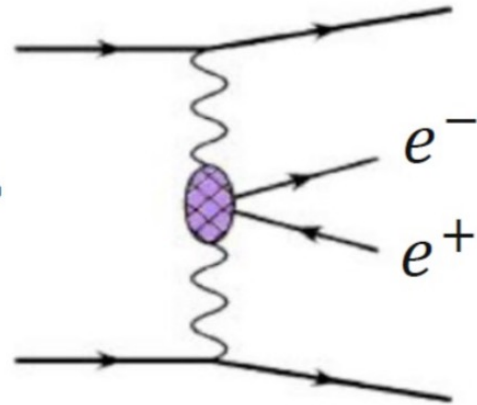
低横運動量電子対の増大に関する結果



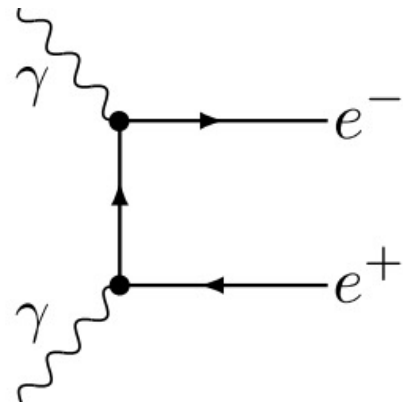
Electromagnetic interaction

Phys. Rev. Lett. 121.132301 (2018)

\Rightarrow

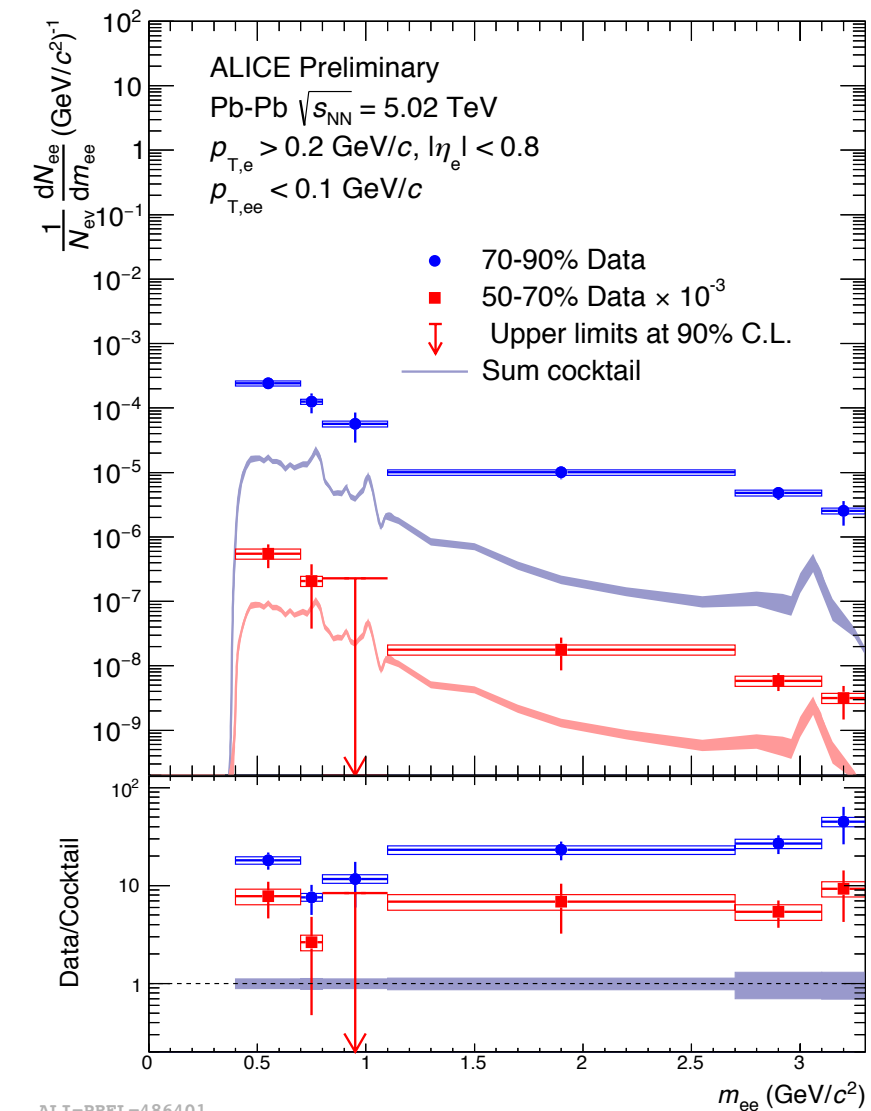


Photon-photon interactions

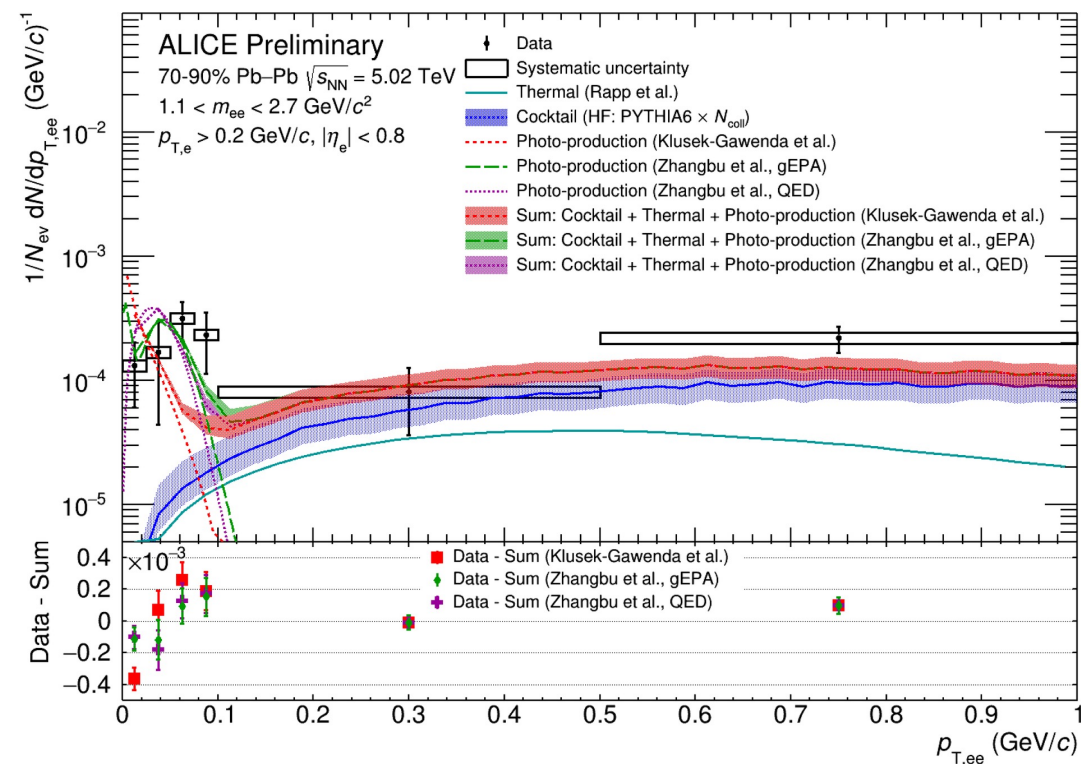


- 超かすり衝突(Ultra Peripheral Collisions)
 - 加速した重イオンビームの電磁場でレプトン対が生成
- 超かすり衝突 + ハドロン衝突
 - 高精度で計算可能なQEDをプローブとして研究対象となるQCD物質に打ち込む
 - かすり衝突ではQGPの寿命が短いので困難さもある。
 - 強磁場があると、電子対の角度差分布、平均横運動量に変化が現れる

かすり衝突での低横運動量電子対の増大



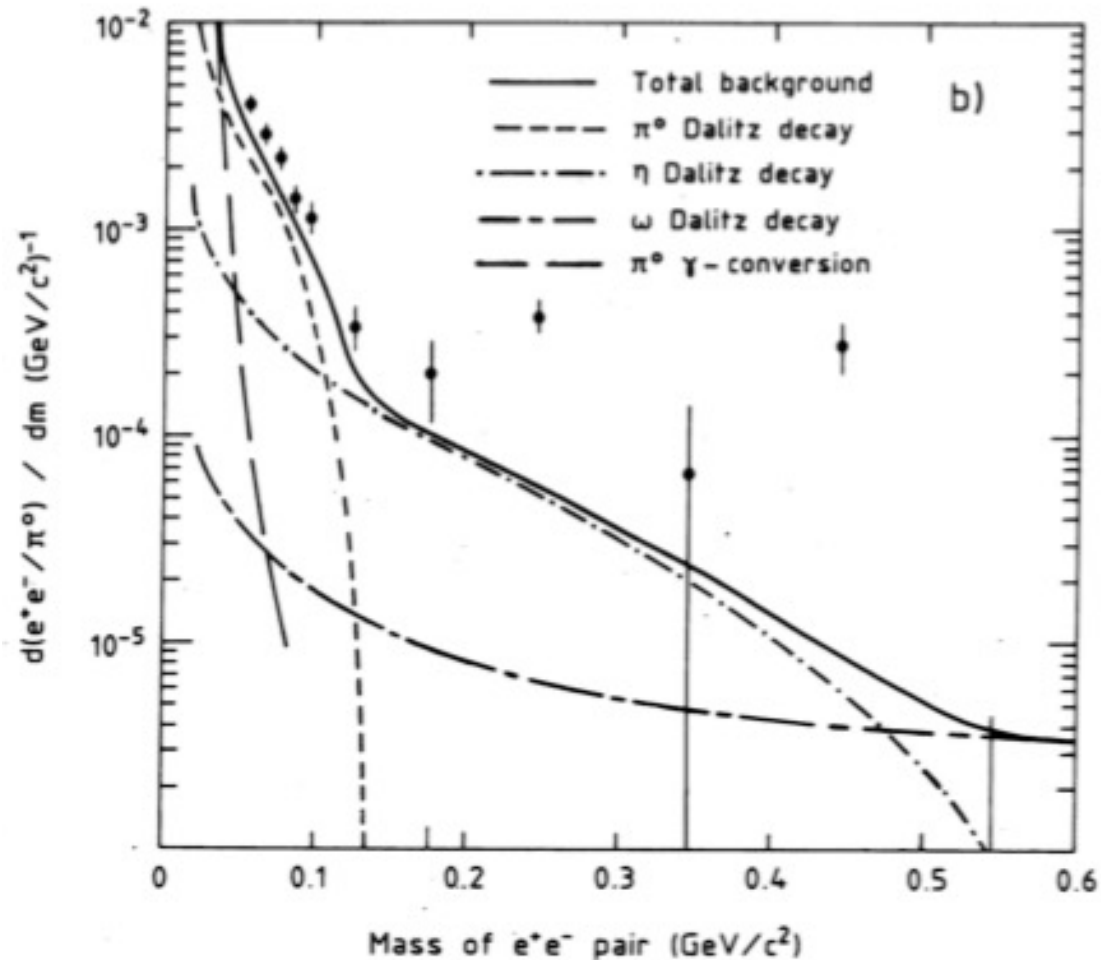
ALI-PREL-486401



ALI-PREL-326033

- Coherent photoproductionと一致。
- 2015+2018 ~ 統計量約2倍
- 平均横運動量や角度差分布にも挑戦。(強磁場探索)

pp衝突での電子対の増大 $\sqrt{s} = 63 \text{ GeV}$



V.Hedberg, Ph.D thesis, Lund University, 1987 at the ISR

- CERN ISR AFSでの電子対増大

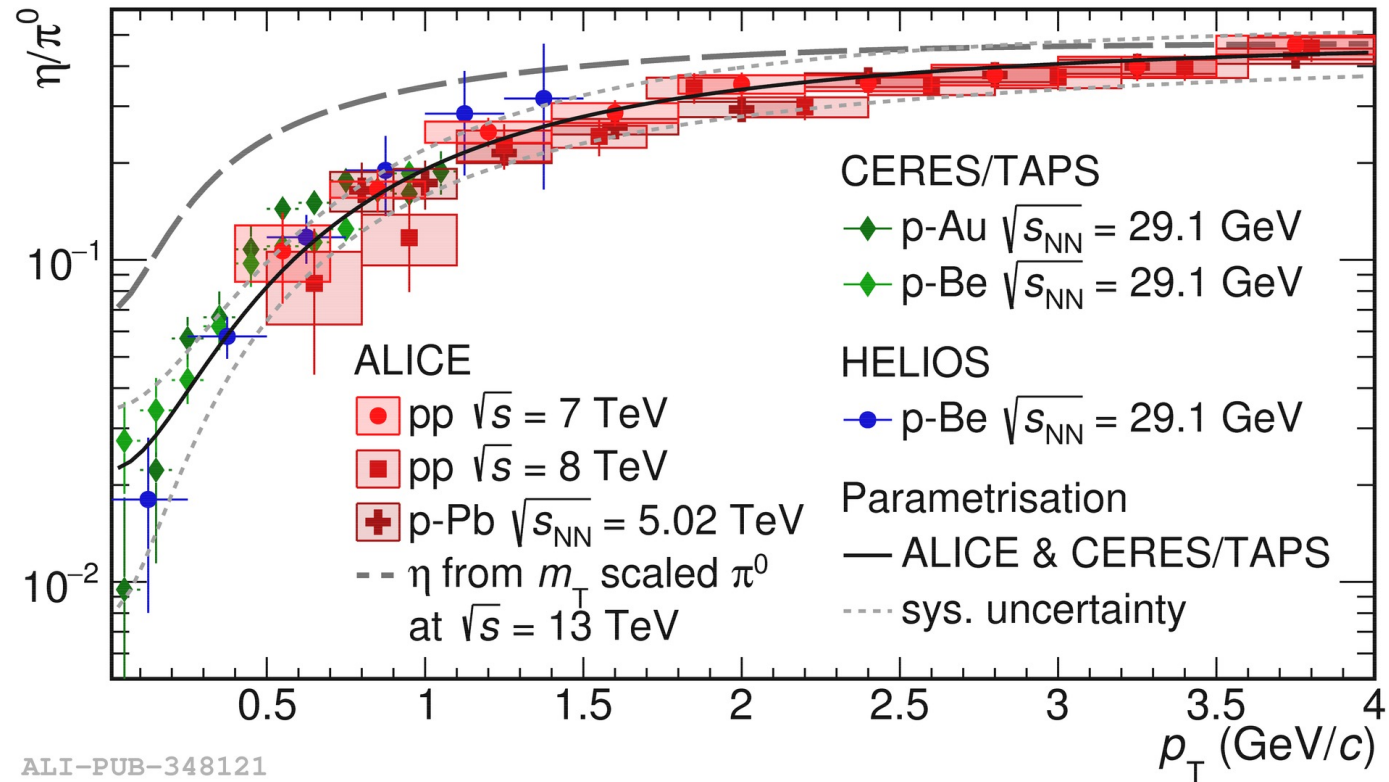
- $p_{T,ee} < 1 \text{ GeV}/c$
- 未だに説明がついていない
- 追実験もない

- ALICEでの低磁場データ ($B = 0.2 \text{ T}$)

- $p_{T,e} > 75 \text{ MeV}/c$
- TOFでの電子識別が低運動量でも可能

- η/π^0 の改善が必須

η/π^0 の実験的改善

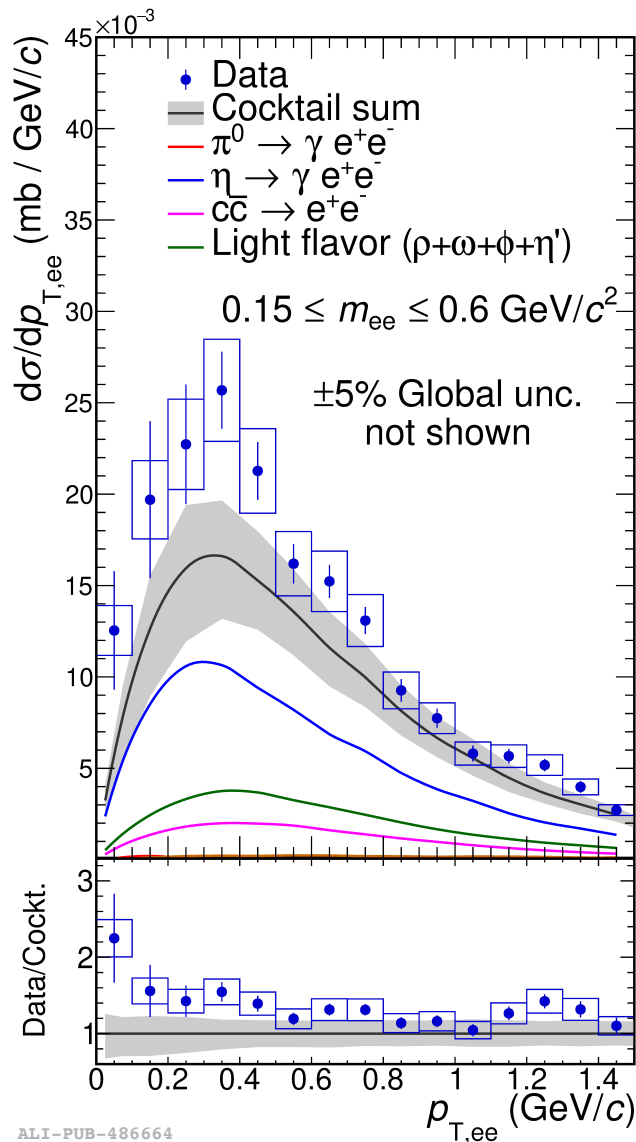
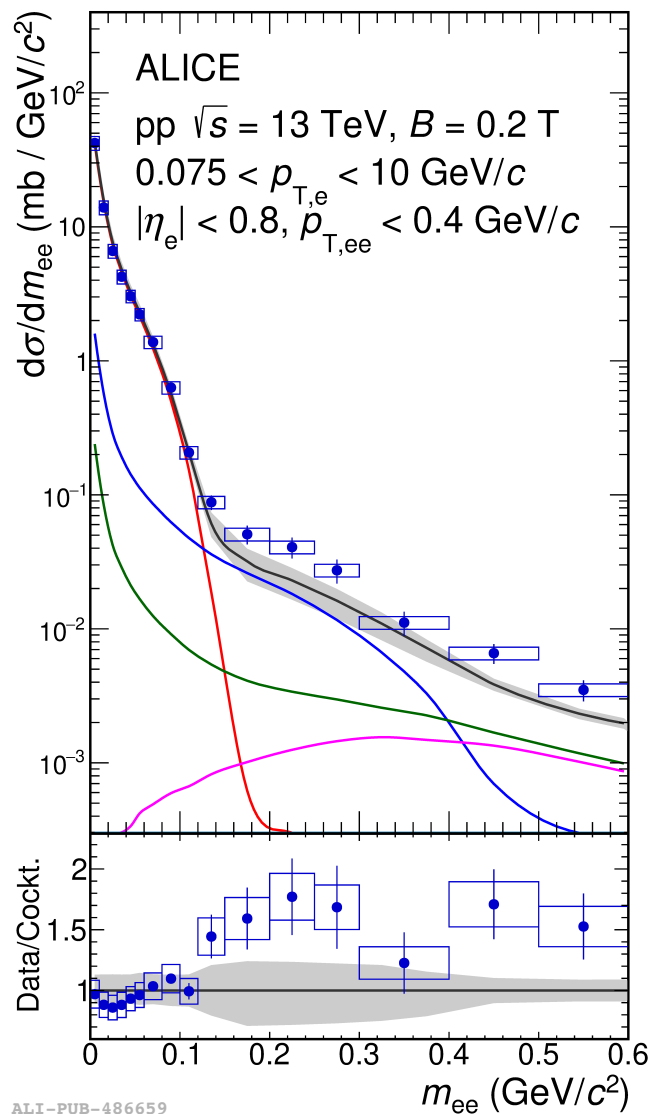


ALI-PUB-348121

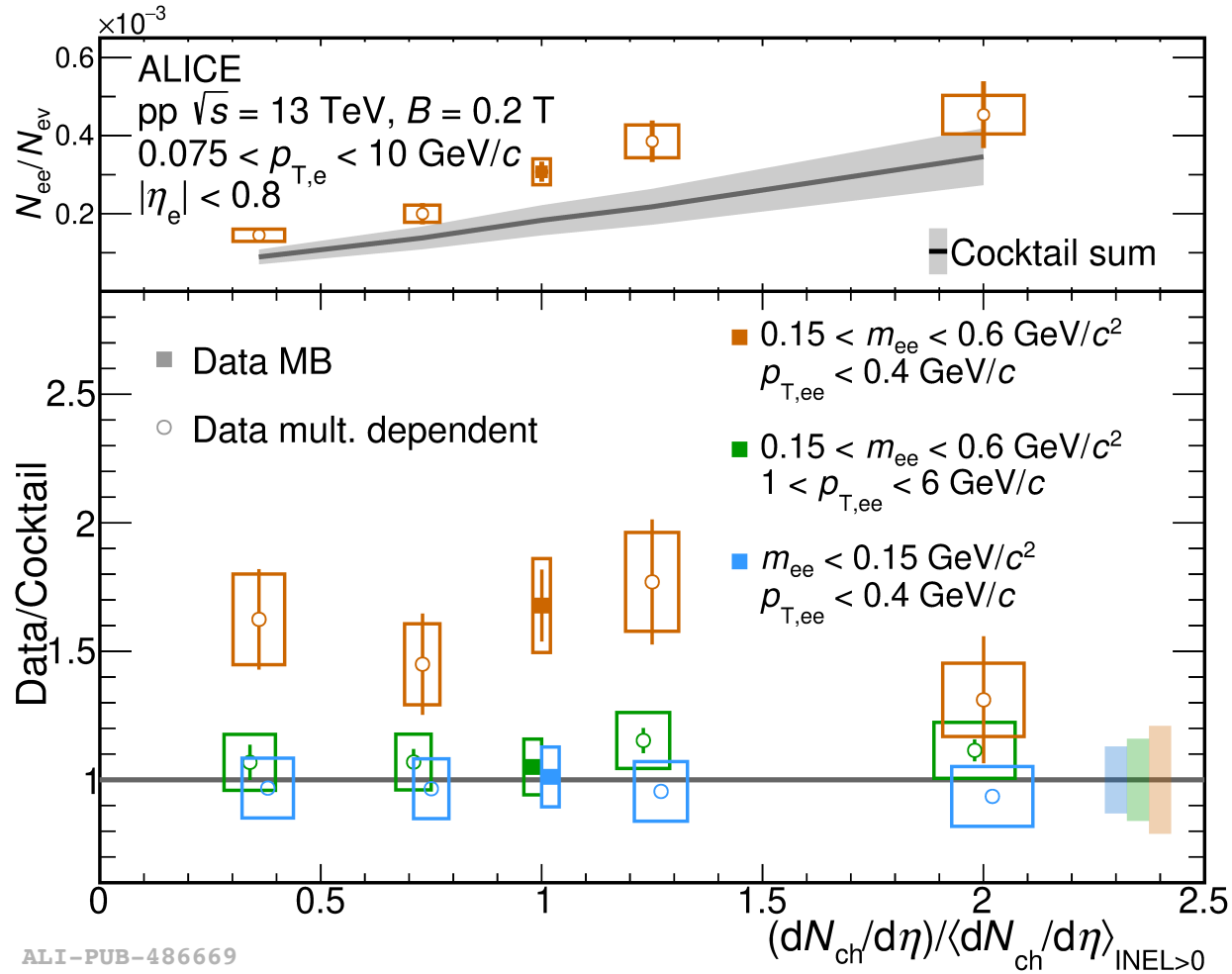
- m_T scalingをやめて、SPS実験データから制限
 - η/π^0 は衝突エネルギーに依存しない
 - 低横運動量で強い制限を与える(- 今後のためにも、 $B = 0.2$ TのALICEデータでの η/π^0 を求む。)

pp衝突での電子対の増大 $\sqrt{s} = 13$ TeV with low B field

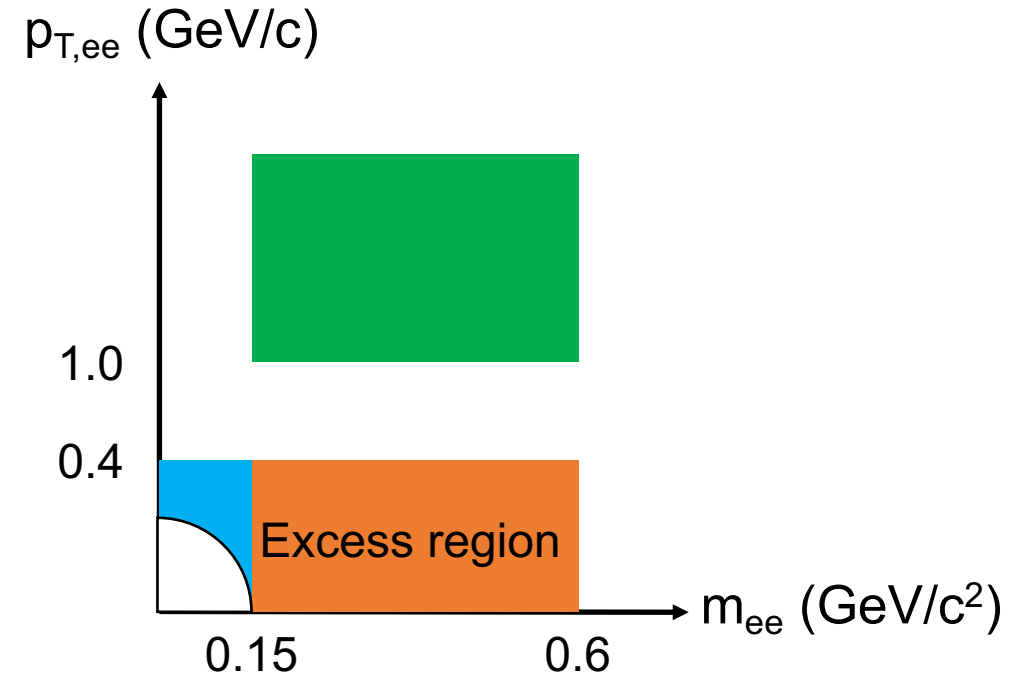
- $0.15 < m_{ee} < 0.6$ GeV/c², $p_{T,ee} < 0.4$ GeV/cで増大



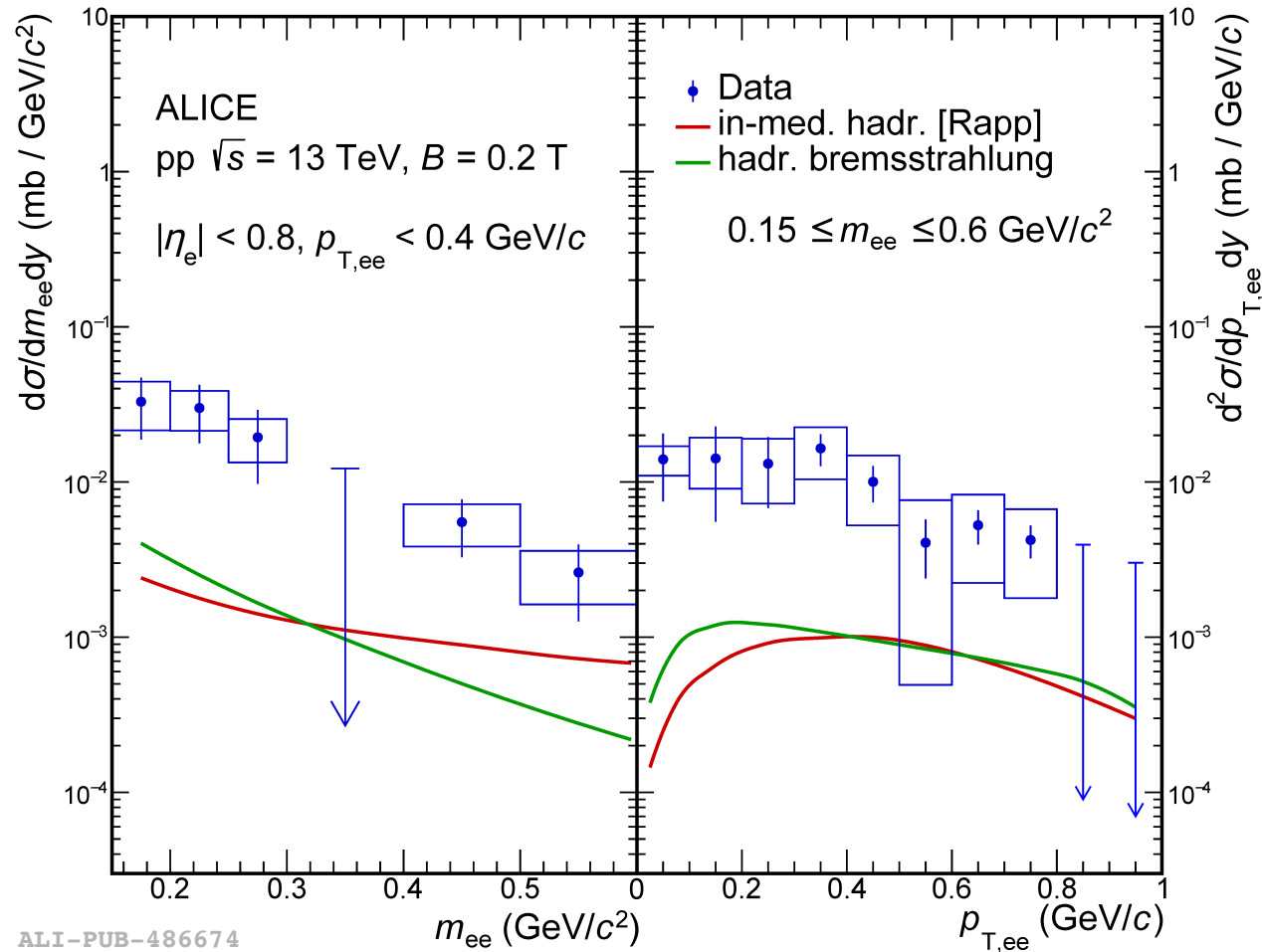
pp衝突での電子対の増大 $\sqrt{s} = 13$ TeV with low B field



- $0.15 < m_{ee} < 0.6$ GeV/c², $p_{T,ee} < 0.4$ GeV/cで増大
- 超過収量は荷電粒子多重度に依存しない

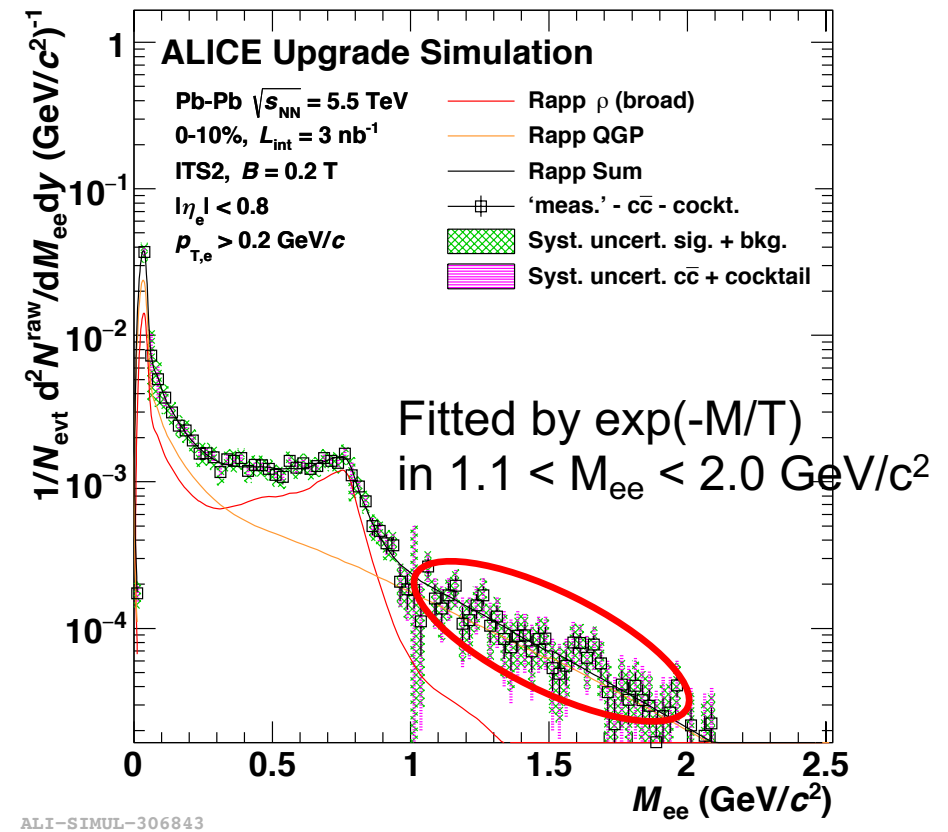
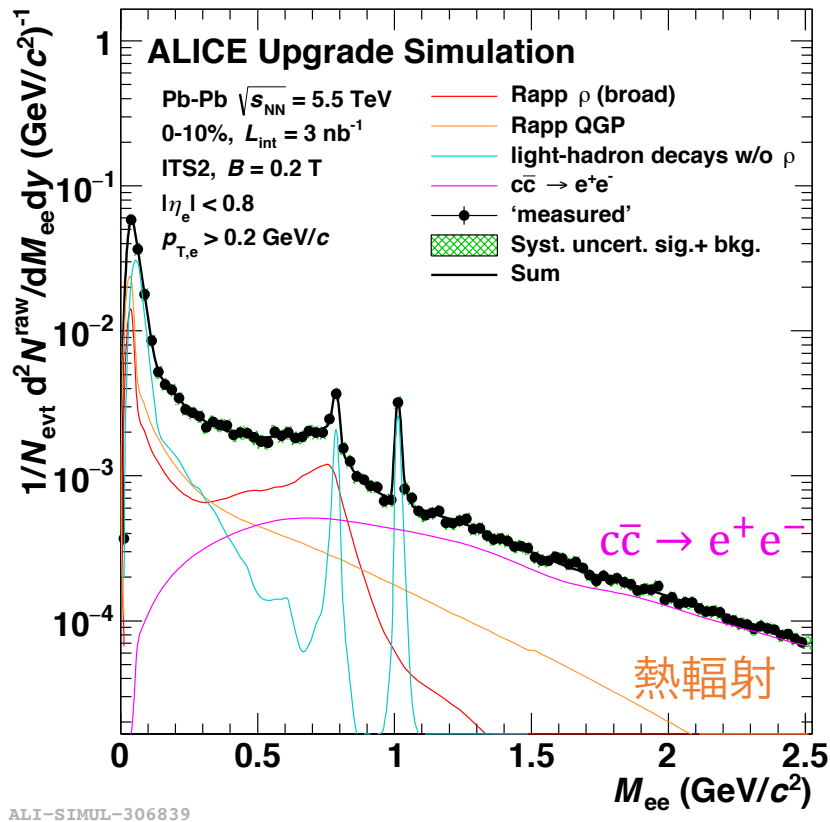


pp衝突での電子対の増大 $\sqrt{s} = 13$ TeV with low B field



ALI-PUB-486674

- $0.15 < m_{ee} < 0.6$ GeV/c², $p_{T,ee} < 0.4$ GeV/cで増大
- 超過収量は荷電粒子多重度に依存しない
- 超過収量は
 - ハドロンの制動放射
 - ハドロン多体系からの熱輻射
 どちらでも説明されない。



- GEM-TPC換装による高統計データ収集と
- 新ITSによる衝突点決定精度向上

チャームハドロン起源電子除去後

の組み合わせで初めて可能になる。

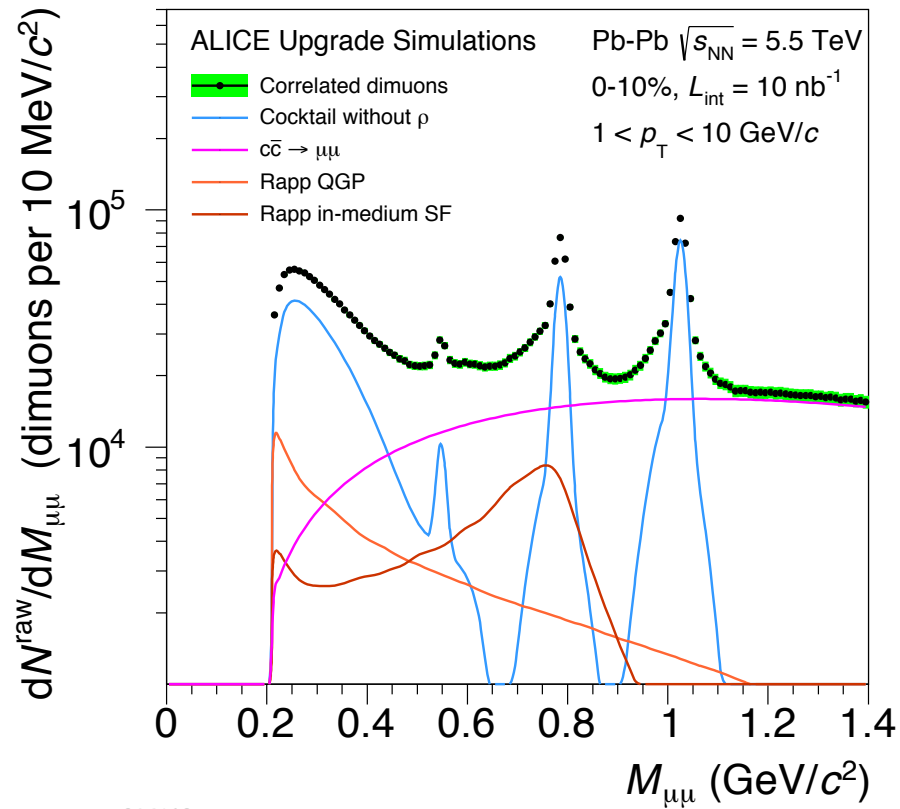
まとめ

- Run2データからも続々と電子対の結果を公表している。
 - 同じ衝突エネルギーで大小様々な系(pp, pPb, PbPb @ 5.02 TeV)
 - 低横運動量電子対の増大

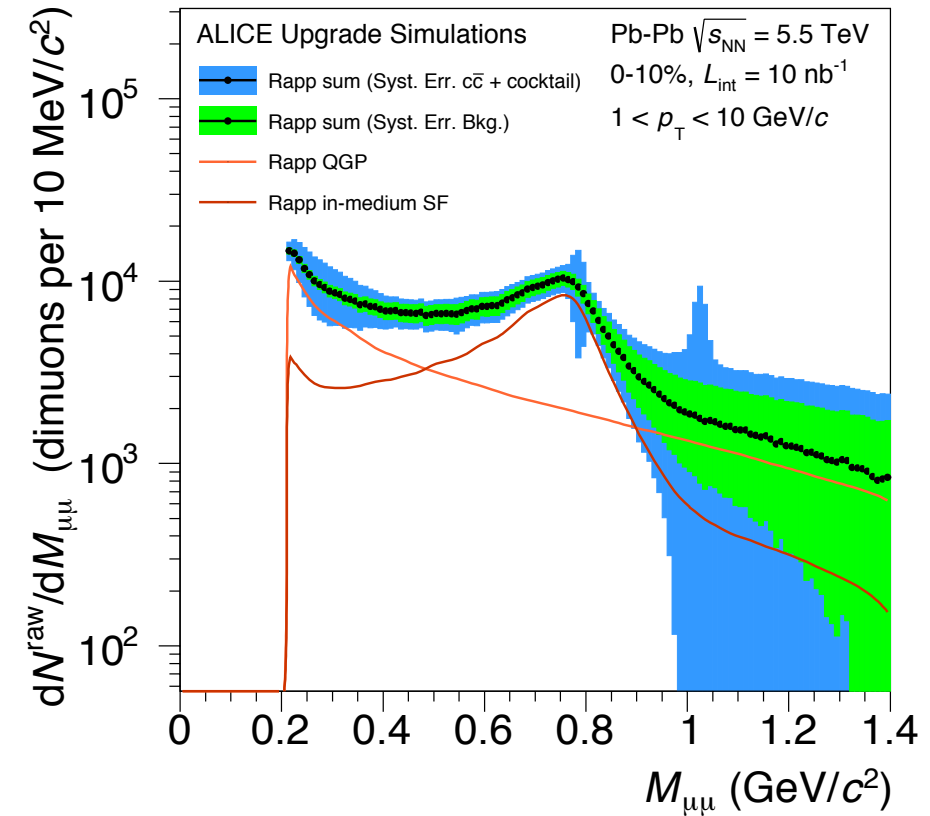
- Run3へ向けたALICE高度化
 - 100倍のデータ収集能力(GEM-TPC)
 - 衝突点分解能向上(ITS, MFT)

展望の紹介

ミューオン対

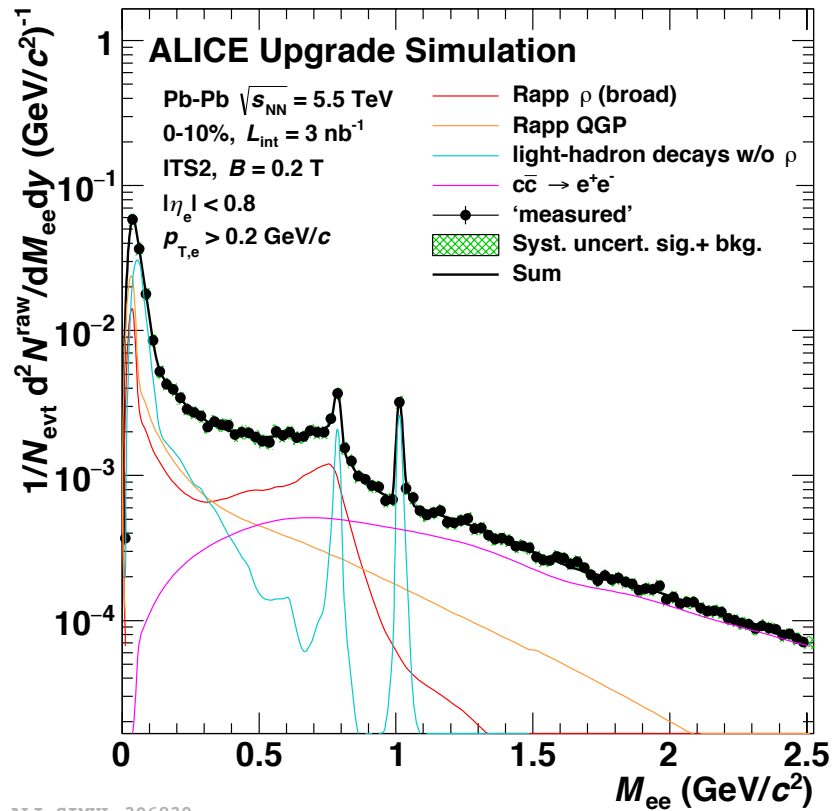


ALI-SIMUL-306418

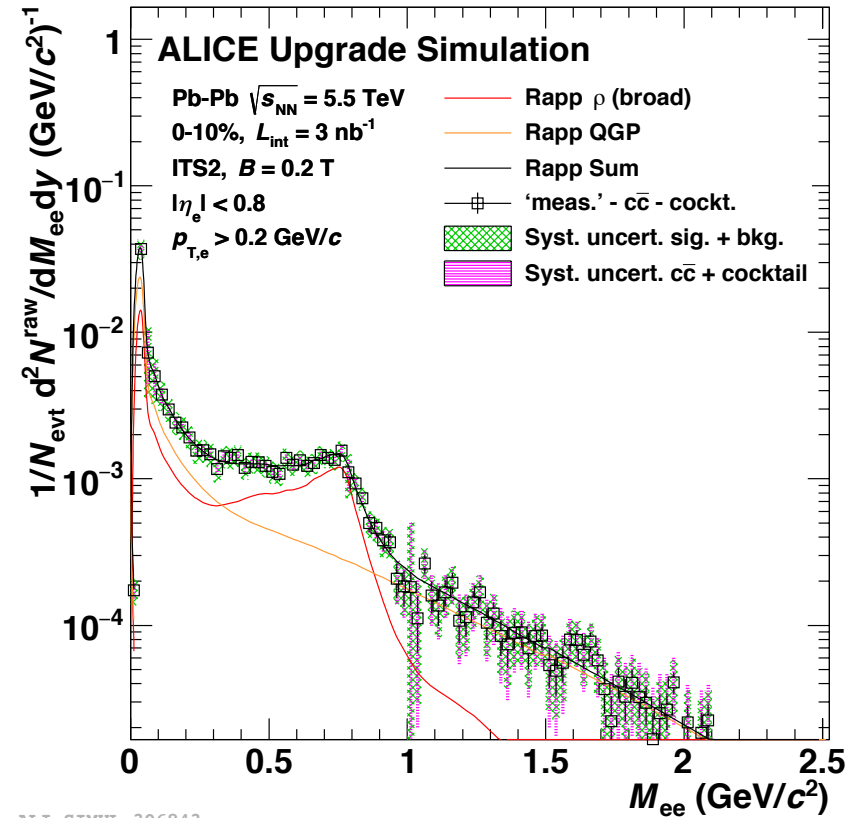


ALI-SIMUL-306413

- Excellent mass resolution for dimuons thanks to MFT
- ρ meson mass spectrum with $\sim 20\%$ uncertainty @ $M_{\mu\mu} = 0.5 \text{ GeV}/c^2$



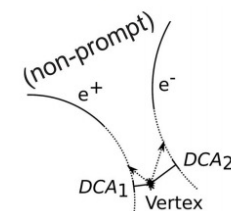
ALI-SIMUL-306839



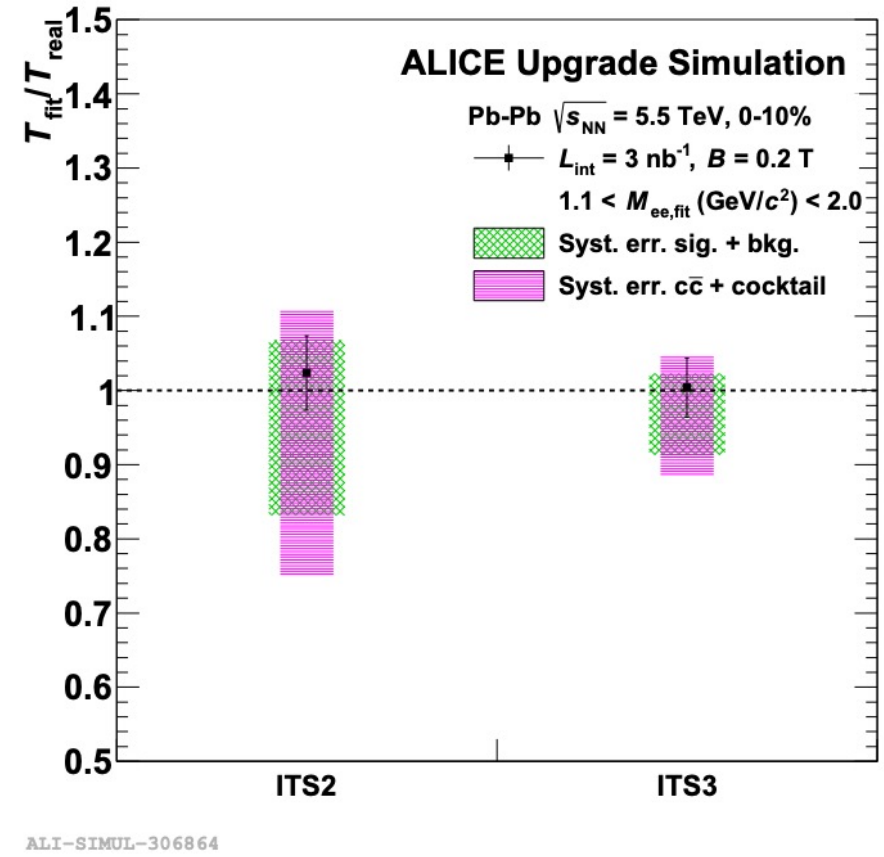
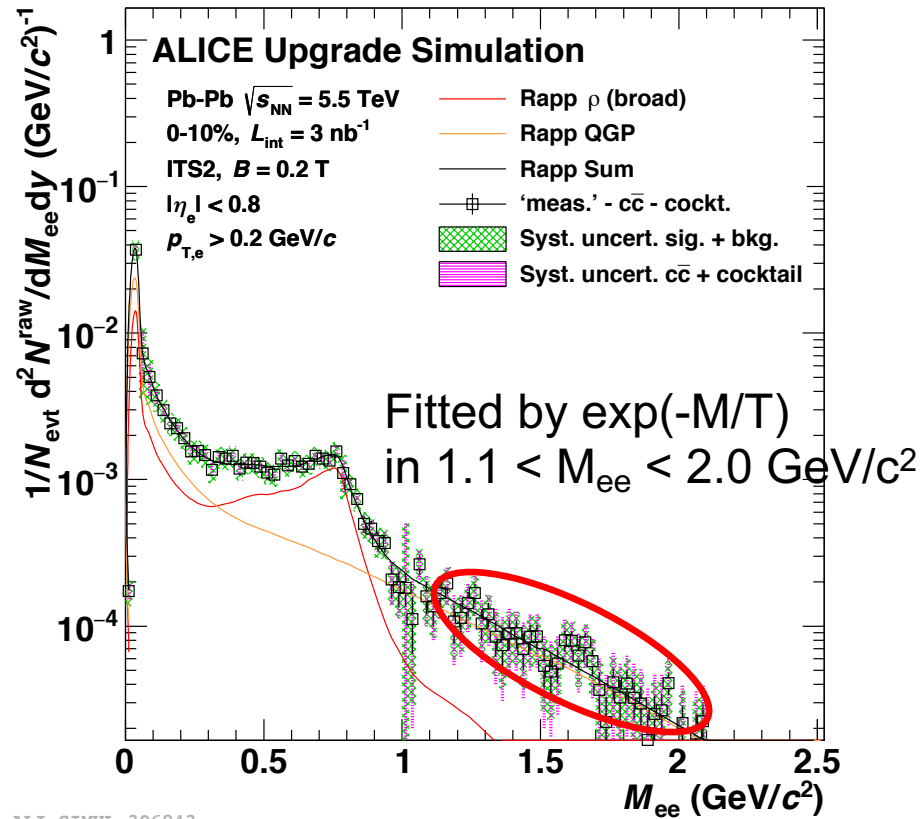
ALI-SIMUL-306843

- Reject dileptons from cc pairs by DCA

$$DCA_{ee} = \sqrt{\frac{(DCA_{xy,1}/\sigma_{xy,1})^2 + (DCA_{xy,2}/\sigma_{xy,2})^2}{2}}$$

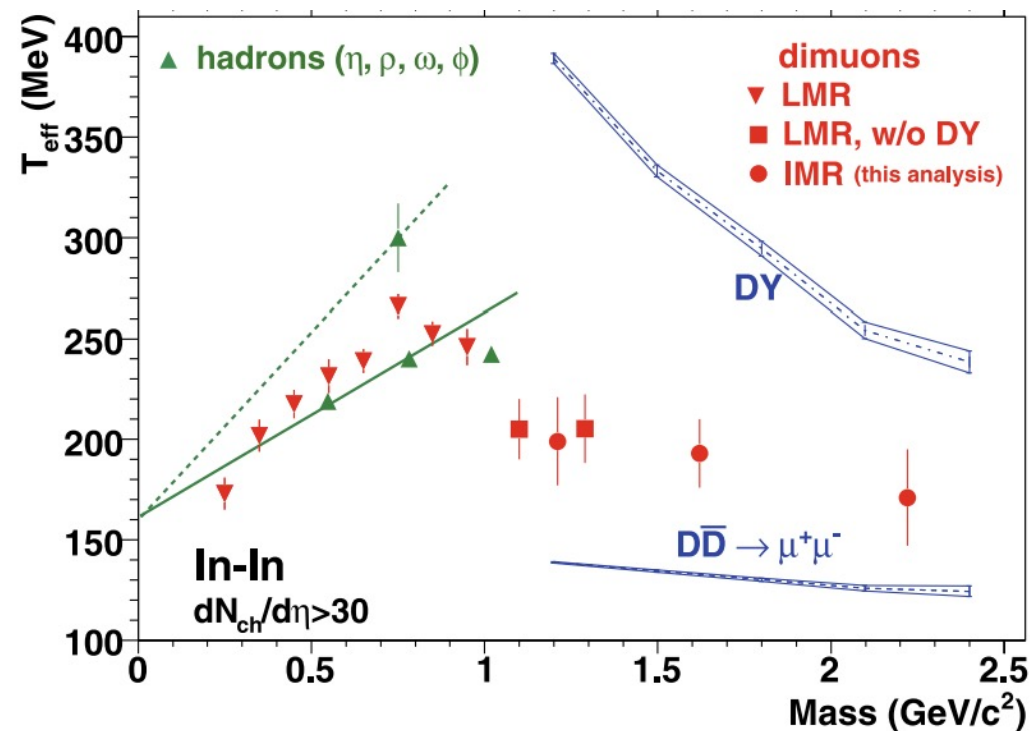
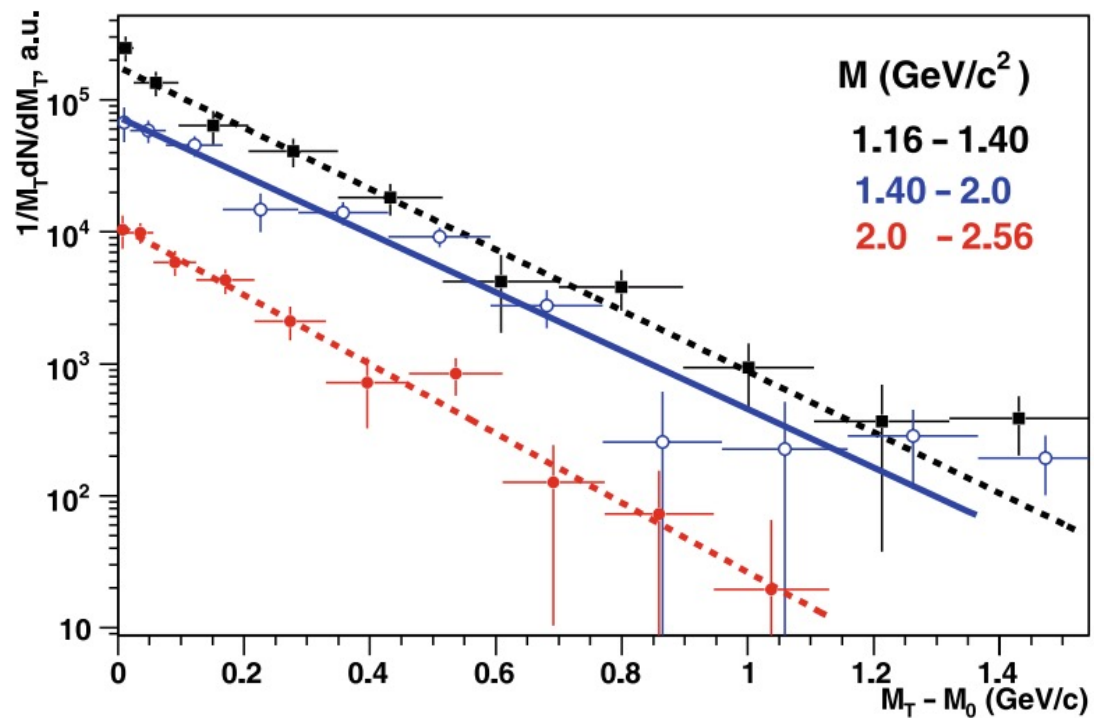


中間質量領域からの平均温度抽出



- Reject dileptons from cc pairs by DCA
- $dN/dM \propto \exp(-M/T)$

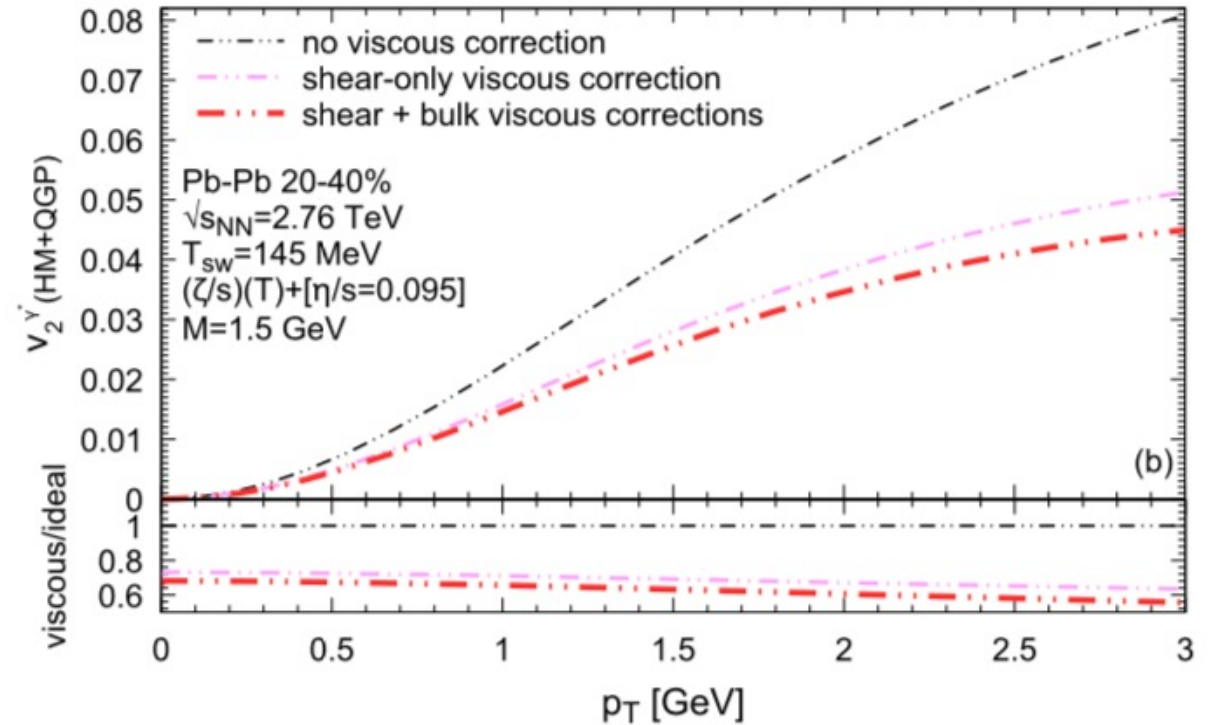
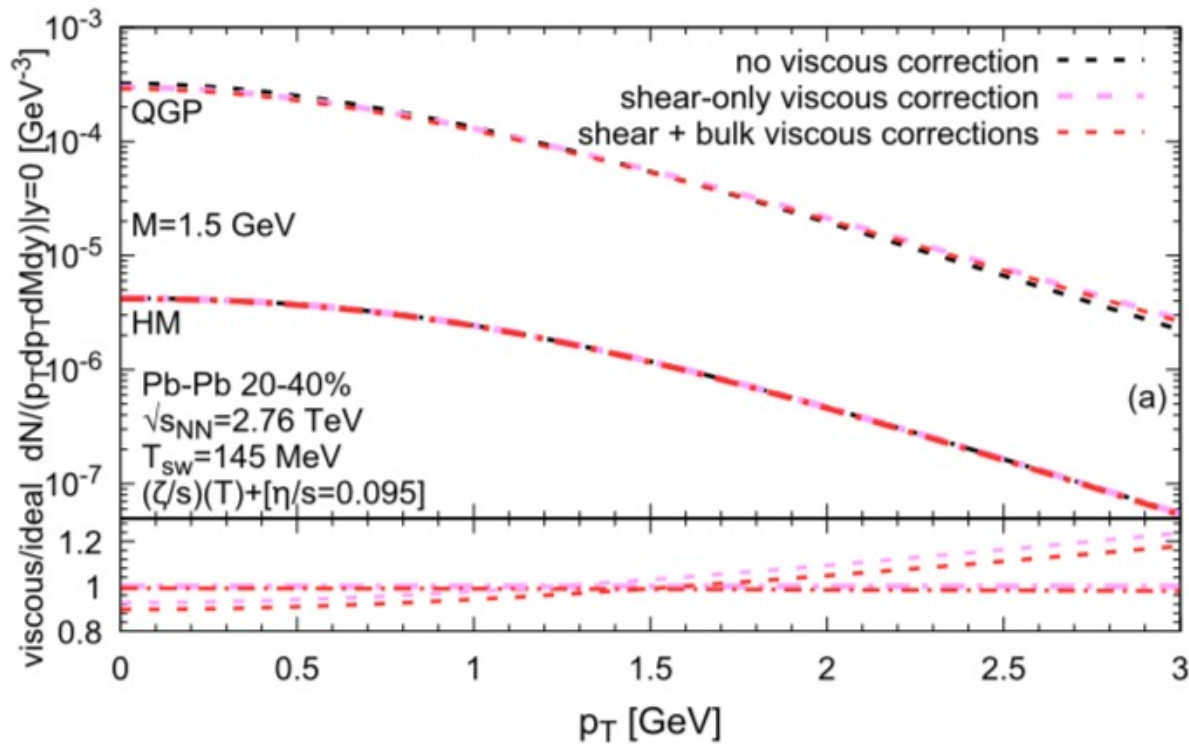
p_T spectra of dileptons and inverse slope of $\exp(-p_T/T_{\text{eff}})$



Eur. Phys. J. C (2009) 59: 607–623

- Inverse slope parameter T_{eff} : sensitive to radial flow velocity β as “barometer”
 - Expected relative stat. uncertainty $\sim 1\%$ for T_{eff} in Run 3-4
- $$T_{\text{eff}} \simeq T + M \langle \beta \rangle^2$$

Dilepton flow

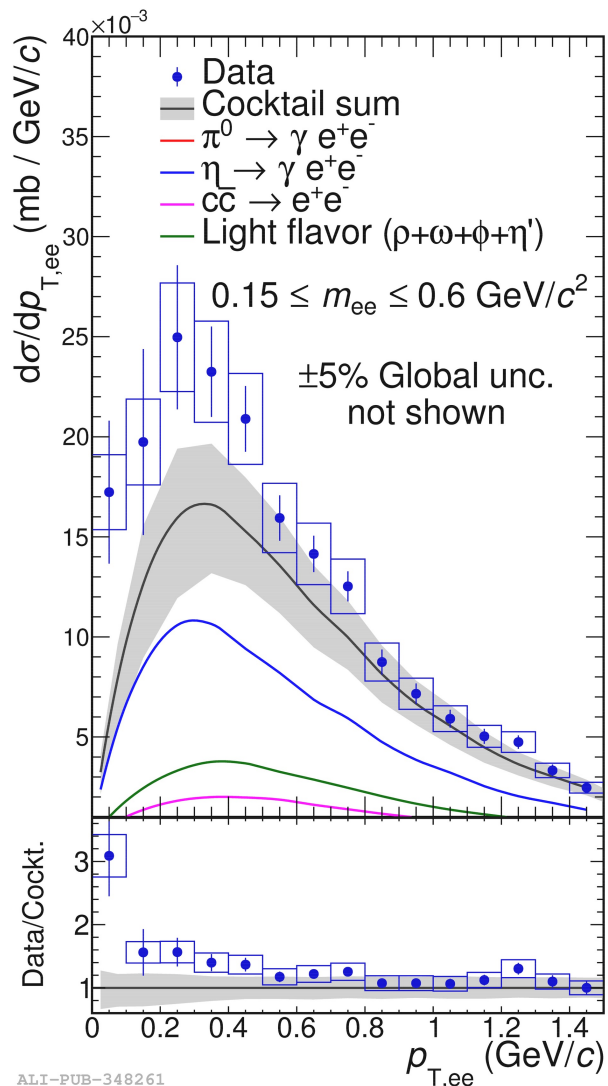


Phys. Rev. C 101, 044904 (2020),
Gojko Vujanovic et. al.

- Important to measure not only dN/dM , but also v_2
- Sensitive to shear and bulk viscosity
- Expected relative stat. uncertainty $\sim 10\%$ in Run 3-4

Future pp program at $\sqrt{s} = 14$ TeV

arXiv:2005.14522



ALI-PUB-348261

- Reduced solenoid magnetic field 0.2 T
 - $p_{T,e} > 75$ MeV/c
 - η/π^0 ratio at low p_T
- Expected $L_{\text{int}} \sim 3$ pb $^{-1}$ (x 300 more than Run 2 data)
 - multi-differential analysis in m_{ee} , $p_{T,ee}$, multiplicity
- Unique sensitivity to soft dielectron at RHIC and the LHC
 - So far, the excess is described by neither hadronic bremsstrahlung nor thermal radiation.

http://cds.cern.ch/record/2724925/files/ALICE_HEpp_PubINote.pdf

