

電磁プローブ (フォトン&レプトン対)

山口頼人

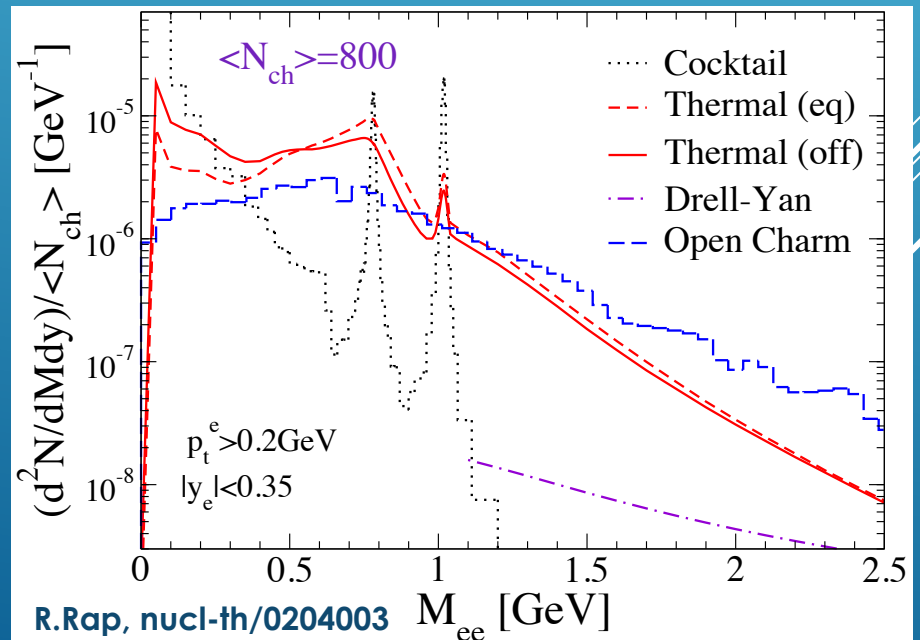
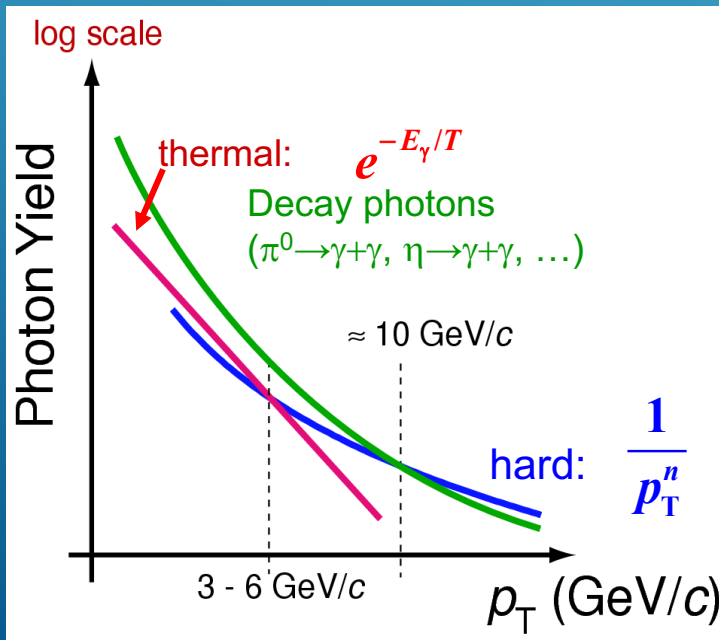
理研BNLセンター

Heavy Ion Café & Pub合同研究会@名古屋大



フォトン & レプトン対

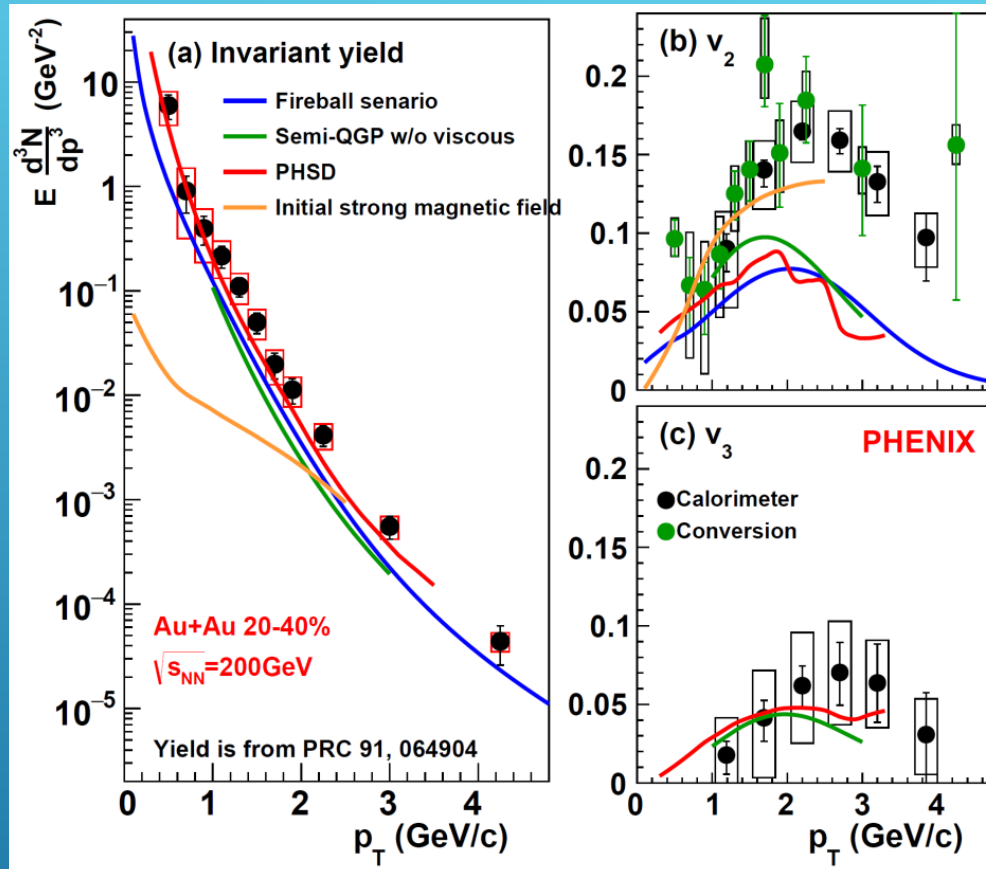
- 重イオン衝突でできる媒質に対して透過的
- 特にQGPからの熱放射：**熱光子**
 - ✓ 温度が高いほど大きな放出レート
 - QGP初期からの大きな寄与を期待 (**低横運動量領域**)
 - ✓ スペクトルの傾き ($\sim e^{-E/T}$) からQGP温度測定
 - QGPライフタイムや温度変化を考慮する必要あり
- カイラル対称性回復によるベクターメソンの質量変化
 - ✓ **低質量電子対**のcontinuum成分



熱光子：低橫運動量直接光子



QM前の理解 : DIRECT PHOTON PUZZLE

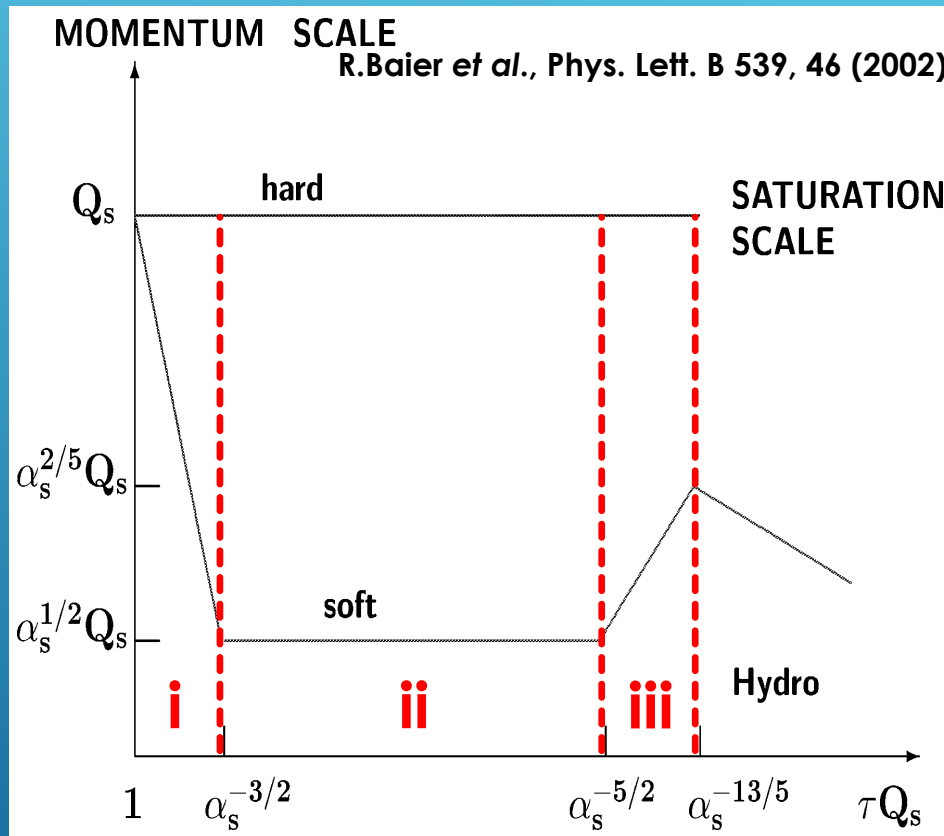


- 期待通りの大きな収量 & 予期していなかった大きな v_2
 - ✓ 大きな収量 → 温度の高い early stage からの寄与?
 - ✓ 大きな v_2 → フローが発達した late stage からの寄与?
- 新たな光子源の導入:

Photon emissions at 1) Glasma & 2) meson production

1) PHOTONS FROM GLASMA

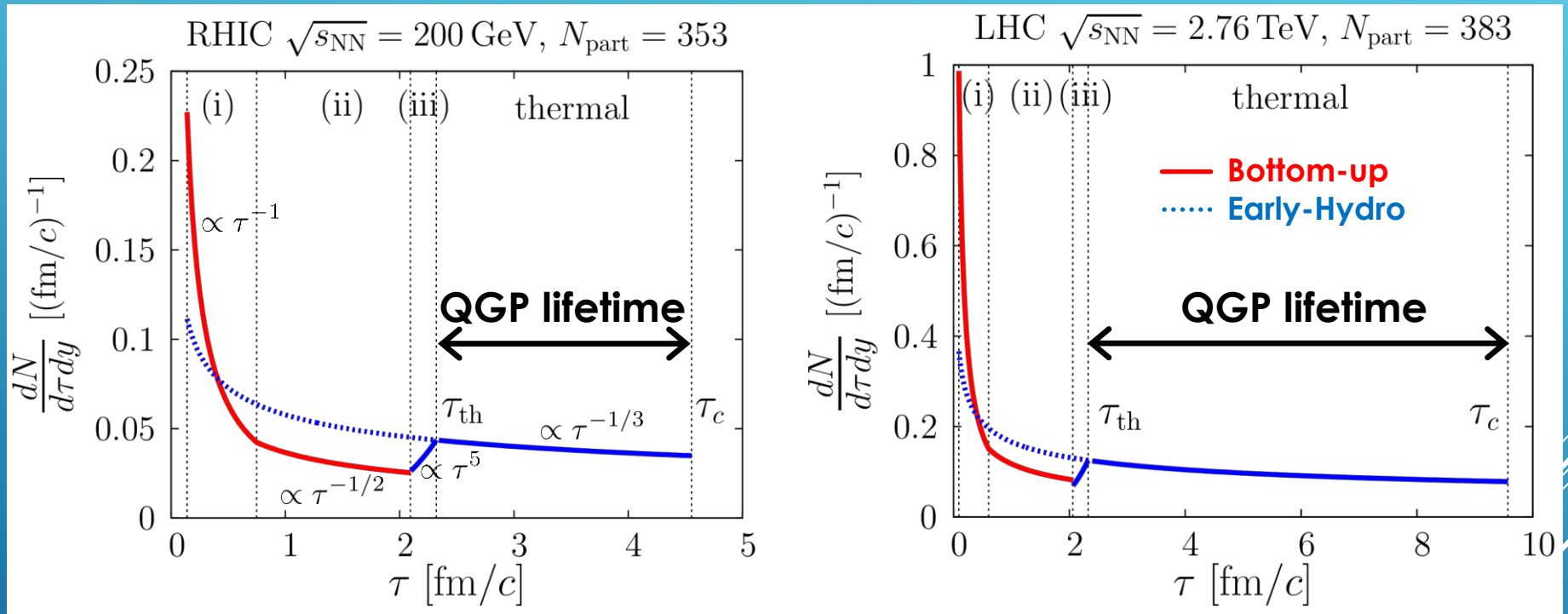
- Bottom-up thermalization scenario (丹治さんの発表)
 - ✓ 前熱平衡状態 = Glasmaからの放射を含む計算



- i. Hard gluon scatterings
- ii. Soft gluon bath
- iii. Heat-up by remaining hard gluons

1) PHOTONS FROM GLASMA

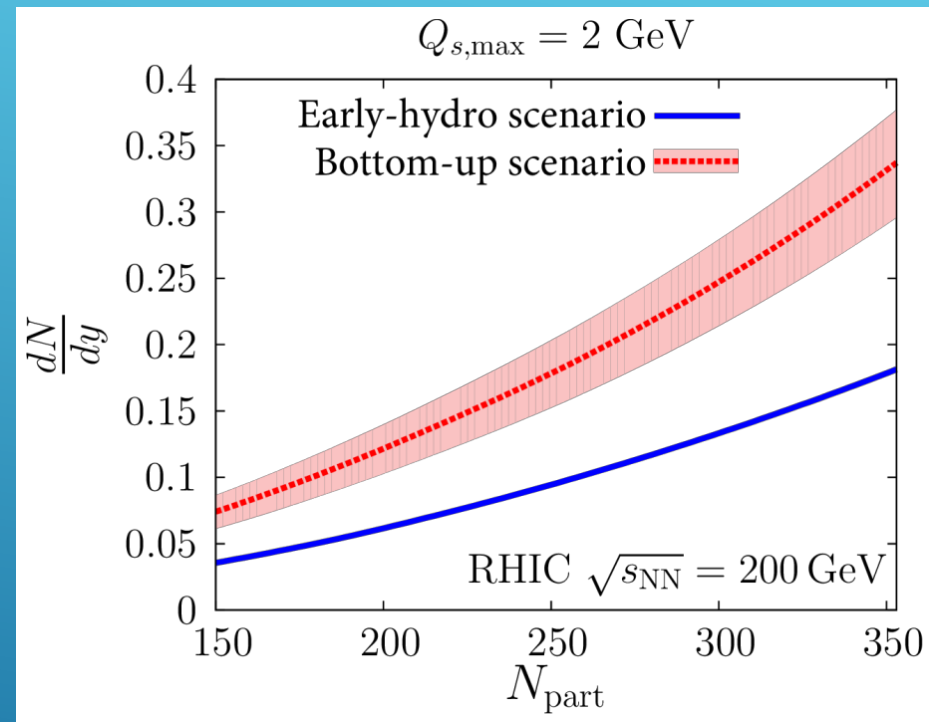
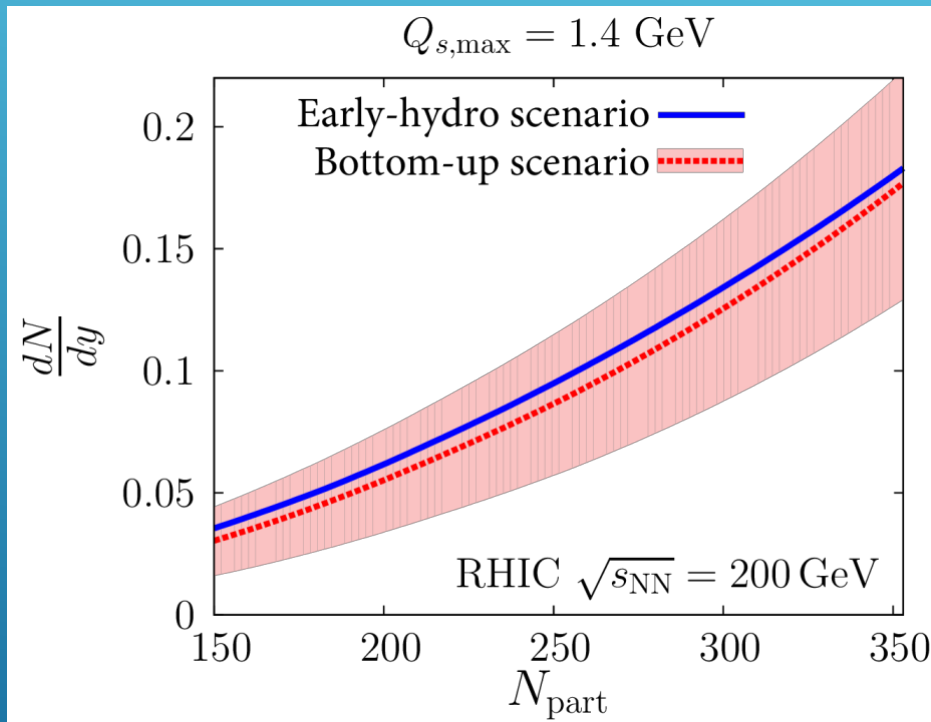
- Bottom-up thermalization scenario (丹治さんの発表)
 - ✓ 前熱平衡状態 = Glasmaからの放射を含む計算



- QGP@LHC energyはより長いLifetime
 - ✓ RHIC energyではGlasmaからの放射の割合が増加
 - ✓ Peripheral collisionについても同様

1) PHOTONS FROM GLASMA

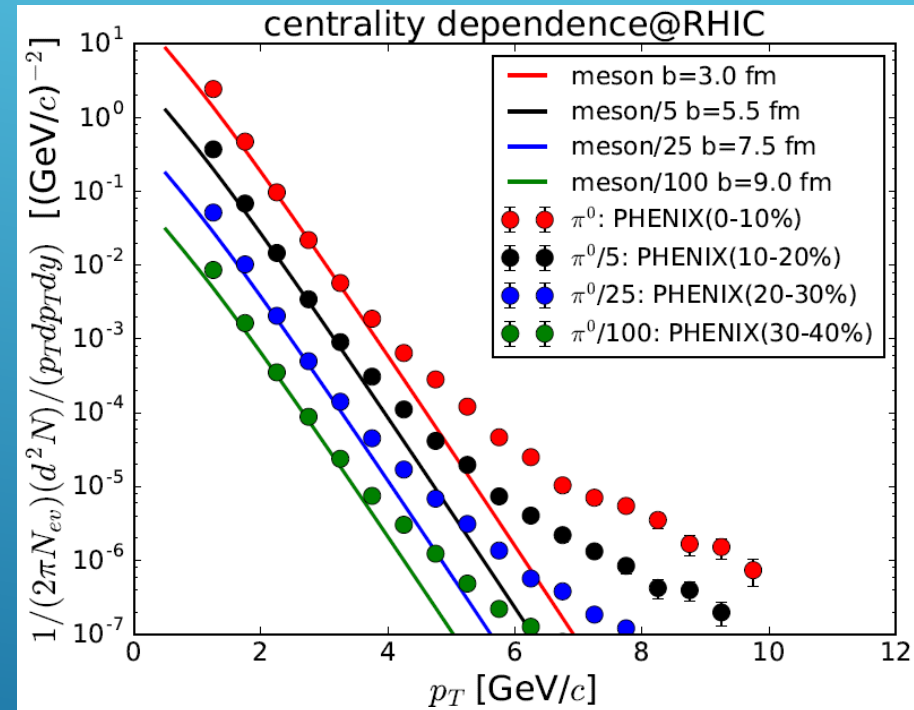
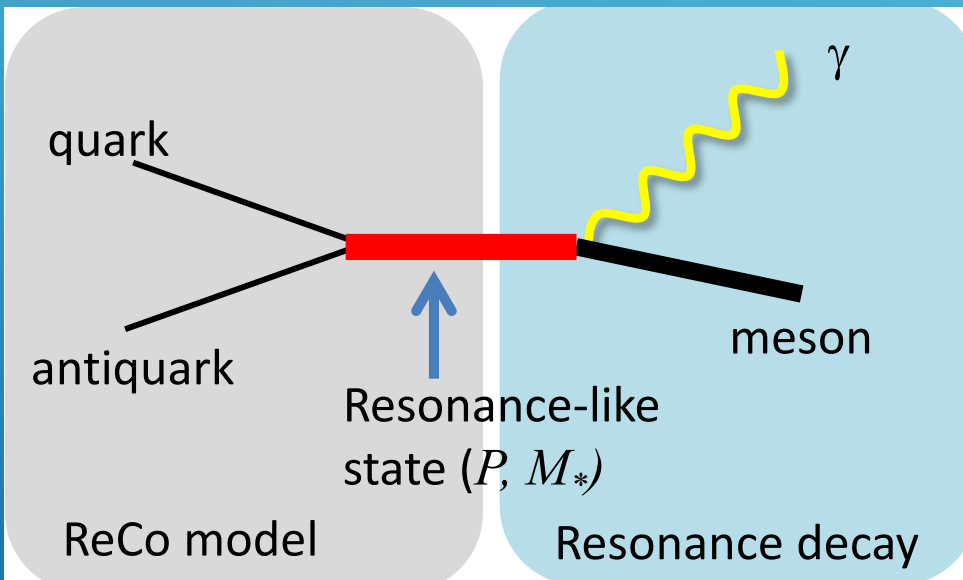
- Bottom-up thermalization scenario (丹治さんの発表)
 - ✓ 前熱平衡状態 = Glasmaからの放射を含む計算



- Glasmaの光子生成率に強い Q_s^2 依存性
 - ✓ Small Q_s : Early-Hydro scenarioとconsistent
 - ✓ Large Q_s : Glasmaからのより大きな寄与
- 大きな v_2 を作る機構を別に用意する必要あり

2) PHOTONS AT MESON PRODUCTION

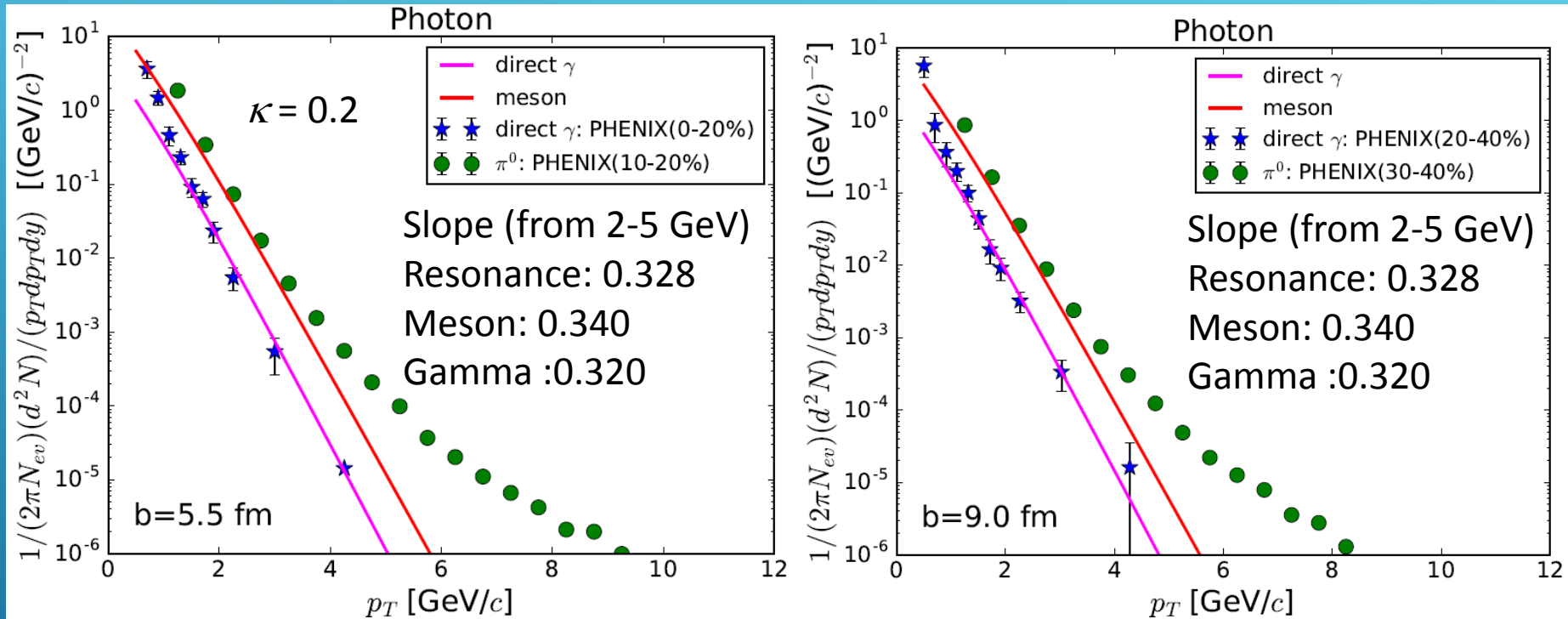
- ReCombination model + photon emission (板倉さんの発表)
 - ✓ メソン生成時のフォトン → メソンと同じ大きさの v_2
 - ✓ Recombination時のエネルギー保存を保証



- パイオン生成のみを考慮(QM'17の時点)
 - ✓ Temperature@Hadronization: $T_h = 175$ MeV
 - ✓ π^0 のcentrality dependenceを再現 ($p_T < 4$ GeV/c)

2) PHOTONS AT MESON PRODUCTION

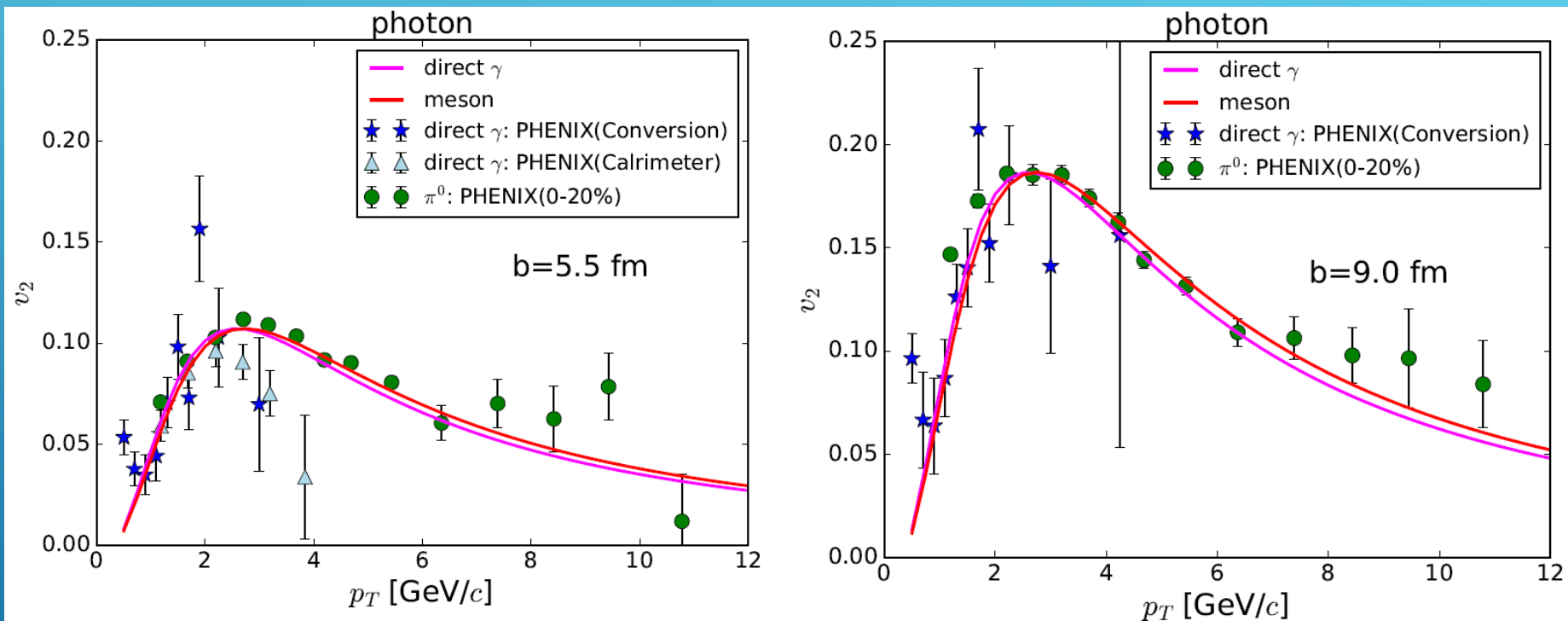
- ReCombination model + photon emission (板倉さんの発表)



- p_T spectra : データを再現
 - ✓ Low p_T でのGapはより重いメソンの寄与で説明可

2) PHOTONS AT MESON PRODUCTION

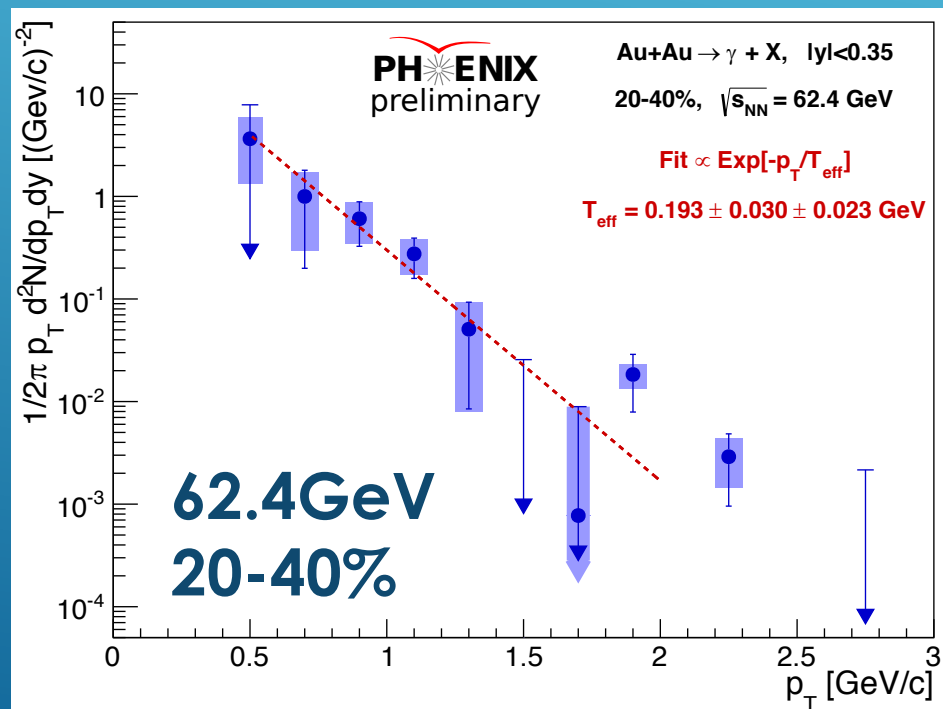
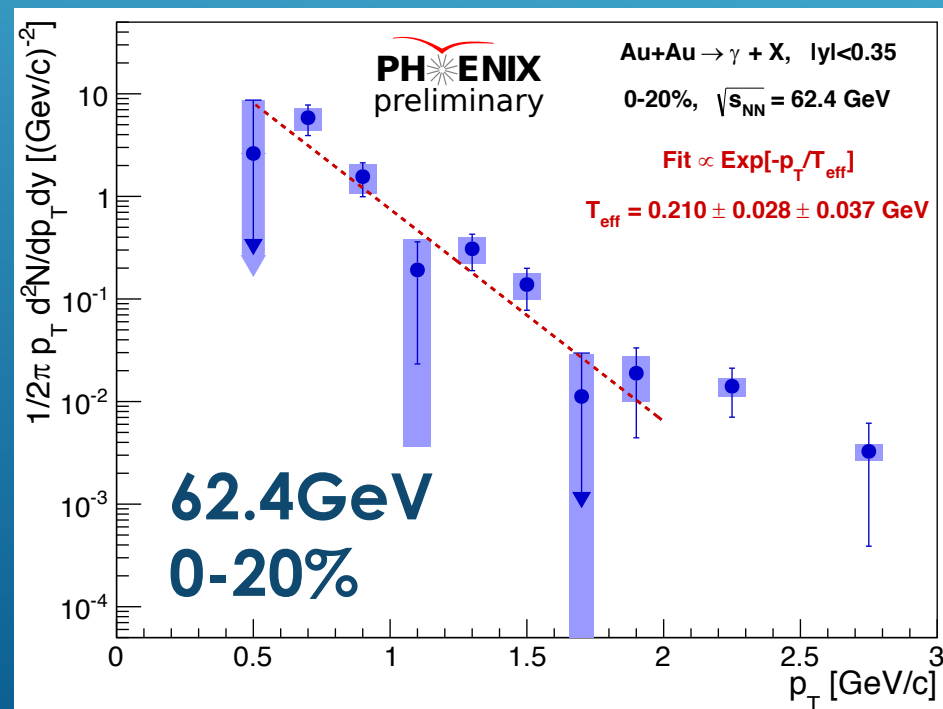
- ReCombination model + photon emission (板倉さんの発表)



- p_T spectra : データを再現 & v_2 : データを再現
 - ✓ Low p_T でのGapはより重いメソンの寄与で説明可
 - ✓ ALICEの結果も再現
- 時空発展を考慮したより本格的な計算に期待

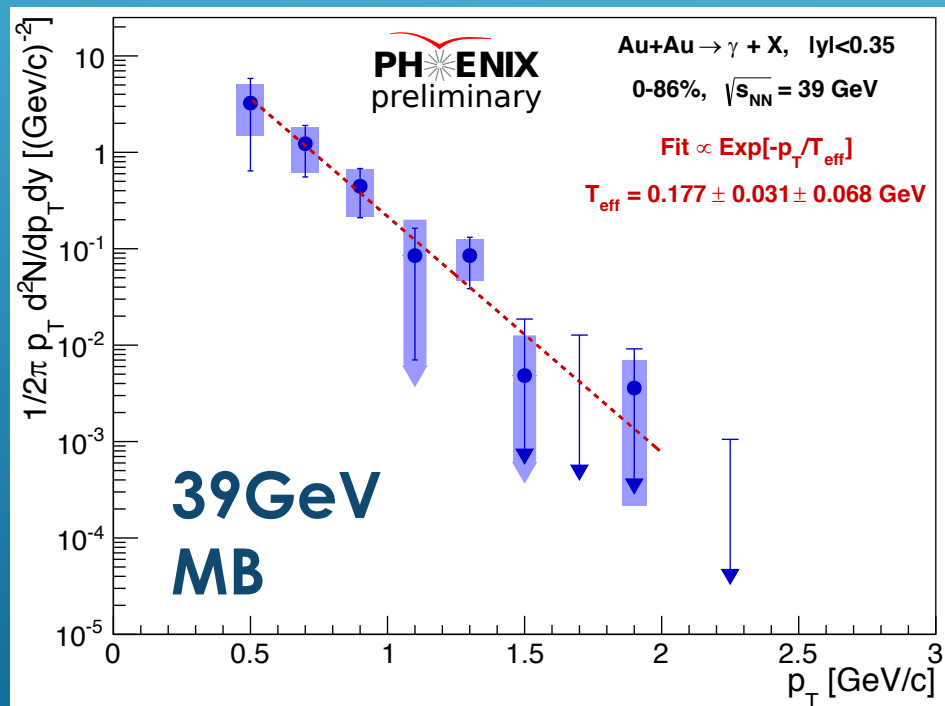
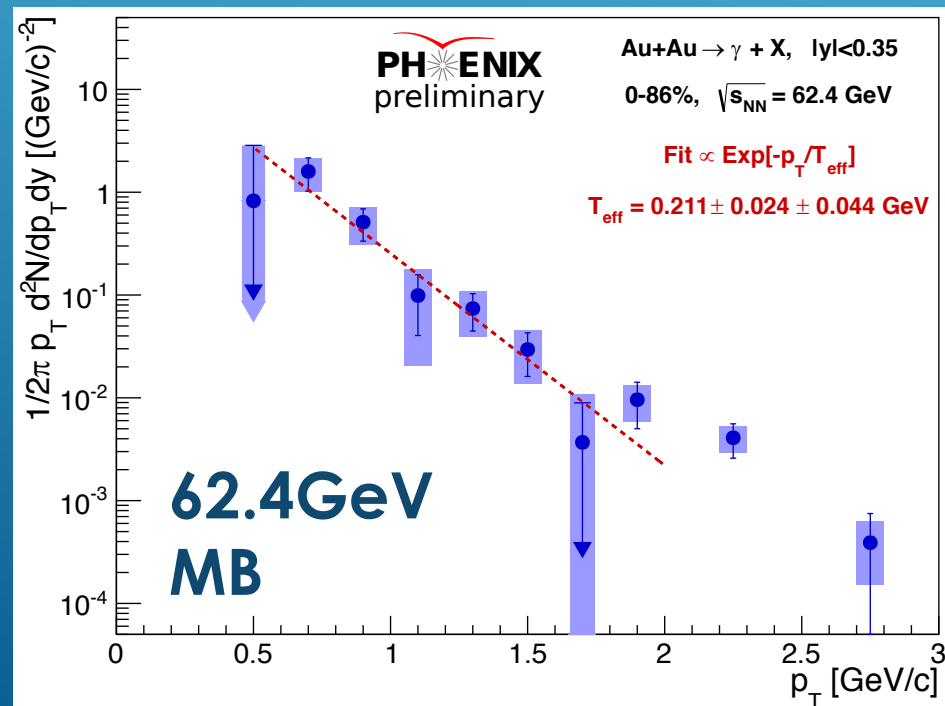
NEW DATA FROM EXPERIMENTS

- New data from PHENIX
 - ✓ 検出器による外部光子変換を利用した測定
 - Au+Au: **62.4(0-20,20-40,MB)**, 39(MB)GeV
 - ✓ 仮想光子による内部光子変換を利用した測定
 - Cu+Cu: 200(0-40,MB)GeV



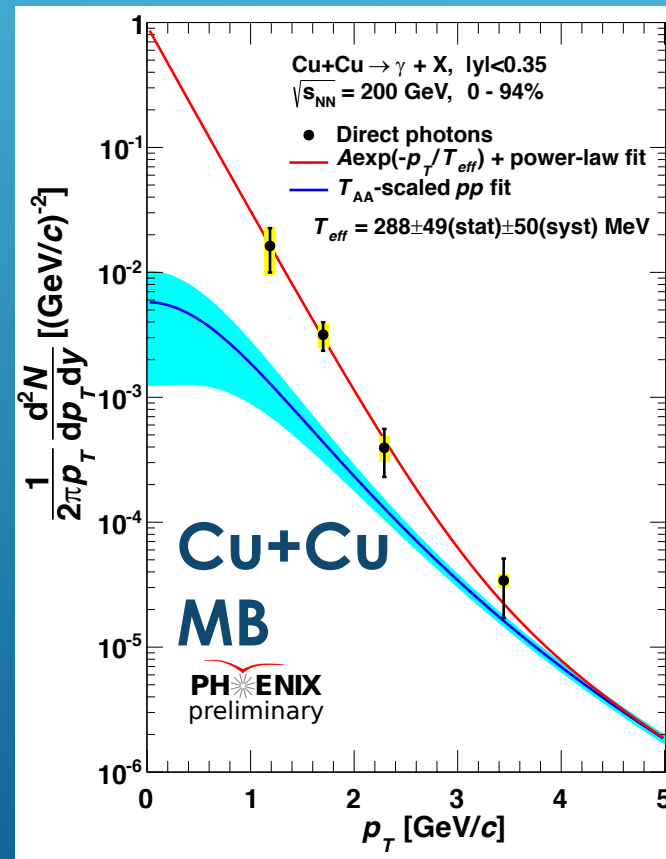
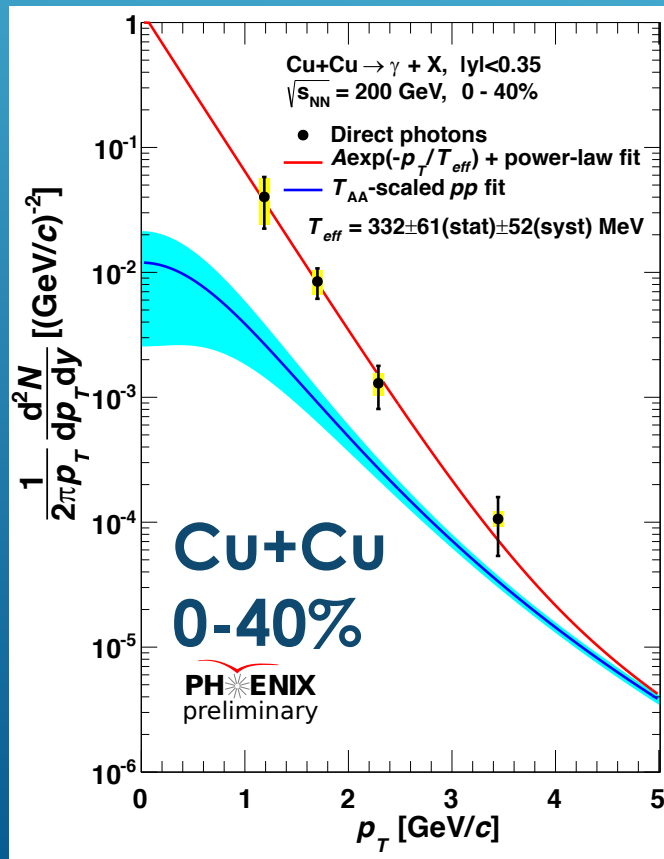
NEW DATA FROM EXPERIMENTS

- New data from PHENIX
 - ✓ 検出器による外部光子変換を利用した測定
 - Au+Au: **62.4(0-20,20-40,MB), 39(MB) GeV**
 - ✓ 仮想光子による内部光子変換を利用した測定
 - Cu+Cu: 200(0-40,MB) GeV



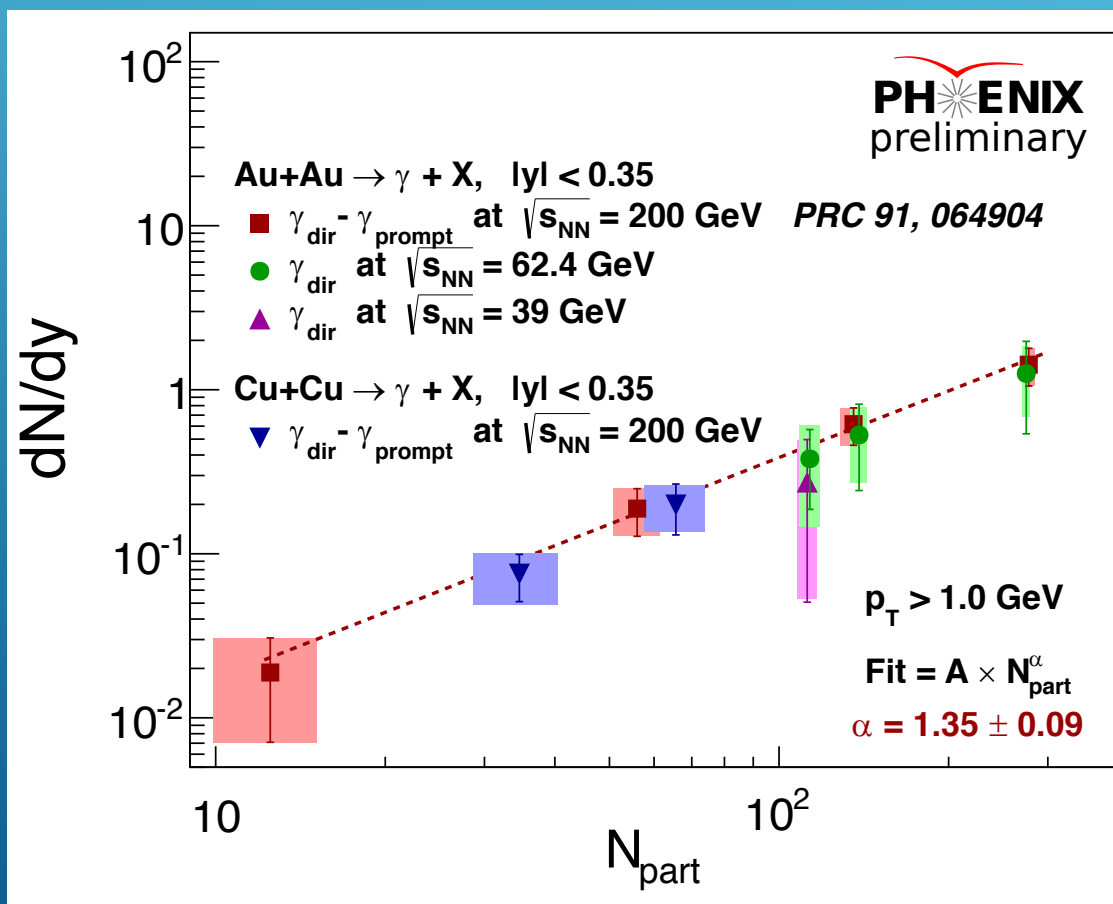
NEW DATA FROM EXPERIMENTS

- New data from PHENIX
 - ✓ 検出器による外部光子変換を利用した測定
 - Au+Au: 62.4(0-20,20-40,MB), 39(MB)GeV
 - ✓ 仮想光子による内部光子変換を利用した測定
 - Cu+Cu: **200(0-40,MB)** GeV (広島大星野くんの結果)



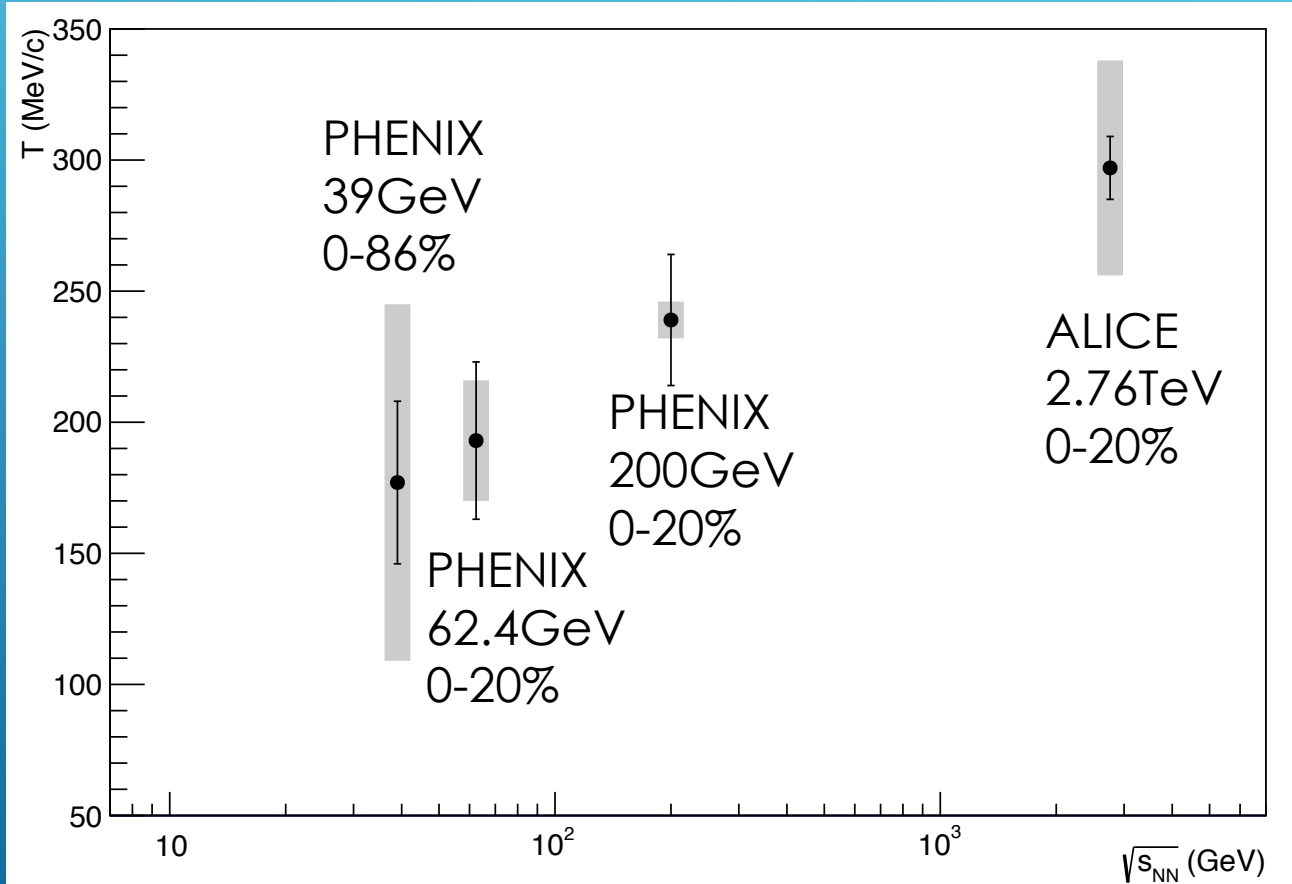
dN/dy : N_{PART} DEPENDENCE

- 超過収量に明らかなN_{part}依存性
 - ✓ $A \times N_{part}^\alpha$ Fit: $\alpha=1.35$
 - ✓ 2体のパートン散乱による放射を仮定した(単純な)計算と無矛盾 : $R_\gamma \propto (N_{qp}/2)/V \cdot T$ ※N_{part} ~ 2-3N_{qp}



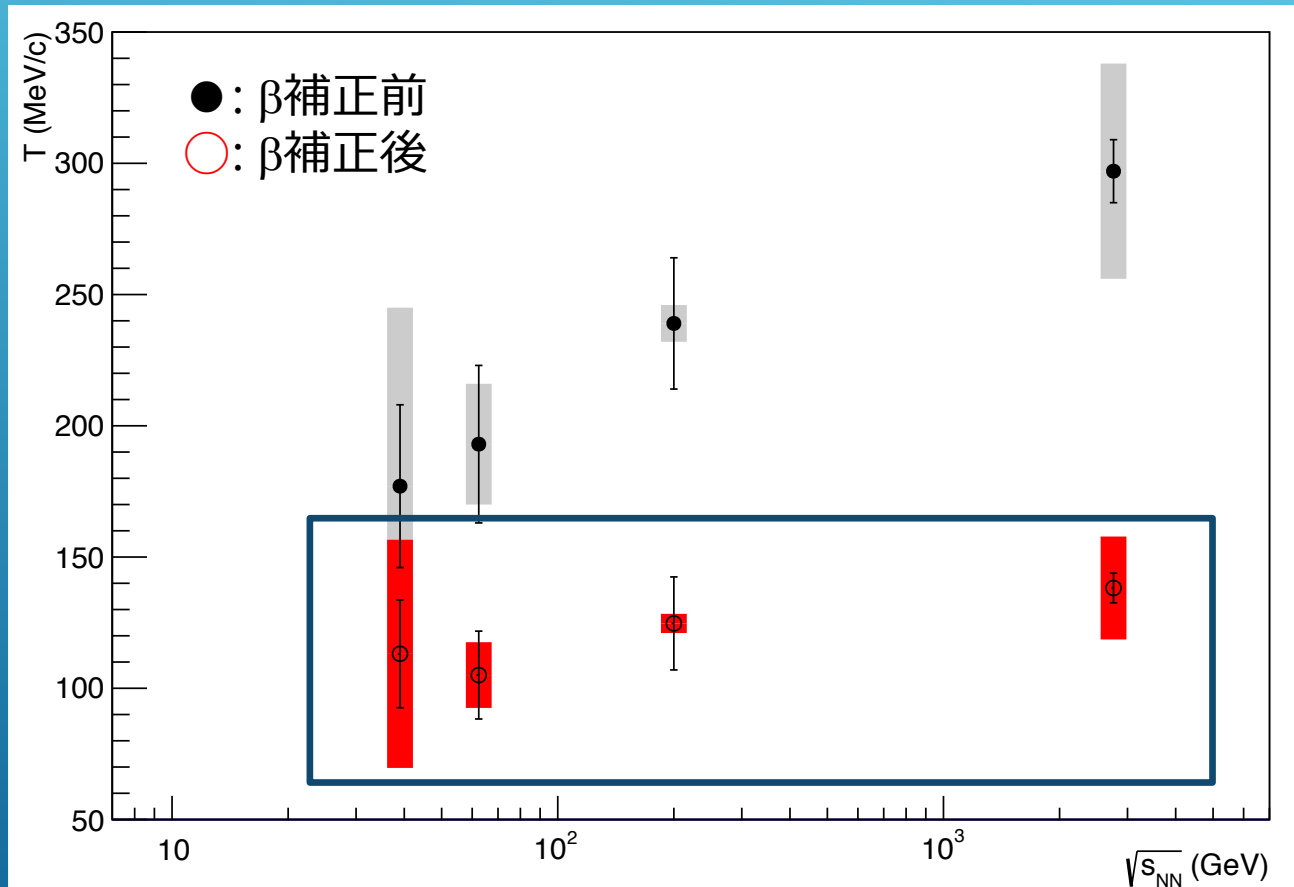
$T_{\text{EFF}} : \sqrt{S_{NN}}$ DEPENDENCE

- $T_{\text{eff}} \neq$ 生成物質の平均温度
 - ✓ Radial flowによるBlue-shift $\rightarrow T_{\text{eff}} > T_0$



β -CORRECTED $T_{\text{EFF}} : \sqrt{s_{NN}}$ DEPENDENCE

- Radial flow (β) 補正 : $T_{\text{eff}} = T_0 \sqrt{1 + \beta / 1 - \beta}$
 - ✓ β は π, K, p の測定結果に Blast-wave fit で算出したもの



- $T_0 \sim 150 \text{ MeV} (\sim T_c)$ & 弱い $\sqrt{s_{NN}}$ 依存性
→ Late stage からの寄与が支配的？ 初期温度への感度は？

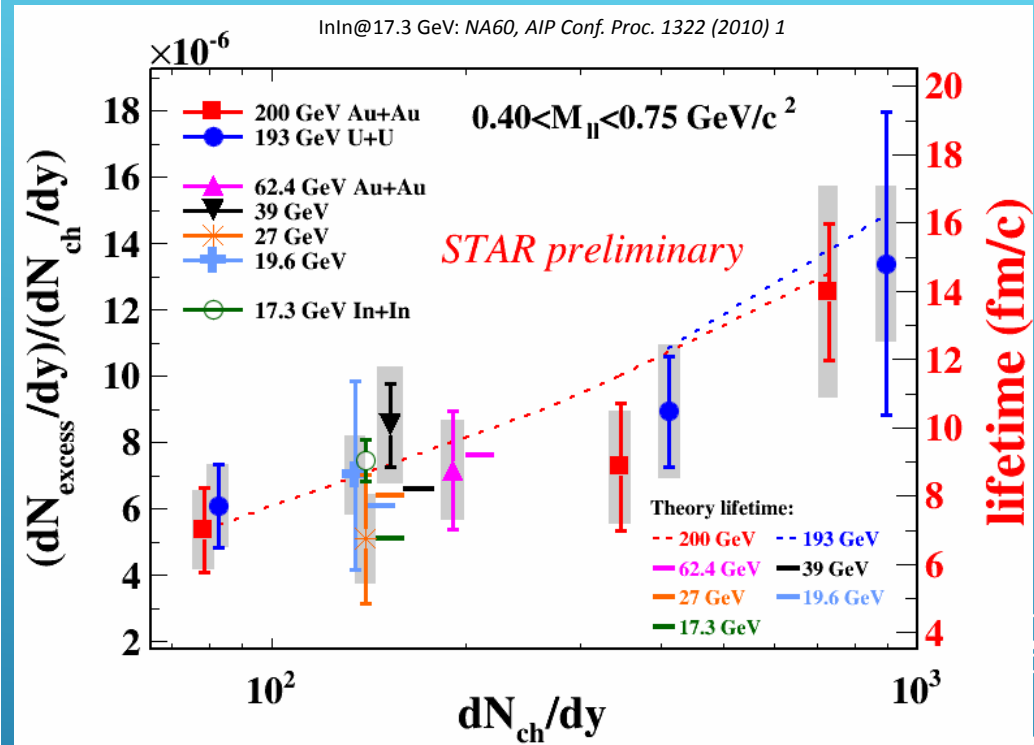
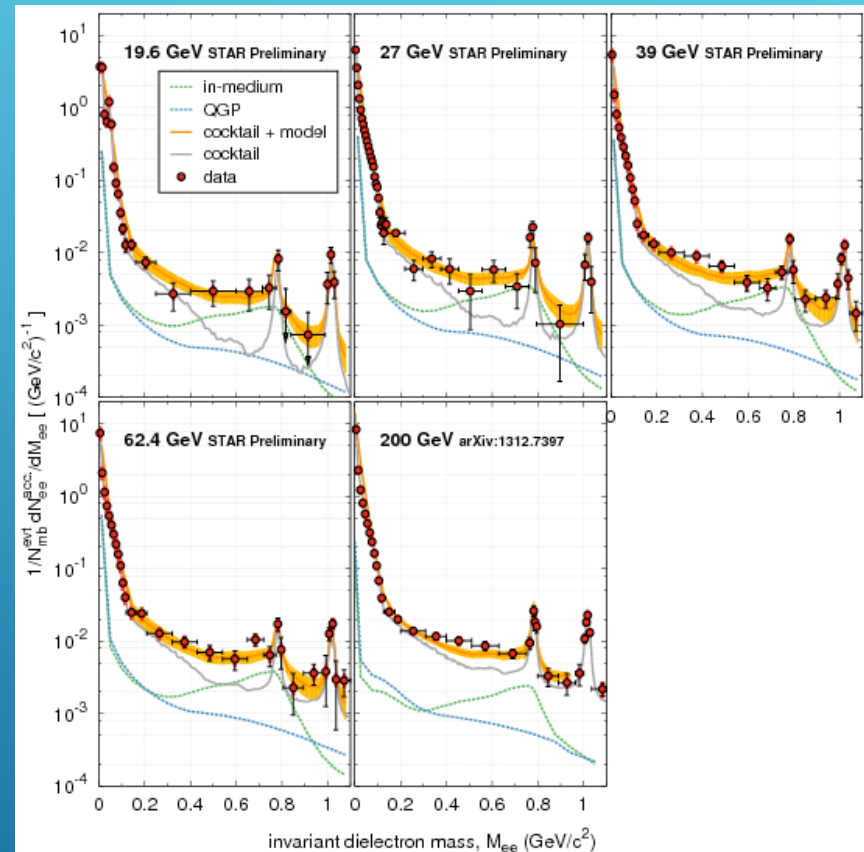
今後期待される測定 (フォトン)

- A+A data
 - ✓ PHENIX: VTX導入後の外部変換光子測定。統計も10倍以上改善される見込み。
 - ✓ STAR: 内部変換光子測定結果(投稿済)
 - ✓ ALICE: RUN-3での測定に期待(外部&内部変換光子測定)
 - ✓ Low- p_T photonが初期温度に敏感でない場合、**thermal di-electron** ($1 < m_{ee} < 3 \text{ GeV}$)測定がより重要 (PHENIX&ALICE)
 - ✓ 光子偏極測定? (強磁場のピュアな信号)
- Small system (p+p & p+A)
 - ✓ PHENIX: d+Au, He³+Auなどのmost-central eventsの解析が進行中
 - ✓ ALICE: p+p high-multiplicity events(東大村上さん)

レプトン対：低質量電子対



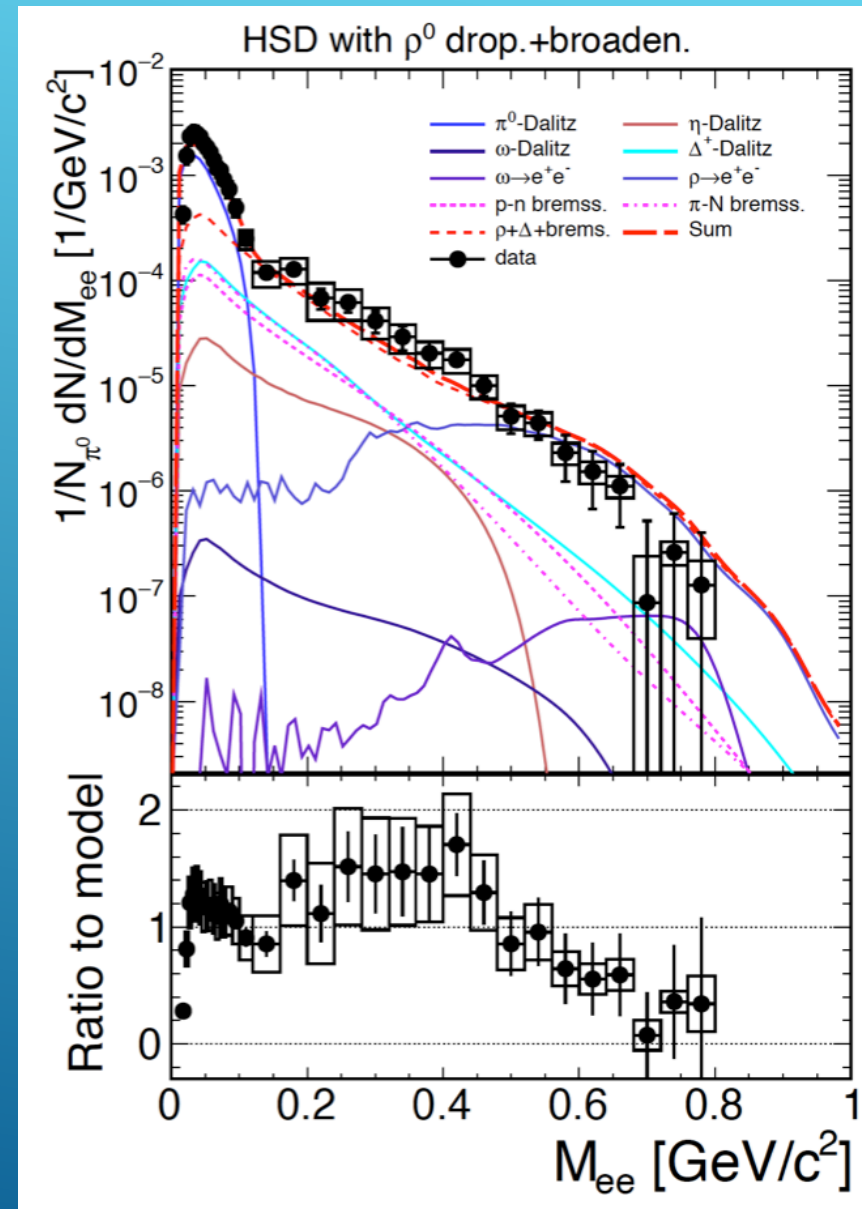
QM前の理解： ρ MASS BROADENING



- 低質量電子対について系統的な測定に成功
 - ✓ 広範囲のシステムサイズ & 衝突エネルギー
 - 17.3-200 GeV (SPS&RHIC)
 - ✓ ρ mass broadeningで説明できる
 - 生成媒質のライフタイム依存性

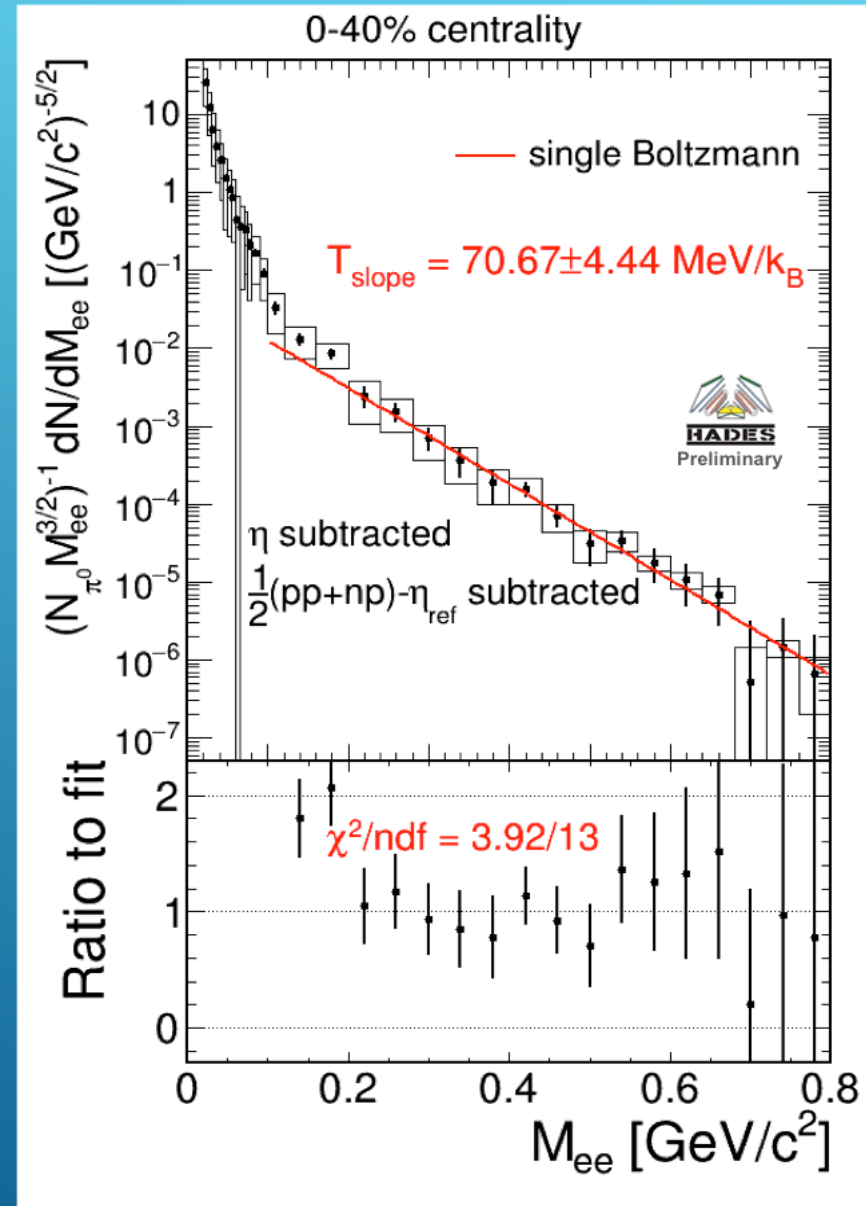
HADES: Au+Au@ $\sqrt{s_{NN}}=2.4\text{GeV}$

- Hot baryonic matter
- $M_{ee} > 150\text{MeV}$ に大きな超過収量
 - ✓ ρ -baryon interaction + ρ mass broadening で説明できる (Coarse-grained transport model)



HADES: Au+Au@ $\sqrt{s_{NN}}=2.4\text{GeV}$

- Hot baryonic matter
- $M_{ee} > 150\text{MeV}$ に大きな超過収量
 - ✓ ρ -baryon interaction + ρ mass broadening で説明できる (Coarse-grained transport model)
 - ✓ Exponential fit: $T_{\text{slope}} = 71\text{MeV}$

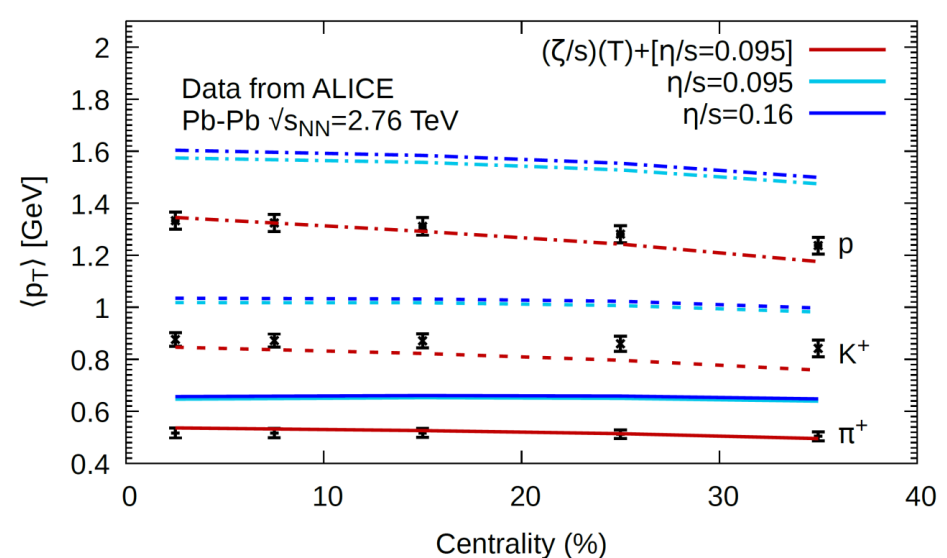
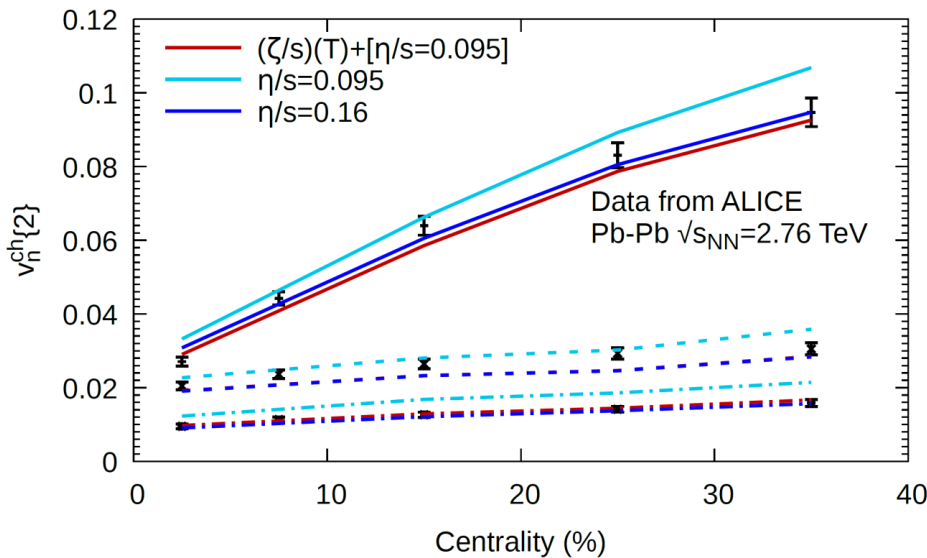


BULK VISCOSITY EFFECT ON DI-LEPTONS

- Bulk viscosityを計算に入れたモデル
 - ✓ IP-Glasma + Viscous Hydro + UrQMD [PRL115,132301]
 - ✓ ハドロンの実験結果(dN/dy , $\langle p_T \rangle$, v_n)を記述
 - ✓ Hadronic matter(HM)からのdi-leptonを新たに導入

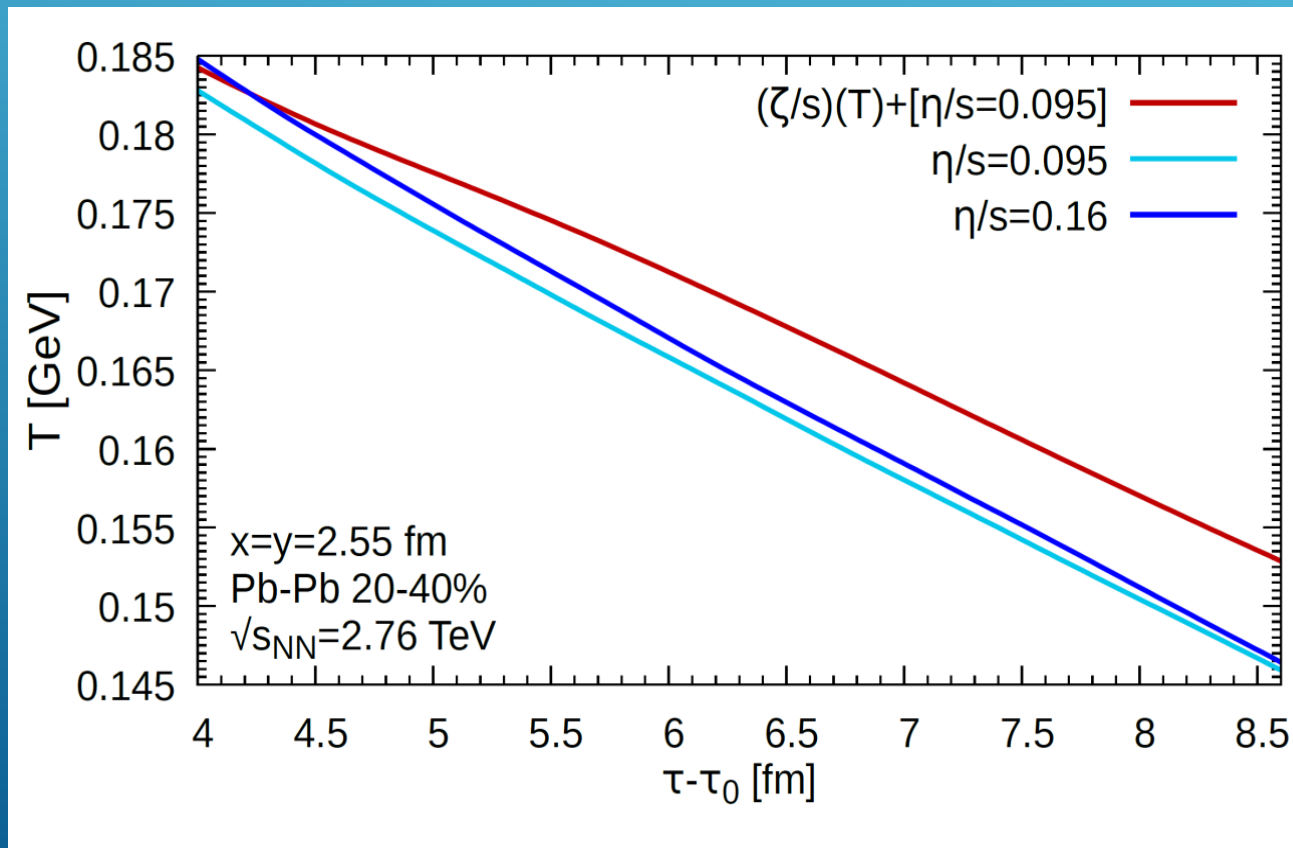
Charged hadron v_2

$\langle p_T \rangle$ for π , K, p



BULK VISCOSITY EFFECT ON DI-LEPTONS

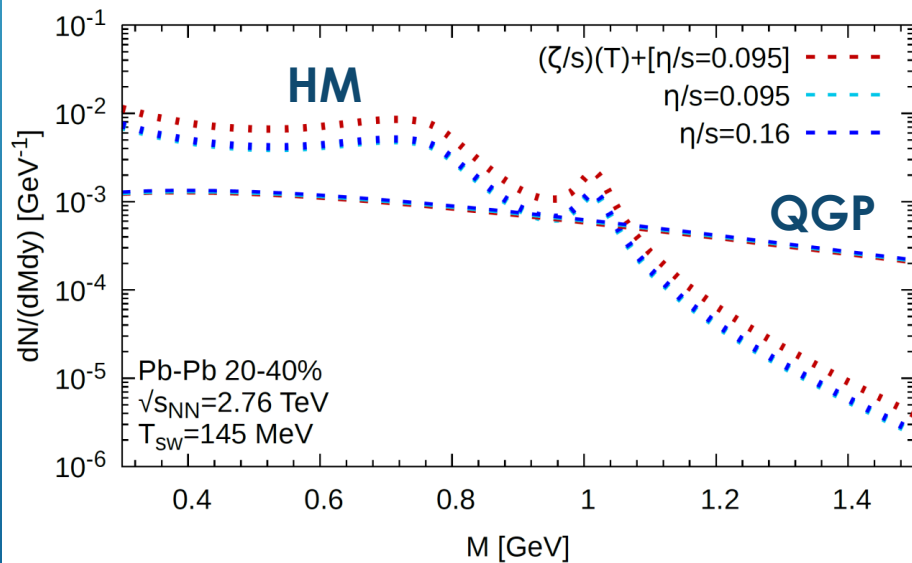
- Bulk viscosityを計算に入れたモデル
 - ✓ IP-Glasma + Viscous Hydro + UrQMD [PRL115,132301]
 - ✓ Bulk viscosityを考慮すると、HMでの温度降下が緩やかに



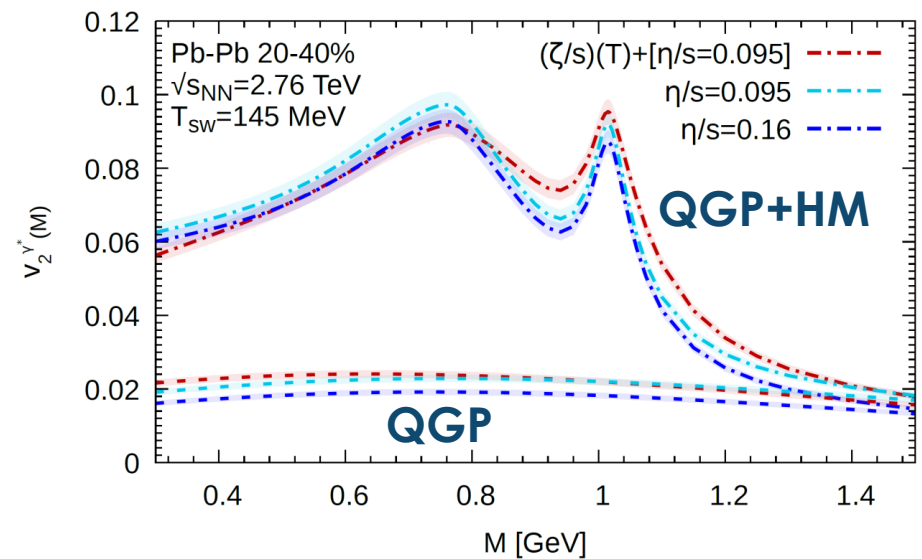
BULK VISCOSITY EFFECT ON DI-LEPTONS

- Bulk viscosityを計算に入れたモデル
 - ✓ IP-Glasma + Viscous Hydro + UrQMD [PRL115,132301]
 - ✓ Bulk viscosityを考慮すると、HMでの温度降下が緩やかに
→ HMからのdi-lepton収量 & v_2 が増加

dN/dy



v_2



今後期待される測定 (レプトン対)

- ρ mass broadeningのより系統的な測定
 - ✓ STAR BES-II & ALICE RUN-3
 - $\sqrt{s_{NN}}$, p_T 依存性
 - ✓ Di-muon測定も (ALICE: 広島大志垣さん)

まとめ

- 新しいデータ、モデル計算が出てきた。今後も活発な議論が期待出来る。(特にフォトン)
 - ✓ Photons at Glasma & meson production
 - ✓ $\sqrt{s_{NN}}$, N_{part} に対する系統的な測定
 - Thermal di-lepton (IMR)がQGP初期温度決定の決め手になると思っている。
- 実験、理論ともに日本グループの活躍が目立っている。
 - ✓ 今後もより頻繁に議論する機会を持てると良い。