

光子

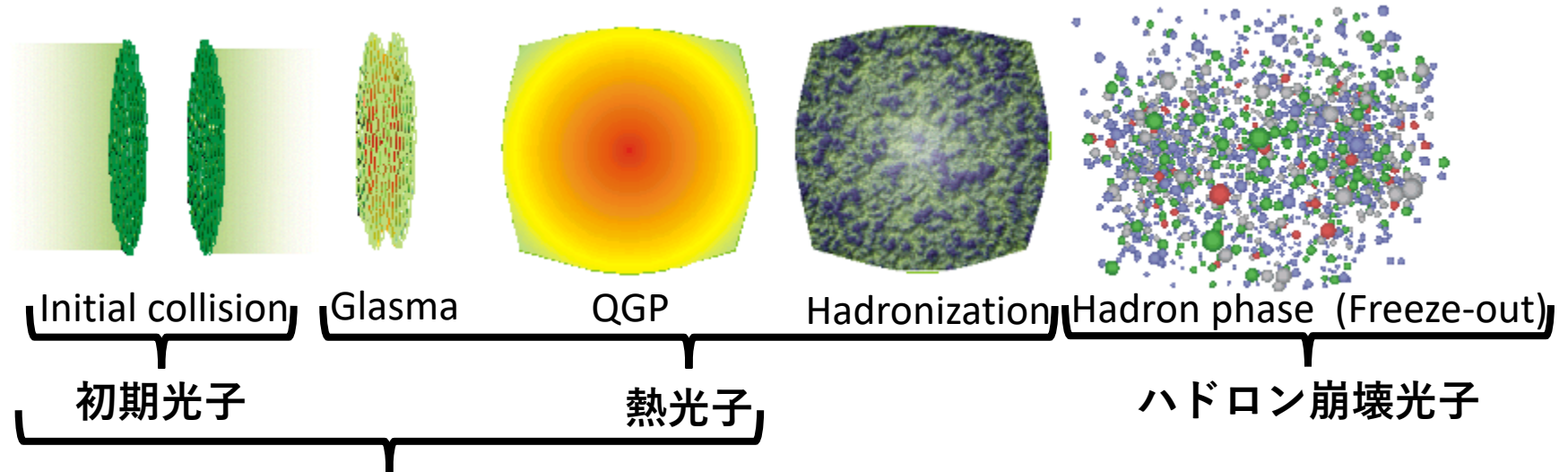
山口 頼人
広島大学
チュートリアル研究会
2019年8月20日

概要

1. 直接光子測定の意味
2. 直接光子測定方法
3. 結果とその解釈

直接光子とは

- 重イオン衝突の各段階で光子が生成



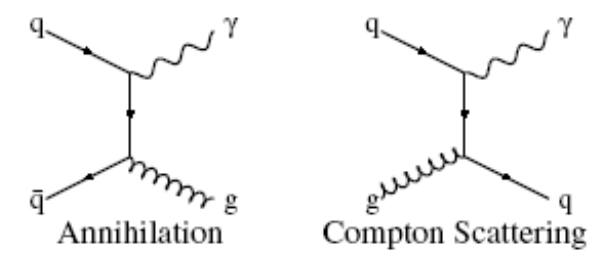
直接光子

- 直接光子** = ハドロン崩壊でない過程で生成される単光子

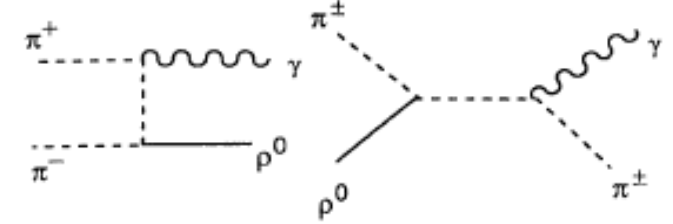
 - 初期光子：入射パートン同士のハードな散乱で生成
 - 熱光子：QGP(ハドロンガス)中の熱化したパートン(ハドロン)の散乱で生成

- ハドロンに比べて小さな生成量 ($\alpha < \alpha_s$)
→ レアプローブ

パートンレベルでの主な過程



ハドロンレベルでの主な過程



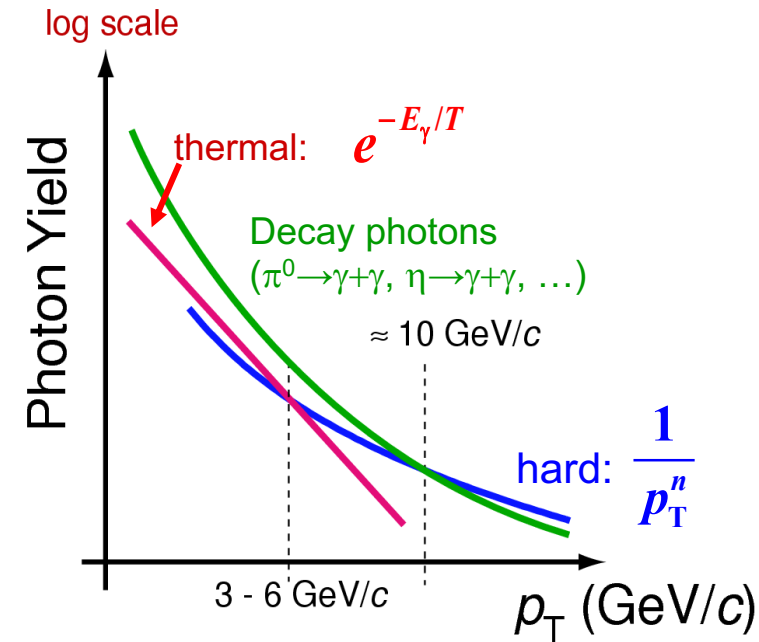
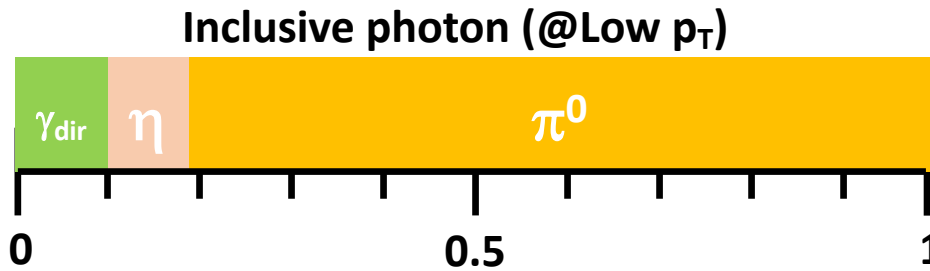
直接光子測定の意味

- 生成後、強い相互作用せず衝突領域を通過（透過的プローブ）
 - ✓ 生成時の情報を保ったまま検出
 - 1. 初期光子
 - 摂動QCD(pQCD)計算の検証
 - 特に非摂動効果が非自明な低エネルギー領域で重要
 - ジェットの元々のエネルギーがわかる (γ -jetの場合)
 - ハドロンジェットは媒質通過時にエネルギー損失
 - 2. 熱光子
 - 収量・エネルギー分布に生成時の温度、自由度を反映
 - $T > T_c$ ならQGP生成の直接証拠
 - 熱光子収量: $N_\gamma = \int_{\tau_0}^{\tau_c} R_\gamma \times V dt$, R_γ : 光子生成レート
 - 熱光子エネルギー分布: $E d^3 N_\gamma / dp^3 \propto e^{-E_\gamma/T}$
 - 時空発展による温度変化を仮定
 - T は“実効温度(effective temperature)” ≠ 平均温度
 - QGP温度は系統的なQGP物性研究のための有用な指標
 - 広い $\sqrt{s_{NN}}$ 領域での実験結果の統一的理解

直接光子測定

- 実験データは前述の光子の重ね合わせ
→ 各光子源の寄与が最も大きいと考えられる横運動量領域に注目

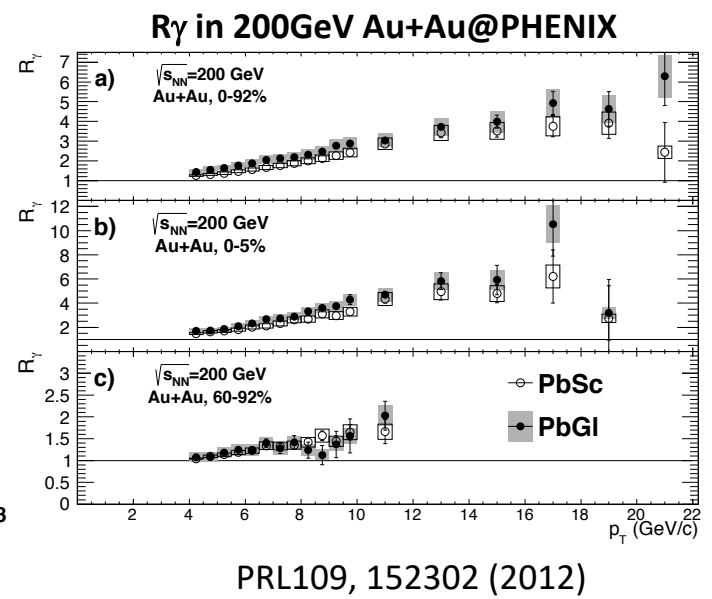
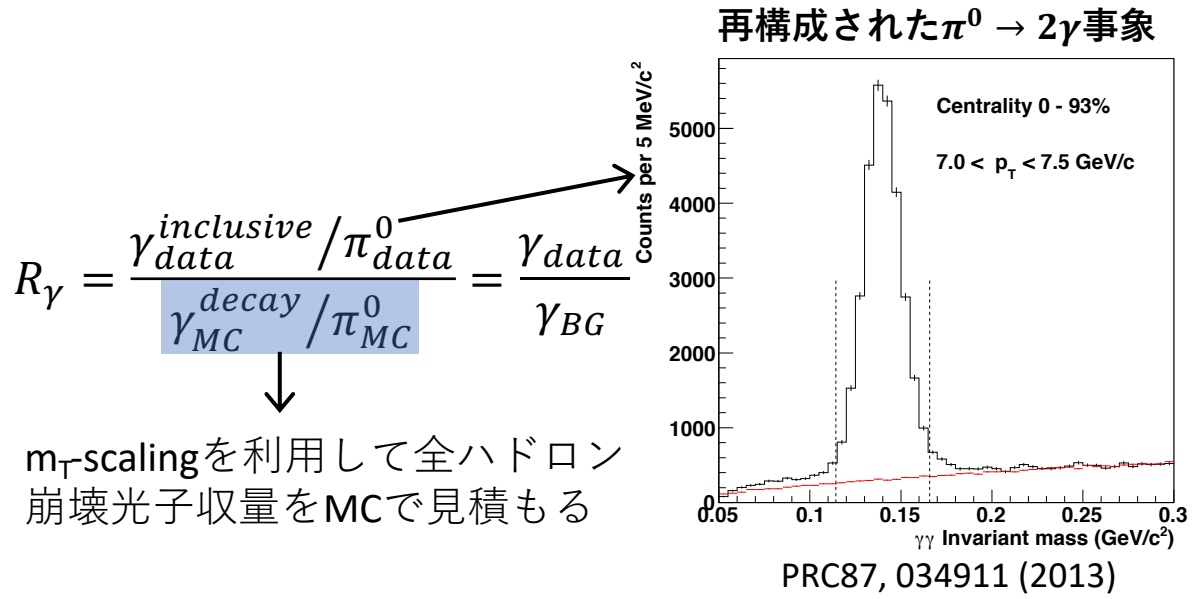
- ✓ $p_T < 1 \text{ GeV}/c$: HG熱光子
- ✓ $1 < p_T < 4 \text{ GeV}/c$: QGP熱光子
- ✓ $4 \text{ GeV}/c < p_T$: 初期光子



- いかにかハドロン崩壊光子(特に π^0)を除去できるかが測定の鍵
 - ✓ BG光子のうち、 $\pi^0 \sim 80-90\%$ 、 $\eta \sim 10\%$ 弱
 - ✓ 全光子収量からBG光子を引いた残り = 直接光子
- 代表的な直接光子測定法
 - 実光子測定
 - 外部変換光子測定
 - 仮想光子測定

測定法a：実光子測定

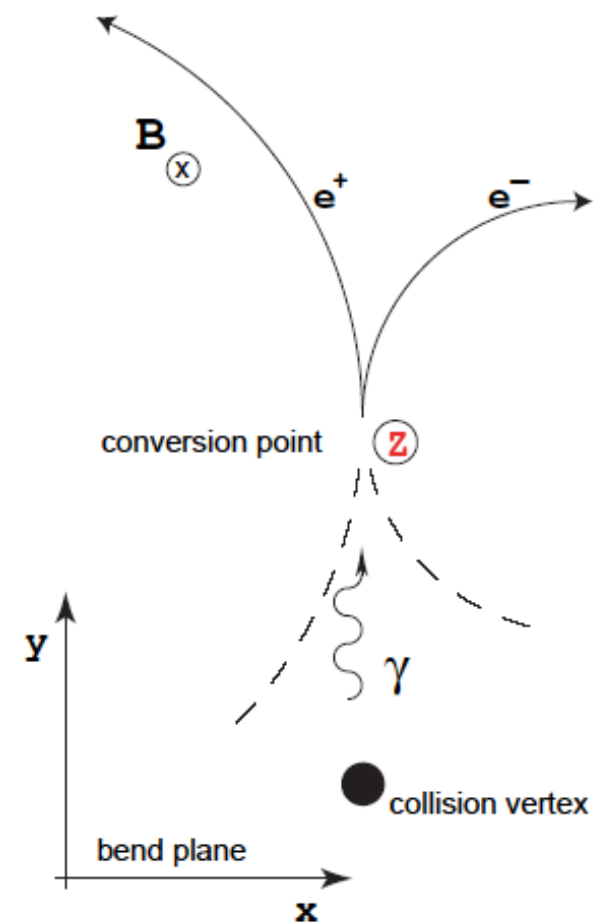
- 電磁カロリメータ(EMCal)による最も標準的な光子測定法
 - ✓ 高統計データが期待出来る
 - ✓ High p_T ではハドロン収量の抑制によりS/Bが向上



- Low p_T (<4GeV/c)では、
 - ✓ EMCalのエネルギー分解能の劣化
 - ✓ 荷電ハドロン光子誤認確率大
- BG光子収量の不定性が直接光子信号レベルと同程度かそれ以上となり、測定が非常に難しい
 - ✓ S/Bの悪さが最大の問題

測定法b：外部変換光子測定

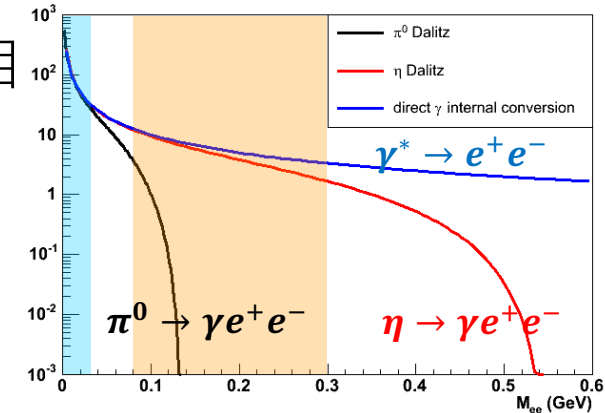
- 検出器材料での外部変換、 $\gamma \rightarrow e^+e^-$ を利用
実光子測定の問題点@Low p_T
 - ✓ エネルギー分解能の劣化 $\rightarrow e^+e^-$ により改善
 - ✓ 荷電ハドロンの光子誤認 \rightarrow なし
- BG光子収量決定精度の向上
 - ✓ 特に π^0 収量の不定性減少
 - ✓ $M_{\gamma e^+e^-}$ で π^0 再構成し、統計的損失を最小に
- 本質的にS/Bの悪さを克服したわけではないことに注意
- 直接光子信号レベルの大きいA+Aでは有利。でも、p+p & p+Aでは難しくなる。



測定法c：仮想光子測定

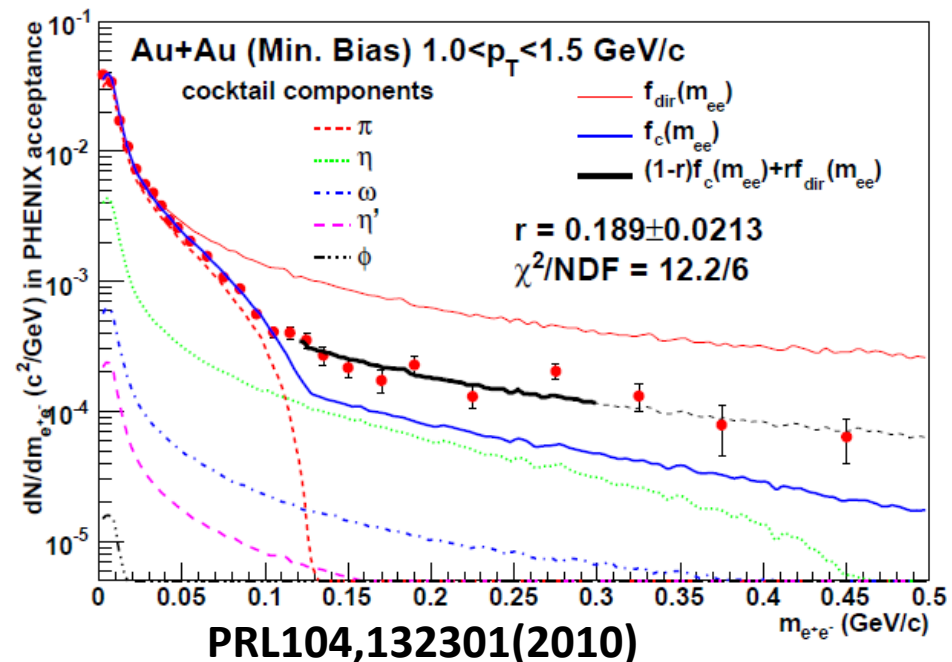
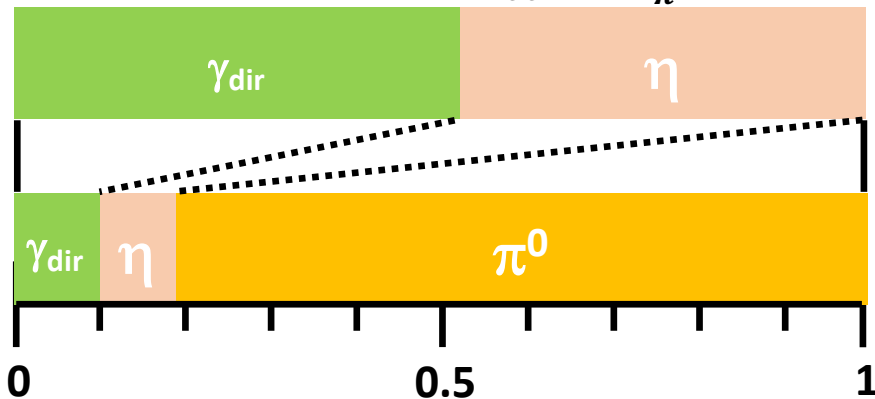
- 高次プロセス(例えば $qg \rightarrow q\gamma^* \rightarrow qe^+e^-$)に着目
光子生成率と e^+e^- 生成率の関係：

$$\frac{d^2n_{ee}}{dm_{ee}} = \frac{2\alpha}{3\pi} \frac{1}{m_{ee}} \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{m_{ee}^2}} \left(1 + \frac{2m_e^2}{m_{ee}^2}\right) S(m_{ee}) dn_\gamma$$



- ✓ 直接光子と π^0, η では $S(m_{ee})$ の振舞に違い
 - 直接光子では $S(m_{ee}) \sim 1$ if $p_T^2 \gg m_{ee}^2$ @mid-rapidity
 - π^0 寄与を $m_{ee} > m_{\pi^0}$ で完全に除去 \rightarrow S/B の大幅な改善
- ✓ 悪い点：統計が厳しい

Inclusive photon ($m_{ee} > m_{\pi^0}$)



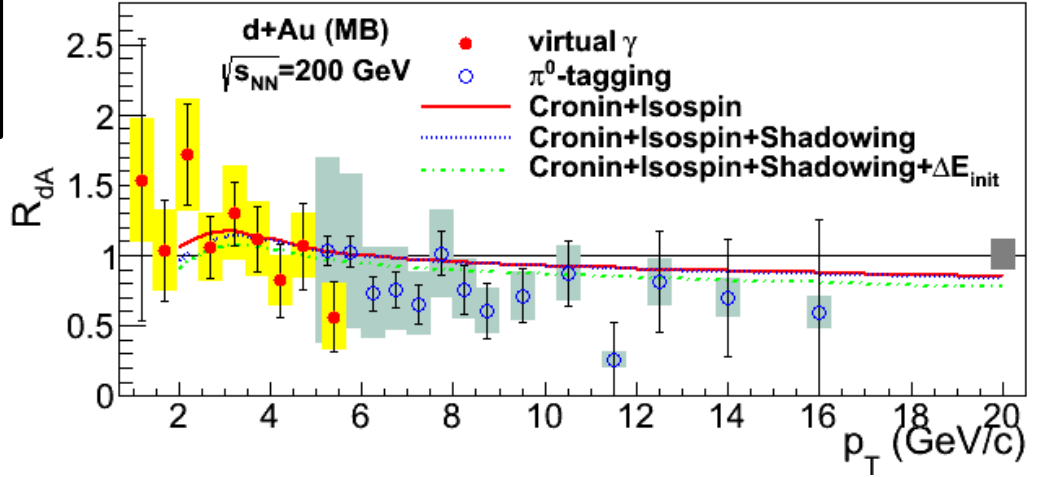
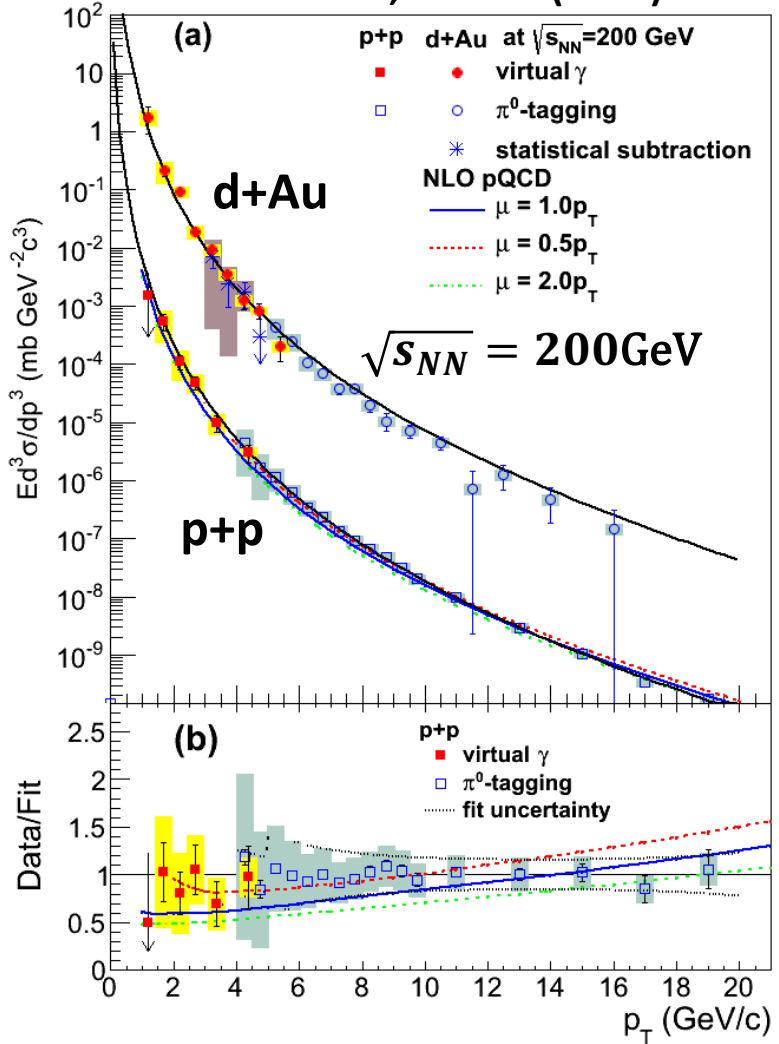
各測定法の特徴まとめ

測定法	統計	S/B	特徴
実光子	◎	× ×	<ul style="list-style-type: none"> • High $p_T \gamma_{dir}$ 測定に最適 • Low p_T では厳しい
外部変換光子	○	×	<ul style="list-style-type: none"> • 実光子測定のlow p_T 改良版 • 信号の大きいA+Aで適用可 • $p_T \sim 0.5 \text{ GeV}/c$ まで到達
仮想光子	× ×	◎	<ul style="list-style-type: none"> • 信号の小さいp+p & p+Aでも有用 • $p_T \sim 1 \text{ GeV}/c$ までが限界

初期光子：p+p & p+A結果

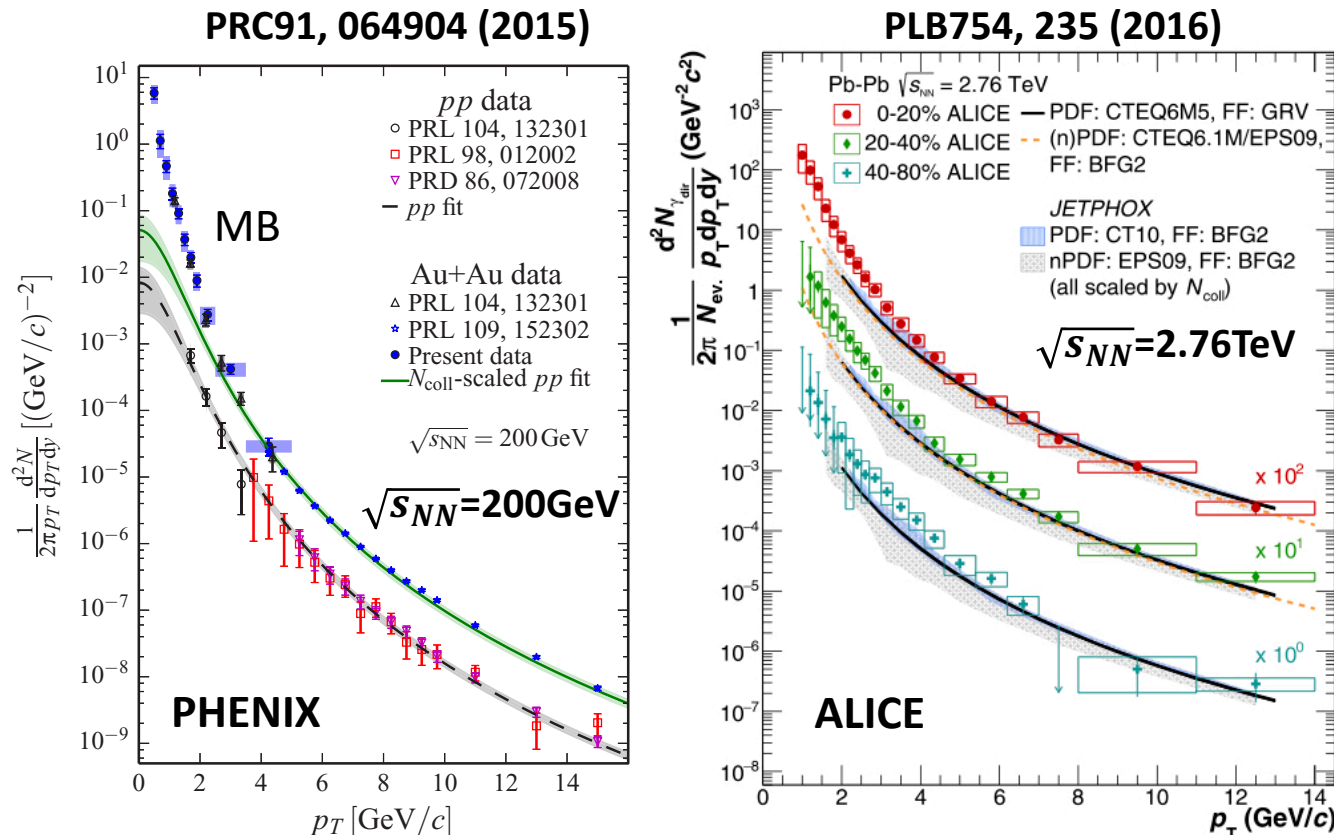
$p_T < 5 \text{ GeV}/c$: 仮想光子測定
 $p_T > 4 \text{ GeV}/c$: 実光子測定

PRC87, 054907 (2013)



- $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ @RHICでの結果のみ。LHCでは未測定。
- ✓ p+p: 広い p_T 領域 (1-20 GeV/c) で pQCD 計算に一致
- ✓ 核子衝突回数スケーリング
- 初期光子収量 in A+A
- ✓ d+Au (MB): p+p 結果 x 平均核子衝突回数に一致
- 非常に小さい原子核効果

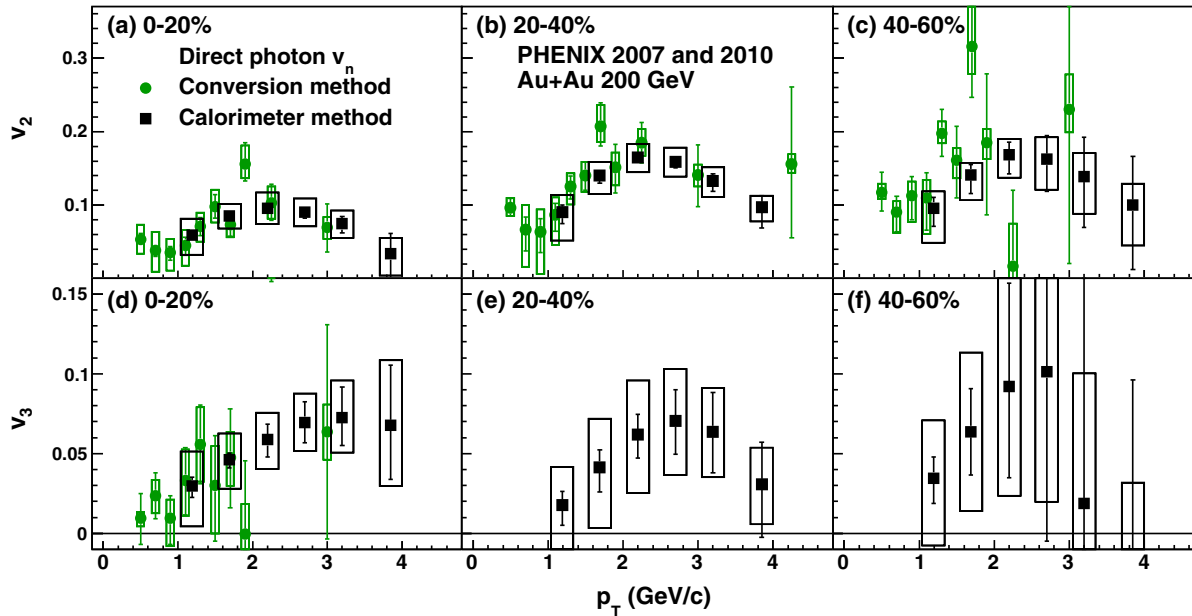
A+A結果 (p_T 分布)



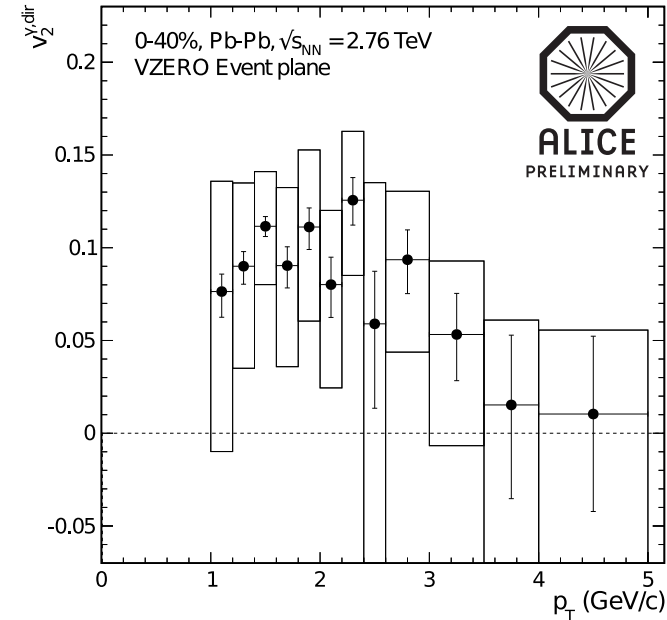
- $p_T > 4 \text{ GeV/c}$: 初期光子の核子衝突回数スケーリングで説明
 - $p_T < 4 \text{ GeV/c}$: 初期光子収量を超える収量 → 熱光子の寄与
 - ✓ 超過収量を $e^{-p_T/T_{\text{eff}}}$ でフィット
 - RHIC: $T_{\text{eff}} = 239 \pm 25 \pm 7 \text{ MeV}$ (0-20%)
 - LHC : $T_{\text{eff}} = 297 \pm 12 \pm 41 \text{ MeV}$ (0-20%)
- $T > T_c$ の高温状態

A+A結果 (方位角異方性 v_2)

PRC94, 064901 (2016)



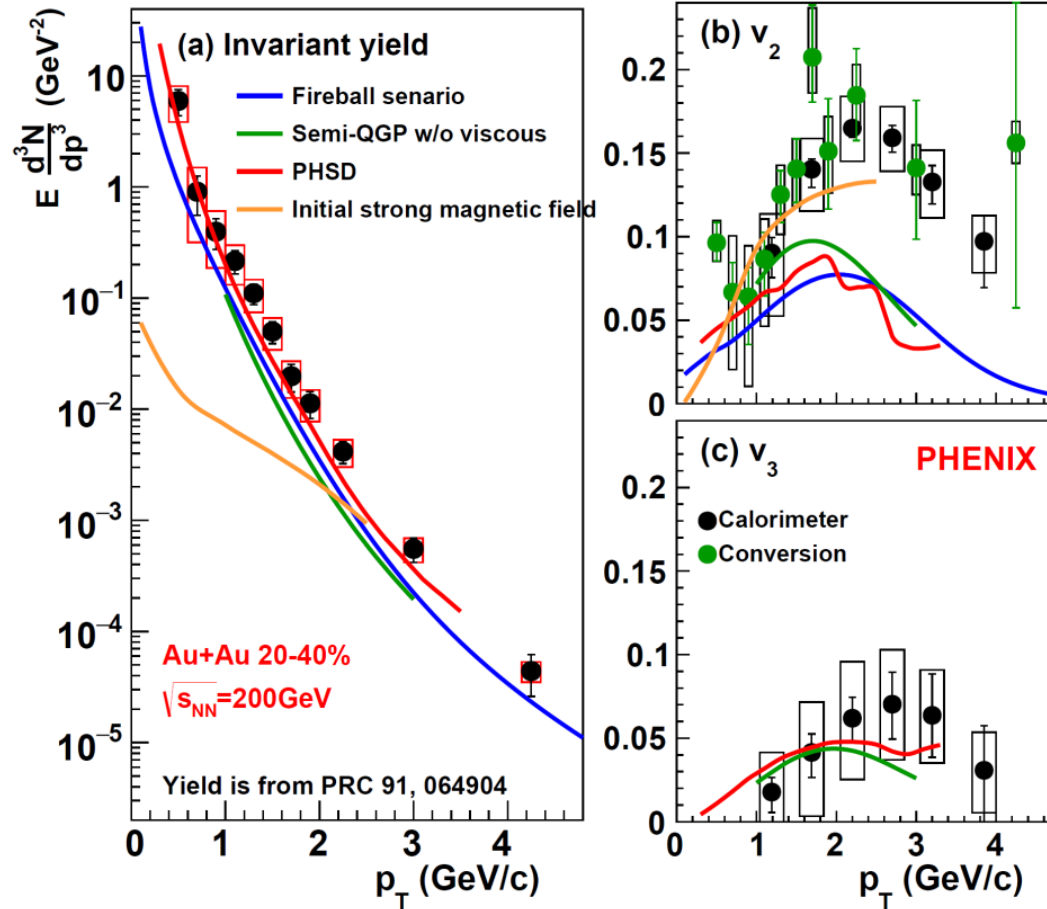
J.Phys.Conf.Ser. 446, 012028 (2013)



- 直接光子の方位角異方性 v_2 測定にも成功
 - ✓ 光子生成時間に敏感
 - ✓ 光子生成プロセスにも感度
- ハドロンの結果とconsistent (大きさ & centrality依存性)
 - ✓ QGP初期からの寄与が支配的なら $v_2(\gamma) < v_2(\text{hadron})$
 - ✓ QGP-ハドロン相転移近傍やHGで生成された光子が支配的か? でも、 T_{eff} はより高い温度を示唆

DIRECT PHOTON PUZZLE

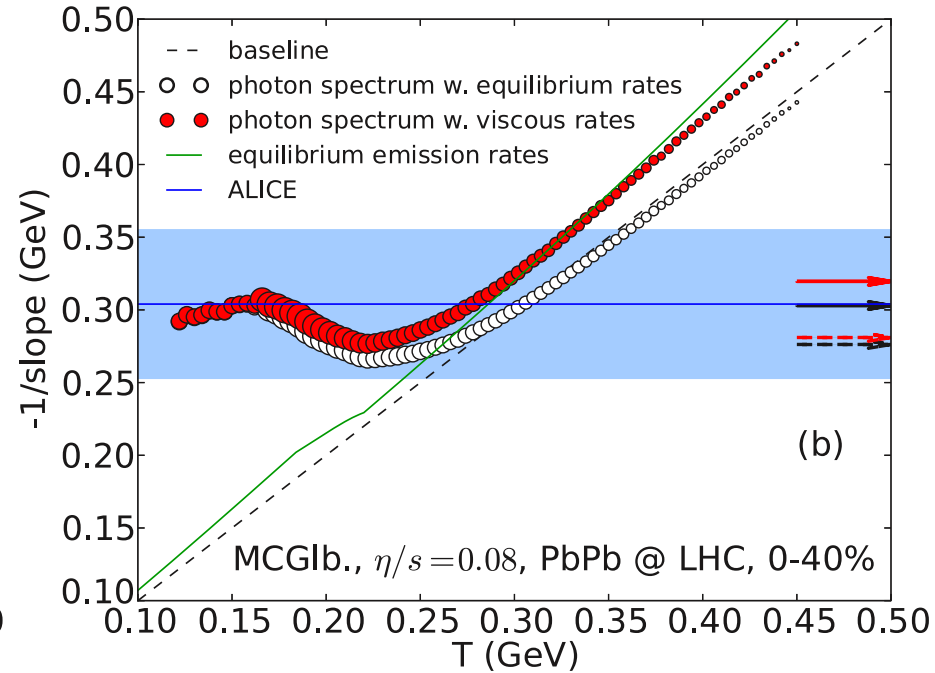
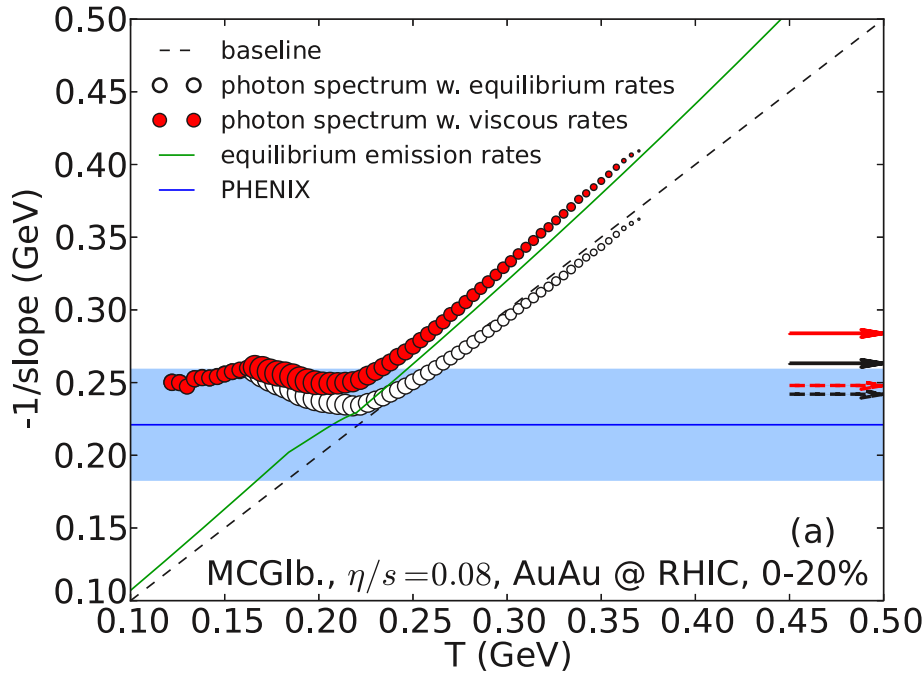
PRC94, 064901 (2016)



- p_T 分布と方位角異方性(v_2)の統一的理解に向けて
 - ✓ 大きな超過収量 & T_{eff} → 温度の高いQGP初期からの寄与
 - ✓ ハドロンと同等の v_2 → ハドロン化近傍及びHGからの寄与
- 同時に再現するのがとても難しい

膨張による青方偏移

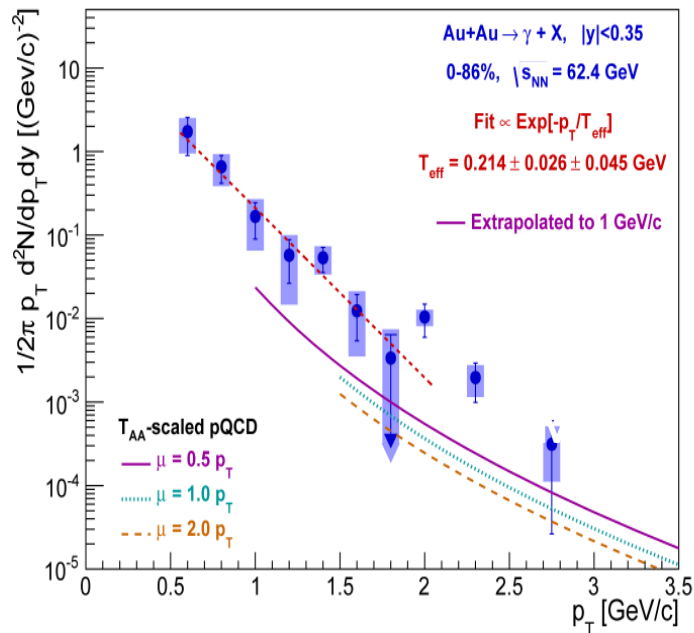
データ点の大きさ = 収量 PRC89, 044910 (2014)



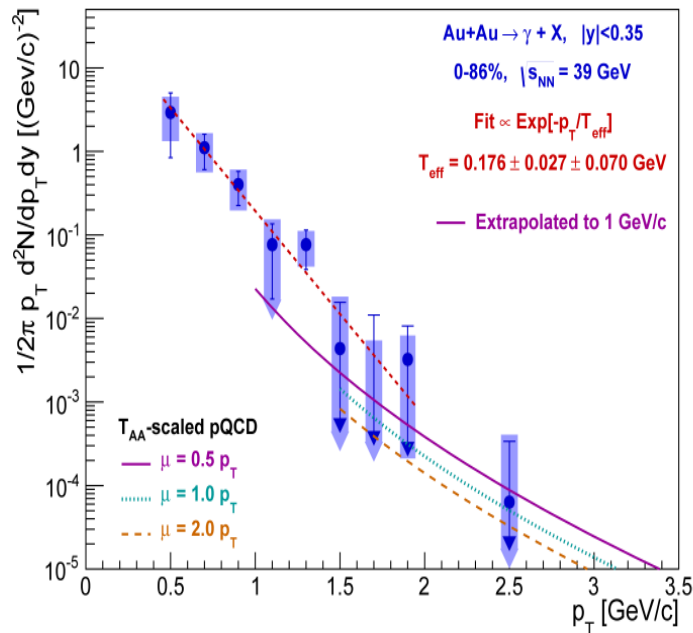
- 青方偏移：系の膨張によるドップラー効果。実際のエネルギーよりも高いエネルギーにシフトしてしまう。
 - ✓ $T_{eff} = T_{true} \sqrt{1 + \beta/1 - \beta}$, β : 膨張速度
- T_c 近傍(クロスオーバー)で生成される光子の大きな寄与を示唆
 - ✓ 生成レートは低いですが、体積が大きい → 収量大
 - ✓ 膨張による大きな青方偏移 → "見かけの温度" = T_{eff} 大

最近の結果

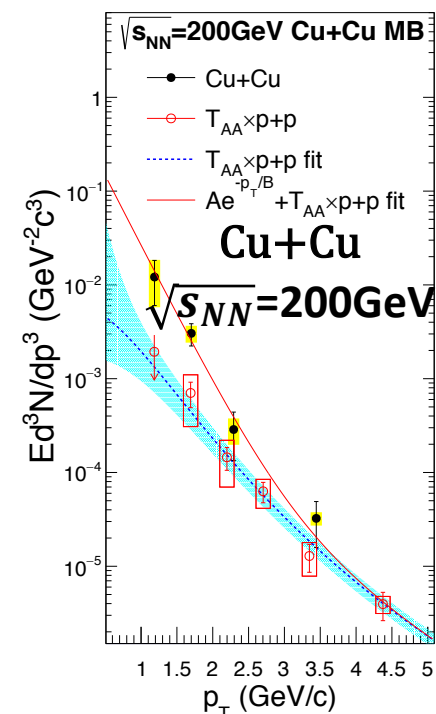
Au+Au $\sqrt{s_{NN}}=62.4\text{GeV}$



Au+Au $\sqrt{s_{NN}}=39\text{GeV}$



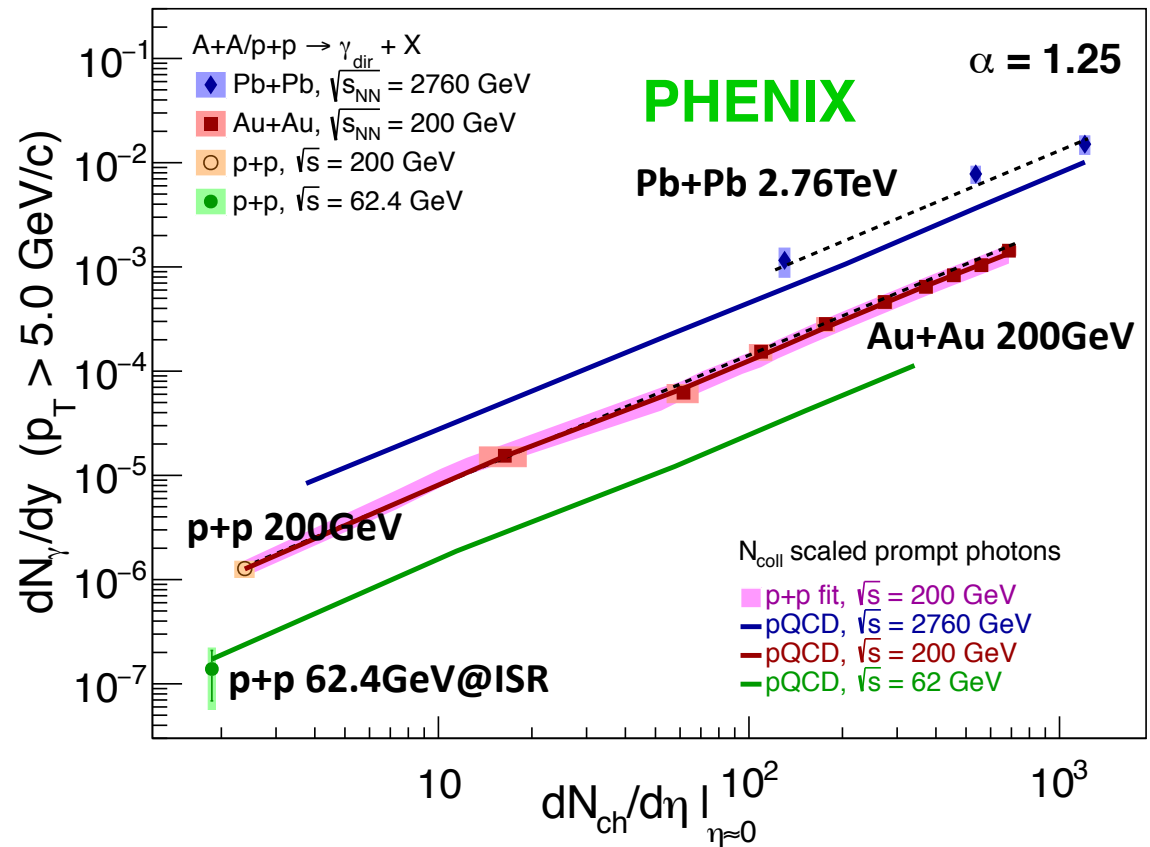
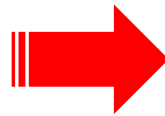
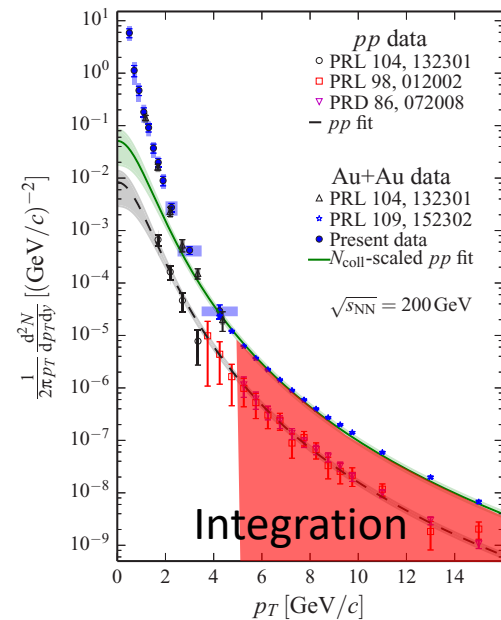
PRC 98, 054902 (2018)



- Cu+Cu 200GeV
 - ✓ 小さい衝突関与核子数
- Au+Au 62.4 & 39GeV
 - ✓ $\sqrt{s_{NN}}$ 依存性

dN_γ/dy for $p_T > 5 \text{ GeV}/c$

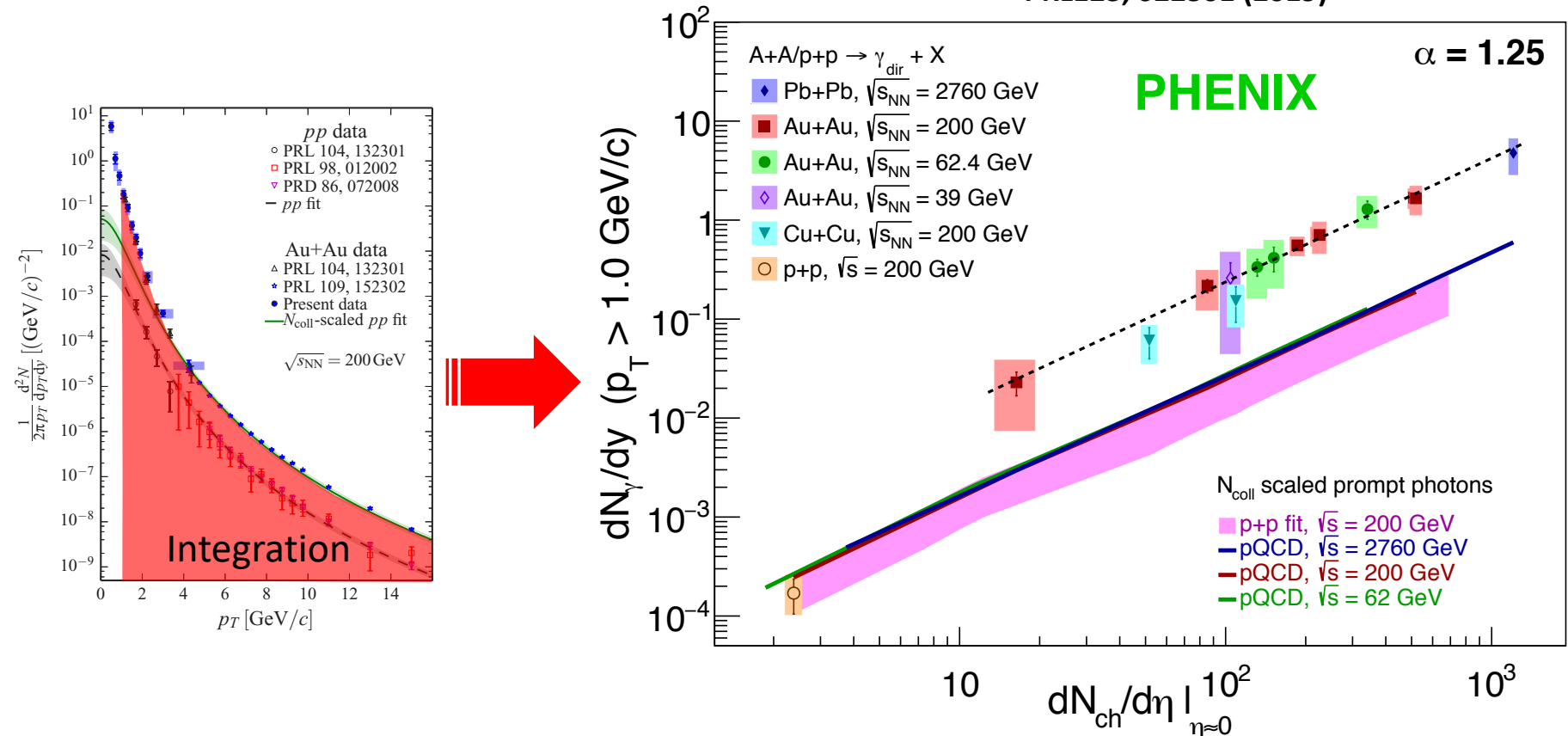
PRL123, 022301 (2019)



- $dN_{\text{ch}}/d\eta$: 荷電粒子多重度 \propto 初期エネルギー密度
 ✓ 異なる衝突中心度データを見るのに有用
- $p_T > 5 \text{ GeV}/c$ の直接光子収量 : 初期光子が支配的
 ✓ $\sqrt{s_{\text{NN}}}$ で異なるスケーリング & p+p と A+A も同一線上

dN_γ/dy for $p_T > 1 \text{ GeV}/c$

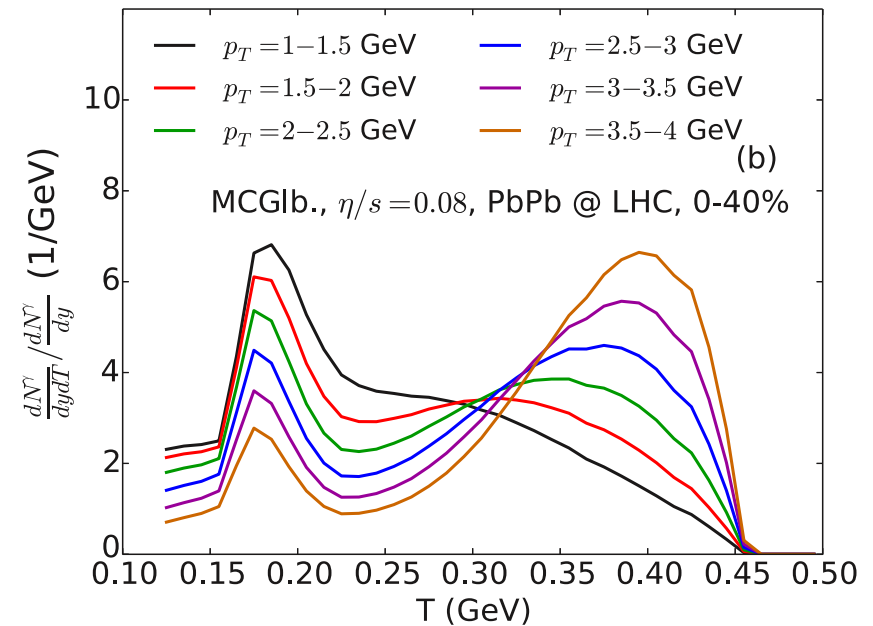
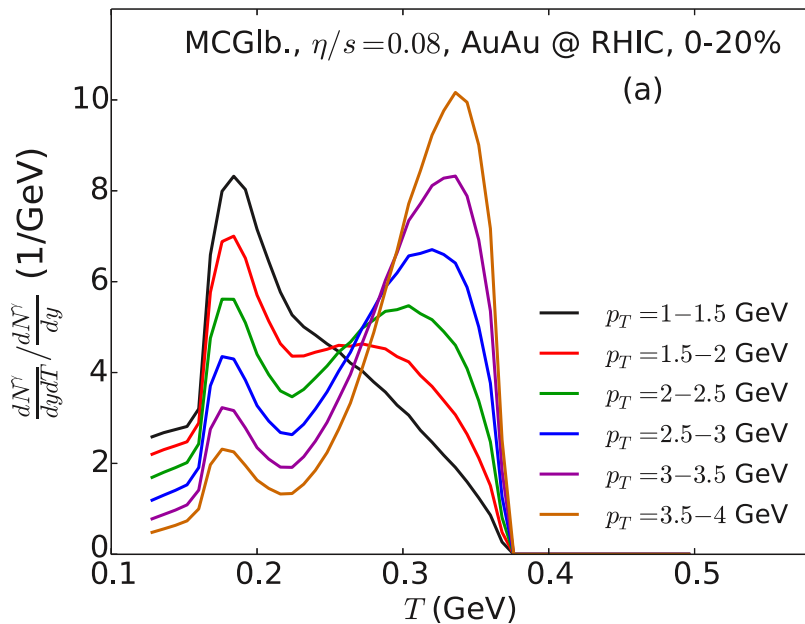
PRL123, 022301 (2019)



- $p_T > 1 \text{ GeV}/c$ の直接光子収量：熱光子が支配的
 - ✓ $\sqrt{s_{NN}} = 39\text{-}2760 \text{ GeV}$ で同じスケールング
 - ✓ 同じ $N_{\text{ch}}/d\eta$ でも $\sqrt{s_{NN}}$ が違えばQGP初期条件は異なる
 - QGP-ハドロン相転移近傍からの寄与が支配的？

今後の展望

PRC89, 044910 (2014)



- より細かい p_T 領域を見ると QGP 初期と T_c 近傍の寄与を分離できる可能性
 - ✓ 1-2.5 GeV/c: T_c 近傍からの寄与大
 - より低いエネルギーで T_c 近傍の温度(クロスオーバーの温度幅)に感度?
 - ✓ 2.5-4 GeV/c: QGP 初期からの寄与大
 - LHC エネルギーならより分離度が高い

まとめ

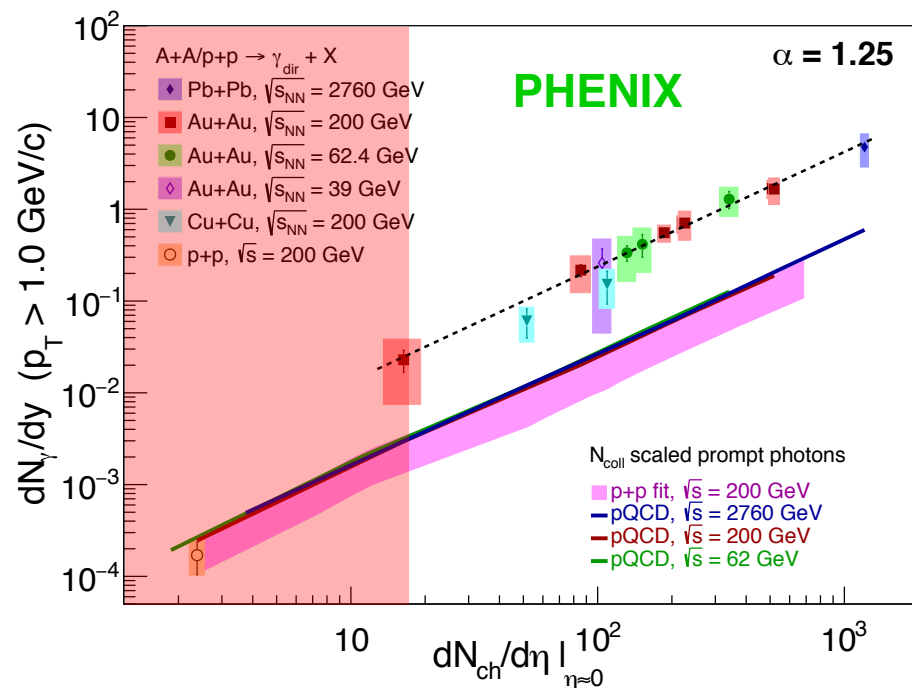
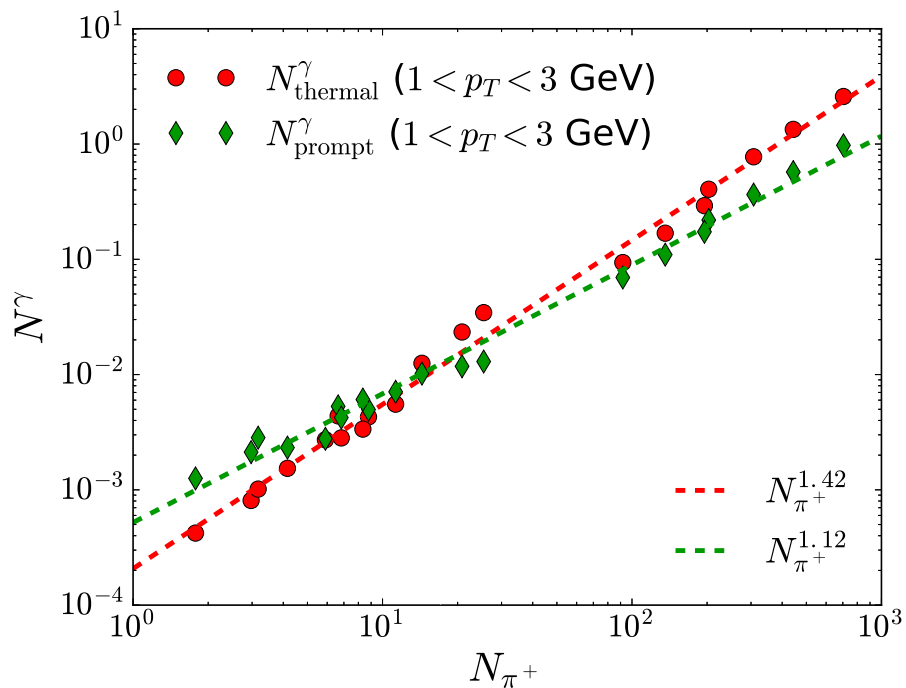
- 直接光子は透過的プローブ
- 特にlow pTでは熱光子が支配的
 - ✓ 生成媒質の温度測定
- Direct photon puzzleの現状での理解
 - ✓ QGP-ハドロン相境界近傍(T_c)の寄与が大きい
 - 青方偏移による大きな T_{eff}
 - 異なる $\sqrt{s_{NN}}$ での収量が $dN_{ch}/d\eta$ で同一のスケールリング
 - ✓ $T > T_c$ の高温物質ができている
- $1 < pT < 4 \text{ GeV}/c$ をもっとよく見れば、QGP初期と T_c 近傍の寄与を分離できる可能性
 - ✓ 今後のLHCの実験結果に期待
 - ✓ 将来的にSPS程度のエネルギーの実験ができると面白い
(個人的な感想)

Backup slides

DOES TRANSITION POINT EXIST?

PRC95, 014906 (2017)

arXiv: 1805.04084

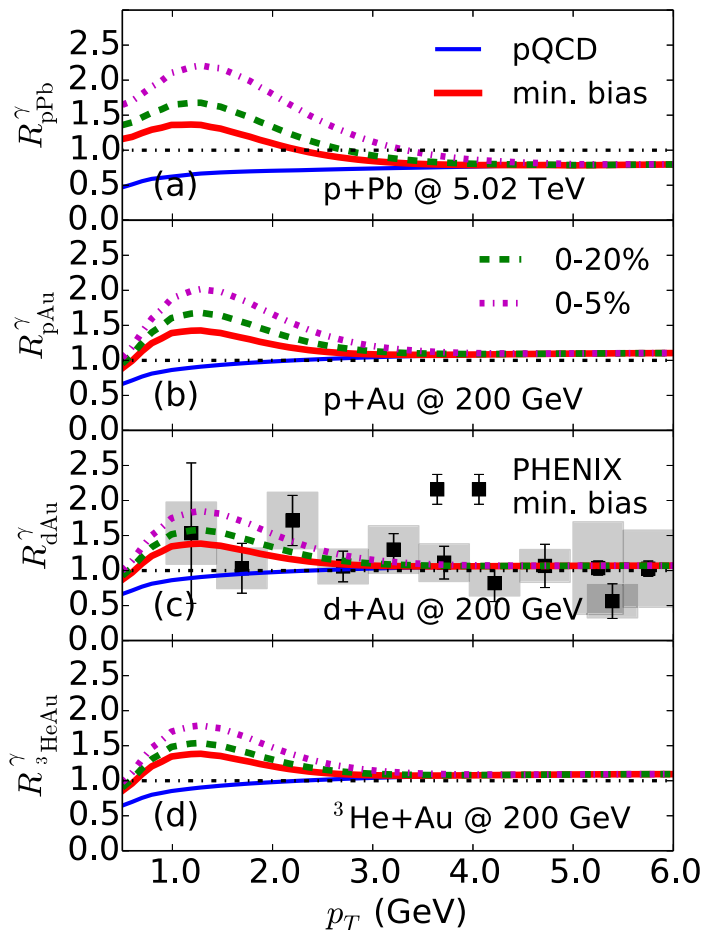


- Theory calculation predicts unique multiplicity scaling of thermal photons as well.
 - ✓ Expected transition at $N_{\pi} < 20$
 - No data point so far
 - ✓ Different slopes for thermal and hard photons
 - Same slope in data

QGP FORMATION IN SMALL SYSTEM?

- Experimental results suggesting collective motion in small systems with high multiplicity
- Possible formation of QGP even in small systems

PRC95, 014906 (2017)



- Thermal photons as an evidence of QGP formation in small systems
- Theoretical prediction of thermal enhancement:

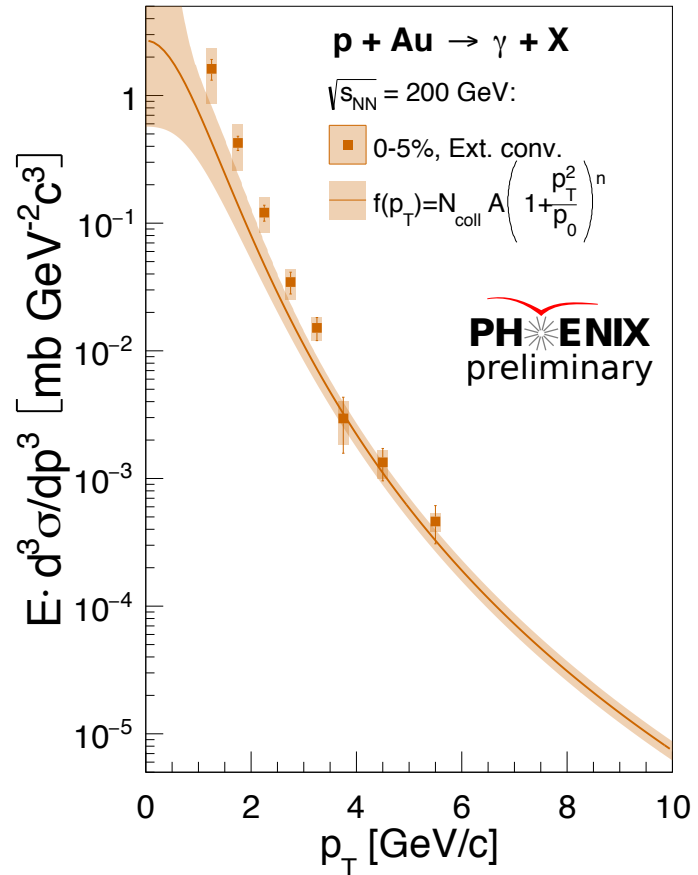
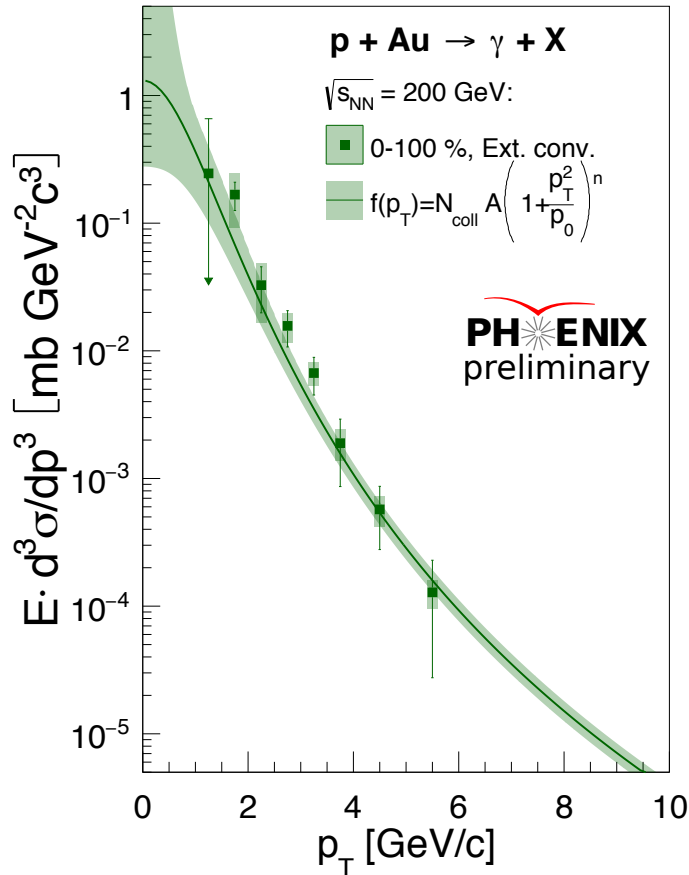
$$\checkmark R_{XX}^{\gamma} = \gamma_{XX}^{\text{dir}} / (N_{\text{coll}} \times \gamma^{\text{hard}})$$

- Less visibility at larger systems

$$- R_{\text{pPb}}^{\gamma} > R_{\text{pAu}}^{\gamma} > R_{\text{dAu}}^{\gamma} > R_{\text{HeAu}}^{\gamma}$$

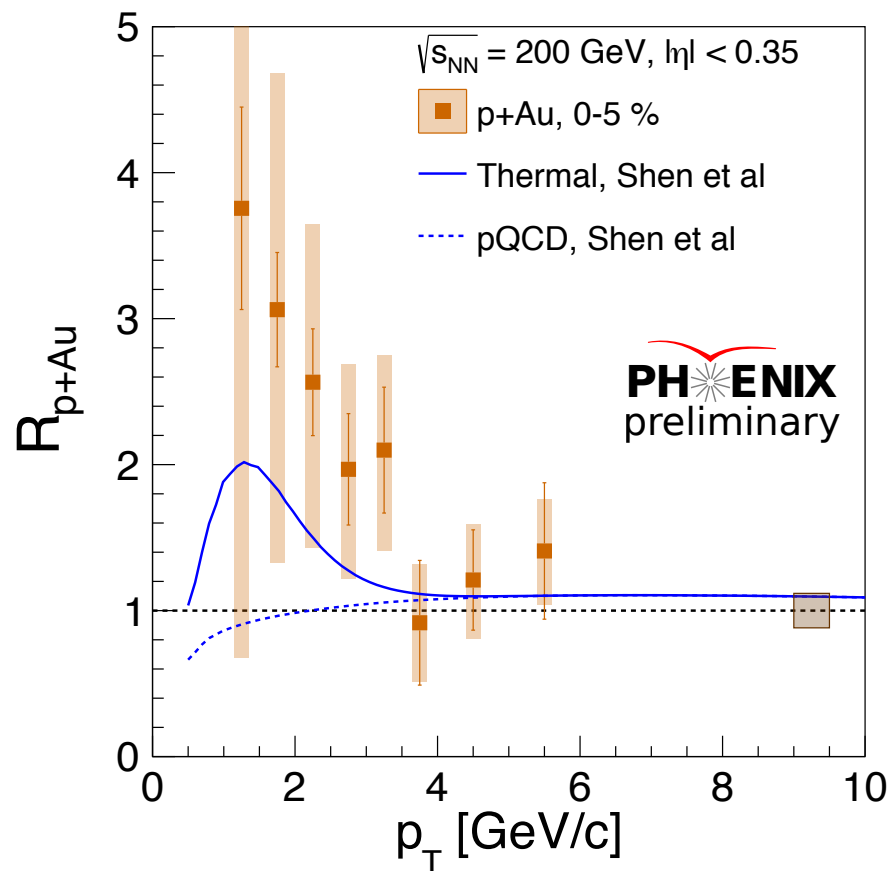
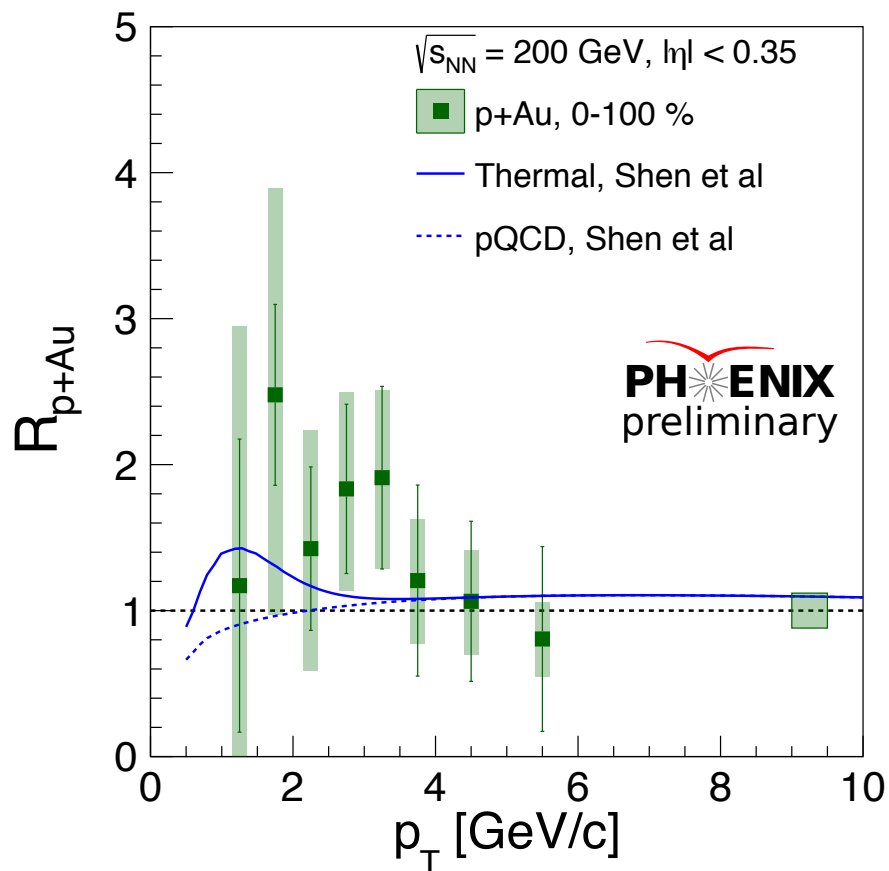
→ Available 0-5% & MB p+Au data at RHIC energy

DIRECT PHOTONS IN p+Au



- Successful measurement for MB & 0-5% in p+Au
 - ✓ MB: consistent with binary-scaled p+p baseline
 - Same for d+Au MB
 - ✓ 0-5%: enhancement over binary-scaled p+p baseline

THEORY COMPARISON OF p+Au PHOTONS



- Consistent with theory calculations for both MB & 0-5%, but not conclusive.
 - ✓ Need more data for systematic study in small systems