

熱光子測定の現状と今後

山口頼人

理研BNLセンター

Heavy Ion Café@大阪大

2018年1月12日

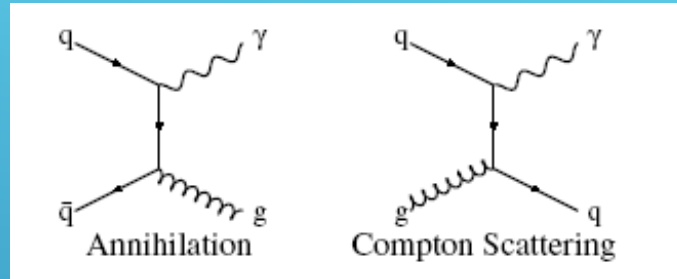


概要

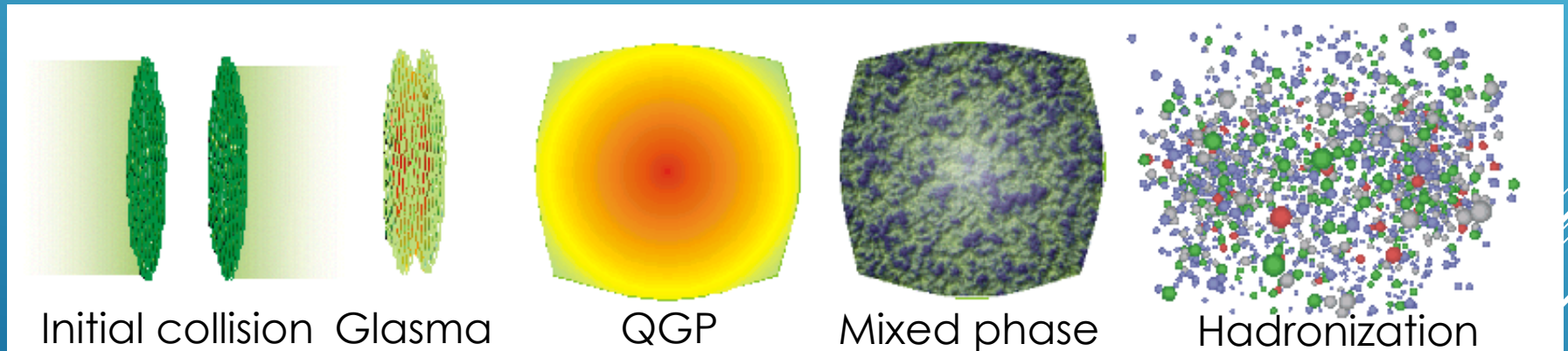
1. 直接光子、特に熱光子測定的重要性
2. 直接光子測定法
 - ✓ 低横運動量領域の光子測定
 - ✓ 各々の測定法の長所・短所
3. これまでに得られた実験結果
 - ✓ p+p, p+A, A+A from RHIC, LHC
 - ✓ 横運動量分布、 v_2
4. 議論
 - ✓ 実験結果の解釈

直接光子

- ハドロン崩壊でない過程で生成される単光子



- 生成後、強い相互作用をせず衝突領域を通過(透過的プローブ)
 - ✓ 収量・横運動量分布に生成時の温度、自由度などを反映



Hard photon

熱光子

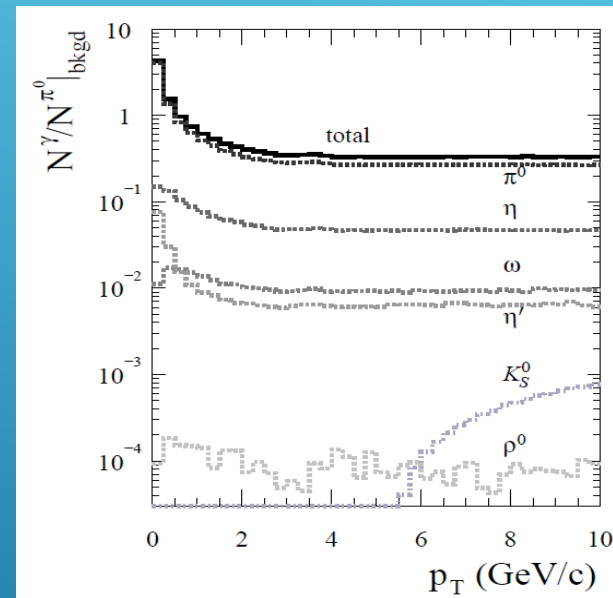
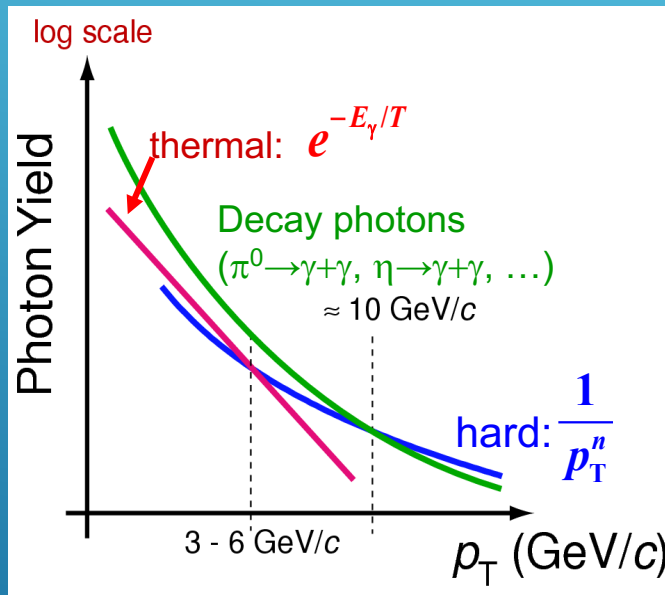
ハドロン崩壊光子

- 重イオン衝突の各ステージで生成

- ✓ 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
→ 各光子源の寄与の大きな横運動量領域に注目
 - ✓ 低横運動量領域 ($p_T < 3-4 \text{ GeV}/c$) : 熱光子測定



- 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
- p+p, p+Aでのベースライン測定的重要性
 - ✓ Low p_T でのHard photon収量&原子核効果

直接光子測定法

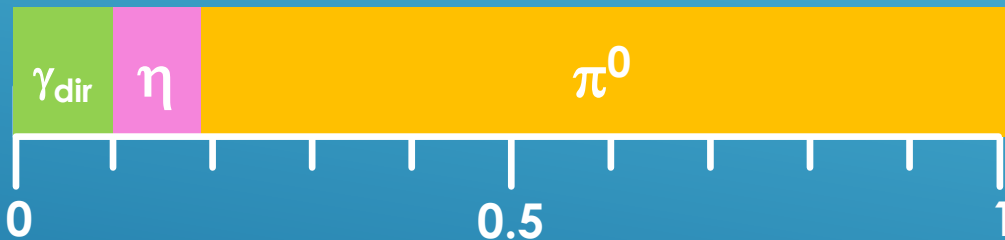


測定方法1：実光子測定

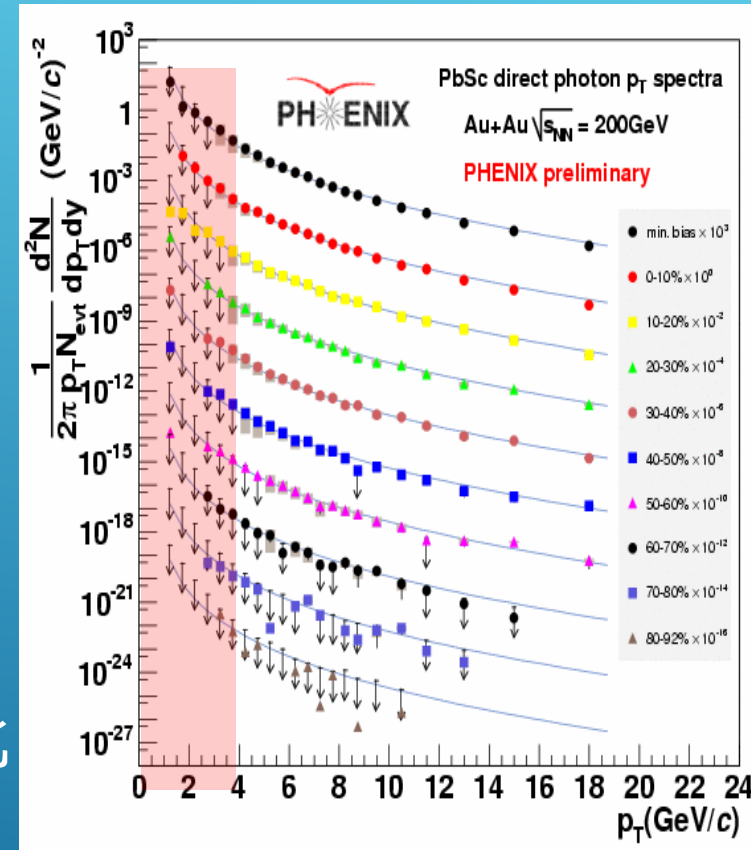
- 電磁カロリメータ(EMCal)による最も標準的な光子測定法
 - ✓ 高統計データが期待出来る
 - ✓ High p_T での直接光子測定に有用

PHENIX Run4 data

Inclusive photon (@Low p_T)

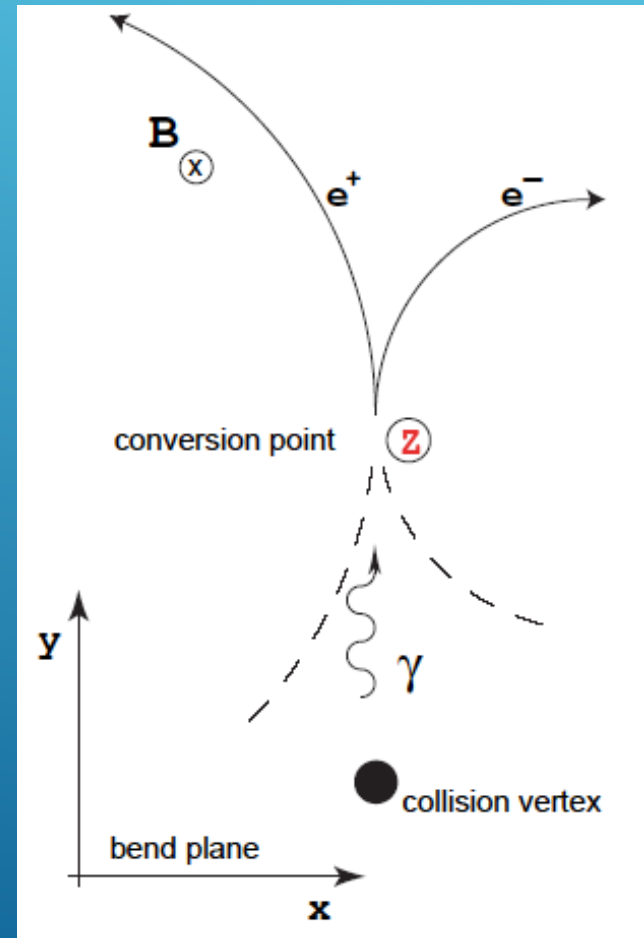


- Low p_T では、
 - ✓ EMCalのエネルギー分解能の劣化
 - ✓ 荷電ハドロン光子誤認確率大
- BG光子収量の不定性が直接光子信号レベルと同程度かそれ以上となり、測定が非常に難しい
 - ✓ S/Bの悪さが最大の問題



測定方法2：外部変換光子測定

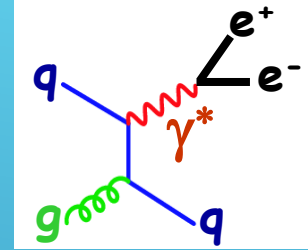
- 検出器マテリアルでの外部変換、 $\gamma \rightarrow e^+e^-$ を利用
- 実光子測定の問題点@Low p_T
 - ✓ エネルギー分解能の劣化 $\rightarrow e^+e^-$ により改善
 - ✓ 荷電ハドロン光子誤認 \rightarrow なし
- BG光子収量決定精度の向上
 - ✓ 特に π^0 収量の不定性減少
 - ✓ $M_{\gamma e^+e^-}$ で π^0 再構成し、統計的損失を最小に
- 本質的にS/Bの悪さを克服したわけではないことに注意
- 直接光子信号レベルの大きいA+Aでは有利。でも、p+p & p+Aでは...



測定方法3：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：

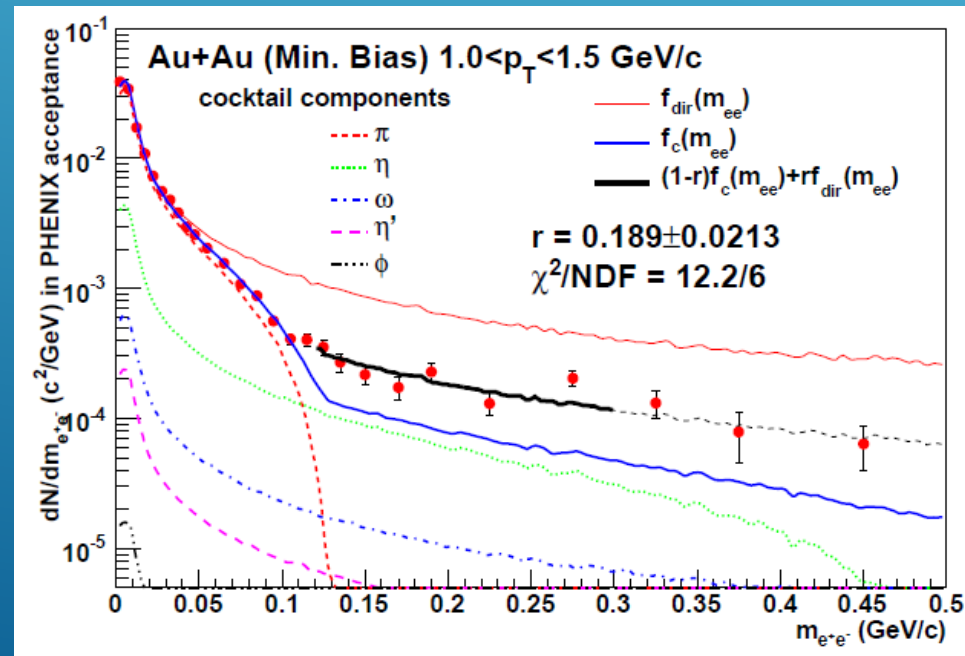
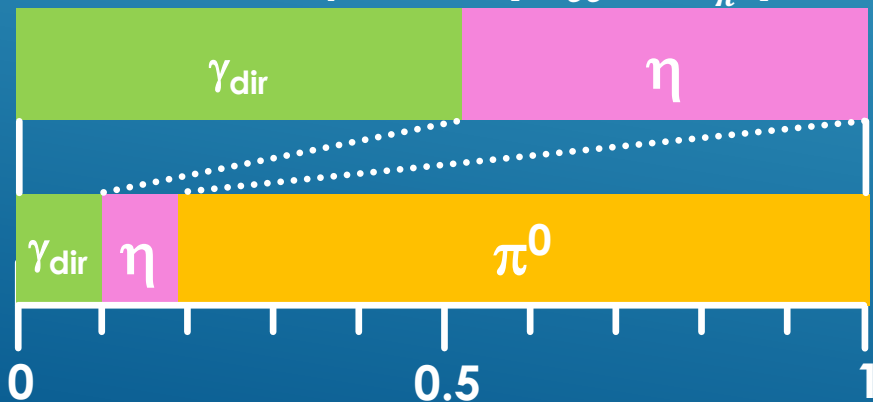
$$\frac{d^2n_{ee}}{dm_{ee}} = \frac{2\alpha}{3\pi} \frac{1}{m_{ee}} \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{m_{ee}^2}} \left(1 + \frac{2m_e^2}{m_{ee}^2}\right) S(m_{ee}) dn_\gamma$$



- ✓ $p_T^2 \gg m_{ee}^2$ ならば $S(m_{ee}) \sim 1 \rightarrow$ “quasi”-real photon @ $m_{ee}=0$
- ✓ π^0 寄与を $m_{ee} > m_{\pi^0}$ で完全に除去
→ S/Bの大幅な改善
- ✓ 悪い点：統計が厳しい

PRL104,132301(2010)

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



各測定の長所・短所のまとめ

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

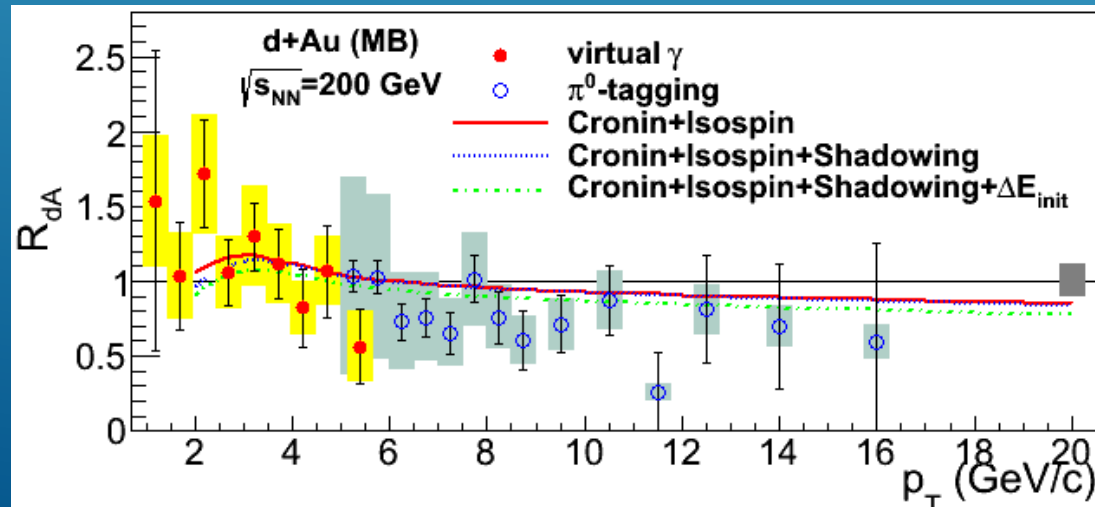
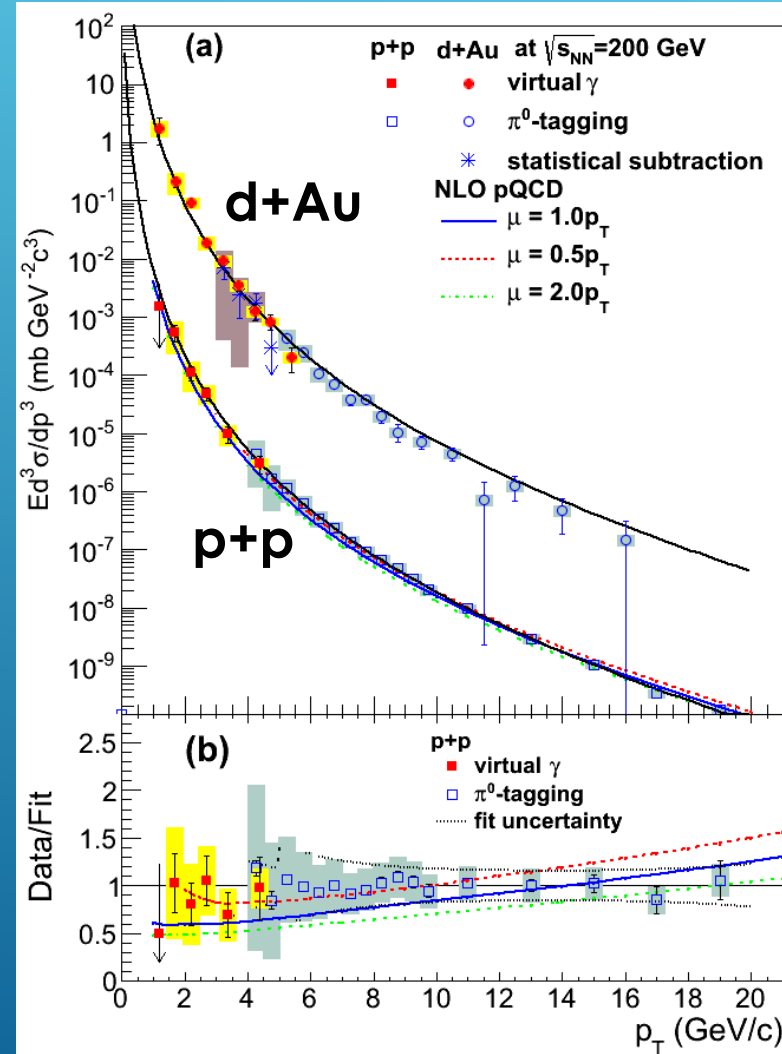
実験結果



ベースライン : p+p & p+A結果

- 仮想光子測定 ($p_T < 5 \text{ GeV}/c$) & 実光子測定 ($p_T > 4 \text{ GeV}/c$)
 - ✓ $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ のみ
- p+p : pQCDとconsistent
- d+Au: $R_{dA} \sim 1 \rightarrow$ 小さな原子核効果
- LHC & 低 $\sqrt{s_{NN}}$ でもp+p, p+A測定は重要
 - ✓ LHC : 原子核効果は?
 - ✓ 低 $\sqrt{s_{NN}}$: pQCD信頼できず

PRC87, 054907 (2013)

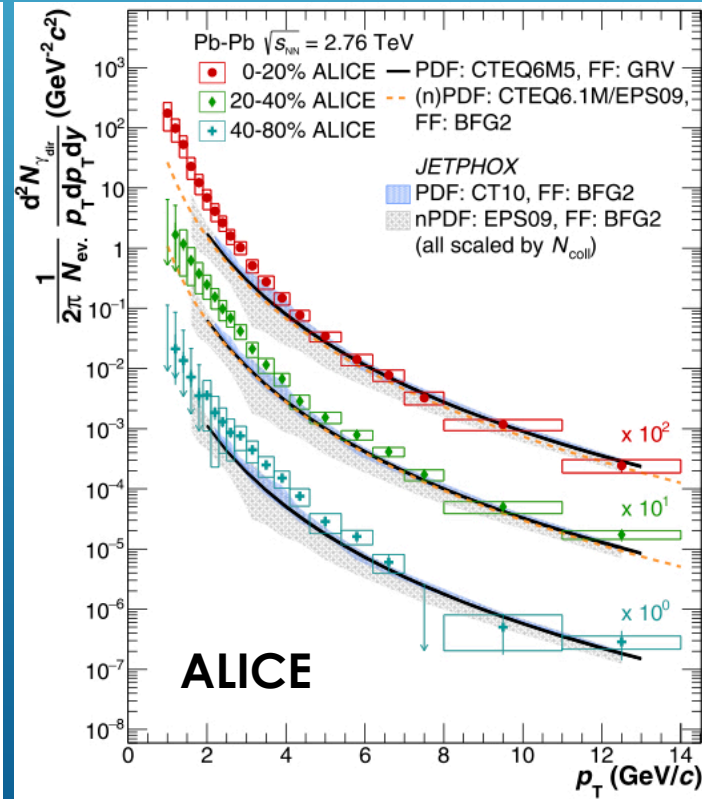
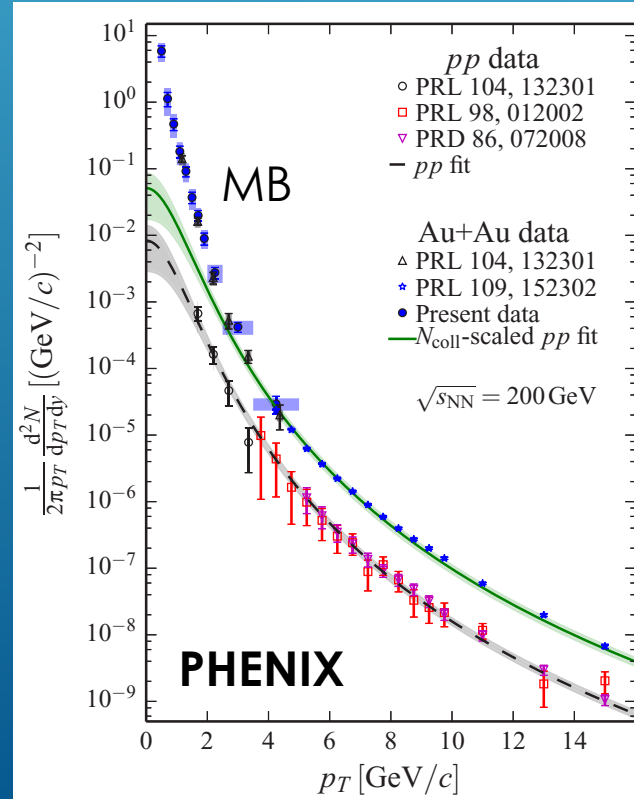


A+A結果 (p_T 分布)

- 200GeV(PHENIX) & 2.76TeV(ALICE)で超過収量 → 熱光子？
 - ✓ PHENIX: 仮想光子 & 外部変換光子
 - η/π^0 の改善: $0.48 \pm 0.03 \rightarrow 0.45 \pm 0.01$ for MB
 - ✓ ALICE : 外部変換光子 & 実光子 (PHOS)
- Centrality依存性も測定

PRC91, 064904 (2015)

PLB754, 235 (2016)



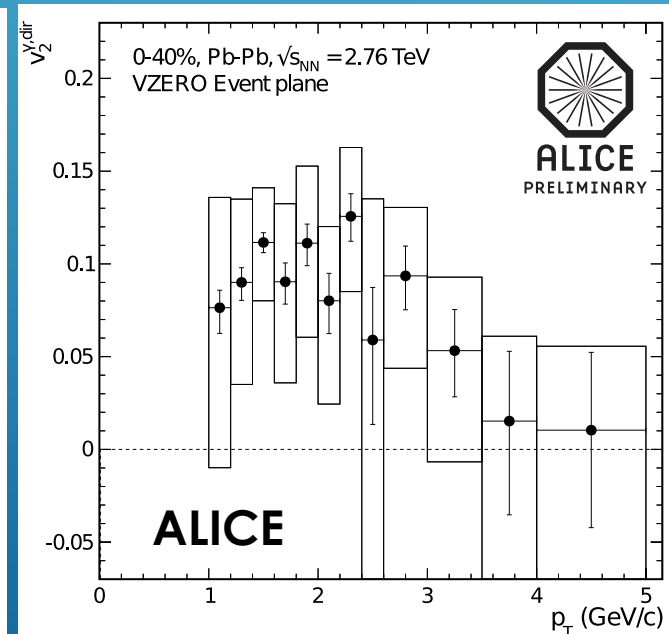
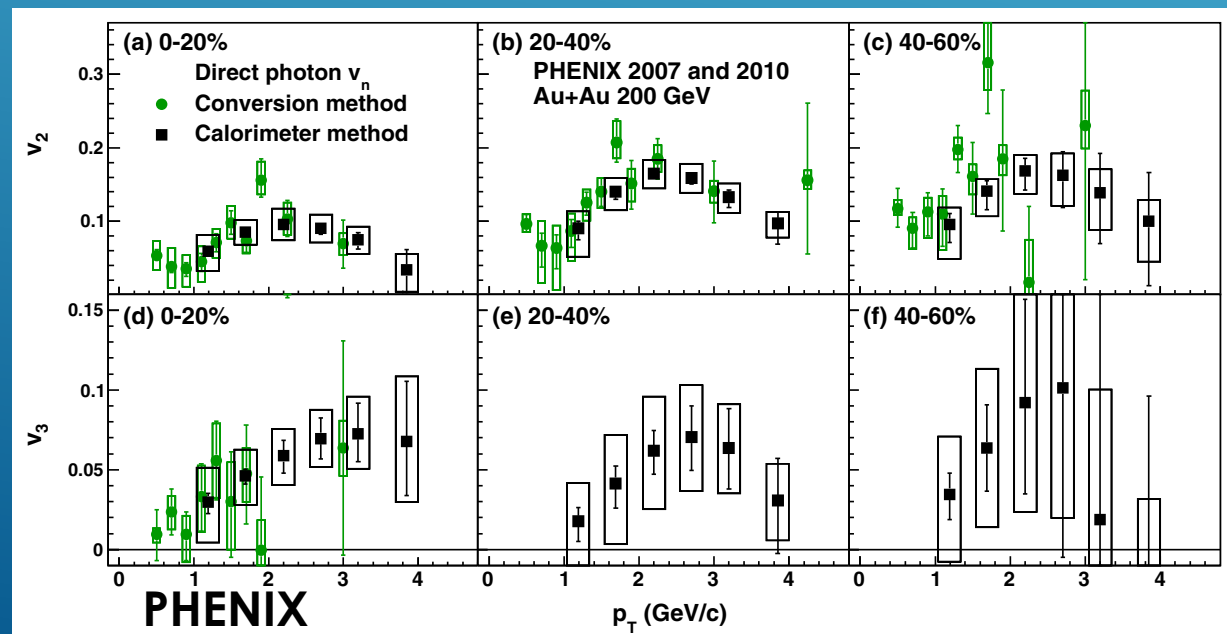
T_{eff} for 0-20%
 ✓ RHIC: 239 MeV
 ✓ LHC: 297 MeV

A+A結果 (FLOW)

- v_2, v_3 も測定に成功 (RHIC & LHC)
 - ✓ 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 $v_{2,3}$ とconsistent (大きさ & centrality依存性)
 - ✓ $v_3 \sim v_2/2$
 - ✓ 臨界温度 T_c 付近で生成された光子が支配的か？

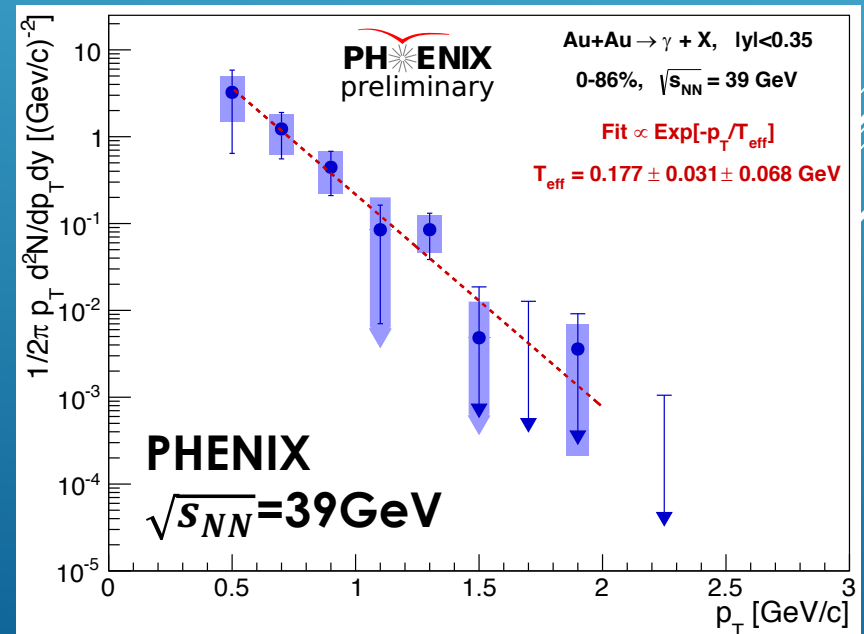
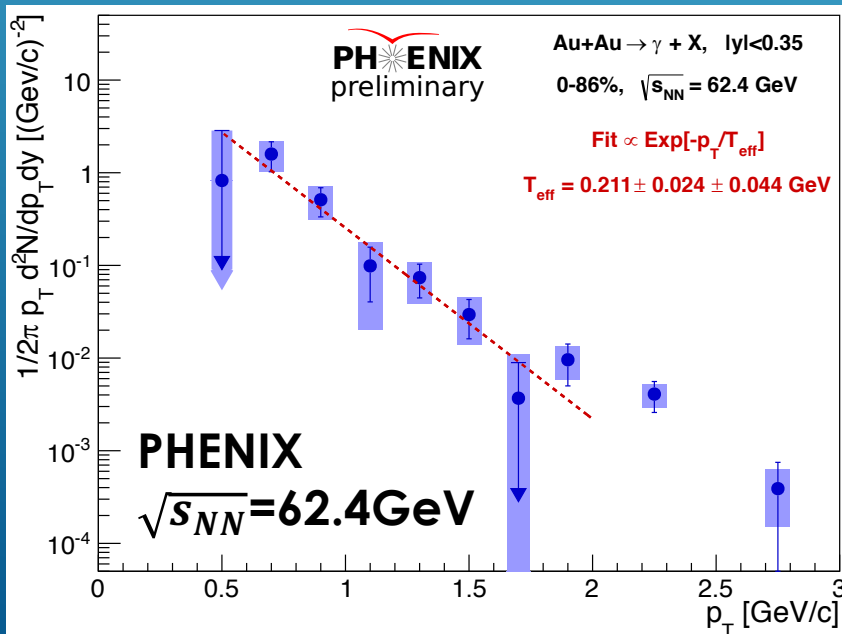
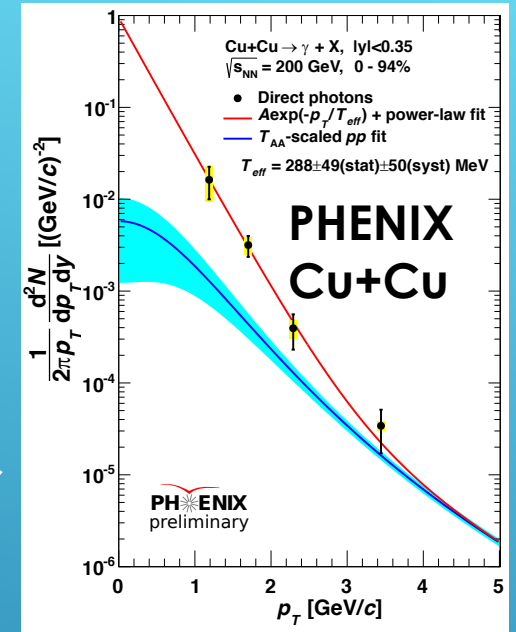
PRC94, 064901 (2016)

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



その他の結果(Cu+Cu, $\sqrt{s_{NN}}=39, 62.4\text{GeV}$)

- 異なるシステムサイズ : Cu+Cu 200GeV
 - ✓ 仮想光子測定
 - ✓ 小さい N_{part} 領域をカバー
- 低い衝突エネルギー : Au+Au 39, 62.4GeV
 - ✓ 外部変換光子測定
 - ✓ 光子収量 & p_T 分布の傾き (T_{eff})の衝突エネルギー依存性

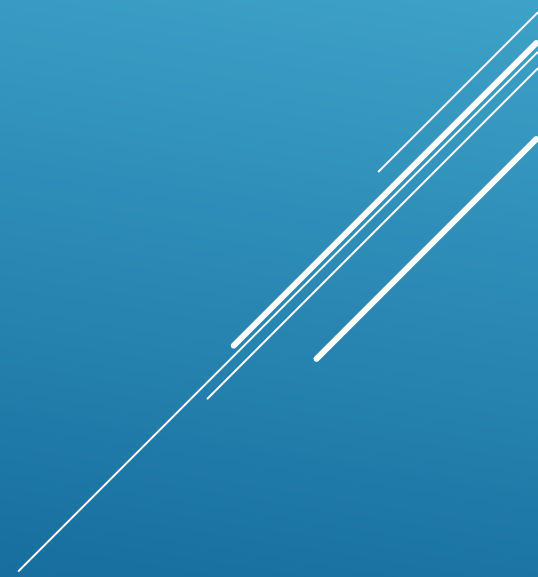


低横運動量直接光子実験結果まとめ

$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	衝突核種	測定法	$v_{2,3}$	Centrality
2760	Pb+Pb	実光子、外部変換光子	v_2 のみ	○
200	Au+Au	仮想光子、外部変換光子	○	○
	Cu+Cu	仮想光子	×	○
	d+Au	仮想光子	-	MB
	p+p	仮想光子	-	-
62.4	Au+Au	外部変換光子	×	○
39	Au+Au	外部変換光子	×	MB

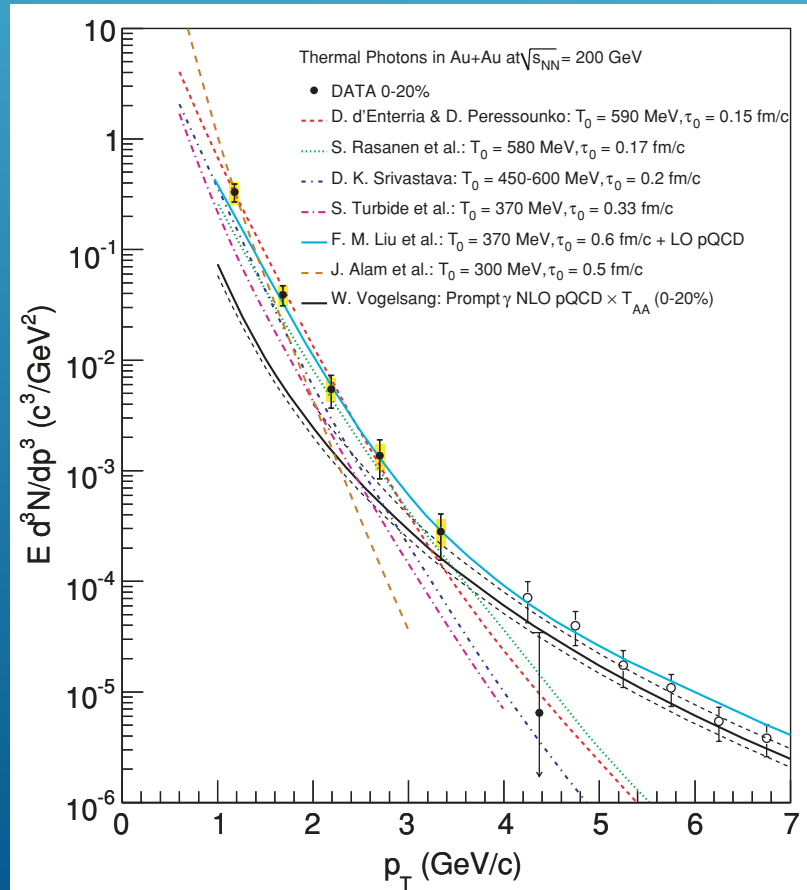
2018.1.12現在、preliminary resultsも含む

議論

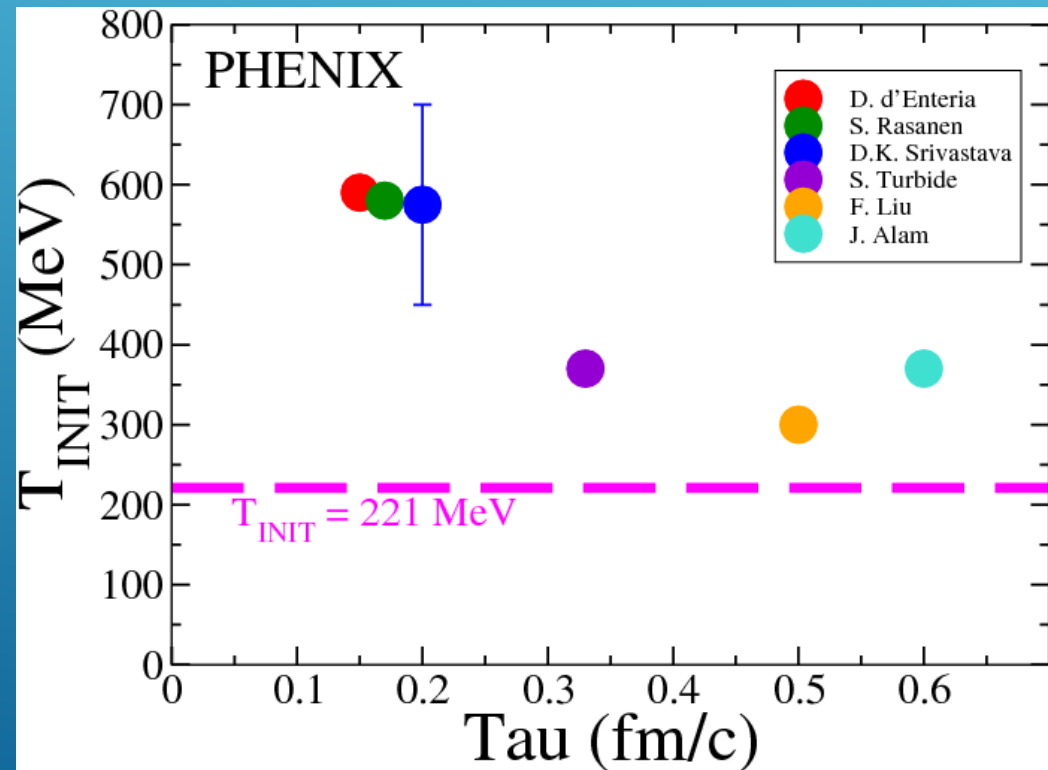


T_0 & τ_0

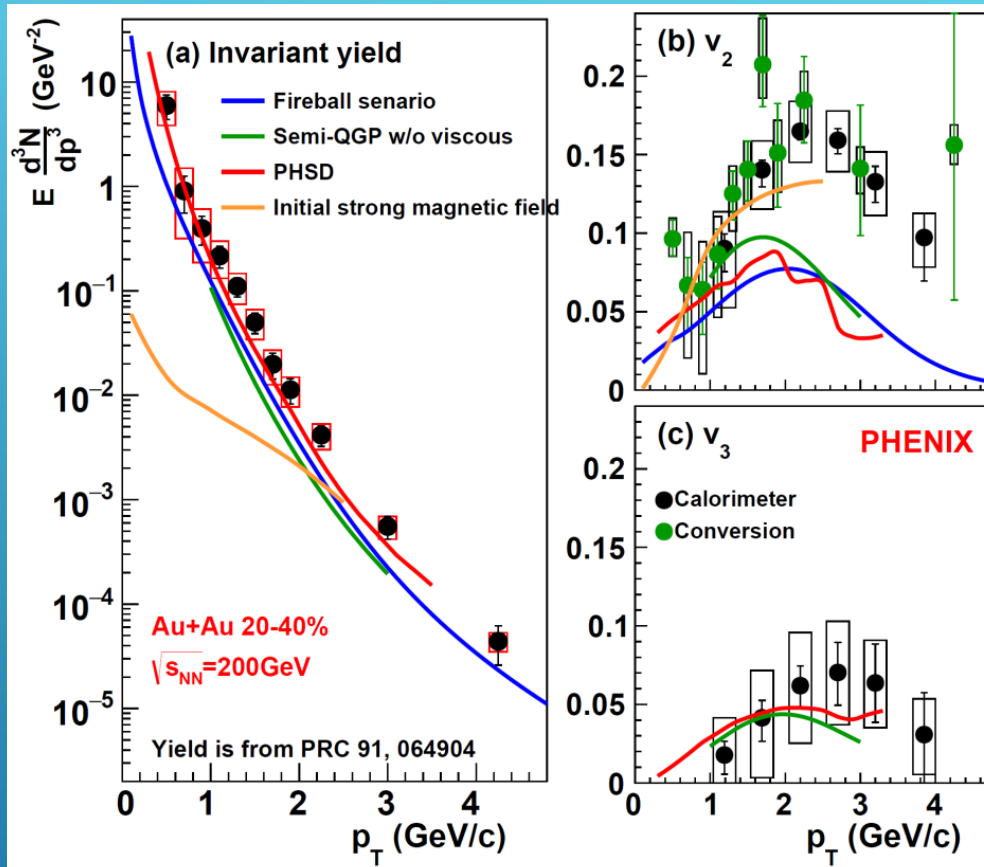
- モデル計算と比較(2010年当時)
 - ✓ 時空発展、Blue-shiftを考慮
 - ✓ QGP+HGの熱放射の積分
 - ✓ T_0 & τ_0 に大きな不定性 → p_T 分布だけでは決定できず



PRC81, 034911 (2010)



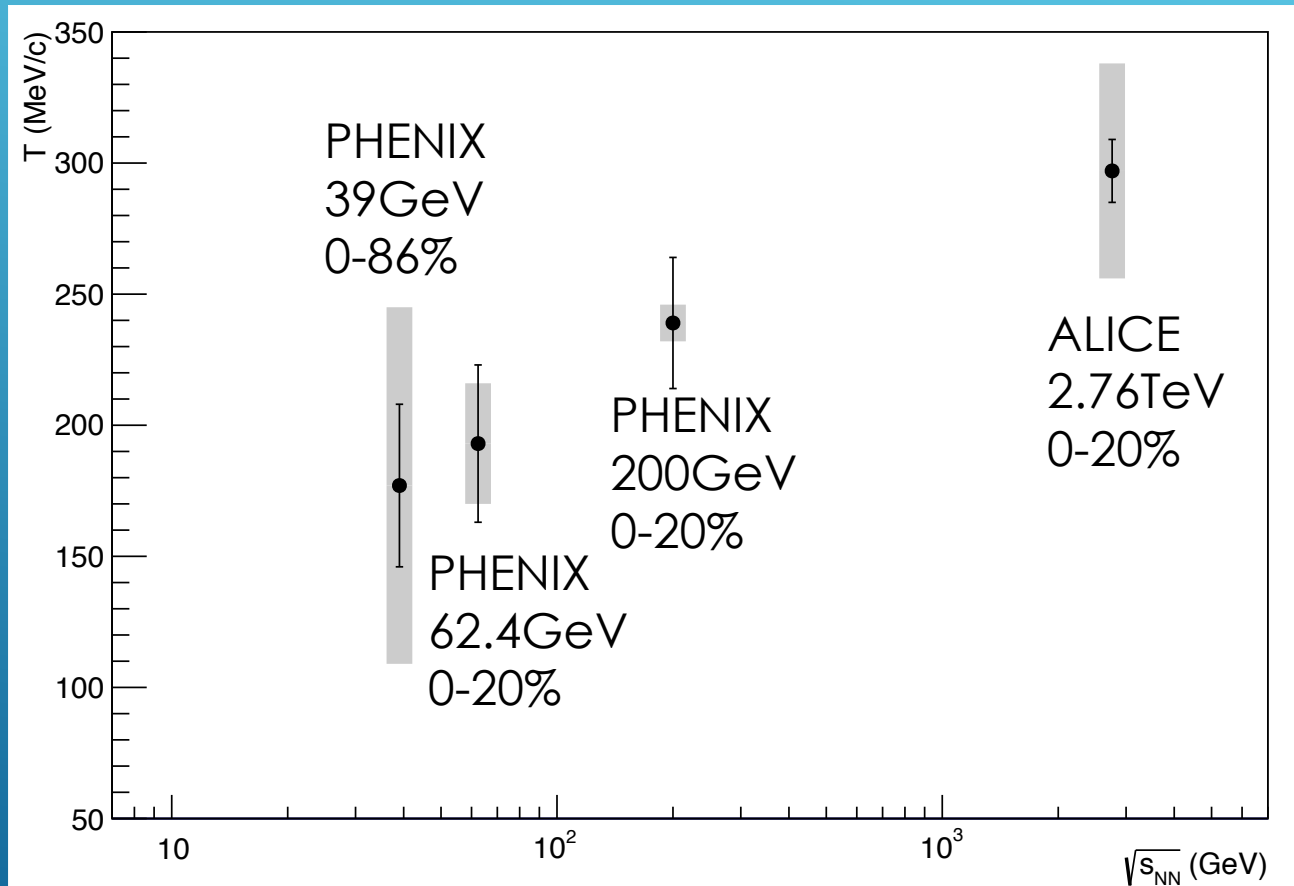
DIRECT PHOTON PUZZLE



- 大きな収量 & 大きな v_2 を同時に再現できない
- 既存の枠組み(熱放射 from QGP & HG)では不十分
 - ✓ 新たな光子源の導入の必要性
 1. 前熱平衡状態からの放射
 2. 臨界温度付近での新しい光子生成

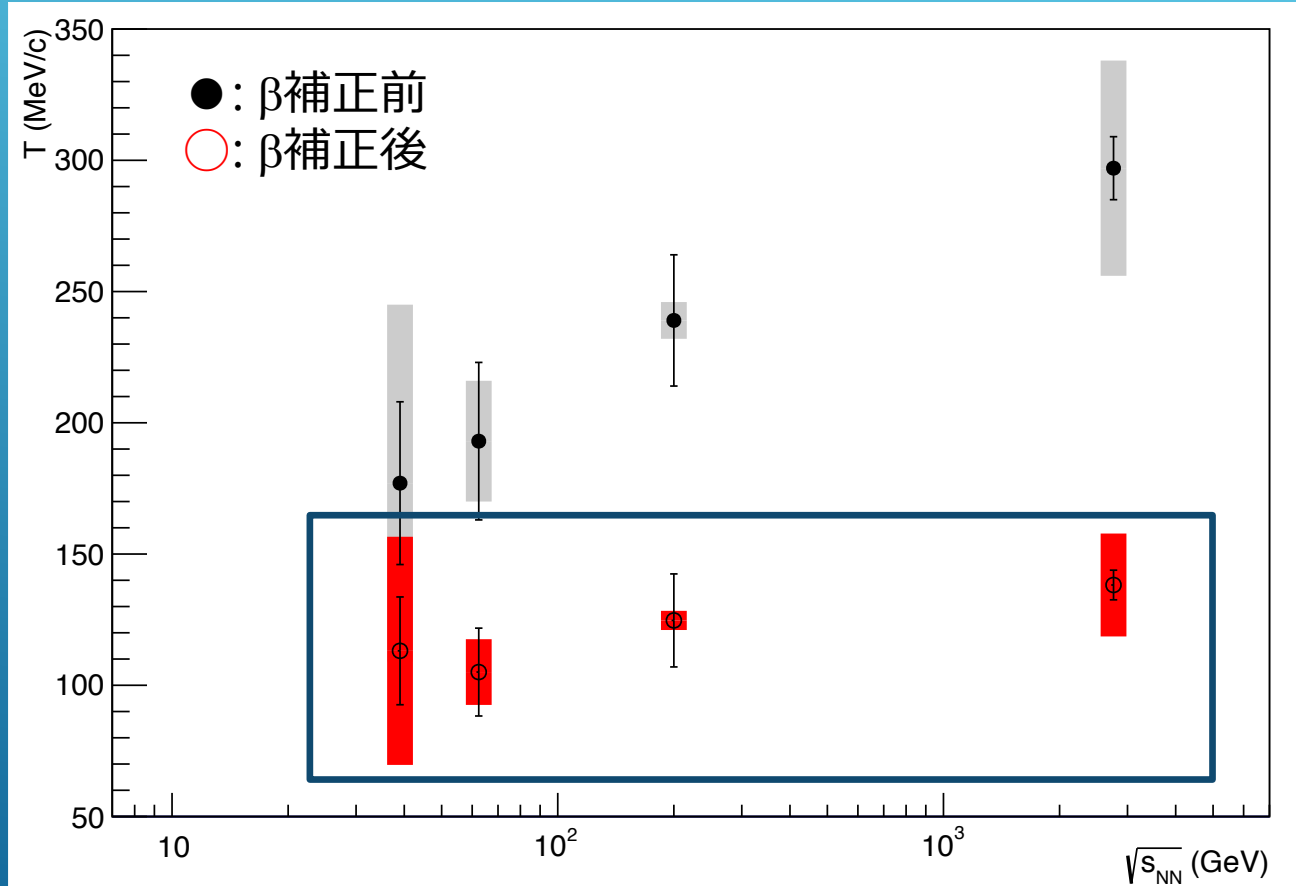
$T_{\text{eff}} : \sqrt{s_{NN}}$ DEPENDENCE

- 指数関数フィットのスロープ : $T_{\text{eff}} \neq$ 生成物質の平均温度
 - ✓ Radial flowによるBlue-shift $\rightarrow T_{\text{eff}} > T_{\text{true}}$



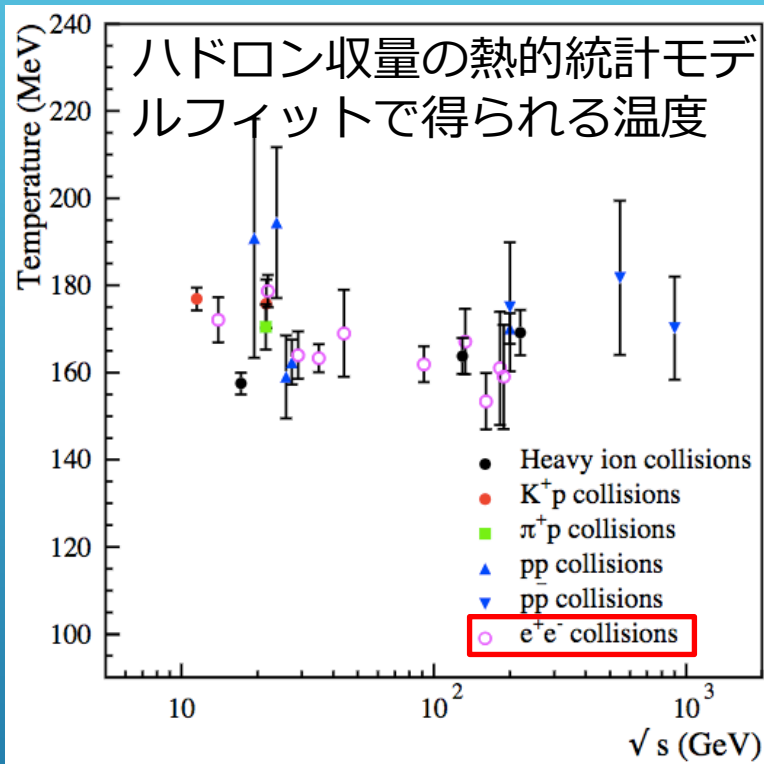
β -CORRECTED T_{eff} : $\sqrt{s_{NN}}$ DEPENDENCE

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



- $T_{\text{true}} \sim 150 \text{ MeV} (\sim T_c)$ & 弱い $\sqrt{s_{NN}}$ 依存性
→ T_c 近傍からの大きな寄与? ハドロン化で生成される光子?

T_{had} 測定の可能性

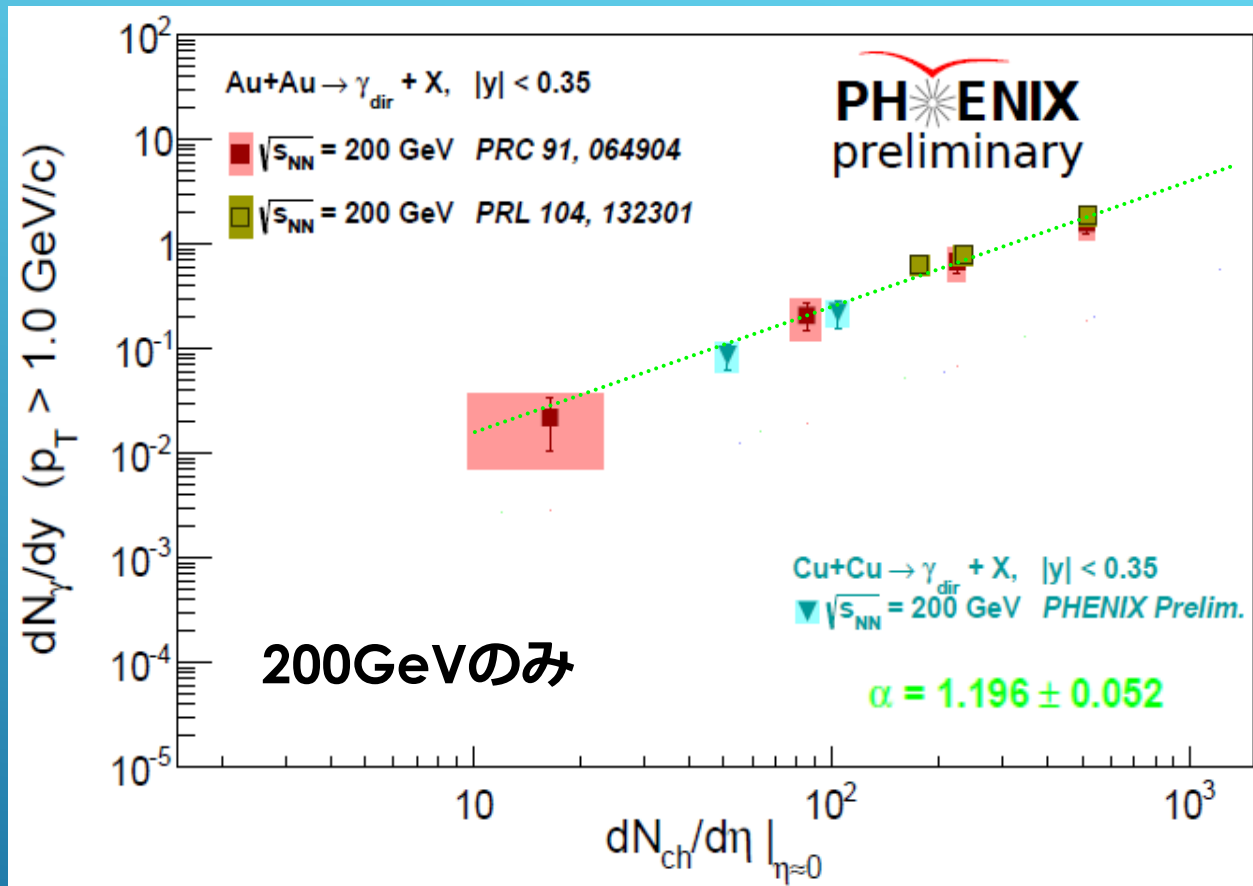


- T_{had} : クロスオーバー転移なので、 T_c でなくハドロン化温度とします
- ハドロン収量の熱的統計モデルフィットで T_{had} の導出
 - ✓ $T_{had} \sim 170 \text{ MeV} (\approx T_c)$
 - ✓ ee衝突でも同じ T_{had}
 - フィットで得られる T_{had} は本当に温度なのか？

直接光子による T_{had} 測定

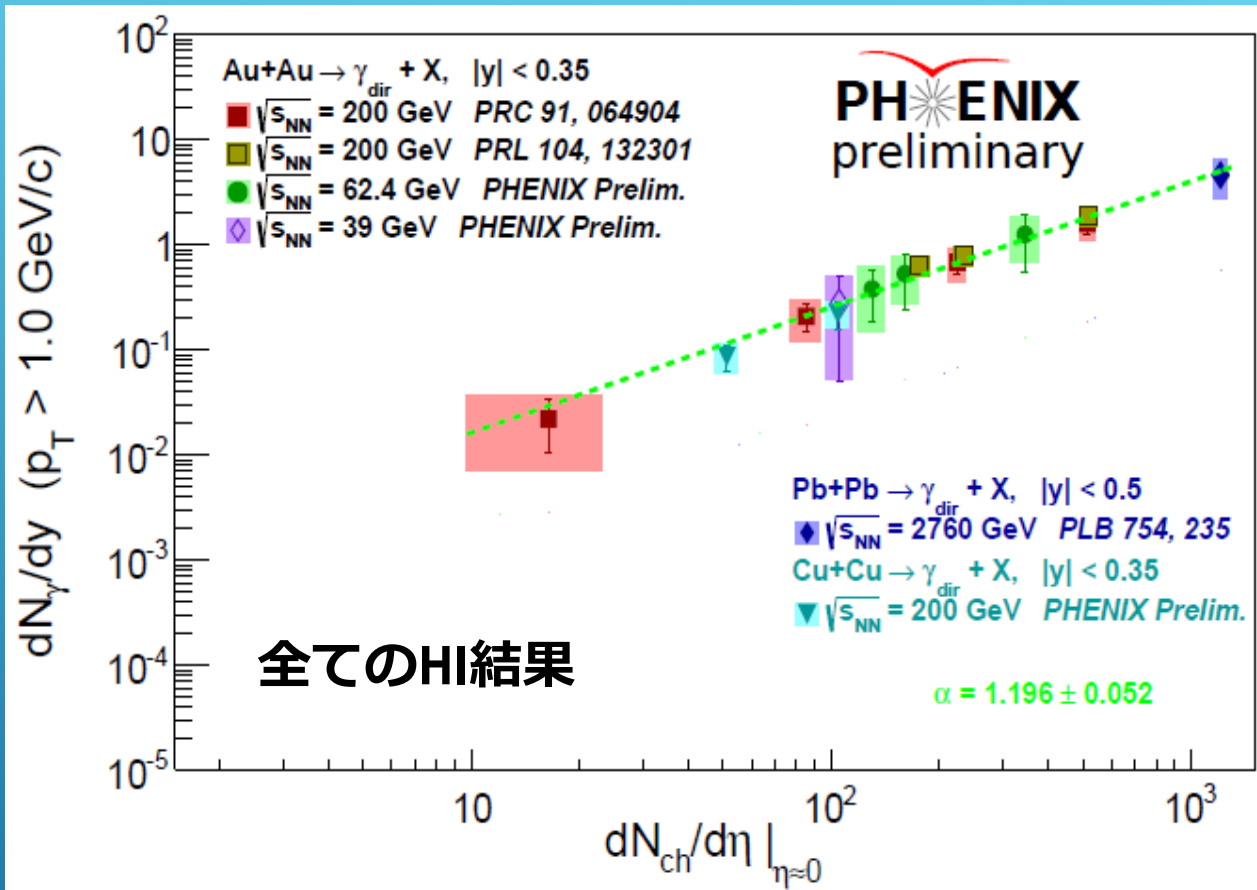
- 仮定： T_c 近傍=ハドロン化が起こる温度でできた光子が支配的
 - ✓ 初期温度に感度なし $\Leftrightarrow T_{had}$ に感度あり
- $N_{part} \& \sqrt{s_{NN}}$ 依存性 \approx Volume依存性
 - ✓ 小さい $N_{part}, \sqrt{s_{NN}}$ 領域では光子@ T_{had} の割合が多いのでは？
 - ✓ 収量& T_{eff} が異なる T_{had} でどう変わるのか？

光子収量のMULTIPLICITY依存性



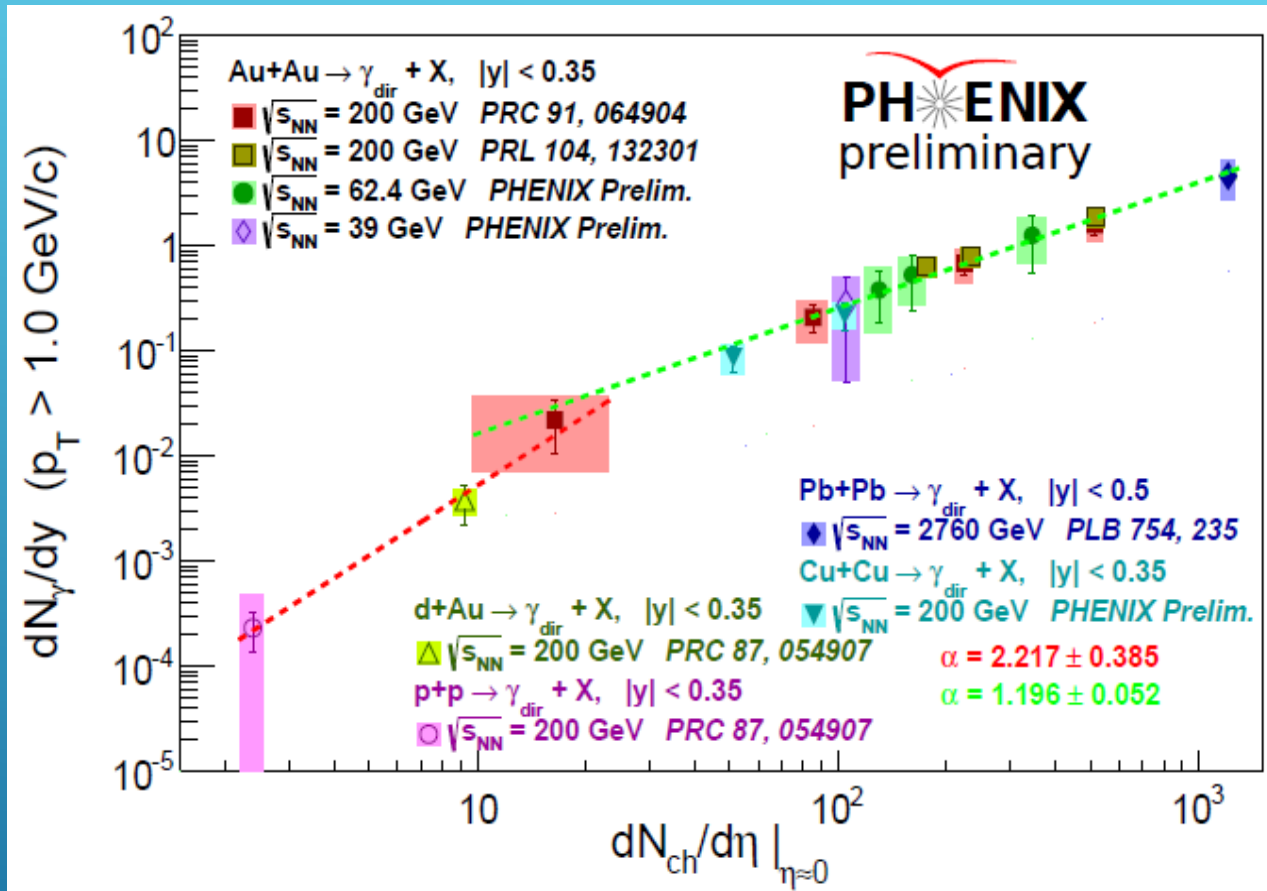
- $p_T > 1 \text{ GeV}/c$ の直接光子収量@ $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$
 - ✓ $A(dN_{ch}/dn_\eta)^\alpha$ fit: $\alpha = 1.196$
 - ✓ dN_{ch}/dn_η で単調増加 → より熱い&大きいQGP生成
 - ✓ $\alpha = 1.196$ からQGPの何がわかるのか？

光子収量のMULTIPLICITY依存性



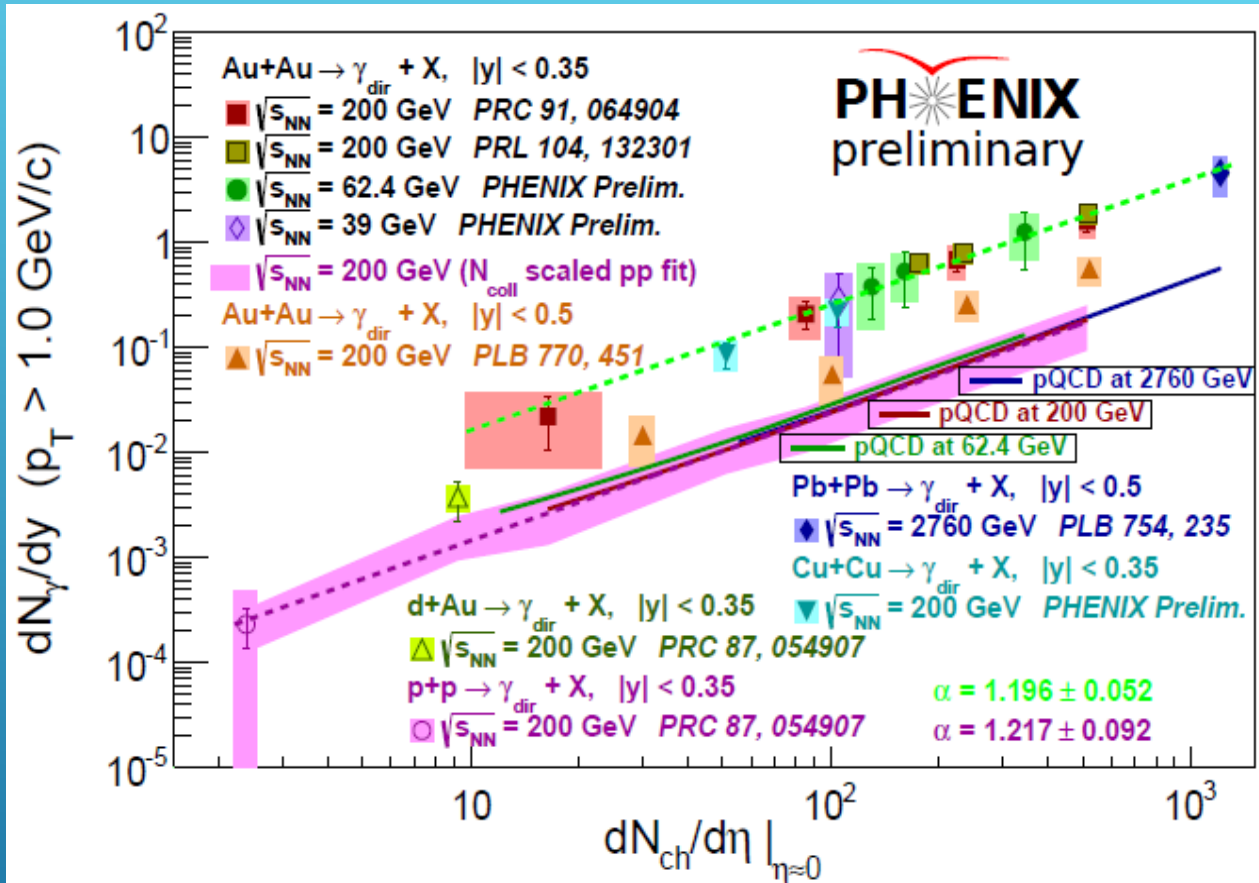
- $p_T > 1 \text{ GeV}/c$ の直接光子収量
 - ✓ $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}, 62.4, 39 \text{ GeV}$ も同じスケールング
 - ✓ 同じ $dN_{ch}/d\eta$ でも $\sqrt{s_{NN}}$ が違えばQGP初期条件が違ふ
 - QGP初期条件の影響は小さい?

光子収量のMULTIPLICITY依存性



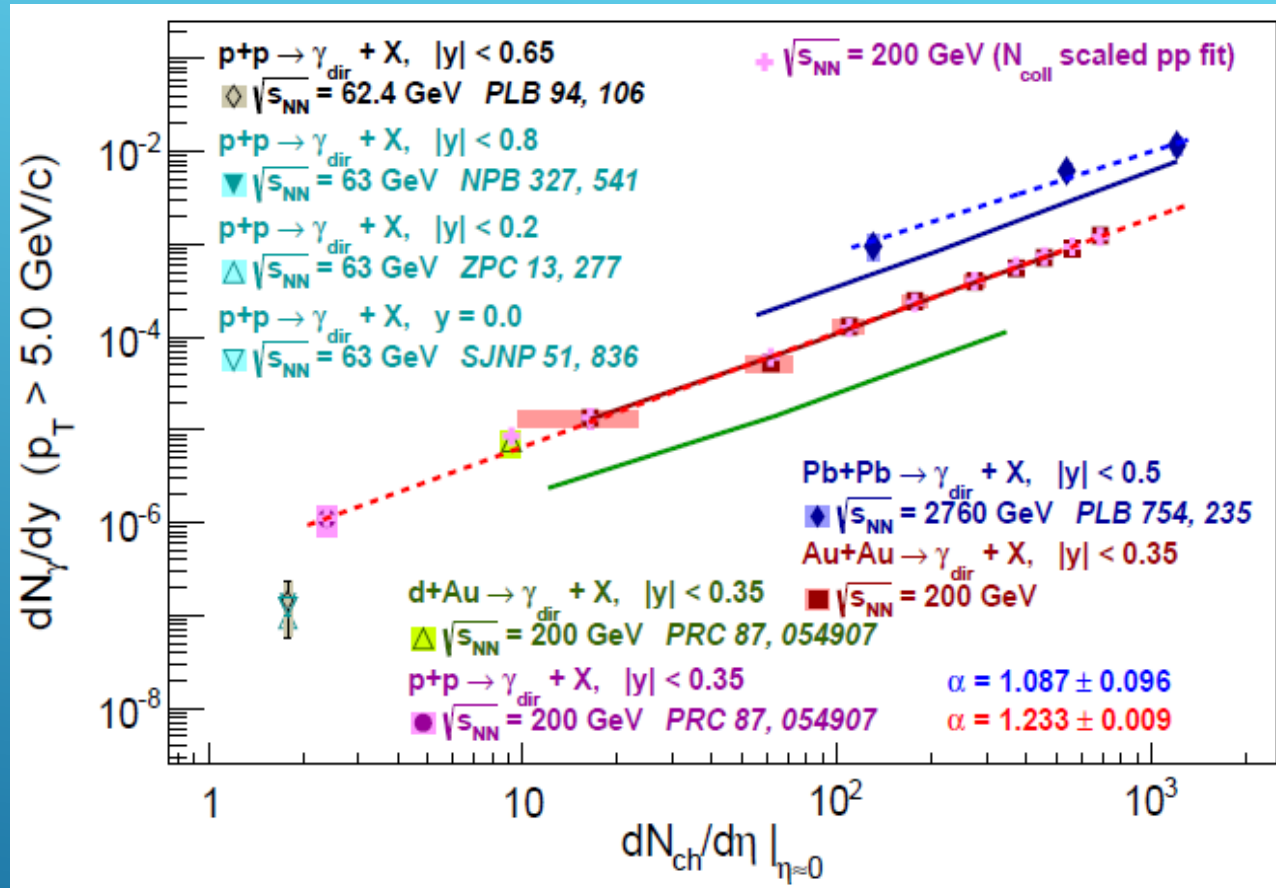
- $p_T > 1 \text{ GeV}/c$ の直接光子収量
 - ✓ p+p, p+AはA+Aのスケールリングからずれる
 - ✓ A+Aでは熱光子を見ていると考えると妥当

光子収量のMULTIPLICITY依存性



- $p_T > 1$ GeV/cの直接光子収量
 - ✓ STARの結果(仮想光子測定)は他のHI結果からずれている

光子収量のMULTIPLICITY依存性



- $p_T > 5 \text{ GeV}/c$ の直接光子収量
 - ✓ $p_T > 1 \text{ GeV}/c$ とは違い、 $\sqrt{s_{NN}}$ で異なるスケーリング
 - ✓ p+p, p+Aも同一直線上にある
 - ✓ $\alpha = 1.233 \sim 1.196$ ($p_T > 1 \text{ GeV}/c$ のHIフィット)

まとめ

- 熱光子測定はQGP温度、自由度などを知るのに不可欠
 - ✓ 主に低横運動量直接光子
- 3つの測定法の確立
 - ✓ それぞれに長所と短所あり
- 異なる衝突エネルギー、システムサイズで光子収量、 v_2 の測定に成功
 - ✓ 結果の解釈に議論の余地が大いにある
 - T_{had} 測定の可能性は？
 - $dN_{ch}/d\eta$ 依存性の解釈は？
 - より良い指標は他にないのか？
 - ✓ 特に200GeVデータはp+p, p+Aベースライン・Centrality依存性もあるので、もっと活発な議論があると良い