



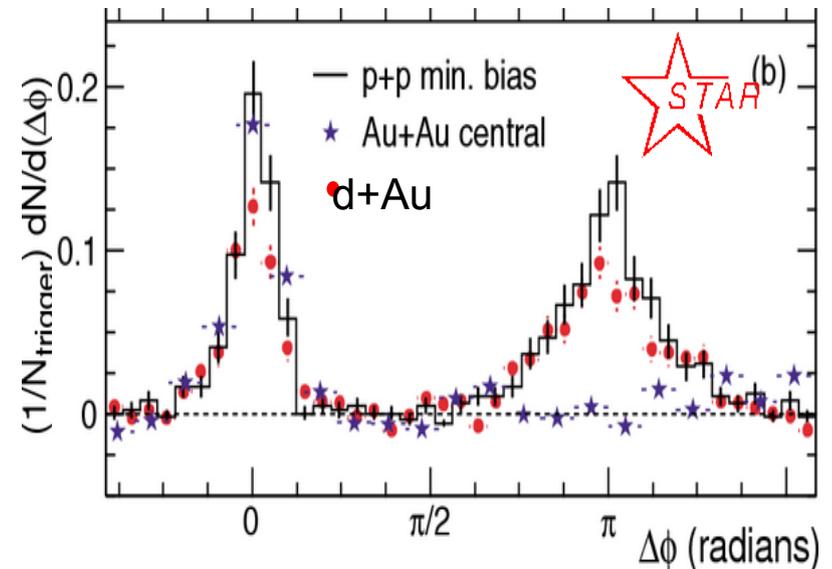
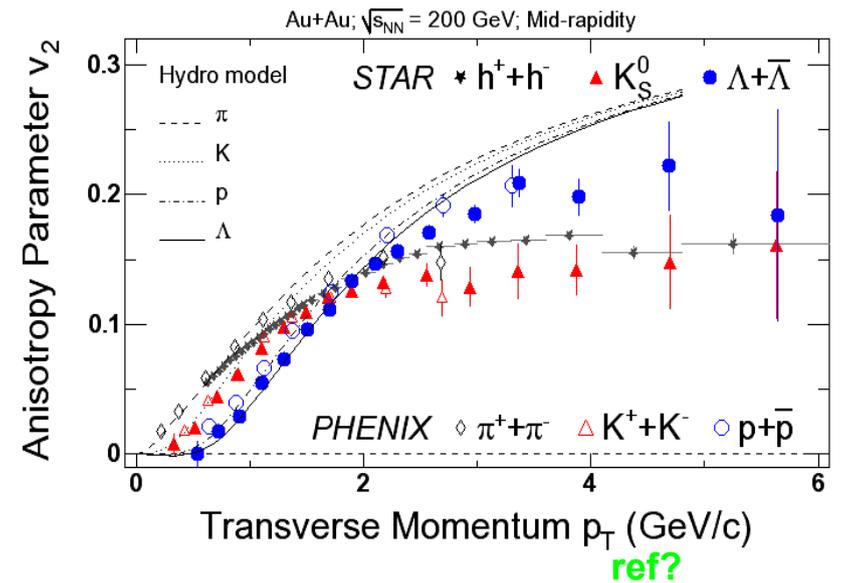
***When a plasma shines***

**H. Fujii**  
**(U Tokyo, Komama)**

***in collaboration with***  
**K. Itakura, C. Nonaka**

# QGP生成を示唆する3観測量(RHIC)

- ハドロン集団の流れ:  
パートン相の圧力
- 高運動量粒子の抑制:  
高密度な散乱体の存在
- 直接光子の観測:  
プラズマからの熱放射

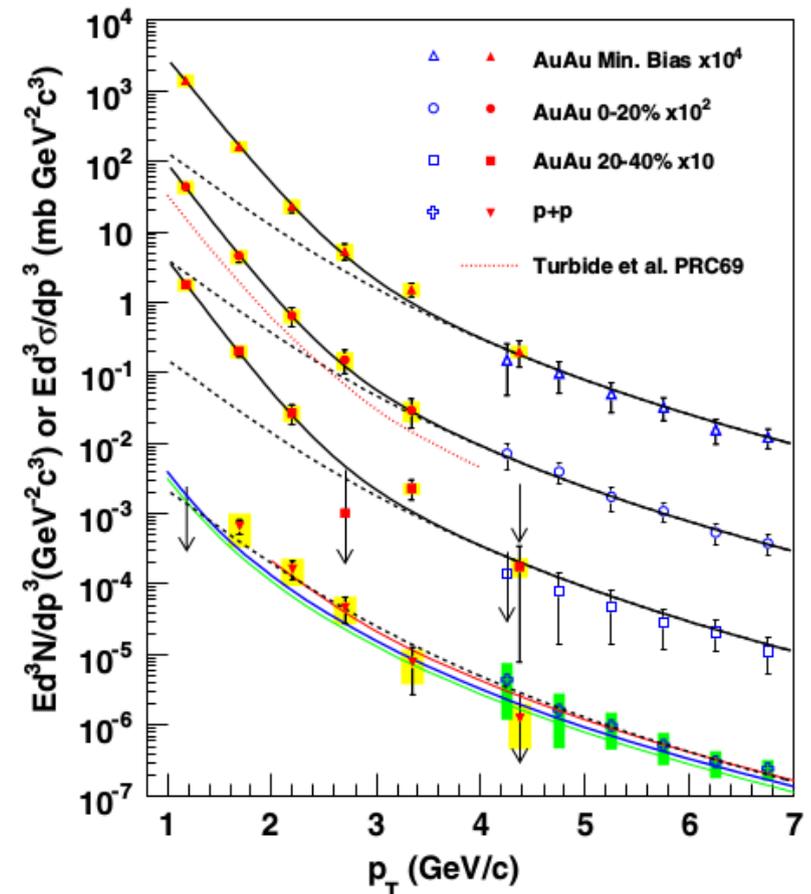


## Enhanced Production of Direct Photons in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and Implications for the Initial Temperature

The production of  $e^+e^-$  pairs for  $m_{e^+e^-} < 0.3$  GeV/ $c^2$  and  $1 < p_T < 5$  GeV/ $c$  is measured in  $p + p$  and Au + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. An enhanced yield above hadronic sources is observed. Treating the excess as photon internal conversions, the invariant yield of direct photons is deduced. In central Au + Au collisions, the excess of the direct photon yield over  $p + p$  is exponential in transverse momentum, with an inverse slope  $T = 221 \pm 19^{\text{stat}} \pm 19^{\text{syst}}$  MeV. Hydrodynamical models with initial temperatures ranging from  $T_{\text{init}} \sim 300\text{--}600$  MeV at times of  $\sim 0.6\text{--}0.15$  fm/ $c$  after the collision are in qualitative agreement with the data. Lattice QCD predicts a phase transition to quark gluon plasma at  $\sim 170$  MeV.

A. Adare et al.  
(PHENIX)

- 直接光子生成の増大を観測!
- $T_{\text{slope}} = 221 \pm 19 \pm 19$  MeV
- $T_{\text{init}} \sim 300 - 600$  MeV  $\gg T_c$   
– at 0.6 – 0.15 fm/ $c$   
(流体モデル計算)

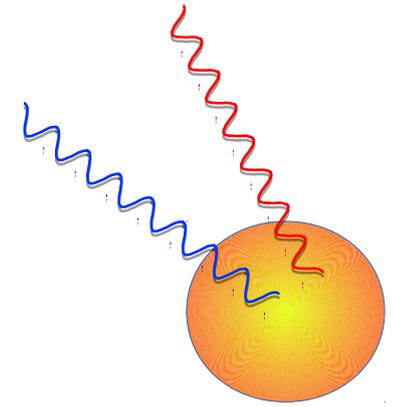


# アウトライン

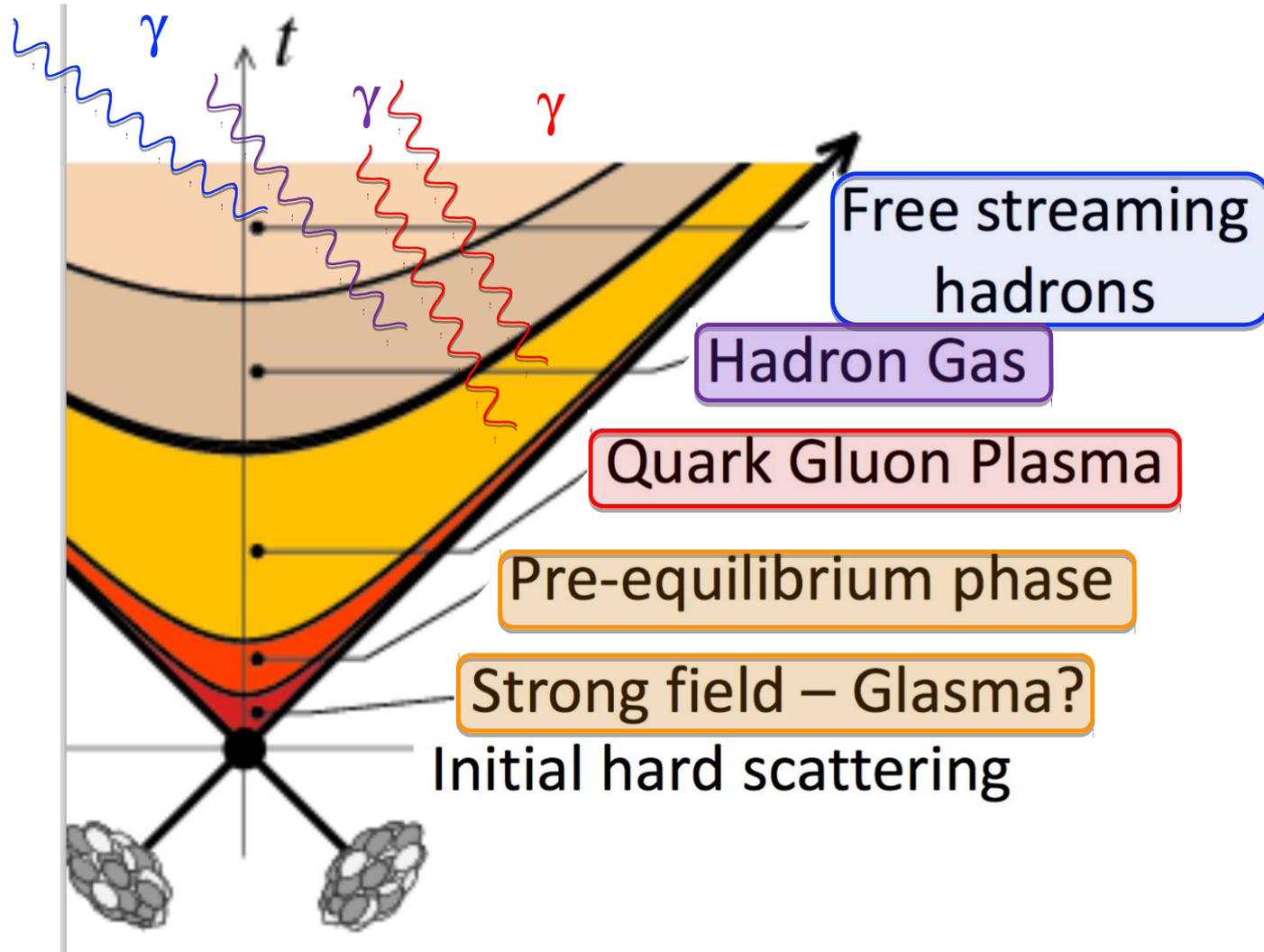
- 光子生成: 簡単な復習
- 光子パズル: 部分的動機付け
  - 見逃された光子生成機構?
- 放射再結合過程
  - 概念
  - **ReCo**モデルの拡張
  - シンプルセットアップでの結果
- 展望

# HICの火玉は、始終、輝いている

- 原子核衝突事象サイズ  $R \ll \lambda_{\text{mean}}$ 
  - 透過性プローブ
  - それぞれの生成時空点の情報を運ぶ
  - 全収量 = 事象寿命にわたる積分
  
- しかし、少収量
  - **EM:strong**  $\sim \alpha \alpha_s : \alpha_s^2 \sim 1 : 40$



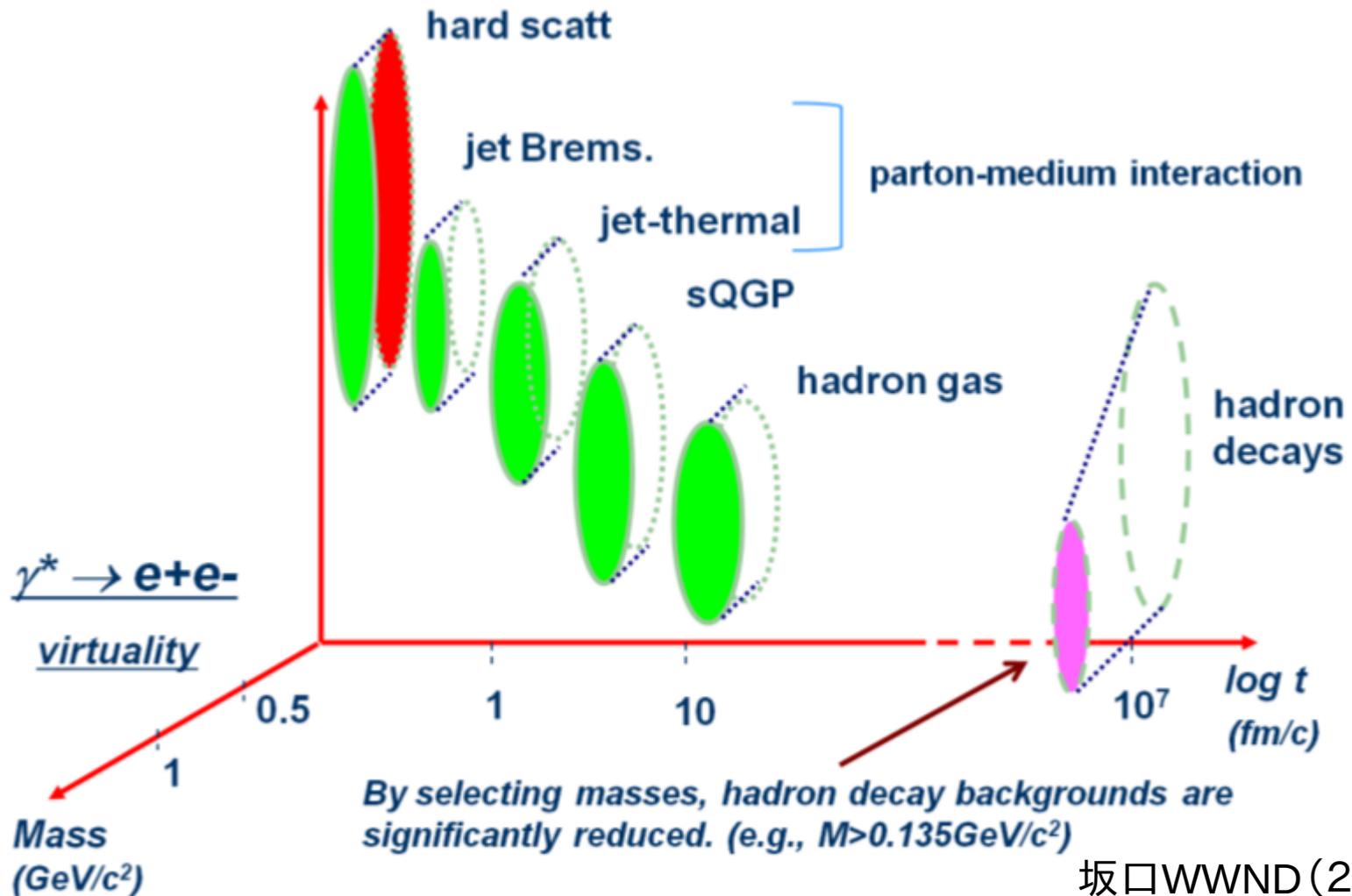
# 光子の起源



Campbell@QM2017を改変

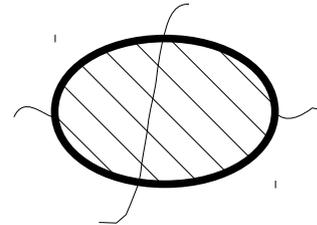
# 光子の起源

- (直接光子) = (全光子) - (ハドロン崩壊光子)



# 熱的光子 ( $k_T < 2-3 \text{ GeV}/c$ )

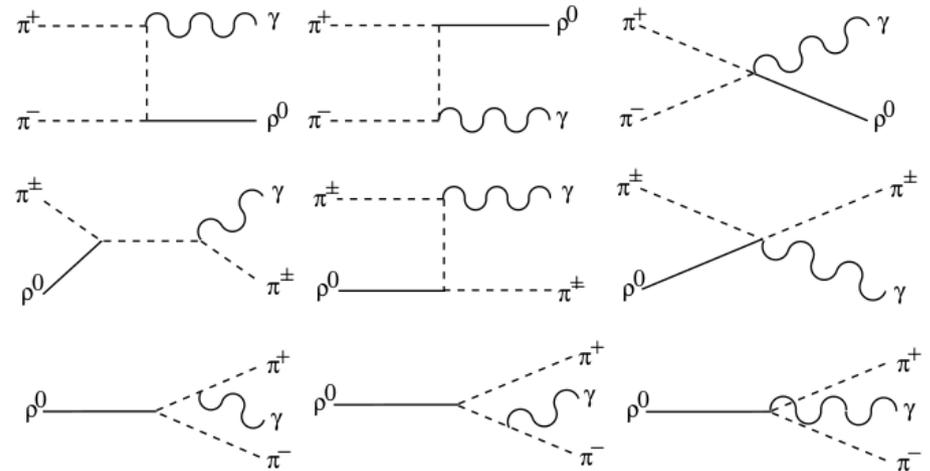
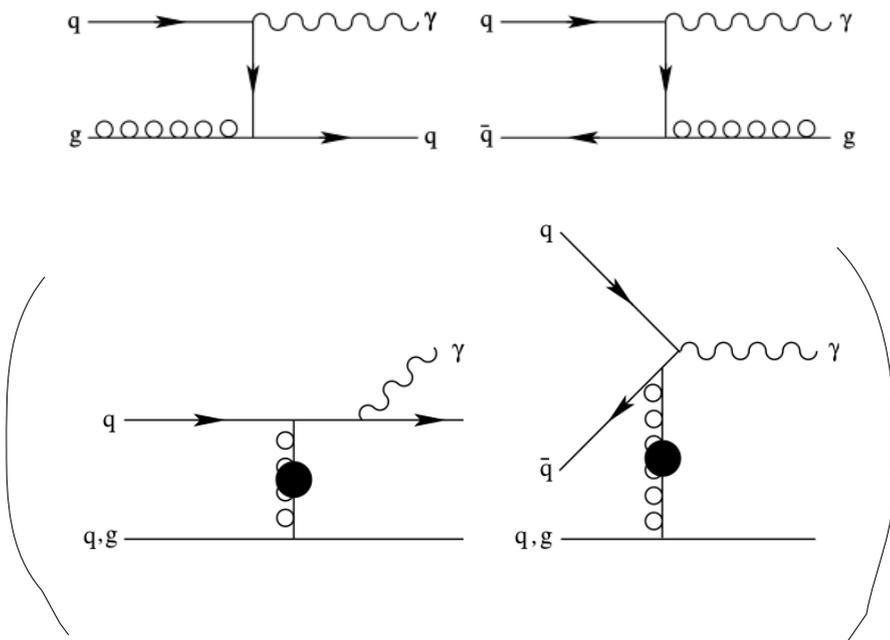
$$\frac{dN}{d^4x d^3k} = -\frac{1}{(2\pi)^3} \frac{1}{E} \frac{\text{Im} \Pi_\mu^\mu(k)}{e^{E/T} - 1} =$$



$$\sim \alpha \alpha_s T^2 e^{-E/T}$$

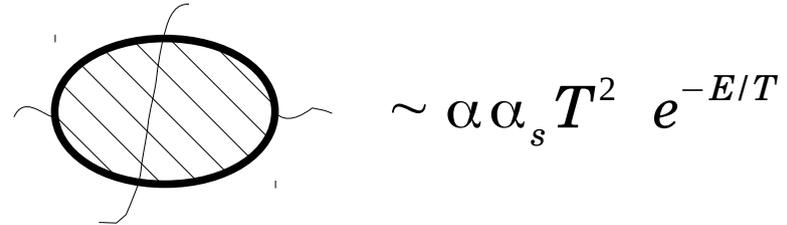
## • プラズマ相: HTL

## • ハドロン相: モデル



# 熱的光子 ( $k_T < 2-3 \text{ GeV}/c$ )

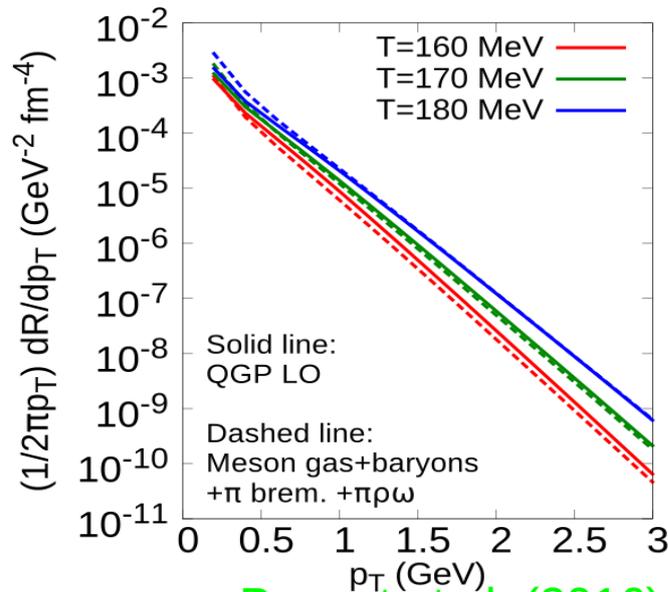
$$\frac{dN}{d^4x d^3k} = -\frac{1}{(2\pi)^3} \frac{1}{E} \frac{\text{Im} \Pi_\mu^\mu(k)}{e^{E/T} - 1} =$$



- プラズマ相: HTL

高温  $\Rightarrow$  高生成率

70's Shuryak, ...



Paquet et al. (2016)

- ハドロン相: モデル

低温  $\Rightarrow$  低生成率

註)  $T \sim 150 \text{ MeV}$ では

“The hadron gas shines as brightly as the QGP”

90's Kapusta-Lichard-Seibert

# 熱的光子 ( $k_T < 2-3 \text{ GeV}/c$ )

$$\frac{dN}{d^4x d^3k} = -\frac{1}{(2\pi)^3} \frac{1}{E} \frac{\text{Im} \Pi_\mu^\mu(k)}{e^{E/T} - 1} = \text{Diagram} \sim \alpha \alpha_s T^2 e^{-E/T}$$

- プラズマ相: HTL

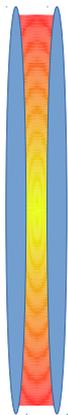
高温 ⇒ 高生成率

小時空体積

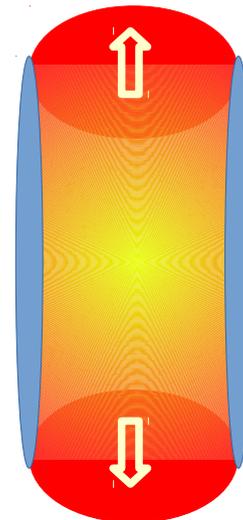
- ハドロン相: モデル

低温 ⇒ 低生成率

大時空体積、集団流れ



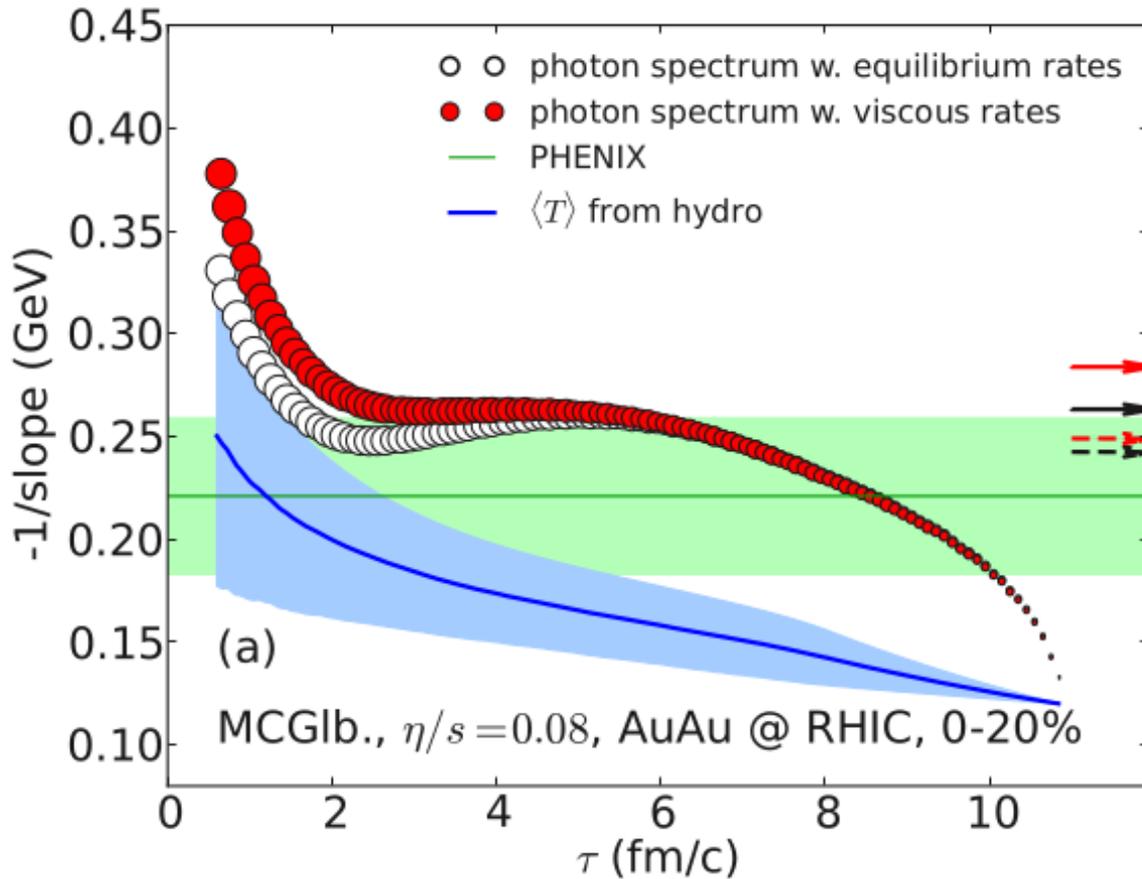
収量に同じく寄与



# 熱的光子の放射時刻と温度

プラズマのもっとも輝く時

Shen et al. PRC89,044910 (2014)



粘性流体モデル:

クロスオーバー

内挿  $184 < T < 220$  MeV

化学凍結  $T = 165$  MeV

- 相転移領域から収量が大
- ハドロン相ソースの有効温度は大きく青方遷移 (動径方向流れの影響)

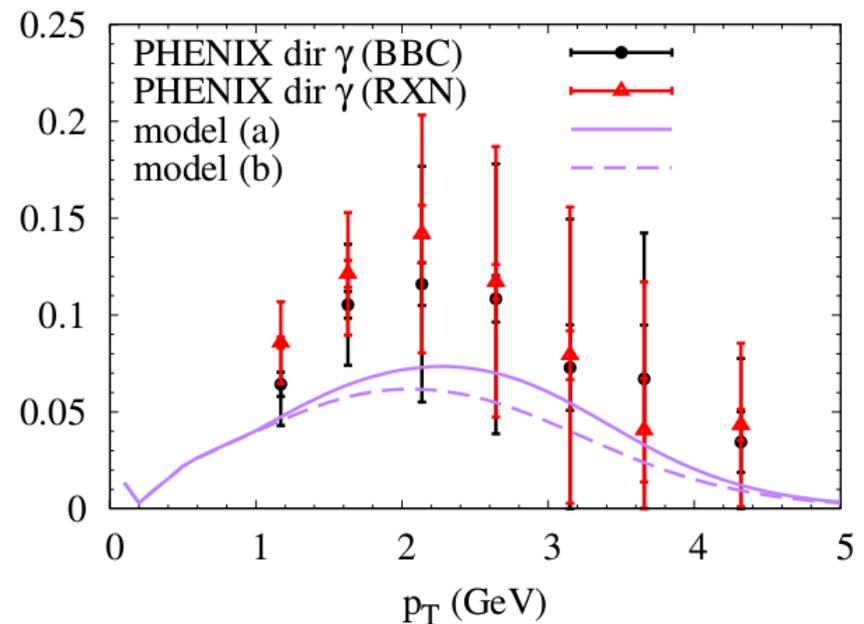
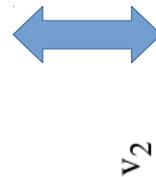
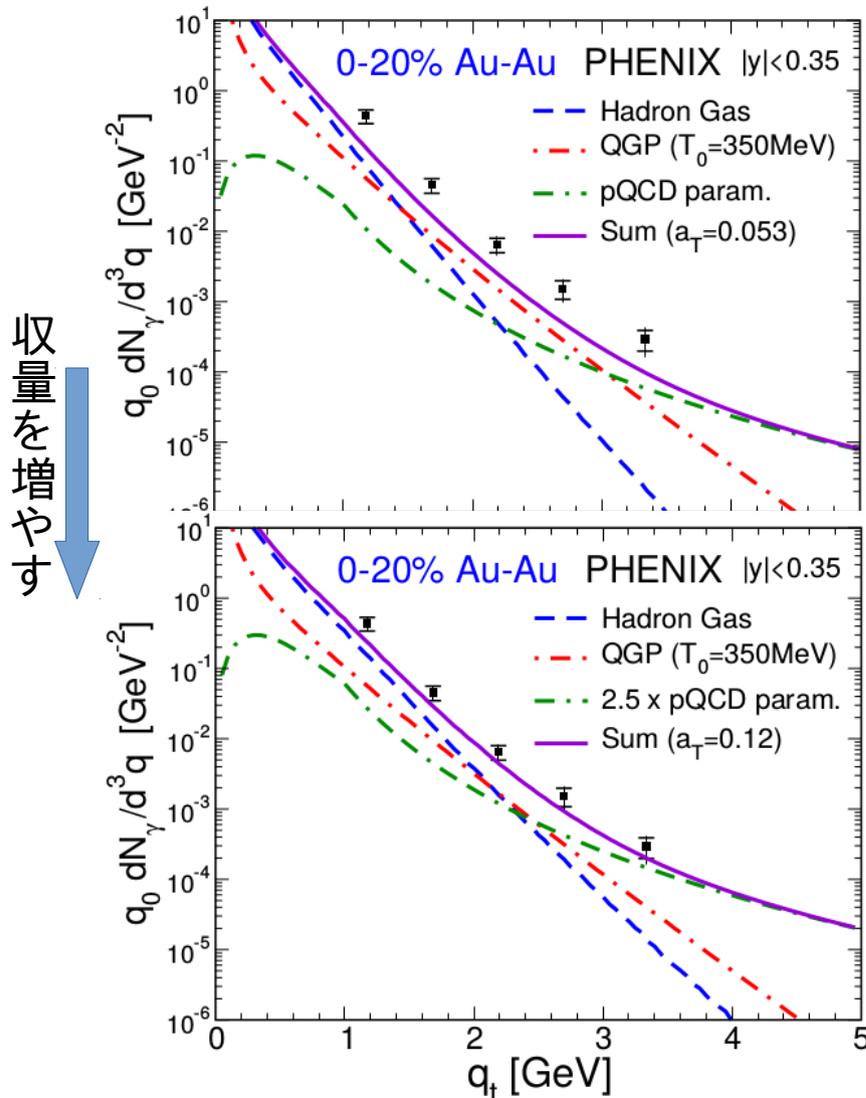
# 直接光子の”パズル”

高収量 (高温?) vs 強い楕円形流れ (ハドロン起源?)

van Hees et al. PRC84,054906 (2011)

シンプルな火の玉模型:  
( $a_T$ : 動径加速割合)

- QGPの窓は、意外に狭い
- 収量の調整後も、 $v_2$ 不足



# 直接光子の”パズル”

高収量(高温?) vs 強い楕円形流れ(ハドロン起源?)

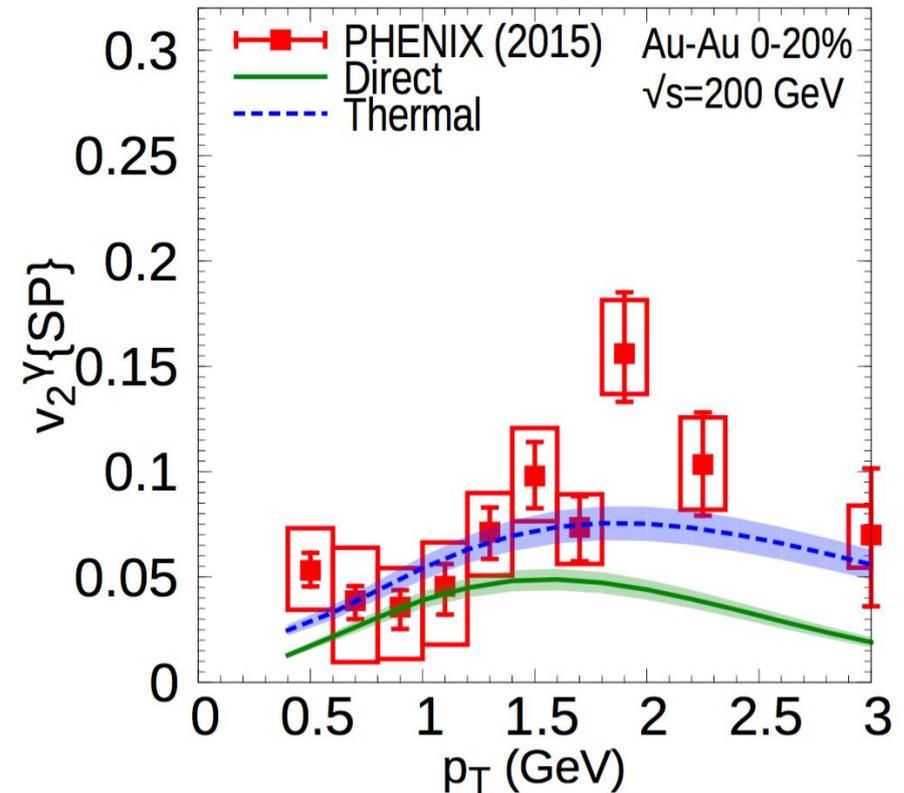
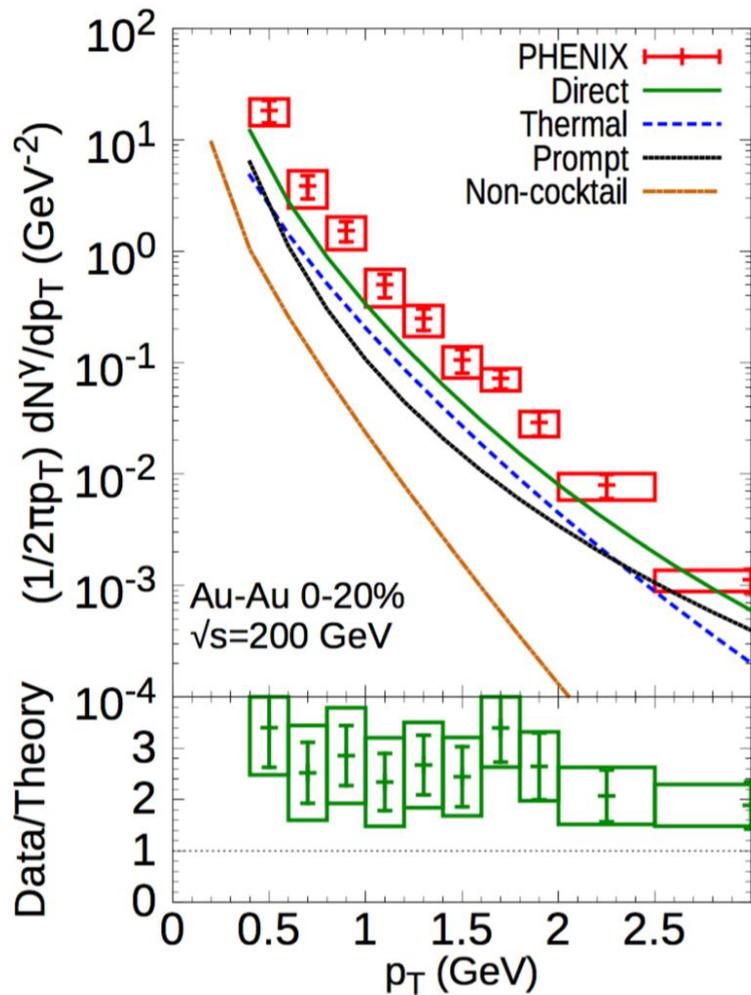
Paquet et al. PRC93,044906(2016)

(最新)粘性流体+UrQMDモデル

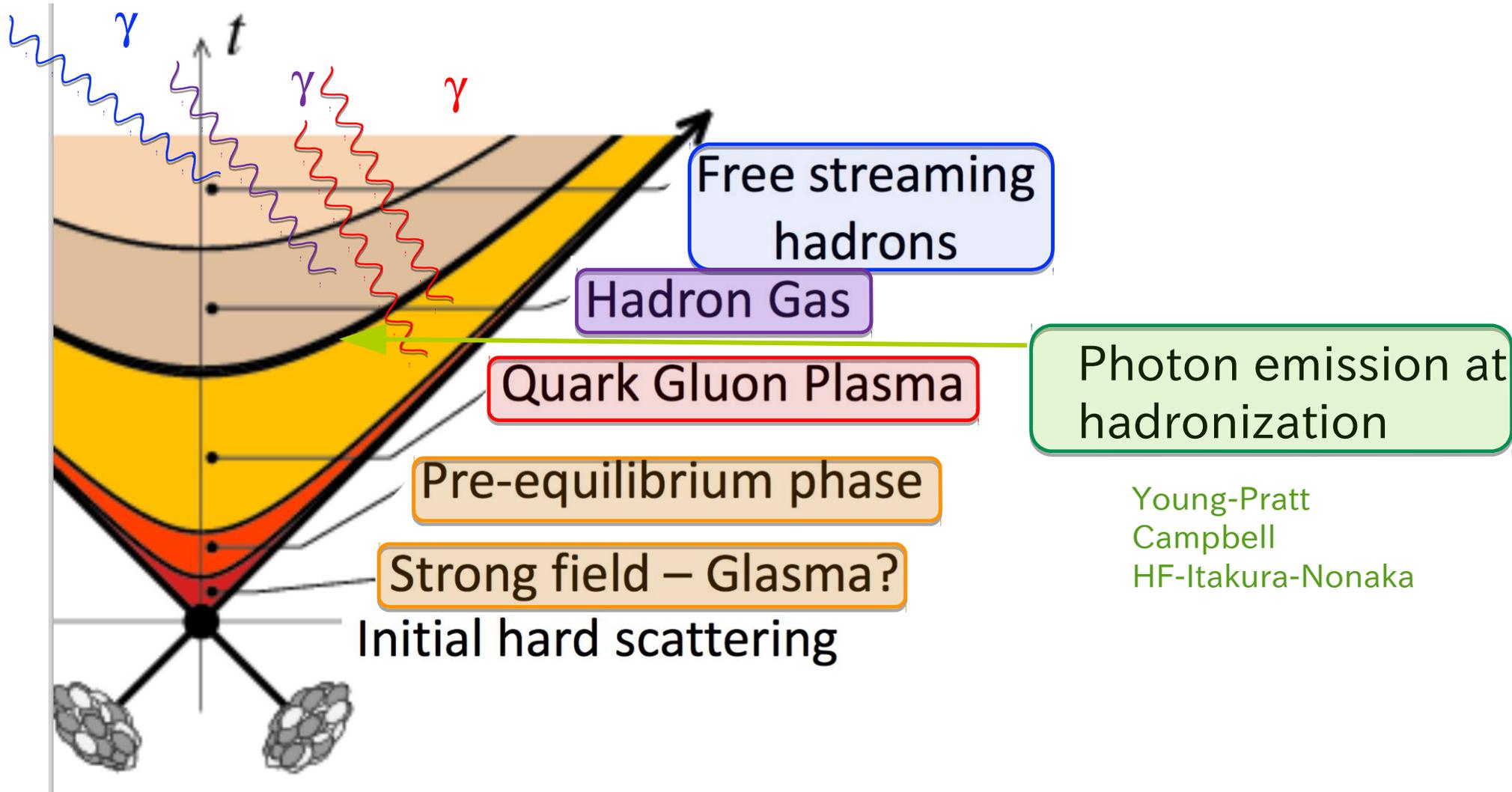
収量不足、 $v_2$ 不足

熱的光子成分のみの $v_2$ が一致!?

⇒別の”ハドロン相”起源光子か?



# 光子の起源 (改)



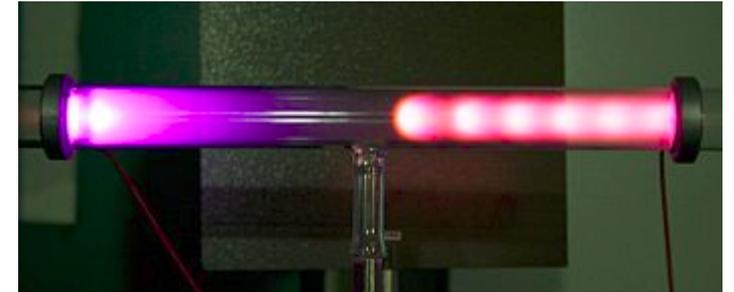
Campbell@QM2017を改変

# 放射再結合

- プラズマが中性化する際の光放射
- 光分解の逆過程

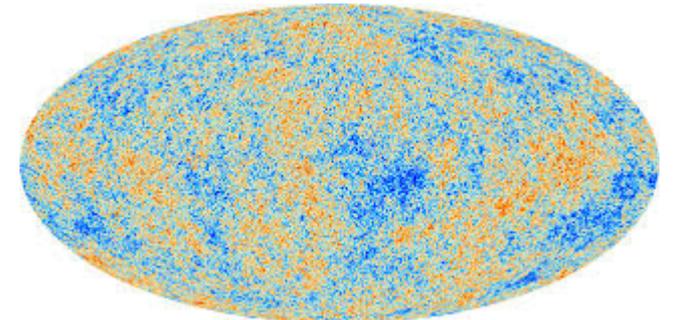
# 放射再結合

- グロー放電:  $e + I^+ \rightarrow A + \gamma$



[https://en.wikipedia.org/wiki/Glow\\_discharge](https://en.wikipedia.org/wiki/Glow_discharge)

- 宇宙の晴れ上がり (CMB):



[http://m.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck\\_CMB](http://m.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck_CMB)

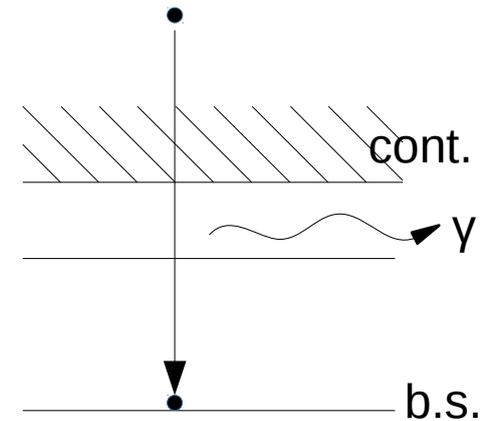
- 星雲の発光:  $e + p \rightarrow H + \gamma$



<https://apod.nasa.gov/>

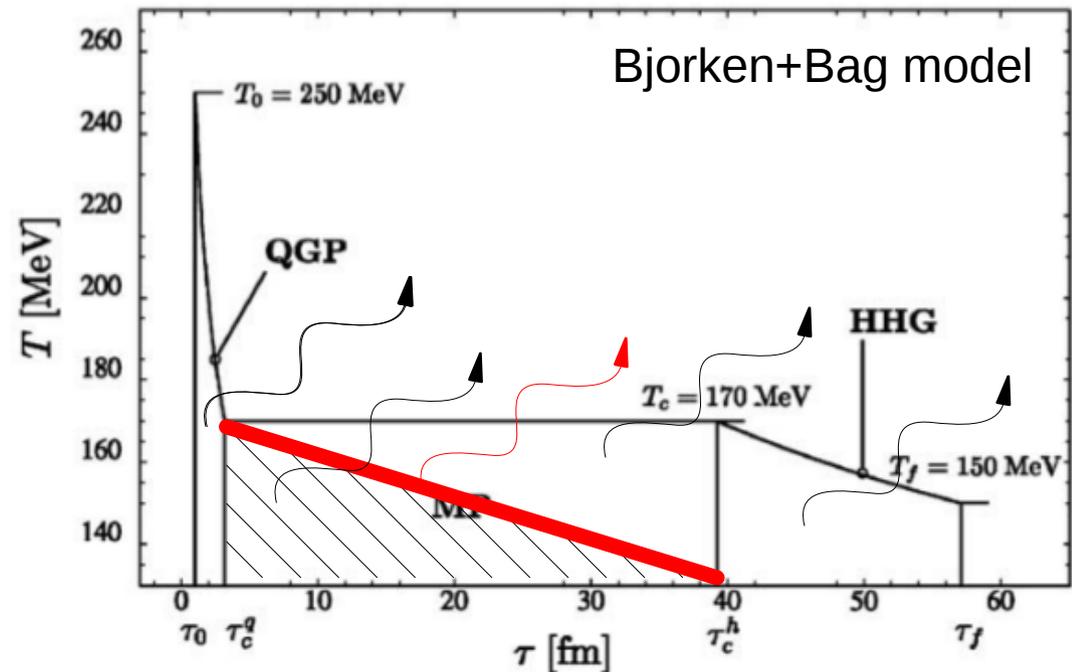
# 放射再結合

- **free-bound** 遷移
  - エネルギー・運動量の保存
  - ハドロン化過程に伴う放射



- **"free"- "free"** 遷移
  - QGP熱放射
  - ハドロン熱放射

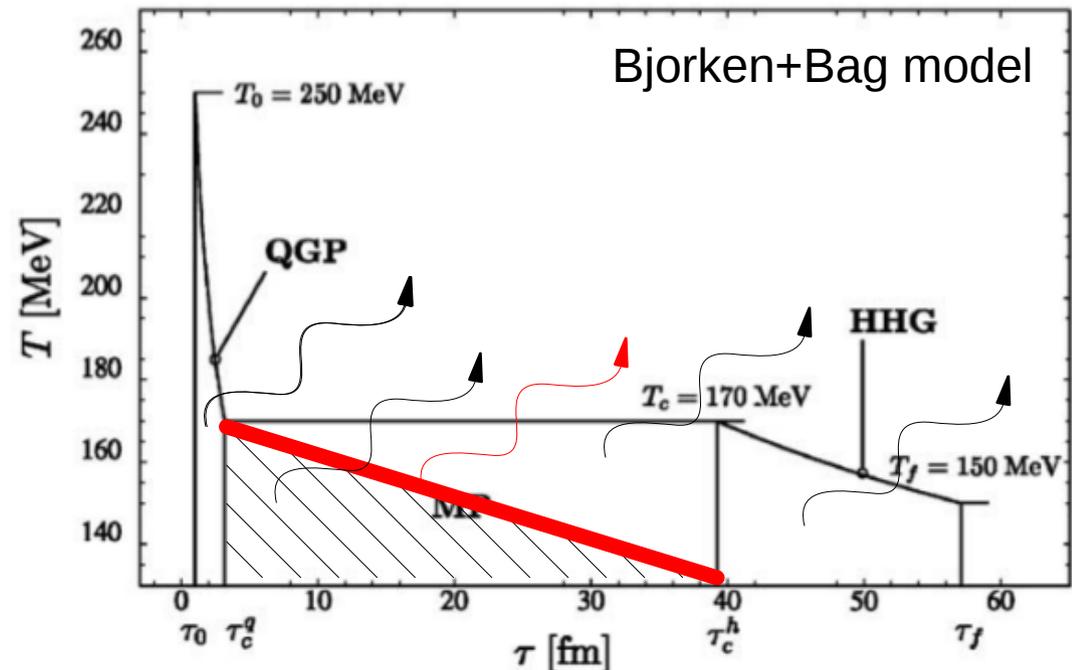
物理的に異なる過程



# 放射再結合の光分布に期待する特徴

- ハドロン化過程のエネルギーを持ち去る
  - 収量大? (グルーオンは非透過)
  - Cf. 超新星爆発の99%エネルギーを $\nu$ が持ち去る
- 強いプラズマ集団流の影響を反映できる

- 光子パズルを埋める可能性

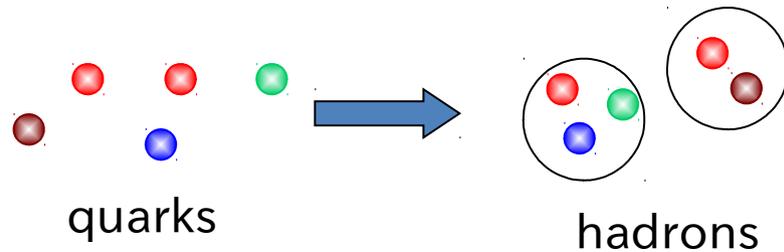


# 放射再結合のモデル化

- ハドロン化過程：非摂動な未解決問題

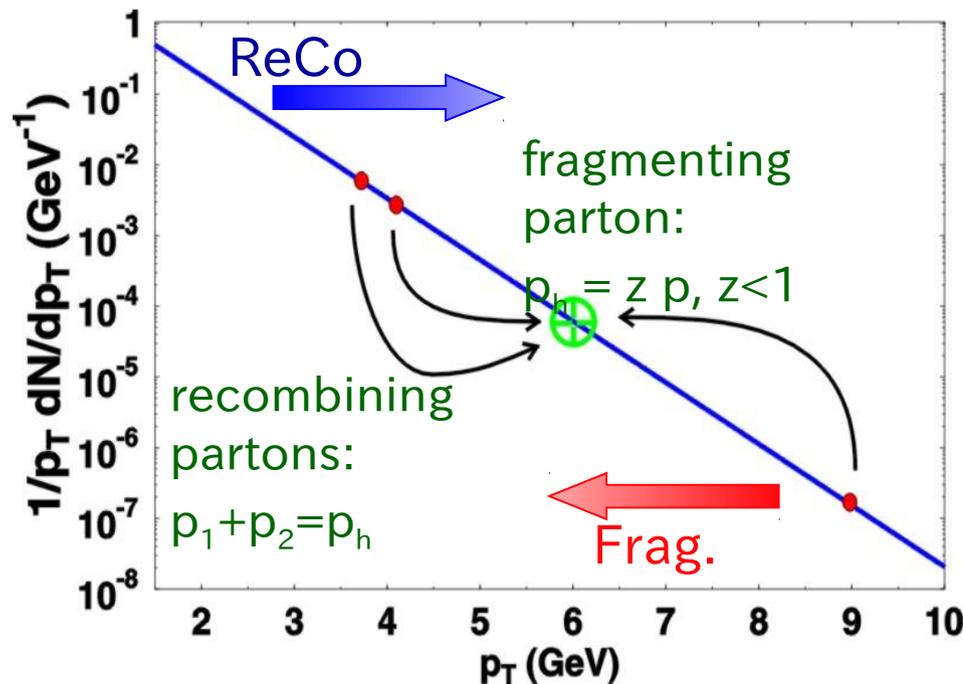
# 放射再結合のモデル化

- クォーク再結合モデル (ReCo) :  $p_T \sim 2 \text{ GeV}$  で有用



低運動量  $\sim 1 \text{ GeV}$ :  
流体 + Cooper-Frye 公式

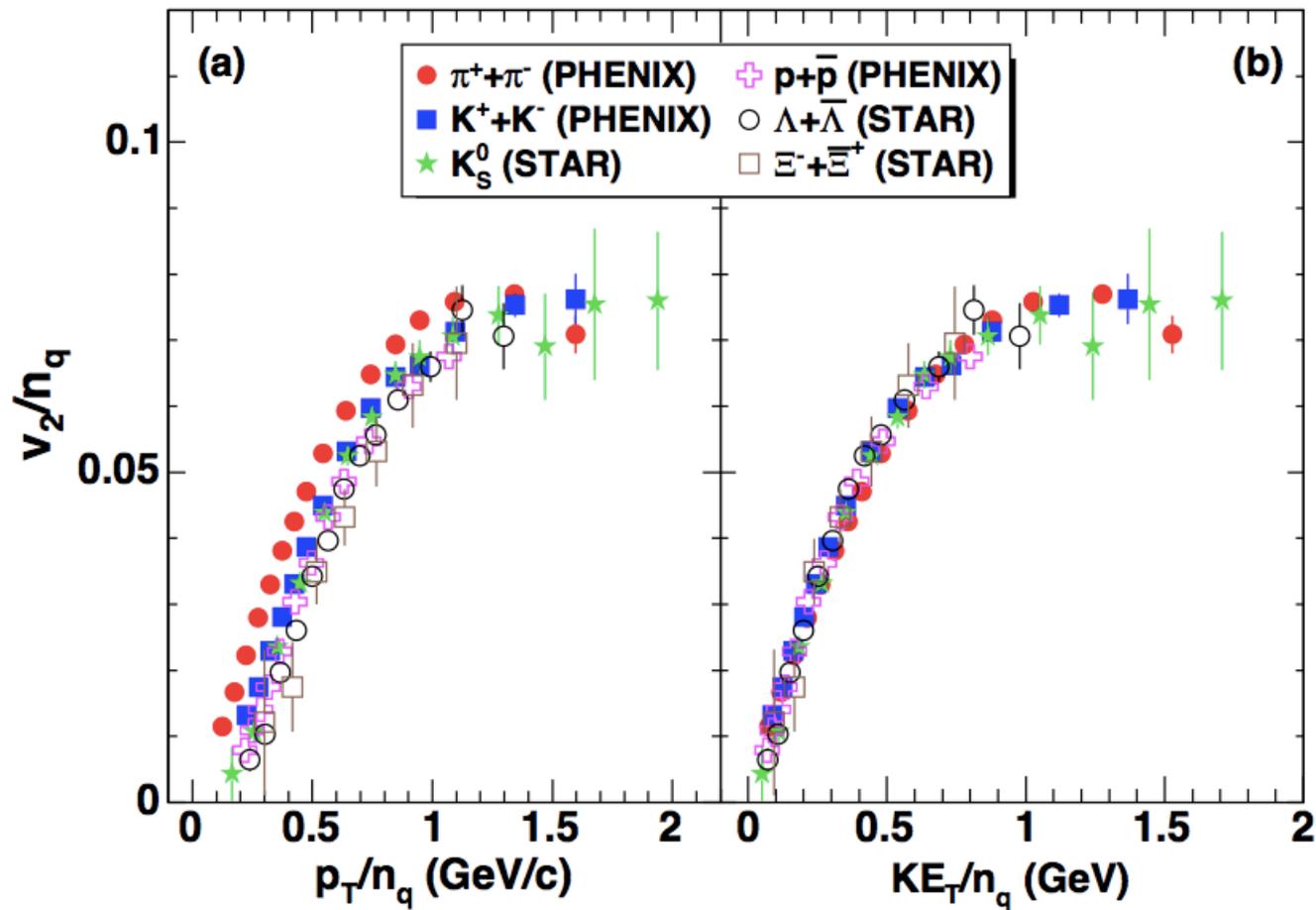
高運動量  $> \sim 3 \text{ GeV}$ :  
パートンのフラグメンテーション



Fries, Mueller, CN and Bass,  
PRC68(2003)

# クォーク数スケーリング

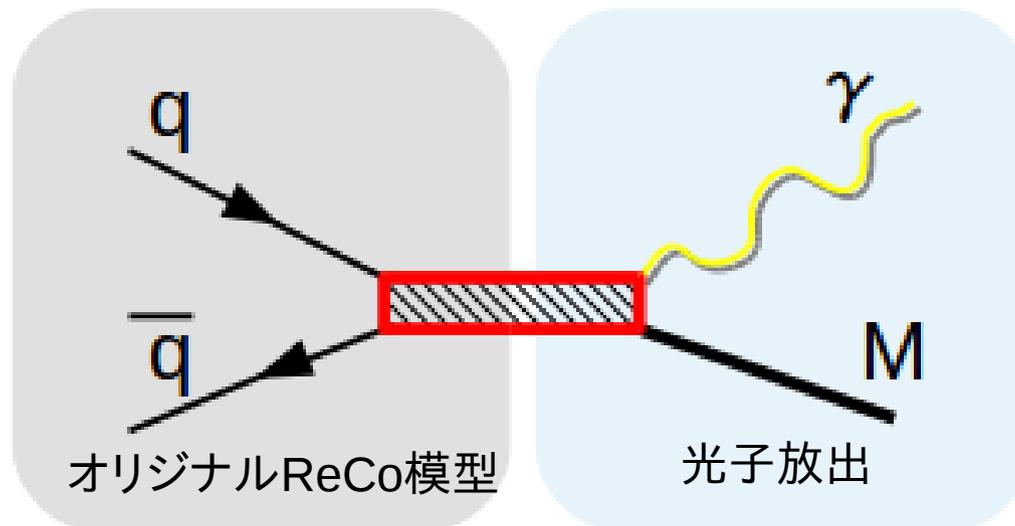
$$p_T = n_q p_T^q \quad v_2(p_T) \sim n_q v_2^q(p_T^q) = n_q v_2^q(p_T/n_q)$$



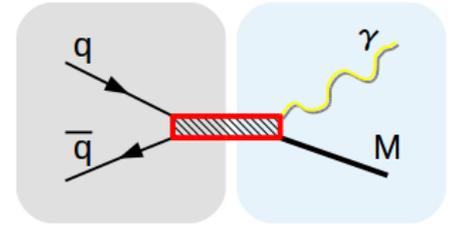
$$KE_T = \sqrt{M^2 + p_T^2} - M$$

# 放射再結合のモデル化

- クォーク再結合模型の問題点：
  - エントロピーの減少・エネルギー保存の破れ
- 放射クォーク再結合模型
  - 2段階模型：中間状態生成＋光子放出
  - 保存則を満足



# 光子生成の評価



規格化

$$E_\gamma \frac{dN_\gamma}{d^3 k_\gamma} = \kappa \int dM_* \rho(M_*) \int d^3 P \left( \frac{dN_{M_*}}{d^3 P} \right) \left( \varepsilon_\gamma \frac{dn_\gamma(M_*, P)}{d^3 k_\gamma} \right)$$

- 中間状態  $\rho(M^*)$

一般に連続スペクトル

ここでは、簡単に

$$\sim \delta(M^* - 2M_q)$$

- ReCo

クォーク分布

$$w_a(p) \sim \gamma e^{-p \cdot u / T}$$

$u$ : 流体速度場



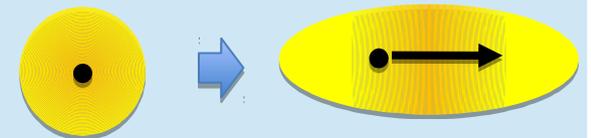
中間状態分布

$$\frac{dN_{M_*}}{d^3 P} \sim w_a(p)^2 \sim e^{-P/T_{\text{eff}}}$$

- 光子放出

$M^*$  静止系で等方

$P$  方向にブースト



# シンプルセットアップの数値結果

- 放射クォーク再結合モデルによる光子のみ

# ハドロン生成 vs 中心度

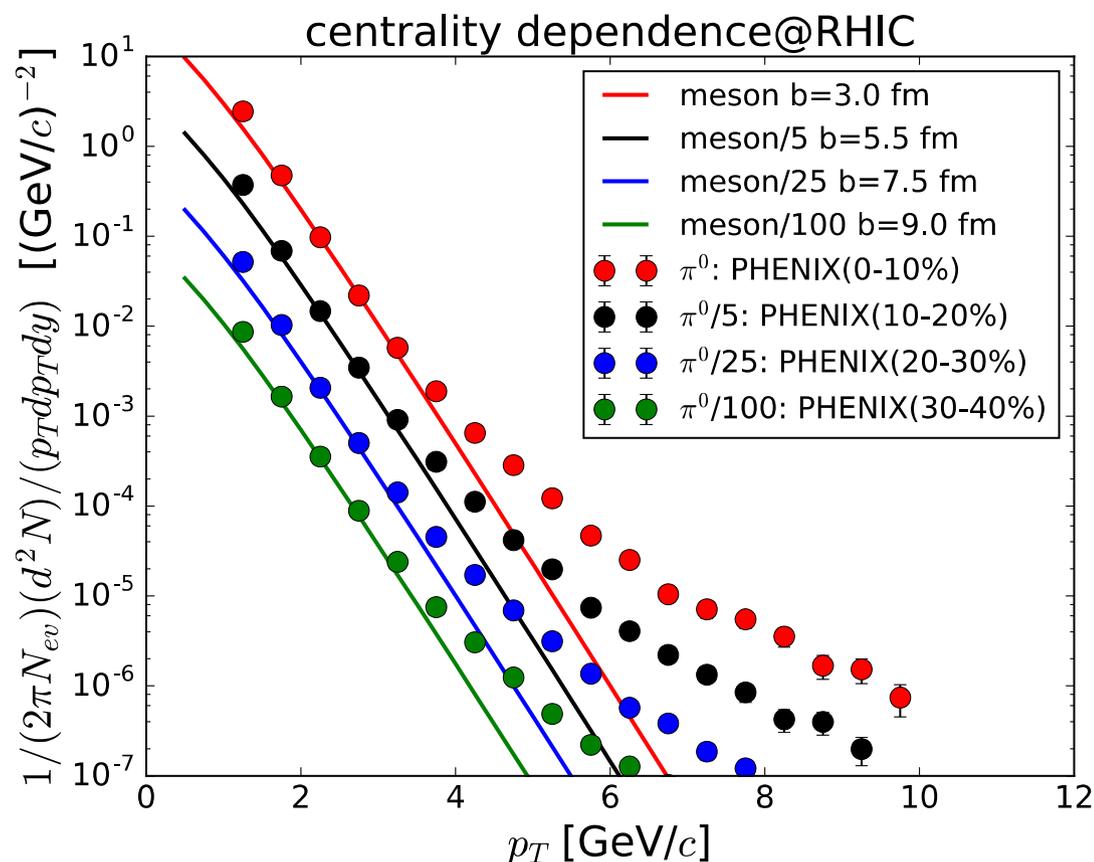
- パラメタ

$$M^* = 2M_q = 0.6 \text{ GeV}$$

$$v_T = 0.55$$

$$T_h = 155 \text{ MeV}$$

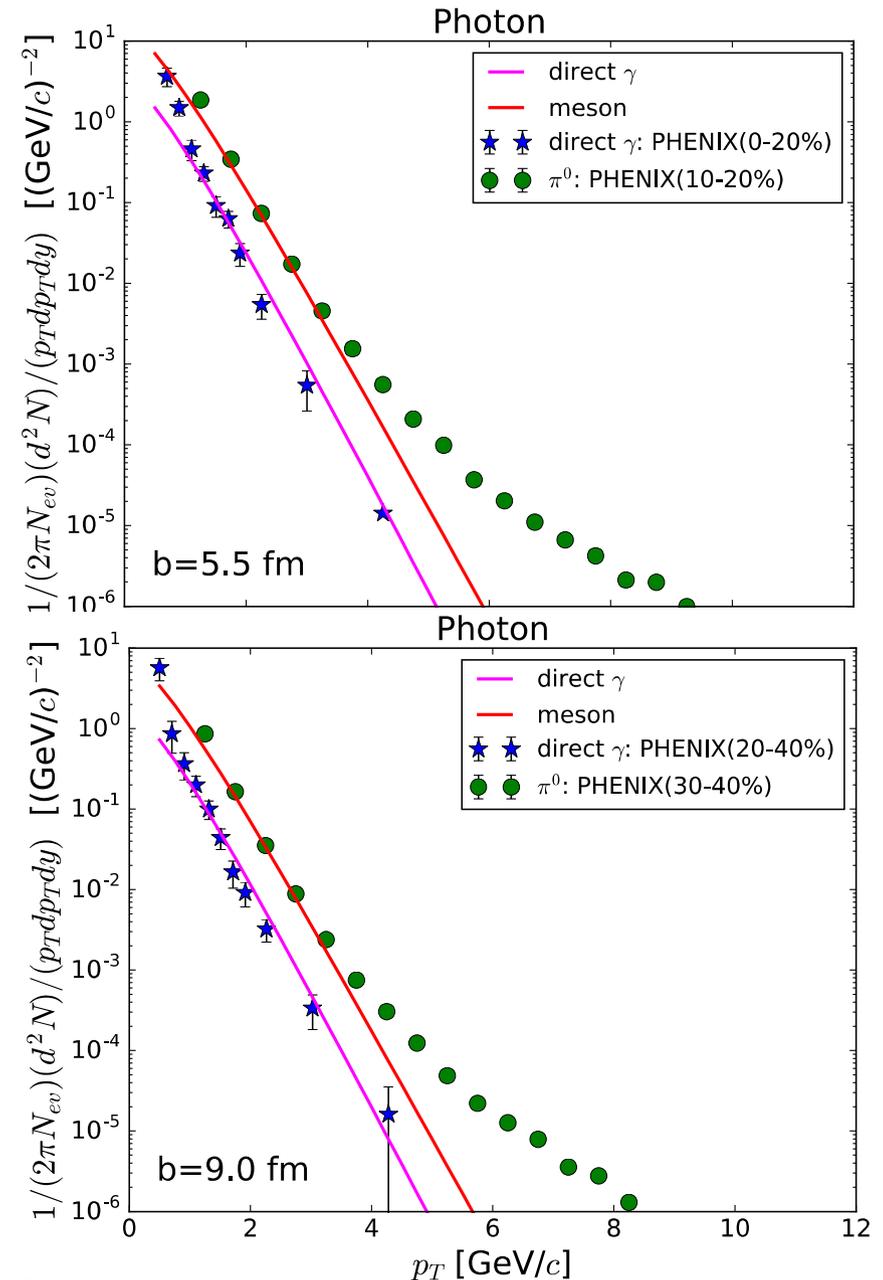
$$Y_{ud} = 1, Y_{\bar{u}\bar{d}} = 0.9$$



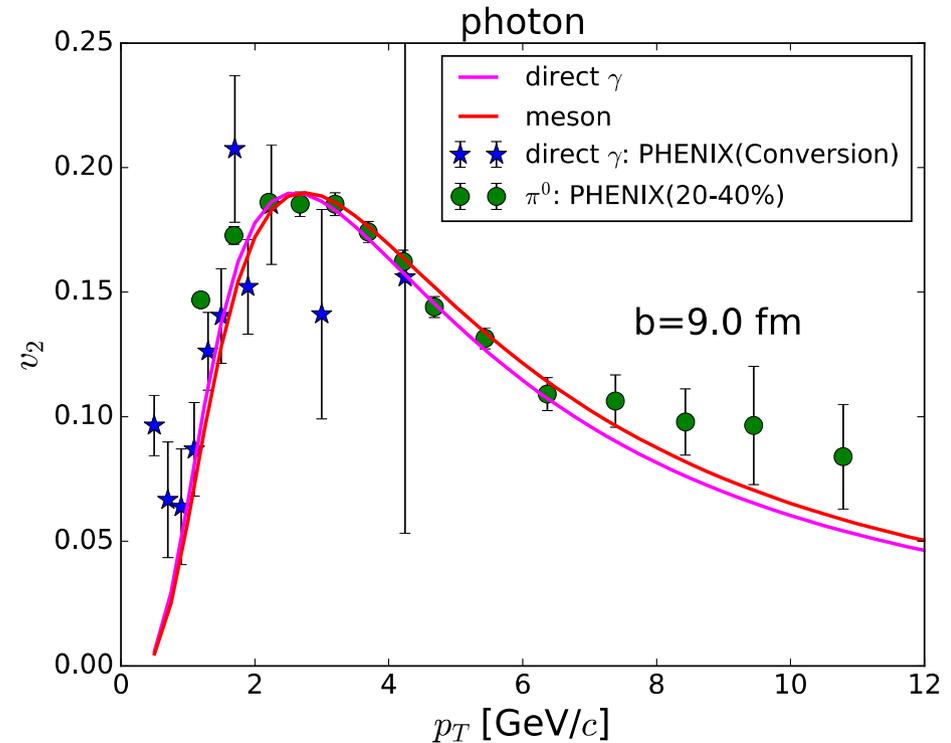
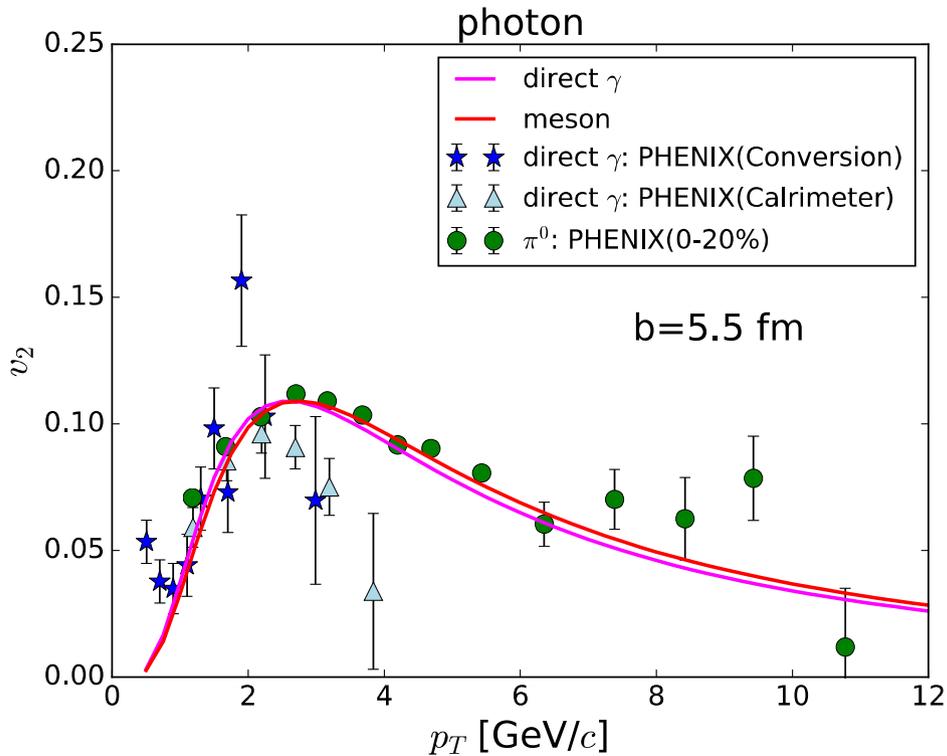
ハドロンに対するReCoの成功をたもつ

# 光子生成

- パラメタ  
 $\kappa=0.2$  (中心衝突でfix)
- 結果:  
 $T_{\text{slope}}(2-5 \text{ GeV})$   
 $M^* \dots 331 \text{ MeV}$   
 $M \dots 342 \text{ MeV}$   
 $\gamma \dots 322 \text{ MeV}$
- 光子温度も同様に青方偏位



# 光子の楕円フロー $v_2$

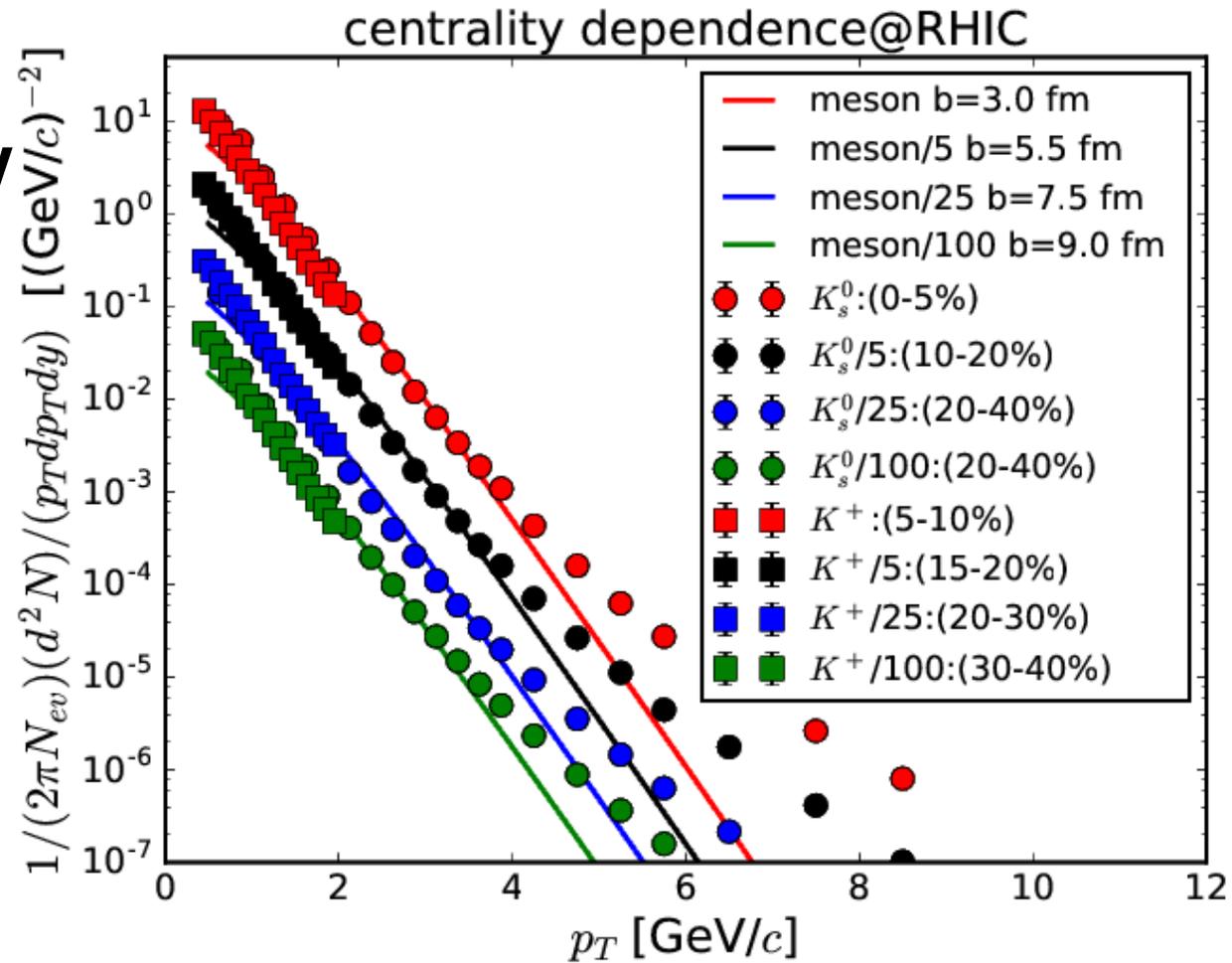


- パラメタ: パートン $v_2$   $v_2^q(p_T) \propto \frac{1}{1 + (p_T/p_0)^3}$   $p_0 = 1.2$  GeV
- 結果:  $\pi$ 、 $\gamma$ 同程度の $v_2$ をもつ

# K 収量 vs 中心度

- パラメタ: K

$$M^* = M_q + M_s = 0.8 \text{ GeV}$$



# ( $\pi, \gamma$ )、( $K, \gamma$ )

- パラメタ:  $K$

$$M^* = M_q + M_s = 0.8 \text{ GeV}$$

$$(\kappa_\pi = 0.1, \kappa_K = 0.67)$$

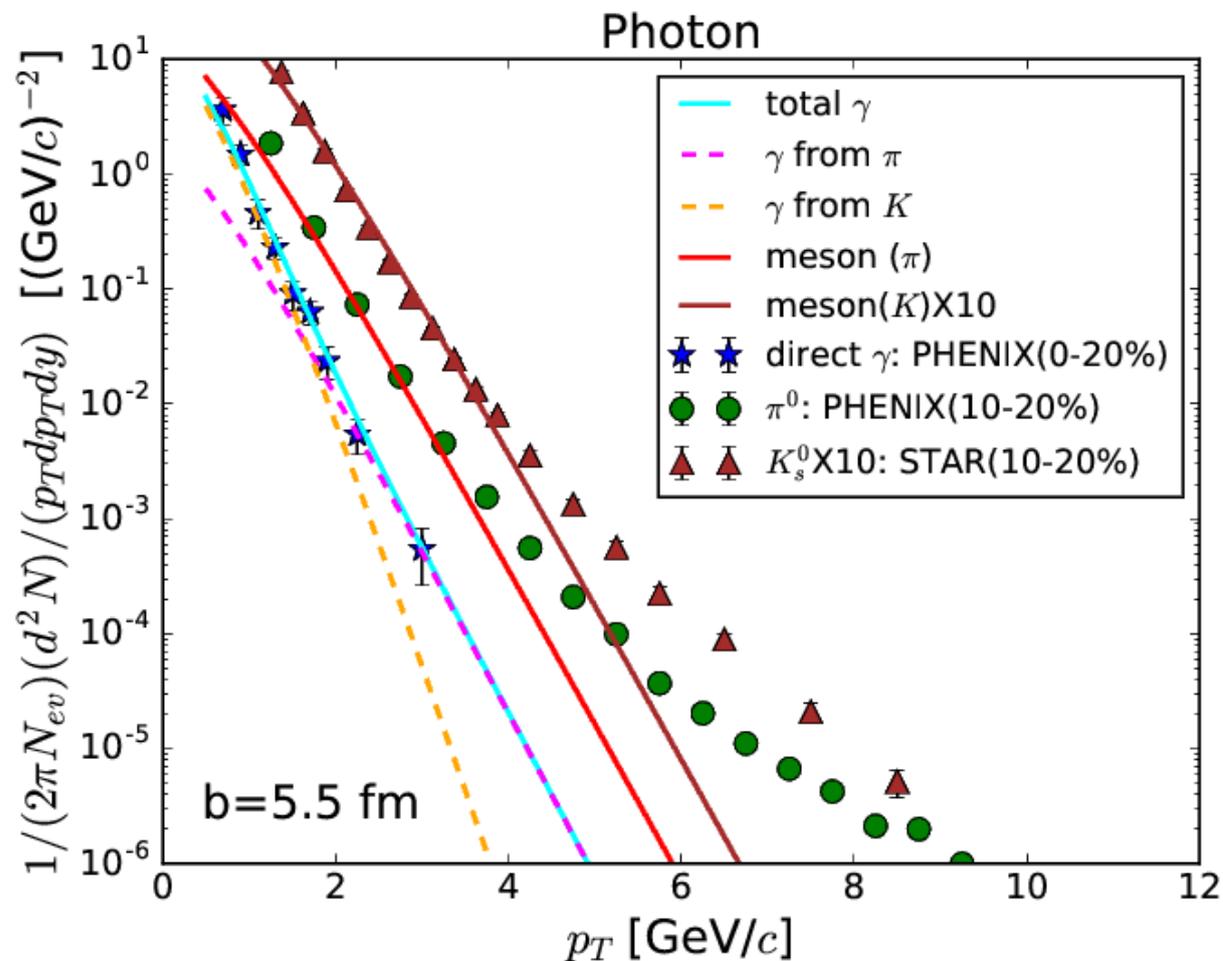
- 結果:

$$T_{\text{slope}}(2-5 \text{ GeV})$$

$$K \dots 360 \text{ MeV}$$

$$\gamma_K \dots 206 \text{ MeV}$$

$$(280 [0.5-1.2])$$



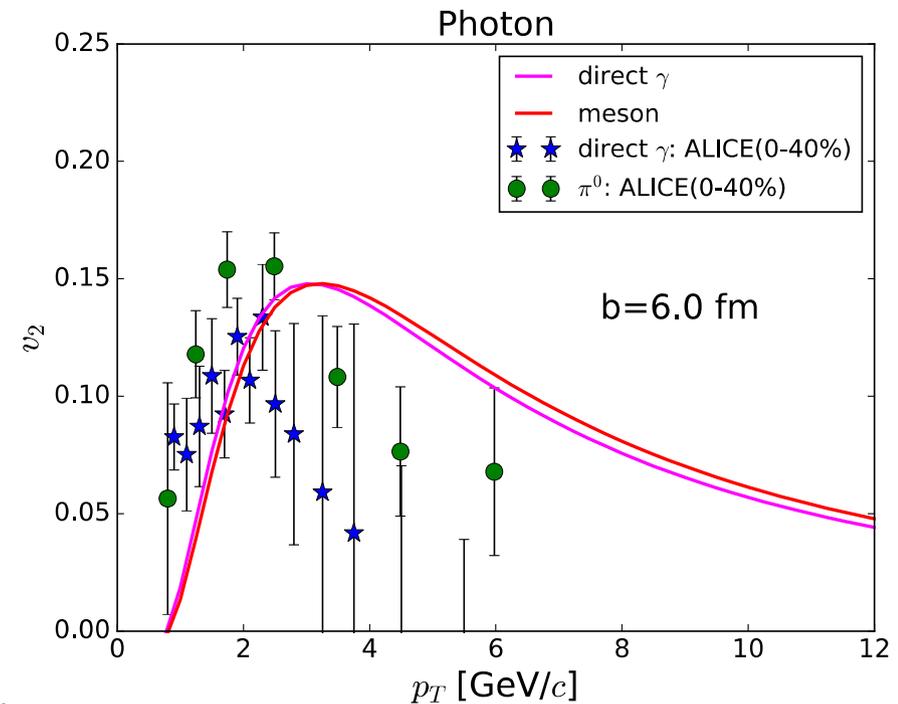
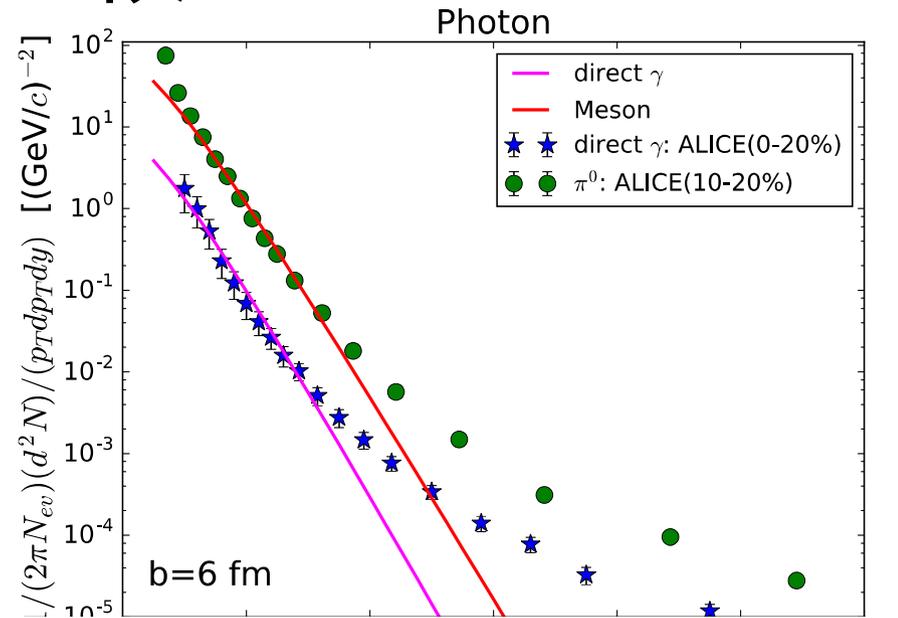
# LHCでの比較

- パラメタ

$$v_T = 0.65$$

$$T_h = 155 \text{ MeV}$$

$$Y_q = 1$$



# 展望

- **HIC**全ての段階から光子生成がある
- ハドロン化過程放射の定量化が必須
  
- 観測と理論の不一致を埋める可能性
  - 光子の収量・集団流れともに+に作用
- 放射再結合モデルの精緻化
  - バリオン、中間状態の扱い、..., **etc.**
- 異なる定式化の模索 Young-Pratt, Campbell
- 衝突事象シミュレーションへ