



熱直接光子は見えるのか？

Hisayuki Torii, Hiroshima Univ.

2007/12/21

Heavy Ion Pub @ 阪大

目次

- 光子プローブに期待すること
- 直接光子の測定方法
- 光子をプローブとしたQGP研究からこれまで何を学んだのか？
- LHCにおける光子測定
- まとめ

注意) 検出器の話はほとんど出てこないなので最後まで聞いてね

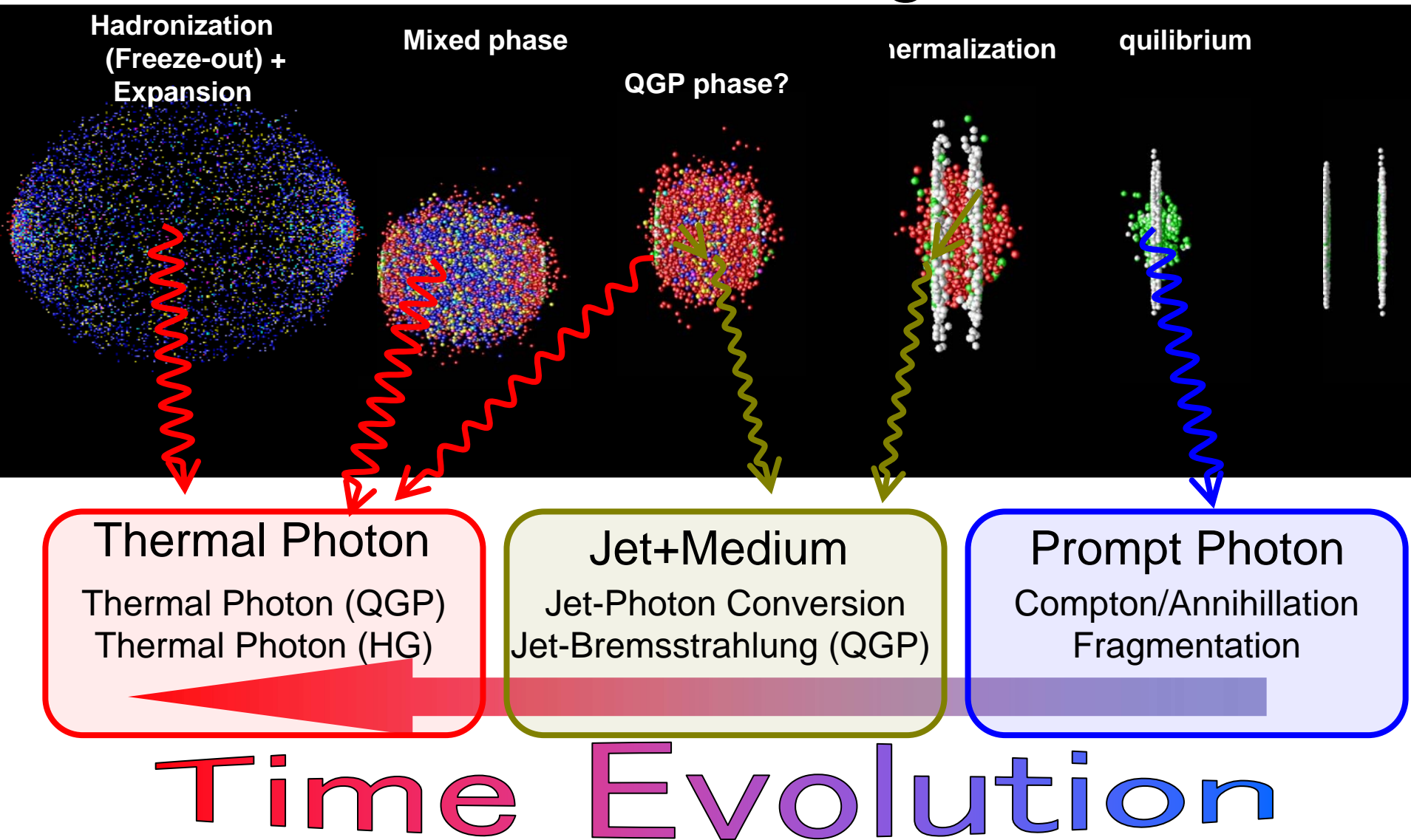
概要

- まずは、非重イオンハドロン衝突(陽子-陽子など)からの直接光子(QCD光子)生成について簡単にまとめます。次に、重イオン衝突におけるクォークグルーオンプラズマの物理を進めるにあたり、直接光子がどのような役割を果たしていくと期待されているのか、を出来るだけ分かりやすく説明したいと思います。その上で、SPS,RHICにおけるこれまでの結果を用いて実験並びに理論的側面から何が分かったのか、何が分かっていないのかについて、多少個人的な見解も交えながら議論をしていきたいと考えております。このトークの主題であるLHCにおける光子プローブについて、その実験的可能性について報告すると共に、幾つかの理論予想について紹介していきたいと思います。
- ここでは、特に若手の皆さんに興味を持っていただけるように、基本的な知識ならびに議論から進めて行く計画です。その中で、特に理論の皆様、直接光子を測定する上での実験手法や苦勞について雰囲気伝われば幸いです。さらに、このトークを通して、QGP研究での実験-理論間の相互協力の重要性について理解を求めると共に、我々としてどういう研究協力が可能か、という議論へ向けてのスタートラインを提供できれば、と考えております。

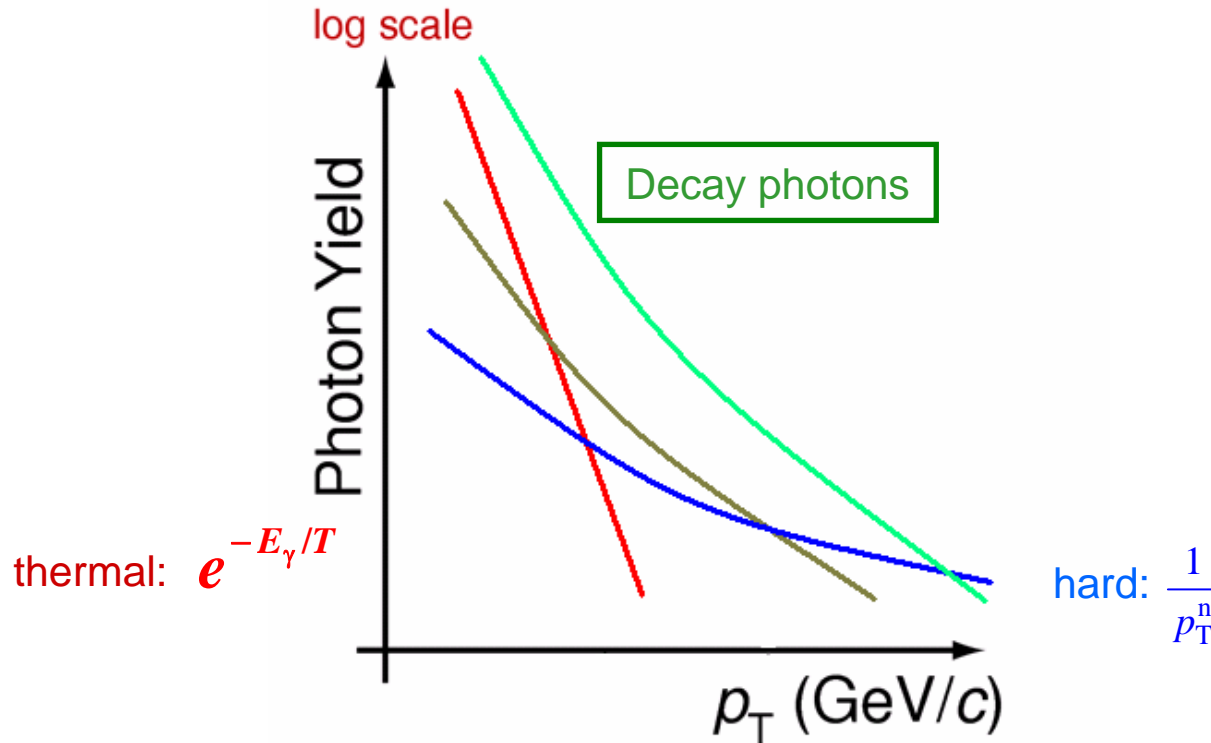


光子プローブに期待すること

Photons from Multi Stage



Schematic Spectrum in A+A



Thermal Photon

Thermal Photon (QGP)
Thermal Photon (HG)

Jet+Medium

Jet-Photon Conversion
Jet-Bremsstrahlung (QGP)

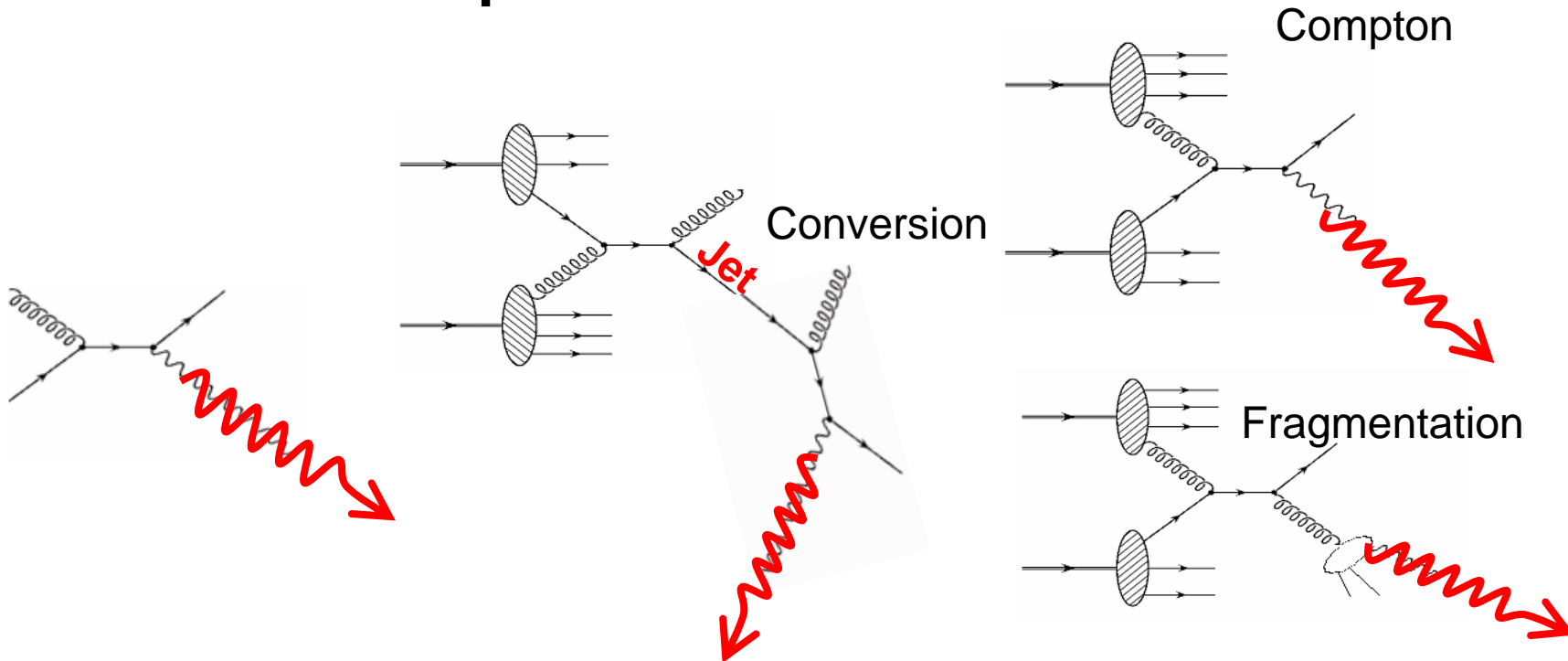
Prompt Photon

Compton/Annihilation
Fragmentation

+ Decay photon as huge background

The decay photon background strongly reduced due to jet suppression in A+A

Schematic Spectrum in A+A



Fries et.al.PRL90(2003)132301

Thermal Photon

Thermal Photon (QGP)
Thermal Photon (HG)

$p_T^\gamma \sim T_{\text{medium}}$
 $\sim 1 \text{ GeV (QGP)}$
 $\sim 200 \text{ MeV (HG)}$

Jet+Medium

Jet-Photon Conversion
Jet-Bremsstrahlung (QGP)

$p_T^\gamma \sim p_T^q$ (Conversion)
 $< p_T^q$ (Brems)

Prompt Photon

Compton/Annihilation
Fragmentation

$p_T^\gamma \sim \Lambda_{\text{QCD}}$
 $T_{\text{medium}} \sim 1 \text{ GeV (QGP)}$

直接光子測定から分かること

(QGP, HG)の
温度

Mediumのエネルギー密度
(でいいのかしら?)

Compton
パートン分布
& Ncoll Scaling
のチェック

Fragmentation
ジェットクエンチ
によりなくなる?

Fries et.al.PRL90(2003)132301

Thermal Photon

Thermal Photon (QGP)
Thermal Photon (HG)

Jet+Medium

Jet-Photon Conversion
Jet-Bremsstrahlung (QGP)

Prompt Photon

Compton/Annihilation
Fragmentation

$p_T^\gamma \sim T_{\text{medium}}$
~ 1 GeV (QGP)
~ 200 MeV (HG)

$p_T^\gamma \sim p_T^q$ (Conversion)
< p_T^q (Brems)

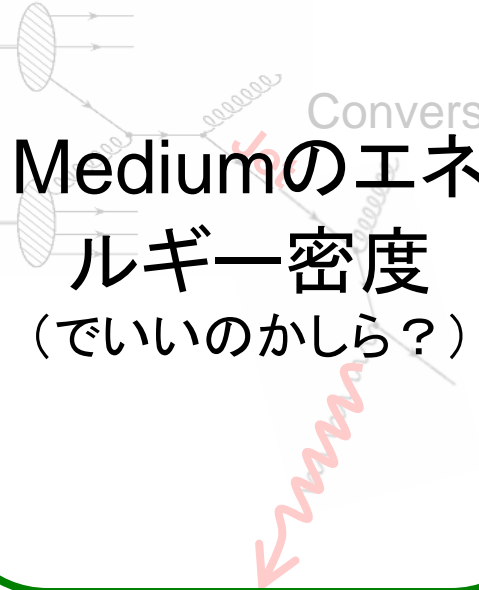
$p_T^\gamma \sim \Lambda_{\text{QCD}}$
 $T_{\text{medium}} \sim 1 \text{ GeV}$ (QGP)

直接光子測定から分かること

(QGP, HG)の
温度



Mediumのエネルギー密度
(でいいのかしら?)



Compton
パートン分布
& Ncoll Scaling
のチェック



Fragmentation
ジェットクエンチ
によりなくなる?



直接光子はQGP研究の宝石箱や！



直接光子の測定方法

直接光子測定は難しい？

後々のために x_T の定義だけ

□ $x_T = p_T/(\sqrt{s}/2)$

■ 直接光子の主なバックグラウンド

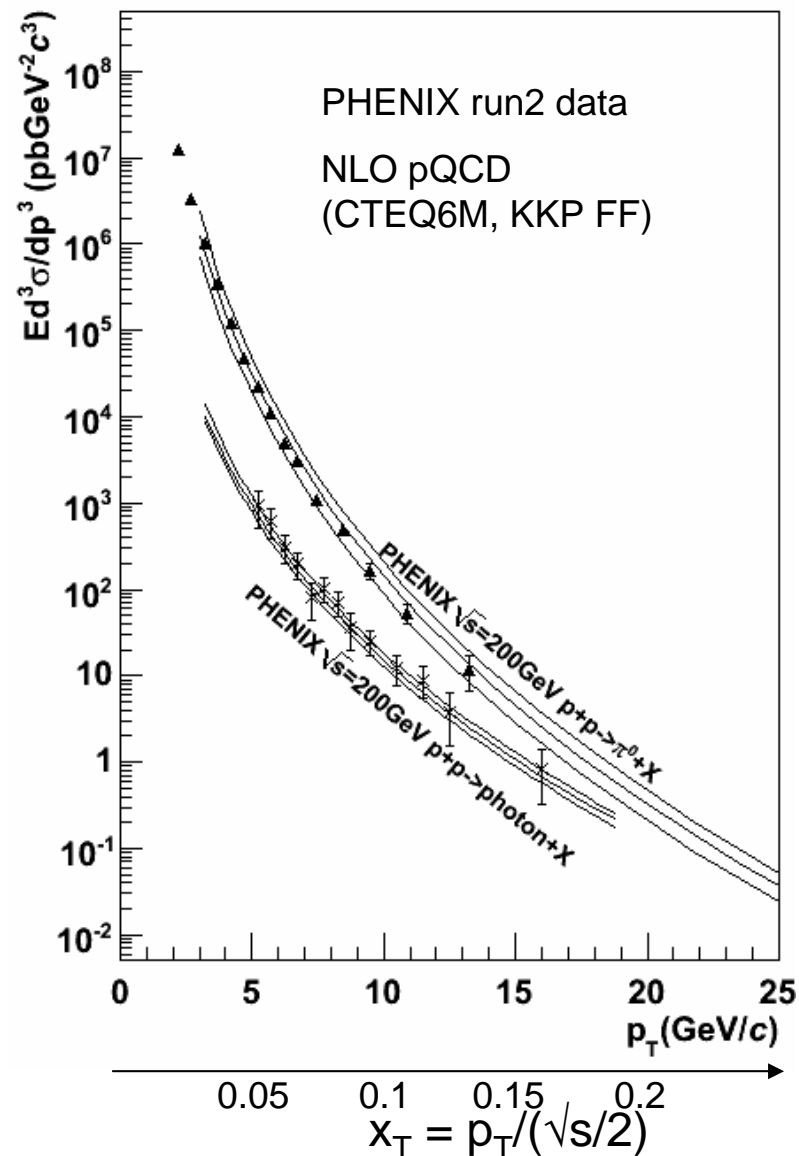
ド: π^0

□ Low $p_T < 20 \text{ GeV}/c$ の領域で、 π^0 の生成量が多い。

■ 1/20 @5GeV/c

■ → 実際には、 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊のため、1/5-1/10程度しか直接光子は生成されない。

主に低いエネルギー領域にて実験的な困難を生じる。



直接光子測定方法

■ 直接測定

□ 統計的手法

① バックグラウンドを全部差し引く

- ConverterやDouble Ratioを使った実験的な工夫あり。→次ページへ

□ 非統計的手法

② 光子毎に直接光子かどうかの判断をする

- Isolation Cut →3ページ先へ

□ ハイブリッド手法

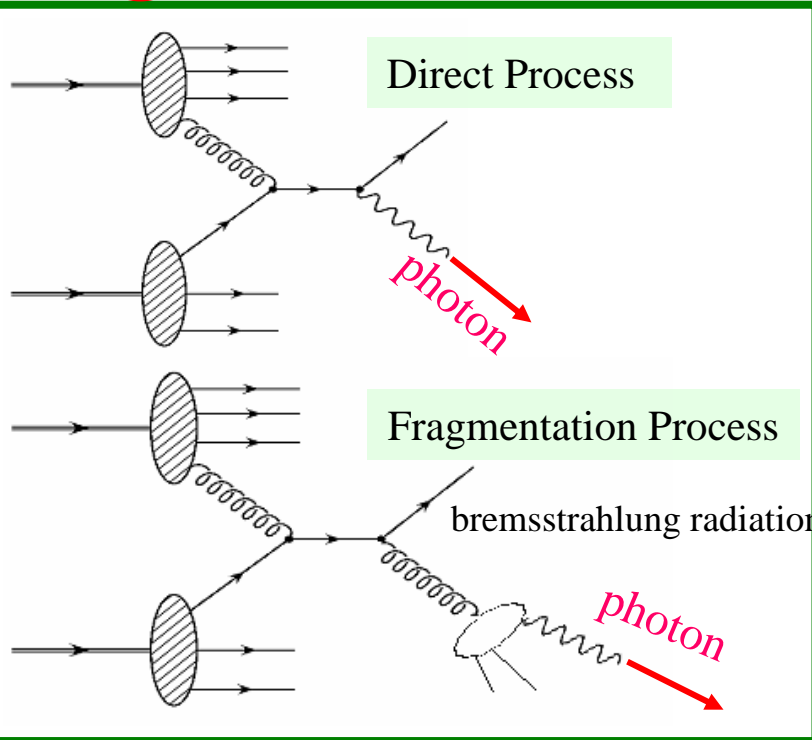
③ 光子毎に π^0 (や η)崩壊からきた光子でない判断をする。

他のバックグラウンドは統計的手法で差し引く。→4ページ先へ

■ 間接測定

④ インターナルコンバージョン法→5ページ先へ

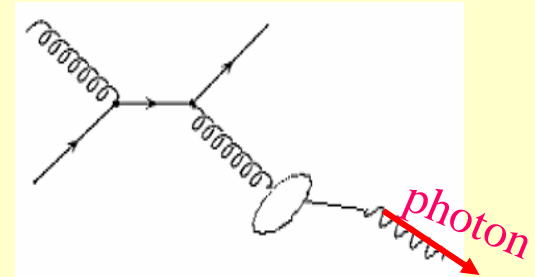
①測定方法 – 直接測定、統計的手法



実験的に同定することは不可能

バックグラウンド

衝突点以外からの光子
中性・荷電ハドロンが光子に見えてしまう
検出器のノイズ
ハドロン(π^0, η, ω 等)崩壊から来る光子



すべてのバックグラウンドを特定

すべてのバックグラウンドを差し引いた残りを
直接光子生成の信号とする

①測定方法 – 直接測定、統計的手法

■ 実験的な工夫

$$\gamma_{direct} = \gamma_{all} - \gamma_{decay} = \left(1 - \frac{\gamma_{decay}}{\gamma_{all}}\right) \times \gamma_{all}$$

$$= \left(1 - \frac{1}{R}\right) \times \gamma_{all}$$

$$\text{with } R = \frac{\left(\frac{\gamma_{all}}{\pi^0}\right)_{meas}}{\left(\frac{\gamma_{decay}}{\pi^0}\right)_{sim}}$$

Systematic Errors partially cancel

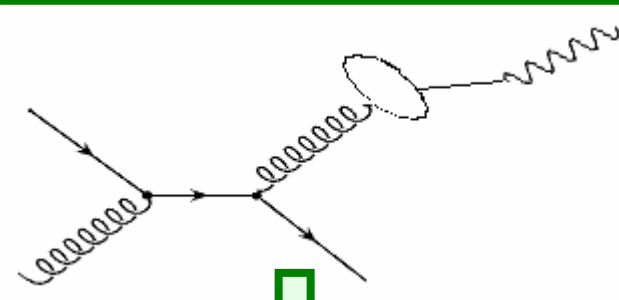
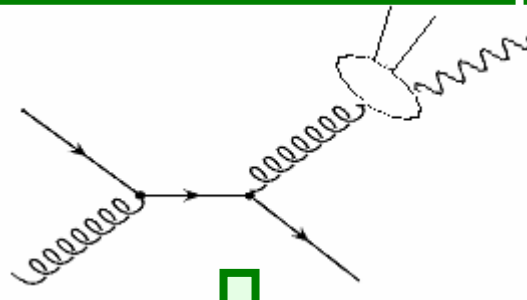
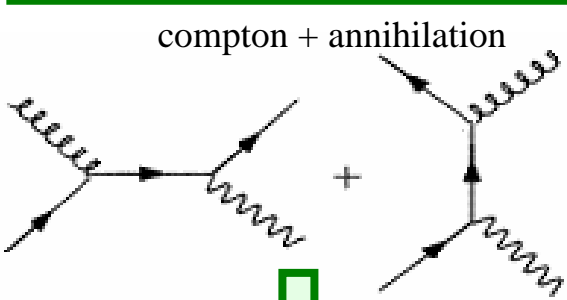
②測定方法 – 直接測定、非統計的手法

(1)Signal(direct)

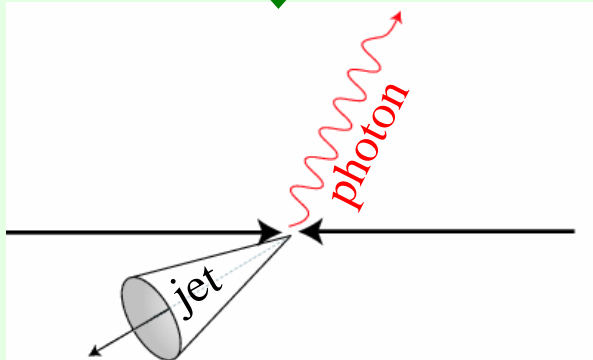
(2)Signal(fragmentation)

(3)Background(hadron decay)

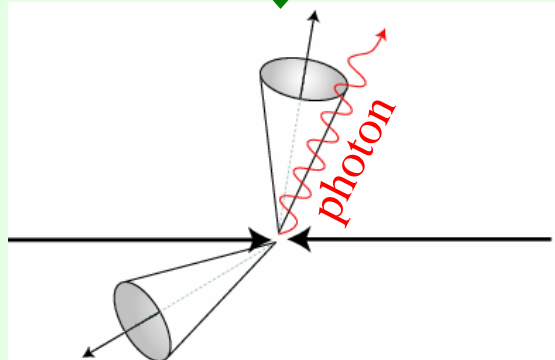
compton + annihilation



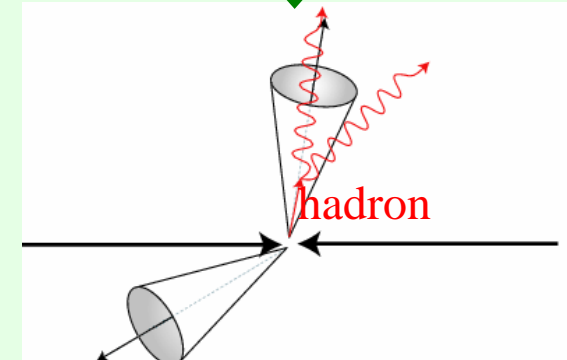
実験系での ↓ イメージ



約30% @ 10GeV



約10% @ 10GeV

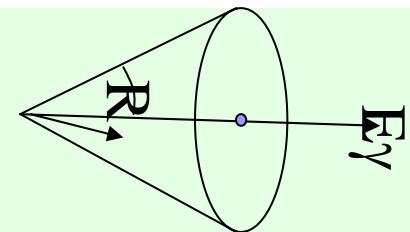


約60% @ 10GeV

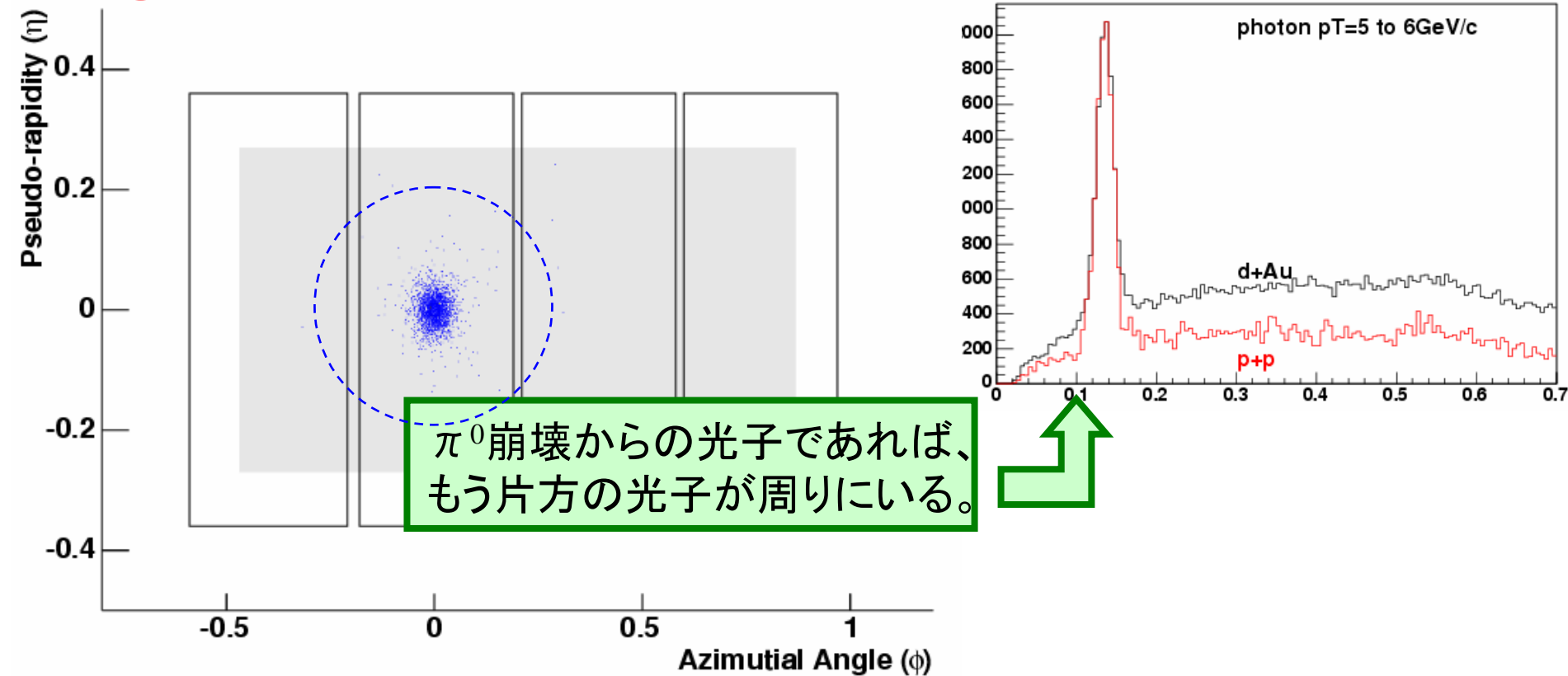
Isolation cut to reduce background

$$R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2} < 0.5$$

$$E_{sum}(R < 0.5) < E_\gamma \times 0.1$$



③測定方法 – 直接測定、ハイブリッド



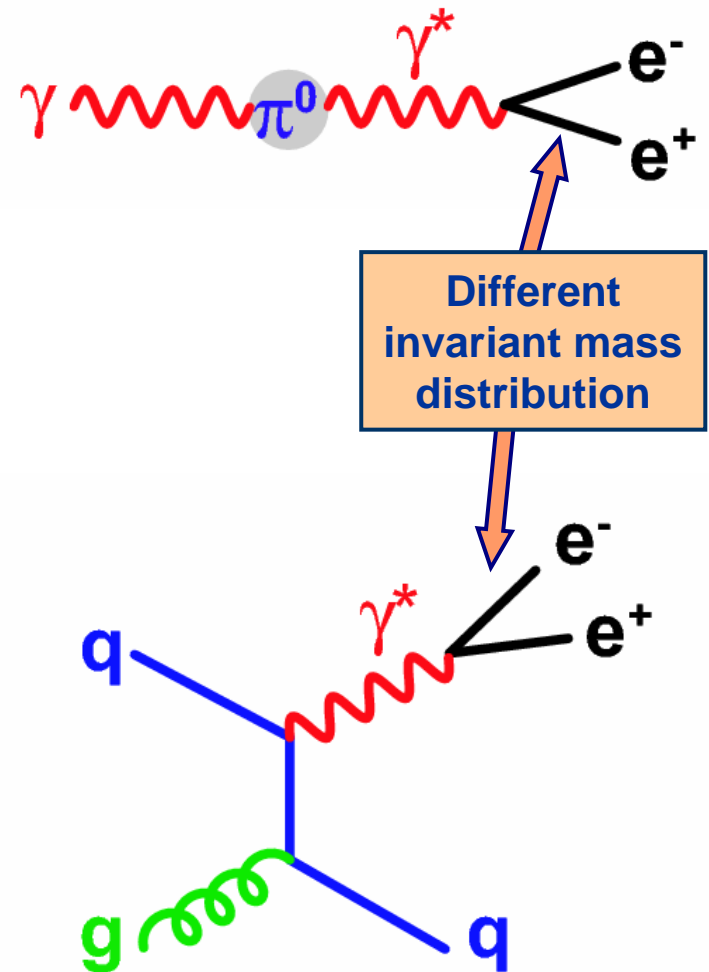
π^0 崩壊からの光子であれば、もう片方の光子が周りにいる。

ターゲットとなる光子と周りのすべてとの組み合わせを取ることで、 π^0 中間子からのバックグラウンドの寄与を差し引くことができる。

→ 約70%の π^0 崩壊からの光子を同定することが可能

④測定方法 – 間接測定

- Any source of real photons emits virtual photons with small invariant mass
- The distribution of the virtual photon mass depends on the emitting source
- Phase space at higher inv. masses limited for virtual photons from hadron decays
- Signal/background for virtual direct photons significantly improves with increasing mass



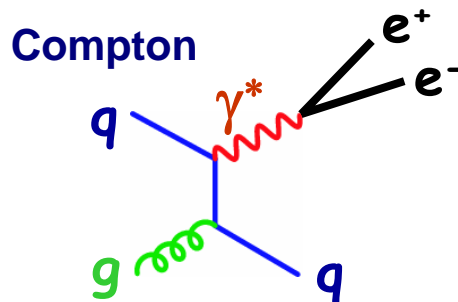
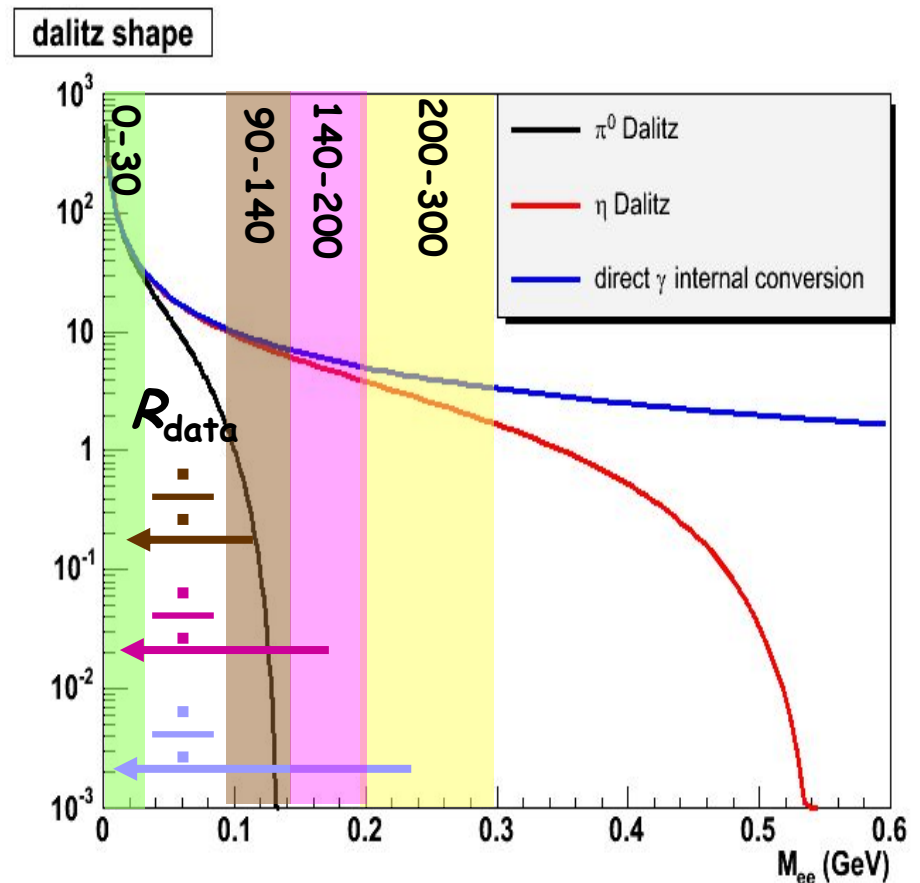
④測定方法 – 間接測定

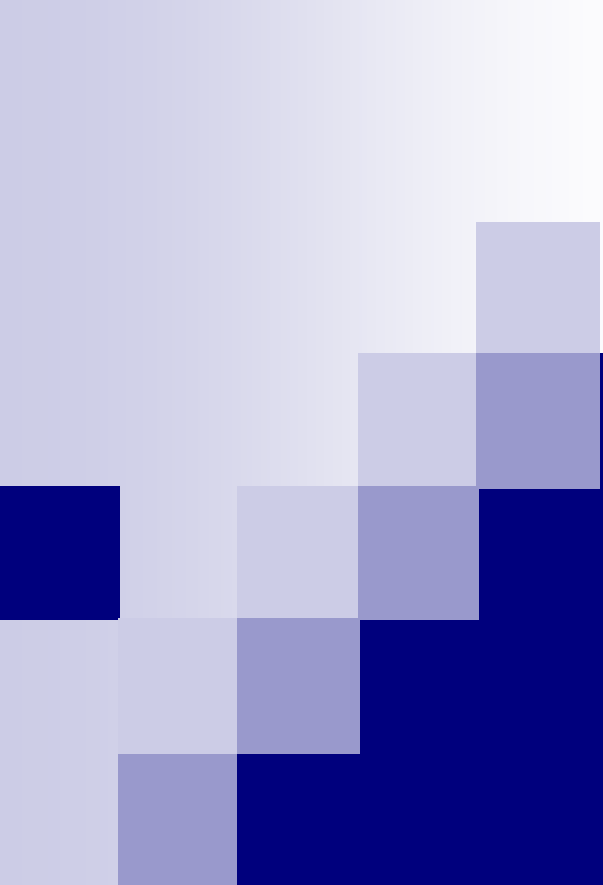
$$\frac{1}{N_\gamma} \frac{dN_{ee}}{dm_{ee}} = \frac{2\alpha}{3\pi} \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{m_{ee}^2}} \left(1 + \frac{2m_e^2}{m_{ee}^2}\right) \frac{1}{m_{ee}} |F(m_{ee}^2)|^2 \left(1 - \frac{m_{ee}^2}{M^2}\right)^3$$

Kroll-Wada Formula

phase space factor 1 for high $p_T \gamma$

- any source of real photons produces virtual photons with very low invariant mass
- Ratios of M_{inv} bins to lowest one (R_{data})
- If no direct photons: the ratios become exactly what can be calculated from Dalitz decay formulae above
- If excess over calculation: direct photons

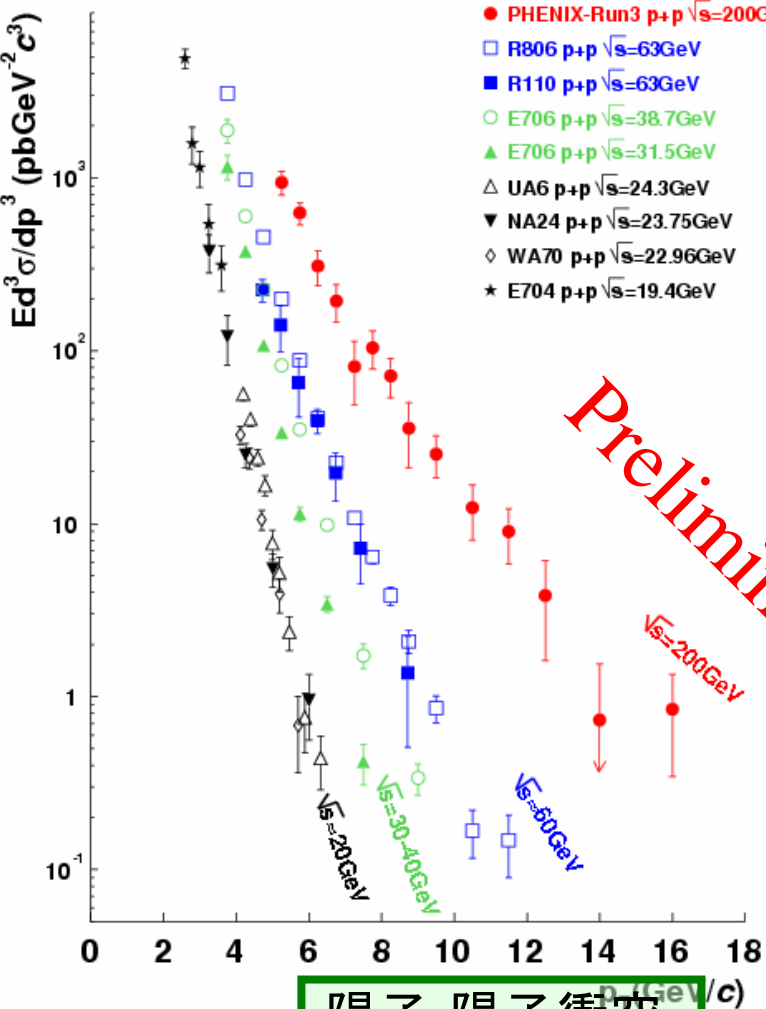




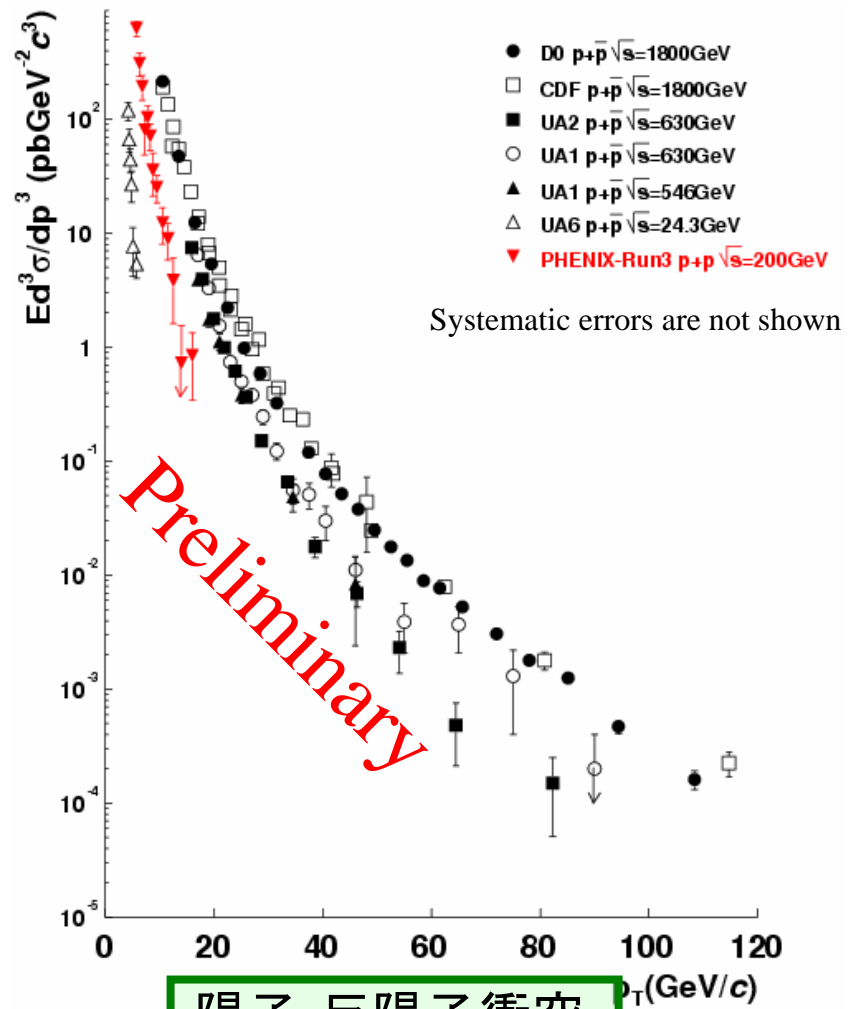
光子をプローブとしたQGP
研究からこれまで何を学ん
だのか？

History of $p+p/p\bar{p} \rightarrow \gamma$

- 過去の実験、陽子陽子、陽子反陽子衝突実験との比較。
 - ほとんど何かしらのisolation cutが入っている。
- クロスセクションは \sqrt{s} とともに大きくなっている。



陽子-陽子衝突



陽子-反陽子衝突

Systematic errors are not shown

x_T スケーリング則

- $x_T = p_T / (\sqrt{s}/2)$

- QCD理論によると、以下の仮定

- PDFとFFの Q^2 スケーリング
- Coupling constant(α_s)が Q^2 に非依存。

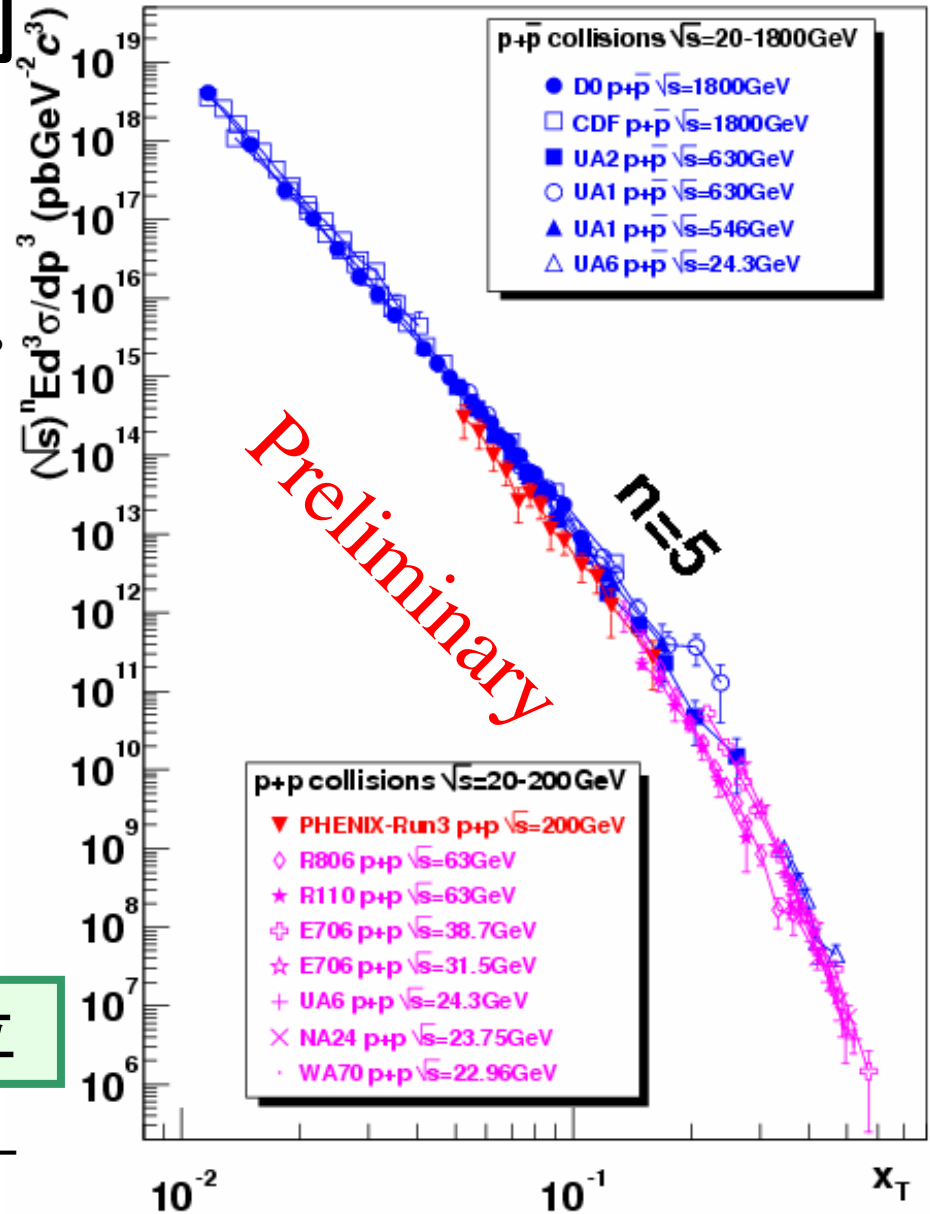
$$\sigma = (\sqrt{s})^{-n} \times F(x_T)$$

n =定数。 $x_T = 2p_T / \sqrt{s}$

- 相互作用項と構造を表す項に分離
→ x_T スケーリング
- 定数 n に対する予想
 - Leading order $n=4$
 - Next-to-leading order: $n=4+\alpha$

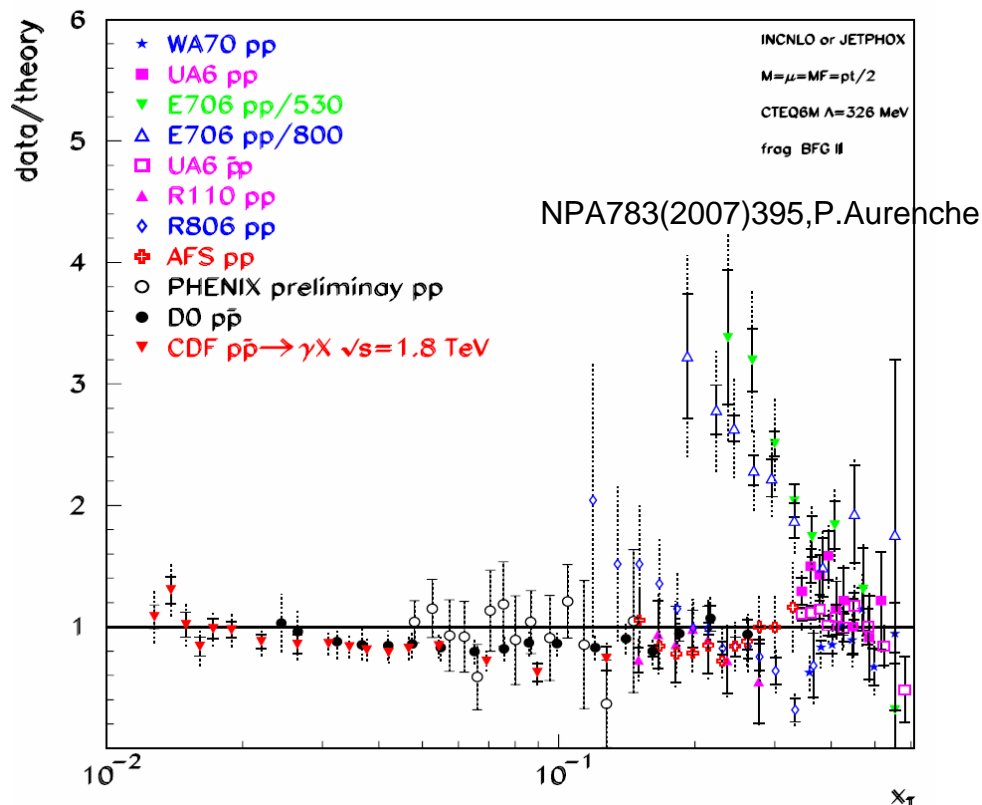
x_T スケーリング則 $n=5$ 付近で成立

陽子反陽子衝突でも同様のスケーリング則が得られたことは、低い x_T の領域でクォークと反クォーク分布が似ているためではないかと推測される。



Prompt Photon in p+p/pbar

Photon is penetrating probe since it's lower cross section with matter



直接光子はパートン構造を知る上で良いプローブである

と、誰もがいうけど、CTEQ他のパートン分布決定に入力として入っていないのも事実。

QGP探索の歴史

■ Bevalac @LBNL

□ $p=0.8$ GeV/A, $\sqrt{s_{NN}}=1.8$ GeV

■ E802/859/866 @AGS-BNL

□ $p=14.6$ GeV/A, $\sqrt{s_{NN}}=5.4$ GeV

■ NA44/WA98 @SPS-CERN

□ $p=160$ GeV/A, $\sqrt{s_{NN}}=17$ GeV

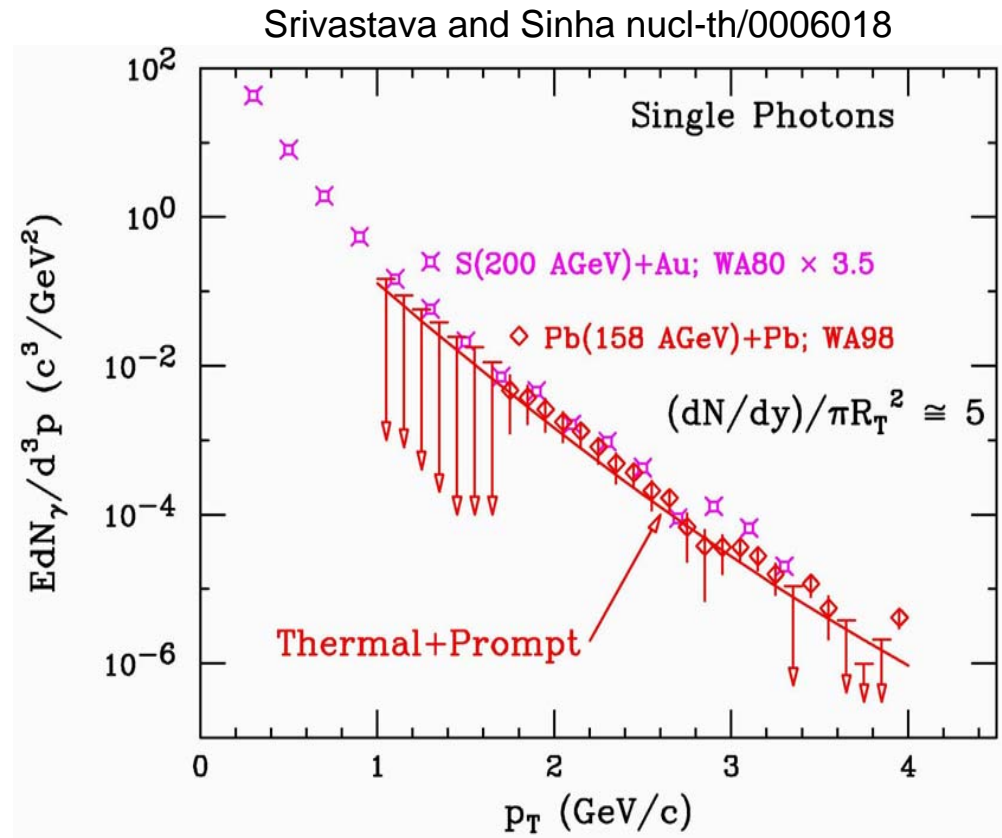
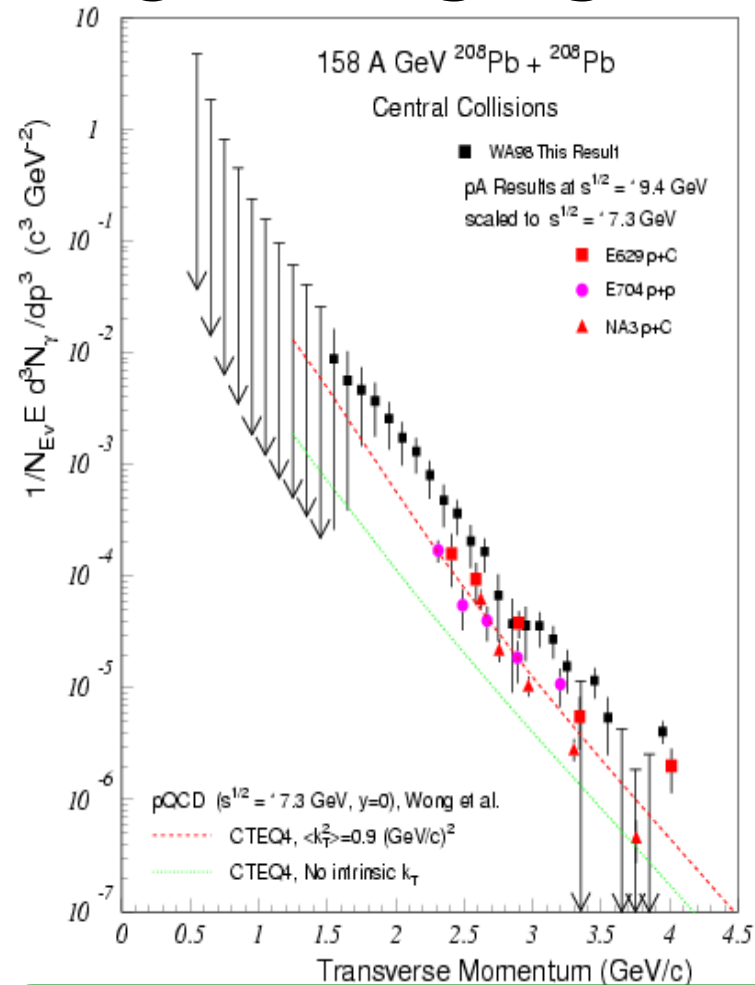
■ PHENIX @RHIC-BNL

□ $p=100+100$ GeV/A, $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV

■ ALICE @LHC-CERN

□ $p=2750+2750$ GeV/A, $\sqrt{s_{NN}}=5500$ GeV

CERN-SPS-WA98: Pb+Pb $\sqrt{s_{NN}}=17$ GeV

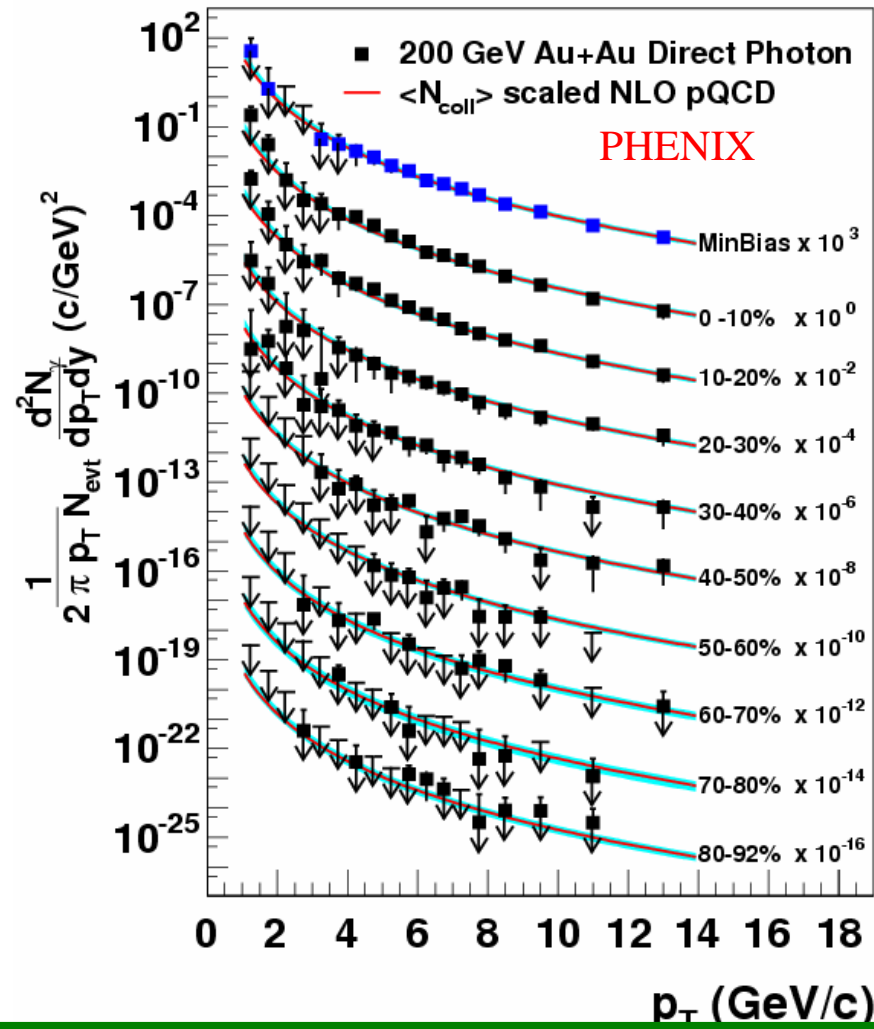


Hydro calculations :
 Prompt + QGP \rightarrow Mixed phase \rightarrow HG

Prompt Photonだけでは説明できないEnhancementあり

QGPシナリオとconsistent

BNL-RHIC-PHENIX: Au+Au $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV

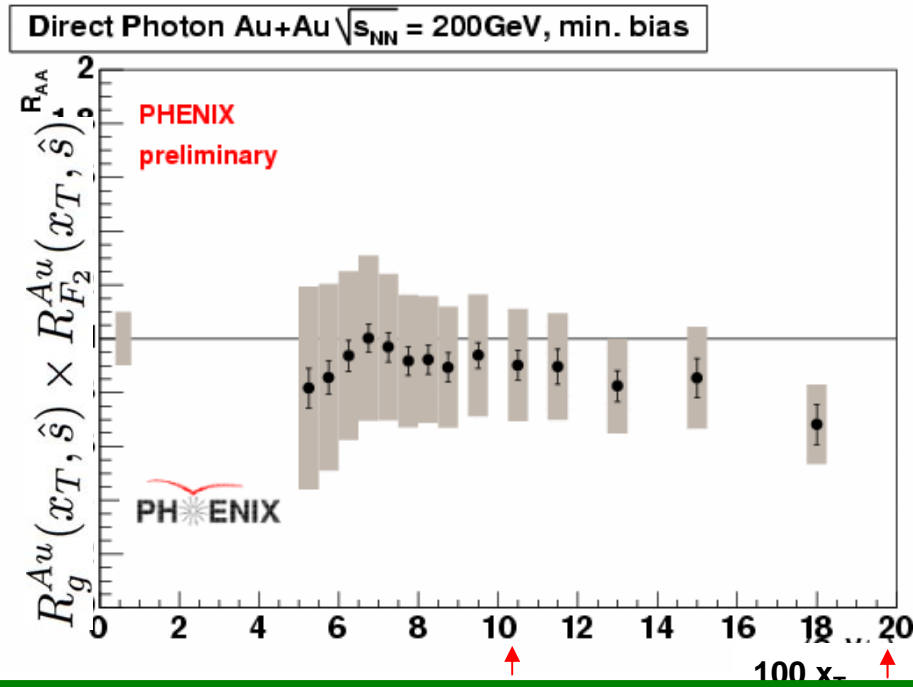


p+p衝突の重ね合わせで記述できる。

BNL-RHIC-PHENIX: Prompt Photon

Au+Au minimum bias $gq \rightarrow \gamma q$ is main contribution

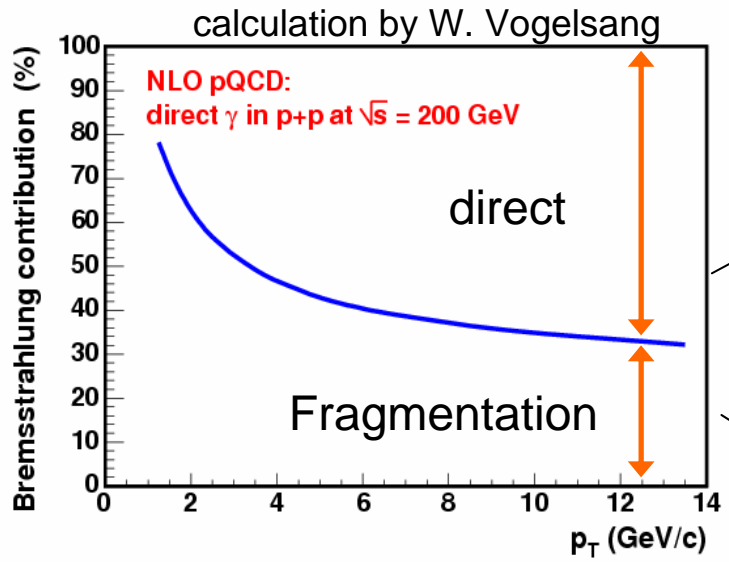
$$R_{AA} = \frac{d^2\sigma_\gamma^{AA}/dp_T^2 dy_\gamma}{AA d^2\sigma_\gamma^{pp}/dp_T^2 dy_\gamma} \approx \left(\frac{F_{2A}(x_T)}{AF_{2p}(x_T)} \times \frac{g_A(x_T)}{Ag_p(x_T)} \right)$$



x=0.1から0.2にかけて20%の減少がみられた
 → 次のページへ

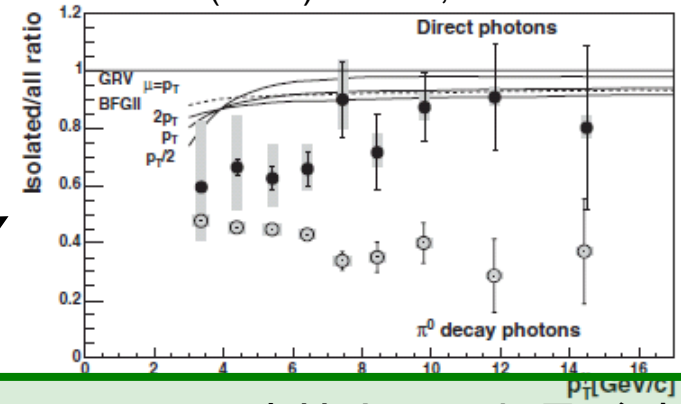
BNL-RHIC-PHENIX: Prompt Photon

pQCD Photon = Direct Photon + Fragmentation



At RHIC energy, the fragmentation contribution is not negligible, ~30% at 10GeV/c photon.

PRL98(2007)012002, PHENIX

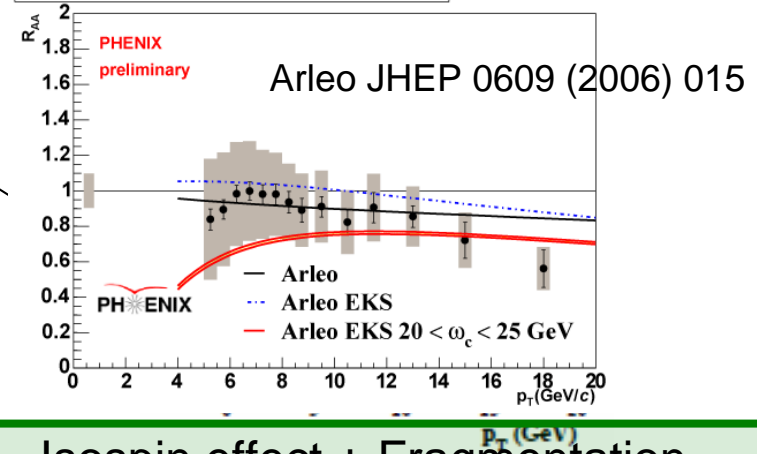


Isolation cutにより直接光子の収量が減る。
Fragmentation + Underlying Eventにより説明可能

p+p

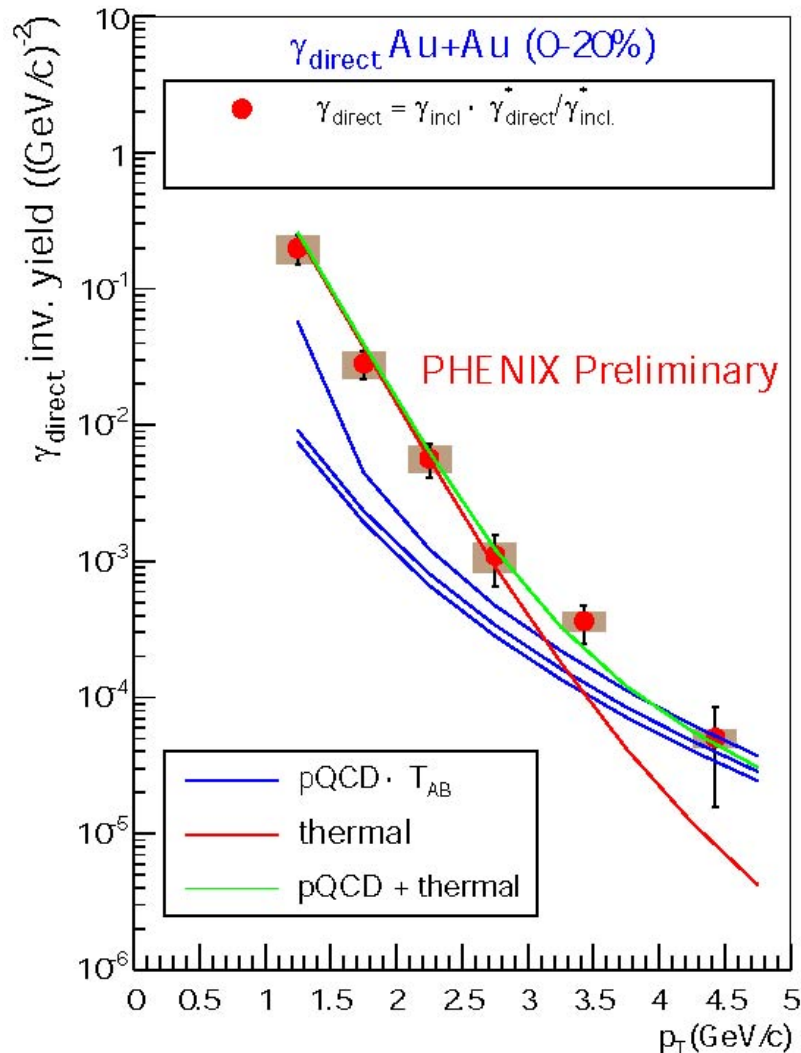
Au+Au

Direct Photon Au+Au $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$, 0-10%



Isospin effect + Fragmentation
Quenching is consistent with data

BNL-RHIC-PHENIX: Thermal Photon



■ NLO pQCD

L.E. Gordon, W. Vogelsang
Phys. Rev. D48, 3136 (1993)

■ A particular thermal Model

- 2+1 hydro, $\tau_0=0.15$ fm/c
- $T_0^{\text{ave}}=360$ MeV ($T_0^{\text{max}}=570$ MeV)

D. d'Enterria, D. Peressounko
nucl-th/0503054

- The data are consistent with thermal + pQCD
- pQCD questionable down to low p_T
 - needs confirmation from analysis of p+p data

BNL-RHIC-PHENIX: Jet-Medium

Interaction of hard-scattered parton with dense matter.

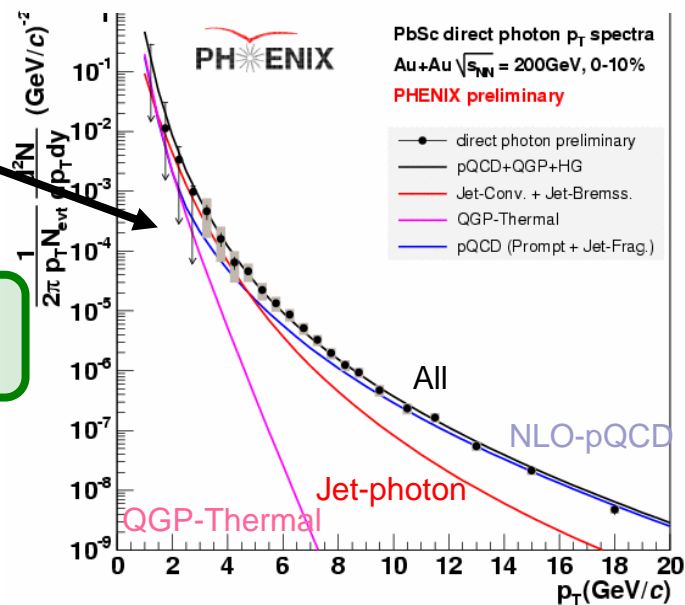
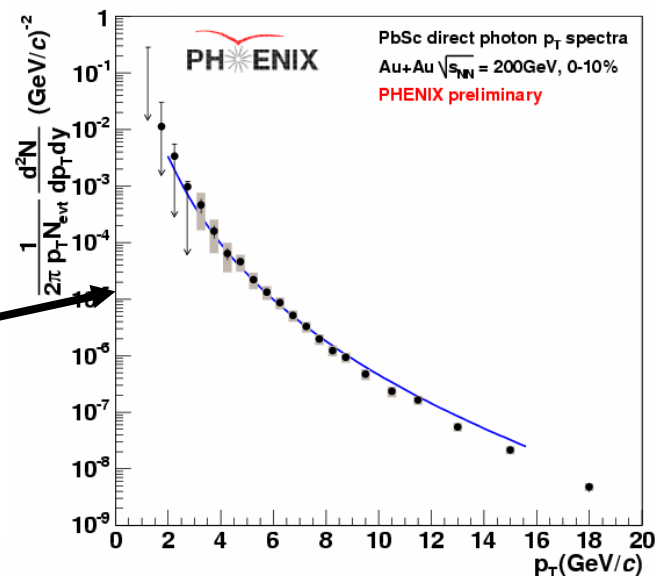
Compton scattering (jet-photon conv.)

- R.J. Fries, Phys.Rev. C72 (2005) 041902
 - Over estimation at high-pT
- S. Turbide, Phys.Rev. C72 (2005) 014906
 - Reproduce data well

Bremsstrahlung

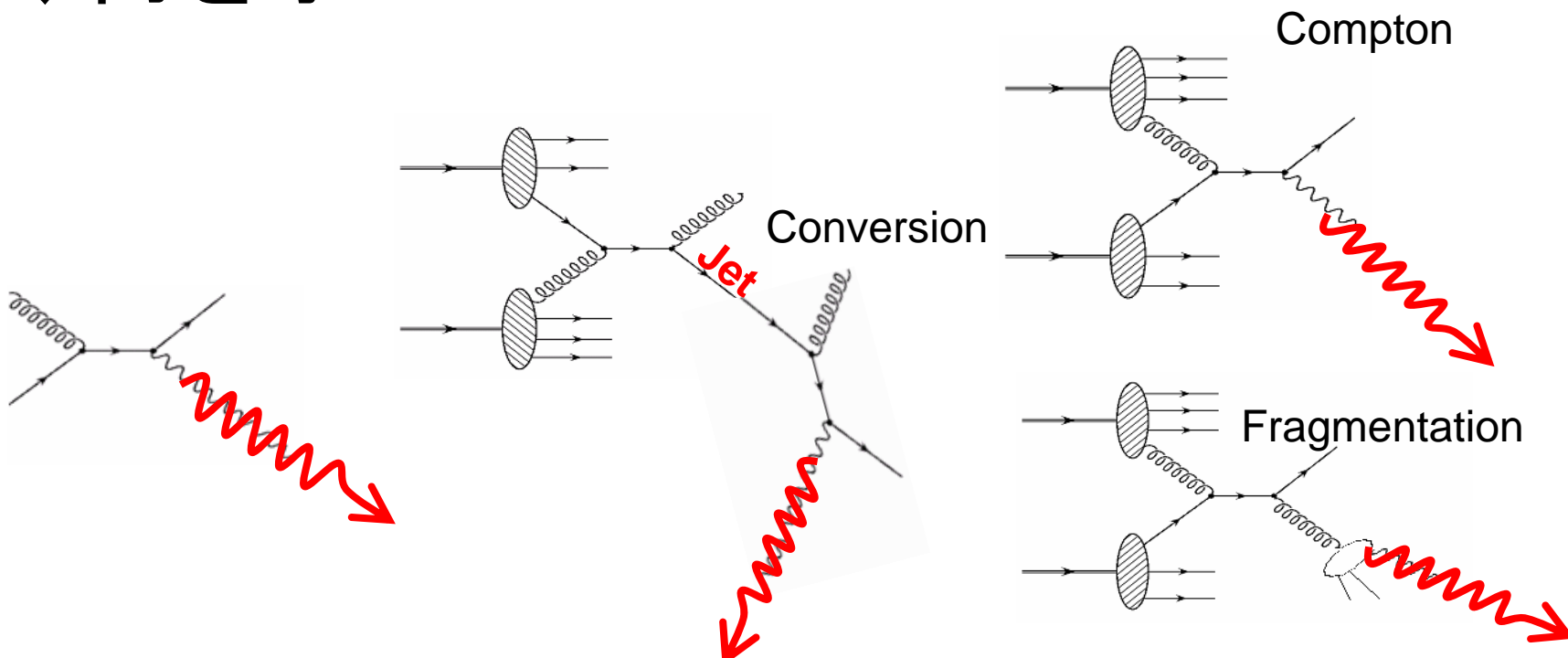
- B.G. Zakharov, JETP Lett. 80 (2004) 1

もう少し理解が必要



Jet-quenching effect for fragmentation photons are

で、何を学んだの？



Fries et.al.PRL90(2003)132301

Thermal Photon

Thermal Photon (QGP)
Thermal Photon (HG)

$p_T^\gamma \sim T_{\text{medium}}$
 $\sim 1 \text{ GeV (QGP)}$
 $\sim 200 \text{ MeV (HG)}$

Jet+Medium

Jet-Photon Conversion
Jet-Bremsstrahlung (QGP)

$p_T^\gamma \sim p_T^q$ (Conversion)
 $< p_T^q$ (Brems)

Prompt Photon

Compton/Annihilation
Fragmentation

$p_T^\gamma \sim \Lambda_{\text{QCD}}$
 $T_{\text{medium}} \sim 1 \text{ GeV (QGP)}$

で、何を学んだの？

直接法では実験の系統誤差が大きすぎる。温度は理論計算依存性が大きい。

存在しているかわからん
 他(Thermal+Prompt)だけでも説明できちゃう。

Compton
 パarton分布 & Ncoll Scalingのチェックができた。

Fragmentation
 ジェットクエンチにより無くなったかどうかまだ分からん

Fries et.al.PRL90(2003)132301

Thermal Photon

Thermal Photon (QGP)
 Thermal Photon (HG)

$$p_T^\gamma \sim T_{\text{medium}} \\
 \sim 1 \text{ GeV (QGP)} \\
 \sim 200 \text{ MeV (HG)}$$

Jet+Medium

Jet-Photon Conversion
 Jet-Bremsstrahlung (QGP)


$$p_T^\gamma \sim p_T^q \text{ (Conversion)} \\
 < p_T^q \text{ (Brems)}$$

Prompt Photon

Compton/Annihilation
 Fragmentation

$$p_T^\gamma \sim \Lambda_{\text{QCD}} \\
 T_{\text{medium}} \sim 1 \text{ GeV (QGP)}$$

で、何を学んだの？




直接法では実験の系統誤差が大きすぎる。温度は理論計算依存性が大きい。



存在しているかどうかわからん
他(Thermal+Prompt)だけでも説明できちゃう。



Compton
Parton distribution & Ncoll Scalingのチェックができた。



Fragmentation
ジェットクエンチにより無くなったかどうかまだわからん



直接光子はQGP研究の~~宝~~石箱や！
天気図

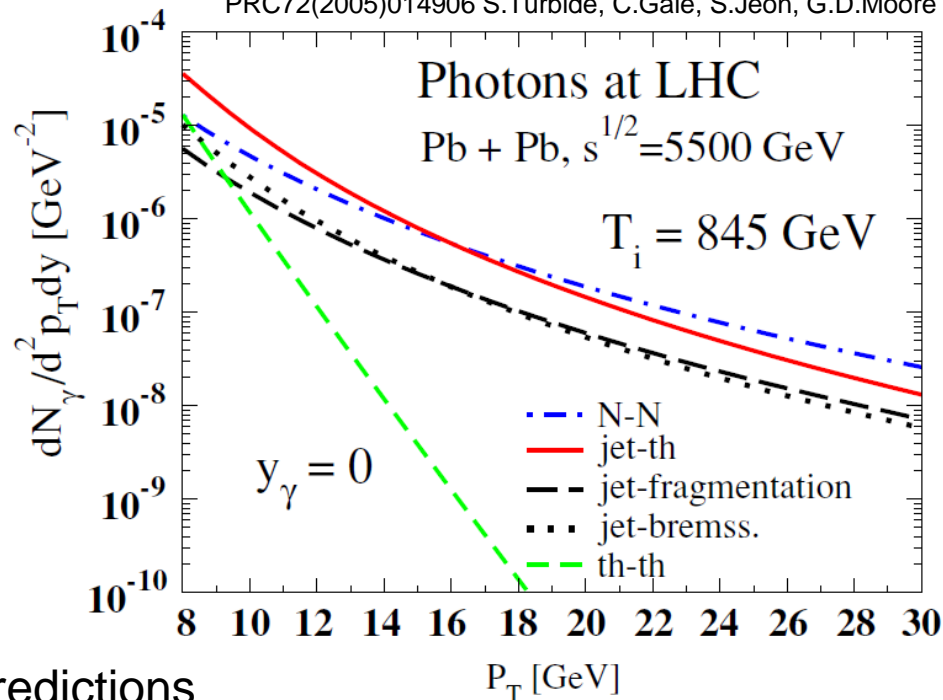
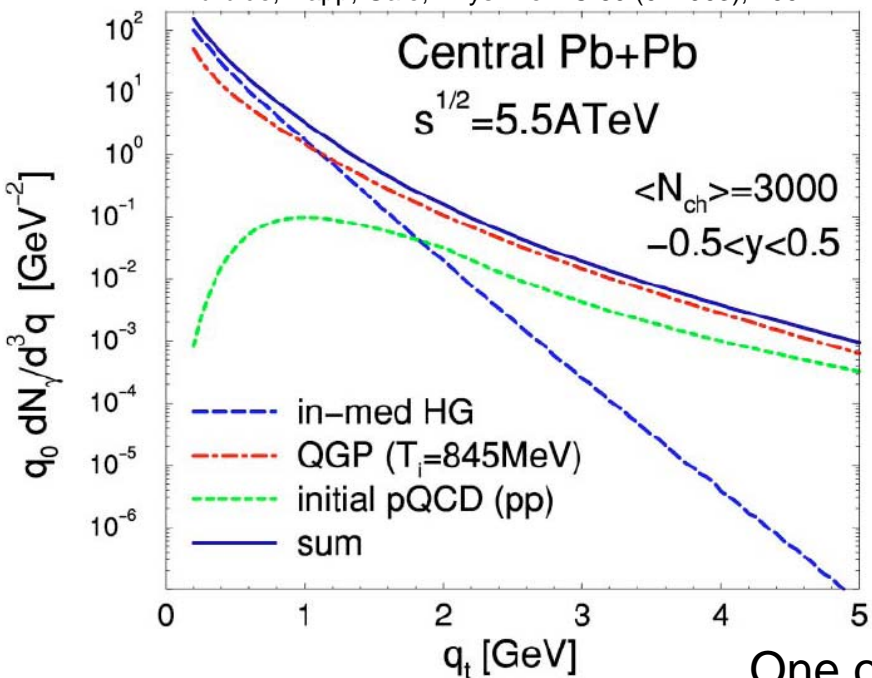


LHCにおける光子生成

Realistic Prediction for LHC (1)

Turbide, Rapp, Gale, Phys. Rev. C 69 (014903), 2004

PRC72(2005)014906 S.Turbide, C.Gale, S.Jeon, G.D.Moore



One of predictions

Thermal Photon from HG: $<1\text{GeV}/c$

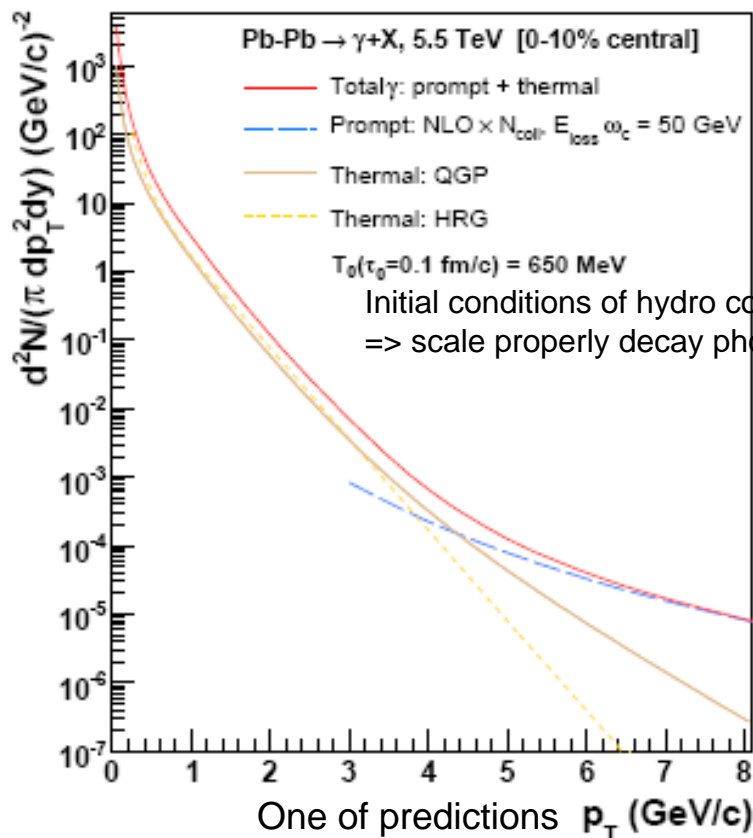
Thermal Photon from QGP: $1\text{-}5\text{GeV}/c$

Jet + Hot Matter : $5\text{-}15\text{GeV}/c$

Prompt Photon : $>15\text{GeV}/c$

1-15 GeV/c Photon caused from Hot Matter = QGP

Realistic Prediction for LHC (2)



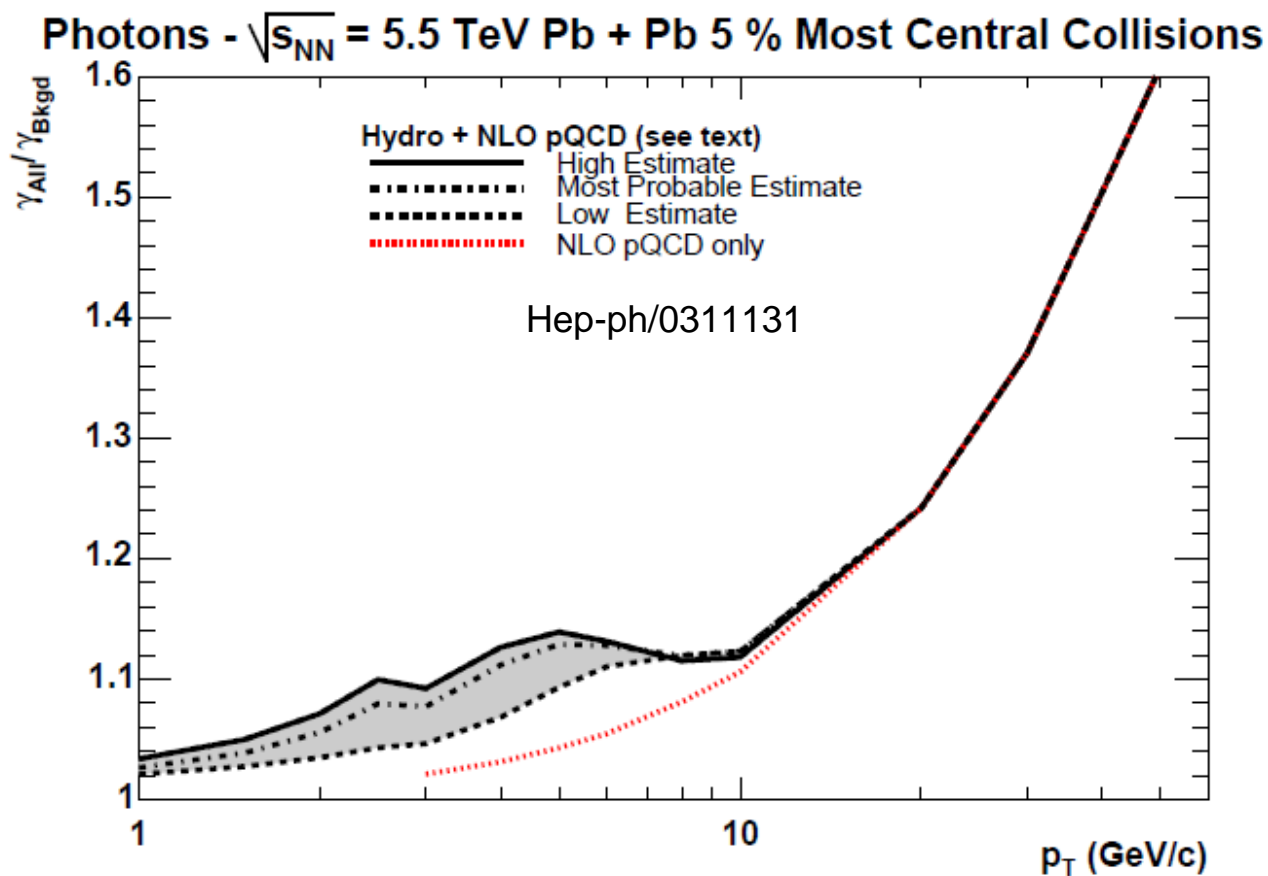
nucl-th 0707.2357

Initial conditions of hydro corresponds to $dN^{hadr}/dy \sim 2000$
 \Rightarrow scale properly decay photon yield from slide 1

One of predictions p_T (GeV/c)
 Thermal Photon from HG: $< 0 \text{ GeV}/c$
 Thermal Photon from QGP: $0-4 \text{ GeV}/c$
 Prompt Photon : $> 4 \text{ GeV}/c$

$< 4 \text{ GeV}/c$ Photon caused from Hot Matter = QGP

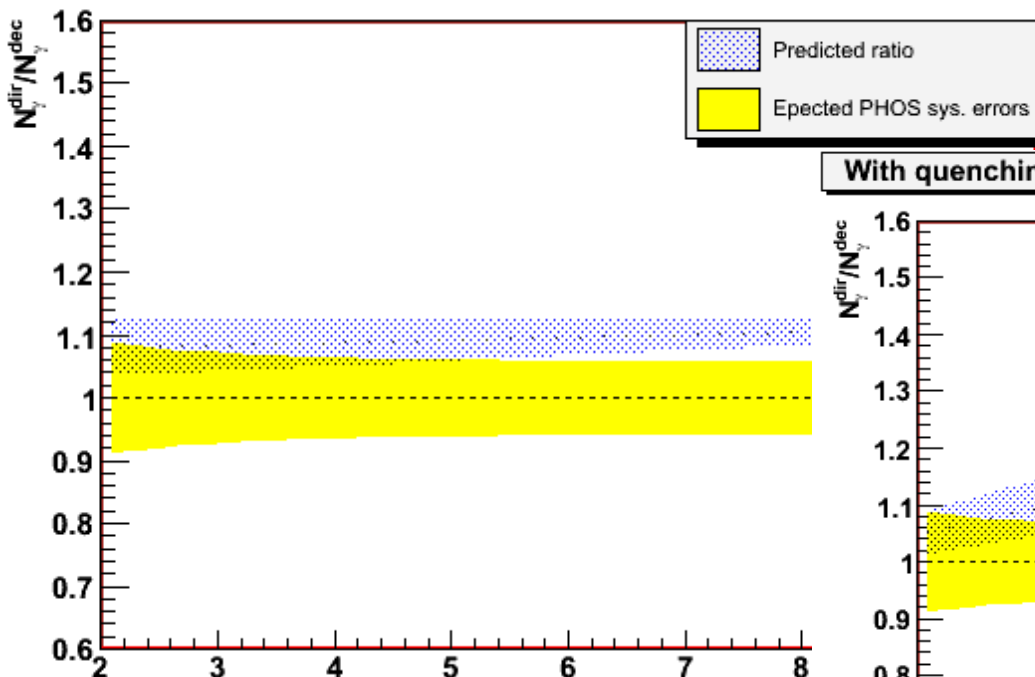
Realistic Prediction for LHC (3)



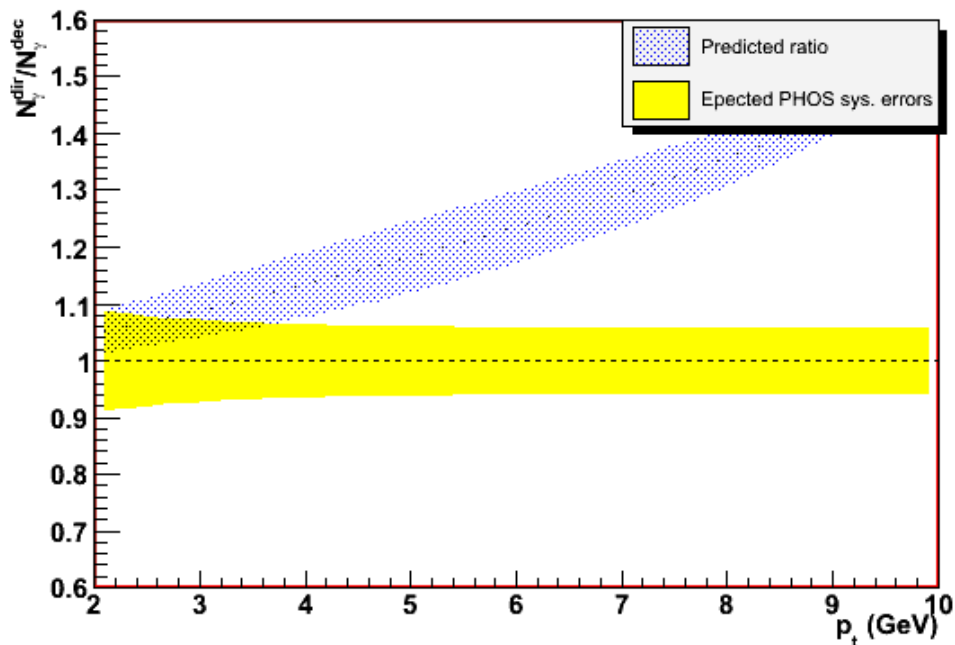
1-10 GeV/c Photon caused from Hot Matter = QGP

理論予想値と予想系統誤差

Without quenching



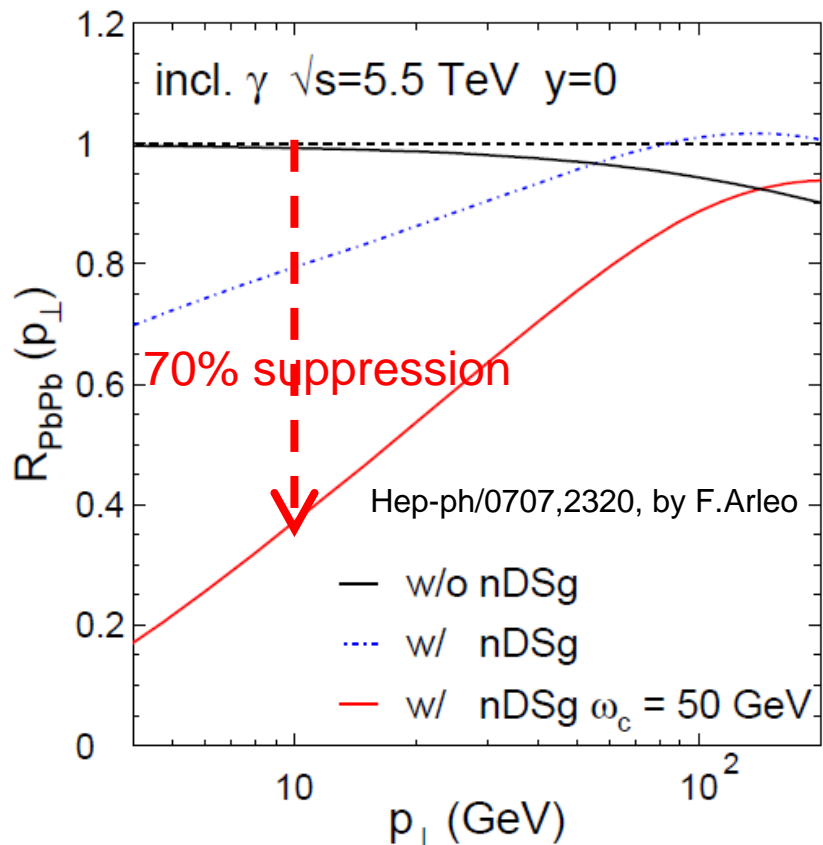
With quenching



もしJet Quenchingが起こったならば、 $p_T > 3$ GeVの領域にて系統誤差よりも優位な信号が見えるはず。

Good News for LHC

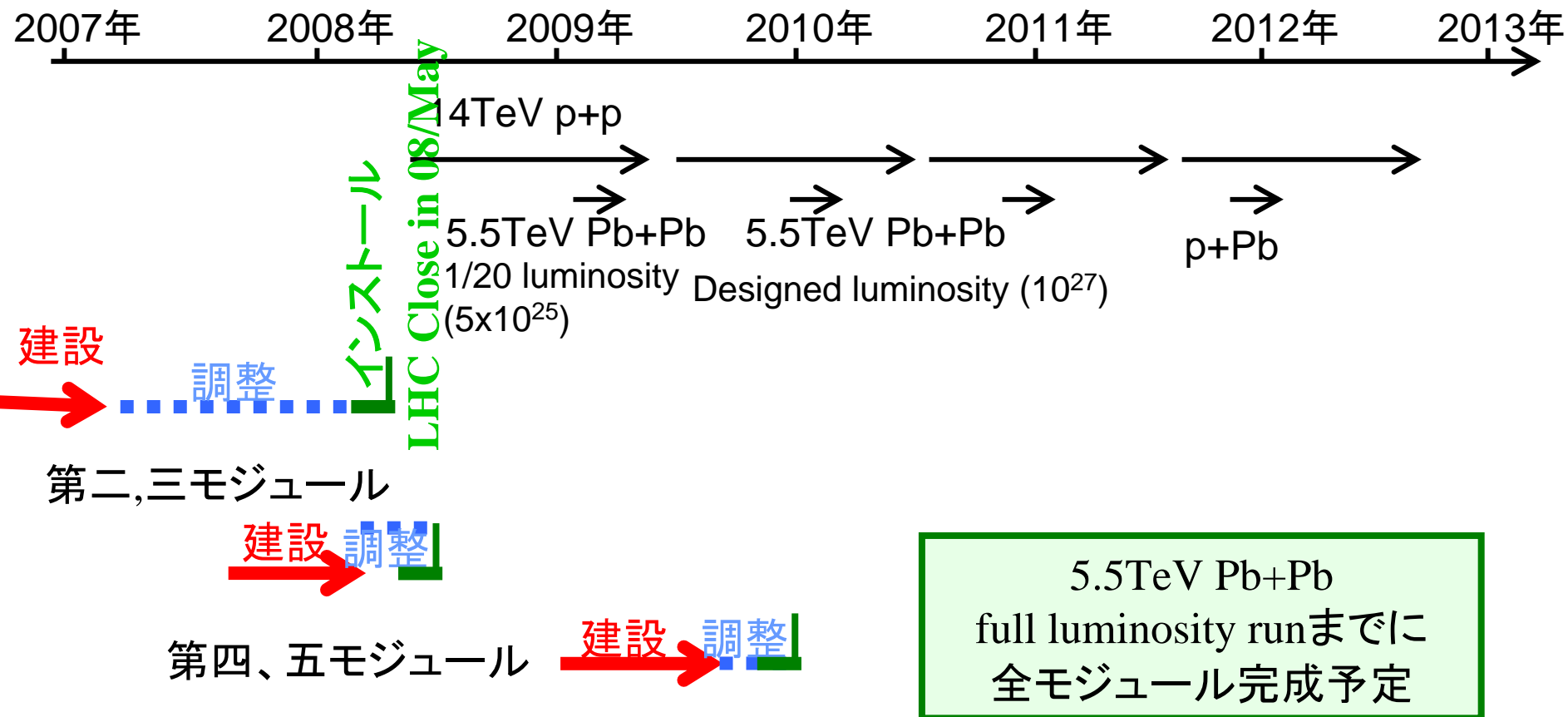
Suppression of Prompt Photon?



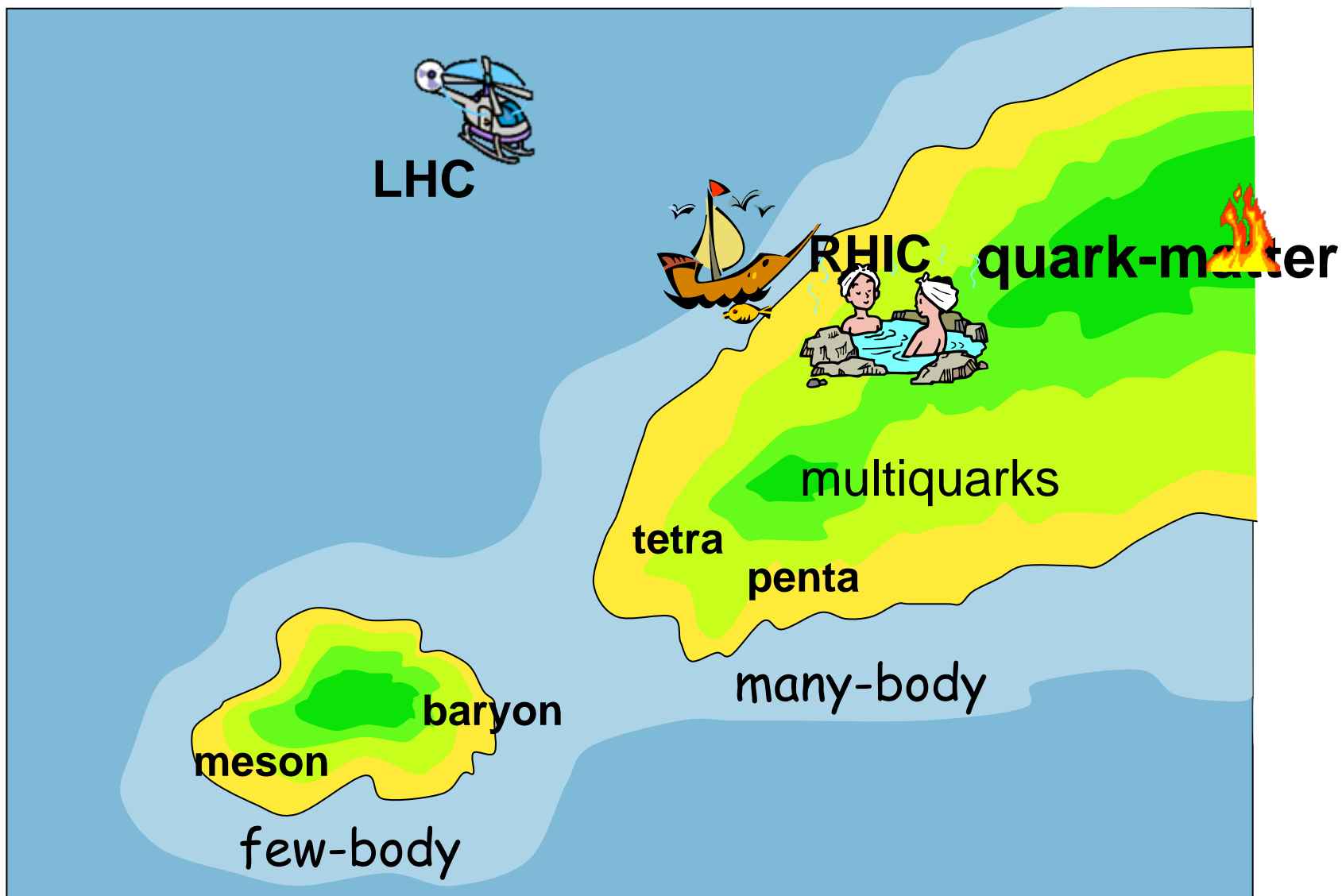
もし、Prompt PhotonのうちFragmentationの項がJet Quenching効果により減衰するかもしれない。

This is a **good** news for LHC energy.

将来計画



Y.Enyoさんのトラペをおかりして



LHCにおける熱光子測定にむけて

- LHCにおいて有利な点
 - 温度が高い → Thermal Photonが見えやすくなる。
- 一方、その解釈となると、
 - Prompt Photon: p+p測定やpQCD計算が必要
 - Thermal Photon: Hydro計算が必要
- 熱光子であるという実験的証拠はどこにある？
 - Inclusive測定だけでは限界があるのでは？ Photon-jet イベントをタグして、prompt photonを積極的に落とす必要があるのでは？ NLO-pQCDイベントジェネレータを探し中。
 - Jet-Medium散乱からくる直接光子付近にはどういう粒子生成があるのか？
 - Hydro Event Generatorってのは無理なのかしら？

おしまい

ご静聴ならびにたくさんの質問、議論
ありがとうございました。