

Measurement of prompt photon
in $\sqrt{s}=200\text{GeV}$ pp collisions
with isolation cut method

鳥井 久行 for the PHENIX Collaboration

理化学研究所

JPS meeting、高知大学

研究動機

- 直接光子生成は、
 - 原子核中のパートン構造を知る上でよいプローブとなる。
 - ハドロン衝突における簡単なプロセスの一つ。
- なぜ、RHICにて直接光子測定を行うのか？
 - RHICは陽子陽子衝突としては最大エネルギー
 - これまでにないユニークな測定。
 - 将来または現在解析中の
 - QGP探索のための比較対象として。
 - 核子中のグルーオンスピンの測定のための基礎として。
- この発表では、
 - 一つ前の発表に引き続き、直接光子測定のための別の方法(isolation method)を試みる。
 - この方法によりS/N比を上げてより系統誤差の小さい測定が可能。
 - 二つのsignal (direct photon と fragmentation photon) を分けることが可能？
 - NLO-pQCD計算との比較。
 - これまで得られている陽子陽子衝突、陽子反陽子衝突における直接光子測定との比較。

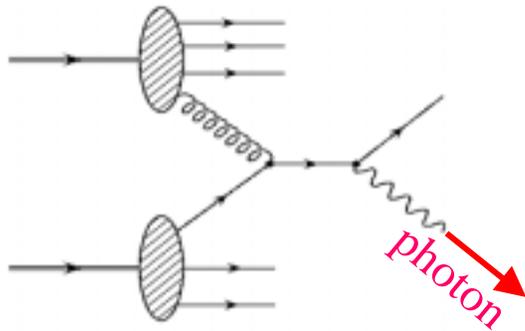
Prompt Photon Production

ハドロン衝突における直接光子生成は2つのプロセスからなる。

$$\sigma = \sigma_{dir} + \sigma_{frag} = \sum_{i,j,k} \int dx_i dx_j \times \boxed{f_1^i(x_i, \mu) \cdot f_2^j(x_j, \mu)} \quad \text{parton distribution function(PDF)}$$
$$\times \left\{ \boxed{\sigma(i + j \rightarrow \gamma)} + \int dz \boxed{\sigma(i + j \rightarrow k)} \times \boxed{D_k^3(z_k, \mu_F)} \right\}$$

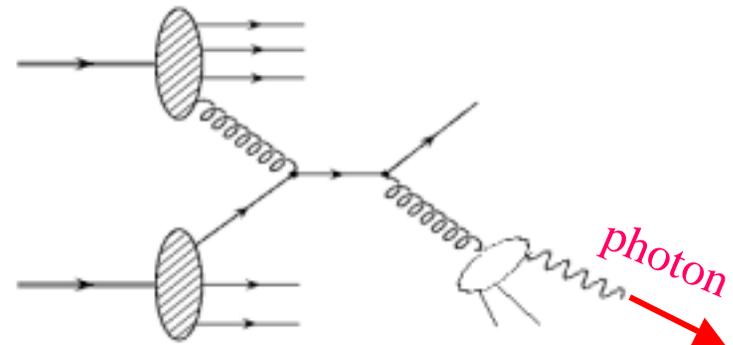
fragmentation function(FF)

Direct Process



Compton/Annihilation process

Fragmentation Process



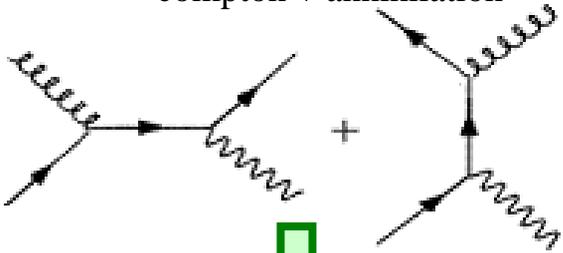
PDF/FFは主に deep inelastic scattering(DIS)/ e^+e^- 消滅反応で測定。

本研究では、これらのPDF/FFを使った next-to-leading order(NLO) pQCD計算との比較を行う

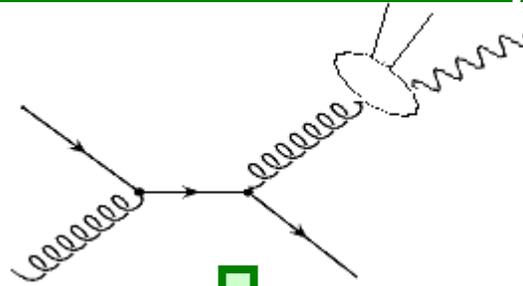
Strategy of Isolation Method

(1) Signal(direct)

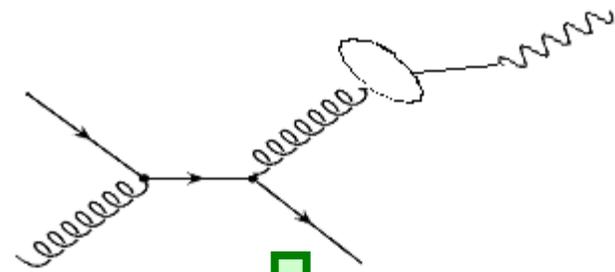
compton + annihilation



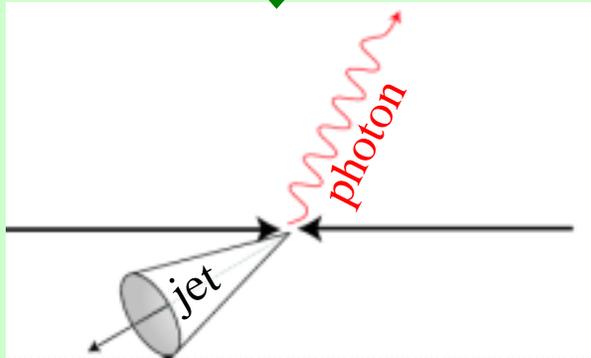
(2) Signal(fragmentation)



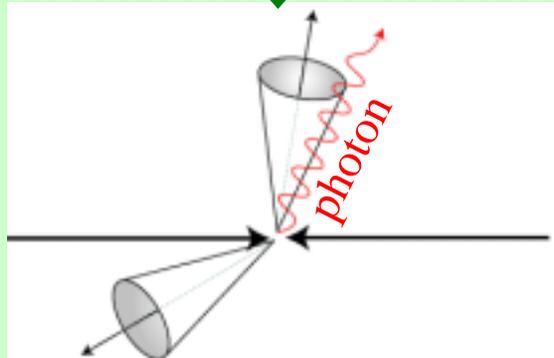
(3) Background(hadron decay)



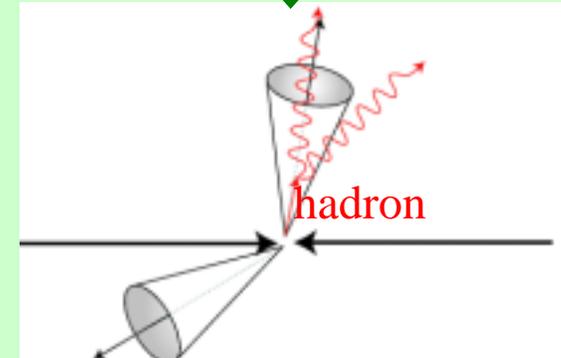
実験系でのイメージ



約30% @ 10GeV



約10% @ 10GeV

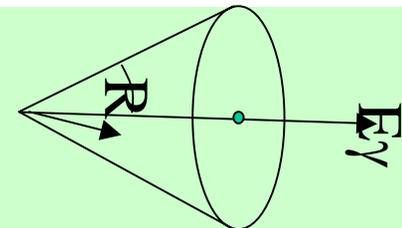


約60% @ 10GeV

Isolation cut to
reduce background

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

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



What is the efficiency by this cut for signal 1)&2) → Next slide

Isolation Cutの効率

- なにが原因で効率/非効率を生み出すのか?
 - イベント構造によるもの
 - fragmentation photon は近くにジェットを伴うため効率は低いと予想される。
 - PHENIX検出器のアクセプタンスは完全ではない。
 - Underlying eventによるもの。
 - Isolation cut による検出効率をMonte Carlo計算により見積もる。
 - モデル依存の計算である。
 - PYTHIA simulationによる見積もり。
 - Signal(direct photon) : $>90\%$ for $p_T > 5\text{GeV}/c$
 - Signal(fragmentation photon)に関しては研究を進めている最中である。
- T.Horaguchi and K.Nakano are working for these items.*
- この発表ではisolation cutによる効率の補正なしで、isolation methodで得られた結果をsubtraction method (前の岡田さん発表)の結果と比較してみる。
 - この比較により、direct/fragmentation photonの成分を分けることができないだろうか、ということを念頭に。

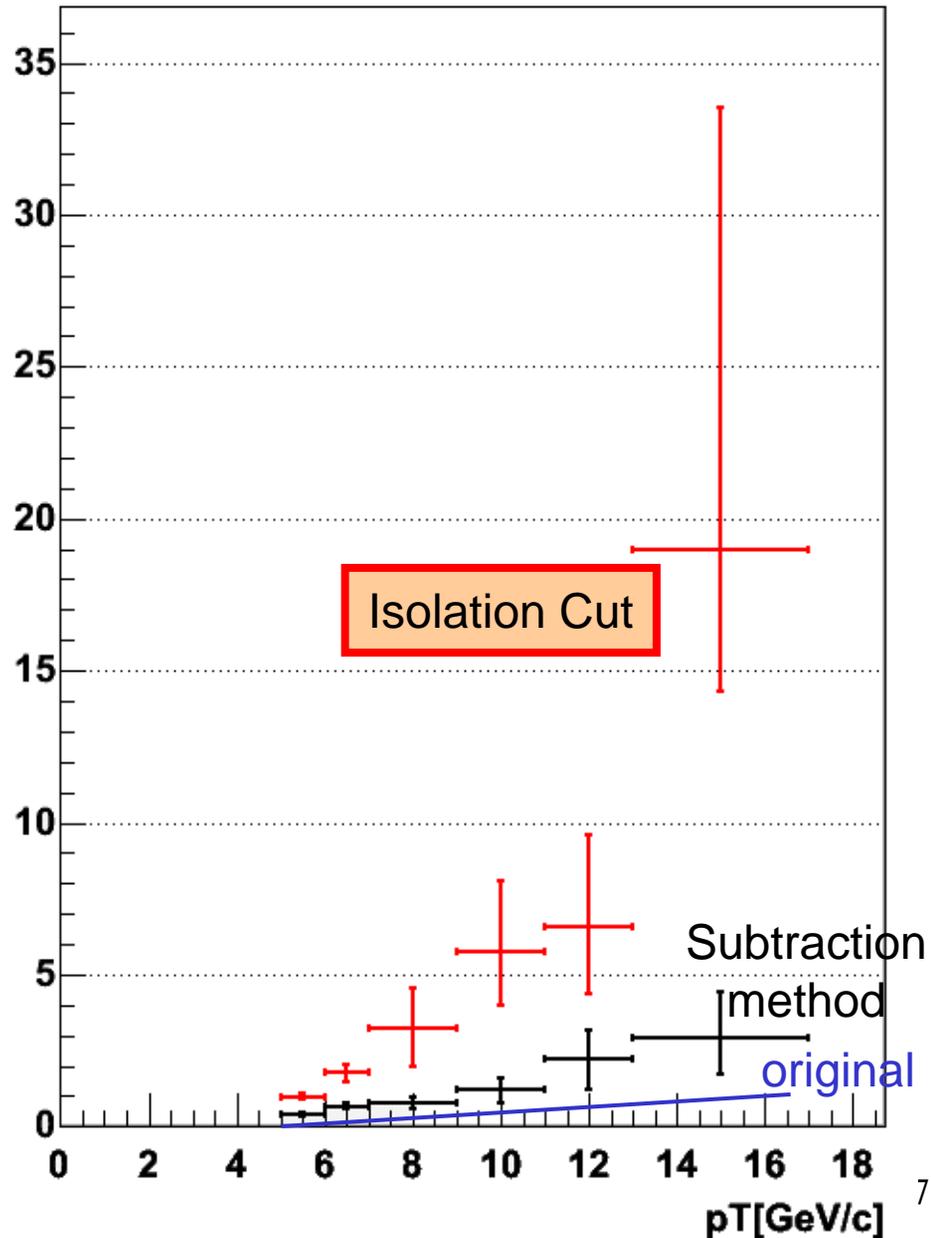
Event Selection and Analysis

- Event Selection
 - データはRHIC-run3 p+p データ (2003/Apr – May)
 - 陽子ビームは longitudinally polarized at PHENIX. 偏極平均での測定。
 - 今回解析したデータは、ERTトリガー ($E_\gamma > 1.5 \text{ GeV}/c$)にて取得。
 - 266 pb^{-1} 相当。
- Analysis procedure
 - 光子の選択
 - EM shower is photon-like
 - No charge hit on chambers in front of EMCal.
 - Isolation cut .
 - π^0 からくる(上の選択を通り抜けた)光子の寄与はデータ自身から見積もる。
 - ただし、検出器にて検出できなかった π^0 からくる寄与ならびに他のハドロン (ω , η 他)からくる寄与は
 - 過去の実験からの推定
 - 我々PHENIXでの測定(π^0 , η)
 - モンテカルロ計算

- Cross section calculation
$$E \frac{d^3\sigma}{dp^3} = \frac{1}{L} \times \frac{1}{2\pi p_T} \times \frac{N_{\text{photon}}}{\epsilon_{\text{eff}} \times \epsilon_{\text{acc}} \times \epsilon_{\text{triggerbias}}}$$

S/N Ratio with Isolation Cut

- S/N ratio
 - S = 直接光子
 - N = 検出できなかった π^0 からくる寄与
- Isolation cutを掛けることにより、S/N ratioが改善。
 - Subtraction method(岡田さんトーク)と比較して約5倍。
 - 将来予定している直接光子を用いた陽子中グルーオン偏極量の測定に有効。
- 測定レンジ
 - $p_T = 5-17\text{GeV}/c$



結果

- 二つの結果の比較。
 - Subtraction method (前の岡田さんトーク)の結果。
 - 今回得られたisolation methodを用いた結果。
 - 理論予想では20-30%減少を予想。
- 二つの結果は予想ほど違ってない。これは、

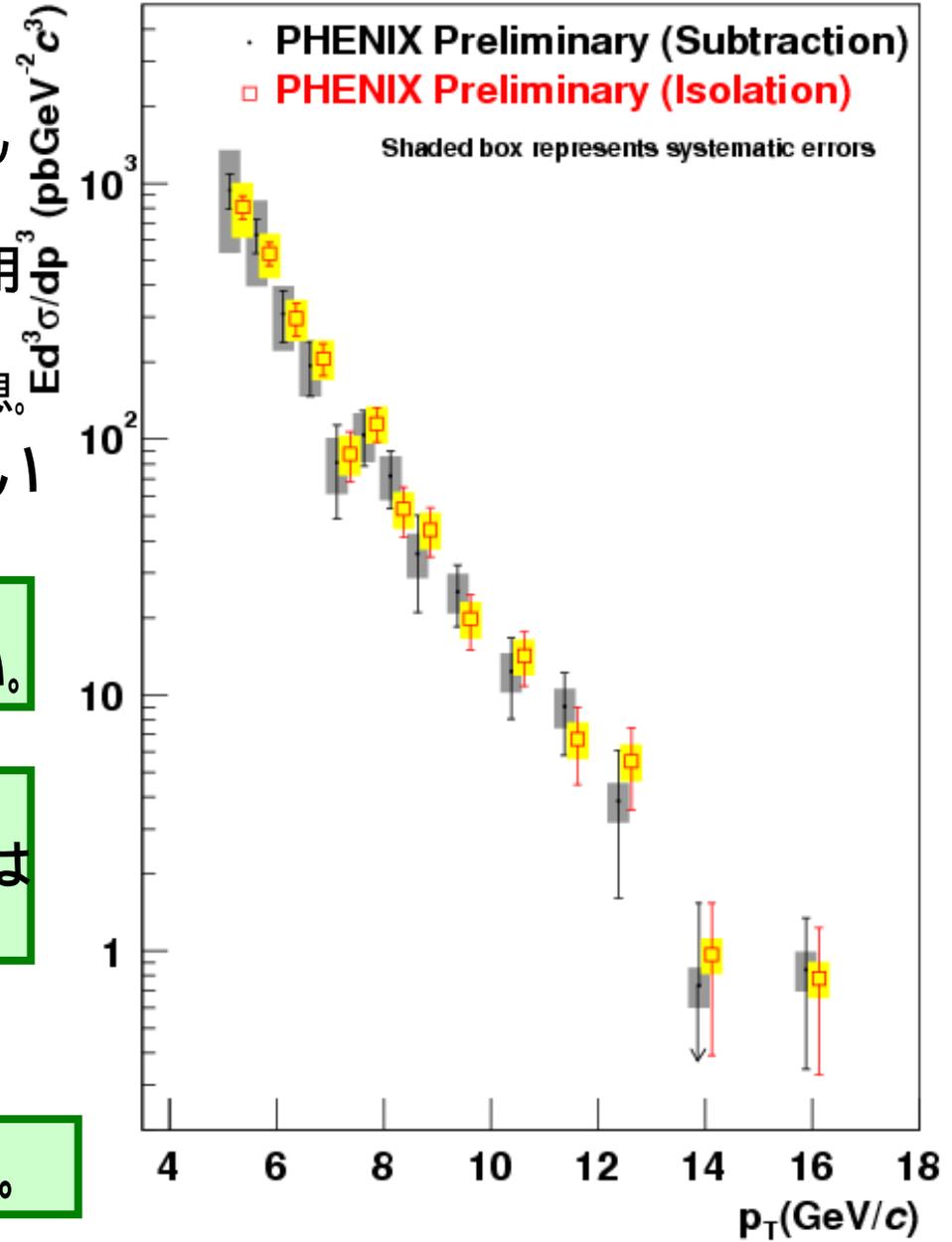
Fragmentation photonの寄与が
isolation cutによって落ちていない。

もしくは

測定されたprompt photon
(subtraction method)のほとんどは
direct photonから来ている。

ことを示唆。

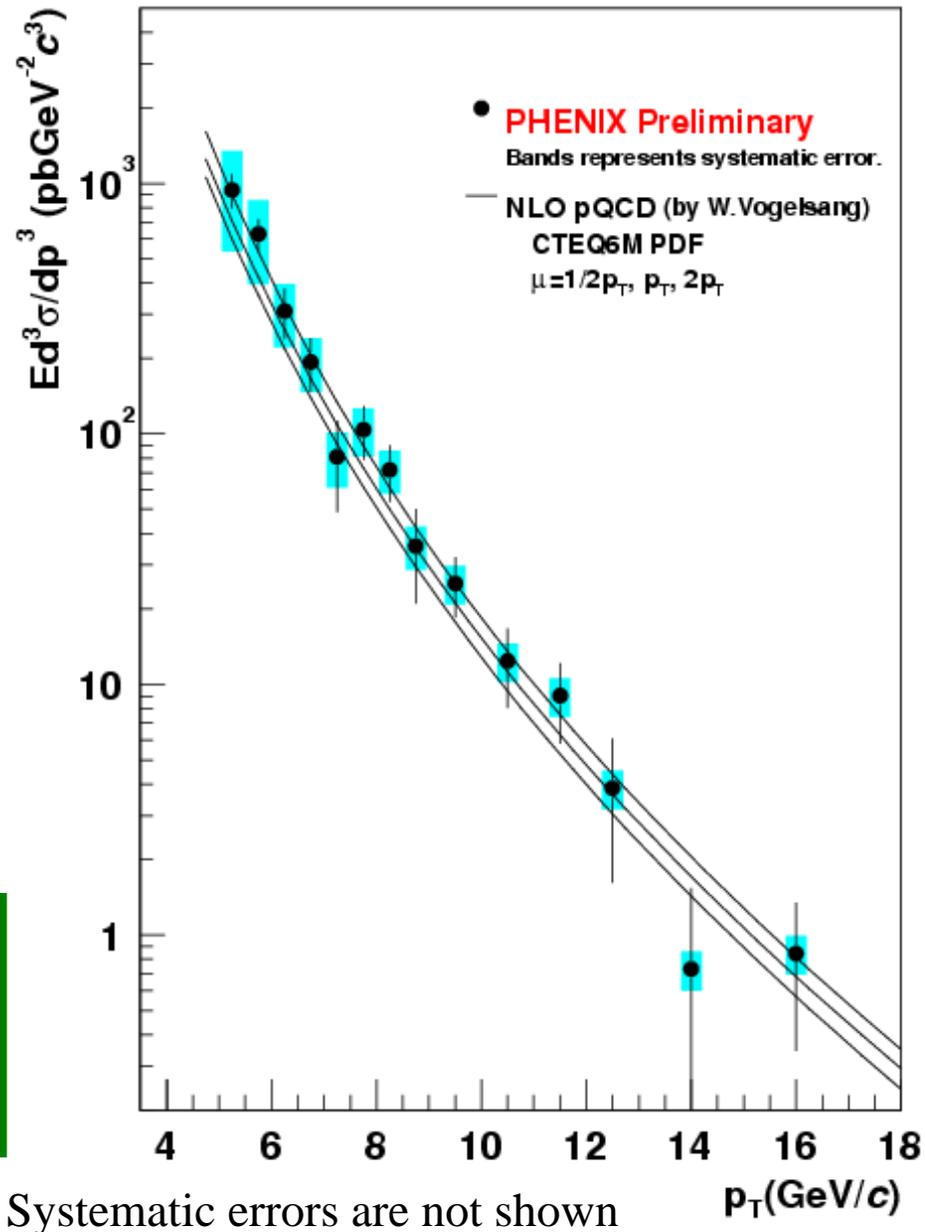
さらなる研究を進めている最中。



NLO-pQCD計算との比較

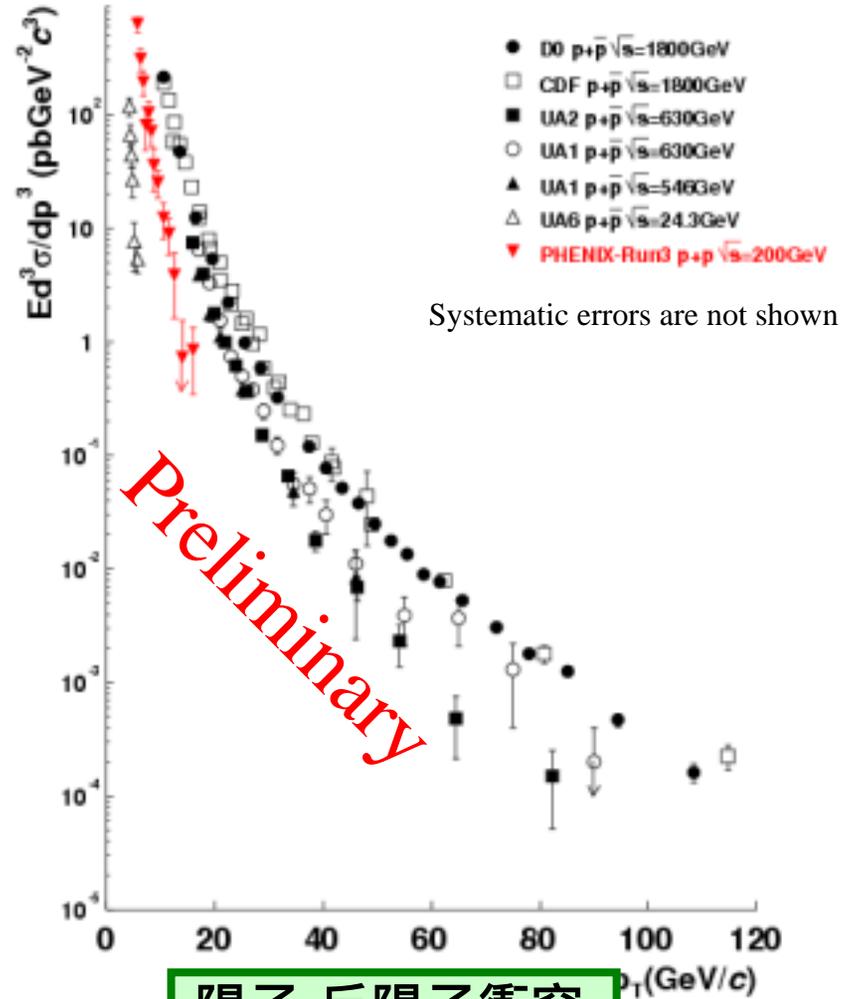
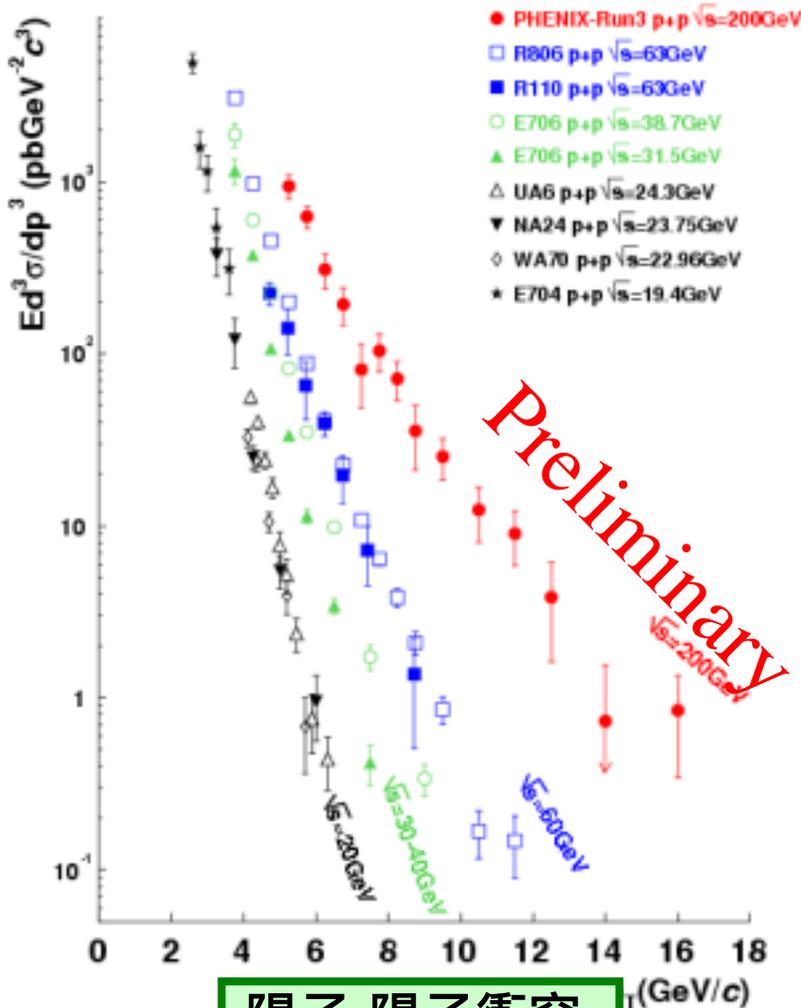
- Subtraction methodで得られたデータとの比較を行う。
- NLO-pQCD calculation
 - Private communication with W.Vogelsang
 - CTEQ6M PDF.
 - 二つの寄与(direct photon と fragmentation photon) の和。
 - 3つのスケール、 $1/2, 1, 2 p_T$
 - Renormalization scale と factorization scale を同じにとる

今回のデータは、pQCD計算のスケールの違いの範囲でよく一致している。



過去の実験との比較

- 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。



x_T スケーリング則

- 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

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

n =定数。 $x_T=2p_T/\sqrt{s}$

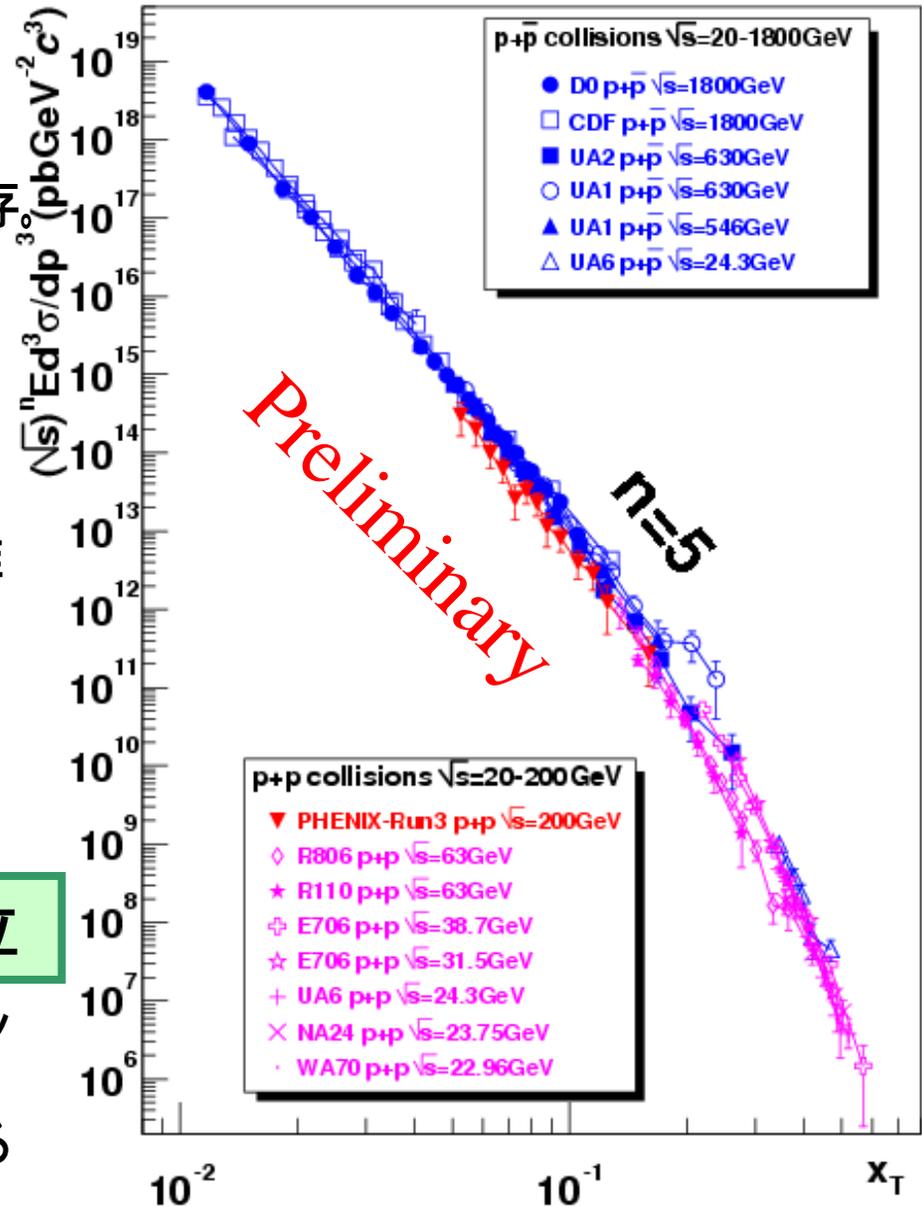
- 相互作用項と構造を表す項に分離

→ 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。



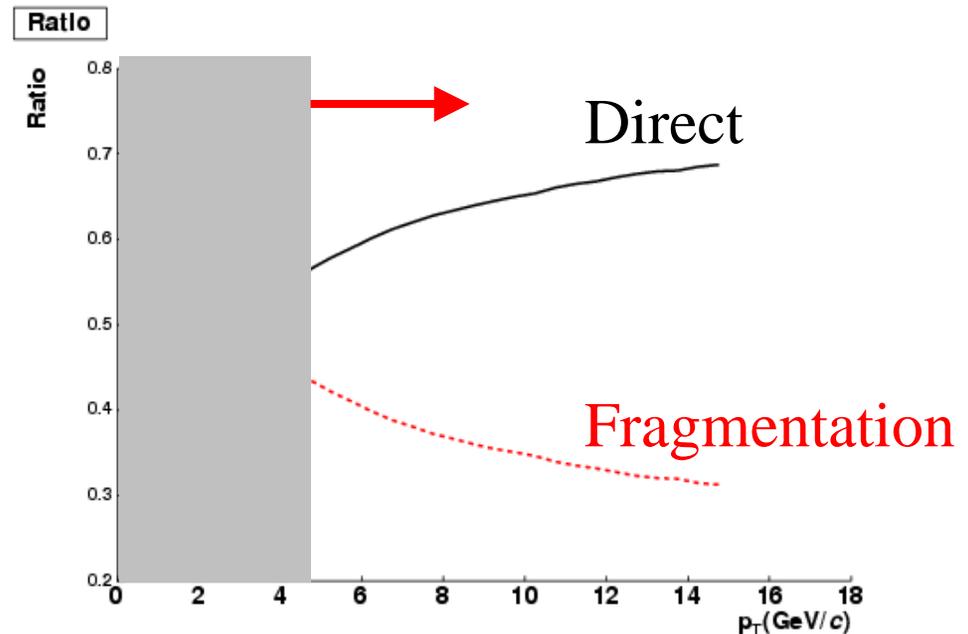
結論

- Isolation method
 - を用いて、二つの寄与(direct/fragmentation)を分けることが可能か？
 - S/Nを大幅に改善。Subtraction methodと比較して約5倍。
 - 将来の陽子中グルーオン偏極量測定に有利。
 - モンテカルロ計算を用いた検出効率の見積もりを行っている。
- 測定結果
 - $p_T = 5-17\text{GeV}/c$ を測定。陽子陽子衝突としては最大エネルギー。
 - Isolation methodによる結果はsubtraction methodと比較して予想ほど減少していない。
 - Fragmentation photon が isolation cutにより落とされていない。
 - Prompt photon生成のほとんどが、direct photon生成によるものである。
 - さらなる研究を進めている最中。
 - pQCD計算とスケール選択の範囲で一致。
 - This fact is very essential for the future analysis of ALL.
 - x_T スケールリング則が $n=5$ 付近で成立。
 - パarton描像を示唆。
 - 陽子反陽子衝突との違いは、小さい x_T 領域で小さいのではないかと推定。

Backup Slides

Bias on Physics Process

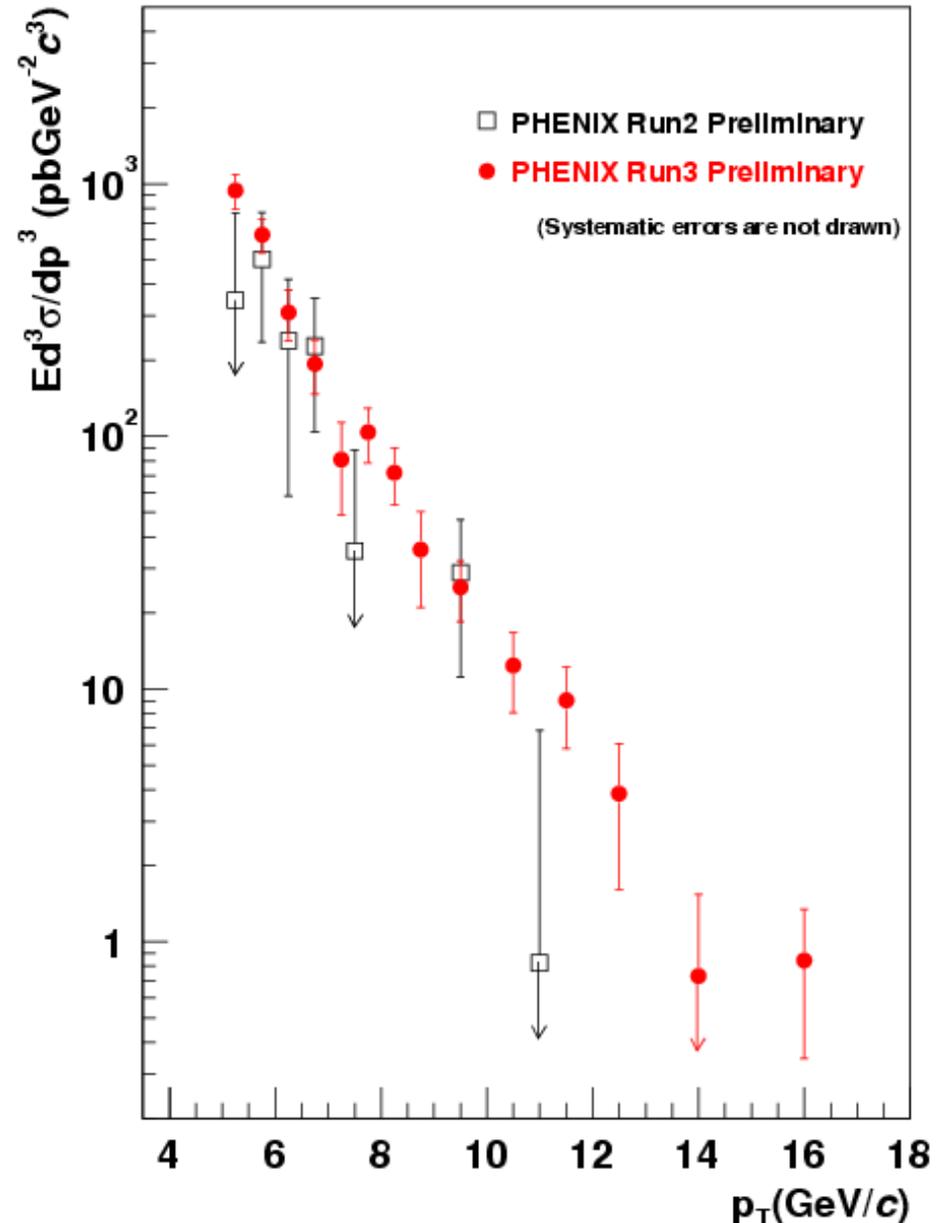
- Two processes
 - Direct
 - Fragmentation
- Direct photon measurement at $p_T > 5 \text{ GeV}/c$ is dominated by direct process.
 - The difference between two methods is small.



Private communication with W.Vogelsang

Comparison with the RunII

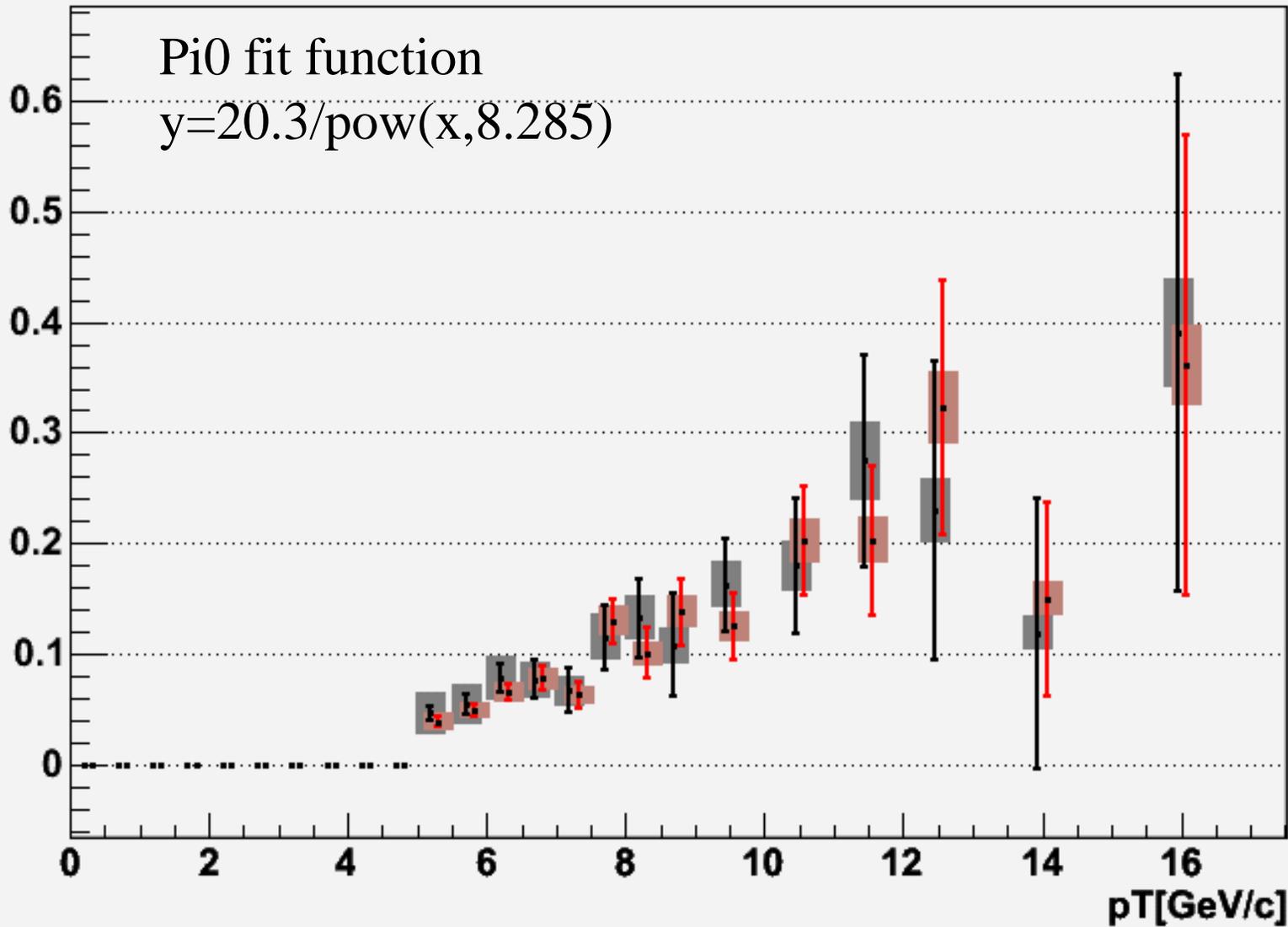
- Comparison
- RunII and RunIII are consistent
- RunIII provide larger statistics
 - $p_T = 5-18\text{GeV}/c$
 - Cross section $1 - 10^3$ $\text{pbGeV}^{-2}c^3$



Results

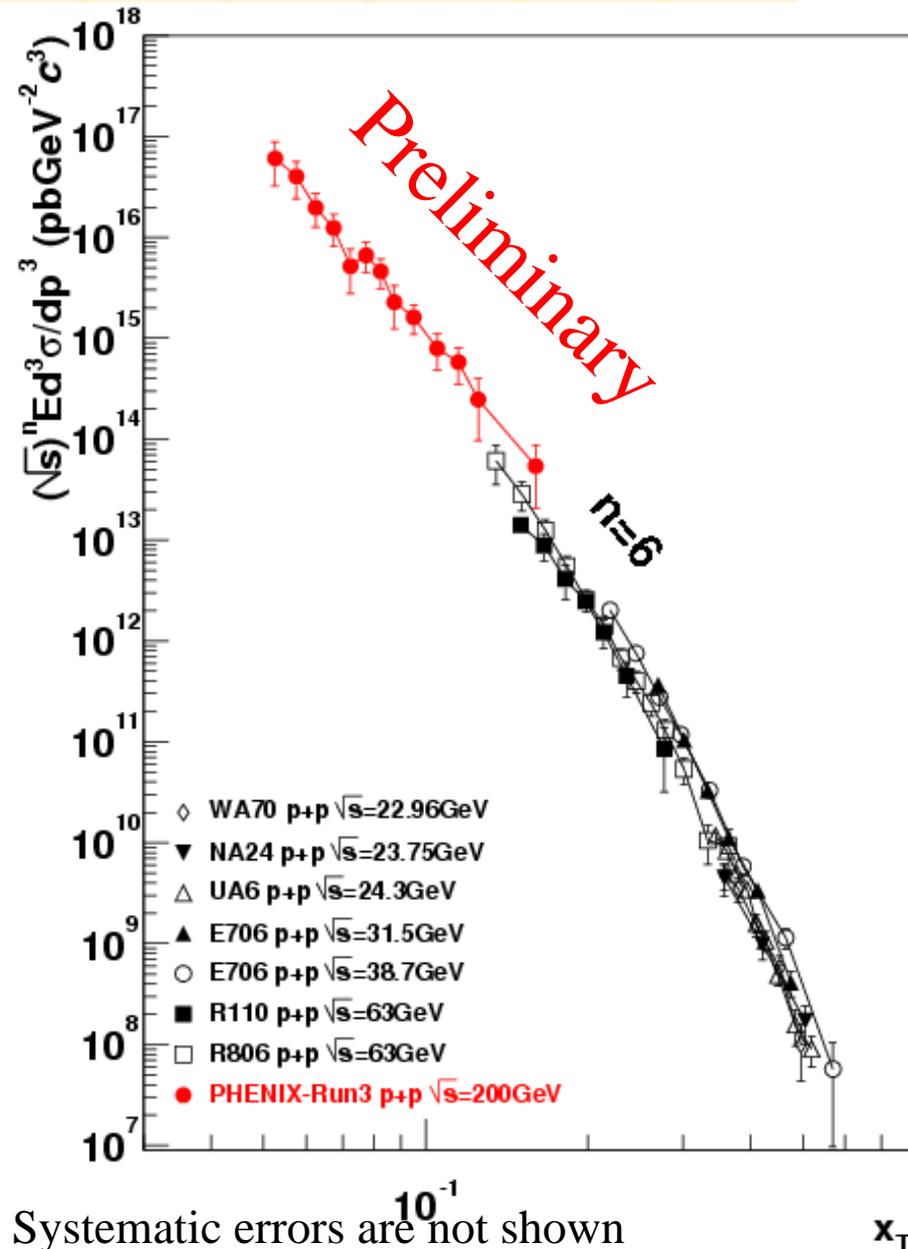
Ratio to run2pi0 fit

PHENIX Preliminary

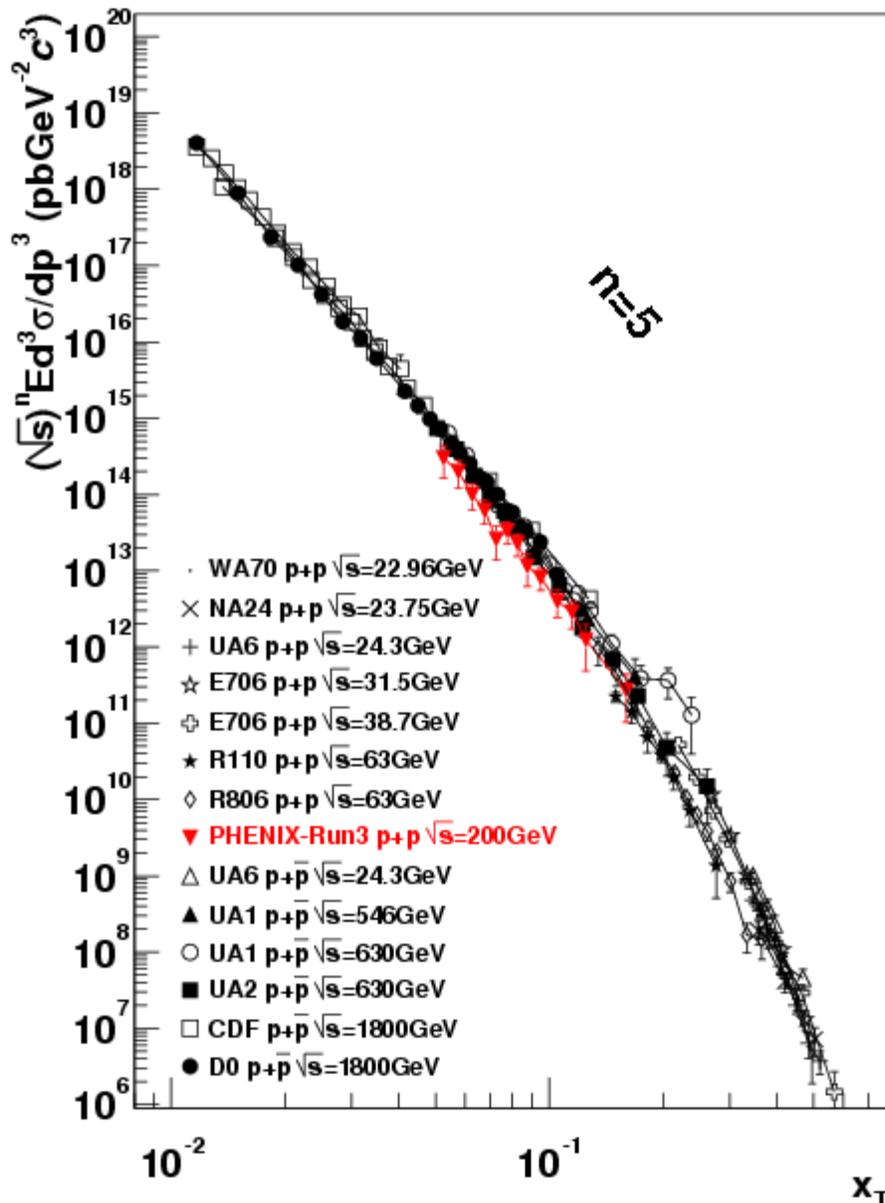
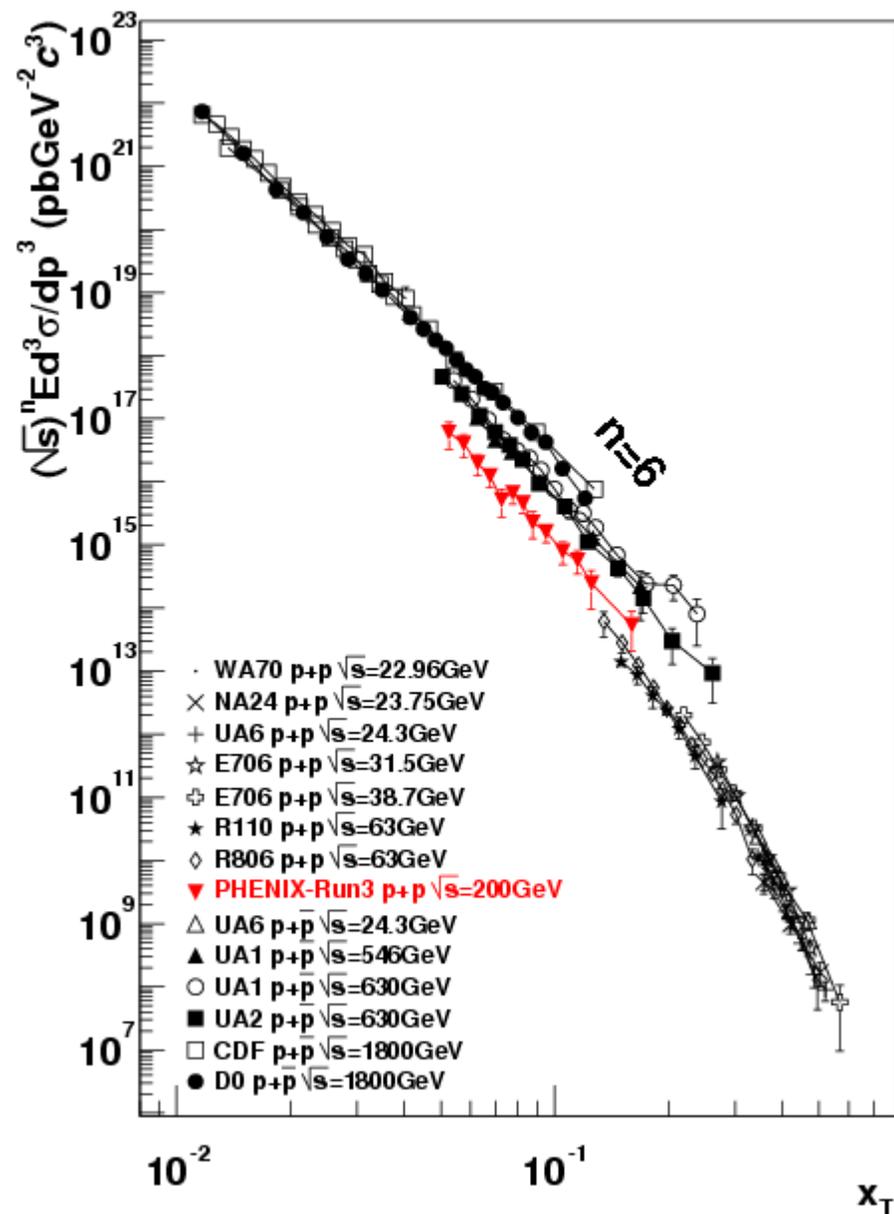


X_T Scaling

- From eye-ball fitting,
 - $n=6$ shows better agreement
 - Between 20 – 200GeV
 - $x_T = 0.05 - 0.5$
- I'd like to emphasize that the present result covers x_T down to 0.05
 - We can go down lower x_T range in the future \rightarrow next slide.
- I'd like to show this comparison at JPS meeting.



xT-scaling with p+pbar data



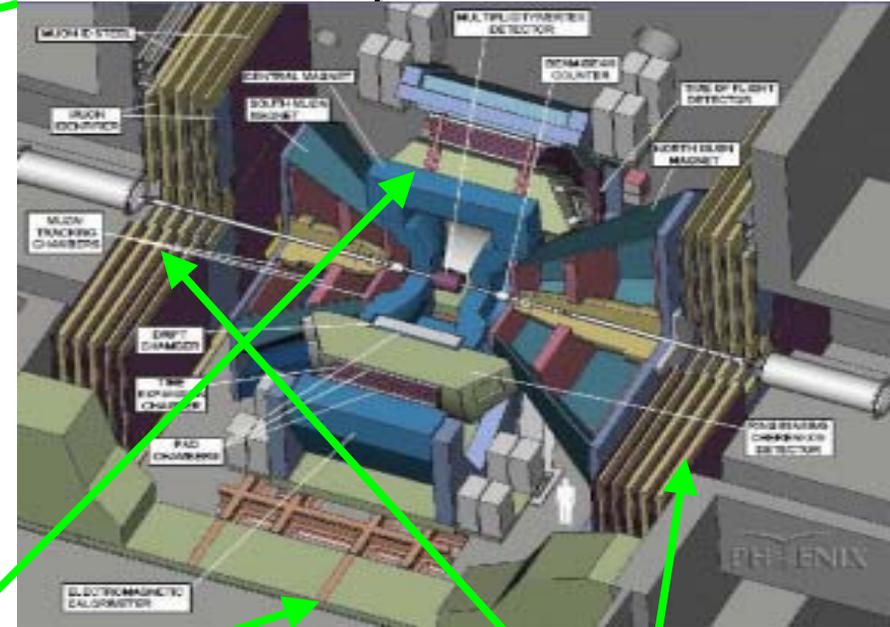
Relativistic Heavy Ion Collider



PHENIX実験

PHENIX

Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment



- 全周3.8km 2リング
 - 120bunch/ring
 - 106ns crossing time
- 最大エネルギー
 - 250GeV for p(polarized)
 - 100GeV/nucleon for Au
- Luminosity
 - Au-Au : $2 \times 10^{26} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-2}$
 - p-p : $2 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-2}$
- 6 の Crossing point

2 central Spectrometers

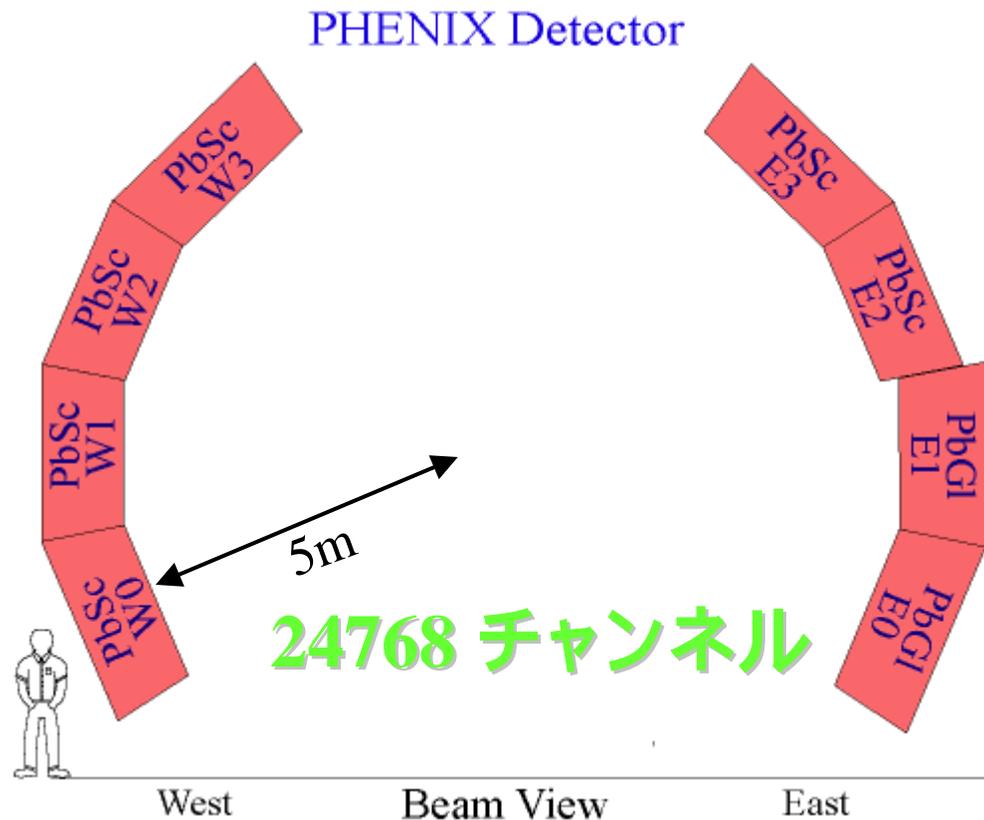
2 forward Spectrometers

衝突点、ルミノシティ、中心度を決めるための3つの detector がインストールされている。

- Beam Beam Counter(BBC)
- Zero Degree Calorimeter(ZDC)
- Multiplicity and Vertex Detector(MVD)

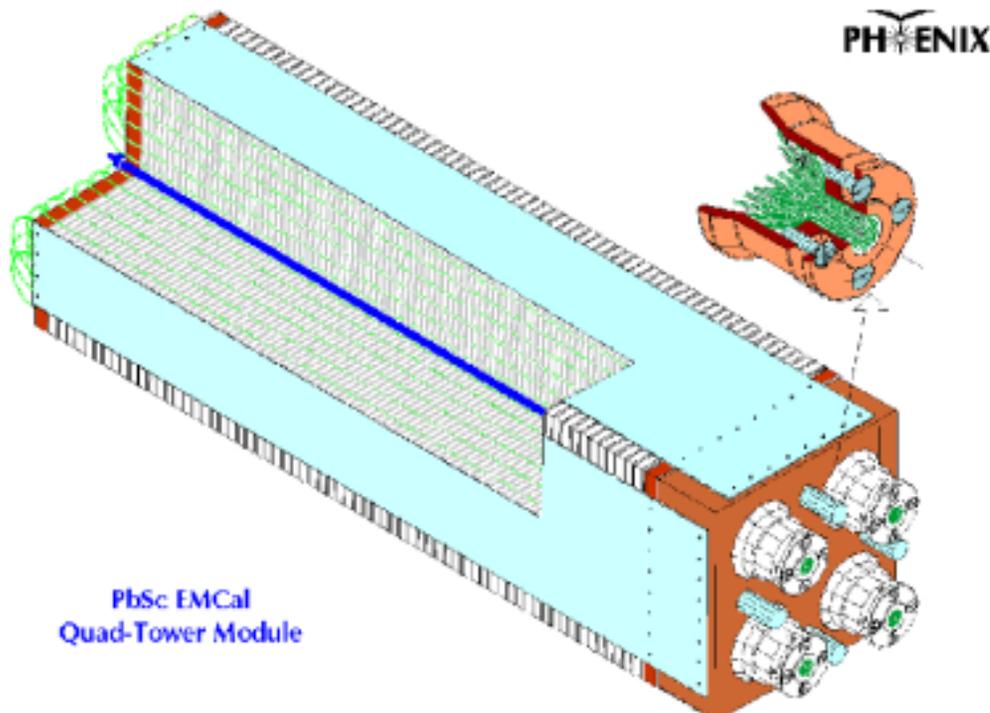
電磁カロリメータ

- π^0 測定のための検出器
- 2種類の電磁カロリメータ
 - PbSc型
 - Lead Scintillation Type
 - PbGl型
 - Lead Glass Type
- EMCal RICH Level1 Trigger(ERT)
 - High- p_T の π^0 測定に必要不可欠



– ここから8ページにわたって両方の装置の説明

PbSc型カロリメータ



PbSc EMCal
Quad-Tower Module

	PbSc
Size(cm x cm)	5.52 x 5.52
Depth(cm)	37.5
Number of towers	15552
Sampling fraction	~ 20%
η cov.	0.7
ϕ cov.	90+45deg
η /mod	0.011
ϕ /mod	0.011
X_0	18
Molière Radius	~ 3cm

Sandwich type calorimeter

Lead plates 55.2x55.2x1.5mm

Scintillator plates 110.4x110.4x4mm

Shish-kebab geometry wave shifter fiber readout

6x6 fibers \rightarrow 1 PMT = 1 tower

2 x 2 towers = 1 module

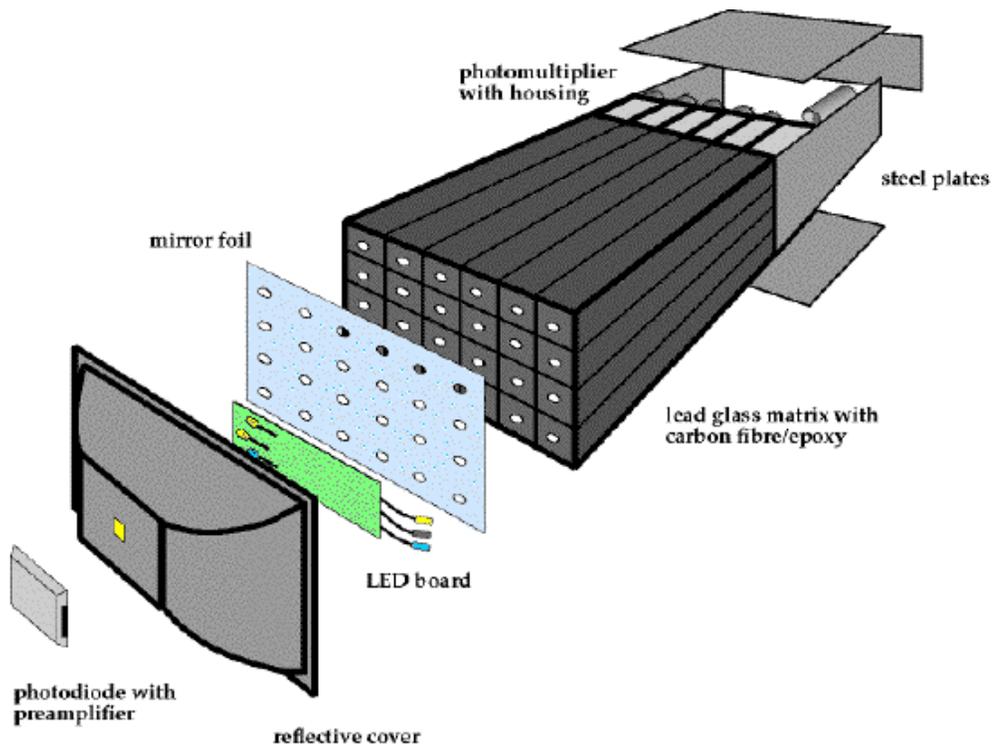
6 x 6 module = 1 super module

6 x 3 super module = 1 sector



PbSc sector 2.0m x 4.0m

PbG1型カロリメータ



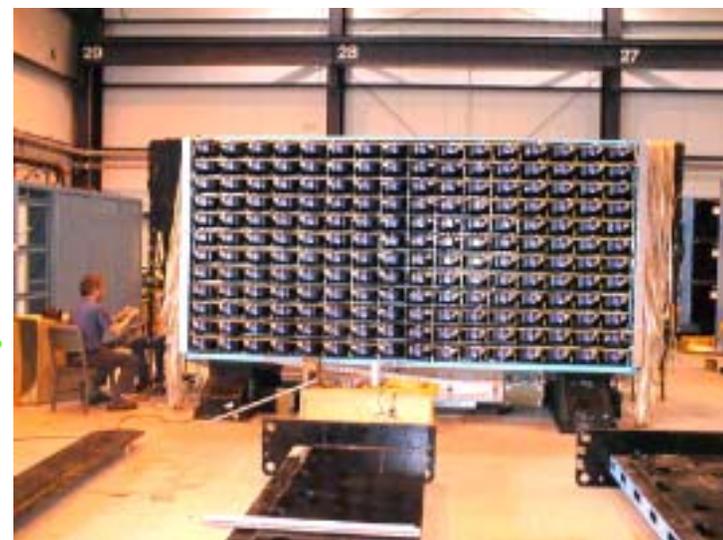
	PbG1
Size(cm x cm)	4.0 x 4.0
Depth(cm)	40
Number of towers	9216
Sampling fraction	100%
η cov.	0.7
ϕ cov.	45deg
η /mod	0.008
ϕ /mod	0.008
X_0	14.4
Molière Radius	3.68cm

Lead Glass calorimeter

Lead Glass 40x40x400mm
used at WA98 exp.

4x6 towers = 1 super module

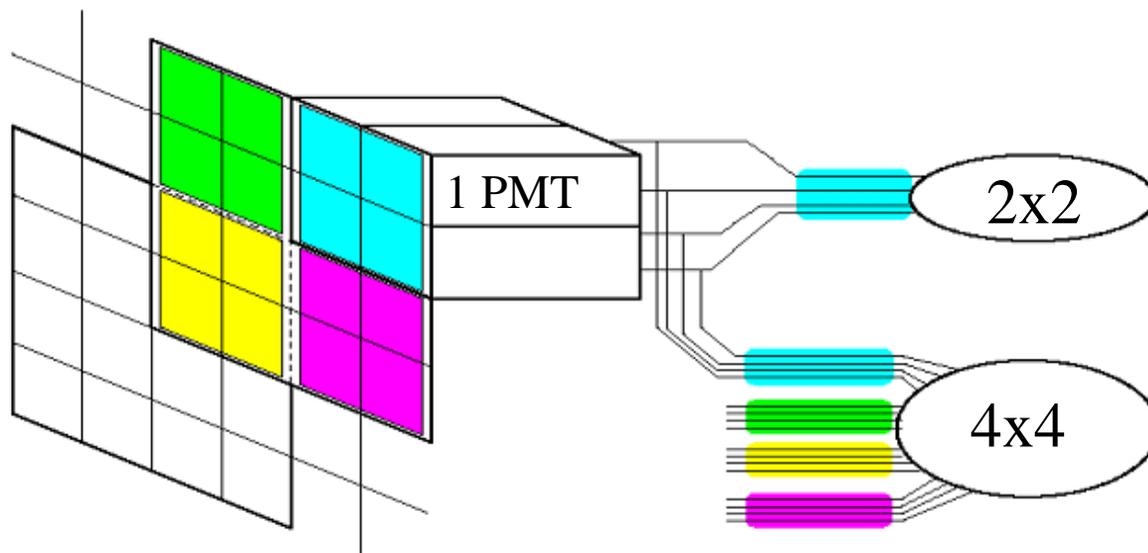
15*12 super module = 1 sector



PbG1 sector 2.1m x 3.9m

ERT トリガー

- EMCal RICH level1 Trigger(ERT)
 - electron, di-electron, photon, high- p_T π^\pm をトリガーする目的。
 - 本研究では、ERTのEMCal部分のみを使用
- 電磁シャワーのエネルギーを得るために、タワー
($5.5 \times 5.5 \text{cm}^2$ [PbSc] $4 \times 4 \text{cm}^2$ [PbGl])のエネルギーの合計をとる必要がある。
 - 2x2 towers non-overlapping sum (threshold=0.8GeV)
 - 4x4 towers overlapping sum (threshold=2 and 3GeV)
- 本研究での π^0 測定には、2x2 non-overlapping sumを使用。
 - Enhances high- p_T π^0 by a factor of 50



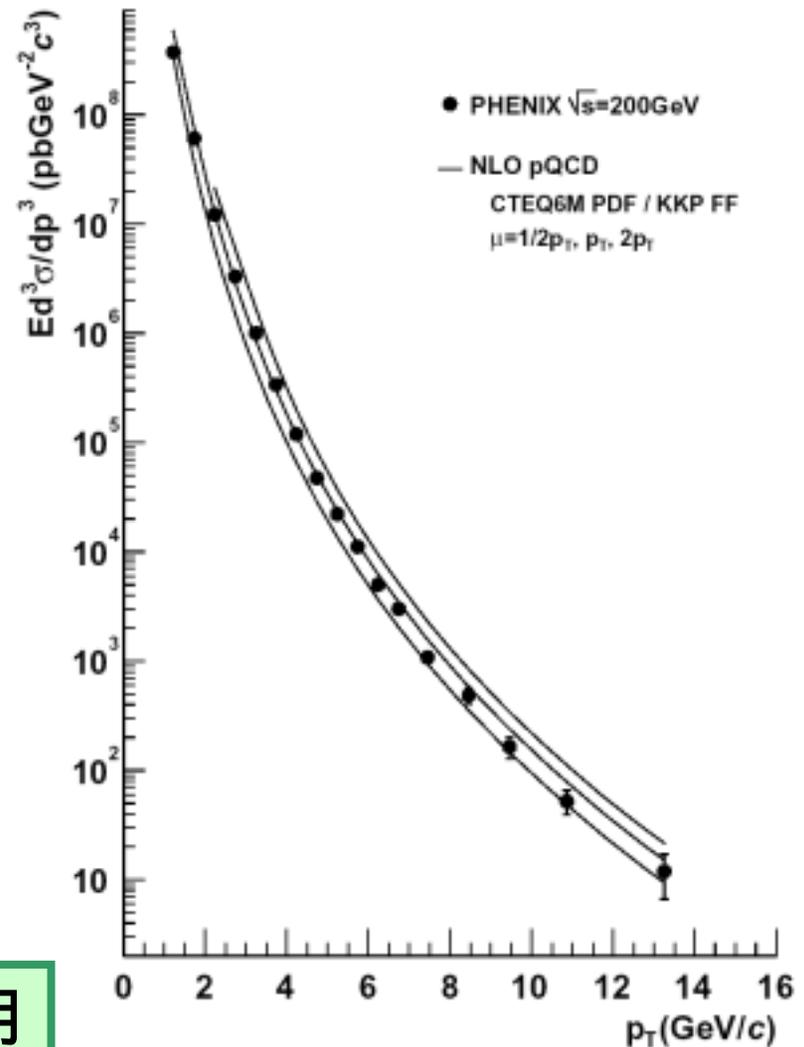
PHENIX実験



NLO-pQCD計算との比較

- Next-to-leading order(NLO) pQCD計算のパラメータ
 - Parton distribution function(PDF): CTEQ6M
 - Fragmentation function(FF): KKP
 - Matrix calculation by Aversa, et. al.
 - Renormalization and factorization scales are set to be equal and set to $1/2p_T, p_T, 2p_T$
- W.Vogelsangとのprivate communicationによる計算結果と一致している。

得られたデータは、3つのスケールを用いた計算結果の範囲で一致している。



過去のデータとの比較

- 陽子陽子衝突では最高エネルギー

- CERN

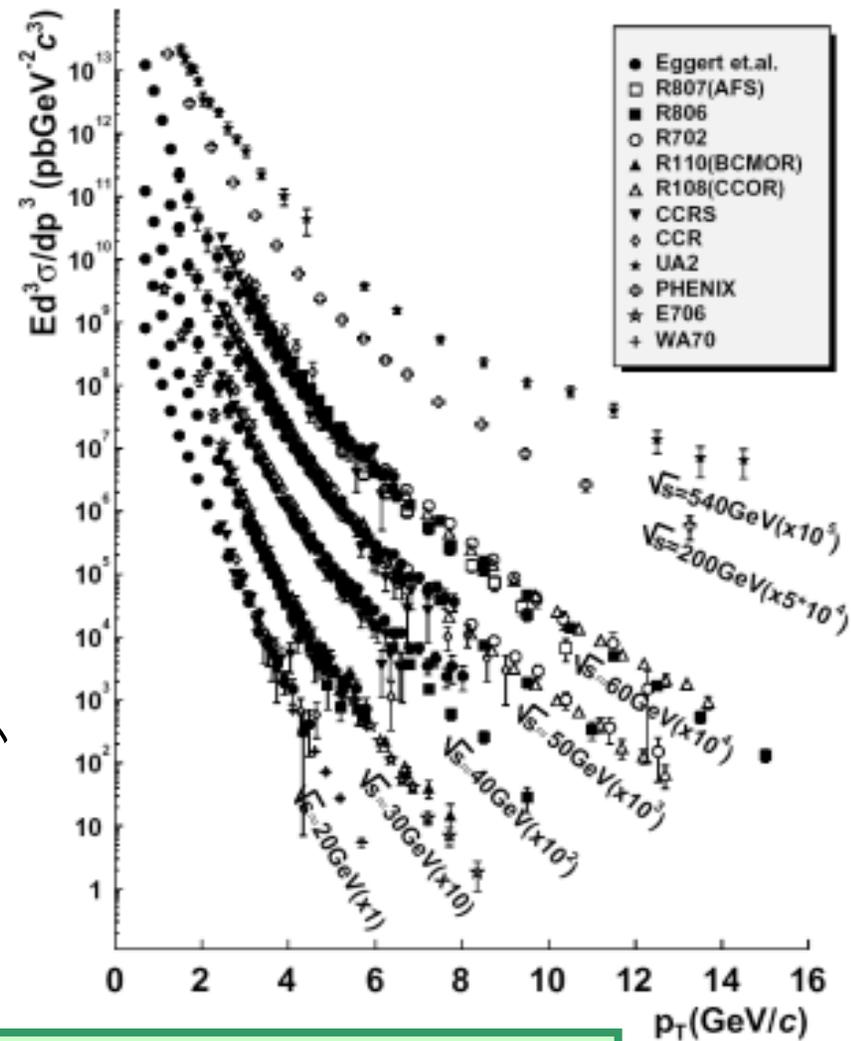
- ISR (1971~) p+p $\sqrt{s}=10\text{-}60\text{GeV}$
- SPS(1977~) p-beam $p\leq 450\text{GeV}$
- Sp \bar{p} S(1981~) p+ \bar{p} $\sqrt{s}\leq 640\text{GeV}$

- FermiLab

- Synchrotron(1972~) p-beam $p\leq 400\text{GeV}$
- Tevatron(1981~) p-beam $p\leq 0.9\text{TeV}$

- p_T 分布

- High p_T では、 \sqrt{s} が大きくなるにつれて、 p_T 分布の形の傾きは緩やか。
- Low p_T では、傾きは \sqrt{s} によらずほぼ一定に収束している。



今回得られた p_T 分布が、パートン(QCD)描像で説明できることを、過去のデータとの比較において考察を行う。

x_T スケーリング

- 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。

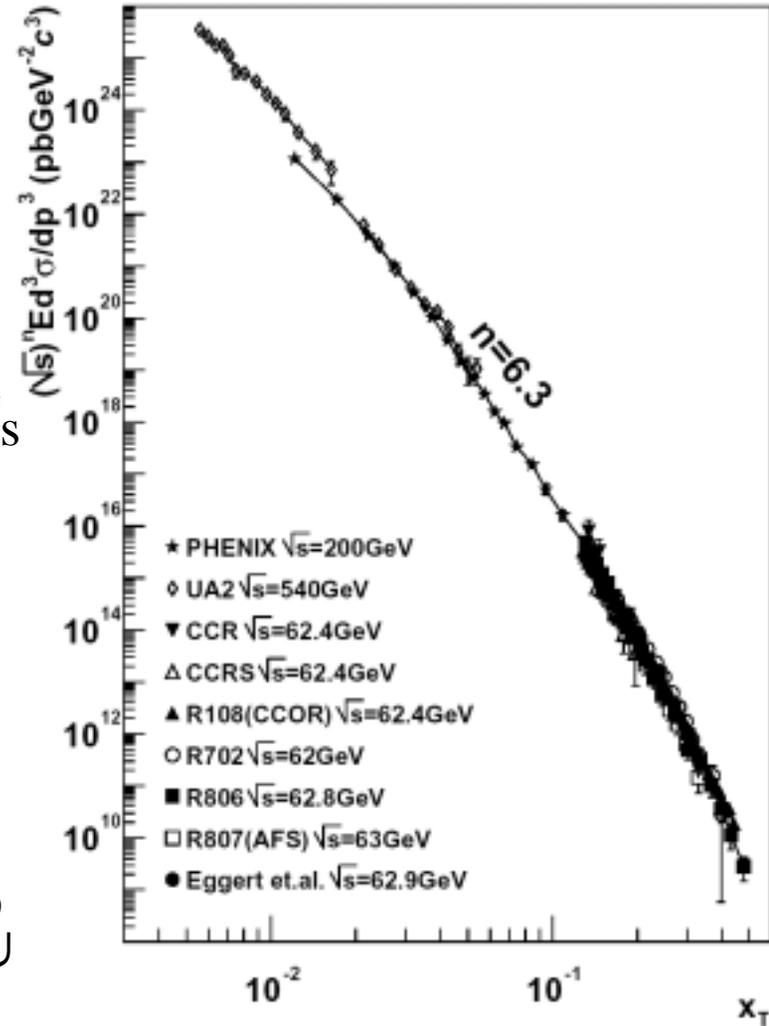
$$\sigma = \left(\sqrt{s}\right)^{-n} \times F(x_T)$$

$n = \text{定数}$ 。 $x_T = 2p_T/\sqrt{s}$

- 定数 n に対する予想
 - Leading order $n=4$
 - Next-to-leading order: $n=4+\alpha$
 - 過去の実験から $n=6.3$ (by R108 collaboration)
- x_T 分布は \sqrt{s} に依存しない

→ x_T スケーリング

- ここでは、今回得られたデータと過去のデータ $\sqrt{s} > 60\text{GeV}$ と比較して、 x_T スケーリングが $n=6.3$ で成り立つかどうか見る。



x_T スケーリングが $n=6.3$ で成り立つ → パarton 描像