



Midrapidity Neutral-Pion Production in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s}=200\text{GeV}$

鳥井 久行

2004年8月9日 博士論文公聴会

目次

- **研究動機I,II**
- **RHIC-PHENIX実験**
- **解析**
- **結果と議論**
- **結論**

研究動機 I

一つ目の動機

「QCDを確証するための基礎データの取得」

本研究ではどういう利点があるか。

- 陽子陽子衝突としては、世界最大エネルギー
 - 世界初の偏極陽子衝突コライダー
 - スピン物理：陽子スピンに対するグルーオンの寄与を測定するために、pQCDによる解釈が不可欠。そのための基礎としてまず inclusive cross section を測定し pQCD で説明できるかどうかを確認する必要がある。
- 陽子陽子衝突は、多くの gluon ジェットを含む。
 - gluon ジェットの理解するのに有利である。
 - Non-perturbative な効果

研究動機 I

pQCD理論によると、ハドロン衝突におけるハドロン生成($1+2 \rightarrow 3+X$)は、

$$\sigma_{1+2}^3 = \sum_{i,j,k} \int dx_i dx_j dx_k \times f_1^k(x_k, \mu) \cdot f_2^j(x_j, \mu)$$

parton distribution function(PDF)

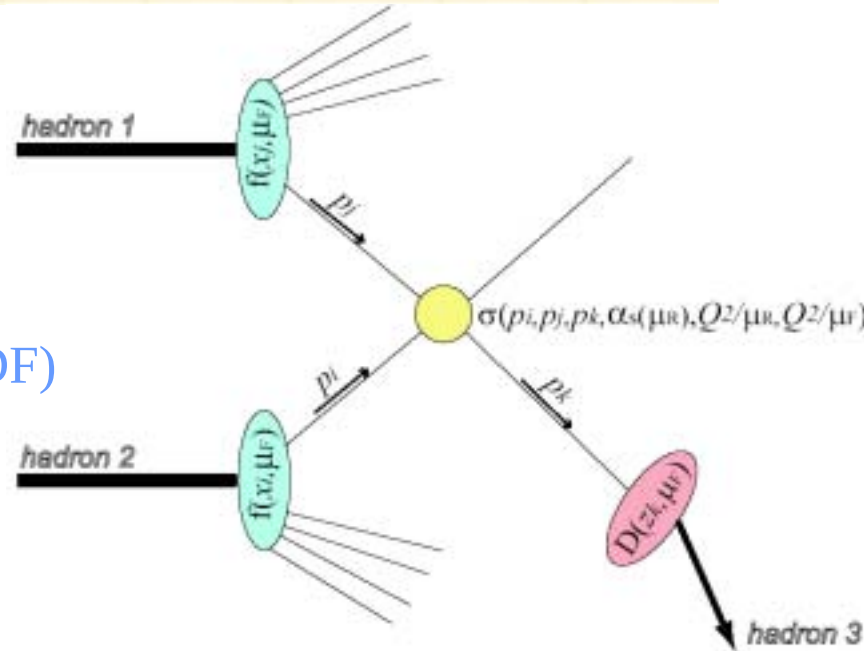
$$\times \sigma_{i,j}^k(p_i, p_j, p_k, \alpha_s(\mu_R), Q^2/\mu_F, Q^2/\mu_F)$$

$$\times D_k^3(z_k, \mu_F)$$

fragmentation function(FF)

μ_R =renormalization scale, μ_F =factorization scale

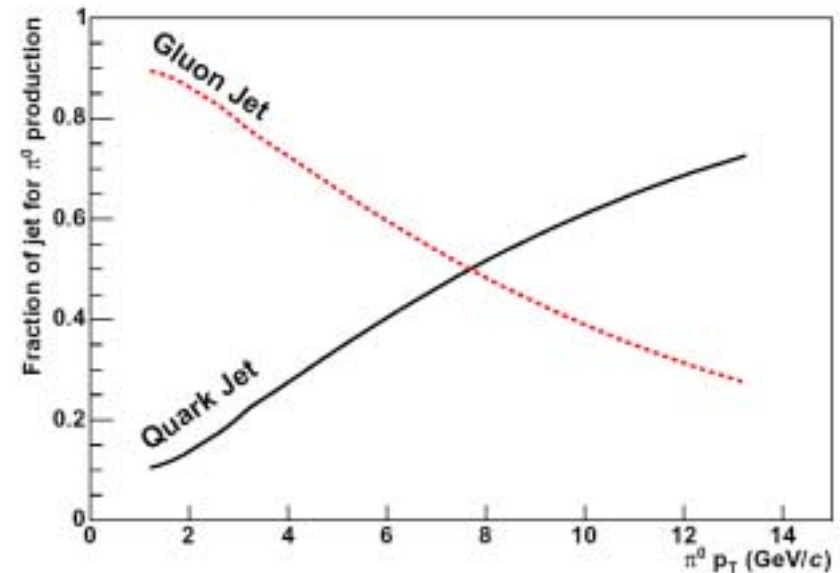
- PDF/FFは主に deep inelastic scattering(DIS)/ e^+e^- 消滅反応で測定。
 - Q-scaling violationは、pQCDの成果
- いくつかの理論グループが、実験PDF/FFデータを $x^a(1-x)^b$ 式でフィット。
 - PDF : GRV, CTEQ, MRST グループ
 - FF : BKK, KKP, Kretzer グループ
 - グループ間の違いは、使用するデータやフィット範囲の違い。



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

研究動機 I

- gluon FF(破砕関数)は、 $e^+e^- \rightarrow \bar{q}qg(3\text{jet})$ 反応を使って測定されてきた。
 - $z > 0.5$ の領域で大きな不定性。
 - 3-jetの統計からくる制限
 - Gluonジェット同定のモデル依存性
- 本実験はgluonジェットの宝庫
 - π^0 生成に寄与する平均 z は0.6~0.7
 - $\pi^0 p_T$ に依存。
 - 低い p_T では、gluon jet
 - 高い p_T では、quark jet
 - p_T 依存性を調べることで、quark/gluon jetをある程度区別できる。
 - 各理論グループがフィットして導き出したFFを使って、NLO-pQCD計算を行い、本データと比較することによりFFに対して研究を行う。



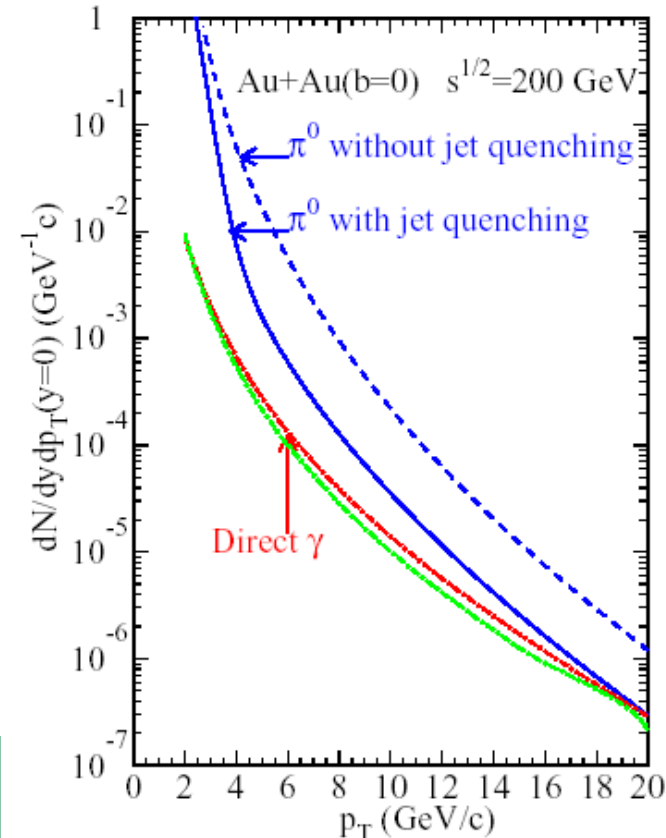
$z > 0.5$ のgluon jetについて理解を深めることが本研究の特色

研究動機 II

2つ目の動機

「Quark Gluon Plasma探索のための基礎データ」

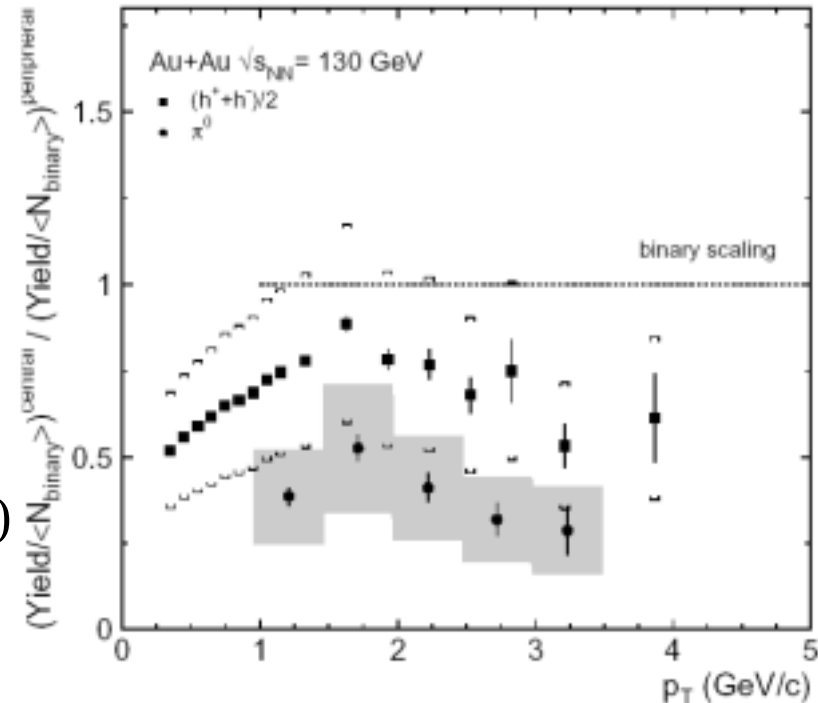
- Quark Gluon Plasma(QGP)とは、
 - 高温度又は高密度状態にすることにより閉じ込められていたクォークが自由になった状態。Big Bang直後 (10^{-10} sec後) の宇宙初期の状態であると考えられている。
- QGPを探索するための方法
 - “Jet Quenching”
 - 核子核子の初期衝突により散乱されたパートンがQGP中を通過する際にグルーオン制動輻射によりエネルギー減衰(Quenching)を受ける。
 - このエネルギー減衰はパートンジェットからの破砕片であるハドロンの p_T 分布の低 p_T 側への推移として観測出来るはずである。



予想:収量として約1/5～1/10に減衰

研究動機 II

- Jet Quenchingの過去の結果
 - CERN-SPS($\sqrt{s_{NN}} < 20 \text{ GeV}$)の鉛衝突
 - Jet Quenching効果なし
 - 2000年 $\sqrt{s_{NN}} = 130 \text{ GeV}$ 金金衝突
 - 正面衝突でかすり衝突と比較して π^0 ならびに荷電粒子の収量抑制が観測された。
 - かすり衝突においては中心度測定
の不定性が大きい
ため誤差 ($\sim 40\%$)
が大きかった。



金金衝突と比較するために、陽子陽子衝突の不定性の少ないデータを得ることが本研究の動機

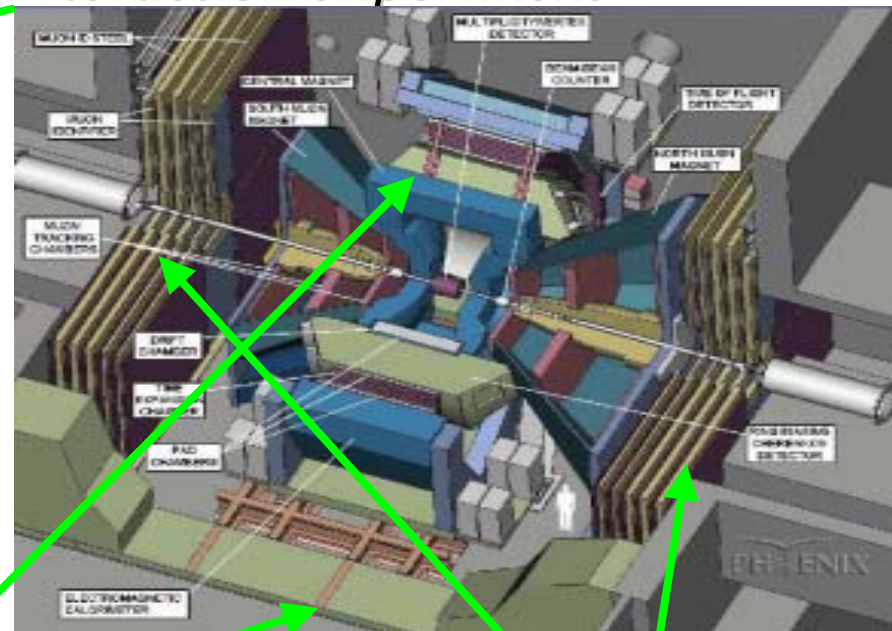
Relativistic Heavy Ion Collider



PHENIX実験



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

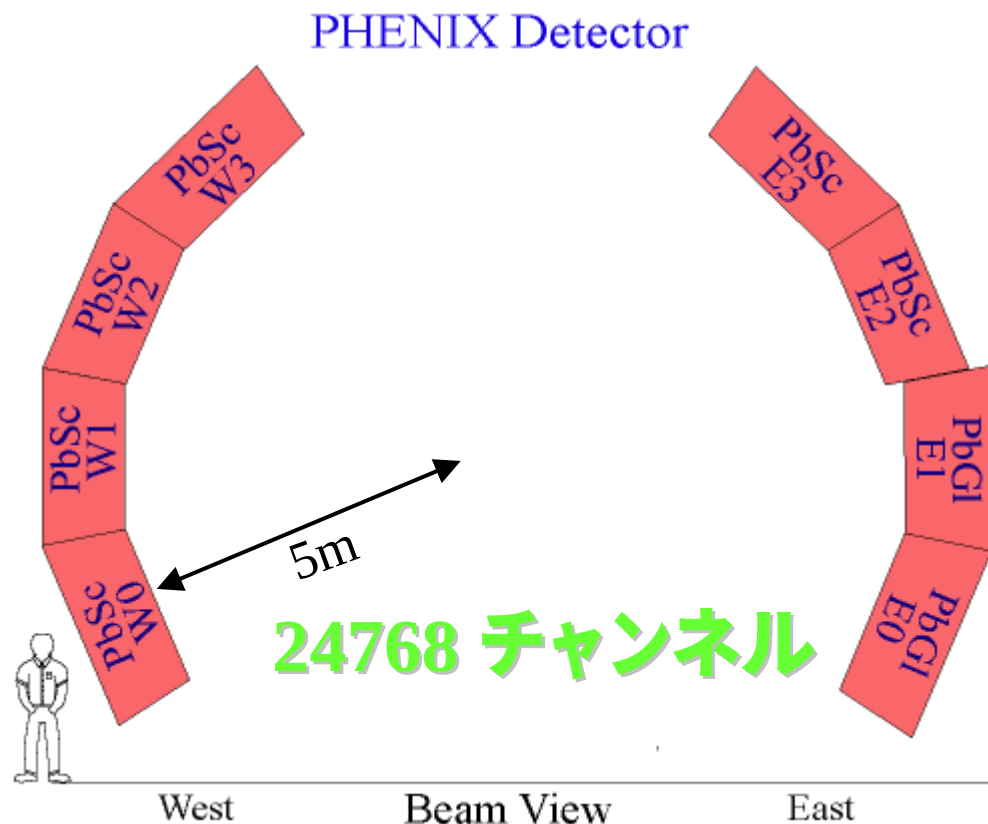
2 forward Spectrometers

衝突点、ルミノシティ、中心度を定めるための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)

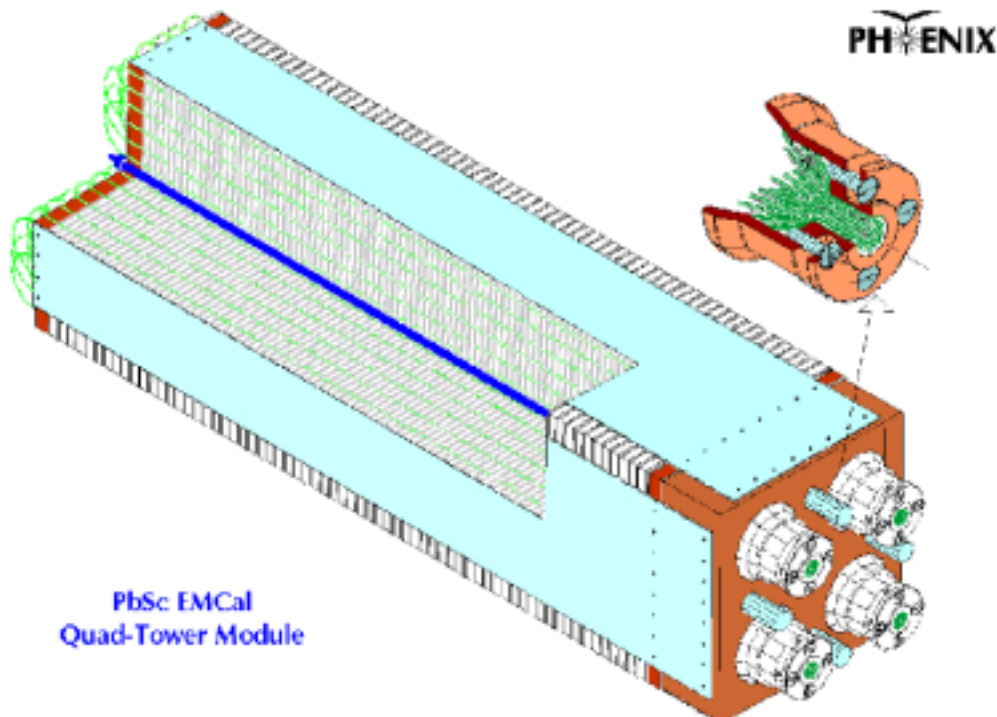
電磁カロリメータ

- 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
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

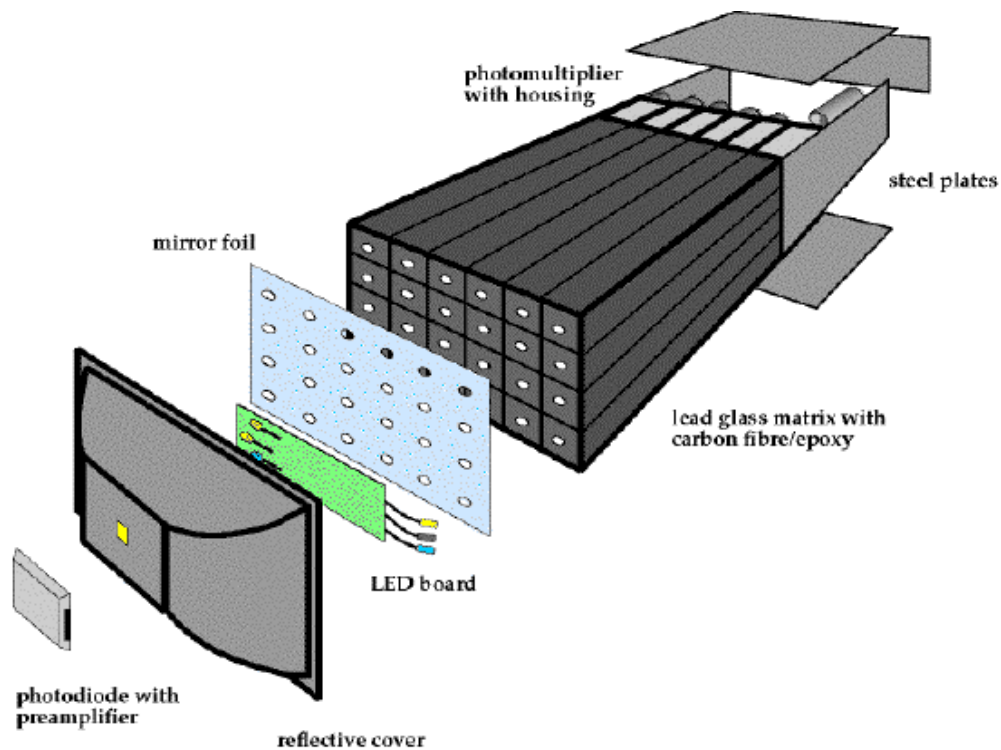
6 x 6 module = 1 super module

6 x 3 super module = 1 sector



PbSc sector 2.0m x 4.0m

PbGl型カロリメータ



	PbGl
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



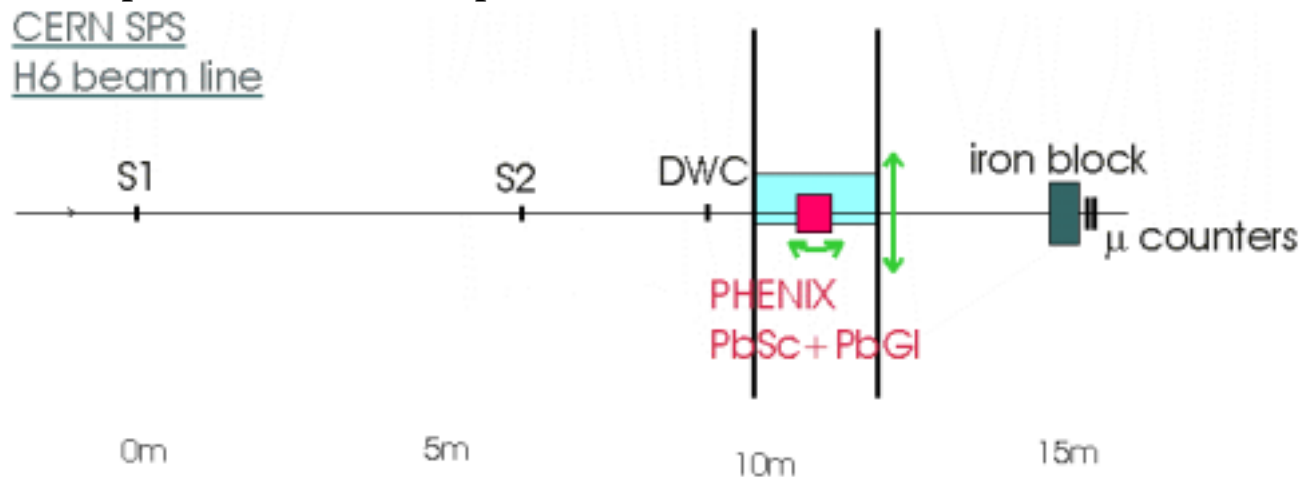
PbGl sector 2.1m x 3.9m

性能評価のためのテスト実験

- 電磁カロリメータの性能評価のためのテスト実験
 - 1996年 BNL-AGS electron 0.5-6GeV/c
 - 1998年 CERN-SPS electron 6-80GeV/c

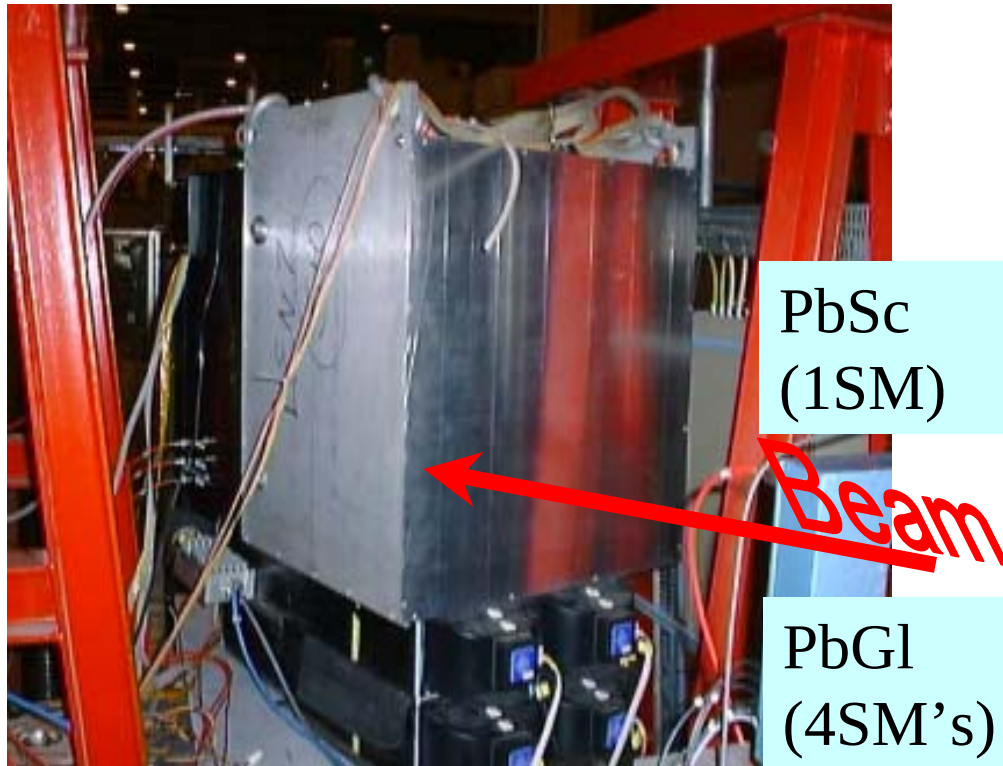
ここでは、私が主体となって行ったCERN-SPSでのテスト実験を簡単に説明し、得られた性能評価についてまとめる。

- テスト実験@CERN
 - Aug 28 - Sep 5 , 1998
 - hadron,electron,muon 5GeV/c to 80GeV/c
 - 1spill - 14.4sec 5k/spill in 20GeV/c electron



テスト実験@CERN

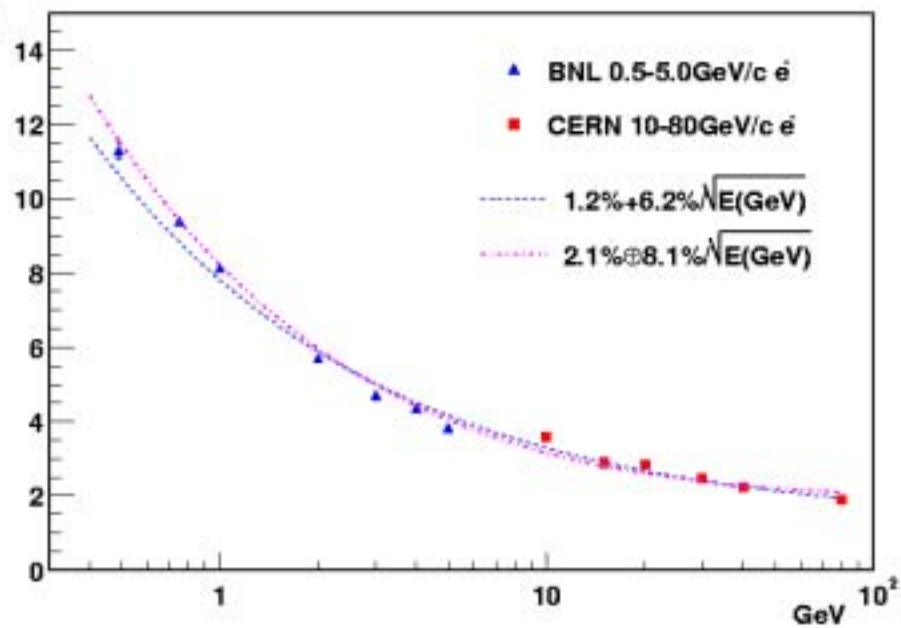
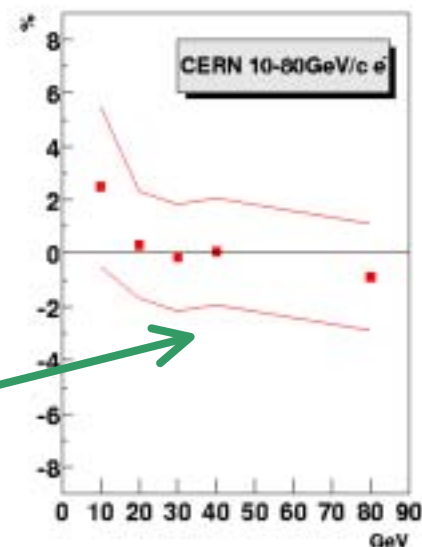
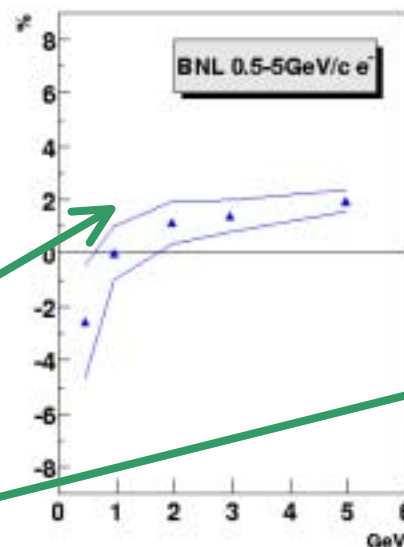
At the **CERN SPS** H6 beam line
from Aug.29 to Sep.5 1998



性能評価 (エネルギー測定)

エネルギー線形性

- 電磁シャワーの深さはエネルギーが大きくなればなるほど深くなる (PMTに近くなる)。
- ファイバー中での光の減衰により、高いエネルギーほど減衰の効果を受けにくくなる。
 - 減衰長 $\approx 100\text{cm}$
- エネルギーが大きくなれば、後ろから電磁シャワーの漏れが生じる。
 - 1% at 10GeV
 - 4% at 100GeV
- 10GeV以上では、2つの効果が相殺することが予想され、非線形性は約2%以下である。



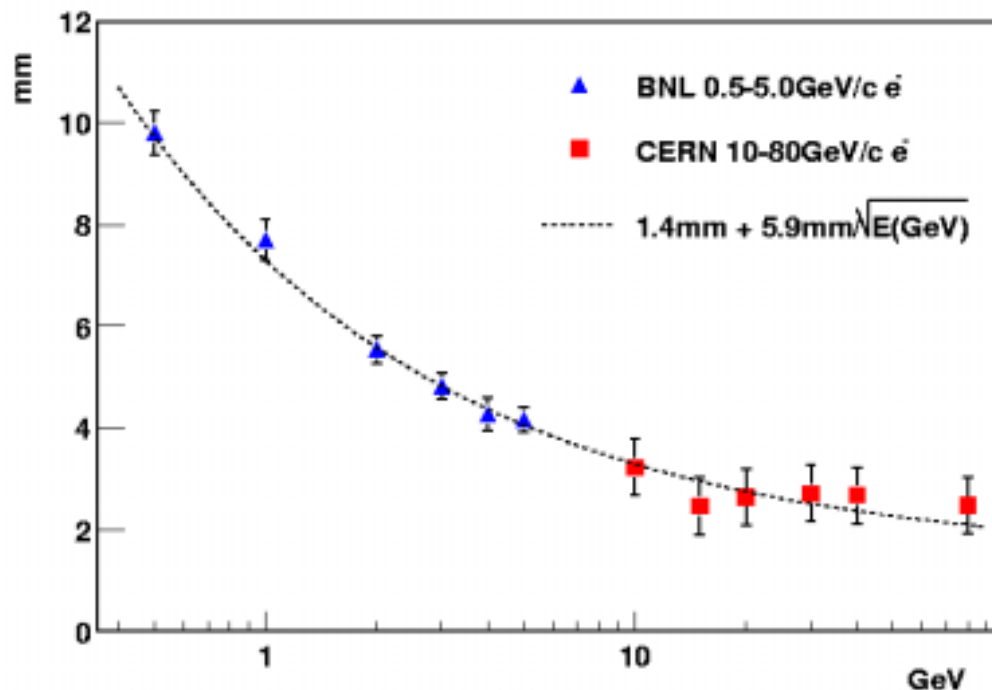
エネルギー分解能

- $2.1\% \oplus 8.1\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$

性能評価 (位置測定)

- 位置分解能

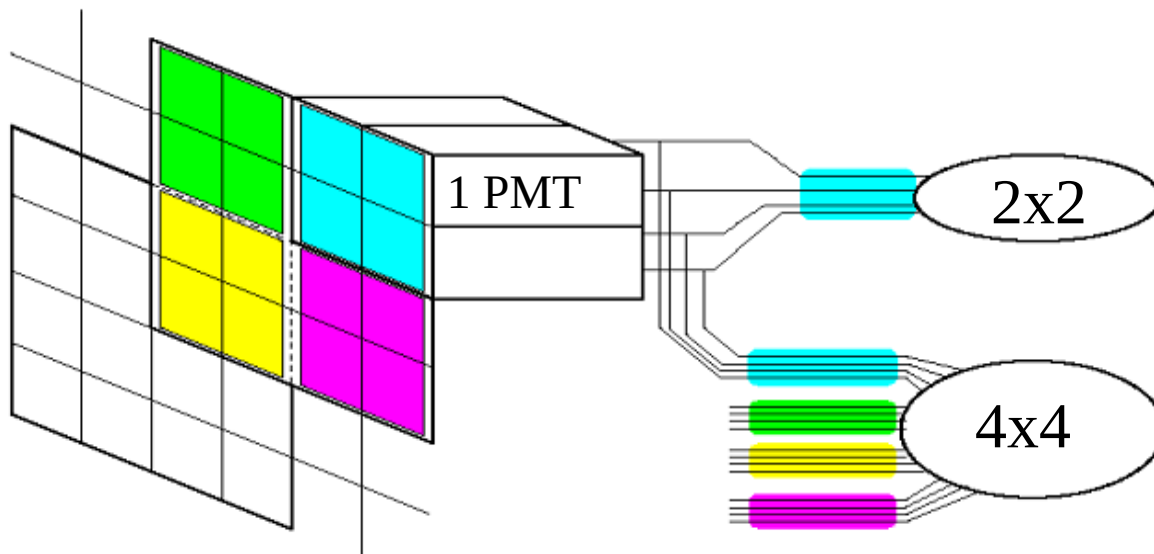
- $1.4\text{mm} + 5.9\text{mm}/\sqrt{E(\text{GeV})}$



これらの結果は、日本物理学会ならびに国際会議のポスターにて発表するとともに、参考論文 (Nucl.Instr.Meth A499(2003)521-536) にて発表した。

ERT トリガー

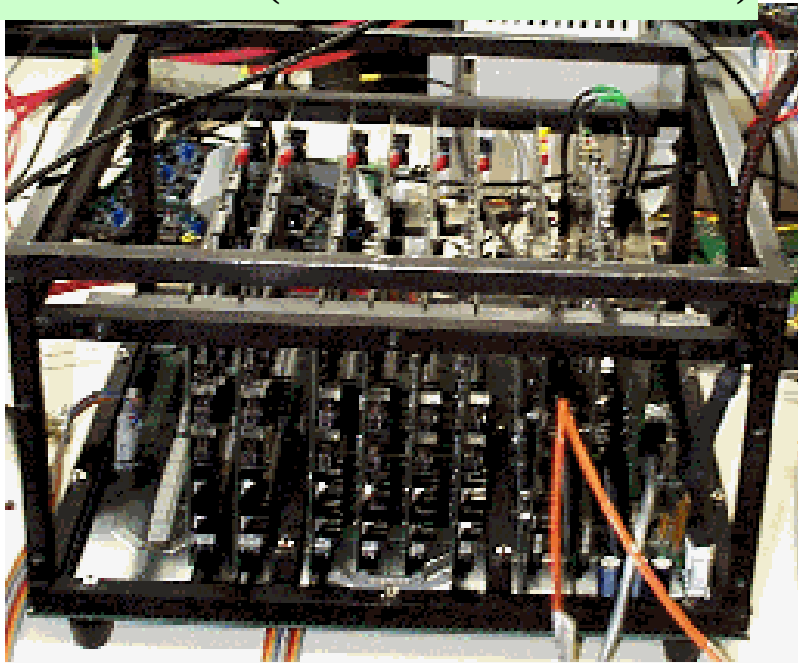
- EMCal RICH level1 Trigger(ERT)
 - electron, di-electron, photon, high- p_T $\pi^\pm$ をトリガーする目的。
 - **本研究では、ERTのEMCal部分のみを使用**
- **電磁シャワーのエネルギーを得るために、タワー**
($5.5 \times 5.5 \text{ cm}^2$ [PbSc] $4 \times 4 \text{ cm}^2$ [PbGl]) **のエネルギーの合計をとる必要がある。**
 - 2x2 towers non-overlapping sum (threshold=0.8GeV)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



ERT トリガー

- 主に読み出し回路ならびにトリガー回路のテスト、インストール、性能評価、等行ってきた。

Test Bench(FEE rack for 144 channels)



Trigger board(32sumのORを取る)



Run2001-2002の直前にインストールした。ノイズ(主に回路の発振による)がおおく、約1/5の領域で使用不可。

Run2003までに問題の回路交換を行い、ほぼ100%領域で稼動できた。

PHENIX実験と私

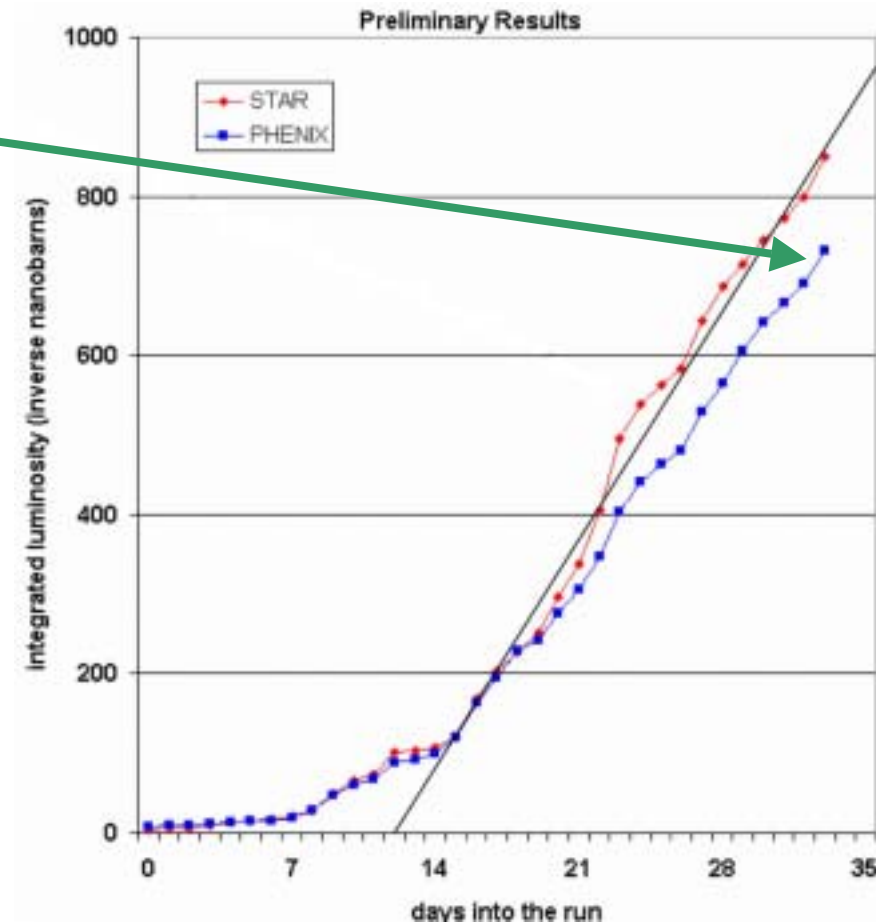
- 1998年4月 博士後期課程進学
- 1998年4-6月 PHENIX-MuID建設に従事
- 1998年6-9月 テスト実験@CERN
- 1999年4-6月 commissioning run
- 2000年4-6月 金金衝突130GeV
- 2001年5-12月 トリガーのテスト・インストール
- 2001年9-12月 金金衝突200GeV
- 2001年12月-2月 偏極陽子陽子衝突実験
- 2002年7月 国際会議にて結果発表
- 2003年4月 公表論文投稿
- 2003年11月 公表論文受理

PHENIX実験



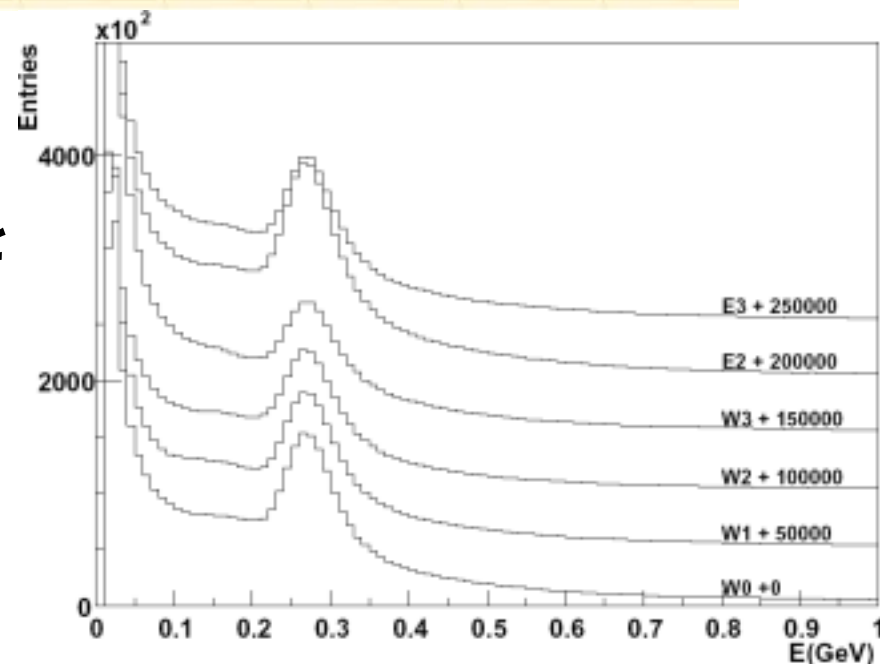
解析～実験データ～

- 2002年12月～2003年2月 陽子陽子衝突実験 ($\sqrt{s}=200\text{GeV}$)
 - Delivered luminosity 700nb^{-1}
 - Recorded luminosity 150nb^{-1}
 - With only vertex cut $<|75\text{cm}|$
 - Vertex cut $<|30\text{cm}| \rightarrow 70\text{nb}^{-1}$
- トリガー
 - Minimum bias trigger
 - BBC($|\eta|=3\sim3.9$)に荷電粒子が一つ以上(南北合計2つ)を要求する。
 - ERT trigger(high- p_T trigger)
 - 他、
- 本研究では、 39nb^{-1} 相当を使用。
 - minimum bias 16M events
 - high- p_T trigger 18M events



解析 ～エネルギー補正～

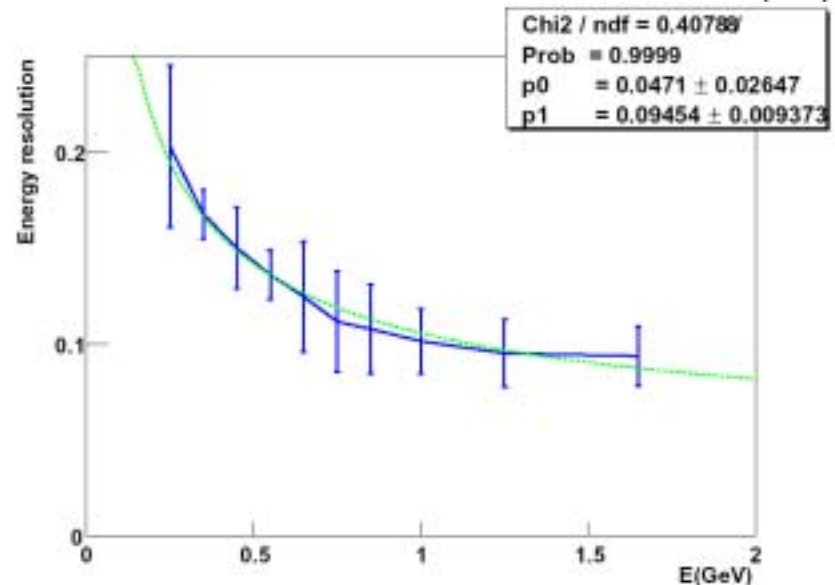
- エネルギー校正は実験データを用いて行う。
 - 荷電粒子によるイオン化エネルギーを用いて各タワー間の相対補正を行う。
 - 260MeVのエネルギーピーク
 - 絶対エネルギーは π^0 の質量を用いて行う。



- 補正後のエネルギー分解能を電子陽電子を用いて見積もる。

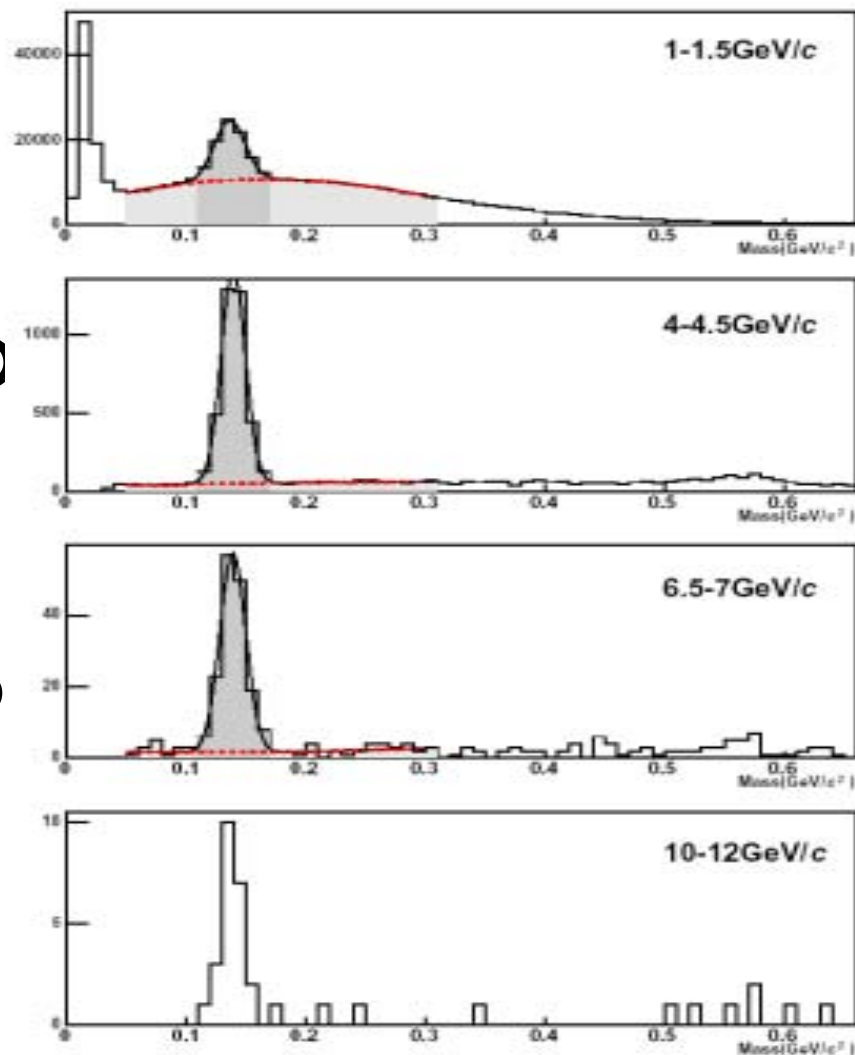
$$\sigma_E/E = 9.4\%/\sqrt{E} \oplus 4.7\%$$

- 得られた性能評価はMonte Carlos simulation に反映。



解析 $\sim \pi^0$ 測定 $\sim$

- Invariant massの再構成
 - M.B. trigger $p_T(1,1.5)\text{GeV}/c$
 - high- p_T trigger
 $p_T(4,4.5)(6.5,7)(10,12)\text{GeV}/c$
- バックグラウンドを見積もるために、ピーク部分(gaussian)といくつかの関数を使いフィットする。
 - $p_T=1-1.5\text{GeV}/c$ N/S = 200%
 - $p_T>5\text{GeV}/c$ N/S = 10%
 - $p_T>8\text{GeV}/c$ では正確に見積もることが出来ないため、 $p_T<8\text{GeV}/c$ からの外挿で見積もった。
- high- p_T trigger
 - Rejection Factor = 50
 - Measured 1-15 GeV/c π^0
 - 30個 π^0 at $p_T=10-12\text{GeV}/c$
 - 10個 π^0 at $p_T=12-15\text{GeV}/c$



解析 ~補正~

L

Luminosity

minimum bias(M.B.) trigger efficiency(51%)

$$\varepsilon_{\pi^0}^{(MB)}(p_T) = \frac{N_{\pi^0}^{(MB \& 4 \times 4)}}{N_{\pi^0}^{(4 \times 4)}}$$

π^0 efficiency in Min. Bias trigger 75% flat

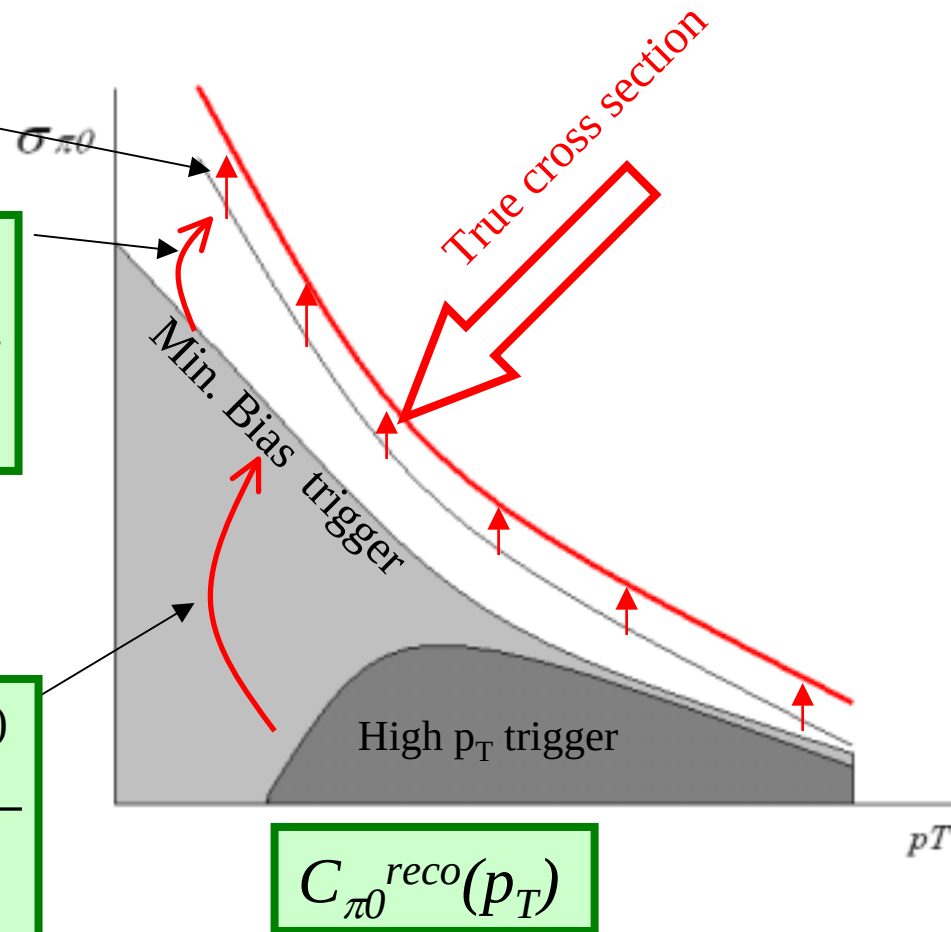
Trigger bias for Min. Bias trigger

$$\varepsilon_{\pi^0}^{(High)}(p_T) = \frac{N_{\pi^0}^{(2 \times 2 \& MB)}}{N_{\pi^0}^{(MB)}}$$

80% flat for $p_T > 3\text{GeV}$

π^0 efficiency in high- p_T trigger

“turn-on” curve for trigger



efficiency, acceptance, p_T smearing,

解析

～efficiency, acceptance, p_T smearing～

- p_T smearing効果

- 有限のエネルギー分解能により、測定された p_T は誤差をもつ。これにより測定された p_T 分布がずれる。
- Monte Carloを使って p_T 分布の補正。

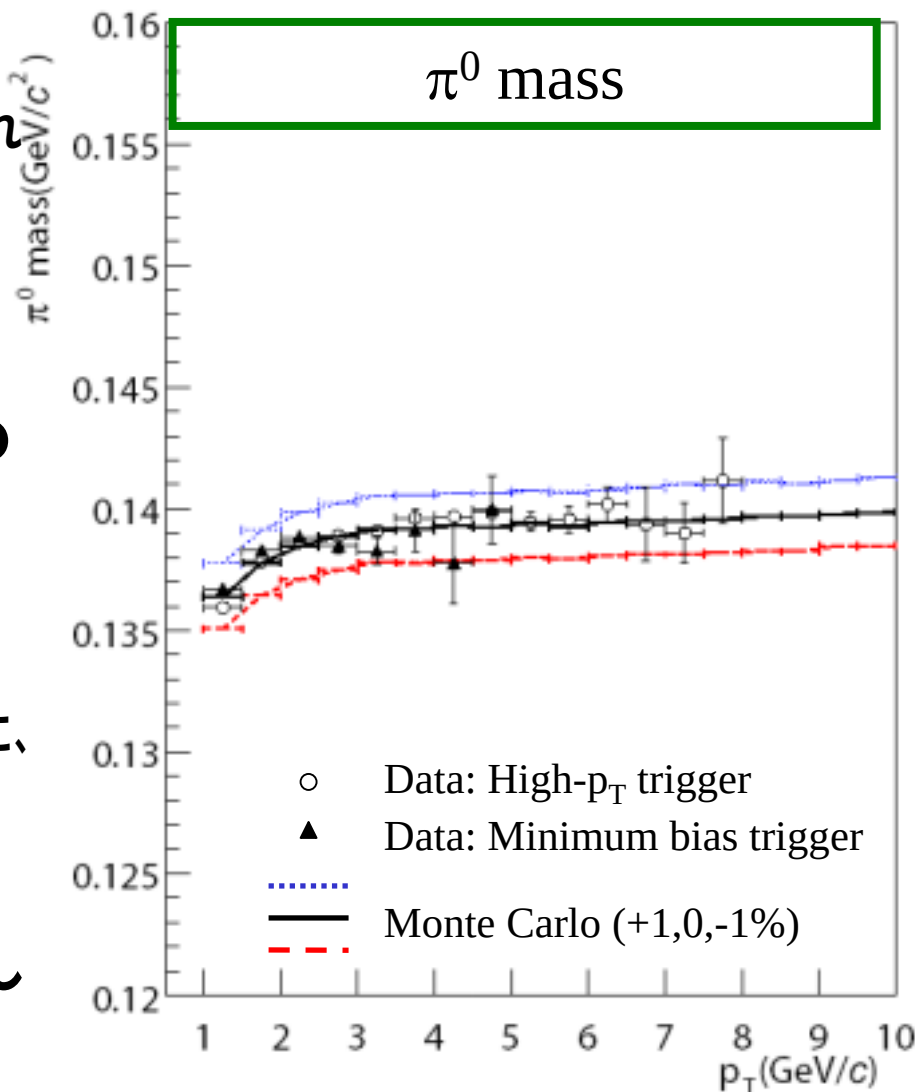
$$C_{\pi^0}^{reco}(p_T)$$

→同時に、見かけ上の π^0 質量は標準のものより大きく見える

- p_T 測定に誤差があるために、ある p_T binで π^0 をreconstructした際、本来両隣の p_T binに入るべき π^0 が検出される。
- π^0 p_T 分布は大きなスロープを持つために、低い p_T からの染み出しの数が多い。
- 測定 p_T が高く測定されたものは、測定質量も高く見える。

- 測定 π^0 質量は、 p_T smearingの効果が正しく見積もられたかどうかの良い試金石。

- 同時に、絶対エネルギー校正が $\pm 1\%$ で補正できていることを確認。

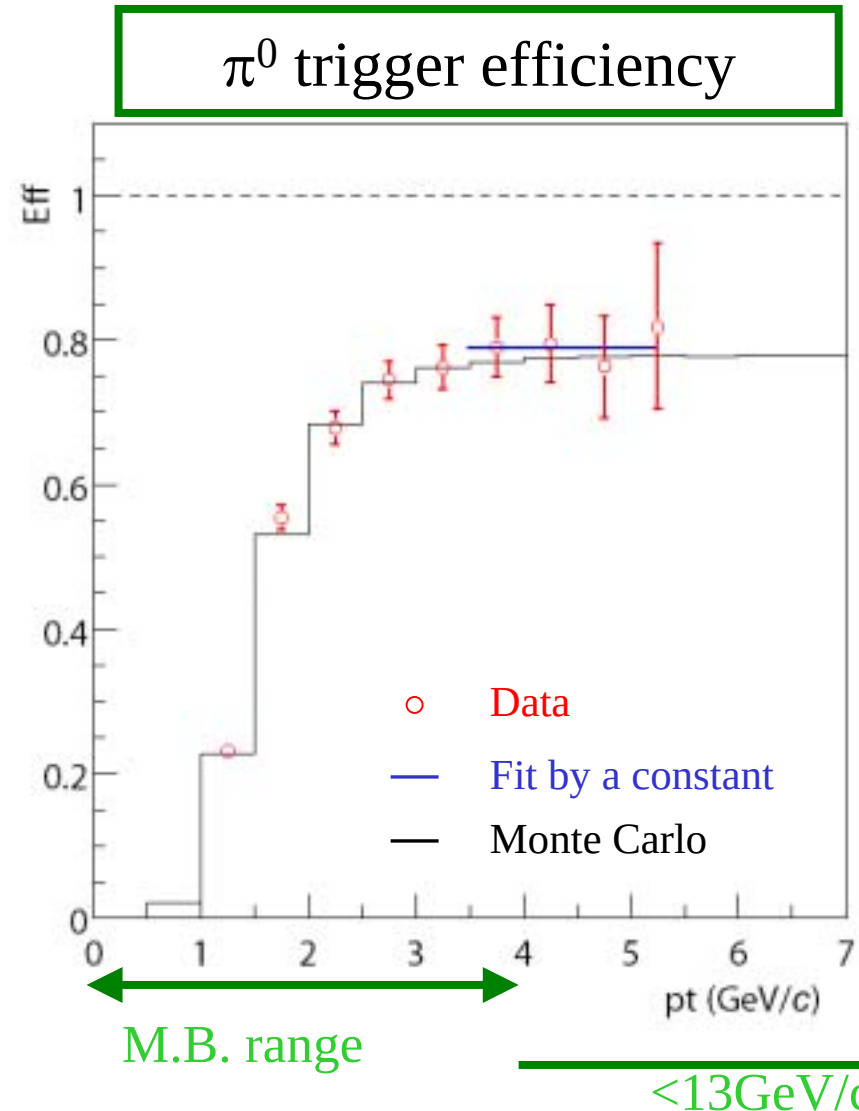


解析 ~trigger efficiency~

- high-pT trigger 効率は、minimum bias(M.B.) trigger eventを使って見積もる。

$$\varepsilon_{\pi^0}^{(High)} = \frac{N_{\pi^0}^{(2 \times 2 \& MB)}}{N_{\pi^0}^{(MB)}}$$

- トリガー効率は、 $p_T > 3 \text{ GeV}/c$ で一定値($\sim 80\%$)
 - 有効なトリガー回路の面積比と一致。
 - M.B. trigger data for 1-4 GeV/c
 - 2x2 trigger for 4-15 GeV/c



解析 $\sim \pi^0$ efficiency in minimum bias trigger $\sim$

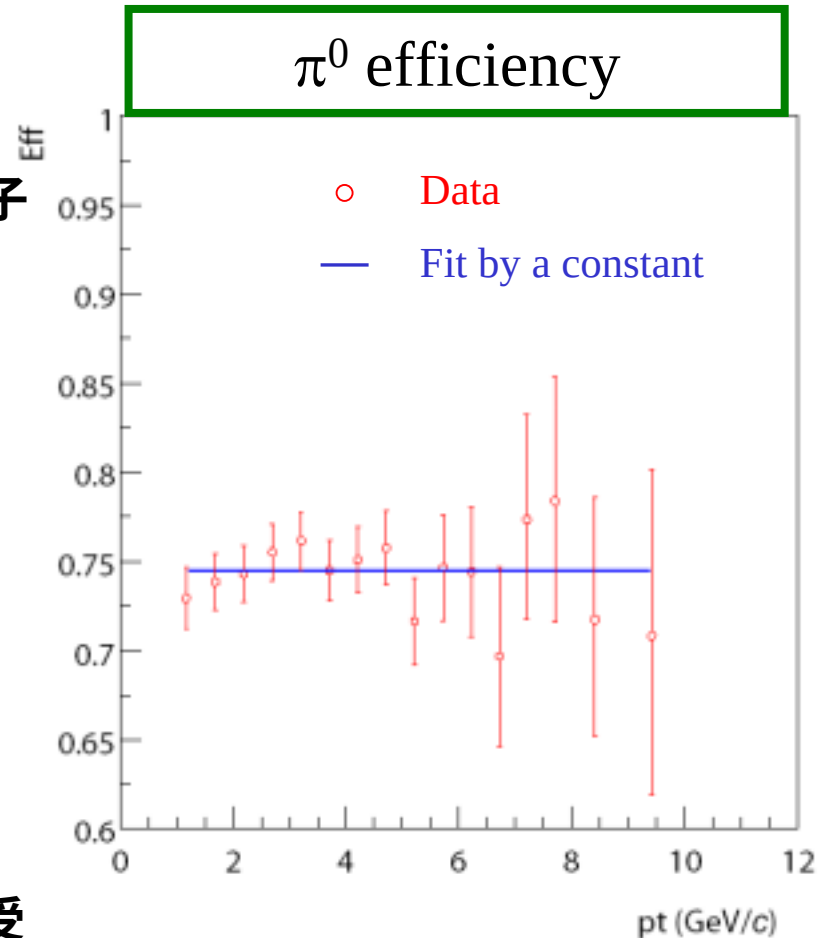
- minimum bias(M.B.) triggerは、 $|\eta|=3\sim 3.9$ の領域に荷電粒子が一つ以上(南北合計2つ)を要求する。
 - これは、中間ラピディティ領域における粒子生成に影響(bias)を与える。
- π^0 efficiency in M.B. trigger
 - ERTトリガーのうち、4x4 overlapping sumはM.B.トリガーとcoincidenceしてない。
 - 4x4トリガーを使って得られた影響(bias)を受けていない π^0 サンプルを使って直接測定。

$$\mathcal{E}_{\pi^0}^{(MB)} = \frac{N_{\pi^0}^{(MB \& 4 \times 4)}}{N_{\pi^0}^{(4 \times 4)}}$$

- もし、イベントに対するM.B. trigger efficiency(51%)と同じならば、影響(bias)を受けていないことになる。

結果は75% Pythia simulationと良い一致

M.B.triggerは、high multiplicityのイベントを選んでいる。



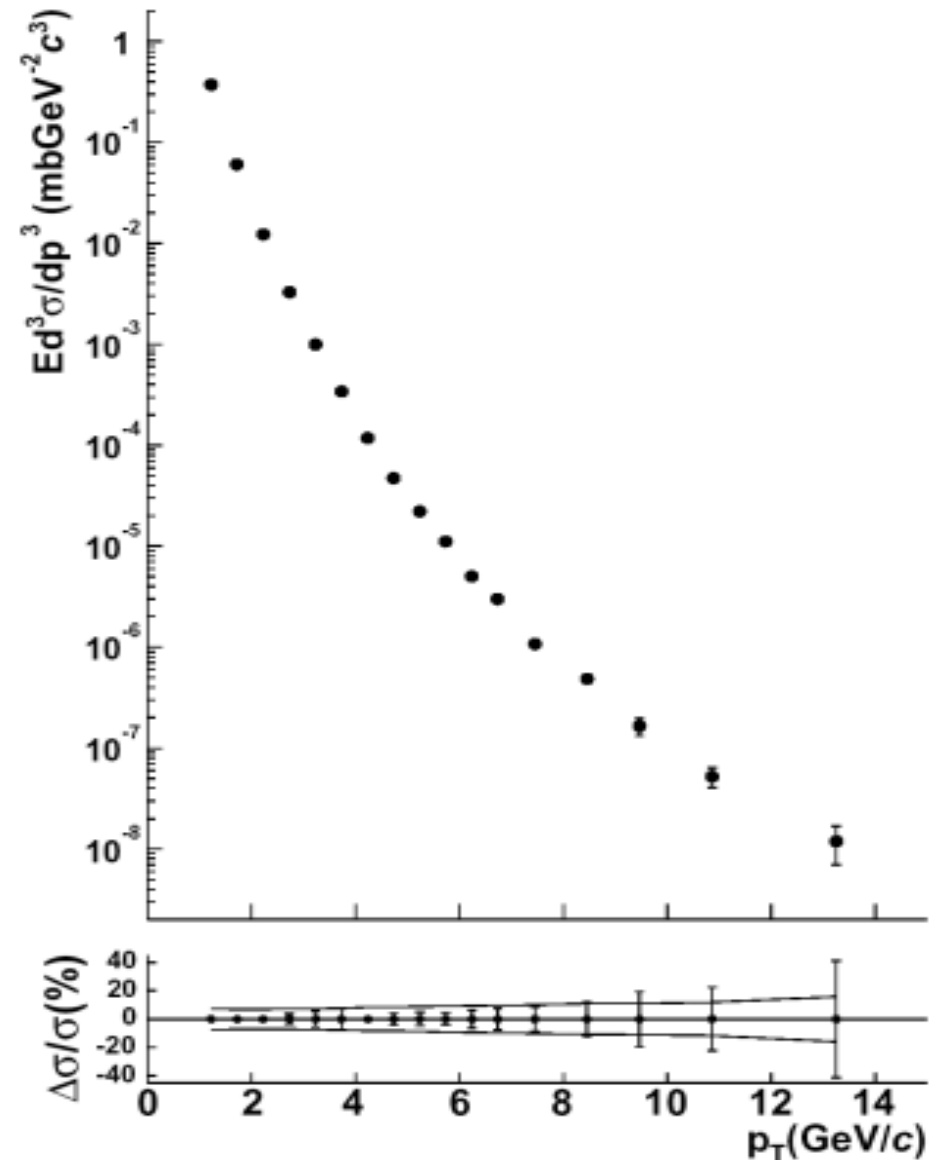
結果

- **結果は、**

- $p_T = 1 - 13 \text{ GeV}/c$
- クロスセクションにして、 $10^{-8} \sim 1 \text{ mb}/\text{GeV}^2/c^3$ を測定

- **誤差**

- ルミノシティの誤差 9.6%
- 系統誤差 7 ~ 15%
 - 主な寄与は絶対エネルギー補正によるもの。
- $p_T > 8 \text{ GeV}/c$ では、統計誤差が系統誤差に比べて大きい。
 - $p_T = 13.3 \text{ GeV}/c$ で統計誤差 40%



Normalization systematic error 9.6% is not included here.

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

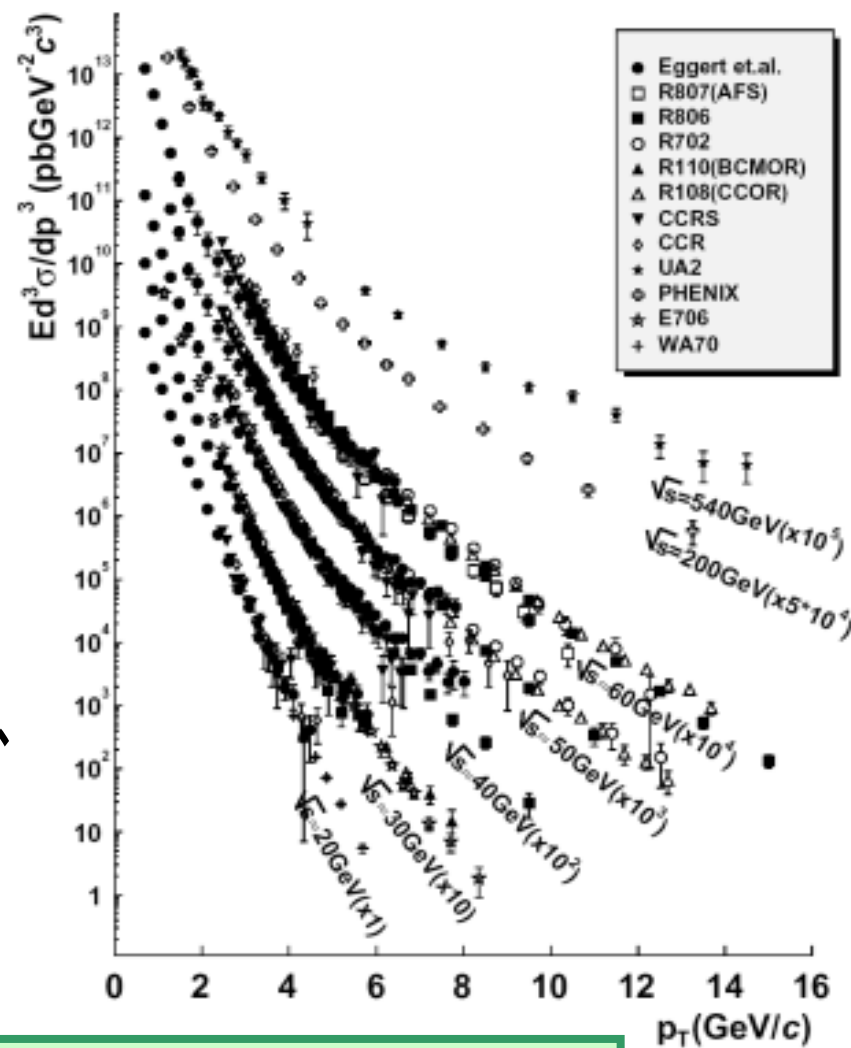
- ISR (1971~) p+p $\sqrt{s}=10\text{-}60\text{GeV}$
- SPS(1977~) p-beam $p\leq 450\text{GeV}$
- Sp $\bar{p}$ S(1981~) p+ $\bar{p}$ $\sqrt{s}\leq 640\text{GeV}$

- 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。

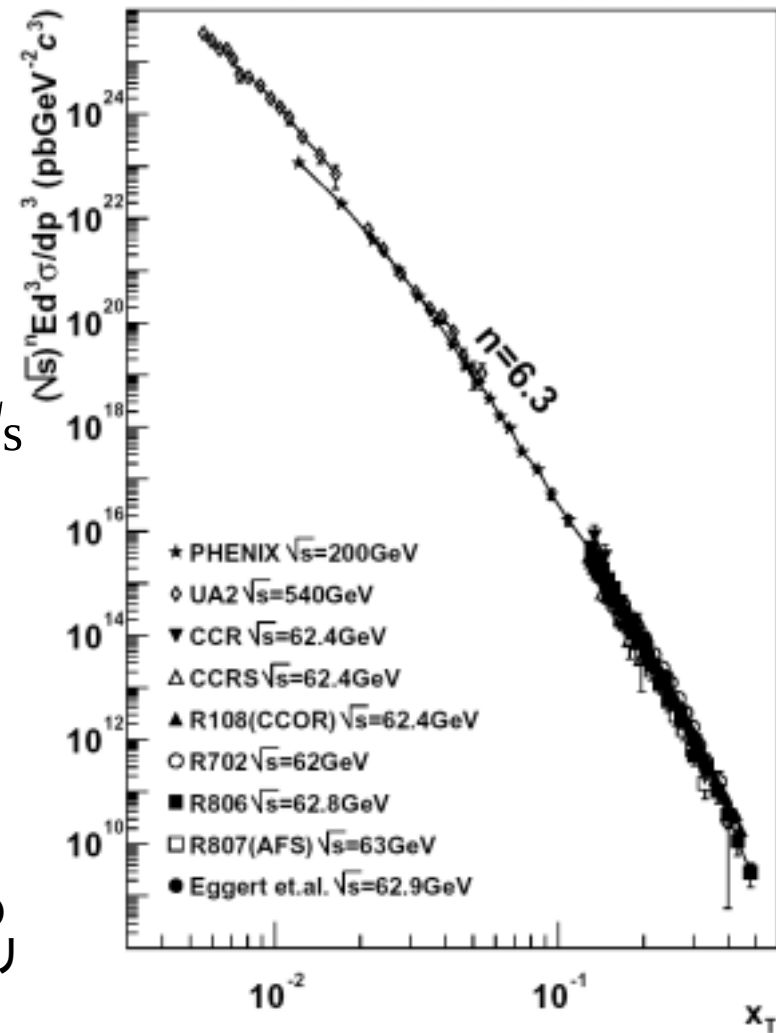
$$\sigma = \left(\sqrt{s}\right)^{-n} \times F(x_T)$$

n =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

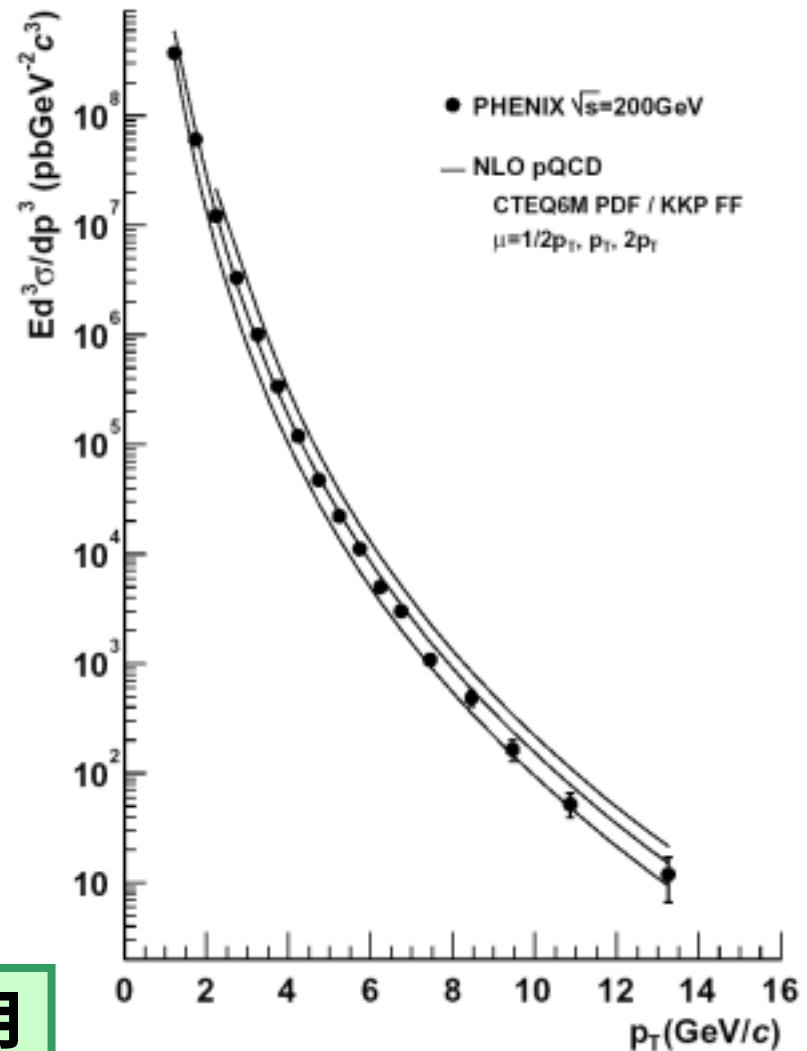
- ここでは、今回得られたデータと過去のデータ $\sqrt{s}>60\text{GeV}$ と比較して、 x_T スケーリングが $n=6.3$ で成り立つかどうか見る。



x_T スケーリングが $n=6.3$ で成り立つ→パートン描像

NLO-pQCD計算との比較

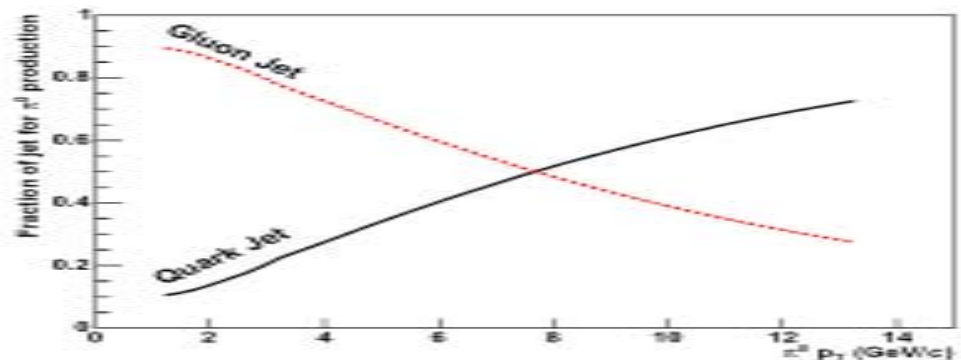
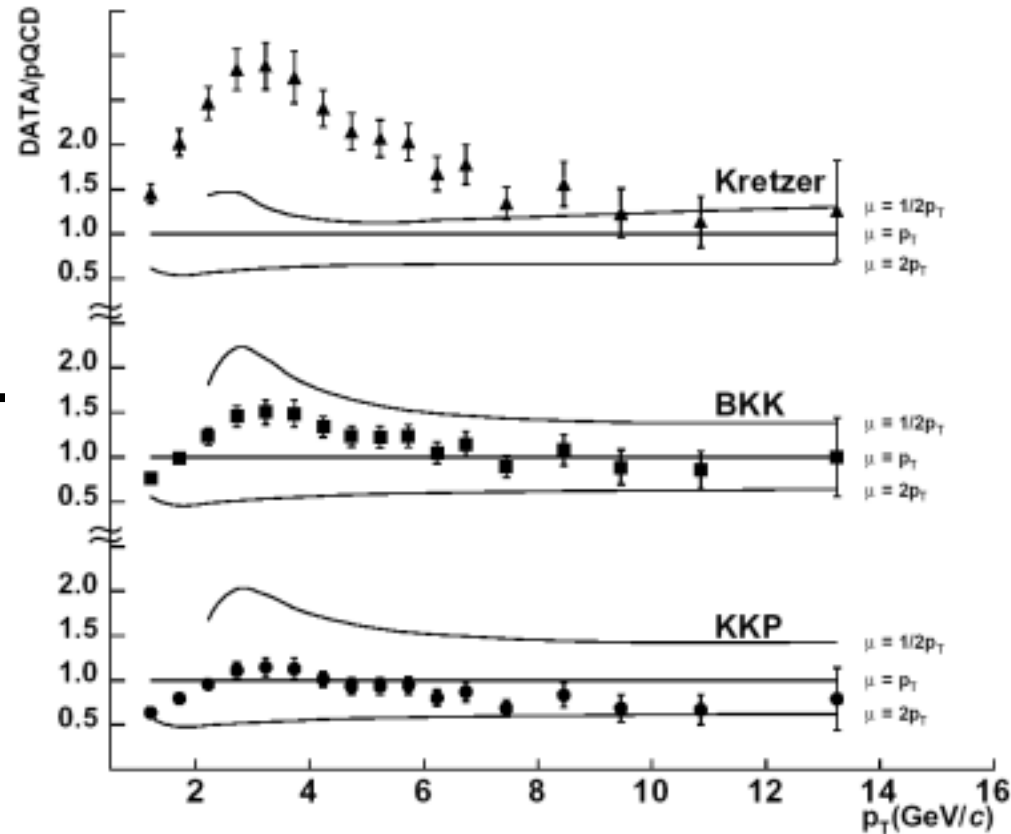
- Next-to-leading order(NLO)
pQCD計算のパラメータ
 - Parton distribution function(PDF): CTEQ6M
 - Fragmentation function(FF): KKP
 - Matrix calculation by Aversa, et. al.
 - Renormalization and factorization scales are set to be equal and set to $1/2p_T, p_T, 2p_T$
- W.Vogelsangとのprivate communicationによる計算結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



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。

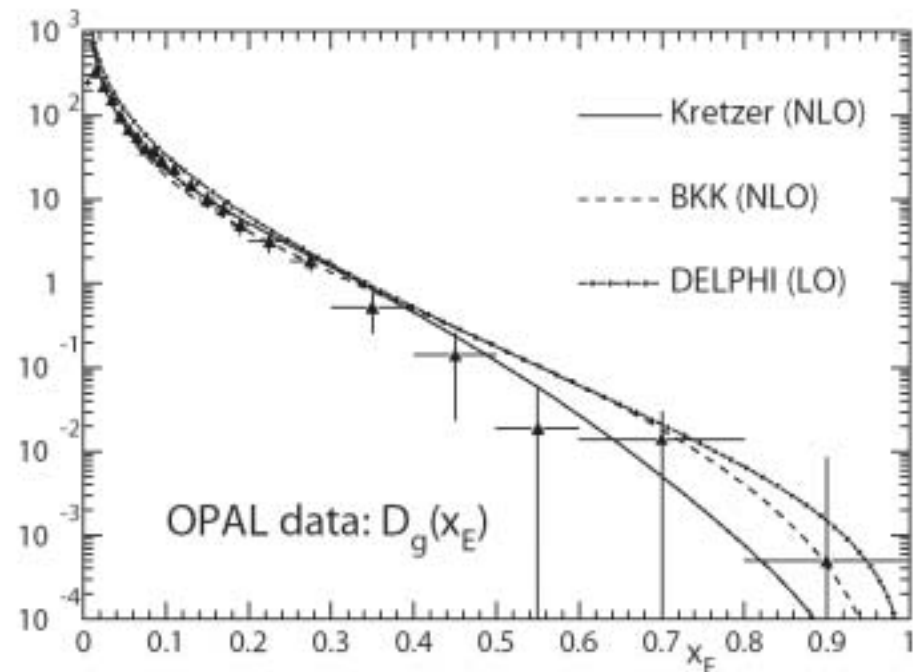
破砕関数の比較

- データと他のFFを用いたNLO-pQCD計算との比較。
 - FFとして、Kretzer, BKK, KKPを使用
 - BKKとKKPを用いた計算はデータと一致
 - Kretzerを用いた計算は $p_T < 8 \text{ GeV}/c$ においてデータより低く見積もっている。
 - この大きな違いは、gluonからの破砕関数にある。
 - Gluon と quark ジェットの寄与は、 π^0 $p_T = 8 \text{ GeV}/c$ 辺りでクロスする。



グルーオンからの破砕関数

- gluon FFは、 $e^+e^- \rightarrow qqg(3\text{-jet})$ 反応を使って測定されてきた。
 - 最大10倍の違い
 - $BKK = KKP > \text{Kretzer}$
- 今回のデータとの比較により、 $z > 0.5$ の領域では、Krezerの予想よりハードな破砕関数であることがわかった。



本研究によりgluonからの破砕関数、特に $z > 0.5$ の領域
に対し情報を与えることが出来た。

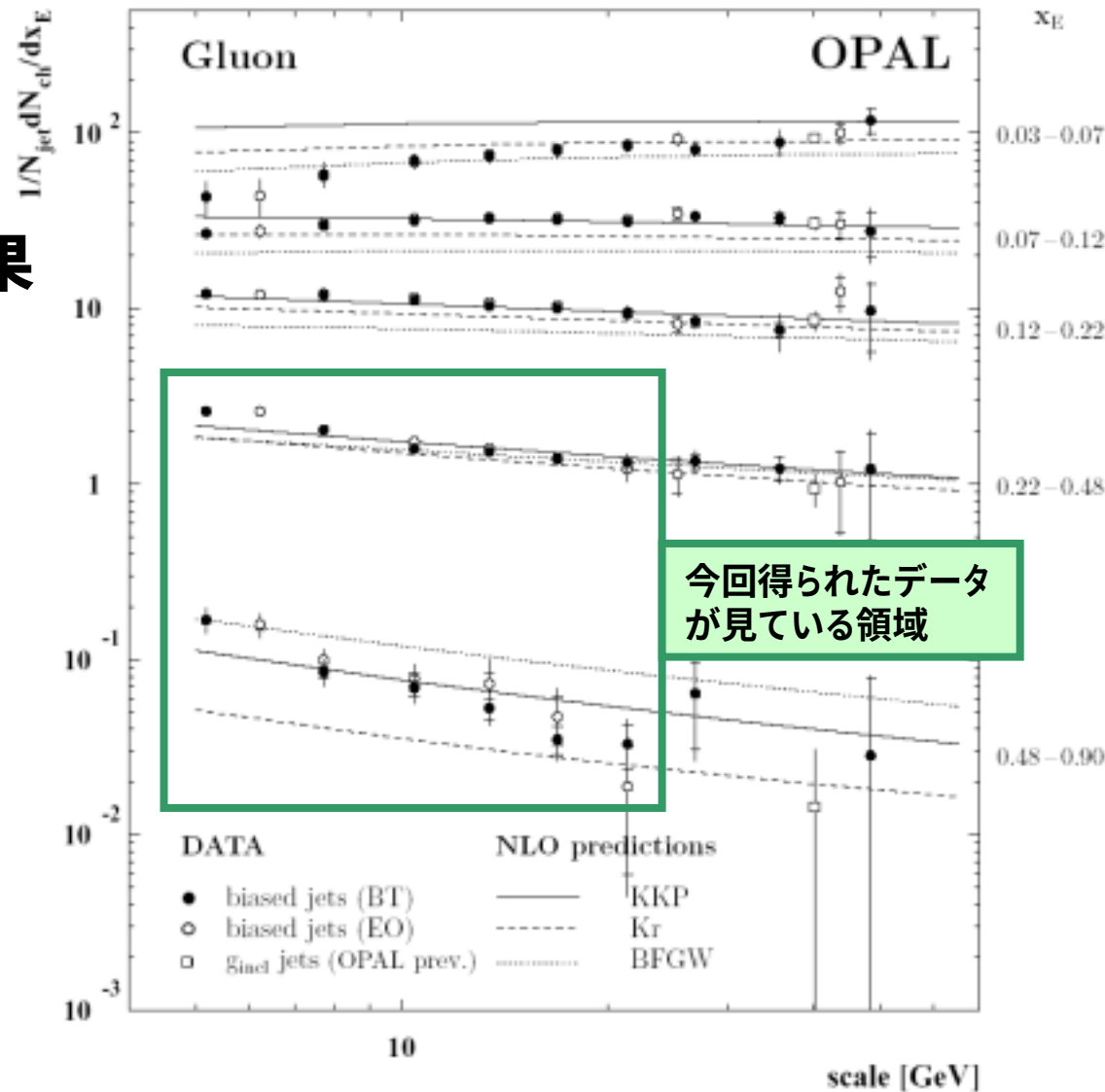
•将来の課題

- NNLO
- Initial k_T
- Multi-jetイベントにおけるJet-jet final interaction
 - Space and time evolution of the color field

LEP2の結果から

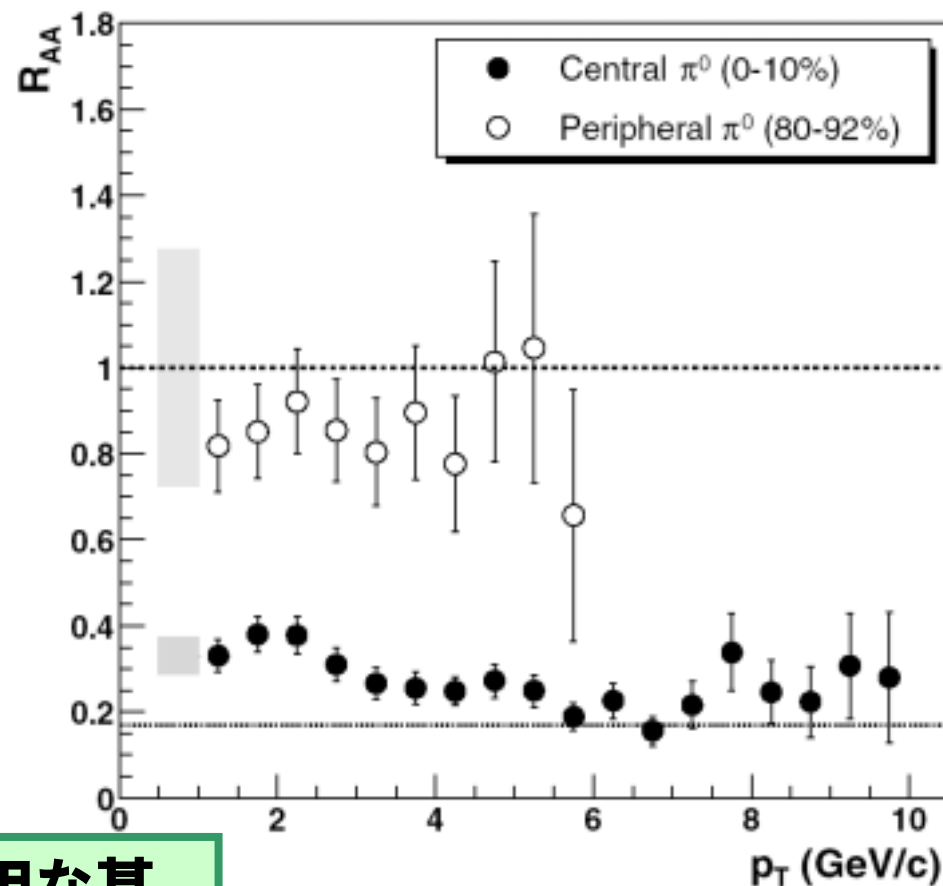
- **最近のLEP2-OPALの結果**
 - $Z > 0.5$ の領域では、Kretzerはunderestimationである。

今回得た結論と一致



金金衝突との比較

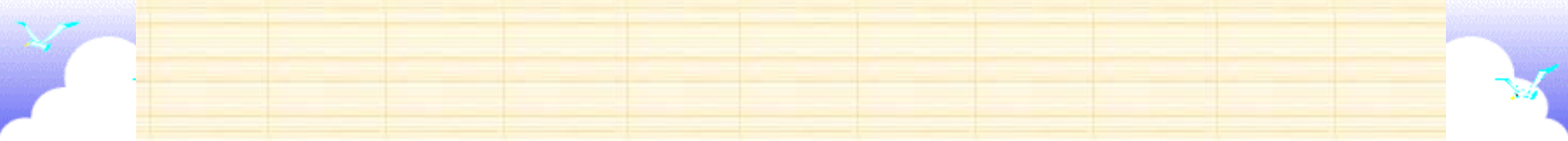
- 今回得られたデータを比較のために、**金金衝突中における平均核子衝突回数**(number of collision)でスケール。
 - Glauberモデルによる予想。
- 金金かすり衝突では一致。**
 - 金金かすり衝突では、核子核子衝突の単なる重ね合わせで表すことが出来る。
 - Glauberモデルの正当性を示唆
- 金金正面衝突では、陽子陽子衝突と比較して、1/3-1/4の減衰が見られた。**
 - QGPを仮定したJet quenchingモデルで説明できる。
 - 比に対する系統誤差は、RHIC2001年の40%から、約25%まで小さくすることが出来た。



本研究によりQGP探索に際し有用な基礎的データを与えることが出来た。

結論

- $\sqrt{s}=200\text{GeV}$ における陽子陽子衝突 π^0 生成
 - $|\eta| < 0.35$
 - $p_T : 1.2 - 13.25\text{GeV}/c$ の広い領域に渡って測定ができた。
 - high- p_T trigger が期待通りに動作した。 Rejection factor = 50
- 過去のデータとの比較
 - x_T スケーリング則が成り立つ。 → パarton描像
- NLO-pQCD計算との比較
 - データは計算結果と一致。スケールを変化させたときの範囲。
 - Kretzer fragmentation functionを使ったNLO-pQCD計算はデータを過小評価している。
 - gluon からの fragmentation functionに対し、特に $z>0.5$ の領域で情報を与えることが出来た。
- 金金衝突との比較
 - かすり衝突は陽子陽子衝突の重ね合わせで記述できる。
 - 正面衝突では陽子陽子衝突と比べて $1/4 \sim 1/5$ の減少が見られた。
 - QGPを仮定したJet Quenchingモデルで説明がつく。



Backup Slides

研究の特色

1969年に核子中の点内部構造が発見されてから35年

FermiLab ★

Synchrotron(1972~) p-beam $P \leq 400 \text{ GeV}$

Tevatron(1981~) $p + \bar{p}$ $\sqrt{s} \leq 1.8 \text{ TeV}$

★ CERN

ISR (1971~) $p + p$ $\sqrt{s} = 10 - 60 \text{ GeV}$

SPS(1977~) p-beam $P \leq 450 \text{ GeV}$

SppS(1981~) $p + \bar{p}$ $\sqrt{s} \leq 640 \text{ GeV}$

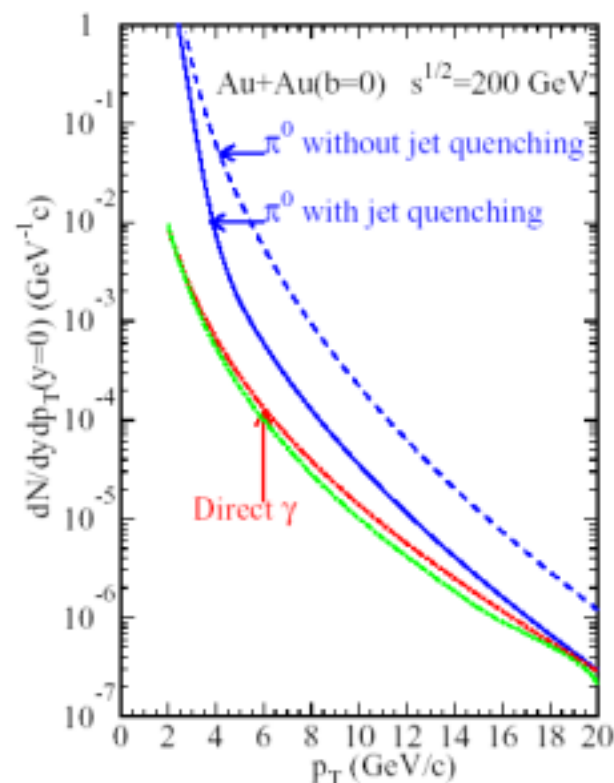
本研究は

陽子陽子衝突、 $\sqrt{s} = 200 \text{ GeV}$

陽子陽子衝突としては、世界最高エネルギーである。

研究動機 2

- Data baseline for high p_T heavy ion physics
 - Compare with peripheral Au+Au collisions as consistency check
 - Compare with central Au+Au collisions
 - Especially for high p_T physics in Au+Au
- In this talk, we compare the π^0 cross section with a NLO pQCD calculation and provide reliable data for heavy ion data comparison.



テスト実験@CERN

Absolute Beam Momentum 0.6% at 40GeV/c

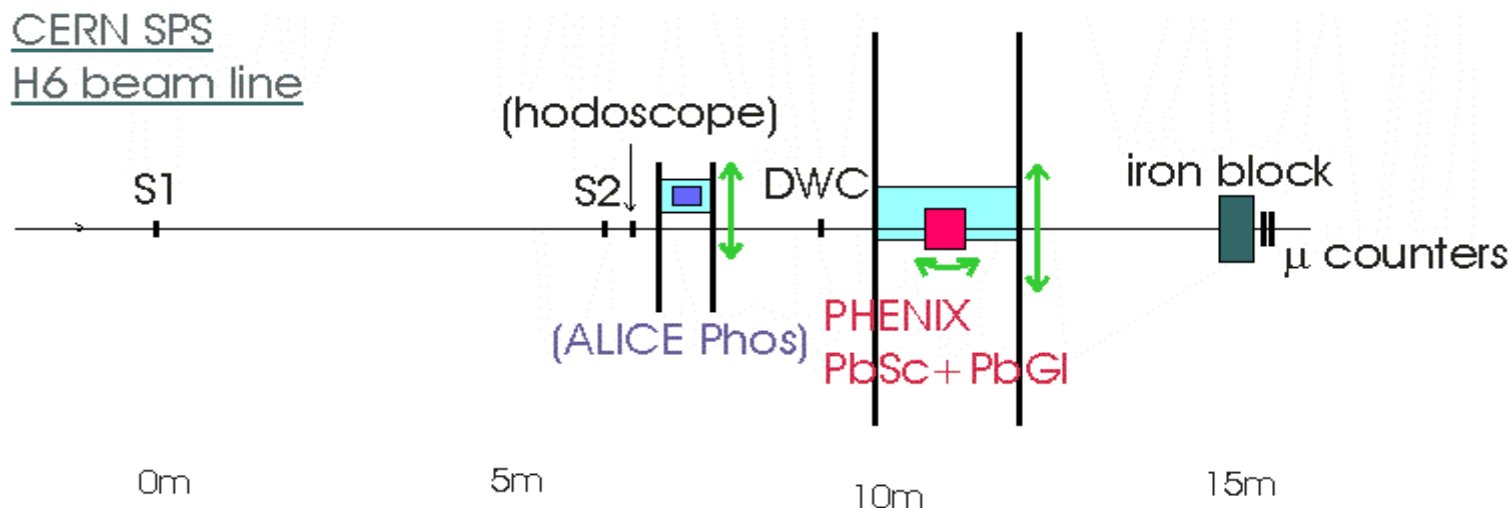
(from uncertainties of magnet current and alignment)

Beam Momentum bite 0.6-0.8% (adjustable with slits setting)

+CEDAR(Cherenkov counter) - particle ID

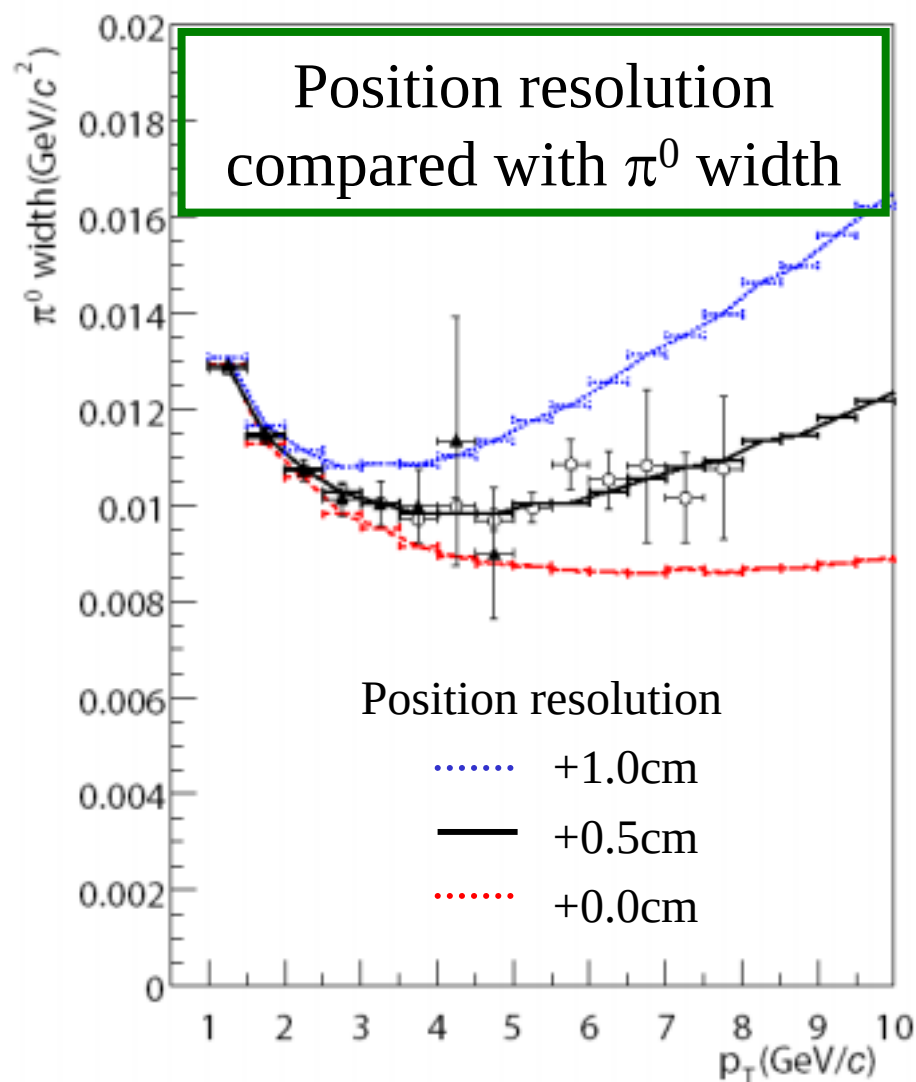
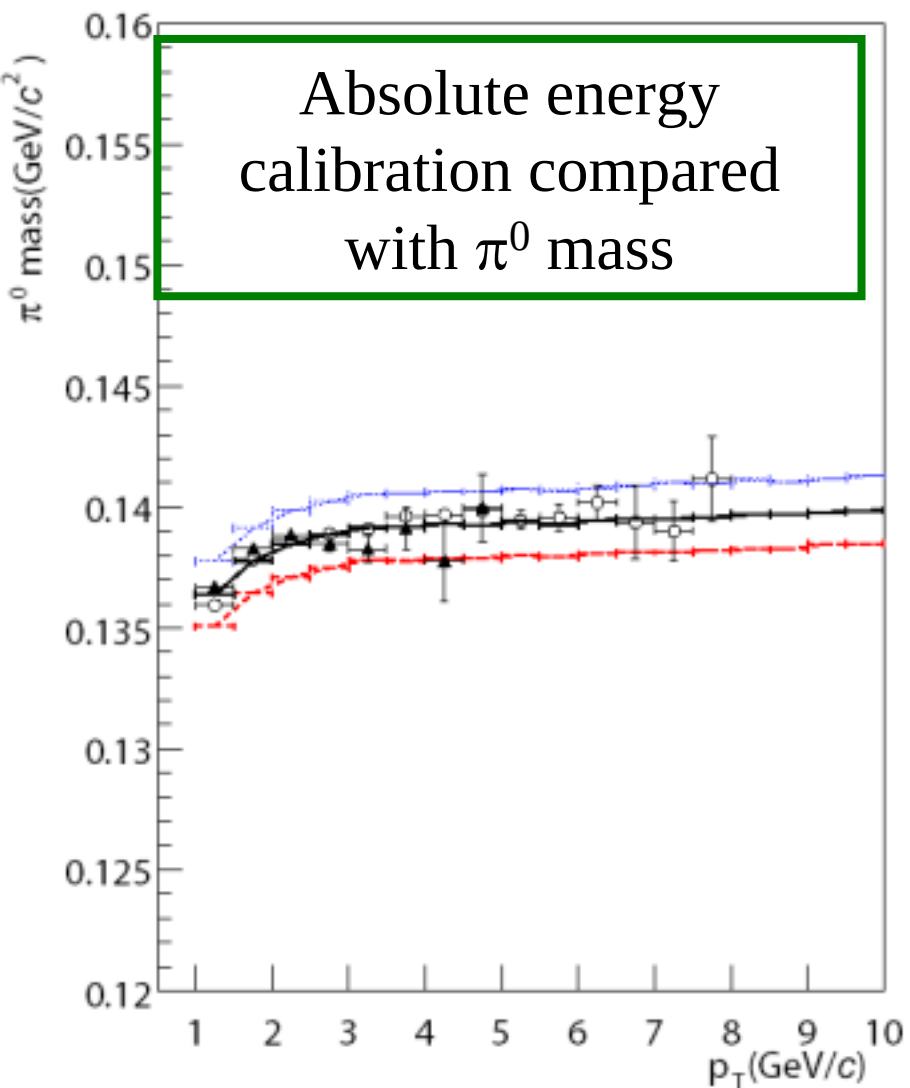
+DWC(Delayline Wire Chamber) - position measurement

+Electron, π , μ can be selected by using CEDAR and μ -counter

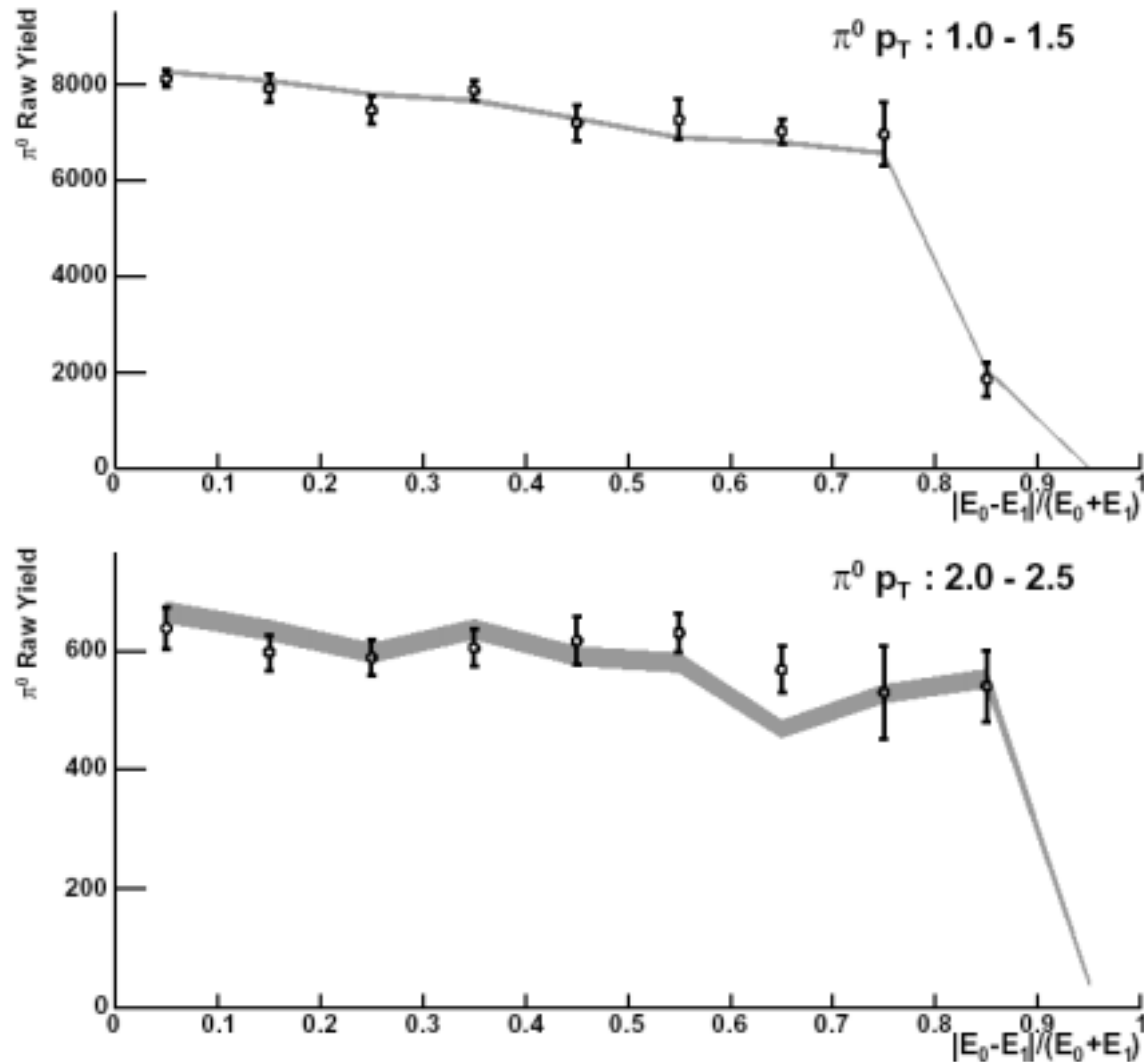


解析

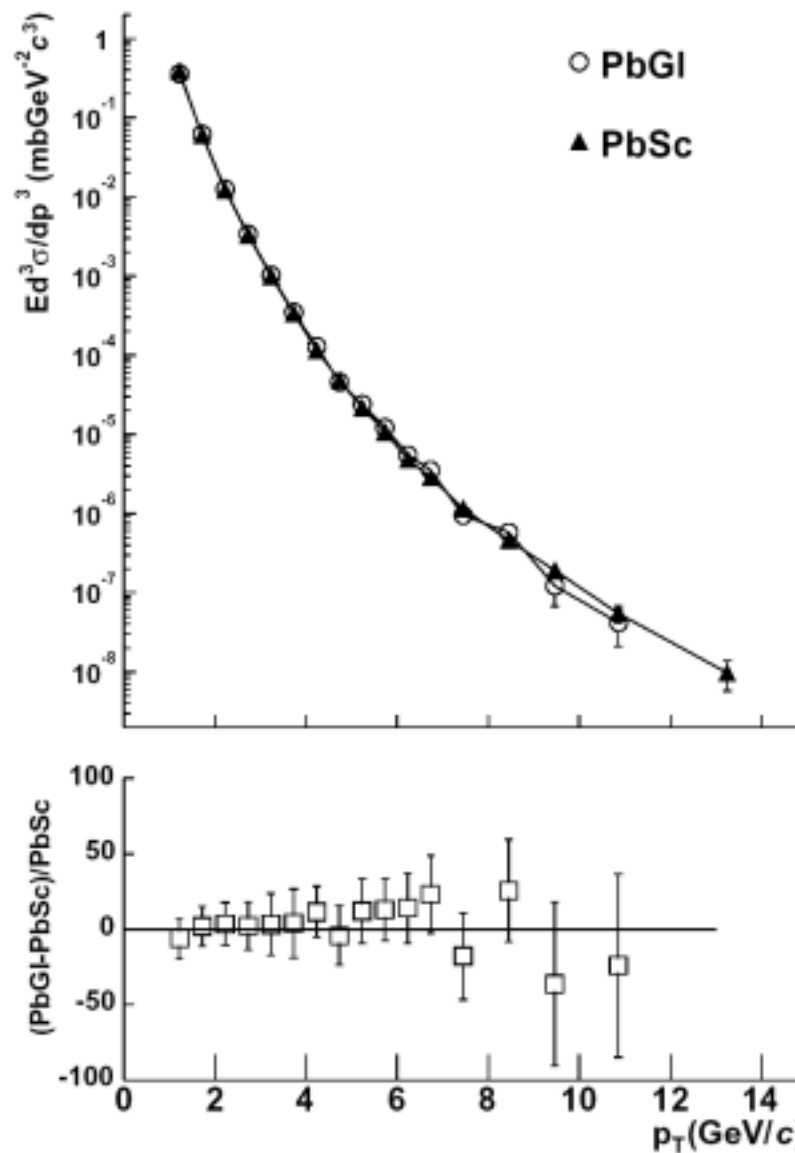
~efficiency, acceptance, p_T smearing~



Energy Asymmetry



解析



CIMモデル

• Meson Exchange Model

– Constituent interchange model(CIM)

- 入射ハドロンから制動放射されたvirtual mesonとパートンとの散乱モデル。

$$\sigma = \left(\sqrt{s}\right)^{-n} \times C \cdot x_T^{-n} (1-x_T)^m$$

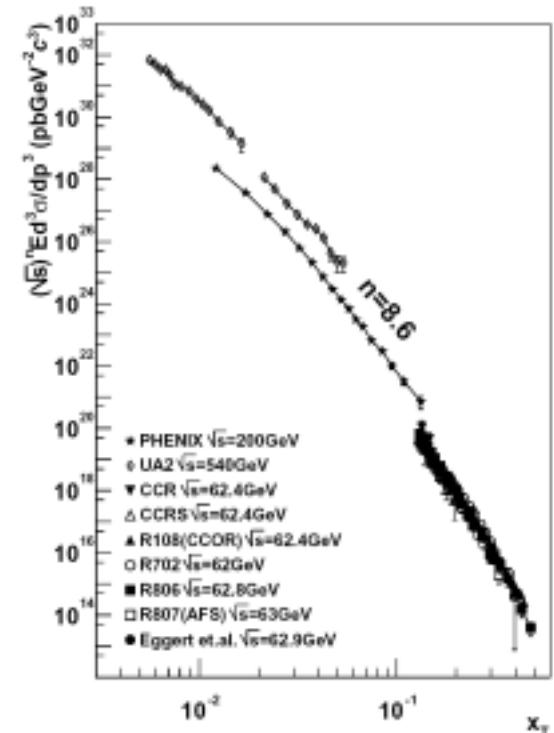
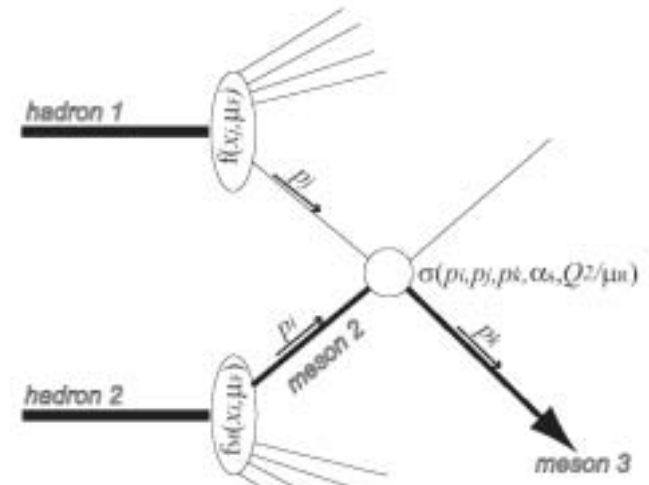
n,m : 定数

– 定数

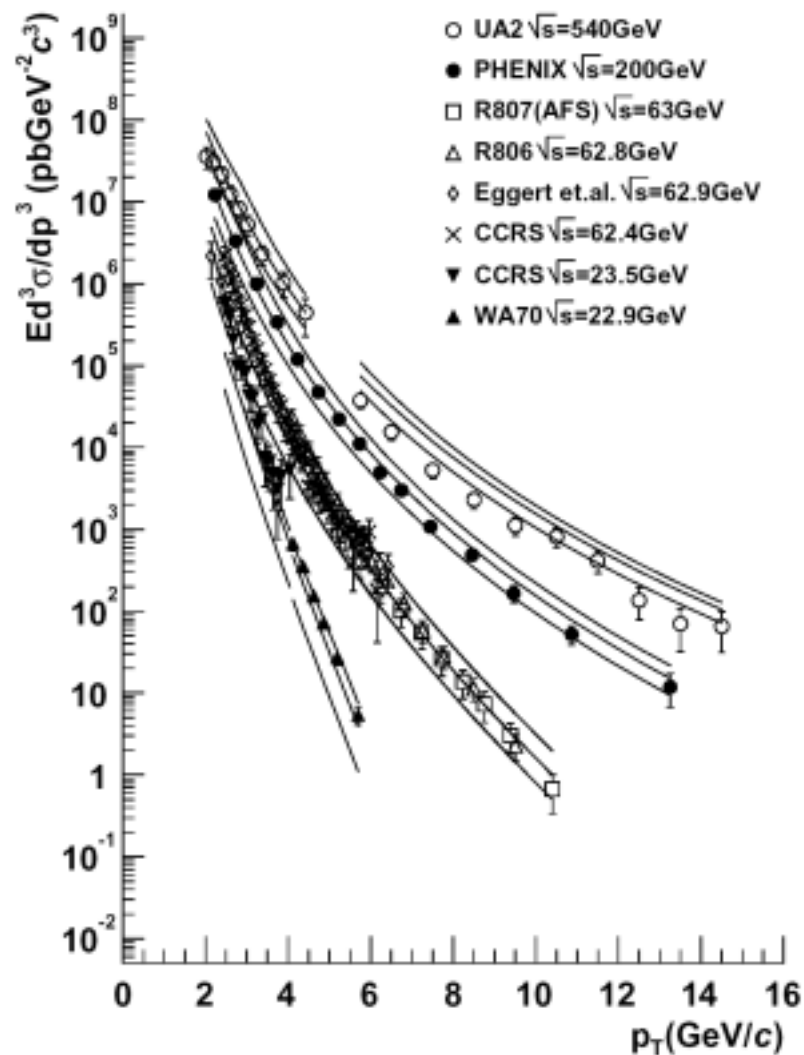
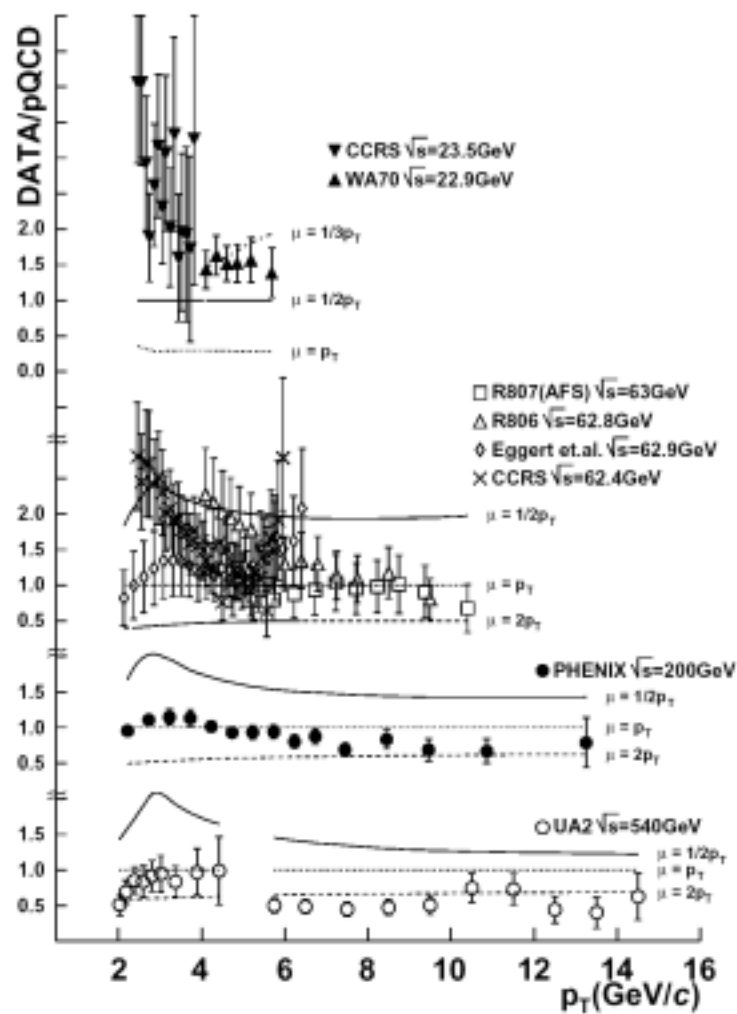
- モデル n=8, m=9
- 過去の実験 n=8.6 (CCR collaboration)
 - $\sqrt{s} < 60 \text{ GeV}$ low p_T (x_T)
 - ここでは、今回得られたデータと過去のデータ $\sqrt{s} > 60 \text{ GeV}$ と比較して、n=8.6でスケールするかどうかをしてみる。

n=8.6ではスケールしない。

→CIMモデルは成り立たない



$\sqrt{s}$ 依存性



Color Recombination

- 3-jet トポロジーにおいて、jet-jet final interactionである、color recombinationの効果が大きい。
 - 10倍の違い。
- 200GeV p+p 衝突ではどうか？
 - Herwig6.5 を使って見積。
 - 結果、ほとんど変わらない。
 - Herwigには、 $2 \rightarrow 2$ QCD process+ α の効果しか入っていないので、ある意味当然ではある。

