## Photon and Neutral Pion Production from p+p to Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV

#### 鳥井 久行、理化学研究所 2004年12月1日 セミナー@広大 <sub>目次</sub>

23ページ

9ページ

9ページ

4ページ

2ページ

1

- 1. 研究動機8ページ
- 2. 検出器技術
- 3. 実験と解析
- 4. p+pでの結果と議論
- 5. Au+Auでの結果と議論
   6. 結論



### Chapter 1 研究動機



#### RHICの特徴

- ・ 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

## **π<sup>0</sup>生成**

hadron 2



 $\sigma(p_i, p_j, p_k, \alpha_s(\mu_R), O^2/\mu_R, O^2/\mu_F)$ 



$$\sigma_{1+2}^{3} = \sum_{i,j,k} \int dx_{i} dx_{j} dx_{k} \times f_{1}^{k}(x_{k},\mu) \cdot f_{2}^{j}(x_{j},\mu)$$
parton distribution function(PDF)

 $\times \sigma_{i,j}^{k} \left( p_{i}, p_{j}, p_{k}, \alpha_{s}(\mu_{R}), Q^{2} / \mu_{F}, Q^{2} / \mu_{F} \right)$ 

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

#### fragmentation function(FF)

 $\mu_R$ =renormalization scale,  $\mu_F$ =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<sup>a</sup>(1-x)<sup>b</sup> 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。

#### 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

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

#### 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

## クオークの発見

1969年 at SLAC
20GeV電子を使った深

非弾性散乱実験。

- 実験の当初の目的は、レ ゾナンスハドロン生成の エネルギー依存性を見る ためだったとか。
- 偶然、弾性散乱と比較して非弾性散乱の割合が 非常に大きいことを発見。
- 点電荷、つまりパートンの発見につながる。

1990年、ノーベル賞受賞

Friedman, Kendall, Taylor



Bjorken スケーリング

実験当初は、非弾性散乱の増大が何を意味するのか分からなかった。  $\frac{d\sigma}{dq^2 d\upsilon} = C \times \left[ W_2 \cos^2(0.5\theta) + 2W_1 \sin^2(0.5\theta) \right]$ 

Bjorken先生が、形状因子がエネルギー移行量に依らないことを指摘。



7

## 今セミナーの目的

- e+p 衝突 深非弾性散乱
  - 形状因子が運動量移行に依存しない
  - → 点電荷の存在 (Bjorken先生は賢い)

- p+p 衝突
  - 深非弾性散乱に比べてクオークに対する運動量移行は測定できない。 その代わりに、衝突エネルギーを使って散乱断面積を「形状」に関する 項と「相互作用」関する部分に分ける。
  - 「形状」が衝突エネルギーに依存しない。

p+p衝突においてパートンの存在を感じていただきたい。

σ(p.p.p.a.(μ.), Q2/μ. Q2/μ.

### 研究動機:金金衝突

- QCD 理論
  - クオーク間に働く強い相互作用を説明す る理論
  - クオークはハドロン中に閉じ込められて いることがわかっている。
- では、どうすれば閉じ込められたクオークを開放することができるだろう?
  - 高エネルギー衝突

→漸近的自由性

- 高い温度

- 高密度

- Quark Gluon Plasmaへの相転移
- ・ なぜQGPが面白いのか?
  - Big Bang直後(10<sup>-10</sup>sec後)の宇宙初期
     の状態であると考えられている。
  - 原子核、素粒子、宇宙物理の基本的問題であるだけでなく、人類の自然認識の根幹に関わる問題に答えるものである。



## QGP 探索

- QGPを探索するための方法
   →"Jet Quenching"
- "Jet Quenching"とは?
  - 核子核子の初期衝突により散乱され たクオークが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、クォークからの生成物であるハドロンのエネルギー分布の低エネルギー側への推移として観測出来るはずである。
- →QCD理論により(Quenchingがない 場合の)予想が立てやすい。
- √s<sub>NN</sub>=200GeVまでのp+p, Au+Au衝 突をRHIC-PHENIX 実験で行ない、 Jet Quenchingを測定し、QGPの存 在を明らかにしたい。





### RHIC

#### RHIC = Relativistic Heavy Ion Collider

#### Located at Brookhaven National Laboratory



## PHENIX実験



Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment



• 全周3.8km 2リング

RAME \_ AR AR

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



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

### PHENIX実験



## 電磁カロリーメータ



PHENIX Detector

π<sup>0</sup>測定のための検出器 2種類の電磁カロリーメータ - PbSc型 Lead Scintillation Type PbGI型 • Lead Glass Type 5m **EMCal RICH Level1** 24768 チャンネル Trigger(ERT) High-p<sub>T</sub>のπ<sup>0</sup>測定に必要不可欠 West Beam View East



![](_page_16_Picture_0.jpeg)

- (電子が)Critical Energy に達するまでシャワーを 起こす。
  - Critical Energy程度になると、Ionization energy loss等により0.5cm程度でとまる。

![](_page_16_Figure_3.jpeg)

![](_page_16_Figure_4.jpeg)

![](_page_16_Figure_5.jpeg)

![](_page_17_Picture_0.jpeg)

![](_page_17_Figure_1.jpeg)

![](_page_18_Picture_0.jpeg)

• PHENIX PbSc型サンプリングカロリーメータ

![](_page_18_Figure_2.jpeg)

- ・ シンチレータプレート
  - 5cm x 5cm x 4mm(厚さ)
  - 端は、アルミで蒸着。一つの角をlaser calibration用に残す。
  - 発生した光を、Wave length shifter fiberで変換しつつ、PMT に転送する。
    - Fiber 中における光の減衰(=120cm)が無視できない。

### PbSc型カロリーメータ

![](_page_19_Figure_1.jpeg)

Sandwich type calorimeter Lead plates 55.2x55.2x1.5mmScintillator plates 110.4x110.4x4mmShish-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
5.52 x 5.52
37.5
15552
~ 20%
0.7
90+45deg
0.011
0.011
18
~ 3cm

![](_page_19_Picture_4.jpeg)

PbSc sector 2.0m x 4.0m

### PHENIX PbSc型

![](_page_20_Picture_1.jpeg)

# 性能評価のためのテスト実験

- 電磁カロリー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

# 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

![](_page_21_Figure_8.jpeg)

![](_page_22_Picture_0.jpeg)

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

![](_page_22_Picture_2.jpeg)

![](_page_22_Picture_3.jpeg)

# 性能評価

![](_page_23_Figure_1.jpeg)

#### Fine Segment - ○測定のために-

- 高い運動量を持つ 0
   からの2光子間の距離。
  - 衝突点から5m離れて、
  - 14cm @ 10GeV/c ( 0)
  - 7cm @ 20GeV/c
- PHENIXの1タワーのサ イズ
  - 5cm x 5cm
  - 20GeV/c までの2光子を
     分離することが可能。

![](_page_24_Figure_8.jpeg)

# 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

   (5.5x5.5cm<sup>2</sup>[PbSc] 4x4cm<sup>2</sup>[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)
- 高い運動量を持つπ<sup>0</sup>, prompt- を効率よ<測定するため。</li>
  - Enhances high-pT  $\pi^0$  by a factor of 50

![](_page_25_Figure_9.jpeg)

## 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。

![](_page_26_Picture_2.jpeg)

#### Trigger board(32sumのORを取る)

![](_page_26_Picture_4.jpeg)

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 <、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。

![](_page_27_Picture_0.jpeg)

![](_page_28_Figure_0.jpeg)

![](_page_29_Figure_0.jpeg)

を求める。

![](_page_29_Figure_1.jpeg)

30

# エネルギー校正:Laser

![](_page_30_Picture_1.jpeg)

- UV laser (YAG laser) is used for calibration and monitoring system
  - The light intensity is monitored with PIN diodes at each intermediate splitter that are used for normalization.
  - Light is injected into each module through a "leaky fiber" to simulates an electromagnetic shower
- Laser monitoring system works for
  - Transportation from cosmic muon calibration into PHENIX configuration
  - Trace of time drift

![](_page_30_Figure_8.jpeg)

# エネルギー校正:荷電粒子

![](_page_31_Figure_1.jpeg)

- RHIC-PHENIXにおいて、衝突点から
   来た荷電粒子を使う
  - 主に、荷電 粒子
  - 270MeV
- ・ 全チャンネルに対して補正項を求める。200

![](_page_31_Figure_6.jpeg)

![](_page_31_Figure_7.jpeg)

# エネルギー校正:(陽)電子

- 電子または陽電子が入射
  - 光子によるシャワーよりも、より浅い位置(1X<sub>0</sub>=約2cm分)で電磁シャワーを起こす。言い換えると、PMTから遠い位置。
    - →ファイバー中での減衰がより大きい。 約2%.
  - 運動量はトラッキングシステムにより 測定。エネルギーと運動量の比をとる と、98%の位置にあるべし。
    - 実際には、低い運動量では98%より小 さい。いくつかの原因がある、Dchと EMCal間でのエネルギーロスなど。
- 幅を使って、エネルギー分解能を 見積もる。

 $\sigma_{\rm E}/{\rm E}=9.4\%/{\rm \sqrt{E}\oplus4.7\%}$ 

![](_page_32_Figure_8.jpeg)

![](_page_33_Picture_0.jpeg)

- p<sub>T</sub> smearing**効果** 
  - 有限のエネルギー分解能により、測定さ $\sqrt{3}$ れた $p_T$ は誤差をもつ。これにより測定され  $\sqrt{3}$ た $p_T$ 分布がずれる。
- →同時に、見かけ上のπ<sup>0</sup>質量は標準のもの <sup>2</sup> より大きく見える
  - p<sub>T</sub>測定に誤差があるために、あるp<sub>T</sub> bin でπ<sup>0</sup>をreconstruct した際、本来両隣のp<sub>T</sub> binに入るべきπ<sup>0</sup>が検出される。
  - $\pi^0 p_T$ 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大きい。
  - 測定p<sub>T</sub>が高く測定されたものは、測定質 量も高く見える。
- 測定π<sup>0</sup>質量は、p<sub>T</sub> 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+-1%で 補正できていることを確認。
  - Run3からは、全タワーの補正項を求めるのに使用。

![](_page_33_Figure_10.jpeg)

![](_page_34_Picture_0.jpeg)

![](_page_35_Picture_0.jpeg)

- ・トリガー
  - Minimum bias trigger
    - BBC(|η|=3~3.9)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) (p+p衝突のみ)

— 他、

Run	Year	Species	$s^{1/2}$ [GeV ]	∫Ldt	N <sub>tot</sub>	p-p Equivalent	Data Size
01	2000	Au+Au	130	1 μb <sup>-1</sup>	10 <b>M</b>	0.04 pb <sup>-1</sup>	3 TB
02	2001/2002	Au+Au	200	24 μb <sup>-1</sup>	170M	1.0 pb <sup>-1</sup>	10 TB
		p+p	200	0.15 pb <sup>-1</sup>	3.7G	0.15 pb <sup>-1</sup>	20 TB
03	2002/2003	d+Au	200	2.74 nb <sup>-1</sup>	5.5G	1.1 pb <sup>-1</sup>	46 TB
		p+p	200	0.35 pb <sup>-1</sup>	6.6G	0.35 pb <sup>-1</sup>	35 TB
04	2003/2004	Au+Au Au+Au	200 62	241 μb <sup>-1</sup> 9 μb <sup>-1</sup>	1.5G 58M	10.0 pb <sup>-1</sup> 0.36 pb <sup>-1</sup>	270 TB 10 TB <sub>36</sub>

## 解析 ~π<sup>0</sup> 測定~

- Run2 p+p データを使用。
- Invariant massの再構成
  - M.B. trigger  $p_T(1,1.5)$ GeV/c
  - high-p<sub>T</sub> trigger
     pT(4,4.5)(6.5,7)(10,12)GeV/c
- バックグランドを見積もるために、
   いくつかの関数を使いフィットする
  - $p_T = 1-1.5 \text{GeV/c N/S} = 200\%$
  - $p_T > 5 GeV/c$  N/S = 10%
  - pT>8GeV/cでは正確に見積もることが出来ないため、pT<8GeV/cからの外挿で見積もった。</li>
- high-p<sub>T</sub> trigger
  - Rejection Factor = 50
  - Measured 1-15GeV/c  $\pi^0$ 
    - 30個  $\pi^0$  at  $p_T=10-12GeV/c$
    - 10個  $\pi^0$  at  $p_T = 12-15 GeV/c$

![](_page_36_Figure_14.jpeg)

### ~作目1-~

![](_page_37_Figure_1.jpeg)

## 解析 ~trigger efficiency~

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

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

- トリガー効率は、p<sub>T</sub>>3GeV/c
   で一定値(~80%)
  - 有効なトリガー回路の面積比 と一致。
  - M.B. trigger data for 1-4GeV/c
  - 2x2 trigger for 4-15GeV/c

![](_page_38_Figure_7.jpeg)

#### 解析 ~ $\pi^0$ efficiency in M.B. trigger~

- minimum bias(M.B.) triggerは、|η|=3~3.9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、中間ラピディティー領域における粒子 0.
     生成に影響(bias)を与える。
- $\pi^0$  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<sup>0</sup>サンプルを使って直接測定。

![](_page_39_Figure_6.jpeg)

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。

![](_page_39_Figure_10.jpeg)

## 解析 ~prompt-γ 測定~

- 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(Eγ>1.5GeV/c)にて取得。
    - 266pb<sup>-1</sup>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<sup>0</sup>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。

- 次ページ参照。
- ただし、検出器にて検出できなかったπ<sup>0</sup>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<sup>0</sup>, η)
  - モンテカルロ計算
- Cross section calculation

![](_page_40_Figure_18.jpeg)

## 解析 ~prompt-γ 測定~

- π<sup>0</sup>からくる光子の寄与はデータ 自身から見積もるのに、効率が よいように、検出器の端の方を 使わない。
  - 端から10タワー分(55cm)。
  - 5GeV/cの 0のうち、片方の光子 が領域内に入ってきた場合、もう 片方の光子のうち90%は全領域を 使って検出できる。
  - 検出できない分はMonteCarloで見 積もる。

方向

![](_page_41_Figure_5.jpeg)

![](_page_41_Figure_6.jpeg)

![](_page_42_Figure_0.jpeg)

What is the efficiency by this cut for signal 1)&2)  $\rightarrow$  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 pT>5GeV/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。
  - 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。

### S/N Ratio with Isolation Cut

- S/N ratio
  - S = 直接光子
  - N = 検出できなかったπ<sup>0</sup>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

 $- p_T = 5-17 GeV/c$ 

![](_page_44_Figure_9.jpeg)

#### AuAu 衝突における 測定効率

- 金金衝突では、占有率(occupancy)
   が最大15%
  - 一つのシャワーが占めるタワーの数が 2,3個。
  - 隣のシャワーとの重なりにより、
    - 測定したエネルギーが間違っている
    - 他のシャワーに吸収される。
- シャワーの重なりの効果を、
   Embedding 法で求める。
  - 得られたデータの中に、Geantでシミュレートした 0や1光子のシャワーを混ぜる。
  - 混ぜる前と後での、 0や光子の量を 測定して、前後の差から検出効率を見 積もる。

![](_page_45_Figure_9.jpeg)

![](_page_46_Picture_0.jpeg)

### Chapter 4 p+pの結果と議論

## **結果 p+p**→ <sup>0</sup>

- 結果は、
  - $p_{\rm T} = 1 13 {\rm GeV/c}$
  - クロスセクションにして、10<sup>-8</sup>~
     1mb/GeV<sup>2</sup>/c<sup>3</sup> 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<sub>T</sub>>8GeV/c では、統計誤差
     が系統誤差に比べて大きい。
    - p<sub>T</sub>=13.3GeV/cで統計誤差40%

![](_page_47_Figure_10.jpeg)

Normalization systematic error 9.6% is not included here.

# 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

 $1/2p_{\rm T}, p_{\rm T}, 2p_{\rm T}$ 

 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。

![](_page_48_Figure_9.jpeg)

## 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・
     タと一致
  - Kretzerを用いた計算は pT<8GeV/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、pi0pT=8GeV/c辺りでクE スする。

![](_page_49_Figure_7.jpeg)

## グルーオンからの破砕関数

![](_page_50_Figure_1.jpeg)

#### 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

![](_page_51_Figure_0.jpeg)

hep-ex/0404026

![](_page_52_Figure_0.jpeg)

![](_page_52_Figure_1.jpeg)

# NLO-pQCD計算との比較

Subtraction methodで得られた Ed³σ/dp³ (pbGeV PHENIX Preliminary Bands represents systematic error. データとの比較を行う。 10 NLO pQCD (by W.Vogelsang) CTEQ6M PDF NLO-pQCD calculation μ=1/2p<sub>T</sub>, p<sub>T</sub>, 2p<sub>T</sub> - Private communication with W.Vogelsang 10 - CTEQ6M PDF. - 二つの寄与(direct photon と fragmentation photon) の和。 10 - 3**つのスケール**、1/2,1,2 pT • Renormalization scale *k* 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。 18 12

Systematic errors are not shown

р<sub>т</sub>(GeV/*с*)

## x<sub>T</sub>スケーリング p+p→

陽子陽子衝突では最高エネルギー

#### - CERN

- ISR (1971~) p+p  $\sqrt{s}=10-60$ GeV
- SPS(1977~) p-beam p≤450GeV
- SppS(1981~) p+  $\bar{p} \sqrt{s} \le 640 \text{GeV}$
- FermiLab
  - Syncrotron(1972~) p-beam p≤400GeV
  - Tevatron(1981~) p-beam  $p \le 0.9$  TeV
- p<sub>T</sub>分布
  - High  $p_T$  では、 $\sqrt{s}$ が大きくなるにつれて、 p<sub>T</sub>分布の形の傾きは緩やか。
  - Low  $p_T$ では、傾きは $\sqrt{s}$ によらずほぼー 定に収束している。

![](_page_54_Figure_12.jpeg)

![](_page_55_Figure_0.jpeg)

## $X_T$ スケーリング- 0-

QCD理論によると、以下の仮定 - PDFFF**0**Q<sup>2</sup>**7** pbGe/ Coupling constant( $\alpha_s$ )がQ<sup>2</sup>に非依存。 Ns)"Ed³₀/dp° \_\_\_\_\_\_  $\boldsymbol{\sigma} = \left(\sqrt{s}\right)^{-n} \times F(\boldsymbol{x}_T)$ n=**定数。**x<sub>T</sub>=2p<sub>T</sub>/√s 定数nに対する予想 PHENIX Vs=200GeV • Leading order n=4 ♦ UA2 vs=540GeV • Next-to-leading order:  $n=4+\alpha$ ▼ CCR √s=62.4GeV 10 △ CCRS √s=62.4GeV • 過去の実験から n=6.3 (by R108 collaboration) ▲ R108(CCOR) √s=62.4GeV - x<sub>T</sub>分布は√sに依存しない OR702√s=62GeV ■ R806√s=62.8GeV →x<sub>T</sub>スケーリング □ R807(AFS) √s=63GeV ● Eggert et.al. √s=62.9GeV - ここでは、今回得られたデータと過去の データ $\sqrt{s}$ >60GeV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。 10<sup>-2</sup> 10<sup>-1</sup> Хт x<sub>T</sub>スケーリングがn=6.3で成り立つ→パートン描像

![](_page_57_Figure_0.jpeg)

### Chapter 5 Au+Auの結果と議論

#### Nuclear Modification Factor $R_{AA}$ • Hard processes **Nuclear overlap function** - 収量は N<sub>coll</sub>にスケール $T_{AB} = \int d^2 \mathbf{r} T_A(\mathbf{r}) T_B(\mathbf{b} - \mathbf{r})$ • incoherent superposition **Nuclear thickness function** • Nuclear Modification $T_A(b) = \int dz \rho_A(b, z)$ Factor(R<sub>AA</sub>)を定義する。 from Glauber model $egin{aligned} & \left( 1\!\left/ N_{AB}^{\mathrm{evt}} ight) \mathrm{d}^2 \mathrm{N}_{AB} / \mathrm{dydp}_{\mathrm{T}} \ & \left\langle \mathrm{T}_{AB} ight angle \, \mathrm{d}^2 \sigma_{\mathrm{pp}} / \mathrm{dydp}_{\mathrm{T}} \end{aligned}$ R no effect 1.2 R = 11.0 0.8 "hard" R < 1 0.6 0.4 "soft" 0.2 原子核の重なりによる変化 0.0 5 3

Tranverse Momentum (GeV/c)

6

~π<sup>0</sup> 測定~

- 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。

![](_page_60_Figure_8.jpeg)

# 結果 ~prompt- 測定~

- ・ AuAu衝突での全光子分布
  - pp衝突と違って多重度が大きいために、光子ごとに 0から きたのかどうか判断するのが難しい。
  - すでに測定された 0のスペクトラを使って、 0崩壊から出てくる光子の数との比較を行っていく。

![](_page_61_Figure_4.jpeg)

![](_page_62_Figure_0.jpeg)

![](_page_63_Picture_0.jpeg)

![](_page_64_Picture_0.jpeg)

- p+p衝突における結果
  - 0測定
    - 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。
  - Prompt-
    - p<sub>T</sub> = 5-17GeV/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。
    - 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 for spin physics
  - x<sub>T</sub>スケーリング則がn=5付近で成立。
    - パートン描像を示唆。
    - 陽子反陽子衝突との違いは、小さいx<sub>T</sub>領域で小さいのではないかと推定。

![](_page_65_Picture_0.jpeg)

#### ・金金衝突との比較

- Nuclear Modification Factor
  - Glauber modelにより計算した、平均衝突回数(N<sub>coll</sub>)を使用。
  - 陽子陽子衝突の単純な(incoherentな)重ね合わせで表されるならば、1 になるべき係数。
    - かすり衝突を陽子陽子衝突と比較することにより、Glauber modelの確認にもなる。
- かすり衝突
  - <sup>0</sup>測定
  - 陽子陽子衝突の重ね合わせで記述できる。
- 正面衝突
  - <sup>0</sup>測定
    - 陽子陽子衝突と比べて1/4~1/5の減少が見られた。
  - prompt- 測定
    - 陽子陽子衝突と比較して、変化なし。
- QGPを仮定したJet Qunchingモデルで説明がつく。