



Study of Charm Production from the Measurement of Single Electrons in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV

(核子対あたりの重心系衝突エネルギー200GeVの金 + 金原子核
衝突における単電子測定によるチャーム生成の研究)



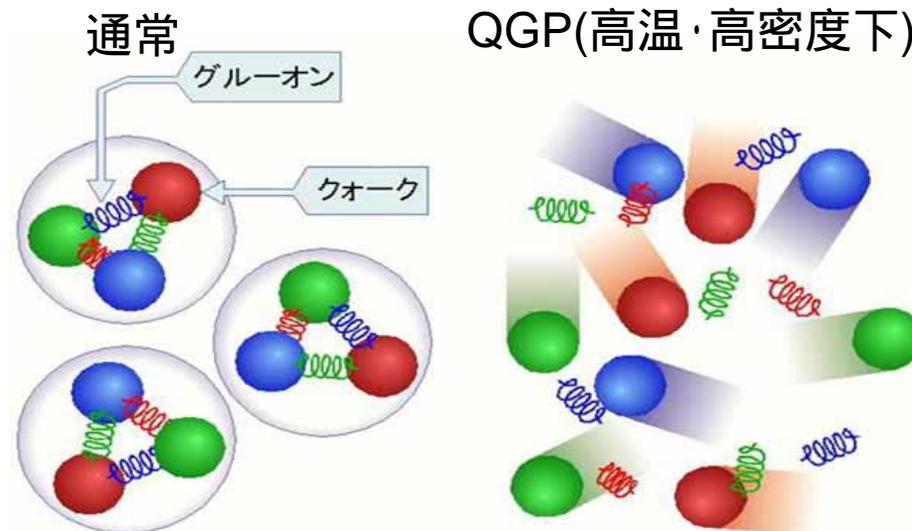
蜂谷 崇

発表概要

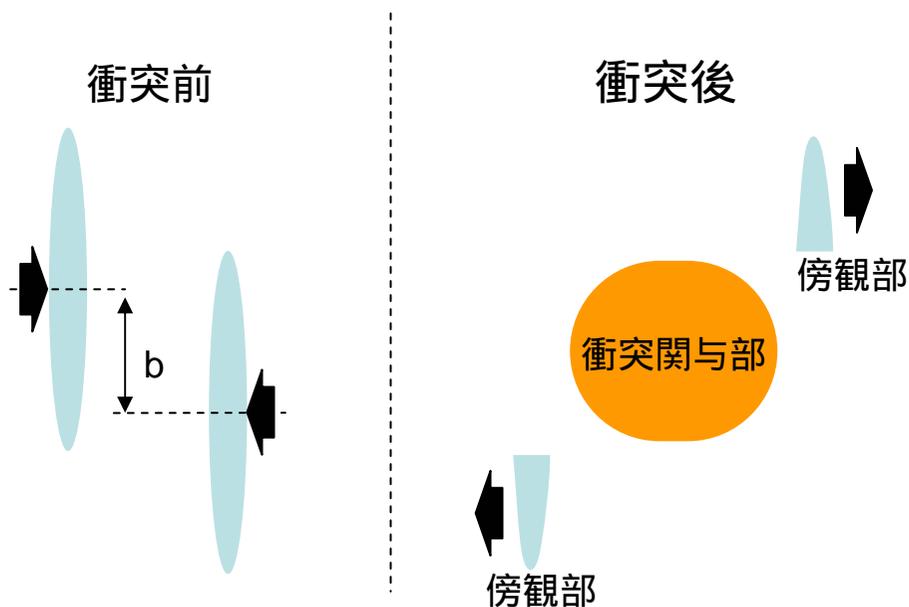
- 導入
 - クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)
 - 原子核衝突におけるHeavy Quark生成
- PHENIX実験と解析
- 結果
- まとめと結論

クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

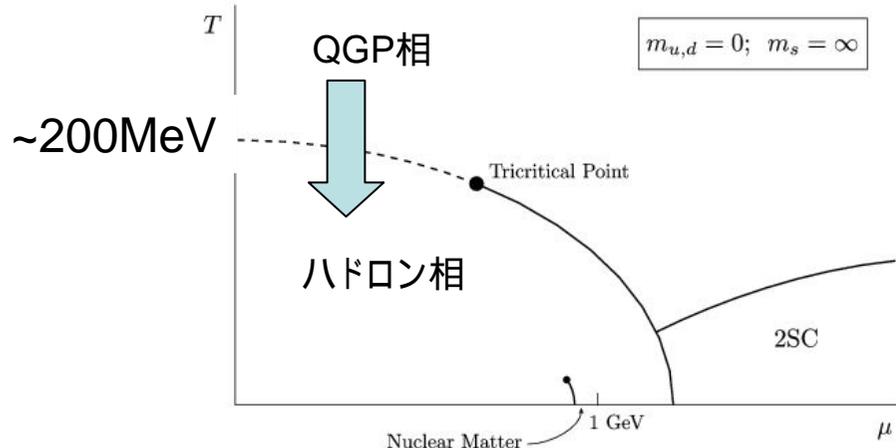
- クォーク(とグルーオン)は、強い力により原子核中に閉じ込められてる
 - 強い力は 量子色力学(QCD) で記述される。
- 高温・高密度状態では閉じ込めから解放される
 - クォーク・グルーオンのプラズマ状態(QGP)
 - 格子QCDの予言では、 $T \sim 200\text{MeV}$ で相転移する。
- QGP状態は、宇宙初期数 μs 後に存在したと考えられている。



高エネルギー原子核衝突



- 原子核を光速付近まで加速し、衝突させる。
- 衝突関与部に有限サイズの高温度状態を実験的に作る。



RHIC加速器@米国BNL



核子対あたりの衝突エネルギー
 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ のAu+Au衝突実験を行う。

QGP生成を示唆する測定

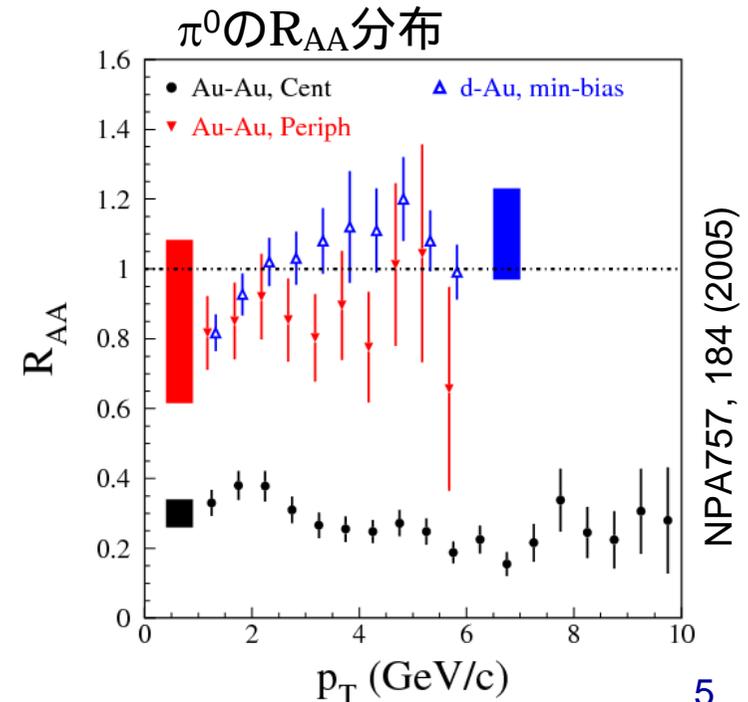
- RHICでの多くの測定により高温物質の存在が確認された。
 - 高横運動量(p_T)粒子の生成抑制
 - $R_{AA} < 1$
 - 高温物質の相互作用で、高い p_T パートンがエネルギーを損失する
 - 強い楕円フローの発見
- 高温物質ができて、早期に熱平衡になっている。これはQGPであると考えられる
 - QGPの性質を調査する段階へ
 - 最近、熱的光子の観測で、初期温度がQGP相転移温度を超えていることが分った。

Nuclear Modification Factor

$$R_{AA} = \frac{dN_{AA} / dp_T}{\langle T_{AA} \rangle d\sigma_{pp} / dp_T}$$

Au+Au衝突における
核子衝突あたりの生成量

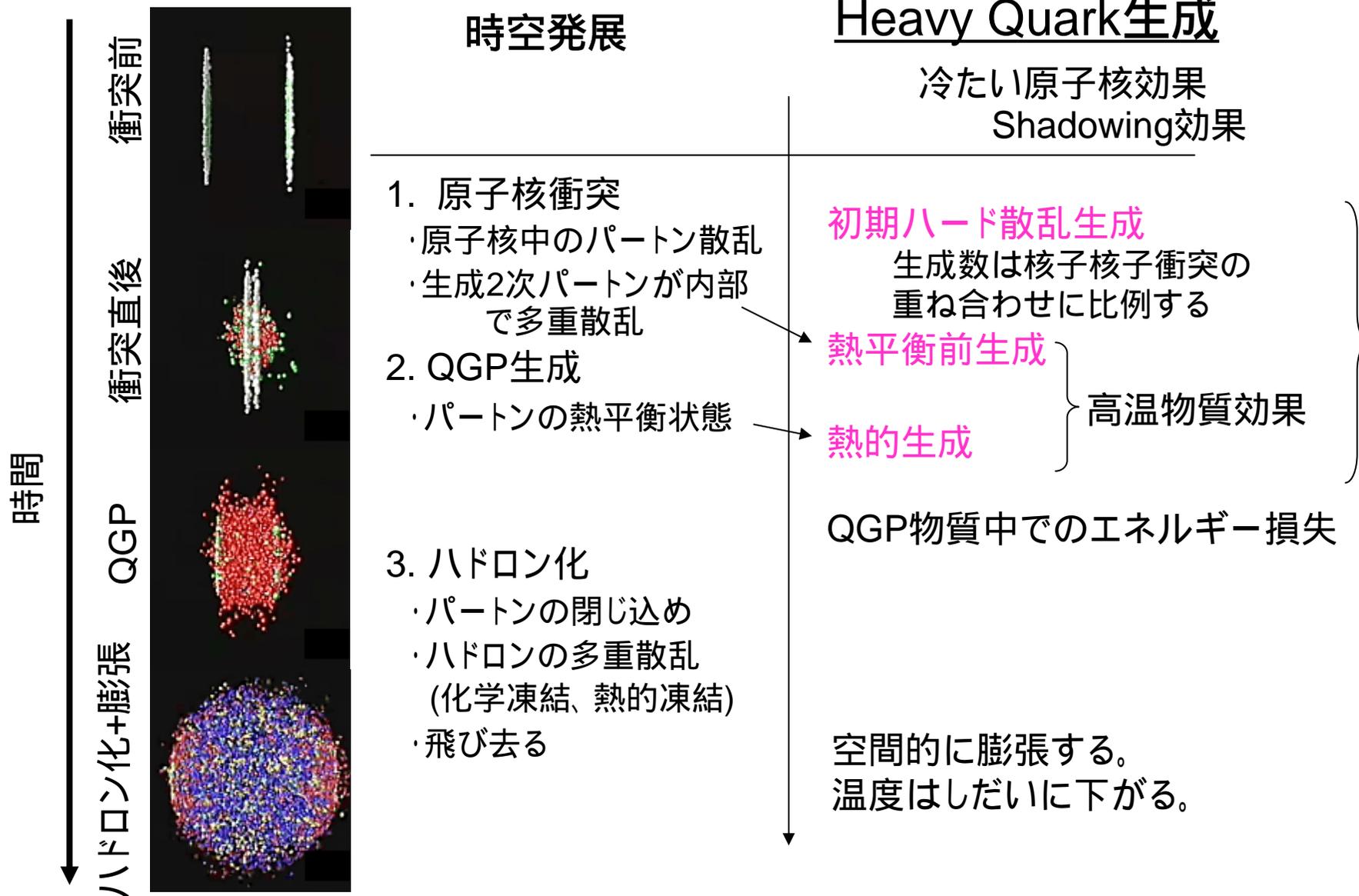
p+p衝突における生成量



Heavy Quark測定の意義

- Heavy Quark (Charm, Bottom)を使用して, 高温物質の性質を調べる
 - 質量が大きいので、ハード衝突でのみ生成される。
 - $M_c = 1.2\text{GeV}$, $M_b = 4.2\text{GeV}$ @ PDG
 - 核子の中にほとんどない。
 - 主にグルーオン衝突($gg \rightarrow c\bar{c}$)によって生成される。
衝突初期のグルーオン密度に関する情報を得られる

原子核衝突におけるHeavy Quark生成

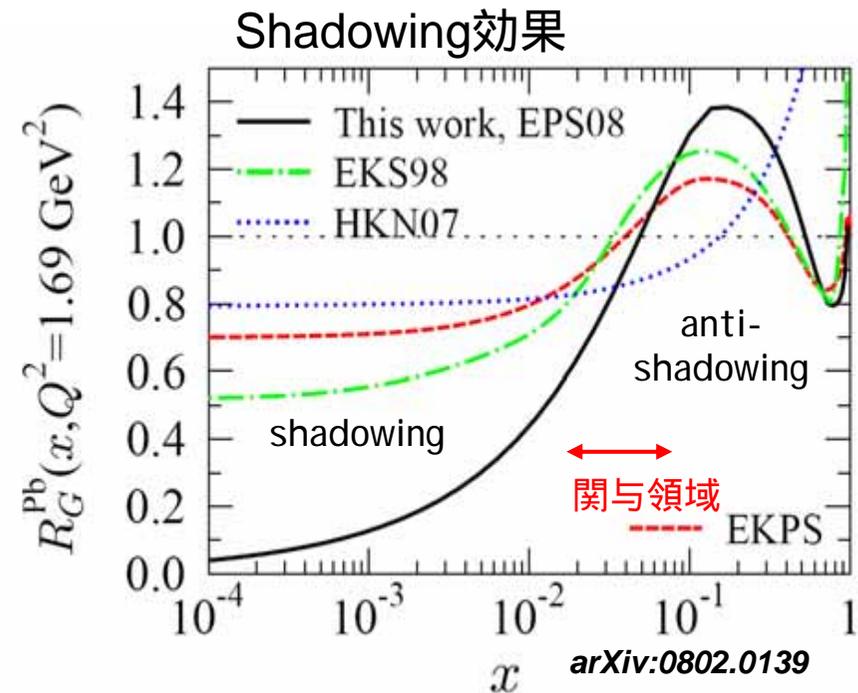


冷たい原子核効果(Cold Nuclear Effect)

- Shadowing効果
 - 原子核中では核子に比べ、グルーオンの数が減少している。
 - Heavy Quarkの収量が減少する
 - EKS98モデルによると、10%減少する
- Cronin効果
 - パートの多重散乱による運動量が分布の変更。

QGP中の効果

- Heavy Quarkのエネルギー損失
 - Radiative損失(グルーオンの制動放射)
 - π^0 で観測
 - Heavy Quarkは質量が重いので、Radiative損失は少ないと予想 (dead cone 効果)
 - 電子/ μ 粒子の制動放射の違いと類似

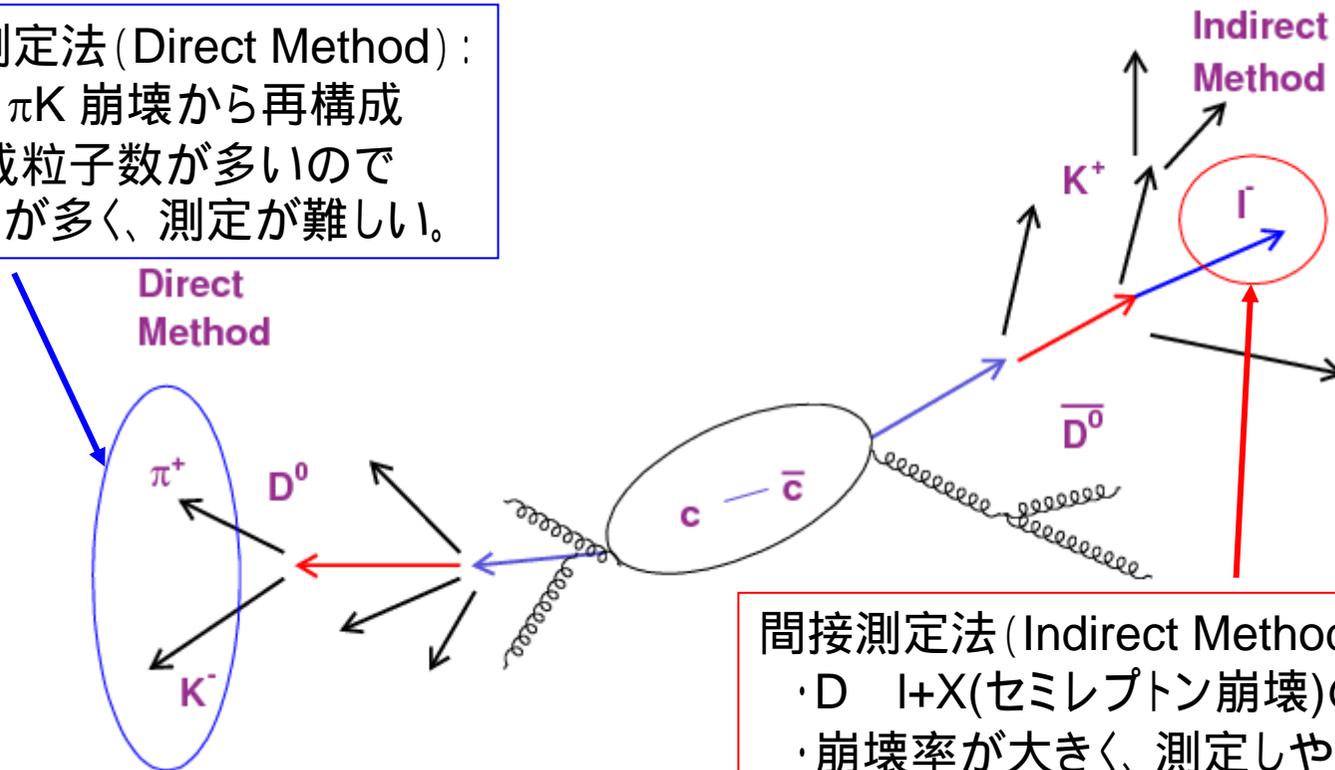


研究動機

- Heavy Quark測定によって原子核衝突の初期状態を調べる。
 - Heavy Quarkの全収量が核子衝突の重ねあわせで説明できるか。
 - 初期ハード衝突生成だけなのか。
 - 高温物質効果により、収量が増減するか。(熱平衡前、熱的生成)
- $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ のAu + Au、p+p、d+Au衝突におけるHeavy Quarkの全収量比較を行う。

Heavy Quark測定

直接測定法 (Direct Method) :
・D π K 崩壊から再構成
・生成粒子数が多いので
BGが多く、測定が難しい。



間接測定法 (Indirect Method) :
・D $l+X$ (セミレプトン崩壊)の $l(e)$ を測定。
・崩壊率が大きく、測定しやすい。
 $D^0 \rightarrow eX(6.86\%)$, $D^{+/-} \rightarrow eX(17.2\%)$
・HQ測定に良く使われる。

間接測定法で測定する。

Heavy Quarkのセミレプトン崩壊による電子を測定する。

実験で測定される電子:シグナルとバックグラウンド

- Non-photonic電子

- Heavy Quark電子

- 測定したいシグナル
 - Heavy Quarkのセミレプトン崩壊の電子
c e, b e

- バックグラウンド電子:

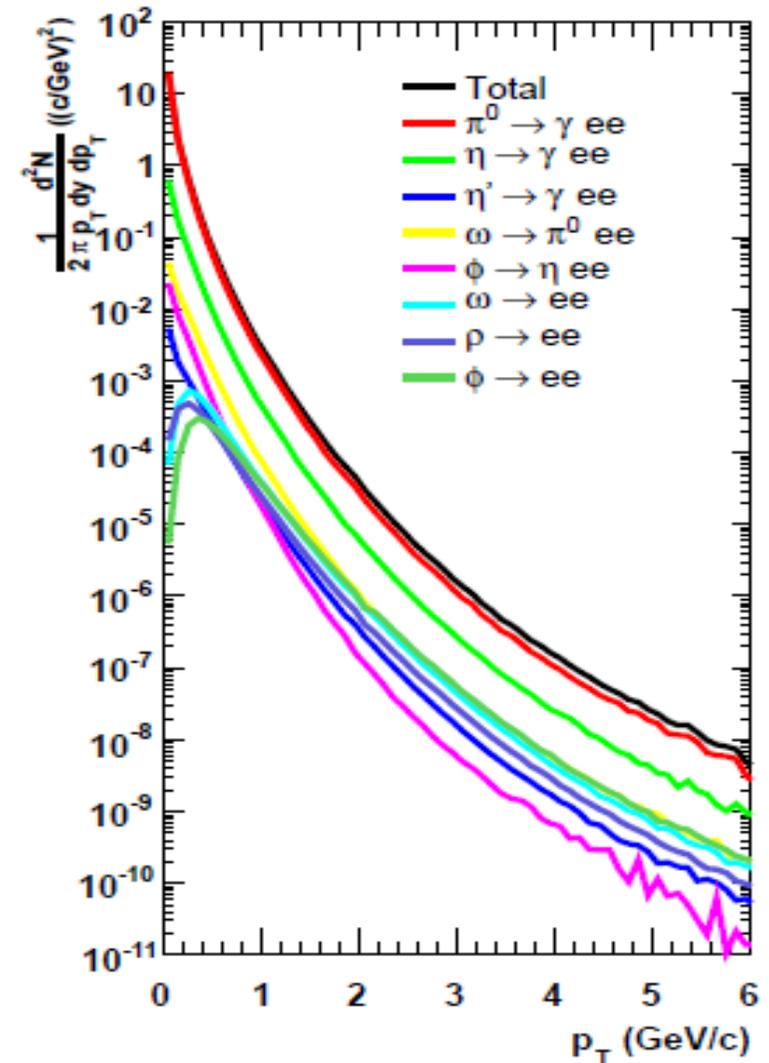
- Ke3 (K → eνπ) <6% @ p_T>1GeV/c
 - φ, ρ, ω → ee <3% @ p_T>1GeV/c
 - J/ψ → ee, Drell-Yan過程
 - 低いp_Tでは寄与が小さい

- Photonic電子

- 主要なバックグラウンド電子

- ダリッツ崩壊 (π⁰, η → γee, ω → π⁰eeなど)
 - Photon Conversion 測定器などの物質 (1.1%X₀)
 - π⁰, η → γγ, γ → ee

バックグラウンド電子のカクテル(計算)



PHENIX実験と解析

解析のフローチャート

電子識別

- PHENIX測定器を用いてAu+Au衝突において電子を識別する。
- 中心衝突度毎に原子核衝突事象を分類する

Heavy Quark電子の抽出

- コンバータ法を用いてNon-photonic電子とPhotonic電子の分離する
- その他のバックグラウンドの差引く

検出器効果の補正

- アクセプタンス、電子識別効率

Heavy Quark電子の不変収量

PHENIX実験

中心測定器アーム

アクセプタンス:

$$|\eta| < 0.35, \Delta\phi = \pi/2 \times 2, \\ p > 0.2 \text{ GeV}/c$$

荷電粒子の飛跡検出

- ・ ドリフトチェンバ (DC)
- ・ MWPC (PC)

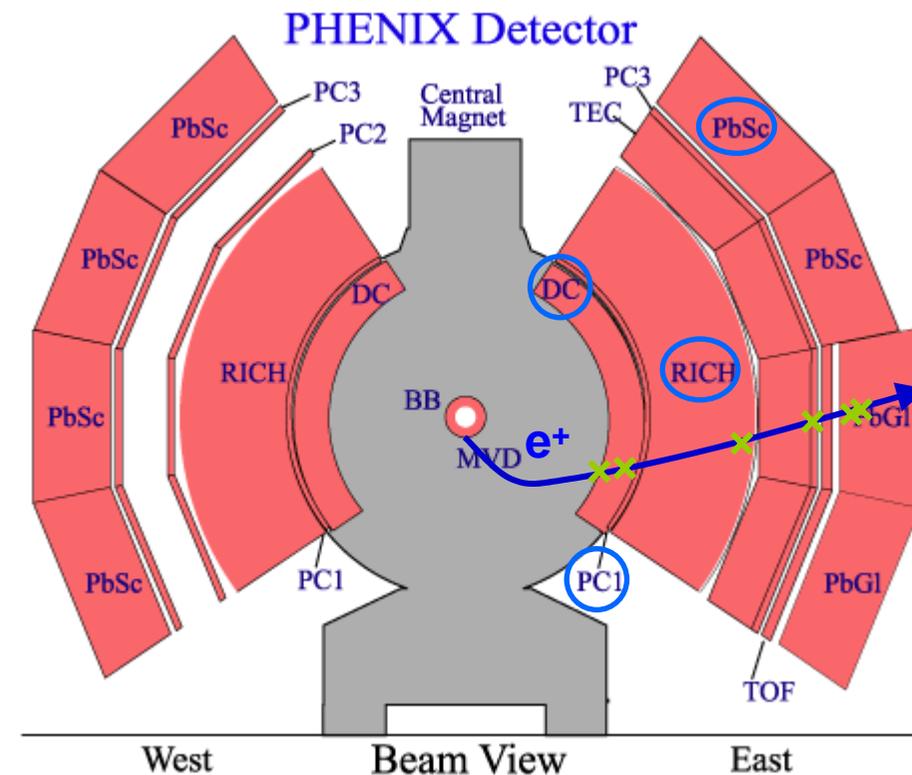
電子識別

- ・ リングイメージチェレンコフ検出器 (RICH)
- ・ 電磁カロリメータ (EMCAL)

データセット

Au+Au@ $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$

- ・ **Run2データを解析**
- ・ Run4データを**一部解析**



p+p@ $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$

- ・ Run2、5データを比較用に使用

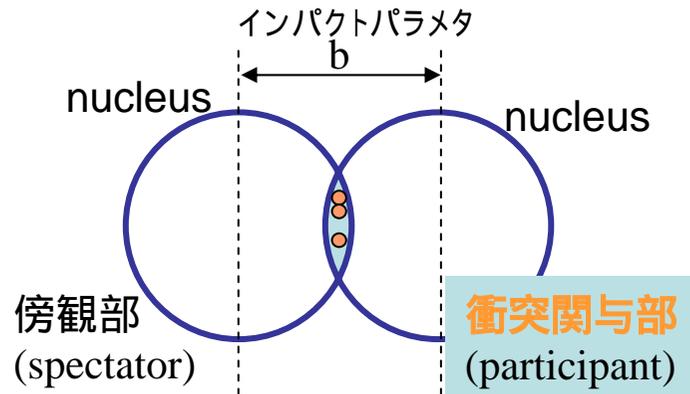
d+Au@ $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$

- ・ Run3データを**一部解析**

中心衝突度(セントラリティ)

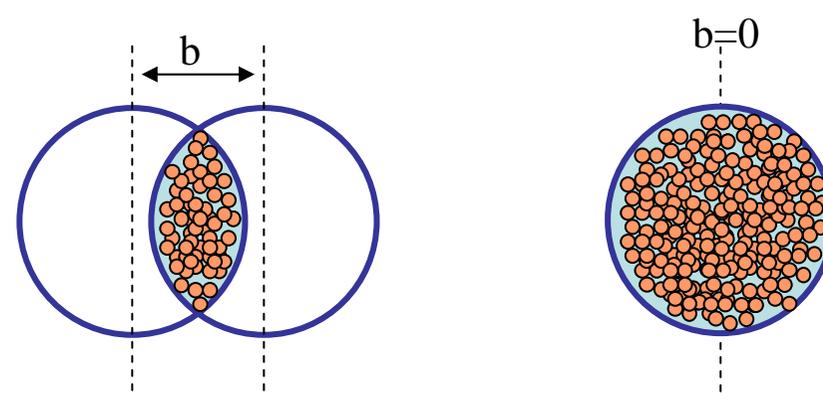
かすり衝突

中心衝突度 92%



中心衝突

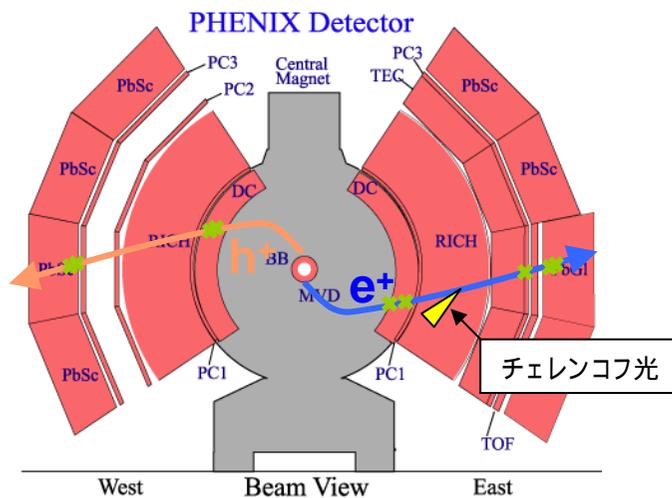
中心衝突度 0%



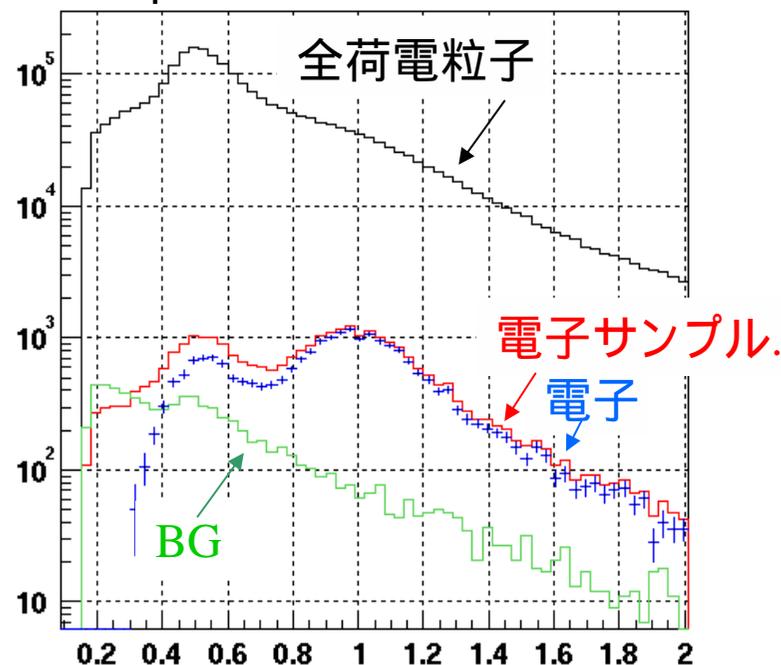
- 原子核衝突を中心衝突度で分類する
 - 中心衝突であるほどエネルギー密度が大きくなる 高温物質効果大
- 解析に使用するパラメータ
 - N_{coll} : 原子核衝突あたりの核子核子衝突回数
 - ハード衝突の回数

電子識別

- RICH
 - 電子識別
 - チェレンコフ光量
 - リングシェイプによる識別
- 電磁カロリメータ
 - エネルギー – 運動量マッチング
 - $E/p=1$ @電子
 - $E/p<1$ @ハドロン
- 誤識別によるバックグラウンド
 - $\sim 10\%$
 - イベントミキシングにより差し引く

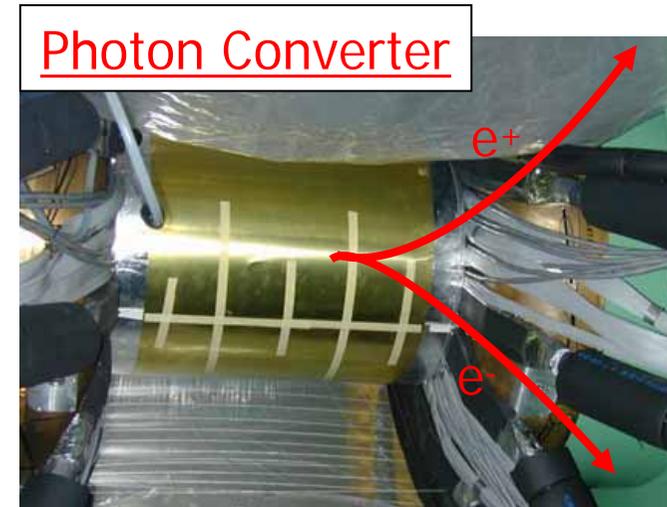


E/p 分布



コンバータ法

- 光子コンバータ
1.7% X0の真鍮
(~Cu:70%, Zn:30%)
データ収集期間の一時期にインストール
- コンバータ法
 - Non-photonic電子とPhotonic電子を統計的に分離する方法。
 - 原理
 - コンバータIN/OUTのデータセット比較することでPhotonic電子とNon-photonic電子を分離する

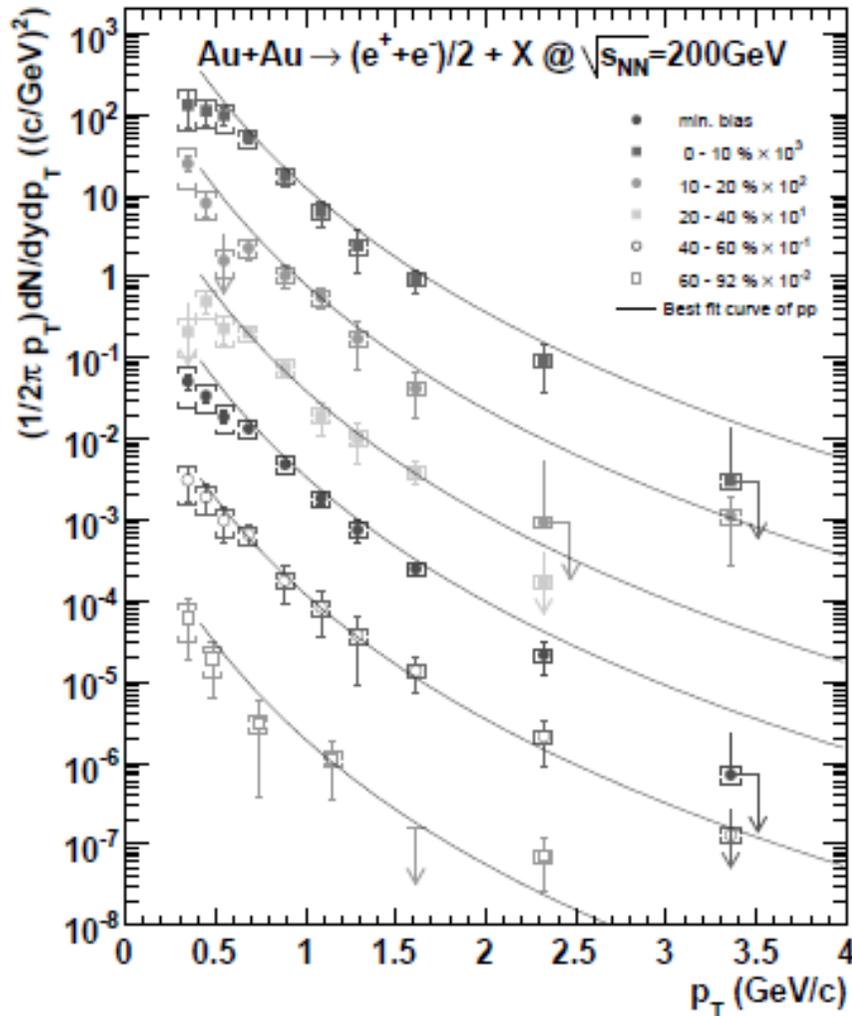


データ自身からNon-photonic電子を抽出するので
系統誤差が少ない測定が可能。

結果

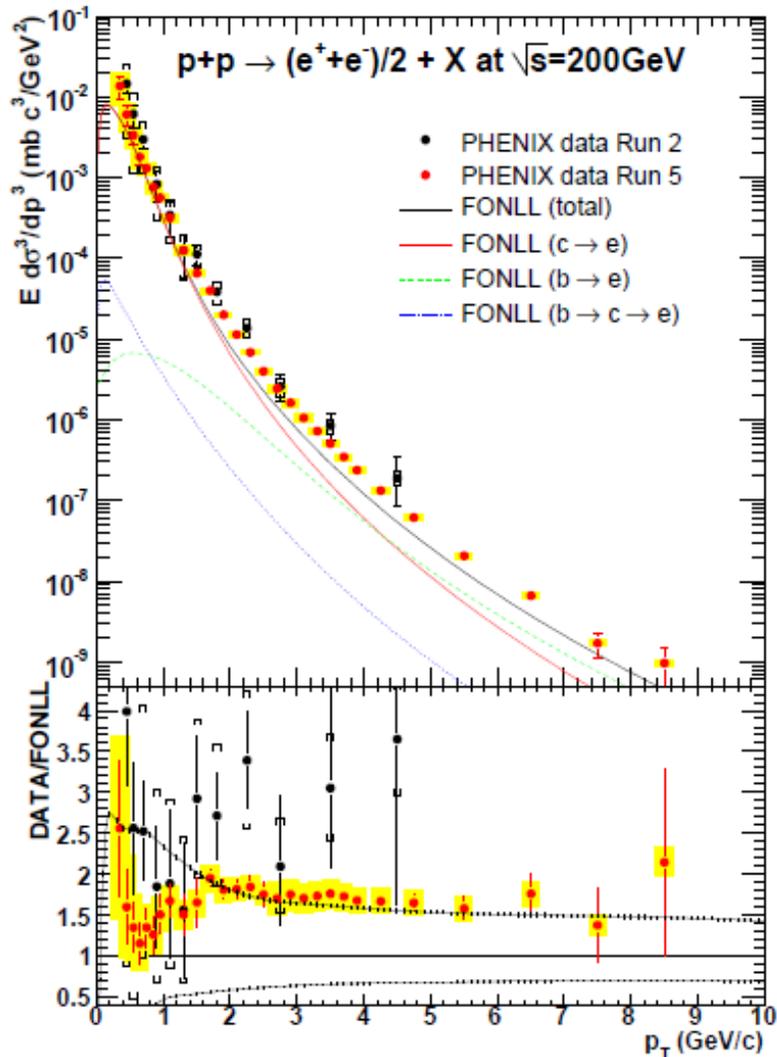
結果

Heavy Quark電子の不変収量 Au+Au@ $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$



- Heavy Quark電子の不変収量
 - Au+Au@ $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$
 - 全イベント: ミニマムバイアス
 - 中心衝突度別: 5分割
 - 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-92%
- p+p@ $\sqrt{s}=200\text{GeV}$ と比較
 - 核子衝突回数 N_{coll} でスケール。
 - p+pの重ね合わせで表現できるか?
 - Au+Auとp+pはエラーの範囲内で一致。

p+p@ $\sqrt{s}=200\text{GeV}$ におけるHeavy Quark電子の不変収量



PRL96(2005) 023001 (Run3)

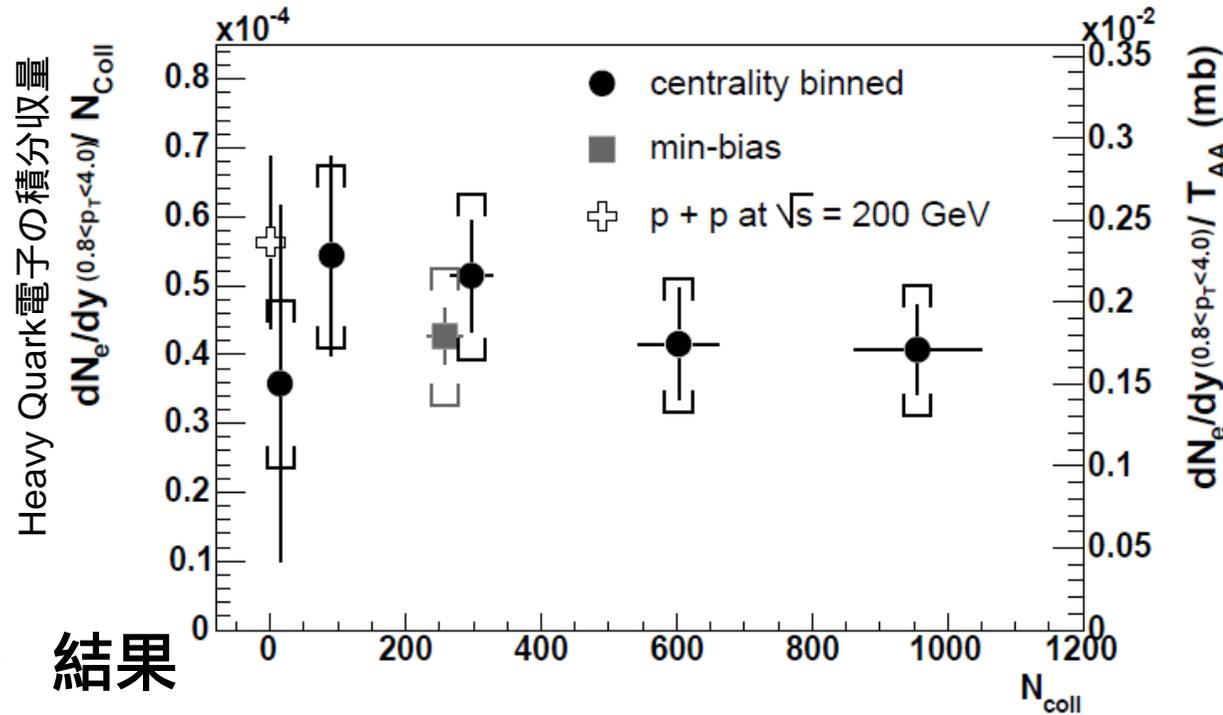
PRL97(2006) 252002 (Run5)

2010/2/18

- Heavy Quark電子の生成断面積
 - 2つのデータセット (Run2+Run5)
 - 摂動QCD計算(FONLL)と比較
 - p+pデータはFONLLとエラーの範囲で一致
 - DATA/FONLL=1.7
 - AuAuもFONLLと一致
 - AuAu=pp, pp=FONLLより
- 摂動QCD計算(FONLL)について
 - $p_T < 4\text{GeV}/c$ 以下はCharmの寄与が支配的
 - $p_T > 4\text{GeV}/c$ でBottomが増大
 - この傾向は実験データで確かめられた。
 - CharmとBottomを実験的に分離

低い p_T 領域を積分することで
Charm生成を調べることができる。

Au+Au衝突におけるCharmの中心衝突度依存性



N_{coll} スケーリングを
定量的に評価

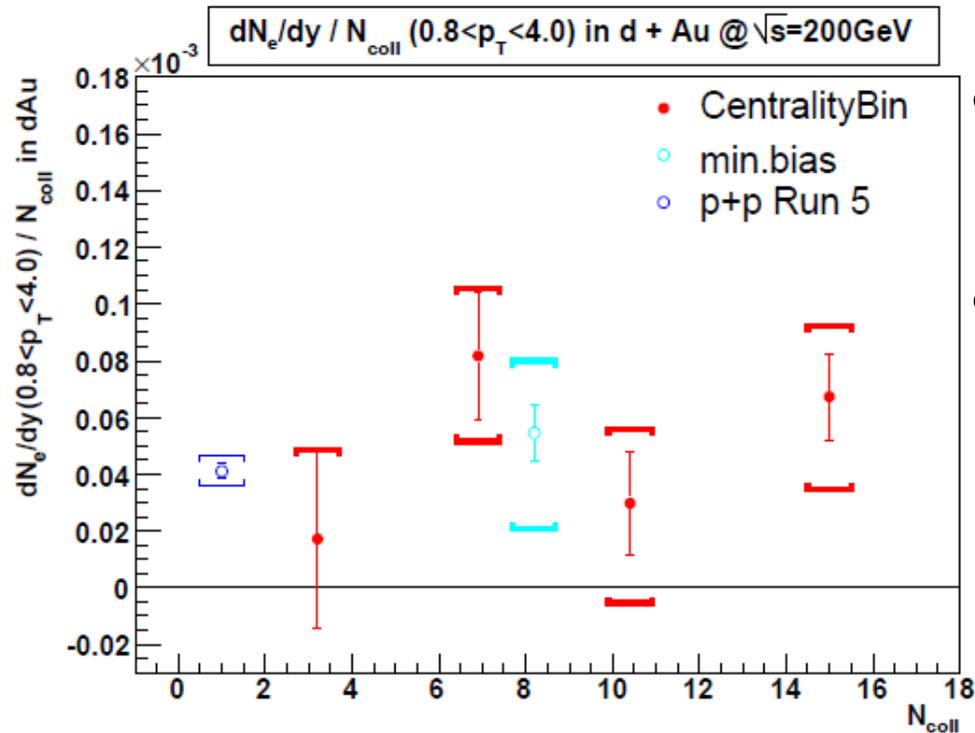
$$A \cdot N_{coll}^{\alpha-1}$$

• もし $\alpha=1$ だったら、完全に
 N_{coll} スケーリングが成り立っ
ている。

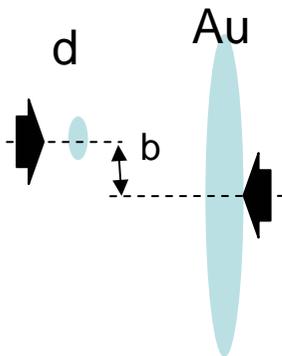
結果

- Run2の dN_{dy}/N_{coll} ($0.8 < p_T < 4 \text{ GeV}$)
 - $\alpha = 0.938 \pm 0.075 \text{ (stat)} \pm 0.018 \text{ (sys)}$ エラーの範囲で $\alpha = 1$ 。
- Charmの全生成量は初期ハード散乱で説明できる。
 - 極端な増加のような現象は無い(熱平衡前 or 熱的生成)
 - エラーの範囲内での増加・減少はあるかもしれない。
 - エネルギー損失の議論の基準となる。
- 原子核衝突の初期状態は、核子衝突の重ね合わせである。

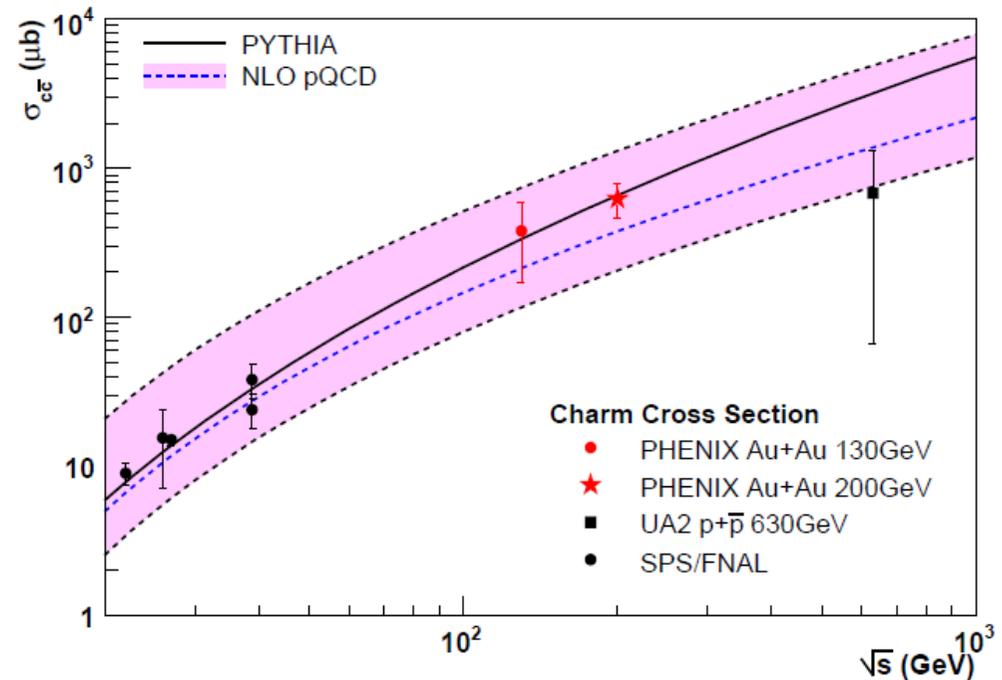
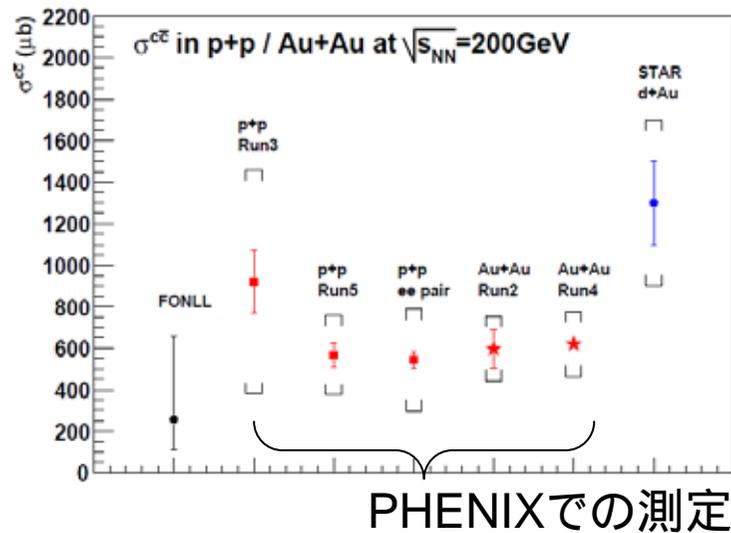
d+Au 衝突におけるCharmの中心衝突度依存性



- d+Au衝突
 - 冷たい原子核効果の研究
- p+pとの比較
 - N_{coll} スケーリングと一致している。
 - Shadowing効果は小さいことを示唆している
 - 統計が少なく定量的な結論は難しい。



Charmの全生成断面積と衝突エネルギー依存性



- Charmの全生成断面積
 - $\sigma_{cc} = 622 \pm 57 \pm 160$ (μb) @ ミニマムバイアス
- PHENIX内のすべての測定と一致
 - 高統計のデータ(Au+Au, p+pの両方)と一致
 - 摂動QCD計算(FONLL)ともエラーの範囲内で一致
 - ($\sigma_{cc} = 256 + 400 - 140$ (μb))
 - d+Auで測定したSTAR実験のデータは2倍程度大きい。

まとめと結論

- $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ Au+Au衝突において、Heavy Quark電子を測定した。
 - コンバータ法を用いてNon-photon電子を抽出した。
 - $0.4 < p_T < 4.0 \text{ GeV}/c$
- 微分不変収量分布(p_T 分布)の形はp+pデータと一致した
- Au+Au衝突において中心衝突度依存性を測定し、Heavy Quark電子の全収量は N_{coll} スケールすることを発見した。
 - $\alpha = 0.938 \pm 0.075 \text{ (stat)} \pm 0.018 \text{ (sys)}$
 - 原子核衝突Heavy Quark生成は、核子核子衝突の重ね合わせで表現できる。
 - d+Au衝突においても、 N_{coll} スケールリングを測定した。
- 核子衝突あたりのCharmの全生成断面積を測定
 - $\sigma_{cc} = 622 \pm 57 \pm 160 \text{ (}\mu\text{b)}$ @ ミニマムバイアス
 - NLO pQCDの予言と一致。(FONLL= $256 + 400 - 140 \text{ (}\mu\text{b)}$)

最近の進展

Heavy Quark電子の高 p_T 抑制

- 低 p_T 領域は $R_{AA}=1$
 - N_{coll} スケーリングを示す。
- 高 p_T でHeavy Quark生成の抑制を観測
 - Heavy Quark電子の R_{AA} は π^0 , η と同程度。
 - 定量的に説明できるモデルはない。
- 生成は N_{coll} スケールし、その後エネルギー損失により減少する。

Nuclear Modification Factor

$$R_{AA} = \frac{dN_{AA} / dp_T}{\langle T_{AA} \rangle d\sigma_{pp} / dp_T}$$

