

RHIC-PHENIX実験における 重いクォークを用いた クォーク・グルーオン・プラズマの 物性研究

RCNP, Osaka U.

浅野秀光



目次

-Introduction

- Quark Gluon Plasma (QGP) 概観
- QGPのプローブとしての重いクォーク

-RHIC-PHENIX実験でのシリコン検出器を使った charm/bottom 由来の電子の R_{AA} 測定

based on “Phys.Rev. C93 (2016) no.3, 034904 ”

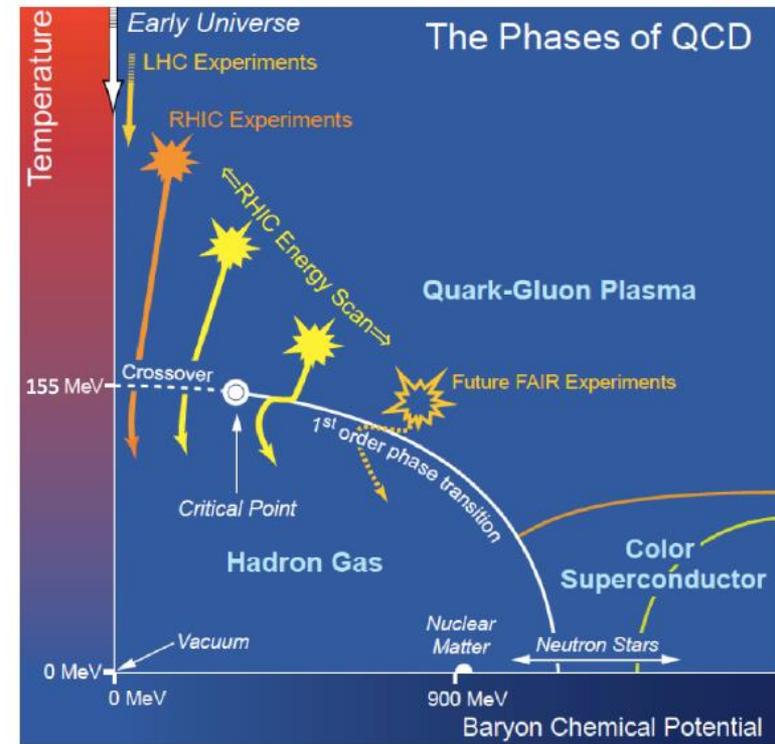
- まとめ

Quark Gluon Plasma (QGP)

- 高温、もしくは高密度状態でクォークとグルーオンが閉じ込めから開放された状態
- RHIC ($\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$) / LHC ($\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$)では、重イオン衝突実験を行い、QGPを生成
異なる温度領域で性質を研究-> 多くの観測量

なにをもってQGPができたと言えるのか？

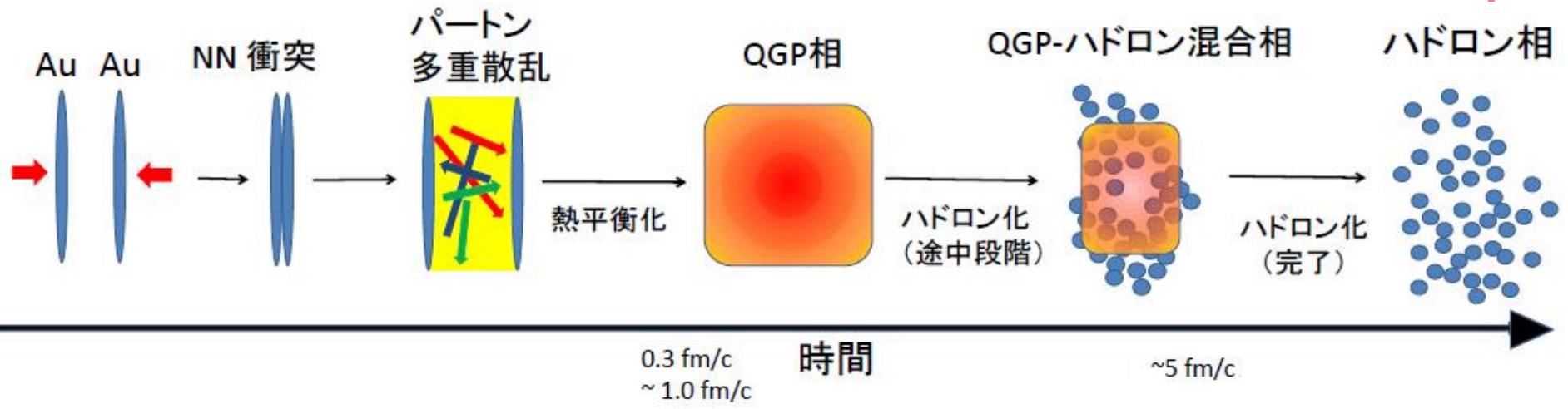
- RHIC/LHCでの重要な観測結果
 1. パートの大きなエネルギー損失
 2. 大きな方位角異方性
 3. 直接光子の生成増加



Y Akiba *et al.*

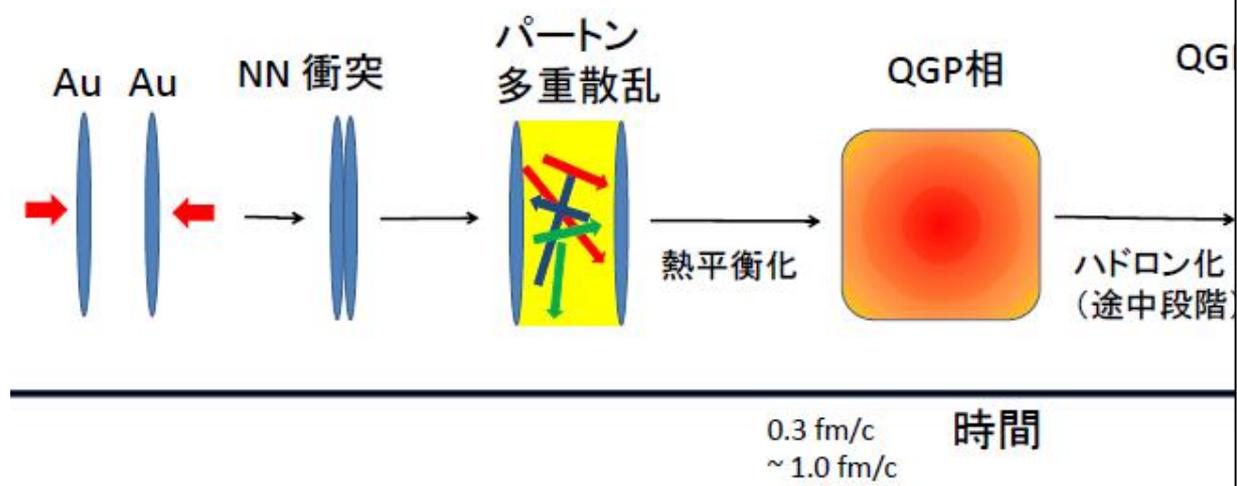
The Hot QCD White Paper: Exploring the Phases of QCD at RHIC and the LHC

重イオン衝突反応の時間発展



1. 原子核が衝突後、パートンの多重散乱が起こる。

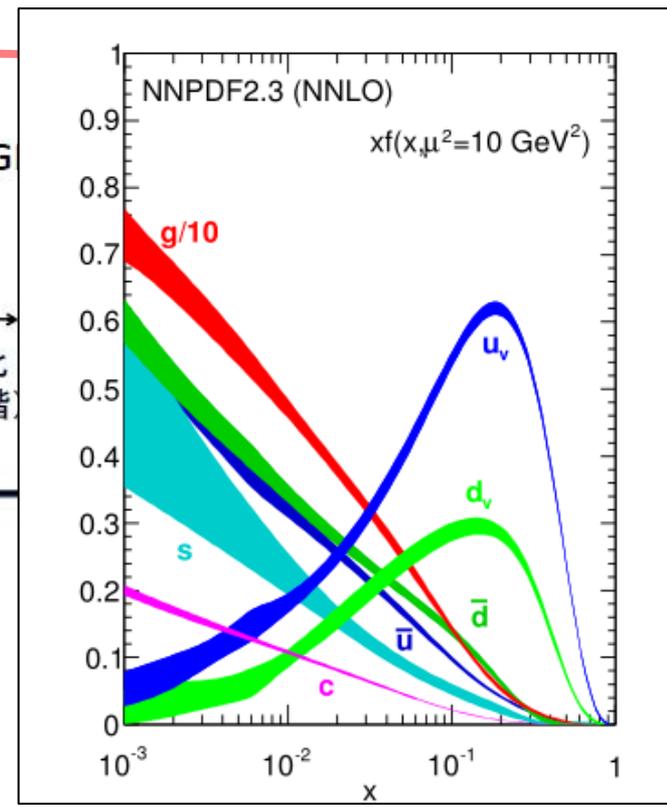
重イオン衝突反応の時間発展



1. 原子核が衝突後、パートンの多重散乱が起こる。

-- 中央ラピディティ領域で反応を見る限り、金原子核の中のバリオンは、ほぼそのまますり抜け

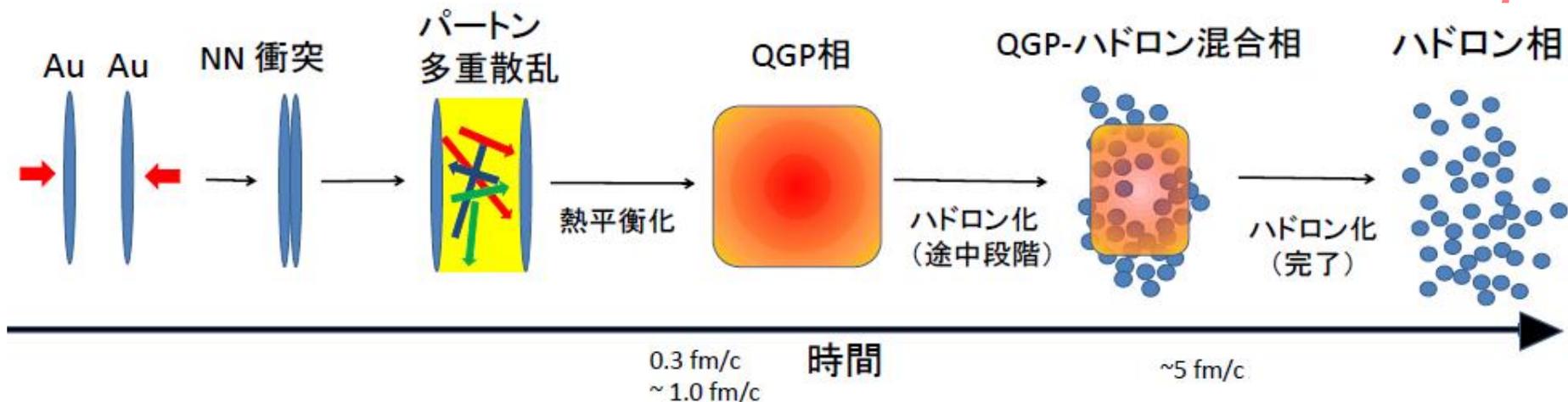
-- 反応領域には運動量の低いパートン(主にgluon)が残り多重散乱し、クォーク・反クォーク対を多数生成。



陽子のパートン分布関数

Richard D. Ball et al.
Nucl. Phys., B867:244–289, 2013.

重イオン衝突反応の時間発展



1. 原子核が衝突後、パートンの多重散乱が起こる。
2. それが熱平衡状態に達することでQGP相が実現。
 - 流体モデルの計算によると、0.3~1.0 fm/cの早い時間に熱平衡状態。
3. その後系はビーム軸方向に急速に膨張して冷却。混合相を経てハドロン化

1. パートンのエネルギー損失

- 重イオン衝突の最も特徴的な現象の一つ

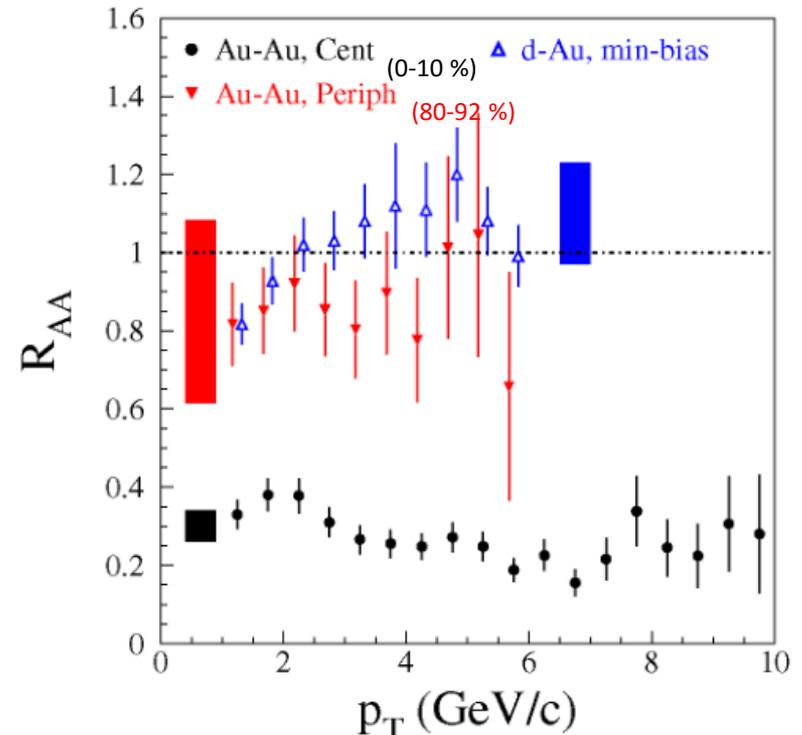
RHICの金+金の中心衝突において、高運動量の粒子生成が強く抑制されている

- 指標: 原子核抑制因子
(Nuclear modification factor)

$$R_{AA}(p_T, y; b) = \frac{d^2 N_{AA}/dydp_T}{N_{\text{coll}} \times d^2 N_{pp}/dydp_T}$$

金+金衝突中での
核子対衝突の数

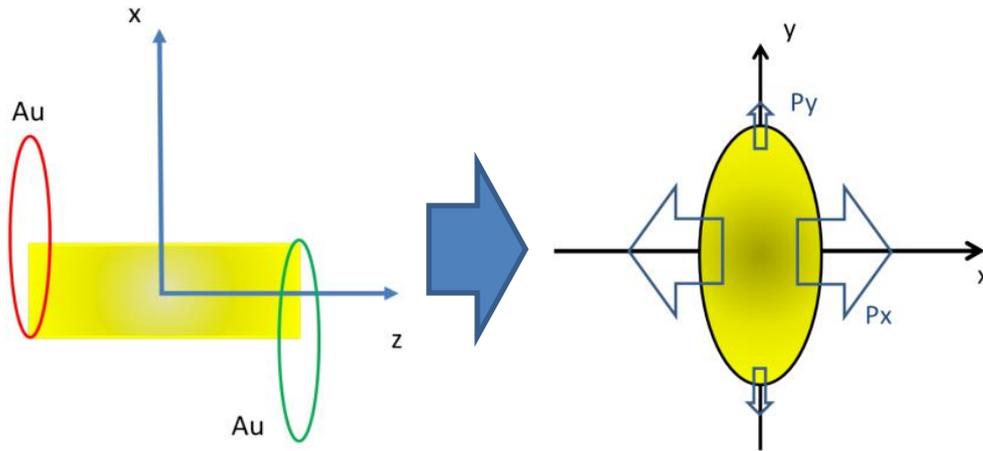
PHENIXでの π^0 中間子 R_{AA}



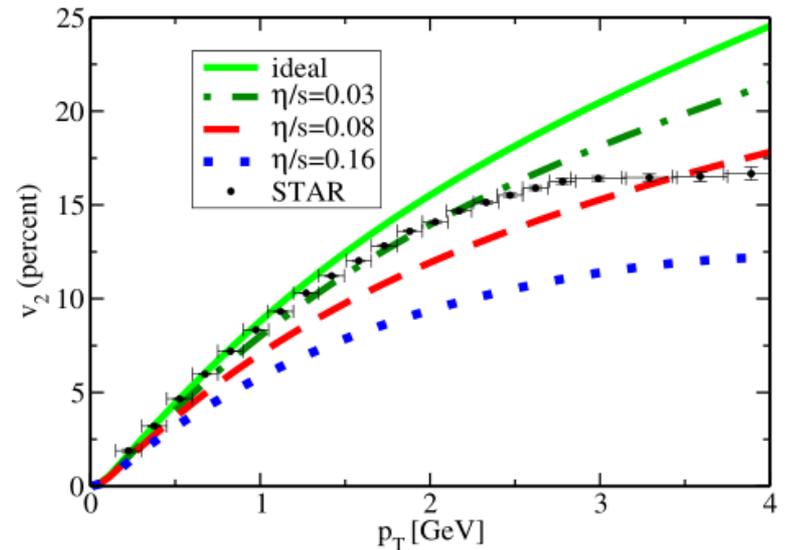
PHENIX Collaboration / Nuclear Physics A 757
(2005) 184–283

重陽子+金衝突では高運動量の粒子は N_{coll} にスケールすることを確認。
金+金衝突では反応後の生成物によって抑制。

2. 大きな方位角異方性



- 非中心衝突
- アーモンド状の反応領域
- 圧力勾配により膨張
- 粒子分布に方位角異方性(v_2)



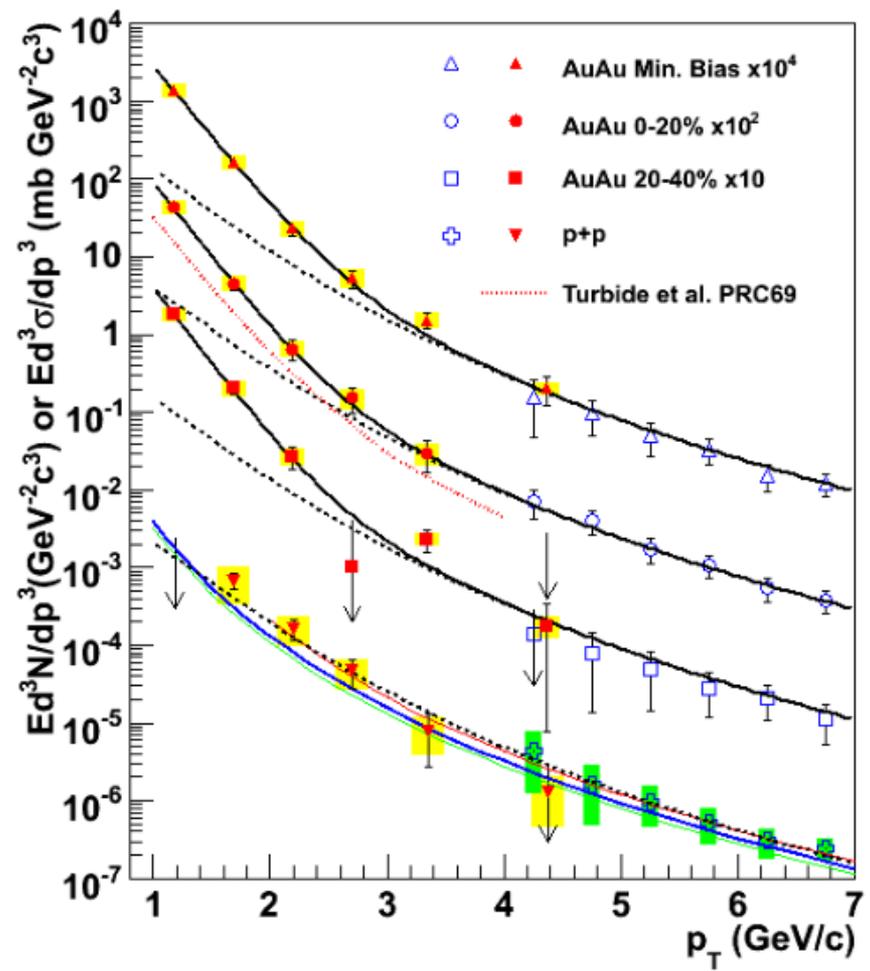
Paul Romatschke and Ulrike Romatschke.
Phys. Rev. Lett., 99:172301, 2007.

発生粒子が横方向に集団運動

- 衝突後 0.3 – 1.0 fm/c の時間で熱平衡状態に達していると仮定した上で流体モデルを実験データと比較

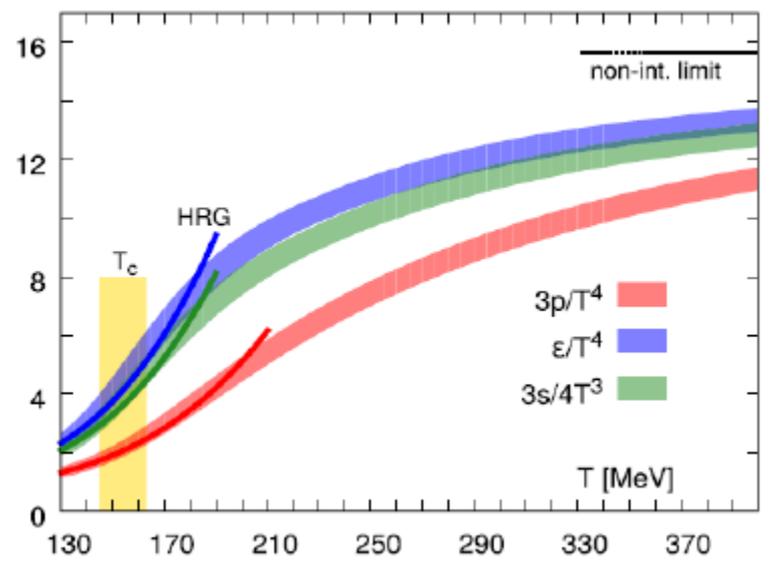
ずり粘性/エントロピー比が非常に小さい値

3. 直接光子の生成増加。



direct photon yield

PHENIX collaboration
Phys. Rev. Lett., 104:132301, 2010.



Lattice QCD results
Hot QCD collaboration

Phys. Rev. D, 90(9):094503

- 金+金衝突では、陽子+陽子衝突と比較して、QGPからの熱放射によって低いpTでの直接光子が増大
- 生成物質の初期温度は 300-600 MeV と推定される
- Lattice QCDが予言するQGPへの転移温度は ~150 MeV

- RHIC/LHCの重イオン衝突実験では、Lattice QCDの予言するQGP転移温度 (~ 150 MeV) を超える高温物質(=QGP)ができていることが確認された。
- 今日ではQGPの物性をより定量的に研究する段階へとシフトしている。

目次

-Introduction

-- Quark Gluon Plasma (QGP) 概観

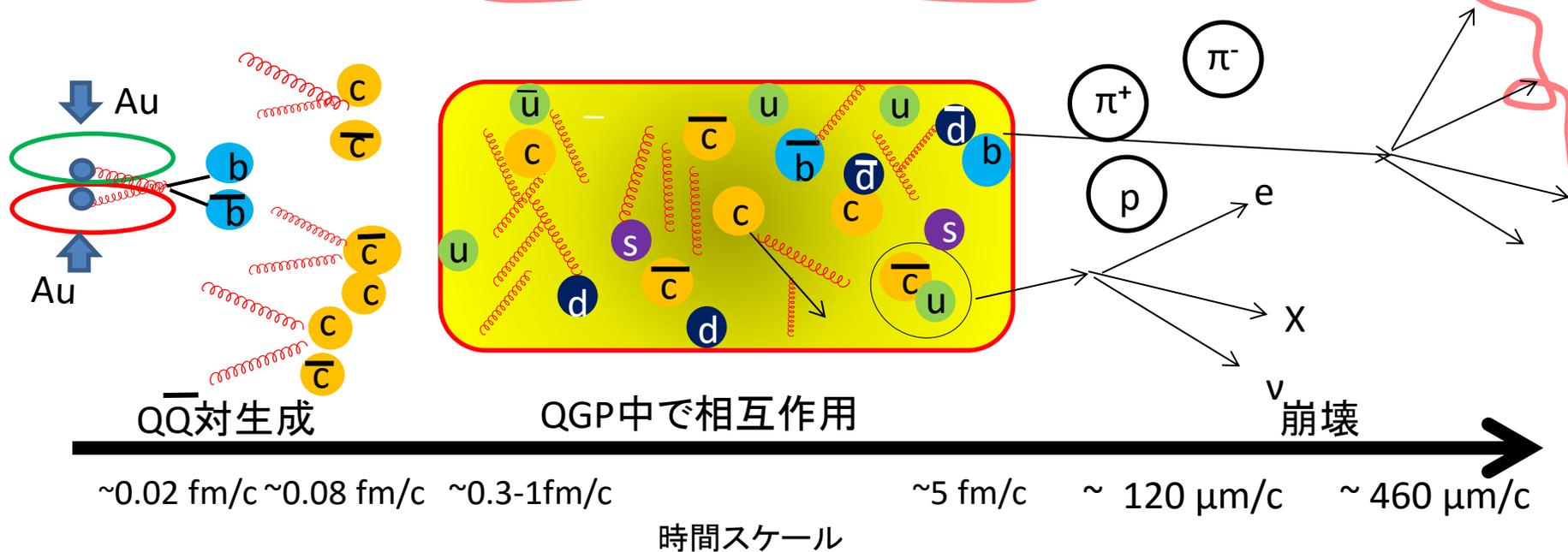
-- QGPのプロープとしての重いクォーク

-RHIC-PHENIX実験でのシリコン検出器を使った
charm/bottom 由来の電子の R_{AA} 測定

based on “Phys.Rev. C93 (2016) no.3, 034904 ”

- まとめ

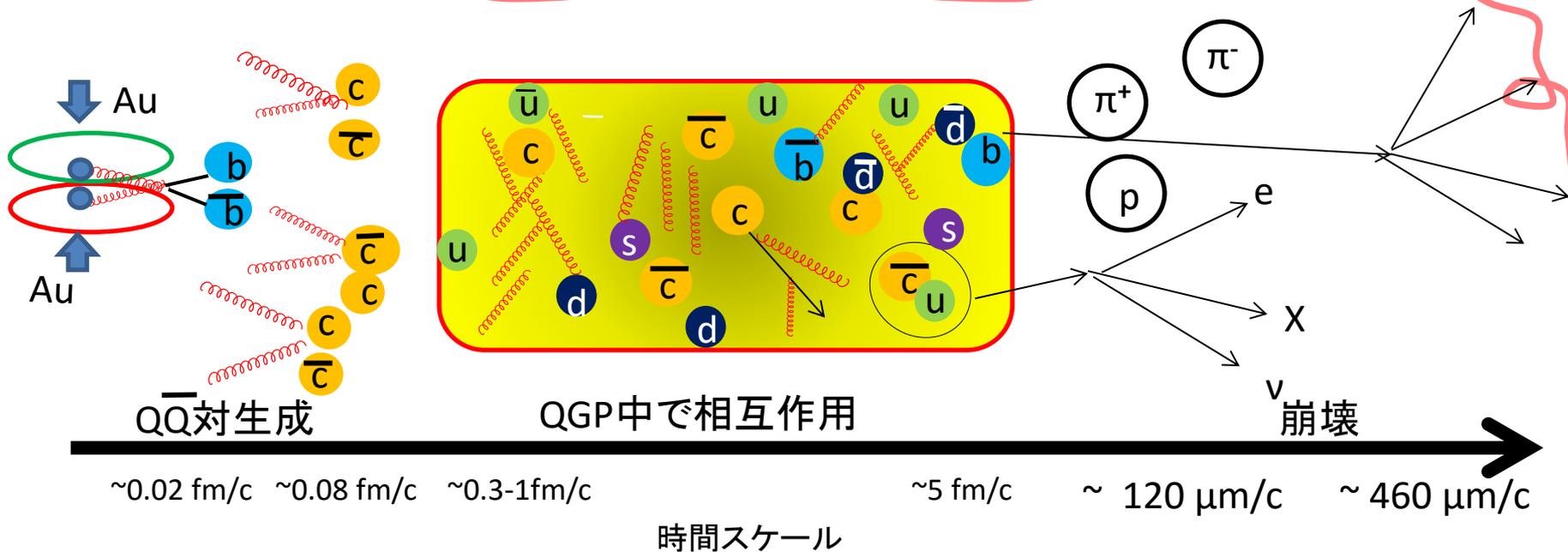
重いクォークの時間発展



charm クォーク ($m_c \approx 1.3 \text{ GeV}$)と bottom クォーク ($m_b \approx 5 \text{ GeV}$)の質量は QGPの温度($300 \sim 600 \text{ MeV}$)よりも十分大きい

衝突初期のハード散乱でのみ生成される。

重いクォークの時間発展

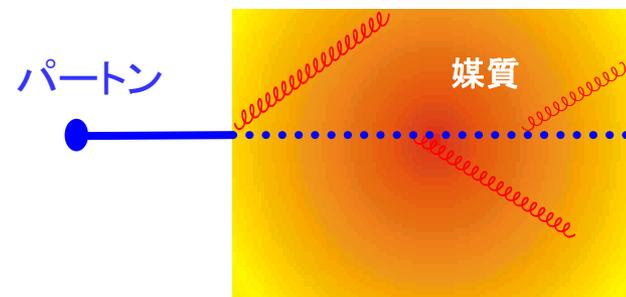


- QGP中で相互作用するが、クォークの数の総量は変化せず
 > QGP相の始まりから終わりまでの情報を持ち出す、プローブとしての役割
 例: QGP生成初期のグルーオン密度 } 但し、モデルに依存
 QGPと重クォークの結合の強さ
- 一方低い p_T の軽いハドロンは、QGP中でも生成されるので、反応終了時の様子を知ることはできるが、QGP内部の情報を直接知るのは難しい

パートンエネルギー損失の2つの機構

1. 輻射損失(Radiative energy loss)

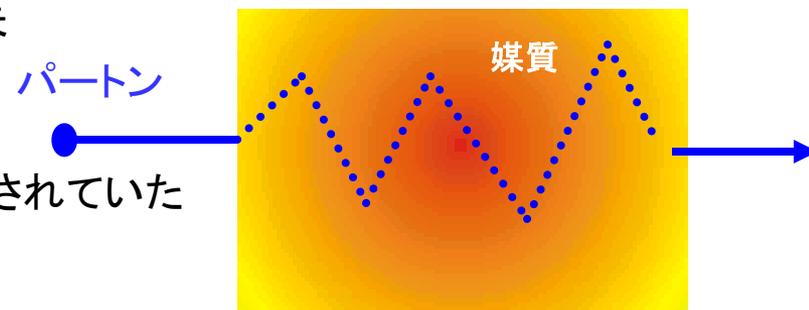
- 媒質中でのgluon放出によって起こるエネルギー損失
- 定性的には高い p_T 領域で主要な損失プロセス



2. 衝突損失(Collisional energy loss)

- 媒質中のパートンとの衝突によって起こるエネルギー損失
- 定性的には低い p_T 領域で主要な損失プロセス

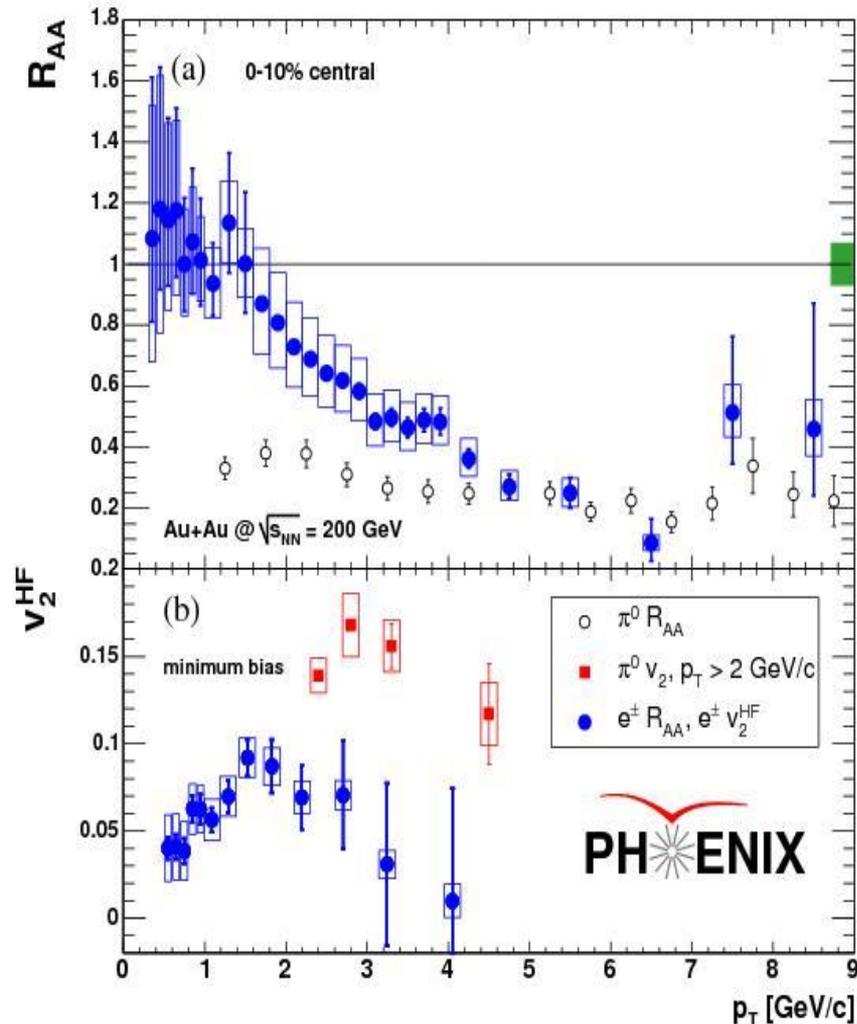
- PHENIXのsingle electron 測定(2004/2005) 以前は無視されていた (pQCD-based calculations)
- 非摂動論効果が大きい場合、無視できなくなる。



先行研究: charm + bottom からの電子測定

以前の PHENIX での測定 (2004/2005年データ)

PRL 98, 172301 (2007)



-charmとbottomからの寄与を分離していない電子は、 p_T が高いところで強く抑制され、5GeV/c付近からは π^0 (白丸)と同程度の R_{AA} になる

+方位角異方性(v_2)をもつことも観測された。

➡ 大きな驚き！！

-この結果が出るまでは衝突損失は十分小さいと信じられ、輻射損失については、

$$\Delta E_g > \Delta E_{u,d,s} > \Delta E_c > \Delta E_b \quad (\text{dead cone effect})$$

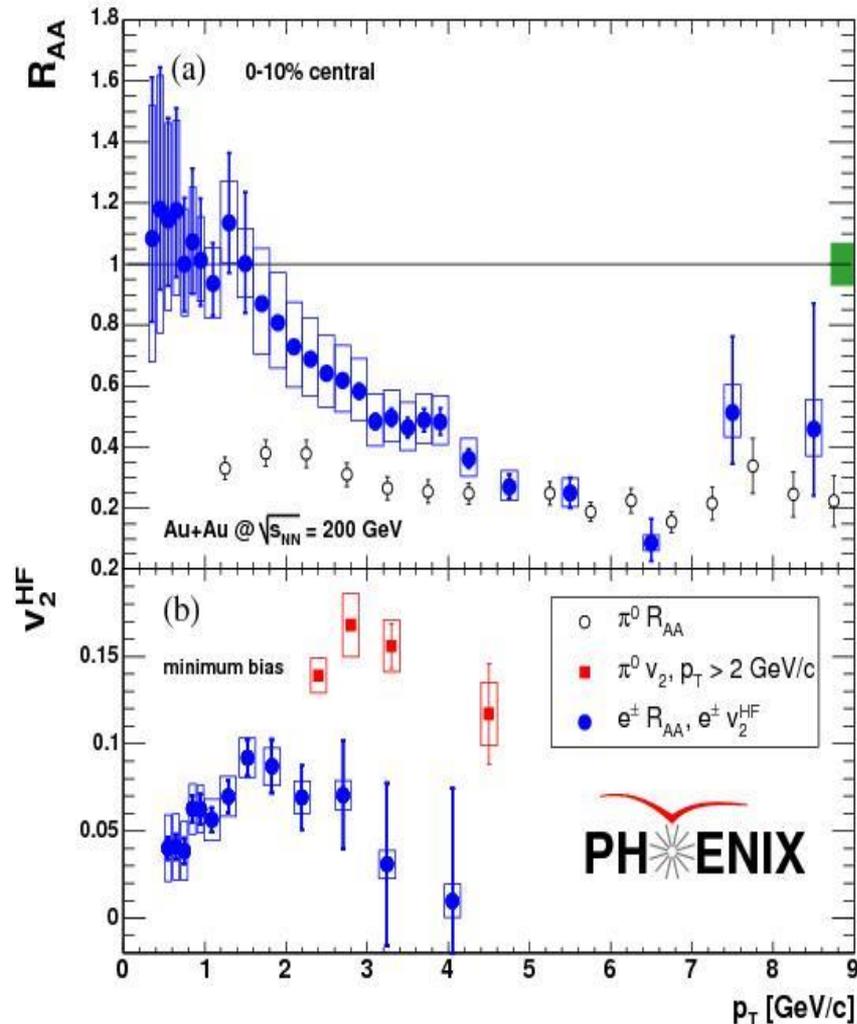
と予想されていたのだが。。。

衝突損失と輻射損失 双方からエネルギー損失モデルの再構築

先行研究: charm + bottom からの電子測定

以前の PHENIX での測定 (2004/2005年データ)

PRL 98, 172301 (2007)



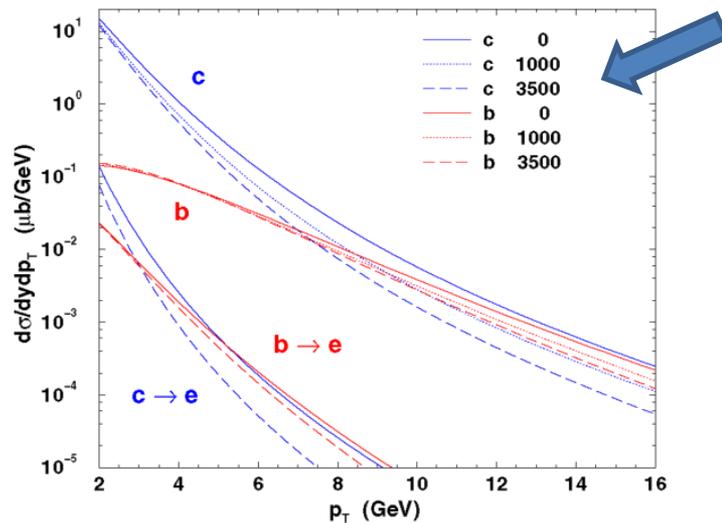
-charmとbottomからの寄与を分離していない電子は、 p_T が高いところで強く抑制され、5GeV/c付近からは π^0 (白丸)と同程度の R_{AA} になる。

- この測定では少なくともcharm quarkは抑制されていることが言えるが、bottom quarkは生成断面積が相対的に小さいため(0(1/100))、抑制されているのか分からず

輻射損失モデル(例)

DGLV 理論

M. Djordjevic, M. Gyulassy, R. Vogt, and S. Wicks
Phys.Lett. B, 632:81, 2006



static な散乱中心としてのグルーオンを配置し、円筒状に一様にビーム軸方向に膨張していくというモデル。

QGP生成初期のグルーオン密度(dN_g/dy)を free parameter として、charm / bottom quark の散乱による輻射損失を各々評価

衝突損失モデル(例)

S. Cao, G.-Y. Qin, and S. A. Bass.

J. Phys. G, 40:085103, 2013

重いクォークがQGP中でブラウン運動する模型

Langevin方程式

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = -\eta_D(p)\vec{p} + \vec{\xi}.$$

(η_D : 摩擦係数, ξ : ノイズ項)

QGPは流体モデルで記述

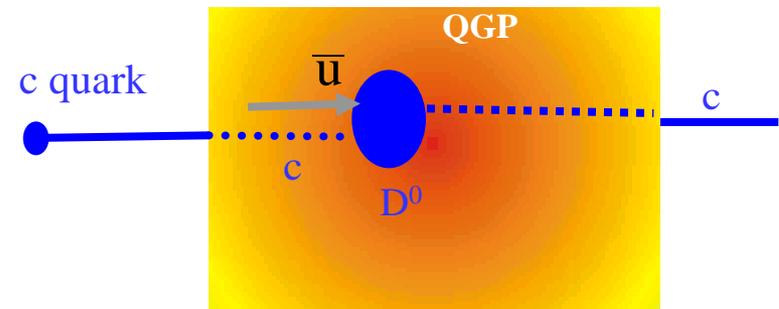
(空間) 拡散係数Dをfree parameterとして、チャーム、ボトムクォークの R_{AA} をそれぞれ記述

$$D = \frac{T}{M\eta_D(0)}$$

M. He, R. J. Fries, and R. Rapp. Phys. Lett. B, 735:445, 2014.

H. van Hees, M. Mannarelli, V. Greco, and R. Rapp. Eur. Phys. J. C, 61:799, 2009

T-matrix approach



- QGP中で共鳴状態としてハドロンを形成する。
- 大きな衝突断面積
- 共鳴を作る非摂動論過程をT行列を使って計算。

charm/bottom の分離

- 定性的には高い p_T では輻射損失が優位になると思われているが、定量的な衝突損失と輻射損失の寄与は不明
- 各モデル(衝突損失/輻射損失)で予想されるエネルギー損失は charm と bottom で各々異なる



charm/bottom を分離して測定し、 R_{AA} の質量依存性を理解！

モデルへの制限

目次

-Introduction

- Quark Gluon Plasma (QGP) 概観
- QGPのプロープとしての重いクォーク

-RHIC-PHENIX実験でのシリコン検出器を使った
charm/bottom 由来の電子の R_{AA} 測定

based on "Phys.Rev. C93 (2016) no.3, 034904 "

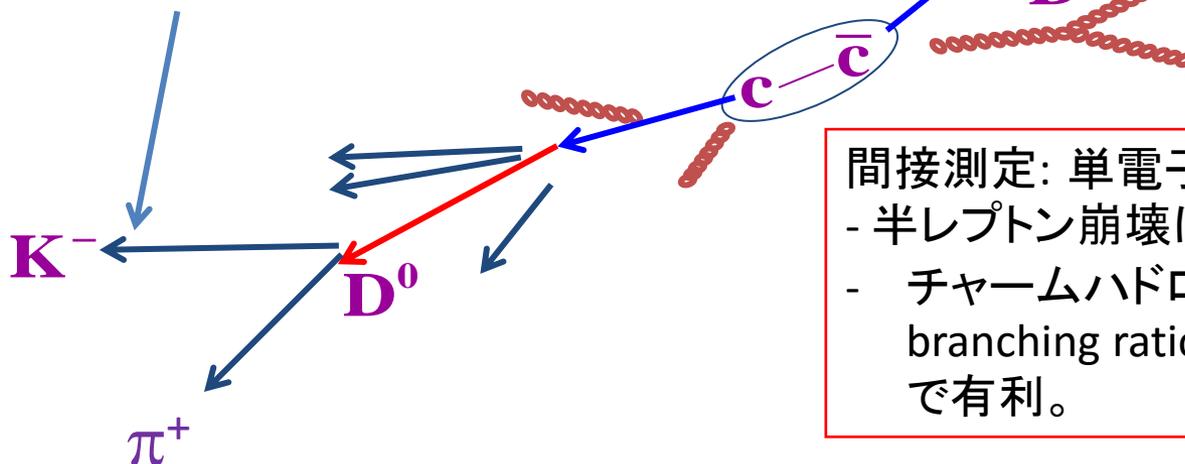
- まとめ

測定手法

直接測定: 不変質量法

$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$, $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$
 $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ 等

生成粒子が多いので、測定が難しい。大きなアクセプタンスを持つ検出器が必要。



間接測定: 単電子法

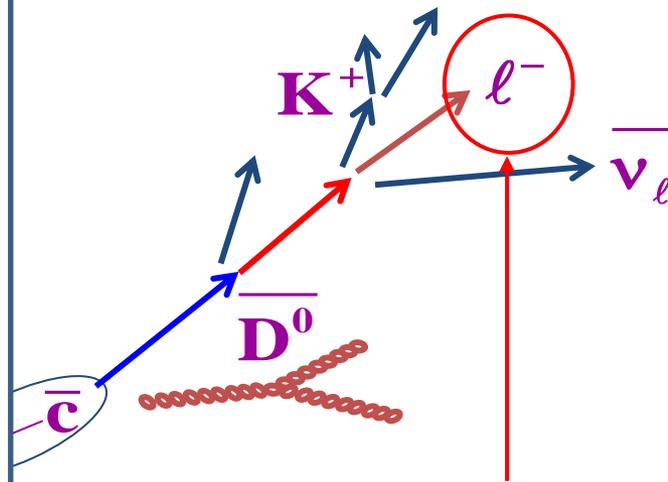
- 半レプトン崩壊による電子(陽電子)を測定。
- チャームハドロン、ボトムハドロンともに branching ratio が大きく($\sim 10\%$)統計の点で有利。

測定手法

- 単電子測定のみでは、charm/bottomハドロンとの寄与は分離できない。
- 陽子+陽子衝突では、親のチャーム、ボトムハドロン由来のハドロンとの相関を測ることで崩壊運動学の違いから分離可能。
(e-h correlation method)
- PHENIXでは、チャーム/ボトムハドロンの寿命の違いに注目。これを利用して分離するために新しいシリコン検出器の開発を進めてきた。

$$c\tau_{D^0} = 123 \mu\text{m}, c\tau_{D^\pm} = 312 \mu\text{m}$$

$$c\tau_{B^0} = 455 \mu\text{m}, c\tau_{B^\pm} = 491 \mu\text{m}$$

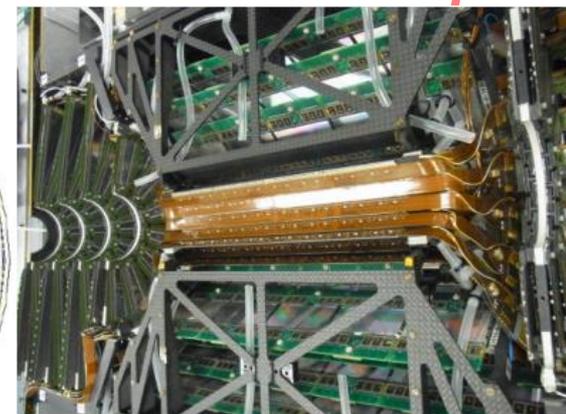
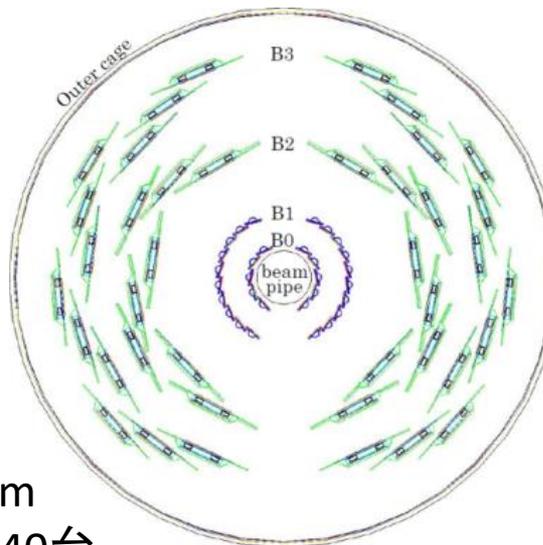


間接測定: 単電子法

- 半レプトン崩壊による電子(陽電子)を測定。
- チャームハドロン、ボトムハドロンともに branching ratio が大きく(~10%)統計の点で有利。

シリコン崩壊点飛跡検出器(VTX)

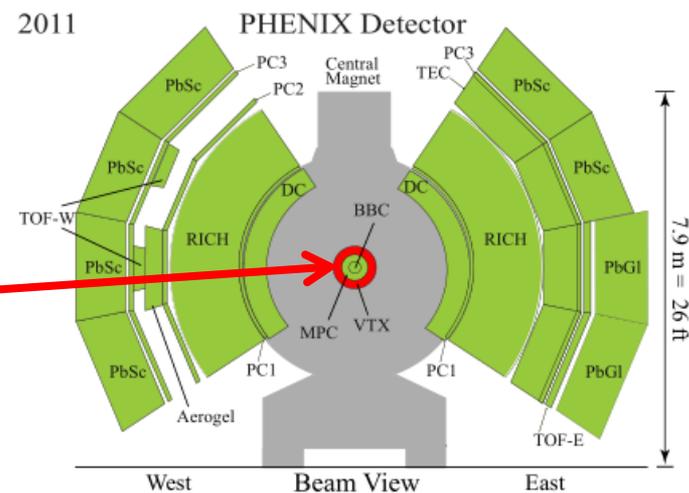
- 4層構造の円筒形シリコン検出器。



- 内側二層: ピクセル検出器 30台
方位角方向位置分解能 $\sigma_{r\phi} = 14.4 \mu\text{m}$
- 外側二層: ストリップピクセル検出器 40台
方位角方向位置分解能 $\sigma_{r\phi} = 23 \mu\text{m}$

- チャーム・ボトムハドロン分離のための高精度飛跡検出が可能。

- 2011年度、PHENIX実験室のビーム衝突点周りに設置。



2011年度金+金 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 衝突実験解析

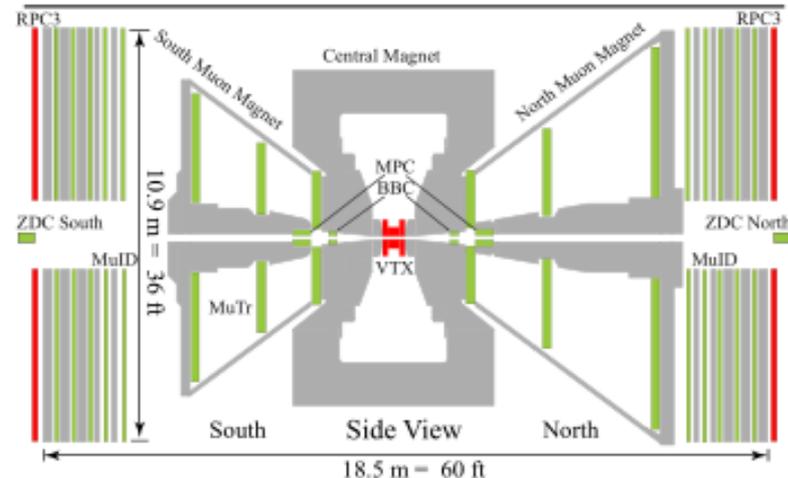
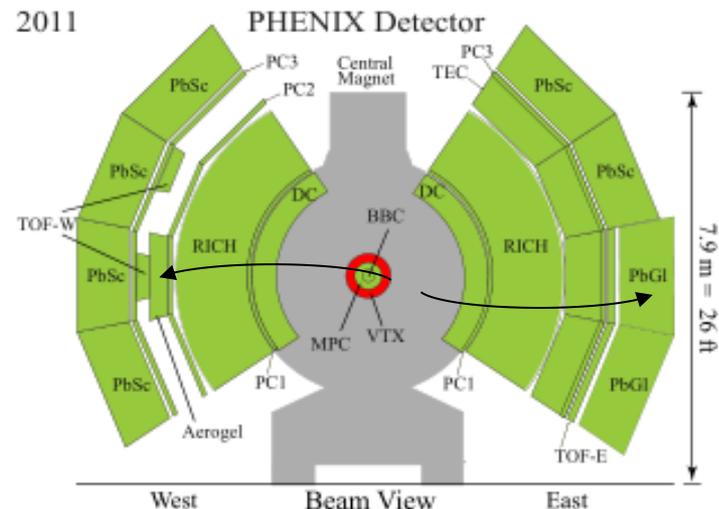
解析の流れ

- 5.4×10^9 衝突イベントを取得
- ビーム衝突点が $|z| < 10$ cm のイベントを選択 (VTXのアクセプタンスに入るイベント)
- 中心衝突度の選択は行わない最小バイアスデータを解析。



PHENIXのcentral arm で飛跡検出。荷電粒子の運動量解析、電子識別。(RICH, E/p)

飛跡をVTX上のヒット情報と接続



c->e / b->e 分離の解析方針

寿命と崩壊時の運動量移行の違いを利用

- VTX + Central arms を用いた単電子の”displaced track”を測定
1.5 < pT < 5.0 [GeV/c] , 2011 Au+Au 衝突データ

charm hadron

$$c\tau_{D^0} = 123 \mu\text{m}, c\tau_{D^\pm} = 312 \mu\text{m}$$

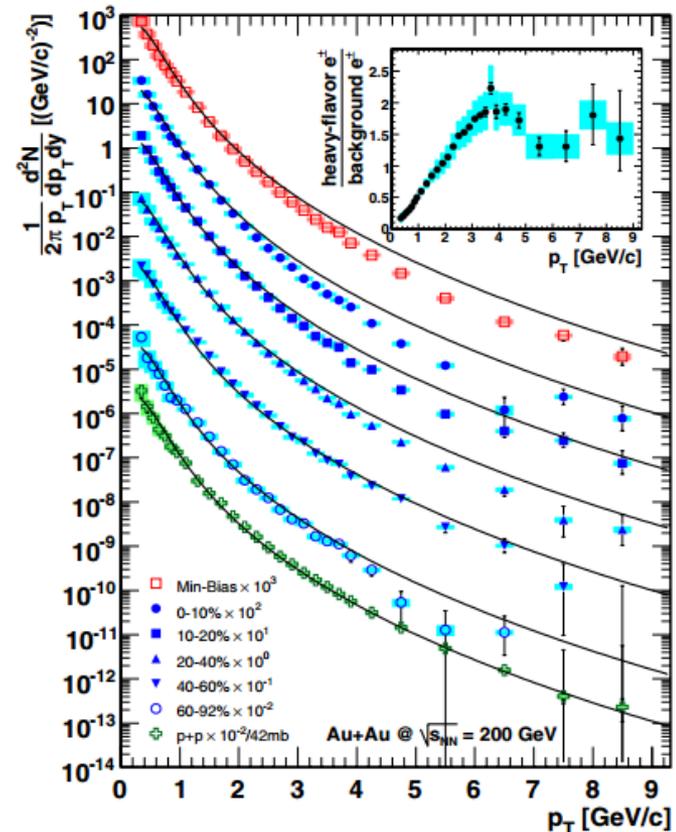
bottom hadron

$$c\tau_{B^0} = 455 \mu\text{m}, c\tau_{B^\pm} = 491 \mu\text{m}$$

- 2004年 金+金衝突データで、測定された単電子 (c->e + b->e) の横運動量分布も使用
1.0 < pT < 9.0 [GeV/c]
-- アクセプタンス、検出効率 の補正が行われている。
(不変収量 (invariant yield))
- 高いpTまでデータがある。

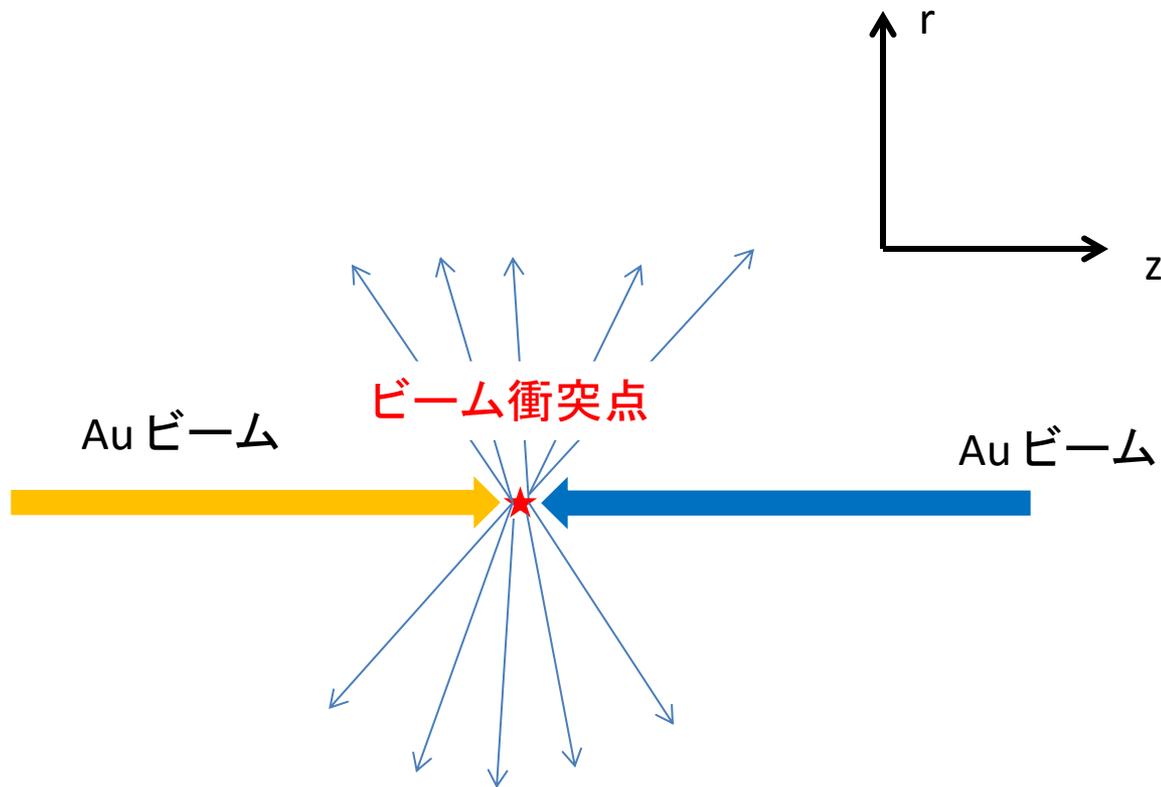
“unfolding”を用いて、両者を同時フィットを行い、チャームとボトムを統計的に分離する。

PRL 98, 172301 (2007)



VTXを用いた DCA測定

- VTXのヒット情報のみを用いて、飛跡を再構成
- 3次元空間上での**ビーム衝突点**の位置を計算

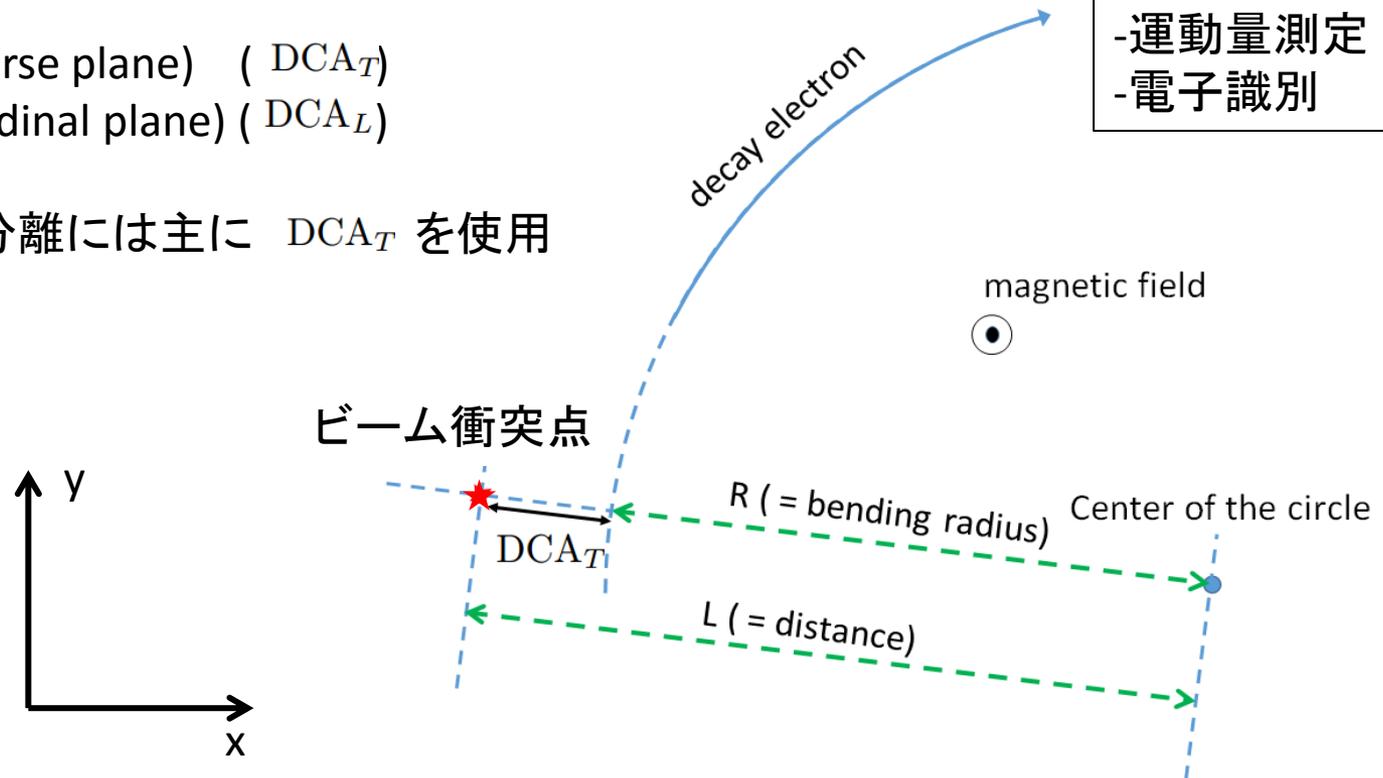


VTXを用いたDCA測定

- VTX + Central armを用いて飛跡を再構成
- 各荷電粒子の**ビーム衝突点**からの最近接距離 (Distance of Closest Approach, DCA)を計算
- x-y 平面 (transverse plane) (DCA_T)
- r-z 平面 (longitudinal plane) (DCA_L)
- チャーム・ボトム分離には主に DCA_T を使用

$$DCA_T \equiv L - R$$

Central arm
-運動量測定
-電子識別



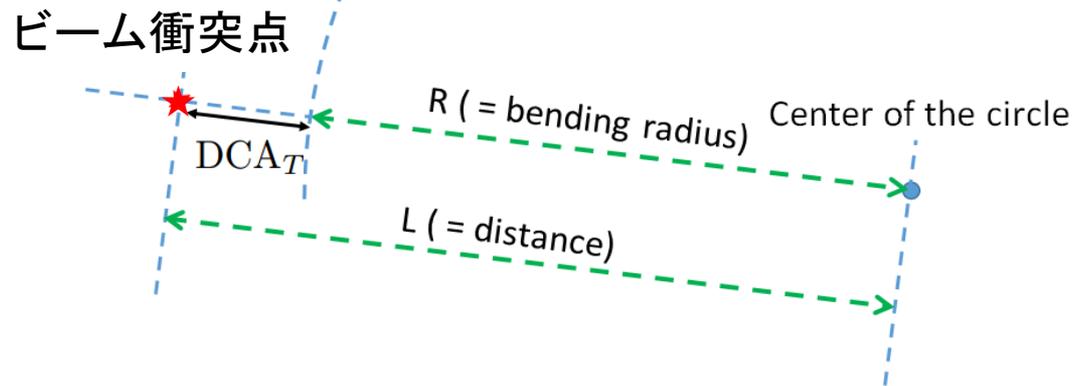
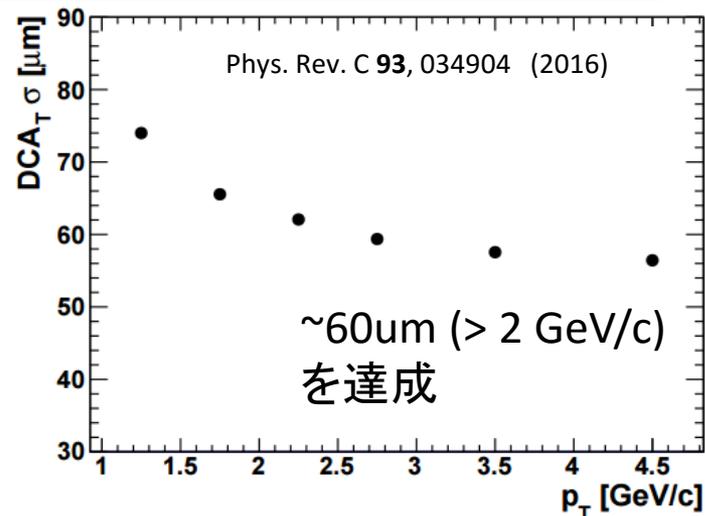
VTXを用いたDCA測定

- VTX + Central armを用いて飛跡を再構成
- 各荷電粒子の**ビーム衝突点**からの最近接距離(DCA)を計算
- x-y 平面 (transverse plane) (DCA_T)
r-z 平面 (longitudinal plane) (DCA_L)
- charm・bottom分離には主に DCA_T を使用

$$DCA_T \equiv L - R$$

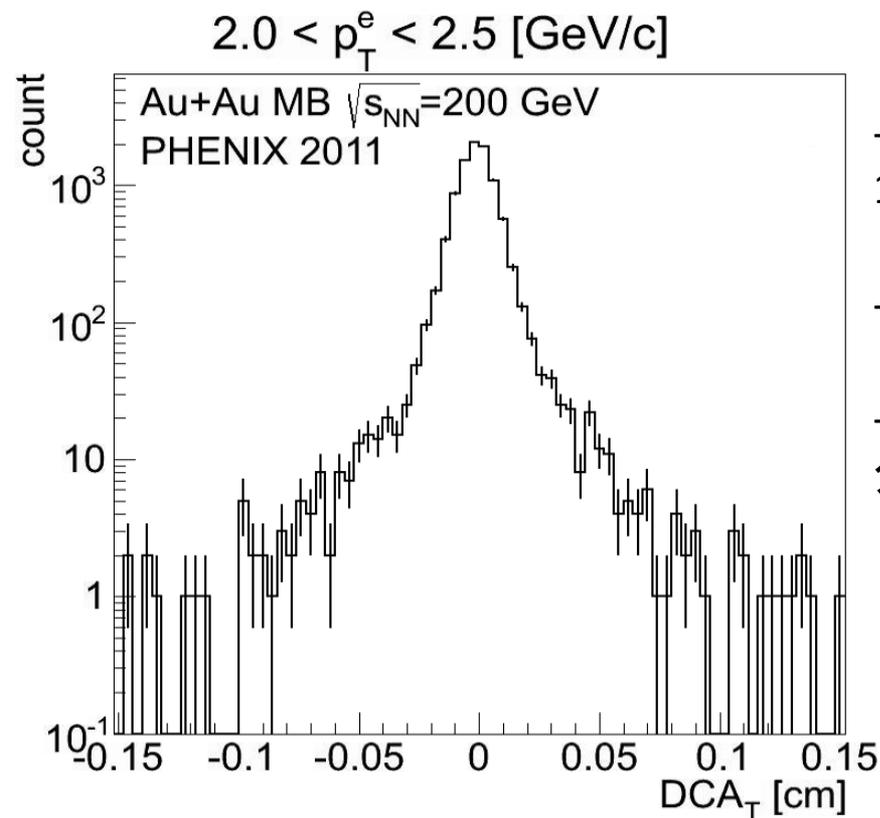
Central arm
-運動量測定
-電子識別

2011年 Au+Au 衝突データでの
 DCA_T 分解能



電子の DCA_T 分布

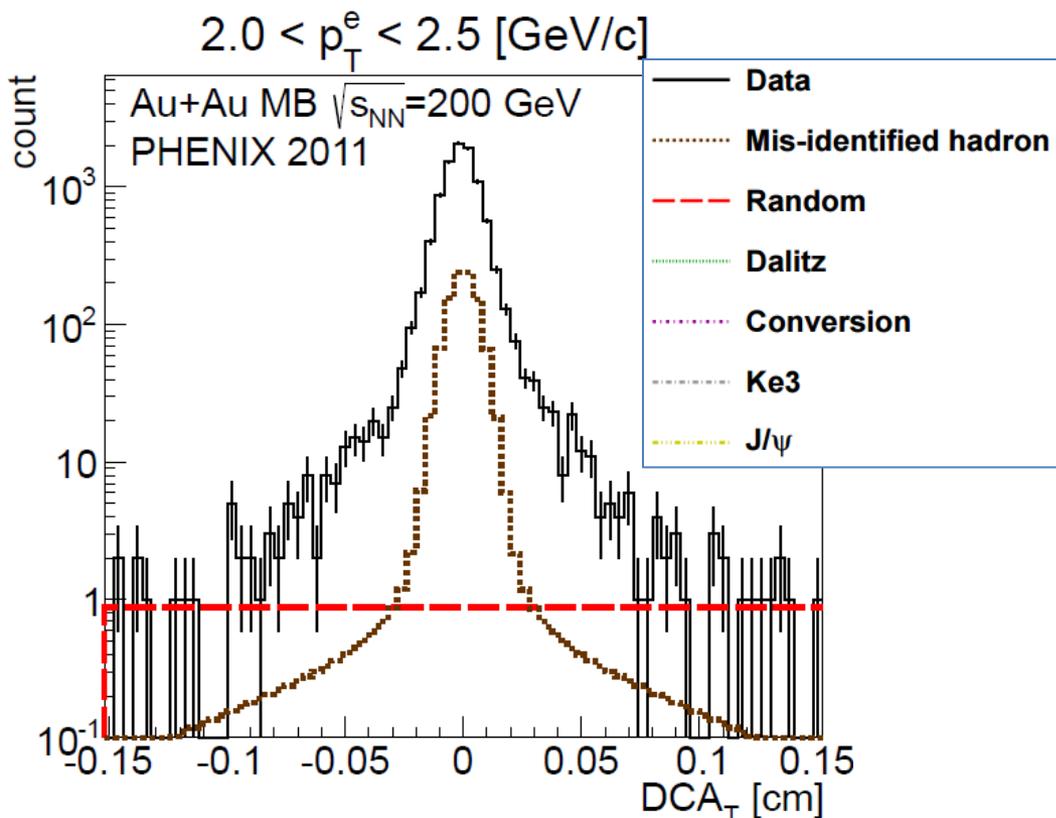
2011年Au+Au 衝突データ ($|\eta| < 0.35$)で
の電子の DCA_T 分布



- 電子の運動量に応じて5つのビンに分割:
1.5 – 2.0 , 2.0-2.5 , 2.5 – 3.0 , 3.0 – 4.0 , 4.0-5.0
[GeV/c]
- 検出効率による補正無し
- はじめに、この中からバックグラウンドの量と DCA
分布の形を求め、差し引く

電子の DCA_T 分布

2011年Au+Au 衝突データ ($|\eta| < 0.35$)で
の電子の DCA_T 分布



Phys. Rev. C **93**, 034904 (2016)

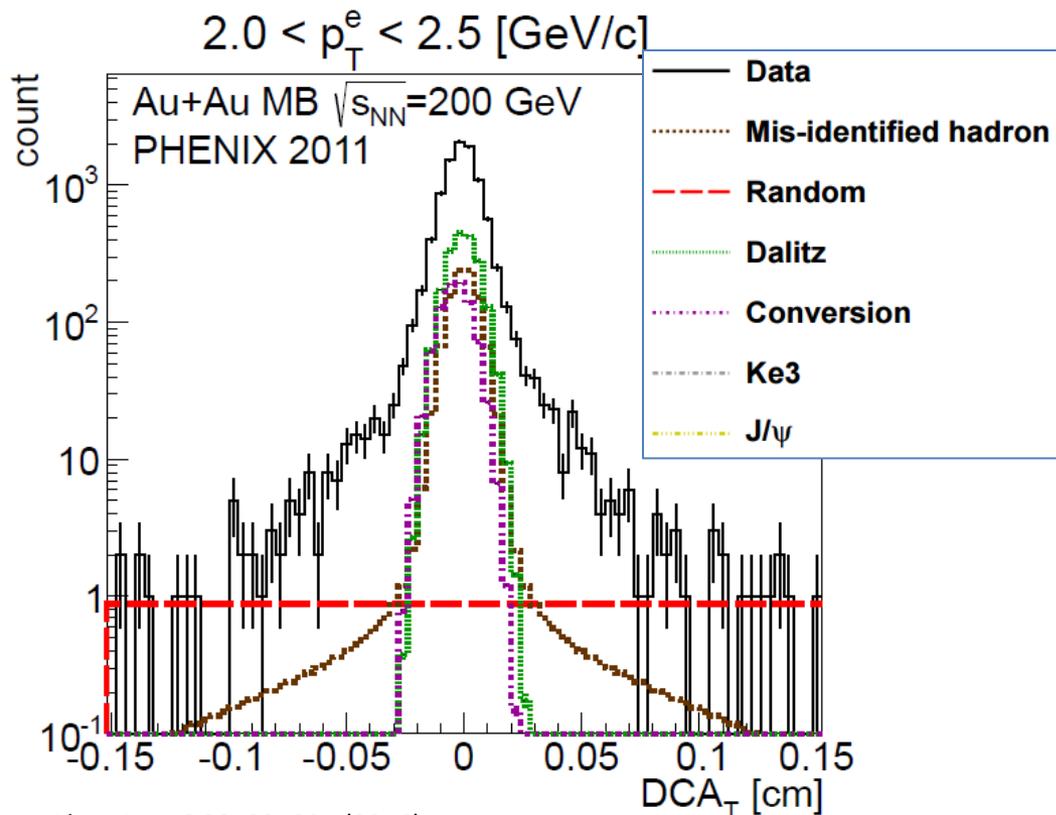
Mis-reconstructed 成分

- 生成粒子が多い場合に発生
Central armでハドロンを電子と誤認識
(Mis-identified hadron)
- 間違ったVTX上のヒットと飛跡をつなげ
てしまった場合
(Random)

data driven method で DCA 分布の
形と量を求め差し引く

電子の DCA_T 分布

2011年Au+Au 衝突データ ($|\eta| < 0.35$)で
の電子の DCA_T 分布



Phys. Rev. C **93**, 034904 (2016)

Mis-reconstructed 成分

- Mis-identified hadron
- Random

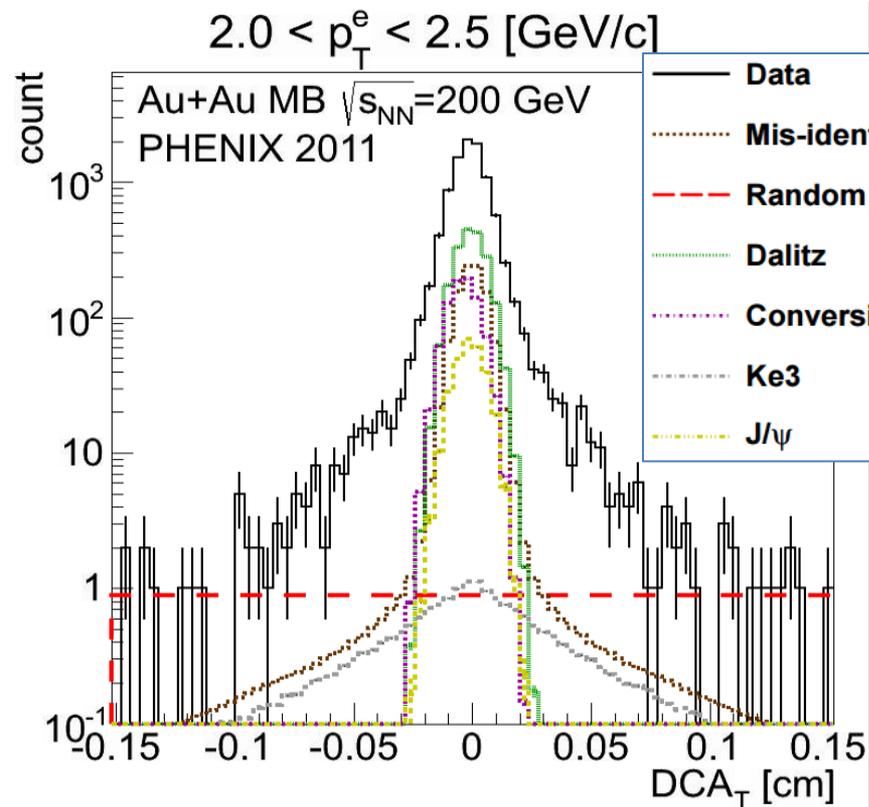
photonic 成分

- Dalitz decay ($\pi, \eta \rightarrow e^+e^-\gamma$)
(+ direct virtual $\gamma \rightarrow e^+, e^-$)
- Conversions $\gamma \rightarrow e^+e^-$

DCA_T 分布の形をシミュレーションで
求め、過去のPHENIXでの測定
データを元に比を計算。

電子の DCA_T 分布

2011年Au+Au 衝突データ ($|\eta| < 0.35$)で
の電子の DCA_T 分布



Phys. Rev. C **93**, 034904 (2016)

日本物理学会

Mis-reconstructed 成分

- Mis-identified hadron
- Random

photonic 成分

- Dalitz decay ($\pi, \eta \rightarrow e^+e^- \gamma$)
- Conversions $\gamma \rightarrow e^+e^-$

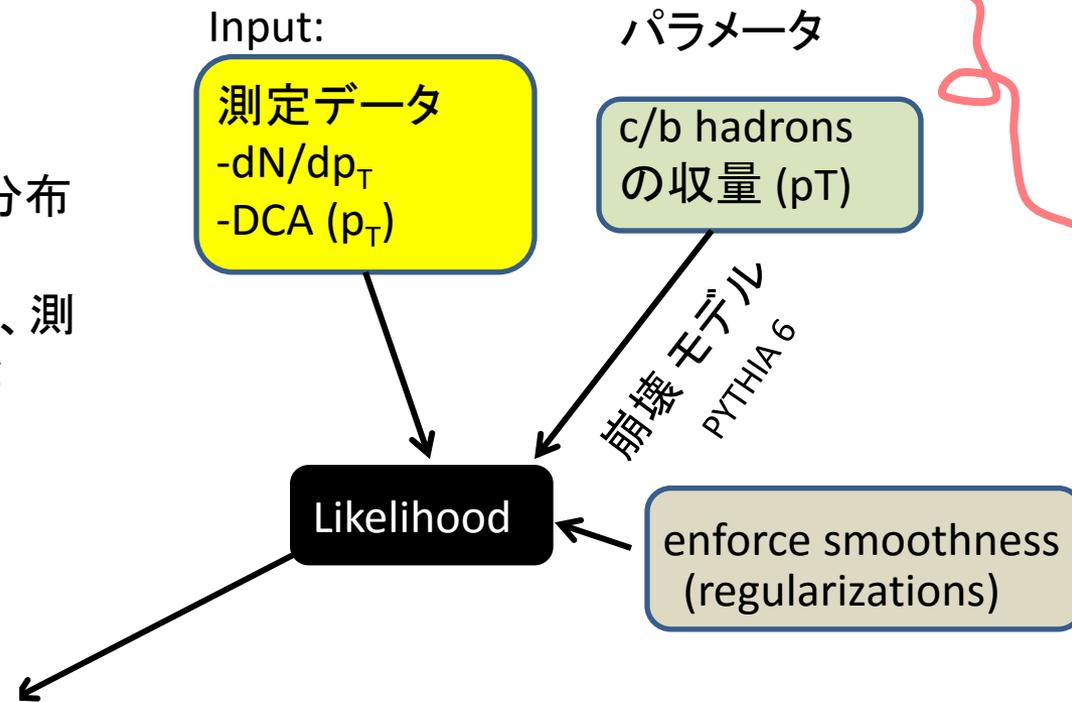
Non-photonic 成分

- J/ψ $\rightarrow e^+e^-$
- Ke3

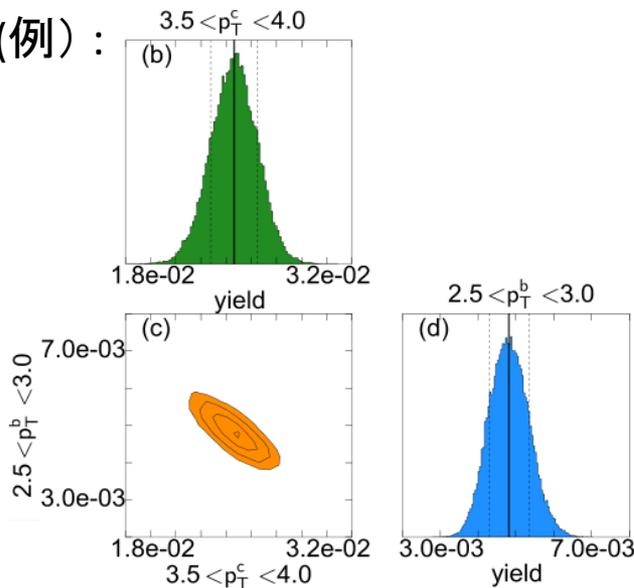
- 同様に DCA_T 分布の形をシミュレーションで求め、過去のPHENIXでの測定データを元に比を計算
- 残りの部分が charm と bottom ハドロン由来の電子

Unfolding

- 親の **charm** と **bottom** ハドロンの p_T 分布を求める。
- PYTHIA (ver. 6) を用いたモデル生成
 1. 親の **c/b** ハドロン各々の p_T 分布、
 2. 対応する子の電子の p_T 分布、DCA分布
- このモデルパラメータを多数回抽出し、測定データ (電子のDCA分布、 p_T 分布) と Likelihood関数を使って比較



output (例) :



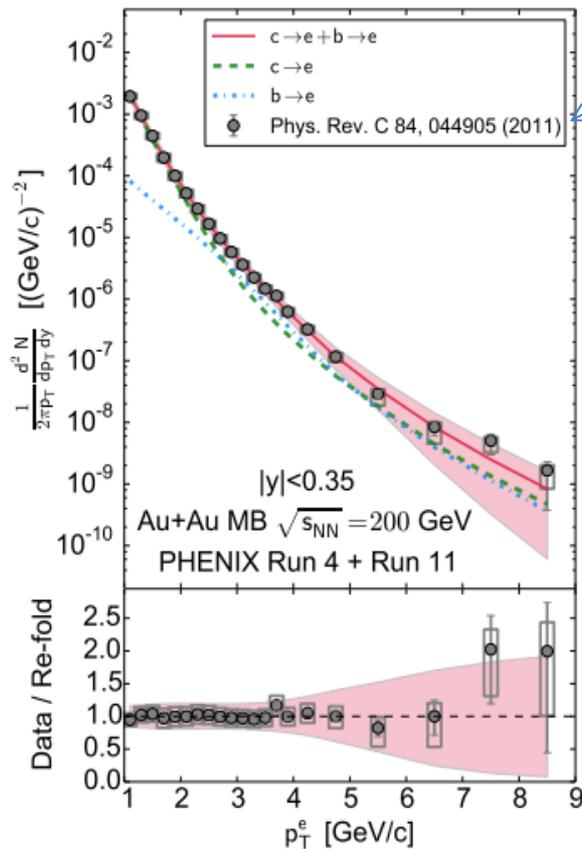
親の **charm** と **bottom** ハドロンの収量の確率分布と両者の相関

Unfolding 結果 consistency check

親のハドロン

p_T -> 子の電子の

p_T を逆算



2004年データ

生データ

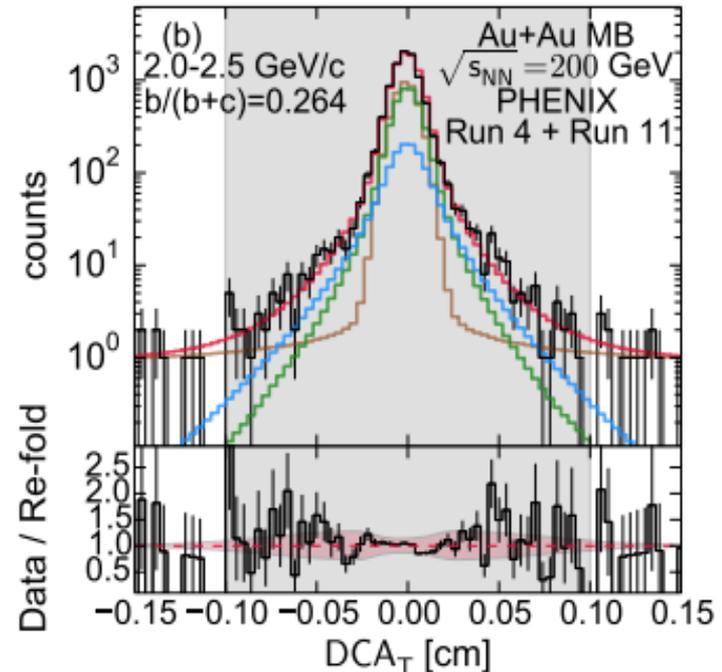
c->e

b->e

合計

DCA分布中の全
バックグラウンド

Phys. Rev. C **93**, 034904 (2016)



Phys. Rev. C **93**, 034904 (2016)

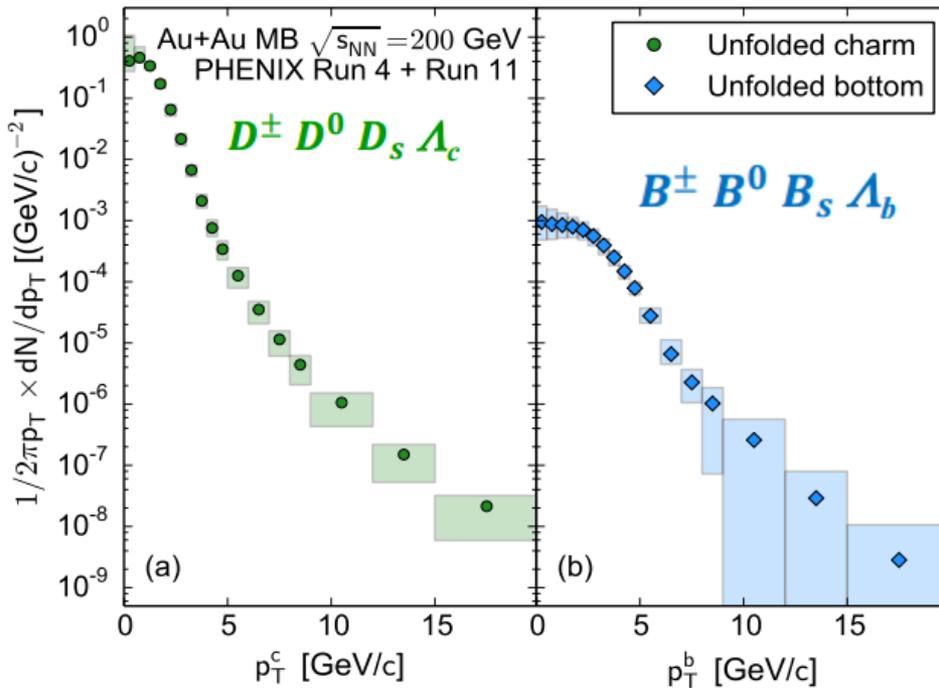
p_T 分布とDCA分布の同時フィットが
成功していることを確認。

親のcharm bottom ハドロン収量

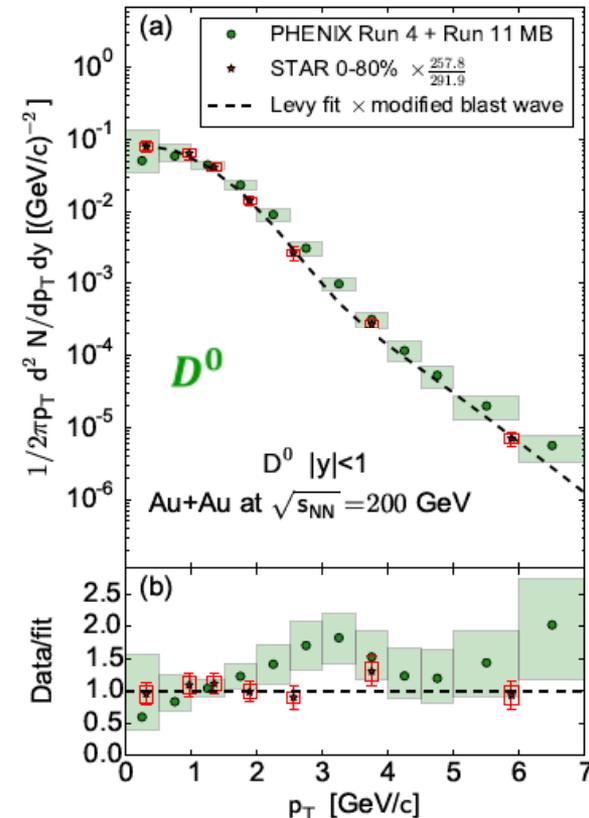
全ラピディティーで積分した親のcharm bottom
ハドロン分布

-STAR 実験の D^0 測定結果と比較するために
-PYTHIA + Charm ハドロン分布から
 D^0 収量を rapidity $|y| < 1$ で計算

(Phys. Rev. Lett. 113, 142301)



Phys. Rev. C **93**, 034904 (2016)



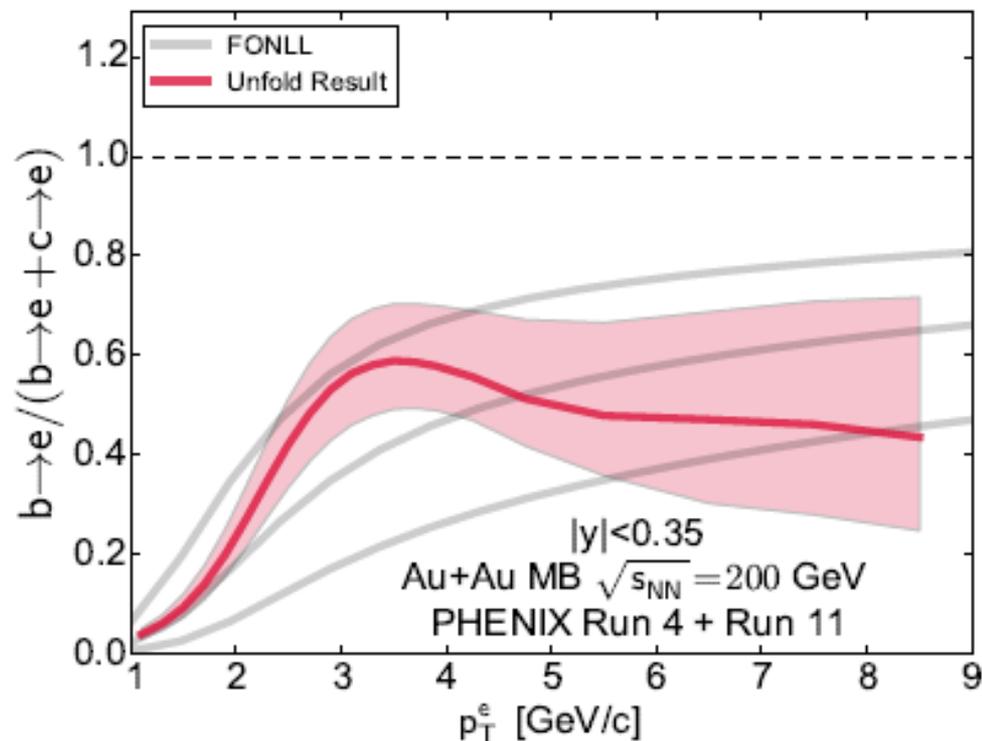
よく一致!

Phys. Rev. C **93**, 034904 (2016)

bottom 由来の電子比

Fraction of electrons from bottom

$$F = \frac{b \rightarrow e}{b \rightarrow e + c \rightarrow e}$$



Phys. Rev. C **93**, 034904 (2016)

JAEA/ASRC seminar

5 GeV/c 以上の p_T 領域では DCA 分布データからの制限が無いので (p_T 分布情報のみ) 誤差範囲 (1 sigma) が増大

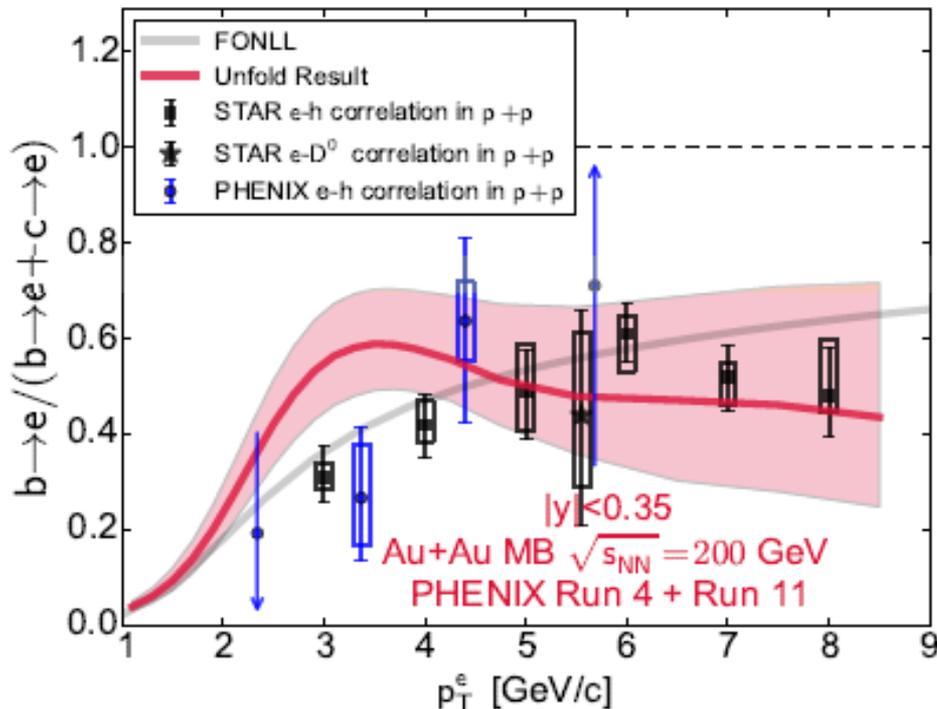
FONLL: pQCD 計算に基づく bottom 由来の電子比
計算で使う運動量スケールとクォークの質量の不定性からエラーをもつ。

3 GeV/c 付近では形の違い (原子核効果) が見える

bottom 由来の電子比

Fraction of electrons from bottom

$$F = \frac{b \rightarrow e}{b \rightarrow e + c \rightarrow e}$$



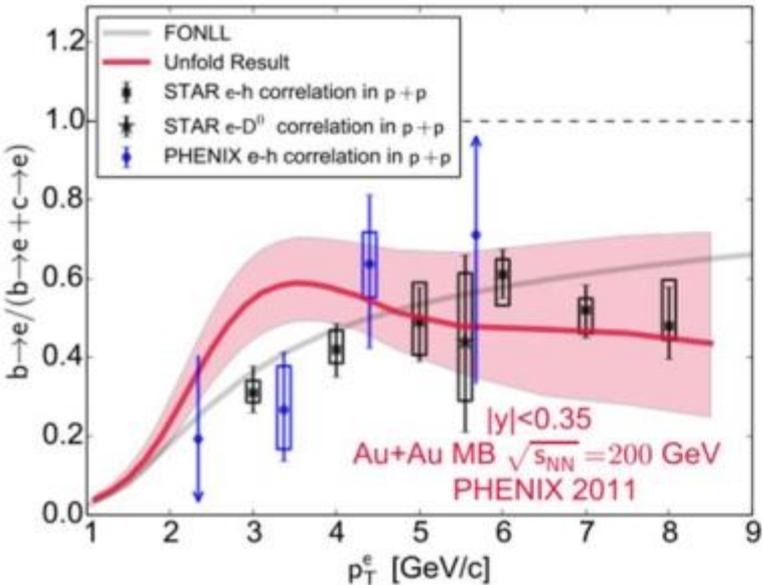
さらに陽子-陽子衝突
でのe-h correlation method
により求められたbottom 由来の
電子比をプロット。

形の違い(原子核効果)が見える

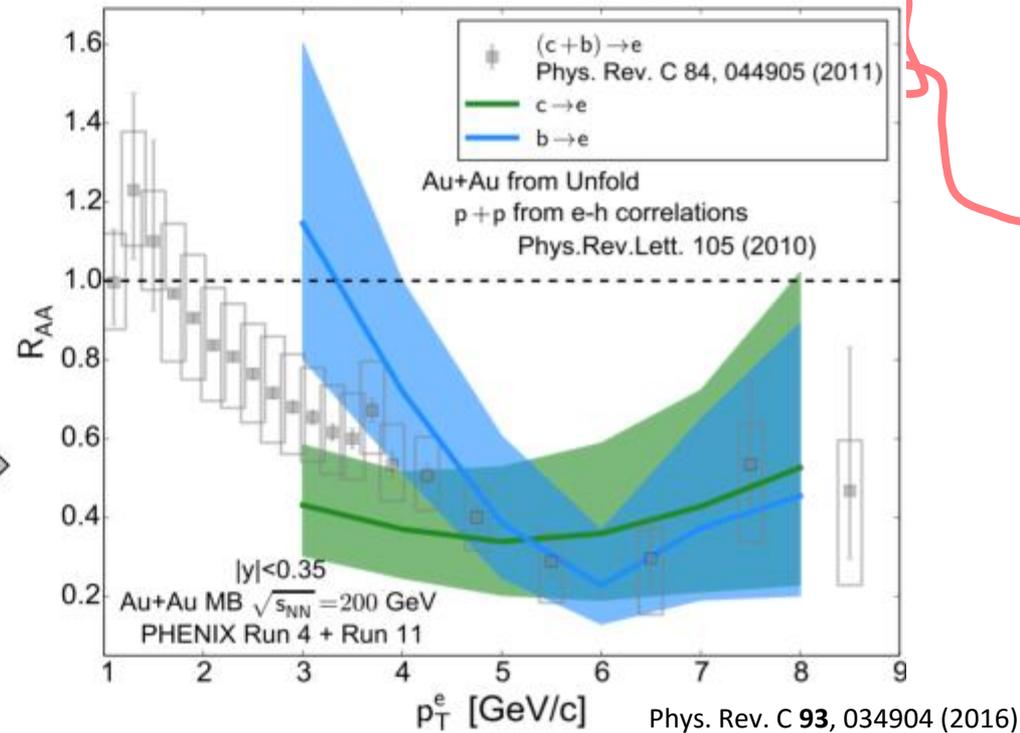
Charm 由来の電子 / Bottom 由来の電子の R_{AA}

Fraction of electrons from bottom

$$F = \frac{b \rightarrow e}{b \rightarrow e + c \rightarrow e} \quad \text{Phys. Rev. C 93, 034904 (2016)}$$



Single electron R_{AA} for bottom and charm



VTXを使って求めた今回の金+金衝突での b->e 比の結果

$$R_{AA}^{b \rightarrow e} = \frac{F_{AuAu}}{F_{pp}} R_{AA}^{HF}$$

以前の PHENIX 測定結果 (c->e + b->e) in Au+Au
Phys. Rev. C 84, 044905 (2011).

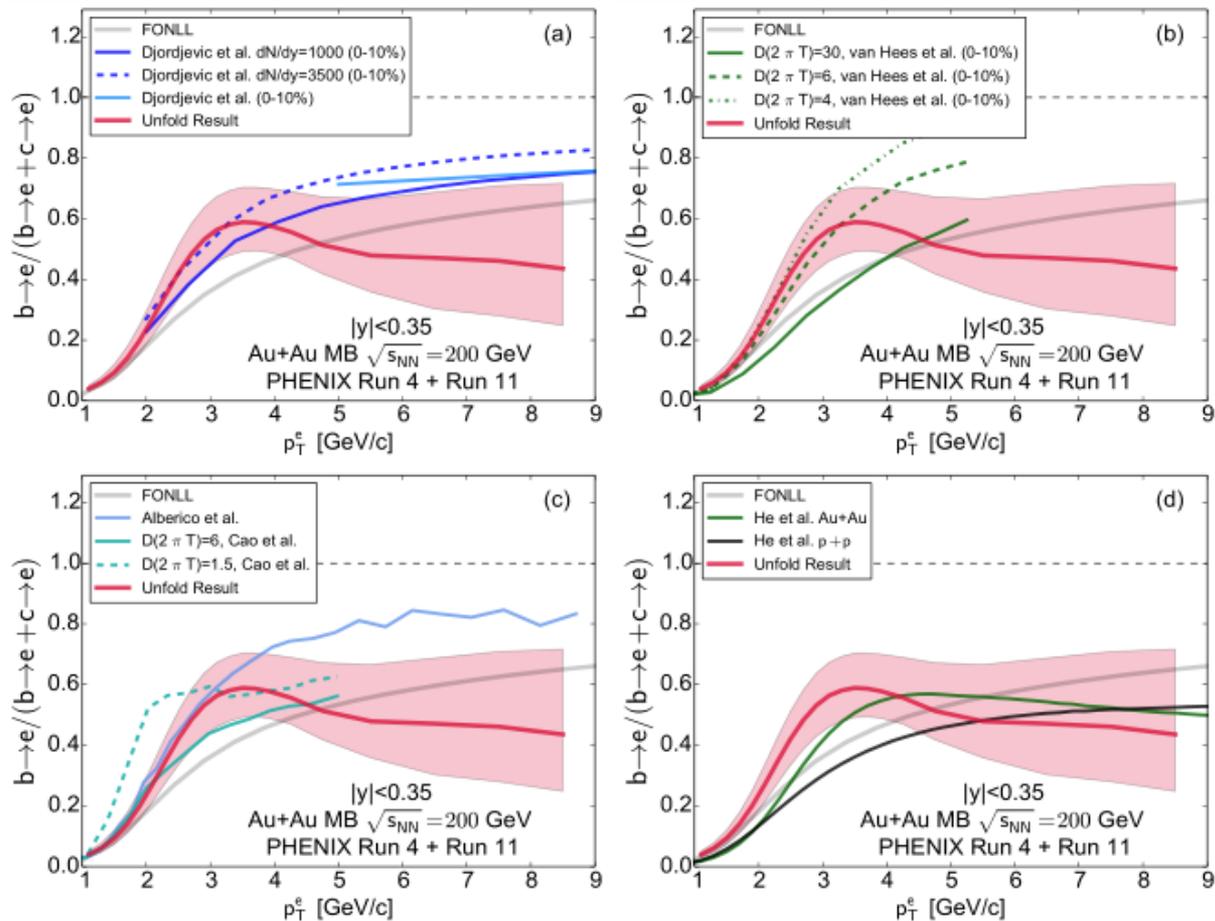
STAR 陽子+陽子 での b->e 比
Phys. Rev. Lett. 105, 202301 (2010).

$R_{AA}^{c \rightarrow e} < R_{AA}^{b \rightarrow e}$ $3 < p_T < 4 \text{ GeV/c}$
 $R_{AA}^{c \rightarrow e} \sim R_{AA}^{b \rightarrow e}$ 4 GeV/c 以上

RHIC で初めて bottom 由来の電子が抑制されていることを確認！

理論との比較

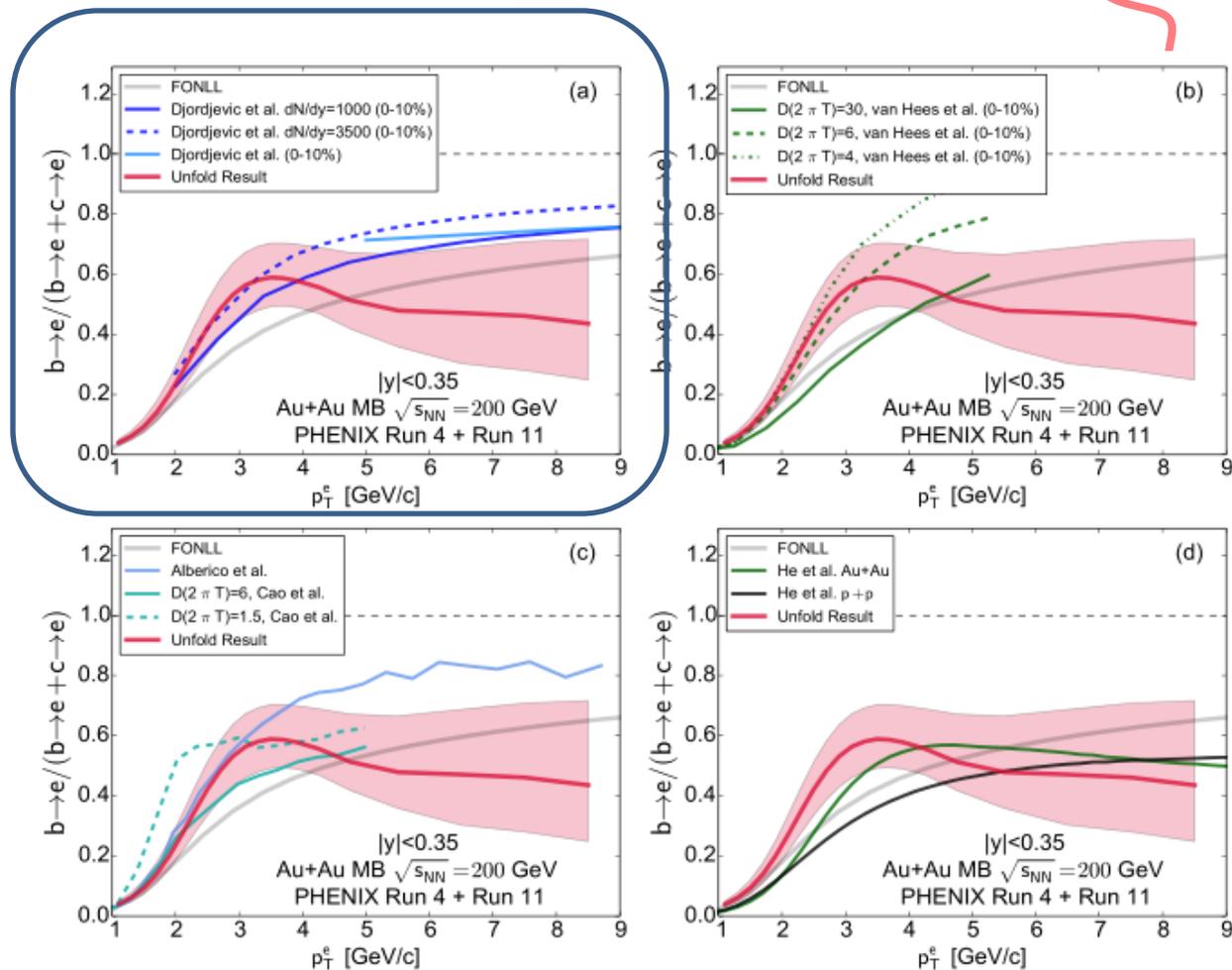
衝突損失と輻射損失を
計算したモデルとの比較



Phys. Rev. C **93**, 034904 (2016)

理論との比較

DGLVモデル
 (輻射損失のみの計算)
 4 GeV/c以下では
 初期グルーオン密度
 $dNg/dy = 1000, 3500$
 両方と合うが、その高い
 p_T では少しずれ始める



+ 衝突損失の計算を加えたもの

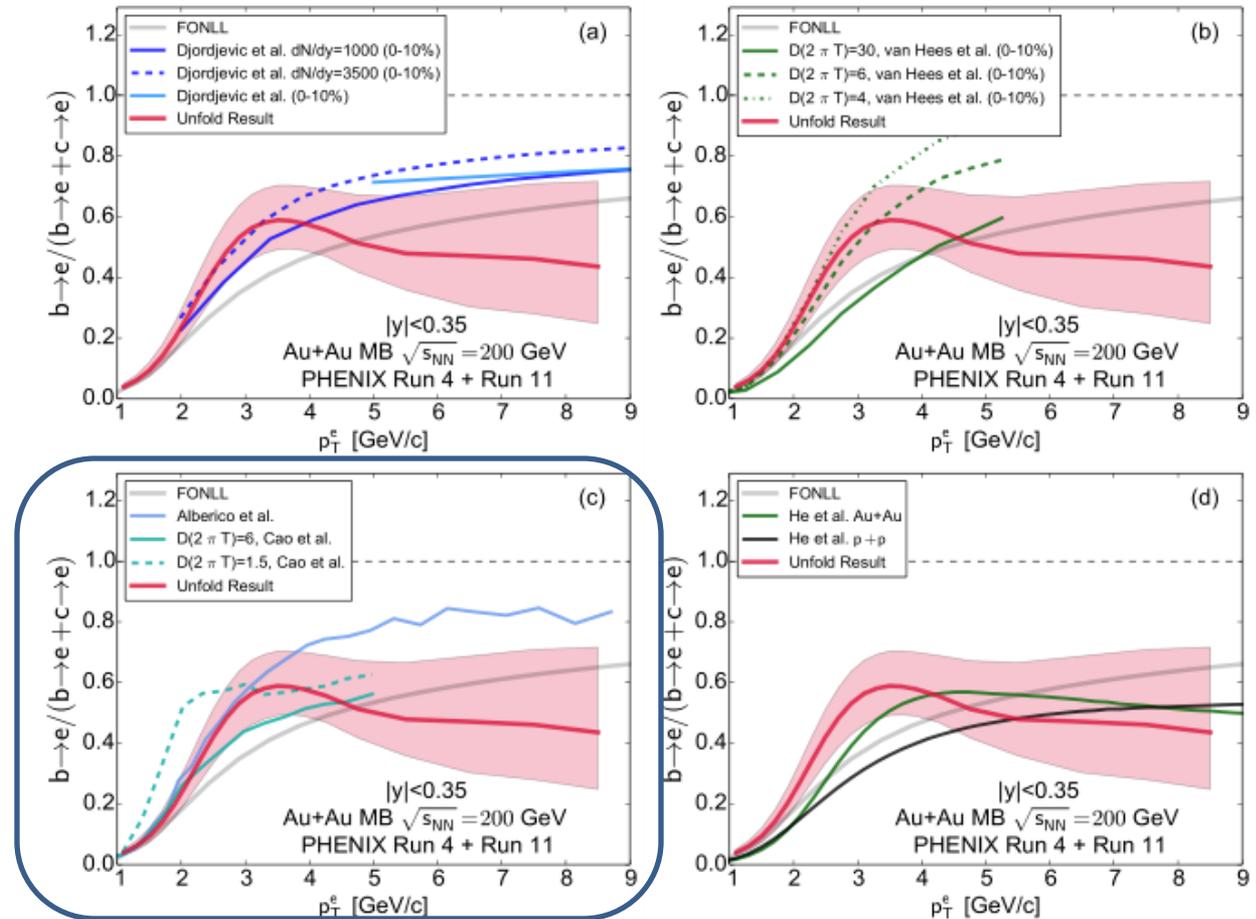
注) 理論では中心衝突
 (0-10%) イベントのみで
 計算。

理論との比較

衝突損失のみのモデル

重いクォークがQGP中で
ブラウン運動するモデル
QGPとの結合の強さを示
す拡散係数 D がfree
parameter.

$D(2\pi T) = 6$ 付近は実験
データをよく再現



理論との比較

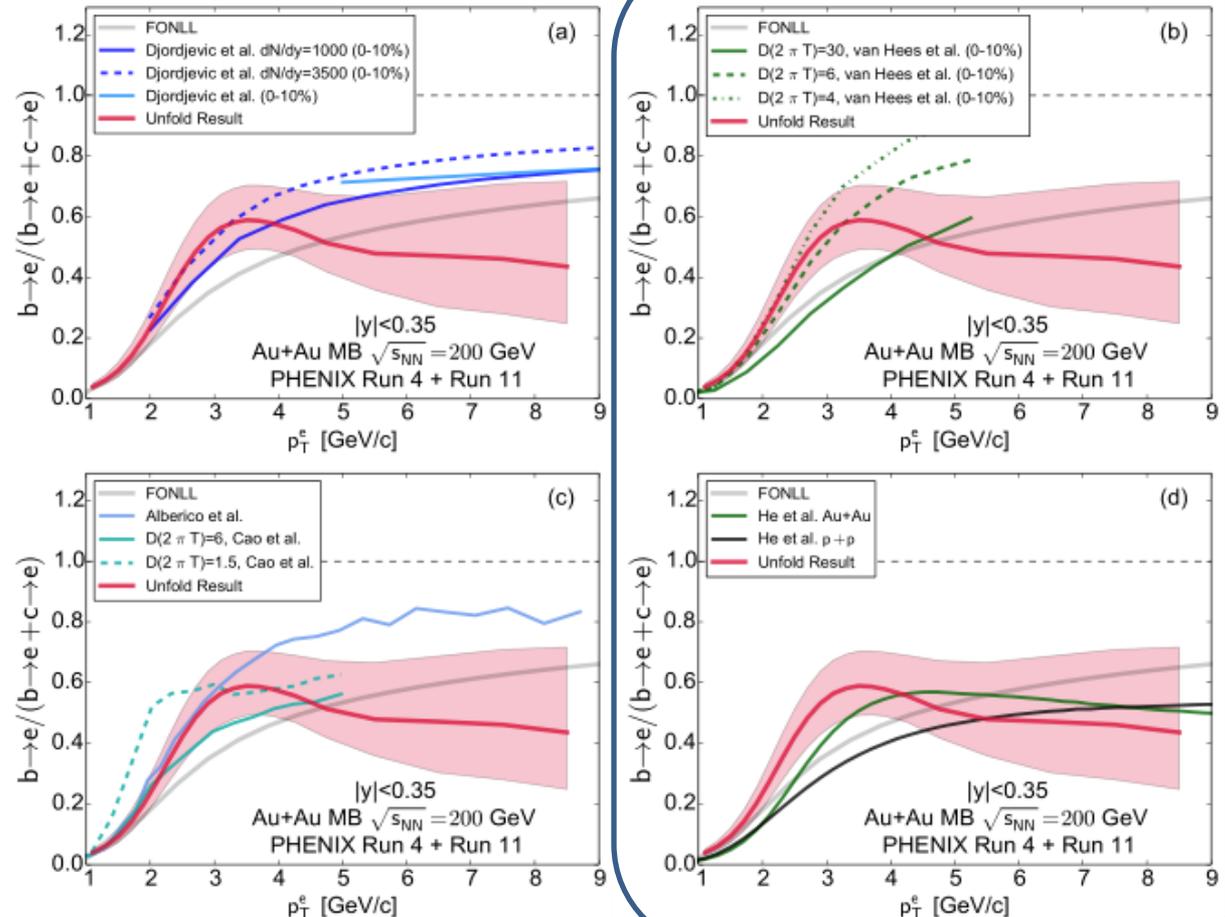
衝突損失のみのモデル

QGP中でD,Bメソンの共鳴状態ができることを考慮に入れ、衝突損失を評価したもの

(T-Matrix approach)

(b)のモデルでは $D=4\sim 6$ で低い p_T では一致。

(d)のモデルのみ、 b fractionの振る舞いが実験データの中心値

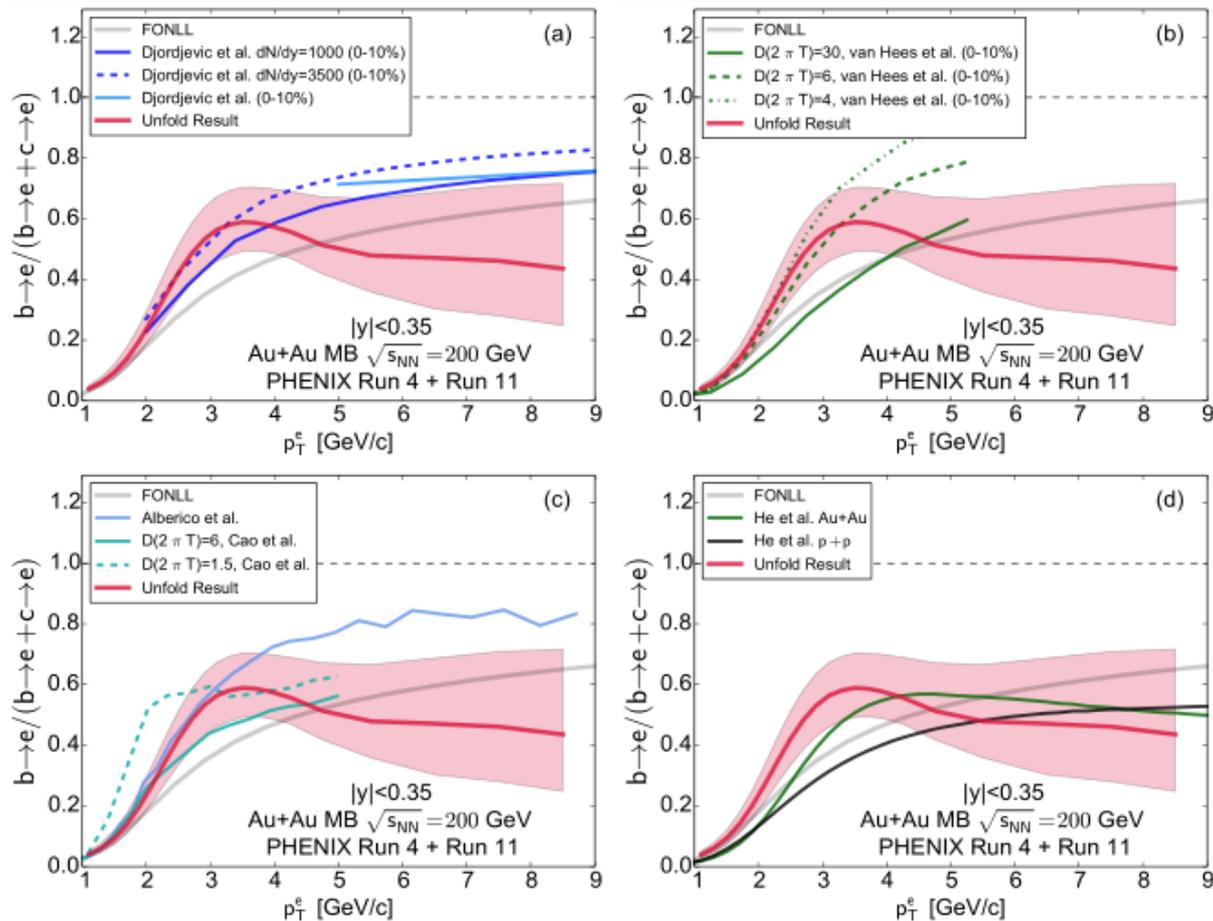


Phys. Rev. C **93**, 034904 (2016)

理論との比較

いくつかのモデルパラメーターに対して制限をかけた。

- 各モデルとも高い p_T (5GeV/c)で異なる大きくことなる振る舞いを見せているので、今後高い p_T での誤差を小さくしていくことが望まれる。



Phys. Rev. C **93**, 034904 (2016)

今後の展望

- 2014年に高統計の(2011年の約10倍)の金+金衝突データを取得した。
 - > 高い p_T での誤差の縮小
 - > 拡散係数(D)に敏感である、方位角異方性の測定
 - > 中心度を分けた測定
- 2015年には陽子+陽子衝突データを取得した。
 - > 同じ手法で金+金衝突データと比較するための重要なベース・ライン。

まとめ

- 重いクォークはQGPのよいプローブ
- PHENIX実験にVTXを設置することで、RHICの $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeVの金+金衝突において初めてcharm由来の電子とbottom由来の電子の分離に成功
- $3 < p_T < 4$ GeV/c の電子の p_T 領域では $R_{AA}^{c \rightarrow e} < R_{AA}^{b \rightarrow e}$
- 4 GeV/c 以上では誤差の範囲内において $R_{AA}^{c \rightarrow e} \sim R_{AA}^{b \rightarrow e}$
- bottom由来の電子が抑制されていることをRHICで初めて観測。
- bottom quarkがQGP中でエネルギー損失を被っていることを強く示唆。
- モデルとの比較を行い、いくつかのモデルパラメータに対して制限をかけた。
- 2014/2015年データ 鋭意解析中

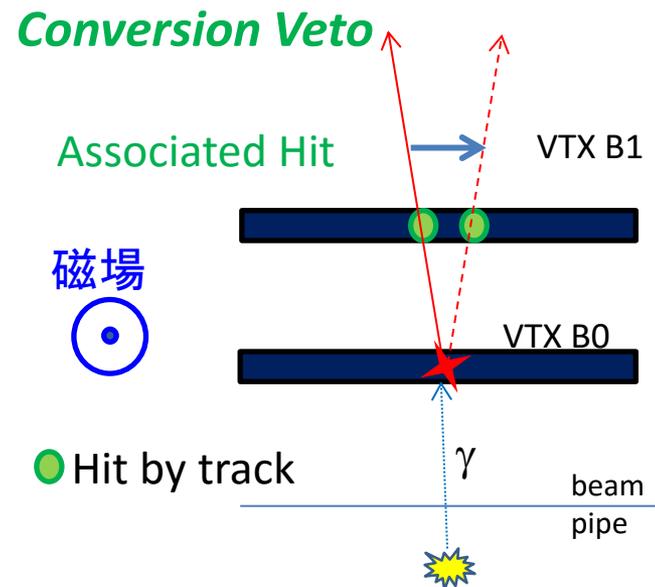


backups

VTXを用いた電子のDCA測定

- 最大のバックグラウンド (photonic electron)
 - (π^0, η) 由来 γ 線と直接光子が
ビームパイプ(0.24%X0) とVTX自身(12%X0) に当たって出てくる電子対 (conversion electron)
 - (π^0, η) のDalitz 崩壊 ($e^+e^-\gamma$) + 直接仮想光子由来の電子対

- 必ず電子対でやってくることを利用。
- VTX上で電子の飛跡を検出したら、各層とも、近くにもう一個ヒットがあるかを検索。
photonic electronsの候補
(Conversion Veto)
- これにより、 conversion electronの7割をカット。
Dalitz 崩壊 + 直接仮想光子由来の電子対を3~4割をカット。



electron DCA_T distribution

Suppressed by isolation cuts
using VTX a nearby hit!

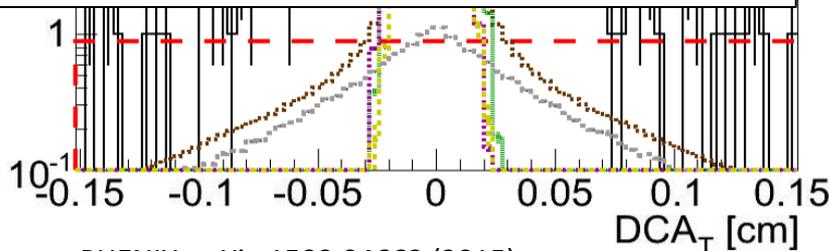
Associated Hit → VTX 2nd layer

B-field
⊙

VTX 1st layer

● Hit by track

γ



Prompt components

- Dalitz decay ($\pi, \eta \rightarrow e^+e^-\gamma$)
- $J/\psi \rightarrow e^+e^-$

Non-prompt components

- Conversions $\gamma \rightarrow e^+e^-$
- Ke3

Mis-reconstructed components

- Hadrons identified as electrons
- Wrong VTX hit association