

A close-up photograph of a pencil and a ruler on a piece of graph paper. The pencil is positioned diagonally across the frame, pointing towards the bottom right. The ruler is also diagonal, parallel to the pencil. The graph paper has a grid pattern and some faint, illegible markings. The overall lighting is warm and slightly blurred, creating a soft, academic atmosphere.

高エネルギー重イオン衝突実験における稀少プローブを用いた超高温物質の性質解明

渡辺陽介（東京大学、CNS）

Outline

- 動機
- 電子対測定を通じた「カイラル対称性」に関する研究
 - PRC93(2016)014904
- 重クォークを用いた「閉じ込め」に関する研究
 - Ongoing
- まとめ

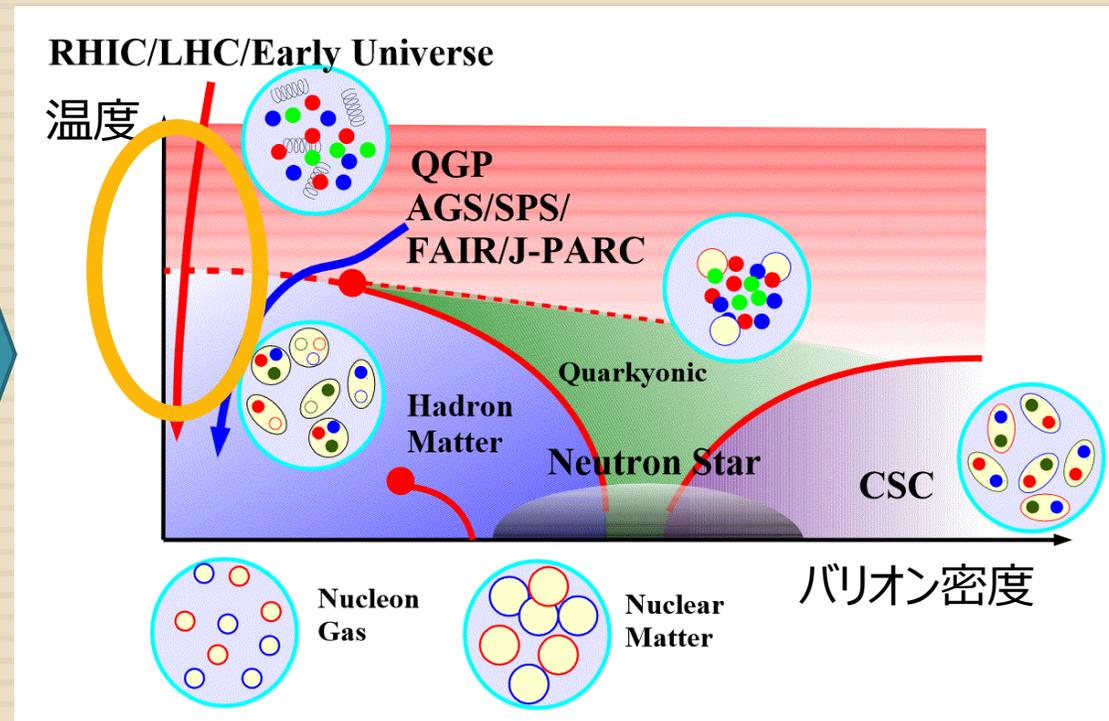
QCD物性

3

クォーク・グルーオン多体系のもつ性質の解明

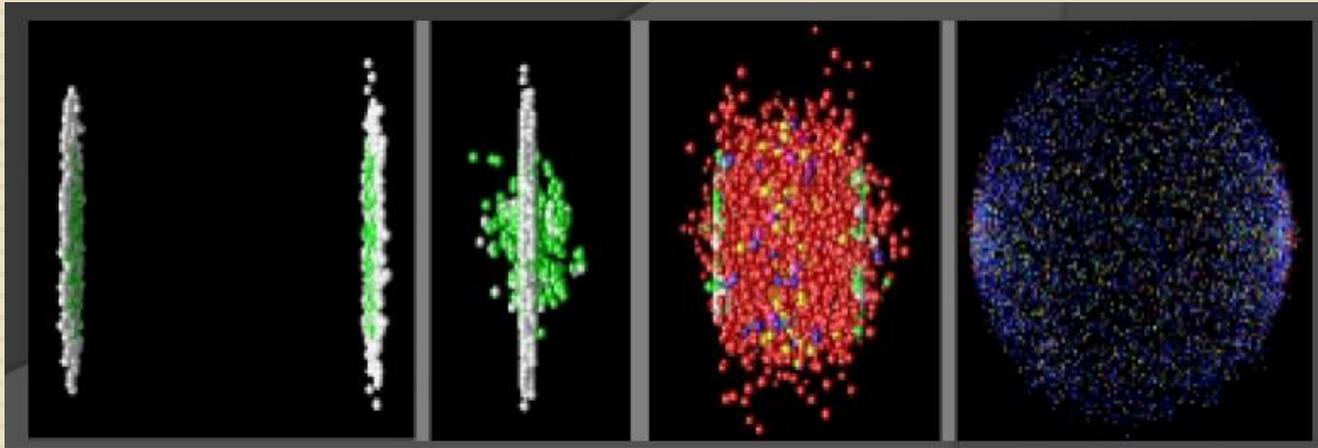
量子色力学のラグランジアン

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a + \sum_f \bar{q}_f^a (i\gamma_\mu D_\mu - m_f) q_f^a$$



- クォークとグルーオンの動力学は量子色力学 (QCD)で記述される
- その方程式から生まれる多様な物性はまだ多くのことがわかっていない

高エネルギー重イオン衝突



- 高エネルギー重イオン衝突によって生成
 - 2000年のRHIC稼動以降、QGPの生成が確定的
 - さまざまなプローブ（電磁プローブ、集団運動、ジェット、重クォーク）を用いて性質解明が進んでいる
- 研究拠点
 - RHIC: 金金衝突など、 $\sqrt{s_{NN}} = 10 - 200 \text{ GeV}$
 - PHENIX, STAR
 - LHC: 鉛鉛衝突 $\sqrt{s_{NN}} = 5 \text{ TeV}$
 - ALICE, ATLAS, CMS

QCD物性を理解する鍵

5

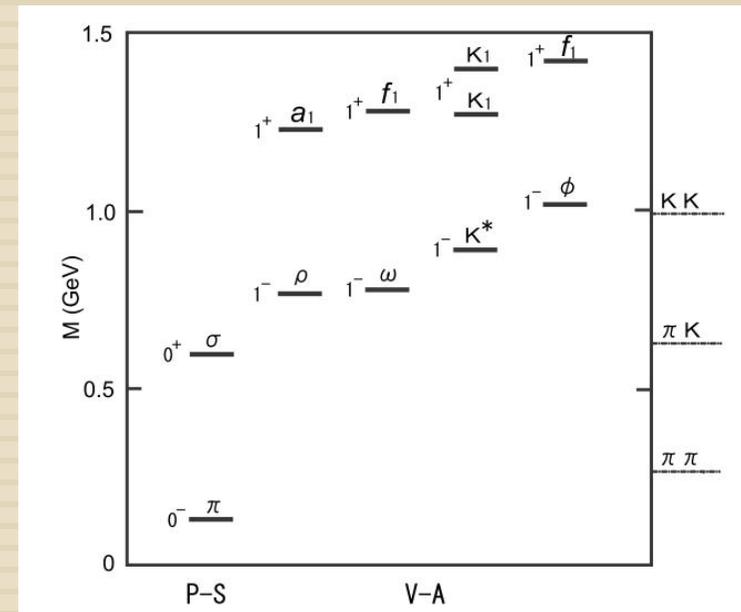
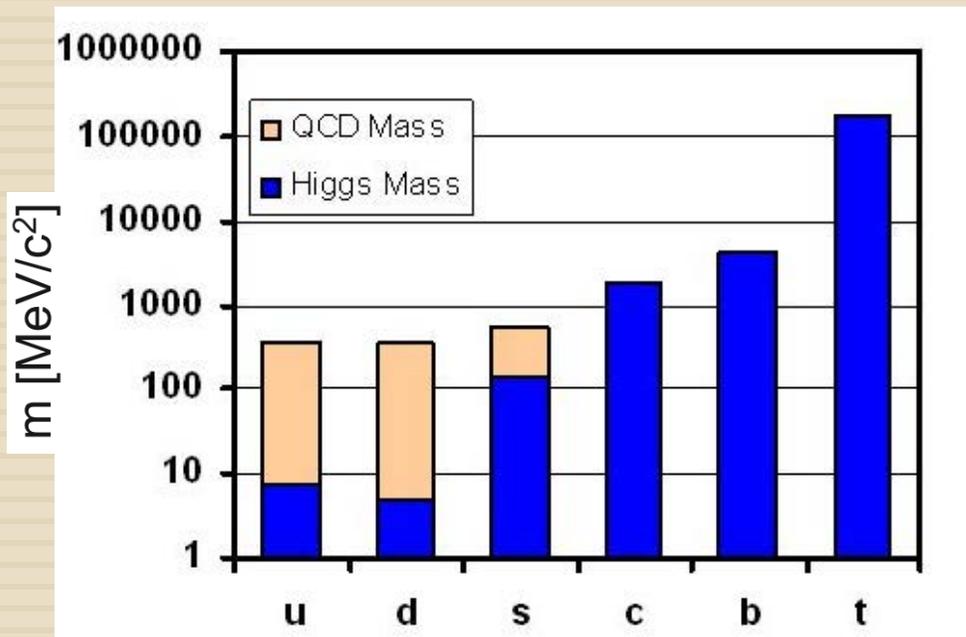
- カイラル対称性
 - ▣ 右巻きと左巻きのクォークの対称性
 - ▣ 自発的破れ
 - ▣ 実験的にその効果を見ることはできないか？
- 閉じ込め（漸近的自由）
 - ▣ クォークは単体では観測されない
 - ▣ どのようなとき安定に存在できるのか？

高温領域の性質を「カイラル対称性」「閉じ込め（有効自由度）」の観点から理解する

カイラル対称性

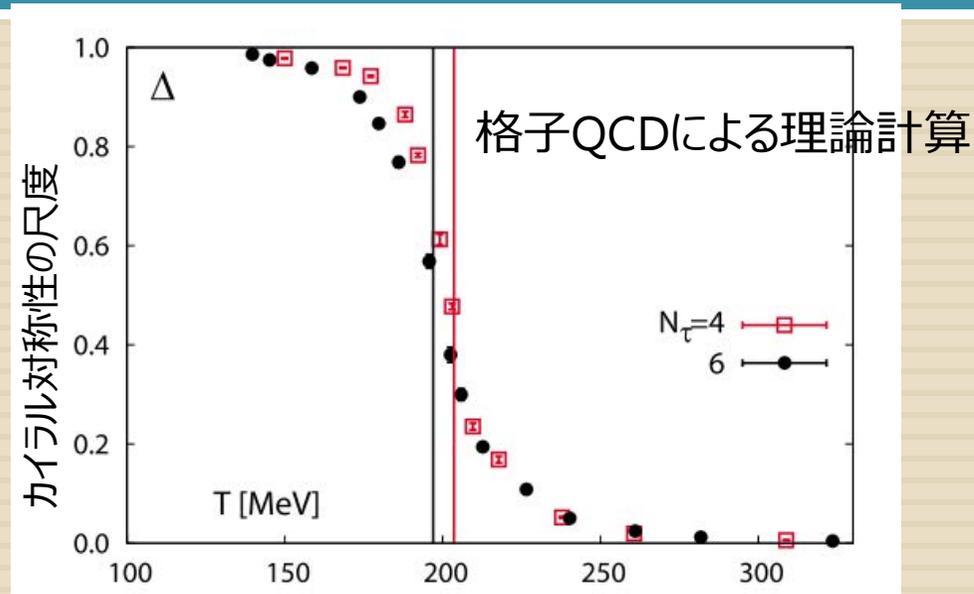
6

- 右巻きと左巻きのクォークの対称性
- 通常環境では自発的に破れている
 - ▣ ハドロンの質量 $\sim 1 \text{ GeV}/c^2$ カレントクォーク質量 $\sim 5 \text{ MeV}/c^2$
 - ▣ カイラルパートナーの質量分離



高温環境でのカイラル対称性

7

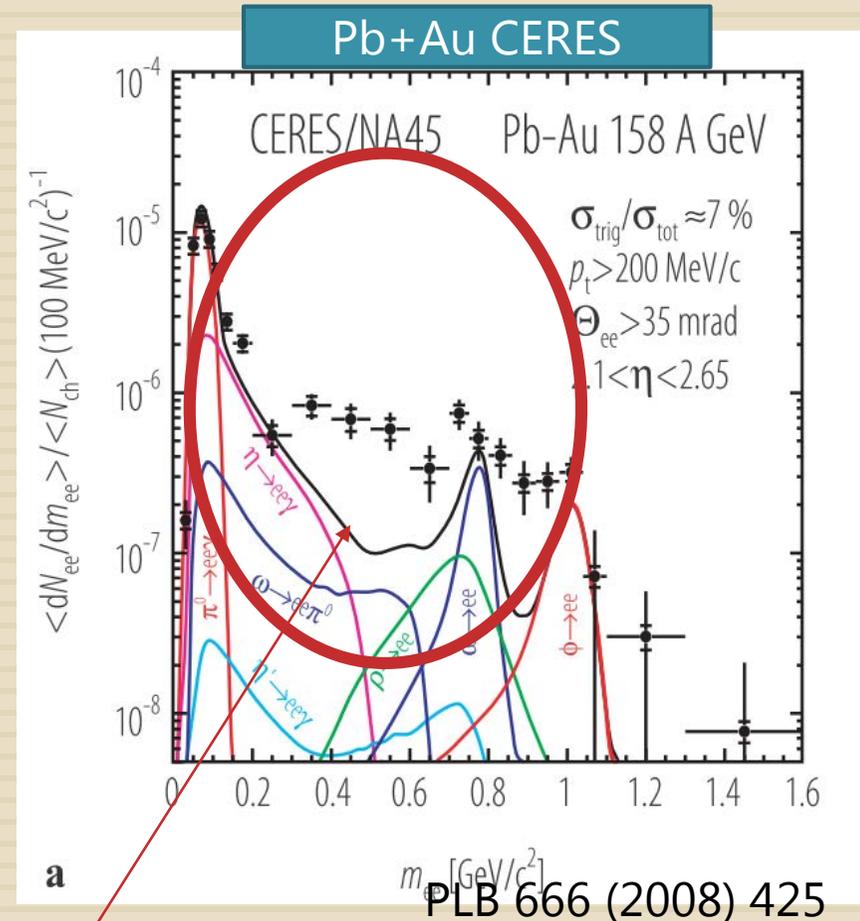
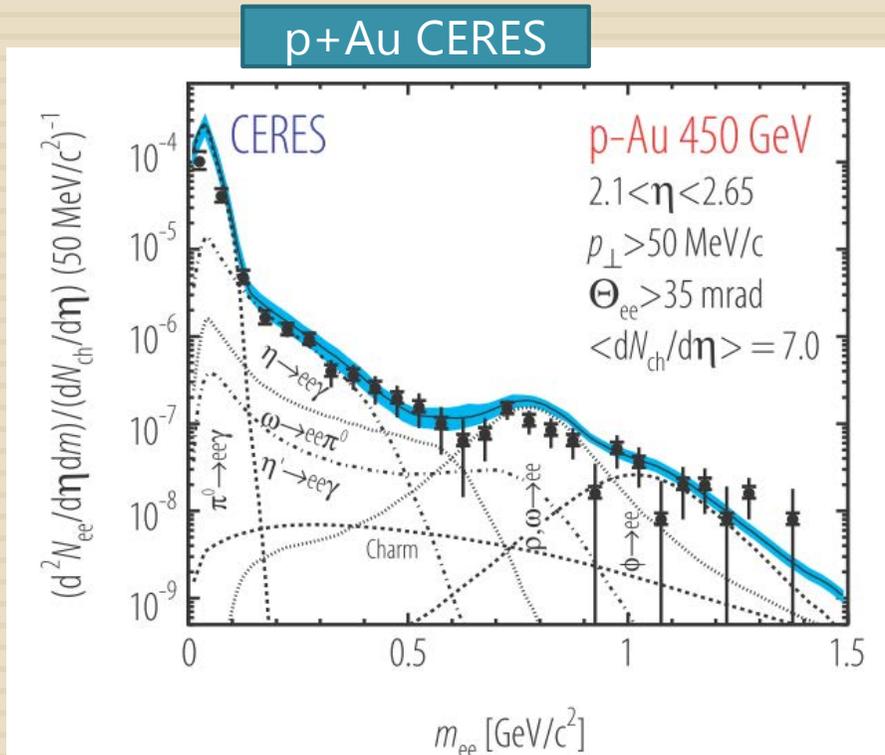


- 高温ではカイラル対称性は回復する
- ハドロンの質量はカイラル対称性を調べるプローブとなる
 - ρ 中間子(質量770 MeV/c²)は中でもいい性質をもつ
 - 寿命が短い: ~ 1.3 fm ($<$ 系の寿命 ~ 10 fm)
 - ベクトル中間子なので電子対に崩壊する

金金衝突 ($\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV) での ρ 中間子領域の電子対測定

CERES experiment @ CERN-SPS

8

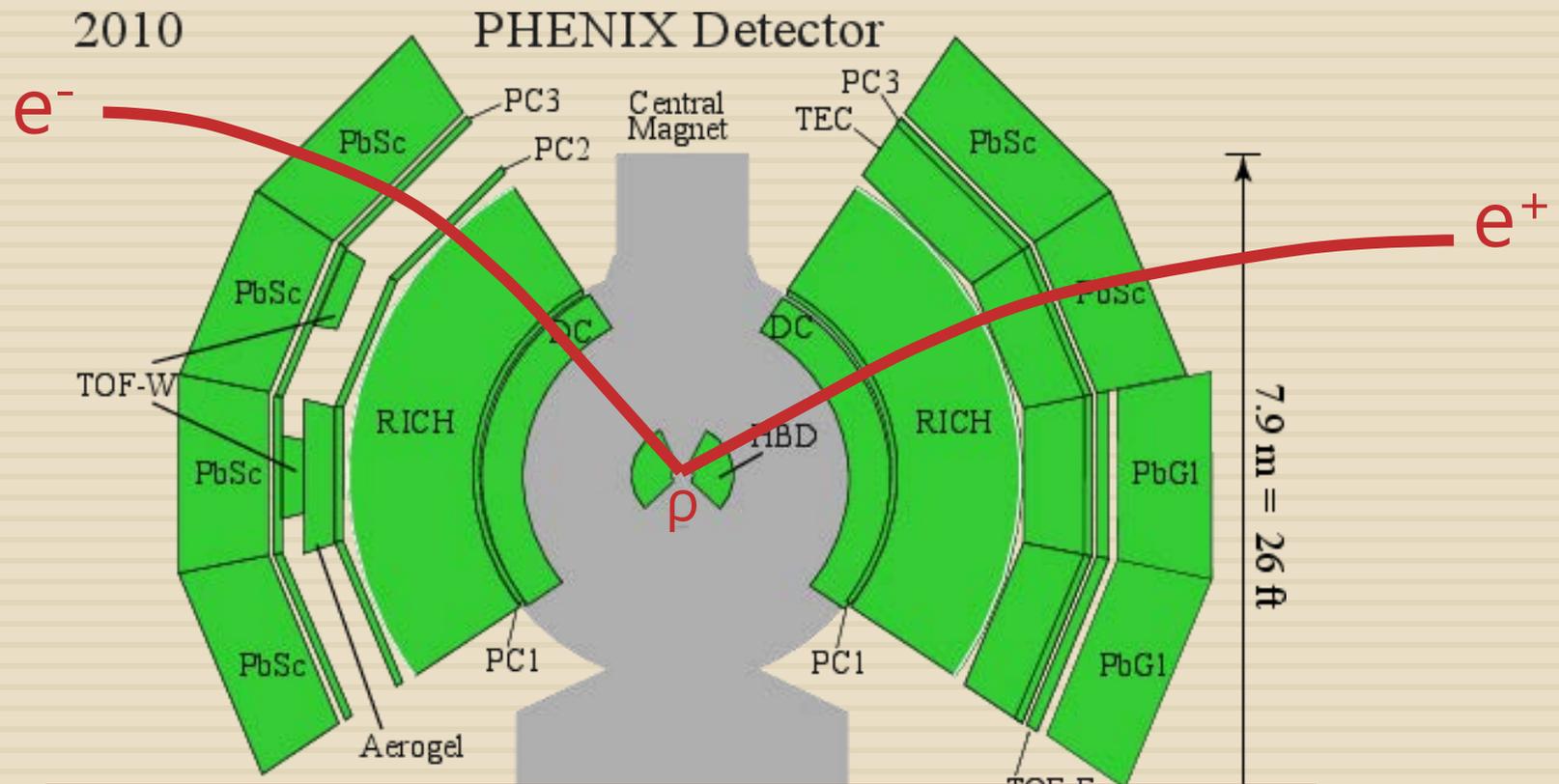


高温媒質中での“ $\pi\pi \rightarrow \rho \rightarrow ee$ ”
 高温媒質中での ρ の質量分布がわかる

PLB 666 (2008) 425

PHENIXにおける電子測定

9

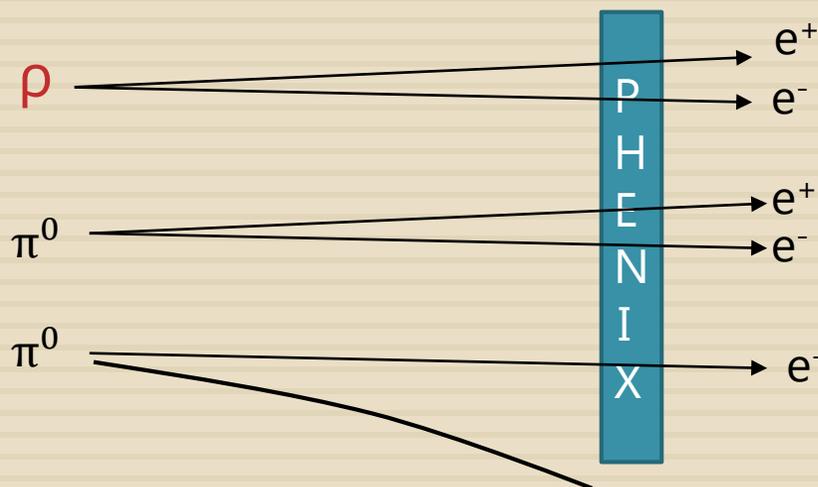


- 電子同定: RICH, EMCal, TOFE, **HBD**
- 飛跡検出: DC, PC

電子対測定 of 難しさ：無相関バックグラウンド

10

- π^0 起源の電子が大量に存在する
 - $\pi^0 \rightarrow ee\gamma$ (Dalitz), $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ とその後の電子陽電子対変換
- 実験的にはすべての電子陽電子の組み合わせを考える必要がある
 - 無相関な電子対の寄与
- 金金中心衝突でのS/B: $\sim 1/1000$
 - バックグラウンドを0.1%の精度で理解する必要がある



Total 6 e^+e^- pairs

ρ : 1 pair

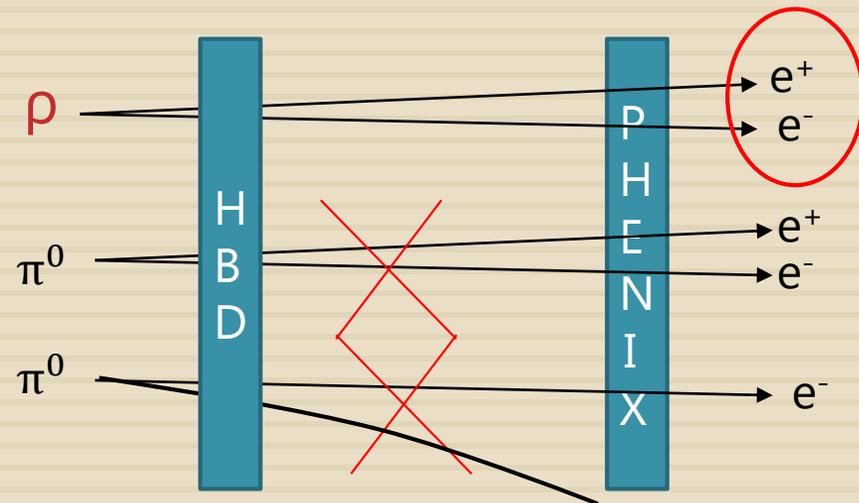
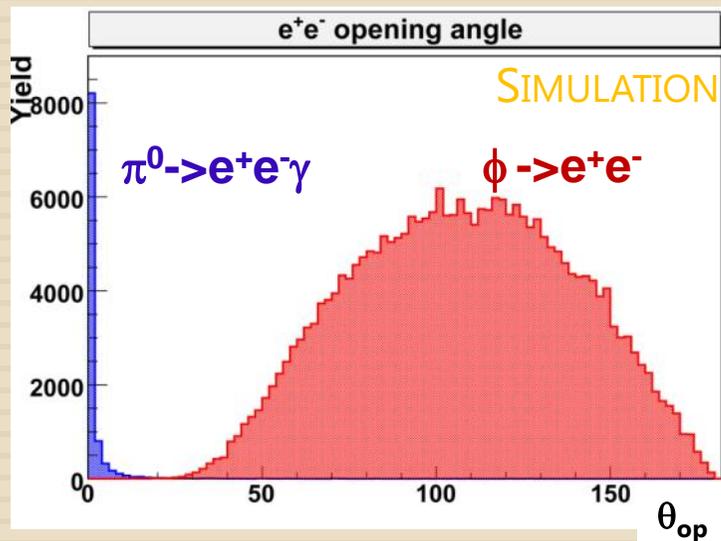
π^0 : 1 pair

無相関電子対: 4 pairs

無相関バックグラウンドの削減

11

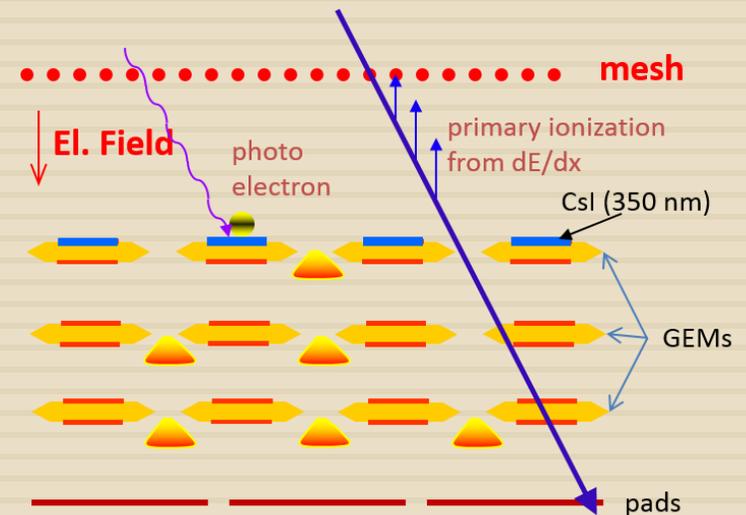
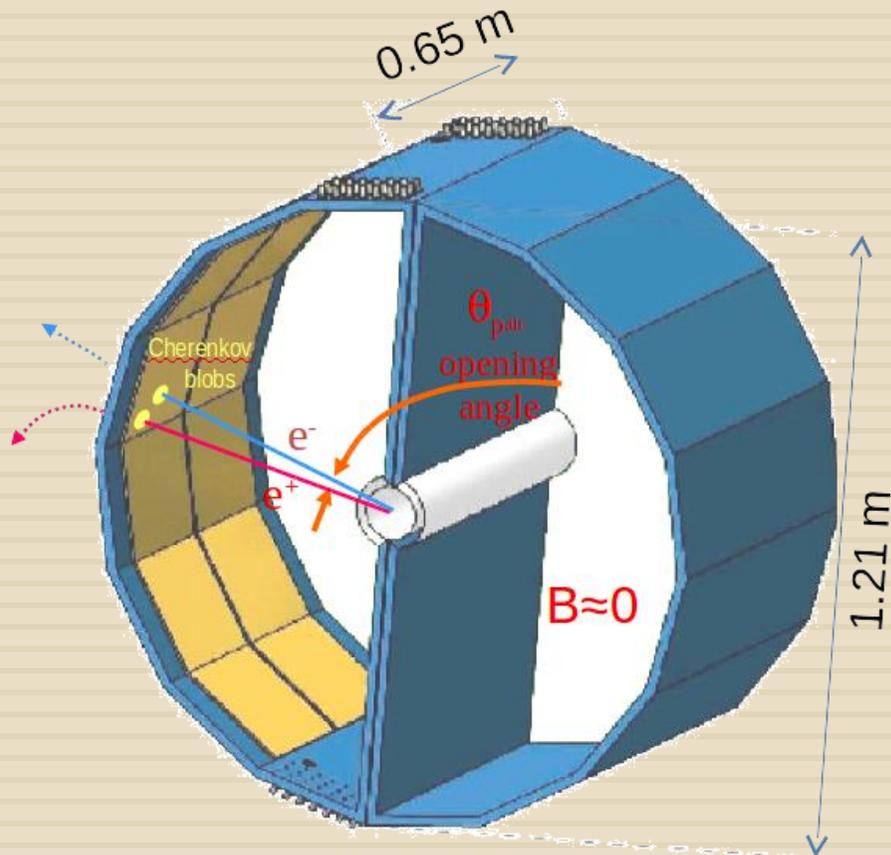
- π^0 および光子変換からくる電子対の削除
 - ▣ 開き角が小さいという性質を利用
- Hadron Blind Detector (HBD)
 - ▣ 電子同定
 - ▣ 開き角を保存するために磁場がない領域におく
 - ▣ 大きなアクセプタンス



Hadron Blind Detector (HBD)

12

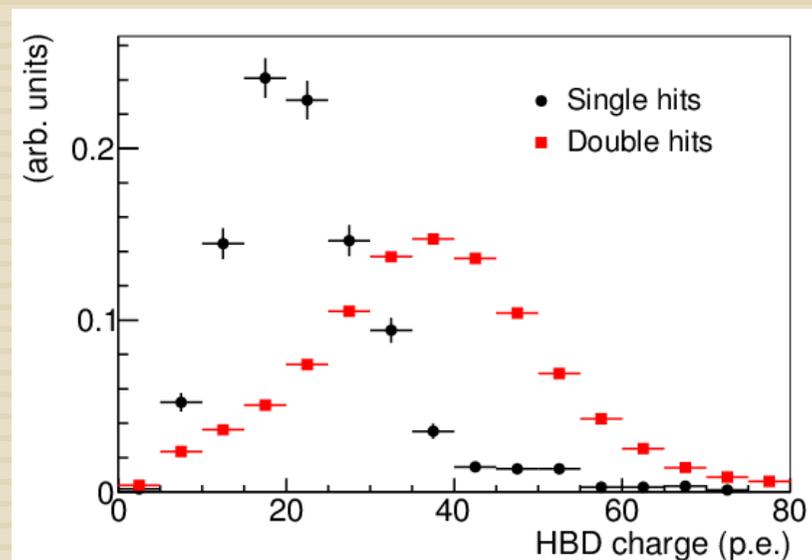
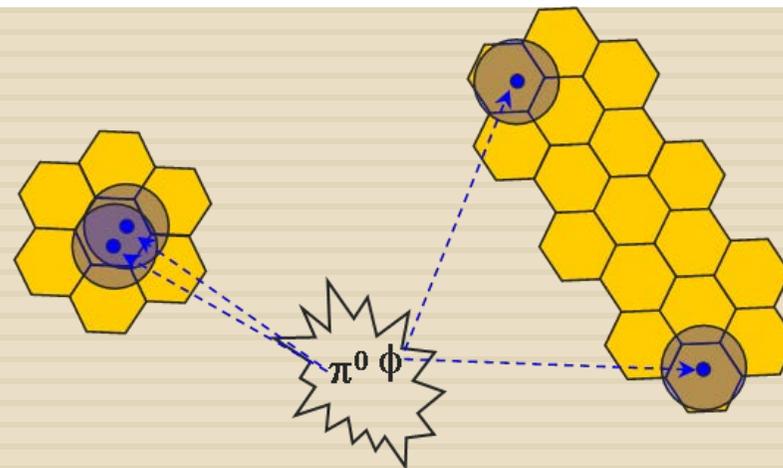
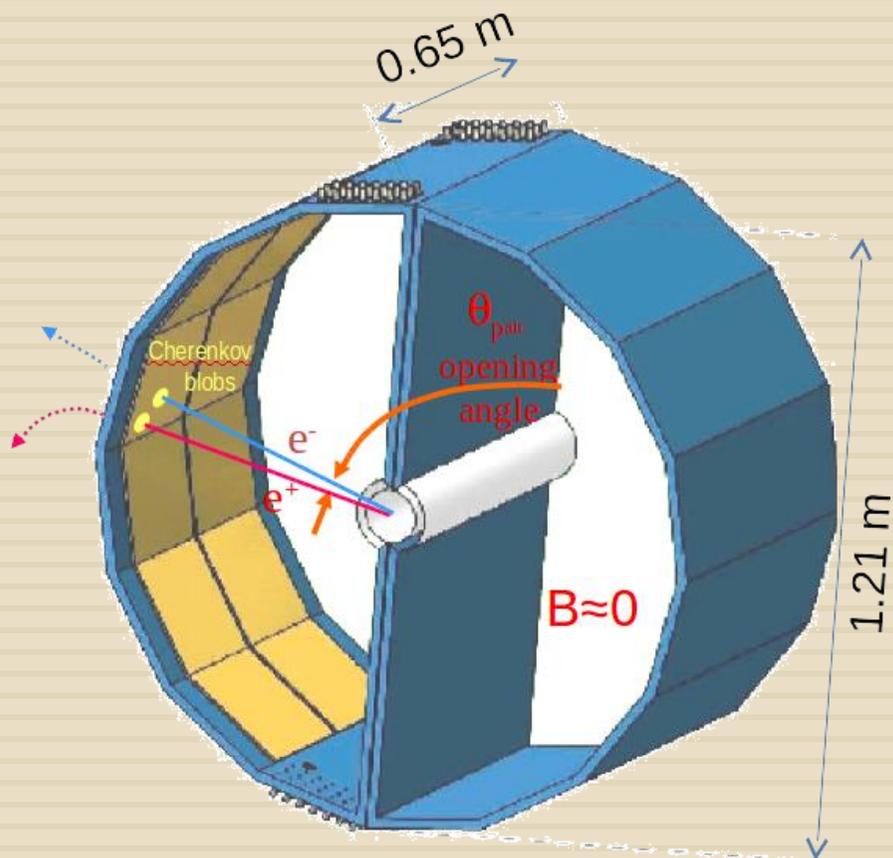
ビームパイプ周りのチェレンコフ光検出器
ラジエータ：CF₄



Hadron Blind Detector (HBD)

13

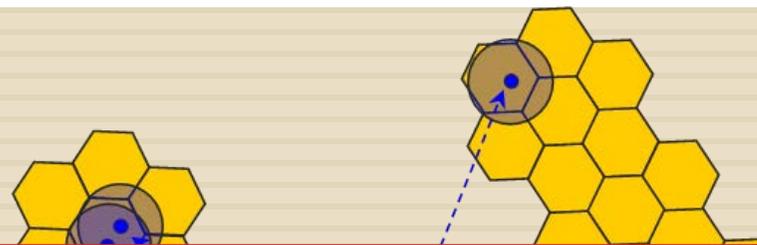
ビームパイプ周りのチェレンコフ光検出器
ラジエータ：CF₄



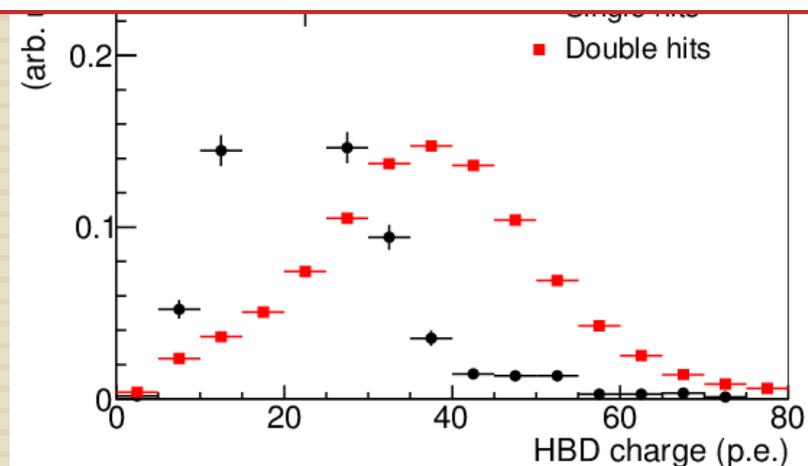
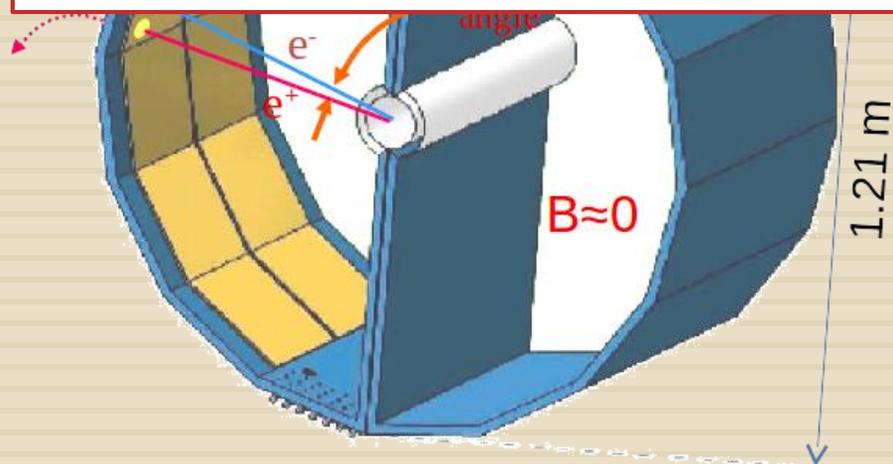
Hadron Blind Detector (HBD)

14

ビームパイプ周りのチェレンコフ光検出器
ラジエータ：CF₄



- 2009年のppでHBDが動いたことを見て、本格的にHBD解析を開始
 - HBDのアイデアが気に入った

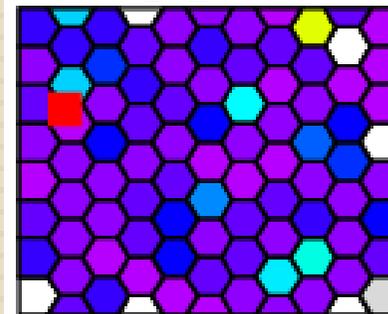


HBD: 現実...

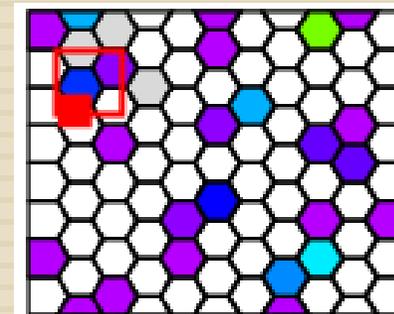
15

- Occupancy is $\sim 100\%$ in Au+Au
 - CF₄ (radiator) emits scintillation!
 - Scintillation light emitted by all charged particles
 - Cherenkov (20pe)+Scintillation (10pe) (top)
 - Subtract the average charge per module (bottom)
- 1-1.5 years to finalize the calibration and to develop the “best” pattern recognition algorithm

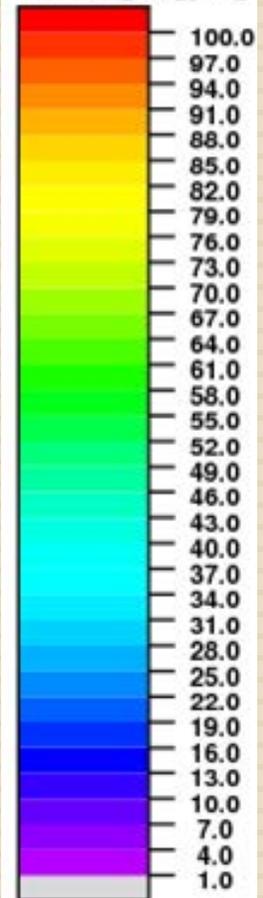
HBD module before subtraction:



HBD module after subtraction:

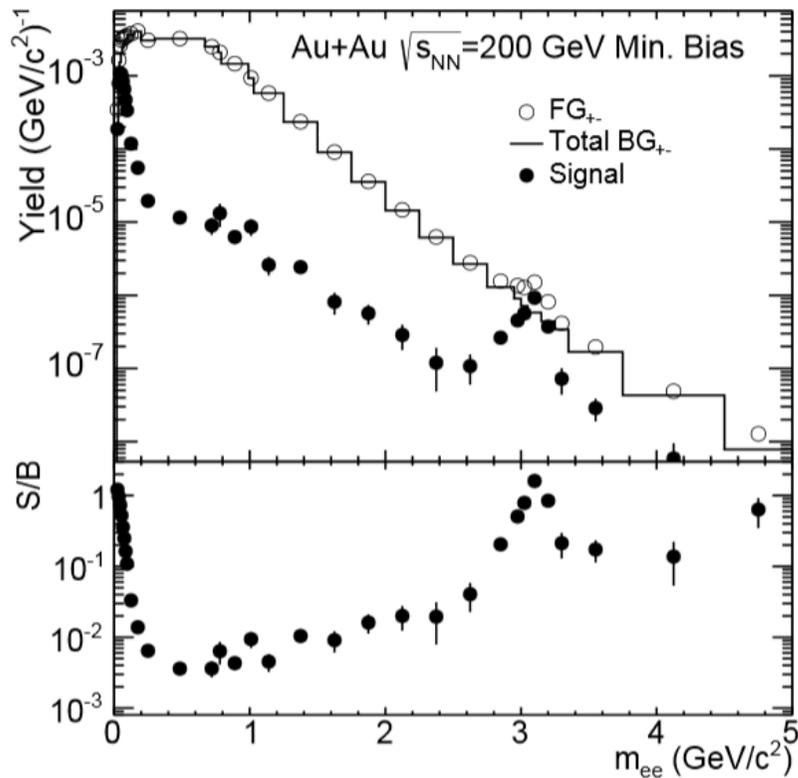


Charge [pe]



電子対解析

16

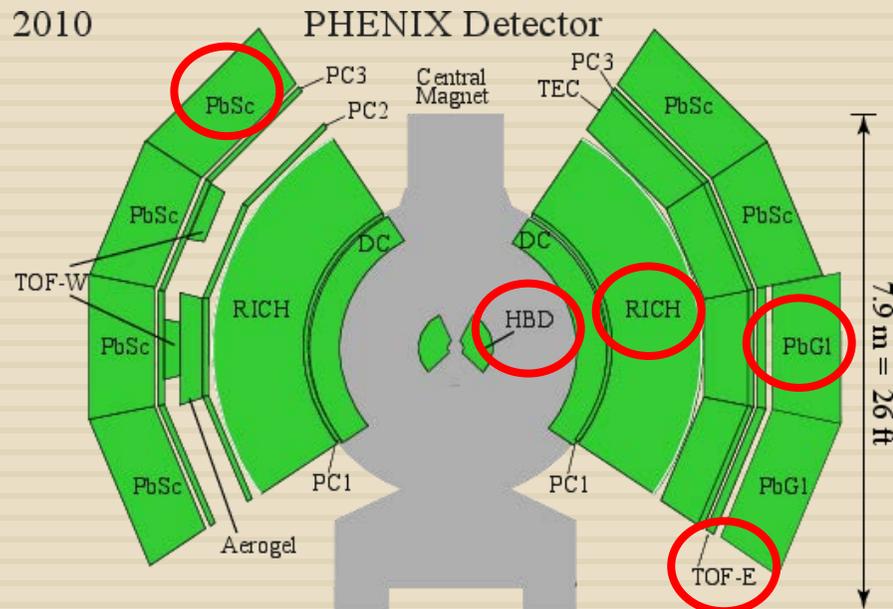


- Step 1: 電子の同定
- Step 2: e^+e^- の不変質量分布
- Step 3: バックグラウンドの寄与の評価
- Step 4: 検出効率の補正

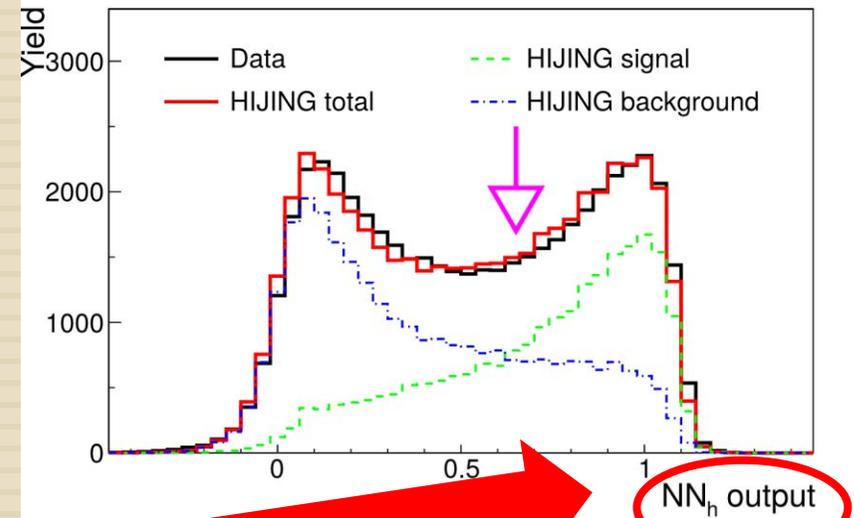
電子同定

17

- HBDの導入、検出器の時間情報を解析に導入、RICHのアルゴリズムの改善
- ニューラルネットワークの導入
 - ▣ シミュレーションはデータの分布を正確に再現するように調整



14 eID variables from 5 detectors

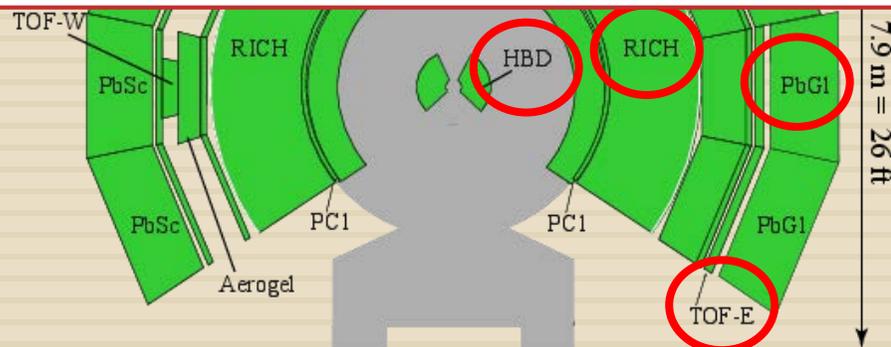


電子同定

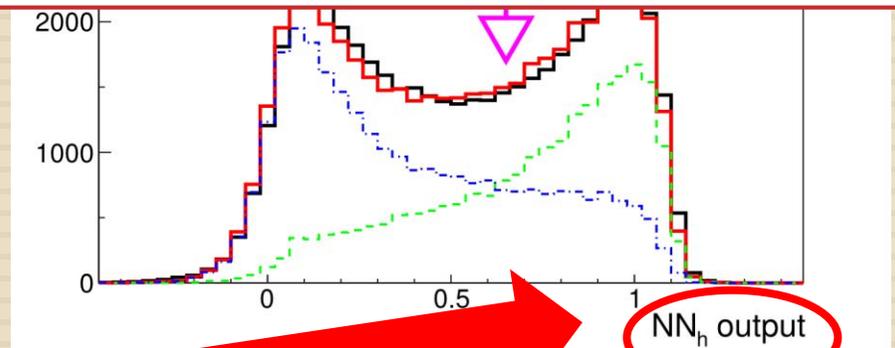
18

- HBDの導入、検出器の時間情報を解析に導入、RICHのアルゴリズムの改善
- ニューラルネットワークの導入
 - ▣ シミュレーションによるカットの調整

- π 中間子の混入は5%未満
- それまでのPHENIX電子解析では混入が中心衝突で~30%

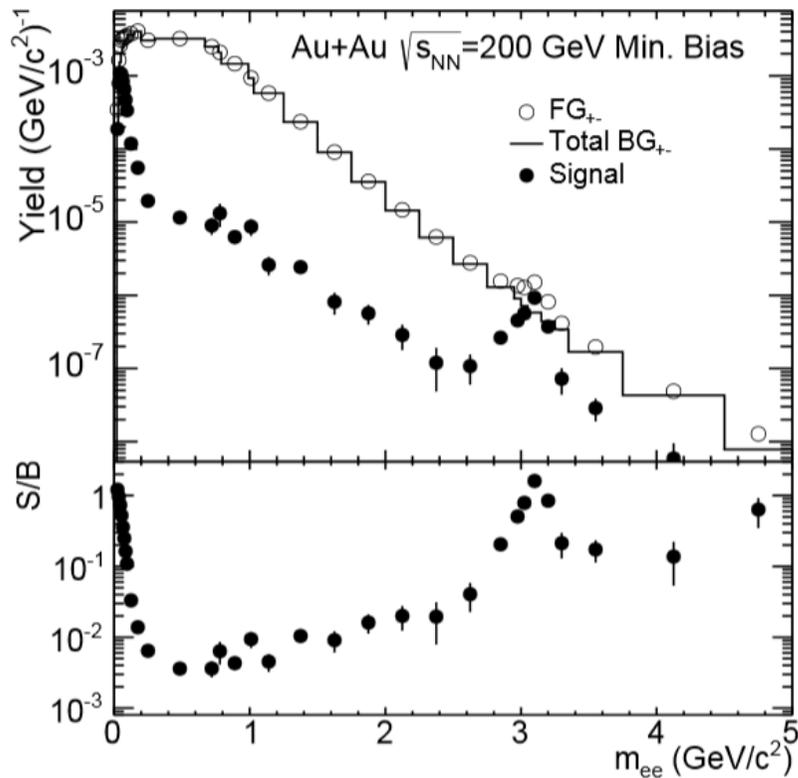


14 eID variables from 5 detectors

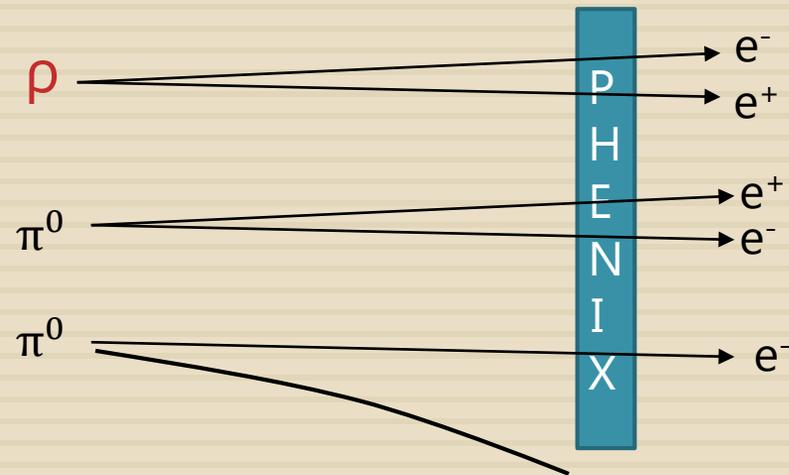


電子対解析

19



- Step 1: 電子の同定
- Step 2: e^+e^- の不変質量分布
- Step 3: バックグラウンドの寄与の評価
- Step 4: 検出効率の補正



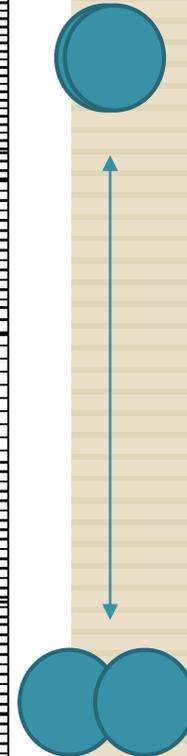
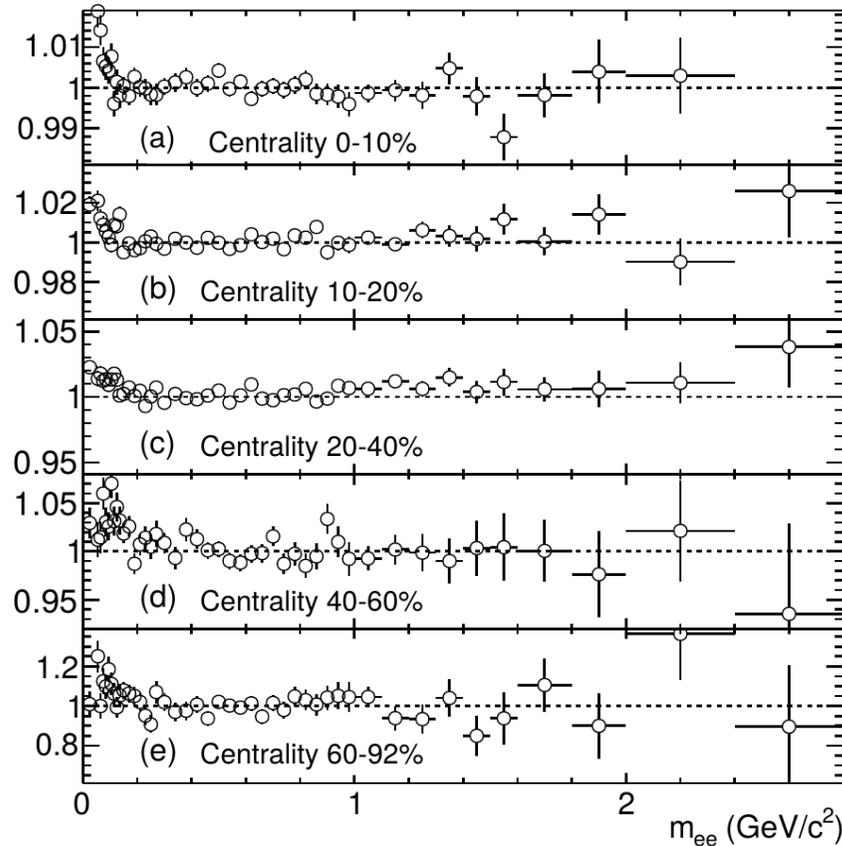
無相関 e^+e^- : 4 pairs

無相関 e^+e^+ or e^-e^- : 4 pairs

バックグラウンド評価の妥当性の評価

20

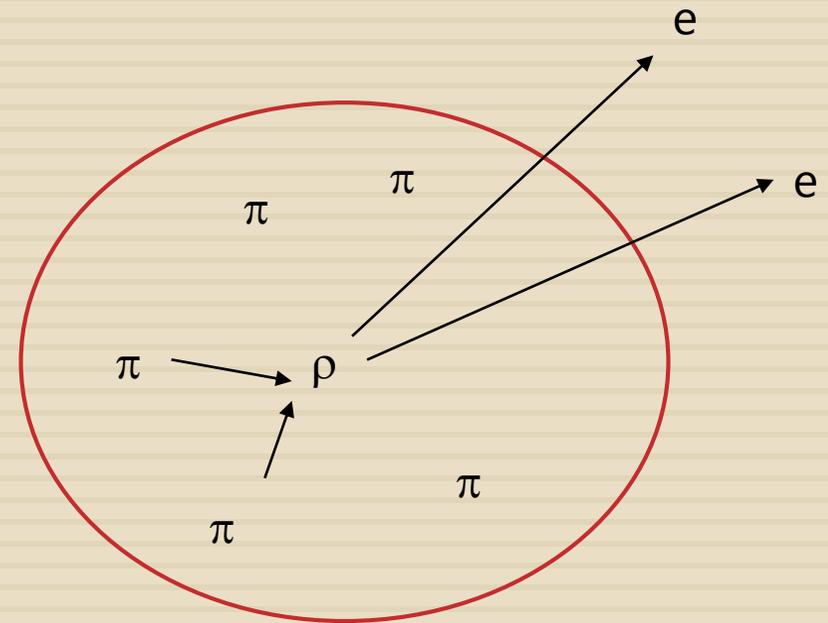
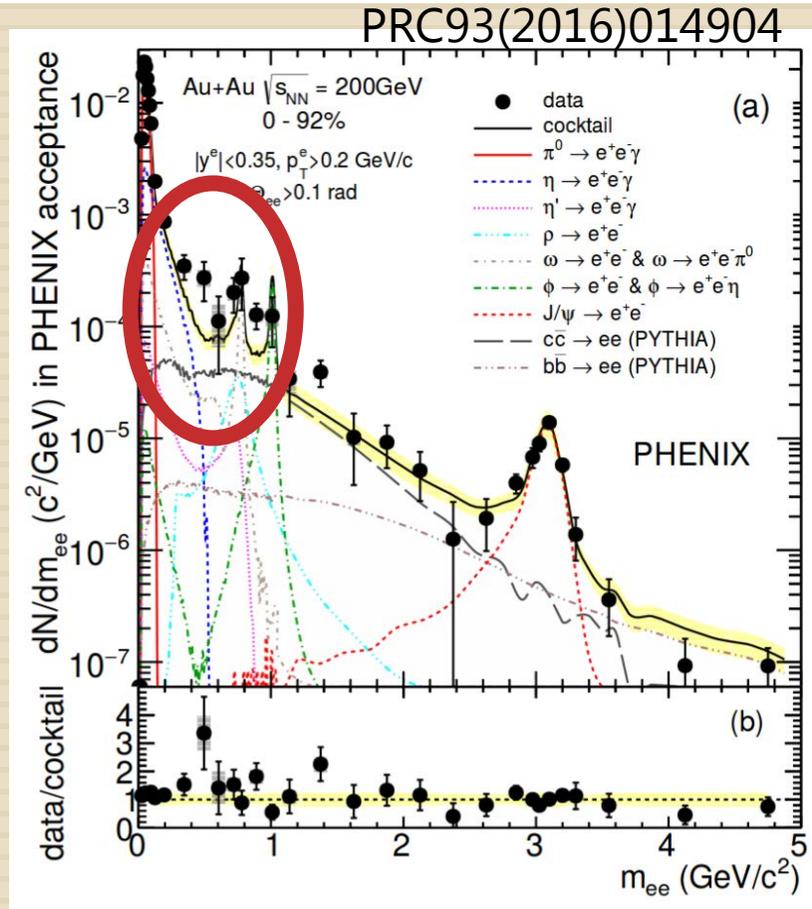
すべての同符号ペア/バックグラウンドモデル



- 同符号ペアのバックグラウンドを $\sim 0.1\%$ の精度で再現
- 再現できてから、異符号ペアを見る

Minimum Biasの結果

21

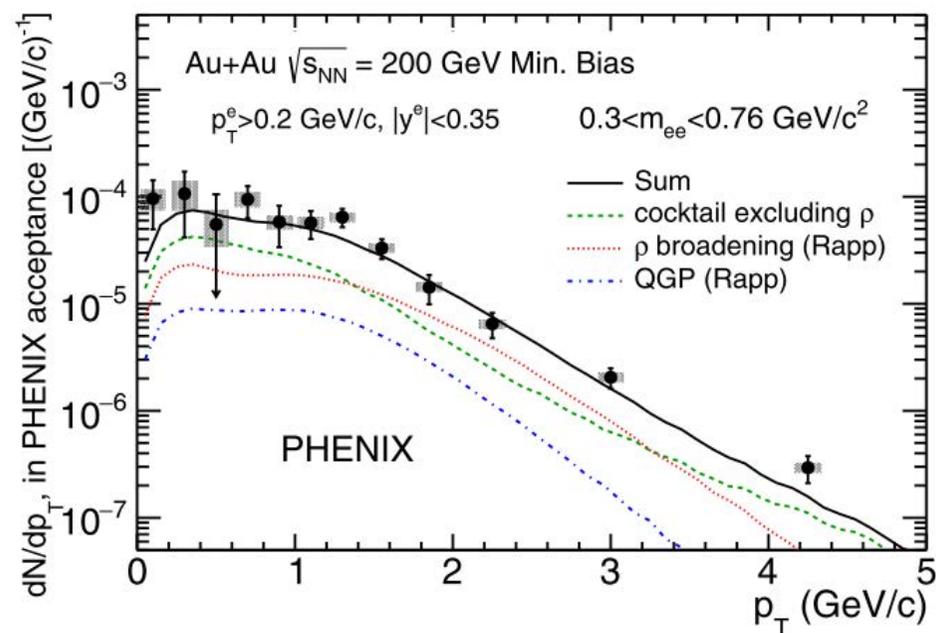
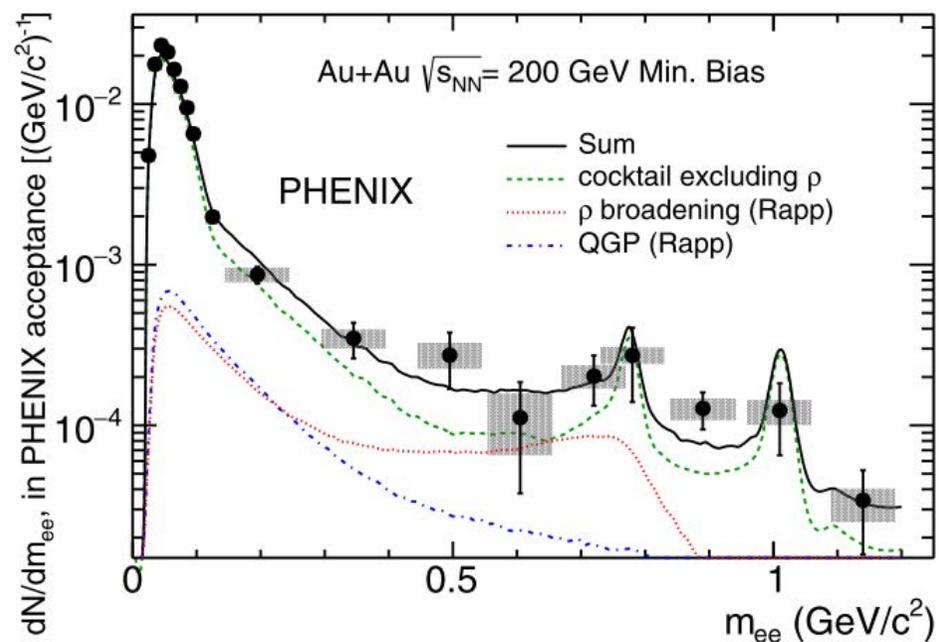


高温なハドロンガスの存在

- 500 MeV/c^2 付近に真空中のハドロン崩壊の寄与からのずれ
- この超過の部分こそ高温媒質中の ρ 中間子の質量分布

カイラル対称性回復を示唆するモデルとの比較

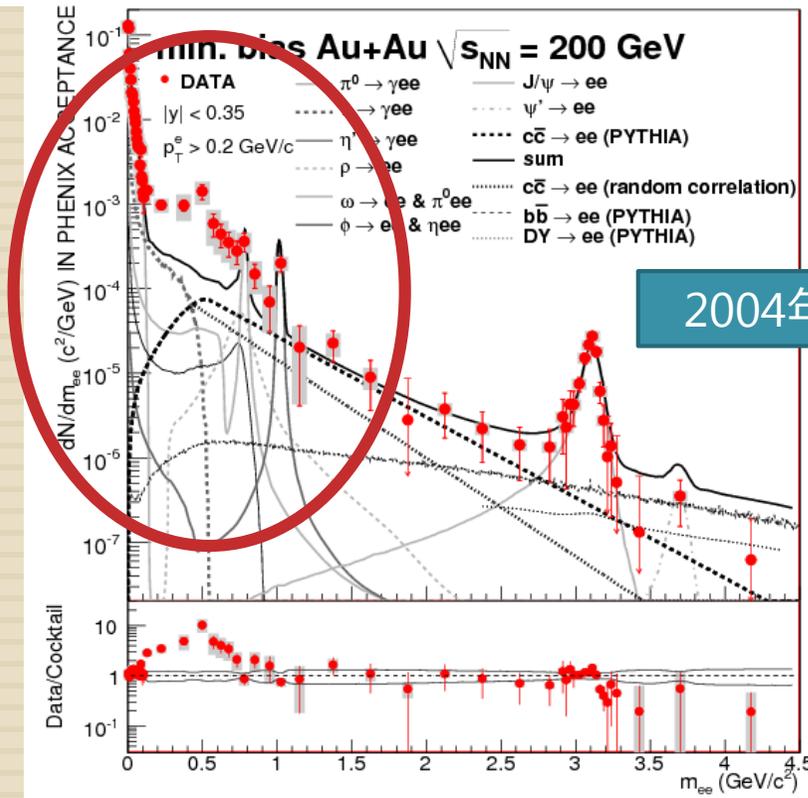
22



- ρ 中間子の幅が広がるというモデルとコンシステント
 - カイラル対称性の回復を示唆

PHENIXの昔の結果の修正

23



2004年のデータを用いた解析

PRC 81 (2010) 034911

- 電子対質量分布はすでにPHENIXで測定されていた
- “異常に”大きい超過を観測
 - 高温媒質中の ρ 中間子では説明できない
 - あらゆるモデルが再現に失敗

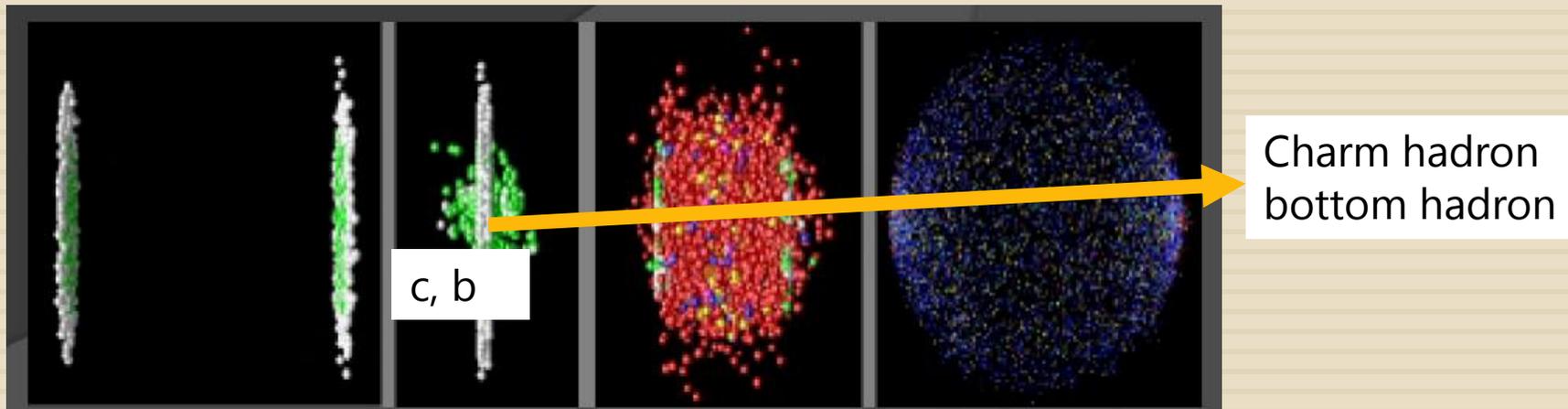


RHICにおける謎のひとつとされていた
 過去の測定に比べて確度の高い結果を出すことに成功

重クォークのユニークな性質

24

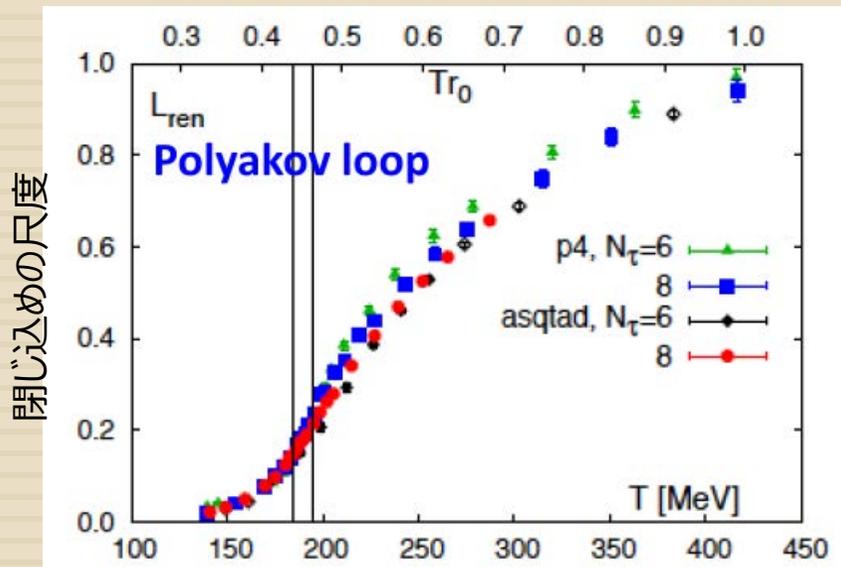
- 重クォーク
 - ▣ チャーム ($1.5 \text{ GeV}/c^2$) やボトム ($5 \text{ GeV}/c^2$)
 - ▣ 衝突初期にしか生成されない (QGPの温度のスケールより重い)
 - ▣ 強い相互作用でフレーバーは保存する
- 重クォークハドロンは衝突の全過程の情報を持っている
 - ▣ QGPによる影響は、陽子陽子衝突などと比較することで評価



QGP・ハドロン相転移

25

- 格子QCDの計算によるとQGPとハドロン相の転移はクロスオーバー
 - 明確な境界線は存在しない
- クロスオーバー領域の閉じ込め形態？
 - ハドロン？クォーク？クォークの組み合わせさせた新たな自由度？



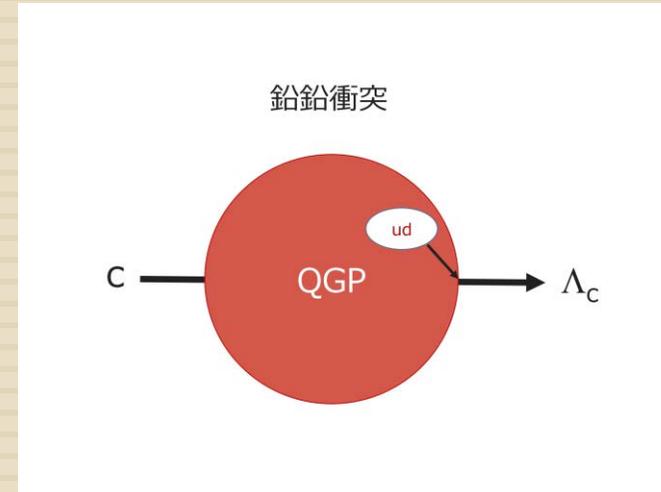
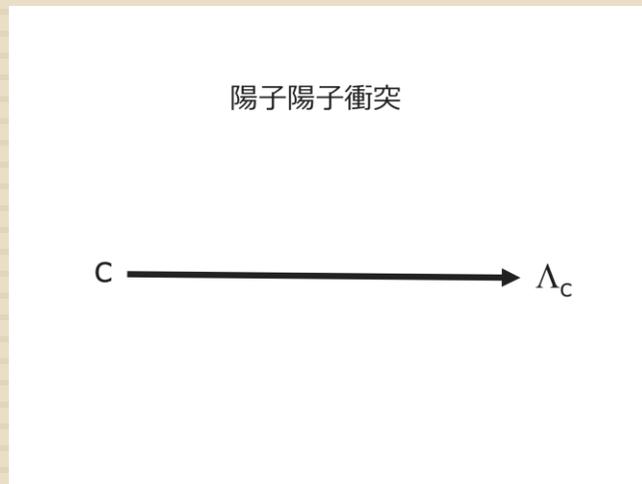
ダイクォーク構造の探索



- 軽いクォークが二つ組み合わせさせた自由度
- 高温領域に限らない重要な自由度の可能性
 - カラー超伝導領域でのクーパー対
 - 近年発見されているエキゾチックハドロンの内部自由度？

ダイクォークと Λ_c

26



- 高温領域に[ud]ダイクォーク構造があるかは Λ_c の収量を調べることでわかる
 - ▣ QGPからのハドロン化：「合体(coalescence)」
 - 近くに存在するクォークが合体してハドロンになるプロセス
- $$N_{\Lambda_c(cud)}(\text{ダイクォークなし}) < N_{\Lambda_c(cud)} + N_{\Lambda_c(c[ud])}(\text{ダイクォークあり})$$
- ▣ 理論の論文によるとダイクォーク構造がない場合に比べて4-8倍程度収量が増加 (PRL100(2008)222301)

Λ_c の測定方法

27

$\Lambda_c \rightarrow pK\pi$ の場合

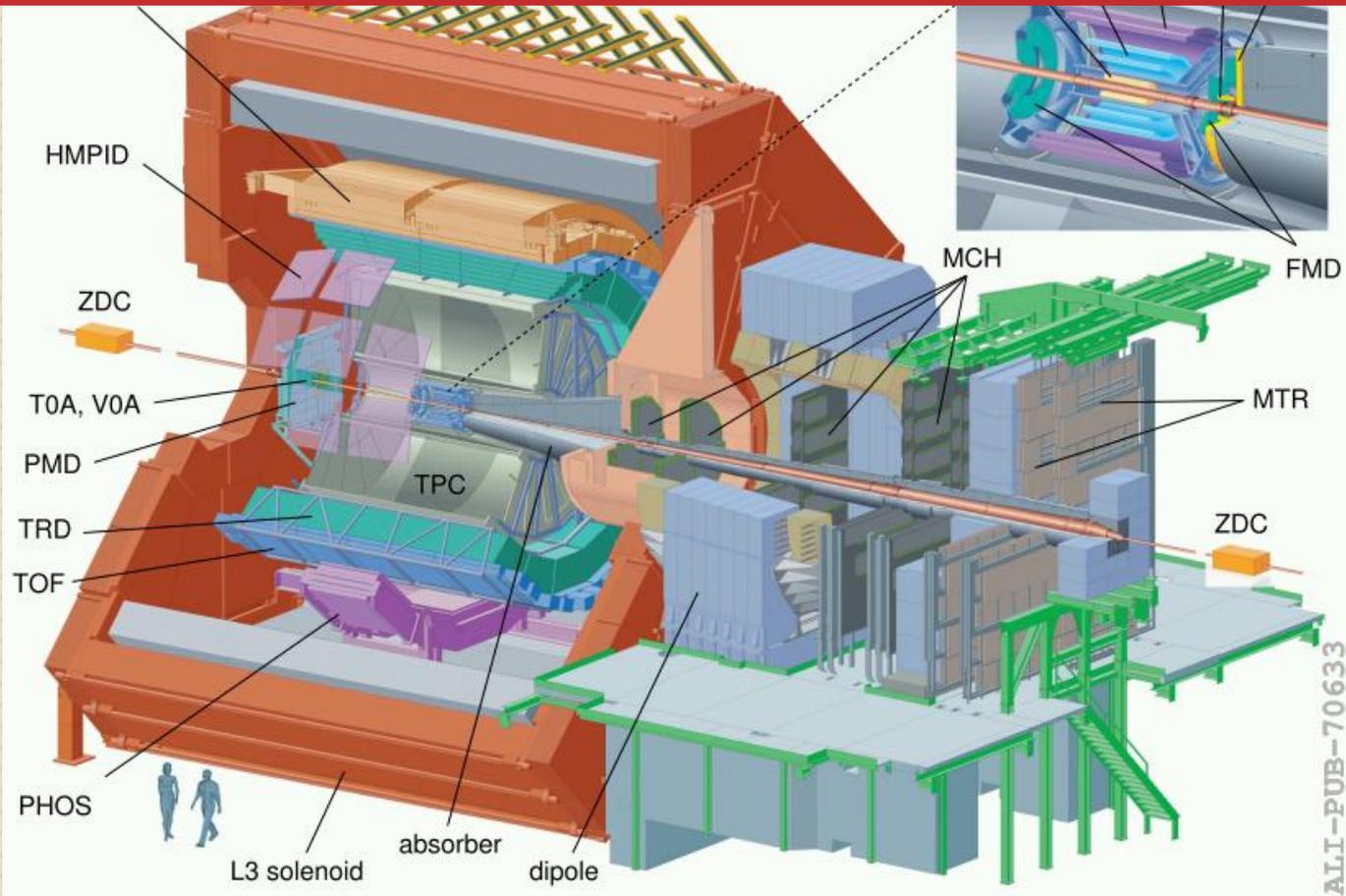
$$m_{\Lambda_c} = \sqrt{(E_p + E_K + E_\pi)^2 - (\vec{p}_p + \vec{p}_K + \vec{p}_\pi)^2}$$

- 衝突断面積の小ささ
 - 衝突エネルギーが高いほど大きくなる
 - LHCの衝突エネルギーでは、RHICに比べて5倍以上チャームクォークが生成される。
- 悪いシグナルバックグラウンド比（無相関バックグラウンド）
 - 低い運動量の荷電粒子まで飛跡検出、粒子同定できること。
 - バーテックス検出器を有すること。
 - Λ_c の寿命 60 μm
 - 衝突点から離れて崩壊した粒子を選ぶことで、シグナルバックグラウンド比自体を改善する。

ALICE検出器

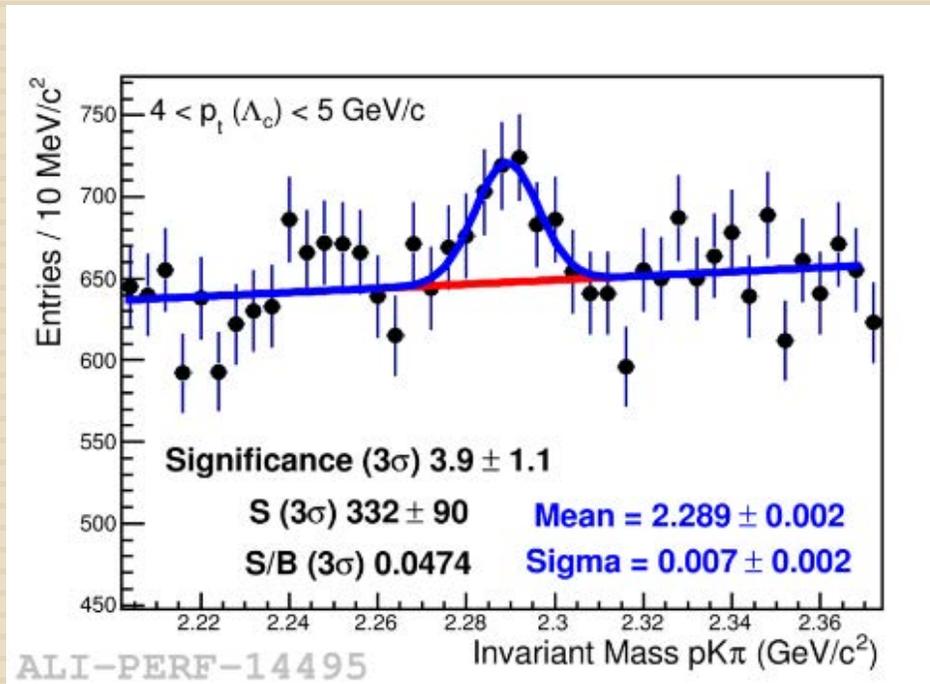
28

Central Barrel ($|\eta| < 0.9$)
ITS (バーテックス検出器)
TPC (飛跡検出、粒子同定)



Run-1 陽子陽子衝突解析

29



- 重イオン衝突解析の基礎データ
- LHCエネルギーでは陽子陽子衝突ですらほとんど測定されていない
- 確かに質量分布でのピークが確認できる → 横運動量分布の導出に成功
- ALICEはΛ_cを測定するのに適した性能を持っている

鉛鉛衝突解析

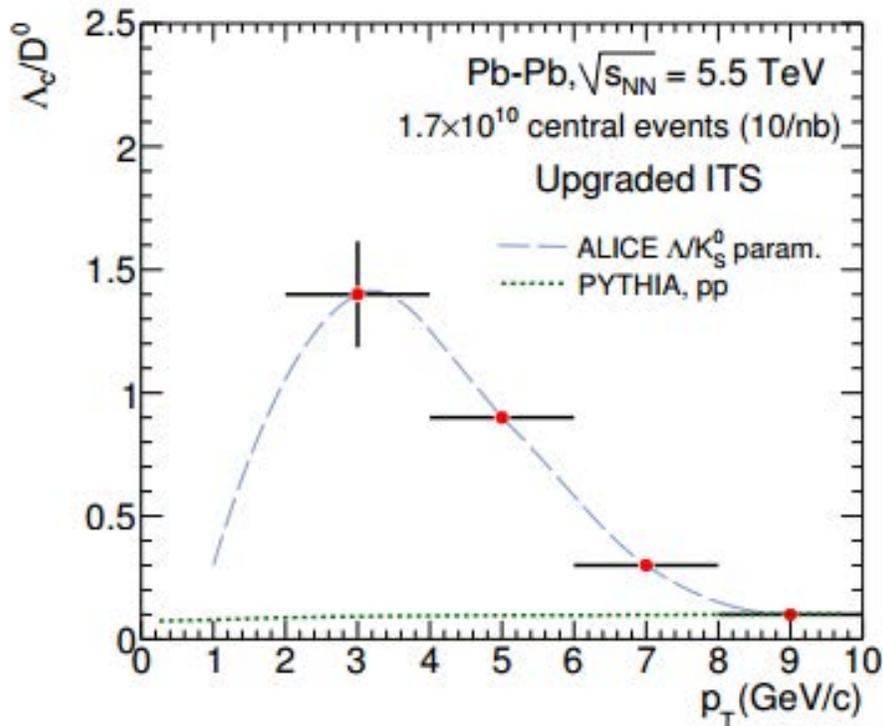
30

?

2016年までに取得したデータでどこまでいけるかは、目下解析中

ALICE Run-3

31



~100倍の統計
~3倍の崩壊点分解能

検出器のアップグレードが不可欠

- TPC: GEMを用いた連続読み出し
- ITS: シリコン検出器、位置分解能、物質量の削減

まとめ

- カイラル対称性の回復事象の探索
 - ▣ 示唆する結果を得ることに成功
 - ▣ 昔のPHENIXの結果を否定
- 高温環境におけるダイクオーク構造の探索
 - ▣ 目下努力中！

33

backup

Rapp's model

