

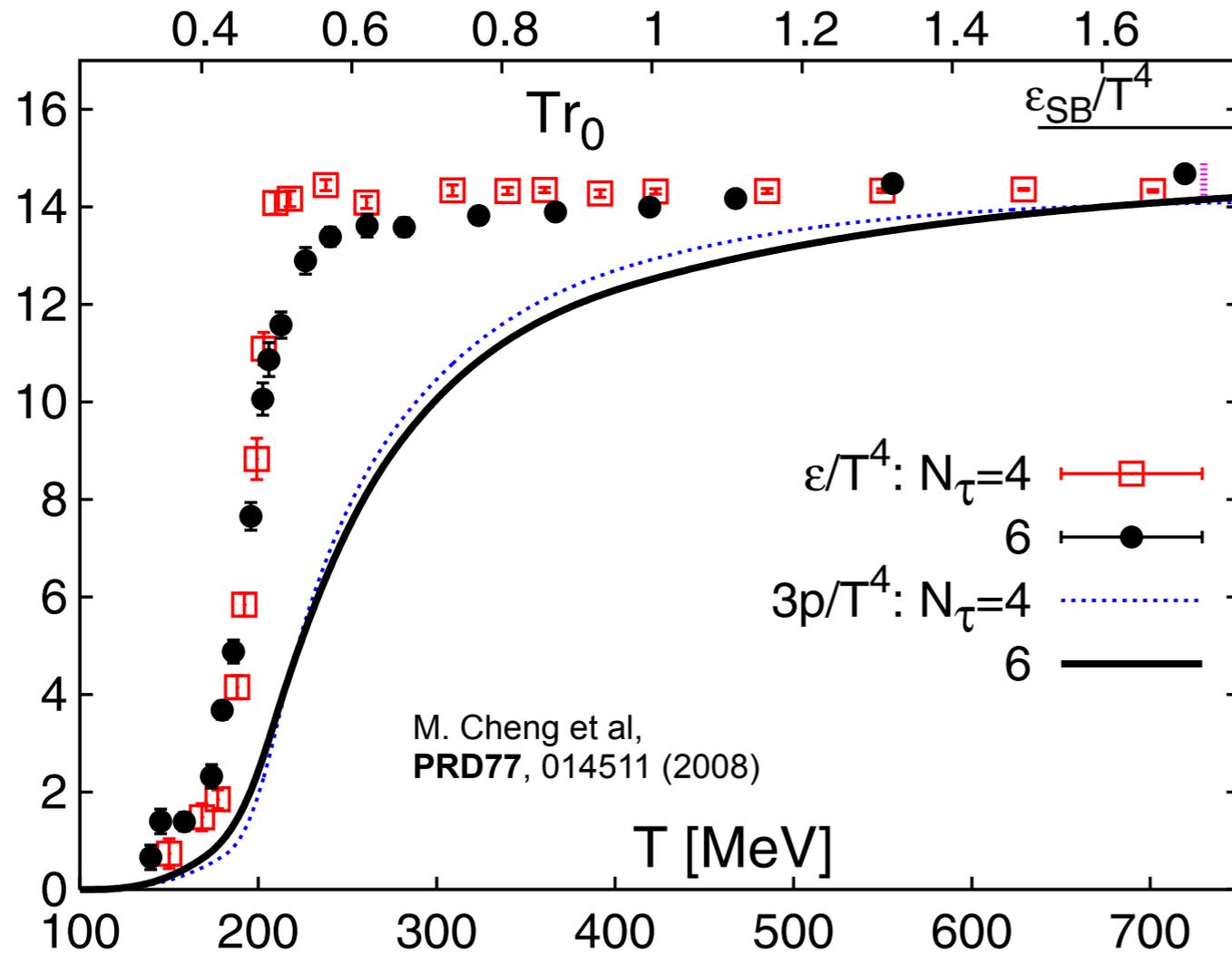
RHICビームエネルギースキヤ ンの (私見を交えた)

最新結果と今後の展望

益井 宙 (筑波大)

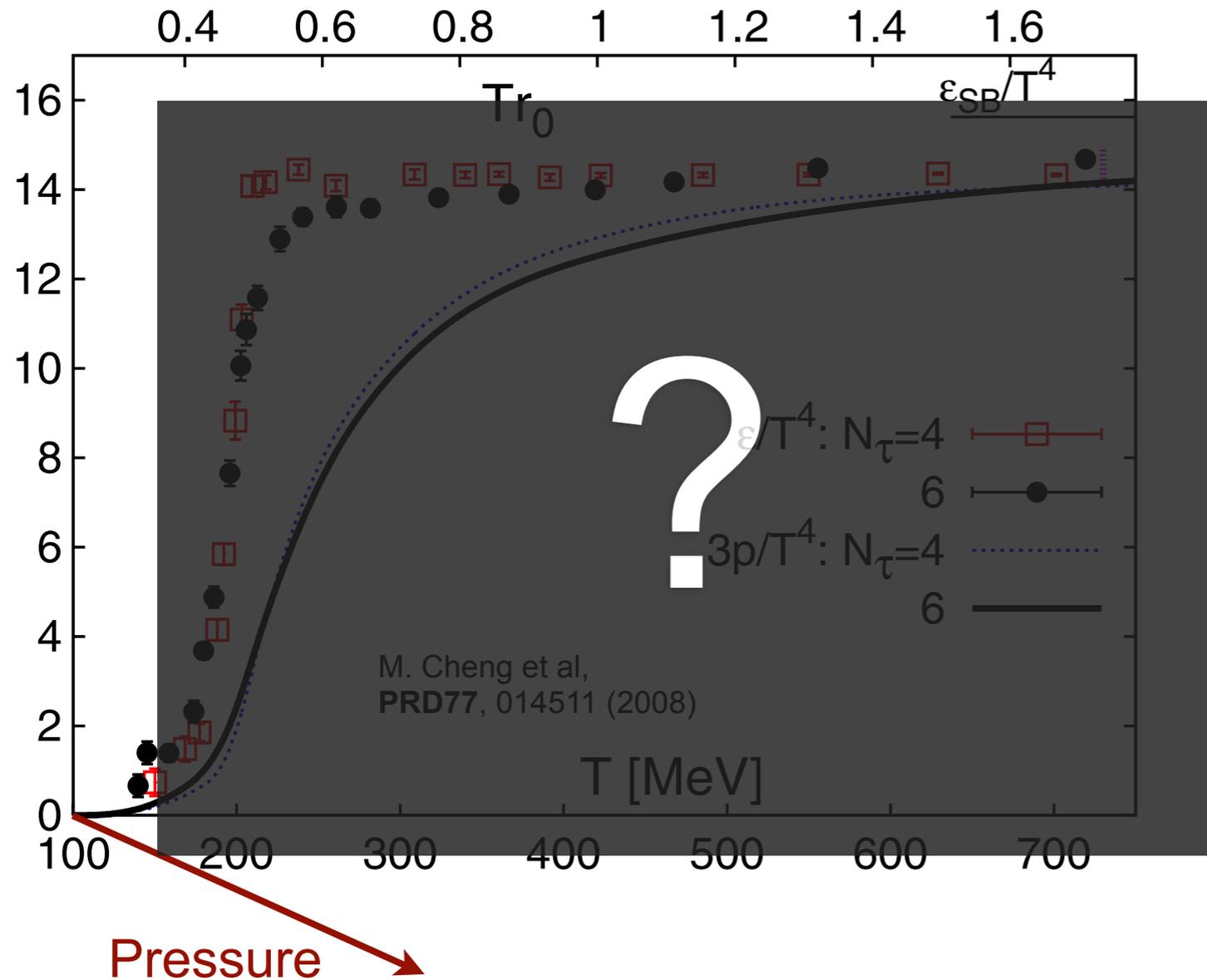
第17回 *Heavy Ion Pub*

QCD相図の探索



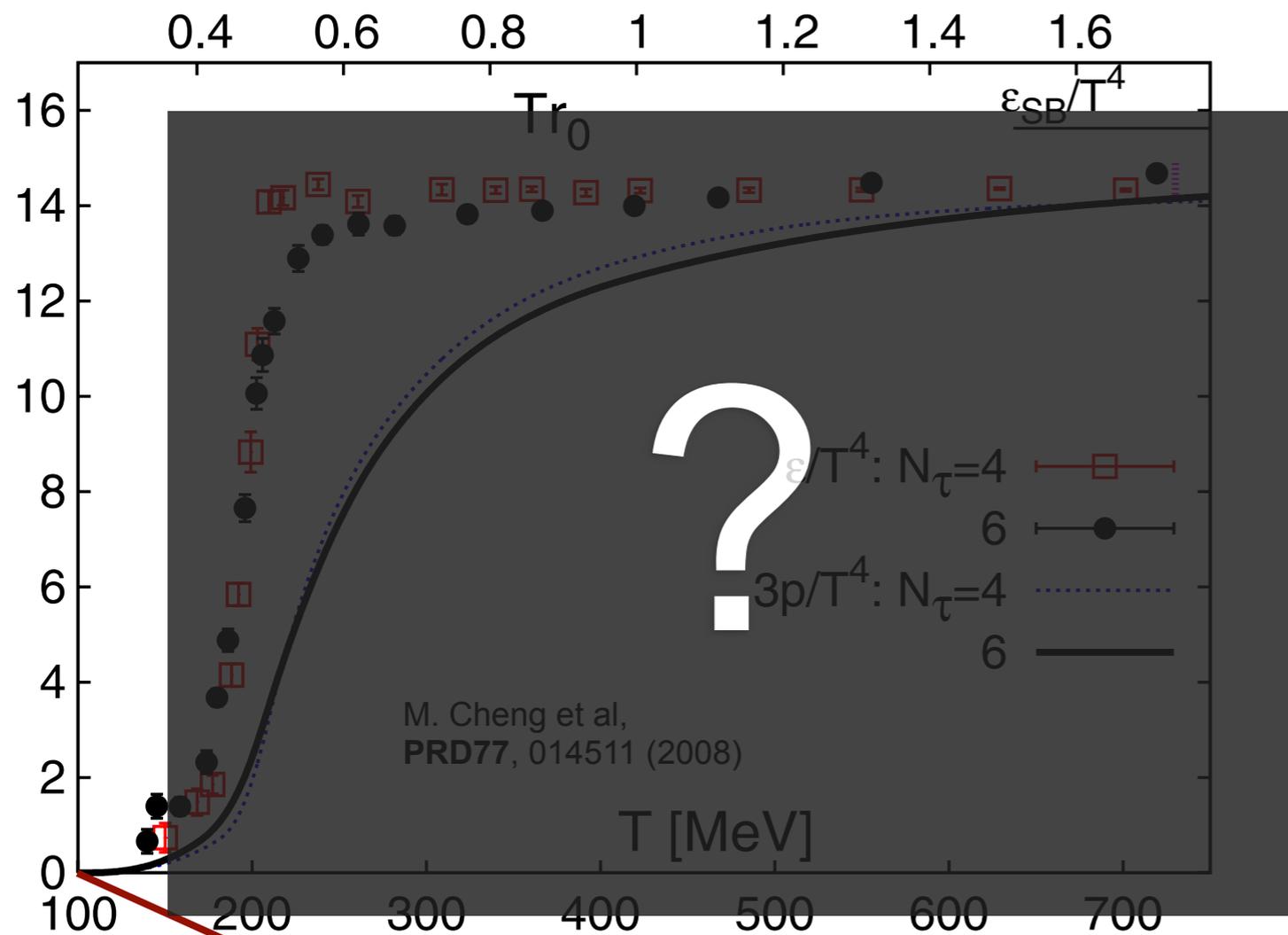
- 超高温では自由度がハドロンからクォークへ”転移”

QCD相図の探索



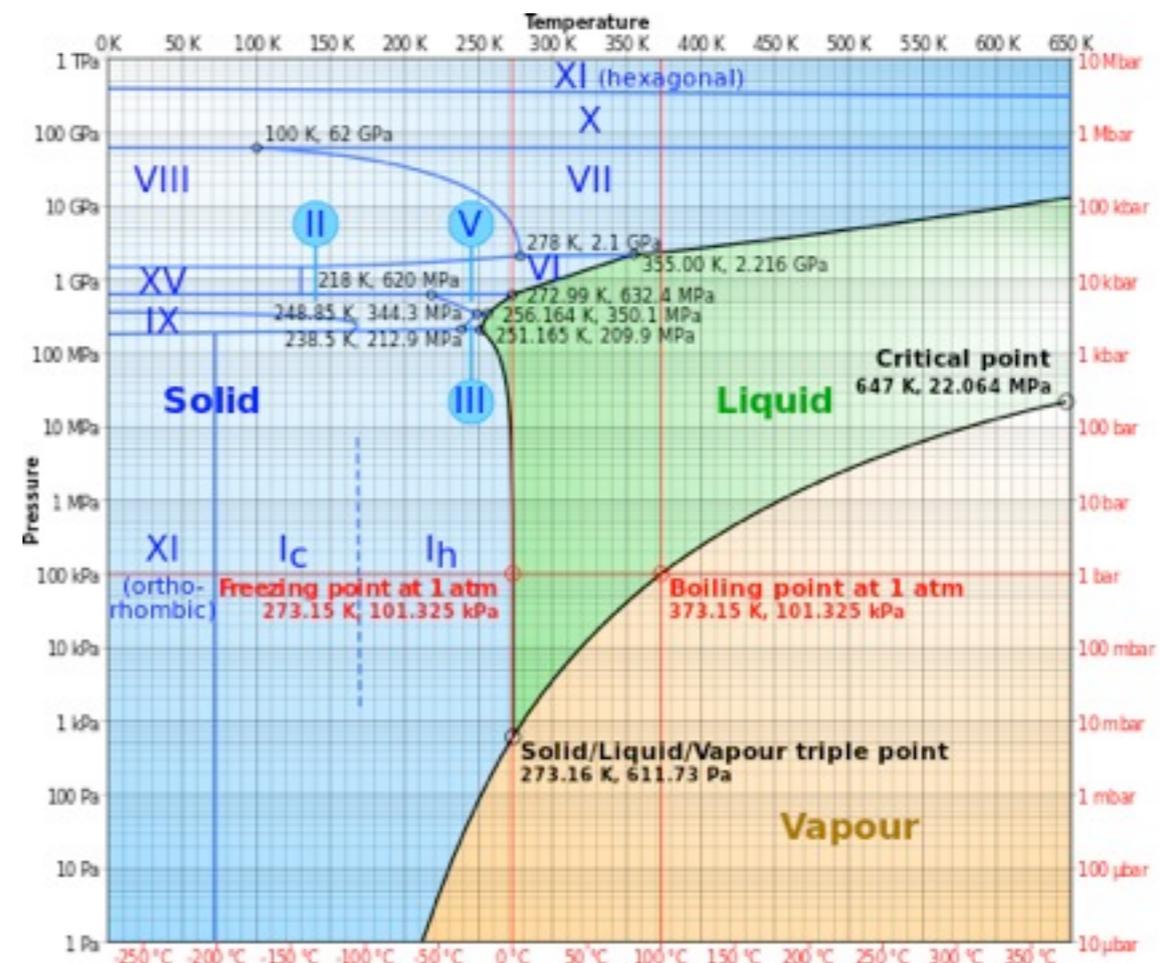
- 超高温では自由度がハドロンからクォークへ”転移”
- ”圧力”を変えるとどうなる？

QCD相図の探索



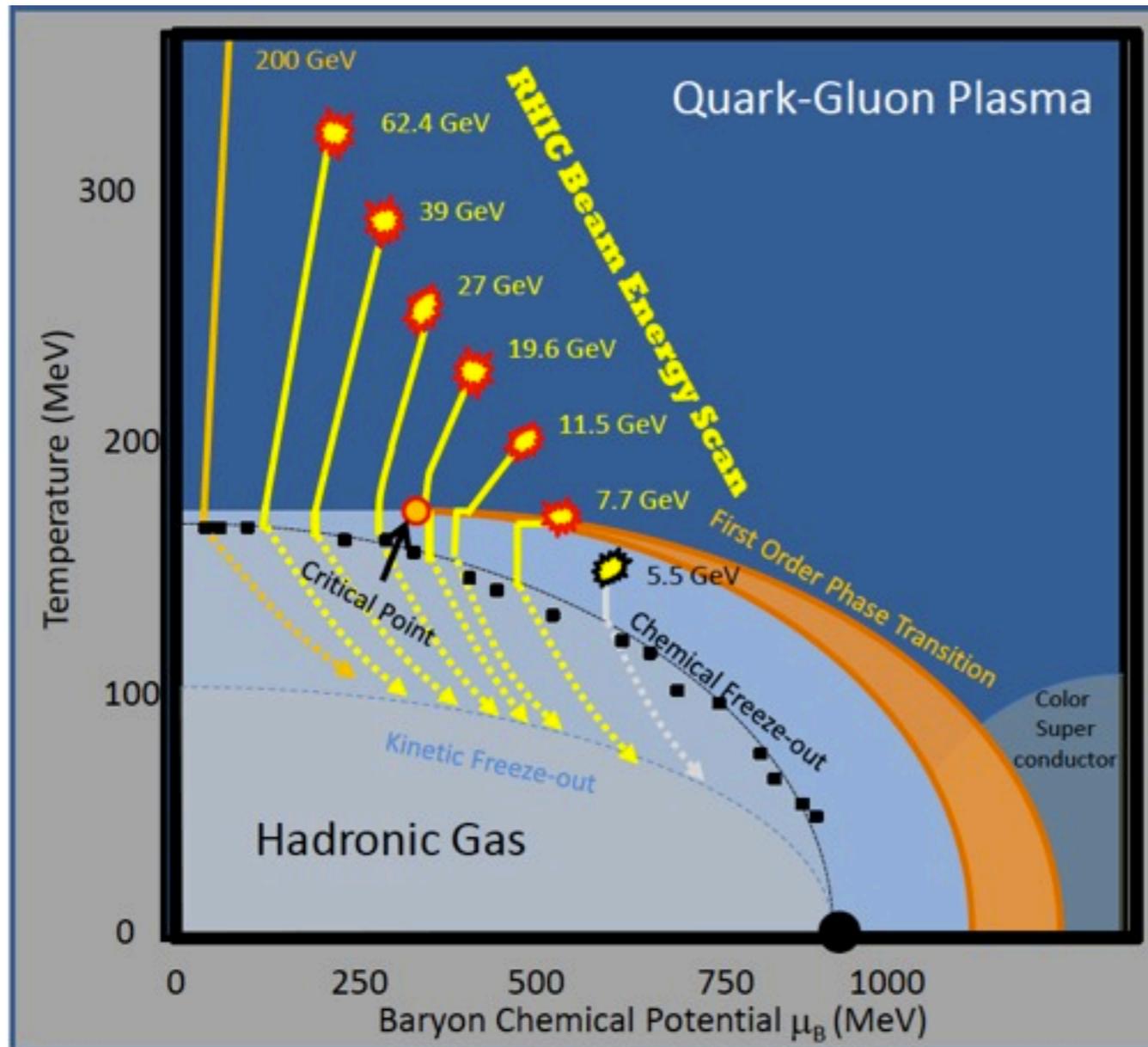
Pressure →

Phase diagram of water from wikipedia
http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_diagram



- 超高温では自由度がハドロンからクォークへ”転移”
- ”圧力”を変えるとどうなる？

RHICビームエネルギースキャン



- QCD相構造の研究

- ▶ 高バリオン密度 ~ 低エネルギー
重イオン衝突

➔ **Beam Energy Scan !**

- 経緯

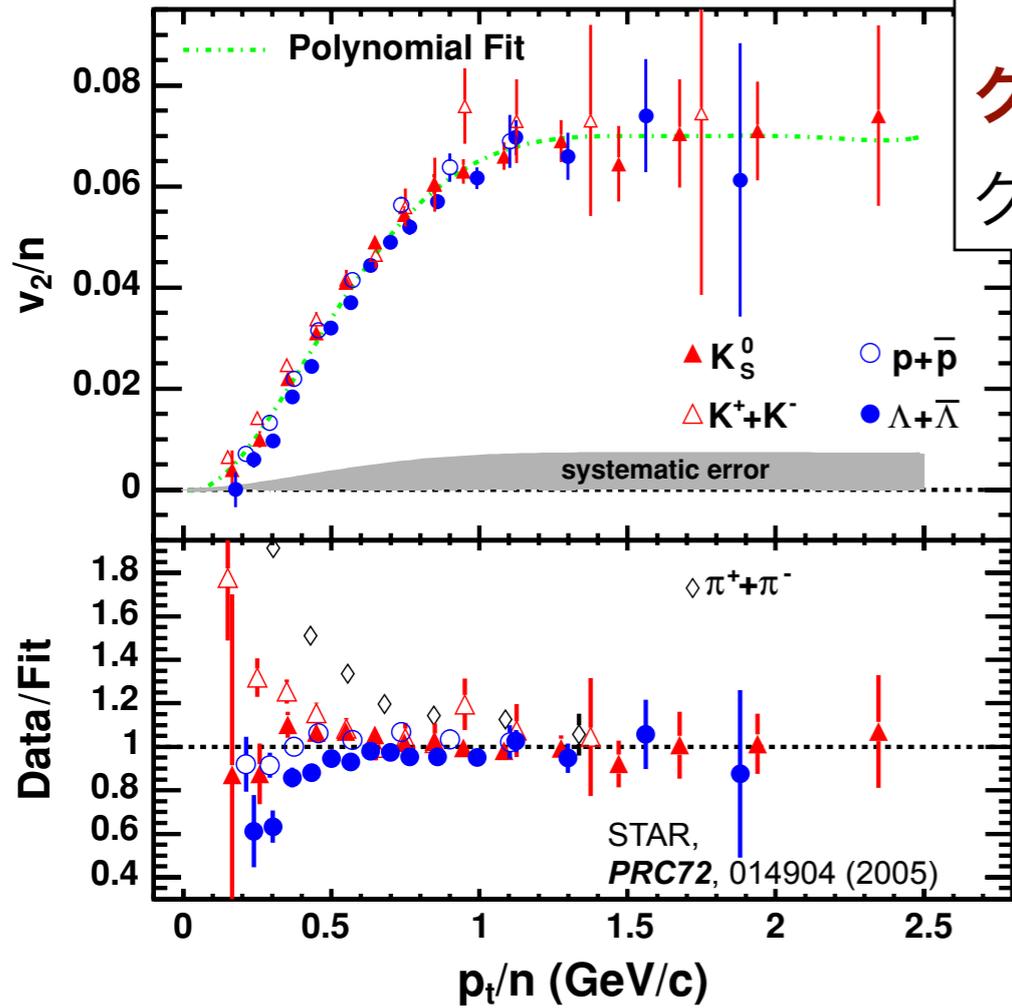
- ▶ 2008年: テスト実験 @ $\sqrt{s_{NN}} = 9.2$ GeV (*PRC81, 024901, 2010*)
- ▶ 2009年: BES Phase-Iの提案 (arXiv: 1007.2613)
- ▶ 2010年: RHIC BES @ 7.7, 11.5, 39 and 62 GeV
- ▶ 2011年: 19.6 and 27 GeV
- ▶ 2012年: 5 GeVでテスト実験 (1 good event)

目的

- RHIC 200 GeVやLHCで観測されたQGP生成シグナルはどこで消失するか？
 - ▶ 言い換えると、シグナルはどこから見え始めるか？
- ➔ これまでのQGP生成シグナルと期待される観測量の系統的測定
- 一次相転移のシグナルを観測する
- QCD特異点を発見する
- ➔ 観測量は？

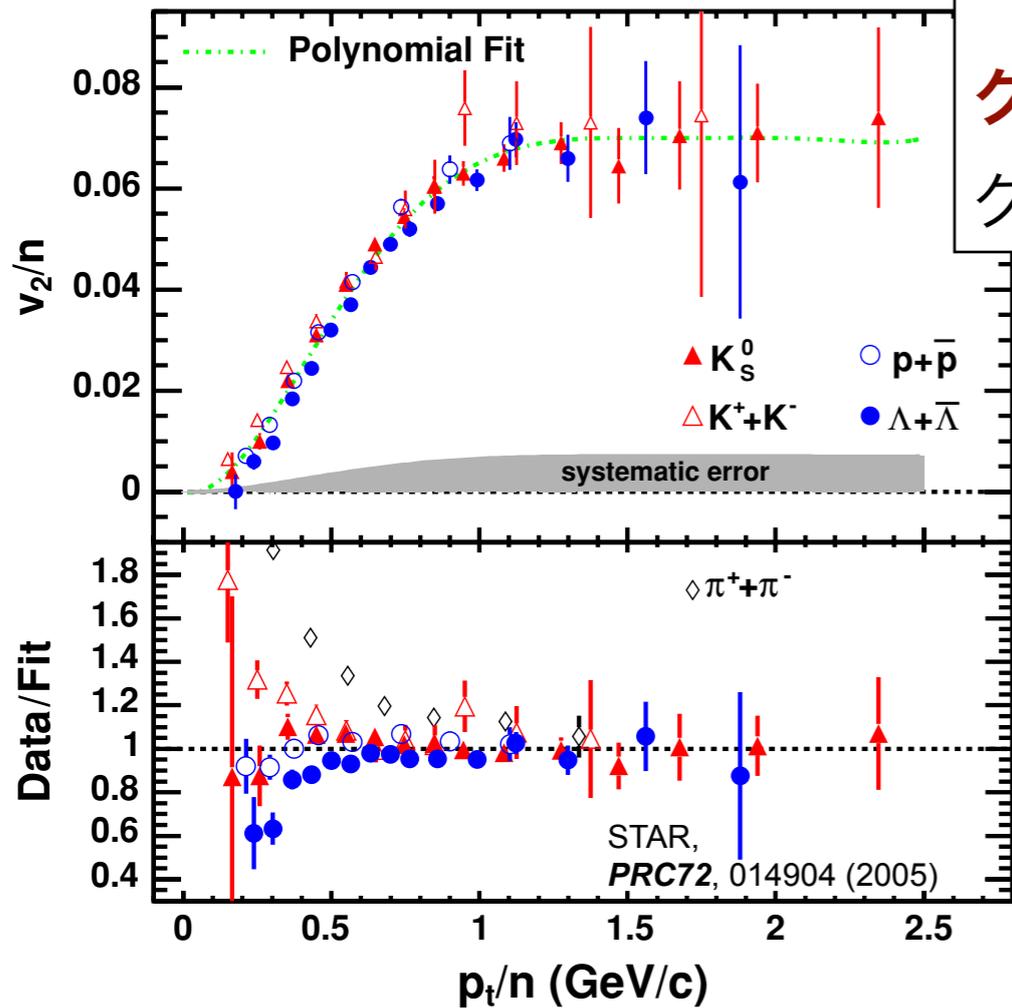
QGP生成のシグナル

QGP生成のシグナル

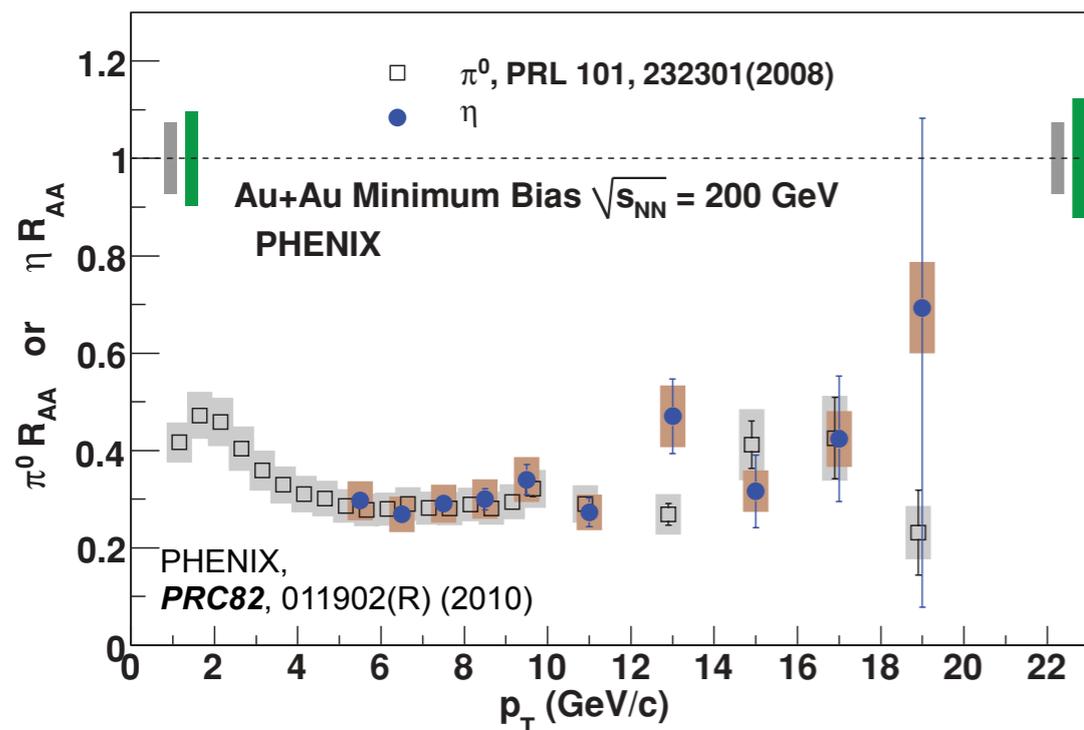


大きな方位角異方性
 クォーク数スケーリング
 クォークの非閉じ込め？

QGP生成のシグナル

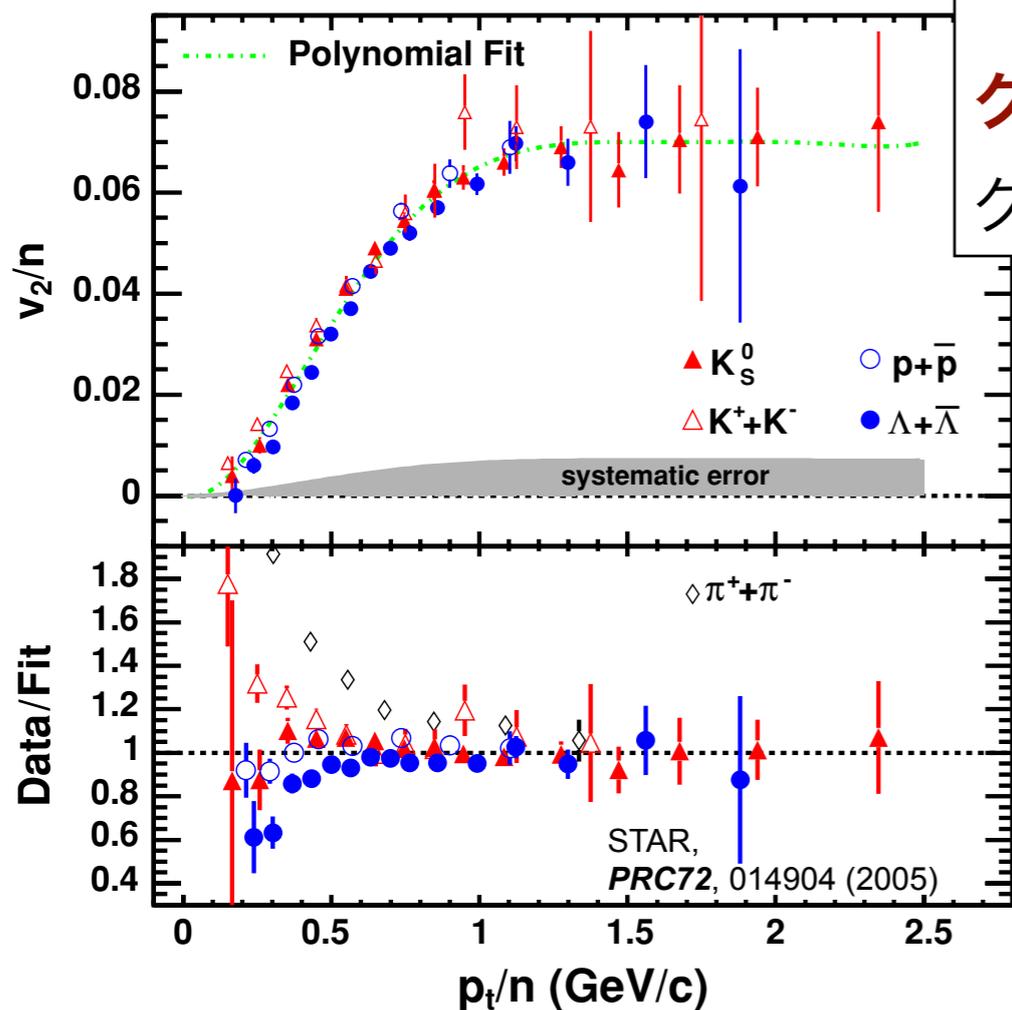


大きな方位角異方性
クォーク数スケーリング
クォークの非閉じ込め？



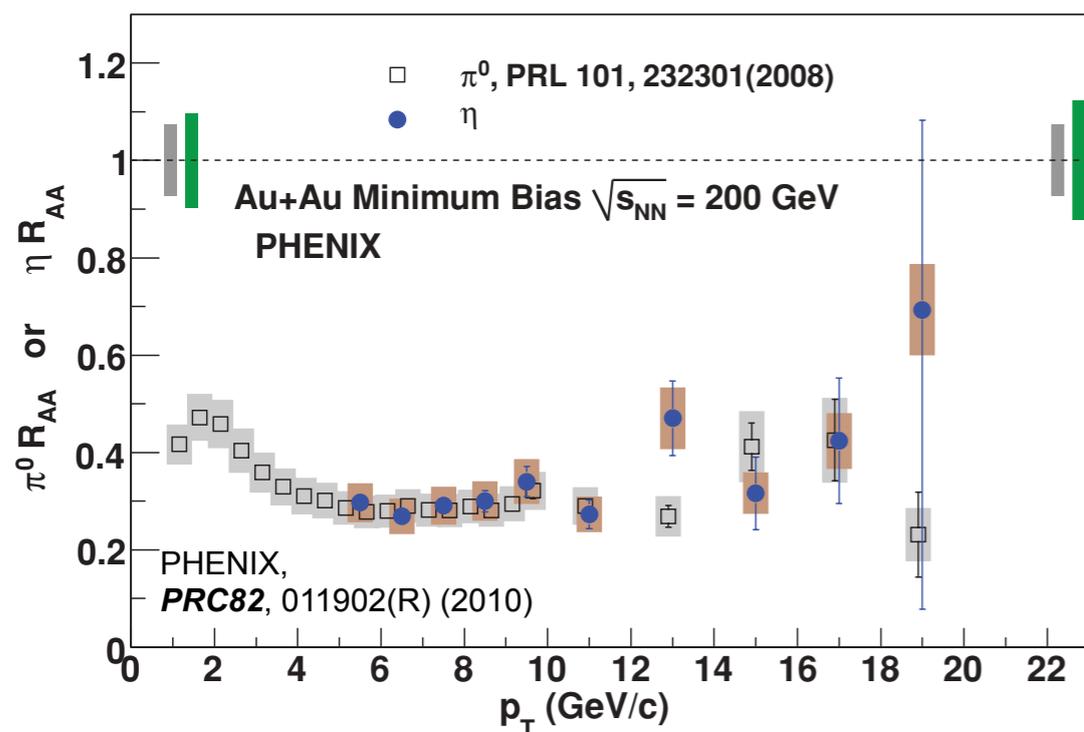
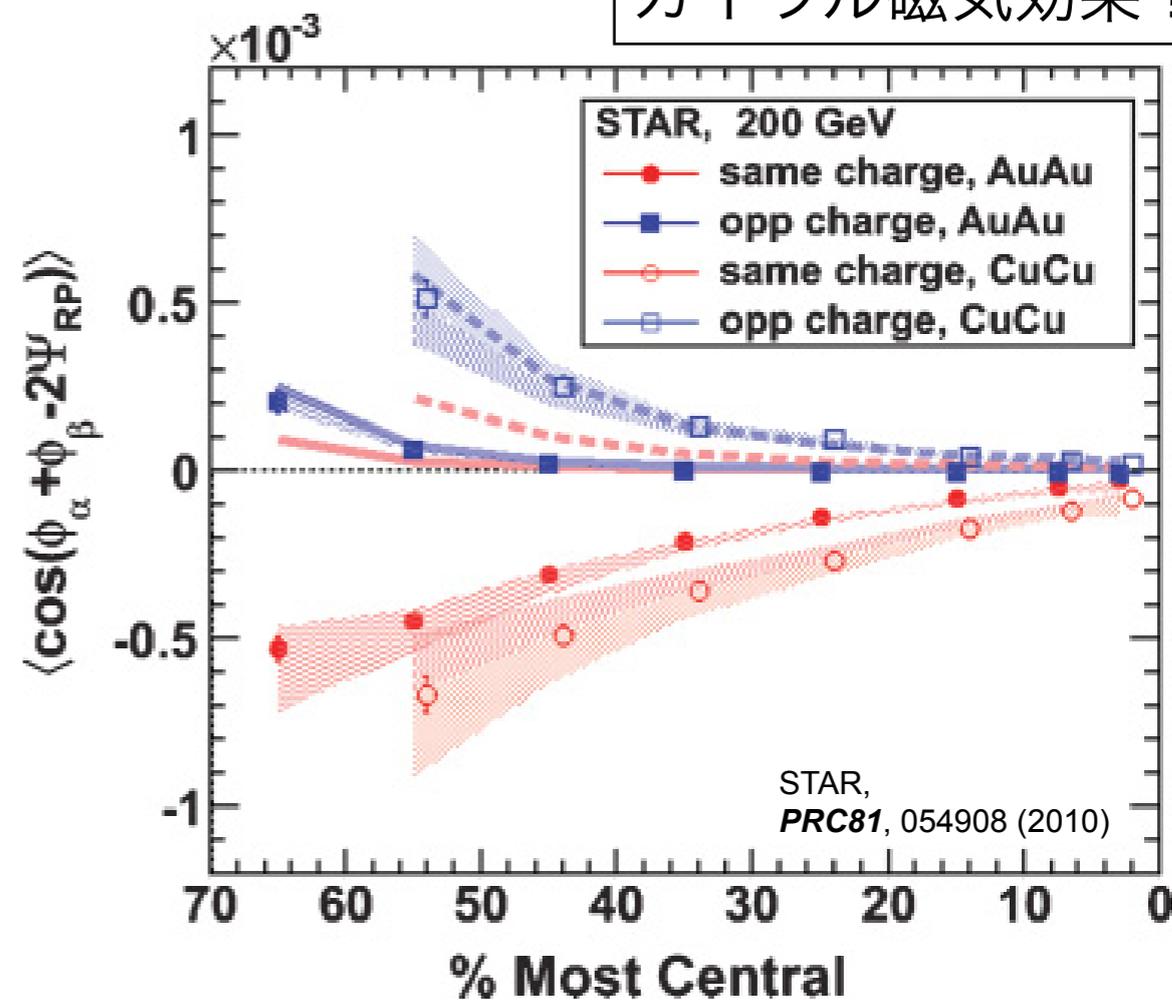
高運動量メソンの抑制
パートンエネルギー損失

QGP生成のシグナル



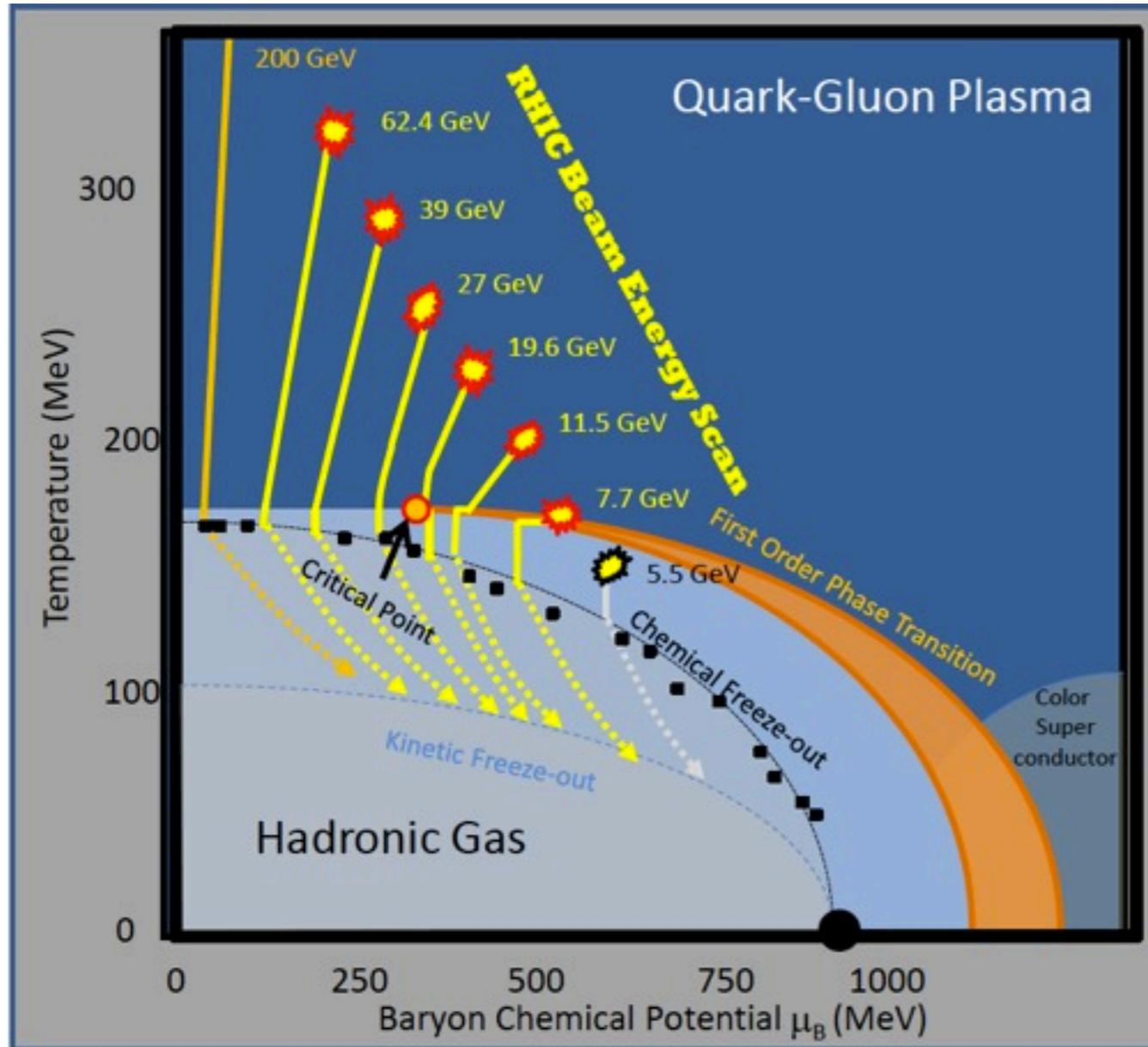
大きな方位角異方性
クォーク数スケーリング
クォークの非閉じ込め？

電荷異方性の揺らぎ
カイラル磁気効果？



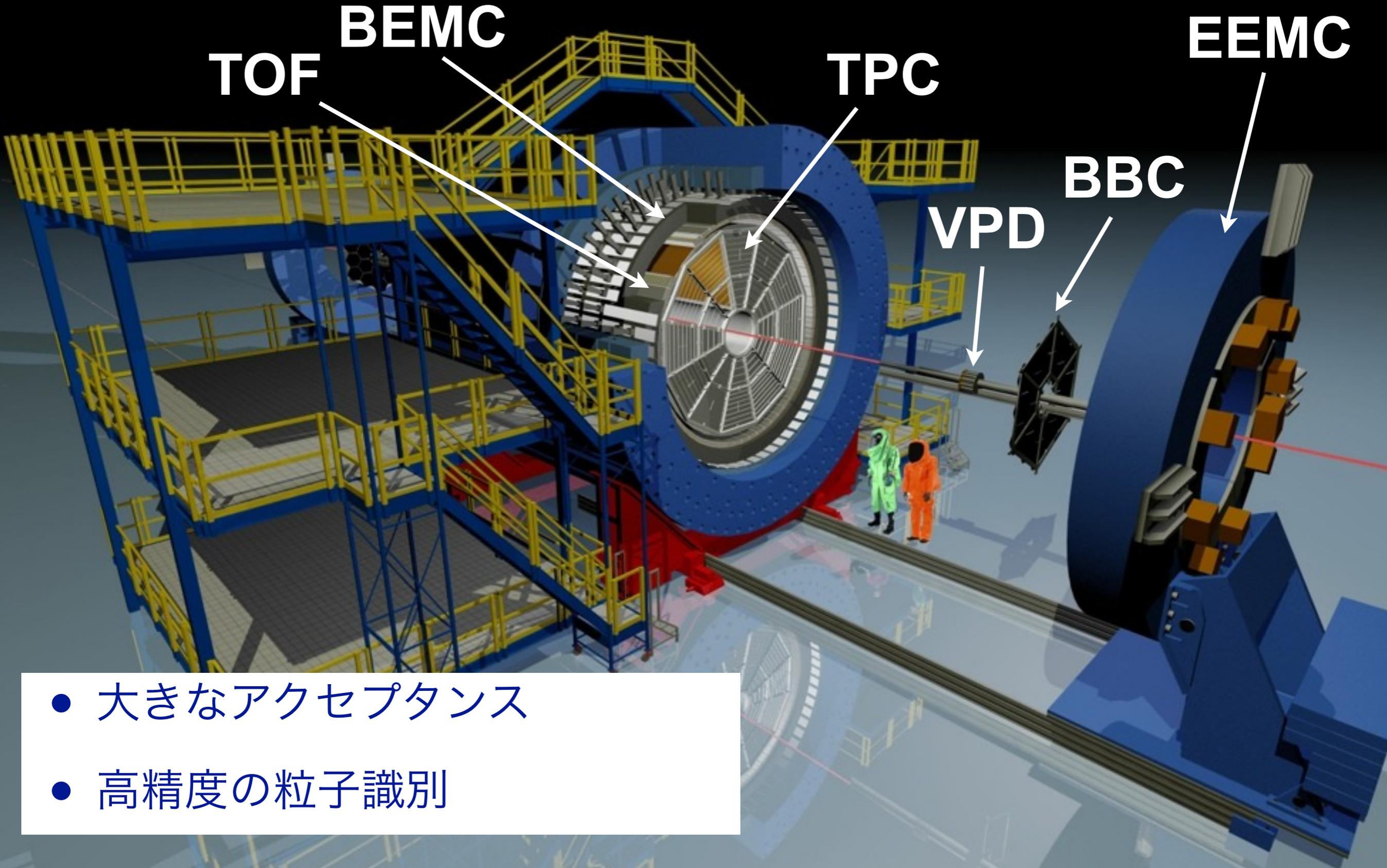
高運動量メソンの抑制
パートンエネルギー損失

観測量



- QGP生成シグナルの消失
 - ▶ 方位角異方性のクォーク数スケーリング
 - ▶ 高横運動量ハドロンの抑制
 - ▶ 電荷異方性の揺らぎ
- 一次相転移のシグナル (?)
 - ▶ 指向的方位角異方性
 - ▶ 同一粒子相関の方位角異方性
- QCD特異点の発見
 - ▶ (保存量の)揺らぎ

Solenoidal Tracker At RHIC

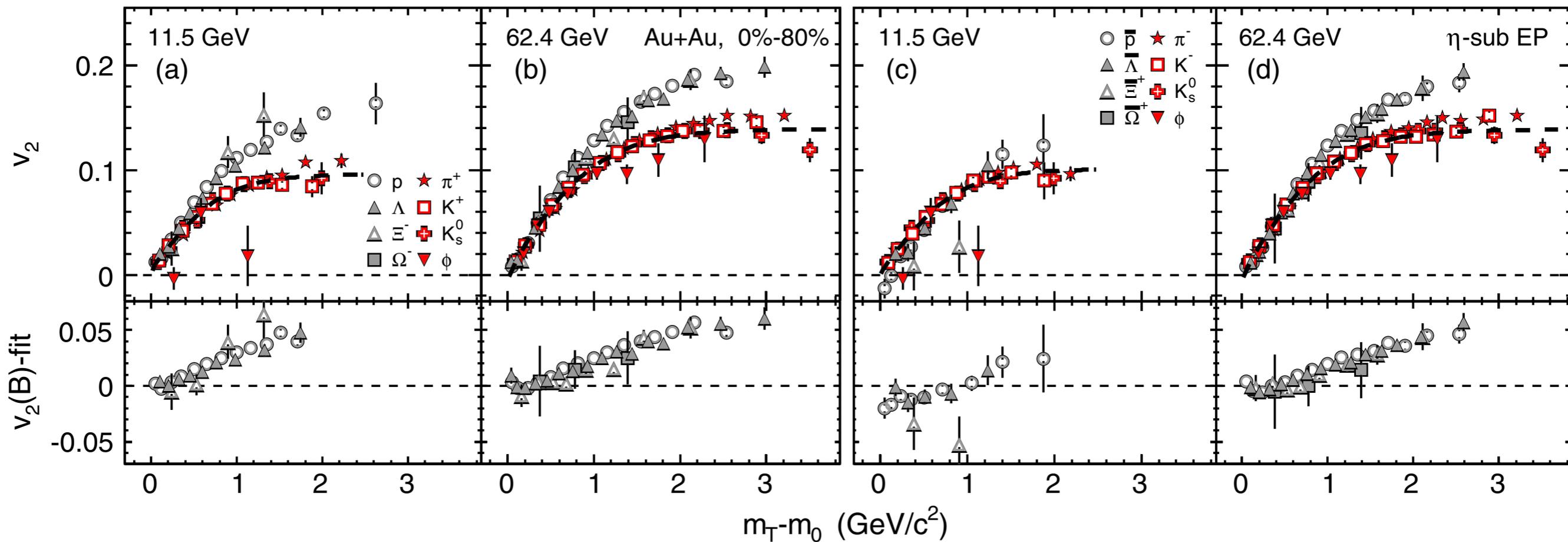


- 大きなアクセプタンス
- 高精度の粒子識別

**QGFP生成シグナル
はどこで消えるか？**

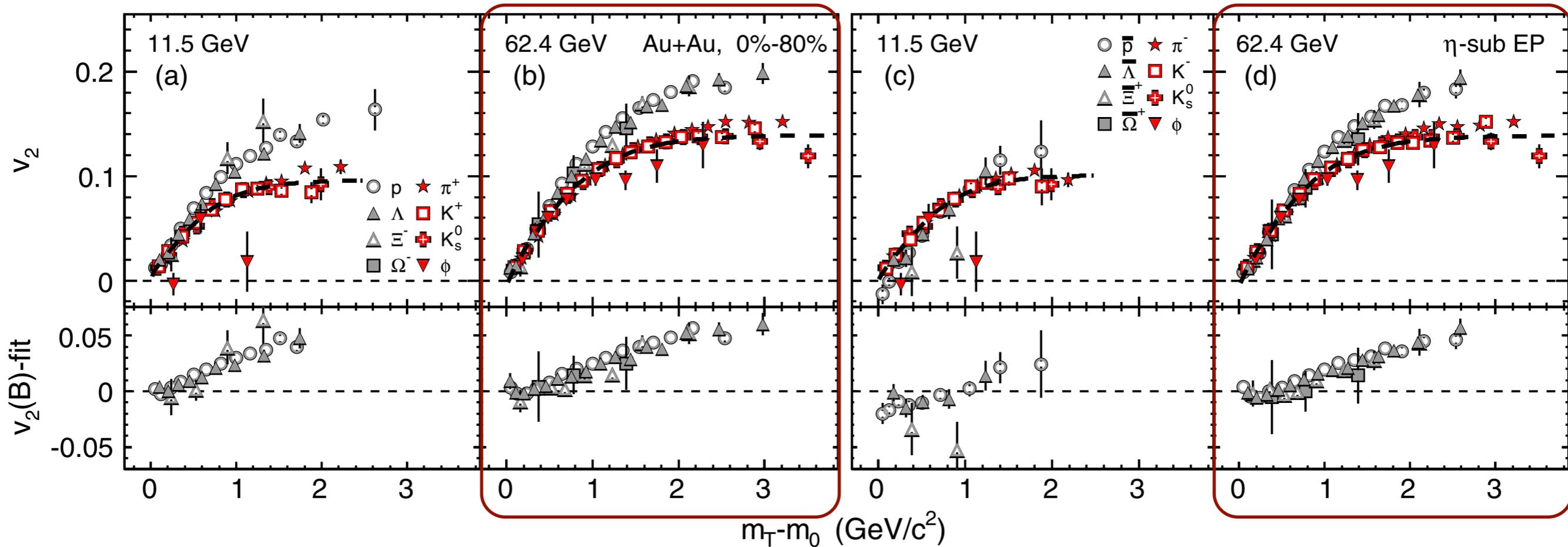
クォーク数スケーリングの破れ

STAR *PRL*110, 143201 (2013)
see also *PRC*88, 014902 (2013)



クォーク数スケーリングの破れ

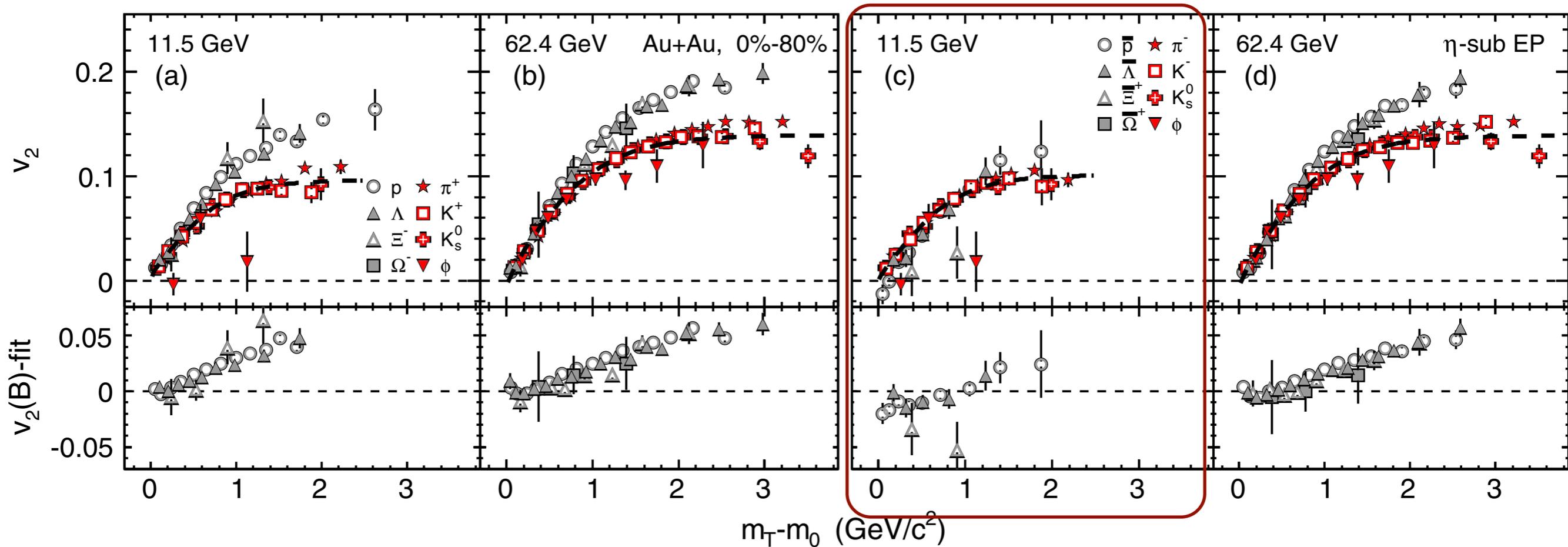
STAR *PRL*110, 143201 (2013)
see also *PRC*88, 014902 (2013)



- メソン・バリオンの分岐 - クォーク数スケーリング
 - ▶ 粒子・反粒子の違いはなし

クォーク数スケーリングの破れ

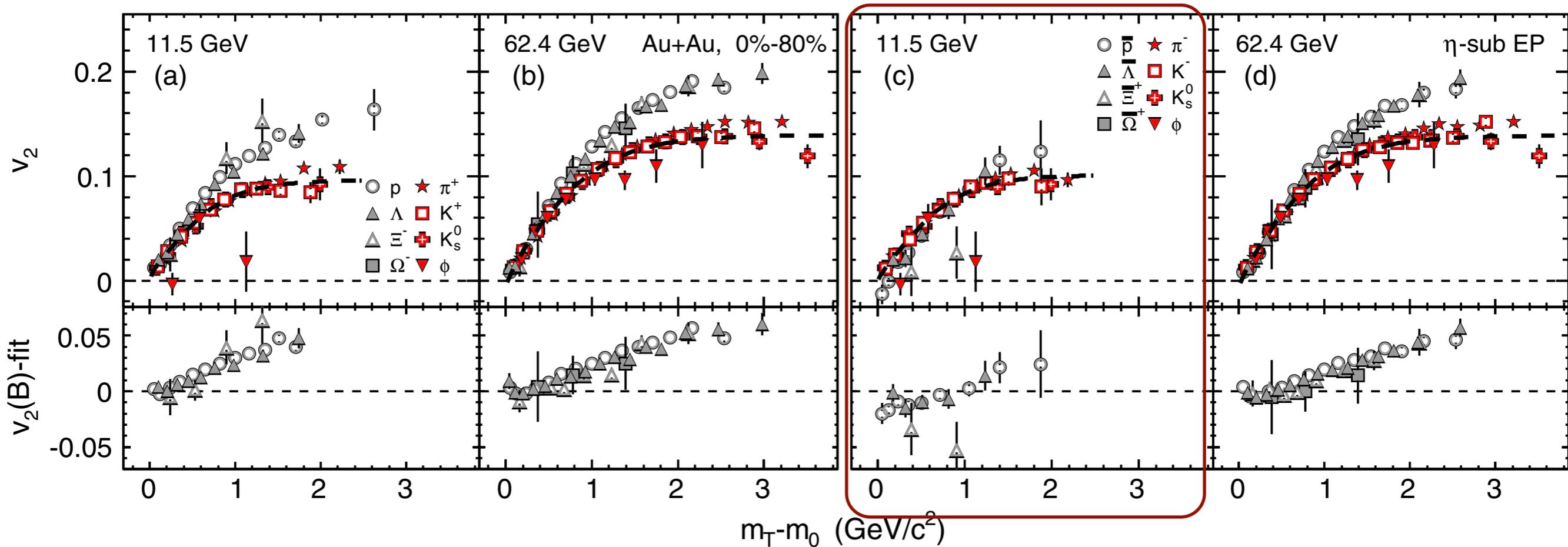
STAR *PRL*110, 143201 (2013)
see also *PRC*88, 014902 (2013)



- メソン・バリオンの分岐 - クォーク数スケーリング
 - ▶ 粒子・反粒子の違いはなし
- メソン・バリオンで同程度の v_2 @11.5 GeV (スケーリング前)

クォーク数スケーリングの破れ

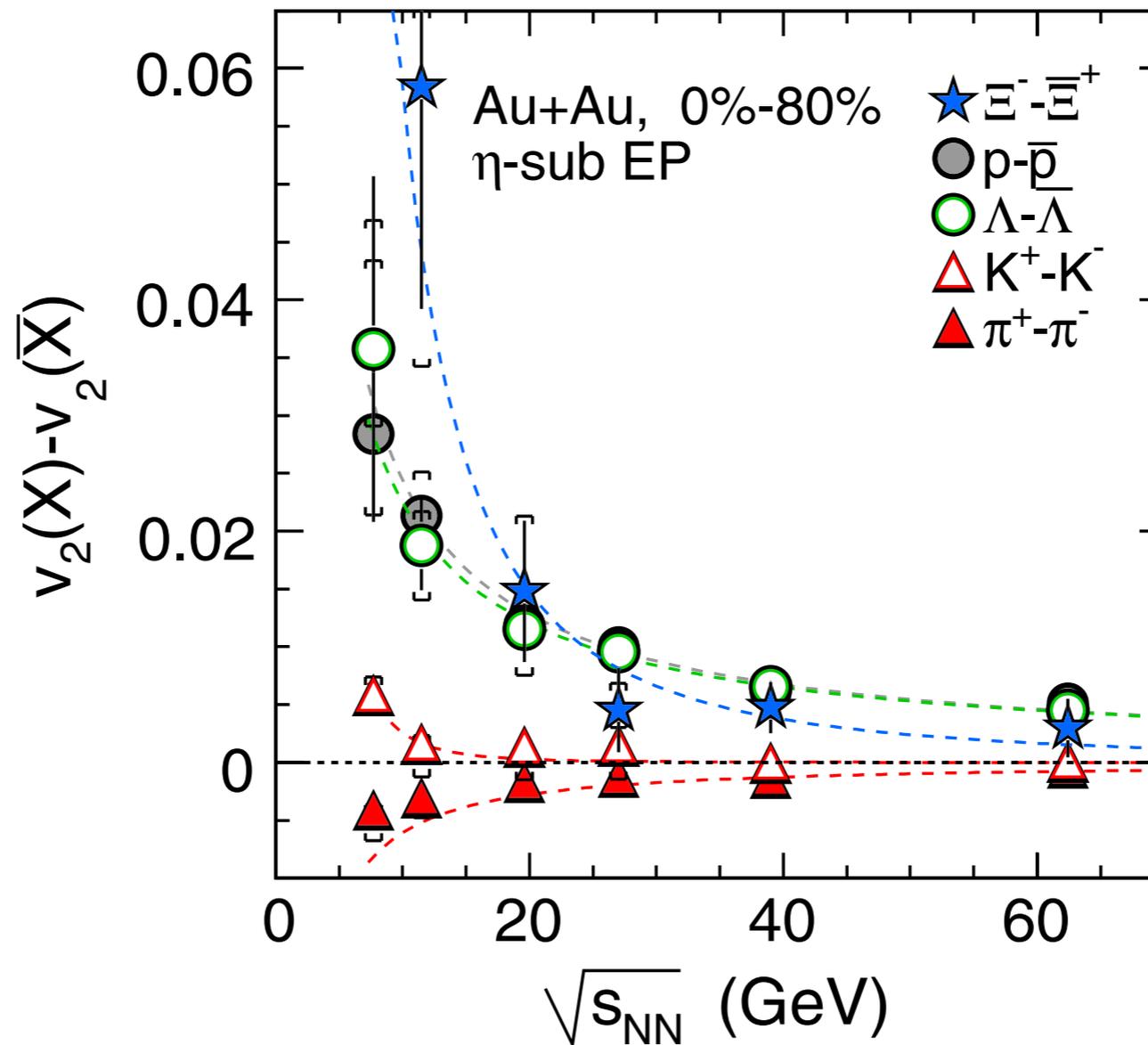
STAR *PRL*110, 143201 (2013)
see also *PRC*88, 014902 (2013)



- メソン・バリオンの分岐 - クォーク数スケーリング
 - ▶ 粒子・反粒子の違いはなし
- メソン・バリオンで同程度の v_2 @11.5 GeV (スケーリング前)
- クォーク数スケーリングは粒子・反粒子間では破れている

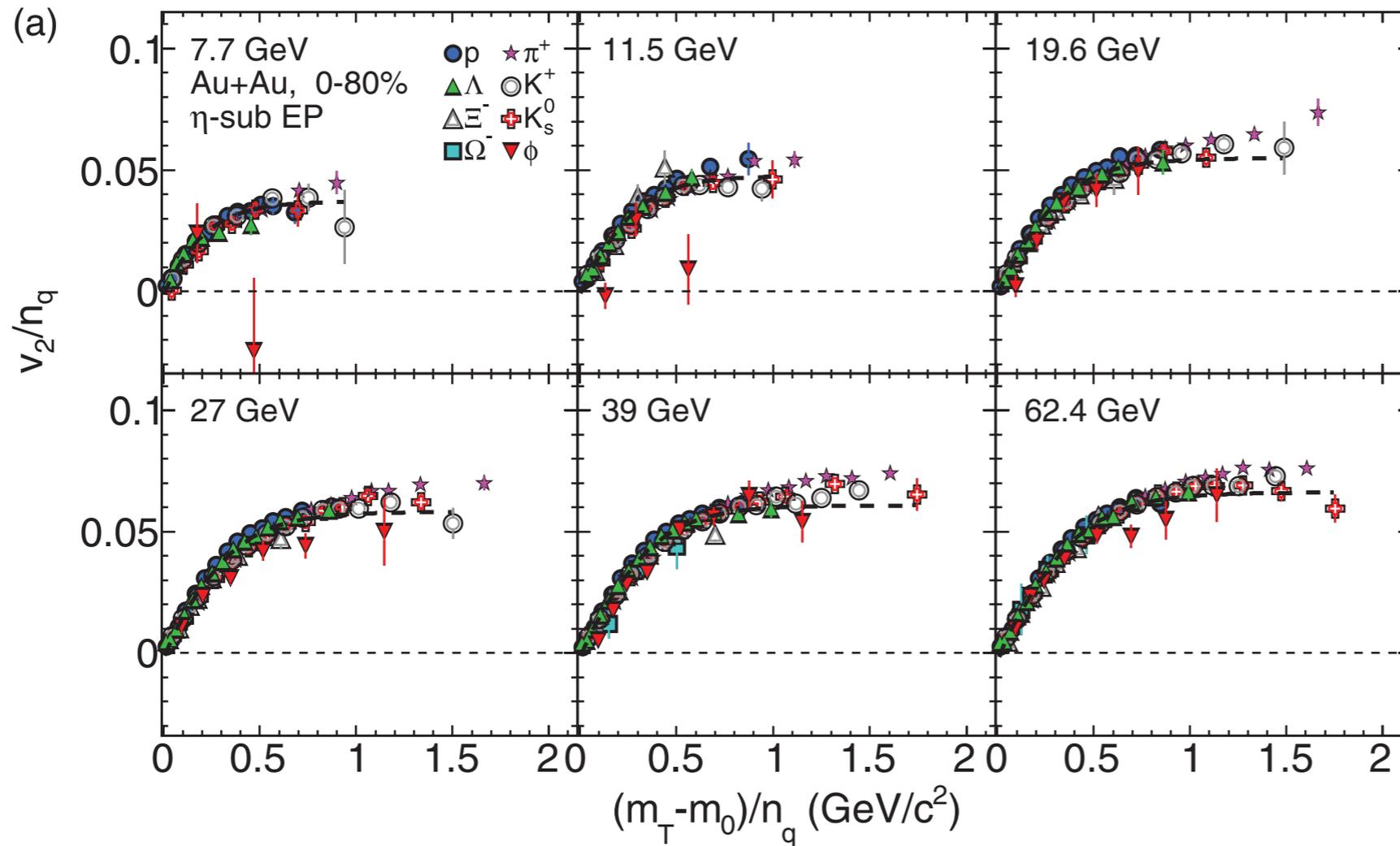
バリオン・反バリオンの差

STAR *PRL*110, 143201 (2013)
see also *PRC*88, 014902 (2013)



- 粒子・反粒子の差は低エネルギーでより大きい
- バリオンの差はメソンに比べて大きい

(反)粒子毎のスケーリング

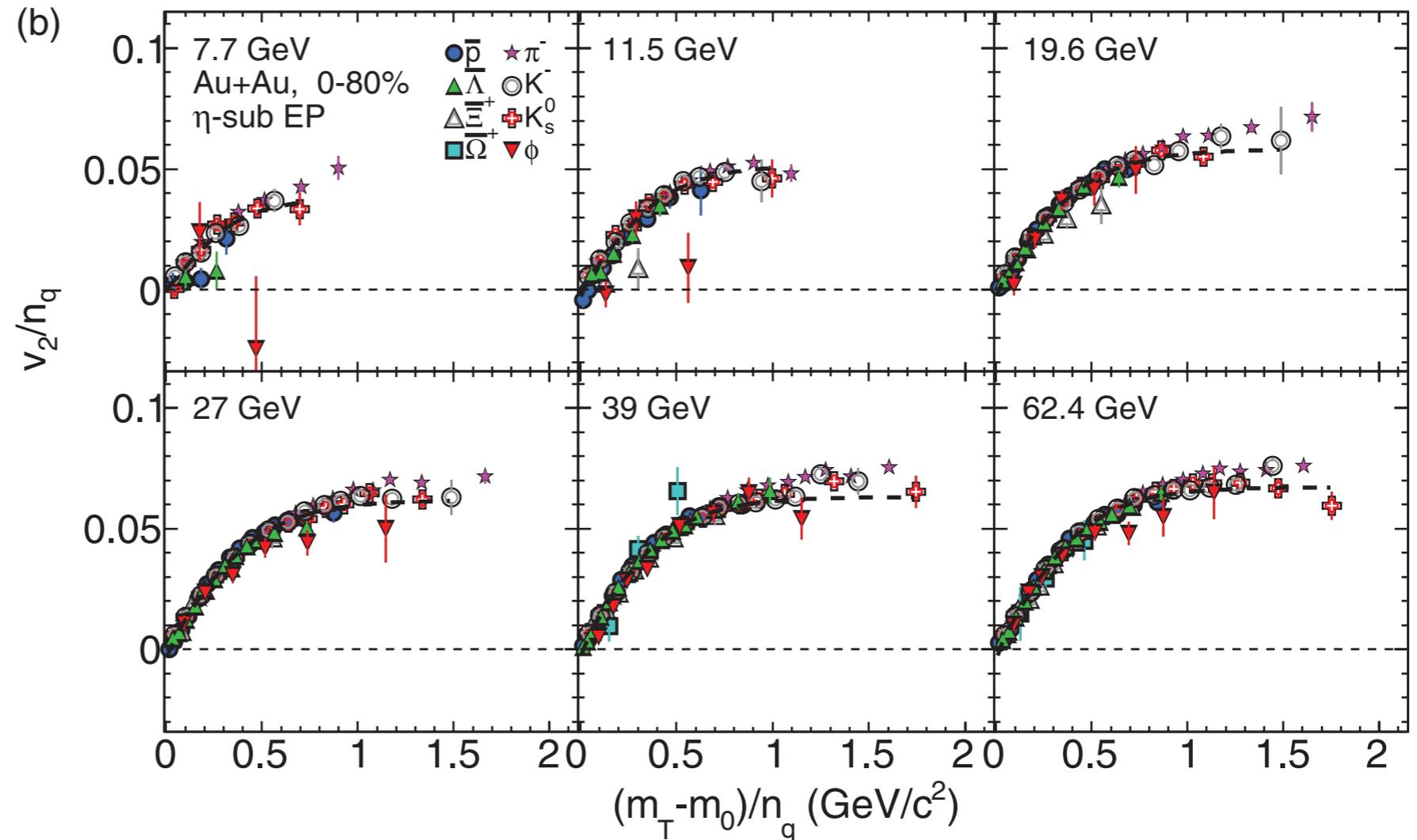


STAR *PRC*88, 014902 (2013)

- (反)粒子毎に見るとスケーリングはよく成り立つ？
- ▶ 7.7 GeVでもQGP？ スケーリングはハドロン相起源？

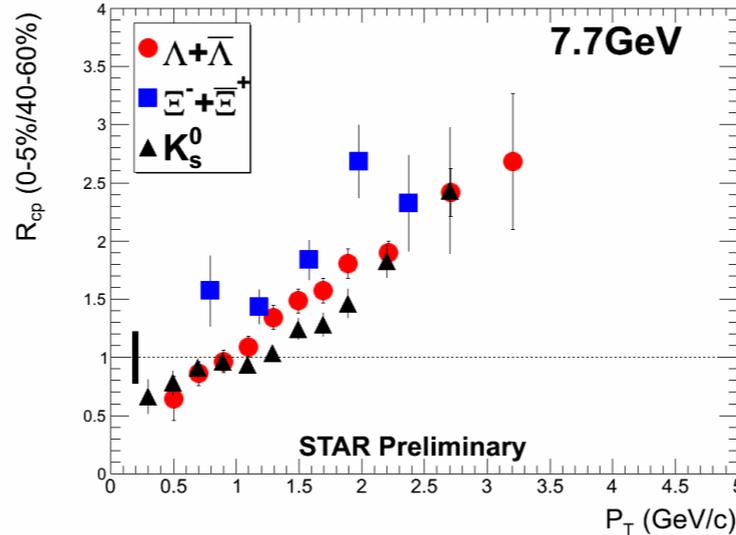
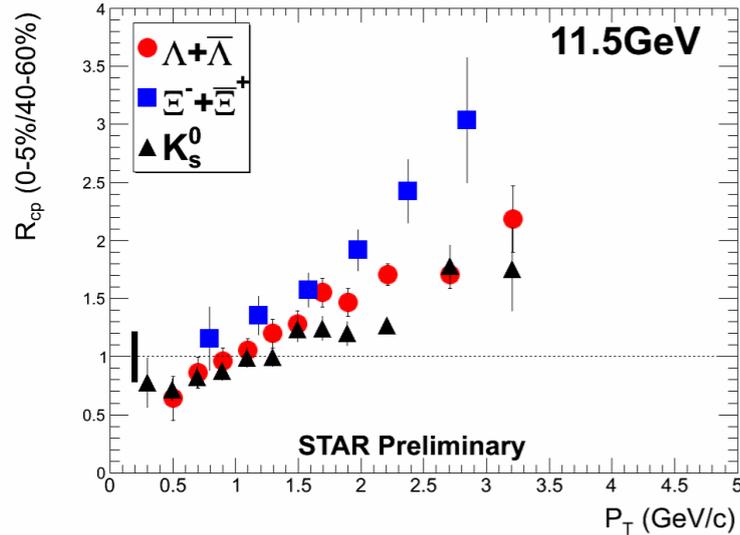
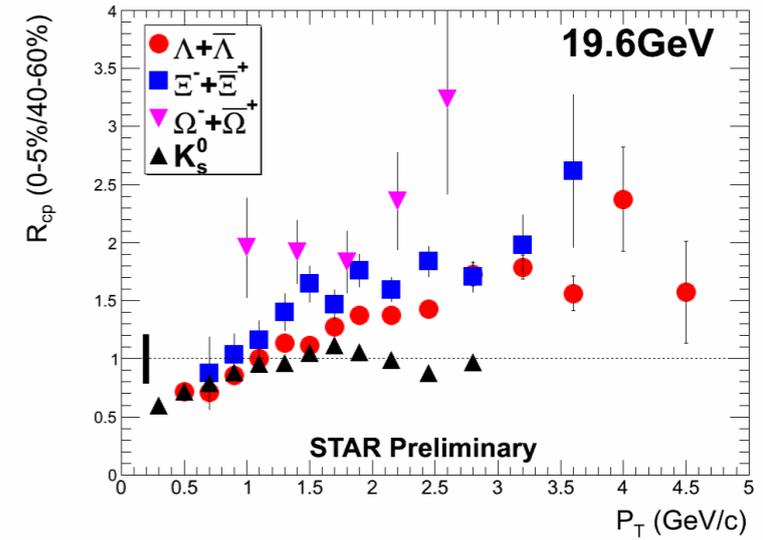
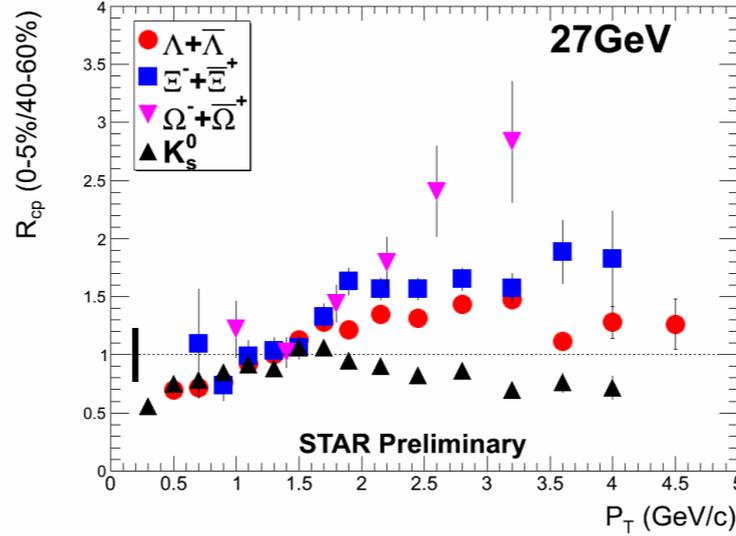
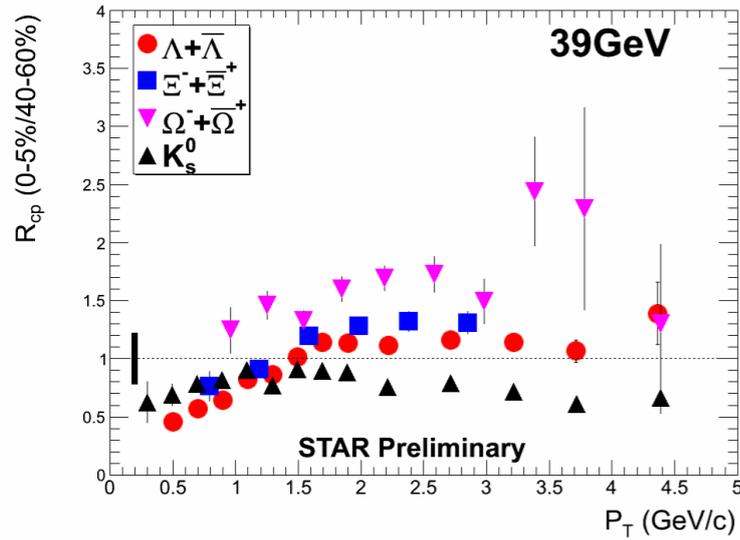
(反)粒子毎のスケーリング

STAR *PRC88*, 014902 (2013)



- (反)粒子毎に見るとスケーリングはよく成り立つ？
 - ▶ 7.7 GeVでもQGP？ スケーリングはハドロン相起源？

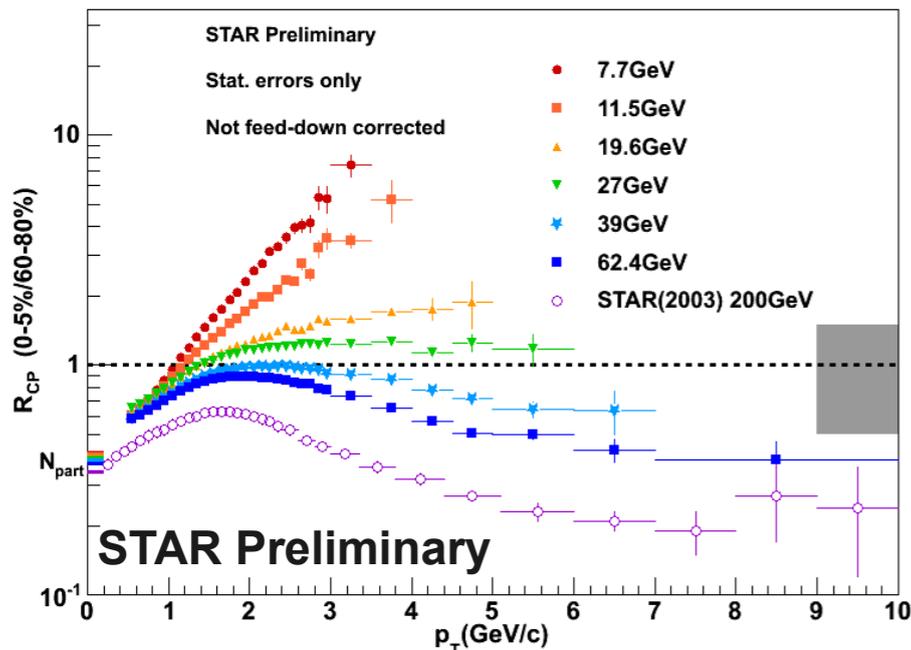
R_{cp} 抑制の消失



Statistical error only

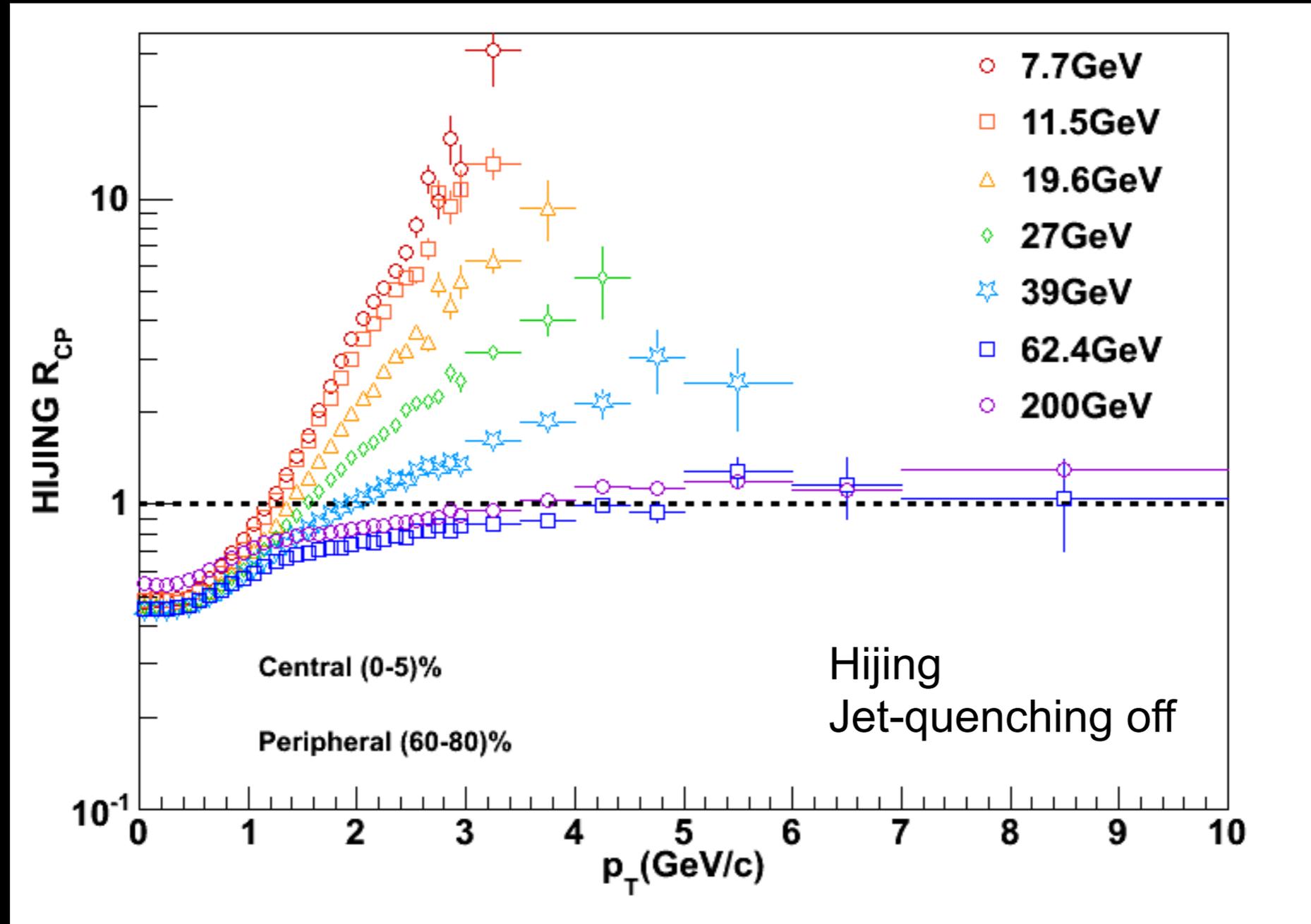
$K_S^0, \Lambda, \Xi, R_{CP}$:
(0~5%)/(40~60%)

ΩR_{CP} in 19.6 and 27 GeV :
(0~10%)/(40~60%)



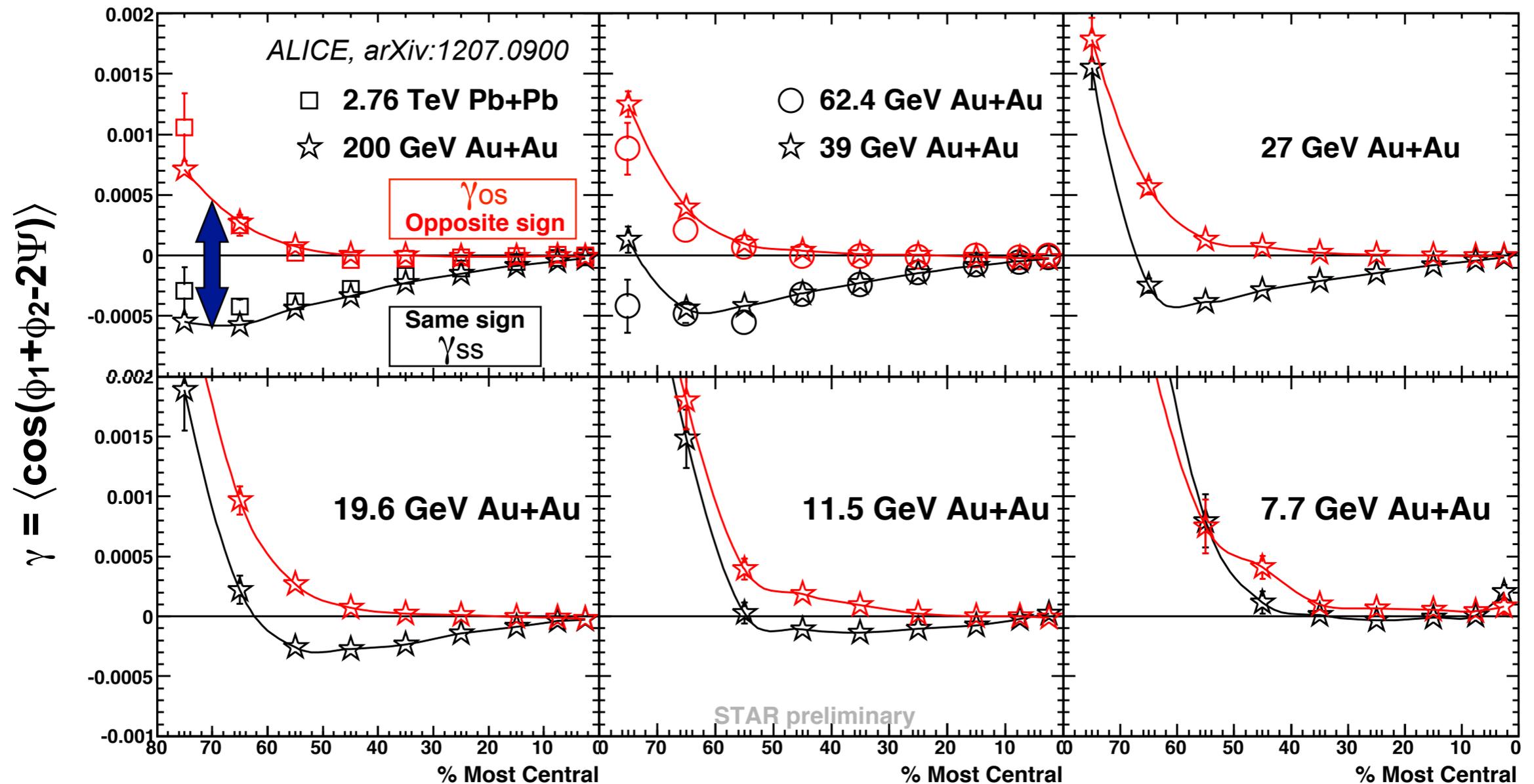
- 200 GeVでは大きな抑制
- R_{cp} は低エネルギーで増加 (>1)
- バリオン・メソン分岐も低エネルギーで消失

そもそもジェットがない？



- 低エネルギーではハード散乱断面積が小さい
- Hijing + クローニン効果で定性的には合う

電荷異方性の消失

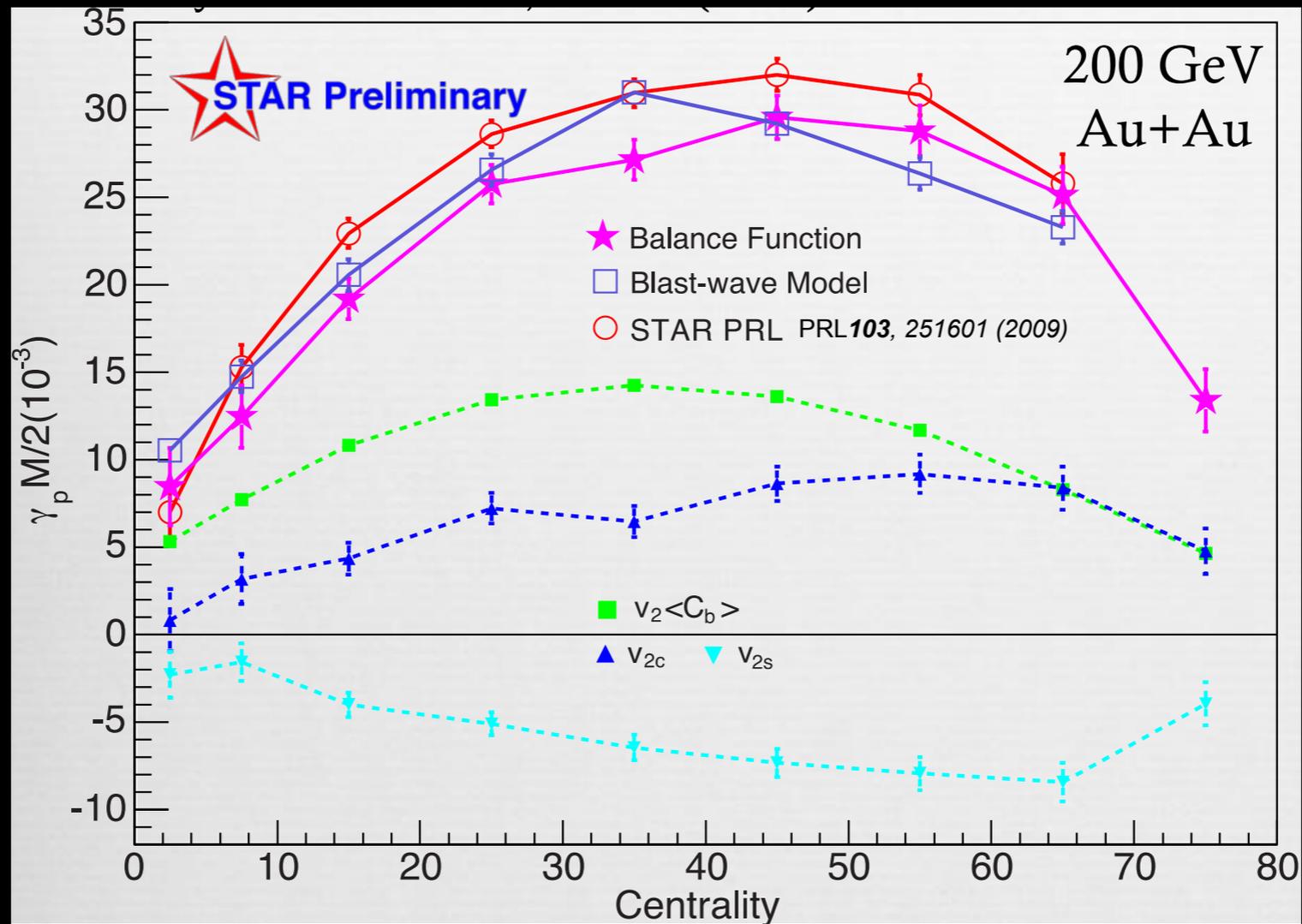


- 電荷異方性 ($\gamma_{os}-\gamma_{ss}$) @ 200 GeV

- ▶ カイラル磁気効果？

- エネルギーと共に異方性の減少、11.5 GeV以下では消失

フロー起源？

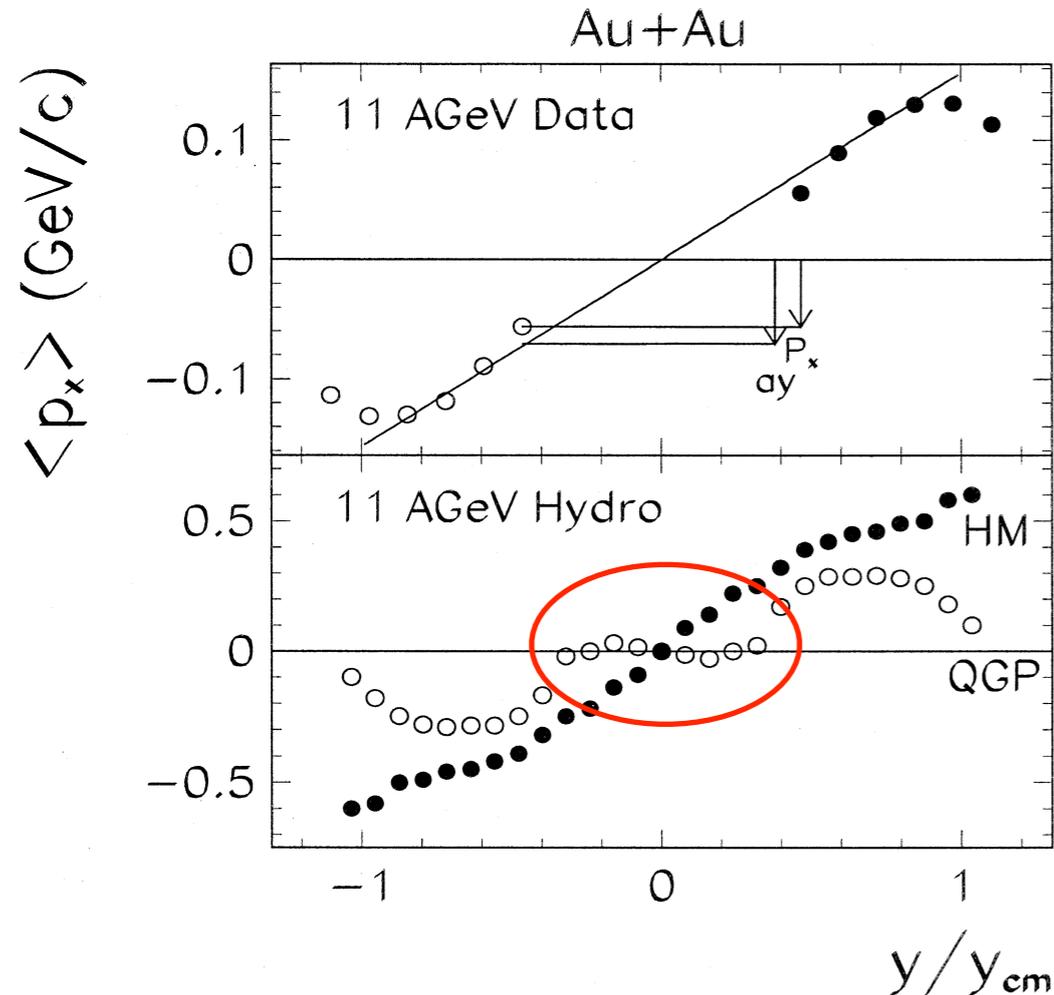


- 200 GeVの結果はBlast-wave modelでも説明可能
 - ▶ 局所電荷保存＋フロー
- 低エネルギーでも説明できるか？

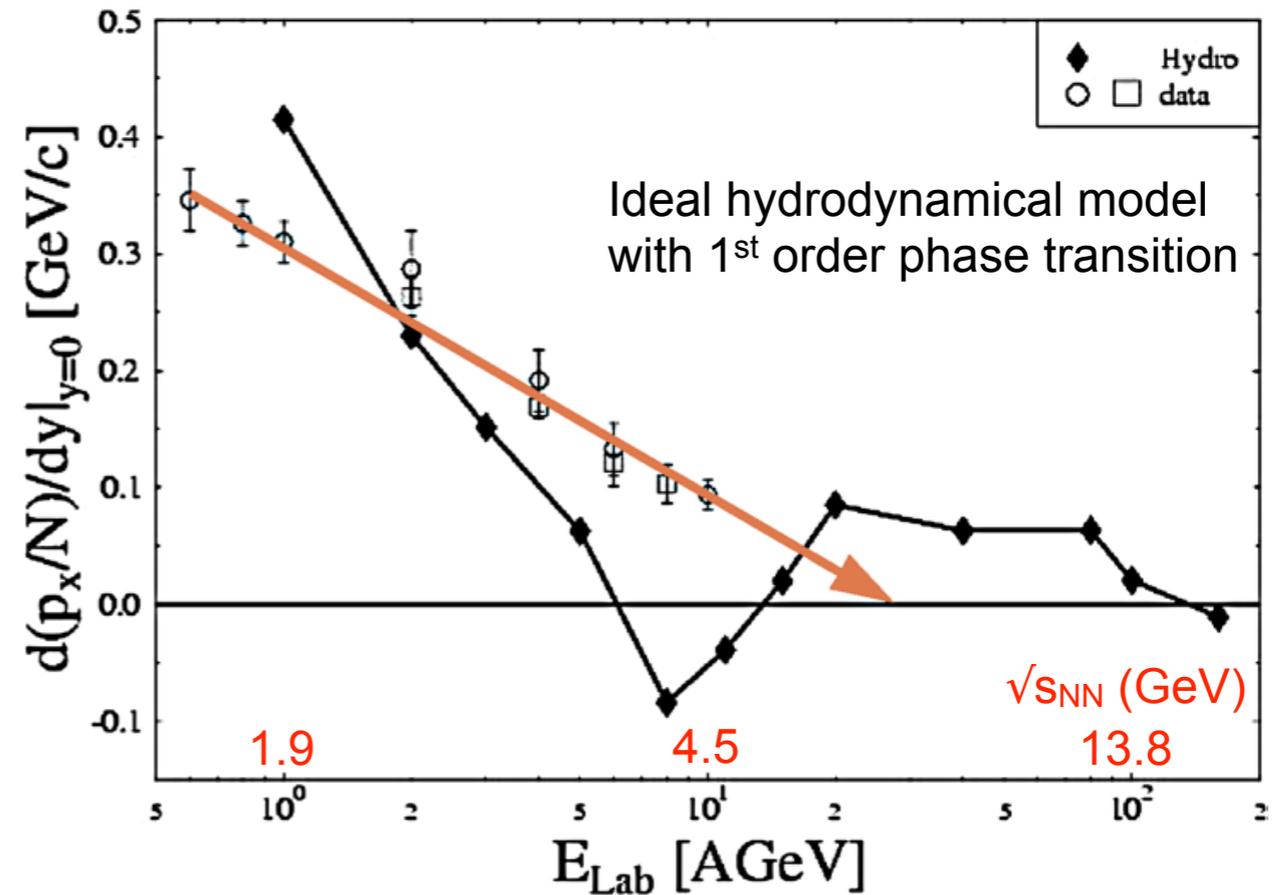
一次相転移の シグナル探索

~10年前の予想

L. P. Csernai, D. Rohrlich, *PLB458*, 454 (1999)

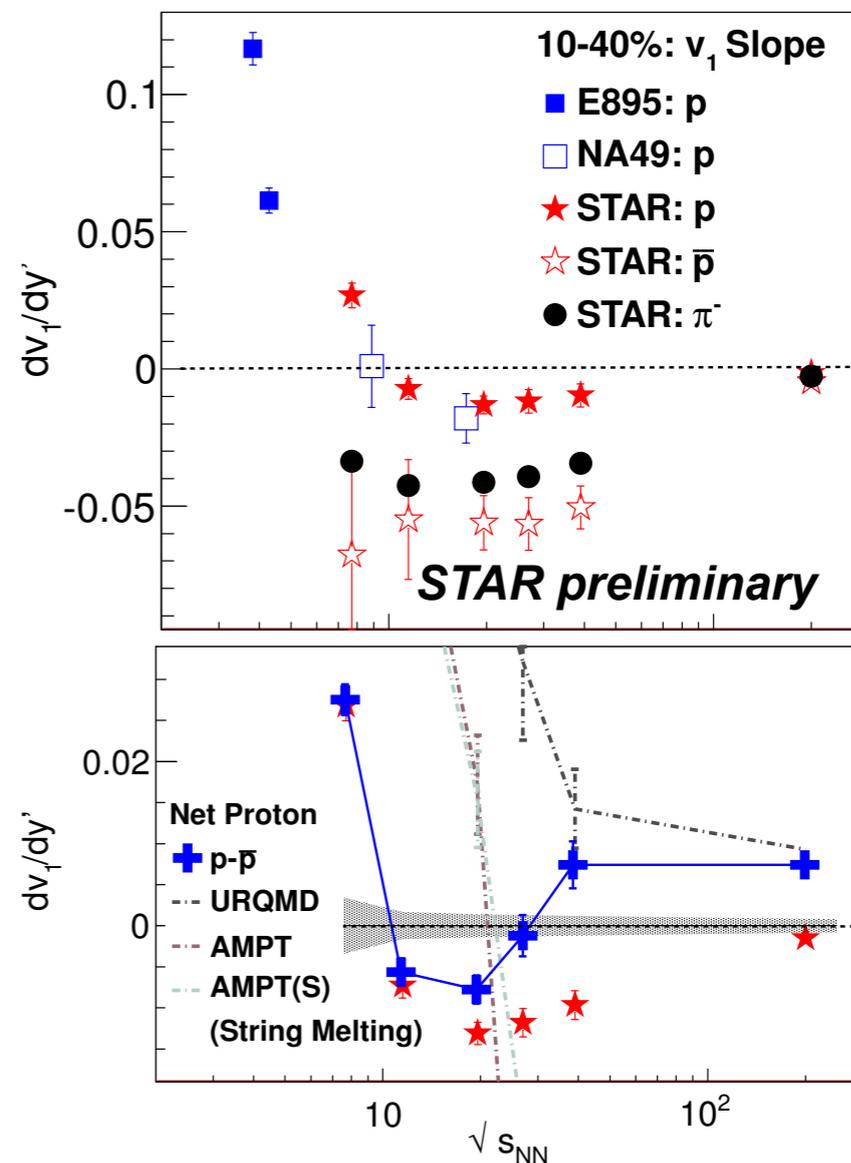
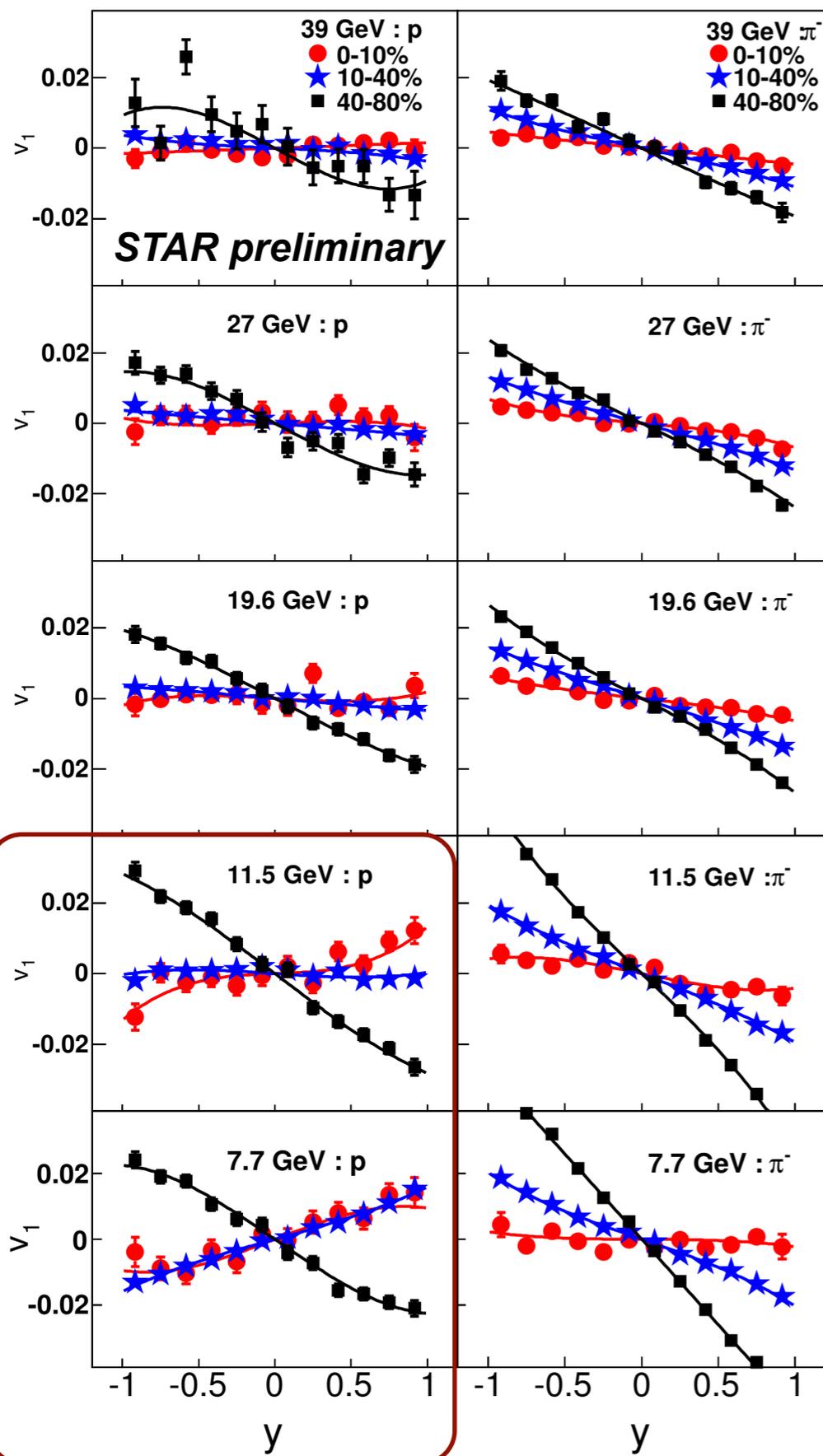


H. Stocker, *NPA750*, 121 (2005)



- 指向的異方性 (directed flow; v_1)は一次相転移で特徴的な振る舞い
 - ▶ v_1 で見えたら v_2 で見えてもおかしくない
- 理想流体(一次相転移)の計算では~ 4.5 GeVくらいで v_1 が最小

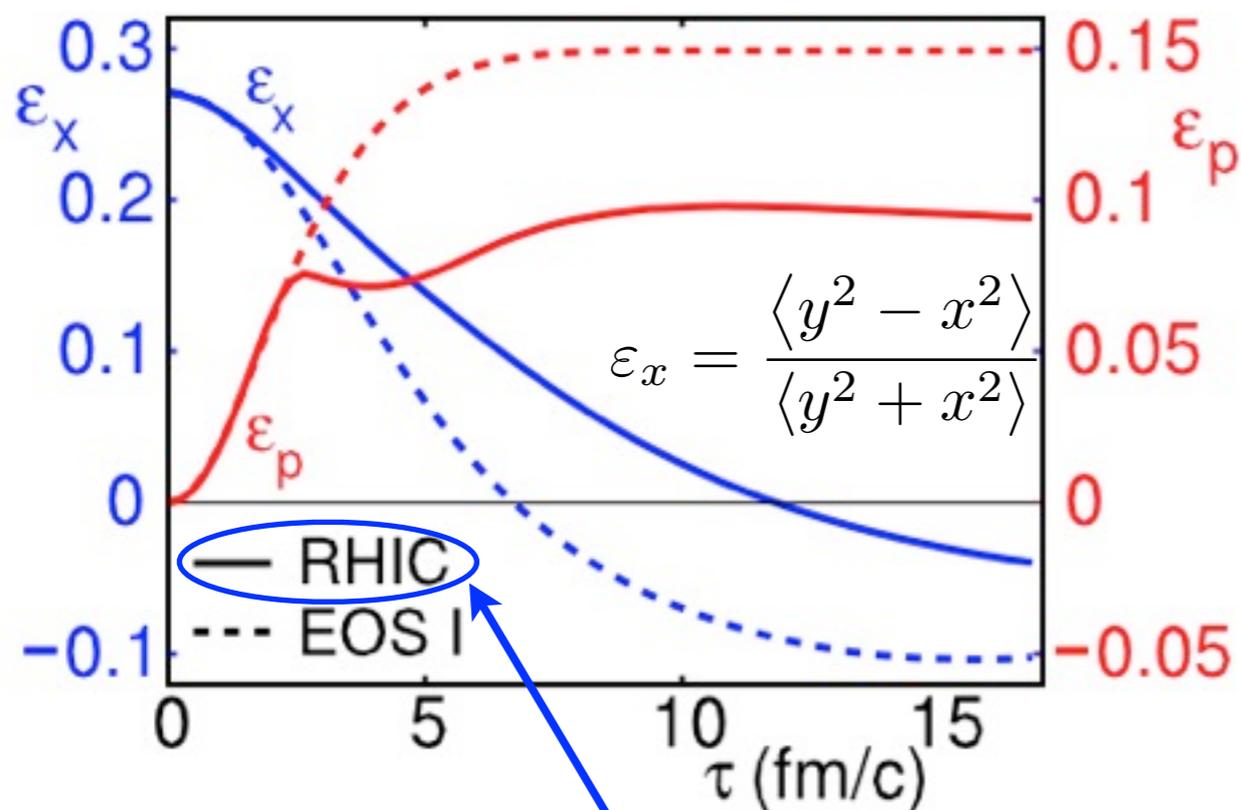
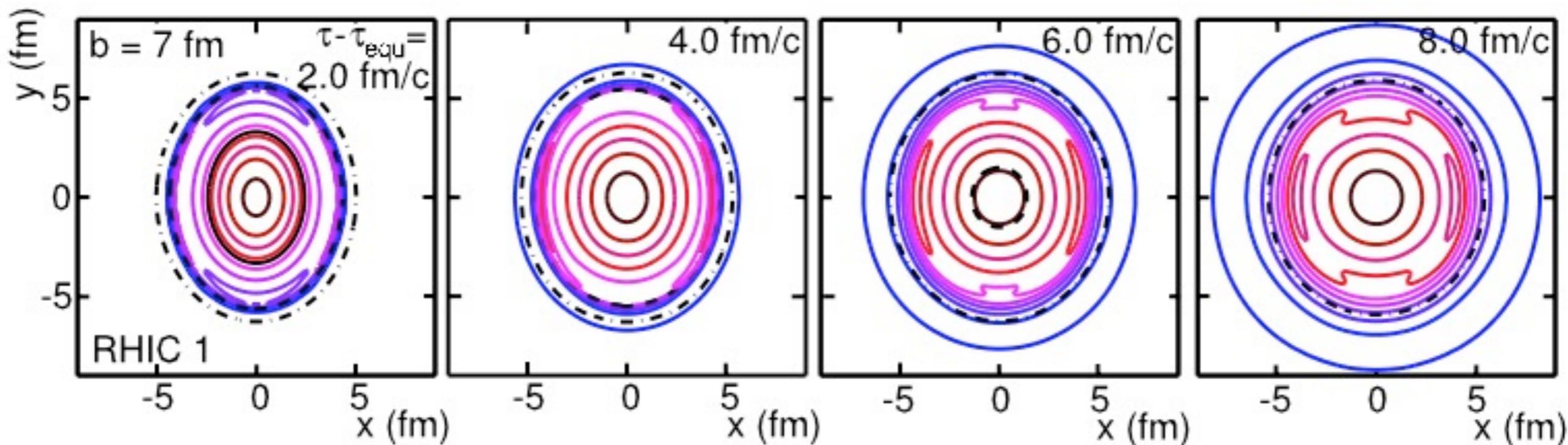
非単調的な振る舞い



- v_1 の傾き (dv_1/dy')は負
 - ▶ 低エネルギーの陽子以外
- net protonの dv_1/dy' は11.5 GeV付近で最小

初期異方性の時空発展

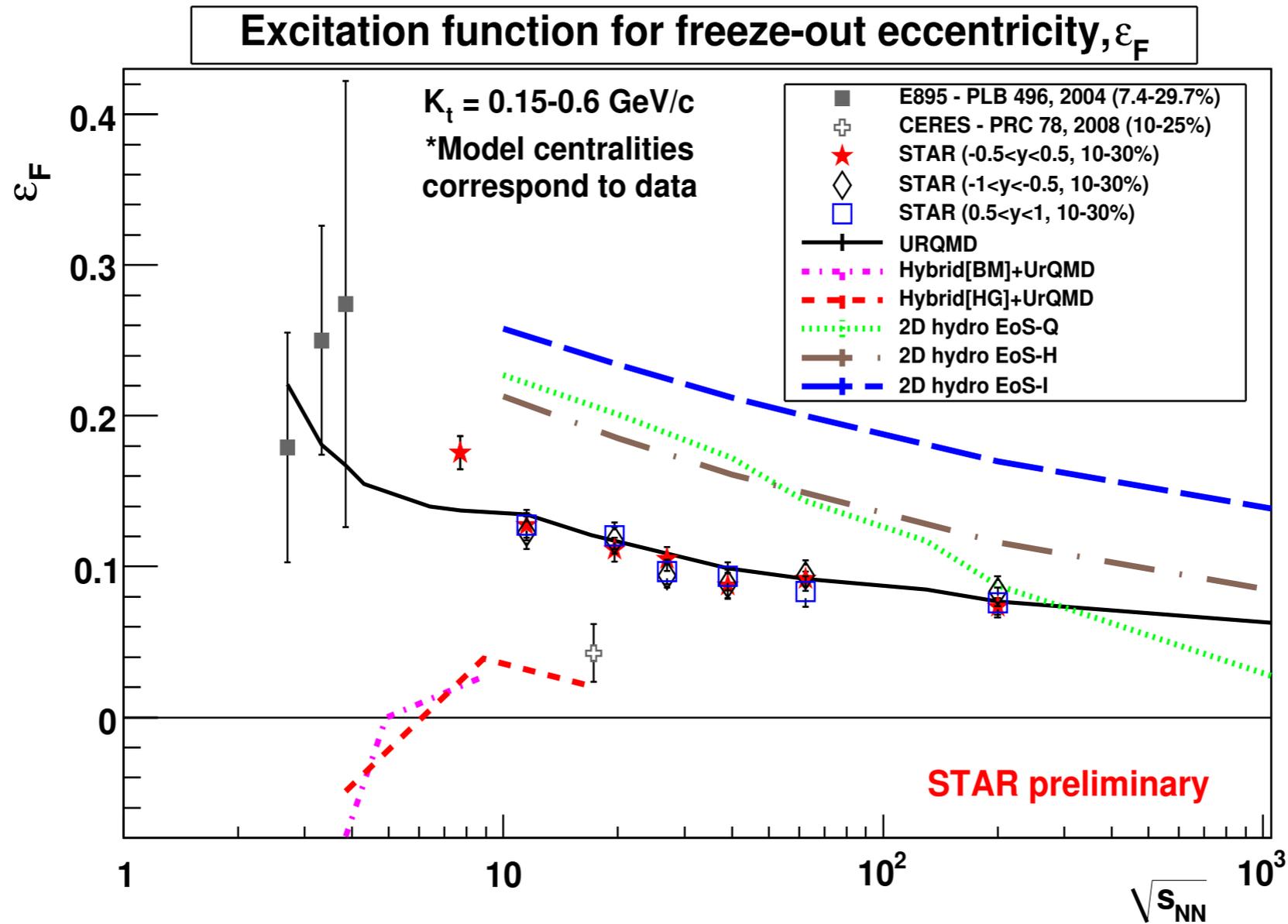
P. F. Kolb et al, PRC62, 054909 (2000)



- 幾何学的異方性は状態方程式に敏感
- 一次相転移のシグナル（かもしれない）

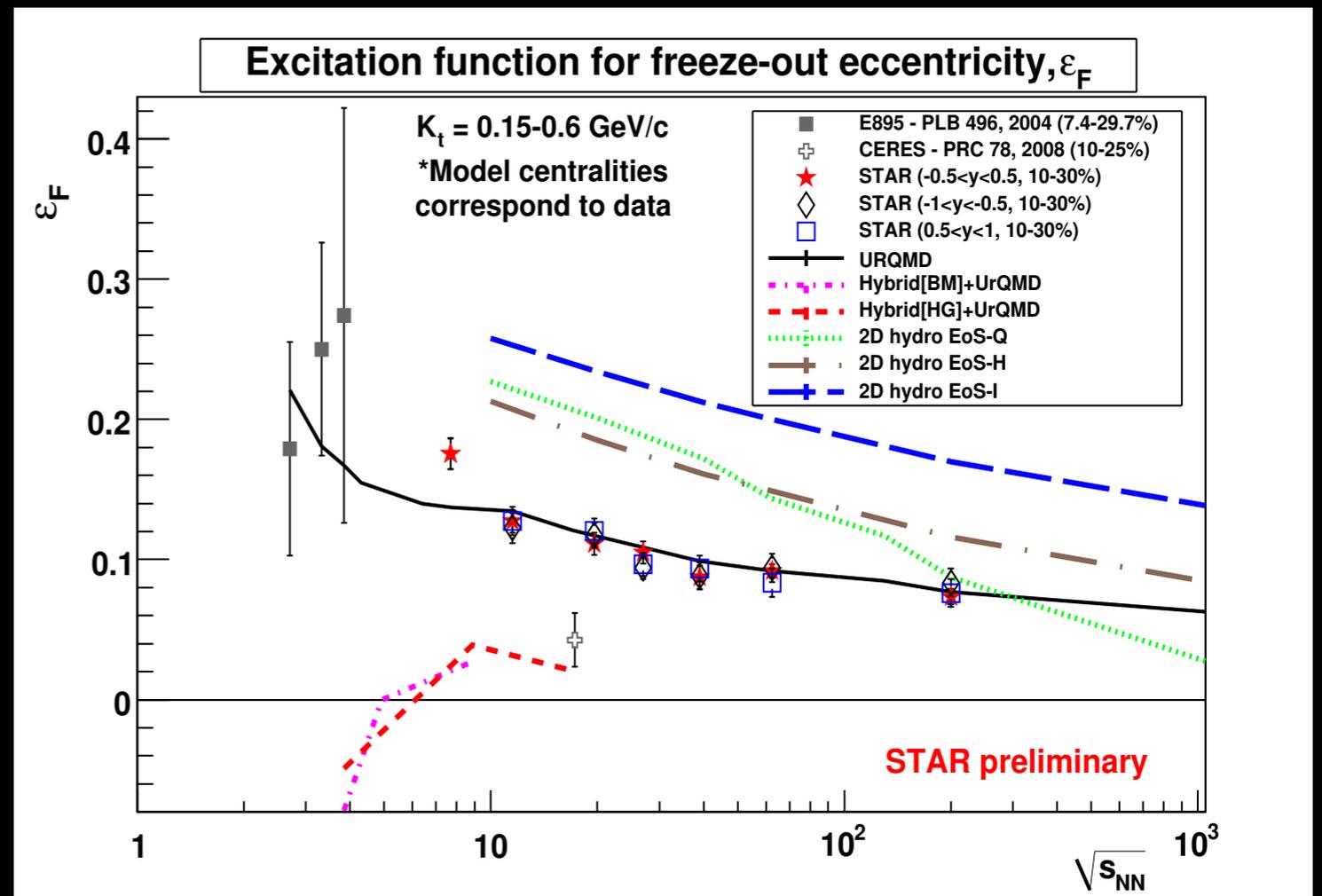
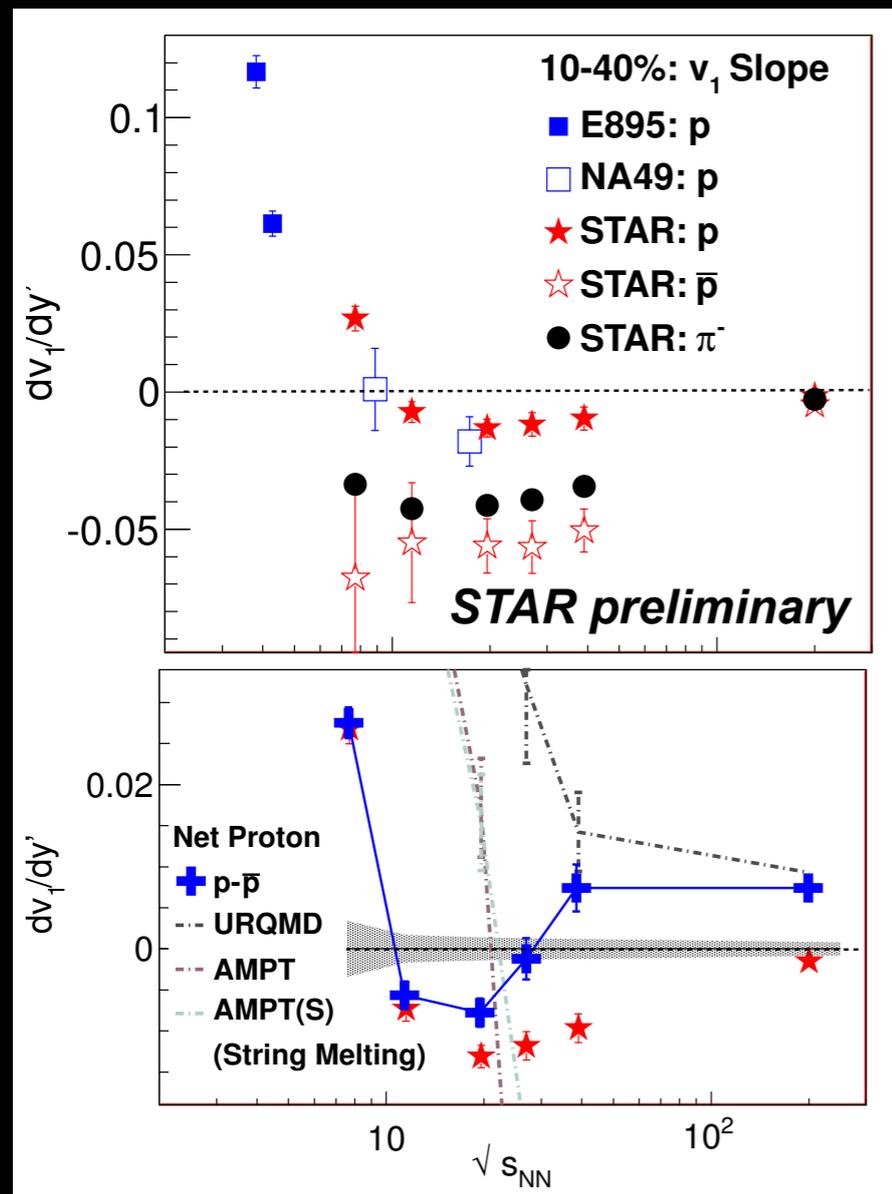
with 1st order phase transition

幾何学的異方性は単調減少



- パイ中間子で測った幾何学的異方性はエネルギーと共に単調減少、CERESのデータは再現できず
 - ▶ ラピディティ依存性はSTARのアクセプタンス内では見られない

相転移のシグナルか？



- 相転移のシグナルだとすると、HBTの結果はどう説明する？
 - ▶ そもそもHBTは相転移に敏感ではない？
- 逆にHBTを信じたら v_1 の結果をどう解釈する？

QCD特異点の 探索

高次モーメント(キュムラント)

- 特異点では(無限に大きな系で)

- ▶ 感受率と相関長が発散 → でも実験では測れない

- 観測量

- ▶ 保存量のモーメント (キュムラント) → 保存量の揺らぎ

- ▶ モーメントの積 (キュムラントの比) ↔ 感受率の比

$$\kappa_2 = \langle (\delta N)^2 \rangle \sim \xi^2, \kappa_3 = \langle (\delta N)^3 \rangle \sim \xi^{4.5}, \kappa_4 = \langle (\delta N)^4 \rangle - 3 \langle (\delta N) \rangle^2 \sim \xi^7$$

$$S_\sigma = \frac{\kappa_3}{\kappa_2} \sim \frac{\chi_3}{\chi_2}, K_\sigma^2 = \frac{\kappa_4}{\kappa_2} \sim \frac{\chi_4}{\chi_2}$$

* M. A. Stephanov, PRL102, 032301 (2009)

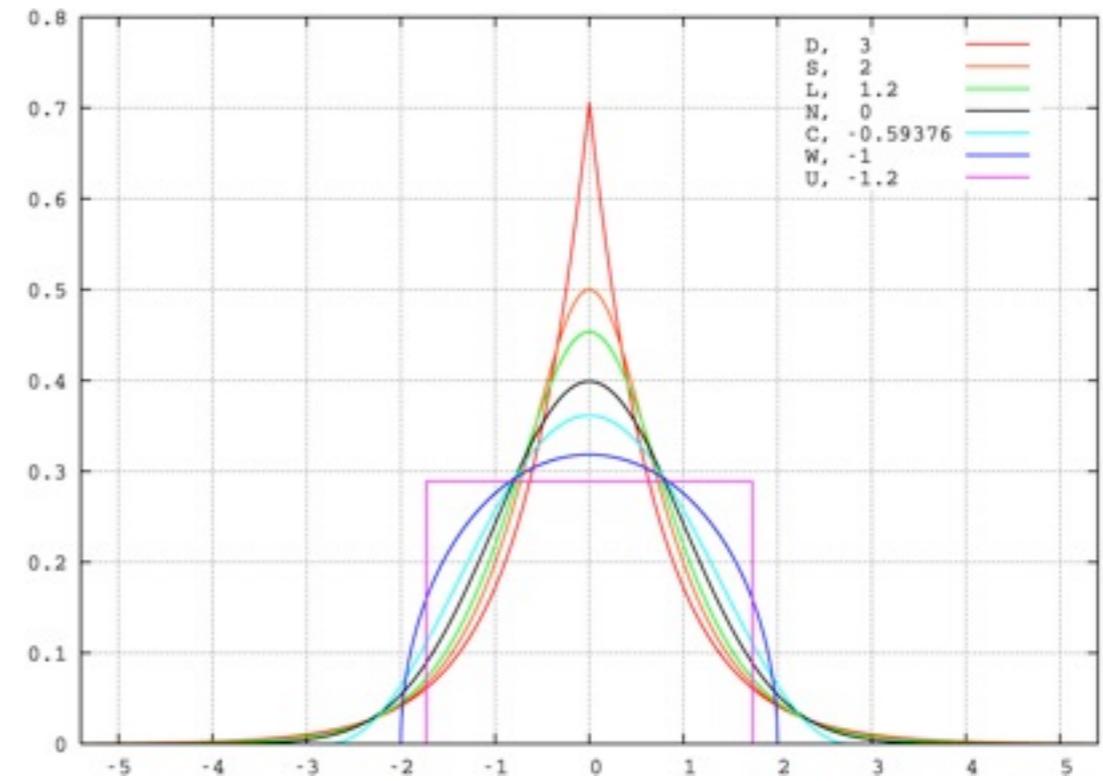
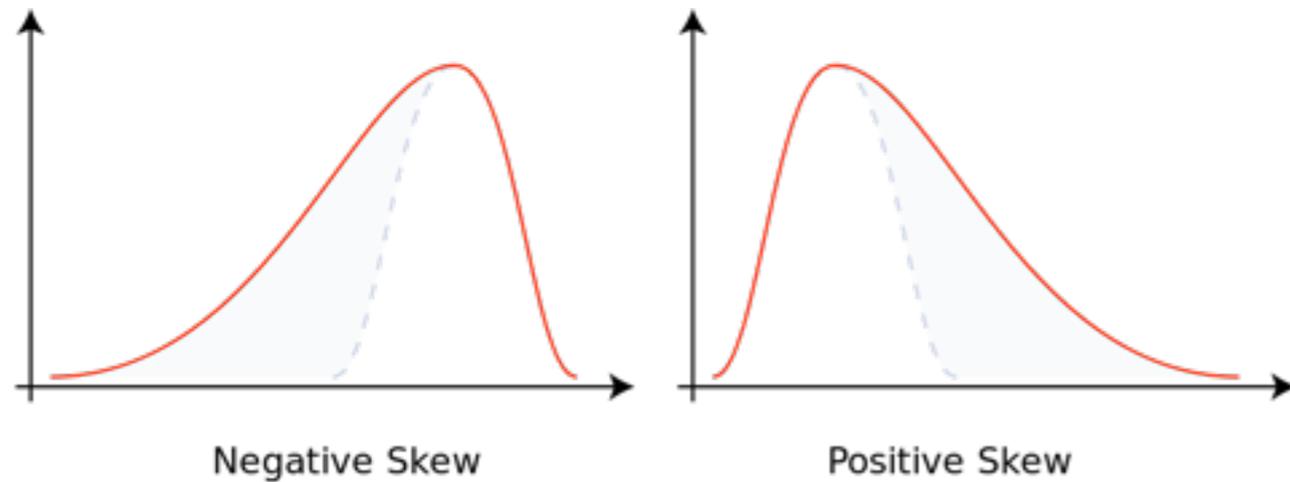
- 感受率は格子QCDで計算可能。高次モーメントは相関長に敏感*

- 保存量揺らぎのエネルギー依存性

- ▶ QCD特異点近傍で大きく変化するはず

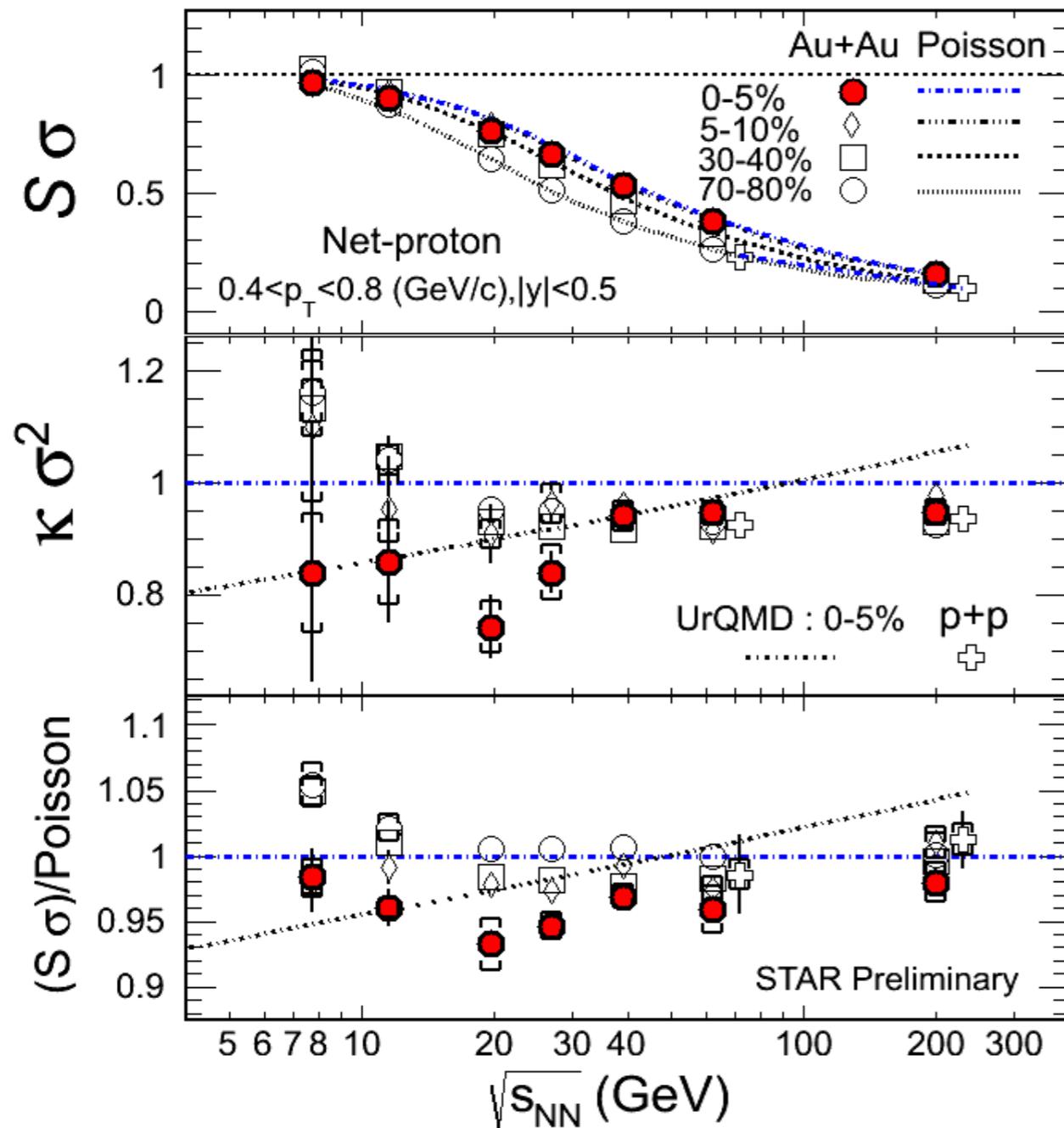
非ガウス揺らぎ

From Wikipedia



- 三次のモーメント = Skewness S - 分布の非対称性
- 四次のモーメント = Kurtosis K - 分布の鋭さ
- ガウス分布では両方0
- 高次モーメントの測定 → 非ガウス揺らぎの測定

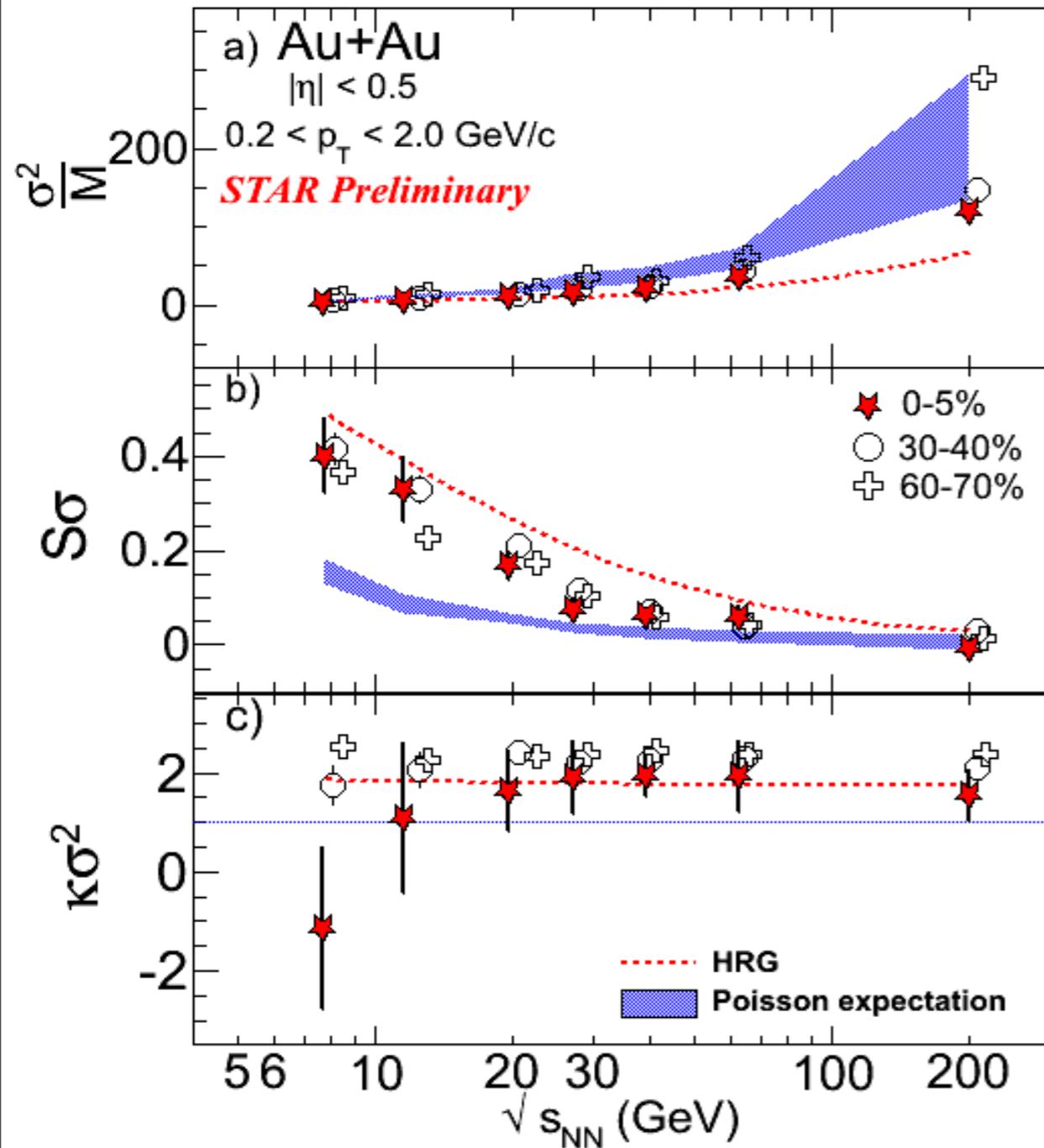
Net-protonの揺らぎ



- データ
 - ▶ 検出効率補正なし*
- 比較した基準値
 - ▶ ポアソン分布
 - ▶ (負)二項分布*
- UrQMDは単調増加
- 精密測定(特に低エネルギー)が必要

* under investigation (not shown here)

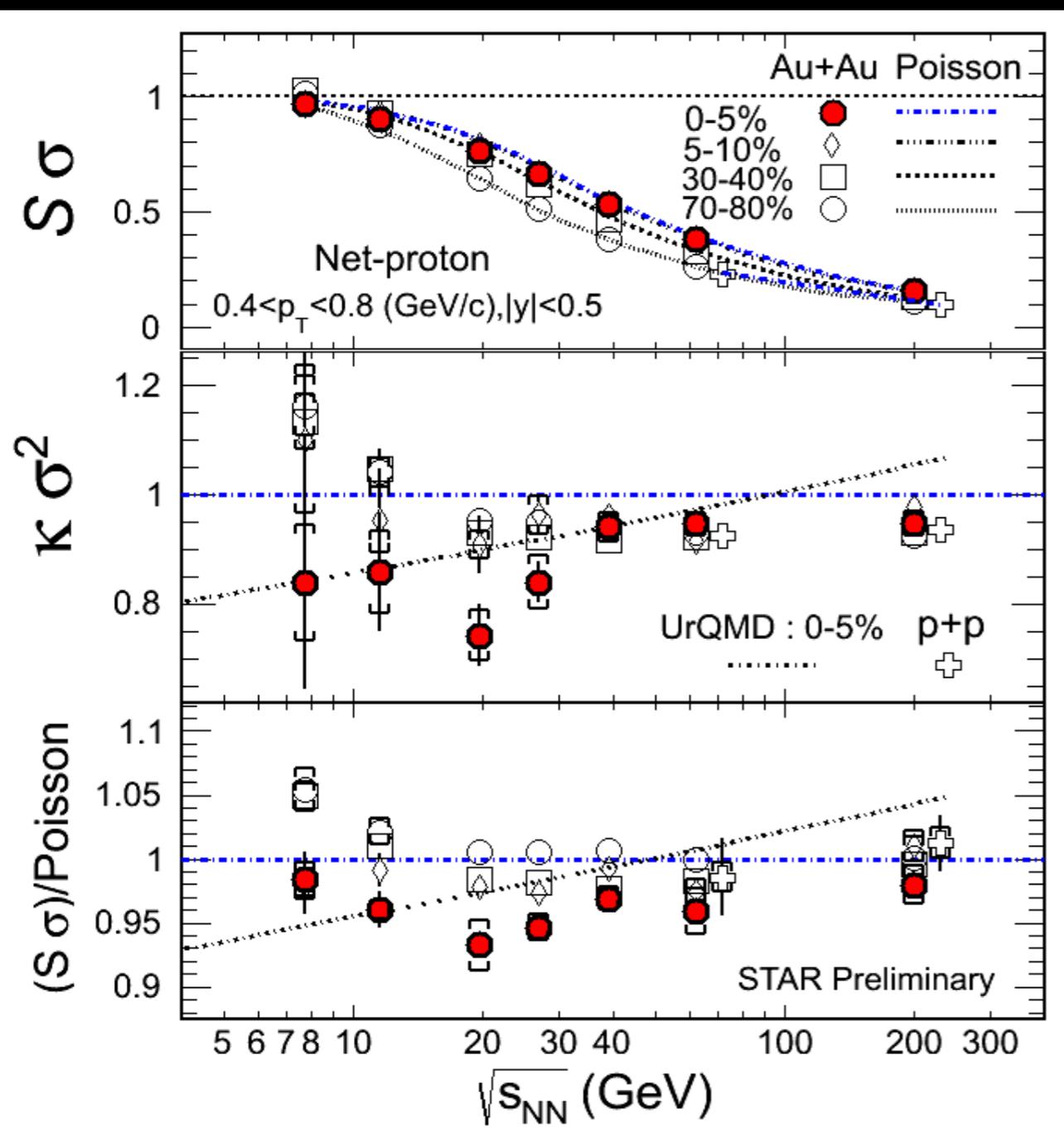
Net-chargeの揺らぎ



- データ
 - ▶ 検出効率補正なし*
- 比較した基準値
 - ▶ ポアソン分布
 - ▶ (負)二項分布*
- net-proton同様もっとデータが必要

* under investigation (not shown here)

QCD特異点はどこに？



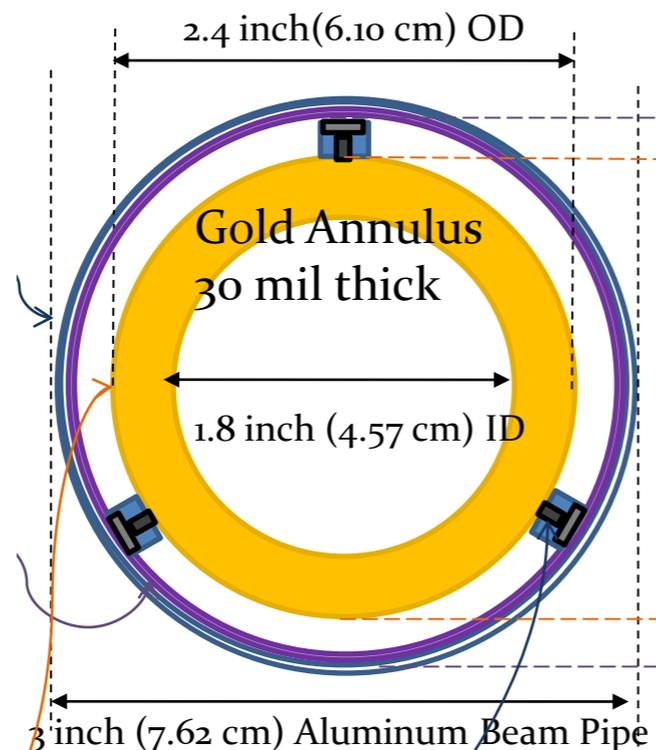
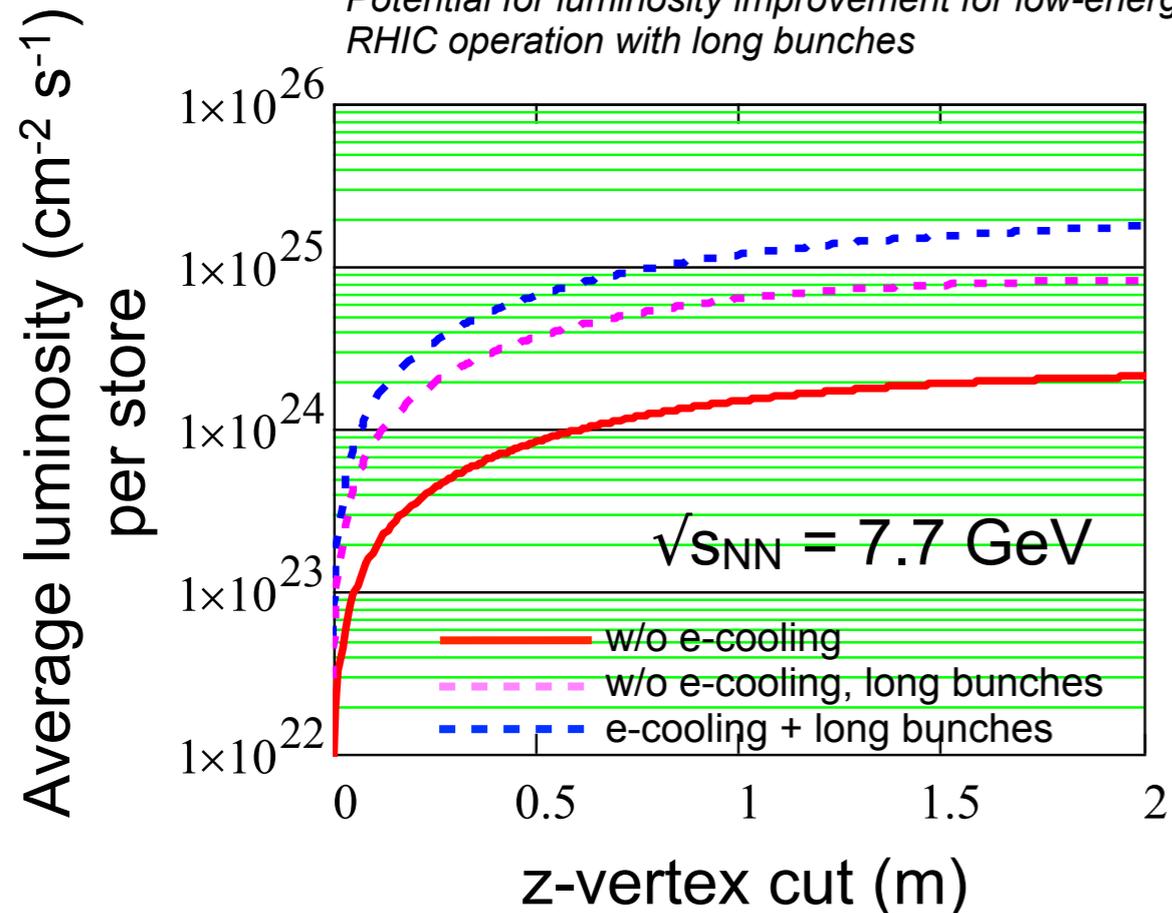
- 期待されていた大きな変化は見られず
 - ▶ ポアソンからのずれは小さい (最大20%程度)
 - 検出効率の補正なし
 - ▶ モデルによっては、特異点で二桁くらい増加するという予想もある
- そもそも net-proton \neq net-baryon (北沢さんの講演)
- PHENIX \neq STAR (net-charge)
 - ▶ acceptance ? centrality ?

BES-Iのまとめ

- QGP消失シグナルの観測 (11.5 GeV付近、それ以下)
 - ▶ クォーク数スケーリングの破れ (粒子・反粒子間)
 - ▶ 高横運動量ハドロン抑制の消失
 - ▶ 電荷異方性の消失
- 一次相転移のシグナルのヒント??
 - ▶ net-protonの dv_1/dy は非単調的な振る舞い
 - ▶ 幾何学的異方性には見られず
- QCD特異点探索、低エネルギーでの精密測定が必要
- BES-IIでは20 GeV以下に絞ってデータ収集

BES phase-II proposal

A. Fedotov and M. Blaskiewicz
 Potential for luminosity improvement for low-energy
 RHIC operation with long bunches



- BES phase-II (2017-)は20 GeV以下を重点的に探索
 - ▶ 11.5と19.6 GeVにはバリオン化学ポテンシャルに100 MeVのギャップ
- Electron cooling + longer bunchesで最大10倍のルミノシティ！
- 固定標的実験 - ~ 3 GeVまで
 - ▶ リング状の金標的をSTARの衝突点から2m前方に設置
 - ▶ コライダーモードと両立可能

まとめ

- QGP生成シグナル消失
 - ➔ ハドロン相互作用が低エネルギーではより重要
- net-protonの v_1 スロープに非単調的振る舞い
 - ▶ HBTには見えない (v_2 にも見えない)
- 保存量揺らぎの測定にはもっとデータが必要
- BES phase-II
 - ▶ 20 GeV以下を重点的に探索、RHICでの固定標的実験も提案中
 - ▶ バルク観測量の精密測定、特に揺らぎの測定

Back up

net-charge, PHENIX vs STAR

