

---

# 高エネルギー重イオン衝突物理の課題

---

郡司 卓

東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター

---

# 導入

---

## ■ 多くの人に聞かれること

- **RHICやLHCでQGPのようなものはあったのだろう。しかし、状況証拠でなくQGPの確固たる実験的証拠がほしい！！**
- **QGPの発見はインパクトがあった。次に打ち上がる花火(新聞に載るような記者発表ネタ)はどんな内容なのか？**
  - これまでの重イオン実験に関する記者発表ネタ
    - **火の玉宇宙を再現(ジェットクエンチングの発見) (2003)**
    - **RHICにおける「完全な流体」の発見(2005)**
    - **4兆度に成功「ビッグバン」直後を再現(2010)**
    - **小さい系(ストレンジネス増大) (2017, CERNからプレスリリース)**
    - **n-3の大きな引力? (2018?)**

# 次の打ち上げ花火(になるか?)①

## ■ QGP物性の高精度化

- 物性の温度依存性と極小値(相転移点)の見極め。液体からガスへの性質変化。
- クロスオーバー相転移(カイラル凝縮や自由度)の定量化。相転移近傍の現象。
- 他の物性量(粘性→完全な流体、伝導度・比熱・拡散率・緩和時間→???)。
- 強電磁場中での物性(物性の磁場依存性)。
- 小さい粘性の起源。
  - QGPの性質？高強度カラー場による異常粘性？

# 次の打ち上げ花火(になるか?)②

- QGP(や高エネルギー重イオン衝突)をツールとして
  - カイラル対称性の回復の発見や閉じ込め機構の解明
  - エキゾチックハドロンの探索や内部構造
  - バリオン間相互作用
  - 核子や原子核核子の内部構造(グルーオン飽和、量子揺らぎ)
  - 最高強度電磁場？
  - 最高強度カラー電磁場？

---

# 次の打ち上げ花火(になるか?)③

---

- **高密度側での新発見**

- 高密度天体の内部構造を実現
- 新しい相の発見
- カラー超電導相に繋がる何か？

# (個人的に思う)次に目指すもの

## ■ 物性量の温度依存性

- EoS、体積粘性( $\zeta/s$ )、ずれ粘性( $\eta/s$ )、伝導度、拡散係数などの温度依存性。  
相転移の見極めやガス状への変化。

## ■ 相転移近傍の物理(真空の構造と変質)

- カイラル凝縮、基本自由度・閉じ込め、クォーク対相関、グルーオン場の凝縮

## ■ 強相関の起源

- QCDの自明な性質？それともグラスマの異常粘性？

## ■ これらの“磁場”に対する依存性。相構造研究の3次元化

# 必要不可欠なもの

---

- 高精度な実験データ
- 重イオン衝突の時空発展の正しい理解
  - **今は、現象論モデルで使われてきた仮定を再検証する時期**
    - 初期状態と量子ゆらぎ
    - 流体化と熱化
    - QGPの時空発展(局所熱平衡、流体揺らぎ、散逸過程、電磁流体、渦)
    - クロスオーバー相転移、フリーズアウト

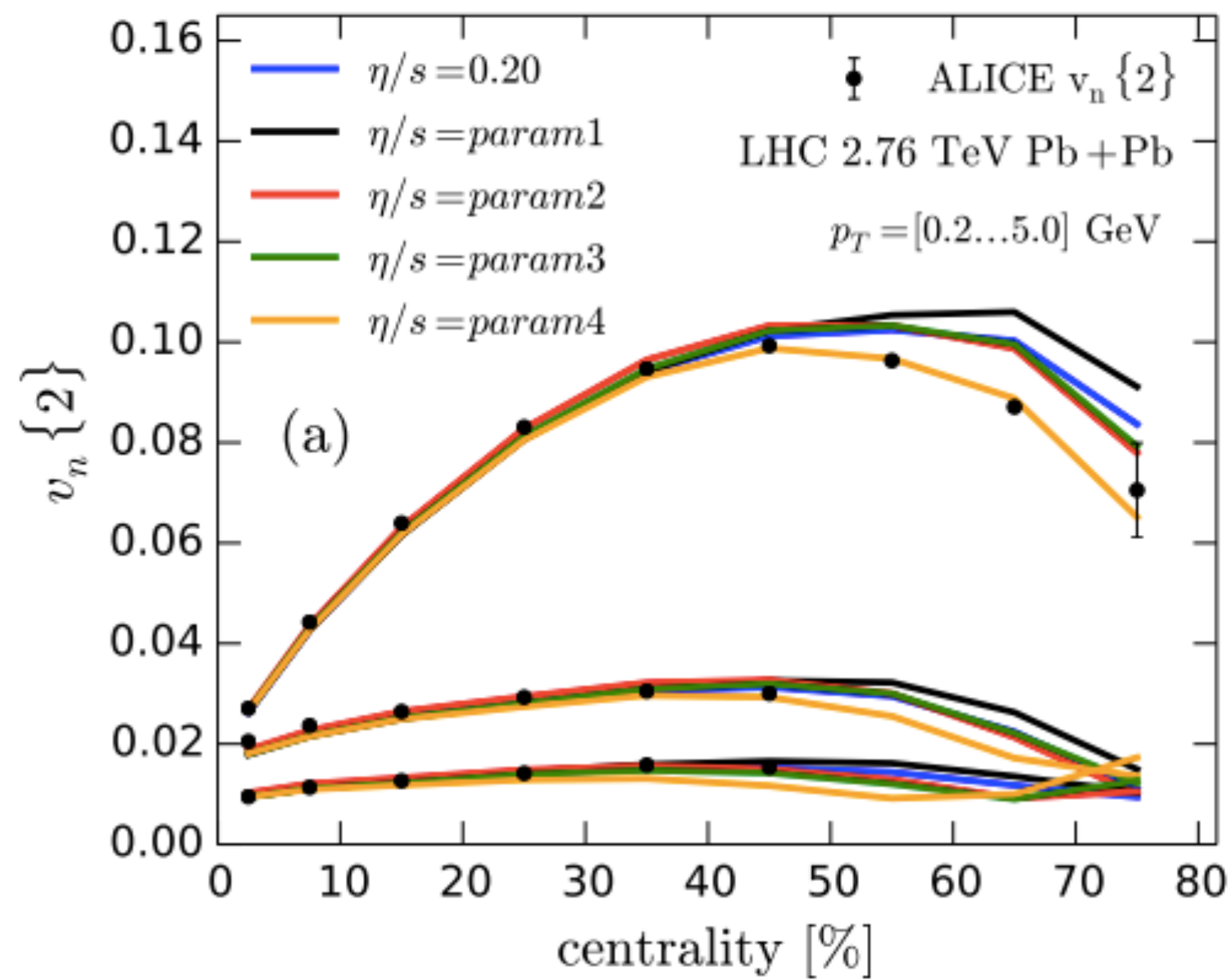
# 衝突初期と量子ゆらぎ

- $V_n, V_n * V_m$  相関 ( $p_T, \eta$ ) に強く現れる  $\rightarrow \eta/s, \zeta/s$ 
  - 初期が分からないと、最終的には何も分からないのと同じ
- 実験結果を再現する初期モデル
  - IP-Glasma (IP-Sat CGC initial conditions with classical Yang-Mills dynamics)
  - EKRT (NLO-improved pQCD (mini-jets) + saturation)
  - **グルーオン飽和 + sub nucleon スケールのゆらぎが重要**

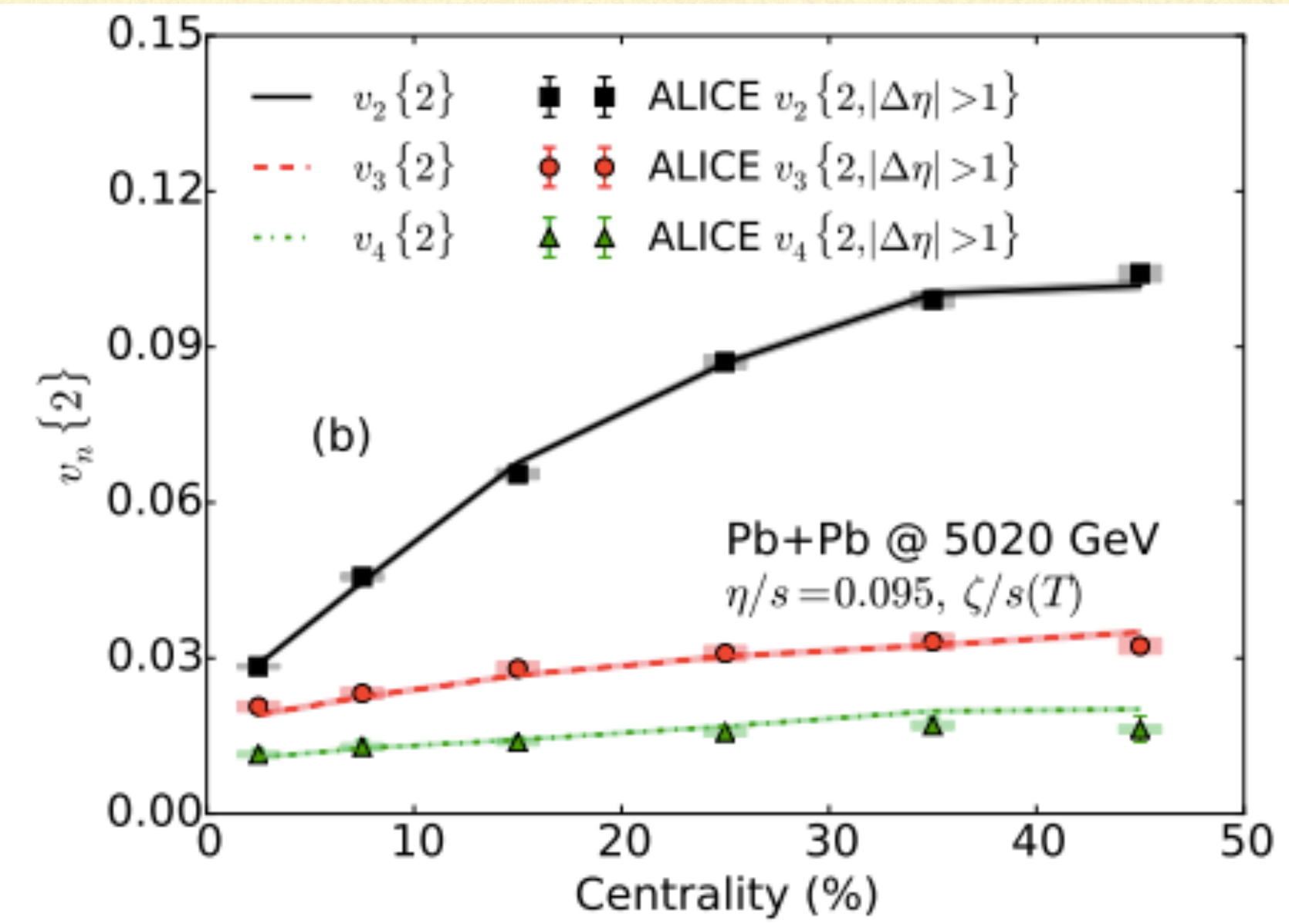
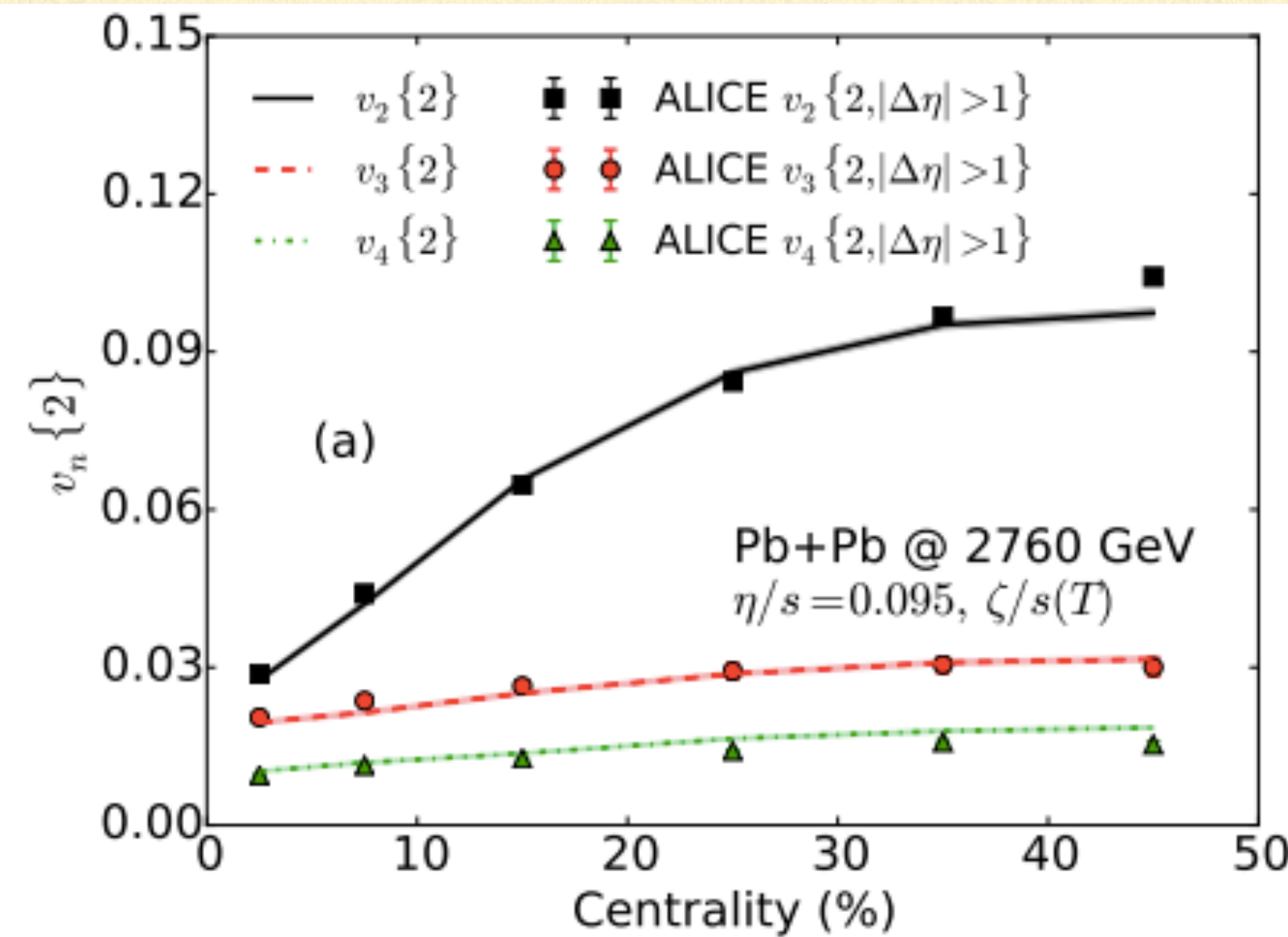


# IP-GLASMA, EKRT

PhysRevC.93.024907



Phys. Rev. C 95, 064913 (2017)



$\eta/s = 0.1$  (IP-Glasma) -  $0.2$  (EKRT)

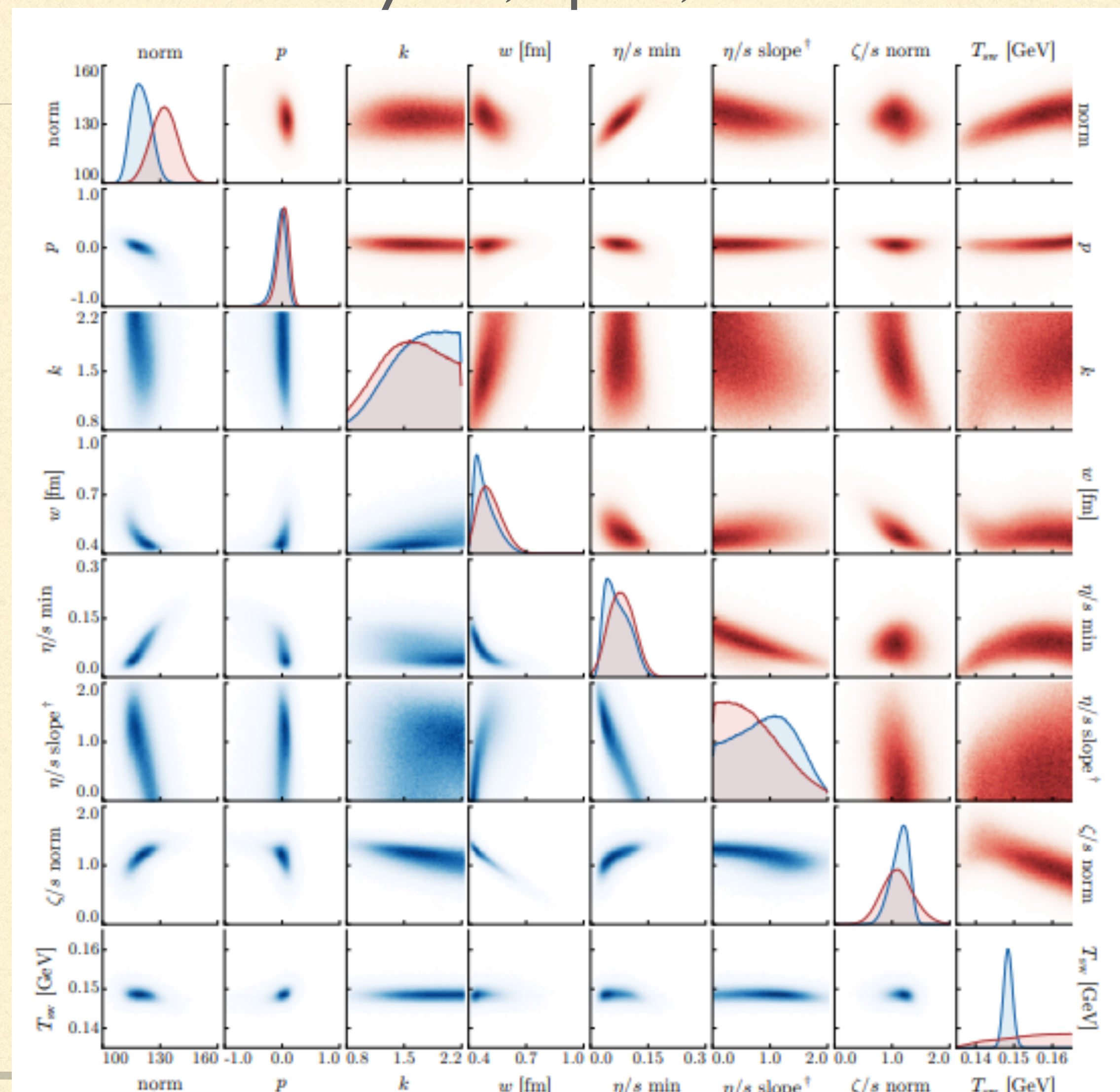
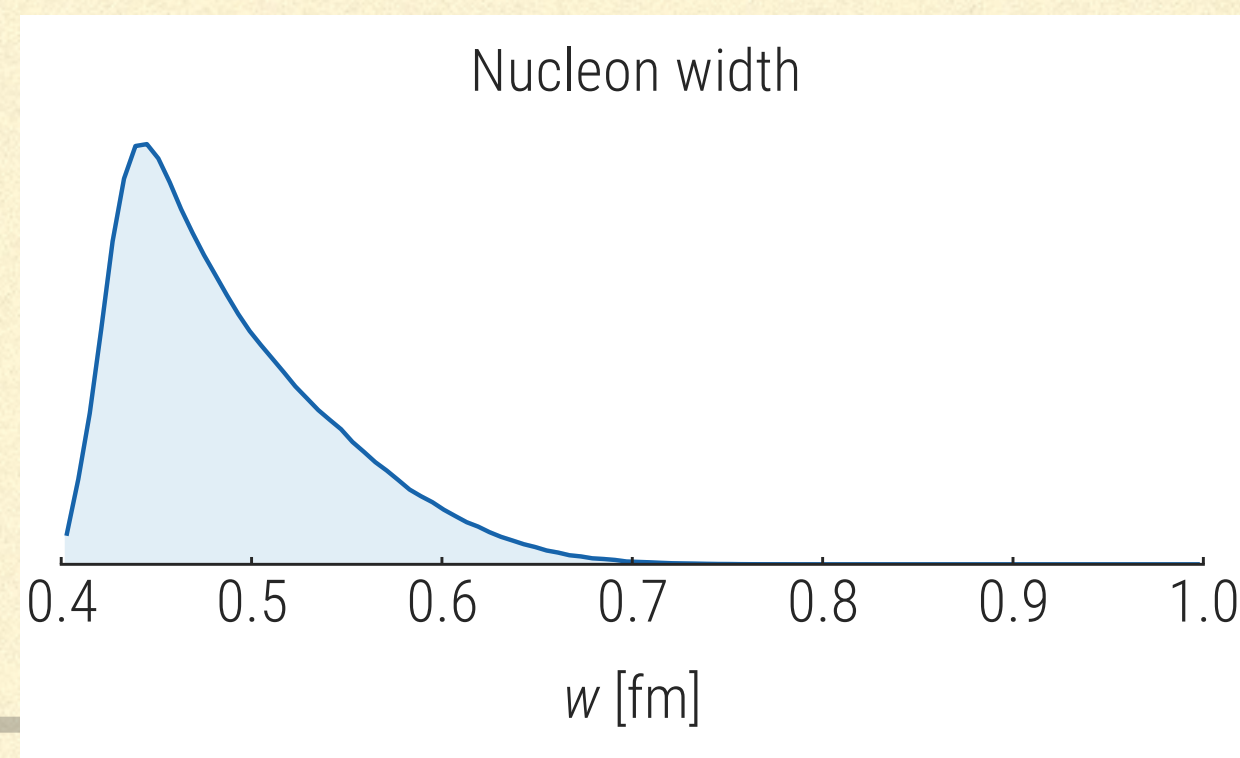
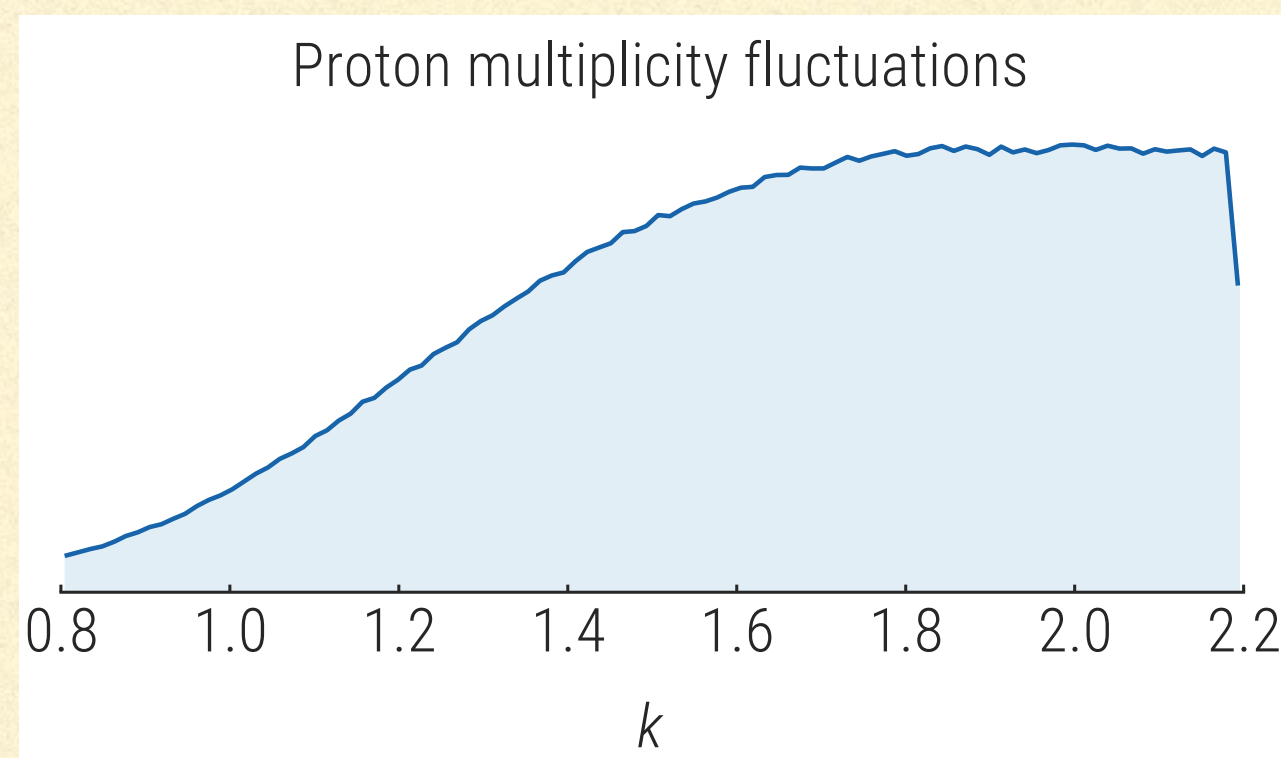
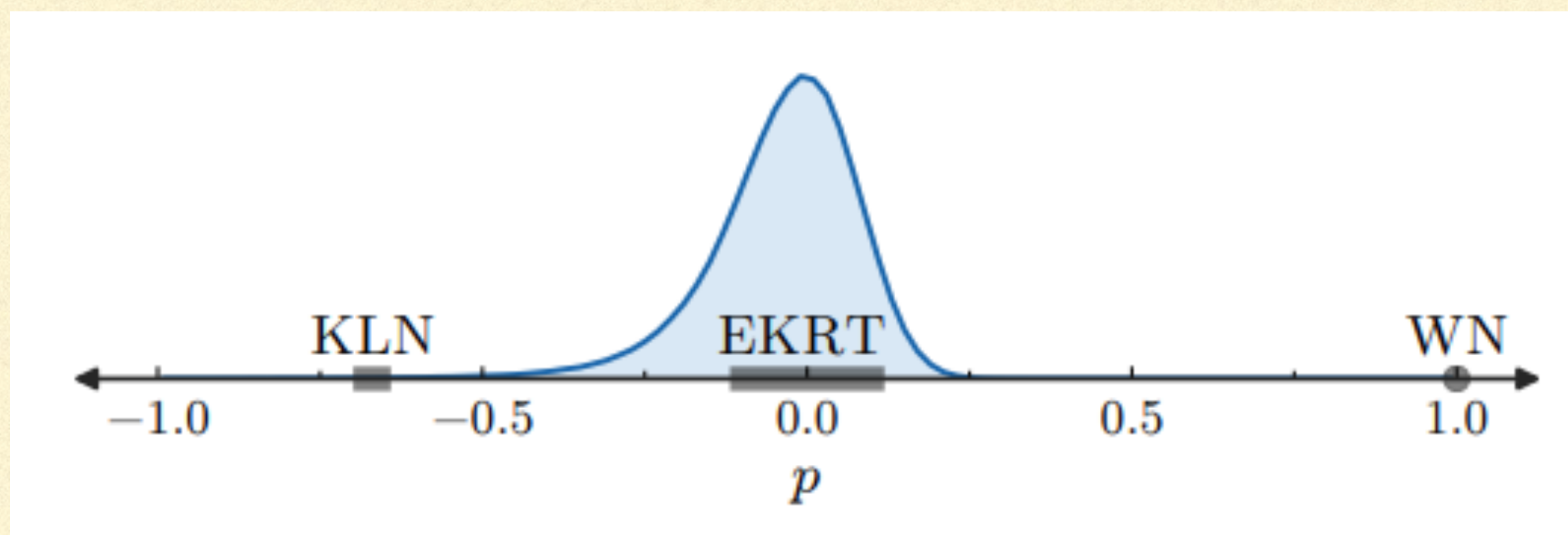
# 初期と粘性の制限

1605.03954

yield,  $\langle pT \rangle$ ,  $v_n$

charged  
identified

- ベイズ推定(様々な仮定があることに注意)
- KLNとGlauberでなくEKRTを支持する



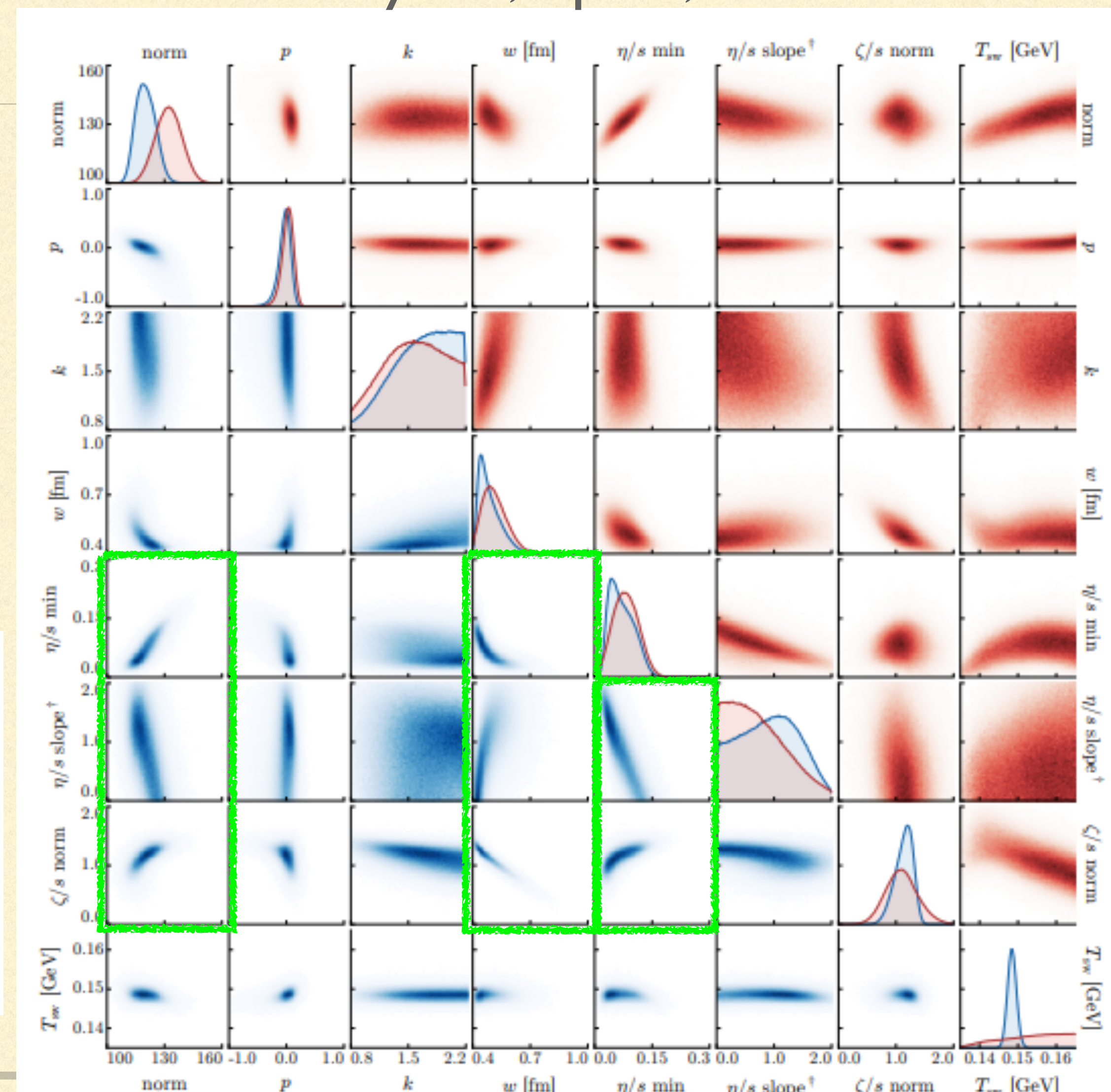
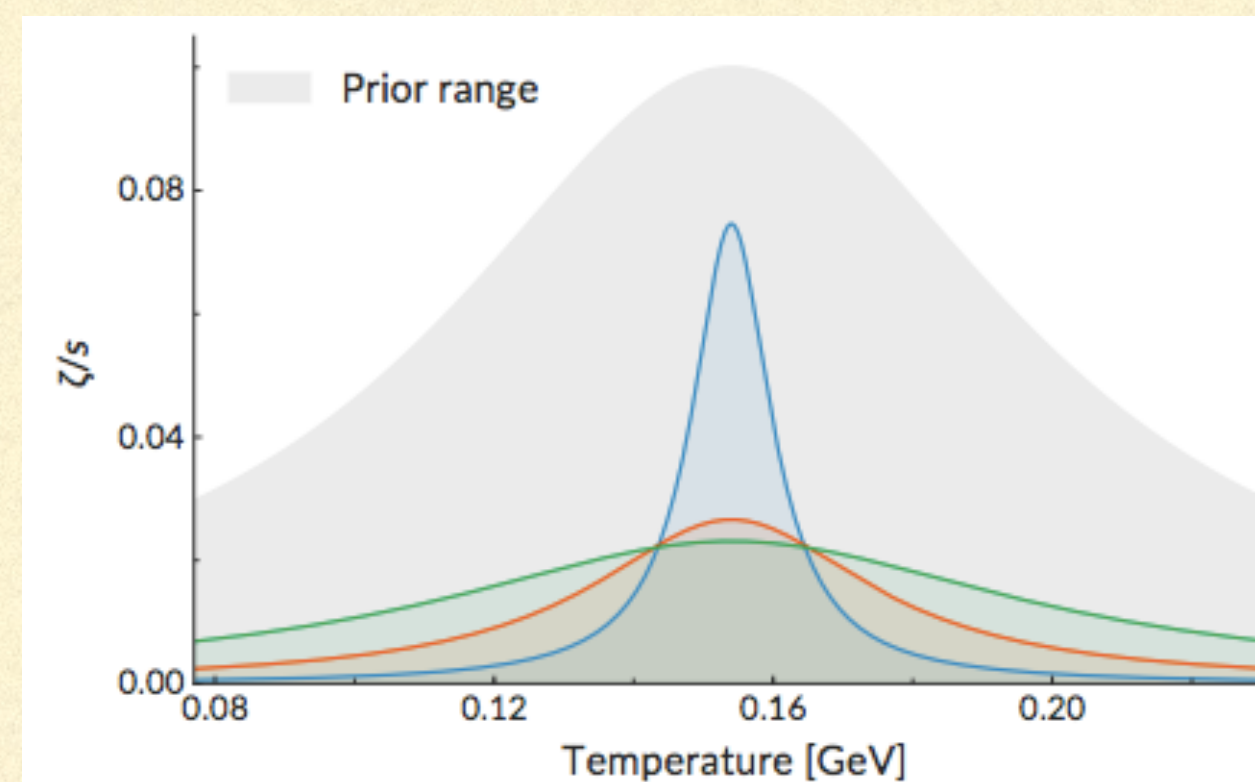
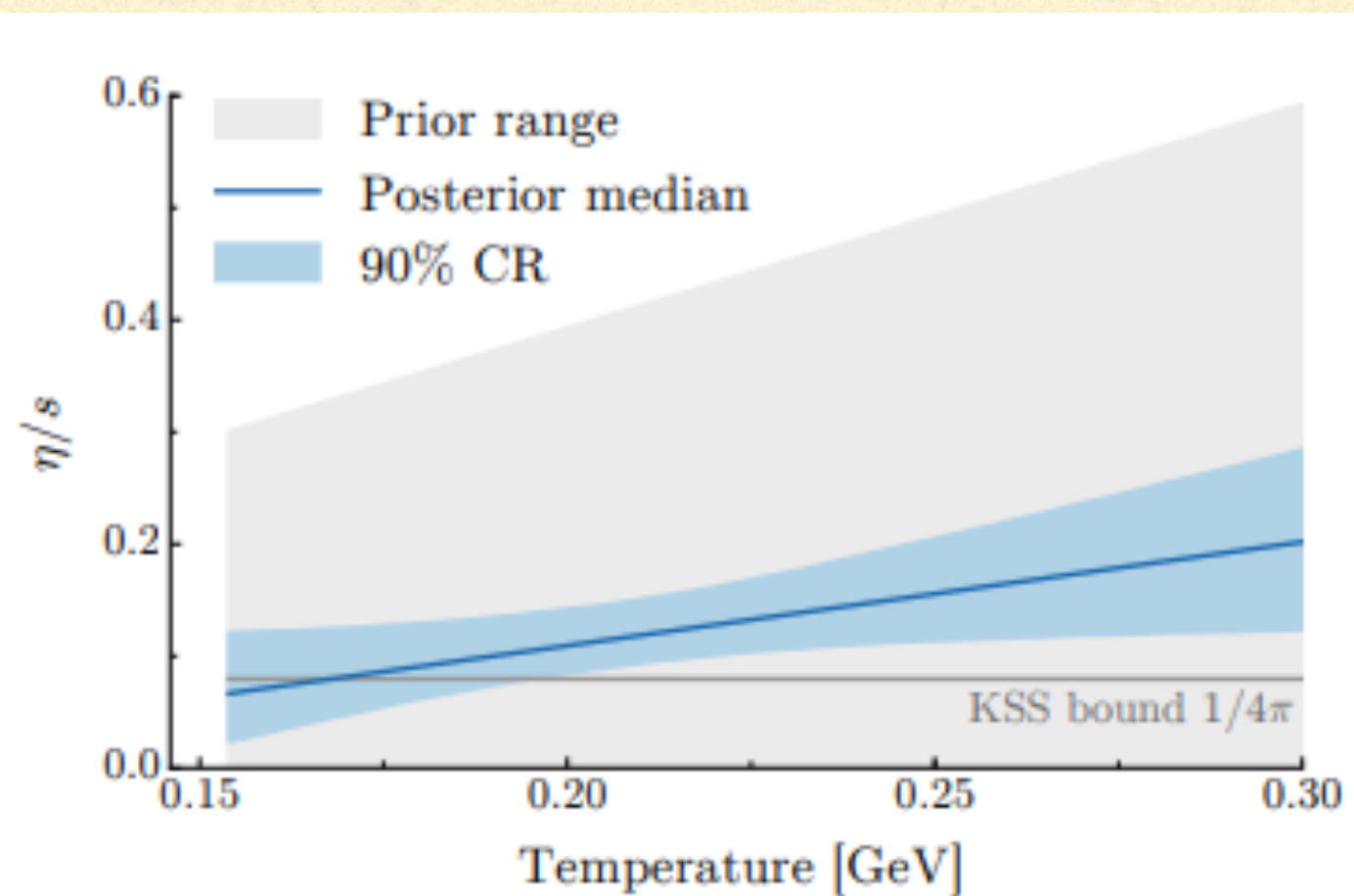
# 初期と粘性の制限

1605.03954

yield,  $\langle pT \rangle$ ,  $v_n$

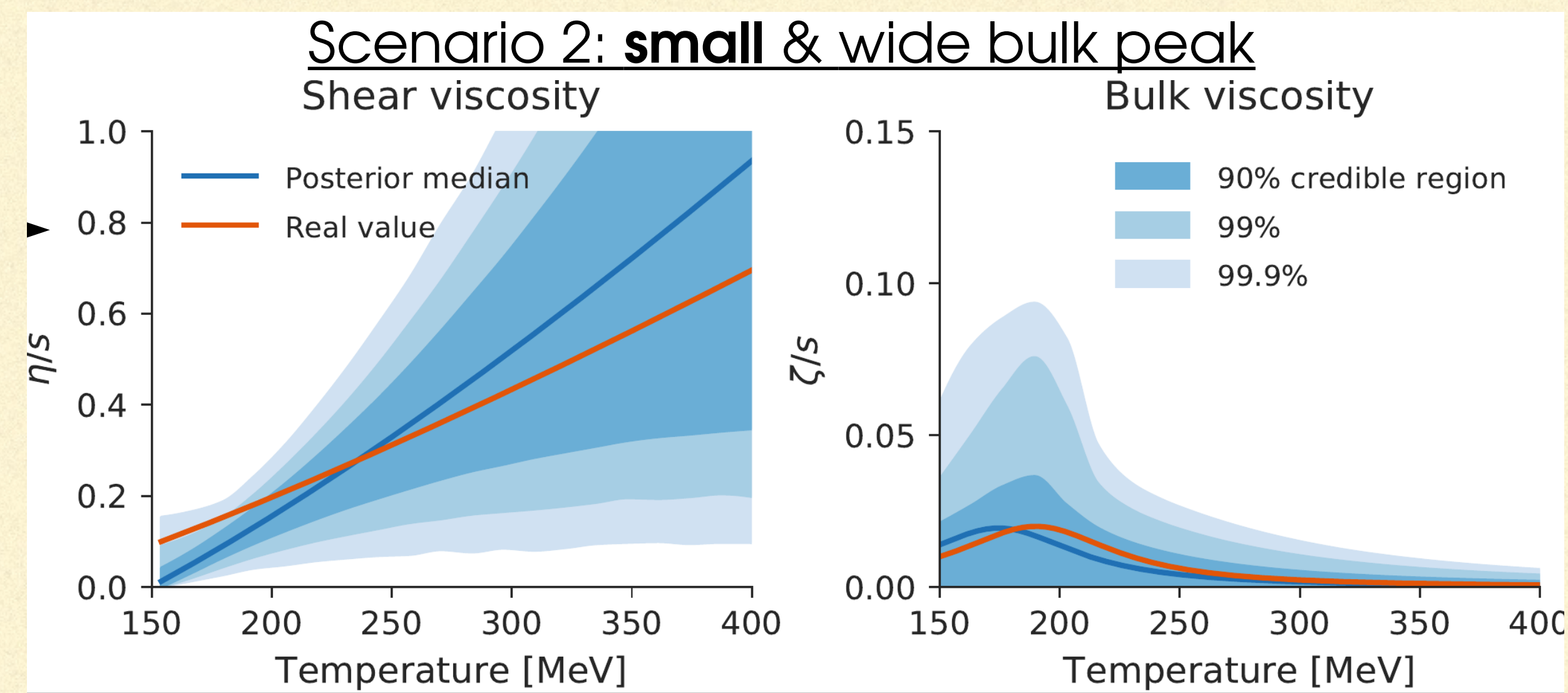
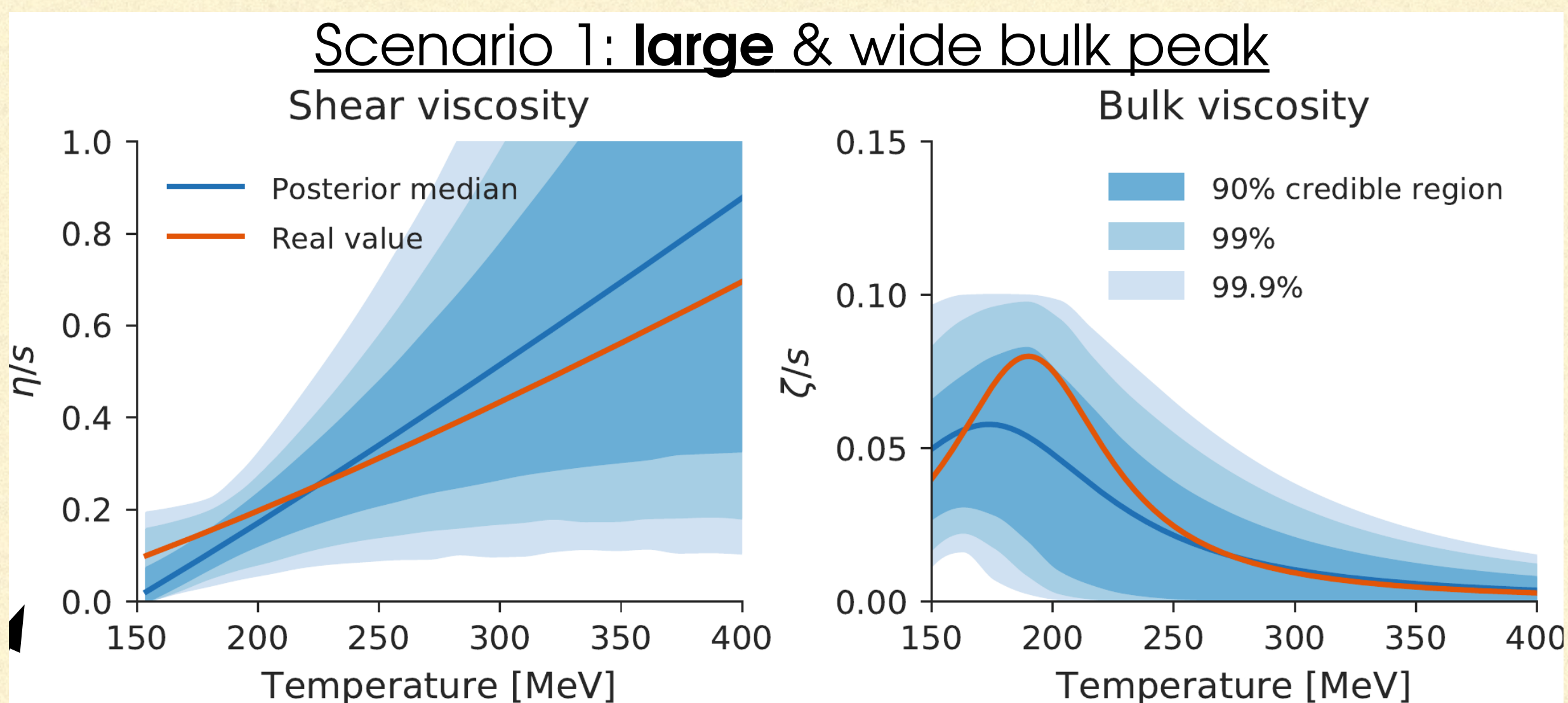
charged  
identified

- ベイズ推定(様々な仮定があることに注意)
- $\eta/s$ , 初期条件(エントロピー密度、核子サイズ),  $\zeta/s$ は互いに強い相関を持つ
- よく制限できているのは $T_c$ 付近のみ



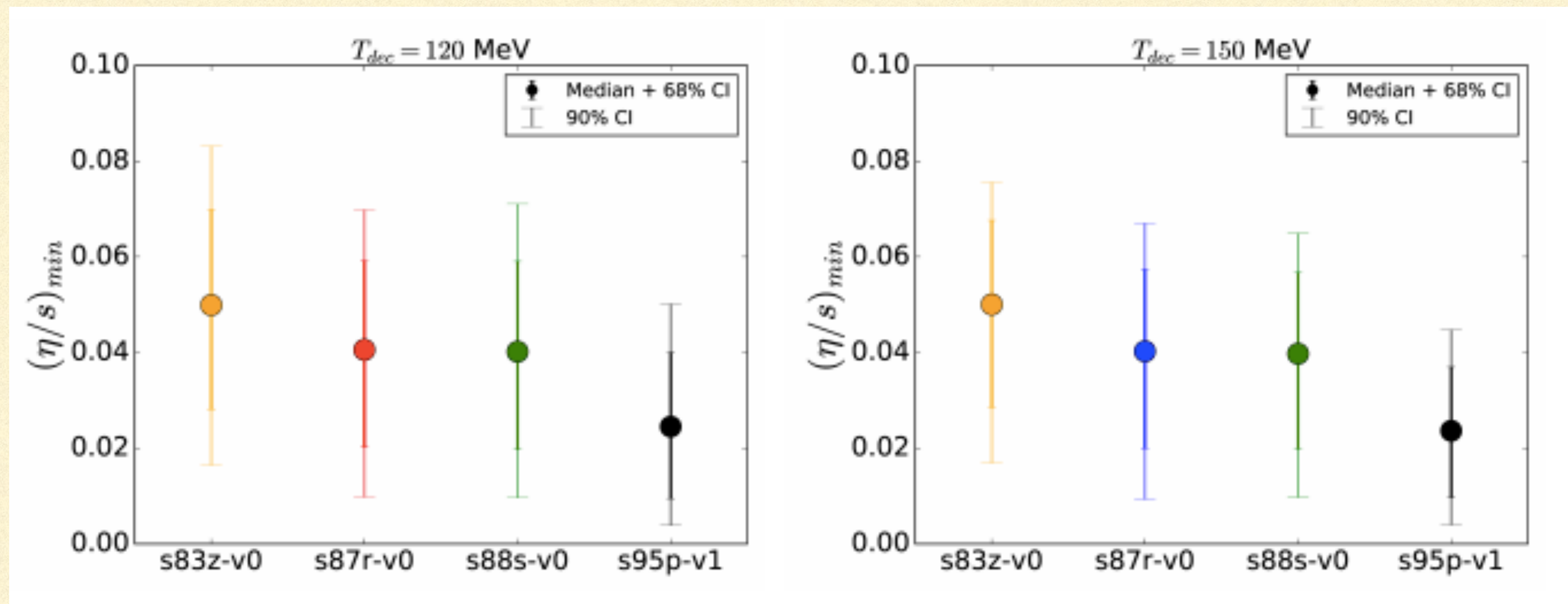
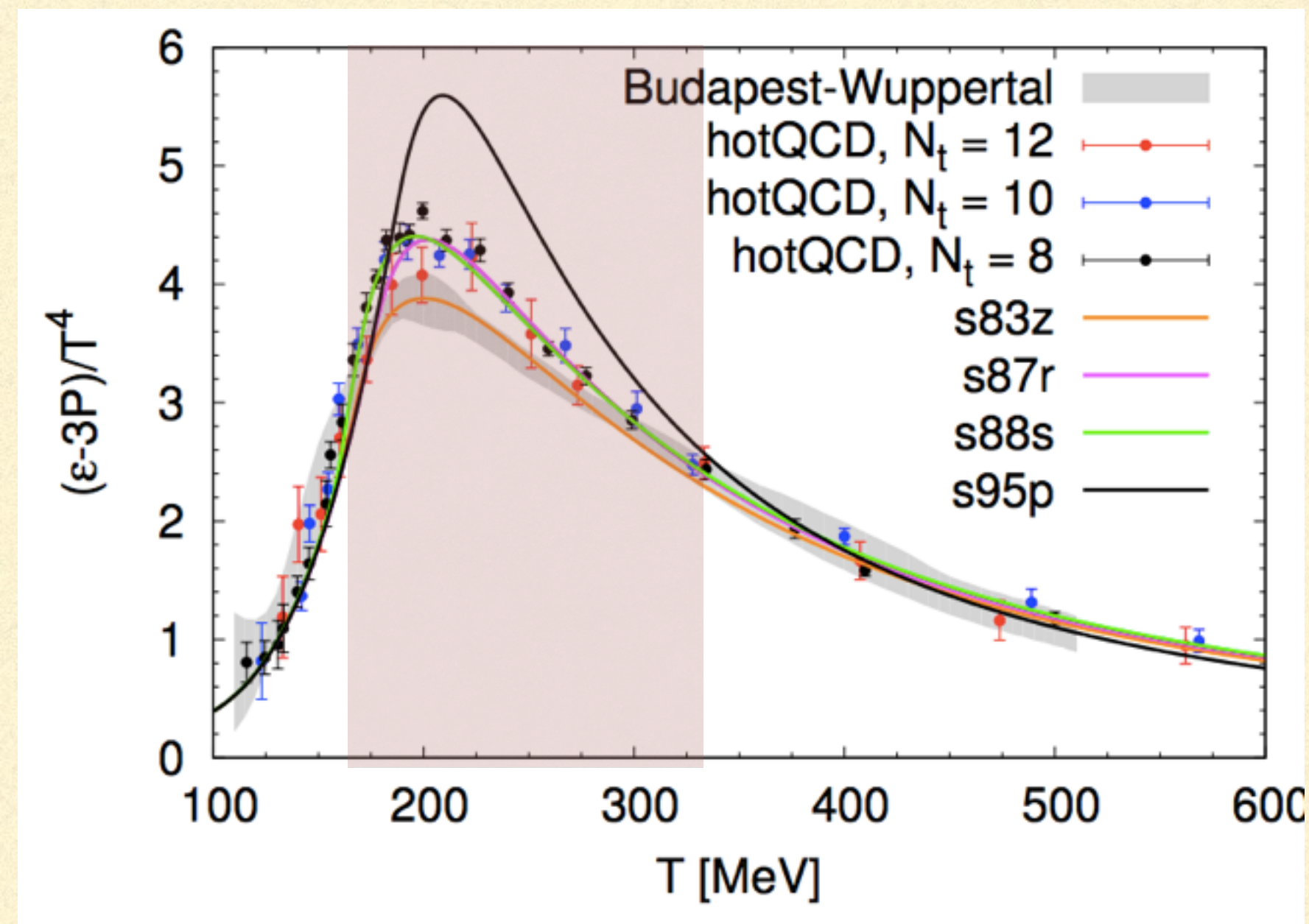
# 初期と粘性の制限(最新結果?)

- QM2018のS. Bassのポスター
- $\eta/s$ と $\zeta/s$ のCRが広い。。。何が変わったのだろうか?  $\zeta/s$ の仮定?
  - これが最新結果だとすると、 $T_c$ から離れているところはまだまだ制限できていない



# 状態方程式と粘性

- $\eta/s$ が60%くらい変化する → **相転移温度付近のEoSの重要性**



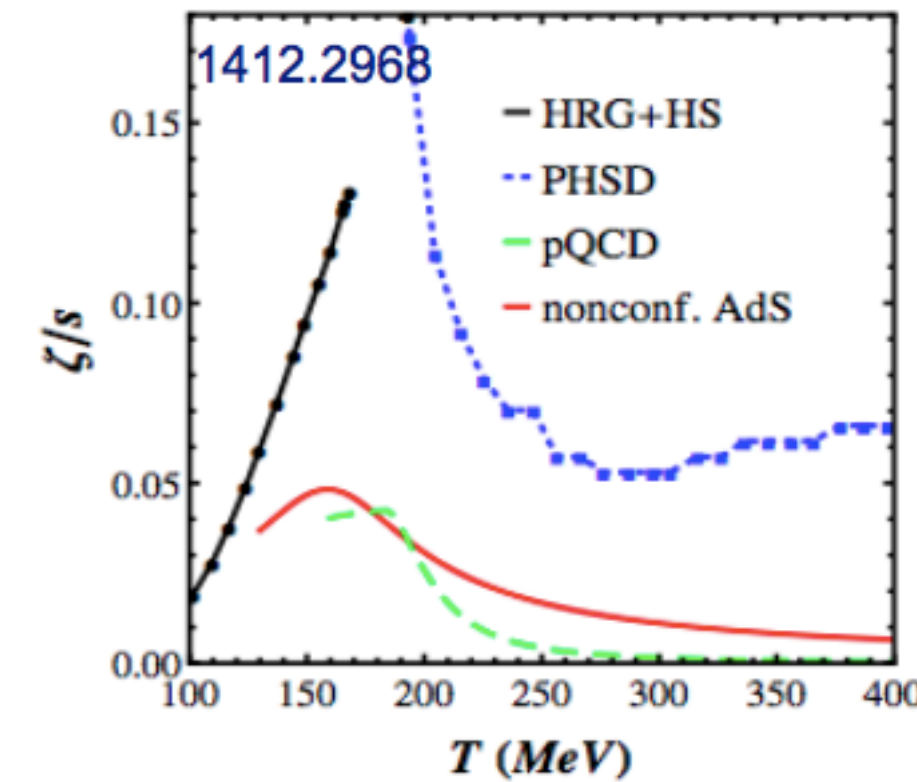
The following equations of state were used in this study:

- **s83z**: Hadron gas particles from 2016 PDG summary tables, fit done to lattice data from [4]
- **s87r**:  $M < 2$  GeV HG particles from 2005 PDG summary tables, fit to lattice data from [5]
- **s88s**: HG particles from 2016 PDG summary tables, fit to lattice data from [5]
- **s95p** [6]:  $M < 2$  GeV HG particles from 2005 PDG summary tables, fit to lattice data from [7]

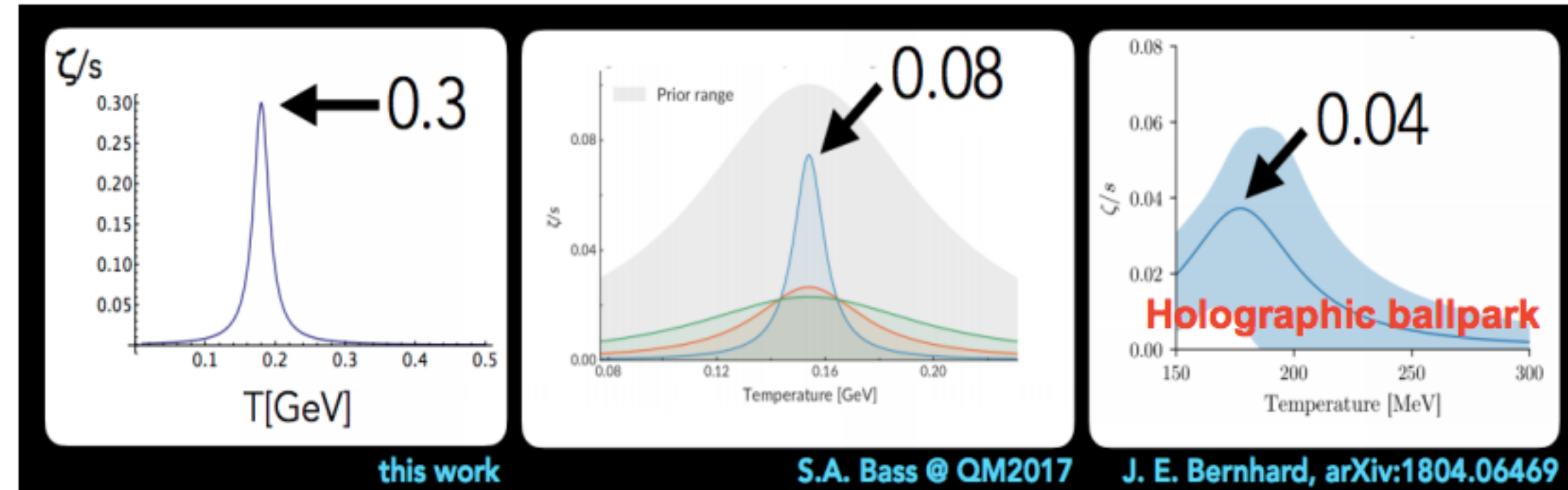
# 体積粘性

- $\eta/s$ の決定にも重要
- 時空発展にも重要
- 体積粘性の大きさは理解されている？

Large theoretical uncertainty



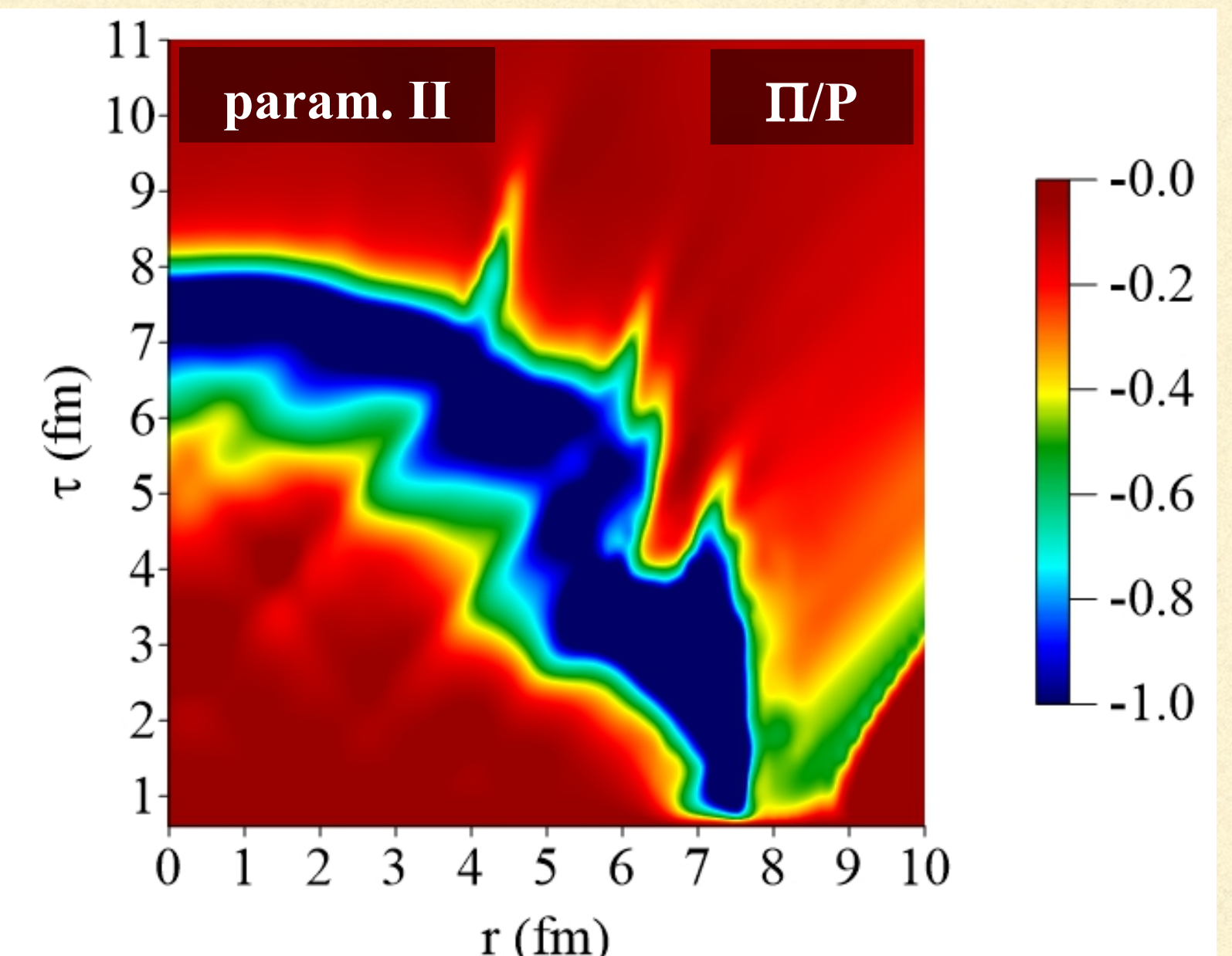
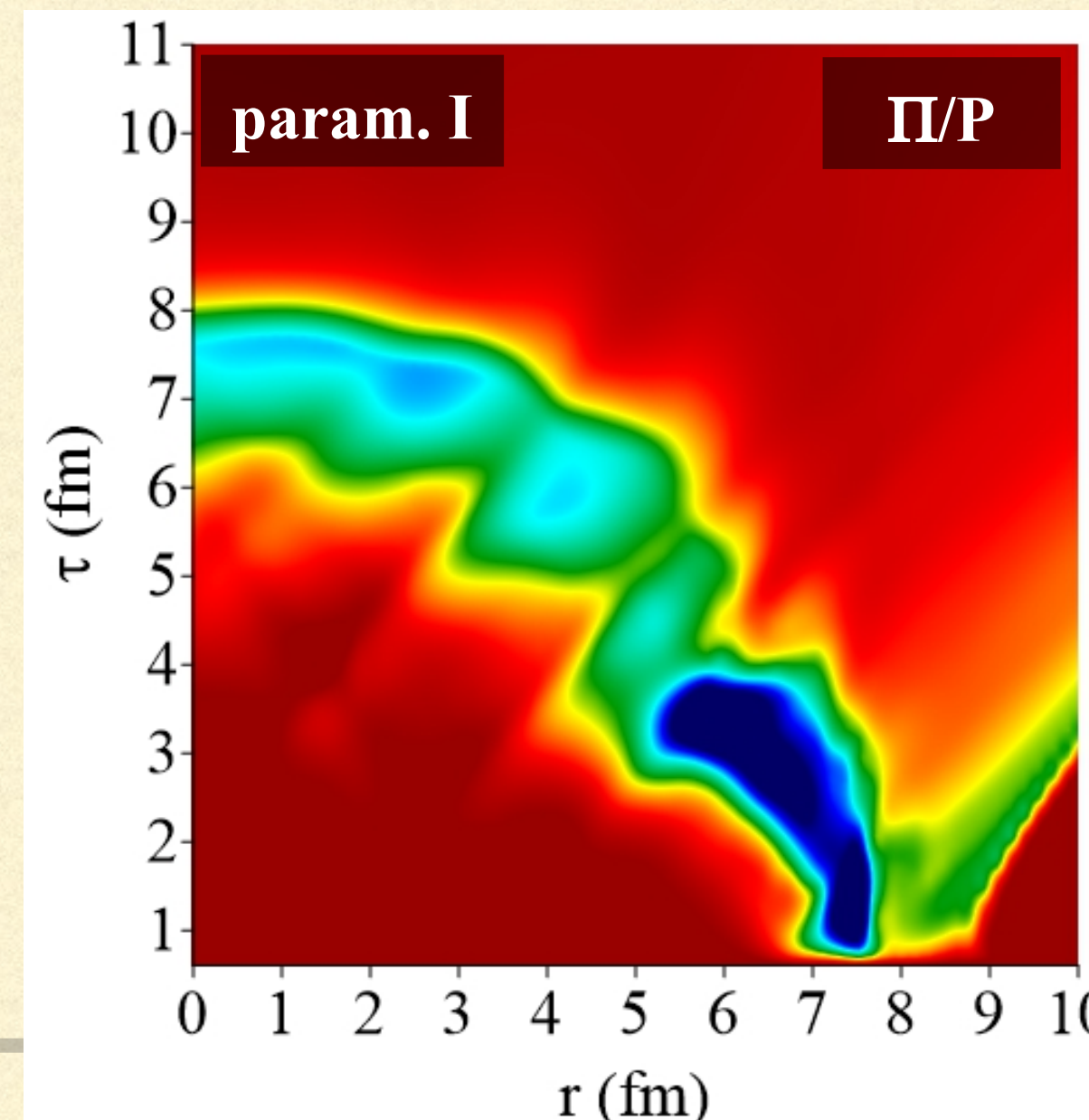
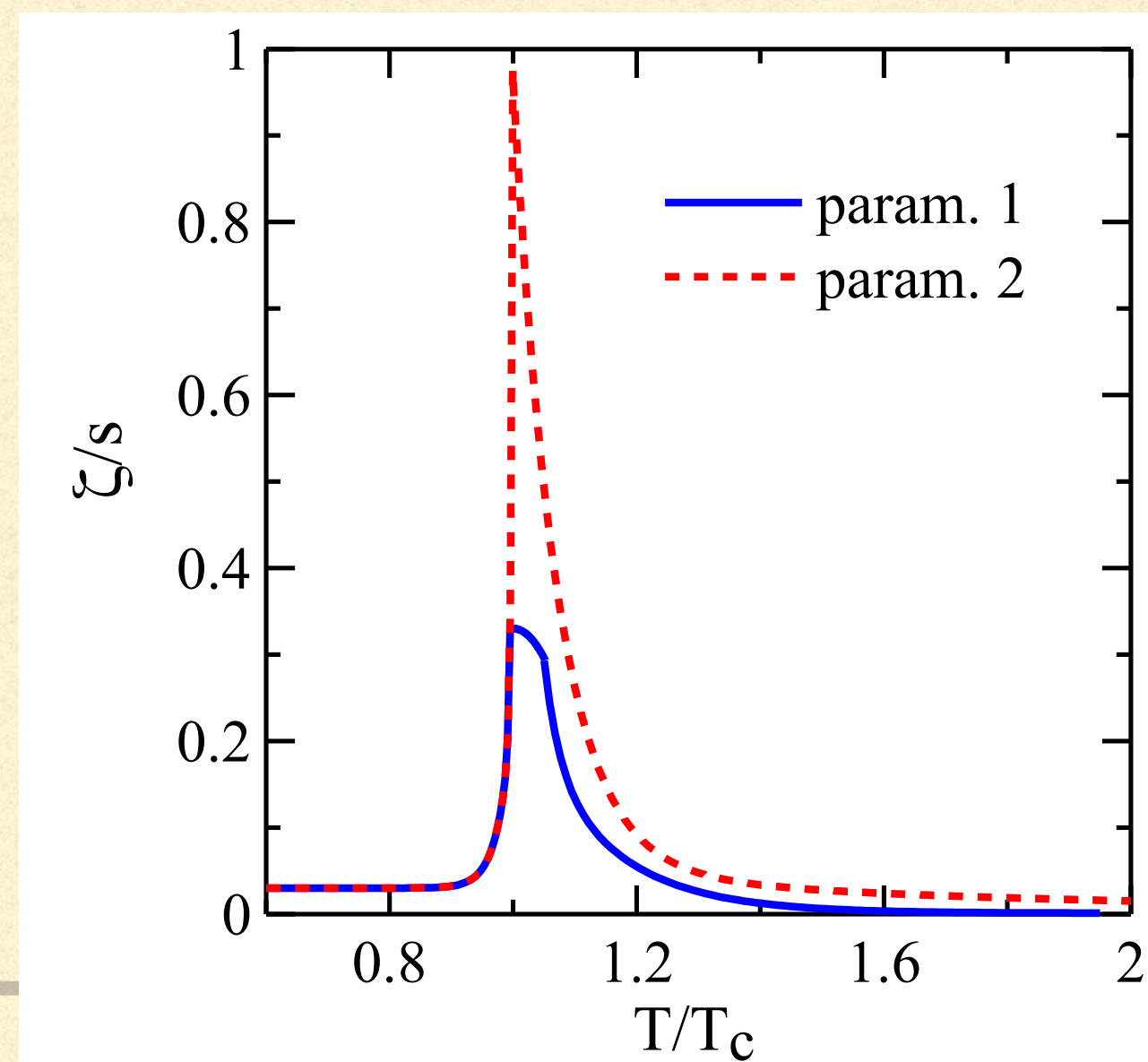
See B. Schenke's talk



$$P_{\text{eff}} = P_0 + \Pi, \quad \Pi/P_0 \text{の時空発展}$$

$\Pi$ : bulk viscous pressure

| 503.0053 |



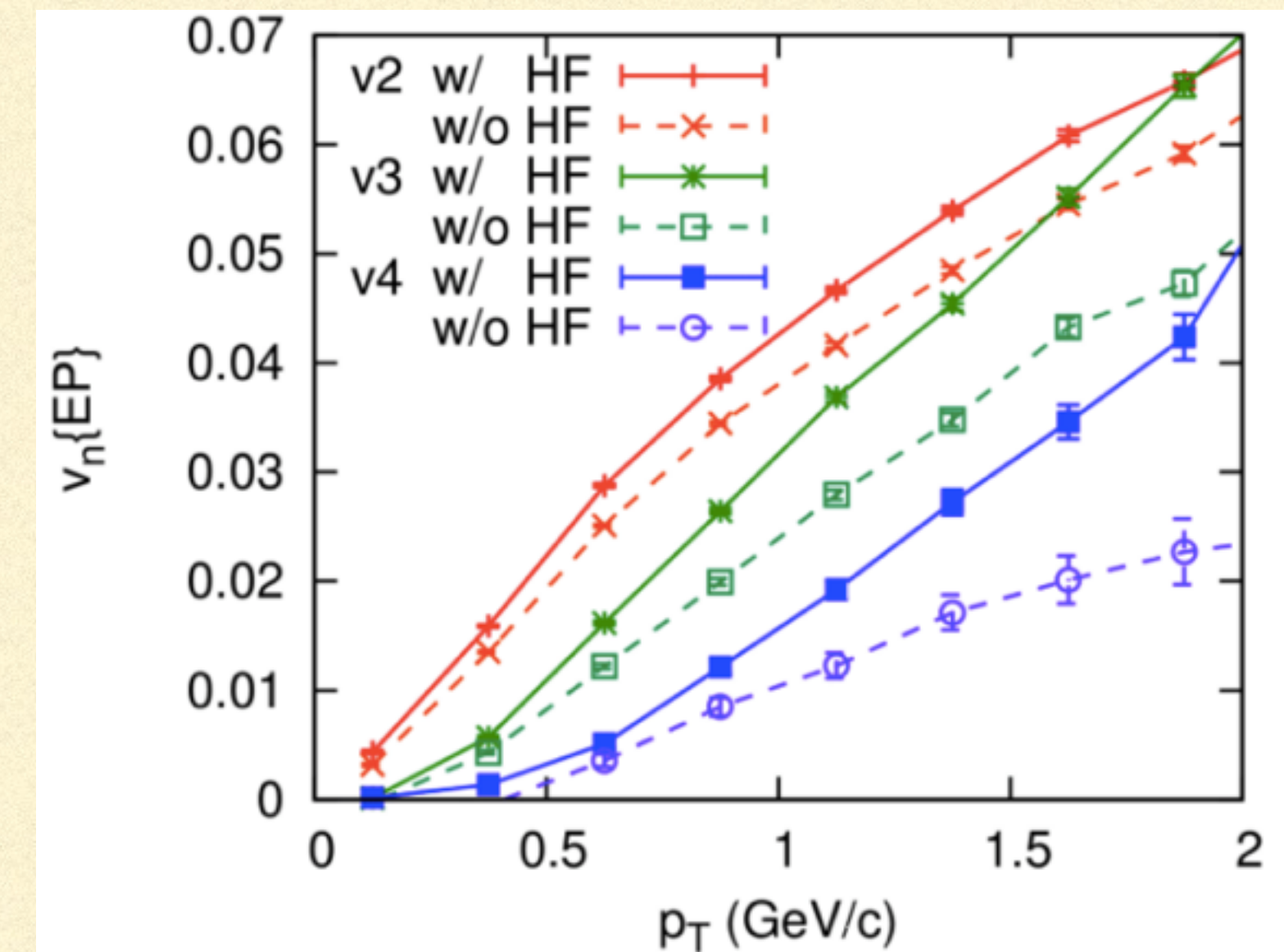
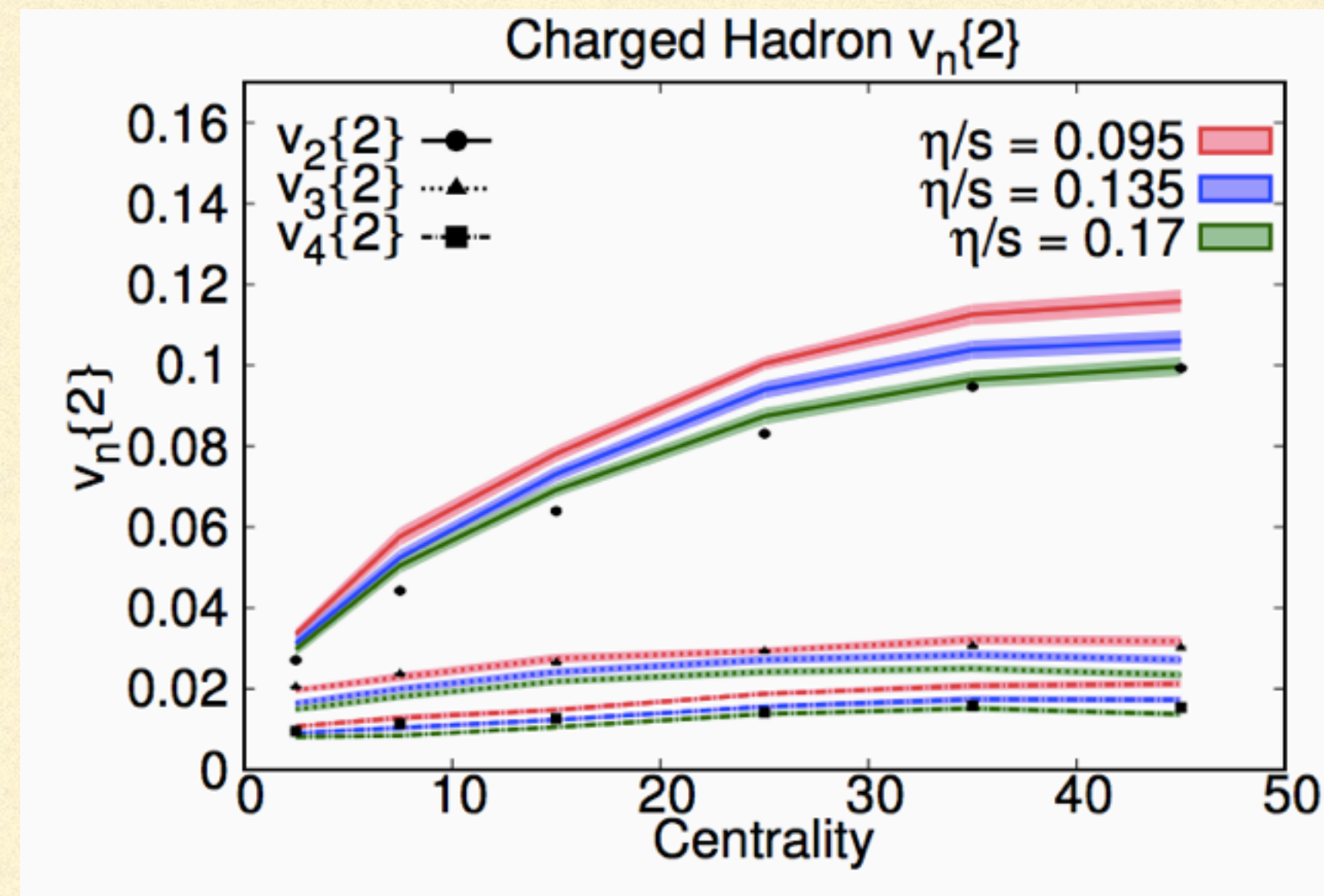
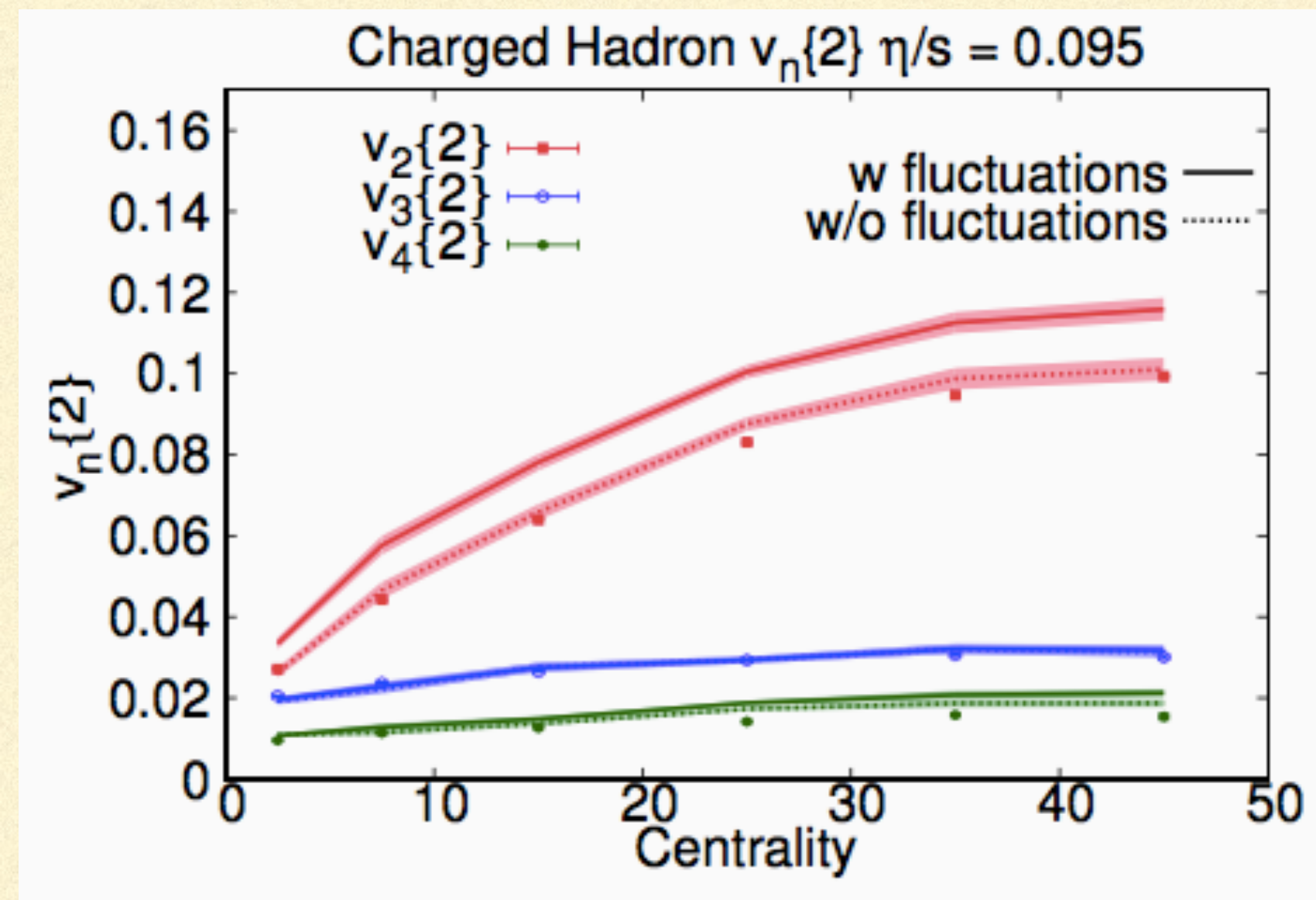
# FLUCTUATING HYDRO

K. Murase, HIC

M. Singh, QM2018

■  $\eta/s$ に大きな影響  $\rightarrow$  **流体揺らぎの重要性**

$$T^{\mu\nu} = e u^\mu u^\nu - (\mathcal{P} + \Pi)\Delta^{\mu\nu} + \pi^{\mu\nu} + S^{\mu\nu}$$

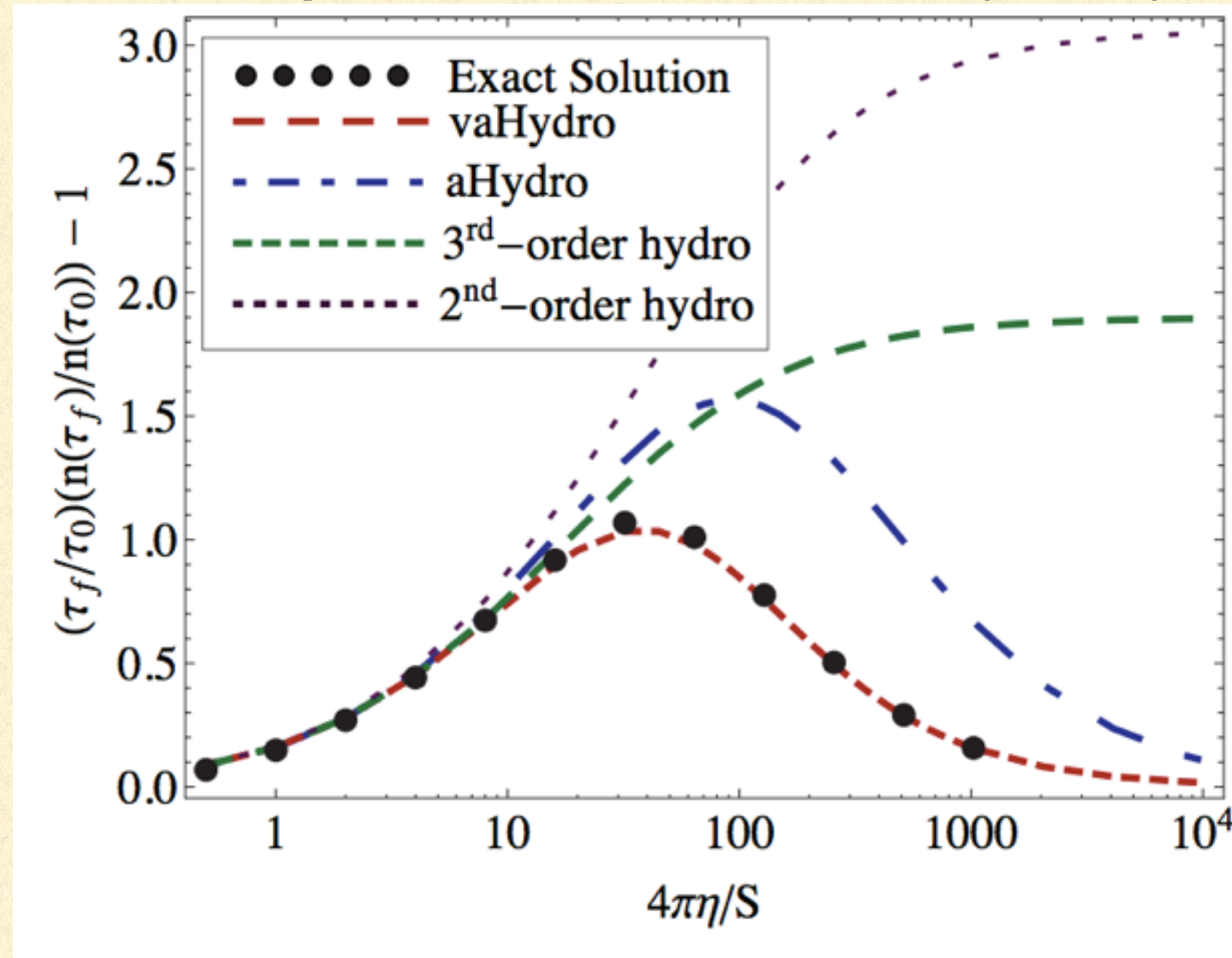
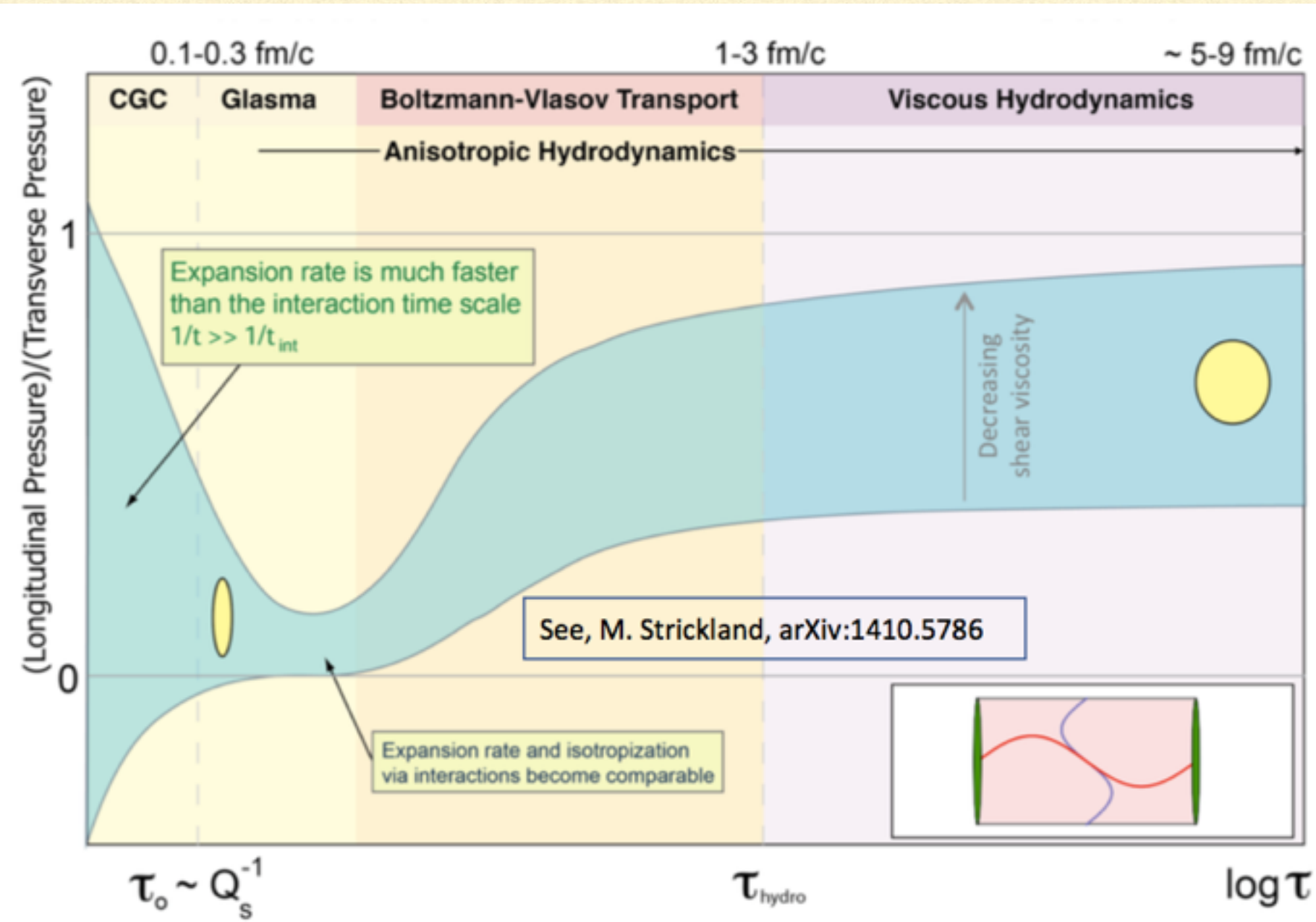


# 流体化

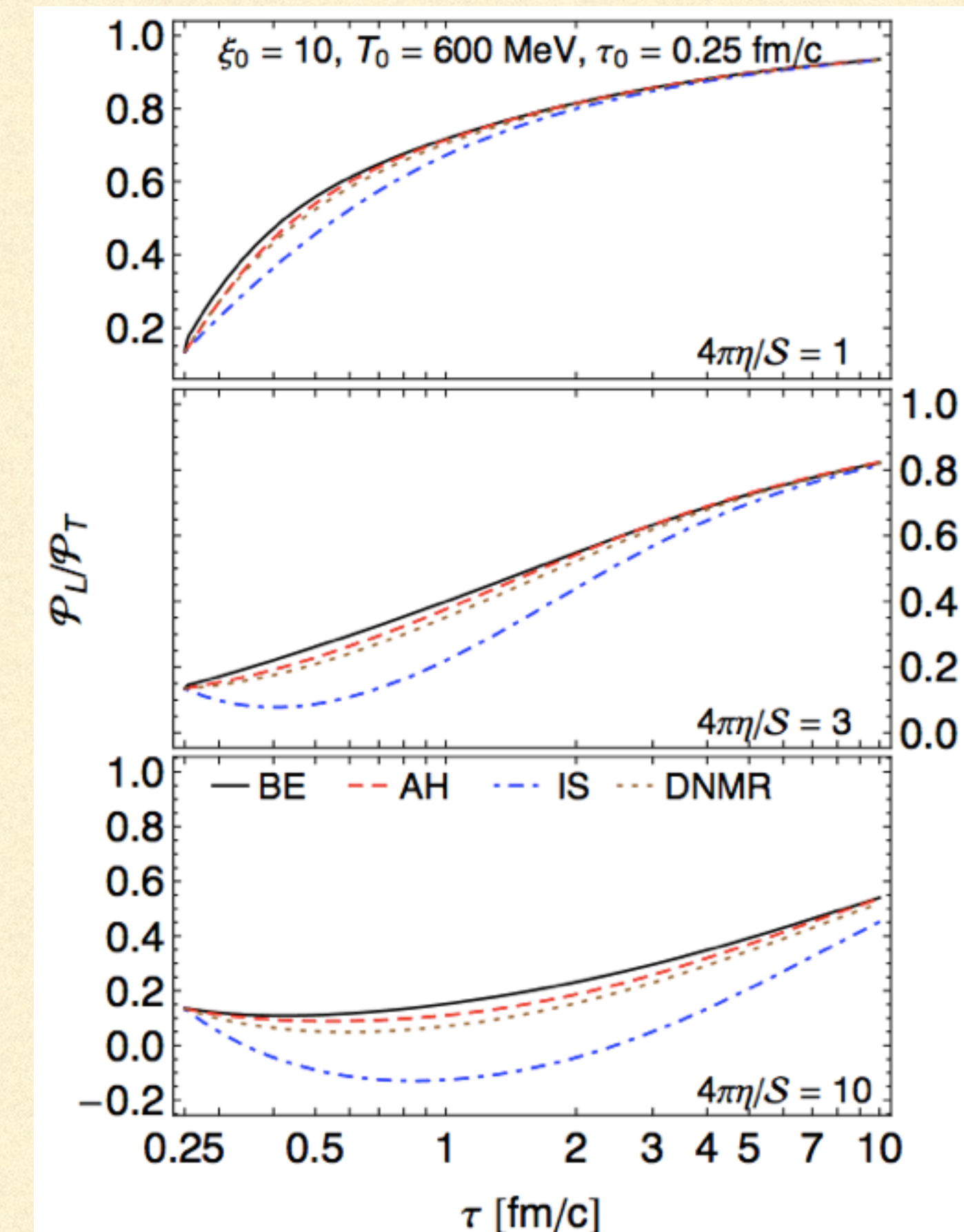
A. Mazeliauskas, QM2018,  
M. Alqahtani, QM2018

- Free streaming (IP-Glasma)
- Kinetic Theory or Anisotropic Hydro

Phys.Rev. C90, 044908 (2014)



1410.5786





# ANISOTROPIC HYDRO

A. Mazeliauskas, QM2018,  
M. Alqahtani, QM2018

- 完全に流体化する前の anisotropy を取り入れる
  - 物性量は どう変わる？
    - $\eta/s = 0.16$  (Glauber I.C.).
    - 昔は 0.08 程度.

→ 流体化過程の重要性

$$f(x, p) = f_{\text{eq}} \left( \frac{\sqrt{p^\mu \Xi_{\mu\nu}(x) p^\nu}}{\lambda(x)} \right) + \delta f(x, p)$$

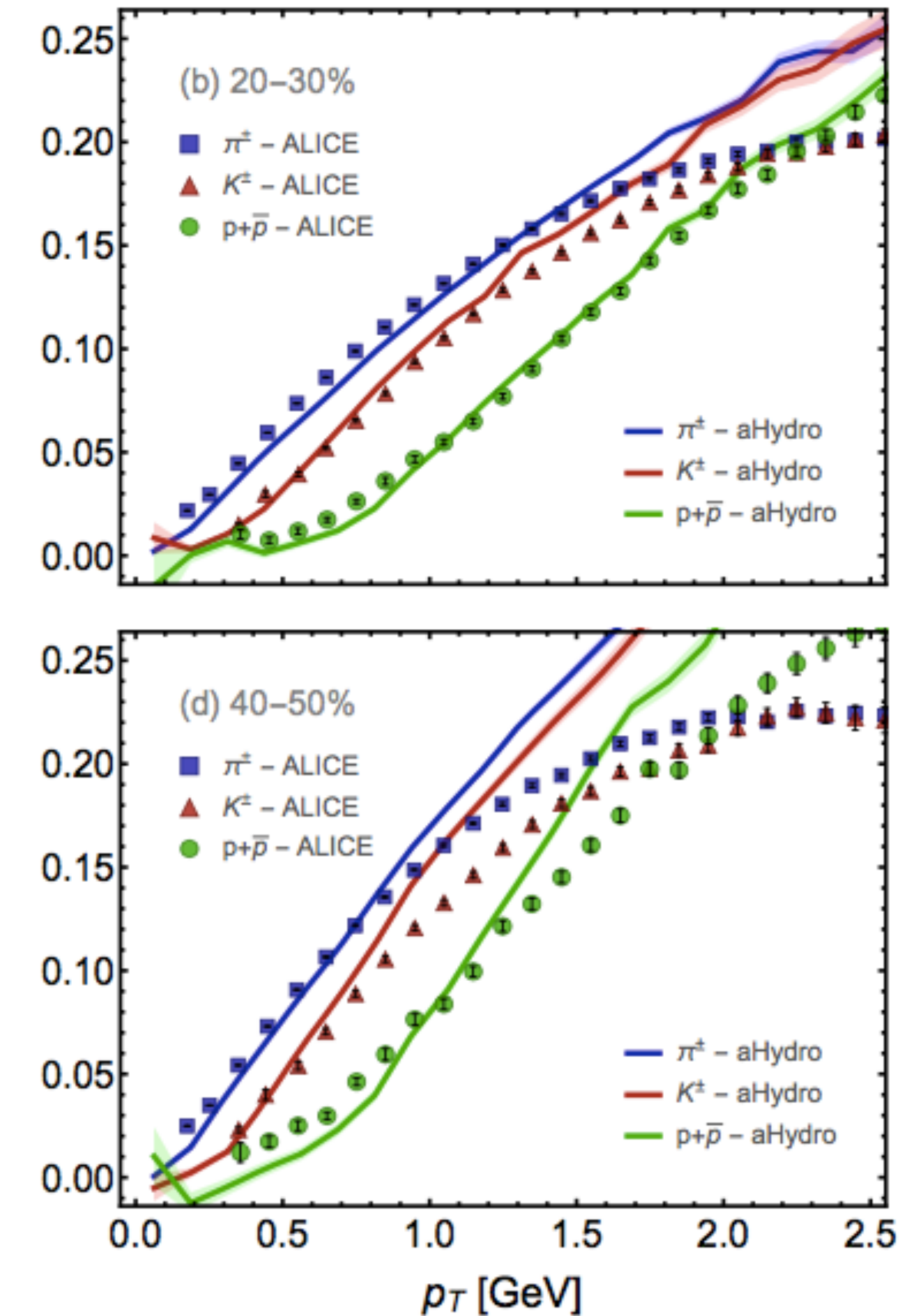
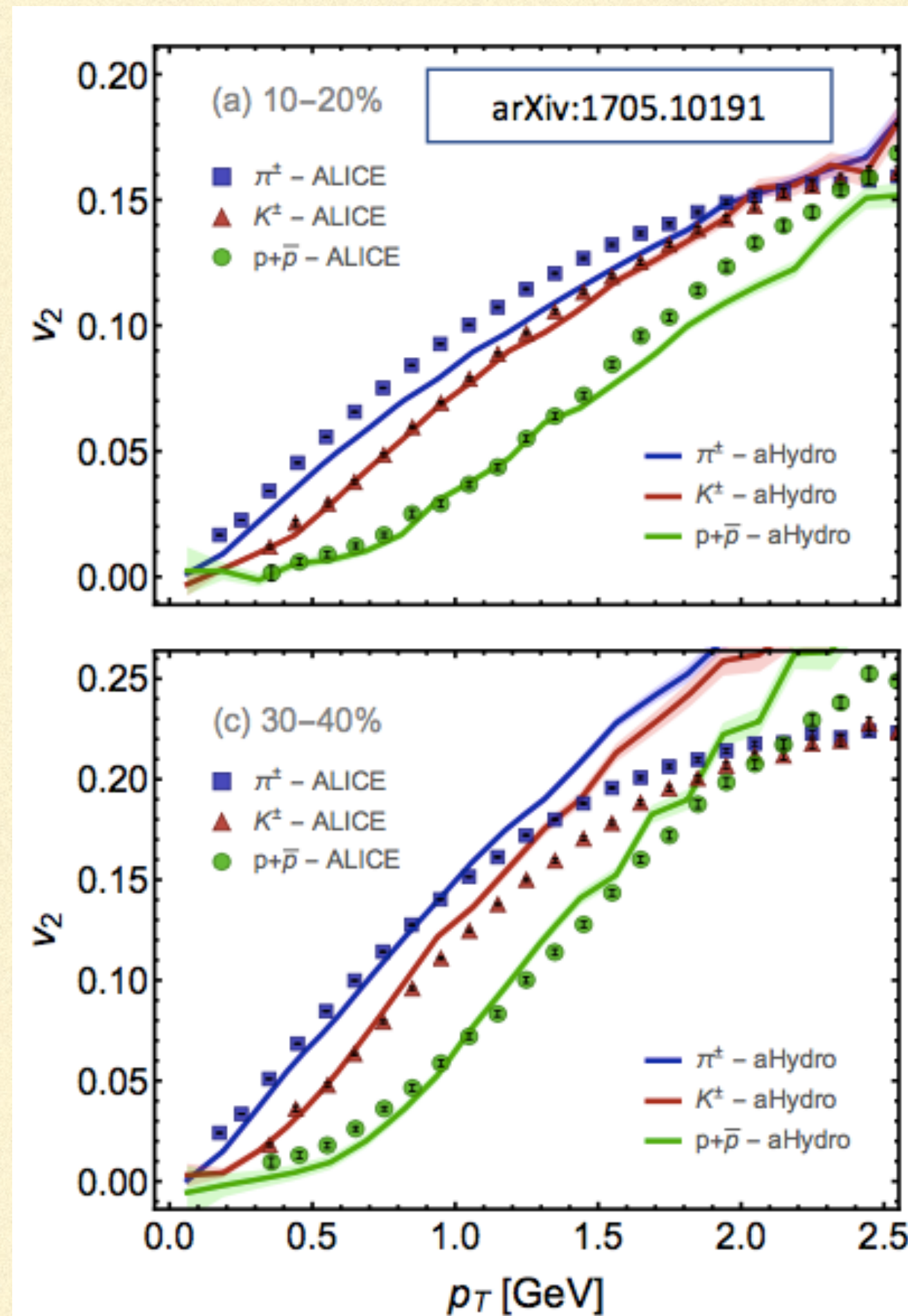
$$\Xi^{\mu\nu} = u^\mu u^\nu + \xi^{\mu\nu} - \Delta^{\mu\nu} \Phi$$

$u^\mu$  LRF four velocity

$\xi^{\mu\nu}$  the traceless anisotropy tensor

$\Delta^{\mu\nu}$  the transverse projector

$\Phi$  the degree of freedom associated with bulk



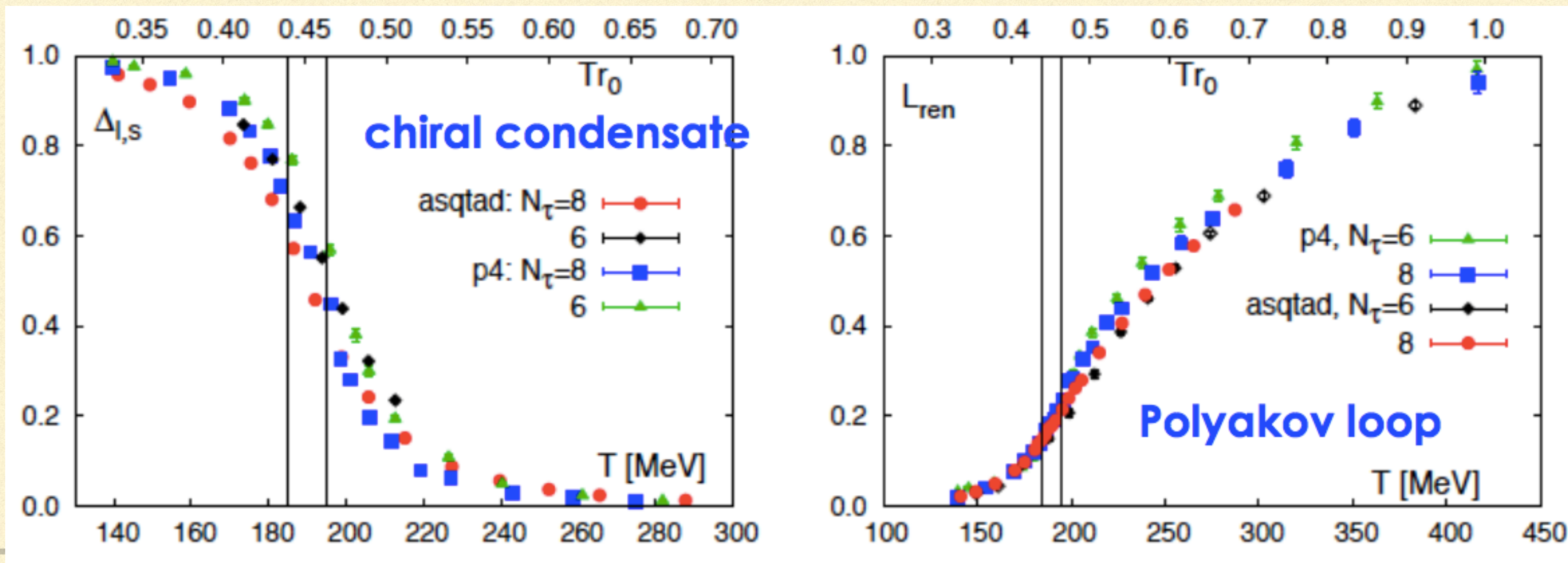
$$\frac{\eta}{s} = 0.159, T_0 = 600 \text{ MeV at } \tau_0 = 0.25 \text{ fm/c, } T_{FO} = 130 \text{ MeV.}$$

# QGP = 熱平衡系？

- 流体化はしているが、熱化しているとは限らない
  - 流体化 = エネルギー密度や圧力のために状態方程式以外の関係が成立し、巨視的には流体方程式に従うようになる状態
  - 熱化 = 圧力や内部エネルギー密度等の熱力学関数や粒子の運動量分布が熱分布に従うようになる状態
- **局所熱平衡を必要とする結果は？熱化していない場合の物性量(の意味)は？**
- **実験で熱化のシグナルをきちんと検証することが重要**
  - **RHICやLHCの低運動量光子の起源を理解することが重要**

# クロスオーバー相転移

- 秩序変数が温度とどう変わるか？ 流体モデルにどう入っているのか？
- 実験で温度の関数として直接測れれば嬉しいのだが。。。。

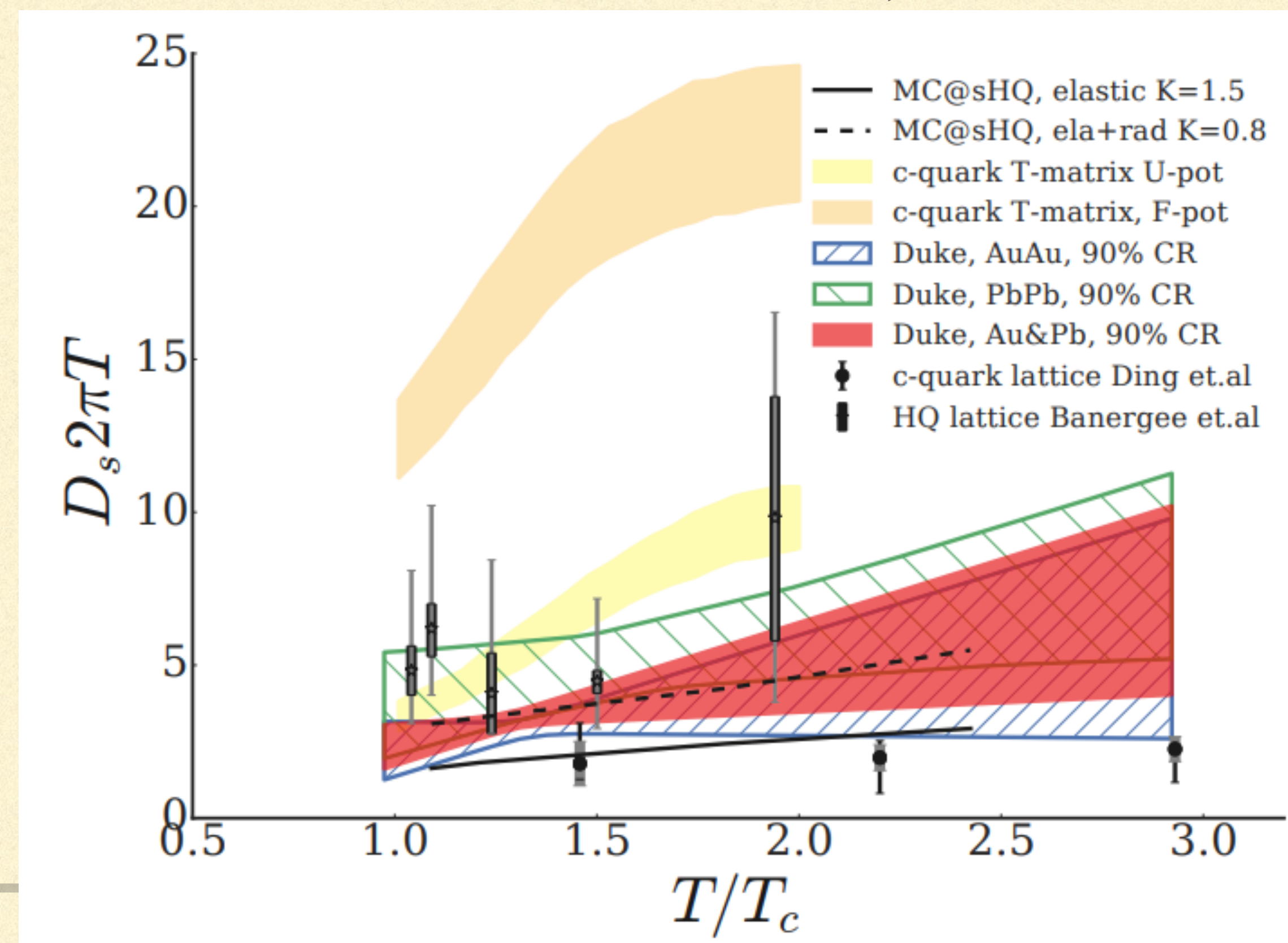
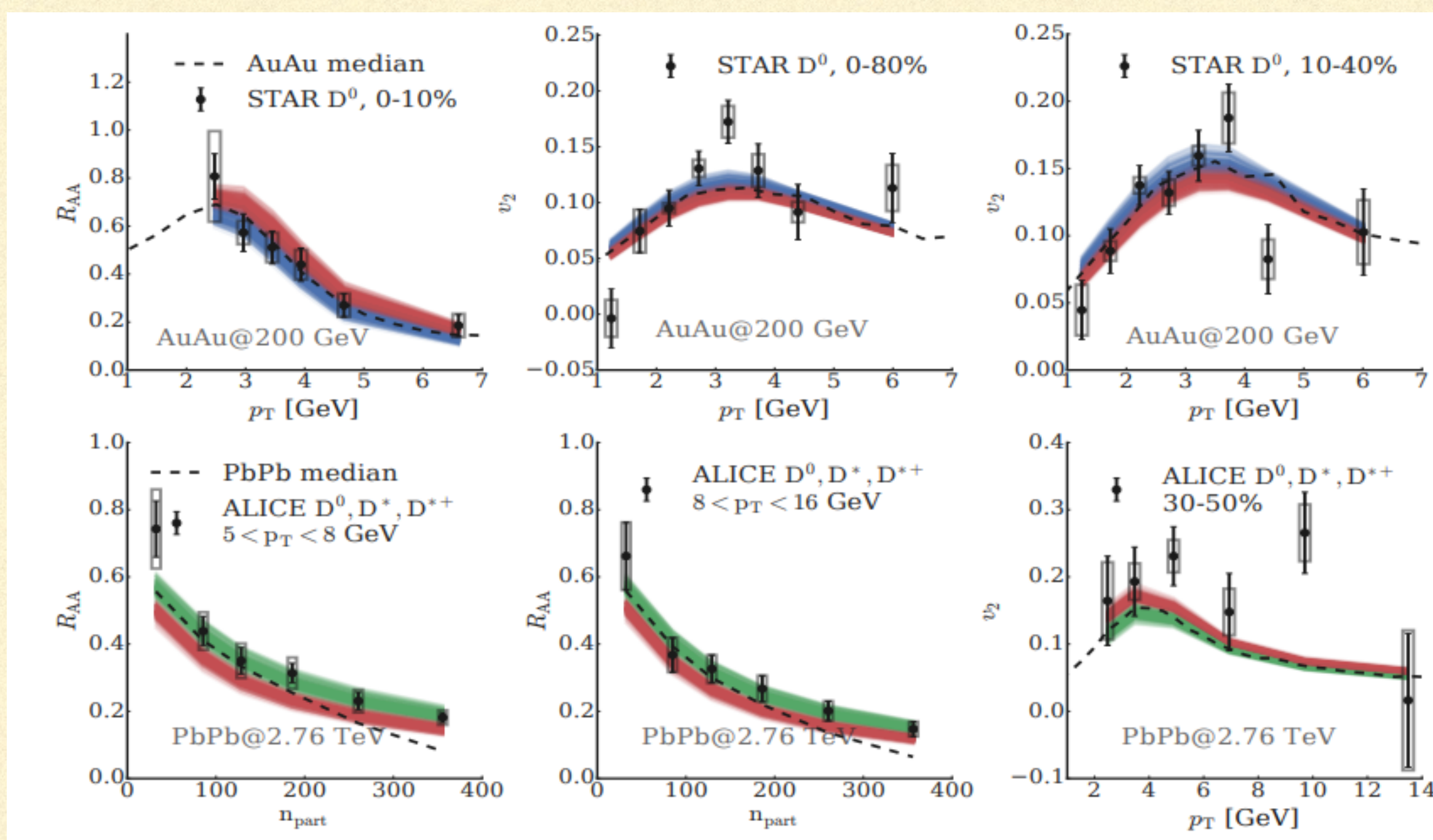


# 他の物性量—拡散係数

## ■ 低い運動量の重クォーク測定→拡散係数(ブラウン運動)

### ■ $\eta/s$ と同様に高温側はよく制限できていない

Y. Xu et al., arXiv:1704.07800

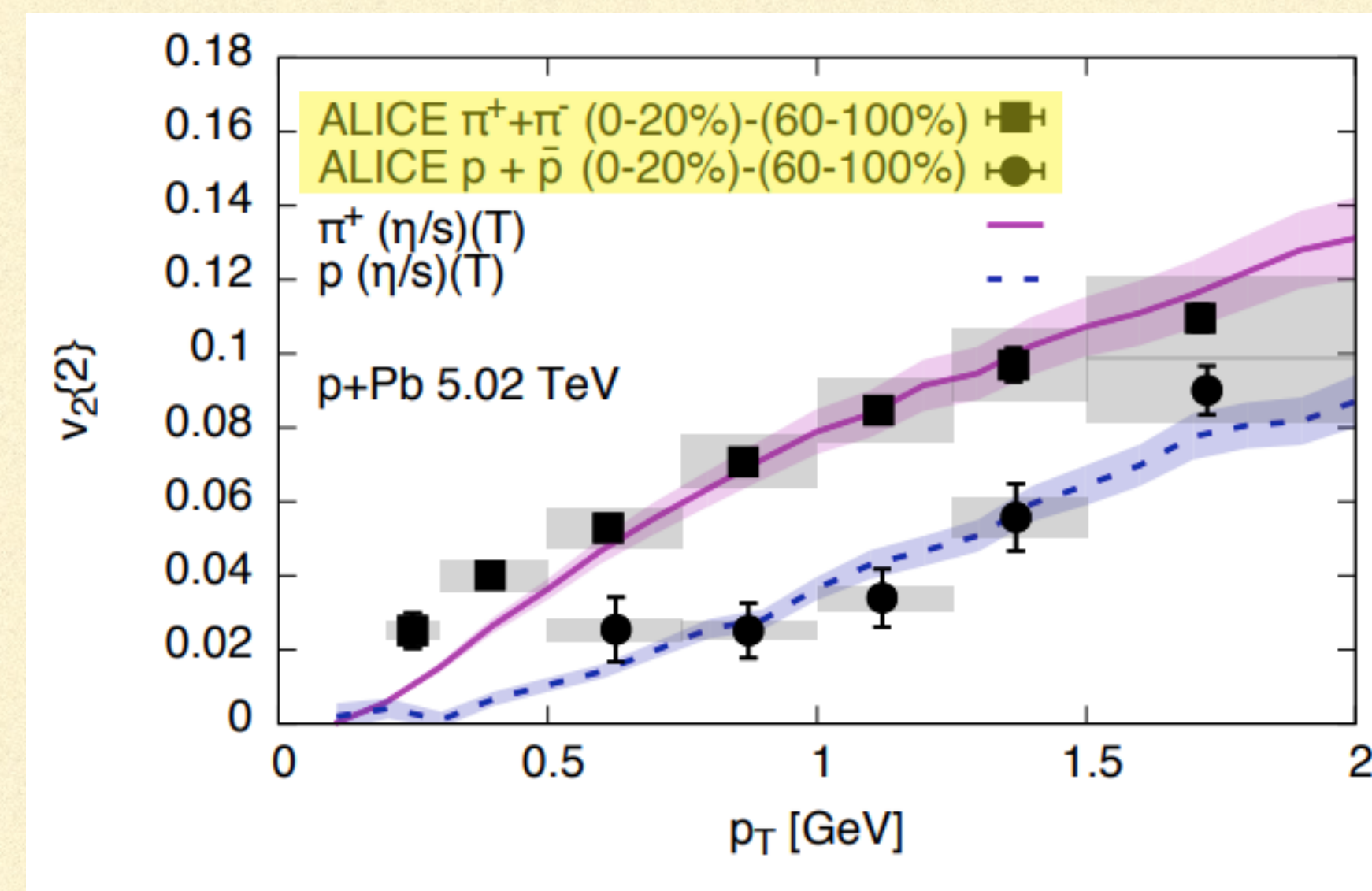
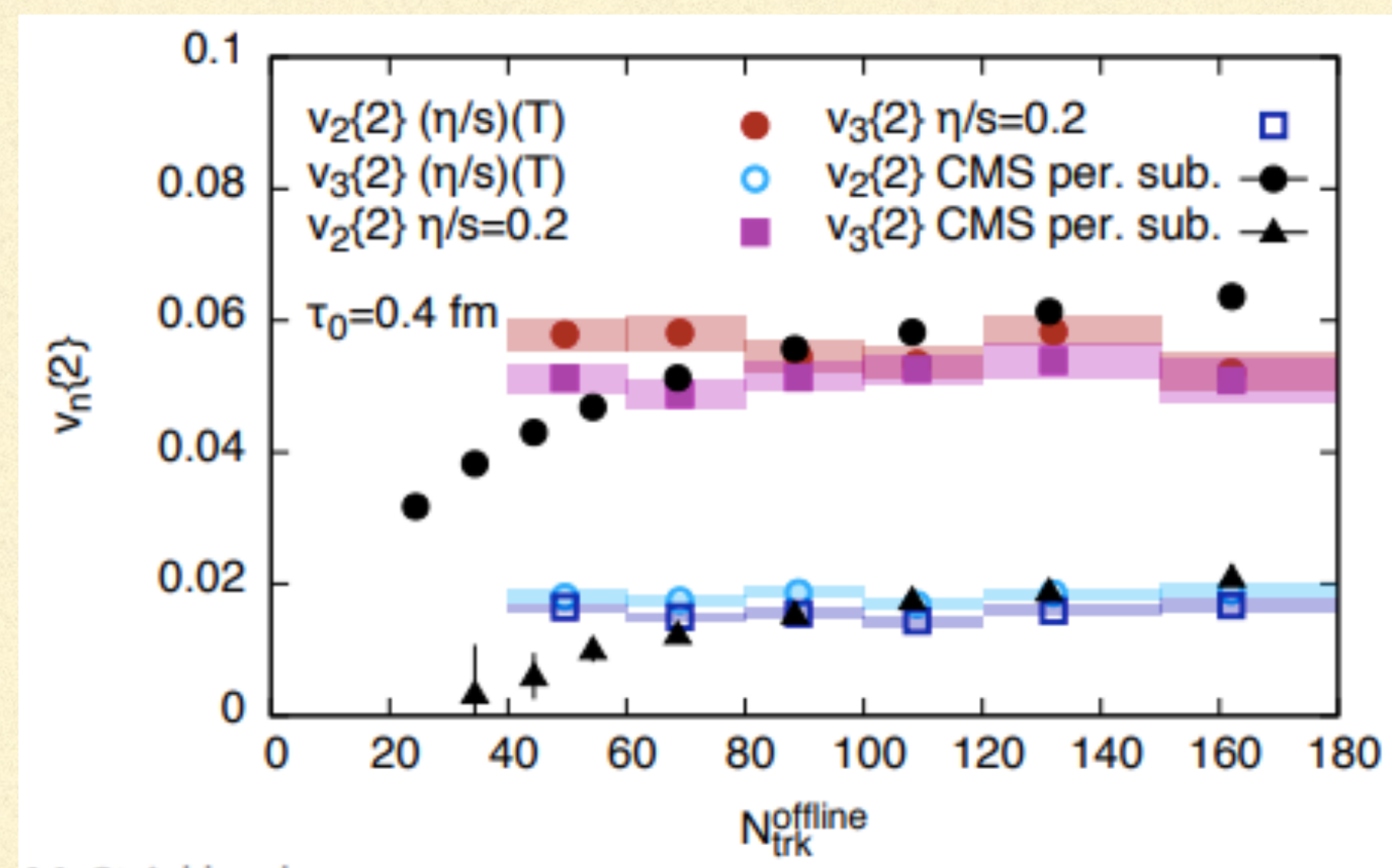
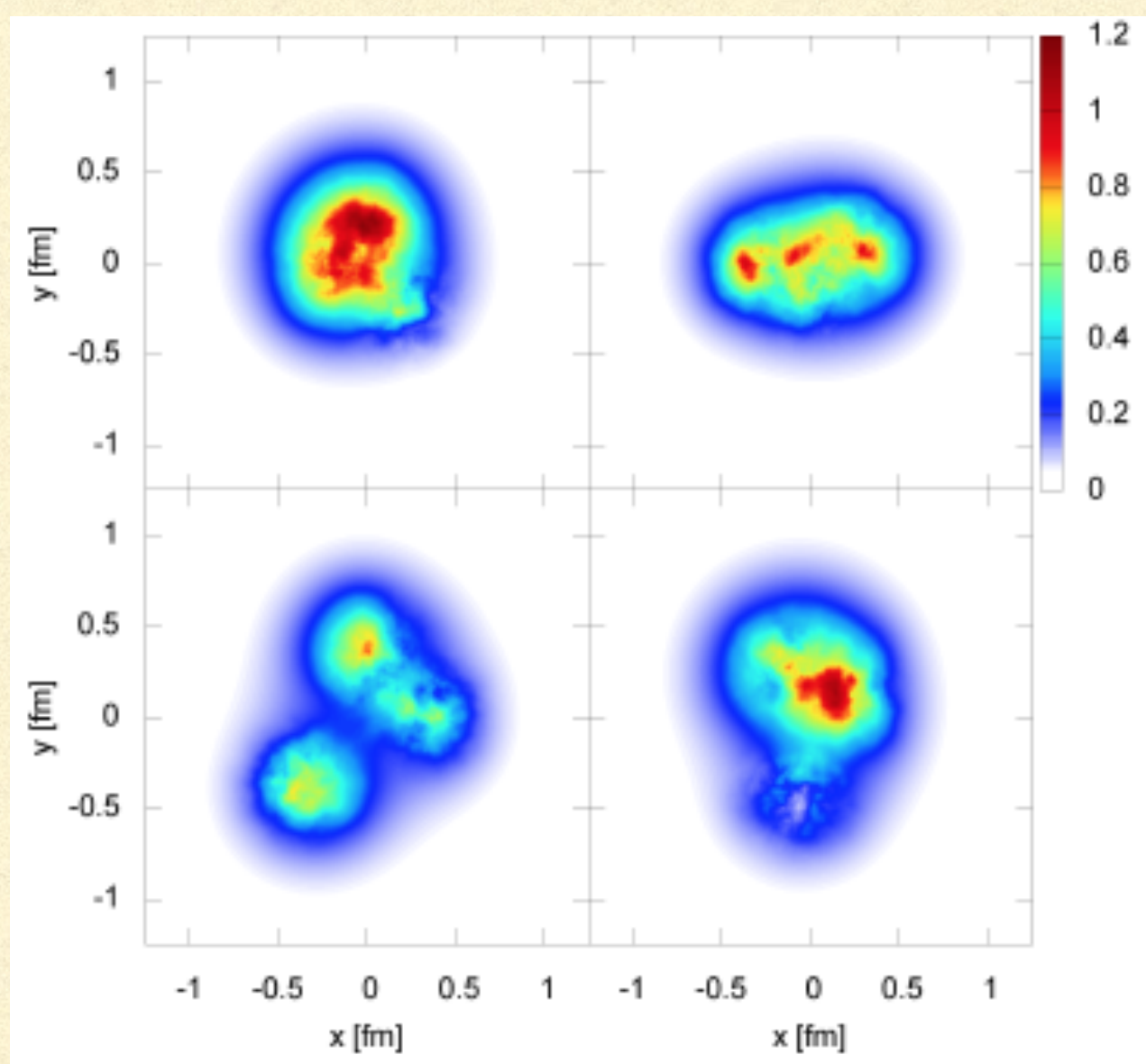


# 小さい系での $V_N$ : 流体計算

- IP-Glasma + MUSIC(hydro) + UrQMD

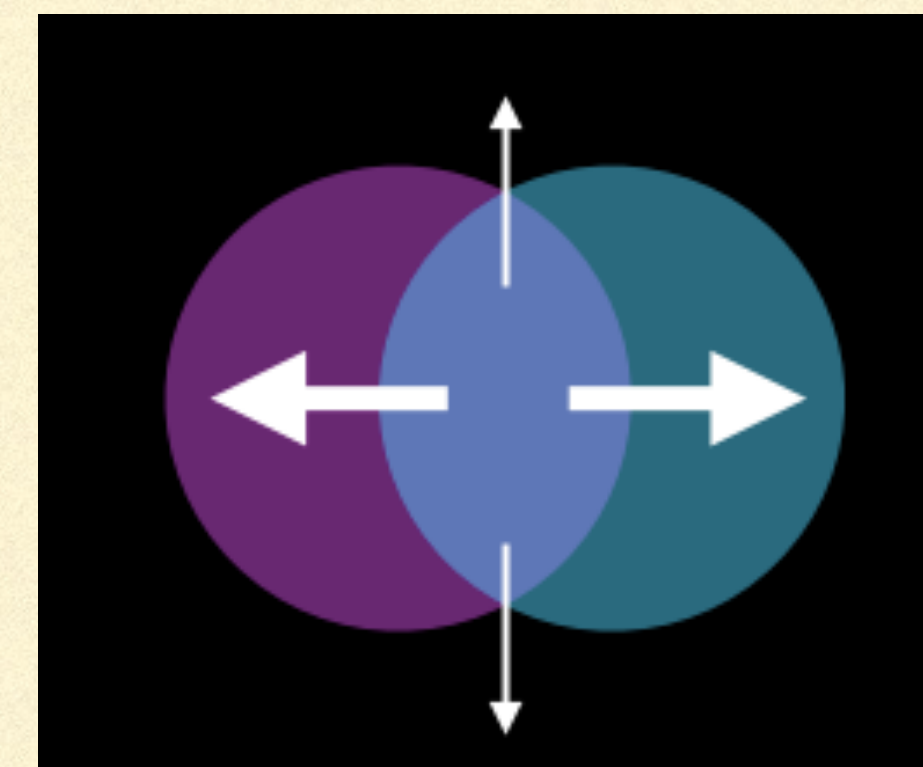
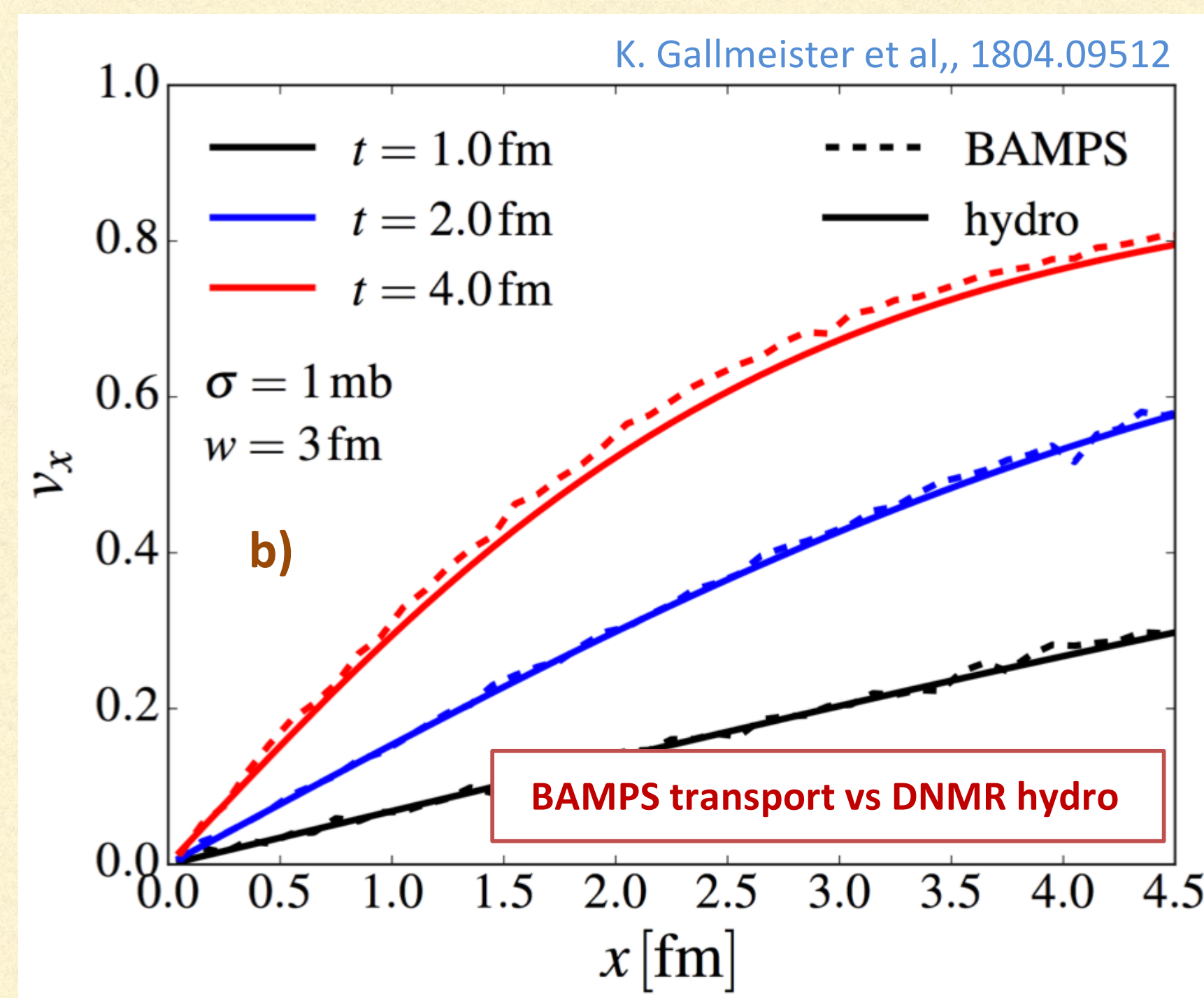
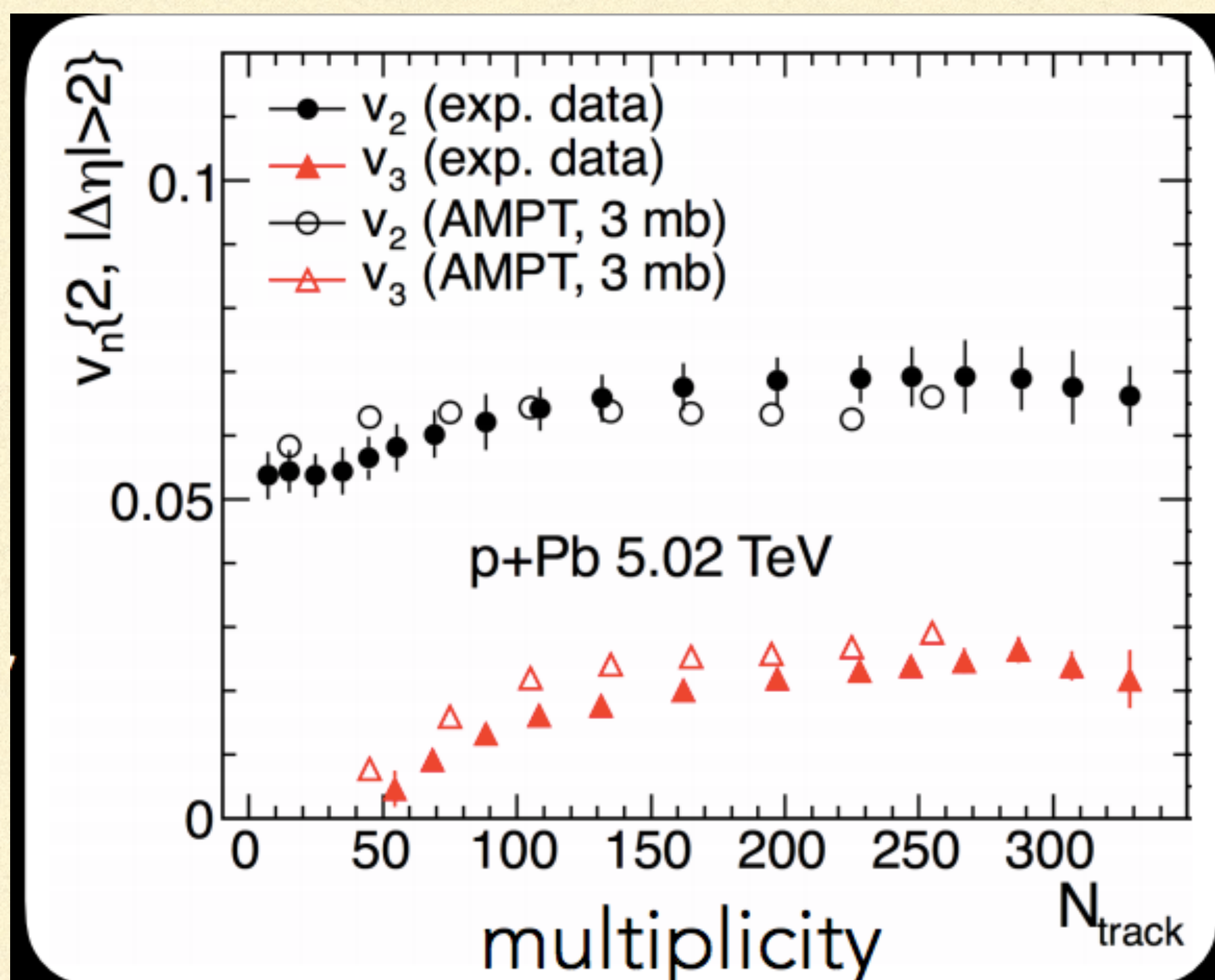
Michael Strickland, QM2018

- sub-nucleonic fluctuations



# 小さい系での $V_N$ : 輸送計算

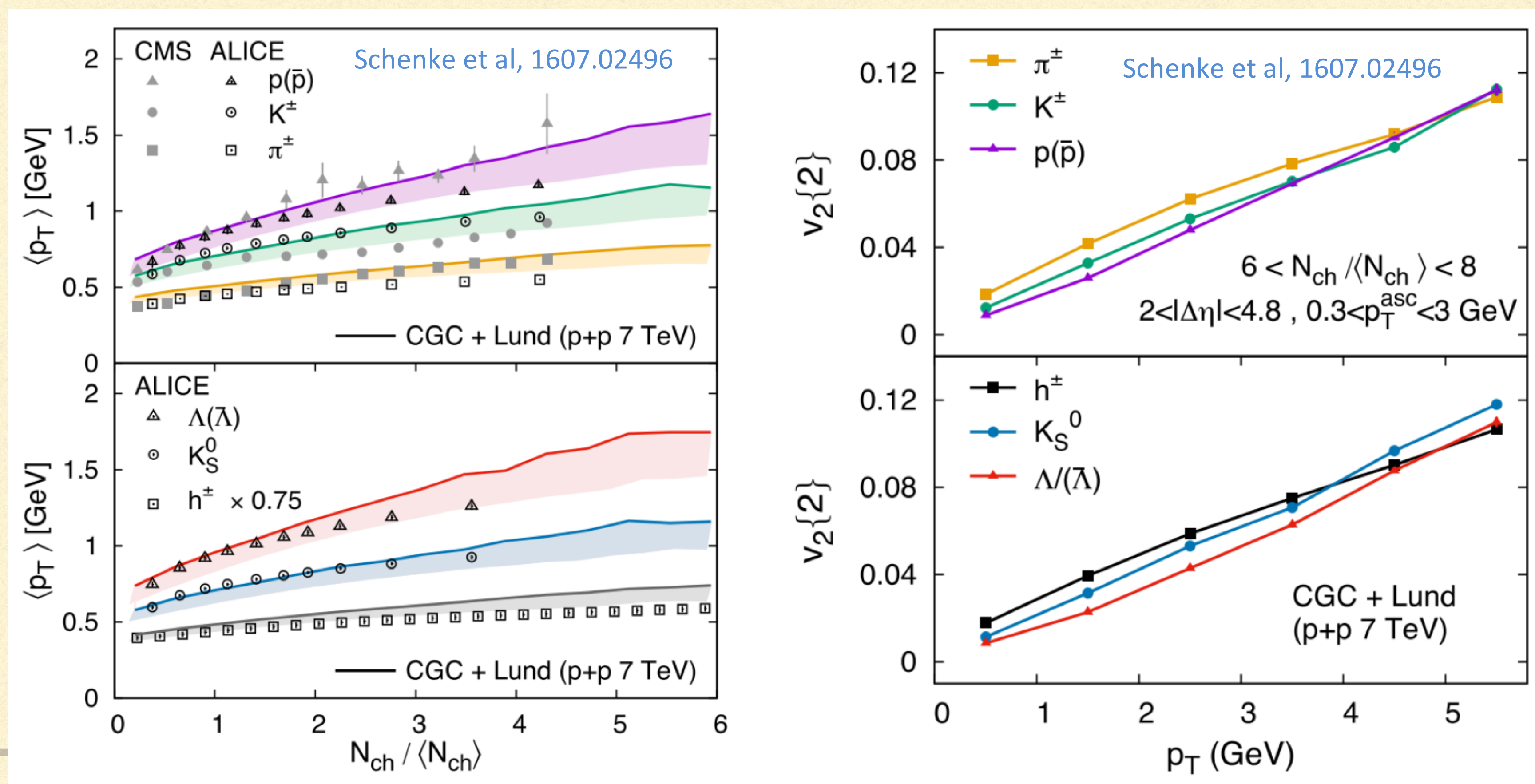
- Transport model(Kinetic theory, weak coupling)でもOK



短軸方向のパートンは  
はエスケープする  
arXiv:1803.02072

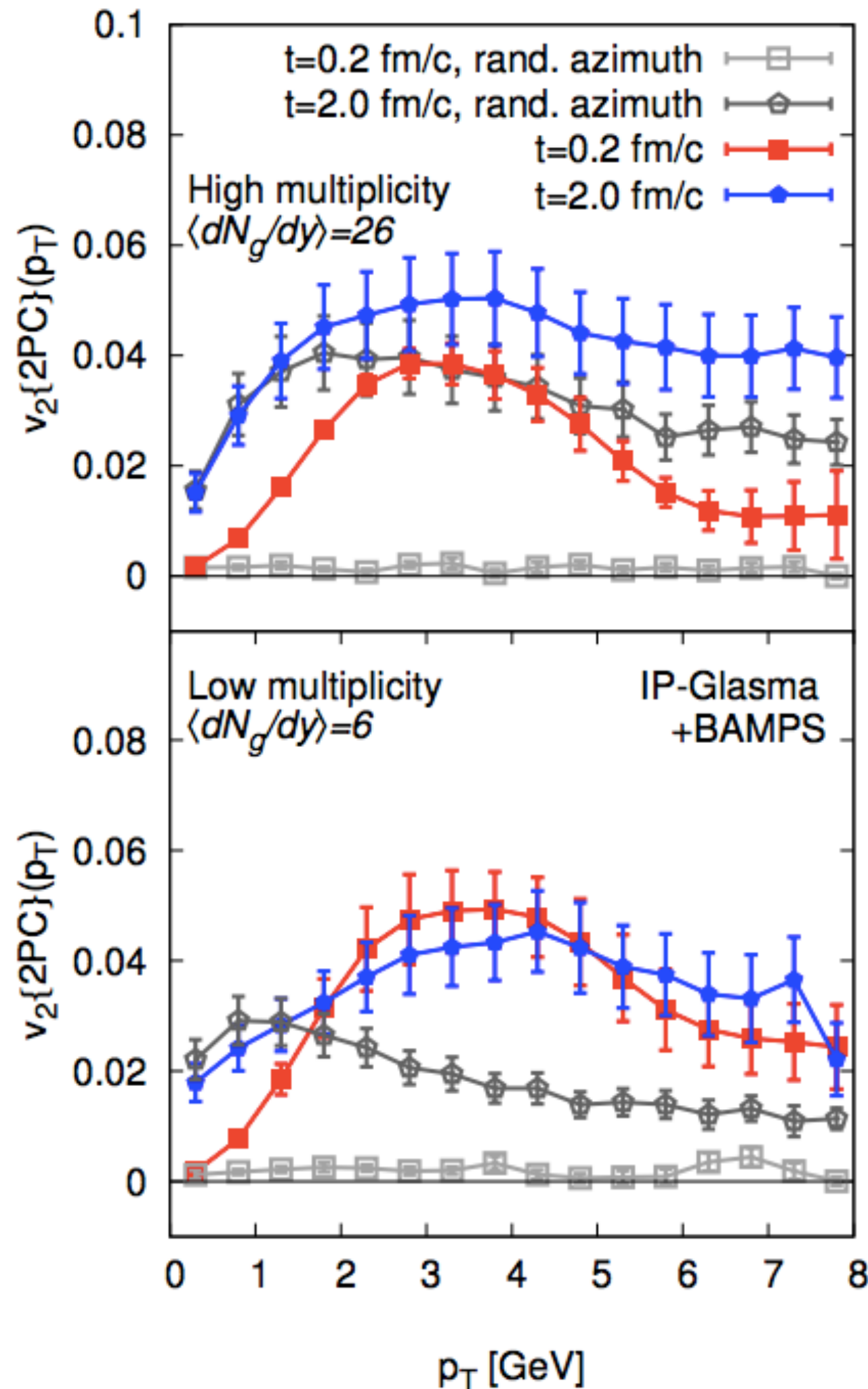
# 小さい系での $V_N$ : 初期の効果

## ■ 流体を除く、初期の効果のみ(IP-Glasma + Lund)



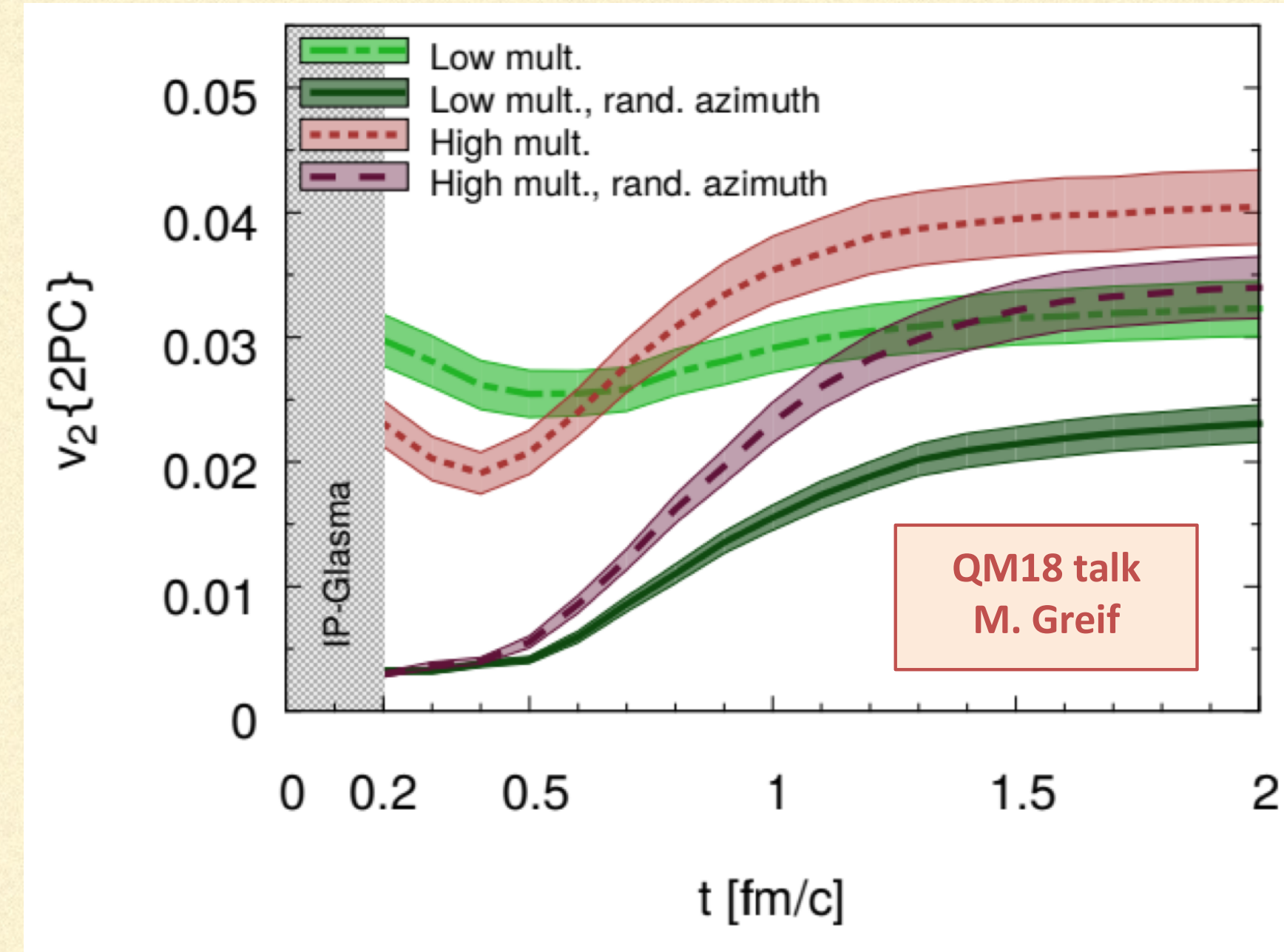
# 小さい系の物理：終状態効果と初期効果の競合

M. Greif, C. Greiner, B. Schenke, S. Schlichting, Z. Xu, arXiv:1708.02076, Phys. Rev. D96, 091509(R)



with initial effects  
without initial effects

- 低い運動量では終状態
- 高い運動量では初期状態の効果が残る
- A-Aでの流体化の理解に役立つ？(ボトムアップ)





# 現状

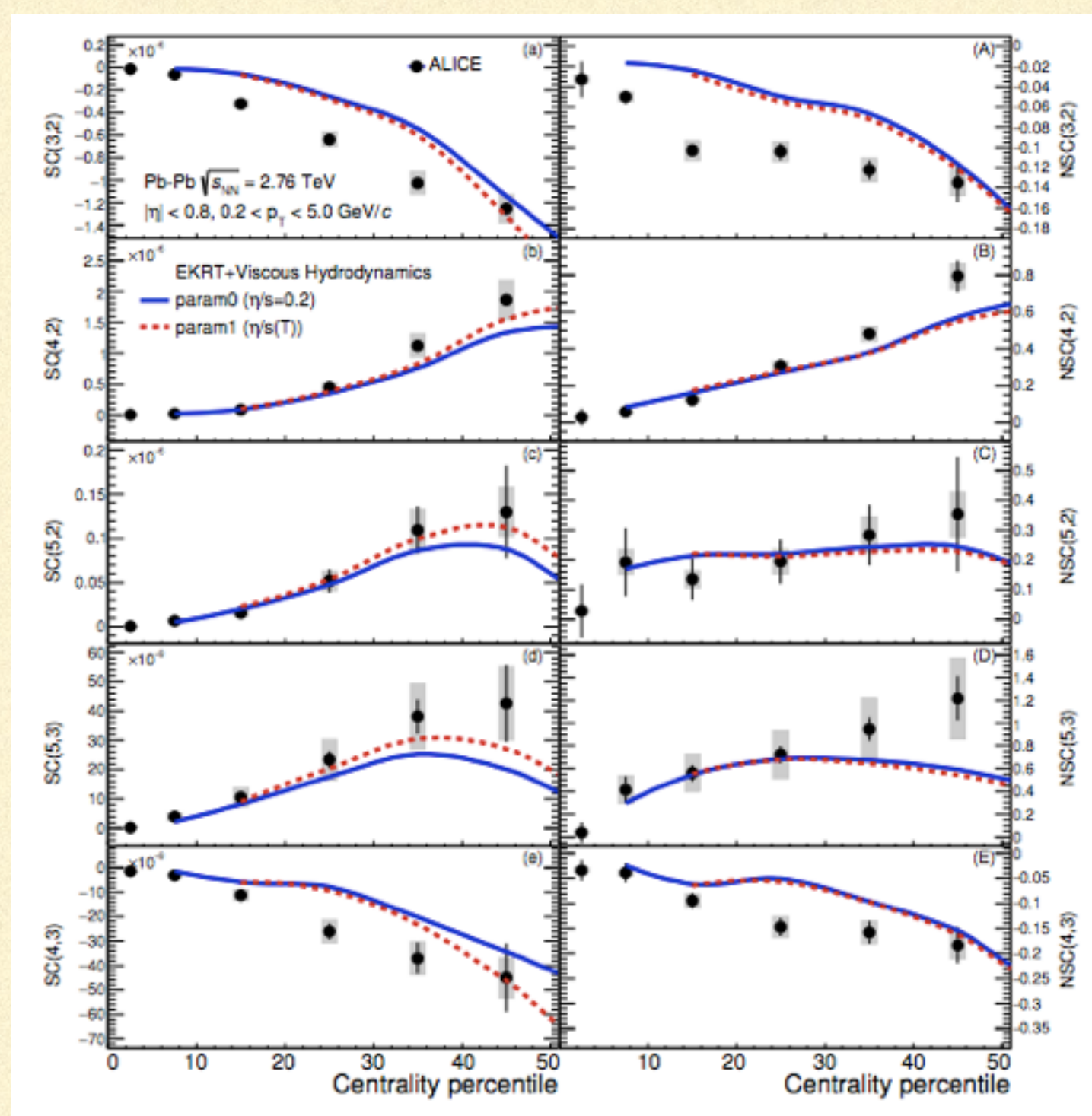
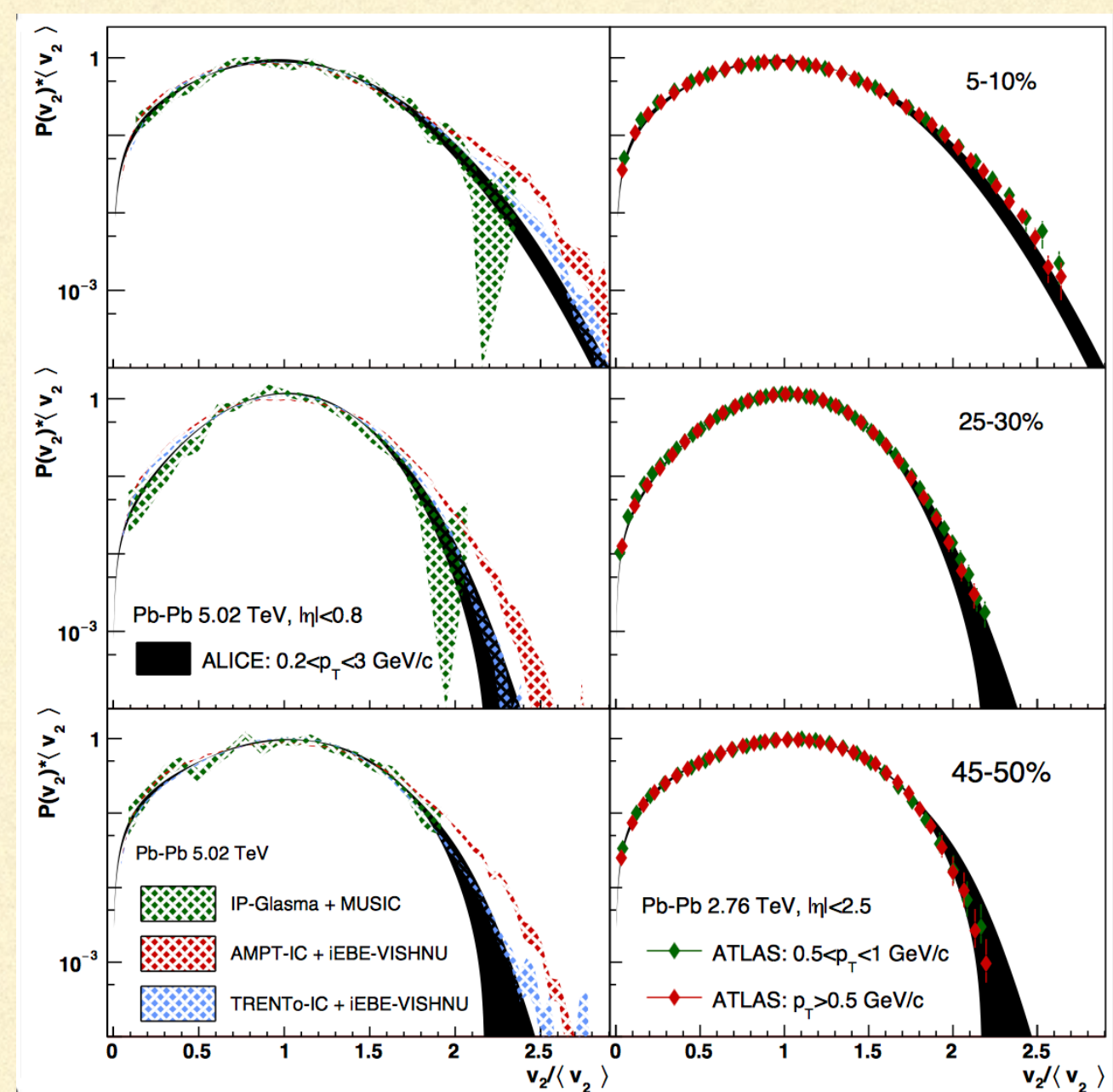
- 初期状態 → グルーオン飽和 + sub nucleonスケールの揺らぎ
- $\eta/s$ の制限 → 初期状態、状態方程式、 $\zeta/s$ 、流体揺らぎに依存。まだ十分に制限されていない。特に高温側。
- $\zeta/s$ の制限 → まだ十分に制限されていない。 $\eta/s$ や初期状態に依存。
- 流体による時空発展 → fluctuating hydrodynamics, viscous anisotropic hydrodynamics, 電磁流体など。渦度も重要なはず。→ **統一化への課題は？**
- クロスオーバー、フリーズアウト → 今の現象論計算は現実的な扱いになっているのか？
- 熱化 → QGP = 熱平衡系を証明・否定する直接的な証拠は？ 低運動量光子生成の解釈は？
- 他の物性量 → 重クォーク測定による拡散係数のみ( $T_c$ 付近のみ)。伝導度・比熱などはまだ。
- 小さい系 → 初期と終状態の競合。終状態は、HydroなのかTransportなのかは未解決。Hydroは本当に適用できる？

# (個人的に思う)鍵となる測定

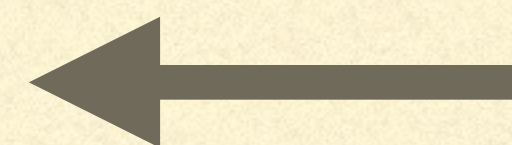
- 同定されたハドロンの高次の集団運動とフロー相関の因子化(運動量、異次フロー、ラピディティ) → 初期条件や粘性( $\eta/s$ ,  $\zeta/s$ , EoS)の制限、流体揺らぎ
- 熱的光子とHBT、熱的レプトン対、偏極 → 熱化の可否、高温側の物性、初期-時空発展-クロスオーバーのダイナミクス
- 低質量ベクトル中間子 → カイラル対称性の回復(?)
- 低運動量の重クォークメソン → 拡散係数
- 低運動量の重クォークバリオン → ダイクォーク構造、相転移(ハドロン化)近傍の性質
- クォークコニウム → クォーク・反クォーク相関(ポテンシャル)
- エキゾチックハドロン → 閉じ込め

# 高次の集団運動

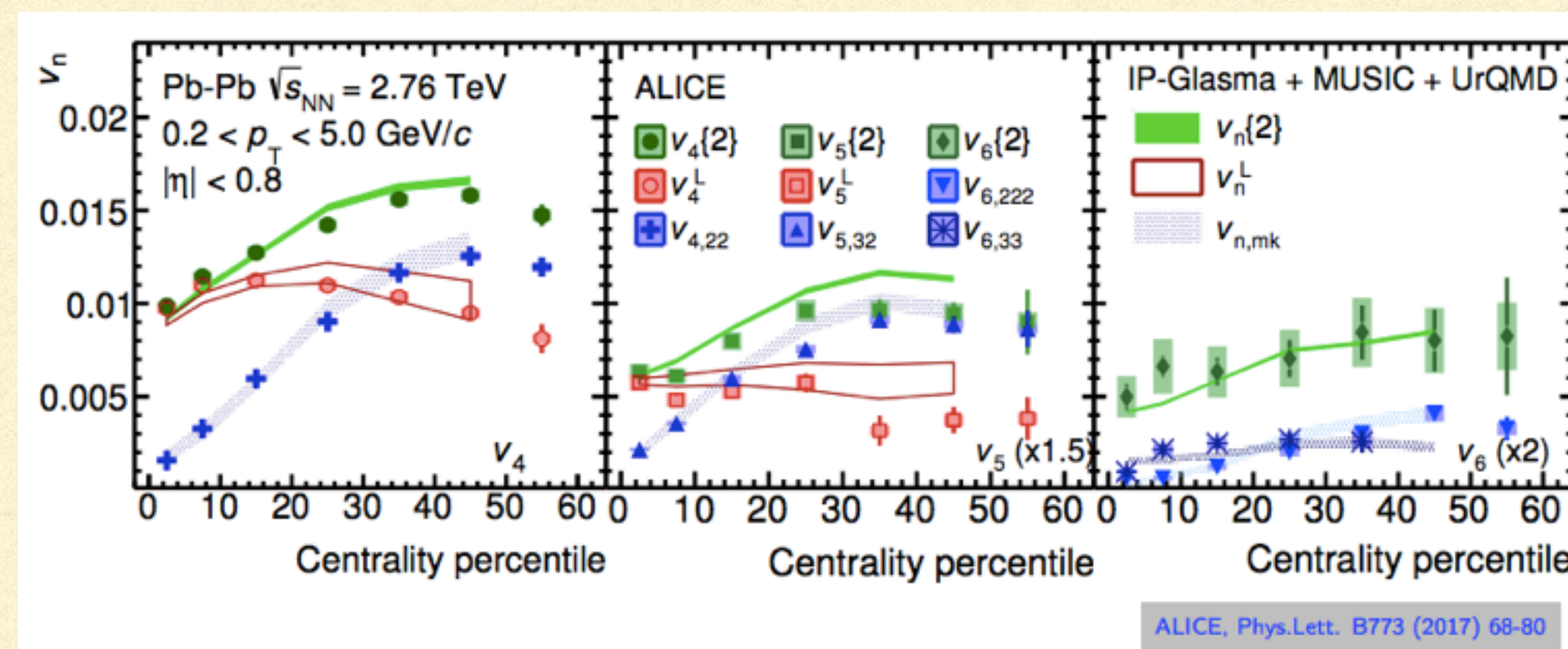
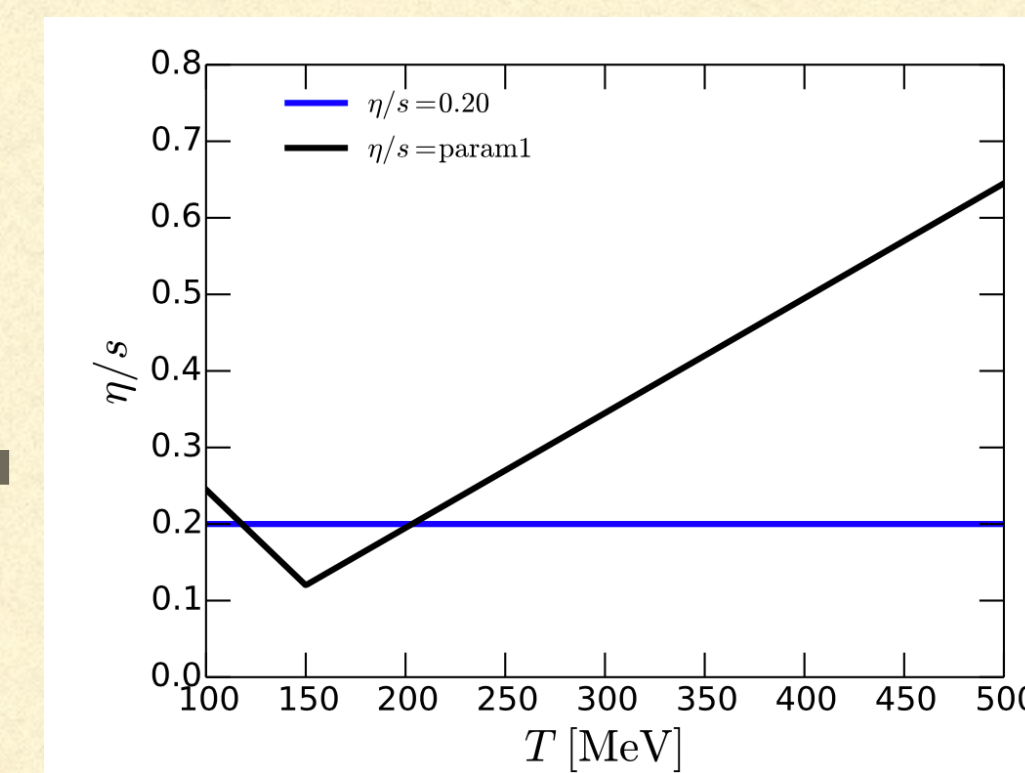
- 事象ごとの集団運動:  $P(v_n)$  → 現状は4次まで。
- $v_n$  同士の相関:  $SC(n,m)$  → (2,3), (2,4), (2,5), (3,4), (3,5)
- 線形と非線形応答



1709.01127



PRC97,034911 (2018)

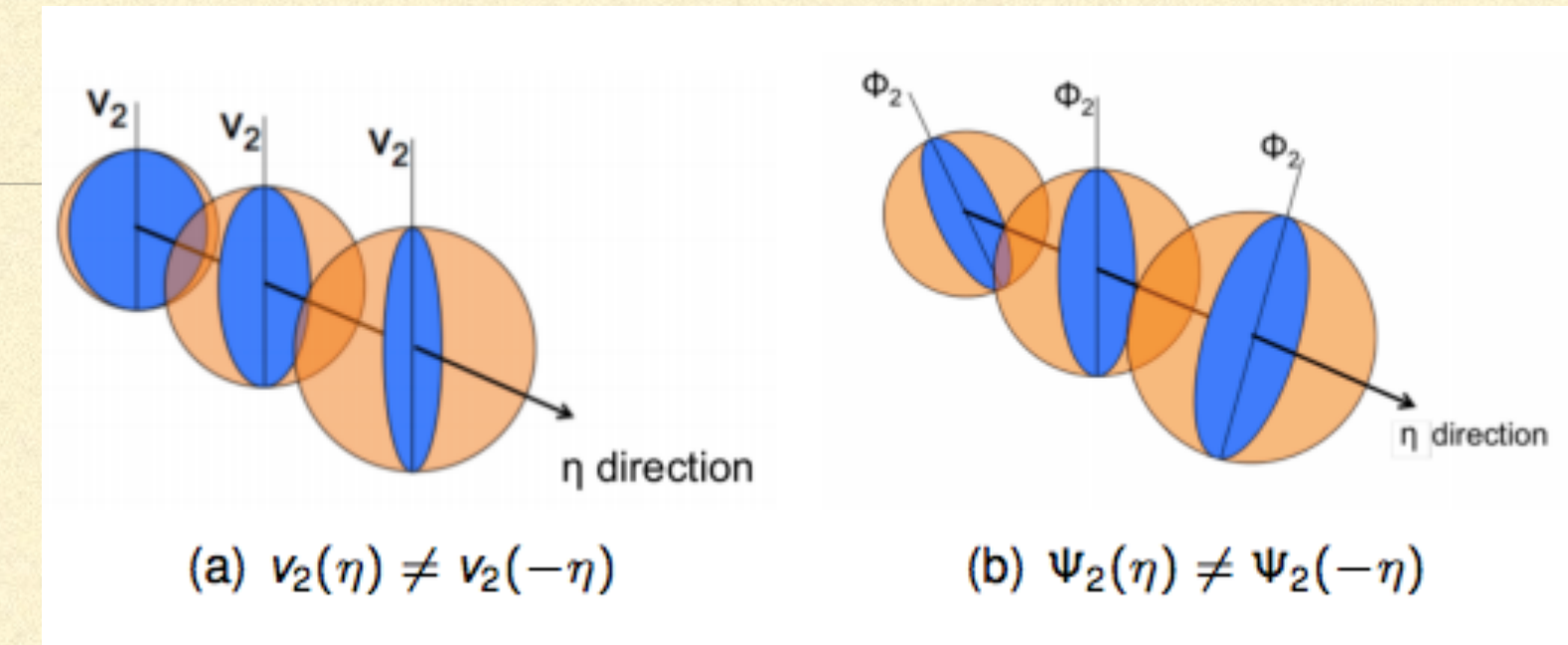


ALICE, Phys.Lett. B773 (2017) 68-80

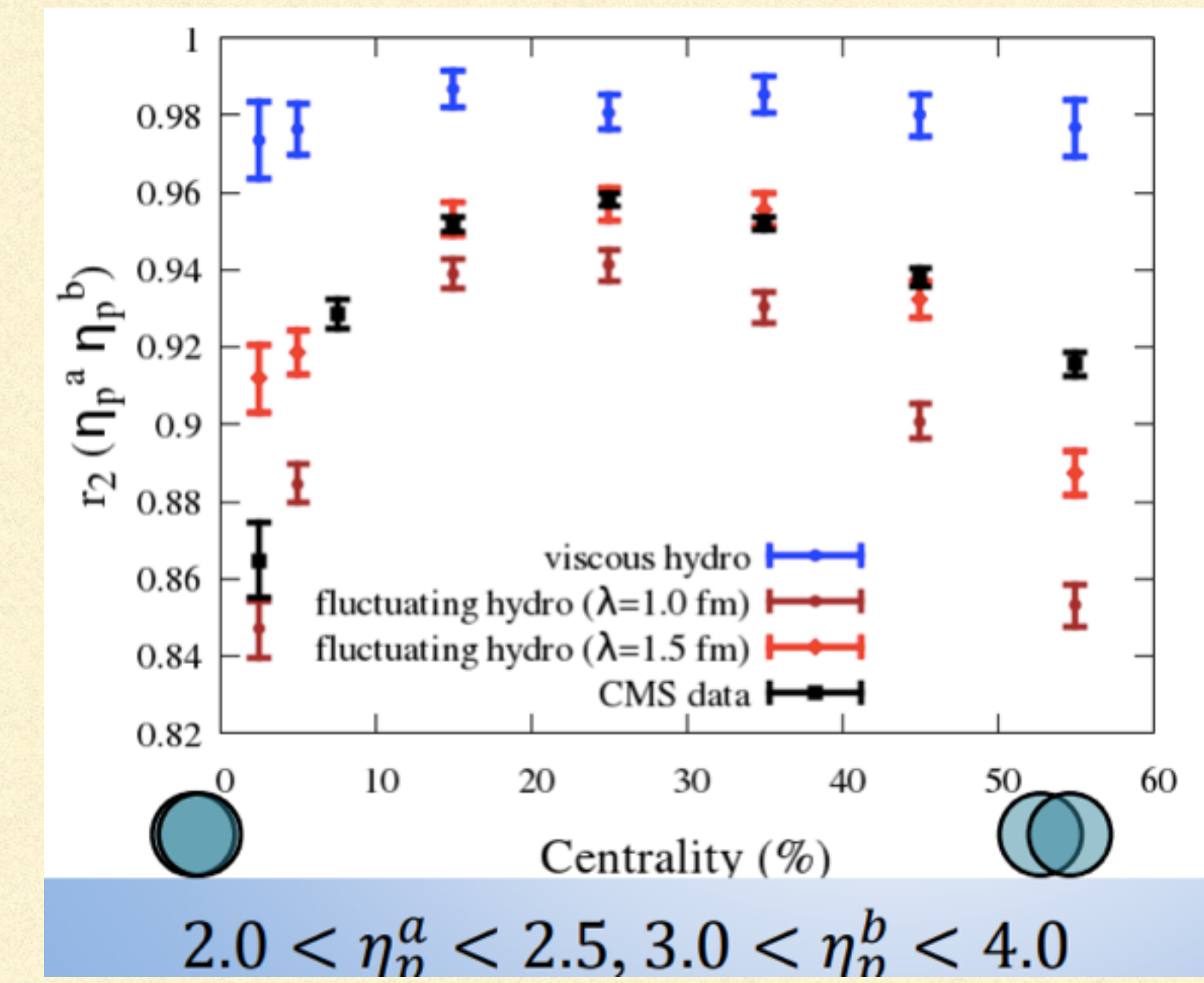
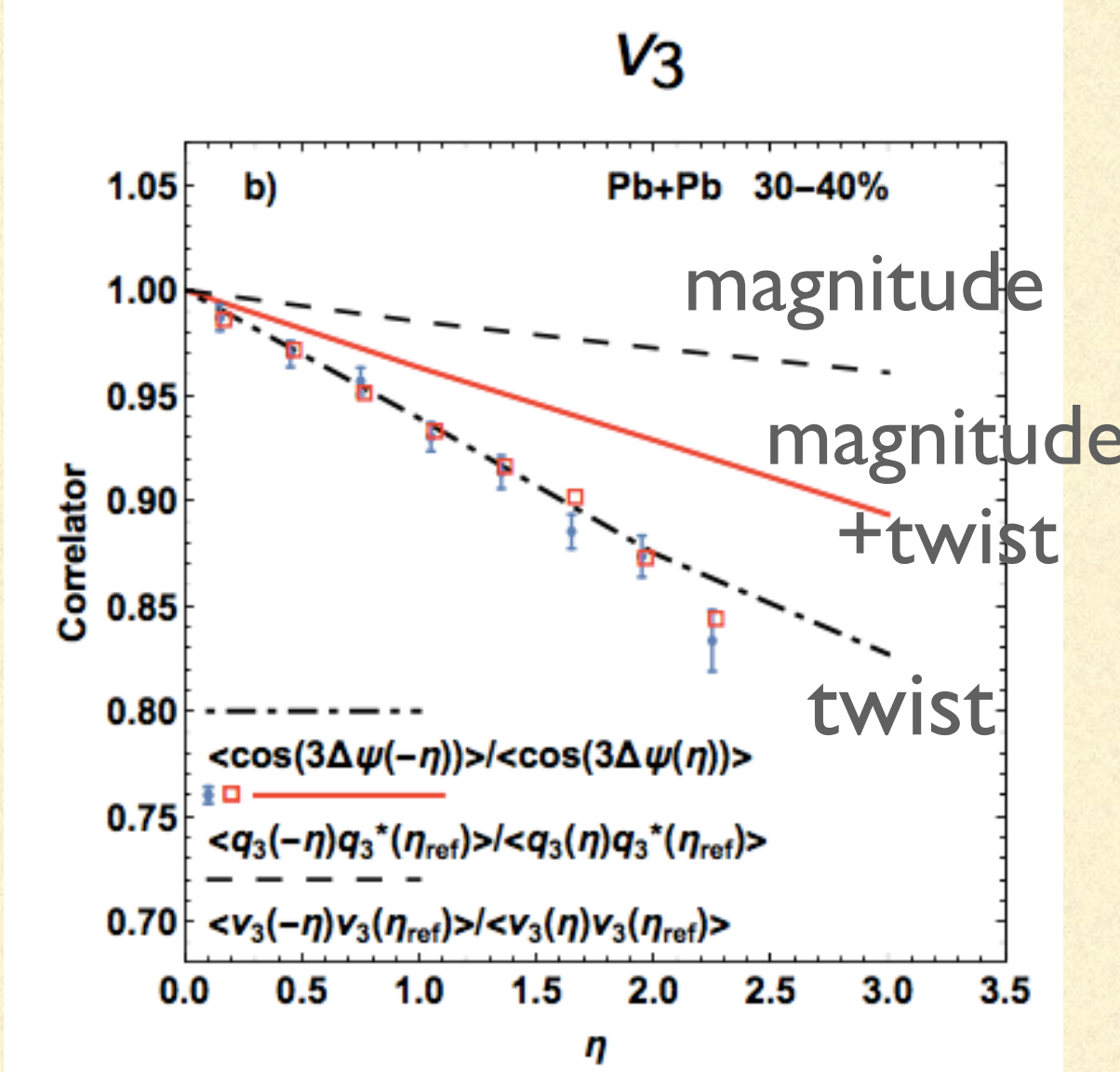
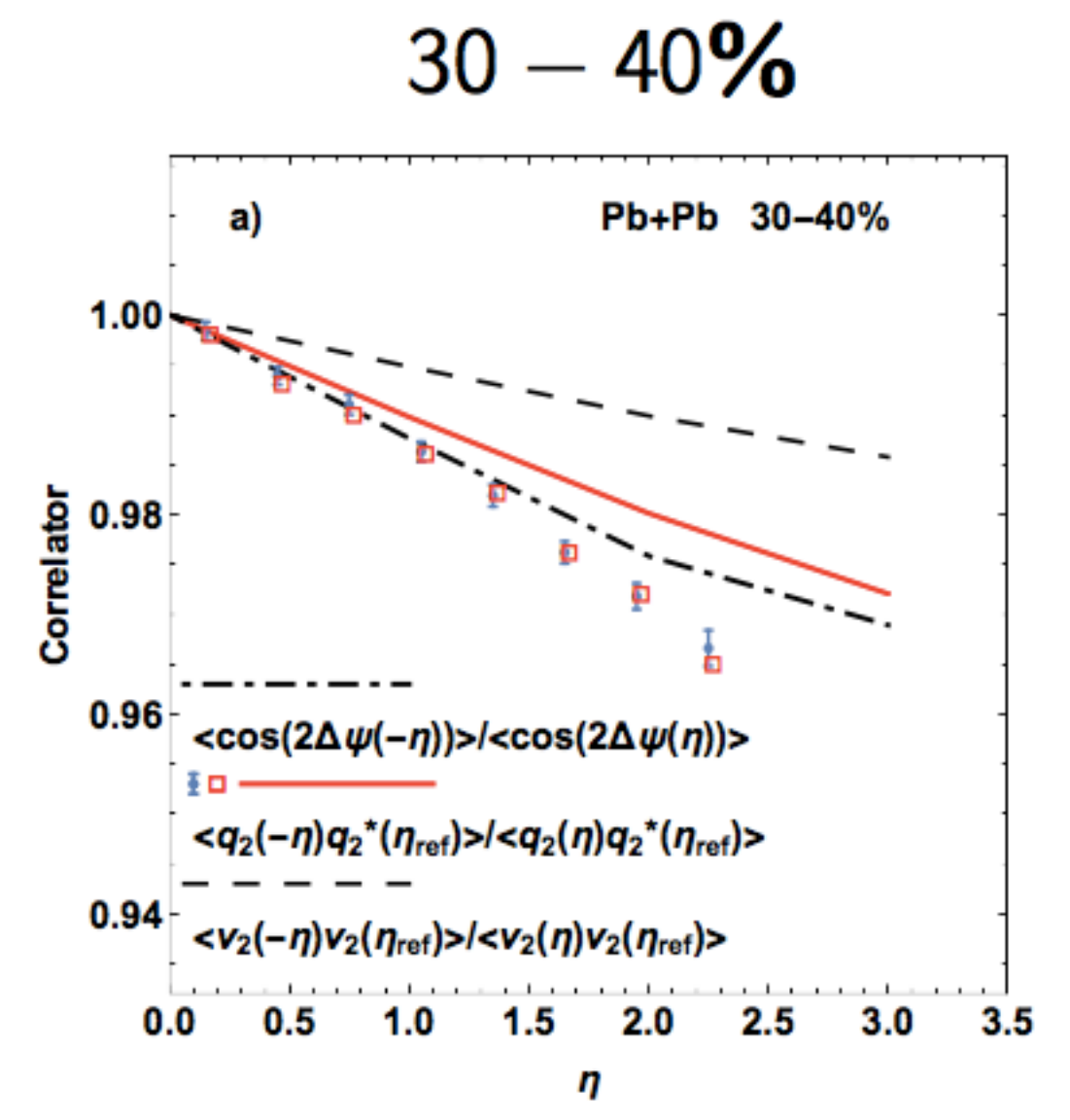
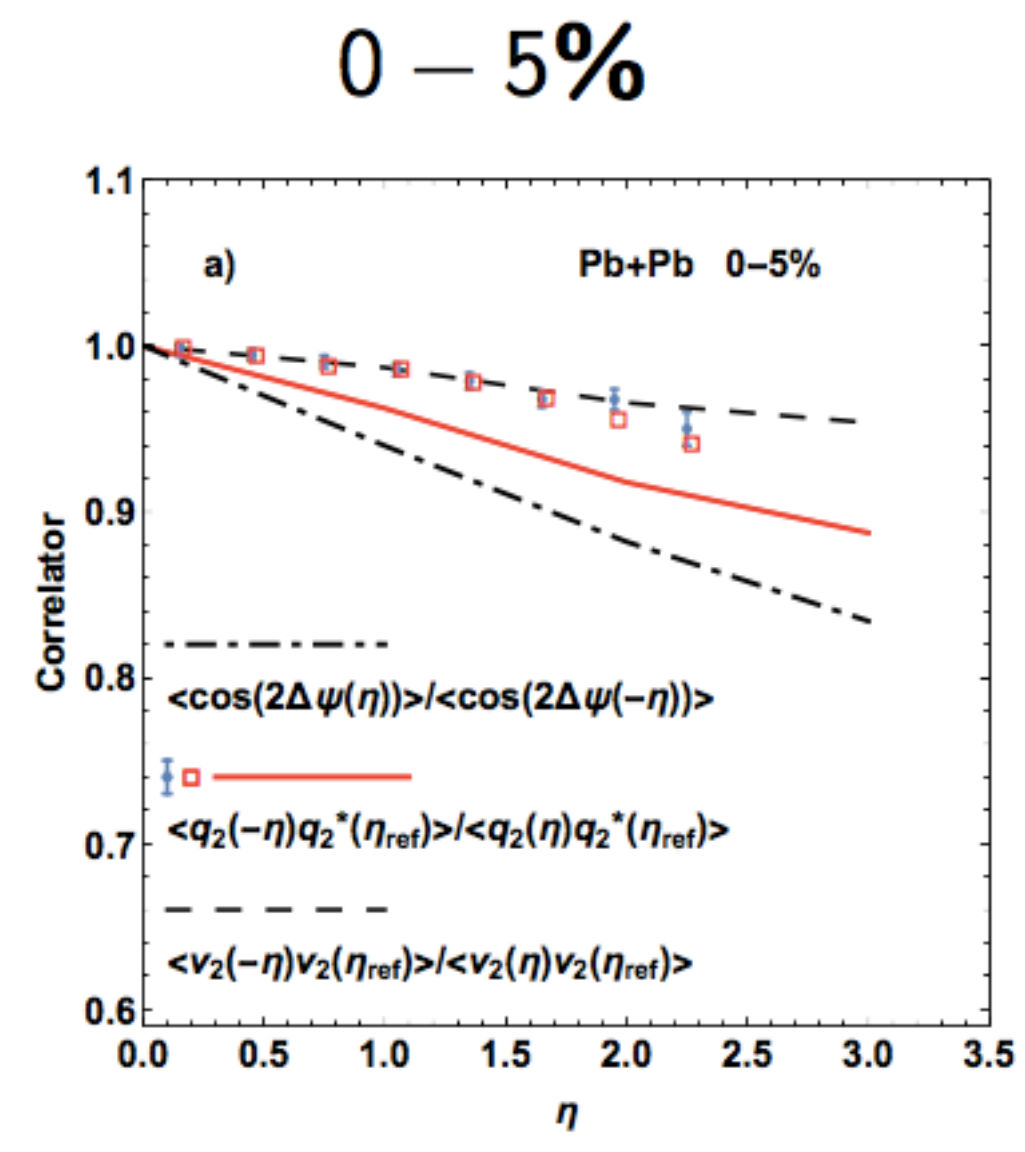
初期状態の制限、Tc付近の $\eta/s$ の決定(高温の $\eta/s$ の決定は難しいか...)

# FLOW FACTORIZATION

- vs.  $p_T \rightarrow$  ソフトとハード、流体揺らぎ？
- vs. ラピディティ  $\rightarrow$  初期フロー、流体揺らぎ、トルク

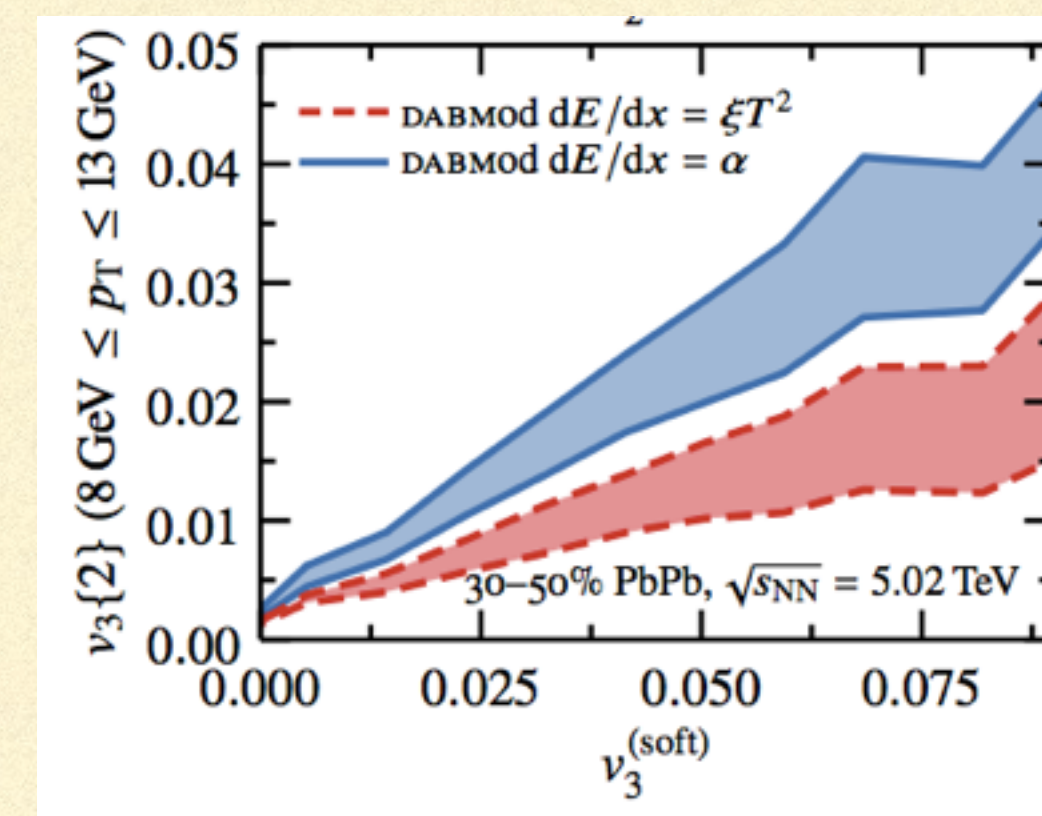
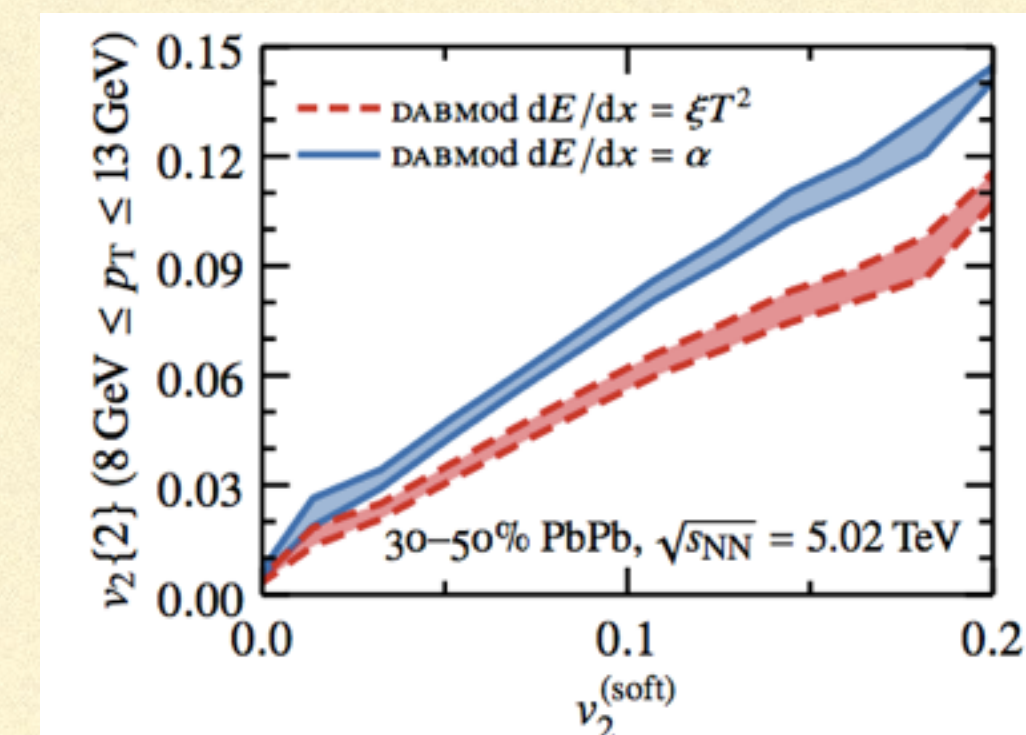
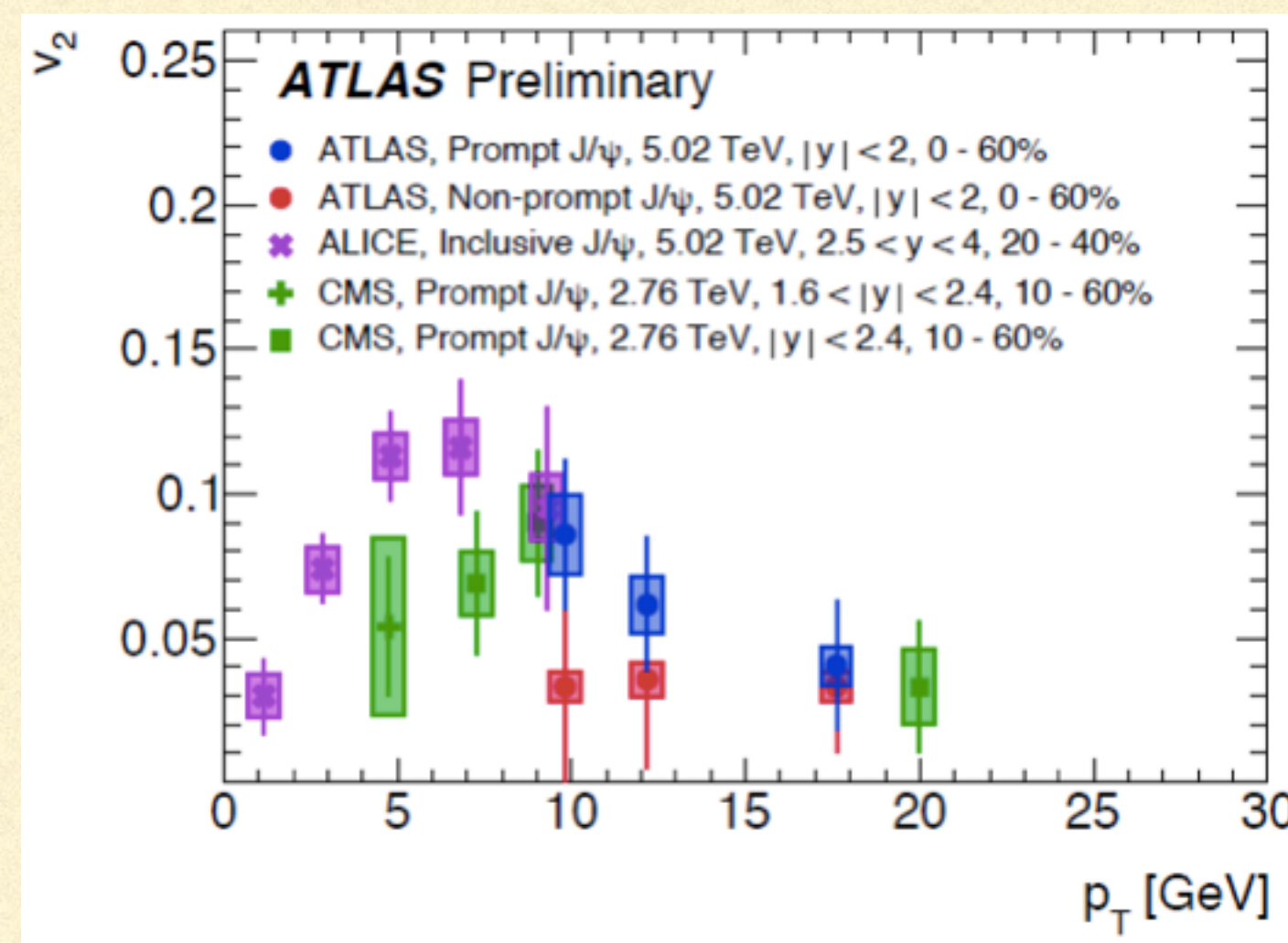
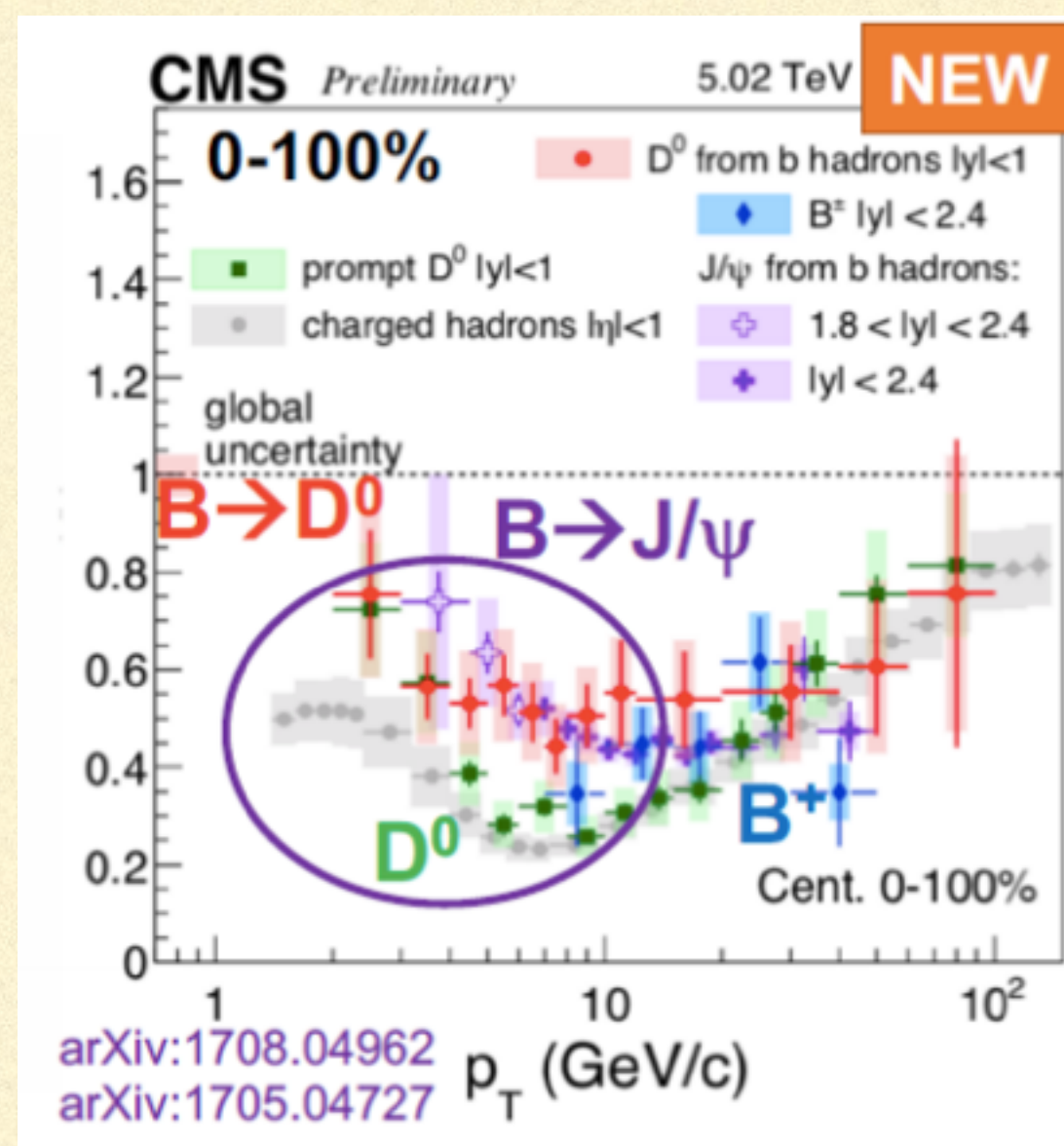
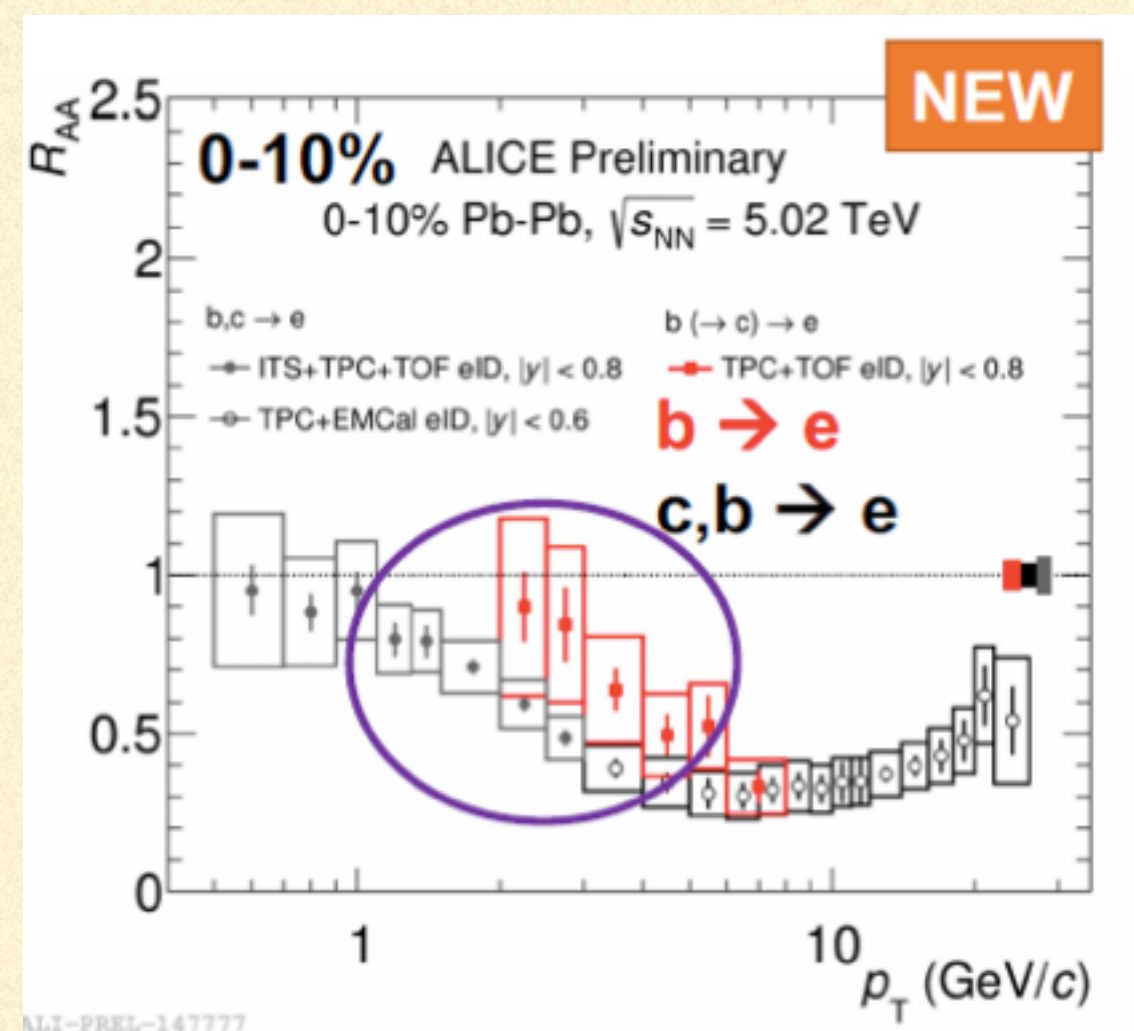


twist angle and flow magnitude decorrelation 3+1D hydro model (1711.03325)



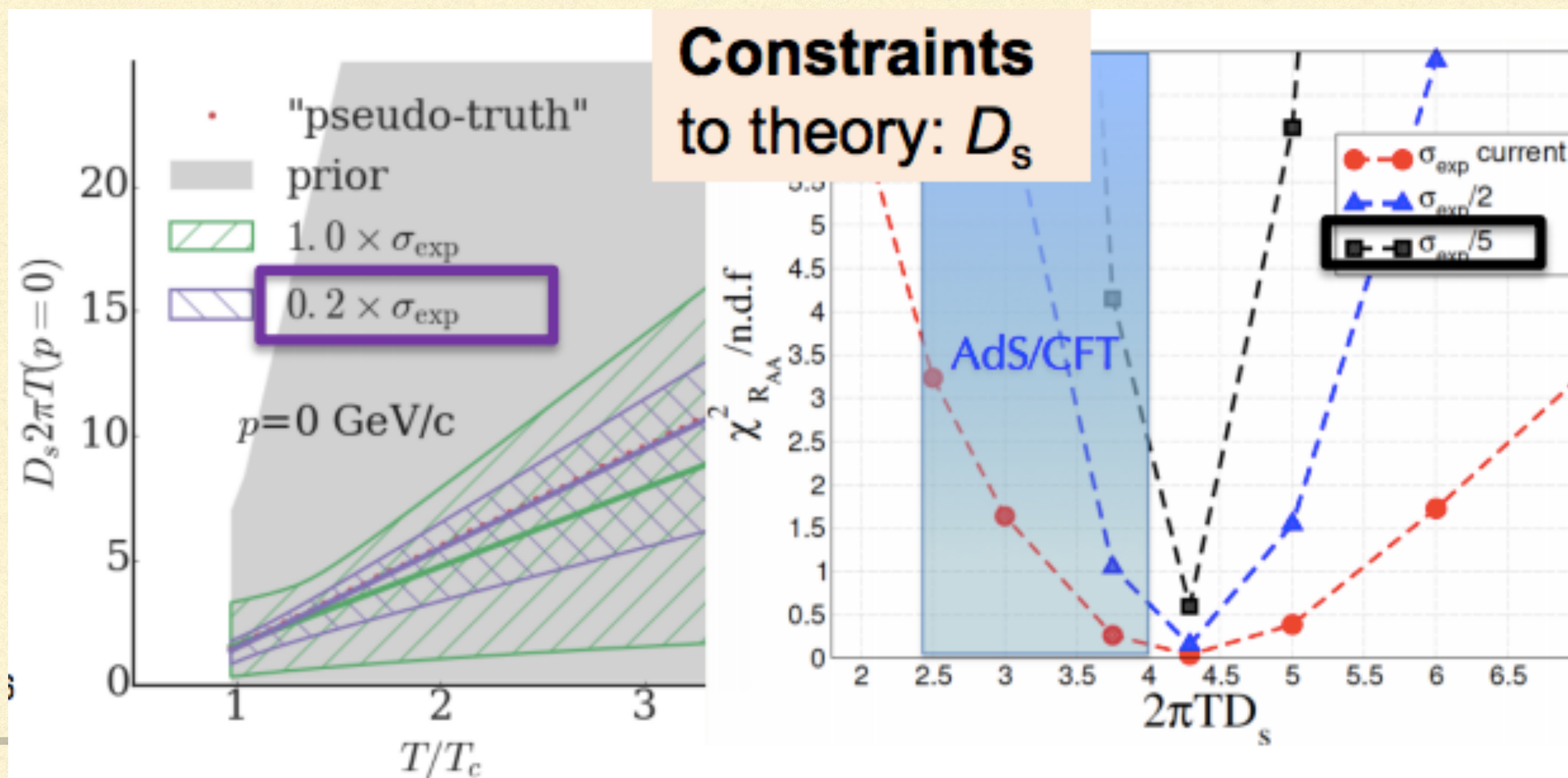
# 重クォークの測定

- 拡散係数(ブラウン運動) → 低い運動量の重クォーク測定精度の向上が最重要
  - 低運動量bクォークハドロンの測定に期待
- グルーオン放射によるエネルギー損失 → ソフトな $v_n$ との相関



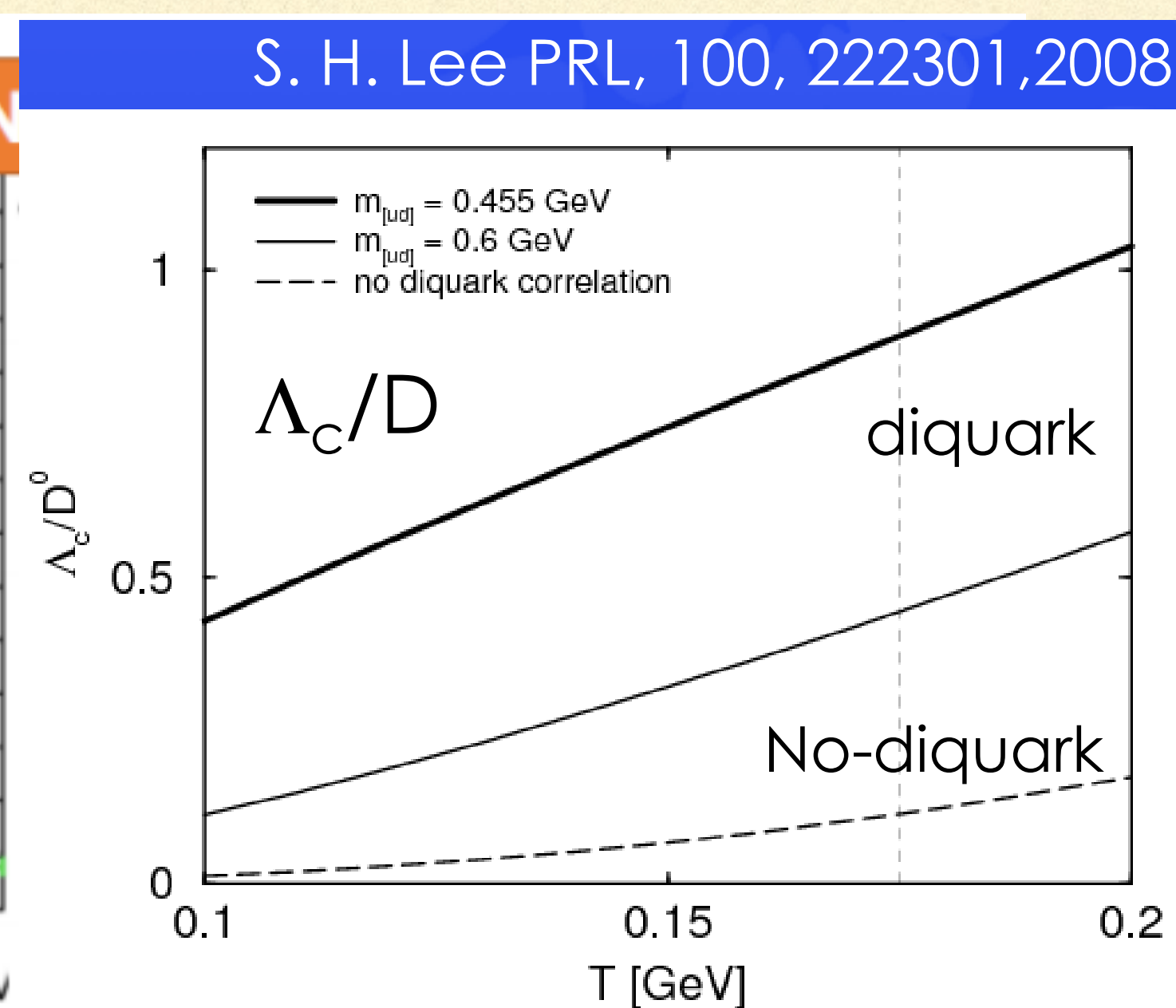
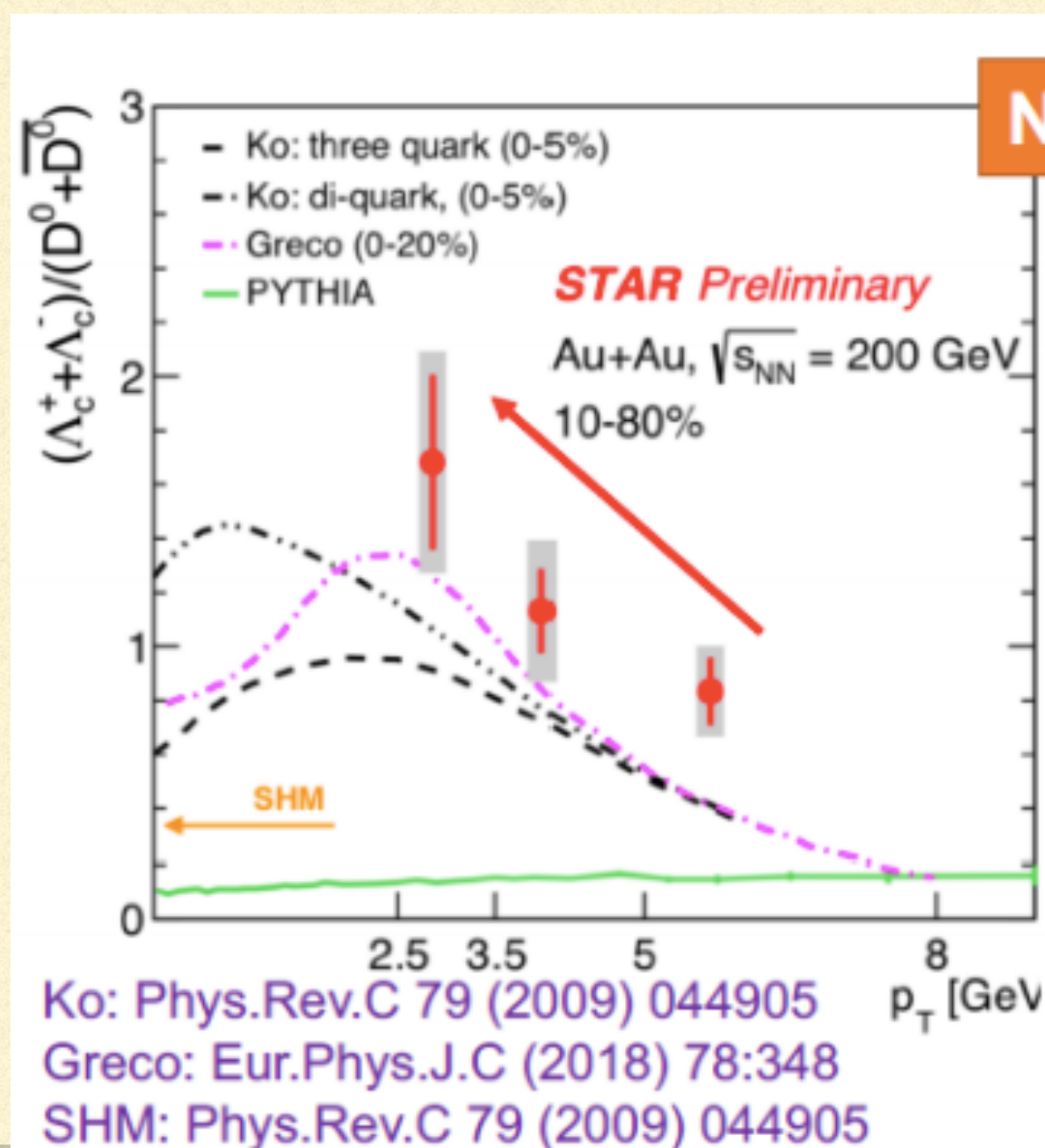
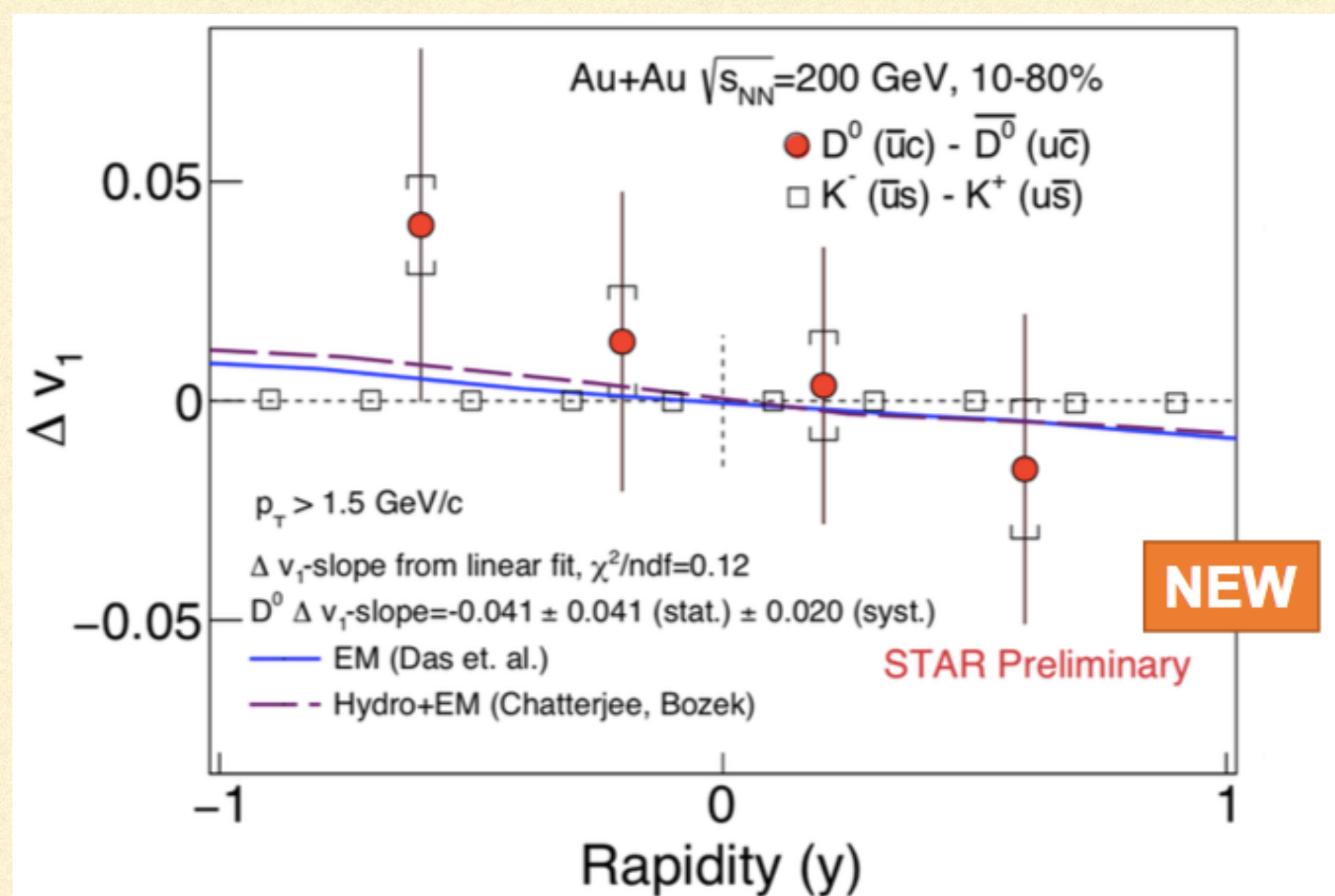
# 重クォークの測定

- 実験精度が5倍くらい向上すると…
  - 左:  $D+D_s$  右:  $D+D_s+B$



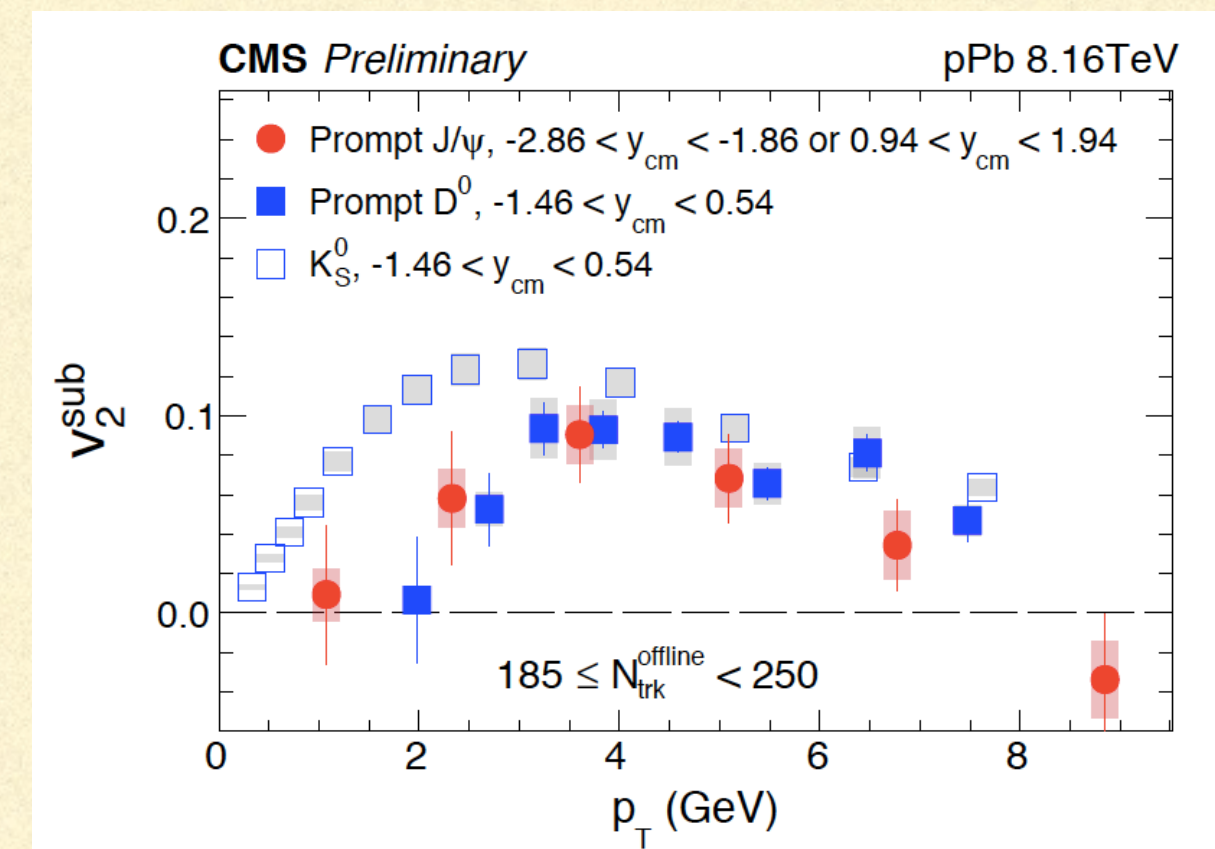
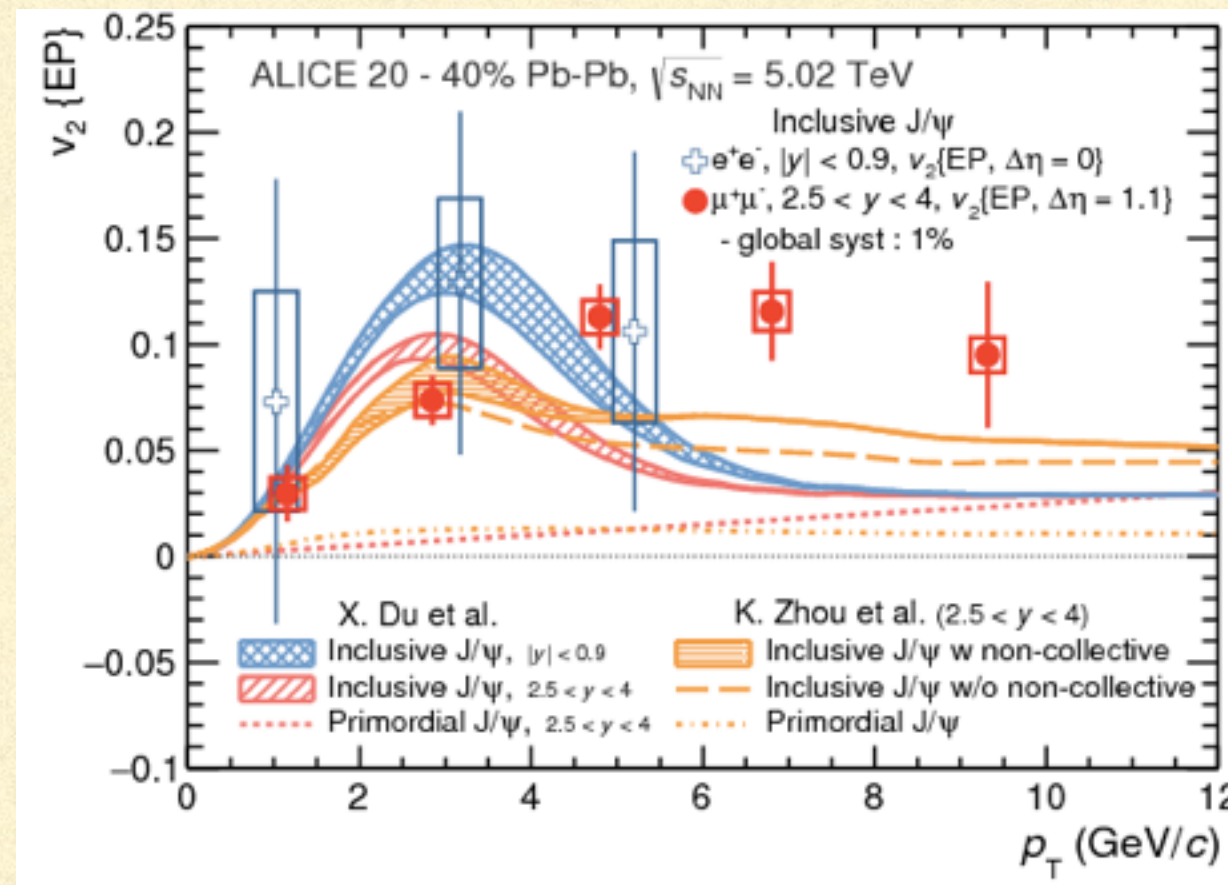
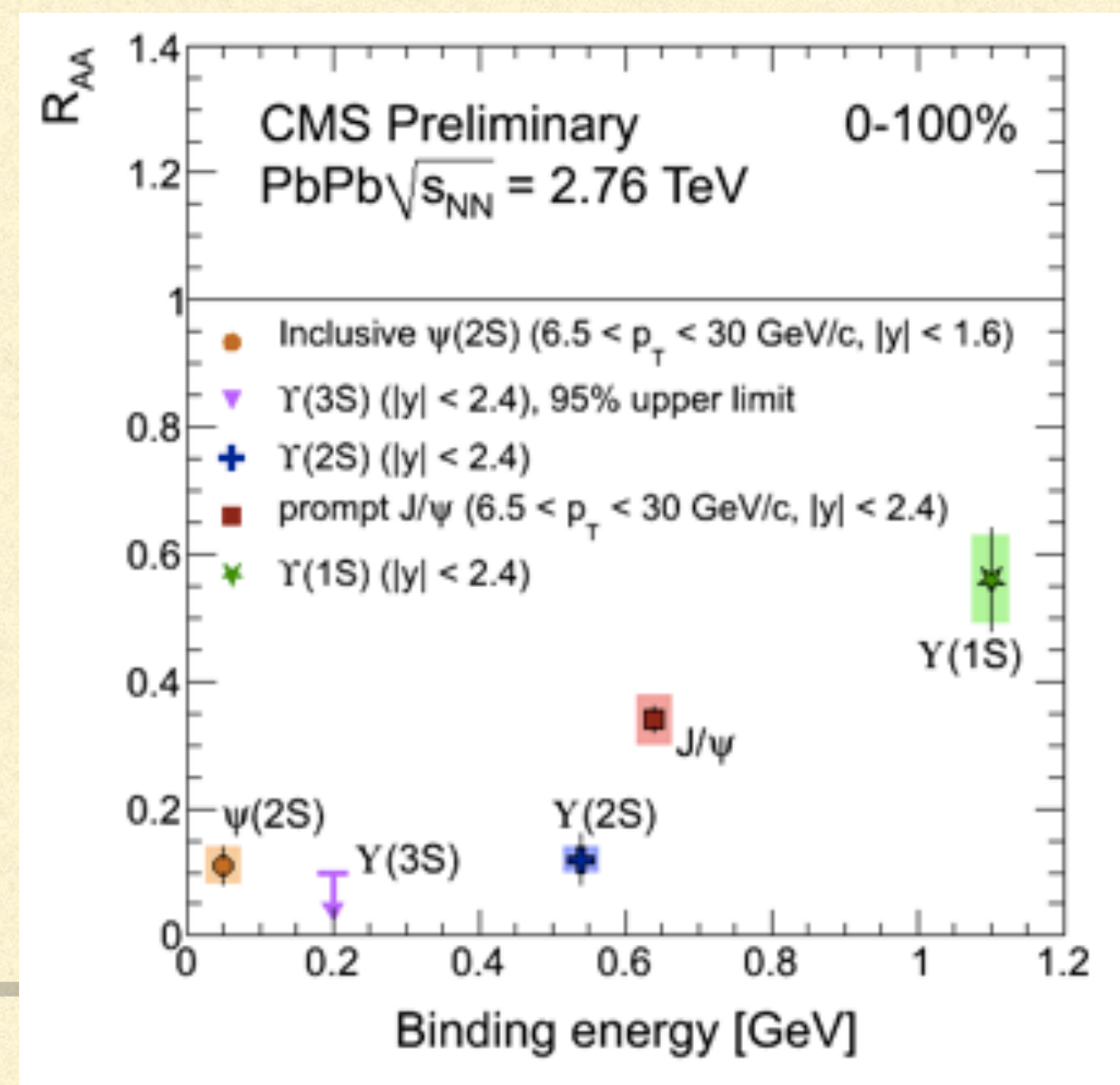
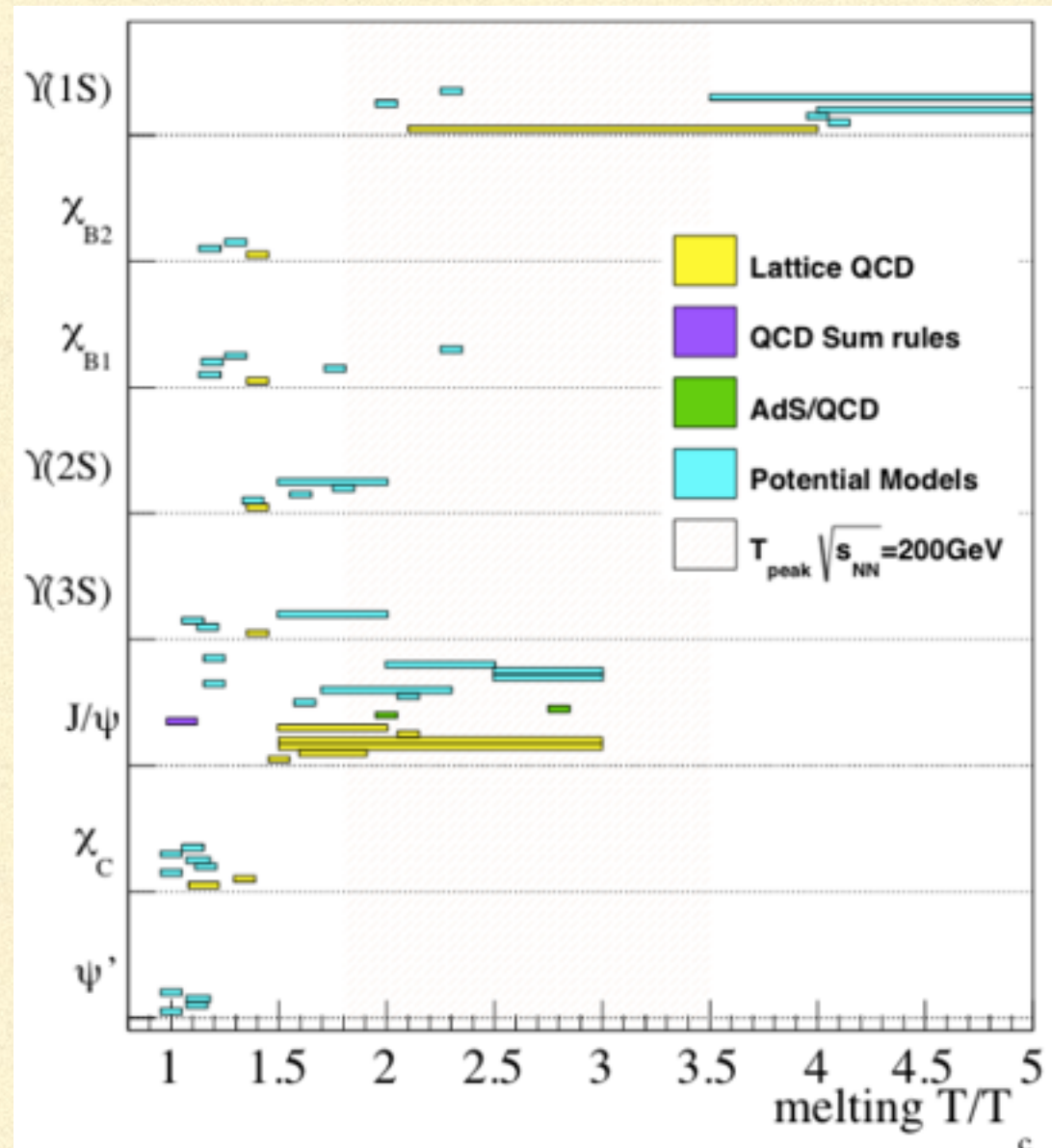
# 重クォークの新たな測定

- 重クォークの $v_1$ (LHCで未測定) → 初期条件、初期の電磁場、伝導度
- 低運動量の重クォークバリオン(LHCで未測定) → ダイクォーク相関



# クォークコニア

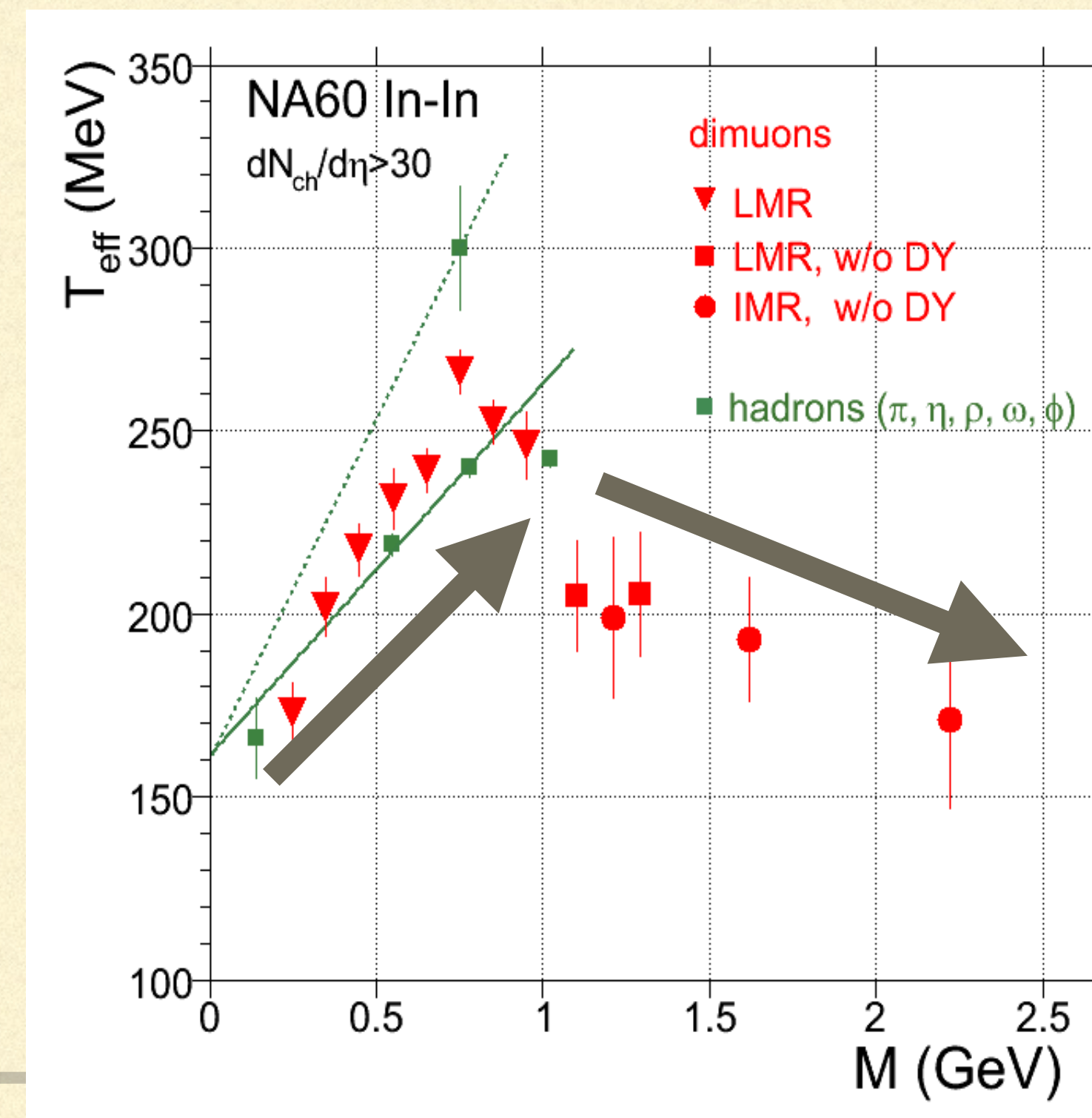
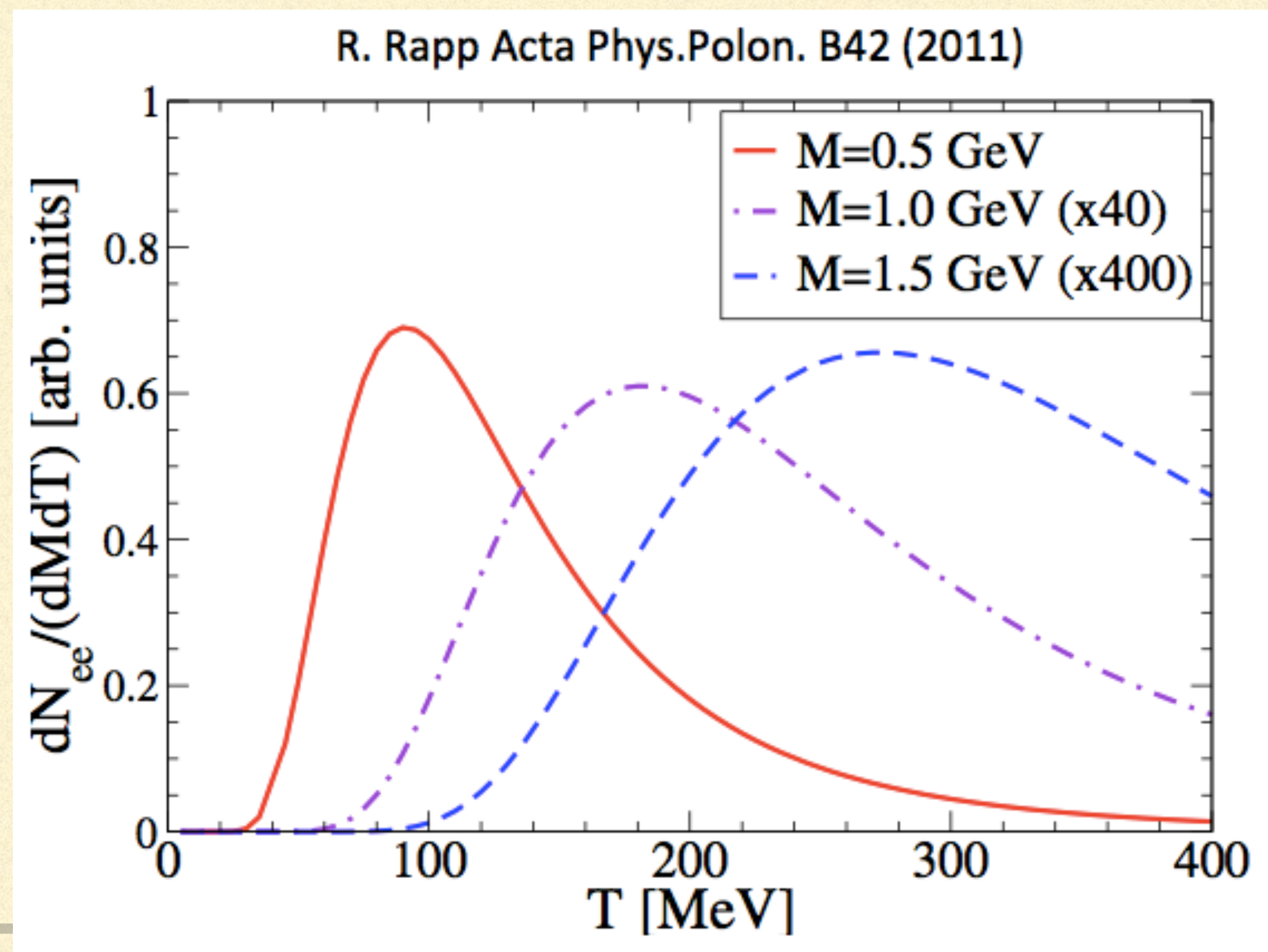
- 実験結果は色々出てきているが、QGPの物性に迫れているのか？
  - 遮蔽効果なのか散乱効果なのか？ 溶解温度？ 溶解幅の温度依存性？ 相関長？
  - クォーク・反クォーク間の波動関数の実時間発展(量子開放系としてのクォークコニウムの時間発展)?
- 様々なクォークコニウムの高精度測定が必須。特に、励起状態の測定(フィードダウン)。  $R_{AA}$  &  $v_n$  vs.  $p_T \rightarrow$  そもそも、現在のhigh  $p_T$ の大きな $v_2$ やp-Aでの $v_2$ はどう理解される？





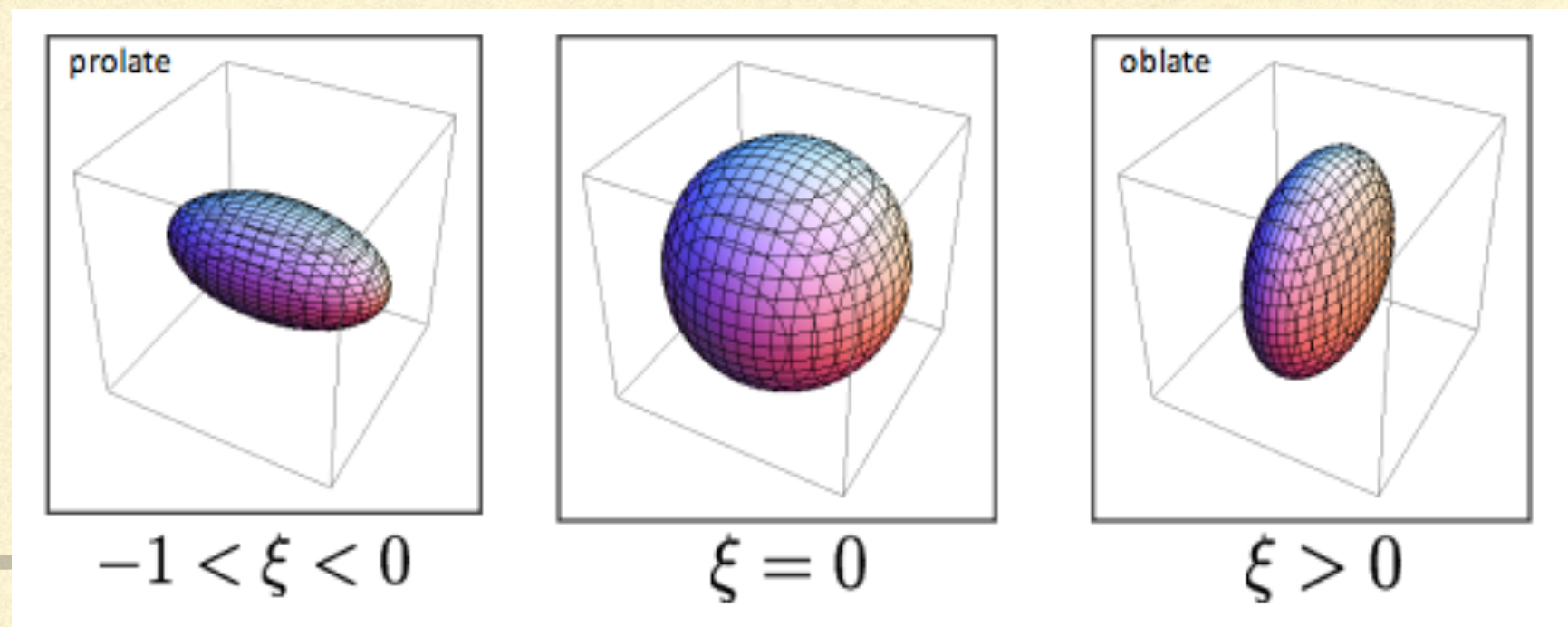
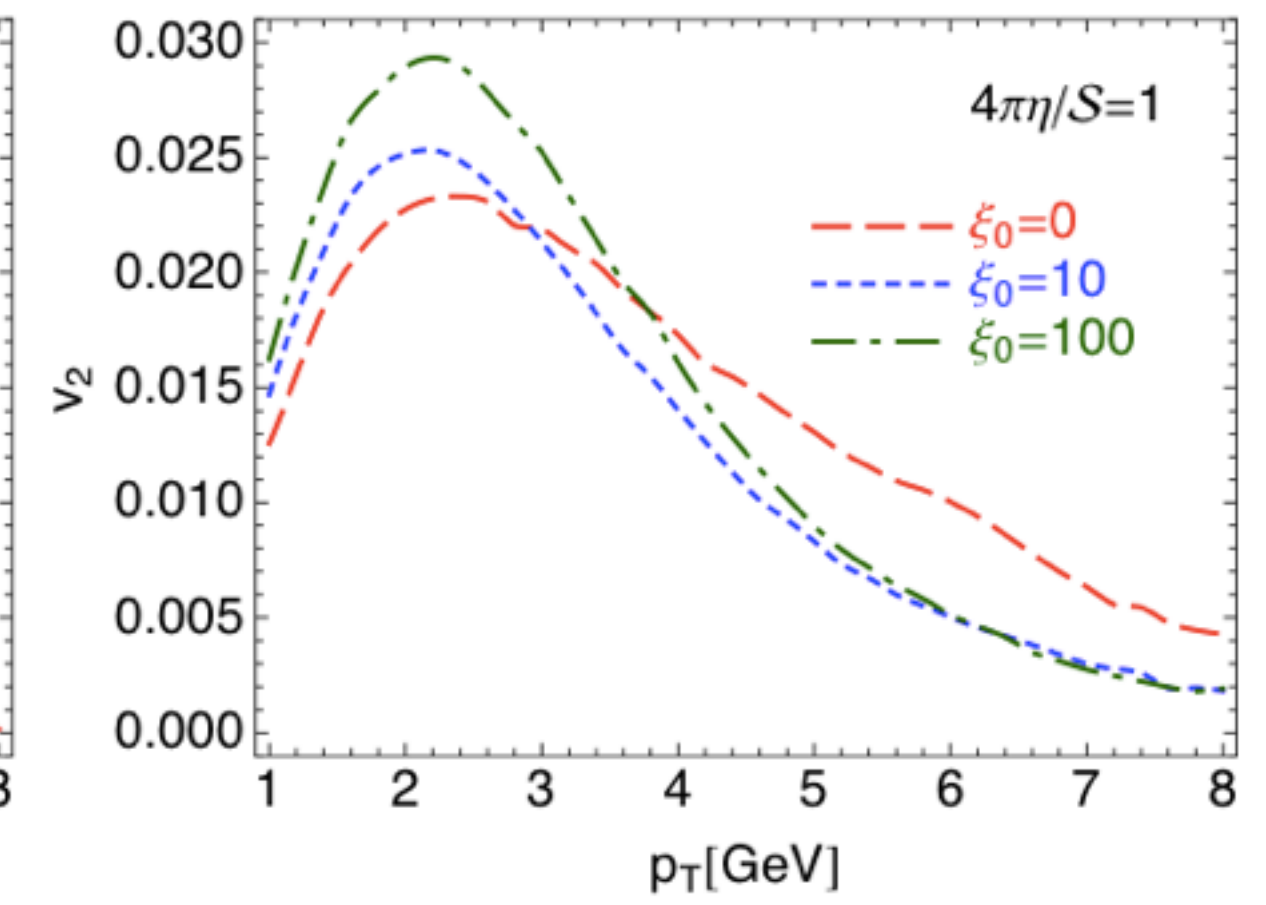
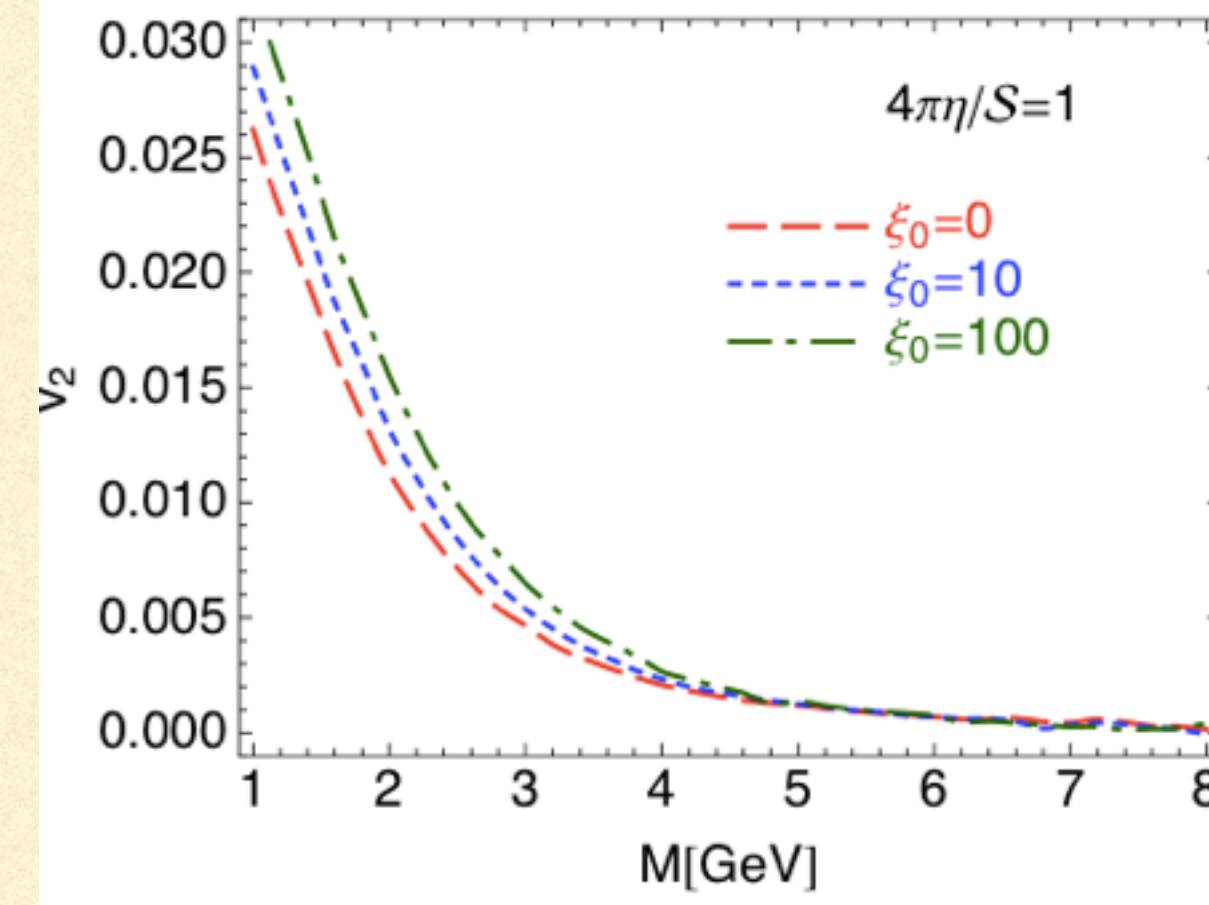
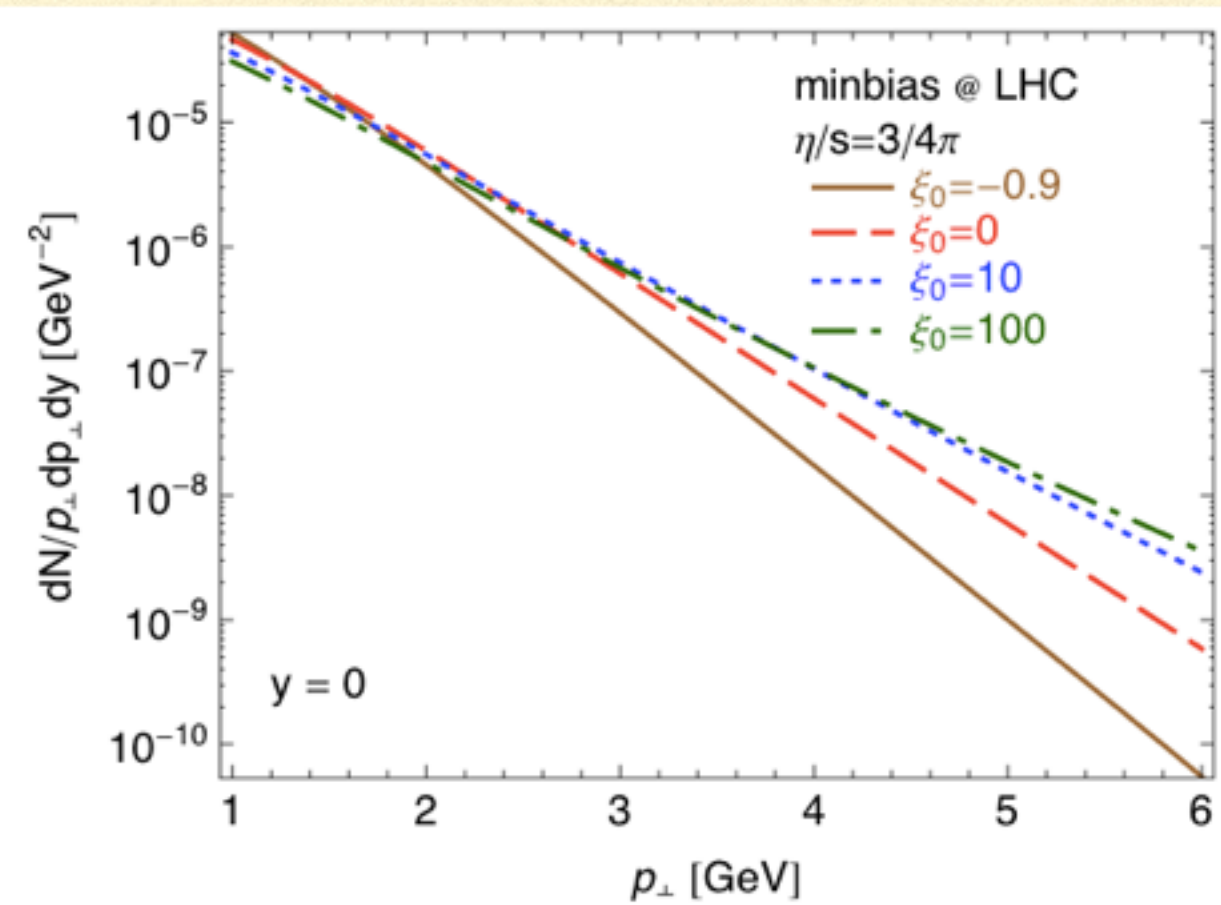
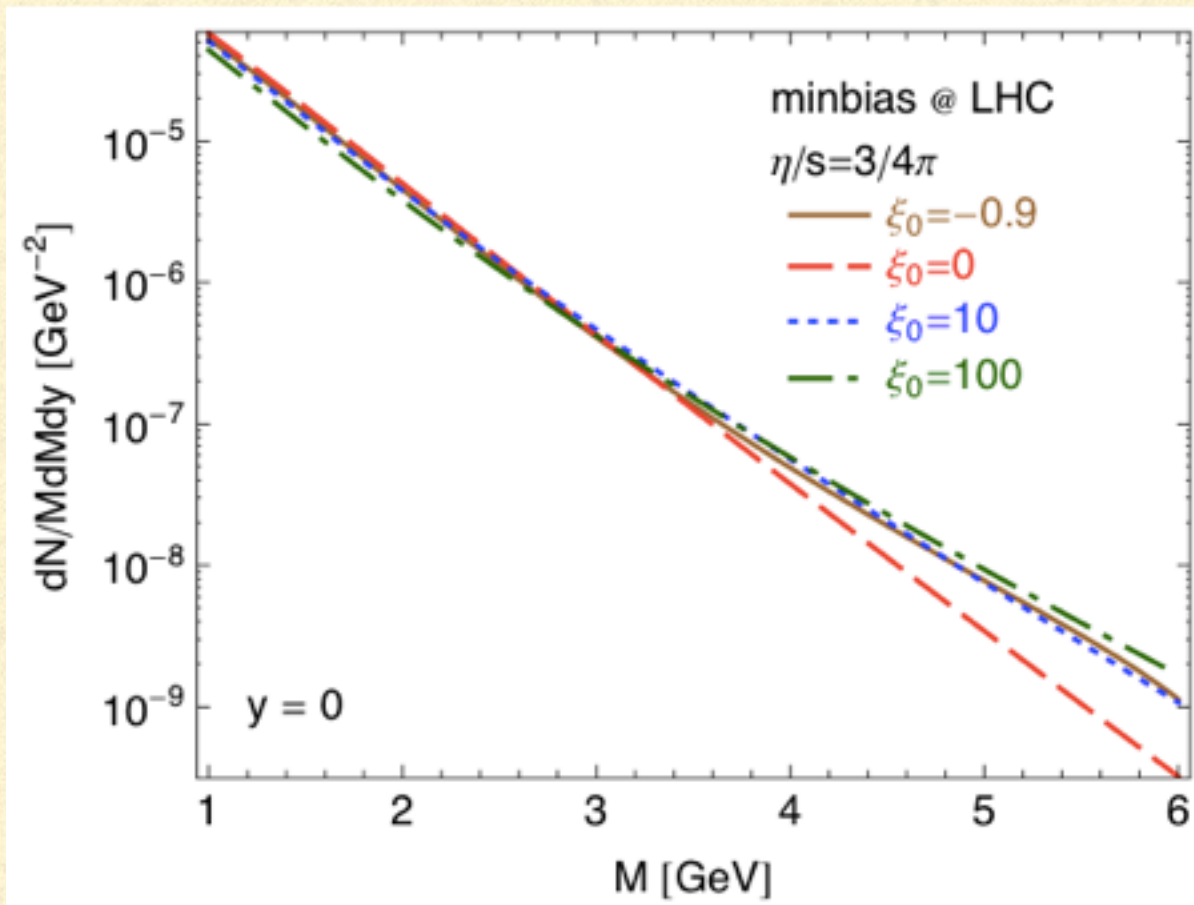
# 熱光子、熱的レプトン対

- HBTや偏極→熱光子・レプトン対の起源, 時空発展
- $\langle p_T \rangle$ や $v_n$  vs. レプトン対質量(→温度) →高温側物性に迫る唯一のプローブ?



# 高質量&高横運動量 レプトン対

## ■ 収量や $v_2$ → 流体化へのダイナミクス



energy density

$4\pi\eta/s \backslash \xi_0$	-0.9	0	10	100
0.1	-	72.11	-	-
1	12.98	64.53	235.86	714.31
3	13.69	60.44	215.61	660.74

aHydro計算

1505.04018

1501.03418

# ALICE実験高度化(>2020-2030)

## New Inner Tracking System (ITS)

- improved pointing precision
- less material -> thinnest tracker at the LHC

## Time Projection Chamber (TPC)

- new GEM technology for readout chambers
- continuous readout
- faster readout electronics

## New Central Trigger Processor

## Data Acquisition (DAQ)/ High Level Trigger (HLT)

- new architecture
- on line tracking & data compression
- 50kHz Pbb event rate

## Muon Forward Tracker (MFT)

- new Si tracker
- Improved MUON pointing precision

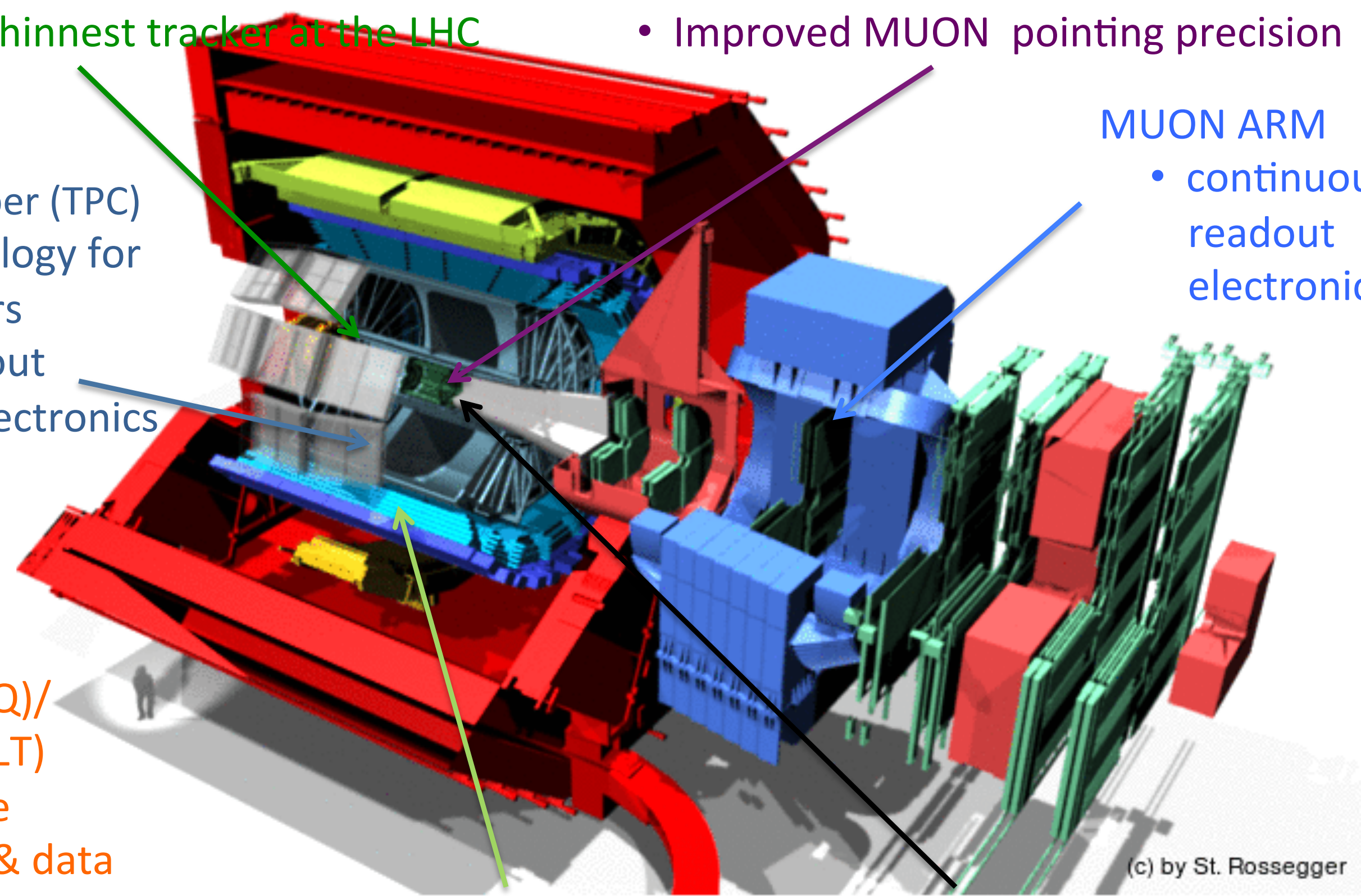
## MUON ARM

- continuous readout electronics

## TOF, TRD

- Faster readout

## New Trigger Detectors (FIT)



鉛＋鉛衝突 50kHzに対応  
すべてを取得する(これまでの100倍に対応)

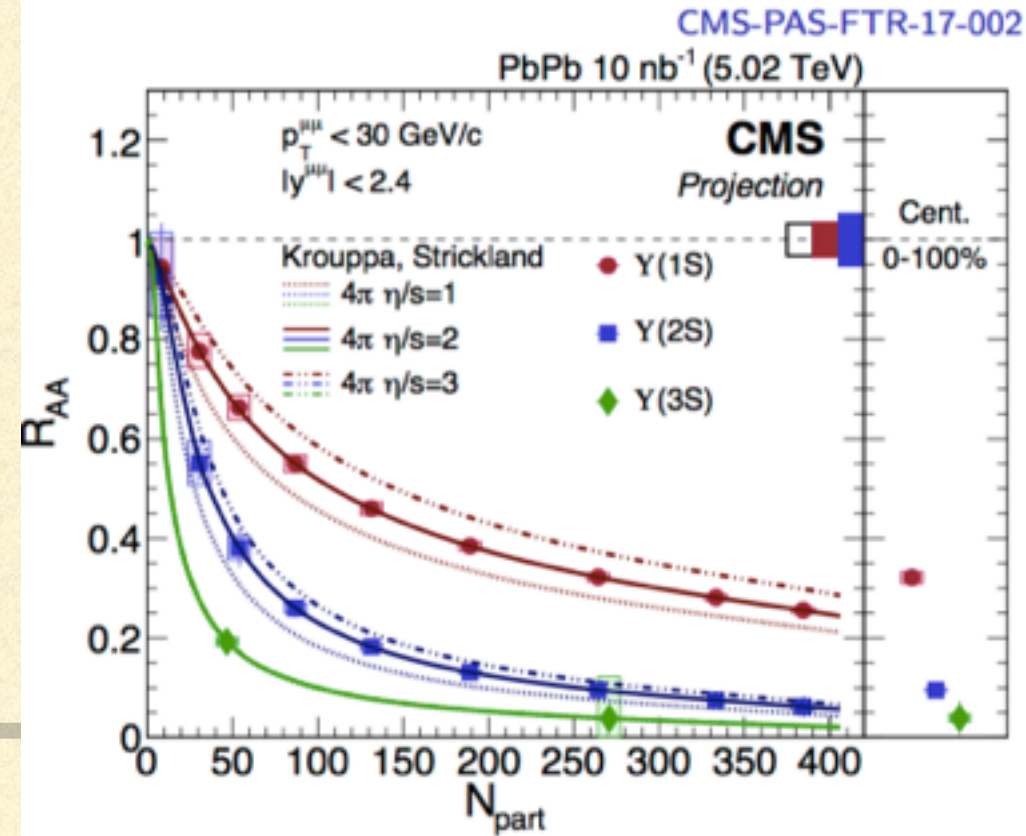
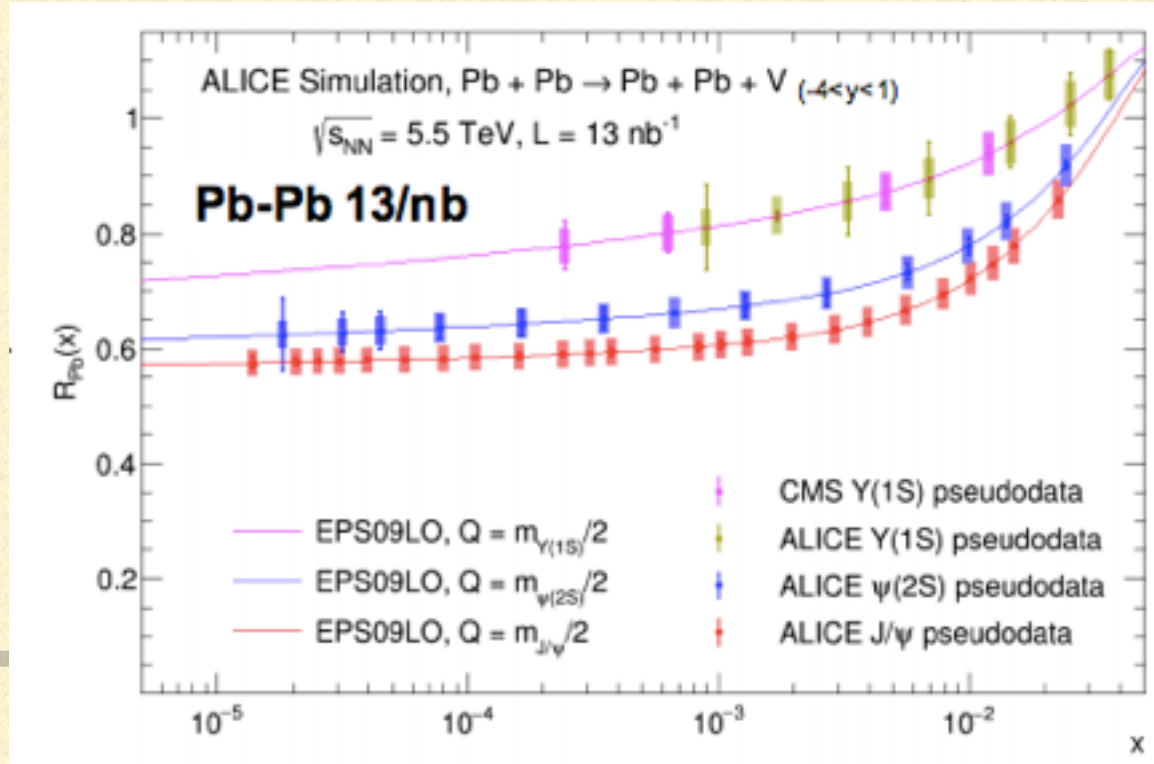
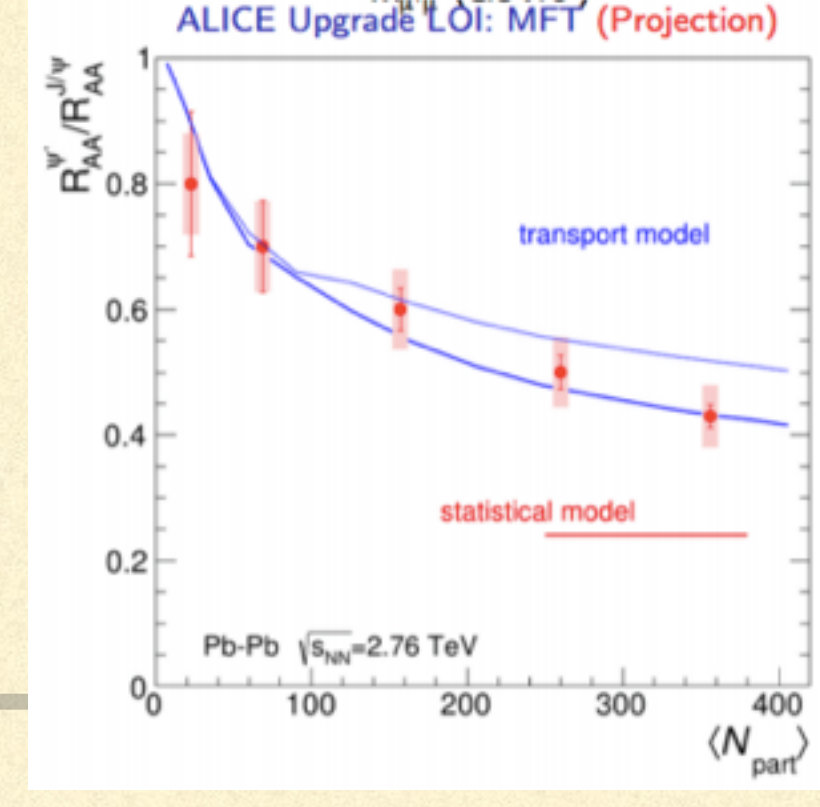
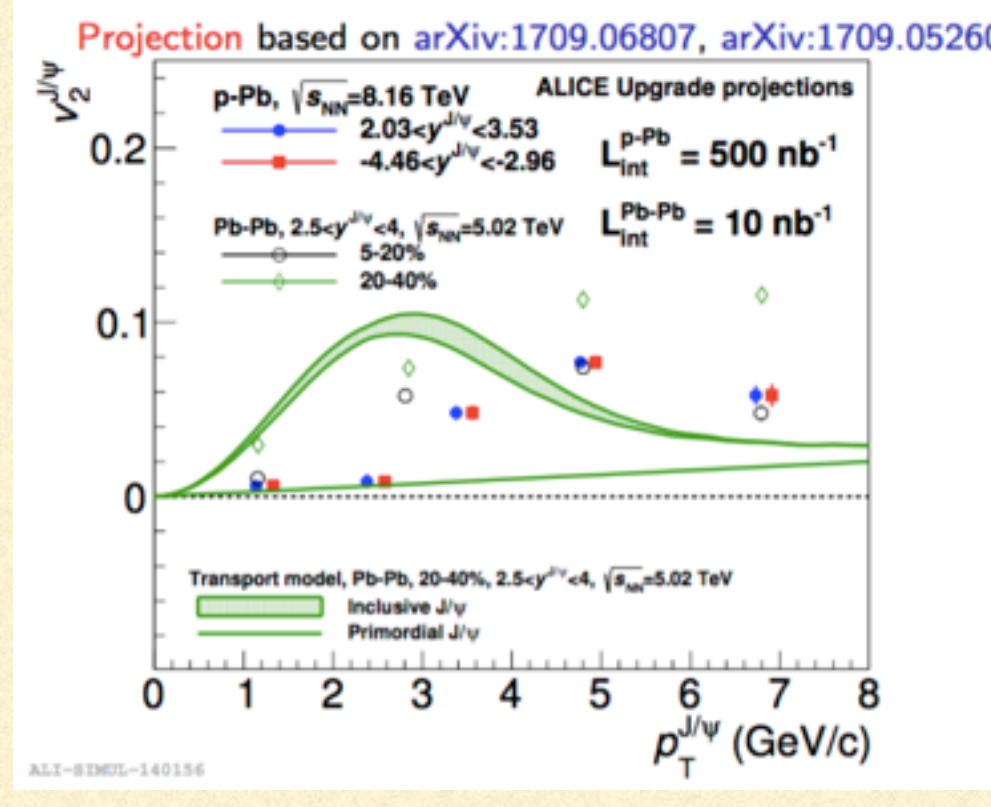
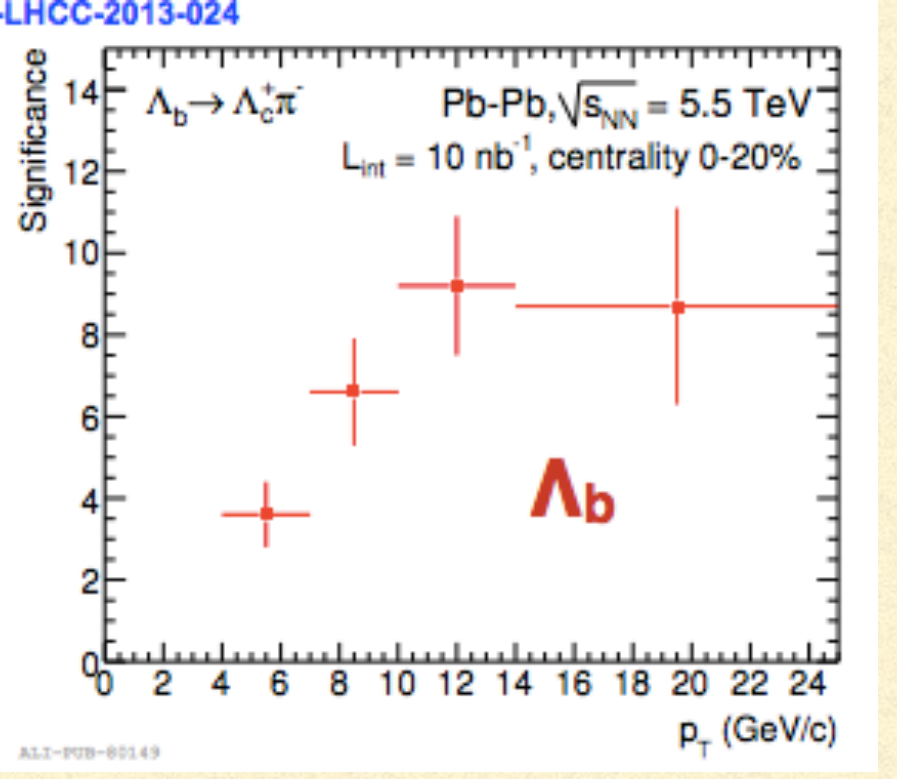
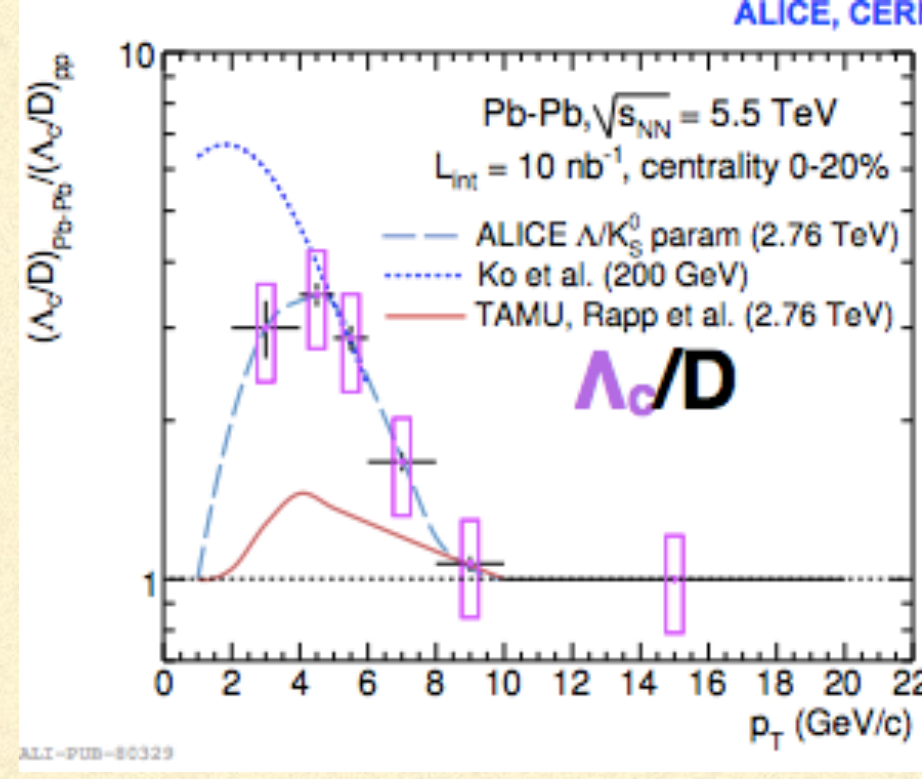
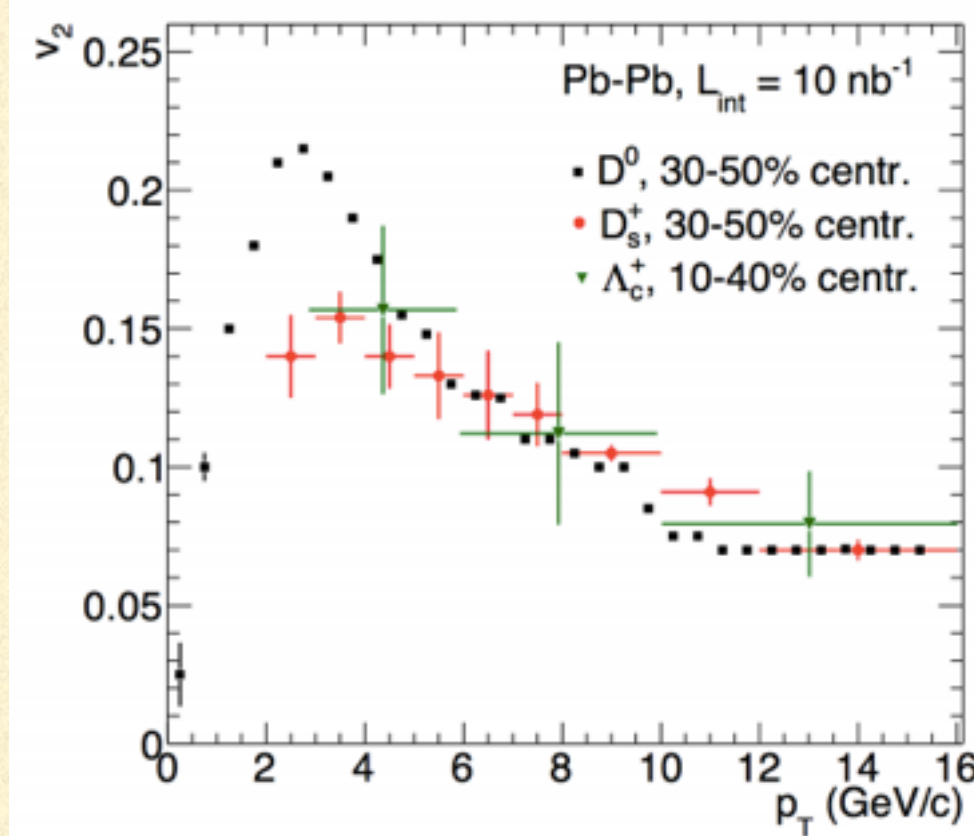
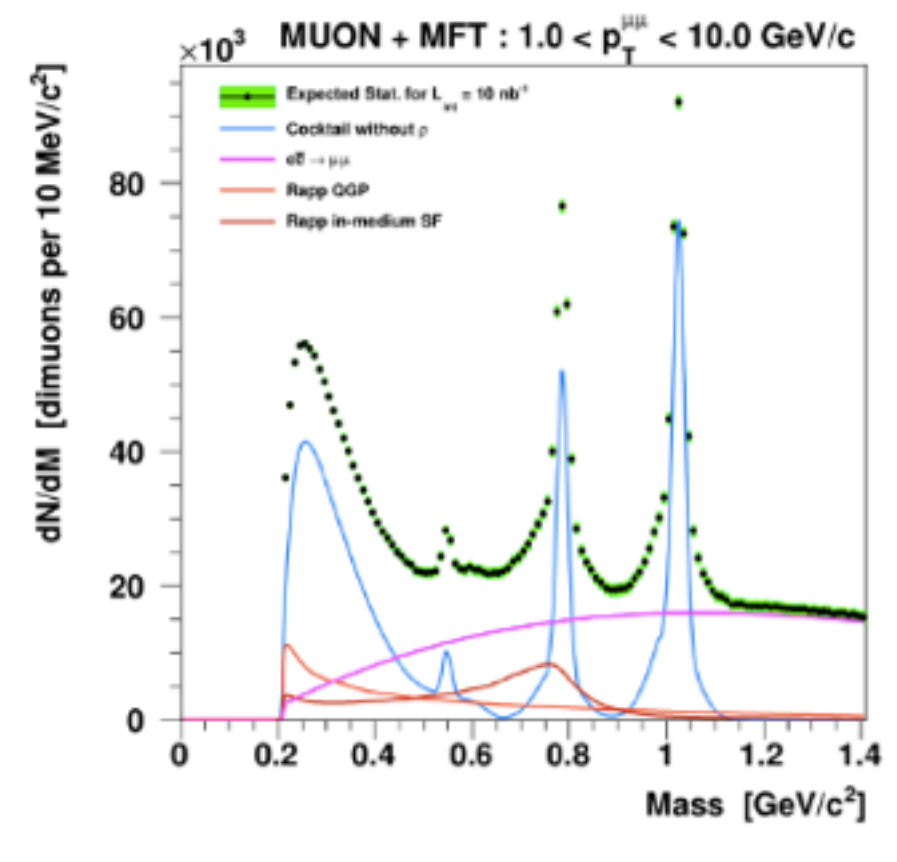
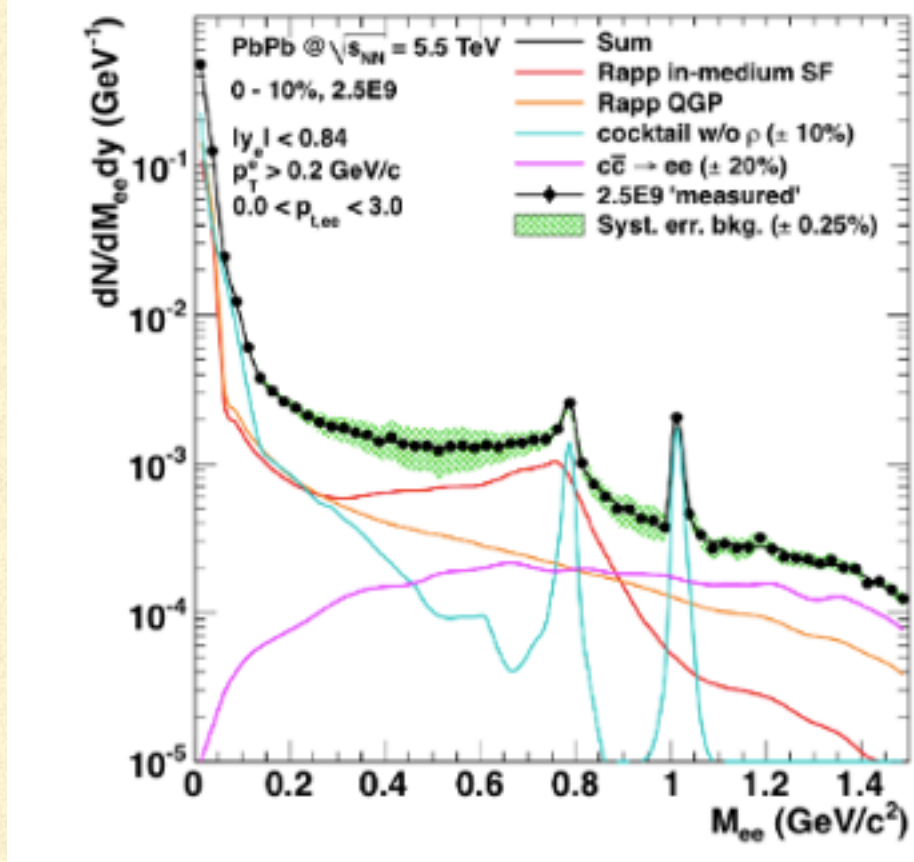
2020-2030の間に鉛＋鉛衝突  
10 /nb (0.5T)と3 /nb  
(0.2T)を予定

# HL-LHC YELLOW REPORT

Future physics opportunities for high-density QCD with ions and proton beams at LHC  
 HL/HE-LHC Physics Workshop Report Working Group 5

HL-LHC Yellow reportを纏めている段階

- Run3+4での物理達成予想のまとめ
- 郡司はDilepton章の取りまとめ責任者の一人



詳しくは  
 大山氏と  
 志垣氏の講演

# ALICE実験高度化(>2030)

- 2030年以降のALICEに関する話し合いが始まっている
  - TPCをなくして、高レートで走れるようにする。
  - 何が主題になるのか？
- 測定項目のリスト？
  - **熱的レプトンペア (Run3+4ではまだ精密測定には到達しない)**
  - **重クォークバリオン( $\Xi_{cc}$ や $\Omega_{ccc}$ )**
  - **アイデアを募集中！！**

# まとめ(?)

- **次の花火は何か？を真剣に考える必要性。科研費にも重要。**
  - **QGP物性の精密研究、クロスオーバー相転移の物理、強相関の起源、新ハドロン探索とバリオン間相互作用、強磁場の物理、小さい系の物理**
- **重要なのは、実験データの高精度化と現象論モデルの高精度化(これまでの仮定を再検証する)**
  - **現象論モデルや理論における喫緊の課題は何か？**
    - 初期(sub nucleonスケールのゆらぎ)、流体化と熱化(aHydro, Kinetic theory)、流体の時空発展(散逸効果 $-\eta/s+\zeta/s$ +流体揺らぎ, 渦度, 電磁場), クロスオーバーとハドロン化
  - **ALICEの実験高度化でどこまで解決できるか？**
    - 高次集団運動、vn相関、重クォーク $v_1$ (磁場)、重クォーク(ボトム)、重クォークバリオン、光子とレプトン対、クォークコニウム→ **初期～物性の温度依存性～相転移近傍の物理**
- **現実にどんな花火があがりそうか？**

---

BACKUP

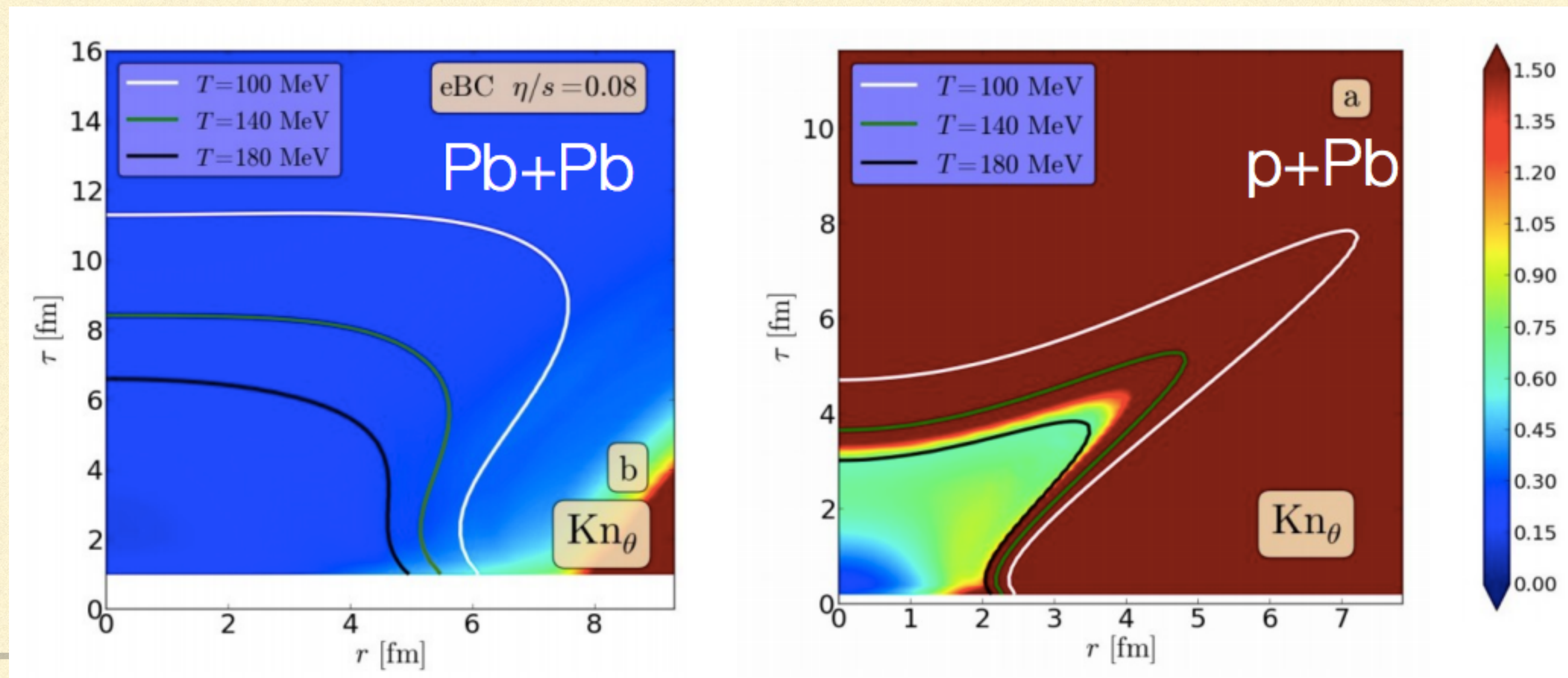
---

---

# 流体は適用できる？

## ■ クヌーセン数

ARXIV:1404.7327





# グルーオン飽和

## ■ クォーコニア in UPC

