QGP物性の定量的解明

ー相対論的流体模型を軸とした現象論的模型の開発

岡本 和久（名大理）

野中 千穂（KMI, 名大理）

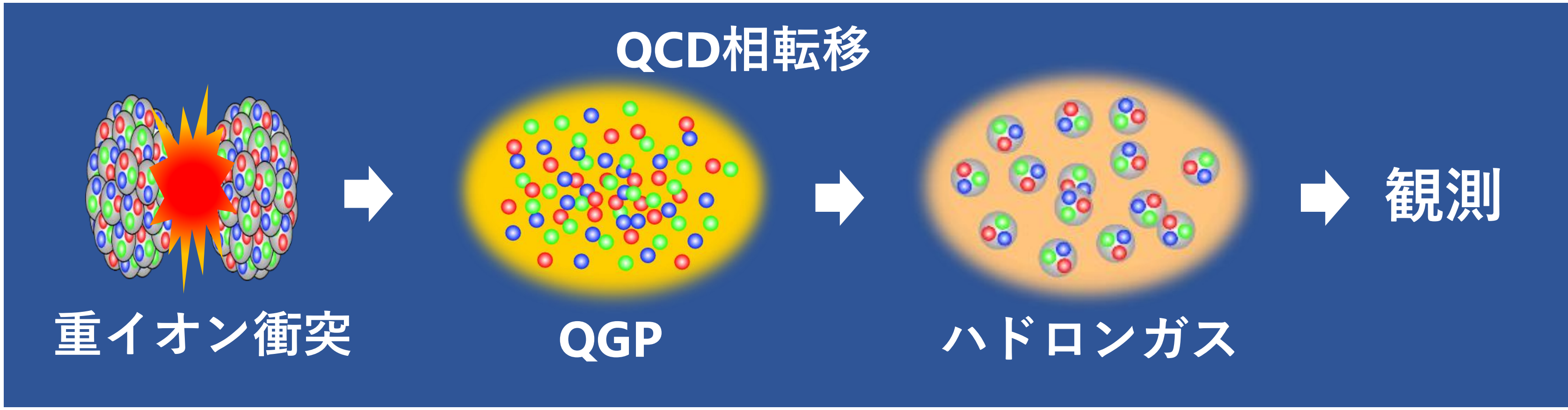
Heavy Ion Pub @ 広島大 2017年10月20日

目次

- イントロダクション
- 相対論的流体模型の構築
- LHC実験との比較

イントロダクション

高エネルギー重イオン衝突実験



現象論的模型

実験データ

QGPの物性

状態方程式、輸送係数

QGP物性の定量的評価

完全流体計算による楕円フローの解析

強結合QGP

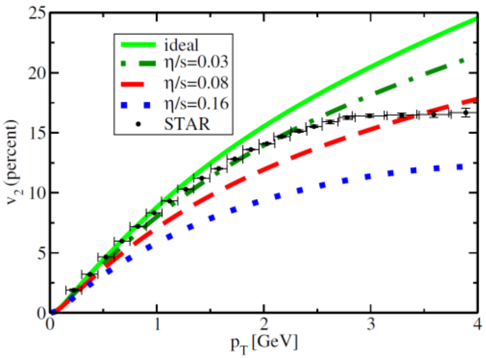
粘性流体計算による楕円フローの解析

流れの異方性が
ずり粘性に敏感

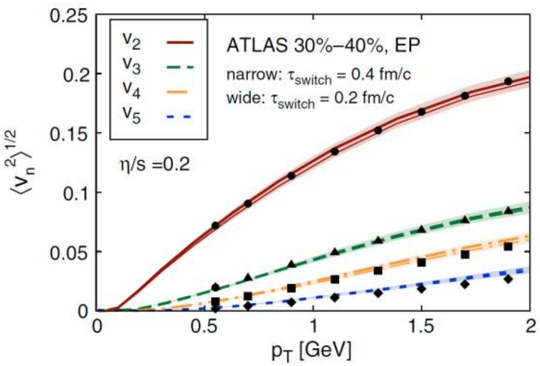
高次の方位角異方性の解析

$4\pi\eta/s \cong 1\sim3$

世界最小のη/s



Romatchke, Romatchke, PRL99,172301(2007)



Gale, Jeon, Schenke, Tribedy,Venugopalan,
PRL110, 012302 (2013)

QCD粘性の温度依存性

RHIC, LHCでQGPの物性に敏感な新しい観測量が複数報告されている

⬇

QGPのより詳細な情報が得られる

ずり粘性に加え体積粘性、粘性の温度依存性が注目されている

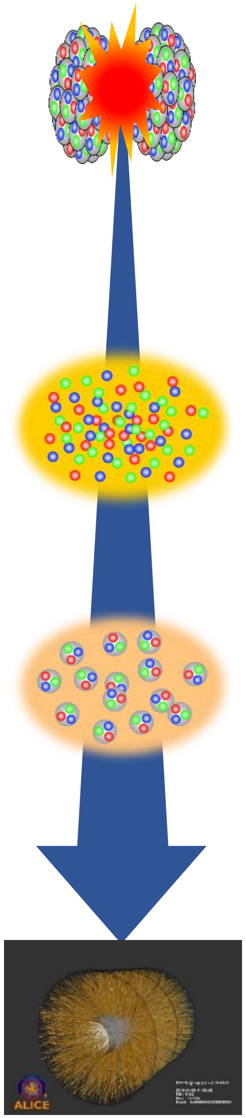
- 漸近的自由性により高温でずり粘性が増大？
- ハドロン相では高温ほど強結合？
- 相転移点で体積粘性が増大？

⬇

QGPの粘性の効果を精度よく再現するため、
数値粘性の小さな相対論的粘性流体コードが必要

相対論的流体模型の構築

モデルの概要



- **初期条件：TRENTO** Moreland,Bernhard,Bass, PRC92,011901(2015)

  空間3次元のエントロピー密度ゆらぎ

  Ke, Moreland, Bernhard, Bass, arXiv:1610.08490

- **3次元相対論的粘性流体計算**

  リーマン解法 Akamatsu et al,JCP256,34(2014), Okamoto et al, EPJC76,579 (2016), Okamoto et al, EPJC77,383(2017)

  格子QCD状態方程式 Bluhm rt al., NPA929(2014)157

- **粒子化**

  Cooper-Frye 公式

  ずれ粘性、体積粘性の分布関数への補正

  Pratt, Torrieri, PRC82,044901(2010)

- **UrQMD**

相対論的流体方程式

保存則

$$T^{\mu\nu}_{;\mu} = 0 \qquad T^{\mu\nu} = eu^{\mu}u^{\nu} - (p+\Pi)\Delta^{\mu\nu} + \pi^{\mu\nu}$$

粘性テンソルの運動方程式

$$\tau_{\Pi} D\Pi + \Pi = -\zeta\theta - \delta_{\Pi\Pi}\Pi\theta + \lambda_{\Pi\pi}\pi^{\mu\nu}\sigma_{\mu\nu}$$

$$\tau_{\pi}\dot{\pi}^{\langle\mu\nu\rangle} + \pi^{\mu\nu} = 2\eta\sigma^{\mu\nu} - \delta_{\pi\pi}\pi^{\mu\nu}\theta + \varphi_7\pi_{\alpha}^{\langle\mu}\pi^{\nu\rangle\alpha} - \tau_{\pi\pi}\pi_{\alpha}^{\langle\mu}\sigma^{\nu\rangle\alpha} + \lambda_{\pi\Pi}\Pi\sigma^{\mu\nu}$$

- ボルツマン方程式から得られた2次の流体方程式（14モーメント近似）
  Denicol,Niemi,Molnar,Rischke, PRC85,114047(2012)
- ボルツマン方程式の解析解を再現　Denicol,et al, PRC90,044905(2014)
- η, ζ以外の輸送係数については, $mT \ll 1$の近似の下でボルツマン方程式から得られた表式を利用
  Molnar,Niemi,Denicol,Rischke, PRC89,074010(2014)

相対論的粘性流体計算

Milne座標 (τ, x, y, η) → 衝突軸方向の発展の記述

保存則　$T^{\mu\nu}_{;\mu} = 0$

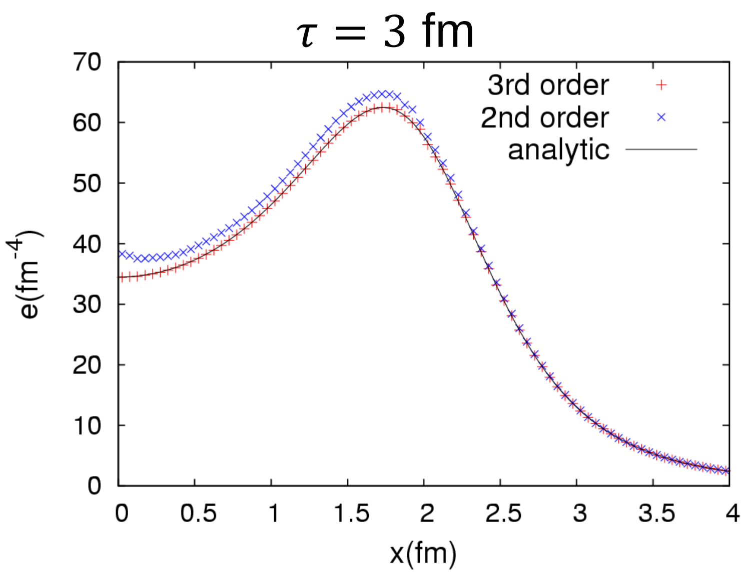
- 完全流体計算と粘性の補正の計算の2段階に分ける
- 完全流体計算に対し**リーマン解法**を利用
- 空間3次精度補間

粘性テンソルの運動方程式

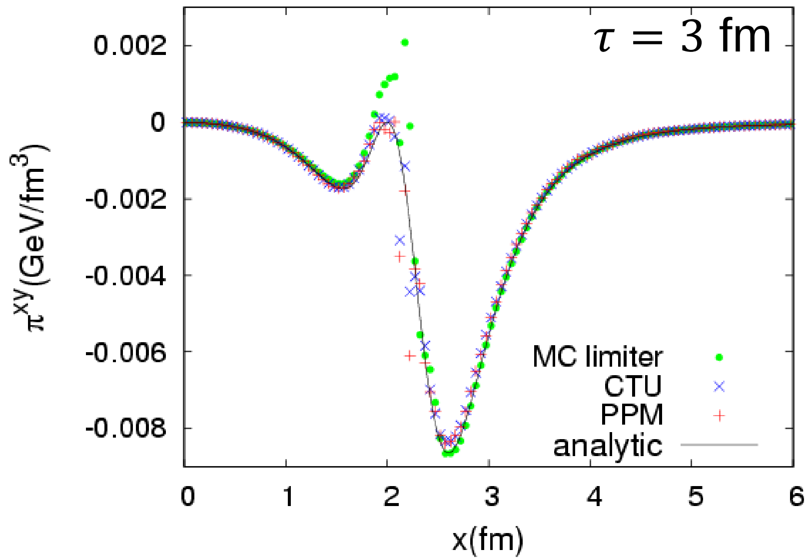
- 移流項を2次精度風上差分、その他の微分項を中心差分で評価
- 緩和時間が時間刻みより短いとき、Piecewise Exact Solution (PES) methodを利用

テスト計算

Ideal Gubser flow



Viscous Gubser flow

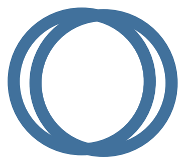


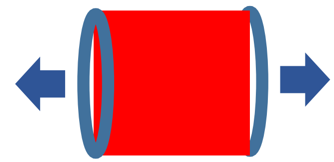
- 3次精度スキームを利用することで多次元膨張の記述を改善
- 粘性テンソルの結果はその運動方程式の移流項を解くスキームに強く依存する

後の時間では温度分布に影響がでるため注意が必要

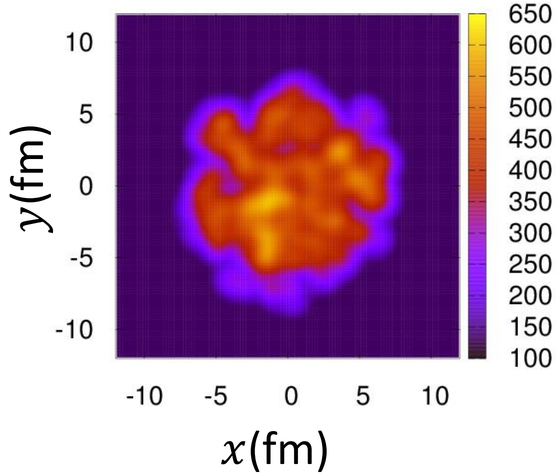
LHC重イオン衝突験の時空発展

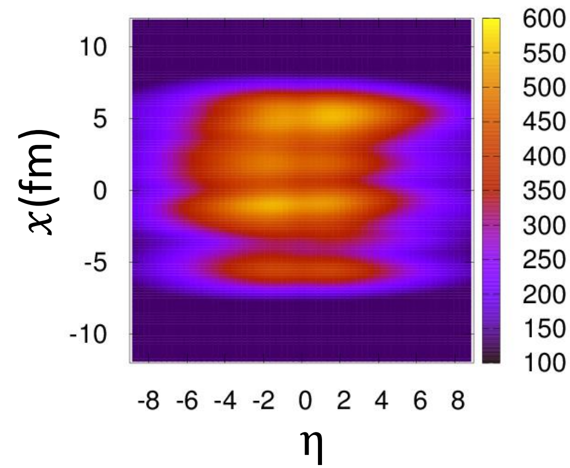
中心度 0 - 5 %





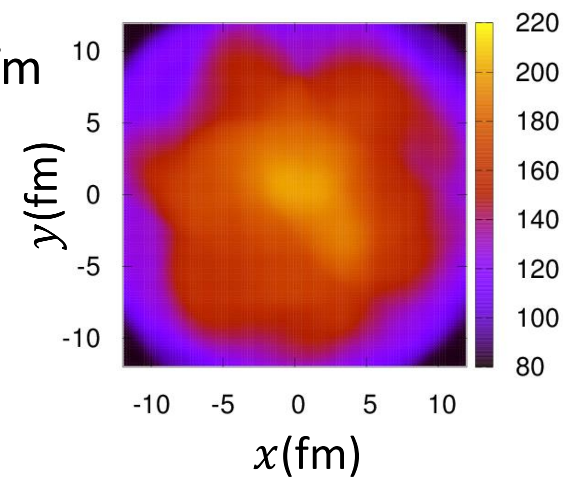
$\tau = 0.4\text{fm}$

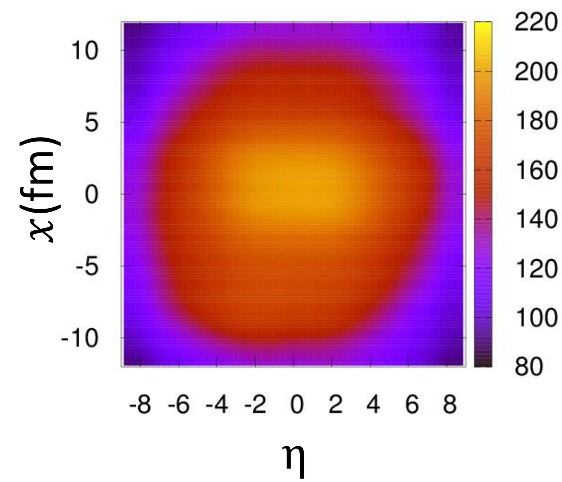




フラックスチューブのような構造

$\tau = 8\text{fm}$





LHC実験との比較

セットアップ

モデルのパラメータ

- **初期条件**

Transeverse平面: 3個

Ke et al, arXiv:1610.08490

と同じ値を用いる

Longitudinal： 2個

dN/dyから決める

Normalization

- $T_{sw} = 150\mathrm{MeV}$
- **初期時刻** $\tau_0 = 0.5$ fm
- **粘性係数** η/s, ζ/s

今回注目した観測量

荷電粒子数、v_2、v_3の横運動量分布、**擬ラピディティー分布**

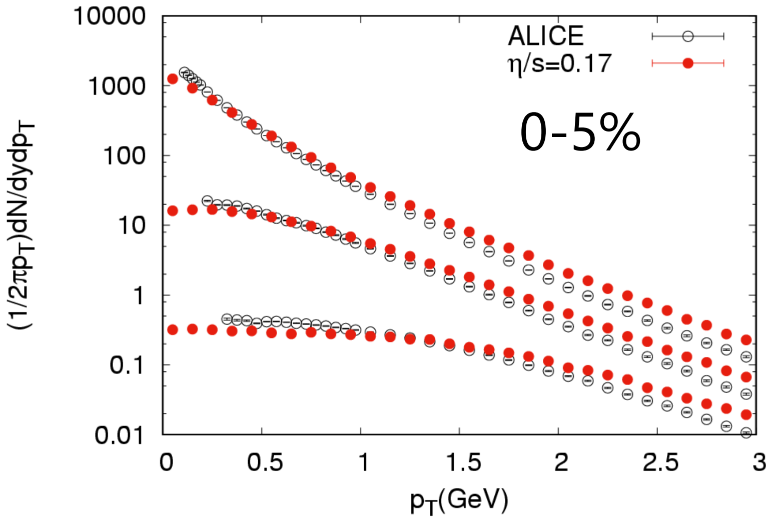
ALICE, Pb+Pb, $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\mathrm{TeV}$

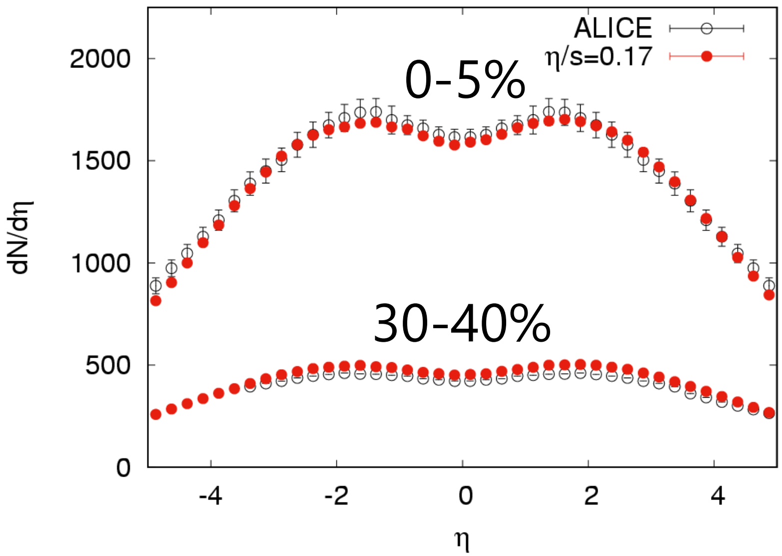
10%のセントラリティービンで200event計算

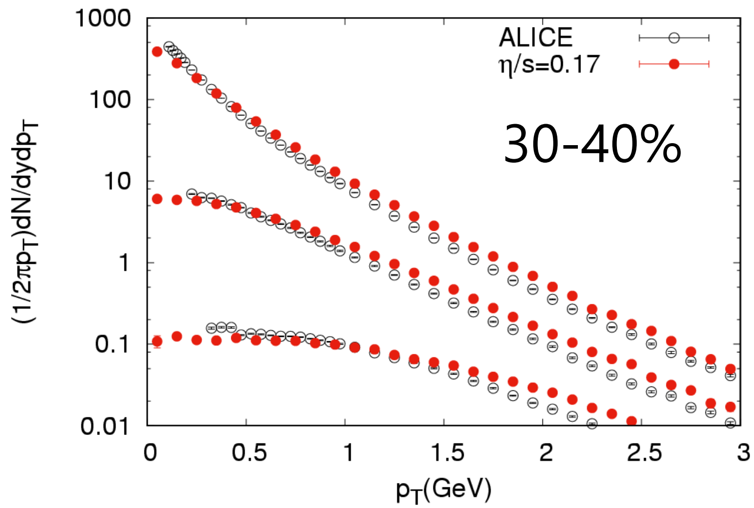
$\Delta x = \Delta y = 0.2$ fm, $\Delta\eta = 0.3$, $\Delta\tau = 0.5\Delta x$

1粒子分布　　η/s=0.17, ζ/s =0

ALICE, PRC88,0444910(2013), PLB726(2013)610, PLB754(2016)373







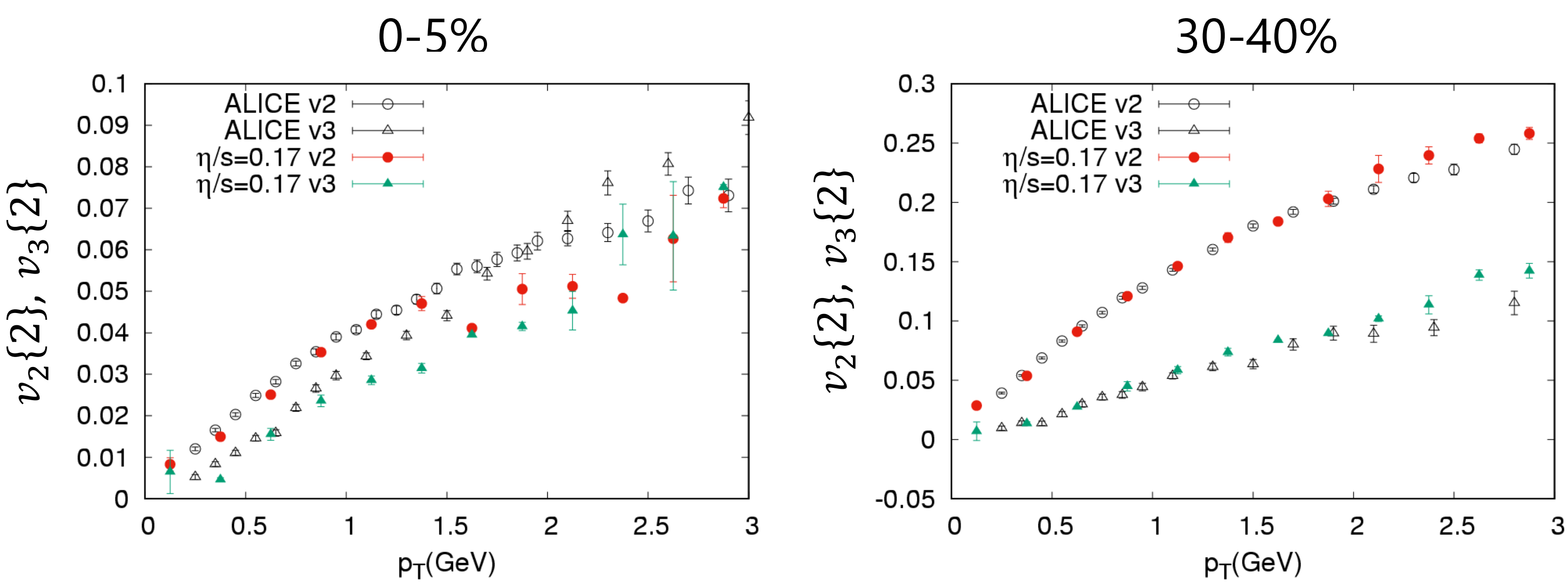
- TRENTOのパラメータを決める
- 擬ラピディティー分布を再現
- 高運動量粒子が実験より多い

pion $\langle p_T \rangle$ の実験とのずれ

16.2%(0-5%)　13.2%(30-40%)

荷電ハドロン方位角異方性

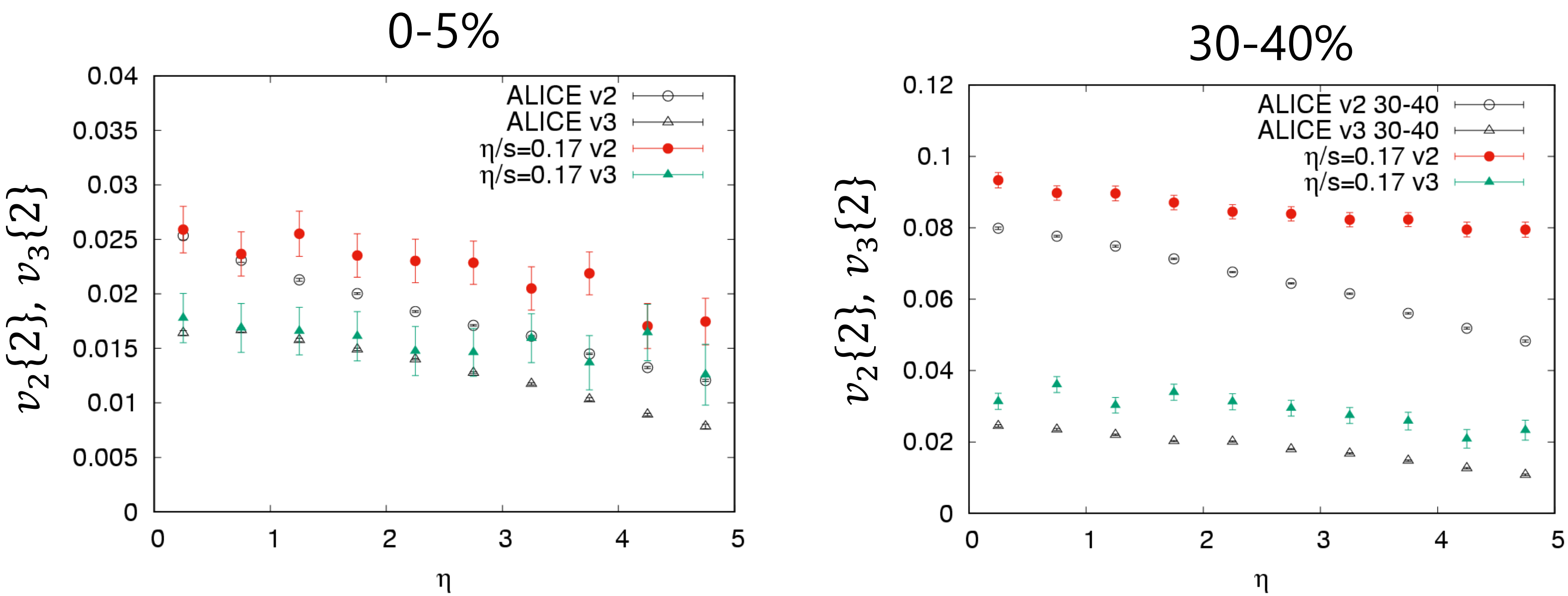
ALICE, PRL107,032301(2011)



η/s=0.17で2次, 3次方位角異方性のp_T分布をよく再現する

方位角異方性の擬ラピディティー分布

ALICE, PLB762(2016)376



- 平均横運動量が実験値より大きいため, p_T積分されたv_2は実験値より大きくなる

- v_2の擬ラピディティー依存性が実験より平坦

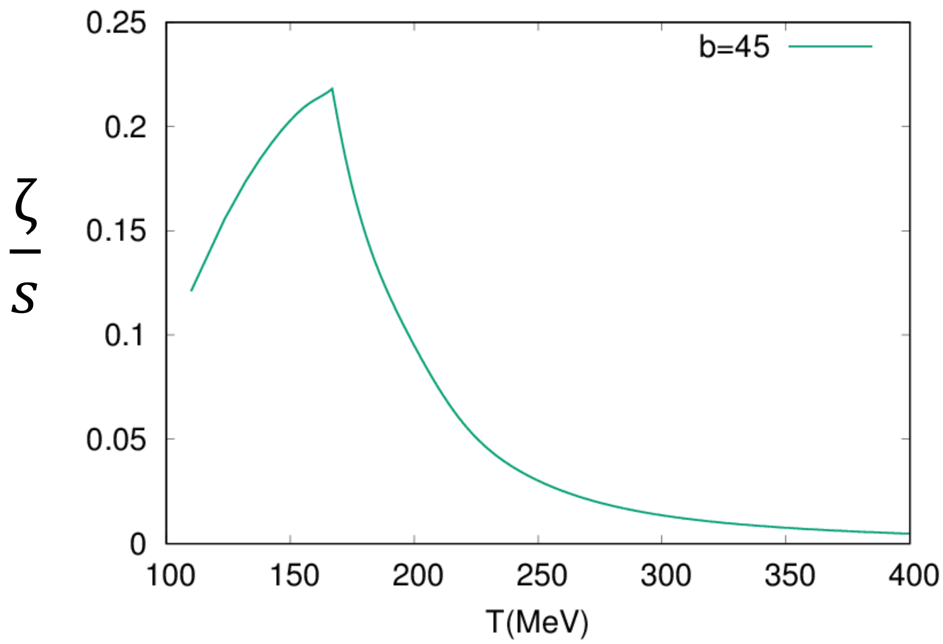
  event plane decorrelationの影響は見えない

体積粘性の導入

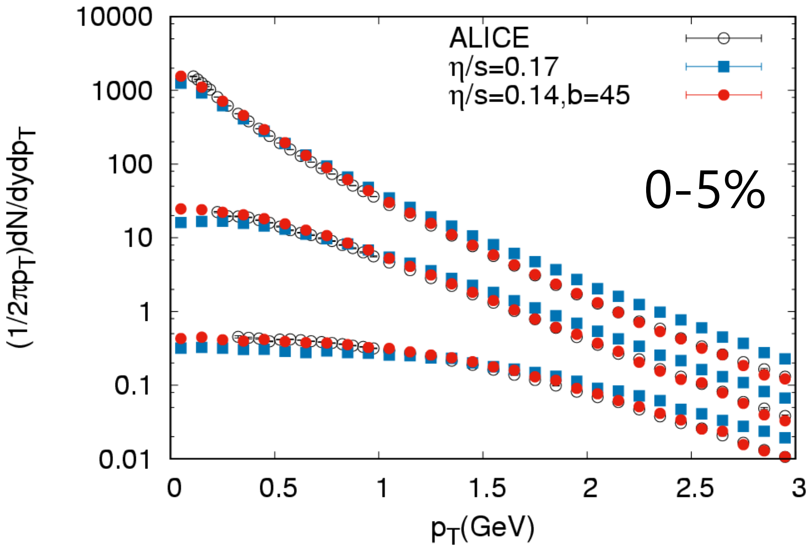
体積粘性係数について次の表式を用いる

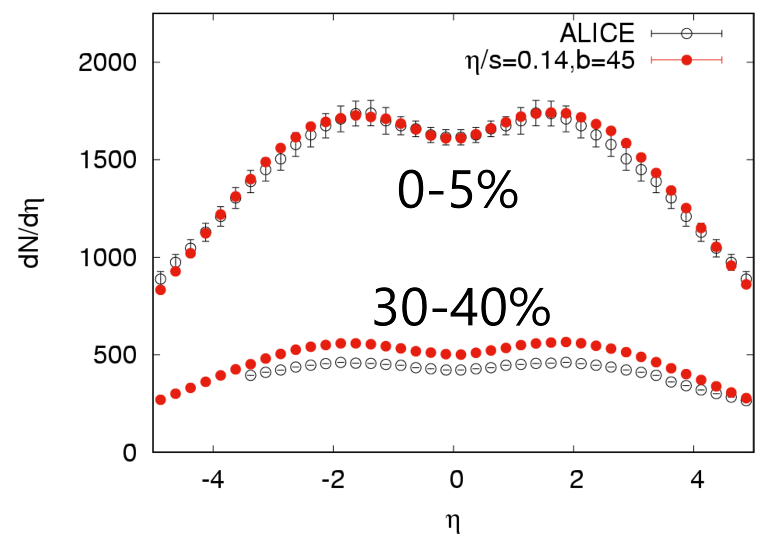
ex. Denicol,Niemi,Molnar,Rischke, PRC85,114047(2012)

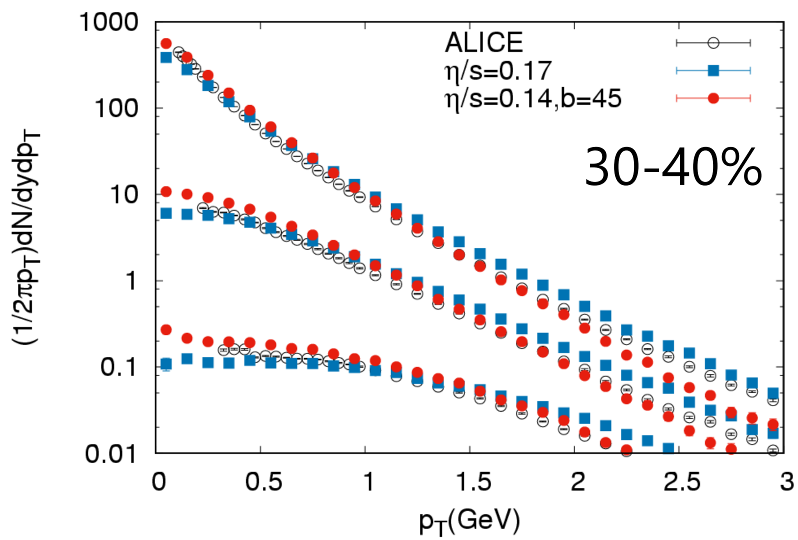
$$\zeta = b\eta\left(\frac{1}{3} - c_s^2\right)^2$$



体積粘性の1粒子分布への影響 η/s=0.14　$\zeta = 45\eta\left(\frac{1}{3} - c_s^2\right)^2$







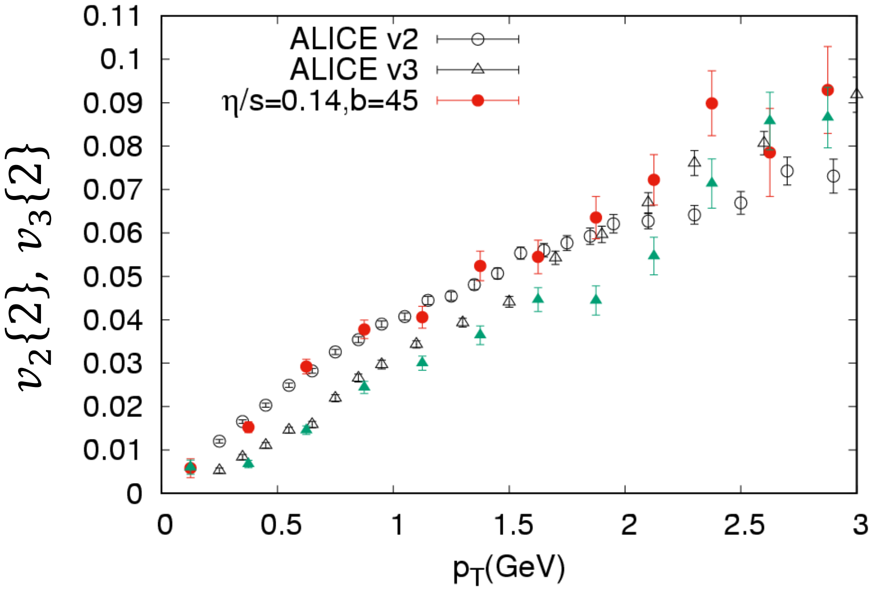
体積粘性によりradial flowが抑えられる

pion $\langle p_T \rangle$ の実験とのずれ

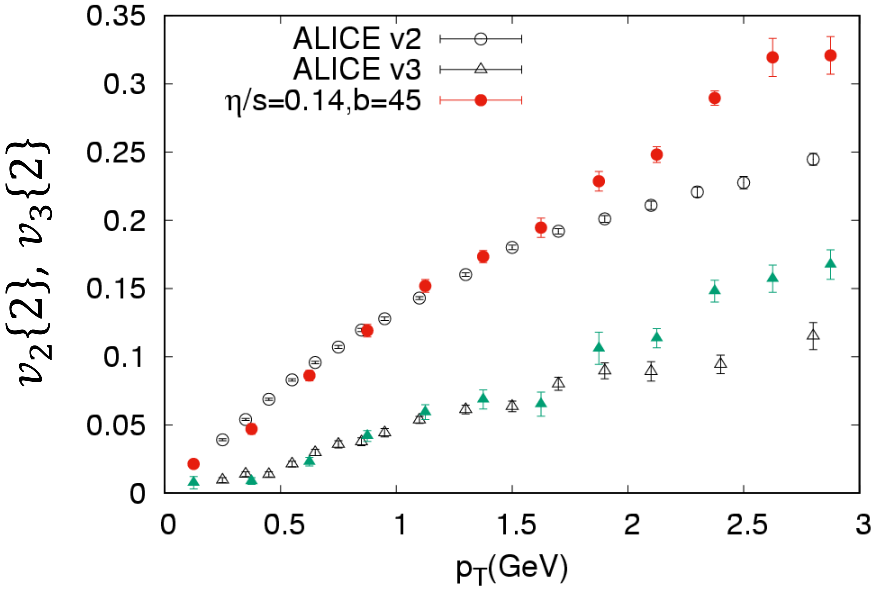
2.3%(0-5%)　−3.3%(30-40%)

体積粘性の方位角異方性への影響

0-5%



30-40%

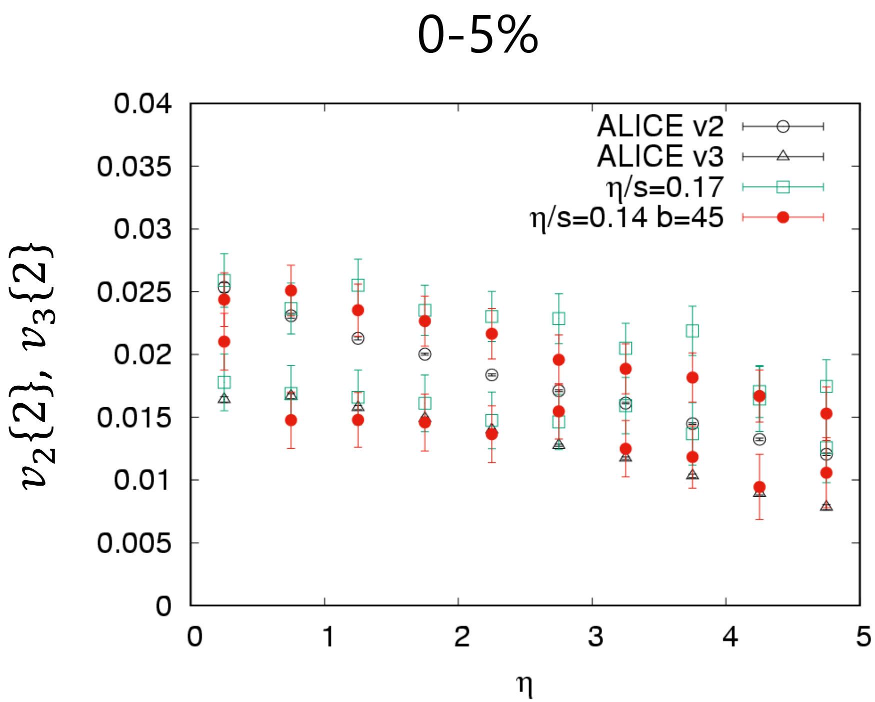


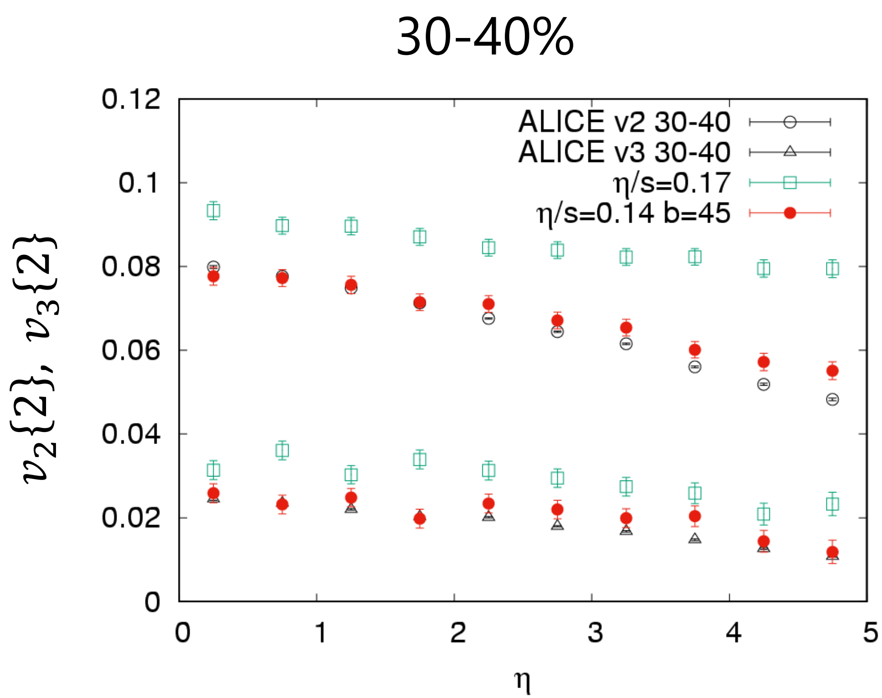
- 体積粘性によっても方位角異方性が抑えられる

  η/s=0.17 → 0.14

- 2GeV付近から実験値を上回る
  体積粘性の分布関数への補正の影響だと思われる
  2GeV以上では分布関数への補正のモデル依存性が大きいかもしれない

方位角異方性の疑ラピディティー分布





- 体積粘性を導入したことで、実験結果とのより良い一致が得られた
- 低温領域で体積粘性が大きくなるため, ラピディティーの大きな領域ほど, 体積粘性の影響が大きく, v_nが抑制され実験値に近づく

まとめ

- 精度の高い新しい相対論的粘性流体アルゴリズムと相対論的流体模型の開発

  3次元発展を記述できる　数値粘性が小さい

- LHC実験との比較

  v_nの疑ラピディティー分布が粘性の温度依存性に敏感

  実験データは低温で有限の体積粘性を支持

展望

QGP物性に敏感な他の観測量の解析

直接光子（流体の時空発展を反映）
HBT半径（流体の空間分布に関する情報）

初期条件：TRENTO

初期条件をパラメトライズ

Transvers plane

- エントロピー分布

$$s \propto \left(\frac{T_A^p + T_B^p}{2} \right)^{1/p}$$

$p = 0$ ⟶ IP-Glasma

pの値によって既存の初期条件モデルを再現する

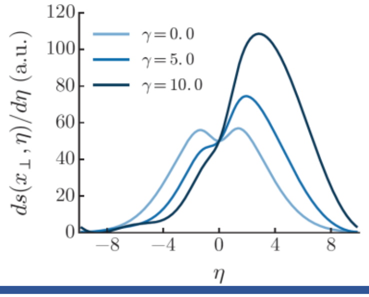
- 核子の幅 w
- 生成粒子数のゆらぎ（分散 k） ⟶ NBD分布

パラメータ：p, w, k, normalization

Longitudinal direction

$$s(x, \eta) \propto \mathcal{F}^{-1}\left\{ \exp\left(i\mu k - \frac{1}{2}\sigma^2 k^2 - \frac{i}{6}\gamma\sigma^3 k^3\right) \right\}$$

パラメータ：$\sigma_0, \mu_0, \gamma_0$, Jacobian



衝突軸方向を含めた空間3次元のゆらぎ