

Collective Dynamics 03

Effects of hydrodynamic fluctuations on anisotropic flow in ultra-central heavy-ion collisions

2019/12/22 post QM @名古屋大



黒木 健志

上智大学

共同研究者

坂井 あづみ (上智大学)

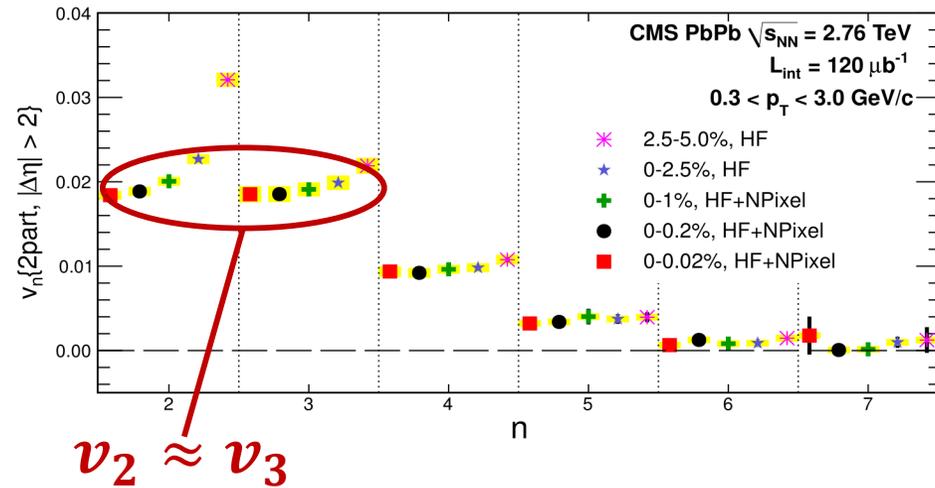
村瀬 功一 (北京大学)

平野 哲文 (上智大学)

超中心衝突事象 (Centrality 0 – 0.2%): 事象毎揺らぎの効果が顕著

CMS超中心衝突実験データ (2014)

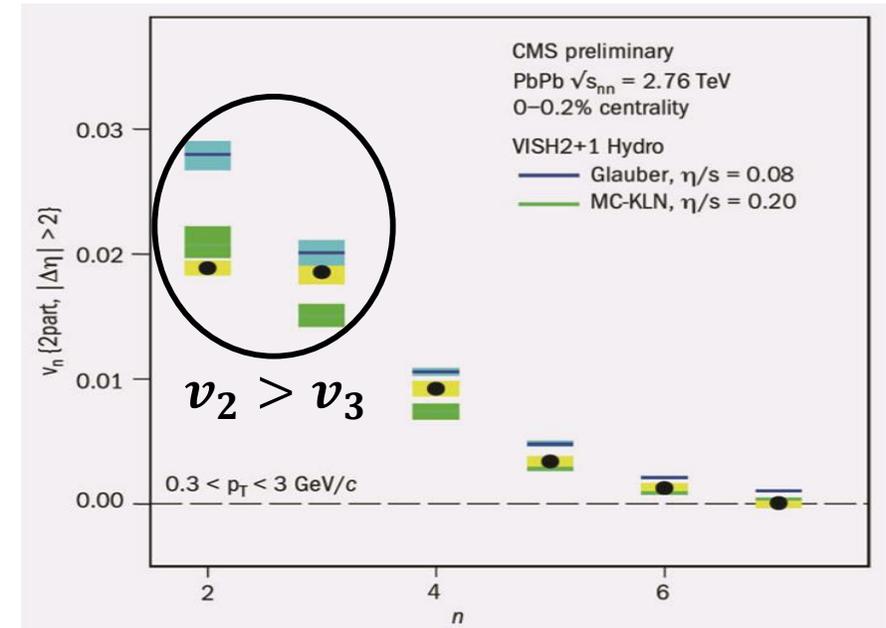
CMS Collaboration, JHEP **02** (2014) 088



- 衝突幾何由来の v_2 → 減少
- 揺らぎ由来の v_3 → 相対的に増加

先行研究

Ulrich Heinz, J. Phys., Conf. Ser. 455, Conf. 1 (2013)

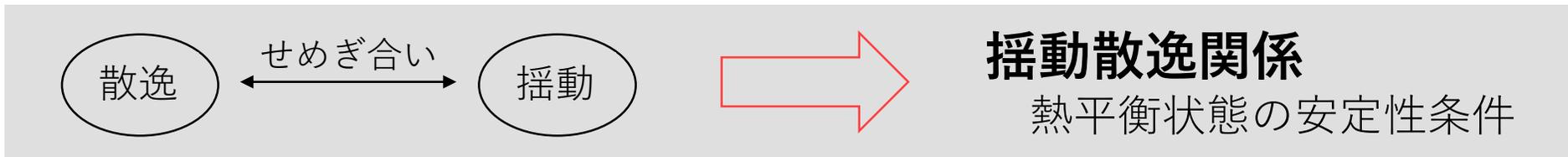
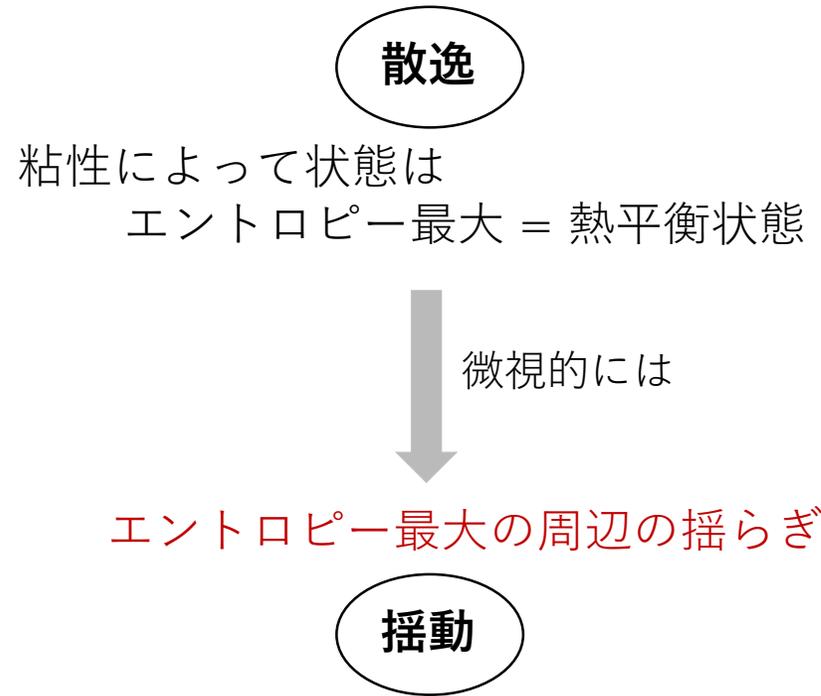
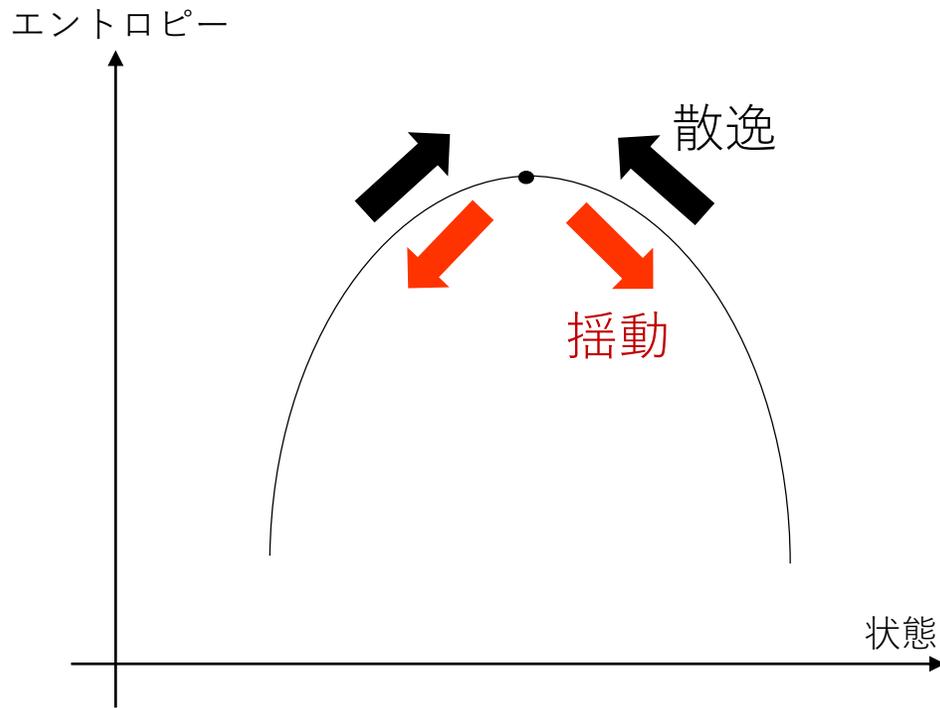


New!

超中心衝突事象における流体揺らぎの影響は？

流体揺らぎ

熱平衡にある系でも、微視的にみると熱平衡周りで揺らいでいる 例) ブラウン運動



連続の方程式 + 状態方程式

K. Murase, Ph.D thesis, The University of Tokyo (2015)

+
構成方程式 例) 応力テンソル $\pi^{\mu\nu}$

$$\tau_\pi \Delta^{\mu\nu}_{\alpha\beta} u^\lambda \partial_\lambda \pi^{\alpha\beta} + \left(1 + \frac{4}{3} \tau_\pi \partial_\lambda u^\lambda\right) \pi^{\mu\nu} = 2\eta \Delta^{\mu\nu}_{\alpha\beta} \partial^\alpha u^\beta + \delta\pi^{\mu\nu}$$

流体揺らぎ

 u^μ : 流速(Landau系) τ_π : 緩和時間 $g^{\mu\nu} := \text{diag}(+, -, -, -)$ η : ずれ粘性 $\Delta^{\mu\nu} := g^{\mu\nu} - u^\mu u^\nu$ $\Delta^{\mu\nu}_{\alpha\beta} := \frac{1}{2} (\Delta^\mu_\alpha \Delta^\nu_\beta + \Delta^\mu_\beta \Delta^\nu_\alpha) - \frac{1}{3} \Delta^{\mu\nu} \Delta_{\alpha\beta}$

揺動散逸関係

= 熱平衡状態の安定性条件

$$\langle \delta\pi^{\mu\nu}(x) \delta\pi_{\alpha\beta}(x') \rangle = 4T\eta \Delta^{\mu\nu}_{\alpha\beta} \delta^{(4)}(x - x')$$

 T : 温度

シミュレーションでは

$$\delta^{(4)}(x - x') \rightarrow \frac{1}{2\Delta t} \frac{1}{(4\pi\lambda^2)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{(x-x')^2}{4\lambda^2}}$$

 λ : カットオフパラメータ

高エネルギー重イオン衝突を統合的に記述するモデル T. Hirano *et al.*, Prog. Part. Nucl. Phys. **70**, 108 (2013)

4. ハドロンカスケードシミュレーション
— **JAM**

Y. Nara *et al.*, Phys. Rev. C **61** (2000) 024901

3. 流体描写 → 粒子描写 @ $T_{SW} = 155$ MeV
— **Cooper-Frye formula**

F. Cooper and G. Frye, Phys. Rev. D **10** (1974) 186

2. (3+1)-D 流体シミュレーション $\eta/s = 1/4\pi$
— **rfh (相対論的揺らぎ流体)**
— **rdh (相対論的粘性流体)**

K. Murase, Ph.D thesis, The University of Tokyo (2015)

+ EoS **s95p-v1.1** (格子QCD + HRG)

P. Huovinen, P. Petreczky, Nucl. Phys. **837** (2010) 26.

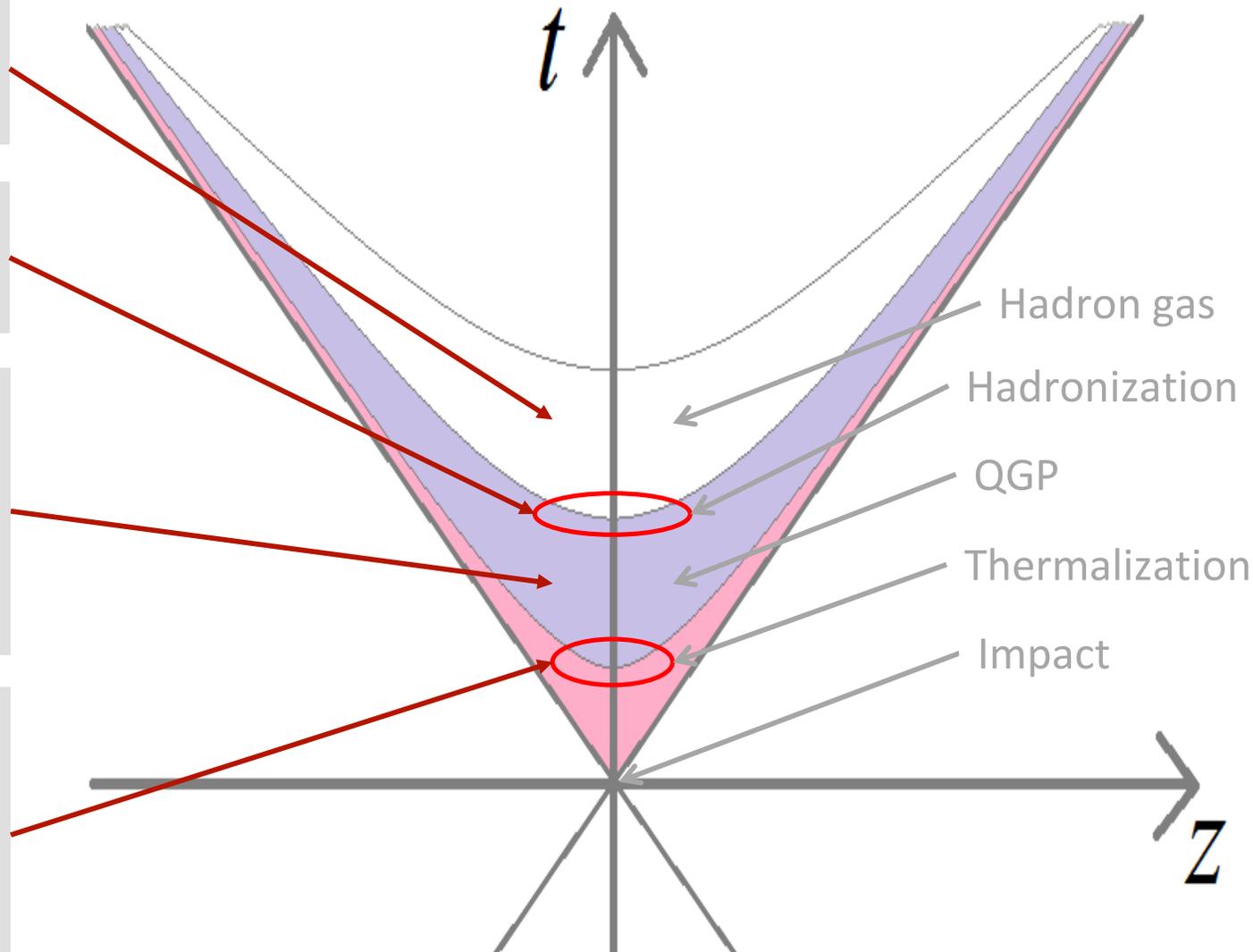
1. 初期状態生成

— **MC-Glauber** + **Modified BGK**

— **Optical-Glauber** + **Modified BGK**

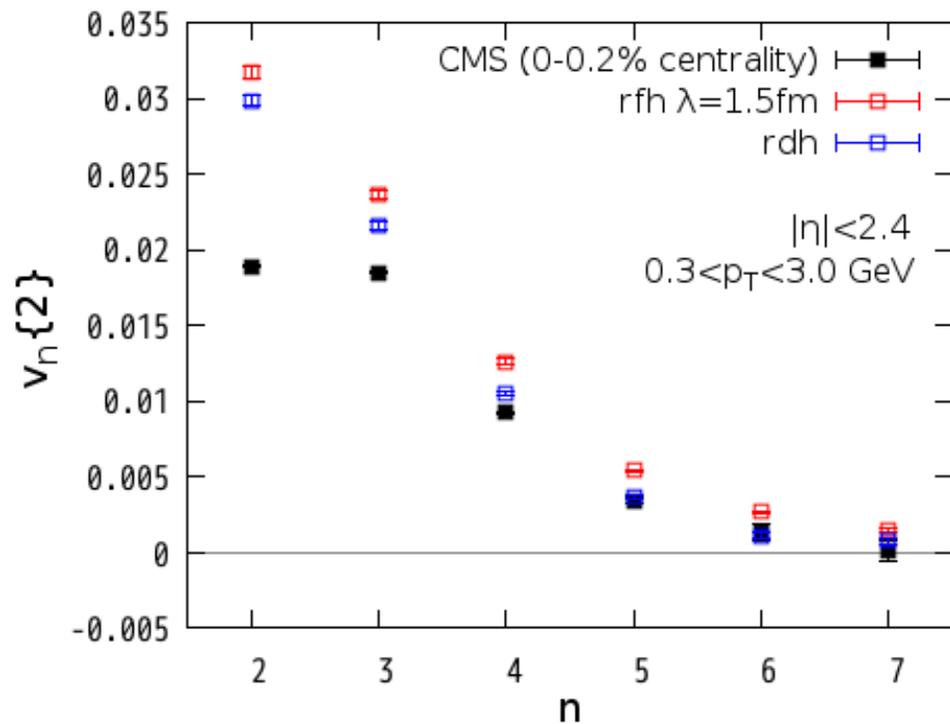
■ 衝突径数

$b = 0$ fm → 事象毎揺らぎの効果のみ



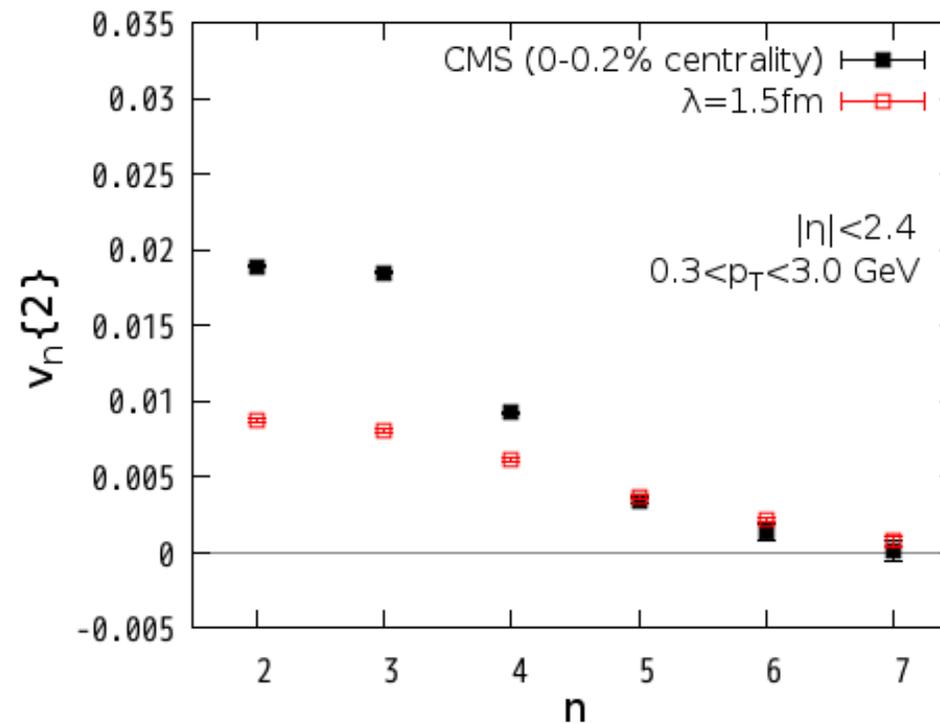
$^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$, $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76 \text{ TeV}$, $b = 0 \text{ fm}$

MC-Glauber



- 流体揺らぎによって v_n 増加
 - 増加率は高次フローの方が大きい
- しかし、定量的には **overestimate**

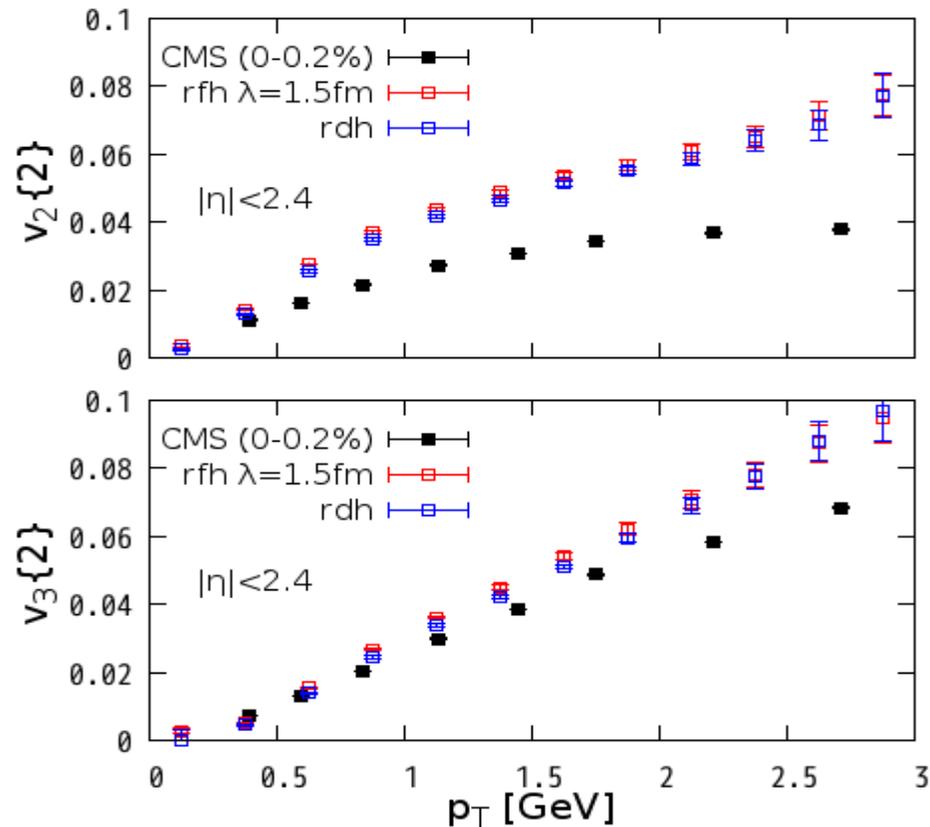
Optical-Glauber



- 流体揺らぎのみで約半分再現
- $v_2 \approx v_3$ (実験と同じ傾向)

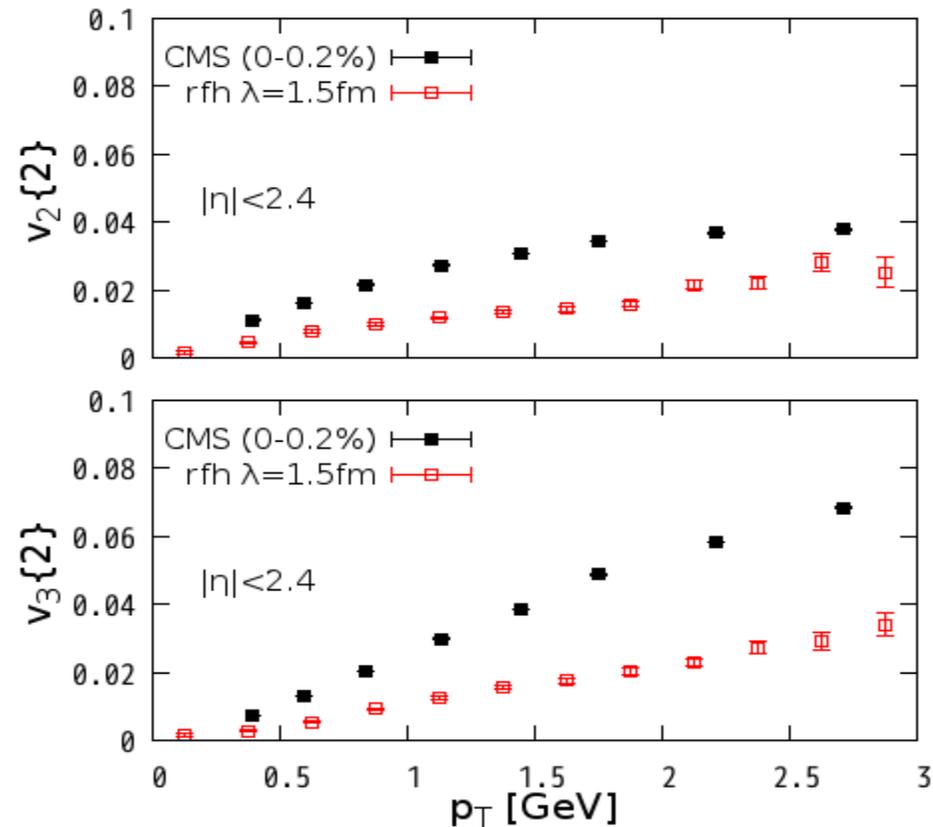
$^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}, \sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76 \text{ TeV}, b = 0 \text{ fm}$

MC-Glauber



■ low- p_T で v_3 よく再現
しかし、 v_2 はoverestimate

Optical-Glauber

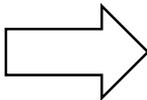


■ 流体揺らぎのみで約50%再現
■ 実験と傾向が同じ

まとめ**■ 超中心高エネルギー重イオン衝突事象における流体揺らぎの効果の解析**

- ✓ 流体揺らぎによる v_n の増加率は高次フローほど大
 v_2 と v_3 の差がわずかに縮まった
- ✓ 流体揺らぎによるフロー強度 $v_2 \approx v_3$

■ シミュレーション ($b = 0$ fm) と CMS 実験データ (Centrality 0-0.2%) 比較

- ✓ 流体揺らぎによりグラフの概形の再現度わずかに向上
- × 定量的には $v_2 > v_3$
初期状態では $\varepsilon_2 \approx \varepsilon_3$  流体発展中により事象毎揺らぎあり？

展望**■ 流体初期状態に縦初期揺らぎ&初期流速分布揺らぎを導入**

終わり

ご清聴ありがとうございました

Backup

$$(v_n\{2\})^2 \equiv \frac{\langle \sum_k^{N_{\text{pair}}} e^{in\Delta\phi_k} \rangle_{\text{ev}}}{\langle N_{\text{pair}} \rangle_{\text{ev}}}$$

$\Delta\phi_k$: k組目の粒子の方位角の差

N_{pair} : 粒子ペア数

$\langle \dots \rangle_{\text{ev}}$: 衝突事象による平均

興味ある粒子数 N に注目すると

$$\frac{\langle \sum_k^{N_{\text{pair}}} e^{in\Delta\phi_k} \rangle_{\text{ev}}}{\langle N_{\text{pair}} \rangle_{\text{ev}}} = \frac{\langle \sum_{i,j}^N e^{in\phi_i} e^{-in\phi_j} - N \rangle_{\text{ev}}}{\langle N(N-1) \rangle_{\text{ev}}}$$

よって

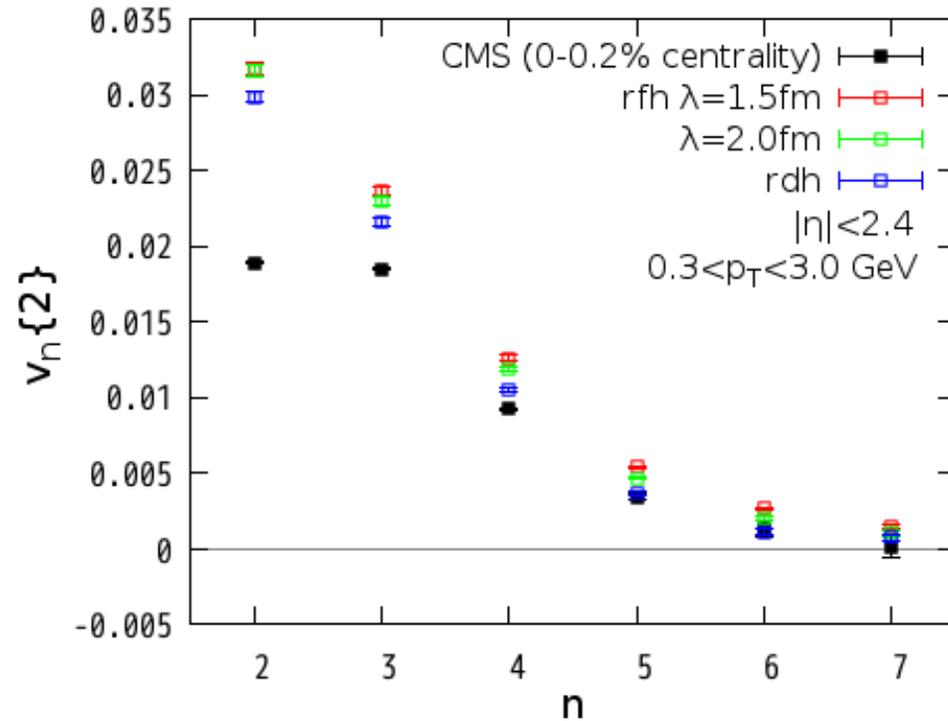
$$(v_n\{2\})^2 = \frac{\langle \text{Re}\{Q_n Q_n^*\} - N \rangle_{\text{ev}}}{\langle N(N-1) \rangle_{\text{ev}}}$$

フローベクトル : $Q_n \equiv \sum_k^N e^{in\phi_k}$

ϕ_k : k番目の粒子の方位角

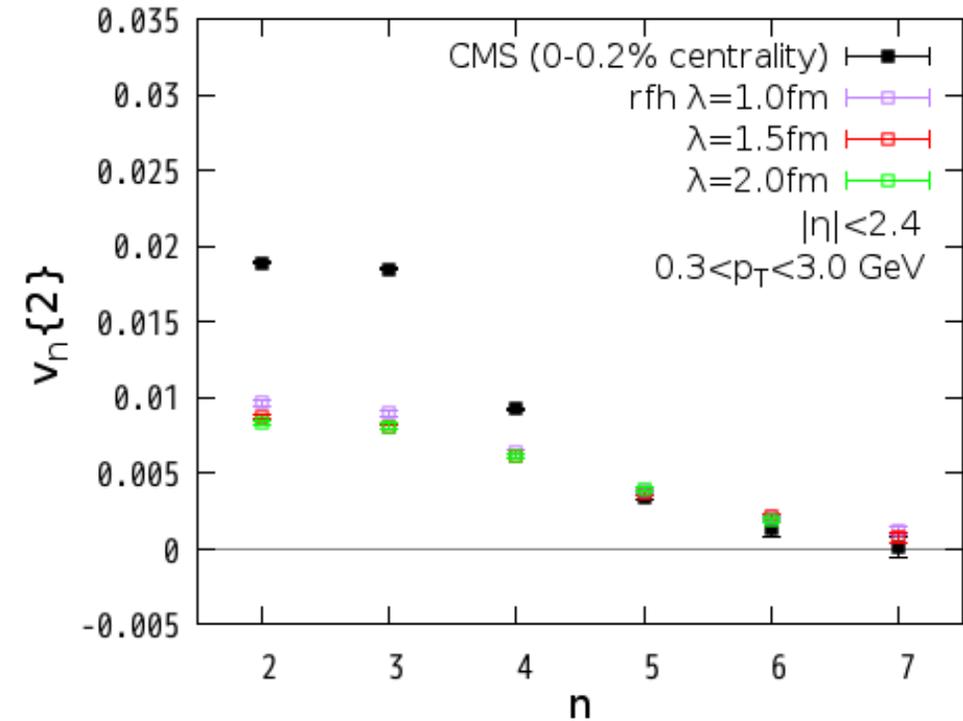
$^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$, $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76 \text{ TeV}$, $b = 0 \text{ fm}$

MC-Glauber



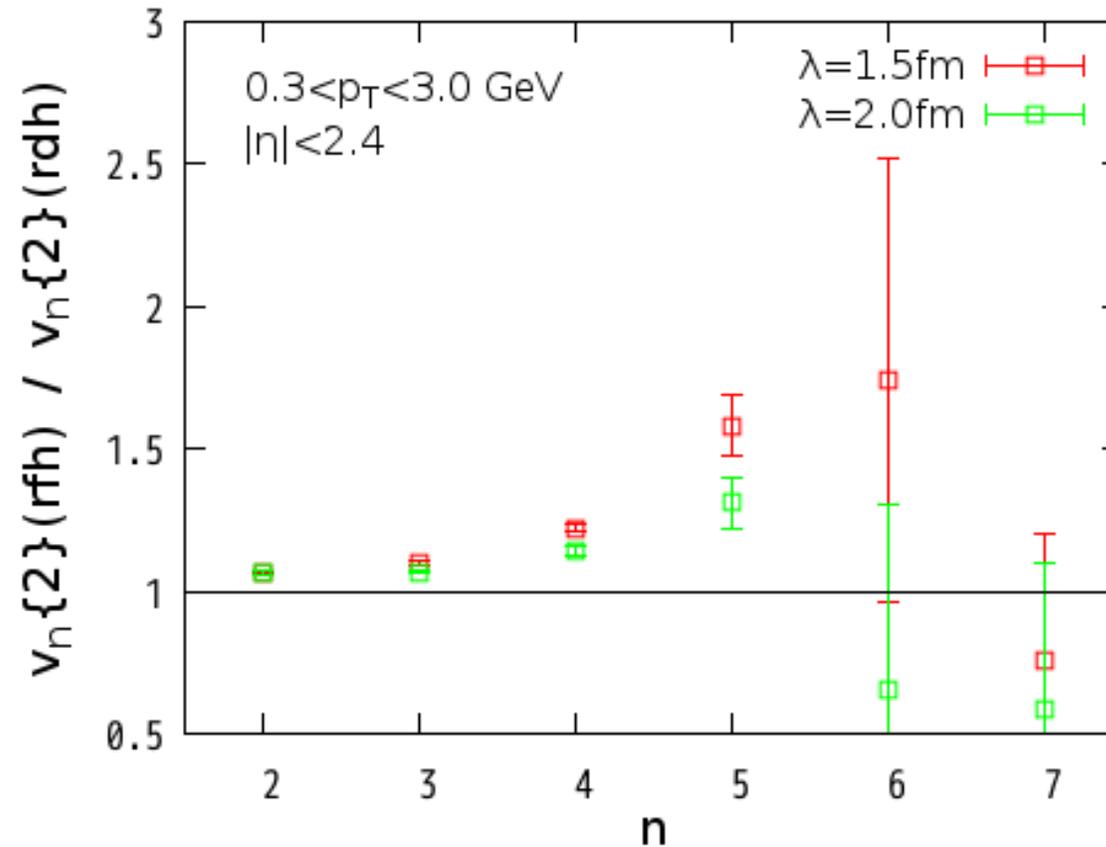
■ λ 大(流体揺らぎ強)でより v_n 増加

Optical-Glauber



■ λ 大(流体揺らぎ強)でより v_n 増加
差はわずか

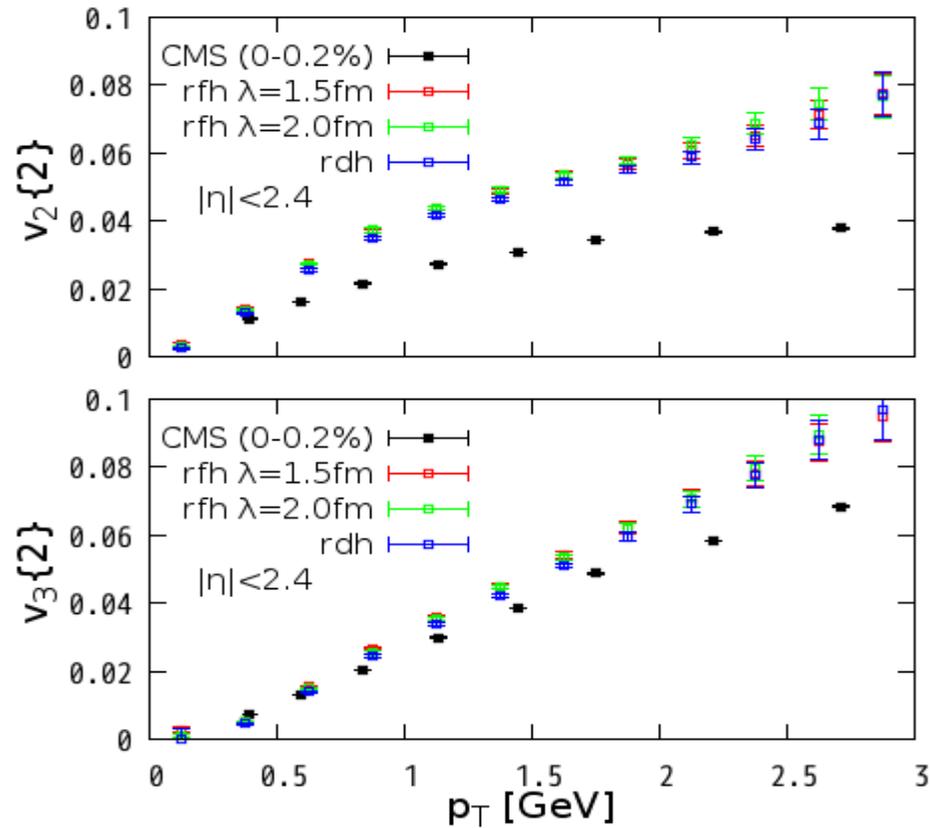
$^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$, $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76 \text{ TeV}$, $b = 0 \text{ fm}$



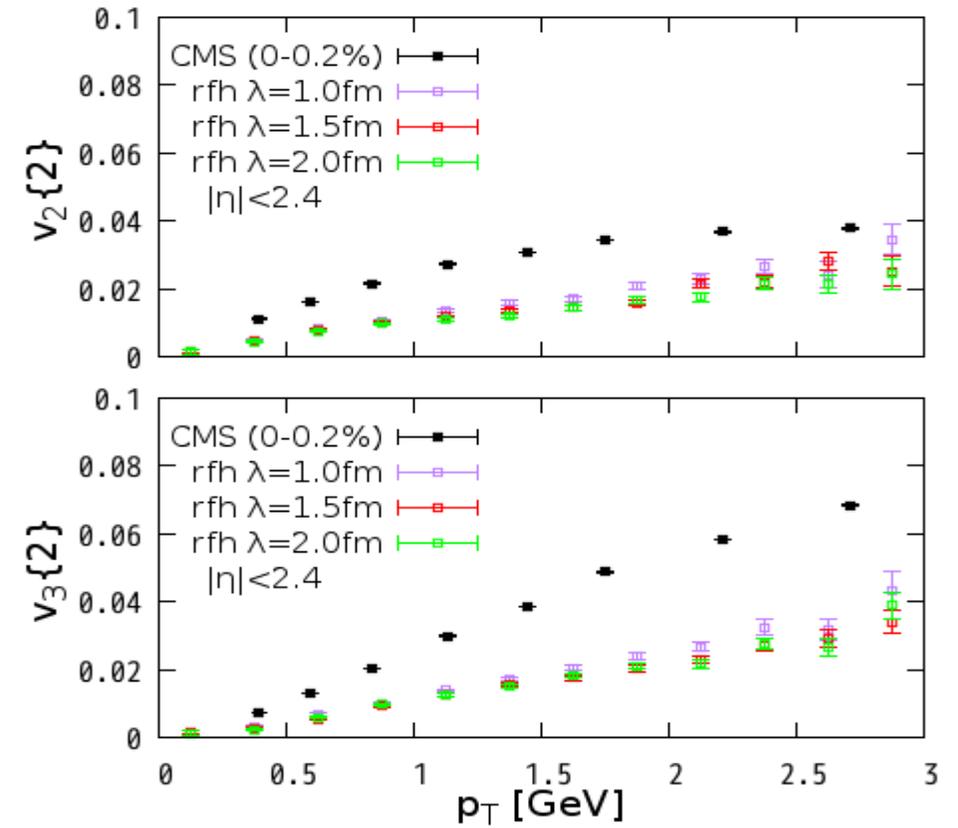
- 増加率は高次フローほど大
- λ 大(流体揺らぎ強)でより増加

$^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$, $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76 \text{ TeV}$, $b = 0 \text{ fm}$

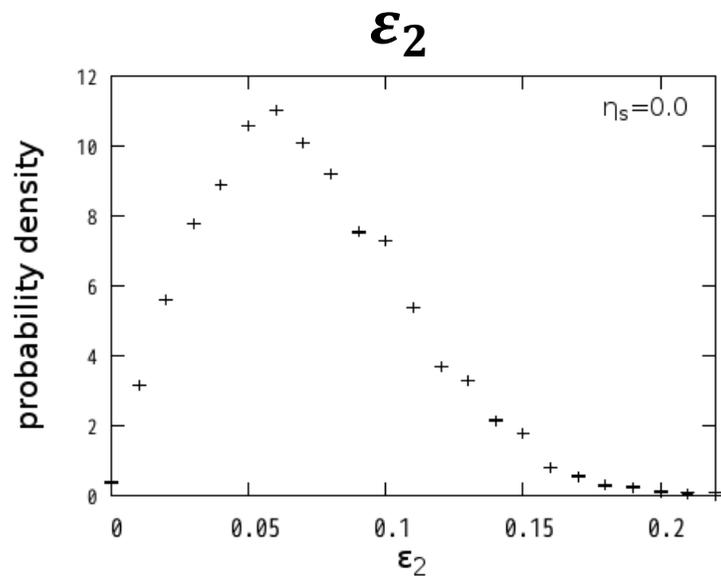
MC-Glauber

■ λ 依存性はほとんど見えない

Optical-Glauber

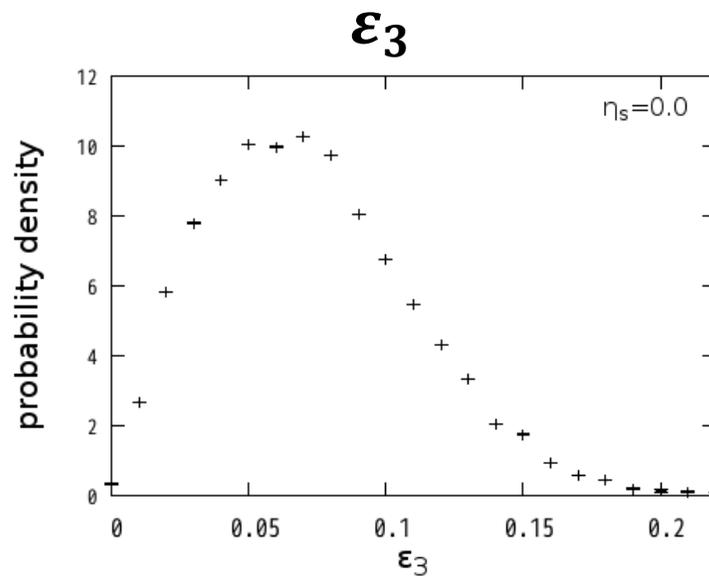
■ λ 依存性はほとんど見えない

初期状態生成モデル: MC-Glauber

 $^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$, $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76 \text{ TeV}$, $b = 0 \text{ fm}$ ※パラメータ $\alpha = 0.13$
(粘性流体の初期条件)

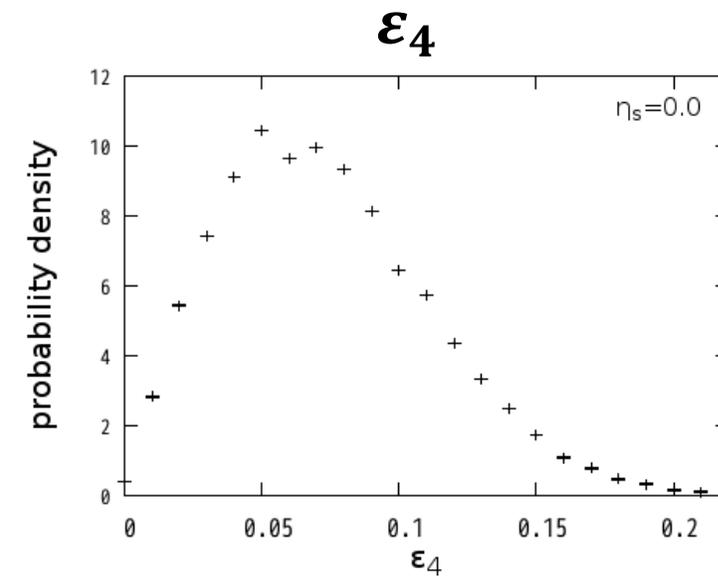
$$\langle \varepsilon_2 \rangle = 0.069541 \pm 0.000359$$

cf) $\alpha = 0.16$ の時 (揺動流体の初期条件)
 $\langle \varepsilon_2 \rangle = 0.071779 \pm 0.000370$



$$\langle \varepsilon_3 \rangle = 0.070949 \pm 0.000366$$

cf) $\alpha = 0.16$ の時 (揺動流体の初期条件)
 $\langle \varepsilon_3 \rangle = 0.072782 \pm 0.000375$



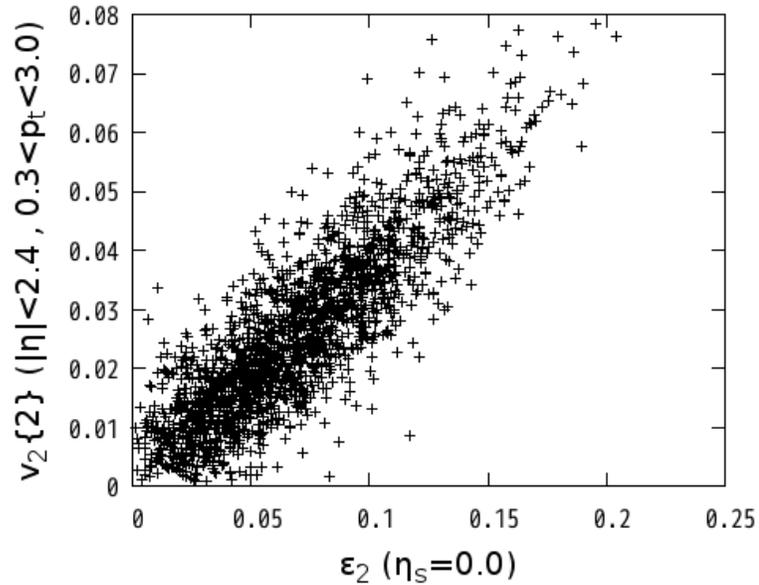
$$\langle \varepsilon_4 \rangle = 0.072455 \pm 0.000380$$

cf) $\alpha = 0.16$ の時 (揺動流体の初期条件)
 $\langle \varepsilon_4 \rangle = 0.073930 \pm 0.000387$

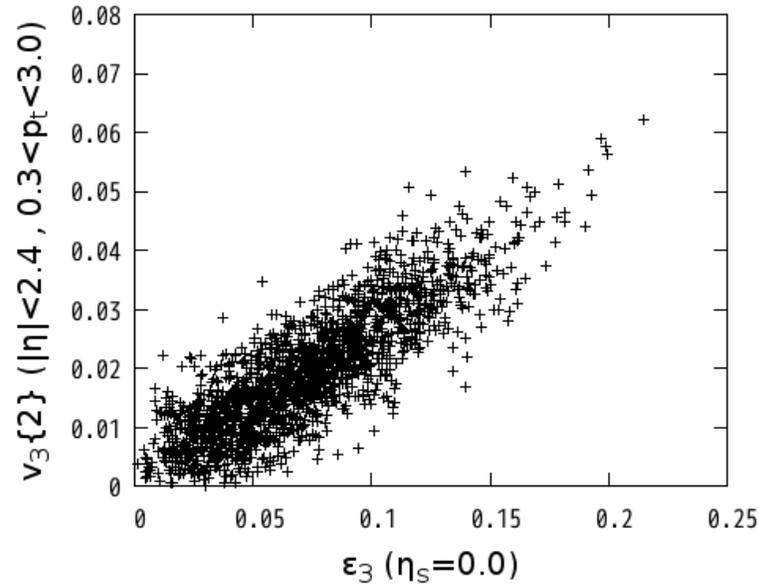
初期状態では $\varepsilon_2 \approx \varepsilon_3 \approx \varepsilon_4$

流体モデル: rdh

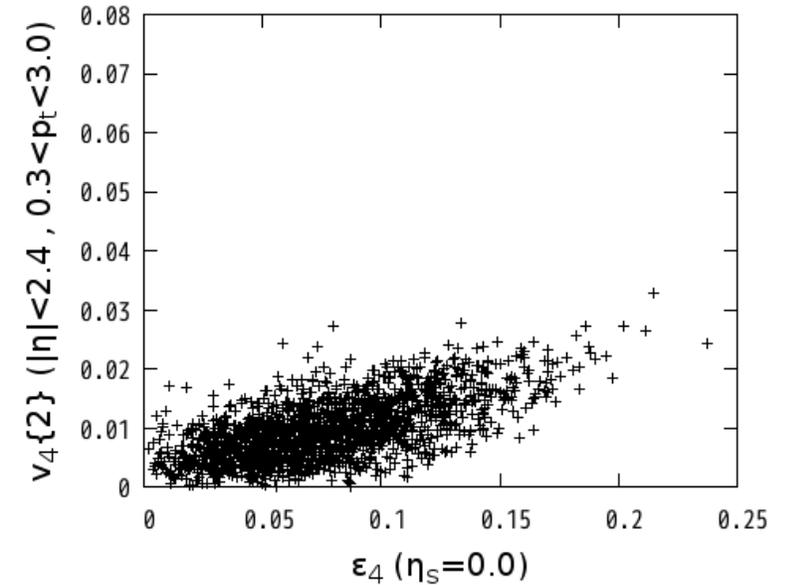
$$\eta/s = 1/4\pi$$

 $\varepsilon_2 - \nu_2$ 

傾き: 0.355818

cf) 揺動流体($\lambda = 1.5\text{fm}$) \rightarrow 傾き: 0.336985 $\varepsilon_3 - \nu_3$ 

傾き: 0.247948

cf) 揺動流体($\lambda = 1.5\text{fm}$) \rightarrow 傾き: 0.230093 $\varepsilon_4 - \nu_4$ 

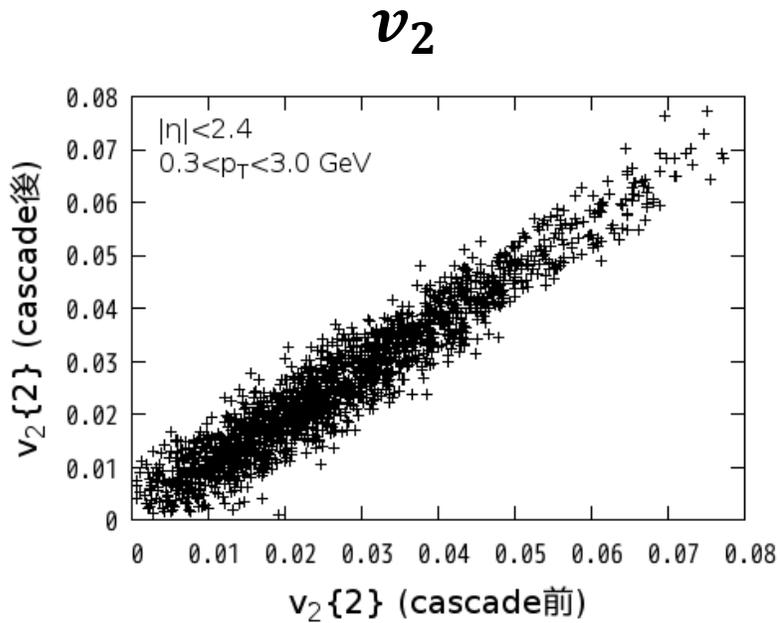
傾き: 0.0872738

cf) 揺動流体($\lambda = 1.5\text{fm}$) \rightarrow 傾き: 0.076139

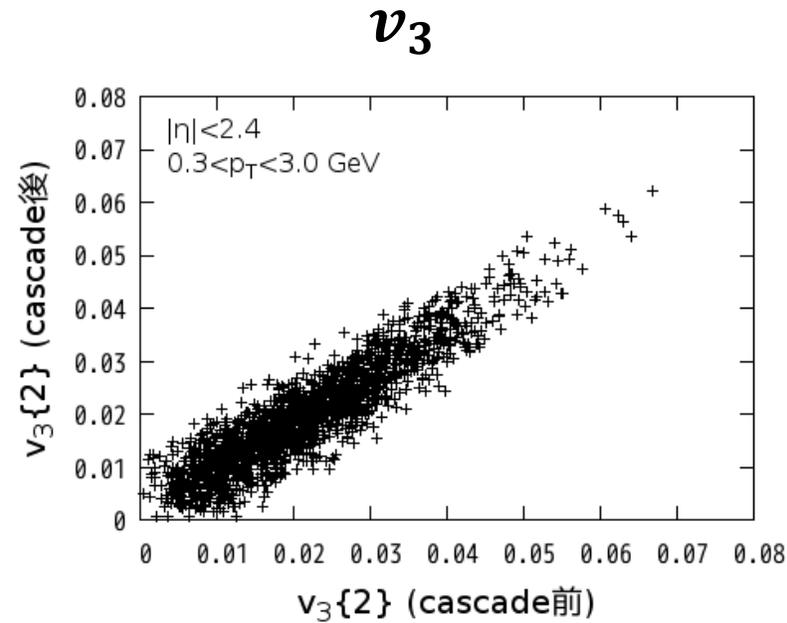
粘性によって高次異方性がよりなめされる

※初期状態生成モデル: MC-Glauber

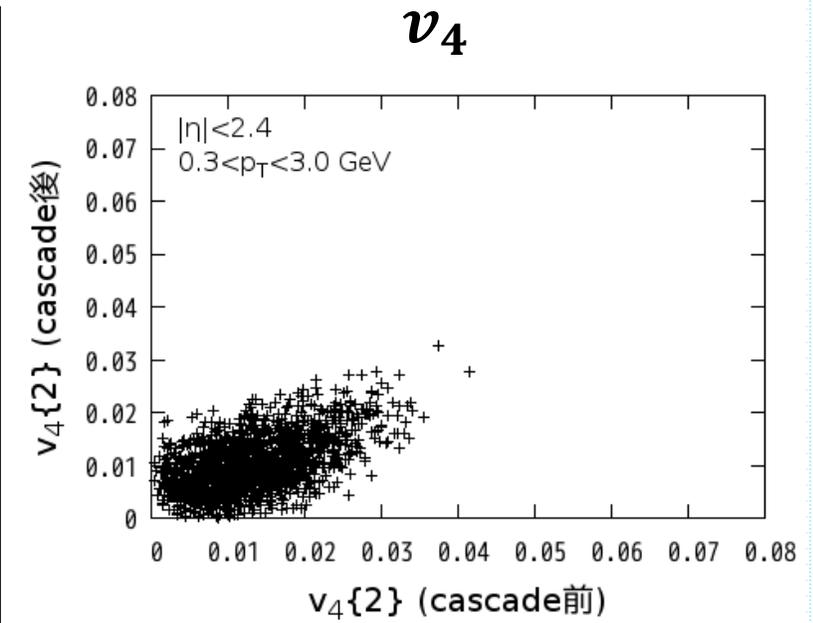
ハドロンカスケードモデル: JAM



傾き: 0.901204



傾き: 0.830813

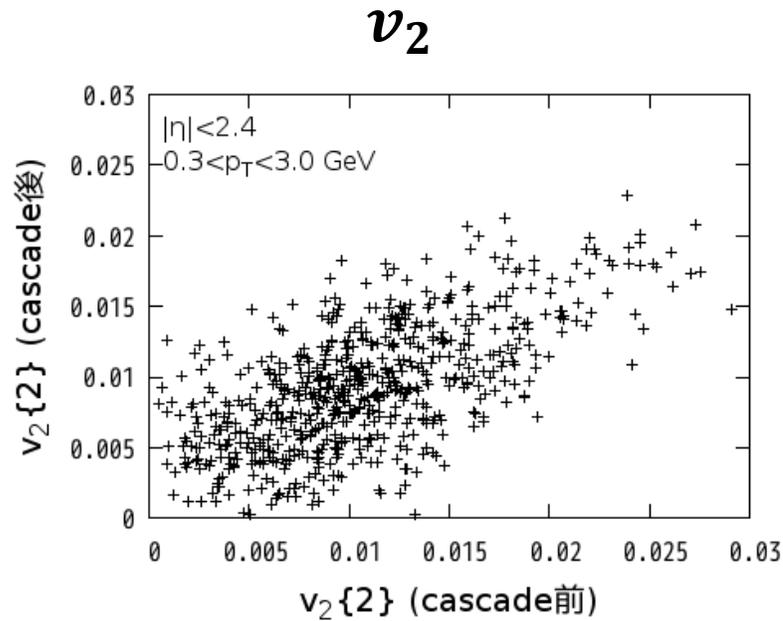


傾き: 0.392824

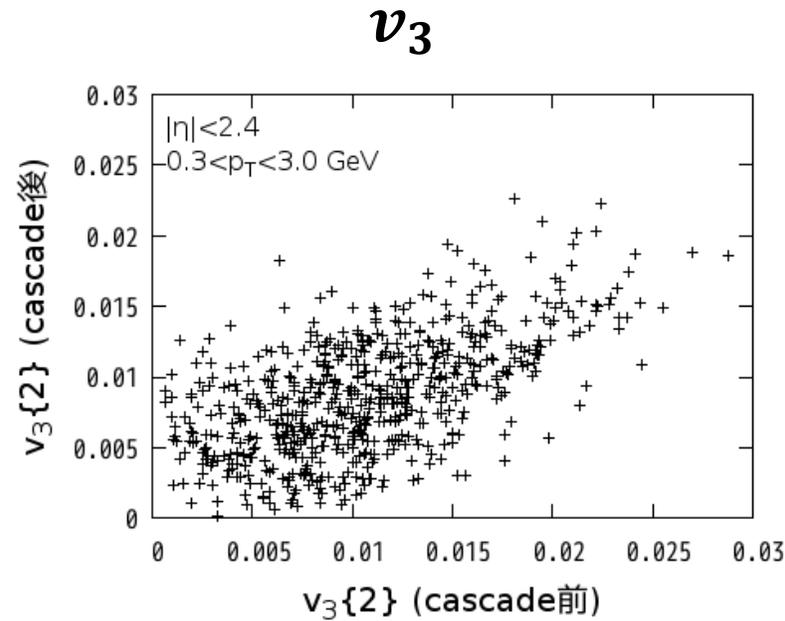
ハドロンカスケードによって高次異方性がよりなめされる

※初期状態生成モデル: Optical-Glauber

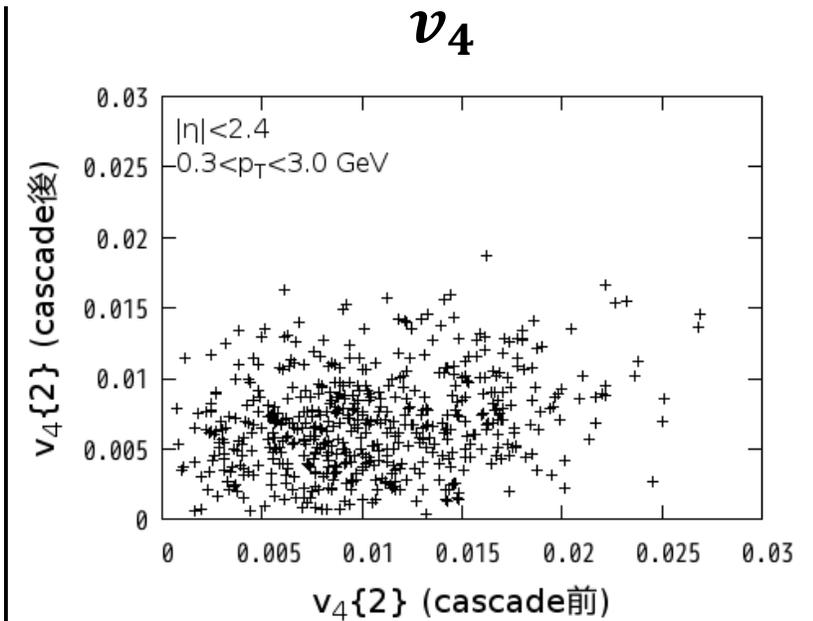
ハドロンカスケードモデル: JAM



傾き: 0.508352



傾き: 0.462750



傾き: 0.178800

ハドロンカスケードによって高次異方性がよりなめされる