

# RHIC及びLHCでの小さい衝突系 における方位角異方性の測定

筑波大学

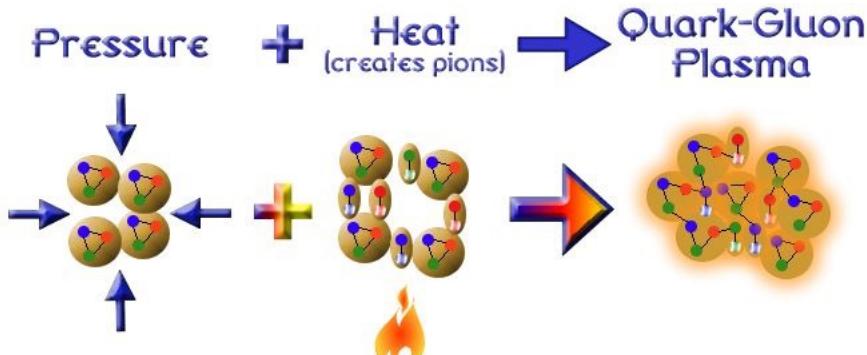
高エネルギー原子核実験グループ

轟木 貴人

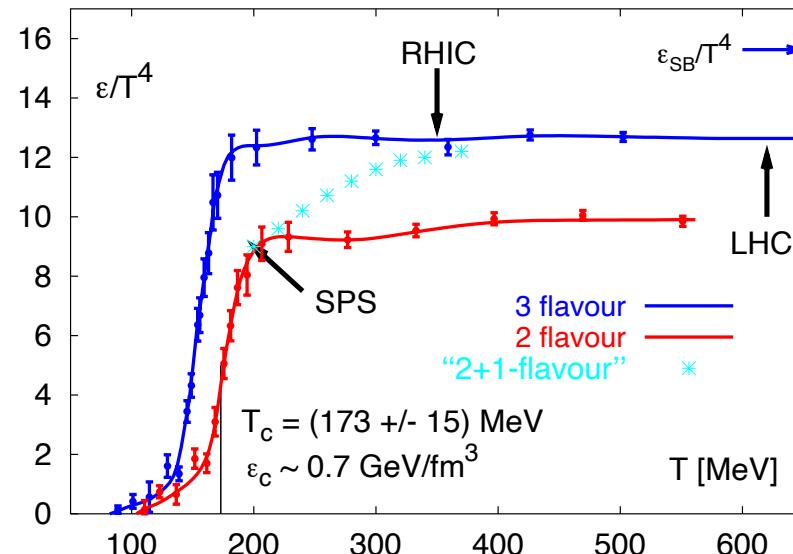
2021年度第1回 宇宙史研究センター構成員会議&成果報告会

# クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

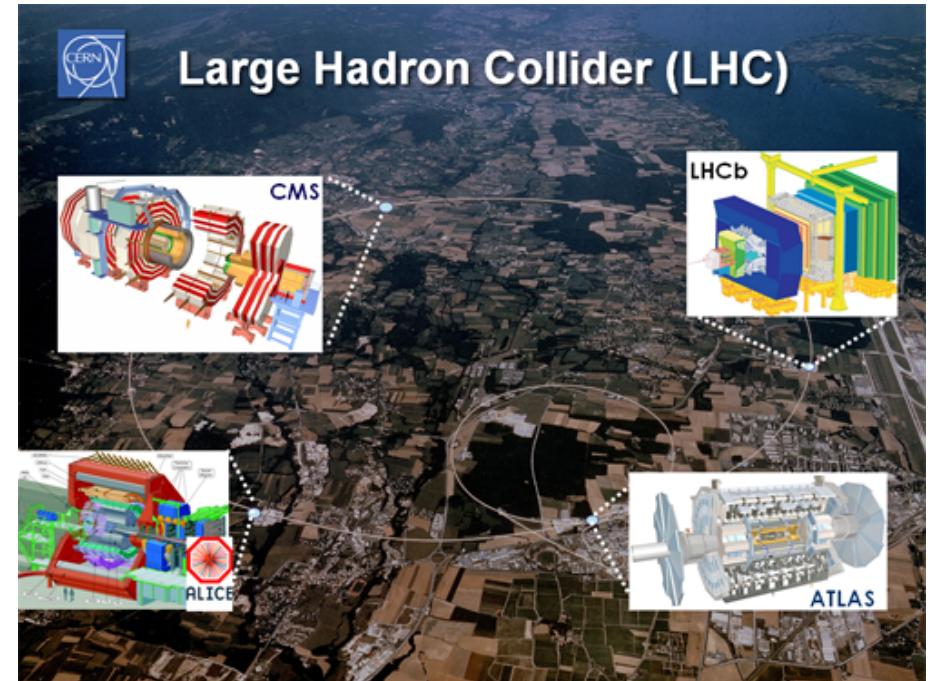
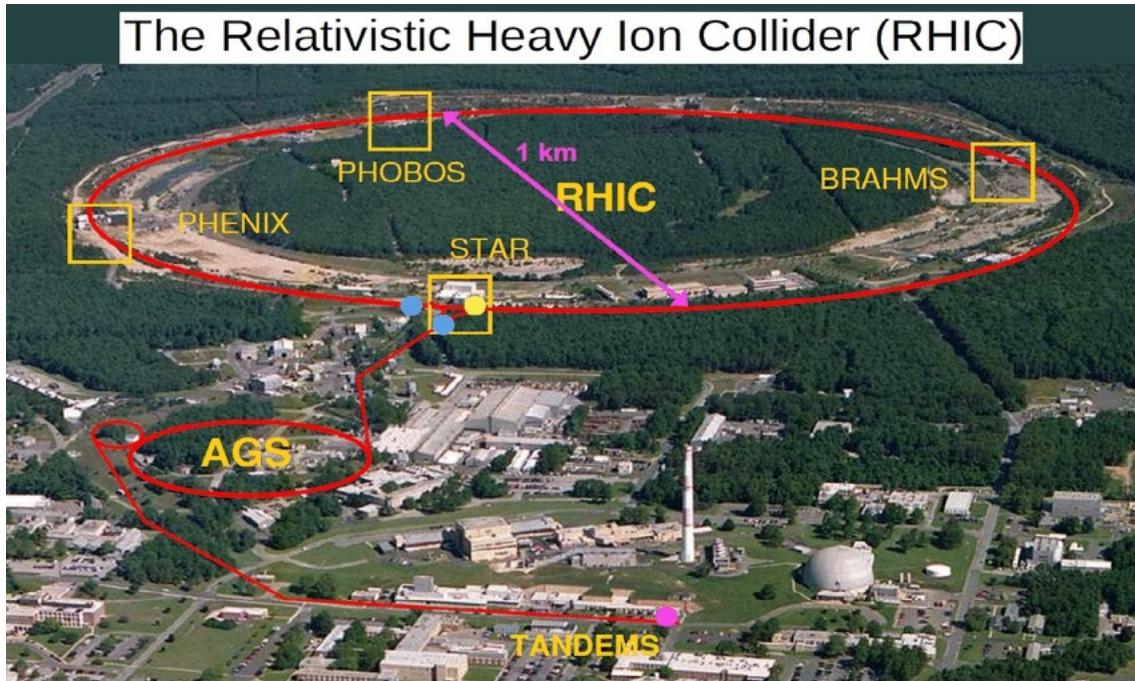
- クォーク及びグルーオン（総称パートン）が高温・高圧下でハドロンの閉じ込めから解放され形成する多体系
- 格子QCD計算による予想
  - 臨界温度：150 ~ 180 MeV
  - 臨界エネルギー密度： $0.7 \sim 1 \text{ GeV/fm}^3$
- 実験的生成方法：**大きな原子核**を用いた相対論的高エネルギー原子核衝突実験



Karsch, et. Al., Nucl. Phys. B605 579 (2001)



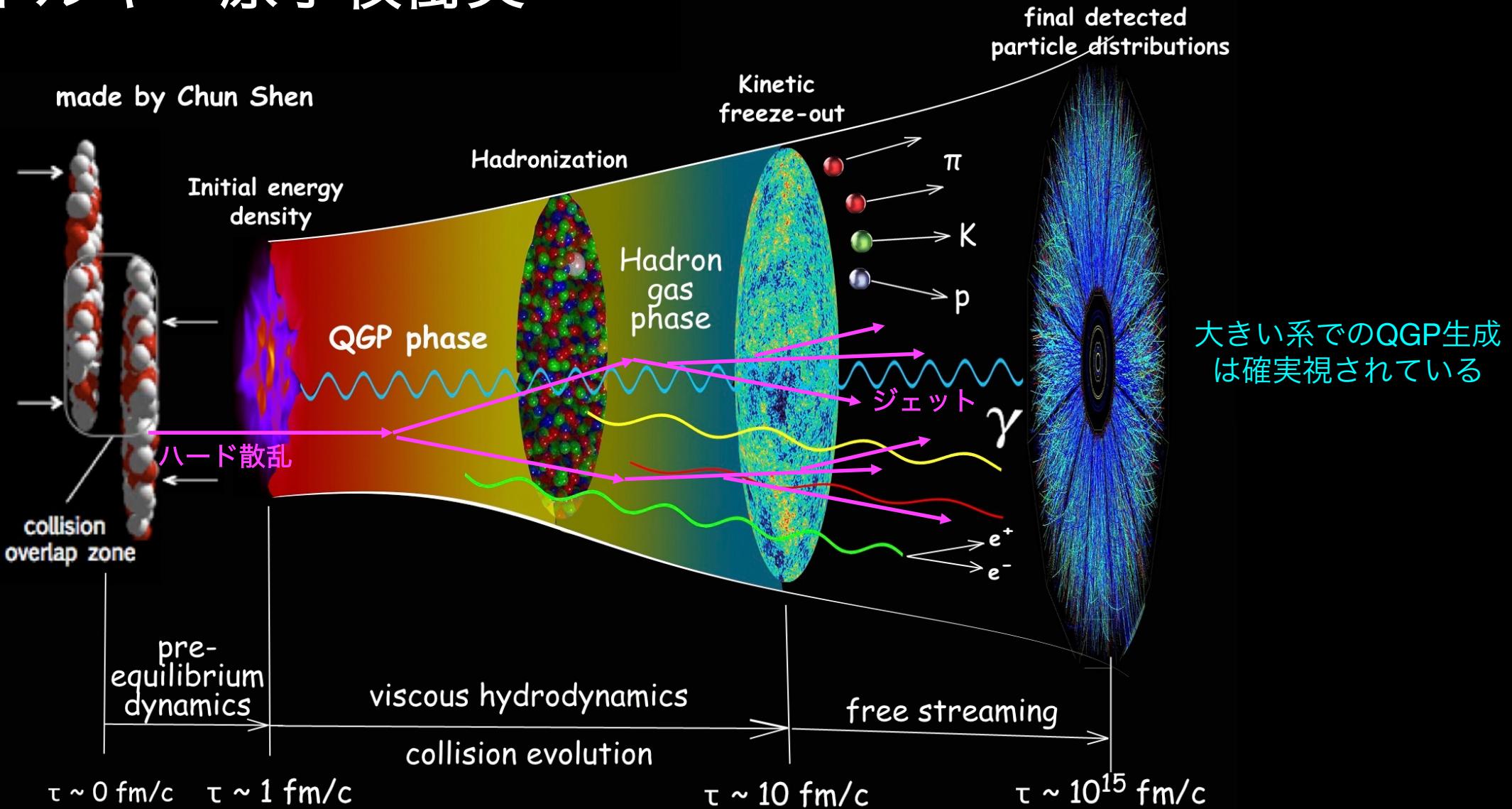
# RHICとLHC



- RHIC最高到達エネルギー = 200 GeV
  - 大きい系 : Au+Au
  - 小さい系 : p+Au, d+Au,  $^3\text{He}+\text{Au}$

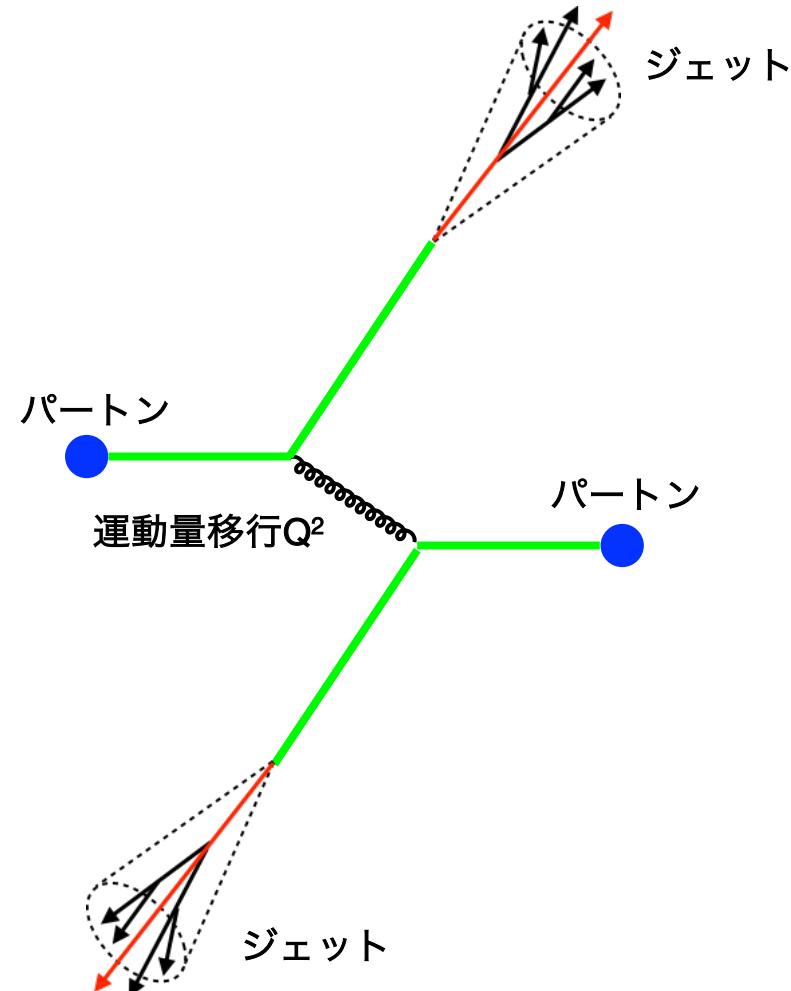
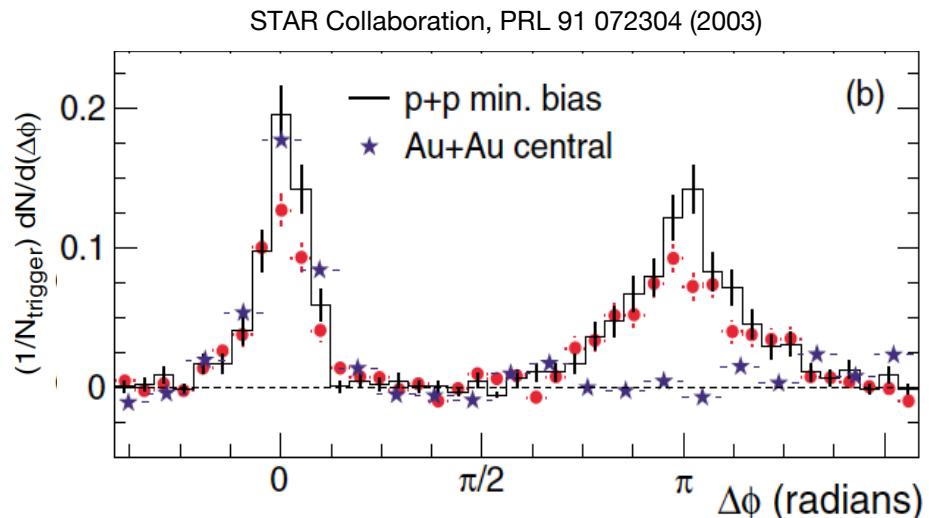
- LHC最高到達エネルギー = 5.02 TeV
  - 大きい系 : Pb+Pb
  - 小さい系 : p+Pb

# 高エネルギー原子核衝突



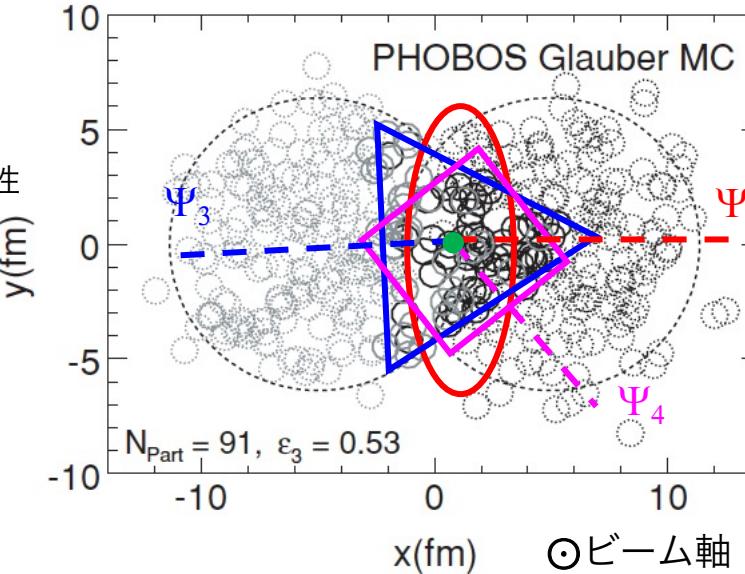
# ジェット

- 大運動量移行  $Q^2$ を持つハードなパートン二体散乱
  - 衝突初期に散乱が発生
  - パートンが破碎し高エネルギー粒子束を形成
  - 180°反対方向に対生成
  - 摂動QCDで生成量が計算可能
- QGPとの強い相互作用でエネルギーを損失
  - 収量・形状の変化を見ることでQGP物性を探ることができる

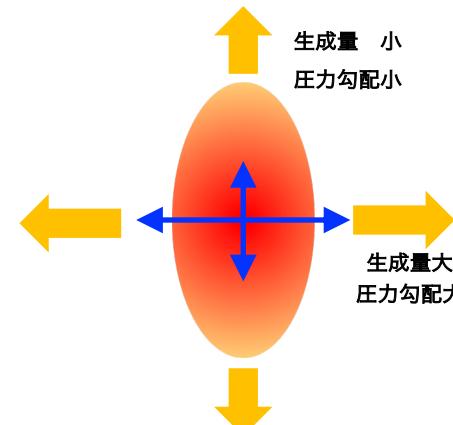


# 方位角異方性 $v_n$

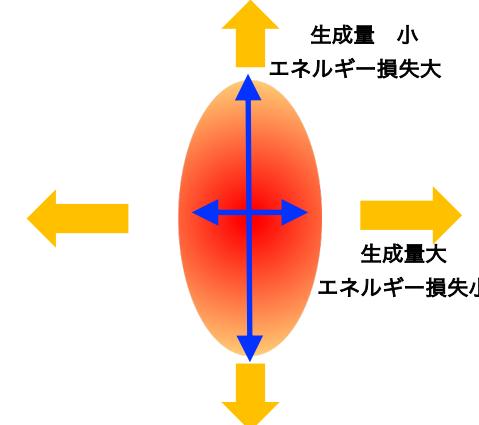
$\Psi_n$ : 反応平面  
 $\varepsilon_n$ : 初期異方性



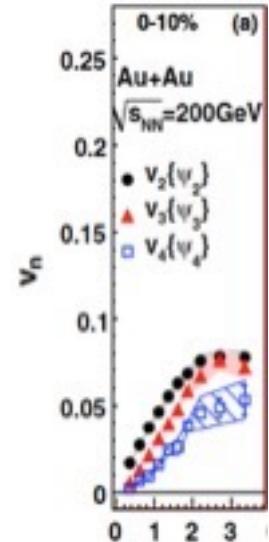
流体成分  
(低～中運動量領域)



ジェット成分  
(中～高運動量領域)



PHENIX Collaboration,  
PRL107.252301 (2011)



$$dN/d\phi \propto 1 + 2 \sum_n v_n \cos n(\phi - \Psi_n) \quad \Psi_n: \text{反応平面} \\ \phi: \text{粒子角度}$$

- QGPによる初期形状の運動量空間への転換
  - 低中運動量領域：流体力学的発展（フロー）
  - 中高運動量領域：ジェットエネルギー損失

- 放出粒子方位角分布の振幅  $v_n$  で定量化
  - 流体成分  $v_n$  は一般に  $\varepsilon_n$  スケール（大きい系での経験則）
  - 反応平面法(EP)、粒子相関法(2PC)

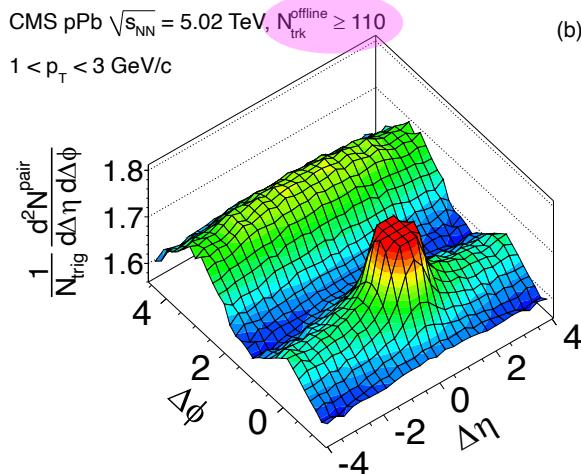
# 小さい系における $v_n$ の発見

- 従来の小さい系での測定の動機
  - 原子核によるPDFの変化
  - 冷たい(非QGP)原子核物質による各種測定量への影響を評価
- 大粒子多重度イベントにおける二粒子相関
  - $\cos$ 成分に振幅 $\approx$ 有限の $v_n$ が存在
  - 200 ~ 5000 GeVの広範なエネルギー領域で確認
- 大きい系と同程度の $v_n$ を予想外に観測

$$V_{nn} = \langle \cos n(\phi^a - \phi^t) \rangle = \langle v_n \times v_n \rangle$$

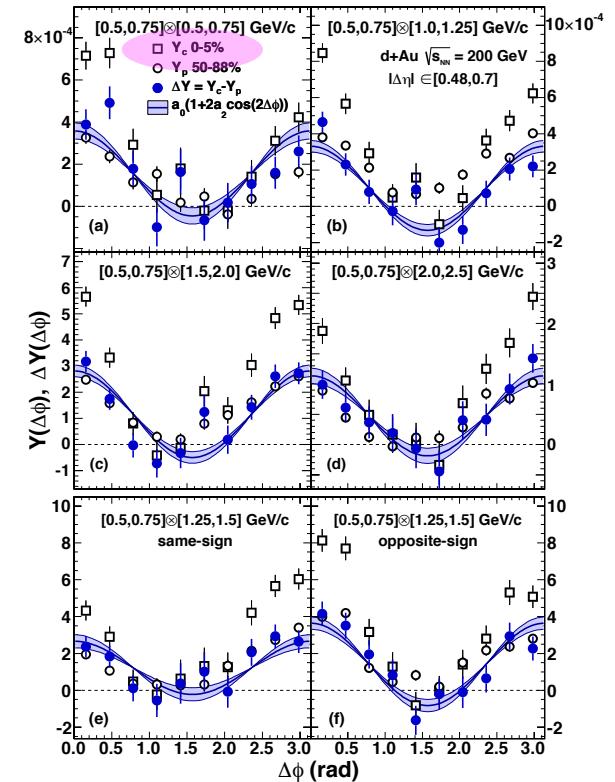
LHC

CMS Collaboration, PLB 718 (2013) 795



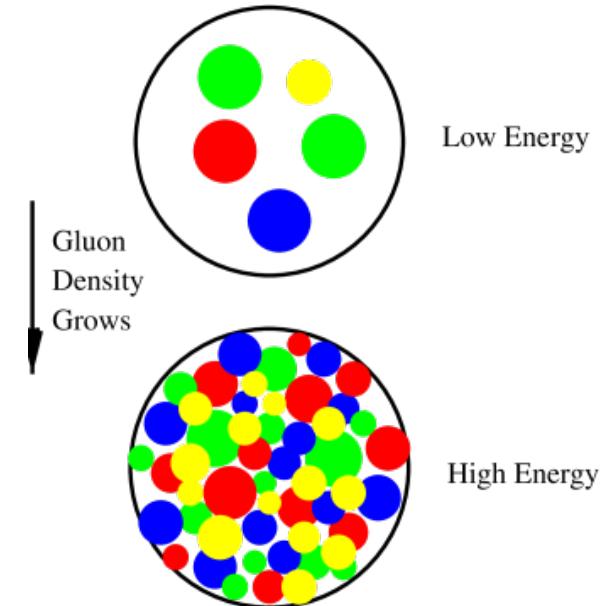
RHIC

PHENIX Collaboration, PRL 111, 212301 (2013)



# 小さい系における $v_n$ の理解に向けた課題

- QGP流体生成の有無!?
- 衝突初期条件
  - 弱結合：カラーグラス凝縮(CGC)
  - 強結合：AdS / CFT
- QGP生成時の熱平衡化過程
  - パートン時空発展(プリフロー)の有無
- QGPの流体発展
- ジェット成分の理解
- 現在CGCモデルに基づいた熱平衡化過程や流体発展の検討が進行中



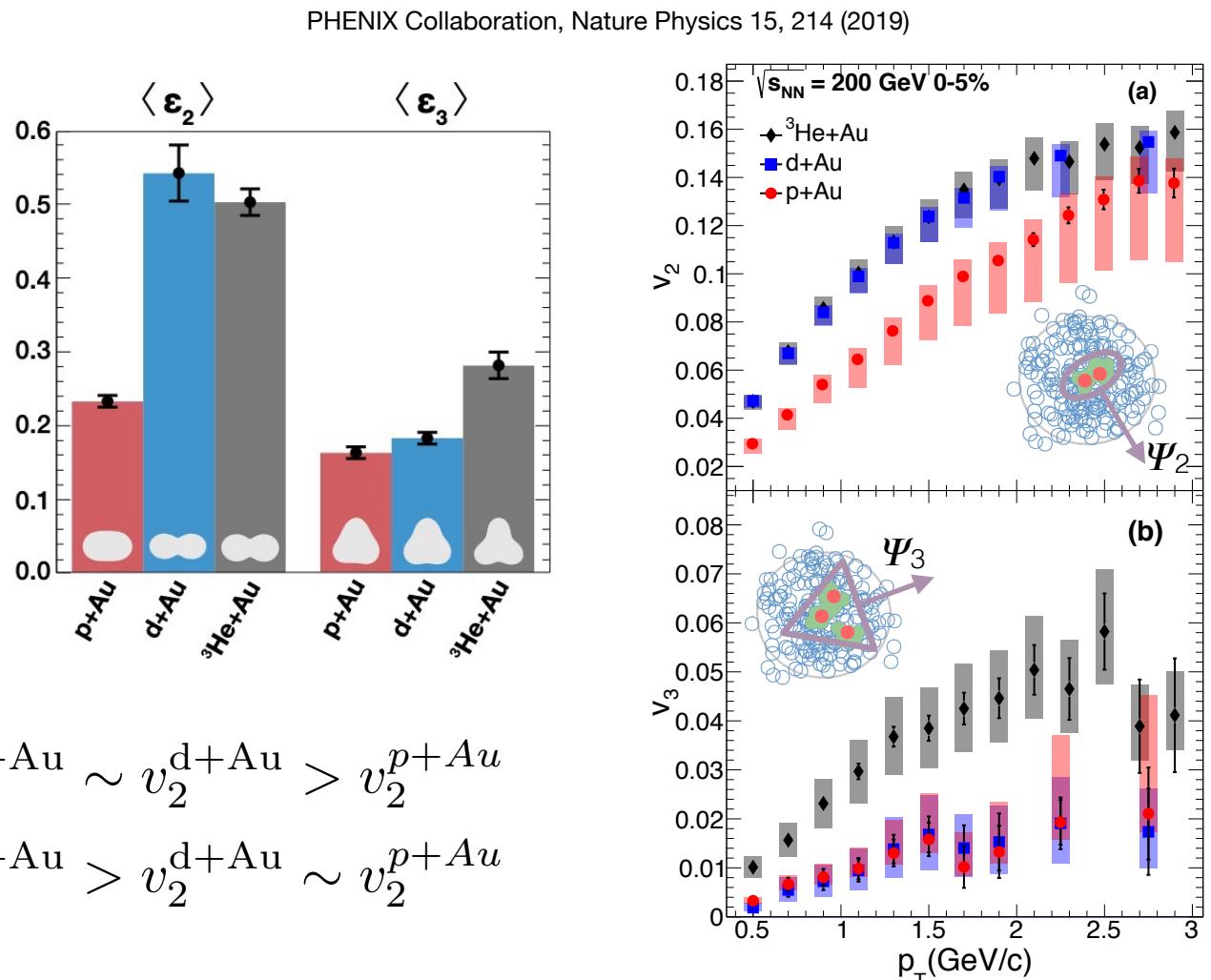
McLerran, arXiv: 0402137

# 幾何学的スケーリング

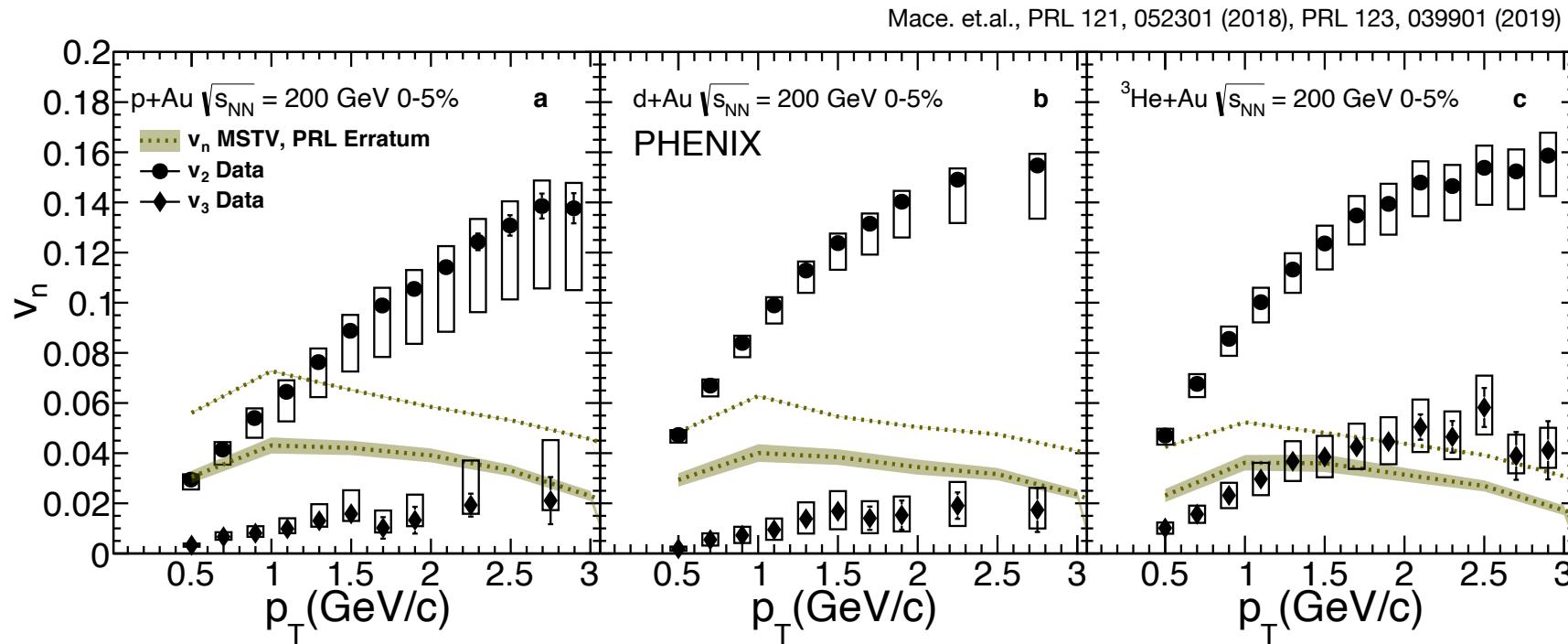
- 初期形状への応答を用いた流体生成の検証
  - $p+Au$ ,  $d+Au$ ,  ${}^3He+Au$ を用いた形状走査
  - 円盤状の核子を仮定したグラウバー モデルによる初期形状の計算

$$\begin{aligned} \varepsilon_2^{ {}^3He+Au} &\sim \varepsilon_2^{d+Au} > \varepsilon_2^{p+Au} \\ \varepsilon_3^{ {}^3He+Au} &> \varepsilon_2^{d+Au} \sim \varepsilon_2^{p+Au} \end{aligned} \quad \xrightarrow{\text{blue arrow}} \quad \begin{aligned} v_2^{ {}^3He+Au} &\sim v_2^{d+Au} > v_2^{p+Au} \\ v_3^{ {}^3He+Au} &> v_2^{d+Au} \sim v_2^{p+Au} \end{aligned}$$

- 初期形状に対する $v_n$ のスケーリングを確認 → 大きい系での経験則を再現



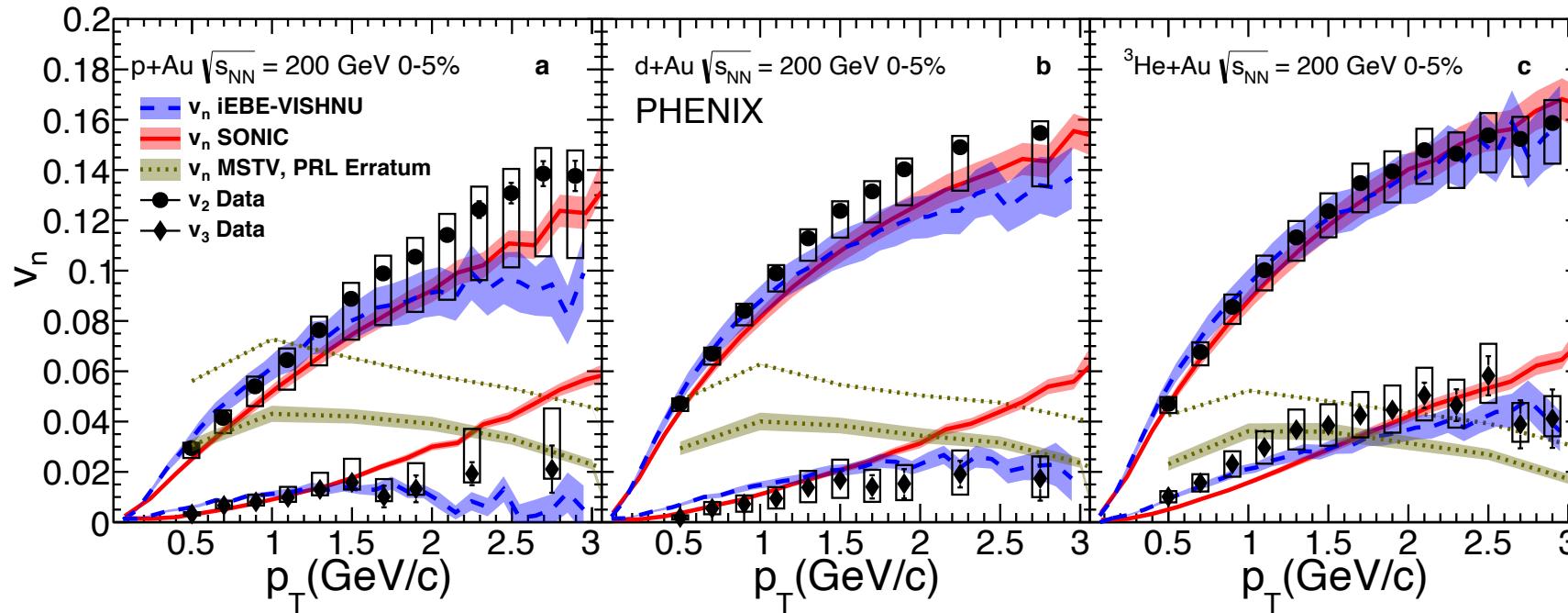
# CGC + ストリング破碎



- CGCで生成したグルーオンを流体発展を経ずにストリングを用いて破碎
- $v_n$ の形状の再現に失敗
- $v_2$ を過小評価。 $v_3$ は $p+Au$ 、 $d+Au$ で過大評価。
- 初期状態だけでは小さい系の $v_n$ を再現できない

# CGC + 流体発展

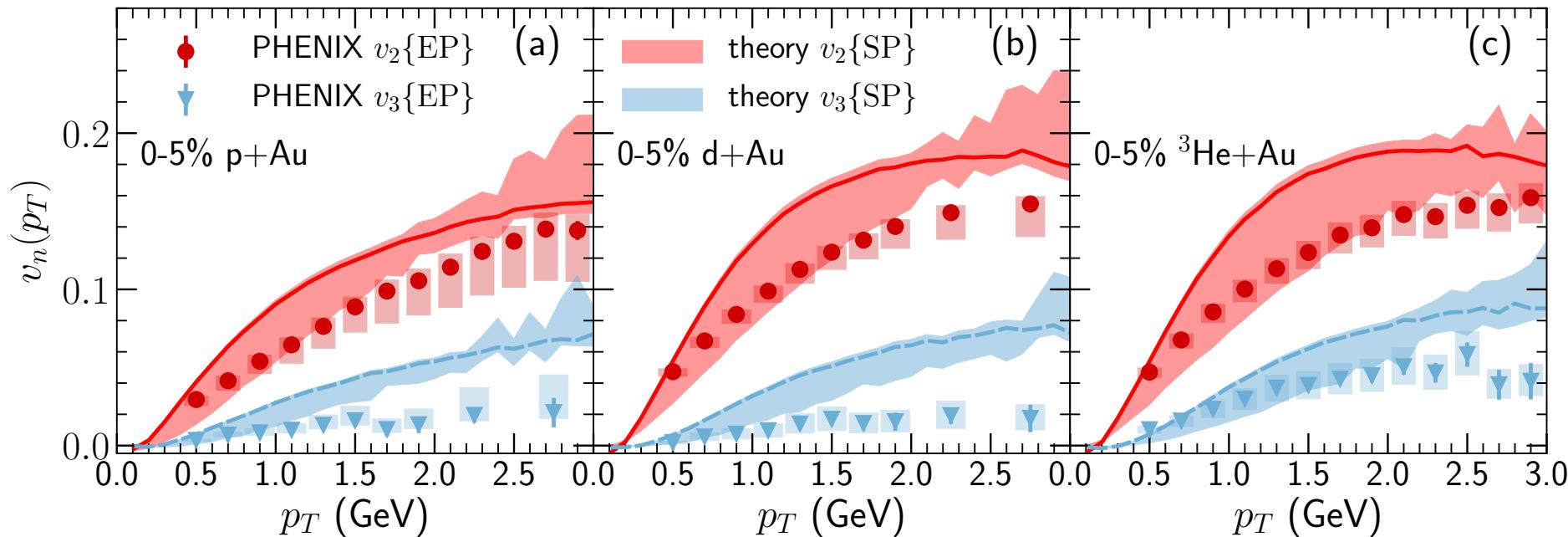
PHENIX Collaboration, Nature Physics 15, 214 (2019)



- CGCで生成したグルーオンを流体発展
- $v_n$ の形状・値を共によく再現
- 小さい系におけるQGP流体の生成を強く示唆

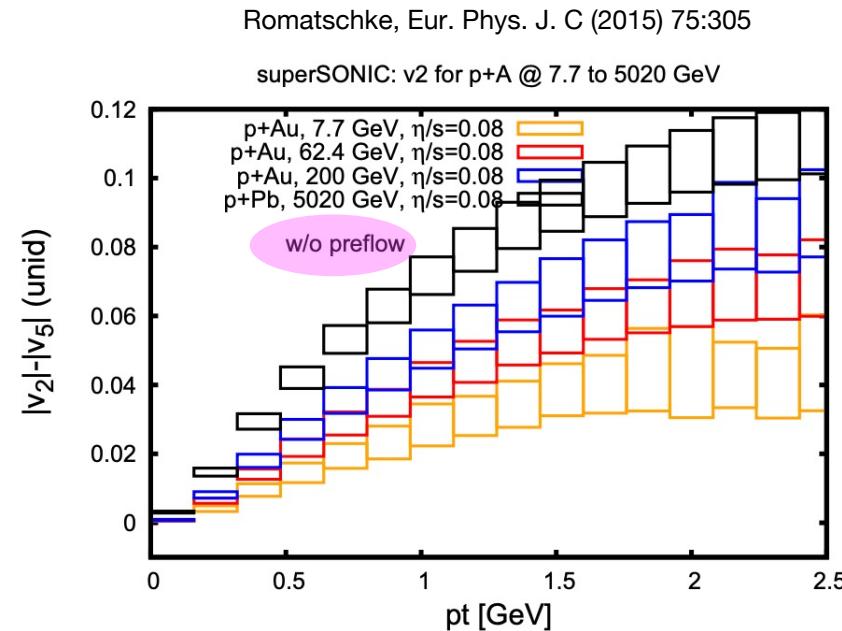
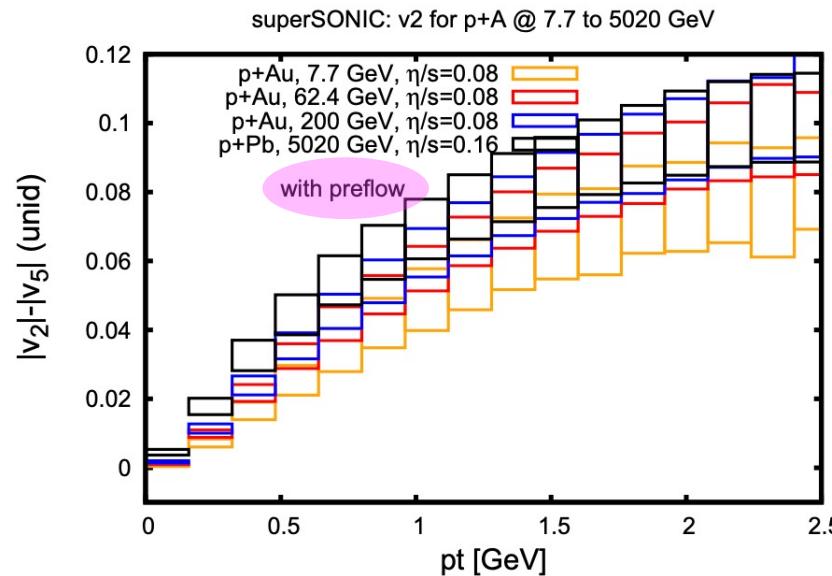
# CGC + プリフロー + 流体発展

Shencke et. al., PLB 803 (2020) 135322



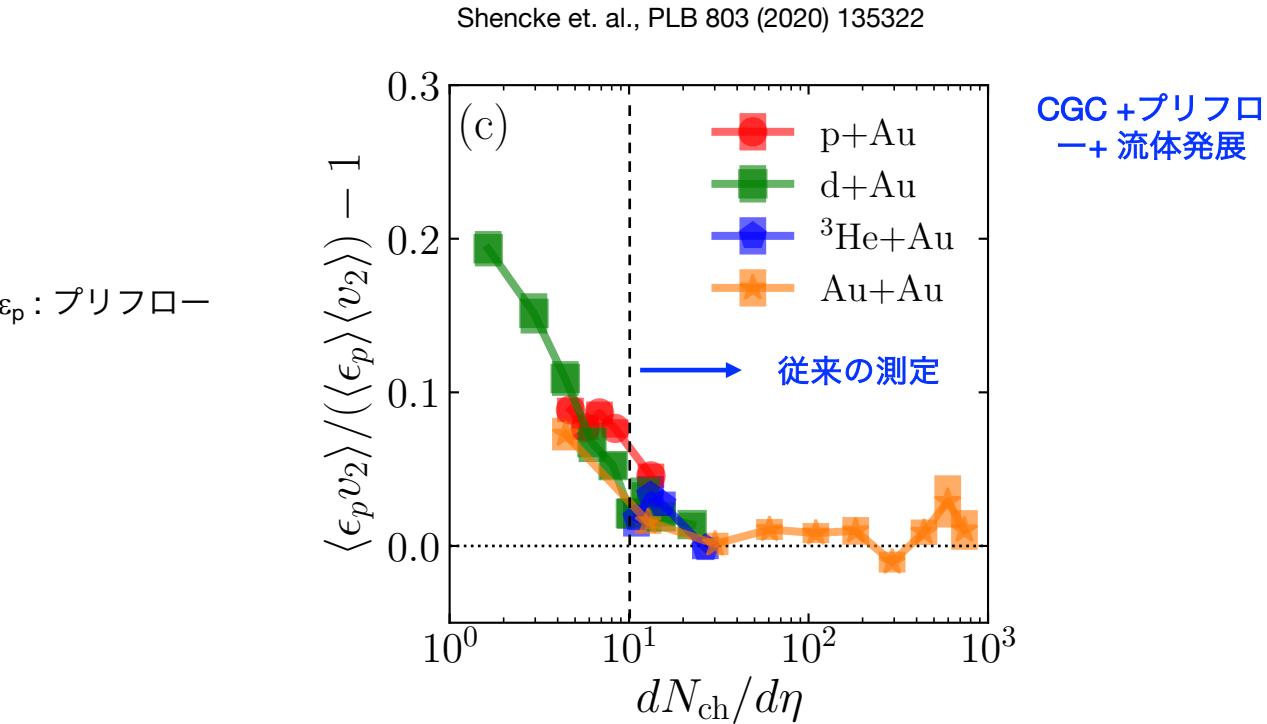
- CGCで生成したグルーオンをパートンレベルで時間発展させた後流体発展
- $v_n$ をよく再現
- プリフローによる $v_n$ の増大・過大評価

# プリフロー決定の精密化

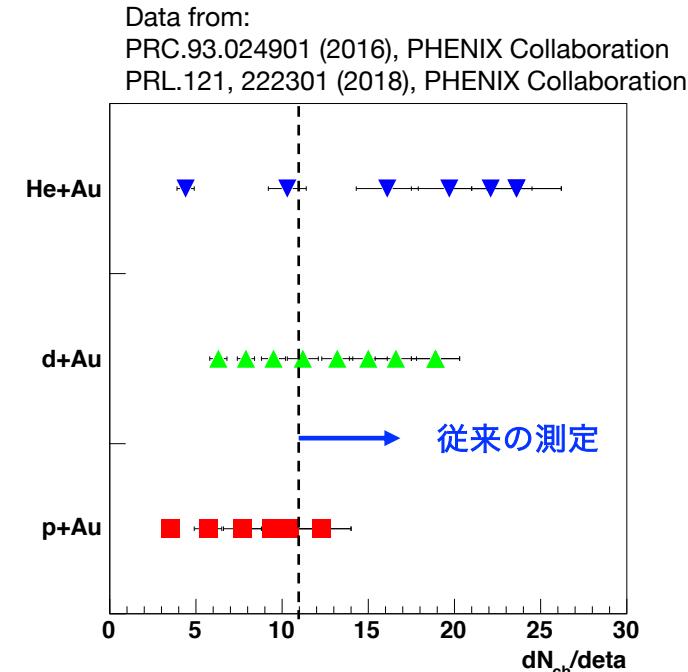


- 粒子多密度の小さい(流体の寿命が短い)系でプリフローの寄与が鮮明になる
- 低い衝突エネルギーを選択
- 粒子多密度の小さいイベントを選択

# 粒子多重度選択

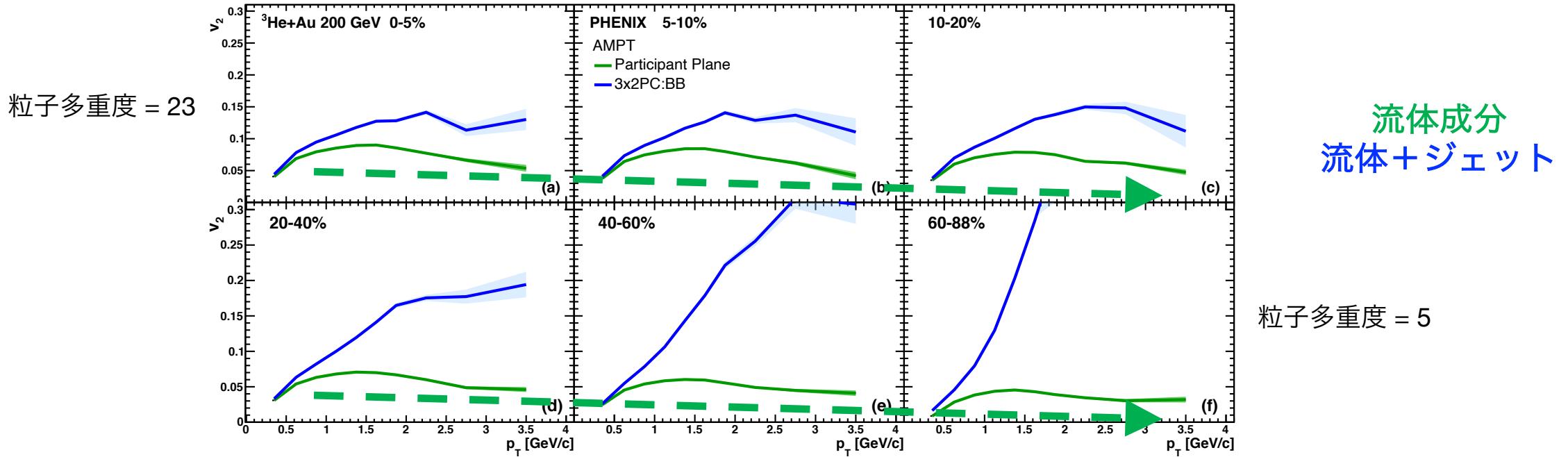


- 粒子多重度10以下で初期異方性により良い感度
- RHICでは最小粒子多重度3程度まで $v_n$ の測定が可能



# 粒子多重度スキャン ${}^3\text{He}+\text{Au}$

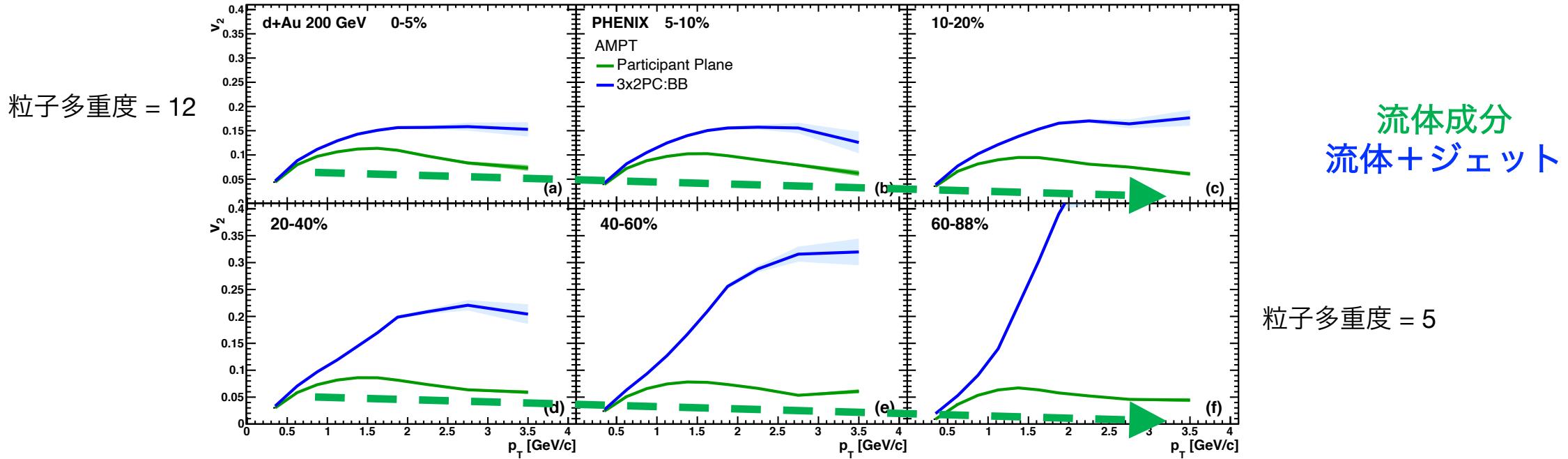
AMPT : パートンカスケードを用いた  
擬似流体モデル。ジェット成分を含む。



- AMPTモデルによる低い粒子多重度領域における予想
  - 流体成分の減少
  - ジェット成分の増大

# 粒子多重度スキャン d+Au

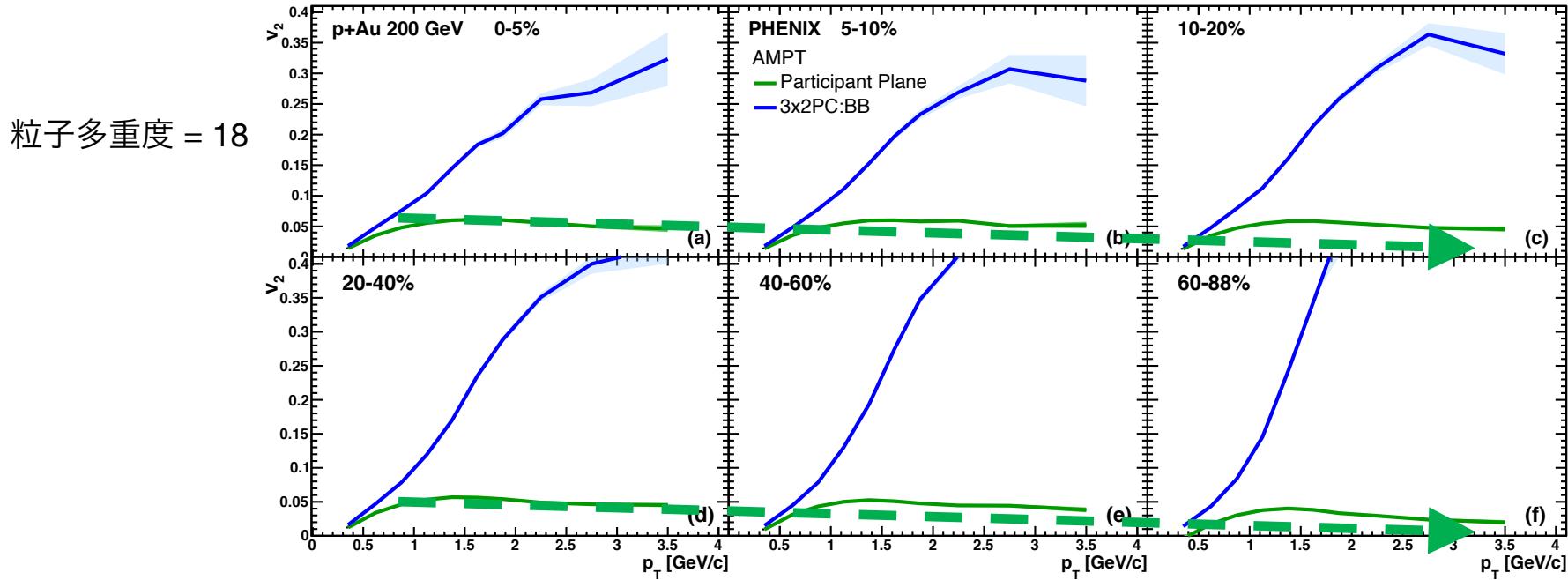
AMPT : パートンカスケードを用いた  
擬似流体モデル。ジェット成分を含む。



- AMPTモデルによる低い粒子多重度領域における予想
  - 流体成分の減少
  - ジェット成分の増大

# 粒子多重度スキャン p+Au

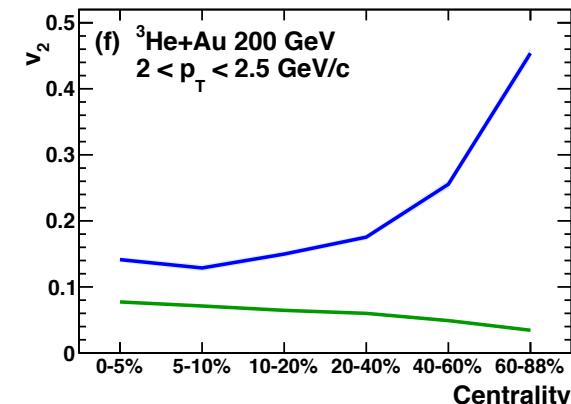
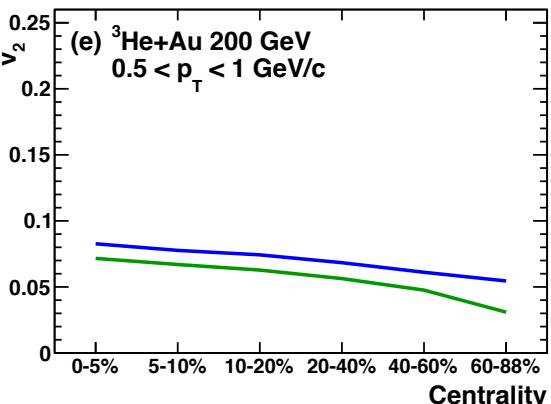
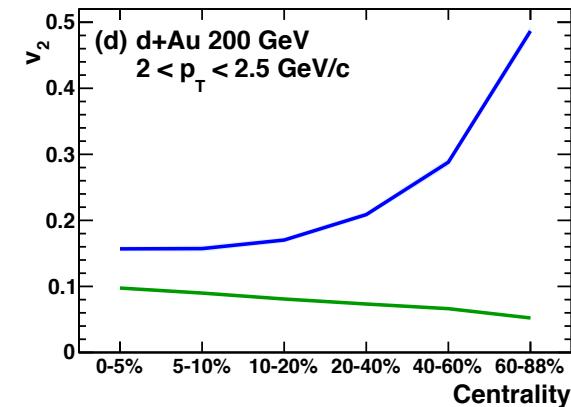
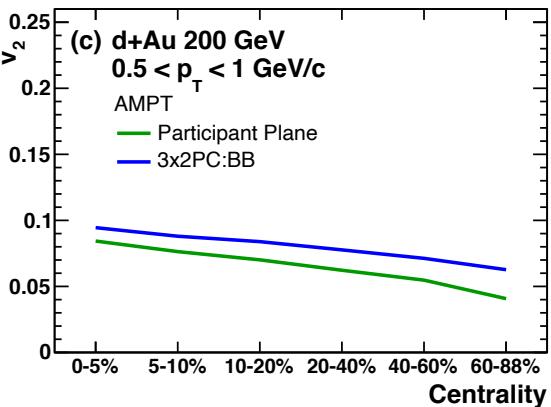
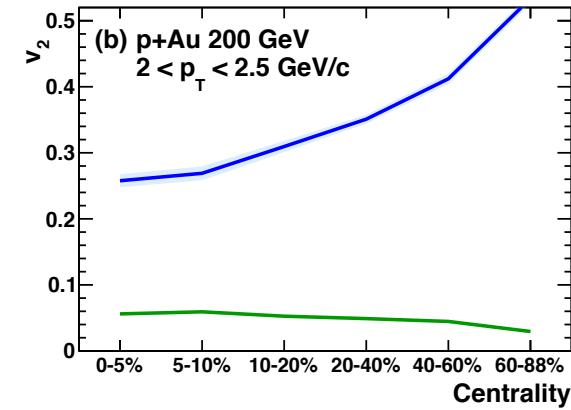
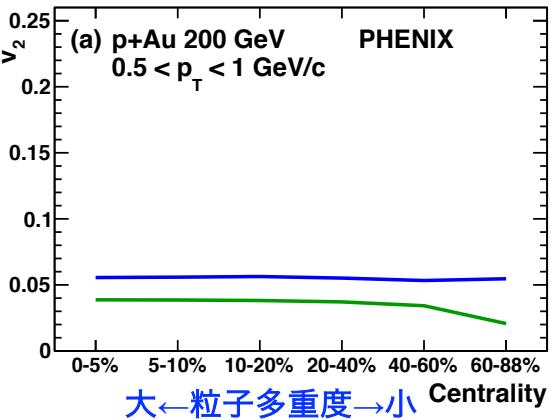
AMPT : パートンカスケードを用いた  
擬似流体モデル。ジェット成分を含む。



- AMPTモデルによる低い粒子多重度領域における予想
  - 流体成分の減少
  - ジェット成分の増大

# 粒子多重度スキャン

- 初期状態、プリフロー、流体発展、及びジェット全てを含むモデルによる解析が重要

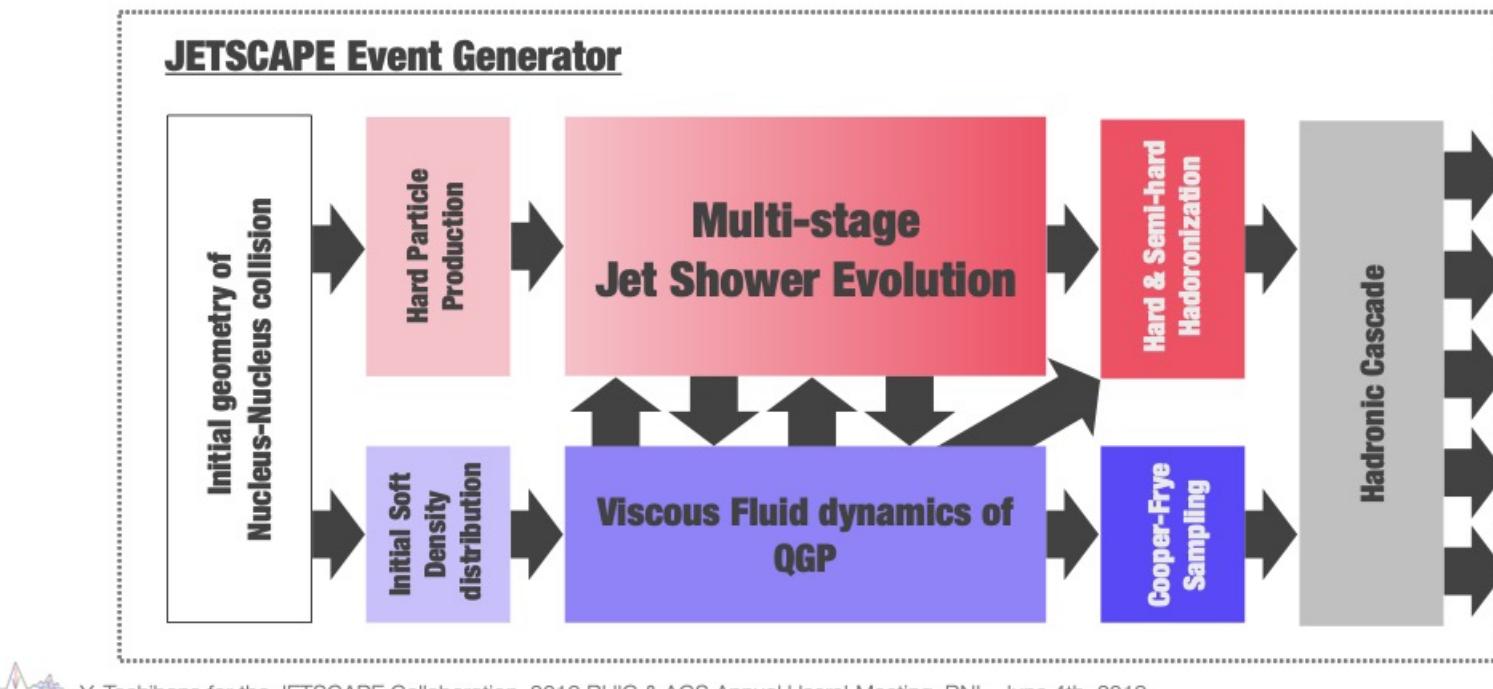


# JETSCAPE

<http://jetscape.org>

- Package of MC event generator for heavy ion collision

- Current version, JETSCAPE 1.4 available on GitHub: [github.com/JETSCAPE](https://github.com/JETSCAPE)
- General, modular and highly extensible
- “Manual”: [arXiv:1903.07706](https://arxiv.org/abs/1903.07706)



Y. Tachibana for the JETSCAPE Collaboration, 2019 RHIC & AGS Annual Users' Meeting, BNL, June 4th, 2019

2

# まとめ・今後の展望

- 2010年代までの常識に反して、小さい衝突系での方位角異方性 $v_n$ を観測
- 初期形状依存性及び流体計算は小さい系でのQGP生成を強く示唆
- 衝突初期から熱平衡の間のプリフローの理解が今後の課題
  - RHICでの小さい系における $v_n$ 測定
  - 初期状態、プリフロー、流体発展、ジェットの寄与を統一的に記述できるモデルによるデータの解釈