

独断と偏見で選んだ、最近の

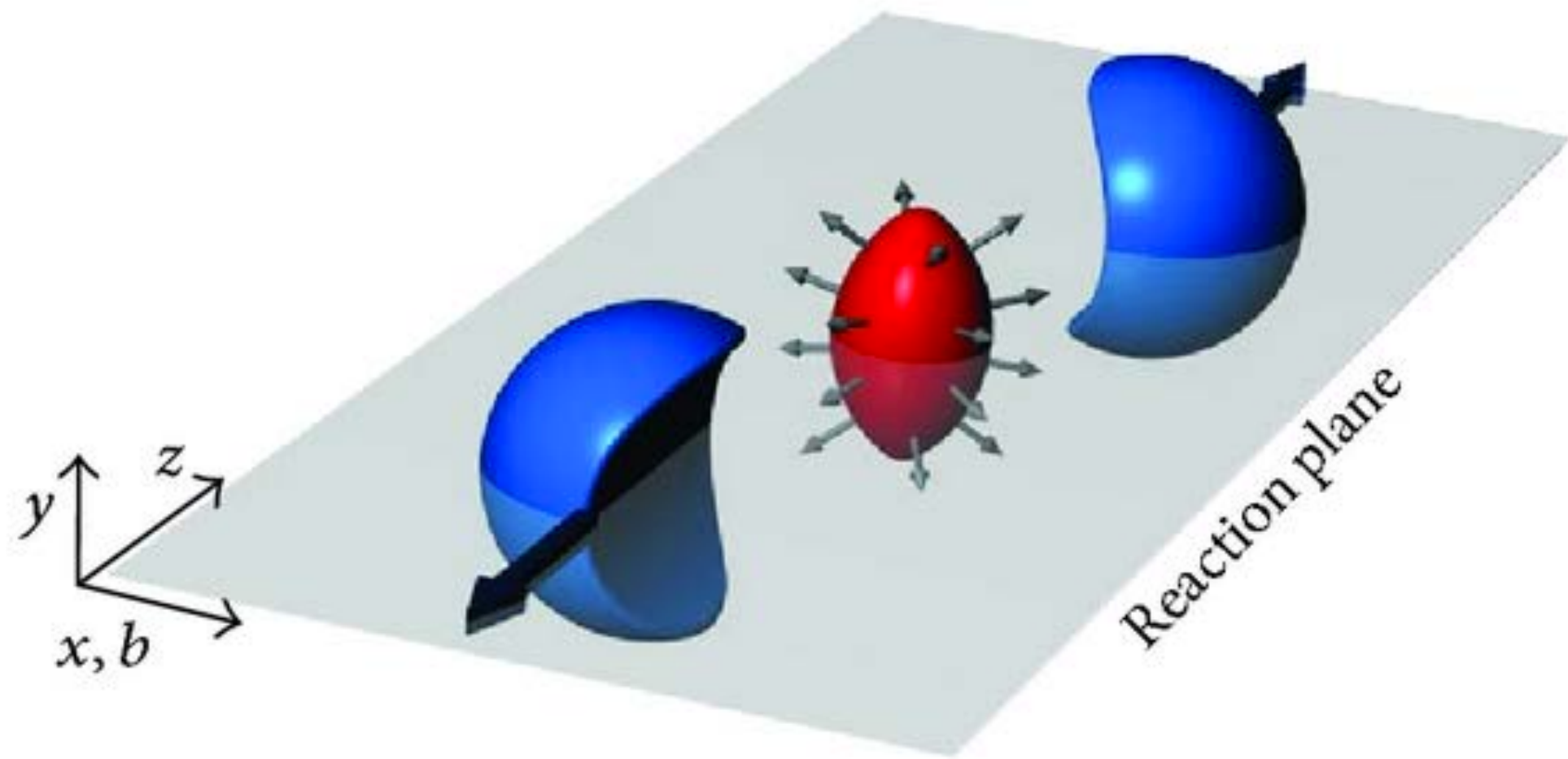
# フローなどのソフト測定

---

新井田 貴文  
(筑波大学)

QCD相転移やQGP生成のモデル化による重イオン衝突の時空発展  
の理解に向けた理論・実験共同研究会 @オンライン, 9/24/2021

# 粒子の集団運動（フロー）



$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{d^2 N}{2\pi p_T dp_T dy} \left( 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n \cos(n\phi) \right)$$

$\phi$ : 粒子の反応平面（あるいはイベント平面）からの方位角

- ▶ フローは粒子の集団運動を表す。初期の空間異方性・密度揺らぎに対するシステムのレスポンス  $\varepsilon_n \propto v_n$ 。反応平面と粒子の相関とも言える。
- ▶ 生成粒子の方位角分布のフーリエ係数で表される
  - ▶  $v_1$ : directed flow, 指向型フロー
  - ▶  $v_2$ : elliptic flow, 楕円型フロー
  - ▶  $v_3$ : triangular flow
  - ▶  $v_4, v_5, v_6 \dots$

L. Yan, CPC42,042001(2018)

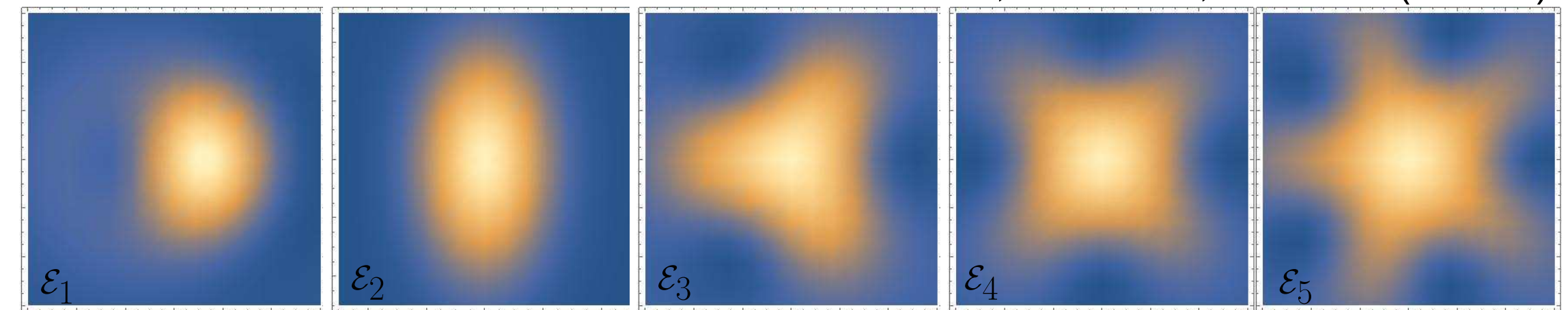
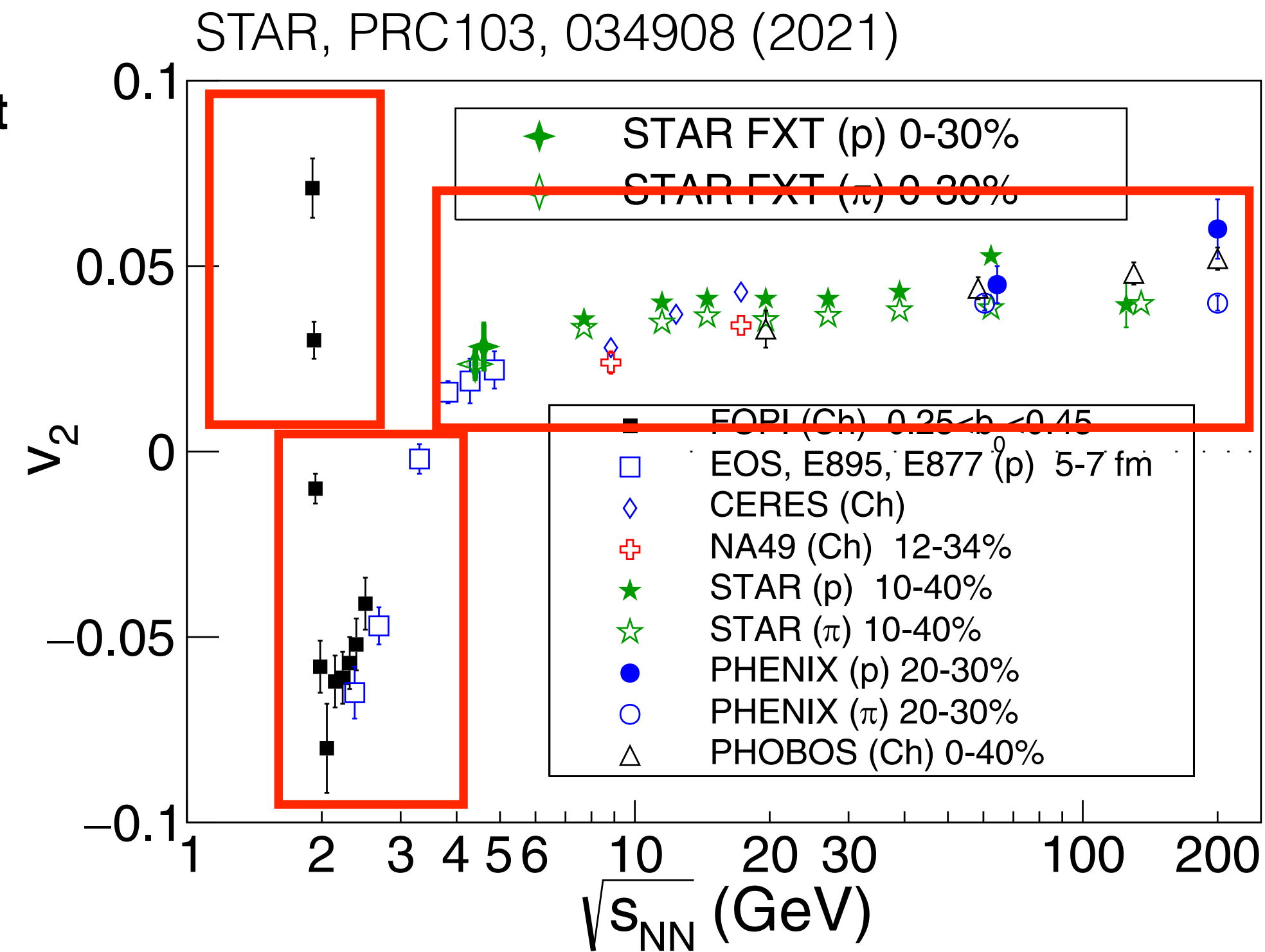
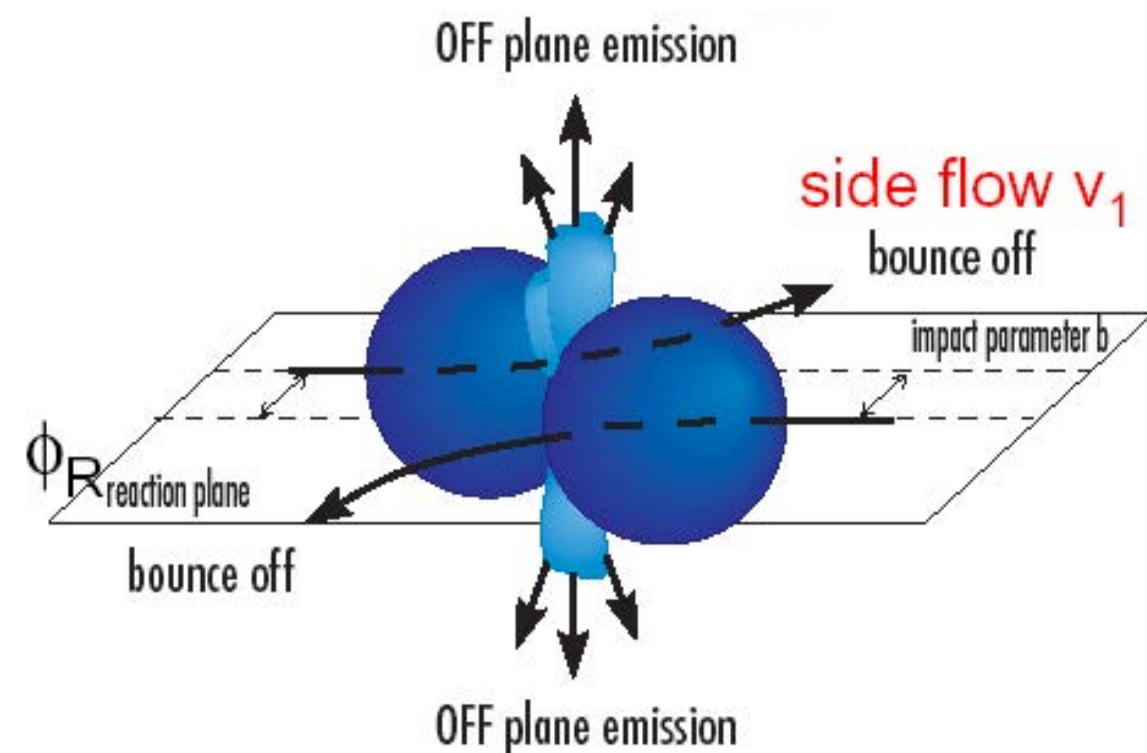


Fig. 2. Characteristic shapes of the deformed initial state density profile, corresponding to anisotropies of  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ ,  $\varepsilon_4$  and  $\varepsilon_5$  (from left to right).

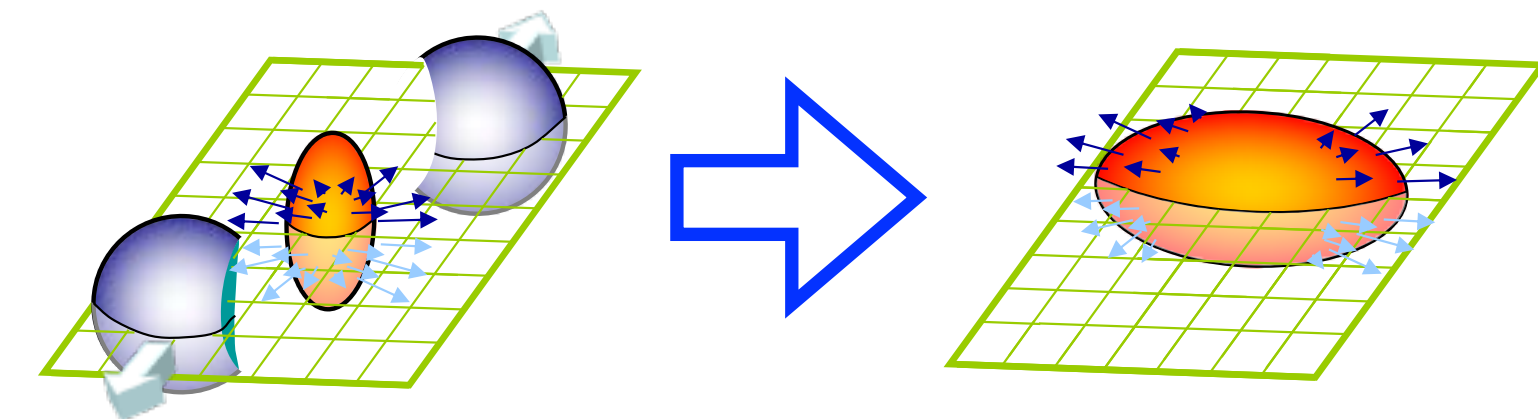
# 楕円型フロー vs. 衝突エネルギー

Rotating system of projectile-target  
( $v_2 > 0$  at  $\sqrt{s_{NN}} < 1.4$  GeV)

“squeeze-out” emission ( $v_2 < 0$ )



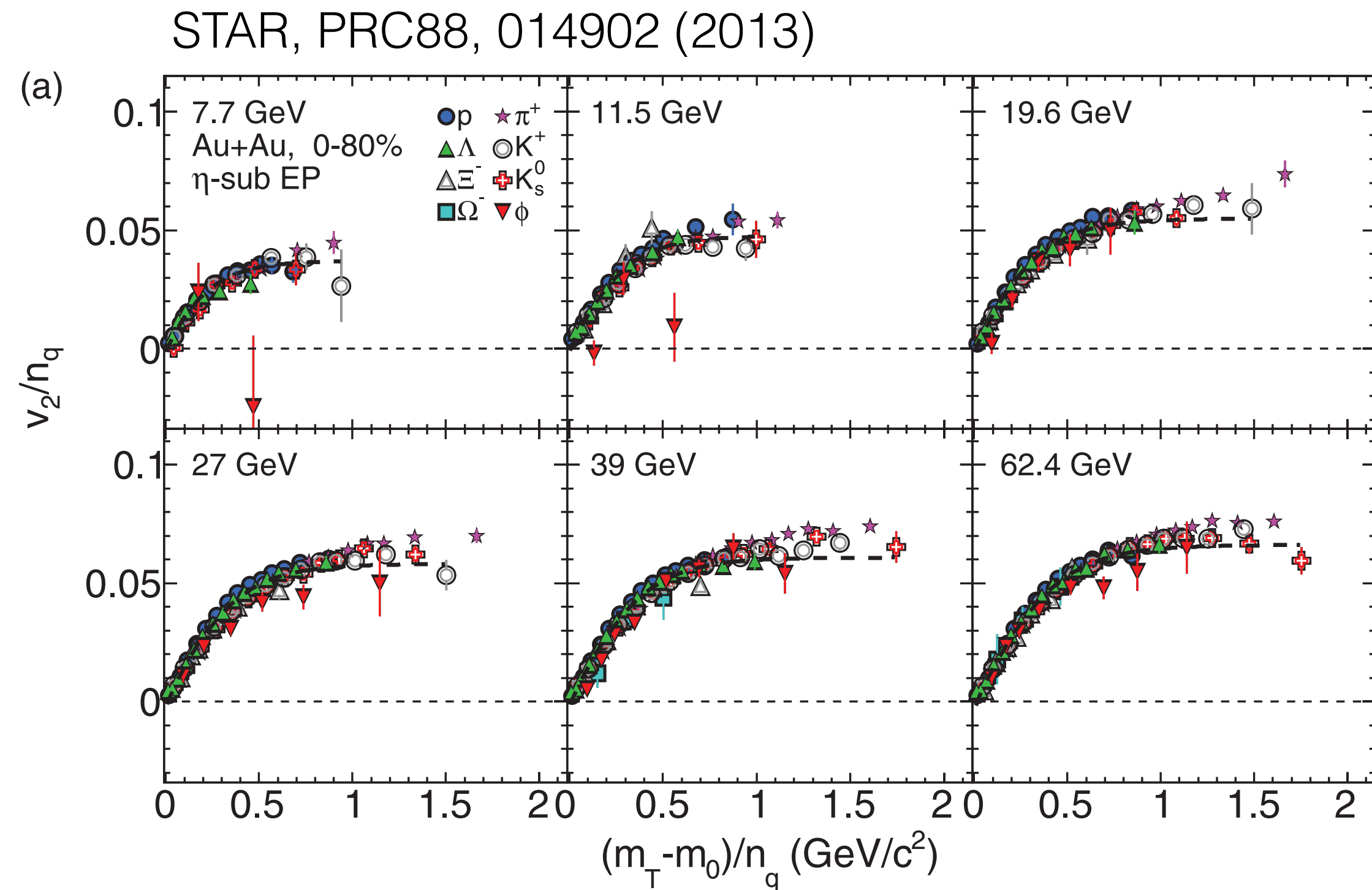
pressure-gradient-driven expansion  
( $v_2 > 0$  at  $\sqrt{s_{NN}} > 4$  GeV)



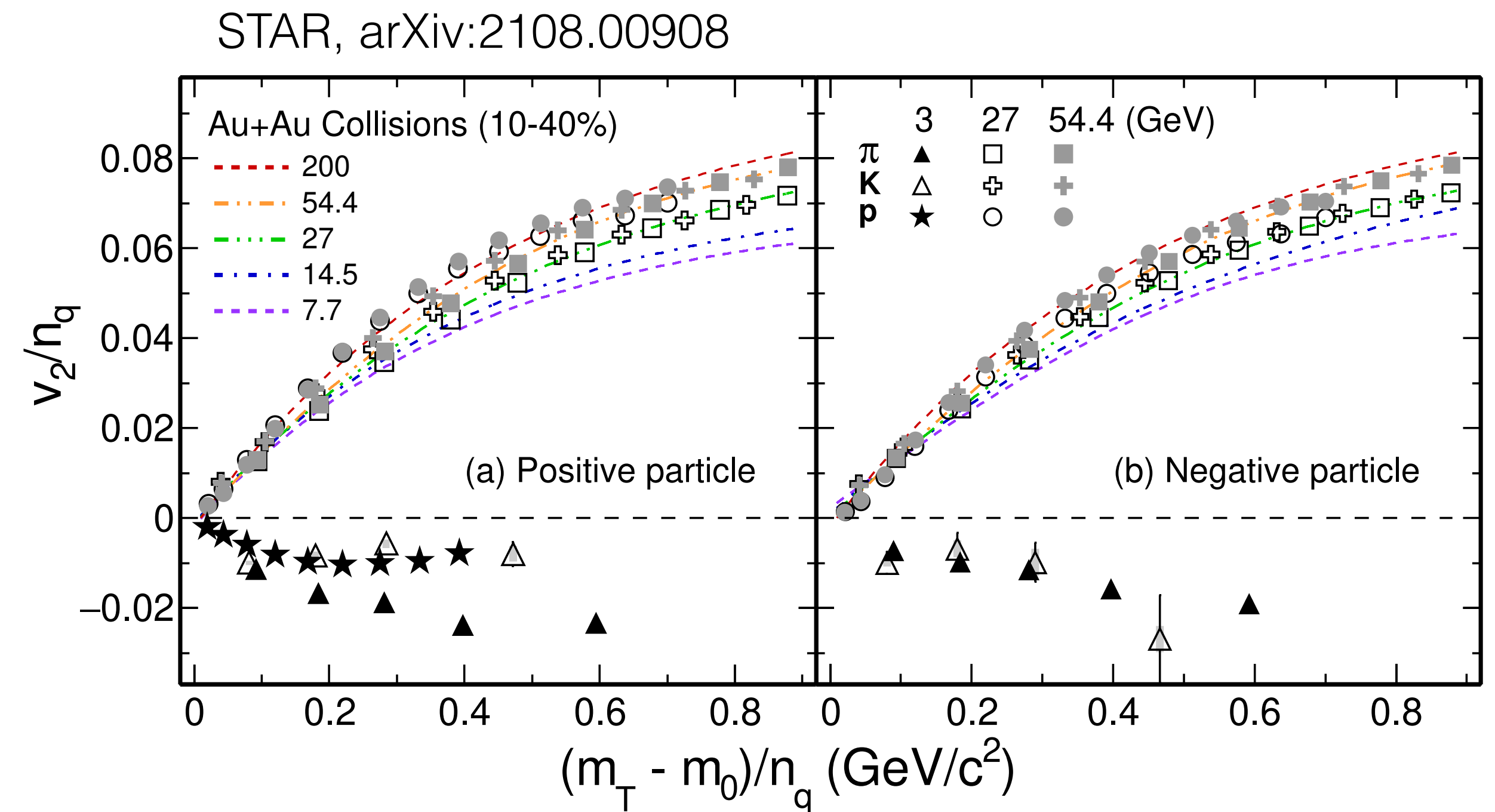
楕円型フロー  $v_2$ の符号は、エネルギーを変えていくと、2回変わる。



# Number of Constituent Quark (NCQ) スケーリング



NCQスケーリングが成り立つことが  
パートンレベルでの集団運動を示唆。



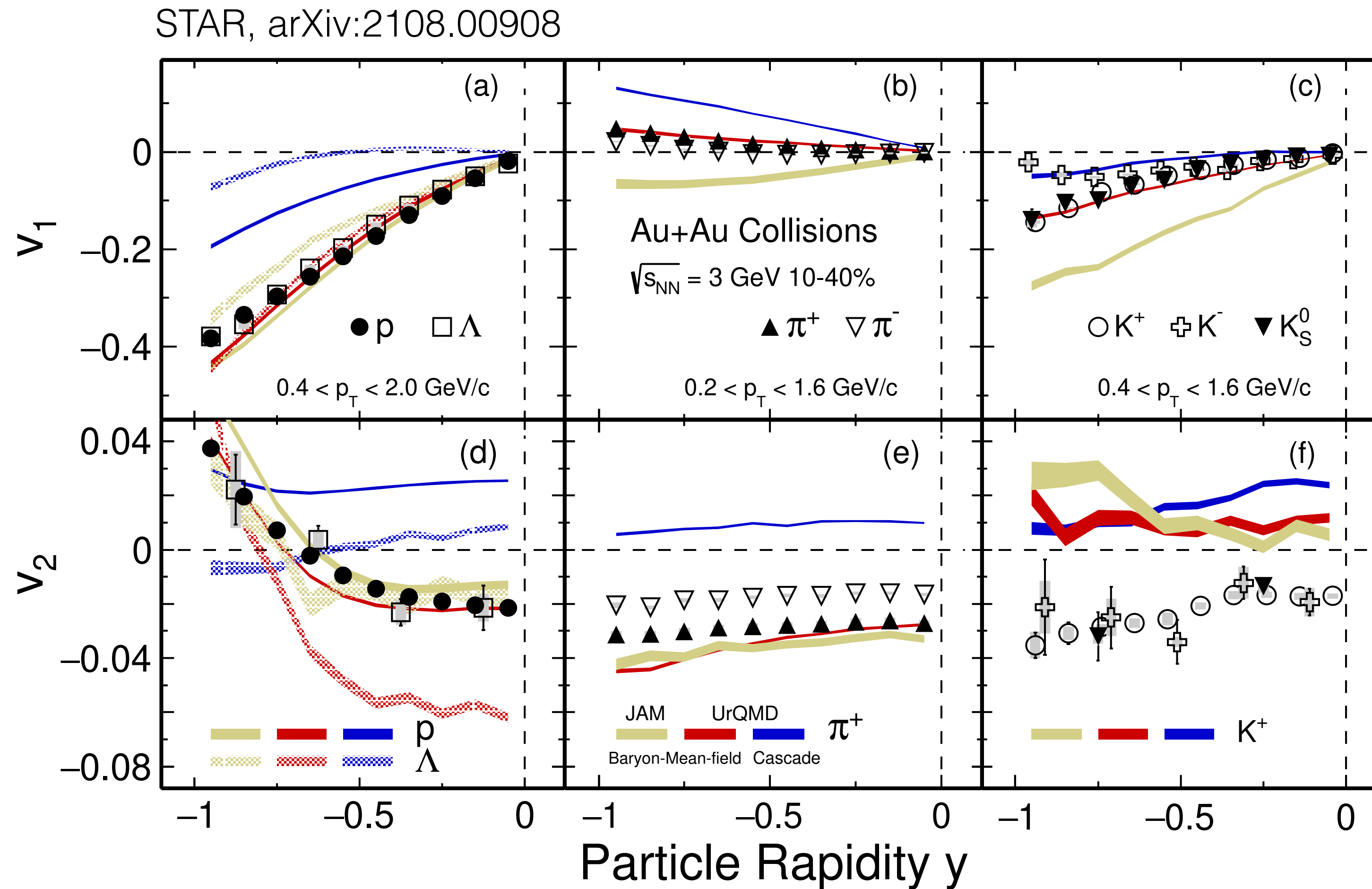
3 GeVでは、“粒子”のNCQスケーリングが成り立たない。  
パートンではなく、バリオンが支配的。

$\pi^+$ :  $\Delta$  resonance

$K^+$ : associated production of  $\Lambda$

p: spectator proton contribution

# モデルとの比較



JAM: JET AA Microscopic Transportation Model  
UrQMD: Ultra-relativistic Quantum Molecular Dynamics

Y. Nara et al., PRC61, 0249021 (1999)  
S. Bass et al., Prog.Part.Nucl.Phys.41, 255 (1998)

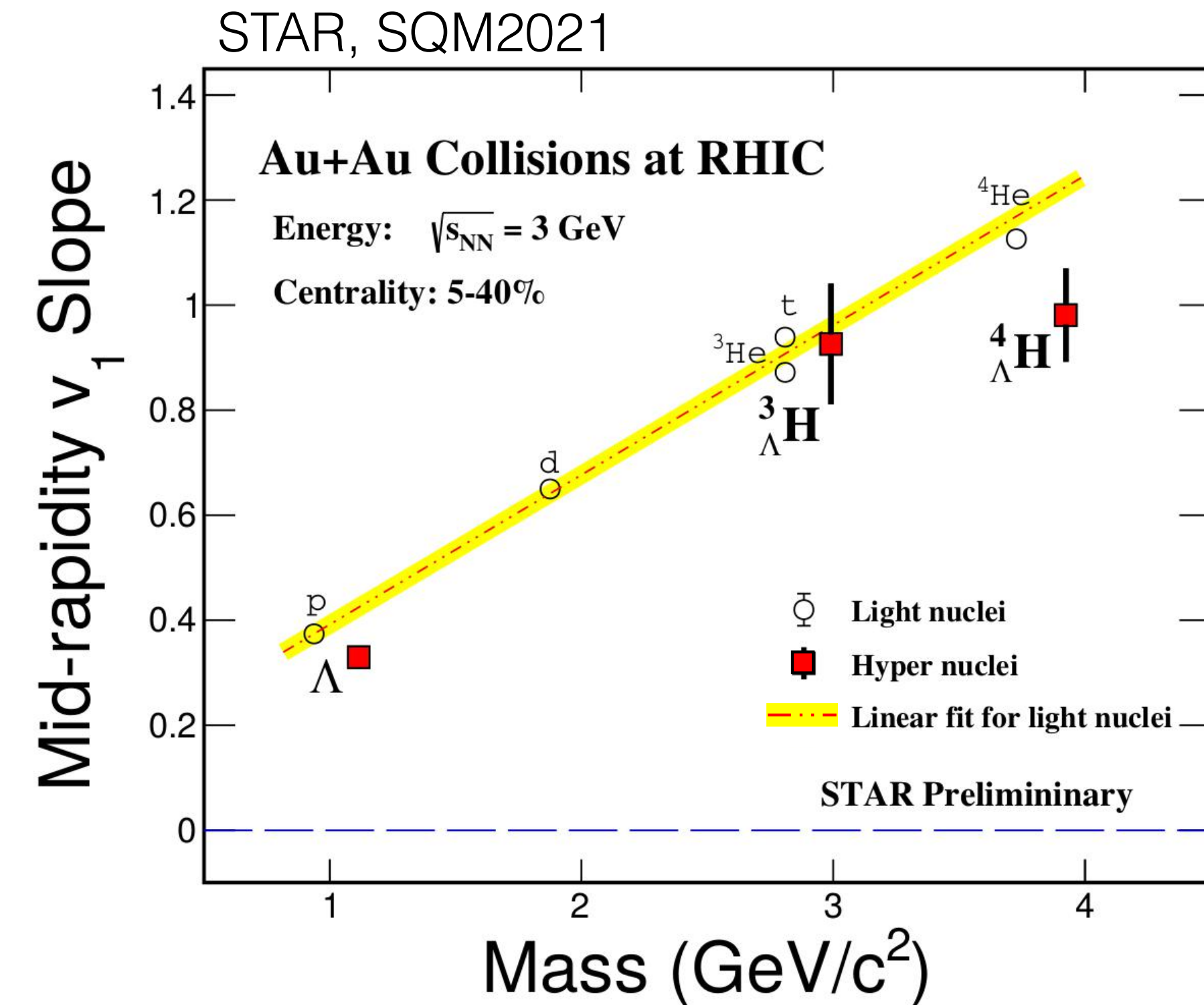
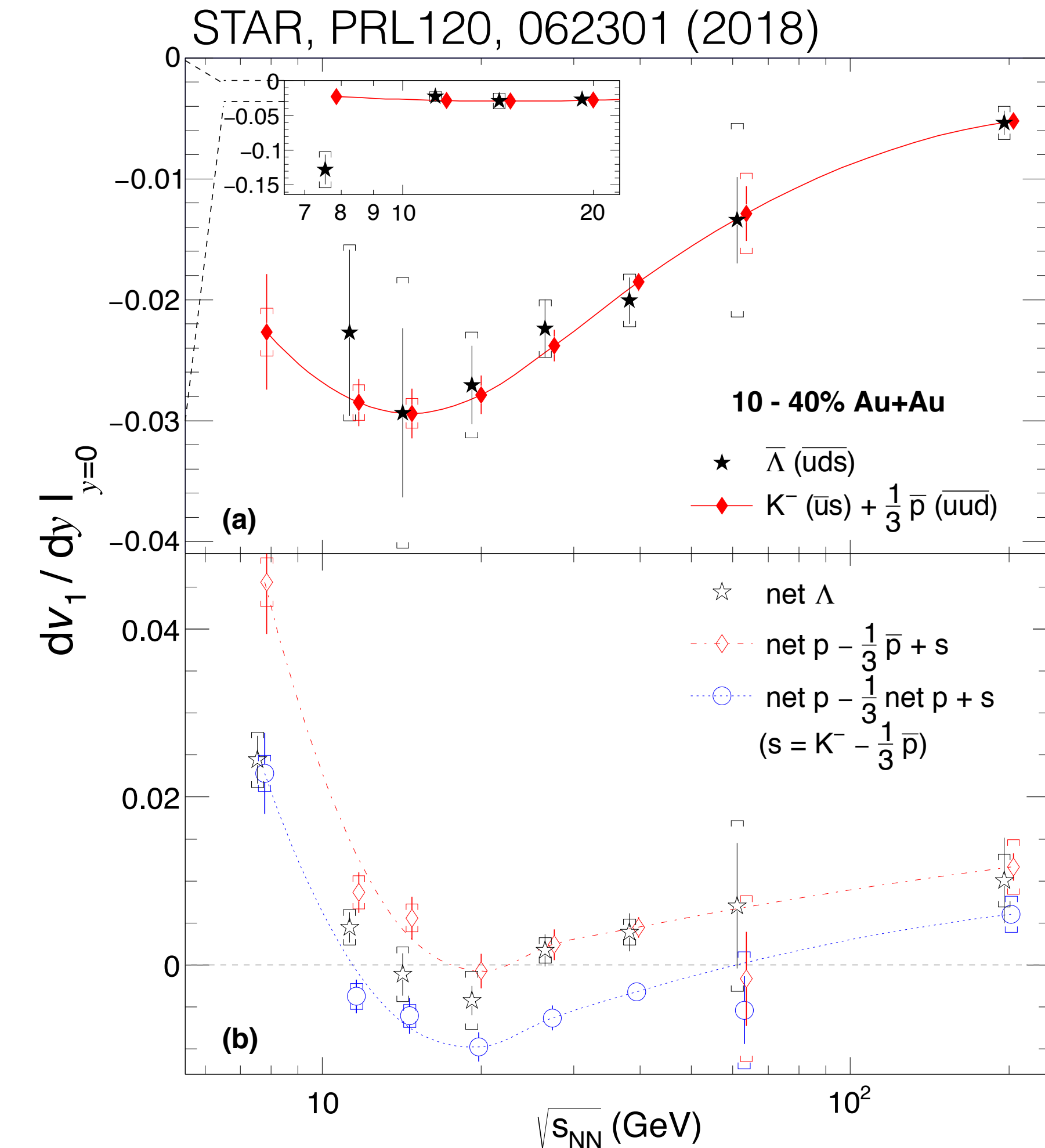
Baryonic mean-fieldを取り入れたモデル計算（JAM、UrQMD）は、定性的に実験データを再現。

ただし、 $K^+ v_2$ （ $\pi v_1$ や $\Lambda v_2$ なども）は再現できていない。

# 指向型フロー $v_1$

1 次相転移に敏感な量として  $v_1$  は測定されてきた。

最近は、"even" 成分、初期の "tilt"、電磁場の効果、coalescence の研究がされている。



► "輸送クォーク"と"生成クォーク"に基づく coalescence sumルール

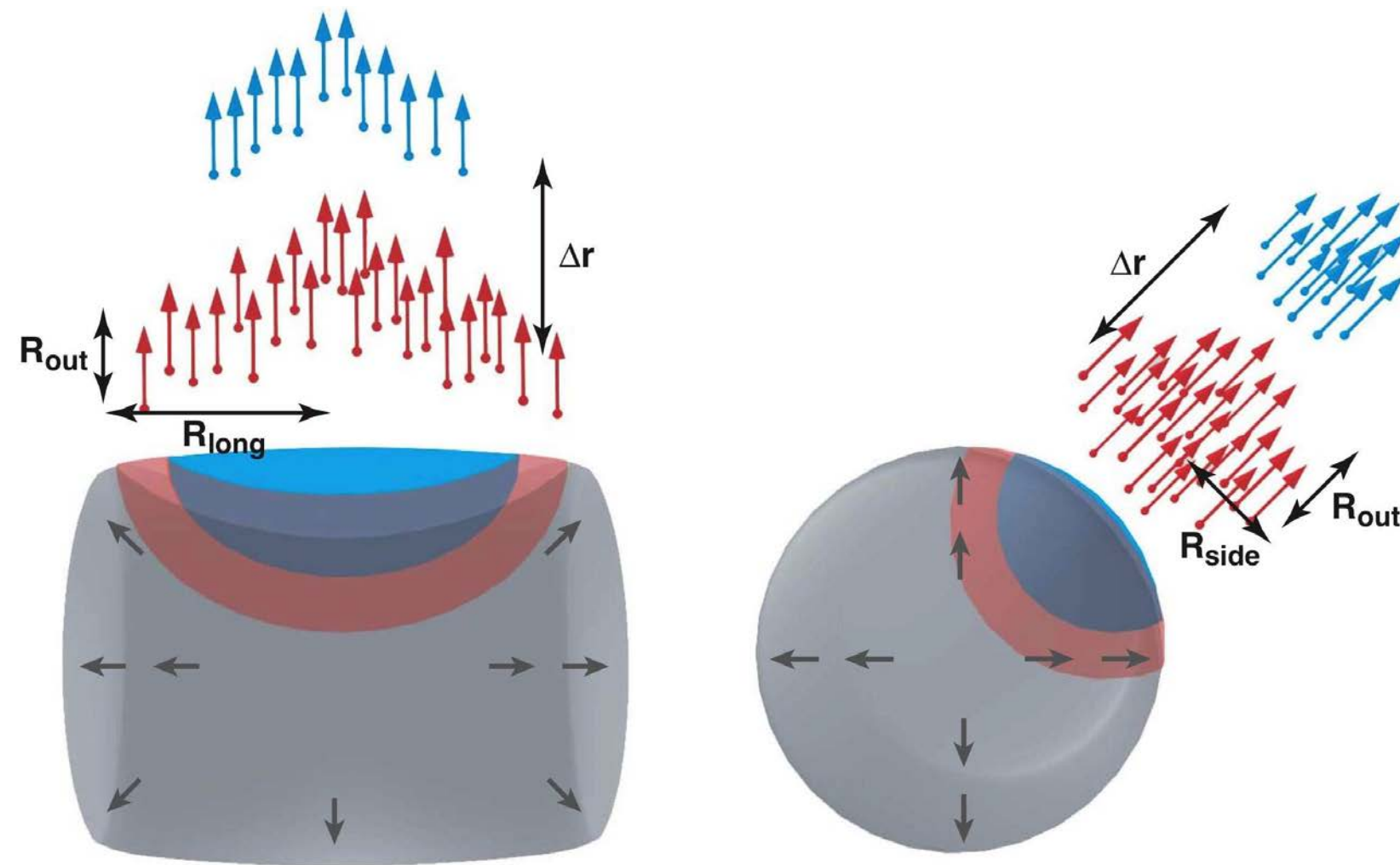
► ハイパー核を含む原子核の  $dv_1/dy$  vs. 質量。

ハイパー核生成プロセスはcoalescenceが支配的。



# Femtoscopy

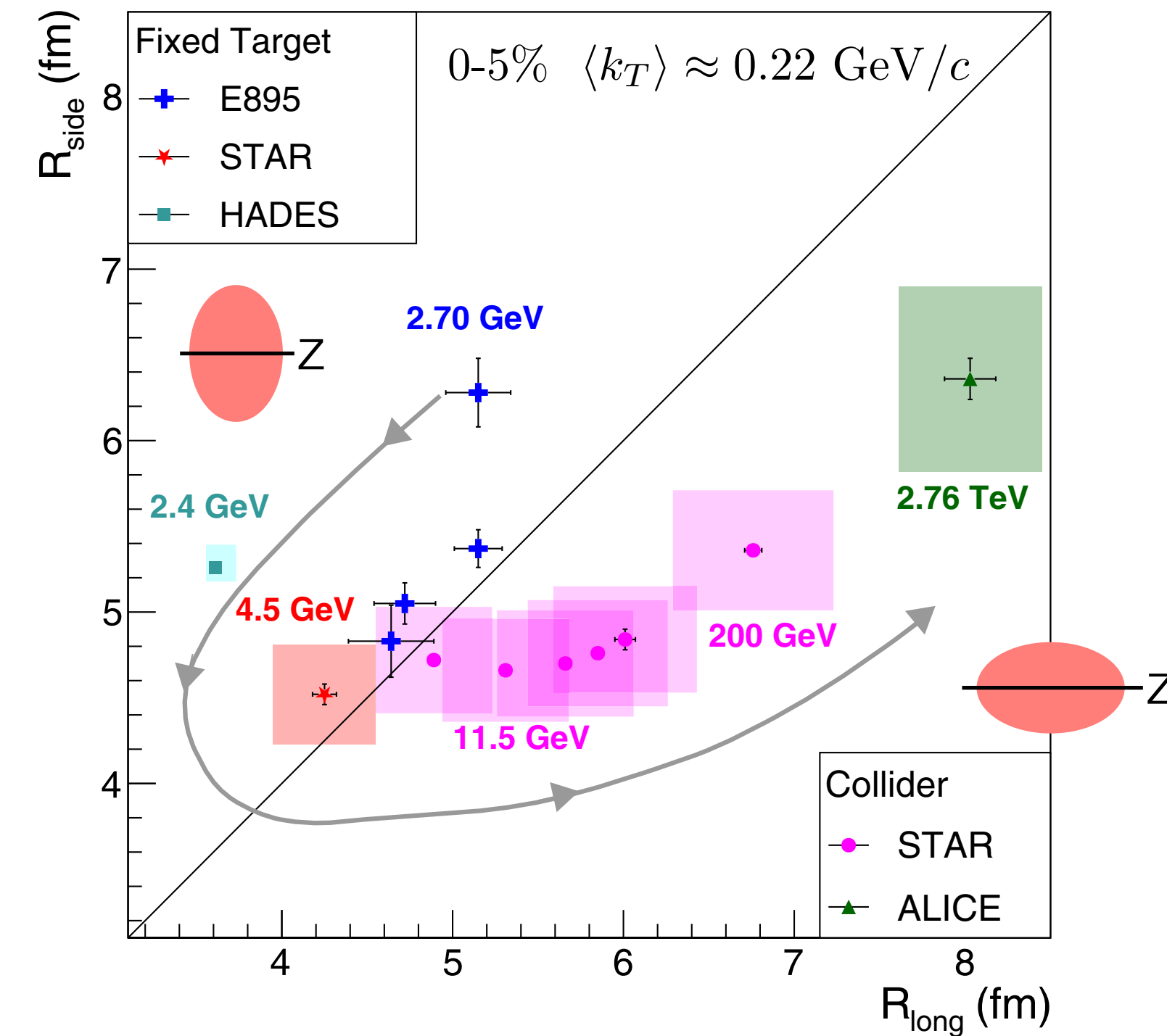
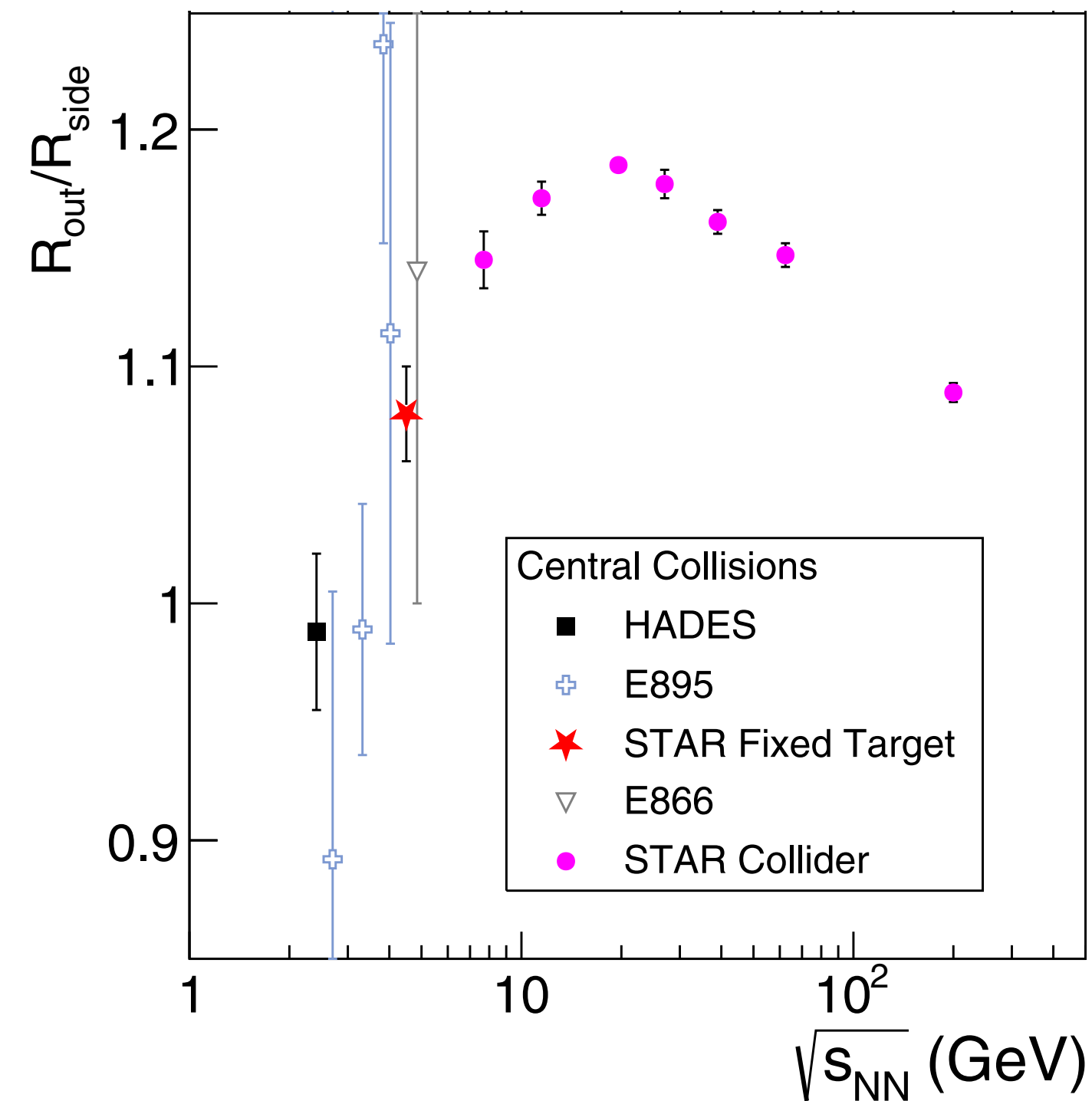
STAR, PRC103, 034908 (2021)



$R_{\text{long}}$ : ビーム軸方向のHBT半径

$R_{\text{out}}$ : ペア横運動量方向のHBT半径+粒子放出時間

$R_{\text{side}}$ :  $R_{\text{long}}$ と $R_{\text{out}}$ に直行する方向の半径

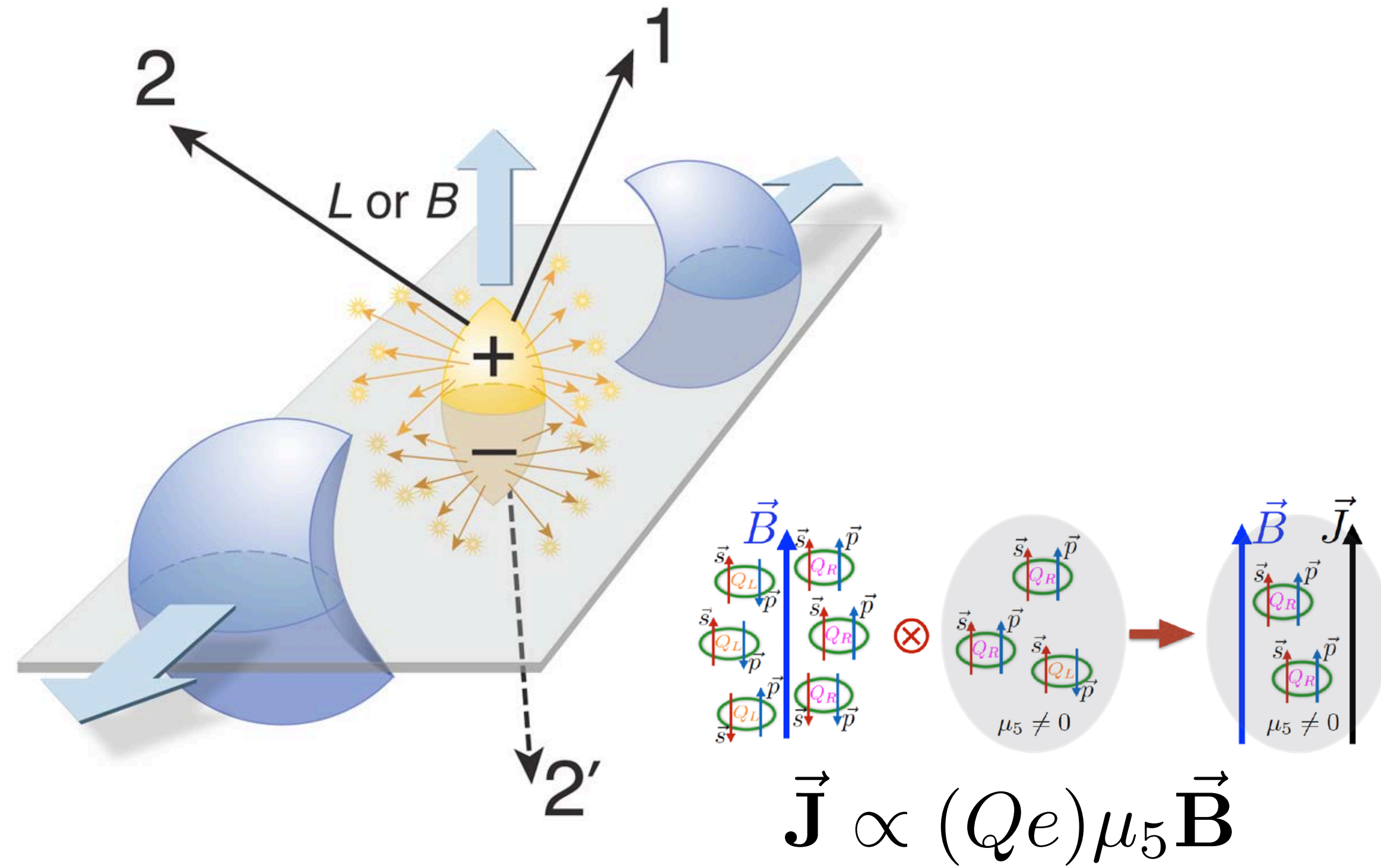


► 20 GeV付近で $R_{\text{out}}/R_{\text{side}}$ のピーク。EOSのsoftest point ?

► 4.5 GeVは ( $\pi$ 中間子の) 放出領域が“oblate”から“prolate”シェイプへ変化する中間点。

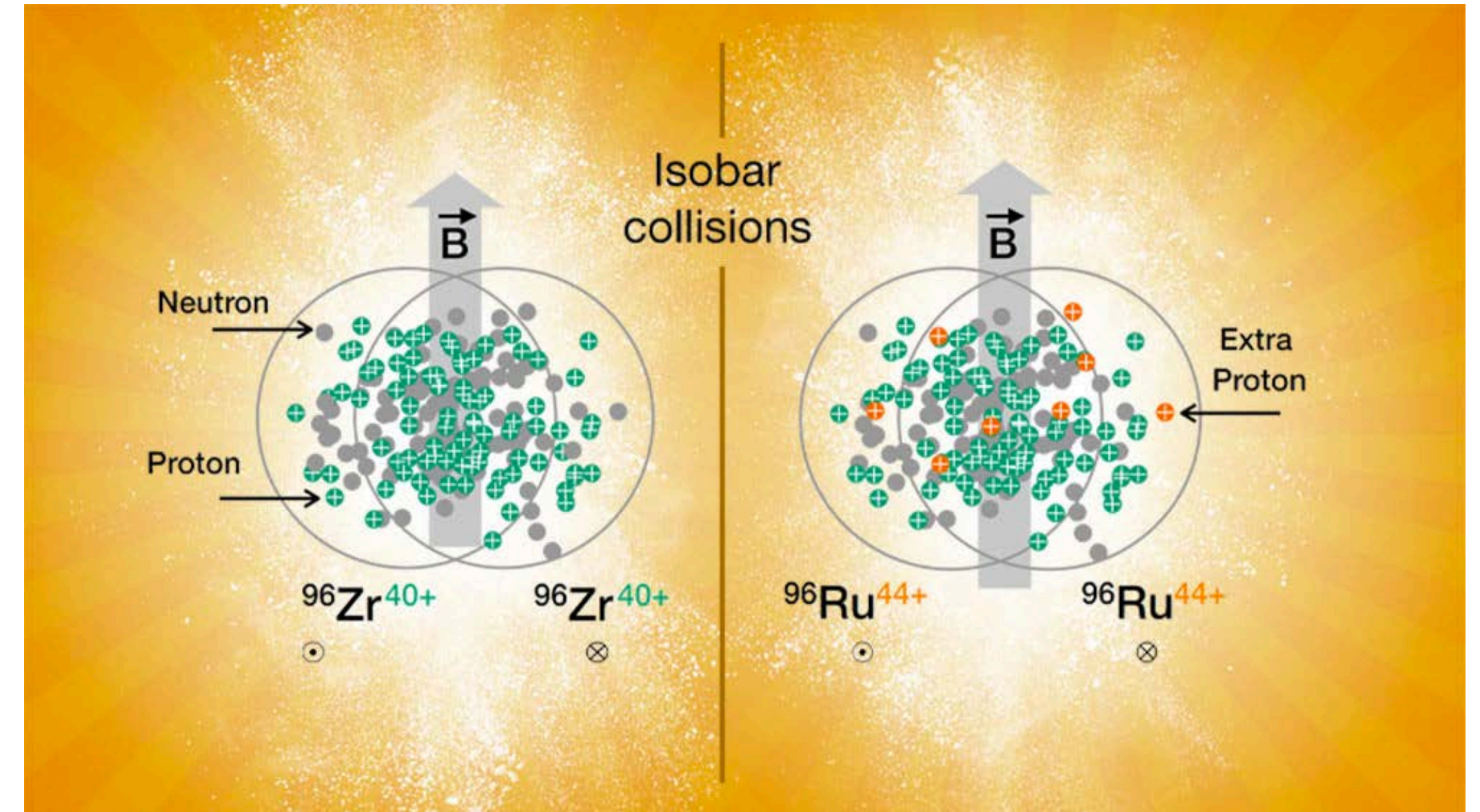


# カイラル磁気効果(CME)の探索



CMEは、磁場方向に電流が流れる現象

(masslessクォーク物質+カイラリティインバランス+強磁場)



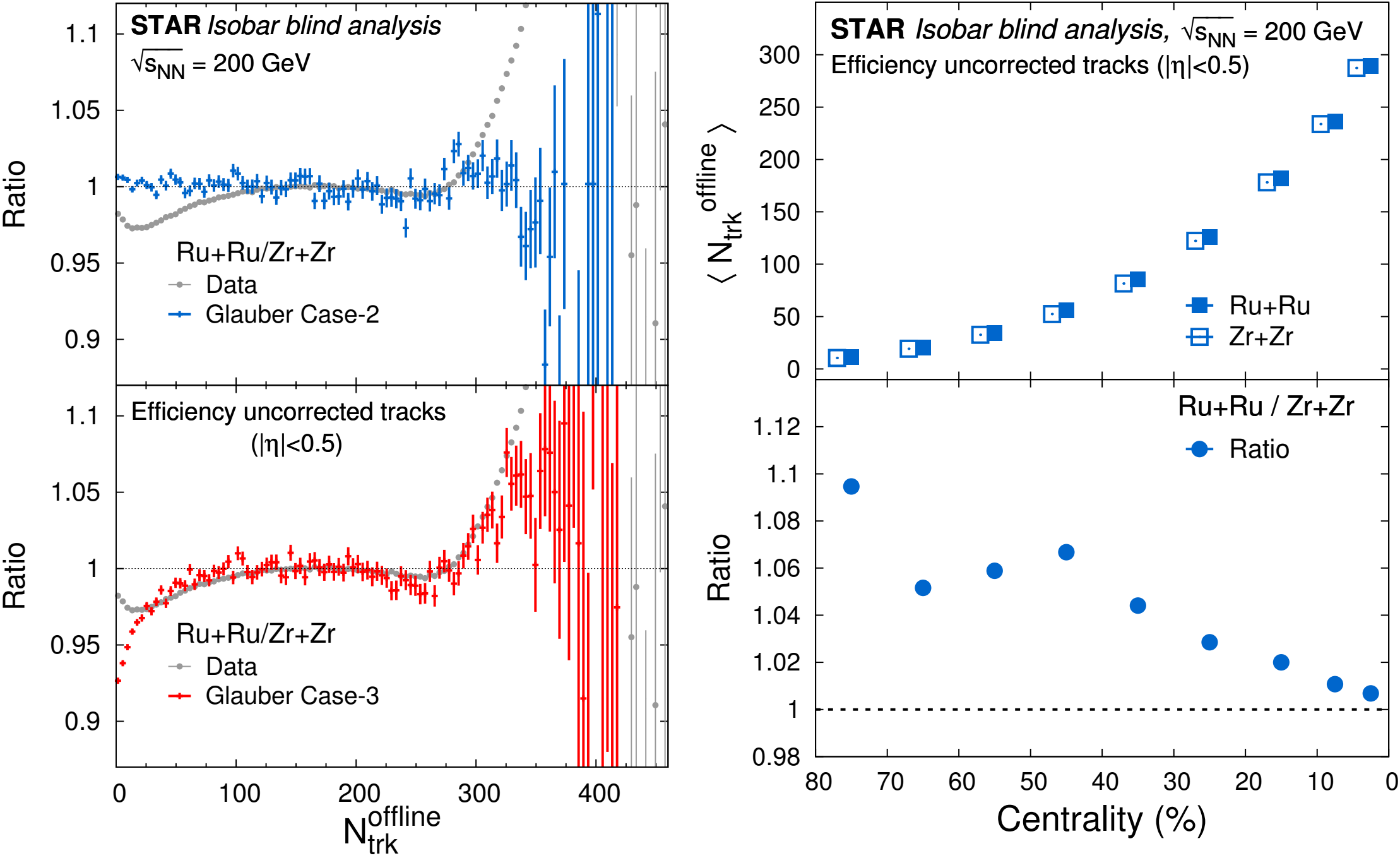
▶ 同重体衝突 Ru+Ru vs. Zr+Zr

- ▶ 同じ質量数、異なる電荷 (陽子数)
- ▶ Ru+Ruの方が、10-18% 初期磁場が大きい
- ▶ ほぼ同じ大きさなので、 $v_2$ などによるBGが同じで、CMEシグナルだけ異なる

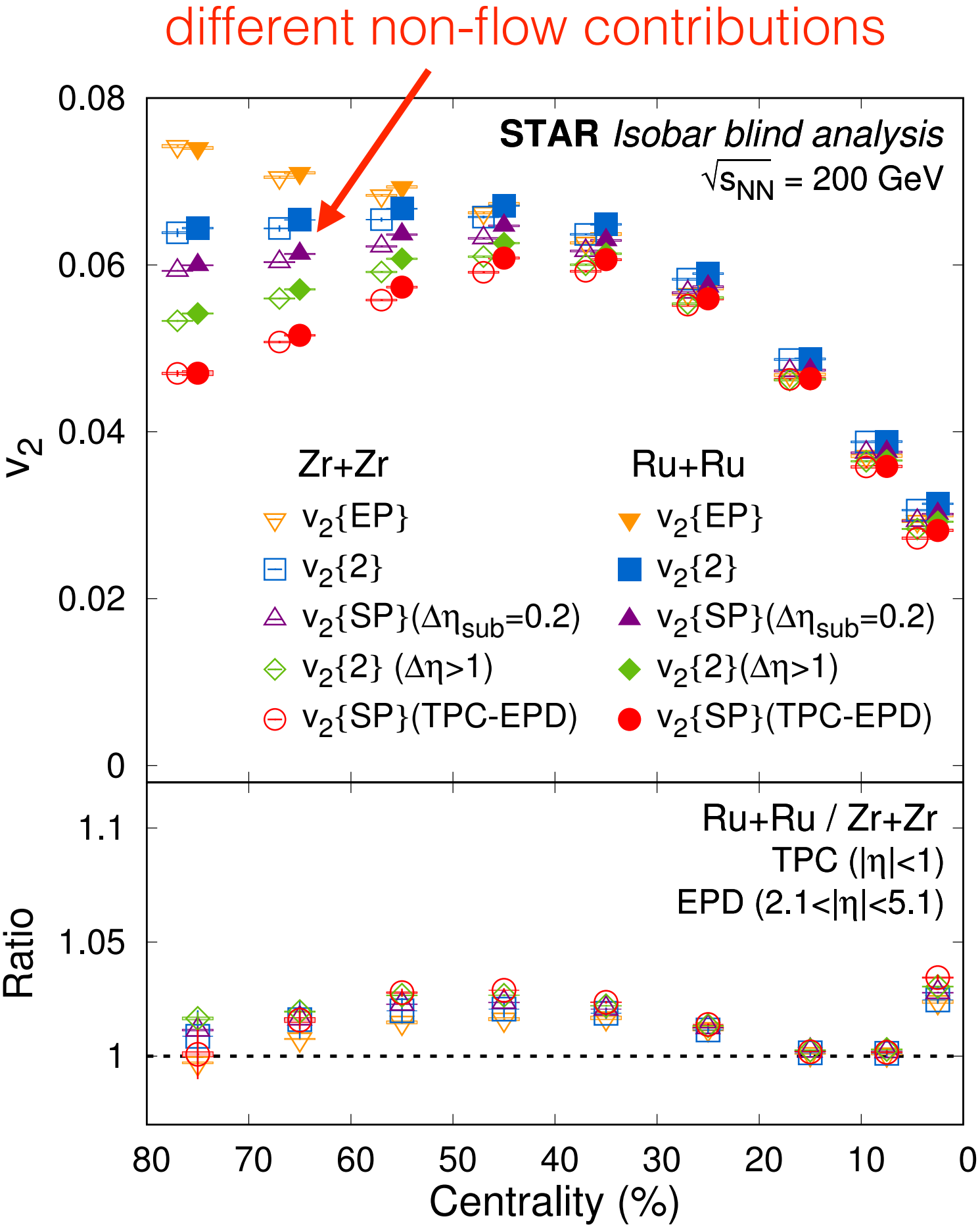


# 粒子多重度と楕円型フロー

Nucleus	Case-1 [83]			Case-2 [83]			Case-3 [113]		
	$R$ (fm)	$a$ (fm)	$\beta_2$	$R$ (fm)	$a$ (fm)	$\beta_2$	$R$ (fm)	$a$ (fm)	$\beta_2$
$^{96}_{44}\text{Ru}$	5.085	0.46	0.158	5.085	0.46	0.053	5.067	0.500	0
$^{96}_{40}\text{Zr}$	5.02	0.46	0.08	5.02	0.46	0.217	4.965	0.556	0

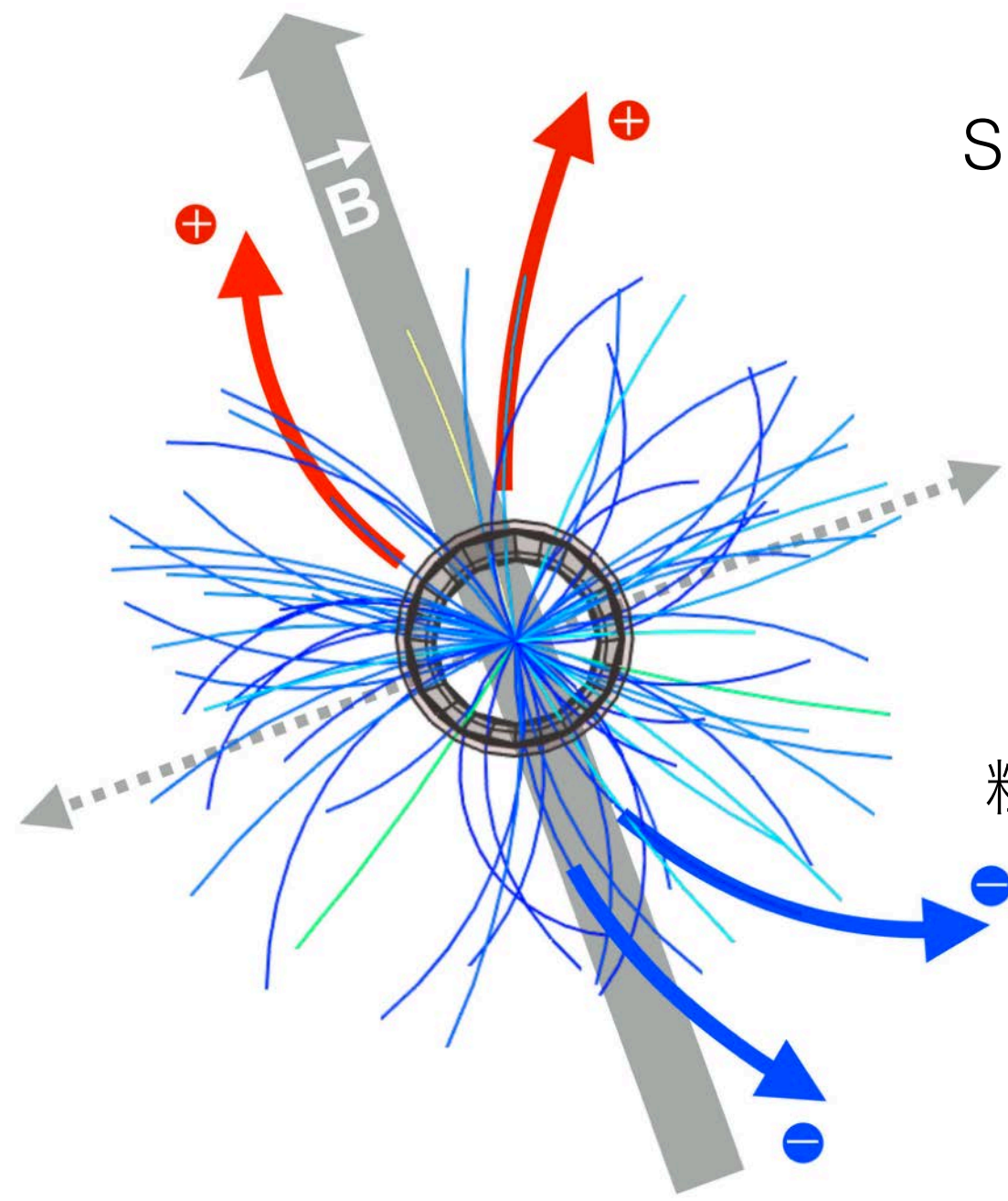


同じ中心衝突度で~4%程度の粒子多重度の違い。



$v_2$  (BG) は~3%程度の違い。

# ***$\gamma$ -correlator***



S. Voloshin, PRC70.057901(2004)

$$\gamma_{112} = \langle \cos(\phi_\alpha + \phi_\beta - 2\Psi_2) \rangle$$

$$\Delta\gamma = \gamma_{112}^{OS} - \gamma_{112}^{SS}$$

粒子が反応平面から $\pm 90$ 度方向に放出すると

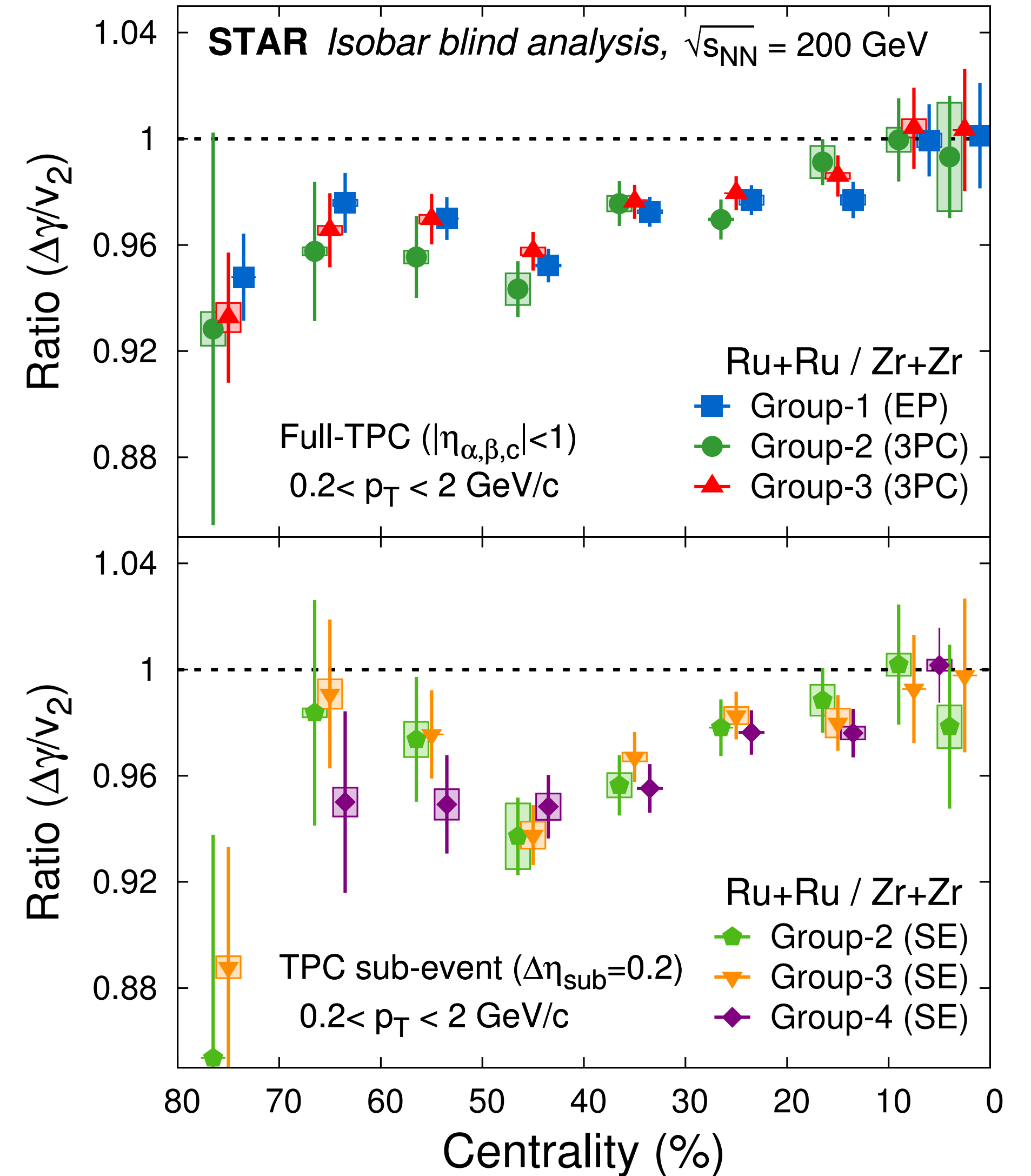
$$\gamma^{OS} = \langle \cos(90 - 90 + 0) \rangle = +1$$

$$\gamma^{SS} = \langle \cos(90 + 90 + 0) \rangle = -1$$

Predefined CME signature:  $\frac{(\Delta\gamma/v_2)^{Ru+Ru}}{(\Delta\gamma/v_2)^{Zr+Zr}} > 1$

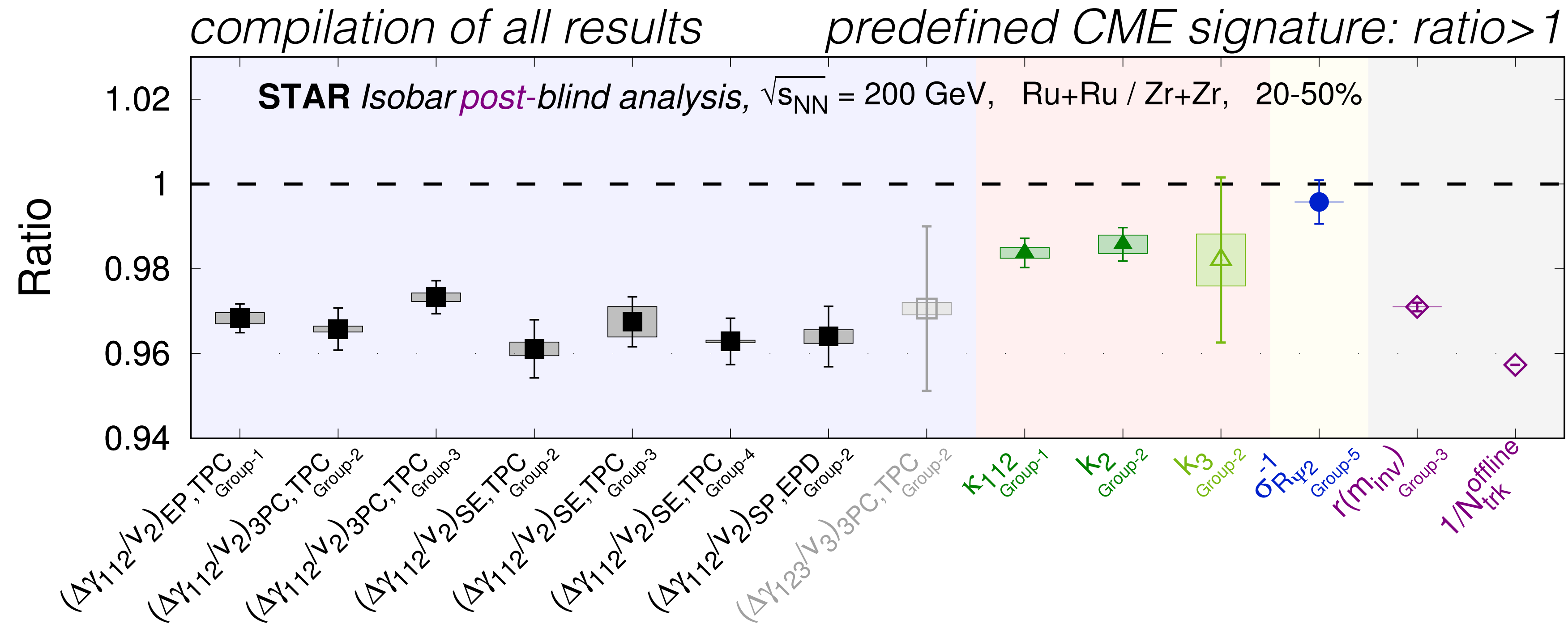
事前に定義したCMEシグナルは観測されず。

ベースライン (ratio=1からのずれ) を理解する必要がある。



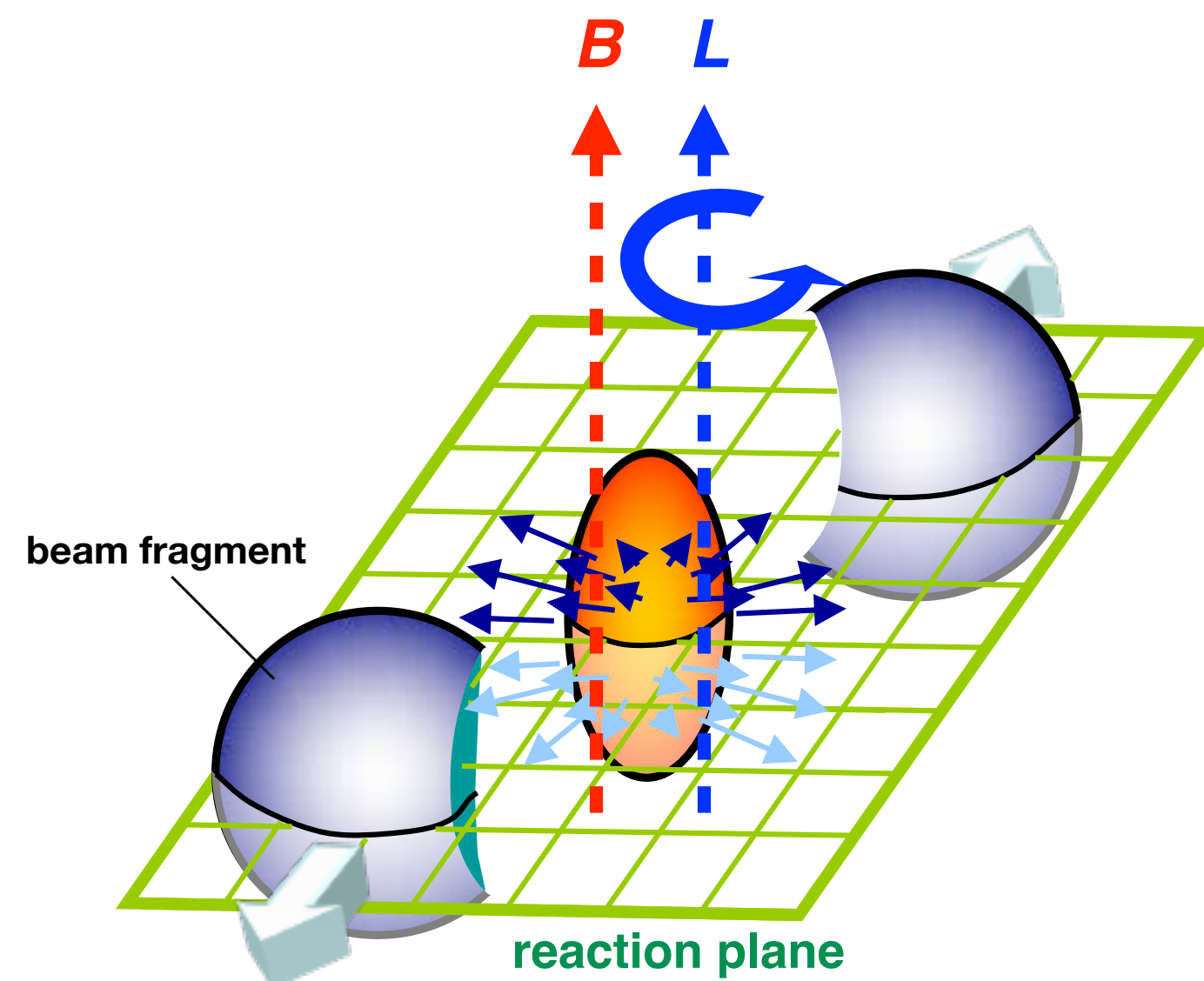


# Isobar CMEのサマリープロット



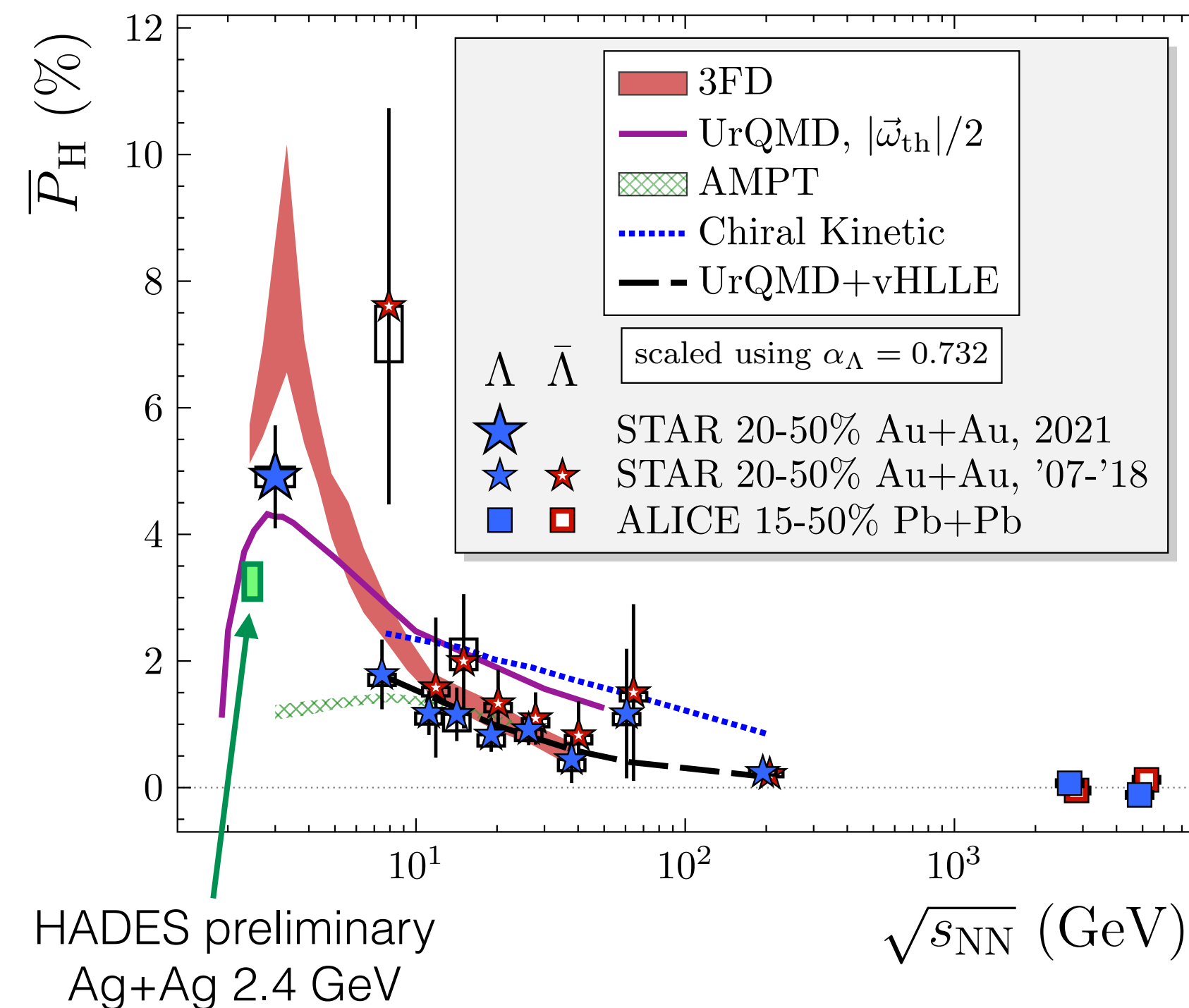
- ▶ STARは5グループによるブラインド解析により、アイソバーにおけるCME探索を行ったが、“事前定義”したCMEシグナルは見えなかった。
- ▶ 粒子多重度の微妙な違いによって、ベースラインの変化（Ratioが1以下）が見られるので、その理解に向けて現在調査中。

# ハイペロンのグローバル偏極

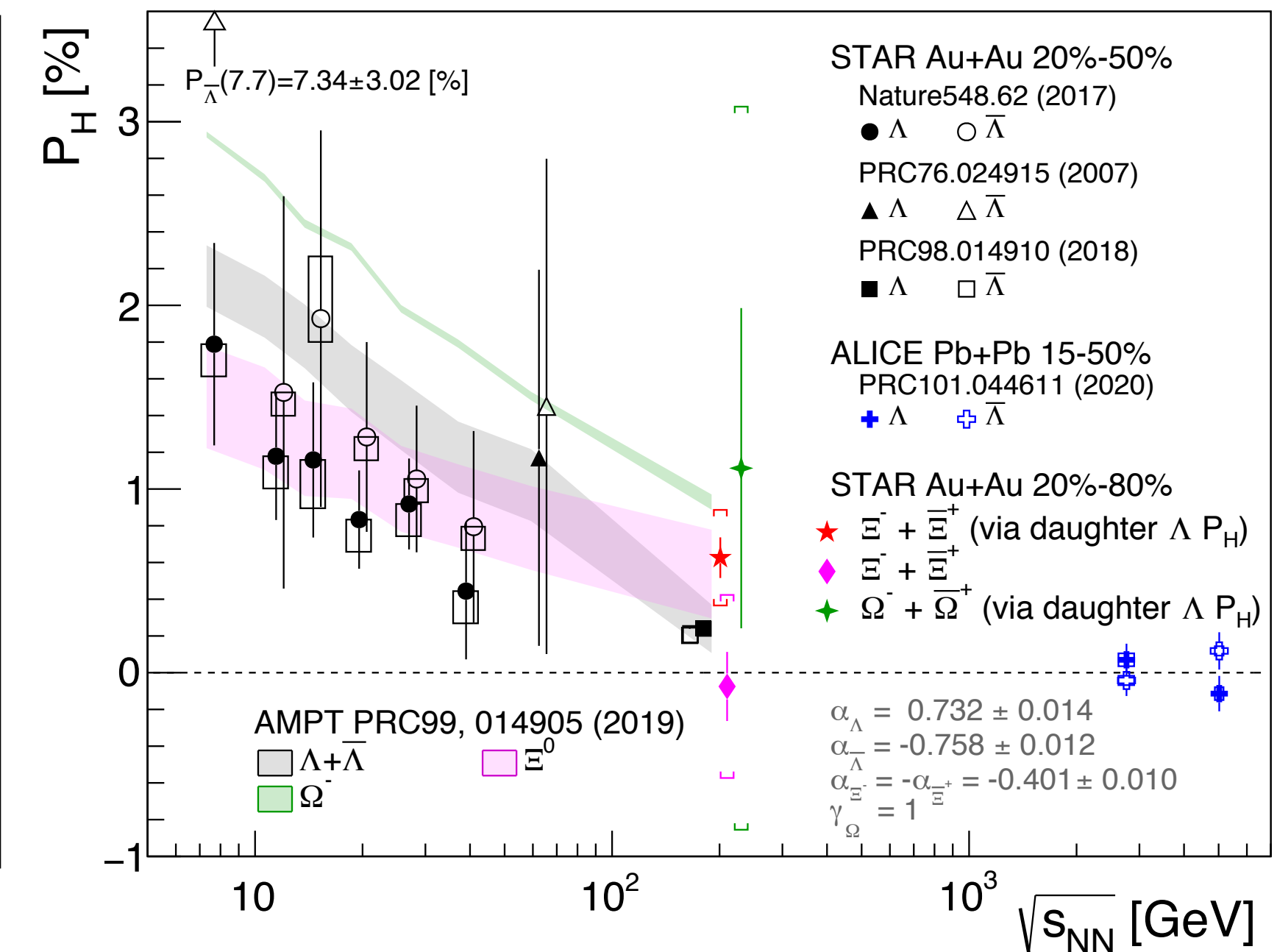


初期の軌道角運動量L  
→L方向にスピンの偏極  
”グローバル”偏極と呼ぶ。

STAR, arXiv:2108.00044



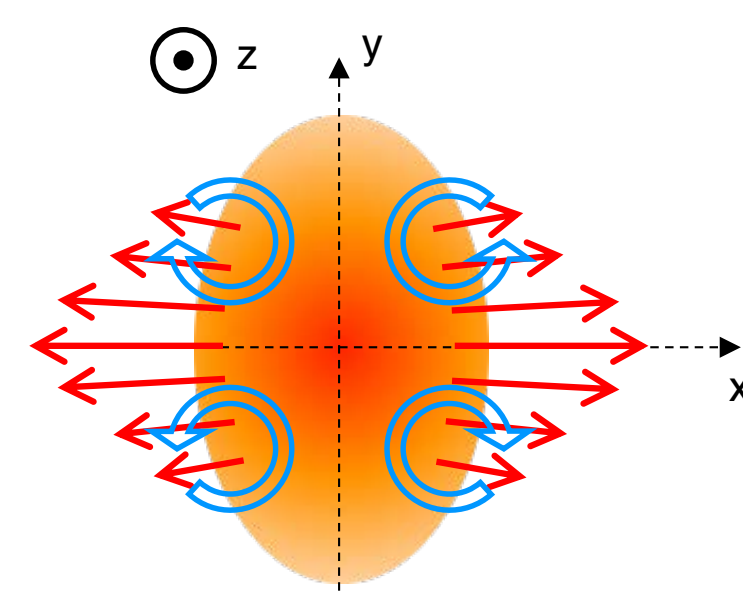
STAR, PRL126, 162301 (2021)



グローバル偏極は理論予測通り、3 GeV付近で最大値をとりそう。  
Ξ(spin-1/2)やΩ(spin-3/2)の偏極測定が出始めている。  
今の所、（初期磁場による）粒子・反粒子に違いはない。

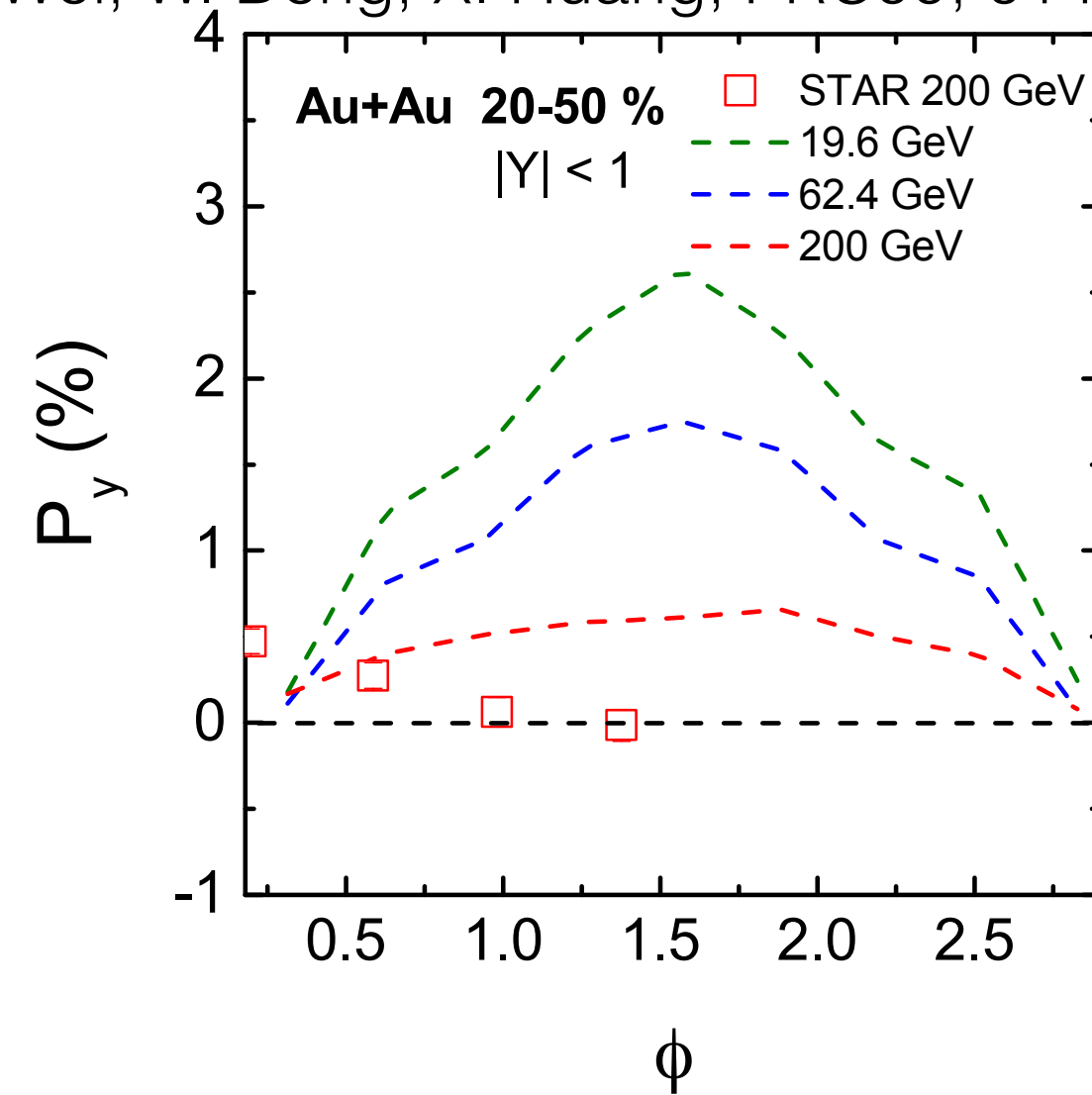


# 偏極測定における課題



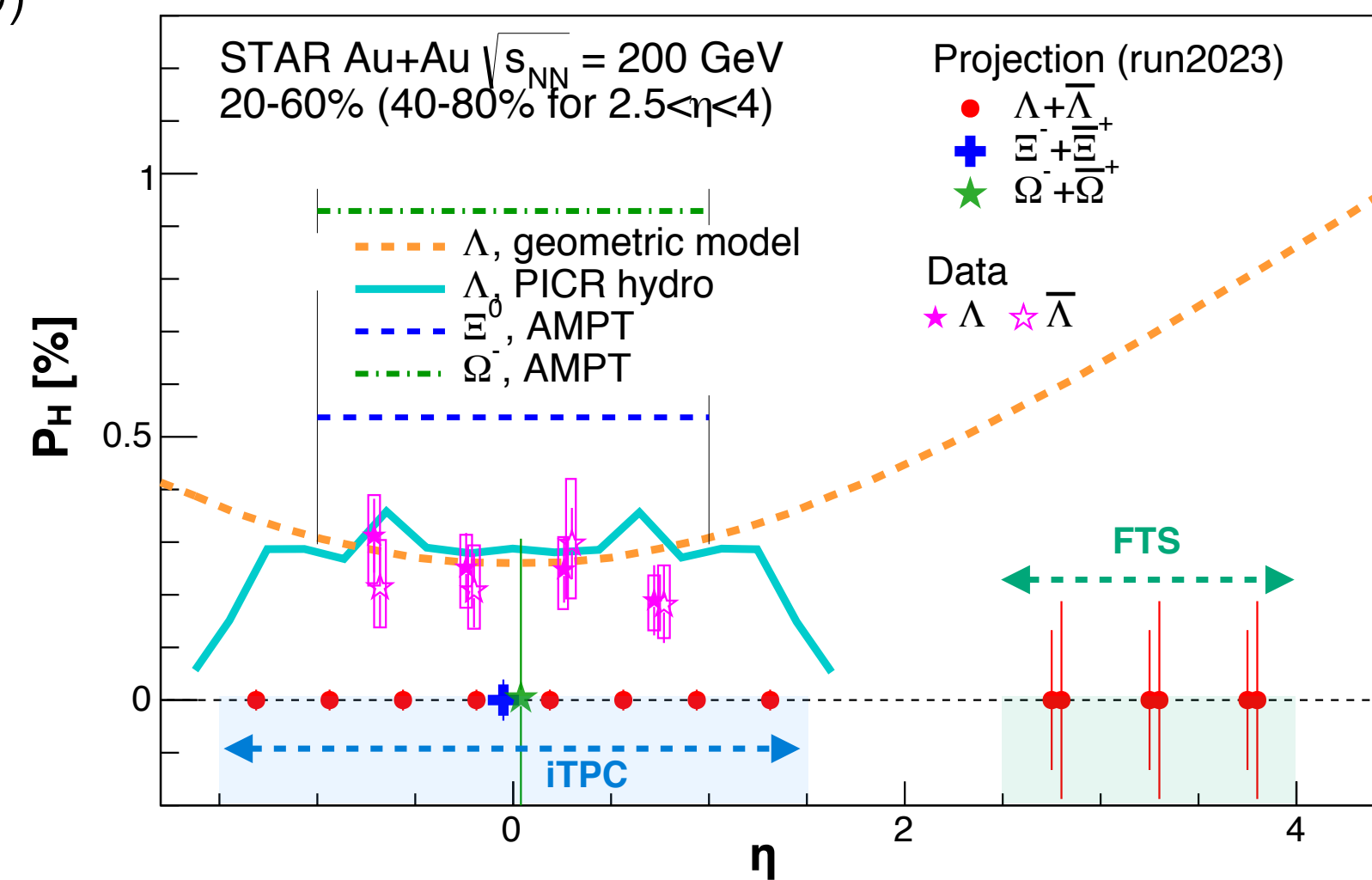
## 方位角依存性

AMPT model  
D. Wei, W. Deng, X. Huang, PRC99, 014905 (2019)



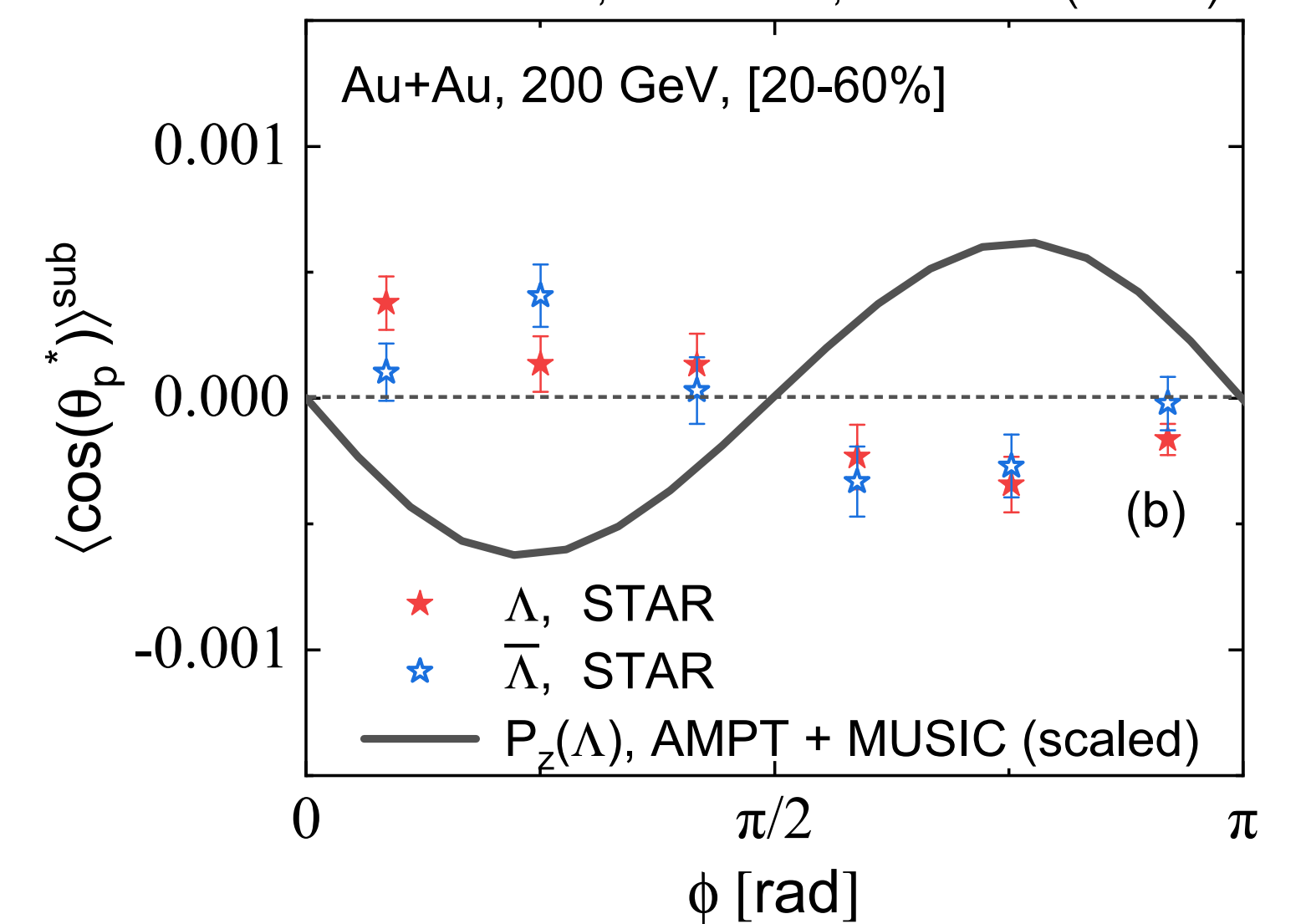
## ラピディティ依存性

BUR2020, STAR Note SN0755



## ビーム軸方向の局所渦

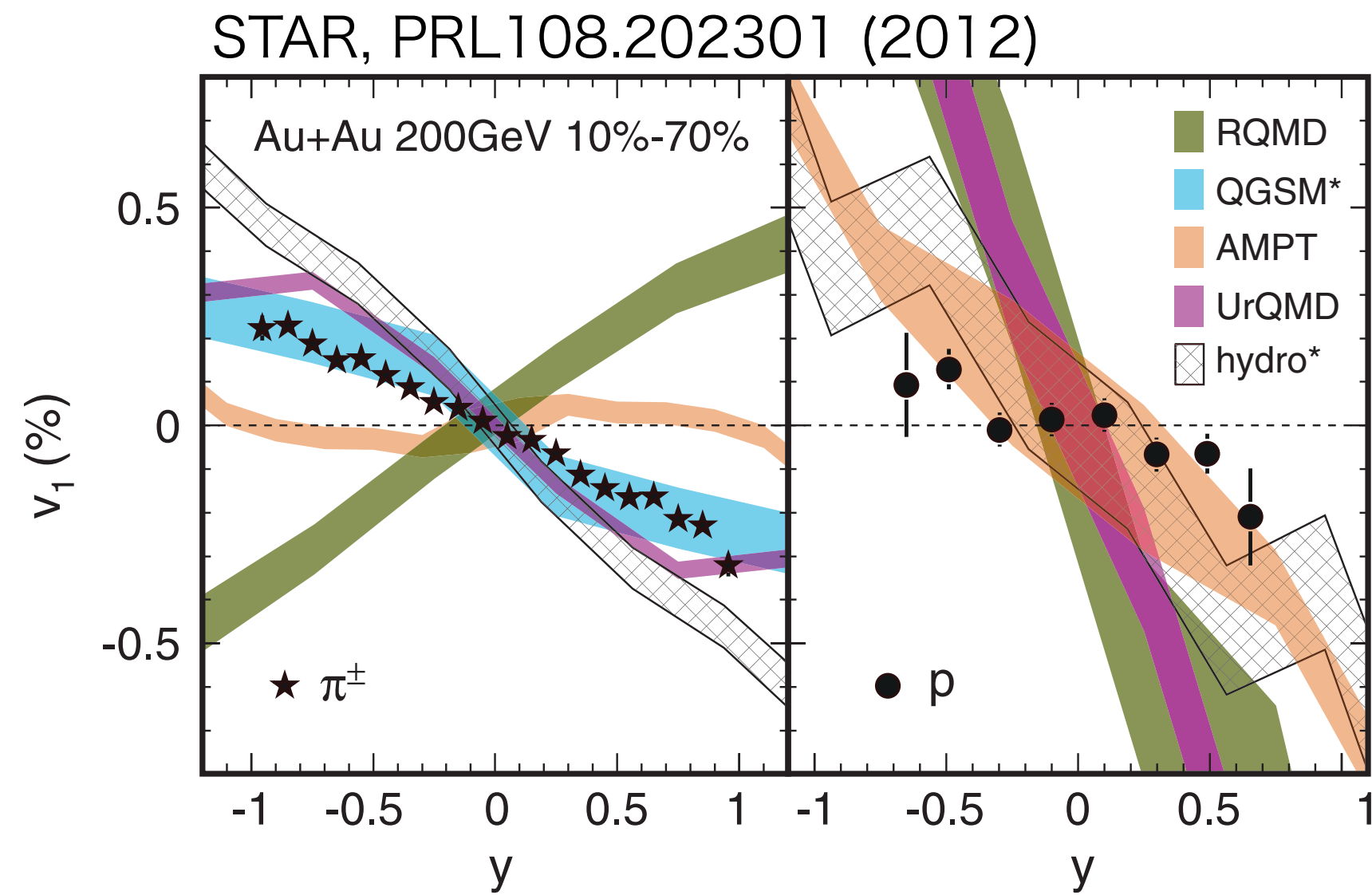
AMPT-IC + MUSIC hydro  
B. Fu et al., PRC103, 024903 (2021)



differentialな測定を見ると、多くのモデルが実験データを再現できていない。

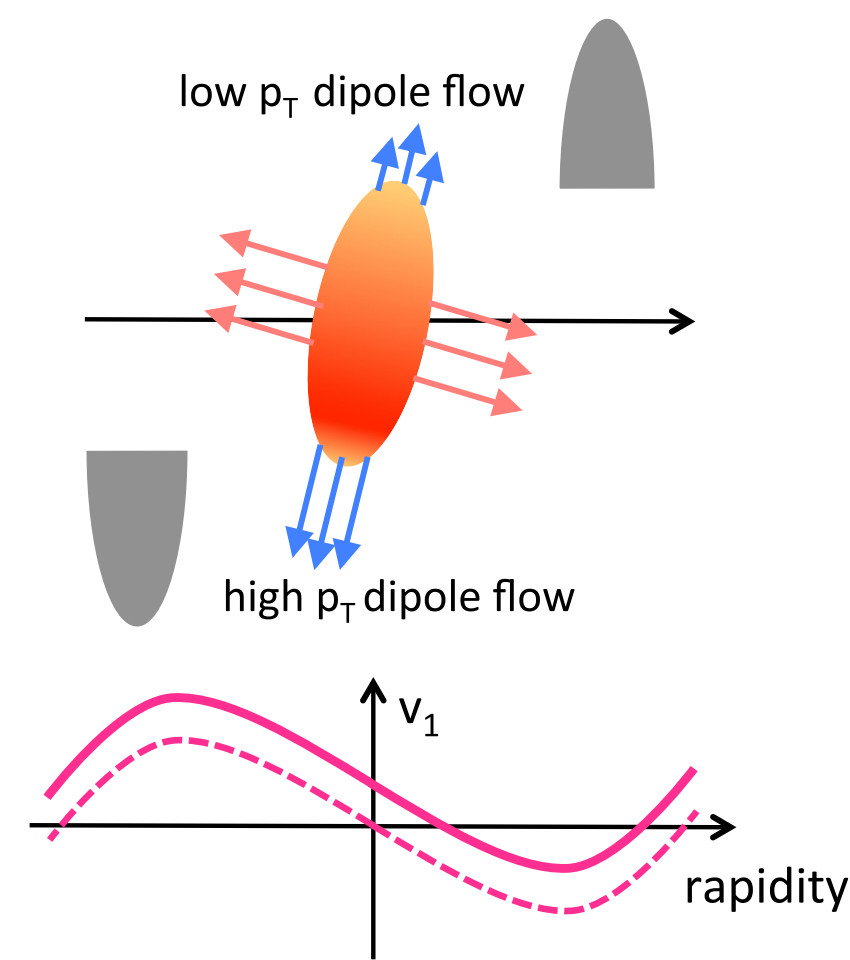
局所渦に関しては、BWモデルは定量的に再現している。今も議論が続いている。

# 渦と $v_1$



STAR, PRC98, 014915 (2018)

(b) tilted source  
+ asymmetric density gradient

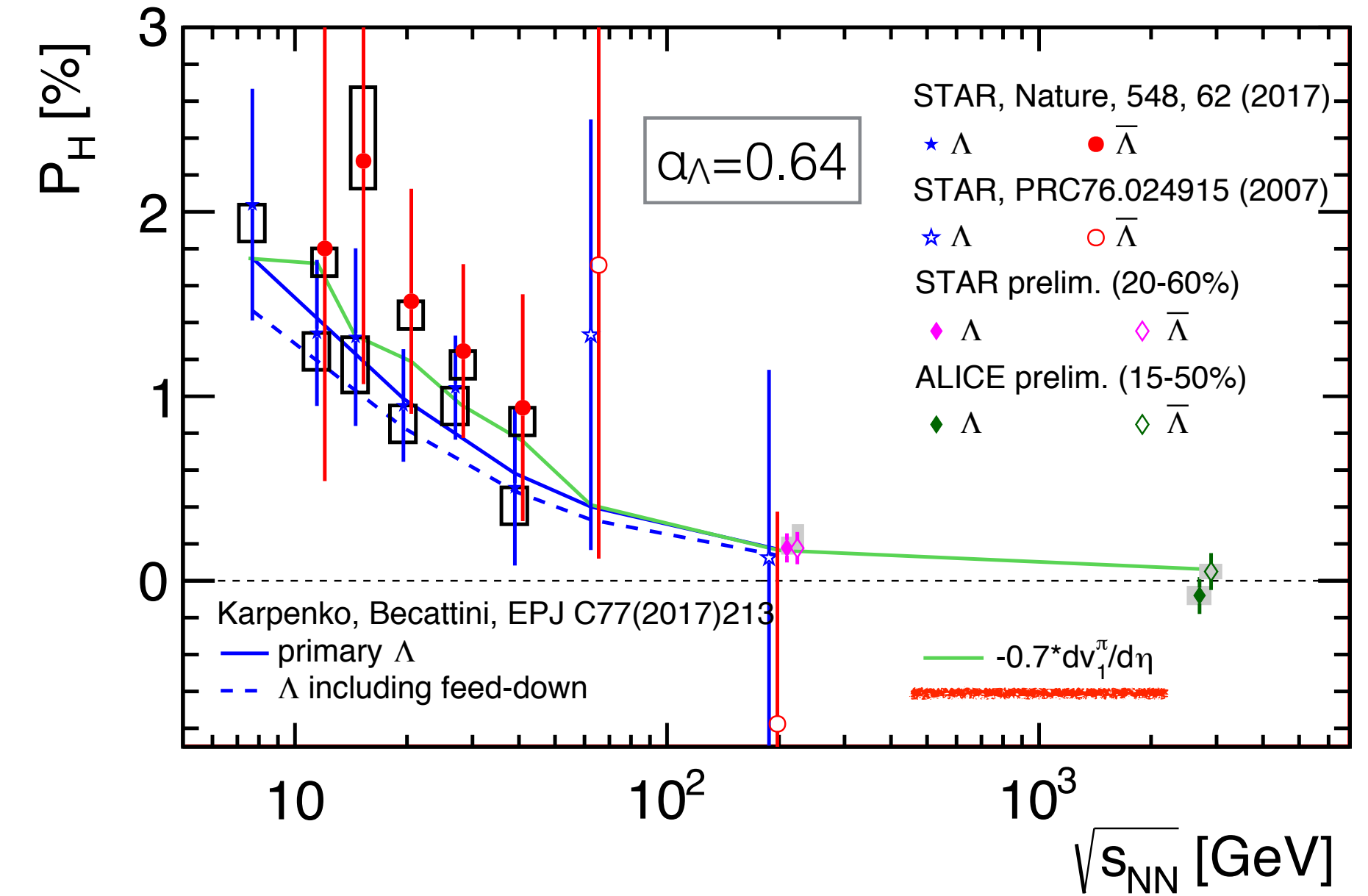


$v_1$ の起源：初期の傾きと非対称な密度分布

渦の起源：初期の軌道角運動量・速度プロファイル

$v_2$ や $v_3$ と比べると、  
 $v_1$ (エネルギーや粒子種依存性)は  
定量的に再現できていない。

S. Voloshin, EPJ Web Conf.171, 07002 (2018)



$v_1$ の傾きとグローバル偏極が同じような  
エネルギー依存性に見える。

モデルは、少なくとも $v_1$ とグローバル偏極の両方を再現すべき。



# まとめ

---

フローと粒子相関に関する最近の実験結果（ほぼSTARしかカバーしていない）を紹介しました

- ▶ QCD相転移やバリオン高密度領域における物性解明のために、低エネルギー領域でフローやfemtoscopiaの精密測定が進んでいる。
- ▶ ブラインド解析によるアイソバーCME探索がついに終了。事前定義したCMEシグナルは観測されず、さらなる調査が必要。完全にCMEを否定したわけではない。
- ▶ グローバル偏極の新しいデータ（低エネルギーや粒子種依存）が出始めている。

# バックアップ

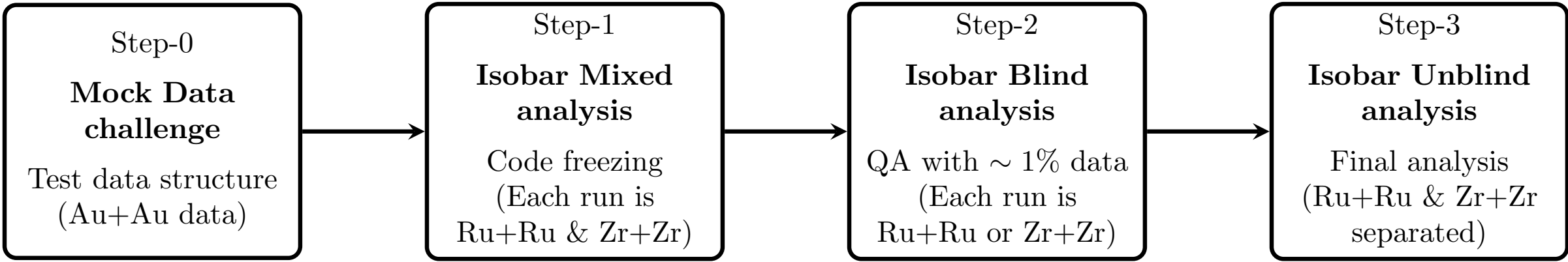
---



# Analysis procedure

started ~Jan/2019

started end of May/2021



► Follow blind analysis as recommended by BNL NPP PAC

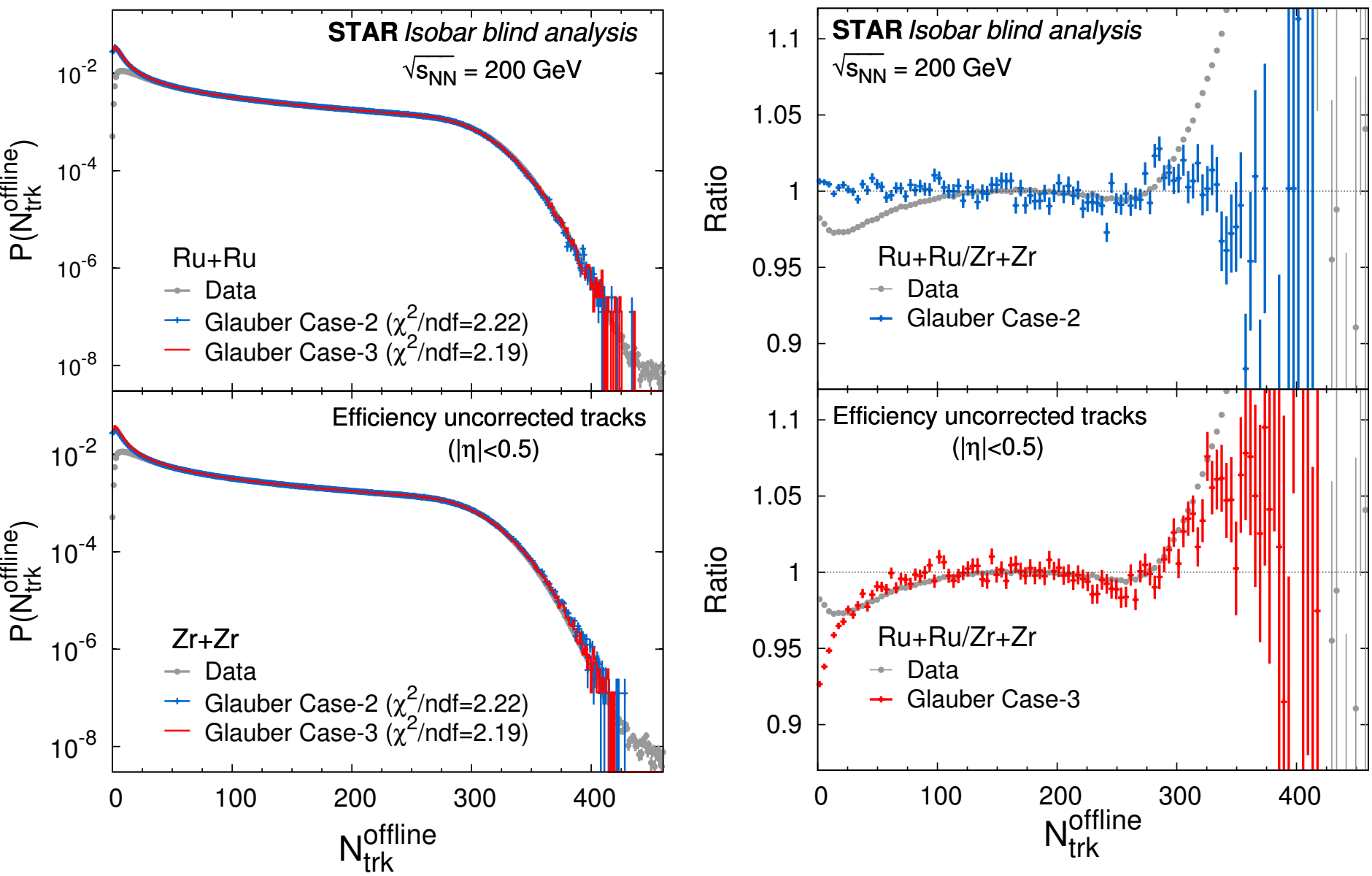
- No species info. until final step
- Codes frozen before the unblind step
- Analyzed by 5 independent groups
- Case for CME is pre-defined

STAR, Nucl.Sci.Tech. 32(2021)5,48

“Methods for a blind analysis of isobar data collected by the STAR collaboration”

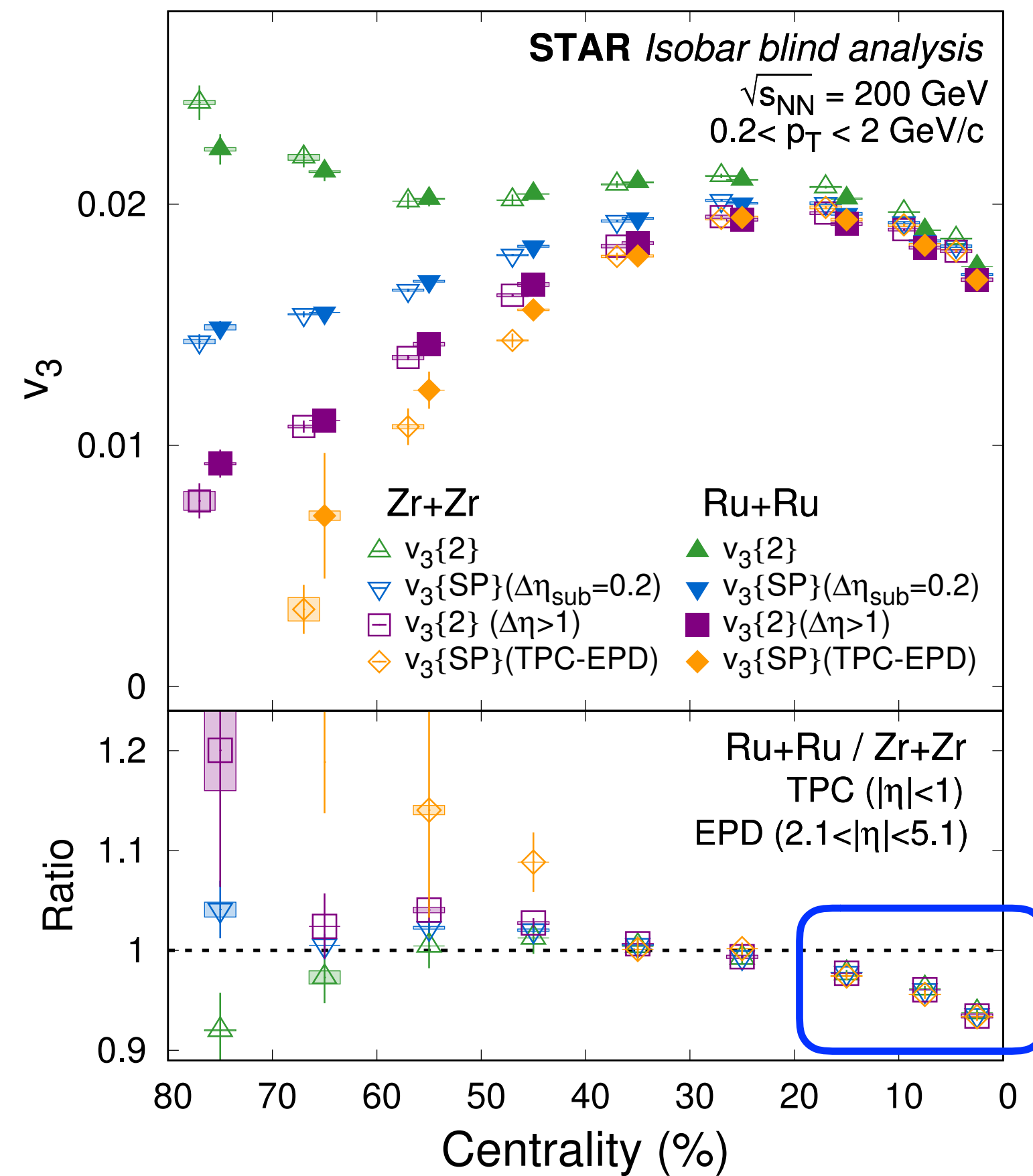
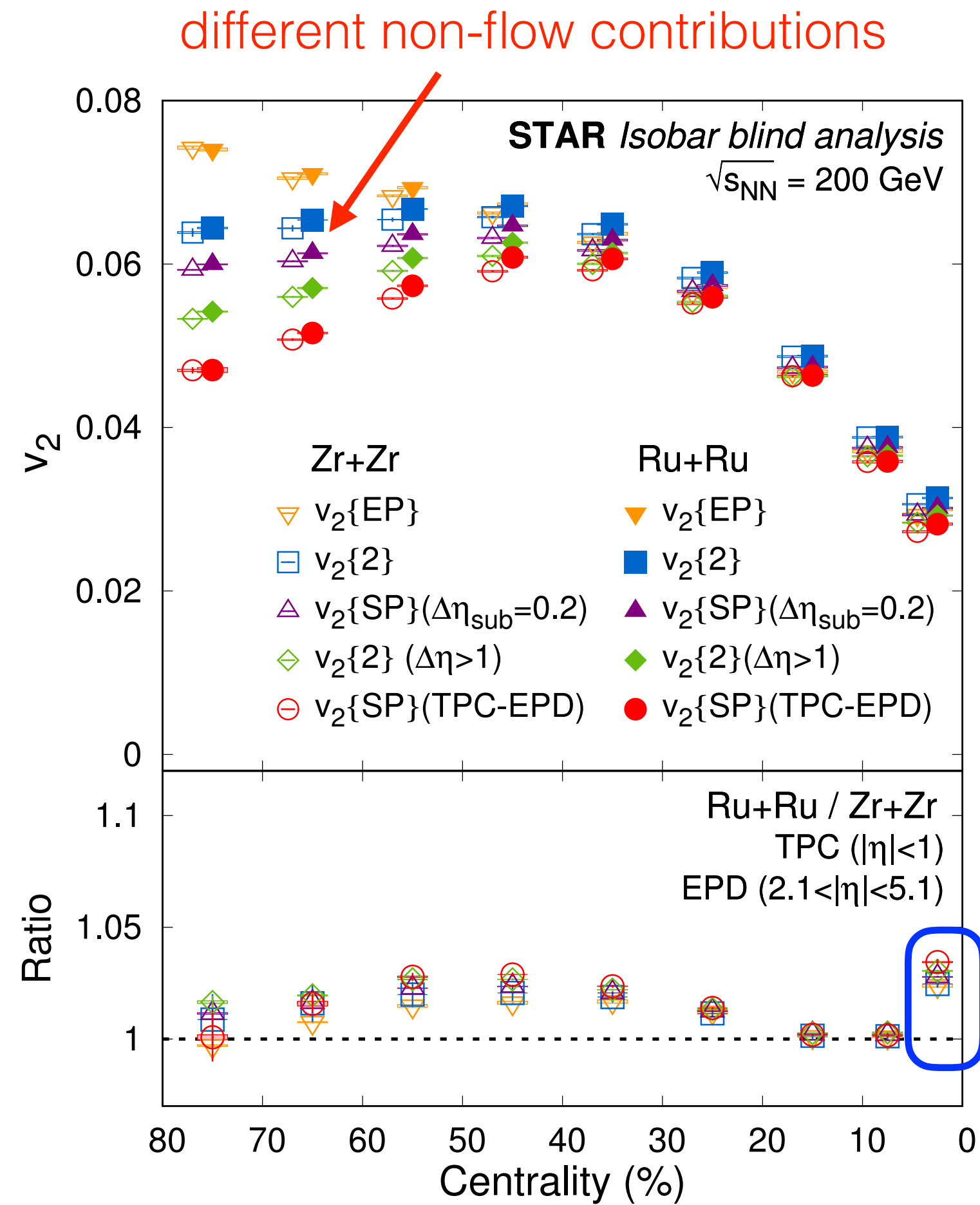
► Centrality determination

- Done by non-CME analyzers
- Unknown deformation parameter, tried 3 cases of Woods-Saxon parameters below
- Case-3 ( $\beta_2=0$ ) best describes the data. Potential room for improvement.



Nucleus	Case-1 [83]			Case-2 [83]			Case-3 [113]		
	$R$ (fm)	$a$ (fm)	$\beta_2$	$R$ (fm)	$a$ (fm)	$\beta_2$	$R$ (fm)	$a$ (fm)	$\beta_2$
$^{96}_{44}\text{Ru}$	5.085	0.46	0.158	5.085	0.46	0.053	5.067	0.500	0
$^{96}_{40}\text{Zr}$	5.02	0.46	0.08	5.02	0.46	0.217	4.965	0.556	0

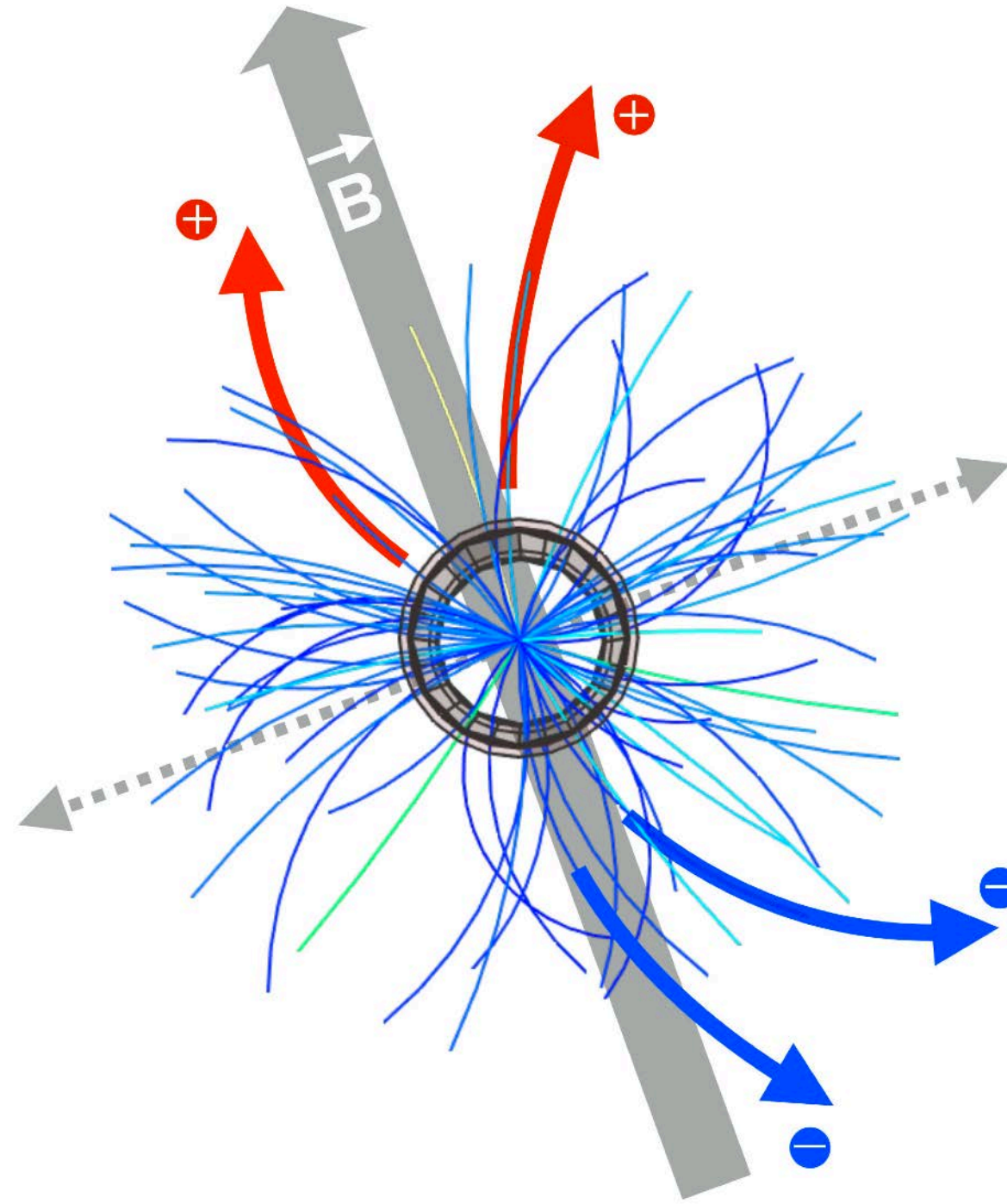
# ***Elliptic/triangular flow***



►  $v_2$  differs by  $\sim 2\text{-}3\%$ , indicating different shape and CME background for a given centrality

►  $v_2$  ratio deviates from unity in 0-5%, while  $v_3$  deviates in opposite direction. Could be related to nuclear structure difference between the two species.

# CME observables



$$\gamma_{112} = \langle \cos(\phi_\alpha + \phi_\beta - 2\Psi_2) \rangle$$

$$\Delta\gamma = \gamma_{112}^{\text{OS}} - \gamma_{112}^{\text{SS}}$$

$$\gamma_{123} = \langle \cos(\phi_\alpha + 2\phi_\beta - 3\Psi_3) \rangle$$

- ▶  $\gamma$ -correlator S. Voloshin, PRC70.057901(2004)
  - ▶ Well-studied charge sensitive correlator
  - ▶  $\Delta\gamma/v_2$  is commonly used to cancel  $v_2$ -driven background
- ▶ Derived measurements
  - ▶  $\gamma_{113}$ : wrt  $\Psi_3$  which is uncorrelated with B-field direction
  - ▶ two-particle correlator  $\delta$
  - ▶ pseudorapidity dependence
  - ▶ invariant mass
  - ▶ wrt spectator/participant planes

## ▶ R-correlator

- ▶ Alternative measure for charge separation N.N. Ajitnand et al., PRC83.011901(2011)  
N. Magdy et al., PRC97.061901(2018)
- ▶ Similar to  $\Delta\gamma$  in sensitivity to CME based on AVFD model study  
S. Choudhury et al., arXiv:2105.06044