

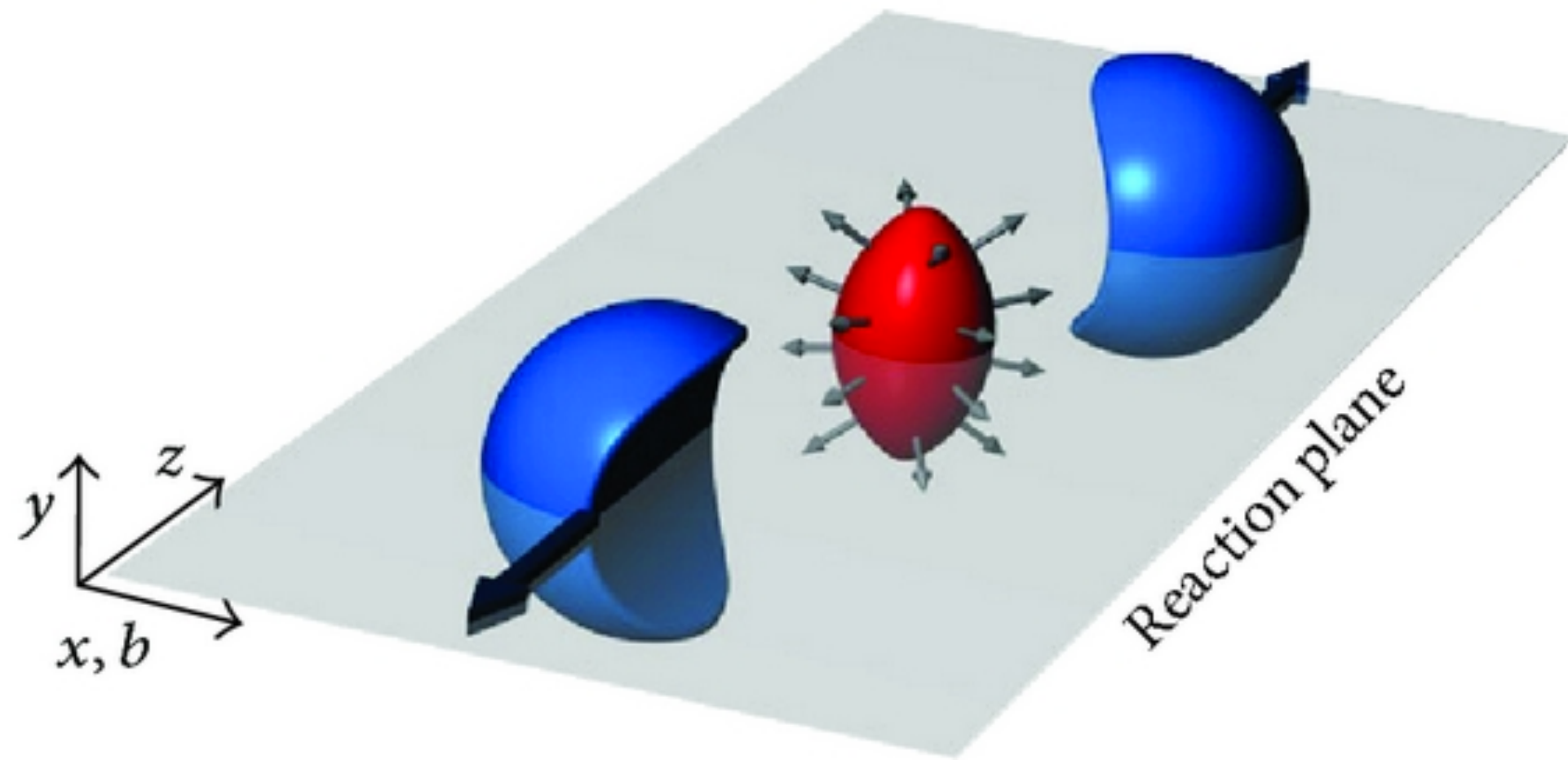
独断と偏見で選んだ、最近の

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）



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

ϕ : 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 $\epsilon_n \propto v_n$ 。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)

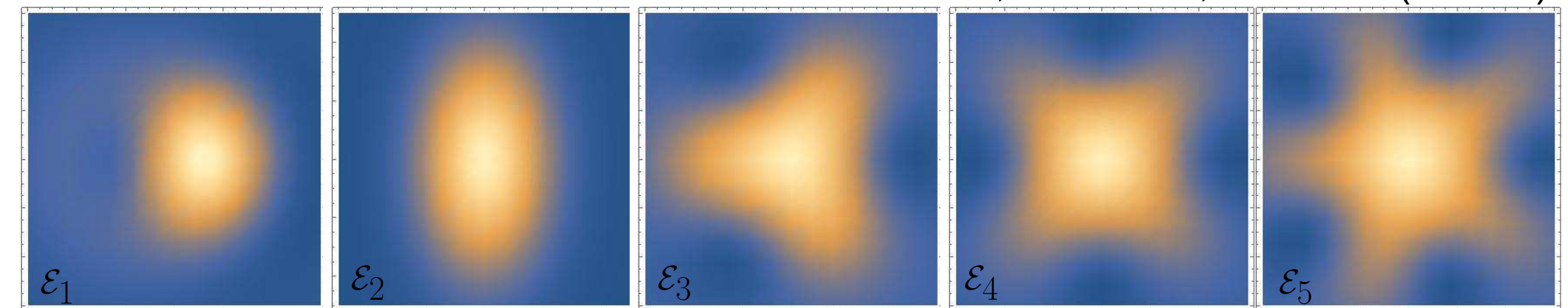
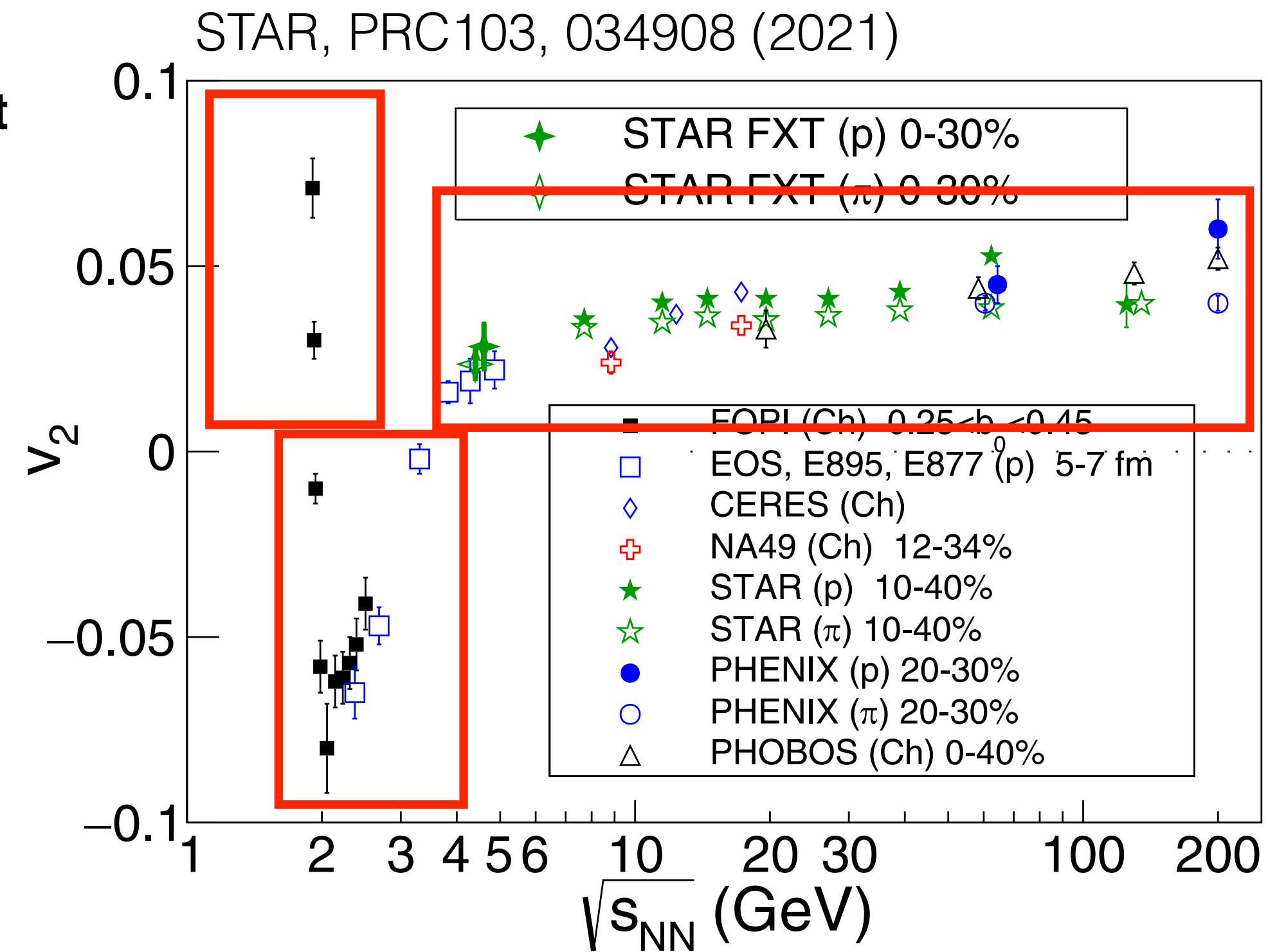
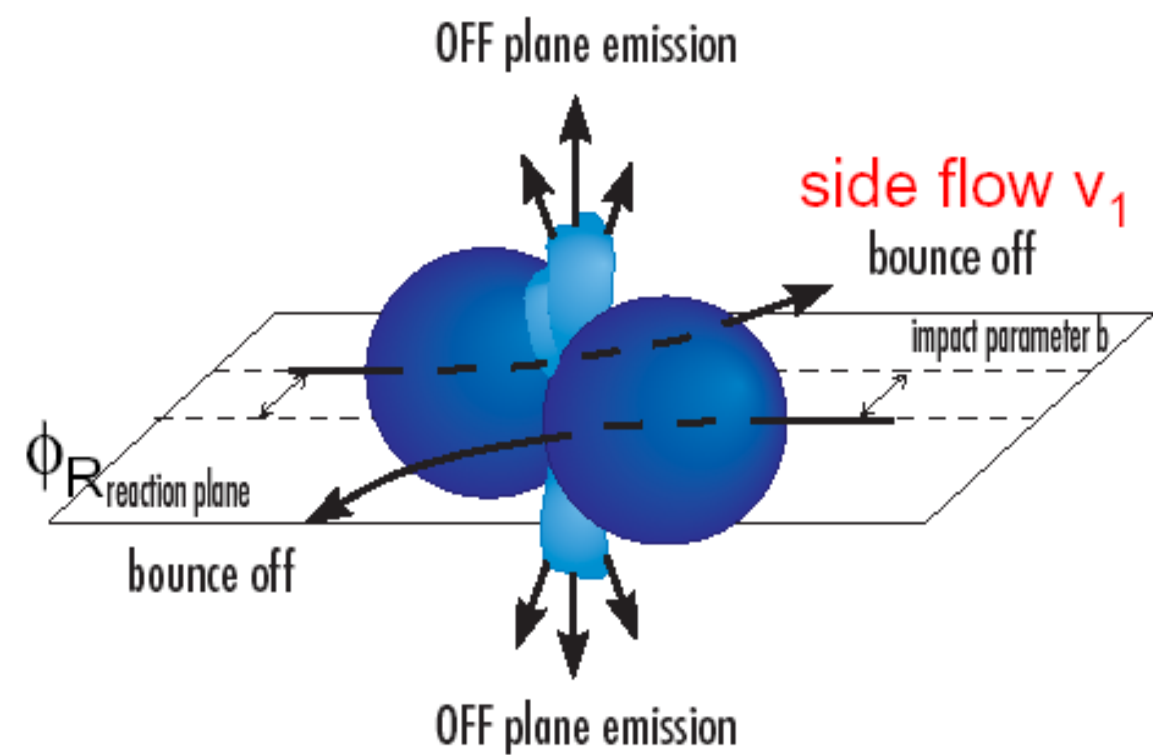


Fig. 2. Characteristic shapes of the deformed initial state density profile, corresponding to anisotropies of $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ and ϵ_5 (from left to right).

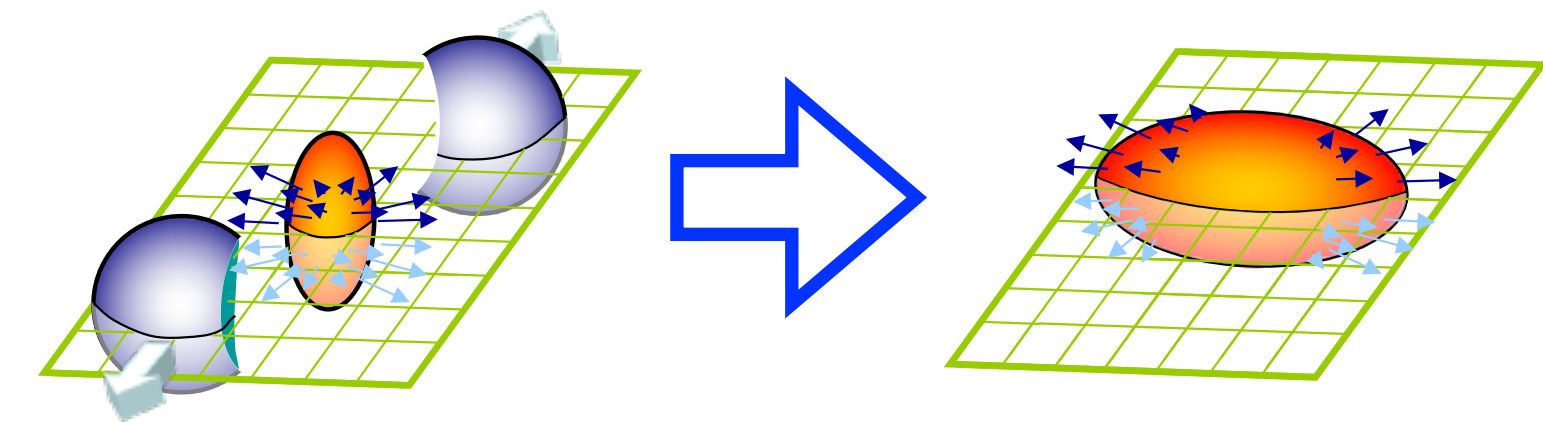
楕円型フロー vs. 衝突エネルギー

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

“squeeze-out” emission ($v_2 < 0$)

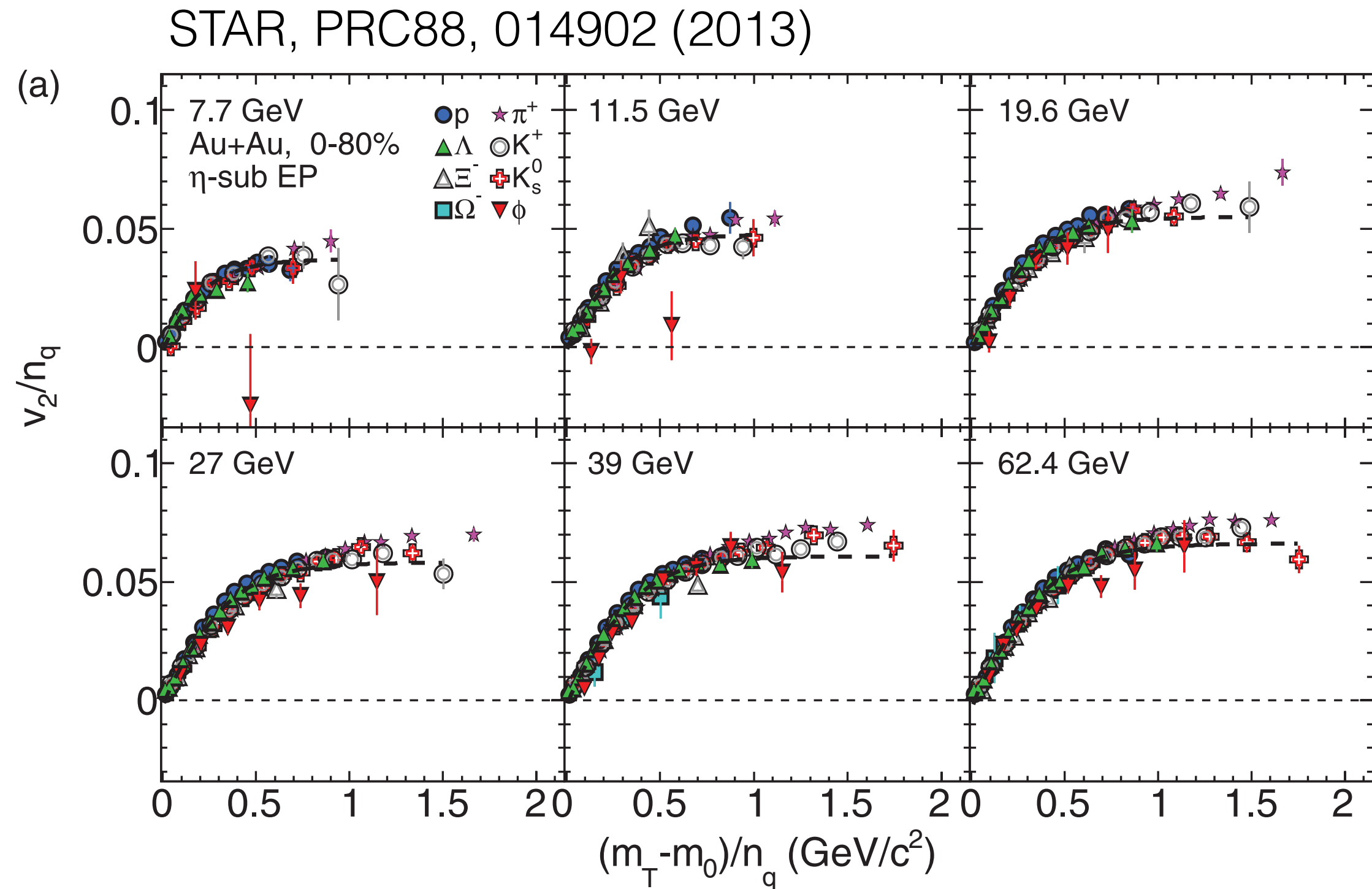


pressure-gradient-driven expansion
($v_2 > 0$ at $\sqrt{s_{NN}} > 4$ GeV)

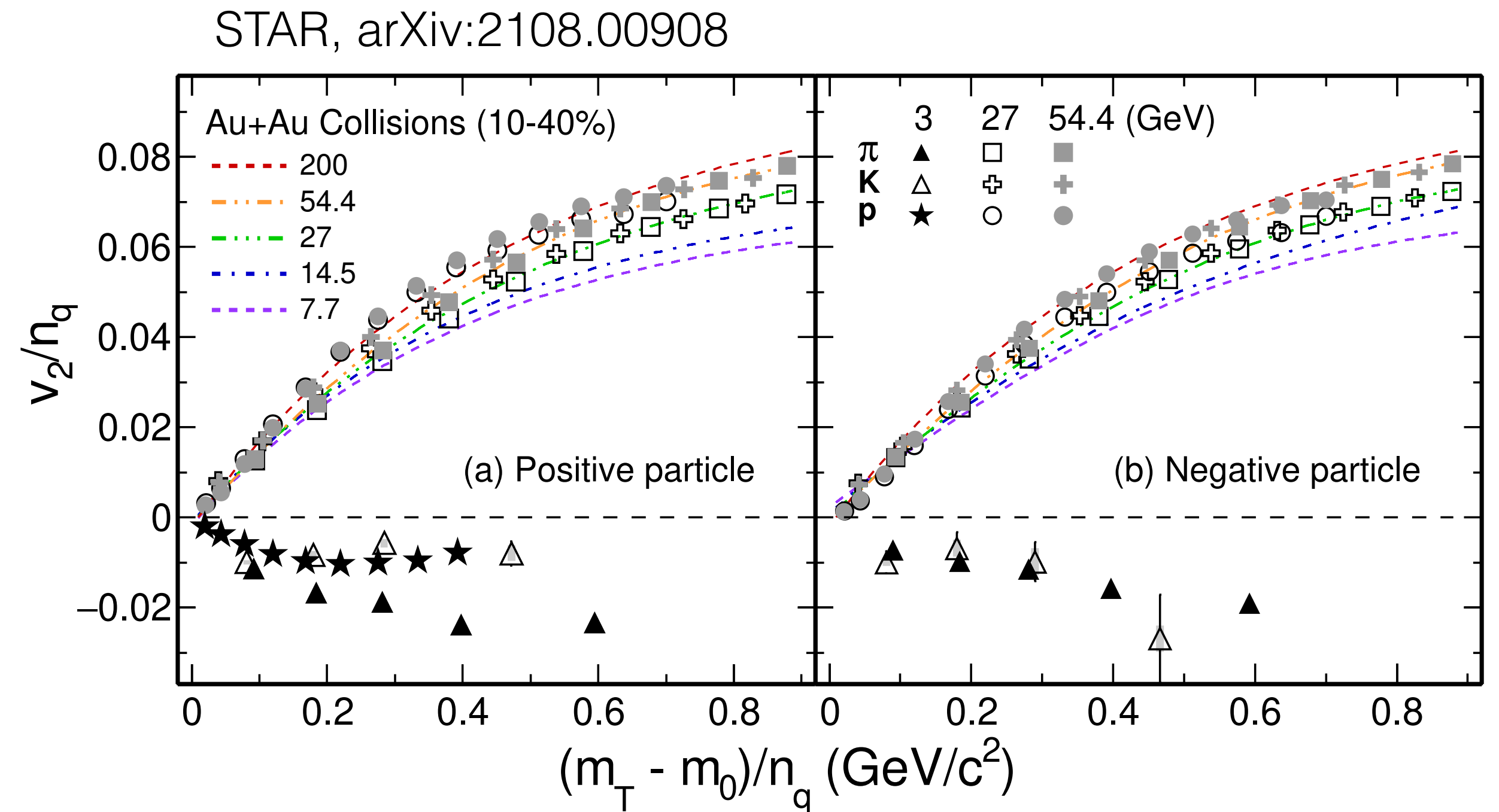


楕円型フロー v_2 の符号は、エネルギーを変えていくと、2回変わる。

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



NCQスケール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。



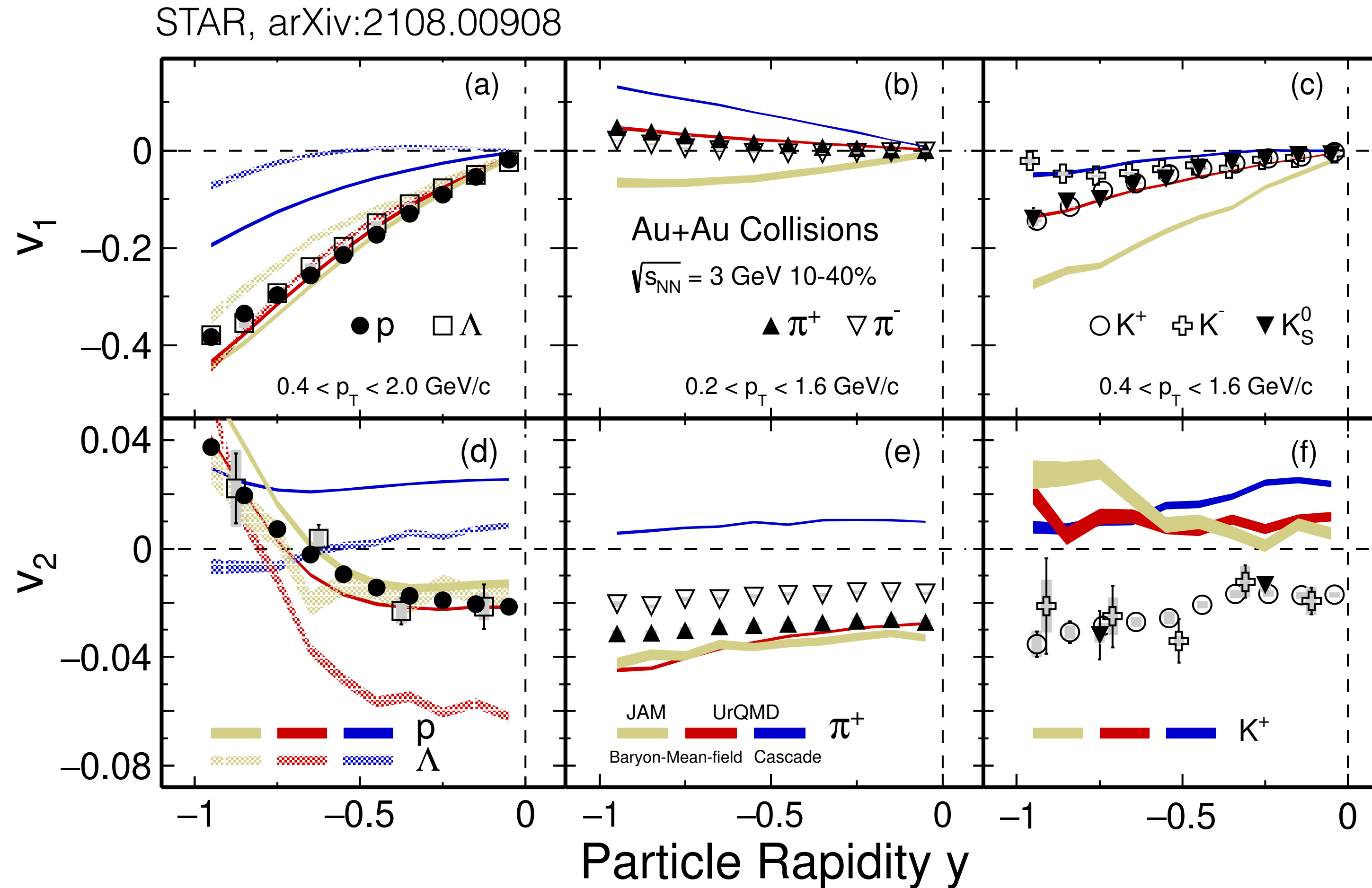
3 GeVでは、“粒子”のNCQスケールリングが成り立たない。
パートンではなく、バリオンが支配的。

π^+ : Δ resonance

K^+ : associated production of Λ

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)

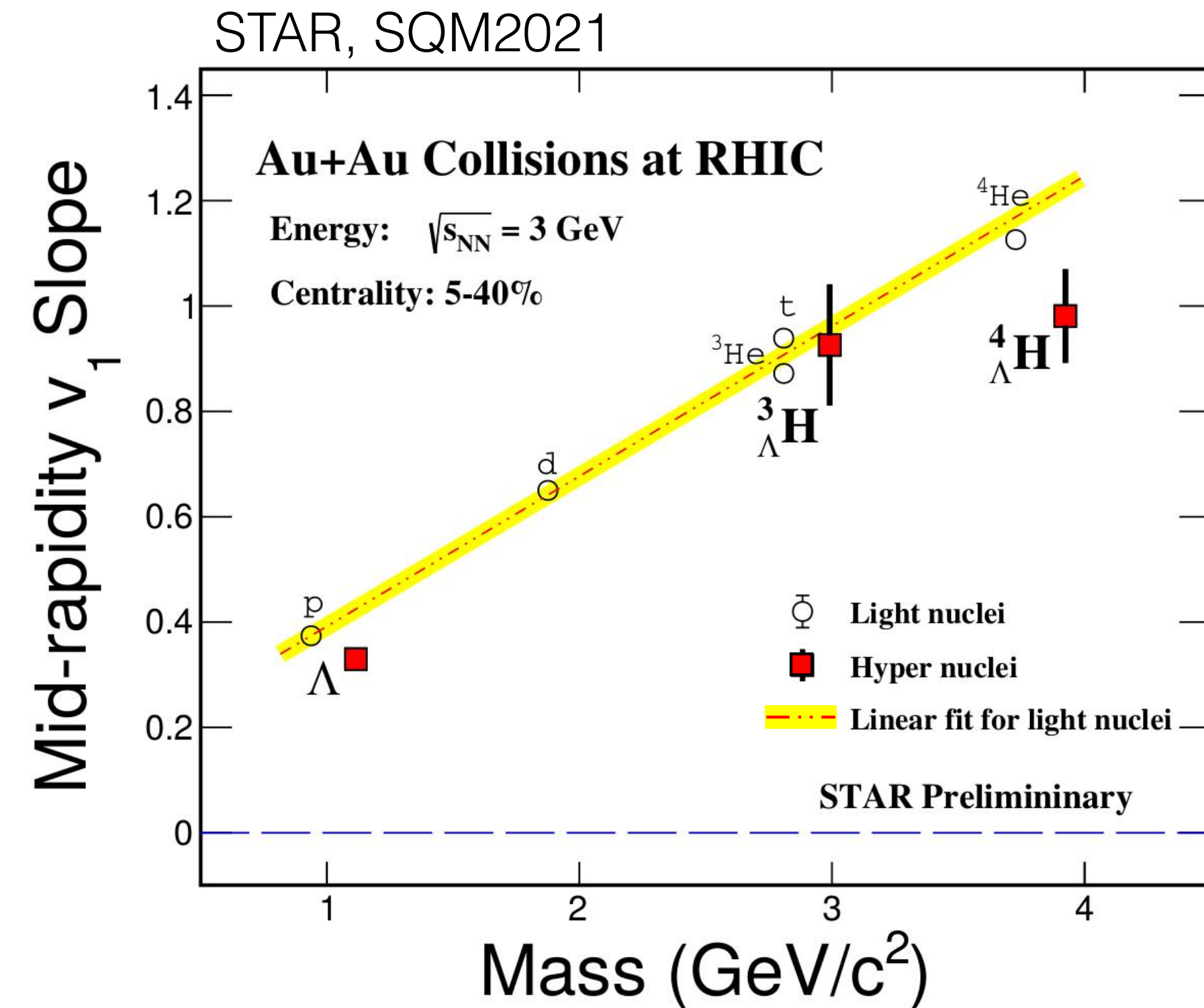
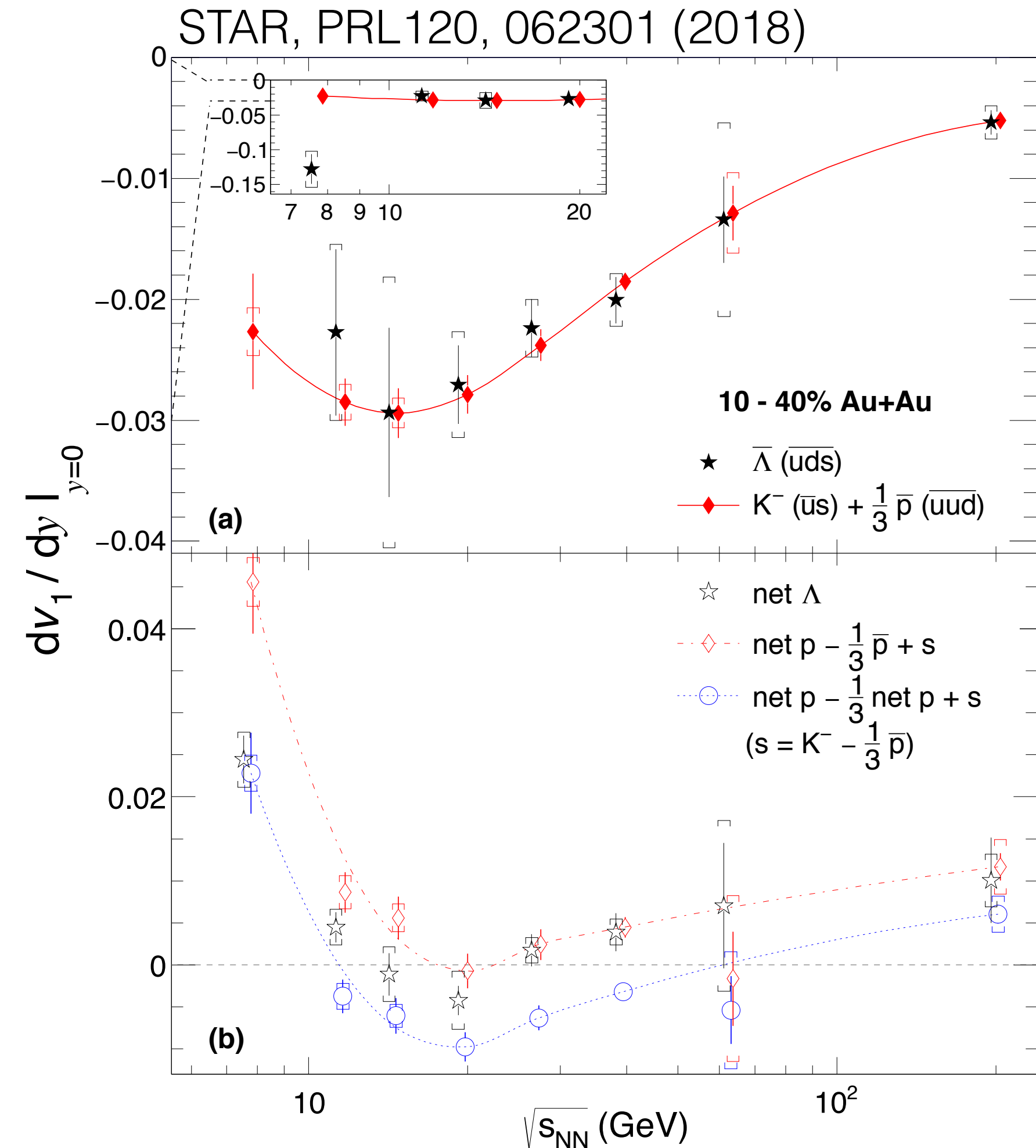
Baryonic mean-fieldを取り入れたモデル計算 (JAM、UrQMD) は、定性的に実験データを再現。

ただし、 $K^+ v_2$ (πv_1 や Λv_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。

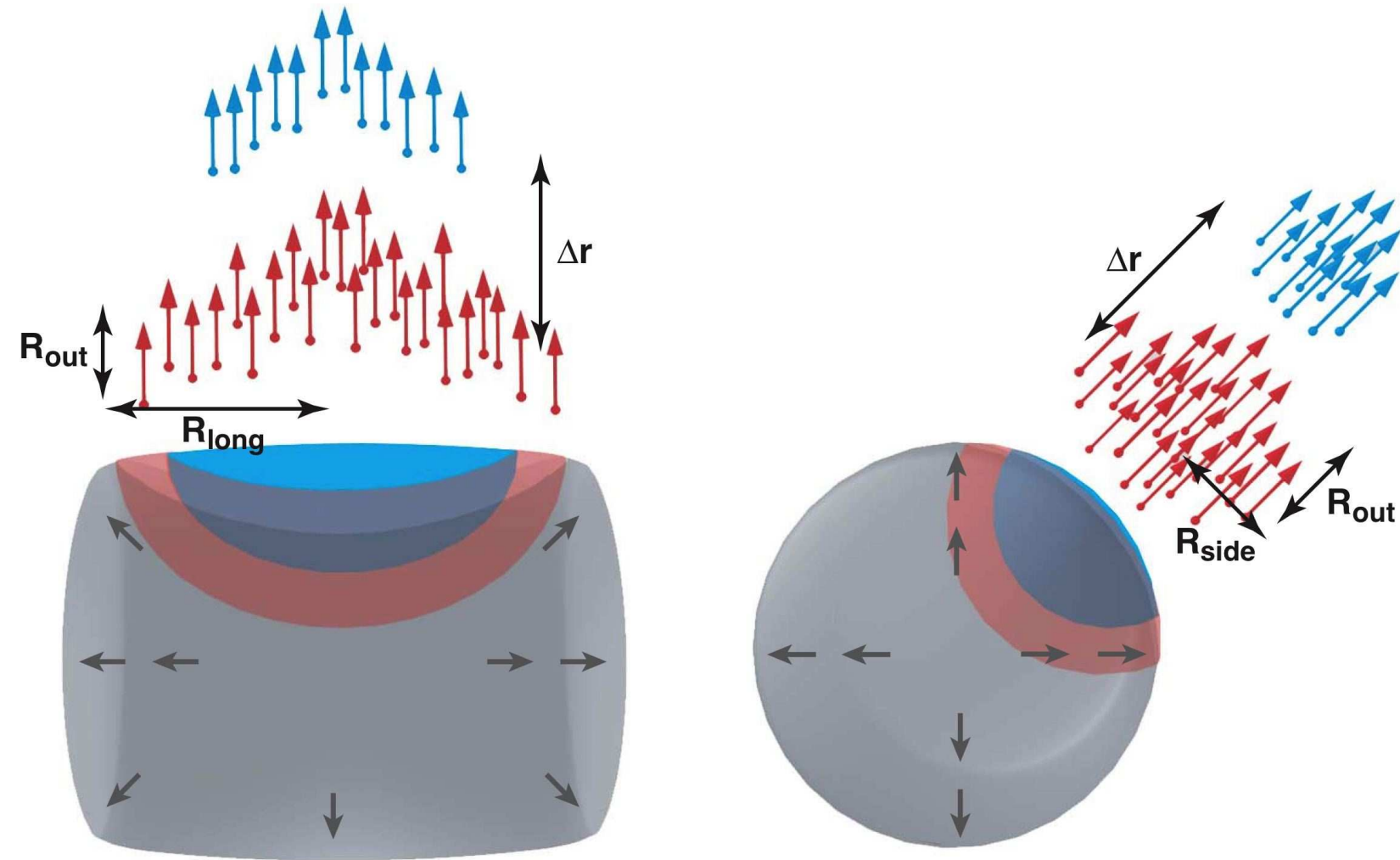
最近は、"even"成分、初期の"tilt"、電磁場の効果、coalescenceの研究がされている。



- ▶ "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。

Femtoscscopy

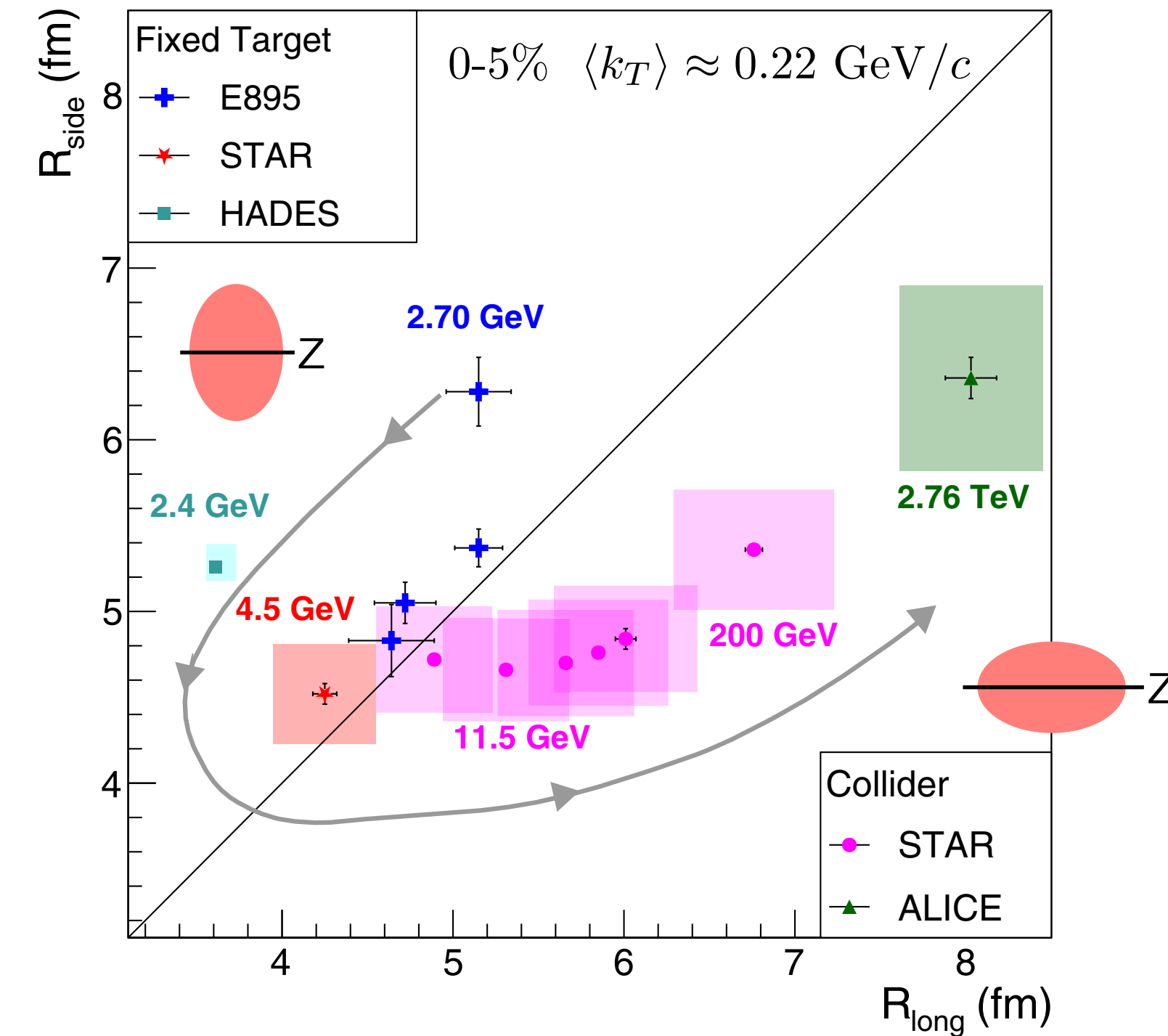
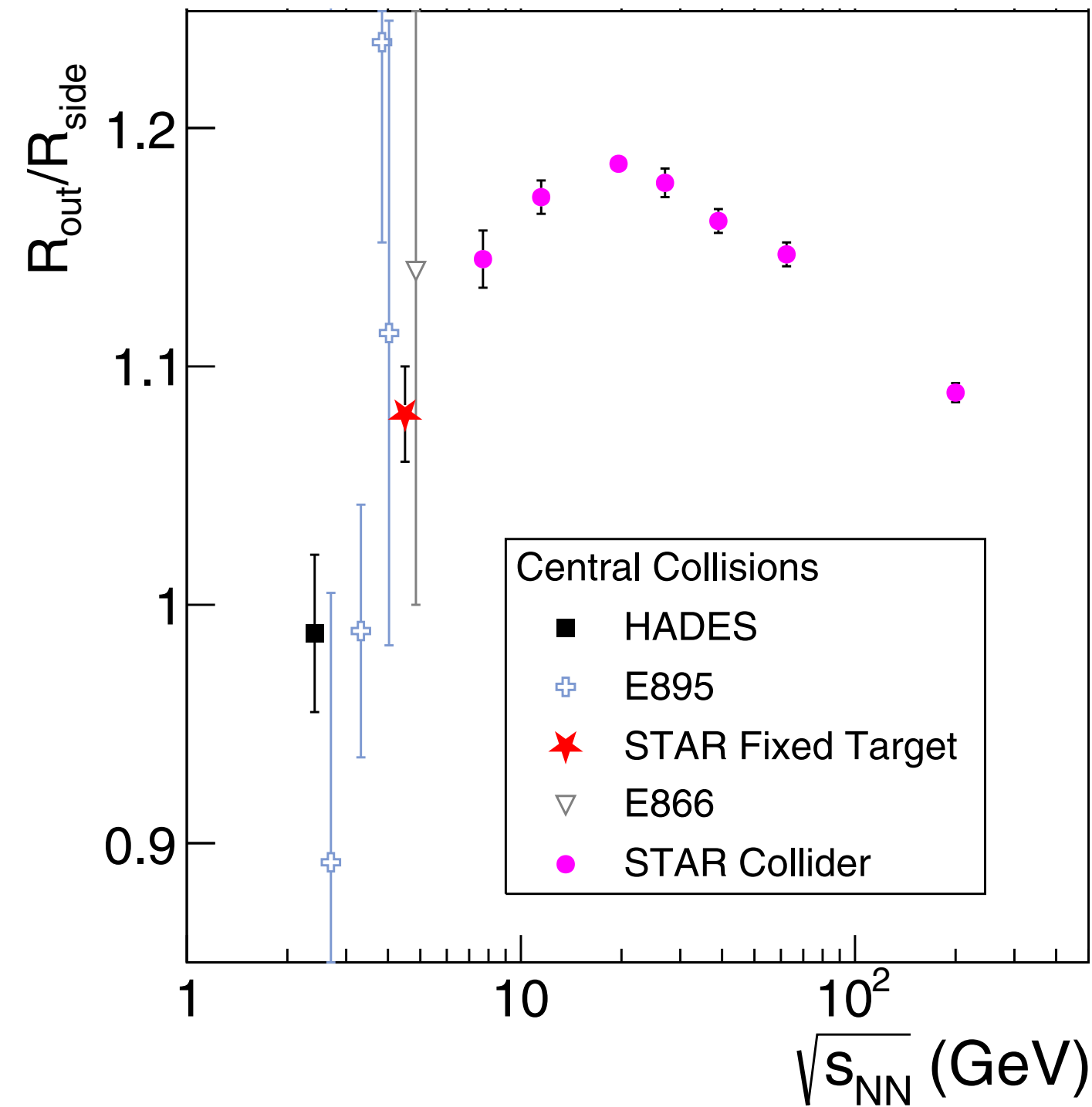
STAR, PRC103, 034908 (2021)



R_{long} : ビーム軸方向のHBT半径

R_{out} : ペア横運動量方向のHBT半径+粒子放出時間

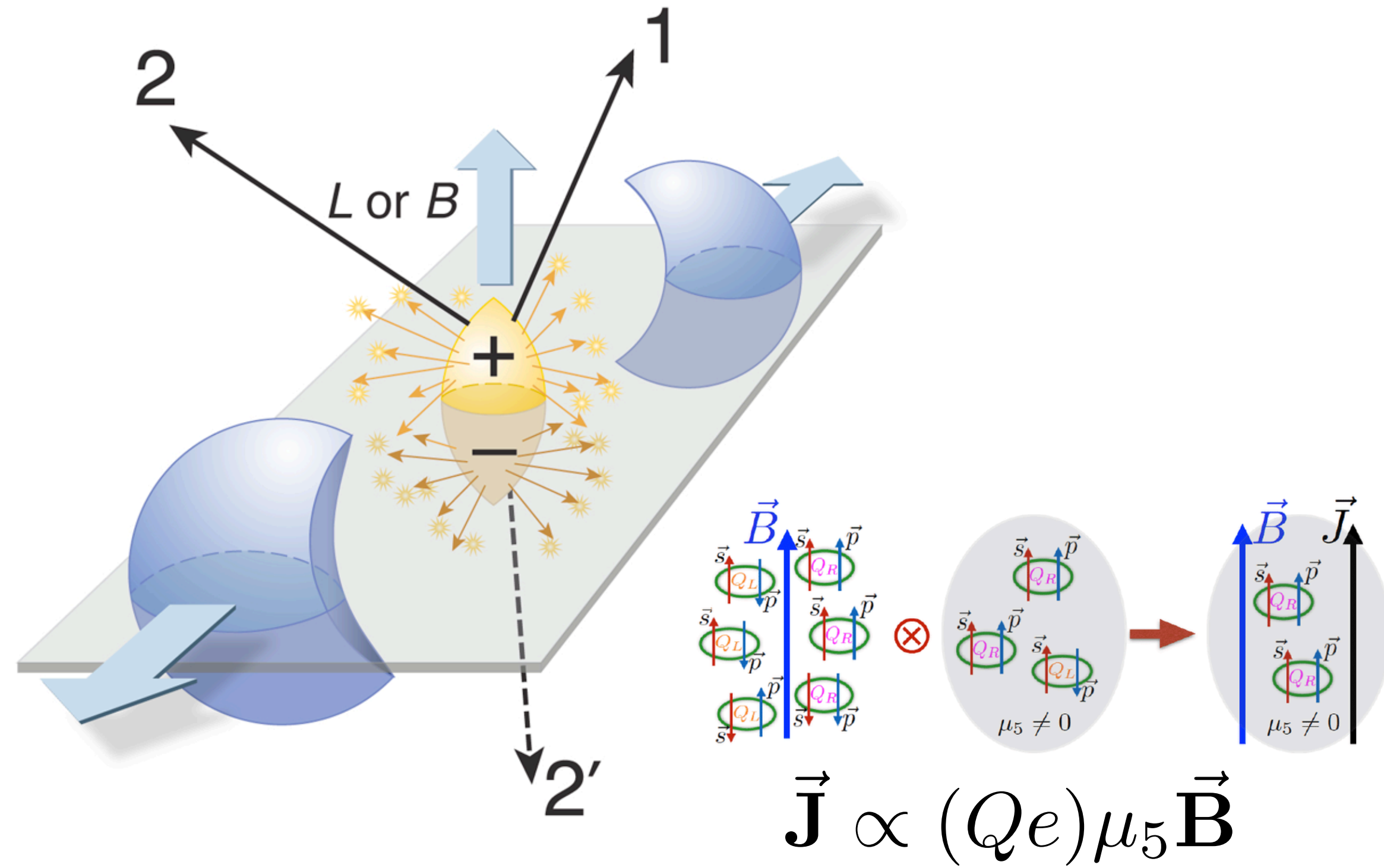
R_{side} : R_{long} と R_{out} に直行する方向の半径



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

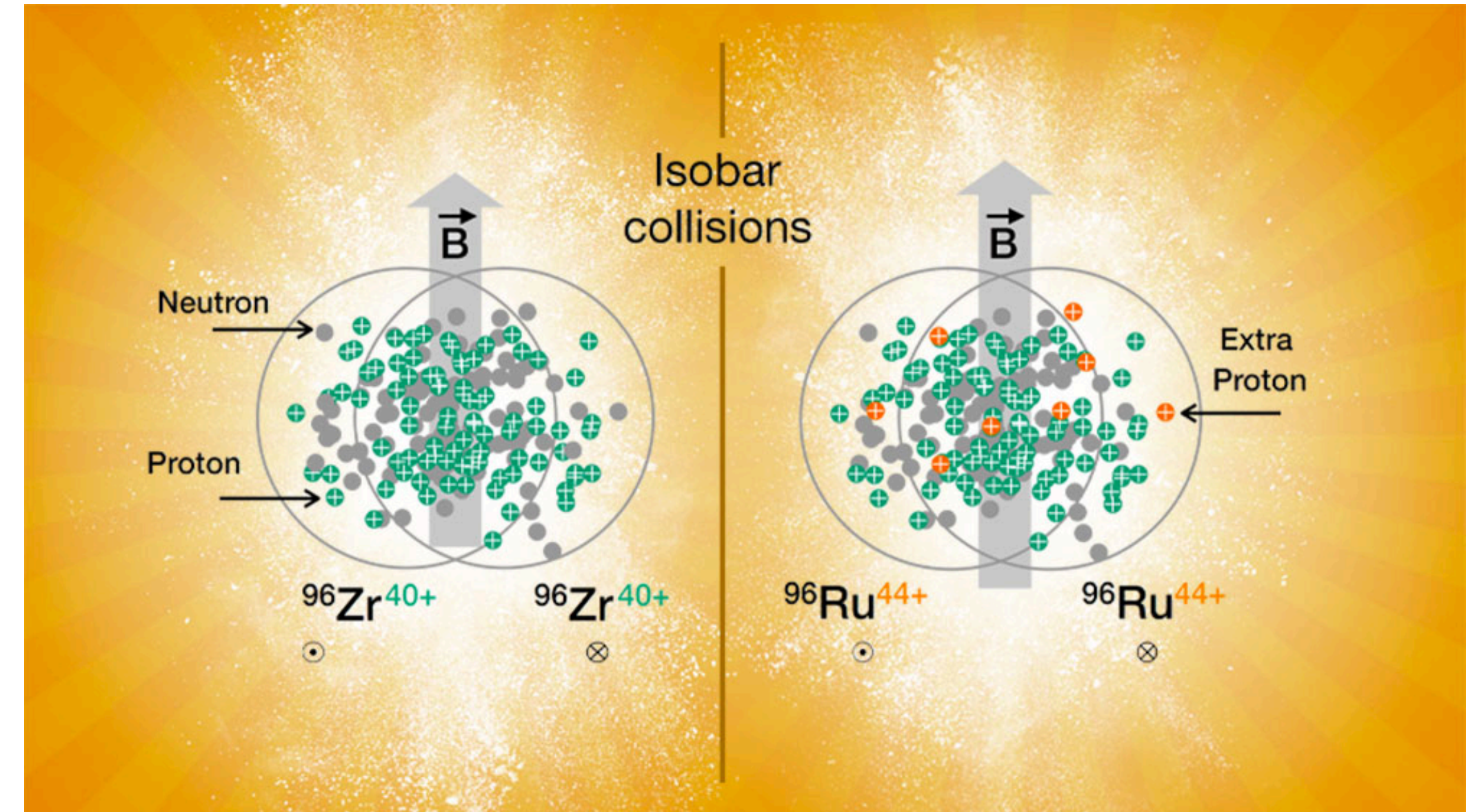
▶ 4.5 GeVは (π 中間子の) 放出領域が“oblate”から“prolate”シェイプへ変化する中間点。

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)

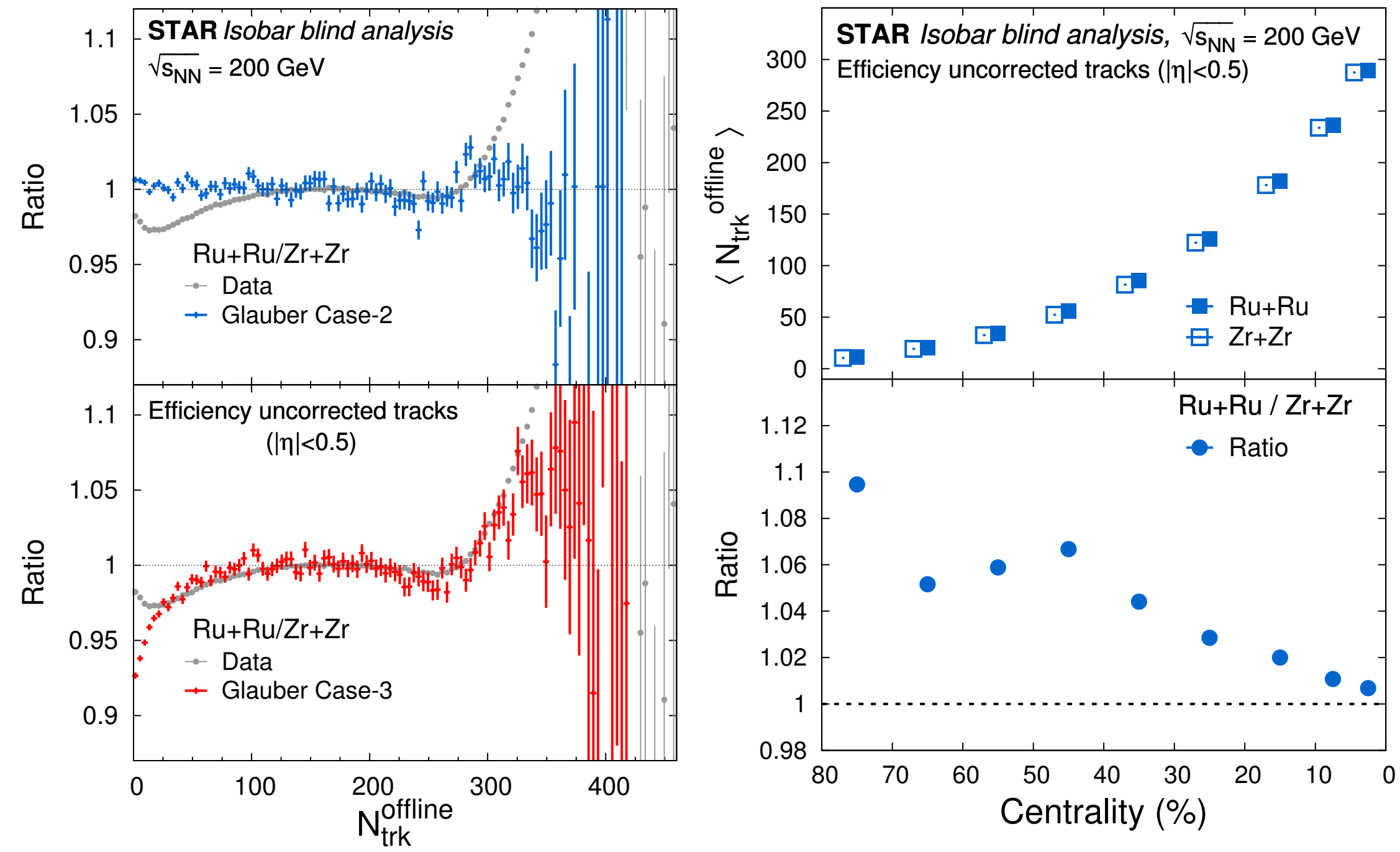


▶ 同重体衝突 Ru+Ru vs. Zr+Zr

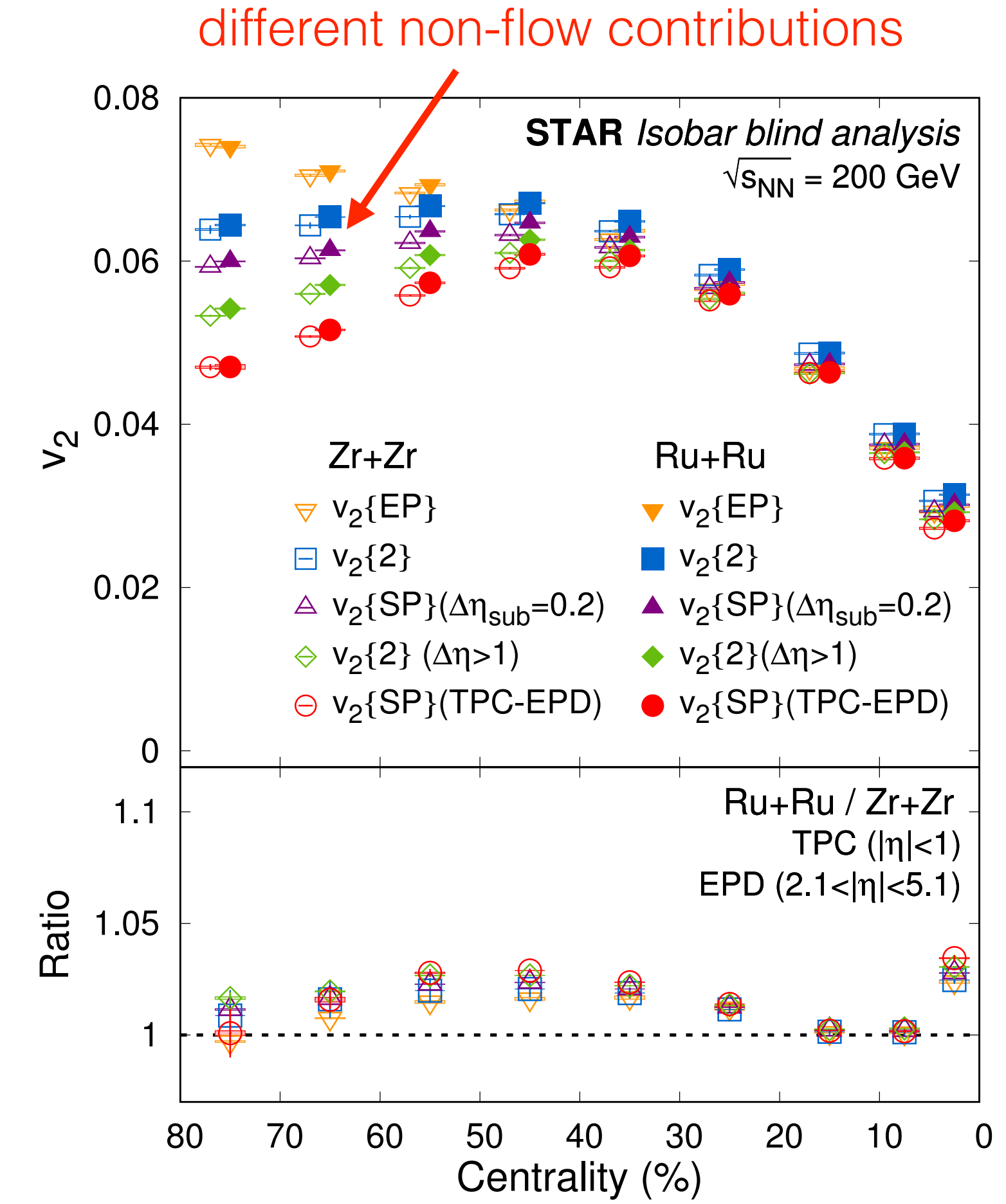
- ▶ 同じ質量数、異なる電荷 (陽子数)
- ▶ Ru+Ruの方が、10-18% 初期磁場が大きい
- ▶ ほぼ同じ大きさなので、v2などによるBGが同じで、CMEシグナルだけ異なる

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)	β_2	R (fm)	a (fm)	β_2	R (fm)	a (fm)	β_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

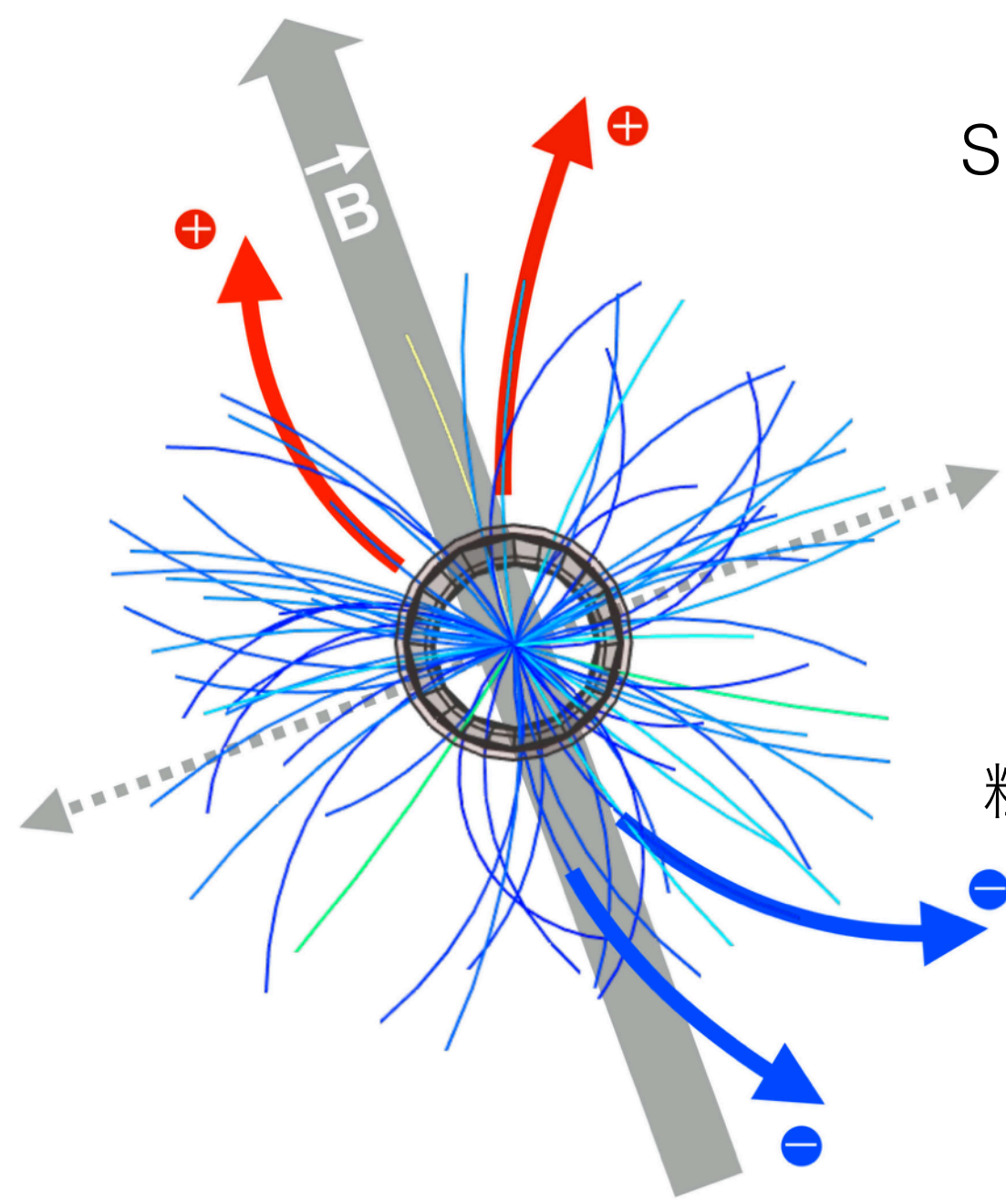


同じ中心衝突度で~4%程度の粒子多重度の違い。



v_2 (BG) は~3%程度の違い。

γ -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 ± 90 度方向に放出すると

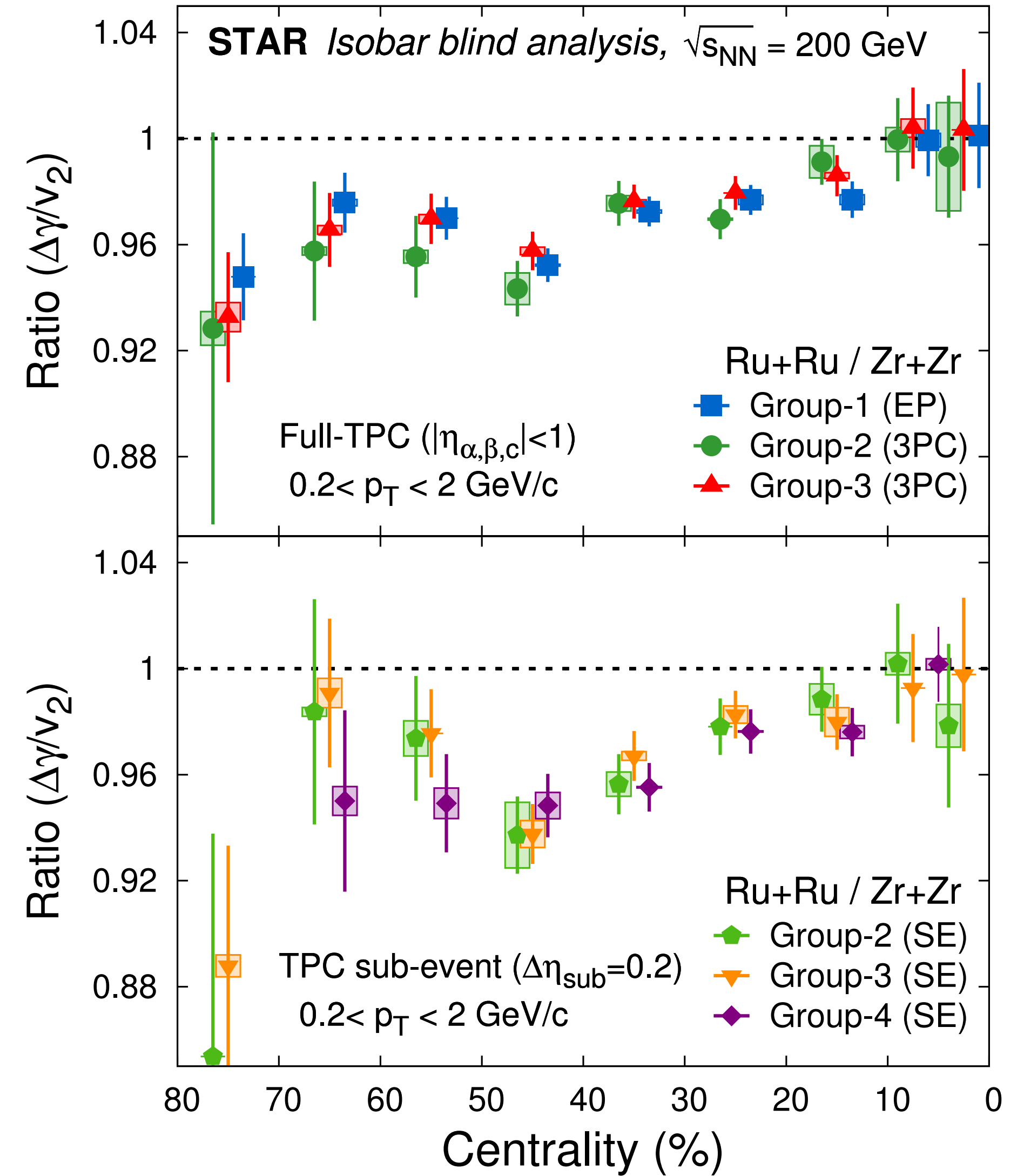
$$\gamma^{OS} = \langle \cos(90 - 90 + 0) \rangle = +1$$

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

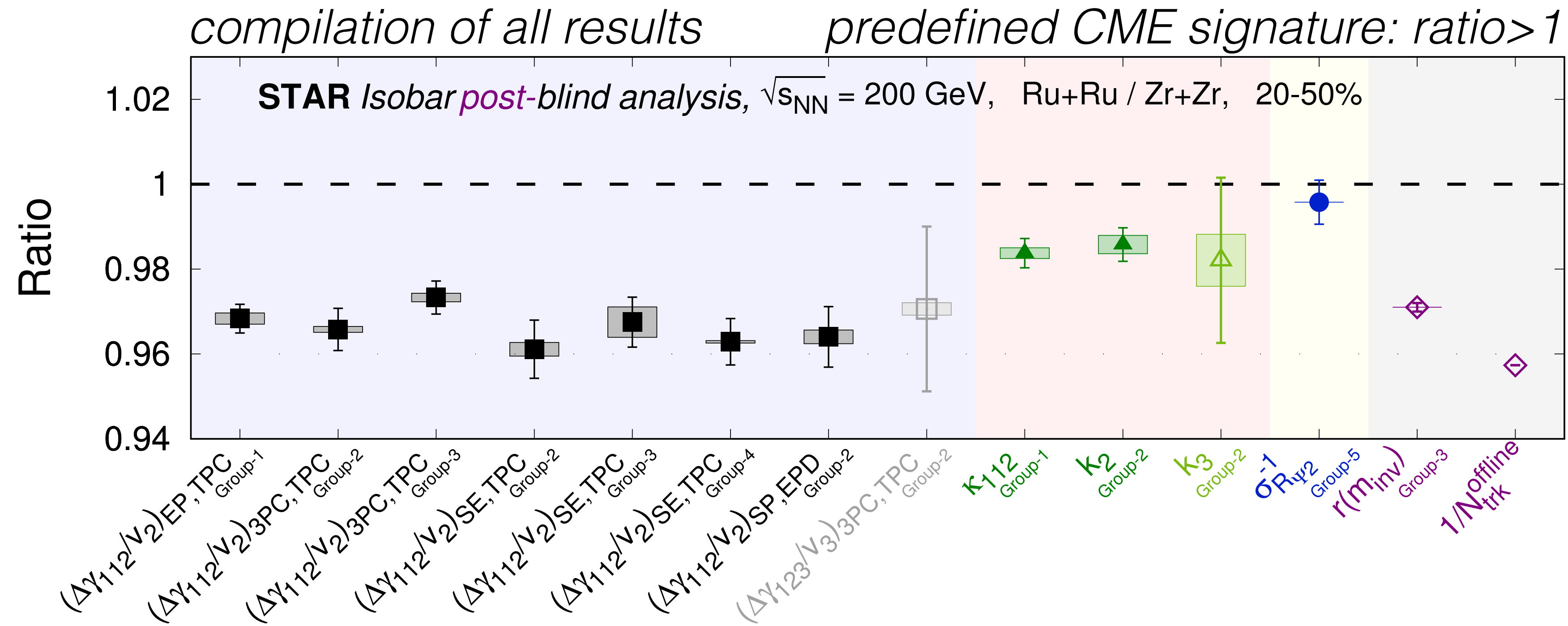
Predefined CME signature: $\frac{(\Delta\gamma/v_2)^{Ru+Ru}}{(\Delta\gamma/v_2)^{Zr+Zr}} > 1$

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。

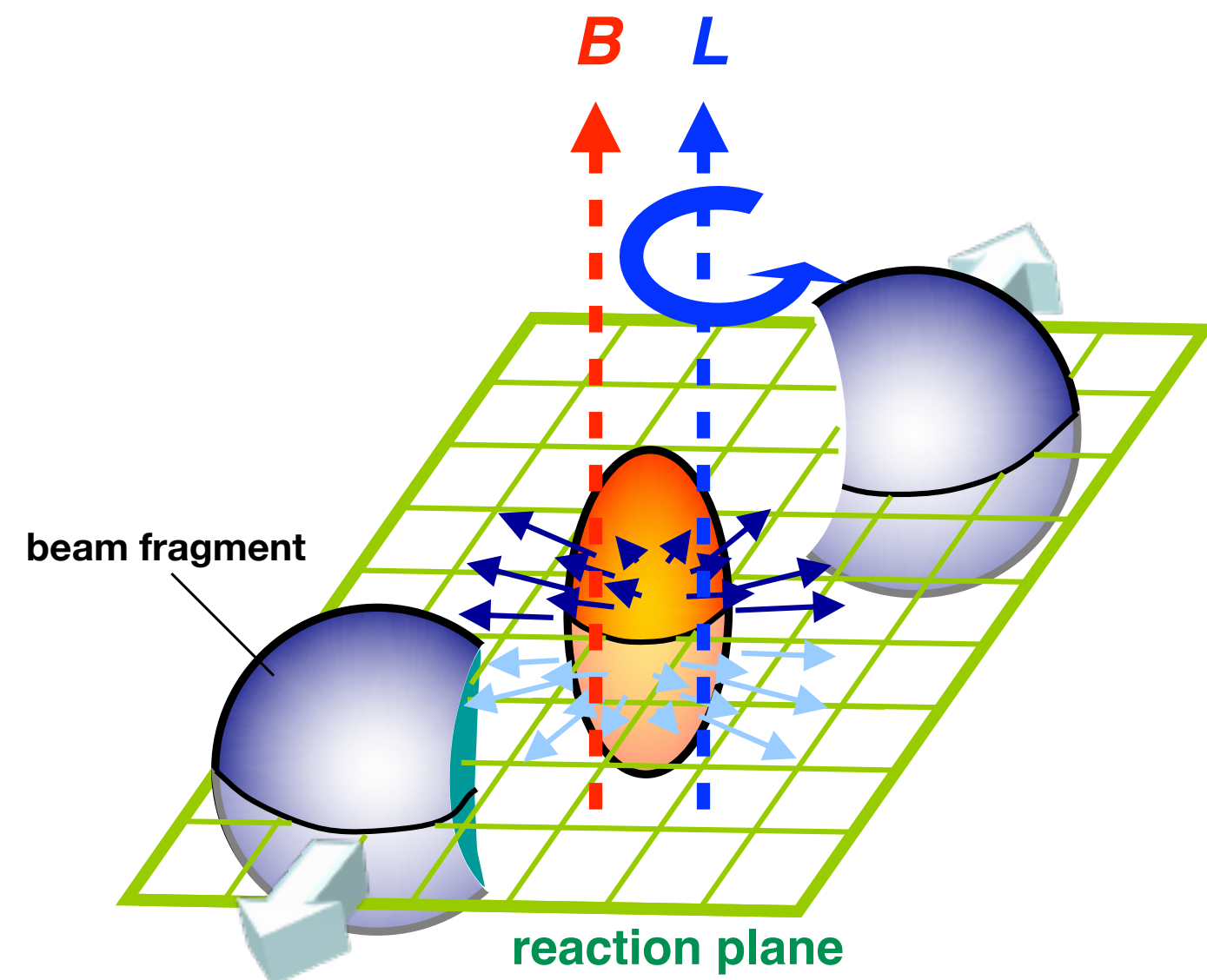


Isobar CMEのサマリープロット



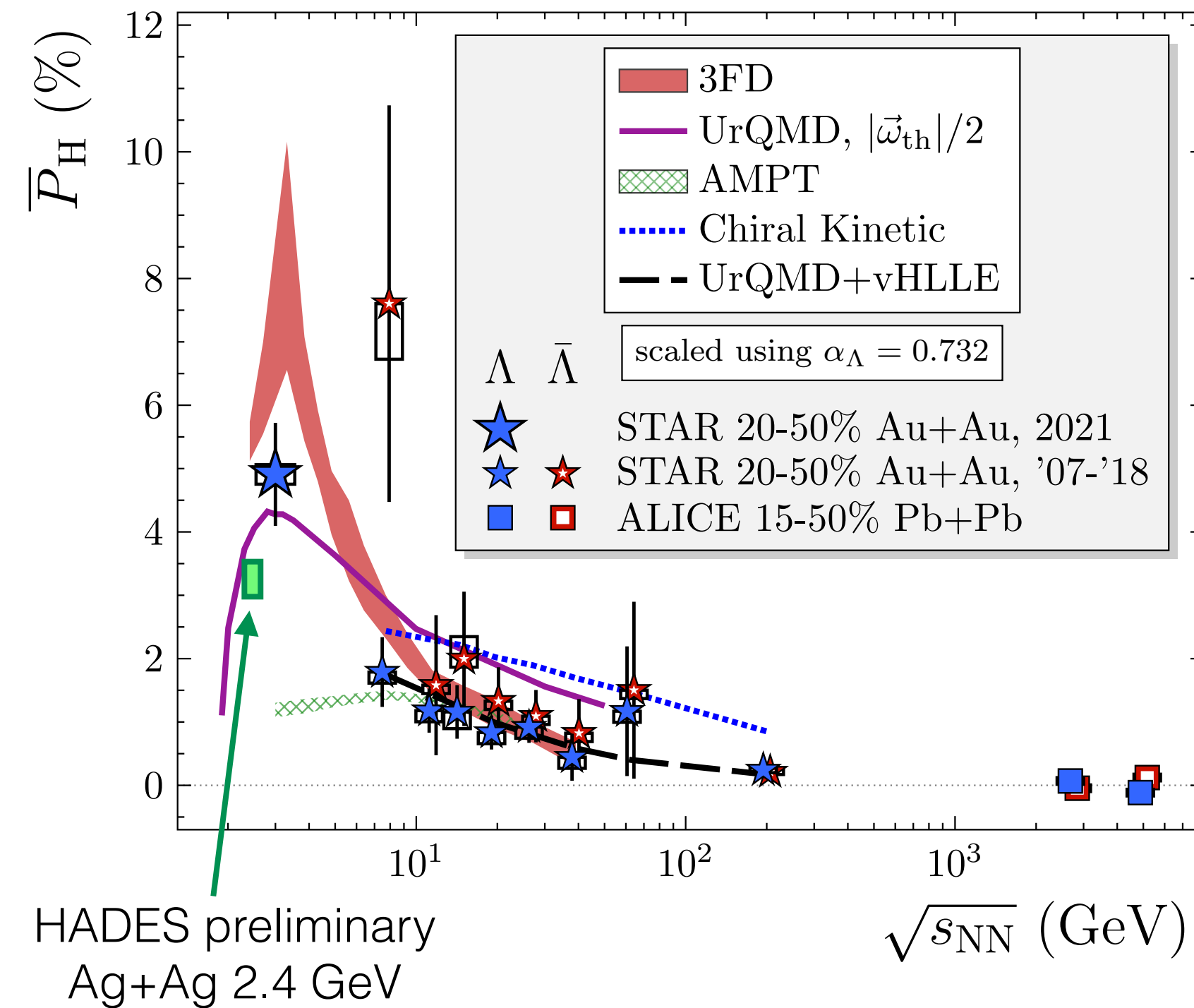
- ▶ STARは5グループによるブラインド解析により、アイソバーにおけるCME探索を行ったが、“事前定義”したCMEシグナルは見えなかった。
- ▶ 粒子多重度の微妙な違いによって、ベースラインの変化（Ratioが1以下）が見られるので、その理解に向けて現在調査中。

ハイペロンのグローバル偏極

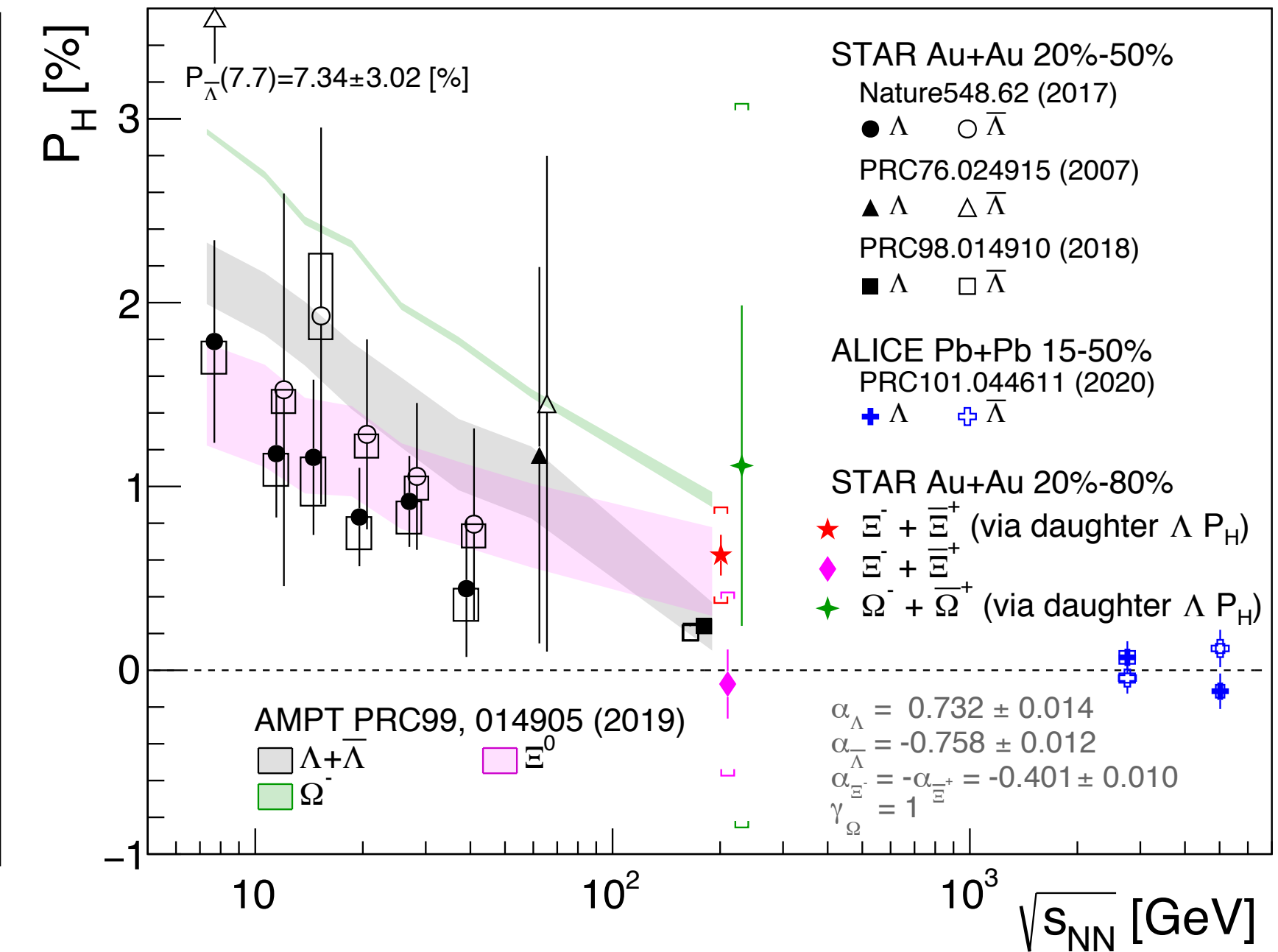


初期の軌道角運動量L
 →L方向にスピンの偏極
 "グローバル"偏極と呼ぶ。

STAR, arXiv:2108.00044

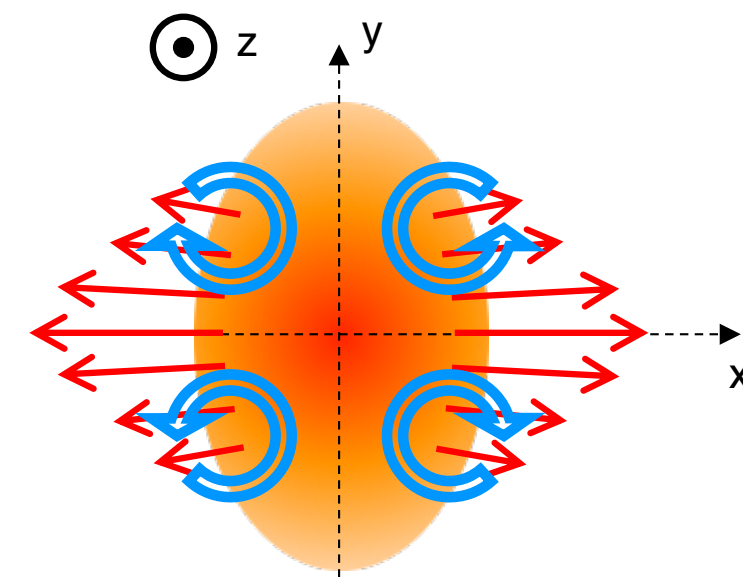


STAR, PRL126, 162301 (2021)

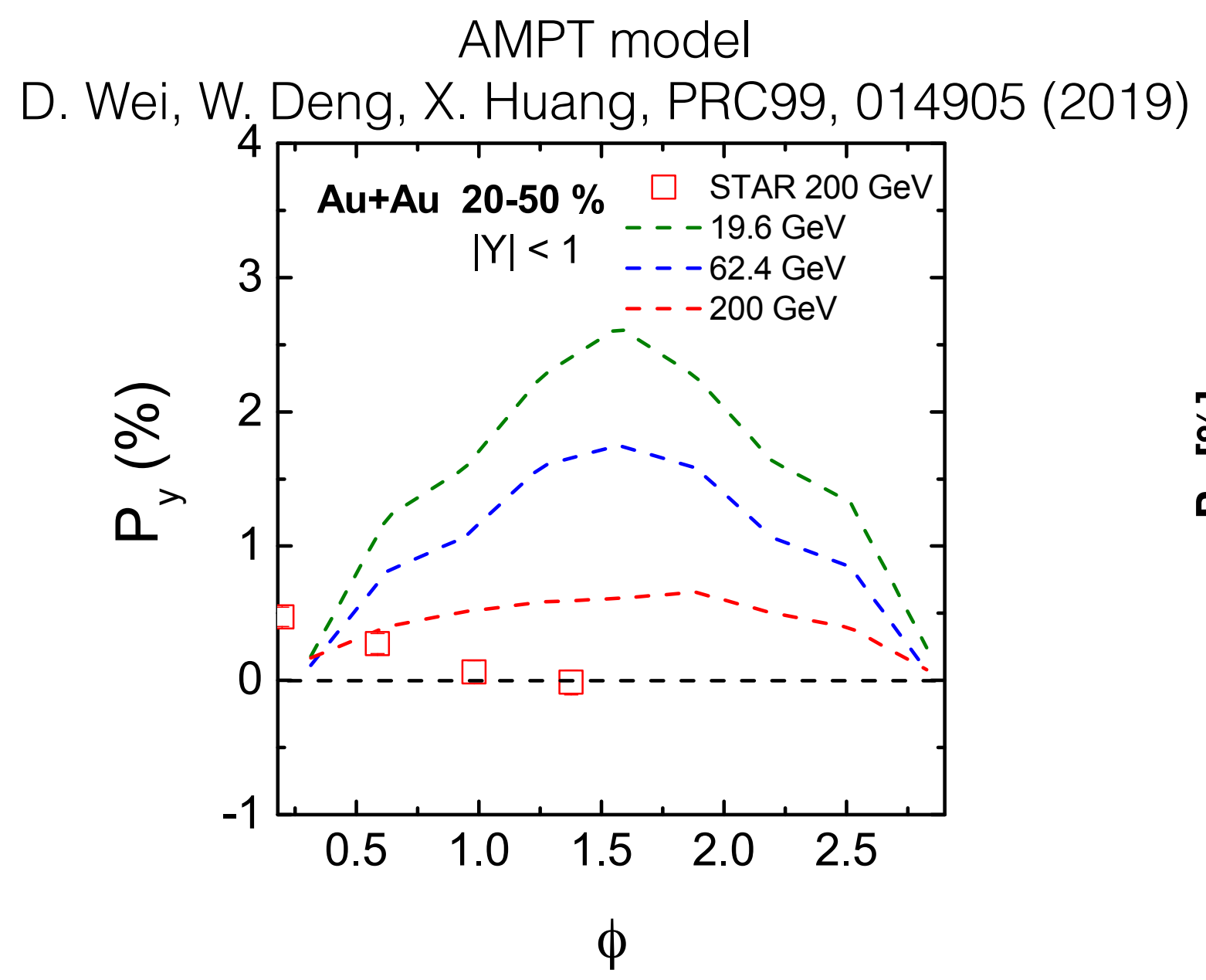


グローバル偏極は理論予測通り、3 GeV付近で最大値をとりそう。
 Xi(spin-1/2)やOmega(spin-3/2)の偏極測定が出始めている。
 今の所、(初期磁場による) 粒子・反粒子に違いはない。

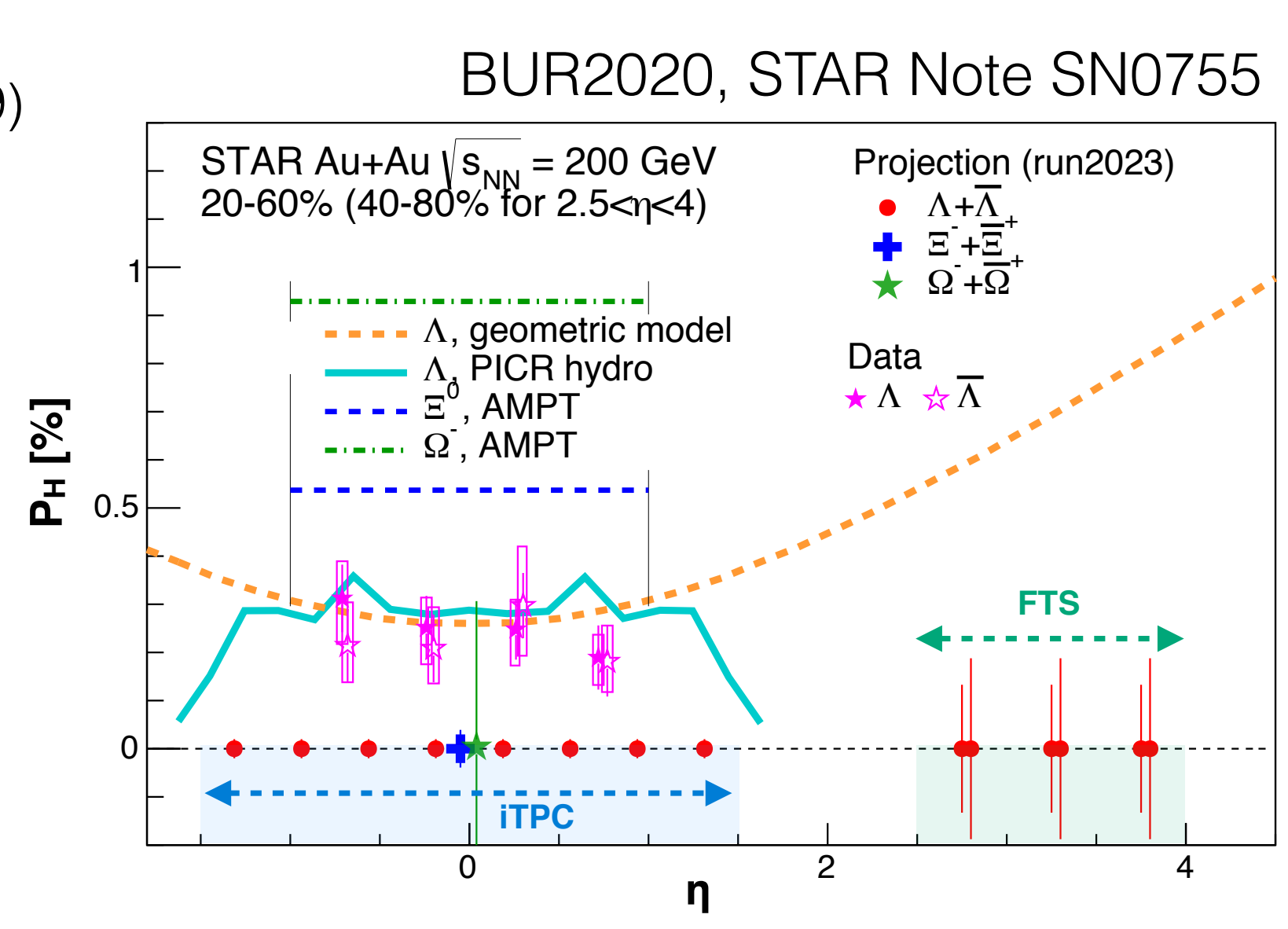
偏極測定における課題



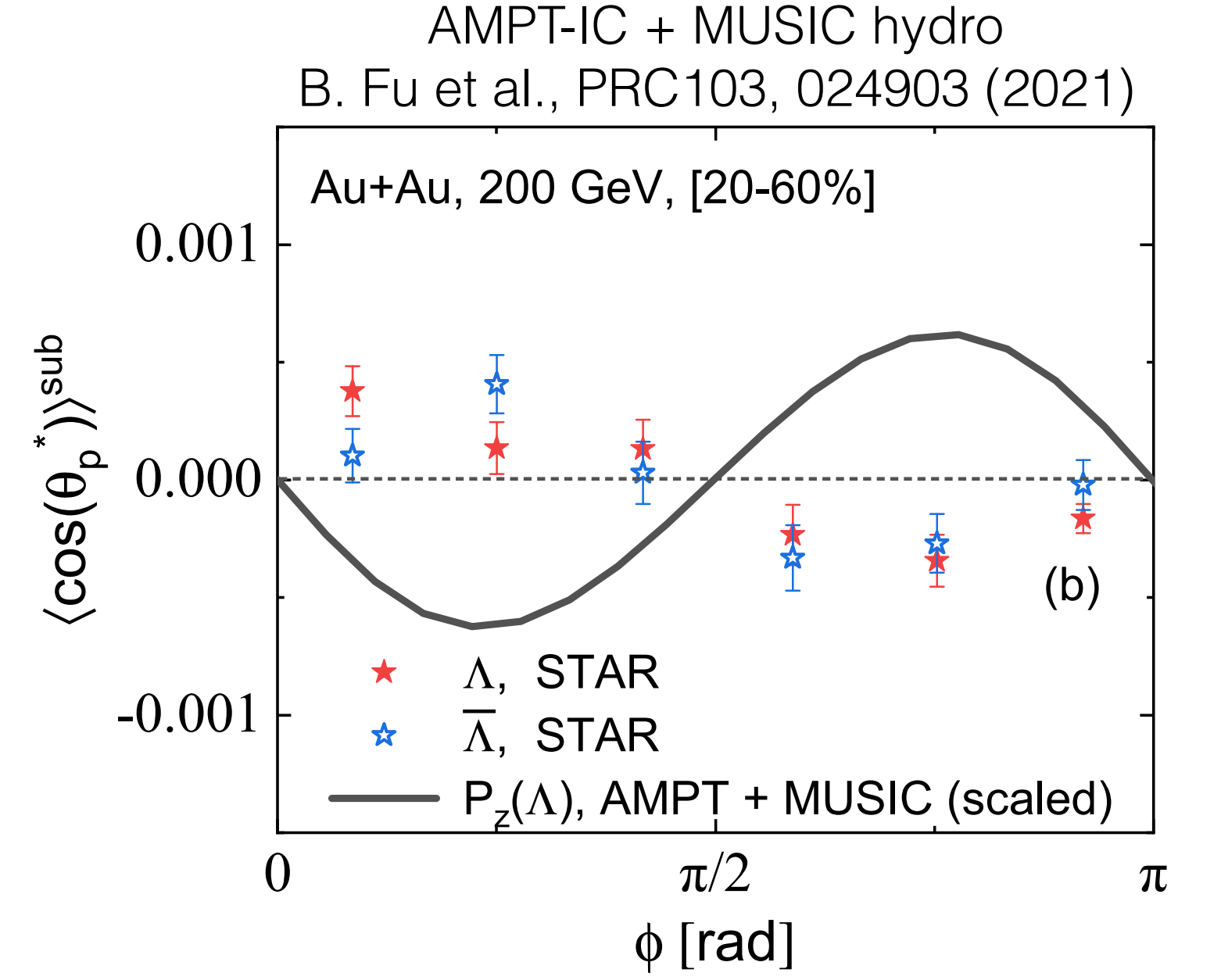
方位角依存性



ラピディティ依存性

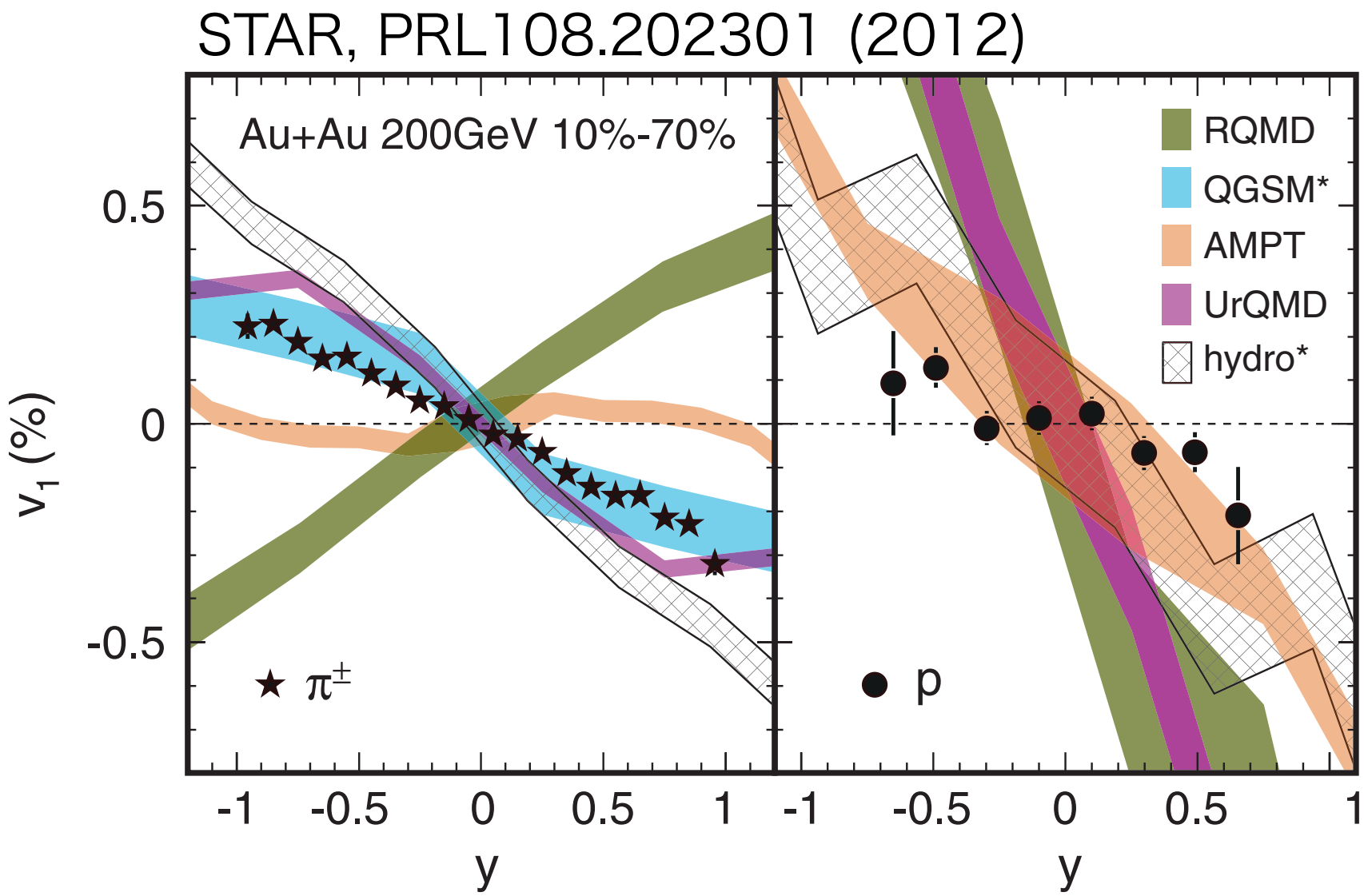


ビーム軸方向の局所渦



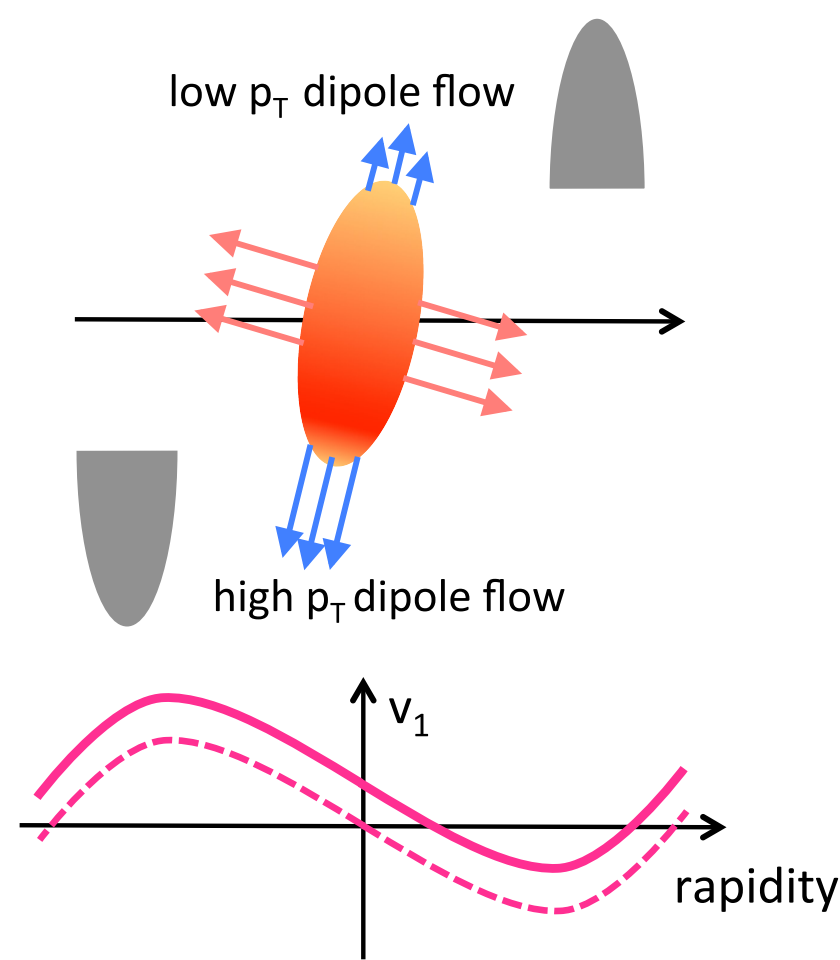
differentialな測定を見ると、多くのモデルが実験データを再現できていない。
局所渦に関しては、BWモデルは定量的に再現している。今も議論が続いている。

渦と v_1



STAR, PRC98, 014915 (2018)

(b) tilted source
 + asymmetric density gradient

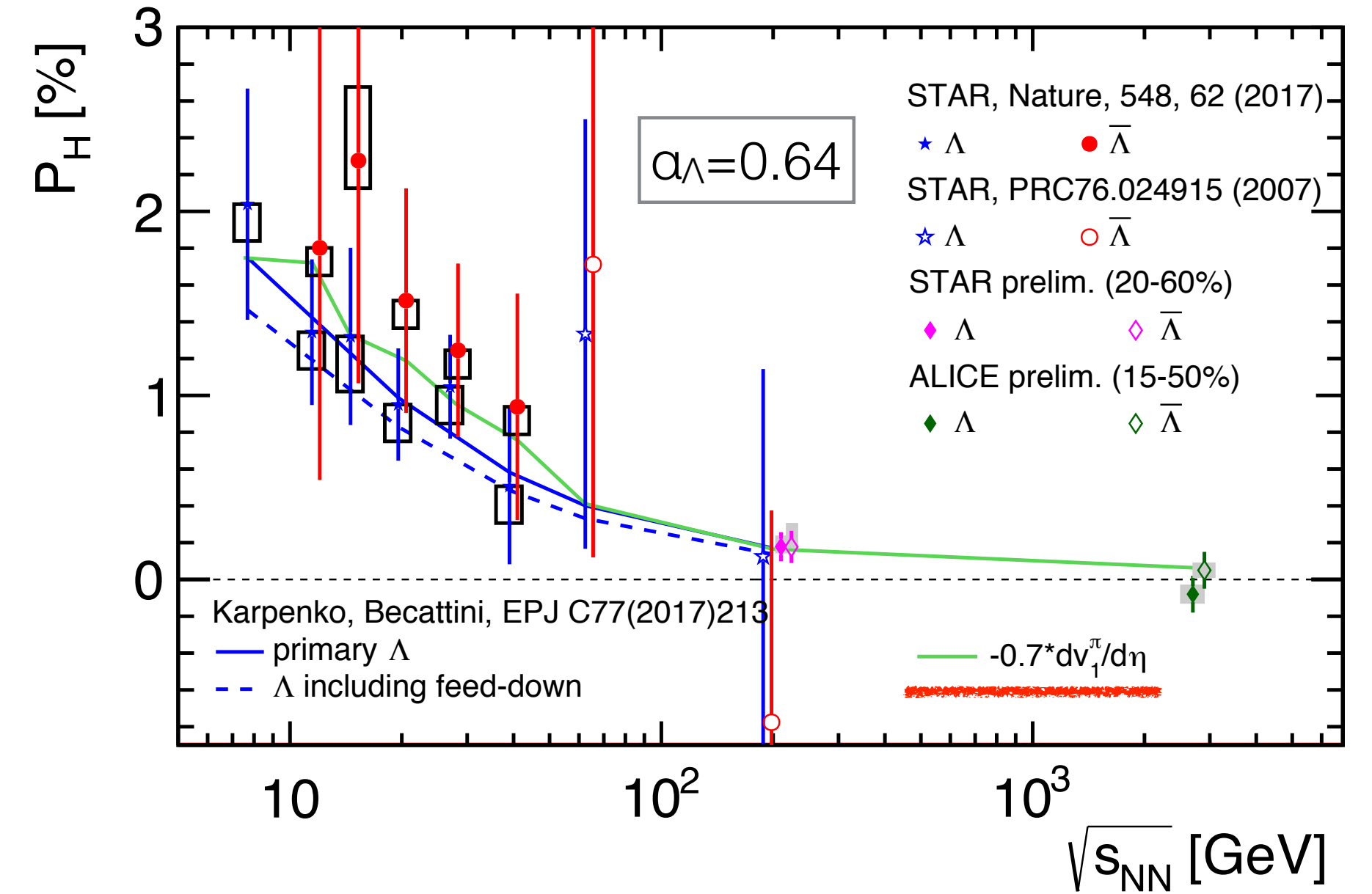


v_1 の起源：初期の傾きと非対称な密度分布

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

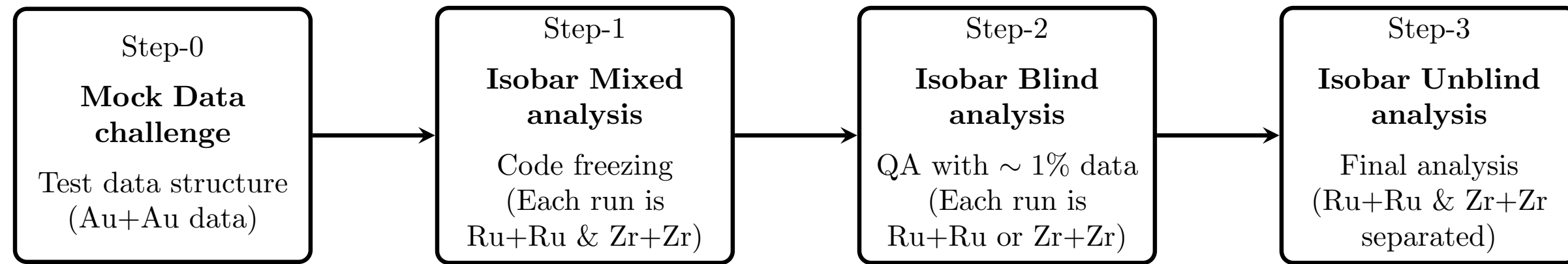
- ▶ QCD相転移やバリオン高密度領域における物性解明のために、低エネルギー領域でフローやfemtoscopiaの精密測定が進んでいる。
- ▶ ブラインド解析によるアイソバーCME探索がついに終了。事前定義したCMEシグナルは観測されず、さらなる調査が必要。完全にCMEを否定したわけではない。
- ▶ グローバル偏極の新しいデータ（低エネルギーや粒子種依存）が出始めている。

バックアップ

Analysis procedure

started ~Jan/2019

started end of May/2021

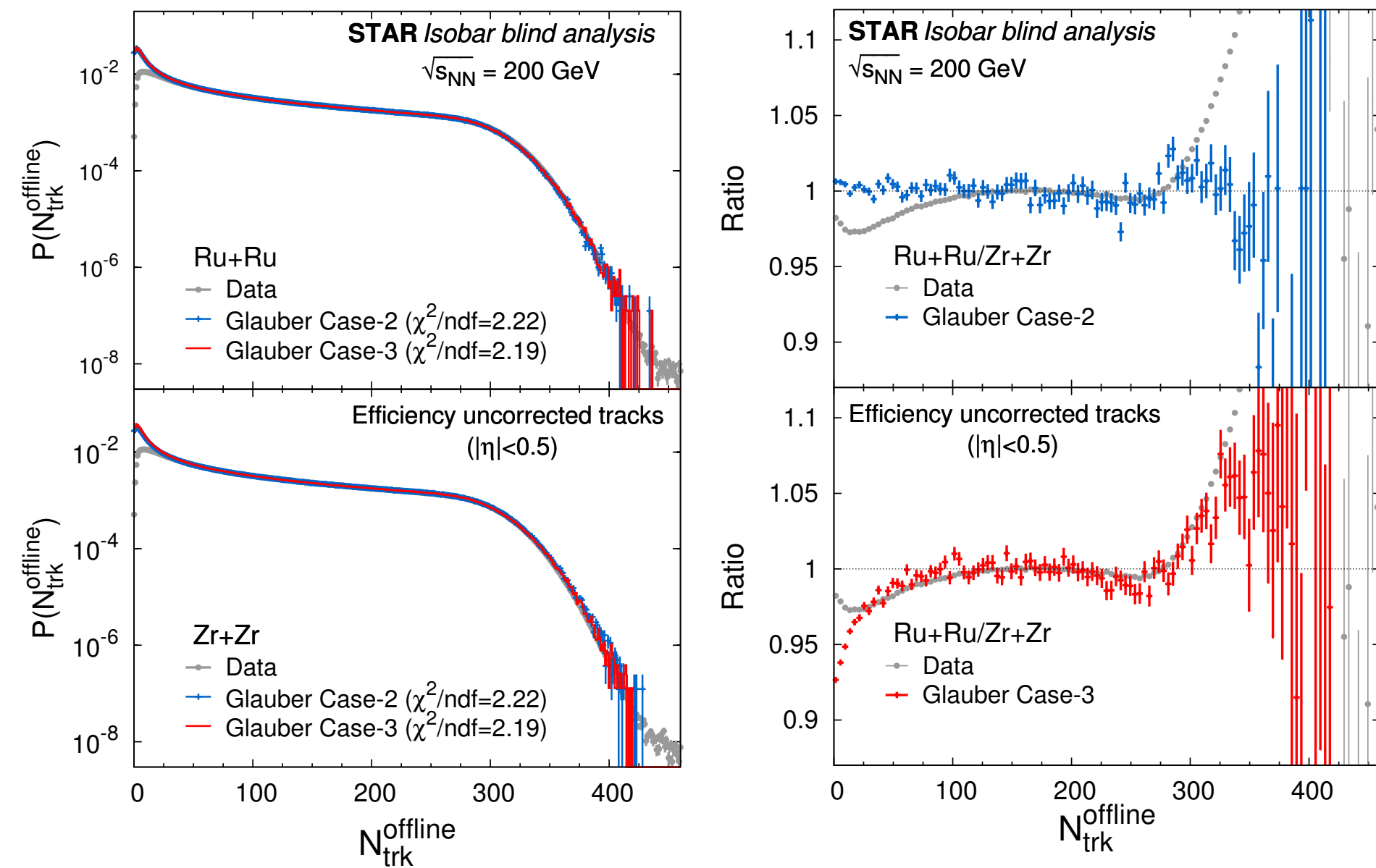


► Follow blind analysis as recommended by BNL NPP PAC

- 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”

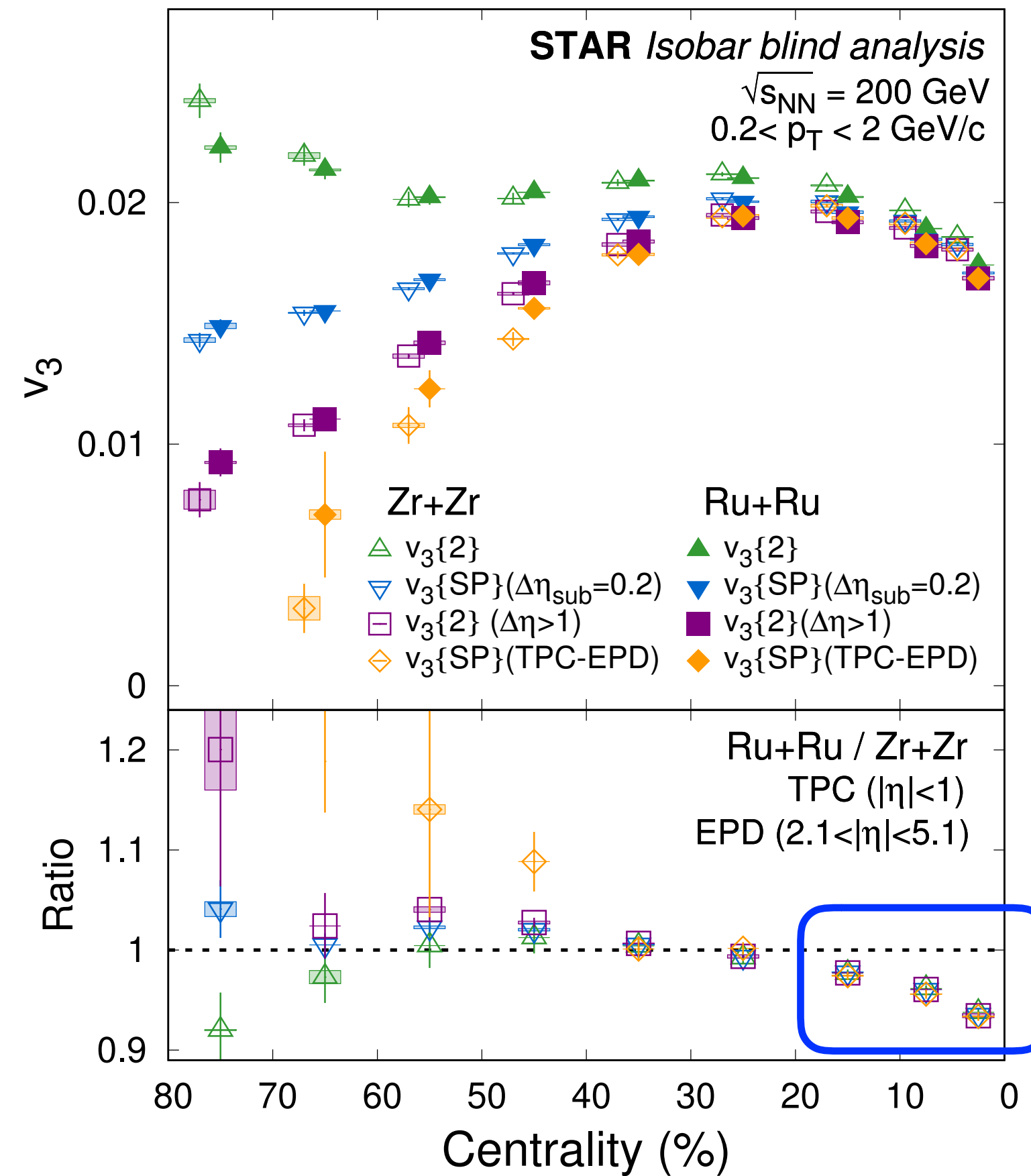
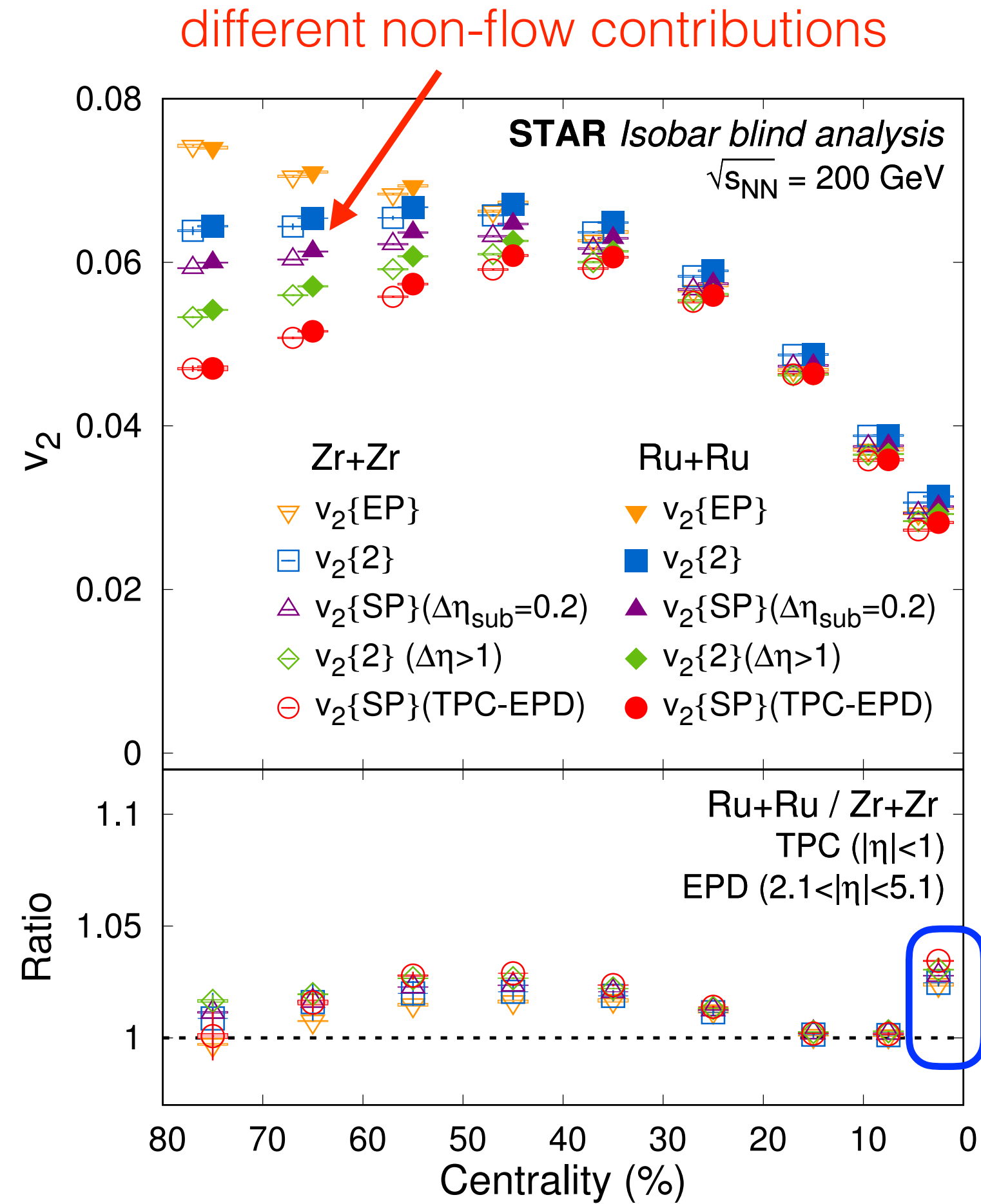


► Centrality determination

- 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)	β_2	R (fm)	a (fm)	β_2	R (fm)	a (fm)	β_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

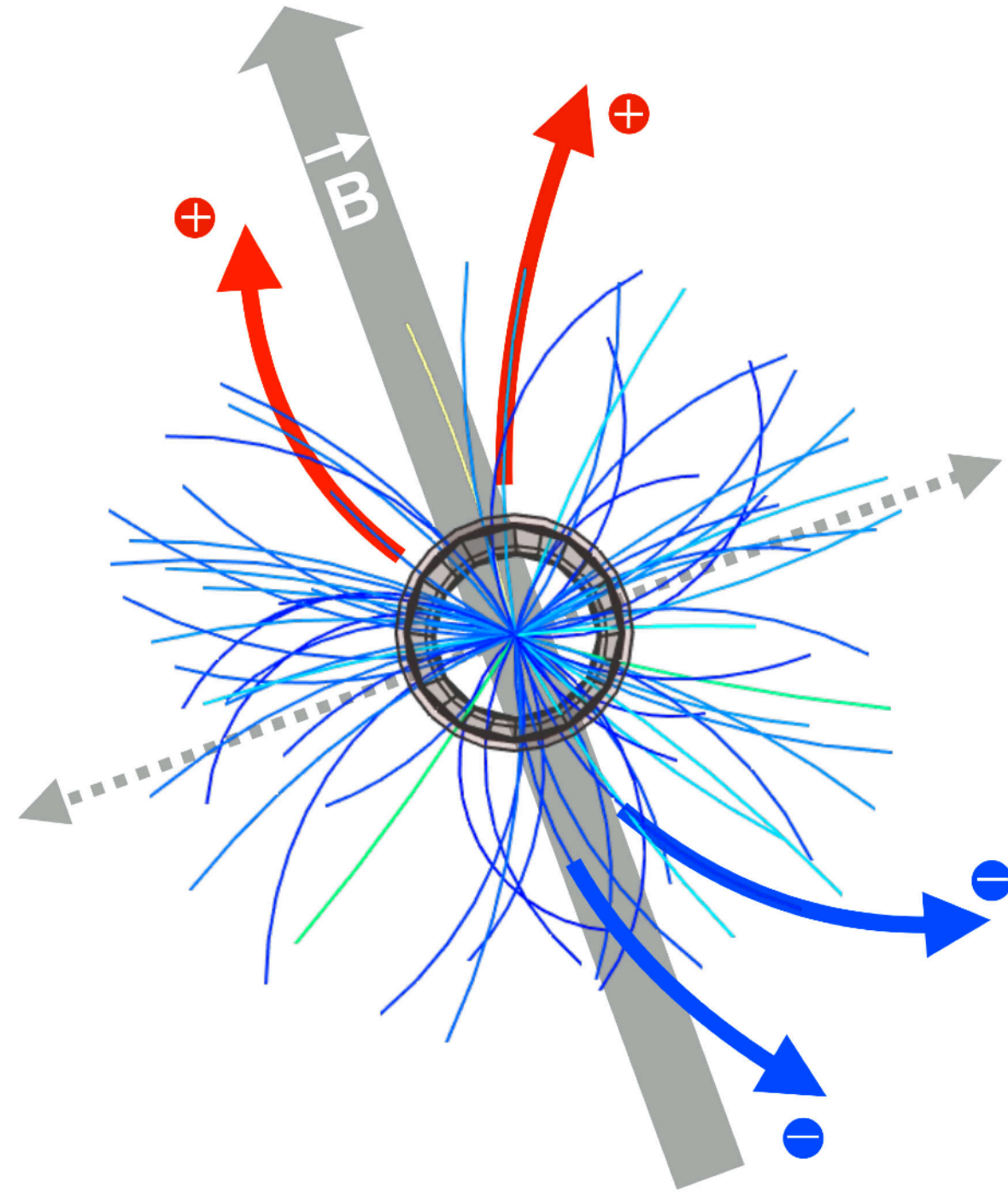
Elliptic/triangular flow



► 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 $0\text{-}5\%$, while v_3 deviates in opposite direction. Could be related to nuclear structure difference between the two species.

CME observables



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

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

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

- ▶ γ -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
 - ▶ γ_{113} : wrt Ψ_3 which is uncorrelated with B-field direction
 - ▶ two-particle correlator δ
 - ▶ 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