

Quark Matter 2017

理論の発展

カイラル磁気効果、カイラル渦効果を中心に

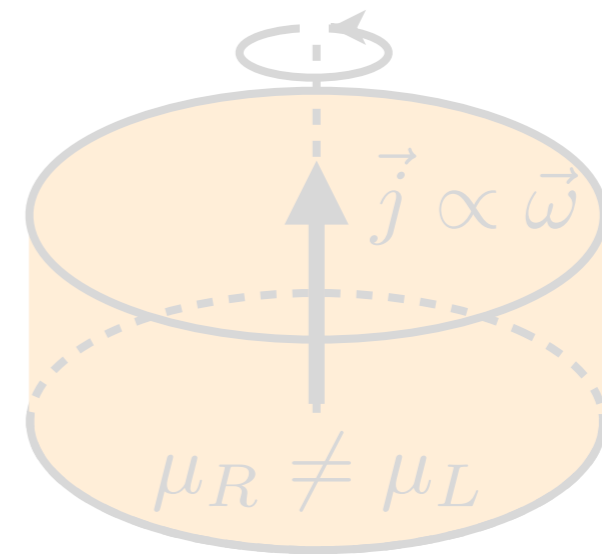
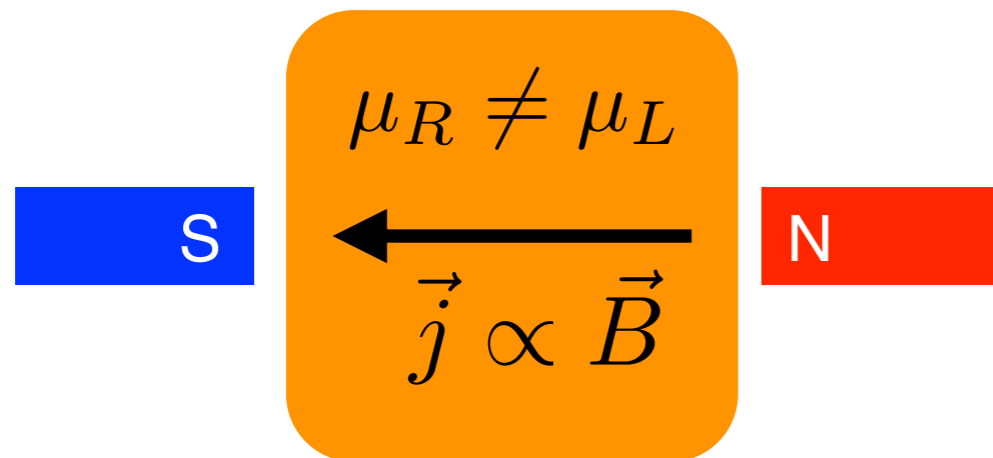


本郷 優
(理研 iTHES)

Quark Matter 2017

理論・実験の発展

カイラル磁気効果、カイラル渦効果を中心に



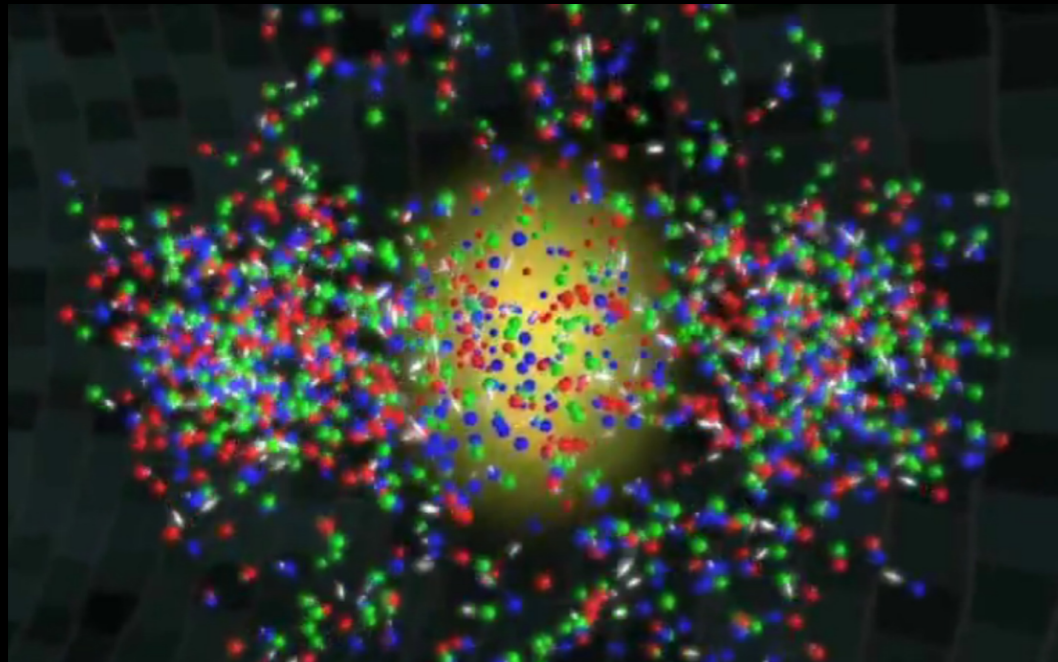
本郷 優
(理研 iTHES)

QGPと流体力学

- 系の詳細によらない, **ユニバーサル**な記述を行う
- **マクロ**なダイナミクスを記述する**有効理論**
- **保存量のみ**に注目 ~ 系の~~対称性のみ~~に注目

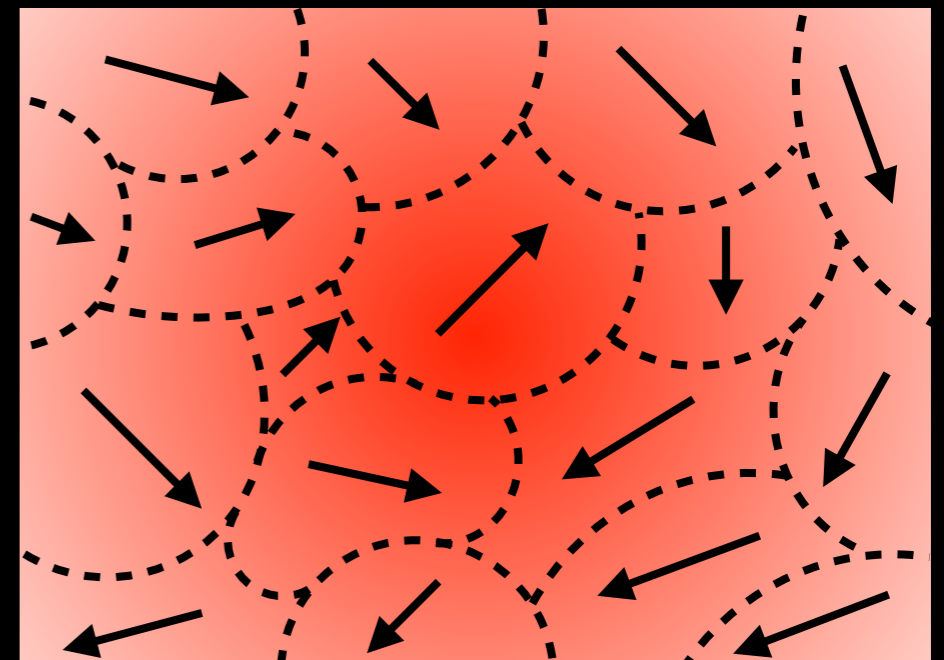
[日高 義将, 本郷 優, 数理科学 2017年 7月号掲載予定 「場の量子論と流体力学のつながり」]

クォーク・グルーオン プラズマ



≈

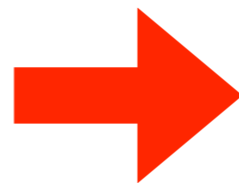
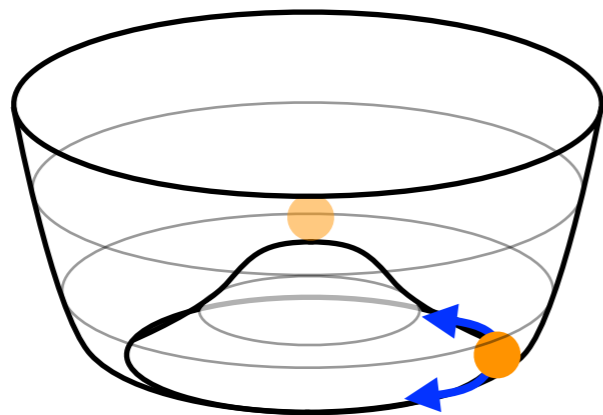
流体力学 $\{\beta(x), \vec{v}(x)\}$



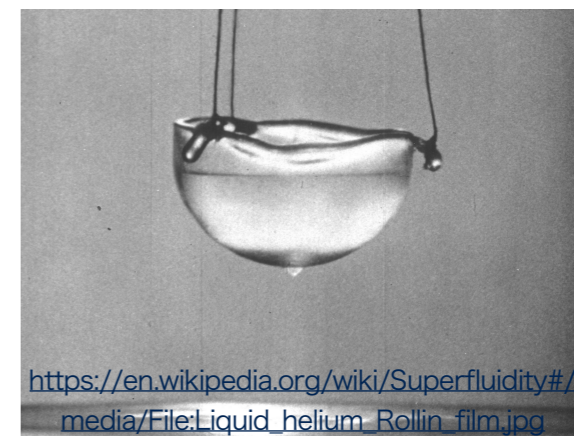
対称性の破れと流体力学

◆ 自発的な対称性の破れ

ミクロな現れ：真空の選択

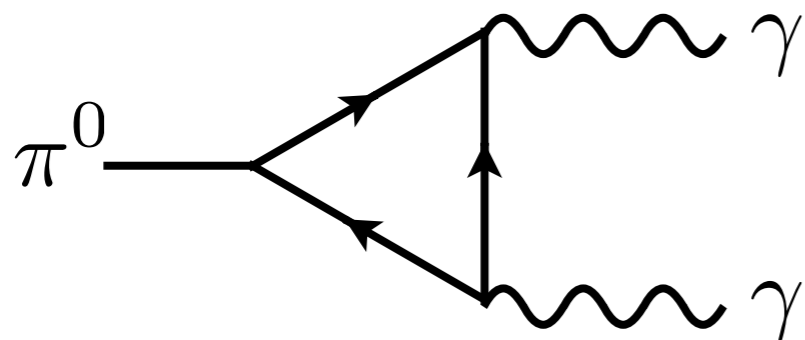


マクロな現れ：超流動



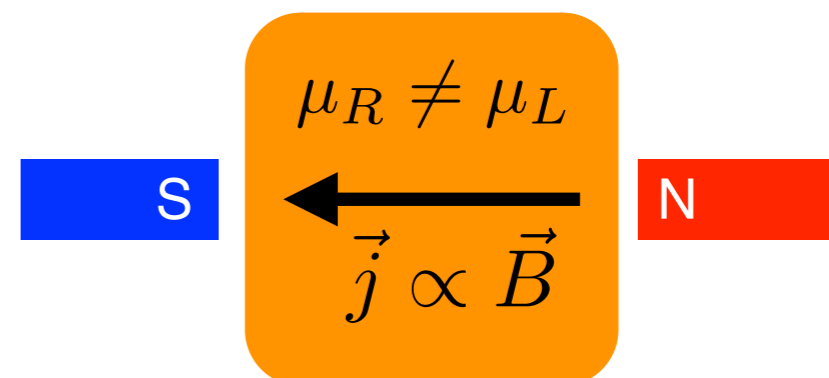
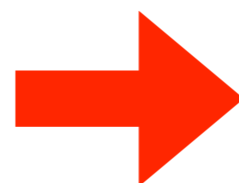
◆ 量子異常による対称性の破れ

ミクロな現れ： π^0 崩壊



[Adler 1969, Bell-Jackiw 1969]

マクロな現れ：カイラル異常輸送



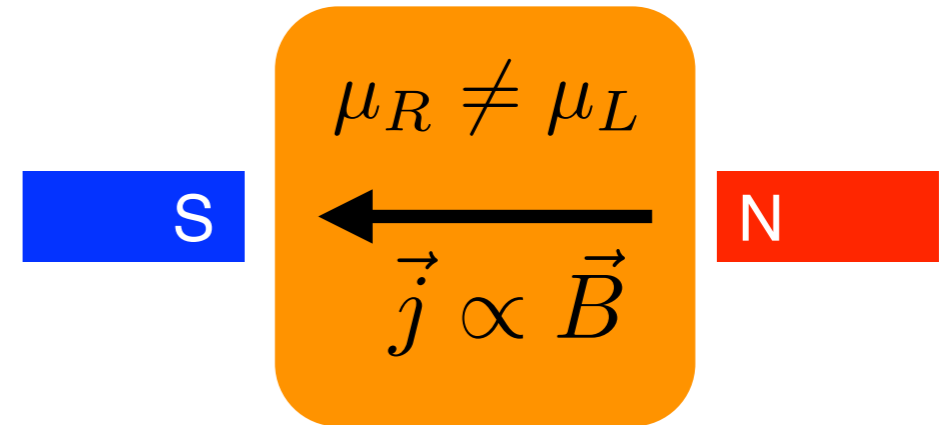
[Erdmenger et al. 2008, Son-Surowka 2009]

パリティの破れに伴う輸送現象

◆ カイラル磁気効果 (CME)

[Fukushima et al.2008, Vilenkin 1980]

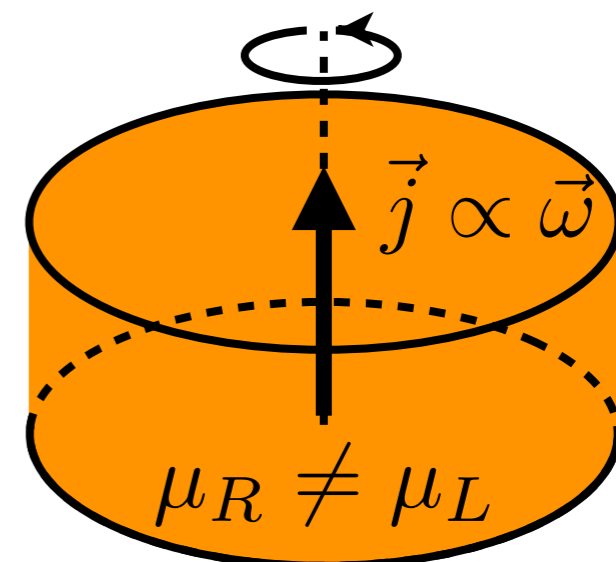
$$\vec{j} = \frac{e\mu_5}{2\pi^2} \vec{B}$$



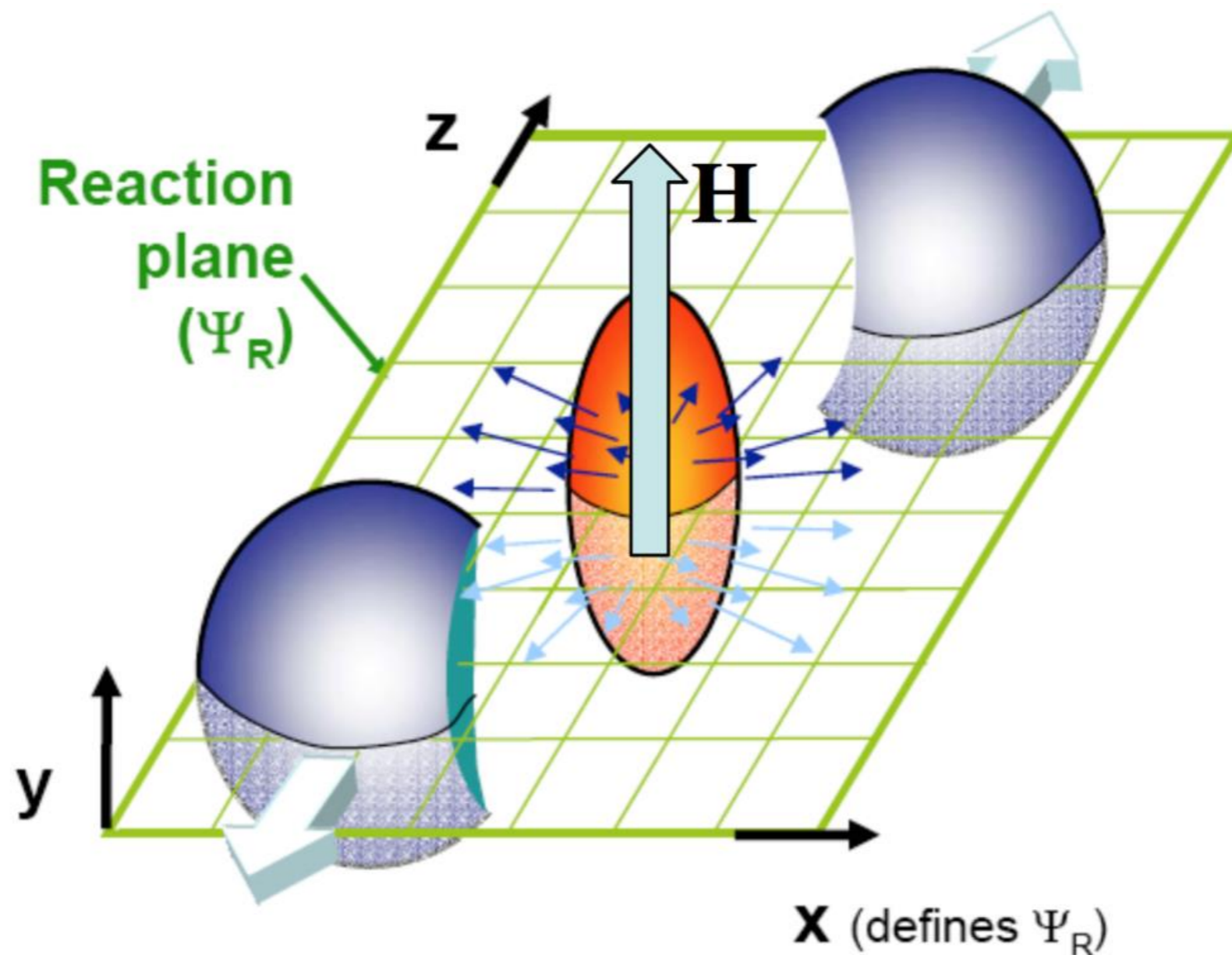
◆ カイラル渦効果 (CVE)

[Erdmenger et al. 2008, Son-Surowka 2009]

$$\vec{j} = \frac{\mu\mu_5}{2\pi^2} \vec{\omega}$$



CME検証の場としての重イオン衝突



重イオン衝突には強い磁場もパリティの破れもある！

➡ QGPはカイラル磁気効果を検証する絶好の場！！



典型的な磁場の強さ

• 地球の地磁気 $\sim 10^{-5}$ T

• 棒磁石, ピップエレキバン $\sim 10^{-1}$ T

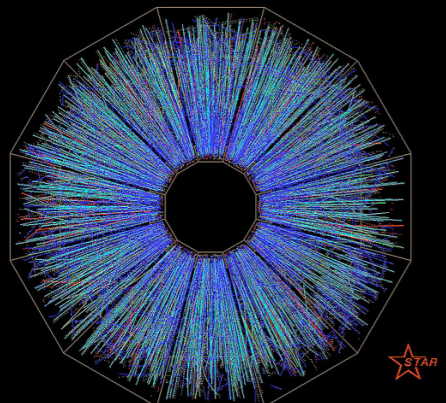
• 実験室で到達可能な定常磁場 ~ 10 T

• 実験室で到達可能な瞬間磁場 $\sim 10^3$ T

• マグネターの表面 $\sim 10^8 - 10^{11}$ T

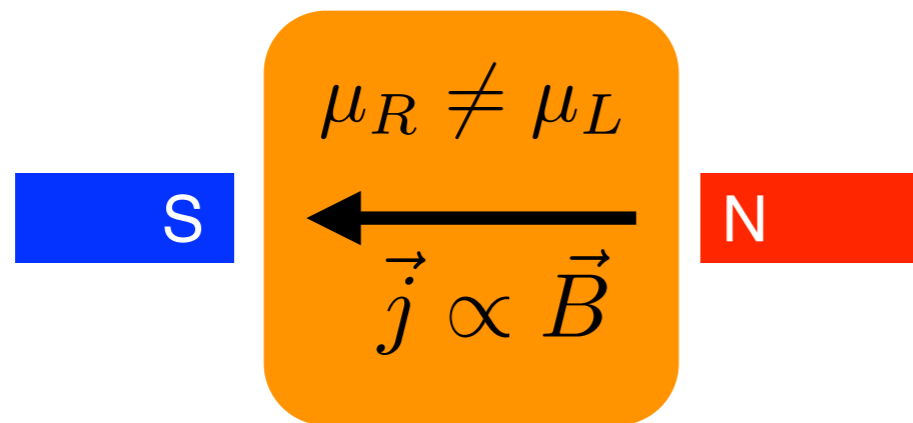
• 重イオン衝突における磁場 $\sim 10^{15}$ T

宇宙で最も強い磁場！

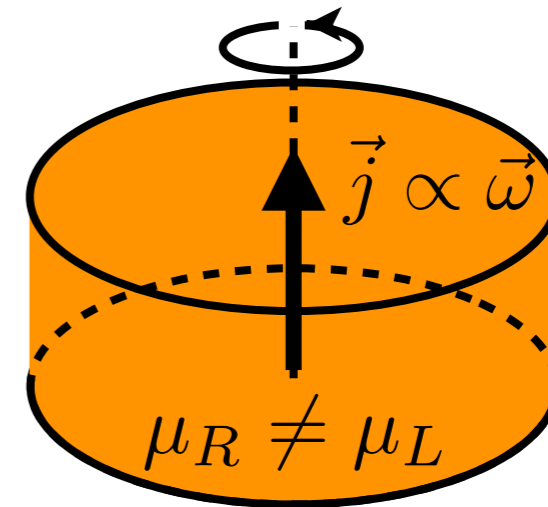


カイラル輸送現象と**重要な物理**

カイラル磁気効果(CME)



カイラル渦効果(CVE)



重イオン衝突での目標：

①カイラル輸送現象の検証, 並びに②これを用いた**QCDの性質**の検証

① CME/CVE自身の
実験的検証

物性物理での検証可能！

[Q. Li, Nature Phys. (2016), ...]

② QCD真空の性質
(スファレロン遷移)

物性物理ではむずかしい!
が, 重イオンでも非常に厳しい

QM2017での進展(の一部)

1. 重イオン衝突におけるカイラル輸送現象の検証に向けて

- カイラル磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Hirono]
- 粘性+カイラル輸送流体のシミュレーションと粒子相関の計算 [Talk by Shi]
- 小さい系におけるカイラル磁気効果の実験的検証 [Talk by Sorensen, Tu, Park]
- RHICの同重体(isobar, ZrZr/RuRu)衝突実験に向けた計算 [Talk by Huang, Shi]
- 初期過程における古典統計近似に基づいたカイラル磁気効果の計算 [Talk by Mueller]
- カイラル渦/磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Guo]
- 流速場の渦度分布の時間発展とラムダ粒子の偏極 [Talk by Pang, Karpenko, Wang]
- 原子核内の荷電粒子を波束として扱ったときの電磁場の時間発展 [Talk by Peroutka]

2. カイラル輸送現象に関する新しい現象の提案

- 磁力線のつながりかえにより誘発されるカイラル磁気効果 [Talk by Hirono, Kharzeev]
- カイラル磁気流体におけるモード解析と不安定モード [Talk by Hattori, Hirono]
- 強い磁場中におけるカイラルプラズマの輸送現象(電荷の再分配) [Talk by Hattori]

QM2017での進展(の一部)

3. 流体力学の理論的枠組みに関する進展

- Bjorken解を背景にした流体の非線形揺らぎとロングタイムテイル [Talk by Akamatsu]
- 臨界点近傍における流体方程式の現象論的理解 [Talk by Stephanov]
- 場の理論(久保公式)に基づいた粘性・緩和時間の摂動計算 [Talk by Czajka]

4. その他

- Lefschetz thimbleを用いた符号問題への取り組み(実時間と有限密度) [Talk by Basar]
- 曲がった時空中における新たなカイラル渦効果の提案 [Talk by Fukushima in satellite]
- 世界線形式に基づいたカイラル運動論の再定式化 [Talk by Venugopalan in satellite]

QM2017での進展(の一部)

3. 流体力学の理論的枠組みに関する進展

- Bjorken解を背景にした流体の非線形揺らぎとロングタイムテイル [Talk by Akamatsu]
- 臨界点近傍における流体方程式の現象論的理解 [Talk by Stephanov]
- 場の理論(久保公式)に基づいた粘性・緩和時間の摂動計算 [Talk by Czajka]

4. その他

- Lefschetz thimbleを用いた符号問題への取り組み(実時間と有限密度) [Talk by Basar]
- 曲がった時空中における新たなカイラル渦効果の提案 [Talk by Fukushima in satellite]
- 世界線形式に基づいたカイラル運動論の再定式化 [Talk by Venugopalan in satellite]

QM2017での進展(の一部)

1. 重イオン衝突におけるカイラル輸送現象の検証に向けて

- カイラル磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Hirono]
- 粘性+カイラル輸送流体のシミュレーションと粒子相関の計算 [Talk by Shi]
- 小さい系におけるカイラル磁気効果の実験的検証 [Talk by Sorensen, Tu, Park]
- RHICの同重体(isobar, ZrZr/RuRu)衝突実験に向けた計算 [Talk by Huang, Shi]
- 初期過程における古典統計近似に基づいたカイラル磁気効果の計算 [Talk by Mueller]
- カイラル渦/磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Guo]
- 流速場の渦度分布の時間発展とラムダ粒子の偏極 [Talk by Pang, Karpenko, Wang]
- 原子核内の荷電粒子を波束として扱ったときの電磁場の時間発展 [Talk by Peroutka]

2. カイラル輸送現象に関する新しい現象の提案

- 磁力線のつながりかえにより誘発されるカイラル磁気効果 [Talk by Hirono, Kharzeev]
- カイラル磁気流体におけるモード解析と不安定モード [Talk by Hattori, Hirono]
- 強い磁場中におけるカイラルプラズマの輸送現象(電荷の再分配) [Talk by Hattori]

QM2017での進展(の一部)

1. 重イオン衝突におけるカイラル輸送現象の検証に向けて

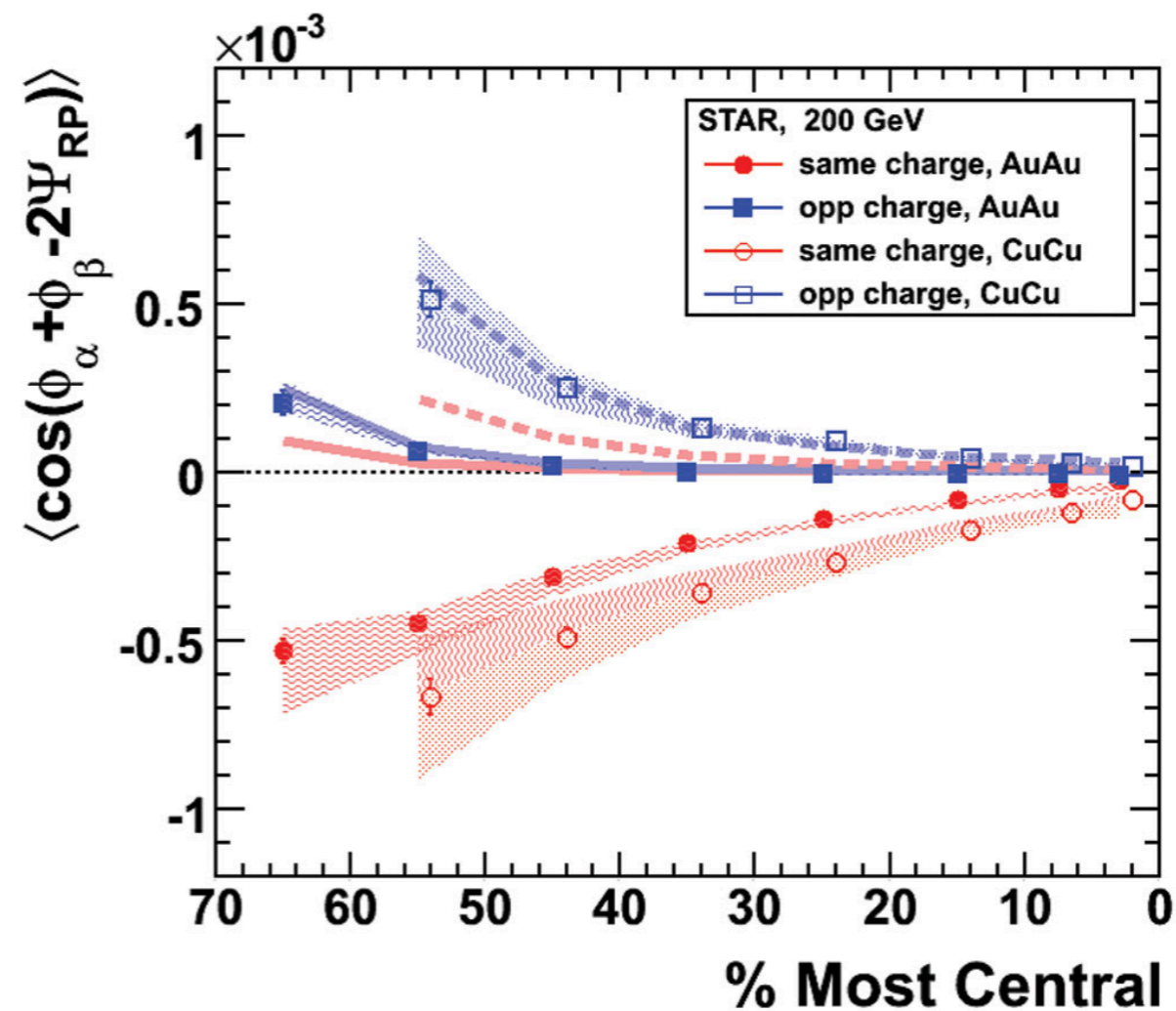
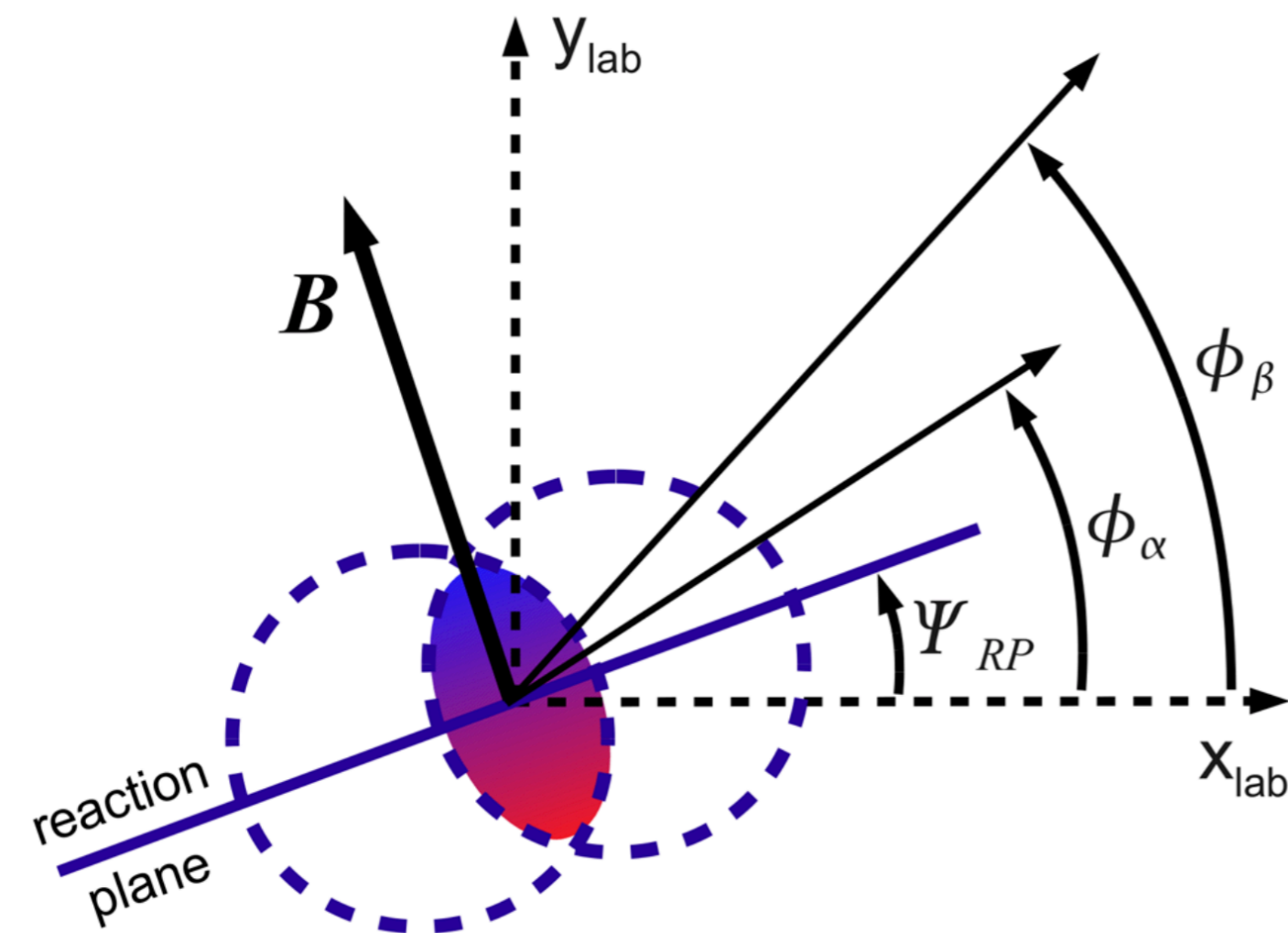
- カイラル磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Hirono]
- 粘性+カイラル輸送流体のシミュレーションと粒子相関の計算 [Talk by Shi]
- 小さい系におけるカイラル磁気効果の実験的検証 [Talk by Sorensen, Tu, Park]
- RHICの同重体(isobar, ZrZr/RuRu)衝突実験に向けた計算 [Talk by Huang, Shi]
- 初期過程における古典統計近似に基づいたカイラル磁気効果の計算 [Talk by Mueller]
- カイラル渦/磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Guo]
- 流速場の渦度分布の時間発展とラムダ粒子の偏極 [Talk by Pang, Karpenko, Wang]
- 原子核内の荷電粒子を波束として扱ったときの電磁場の時間発展 [Talk by Peroutka]

2. カイラル輸送現象に関する新しい現象の提案

- 磁力線のつながりかえにより誘発されるカイラル磁気効果 [Talk by Hirono, Kharzeev]
- カイラル磁気流体におけるモード解析と不安定モード [Talk by Hattori, Hirono]
- 強い磁場中におけるカイラルプラズマの輸送現象(電荷の再分配) [Talk by Hattori]

CMEのシグナル候補1

Charge dependent correlations: $\langle \cos(\phi_1^\alpha + \phi_2^\beta - 2\Psi_{RP}) \rangle$
 $\alpha, \beta \in \{+, -\}$



同じ電荷同士の2粒子相関・異なる電荷の2粒子相関の間の
 非対称性がCMEのシグナルになっているはず！

Charge dependent correlations [STAR]

$$\langle \cos(\phi_1^\alpha + \phi_2^\beta - 2\Psi_{RP}) \rangle$$

$$\alpha, \beta \in \{+, -\}$$

Charge dependent correlations [STAR]

$$\langle \cos(\phi_1^\alpha + \phi_2^\beta - 2\Psi_{RP}) \rangle$$

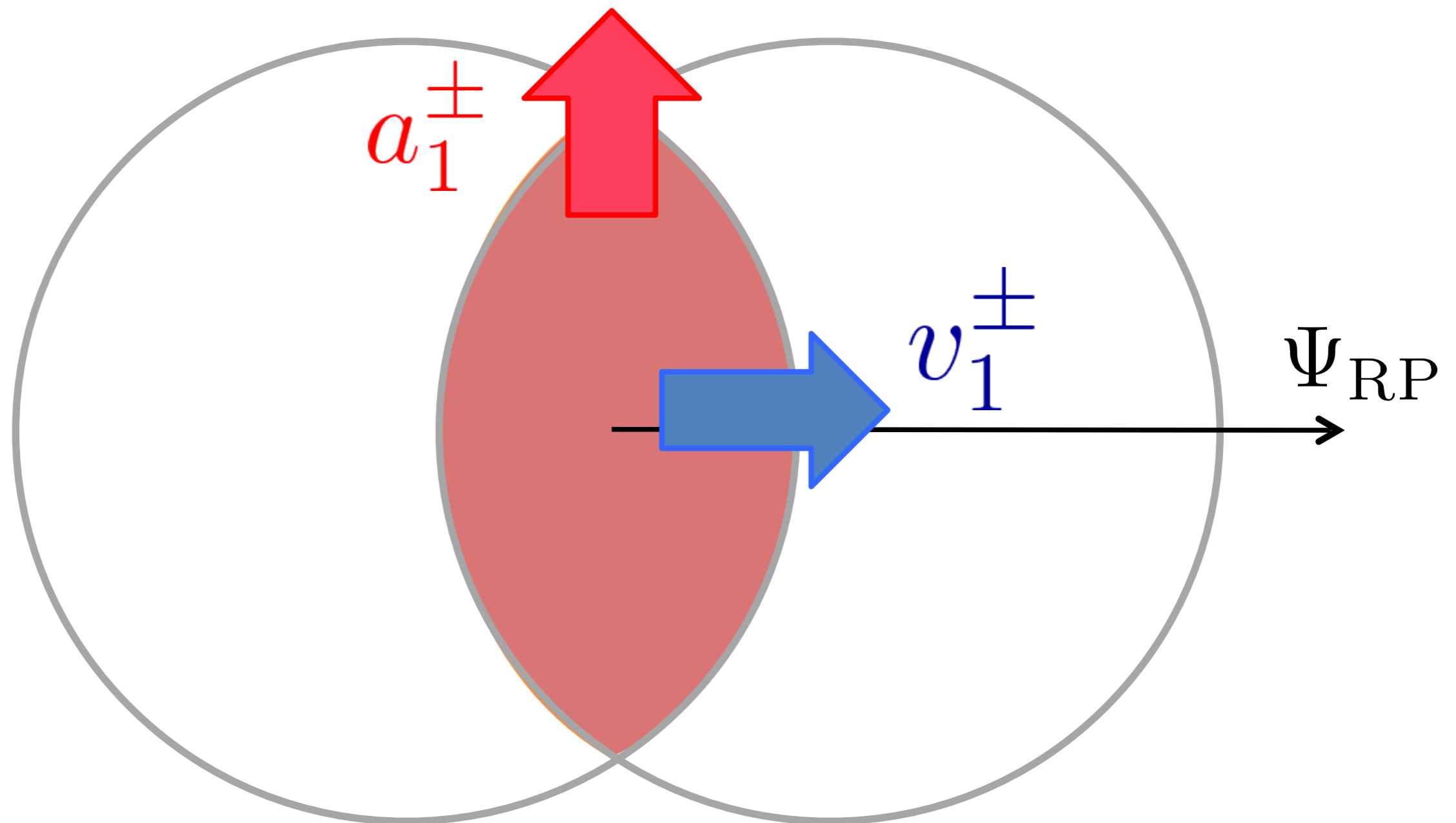
$$\alpha, \beta \in \{+, -\}$$

$$\langle \cos(\phi_1^+ + \phi_2^+ - 2\Psi_{RP}) \rangle$$

$$= \langle \cos(\phi_1^+ - \Psi_{RP}) \cos(\phi_2^+ - \Psi_{RP}) \rangle - \langle \sin(\phi_1^+ - \Psi_{RP}) \sin(\phi_2^+ - \Psi_{RP}) \rangle$$

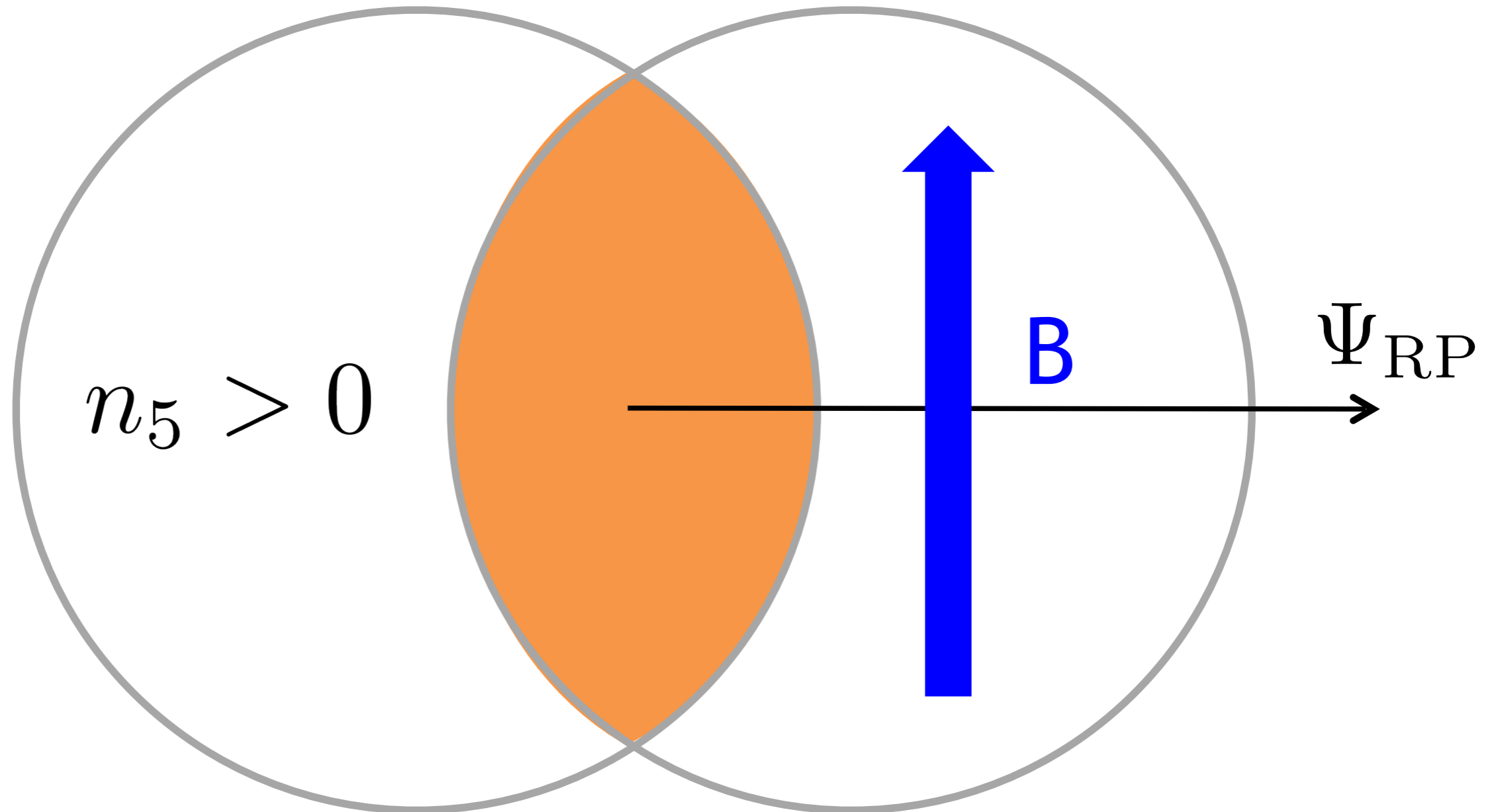
$$= \langle (v_1^+)^2 \rangle - \langle (a_1^+)^2 \rangle$$

Charge dependent correlations [STAR]

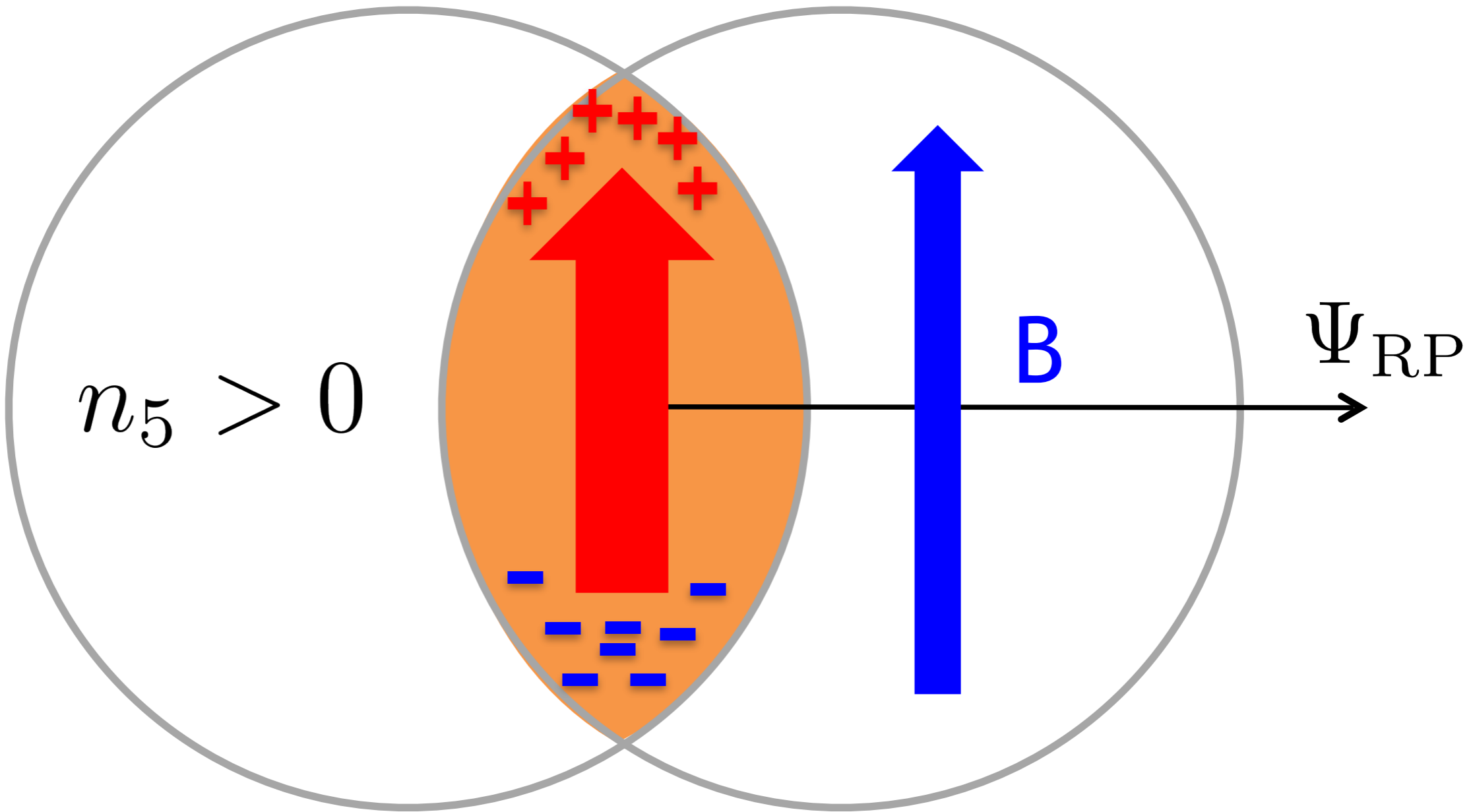


$$\langle \cos(\phi_1^+ + \phi_2^+ - 2\Psi_{RP}) \rangle = \langle (v_1^+)^2 \rangle - \langle (a_1^+)^2 \rangle$$

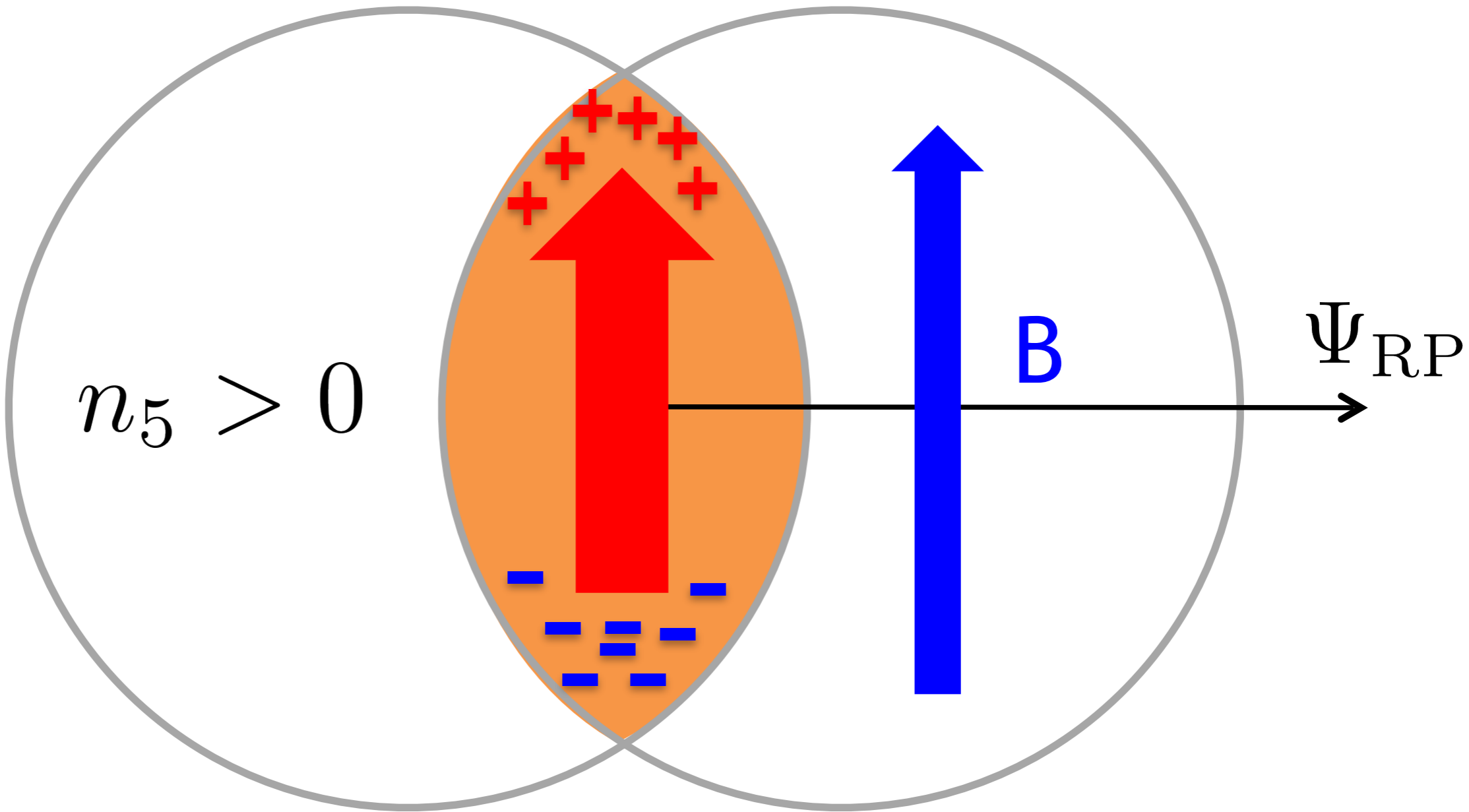
Charge dependent correlations [STAR]



Charge dependent correlations [STAR]

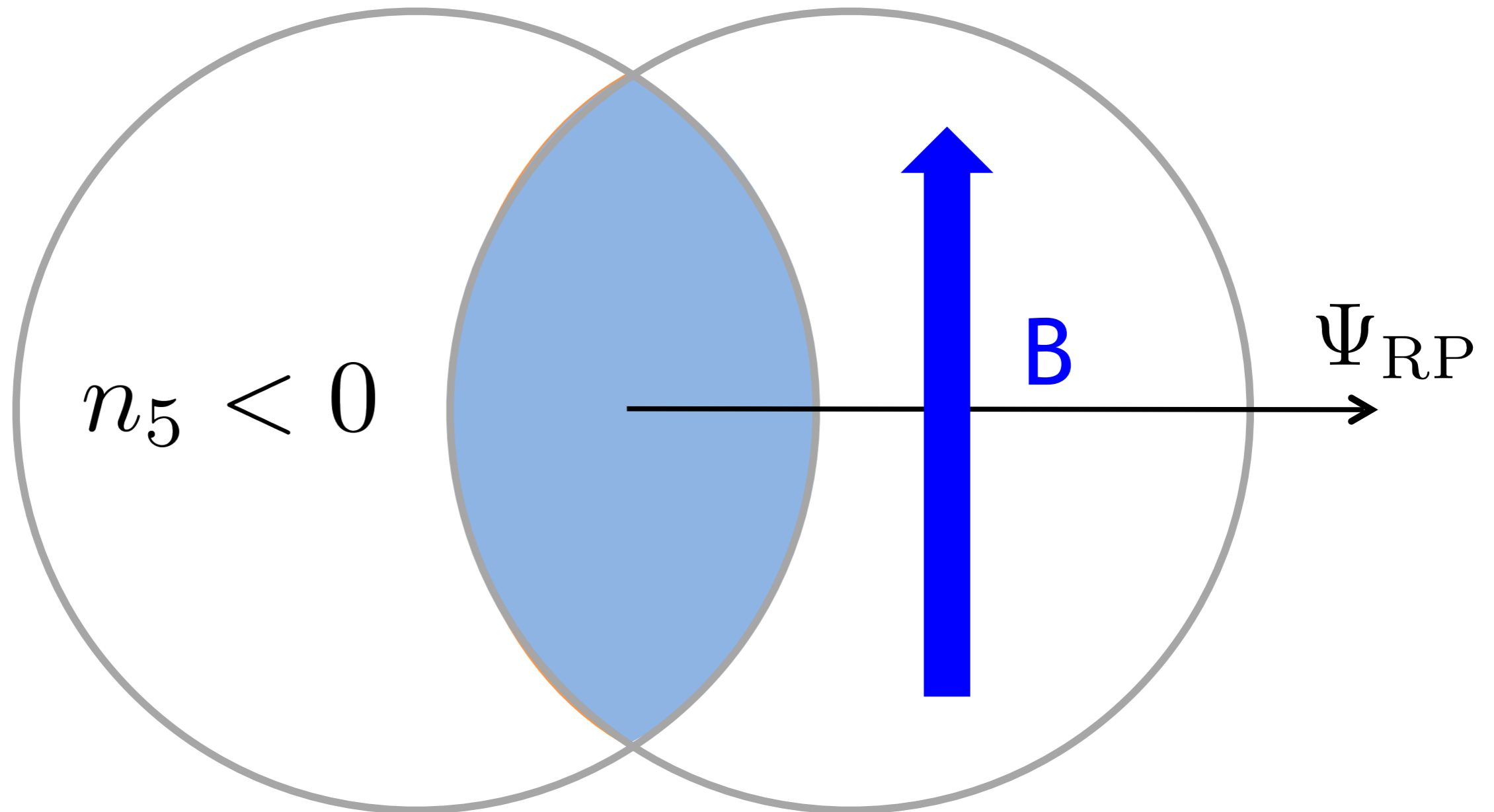


Charge dependent correlations [STAR]

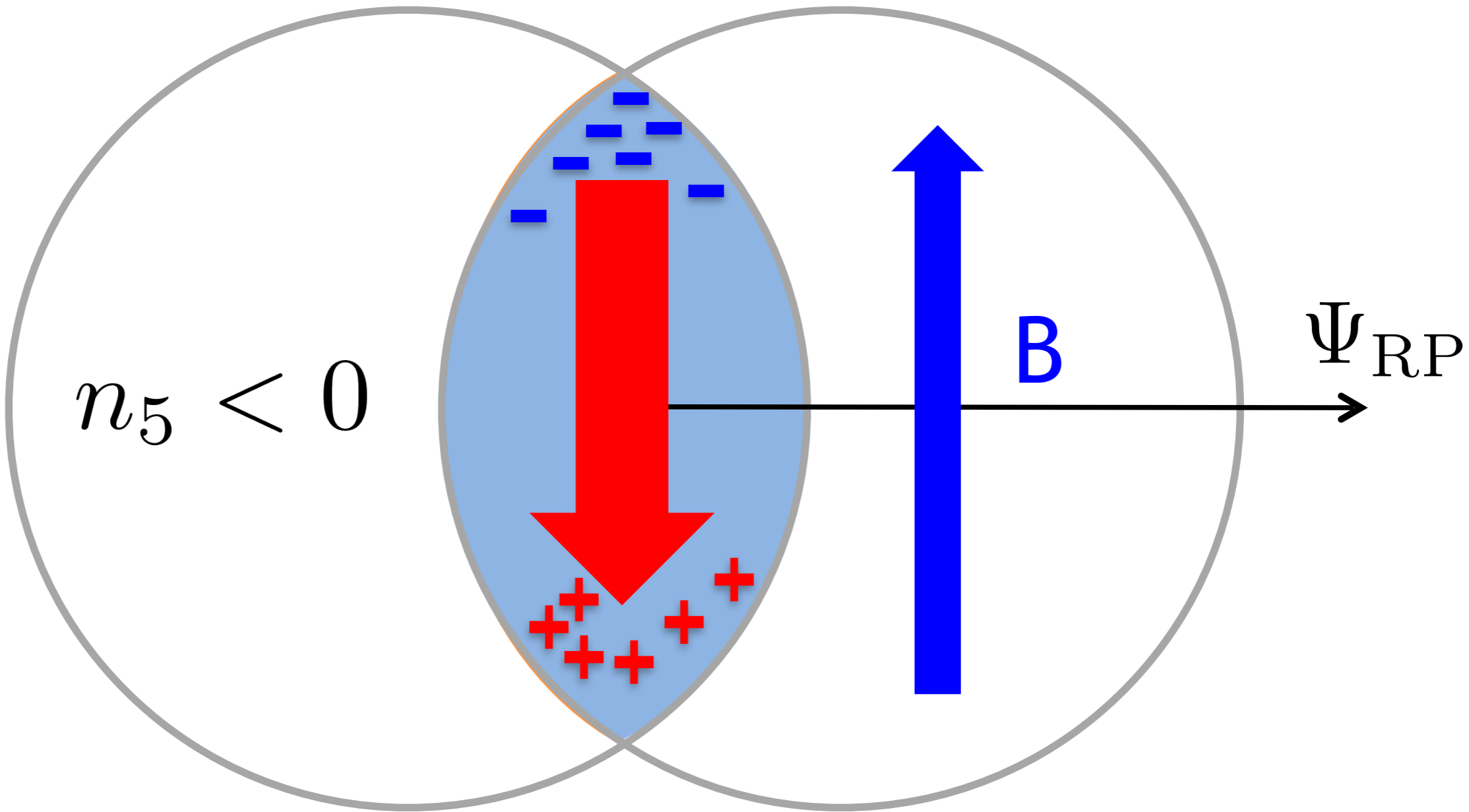


$$a_1^+ > 0 \quad a_1^- < 0$$

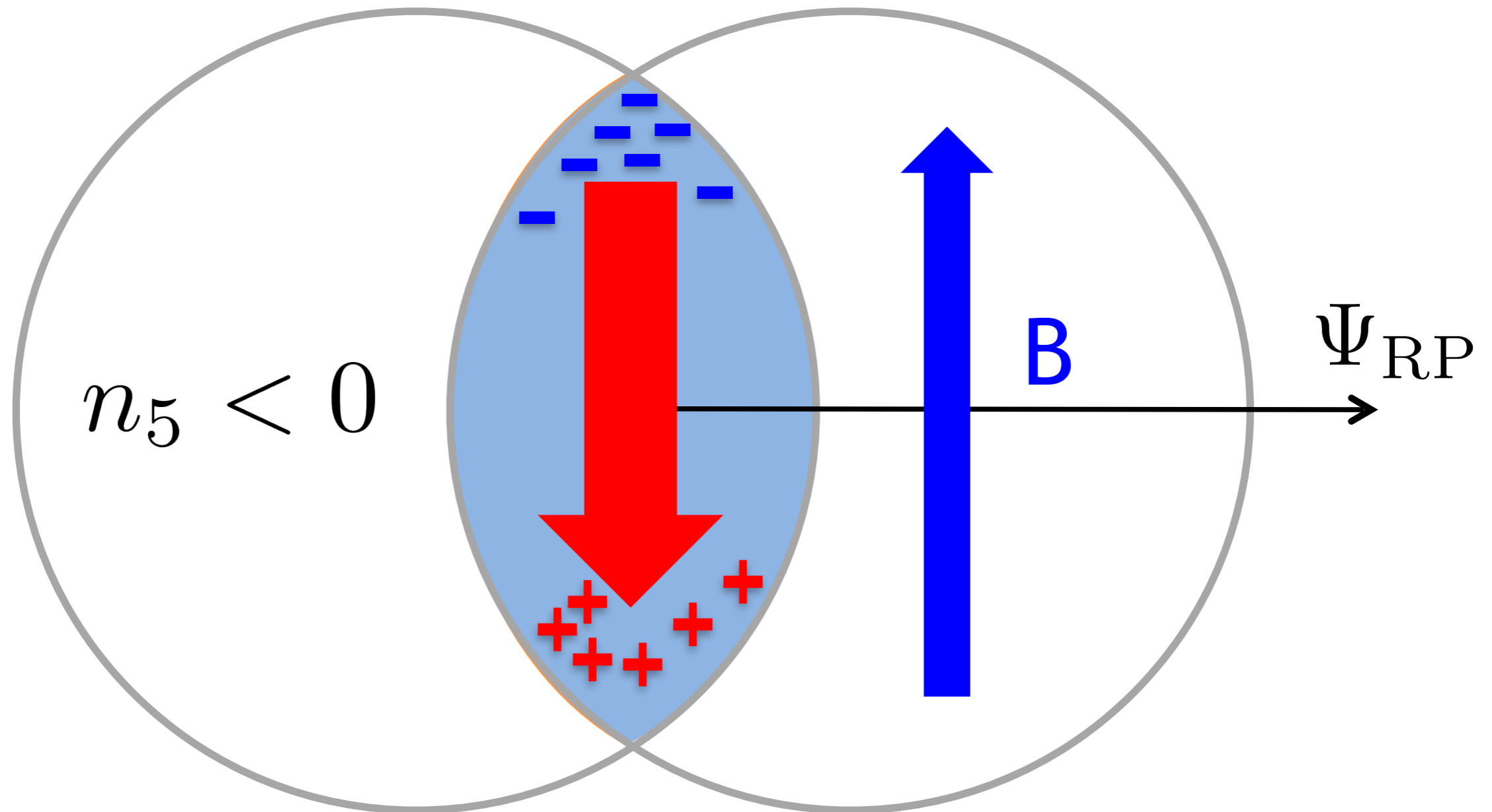
Charge dependent correlations [STAR]



Charge dependent correlations [STAR]



Charge dependent correlations [STAR]



$$a_1^+ < 0 \quad a_1^- > 0$$

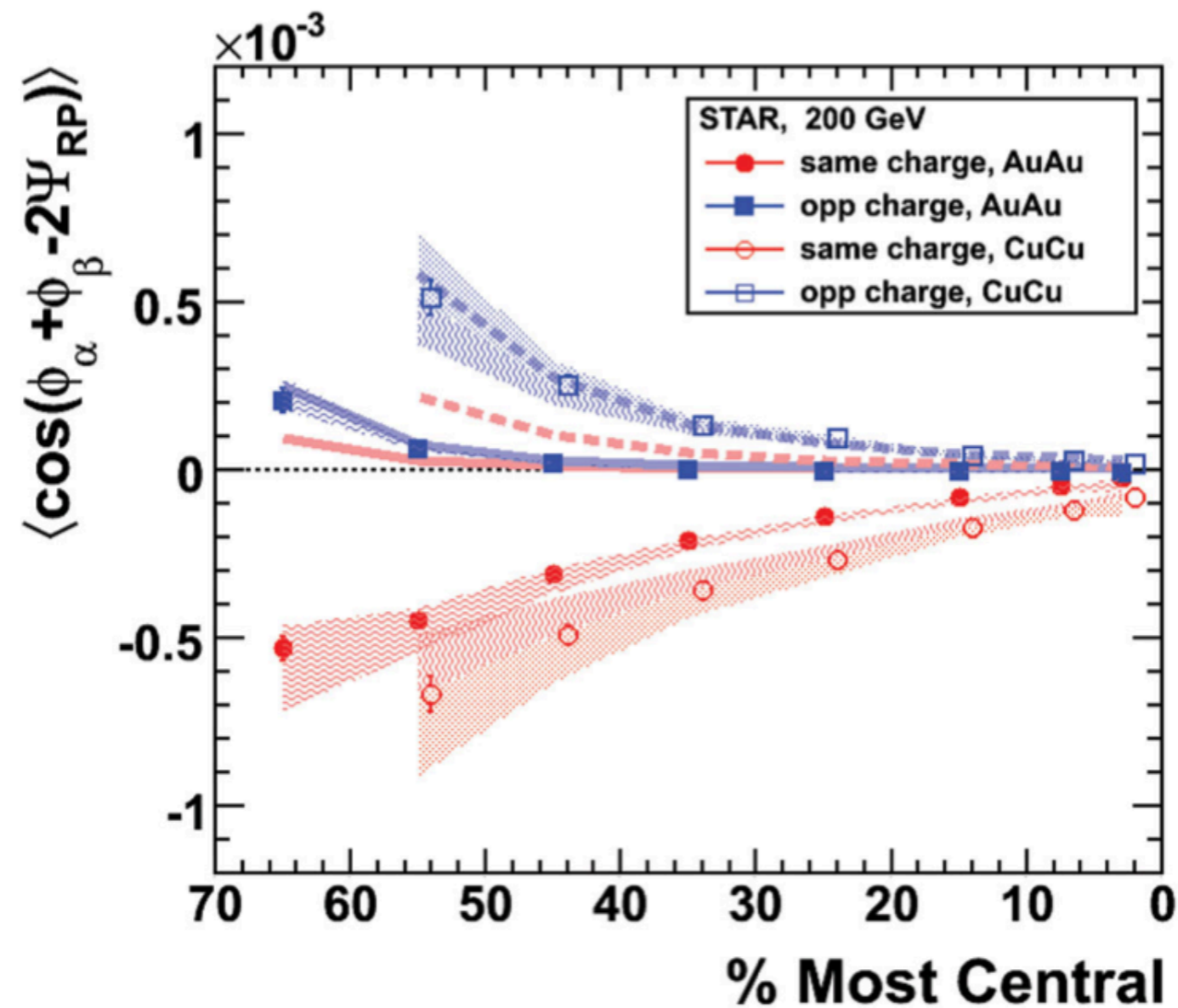
Charge dependent correlations [STAR]

$$\langle a_1^+ \rangle = \langle a_1^- \rangle = 0$$

$$\langle (a_1^+)^2 \rangle = \langle (a_1^-)^2 \rangle > 0$$

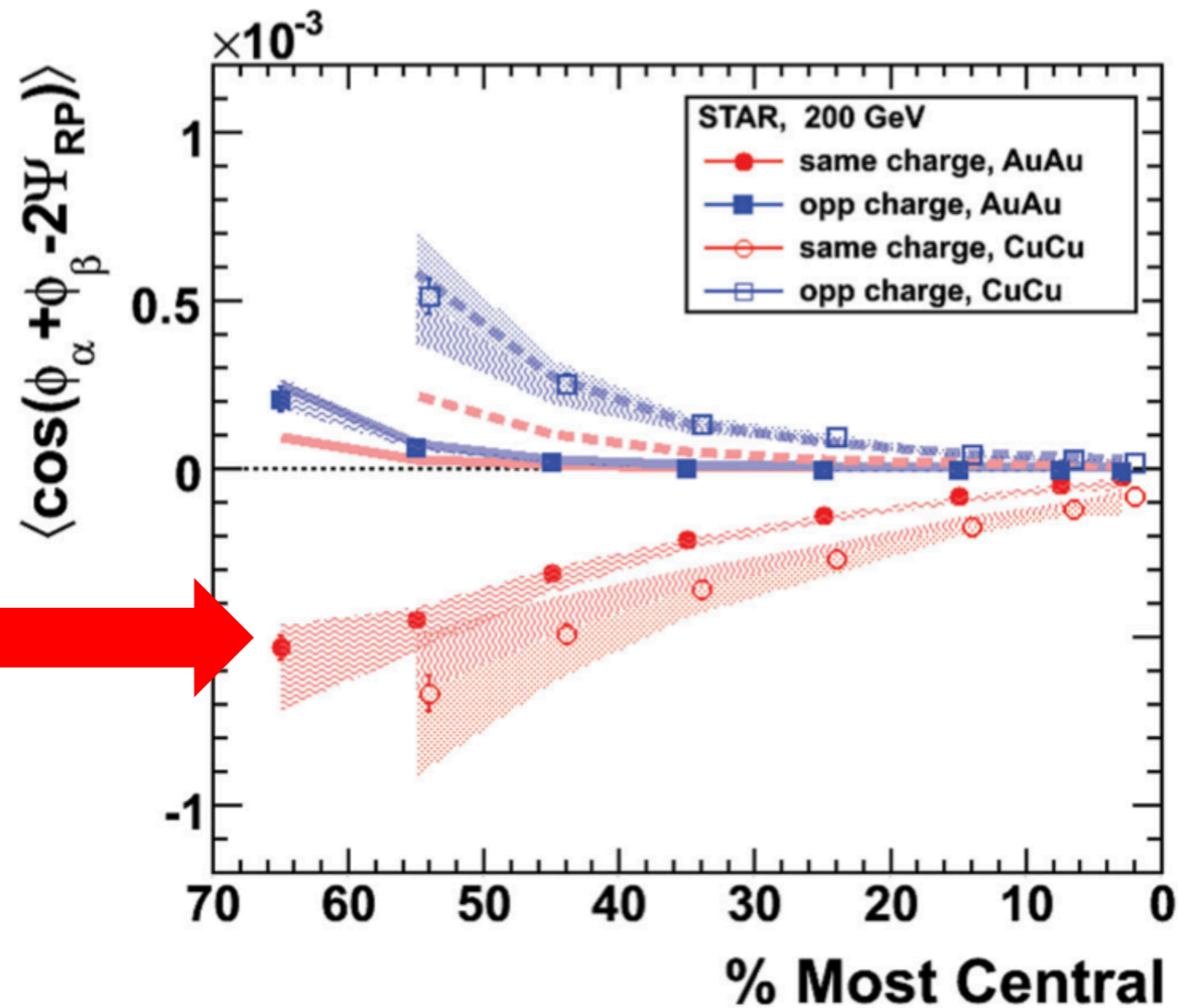
$$\langle a_1^+ a_1^- \rangle < 0$$

Charge dependent correlations [STAR]



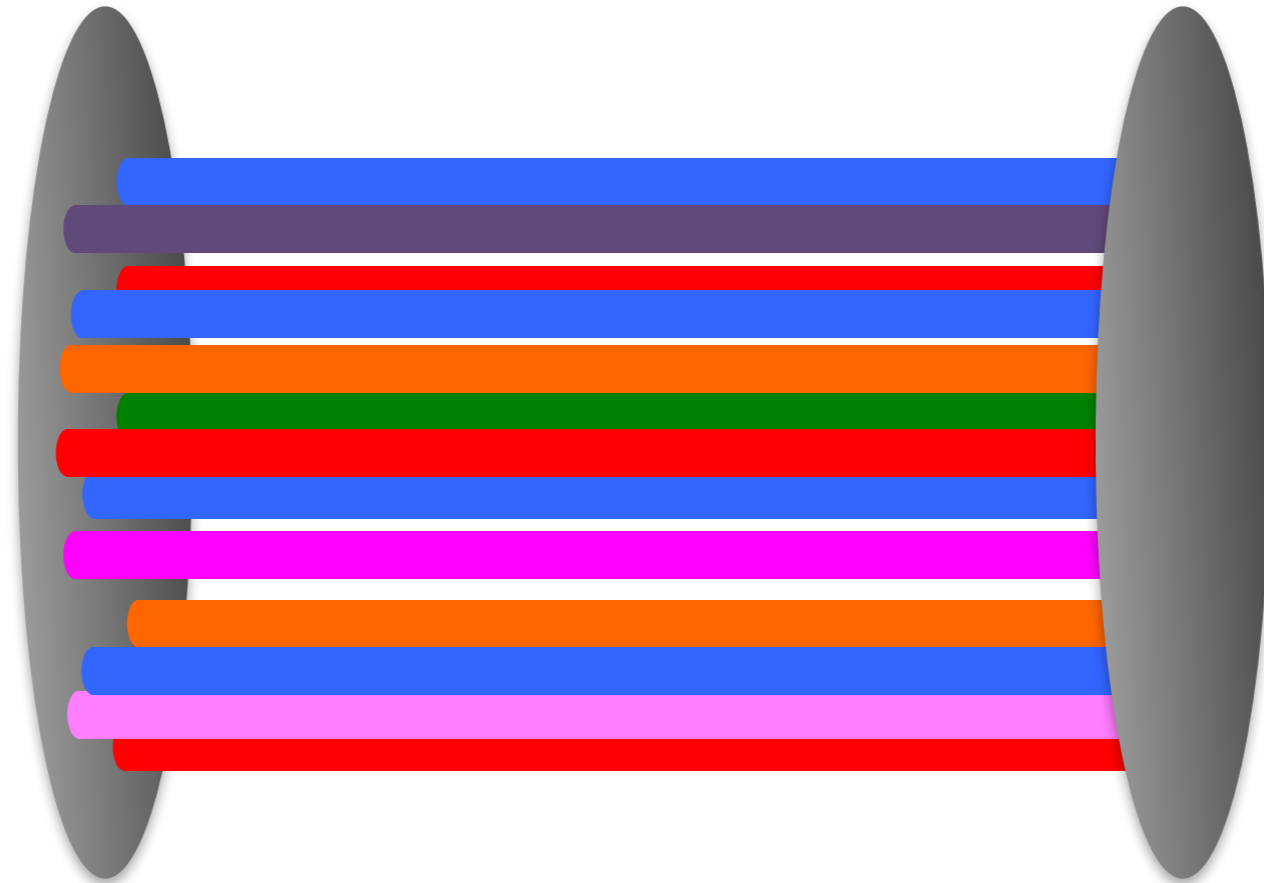
$$\langle \cos(\phi_1^+ + \phi_2^+ - 2\Psi_{RP}) \rangle = \langle (v_1^+)^2 \rangle - \langle (a_1^+)^2 \rangle$$

Charge dependent correlations [STAR]

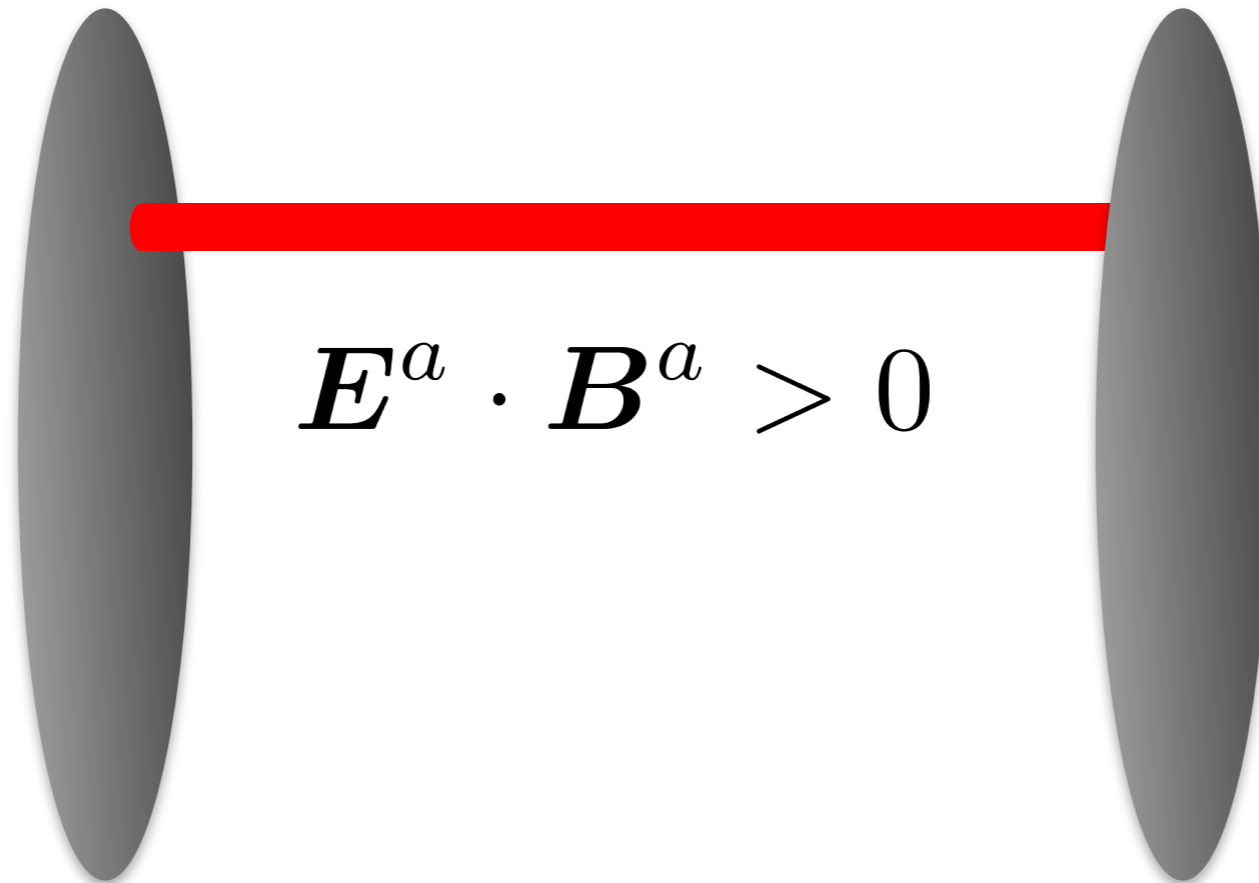


$$\langle \cos(\phi_1^+ + \phi_2^+ - 2\Psi_{RP}) \rangle = \langle (v_1^+)^2 \rangle - \langle (a_1^+)^2 \rangle$$

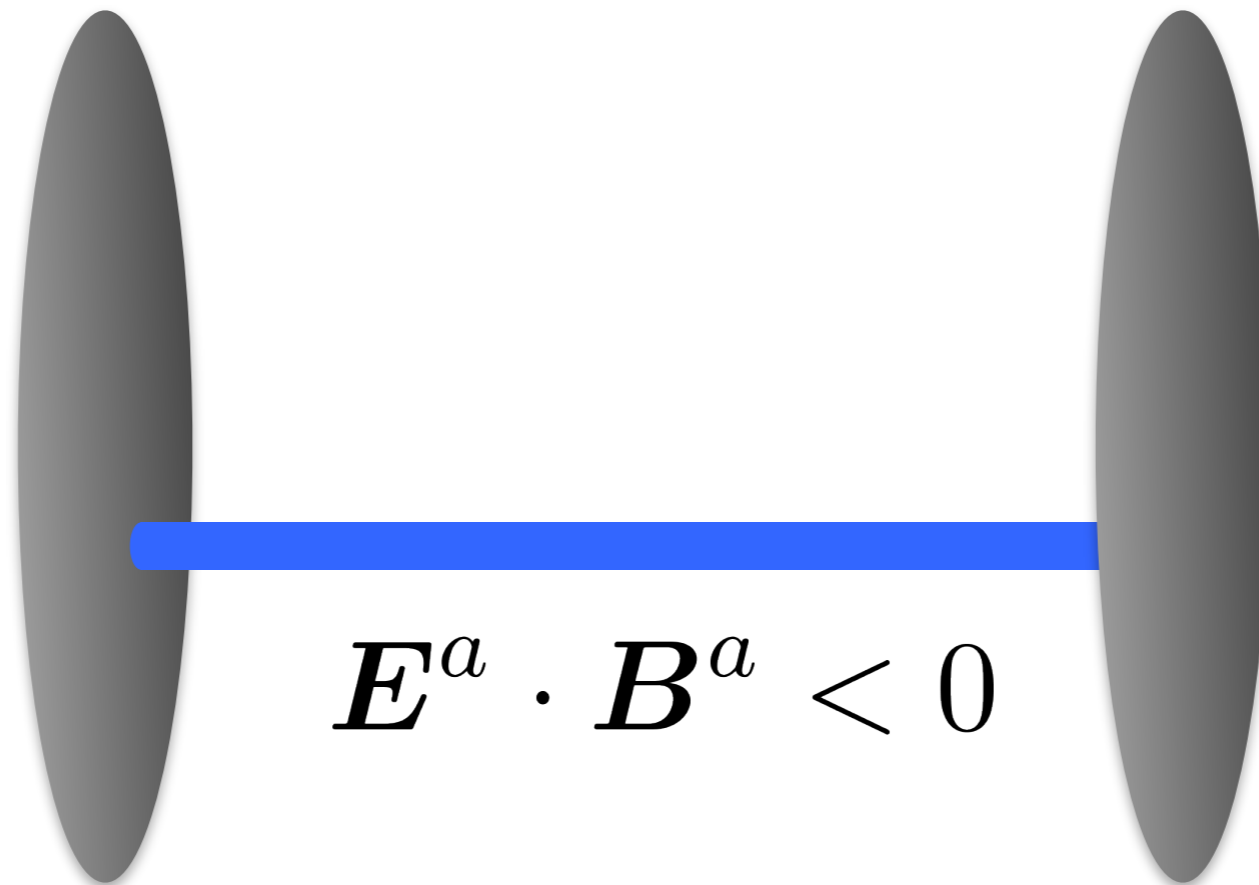
$$\partial_{\mu} j_5^{\mu} = \frac{g^2}{16\pi^2} \mathbf{E}^a \cdot \mathbf{B}^a$$



$$\partial_{\mu} j_5^{\mu} = \frac{g^2}{16\pi^2} \mathbf{E}^a \cdot \mathbf{B}^a$$



$$\partial_{\mu} j_5^{\mu} = \frac{g^2}{16\pi^2} \mathbf{E}^a \cdot \mathbf{B}^a$$

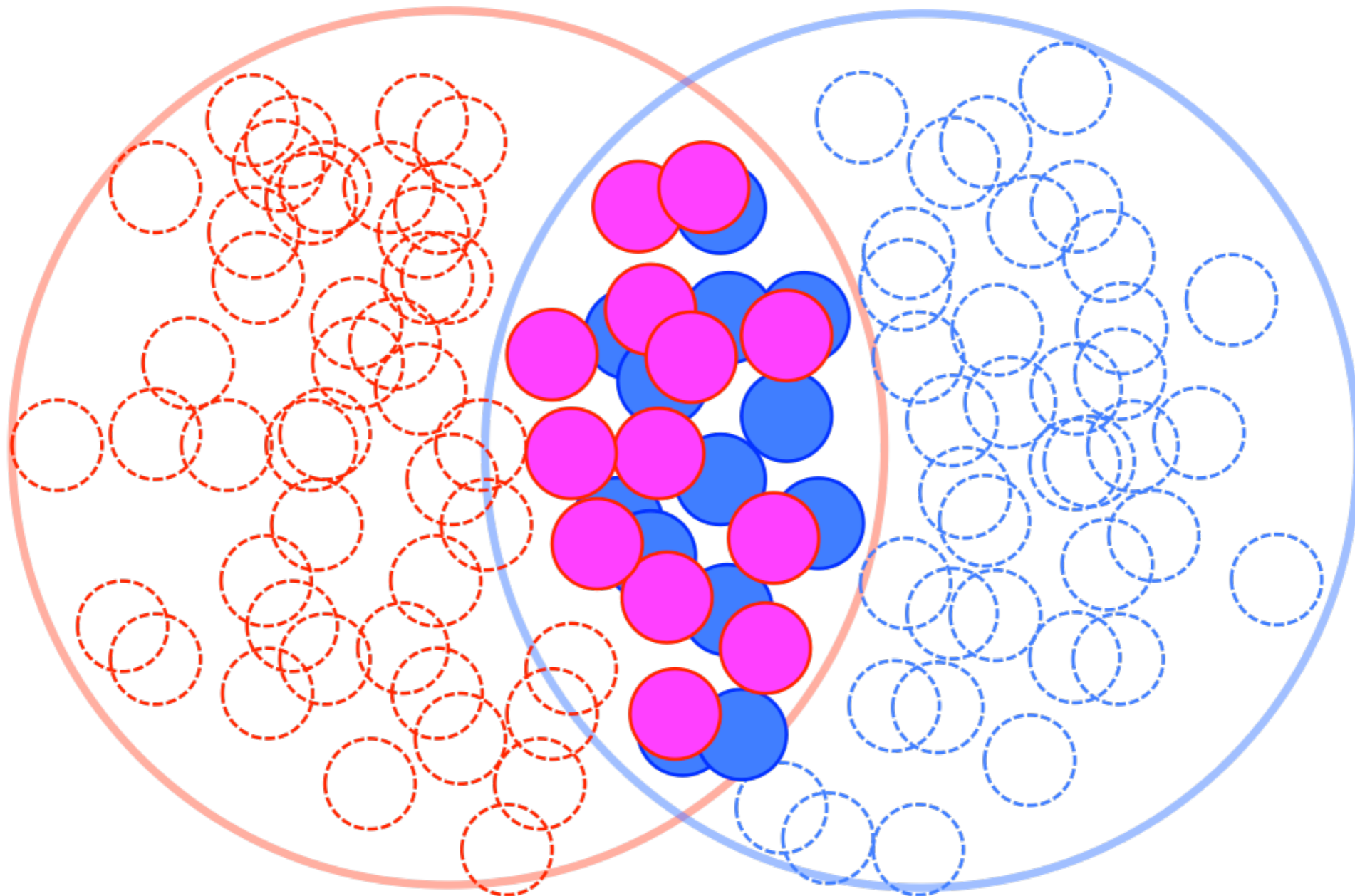


Axial charges from color flux tubes

$$X_j \in \{+1, -1\}$$

Sign of $\mathbf{E}^a \cdot \mathbf{B}^a$

$$\mu_5(\mathbf{x}_T) = C_{\mu_5} \sum_{j=1}^{N_{\text{coll}}(\mathbf{x}_T)} X_j$$

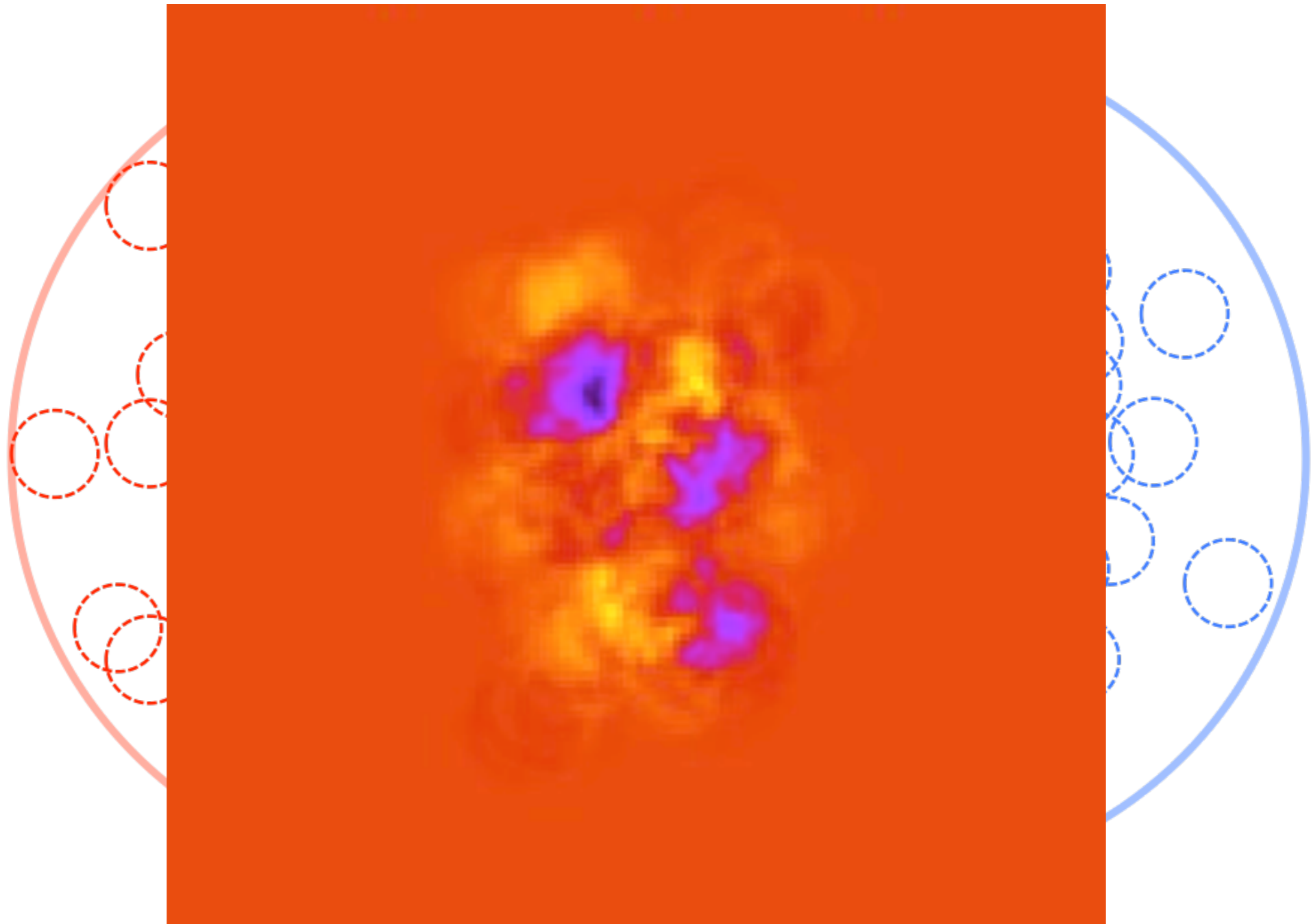


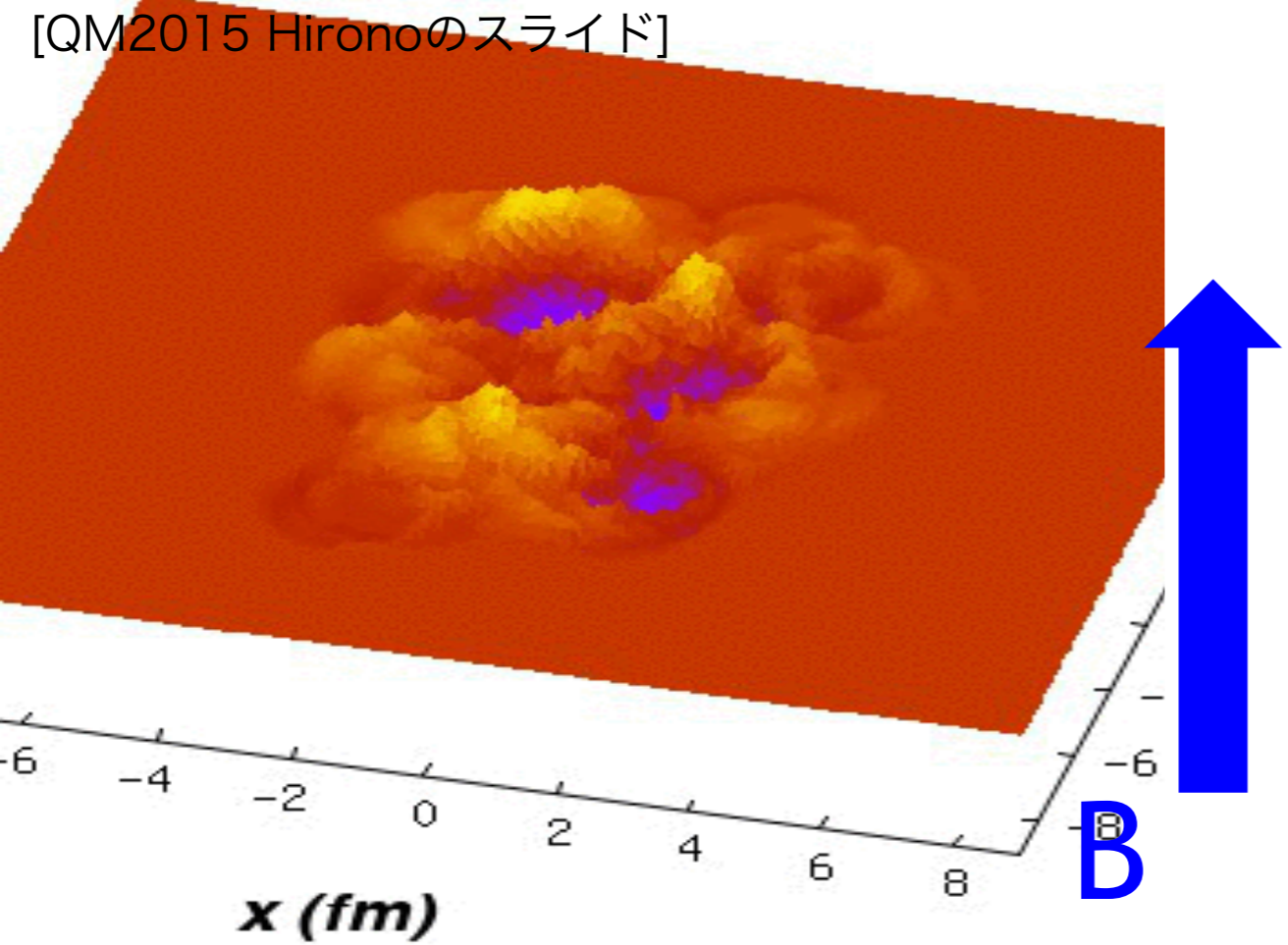
Axial charges from color flux tubes

$$X_j \in \{+1, -1\}$$

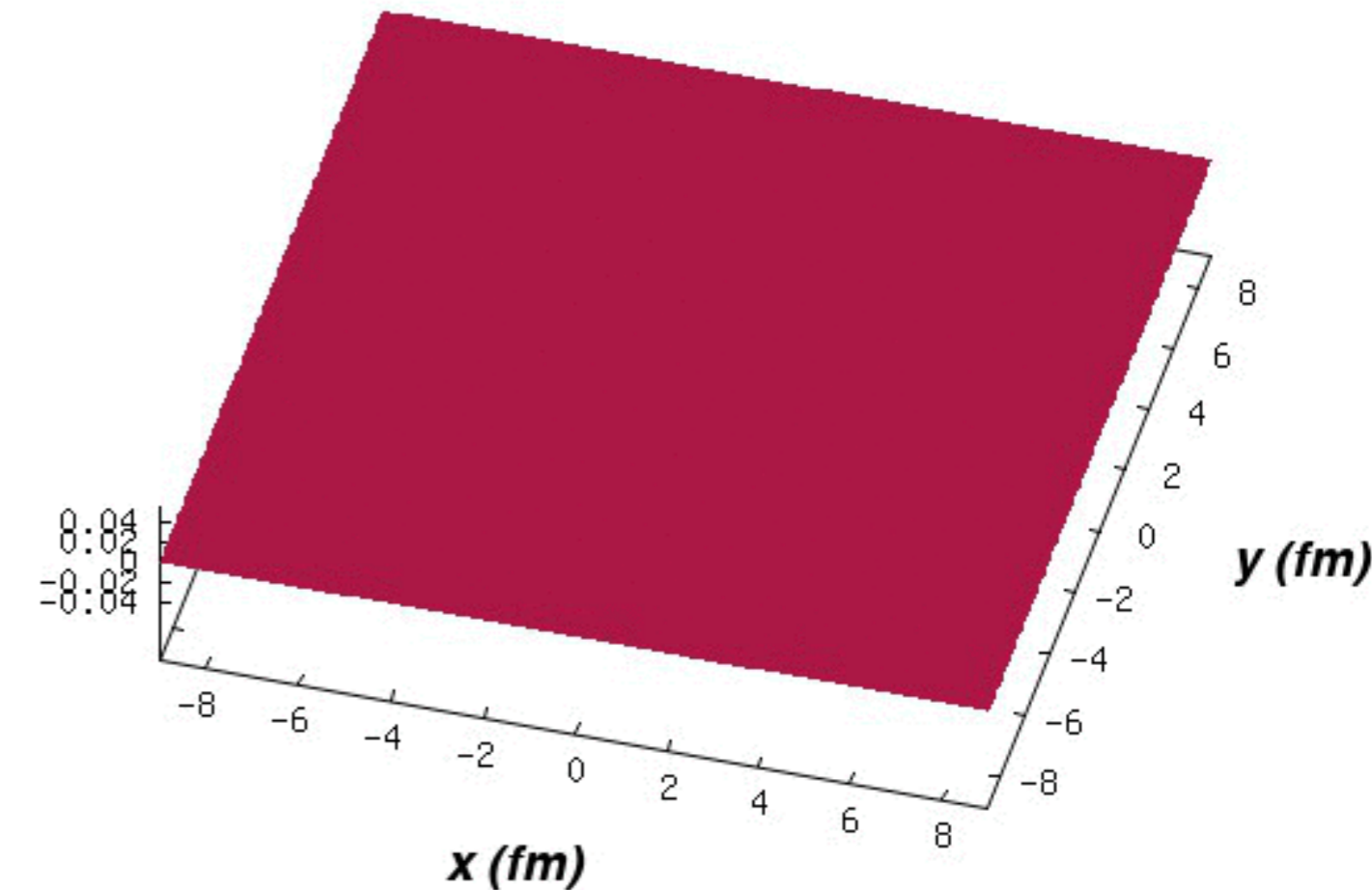
Sign of $\mathbf{E}^a \cdot \mathbf{B}^a$

$$\mu_5(\mathbf{x}_T) = C_{\mu_5} \sum_{j=1}^{N_{\text{coll}}(\mathbf{x}_T)} X_j$$



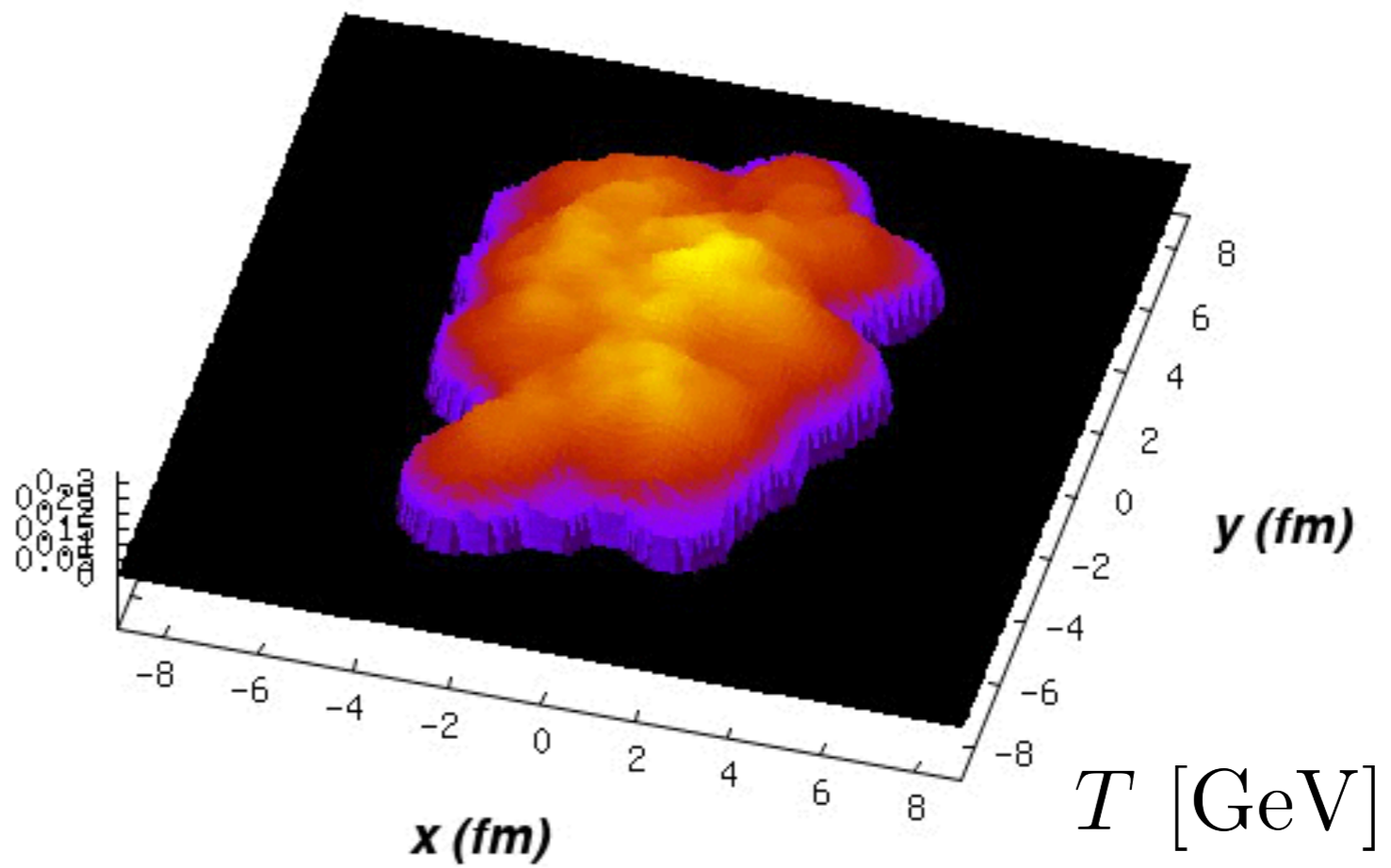


μ_5 [GeV]



μ [GeV]

- RHIC energy
- =7.2fm(20-30%)
- $eB_{\text{max}} \simeq (2m_{\pi})^2$
- $\tau_B = 3$ [fm]
- $C_{\mu_5} = 0.1$ [GeV]

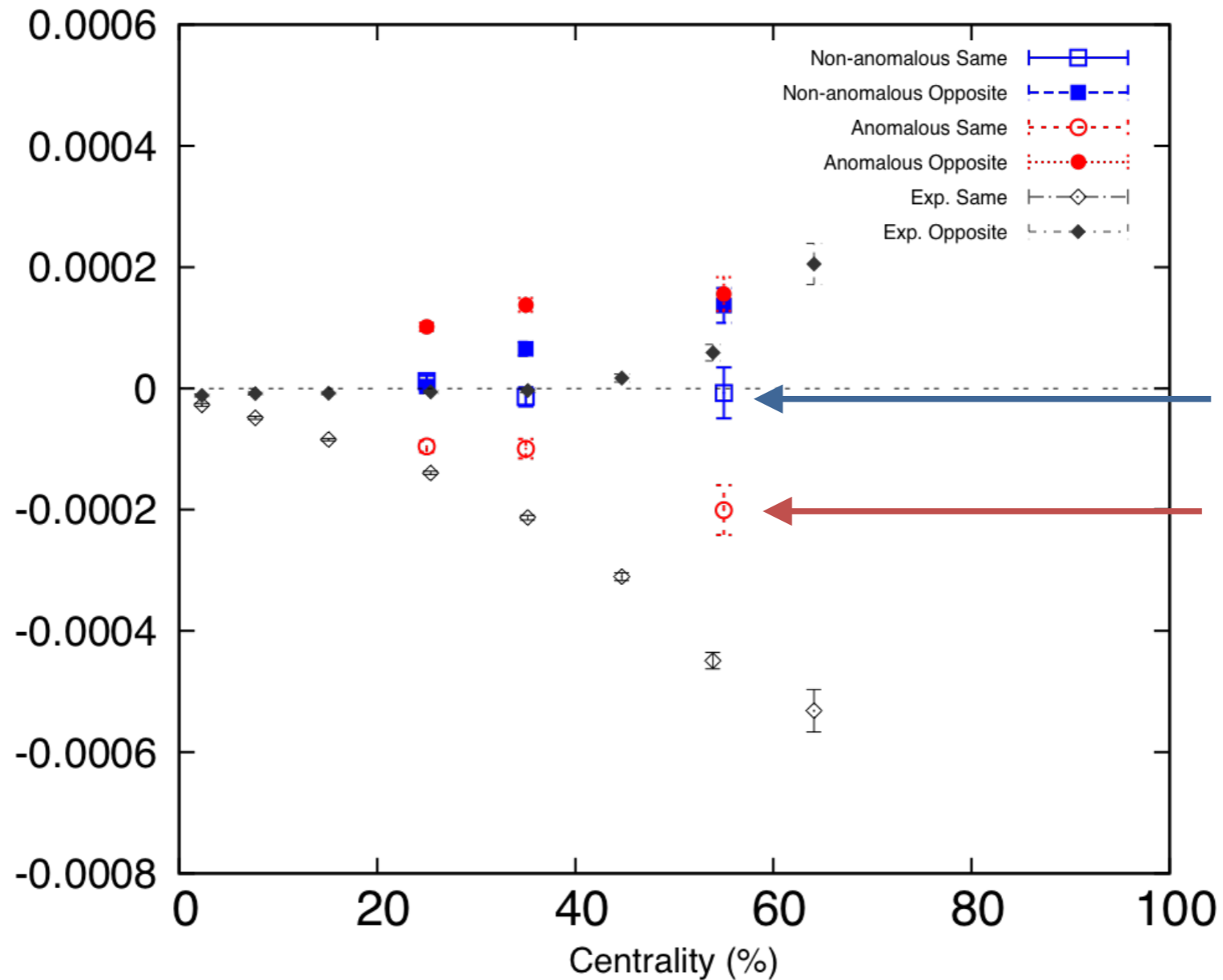


T [GeV]

Event-by-event anomalous hydro under decaying B

$$\gamma_{\alpha\beta} = \langle \cos(\phi_i + \phi_j - 2\psi_{RP}) \rangle_{\alpha\beta}$$

[Hirono-Hirano-Kharzeev 1412.0311]



Without CME

With CME

Gamma is indeed sensitive to CME

QM2017での進展(の一部)

1. 重イオン衝突におけるカイラル輸送現象の検証に向けて

✓ カイラル磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Hirono]

- 粘性+カイラル輸送流体のシミュレーションと粒子相関の計算 [Talk by Shi]
- 小さい系におけるカイラル磁気効果の実験的検証 [Talk by Sorensen, Tu, Park]
- RHICの同重体(isobar, ZrZr/RuRu)衝突実験に向けた計算 [Talk by Huang, Shi]
- 初期過程における古典統計近似に基づいたカイラル磁気効果の計算 [Talk by Mueller]
- カイラル渦/磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Guo]
- 流速場の渦度分布の時間発展とラムダ粒子の偏極 [Talk by Pang, Karpenko, Wang]
- 原子核内の荷電粒子を波束として扱ったときの電磁場の時間発展 [Talk by Peroutka]

2. カイラル輸送現象に関する新しい現象の提案

- 磁力線のつながりかえにより誘発されるカイラル磁気効果 [Talk by Hirono, Kharzeev]
- カイラル磁気流体におけるモード解析と不安定モード [Talk by Hattori, Hirono]
- 強い磁場中におけるカイラルプラズマの輸送現象(電荷の再分配) [Talk by Hattori]

How Can We Calculate CME Quantitatively?

axial (& vector)
charge density

Anomalous
-Viscous
Fluid
Dynamics

initial condition

+

driving force

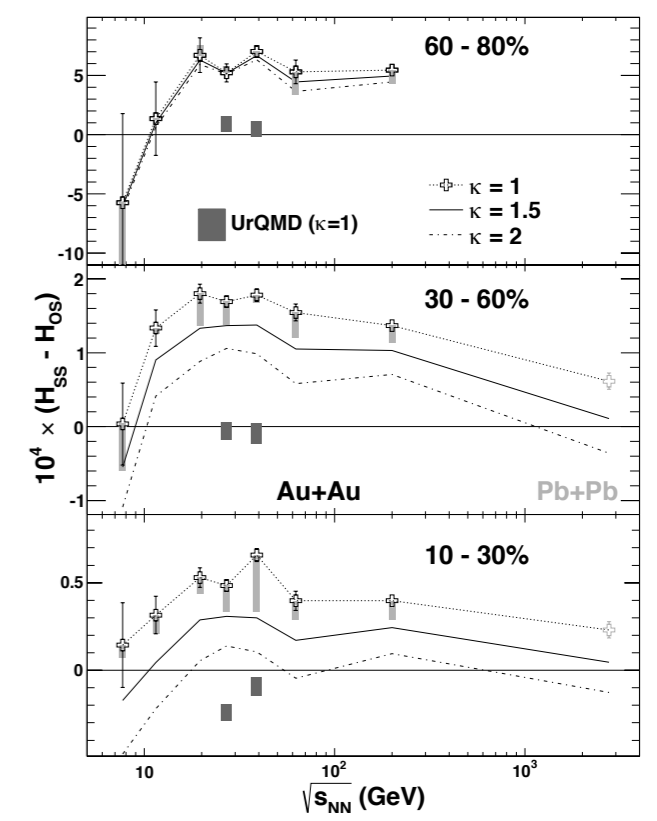
B field



dynamical
evolution



final particle
distribution



M.Hongo, Y.Hirono, T.Hirano, 2013;
 H.-U.Yee, Y.Yin, 2014;
 Y.Hirono, T.Hirano, D.Kharzeev, 2014;
 Y.Yin, J.Liao, 2016;

Anomalous-Viscous Fluid Dynamics

$$D_{\mu} J_R^{\mu} = + \frac{N_c q^2}{4\pi^2} E_{\mu} B^{\mu} \quad D_{\mu} J_L^{\mu} = - \frac{N_c q^2}{4\pi^2} E_{\mu} B^{\mu}$$

$$J_R^{\mu} = n_R u^{\mu} + v_R^{\mu} + \frac{N_c q}{4\pi^2} \mu_R B^{\mu}$$

$$J_L^{\mu} = n_L u^{\mu} + v_L^{\mu} - \frac{N_c q}{4\pi^2} \mu_L B^{\mu}$$

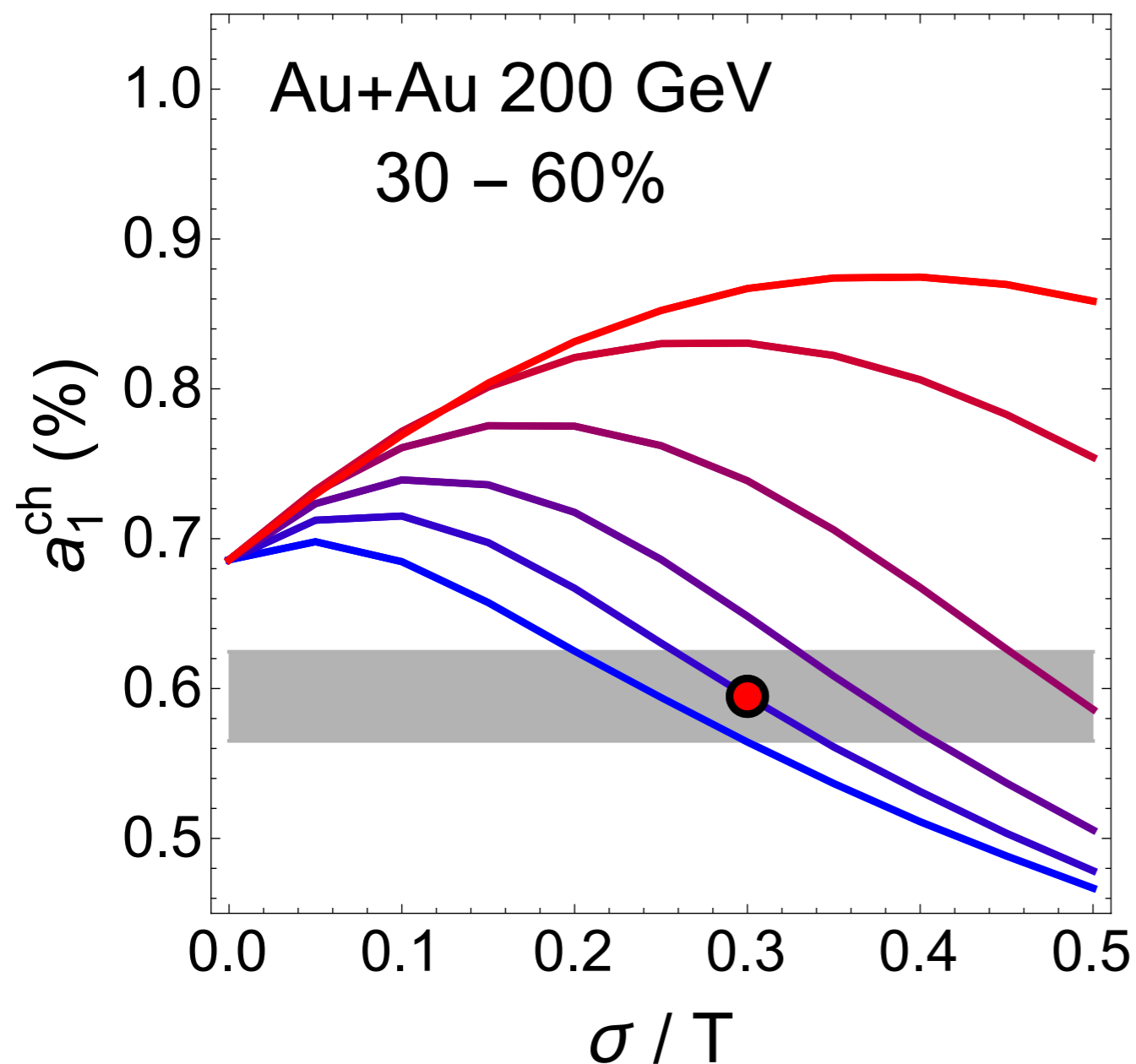
CME

$$\Delta_{\nu}^{\mu} d v_{R,L}^{\nu} = - \frac{1}{\tau_{\text{rlx}}} (v_{R,L}^{\mu} - v_{\text{NS}}^{\mu})$$

on top of 2+1D VISHNew — OSU Group

$$D_{\mu} T^{\mu\nu} = 0$$

Effect of Viscous Transportation

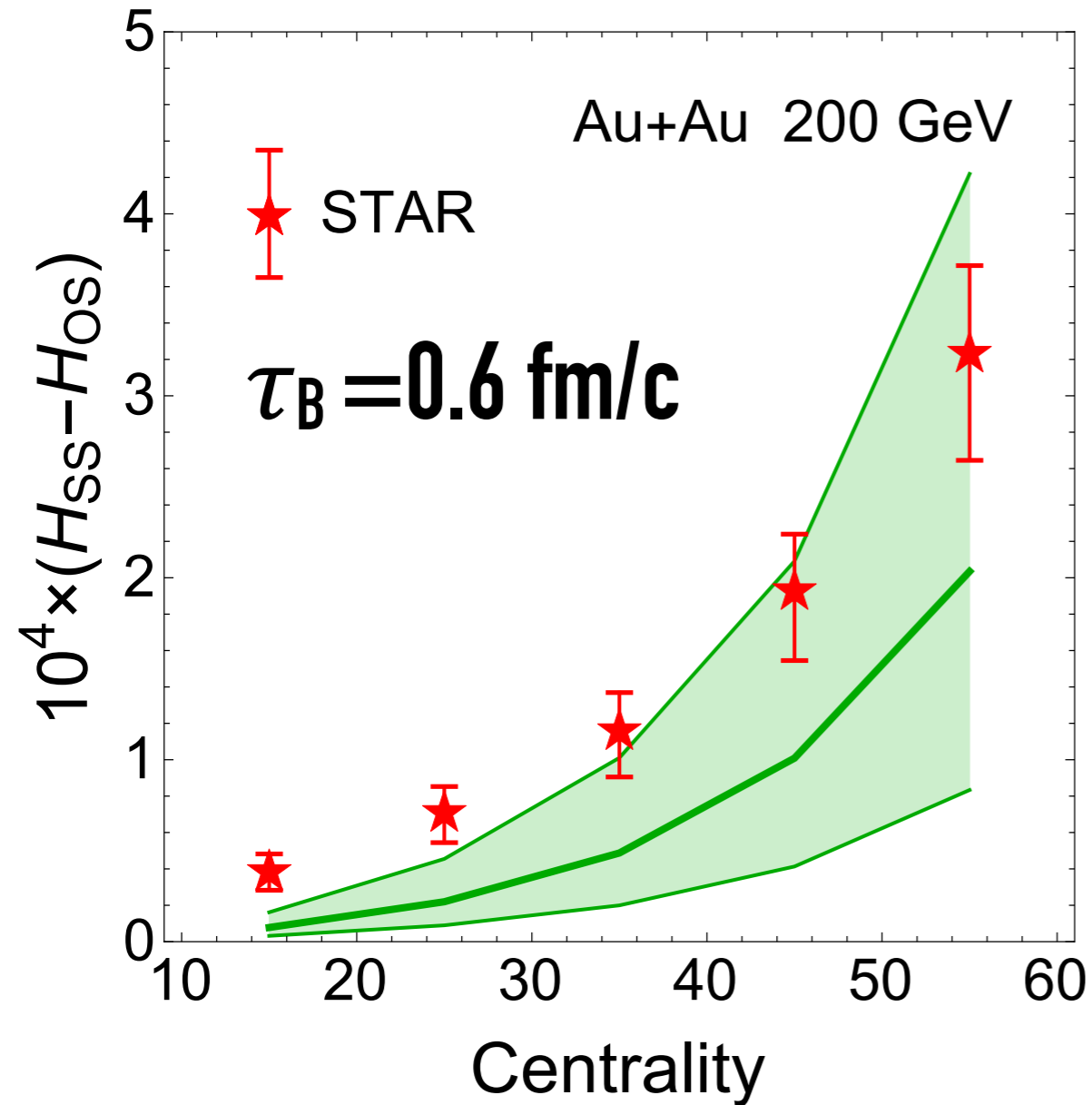


$$\Delta_{\nu}^{\mu} d v_{R,L}^{\nu} = -\frac{1}{\tau_{\text{rlx}}} (v_{R,L}^{\mu} - v_{\text{NS}}^{\mu})$$

$$v_{\text{NS}}^{\mu} = \frac{\sigma}{2} T \Delta^{\mu\nu} \partial_{\nu} \frac{\mu}{T} + \frac{\sigma}{2} q E^{\mu}$$

- Viscous transportation has sizable ($\sim 30\%$) effect on charge separation.
- “Canonic” parameters are employed.

Comparison with Experimental Data



Implementing with best
estimated n_A & τ_B

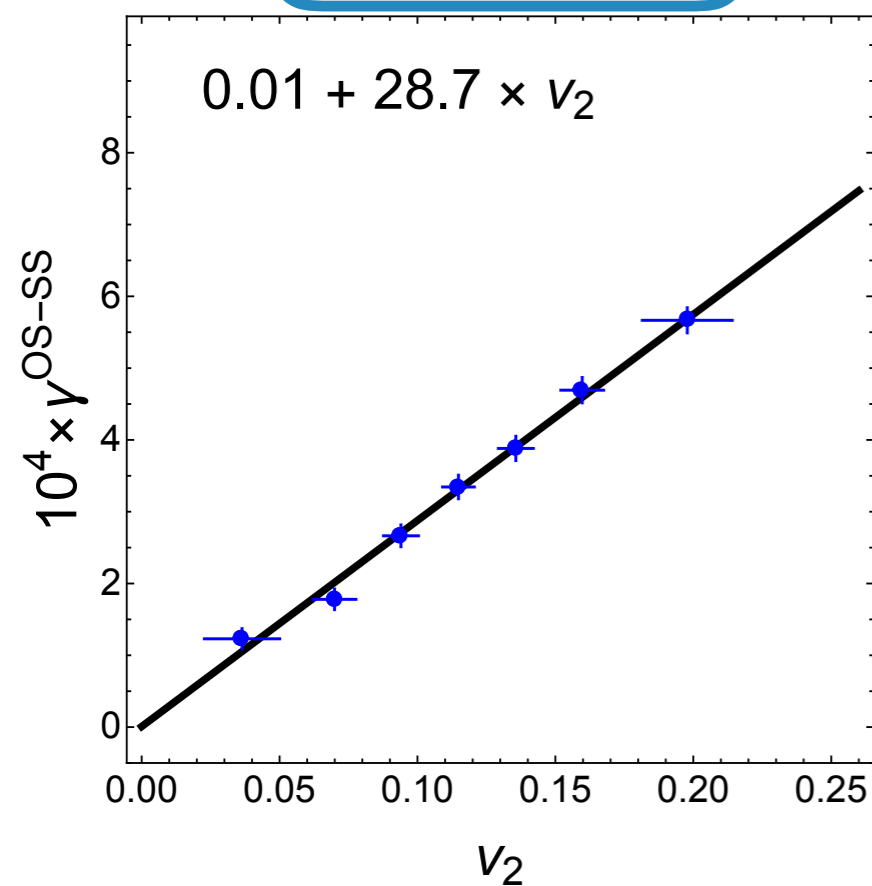
Good agreement for
magnitude & centrality trend

Y.Jiang, SS, Y.Yin & J.Liao,

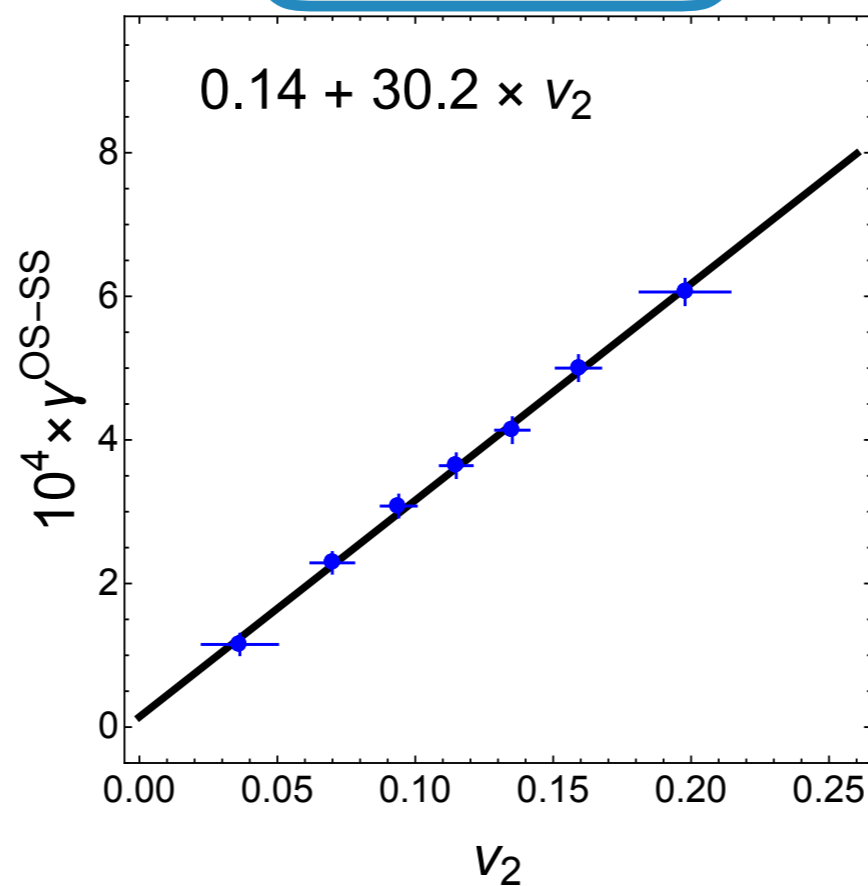
arXiv:1611.04586

CME from event-by-event simulation

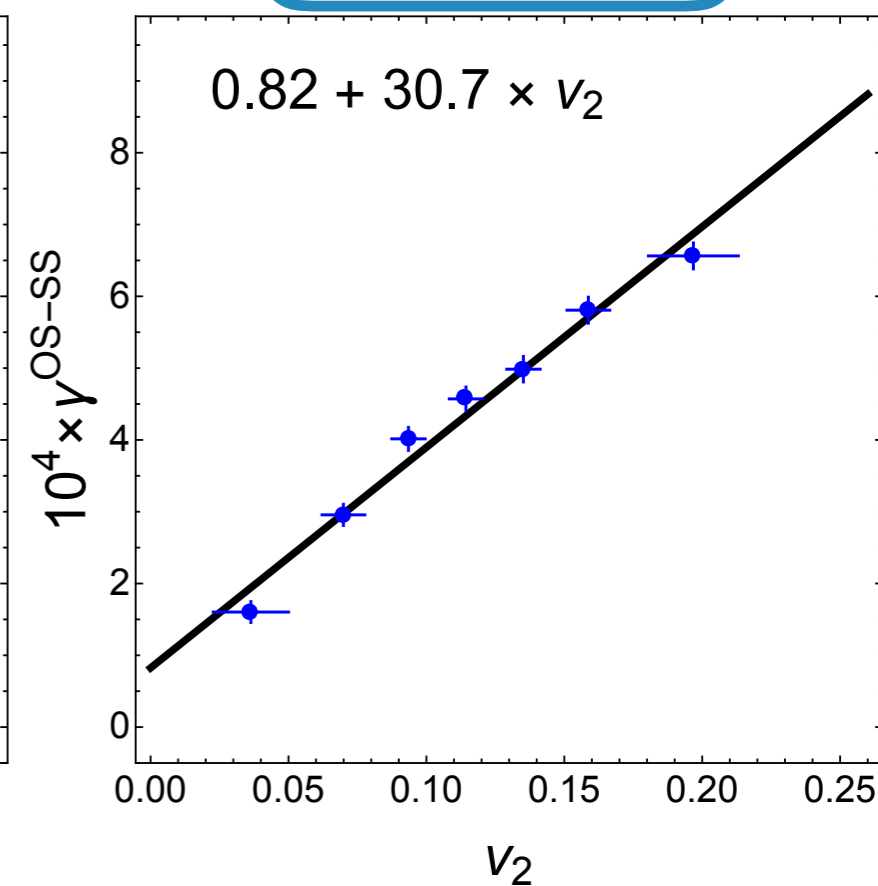
$$n_A/s=0.0$$



$$n_A/s=0.1$$



$$n_A/s=0.2$$



$$\gamma = \kappa v_2 \mathbf{F} - \mathbf{H}$$

注意：以上のシナリオは危ない

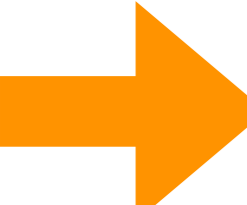
$U(1)_V \times U(1)_A$ に関するカイラル輸送は流体力学としては危険！

$$U(1)_V : \partial_\mu j_V^\mu = 0 \quad \longrightarrow \quad \mu_V$$

$$U(1)_A : \partial_\mu j_5^\mu = C g^2 E^a \cdot B^a + C' e^2 E \cdot B \quad \xrightarrow{\text{!}} \quad \mu_A$$

 $U(1)_V \times SU(2)_A$ に関するカイラル輸送は流体としてまだ安全

$$SU(2)_A \ni \partial_\mu A_3^\mu = C' e^2 E \cdot B \quad \longrightarrow \quad \mu_{A_3}$$

 μ_{A_3} に関するCME/CVE自体を流体力学で調べることはできるが、
重イオン衝突におけるスファレロン遷移を
 μ_A を含めたカイラル流体力学で調べるのは理論的に危険

CMEのシグナル候補1

Charge dependent correlations: $\langle \cos(\phi_1^\alpha + \phi_2^\beta - 2\Psi_{RP}) \rangle$
 $\alpha, \beta \in \{+, -\}$

これらは本当にCMEのシグナルと言えるか？



参照実験で本当にシグナルか確かめよう！



同じ電荷同士の2粒子相関・異なる電荷の2粒子相関の間の
非対称性がCMEのシグナルになっているはず！

QM2017での進展(の一部)

1. 重イオン衝突におけるカイラル輸送現象の検証に向けて

✓ カイラル磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Hirono]

✓ 粘性+カイラル輸送流体のシミュレーションと粒子相関の計算 [Talk by Shi]

- 小さい系におけるカイラル磁気効果の実験的検証 [Talk by Sorensen, Tu, Park]

- RHICの同重体(isobar, ZrZr/RuRu)衝突実験に向けた計算 [Talk by Huang, Shi]

- 初期過程における古典統計近似に基づいたカイラル磁気効果の計算 [Talk by Mueller]

- カイラル渦/磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Guo]

- 流速場の渦度分布の時間発展とラムダ粒子の偏極 [Talk by Pang, Karpenko, Wang]

- 原子核内の荷電粒子を波束として扱ったときの電磁場の時間発展 [Talk by Peroutka]

2. カイラル輸送現象に関する新しい現象の提案

- 磁力線のつながりかえにより誘発されるカイラル磁気効果 [Talk by Hirono, Kharzeev]

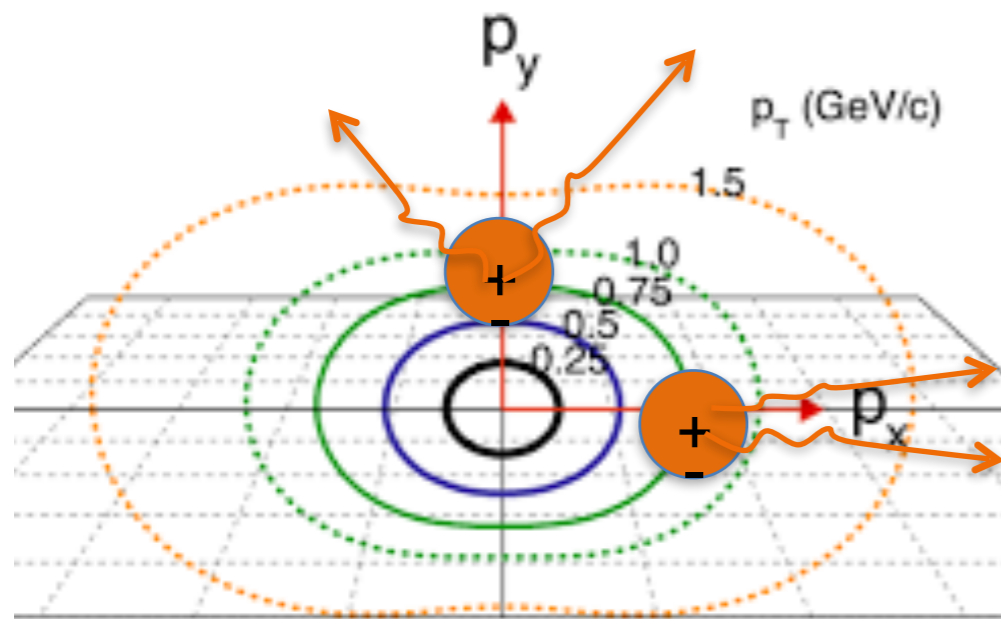
- カイラル磁気流体におけるモード解析と不安定モード [Talk by Hattori, Hirono]

- 強い磁場中におけるカイラルプラズマの輸送現象(電荷の再分配) [Talk by Hattori]

Small systemでの実験結果

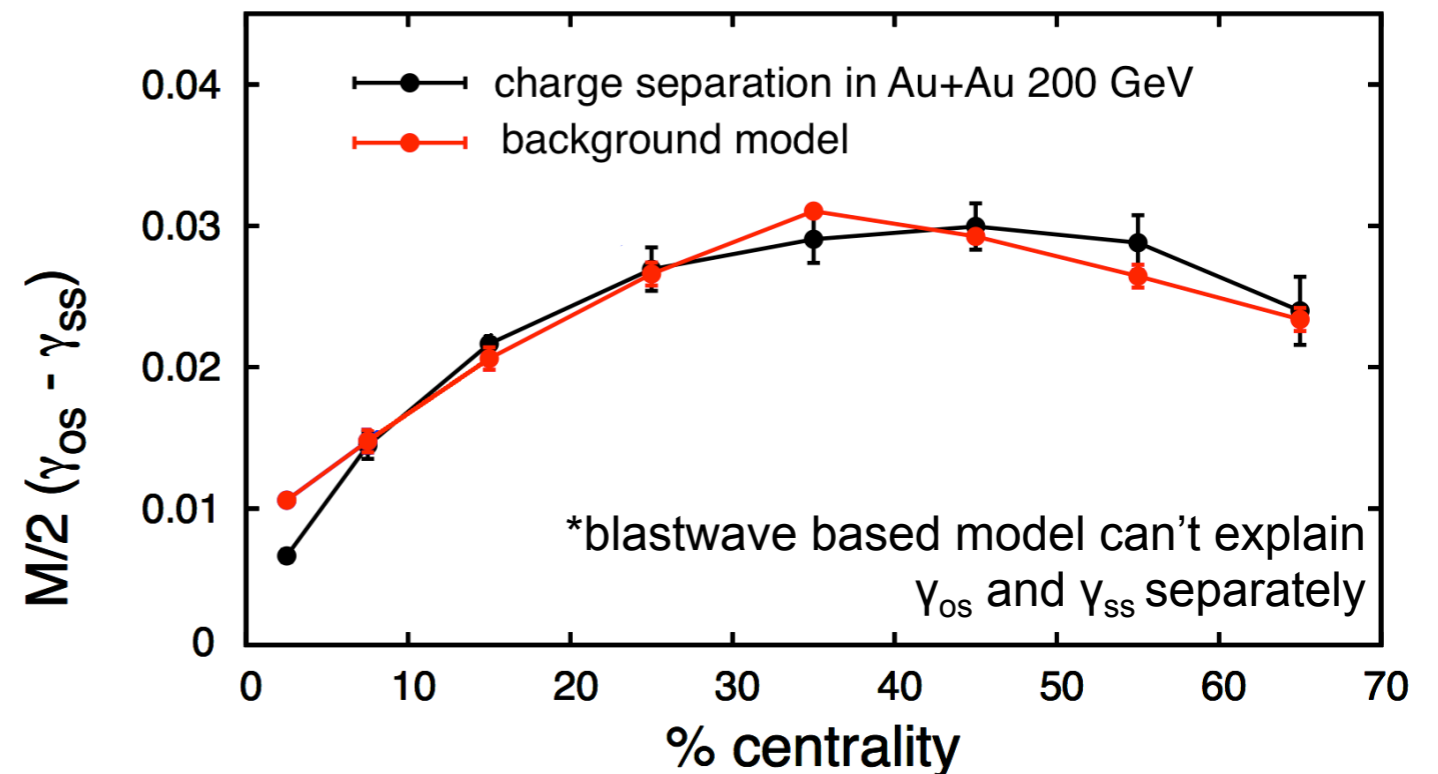
Potential Backgrounds

Backgrounds unrelated to the chiral magnetic effect may be able to explain the observed charge separation*



Flow boost collimates pairs more strongly in-plane than out of plane
 known backgrounds are expected to go as v_2

S. Schlichting and S. Pratt, Phys. Rev. C 83, 014913 (2011)

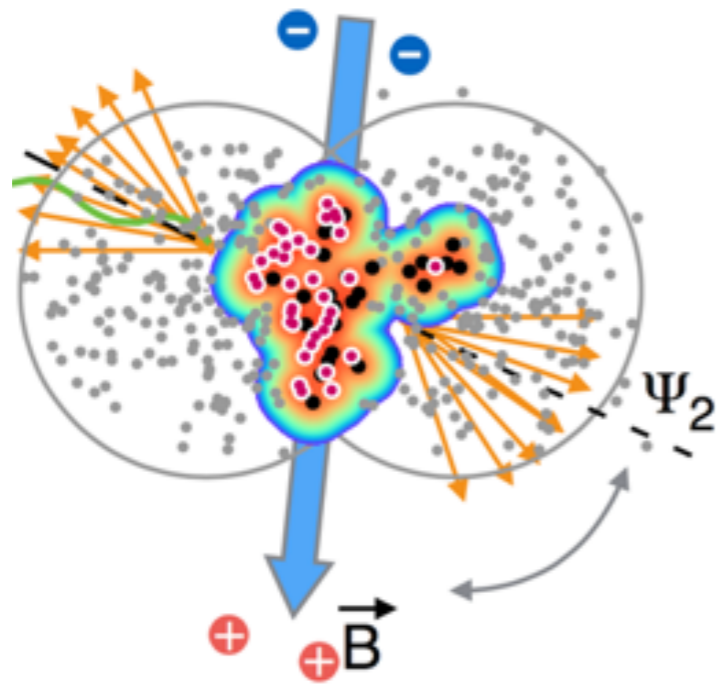


*blastwave based model can't explain γ_{os} and γ_{ss} separately

Difficult to draw definitive conclusions without better models, and an independent lever arm for magnetic field and v_2

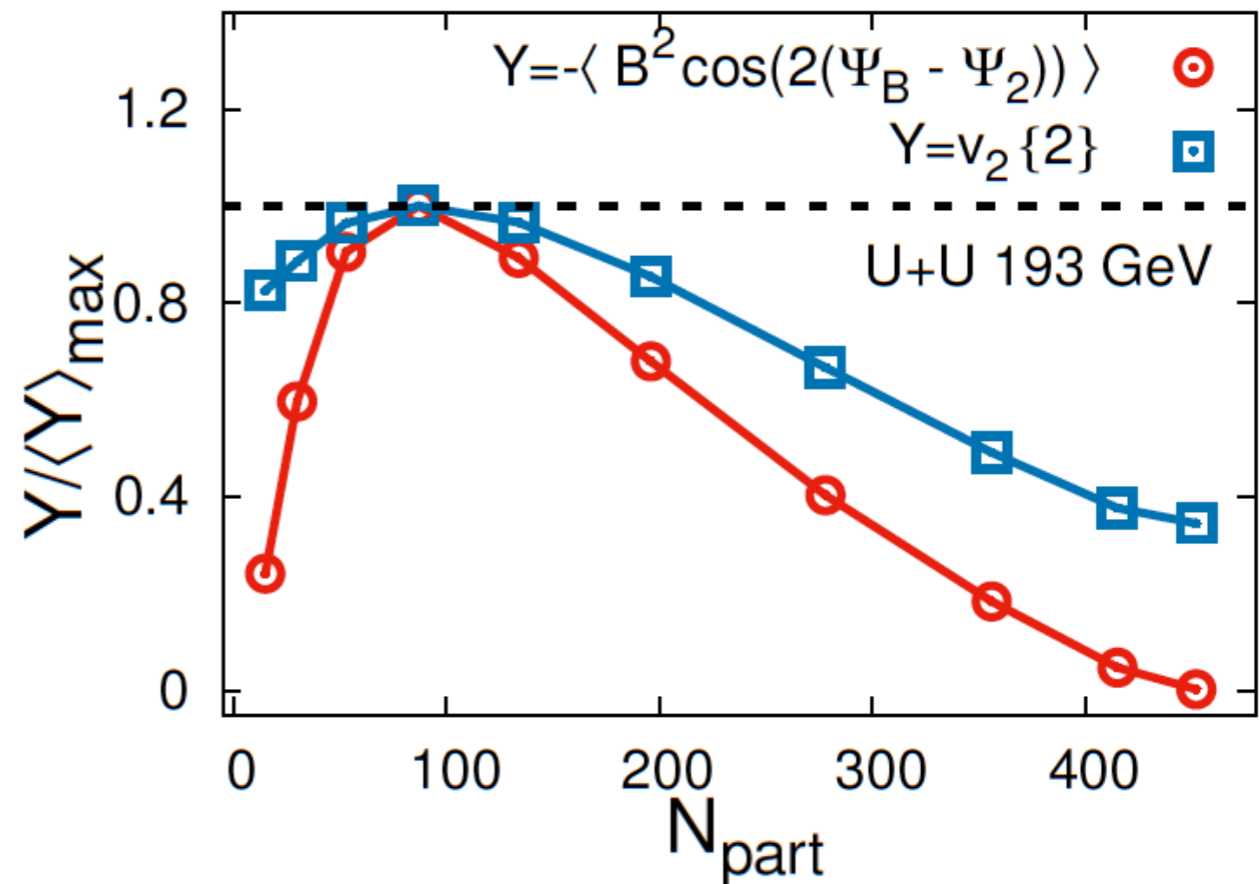
Disentangling the Entangled

CME should follow projected magnetic field $\langle B^2 \cos(2(\psi_B - \psi_2)) \rangle$



Signal and background have similar centrality dependence

Prithwish Tribedy: Parallel Session 4.2



Background mimics the signal. We need ways to break the degeneracy. Several attempts were shown at this Quark Matter

- Ultra central U+U and Au+Au (*P. Tribedy*)
- Event-shape engineering (*A. Dobrin*)
- p+A, d+A (*X.-G.Huang, S. Park, P. Tribedy, Z. Tu, L. Wen*)

In the future, isobar collisions $^{96}\text{Ru}_{40}$ and $^{96}\text{Zr}_{44}$ appear very promising

How can we turn it off?

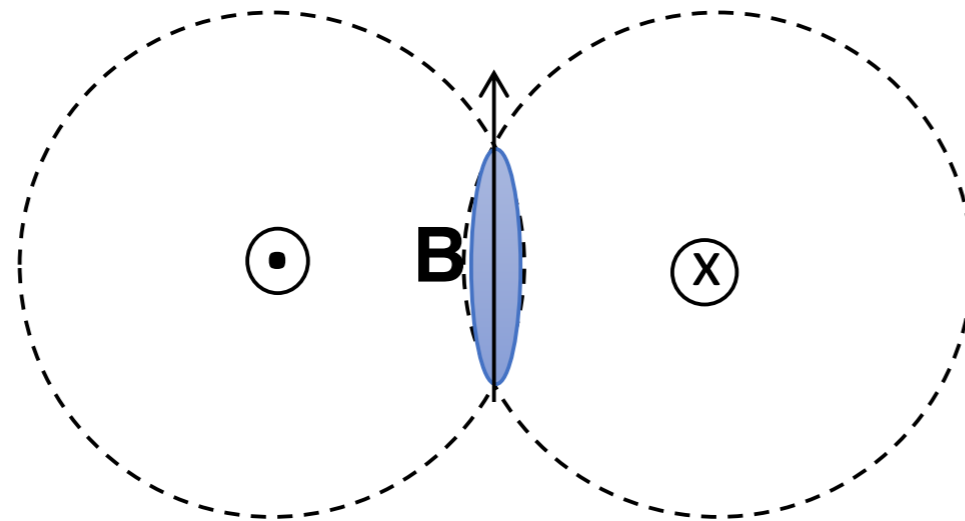
arXiv:1607.04697

- **Charge separation signal:** $\Delta\gamma \sim B^2 \left\langle \cos\left(2\Psi_B - 2\Psi_{EP}\right) \right\rangle$

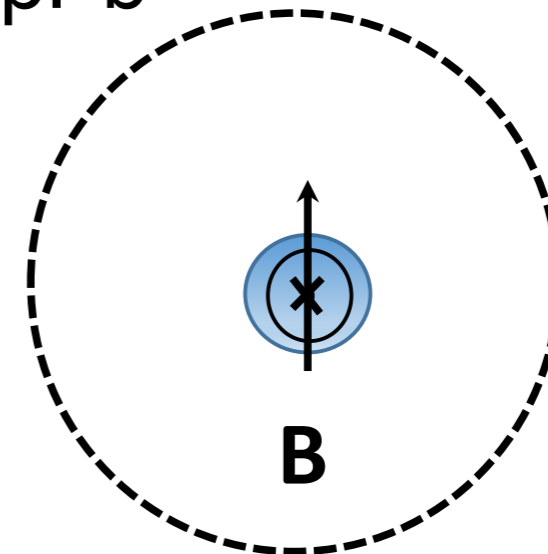
How does the B-field in pPb compare to PbPb?

- $B(\text{PbPb}) > B(\text{pPb})$ for the magnitude

PbPb



pPb



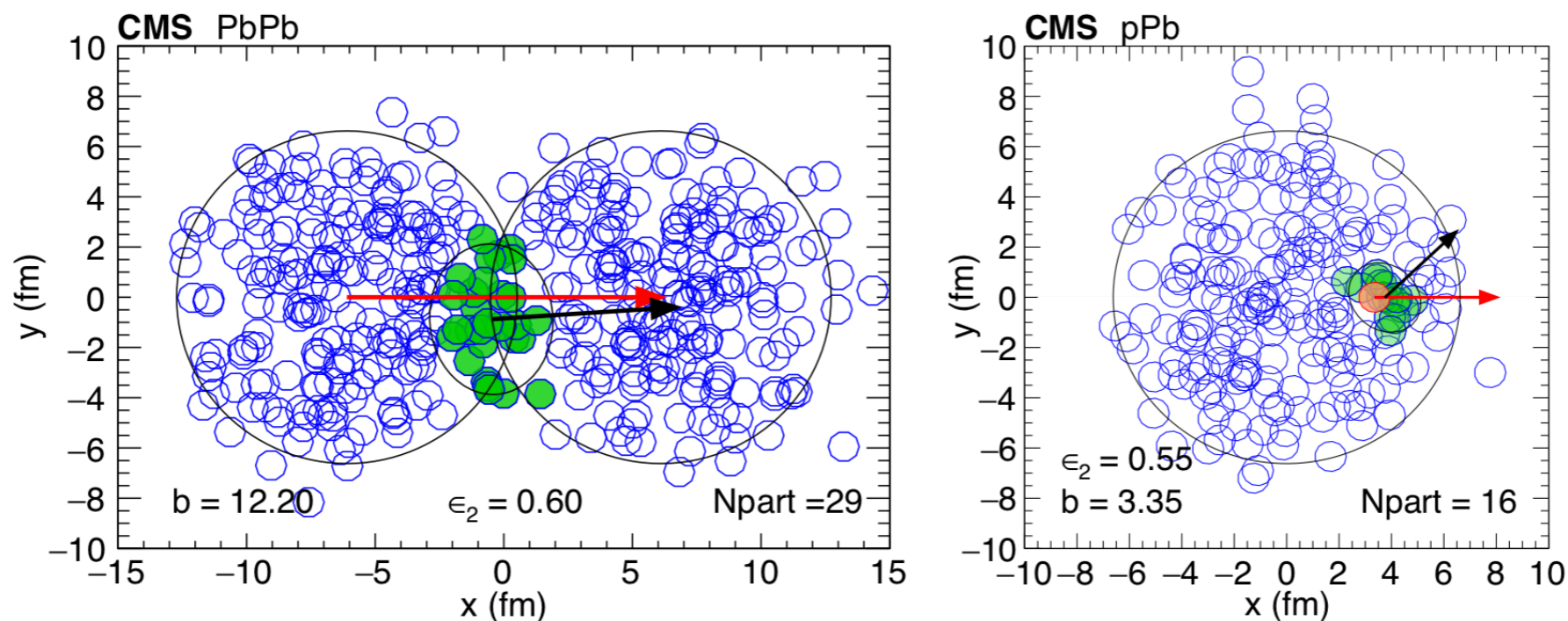
How can we turn it off?

arXiv:1607.04697

- **Charge separation signal:** $\Delta\gamma \sim B^2 \left\langle \cos\left(2\Psi_B - 2\Psi_{EP}\right) \right\rangle$

How does the B-field in pPb compare to PbPb?

- $B(\text{PbPb}) > B(\text{pPb})$ for the magnitude
- De-correlation between Ψ_B and Ψ_{EP}



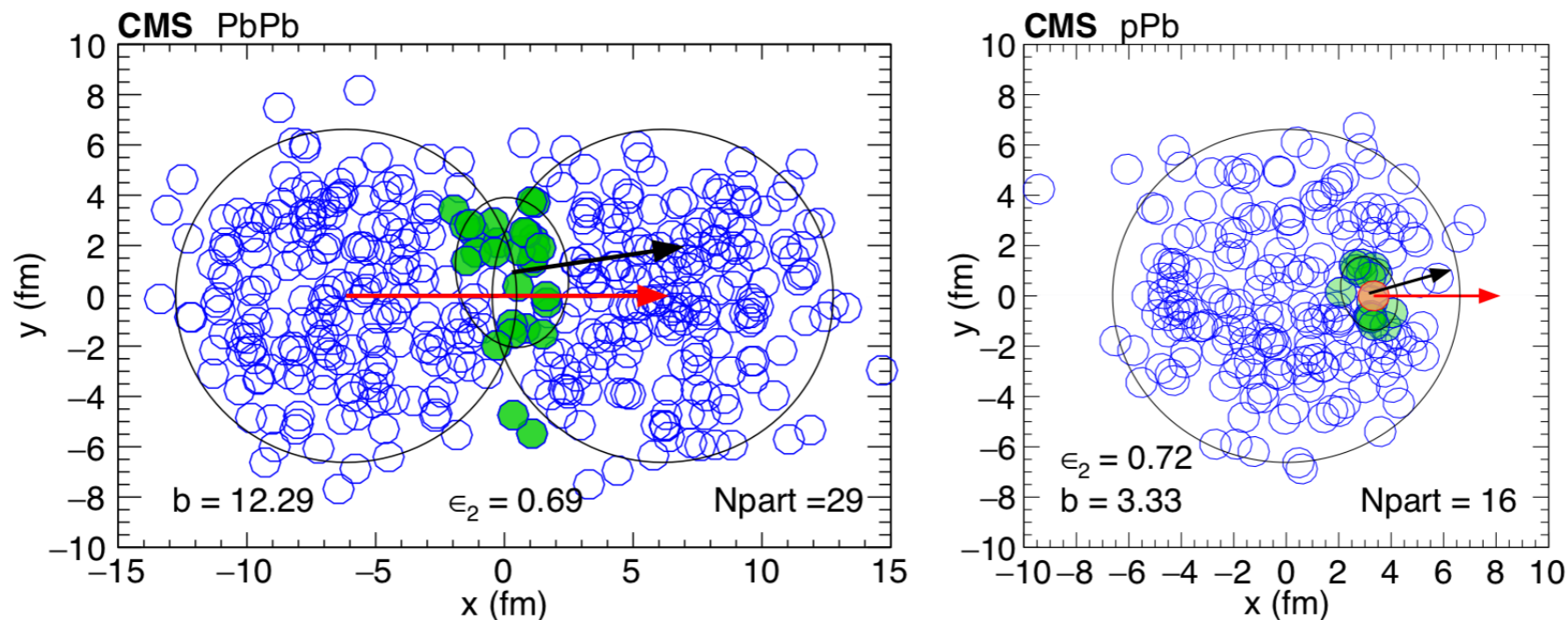
How can we turn it off?

arXiv:1607.04697

- **Charge separation signal:** $\Delta\gamma \sim B^2 \left\langle \cos\left(2\Psi_B - 2\Psi_{EP}\right) \right\rangle$

How does the B-field in pPb compare to PbPb?

- $B(\text{PbPb}) > B(\text{pPb})$ for the magnitude
- De-correlation between Ψ_B and Ψ_{EP}



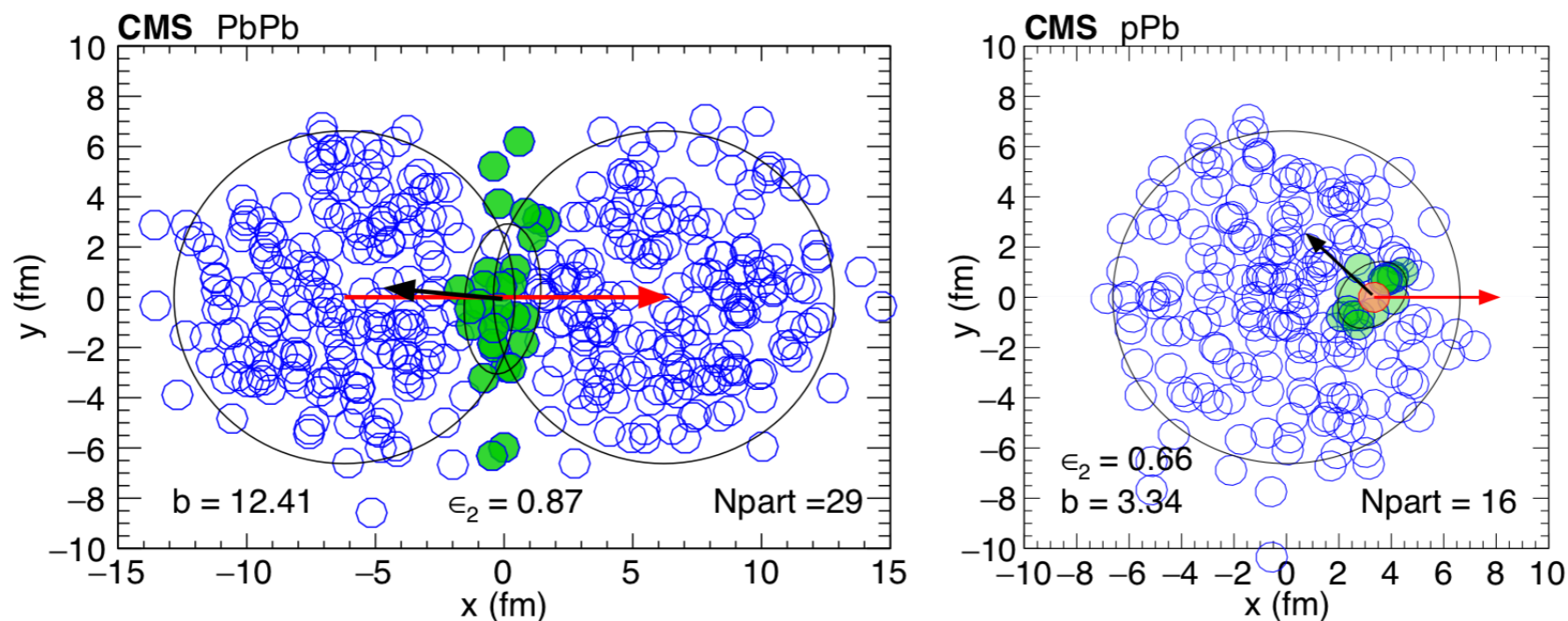
How can we turn it off?

arXiv:1607.04697

- **Charge separation signal:** $\Delta\gamma \sim B^2 \left\langle \cos\left(2\Psi_B - 2\Psi_{EP}\right) \right\rangle$

How does the B-field in pPb compare to PbPb?

- B (PbPb) > B (pPb) for the magnitude
- De-correlation between Ψ_B and Ψ_{EP}



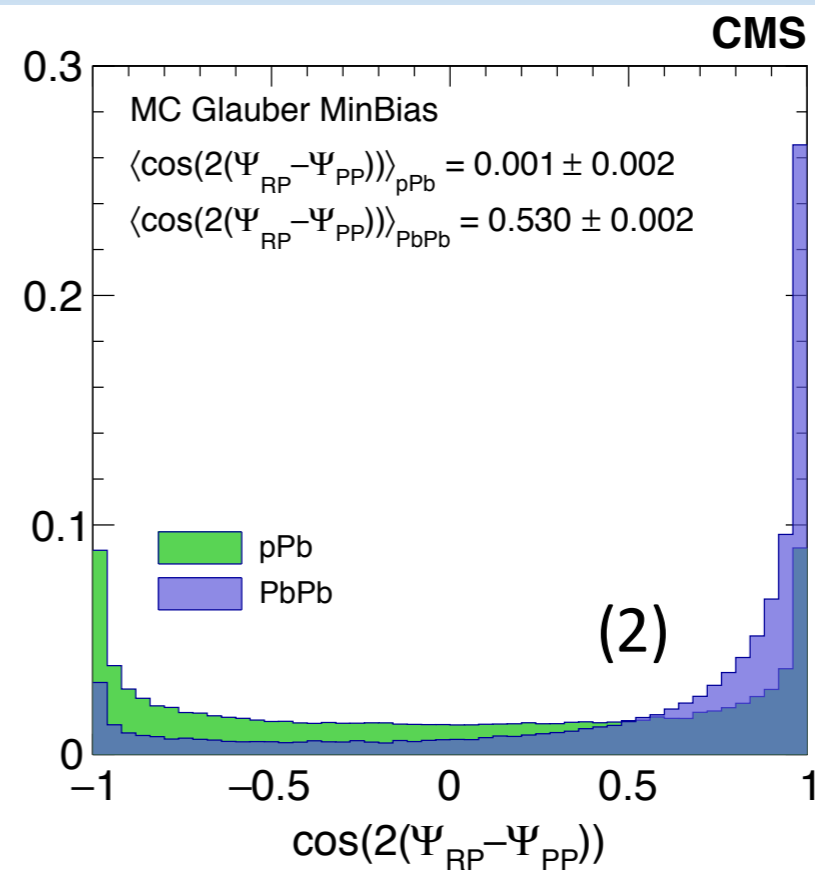
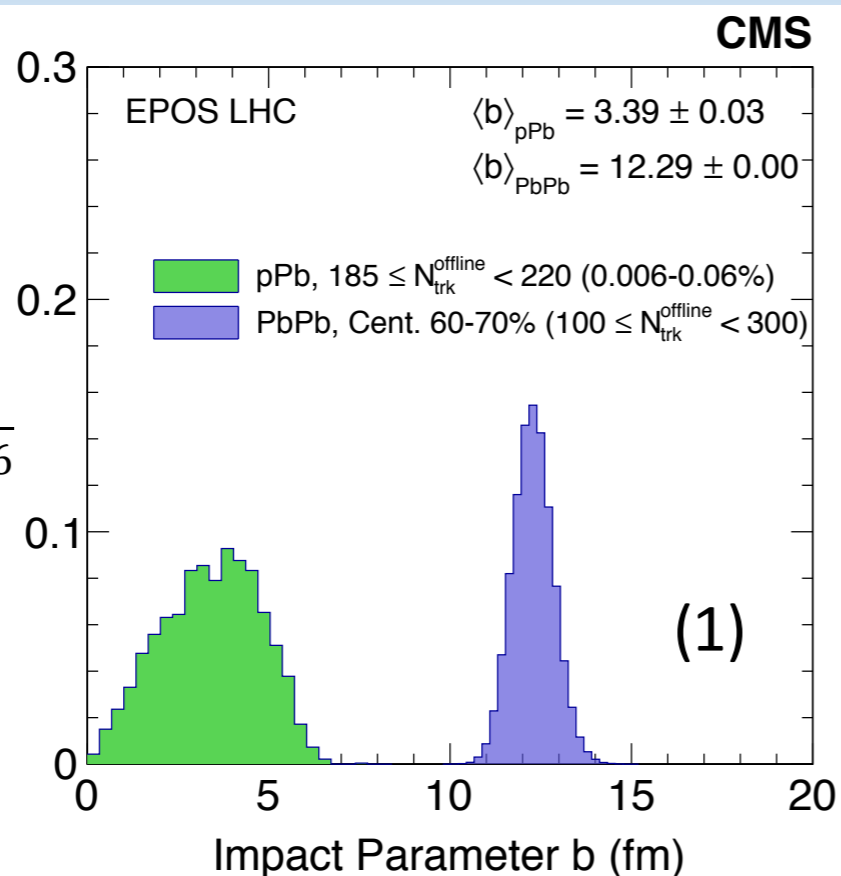
How can we turn it off?

arXiv:1607.04697

○ **Charge separation signal:** $\Delta\gamma \sim B^2 \left\langle \cos\left(2\Psi_B - 2\Psi_{EP}\right) \right\rangle$

- B (PbPb) > B (pPb) for the magnitude
- De-correlation between Ψ_B ($\sim\Psi_{RP}$) and Ψ_{EP} ($\sim\Psi_{PP}$)

$$(1) \quad \left(\frac{B_{pPb}}{B_{PbPb}}\right)^2 \sim \left(\frac{b_{pPb}}{b_{PbPb}}\right)^2 \leq \frac{1}{16}$$



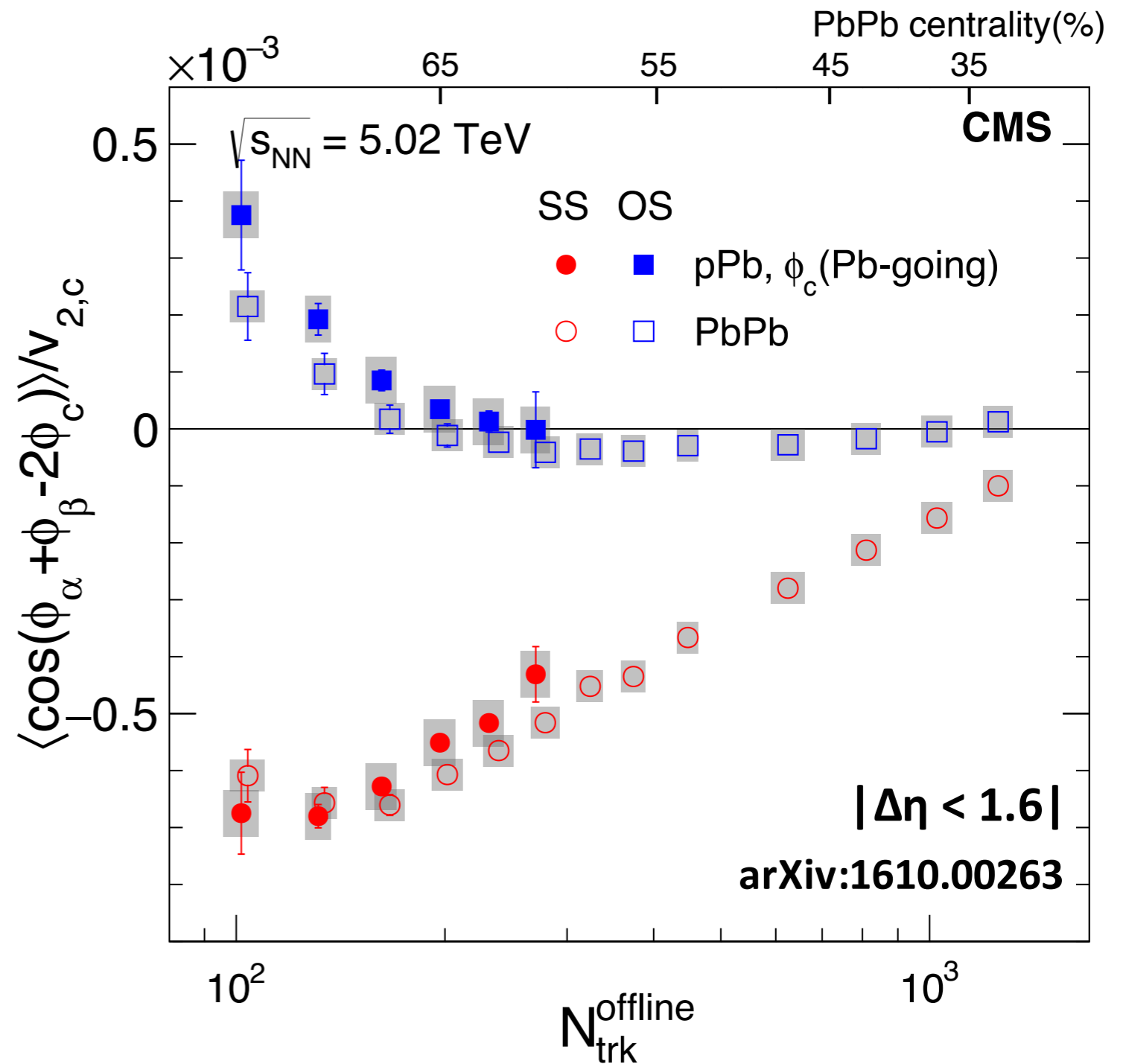
$$(2) \quad \frac{\langle \cos(2\Psi_B - 2\Psi_{EP}) \rangle_{pPb}}{\langle \cos(2\Psi_B - 2\Psi_{EP}) \rangle_{PbPb}} \ll 1$$

- $\Delta\gamma(\text{PbPb}) \gg \Delta\gamma(\text{pPb}) \rightarrow$ support CME in AA
- $\Delta\gamma(\text{PbPb}) \approx \Delta\gamma(\text{pPb}) \rightarrow$ challenge to CME



γ as function of multiplicity

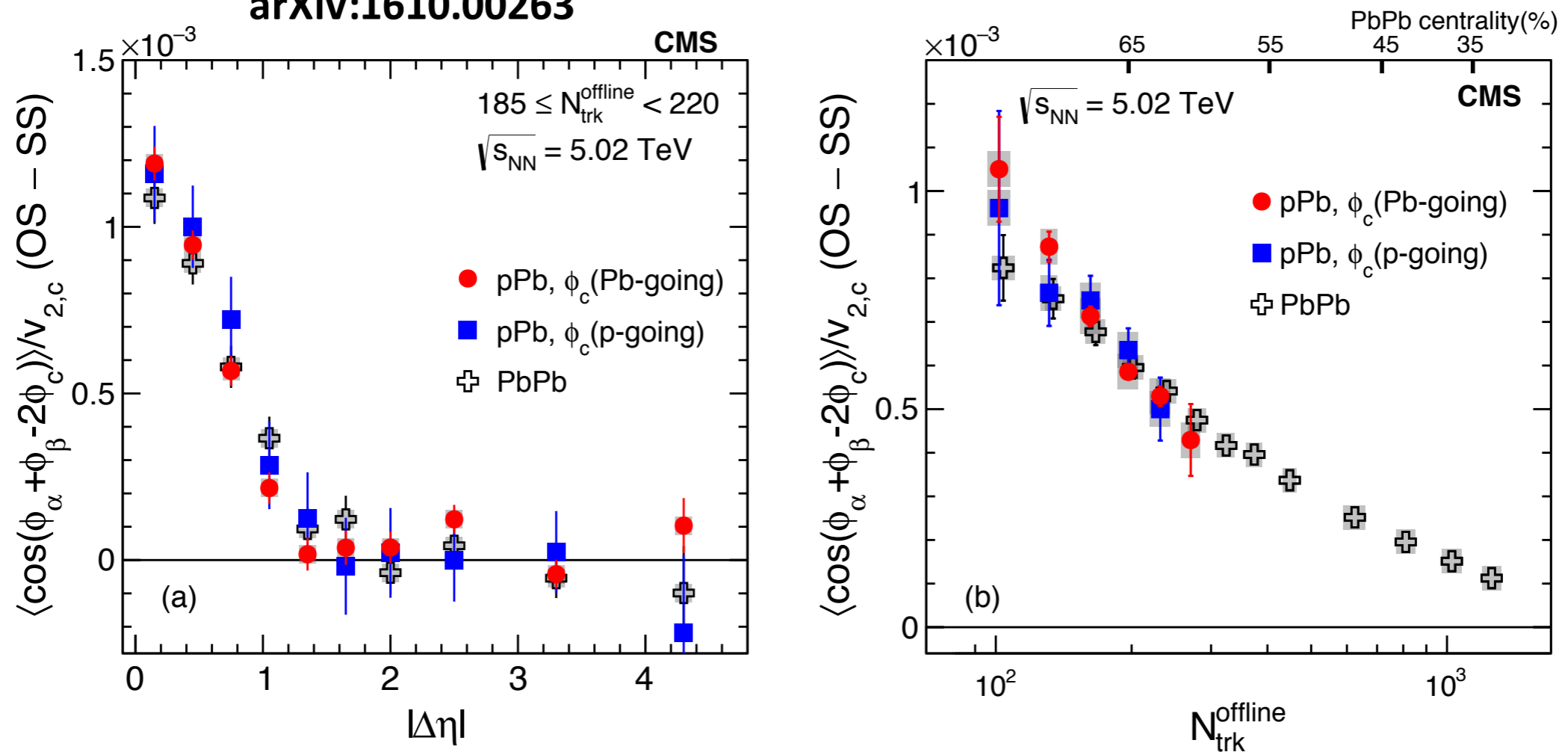
- Integrated results as function of multiplicity in pPb and PbPb collisions.
- Almost identical for both SS and OS from 90 to 300 (N_{trk}) btw two systems.
- **It doesn't seem like a coincidence \rightarrow challenge to CME**





$$\underline{\Delta\gamma (\gamma^{OS} - \gamma^{SS})}$$

arXiv:1610.00263



- All $\Delta\gamma$ (OS-SS) agree with each other in both $\Delta\eta$ and multiplicity.
- The charge separation signal seems not related to B-field.

捜査のプロが分析

田中 隆一

元捜査官 元捜査官 元捜査官

CMEのシグナル,
あるいはバックグラウンド

CMEのシグナル候補1

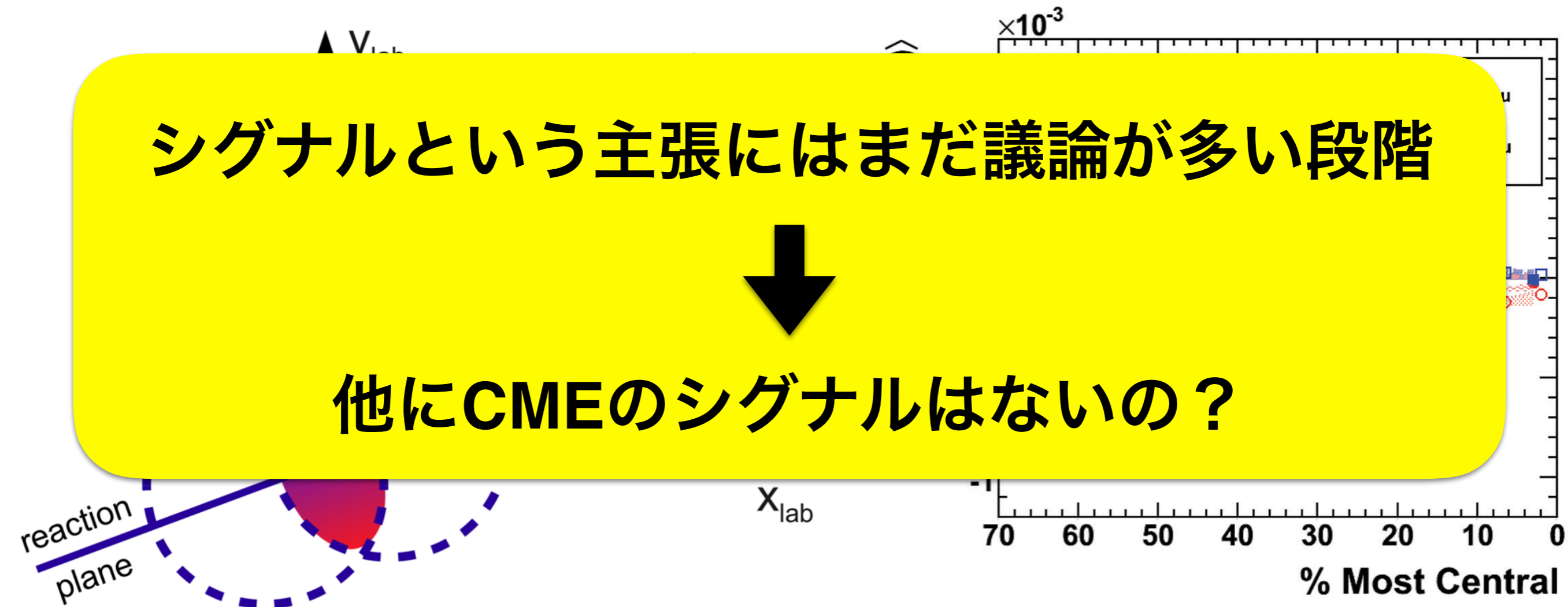
Charge dependent correlations: $\langle \cos(\phi_1^\alpha + \phi_2^\beta - 2\Psi_{RP}) \rangle$
 $\alpha, \beta \in \{+, -\}$

シグナルという主張にはまだ議論が多い段階



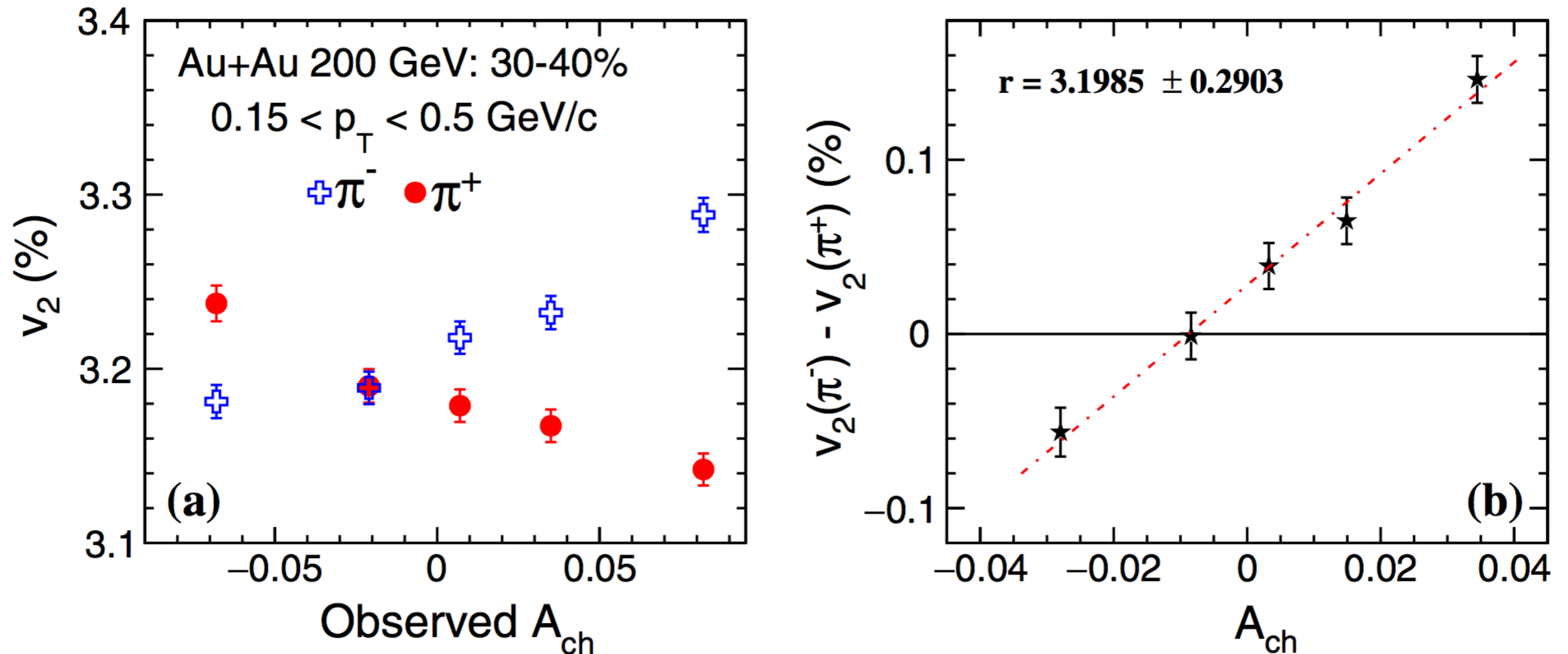
他にCMEのシグナルはないの？

同じ電荷同士の2粒子相関・異なる電荷の2粒子相関の間の
非対称性がCMEのシグナルになっているはず！



CMEのシグナル候補2

Charge dependent elliptic flow: $\Delta v_2 \equiv v_2(\pi^-) - v_2(\pi^+)$



荷電粒子(とくに π 中間子)の楕円フローに関する

電荷ごとの非対称性がCMEのシグナルになっているはず！

カイラル磁気波 (CMW)

カイラル分離効果

$$\vec{j}_5 = \frac{N_c e}{2\pi^2} \underline{\mu} \vec{B}$$

カイラル磁気効果

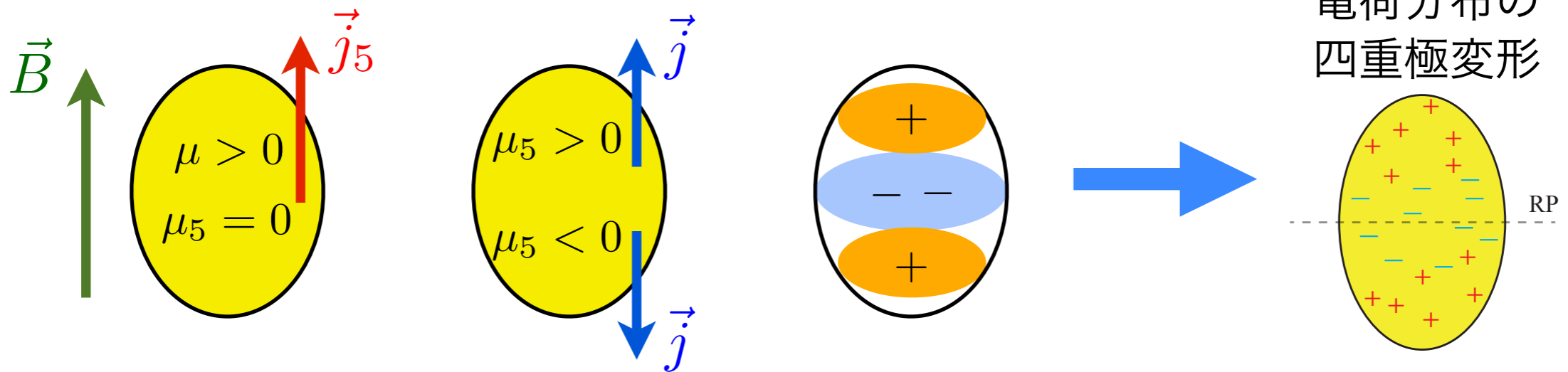
$$\vec{j} = \frac{N_c e}{2\pi^2} \underline{\mu}_5 \vec{B}$$



Chiral Magnetic Wave

[Kharzeev, Yee, 2011]

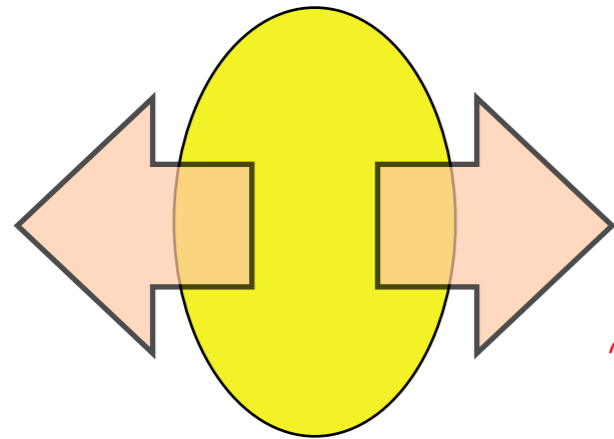
ex.)



[Burnier et al, 2012]

Charge dependent v_2

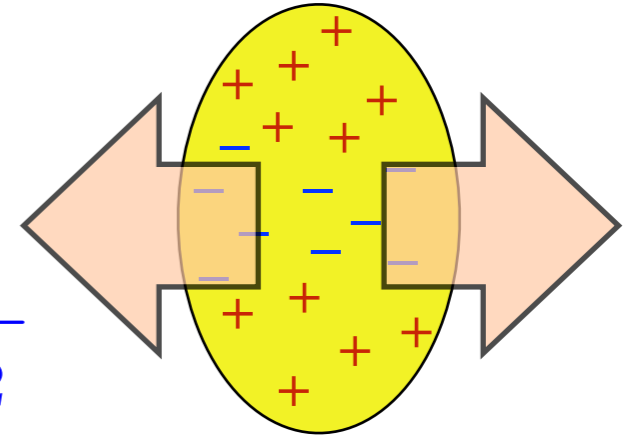
電荷分布の変形がないとき



$$v_2^+ = v_2^-$$



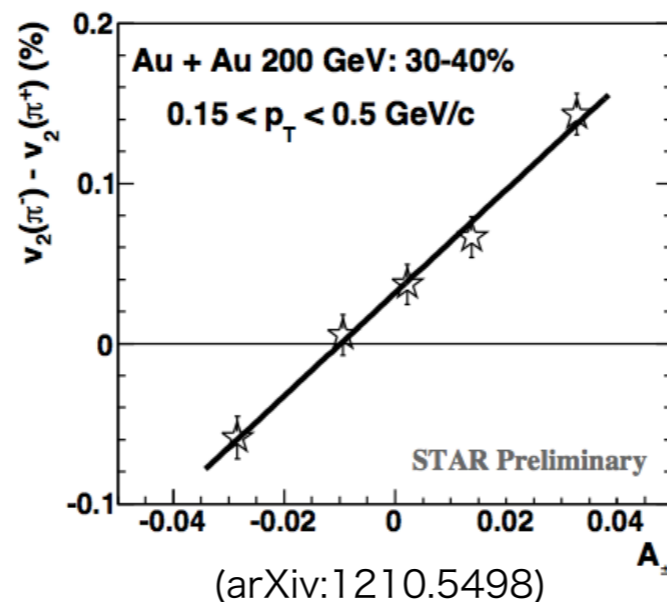
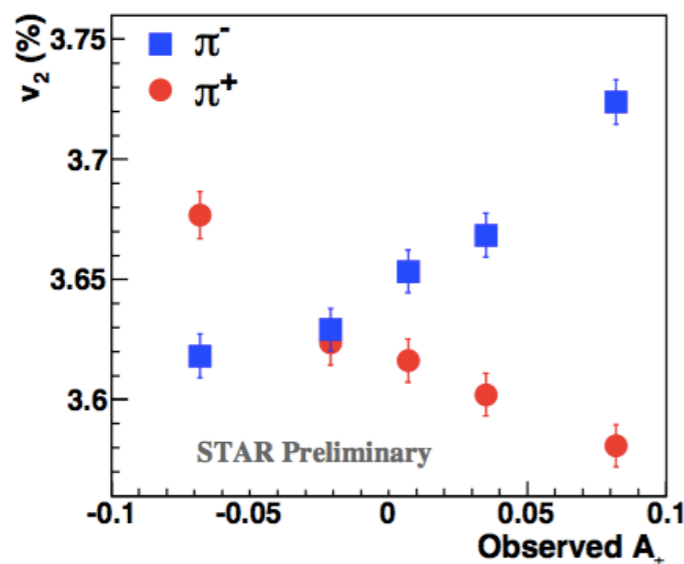
電荷の四重極変形があるとき



$$v_2^+ \neq v_2^-$$

Charge dependent v_2 :
$$v_2^\pm = v_2 \mp r_e A, \quad A \equiv \frac{\bar{N}_+ - \bar{N}_-}{\bar{N}_+ + \bar{N}_-}$$

実験結果 from STAR



$$r_e \sim 10^{-2} > 0$$

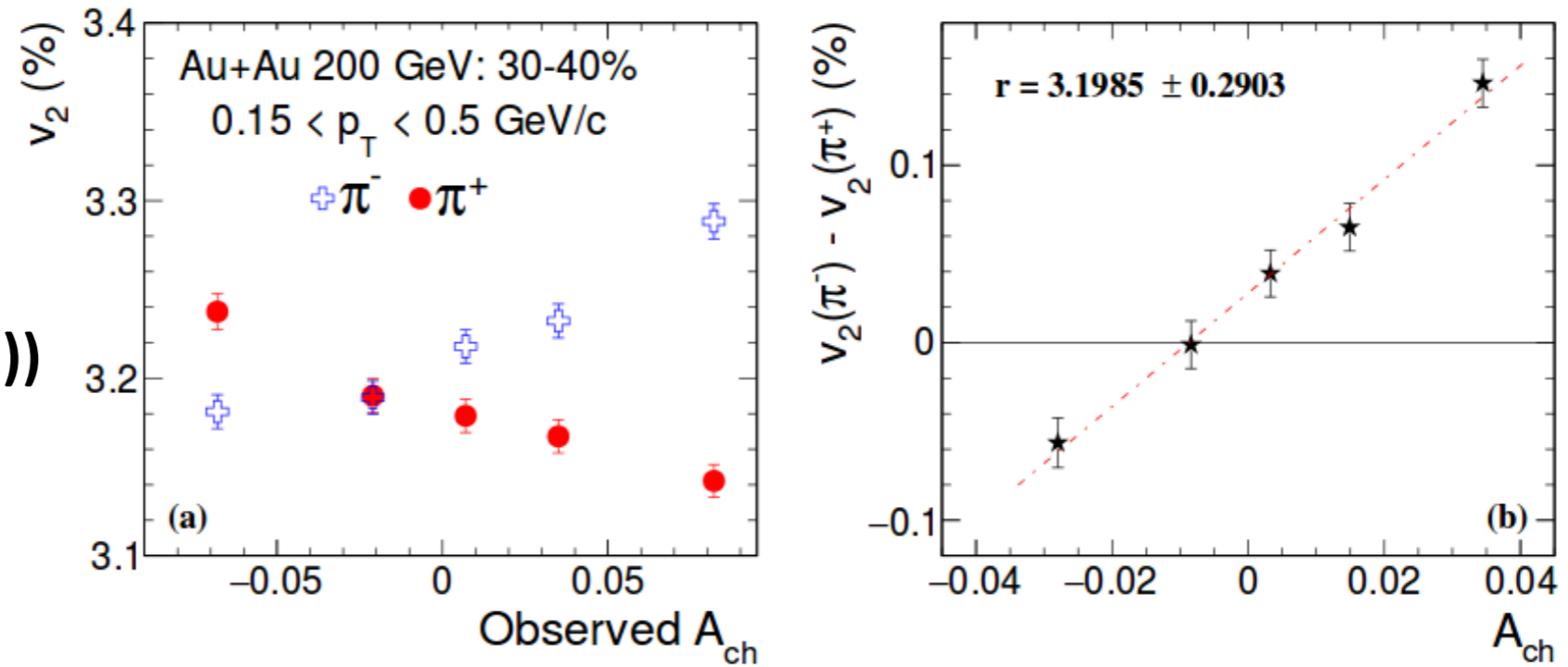
カイラル磁気波のシグナル?

[Burnier et al, 2012]

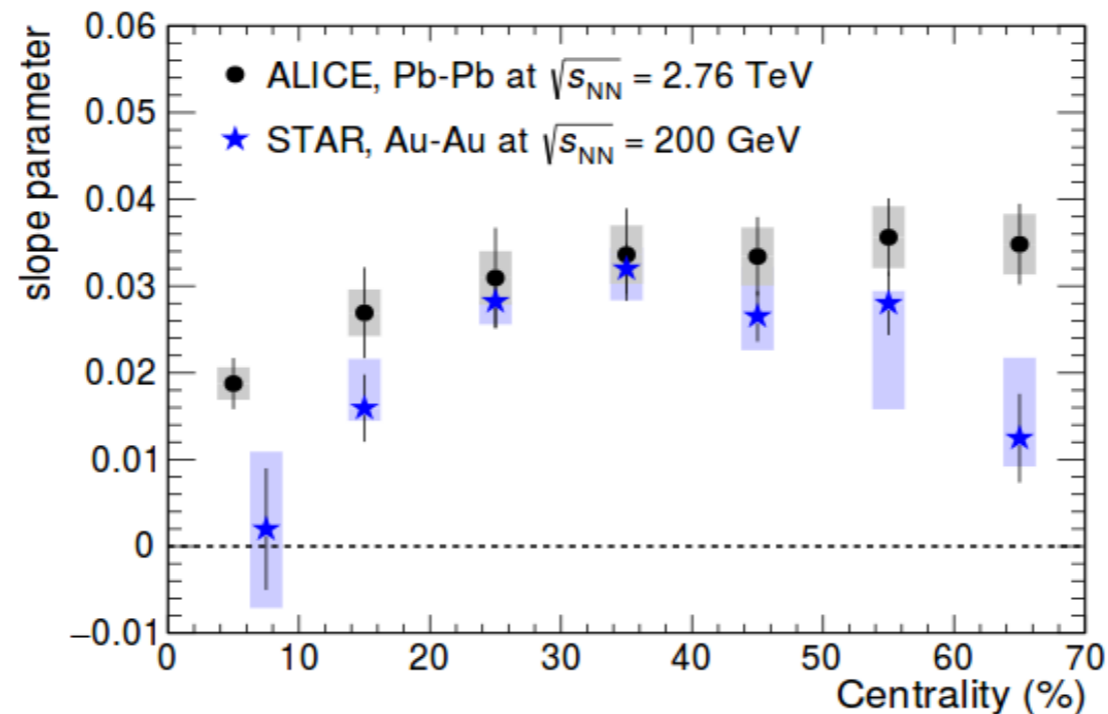
Previous Measurements



STAR
(Phys.Rev.Lett. 114 (2015))



ALICE
(Phys.Rev. C93 (2016))



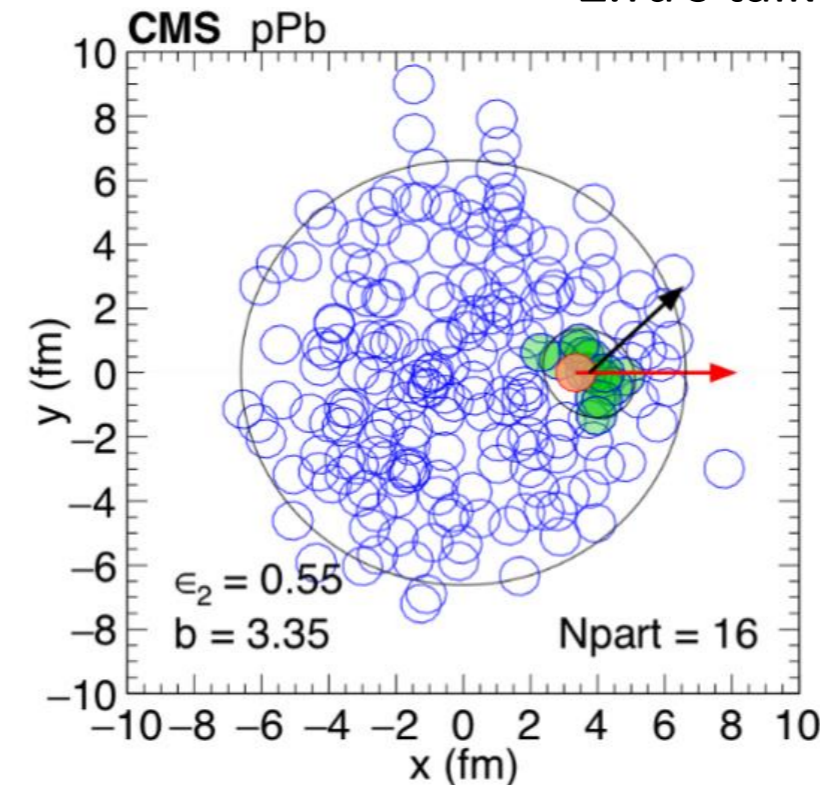
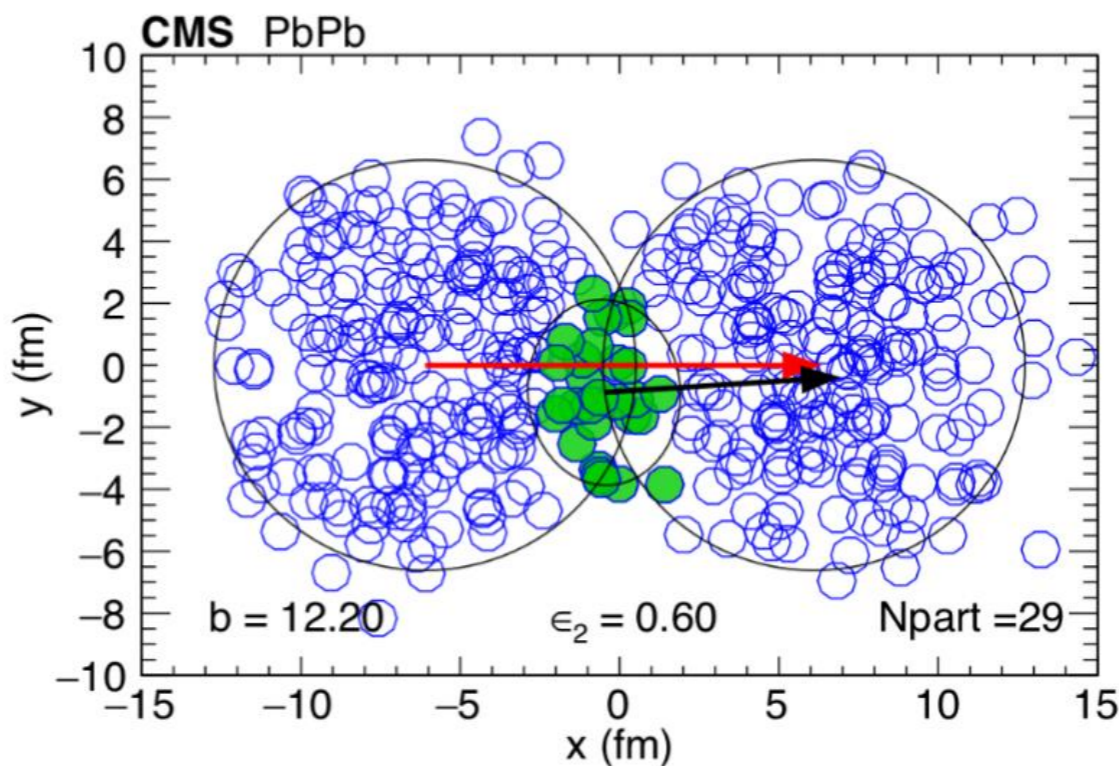
$$v_2^\pm \simeq v_{2,\pm}^{base} \mp r_e A_{ch}/2$$

$$v_2^- - v_2^+ = r_e A$$

Small systemでの実験結果

❖ 1. CMW in a smaller system (pPb)

arXiv:1610.00263
Z.Tu's talk at 3pm !



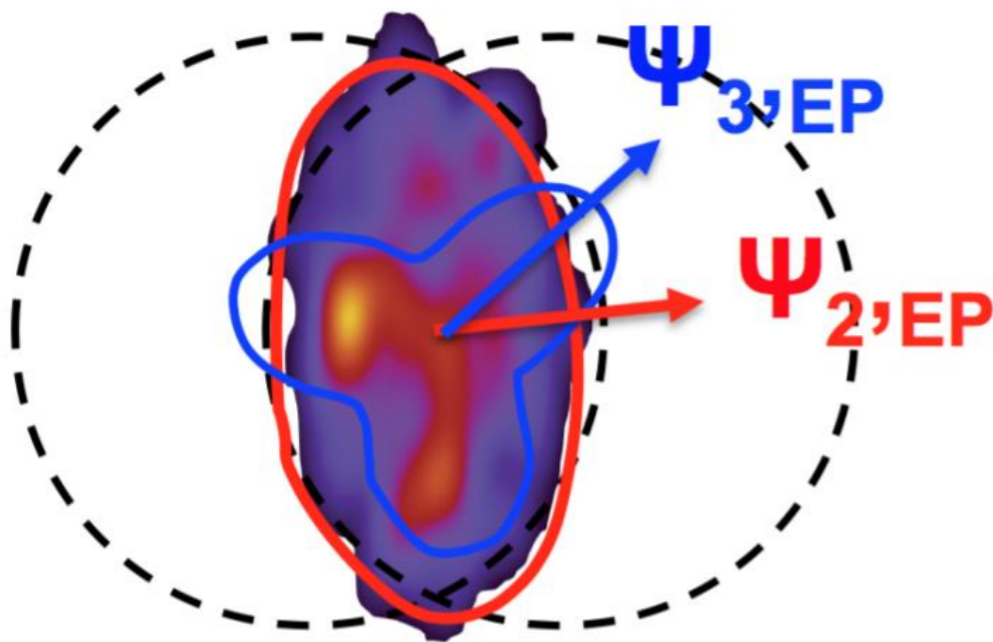
$$\langle (eB)^2 \cos[2(\psi_B - \Psi_{RP})] \rangle$$

↑
Smaller B field

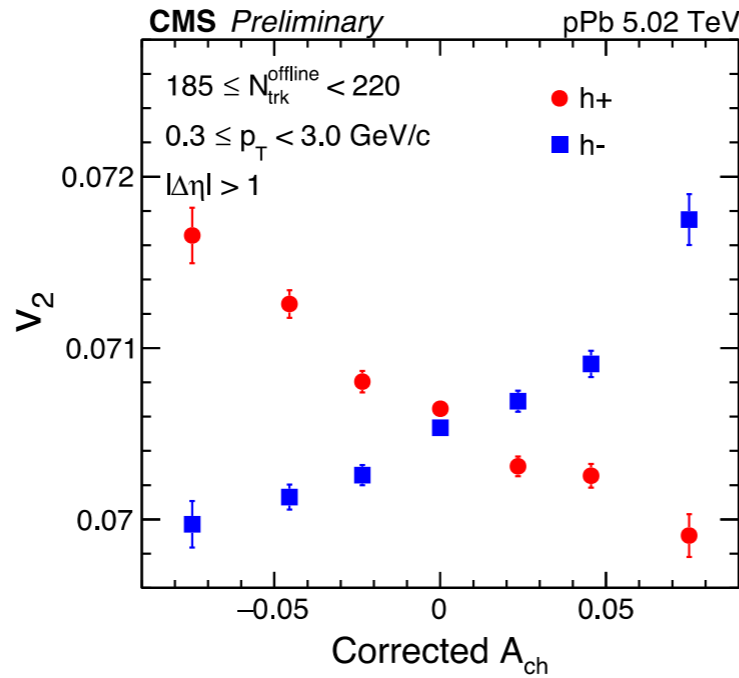
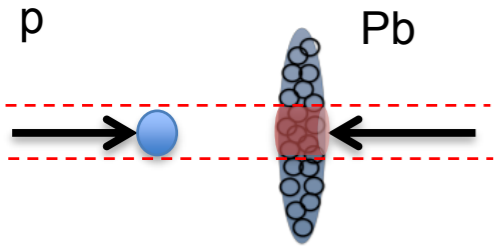
↑
B field direction \neq Reaction Plane

❖ 2. Third Order Harmonics

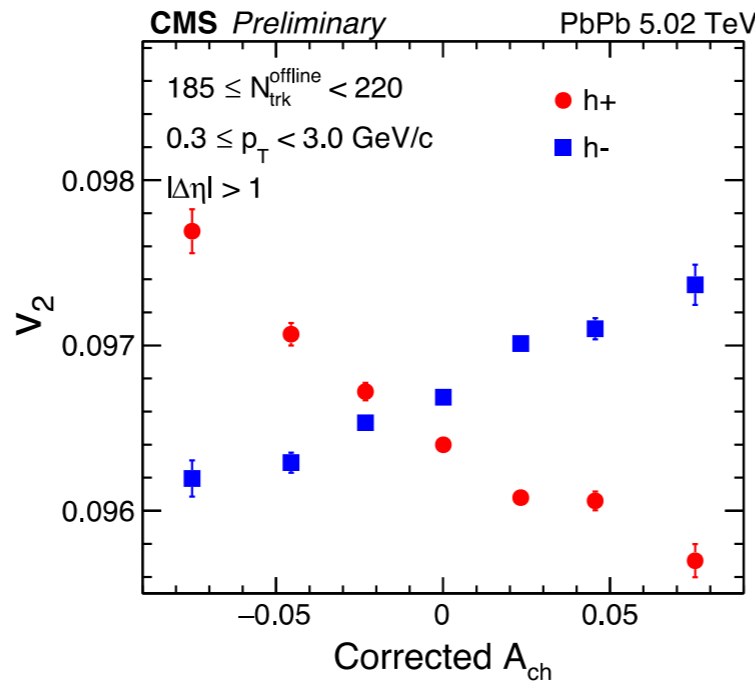
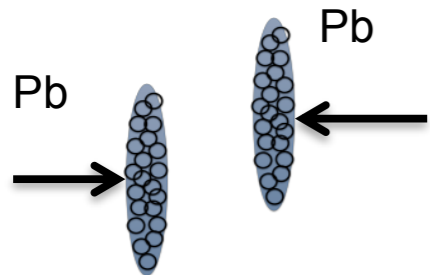
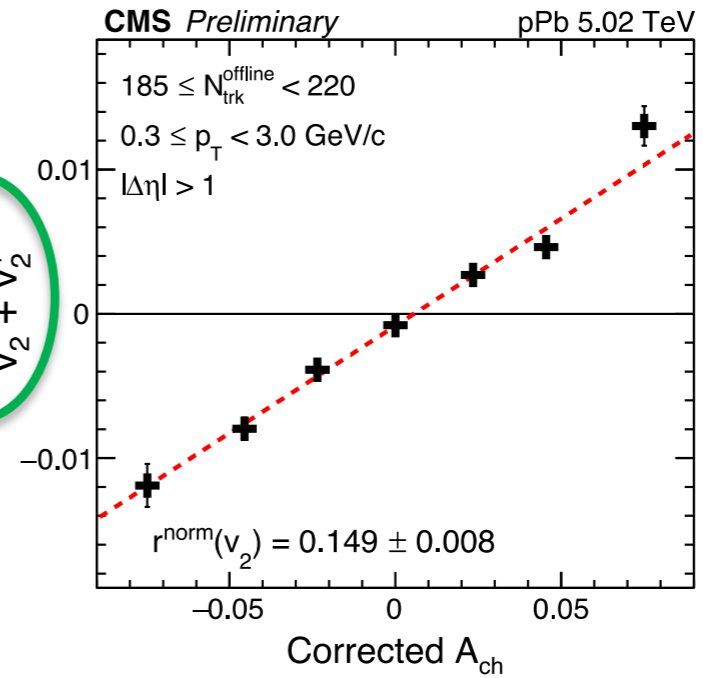
- CMW mechanism predicts the slope of the third harmonic to be zero
- Orientation of the triangular flow has no correlation with RP
- Measurement of v_3 slope in PbPb - crucial in testing CMW



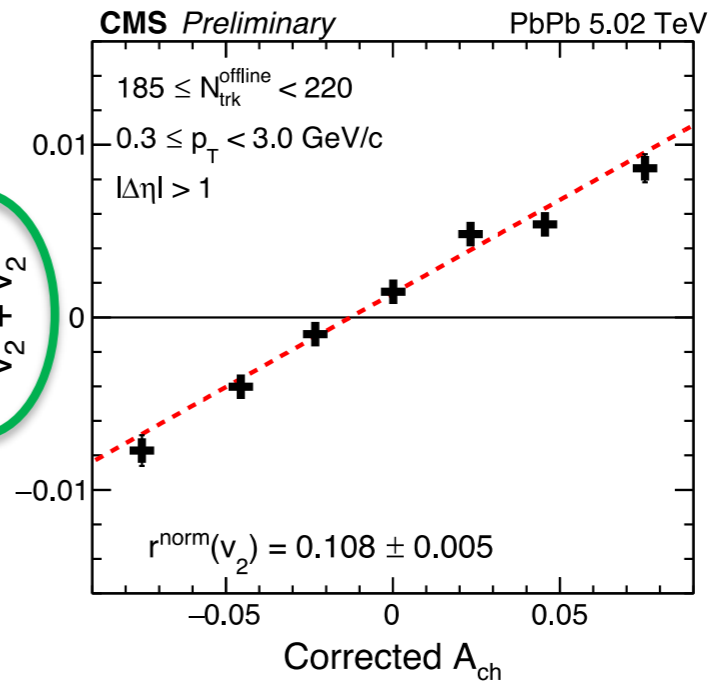
1. CMW in pPb and PbPb



$$\frac{V_2^- - V_2^+}{V_2^- + V_2^+}$$



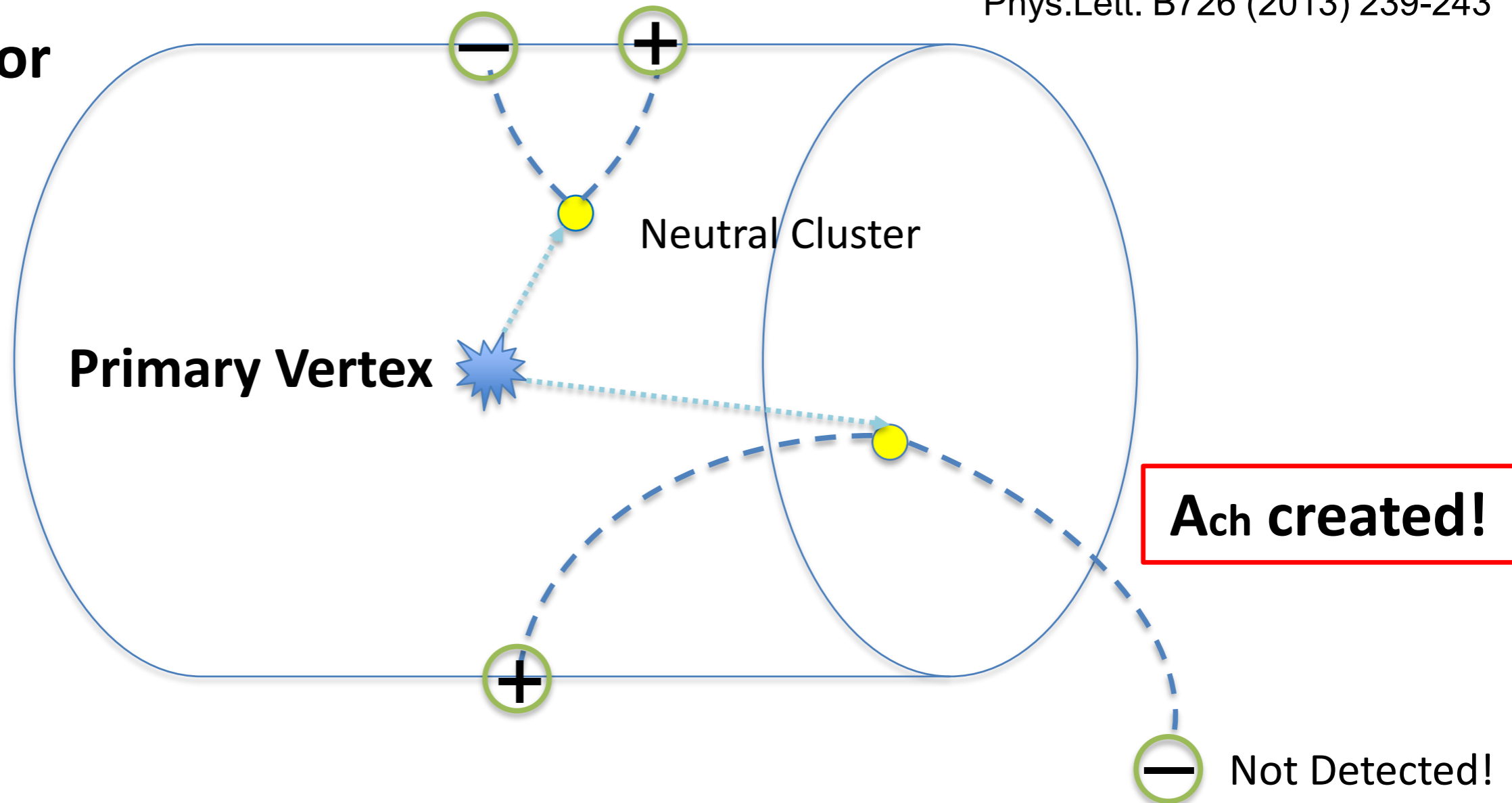
$$\frac{V_2^- - V_2^+}{V_2^- + V_2^+}$$



Significant nonzero slope observed in pPb : **Challenges CMW!**

A. Bzdak, P. Bozek
Phys.Lett. B726 (2013) 239-243

Detector



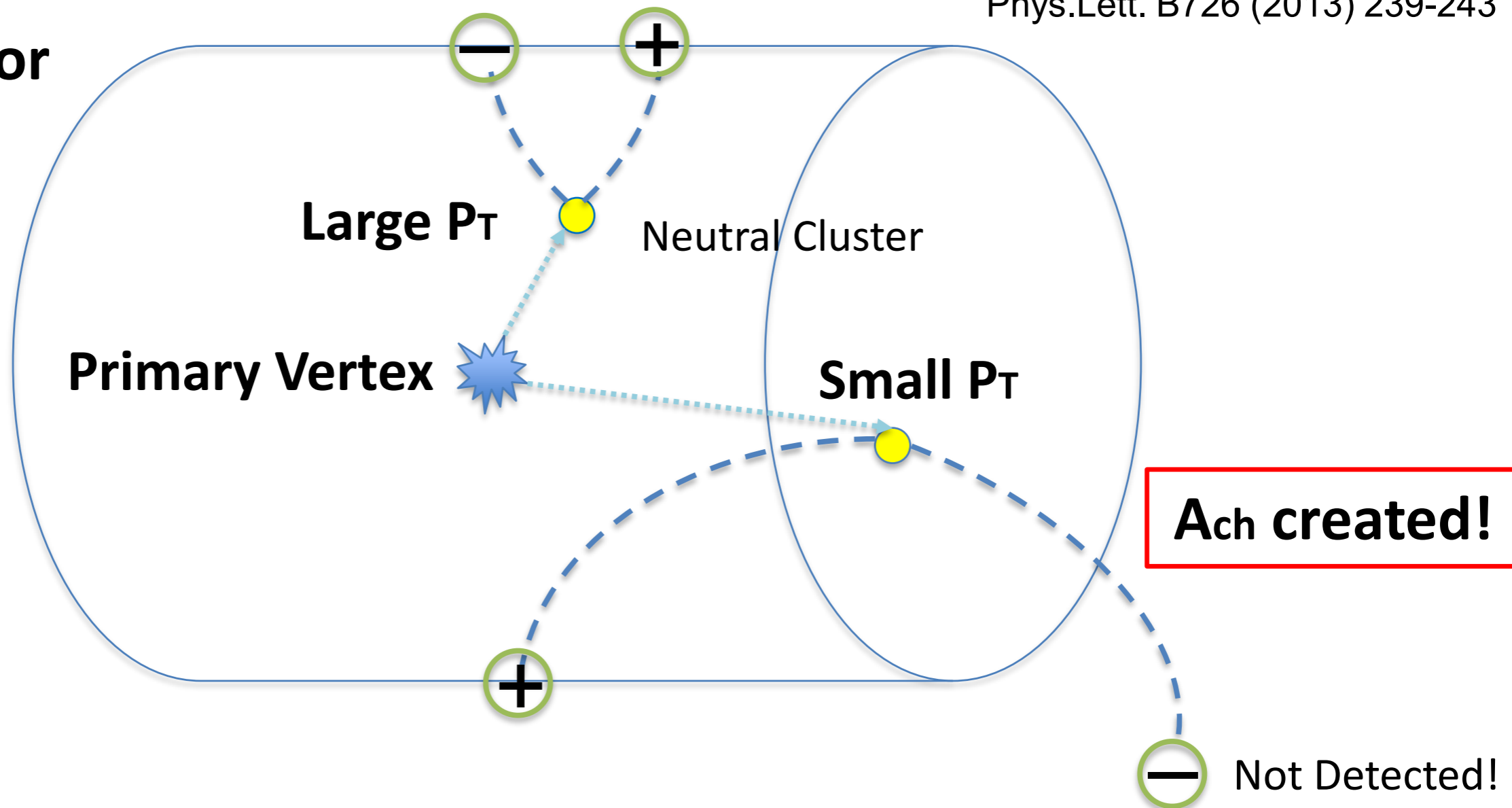
- ❖ Neutral cluster decays locally into charged pairs with a certain η separation

Local Charge Conservation Mechanism



A. Bzdak, P. Bozek
Phys.Lett. B726 (2013) 239-243

Detector



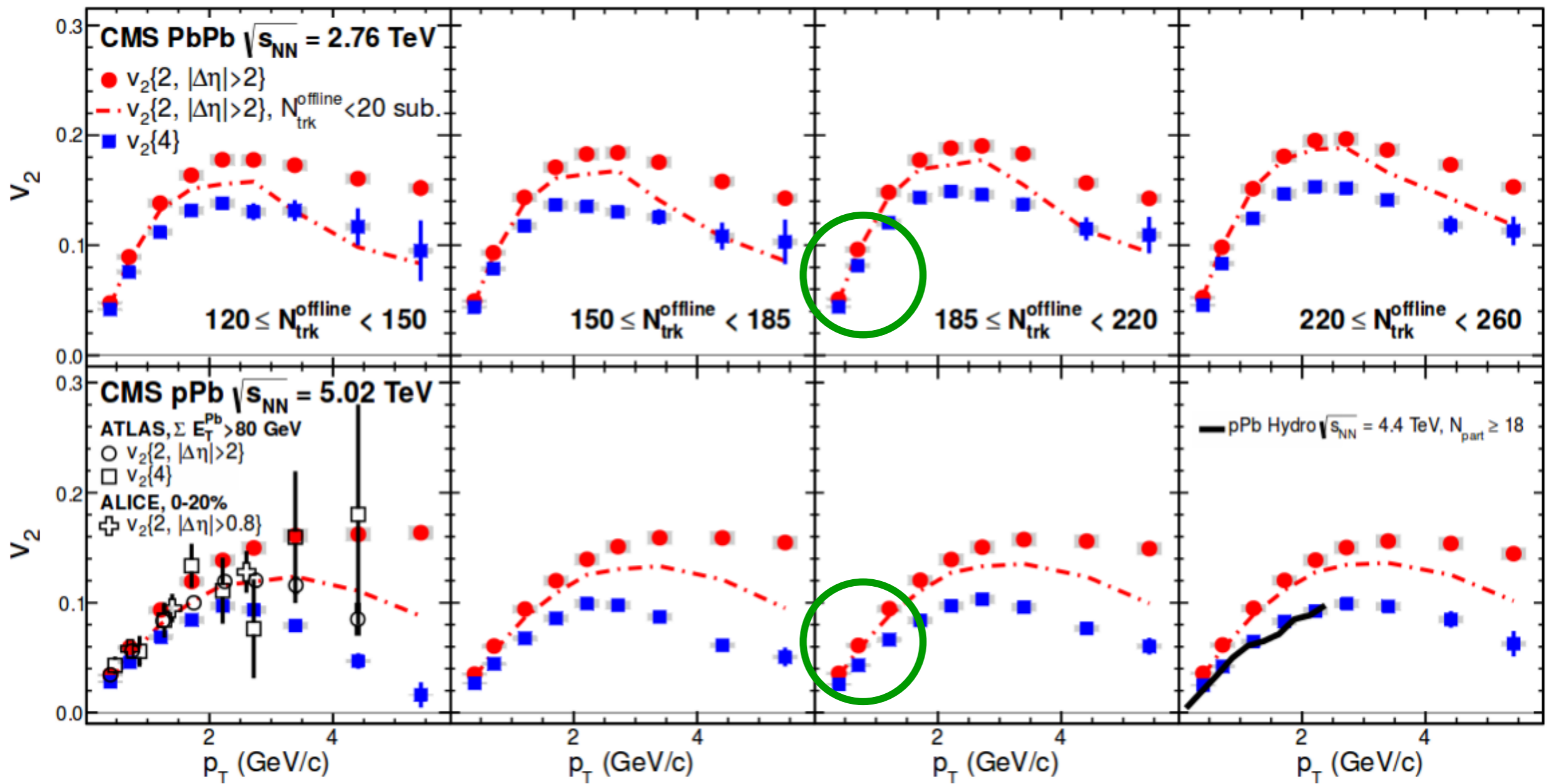
Clusters with small $P_T \rightarrow$ More likely to contribute to A_{ch}

Local Charge Conservation



When P_T is small, V_2 is proportional to P_T

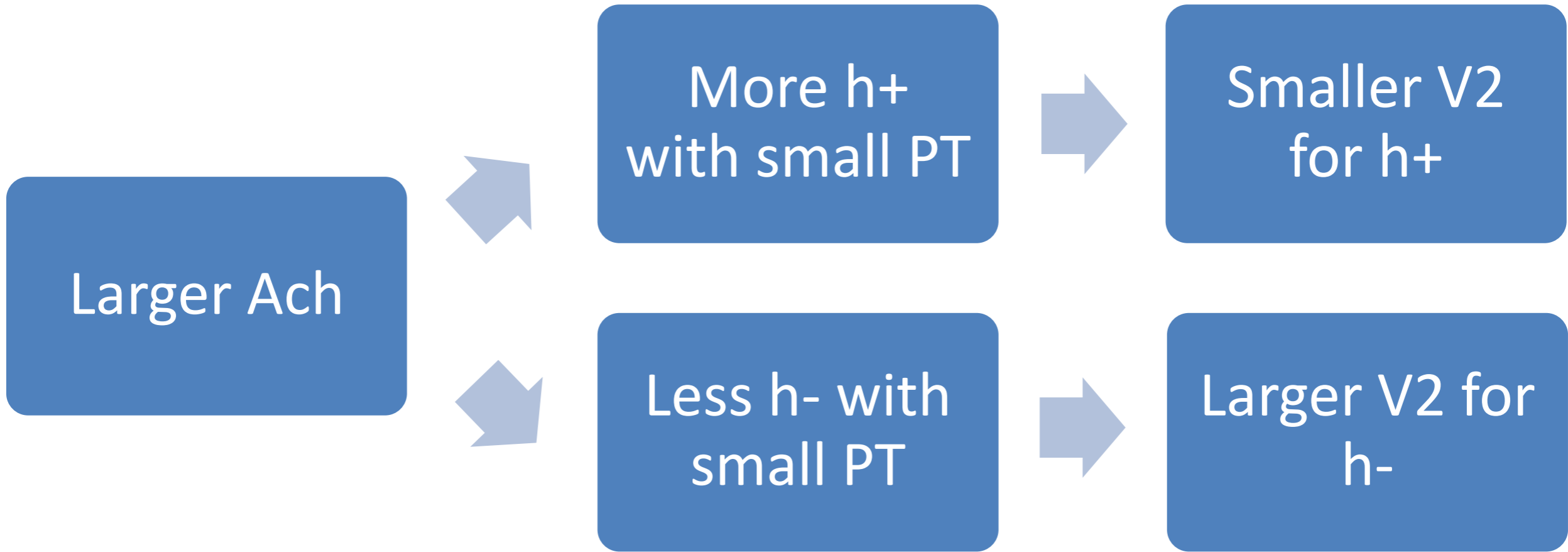
Phys.Lett. B724
(2013) 213-240



Local Charge Conservation



1. Clusters with small $P_T \rightarrow$ More likely to contribute to A_{ch}
2. When P_T is small, V_2 is proportional to P_T



$$v_2^\pm \simeq v_{2,\pm}^{base} \mp r_e A_{ch} / 2$$

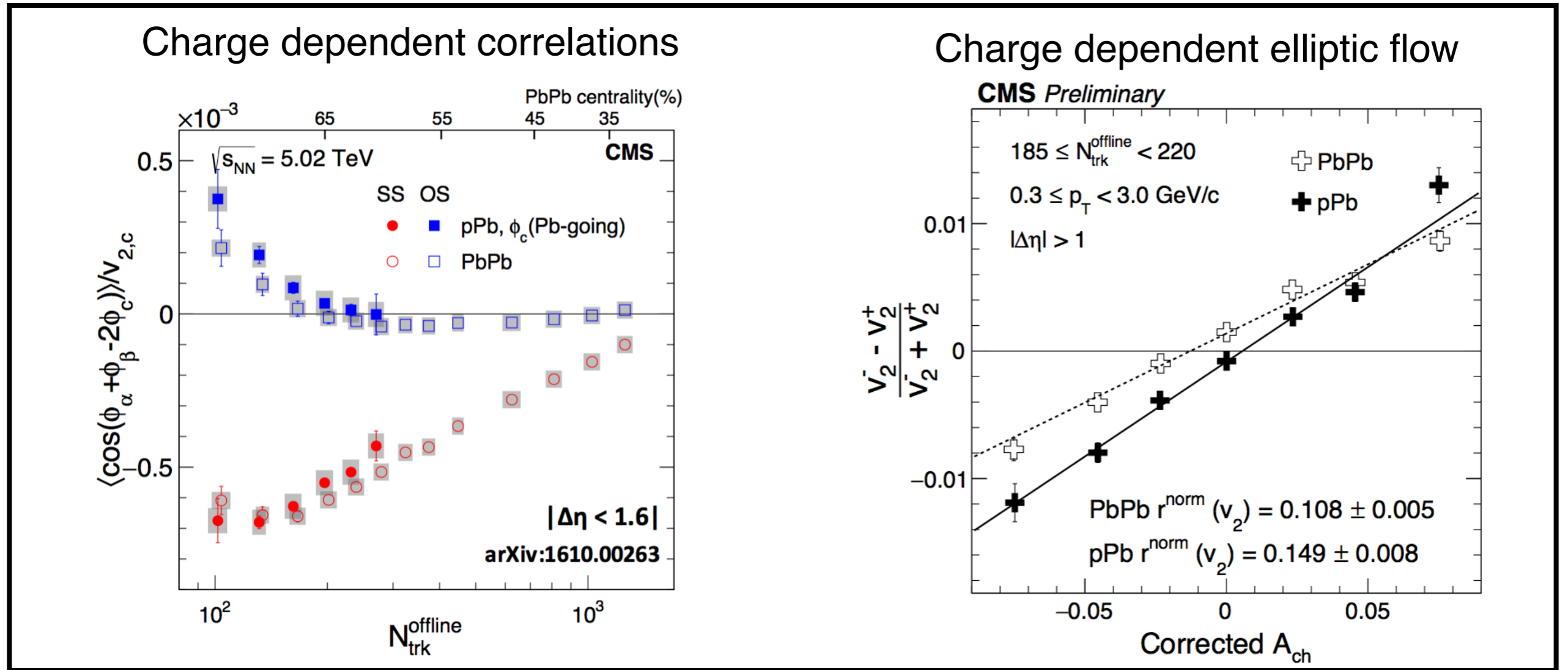
捜査のプロが分析

元捜査官 田中 誠
田中 誠

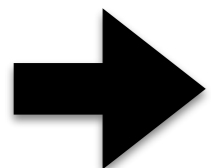
**CMEのシグナル,
あるいはバックグラウンド**

CMEの探索のまとめ

CMEのシグナルだと思われていた観測量の振る舞いが



のようにCMEの効果が小さいはずのpPb衝突でも得られてしまった！



シグナルかバックグラウンドかを区別する解析・実験が必要！！

CMEの検証に向けた 今後の展望

QM2017での進展(の一部)

1. 重イオン衝突におけるカイラル輸送現象の検証に向けて

- ✓ カイラル磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Hirono]
- ✓ 粘性+カイラル輸送流体のシミュレーションと粒子相関の計算 [Talk by Shi]
- ✓ 小さい系におけるカイラル磁気効果の実験的検証 [Talk by Sorensen, Tu, Park]
- RHICの同重体(isobar, ZrZr/RuRu)衝突実験に向けた計算 [Talk by Huang, Shi]
- 初期過程における古典統計近似に基づいたカイラル磁気効果の計算 [Talk by Mueller]
- カイラル渦/磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Guo]
- 流速場の渦度分布の時間発展とラムダ粒子の偏極 [Talk by Pang, Karpenko, Wang]
- 原子核内の荷電粒子を波束として扱ったときの電磁場の時間発展 [Talk by Peroutka]

2. カイラル輸送現象に関する新しい現象の提案

- 磁力線のつながりかえにより誘発されるカイラル磁気効果 [Talk by Hirono, Kharzeev]
- カイラル磁気流体におけるモード解析と不安定モード [Talk by Hattori, Hirono]
- 強い磁場中におけるカイラルプラズマの輸送現象(電荷の再分配) [Talk by Hattori]

Test of CME — Isobaric Collisions @ RHIC

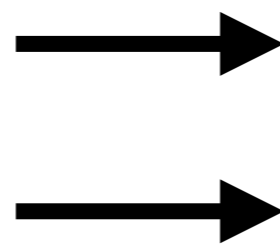


$^{96}_{44}\text{Ru}$ Ruthenium



$^{96}_{40}\text{Zr}$ Zirconium

Same Baryon #
Different Proton #



Similar Bulk Background
Different CME!

How Can We Calculate CME Quantitatively?

axial (& vector)
charge density

Anomalous
-Viscous
Fluid
Dynamics

initial condition

+

driving force

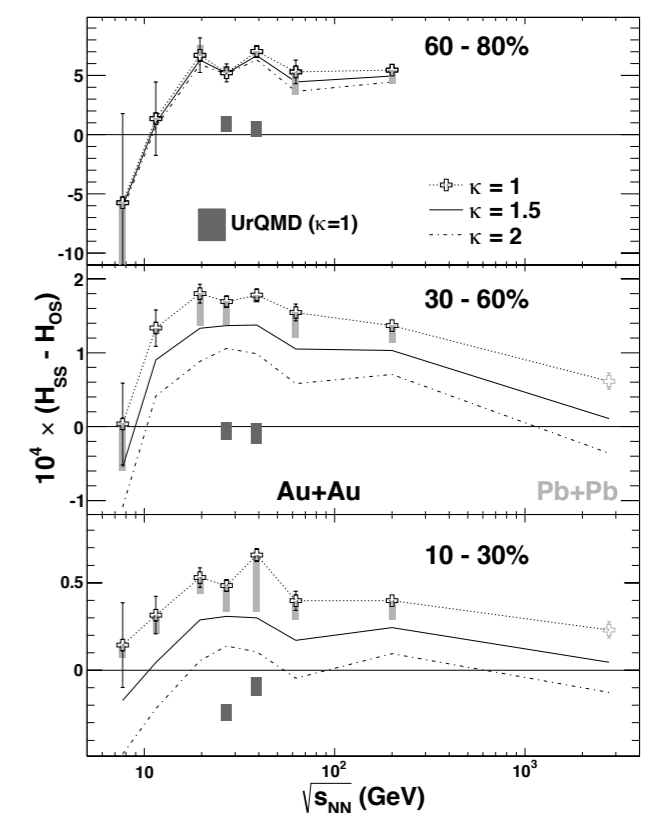
B field



dynamical
evolution



final particle
distribution



M.Hongo, Y.Hirono, T.Hirano, 2013;
 H.-U.Yee, Y.Yin, 2014;
 Y.Hirono, T.Hirano, D.Kharzeev, 2014;
 Y.Yin, J.Liao, 2016;

Anomalous-Viscous Fluid Dynamics

$$D_{\mu} J_R^{\mu} = + \frac{N_c q^2}{4\pi^2} E_{\mu} B^{\mu} \quad D_{\mu} J_L^{\mu} = - \frac{N_c q^2}{4\pi^2} E_{\mu} B^{\mu}$$

$$J_R^{\mu} = n_R u^{\mu} + v_R^{\mu} + \frac{N_c q}{4\pi^2} \mu_R B^{\mu}$$

$$J_L^{\mu} = n_L u^{\mu} + v_L^{\mu} - \frac{N_c q}{4\pi^2} \mu_L B^{\mu}$$

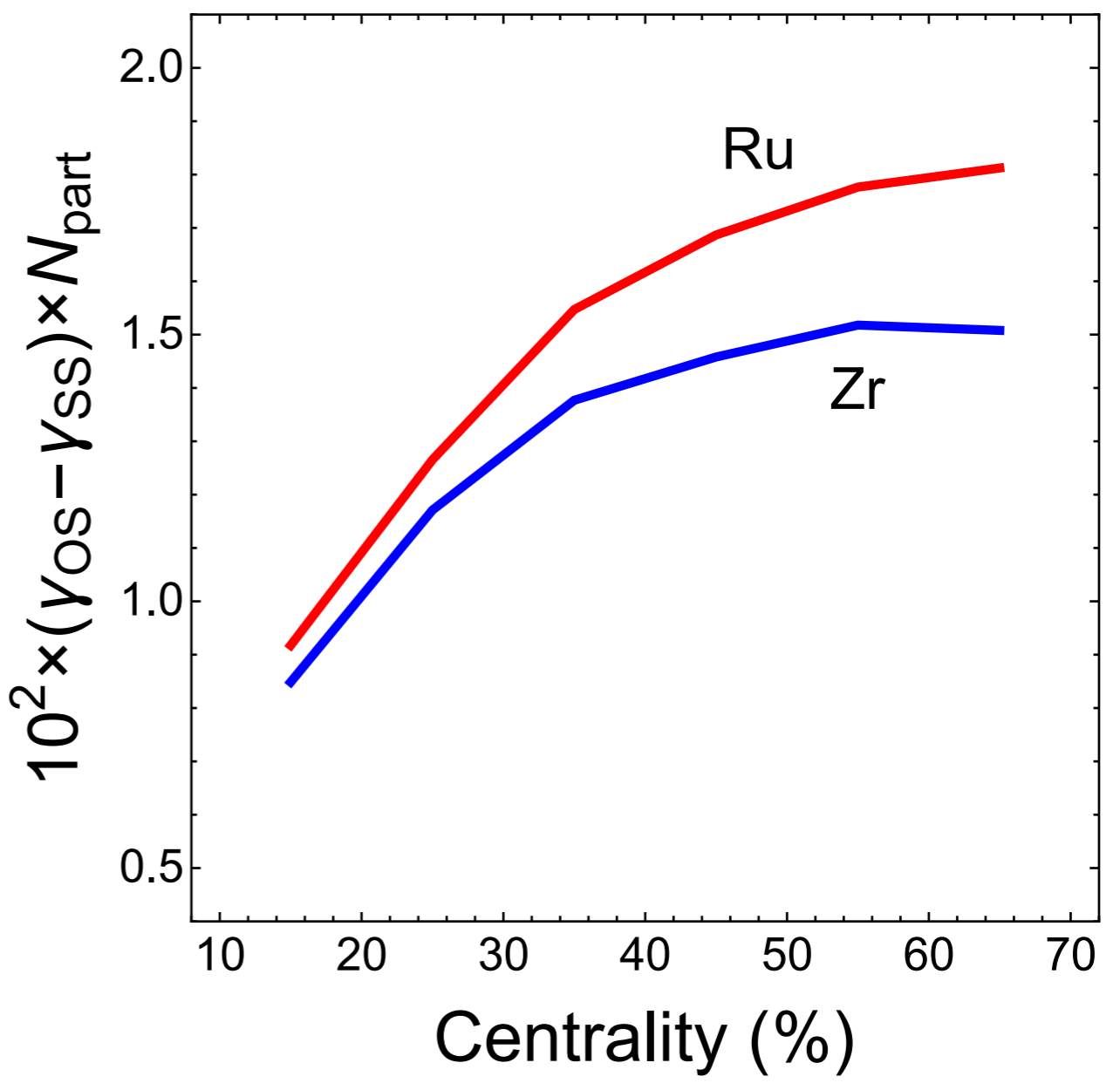
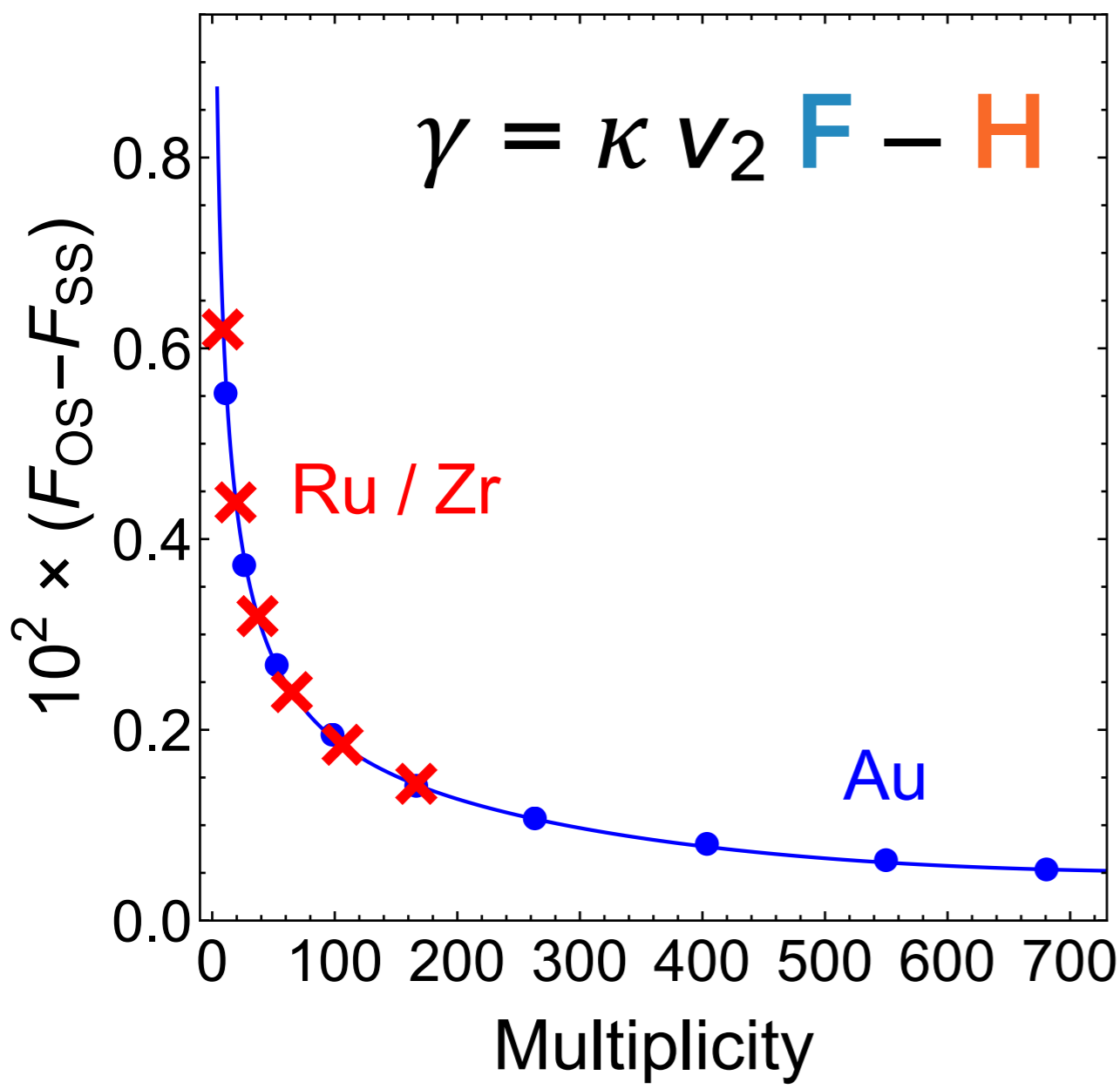
CME

$$\Delta_{\nu}^{\mu} d v_{R,L}^{\nu} = - \frac{1}{\tau_{\text{rlx}}} (v_{R,L}^{\mu} - v_{\text{NS}}^{\mu})$$

on top of 2+1D VISHNew — OSU Group

$$D_{\mu} T^{\mu\nu} = 0$$

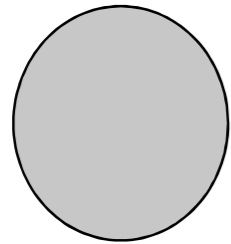
Test of CME — Isobaric Collisions @ RHIC



collaborating with E.Lilleskov, Y.Jiang & J. Liao

Isobaric collisions

Nucleus shape, Wood-Saxon distribution



$$\rho(r, \theta) = \frac{\rho_0}{1 + \exp [(r - R_0 - \beta_2 R_0 Y_2^0(\theta))/a]}$$

Current experimental data for the parameters:

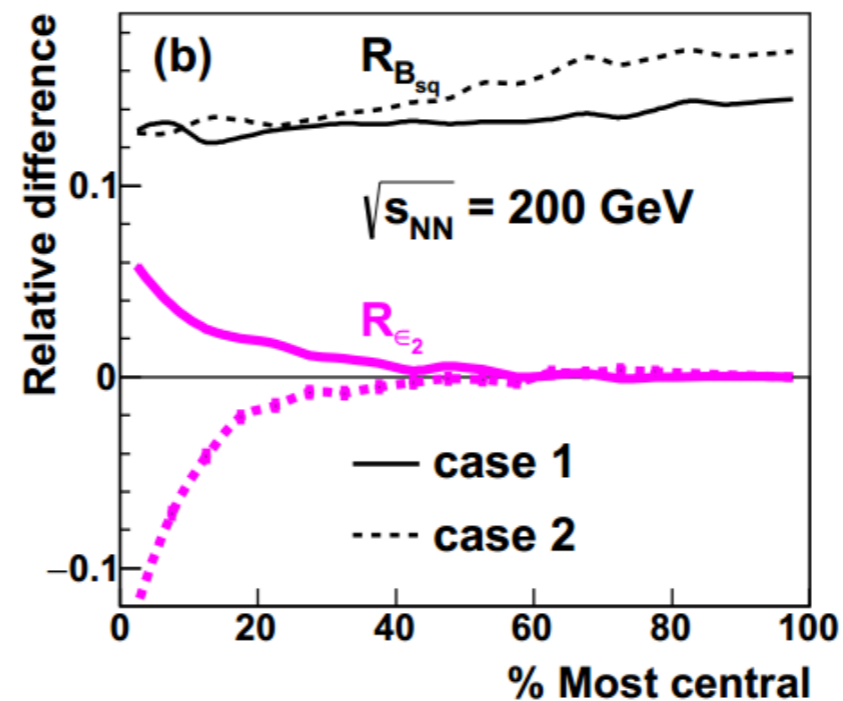
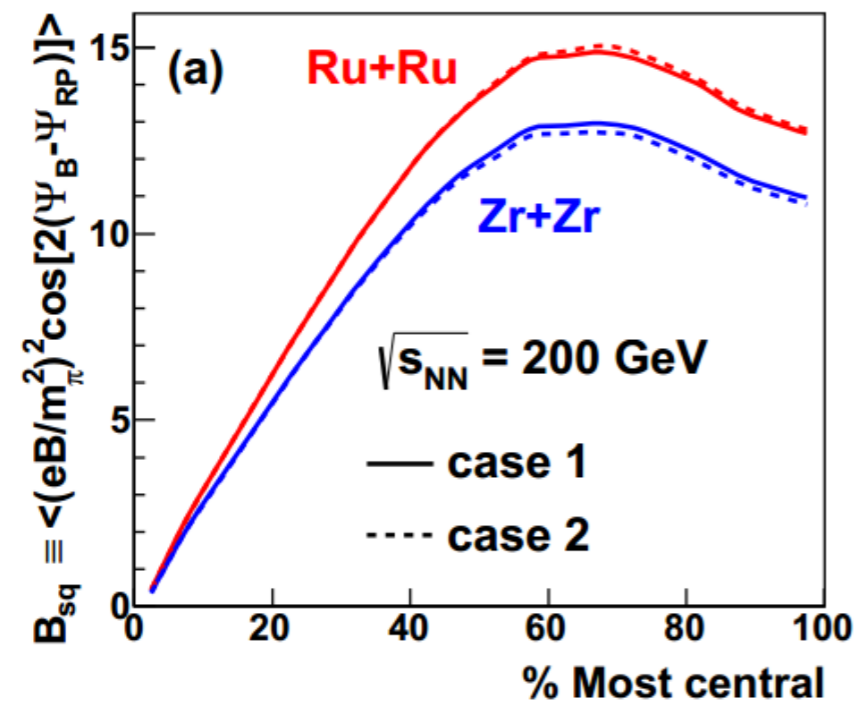
Case 1: e-A scattering experiments (nucl. Data tab. 2001)

Case 2: comprehensive model deductions (nucl. Data tab. 2001)

		R_0 (fm)	a (fm)	β_2
Case 1	Ru	5.085	0.46	0.158
	Zr	5.02	0.46	0.08
Case 2	Ru	5.085	0.46	0.053
	Zr	5.02	0.46	0.217

Isobaric collisions

Initial magnetic field and initial eccentricity



Deng, XGH,
Ma, and
Wang, 2016

B_{sq} quantifies magnetic-field fluctuation (Blozynski, XGH, Zhang, and Liao, 2013)

R is the relative difference: $2(RuRu - ZrZr) / (RuRu + ZrZr)$

Centrality 20-60%: sizable difference in B ($R_{B_{sq}} \sim 10 - 20\%$) but small difference in eccentricity ($R_{\epsilon_2} < 2\%$)

QM2017での進展(の一部)

1. 重イオン衝突におけるカイラル輸送現象の検証に向けて

- ✓ カイラル磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Hirono]
- ✓ 粘性+カイラル輸送流体のシミュレーションと粒子相関の計算 [Talk by Shi]
- ✓ 小さい系におけるカイラル磁気効果の実験的検証 [Talk by Sorensen, Tu, Park]
- ✓ RHICの同重体(isobar, ZrZr/RuRu)衝突実験に向けた計算 [Talk by Huang, Shi]
- 初期過程における古典統計近似に基づいたカイラル磁気効果の計算 [Talk by Mueller]
- カイラル渦/磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Guo]
- 流速場の渦度分布の時間発展とラムダ粒子の偏極 [Talk by Pang, Karpenko, Wang]
- 原子核内の荷電粒子を波束として扱ったときの電磁場の時間発展 [Talk by Peroutka]

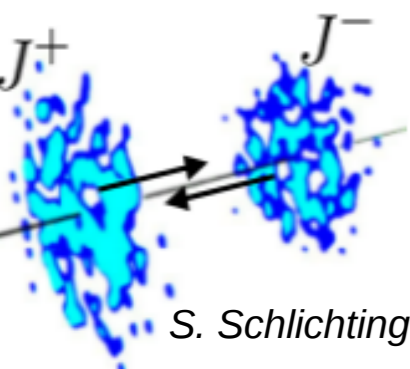
2. カイラル輸送現象に関する新しい現象の提案

- 磁力線のつながりかえにより誘発されるカイラル磁気効果 [Talk by Hirono, Kharzeev]
- カイラル磁気流体におけるモード解析と不安定モード [Talk by Hattori, Hirono]
- 強い磁場中におけるカイラルプラズマの輸送現象(電荷の再分配) [Talk by Hattori]

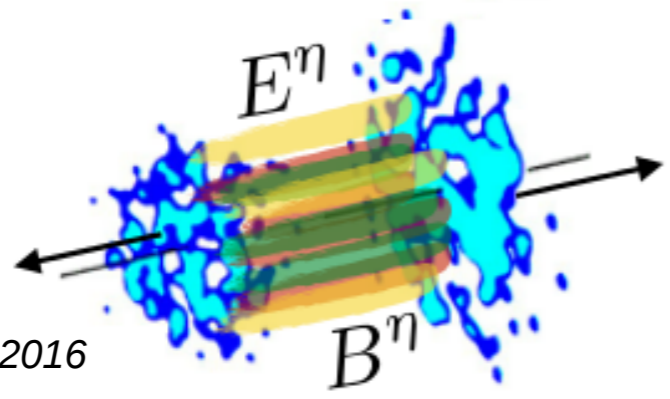


1. Anomalous Phenomena in Heavy Ion Collisions

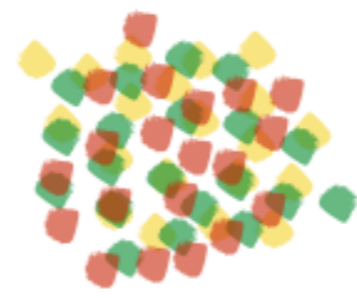
CGC
colliding nuclei



flux tubes



over-occupied
plasma



kinetic regime

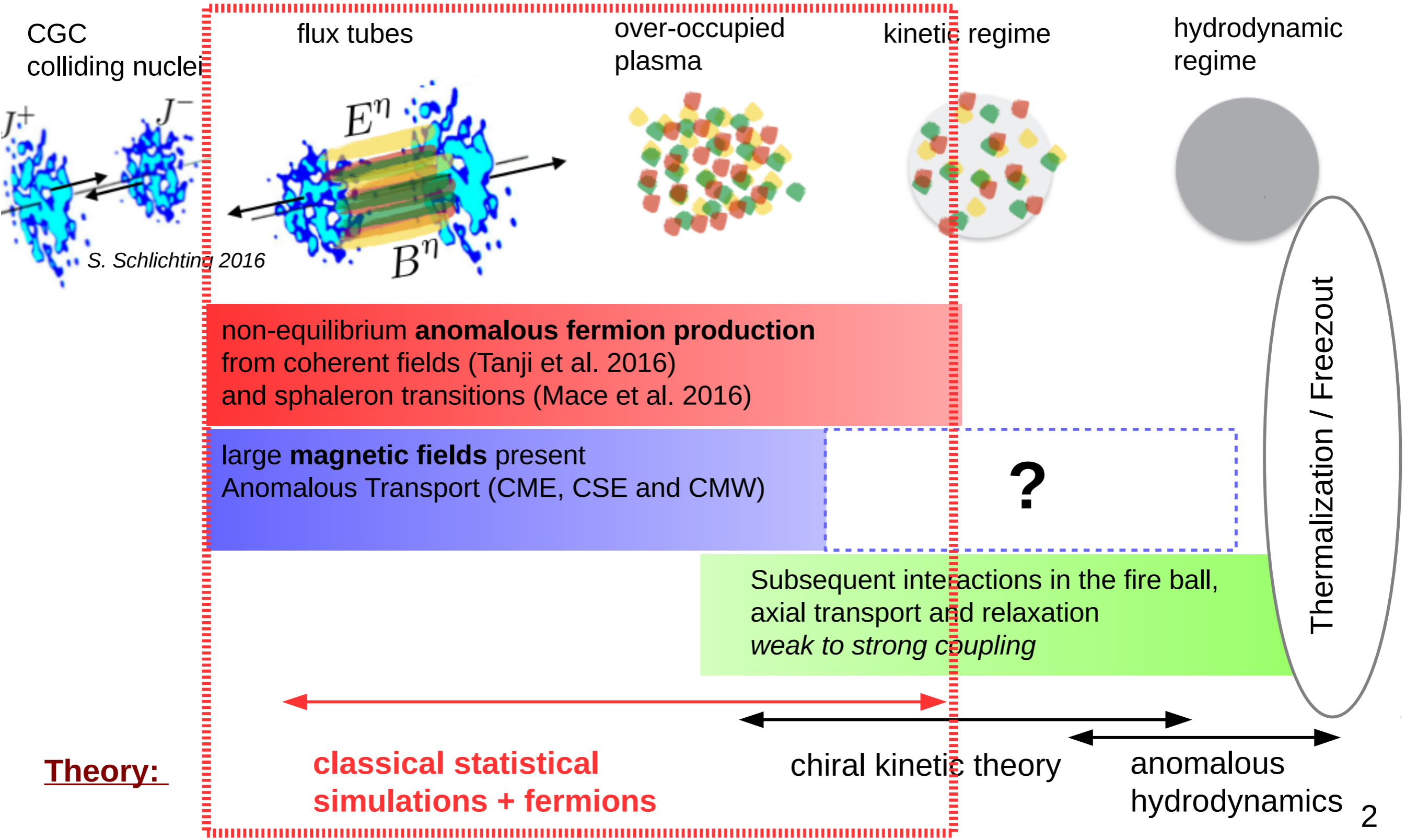


hydrodynamic
regime





1. Anomalous Phenomena in Heavy Ion Collisions



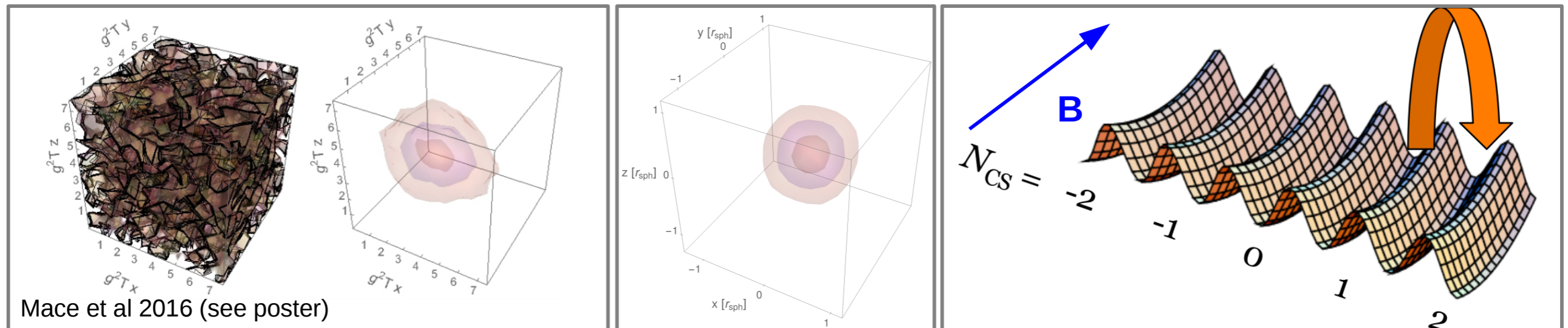


2. Real-time simulations

Anomalous fermion dynamics induced by a topological transition

→ Classical statistical simulations

simplified situation: setting up an isolated **sphaleron transition** in background **abelian magnetic fields**



- consistent treatment of axial charge production, non-abelian gauge fields as **dynamical degrees** of freedom.

Fermions: Challenging!
 Solving Dirac operator equation
 in mode-function expansion

$$i\gamma^0 \partial_t \hat{\psi} = (-i\mathcal{D}_W^s + m)\hat{\psi}$$

$$\hat{\psi}_{\mathbf{x}}(t) = \frac{1}{\sqrt{V}} \sum_{\lambda} \left(\hat{b}_{\lambda}(0) \phi_{\lambda}^u(t, \mathbf{x}) + \hat{d}_{\lambda}^{\dagger}(0) \phi_{\lambda}^v(t, \mathbf{x}) \right)$$

→ extremely costly ($\sim N^6$)

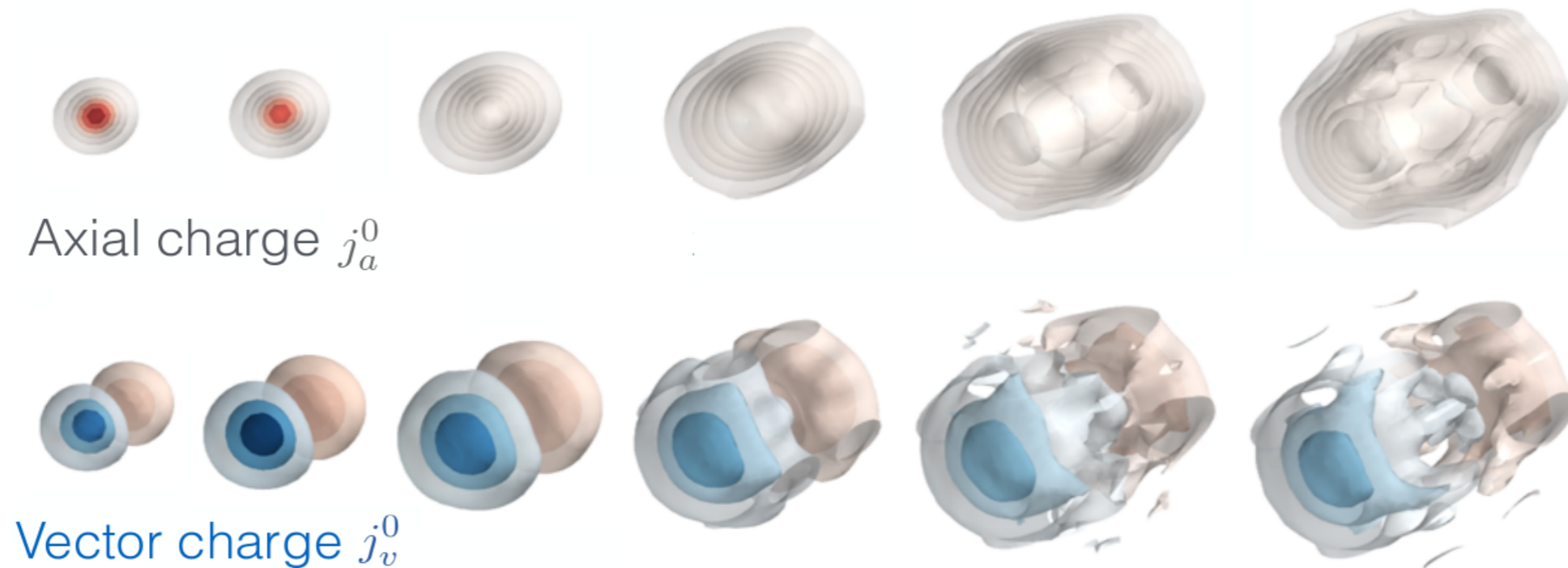
→ big obstacle so far and many attempts at reducing price (e.g. 'low-cost' techniques, Borsányi and Hindmarsh 2009)



2. Real-time simulations

Chiral Magnetic and Chiral Separation Effect

NM, Schlichting, Sharma, PRL 117 (2016) 142301; Mace, NM, Schlichting, Sharma, arXiv:1612.02477



Initially: Vacuum (no fermions, no axial charge)

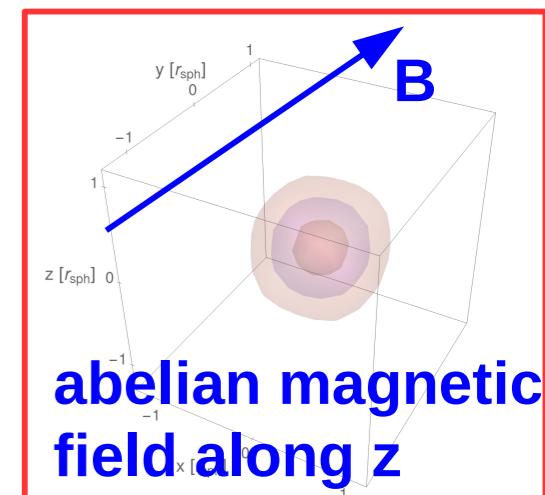
Chiral Magnetic Effect:

Electric current generated due to axial charge produced

Chiral Separation Effect:

Axial current generated due to electric charge

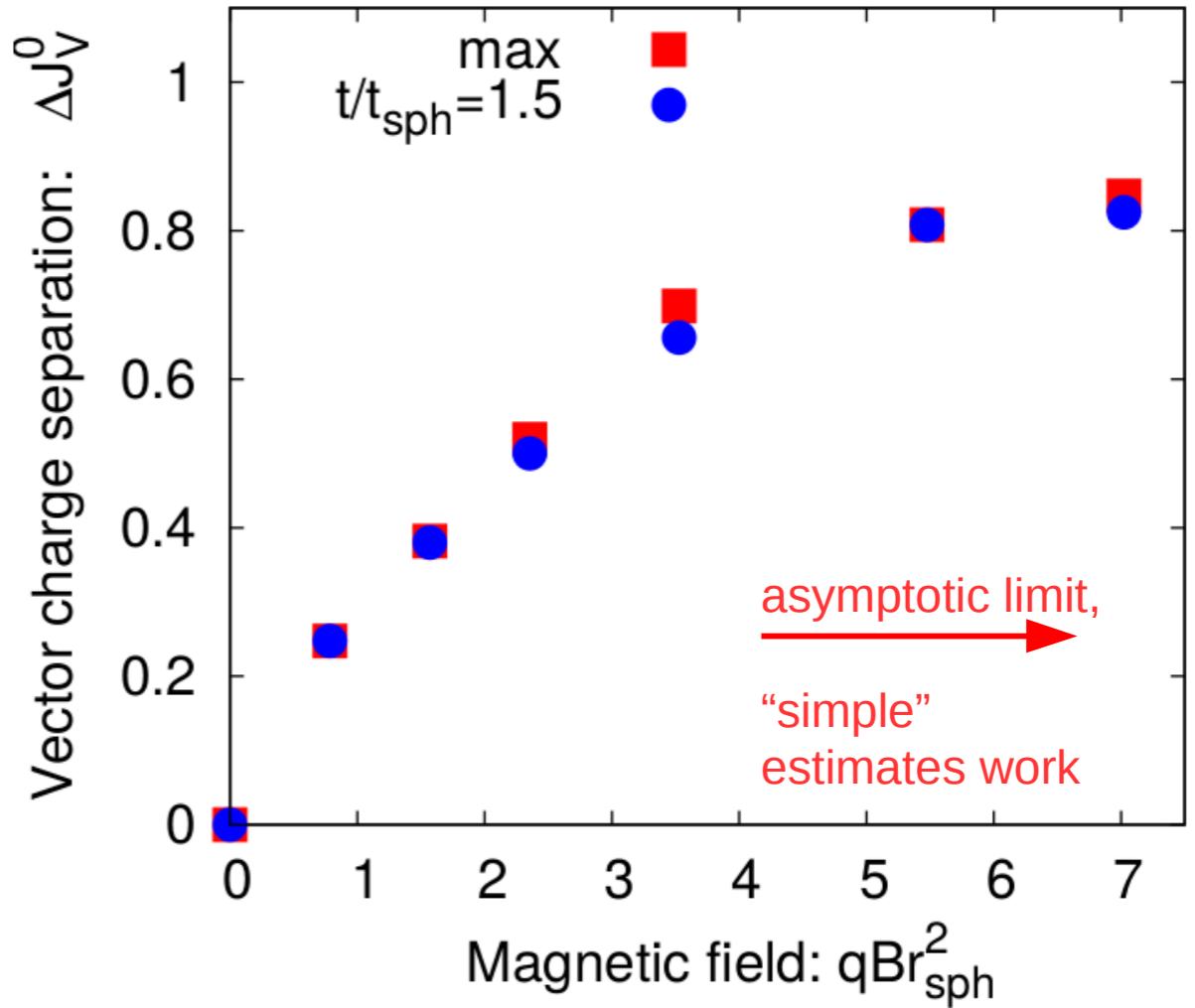
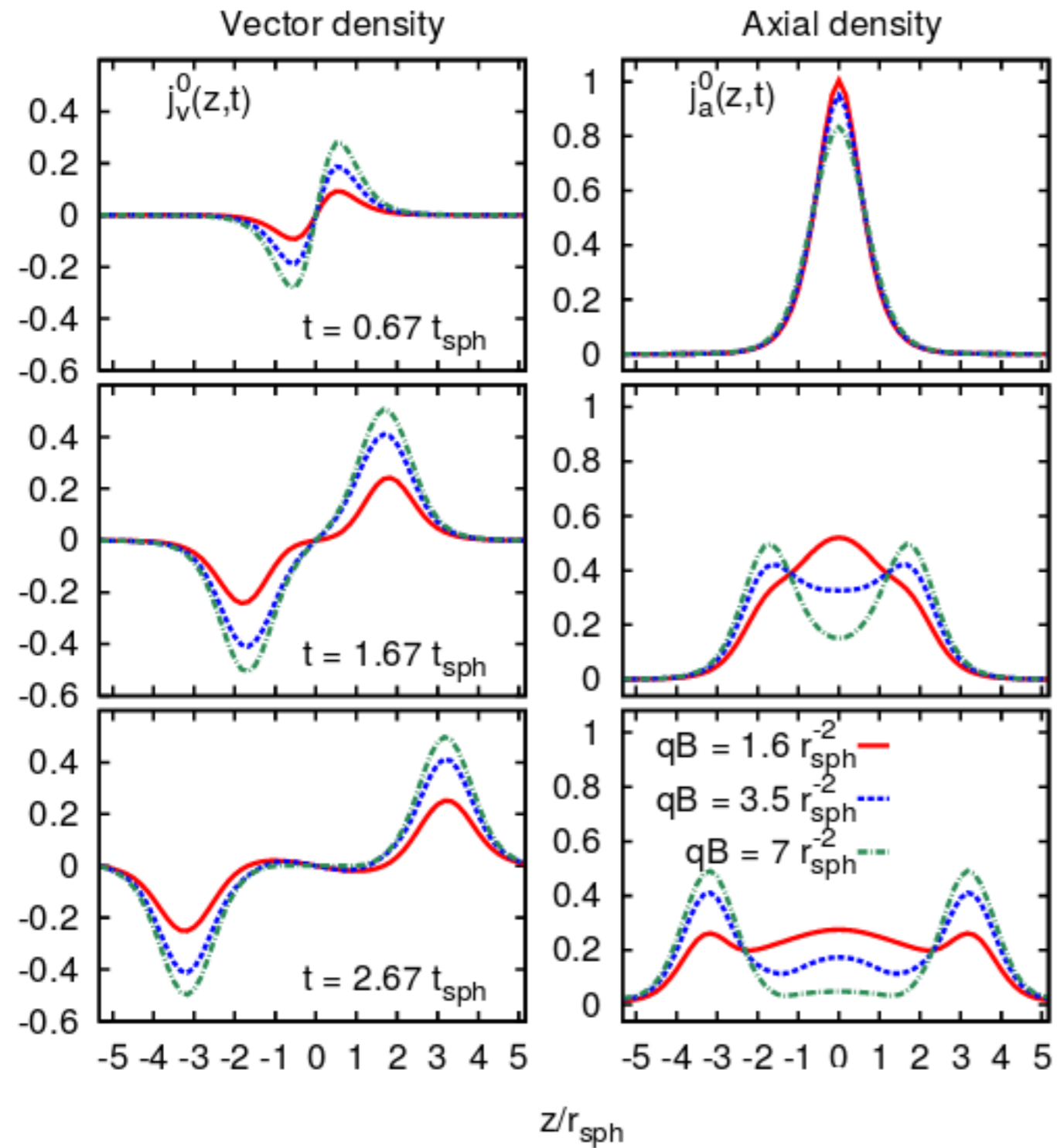
→ Emergence of the **Chiral Magnetic Wave**





2. Real-time simulations

Magnetic Field Dependence

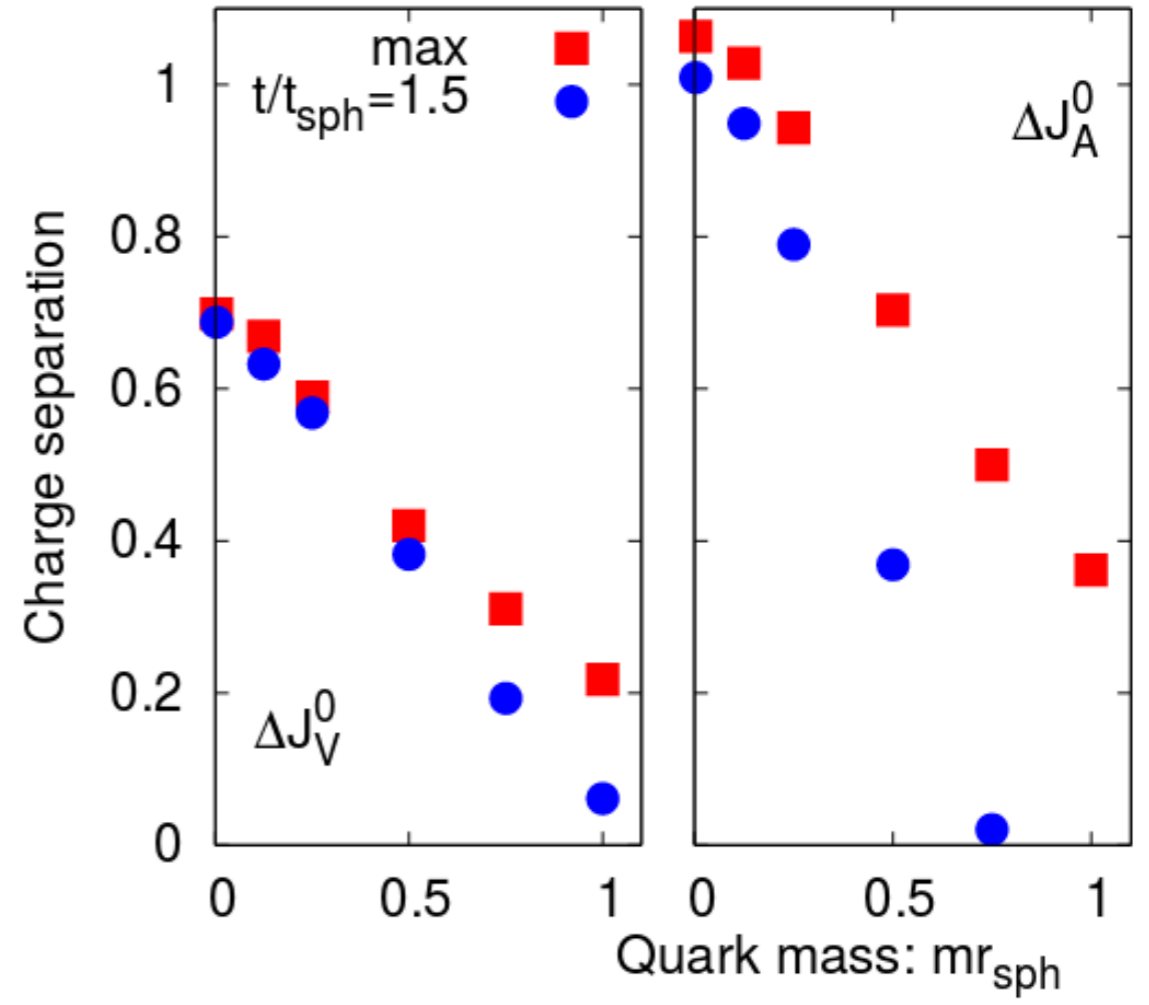
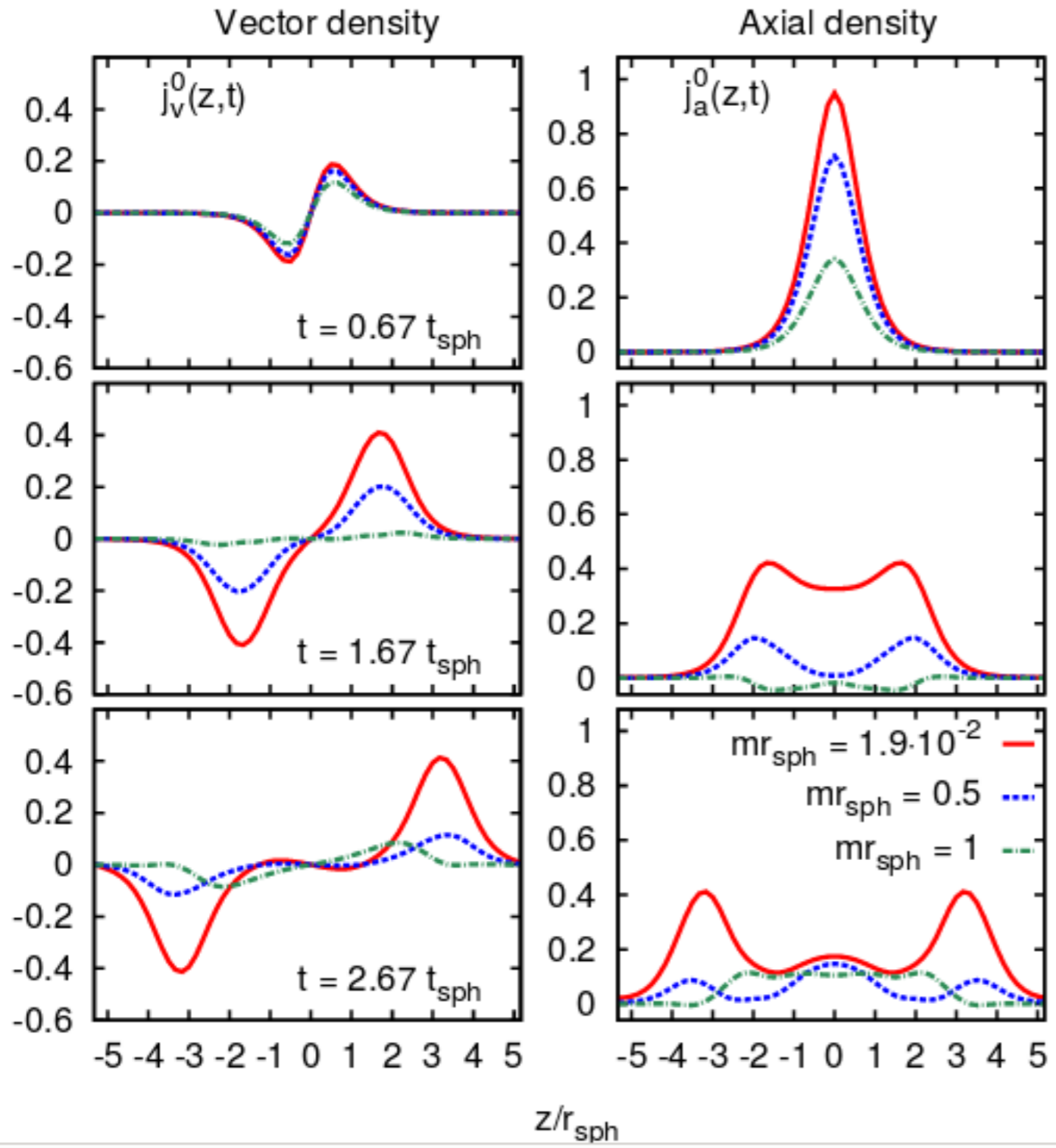


finite magnetic field:
 → important deviations from 'ideal' picture of CME



2. Real-time simulations

Finite quark mass



finite quark mass effects
 → anomalous transport
 suppressed for heavy quarks

まとめ

1. 重イオン衝突におけるカイラル輸送現象の検証に向けて

- ✓ カイラル磁気効果を含んだ流体力学の数値計算と粒子相関 [Talk by Hirono]
- ✓ 粘性+カイラル輸送流体のシミュレーションと粒子相関の計算 [Talk by Shi]
- ✓ 小さい系におけるカイラル磁気効果の実験的検証 [Talk by Sorensen, Tu, Park]
- ✓ RHICの同重体(isobar, ZrZr/RuRu)衝突実験に向けた計算 [Talk by Huang, Shi]
- ✓ 初期過程における古典統計近似に基づいたカイラル磁気効果の計算 [Talk by Mueller]

理論計算も実験解析も着実に進展している。

(とくに、**CME+Hydroによる観測量の計算**は大きな進展。

ただし、問題点があるところにも気をつける必要あり)

しかしいまのところ、**CMEのシグナルと断言できるものはない**

(個人的には今回出た実験データはCMEを否定しているように見える)

ということで、次回QMのさらなる結果に乞うご期待！

Back up

QM2017のさんかしゅ

りろん (26めい)

あかまつ, いたくら, おおの, おかい, おかもと, かじもと, か
わぐち, つきじ, こじょう, さかい, さかいだ, せきぐち, た
ばな, たや, たんじ, つつい, なら, のなか, はっとり, ひだか,
ひろの, ふじい, ほんごう, もんない, よした, わたなべ,

じっけん (27めい)

あおき, あきは, おがわ, おざわ, くんじ, さかい, さかぐち, さ
かもと, しがき, しもむら, すぎうら, すぎたて, せきはた, た
なか, とどろき, なかごみ, ながしま, にいだ, のなか, はまが
き, ほしの, ほそかわ, みつか, むらかみ, やの, やまぐち, わた
なべ,