東京大学大学院理学系研究科附属
原子核科学研究センター
Center for Nuclear Study (CNS)

ALICE

Mixed harmonic charge dependent azimuthal correlations in relativistic HIC

堀　泰斗
University of Tokyo, CNS

Chiral Magnetic Effect 探索

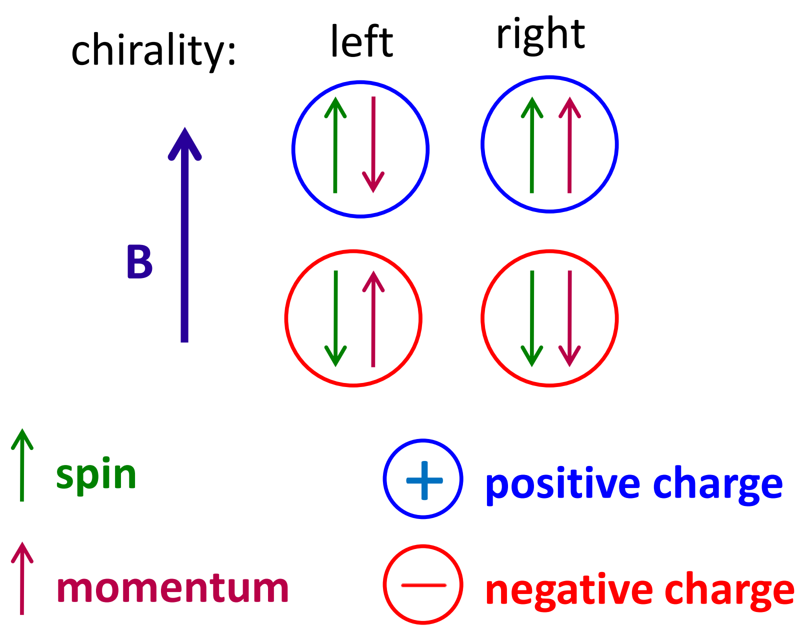
Charge separation by LPV effects in a heavy-ion collisions

Strong magnetic field:

$\mathbf{B} \sim 10^{15}$ T $\quad (e\mathbf{B} \sim 10^4 \text{ MeV}^2)$

$(\mu_N \mathbf{B} \sim 100 \text{ MeV})$

→Magnetic field aligns quark spins along or opposite to its direction

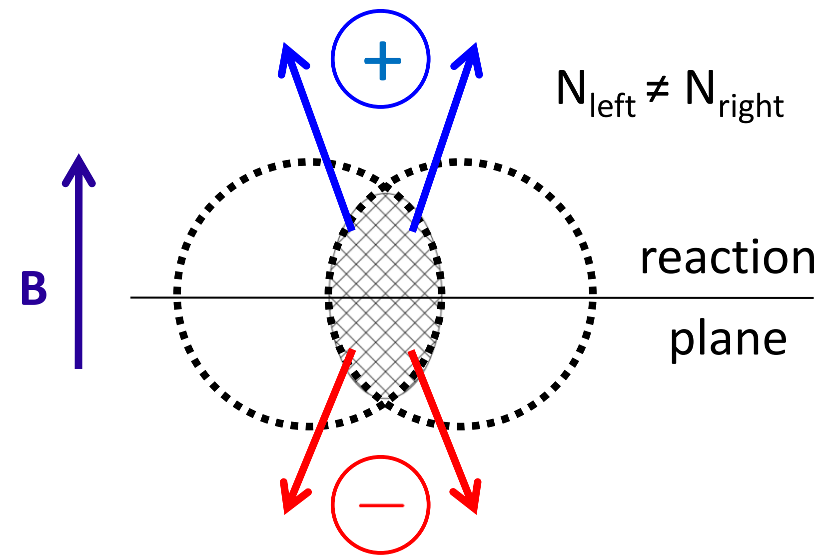


Right-handed quark momentum is opposite to the left-handed one

In HIC formation of (local) metastable P-odd domains is not forbidden.

Kharzeev, Pisarski, Tytgat, PRL81:512 (1998)

→This vacuum transitions produce local excess of left/right handed quarks:



Induced electric field (parallel to B): $E \sim \theta \cdot B$

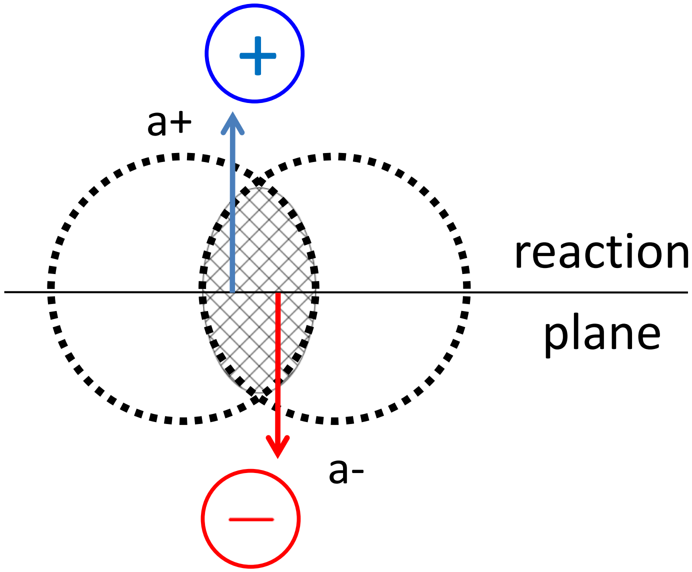
Positive and negative charges moving opposite to each other

→ charge separation in a finite volume

Chiral Magnetic Effect(CME)探索としてのcharge dependent azimuthal correlations

1イベントの電荷別粒子方位角分布

$$\frac{dN_\pm}{d\phi} \propto (1 + 2v_1\cos(\Delta\phi) + 2v_2\cos(2\Delta\phi) + \ldots + 2a_\pm\sin(\Delta\phi) + \ldots), \quad \Delta\phi = \phi - \Psi_{RP}$$



方位角方向のCharge separation a+/a− を測る
しかし、P-odd測定量はイベント平均すると0

$$\langle a_\pm \rangle = \langle \sin(\phi_\pm - \Psi_{2ndRP}) \rangle = 0$$

Same-sign pair 負
Opposite-sign pair 正

$$\boxed{\langle \cos(\phi_\alpha + \phi_\beta - 2\Psi_{RP}) \rangle} = \langle \cos\Delta\phi_\alpha \cos\Delta\phi_\beta \rangle - \langle \sin\Delta\phi_\alpha \sin\Delta\phi_\beta \rangle$$

$$= \underline{[\langle v_{1,\alpha} v_{1,\beta} \rangle + Bg^{(in)}]} - \underline{[\langle a_\alpha a_\beta \rangle + Bg^{(out)}]}$$

$$\Delta\phi_{\alpha,\beta} = \phi_{\alpha,\beta} - \Psi_{RP}$$

Voloshin PRC70:057901 (2004)

$[Bg^{(in)}] - [Bg^{(out)}]$ と $[\langle v_{1,\alpha} v_{1,\beta} \rangle]$ はcharge dependencyは0と考える

多粒子方位角相関を計算するためのQ-cumulant 法

$$\left\langle \cos\left(\phi_\alpha + \phi_\beta - 2\Psi_{RP}\right)\right\rangle \approx \left\langle \cos\left(\phi_\alpha + \phi_\beta - 2\phi_\gamma\right)\right\rangle / v_{\gamma 2}$$

3 particle correlation

あとで出てくcorrelation

$$\left\langle \cos\left(2\phi_\alpha + 2\phi_\beta - 4\Psi_{RP}\right)\right\rangle \approx \left\langle \cos\left(2\phi_\alpha + 2\phi_\beta - 2\phi_\gamma - 2\phi_\delta\right)\right\rangle /(v_{\gamma 2} v_{\delta 2})$$

4 particle correlation

3 particle 以上のcorrelationを計算するときに、全粒子のfor文を入れ子にして計算するのは計算時間がかかりすぎて現実的でない
以下の式をつかう

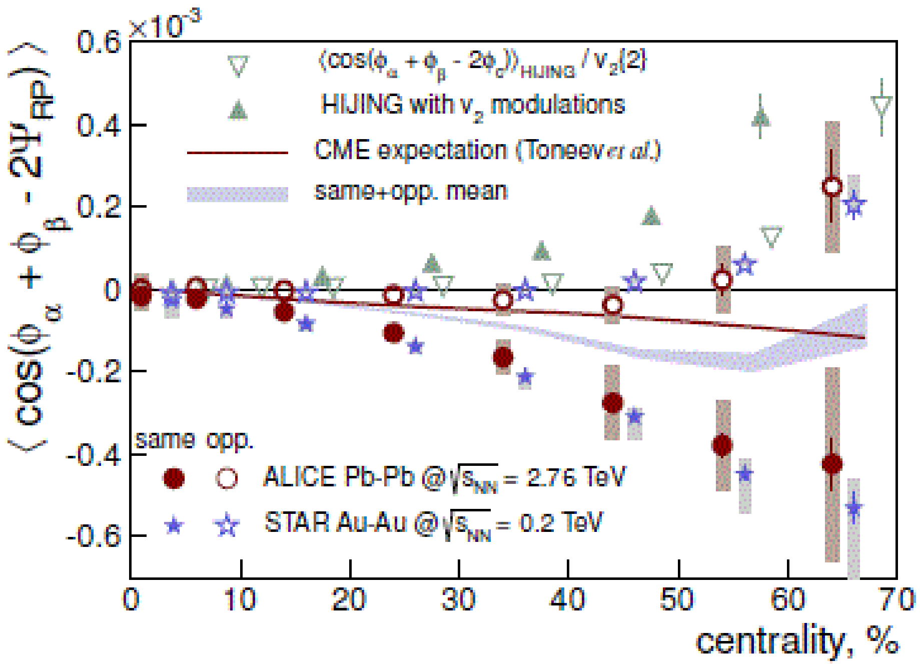
$$\sum_{1event} \cos(\phi_\alpha + \phi_\beta - 2\phi_\gamma) = \frac{Q_1 Q_1 Q_2^* - Q_2 Q_2^* - 2Q_1 Q_1^* + 2M}{M(M-1)(M-2)}$$

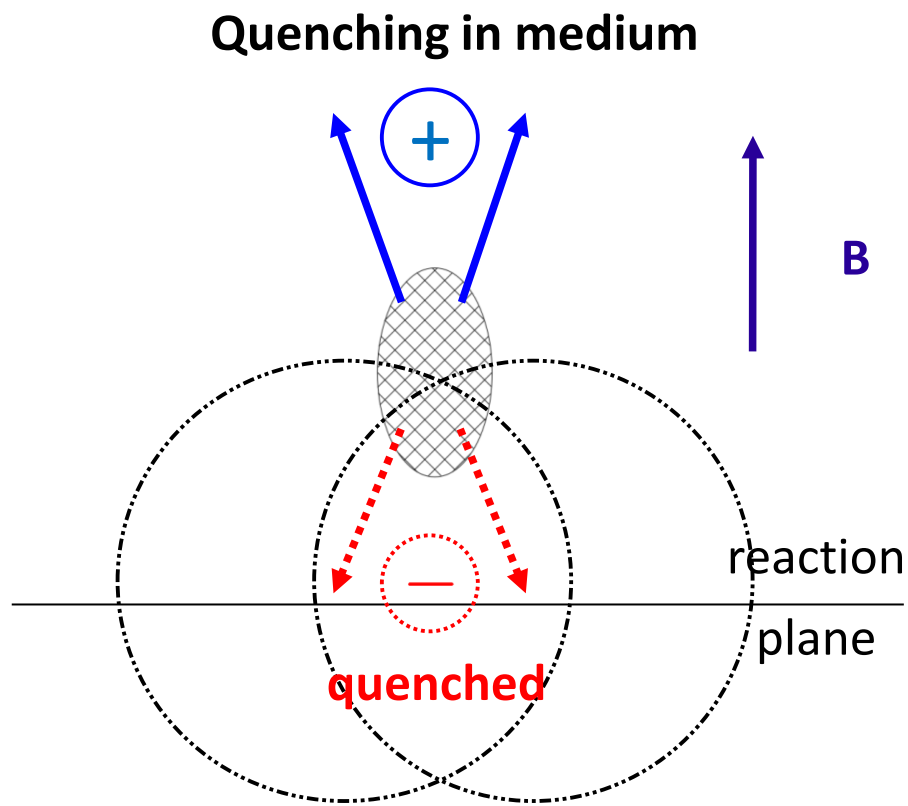
M multiplicity

$$Q_n = \sum_{\alpha=1}^{M} \exp(in\phi_\alpha)$$ 1つのfor文で計算できる

その他の相関も同様の式を使う

ALICEの結果と問題点





RHICとLHCで同様の結果
Same-signとopposite-signで差
HIJING などには見られない信号

問題点１　現在のCME理論ではRHICとLHC両方のデータを同時には説明できない
問題点２　Opposite-signが非常に小さな値
→ “Quenching in medium” / “pt conservation” / “v1 fluctuation”

explanation for shift （pt conservation）

Globalなpt conservationを考えると、
2粒子分布関数は1粒子分布関数の積に補正係数がかかる

Formula 1

$$\left.\frac{dN_{pairs}}{d^2\mathbf{p}_t^{(t)}d^2\mathbf{p}_t^{(a)}}\right|_{\Psi_{PP}} = \frac{dN}{d^2\mathbf{p}_t^{(t)}}\frac{dN}{d^2\mathbf{p}_t^{(a)}}\left(1 - 2\frac{\mathbf{p}_t^{(t)}\cdot\mathbf{p}_t^{(a)}}{\langle\sum p_t^2\rangle}\right).$$

Assumption from N.Borghini
arXiv: 0202013

2p distribution with fixed initial geometry

$$\left\langle\!\!\left\langle\frac{\mathrm{d}N_{\mathrm{pairs},\alpha\beta}}{\mathrm{d}\phi_\alpha\mathrm{d}\phi_\beta}\right\rangle\!\!\right\rangle_{\Psi_{PP}} \simeq \frac{N_\alpha N_\beta}{(2\pi)^2}\Big[1+\sum_n 2\left(\frac{v_{n\alpha}v_{n\beta}}{\epsilon_n^2}\right)\langle\langle\epsilon_n^2\rangle\rangle\cos(n\phi_\alpha - n\phi_\beta)$$
$$+ 2\frac{v_{2\alpha}}{\epsilon_2}\langle\langle\epsilon_2\rangle\rangle\ \cos(2\phi_\alpha - 2\Psi_{PP})$$
$$+ 2\frac{v_{2\alpha}v_{2\beta}}{\epsilon_2^2}\langle\langle\epsilon_2^2\rangle\rangle\ \cos(2\phi_\alpha + 2\phi_\beta - 4\Psi_{PP})$$
$$\boxed{+\ 2\frac{v_{1\alpha}v_{1\beta}}{\epsilon_1^2}\langle\langle\epsilon_1^2\cos(2\psi_{1,3} - 2\Psi_{PP})\rangle\rangle\ \cos(\phi_\alpha + \phi_\beta - 2\Psi_{PP})}$$
$$+ 2\frac{v_{1\alpha}v_{3\beta}}{\epsilon_1\epsilon_3}\langle\langle\epsilon_1\epsilon_3\cos(\psi_{1,3} - 3\psi_{3,3} + 2\Psi_{PP})\rangle\rangle\cos(\phi_\alpha - 3\phi_\beta + 2\Psi_{PP})$$
$$+ \alpha\leftrightarrow\beta\Big]. \qquad (5.6)$$

Formula 1 at previous page

$$<\cos(\phi_\alpha+\phi_\beta-2\Psi_{PP})>_{measured}=\frac{1}{2\pi N_\alpha N_\beta}\int\frac{dN_{pair}}{d^2p_t^{(\alpha)}d^2p_t^{(\beta)}}\bigg|_{\Psi_{PP}}\cos(\phi_\alpha+\phi_\beta-2\Psi_{PP})d\phi_\alpha d\phi_\beta dp_t^{(\alpha)}dp_t^{(\beta)}d\Psi_{PP}$$

(In case of perfect phi acceptance)

$$=<True>-\frac{2}{N_\alpha N_\beta(2\pi)^3<\sum p_t^2>}\int dp_t^{(\alpha)}dp_t^{(\beta)}p_t^{(\alpha)}p_t^{(\beta)}\left(\cos(\phi_\alpha-\phi_\beta)\cos(\phi_\alpha+\phi_\beta-2\Psi_{PP})d\phi_\alpha d\phi_\beta d\Psi_{PP}\right)$$

$$=<True>-\frac{2<p_t^{(\alpha)}p_t^{(\beta)}>}{(2\pi)^3<\sum p_t^2>}\int dx\cos(x+2(\phi_\beta-\Psi_{PP}))\cos(x)d\phi_\beta d\Psi_{PP}$$

$$=<True>-\frac{2<p_t^{(\alpha)}p_t^{(\beta)}>}{(2\pi)^3<\sum p_t^2>}\int d\phi_\beta d\Psi_{PP}\int dx\left(\cos^2x\cos(2(\phi_\beta-\Psi_{PP}))+\cos x\sin x\sin(2(\phi_\beta-\Psi_{PP}))\right)$$

$$=<True>\boxed{-\frac{<p_t^{(\alpha)}p_t^{(\beta)}v_2(p_t^{\beta})>}{<\sum p_t^2>}}$$

Negative shift !!
This contribution is sensitive to the eta gaps.

For dilute system,
We only think about global
Pt conservation, so
<> is all tracks sum in one event. But
QGP matter is dense, so we need also
think about “local” pt conservation

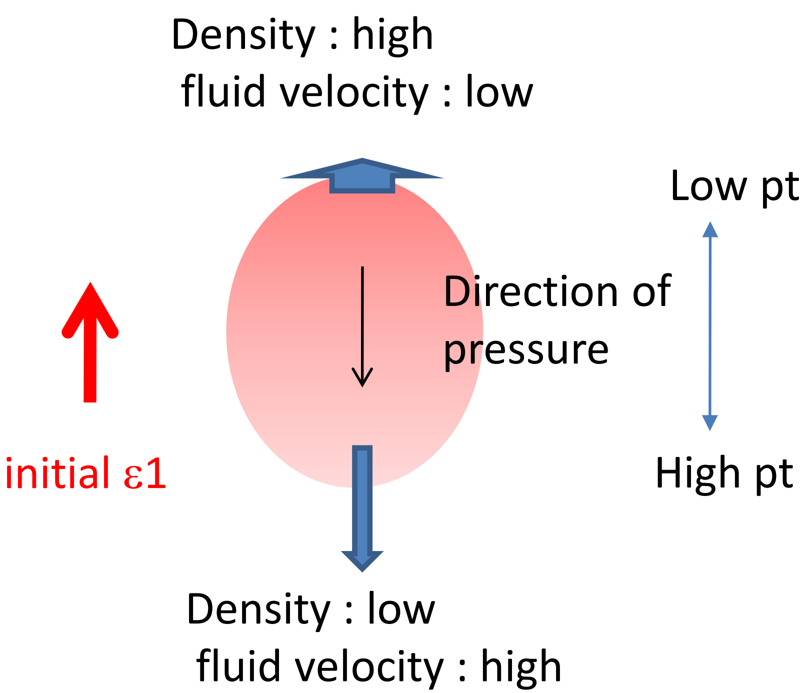
explanation for shift （v1 fluctuation）

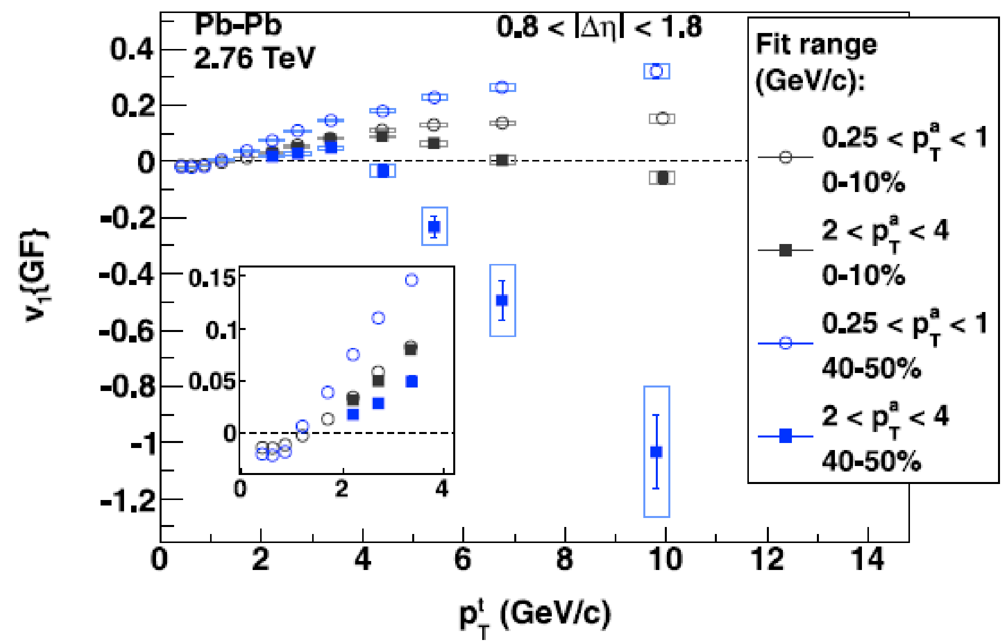
Teaney-Yan の理論（これ自体、物理的面白さのある話）

初期条件の形状揺らぎを考えるとdipole成分が存在する
Dipoleは流体的発展後も残り観測にかかるかもしれない
たしかに、eta symmetric なdipoleはhydro理論値程度のものが観測されている

このdipoleとelliptic flow が大きさだけでなく向きが相関していれば、

$\left[\left\langle v_{1,\alpha} v_{1,\beta} \right\rangle\right]$ が大きな値をもつ





バックグラウンド$Bg^{(in)}$-$Bg^{(out)}$

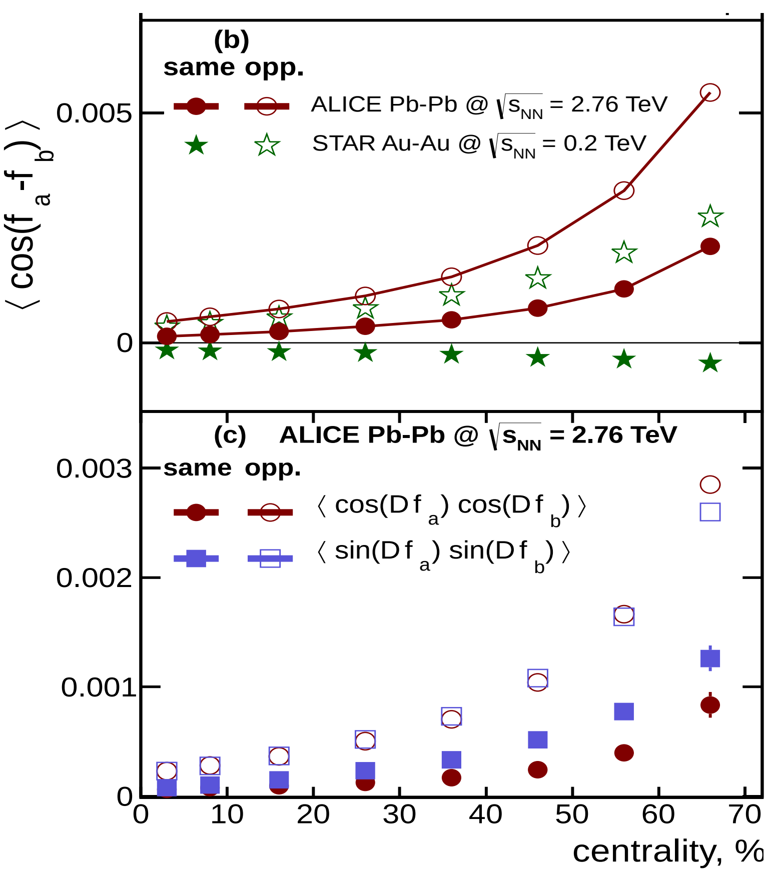
$$\Delta\phi_{\alpha,\beta} = \phi_{\alpha,\beta} - \Psi_{RP}$$

$$\boxed{\left\langle \cos\left(\phi_\alpha - \phi_\beta\right)\right\rangle}$$

$$= \left\langle \cos\Delta\phi_\alpha \cos\Delta\phi_\beta \right\rangle + \left\langle \sin\Delta\phi_\alpha \sin\Delta\phi_\beta \right\rangle$$

$$= \left[\left\langle v_{1,\alpha} v_{1,\beta}\right\rangle + Bg^{(in)}\right] + \left[\left\langle a_\alpha a_\beta \right\rangle + Bg^{(out)}\right]$$

この測定量では、Bgはin-planeとout-of-planeでキャンセルしない



$\left\langle \sin\Delta\phi_\alpha \sin\Delta\phi_\beta \right\rangle$

だけではなく

$\left\langle \cos\Delta\phi_\alpha \cos\Delta\phi_\beta \right\rangle$

も大きな電荷依存性を持っている

Bg自体が大きな電荷依存性を持っているのでは？

$$\left[Bg^{(in)}\right] - \left[Bg^{(out)}\right]$$

はキャンセルしないのでは？

QGP寿命の測定、ハドロン化機構の研究

（測定されたcharge dependent azimuthal correlationに対し、別の解釈を与える）

freeze-out面上の局所電荷保存

多くの“charge”は10fm/c程度の寿命を持つQGP相がハドロン相に相転移した時にできる

→ delayed hadronization

その時、freeze-out面上の各space-pointでnet-chargeゼロのクォーク反クォーク-アンサンブル（あるいは対）として生成される

→ local charge conservation on freeze-out surface

opposite-sign対の運動量空間上での相関はnear sideでsame-sign対の相関より強くなる

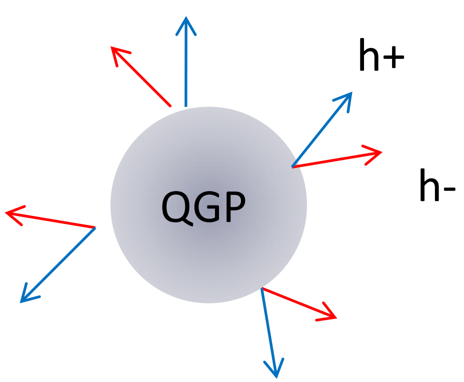
Charge productionが非常に大きい
radial flowを持つ面で生じる

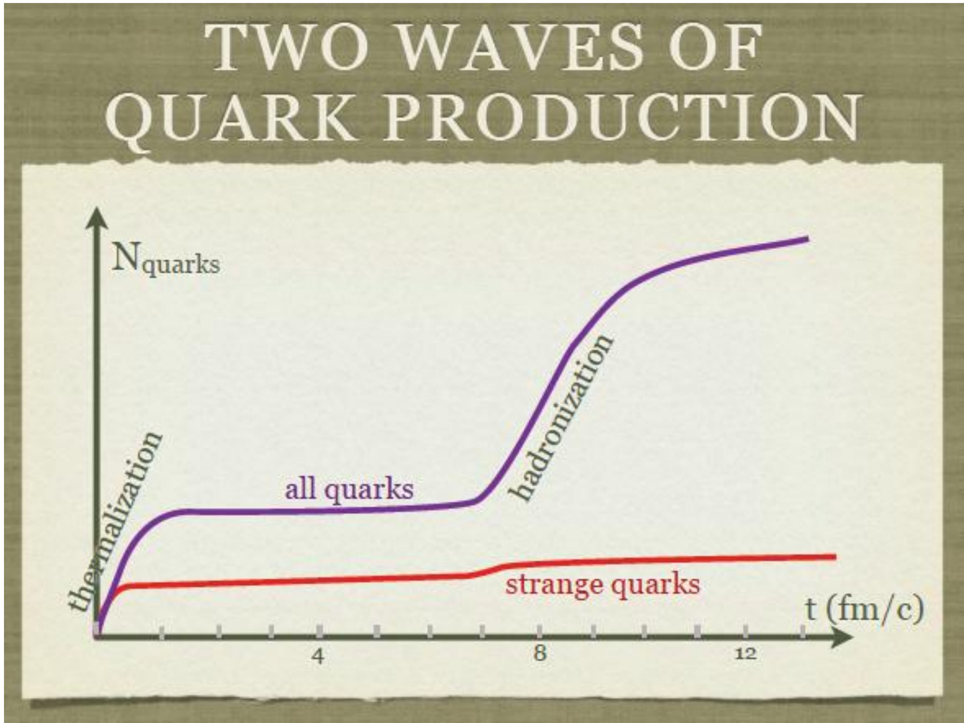
→ より強いopposite-sign相関

→ $\Delta\langle\cos(\delta\phi)\rangle$ 大

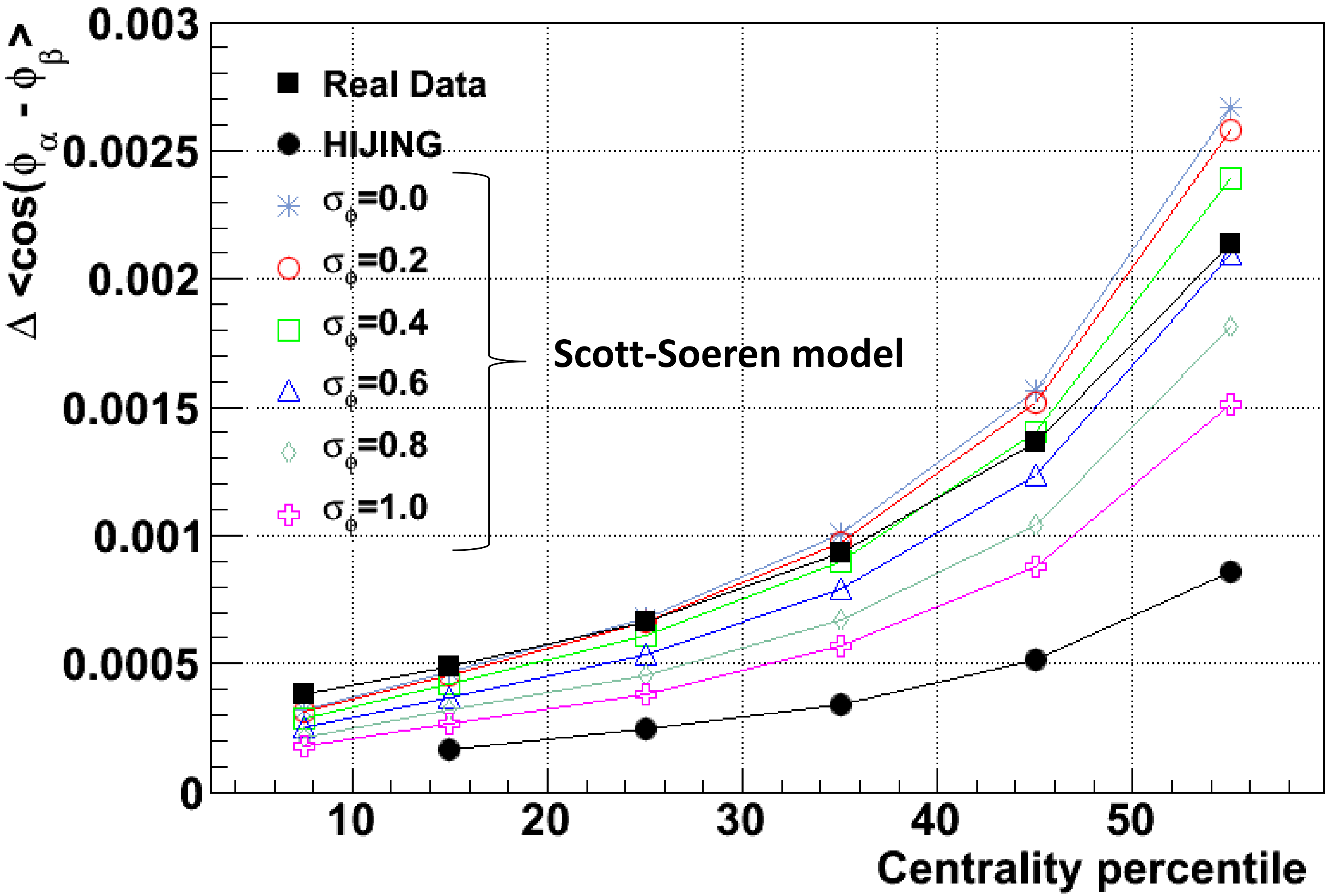
いいかえると、

charge balancing width が狭い





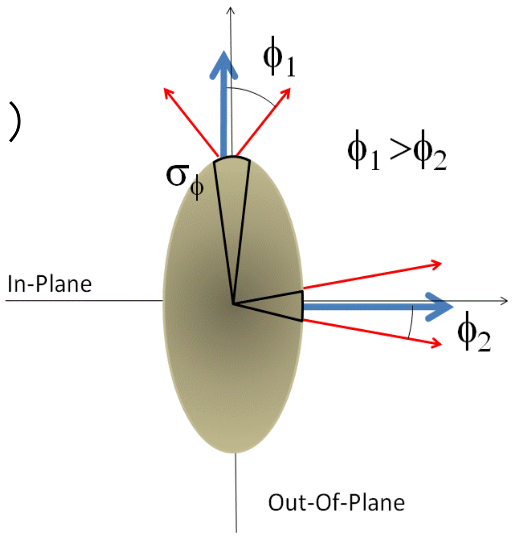
HIJINGのcharge balancing widthは非常に広い



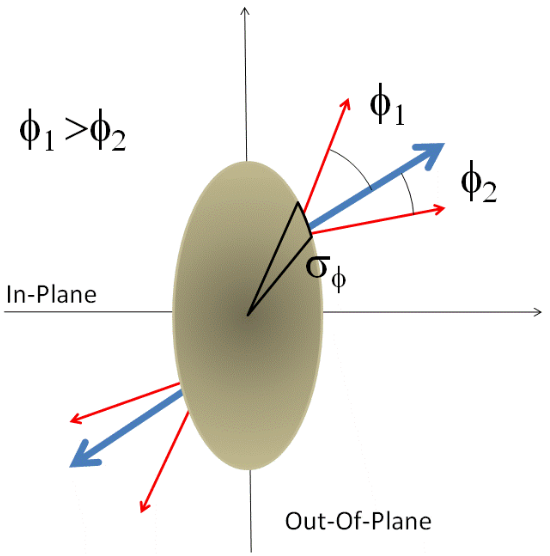
$\langle \cos(\phi_\alpha + \phi_\beta - 2\Psi_{RP}) \rangle$ の解釈

“Charge balancing partner”の方位角分布は、Freeze-out面のazimuthal anisotropyにより変調を受ける

（1）



（2）



（1） Charge balancing width はin-planeのほうが狭い
（2） Charge balancing asymmetry $\Delta\langle\sin(\delta\phi)\rangle$ は0だが、方位角ごとに見れば振動している

$$
\begin{aligned}
&\Delta\langle\cos(\phi_\alpha + \phi_\beta - 2\Psi_2)\rangle \\
&= \Delta\langle\cos(\delta\phi)\cos(\phi_\beta - \Psi_2)\rangle - \Delta\langle\cos(\delta\phi)\rangle \times \langle\cos 2(\phi_\beta - \Psi_2)\rangle \quad \longleftarrow \text{（1）} \\
&+\Delta\langle\cos(\delta\phi)\rangle \times \langle\cos 2(\phi_\beta - \Psi_2)\rangle \\
&+\Delta\langle\sin(\delta\phi)\sin 2(\phi_\beta - \Psi_2)\rangle \quad \longleftarrow \text{（2）}
\end{aligned}
$$

Mixed harmonic azimuthal correlations

"2nd harmonic azimuthal anisotropy"による
"2nd harmonic modulation of charge balancing width/asymmetry"の例を一般化する

|n+m|-th harmonic flow w.r.t. Ψ_k による変調

$$C_{\alpha\beta}(n,m;k) \equiv \left\langle \cos(n\phi_\alpha + m\phi_\beta - (n+m)\Psi_k) \right\rangle \quad (\alpha,\beta = \pm)$$

$$\Delta C \equiv (C_{-+} + C_{+-})/2 - (C_{++} + C_{--})/2$$

$$\begin{aligned}
&\Delta\langle\cos(n\phi_\alpha + m\phi_\beta - (n+m)\Psi_k)\rangle \\
&= \Delta\langle\cos(n\delta\phi)\cos(n+m)(\phi_\beta - \Psi_k)\rangle - \Delta\langle\cos(n\delta\phi)\rangle \times \langle\cos(n+m)(\phi_\beta - \Psi_k)\rangle \\
&+\Delta\langle\cos(n\delta\phi)\rangle \times \langle\cos(n+m)(\phi_\beta - \Psi_k)\rangle \\
&+\Delta\langle\sin(n\delta\phi)\sin(n+m)(\phi_\beta - \Psi_k)\rangle
\end{aligned}$$

$$(\delta\phi = \phi_\alpha - \phi_\beta)$$

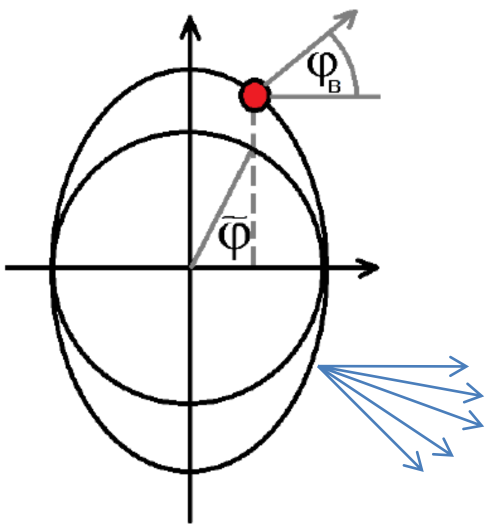
以上の一連のcorrelationを測定し、理論と比較することにより、
カイラル磁気効果 / 局所電荷保存＋方位角異方性の効果　の区別をする

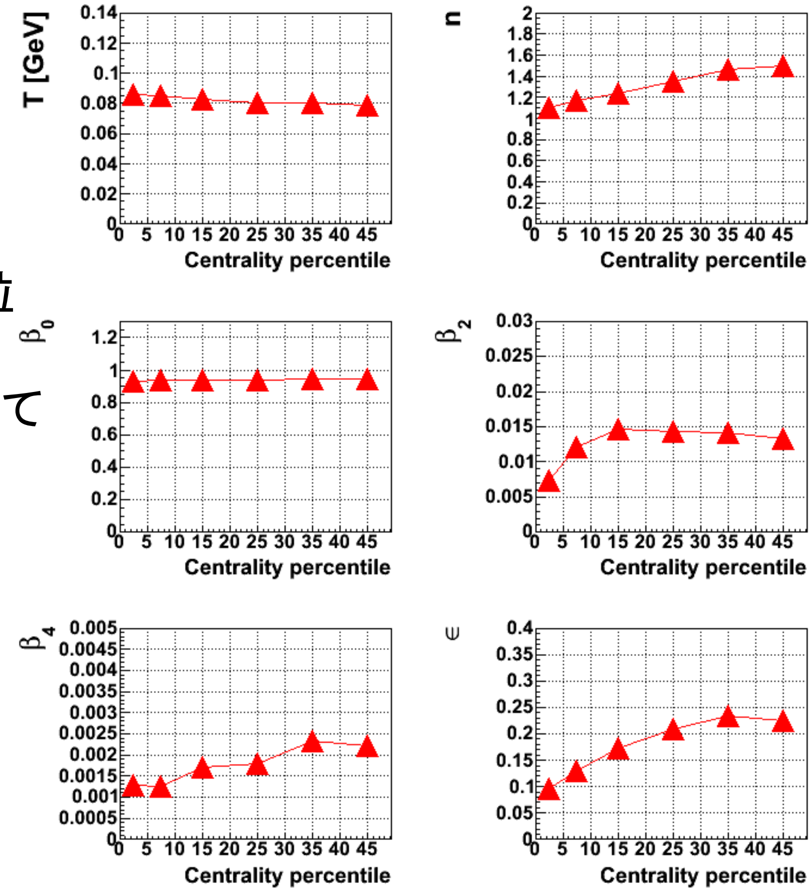
後者の場合、ハドロン化が"sourceが方位角異方性を十分獲得するほど"遅れて起こっていることの強い証拠となる。→ QGPの寿命, delayed hadronization

Scott-Soerenモデル

基本的にはblast wave model
- Freeze-out面をparameterize
- パラメタはdN/dpt, v2(pt), v4をフィットして得る

Over-sampling法
各space-pointからは10コ程度のnet-chargeが0の粒子アンサンブルを放出
アンサンブルの化学組成は実験から得たTchに従って決める

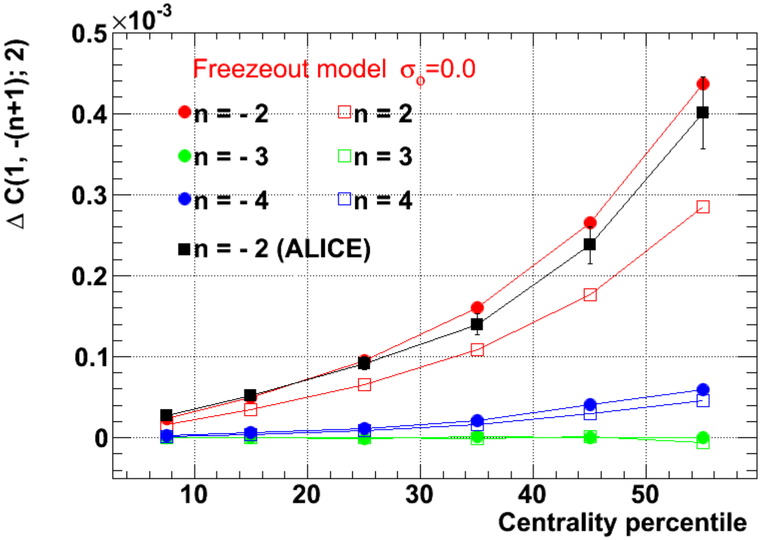




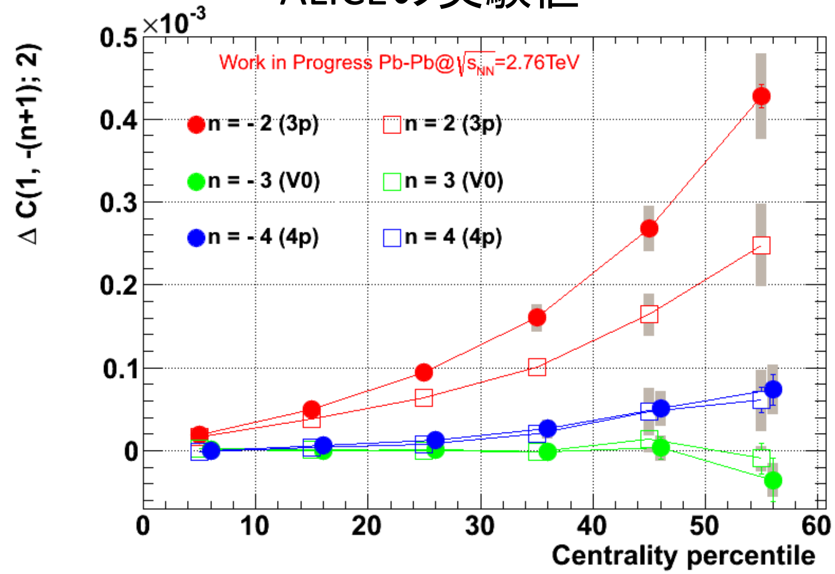
相転移面と力学的凍結面は別だけれども、toyモデルとしてはほぼ同じと思っている

ALICEの結果とモデル予想

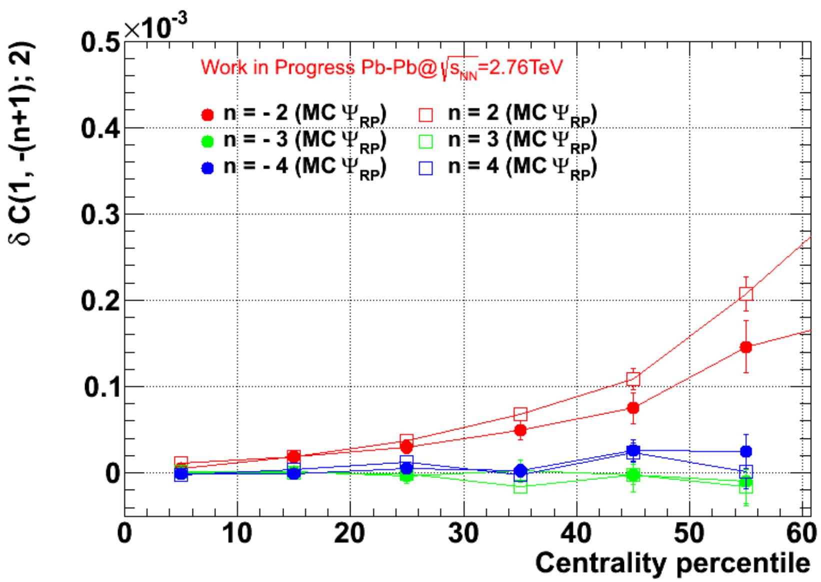
Scott-Soerenモデル予想



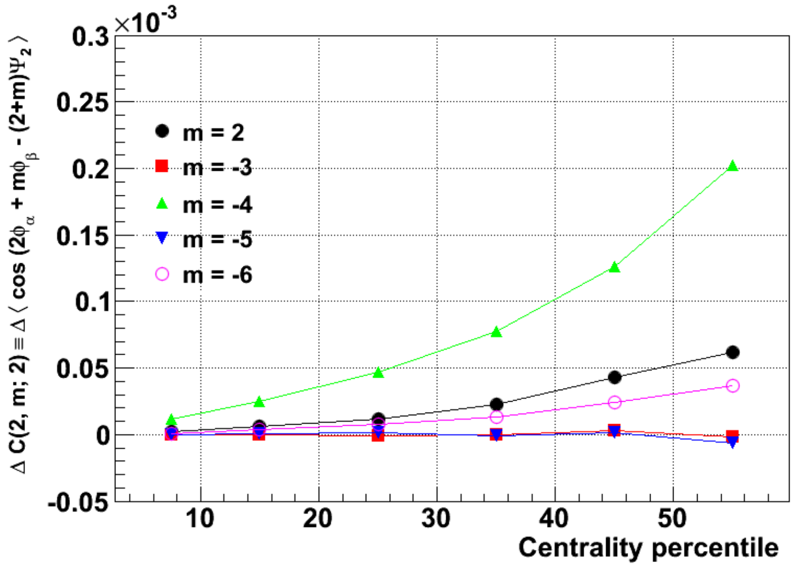
ALICEの実験値

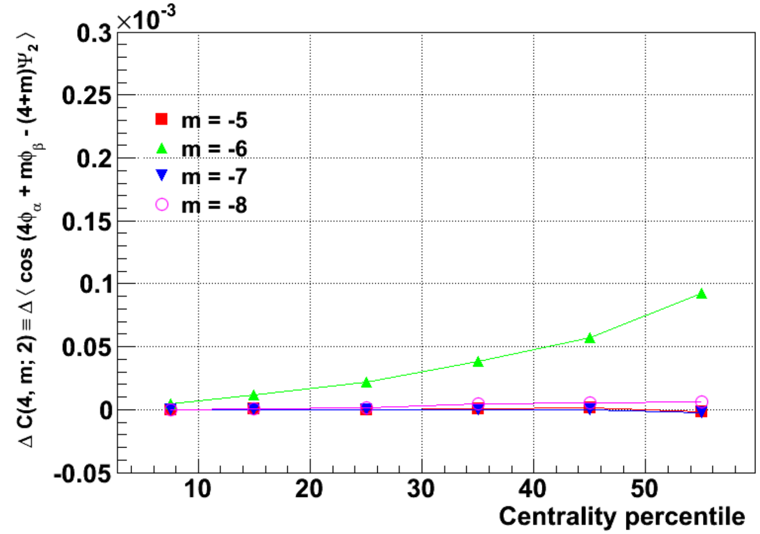


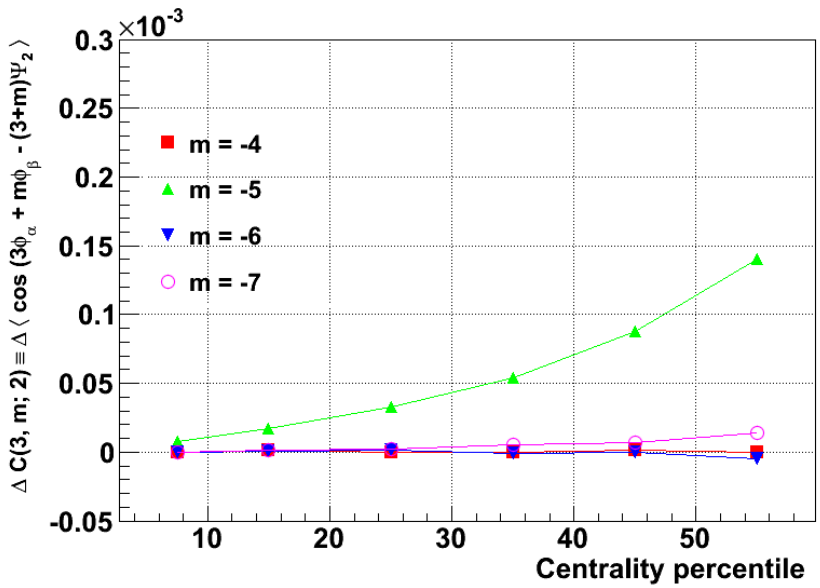
HIJING + afterburner v2&v4



さらに高次のモーメントのモデル予想







FSI効果を考慮していない
高次のモーメントではFSI効果は大きいと思われる

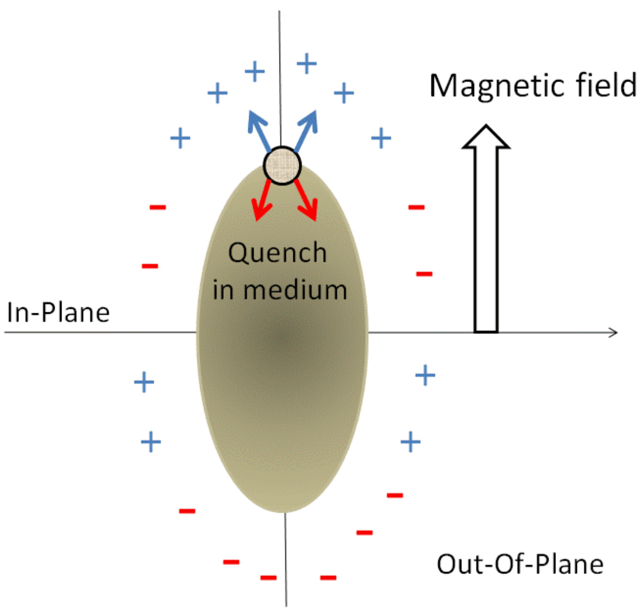
Scott-Soeren modelには高次のイベント平面を入れることはできない

The implication for the local parity violation

It maybe interesting question whether or not the parity violation can contribute not only $\Delta\langle\cos(\delta\phi)\rangle$ and $\Delta\langle\cos(\phi_\alpha+\phi_\beta-2\Psi_2)\rangle$ but also other correlations

Here is the general decomposition

$$\begin{aligned} C_{\alpha\beta}(1,-(n+1);2) &= \langle\cos(\phi_\alpha-\Psi_{RP})\times\cos\Big((n+1)(\phi_\beta-\Psi_{RP})\Big)\rangle \\ &\quad +\langle\sin(\phi_\alpha-\Psi_{RP})\times\sin\Big((n+1)(\phi_\beta-\Psi_{RP})\Big)\rangle \\ &= \langle v_{1,\alpha}v_{n+1,\beta}\rangle+\underline{\langle a_{1,\alpha}a_{n+1,\beta}\rangle}+B_{in}-B_{out} \end{aligned}$$



The possible term which is related to the parity violation

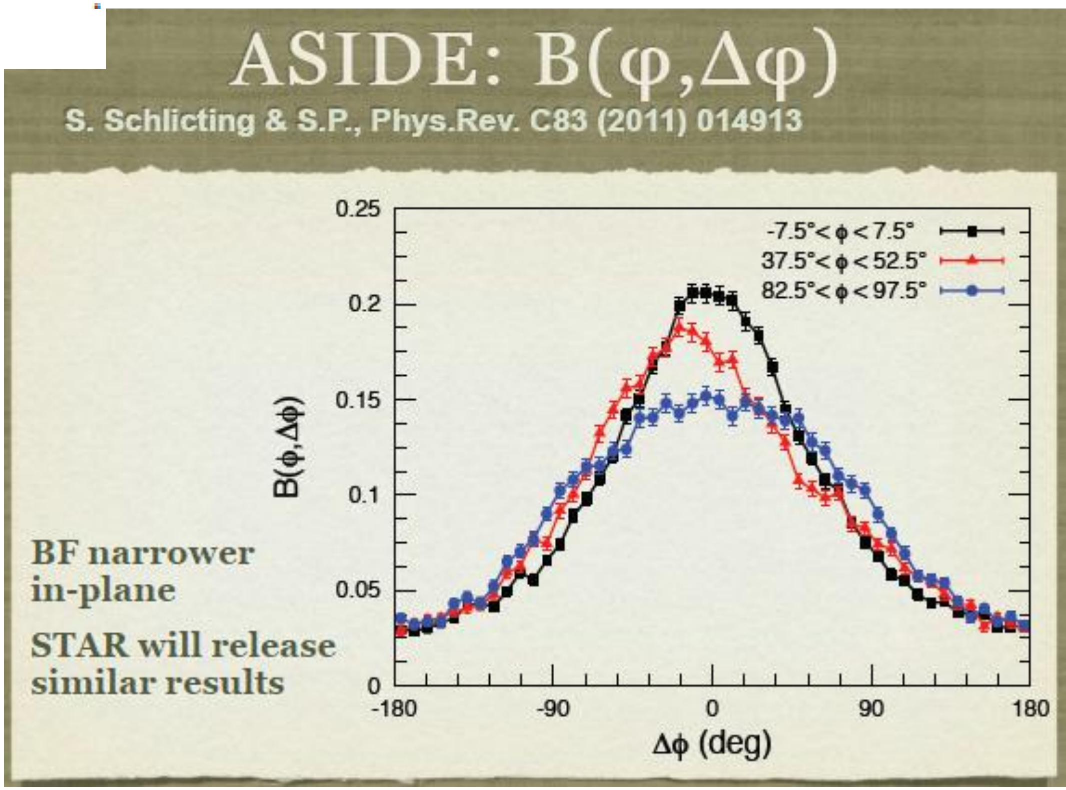
→
The interaction between the flowing medium and the sphaleron can produce non-zero $\langle a_{1\alpha}a_{3\beta}\rangle$, which leads non-zero $\Delta C(1, -3; 2)$

Balance functionとのつながり

$$B(\phi,\Delta\phi) = \frac{\langle N_{+-}(\phi|\Delta\phi) - N_{++}(\phi|\Delta\phi)\rangle}{\langle dM/d\phi\rangle} + \frac{\langle N_{-+}(\phi|\Delta\phi) - N_{--}(\phi|\Delta\phi)\rangle}{\langle dM/d\phi\rangle} .$$

ϕ (= ϕ_β) はΨ_kから測った方位角

$(\Delta\phi = \phi_\alpha - \phi_\beta)$

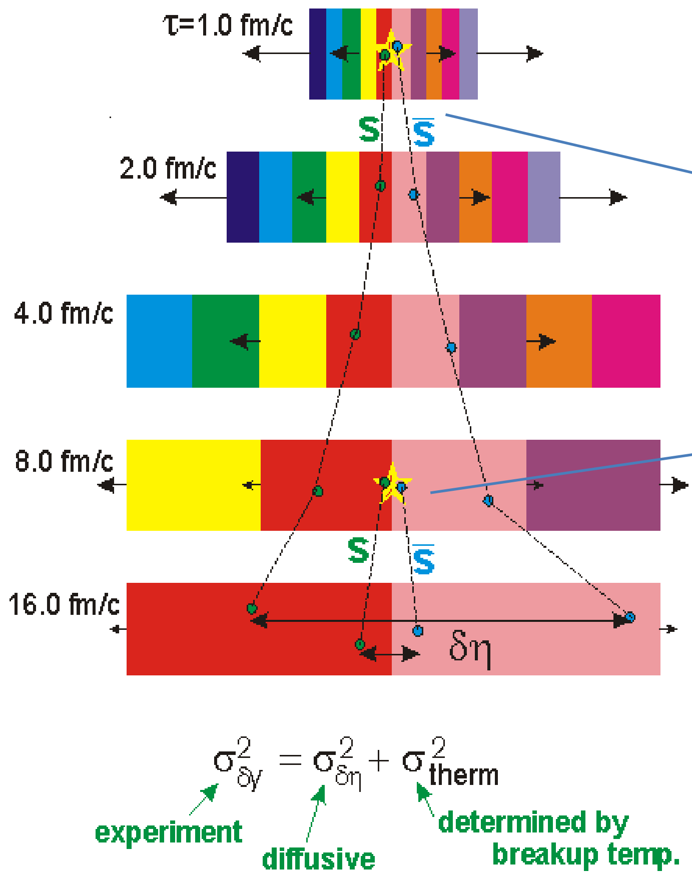


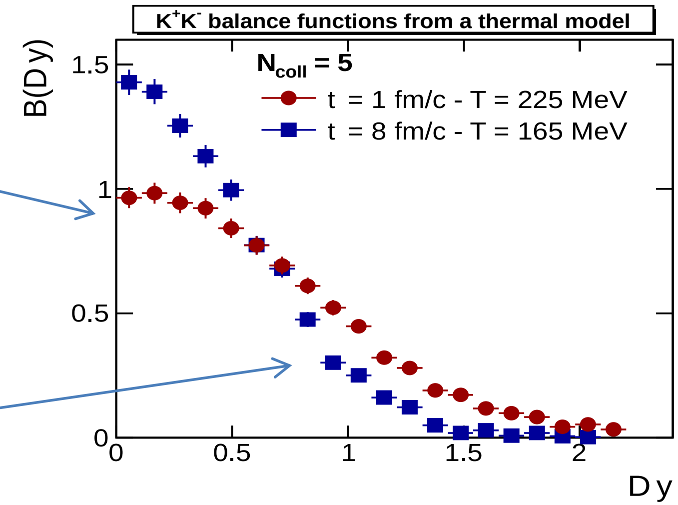
条件付き確率
Given ϕ_β, probability of finding charge balancing partner at ϕ_α

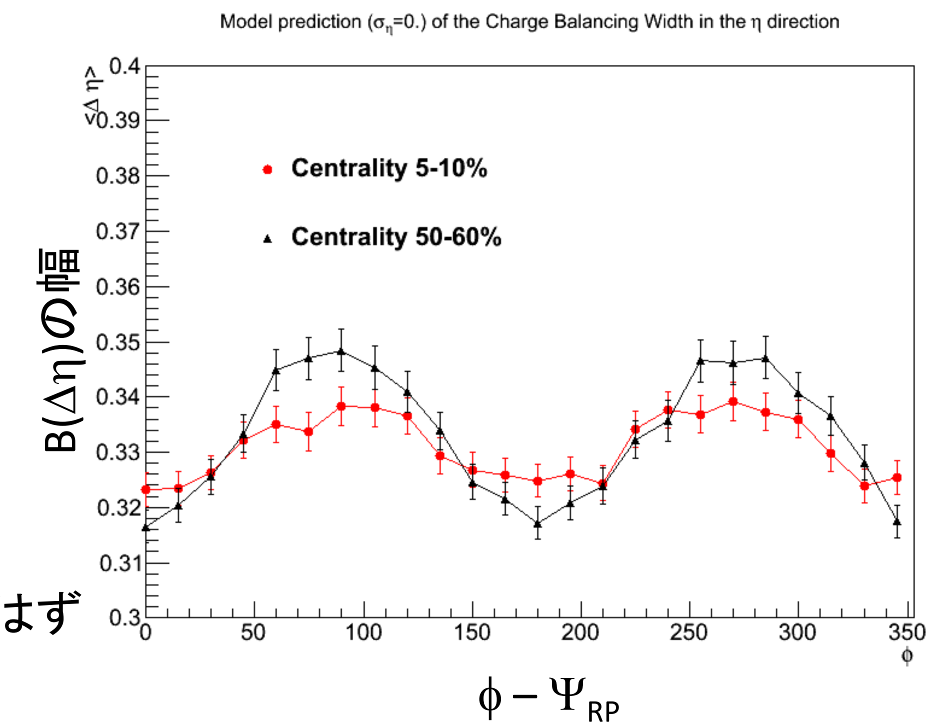
一連のazimuthal correlationsは、B(ϕ, $\Delta\phi$)のϕ・$\Delta\phi$に対するフーリエ係数

Analogy: dN/dϕ とv2, v3, …

Eta方向のcharge balancing widthの変調







Eta方向にはfree streamingとして
Eta方向のBalance functionの幅は、
chargeの生成時刻が遅いほど狭い

幅の狭い成分はやはり変調を受けているはず

結論と理論への質問

Chiral Magnetic Effectは面白そうな効果

- PとCP破れ
- 大きな磁場
- クォーク閉じ込めの破れ

Charge separationは測定されうるのか？

→ 個人的には、ほぼ局所電荷保存を測定しているのだと思っている

→ 合計60個のmixed harmonic charge dependent azimuthal correlationsで、後者の理論予想通りの信号が見えている（まだ、見せてないけれど）

→ 物理的に意味は？

Full hydrodynamicsでかつハドロン化を局所電荷保存型にした理論が必要

CME理論での他のcorrelationに対する効果の可能性の検討

そもそも、相転移面での（effective ?）局所電荷保存の物理的意味

→ 相転移におけるハドロン化も、通常のハドロン化と同じくストリングフラグメンテーションのようなものと考えてよい（コアレッセンスとはある意味真逆）、ということか？

RHICでのU＋U衝突、エネルギースキャンでの測定