

RHIC - sPHENIX 実験での $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV の Au+Au衝突における、方位角異方性の測定

奈良女子大学大学院

人間文化総合科学研究科 数物科学専攻 物理コース

高エネルギー物理学研究室

学籍番号: 23810136

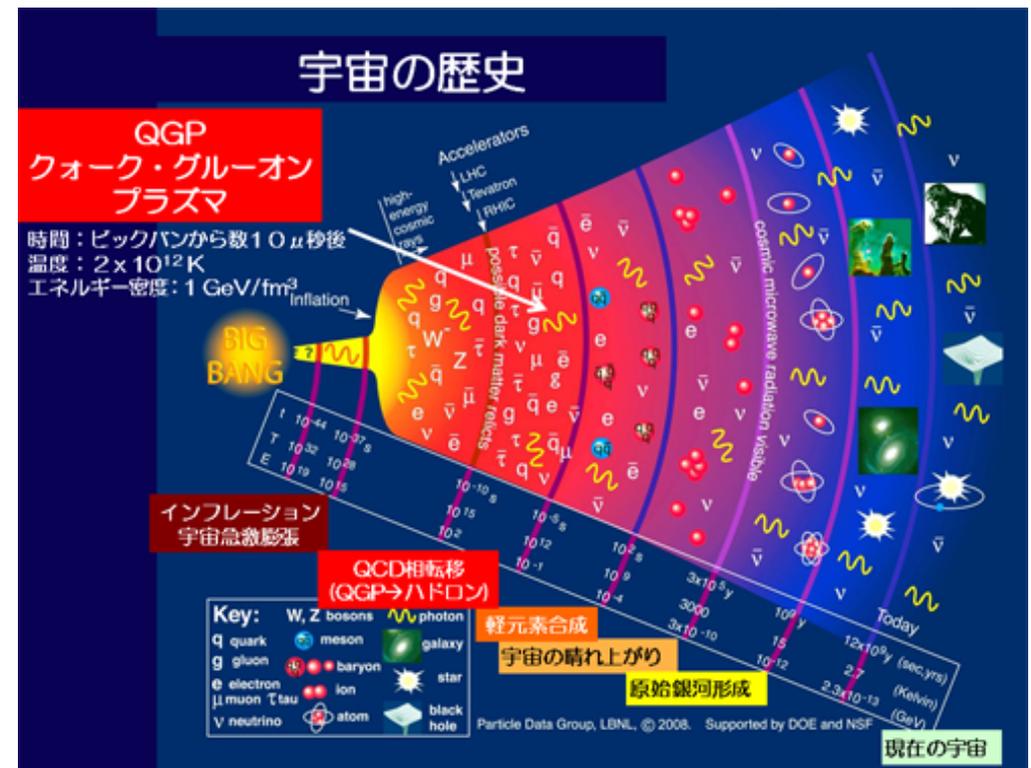
藤原愛実

2025/02/17 修士論文審査会

QGP

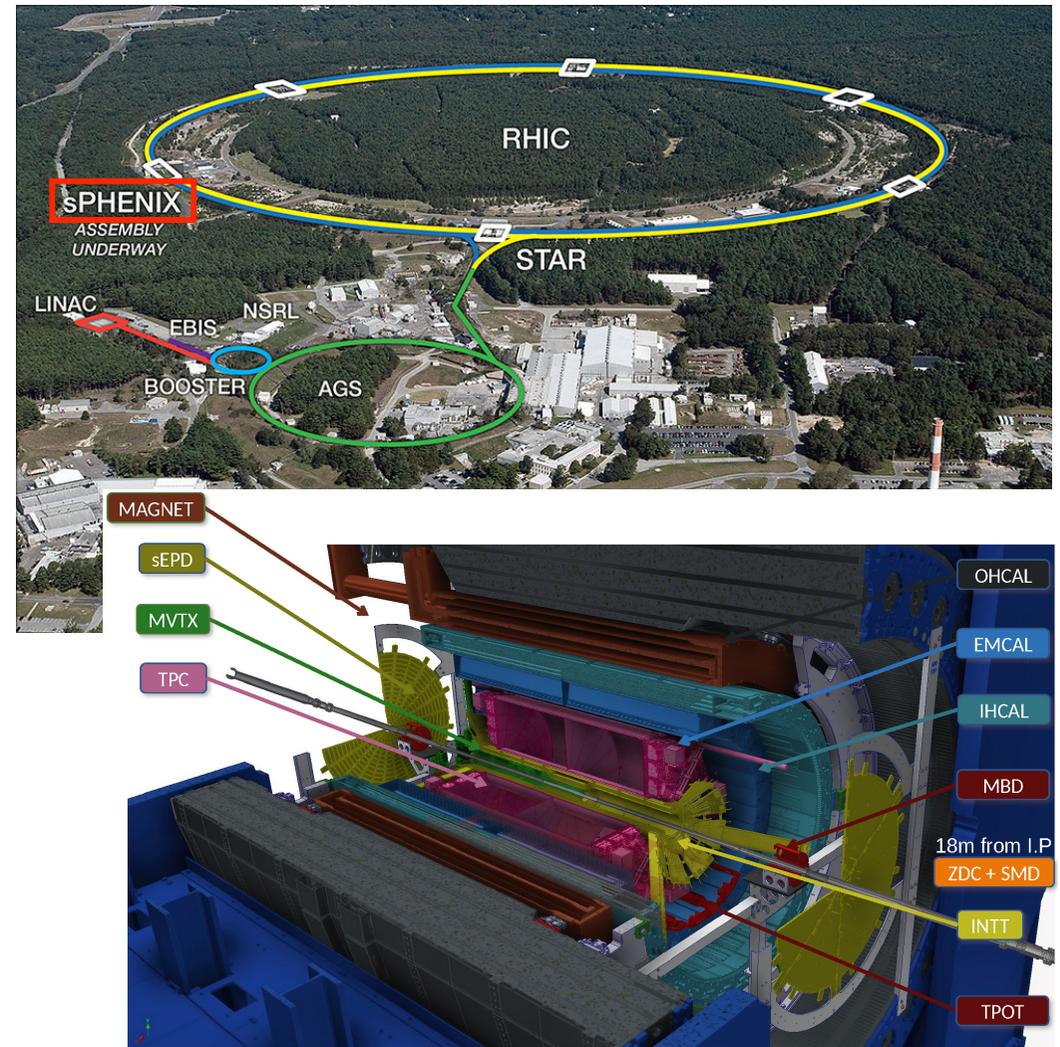
- クォークグルーオンプラズマ(QGP)は、通常では核子内に閉じ込められているクォークやグルーオンが超高温または高密度になることでプラズマ化した状態
- QGP は宇宙誕生後数十 μ 秒後に実現していた

QGP の性質を調べることで宇宙初期の状態を調べることができる

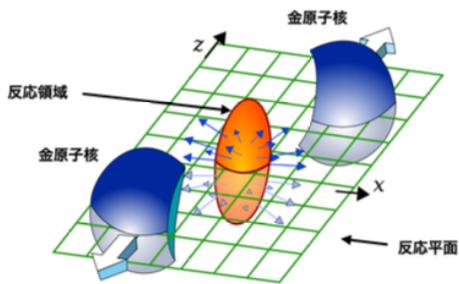
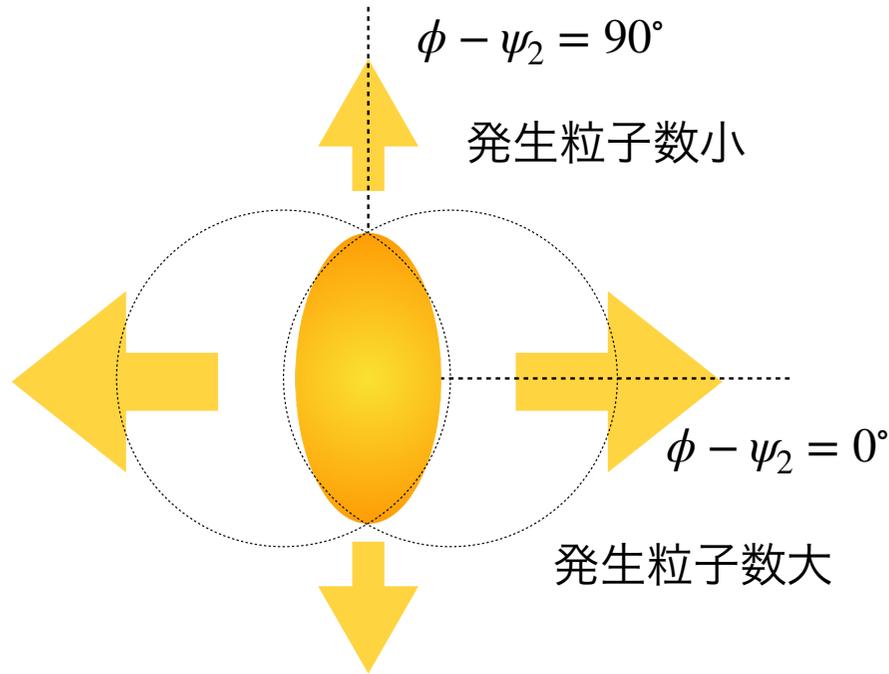


sPHENIX実験

- 米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)のRHIC加速器を用いた実験
- 2000-2016年に行われたPHENIX 実験を高度化した実験
- $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV のAu+Au衝突でQGPを実現する
- 2023年5月から実験開始
- sPHENIX検出器によって衝突によって放出された粒子の物理量を計測する



QGPの流体力学的振る舞いと粒子の方位角異方性(v_2) 4



$$\frac{dN}{d(\phi - \psi_2)} \propto 1 + 2v_2 \cos[2(\phi - \psi_2)]$$

ϕ : 衝突により生成・放出された粒子の方位角

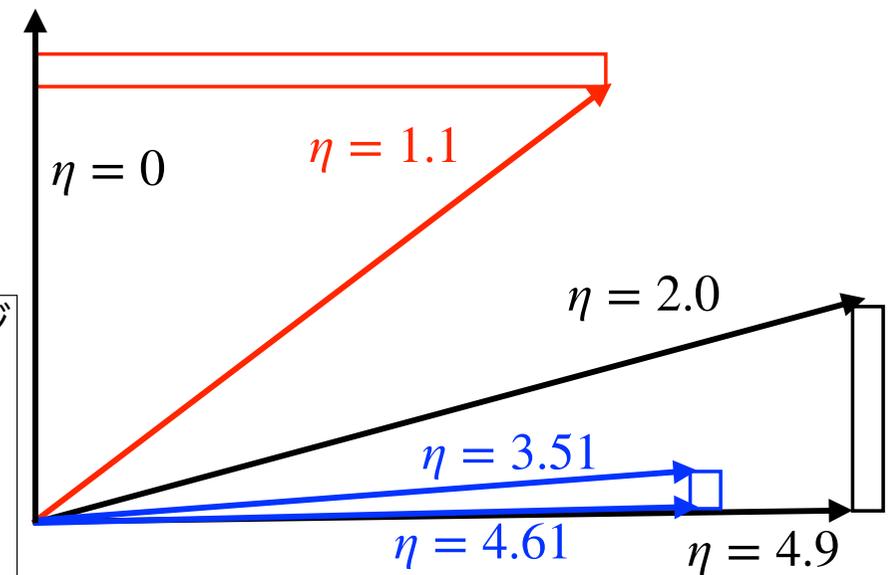
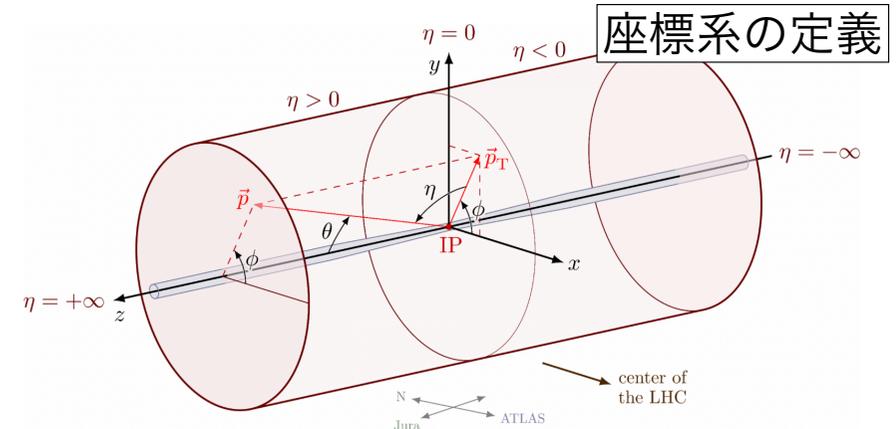
ψ_2 : 反応平面角 (原子核の中心同士を結んだ直線とビーム軸とのなす角)

v_2 : 方位角異方性の強度を表す値

QGP が生成される $\rightarrow v_2 \neq 0$ になる

各検出器の計測領域

- 擬ラピディティ: $\eta \equiv -\ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]$
- ビーム軸をz軸とし、 $z > 0$ がNorthにあたり前方と呼び、 $z < 0$ にあたりSouthで後方と呼ぶ
- 擬ラピディティレンジの近い検出器を使うと自己相関が生じるため擬ラピディティレンジの異なる離れた検出器で反応平面と方位角を測る必要がある

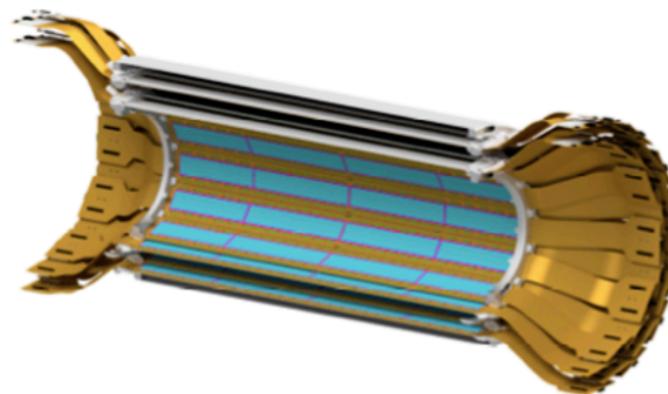
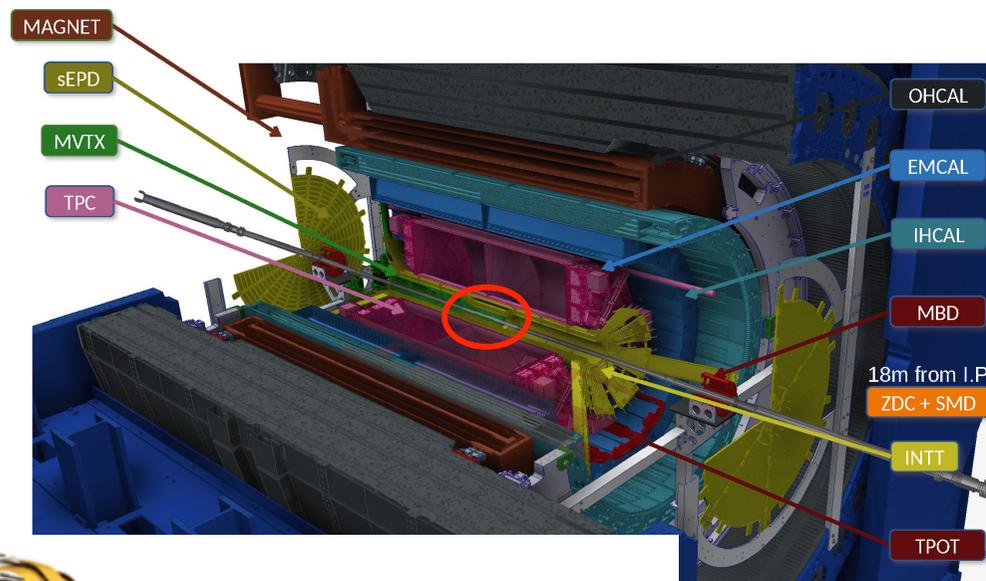


各検出器の擬ラピディティレンジ
 INTT : $|\eta| < 1.1$
 MBD : $3.51 < |\eta| < 4.61$
 sEPD : $2.0 < |\eta| < 4.9$

INTermediate Tracker (INTT)

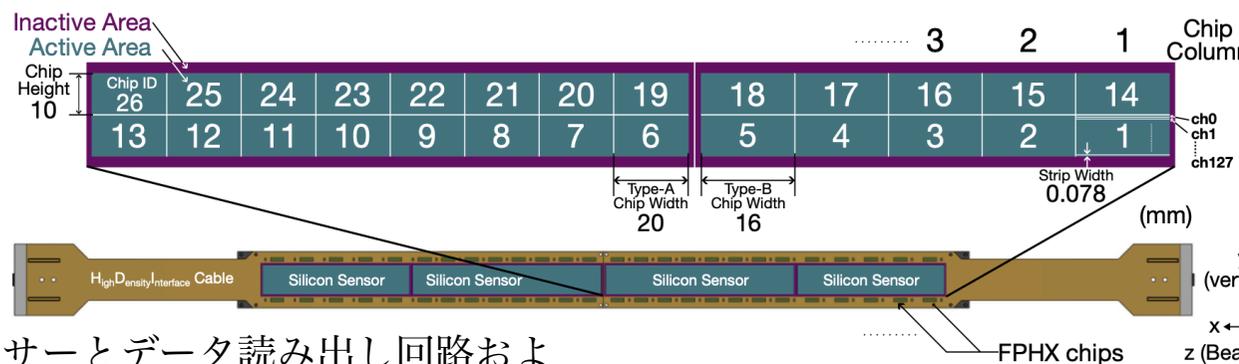
6

- 2層のバレル状のストリップ型シリコン検出器で荷電粒子の通過位置を検出
- 内層24枚、外層32枚のラダーで構成されている
- ビーム軸から 7 ~ 10cm に位置する
- 方位角分解能に優れる
- $|\eta| < 1.1$ 、 $|z| < 20$ cm の範囲をカバー

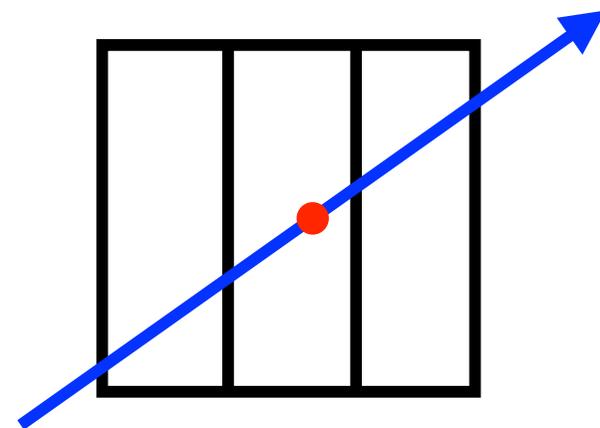


INTermediate Tracker (INTT)

7



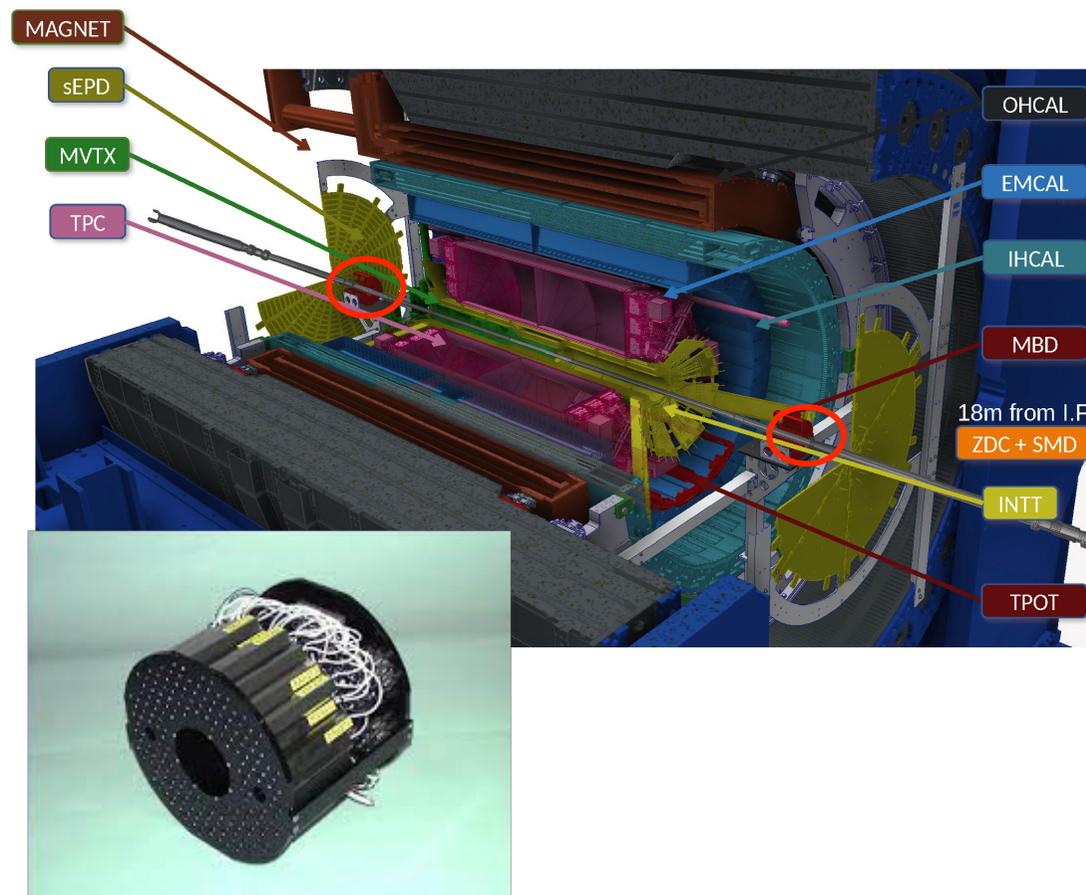
- INTT はラダーと呼ばれるシリコンストリップセンサーとデータ読み出し回路およびデータ伝送ケーブルからできたユニットで構成
- 1ストリップの幅は0.078mm, 厚みは0.32mm
- ストリップごとに信号電荷を3bitのADC(8段階)でデジタル化
 - 閾値を任意に決められる
- 隣り合ったストリップがなった場合にはクラスターとして1つのヒットとみなすクラスタリングを行なっている
 - クラスタ座標はクラスターを構成するヒット座標の平均
 - クラスタADCはクラスターを構成するヒットのADCの合計



Minimum Binas Detector (MBD)

8

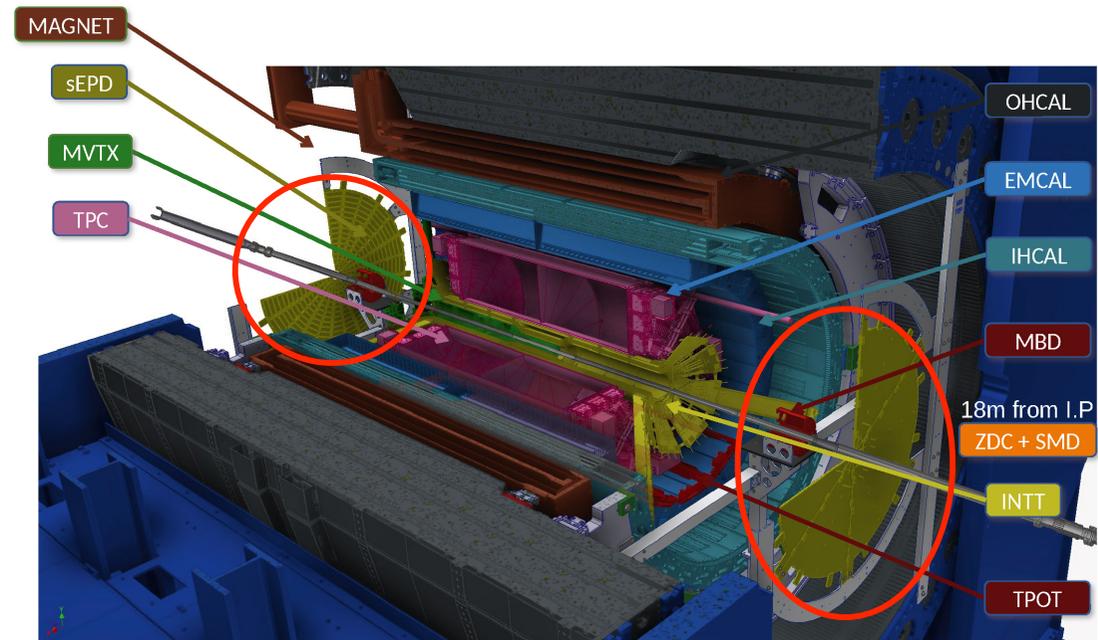
- 片側64本のチェレンコフ放射体と光電子増倍管(PMT)で荷電粒子の通過位置と電荷量を検出
- ビーム軸に沿って南北に1つずつ設置されている
- 粒子到達の時間差によって衝突点のz座標を求められる
- 時間分解能 120 ps
- $3.51 < |\eta| < 4.61$ の範囲をカバー



sPHENIX Event Plane Detector (sEPD)

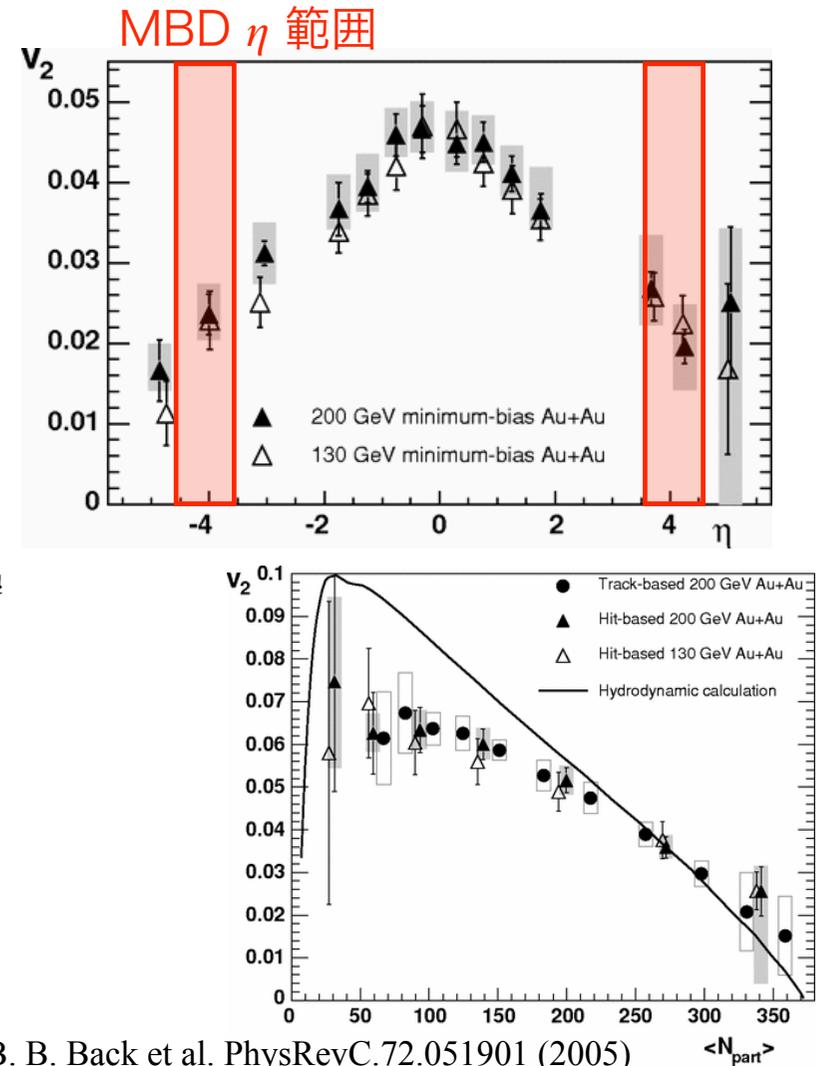
9

- シンチレータータイルホイールで構成された検出器
- MBDに比べて方位角分解能が高く、反応平面を高い精度で求められる
- ビーム軸に沿って南北に1つずつ設置されている
- $2.0 < |\eta| < 4.9$ の範囲をカバー
- 本研究の解析ではINTT、MBD、sEPDで測定されたデータを用いた



先行研究

- RHIC - PHOBOS 実験 Au+Au 衝突 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeVの結果
- v_2 を衝突核子数の平均値の関数として求め、流体力学モデルでの計算と比較すると、よい一致を示す。これは、QGPが生成されていることを示す証拠の1つとされた。
- 本研究で観測される v_2 は0.02程度になると予測される



研究目的

- 2024年にsPHENIX 実験で測定された磁場なしのAu+Au衝突のデータを用いて PHENIX実験では計測できなかった、前方と後方での荷電粒子の方位角異方性(v_2)を測定し、 v_2 を中心衝突度の関数として求める
- v_2 の解析のためにINTTで反応平面を測定し、その歪みを較正する
- 反応平面分解能の効果による v_2 の補正係数を求める

データ選定

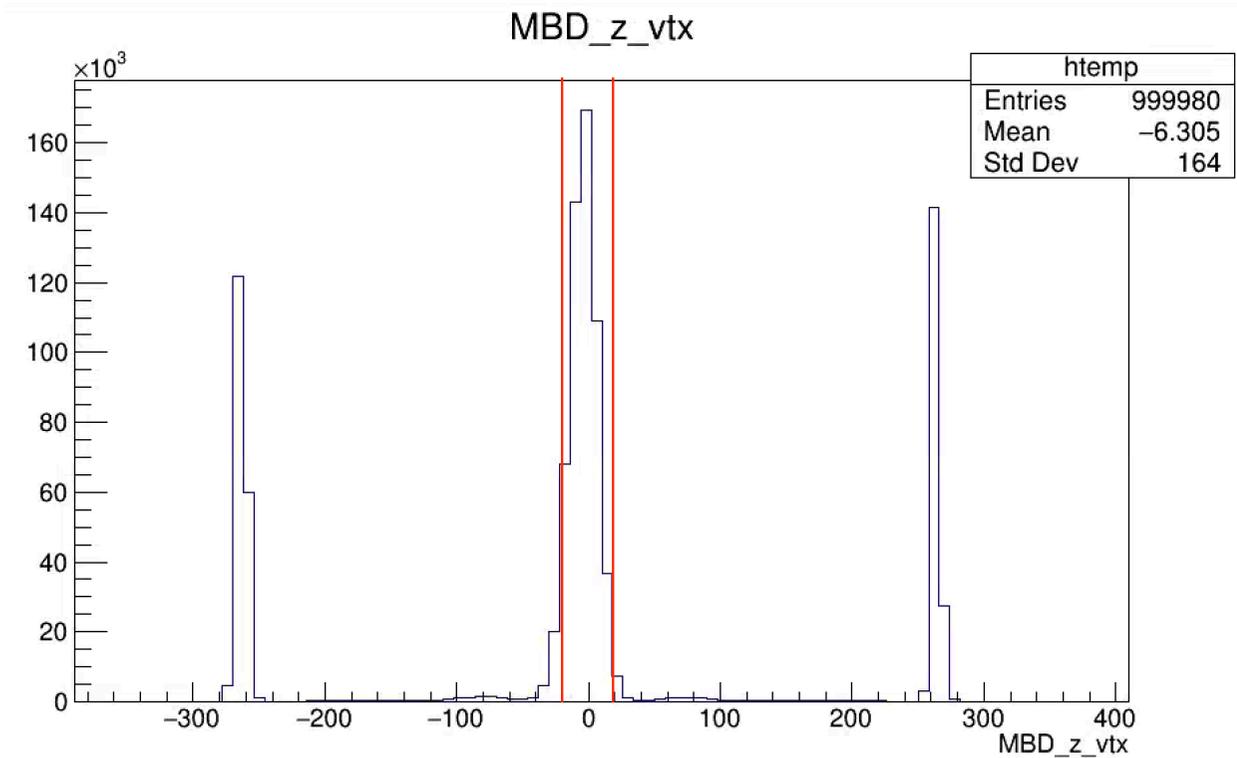
12

- データ選定条件
 - MBD z vertex カット
 - Beam Clock カット
 - Hotdead Channel カット
 - INTT クラスタ-ADC > 45
 - sEPD ヒット数カット

MBD z vertex カット

13

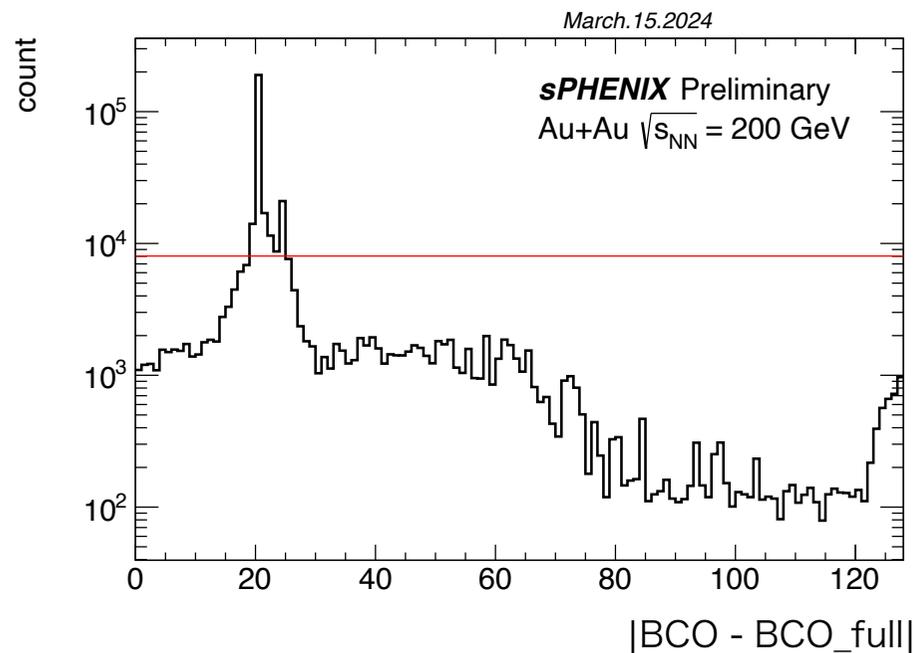
- MBDで計測された衝突点のz座標によるカット
- 衝突点がINTTの検出範囲内にある衝突($|z| < 20$ cm)のみを解析した



BCO - BCO_full カット

14

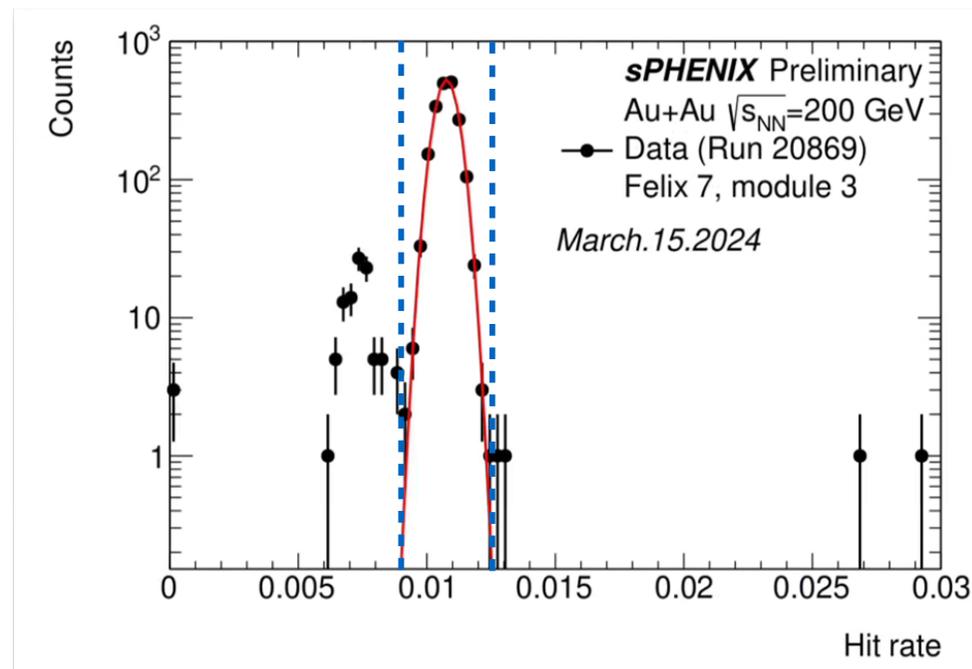
- BCO : INTT のBeam Clock(時刻タグ)
- BCO_full : sPHENIX検出器のBeam Clock
- sPHENIX検出器のトリガーシステムとINTTが同期しているとBCOとBCO_fullの差は一定になる
- BCOとBCO_fullの差が一定である赤線より上にあるヒットのみ解析した



Hotdead Channel カット

15

- あるハーフラダーのストリップ毎のヒット数分布
 - 赤線：ガウスフィットした結果
 - 点線： $\text{mean} \pm 3\sigma$
 - $\text{mean} \pm 3\sigma$ の範囲内に含まれるストリップのヒットを使用
- 信号が鳴らないストリップや信号が鳴り続けるストリップを除去



ADCカット

sEPD ヒット数カット 16

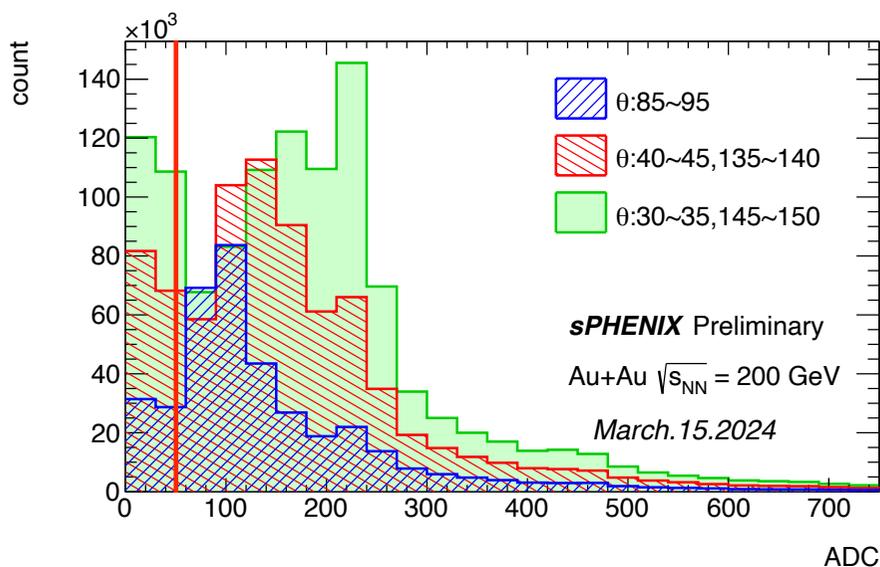
- MIP (荷電粒子が物質を通過するときに落とすエネルギーの最小値) ピークを選ぶために クラスタ-ADC > 45 のクラスタを解析

- 反応平面の決定式

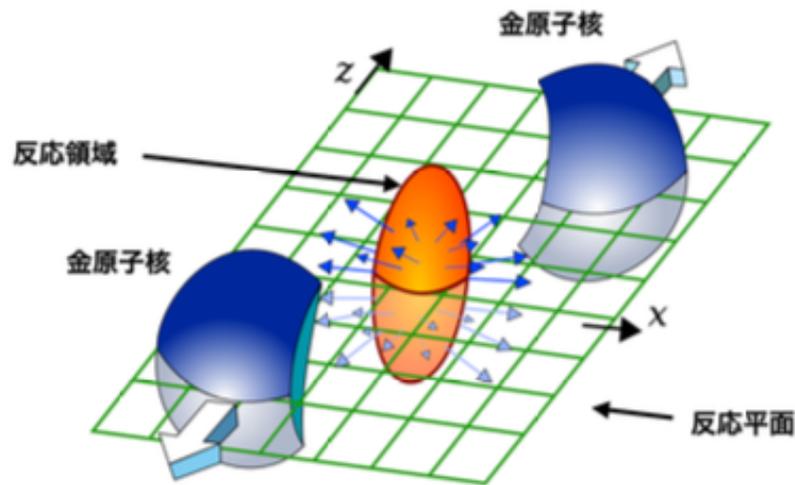
$$Q_x^{obs} = \frac{\sum_i \omega_i \cos(n\phi)}{\sum_i \omega_i}, \quad Q_y^{obs} = \frac{\sum_i \omega_i \sin(n\phi)}{\sum_i \omega_i}$$

よりヒット数が0の衝突では反応平面が求められない

- sEPD south/north どちらにも1ヒット以上あるイベントを選択



反応平面



- 反応平面とは衝突する原子核の中心同士を結んだ直線とビーム軸を含む平面のこと
- 原子核衝突実験において反応平面は制御できないので反応平面の角度は一様に分布するはず

→ 検出器のアクセプタンスの効果や、ビームのずれ等が原因で反応平面の角度が歪む

→ v_2 の測定に使うためには歪みを補正(re-centering, flattening)する必要がある

反応平面の決定

- 反応平面角 ψ を衝突によって発生した粒子の方位角(INTT 上のクラスター座標(x,y))を用いて計算した

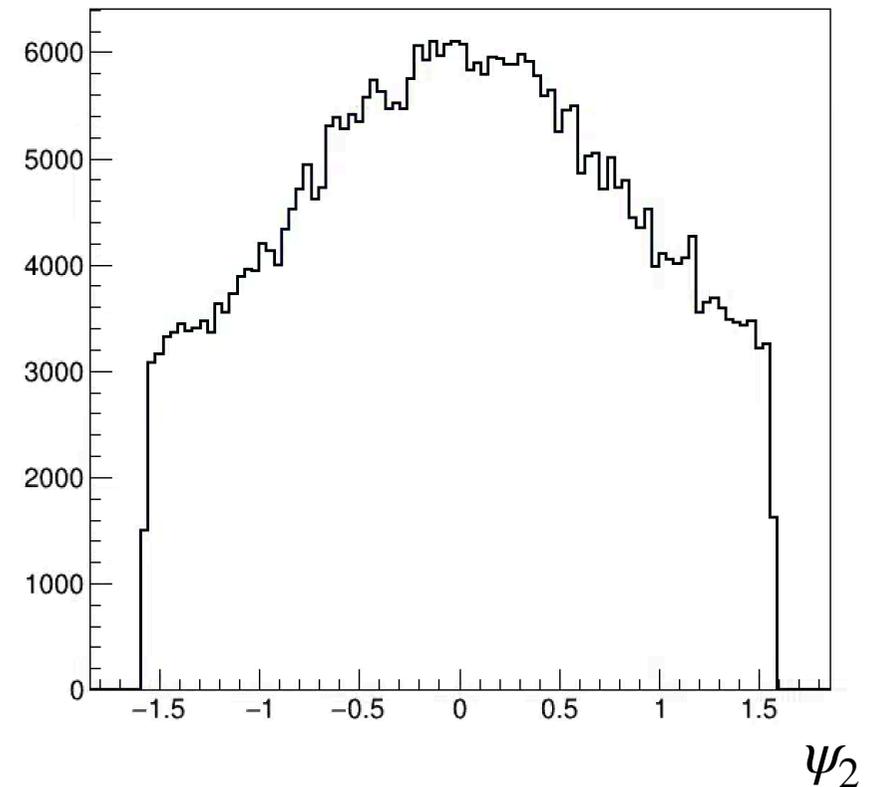
- $\phi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$

- $Q_x^{obs} = \frac{\sum_i^N \cos(2\phi)}{N}$, $Q_y^{obs} = \frac{\sum_i^N \sin(2\phi)}{N}$

- $\psi_2 = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{Q_x}{Q_y}$

- 一様分布になっていないことがわかる

反応平面角分布



Re-centering

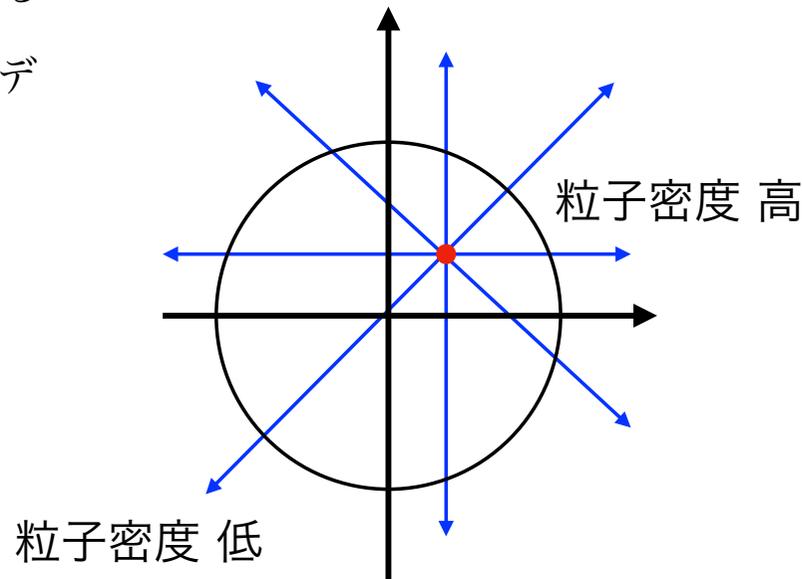
- ビームが検出器の中心を通過していないことで生じる効果を補正する

- $\langle Q_{x,y}^{obs} \rangle$ は解析に使用した全衝突データの $Q_{x,y}^{obs}$ の平均

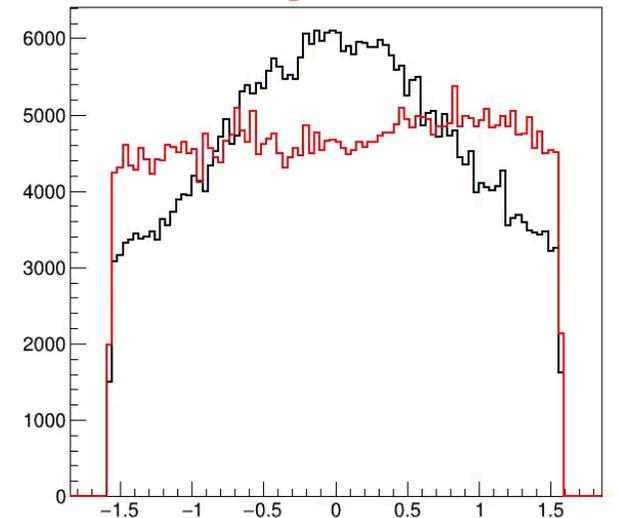
- $$Q_x^{rec} = \frac{Q_x^{obs} - \langle Q_x^{obs} \rangle}{\sigma_x},$$

- $$Q_y^{rec} = \frac{Q_y^{obs} - \langle Q_y^{obs} \rangle}{\sigma_y}$$

- $$\psi_2^{re-cent} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{Q_x^{rec}}{Q_y^{rec}}$$



黒: キャリブレーション前
赤: re-centering 後



ψ_2

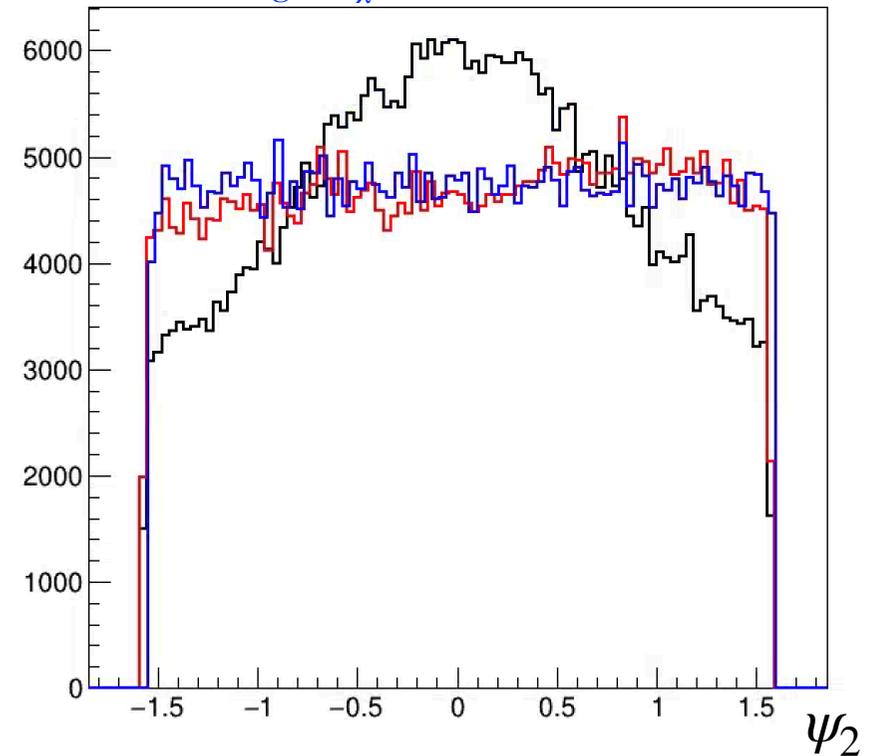
Flattening

- 検出器の検出可能領域の効果を補正する
- $\psi^{flat} = \psi^{rec} + \Delta\psi$
- $$\frac{\Delta\psi}{2} = \sum_{k=1} (A_k \cos 2k\psi^{rec} + B_k \sin 2k\psi^{rec})$$
- $A_k = -\frac{2}{k} \langle \sin 2k\psi^{rec} \rangle, B_k = \frac{2}{k} \langle \cos 2k\psi^{rec} \rangle$
- キャリブレーションによって一様分布に近づき、 v_2 の測定に使えるようになった

黒:キャリブレーション前

赤:re-centering後 $\chi^2/ndf = 7228/85$

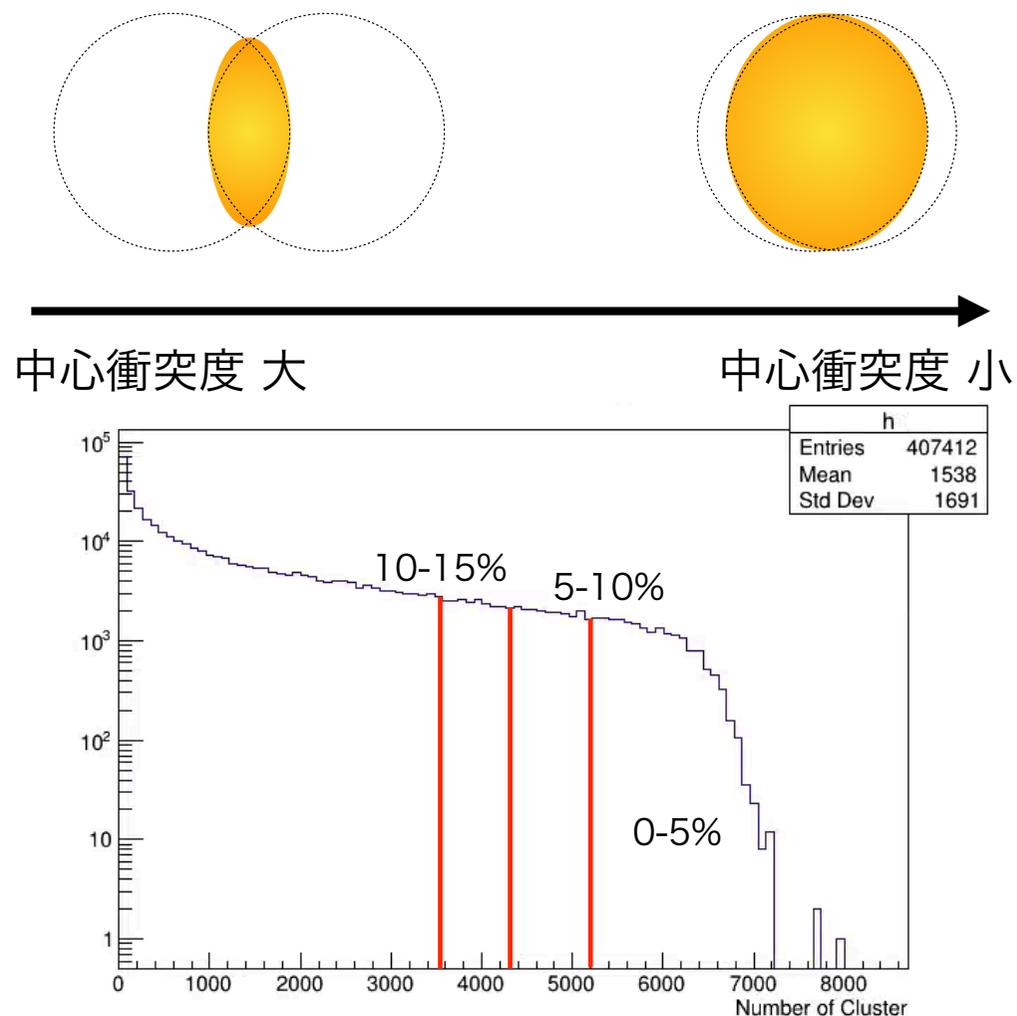
青:flattening後 $\chi^2/ndf = 536.3/83$



中心衝突度(Centrality)

21

- 高エネルギー原子核衝突実験において衝突する2つの原子核の重なり度合いを中心衝突度(centrality)と呼ぶ
- 中心衝突度が小さくなるほど発生粒子数は増える
- 実験では発生粒子数を用いて中心衝突度を決定する
- 本研究ではINTTで検出されたクラスター数によってクラス分けを行った



反応平面分解能による補正

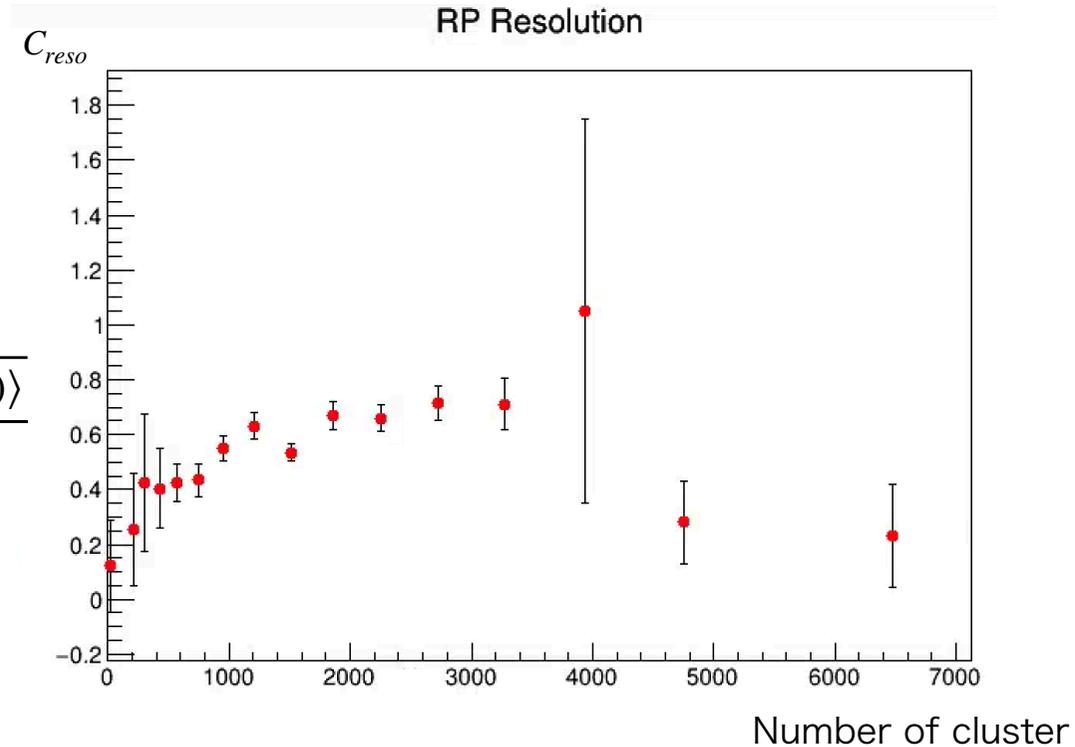
- 反応平面分解能の効果による v_2 の補正係数

C_{reso} を求める必要がある

- INTTの半分を使って ψ_2 を求めた場合の補正係数

$$C_{reso} = \sqrt{\frac{\langle \cos(2(\psi_{INTTN} - \psi_{sEPDS})) \rangle \langle \cos(2(\psi_{INTTS} - \psi_{sEPDN})) \rangle}{\langle \cos(2(\psi_{sEPDS} - \psi_{sEPDN})) \rangle}}$$

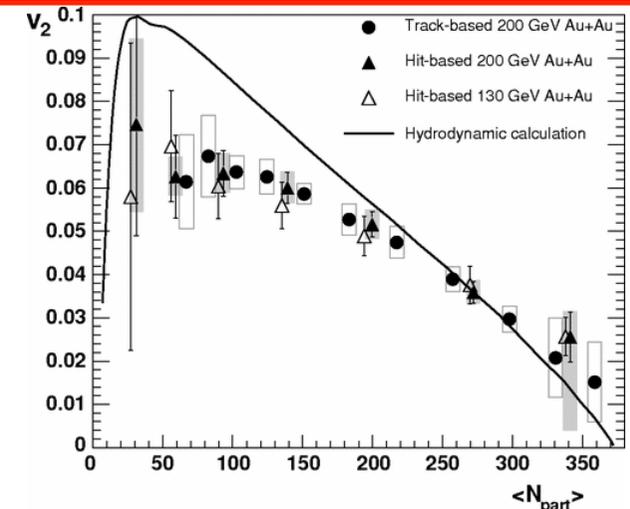
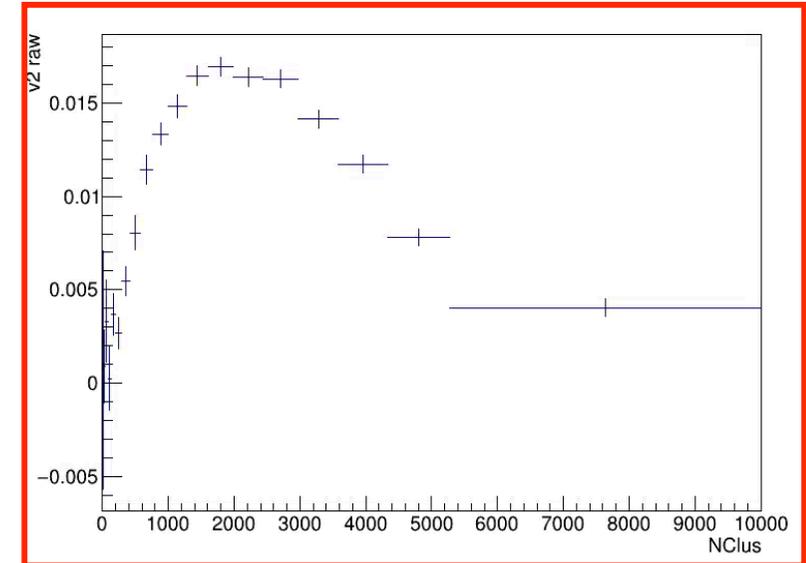
- 補正係数のINTTクラスター数依存性



v_2 計測結果

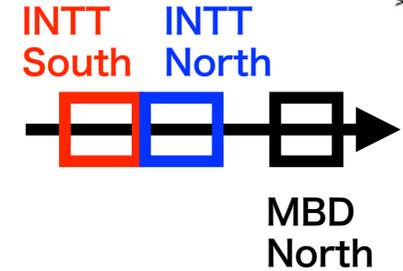
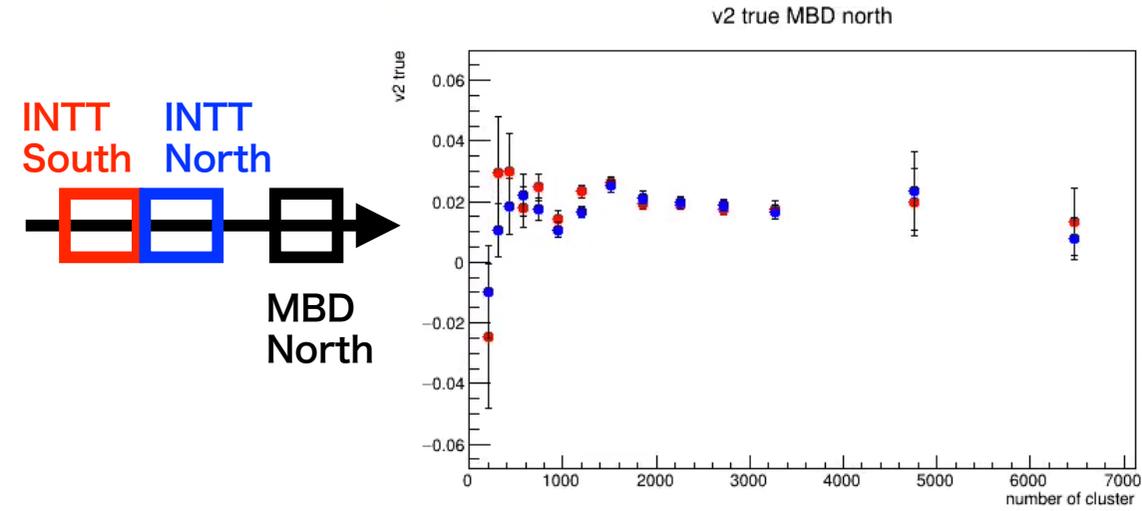
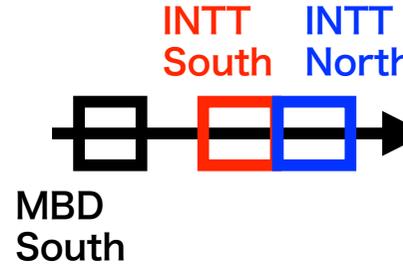
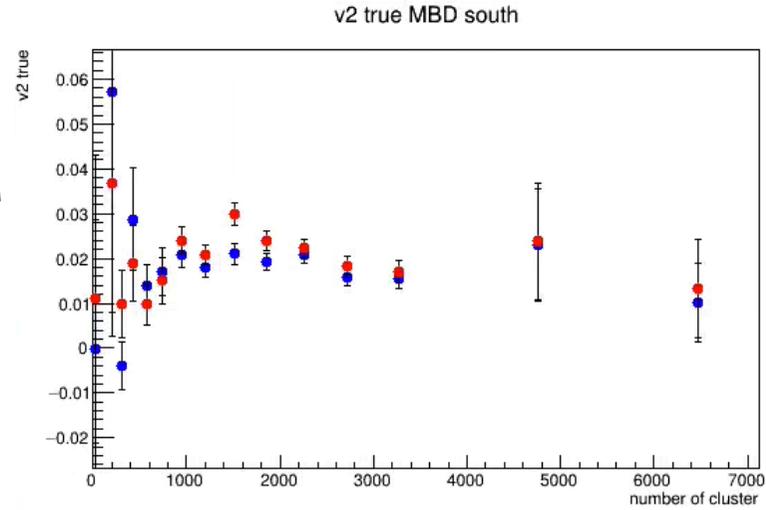
$$\bullet v_2^{measure} = \frac{\sum_i \omega_i \cos(2(\phi_i - \psi_2))}{\sum_i \omega_i}$$

- ϕ_i : MBD で計測されたi番目のPMTの方位角
- ω_i : MBDで計測されたi番目のPMTの電荷量
- ψ_2 : INTTで計測された反応平面角
- 先行研究であるPHOBOS実験でも見られた中心衝突度の減少に伴い v_2 が減少する傾向が見られた
- η 範囲の違いや中心衝突度の計測方法から直接比較はできない



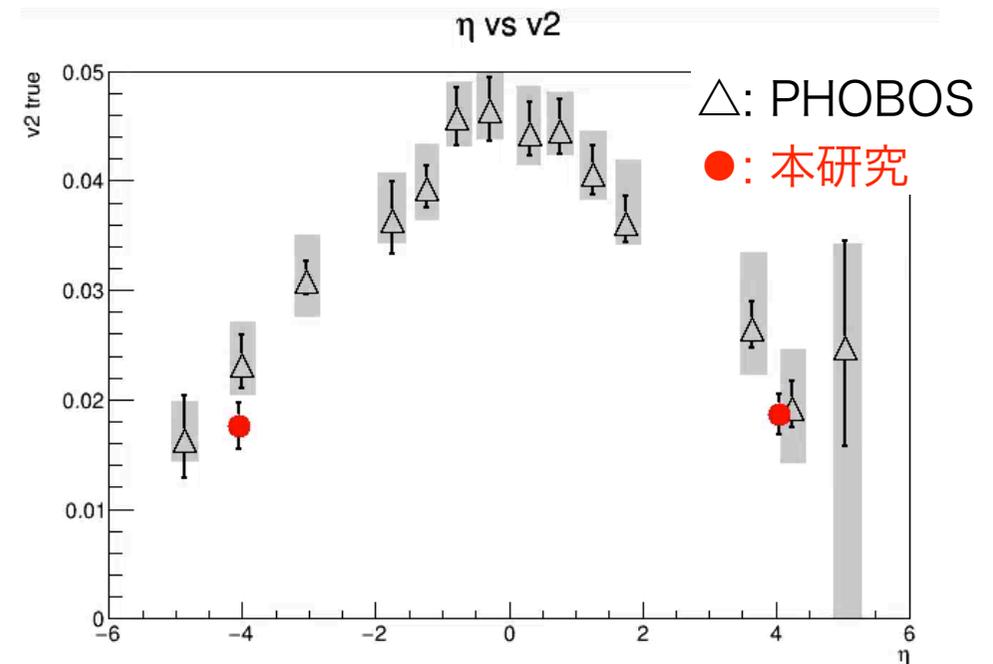
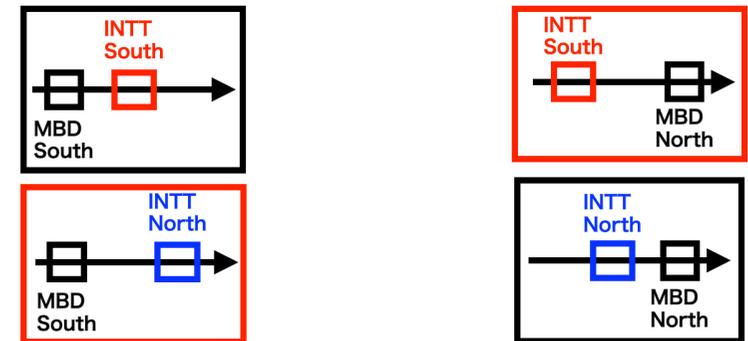
ν_2 計測結果

- $\nu_2^{true} = \frac{\nu_2^{measure}}{C_{reso}}$
- 反応平面分解能の効果を補正した ν_2 のINTT クラスタ数依存性
- INTT south or northの ψ_2 , MBD south ϕ , INTT south or northの ψ_2 , MBD north ϕ という組み合わせで ν_2 を計測した結果
- 各組み合わせで求めた結果は誤差の範囲で概ね一致した
- INTT をsouth/north で分割して半分のみで計測した反応平面を用いても ν_2 が計測できた



PHOBOS実験との比較

- INTT north ψ_2 , MBD south ϕ と INTT south ψ_2 , MBD north ϕ の組み合わせで測った v_2^{true} の平均をプロットした
- INTT south ψ_2 , MBD south ϕ と INTT north ψ_2 , MBD north ϕ の組み合わせで測った v_2^{true} の平均と前述の組み合わせで測った v_2^{true} との差で見積もった
- PHOBOS実験の結果と誤差の範囲で一致した



まとめ・今後の課題

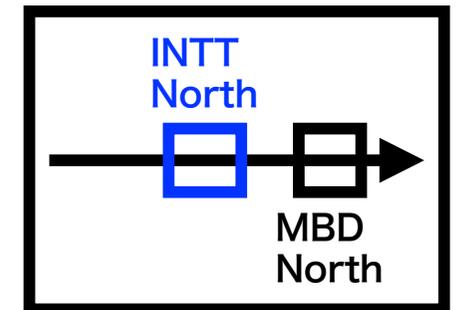
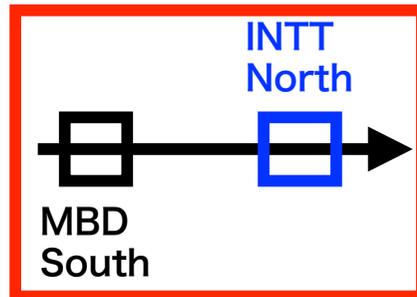
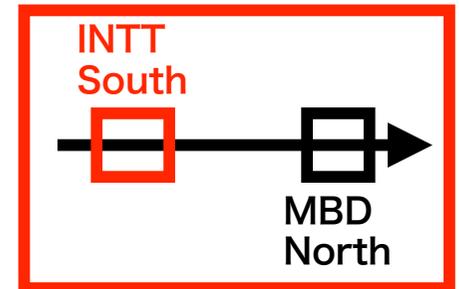
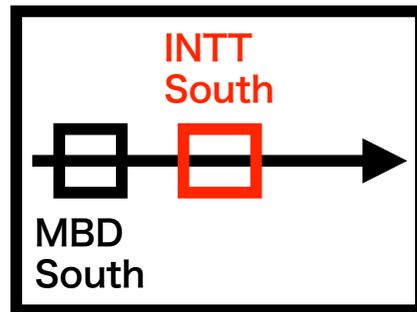
- 2024年にsPHENIX実験INTT検出器で計測された磁場なしの $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$, Au+Au衝突のデータからPHENIX実験では計測できなかった、 $3.51 < |\eta| < 4.61$ での荷電粒子の方位角異方性(v_2)を測定した
- v_2 とINTTクラスター数依存性は過去の研究と矛盾しない結果が得られた
- PHOBOS実験の結果と誤差の範囲内で一致した

今後の課題

- INTTの反応平面とMBDの方位角以外の組み合わせでの v_2 の計測
- シミュレーションによる検出器の反応平面分解能によって v_2 が小さくなる効果の見積もり

Back Up

v2 誤差



PHENIX検出器

BBC による反応平面分解能

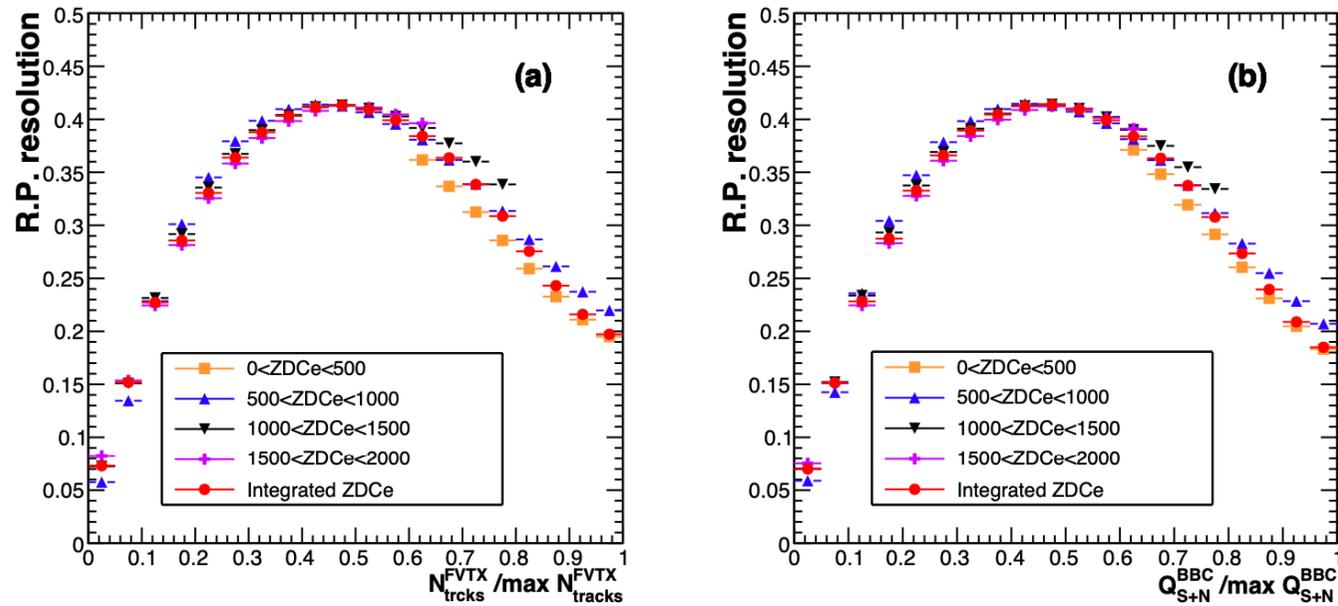
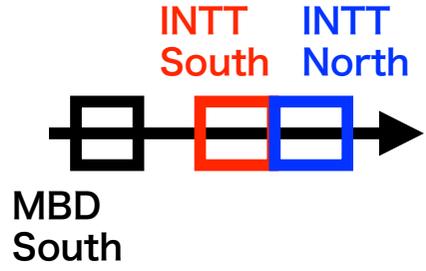
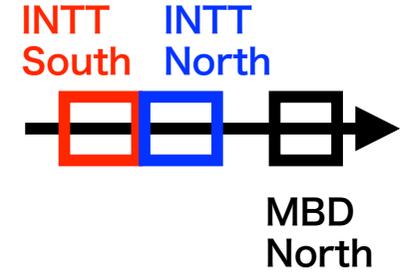
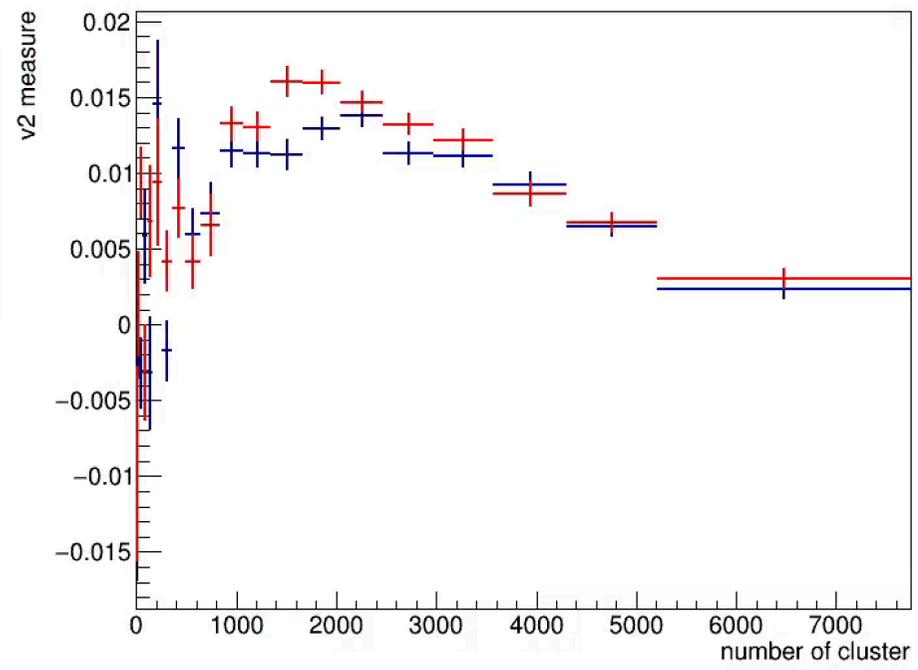


図 3.17 BBCSN の反応平面分解能の ZDCe クラス依存性 左： N_{tracks}^{FVTX} 依存 右： Q_{S+N}^{BBC} 依存

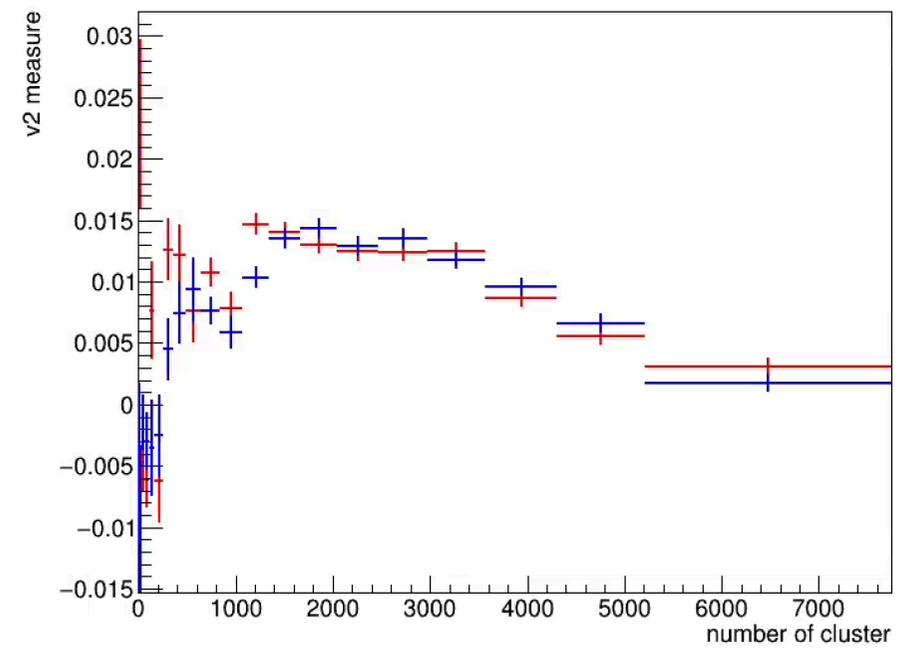
v_2 計測結果



v2 measure MBD south



v2 measure MBD north



反応平面キャリブレーション

- 反応平面キャリブレーションによって反応平面角分布が一様分布に近づいていくことがわかる

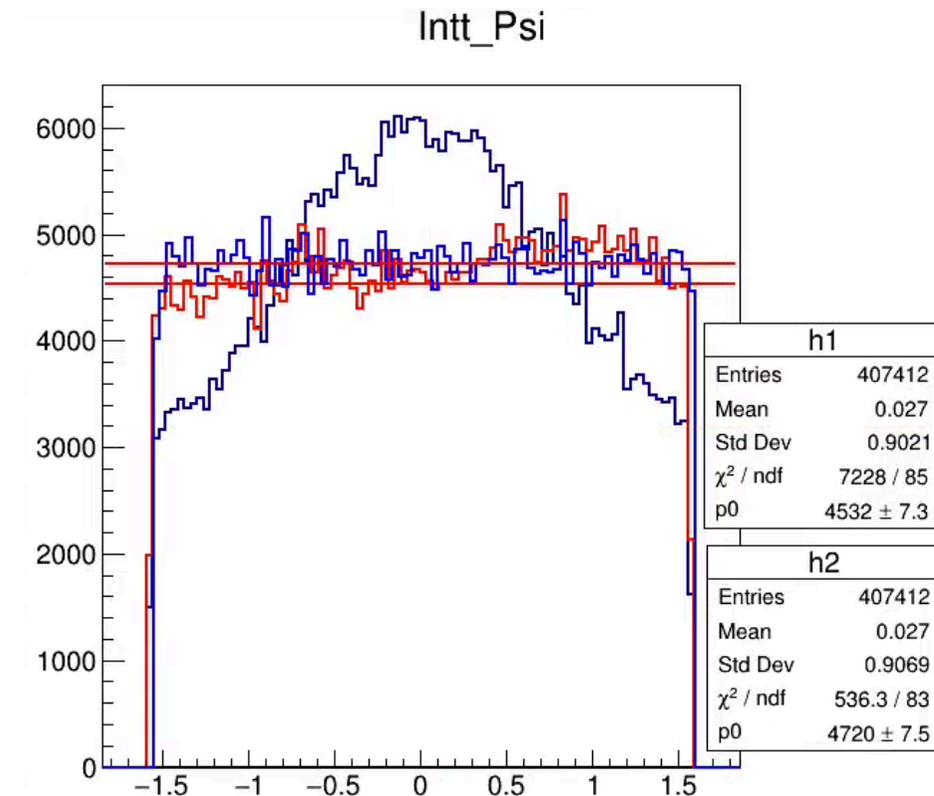
$$\chi^2/\text{ndf} = 7228/85$$

$$\chi^2/\text{ndf} = 536.3/83$$

黒:キャリブレーション前

赤:re-centering後

青:flattening後



流体モデル

- 反応領域から放出される粒子の衝突軸周りに測った方位角分布を、 ϕ でフーリエ展開すると以下の式が得られる。

$$\frac{d^3N}{dy_T dp_T d\phi} = \frac{d^2N}{dy_T dp_T} \left[1 + \sum_{n=1} 2v_n \cos(n[\phi - \Psi_n]) \right]$$