

2022年度 修士論文

RHIC-PHENIX 実験での  $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$  の Au+Au 衝突における、 $v_2$  の粒子多重度依存性とその rapidity 依存性

奈良女子大学大学院人間文化総合科学研究科  
博士前期課程数物科学専攻 高エネルギー物理学研究室

学籍番号: 21810056

高濱 瑠菜

2023年2月9日

## 概要

米国のブルックヘブン国立研究所 (BNL) で行われた、重イオン衝突型加速器 (RHIC) を用いた PHENIX 実験では、実験室でクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) と呼ばれる高温物質を作り出すことに成功した。QGP とは、核子を構成するクォークやグルーオンと呼ばれる素粒子が、高温高密度状態で核子の束縛から解放された状態である。この QGP の性質をより詳細に理解するために、現在も様々な解析が行われている。

密度が高い原子核同士を衝突させた場合にのみ、QGP の様な高温物質が生成されると考えられてきた。しかし、ここ十数年の間に、軽い粒子同士の衝突においても発生粒子数が大きい衝突事象のみ解析を行うと、QGP 生成の可能性を示唆する結果が次々と報告されている。軽い粒子同士の衝突における QGP 生成の可能性に対して、その機構として最も有力と考えられているのが multiparton interaction (MPI) である。パートンはクォークとグルーオンの総称で、MPI は核子の内部構造による相互作用である。MPI による効果の一つとして、MPI が優位な衝突事象では発生粒子数が増えると考えられている。

本研究は軽い粒子の衝突系における MPI の効果から着想を得たものである。重イオン衝突においては衝突に関与する核子数と発生粒子数は平均的にほぼ比例すると考えられている。本研究は重イオン衝突実験において、反応に関与した核子数と発生粒子数の関係について詳しく調べ、物理現象の違いが観測されるかを検証する研究である。

本研究は、PHENIX 実験において 2014 年に収集された重心系衝突エネルギー 200 GeV の Au+Au 衝突のデータを解析した。反応に関与した核子数と発生粒子数を別の軸として、反応に関与した核子数が同じ衝突事象の中で、発生粒子数が違う時に、その違いが方位角異方性の強度を表す  $v_2$  にどの様に影響するかを調べる。現行の解析手法では発生粒子数のみで中心衝突度が決定されており、発生粒子数が同じイベントについて、反応に関与した核子数でイベント分類を行なっている点が、 $v_2$  を中心衝突度の関数として測定している先行研究と異なる点である。さらにラピディティ領域の違う検出器で測定した発生粒子数に依存する  $v_2$  の比較を行い、ラピディティ依存性を調べた。その結果、反応に関与した核子数によるイベント選択を行った場合の  $v_2$  の発生粒子数依存性は、そのイベント選択を行わない場合と同じ傾向を示した。また、発生粒子数が同じイベントでは反応に関与した核子数の違いによって  $v_2$  の値に違いがあることがわかった。この違いは  $v_2$  を発生粒子数の関数として測定していた先行研究では見ることができない結果で、反応に関与した核子数によるイベント選択を行ったことで見えた違いであり、反応に関与した核子数は異なるが、発生粒子数が同程度になる物理現象がある場合に観測されると考えられる  $v_2$  の傾向と定性的に矛盾しない結果が得られた。さらに、ラピディティ領域の異なる 2 つの検出器で測定した発生粒子数に依存する  $v_2$  を比較した結果、ラピディティ依存性はないことがわかった。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序章</b>	<b>7</b>
1.1	クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) . . . . .	7
1.2	高エネルギー原子核衝突実験 . . . . .	8
1.2.1	楕円フロー . . . . .	8
1.3	重イオン衝突系以外での QGP-like な物質生成の可能性 . . . . .	9
1.3.1	2 粒子間の $\Delta\eta - \Delta\phi$ 分布におけるリッジ構造 . . . . .	9
1.4	研究目的と特色 . . . . .	11
<b>第 2 章</b>	<b>実験セットアップ</b>	<b>12</b>
2.1	RHIC 加速器 . . . . .	12
2.2	PHENIX 実験 . . . . .	12
2.2.1	PHENIX 検出器 . . . . .	13
2.2.1.1	Central Arm (CNT) . . . . .	14
2.2.1.2	Beam Beam Counter (BBC) . . . . .	14
2.2.1.3	Silicon Vertex Tracker (VTX) . . . . .	14
2.2.1.4	Forward Silicon Vertex Tracker (FVTX) . . . . .	15
2.2.1.5	Zero Degree Calorimeter (ZDC) . . . . .	15
<b>第 3 章</b>	<b>解析手法</b>	<b>17</b>
3.1	物理量の定義 . . . . .	17
3.1.1	participant と spectator . . . . .	17
3.1.2	中心衝突度 . . . . .	18
3.1.3	楕円率 . . . . .	18
3.1.4	反応平面 . . . . .	18
3.2	解析手法 . . . . .	19
3.2.1	解析の概要 . . . . .	19
3.3	データ解析 . . . . .	20
3.3.1	反応平面角キャリブレーション . . . . .	20
3.3.1.1	反応平面角の定義 . . . . .	21

3.3.1.2	反応平面角キャリブレーションの手順 . . . . .	22
3.3.1.3	イベントクラスの定義 . . . . .	24
3.3.1.4	反応平面角キャリブレーションの QA . . . . .	24
3.3.2	イベント選択 . . . . .	27
3.3.3	トラック選択 . . . . .	29
3.3.3.1	Central Arm トラックの選別条件 . . . . .	29
3.3.3.2	FVTX トラックの選別条件 . . . . .	30
3.3.4	$v_2$ の測定 . . . . .	30
3.3.5	反応平面の分解能と $v_2$ の補正 . . . . .	31
3.3.6	系統誤差の見積もり . . . . .	32
<b>第 4 章</b>	<b>解析結果と考察</b>	<b>39</b>
4.1	Integrated ZDCe の $v_2$ . . . . .	40
4.2	$v_2$ vs. $N_{tracks}^{FVTX}$ と $v_2$ vs. $Q_{S+N}^{BBC}$ . . . . .	41
4.3	Integrated ZDCe の $v_2$ と ZDCe による分類を行なった $v_2$ の比較 . . . . .	43
4.4	$v_2$ vs. $N_{tracks}^{FVTX}$ と $v_2$ vs. $Q_{S+N}^{BBC}$ の比較 . . . . .	44
<b>第 5 章</b>	<b>まとめ</b>	<b>45</b>
	<b>参考文献</b>	<b>46</b>

# 目次

1.1	ハドロン相と QGP 相におけるクォークとグルーオンの様子 . . . . .	7
1.2	QCD の相図 . . . . .	7
1.3	宇宙の時間発展に伴う温度とエネルギー密度 [2] . . . . .	8
1.4	原子核衝突のイメージ図 . . . . .	9
1.5	LHC の CMS で測定された $\sqrt{s_{NN}} = 5.02\text{TeV}$ の p+Pb 衝突における荷電ハドロン $1 < p_T < 3\text{GeV}/c$ の $\Delta\eta - \Delta\phi$ 相関 (a) 発生粒子数の少ないイベント ( $N_{trk}^{offline} < 35$ ) (b) 発生粒子数の大きいイベント ( $N_{trk}^{offline} \geq 110$ ) [4] . . . . .	10
1.6	LHC の CMS で測定された $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{ TeV}$ の Pb+Pb 衝突における中心衝突度 0-20 %での $\Delta\eta - \Delta\phi$ 相関 [5] . . . . .	10
2.1	RHIC 加速器の航空写真 . . . . .	13
2.2	PHENIX 検出器の全体像 . . . . .	13
2.3	左：BBC 検出器の全体像 右：BBC を構成するチェレンコフ放射体 [13] . . . . .	14
2.4	VTX の概要図 [14] . . . . .	15
2.5	VTX と FVTX のハーフバレルの写真。中央が VTX バレル、その両端に 4 層の円盤で構成される FVTX がついている。 [15] . . . . .	16
3.1	participant と spectator の概念図 . . . . .	17
3.2	ビーム方向から見た原子核衝突の様子と中心衝突度の関係の概念図 . . . . .	18
3.3	原子核衝突の様子 . . . . .	19
3.4	衝突後の粒子が PHENIX 検出器で捉えられる様子 . . . . .	20
3.5	黒線：測定された反応平面角分布 赤線：Re-centering キャリブレーション後の反応平面角分布 青線：Re-centring キャリブレーションと Flattening キャリブレーション後の反応平面角分布 . . . . .	21
3.6	(a)Re-centering キャリブレーション前の $Q_x^{obs}$ と $Q_y^{obs}$ の相関 (b)Re-centering キャリブレーション後の $Q_x^{rec}$ と $Q_y^{rec}$ の相関 (c)Re-centering キャリブレーション前の $Q_x^{obs}$ 分布 (d)Re-centering キャリブレーション前の $Q_y^{obs}$ 分布 (e)Re-centering キャリブレーション後の $Q_x^{rec}$ 分布 (f)Re-centering キャリブレーション後の $Q_y^{rec}$ 分布 . . . . .	23

3.7	(a)BBCS で測定した反応平面角分布 (b)BBCN で測定した反応平面角分布 (c)BBCSN で測定した反応平面角分布 (a)(b)(c) 0次関数でフィットを行った結果。イベントクラス・RunNumber は図中に記載	25
3.8	(a)Re-centering キャリブレーション前の $Q_{x,y}^{obs}$ (b)Re-centering キャリブレーション後の $Q_{x,y}^{rec}$ (c) 反応平面角分布 (a)(b)(c)BBCSN で測定。イベントクラス・RunNumber は図中に記載	26
3.9	$N_{tracks}^{FVTX}$ と ZDCe のイベント分類でイベントクラスを定義した時の、 $\psi_2^{BBCS}$ (a)、 $\psi_2^{BBCN}$ (b)、 $\psi_2^{BBCSN}$ (c) 分布を、0次関数でフィッティングした $\chi^2/ndf$ の Run 依存性	26
3.10	$Q_{S+N}^{BBC}$ と ZDCe のイベント分類でイベントクラスを定義した時の、 $\psi_2^{BBCS}$ (a)、 $\psi_2^{BBCN}$ (b)、 $\psi_2^{BBCSN}$ (c) 分布を、0次関数でフィッティングした $\chi^2/ndf$ の Run 依存性	26
3.11	$N_{tracks}^{FVTX}$ 分布	27
3.12	$Q_{S+N}^{BBC}$ 分布	27
3.13	左：イベントカット前の $N_{tracks}^{FVTX}$ と $Q_{S+N}^{BBC}$ の相関。右：イベントカット後の $N_{tracks}^{FVTX}$ と $Q_{S+N}^{BBC}$ の相関。 $N_{trk}^{FVT} < 600$ と $Q^{BBCN+S} < 1705$ のイベントカットが適用されている。	28
3.14	ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) と $N_{tracks}^{FVTX}$ の相関 左：イベントカットなし 右：統計が少ないイベントクラスをカット	28
3.15	ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) と $Q_{S+N}^{BBC}$ の相関 左：イベントカットなし 右：統計が少ないイベントクラスをカット	29
3.16	PHENIX 実験の Drift Chamber のワイヤー平面の図	29
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	32
3.18	BBCSN の反応平面分解能の発生粒子数を測定する検出器による依存性	32
3.19	Run による $v_2$ の $N_{tracks}^{FVTX}$ 依存性の差	33
3.20	Run による $v_2$ の $Q_{S+N}^{BBC}$ 依存性の差	33
3.21	$v_2$ を測定する反応平面による $v_2$ の $N_{tracks}^{FVTX}$ 依存性の差	34
3.22	$v_2$ を測定する反応平面による $v_2$ の $Q_{S+N}^{BBC}$ 依存性の差	34
3.23	$v_2$ を測定する Central Arm の $v_2$ の $N_{tracks}^{FVTX}$ 依存性の差	35
3.24	$v_2$ を測定する Central Arm の $v_2$ の $Q_{S+N}^{BBC}$ 依存性の差	35
3.25	$v_2$ を補正する補正係数の ZDC 依存による、 $v_2$ の $N_{tracks}^{FVTX}$ 依存性の差	36
3.26	$v_2$ を補正する補正係数の ZDC 依存による、 $v_2$ の $Q_{S+N}^{BBC}$ 依存性の差	37
4.1	ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) とスケーリング後の $N_{tracks}^{FVTX}$ と $Q_{S+N}^{BBC}$ の分布の平均値。誤差棒はその X ビンで Y 軸方向に射影した時の分布の RMS を表している。	40

4.2	Integrated ZDCe の $v_2$ の $N_{tracks}^{FVTX}$ 依存性 . . . . .	40
4.3	Integrated ZDCe の $v_2$ の $Q_{S+N}^{BBC}$ 依存性 . . . . .	40
4.4	ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) によるイベント選択を用いた場合と Integrated ZDCe の $v_2$ の $N_{tracks}^{FVTX}$ 依存性の比較。左上のパネルから右下に向かって、ZDCe のイベントカットは中心衝突から周辺衝突を意味している。 . . . . .	41
4.5	ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) によるイベント選択を用いた場合と Integrated ZDCe の $v_2$ の $Q_{S+N}^{BBC}$ 依存性の比較。左上のパネルから右下に向かって、ZDCe のイベントカットは中心衝突から周辺衝突を意味している。 . . . . .	42
4.6	ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) のクラス分けによる $v_2$ の違い。下のパネルは ZDCe によるイベント選択を行わなかった場合の $v_2$ との比。左: $N_{tracks}^{FVTX}$ 依存 右: $Q_{S+N}^{BBC}$ 依存 系統誤差はボックス、統計誤差はバーで表されている。 . . . .	43
4.7	図 4.6 左下のプロットから $0.85 < N_{tracks}^{FVTX} < 0.90$ を取り出し、その解釈をイラストで示した図 . . . . .	44
4.8	$v_2$ の $N_{tracks}^{FVTX}$ と $Q_{S+N}^{BBC}$ 依存性の比較 . . . . .	44

# 表目次

3.1	系統誤差 . . . . .	37
3.2	系統誤差 . . . . .	38
3.3	系統誤差 . . . . .	38
3.4	系統誤差 . . . . .	38



# 第1章

## 序章

### 1.1 クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) とは、陽子や中性子などのハドロンの内部に束縛されているクォークやグルーオンと呼ばれる素粒子が、高温高密度状態において束縛から解放され、クォークやグルーオン単体で自由に動き回れる状態のことである。原子は電子と原子核によって構成され、原子核は核子と呼ばれる陽子と中性子によって構成される。図 1.1 のように、その核子はクォークとグルーオンと呼ばれる素粒子によって構成されており、現在の宇宙ではこのクォークやグルーオンは核子の内部に閉じ込められている。しかしビッグバンから数十  $\mu$  秒後の高温な宇宙では、ハドロンはまだ形成されておらず、クォークやグルーオンは自由に動き回ることができたと考えられている。図 1.2 は QCD の相図を表している。図 1.3 はビッグバンからの宇宙の時間発展に伴う温度とエネルギー密度を表している。宇宙の膨張に伴い温度が下がると、QGP 相からハドロン相への相転移が起き、陽子や中性子が形成された。この相転移、ハドロン相から QGP 相への相転移を人工的に実現したのが、後述の高エネルギー原子核衝突実験である。[1]

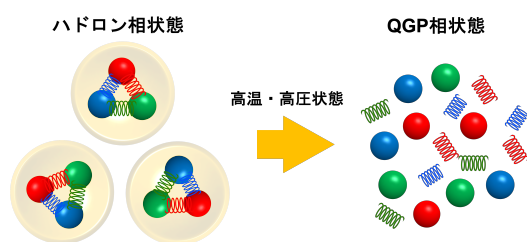


図 1.1 ハドロン相と QGP 相におけるクォークとグルーオンの様子

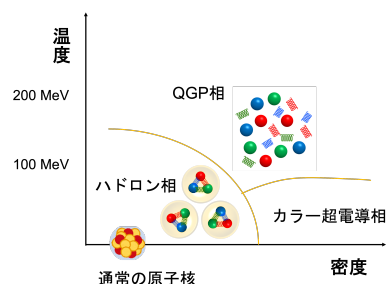


図 1.2 QCD の相図

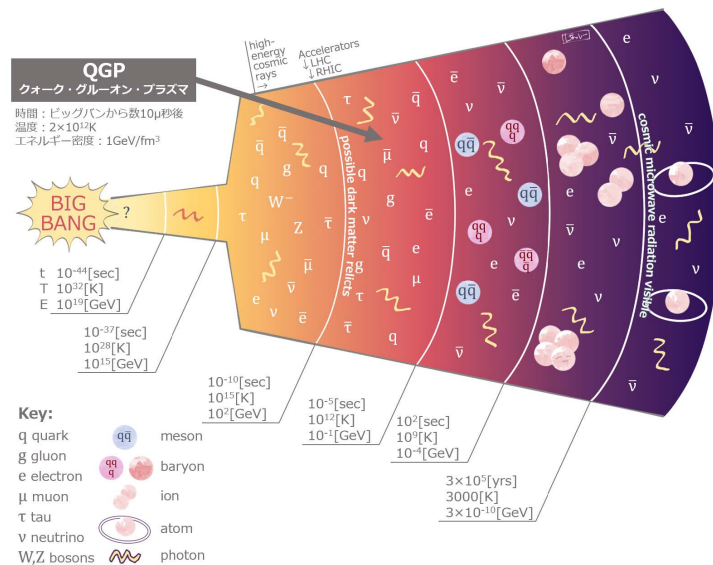


図 1.3 宇宙の時間発展に伴う温度とエネルギー密度 [2]

## 1.2 高エネルギー原子核衝突実験

高エネルギー原子核衝突実験は、加速器を用いてほぼ光速に加速した重い原子核同士を衝突させる実験である。重い原子核を高エネルギーに加速して衝突させることで、その衝突領域では瞬間的に高温物質が作られる。この高温物質の温度が、ハドロン相から QGP 相への相転移温度を超えると、QGP を作り出すことができる。高エネルギー原子核衝突実験の主な目的は、QGP 相への相転移を実現することで QCD 理論の検証・詳細な理解を行うことである。[1] 2005 年までに、米国ブルックヘブン国立研究所の RHIC 加速器で行われた金原子核衝突実験において QGP が生成されていることが確認された。その根拠となった重要な結果が、後述の強い楕円フローとジェット・クエンチングの観測である。

### 1.2.1 楕円フロー

原子核衝突における QGP 生成の根拠の一つとなったのは強い楕円フローの観測である。図 1.4 の様に、原子核衝突の場合、原子核には大きさがあるため衝突中心度がある程度離れていると、衝突領域の形状が楕円型になる。この時、内部の高温物質は流体的な振る舞いをするのが知られており、衝突初期の楕円形状が内部の圧力勾配をうみ、その圧力勾配によって短軸方向に粒子が多く押し出される。この効果によって短軸方向の粒子生成量が、長軸方向の粒子生成量より多くなるため、粒子の方位角分布に異方性が生まれる。この方位角異方性の強度は  $v_2$  と表され、衝突による

反応平面  $\psi_2$  から見た粒子の方位角 ( $\phi$ ) 分布をフーリエ展開した式が式 1.1 である。

$$\frac{dN}{d(\psi_2 - \phi)} \propto 1 + 2v_2 \cos[2(\psi_2 - \phi)] \quad (1.1)$$

また、式 1.1 から

$$v_2 = \langle \cos[2(\psi_2 - \phi)] \rangle \quad (1.2)$$

である。

平均的な陽子・陽子衝突ではこのような異方性は生まれないことがわかっている。そのため大きな  $v_2$  が観測されたということは、原子核衝突は単純な核子・核子衝突の重ね合わせではなく、反応領域内に高温物質 (QGP) が生成された結果であると考えられるため、原子核衝突による QGP 生成の根拠となった。[1]

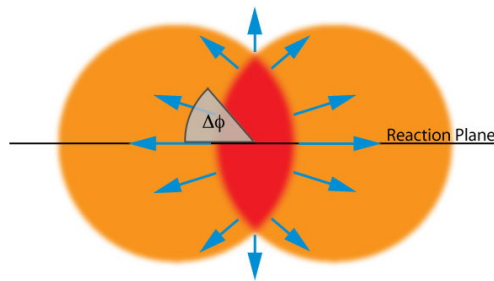


図 1.4 原子核衝突のイメージ図

### 1.3 重イオン衝突系以外での QGP-like な物質生成の可能性

#### 1.3.1 2 粒子間の $\Delta\eta - \Delta\phi$ 分布におけるリッジ構造

欧州加速器機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) において、陽子・鉛衝突の発生粒子数が極めて大きいイベントについて、2 粒子間の相対的擬ラピディティ ( $|\Delta\eta| = |\eta_1 - \eta_2|$ ) を相対的方位角 ( $|\Delta\phi| = |\phi_1 - \phi_2|$ ) の関数として全荷電粒子について測定した結果が図 1.5 である。これらの結果から、p+Pb 衝突において発生粒子数が大きいイベントについて  $\Delta\eta - \Delta\phi$  相関を測定するとリッジ構造が見られることがわかった。リッジ構造とは、図 1.5(b) で見られる、 $\Delta\phi = 0$  周りに  $-4 < \Delta\eta < 4$  で見られる構造のことである。さらにこの様なリッジ構造は p+Pb 衝突の発生粒子数の小さいデータのみを解析した場合には見られないことがわかる。(図 1.5(a)) また、重イオン衝突実験においても同じようにリッジ構造が見えることがわかっている。(図 1.6) 現在では、この様なリッジ構造は LHC の p+p 衝突 [6] や、RHIC の d+Au 衝突 [7][8]・ $^3\text{He}+\text{Au}$  衝突 [9] においても観測されている。

重イオン衝突において、さまざまなモデル計算を用いてリッジ構造について定量的な解釈が試みられた結果、現在ではこの様な構造は楕円フローに似た流体力学的な現象による結果だと解釈されており、その結果リッジ構造の解析には式 1.2 に似たフーリエ変換を用いることができる。一方で

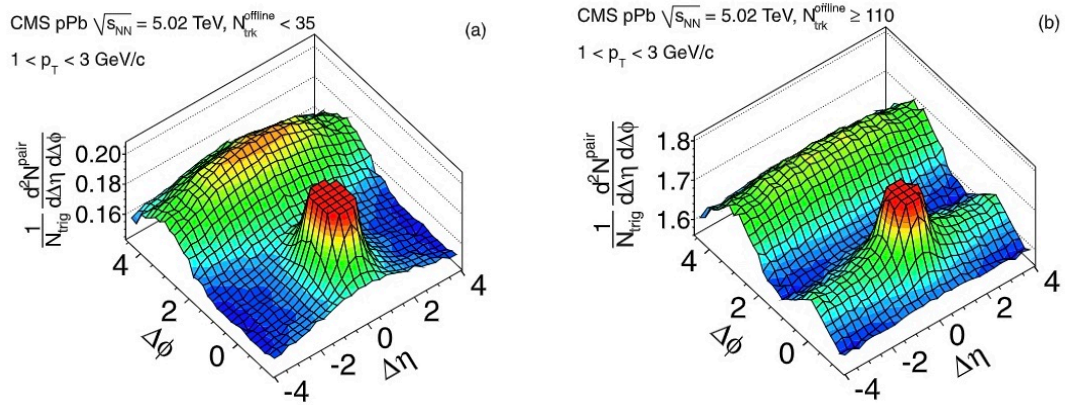


図 1.5 LHC の CMS で測定された  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02\text{TeV}$  の p+Pb 衝突における荷電ハドロン  $1 < p_T < 3\text{GeV}/c$  の  $\Delta\eta - \Delta\phi$  相関 (a) 発生粒子数の少ないイベント ( $N_{trk}^{offline} < 35$ ) (b) 発生粒子数の大きいイベント ( $N_{trk}^{offline} \geq 110$ ) [4]

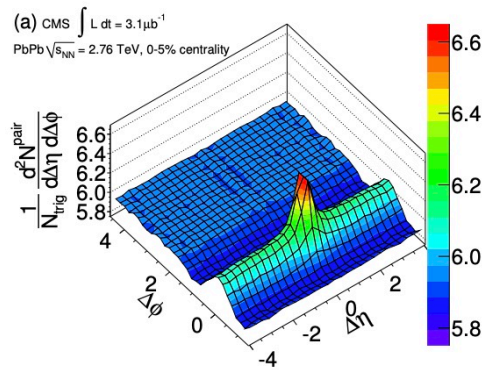


図 1.6 LHC の CMS で測定された  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}$  の Pb+Pb 衝突における中心衝突度 0-20% での  $\Delta\eta - \Delta\phi$  相関 [5]

p+Pb 衝突や p+p 衝突（小さい系の衝突）で現れるリッジ構造については現在様々な解釈が試みられているが、未だ完全には理解されていない。しかしながら、リッジ構造が見られるのが小さい系の衝突において極めて発生粒子数の大きいイベントだということは、マルチ・パートン・インタラクション (MPI) の効果がより優位なイベントにおいてリッジ構造が見えていると考えることもできる。MPI とは核子内部のパートン同士の相互作用のことであり、特に構成クォーク数よりも多い数のパートン同士の相互作用のことである。つまり、p+p 衝突において核子内部の衝突パー

トンが初期のジオメトリーをもち、衝突領域に持ち込まれるエネルギーの揺らぎによって重イオン衝突実験の時と同じようなリッジ構造が引き起こされていると考えることもできる。[10] さらに近年では、小さい衝突系において比較的値が大きいフローが観測されており、重イオン衝突の場合と同じように粒子の集団運動もあることがわかっている。[11] この様な報告から、小さい系の衝突において MPI の効果が大きい、発生粒子数が極めて大きいイベントでは、QGP の様な物質が生成されている可能性があることがわかってきている。

## 1.4 研究目的と特色

本研究は、近年注目を集めている小さい系での QGP 生成の可能性に関連して、その機構として有力だと考えられている MPI から着想を得たものである。重イオン衝突においては衝突に関与する核子の数と発生粒子数は平均的にほぼ比例すると考えられているが、p+p 衝突において MPI が発生粒子数に違いを作り、発生粒子数の違いによって物理現象に違いが見られることがわかってきた。本研究はそれに関連して、反応に関与した核子数と発生粒子数の関係についてより詳しく調べることを目的としている。反応に関与した核子数と発生粒子数を別の軸として、反応に関与した核子数が同じイベントの中で、発生粒子数が違う時に、その違いが方位角異方性の強度を表す  $v_2$  にどの様に影響するかを調べる。現行の解析手法では発生粒子数のみで中心衝突度が決定されており、発生粒子数が同じイベントについて、反応に関与した核子数でイベント分類を行なっている点だが、 $v_2$  を中心衝突度の関数として測定している先行研究と異なる点である。

## 第 2 章

# 実験セットアップ

本研究では、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の衝突が多重イオン加速器 (RHIC 加速器) で行われた PHENIX 実験のデータ解析を行った。これらについて以下に述べる。

### 2.1 RHIC 加速器

Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) は米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) にある衝突型重イオン加速器である。図 2.1 は RHIC 加速器の航空写真である。RHIC 加速器は 2000 年に稼働を始め、世界で初めて実験室で QGP を生成することに成功した。現在も QGP の性質の解明に向けて実験が続けられている。主な加速原子核は金原子核であり、その核子当たりの重心系エネルギーは最大で 200GeV、p+p 衝突では 500GeV である。また、RHIC 加速器は 2 つの加速リングを持つことから、異なる核種同士の衝突も可能にしている。RHIC 加速器では、p+p, p+Au, d+Au, He+Au, Au+Au, Cu+Cu, Cu+Au, U+U などの様々なバリエーションで実験が行われてきた。

RHIC 加速器は 6 つの衝突点を持つ加速器であり、それぞれの衝突点に実験名が与えられている。RHIC 加速器の 2 大主要実験であったのが PHENIX 実験と STAR 実験である。残りの 4 つの実験のうち 2 つは PHOBOS 実験と BRAHMS 実験で比較的小規模な実験である。現在は STAR 実験のみが稼働している。PHENIX 実験をアップグレードした sPHENIX 実験が 2023 年に稼働する。

### 2.2 PHENIX 実験

PHENIX 実験とは、QGP の生成とその証拠を測定すること、またその性質を研究することを目的に RHIC 加速器で行われた 2 大主要実験の 1 つで、15 カ国、70 数研究機関から約 500 名が参加する国際共同実験である。2000 年から 2016 年にかけてデータ収集が行われた。[1]

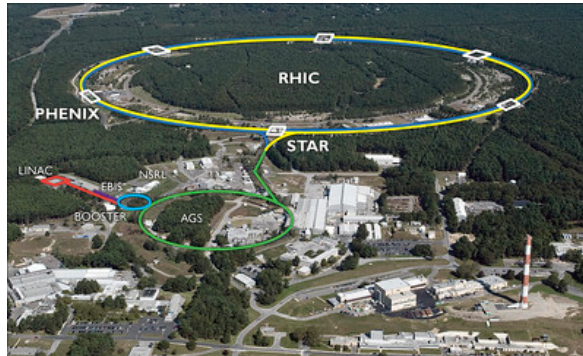


図 2.1 RHIC 加速器の航空写真

## 2.2.1 PHENIX 検出器

PHENIX 実験の目的は QGP の生成とその証拠を測定すること、またその性質を研究することである。そのため、PHENIX 実験の検出器は、横運動量が数 GeV/c までのハドロン粒子の識別が可能であること、電子・光子・ミュオンが高い精度で測定できること、などの要求を満たすように設計されている。図 2.2 は PHENIX 検出器の全体像である。次に本研究で主に用いた検出器について述べる。

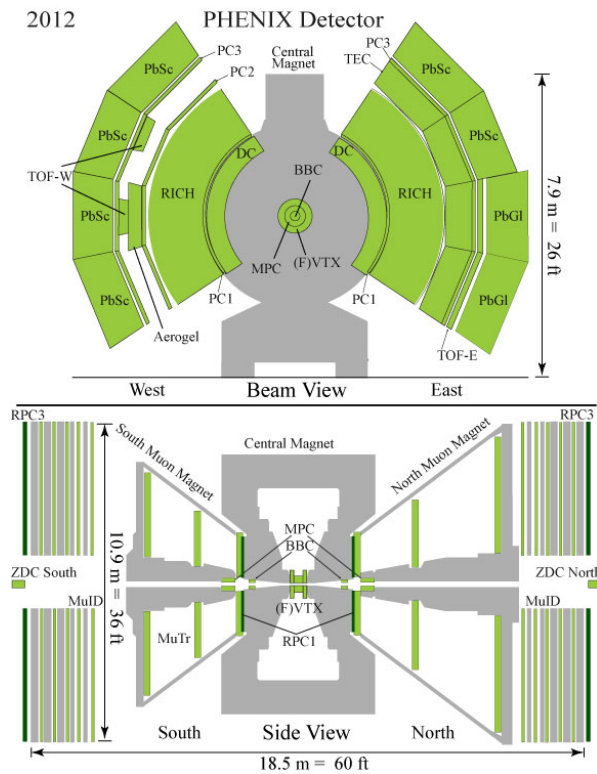


図 2.2 PHENIX 検出器の全体像

### 2.2.1.1 Central Arm (CNT)

Central Arm (CNT) はビーム軸を覆うように配置されているいくつかの検出器の総称である。Drift Chamber(DC) と呼ばれる飛跡検出器、Pad Chamber(PC) と呼ばれる位置検出器、Ring Imaging Cherenkov Counter(RICH) と呼ばれる電子識別用のチェレンコフカウンター、Time of Flight (TOF) と呼ばれるハドロン粒子識別のための飛行時間測定器、PbSc と PbGl から成る電磁カロリメータ (EMCal) で構成されている。飛跡検出器では荷電粒子の飛跡を再構成するだけでなく、運動量を測定することもできる。中央にあるマグネットによって粒子の進行方向が曲がり、その曲がり角は粒子の運動量に比例することを利用して、粒子の運動量を測定する。

### 2.2.1.2 Beam Beam Counter (BBC)

Beam Beam Counter (BBC) はビーム軸の前方と後方に設置され、それぞれ 64 個のクォーツチェレンコフ放射体と光電子倍增管からなる検出器である。図 2.3 はその写真である。BBC は  $3.0 < |\eta| < 3.9$  の領域でビーム軸周りの全方位角を覆っている。ビームが衝突すると荷電粒子が発生し、その粒子が BBC を通過することで、衝突が起きたことがわかる。PHENIX 実験でのミニマムバイアス (MB) トリガーは、両方の BBC に 1 つ以上のヒットが記録されることである。さらに BBC は粒子が通過したタイミングを  $52 \pm 4 \text{ps}$  [12] という高い分解能で測定することができ、衝突点の前方と後方、それぞれの検出器が粒子を捕らえた時間差を用いて衝突点を決定するのに用いることができる。また、BBC を通過した荷電粒子数を用いて、反応平面や中心衝突度を決定している。

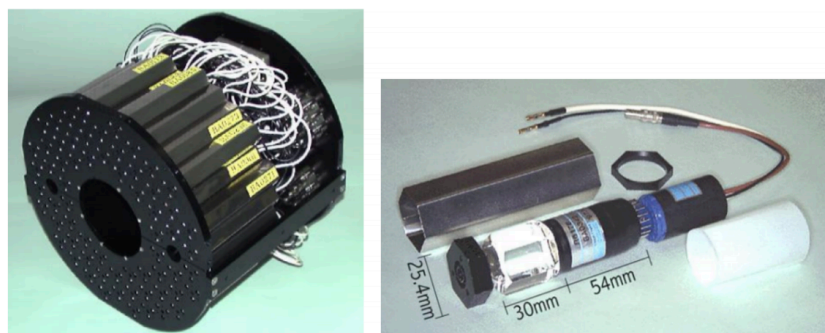


図 2.3 左：BBC 検出器の全体像 右：BBC を構成するチェレンコフ放射体 [13]

### 2.2.1.3 Silicon Vertex Tracker (VTX)

Silicon Vertex Tracker (VTX) は衝突点付近の粒子の飛跡を測定するためのシリコン検出器である。チャームやボトムなどの重いクォーク生成の測定を目指して 2011 年に PHENIX に導入された。VTX は  $|\eta| < 1.2$  で全方位角を覆い、図 2.4 のように 4 層 (B0,B1,B2,B3) に配置されている。内側 2 層が pixel layer、外側 2 層が pixelstrip layer になっている。VTX はビーム軸方向



の衝突点からの距離  $|z| < 10\text{cm}$  の範囲で、衝突点を高い精度で測定することができ、ビーム衝突点と飛跡の最近接距離 (DCA) を高精度で求めることができる。本研究では VTX で測定した衝突点を計算に用いている。

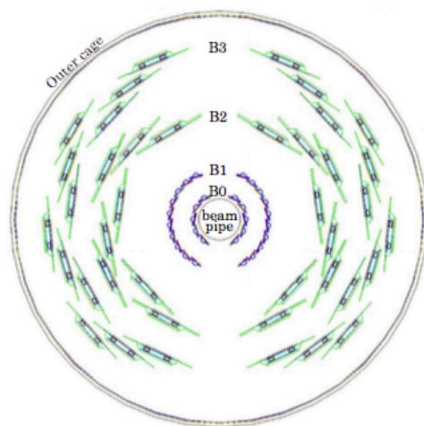


図 2.4 VTX の概要図 [14]

#### 2.2.1.4 Forward Silicon Vertex Tracker (FVTX)

Forward Silicon Vertex Tracker (FVTX) は PHENIX 検出器の前方・後方において、荷電粒子の飛跡を測定することを目的に設計されたシリコン検出器で、2012 年に PHENIX 実験に導入された。FVTX は図 2.5 の様に円盤状の検出器で、前方と後方それぞれ 4 層の円盤で構成されている。各層が 48 個のシリコンセンサーで構成され、全長は 80cm である。PHENIX 検出器には前方と後方にミュオンを識別するための検出器群があり、それらを Muon Arm と呼んでいる。PHENIX では heavy flavor のハドロンがミュオンに崩壊して前方角で測定されるが、このような測定は  $\pi^\pm$  や  $K^\pm$  の崩壊により生じたミュオンからのバックグラウンドの影響を受ける。FVTX は Muon Arm のハドロン吸収体より衝突点側に設置され、ビーム衝突点から離れた場所で発生した粒子を検出することで  $\pi^\pm$  や  $K^\pm$  などの比較的長寿命の粒子の崩壊から生じたミュオンを落とすことができ、heavy flavor のハドロン測定に役立っている。また、重イオン衝突実験においては反応平面の測定にも用いられている。[15]

#### 2.2.1.5 Zero Degree Calorimeter (ZDC)

Zero Degree Calorimeter (ZDC) は Central Magnet の外側に、ビーム軸から 0 度の方向に設置されているハドロンカロリメータである。ZDC はマグネットの外側にあるため、荷電粒子はマグネットで飛跡が曲げられ、ZDC では測定することができず、ビーム方向に対して 0.2mrad の円錐内の中性子のエネルギーを測定する。実際の検出器の位置は衝突点から約 18m 下流で、水平方向の許容差は  $\pm 5\text{cm}$  である。[16]

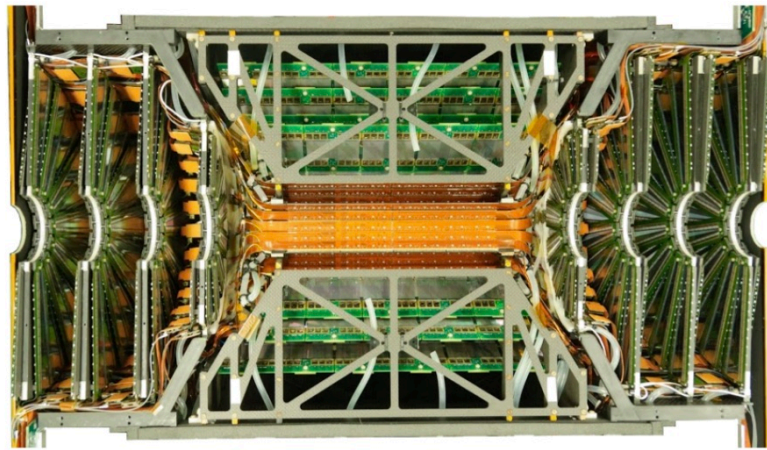


図 2.5 VTX と FVTX のハーフバレルの写真。中央が VTX バレル、その両端に 4 層の円盤で構成される FVTX がついている。[15]

## 第 3 章

# 解析手法

この章では初めに物理量の定義を述べた後、解析手法の中で解析の概要を記した後、詳しいデータ解析の方法について述べる。

### 3.1 物理量の定義

ここでは本研究で用いた物理量・測定量の定義を述べる。

#### 3.1.1 participant と spectator

原子核衝突では反応に関与するのは2つの原子核が重なった部分だけである。図 3.1 はビーム軸方向から見た原子核の衝突の様子である。図 3.1 の様に、反応領域内にある核子を participant、反応に関与しなかった核子を spectator と呼ぶ。また、participant の数を  $N_{part}$ 、spectator の数を  $N_{spec}$  とする。

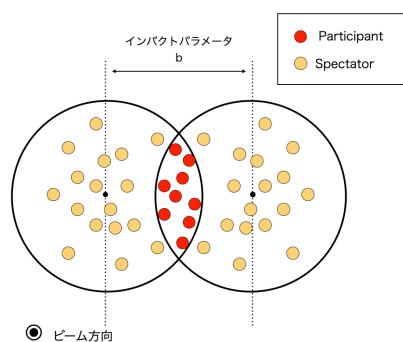


図 3.1 participant と spectator の概念図

### 3.1.2 中心衝突度

中心衝突度は、衝突する2つの原子核の重なり度合いを表す量である。2つの原子核の中心が最も近づいた時の中心間の距離をインパクトパラメータと呼び、通常  $b$  で表す。この  $b$  と、衝突する原子核 A の半径  $R_A$  と原子核 B の半径  $R_B$  の関係が、 $b > R_A + R_B$  の時、衝突は起こらない。 $b \simeq 0$  の時を中心衝突、 $b \simeq R_A + R_B$  の時を周辺衝突と呼ぶ。図 3.2 の様に、中心衝突度を最も中心衝突を 0% ととして表す。実験では  $b$  の値を測定することは不可能なため、発生粒子数を用いて中心衝突度を決定する。発生粒子数の測定には MB トリガーとしても用いられている BBC 検出器を使う。BBC 検出器で測定した発生粒子数が、上位 10% のイベントを中心衝突度 0-10%、次に発生粒子数が多い 10% のイベントを中心衝突度 10-20% としてクラス分けしている。原子核同士が擦るような衝突では発生粒子数が少なすぎるために中心衝突度を決定することができない。PHENIX 実験では、0-93% まで中心衝突度を測定することができる。

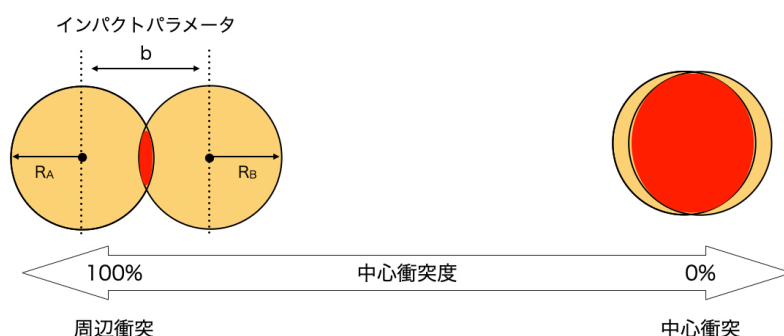


図 3.2 ビーム方向から見た原子核衝突の様子と中心衝突度の関係の概念図

### 3.1.3 楕円率

原子核衝突の場合は、原子核同士の中心間の距離が短い時は中心衝突、長い時は周辺衝突と呼ばれ反応領域のサイズが異なる。さらに図 3.2 の様に反応領域のジオメトリーは中心衝突では円に近く、周辺衝突ではアーモンド型になる。反応領域の形が円形からどれだけ離れているかを表す値が楕円率である。楕円率は一般的に  $\epsilon$  で表され、式 3.1 の様に、participant の座標を用いて定義される。xy 座標は実験室系の座標で、ビーム軸方向を z 軸、z 軸に垂直な平面を xy 平面とする。

$$\epsilon = \frac{\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle}{\langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle} \quad (3.1)$$

### 3.1.4 反応平面

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を反応平面と呼ぶ。図 3.3 は原子核衝突の際の反応平面の模式図である。

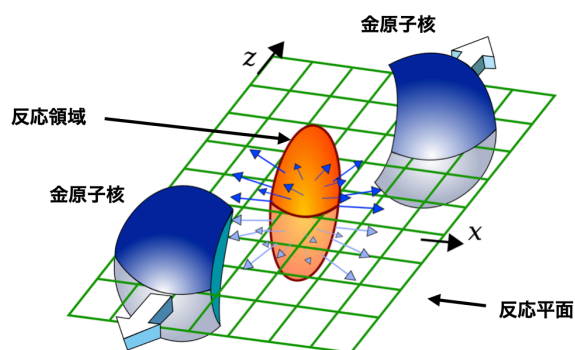


図 3.3 原子核衝突の様子

## 3.2 解析手法

本章では解析の概要について述べた後、データ解析について詳しく述べる。

### 3.2.1 解析の概要

本研究は、反応に関与した核子数と発生粒子数を別の軸とし、それらの関係についてより詳しく調べることを目的としている。反応に関与した核子 (participant) は相互作用の結果、新しく形を変え、衝突により発生した粒子となって観測されるため、反応に関与した核子数 ( $N_{part}$ ) を直接測定することはできない。一方で反応に関与しなかった核子 (spectator) は、衝突領域からもぎとられ、バラバラになり中性子のみが Zero Degree Calorimeter (ZDC) と呼ばれるハドロンカロリメータで検出されるため、ZDC で測定されるエネルギー (ZDCe) は反応に関与しなかった核子数 ( $N_{spec}$ ) に比例する量を直接測定することができる。図 3.4 は衝突後の粒子が検出器に測定される様子を表した図である。また衝突する原子核の数 ( $A$ ) は決まっているため、式 3.2 が成り立つことから、 $N_{spec}$  が分かれば  $N_{part}$  がわかる。そのため、ZDC 検出器を用いることで本研究の目的である、反応に関与した核子数と発生粒子数を別のものとして測定することができる。

$$N_{part} + N_{spec} = 2A \quad (3.2)$$

本研究では、反応に関与した核子数と発生粒子数の違いによる、物理現象の違いを調べるために  $v_2$  を用いることにした。 $v_2$  は衝突初期の反応領域の形の異方性、が時間発展の結果、粒子の方位角分布に異方性を生み出し、その異方性の強度を表す値である。反応領域の形は衝突に関与する核子数に強く依存するはずである。そのため、反応に関与した核子数と相関を持つ  $v_2$  をプローブにして、反応に関与した核子数と発生粒子数の関係について調べることにした。以上のことから本研究

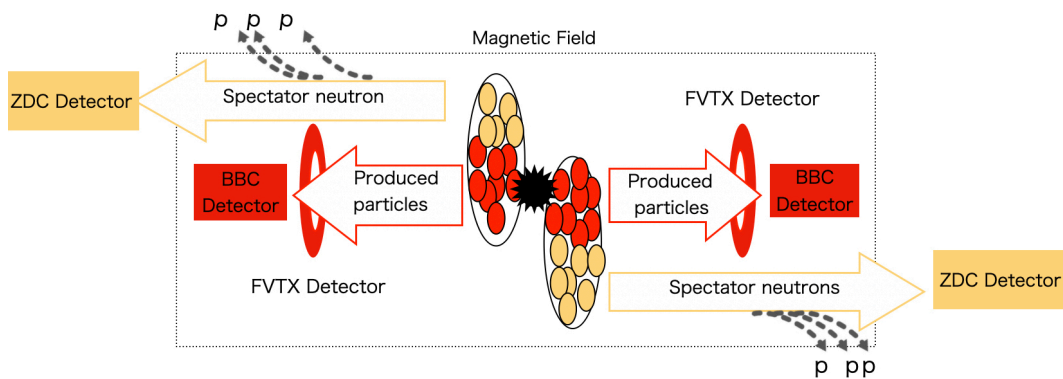


図 3.4 衝突後の粒子が PHENIX 検出器で捉えられる様子

は ZDCe でイベント分類を行い、発生粒子数の関数として  $v_2$  の解析を行うものである。

さらに、粒子発生機構の違いがある可能性を考え、ラピディティ領域が異なる検出器で測定した  $v_2$  を比較する。本研究では、発生粒子数として、Forward Silicon Vertex Tracker(FVTX) で測定したトラックの本数 ( $N_{tracks}^{FVTX}$ ) と Beam Beam Counter(BBC) で測定した電荷総数 ( $Q_{S+N}^{BBC}$ ) を用いた。FVTX の検出領域は  $1.5 < |\eta| < 2.5$  かつ  $0 < \phi < 2\pi$ 、BBC の検出領域は  $3.5 < |\eta| < 3.9$  かつ  $0 < \phi < 2\pi$  である。

### 3.3 データ解析

データ解析は以下の手順で行う。

- 反応平面角キャリブレーション
- 解析
  1. イベント選択
  2. トラック選択
  3.  $v_2$  の測定と反応平面分解能の測定
  4.  $v_2$  の補正係数の計算
  5.  $v_2$  の補正
  6. 統計誤差と系統誤差の見積もり

それぞれの手順について以下に示す。

#### 3.3.1 反応平面角キャリブレーション

章 3.1.4 で述べた様に、反応平面は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であり、ビーム軸に平行な xy 平面に対する反応平面の角度を反応平面角という。原子核衝突実験

において、反応平面角をコントロールして原子核を衝突させることは不可能なので、反応平面角は一様に分布するはずである。しかし実際は、ビームが検出器の中央を通過していないことや、反応平面角を決定する検出器の検出可能領域 (acceptance) の効果によって反応平面角の分布が歪むことがわかっている。本研究ではデータ解析を行う前に、反応平面角分布が一様分布になる様にキャリブレーションを行った。ビームが検出器の中央を通過していない効果を補正するキャリブレーションを Re-centering キャリブレーション、反応平面角を決定する検出器の検出可能領域による効果を補正するキャリブレーションを Flattening キャリブレーションと呼ぶ。まず、反応平面角を決定する方法について記した後、反応平面角キャリブレーションの手順と QA の結果を以下に示す。

### 3.3.1.1 反応平面角の定義

反応平面角は、衝突によって発生した粒子の方位角を用いて決定する。ビーム軸に垂直な平面 (xy 平面) において、イベント毎に粒子の x 座標の加重平均 ( $Q_x^{obs}$ )、y 座標の加重平均 ( $Q_y^{obs}$ ) を式 3.3 で求め、式 3.4 の様に反応平面角  $\psi_n^{obs}$  を決定する。

$$Q_x^{obs} \equiv \frac{\sum_i \omega_i \cos(n\phi_i)}{\sum_i \omega_i} \quad (3.3)$$

$$Q_y^{obs} \equiv \frac{\sum_i \omega_i \sin(n\phi_i)}{\sum_i \omega_i}$$

$$\psi_n^{obs} = \frac{1}{n} \tan^{-1} \frac{Q_x^{obs}}{Q_y^{obs}} \quad (3.4)$$

本研究では  $v_2$  を測定するため、以降は  $n=2$  の場合について言及する。図 3.5 は、式 3.4 で決定した  $\psi_2^{obs}$  と、以下に示す手順で行ったキャリブレーション後の  $\psi_2$  の分布である。図 3.5 から、測定された反応平面角分布には歪みがあることがわかる。

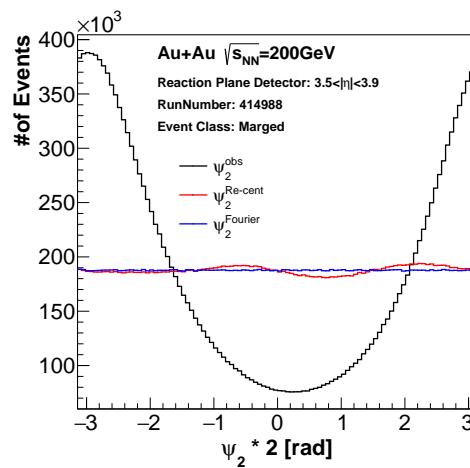


図 3.5 黒線：測定された反応平面角分布 赤線：Re-centering キャリブレーション後の反応平面角分布 青線：Re-centering キャリブレーションと Flattening キャリブレーション後の反応平面角分布

### 3.3.1.2 反応平面角キャリブレーションの手順

反応平面角のキャリブレーションは、前述の Re-centering キャリブレーションを行った後に Flattening キャリブレーションを行う。以下にそれらのキャリブレーションの詳しい操作について述べる。

#### Re-centering キャリブレーション

Re-centering キャリブレーションは、ビームが検出器の中央を通過していない効果を補正するキャリブレーションである。 $Q_x^{obs}$ 、 $Q_y^{obs}$  は式 3.3 で定義され、これらは反応平面角の x または y 軸への射影であるから、反応平面が一様に分布していればどちらも 0 になる値である。そこで式 3.5 の様に、イベントクラス毎に  $Q_{x,y}^{obs}$  の平均  $\langle Q_{x,y}^{obs} \rangle$ 、 $Q_{x,y}^{obs}$  分布の広がり  $\sigma_{x,y}$  を求め、式 3.5 の様に、 $\langle Q_{x,y}^{rec} \rangle = 0$ 、 $Q_{x,y}^{rec}$  の分布の広がり  $\sigma_{x,y}^{rec} = 1$  になる様に補正する。図 3.6 は Re-centering キャリブレーション前後の  $Q_{x,y}$  分布である。その後、式 3.6 の様に Recentering キャリブレーション後の反応平面角  $\psi_2^{Re-cent}$  を求める。

$$\begin{aligned} Q_x^{rec} &= \frac{Q_x^{obs} - \langle Q_x^{obs} \rangle}{\sigma_x} \\ Q_y^{rec} &= \frac{Q_y^{obs} - \langle Q_y^{obs} \rangle}{\sigma_y} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\psi_2^{Re-cent} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{Q_x^{rec}}{Q_y^{rec}} \quad (3.6)$$

図 3.5 からわかる様に、Re-centering キャリブレーションによって反応平面角分布は大きく補正されることがわかる。Re-centering キャリブレーション後に残った反応平面角分布の小さな歪みを補正するために、次の Flattening キャリブレーションを行う。

#### Flattening キャリブレーション

$\psi_2^{Re-cent}$  分布に残った僅かな歪みを  $\Delta\psi_2$ 、Flattening キャリブレーション後に完全に一様分布する反応平面角を  $\psi_2^{Fourier}$  とすると、これらの関係は式 3.7 の様に定義できる。

$$\psi_2^{Fourier} \equiv 2\psi_2^{Re-cent} + 2\Delta\psi_2 \quad (3.7)$$

さらに  $\Delta\psi_2$  は一般的にフーリエ級数を用いて式 3.8 で表すことができる。

$$2\Delta\psi_2 \equiv \sum_{k=1}^8 [A_k \cos 2k\psi_2^{Re-cent} + B_k \sin 2k\psi_2^{Re-cent}] \quad (3.8)$$



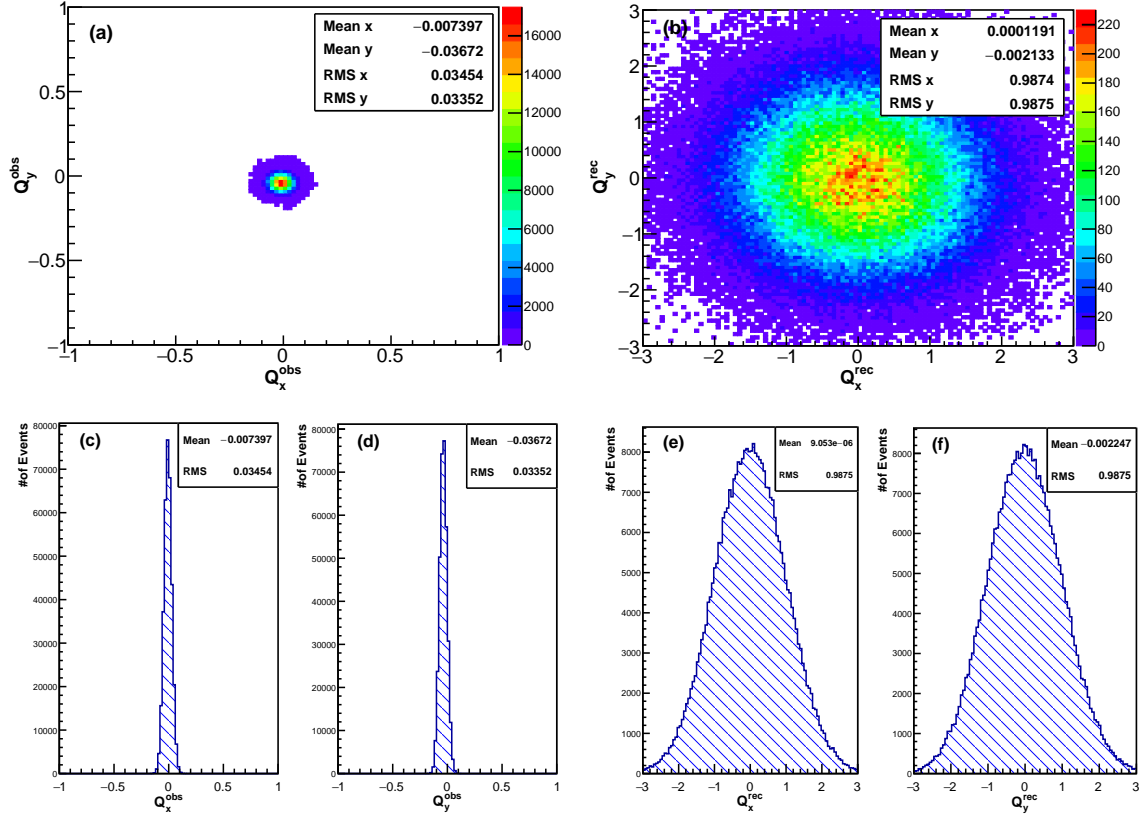


図 3.6 (a)Re-centering キャリブレーション前の  $Q_x^{obs}$  と  $Q_y^{obs}$  の相関 (b)Re-centering キャリブレーション後の  $Q_x^{rec}$  と  $Q_y^{rec}$  の相関 (c)Re-centering キャリブレーション前の  $Q_x^{obs}$  分布 (d)Re-centering キャリブレーション前の  $Q_y^{obs}$  分布 (e)Re-centering キャリブレーション後の  $Q_x^{rec}$  分布 (f)Re-centering キャリブレーション後の  $Q_y^{rec}$  分布

式 3.8 の  $A_k$  と  $B_k$  は、 $\cos$  と  $\sin$  の項の平均値が 0 になる様に決められる。すなわち

$$\begin{aligned}
\langle \cos 2k\psi_2^{Fourier} \rangle &= \langle \cos (2k\psi_2^{Re-cent} + 2k\Delta\psi_2) \rangle \\
&= \langle \cos 2k\psi_2^{Re-cent} \cos 2k\Delta\psi_2 \rangle - \langle \sin 2k\psi_2^{Re-cent} \sin 2k\Delta\psi_2 \rangle \\
&\simeq \langle \cos 2k\psi_2^{Re-cent} \rangle - \langle \sin 2k\psi_2^{Re-cent} \cdot (2k\Delta\psi_2) \rangle \\
&= \langle \cos 2k\psi_2^{Re-cent} \rangle - kB_k \langle \sin^2 (2k\psi_2^{Re-cent}) \rangle \\
&= \langle \cos 2k\psi_2^{Re-cent} \rangle - kB_k/2 \\
&= 0 \\
B_k &= \frac{2}{k} \langle \cos 2k\psi_2^{Re-cent} \rangle
\end{aligned} \tag{3.9}$$

となる。同様に  $A_k = -\frac{2}{k} \langle \sin 2k\psi_2^{Re-cent} \rangle$  である。以上の様にして求めた  $A_k$ 、 $B_k$  を式 3.7 に代入して求めた  $\psi_2^{Fourier}$  を図 3.5 に示している。

### 3.3.1.3 イベントクラスの定義

$v_2$  を求めるイベントクラスにおいて反応平面角分布が一様である必要がある。そのため、反応平面角キャリブレーションはイベントクラス毎に行う。以下に反応平面角分布のキャリブレーションを行ったイベントクラス分けの定義を示す。さらに、ビームが通る位置は Run によって異なる可能性があるため、反応平面角のキャリブレーションは Run 毎に行う。本研究は、ZDC 検出器で測定したエネルギー (ZDCe) でイベントを分類し、 $v_2$  と FVTX 検出器で測定したトラックの本数 ( $N_{tracks}^{FVTX}$ ) または BBC 検出器で測定した電荷総数 ( $Q_{S+N}^{BBC}$ ) の関数として測定するものである。そのため、以下のようにイベントクラスの定義を定めた。

- 衝突点のビーム軸方向の位置 ( $z_{vtx}$ ) によるクラス分け  
 $|z_{vtx}| < 30\text{cm}$  を 5cm 刻みで分け、イベントクラスを定義した。つまり  $-30\text{cm} < z_{vtx} < -25\text{cm}$ 、 $-25 < z_{vtx} < -20\text{cm}$ , ...,  $25\text{cm} < z_{vtx} < 30\text{cm}$  の様に分けた。章 3.3.2 で述べるように、解析では  $|z_{vtx}| < 10\text{cm}$  のイベントのみを用いた。

- ZDCe によるクラス分け

以下に示す値でクラス分けを行った。

1.  $100 < \text{ZDCe} < 110$
2.  $300 < \text{ZDCe} < 310$
3.  $500 < \text{ZDCe} < 510$
4.  $700 < \text{ZDCe} < 710$
5.  $900 < \text{ZDCe} < 910$
6.  $1100 < \text{ZDCe} < 1110$
7.  $1300 < \text{ZDCe} < 1310$
8.  $1500 < \text{ZDCe} < 1510$
9.  $1700 < \text{ZDCe} < 1710$
10.  $1900 < \text{ZDCe} < 1910$
11. それ以外の ZDCe

- 発生粒子数によるクラス分け

本研究では、FVTX 検出器で測定したトラックの本数  $N_{tracks}^{FVTX}$  と BBC 検出器で測定した電荷総数  $Q_{S+N}^{BBC}$  を発生粒子数の指標として用いた。この 2 つの値は章 4 の冒頭で述べる方法でスケールリングを行う。スケールリング後の  $N_{tracks}^{FVTX}$  または  $Q_{S+N}^{BBC}$  を Scaled Multiplicity (SM) とする。本研究では、 $0 < \text{SM} < 0.05$ 、 $0.05 < \text{SM} < 0.10$ , ...,  $0.95 < \text{SM} < 1.0$  の様に、0.05 刻みでイベントクラス分けを行った。

### 3.3.1.4 反応平面角キャリブレーションの QA

本研究では南側の BBC (BBCS) と北側の BBC (BBCN) で測定した反応平面  $\psi_2^{BBCSN}$  を用いて  $v_2$  を測定した。また、章 3.3.5 で述べるように、BBCS で測定した  $\psi_2^{BBCS}$  と BBCN で測定

した  $\psi_2^{BBCN}$  で  $v_2$  の補正を行なった。そのため、反応平面角キャリブレーションは  $\psi_2^{BBCSN}$ 、 $\psi_2^{BBCS}$ 、 $\psi_2^{BBCN}$  について行なった。反応平面角キャリブレーションの QA として、 $|z_{vtx}| < 10\text{cm}$  のイベントを足し合わせて、イベントクラス毎に反応平面角分布の 0 次フィッティングを、Run 毎に行なった。図 3.7 は、反応平面角分布の 0 次フィッティングの一例である。 $\psi_2^{BBCSN}$ 、 $\psi_2^{BBCS}$ 、 $\psi_2^{BBCN}$  において、 $\chi^2/\text{ndf}$  が 1 付近になっており、反応平面角分布が一様分布になっていることがわかる。

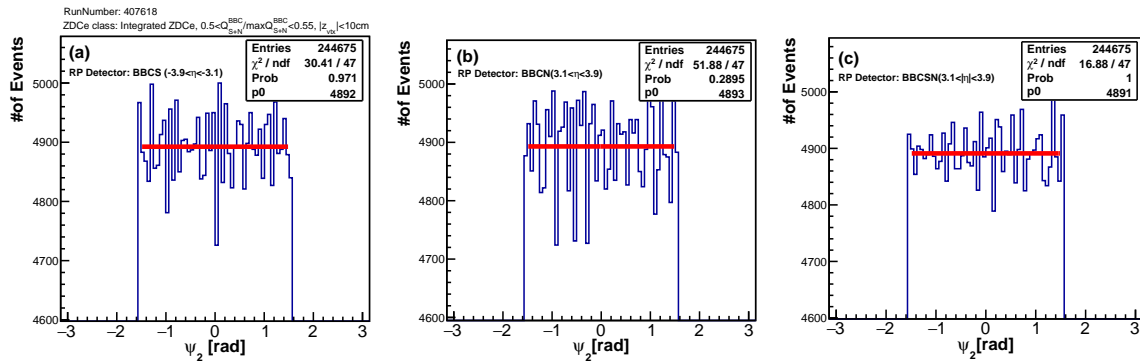


図 3.7 (a)BBCS で測定した反応平面角分布 (b)BBCN で測定した反応平面角分布 (c)BBCSN で測定した反応平面角分布 (a)(b)(c) 0 次関数でフィッティングを行った結果。イベントクラス・RunNumber は図中に記載

また、ある Run において、イベント数が数個しかないイベントクラスでは、Re-centering キャリブレーションができないことがわかった。Re-centering キャリブレーションは  $Q_{x,y}^{obs}$  の分布をそれらの平均値と分布の幅で補正して、 $\langle Q_{x,y}^{rec} \rangle = 0$ 、 $\sigma_{x,y}^{rec} = 1$  になる様に調整するキャリブレーションである。このようなキャリブレーションを数個のイベントしかないイベントクラスにおいて行うと、図 3.8(b) の様にバイアスがかかる。その結果、イベント数が少ない場合は常に図 3.8(c) の様に反応平面角の値が決まってしまうので、全 Run を通してイベント数が少ないイベントクラスでは反応平面角分布にピークができてしまう。そのため、章 3.3.2 で述べる様に、イベント数が少ないイベントクラスを除いて解析を行った。

また、 $N_{tracks}^{FVTX} < 0.1$ 、 $Q_{S+N}^{BBC} < 0.1$  では反応平面角分布を 0 次フィッティングした時の  $\chi^2/\text{ndf}$  の値が 2 を超えてしまうことがわかったので、これらのイベントクラスは解析に用いないことにした。この様な、イベント数が少ないために反応平面角キャリブレーションが行えないイベントクラスと、 $N_{tracks}^{FVTX} < 0.1$ 、 $Q_{S+N}^{BBC} < 0.1$  のイベントクラスを除いて、Run 毎に  $|z_{vtx}| < 10\text{cm}$  のイベントを足し合わせた全てのイベントクラスにおいて反応平面角分布を 0 次関数でフィッティングし、その時の  $\chi^2/\text{ndf}$  の値を求めた。図 3.9 は、 $N_{tracks}^{FVTX}$  でイベントクラスを定義した時の  $\psi_2^{BBCSN}$ 、 $\psi_2^{BBCS}$ 、 $\psi_2^{BBCN}$  分布を、Run 毎に全てのイベントクラスで 0 次関数でフィッティングした  $\chi^2/\text{ndf}$ 、図 3.10 は、 $Q_{S+N}^{BBC}$  でイベントクラスを定義した時の  $\psi_2^{BBCSN}$ 、 $\psi_2^{BBCS}$ 、 $\psi_2^{BBCN}$  分布を、Run 毎に全てのイベントクラスで 0 次関数でフィッティングした  $\chi^2/\text{ndf}$  である。図 3.9、

3.10 からほとんどの Run とイベントクラスにおいて反応平面角分布が一様分布になっていることがわかる。本解析では、全てのイベントクラスで  $\chi^2/\text{ndf}$  の値が 2 以下になる Run のみを解析に用いた。

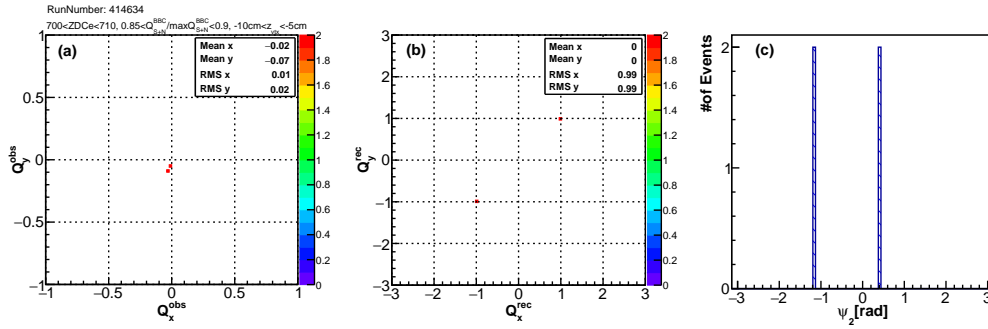


図 3.8 (a)Re-centering キャリブレーション前の  $Q_{x,y}^{\text{obs}}$  (b)Re-centering キャリブレーション後の  $Q_{x,y}^{\text{rec}}$  (c) 反応平面角分布 (a)(b)(c)BBCSN で測定。イベントクラス・RunNumber は図中に記載

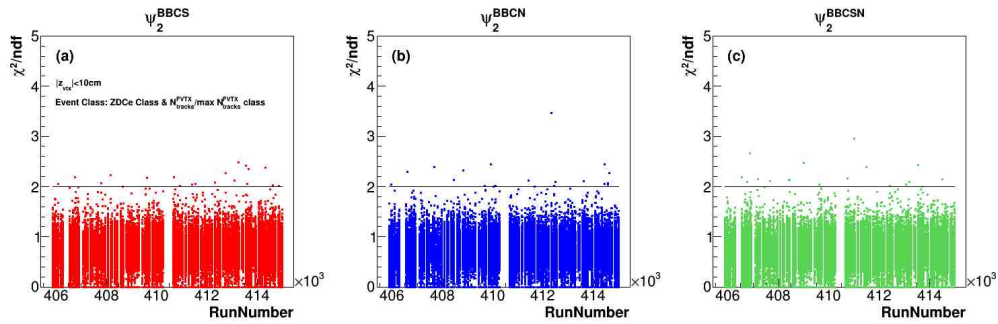


図 3.9  $N_{\text{tracks}}^{\text{FVTX}}$  と ZDCe のイベント分類でイベントクラスを定義した時の、 $\psi_2^{\text{BBCS}}$  (a)、 $\psi_2^{\text{BBCN}}$  (b)、 $\psi_2^{\text{BBCSN}}$  (c) 分布を、0 次関数でフィッティングした  $\chi^2/\text{ndf}$  の Run 依存性

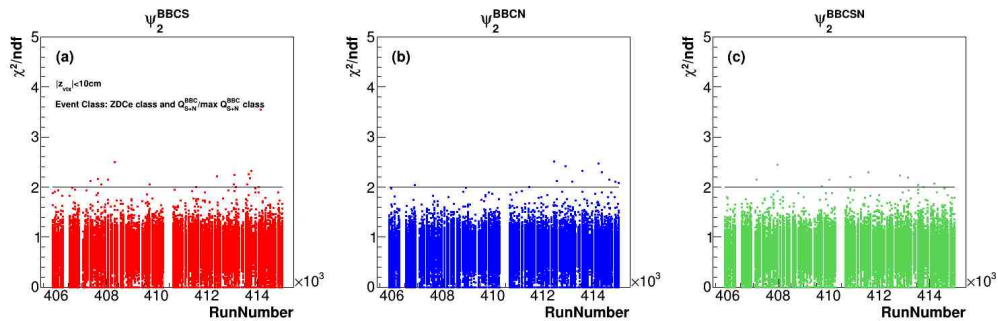


図 3.10  $Q_{S+N}^{\text{BBC}}$  と ZDCe のイベント分類でイベントクラスを定義した時の、 $\psi_2^{\text{BBCS}}$  (a)、 $\psi_2^{\text{BBCN}}$  (b)、 $\psi_2^{\text{BBCSN}}$  (c) 分布を、0 次関数でフィッティングした  $\chi^2/\text{ndf}$  の Run 依存性

### 3.3.2 イベント選択

本研究では、RHIC-PHENIX 実験における 2014 年に収集された核子対当たりの重心系衝突エネルギー  $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$  の Au+Au 衝突の MB データを用いて解析を行った。MB トリガーとして BBC 検出器を用いており、トリガー条件は BBC south, BBC north 両方に 1 つ以上のヒットが存在することである。さらに以下の条件を課した。

- VTX 検出器により測定された衝突位置が、ビーム軸方向から  $\pm 10\text{cm}$  以内のイベントであること。
- FVTX 検出器により測定されたトラックの本数 ( $N_{tracks}^{FVTX}$ ) が 600 以下、かつ、BBC 検出器により測定された電荷総数 ( $Q_{S+N}^{BBC}$ ) が 1705 以下であること。

図 3.11、3.12 は MB での  $N_{tracks}^{FVTX}$  分布と  $Q_{S+N}^{BBC}$  の分布で、分布内の実線はイベント選択の閾値を表している。図 3.11 と 3.12 において、分布が緩やかに減少し始めた後、イベント数が完全に 0 になる前に分布に構造が生まれていることがわかる。これらの構造は pile-up イベントによるものである。pile-up イベントとは、1 バンチ衝突で原子核衝突が 2 回以上起きているイベントである。原子核衝突の場合、pile-up イベントは全体のイベントの 1% 未満である。本解析では MPI の効果によって発生粒子数が大きくなったイベントに注目する必要があるので pile-up イベントを除く必要がある。そのため上記のイベント選択を要求した。

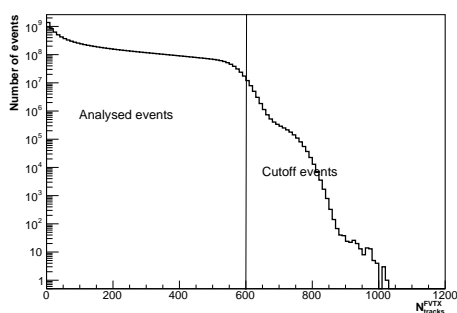


図 3.11  $N_{tracks}^{FVTX}$  分布

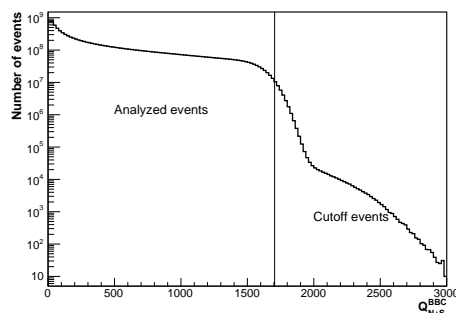


図 3.12  $Q_{S+N}^{BBC}$  分布

- ある  $N_{tracks}^{FVTX}$  ビンでの  $Q_{S+N}^{BBC}/N_{tracks}^{FVTX}$  の分布が  $2\sigma$  以内のイベントであること

図 3.13 は  $N_{tracks}^{FVTX}$  と  $Q_{S+N}^{BBC}$  の分布である。 $N_{tracks}^{FVTX}$  も  $Q_{S+N}^{BBC}$  はどちらも発生粒子数を表す値であるから、強い正の相関が見えると予想できるが、図 3.13 の左図には 2 つ目の相関が見える。2 つ目の相関が作られる原因を調べるために、データテイキングの時間依存性の確認と、FVTX North と FVTX South を分けた相関の確認を行ったが、依存性は見えず、このようなイベントはランダムに起きていると結論づけた。そこで、 $N_{tracks}^{FVTX}$  と  $Q_{S+N}^{BBC}$

の相関から、2つ目の相関を作るイベントを落とす様にイベントカットをかけた。図 3.13 の右図はイベントカットをかけた後の  $N_{tracks}^{FVTX}$  と  $Q_{S+N}^{BBC}$  の相関である。

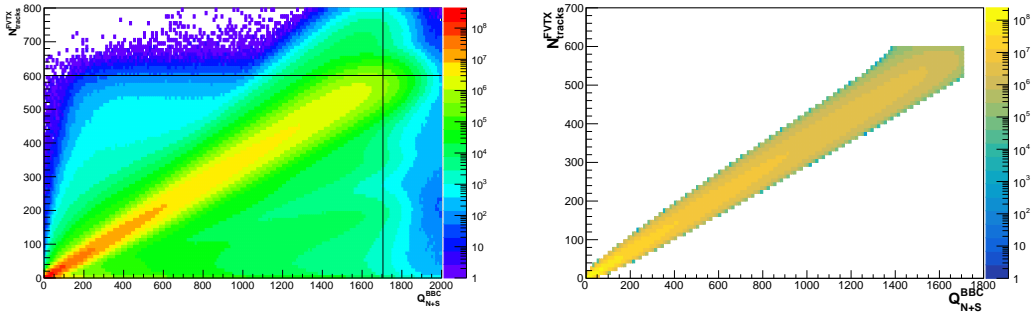


図 3.13 左: イベントカット前の  $N_{tracks}^{FVTX}$  と  $Q_{S+N}^{BBC}$  の相関。右: イベントカット後の  $N_{tracks}^{FVTX}$  と  $Q_{S+N}^{BBC}$  の相関。  $N_{trk}^{FVT} < 600$  と  $Q_{S+N}^{BBC} < 1705$  のイベントカットが適用されている。

- 統計が十分にあるイベントクラスのみを解析に使う

本研究では ZDCe でイベントの分類を行い、  $N_{tracks}^{FVTX}$  または  $Q_{S+N}^{BBC}$  のビン毎に  $v_2$  を求める。そのため、前述の反応平面角キャリブレーションも同じイベントクラスの定義で行う。その際、イベントクラスに統計が少ないと反応平面のキャリブレーションができないことがわかった。そのため、キャリブレーションができるだけの統計があるイベントクラスのみを解析に用いた。図 3.15 と図 3.14 は ZDCe と  $N_{tracks}^{FVTX}$ 、ZDCe と  $Q_{S+N}^{BBC}$  の相関で、左図はイベントカットをかける前、右図は統計が少ないイベントクラスをカットした後である。

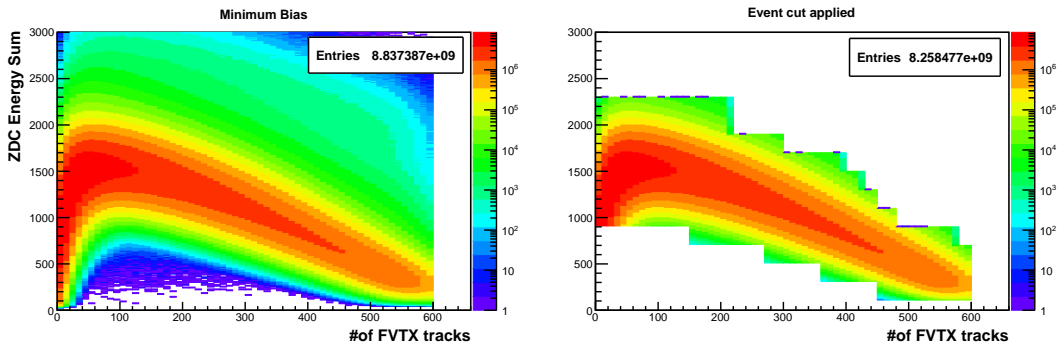


図 3.14 ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) と  $N_{tracks}^{FVTX}$  の相関 左: イベントカットなし 右: 統計が少ないイベントクラスをカット

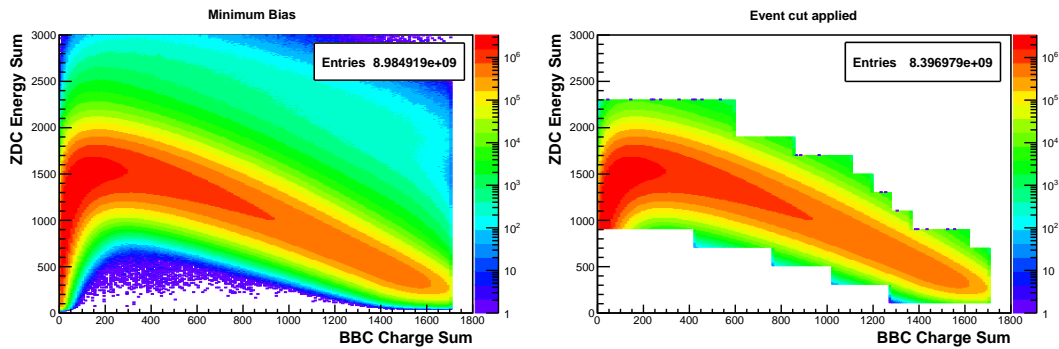


図 3.15 ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) と  $Q_{S+N}^{BBC}$  の相関 左：イベントカットなし  
右：統計が少ないイベントクラスをカット

### 3.3.3 トラック選択

本解析では、 $v_2$  を測定するために Central Arm を用いており、さらに FVTX 検出器で測定したトラックの本数と  $v_2$  の相関を調べている。以下では Central Arm で測定したトラックの選別条件と、FVTX 検出器で測定したトラックの選別条件を述べる。

#### 3.3.3.1 Central Arm トラックの選別条件

Central Arm トラックの選別に以下の条件を課す。

- 横運動量  $p_T > 0.10$  [GeV/c]
- Central Arm はビーム軸方向に衝突点から  $\pm 80$ cm をカバーしている。本解析では  $\pm 75$ cm 以内に存在するトラックを使用する。
- Central Arm の Drift Chamber(DC) は図の様に X1,U1,V1,X2,U2,V2 の 6 つの平面に分けられる。まず、X1・X2 両方にヒットがあるトラックであること、さらに U1 または V1、U2 または V2 にヒットがあり、そのヒット点が他のトラックと共有されていないことが要求される。最後にそのトラックを外挿した時、PC1 にヒットがあるトラックを解析に用いる。

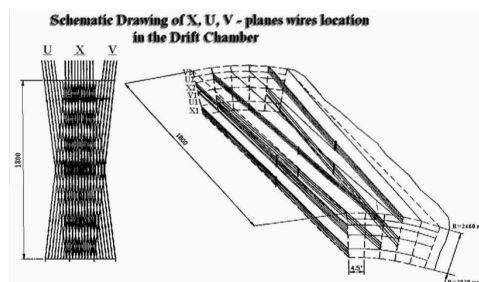


図 3.16 PHENIX 実験の Drift Chamber のワイヤー平面の図

- E/p カットは、電子のトラックと実際には存在しないトラックによるバックグラウンドを減らすためのカットある。Central Arm の EMCal で測定したエネルギーを  $E$ 、DC で測定した運動量を  $p$  とし、 $E/p \simeq 1$  ならば電子のトラック、 $E/p \ll 1$  ならば崩壊した粒子による実際には存在しないトラック、または再構成の間違いを多く含んでいる。また、バックグラウンドが  $E/p$  の 0 付近と 1 付近に集中する傾向があることがわかっており、バックグラウンドとシグナルの比が最も良くなる  $0.2 \leq E/p \leq 0.8$  を採用した。[18]
- DC で再構成されたトラックの外挿と、PC3、EMCal で検出された測定点との  $z$  方向（ビーム軸方向）と  $\phi$  方向（方位角方向）の残差を  $pc3dz$ ,  $pc3dphi$  と呼ぶ。 $pc3dz$ ,  $pc3dphi$  分布をガウス関数でフィットした時の、平均値から  $3\sigma$  以内にあるトラックのみを解析に用いる。[18]

### 3.3.3.2 FVTX トラックの選別条件

FVTX トラックの選別には以下の条件を課す。

- 4 層の FVTX 検出器のうち、3 層以上にヒットがあること
- トラックを外挿して予想されるヒット位置と実際のヒットの距離が  $x$  方向、 $y$  方向共に 2.0cm 以内であること
- 再構成したトラックに対するヒット点の  $\chi^2/ndf$  が 5 以下であること

### 3.3.4 $v_2$ の測定

章 1.2.1 で述べたように、 $v_2$  は衝突で生成した粒子の反応平面からの方位角分布をフーリエ展開した時の 2 次の係数であり、その生成粒子の異方性の強度を表す値である。実験的に測定される  $v_2$  を  $v_2^{measure}$  とすると、以下の様に表される。

$$v_2^{measure} = \langle \cos[2(\psi_2 - \phi_i)] \rangle \quad (3.10)$$

ここで  $\psi$  は反応平面、 $\phi_i$  はあるイベントで発生した  $i$  番目の粒子の方位角である。本研究では南側の BBC(BBCS) と北側の BBC(BBCN) で測定された粒子のヒット分布によって決定した  $\psi$  と、Central Arm で測定された  $\phi$  を用いて  $v_2$  を測定した。

式 3.10 で求められる  $v_2^{measure}$  は真の  $v_2$  ではなく、 $\psi$  の測定における不確実性を考慮しなければならない。そのため  $\psi$  の測定分解能で  $v_2^{measure}$  を、式 3.11 の様に補正した  $v_2^{true}$  が真の  $v_2$  となる。

$$v_2^{true} = \frac{v_2^{measure}}{C_{reso}} \quad (3.11)$$

章 3.3.5 で式 3.11 の補正係数  $C_{reso}$  の求め方を述べる。



### 3.3.5 反応平面の分解能と $v_2$ の補正

章 3.3.4 で述べた様に、測定した  $v_2^{measure}$  は反応平面の測定分解能による不変性を含んでいるため、反応平面の分解能  $C_{reso}$  によって式 3.11 に従って補正される。本研究では  $v_2$  を測定するための反応平面を南側の BBC(BBCS) と北側の BBC(BBCN) で測定しているため、補正係数  $C_{reso}$  は BBCSN の反応平面の分解能  $\sigma_{BBCSN}$  である。

反応平面の分解能とは、2つの異なる検出器で測定した反応平面角の差から決まる値である。検出器 A で求めた反応平面を  $\psi_A$ 、検出器 B で求めた反応平面を  $\psi_B$ 、実際の反応平面を  $\psi^{true}$  とすると、それぞれの検出器の反応平面の分解能  $\sigma_A$ 、 $\sigma_B$  は式 3.12 で与えられる。

$$\begin{aligned}\sigma_A &\equiv \langle \cos(2[\psi^{true} - \psi_A]) \rangle \\ \sigma_B &\equiv \langle \cos(2[\psi^{true} - \psi_B]) \rangle\end{aligned}\quad (3.12)$$

さらに、

$$\begin{aligned}\sigma_A \sigma_B &= \langle \cos(2[\psi^{true} - \psi_A]) \rangle \langle \cos(2[\psi^{true} - \psi_B]) \rangle \\ &= \langle \cos 2[\psi_A - \psi_B] \rangle\end{aligned}\quad (3.13)$$

である。本研究では、BBCS と BBCN のアクセプタンスが同じであることから式 3.14 を仮定して、 $\sigma_{BBCSN}$  を求めるために、BBCS、BBCN で測定した反応平面  $\psi_{BBCS}, \psi_{BBCN}$  を用いて式 3.15 の様に補正係数  $C_{reso}$  を求めた。

$$\sigma_{BBCS} = \sigma_{BBCN} = \sqrt{\sigma_{BBCSN}} = \sqrt{\langle \cos[2(\psi_{BBCS} - \psi_{BBCN})] \rangle}\quad (3.14)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{BBCSN} &= \sqrt{\sigma_{BBCS}^2 + \sigma_{BBCN}^2} = \sqrt{2\langle \cos[2(\psi_{BBCS} - \psi_{BBCN})] \rangle} \\ &\equiv C_{reso}\end{aligned}\quad (3.15)$$

図 3.17 は上記の方法で求めた補正係数である。図 3.17(a) は補正係数の  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存性、図 3.17(b) は補正係数の  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存性を表している。さらに、本研究では、ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) でイベント選択を行い  $v_2$  を求めているので、補正係数も ZDCe でクラス分けして求めた。図 3.17 から補正係数に ZDCe クラス依存性があることがわかる。そのため、 $v_2$  を求める ZDCe のイベントクラスに合った、ZDCe クラスの補正係数で  $v_2$  を補正する。ただし ZDCe によるイベント選択を行わず求めた補正係数で補正した  $v_2$  と、その ZDCe ビンで補正して求めた  $v_2$  の差を系統誤差に含めた。さらに、図 3.18 は ZDCe クラス毎に補正係数の  $N_{tracks}^{FVTX}$  と  $Q_{S+N}^{BBC}$  の比較である。全ての ZDCe クラスにおいて補正係数に差がないことがわかる。

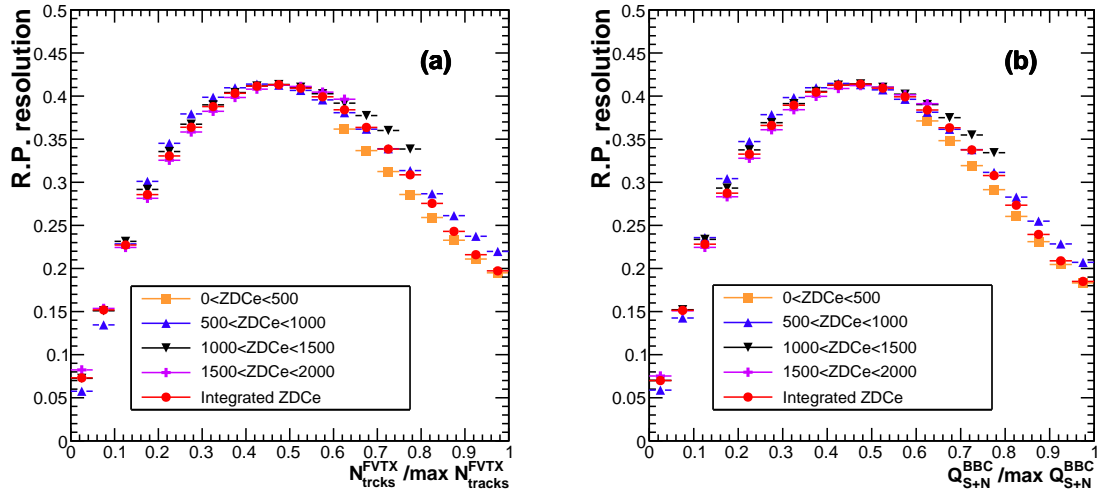


図 3.17 BBSN の反応平面分解能の ZDCe クラス依存性 左:  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存 右:  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存

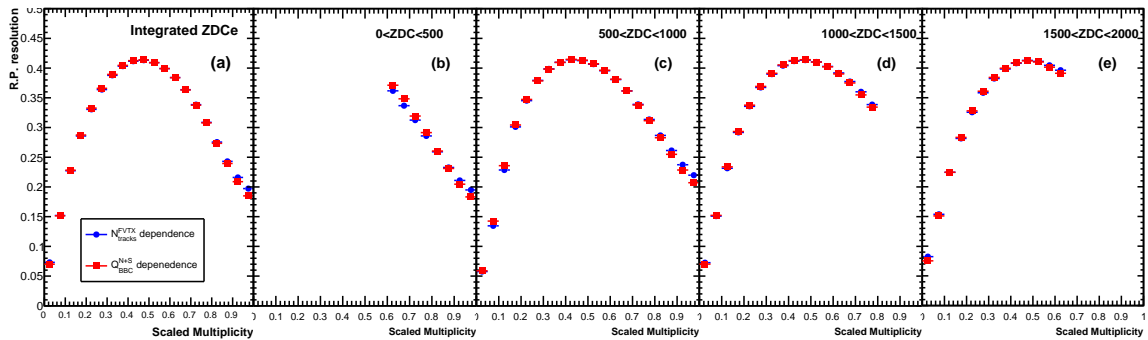


図 3.18 BBSN の反応平面分解能の発生粒子数を測定する検出器による依存性

### 3.3.6 系統誤差の見積もり

系統誤差は以下の項目から見積もる。

- Run 依存性
- $v_2$  を測定する反応平面による違い
- $v_2$  を測定する検出器の違い
- $v_2$  の補正係数の違い

#### Run 依存性

本研究で用いている PHENIX の 2014 年のデータは 1024 個の Run により構成されている。本研究では、反応平面の角度分布を 0 次フィッティングした時の  $\chi^2/\text{ndf}$  が 2.0 以下になる Run の

みを解析に用いるため、 $v_2$  の  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存性の解析には 941 個、 $v_2$  の  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存性の解析には 957 個の Run を用いた。それらの Run を good run と呼び、good run を 2 つのグループに分け、good run0、good run1 とした。全ての good run(all good run) を使って求めた  $v_2$  と good run0、good run1 で求めた  $v_2$  の差をそれぞれ比較し、差が大きい方を系統誤差に含めた。図 3.19 と図 3.20 は all good run、good run0、good run1 の  $v_2$  の比較で図 3.19 は  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存、図 3.20 は  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存である。ボックスの誤差は all good run で求めた  $v_2$  と good run0 または good run1 で求めた  $v_2$  との差を表している。

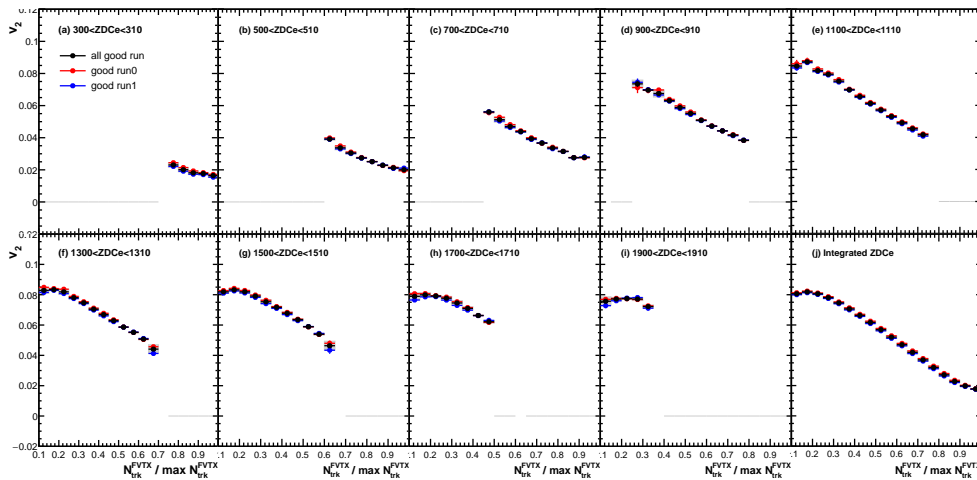


図 3.19 Run による  $v_2$  の  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存性の差

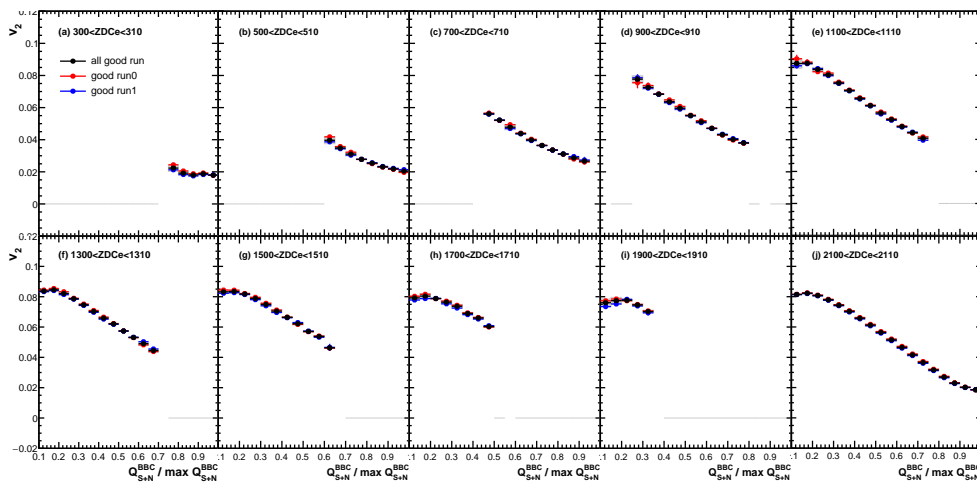


図 3.20 Run による  $v_2$  の  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存性の差

### $v_2$ を測定する反応平面による違い

本研究の  $v_2$  の測定には南側の BBC(BBCS) と北側の BBC(BBCN) の両方 (BBCSN) で測定した反応平面を用いた。そのため、BBCS だけ、BBCN だけで反応平面を求めた場合の  $v_2$  との差を系統誤差に含めた。また、BBCS だけ、BBCN だけで求める  $v_2$  の補正係数は式 3.14 となる。BBCSN で決定した反応平面で測定した  $v_2$  と、BBCS だけ BBCN だけで決定した反応平面で測定した  $v_2$  を比較し、差が大きい方を統計誤差に含めた。図 3.21 と図 3.22 は、BBCSN、BBCS、BBCN で反応平面を決定したときの  $v_2$  の比較で、図 3.21 は  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存、図 3.22 は  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存である。ボックスの誤差は BBCSN で決定した反応平面から測定した  $v_2$  と、BBCS または BBCN で決定した反応平面から測定した  $v_2$  の差を表している。

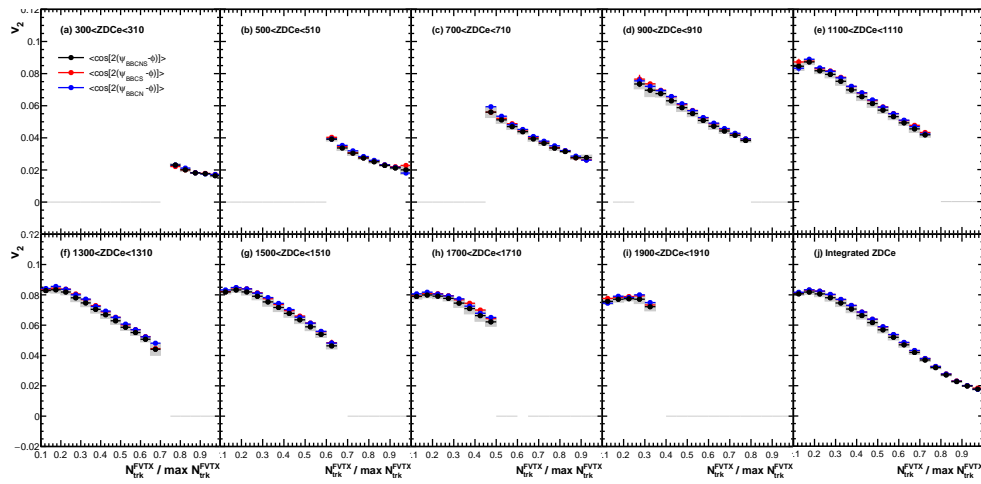


図 3.21  $v_2$  を測定する反応平面による  $v_2$  の  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存性の差

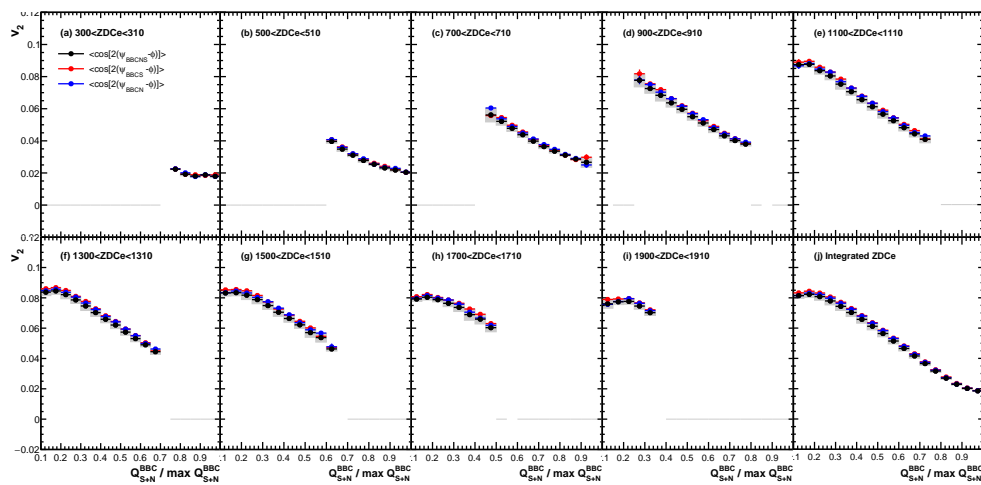


図 3.22  $v_2$  を測定する反応平面による  $v_2$  の  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存性の差

### $v_2$ を測定する検出器による違い

本研究では  $v_2$  の測定に Central Arm を用いている。図 2.2 の上段の図が Central Arm を表しており、図 2.2 からわかるように Central Arm は東側の Arm(East Arm) と西側の Arm(West Arm) に分かれている。本研究では  $v_2$  を East Arm と West Arm 両方で測定している。そのため East Arm と West Arm 両方で測定した  $v_2^{DCW+E}$  と、East Arm だけで測定した  $v_2^{DCEast}$ 、West Arm だけで測定した  $v_2^{DCWest}$  を比較し、差が大きい方を系統誤差に含めた。図 3.23 と図 3.24 は、 $v_2^{DCW+E}$ 、 $v_2^{DCWest}$ 、 $v_2^{DCEast}$  の比較で、図 3.23 は  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存、図 3.24 は  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存である。ボックスの誤差は、 $v_2^{DCW+E}$  と、 $v_2^{DCWest}$  または  $v_2^{DCEast}$  の差を表している。

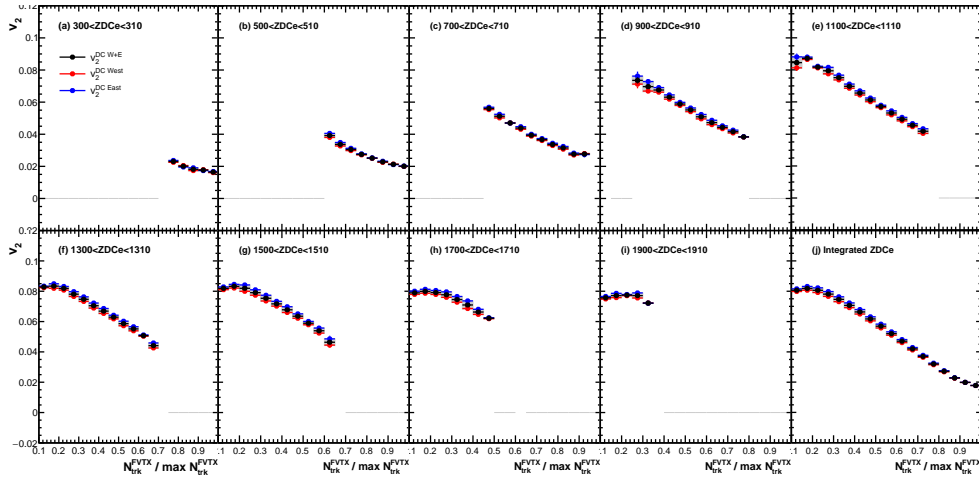


図 3.23  $v_2$  を測定する Central Arm の  $v_2$  の  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存性の差

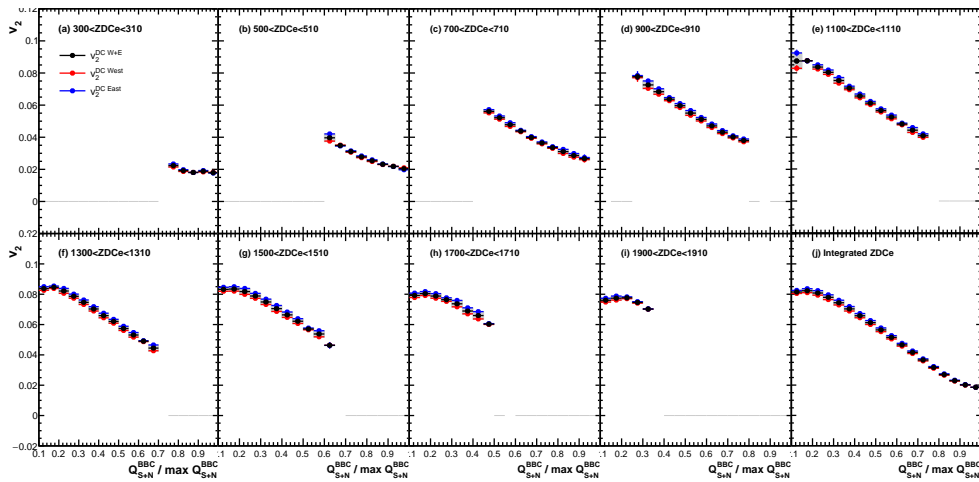


図 3.24  $v_2$  を測定する Central Arm の  $v_2$  の  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存性の差

### $v_2$ の補正係数の違い

本研究は ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) の値によってイベントを分類し、 $v_2$  の  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存性と  $v_2$  の  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存性を求めた。そのため、 $v_2$  の補正係数を ZDCe でクラス分けし、それぞれのクラスにあった補正係数で  $v_2$  を補正している。ZDCe によるクラス分けして求めた補正係数と、ZDCe のクラス分けをせずに求めた補正係数では図 3.17 の様に差がある。そこで ZDCe のクラス分けをして求めた補正係数で補正した  $v_2$  と、クラス分けをせずに求めた補正係数で補正した  $v_2$  の差を系統誤差に含めた。図 3.25 と図 3.26 は、ZDCe のクラス分けを行った補正係数で補正した  $v_2$  (青マーカ) と ZDCe のクラス分けをおこなわずに求めた補正係数で補正した  $v_2$  (黒マーカ) の比較で、図 3.25 は  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存、図 3.26 は  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存である。ボックスの誤差はそれらの差を表している。

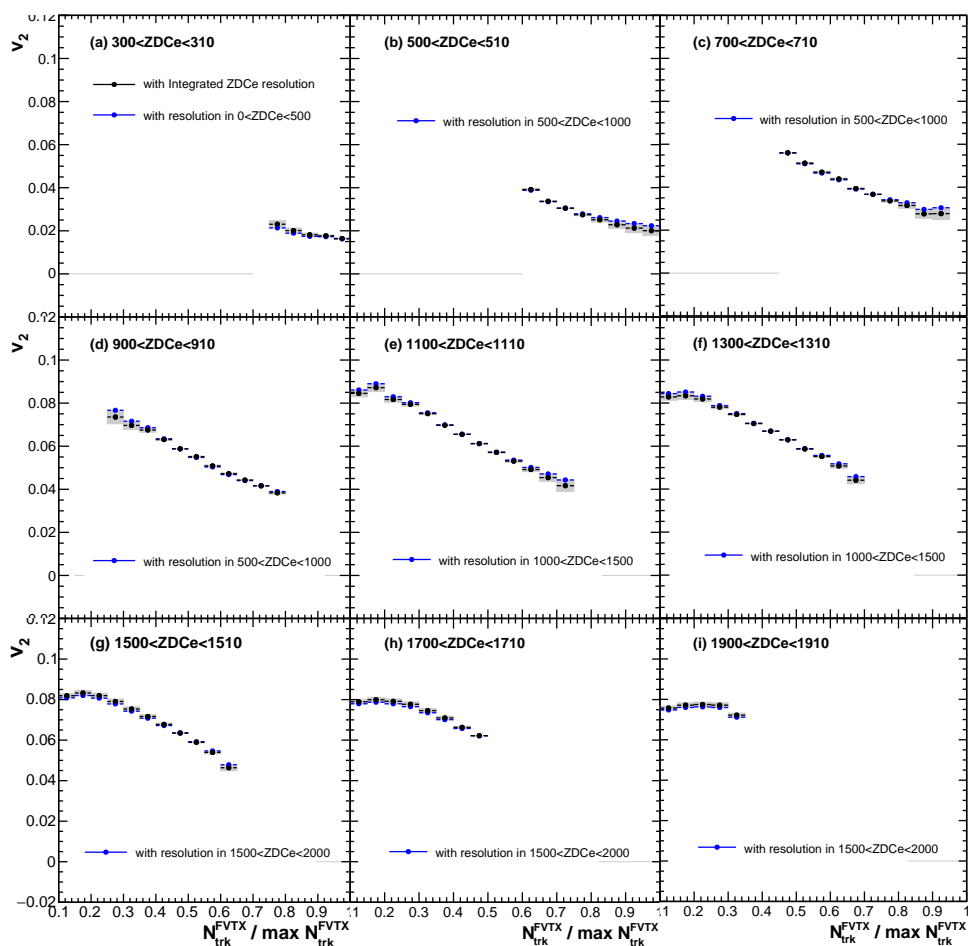


図 3.25  $v_2$  を補正する補正係数の ZDC 依存による、 $v_2$  の  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存性の差

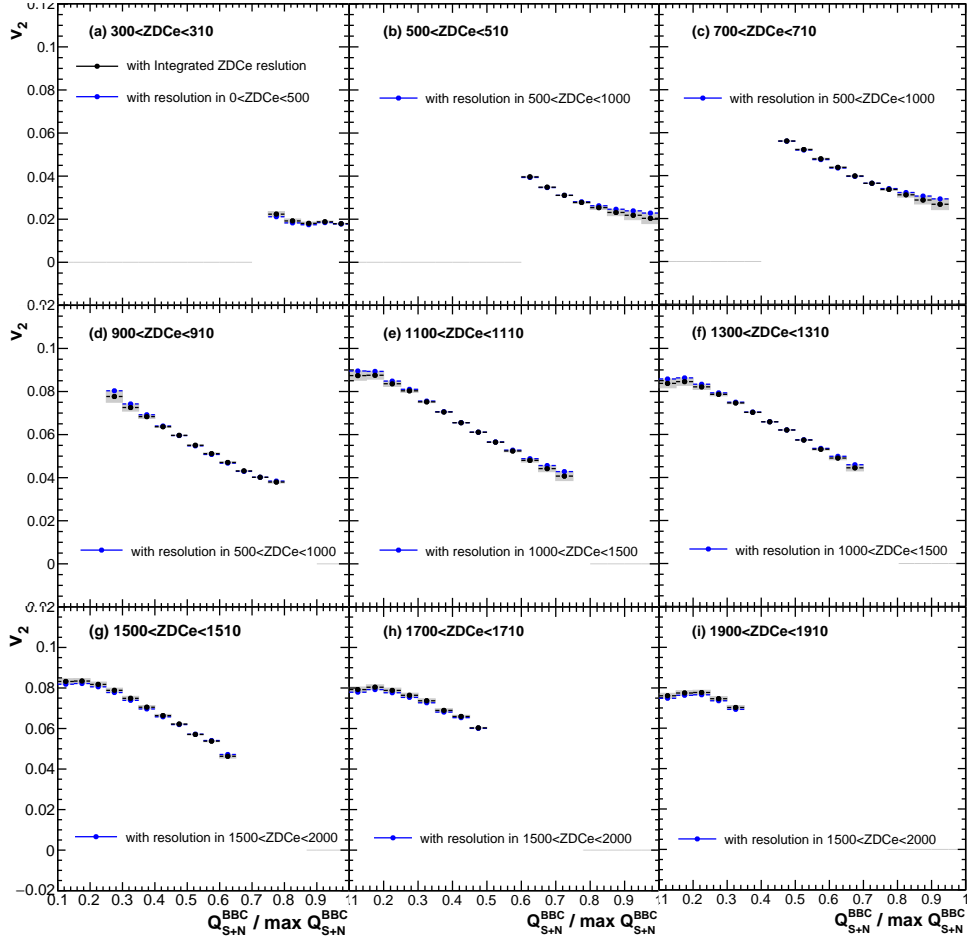


図 3.26  $v_2$  を補正する補正係数の ZDC 依存による、 $v_2$  の  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存性の差

### 系統誤差のまとめ

これまでに記した手順で見積もった系統誤差を以下の表 3.1 から表 3.4 に示す。全体の系統誤差はこれらの項目が互いに独立であると考え、二乗和の平方根を取った。

表 3.1 系統誤差

項目	系統誤差 [%]					
	Integrated ZDCe		300<ZDCe<310		500<ZDCe<510	
ZDCe Class	$N_{tracks}^{FVTX}$ 依存	$Q_{S+N}^{BBC}$ 依存	$N_{tracks}^{FVTX}$ 依存	$Q_{S+N}^{BBC}$ 依存	$N_{tracks}^{FVTX}$ 依存	$Q_{S+N}^{BBC}$ 依存
Run による違い	1.6	0.8	5.7	4.7	2.0	2.5
$v_2$ を測定する反応平面による違い	3.2	3.2	3.2	3.5	4.8	3.2
$v_2$ を測定する検出器の違い	2.1	2.2	2.9	2.4	1.8	2.1
$v_2$ の補正係数の違い	なし	なし	4.2	3.3	4.5	4.2
合計	4.4	4.0	8.7	7.8	8.0	7.5

表 3.2 系統誤差

項目	系統誤差 [%]					
	700<ZDCe<710		900<ZDCe<910		1100<ZDCe<1110	
ZDCe Class	$N_{tracks}^{FVTX}$ 依存	$Q_{S+N}^{BBC}$ 依存	$N_{tracks}^{FVTX}$ 依存	$Q_{S+N}^{BBC}$ 依存	$N_{tracks}^{FVTX}$ 依存	$Q_{S+N}^{BBC}$ 依存
Run による違い	1.2	1.3	1.2	1.2	1.6	1.3
$v_2$ を測定する反応平面による違い	4.0	4.5	3.8	4.0	4.1	3.9
$v_2$ を測定する検出器の違い	1.8	2.4	2.5	2.3	3.5	3.1
$v_2$ の補正係数の違い	2.6	2.3	1.3	1.0	1.5	1.3
合計	6.0	6.5	5.1	5.1	6.2	5.7

表 3.3 系統誤差

項目	系統誤差 [%]					
	1300<ZDCe<1310		1500<ZDCe<1510		1700<ZDCe<1710	
ZDCe Class	$N_{tracks}^{FVTX}$ 依存	$Q_{S+N}^{BBC}$ 依存	$N_{tracks}^{FVTX}$ 依存	$Q_{S+N}^{BBC}$ 依存	$N_{tracks}^{FVTX}$ 依存	$Q_{S+N}^{BBC}$ 依存
Run による違い	1.5	1.2	2.1	1.2	1.9	1.0
$v_2$ を測定する反応平面による違い	3.6	3.4	3.2	3.7	3.1	3.6
$v_2$ を測定する検出器の違い	3.0	2.8	2.4	2.2	2.2	2.7
$v_2$ の補正係数の違い	1.1	1.0	2.2	1.6	2.3	1.8
合計	5.5	5.0	5.5	5.0	5.5	5.3

表 3.4 系統誤差

項目	系統誤差 [%]	
	1900<ZDCe<1910	
ZDCe Class	$N_{tracks}^{FVTX}$ 依存	$Q_{S+N}^{BBC}$ 依存
Run による違い	8.4	4.9
$v_2$ を測定する反応平面による違い	4.8	3.9
$v_2$ を測定する検出器の違い	2.5	1.4
$v_2$ の補正係数の違い	3.0	2.2
合計	11.0	7.2



## 第 4 章

# 解析結果と考察

本章では  $v_2$  の測定結果について述べ、議論する。本研究では、ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) による分類を用いて  $v_2$  の測定を行なった。ZDCe のクラス分けは以下の通りである。ZDCe は反応に関与しなかった中性子の数に比例する量であるから、ZDCe が小さい値が中心衝突に相当し、大きい値が周辺衝突に相当する。また、ZDCe による選択を行わない場合も解析しており、その場合のクラスを Integrated ZDCe と呼ぶ。

- $300 < \text{ZDCe} < 310$
- $700 < \text{ZDCe} < 710$
- $900 < \text{ZDCe} < 910$
- $1100 < \text{ZDCe} < 1110$
- $1300 < \text{ZDCe} < 1310$
- $1500 < \text{ZDCe} < 1510$
- $1700 < \text{ZDCe} < 1710$
- $1900 < \text{ZDCe} < 1910$
- Integrated ZDCe

また、本研究は FVTX で測定したトラック数  $N_{tracks}^{FVTX}$  と BBC で測定した電荷総数  $Q_{S+N}^{BBC}$  に依存する  $v_2$  の値を比較することを目的としている。そのため、 $N_{tracks}^{FVTX}$  と  $Q_{S+N}^{BBC}$  をそれらの最大値でスケールして  $v_2$  の値を直接比較できる様にしている。 $N_{tracks}^{FVTX}$  の最大値を 600、 $Q_{S+N}^{BBC}$  の最大値を 1705 とし、それらの値で  $N_{tracks}^{FVTX}$  と  $Q_{S+N}^{BBC}$  をそれぞれスケールした。その時の ZDCe と  $N_{tracks}^{FVTX} / \max N_{tracks}^{FVTX}$ 、ZDCe と  $Q_{S+N}^{BBC} / \max Q_{S+N}^{BBC}$  の分布の平均値と Y 軸方向の RMS をプロットしたのが図 4.1 である。分布が同じであるから、横軸のスケールは正しく行っていると判断し、以下で述べる結果では、以上の方法でスケールした  $N_{tracks}^{FVTX}$  と  $Q_{S+N}^{BBC}$  を横軸に用いた。

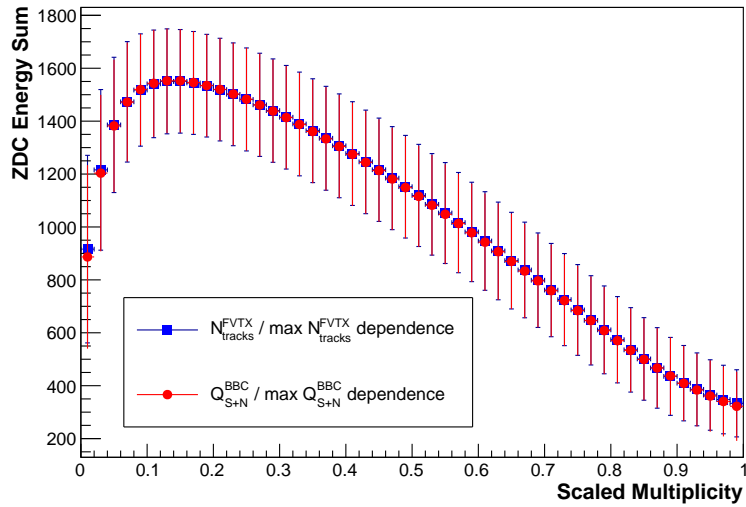


図 4.1 ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) とスケーリング後の  $N_{tracks}^{FVTX}$  と  $Q_{S+N}^{BBC}$  の分布の平均値。誤差棒はその X ビンで Y 軸方向に射影した時の分布の RMS を表している。

#### 4.1 Integrated ZDCe の $v_2$

図 4.3 と図 4.2 は Integrated ZDCe の  $v_2$  の測定結果である。図 4.2 が  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存性、図 4.3 が  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存性を表している。どちらの結果も粒子多重度が大きくなるにつれて  $v_2$  が減少しており、この結果は  $v_2$  を中心衝突度の関数として測定した先行研究の結果と矛盾しない。

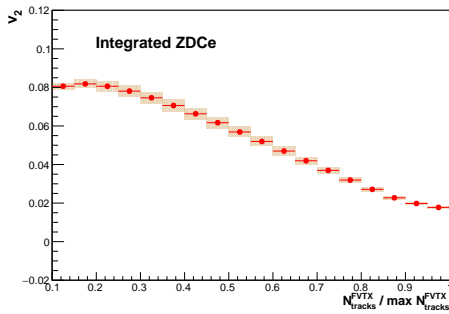


図 4.2 Integrated ZDCe の  $v_2$  の  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存性

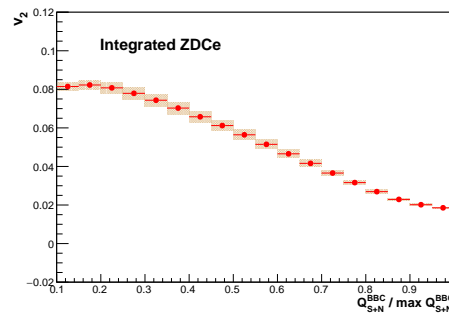


図 4.3 Integrated ZDCe の  $v_2$  の  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存性

## 4.2 $v_2$ vs. $N_{tracks}^{FVTX}$ と $v_2$ vs. $Q_{S+N}^{BBC}$

$N_{tracks}^{FVTX}$  に依存する  $v_2$  の測定結果が図 4.4、 $Q_{S+N}^{BBC}$  に依存する  $v_2$  の測定結果が図 4.5 である。青のマークが ZDCe によるイベント選択を行なった場合、赤のマークが Integrated ZDCe の  $v_2$  である。それぞれの ZDCe のクラスで求めた  $v_2$  を Integrated ZDCe の  $v_2$  と比較している。図 4.4 と図 4.5 の結果から、ZDCe による分類を行なった場合も Integrated ZDCe の  $v_2$  と同様に、粒子多重度が大きくなるに従って  $v_2$  も小さくなることがわかった。

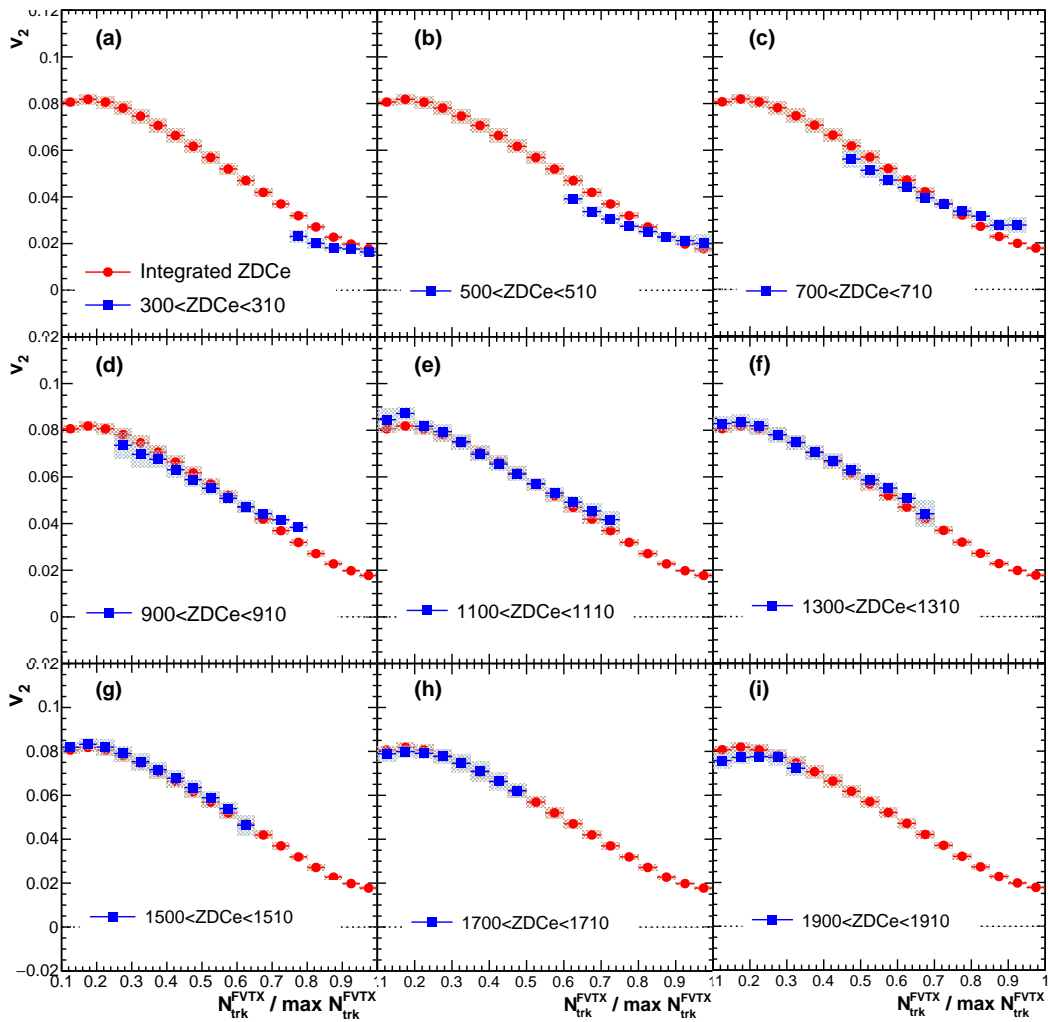


図 4.4 ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) によるイベント選択を用いた場合と Integrated ZDCe の  $v_2$  の  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存性の比較。左上のパネルから右下に向かって、ZDCe のイベントカットは中心衝突から周辺衝突を意味している。

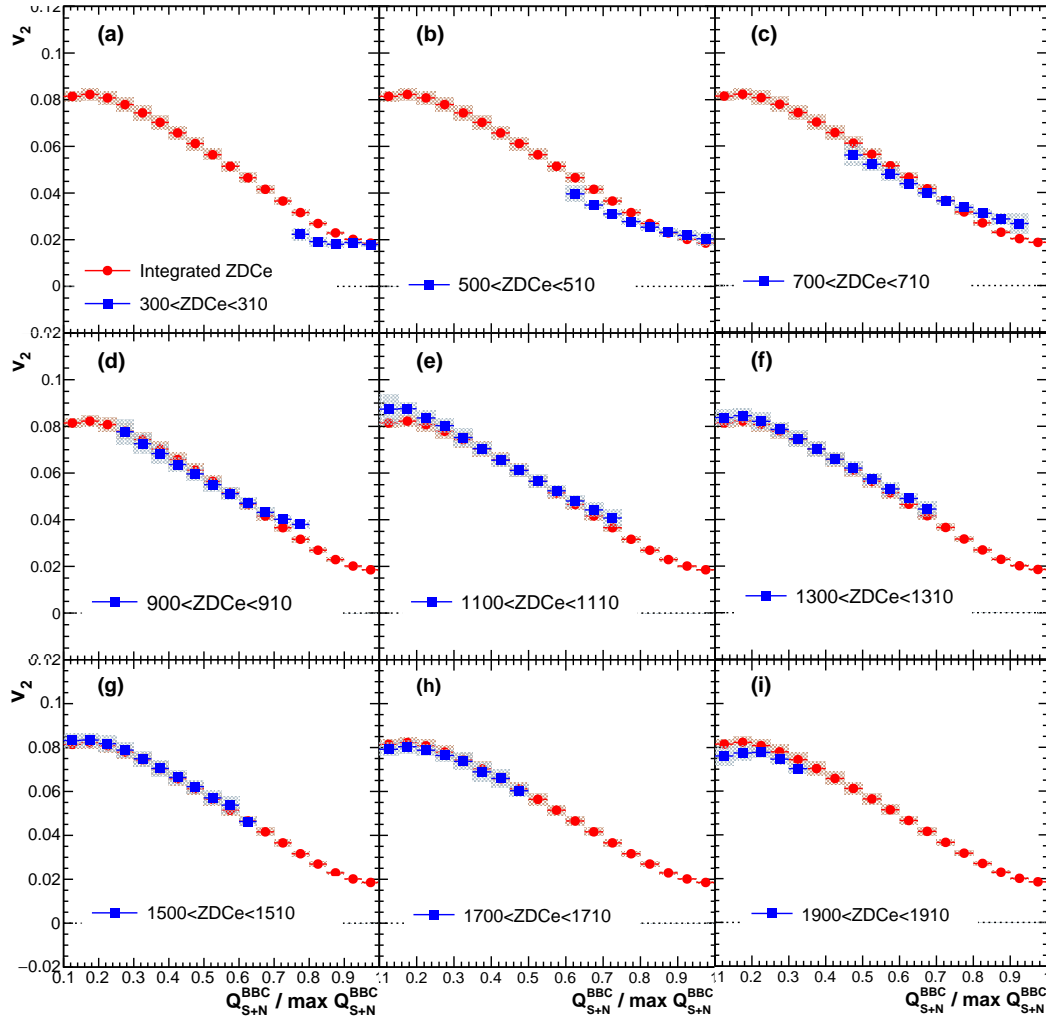


図 4.5 ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) によるイベント選択を用いた場合と Integrated ZDCe の  $v_2$  の  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存性の比較。左上のパネルから右下に向かって、ZDCe のイベントカットは中心衝突から周辺衝突を意味している。

また、ZDCe の値が小さいクラス (中心衝突) では  $N_{tracks}^{FVTX}$  ( $Q_{S+N}^{BBC}$ ) が大きいところで Integrated ZDCe の  $v_2$  より  $v_2$  が大きくなり、 $N_{tracks}^{FVTX}$  ( $Q_{S+N}^{BBC}$ ) が小さいところで Integrated ZDCe の  $v_2$  より  $v_2$  が小さくなる。(図 4.4(a),(b),(c),(d) と図 4.5(a),(b),(c),(d)) 一方で ZDCe の値が大きいクラス (周辺衝突) では、ZDCe による分類を用いて測定した  $v_2$  と Integrated ZDCe の  $v_2$  に差がないことがわかる。(図 4.4(e),(f),(g),(h),(i) と図 4.5(e),(f),(g),(h),(i)) Integrated ZDCe の  $v_2$  と ZDCe による分類を用いて測定した  $v_2$  との違いについて次に述べる。

### 4.3 Integrated ZDCe の $v_2$ と ZDCe による分類を行なった $v_2$ の比較

図 4.6 は ZDCe クラス毎の  $v_2$  の比較で、左のパネルは  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存、右のパネルは  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存である。下のグラフは、それぞれの ZDCe クラスの  $v_2$  の値と Integrated ZDCe の  $v_2$  の値の比をプロットしたものである。 $N_{tracks}^{FVTX}$  依存、 $Q_{S+N}^{BBC}$  依存のどちらにおいても粒子多重度が大きいところでは ZDCe のクラス分けによって  $v_2$  の値に差があり、Integrated ZDCe と比べてその差は最大で約 1.4 倍であることがわかる。

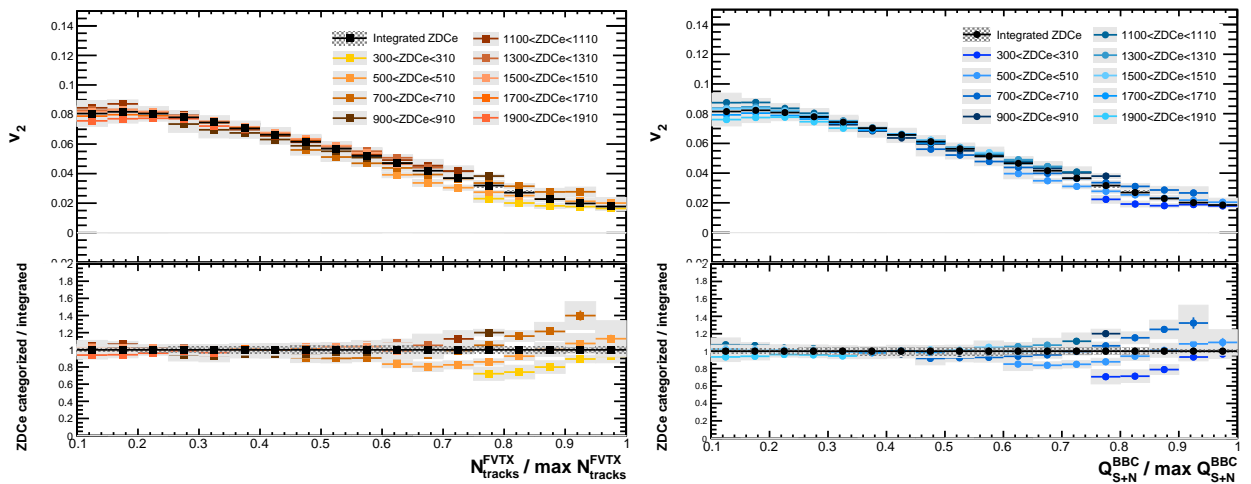


図 4.6 ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) のクラス分けによる  $v_2$  の違い。下のパネルは ZDCe によるイベント選択を行わなかった場合の  $v_2$  との比。左:  $N_{tracks}^{FVTX}$  依存 右:  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存 系統誤差はボックス、統計誤差はバーで表されている。

この結果から、同じ粒子多重度のイベントでも楕円率が違うということを表していると考えられる。図 4.7 はその解釈をイラストで示したものである。衝突初期にあった反応領域の形の異方性が、反応領域内部の圧力勾配に従い時間発展した結果、粒子の方位角分布位異方性が生まれ、その異方性の強度を表す値が  $v_2$  である。従って  $v_2$  が大きいということは反応領域の形がよりアーモンド型に近く、 $v_2$  が小さいということは反応領域の形はより丸型に近いということである。 $v_2$  の中心衝突度依存性や、中心衝突度でクラス分けした  $v_2$  の横運動量依存性は先行研究で既に測定されている。中心衝突度は粒子多重度のみで決定されているので、粒子多重度が同じイベントについてさらに詳しくクラス分けを行い  $v_2$  を測定した前例はない。本研究の結果は粒子多重度が同じイベントの中でも ZDCe の値によって楕円率に違いがある可能性を示す結果である。ただしその差は僅かであるため、より詳細な調査が必要である。また、粒子多重度が同じで ZDCe の値が違おうと

いうことは、粒子多重度が同じで  $N_{part}$  が違うと言える。図 4.6 の結果も、粒子多重度が同じで  $N_{part}$  が違うイベントがあることを支持している。この理由として、核子の衝突回数の違いなどが考えられる。

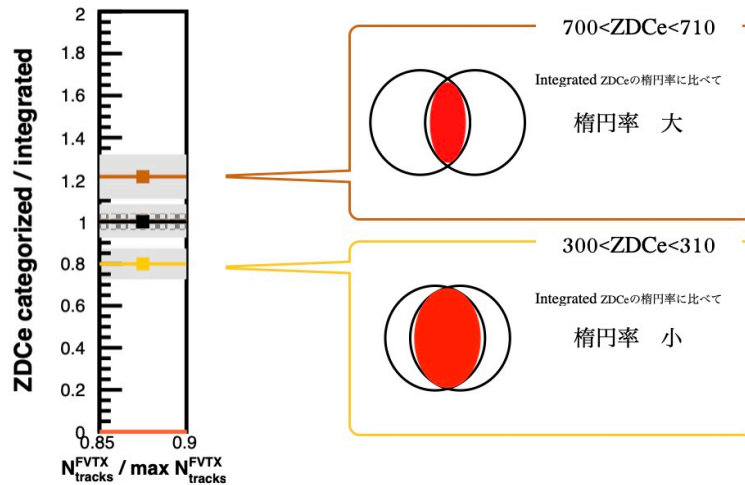


図 4.7 図 4.6 左下のプロットから  $0.85 < N_{tracks}^{FV} / \max N_{tracks}^{FV} < 0.90$  を取り出し、その解釈をイラストで示した図

#### 4.4 $v_2$ vs. $N_{tracks}^{FV}$ と $v_2$ vs. $Q_{S+N}^{BBC}$ の比較

図 4.8 は  $v_2$  の  $N_{tracks}^{FV}$  依存性と  $v_2$  と  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存性の比較である。同じ ZDCe クラスで  $v_2$  の値に粒子多重度を測定する検出器による依存性はなく、値が一致していることがわかる。このことから、 $v_2$  をプローブとしてみた場合、検出器のカバーしているラピディティによる物理の違いはないことがわかった。

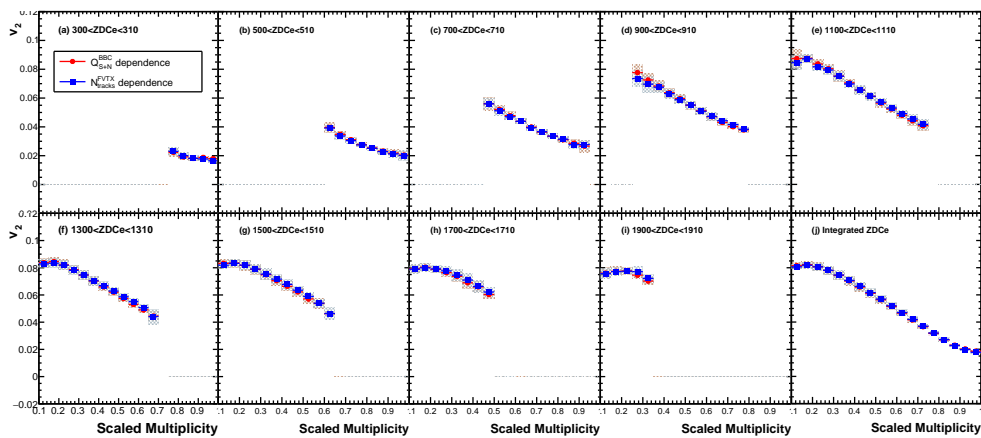


図 4.8  $v_2$  の  $N_{tracks}^{FV}$  と  $Q_{S+N}^{BBC}$  依存性の比較

## 第 5 章

### まとめ

本研究では、RHIC-PHENIX 実験において収集された 2014 年の重心衝突エネルギー  $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$  の Au+Au 衝突のデータを用いて、ZDC で測定したエネルギー (ZDCe) でイベントを分類し、方位角異方性の強度を表すパラメータである  $v_2$  を、FVTX で測定したトラック数 ( $N_{tracks}^{FVTX}$ ) と BBC で測定された電荷総数 ( $Q_{S+N}^{BBC}$ ) の関数として求めた。その結果、ZDCe でイベントの分類を行なった場合と、行わなかった場合 (Integrated ZDC) の  $v_2$  はどちらも同様の傾向を示し、粒子多重度が多くなるにつれて  $v_2$  は減少した。また、ZDCe でイベントの分類を行なった場合の  $v_2$  と Integrated ZDCe の  $v_2$  の比を求めた結果、粒子多重度が大きいところでその比が最大 1.4 倍になることがわかった。この結果は、同じ粒子多重度のイベントでも、衝突初期の反応領域の形の異方性を表す楕円率が違うことを示していると考えられる。先行研究では、 $v_2$  は粒子多重度の値で決定される中心衝突度の関数として測定されており、粒子多重度の違いが同じイベントの中で ZDCe の値によって  $v_2$  の違いがあることを測定したのは本研究が初めてである。ただしこの差は小さいため、これによる物理現象の違いについて議論するにはさらなる調査が必要である。また、ZDCe のクラス毎に  $N_{tracks}^{FVTX}$  に依存する  $v_2$  と  $Q_{S+N}^{BBC}$  に依存する  $v_2$  の値を比較した結果、誤差の範囲で違いがないことがわかった。このことから、粒子多重度を測定する検出器がカバーするラピディティによる  $v_2$  の依存性はないことがわかった。

## 参考文献

- [1] 秋葉康之 『クォーク・グルーオン・プラズマの物理』 共立出版.
- [2] 池田侑加さん (奈良女子大学 高エネルギー物理学研究室) .
- [3] K. Adcox *et al.* (PHENIX Collaboration) Phys. Rev. Lett. 88, 022301 (2001).
- [4] S. Chatrchyan *et al.*(CMS Collaboration) Phys. Lett. B 719, 29 (2013).
- [5] S. Chatrchyan *et al.*(CMS Collaboration) JHEP 1107 (2011) 076.
- [6] V. Khachatryan *et al.*(CMS Collaboration) Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 172302.
- [7] A. Adare *et al.*(PHENIX Collaboration) Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 192301.
- [8] L. Adamczyk *et al.*(STAR Collaboration) Phys. Lett. B 747 (2015) 265.
- [9] A. Adare *et al.*(PHENIX Collaboration) Phys. Rev. Lett. 115 (2015).
- [10] W. Li, Mod. Phys. Lett. A 27 (2012).
- [11] Khachatryan *et al.*(CMS Collaboration) Phys. Lett. B 765 (2017).
- [12] M. Allen *et al.*(PHENIX Collaboration) Phys. Research. A 499 (2003) 549–559.
- [13] PHENIX 検出器, <https://www.phenix.bnl.gov/phenix/WWW/intro/detectors/index.html>
- [14] A. Adare *et al.*(PHENIX Collaboration), Phys. Rev. C 93, 034904 (2016).
- [15] C. Aidala *et al.*, Phys. Research. A 755 (2014) 44-61.
- [16] Zero Degree Calorimeter について, <https://www.phenix.bnl.gov/swhite/zcal/>
- [17] A. Adare *et al.*(PHENIX Collaboration), Phys. Rev. C 92 034913 (2015).
- [18] 武田明莉さんの修士論文 (奈良女子大学 高エネルギー物理学研究室) .