

2020 年度 卒業論文

重イオン衝突実験における
Multi-Parton Interaction の測定

奈良女子大学 理学部
物理科学科 高エネルギー物理学研究室

高濱 瑠菜

2021 年 3 月 25 日

概要

2000年から2016年の間に、米国のRHIC加速器を用いたPHENIX実験では重イオン衝突実験が行われた。重イオン衝突実験（高エネルギー原子核衝突実験）は、Auなどの重い原子核同士を衝突させることにより、瞬間的にクォークとグルーオンが核子内に閉じ込められていない高温・高密度状態（QGP）を作り出すための実験である。このQGP状態は、ビッグバン直後の宇宙の状態を再現することができていると考えられている。QGPは重イオン衝突の場合にしかできていないと考えられていたが、最近の研究でd+AuやHe + Auなどの小さい系の衝突でも、衝突により発生した粒子数が多いイベントだけを取り出してみると、QGPができた時と同じような振る舞いが見えるという結果が報告されている。これを説明する考え方としてMPI(Multi-Parton Interaction)という現象が考えられている。MPIとはハドロン・ハドロン衝突の際にハドロンの中のパートン同士の多重衝突による相互作用のことで、パートンが多く衝突している時にQGPの様なものができていると考えられている。このMPIが起きていることを重イオン衝突実験で確認することが本研究のモチベーションである。

本研究では2014年にPHENIX実験で収集された重心衝突エネルギー200GeVの金原子核同士の衝突によって得られたデータを用いて、反応に関与した核子数(N_{part})が同じくらいのイベントを選び、方位角異方性パラメータ v_2 と衝突により発生・放出された粒子数(multiplicity)との相関を調べた。 N_{part} が同じで衝突したパートン数が違うイベントを比べると考えた時、多くパートンが衝突しているイベントの方がmultiplicityは大きく、また v_2 も大きいと考えている。そのため v_2 とmultiplicityの相関を調べることでMPIが起きているかを確認することができ、 N_{part} が同じイベントでmultiplicityの違いがMPIによって起きているならば、 v_2 とmultiplicityは正の相関を持つと考えている。

N_{part} が同じくらいのイベントを選び v_2 とmultiplicityの相関を調べた結果、 v_2 とmultiplicityには負の相関があることがわかった。また、 N_{part} が1400から1500で v_2 の減少が緩やかになることがわかった。これはMPIの効果を示している可能性があり、確認するためには更なる調査が必要である。

目次

第 1 章	序章	5
1.1	クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)	5
1.2	高エネルギー重イオン衝突実験	6
1.3	使用する物理量の定義	6
1.3.1	横運動量	6
1.3.2	セントラリティ	7
1.3.3	エキセントリシティ	7
1.3.4	反応平面	8
1.3.5	方位角異方性パラメータ： v_2	9
1.4	Multi-Parton Interaction	9
1.5	研究目的・特色	10
第 2 章	RHIC-PHENIX 実験	11
2.1	The Relativistic Heavy Ion Collider	11
2.2	PHENIX 実験	12
2.2.1	PHENIX 検出器	12
2.2.2	Central Arm (CNT)	13
	Drift Chamber (DC)	13
	Pad Chamber (PC)	14
	Electromagnetic Calorimeter (EMCal)	14
2.2.3	Global Detector	14
	Beam Beam Counter (BBC)	14
	Zero Degree Calorimeter (ZDC)	15
第 3 章	物理解析	16
3.1	v_2 と multiplicity の相関と MPI の関係	16
3.1.1	multiplicity と MPI の関係	16
3.1.2	v_2 と MPI の関係	16
3.1.3	v_2 と multiplicity の関係	17

3.2	解析方法	18
3.2.1	反応平面法	18
3.2.2	反応平面の分解能	19
3.2.3	double collision の影響	22
3.2.4	ZDCe の区切り方	22
3.2.5	シグナル抽出	24
3.3	イベント選択	24
3.4	トラック選択	24
第 4 章	結果・考察	26
4.1	v_2 と BBCq の相関	26
4.1.1	測定結果	27
4.1.2	v_2 の補正係数による違い	28
第 5 章	まとめ	30
付録 A	補正前の v_2 vs. BBCq	32
付録 B	補正後の v_2 vs. BBCq	34
	参考文献	36

目次

1.1	宇宙の歴史 [1]	5
1.2	高エネルギー原子核衝突のイメージ図	6
1.3	インパクトパラメータの定義	7
1.4	インパクトパラメータと原子核の重なり度合いの関係	8
1.5	原子核の重なり方とセントラリティの関係	8
1.6	反応平面	9
1.7	MPI のイメージ図	10
2.1	RHIC Complex [3]	12
2.2	PHENIX Detector Overview 上:ビーム軸から垂直な方向にみた PHENIX 検出器下:ビーム軸から平行な方向にみた PHENIX 検出器	13
2.3	Drift Chamber の写真 [4]	14
2.4	左:BBC 検出器の全体像 右:BBC を構成するチェレンコフ検出器 [5]	15
3.1	ε の値が同じくらいの Au+Au 衝突と Cu+Cu 衝突の v_2 の比較 [6]	17
3.2	N_{part} が同程度のイベントで衝突したパートン数の違いによる MPI の大小について	17
3.3	ZDCe と BBCq の相関	18
3.4	BBC 検出器による反応平面の分解能と centrality の関係 [7]	20
3.5	BBC 検出器による反応平面の分解能と BBCq の関係	20
3.6	double collision が起きたときの resolution と multiplicity の関係	21
3.7	BBCq と centrality の関係	21
3.8	ZDCe と BBCq の関係から見える double collision イベント	22
3.9	ZDCe でクラス分けした場合	23
3.10	ZDCe=500 と $500 < ZDCe < 510$ の時の v_2 の比較	24
3.11	ZDCe=700 と $700 < ZDCe < 710$ の時の v_2 の比較	24
3.12	ZDCe=1300 と $1300 < ZDCe < 1310$ の時の v_2 の比較	24
3.13	ZDCe=1700 と $1700 < ZDCe < 1710$ の時の v_2 の比較	24
3.14	quality 変数について	25
3.15	DC の wire の張り方と名前	25

4.1	ZDCe を区切らない時の v_2 と BBCq の関係	26
4.2	500<ZDCe<510 の時の v_2 と BBCq の関係	27
4.3	700<ZDCe<710 の時の v_2 と BBCq の関係	27
4.4	900<ZDCe<910 の時の v_2 と BBCq の関係	27
4.5	1700<ZDCe<1710 の時の v_2 と BBCq の関係	27
4.6	ZDCe で区切った時の v_2 の補正係数	28
4.7	500<ZDCe<510 の時の補正係数の違いによる v_2 の比較	29
4.8	700<ZDCe<710 の時の補正係数の違いによる v_2 の比較	29
4.9	900<ZDCe<910 の時の補正係数の違いによる v_2 の比較	29
4.10	1700<ZDCe<1710 の時の補正係数の違いによる v_2 の比較	29
A.1	100<ZDCe<110 の時の v_2	32
A.2	300<ZDCe<310 の時の v_2	32
A.3	500<ZDCe<510 の時の v_2	32
A.4	700<ZDCe<710 の時の v_2	32
A.5	900<ZDCe<910 の時の v_2	32
A.6	1100<ZDCe<1110 の時の v_2	32
A.7	1300<ZDCe<1310 の時の v_2	33
A.8	1500<ZDCe<1510 の時の v_2	33
A.9	1700<ZDCe<1710 の時の v_2	33
A.10	1900<ZDCe<1910 の時の v_2	33
B.1	500<ZDCe<510 の時の v_2	34
B.2	700<ZDCe<710 の時の v_2	34
B.3	900<ZDCe<910 の時の v_2	34
B.4	1100<ZDCe<1110 の時の v_2	34
B.5	1300<ZDCe<1310 の時の v_2	34
B.6	1500<ZDCe<1510 の時の v_2	34
B.7	1700<ZDCe<1710 の時の v_2	35
B.8	1900<ZDCe<1910 の時の v_2 の比較	35

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) とはクォークとグルーオンが核子内に閉じ込められていない状態のことである。図 1.1 はビッグバン後の宇宙の発展を表している。この図で示されるように、QGP はビッグバン直後の数 10 マイクロ秒後の宇宙と同じであると考えられている。その後、宇宙が冷えてクォークやグルーオンは陽子や中性子を構成し、現在の宇宙が出来上がったと考えられている。この逆の過程を辿ることで、つまり高温・高密度状態を作り出すことで、QGP を再現できると考えられ、これを可能にしたのが後述の高エネルギー重イオン衝突実験である。その温度と密度はそれぞれ約 170MeV と約 $1\text{GeV}/\text{fm}^3$ であると考えられている。

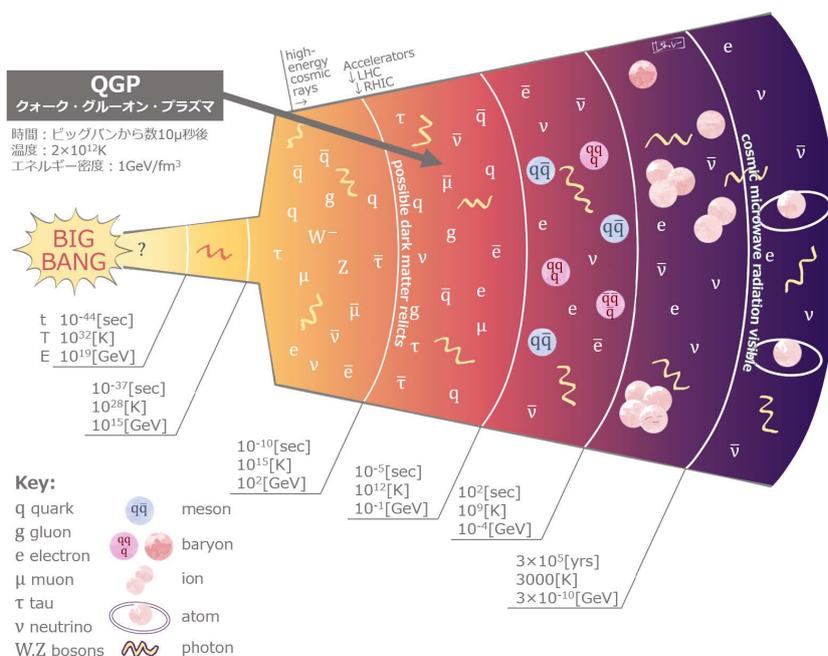


図 1.1 宇宙の歴史 [1]

1.2 高エネルギー重イオン衝突実験

高エネルギー重イオン衝突実験とは、加速器を用いて原子核同士を正面衝突させる実験である。高エネルギー衝突実験は実験室で QGP を生成するために考え出された実験で、図 1.2 のように重い原子核同士をぶつけることにより、短時間だけ微小空間に高温状態を生み出すことができる。QGP を実験室で作出すことにより、初期宇宙の発展の謎の解明への貢献が期待されている。現在、重イオン衝突実験（高エネルギー原子核衝突実験）を行っている加速器は、アメリカ合衆国にあるブルックヘブン国立研究所 (BNL) の Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) と、スイスにある欧州原子核研究機構 (CERN) の Large Hadron Collider (LHC) の 2 つの加速器である。このうち、史上初めて QGP の存在が実験的に確認されたのは RHIC 加速器での実験である。本研究で用いるのは、RHIC 加速器を用いて行われた PHENIX 実験のデータである。

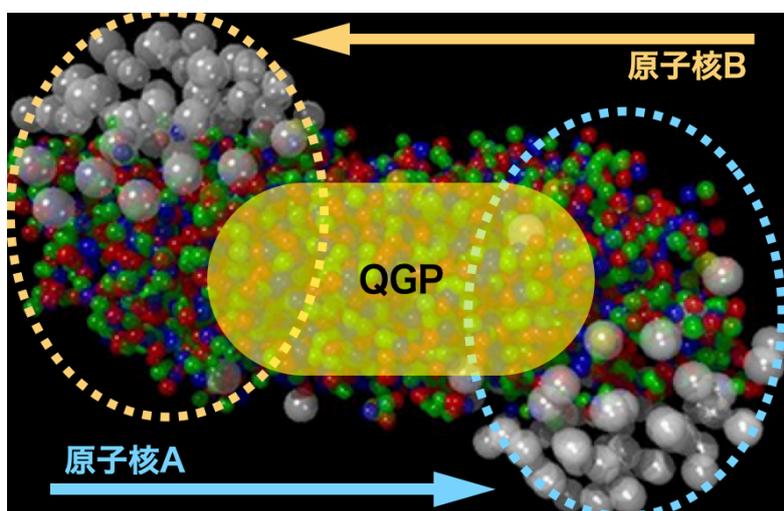


図 1.2 高エネルギー原子核衝突のイメージ図

1.3 使用する物理量の定義

1.3.1 横運動量

横運動量とは、ビーム軸に対して垂直方向の成分の運動量のこと、 p_T と呼ぶ。ビーム軸を z 軸として、 x 軸方向・ y 軸方向の運動量を $p_x \cdot p_y$ とすると p_t は式 1.1 のように表される。

$$p_t = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (1.1)$$

横運動量はローレンツ不変である。また、ビーム軸方向の運動量を持たないため、横運動量を用いることで衝突によって発生する運動量だけに焦点を当てることができる。

1.3.2 セントラリティ

セントラリティ（中心衝突度）とは、衝突する2つの原子核の重なり度を表す量である。図 1.3 で示すように、2つの原子核の中心が通る軌道間の距離をインパクトパラメータ b 、原子核の半径を R とすると、 $b=0$ の時セントラリティ 0 %、 $b=2R$ の時セントラリティ 100 %となる。つまり、図 1.4、図 1.5 で示すように、セントラリティが 0 %に近いほど中心衝突であり、セントラリティが 100 %に近いほど周辺衝突である。実験では衝突により生成された粒子数を BBC 検出器で測定することによりセントラリティを決定しており、粒子生成量が多い上位 5 %のイベントをセントラリティ 0~5 %、次に粒子生成量が多い 5 %のイベントをセントラリティ 5~10 %というようにクラス分けしている。

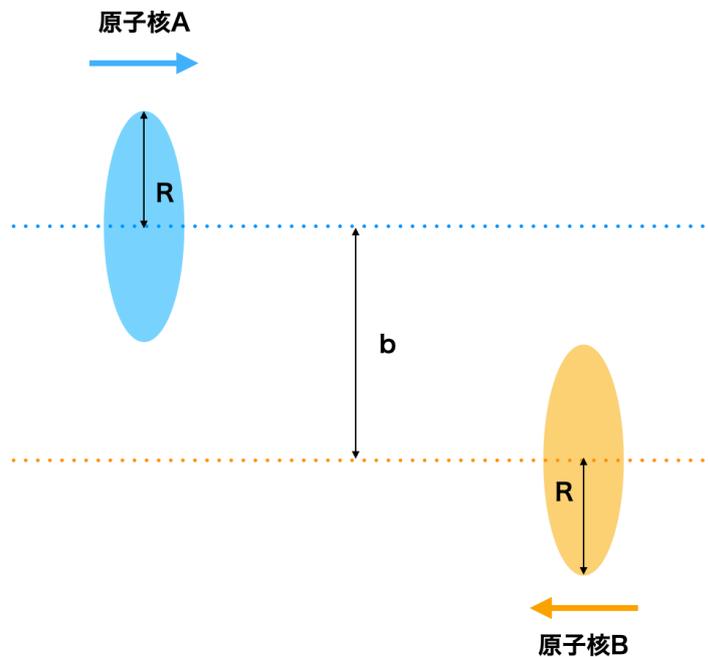


図 1.3 インパクトパラメータの定義

1.3.3 エクセントリシティ

原子核にはある程度の大きさがあるため、インパクトパラメータ b の値によって反応に関与した領域の形が異なる。 $b=0$ の時は反応に関与した領域の形は円形に近く、 b が大きくなるにつれて楕円になる。この様な反応に関与した領域の形が円形からどれだけ離れているかを表す値がエクセントリシティ ε である。 ε の定義は式 (1.2) で表される。式 (1.2) はビーム軸である z 軸に垂直な xy

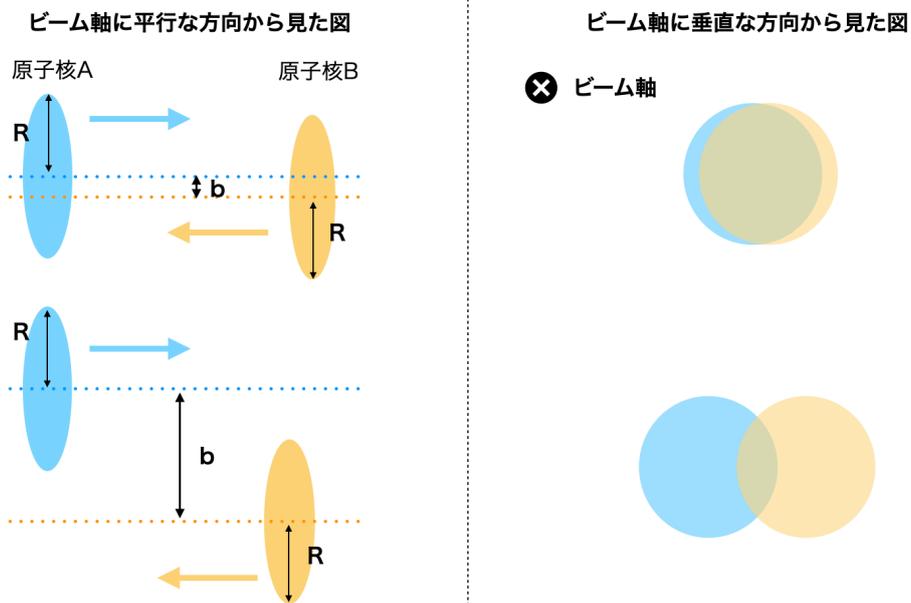


図 1.4 インパクトパラメータと原子核の重なり度合いの関係

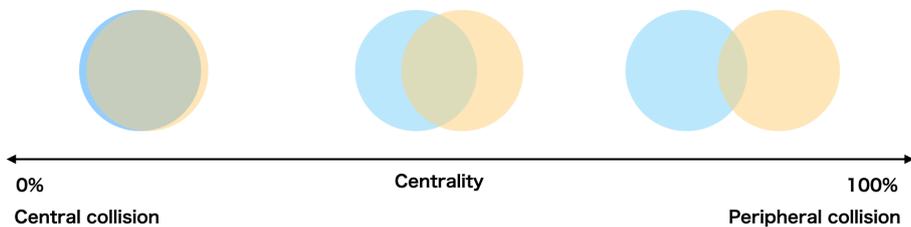


図 1.5 原子核の重なり方とセントラリティの関係

平面上での式で、 y 軸は原子核の中心間を結んだ線の中線を含む軸であり、 x 軸は y 軸に垂直な軸である。

$$\epsilon = \frac{\langle x^2 \rangle - \langle y^2 \rangle}{\langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle} \quad (1.2)$$

1.3.4 反応平面

反応平面とは、図 1.6 で示すように、衝突する原子核同士を中心を結んだ直線と 2 つの原子核のビーム軸を含む平面のことである。発生粒子の方位角分布は反応平面を基準に表される。

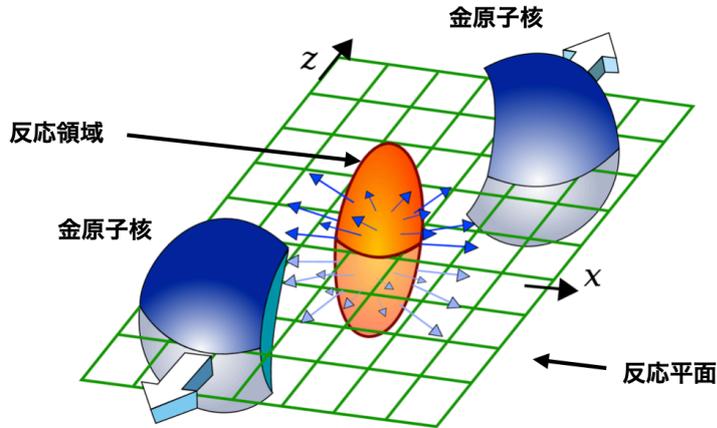


図 1.6 反応平面

1.3.5 方位角異方性パラメータ： v_2

高エネルギー原子核同士の非中心衝突により生成・放出される粒子は方位角方向に一様に分布していない。これを方位角異方性と呼び、QGP 生成を示す主なシグナルの一つである。この方位角異方性の強度を表す値が方位角異方性パラメータ v_2 である。 v_2 は実験室系での放出粒子の方位角 ϕ と、反応平面の方位角 ψ によって決まり

$$v_2 = \langle \cos[2(\phi - \psi)] \rangle \quad (1.3)$$

である。また、衝突で生成・放出され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式は

$$\frac{dN}{d(\phi - \psi)} \propto 1 + 2v_2 \cos[2(\phi - \psi)] \quad (1.4)$$

である。式 (1.4) より v_2 は楕円違法性の強度を表す値である。

1.4 Multi-Parton Interaction

QGP は重イオン衝突実験の時にしか作り出せていないと考えられていたが、最近の研究から小さな衝突系でも衝突によって発生した粒子数 (multiplicity) が多いイベントを取り出して見ると、QGP が生成された時と同じような振る舞いが見えることがわかっている [2]。これを説明する考え方として MPI (Multi-Parton Interaction) が考えられている。図??は MPI のイメージ図である。MPI とは、ハドロン・ハドロン衝突の際にハドロンを構成する粒子 (パートン) 同士の衝突のことである。パートンとはクォークとグルーオンを総称した呼び方である。小さな衝突系においてパー

トン同士の衝突を考えることによって、ハドロンを重イオンと同じ様に高密度な物質とみなすことができる。その高密度なハドロンの内部でパートンが多く衝突しているとき、高温・高密度状態が作りだされ、そこに QGP ができると考えられている。

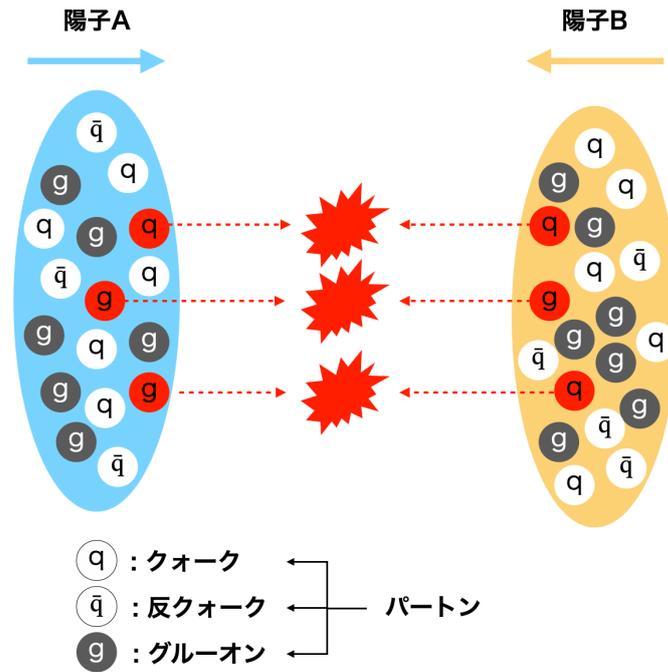


図 1.7 MPI のイメージ図

1.5 研究目的・特色

本研究の目的は、重イオン衝突実験のデータを用いて MPI を観測することである。そのために N_{part} が同じくらいのイベントを選び v_2 と multiplicity の相関を調べた。本研究の特色は、重イオン衝突実験のデータを用いることで MPI の観測に v_2 を導入した点である。

第 2 章

RHIC-PHENIX 実験

2.1 The Relativistic Heavy Ion Collider

The Relativistic Heavy Ion Collider(RHIC) はアメリカ合衆国のブルックヘブン国立研究所に設置されており、世界で初めての重イオン衝突実験を可能にした衝突型加速器である。その目的は主にハドロン相から QGP 相への相転移や、QGP の性質を調べることである。また、RHIC が物理学に対して成す役割は陽子スピンの研究にまで広がっており、スピン変極した陽子を衝突させることにも成功している。図 2.1 は RHIC とその他の補助施設の配置を表している。RHIC では 2 つのリングの中を原子核がほぼ光速で移動し、リングが交差する地点で原子核同士が正面衝突している。リングが交差する地点を衝突点と呼んでおり、RHIC には 6 つの衝突点がある。そのうちの 4 地点では、PHENIX, STAR, PHOBOS, BRAHMS という 4 つの実験・測定器があった。このうち現在も行われているのは STAR 実験のみで、PHENIX は 2016 年、PHOBOS は 2005 年、BRAHMS は 2006 年にデータ収集が終了している。現在、PHENIX 実験をアップグレードした sPHENIX 実験の準備が進んでおり、2023 年の稼働を予定している。RHIC では主に金原子核を加速している。金原子核を使う理由は、金原子核には核子が密に閉じ込められているため、一般に存在する原子の中で最も重たい原子核の一つだからである。RHIC では、陽子や銅などのさまざまな粒子を加速することができ、 $d+Au$ や $Cu + Au$ などの異なる各種同士での加速・衝突も行える。核子対当たり最大の重心系衝突エネルギーは $Au+Au$ 衝突で 200GeV 、 $p+p$ 衝突で 510GeV である。

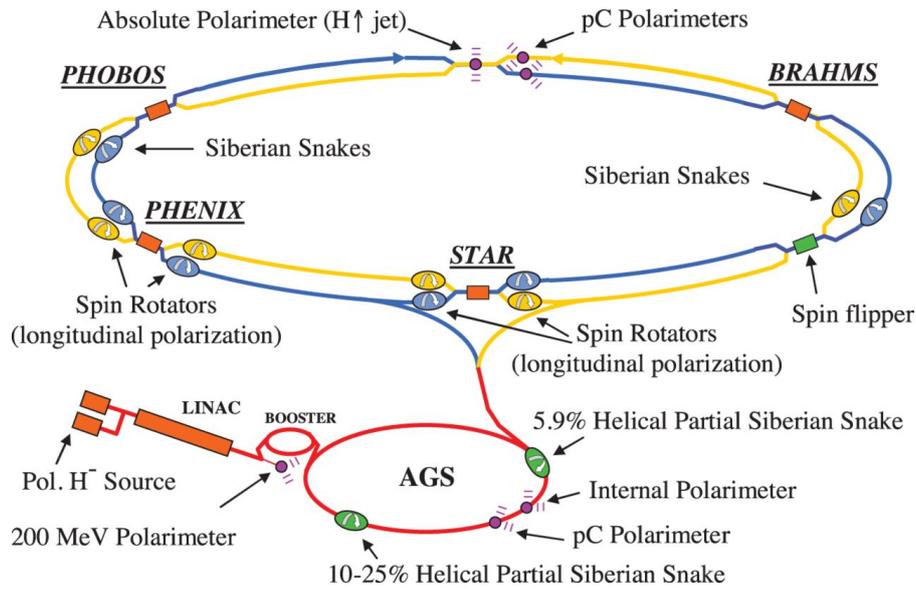


図 2.1 RHIC Complex [3]

2.2 PHENIX 実験

PHENIX 実験 (the Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment) は STAR 実験と並ぶ RHIC での 2 大主要実験の一つである。PHENIX 実験のコンセプトは主に 2 つある。1 つ目は QGP の性質の解明、2 つ目は高温・高密度な状態の下での物質の振る舞いを調べ、QCD 相の構造を理解することである。

2.2.1 PHENIX 検出器

PHENIX 検出器は p+p 衝突から A+A 衝突までの幅広い研究が行えるように、電子、 μ 粒子、光子、ハドロンなどの衝突のプローブを直接測定することに特化してデザインされている。PHENIX 検出器は大きく分けて Central Arm Detector、Muon Arm Detector、Global Detector、Magnet の 4 つに分かれている。Muon Arm Detector は μ 粒子を測定することを目的にビーム軸の前方と後方に一つずつ設置されている。Magnet は荷電粒子の軌跡を曲げるために設置されており、PHENIX には Central Magnet、South Muon Magnet、North Muon Magnet の 3 つの Magnet で構成されている。図 2.2 は PHENIX 検出器の全体像である。

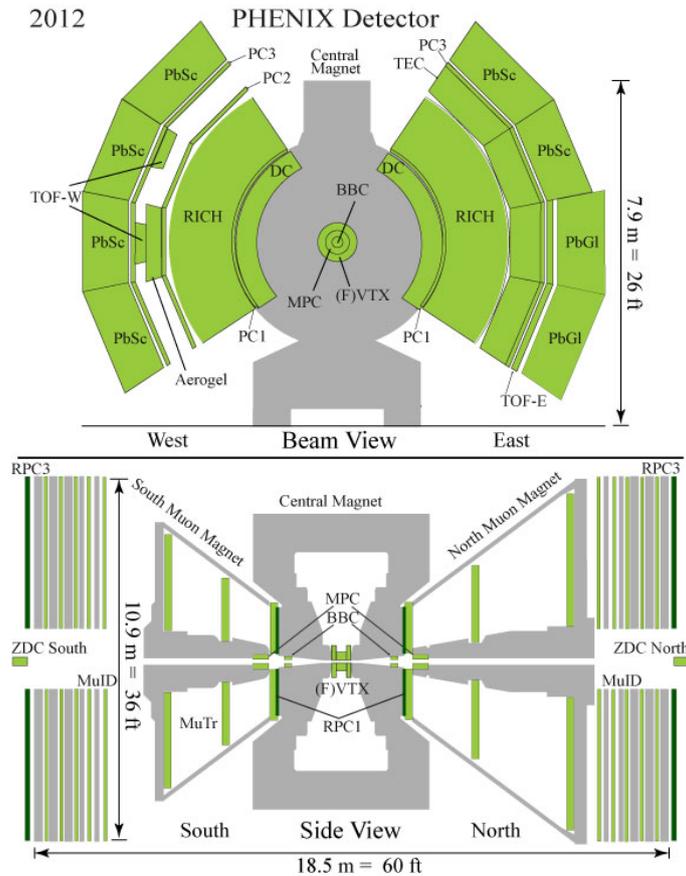


図 2.2 PHENIX Detector Overview 上：ビーム軸から垂直な方向にみた PHENIX 検出器
下：ビーム軸から平行な方向にみた PHENIX 検出器

2.2.2 Central Arm (CNT)

Central Arm Detector(CNT) はビーム軸を挟んで東西に設置されており、東側を East Arm、西側を West Arm と呼んでいる。CNT は飛跡検出器や EMCal と呼ばれる電磁カロリメーターによって構成されている。飛跡検出器では衝突によって生成された粒子の荷電粒子の飛跡を再構成するだけでなく、運動量や粒子の種類を識別する役割を担っている。

Drift Chamber (DC)

Drift Chamber(DC) は CNT の主な飛跡検出器であり、図 2.3 は DC の写真である。DC はアルゴンとエタンガスを 50 % ずつ混ぜたガスの中にワイヤーが張られた multi wire gaseous detector のひとつであり、荷電粒子の飛跡を測定している。また、荷電粒子の通過位置と角度を測定することによって、粒子の横運動量と電荷を決定している。DC はビーム軸を挟んで東西 2.02 ~ 2.48m に一つずつ設置されていて、ビーム軸を中心とした円筒形の一部をなす形状をしており、各 DC は $|z| \leq 90\text{cm}$ 、方位角 $\pi/2$ の範囲を覆っている。

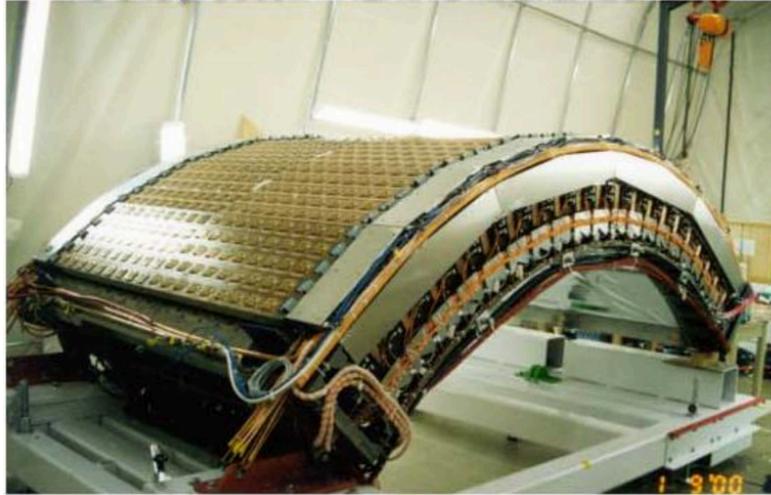


図 2.3 Drift Chamber の写真 [4]

Pad Chamber (PC)

Pad Chamber(PC) は multi wire proportional chamber の一つで、高精度な飛跡検出器である。PC は 3 つの独立した層から構成されており、ビーム軸に近い方から PC1、PC2、PC3 と呼ばれている。PC1 は DC と RICH の間、PC2 は East Arm のみに設置されており RICH の後ろ、PC3 は EMCal の前に設置されている。PC は Central Magnet の磁場外に設置されているため、直進する荷電粒子の飛跡を捉えることができ、DC と組み合わせることで 3 次元の荷電粒子の飛跡を再構成する役割を担っている。

Electromagnetic Calorimeter (EMCal)

Electromagnetic Calorimeter は電子・光子等のエネルギーを測定する検出器である。セントラルアームの最外層に東西に一つずつ設置されている。また、粒子の位置や飛行時間も測定しており、DC や PC と組み合わせることで電子の識別やゴーストトラックの低減に役立っている。

2.2.3 Global Detector

Global Detector は衝突の情報を測定する検出器群のことである。

Beam Beam Counter (BBC)

Beam Beam Counter(BBC) はクォーツチェレンコフ放射体と光電子増倍管からなる検出器である。BBC は偽ラピディティ $3.0 < |\eta| < 3.9$ の領域でビーム軸周りの全方位角を覆い、衝突点の前方と後方に 1 つずつ配置されている。それぞれの BBC で衝突によって生成された粒子が検出されるまでの時間を測定し、その時間差から衝突の起きた位置 (z-vertx) を決定する。また、BBC

は衝突によって発生した荷電粒子数を測定しており、反応平面や centrality の決定も行なっている。図 2.4 は BBC の写真である。

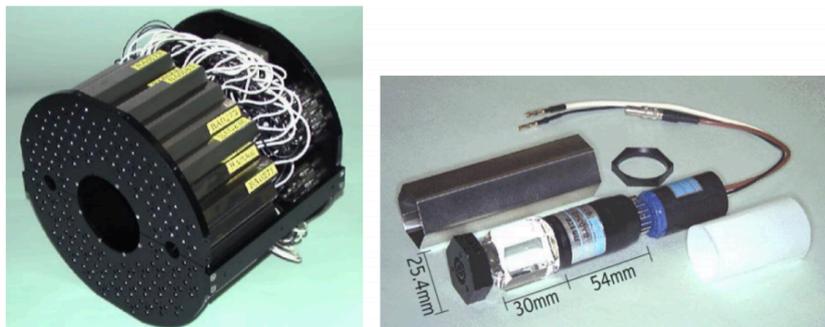


図 2.4 左:BBC 検出器の全体像 右:BBC を構成するチェレンコフ検出器 [5]

Zero Degree Calorimeter (ZDC)

Zero Degree Calorimeter(ZDC) は衝突に関与していない核子のうち中性子のエネルギー和を測定する検出器である。ZDC は衝突点から 18m 離れて、ビーム軸から 0 度の位置に配置されている。衝突点と ZDC の間には、入射する原子核を曲げるための magnet が設置されている。そのため衝突に関与していない核子のうち陽子は磁場で曲げられ、中性子のみが ZDC に入ると考えられており、ZDC の測定値は衝突に関与していない核子の数にほぼ比例する。

第 3 章

物理解析

本研究では、重イオン衝突実験において MPI の効果を観測するために、 v_2 と multiplicity の相関を調べた。まず初めに、 v_2 と multiplicity の相関と MPI の関係についてを述べる。その後、実際のデータ解析で用いたイベントやトラックについて説明する。

3.1 v_2 と multiplicity の相関と MPI の関係

3.1.1 multiplicity と MPI の関係

multiplicity とは衝突によって発生した粒子数のことである。平均的に、衝突に関与した核子が多いと multiplicity も大きくなることがわかっていることから、より多くパートンが衝突している方が multiplicity も大きくなると考えられる。また、p+A などの小さな衝突系において QGP-like な現象が確認されているのは multiplicity が大きいイベントを取り出した時であることから、衝突したパートンが多い方が multiplicity が大きくなる可能性がある。

3.1.2 v_2 と MPI の関係

v_2 について、大きさの違う衝突でエキセントリシティ ε が同じくらいのイベントを比べると、より大きな原子核同士の衝突の方が v_2 が大きくなることが先行研究からわかっている。図 3.1 は ε が同程度の $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ の Au+Au 衝突と Cu+Cu 衝突を比較している。黒のマーカが Au+Au 衝突、赤のマーカが Cu+Cu 衝突を表している。どの p_T 領域においても Au+Au 衝突の方が v_2 が大きいことがわかる。この理由として、反応に関与した核子の数 N_{part} の違いが考えられる。 ε が同じ時、つまり反応に関与した領域の形が同じ時、原子核のサイズが大きい方が反応に関与した領域の大きさは大きく、 N_{part} も大きくなる。つまり、 ε が同程度のイベントでは N_{part} が大きいイベントの方が v_2 が大きくなると言える。このことを MPI に応用すると、 N_{part} が同程度のイベントで衝突に関与したパートンが多い方が v_2 が大きくなると言える。つまり、図 3.2 のように N_{part} が同程度のイベントで、衝突したパートン数が違うイベントを比べると、MPI が多く起きている方が v_2 が大きくなるのではないかと予想できる。

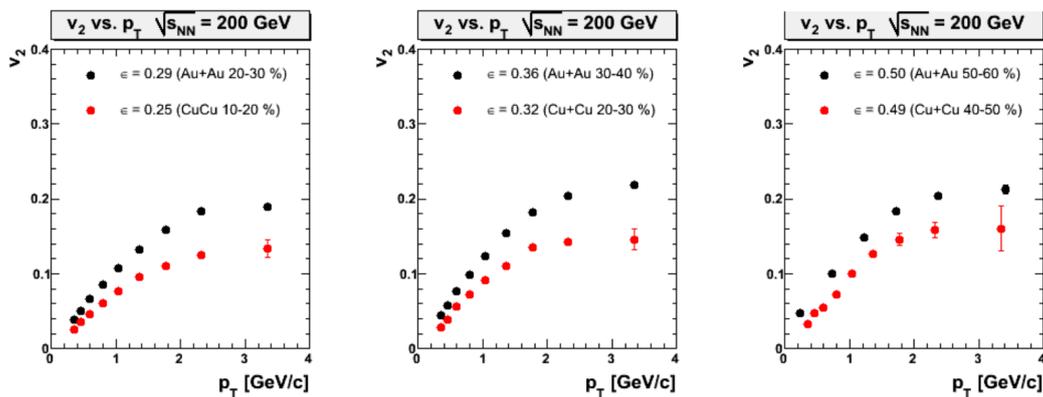


図 3.1 ϵ の値が同じくらいの Au+Au 衝突と Cu+Cu 衝突の v_2 の比較 [6]

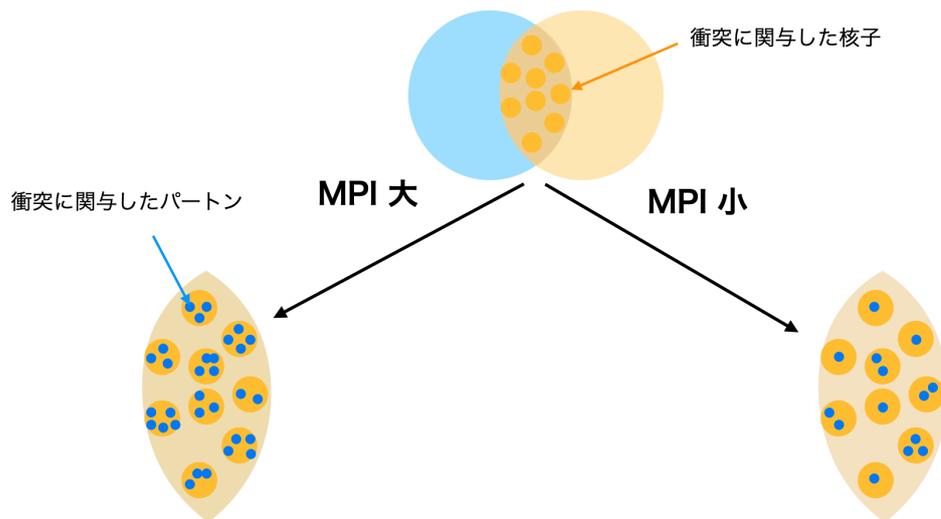


図 3.2 N_{part} が同程度のイベントで衝突したパートン数の違いによる MPI の大小について

3.1.3 v_2 と multiplicity の関係

multiplicity と MPI の関係、 v_2 と MPI の関係をまとめる。

- N_{part} が同程度のイベントでは MPI が多く起きている方が multiplicity が大きくなる。
- ϵ が同程度のイベントでは MPI が多く起きている方が v_2 が大きくなる。

以上のことから、 N_{part} が同程度のイベントを選んだ時 v_2 と multiplicity が正の相関を持つならば、これを MPI の効果と考えることができる。

また、 N_{part} と反応に関与していない核子の数 (N_{spec}) の和は衝突した原子核の質量数 (A) に

なる。つまり $N_{part} + N_{spec} = A$ であり、 A は定数なので、 N_{part} が同程度のイベントを選ぶことは、 N_{spec} が同程度のイベントを選ぶことと同じだと考えることができる。

本研究では、 N_{spec} の指標として ZDC 検出器の測定値を、multiplicity の指標として BBC 検出器の測定値を用いた。ZDC は反応に関与していない核子 (spectator) の内、中性子のエネルギー和を測定するカロリメータであり、その測定値を ZDCe と呼ぶ。BBC は衝突により発生した荷電粒子数を測定するカウンターで、その測定値を BBCq と呼ぶ。本研究では、ZDCe でクラス分けした v_2 と BBCq の相関を調べる。ZDCe と BBCq の相関は図 3.3 の様になっている。 図 3.3

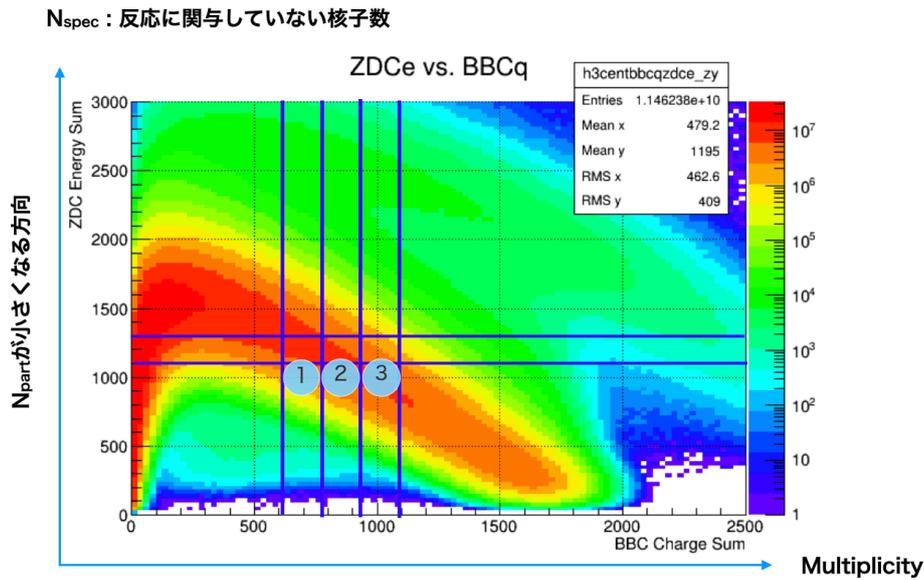


図 3.3 ZDCe と BBCq の相関

の様に ZDCe が同じくらいで BBCq の違う領域 (①、②、③) で v_2 を求める。この時、領域③の方が①より v_2 が大きければ MPI の効果が見えたと言える。

3.2 解析方法

3.2.1 反応平面法

v_2 は衝突で生成された粒子を反応平面からの方位角分布をフーリエ展開したときの 2 次の係数である。式 (1.4) において $n=2$ の時を式 (3.1) に示す。

$$\frac{dN}{d(\phi - \psi)} \propto 1 + 2v_2 \cos[2(\phi - \psi)] \quad (3.1)$$

ここで ϕ は放出された粒子の方位角、 ψ は反応平面角を表している。反応平面角とは原子核の中心同士を結んだ直線とビーム軸のなす角のことであるが、実験では原子核の中心位置を直接観測することはできない。そのため、BBC South と North で測定した粒子のヒット分布によって反応平面

を決定している。また、Central Arm で荷電粒子の方位角 ϕ を測定し、このように測定された ϕ と ψ の相関により v_2 を求める。これを反応平面法と呼ぶ。実験から測定される $v_2^{measured}$ は検出器の分解能による影響を受けることになる。そのため式 (3.2) の様に v_2 を補正することによって検出器の分解能による影響を補正した v_2^{true} を得る。 C_{reso} は検出器の分解能から求まる v_2 の補正係数である。

$$v_2^{true} = \frac{v_2^{measured}}{C_{reso}} \quad (3.2)$$

次のセクションで C_{reso} の求め方について述べる。

3.2.2 反応平面の分解能

前のセクションで述べたように、実験で測定した v_2 は検出器の分解能による補正係数で補正する必要がある。反応平面の分解能とは、2つの検出器によって測定された反応平面の差によって決まる値である。検出器 A によって測定された反応平面を ψ_A 、検出器 B によって測定された反応平面を ψ_B 、実際の反応平面を ψ^{true} とすると、検出器 A の反応平面 σ_A 、検出器 B の反応平面 σ_B は式 (3.3) で求められる。このことから検出器 A、B から決まる反応平面の分解能 σ_{AB} は式 (3.4) で求められる。

$$\begin{aligned} \sigma_A &= \langle \cos(2[\psi^{true} - \psi_A]) \rangle \\ \sigma_B &= \langle \cos(2[\psi^{true} - \psi_B]) \rangle \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{AB} &= \langle \cos(2[\psi_A - \psi_B]) \rangle \\ &= \langle \cos[2(\psi^{true} - \psi_A)] \rangle \langle \cos[2(\psi^{true} - \psi_B)] \rangle \\ &= \sigma_A \sigma_B \end{aligned} \quad (3.4)$$

以上の関係を用いて、 v_2 の補正係数 C_{reso} を求める。本研究では反応平面の測定に BBC South、BBC North、CNT を用いた。そのため、この3つの検出器の分解能を組み合わせた BBC South と BBC North の分解能 σ_{BBCNS} を式 (3.5)(3.6) から求める。この σ_{BBCNS} が v_2 の補正係数 C_{reso} である。

$$\begin{aligned} \sigma_{BBCNS} \sigma_{CNT} &= \langle \cos(2[\psi_{BBCNS} - \psi_{CNT}]) \rangle \\ \sigma_{BBCNS} &= \frac{\langle \cos(2[\psi_{BBCNS} - \psi_{CNT}]) \rangle}{\sigma_{CNT}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{CNT} &= \sqrt{\frac{(\sigma_{BBCN} \sigma_{CNT})(\sigma_{BBCS} \sigma_{CNT})}{\sigma_{BBCN} \sigma_{BBCS}}} \\ &= \sqrt{\frac{\langle \cos(2[\psi_{BBCN} - \psi_{CNT}]) \rangle \langle \cos(2[\psi_{BBCS} - \psi_{CNT}]) \rangle}{\langle \cos(2[\psi_{BBCN} - \psi_{BBCS}]) \rangle}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

ψ_{BBCSN} : BBC South と North で測定した反応平面

ψ_{CNT} : CNT で測定した反応平面

ψ_{BBCN} : BBC North で測定した反応平面

ψ_{BBCS} : BBC South で測定した反応平面

σ_{BBCN} : BBC North の反応平面の分解能

σ_{BBCS} : BBC North の反応平面の分解能

σ_{CNT} : BBC North の反応平面の分解能

図 3.4 は BBC の反応平面の分解能と 5% 刻みの centrality の関係を表している。図 3.4 から分

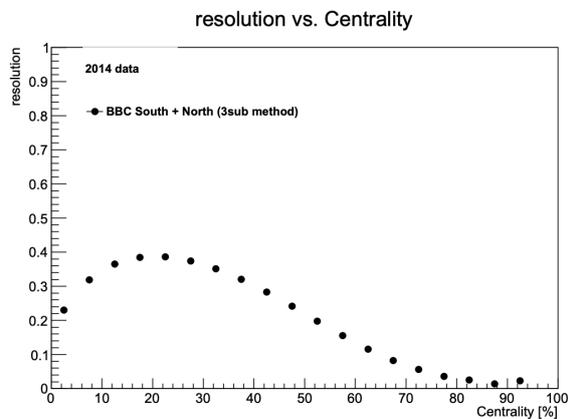


図 3.4 BBC 検出器による反応平面の分解能と centrality の関係 [7]

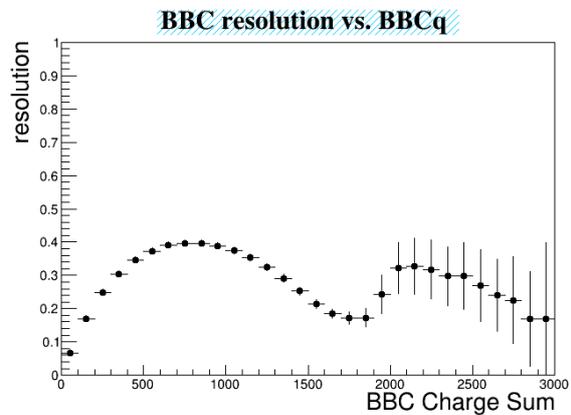


図 3.5 BBC 検出器による反応平面の分解能と BBCq の関係

かる様に、反応平面の分解能は centrality によって違いがあることがわかる。これは centrality によって反応領域の形や発生粒子数が違うためである。centrality が 0~5% では、反応領域は丸に近い形をしている。そのため、衝突によって発生した粒子の方位角分布に異方性が見えにくいため、反応平面が決まりにくくなる。centrality 20~25% ではこの反応領域の形が楕円に近い形になるため反応平面が決まりやすくなる。また、centrality が 20~25% 以降の領域では、衝突によって発生する粒子数が少なくなるために反応平面が決まりにくくなる。

図 3.5 は BBC の反応平面の分解能と BBCq の関係を表している。BBCq とは BBC 検出器で測定した測定値であり、BBC は衝突により放出された荷電粒子数を測定している。反応平面の分解能と BBCq の関係において山が 2 つできる原因として double collision の影響が考えられる。double collision とはバンチの中で原子核が 2 回衝突を起こすことである。double collision が起きると 2 回分の衝突データを 1 回分のデータとして収集することになる。図 3.6 は double collision のイメージ図である。反応平面の分解能と centrality の関係で説明したように、反応領域の形が丸に近い形の際は反応平面の分解能は小さく、また発生した粒子数 (multiplicity) が小さい時も反応

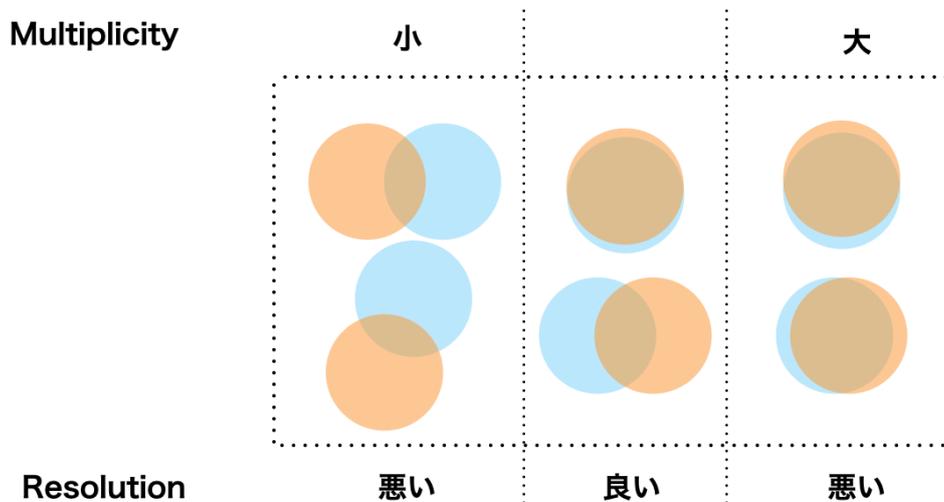


図 3.6 double collision が起きたときの resolution と multiplicity の関係

平面の分解能は小さくなる。つまり、原子核の衝突が 2 つとも周辺衝突の場合は反応平面が決まりにくく、また 2 つとも中心衝突の場合も反応平面が決まりにくい。一方、片方の衝突が周辺衝突でもう一つの衝突が中心衝突の場合は、周辺衝突を起こした原子核同士の反応平面に引っ張られるため反応平面が決まりやすくなる。また、multiplicity と反応平面の分解能は図 3.6 の様になる。また図 3.7 は BBCq と centrality の関係を示している。図 3.7 から、centrality が 0% で、はみ出

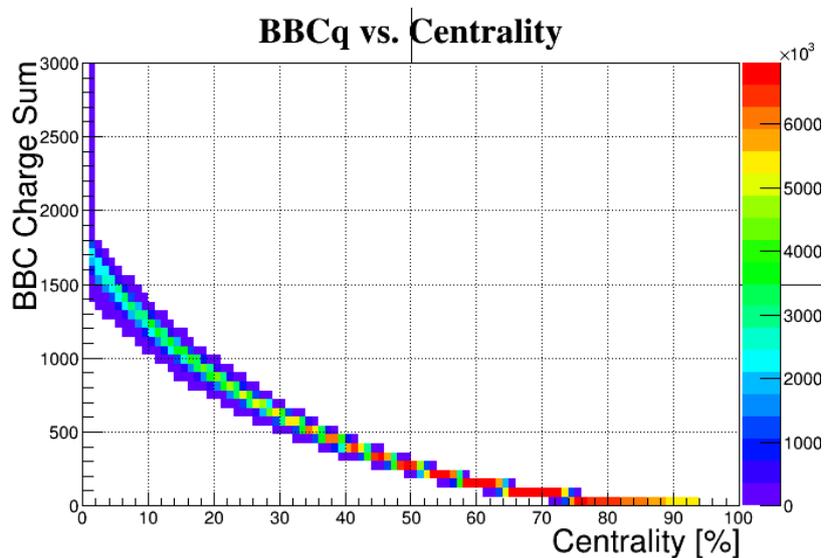


図 3.7 BBCq と centrality の関係

して BBCq が多いイベントがあることがわかる。これは原子核が 1 回しか衝突していないイベントに比べて、double collision によって BBCq が大きくなったイベントだと考えることができる。

また、centarlity は BBC 検出器によって決定されるため、BBCq が 1800 以上のイベントは全て centarlity0% に分類される。以上のことから、図 3.5 の様に BBCq が 1800 以上で反応平面の分解能と BBCq の関係が山形になる。

3.2.3 double collision の影響

前のセクションで述べたように、double collision とはバンチの中で原子核が 2 回衝突を起こすことである。本研究では、MPI によって multiplicity が大きくなったイベントに着目しているため、double collision によって multiplicity が大きくなったイベントをなるべくカットして解析をする必要がある。図 3.8 は ZDCe と BBCq の相関を示す 2 次元ヒストグラムである。図 3.8 で赤色の部分が一番統計が多いところであり、それを覆う様にして赤線で囲んだ部分に同じ様な構造で統計が集まっていることがわかる。これは double collision によって multiplicity が大きくなったイベントだと考えることができる。本研究では ZDCe でクラス分けを行う。そのため図 3.9 の

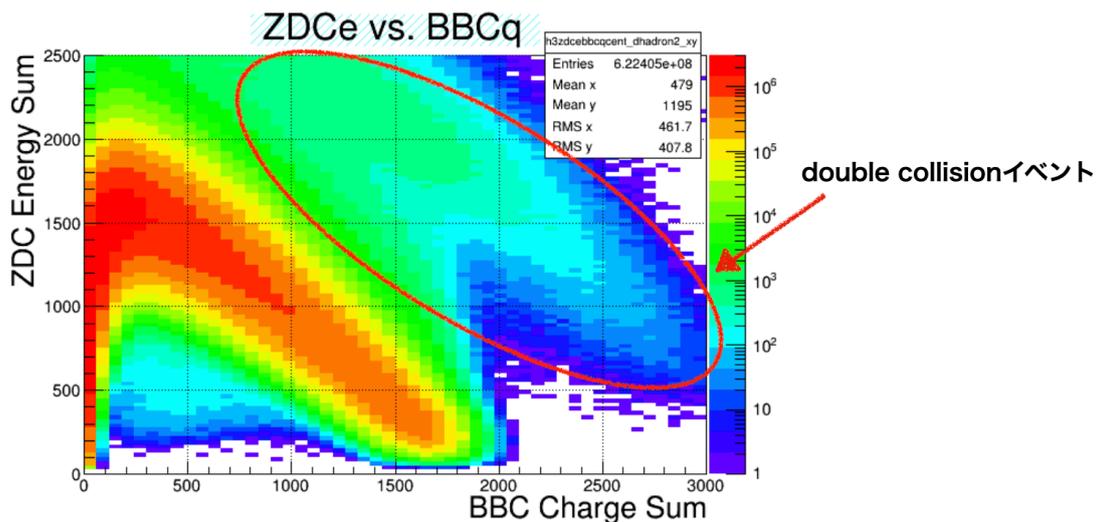


図 3.8 ZDCe と BBCq の関係から見える double collision イベント

青線のように ZDCe を区切った場合は、double collision のイベントをなるべく落とすために、統計が多い場所（斜線部分）についてのみ ZDCe と v_2 の関係を解析する。

3.2.4 ZDCe の区切り方

ここでは、ZDCe を区切る幅の決定について述べる。今回は、ZDCe がある特定の値のみを選んだ場合と、ZDCe の幅を 10 にした場合を比較した。比較した ZDCe の値は

- ZDCe=500, $500 < \text{ZDCe} < 510$

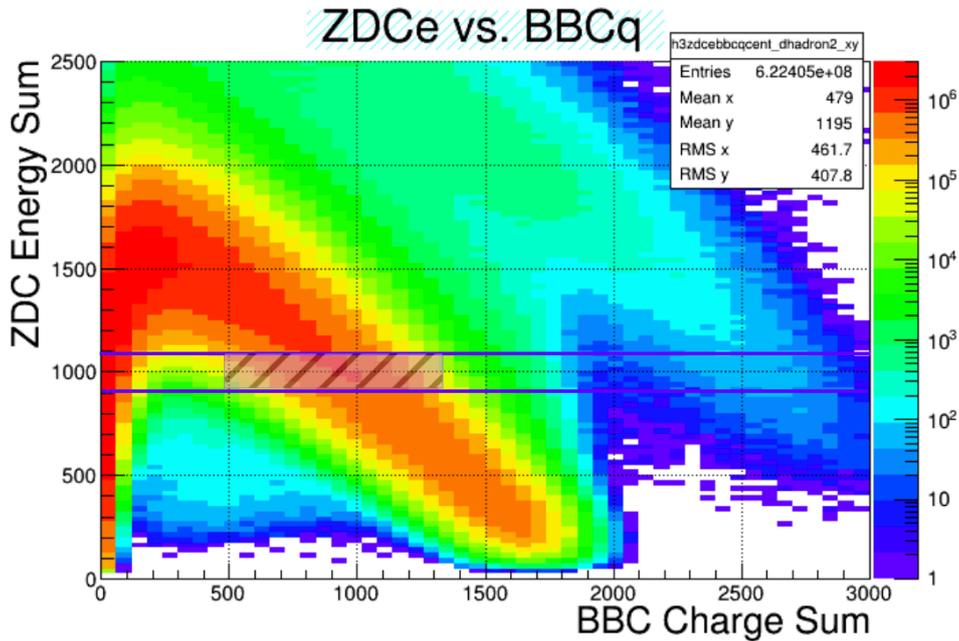


図 3.9 ZDCe でクラス分けした場合

- ZDCe=700, 700<ZDCe<710
- ZDCe=900, 900<ZDCe<910
- ZDCe=1100, 1100<ZDCe<1110
- ZDCe=1300, 1300<ZDCe<1310
- ZDCe=1500, 1500<ZDCe<1510
- ZDCe=1700, 1700<ZDCe<1710
- ZDCe=1900, 1900<ZDCe<1910

である。図 3.10 から図 3.13 がその結果である。赤のプロットが特定の ZDCe の時、青のプロットが ZDCe の幅が 10 の時である。前のセクションでも述べたように、本解析では double collision の影響をなるべくカットするため、統計が多い部分についてのみ v_2 と BBCq の相関を見たい。図 3.10 から図 3.13 わかる様に、統計が多い場所、つまりエラーバーが小さい場所では赤のプロットと青のプロットに違いがないことがわかる。また、ZDCe の幅を広くとったほうが統計が増えるため、 v_2 の値が安定することが期待される。以上のことから、ZDCe の幅を 10 にして解析をすることを決めた。

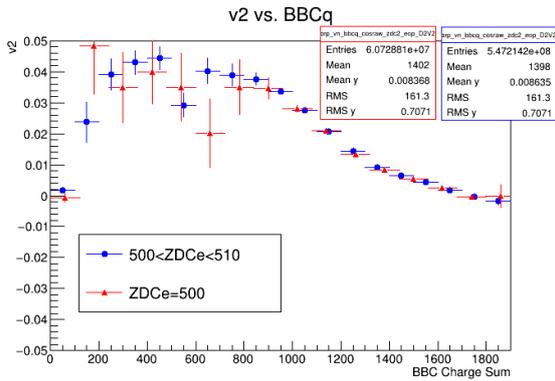


図 3.10 ZDCe=500 と 500<ZDCe<510 の時の v_2 の比較

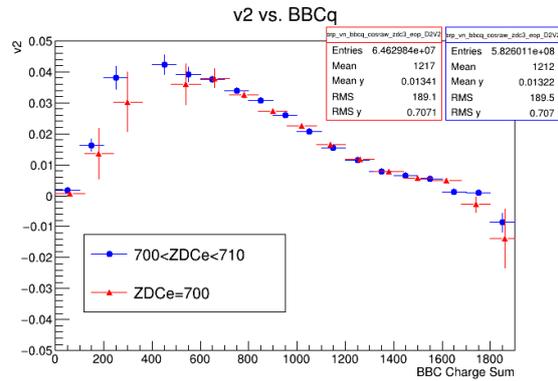


図 3.11 ZDCe=700 と 700<ZDCe<710 の時の v_2 の比較

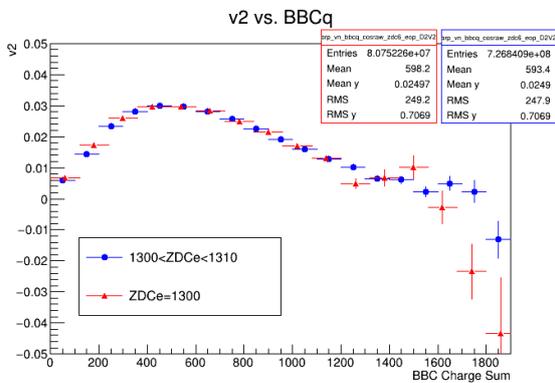


図 3.12 ZDCe=1300 と 1300<ZDCe<1310 の時の v_2 の比較

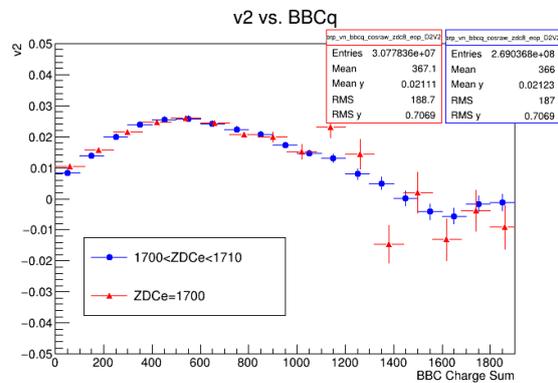


図 3.13 ZDCe=1700 と 1700<ZDCe<1710 の時の v_2 の比較

3.2.5 シグナル抽出

3.3 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あたり重心系衝突エネルギー $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ の Au + Au 衝突の Minimum Bias データを用いて解析を行なった。さらに $|z_{vtx}| < 10\text{cm}$ を要求した。

3.4 トラック選択

トラック選択には次の条件を要求した。

- quality = 31 or 63

この値は DC と PC1 から再構成された track の quality を示している。quality は図 3.14 のような 6 ビットの変数で表されている。DC は図 3.15 のようにワイヤーが張られており、衝突点に近い方から X1,u1,v1, X2,u2,v2 と名前がつけられている。quality 変数の下位 2bit は DC の X1, X2 にヒットがあるかどうかを示している。3bit 目は X1, X2 のヒットから再構成されたトラックに相当するヒット点が u,v にあるかどうかを示しており、さらに 4bit 目でそのヒット点が他のトラックと共有されているかいないかを示している。5,6bit 目は同様に、PC1 にトラックに相当するヒット点があるかどうか、そのヒット点が他のトラックと共有されているかいないかを示している。そのため一番良い track quality は 63 であり、u,v のヒットが優先されるため、次に良い track quality は 31 になる。

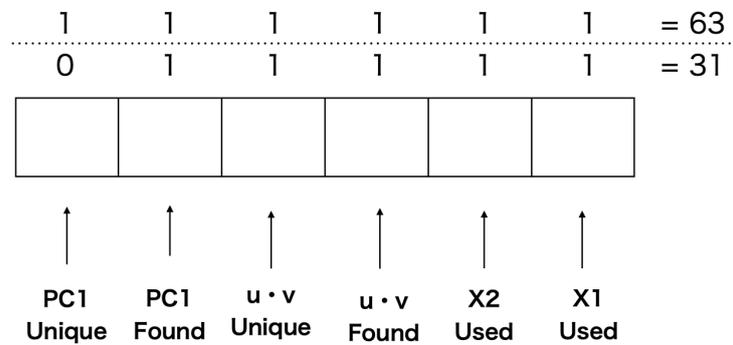


図 3.14 quality 変数について

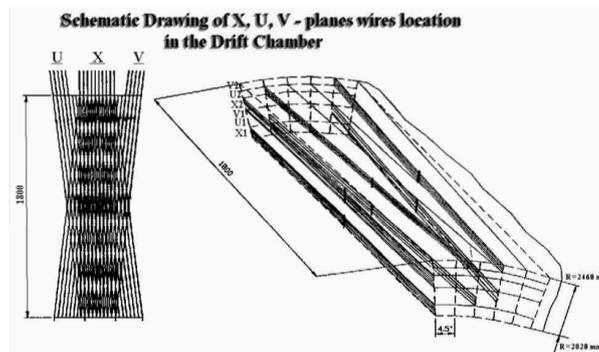


図 3.15 DC の wire の張り方と名前

- $E/p > 0.2$
E は EMcal で測定した粒子のエネルギー、p は DC で測定した粒子の運動量であり、Ghost track を低減するためのカットである。
- $p_T > 0.10 \text{ GeV}/c$
- $|zed| < 75 \text{ cm}$

第4章

結果・考察

本章では、ZDCe でクラス分けをしたときの v_2 と BBCq の相関を調べた結果について述べ、議論する。

4.1 v_2 と BBCq の相関

本研究では ZDCe でクラス分けした時の v_2 と BBCq の相関を求めることが目的である。その前に、ZDCe を区切らずに、全データを用いて求めた v_2 の平均値と BBCq の相関を図 4.1 に示す。

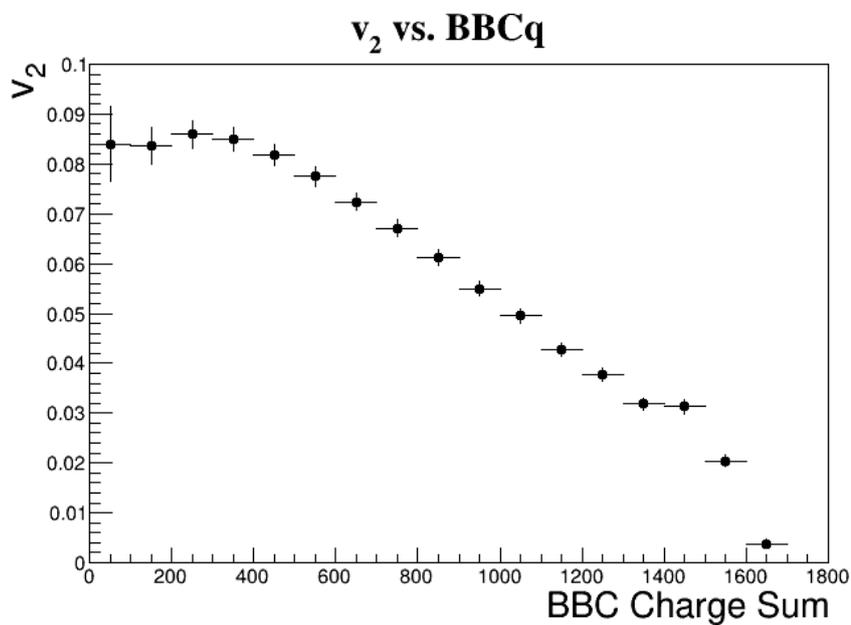


図 4.1 ZDCe を区切らない時の v_2 と BBCq の関係

4.1.1 測定結果

ZDCe で区切った場合の v_2 vs. BBCq のグラフを図 4.2 から図 4.5 に示す。青のプロットは ZDCe を区切った時の v_2 の平均値、緑のプロットは ZDCe を区切らずに求めた v_2 の平均値である。図 4.2 から図 4.5 でわかる様に、 v_2 と BBCq は全体的に負の相関を持つことがわかる。ま

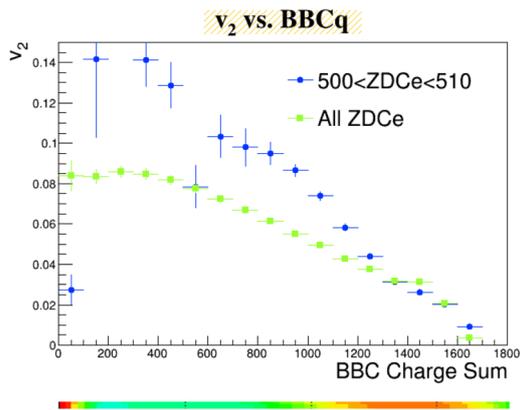


図 4.2 500<ZDCe<510 の時の v_2 と BBCq の関係

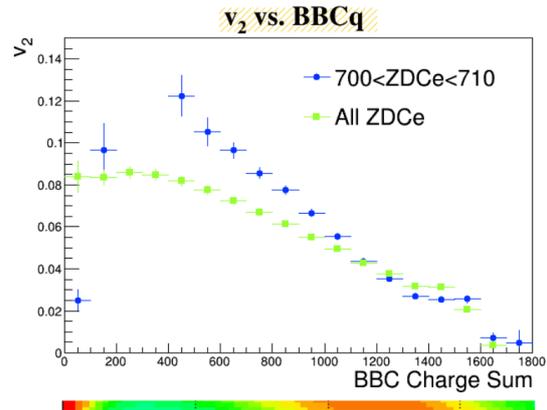


図 4.3 700<ZDCe<710 の時の v_2 と BBCq の関係

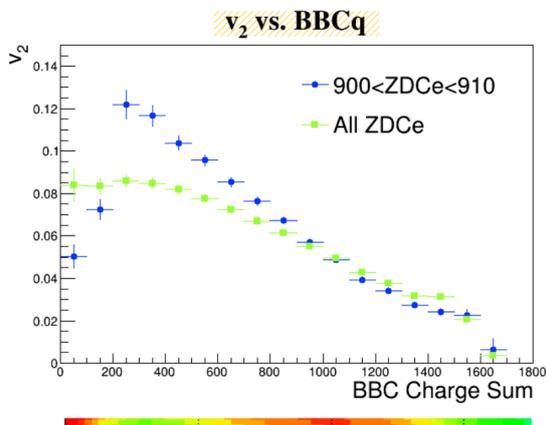


図 4.4 900<ZDCe<910 の時の v_2 と BBCq の関係

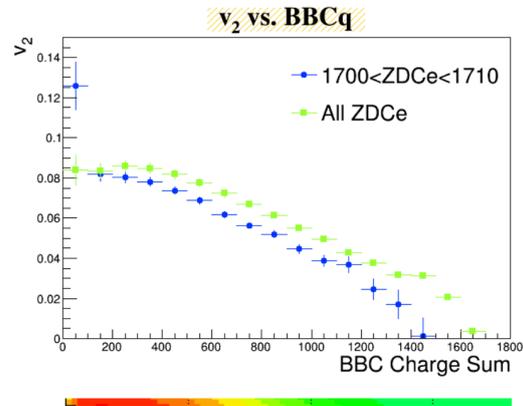


図 4.5 1700<ZDCe<1710 の時の v_2 と BBCq の関係

た、3章で述べたように、MPI のシグナルを見るためには double collision の影響をなるべく落とす必要がある。そのために、ある ZDCe を選んだ時に ZDCe と BBCq の 2次元ヒストグラムにおいて統計が集中している BBCq の値付近を見る必要がある。グラフの下に配置したカラーチャートは ZDCe と BBCq の 2次元ヒストグラムを、上のグラフで v_2 を求めるために区切った v_2 と同じくらいの ZDCe で区切り、上のグラフの BBCq にスケールを合わせたものである。赤

が一番統計が多く、約 10^6 程度である。その次にオレンジ、黄色 (約 10^5 エントリー)、黄緑 (約 $10^3 \sim 10^4$ エントリー)、青 (約 10 エントリー) の順で統計が少なくなる。図 4.3 からわかるように、 $700 < ZDCe < 710$ で区切った場合、BBCq が 1300 ~ 1600 で減少傾向だった v_2 が増加に転じるポイントが見えることがわかる。また、選ぶ ZDCe の値が大きくなると v_2 の減少の傾きが小さくなることがわかった。

4.1.2 v_2 の補正係数による違い

前のセクションでは、ZDCe を区切って v_2 を求めているのに対して、 v_2 の補正係数は ZDCe を区切らずに、全てのデータから求めた値を使っていた。より正確に v_2 の補正を行うために、ZDCe で区切った v_2 の補正係数を求め、 v_2 を補正した。図 4.6 は ZDCe で区切った場合の v_2 の補正係数と BBCq の関係である。オレンジのプロットが ZDCe を区切らずに求めた v_2 の補正係数であ

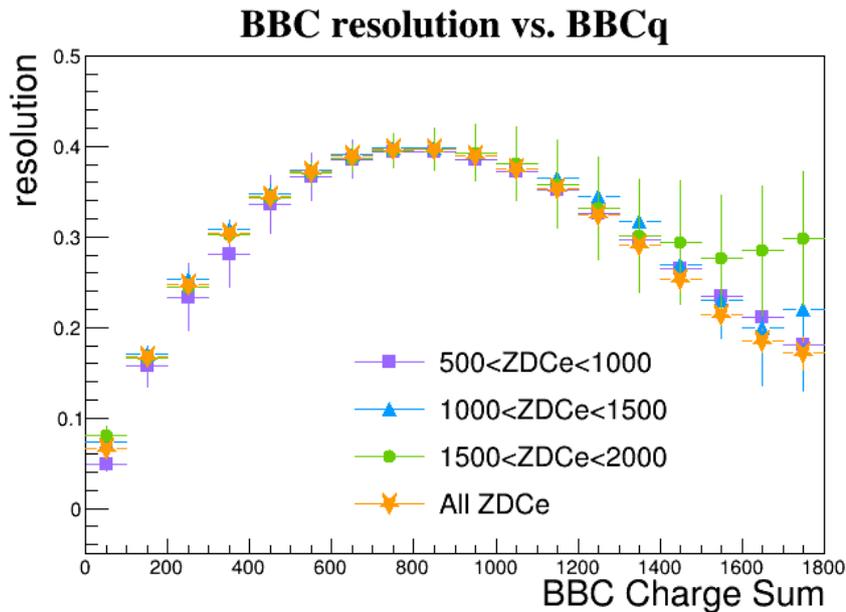


図 4.6 ZDCe で区切った時の v_2 の補正係数

り、その他のプロットは ZDCe で区切って求めた v_2 の補正係数である。オレンジのプロットとその他のプロットで、傾向や値がほとんど変わらないことがわかる。BBCq が 1400 以上でオレンジのプロットとその他のプロットでは傾向が異なっている。これは 3 章で述べたような double collision の影響と考えられる。次に、図 4.7 から図 4.10 に ZDCe で区切って求めた v_2 の補正係数で v_2 の補正を行なった結果を示す。青のプロットは ZDCe で区切った補正係数で v_2 を補正した結果、赤のプロットは ZDCe を区切らずに求めた補正係数で v_2 を補正した結果である。また緑のプロットは ZDCe を区切らずに求めた v_2 である。ZDCe を区切った場合と区切らなかった場合で、補正係数の値に違いがなかったことから予想されるように、 v_2 を補正した結果にも違いがないことがわかった。

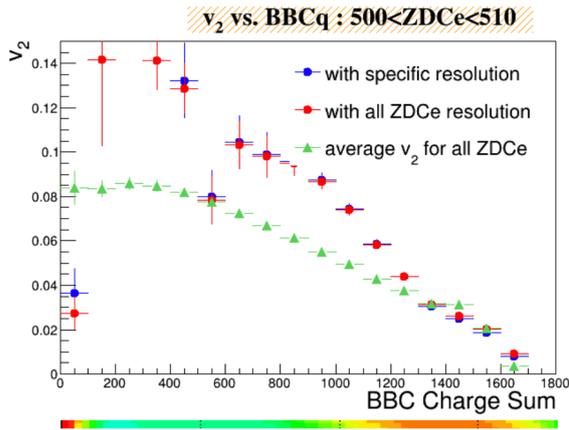


図 4.7 500<ZDCe<510 の時の補正係数の違いによる v_2 の比較

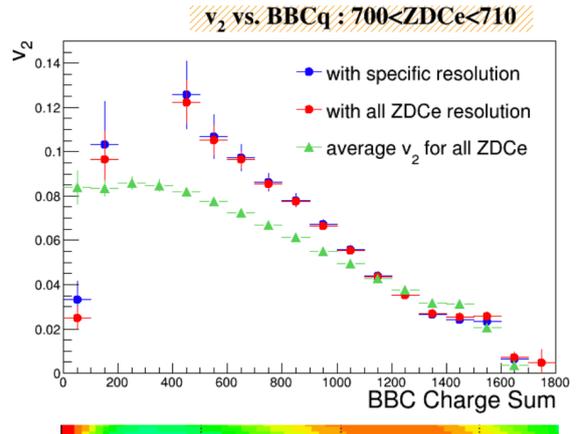


図 4.8 700<ZDCe<710 の時の補正係数の違いによる v_2 の比較

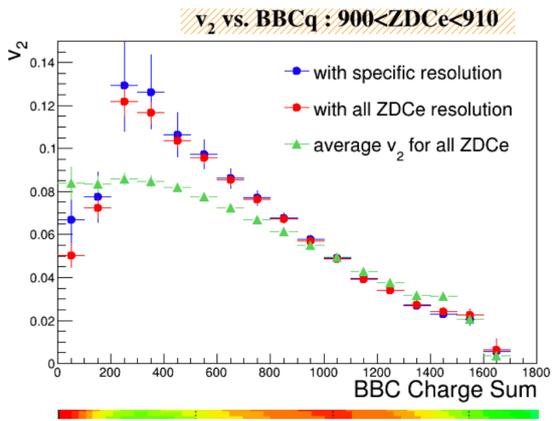


図 4.9 900<ZDCe<910 の時の補正係数の違いによる v_2 の比較

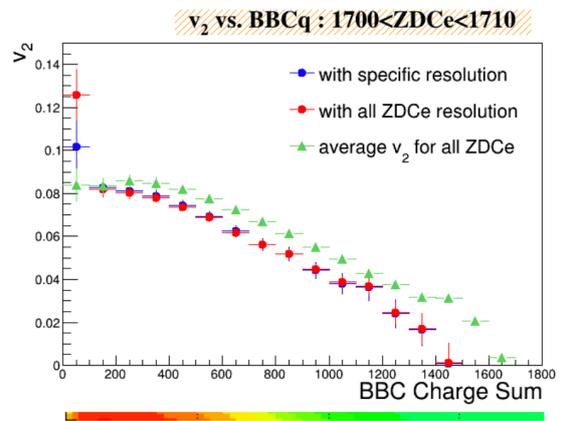


図 4.10 1700<ZDCe<1710 の時の補正係数の違いによる v_2 の比較

第 5 章

まとめ

本研究では、RHIC-PHENIX 実験で 2014 年に収集された重心系衝突エネルギー $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ の Au+Au 衝突のデータを用いて、重イオン衝突実験において MPI を観測することを目的に、反応に関与した核子数 (N_{part}) が同じくらいのイベントを選び v_2 と multiplicity の相関を調べた。 N_{part} が同じで衝突したパートン数が増えると multiplicity と v_2 はどちらも増加することが期待されることから、 v_2 と multiplicity に正の相関が見えれば MPI の効果が見えたと言えると考えている。今回の解析では、反応に関与していない核子 (N_{spec}) のうち中性子のエネルギーを測定する ZDC 検出器の測定値 ZDCe を N_{spec} の指標として用いた。ZDCe は N_{spec} に比例し、また $N_{part} + N_{spec} = A$ (原子核の質量数) なので、 N_{part} が同じくらいのイベントを選ぶということは N_{spec} が同じくらいのイベントを選ぶということと等しい。また、衝突により発生した荷電粒子数を測定する BBC 検出器の測定値 BBCq を multiplicity の指標として用いた。つまり、 N_{part} が同じくらいのイベントを選び v_2 と multiplicity の相関を調べるために、今回の解析では、ZDCe が同じくらいのイベントクラスに分け v_2 と BBCq の相関を調べた。その結果、 v_2 と BBCq は全体的に負の相関を持つことがわかった。ただし、 $700 < \text{ZDCe} < 710$ の時と $900 < \text{ZDCe} < 910$ の時に、 v_2 の減少傾向が緩やかになり増加に転じるポイントがあることがわかった。今後、これが MPI のシグナルかもしれないと考えて解析を進める予定である。また、ZDCe でクラス分けした v_2 の補正係数を求めた結果、double collision の影響がないと考えられる BBCq の範囲では、ZDCe のクラス分けを行なった場合と行わなかった場合で v_2 と BBCq の関係に違いは見られれないことがわかった。次に、より正確に v_2 の補正を行うために ZDCe でクラス分けした補正係数で v_2 の補正を行った。その結果、ZDCe でクラス分けした補正係数で補正した場合とクラス分けしていない補正係数で補正した場合で v_2 の値に違いがないことがわかった。

今後は double collision イベントをカットしてデータを解析することを目指す。また、multiplicity の指標として今回は BBCq のみを使っているが、CNT のトラック数と BBCq を共に用いて multiplicity の指標とすることを考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、林井先生、宮林先生、下村先生、蜂谷先生には大変多くのご指導、ご助言を頂き深く感謝申し上げます。特に下村先生には、大変興味深いテーマを任せて頂き、興味を失うことなく積極的に研究に取り組むことができました。ソフトウェアの知識も乏しい中で、実際の実験データを解析する機会を頂いたことに深く感謝申し上げます。蜂谷先生にはソフトウェアについてや、発表スライドのまとめ方や発表の仕方など大変多くのご助言を頂きました。先輩方には研究室での生活のことから物理の話まで教えていただき、いつも優しく対応してくださってありがとうございました。重イオングループの黒田さん、並本さん、西森さんには、研究活動を行なっていく中で出てきた小さな疑問を日頃から相談することができ、解決のヒントを得ることができました。また、4回生の皆さんのおかげで楽しい研究室生活を送ることができました。今年度はコロナの影響により例年とは異なる研究活動を強いられる中、研究活動を円滑に進められるように対応して頂いたこと、皆様のおかげで本研究を行うことができたこと、この場を借りて深く感謝申し上げます。

付録 A

補正前の v_2 vs. BBCq

補正前の v_2 と BBCq の関係を示す。青のプロットが ZDCe で区切った場合の v_2 で、緑のプロットは ZDCe を区切らずに求めた v_2 の平均値である。

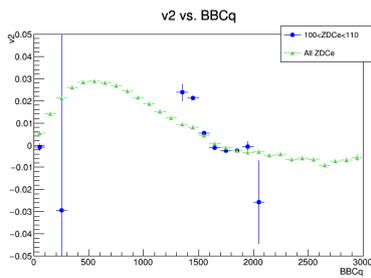


図 A.1 100<ZDCe<110 の時の v_2

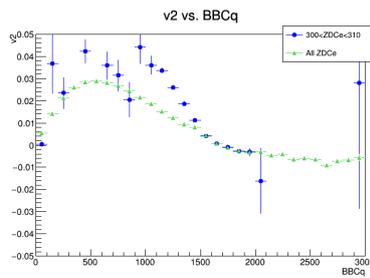


図 A.2 300<ZDCe<310 の時の v_2

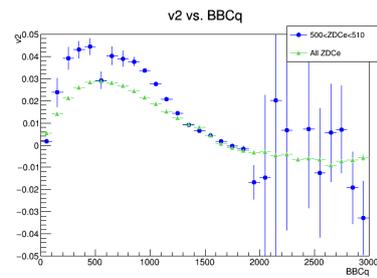


図 A.3 500<ZDCe<510 の時の v_2

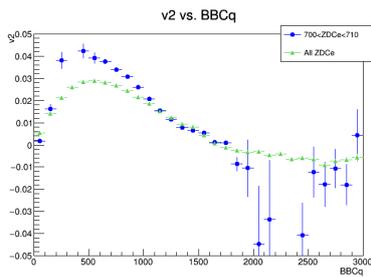


図 A.4 700<ZDCe<710 の時の v_2

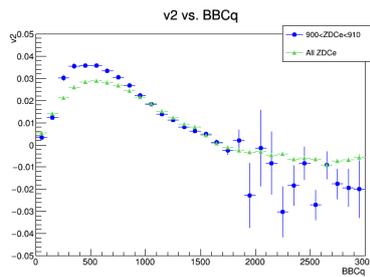


図 A.5 900<ZDCe<910 の時の v_2

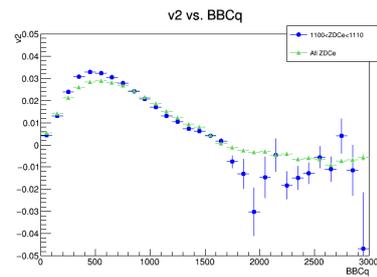


図 A.6 1100<ZDCe<1110 の時の v_2

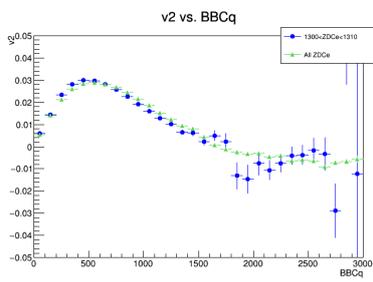


図 A.7 1300 < ZDCe < 1310
の時の v_2

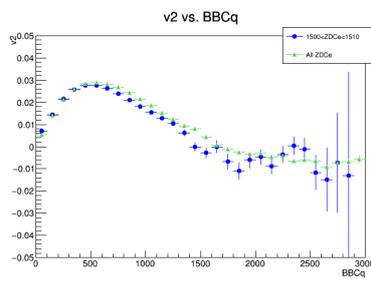


図 A.8 1500 < ZDCe < 1510
の時の v_2

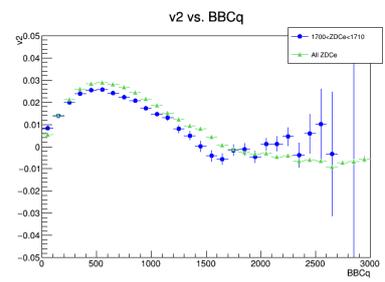


図 A.9 1700 < ZDCe < 1710
の時の v_2

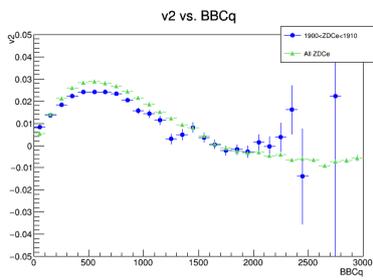


図 A.10 1900 < ZDCe < 1910
の時の v_2

付録 B

補正後の v_2 vs. BBCq

次に、補正後の v_2 と BBCq の関係を示す。赤のプロットは ZDCe を区切らずに求めた補正係数で補正した v_2 、青のプロットは ZDCe を区切って求めた補正係数で補正した v_2 、緑のプロットは ZDCe を区切らずに求めた v_2 の平均値である。

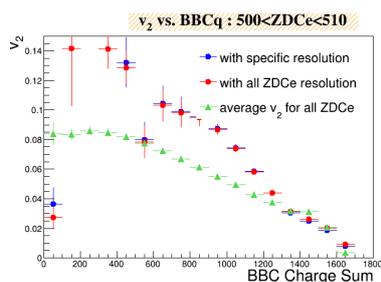


図 B.1 500<ZDCe<510 の時の v_2

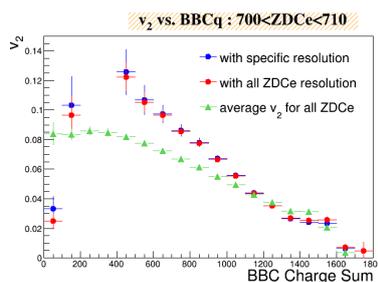


図 B.2 700<ZDCe<710 の時の v_2

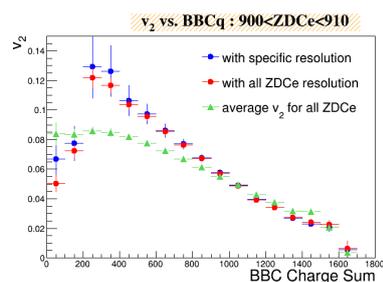


図 B.3 900<ZDCe<910 の時の v_2

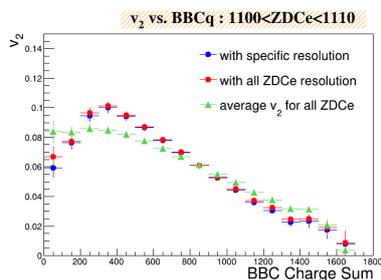


図 B.4 1100<ZDCe<1110 の時の v_2

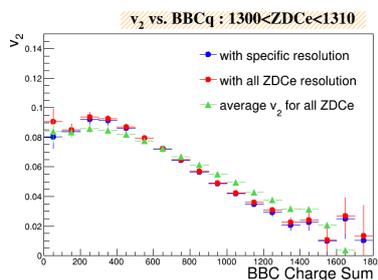


図 B.5 1300<ZDCe<1310 の時の v_2

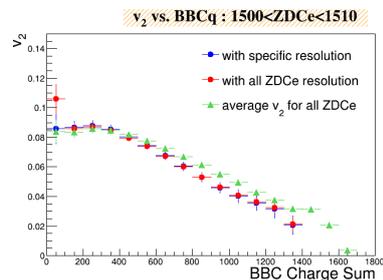


図 B.6 1500<ZDCe<1510 の時の v_2

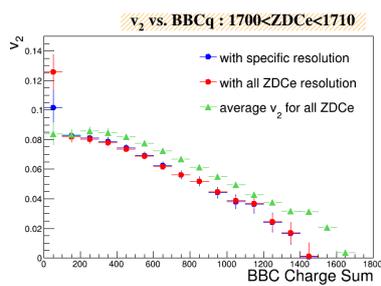


図 B.7 1700<ZDCe<1710
の時の v_2

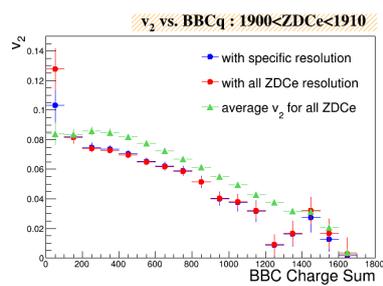


図 B.8 1900<ZDCe<1910
の時の v_2 の比較

参考文献

- [1] 池田侑加さん (奈良女子大学 高エネルギー物理学研究室)
- [2] C. Aidala et al. (PHENIX Collaboration), “Creating small circular, elliptical, and triangular droplets of quark-gluon plasma” (2018) 1805.02973
- [3] RHIC の絵
<https://academic.oup.com/ptep/article/2015/3/03A102/1584518>
- [4] Drift Chamber の写真
<https://www.phenix.bnl.gov/phenix/WWW/intro/detectors/index.html>
- [5] BBC 検出器の写真
<https://www.phenix.bnl.gov/phenix/WWW/intro/detectors/index.html>
- [6] 下村真弥 筑波大学大学院 博士論文 Systematic Study of Azimuthal Anisotropy for Charged Hadron in Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions at RHIC-PHENIX
- [7] 武田明莉 奈良女子大学大学院 2016 年度修士論文