

$\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$  の  
Au+Au 衝突における衝突初期形状の  
eccentricity の核子の内部構造依存性の研究

奈良女子大学理学部  
数物化学科物理学コース  
高エネルギー物理学研究室  
渡部 舞

## 概要

現在の宇宙では、クォークとグルーオンは核子の中に閉じ込められているが、ビッグバン直後の約2兆度以上の初期宇宙では、クォークとグルーオンが閉じ込めから解放されたクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 状態であったと考えられている。このQGPについて調べることで宇宙の成り立ちを知ることができると考えられている。

Brookhaven National Laboratory (BNL) の The Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) は核子対あたり200 GeVの重心系衝突エネルギーで金原子核同士を衝突させることで高温高压状態を作り、QGPを再現することを可能にした。RHICを用いてPHENIX実験が行われており、その中で方位角異方性はQGPの重要な性質の一つである。その方位角異方性を表す $v_2$ があり、 $v_2$ とeccentricityの関係を調べることでQGPの性質の一つを解明できると考えられている。本研究では $v_2$ と相関があるといわれている楕円率 (eccentricity) に核子の内部構造が与える影響をシミュレーションを用いて調べた。

本研究ではparticipant eccentricityを用いる。participant eccentricityとは、原子核同士が非中心衝突したときに衝突方向に対して垂直方向の反応領域に注目した量である。反応領域内の衝突に関与した核子を衝突方向に対して垂直方向に投影すると楕円型になる。投影された衝突に関与したパートンからもっともらしい軸を新たに作り、その軸を基準に計算した楕円率がparticipant eccentricityである。 $v_2$ とは原子核の非中心衝突により放出される粒子群が示す方位角異方性のことで、放出粒子の反応平面からの方位角分布をフーリエ変換した際の2次の項の係数である。方位角異方性はPHENIX実験のデータから計算式より求められる量だが、participant eccentricityは実験で直接測定することはできない。そのため乱数によりパートンを核子内に発生させ、疑似原子核を作り、衝突させるシミュレーションで得た結果から計算する。participant eccentricityを中心衝突度 (centrality) 毎に分けて内部構造による影響を調べた。ここでcentralityは2つの原子核がどの程度重なって衝突するかを示す量であり、衝突する原子核のそれぞれの中心の軌道間の距離 $b$  (インパクトパラメータ) が0のとき、完全中心衝突でcentralityは0%、 $b$ が原子核の直径より大きいとき衝突は起きず、centralityは100%となる。

# 目次

<b>第1章 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 高エネルギー重イオン衝突実験	8
1.2.1 RHIC 加速器	8
1.2.2 PHENIX 実験	10
1.3 物理量の定義	10
1.3.1 centrality(中心衝突度)	10
1.3.2 反応平面	10
1.3.3 $N_{part}, N_{part\_quark}$	11
1.3.4 $N_{coll}, N_{coll\_quark}$	11
1.4 楕円率 (eccentricity)	11
1.5 研究目的	13
<b>第2章 解析</b>	<b>14</b>
2.1 シミュレーション解析の手順	14
2.1.1 核子作成	14
2.1.2 核子やパートンの衝突	16
2.2 内部構造による $N_{part}$ の変化	16
2.3 sシミュレーションの正当性	17
<b>第3章 結果</b>	<b>20</b>
3.1 内部構造の影響の有無	20
3.2 $N_{coll\_quark}$ と eccentricity の関係	21
3.2.1 $N_{part}$ のみを固定した場合の $N_{coll\_quark}$ と eccentricity の関係	21
3.2.2 核子と $N_{part}$ を固定した場合の $N_{coll\_quark}$ と eccentricity の関係	23
3.3 $N_{part\_quark}$ と eccentricity の関係	27
3.3.1 $N_{part}$ を固定した場合の内部構造の影響	27
3.3.2 核子と $N_{part}$ を固定した場合の $N_{part\_quark}$ と eccentricity の関係	29
3.4 パートンの数に依る内部構造の影響	32

	4
3.4.1 パートン5個と3個の比較 . . . . .	32
3.4.2 パートン10個と3個の比較 . . . . .	35
3.5 まとめ . . . . .	38
<b>第4章</b>	<b>39</b>
4.1 謝辞 . . . . .	39

## 目 次

1.1	宇宙創生の流れ . . . . .	7
1.2	クォークとグルーオンの閉じ込めの破れ . . . . .	8
1.3	原子核衝突の時間発展 . . . . .	9
1.4	RHIC 加速器 . . . . .	9
1.5	centrality . . . . .	10
1.6	反応平面 . . . . .	11
1.7	eccentricity . . . . .	12
1.8	centrality と eccentricity の関係 . . . . .	13
2.1	Woods-Saxson 型の核子密度分布 . . . . .	15
2.2	核子の大きさを考慮した原子核モデル . . . . .	15
2.3	衝突反応断面積 . . . . .	16
2.4	パートンによる Npart . . . . .	17
2.5	centrality vs Npart . . . . .	18
2.6	centrality vs participant eccentricity . . . . .	19
3.1	内部構造による eccentricity への影響 . . . . .	20
3.2	Npart=180 の時の Ncoll_quark vs participant eccentricity	22
3.3	Npart=102 の時の Ncoll_quark vs participant eccentricity	22
3.4	Npart=43 の時の Ncoll_quark vs participant eccentricity .	22
3.5	Npart の固定 . . . . .	24
3.6	Npart=180 の時の Ncoll_quark vs participant eccentricity	25
3.7	Npart=102 の時の Ncoll_quark vs participant eccentricity	25
3.8	Npart=43 の時の Ncoll_quark vs participant eccentricity .	25
3.9	Npart=180 の時の Ncoll_quark vs participant eccentricity	26
3.10	Npart=102 の時の Ncoll_quark vs participant eccentricity	26
3.11	Npart=43 の時の Ncoll_quark vs participant eccentricity .	27
3.12	Npart=180 の時の Npart_quark vs participant eccentricity	28
3.13	Npart=102 の時の Npart_quark vs participant eccentricity	28
3.14	Npart=43 の時の Npart_quark vs participant eccentricity .	28
3.15	Npart=180 の時の Npart_quark vs participant eccentricity	29

3.16 Npart=102 の時の Npart_quark vs participant eccentricity	29
3.17 Npart=43 の時の Npart_quark vs participant eccentricity .	30
3.18 Npart=180 の時の Npart_quark vs participant eccentricity	31
3.19 Npart=102 の時の Npart_quark vs participant eccentricity	31
3.20 Npart=43 の時の Npart_quark vs participant eccentricity .	31
3.21 パートン 3 個と 5 個の比較 . . . . .	33
3.22 パートン 3 個と 10 個の比較 . . . . .	36

# 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の閉じ込めから解放された超高温物質である。約 138 億年前の宇宙誕生直後、温度は約 2 兆度以上で QGP 状態にあったと考えられている。図 1.1 は、ビッグバンからの宇宙創生の流れを表している。量子色力学 (QCD) で記述されるように、クォークとグルーオンは核子内に閉じ込められているが、重い原子核を高エネルギーで衝突させることで高温高圧状態を作り、その結果クォークとグルーオンの閉じ込めが破れるため (図 1.2)、QGP 状態を再現することができる。

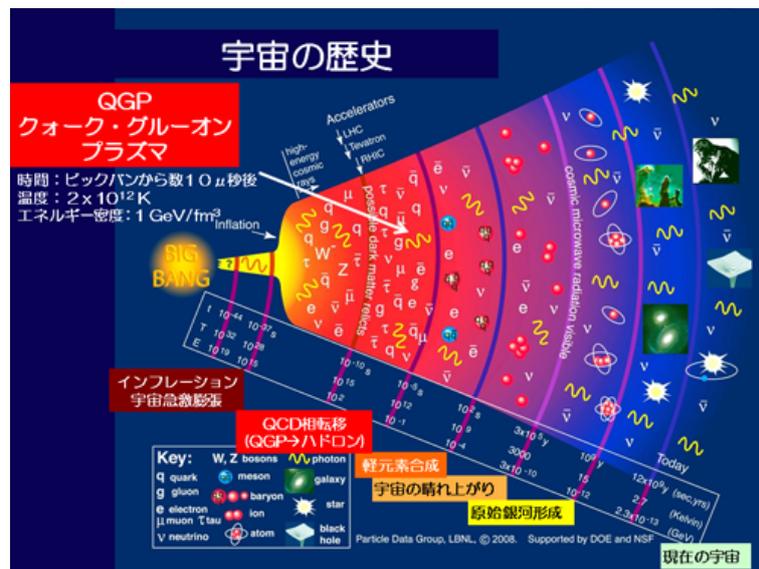


図 1.1: 宇宙創生の流れ

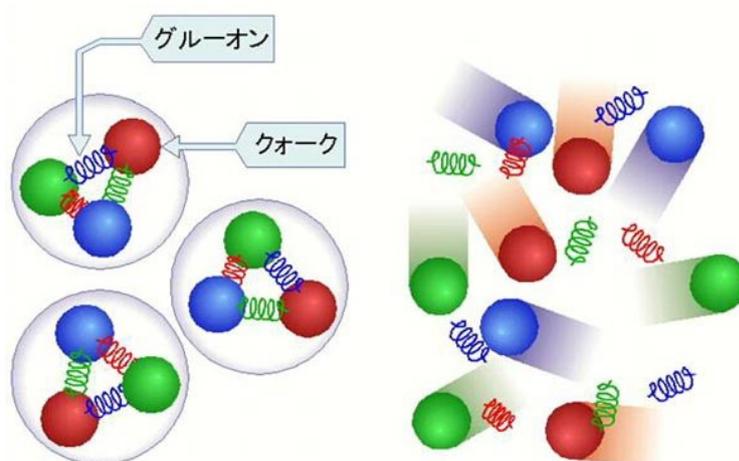


図 1.2: クォークとグルーオンの閉じ込めの破れ

## 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、実験室で QGP 状態を実現するために考案された実験である。加速器を用いて重い原子核をほぼ光速まで加速し、正面衝突させることで高温状態をつくりだす。

原子核衝突の時間発展の様子を図 1.3 に示す。衝突後、2つの原子核のパートン（クォークとグルーオンの総称）の散乱が始まり（図 1.3(3)）、その後熱平衡状態になり、QGP が実現する（図 1.3(4)）。その後温度が下がり、QGP 相からハドロン層へ相転移する（図 1.3(5)）。このハドロン層を観測し、QGP の性質を解明する。

### 1.2.1 RHIC 加速器

Relativistic Heavy Ion Collider(RHIC) 加速器とは米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)に建設された加速器で、陽子や金原子核など様々な粒子をほぼ光速まで加速させ、衝突させることができる。全周約 3800 m のリング型加速器で、世界初の衝突型重イオン加速器である。図 1.4 は RHIC の全体写真であり、写真の通り RHIC の他に 5 つの実験エリアがある。

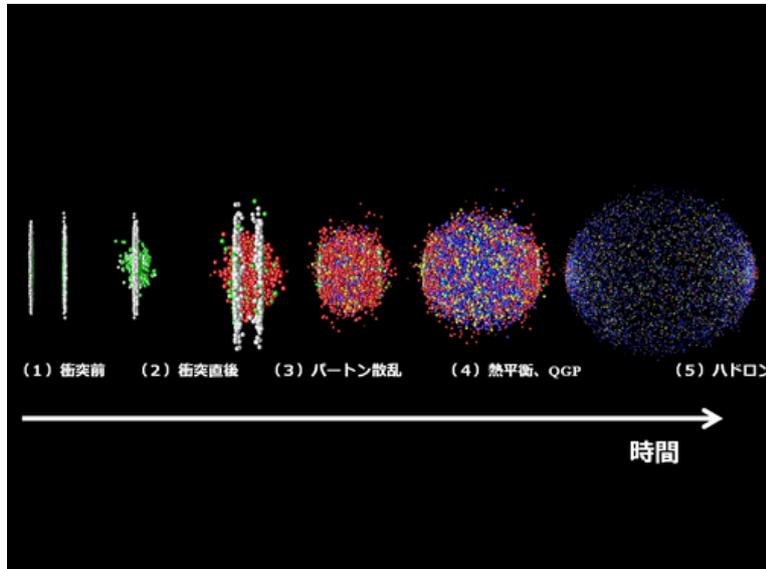


図 1.3: 原子核衝突の時間発展



図 1.4: RHIC 加速器

## 1.2.2 PHENIX 実験

Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment(PHENIX) 実験とは RHIC を用いた高エネルギー重イオン実験の1つで、QGP の研究や陽子の内部構造の研究をしている。2000 年から 2016 年までデータ収集を行っていた

## 1.3 物理量の定義

### 1.3.1 centrality(中心衝突度)

中心衝突度とは、衝突する2つの原子核の重なり具合を示す量である。図 1.5 は centrality について説明している。衝突する原子核のそれぞれのビーム軸の距離を  $b$ (impact parameter) という。 $b=0$  の時は完全正面衝突で centrality は 0% であり、 $b=2R$  のとき centrality は 100% である。PHENIX 実験では 0-92% まで測定が可能である。実際の centrality を直接測定することは不可能であるので、衝突により生成された荷電粒子の量から見積もる。

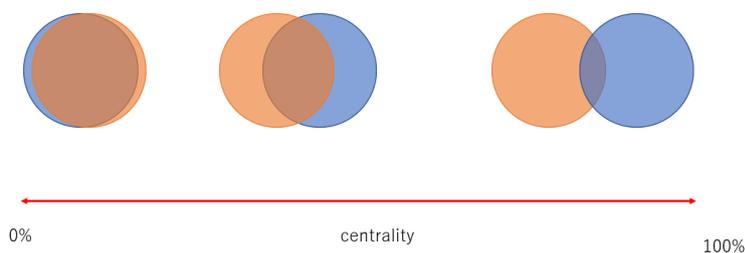


図 1.5: centrality

### 1.3.2 反応平面

衝突する2つの原子核の中心を結ぶ直線と2本のビーム軸を含む平面を反応平面という。図 1.6 は反応平面の概念図である。この反応平面を基準

に発生粒子の方位角分布を測定する。

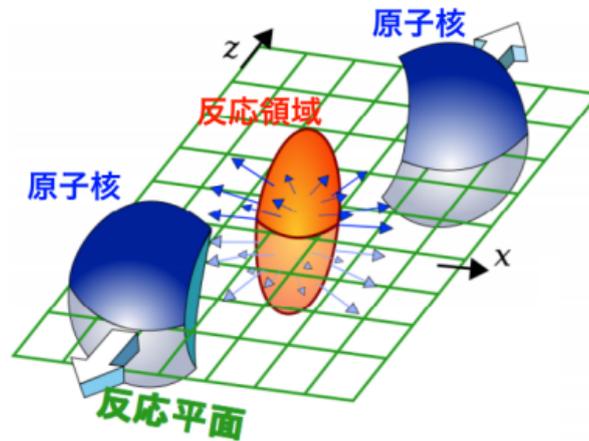


図 1.6: 反応平面

### 1.3.3 Npart, Npart\_quark

Npart とは原子核同士が衝突した際に衝突に関与した核子 (陽子と中性子の総称) の数のことであり、Npart\_quark とは衝突に関与したパートン (クォークとグルーオンの総称) の数のことである。

### 1.3.4 Ncoll, Ncoll\_quark

Ncoll とは原子核同士が衝突した際に核子が衝突を起こした総数のことであり、Ncoll\_quark とはパートンが衝突を起こした総数のことである。

## 1.4 楕円率 (eccentricity)

eccentricity とは、2つの原子核が衝突した際の衝突部分の楕円率のことである。重イオンで用いられる eccentricity には主に standard eccentricity と participant eccentricity があり、図 1.7[1] は eccentricity の概念図を表している。黒い円が原子核を表しており、図のように原子核が衝突したときに、青い点は、衝突した核子、またはパートンを表している。図の x 軸は、先ほど説明した反応平面に相当する。y 軸は、反応平面に垂直な軸である。standard eccentricity とはこの x 軸、y 軸を基準に求めた楕円率の

ことである。衝突した核子、パートンの座標より、

$$\varepsilon_s = \frac{\langle y^2 - x^2 \rangle}{\langle y^2 + x^2 \rangle} \quad (1.1)$$

で求められる。participant eccentricity とは、衝突したパートンの分布からもっともらしい軸を新たに設定し(図 1.7 の  $x'$  軸、 $y'$  軸)、その軸を基準に求めた楕円率のことである。衝突した核子、パートンの座標より

$$\varepsilon_{part} = \frac{\sqrt{(\sigma_y^2 - \sigma_x^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2}}{\sigma_y^2 + \sigma_x^2} \quad (1.2)$$

で求められ、ここで

$$\sigma_x^2 = \{x^2\} - \{x\}^2 \quad (1.3)$$

$$\sigma_y^2 = \{y^2\} - \{y\}^2 \quad (1.4)$$

$$\sigma_{xy} = \{xy\} - \{x\}\{y\} \quad (1.5)$$

である。以上の式より、standard eccentricity でも、participant eccentricity でも図 1.8 のように、中心衝突になるほど 0 に近づき、周辺衝突になるほど 1 に近づく。participant eccentricity のほうが実際の eccentricity に近いので本研究では、participant eccentricity を使用する。

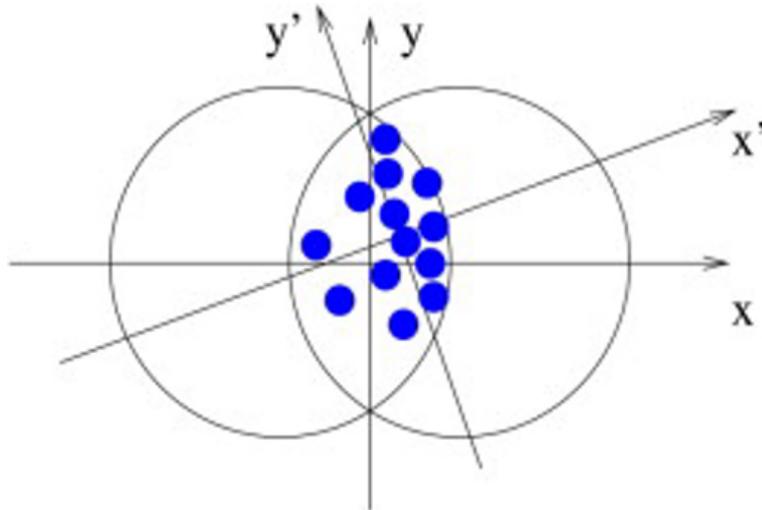


図 1.7: eccentricity

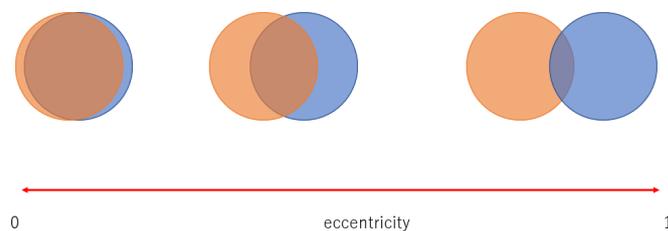


図 1.8: centrality と eccentricity の関係

## 1.5 研究目的

本研究の目的は、原子核同士が衝突した際、核子の内部構造による participant eccentricity への影響を明らかにすることである。これまでの研究では、原子核を構成する核子の内部構造は、考慮せずに eccentricity を計算していた。本研究では、核子が有限な数のパートンによって構成されており、原子核衝突においてそれらのパートンが衝突をすると考えた場合についての eccentricity を計算する。シミュレーションにより核子の内部に任意の数のパートンを作成し、衝突したパートンの数 ( $N_{\text{part-quark}}$ ) や、パートンの衝突回数 ( $N_{\text{coll-quark}}$ ) により participant eccentricity がどう変化するかを検証する。

## 第2章 解析

### 2.1 シミュレーション解析の手順

シミュレーションを用いて疑似金原子核を作り、様々な条件で衝突させることで eccentricity の変化を求める。以下にプログラムの内容を示す。

- (1) 衝突させる金原子核の衝突位置を乱数を用いて決める
- (2) 各原子核に 197 個の核子が重ならず、核子密度分布が Woods-Saxson 型になるように乱数を用いて決める。
- (3) 2つの原子核が衝突したときの衝突に関与した核子を求める。
- (4) 衝突した核子の内部にパートンを作成する
- (5) 衝突に関与したパートンを求め、衝突したパートンの数、パートンの衝突回数を求める。
- (6) 衝突したパートンの座標を用い、eccentricity を求める。

以下、内容についてさらに詳しく記述する。

#### 2.1.1 核子作成

##### Woods-Saxson 型

本研究での金原子核の核子密度分布は Woods-Saxson 型の分布を使用し、実際の式は以下に示す。

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + e^{\frac{r-R}{a}}} \quad (2.1)$$

$$R = 1.18 \times A^{\frac{1}{3}} - 0.48 [fm] \quad (2.2)$$

$$a = 0.54 [fm] \quad (2.3)$$

A は原子核の核子数で、本研究では金原子核を使用するため A=197 である。図 2.1 は金原子核の核子密度分布を示している。これを満たすことが核子の一つ目の条件である。

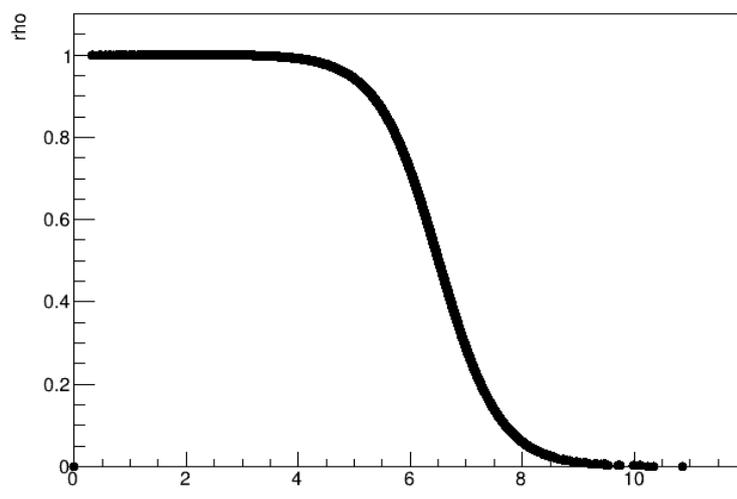


図 2.1: Woods-Saxson 型の核子密度分布

### 核子の大きさ

乱数を用い、原子核半径内にランダムに核子を 197 個作成する。しかし、核子にも大きさがあるため、作成した核子が重ならないようにする為に図 2.2 のようにすべての核子の中心は陽子半径の 2 倍の  $1.752[\text{fm}]$  以上離れて作成することが二つ目の条件である。

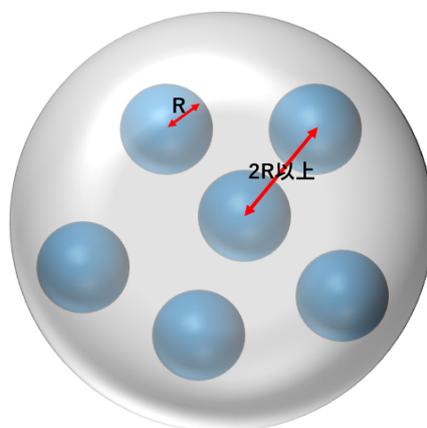


図 2.2: 核子の大きさを考慮した原子核モデル

### 2.1.2 核子やパートンの衝突

プログラム内で衝突の判断をする際、衝突の反応断面積を用いて計算する。本研究では、核子同士の衝突反応断面積は42[mb]とする。原子核の進行方向をz軸としたとき、原子核内の核子をxy平面に投影したときの核子の距離を $b$  (impact parameter) とする。そのとき  $b_{max} \times \pi^2 = 42$  とし、 $b < b_{max}$  を満たした核子は衝突する。次にパートンの衝突判断について述べる。核子の内部にパートンを作成する際パートンの数に依らず衝突反応断面積を等しくすると、パートンの数が増えるほど衝突する核子の数も増えるため、Npart を固定し、パートンの数を変えた時の内部構造の影響を調べることができない。(これについては後で詳しく述べる) そのためパートンの数により、パートンの衝突反応断面積を変える。核子の衝突反応断面積42[mb]を満たすパートンの衝突反応断面積はパートン3個の時は8.1[mb]、パートン5個の時は3.6[mb]、パートン10個のときは0.9[mb]である。その他の場合については以下の図2.3[2]を参照する。この表の $\sigma_{NN}$ は核子の衝突反応断面積、 $N_c$ はパートンの数、 $\sigma_{cc}$ はパートンの衝突反応断面積を表している。本研究では核子の衝突反応断面積は42[mb]であるので、 $\sigma_{NN}=42$ [mb]の箇所を参照する。

$\sqrt{s}$ (TeV)	0.019	0.2	2.76	5.02	7	13
$\sigma_{NN}$ (mb)	33	42	64	70	74	78
$N_c$	$\sigma_{cc}$ (mb)					
3	6.3	9.2	18.3	21.1	23.0	25.2
3*	5.8	8.1	15.5	17.9	19.7	21.6
5	2.4	3.6	8.4	10.3	11.4	12.7
7	1.2	1.9	4.6	5.7	6.5	7.4
10	0.6	0.9	2.2	2.8	3.3	3.8
20	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	0.8

TABLE II: Values used for  $\sigma_{NN}$  at various  $\sqrt{s_{NN}}$  at nucleon level, as well as corresponding  $N_c$  and  $\sigma_{cc}$  parameters at sub-nucleon level. The modified case is indicated with \* (see text).

図 2.3: 衝突反応断面積

## 2.2 内部構造による Npart の変化

本研究では、核子の内部構造を有限な数のパートンによって構成するモデルについても考える。このようなモデルにおいて、核子同士が衝突することは内部構造のパートン同士が衝突することと等しい。つまり、

核子同士が衝突反応断面積 42[mb] を満たしていても、パートンがパートンの衝突反応断面積を満たしていない場合、その核子同士は衝突していなかったということになる。以下にこの例を示す。

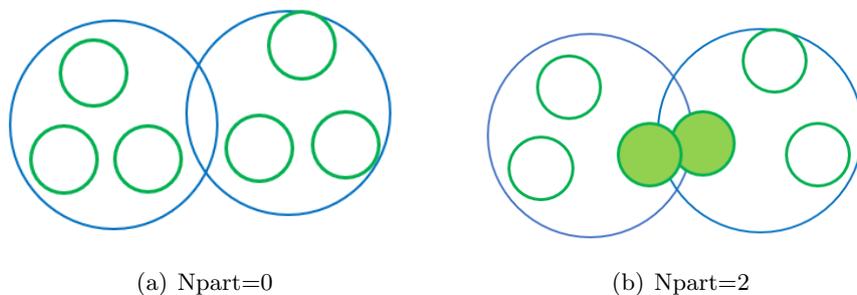


図 2.4: パートンによる  $N_{part}$

青い円は核子を表し、緑の円はパートンを表す。図 2.4(a) は核子は衝突しているように見えるが、実際の内部構造のパートンは衝突していないためこの核子は衝突していない。つまり図 2.4(a) の場合は  $N_{part}$  は 0 のためこの核子は *eccentricity* の計算には加えない。

図 2.4(b) は核子も衝突し、内部構造のパートンも衝突している。そのためこの場合は 2 個の核子は衝突していることとなり、 $N_{part}$  は +2 する。そしてパートンの座標を *eccentricity* の計算に加える。

## 2.3 s シミュレーションの正当性

シミュレーションの妥当性を示すために先行研究で得られている結果と自分のプログラムで求めた結果を比較する。まず原子核が正しく作成され、金原子核が衝突しているかを確認するために centrality vs  $N_{part}$  のグラフを図 2.5 に示す。このグラフは金原子核を 10000 回ランダムな位置で衝突を起こし、 $N_{part}$  が多い順に 10000 個のデータを 20 bin に振り分ける。つまり、 $N_{part}$  が多い順に 500 個のデータを 1 つのプロットとしてグラフに表示させる。グラフの赤色のプロットが先行研究の結果を表し、青色のプロットが本研究に用いたプログラムによる結果である。2 つのデータのプロットは一致していることより、本研究で使用する原子核モデルは正しいと考えられる。

次に、*eccentricity* の計算が正しく行われているか確認するために、centrality 10% 毎の自分の作成したマクロで計算された participant *eccentricity* と、文献値 [3] の値を比べたグラフを図 2.6 に示す。図 2.6 の赤色のプロットが本研究で使用するマクロから計算された participant *eccentricity* で、青色のプロットが文献値である。この 2 つのプロットは一致し

ており、本研究の participant eccentricity の計算も正しく行われていると考えられる。

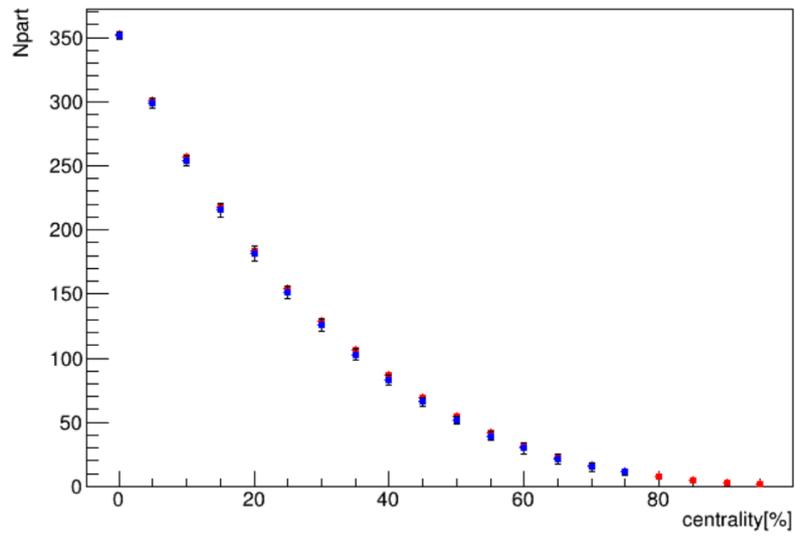


図 2.5: centrality vs Npart

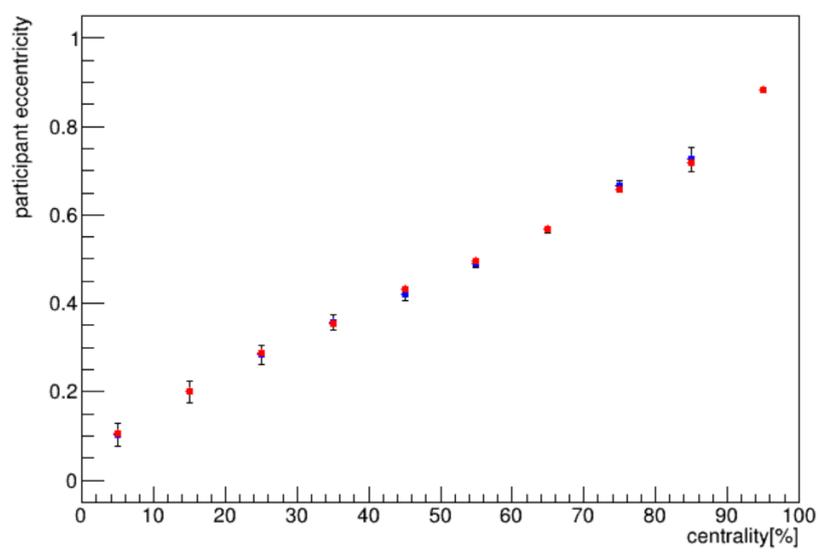


图 2.6: centrality vs participant eccentricity

## 第3章 結果

### 3.1 内部構造の影響の有無

以下に eccentricity の計算に核子の座標を用いたものと、パートンの座標を用いたものの  $N_{\text{coll\_quark}}$  vs eccentricity のグラフを示す。青色のプロットはクォークの座標を用いて計算したものを示し、赤色は核子が衝突反応断面積を満たしていてもパートンが満たしていない場合は計算から除いた核子の座標を用いて計算したもの、緑色は内部構造は考えず衝突した核子の座標を用いて計算したものである。

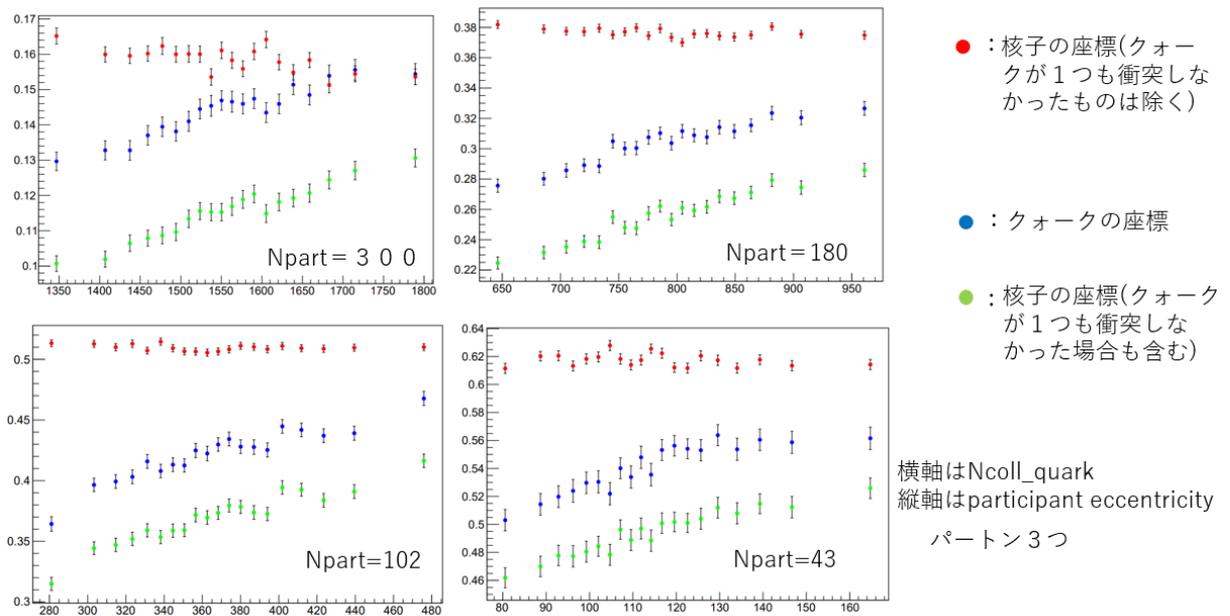


図 3.1: 内部構造による eccentricity への影響

このグラフは内部構造の影響の有無を調べるために  $N_{\text{part}}$  を固定し、それぞれの  $N_{\text{part}}$  についての 10000 イベント分のデータをグラフにしている。また、centrality 毎に内部構造の影響が変わる可能性を調べるためにも各 centrality 毎にグラフを分け、計 4 つのグラフを以下に示す。Centrality と

$N_{part}$  の関係は図 2.5 で示してある。図 2.5 から分かるように、 $N_{part} = 43$  は centrality 約 60 %、 $N_{part}=102$  は centrality 約 40 %、 $N_{part}=180$  は centrality 約 20 %、 $N_{part}=300$  は centrality 約 7.5 %を示している。図 3.1 は  $N_{part}$  を固定しているが、ここでの固定している  $N_{part}$  は 2.2 章で説明しているように内部のパートンが衝突を起こしていない核子は  $N_{part}$  としてカウントされていない。そのため図 3.1 の中で全く内部構造を考えない、つまりパートンが衝突を起こしていても核子が衝突したと思われる時点でその核子の座標を eccentricity の計算に含んでいる赤色のプロットの  $N_{part}$  は固定されていない。そしてこの図 3.1 には図 2.5 と同様に 1 プロットあたり 500 個のデータの平均値を表した 20 プロットが表示されている。この結果より、どの centrality でも内部構造を考えることにより eccentricity の値が異なることがわかる。よって内部構造によってどのように eccentricity が変化するかをより詳しく調べる。

## 3.2 $N_{coll\_quark}$ と eccentricity の関係

### 3.2.1 $N_{part}$ のみを固定した場合の $N_{coll\_quark}$ と eccentricity の関係

まず、 $N_{part}$  を固定することで各 centrality 毎の  $N_{coll\_quark}$  による影響があるかを検討する。核子内部のパートンの数を 3 個にし、毎回原子核の衝突位置、核子の位置を変化させ  $N_{part}=180,102,43$  のデータを各 10000 イベント分集めたものの一例を下図に示す。

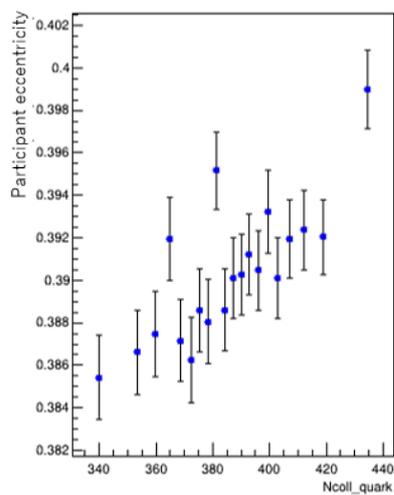
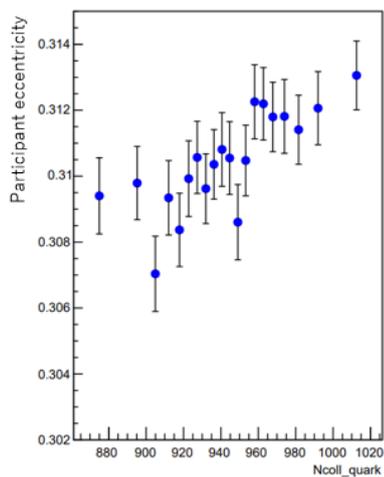


図 3.2: Npart=180 の時の Ncoll\_quark vs participant eccentricity    図 3.3: Npart=102 の時の Ncoll\_quark vs participant eccentricity

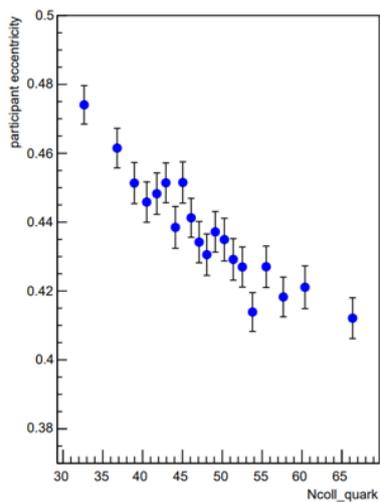


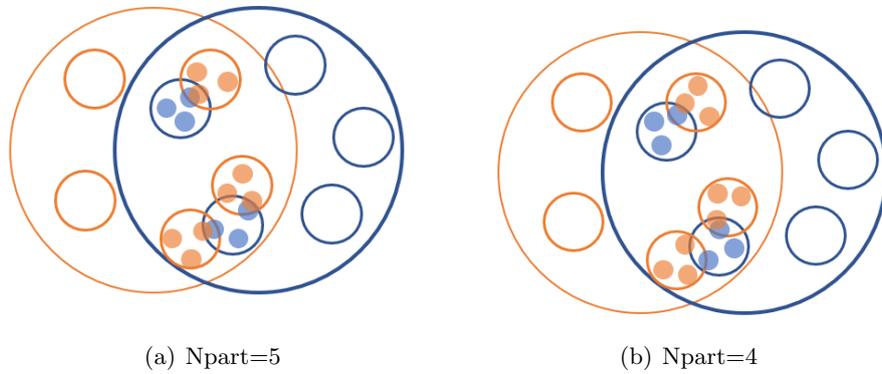
図 3.4: Npart=43 の時の Ncoll\_quark vs participant eccentricity

図 3.2 が centrality 20 %, 図 3.3 が centrality 40 %, 図 3.4 は centrality が 60 % のグラフである。eccentricity が小さいときは Ncoll\_quark が増える

ほど eccentricity も大きくなる傾向がみられたが、centrality が大きくなればなるほど逆に Ncoll\_quark が増えるほど eccentricity が小さくなる傾向がみられるようになった。centrality 40% の場合は Ncoll\_quark が増えても eccentricity が大きくも小さくもならない横ばいのようなグラフも多かったが、図 3.3 のように Ncoll\_quark が増えれば増えるほど eccentricity が大きくなることも多かったため今回は Ncoll\_quark と eccentricity が正の相関を持つ図 3.3 を一例として載せている。また図 3.2, 図 3.4 より、centrality が小さいときの eccentricity の最大値と最小値の差は 0.01 以下であるが、centrality が大きいときは 0.08 程度の差があり揺らぎが大きいことが分かった。

### 3.2.2 核子と Npart を固定した場合の Ncoll\_quark と eccentricity の関係

次に Npart と核子を固定し、内部構造パートンの位置のみを変化させることで内部構造の影響のみを考える。Npart と核子を固定するとはどういうことか、簡単に述べる。例えば Npart=5 のデータを 10000 イベント分収集するとする。そのためにはまず、原子核同士の衝突位置、核子の位置を決める。核子が衝突を起こしていても内部構造のパートン同士が衝突を起こしていない場合、核子は衝突していないものとするためこの時点で Npart は決まらない。核子の位置を決定した後に、核子の内部にパートンを作成する。図 3.5 に一例を示す。下図の大きな円は原子核、中間の円は核子、色がついた小さな円はパートンを表す。例えばパートンが図 3.5(a) のように作成されたとする。図 3.5(a) の場合オレンジの核子は 3 個、青の核子は 2 個衝突を起こしている。つまり Npart=5 を満たすため (a) の場合の eccentricity を計算し、Npart=5 の 1 イベント分のデータとして記録する。次に原子核の衝突位置、核子の位置は全く同じにし、色のついた円のパートンのみを再度ランダムに作成する。それが図 3.5(b) のようになったとする。この場合一番下にあるオレンジ色の核子はパートンが一つも衝突していない。つまり衝突した核子はオレンジの核子が 2 つ、青色の核子が 2 つで Npart=4 となり条件を満たしていない。このような場合はデータとして記録せずに再度パートンを作成する。これを繰り返し、10000 イベント分データ収集したものを 1 つのグラフにする。

図 3.5:  $N_{\text{part}}$  の固定

このようにして核子、 $N_{\text{part}}$  を固定し、パートンの衝突回数  $N_{\text{coll\_quark}}$  によって eccentricity がどのように変化するかを調べる。パートンの数を3個にし、それぞれの centrality で  $N_{\text{part}}$ 、核子を固定して 10000 イベント分のデータをグラフにすることで  $N_{\text{coll\_quark}}$  と eccentricity の相関を見る。centrality が 60%, 40%, 20% の時の  $N_{\text{coll\_quark}}$  vs eccentricity のグラフを何度か作成して内部構造の影響を見た結果の一例を図 3.6, 3.7, 3.8 に示す。

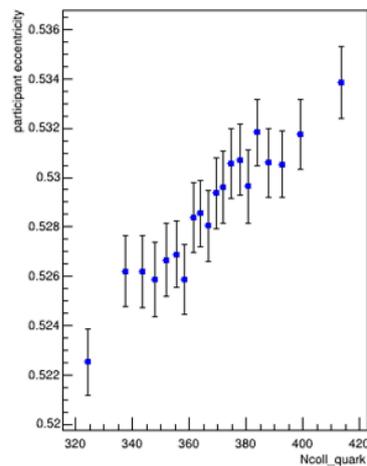
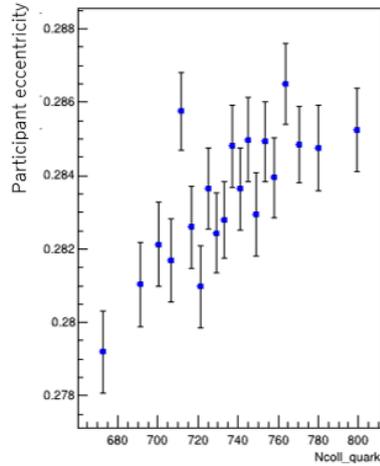


図 3.6: Npart=180 の時の Ncoll\_quark vs participant eccentricity      図 3.7: Npart=102 の時の Ncoll\_quark vs participant eccentricity

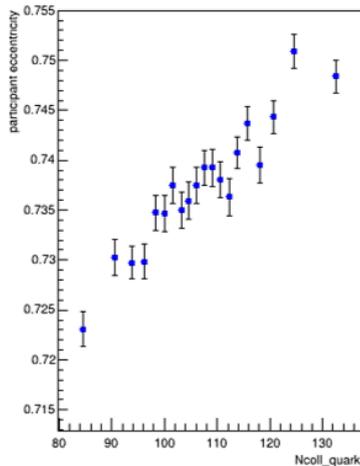


図 3.8: Npart=43 の時の Ncoll\_quark vs participant eccentricity

図 3.6 が centrality20 %, 図 3.7 が centrality40 %, 図 3.8 は centrality が 60 % のグラフである。どの centrality でも Ncoll\_quark が増えるほど eccentricity も大きくなる右肩上がりのグラフになることがほとんどだったが、centrality が大きくなるほど Ncoll\_quark が増えるほど eccentricity が小さくなる右肩下がりのグラフが見られることがあった。centrality が大きくなるほど右肩下がりのグラフがみられるようになったが、本研究で行ったシミュレーションの最大 centrality60 % で何度もグラフを作成した結果、右肩下がりのグラフになることは約 5 % 程でありどの centrality でもほぼ全て右肩上がりのグラフになっている。また、核子を固定した場合

はどの centrality でも同じ Npart 内の eccentricity の最大値と最小値の差は小さく、Npart のみを固定した場合よりも揺らぎが小さいことが分かった。しかし、centrality 20%の時の最大値と最小値の差は0.01程度だが、centrality 60%のときは差は0.03程度でやはり centrality が大きいほうが揺らぎが大きいことが分かった。また、核子の位置を固定しているので内部構造を全く考えなかった場合の核子で求めた eccentricity の値は一つに決まる。核子の座標で求めた eccentricity の値は図 3.6 の場合は 0.234、図 3.7 の場合は 0.456、図 3.8 の場合は 0.683 である。内部構造の影響を考えるために図 3.6, 図 3.7, 図 3.8 の縦軸のスケールを合わせて核子の座標で計算した eccentricity を赤線で表したものを以下に示す。

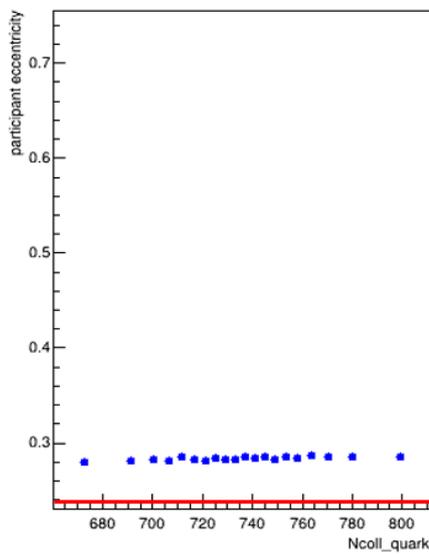


図 3.9: Npart=180 の時の Ncoll\_quark vs participant eccentricity

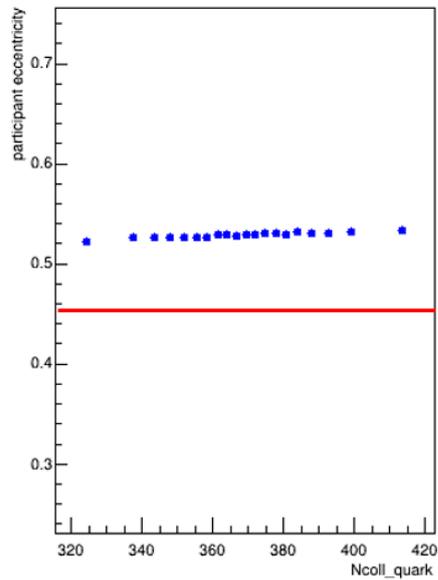


図 3.10: Npart=102 の時の Ncoll\_quark vs participant eccentricity

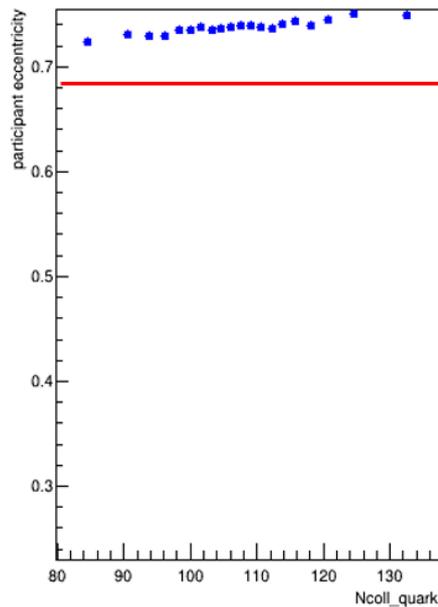


図 3.11:  $N_{part}=43$  の時の  $N_{coll\_quark}$  vs participant eccentricity

図より、どの centrality でも核子の座標の eccentricity と内部構造の eccentricity の差は変わらないことが分かる。つまり centrality が大きいほうが eccentricity の値が大きいため、その差の割合は小さくなる。そのため centrality が大きいほうが内部構造の eccentricity は内部構造を全く考えなかった場合の値に近づくことが分かる。

### 3.3 $N_{part\_quark}$ と eccentricity の関係

#### 3.3.1 $N_{part}$ を固定した場合の内部構造の影響

次に衝突したパートンの数  $N_{part\_quark}$  と eccentricity の関係を調べるために、 $N_{coll\_quark}$  の時と同様にパートンを 3 個にし、まずは  $N_{part}$  のみを固定し、 $N_{part\_quark}$  vs eccentricity のグラフを作成する。centrality 20%, 40%, 60% それぞれ 10000 イベント分のデータのグラフを複数作成し、以下にその一例を示す。

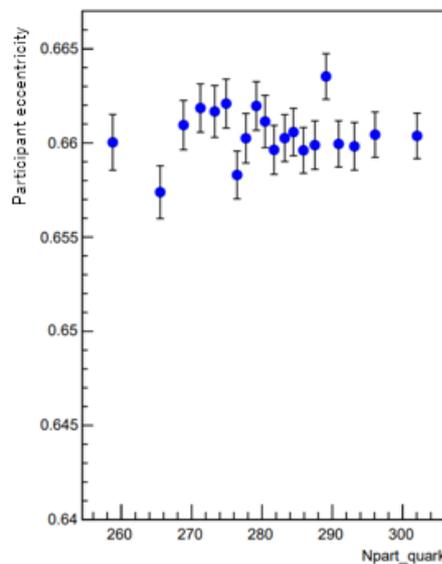
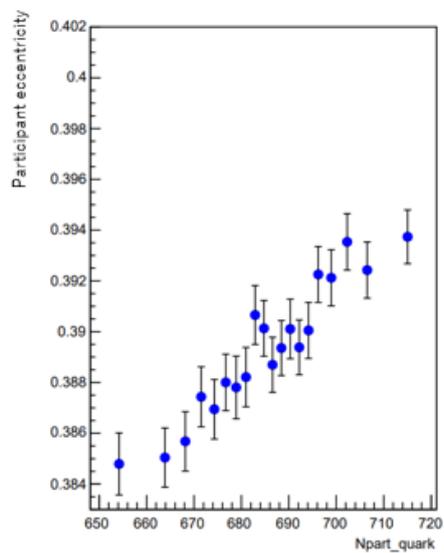


図 3.12: Npart=180 の時の Npart\_quark vs participant eccentricity  
 図 3.13: Npart=102 の時の Npart\_quark vs participant eccentricity

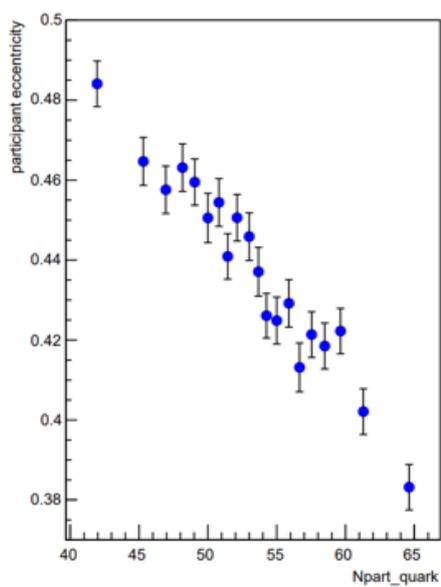


図 3.14: Npart=43 の時の Npart\_quark vs participant eccentricity

結果はNcoll-quarkの時と同様で、centralityが小さいときはNpart-quarkが多くなればなるほど eccentricity が大きくなるが、centrality が大きいときはその逆の傾向がみられることが多くなった。さらに centrality が大きいほうが同じ Npart 内の eccentricity の最大値と最小値の差は大きくなるため揺らぎが大きいことが分かった。また、Ncoll-quarkと同様に centrality 40%では右肩上がりのグラフだけでなく、Npart-quarkに対して横ばいのグラフも多く見られたので今回は横ばいになったグラフを一例として載せている。。これらのグラフより、Npart-quark も eccentricity に関係があることが分かったため内部構造の影響のみを考えた時の Npart-quark と eccentricity の変化を詳しく調べる。

### 3.3.2 核子と Npart を固定した場合の Npart-quark と eccentricity の関係

内部構造の影響のみを考えるために原子核の衝突位置、核子の位置、Npart を固定した場合の Npart-quark vs eccentricity のグラフを各 centrality で作成する。その一例を以下に示す。

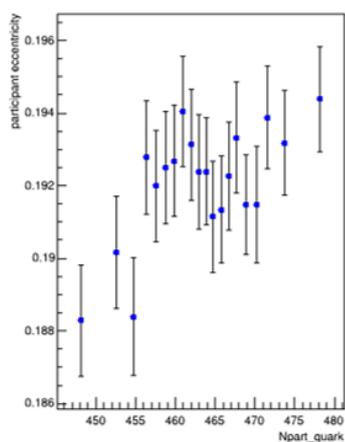


図 3.15: Npart=180 の時の Npart-quark vs participant eccentricity

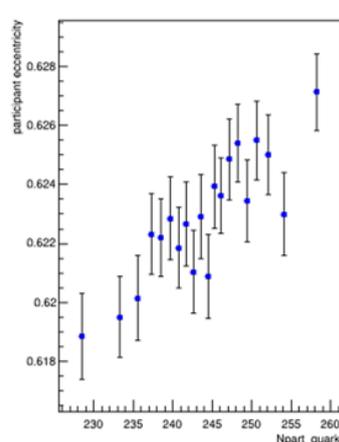


図 3.16: Npart=102 の時の Npart-quark vs participant eccentricity

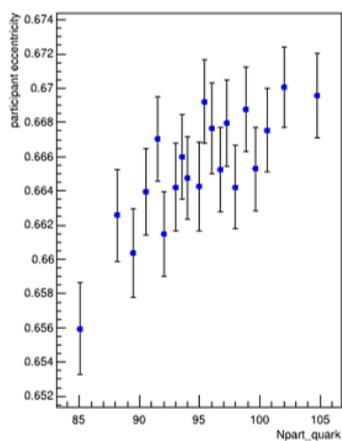


図 3.17:  $N_{part}=43$  の時の  $N_{part\_quark}$  vs participant eccentricity

図 3.15, 図 3.16, 図 3.17 より結果は  $N_{coll\_quark}$  の時と同様に核子を固定した場合は centrality が大きいときも多くが  $N_{part\_quark}$  が増えれば増えるほど eccentricity も大きくなることが分かった。また、核子を固定しなかった場合に比べて揺らぎが小さいが、centrality が大きくなるほど揺らぎが大きくなることが分かる。また、内部構造を全く考えずに核子の座標を用いて計算した eccentricity の値は図 3.15 の時は 0.640、図 3.16 の時は 0.572、図 3.17 の時は 0.141 であった。図 3.15, 図 3.16, 図 3.17 の縦軸のスケールを合わせ、核子の座標を用いて計算した eccentricity を赤線で表した図を以下に示す。

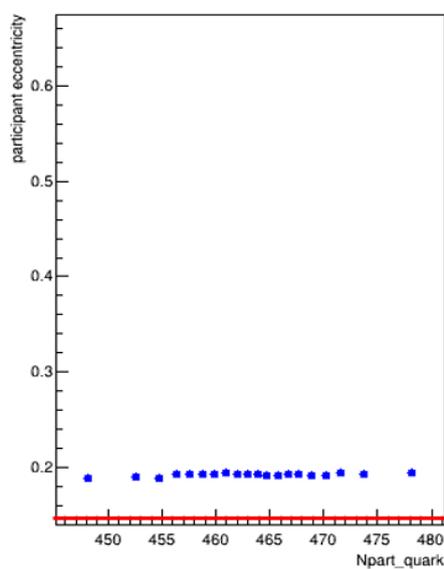


図 3.18:  $N_{part}=180$  の時の  $N_{part\_quark}$  vs participant eccentricity

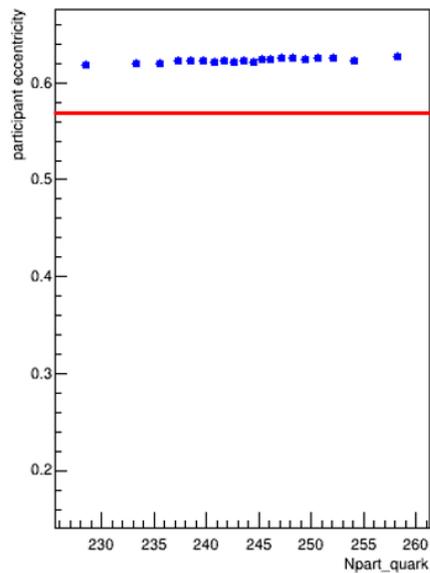


図 3.19:  $N_{part}=102$  の時の  $N_{part\_quark}$  vs participant eccentricity

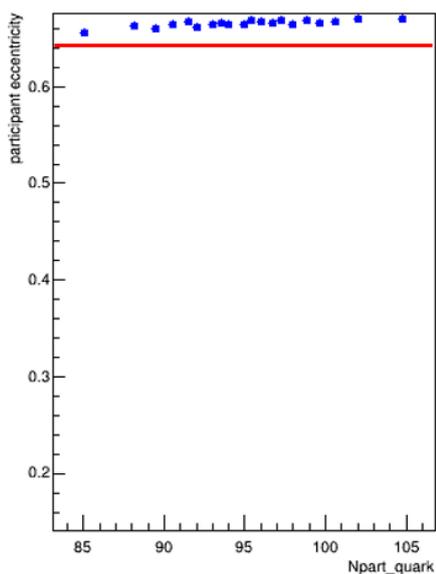


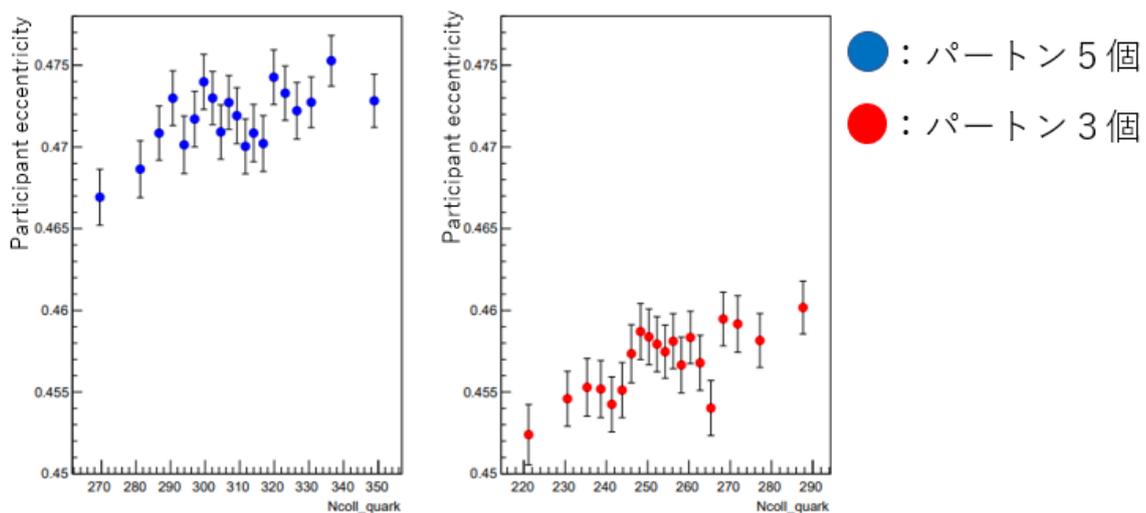
図 3.20:  $N_{part}=43$  の時の  $N_{part\_quark}$  vs participant eccentricity

ncoll\_quark の時と同様に centrality が大きくなるほどパートンで求めた eccentricity は内部構造を全く考えなかった場合の eccentricity に近づいていることが分かる。以上より Npart\_quark と Ncoll\_quark による影響の違いはほとんどないことが分かった。

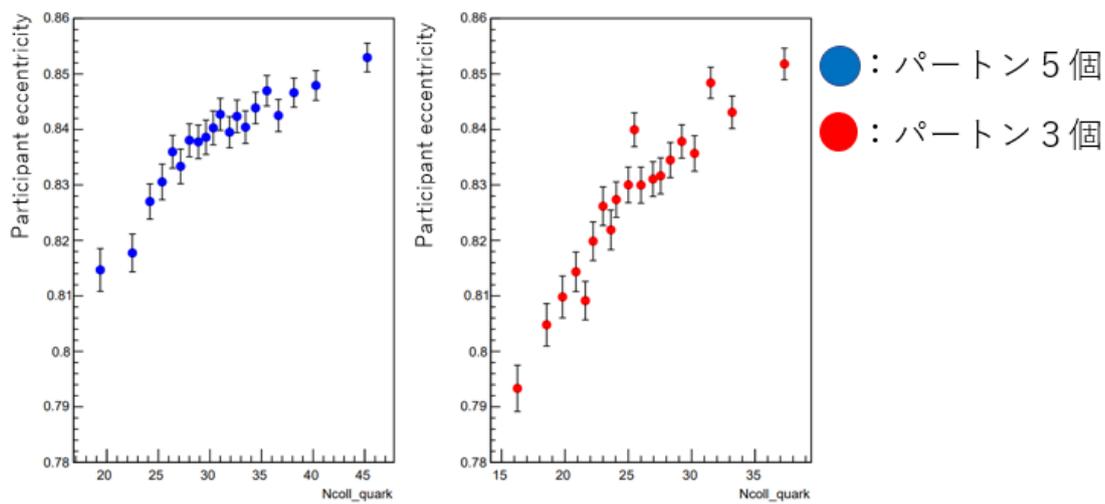
### 3.4 パートンの数に依る内部構造の影響

#### 3.4.1 パートン5個と3個の比較

今まで核子の内部にパートンを3個発生させてシミュレーションを行っていたが、パートンの数を増やし、パートンの数が変わったときに eccentricity に与える影響を調べる。2.1.2 章でも述べたように、パートンの数を変えたときにパートンの衝突反応断面積も変更する。まずはパートンの数を5個にし、3個の時と比べて影響の違いを見る。その結果の一例を図 3.21 に示す。



(a) Npart=120



(b) Npart=100

図 3.21: パートン 3 個と 5 個の比較

この図はそれぞれ核子の位置、Npart を固定し、パートンのみを毎回ランダムに生成したものの 10000 回分のグラフである。左の青色のプロットはパートンが 5 個の時、右の赤色はパートンが 3 個の時の eccentricity を表している。横軸は先ほどの結果より Npart\_quark も Ncoll\_quark も大きな違いがないことが分かったのでこの場では Ncoll\_quark を用いて比較している。図 3.21 より、パートンの数が変わっても Npart\_quark と eccentricity の関係、つまりグラフの形の違いは無いように見える。

実際の eccentricity の値の違いを調べるために、各 Npart 毎にパートンの位置のみを 10000 回変更して求めた eccentricity の平均値をパートンが 5 個の場合と 3 個の場合でそれぞれ求める。それぞれの場合の eccentricity の平均値を比べることでどちらの eccentricity が大きいのか、また値が大きい eccentricity に対する 2 つの平均値の差の割合を調べる。もちろん、ここでの比較はパートンの数による影響のみを見るために原子核の衝突位置、核子の位置、Npart は全て等しい。この比較を centrality 毎の影響の違いも調べるために Npart 50 ずつに分けて、各 Npart で 100 回、計 500 回分のデータの平均を示したものを以下の表にまとめる。以下の表の大小の割合とは各 Npart 毎で 100 回 eccentricity の平均値を比較したときのパートンの数それぞれの eccentricity の値が大きくなった確率を表している。そのためパートンの数が 3 個の場合と 5 個の場合の大小の割合の合計は必ず 100 % になっている。次に差の割合とは 2 つの eccentricity の値を比較した際に、大きかった eccentricity の値に対する 2 つの eccentricity の平均値の差の割合を求め、その割合の平均を表している。つまり差の割合が大きいほどパートンの数が 3 個の場合と 5 個の場合の eccentricity の差が大きいことになる。

Npart	0~50(centrality 大)		51~100		101~150	
	確率	差の割合	確率	差の割合	確率	差の割合
3 個のほうが大きい	35 %	2.5 %	34 %	1.3 %	23 %	1.7 %
5 個のほうが大きい	65 %	1.2 %	66 %	2.0 %	77 %	1.9 %

表 3.1: Npart:0~150

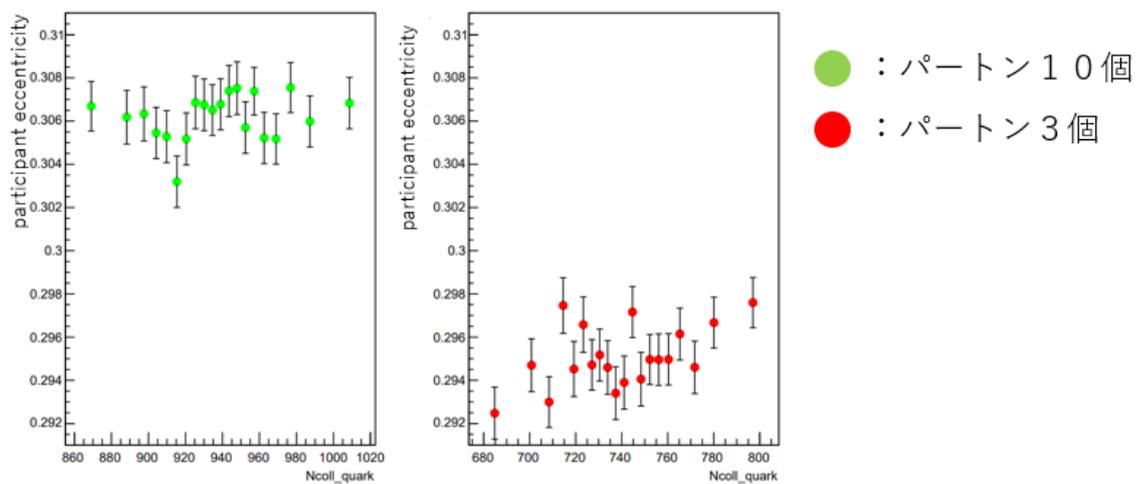
Npart	151~200		201~250(centrality 小)	
	確率	差の割合	確率	差の割合
3個のほうが大きい	21 %	1.2 %	18 %	0.6 %
5個のほうが大きい	79 %	2.2 %	82 %	2.3 %

表 3.2: Npart:151~250

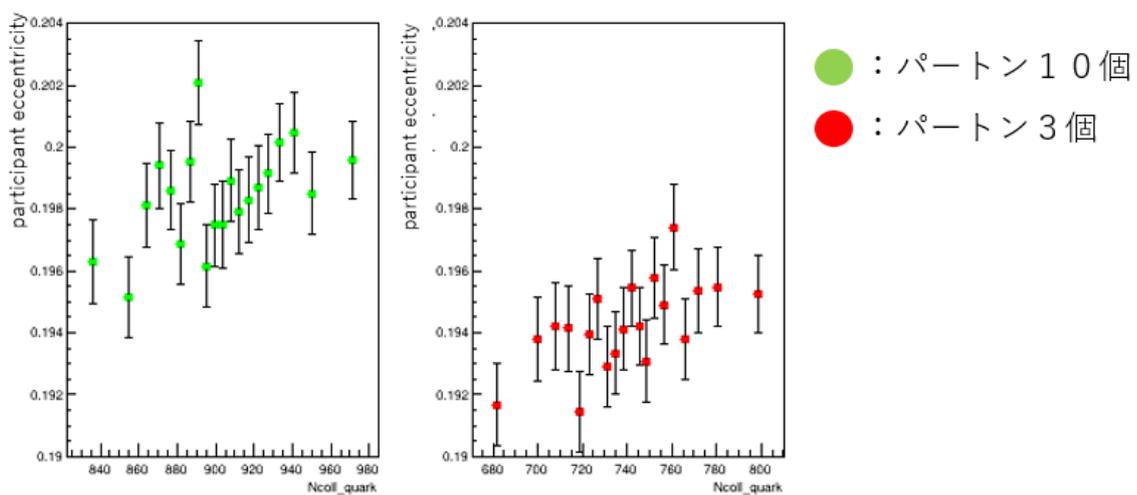
この表より、どの centrality でもパートン5個の方が eccentricity が大きくなる傾向があることが分かった。さらに、パートンが5個の時のほうが大きくなる確率を見ると centrality が小さくなるほどその傾向が強いように見える。また、基本的にパートンが5個の方が eccentricity は大きくなるので、その eccentricity の差の割合はパートンが3個の方が大きくなる場合に比べて大きくなる傾向がみられた。

#### 3.4.2 パートン10個と3個の比較

パートン3個と5個の場合の比較のみでパートンの数における eccentricity の影響を決めることは信憑性に欠けるため、核子内部にパートンを10個作成し、パートンが10個の場合と3個の場合における eccentricity について調べ、先ほどの5個の場合と3個の場合の eccentricity についての結果と比べることでパートンの数による eccentricity への影響を明らかにする。先ほどの5個と3個の時と同様のグラフを以下に示す。



(a) Npart=206



(b) Npart=206

図 3.22: パートン 3 個と 10 個の比較

図 3.22 は緑のプロットがパートンの数 10 個の eccentricity で赤がパートンの数 3 個の eccentricity を表している。この左と右のグラフは図 3.21 の時と同様に原子核の衝突位置、核子の位置、Npart が同じでパートンの数のみが違う。結果はパートンの数が 5 個と 3 個を比較したときと同様に、グラフの形はパートンの数を増やしても同じように見える。実際の eccentricity の値の差を見るために同様の表を以下に示す。

Npart	0~50(centrality 大)		51~100		101~150	
	確率	差の割合	確率	差の割合	確率	差の割合
3 個のほうが大きい	42 %	1.9 %	38 %	2.2 %	38 %	2.1 %
5 個のほうが大きい	58 %	2.6 %	62 %	2.1 %	62 %	2.8 %

表 3.3: Npart:0~150

Npart	151~200		201~250(centrality 小)	
	確率	差の割合	確率	差の割合
3 個のほうが大きい	29 %	2.5 %	26 %	2.2 %
5 個のほうが大きい	71 %	2.6 %	74 %	3.3 %

表 3.4: Npart:151~250

この表より、どの centrality でもパートンを 10 個にしたほうが eccentricity が大きくなり、その確率は centrality が小さくなるほど高くなるという同様の結果が得られた。また表では各 centrality 毎の差の割合を表示しているが、全 centrality の差の割合を平均すると、パートンの数が 3 個の場合よりも 5 個の場合のほうが eccentricity は 1.72 % 大きくなり、3 個の場合よりも 10 個の場合のほうが eccentricity は 2.68 % 大きくなる。つまりパートン 3 個の時よりも 5 個、5 個の時よりも 10 個の時のほうが eccentricity が大きくなることがわかった。

### 3.5 まとめ

本研究では  $\sqrt{s_{NN}}=200\text{Gev}$  で金原子核を衝突させたときの衝突初期形状の eccentricity の核子の内部構造依存性をシミュレーションを行うことで調べた。まず、原子核衝突を一回起こした際に、その eccentricity は内部構造のパートンが衝突を起こした回数  $N_{\text{coll\_quark}}$  とどのような関係があるか調べた。その結果は基本的にはどの centrality でも  $N_{\text{coll\_quark}}$  が増えるほど eccentricity が大きくなるが、centrality が大きくなるにつれ、 $N_{\text{coll\_quark}}$  が増えるほど eccentricity が小さくなる傾向もみられることが分かった。次に  $N_{\text{part\_quark}}$  と eccentricity の関係を調べた。その結果  $N_{\text{coll\_quark}}$  と同様の結果が得られたことから、 $N_{\text{coll\_quark}}$  と  $N_{\text{part\_quark}}$  による影響の違いはないと考えられる。次に核子内部のパートンの数による eccentricity への影響を明らかにするために、パートンの数を3個、5個、10個にして eccentricity を比べた。結果はパートンの数が多いほど eccentricity は大きくなり、centrality が小さくなるほどその傾向が強くなることが分かった。しかし、パートンの数による eccentricity の差は 1.72 %, 2.68 % というわずかな差のため実際に実験でこの違いを見ることは難しいと考える。

本研究では eccentricity について様々なことが明らかになったが、実際の PHENIX 実験の Au+Au 衝突のデータからは eccentricity を直接測定することは不可能である。そのため、eccentricity と関係があるといわれている原子核衝突を起こした際の反応領域の方位角異方性を表す量  $v_2$  と具体的な相関を明らかにすることを今後の課題としたい。

## 第4章

### 4.1 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、常に気をかけてくださり、小さな疑問でもなんでも相談に乗ってくださったため不安に思うことなく研究を続けることができました。また、実験データを解析する機会だけでなく、実際の実験現場に赴く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、日々のミーティング等で小さなお指摘からたくさん助言を頂きました。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柴田さん、森田さん、高濱さん、並本さん、波田さん、杉山さんには、発表の仕方やソフトウェアの便利な使用方法など様々なことについて助言いただきました。また、4回生の皆さんのおかげで研究室に行くことがとても楽しく、何度も励まされました。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。

## 参考文献

- [1] Eccentricity fluctuations and elliptic flow at RHIC  
Physics Letters B Volume 641, Issues 3–4, 12 October 2006, Pages  
260-264
- [2] クォークな数による衝突反応断面積 Phys.Rev.C94,024914(2016)
- [3] 下村真弥 筑波大学大学院 博士論文 Systematic Study of Az-  
imuthal Anisotropy for Charged Hadron in Relativistic Nucleus-  
Nucleus Collisions at RHIC-PHENIX
- [4] 黒田奈津貴 奈良女子大学 2021年度卒業論文
- [5] 高濱瑠菜 奈良女子大学 2021年度卒業論文
- [6] 石丸桜子 奈良女子大学 2019年度修士論文
- [7] 武田明痢奈良女子大学 2017年度修士論文
- [8] QGP <http://alice-j.org/>
- [9] QGP <http://kakudan.rcnp.osaka-u.ac.jp/jp/overview/world/QGP.html>
- [10] RHIC 加速器 <https://www.riken.jp/press/2010/20100216/>