

2020 年度 卒業論文
 $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ の
重イオン衝突における
衝突関与部の幾何学的異方性 の研究

奈良女子大学理学部
数物科学科 物理学コース
高エネルギー物理学研究室
黒田 奈津貴

2021 年 3 月

概要

現在の宇宙ではパートン (クォークとグルーオンの総称) は原子核を構成する核子内に閉じ込められているが、ビッグバン直後の初期宇宙ではこのパートンが核子内の閉じ込めから解放され、バラバラになったクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 状態であったと考えられている。今の宇宙で QGP を生成するためには、高温、もしくは高密度状態にして、パートンの閉じ込めを破らなければならない。そのために考え出されたのが高エネルギー重イオン衝突実験である。

本研究では、核子のモデルとして核子内にパートンが複数個存在するだけの単純なモデルで考えた場合、高エネルギー原子核衝突において幾何学的に記述するグラウバー模型を用いたモンテカルロシミュレーションにより Au + Au 衝突や、Cu + Cu 衝突の様な重イオン衝突におけるパートン衝突シミュレーションを行い、衝突初期の原子核同士の衝突関与部の形状を衝突に関与したパートンを用いて幾何学的に表した楕円率 (parton eccentricity) を計算し、原子核同士の衝突初期の衝突関与部の形状を衝突に関与した核子を用いて幾何学的に表した楕円率 (eccentricity) との比較を行った。

粒子の方位角異方性は QGP 生成の特徴的な性質の QGP の重要な性質の 1 つである。

重イオン衝突により QGP の生成が示唆される特徴の 1 つに、粒子の方位角異方性がある。ここで方位角異方性とは原子核が非中心衝突をすることにより生成、放出される粒子の分布が運動量空間において異方性を持つことである。粒子の方位角異方性は衝突初期の衝突関与部の形状を表す楕円率と相関がある。楕円率を計算することで核種の異なる原子核同士を同じ形状に規格化することが可能になるため、核種の異なる衝突の比較において楕円率を用いる手法は有効的である。

本研究では、核子内部をクォークやグルーオンを区別せずにパートンのみ存在する単純なモデルと仮定して parton eccentricity を計算し、その結果、本研究で考えている単純なモデルの場合において衝突関与パートン数は衝突関与核子同様に原子核が周辺衝突するにつれて減少傾向であり、parton eccentricity は大きくなる傾向があることを確認した。また、核子衝突の反応断面積とパートン衝突の反応断面積、核子内のパートン数にはそれぞれ関係性があることを確認した上で、核子内部構造を考慮しない場合の eccentricity の計算結果と考慮した場合の parton eccentricity の計算結果とは計算結果に差があり、eccentricity と parton eccentricity に違いがあることがわかった。以上より、核子内部構造を複数個のパートンのみで構成する単純なモデルで考えた場合、核子内のパートンの存在は楕円率の値に影響することを明らかにした。また、核子内のパートン数やパートン反応断面積と parton eccentricity の関係性を調べるために、パートン反応断面積を一定にした状態で核子内のパートン数を変更した。その結果、パートンの衝突確率は一定であるため核子内のパートン数が増加するほど衝突に関与したパートン数は増加し、パートンの重心位置が核子の中心位置に近づくため、parton eccentricity は eccentricity に近づき、やがて parton eccentricity は eccentricity よりも小さくなることがわかった。次に、核子内のパートン数一定にした状態でパートン反応断面積を変更した。その結果、核子内のパートン数は一定であるためパートン反応断面積が大きくなるほどパートンの衝突確率が高くなり、衝突に関与したパートン数は増加し、パートンの重心位置が核子の中心位置に近づくため、parton eccentricity は eccentricity に近づき、やがて parton eccentricity は eccentricity よりも小さくなる。パートン反応断面積を一定にした状態で核子内のパートン数を変更した結果と核子内のパートン数を一定にした状態でパートン反応断面積を変更した結果から、核子内のパートン数やパートン反応断面積を変化した場合の影響が周辺衝突と中心衝突で様子が異なることがわかった。

目次

第 1 章	序章	1
1.1	クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)	1
1.2	相対論的高エネルギー重イオン衝突実験	3
1.3	使用する物理量の定義	4
1.4	楕円率	6
1.5	核子の内部構造	8
1.6	研究目的	9
1.7	衝突シミュレーション手順	10
1.8	楕円率計算手法	13
第 2 章	金原子核衝突シミュレーション結果	15
2.1	楕円率計算結果と、先行研究との比較	15
2.2	楕円率計算結果	16
2.3	核子内のパートン数と楕円率との関係	19
2.4	パートン反応断面積と楕円率との関係	23
2.5	金原子核衝突における核子内のパートン数とパートン反応断面積と楕円率の関係についてのまとめ	26
2.6	衝突に関与したパートン数と楕円率の関係	26
2.7	各 N_{part} ごとの N_{ppart} と楕円率の関係	27
2.8	まとめ	29
	謝辞	31
付録 A	銅原子核衝突シミュレーション結果	32
A.1	銅原子核衝突における楕円率計算結果と、先行研究との比較	33
A.2	銅原子核衝突における楕円率計算結果	33
A.3	核子内のパートン数のみ変化した場合の銅原子核衝突における核子内のパートン数と楕円率との関係	36
A.4	銅原子核衝突におけるパートン反応断面積と楕円率との関係	39
付録 B	内部構造を考慮した場合の衝突関与部の形状と楕円の方位角異方性 v_2 の関係	43
B.1	楕円の方位角異方性 v_2	43
B.2	横運動量 p_T	44

B.3	衝突関与部の形状と楕円方位角異方性 v_2 の関係	44
B.4	核子内のパートン数が異なる場合の衝突関与部の形状と楕円方位角異方性 v_2 の関係	46
付録 C	N_{part} 別の N_{ppart} と楕円率の関係	48
付録 D	N_{part} 別の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ 関係	49
付録 E	核子内のパートン数が 10 個の場合における N_{part} 別の N_{ppart} と楕円率の関係	50
付録 F	核子反応断面積 σ_{NN} と核子内のパートン数 N_c とパートン反応断面積 σ_{cc} の関係	52
付録 G	金原子核衝突における各 centrality の N_{part} と eccentricity ε の関係	53
付録 H	銅原子核衝突における各 centrality の N_{part} と eccentricity ε の関係	54
参考文献		55

目次

1.1	クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)	1
1.2	原子核相図	2
1.3	宇宙の歴史	3
1.4	重イオン衝突における時間発展	3
1.5	米国ブルックヘブン国立研究所	4
1.6	反応平面	5
1.7	centrality と衝突関与核子数の関係。2つの原子核を黄色と水色の円で表している。 centrality が 0% に近づくほど原子核同士は重なった状態になる。	5
1.8	standard eccentricity	7
1.9	パートン分布関数	8
1.10	金原子核における核子密度分布	10
1.11	核子内のパートン $\neq 3$ 個の場合のパートン密度分布	11
1.12	核子内のパートン $= 3$ 個の場合のパートン密度分布	12
1.13	eccentricity ε	14
2.1	楕円率計算結果 ε	15
2.2	核子内のパートン数 = 3 個の場合の楕円率計算結果 ε_{parton}	16
2.3	核子内のパートン数 = 10 個の場合の楕円率計算結果 ε_{parton}	17
2.4	核子内のパートン数 = 20 個の場合の楕円率計算結果 ε_{parton}	17
2.5	核子内のパートン数の違いによる比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の変化	18
2.6	パートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ と一定にした場合の核子内のパートン数が 3 個の時 の parton eccentricity ε_{parton} の結果	19
2.7	パートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ と一定にした場合の核子内のパートン数が 10 個の 時の parton eccentricity ε_{parton} の結果	20
2.8	パートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ と一定にした場合の核子内のパートン数が 30 個の 時の parton eccentricity ε_{parton} の結果	20
2.9	核子内のパートン数のみ変化した場合の核子内のパートン数の違いによる比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の 変化	21
2.10	周辺衝突での ε_{parton} と ε の関係	22
2.11	核子内のパートン数が 3 個と一定にした場合のパートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ の時 の parton eccentricity ε_{parton} の結果	23

2.12	核子内のパートン数が 3 個と一定にした場合のパートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 8.1mb$ の時の parton eccentricity ε_{parton} の結果	24
2.13	核子内のパートン数が 3 個と一定にした場合の核子内のパートンが全て衝突する時の parton eccentricity ε_{parton} の結果	24
2.14	パートン反応断面積の違いによる比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の変化	25
2.15	$N_{part} = 167$ の N_{ppart} と楕円率の関係	27
2.16	$N_{part} = 74$ の N_{ppart} と楕円率の関係	27
2.17	$N_{part} = 13$ の N_{ppart} と楕円率の関係	27
2.18	$N_{part} = 167$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係	28
2.19	$N_{part} = 74$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係	28
2.20	$N_{part} = 13$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係	28
A.1	銅原子核の核子分布	32
A.2	銅原子核衝突における楕円率計算結果 ε	33
A.3	銅原子核衝突における核子内のパートン数 = 3 個の場合の楕円率計算結果 ε_{parton}	34
A.4	銅原子核衝突における核子内のパートン数 = 10 個の場合の楕円率計算結果 ε_{parton}	34
A.5	銅原子核衝突における核子内のパートン数 = 20 個の場合の楕円率計算結果 ε_{parton}	35
A.6	銅原子核衝突における核子内のパートン数の違いによる比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の変化	35
A.7	銅原子核衝突におけるパートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ と一定にした場合の核子内のパートン数が 3 個の時の parton eccentricity ε_{parton} の結果	36
A.8	銅原子核衝突におけるパートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ と一定にした場合の核子内のパートン数が 10 個の時の parton eccentricity ε_{parton} の結果	37
A.9	銅原子核衝突におけるパートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ と一定にした場合の核子内のパートン数が 30 個の時の parton eccentricity ε_{parton} の結果	37
A.10	核子内のパートン数のみ変化した場合の銅原子核衝突における核子内のパートン数の違いによる比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の変化	38
A.11	銅原子核衝突における核子内のパートン数が 3 個と一定にした場合のパートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ の時の parton eccentricity ε_{parton} の結果	39
A.12	銅原子核衝突における核子内のパートン数が 3 個と一定にした場合のパートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 8.1mb$ の時の parton eccentricity ε_{parton} の結果	40
A.13	銅原子核衝突における核子内のパートン数が 3 個と一定にした場合の核子内のパートンが全て衝突する時の parton eccentricity ε_{parton} の結果	40
A.14	銅原子核衝突におけるパートン反応断面積の違いによる比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の変化	41
B.1	楕円的方位角異方性	43
B.2	低横運動領域 ($0.2GeV \leq p_T \leq 1.0GeV$) において N_{part} と v_2 を楕円率で規格化した $\frac{v_2}{\varepsilon}$ の関係	44
B.3	中程度横運動領域 ($1.0GeV \leq p_T \leq 2.0GeV$) において N_{part} と v_2 を楕円率で規格化した $\frac{v_2}{\varepsilon}$ の関係	45
B.4	高横運動領域 ($2.0GeV \leq p_T \leq 4.0GeV$) において N_{part} と v_2 を楕円率で規格化した $\frac{v_2}{\varepsilon}$ の関係	45

B.5	低横運動領域 ($0.2\text{GeV} \leq p_T \leq 1.0\text{GeV}$) において N_{part} と v_2 を楕円率で規格化した $\frac{v_2}{\varepsilon}$ の関係	46
B.6	中程度横運動領域 ($1.0\text{GeV} \leq p_T \leq 2.0\text{GeV}$) において N_{part} と v_2 を楕円率で規格化した $\frac{v_2}{\varepsilon}$ の関係	46
B.7	高横運動領域 ($2.0\text{GeV} \leq p_T \leq 4.0\text{GeV}$) において N_{part} と v_2 を楕円率で規格化した $\frac{v_2}{\varepsilon}$ の関係	47
C.1	$N_{part} = 325$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	48
C.2	$N_{part} = 235$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	48
C.3	$N_{part} = 114$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	48
C.4	$N_{part} = 46$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	48
C.5	$N_{part} = 26$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	48
C.6	$N_{part} = 6$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	48
D.1	$N_{part} = 325$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係	49
D.2	$N_{part} = 235$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係	49
D.3	$N_{part} = 114$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係	49
D.4	$N_{part} = 46$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係	49
D.5	$N_{part} = 26$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係	49
D.6	$N_{part} = 6$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係	49
E.1	$N_{part} = 325$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	50
E.2	$N_{part} = 235$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	50
E.3	$N_{part} = 167$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	50
E.4	$N_{part} = 114$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	51
E.5	$N_{part} = 74$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	51
E.6	$N_{part} = 46$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	51
E.7	$N_{part} = 26$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	51
E.8	$N_{part} = 13$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	51
E.9	$N_{part} = 6$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係	51
F.1	核子反応断面積 σ_{NN} と核子内のパートン数 N_c とパートン反応断面積 σ_{cc} の関係 [6]	52

表目次

1.1	核子対あたりの重心系エネルギーの大きさによる核子の反応断面積 σ_{NN} に使用される値、核子内のパートン数に対応する N_c 及びその時のパートン反応断面積 σ_{cc} 核子内のパートン数 = 3 個の場合の修正後の値は 3* で示される。[6]	13
2.1	各 centrality ごとの N_{part} の平均と、その小数第一位を四捨五入した値 [8]	28
G.1	Au+Au の各 centrality における N_{part} と eccentricity ϵ の関係 [8][15]	53
H.1	Cu+Cu の各 centrality における N_{part} と eccentricity ϵ の関係 [9][15]	54

第1章

序章

1.1 クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

強い相互作用を記述する量子色力学 (Quantum Chromo Dynamics :QCD) の性質により、カラー荷を持つ粒子は、一般的にはカラー的に中性である無色（白色）以外の状態では単独で存在することができず、現在の宇宙の様な通常の温度、密度状態では、核子からクォークやグルーオンを単独で取り出すことができない。これをパートンの「閉じ込め」という。ビッグバン直後の初期宇宙ではパートンが核子内の閉じ込めから解放され、バラバラになった状態であるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) という物質相が存在したと考えられている。[1] (図 1.1) この物質相を作り出し研究するために考え出された実験が高エネルギー重イオン衝突実験である。

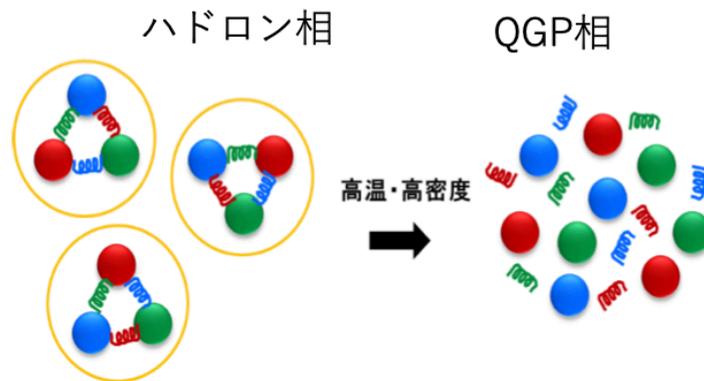


図 1.1 クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

図 1.2 は原子核の相図である。重イオン衝突の初期衝突以降の時間変化は図 1.4 の様であると考えられている。衝突後、高温、もしくは高密度状態になることで熱平衡状態に達すると膨張し、QGP が生成する。膨張することによって密度が低下するため温度が低下し、相転移温度以下にまで温度が低下すると QGP 相からハドロンガス相に相転移し、ハドロン化する。

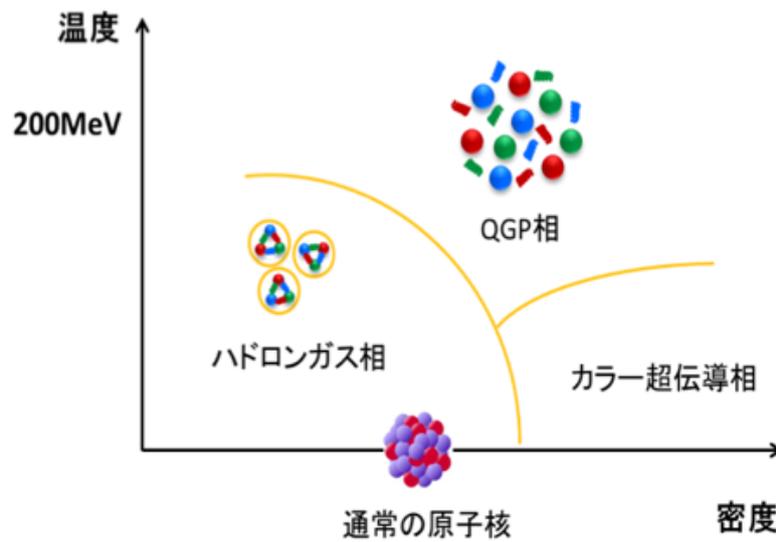


図 1.2 原子核相図

1.2 相対論的高エネルギー重イオン衝突実験

図 1.4 は重イオン衝突における物質の時間発展を表している。QCD によると高温、もしくは高密度状態ではその閉じ込めが破れるという性質も持つため、加速器を用いて、金や鉛等の重イオン同士を高エネルギーで正面衝突させ、高温物質を生成する実験により、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) を実験室で生成する試みが行われている。

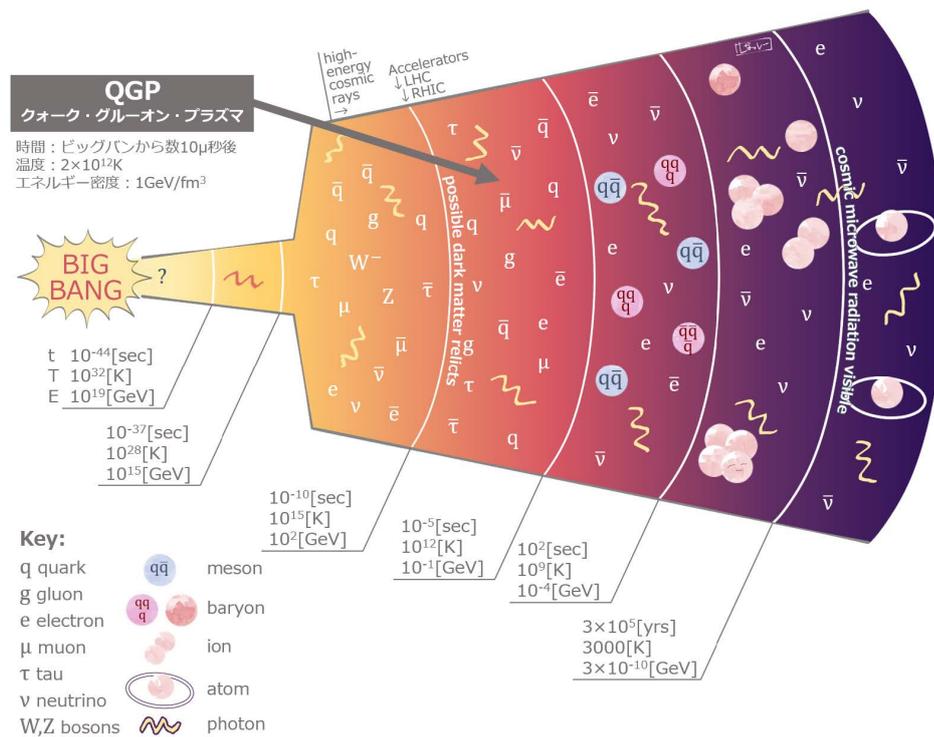


図 1.3 宇宙の歴史

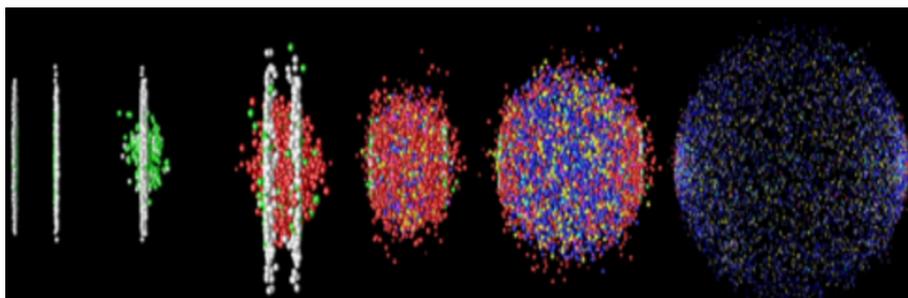


図 1.4 重イオン衝突における時間発展

宇宙初期に存在したと考えられている高温・高エネルギー密度な物質であるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) について実験、研究が行われている例として、PHENIX 実験 (the Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment) がある。PHENIX 実験とは、米国ブルックヘブン国立研究所 (Brookhaven National Laboratory: BNL) にある重イオン衝突型加速器 (Relativistic Heavy Ion Collider: RHIC) で行なわれている高エネルギー原子核衝突実験である。RHIC で実験している核種の例は陽子や金、ウラニウム等で、異なる核種同士の衝突実験も可能である。(図 1.5)

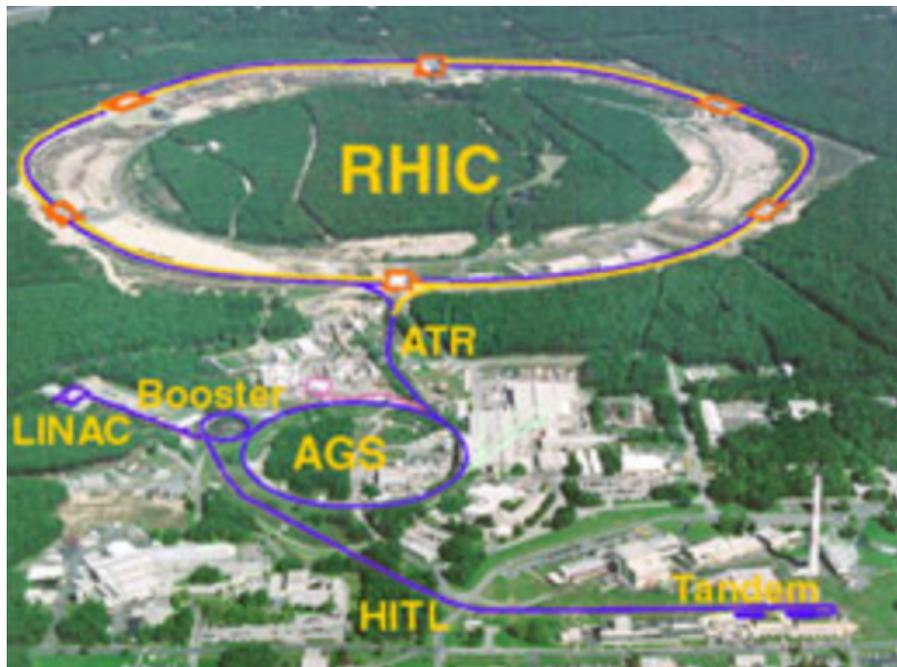


図 1.5 米国ブルックヘブン国立研究所

1.3 使用する物理量の定義

1.3.1 centrality

原子核は広がりを持つため、原子核衝突において正面衝突の場合 (中心衝突) と少し互いにずれて衝突する場合 (非中心衝突) がある。このため、原子核同士の重なる度合を考慮する必要があり、この重なる程度を 0~100% で表す。原子核同士の中心を結ぶ直線とそれぞれの原子核の中心が進む直線 (beam 軸) が成す平面を反応平面と呼び、反応平面方向を「In-Plane」、反応平面に対し垂直な方向を「Out-of-Plane」と呼ぶ。

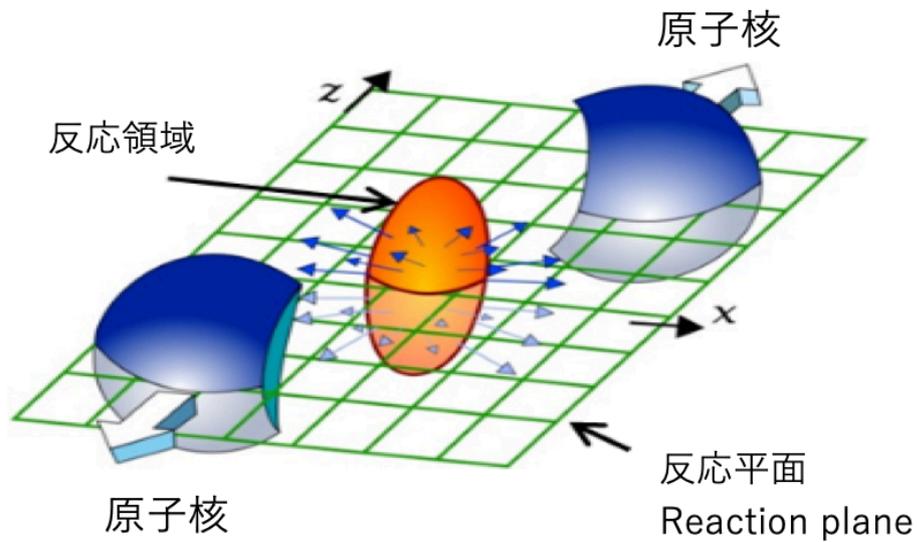


図 1.6 反応平面

In-Plane と Out-of-Plane で成す平面での原子核同士の中心間距離を b (インパクトパラメータ: 衝突係数)、原子核半径を R とすると、 $b=0$ の時、正面衝突して原子核の大部分が重なるため、 $\text{centrality}=0\%$ 、 $b=2R$ の時、 $\text{centrality}=100\%$ である。つまり、 centrality は b が小さくなるにつれて 0% に近づき、中心衝突する。また、 centrality は衝突に関与した核子の数と関係する。関与した核子数が多いほど centrality は 0% に近づき、衝突に関与した核子数が少なくなるほど centrality は 100% に近づく。図 1.7 中の N_{part} とは衝突に関与した核子の数を指す。

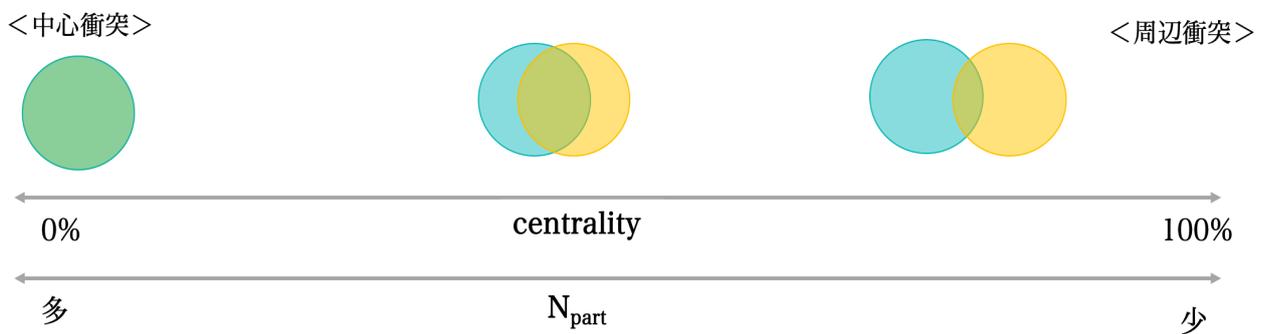


図 1.7 centrality と衝突関与核子数の関係。2つの原子核を黄色と水色の円で表している。centrality が 0% に近づくほど原子核同士は重なった状態になる。

1.3.2 participant

衝突に関与した核子のことを participant と呼び、participant の数を N_{part} と表す。 N_{part} はシミュレーションにおいて centrality を計算する際に用いる。centrality の定義は厳密には測定された荷電粒子数を降順に並べた時に上位 10% を centrality 0-10%, 次に大きな 10% を centrality 20-30% と定義するが、本研究では centrality を測定するのに衝突関与核子の数 N_{part} を用いる。

1.3.3 parton participant

衝突に関与したパートンのことを表す。partonparticipant はパートン衝突関与部の幾何学的な楕円率 (parton eccentricity) を計算する際に用いる。

1.4 楕円率

1.4.1 eccentricity ε

平面上では、幾何学的な観点から見ると原子核同士の衝突は2つの円が重なる様に見える。この重なる部分が衝突関与部である。原子核同士が中心衝突した場合、2つの円が一致する様に重なって見えるため、衝突関与部の形状は円形であり、原子核同士が周辺衝突した場合、2つの円の重なり方がずれて見えるため、衝突関与部の形状はアーモンド形の様な形状に見える。この様な2つの円の衝突関与部の形状が歪み(変形)の程度を表す量を楕円率 (eccentricity) と呼び、重なる部分の形状の歪みの程度を 0~1 の範囲で表す。中心衝突ほど衝突関与部の形状は円形に近づくため、eccentricity の値は 0 に近づき、周辺衝突ほど重なる部分の形状は直線に近づくため、eccentricity の値は 1 に近づく。本研究では衝突関与粒子を用いて楕円の長軸と短軸を決定する participant eccentricity を用いている。本卒業論文中で「eccentricity(または parton eccentricity)」と表記するときはこの participant eccentricity を表す。この計算方法の利点は反応平面に垂直な軸を楕円の長軸と平行な軸を短軸とする standard eccentricity よりも実験の状態に近い状況をシミュレーションし、計算可能な点である。

eccentricity ε の計算式は式 1.1 である。ビーム軸方向を z 軸とすると、反応平面内で z 軸に垂直な直線を x 軸、z 軸と x 軸に垂直な直線を y 軸とする。式 1.1 の $\langle y^2 \rangle$ は xy 平面上において、衝突関与核子 (participant) の y 成分の 2 乗の平均値を表し $\langle x^2 \rangle$ は x 成分の 2 乗の平均値を表している。

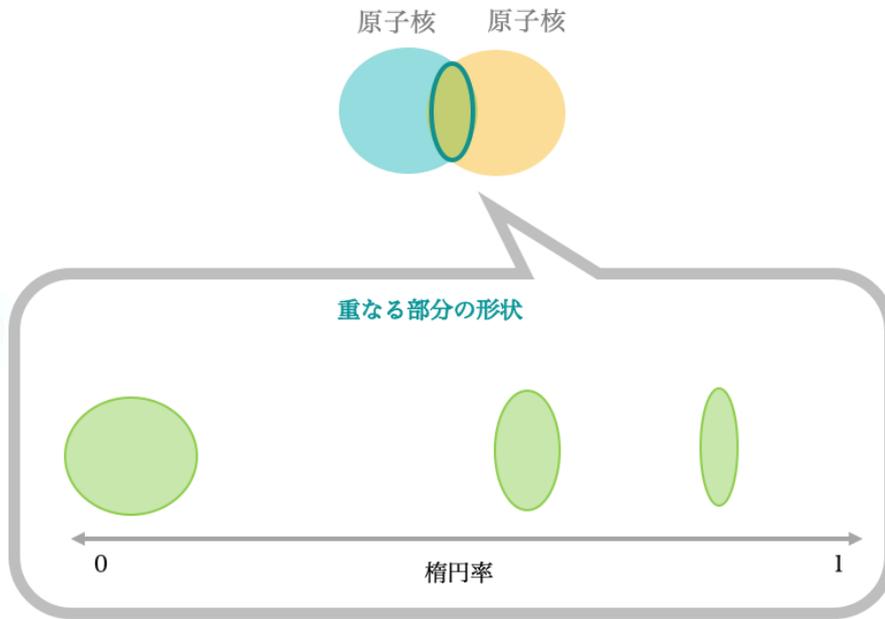


図 1.8 standard eccentricity

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

1.4.2 parton eccentricity ε_{parton}

原子核同士が中心衝突した場合、xy 平面上では2つの円が一致する様に重なって見えるため、衝突関与部の形状は円形であり、原子核同士が周辺衝突した場合、2つの円の重なり方がずれて見えるため、衝突関与部の形状はアーモンド形の様な形状に見える。本研究では原子核衝突の際に原子核の重なりあう部分の形状の楕円率を衝突に関与した核子を用いて計算した場合は単に楕円率 (eccentricity) と表し、計算式は式 1.1 を用いる。

一方、衝突に関与したパートンを用いて計算した場合はパートン楕円率 (participant eccentricity) と表し、計算式は式 1.2 を用いる。原子核の重なる部分の形状の楕円率は 0~1 の範囲で表される。中心衝突ほど衝突関与部の形状は円形に近づくため、participant eccentricity の値は 0 に近づき、周辺衝突ほど衝突関与部の形状は直線に近づくため、participant eccentricity の値は 1 に近づく。parton eccentricity も eccentricity と同様に、衝突関与粒子を用いて楕円の長軸と短軸を決定する participant eccentricity を用いている。

ビーム軸方向を z 軸とすると、式 1.2 の $\langle y_{parton}^2 \rangle$ は xy 平面上において、衝突関与パートン (parton participant) の y 成分の 2 乗の平均値を表し $\langle x_{parton}^2 \rangle$ は x 成分の 2 乗の平均値を表している。

$$\frac{\langle y_{parton}^2 \rangle - \langle x_{parton}^2 \rangle}{\langle y_{parton}^2 \rangle + \langle x_{parton}^2 \rangle} = \frac{\sum_i y_i^2 - \sum_i x_i^2}{\sum_i y_i^2 + \sum_i x_i^2} \quad (1.2)$$

1.5 核子の内部構造

核子内部のパートンの分布はパートン分布関数 (Parton Distribution Functions:PDF) というパートンの運動量の関数で表される。[1]

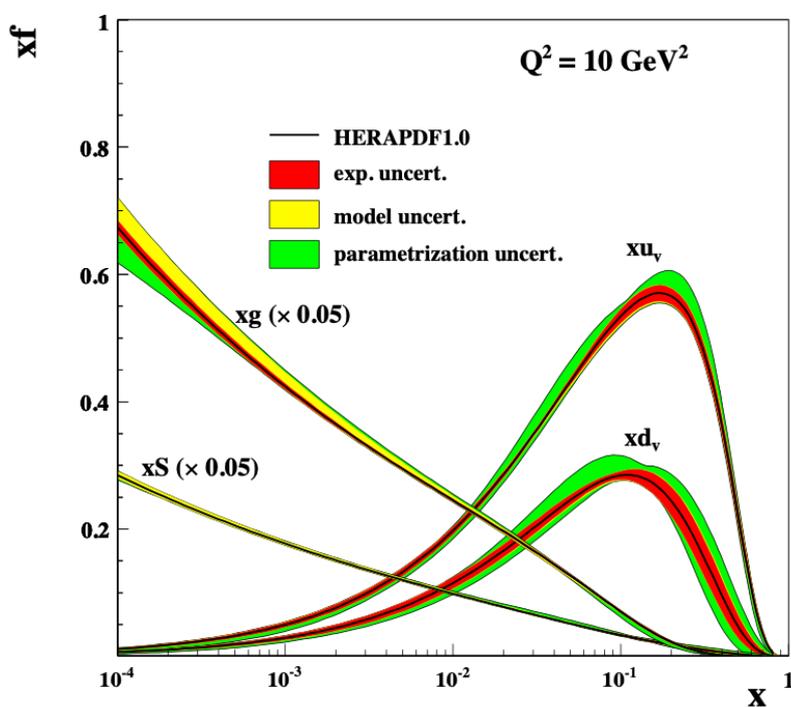


図 1.9 パートン分布関数

1.6 研究目的

本研究の目的は核子の内部構造を考慮しない場合と考慮した場合における衝突関与部の違いを幾何学的観点から調べることである。本論文では衝突関与部を幾何学的に表す *eccentricity* を比較対象として用いて、シミュレーションにて核子の内部に作成したパートンを用いて計算した *parton eccentricity* の結果を表す。また、パートン反応断面積と *parton eccentricity* の関係と核子内に設定するパートン数と *parton eccentricity* の関係、

衝突関与部のサイズが同じ時、*eccentricity* で v_2 がスケールする。

サイズが同じ時に、 $\frac{v_2}{\epsilon}$ が一定になる。これが、*parton participant* による ϵ_{parton} でも成立するかを検証した。従来の核子レベルで成立する関係性が内部構造を考慮した場合も同様に成立するかを、衝突関与部の形状が等しい場合のサイズの違いによる楕円方位角異方性 v_2 の関係性から説明する。衝突に関与したパートンの数 *parton participant* の数 (N_{ppart}) を用いて核子衝突の際に核子サイズで考えていたことをパートンレベルで見る、核子内部構造を考える点が本研究の特徴である。本研究では核子内部構造モデルとして複数個のパートンのみで構成される単純なモデルの場合でシミュレーションを行った。

1.7 衝突シミュレーション手順

本シミュレーションは欧州原子核研究機構 (CERN) によって開発が進められている「ROOT」というデータ解析用ソフトウェアを用いて行った。

1.7.1 原子核作成

シミュレーション上で原子核を作成する。本研究で行うシミュレーションは金原子核衝突シミュレーションと銅原子核シミュレーションである。核種によって作成する核子数が異なる。本研究では金原子核の場合の核子数は 197 個、銅原子核の場合の核子数は 63 個として原子核を作成した。原子核内の核子は核子密度分布に従う。本研究の核子密度分布は、式 1.3 で表される「Woods - Saxon 型」を使った。式 1.3 中の A は核子数であり、金原子核の場合は $A=197$ である。また、原子核の表面はぼやけているため、ぼやけパラメータとして a が組み込まれている。 a は核種によって異なる。

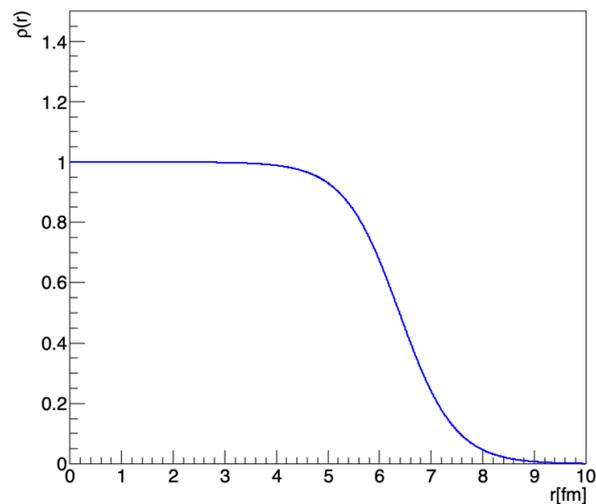


図 1.10 金原子核における核子密度分布

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right)} \quad (1.3)$$

$$R = 1.18A^{\frac{1}{3}} - 0.48[\text{fm}] \quad (1.4)$$

$$A = 197 \quad (1.5)$$

$$a = 0.535[\text{fm}] \quad (1.6)$$

1.7.2 核子衝突判断

シミュレーション上において衝突の判断は反応断面積を用いて行う。本研究は核子当たりの重心系エネルギー = 200GeV の場合でシミュレーションを行う。高エネルギー陽子・陽子衝突において、 $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ の場合の核子の反応断面積 σ_{NN} は 42mb である。ビーム軸方向を z 軸方向とすると、xy 平面に投影した核子と核子の距離 r が、 $\pi \times r^2 = 42\text{mb}$ 以下であれば核子衝突を起こす。つまり、 $\pi \times r^2 = 42\text{mb}$ を満たす r の最大値を rmax とすると $r \leq r\text{max}$ の場合、衝突するとする。ここで、核子同士の距離 r が、 $\pi \times r^2 = \sigma_{cc}\text{mb}$ 以下である核子を participant とする。

1.7.3 パートン作成

シミュレーション上で participant 内に作成する個パートンの数を指定してパートンを作成する。本シミュレーションにおいて「核子の内部構造」とは、核子内のクォークやグルーオンを区別せずに、同一の「パートン」として扱う、非常にシンプルなトイモデルで考えている。核子内のパートン ≠ 3 個の場合は式 1.7 で表されるパートン密度分布に従うとする。

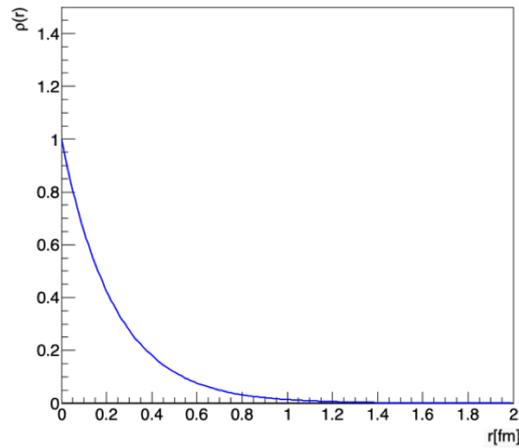


図 1.11 核子内のパートン ≠ 3 個の場合のパートン密度分布

$$\rho(r) = \exp\left(-\frac{r}{R}\right) \quad (1.7)$$

$$R = 0.234 \quad (1.8)$$

核子内のパートン=3個の場合のみ次の式 1.9 で表されるパートン密度分布に従うとする。[6]

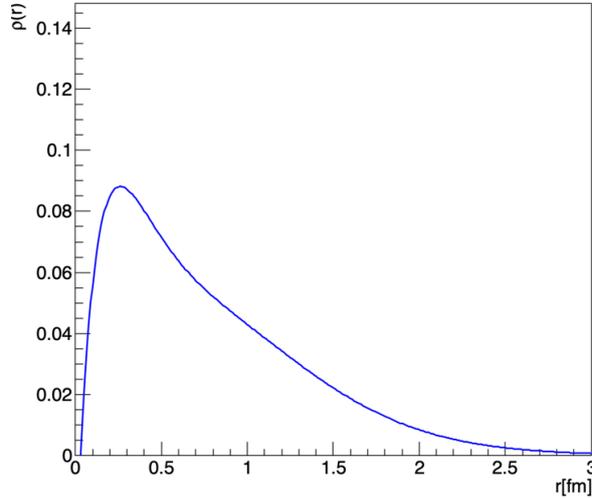


図 1.12 核子内のパートン=3 個の場合のパートン密度分布

$$\rho(r) = \exp\left(-\frac{r}{R}\right) \times [(1.22 - 1.89r + 2.03r^2) \left(1 + \frac{1}{r} - \frac{0.03}{r^2}\right) (1 + 0.15r)] \quad (1.9)$$

$$R = 0.234 \quad (1.10)$$

1.7.4 パートン衝突判断

パートン衝突の反応断面積は核子内に作成するパートン数と核子の反応断面積によって変動する。核子内に作成するパートン数により核子の反応断面積 $\sigma_{NN} = 42mb$ を満たす様にパートン反応断面積 σ_{cc} を決める。[6][7] xy 平面に投影したパートンとパートンの距離 r が、 $\pi \times r^2 = \sigma_{cc}mb$ 以下であればパートン衝突を起こすとする。この時、パートンとパートンの距離 r が、 $\pi \times r^2 = \sigma_{cc}mb$ 以下であるパートンを parton participant とする。

表 1.1 核子対あたりの重心系エネルギーの大きさによる核子の反応断面積 σ_{NN} に使用される値、核子内のパートン数に対応する N_c 及びその時のパートン反応断面積 σ_{cc}
核子内のパートン数 = 3 個の場合の修正後の値は 3* で示される。[6]

$\sqrt{s}[TeV]$	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
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

1.7.5 楕円率計算

participant を用いて式 1.1 より eccentricity ε_{parton} の計算を行う。parton participant を用いて式 1.2 より parton eccentricity ε_{parton} の計算を行う。

1.8 楕円率計算手法

1.8.1 participant eccentricity ε_{part}

participant や parton participant の位置によって軸を決定する楕円率の計算方法である。原子核衝突シミュレーションにおいて衝突毎に反応平面とその軸を決定する。軸の取り方が実験室上で起こる状況を再現している。本シミュレーションではビーム軸を z 軸方向とするため、 xy 平面上において楕円率を計算する。また、楕円の長軸方向を y 軸方向とする。図 1.13 は standard eccentricity と participant eccentricity のそれぞれの軸を表している。standard eccentricity は xy 平面上で衝突関与部の形状を見るのに対し participant eccentricity は participant の位置により決め直した軸による $x'y'$ 平面上で衝突関与部の形状を見る。この時、standard eccentricity は式 1.1 で表されるが、participant eccentricity は次の式 1.11 で表される。[13][14][16]

$$\varepsilon_{part} = \frac{\sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2}}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (1.11)$$

ここで、式 1.11 中の σ_x^2 、 σ_y^2 及び σ_{xy} はそれぞれ、

$$\begin{aligned}\sigma_x^2 &= \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2 \\ \sigma_y^2 &= \langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2 \\ \sigma_{xy} &= \langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle\end{aligned}$$

を表す。

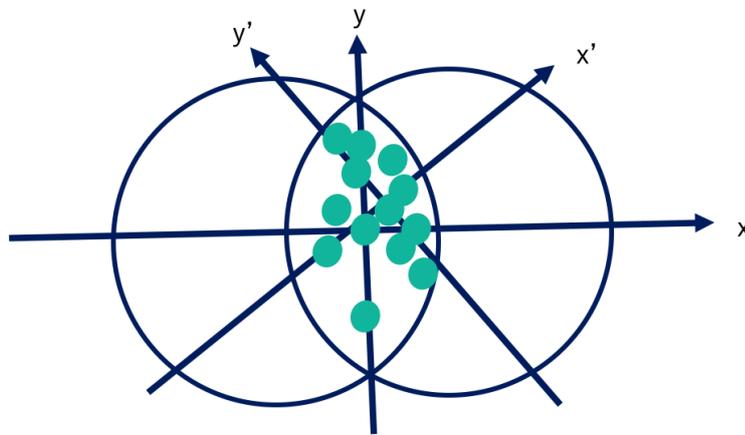


図 1.13 eccentricity ε

第2章

金原子核衝突シミュレーション結果

ここでは核子の内部構造を考慮しない場合（核子を用いて計算した場合）と、考慮した場合（パートンをを用いて計算した場合）の楕円率の違いや、parton eccentricity ε_{parton} に影響するパラメータである「核子内のパートン数」と、「パートン反応断面積 σ_{cc} 」がそれぞれどの様に parton eccentricity ε_{parton} と関係しているかを述べる。

2.1 楕円率計算結果と、先行研究との比較

図 2.1 の黄緑点と青点は、それぞれ各 centrality 0~10%, 10~20%, 20~30%, 30~40%, 40~50%, 50~60%, 60~70%, 70~80%, 80~90% における eccentricity ε の文献値と eccentricity ε の計算結果である。

文献値 [11] とほとんど一致することから、作成したコードで計算した楕円率の結果は妥当であると判断する。

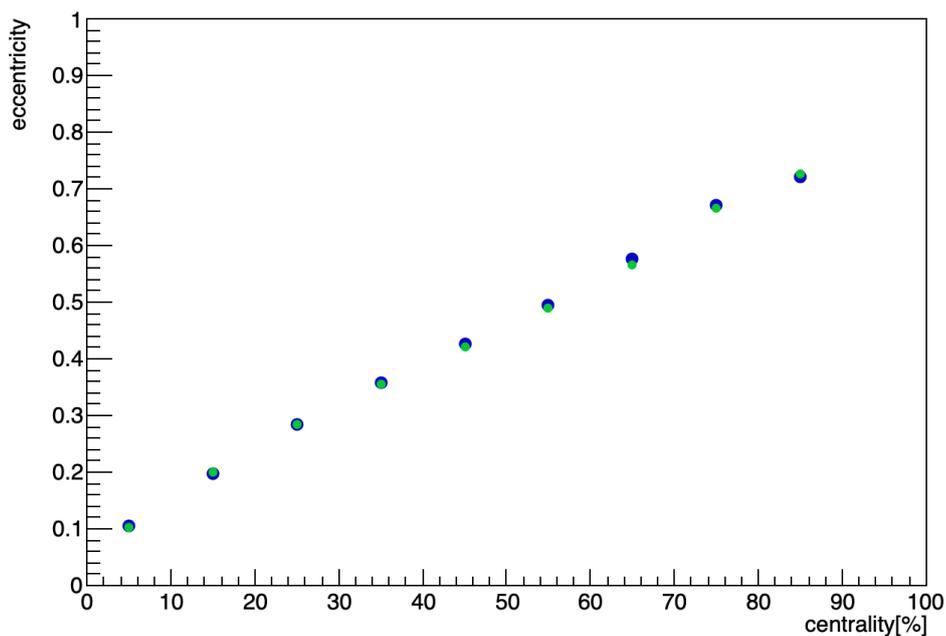


図 2.1 楕円率計算結果 ε

2.2 楕円率計算結果

eccentricity ε と parton eccentricity ε_{parton} の結果を示す。図 2.2 は各 centrality における核子内のパートン数 = 3 個の場合の楕円率計算結果である。核子内のパートン数 = 3 個の場合は、表 1.1 の $N_c = 3^*$ のパートン反応断面積を用いてシミュレーションを行った結果である。

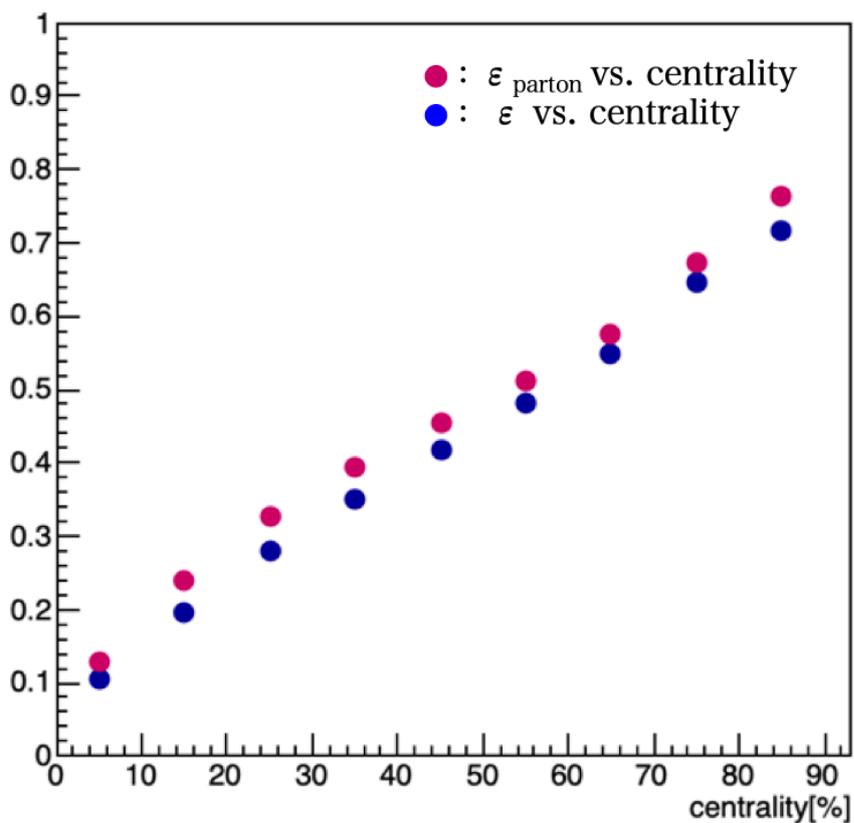


図 2.2 核子内のパートン数 = 3 個の場合の楕円率計算結果 ε_{parton}

図 2.3 は核子内のパートン数 = 10 個の場合の楕円率計算結果、図 2.4 は核子内のパートン数 = 20 個の場合の楕円率計算結果を表している。この結果から、核子内のパートン数によらず、parton eccentricity ε_{parton} の方が eccentricity ε よりも大きい値を取ることがわかった。つまり、核子の反応断面積が一定という条件下では、核子の内部にパートンが複数個存在する非常に単純なモデルの場合においては内部構造を考慮した楕円率の方が大きいということがわかった。

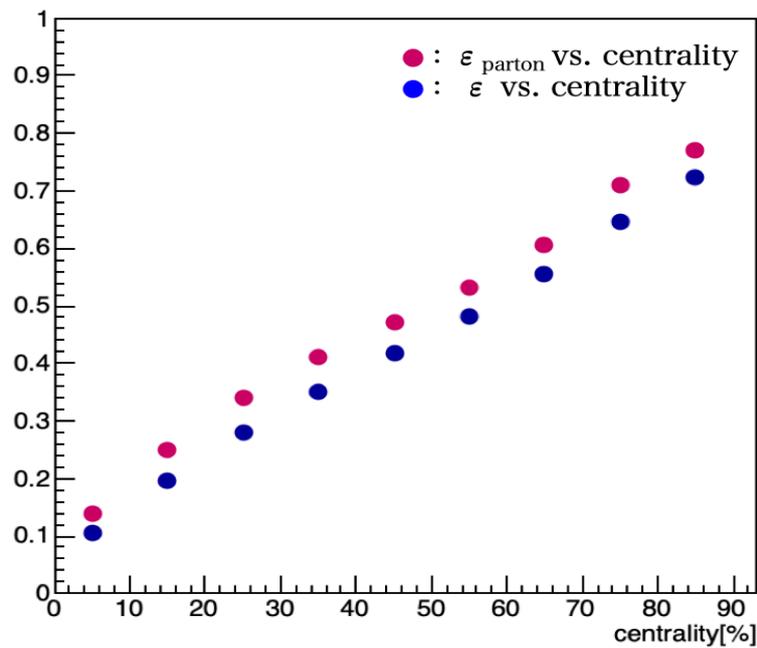


図 2.3 核子内のパートン数 = 10 個の場合の楕円率計算結果 ε_{parton}

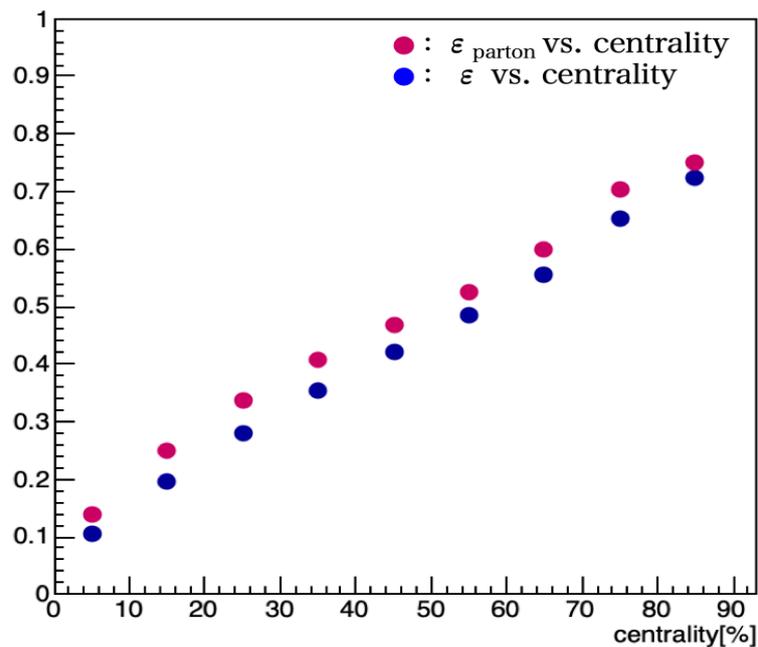


図 2.4 核子内のパートン数 = 20 個の場合の楕円率計算結果 ε_{parton}

2.2.1 核子内のパートン数と楕円率の比との関係性

図 2.5 は、図 2.2、図 2.3、図 2.4 の各 centrality において、parton eccentricity ε_{parton} を eccentricity ε で割ることによって parton eccentricity ε_{parton} と eccentricity ε の比をとった結果である。ここで、 ε_{parton} と ε の比をとる理由は、 ε_{parton} と ε の違いを見るためである。 ε_{parton} と ε の差をとると、基準値となる ε の値が異なるもの同士の比較が見えにくくなるため、 ε_{parton} と ε の差ではなく比をとっている。核子内のパートン数が等しい場合、centrality が高くなるにつれて比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は小さくなることがわかる。また、核子内のパートン数による比の違いが見られる。この傾向は centrality が低い領域で特に見られる。

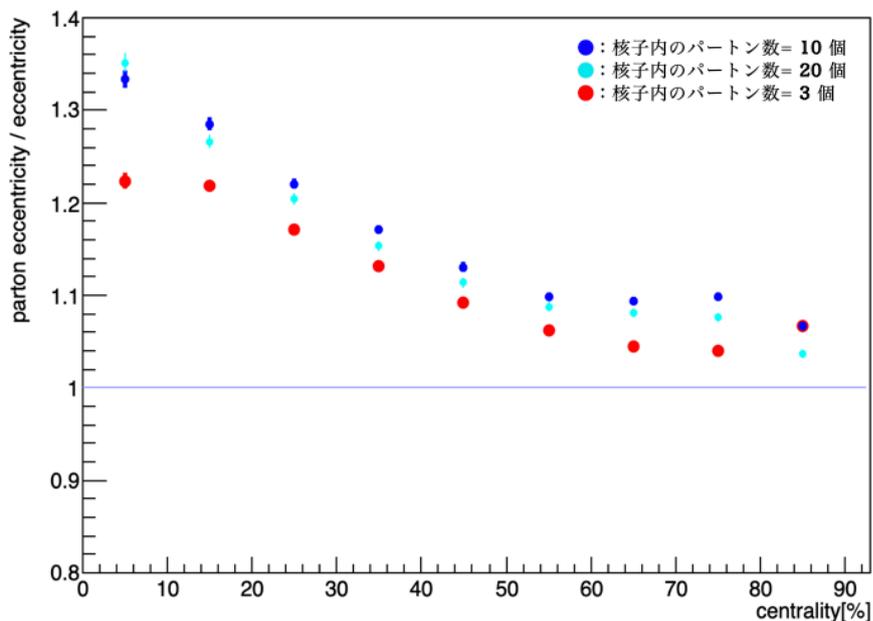


図 2.5 核子内のパートン数の違いによる比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の変化

2.2.2 楕円率計算結果の考察

図 2.2、図 2.3、図 2.4 より、核子内のパートン数によらず、parton eccentricity ε_{parton} の方が eccentricity ε よりも大きい値を取ることがわかった。しかし、比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ をとると核子内のパートン数による違いが見られた。核子内のパートン数の違いによって生まれたこの結果は衝突に関与したパートン数の違いが関係していると考えられる。

2.3 核子内のパートン数と楕円率との関係

核子内のパートン数とパートン反応断面積は共に parton eccentricity ε_{parton} と相関があることはわかっている。ここでは核子内のパートン数が parton eccentricity ε_{parton} にどう影響するかを調べた。そのため、核子の反応断面積を一定にするという条件を外し、パートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ と一定にして核子内のパートン数を3個、10個、30個と増加させた。それぞれの結果が図2.6、図2.7、図2.8である。これより、核子内のパートン数が増加するほど ε_{parton} と ε は近づき、centrality の高い方（周辺衝突）から $\varepsilon_{parton} > \varepsilon$ が $\varepsilon_{parton} < \varepsilon$ に変化することがわかった。

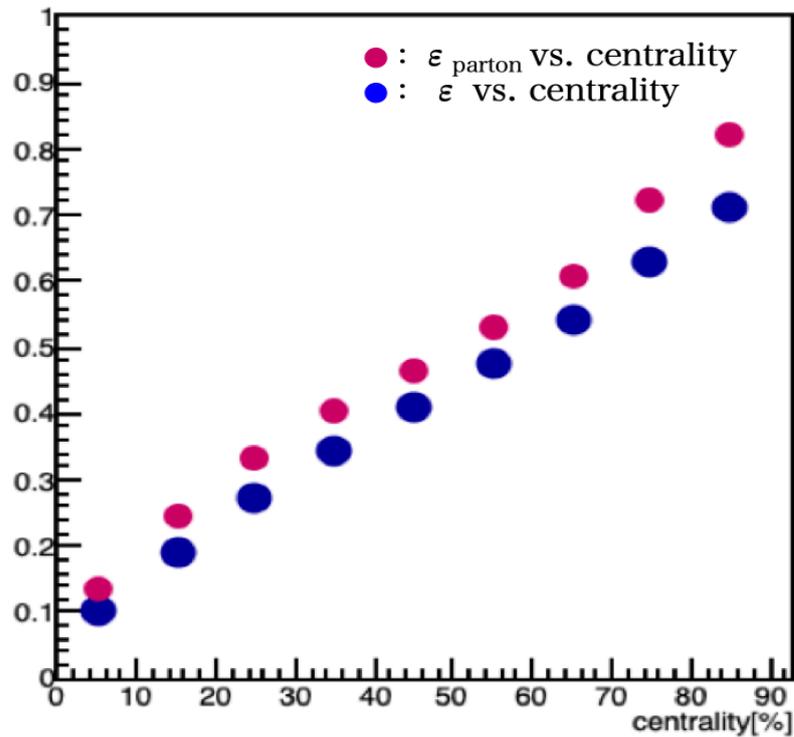


図2.6 パートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ と一定にした場合の核子内のパートン数が3個の時の parton eccentricity ε_{parton} の結果

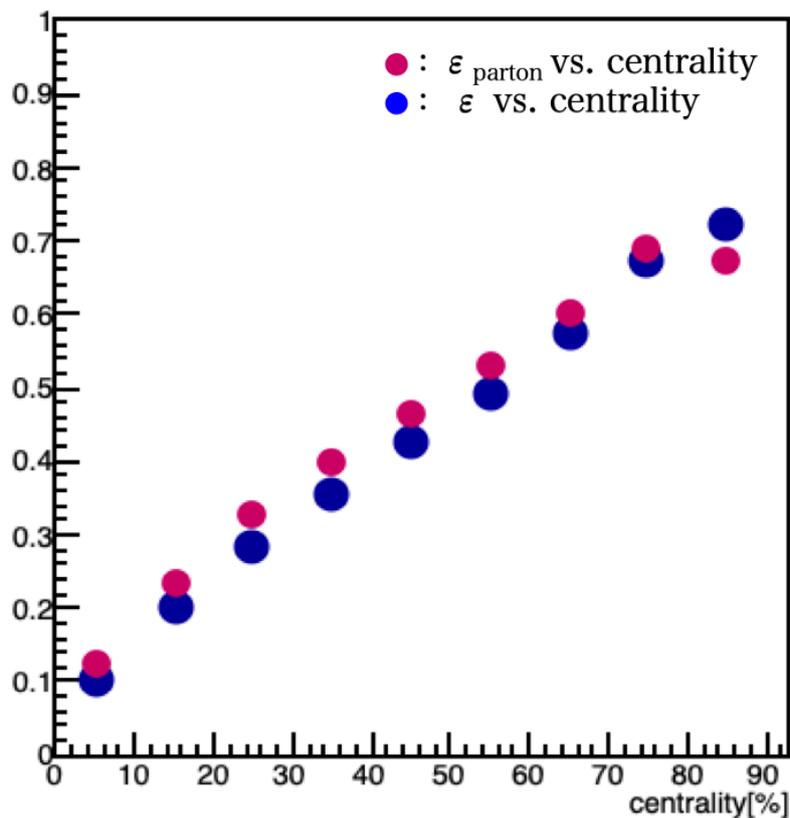


図 2.7 パートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ と一定にした場合の核子内のパートン数が 10 個の時の parton eccentricity ϵ_{parton} の結果

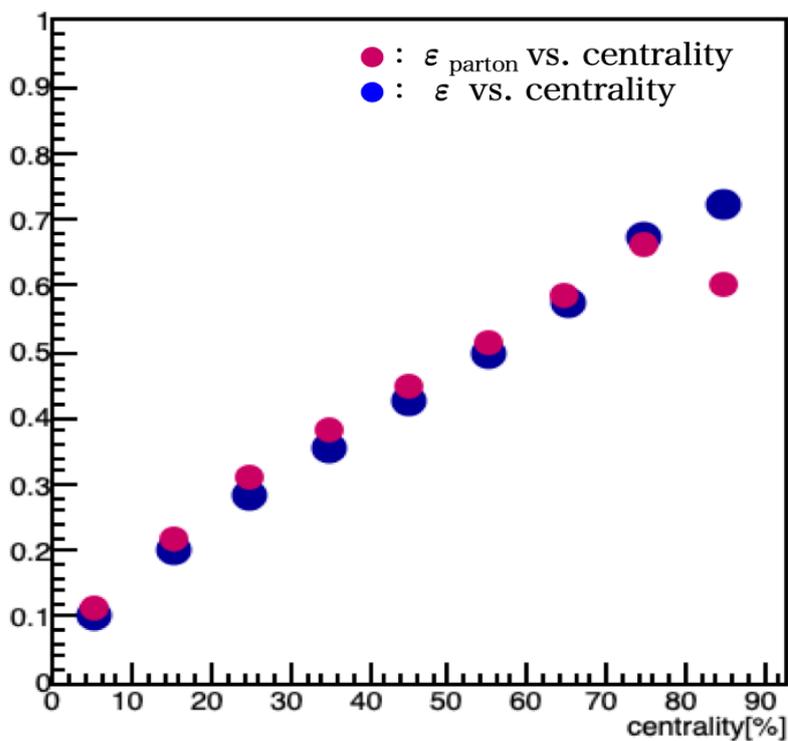


図 2.8 パートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ と一定にした場合の核子内のパートン数が 30 個の時の parton eccentricity ϵ_{parton} の結果

2.3.1 核子内のパートン数のみ変化した場合の核子内のパートン数と楕円率の比との関係

図 2.9 は、図 2.6、図 2.7、図 2.8 の各 centrality において、parton eccentricity ε_{parton} を eccentricity ε で割ることによって parton eccentricity ε_{parton} と eccentricity ε の比をとった結果である。図 2.5 と同様に、核子内のパートン数が増加すると centrality が高くなるにつれて比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は小さくなることがわかる。また、核子内のパートン数が 3 個の場合と 10 個、30 個の場合で比の変化に違いが見られる。核子内のパートン数が 3 個の場合、全 centrality で 1 以上で centrality の高い領域（周辺衝突）では比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ が少し大きくなるという結果に対し、核子内のパートン数が 10 個、30 個の場合、centrality の高い領域（周辺衝突）では比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は 1 より小さくなり、centrality が高くなるほどこの比が小さくなることがわかった。

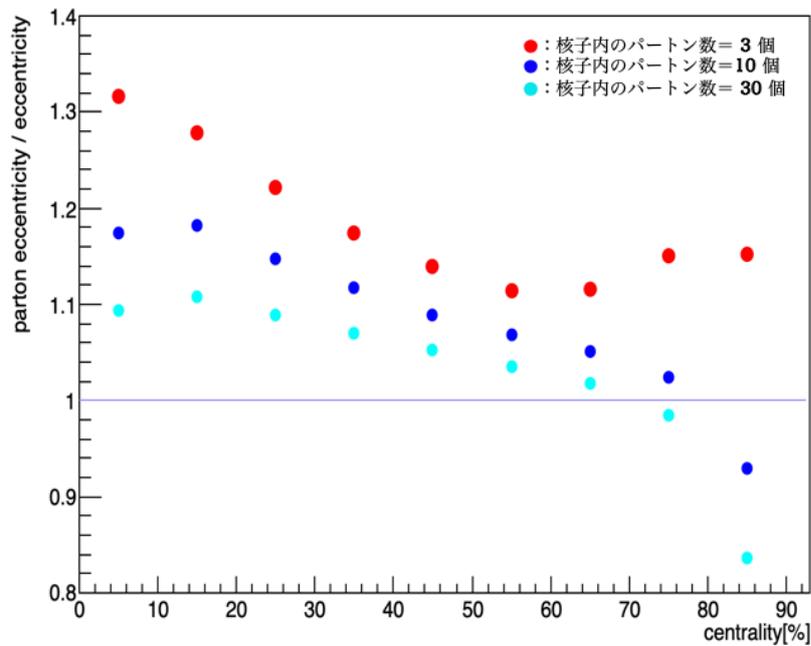
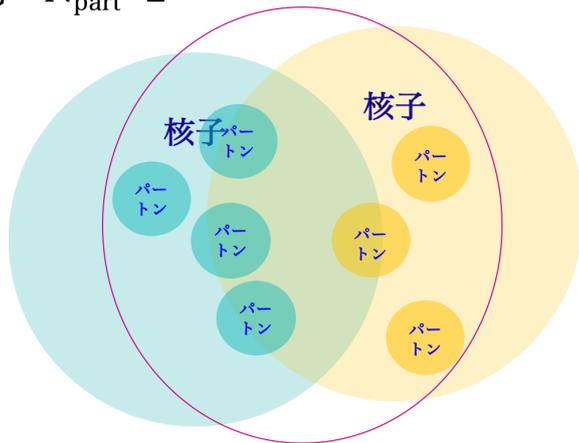


図 2.9 核子内のパートン数のみ変化した場合の核子内のパートン数の違いによる比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の変化

パートン反応断面積を一定にして核子内のパートン数を増加すると、parton participant が増加する。これは parton participant が増加することで ϵ_{parton} が全体的に小さくなり、 ϵ に近づくと考えられる。核子内のパートン数が3個の場合と10個、30個の場合で比の違いが周辺衝突で特に見られる。これは次の理由が考えられる。ここでは1回の原子核衝突を考える。周辺衝突では図2.10の様に、衝突に関与した核子が非常に少なくなる。participant が非常に少ない例として、 $N_{part} = 2$ の場合を考えると、この時の eccentricity は必ず $\epsilon = 1$ である。それに対し、 N_{ppart} のとる範囲は $N_{ppart} \geq 2$ であり、この時の parton eccentricity は $\epsilon_{parton} \leq 1$ であり、 $N_{ppart} > 2$ であることが多いため大半が $\epsilon_{parton} < 1$ である。よってこの場合の比 $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ は $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon} \leq 1$ で、大半が $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon} < 1$ になる。パートン反応断面積を一定にして核子内のパートン数を増やすと N_{part} に対して N_{ppart} が多くなり、このようなケースがより増えるため、核子内のパートン数が増加するほど centrality の高い領域では $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon} < 1$ となる。

例： $N_{part}=2$



$$\text{楕円率の計算式} = \frac{\langle y^2 \rangle - \langle x^2 \rangle}{\langle y^2 \rangle + \langle x^2 \rangle}$$

常に $\epsilon = 1$
(2点を結ぶ形=直線)

$$\epsilon_{parton} \leq 1$$

($N_{ppart}=2$ の時： $\epsilon_{parton}=1$ その他は $\epsilon_{parton}<1$)

図2.10 周辺衝突での ϵ_{parton} と ϵ の関係

2.4 パarton反応断面積と楕円率との関係

parton反応断面積を一定にした場合、核子内のparton数が増加するほど parton eccentricity ε_{parton} が小さくなることがわかった。次に核子内のparton数を一定にしてparton反応断面積を変化させた時の parton eccentricity ε_{parton} の値の変化を調べた。ここでも核子の反応断面積を一定にしないで、核子内のparton数を3個と一定にしてparton反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ 、または $\sigma_{cc} = 8.1mb$ （核子の反応断面積が $42mb$ になる様に調整されたparton反応断面積）、または $\sigma_{cc} = \infty$ （核子内のpartonが全て衝突する場合）と段階的に大きくした場合の比較を行った。parton反応断面積を大きくすることで、parton衝突判断の際に作成したpartonが全て parton participant になる様になっている。図 2.11 はparton反応断面積 $\sigma_{cc} = 4.3mb$ の場合の結果、図 2.12 はparton反応断面積 $\sigma_{cc} = 8.1mb$ の場合の結果、核子内のpartonが全て衝突する場合の結果が図 2.13 である。parton反応断面積を一定にして核子内のparton数が増加させた時と同様に、parton反応断面積が大きくなるほど ε_{parton} と ε は近づき、centrality の大きい方（周辺衝突）から小さい（中心衝突）へと ε_{parton} と ε の大小関係 $\varepsilon_{parton} > \varepsilon$ が $\varepsilon_{parton} \simeq \varepsilon$ に変化することがわかった。

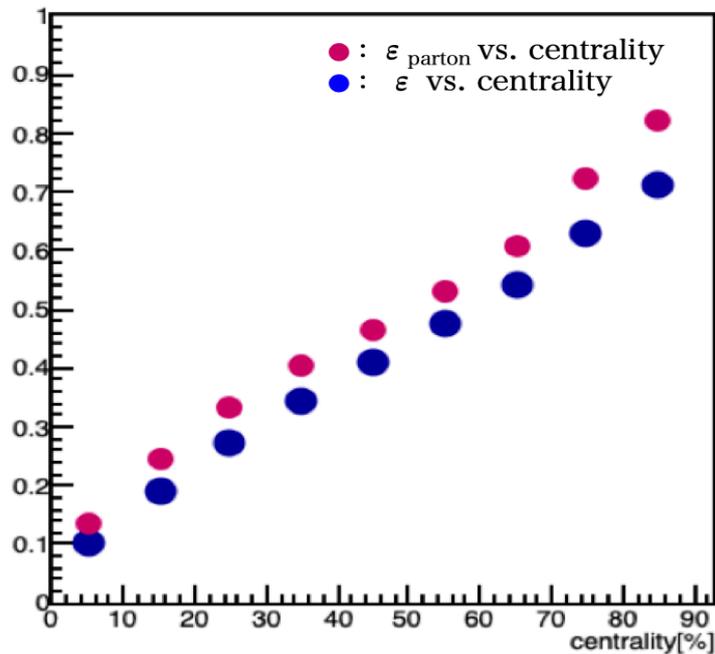


図 2.11 核子内のparton数が3個と一定にした場合のparton反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ の時の parton eccentricity ε_{parton} の結果

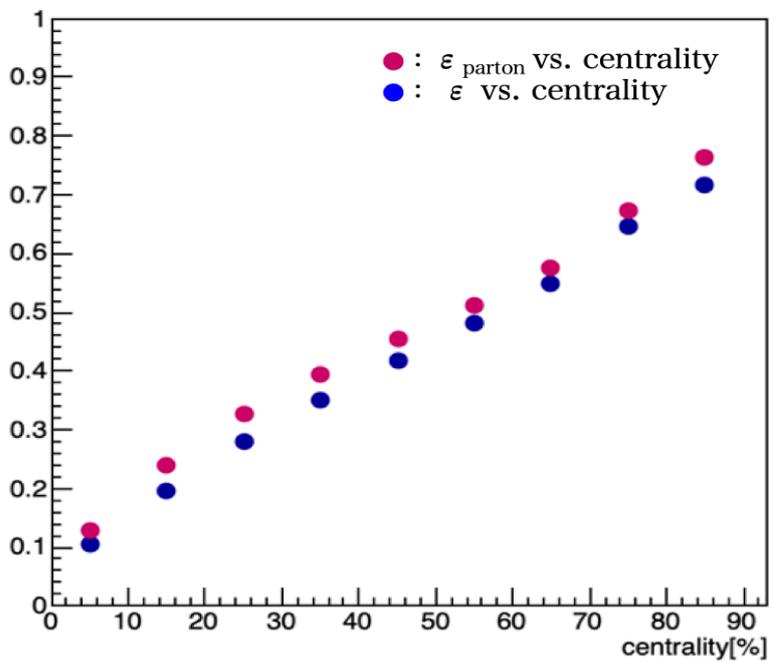


図 2.12 核子内のパートン数が 3 個と一定にした場合のパートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 8.1mb$ の時の parton eccentricity ϵ_{parton} の結果

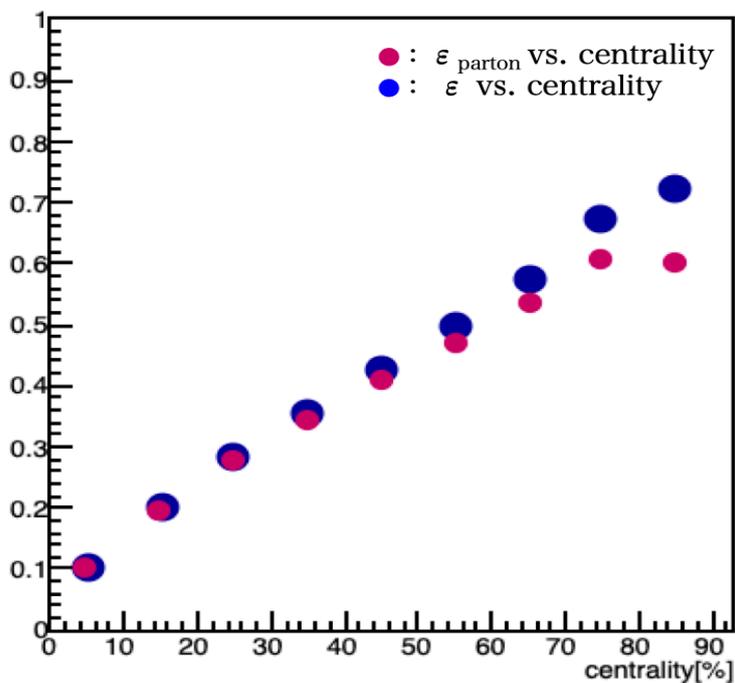


図 2.13 核子内のパートン数が 3 個と一定にした場合の核子内のパートンが全て衝突する時の parton eccentricity ϵ_{parton} の結果

2.4.1 パarton反応断面積と楕円率の比との関係

図 2.14 は、図 2.11、図 2.12、図 2.13 の各 centrality において、parton eccentricity ε_{parton} を eccentricity ε で割ることによって parton eccentricity ε_{parton} と eccentricity ε の比をとった結果である。図 2.5 と同様に、parton 反応断面積が大きくなると centrality が高くなる（周辺衝突）につれて比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は小さくなるのがわかる。また、parton 反応断面積の大きさにより比の変化に違いが見られる。parton 反応断面積を小さくすると、全 centrality で 1 以上になり、centrality の低い領域（中心衝突）では比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は大きくなるのがわかった。また、parton 反応断面積が大きく核子内の parton が全て衝突する場合は、全 centrality で比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は 1 以下になり、centrality が高くなるほど比は大きくなるのがわかった。

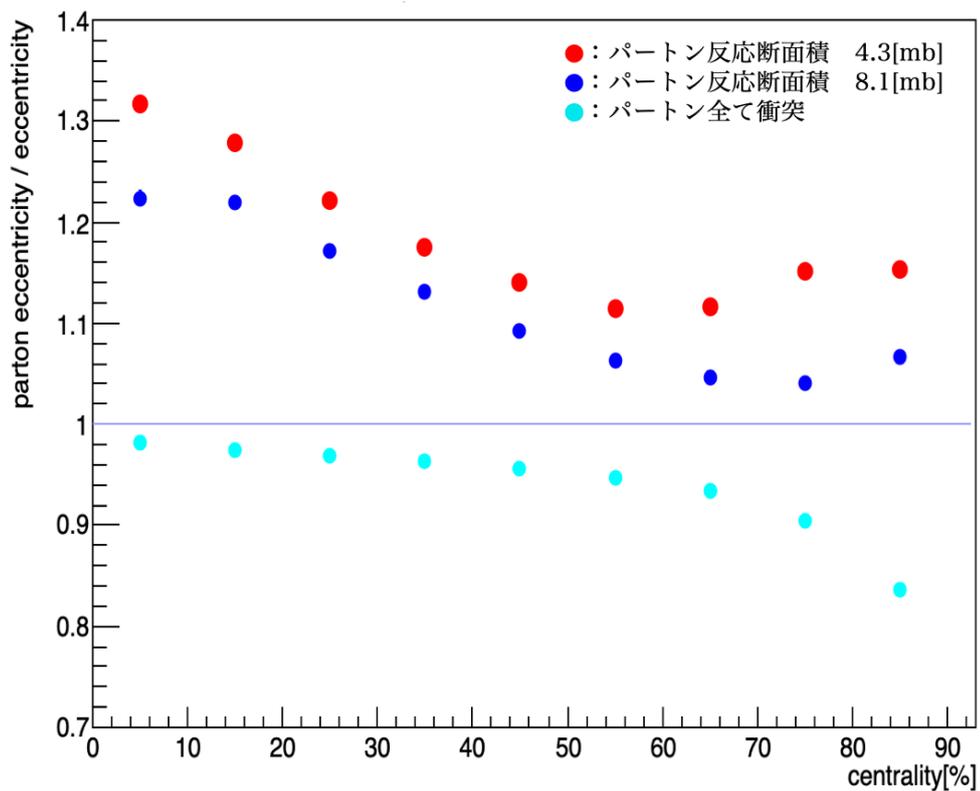


図 2.14 parton 反応断面積の違いによる比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の変化

核子内のパートン数を一定にしてパートン反応断面積を大きくすると、パートン1個が衝突する確率が高くなるため parton participant が増加する。parton participant が増加することで ε_{parton} が全体的に小さくなり、 ε に近づくと考えられる。パートン反応断面積を小さくすると周辺衝突では比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は大きくなる原因として、本シミュレーションではパートン衝突と核子衝突が共に起こる場合のみ考えるという条件があるために比の分母である ε が全体的に小さくなるからである。パートン反応断面積を小さくするとパートン1個が衝突する確率が低くなるため $N_{ppart} = 0$ 、つまり核子衝突はするがパートン衝突しないケースが増える。本シミュレーションにおいて、核子衝突するがパートン衝突しない場合は省いているため、パートン1個が衝突する確率を低くした時、核子衝突もパートン衝突も共に起こるケースは $N_{part} > 2$ であることが多くなり、 ε は全体的に小さくなる。そのため、比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は大きくなると考えられる。

2.5 金原子核衝突における核子内のパートン数とパートン反応断面積と楕円率の関係についてのまとめ

原子核衝突において、核子内のパートン数とパートン反応断面積は共に楕円率と関係するが、本研究では centrality が低い領域で核子内のパートン数による比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の違いが見られた。そこで一方を固定して他方をパラメータとして動かすと、核子内のパートン数を増加させることやパートン反応断面積を大きくするといった、「同数の N_{part} に対して N_{ppart} が増加する」につれて楕円率計算に用いるパートンの重心位置が核子の中心位置に近づくことで ε_{parton} は小さくなり ε に近づくことがわかった。しかし、核子内のパートン数とパートン反応断面積を共にパラメータとして核子の反応断面積が $\sigma_{NN} = 42mb$ と一定になる様に調整した時の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は centrality が低い領域（中心衝突）では核子内のパートン数と比は正の相関をとらない。そこで、核子内のパートン数を増加させることやパートン反応断面積を大きくすることによって N_{part} と N_{ppart} の関係がどの様に変化するかを調べる必要があると考えた。

2.6 衝突に関与したパートン数と楕円率の関係

前章までの考察として、核子内のパートン数による比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の違いから、 N_{ppart} と ε_{parton} の関係が要因であると考えられる。この 2.6 章では同数の N_{part} において N_{ppart} と ε_{parton} の関係を調べることによって、 ε_{parton} の傾向を調べた。

2.7 各 N_{part} ごとの N_{ppart} と楕円率の関係

図 2.15、図 2.16、図 2.17 はそれぞれ文献値 [11] において centrality=20~30%、centrality=40~50%、centrality=60~70% の N_{part} の平均値であり、ここではその centrality の楕円率を表す N_{part} として採用した。図 2.17 は周辺衝突の様子を表している。図より、 N_{ppart} が増加すると ϵ_{parton} は小さくなる。これは楕円率の傾向として無矛盾である。図 2.15 は中心衝突に近い様子を表し、図 2.16 は衝突関与部の形状が楕円的であるところの様子を表している。図 2.15、図 2.16 の結果は、図 2.17 の結果と異なり N_{ppart} が増加すると ϵ_{parton} は小さくならない。よって周辺衝突とそれ以外では N_{ppart} と ϵ_{parton} の関係性に違いがあるということがわかった。その他の N_{part} 別の N_{ppart} と ϵ_{parton} の関係は付録に記載する。

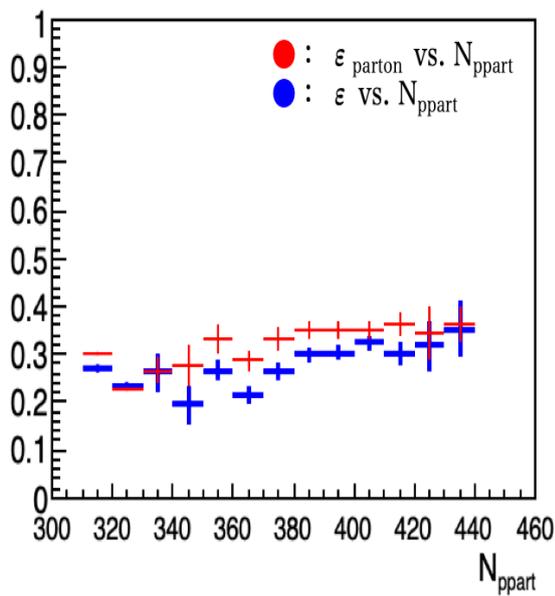


図 2.15 $N_{part} = 167$ の N_{ppart} と楕円率の関係

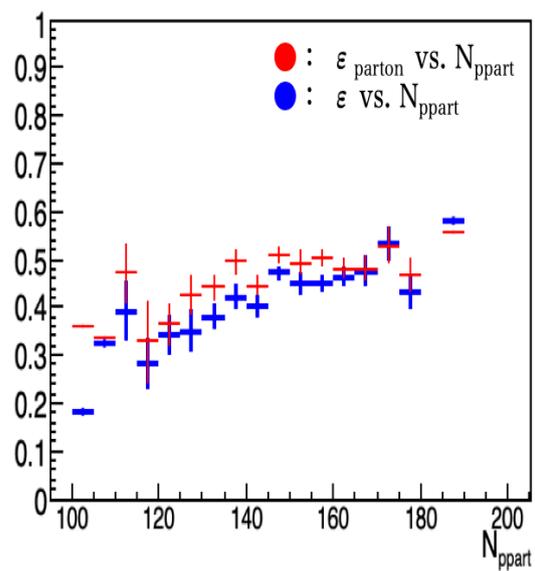


図 2.16 $N_{part} = 74$ の N_{ppart} と楕円率の関係

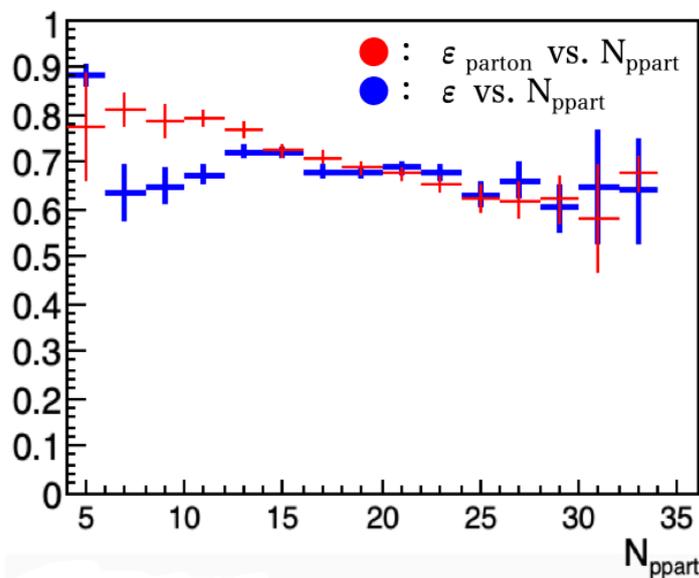


図 2.17 $N_{part} = 13$ の N_{ppart} と楕円率の関係

表 2.1 は各 centrality ごとの N_{part} の平均と、その小数第一位を四捨五入した値である。[8] 本シミュレーションでは N_{part} 、 N_{ppart} は自然数として扱うため、図 2.15、図 2.16、図 2.17 では N_{part} の小数第一位を四捨五入した値である $N_{part} = 167, 74, 13$ とする。

表 2.1 各 centrality ごとの N_{part} の平均と、その小数第一位を四捨五入した値 [8]

centrality[%]	$\langle N_{part} \rangle$	$\langle N_{part} \rangle$ の小数第一位を四捨五入した値
0~10	325.2	325
10~20	234.6	235
20~30	166.6	167
30~40	114.2	114
40~50	74.4	74
50~60	45.5	46
60~70	25.7	26
70~80	13.4	13
80~92.2	6.3	6

2.7.1 各 N_{part} ごとの N_{ppart} と楕円率の比との関係

図 2.18、図 2.19、図 2.20、はそれぞれ図 2.15、図 2.16、図 2.17 の比 $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ を表している。図 2.18、図 2.19、図 2.20 のいずれの場合も、 N_{ppart} が増加すると比 $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ は小さくなることから、衝突関与部の形状によらず同じ傾向が見られた。この傾向は N_{ppart} が増加すると ϵ_{parton} は小さくなるという楕円率の傾向として無矛盾である。

各 N_{part} ごとの N_{ppart} と楕円率の結果と合わせると、同数の N_{part} で見た時に N_{ppart} が多い場合とは、同数の N_{part} でも衝突関与部の核子の位置に偏りがあり ϵ が強く出る軸を取りやすい様な形状であると考えられる。つまり、本シミュレーションにおいて、 ϵ_{parton} とは、衝突関与部の形状の観点で ϵ をより細分化する様な位置付けになっていると考えられる。その他の N_{part} 別の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ の関係は付録に記載する。

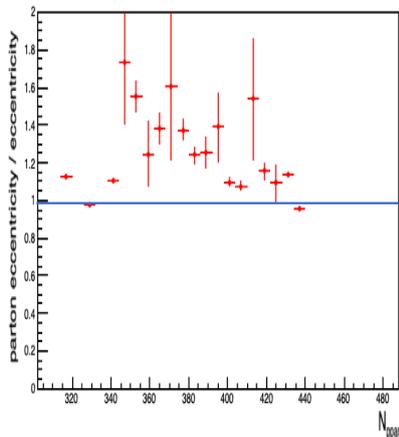


図 2.18 $N_{part} = 167$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ の関係

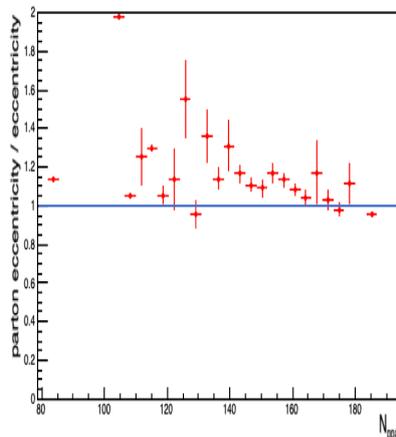


図 2.19 $N_{part} = 74$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ の関係

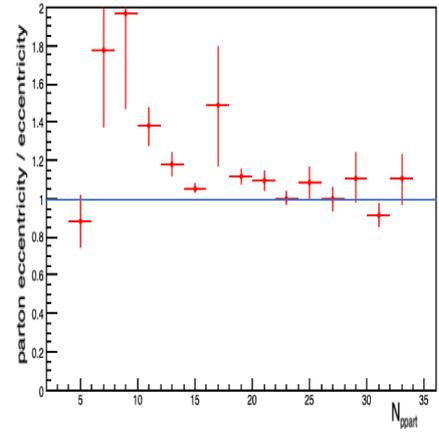


図 2.20 $N_{part} = 13$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ の関係

2.8 まとめ

本研究では、核子対あたりの重心系衝突エネルギー 200GeV の金原子核衝突シミュレーションを行い、原子核衝突関与部の形状を幾何学的に表す楕円率を計算し、核子内の構造を考慮しない場合と考慮した場合の楕円率の違いについて調べた。その結果、核子の反応断面積が $\sigma_{NN} = 42mb$ と一定になる様な条件下では、全 centrality において核子内のパートン数によらず parton eccentricity ε_{parton} の方が eccentricity ε よりも大きく、それにより、核子の内部構造を考慮した方が内部構造を考慮しない場合よりも楕円率は大きいことがわかった。また、楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ をとると核子内のパートン数による違いが見られた。これは衝突に関与したパートン数の違いが関係していると考えられる。次に、核子内のパートン数が parton eccentricity ε_{parton} の値にどの様に影響するのかを調べた結果、パートン反応断面積を一定にした状態で核子内のパートン数を増加させると ε_{parton} は ε に近づき、centrality の高い、周辺衝突では ε_{parton} が ε よりも小さくなることがわかった。また、パートン反応断面積を一定にした状態で核子内のパートン数を増加させた場合の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は、核子内のパートン数が増加するほど比は小さくなることがわかった。核子内のパートン数を増加させると衝突に関与したパートンの数が増加し、そのパートンの重心位置が核子の平均位置に近づくためと考えられる。また、 N_{ppart} が増加すると ε_{parton} は小さくなるため、楕円率の計算上無矛盾である。その次に、パートン反応断面積が parton eccentricity ε_{parton} の値にどの様に影響するのかを調べた結果、核子内のパートン数を一定にした状態でパートン反応断面積を大きくすると、パートン反応断面積を一定にした状態で核子内のパートン数を増加させた場合の結果と同様に ε_{parton} は ε に近づき、centrality の高い、周辺衝突の方から ε_{parton} が ε よりも小さくなることがわかった。また、比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は、パートン反応断面積が大きくなるほど比は小さくなることがわかった。これは核子内のパートン数が一定であるため作成するパートン数は等しいが、パートン反応断面積を大きくすると1個のパートンのパートン衝突する確率が高くなるため、衝突に関与したパートンの数が増加し、そのパートンの重心位置が核子の平均位置に近づくためと考えられる。また、 N_{ppart} が増加すると ε_{parton} は小さくなるため、核子内のパートン数のみ変化させた場合と同様に楕円率の計算上無矛盾である。核子内のパートン数と、パートン反応断面積の両方をパラメータとして変化させた時の楕円率の結果と、核子内のパートン数と、パートン反応断面積の一方を固定し、他方をパラメータとして変化させた時の楕円率の結果から、核子内のパートン数による比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の違いは、 N_{ppart} と ε_{parton} の関係が要因であると考えられる。そこで、RHIC-PHENIX 実験における $\sqrt{s_{NN}} = 200GeV$ の金原子核衝突の、各 centrality ごとの N_{part} のデータを用いて、同数の N_{part} において N_{ppart} と ε_{parton} の関係を調べることで、 ε_{parton} の傾向を調べた。その結果、周辺衝突とそれ以外の衝突で ε_{parton} の傾向に違いがあることがわかった。周辺衝突では N_{ppart} が増加するほど ε_{parton} は小さくなり、楕円率の傾向として N_{part} と ε の関係性と無矛盾であるのに対し、周辺衝突以外では N_{ppart} が増加すると ε_{parton} は小さくならず、周辺衝突とそれ以外では N_{ppart} と ε_{parton} の関係性に差異があることがわかった。また、比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は小さくなることから、衝突関与部の形状によらず同じ傾向が見られ、楕円率の傾向として N_{part} と ε の関係性と無矛盾である。これと各 N_{part} ごとの N_{ppart} と楕円率の結果と合わせると、同数の N_{part} で見た時に N_{ppart} が多い場合は、同数の N_{part} でも衝突関与部の核子の位置に偏りがあり ε が強く出る形状であると考えられる。このことから本シミュレーションにおいて、 ε_{parton} とは、衝突関与部の形状の観点から見て ε をより細分化する様な位置付けになっていると考えられる。今後は、 ε_{parton} だけではなく ε も動いてしまったために見え辛くなっていた、同数の N_{part} において N_{ppart} と ε_{parton} の関係をより調べるために、本シミュレーションで行っていた条件を変更し、核子の位置を固定した状態で核子内のパー

トンの位置のみパートンの密度関数に従う様な分布でランダムに動かした場合でシミュレーションを行う。その他に、核子内のパートン数とそのパートン反応断面積について、衝突に関与した核子やパートンの数だけではなく、核子衝突回数やパートン衝突回数も考慮する。

謝辞

謝辞を書くにあたりまして、始めに、研究生生活を支えていただいた林井久樹先生、宮林謙吉先生、下村真弥先生、蜂谷崇先生、そして全ての皆様にお礼を申し上げます。特に指導教員の下村先生には大変お世話になりました。毎週、研究の進捗を見ていただき、頂いたお言葉や優しさに何度も励まされました。卒業研究発表会では発表の直前まで、発表の組み立てから発表の仕方までご指導いただき、感謝申し上げます。ミーティング等で沢山アドバイスをいただき、ゼミ等でご指導いただいた林井久樹先生、宮林謙吉先生、蜂谷崇先生にも感謝申し上げます。先輩方には将来のことや研究に関して、いつも親身に相談に乗っていただきました。研究室の同期の犬飼さん、五屋さん、高濱さん、並本さん、西森さん、安西さんにはお世話になりました。皆と過ごした研究室生活は楽しかったです。最後に、これまで支えていただいた全ての皆様に感謝申し上げますとともに、謝辞とさせていただきます。本当にありがとうございました。

付録 A

銅原子核衝突シミュレーション結果

ここでは金原子核衝突シミュレーションと同様の方法で銅原子核衝突シミュレーションを行った結果について述べる。金原子核衝突シミュレーションと銅原子核衝突シミュレーションの相違点は、核子数と原子核半径である。ここでは原子核のサイズと核子数の違いが楕円率にどの様に影響するのかを調べた。

銅原子核の核子密度分布は、式 A.1 で表される Woods - Saxon 型関数である。式 A.1 中の A は核子数であり、銅原子核の場合は $A=63$ である。また、ぼやけパラメータである a は金原子核の場合式 1.3 より、 $a=0.535[\text{fm}]$ であるが銅原子核の場合は $a=0.596[\text{fm}]$ である。

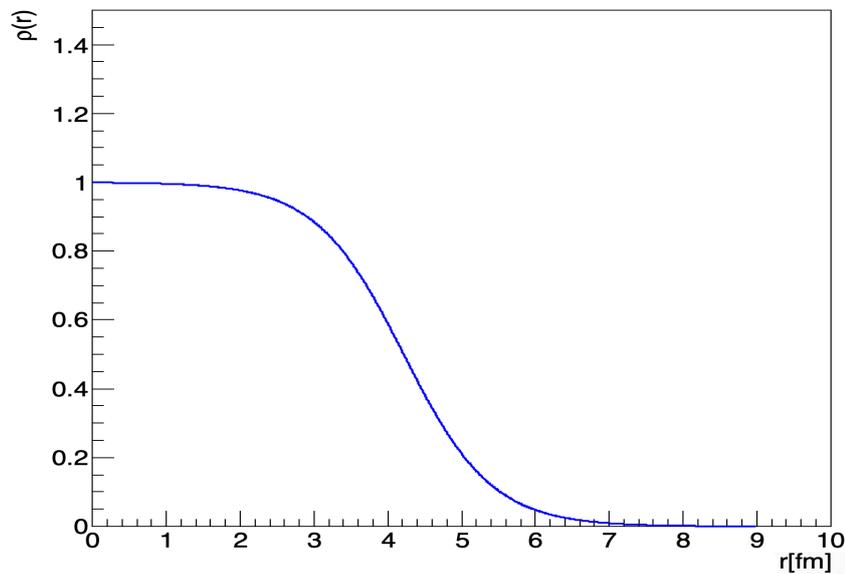


図 A.1 銅原子核の核子分布

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right)} \quad (\text{A.1})$$

$$R = 1.18A^{\frac{1}{3}} - 0.48[\text{fm}] \quad (\text{A.2})$$

$$A = 63 \quad (\text{A.3})$$

$$a = 0.596[\text{fm}] \quad (\text{A.4})$$

A.1 銅原子核衝突における楕円率計算結果と、先行研究との比較

図 A.2 の黄緑点と青点は、それぞれ各 centrality 0~10%, 10~20%, 20~30%, 30~40%, 40~50%, 50~60%, 60~70%, 70~80%, 80~90% における eccentricity ε の文献値と eccentricity ε の計算結果である。

周辺衝突の結果が文献値 [11] と異なる。原因として 2.4.1 で述べた様にパートン衝突と核子衝突が共に起こる場合のみ考えるという条件があるために ε が全体的に小さくなるからである。金原子核に比べて銅原子核の方が核子数が少ないため、よりこのケースが起こりやすくなっていると考えられる。

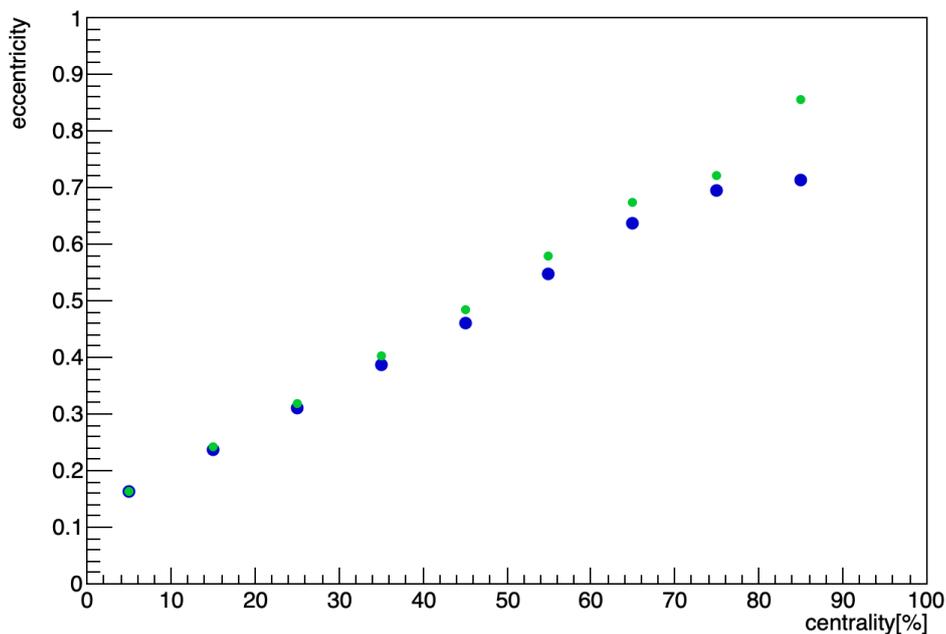


図 A.2 銅原子核衝突における楕円率計算結果 ε

A.2 銅原子核衝突における楕円率計算結果

銅原子核衝突シミュレーションにおける eccentricity ε と parton eccentricity ε_{parton} の計算結果である。図 A.3 は各 centrality における核子内のパートン数 = 3 個の場合の楕円率計算結果である。核子内のパートン数 = 3 個の場合は、表 1.1 の $N_c = 3^*$ のパートン反応断面積を用いてシミュレーションを行った結果である。図 A.4 は核子内のパートン数 = 10 個の場合の楕円率計算結果、図 A.5 は核子内のパートン数 = 20 個の場合の楕円率計算結果を表している。この結果から、金原子核の場合と同様に、核子内のパートン数によらず、parton eccentricity ε_{parton} の方が eccentricity ε よりも大きい値を取ることがわかった。つまり、核子の反応断面積が一定になるという条件下で、核子の内部構造がパートンが複数個存在する非常に単純なモデルの場合においては内部構造を考慮した楕円率の方が大きいということが

わかった。

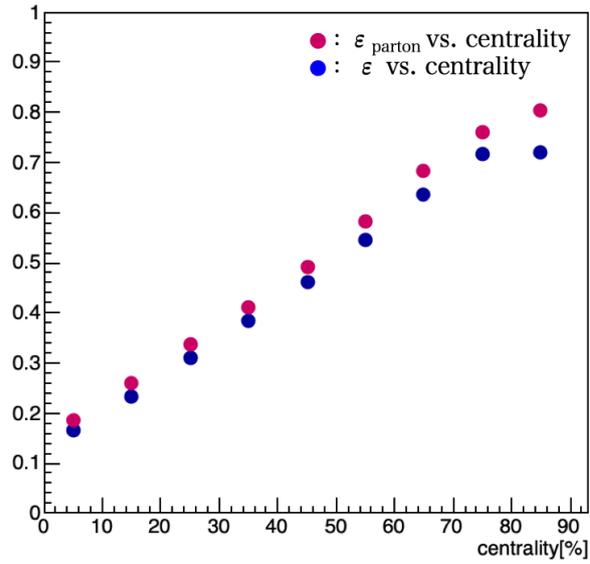


図 A.3 銅原子核衝突における核子内のパートン数 = 3 個の場合の楕円率計算結果 ϵ_{parton}

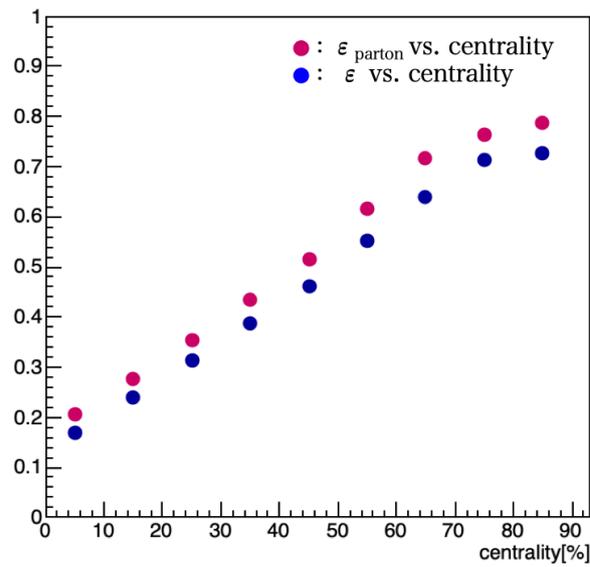


図 A.4 銅原子核衝突における核子内のパートン数 = 10 個の場合の楕円率計算結果 ϵ_{parton}

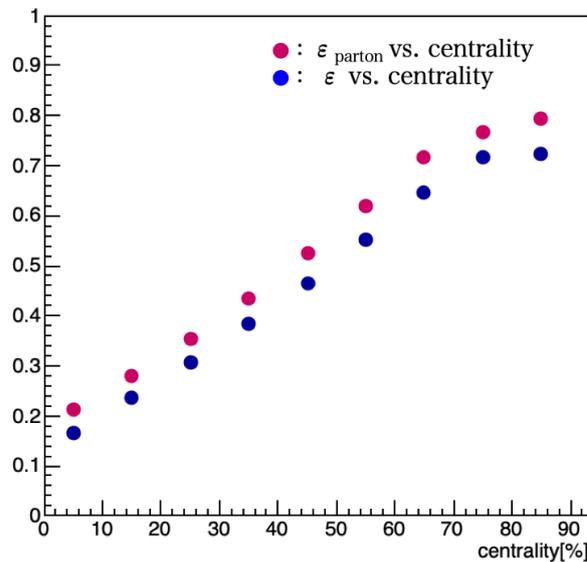


図 A.5 銅原子核衝突における核子内のパートン数 = 20 個の場合の楕円率計算結果 ϵ_{parton}

A.2.1 銅原子核衝突における核子内のパートン数と楕円率の比との関係性

図 A.6 は、図 A.3、図 A.4、図 A.5 の各 centrality において、parton eccentricity ϵ_{parton} を eccentricity ϵ で割ることによって parton eccentricity ϵ_{parton} と eccentricity ϵ の比をとった結果である。核子内のパートン数が等しい場合、centrality が高くなるにつれて比 $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ は小さくなるのがわかる。また、核子内のパートン数による比の違いが見られるが、金原子核の場合の結果とは異なり、核子内のパートン数が多くなるほど比は大きくなる傾向が見られた。

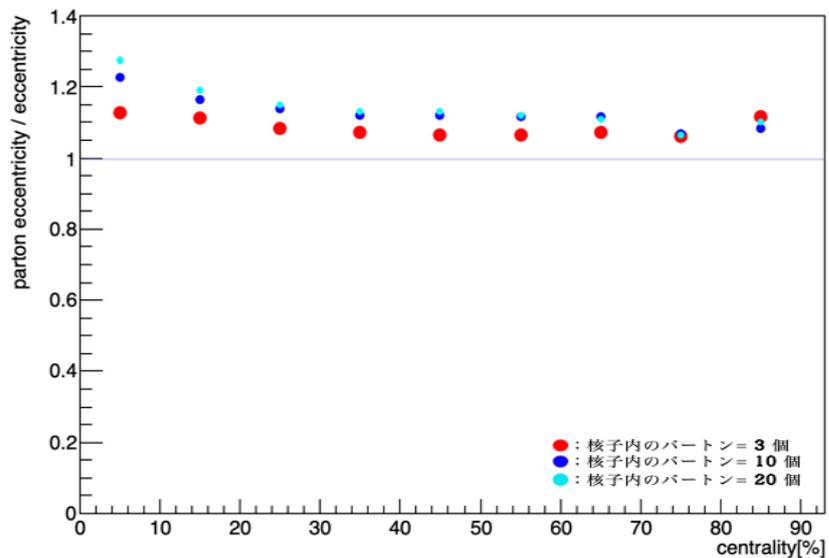


図 A.6 銅原子核衝突における核子内のパートン数の違いによる比 $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ の変化

A.2.2 銅原子核衝突における楕円率計算結果の考察

図 A.3、図 A.4、図 A.5 より、核子内のパートン数によらず、parton eccentricity ε_{parton} の方が eccentricity ε よりも大きい値を取ることがわかった。この結果は金原子核の場合と同じ結果であったため、サイズが異なる重イオンであってもこの結果であると予想される。しかし、核種が異なると比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ と核子内のパートン数による違いが見られた。このことから核子内のパートン数やパートン反応断面積が同じであっても核種が異なると核子数が異なるため、楕円率には核子数とパートン数の関係が影響するという根拠になると考えられる。

A.3 核子内のパートン数のみ変化した場合の銅原子核衝突における核子内のパートン数と楕円率との関係

ここでは銅原子核衝突における核子内のパートン数が parton eccentricity ε_{parton} にどう影響するかを調べた。金原子核の場合と同様の方法で、核子の反応断面積を一定にするという条件を外し、パートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ と一定にして核子内のパートン数を 3 個、10 個、30 個と増加させた。その時の結果が図 A.7、図 A.8、図 A.9 である。これより、核子内のパートン数が増加するほど ε_{parton} と ε は近づき、centrality の高い方（周辺衝突）から $\varepsilon_{parton} > \varepsilon$ が $\varepsilon_{parton} < \varepsilon$ に変化することが確認できた。この結果は金原子核の場合と同じ結果であったため、サイズが異なる重イオンであってもこの結果であると考えられる。

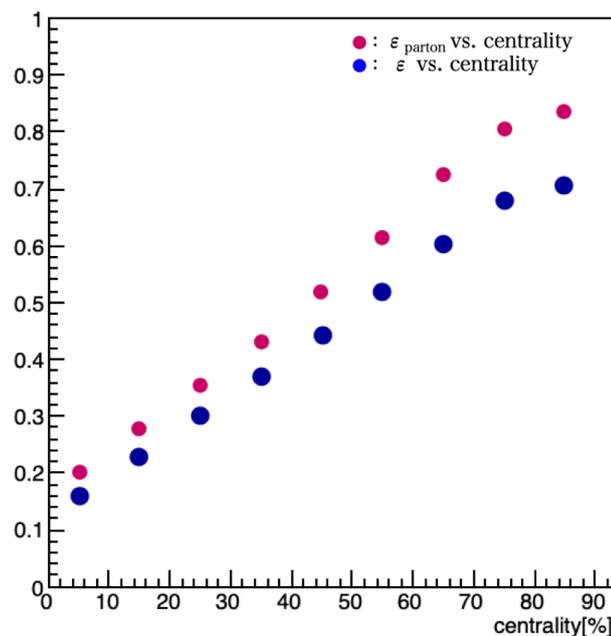


図 A.7 銅原子核衝突におけるパートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ と一定にした場合の核子内のパートン数が 3 個の時の parton eccentricity ε_{parton} の結果

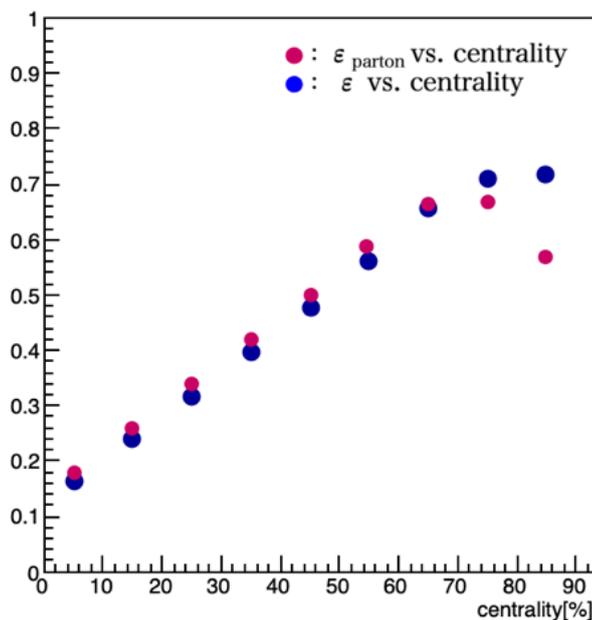


図 A.8 銅原子核衝突におけるパートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ と一定にした場合の核子内のパートン数が 10 個の時の parton eccentricity ϵ_{parton} の結果

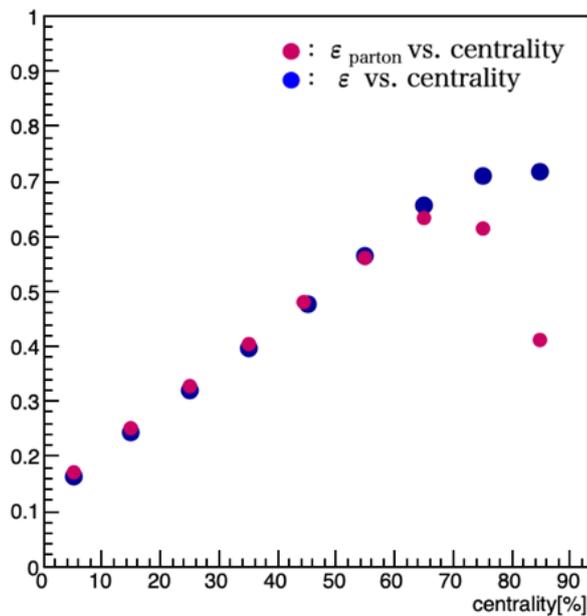


図 A.9 銅原子核衝突におけるパートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ と一定にした場合の核子内のパートン数が 30 個の時の parton eccentricity ϵ_{parton} の結果

A.3.1 核子内のパートン数のみ変化した場合の銅原子核衝突における核子内のパートン数と楕円率の比との関係性

図 A.10 は、図 A.7、図 A.8、図 A.9 の各 centrality において、parton eccentricity ε_{parton} を eccentricity ε で割ることによって parton eccentricity ε_{parton} と eccentricity ε の比をとった結果である。図 A.6 と同様に、核子内のパートン数が増加すると centrality が高くなるにつれて比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は小さくなることがわかる。また、核子内のパートン数が 3 個の場合と 10 個、30 個の場合で比の変化に違いが見られる。核子内のパートン数が 3 個の場合、全 centrality で 1 以上で centrality の高い領域（周辺衝突）では比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ が少し大きくなるという結果に対し、核子内のパートン数が 10 個、30 個の場合、centrality の高い領域（周辺衝突）では比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は 1 より小さくなり、centrality が高くなるほどこの比が小さくなることがわかる。金原子核の場合と比較すると、核子内のパートン数によらず比は小さくなる。パートン

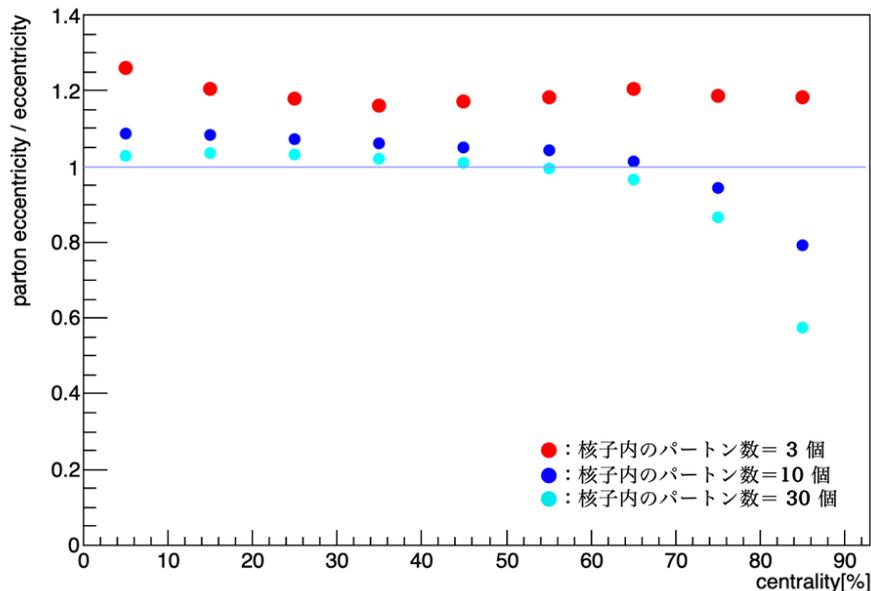


図 A.10 核子内のパートン数のみ変化した場合の銅原子核衝突における核子内のパートン数の違いによる比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の変化

反応断面積を一定にして核子内のパートン数を増加すると、パートン 1 個がパートン衝突する確率は同じであるが、1 核子内に作成するパートン数が増加すると母数が大きくなるため parton participant が増加する。parton participant が増加することで ε_{parton} が全体的に小さくなり、 ε に近づくと考えられる。核子内のパートン数が 3 個の場合と 10 個、30 個の場合で比の違いが周辺衝突で特に見られる。これは金原子核衝突と同様の理由が考えられる。

A.4 銅原子核衝突におけるパートン反応断面積と楕円率との関係

パートン反応断面積を一定にして核子内のパートン数が増加するほど parton eccentricity ε_{parton} が小さくなることがわかる。ここでは核子内のパートン数を一定にしてパートン反応断面積を変化させた時の parton eccentricity ε_{parton} の値の変化を調べた。ここでも核子の反応断面積を一定にするという条件を外し、核子内のパートン数を 3 個と一定にしてパートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ 、 $\sigma_{cc} = 8.1mb$ （核子の反応断面積が 42mb になる様に調整されたパートン反応断面積）、核子内のパートンが全て衝突する場合と段階的に大きくした場合の比較を行った。「パートンが全て衝突する場合」とは前述の通り、パートン反応断面積を大きくすることで、パートン衝突判断の際に作成したパートンが全て parton participant になる様にしている。図 A.11 はパートン反応断面積 $\sigma_{cc} = 4.3mb$ の場合の結果、図 A.12 はパートン反応断面積 $\sigma_{cc} = 8.1mb$ の場合の結果、核子内のパートンが全て衝突する場合の結果が図 A.13 である。パートン反応断面積を一定にして核子内のパートン数を増加させた時と同様に、パートン反応断面積が大きくなるほど ε_{parton} と ε は近づき、centrality の高い方（周辺衝突）では ε_{parton} と ε の大小関係 $\varepsilon_{parton} > \varepsilon$ が $\varepsilon_{parton} < \varepsilon$ に変化することが確認できた。この結果は金原子核の場合と同じ結果であったため、サイズが異なる重イオンであっても同様の結果になると考えられる。

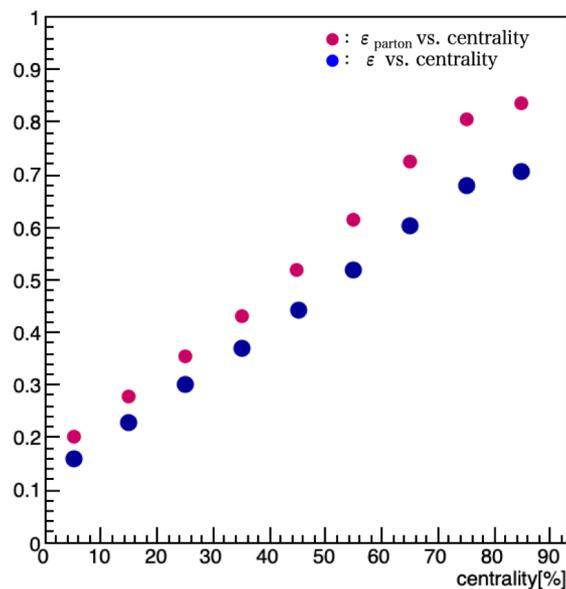


図 A.11 銅原子核衝突における核子内のパートン数が 3 個と一定にした場合のパートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 4.3mb$ の時の parton eccentricity ε_{parton} の結果

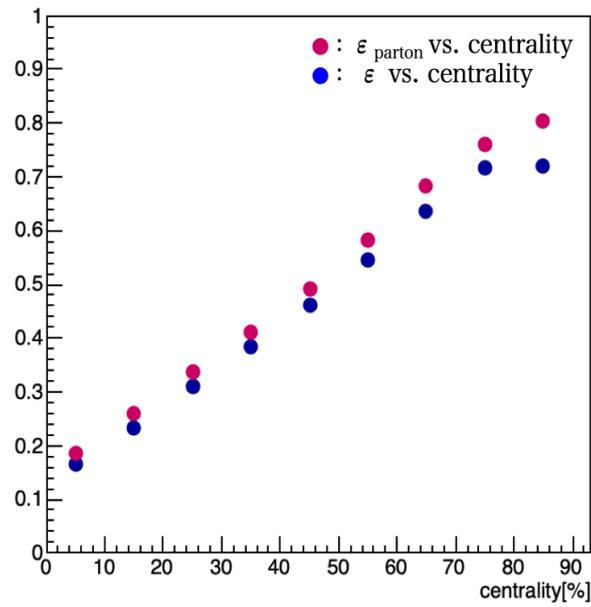


図 A.12 銅原子核衝突における核子内のパートン数が 3 個と一定にした場合のパートン反応断面積を $\sigma_{cc} = 8.1mb$ の時の parton eccentricity ϵ_{parton} の結果

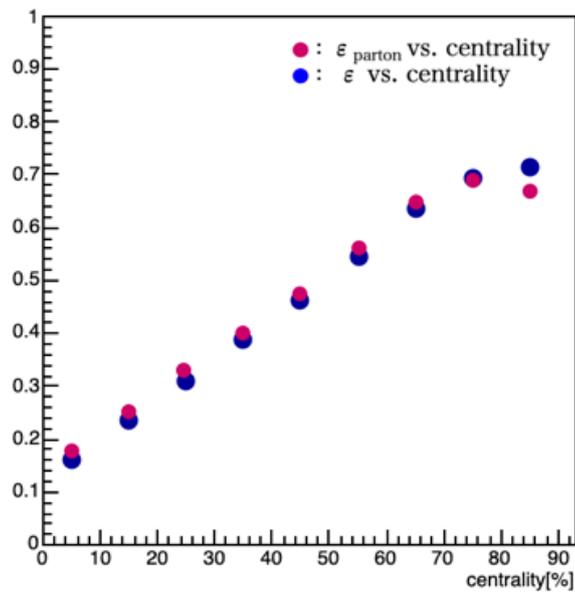


図 A.13 銅原子核衝突における核子内のパートン数が 3 個と一定にした場合の核子内のパートンが全て衝突する時の parton eccentricity ϵ_{parton} の結果

A.4.1 銅原子核衝突におけるパートン反応断面積と楕円率の比との関係性

図 A.14 は、図 A.11、図 A.12、図 A.13 の各 centrality において、parton eccentricity ε_{parton} を eccentricity ε で割ることによって parton eccentricity ε_{parton} と eccentricity ε の比をとった結果である。図 A.6 と同様に、パートン反応断面積が大きくなると centrality が高くなるにつれて比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は小さくなることがわかる。また、パートン反応断面積の大きさにより比の変化に違いが見られる。パートン反応断面積を小さくすると、全 centrality で 1 以上になり、centrality の高い領域（周辺衝突）では比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は大きくなることが確認できた。また、パートン反応断面積が大きく核子内のパートンが全て衝突する場合は、centrality の高い領域（周辺衝突）では比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は 1 以下になり、centrality が高くなるほど比は大きくなることがわかる。金原子核衝突との相違点は中心衝突での核子内のパートンが全て衝突する場合の ε_{parton} と ε の大小関係である。全 centrality において金原子核の場合よりも比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ は小さいが、パートン反応断面積を大きくするとその比の小さくなり方が金原子核の方が顕著に現れる。パートン反応断面積で同じであれば核子内のパートンが衝突する確率は等しいため、この核種による違いは核子数 N_{part} による違いが関係していると考えられる。周辺衝突の場合は金原子核の場合も銅原子核の場合も N_{part} による違いは見られないが、中心衝突になるほど元々存在する核子数の影響が大きくなるからである。しかし、核子内のパートンは全て衝突する場合、核種は異なると核子数は異なるが、 N_{part} と N_{ppart} の比は同じである。従って、楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ には N_{part} と N_{ppart} の関係が影響するが、 N_{part} と N_{ppart} の一対一対応ではなく別の要素も考慮する必要があることが予想される。

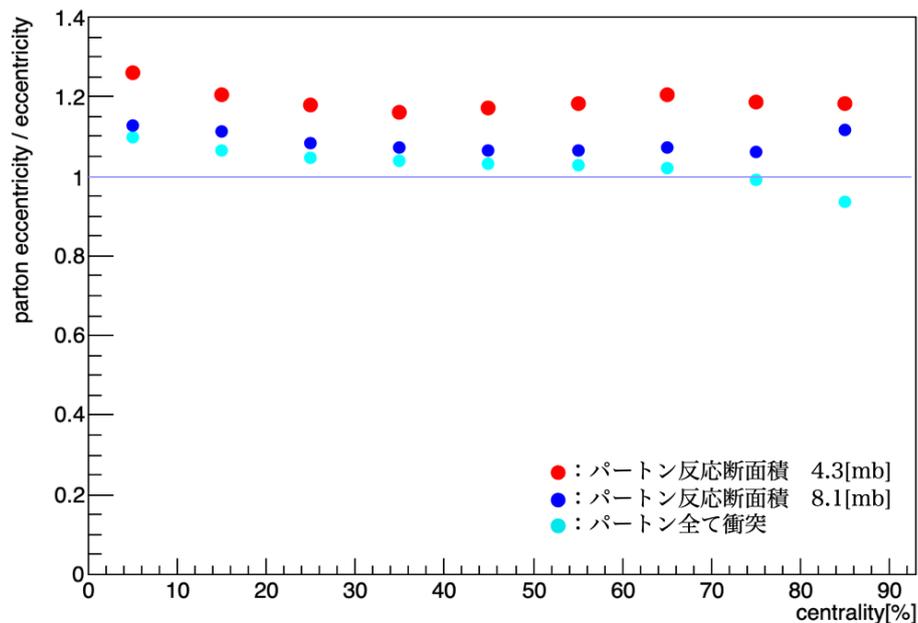


図 A.14 銅原子核衝突におけるパートン反応断面積の違いによる比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の変化

A.4.2 核種の異なる原子核におけるの楕円率の考察

核種の異なる原子核におけるの相違点は原子核の大きさと原子核内の核子数である。本シミュレーションでは xy 平面上で衝突関与部の核子分布を見るため、ビーム軸方向の違いを考慮しない。そのため、同じ密度分布に従う核子の分布であっても平面上で見た際には原子核サイズが大きいためビーム軸方向にも大きい金原子核の方が密度が大きくなる。核子内のパートン数とパートン反応断面積を変更した場合、パートン反応断面積を固定し核子内のパートン数を変更した場合、核子内のパートン数を固定しパートン反応断面積を変更した場合のいずれの結果も、楕円率の比 $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ は密度の大きな金原子核の方が大きく、centrality が高くなるにつれて減少傾向が大きくなった。このことから原子核のサイズが異なる、核種の異なる原子核同士を比較する際、パートン衝突という核子の内部構造を考慮する場合は、形状が等しい場合でもサイズの違いを考慮する必要があることが分かる。

付録 B

内部構造を考慮した場合の衝突関与部の形状と楕円方位角異方性 v_2 の関係

核種が異なるもの同士を比較する際に同数の N_{part} では v_2 を楕円率で規格化 $\frac{v_2}{\epsilon}$ するとほぼ等しくなるということが先行研究においてわかっている。ここでは核子の内部構造を考慮した場合、即ち ϵ_{parton} の場合でもこの特徴が見られるかということ調べた。

B.1 楕円方位角異方性 v_2

v_2 は式 B.1 で表される、方位角方向に対しての運動量空間における放出粒子の収量をフーリエ展開した時の係数として定義される。 v_n は方位角方向に運動量空間において粒子収量にどの程度異方性があるかを表し、 $n=2$ の時を楕円方位角異方性と呼ぶ。式 B.1 中の Φ は粒子の方位角、 Ψ は反応平面の方位角である。粒子の方位角異方性は初期の衝突関与部における空間的異方性に起因していると考えられている。

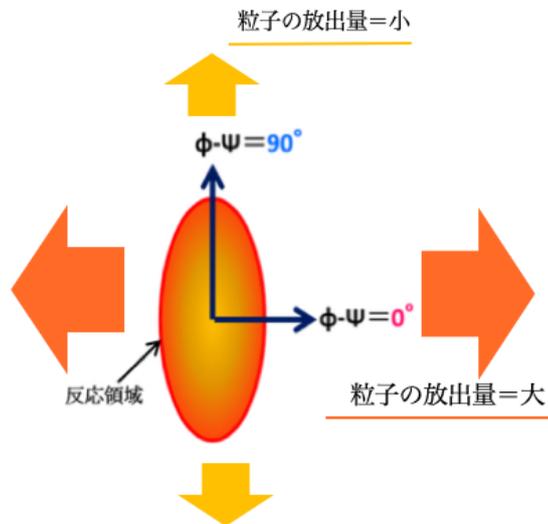


図 B.1 楕円方位角異方性

$$\frac{dN}{d(\Phi - \Psi)} \propto 1 + 2v_2 \cos[2(\Phi - \Psi)] \quad (\text{B.1})$$

$$v_n = \langle \cos(n(\Phi - \Psi)) \rangle \quad (\text{B.2})$$

B.2 横運動量 p_T

式 B.3 で表される、ビーム軸に対して垂直な方向の運動量成分を横運動量と呼ぶ。横運動量はビーム軸方向の運動量の成分を考慮しないため、衝突により生成する量である。そのため横運動量を用いると衝突により発生する運動量のみ考慮することが可能である。

$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (\text{B.3})$$

B.3 衝突関与部の形状と楕円方位角異方性 v_2 の関係

図 B.2、図 B.3、図 B.4 は、核子内のパートン数が 3 個、パートン反応断面積が 8.1[mb] の場合において、それぞれの横運動量領域にて N_{part} と v_2 を楕円率で規格化した $\frac{v_2}{\varepsilon}$ の関係を表している。 ε_{parton} も ε と同様の傾向が見られることから、核子の内部構造を考慮してパートンレベルで考えた場合でも核子レベルで成立していたスケーリング則が成立することがわかった。

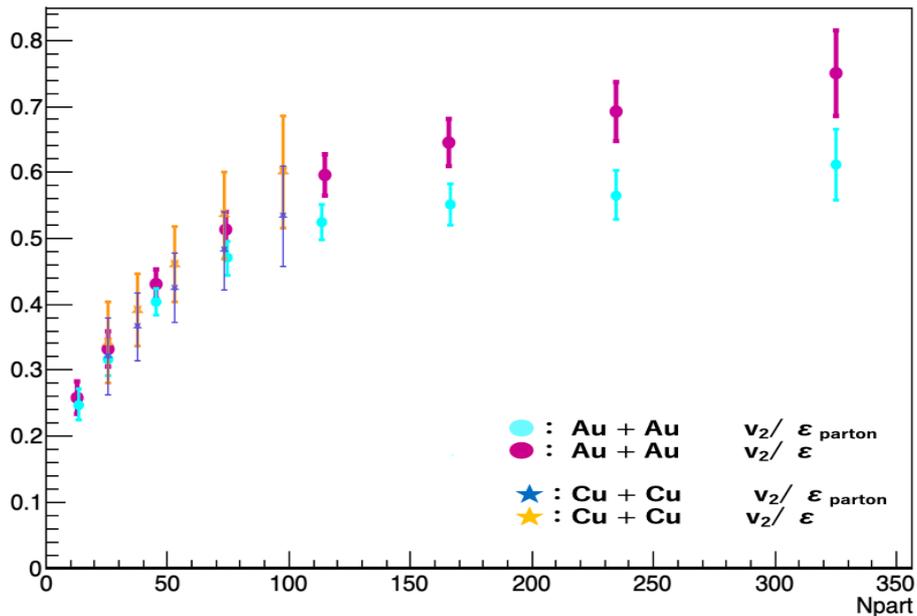


図 B.2 低横運動領域 ($0.2\text{GeV} \leq p_T \leq 1.0\text{GeV}$) において N_{part} と v_2 を楕円率で規格化した $\frac{v_2}{\varepsilon}$ の関係

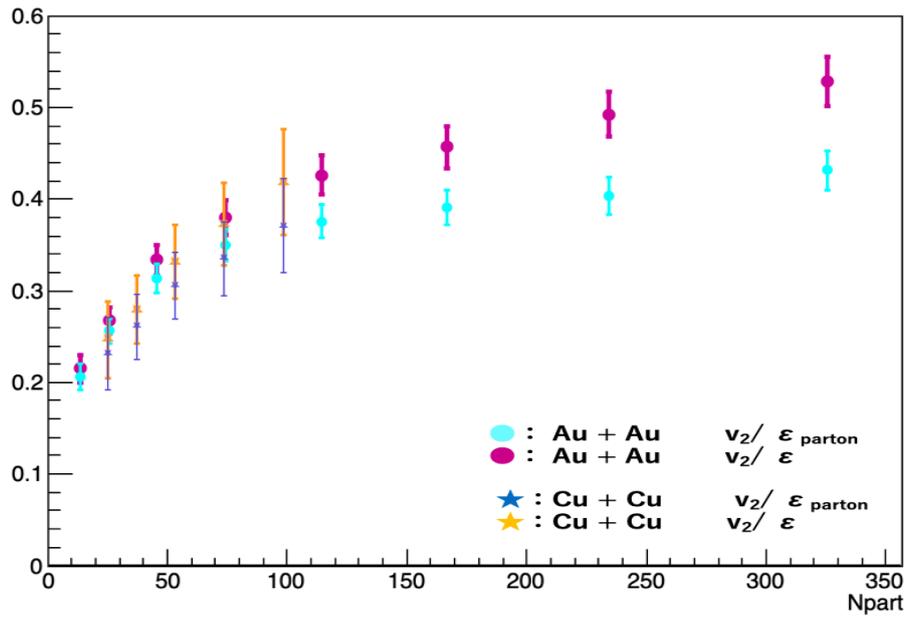


図 B.3 中程度横運動領域 ($1.0\text{GeV} \leq p_T \leq 2.0\text{GeV}$) において N_{part} と v_2 を楕円率で規格化した $\frac{v_2}{\epsilon}$ の関係

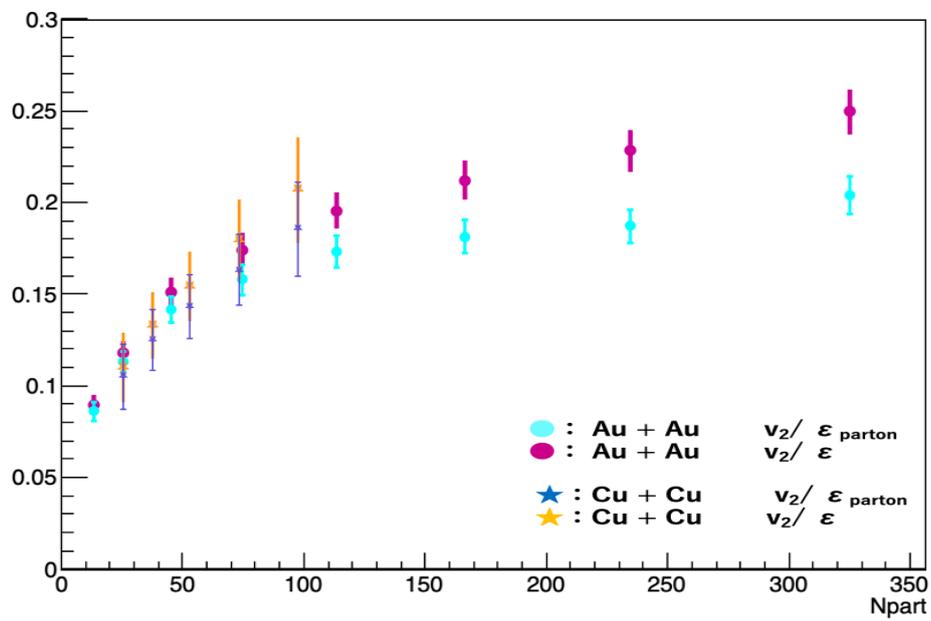


図 B.4 高横運動領域 ($2.0\text{GeV} \leq p_T \leq 4.0\text{GeV}$) において N_{part} と v_2 を楕円率で規格化した $\frac{v_2}{\epsilon}$ の関係

B.4 核子内のパートン数が異なる場合の衝突関与部の形状と楕円方位角異方性 v_2 の関係

核子内のパートン数が 20 個、パートン反応断面積が 0.2[mb] の場合において、核子内のパートン数とパートン反応断面積を変更しても同様に N_{part} と $\frac{v_2}{\epsilon}$ の関係が成立するかを調べた。その結果、核子内のパートンが 3 個、パートン反応断面積が 8.1[mb] の場合と同様の傾向が見られることから、核子の内部構造を考慮してパートンレベルで考えた場合、核子内のパートン数とパートン反応断面積を変更しても核子レベルで成立していたスケール則が成立することが確認できた。

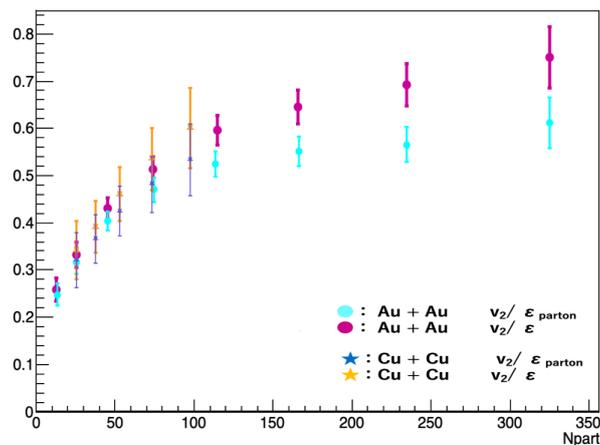


図 B.5 低横運動領域 ($0.2\text{GeV} \leq p_T \leq 1.0\text{GeV}$) において N_{part} と v_2 を楕円率で規格化した $\frac{v_2}{\epsilon}$ の関係

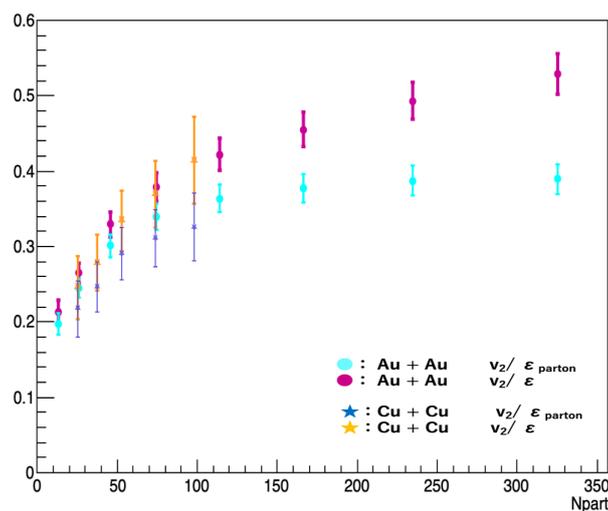


図 B.6 中程度横運動領域 ($1.0\text{GeV} \leq p_T \leq 2.0\text{GeV}$) において N_{part} と v_2 を楕円率で規格化した $\frac{v_2}{\epsilon}$ の関係

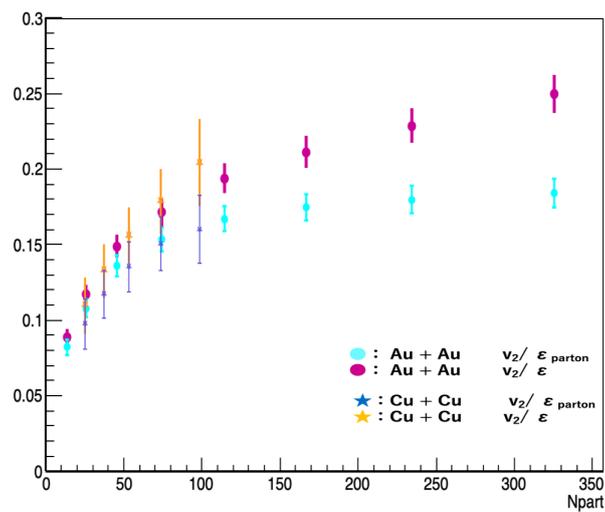


図 B.7 高横運動領域 ($2.0\text{GeV} \leq p_T \leq 4.0\text{GeV}$) において N_{part} と v_2 を楕円率で規格化した $\frac{v_2}{\epsilon}$ の関係

付録 C

N_{part} 別の N_{ppart} と楕円率の関係

核子内のパートン数が 3 個、パートン反応断面積が 8.1[mb] の場合において、2.6 にて前述の N_{part} 別の N_{ppart} と楕円率の関係について本章で記載していない分をここに記す。本章で記載していない分 $N_{part} = 325, 235, 114, 46, 26, 6$ はそれぞれ centrality=0~10%、centrality=10~20%、centrality=30~40%、centrality=50~60%、centrality=60~70%、centrality=80~92.2% の場合の N_{part} の平均値を、小数第一位を四捨五入した値であり、その N_{part} の N_{ppart} と楕円率を見ることでその centrality での楕円率の大まかな特徴を見ることとする。

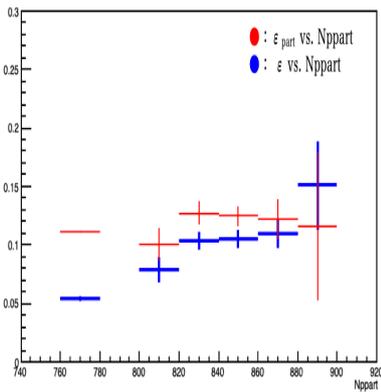


図 C.1 $N_{part} = 325$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係

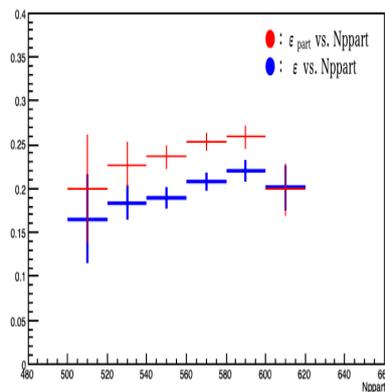


図 C.2 $N_{part} = 235$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係

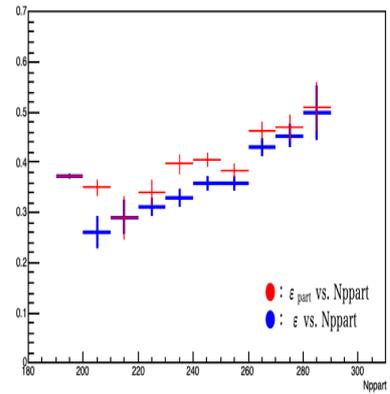


図 C.3 $N_{part} = 114$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係

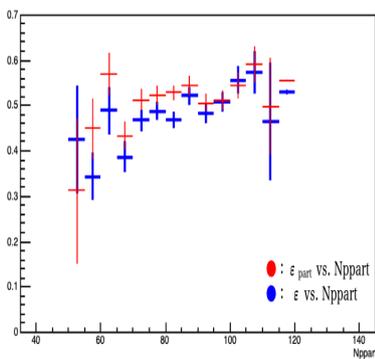


図 C.4 $N_{part} = 46$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係

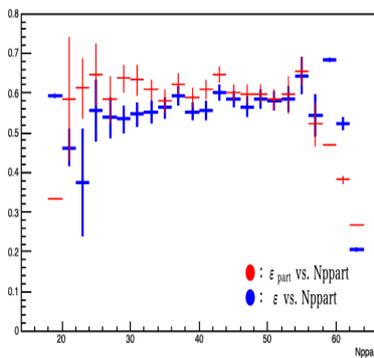


図 C.5 $N_{part} = 26$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係

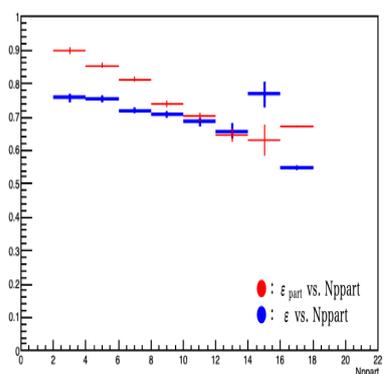


図 C.6 $N_{part} = 6$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係

付録 D

N_{part} 別の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係

核子内のパートン数が 3 個、パートン反応断面積が 8.1[mb] の場合において、2.6 にて前述の N_{part} 別の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係について本章で記載していない分をここに記す。本章で記載していない分 $N_{part} = 325, 235, 114, 46, 26, 6$ はそれぞれ centrality=0~10%、centrality=10~20%、centrality=30~40%、centrality=50~60%、centrality=60~70%、centrality=80~92.2% の場合の N_{part} の平均値を、小数第一位を四捨五入した値であり、その N_{part} の N_{ppart} と楕円率を見ることでその centrality での楕円率の比の全体像として見ることにする。

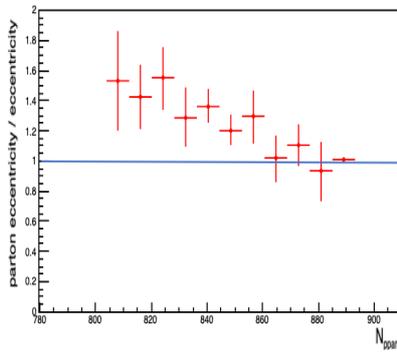


図 D.1 $N_{part} = 325$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係

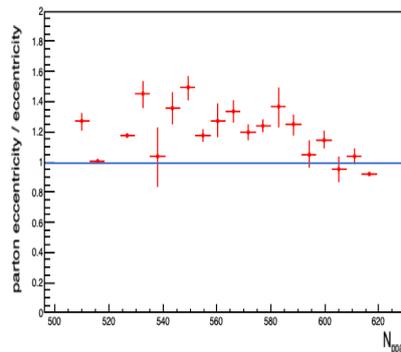


図 D.2 $N_{part} = 235$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係

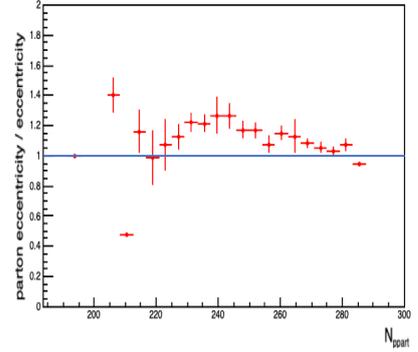


図 D.3 $N_{part} = 114$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係

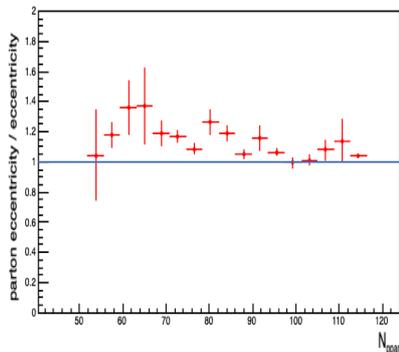


図 D.4 $N_{part} = 46$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係

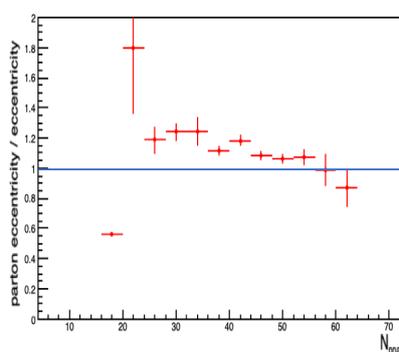


図 D.5 $N_{part} = 26$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係

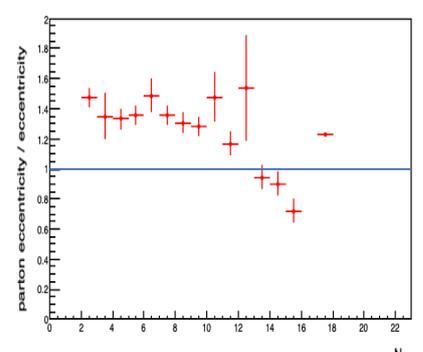


図 D.6 $N_{part} = 6$ の N_{ppart} と楕円率の比 $\frac{\varepsilon_{parton}}{\varepsilon}$ の関係

付録 E

核子内のパートン数が 10 個の場合における N_{part} 別の N_{ppart} と楕円率の関係

核子内のパートン数が 10 個、パートン反応断面積が 0.9[mb] の場合における N_{part} 別の N_{ppart} と楕円率の関係をここに記す。 $N_{part} = 325, 235, 167, 114, 74, 46, 26, 13, 6$ はそれぞれ centrality=0~10%、centrality=10~20%、centrality=20~30%、centrality=30~40%、centrality=40~50% centrality=50~60%、centrality=50~60%、centrality=60~70%、centrality=70~80% centrality=80~92.2% の場合の N_{part} の平均値を、小数第一位を四捨五入した値であり、その N_{part} の N_{ppart} と楕円率を見ることでその centrality での楕円率の大まかな特徴を見ることとする。

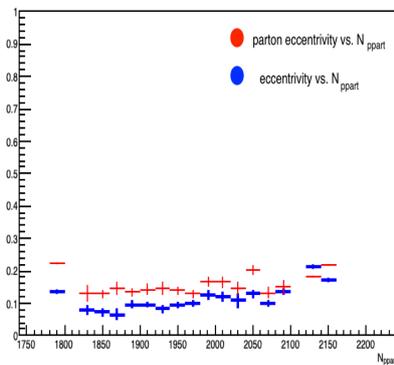


図 E.1 $N_{part} = 325$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係

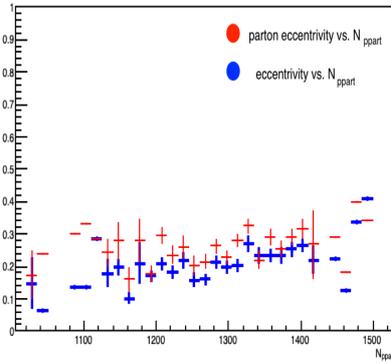


図 E.2 $N_{part} = 235$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係

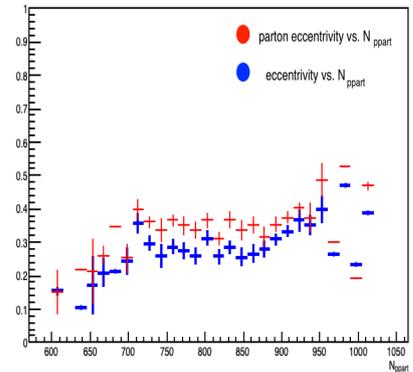


図 E.3 $N_{part} = 167$ の N_{ppart} と楕円率 ε_{parton} の関係

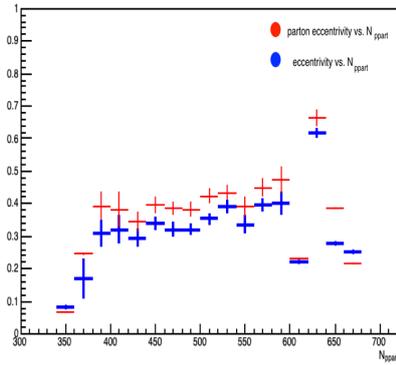


図 E.4 $N_{part} = 114$ の N_{ppart} と楕円率 ϵ_{parton} の関係

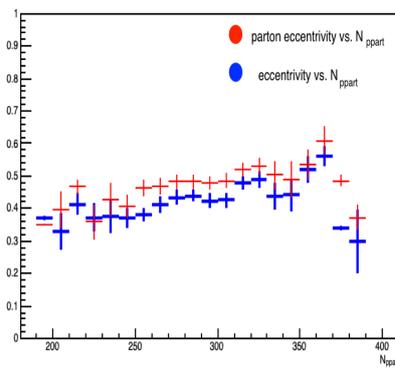


図 E.5 $N_{part} = 74$ の N_{ppart} と楕円率 ϵ_{parton} の関係

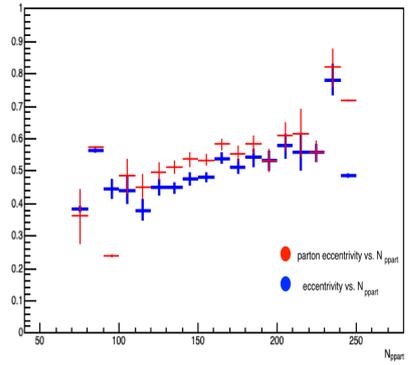


図 E.6 $N_{part} = 46$ の N_{ppart} と楕円率 ϵ_{parton} の関係

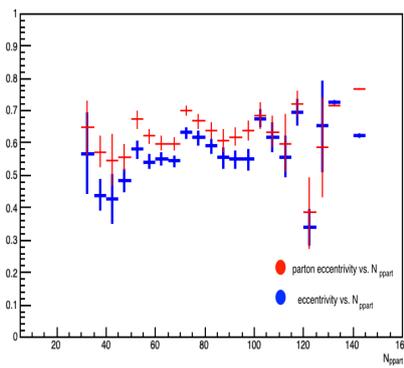


図 E.7 $N_{part} = 26$ の N_{ppart} と楕円率 ϵ_{parton} の関係

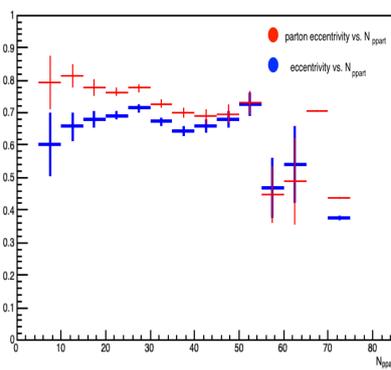


図 E.8 $N_{part} = 13$ の N_{ppart} と楕円率 ϵ_{parton} の関係

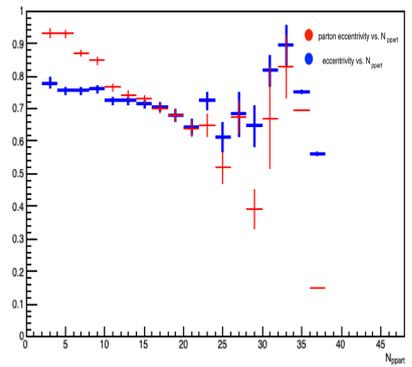


図 E.9 $N_{part} = 6$ の N_{ppart} と楕円率 ϵ_{parton} の関係

付録 F

核子反応断面積 σ_{NN} と核子内のパートン数 N_c とパートン反応断面積 σ_{cc} の関係

図 F.1 は核子反応断面積 σ_{NN} と核子内のパートン数 N_c とパートン反応断面積 σ_{cc} の関係である。[6]
 本シミュレーションでは核子対あたりの重心系エネルギー 200[GeV] の場合でシミュレーションを行ったため、核子反応断面積 $\sigma_{NN} = 42[\text{mb}]$ が一定になる様に核子内のパートン数とパートン反応断面積を用いた。図 F.1 中の「 $N_c = 3(\text{mod})$ 」は核子内のパートン数が 3 個の場合の結果を $N_c = 3$ の時よりも修正した結果である、ということを表している。

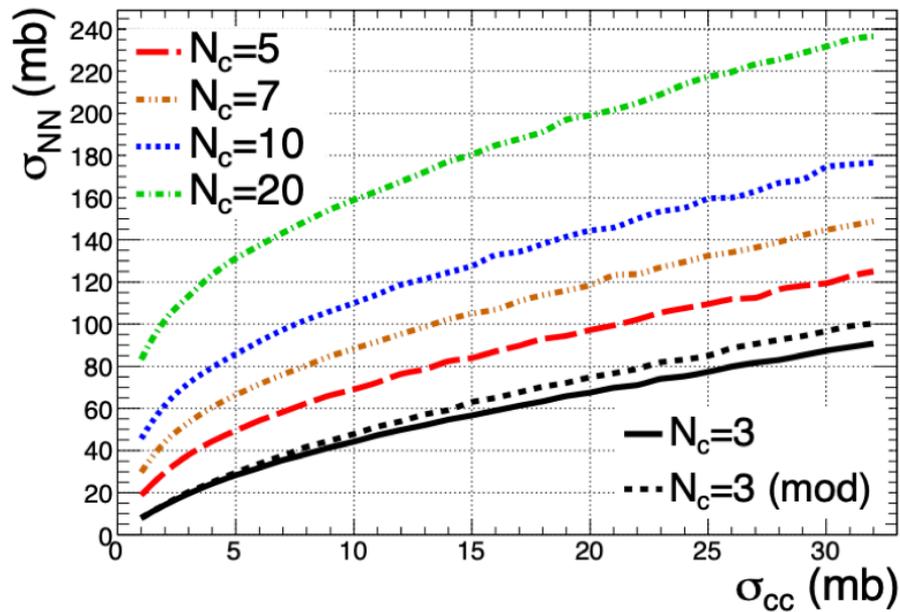


図 F.1 核子反応断面積 σ_{NN} と核子内のパートン数 N_c とパートン反応断面積 σ_{cc} の関係 [6]

付録 G

金原子核衝突における各 centrality の N_{part} と eccentricity ϵ の関係

表 G は $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ の金原子核同士の衝突における各 centrality における N_{part} と eccentricity ϵ の関係を表している。[8][15]

表 G.1 Au+Au の各 centrality における N_{part} と eccentricity ϵ の関係 [8][15]

centrality[%]	$\langle N_{part} \rangle$	Systematic Error	$\langle eccentricity \rangle$	Systematic Error
0~10	325.2	3.3	0.103	0.026
10~20	234.6	4.7	0.200	0.025
20~30	166.6	5.4	0.284	0.021
30~40	114.2	4.4	0.356	0.017
40~50	74.4	3.8	0.422	0.015
50~60	45.5	3.3	0.491	0.011
60~70	25.7	3.8	0.567	0.007
70~80	13.4	3.0	0.666	0.012
80~90	6.3	1.2	0.726	0.028

付録 H

銅原子核衝突における各 centrality の N_{part} と eccentricity ϵ の関係

表 H は $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ の銅原子核同士の衝突における各 centrality における N_{part} と eccentricity ϵ の関係を表している。[9] [15]

表 H.1 Cu+Cu の各 centrality における N_{part} と eccentricity ϵ の関係 [9] [15]

centrality[%]	$\langle N_{part} \rangle$	Systematic Error	$\langle eccentricity \rangle$	Systematic Error
0~10	98.2	2.4	0.163	0.020
10~20	73.6	2.5	0.241	0.030
20~30	53.0	1.9	0.317	0.019
30~40	37.3	1.6	0.401	0.019
40~50	25.4	1.3	0.484	0.016
50~60	16.7	0.9	0.579	0.014
60~70	10.4	0.6	0.674	0.021
70~80	6.4	0.5	0.721	0.017
80~90	3.6	0.3	0.856	0.072

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 実験室で再現する宇宙の始まり 共立出版
- [2] 長岡洋介, 基礎物理学シリーズ 現代物理学 東京教学社
- [3] Kohsuke Yagi, Tetsuo Hatsuda, Yasuo Miake, Quark-Gluon Plasma Cambridge monographs on particle physics, nuclear physics and cosmology
- [4] B. Alver et al., The PHOBOS Glauber Monte Carlo, arXiv:0805.4411.
- [5] System size, energy and pseudorapidity dependence of directed and elliptic flow at RHIC <https://arxiv.org/pdf/nucl-ex/0510031.pdf>
- [6] C. Loizides, Phys. Rev. C 94 (2016) 024914
- [7] J. T. Mitchell, D. V. Perepelitsa et al, Physical Review C 93, 054910 (2016)
- [8] J. K. Reyers, Glauber Monte-Carlo $\sqrt{s_{NN}} = 200 GeV$ Calculations for Au+Au Collisions at
- [9] A. Adare et al. (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. C 92, 034913 (2015)
- [10] Constantin Loizides et al, Phys. 37:770-772, 2007
- [11] 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
- [12] S. Eremín and S. Voloshin, Phys. Rev. C 67, 064905 (2003)
- [13] Rajeev S. Bhalerao, Jean-Yves Ollitrault, Phys. Lett. B 641:260-264, 2006
- [14] S. Manly (for the PHOBOS Collaboration), Nucl. Phys. A 774:523-526, 2006
- [15] PHENIX グループの内部ページ
- [16] L. Ma et al, Phys. Rev. C 94, 044915 (2016)
- [17] J. Scott Moreland, Jonah E. Bernhard, and Steffen A. Bass, Phys. Rev. C 92, 2015
- [18] J. Scott Moreland, Jonah E. Bernhard, Steffen A. Bass, Phys. Rev. C 101, 024911 (2020)
- [19] Hans-Joachim Drescher, Adrian Dumitru, Clement Gombeaud, Jean-Yves Ollitrault, Phys. Rev. C 76:024905 (2007)
- [20] D. d'Enterria, G. Kh. Eyyubova, V. L. Korotkikh, I. P. Lokhtin, S. V. Petrushanko, L. I. Sarycheva, A. M. Snigirev, Eur. Phys. J. C 66:173-185, 2010
- [21] M. L. Miller, K. Reyers, S. J. Sanders, and P. Steinberg, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 57, 205 (2007)
- [22] B. B. Back et al. (PHOBOS Collaboration), Phys. Rev. C 70, 021902 (2004)
- [23] J. T. Mitchell, D. V. Perepelitsa, M. J. Tannenbaum, and P. W. Stankus, Phys. Rev. C 93, 054910 (2016)
- [24] 石丸桜子, RHIC-PHENIX 実験での $\sqrt{s_{NN}} = 200 GeV$ 金 + 金原子核衝突における重いクォーク起源の電子の方位角異方性の測定, 修士学位論文 (2019)

-
- [25] 武田明莉, 相対論的原子核衝突における高横運動量での荷電粒子の方位角異方性の測定, 修士学位論文 (2017)
- [26] 西谷理佐, 核子あたりの重心系エネルギー 200 GeV の Au + Au 原子核衝突における荷電粒子の横運動量分布と方位角異方性を用いた QGP 中のエネルギー損失の研究, 修士学位論文 (2019)