

$\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ の重イオン衝突における
核子の内部構造に依存した
衝突関与部の幾何学的異方性の研究

奈良女子大学
高エネルギー物理学研究室
4回生
黒田奈津貴

目次

> はじめに

クォーク-グルーオン プラズマ
重イオン衝突実験
研究目的

> 研究内容

> 結果

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の楕円率計算結果
パートン反応断面積を固定した場合の楕円率計算結果
核子内のパートン数を固定した場合の楕円率計算結果

> まとめ

はじめに

- クォーク・グルーオン プラズマ
- 重イオン衝突実験
- 研究目的

クォーク・グルーオン プラズマ (Quark-Gluon Plasma : QGP)

クォークとグルーオンがハドロン内の閉じ込めから解放された状態



QGP生成が可能と考えられている実験方法

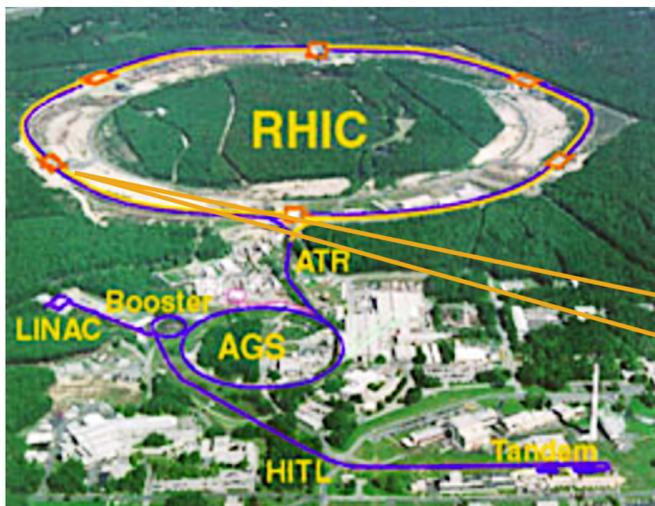
➡ 高エネルギー重イオン衝突実験

高エネルギー重イオン衝突実験

重い原子の原子核 = 重イオン同士を
ほぼ光速まで加速して衝突させる ⇒ 高温物質を生成

衝突型加速器 RHIC

The Relativistic Heavy Ion Collider



ブルックヘブン国立研究所

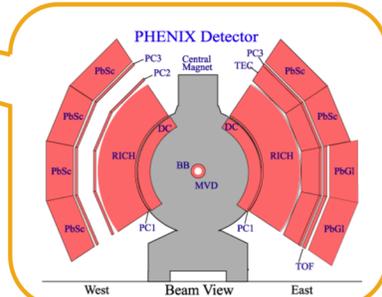
- RHICで実験している核種例：陽子や金、ウランウム等
- 異なる核種同士の衝突実験も可能

- Au + Au 最高エネルギー = 200[GeV]

PHENIX 実験

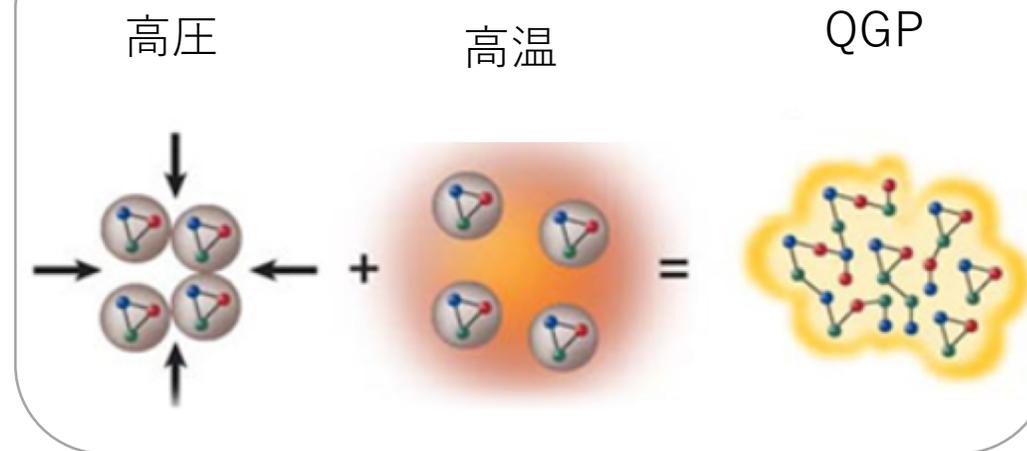
The Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment

- PHENIX 実験：高エネルギー重イオン衝突実験
- PHENIX 実験の主な目的：QGP の性質解明



https://www.phenix.bnl.gov/detectors/drift_chamber.html

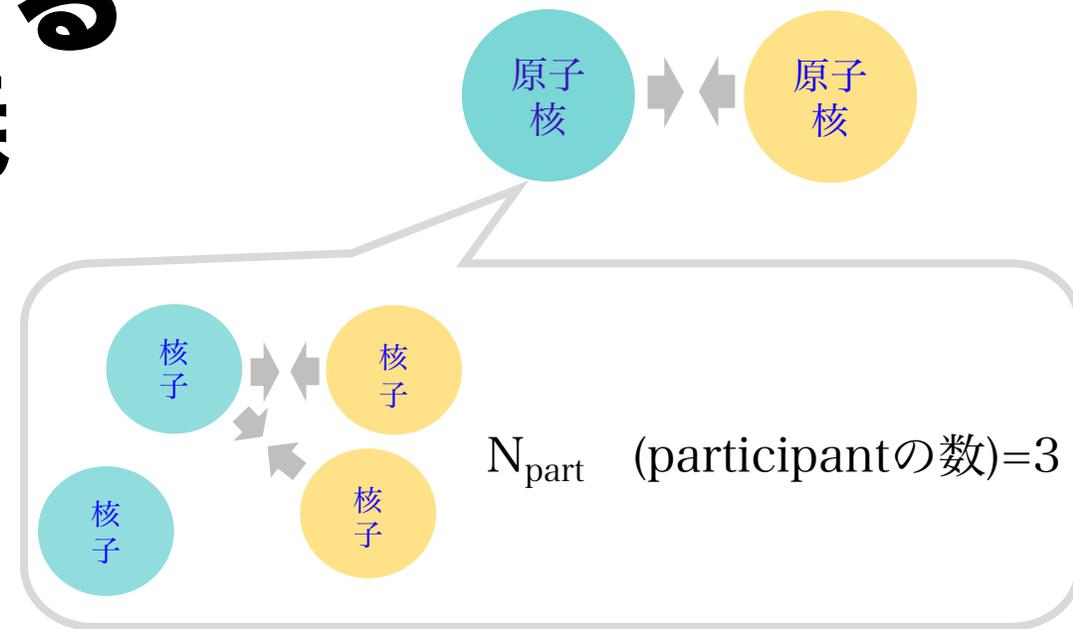
高温・高密度にする
⇒ 閉じ込めが破れる



本研究で使用する 物理量の定義

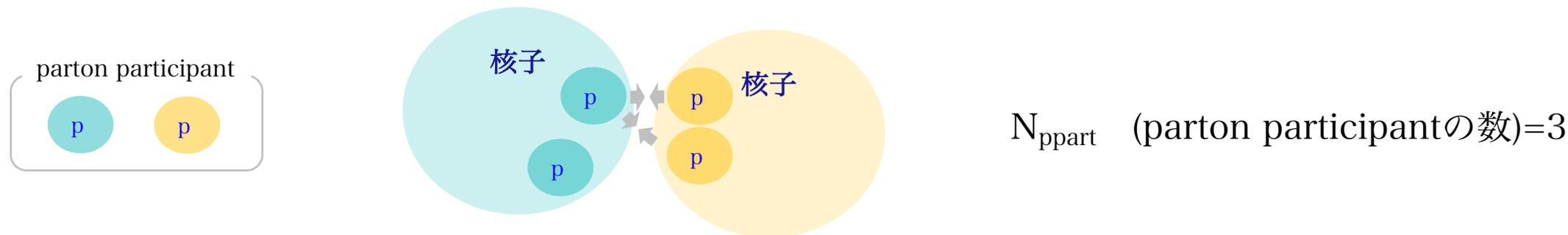
participant (衝突関与核子)

1回以上核子衝突を起こす核子。



parton participant (衝突関与パートン)

1回以上パートン-パートン 衝突を起こすパートン。



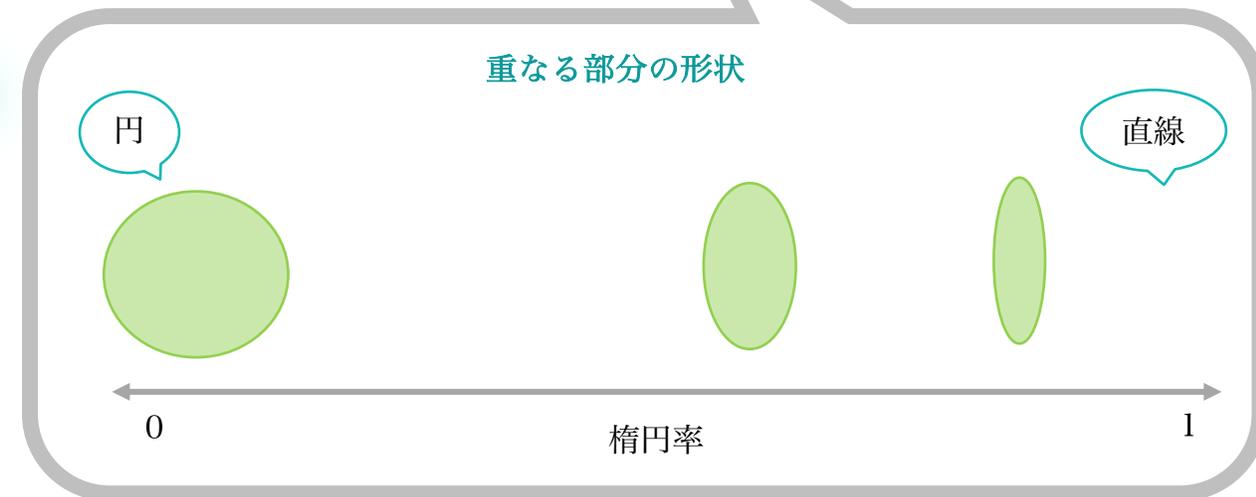
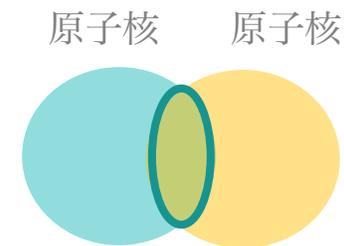
本研究で使用する 物理量の定義

楕円率 ε (eccentricity)

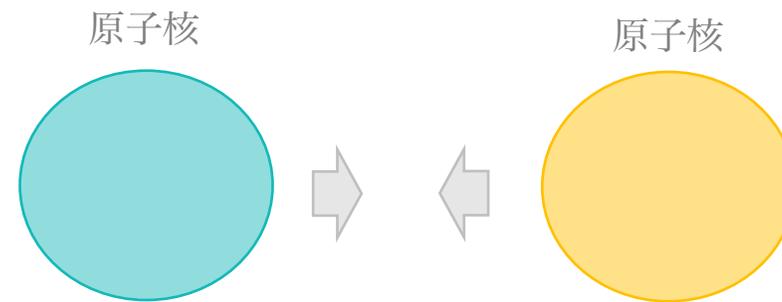
原子核同士の重なる部分が
どの程度円形から変形しているかを表す

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

- participant(衝突関与核子)を用いて計算した楕円率：楕円率 ε
- parton participant(衝突関与パートン)を用いて計算した楕円率：パートン楕円率 $\varepsilon_{\text{parton}}$

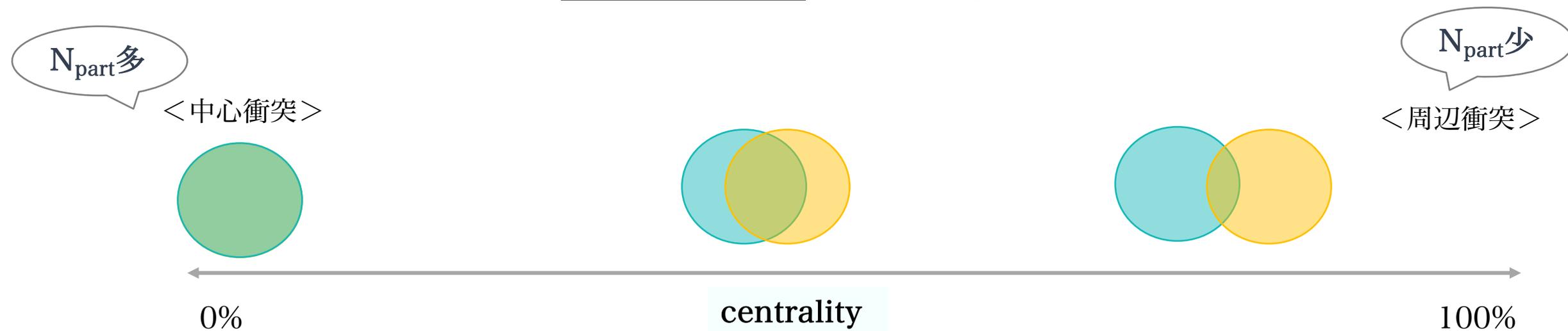


本研究で使用する 物理量の定義



centrality (中心衝突度)

衝突する2つの原子核の重なりの程度を表す量。



研究目的

- 今までの楕円率計算=核子の位置を用いて計算→核子レベルで考える場合が多かった



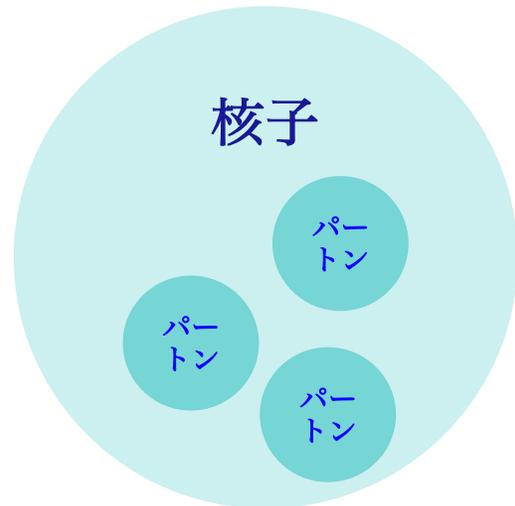
核子の内部構造は楕円率に影響するかを調べる

- シミュレーションで核子の内部に複数個パートンを作り、パートンを用いて楕円率の計算を行う

⇒パートンを用いた場合と核子を用いた場合では楕円率に違いはある？

核子の内部構造モデル

- 核子の内部構造 = グルーオンとクォークを区別せずに、パートンが複数存在するだけのモデルを用いる。



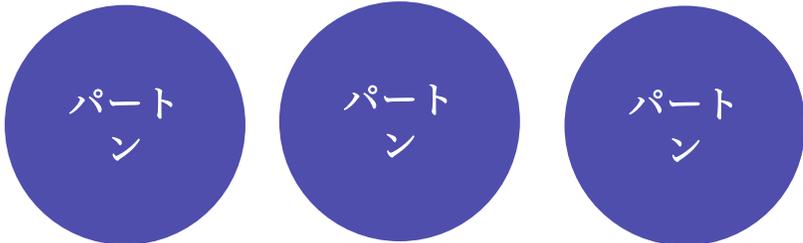
パートン衝突の反応断面積 \Rightarrow パートン数によって変える

● : 核子内のパートン数 = 3 個の場合の反応断面積 $x[\text{mb}]$

● : 核子内のパートン数 = 2 個の場合の反応断面積 $y[\text{mb}]$

$y > x$

核子内のパートン数 = 3 個の場合



パートン断面積

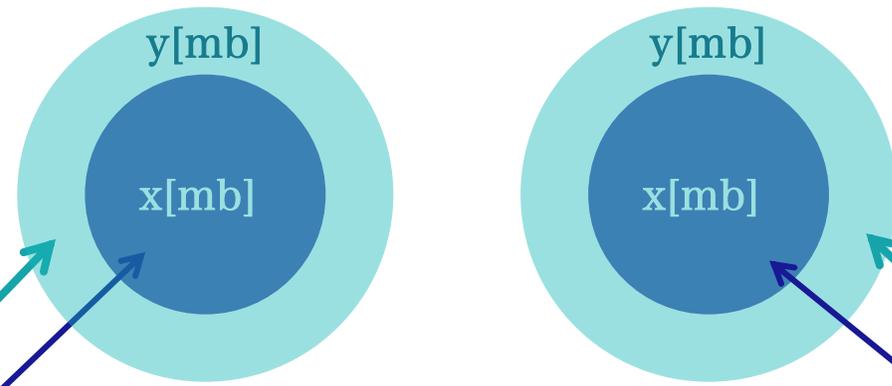
$x[\text{mb}]$ $x[\text{mb}]$ $x[\text{mb}]$



核子衝突の
反応断面積

42[mb]

核子内のパートン数 = 2 個の場合



核子内のパートン数 = 3 個の場合の断面積

核子内のパートン数 = 2 個の場合の断面積



42[mb]

原子核-原子核衝突シミュレーション手順

➤ グラウバーモンテカルロ計算

● 金原子核

- 核子数 = 197個
- 原子核半径 $\approx 6.39[\text{fm}]$



Phys. Rev. C 94 (2016) 024914
Phys. Rev. C 67, 064905



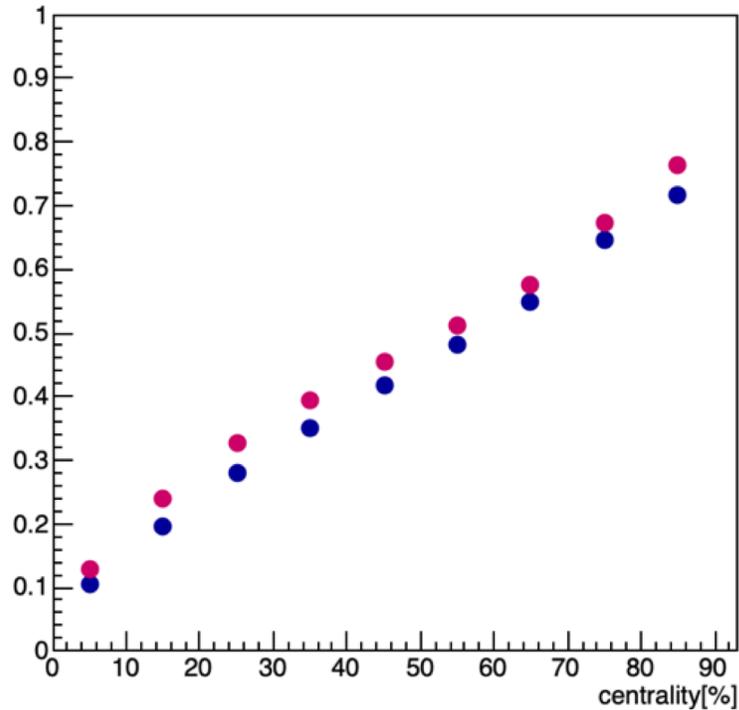
パートン衝突の反応断面積

1核子内のパートン数	パートン衝突の反応断面積[mb]
3	8.1
10	0.9
20	0.2

結果： ϵ_{parton} と ϵ の関係

- : ϵ_{parton} vs. centrality
- : ϵ vs. centrality

I. 核子内のパートン数 = 3 個
楕円率 vs. centrality

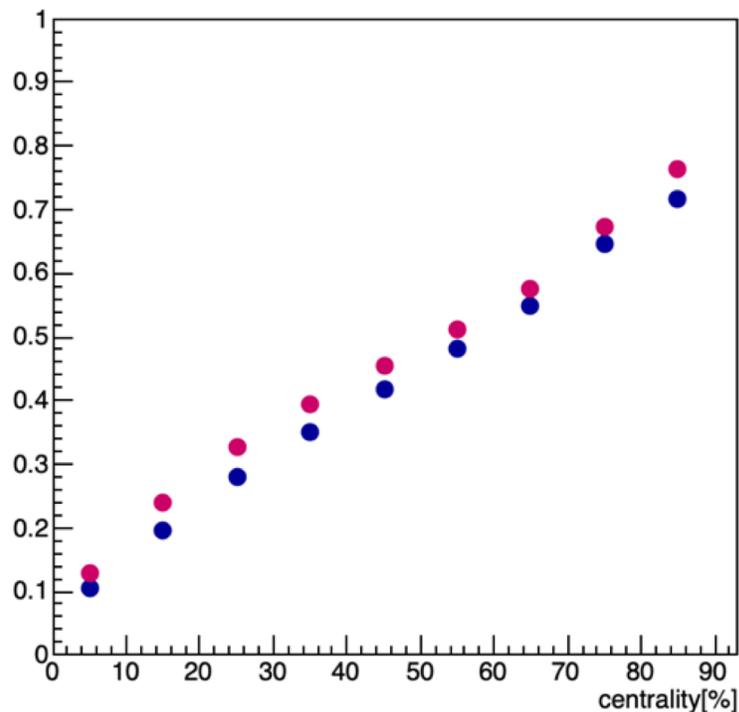


! $\epsilon_{\text{parton}} > \epsilon$

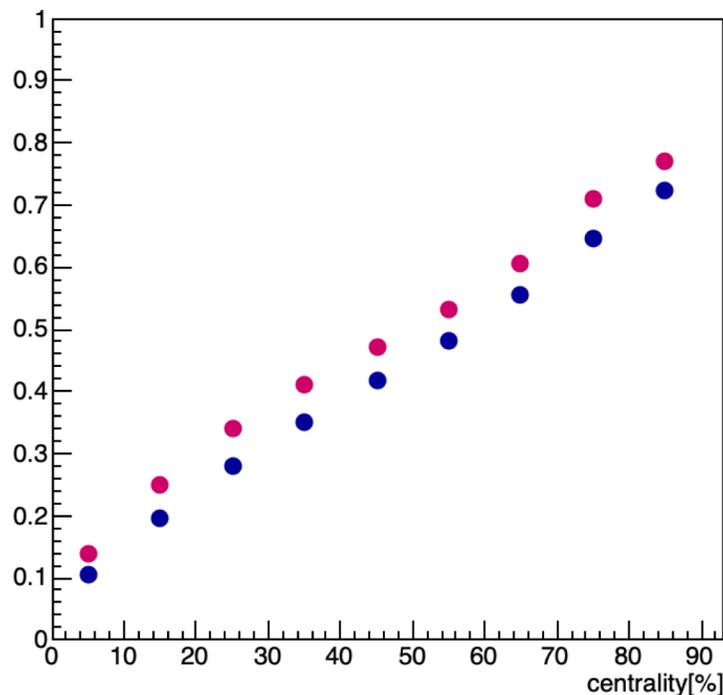
結果： ϵ_{parton} と ϵ の関係

● : ϵ_{parton} vs. centrality
 ● : ϵ vs. centrality

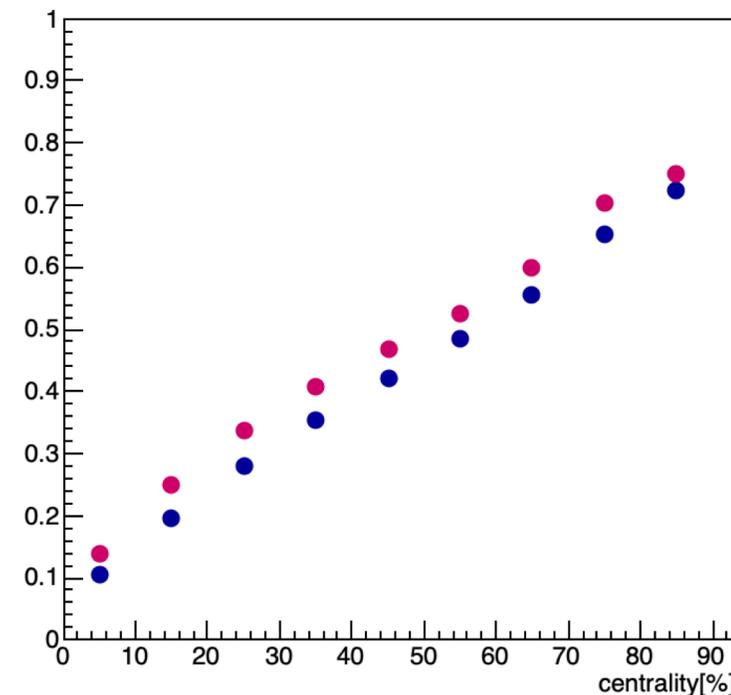
I. 核子内のパートン数 = 3 個
 楕円率 vs. centrality



II. 核子内のパートン数 = 10 個
 楕円率 vs. centrality



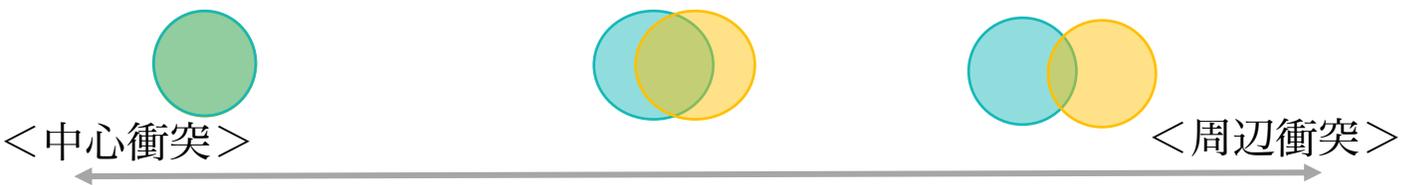
III. 核子内のパートン数 = 20 個
 楕円率 vs. centrality



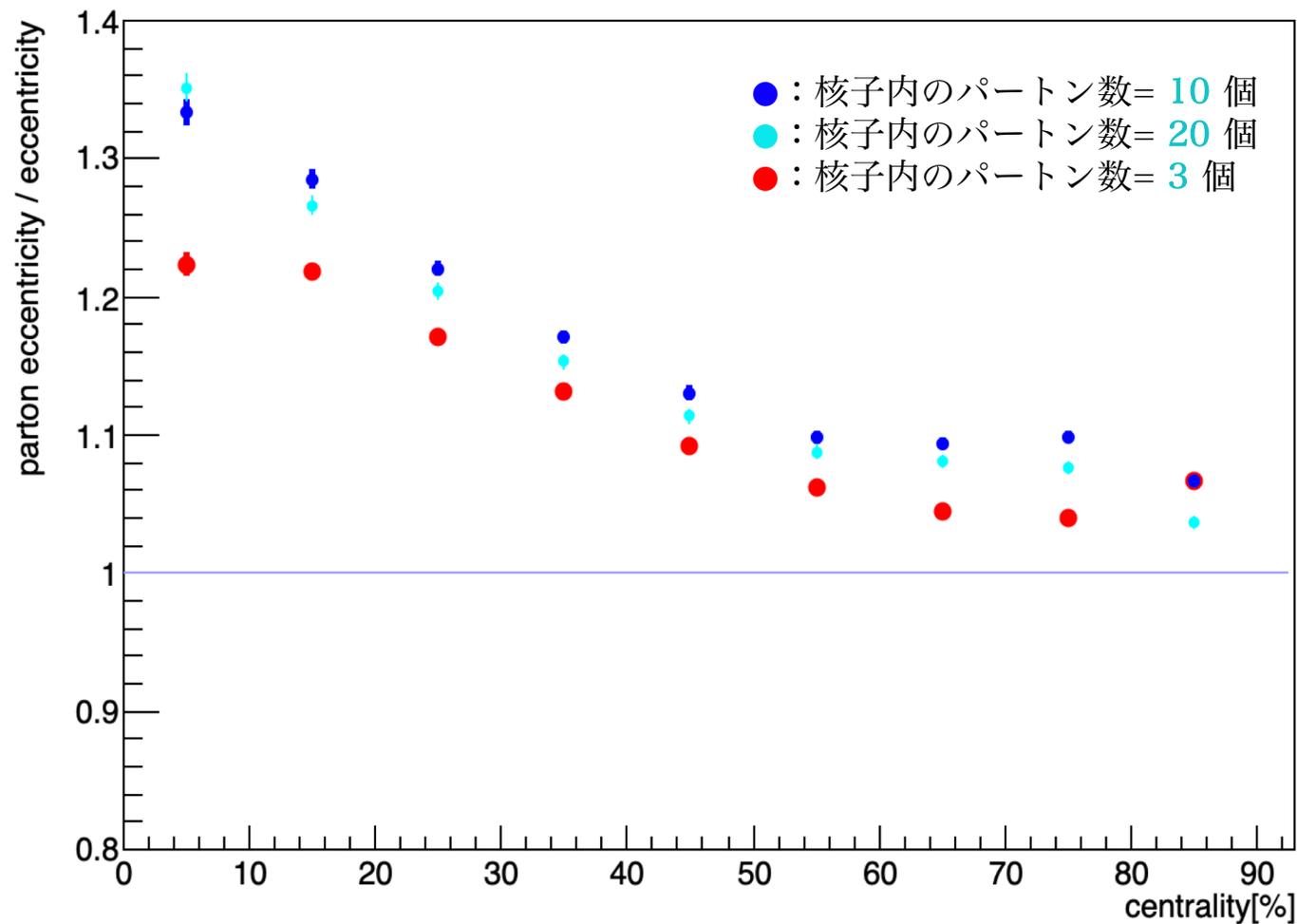
✓ 核子内のパートン数によって
 ϵ_{parton} と ϵ の大小関係は変わらない



! $\epsilon_{\text{parton}} > \epsilon$



$\frac{\epsilon_{\text{parton}}}{\epsilon}$ vs. centrality



核子内部構造を考慮することによる 衝突関与部の形状変化

- ! centralityが高くなると ϵ_{parton} は ϵ に近づく
- ! 中心衝突では 核子内部構造による違いが見える

- 核子内のパートン数と $\frac{\epsilon_{\text{parton}}}{\epsilon}$ の関係
 → N_{part} が関係? (研究中)

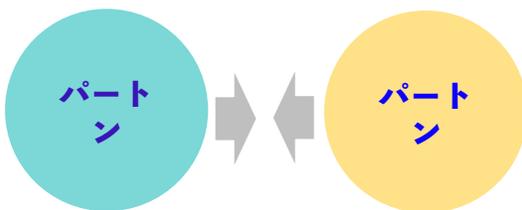
? 楕円率にどう影響する?

- 核子中のパートン数
- パートン衝突の反応断面積

パートン衝突の反応断面積を一定にした場合の 原子核-原子核衝突シミュレーション手順



核子衝突の
反応断面積=42[mb]



パートン衝突の
反応断面積=4.3[mb]
一定

J. S. Moreland, et al. Phys. Rev. C 92 (2015) , 01190.
J. S. Moreland, et al. Phys.Rev.C 101 (2020) 2, 024911

結果： ϵ_{parton} と ϵ の関係



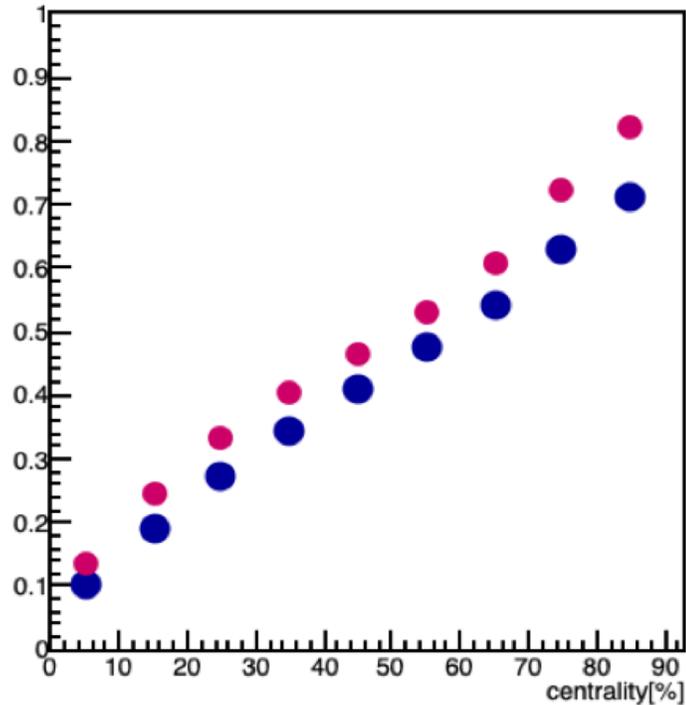
Au+Au

- : ϵ_{parton} vs. centrality
- : ϵ vs. centrality

I. 核子内のパートン数= **3 個**

パートン断面積= 4.3 [mb]

楕円率 vs. centrality



$$\epsilon_{\text{parton}} > \epsilon$$

結果： ϵ_{parton} と ϵ の関係



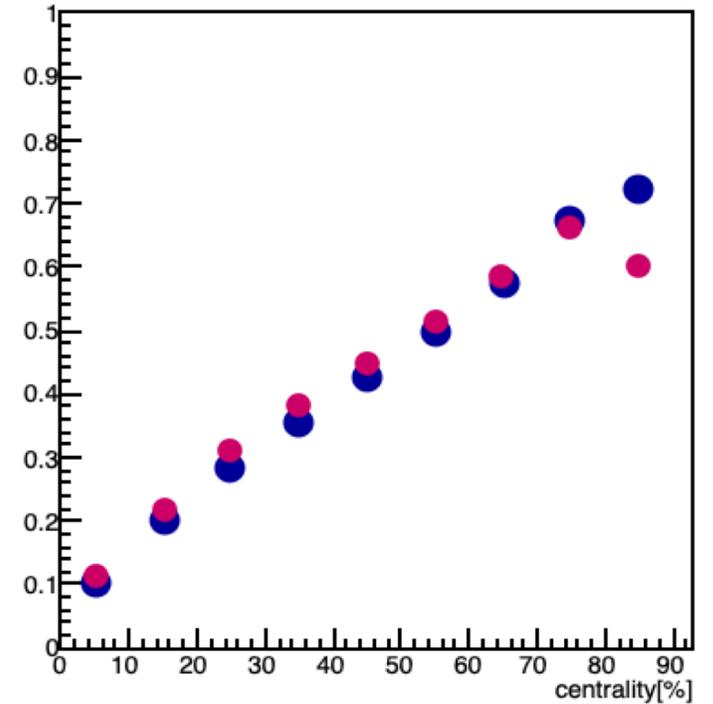
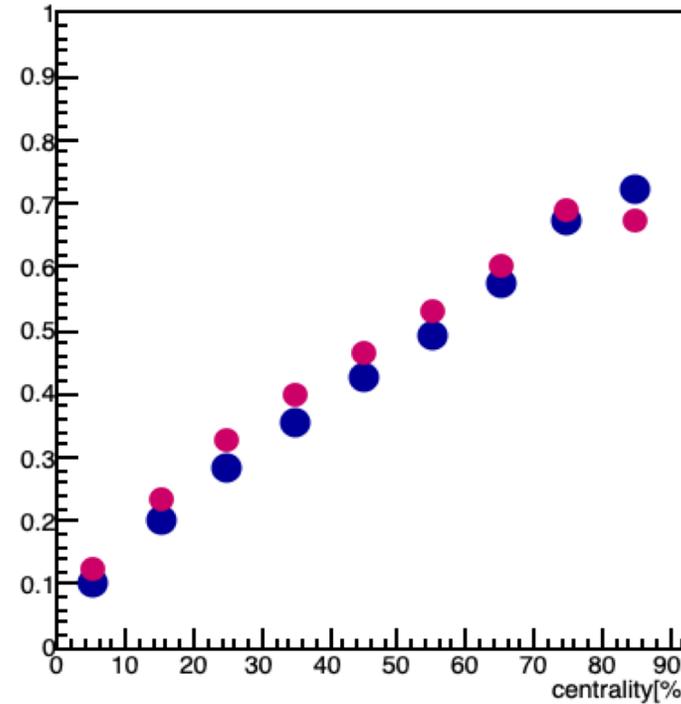
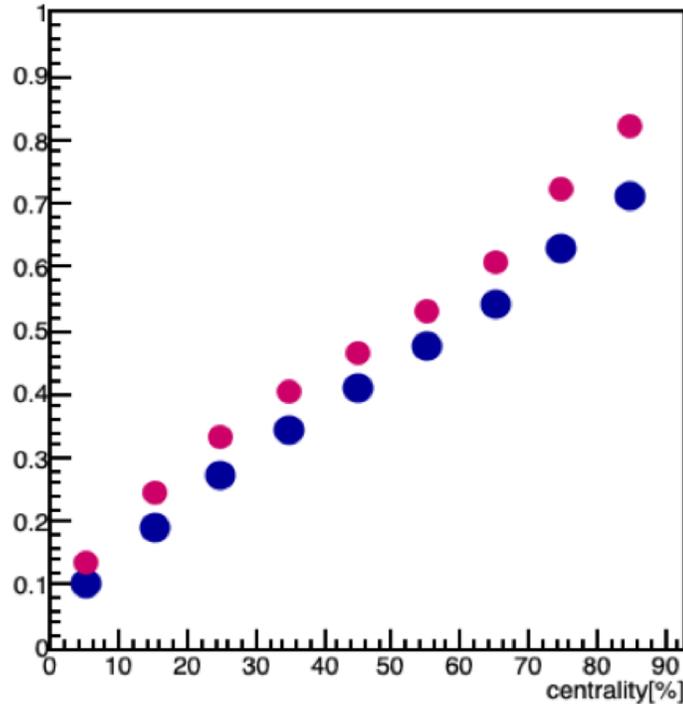
Au+Au

● : ϵ_{parton} vs. centrality
● : ϵ vs. centrality

I. 核子内のパートン数 = **3 個**
パートン断面積 = 4.3 [mb]
楕円率 vs. centrality

II. 核子内のパートン数 = **10 個**
パートン断面積 = 4.3 [mb]
楕円率 vs. centrality

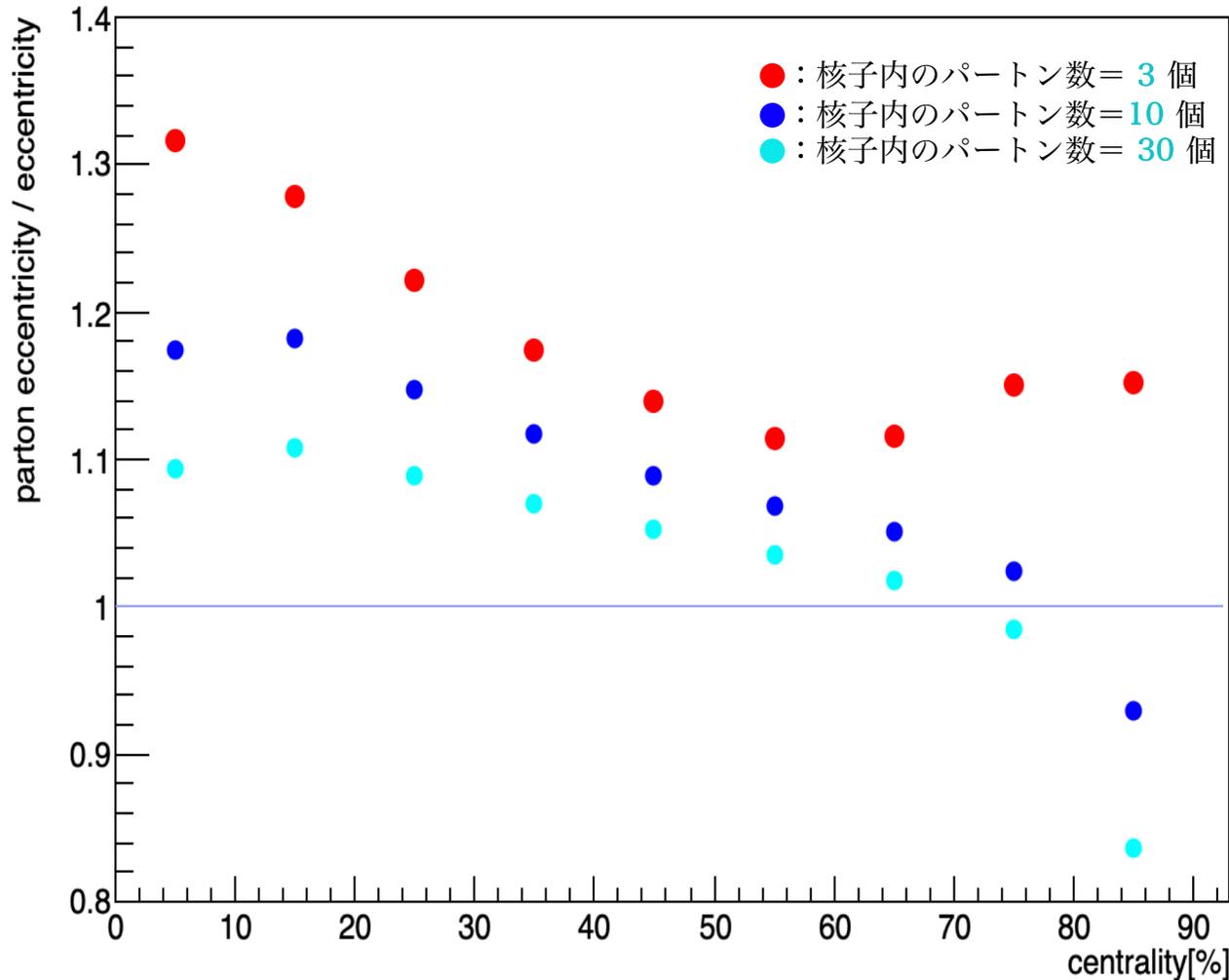
III. 核子内のパートン数 = **30 個**
パートン断面積 = 4.3 [mb]
楕円率 vs. centrality



✓ 核子内のパートン数を増やすと centrality の高い方から $\epsilon_{\text{parton}} < \epsilon$ になる

核子の内部構造と $\frac{\epsilon_{\text{parton}}}{\epsilon}$ vs. centrality の関係

$\frac{\epsilon_{\text{parton}}}{\epsilon}$ vs. centrality



- 核子内のパートン数を増やすと $\frac{\epsilon_{\text{parton}}}{\epsilon}$ は小さくなる

$$\epsilon_{\text{parton}} > \epsilon \rightarrow \epsilon_{\text{parton}} \doteq \epsilon \rightarrow \epsilon_{\text{parton}} < \epsilon$$

- $\epsilon_{\text{parton}} \doteq \epsilon$
 → participant 内の parton participant の
 重心位置 \doteq participant の中心位置
 になる

周辺衝突で ϵ_{parton} が小さくなる理由

- 周辺衝突 = N_{part} が非常に少ない
 - 核子内のパートン数を増やす = N_{ppart} が多くなる
- ⇒ $\epsilon_{\text{parton}} < \epsilon$ の場合が多くなる

<中心衝突>



0%

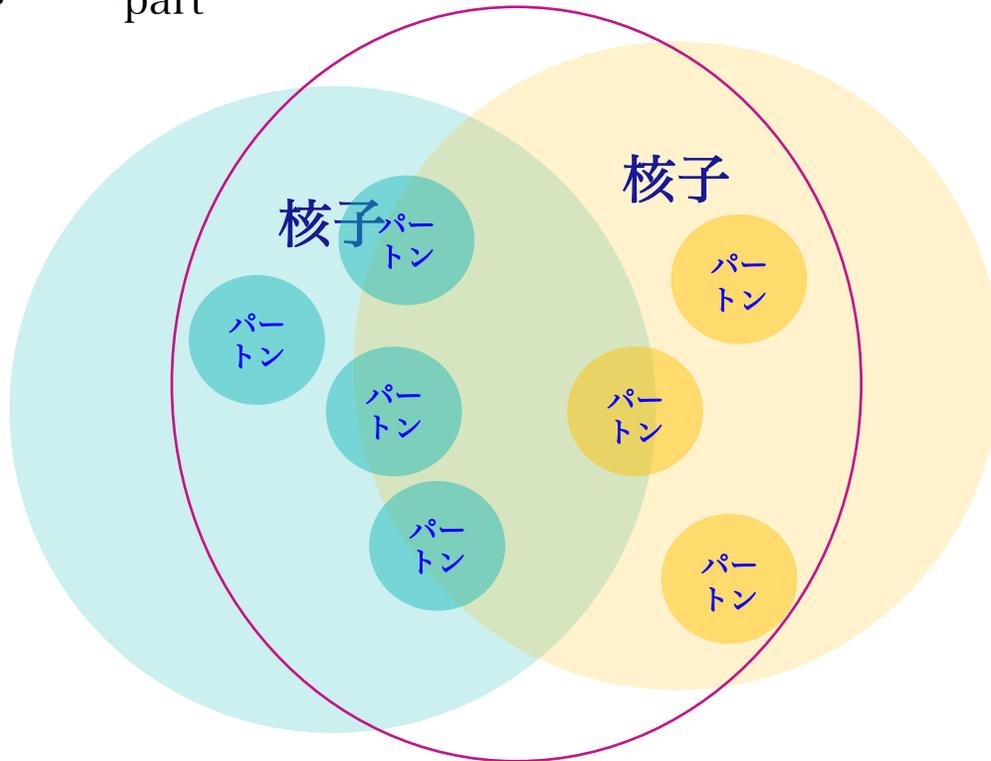
<周辺衝突>



centrality

100%

例: $N_{\text{part}}=2$



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

常に $\epsilon = 1$

(2点を結ぶ形=直線)

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

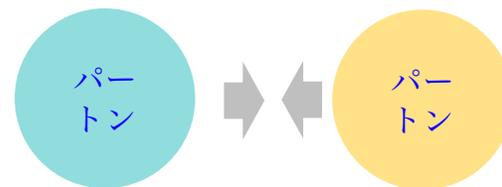
($N_{\text{ppart}}=2$ の時: $\epsilon_{\text{parton}}=1$ 他は $\epsilon_{\text{parton}} < 1$)

核子内のパートン数を一定にした場合の 原子核-原子核衝突シミュレーション手順

核子内のパートン数=一定



核子衝突の
反応断面積=42[mb]



パートン衝突の
反応断面積=変更

結果：核子内のパートン数を一定にした場合

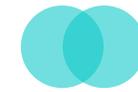
I. パarton断面積=**4.3[mb]** 核子内のパートン数 = 3 個

II. パarton断面積=**8.1[mb]** 核子内のパートン数 = 3 個

III. 核子内の**パートンが全て衝突** 核子内のパートン数 = 3 個

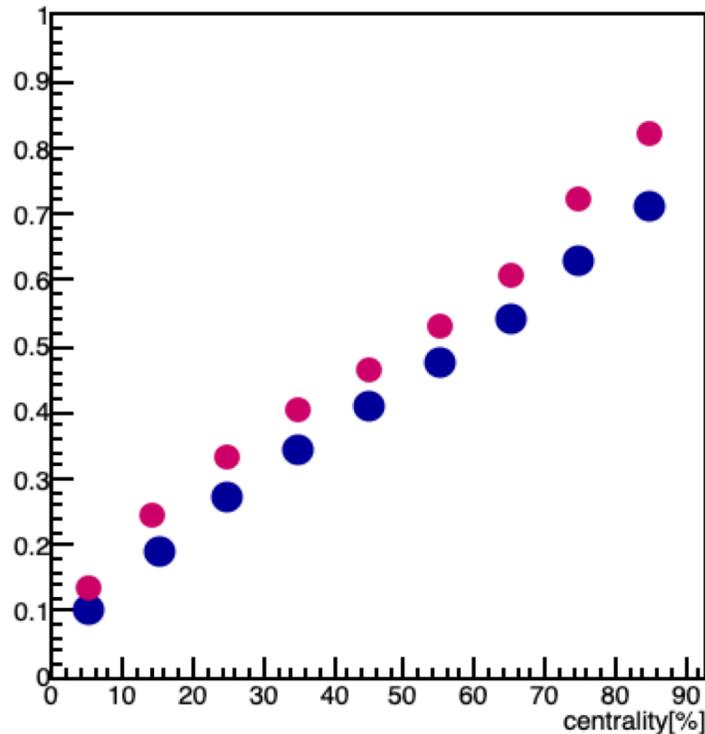
結果： ϵ_{parton} と ϵ の関係

- : ϵ_{parton} vs. centrality
- : ϵ vs. centrality

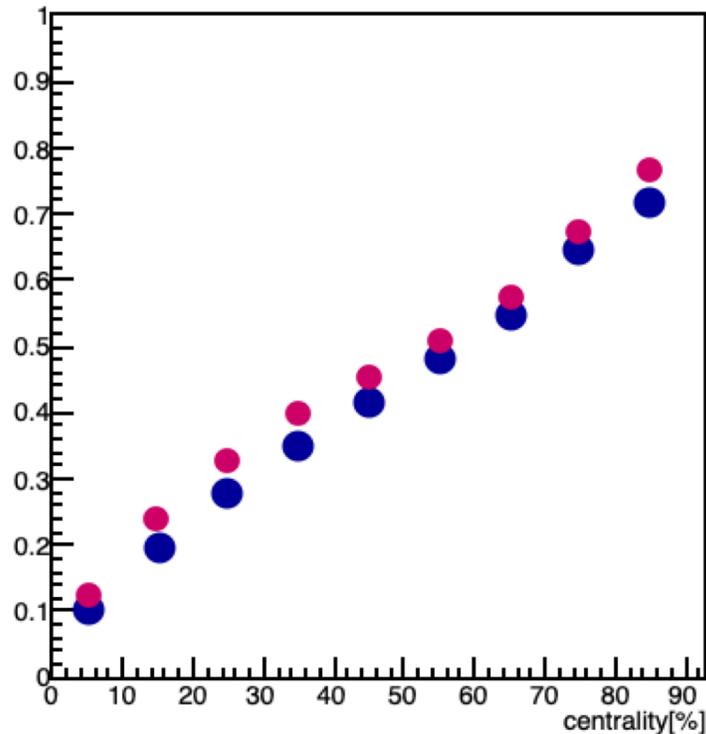


金原子核-金原子核衝突シミュレーション

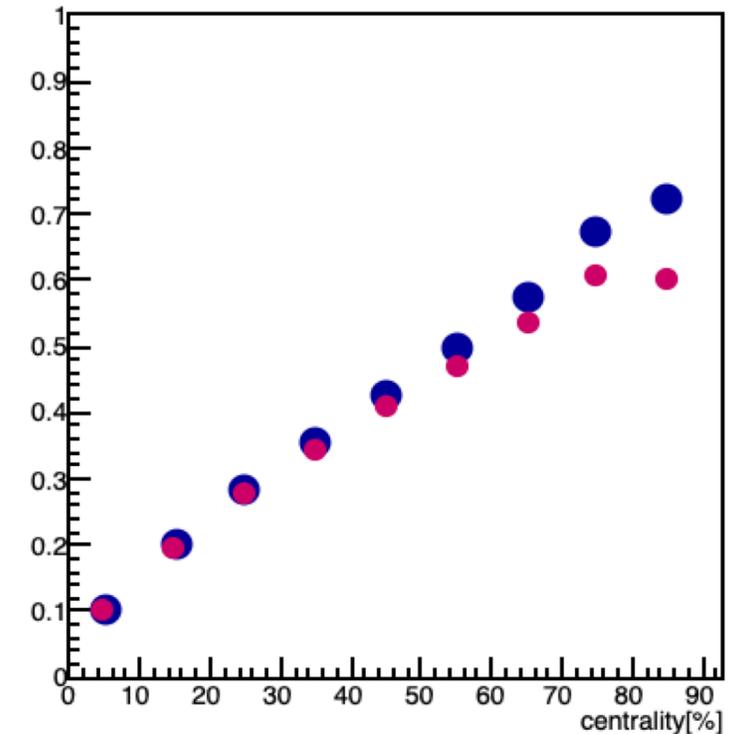
I. 核子内のパートン数= 3 個
パートン断面積= **4.3 [mb]**
楕円率 vs. centrality



II. 核子内のパートン数= 3 個
パートン断面積= **8.1 [mb]**
楕円率 vs. centrality



III. 核子内のパートン数= 3 個
核子内のパートンが**全て衝突**
楕円率 vs. centrality



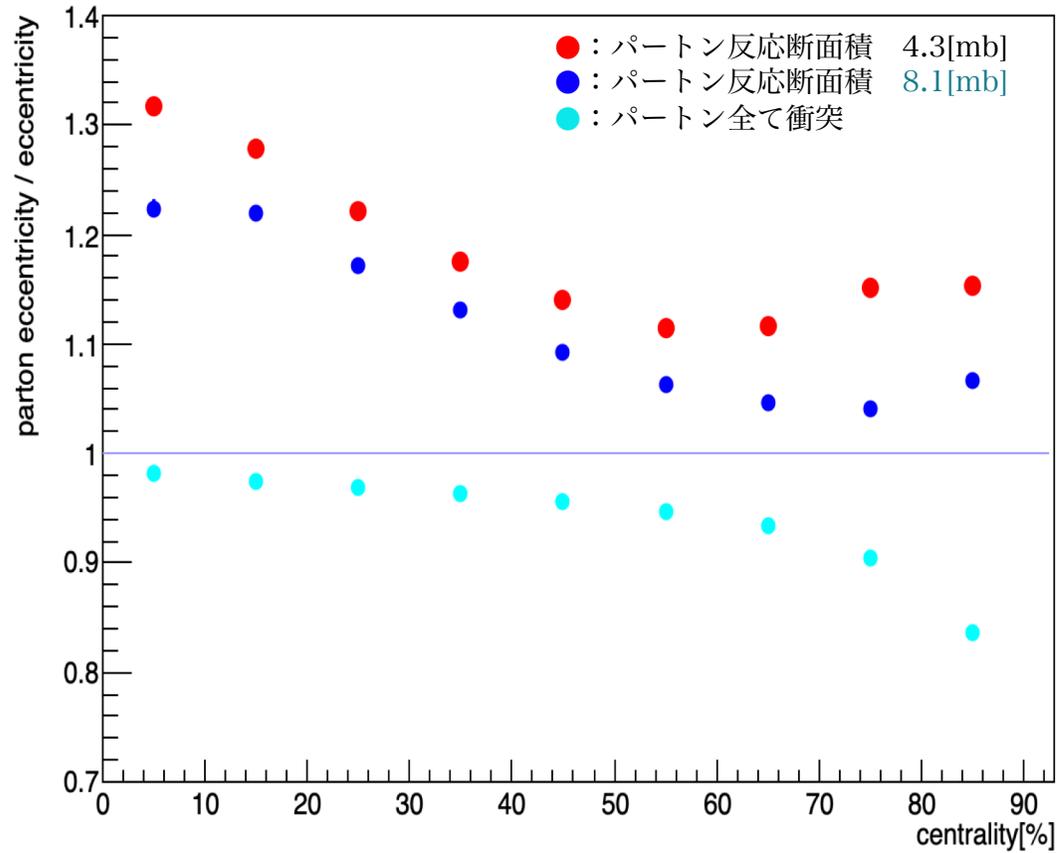
パートン衝突の反応断面積を大きくするとcentralityの高い方から $\epsilon_{\text{parton}} < \epsilon$ になる



パートン断面積と $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ vs. centrality の関係

核子内のパートン数 = 3 個

$\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ vs. centrality



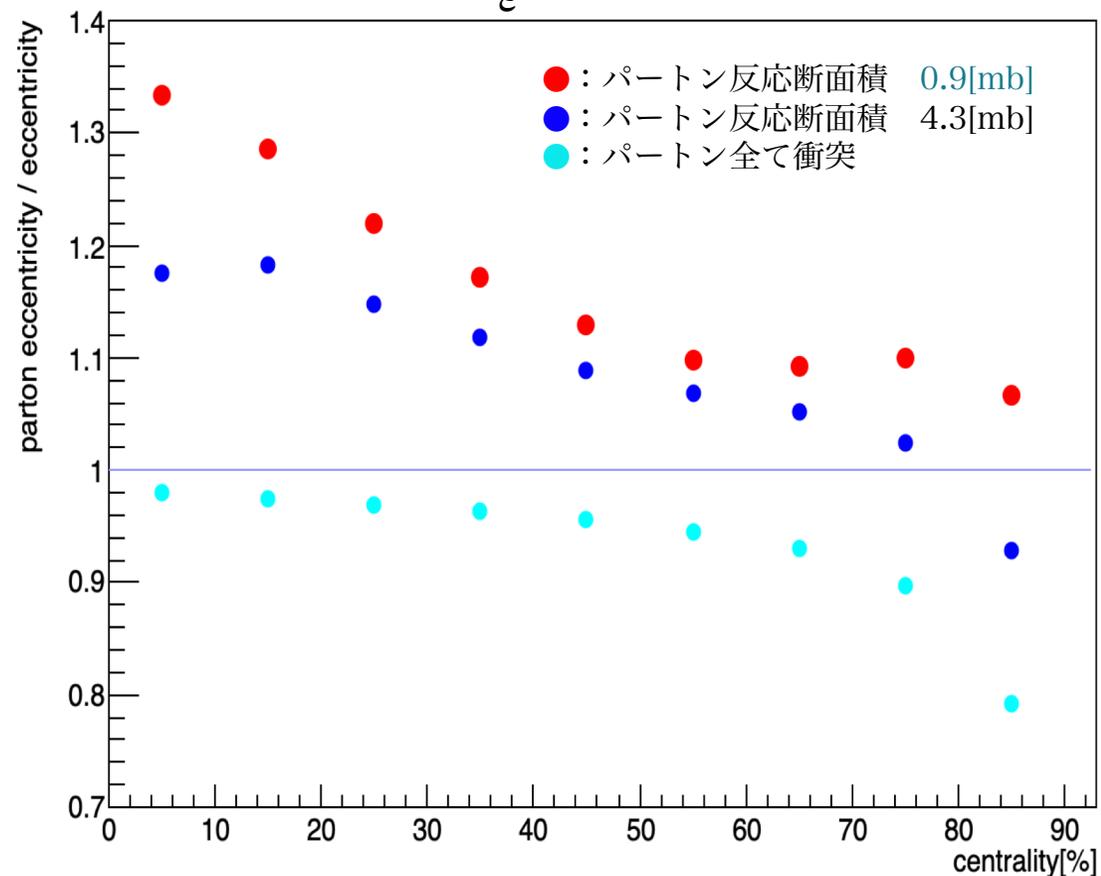
パートン断面積と $\frac{\epsilon_{\text{parton}}}{\epsilon}$ vs. centrality の関係

核子内のパートン数 = 10 個
 $\frac{\epsilon_{\text{parton}}}{\epsilon}$ vs. centrality

IV. パートン断面積 = **0.9[mb]** 核子内のパートン数 = 10 個

V. パートン断面積 = **4.3[mb]** 核子内のパートン数 = 10 個

VI. 核子内のパートンが**全て衝突** 核子内のパートン数 = 10 個

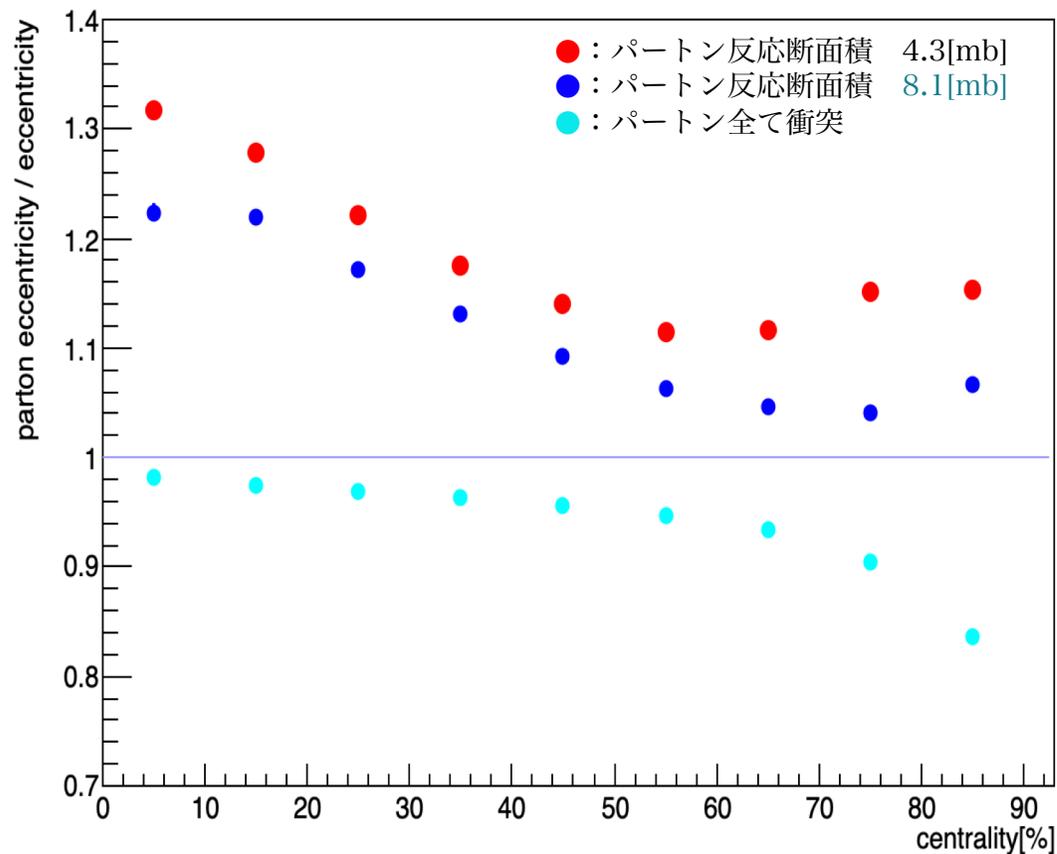




パートン断面積と $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ vs. centrality の関係

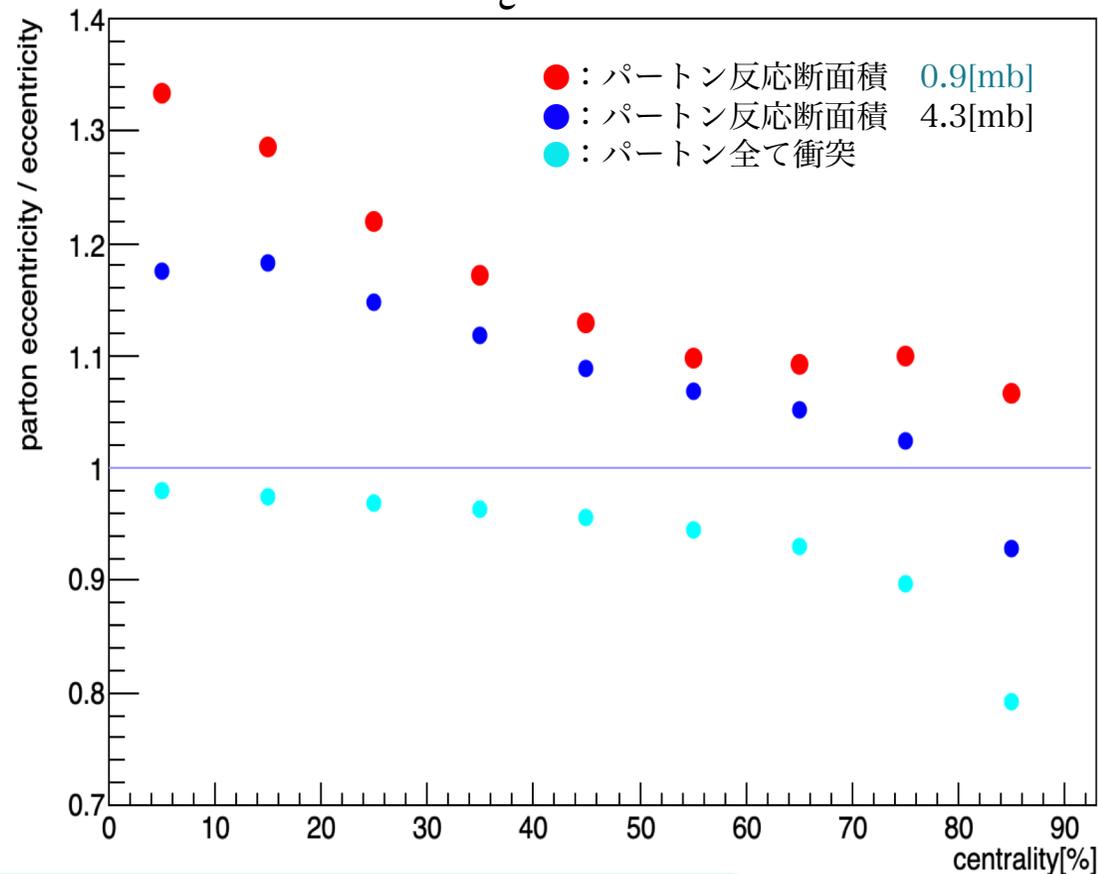
核子内のパートン数 = 3 個

$\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ vs. centrality



核子内のパートン数 = 10 個

$\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ vs. centrality



パートン衝突の反応断面積を大きくすると $\frac{\epsilon_{parton}}{\epsilon}$ は小さくなる

まとめ

▶ 原子核同士の衝突における衝突関与パートンを用いて 楕円率計算を行った

- 核子内のパートン数とパートン衝突の反応断面積を変えた場合
 - 楕円率は核子内部構造を考慮した場合の方が大きい
(ϵ_{parton} について、 N_{ppart} と N_{part} の関係等、より検討する必要がある)

▶ 核子内のパートン数とその反応断面積をそれぞれ変化させた場合に、 パートン楕円率がどの様に変化するかを調べた

- パートン衝突の反応断面積を一定にした場合
 - 核子内のパートン数を増やすと $\frac{\epsilon_{\text{parton}}}{\epsilon}$ は小さくなり、
centralityの高い方から $\epsilon_{\text{parton}} < \epsilon$ になる
- 核子内のパートン数を一定にした場合
 - パートン衝突の反応断面積を大きくすると $\frac{\epsilon_{\text{parton}}}{\epsilon}$ は小さくなり、
centralityの高い方から $\epsilon_{\text{parton}} < \epsilon$ になる

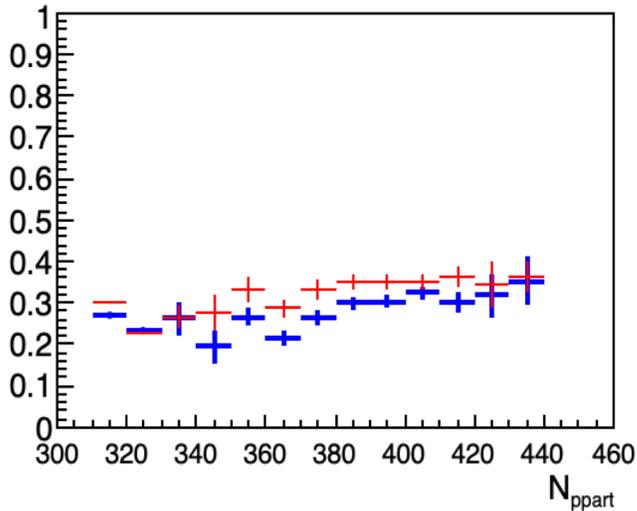
NEXT TO DO >>

同数の N_{part} における N_{ppart} と楕円率の関係調べる

核子内のパートン数=3個 パートン 断面積8.1[mb]

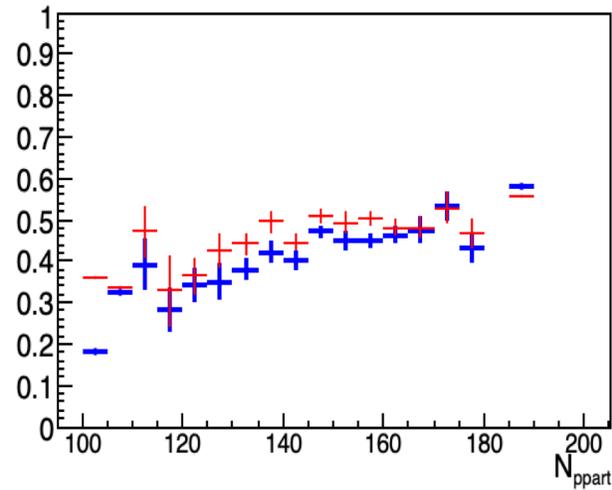
centrality=20-30%

$N_{\text{part}}=167$ の楕円率 vs. N_{ppart}



centrality=40-50%

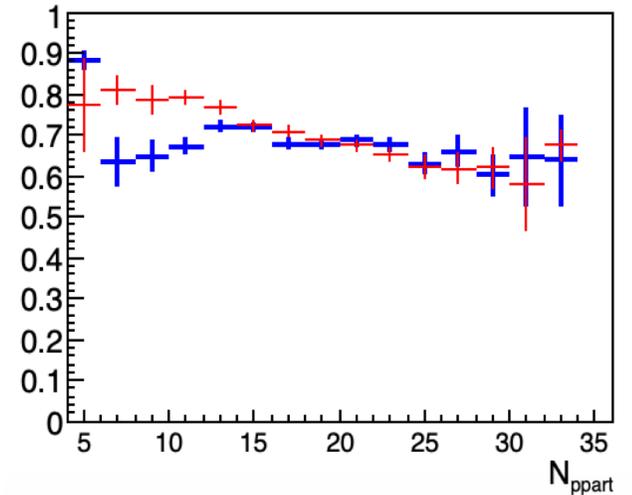
$N_{\text{part}}=74$ の楕円率 vs. N_{ppart}



● : ϵ_{parton} vs. N_{ppart}
● : ϵ vs. N_{ppart}

centrality=70-80%

$N_{\text{part}}=13$ の楕円率 vs. N_{ppart}



! ϵ_{parton} は周辺衝突と異なる傾向

! 周辺衝突では N_{ppart} が増加すると
 ϵ_{parton} が小さくなる

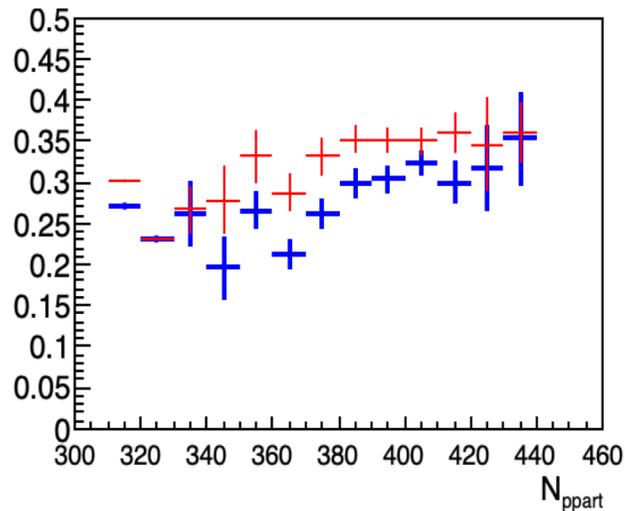
NEXT TO DO >>

同数の N_{part} における N_{ppart} と楕円率の関係調べる

核子内のパートン数=3個 パートン 断面積8.1[mb]

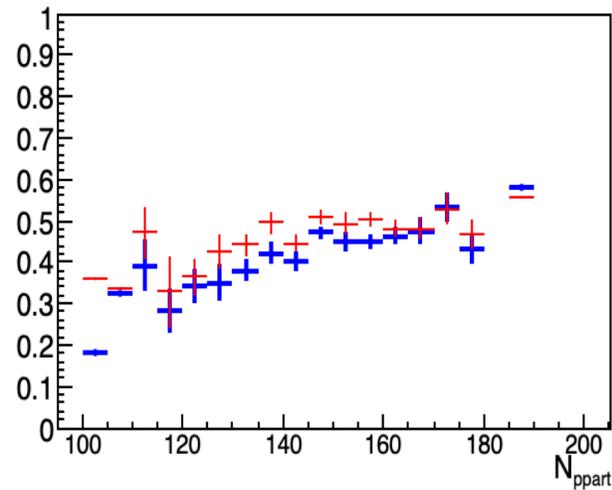
centrality=20-30%

$N_{\text{part}}=167$ の楕円率 vs. N_{ppart}



centrality=40-50%

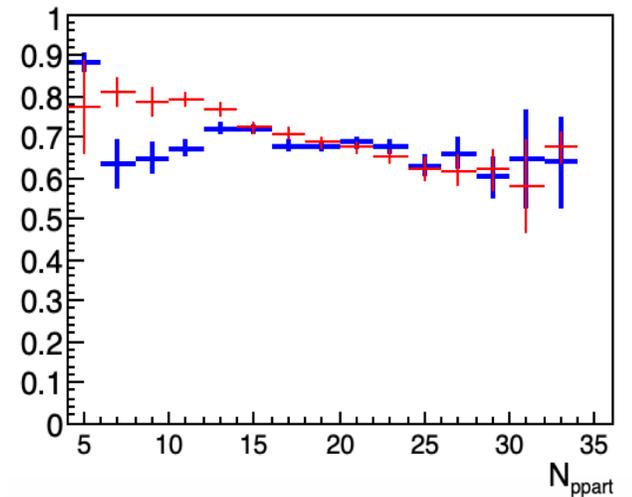
$N_{\text{part}}=74$ の楕円率 vs. N_{ppart}



● : ϵ_{parton} vs. N_{ppart}
● : ϵ vs. N_{ppart}

centrality=70-80%

$N_{\text{part}}=13$ の楕円率 vs. N_{ppart}



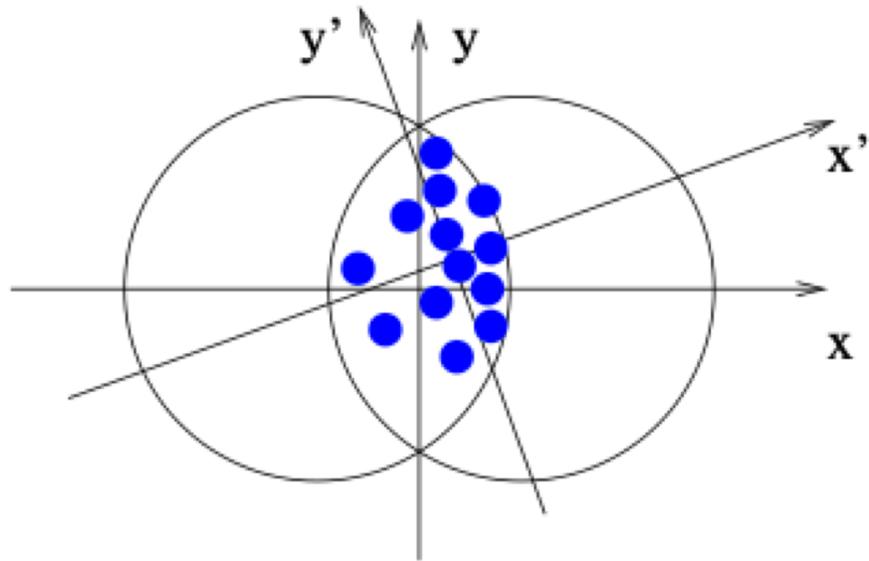
! ϵ_{parton} は周辺衝突と異なる傾向

! 周辺衝突では N_{ppart} が増加すると
 ϵ_{parton} が小さくなる



Back up

楕円率計算式



$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{part}} &= \frac{\langle y'^2 \rangle - \langle x'^2 \rangle}{\langle y'^2 \rangle + \langle x'^2 \rangle} \\ &= \frac{\sqrt{(\sigma_y^2 - \sigma_x^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2}}{\sigma_y^2 + \sigma_x^2}\end{aligned}$$

Ra jeev S. Bhalerao and Jean-Yves Ollitrault

Eccentricity fluctuations and elliptic flow at RHIC

Phys.Lett.B641:260–264,2006

2021/3/1

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

①核子を作る（金原子核を2個作成）

- 中心座標を決めた原子核の内部に核子197個をつくる × 2

重イオンの核子密度分布 $\rho(r)$

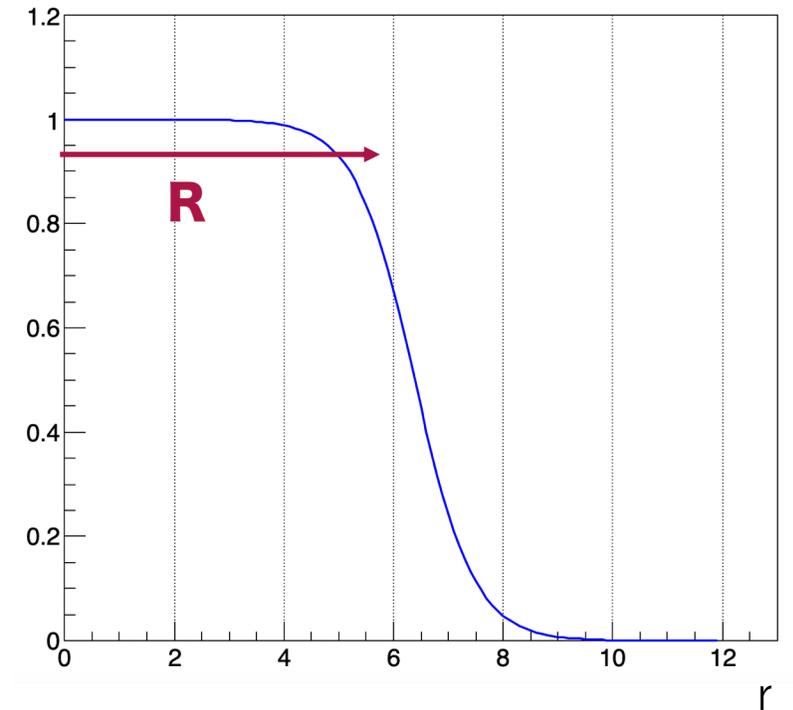
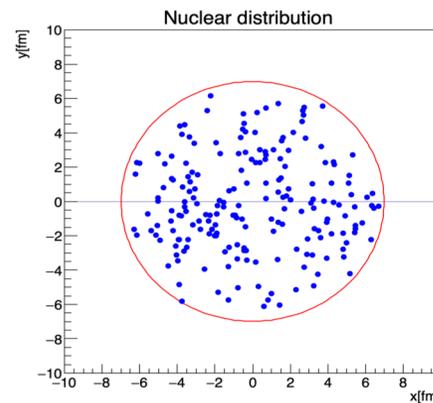
$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right)}$$

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right)} : \text{Woods-Saxon型関数}$$

$$R = 1.18 \times A^{\frac{1}{3}} - 0.48 [\text{fm}]$$

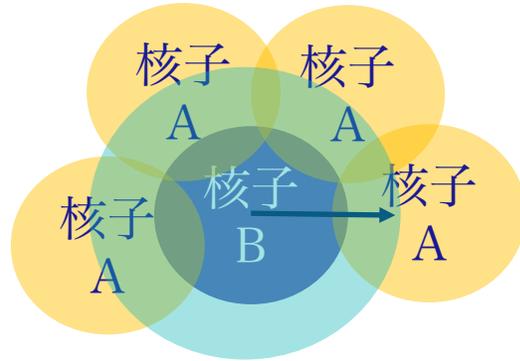
$$^{197}\text{Au} : a = 0.535 [\text{fm}]$$

$$^{63}\text{Cu} : a = 0.596 [\text{fm}]$$



②核子- 核子衝突の判断

核子の反応断面積以下である時 = 衝突 と判断

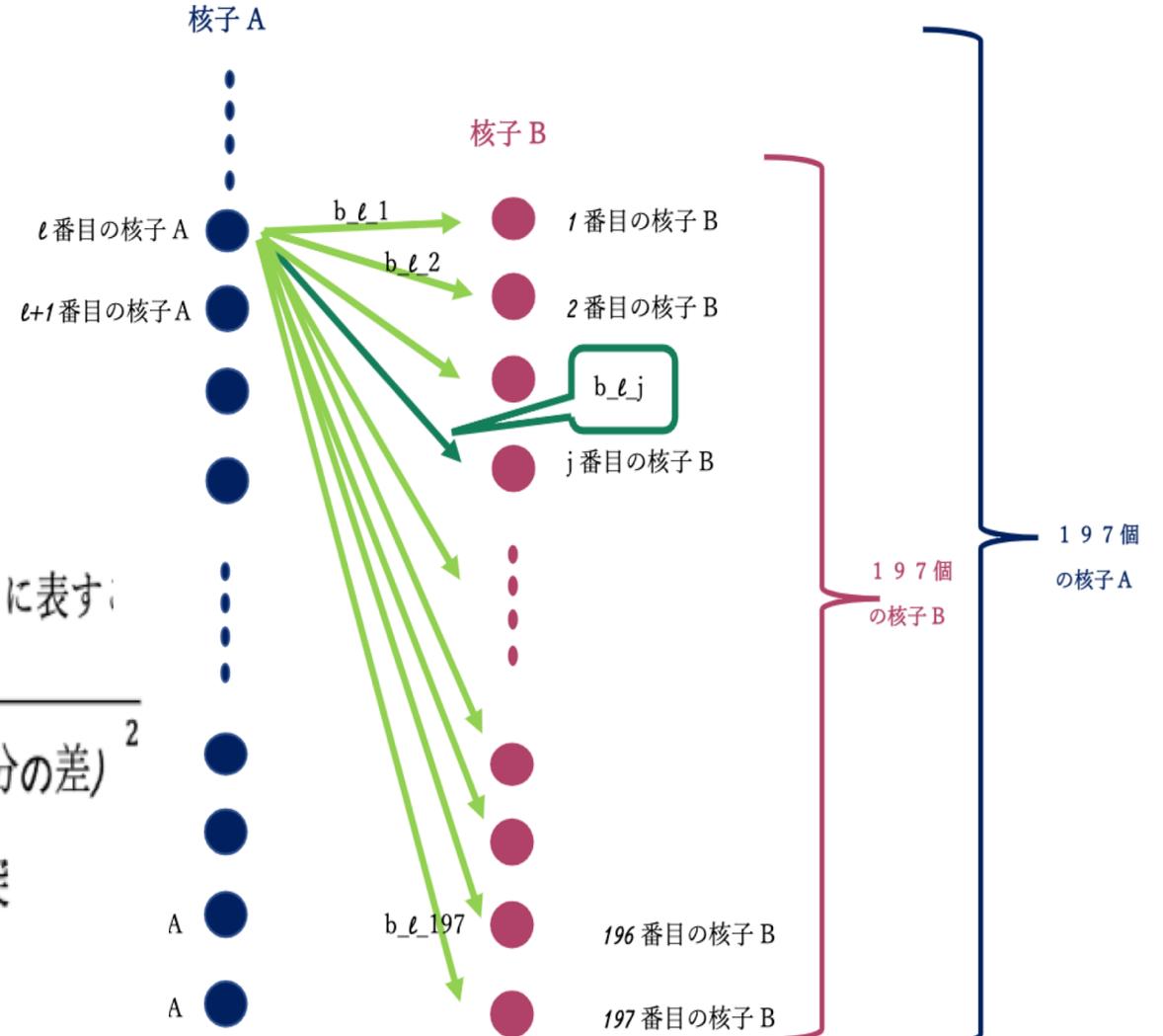


xy 平面に投影した l 番目の核子 A と j 番目核子 B の距離 $b_{l,j}$ を用いて次のように表す:

$$b_{l,j} = \sqrt{(\text{原子核 A と原子核 B の x 成分の差})^2 + (\text{原子核 A と原子核 B の y 成分の差})^2}$$

$\pi \times (b_{l,j})^2 = 42 \text{ [mb]}$ を満たす b_{\max} 以下の時、核子 A と核子 B が衝突

<イメージ図>



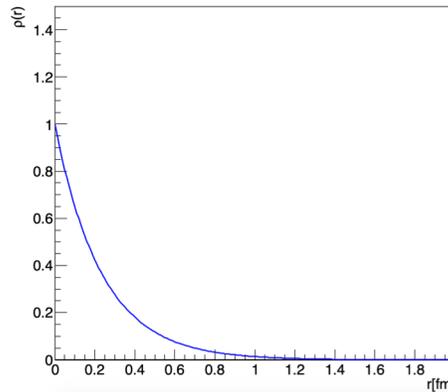
③ パートンを作る

participantの内部に決めた数だけパートンを作る

パートン分布が次の密度関数に従う様に核子内にパートンを作る

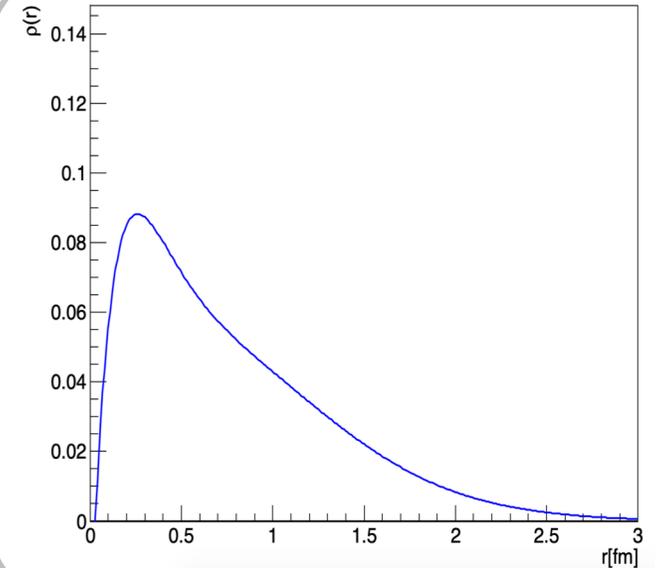
核子内のパートン数≠ 3 個の場合の密度関数

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



核子内のパートン数 = 3 個の場合のみ次の密度関数を用いる

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

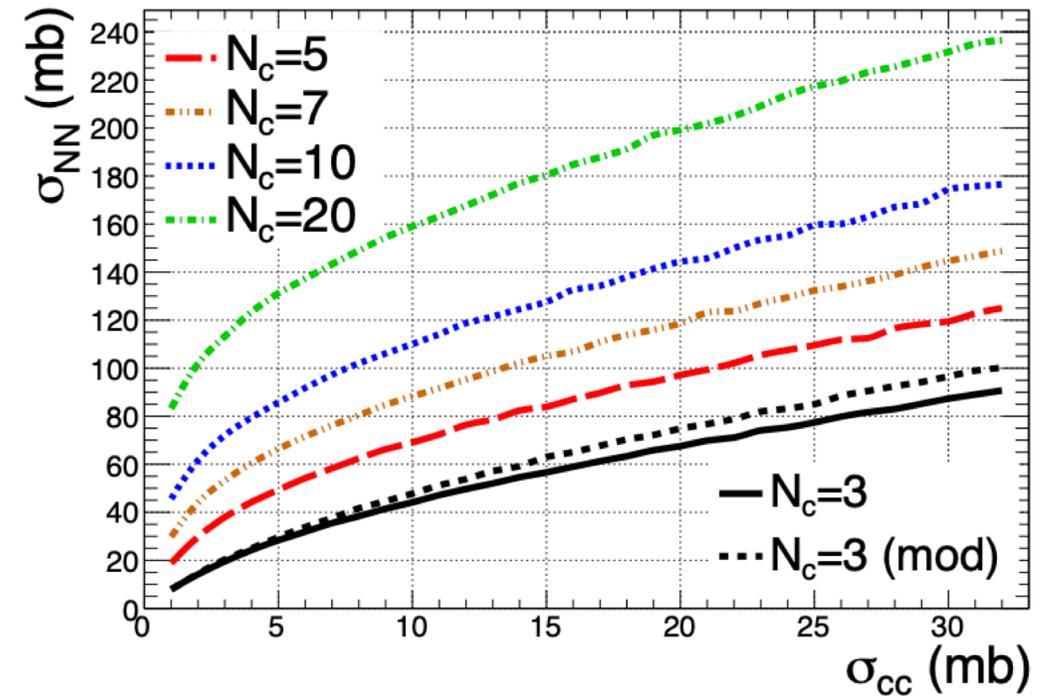


④ パarton - パarton 衝突の判断

パartonの反応断面積以下である時 = 衝突 と判断

\sqrt{s} (TeV)	0.019	0.2	2.76	5.02	7	13
σ_{NN} (mb)	33	42	64	70	74	78
N_c	σ_{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

核子内のパarton数によって
核子の反応断面積が変わらない様に
パarton断面積を決める



Phys. Rev. C 94 (2016) 024914