

高エネルギー衝突実験におけるMPIの観測 ～ v_2 とMultiplicityの相関について～

2020年度卒業研究発表会

高濱 瑠菜

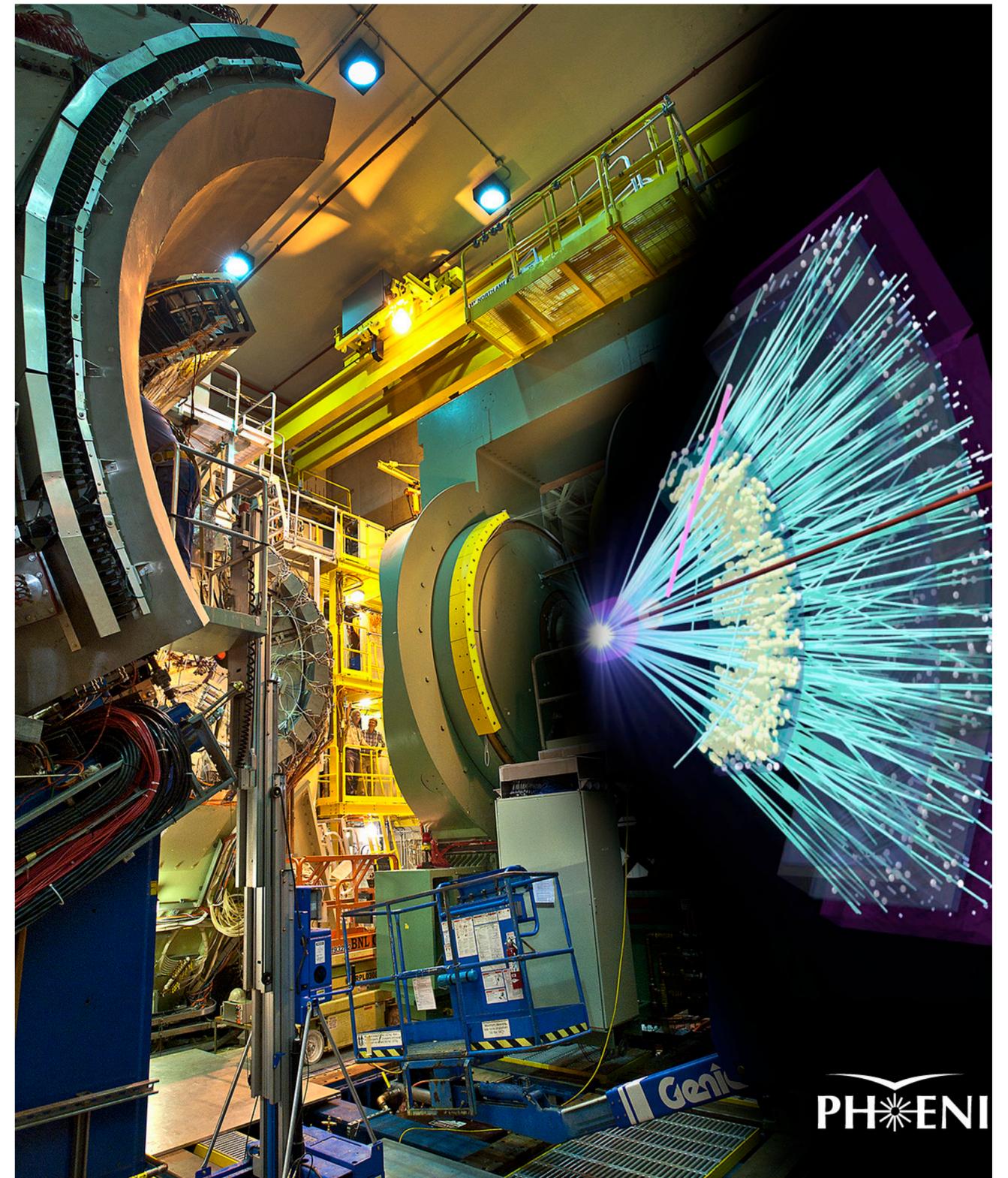
2021.03.01

目次

- 研究背景
- 研究目的
- 解析方法
- 解析結果
- まとめ
- 今後の課題と現在取り組んでいること

研究背景

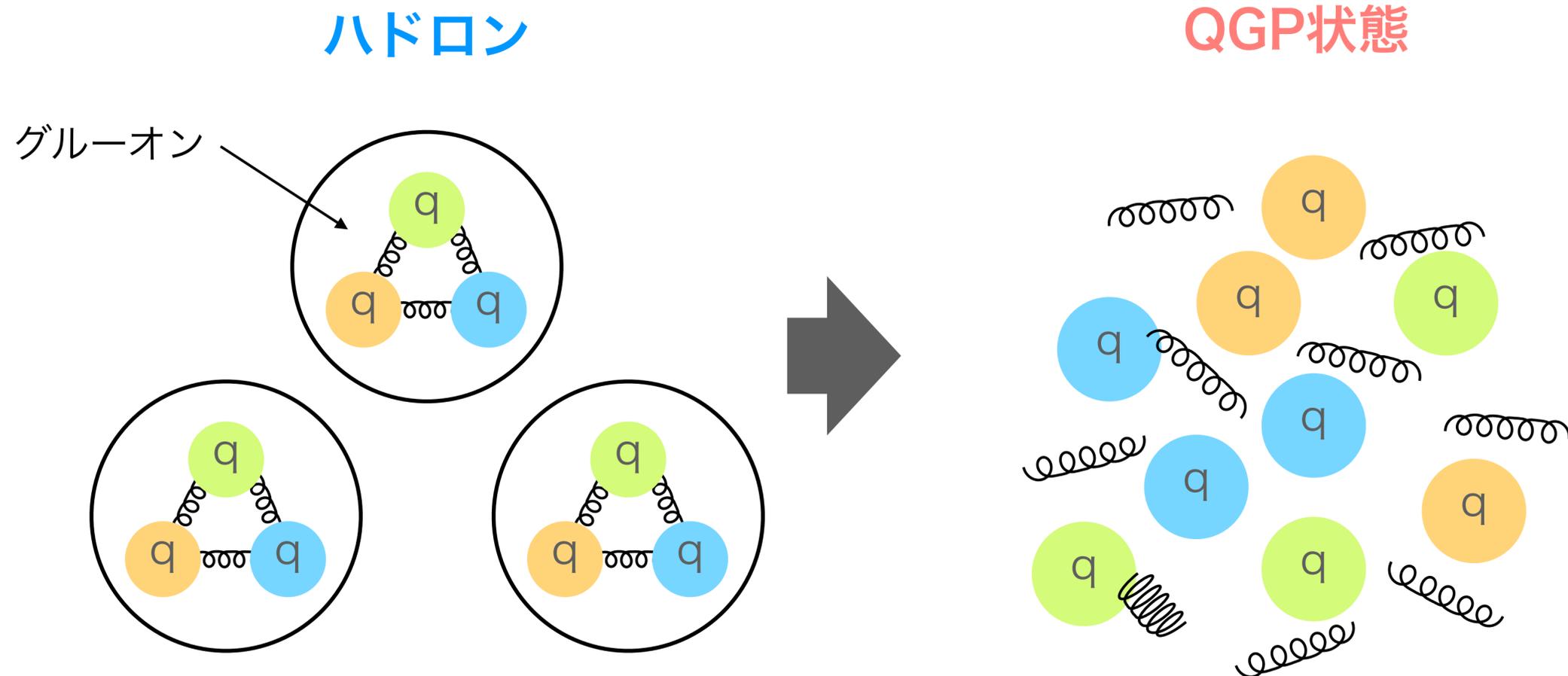
- QGPについて
- 高エネルギー衝突実験について
- PHENIX実験について



研究背景

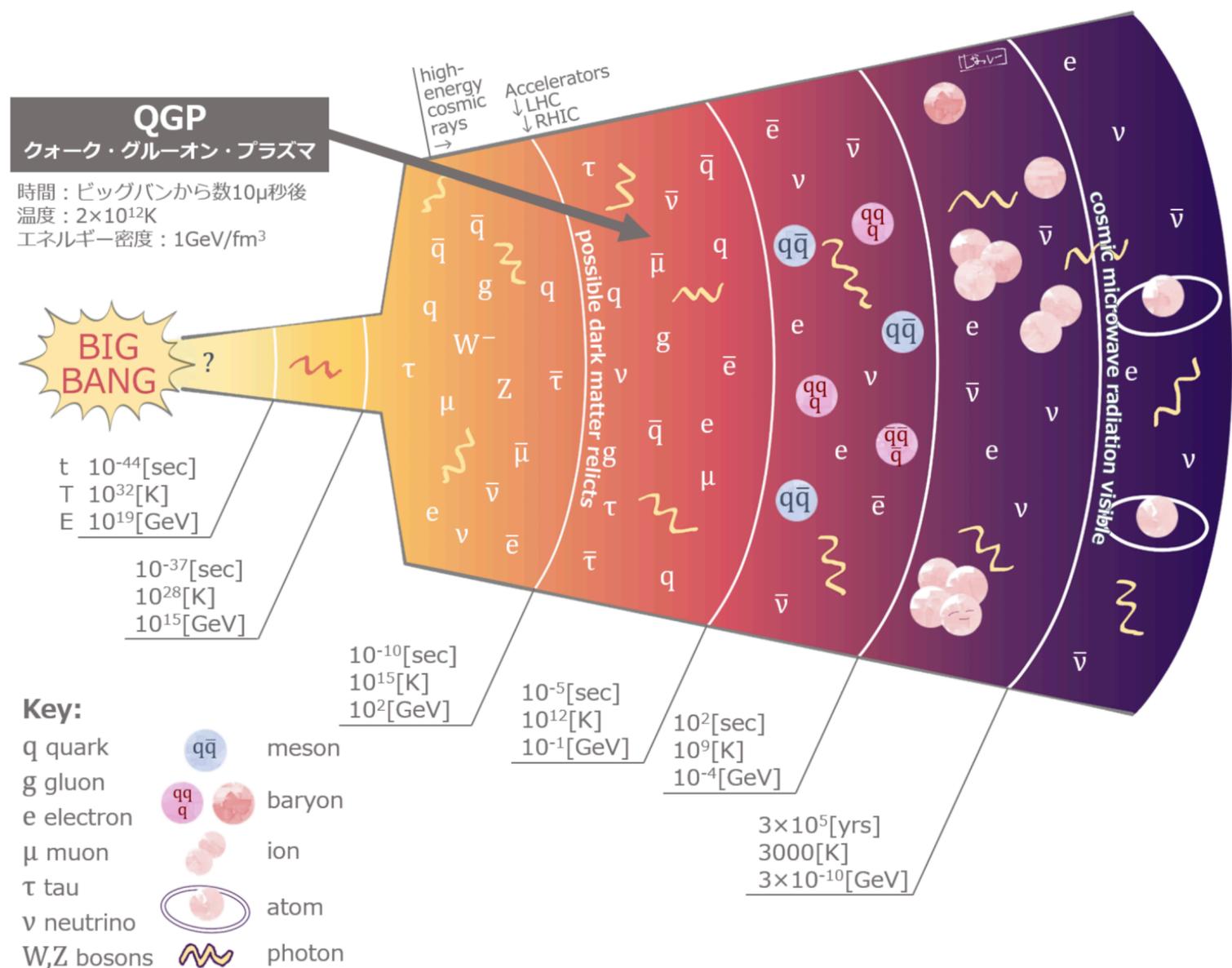
- **QGPについて (1)**

QGP (クォーク・グルーオン・プラズマ) : クォークやグルーオンが高温・高密度で核子内に閉じ込められていない状態



研究背景

• QGPについて (2)



ビッグバンから数十 μ 秒後の宇宙は
QGP状態だったと考えられている

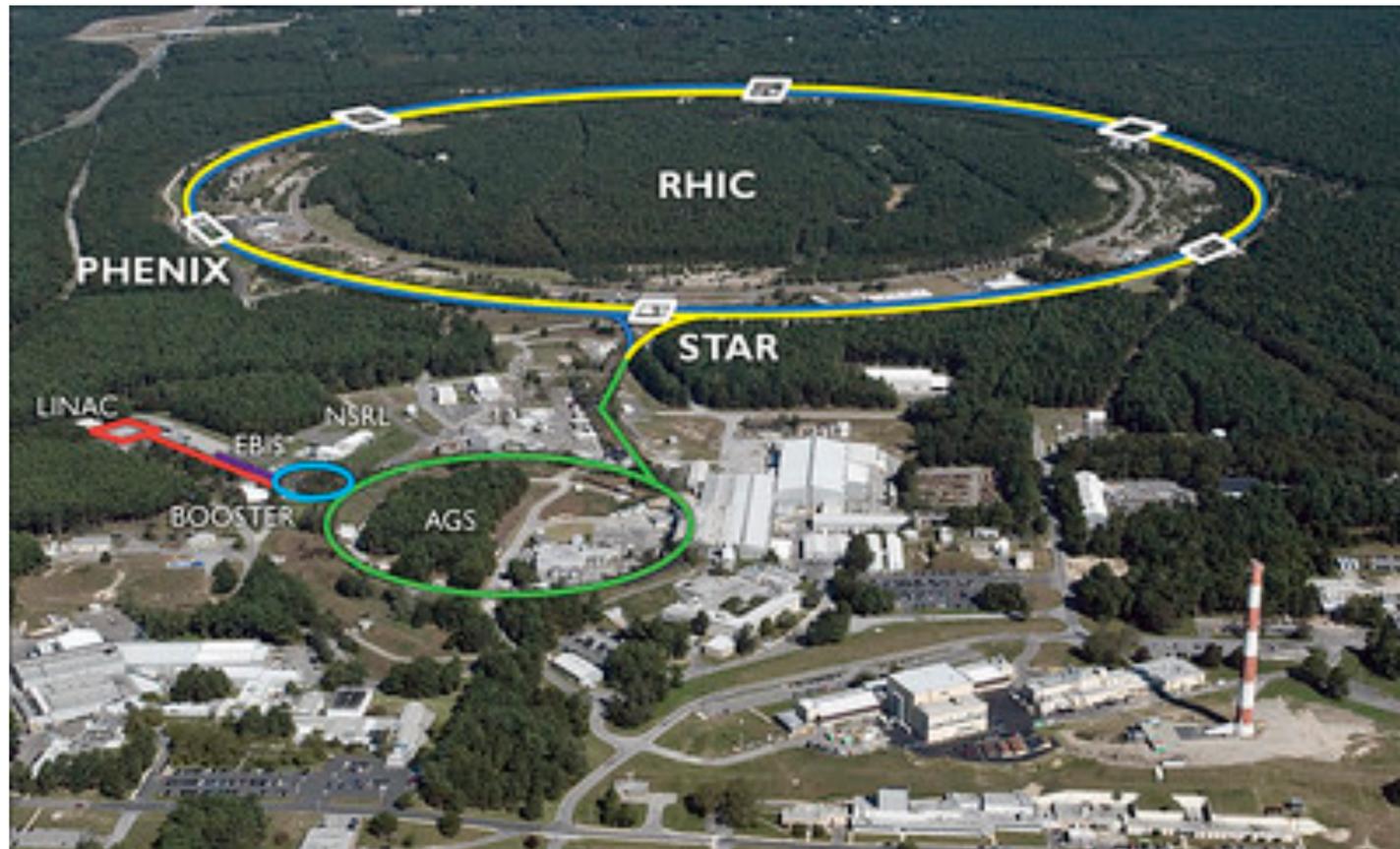
→ QGPの性質を解明することで宇宙
の初期状態を理解することができる

研究背景

• 高エネルギー原子核衝突実験について

高エネルギー原子核衝突実験：重い原子核同士をほぼ光速で衝突させることで高温状態を作り出し、QGPを再現することが目的

Relativistic : 光速の、相対論的な
Heavy Ion : 重たい原子核
Collider : 衝突させるもの



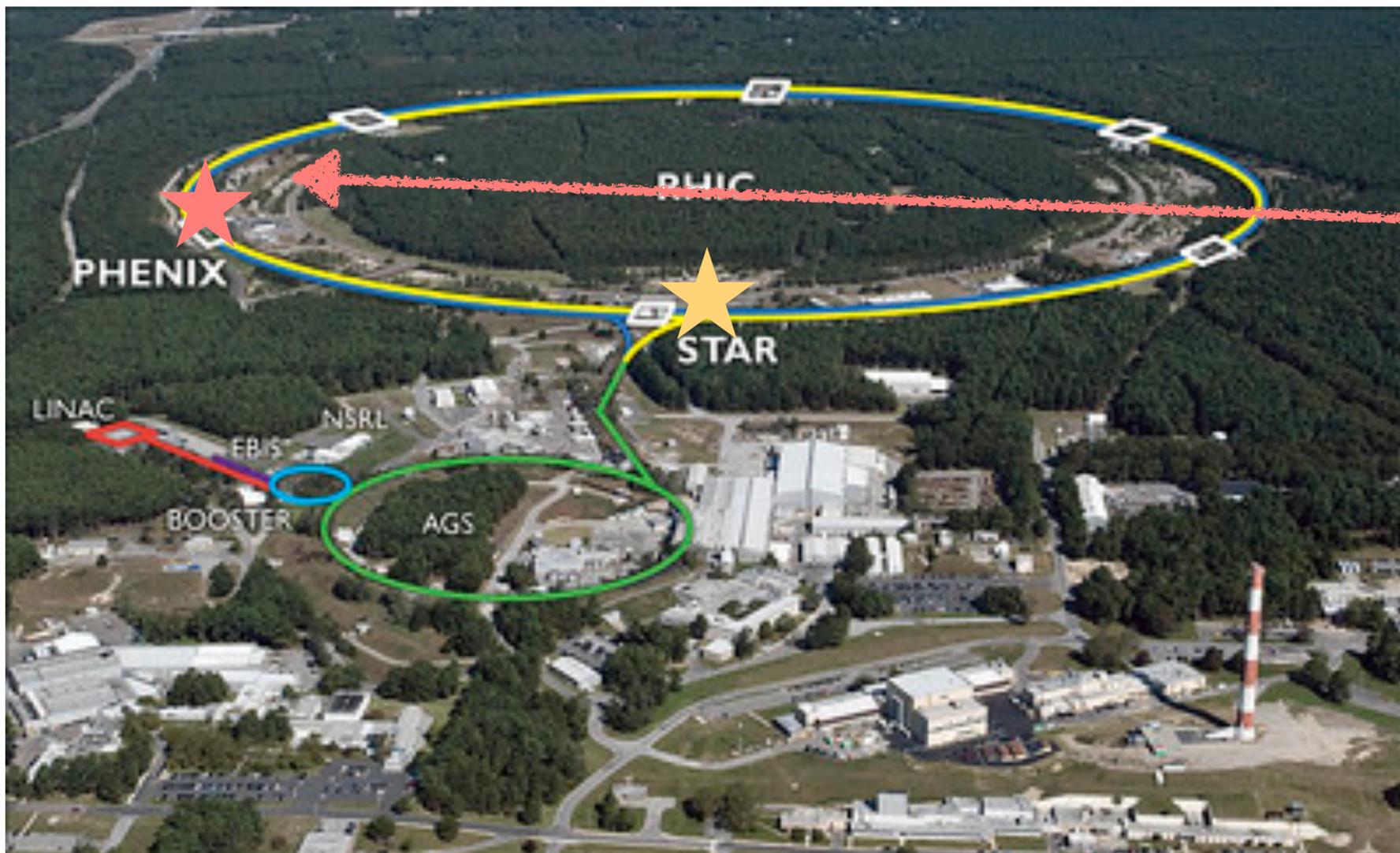
RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider)

- 世界で初めて重イオン衝突実験（高エネルギー原子核衝突実験）を可能にした加速器
- 金、鉛、銅などのさまざまな原子核や陽子を加速することができる

研究背景

- **PHENIX実験について**

本研究では、2014年にPHENIX実験で収集された $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ のAu+Au衝突のデータを解析した



PHENIX(the **P**ioneering **H**igh **E**nergy **N**uclear **I**nteraction **E**xperiment)

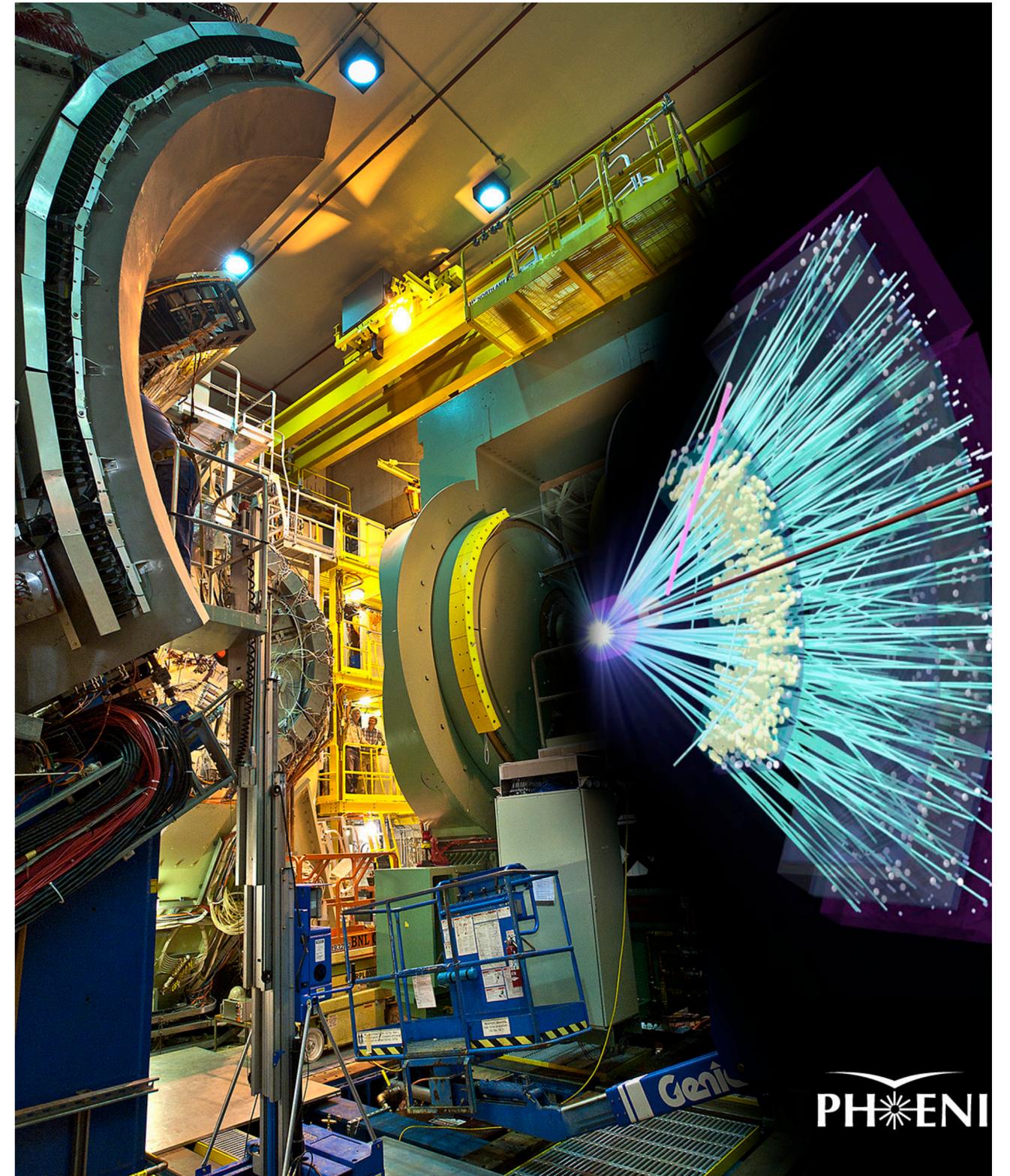
RHICで行われた2大主要実験の一つ

PHENIX実験のコンセプト

- QGPの性質の解明すること

研究目的

- 研究目的と特色
- MPIについて



研究目的

- **研究目的と特色**

- ▶ 研究目的

MPIの効果を重イオン衝突実験において観測すること。

- ▶ 研究の特色

重イオン衝突実験のデータを使うことでMPIの研究に v_2 を導入した。

研究目的

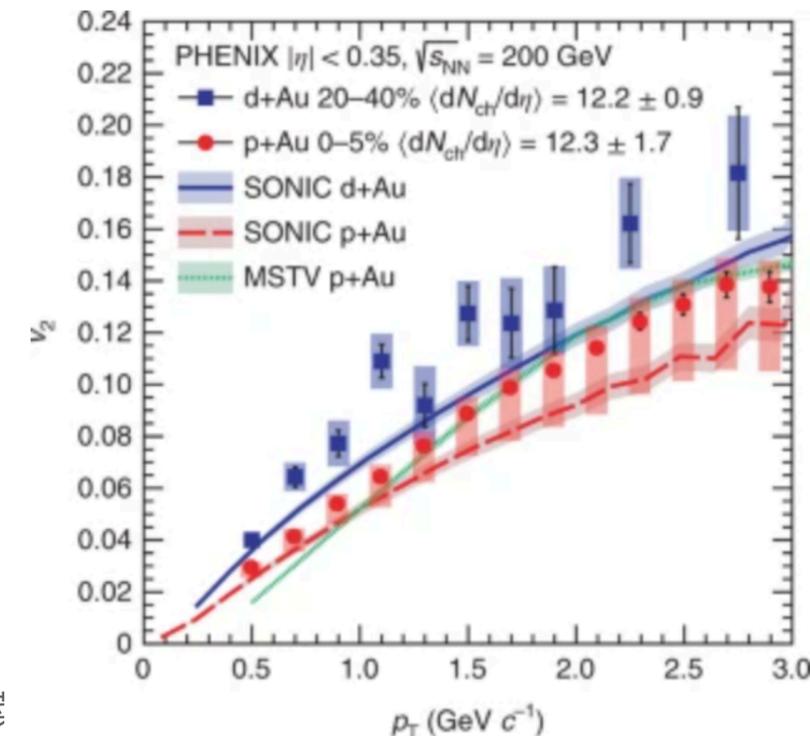
• MPIについて (1)

小さい系の衝突で、粒子多重度 (= 衝突によって生成された粒子数、Multiplicity) が多いイベントだけを取り出してみるとQGP-likeなものができるという実験結果が出てきている

→ **MPI (Multi-Parton Interaction)** という考え方

Nat. Phys. **15**, 214–220 (2019)

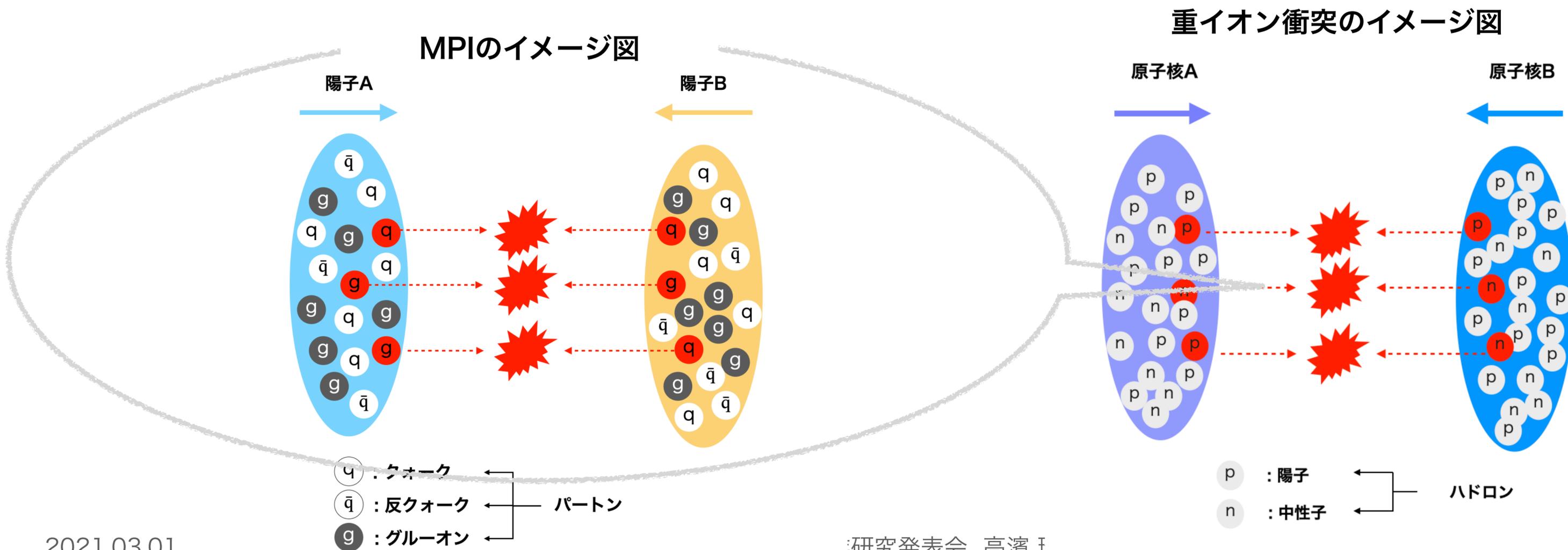
Fig. 4: Measured $v_2(p_T)$ in p+Au and d+Au collisions at the same event multiplicity.



研究目的

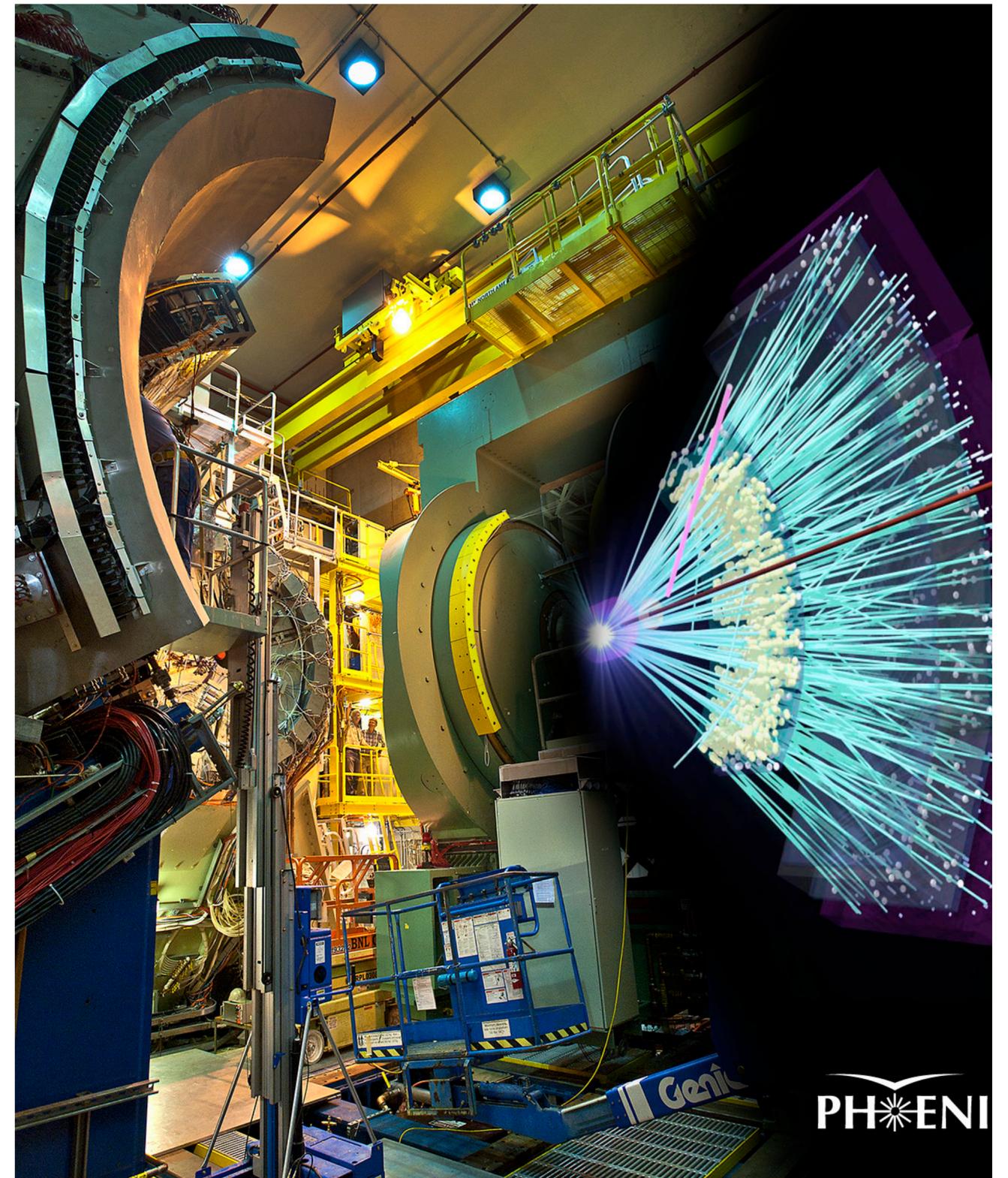
• MPIについて (2)

MPI : ハドロン・ハドロン衝突の場合に、ハドロンの構成粒子 (=パートン)同士の多重衝突による反応



解析方法

- v_2 について
- v_2 とMultiplicityの相関とMPIの関係
- PHENIX検出器について
- v_2 の補正について
- double collisionについて

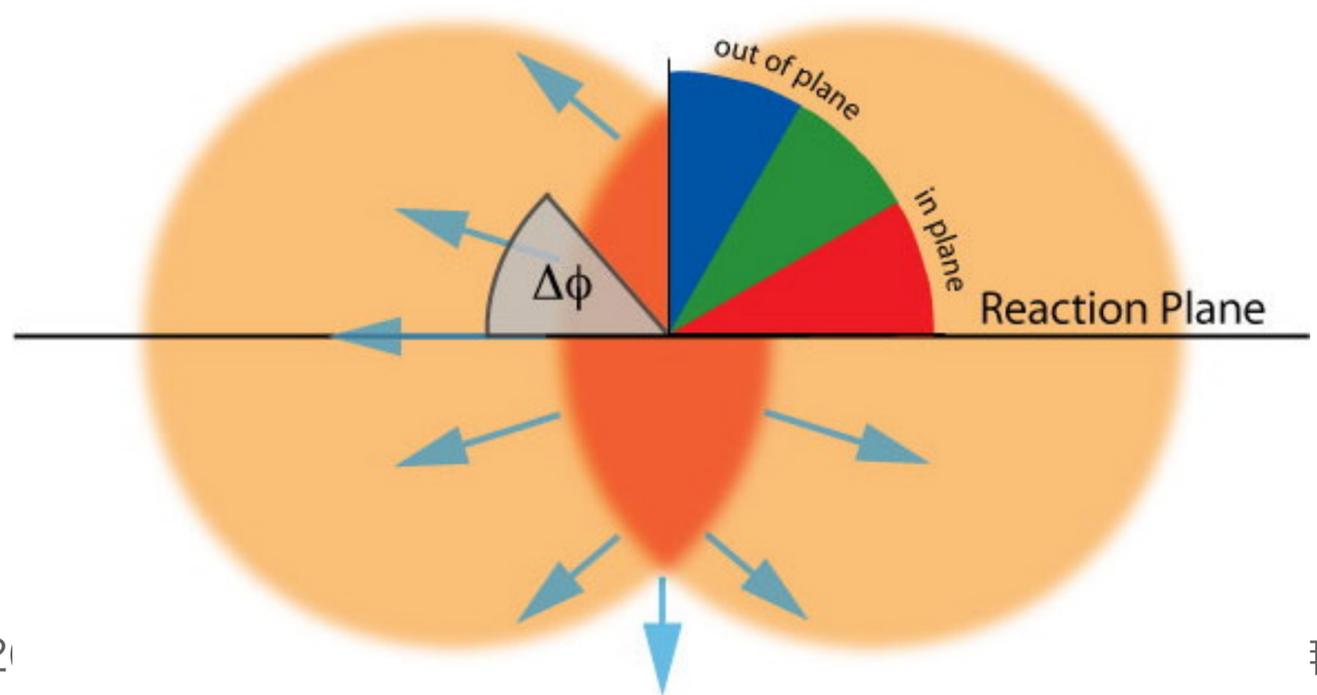
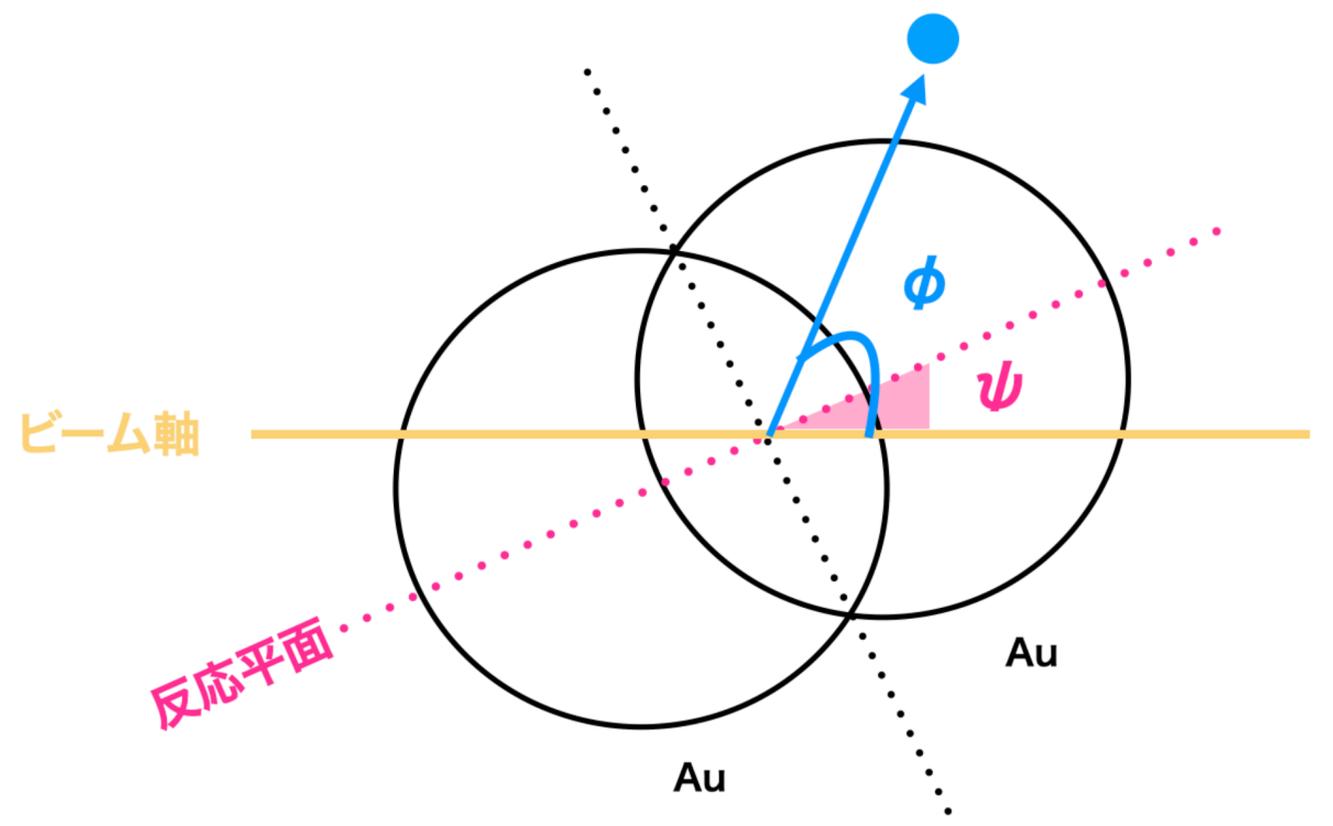


解析方法

- v_2 について

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

ϕ : 衝突により生成・放出された粒子の方位角
 ψ : 反応平面角 (原子核の中心同士を結んだ直線とビーム軸とのなす角)



重イオン衝突では衝突によって放出される粒子の方位角が等方的でないことがある

→ **方位角異方性**

- $v_2 = 0 \rightarrow$ 等方的
- $v_2 \neq 0 \rightarrow$ 方位角異方性がある

解析方法

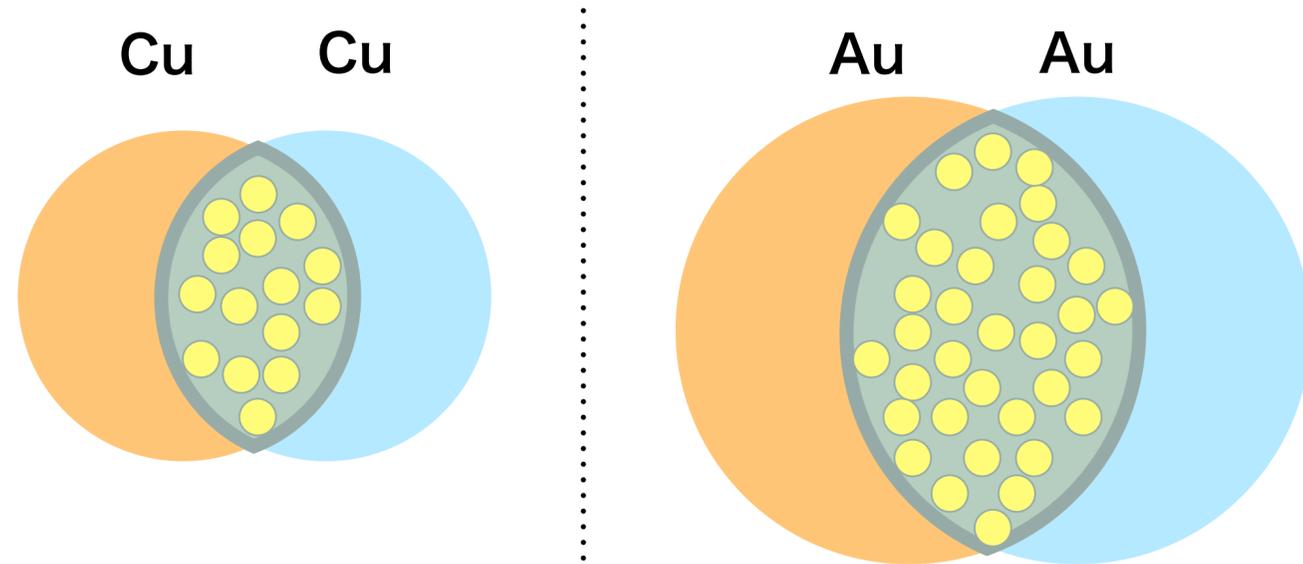
- **v_2 とMultiplicityの相関 ~ MPIとMultiplicityの関係 ~**

小さい衝突系においてMPIが観測されているのはMultiplicityが大きいイベントを取り出したとき

→重イオン衝突では、 N_{part} (反応に関与した核子数) が同じ時、MPIが多く起きていればMultiplicityも大きくなる。

解析方法

- v_2 とMultiplicityの相関 ~ MPIと v_2 の関係 ~



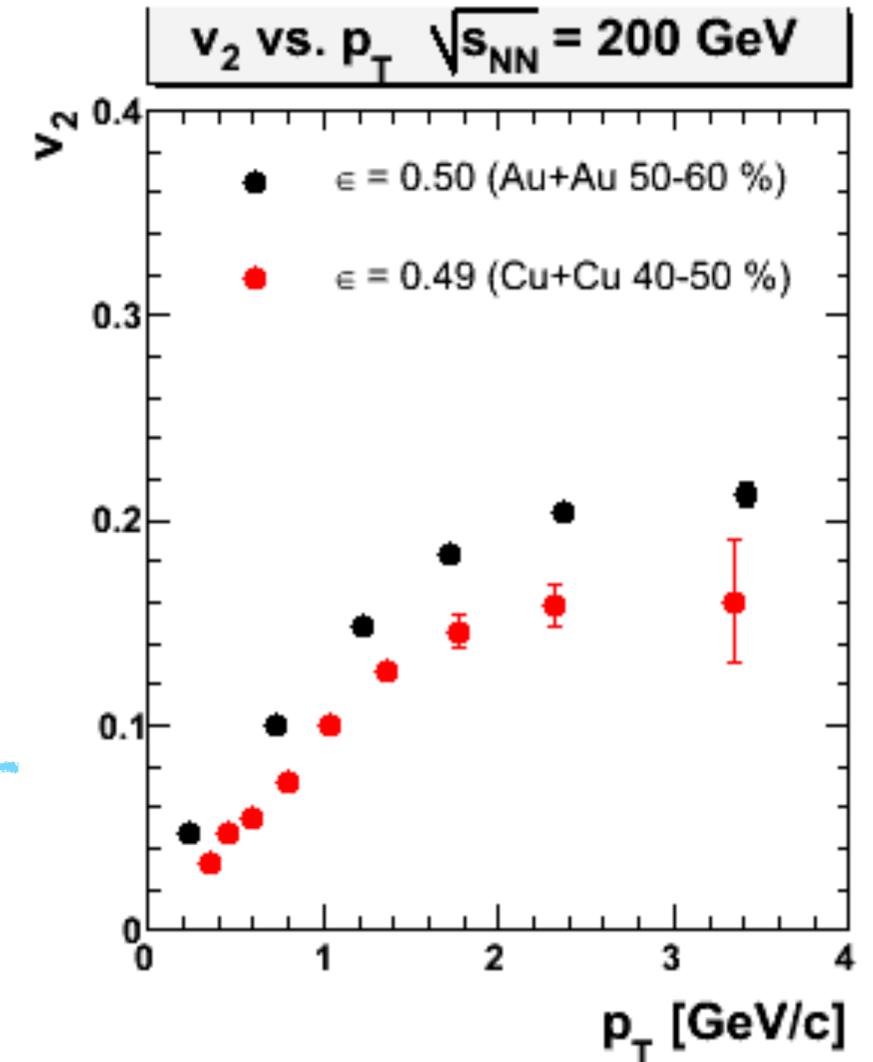
Eccentricity (楕円率)	ϵ^{Cu}	ϵ^{Au}
Npart	$Npart^{Cu}$	$Npart^{Au}$
v_2	v_2^{Cu}	v_2^{Au}

$\epsilon^{Cu} = \epsilon^{Au}$ の時、

- $v_2^{Cu} < v_2^{Au}$
- $Npart^{Cu} < Npart^{Au}$

→ 反応に関与した領域の形が同じ時、反応に関与した粒子数が多い方が v_2 が大きい

→ **$Npart$ が同じで多くパートンが衝突している方が v_2 が大きくなる**



解析方法

- **MPIを考慮したときの v_2 とMultiplicityの関係**

Npartが同じイベントを選んだ時

- ① MPIが多く起きている方がMultiplicityが大きい
- ② MPIが多く起きている方が v_2 が大きい

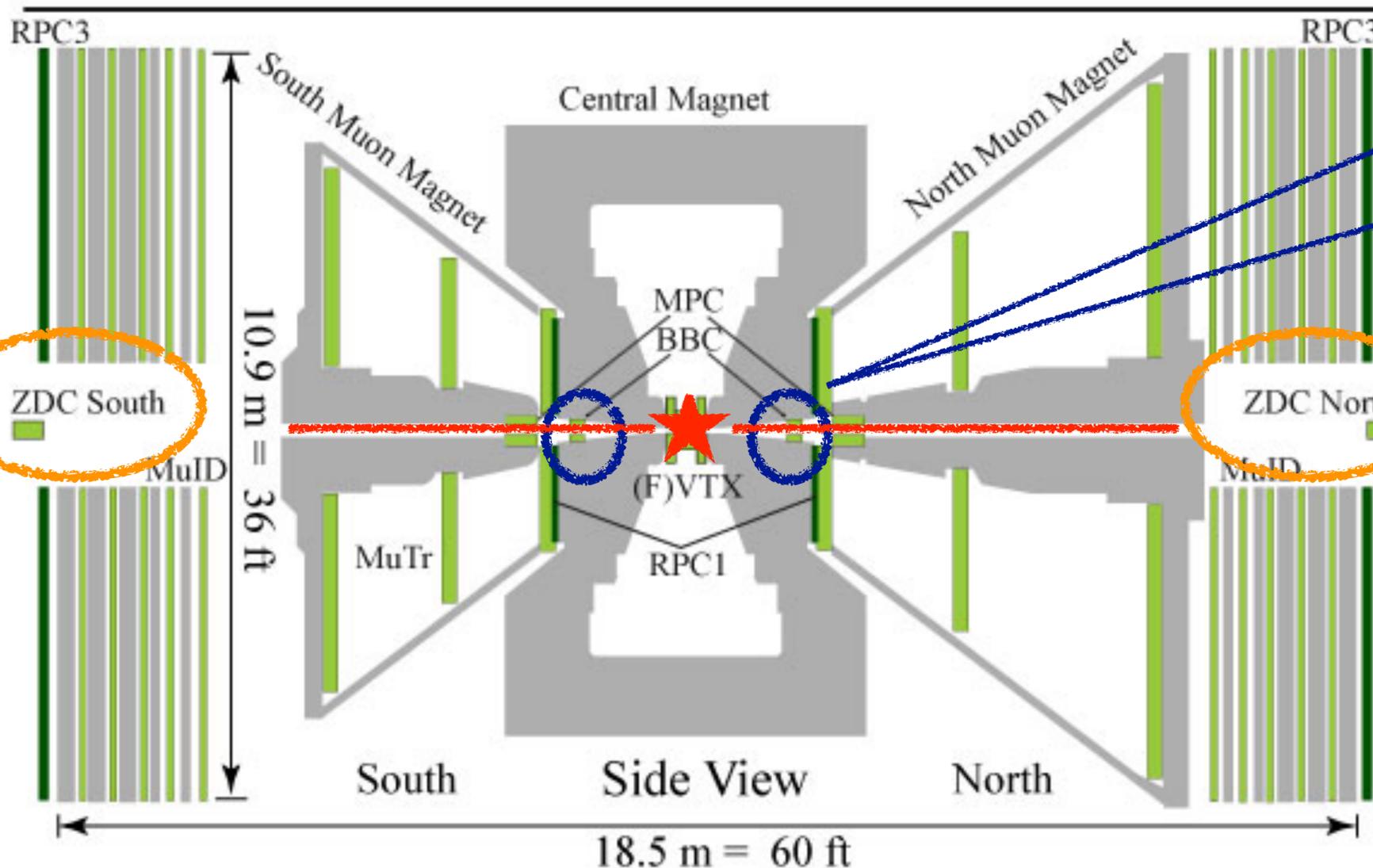
→ **Npartが同じくらいのイベントを選び、Multiplicityと v_2 の相関を調べる。**

この時、 v_2 とMultiplicityに正の相関が見えればMPIが起きていると言える。

解析方法

• PHENIX検出器について

ビーム軸から平行な方向にみたPHENIX検出器



BBC検出器

(Beam Beam Counter)

- 衝突によって放出された荷電粒子数を測定 → BBCq

Multiplicityの指標

ZDC検出器

(Zero Degree Calorimeter)

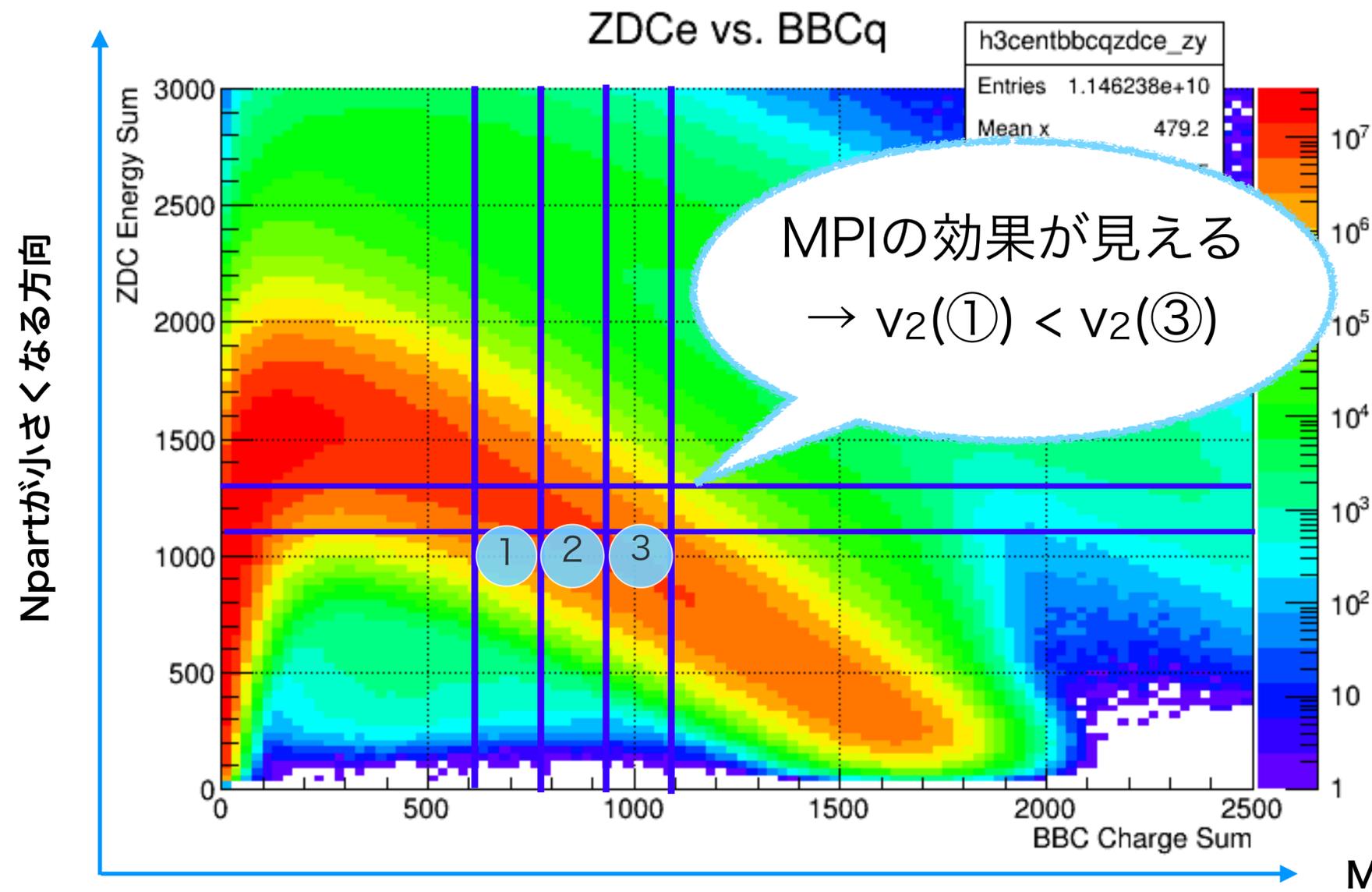
- 衝突に関与していない核子のうち、中性子のエネルギー和を測定 → ZDCe

Nspec (反応に関与していない核子数) の指標

解析方法

- **MPIを考慮したときの v_2 とBBCqの関係**

Nspec : 反応に関与していない核子数



$$N_{\text{part}} + N_{\text{spec}} = A \text{ (質量数)}$$

→ NspecがわかればNpartが分かる

Npartが同じイベントを選んで v_2 と
Multiplicityの相関を調べる

→ ZDCeが同じくらいのイベントで v_2 と
BBCqの相関を調べる

解析方法

- v_2 の補正について(1)

実験で測定される v_2 ($v_2^{measured}$)の値は、反応平面を決める検出器の影響を受ける

→ 検出器で測定した反応平面の分解能で求まる補正係数で v_2 を補正する必要がある。

補正係数を C_{reso} とすると

$$v_2^{true} = \frac{v_2^{measured}}{C_{reso}}$$

解析方法

• v_2 の補正について(2)

- BBC South
- BBC North
- CNT

を用いて反応平面を測定した。

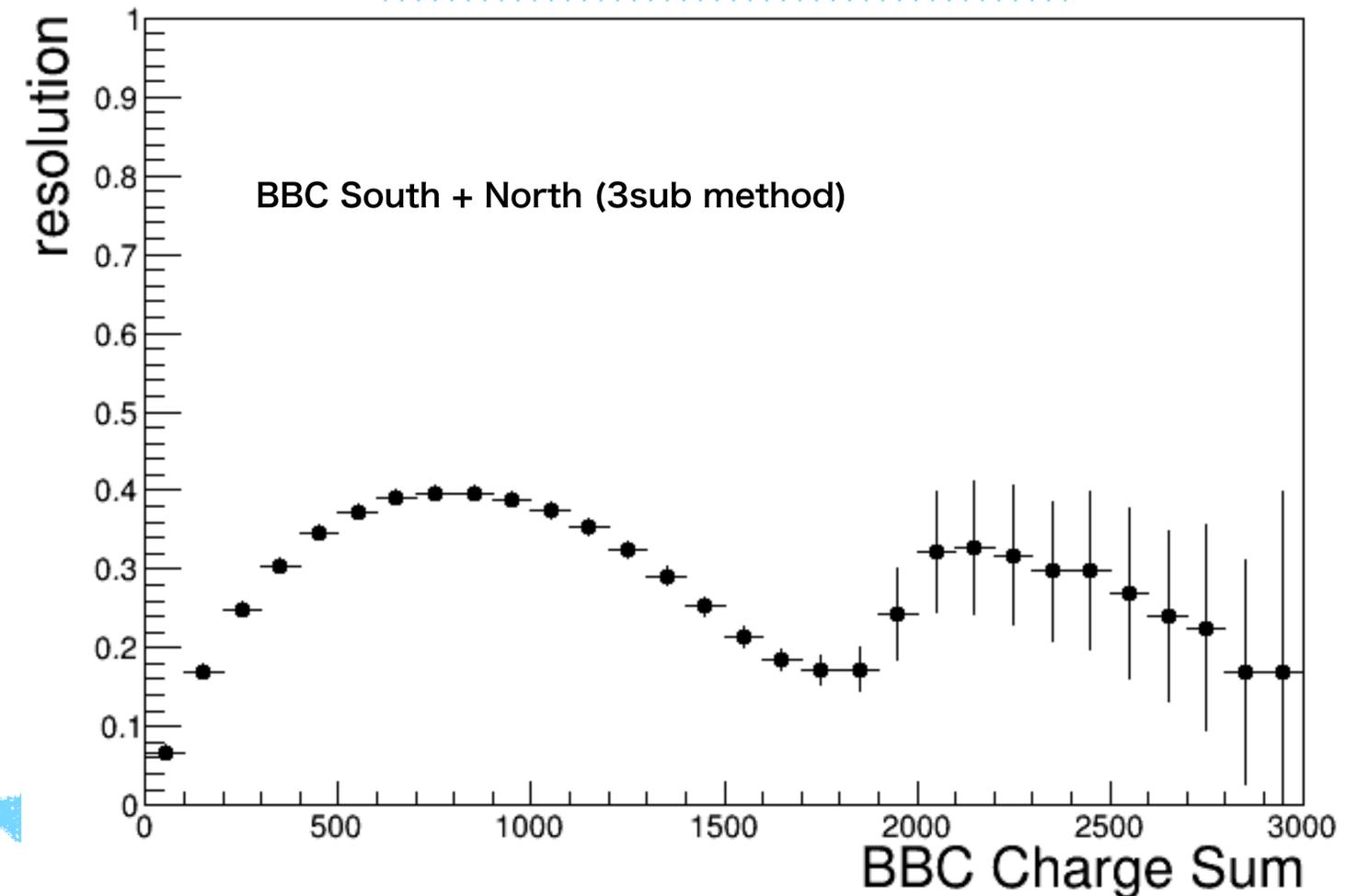
→ 3つの検出器を組み合わせた反応平面の分解能から補正係数 C_{reso} を求める

$$\sigma_{BBC}\sigma_{CNT} = \langle \cos(2[\psi_{BBC} - \psi_{CNT}]) \rangle$$

$$C_{reso} = \sigma_{BBC} = \frac{\langle \cos(2[\psi_{BBC} - \psi_{CNT}]) \rangle}{\sigma_{CNT}}$$

$$\sigma_{CNT} = \sqrt{\frac{(\sigma_{BBCN}\sigma_{CNT}) \cdot (\sigma_{BBCS}\sigma_{CNT})}{\sigma_{BBCS}\sigma_{BBCN}}}$$

BBC resolution vs. BBCq



σ_{BBCN} : BBC Northの反応平面の分解能

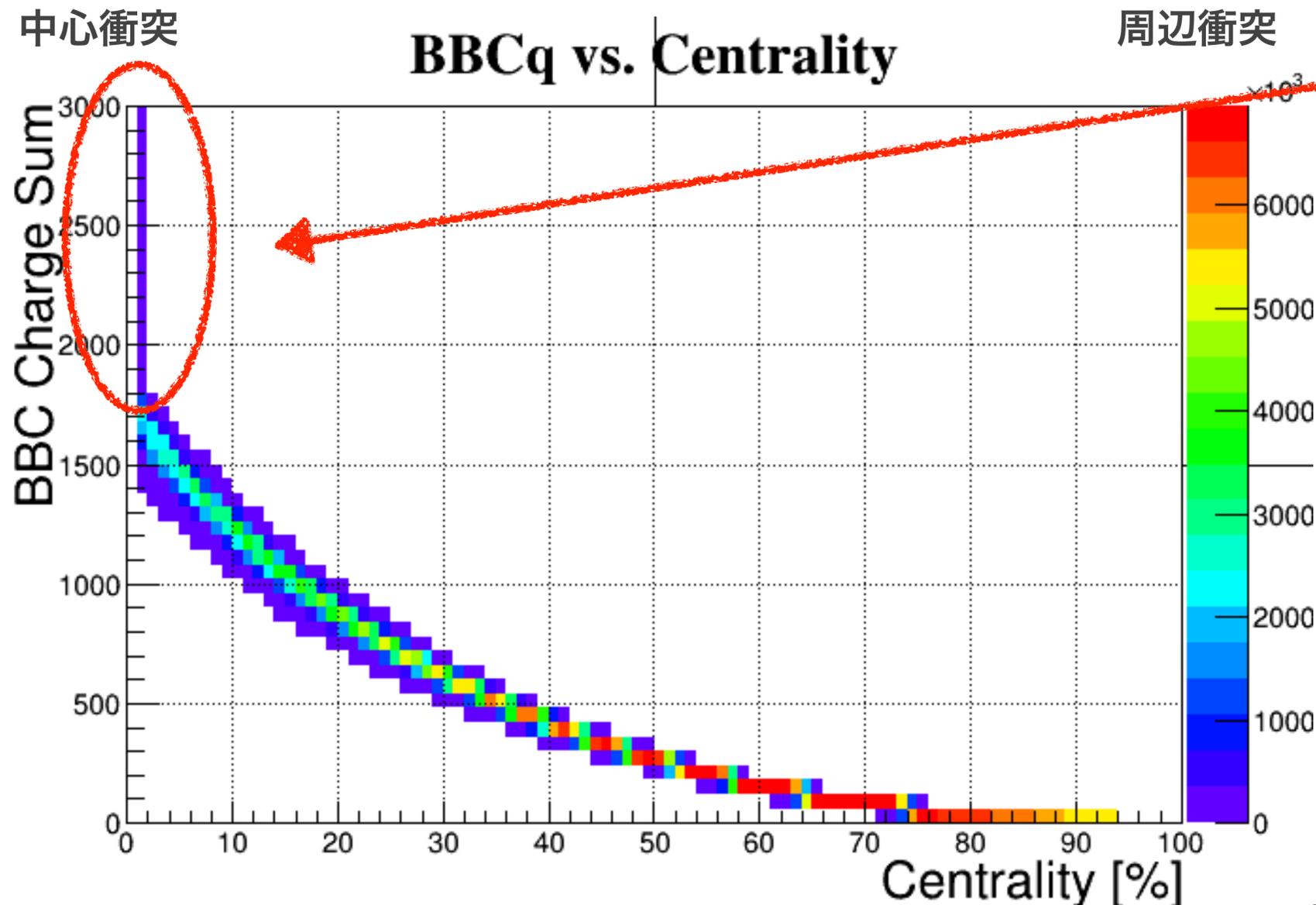
σ_{BBCS} : BBC Southの反応平面の分解能

$\sigma_{BBC} = \sigma_{BBCN}\sigma_{BBCS}$: BBC South + Northの反応平面の分解能

σ_{CNT} : CNTの反応平面の分解能

解析方法

- BBCqとdouble collisionについて



double collision : バンチの中で原子核が2回衝突するイベント

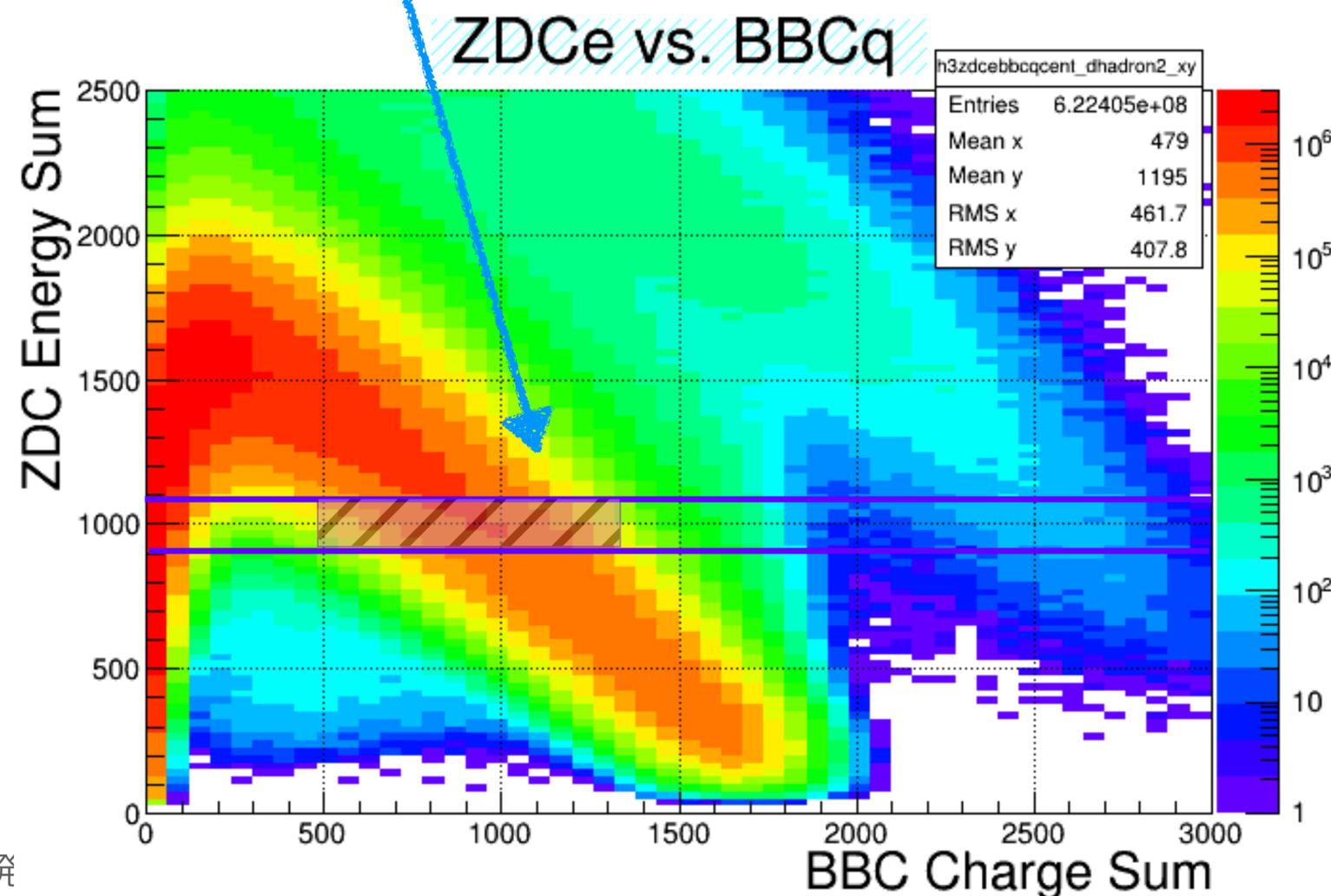
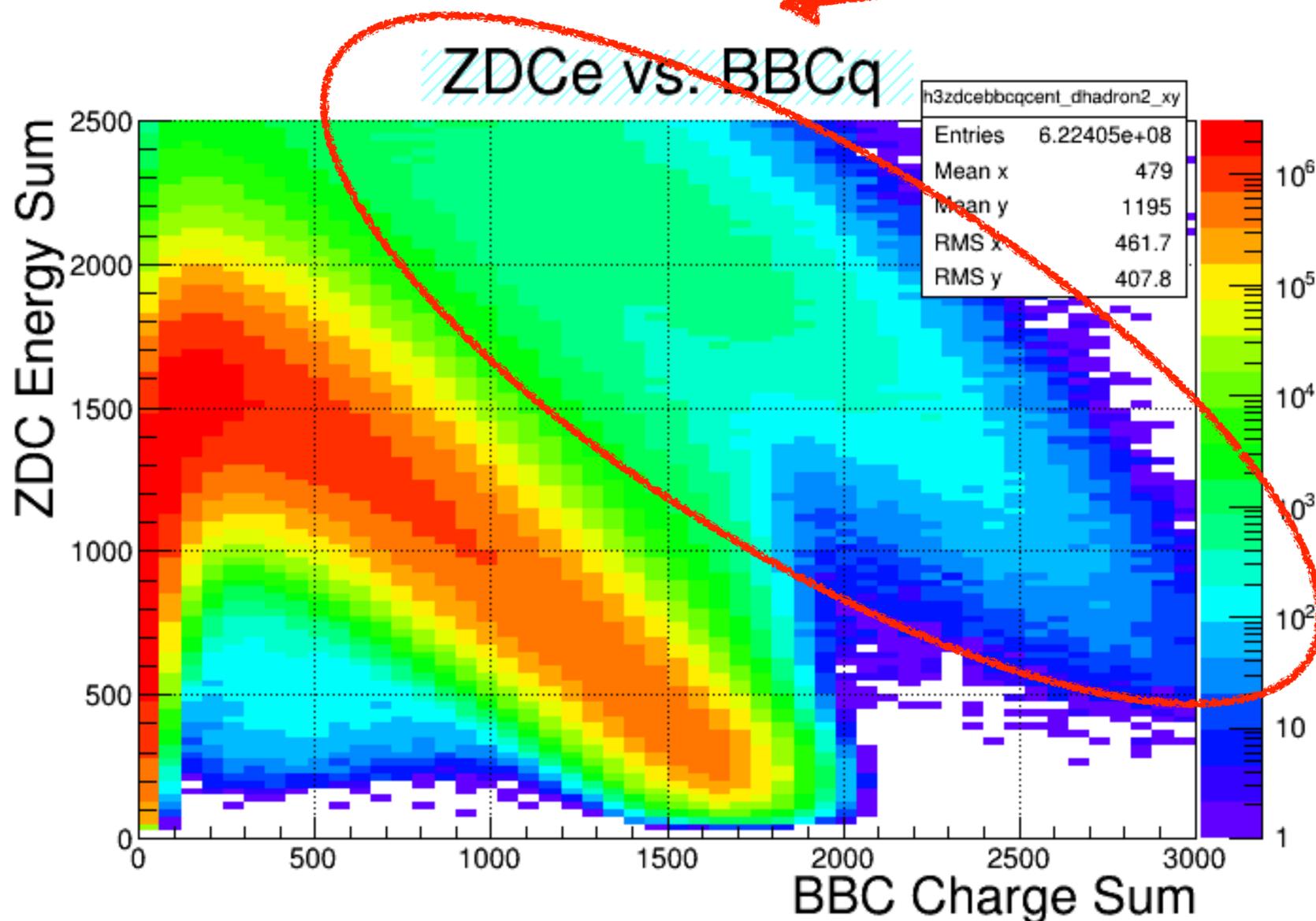
BBCqが1800以上のイベントはMPIではなく、double collisionによってMultiplicityが大きくなっている
→ BBCqが1800以下のイベントについて v_2 とMultiplicityの相関を調べる

解析方法

- **BBCqとdouble collisionの関係**

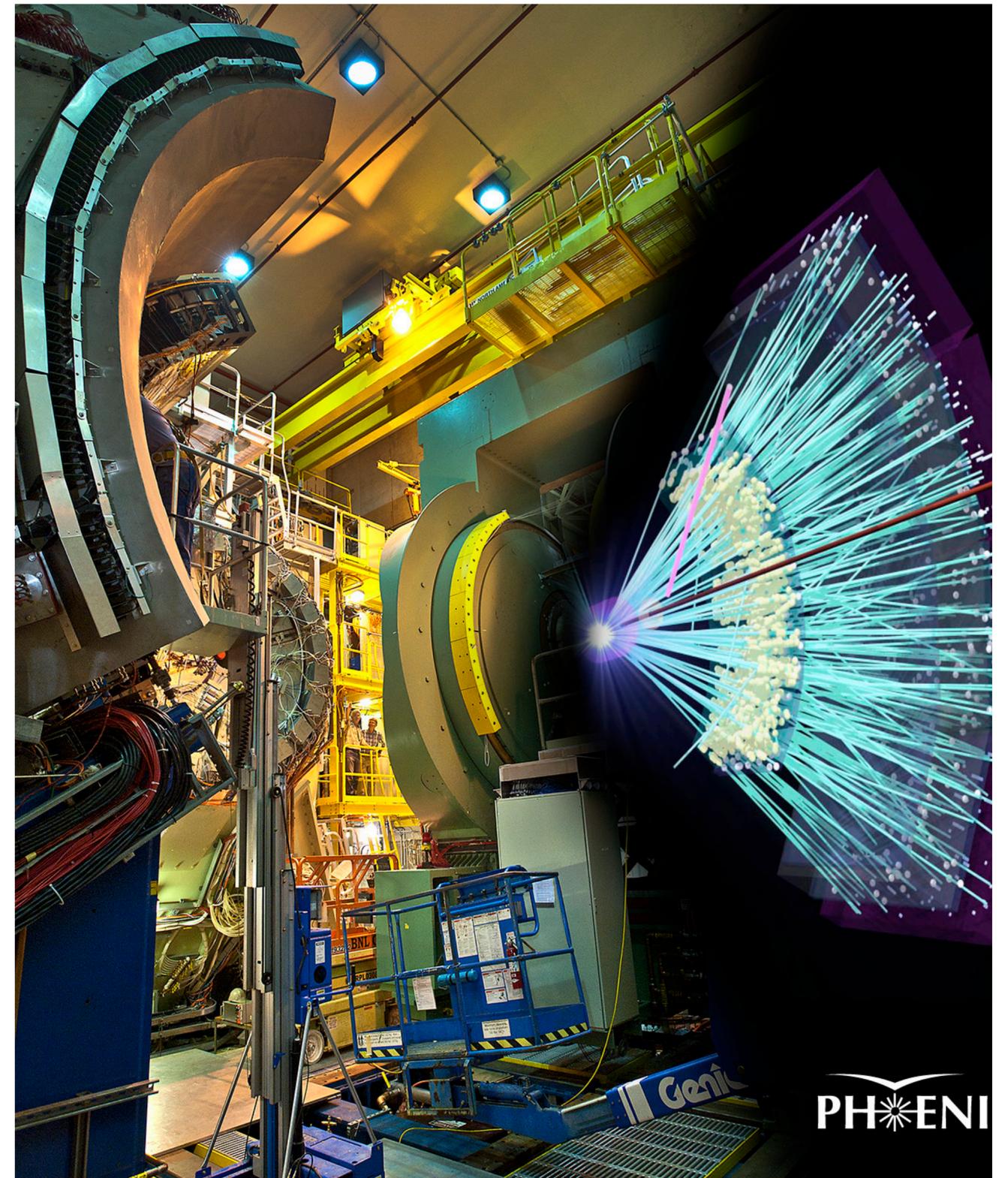
Double collisionが起きたイベント

→ 統計が多い付近で v_2 とMultiplicityの相関を見る



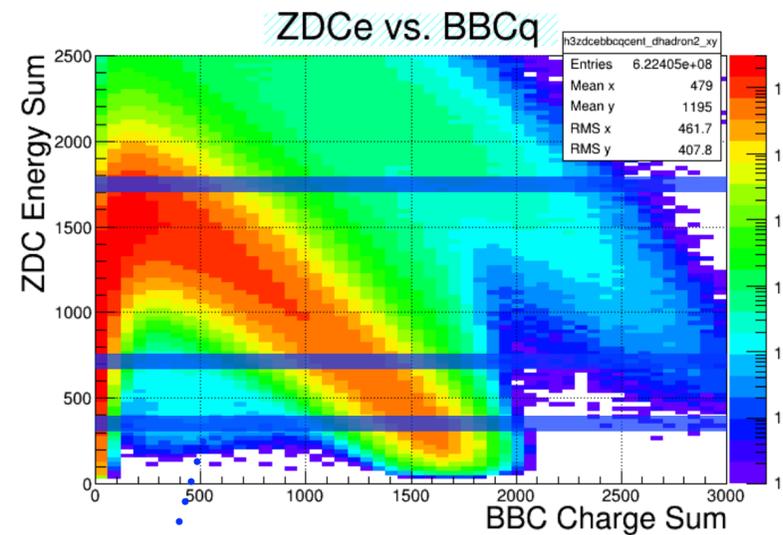
解析結果

- v_2 とBBCqの相関
- ZDCeの値による v_2 の補正係数の違い
- 補正係数の違いによる v_2 とBBCqの相関の違い



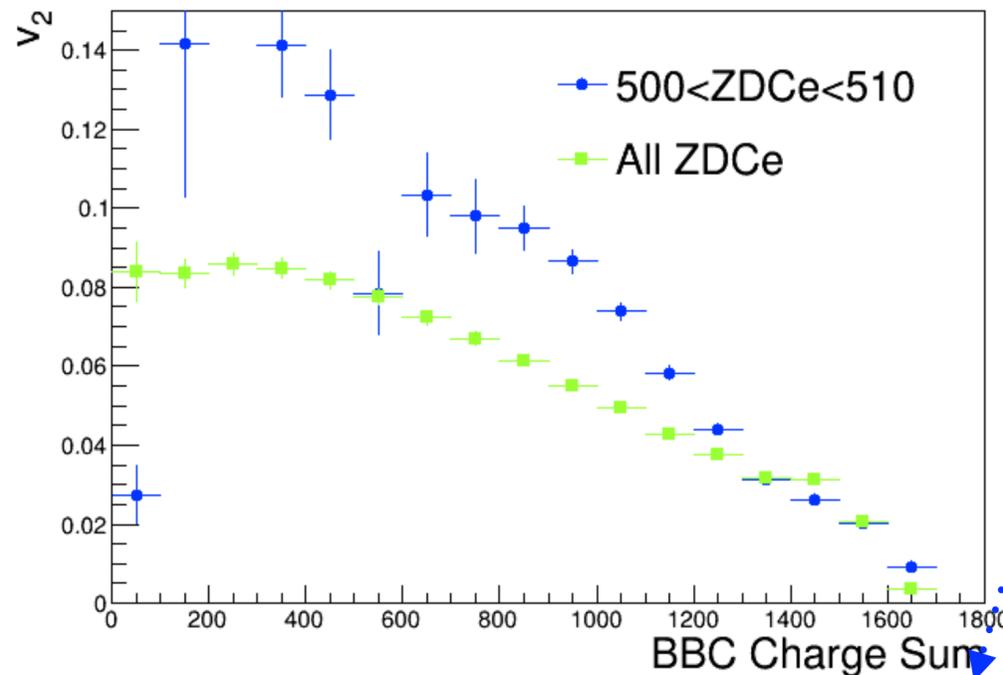
解析結果

• v_2 vs. BBCq

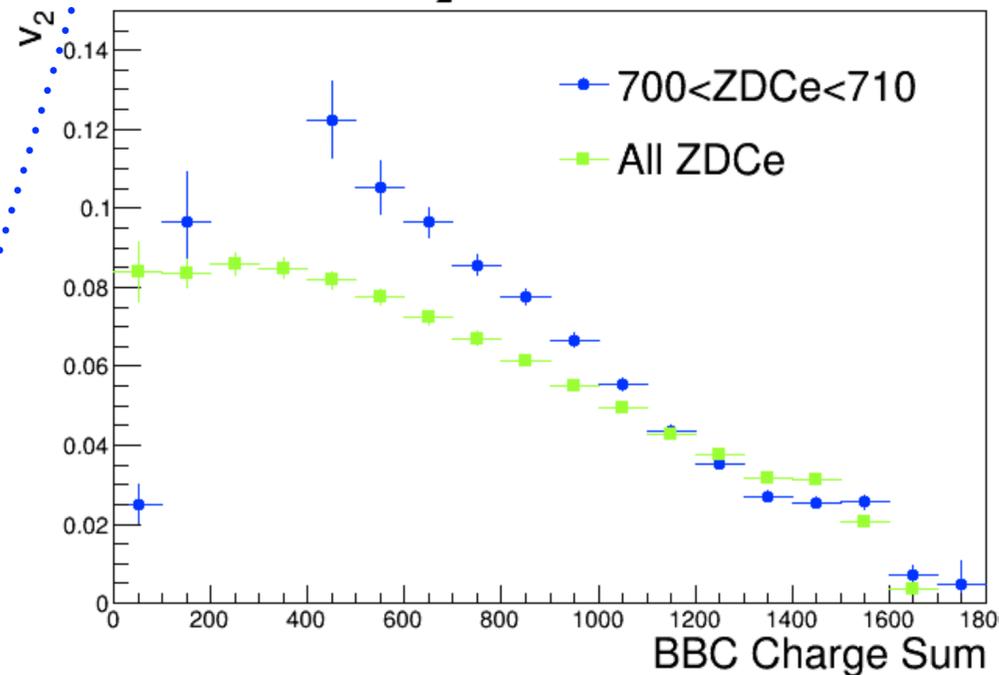


- : ZDCeで区切って求めた v_2
- : ZDCeを区切らずに求めた v_2

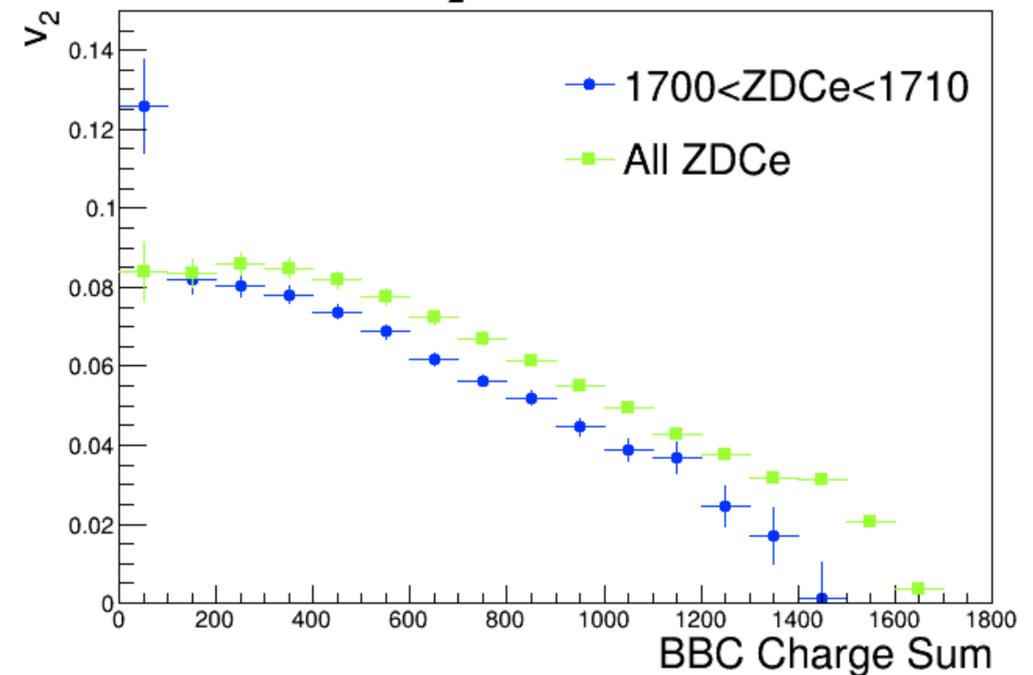
v_2 vs. BBCq



v_2 vs. BBCq



v_2 vs. BBCq



• 統計が少ない
• 減少している

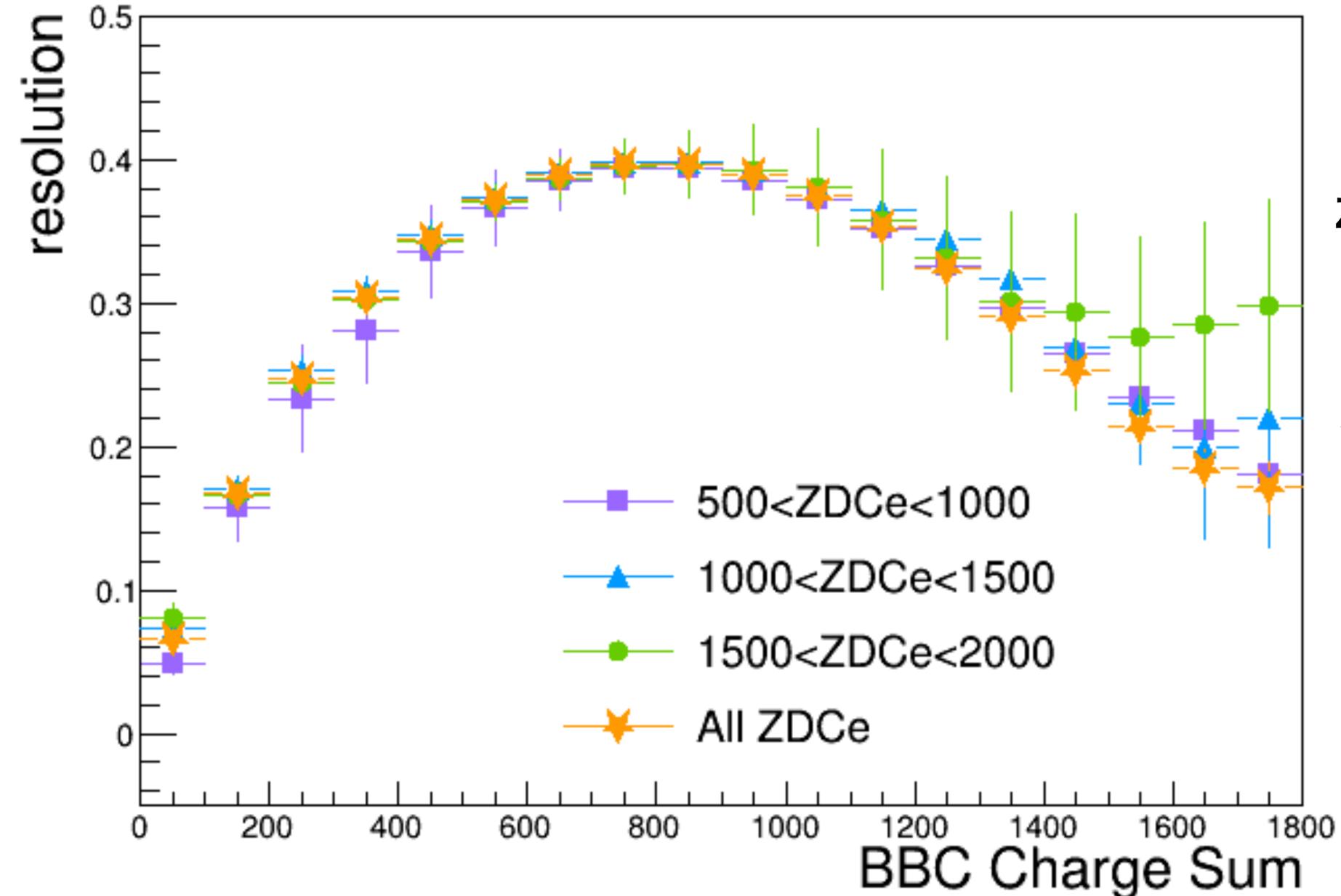
• 減少から増加に転じている場所がある

• 増加は見られない

解析結果

- ZDCeの値による v_2 の補正係数の違い

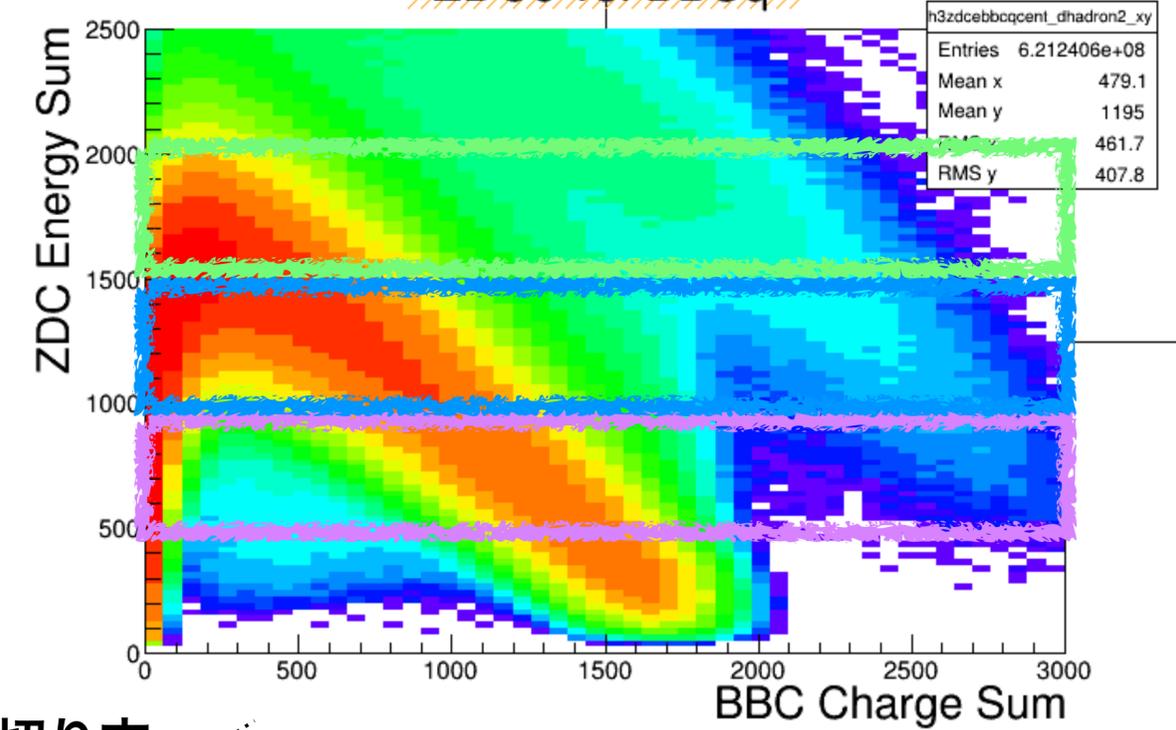
BBC resolution vs. BBCq



ZDCeの区切り方

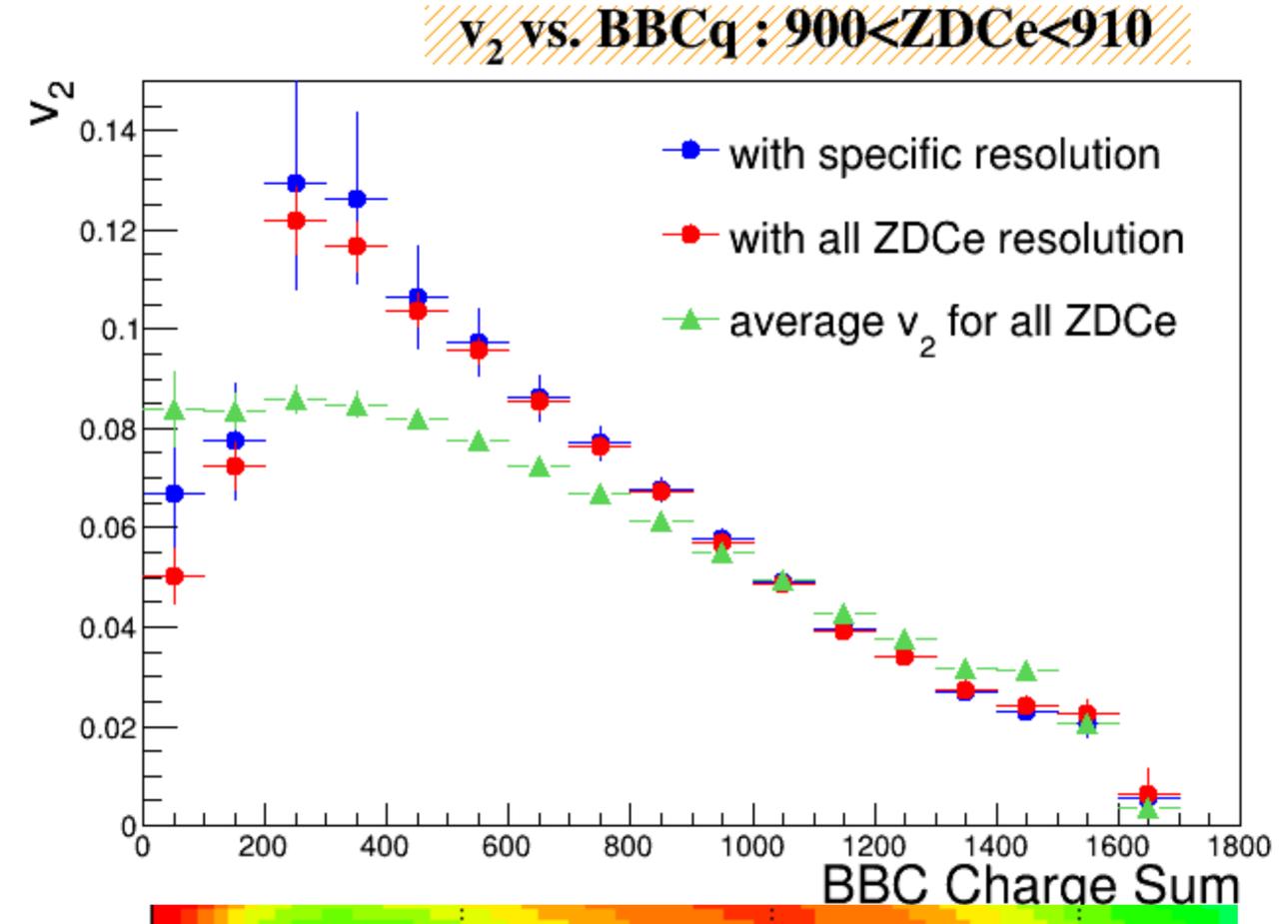
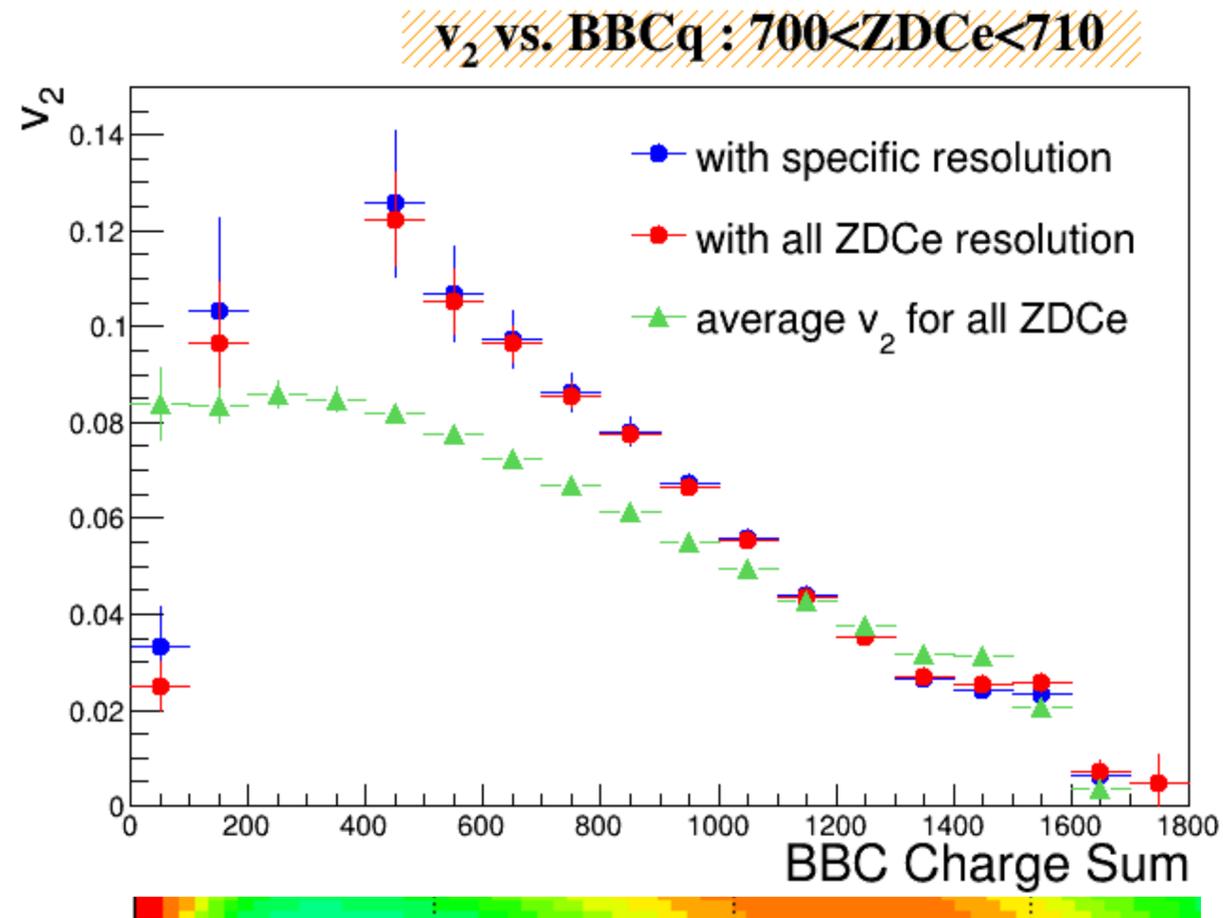
- ZDCeの値によって v_2 の補正係数の傾向は変わらない。
- BBCqが大きいたとこで値の変化が大きくなる。
→ double collisionの影響

ZDCe vs. BBCq



解析結果

- **v₂ vs. BBCq**

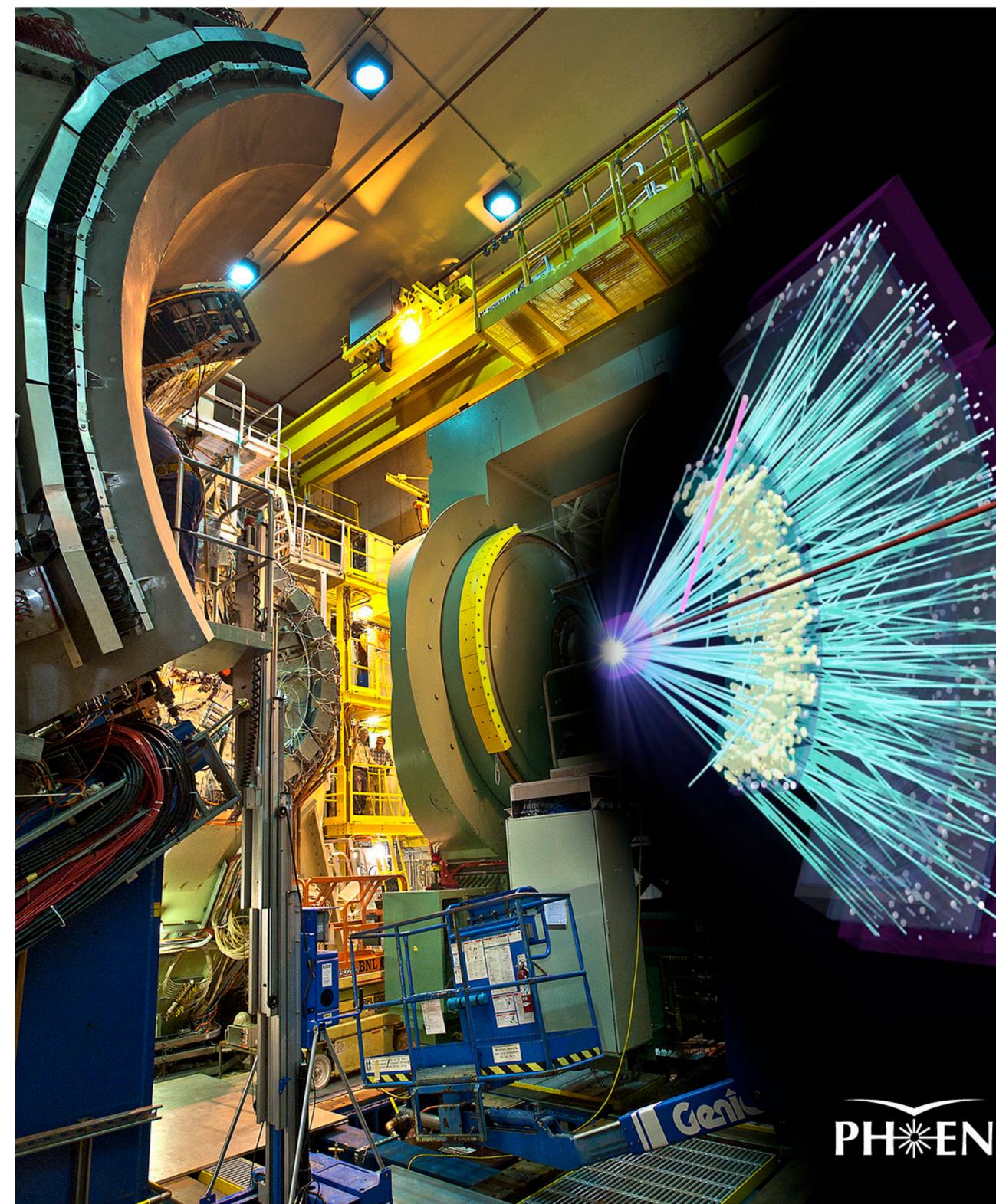


- ZDCeで区切った補正係数で補正したv₂

- ZDCeで区切っていない補正係数で補正したv₂

→ ZDCeで区切った補正係数で補正したv₂の方が増加に転じる様子は見にくい。

まとめ
&
今後の課題
&
現在取り組んでいること

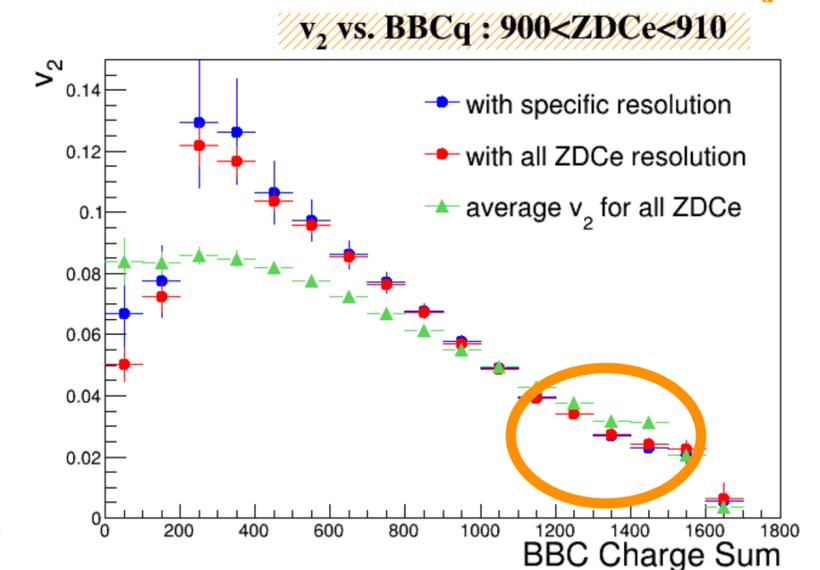
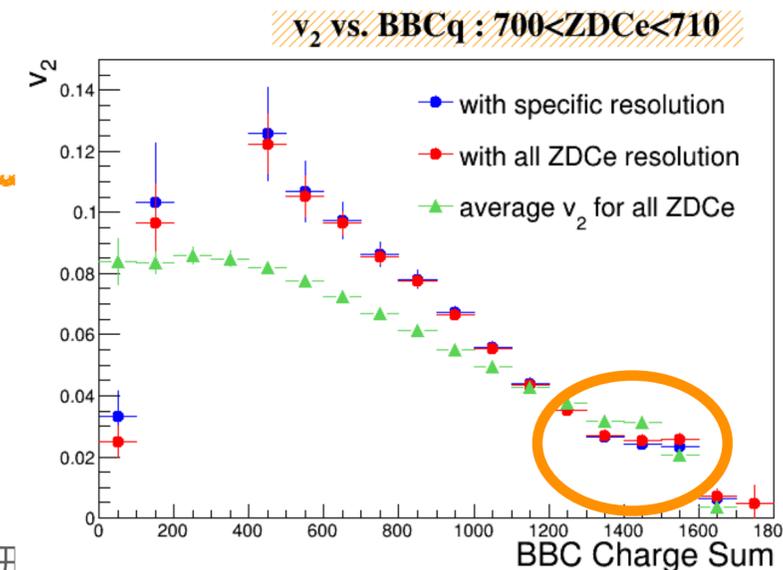
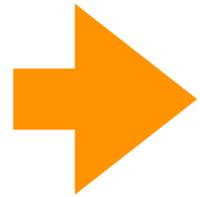


まとめ

重イオン衝突実験においてMPIを観測することを目的に

- PHENIX実験のAu+Au衝突のデータを用いて、ZDCeが同じくらいのイベントを選び v_2 とBBCqの相関を調べた

- BBCqと v_2 は全体的には負の相関を持つ。ただし**ZDCeが700~900付近では増加に転じるポイントが見える。→MPIのシグナル?**
- v_2 を求めた時と同じようにZDCeで区切って求めた補正係数で v_2 を補正すると、**増加傾向が見えにくくなる。**

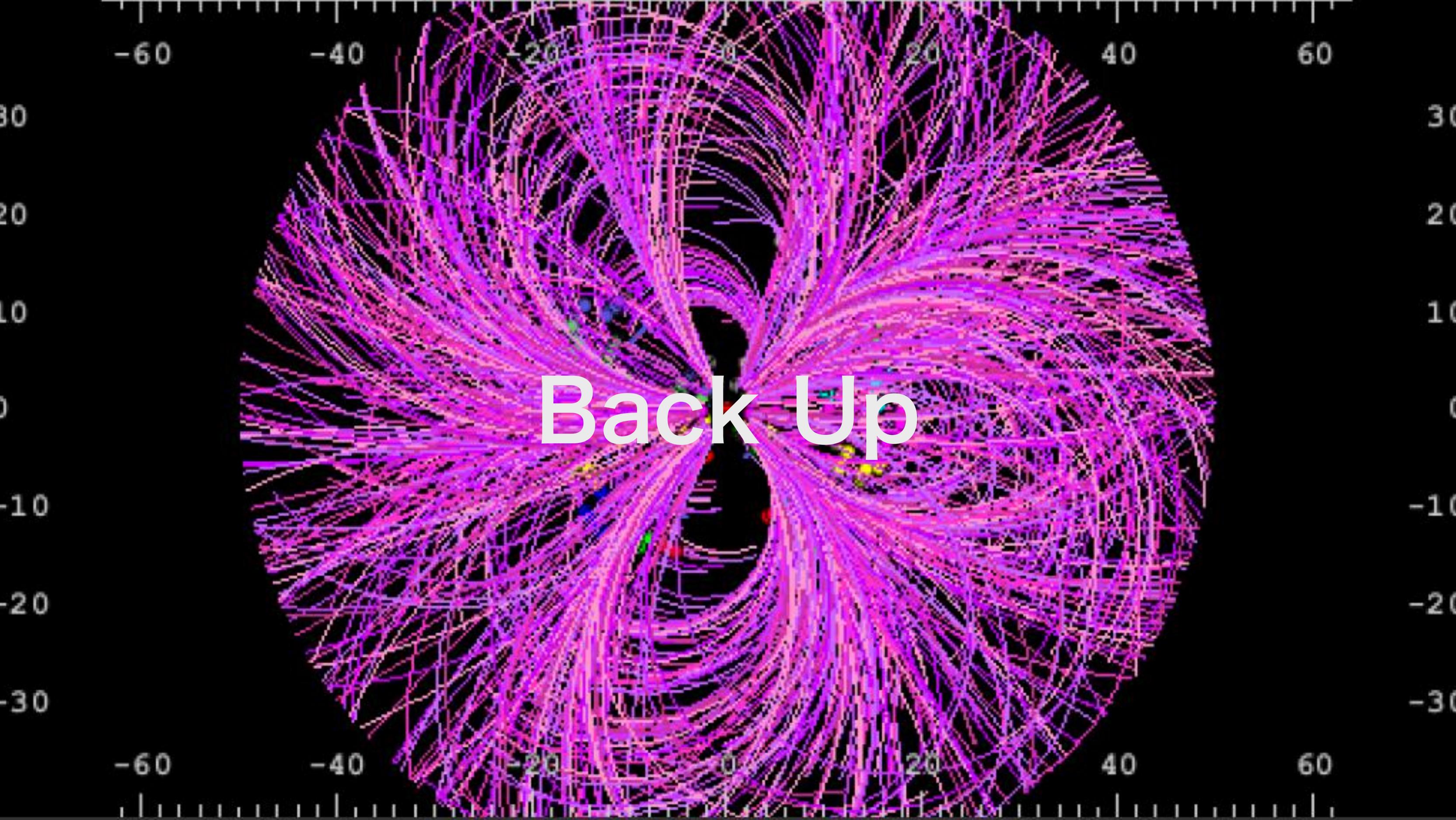


今後の課題

- double collisionのイベントをできる限り落とすカットを使う。
- MPIの効果以外でもMultiplicityの揺らぎができるはず
 - どんな時に揺らぎができるか、またそれらをMPIの効果と見分ける方法

現在取り組んでいること

- 今回は同じZDCeのイベントを選んで v_2 を求めた。
 - BBCqが同じ、またはeccentricityが同じなど、条件を変えて解析をする。
- Multiplicityの指標として今回はBBC検出器のみを使っている。
 - 発生した粒子のトラック数を測る検出器も使う。

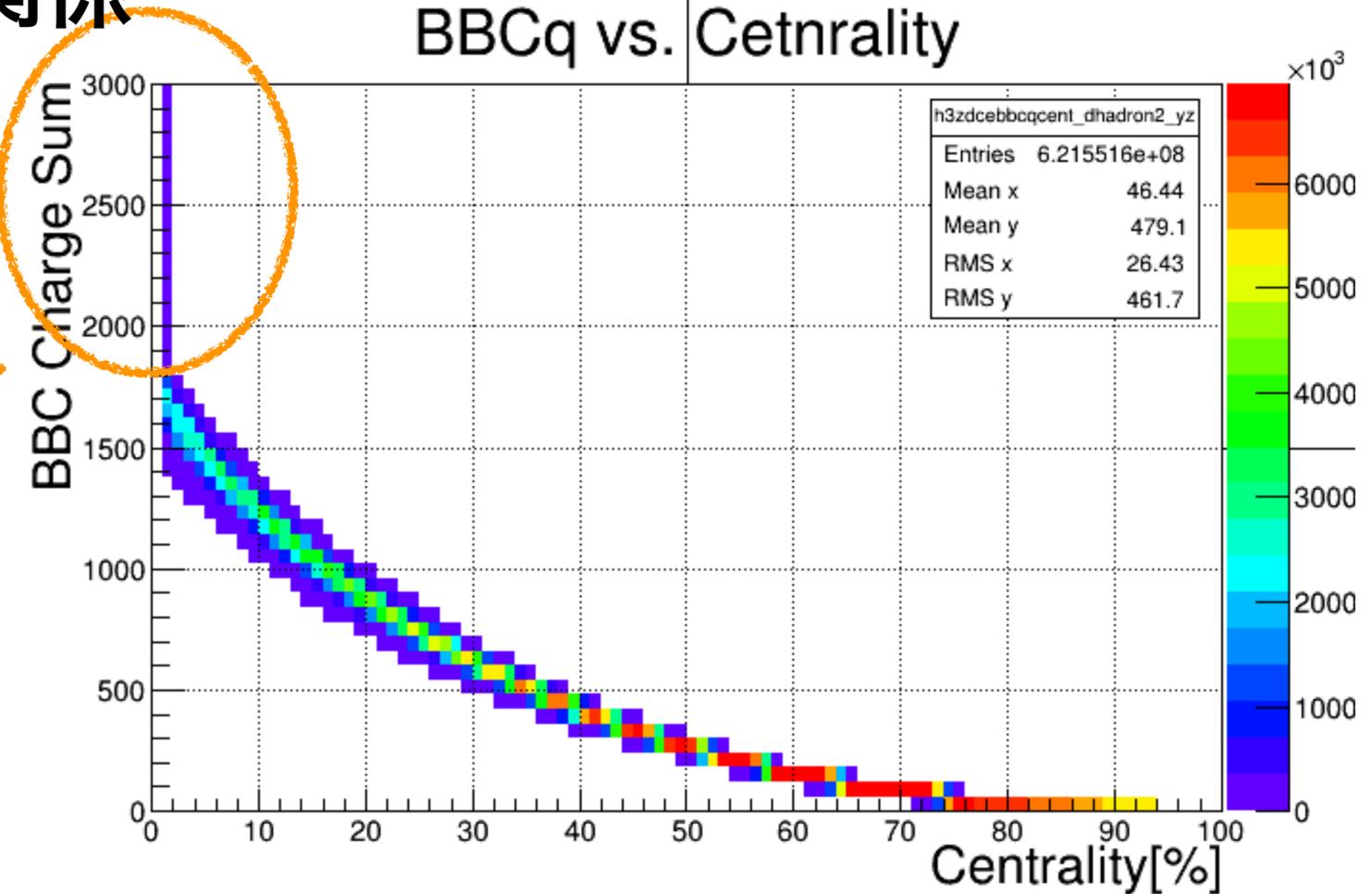
A circular network graph visualization with a grid overlay. The grid has major ticks at -60, -40, -20, 0, 20, 40, and 60 on both the horizontal and vertical axes. The graph consists of a dense network of magenta lines forming a complex, multi-lobed structure. In the center of the graph, there are several small, multi-colored nodes (blue, green, yellow, red). The text "Back Up" is centered over the graph in a large, white, sans-serif font.

Back Up

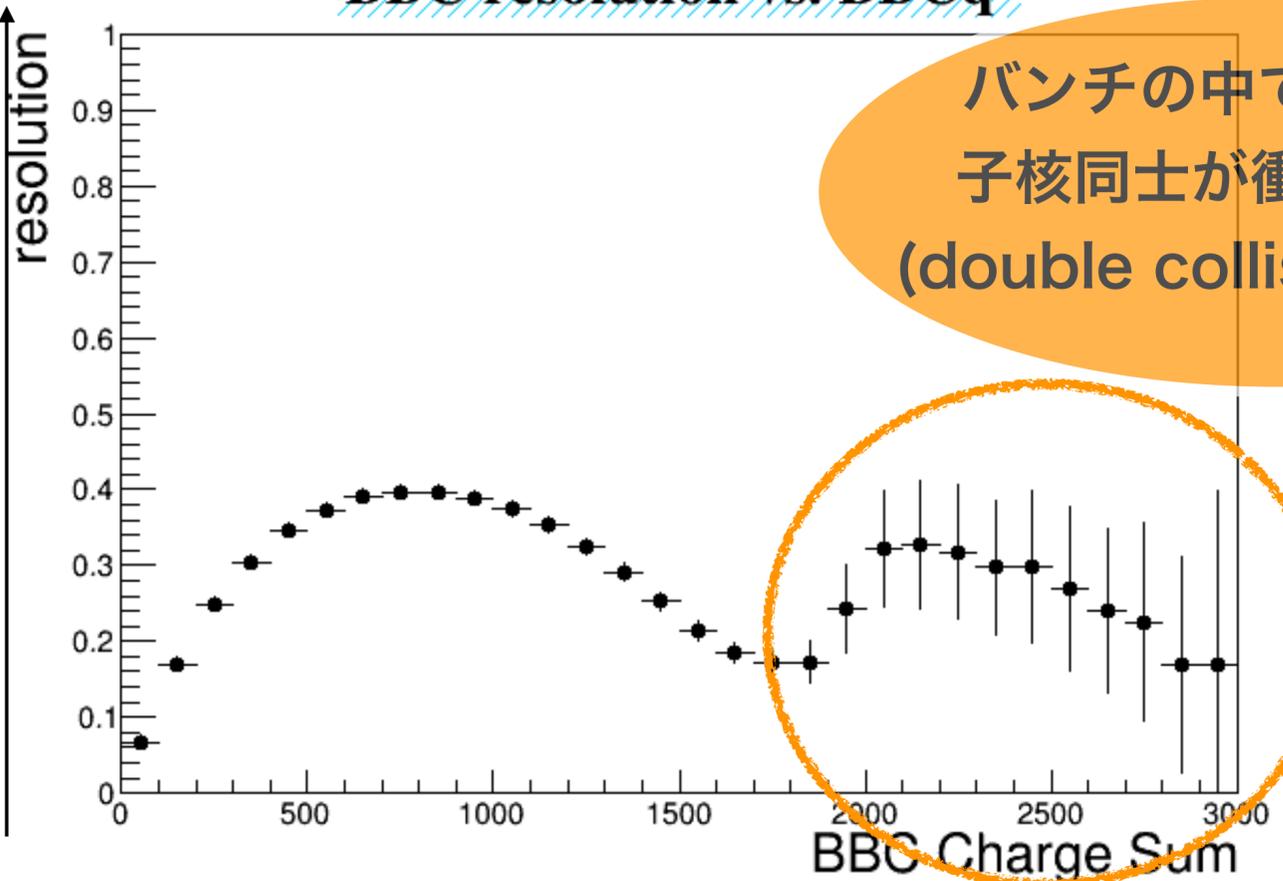
解析方法

- resolutionとdouble collisionの関係

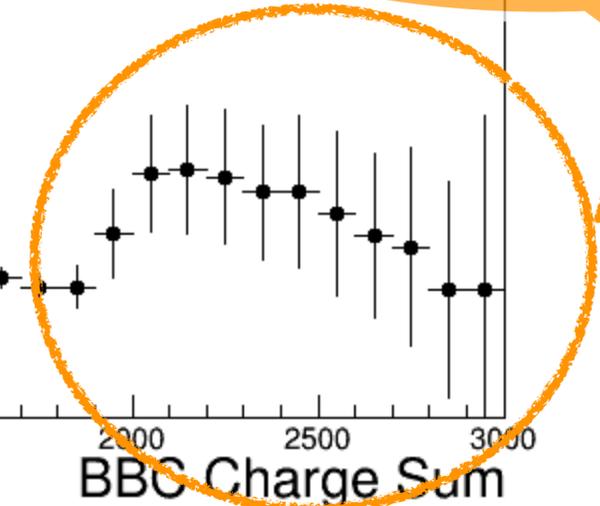
BBCq vs. Centrality



BBC resolution vs. BBCq

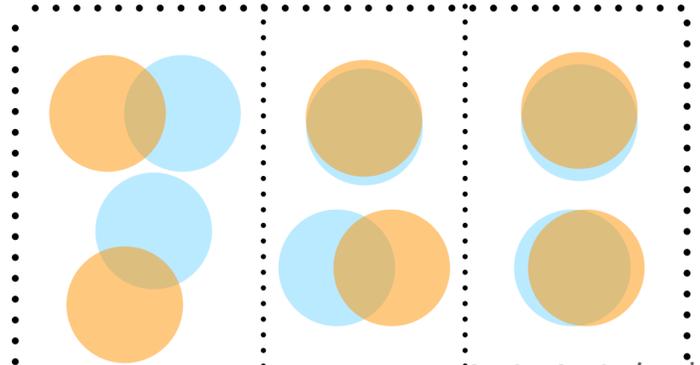


バンチの中で2回以上原子核同士が衝突している (double collision) イベント



Multiplicity

小 大



バンチの中で原子核が2回衝突しているときのイメージ

Resolution

悪い 良い 悪い

BBCqが1800以上のイベントはMPIではなく、double collisionによってMultiplicityが大きくなっている
 → BBCqが1800以下のイベントについて v_2 とMultiplicityの相関を調べる

解析方法

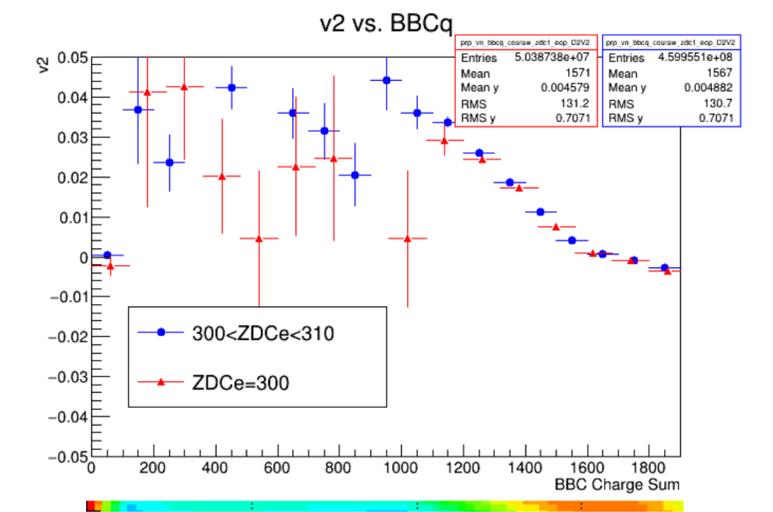
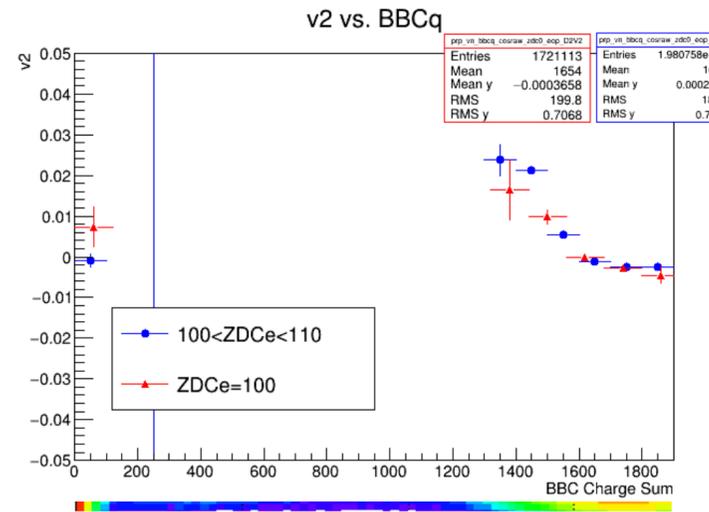
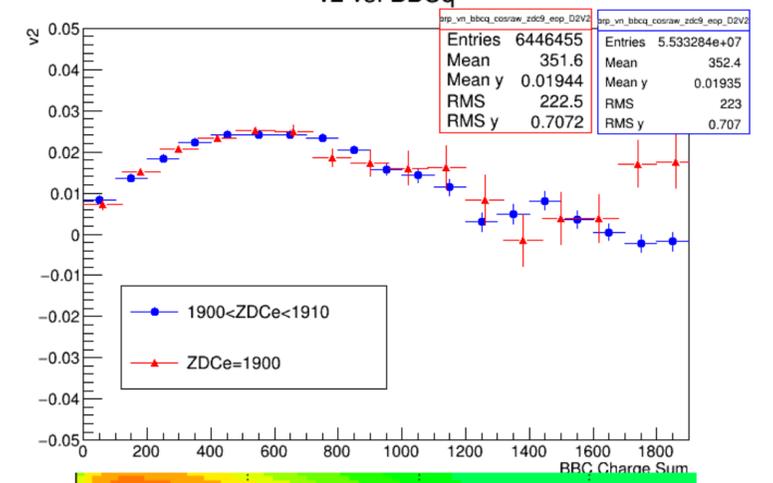
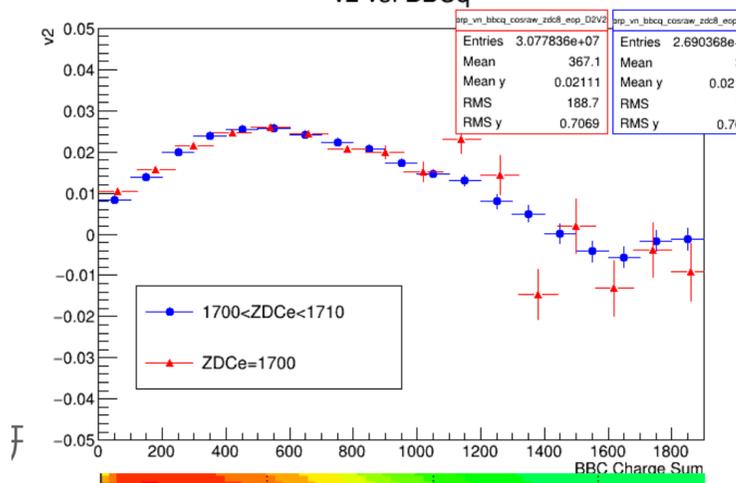
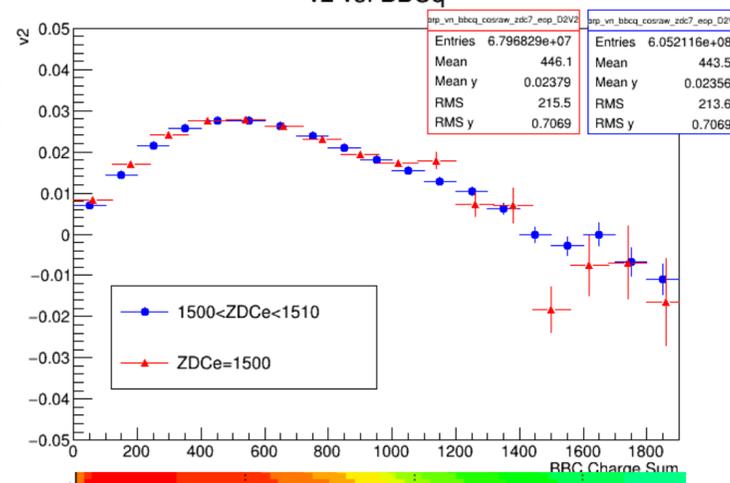
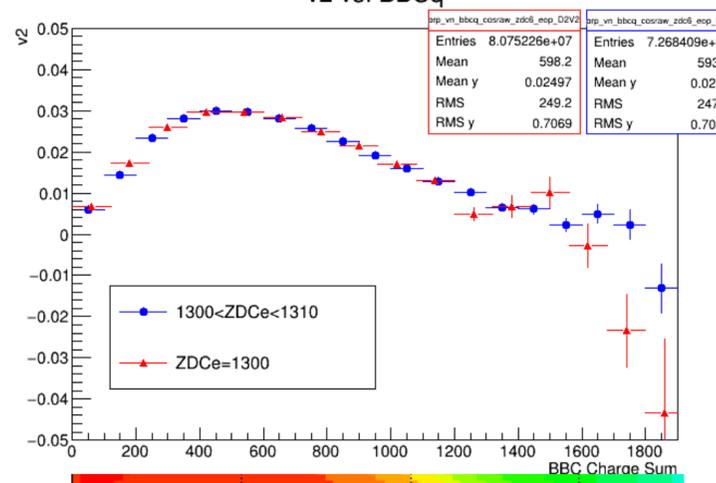
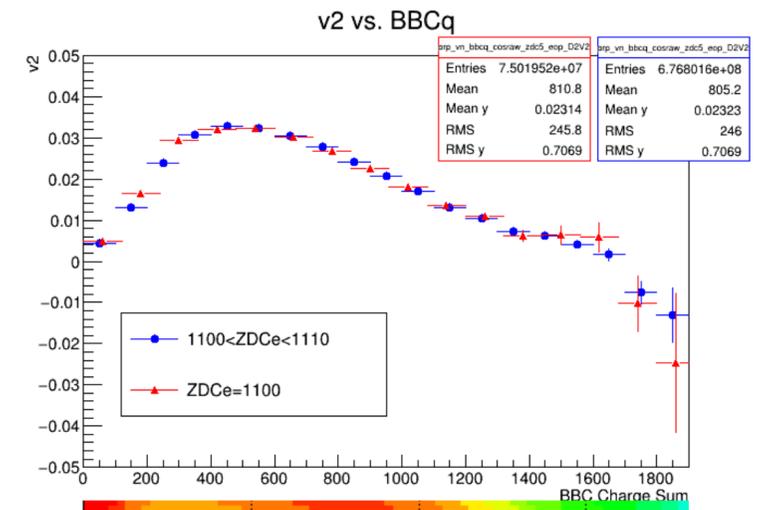
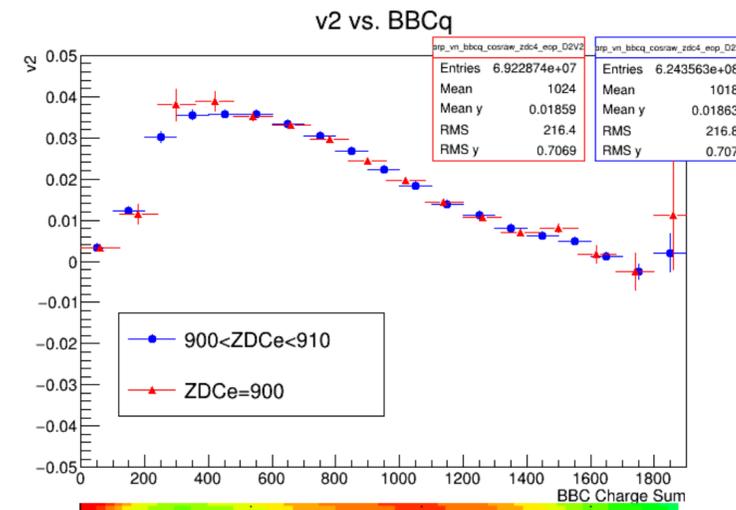
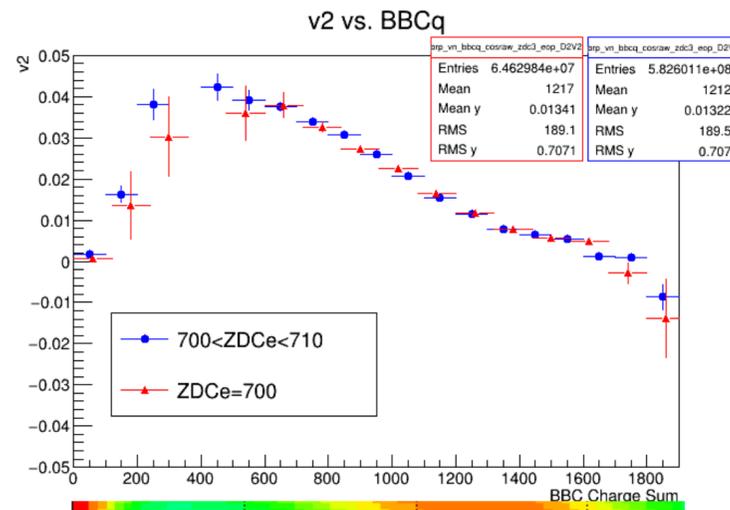
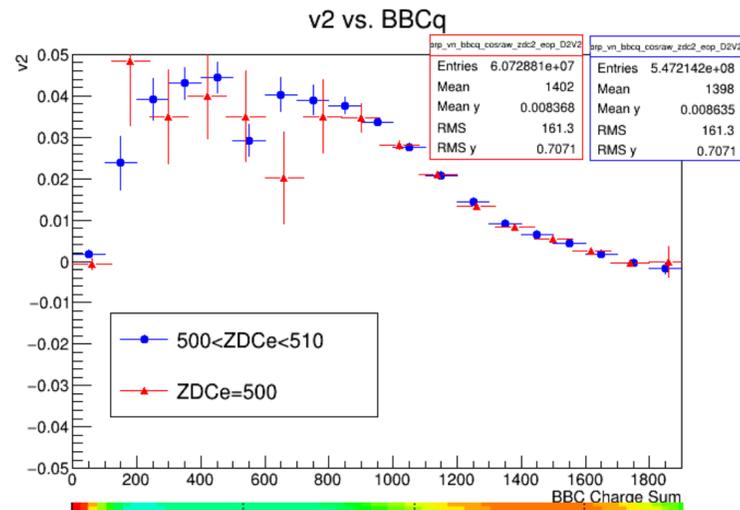
v_2 の補正なし

• v_2 vs. BBCq

ZDCeの幅が違う v_2 vs. BBCqを比べた。

→ 傾向は変わらず、統計が多い方が v_2 の値が安定する。

→ ZDCeの幅を10にして解析を進める

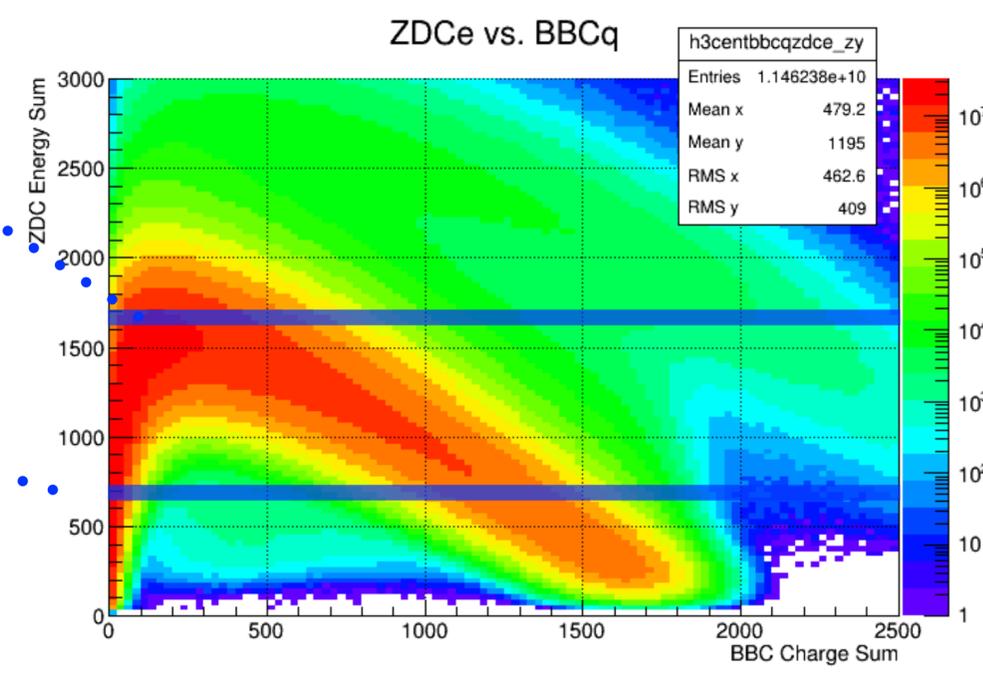
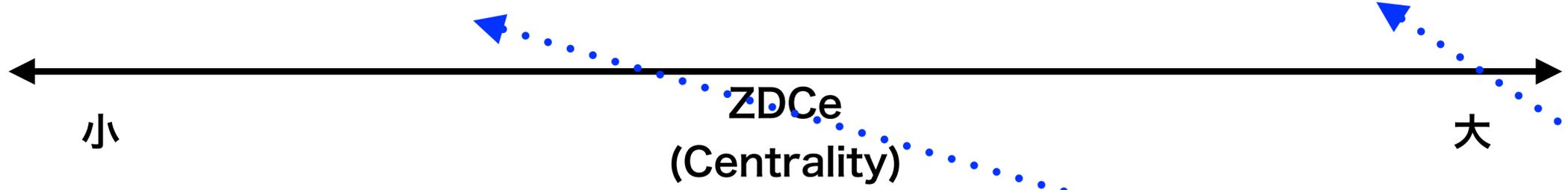
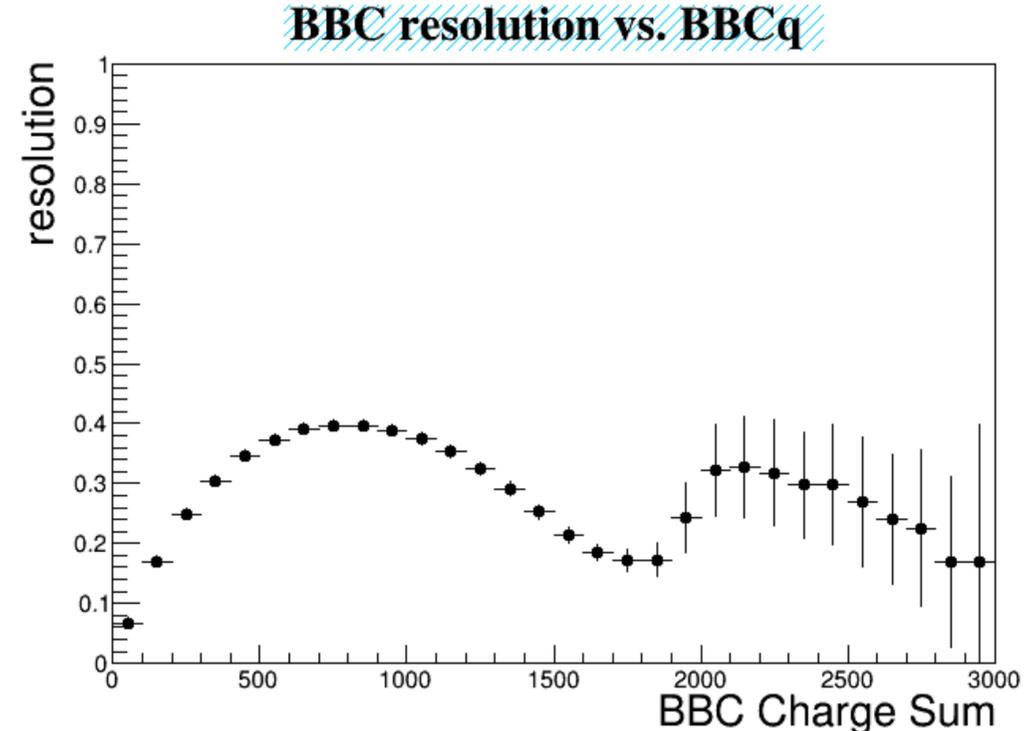
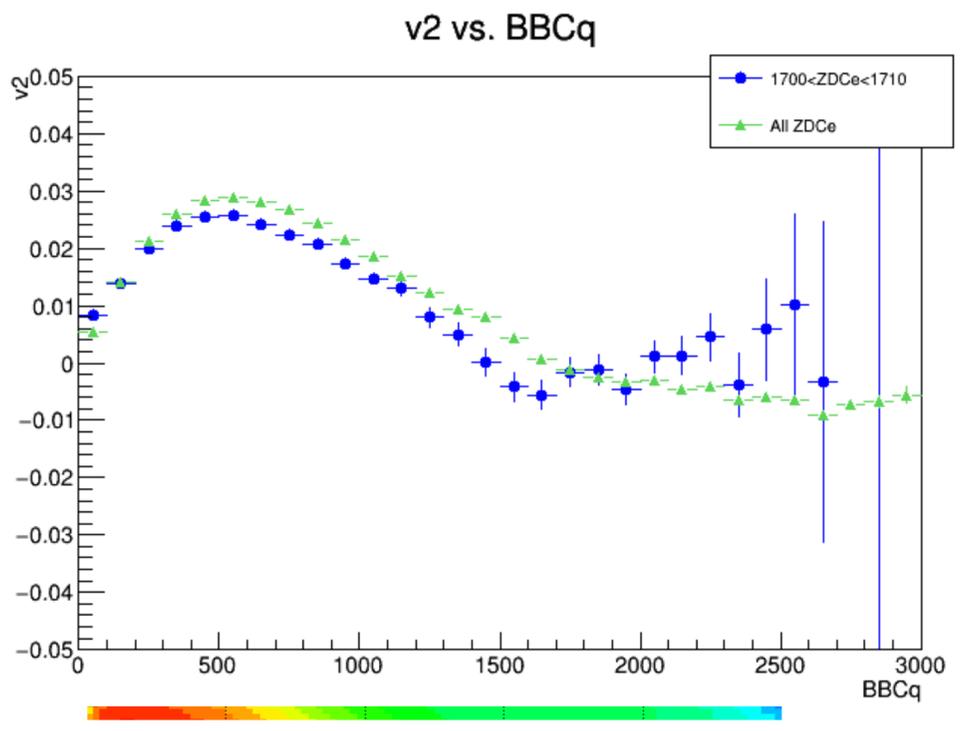
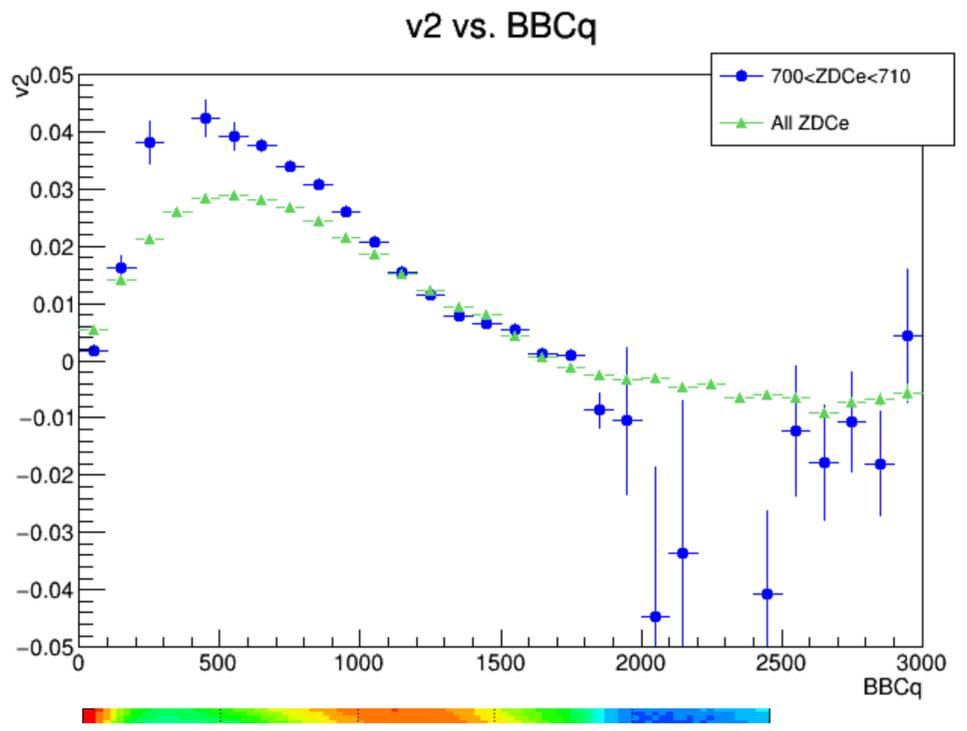


解析結果

• v_2 vs. BBCq

補正していない v_2

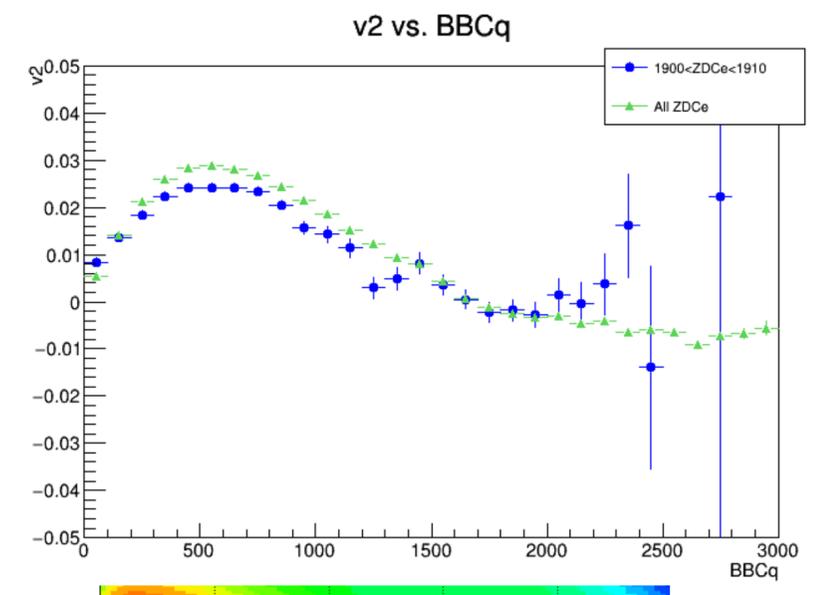
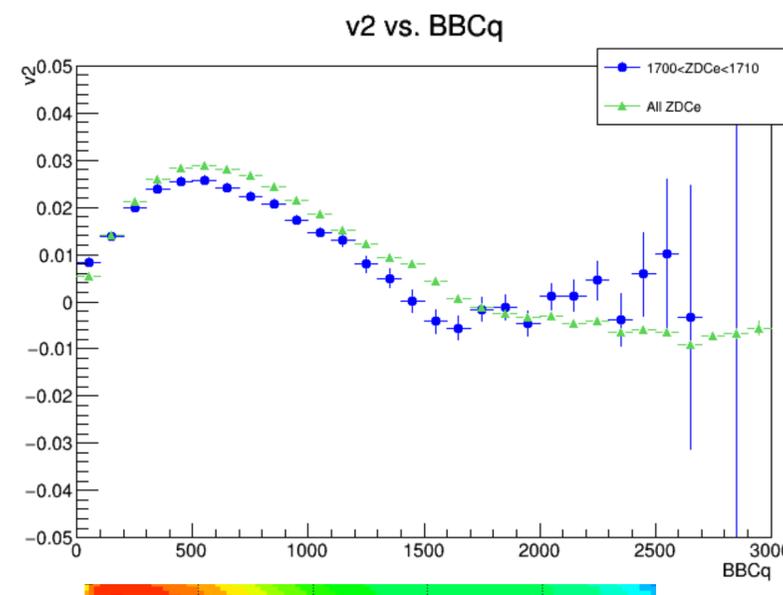
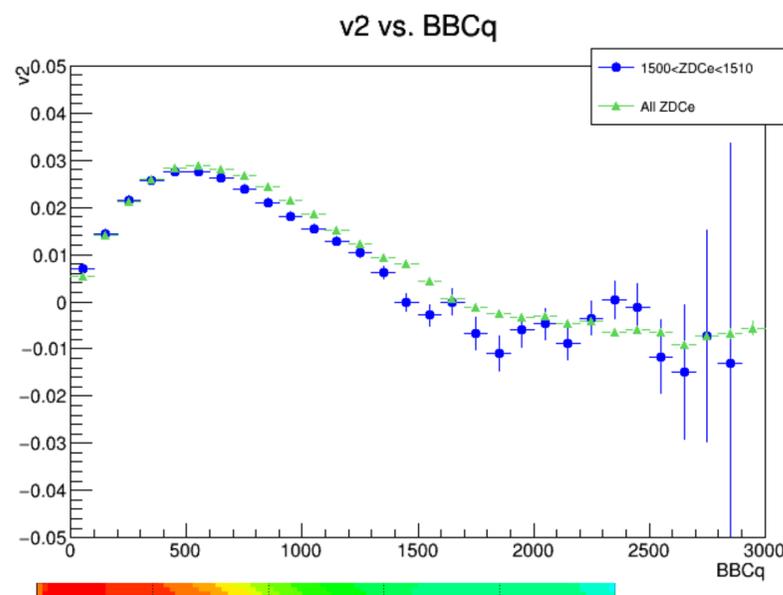
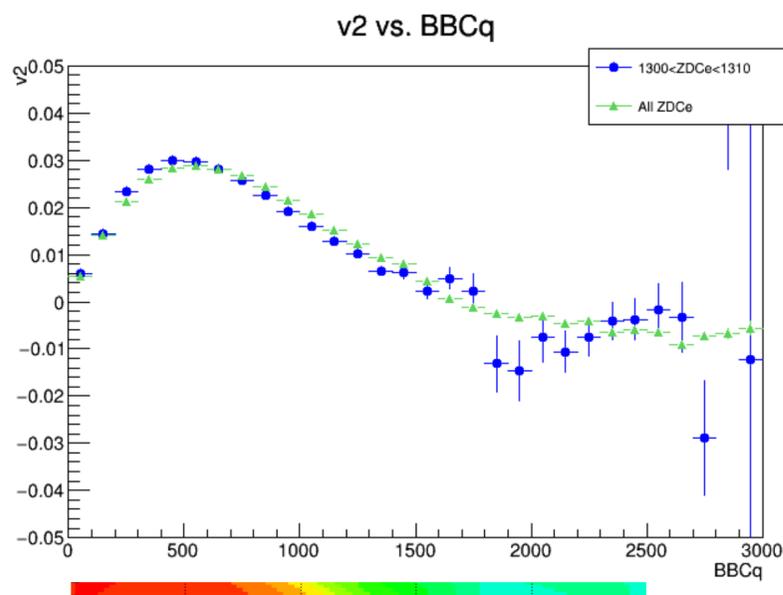
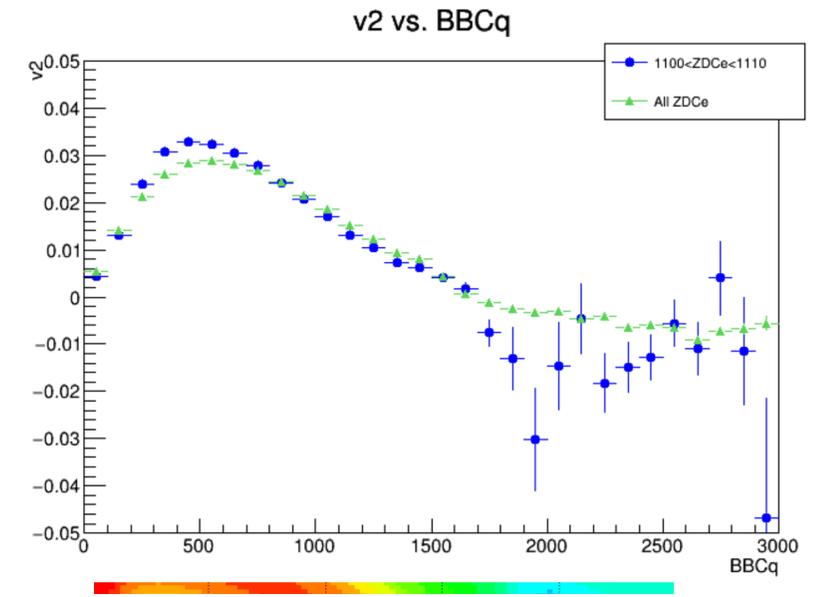
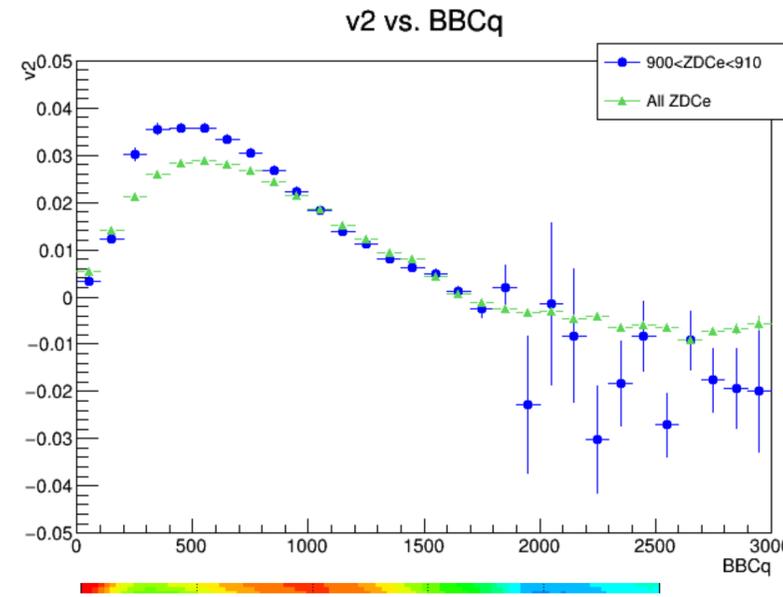
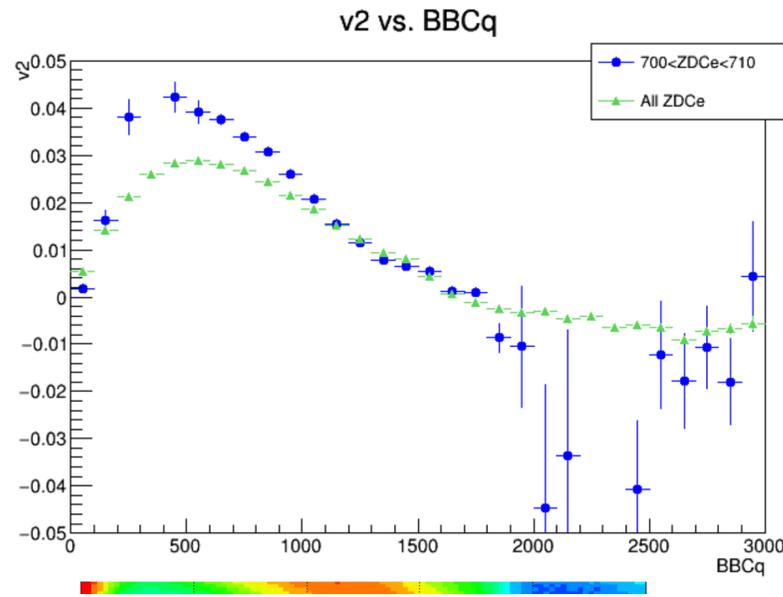
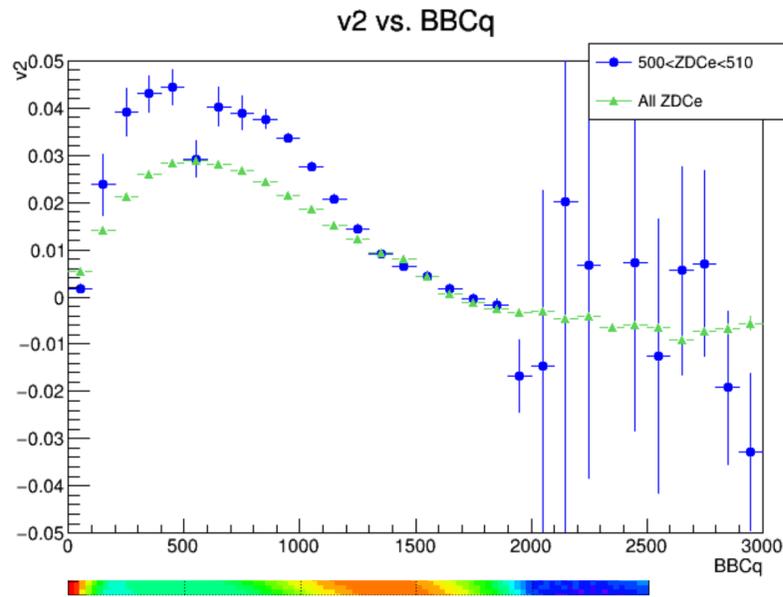
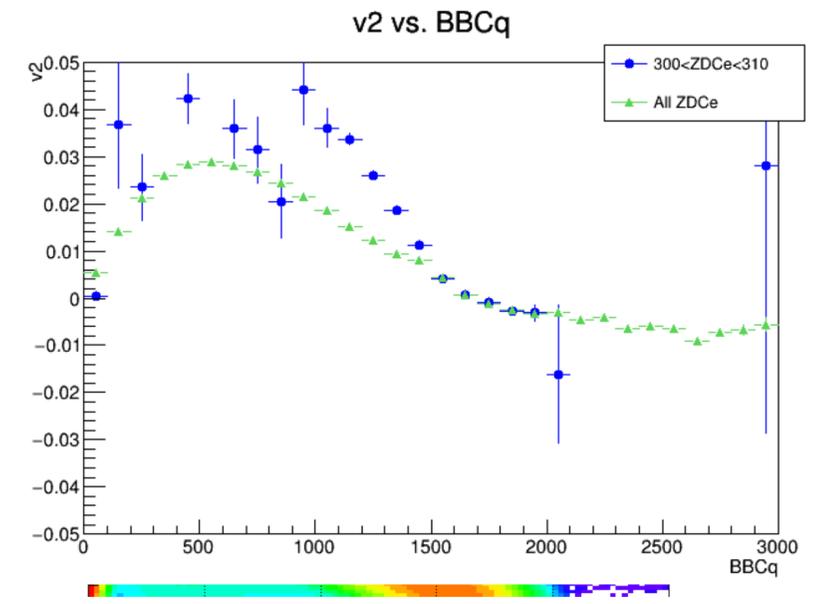
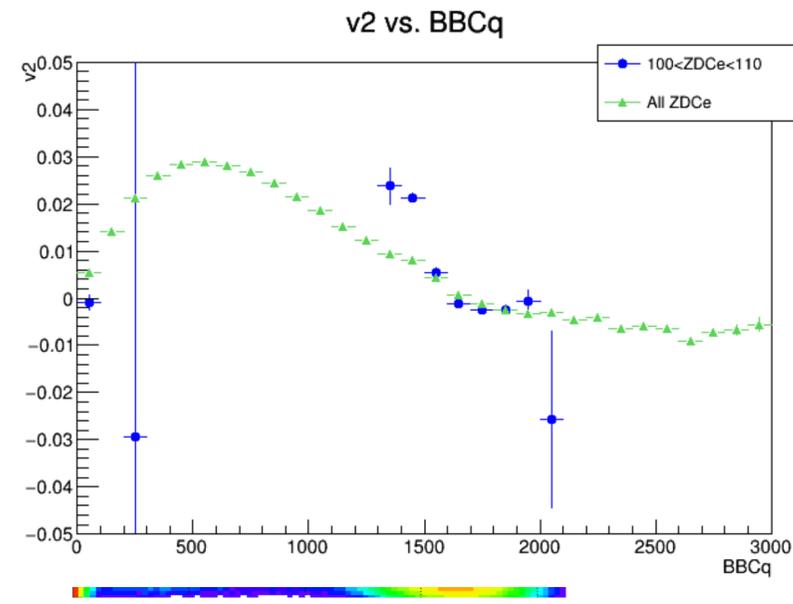
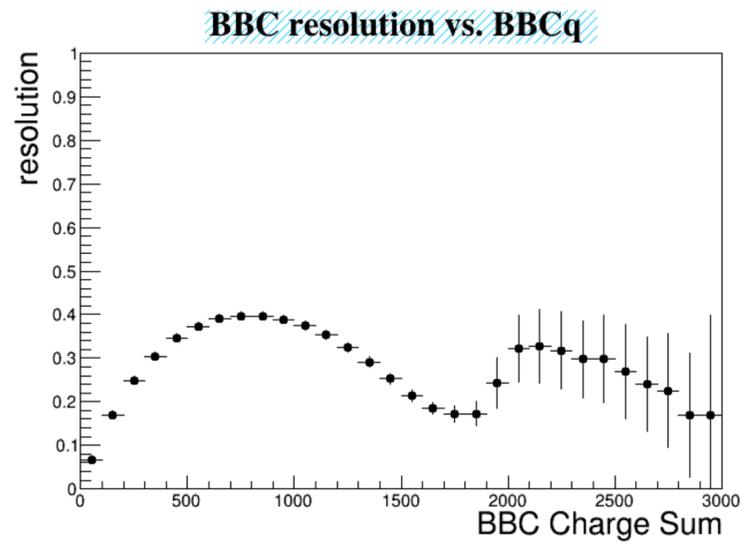
左の v_2 を右の resolution で割って補正する



解析結果

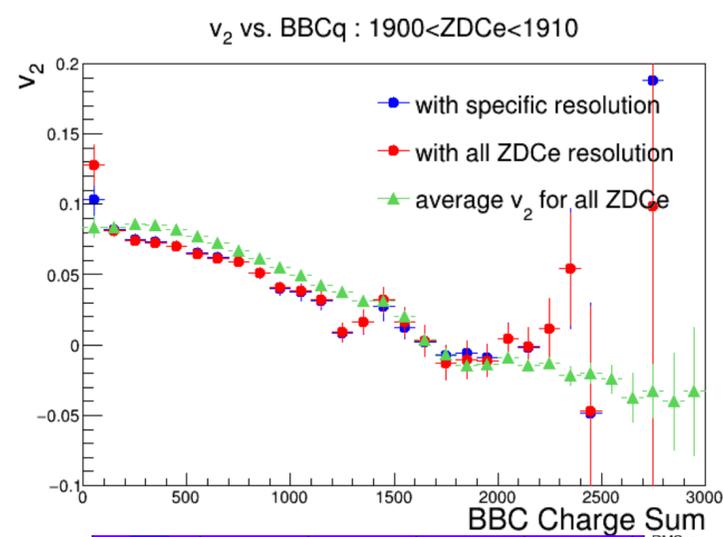
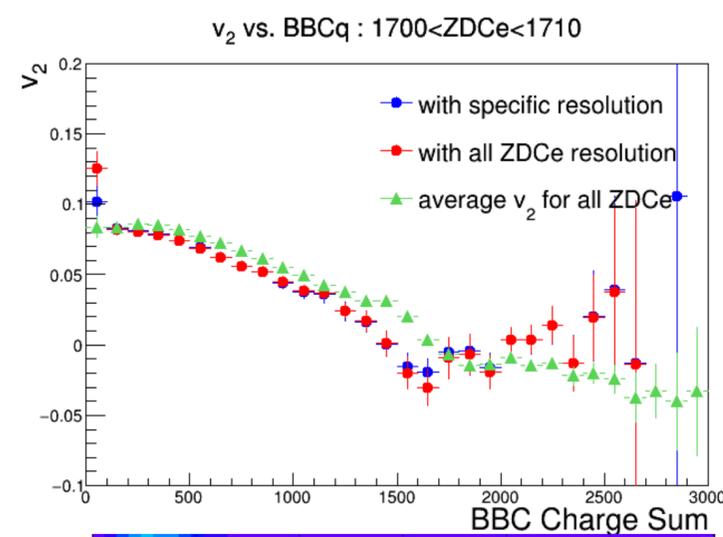
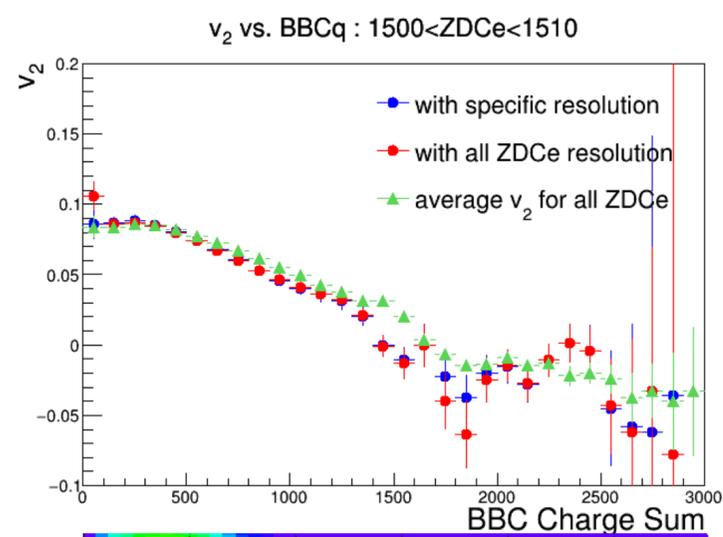
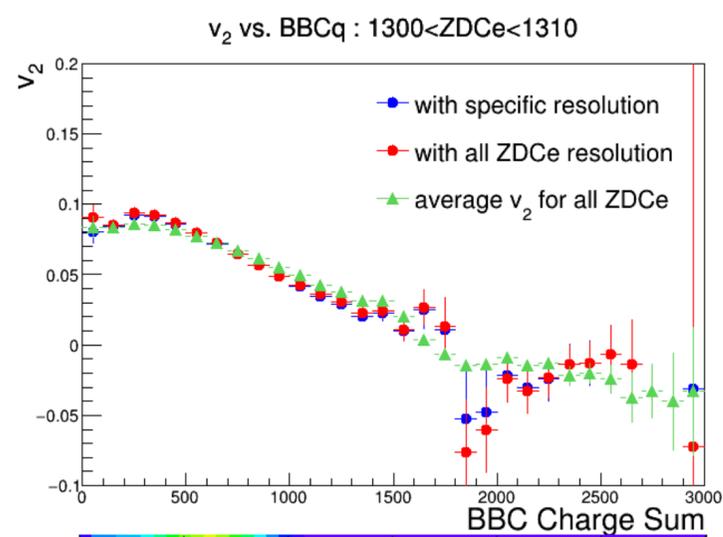
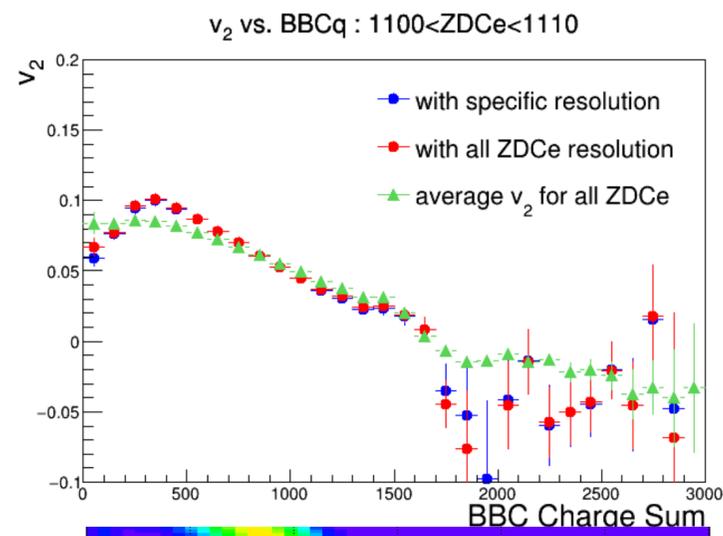
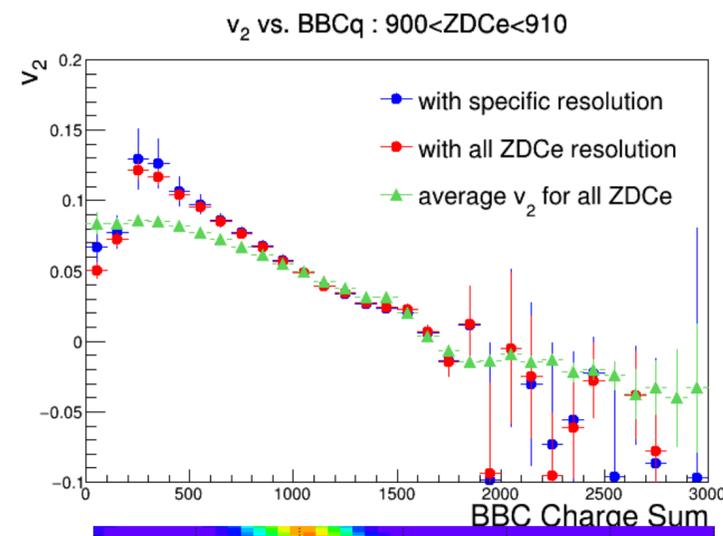
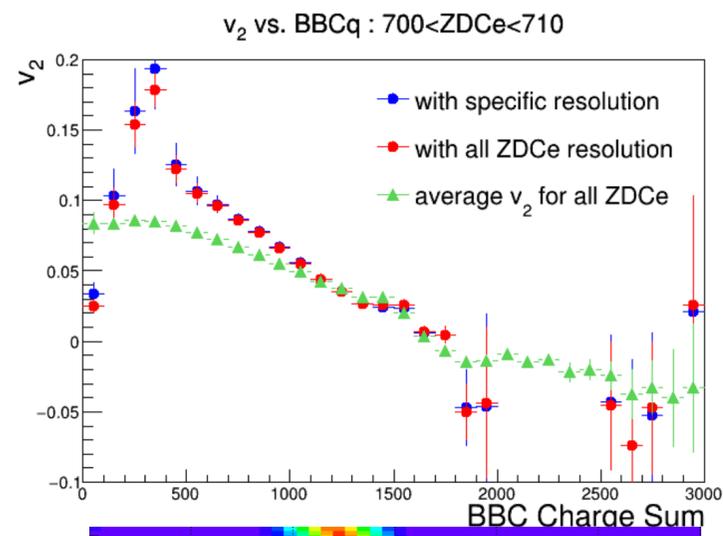
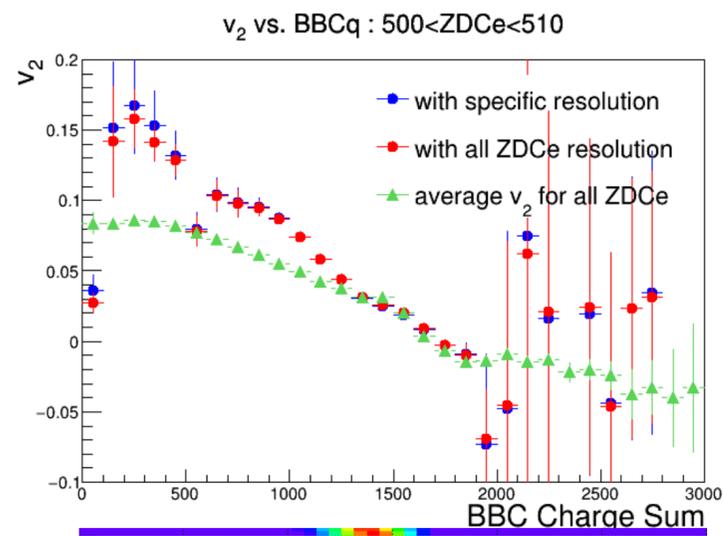
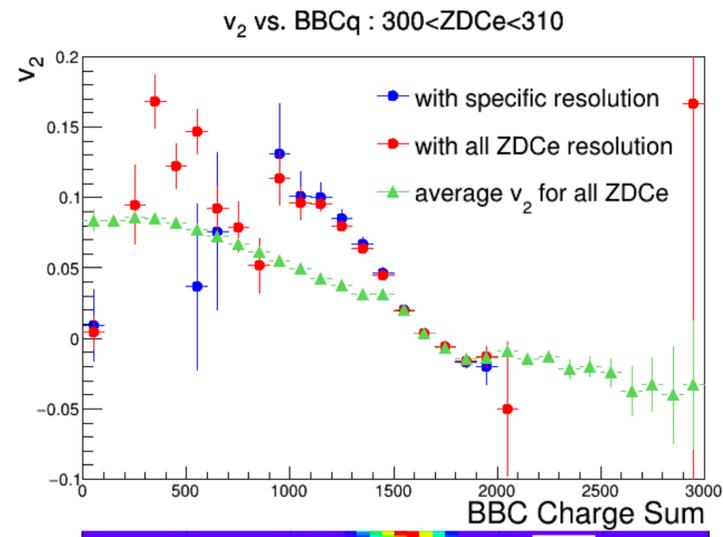
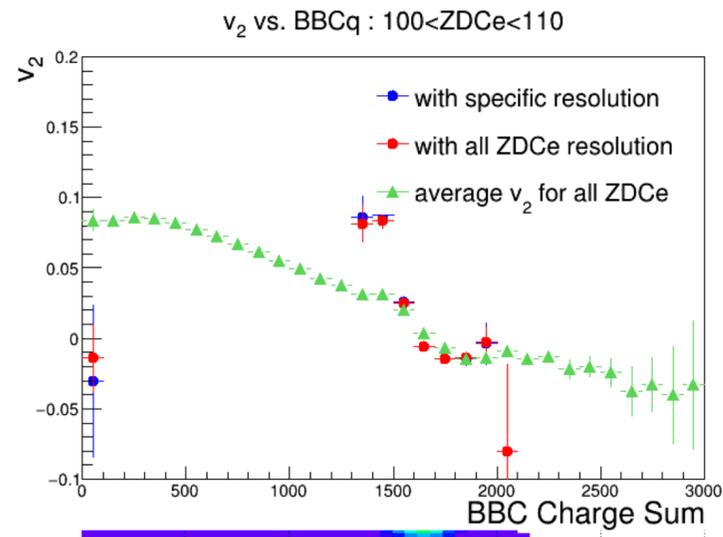
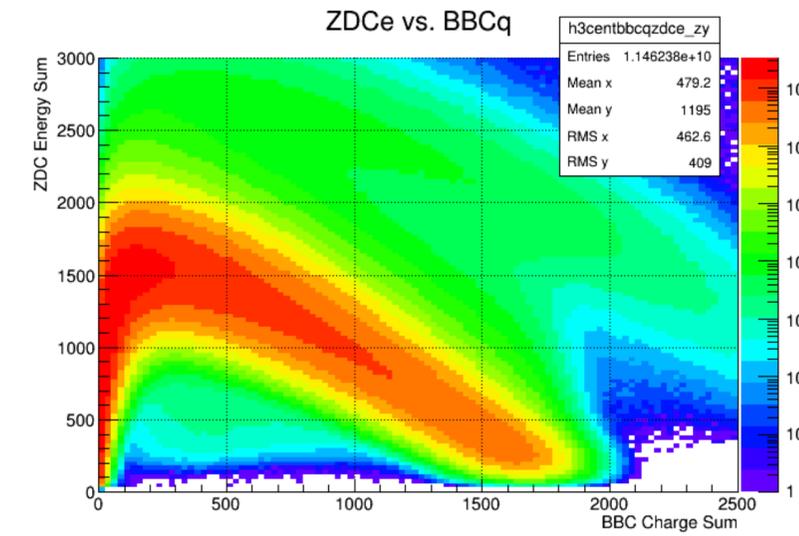
- v_2 vs. BBCq**

補正していない v_2



v_2 vs. BBCq

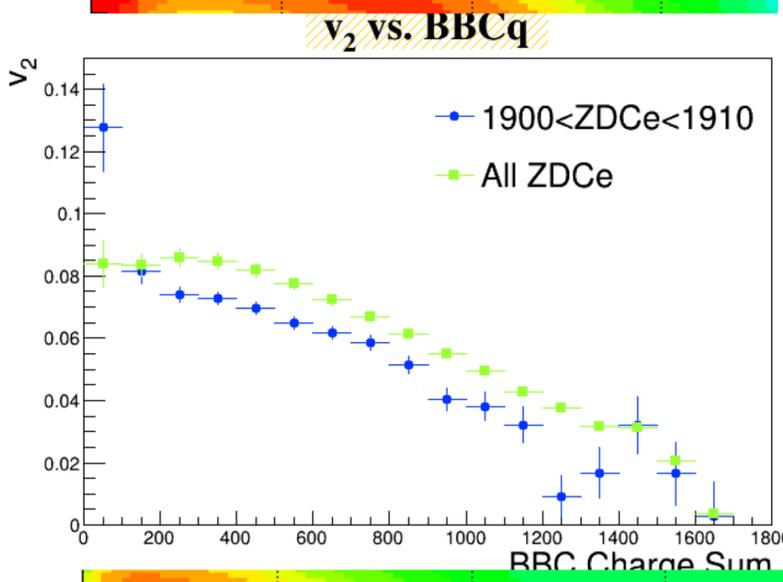
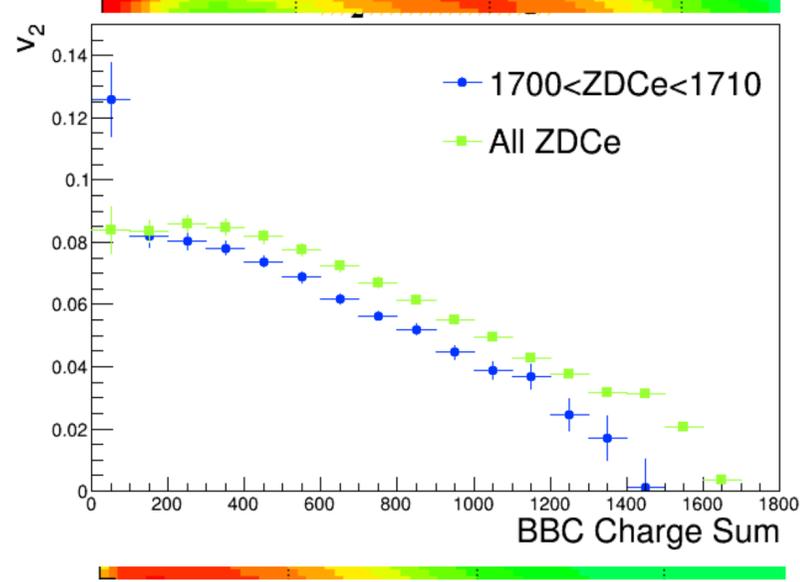
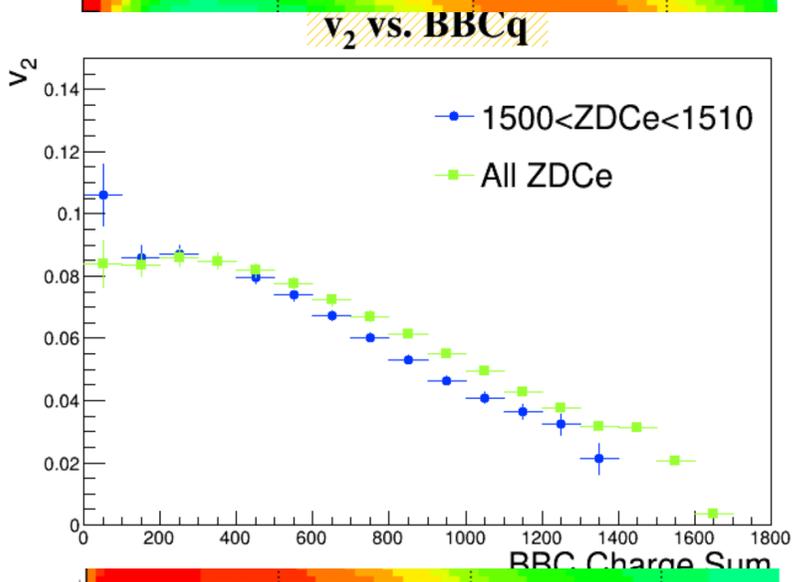
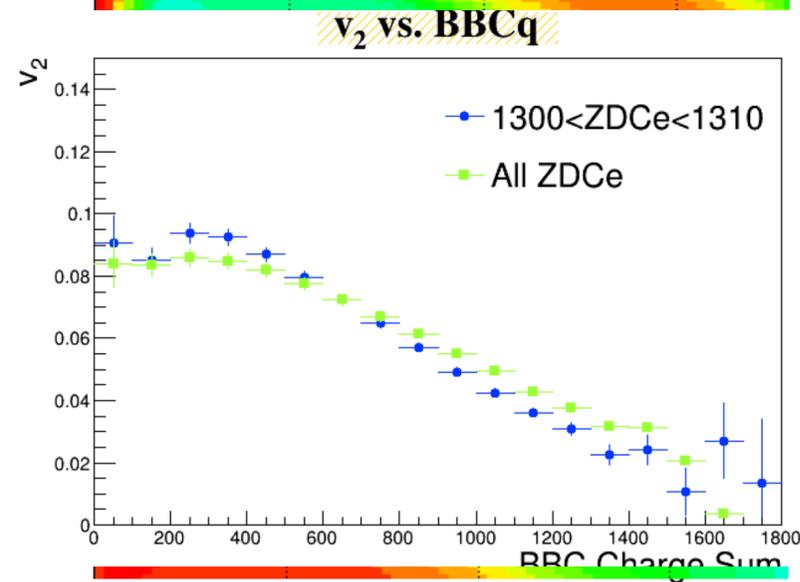
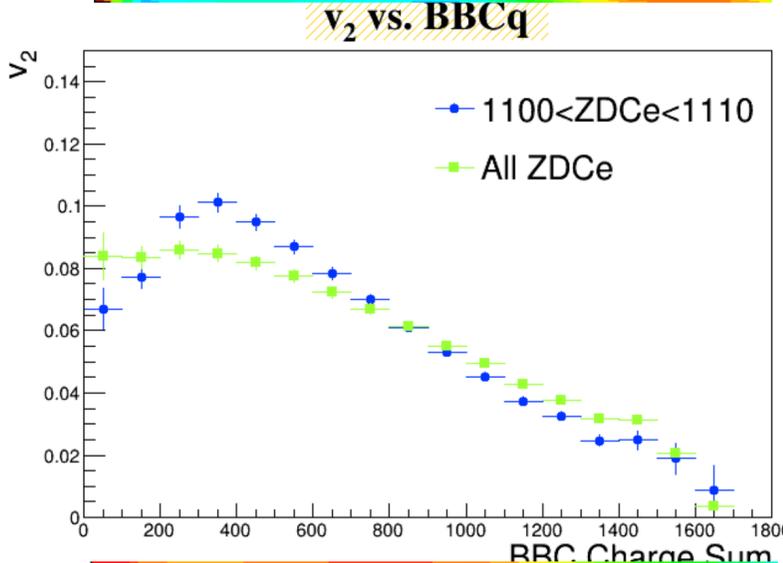
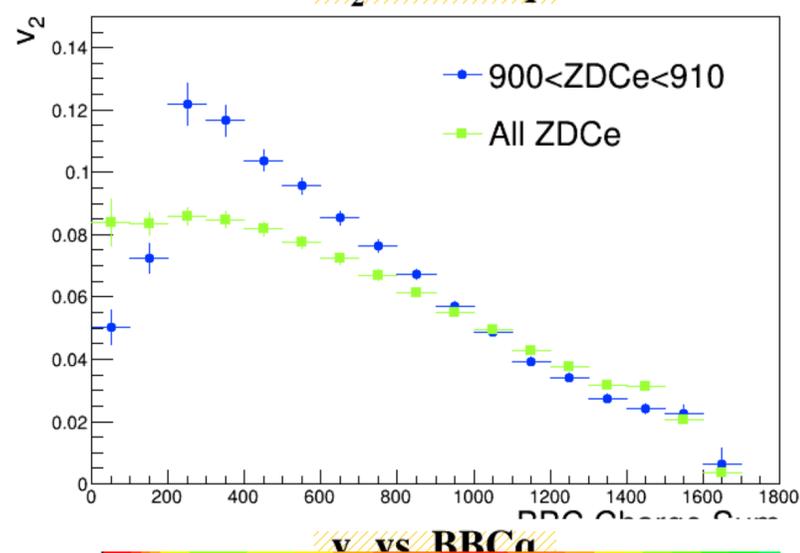
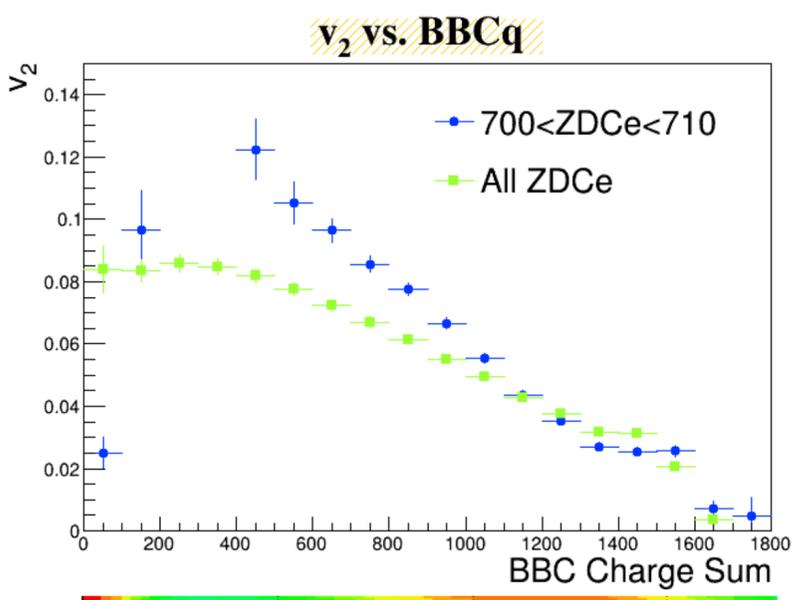
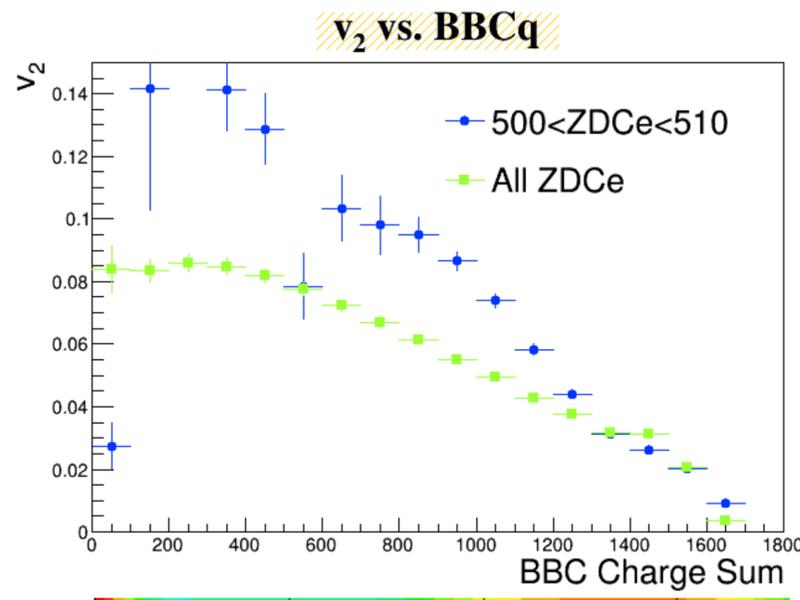
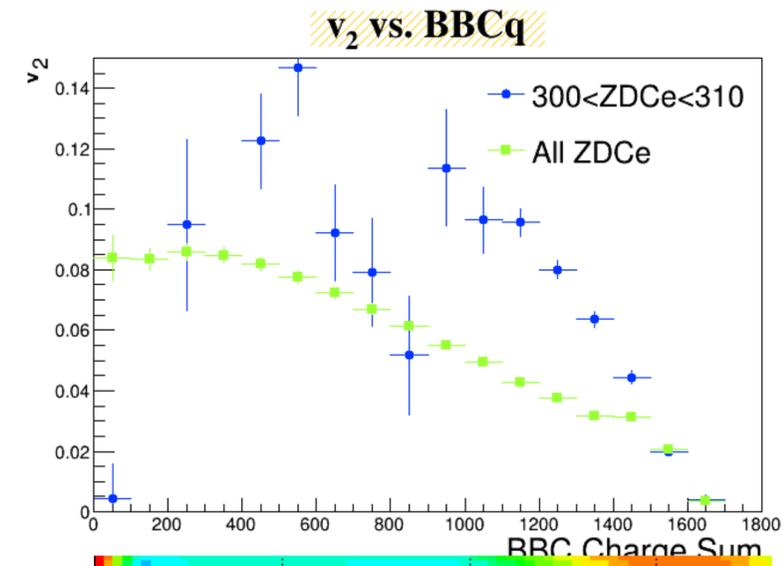
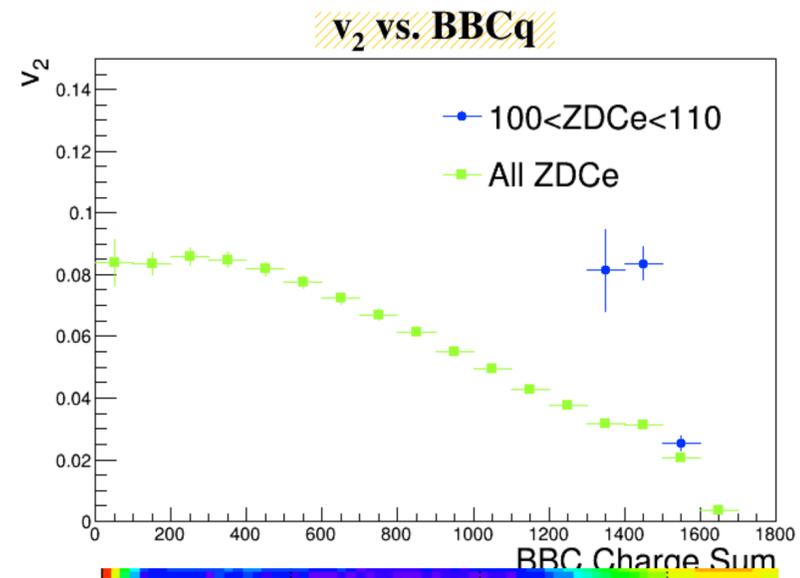
3sub methodで求めたresolutionで補正した v_2



解析結果

• v_2 vs. BBCq

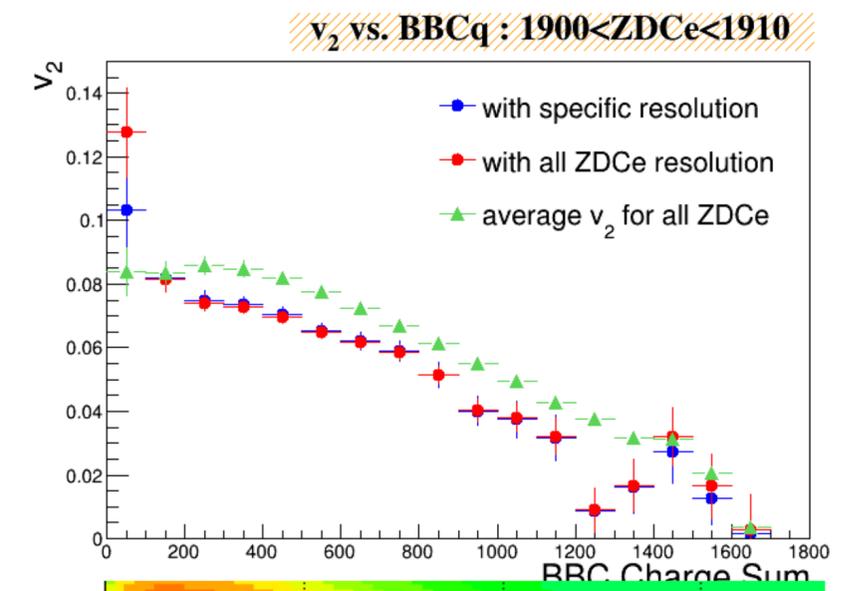
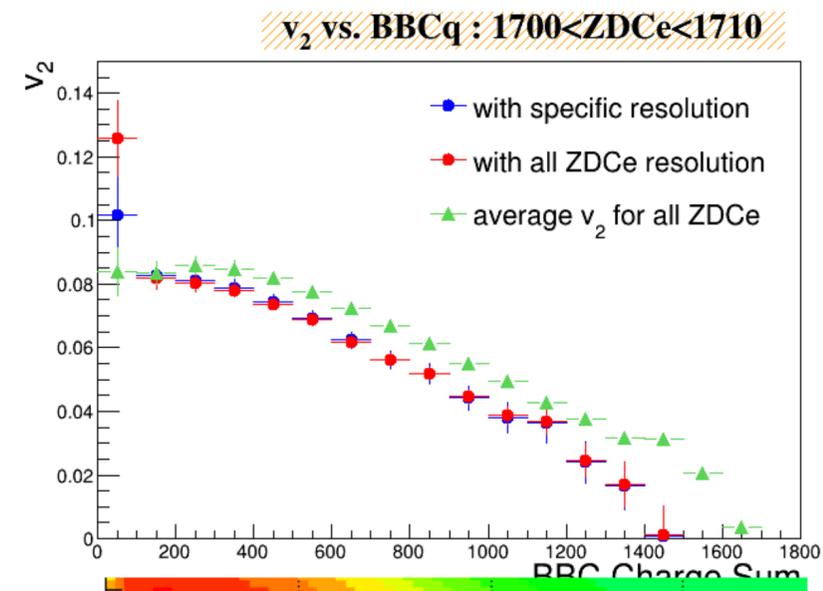
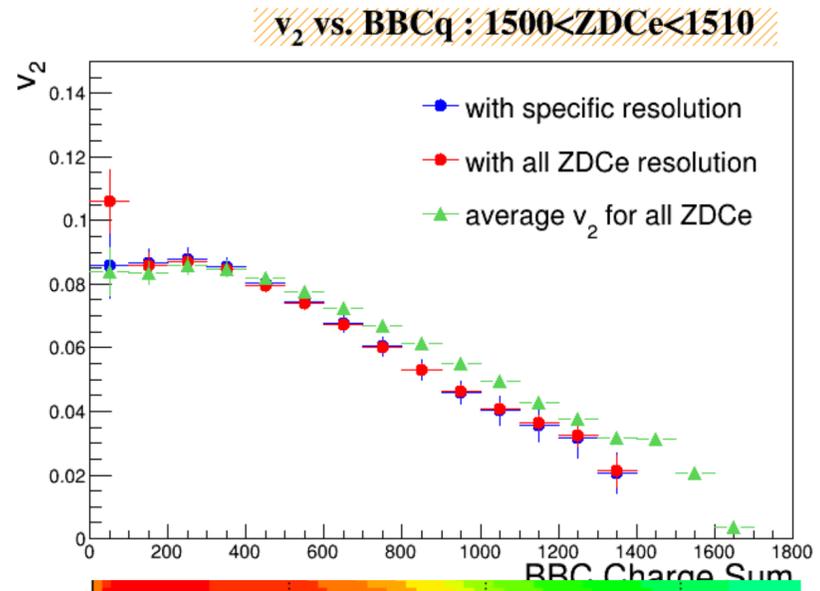
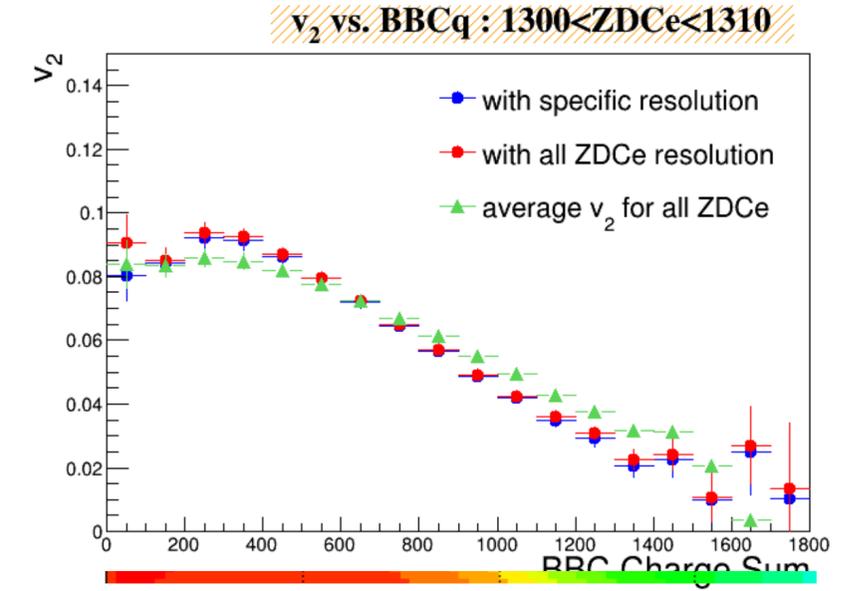
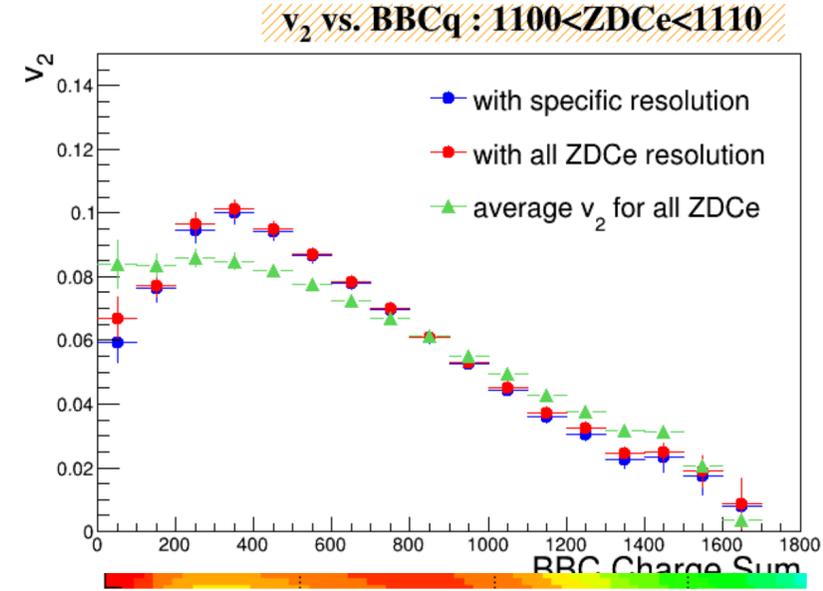
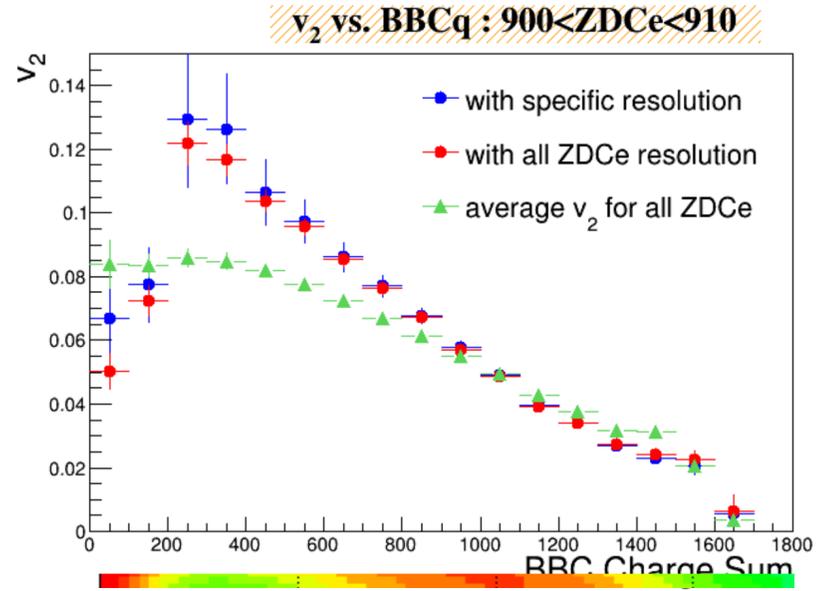
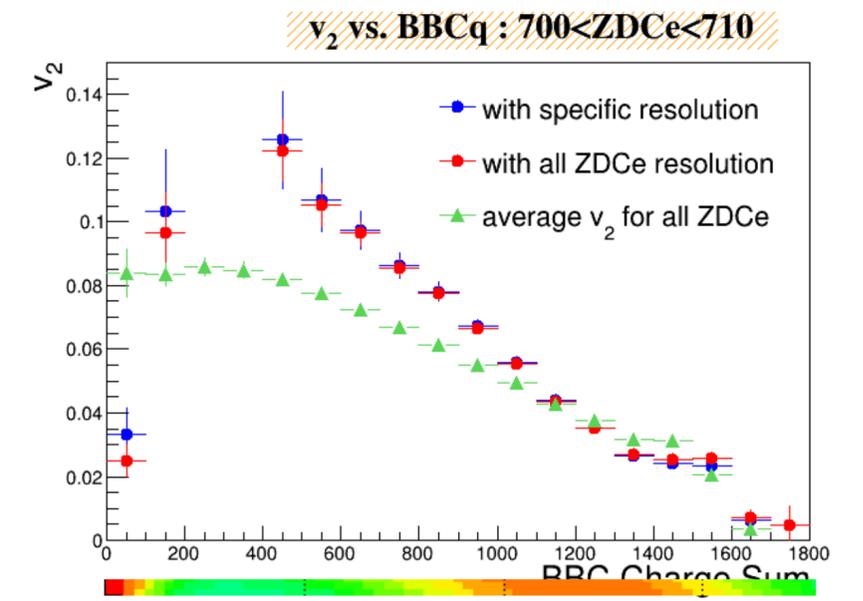
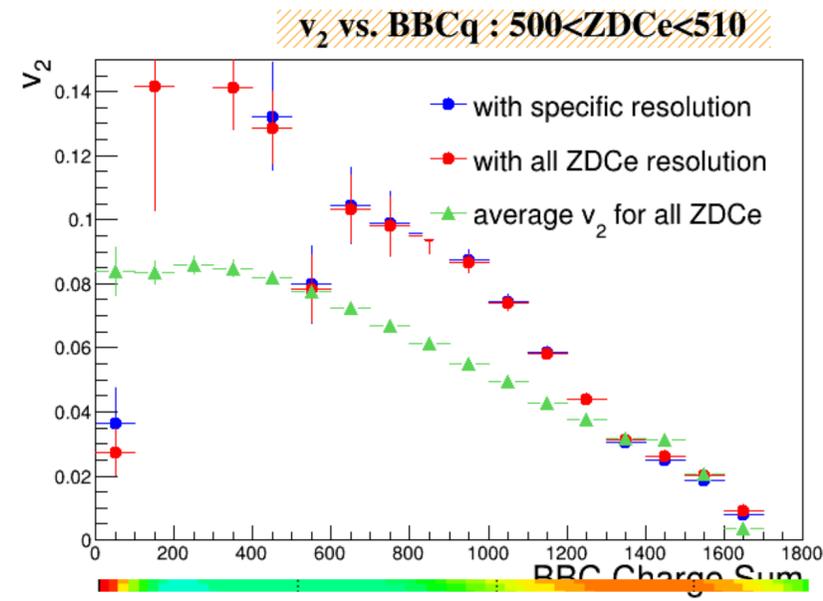
- : ZDCeで区切って求めた v_2
- : ZDCeを区切らずに求めた v_2



解析結果

• v_2 vs. BBCq

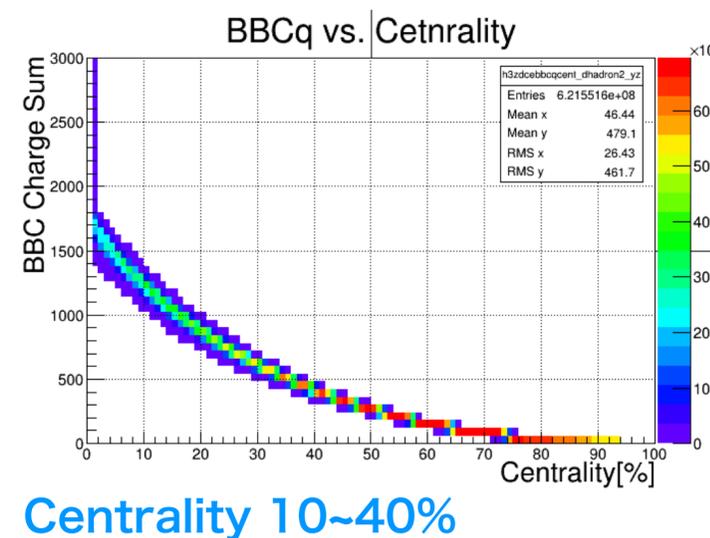
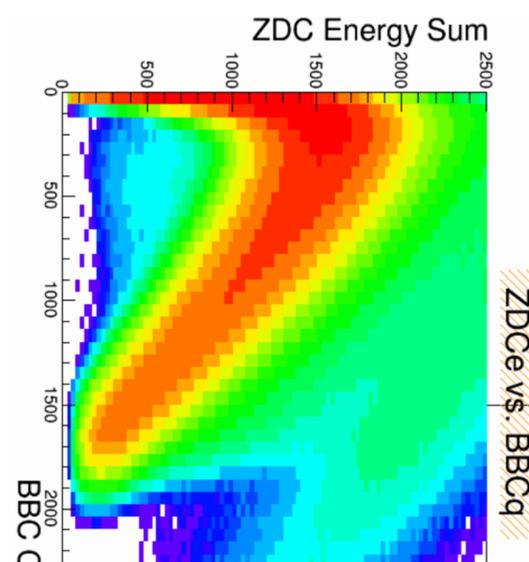
- ZDCeで区切った補正係数で補正した v_2
- ZDCeで区切っていない補正係数で補正した v_2



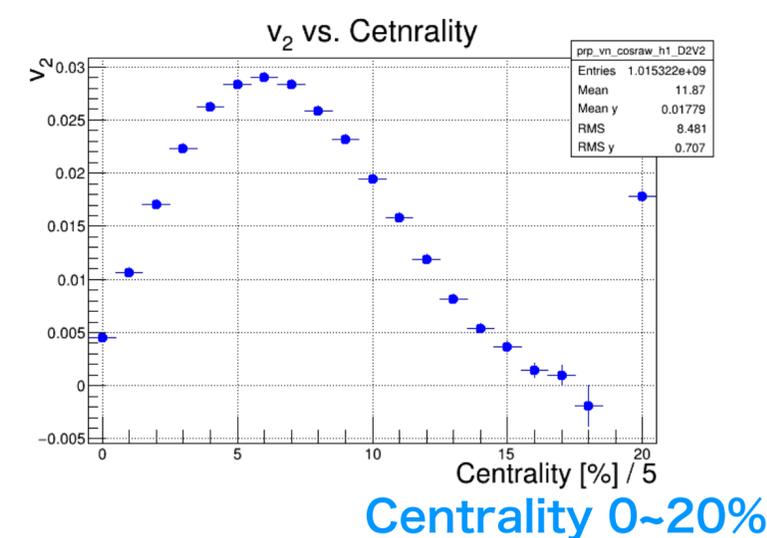
解析結果

- v_2 vs. ZDCe**

Centrality 30%~

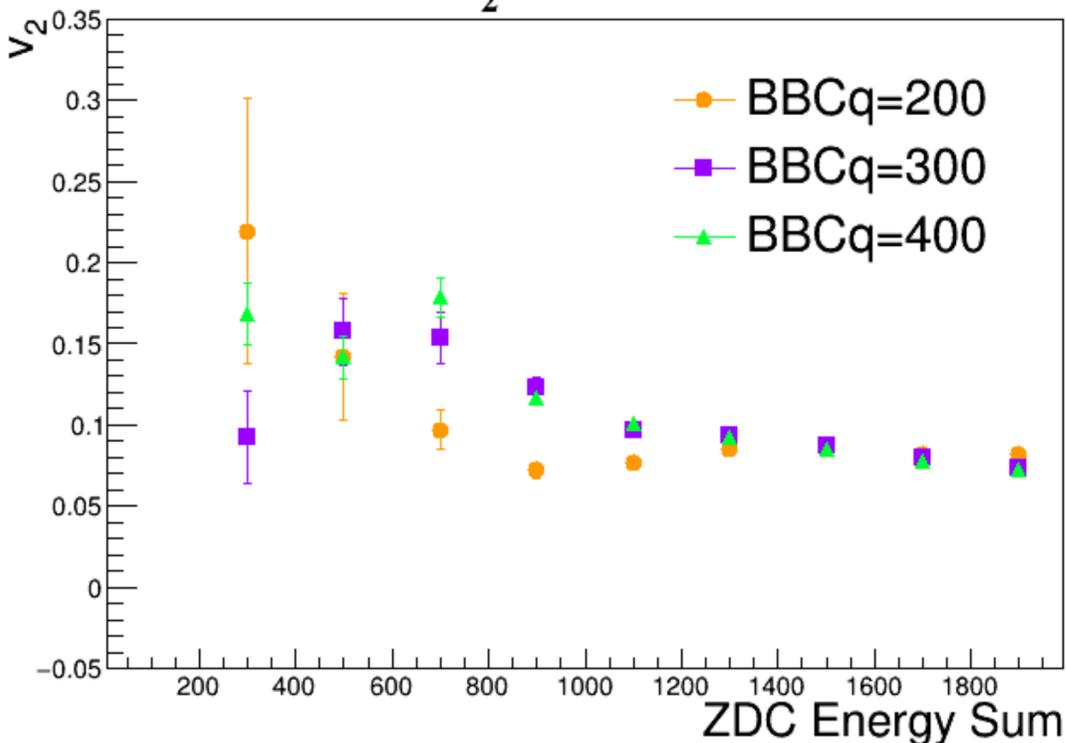


Centrality 10~40%

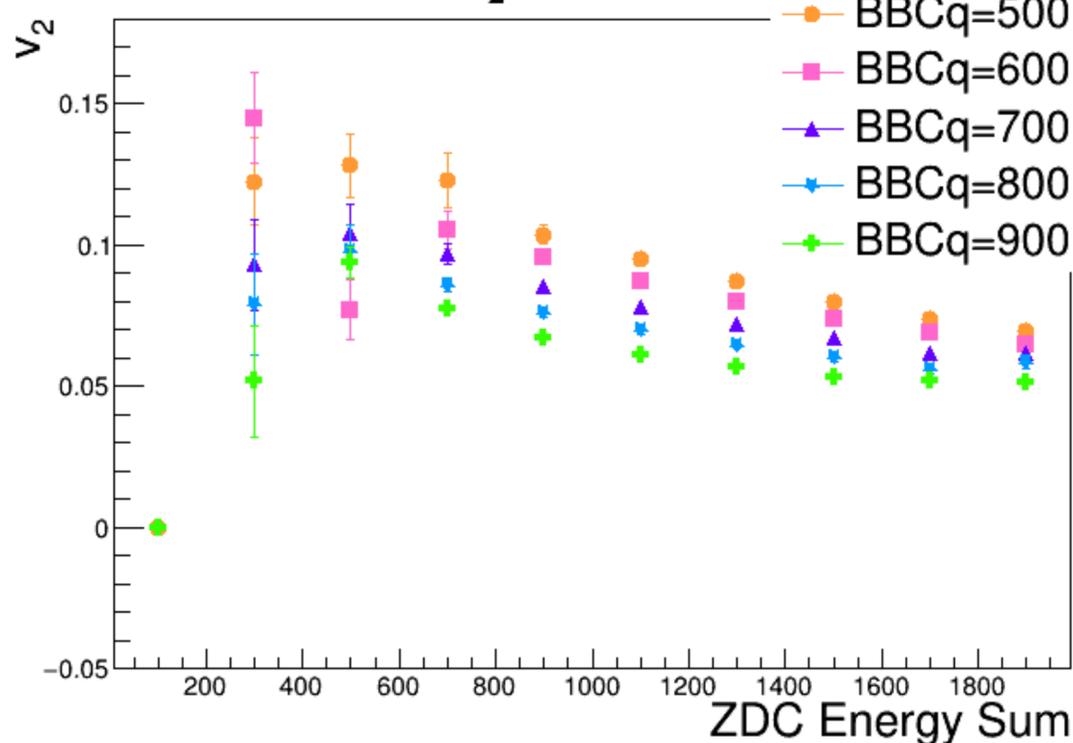


Centrality 0~20%

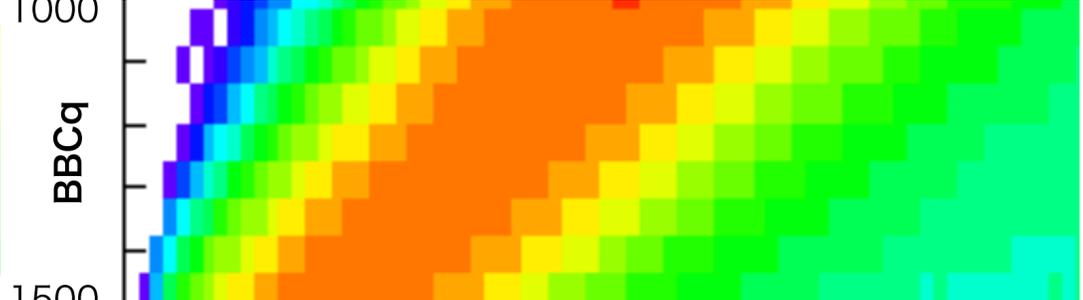
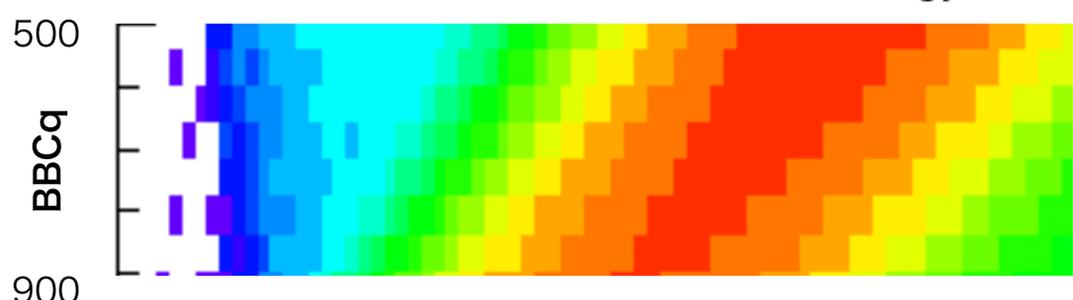
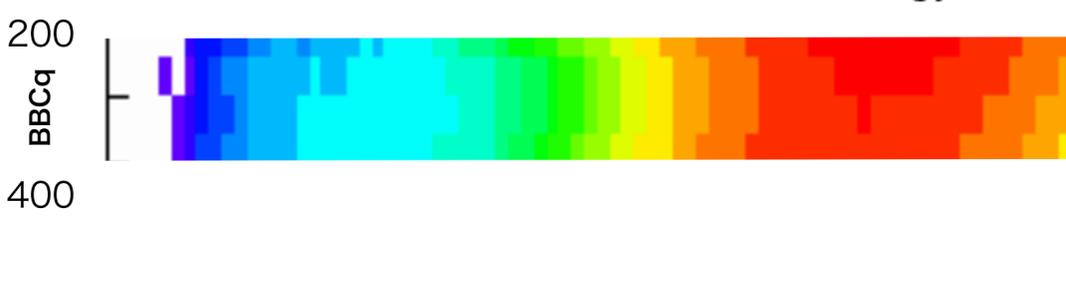
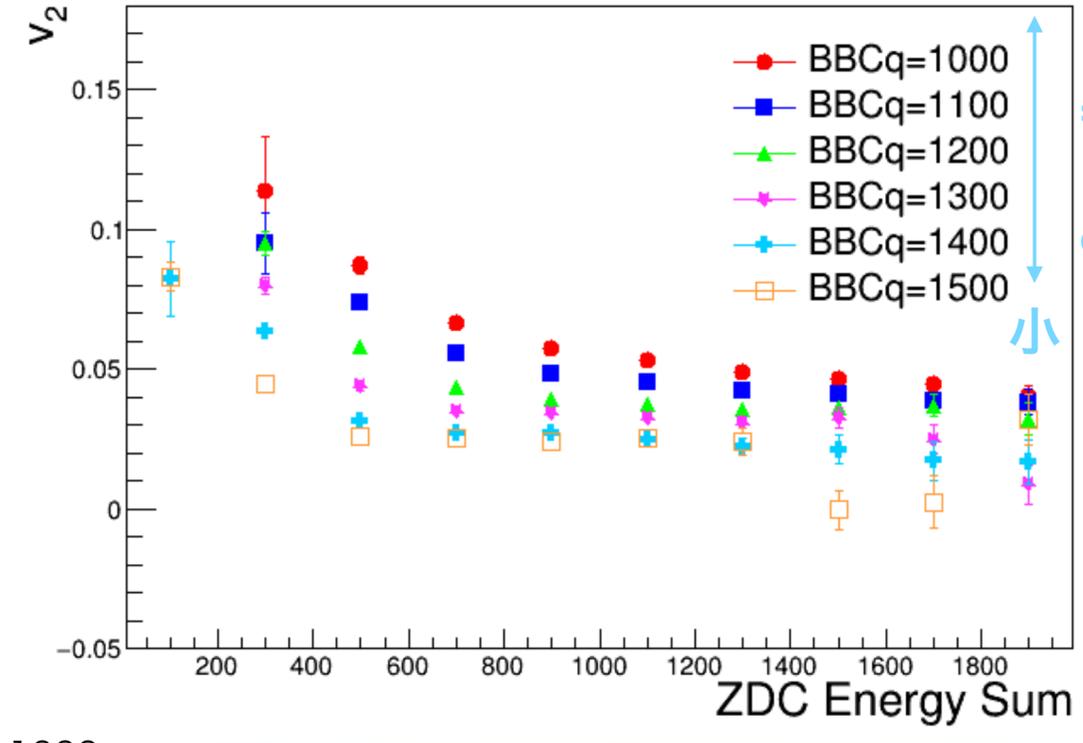
v_2 vs. ZDCe



v_2 vs. ZDCe



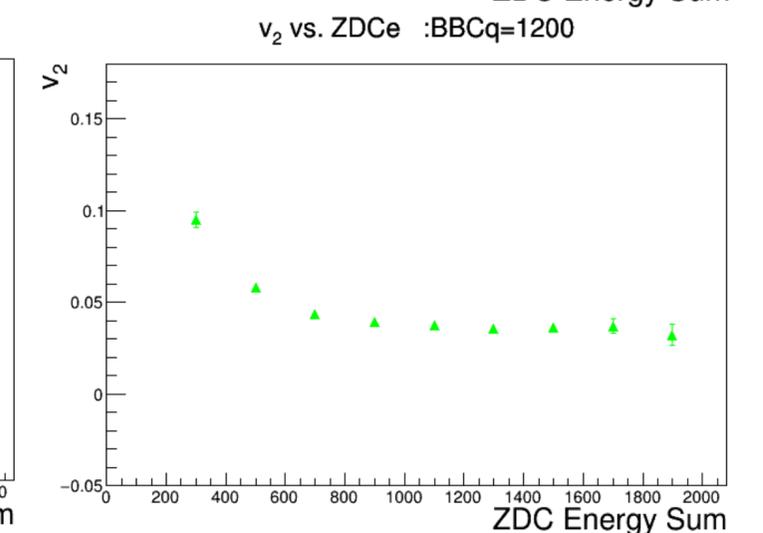
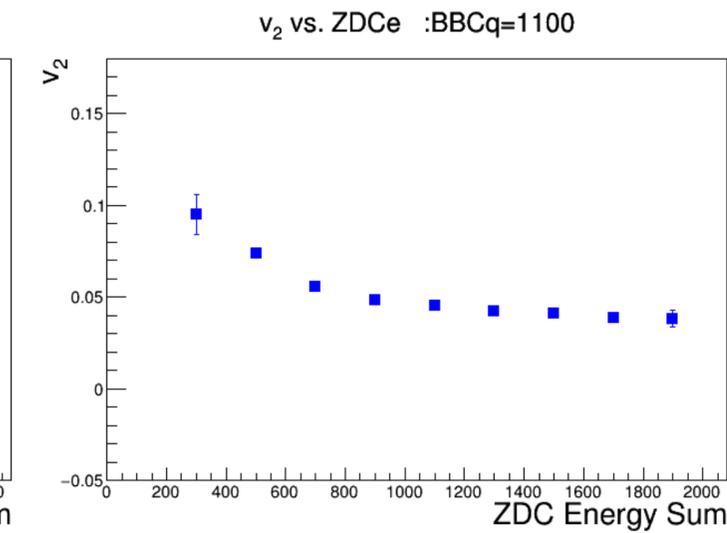
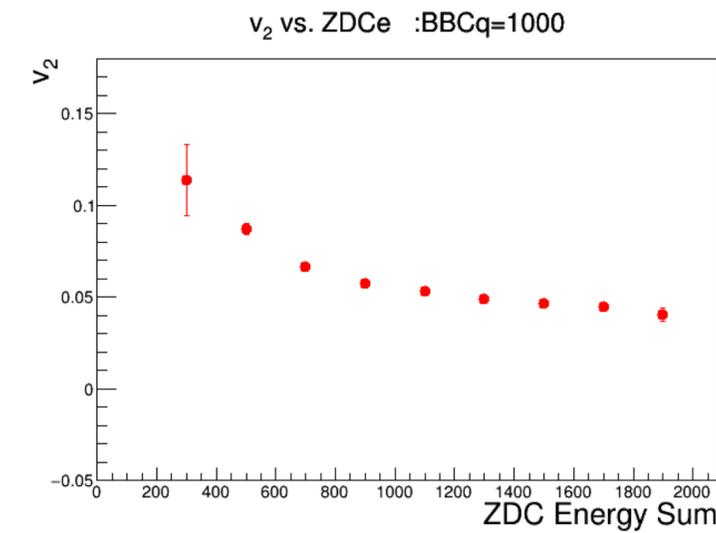
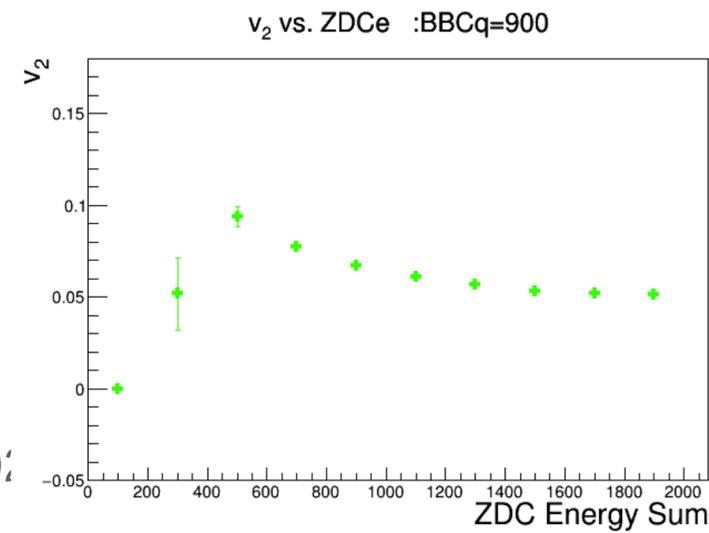
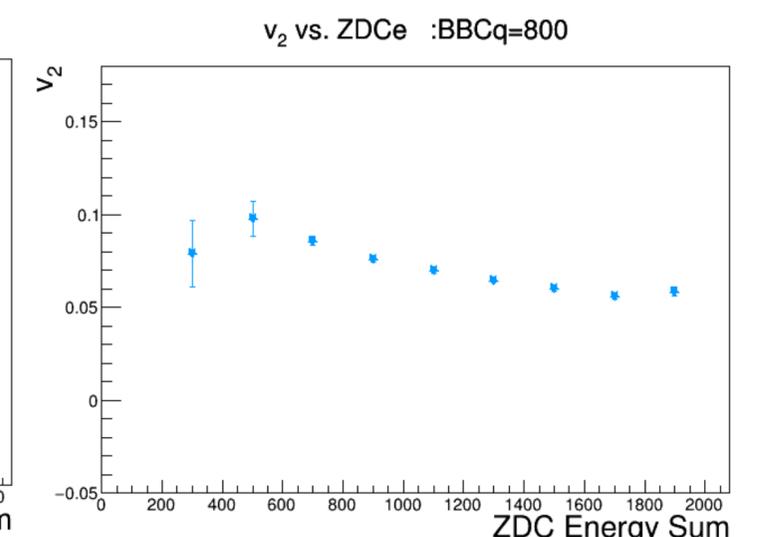
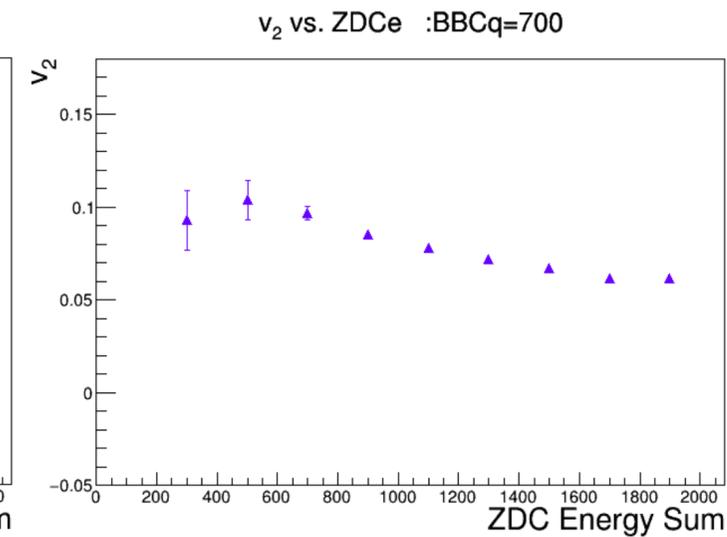
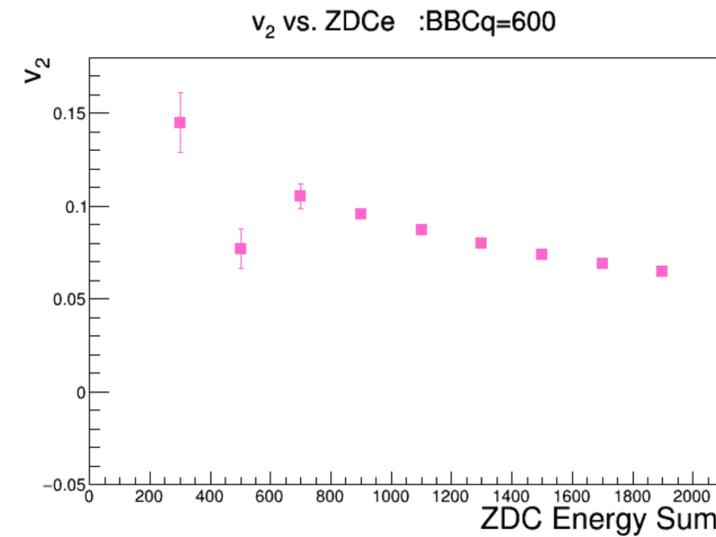
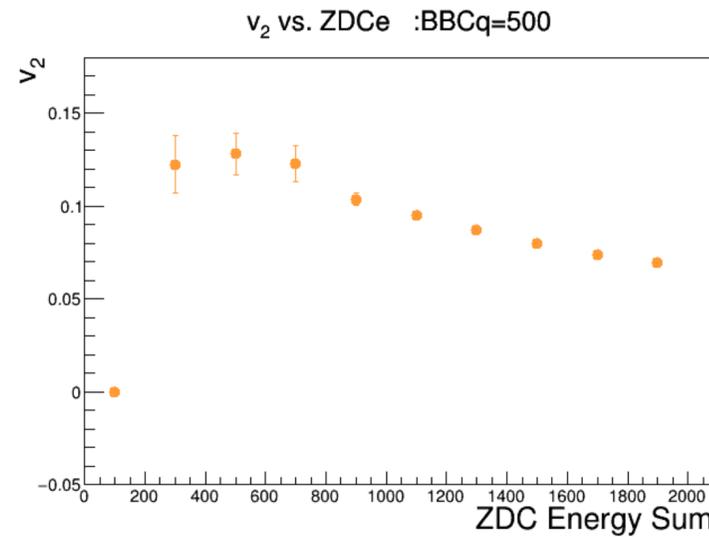
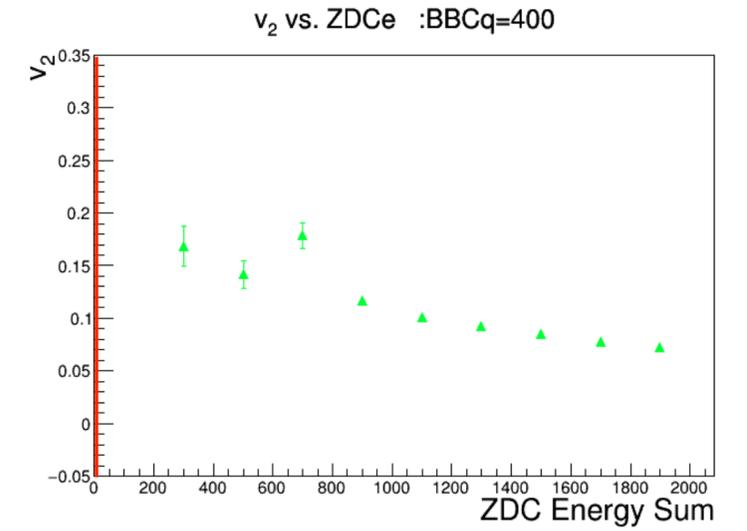
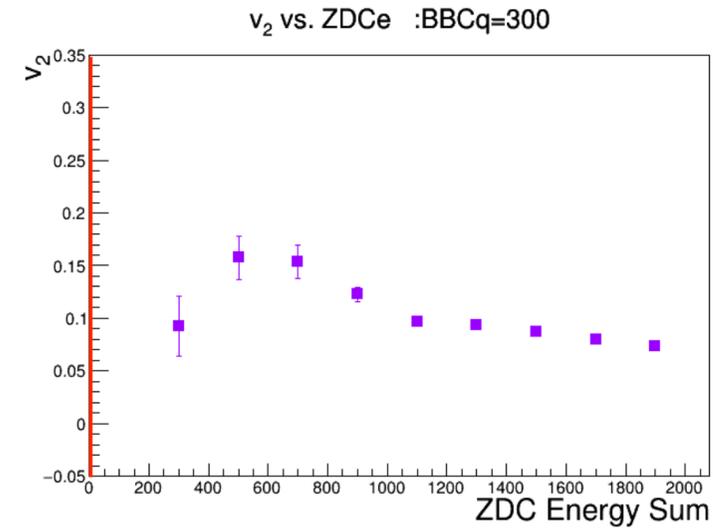
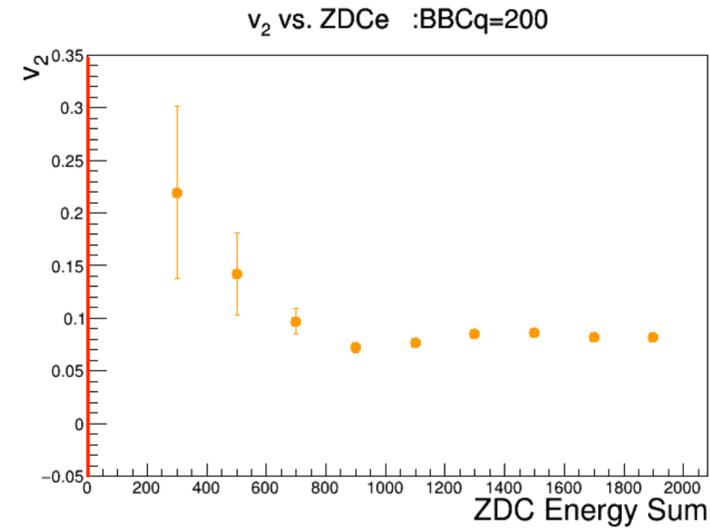
v_2 vs. ZDCe



- Centralityと v_2 の関係と、BBCqが大きい方が v_2 が小さいことは矛盾がない

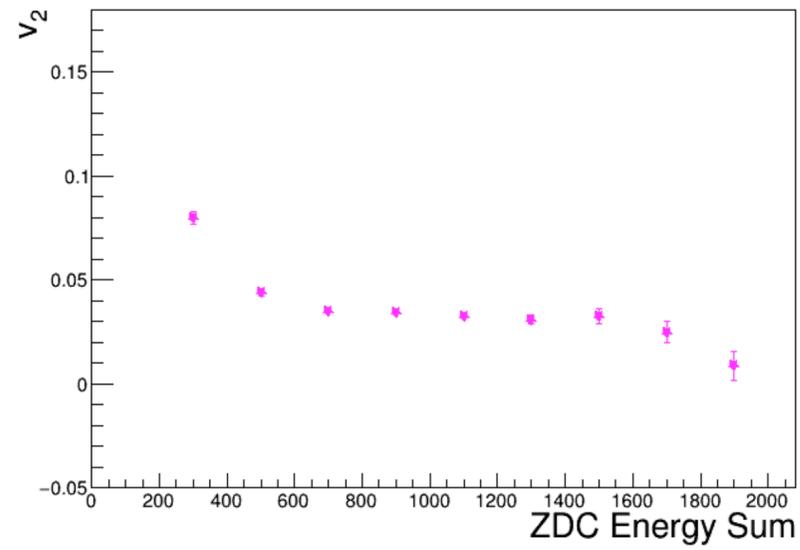
- MPIが起きていれば、同じBBCqで v_2 とZDCeは正の相関を持つはず

v_2 vs. ZDCe

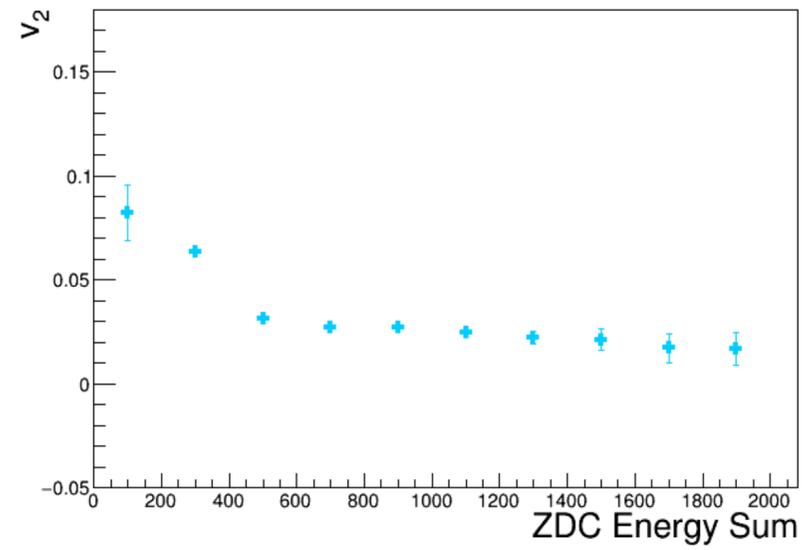


v_2 vs. ZDCe

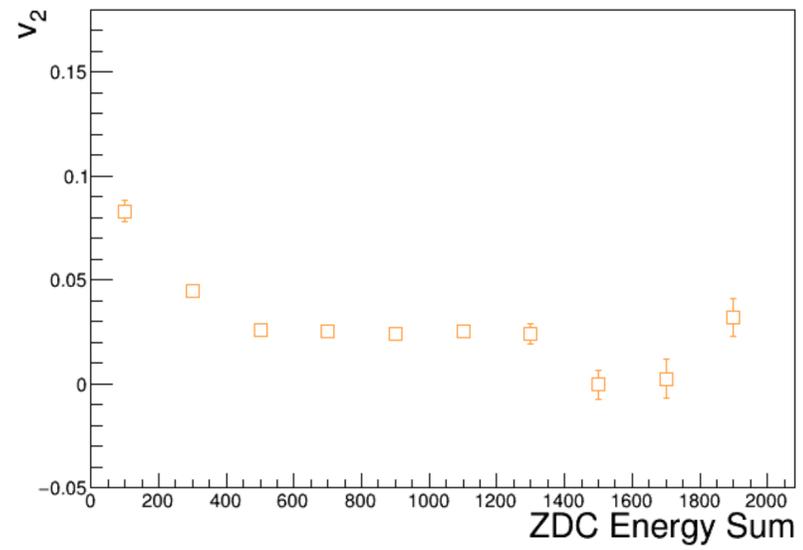
v_2 vs. ZDCe :BBCq=1300



v_2 vs. ZDCe :BBCq=1400

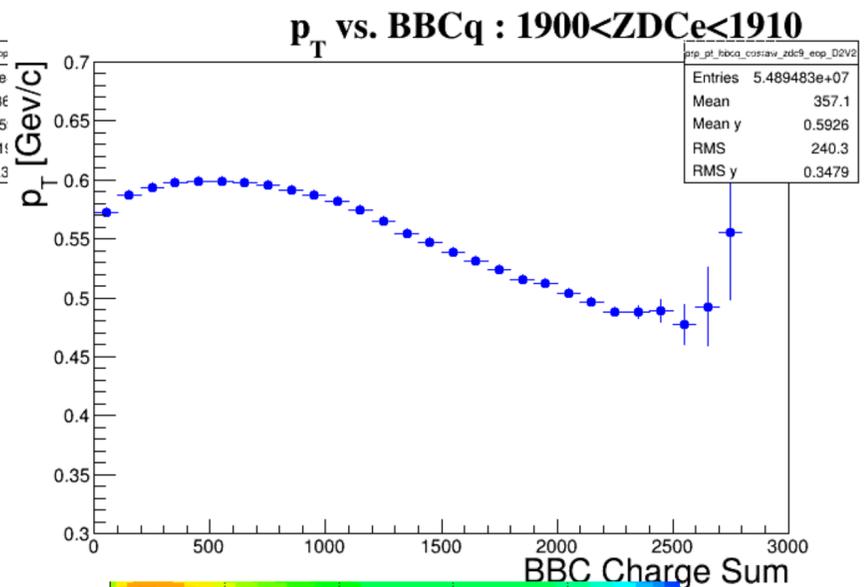
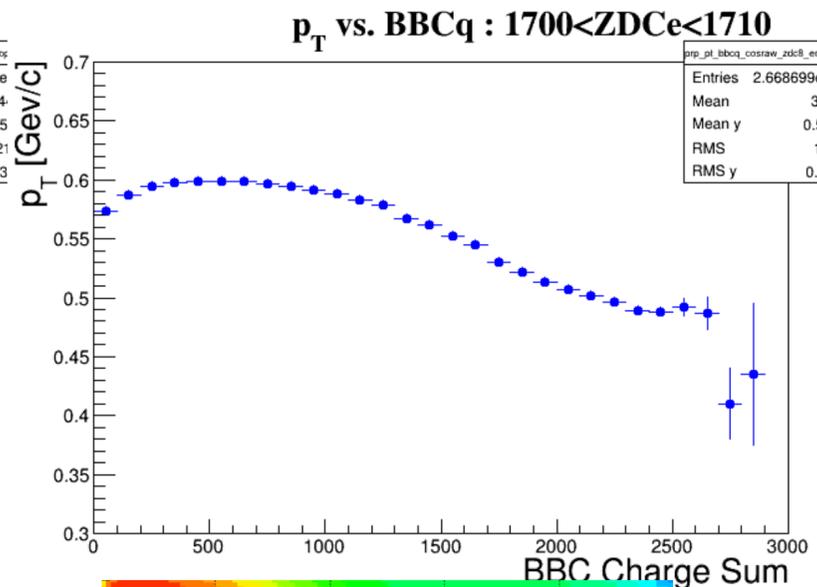
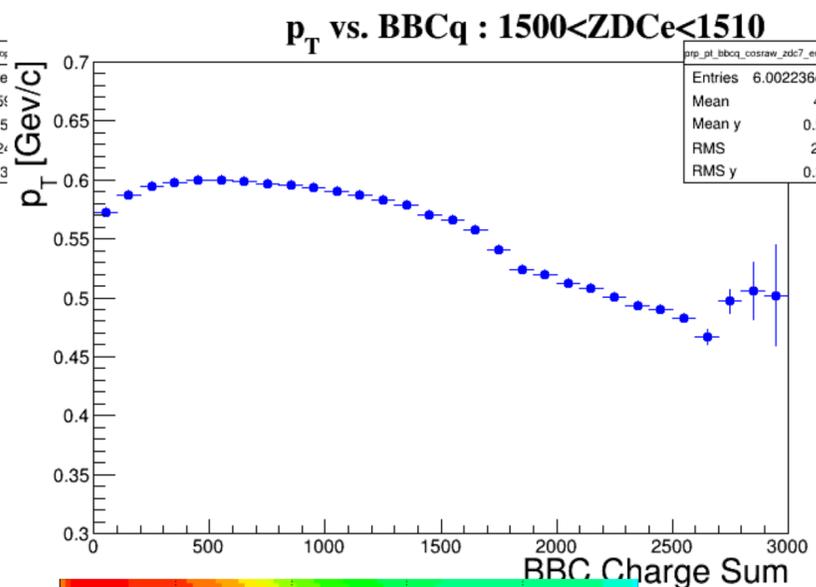
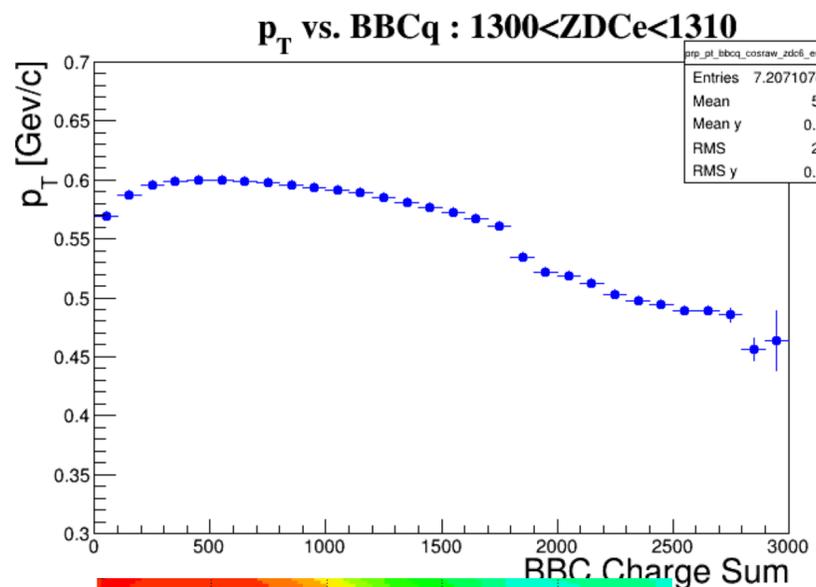
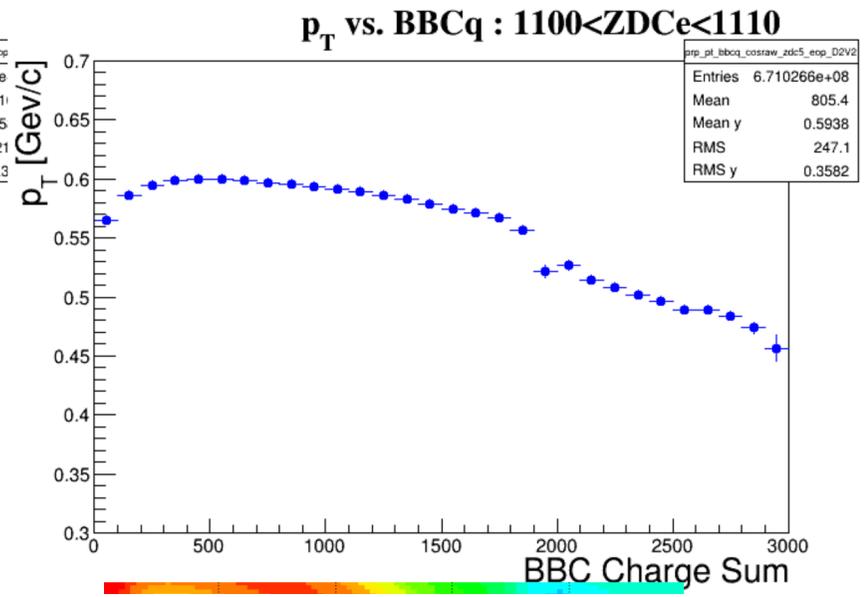
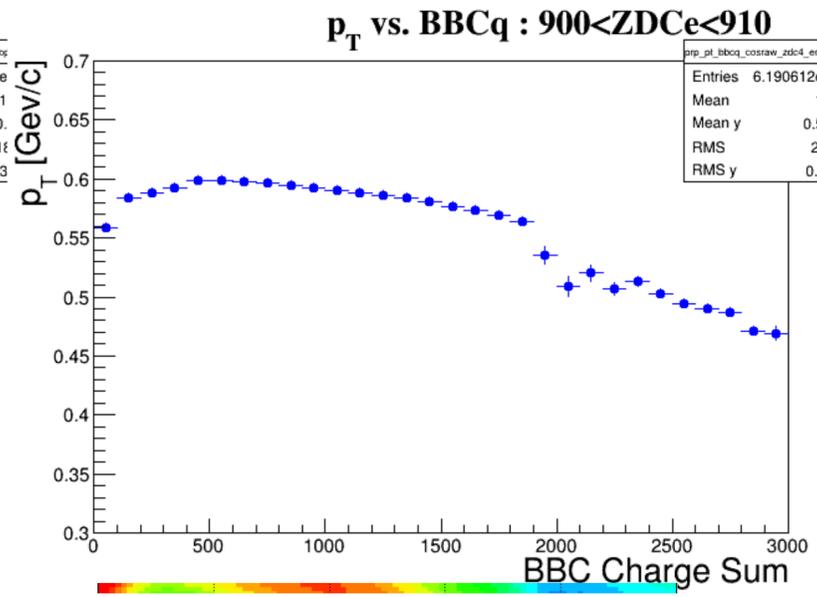
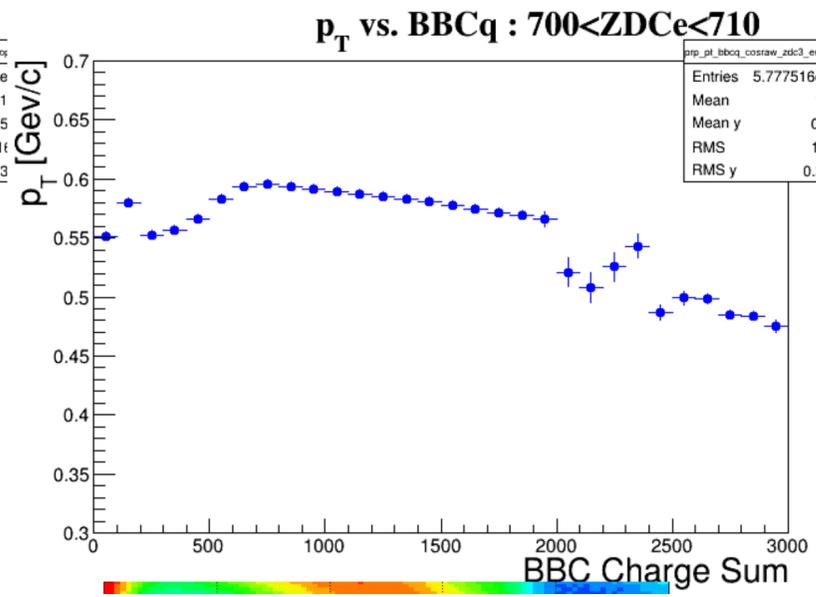
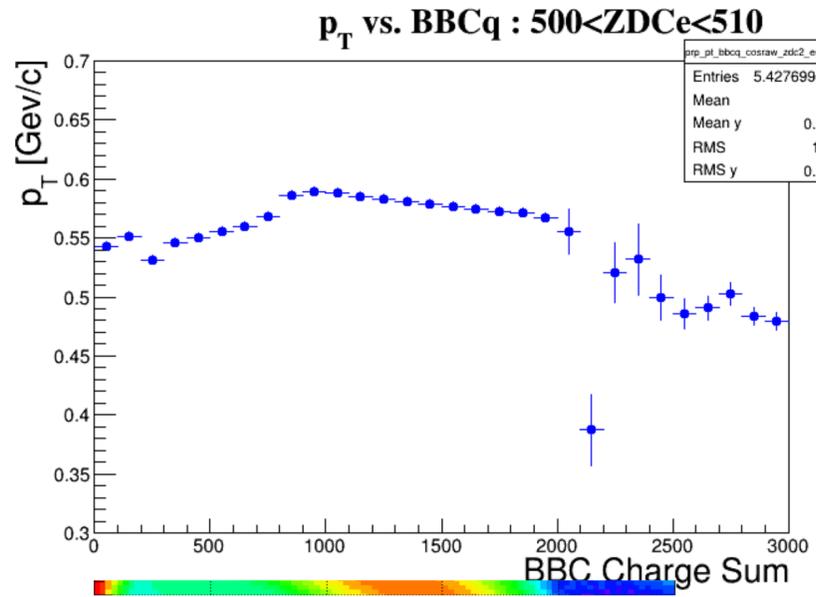
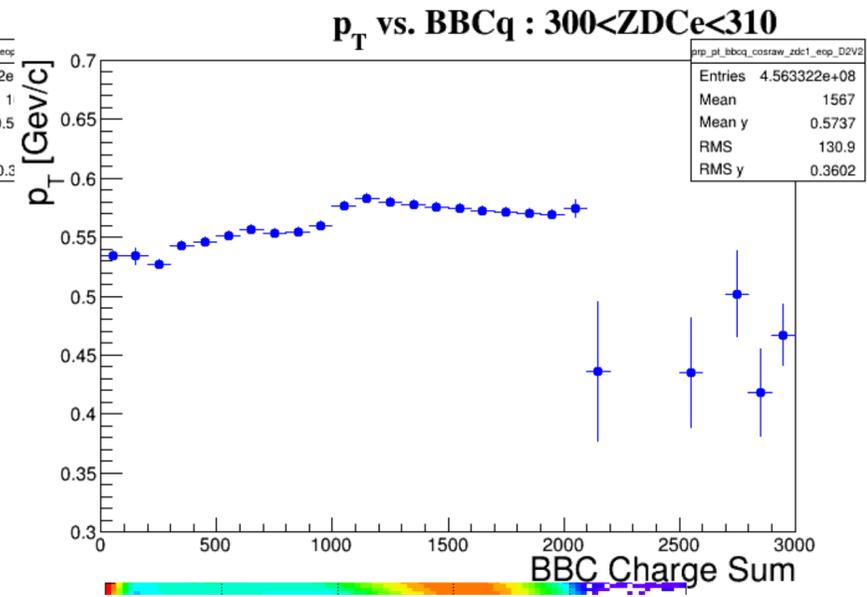
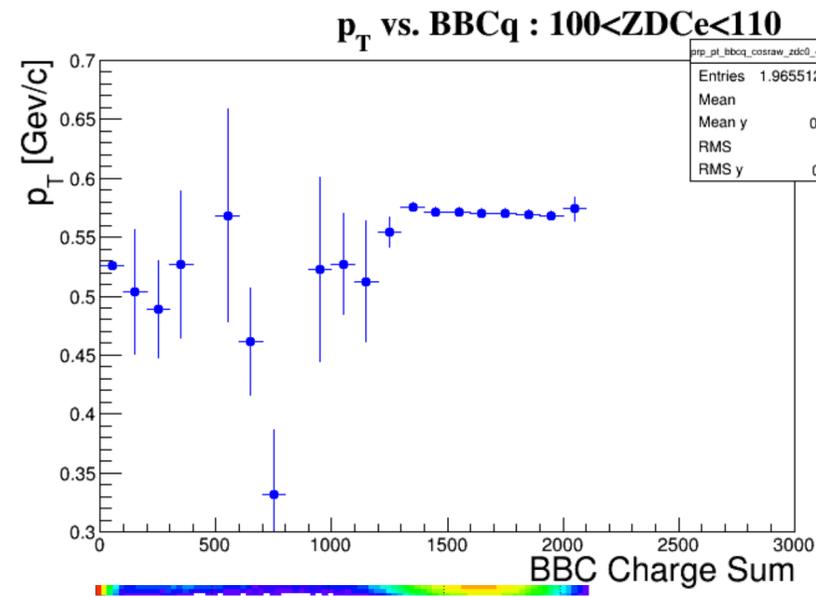


v_2 vs. ZDCe :BBCq=1500



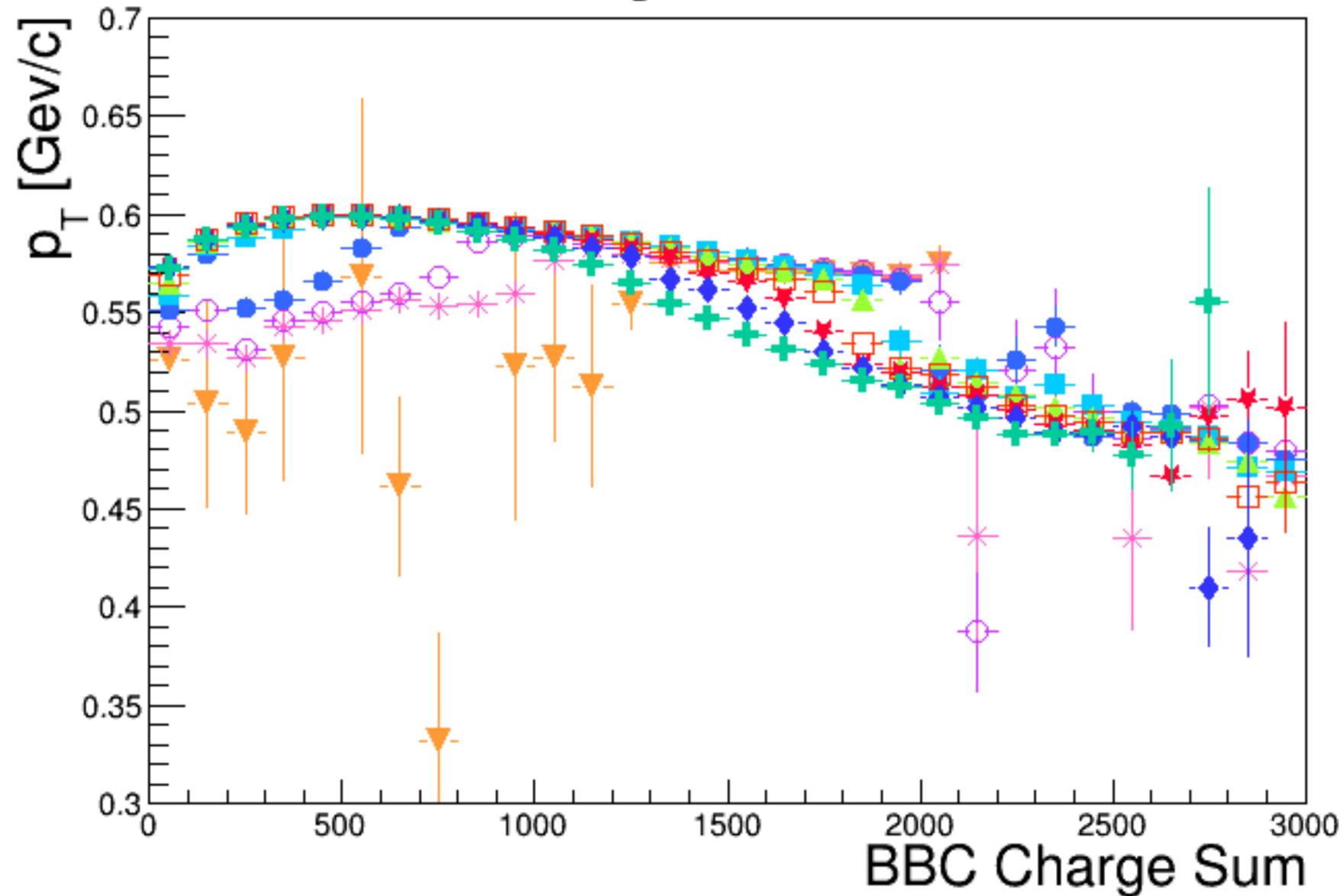
解析結果

• p_T vs. BBCq

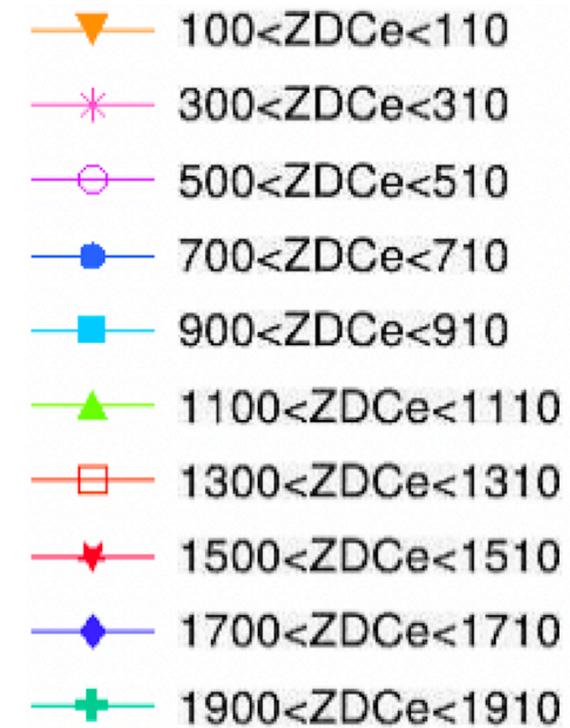


p_T vs. BBCq

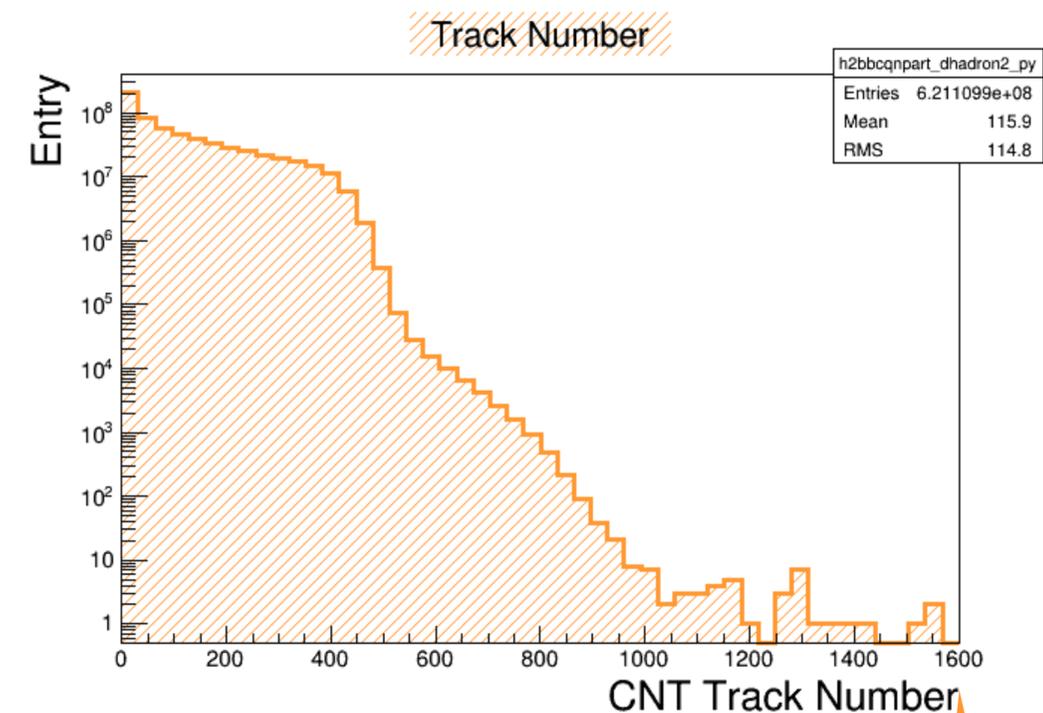
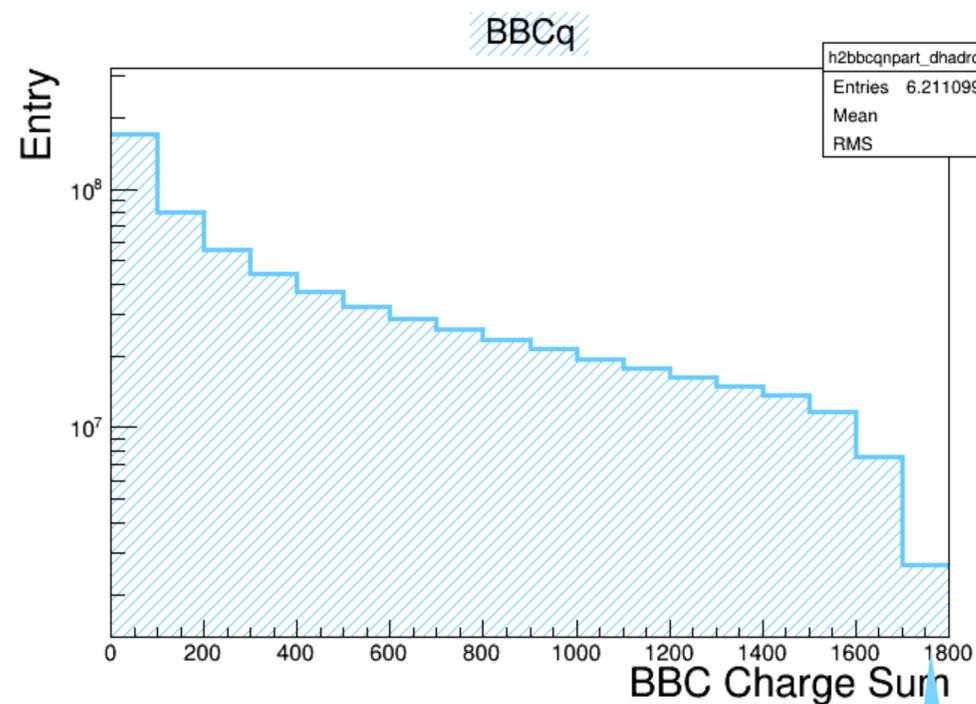
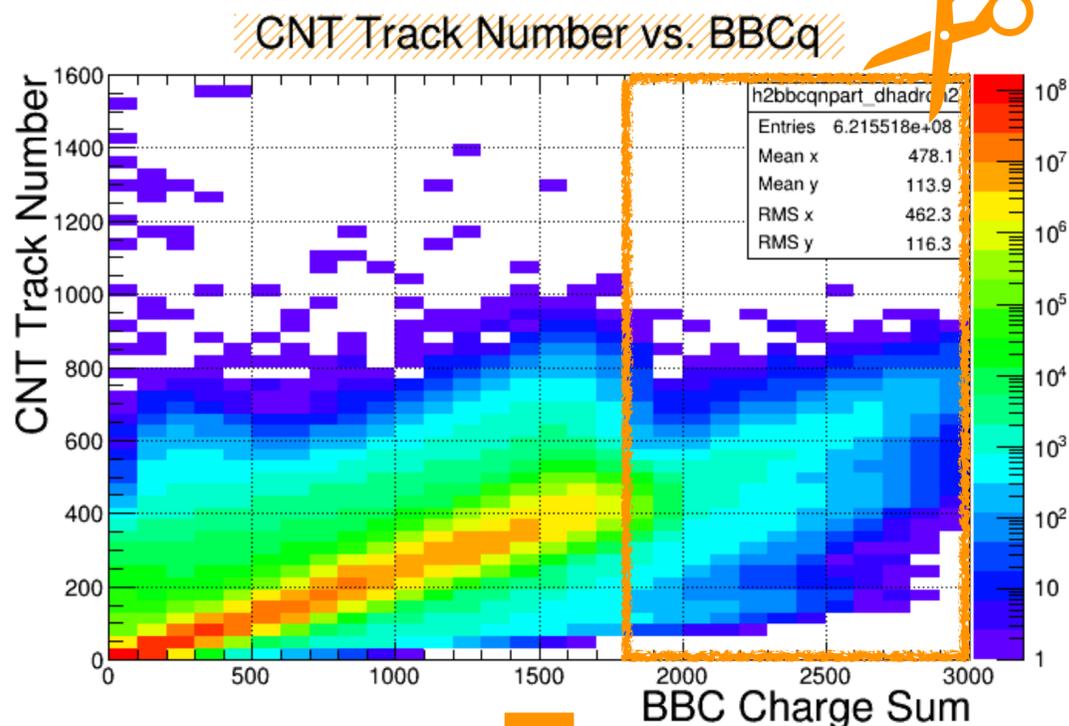
p_T vs. BBCq



- double collisionのところは p_T が小さい

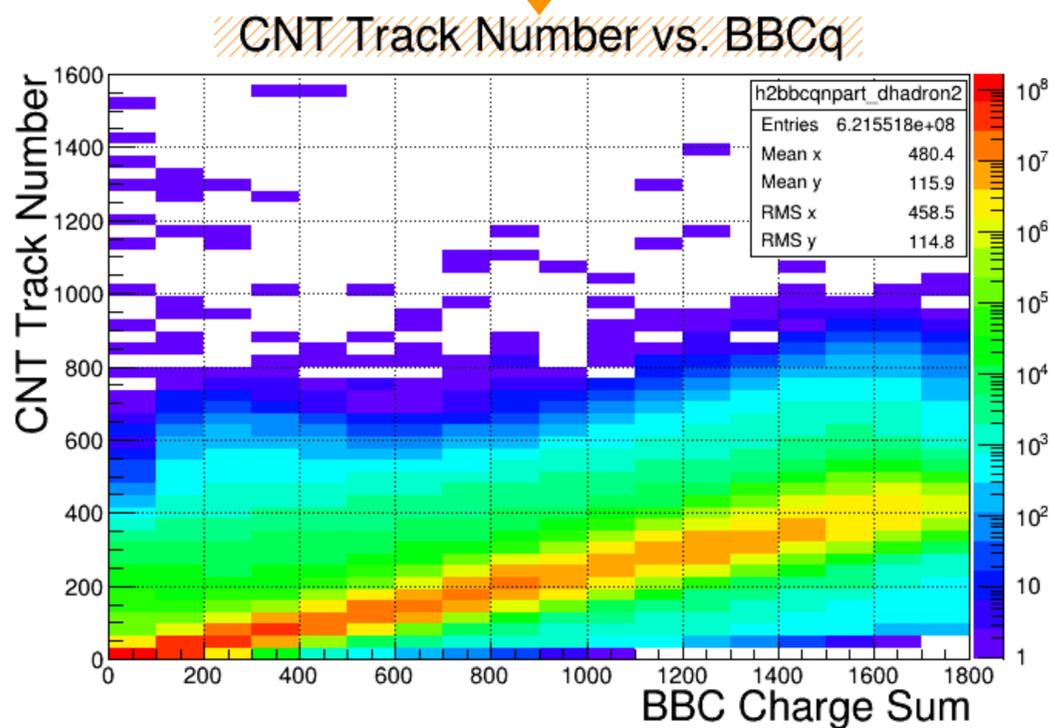


Multiplicityの指標



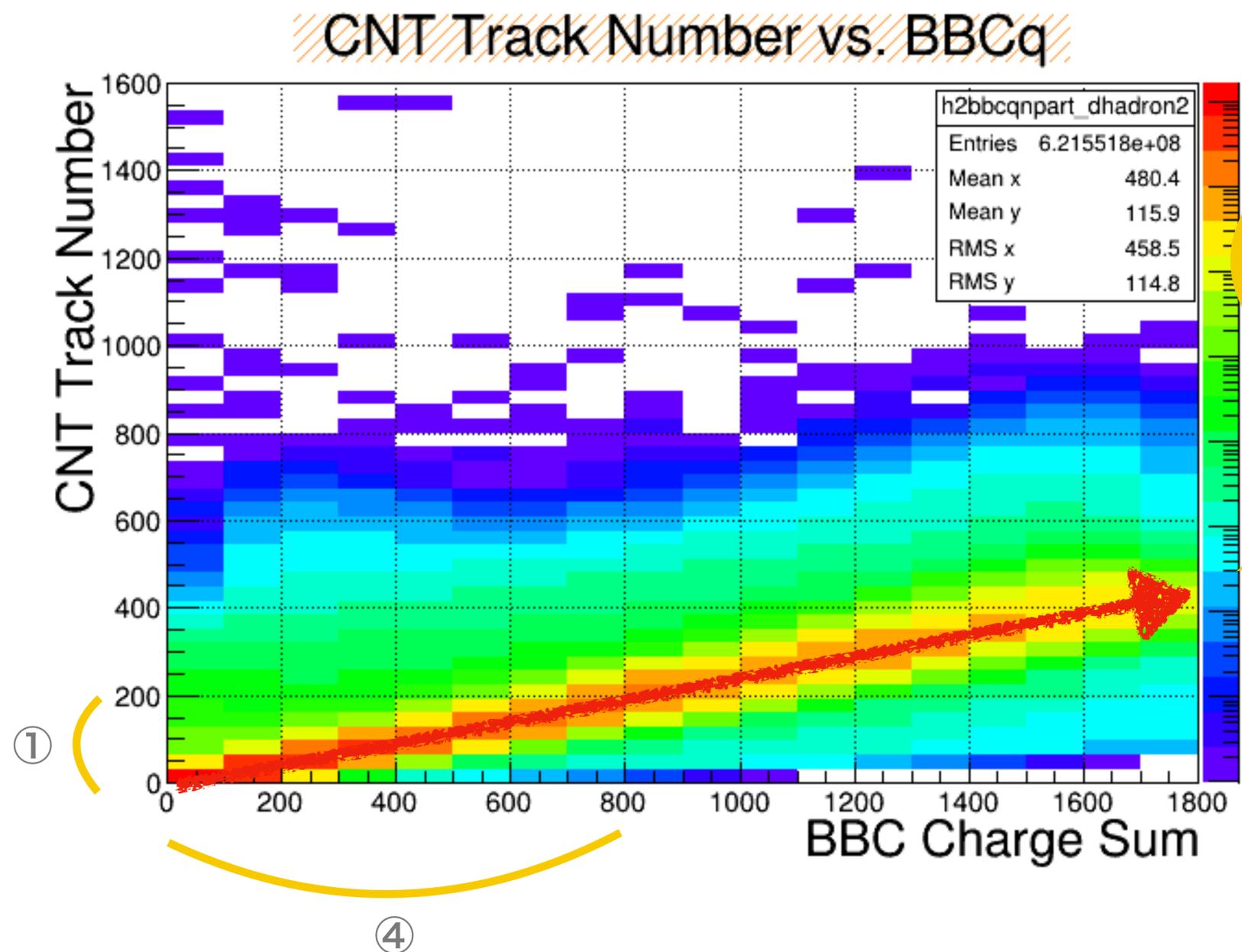
1800

1600



グラフの形が違う。縦軸 (Entry) をlogで表している
ので、かなりちがいがあがる。

Multiplicityの指標



この傾きが1になるように調整する。
BBCqに0.25かけるとか？

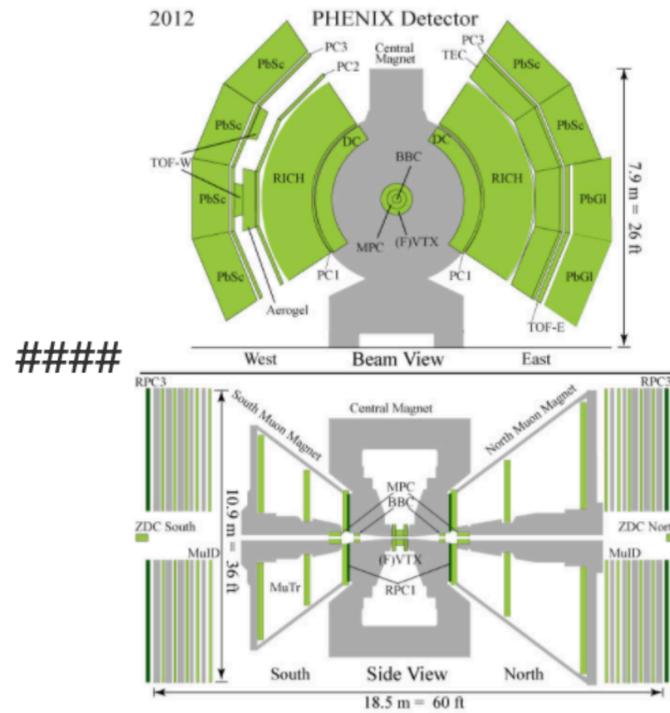
$$\sqrt{(BBCq \times 0.25)^2 + Npart^2}$$

Run 14

Minimum bias
18,521,121,185 Events

Configuration Diagram

RHIC+PHENIX Run Records



Species	Energy (GeV/nucleon)	Integrated Luminosity [Polarization L/T]	N _{events} [BBC _{30cm} /BBC _{narrow}]
$^{197}\text{Au}^{79+} + ^{197}\text{Au}^{79+}$	7.3	$4\mu\text{b}^{-1}$	23M/10M
$^{197}\text{Au}^{79+} + ^{197}\text{Au}^{79+}$	100.0	7.5nb^{-1}	3.5B/19B
$^3\text{He}^{2+} + ^{197}\text{Au}^{79+}$	103.5+100.0	24nb^{-1}	