

RHIC-PHENIX実験での $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ のAu+Au 衝突における v_2 の粒子多重度依存性とその rapidity依存性

高エネルギー研究室

高濱瑠菜

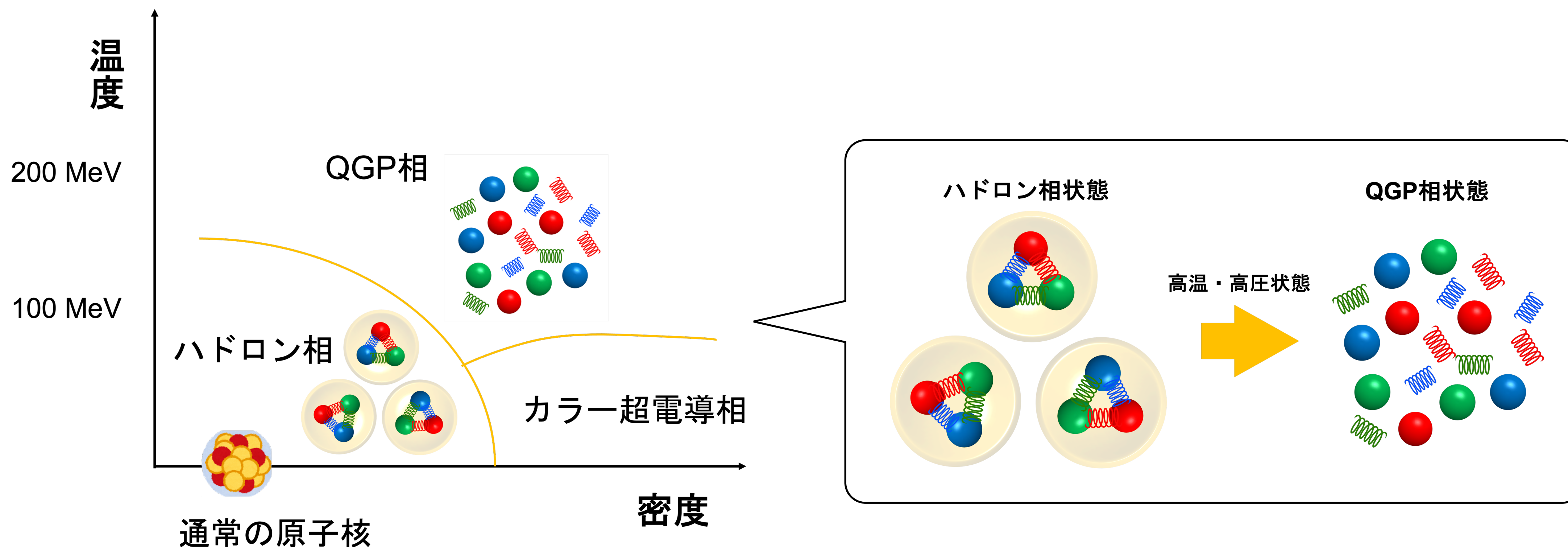
2021年度修士論文発表会

2023/02/16

1. 序章
2. 研究目的と特色
3. 解析概要
4. 解析手法
5. 結果・考察
6. まとめ

1. クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

- クォークやグルーオンと呼ばれる素粒子が、高温高密度状態において核子内部の束縛から解放された状態



序章

(0) 衝突直前

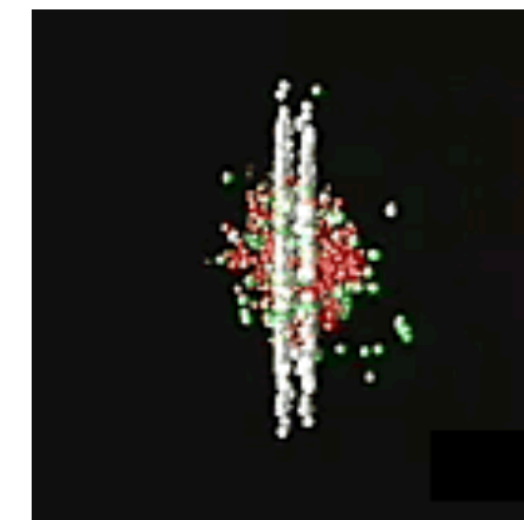
(1) 衝突

(2)クォーク・グルーオ
ンの解放

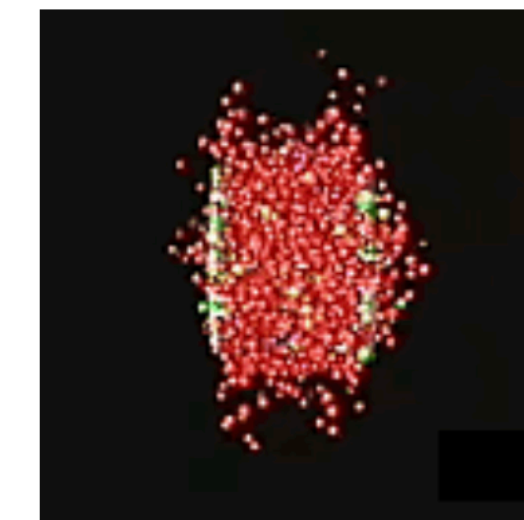
(3)クォーク・グルーオン・
プラズマ



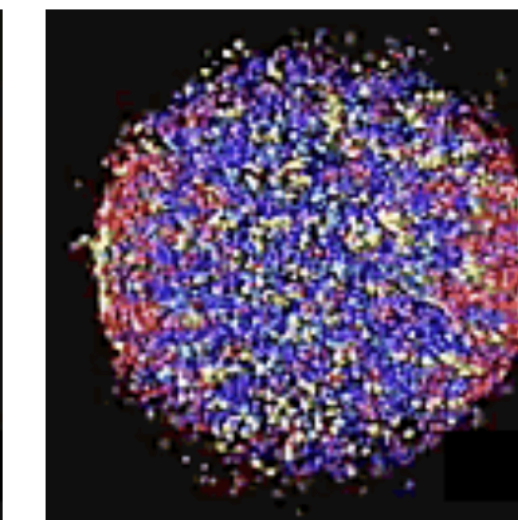
1. Ions about to collide*



2. Ion collision



3. Quarks, gluons freed

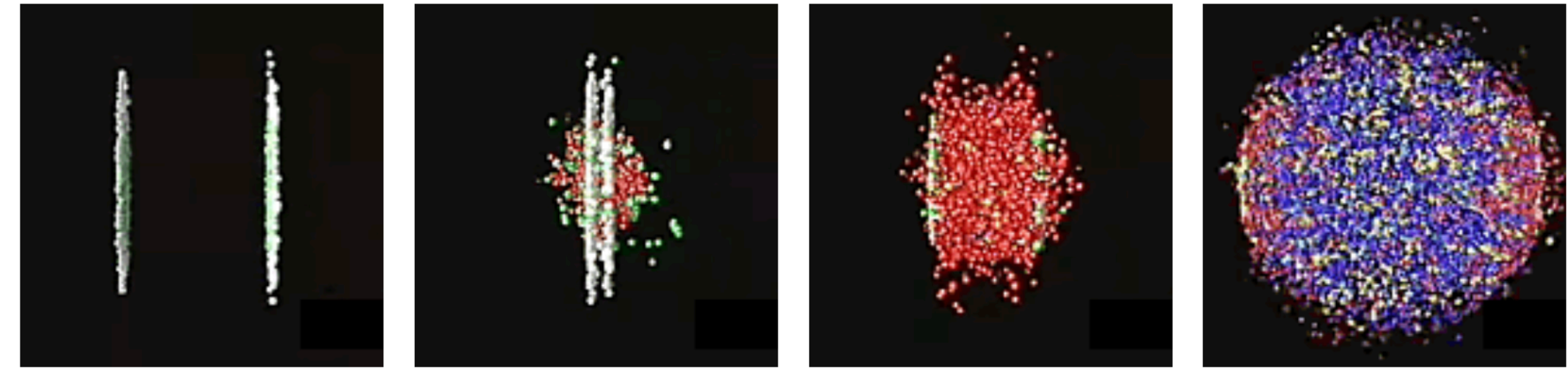


4. Plasma created

4

2. 高エネルギー原子核衝突実験

- 重い原子核同士を加速器を用いて衝突させ、バリオン密度をあげることで瞬間的にQGPを実験室で作りに出すために考えられた実験
- ブルックヘブン国立研究所 (BNL) RHIC加速器
欧州加速器機構 (CERN) LHC加速器



1. Ions about to collide*

2. Ion collision

3. Quarks, gluons freed

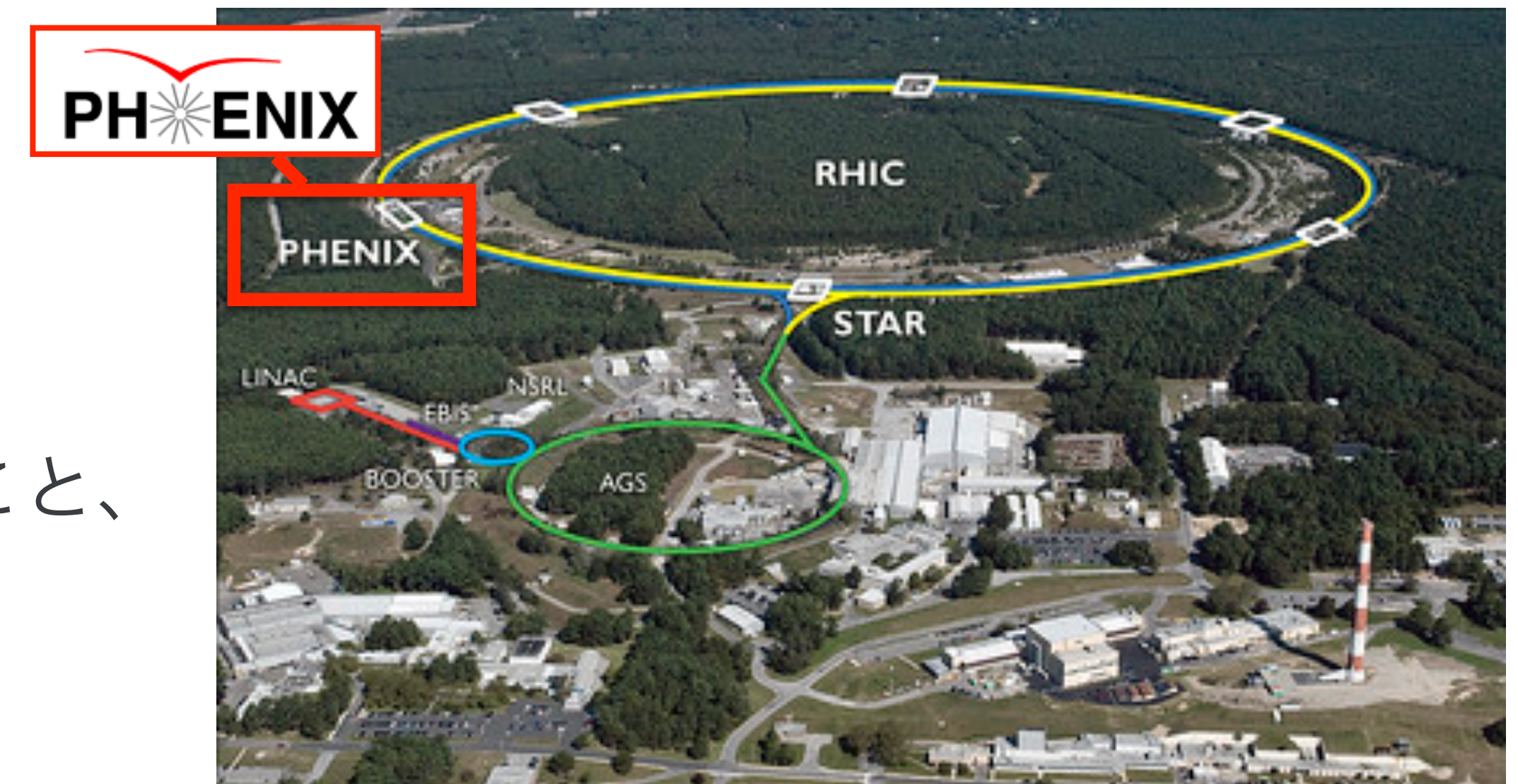
4. Plasma created

2. 高エネルギー原子核衝突実験

- 重い原子核同士を加速器を用いて衝突させ、バリオン密度をあげることで瞬間的にQGPを実験室で作り出すために考えられた実験

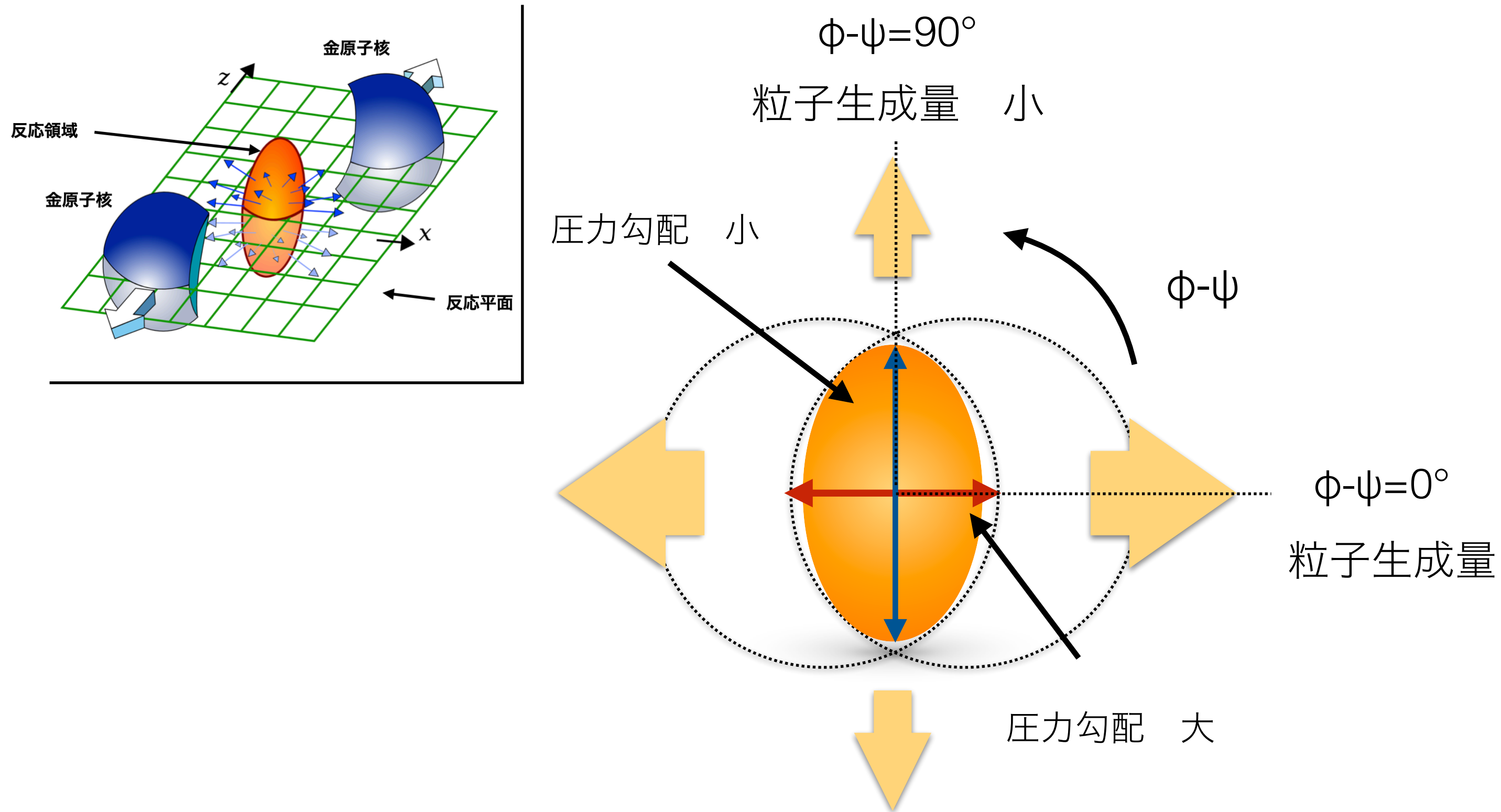
-ブルックヘブン国立研究所 (BNL) RHIC加速器

- ・ 世界で初めてQGPの生成に成功
- ・ 最高エネルギー : $Au+Au \sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$
 $p+p \sqrt{s_{NN}} = 500\text{GeV}$
- ・ PHENIX実験 : QGPの生成とその証拠を測定すること、またその性質を研究することが目的



3. 高エネルギー原子核衝突実験におけるQGP生成の根拠

- 反応領域内部の高密度物質の流体力学的振る舞いと粒子の方位角異方性(v_2)



方位角異方性 v_2

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

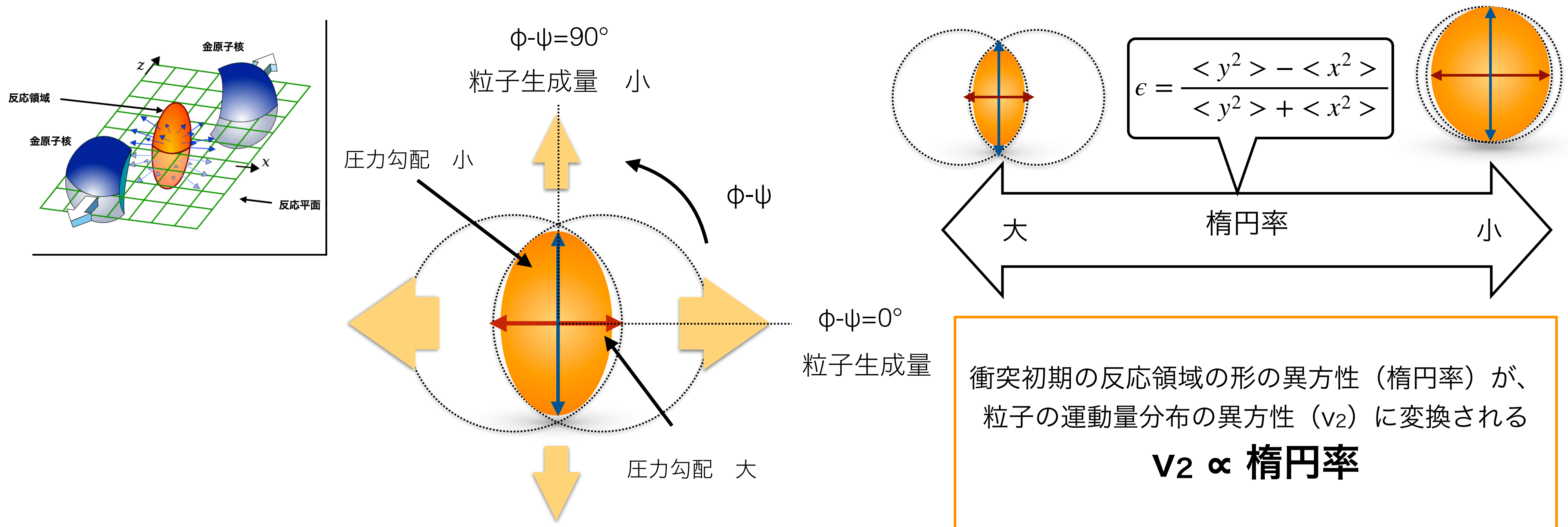
ϕ : 衝突により生成・放出された粒子の方位角

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)

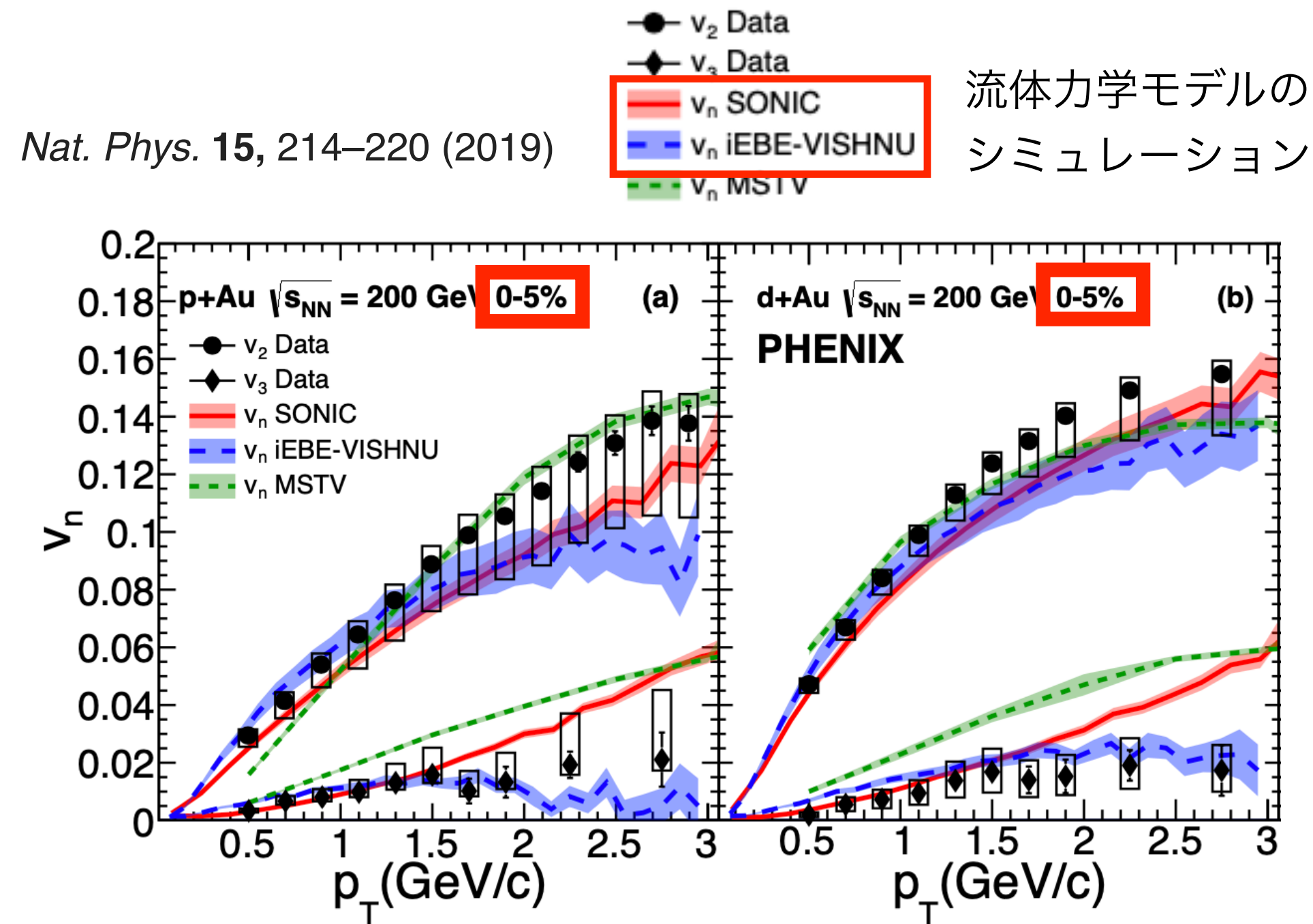
v_2 : 方位角異方性の強度を表す値

3. 高エネルギー原子核衝突実験におけるQGP生成の根拠

- 反応領域内部の高密度物質の流体力学的振る舞いと粒子の方位角異方性(v_2)

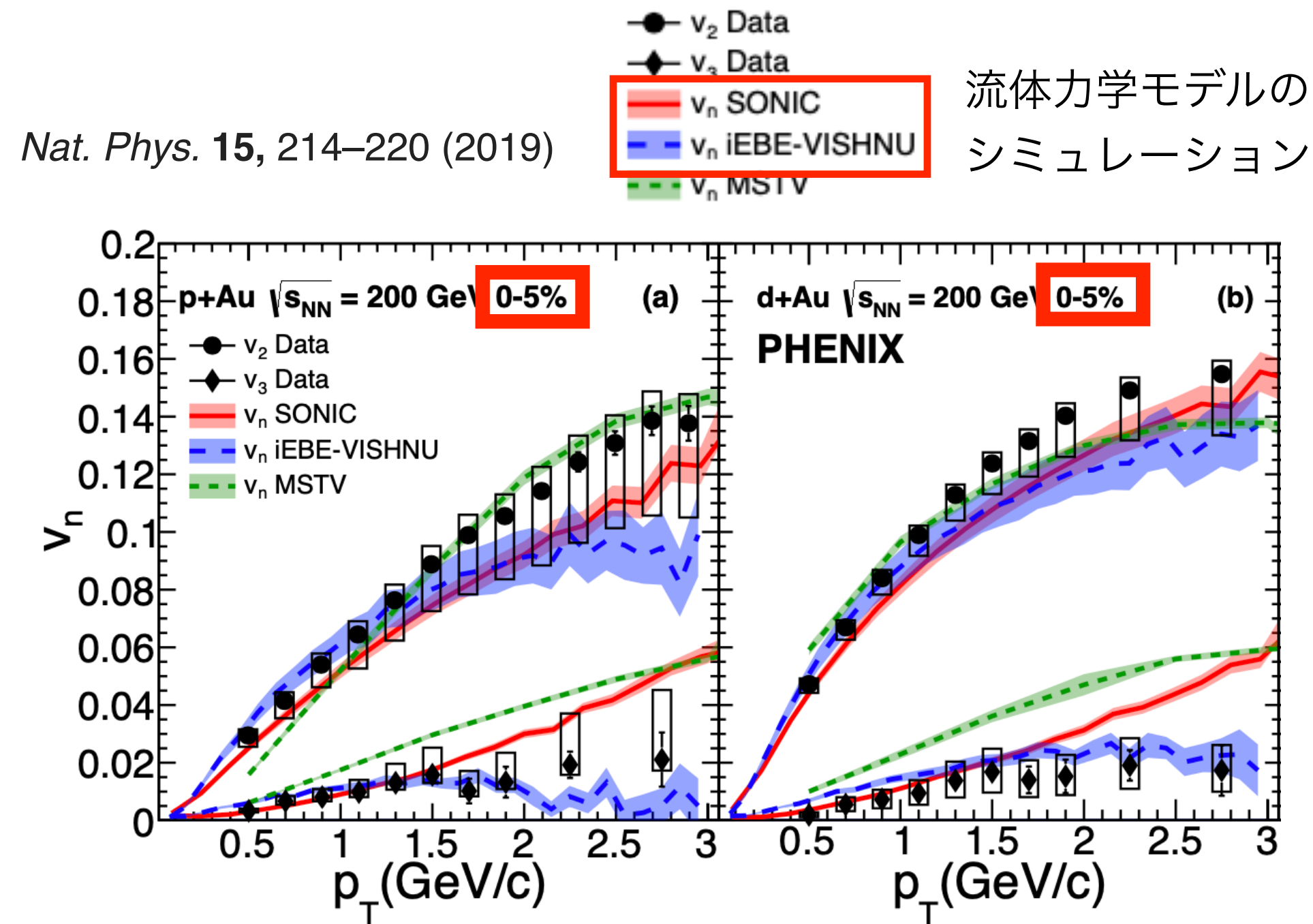


4. 軽い粒子の衝突系における粒子の流体力学的振る舞いの発見



- LHCにおいて、**p+Pb衝突**や**p+p衝突**において、**QGP**の様な物質が生成された場合に予想される現象が、**発生粒子数が極めて多いイベント**についてのみ解析すると見られることがわかった
- PHENIXの**p+Au衝突**や**d+Au衝突**においても、**発生粒子数が多いイベント**で v_2 を測定し、さらにその結果が**流体力学モデル**によって説明されている

4. 軽い粒子の衝突系における粒子の流体力学的振る舞いの発見



• LHCにおいて、**p+Pb衝突**や**p+p衝突**において、**QGP**が生成された場合に予想される現象が、

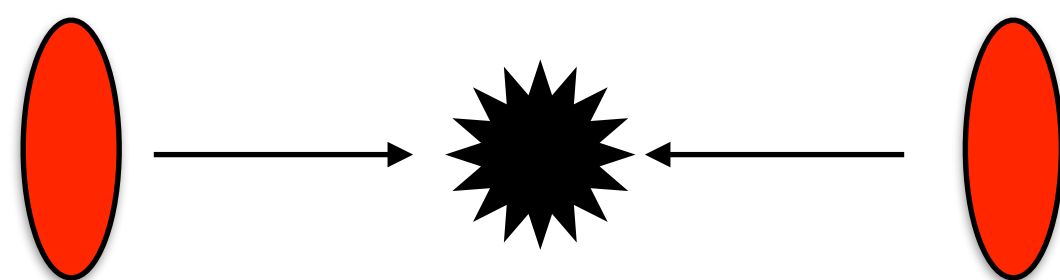
発生粒子数が極めて多いイベントについてのみ解析すると見られることがわかった

• PHENIXの**p+Au衝突**や**d+Au**においても、

発生粒子数が多いイベントで **v_2** や **v_3** が観測され、さらにその結果が**流体力学モデル**によって説明されている

5. 反応に関与した核子数と発生粒子数の違い

p+p衝突の場合

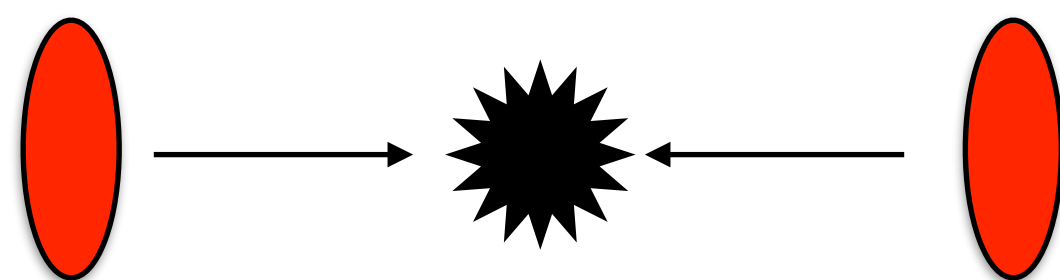


反応に関与した核子数(N_{part}) : 2

発生粒子数が多いイベントのみを解析すると、
発生粒子数でイベント選択行わない時には見えない
物理現象が見える

5. 反応に関与した核子数と発生粒子数の違い

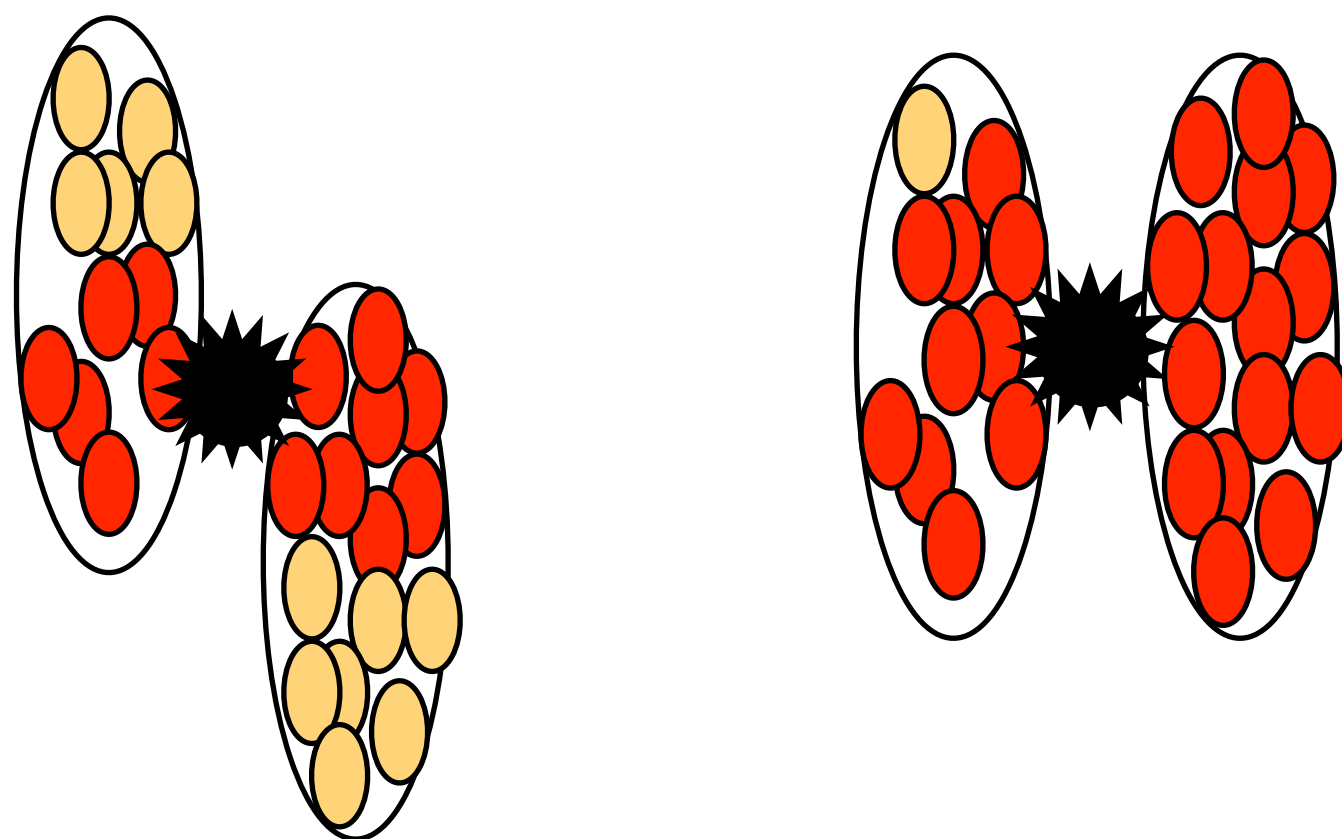
p+p衝突の場合



反応に関与した核子数(N_{part}) : 2

発生粒子数が多いイベントのみを解析すると、
発生粒子数でイベント選択行わない時には見えない
物理現象が見える

A+A衝突の場合



反応に関与した核子数(N_{part}) : イベントによって違う

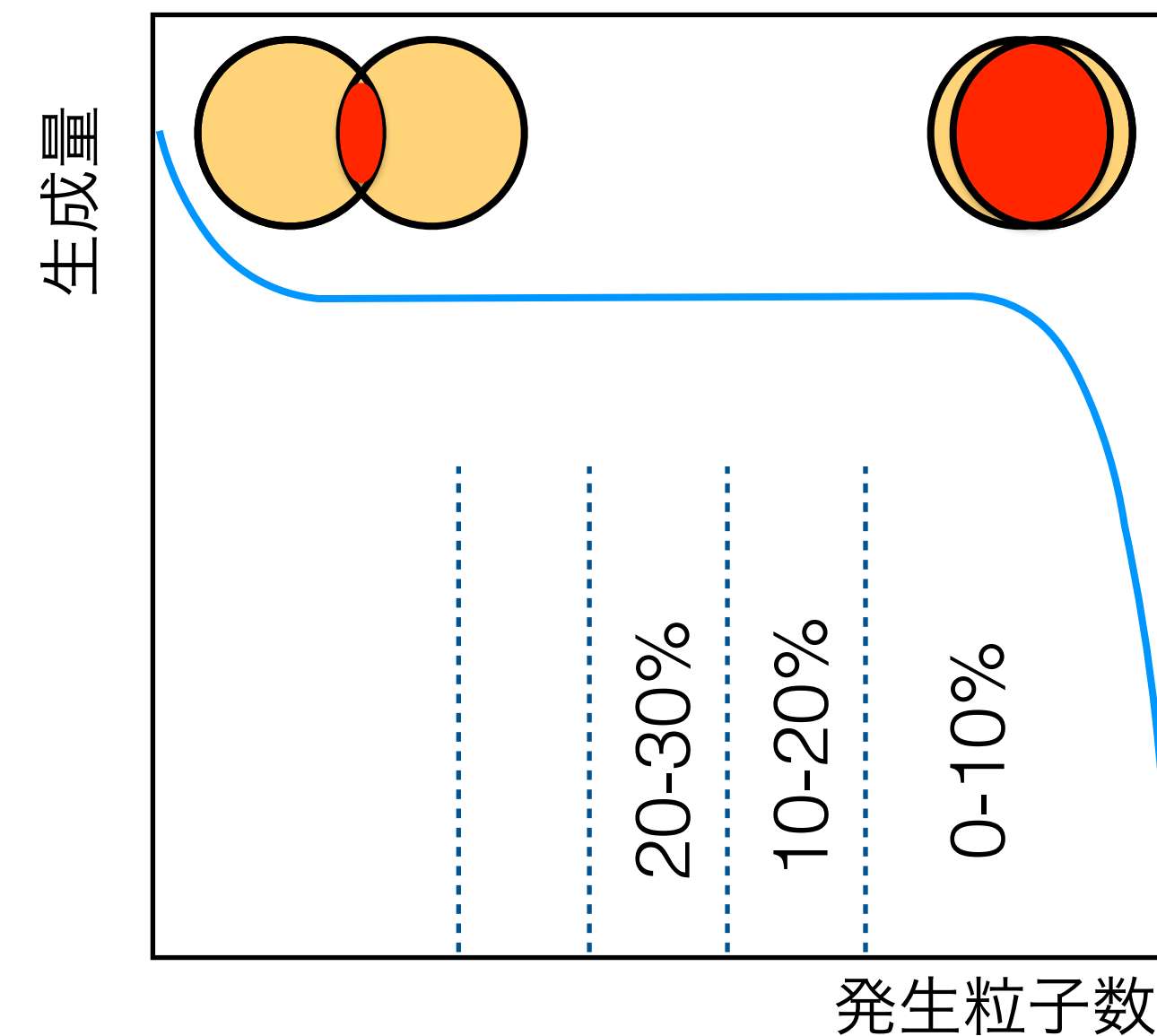
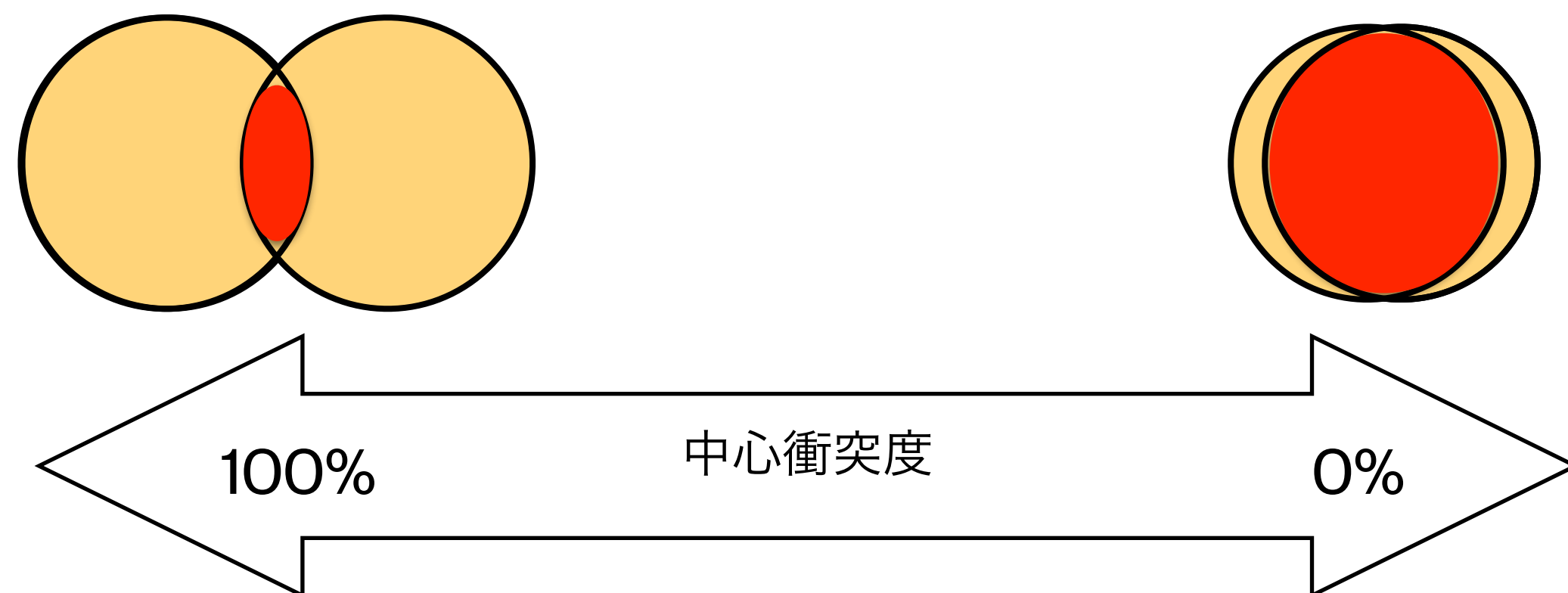
N_{part} が同じイベントを解析すると、
発生粒子数の違いによって、イベント選択を行わない
時には見えない物理現象が見えるかもしれない

- 研究目的

- 反応に関与した核子数 (N_{part}) と発生粒子数を別の軸として、それらの関係によって v_2 がどのように変化するか調べる

- 特色

- 発生粒子数によって決定される中心衝突度より詳しいイベント分類を行なっている



- 反応に関与した核子数 (N_{part}) と反応に関与していない核子数 (N_{spec}) の関係

A: 衝突する原子核の核子数

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

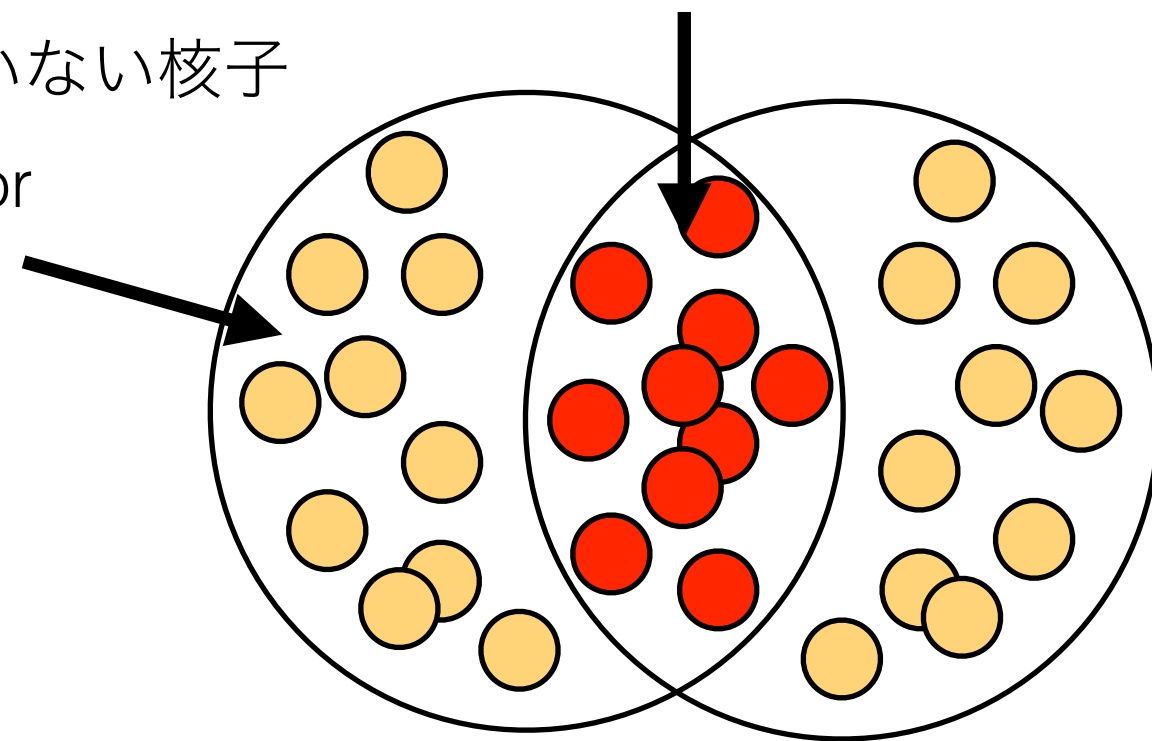
$$\therefore N_{part} = A - N_{spec}$$

反応に関与した核子

participant

反応に関与していない核子

spectator



研究概要

• N_{spec} と発生粒子数の測定

A: 衝突する原子核の核子数

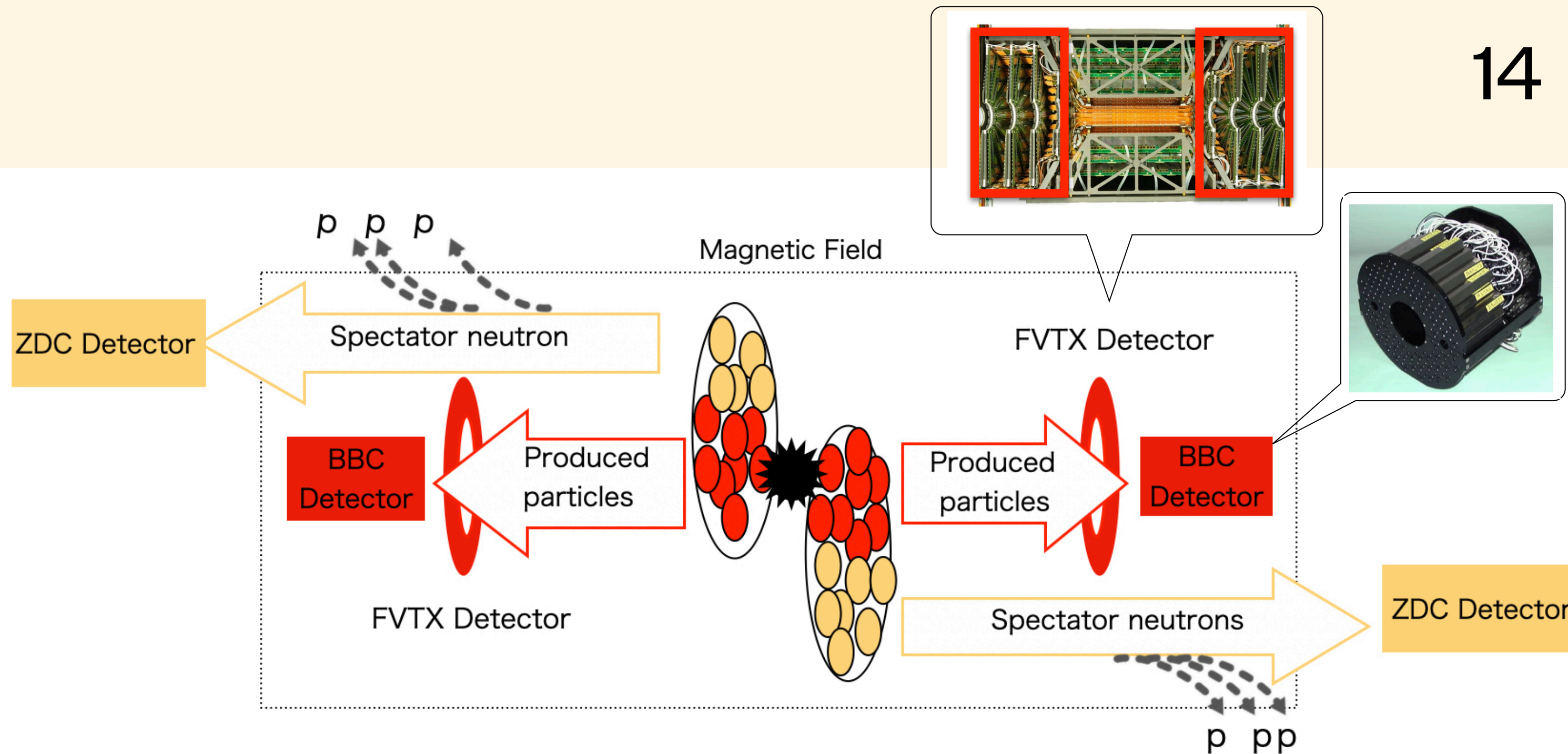
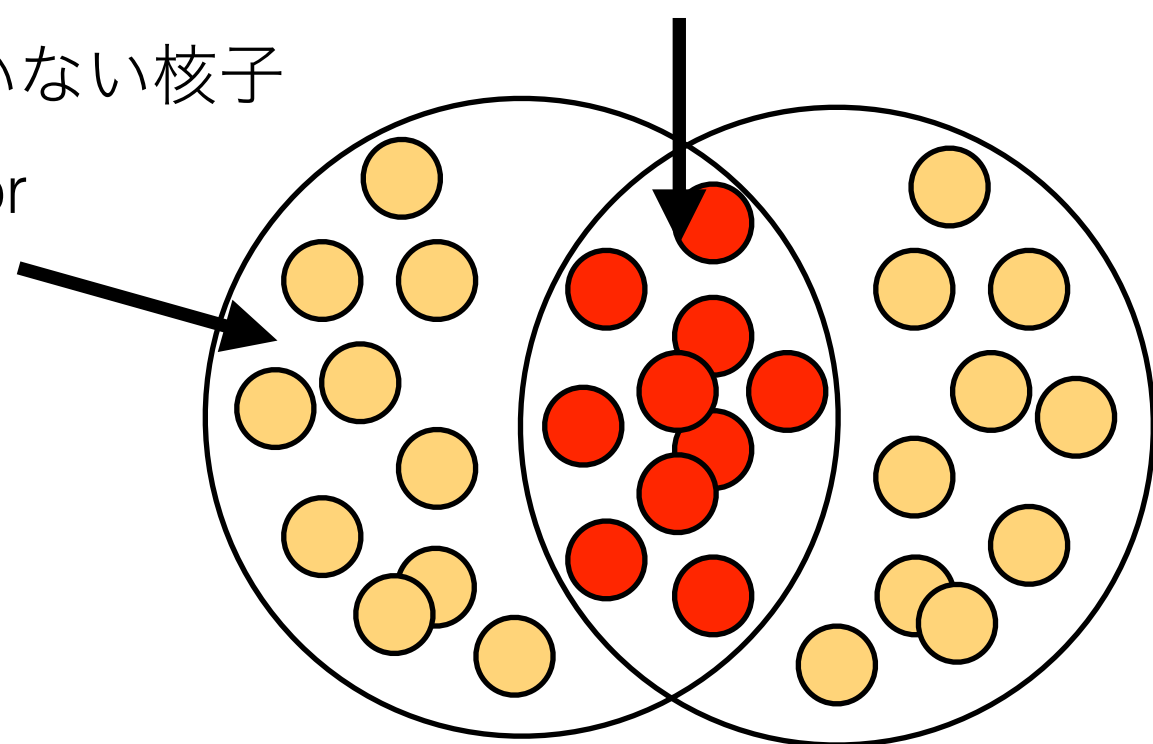
$$N_{part} + N_{spec} = A \text{ (const)}$$

$$\therefore N_{part} = A - N_{spec}$$

反応に関与した核子
participant

反応に関与していない核子

spectator

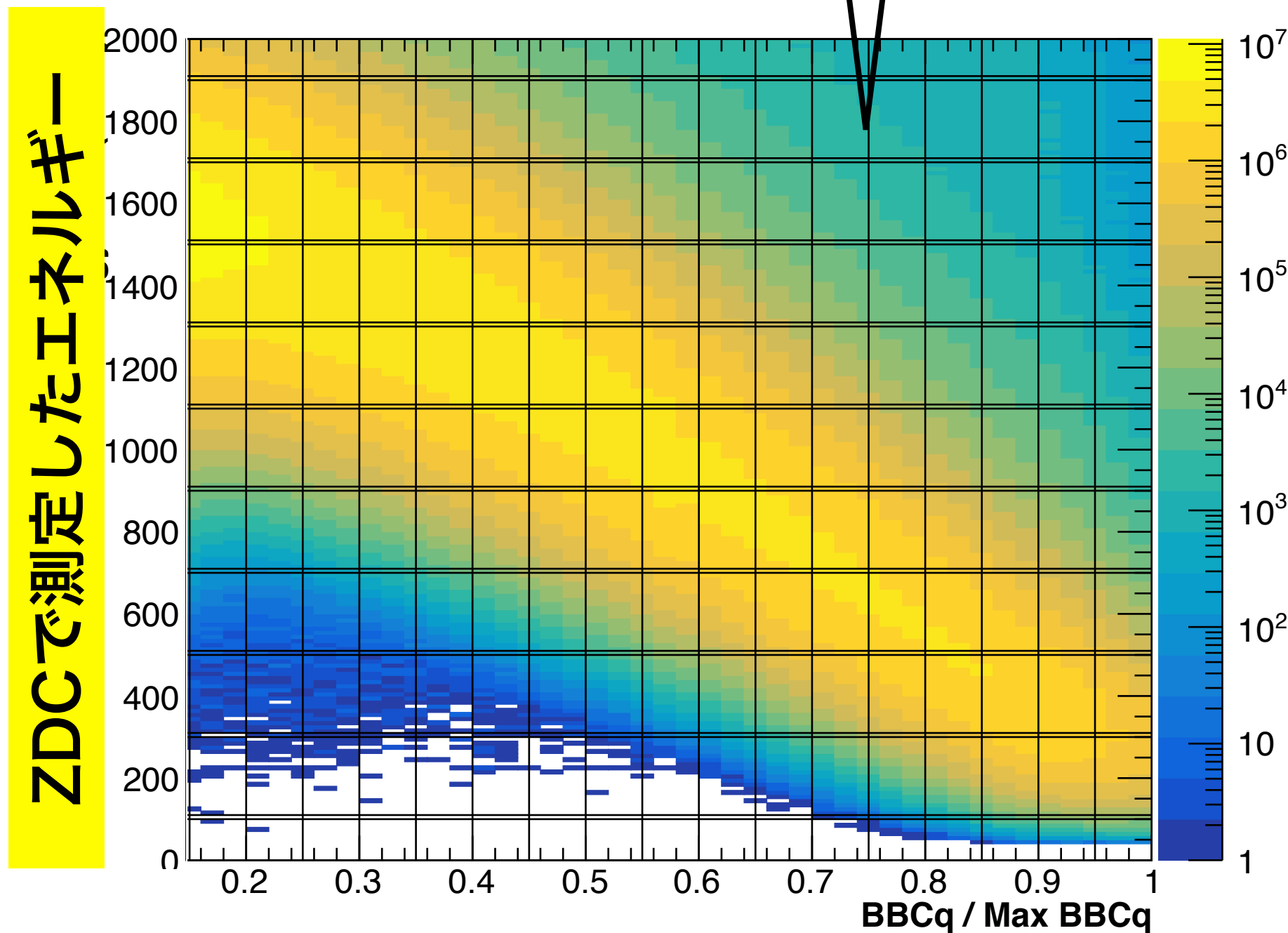


- Spectatorの中性子のエネルギーを測定する ($\propto N_{spec}$)
→ **Zero Degree Calorimeter (ZDC)**
- 衝突によって発生した粒子数を測定
→ **Beam Beam Counter (BBC)**
Forward Silicon Vertex Tracker (FVTX)

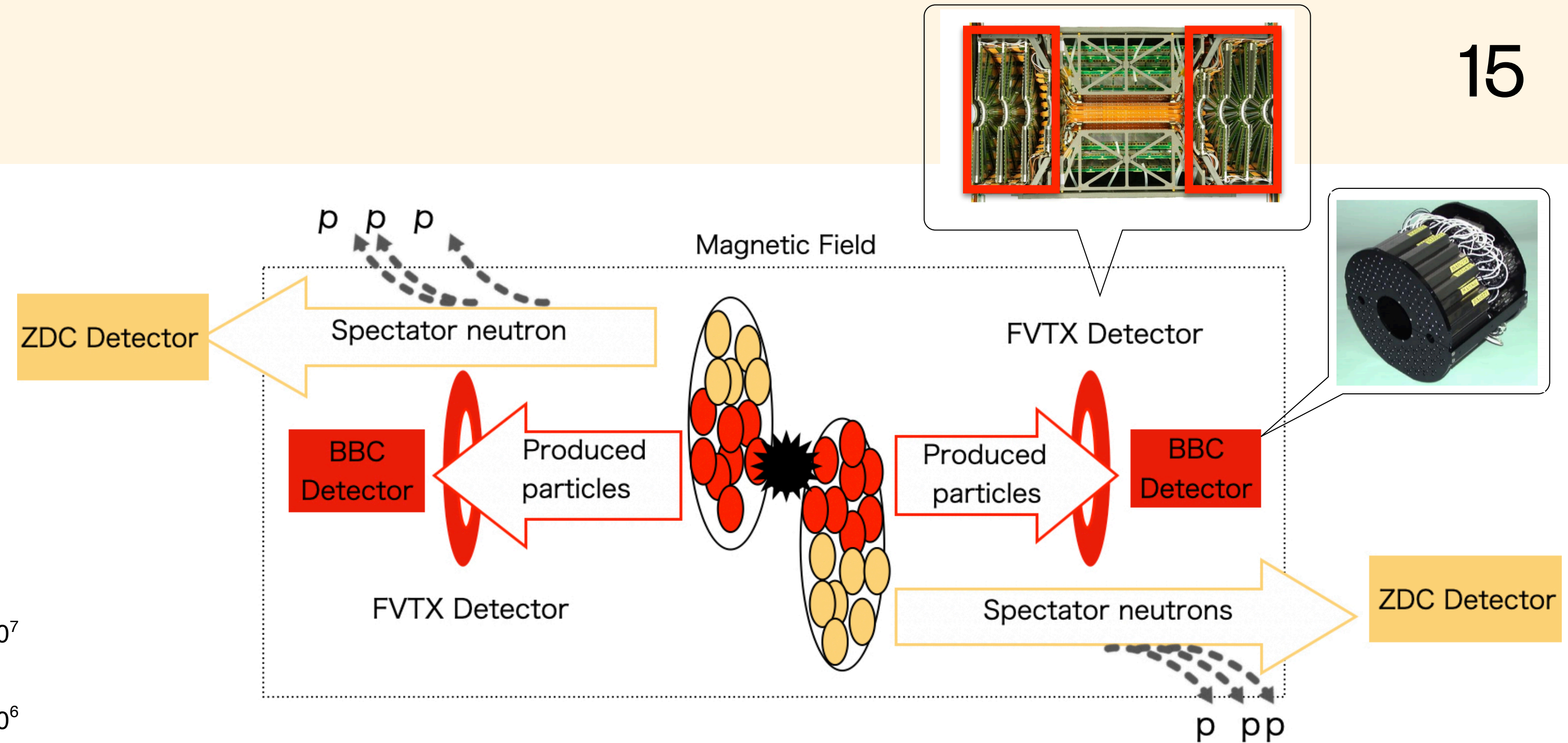
研究概要

• ZDCeと発生粒子数の相関

ZDCで測定したエネルギー(ZDCe)
 $(\propto N_{\text{spec}})$ と発生粒子数は負の相関を持つ



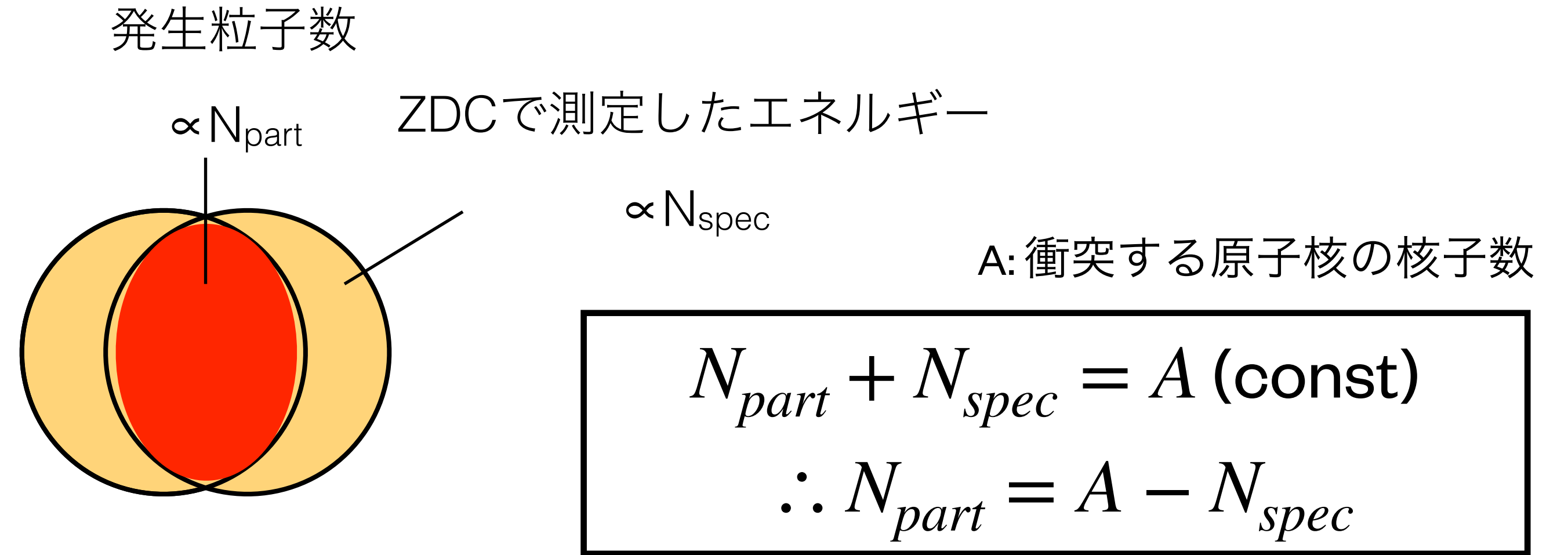
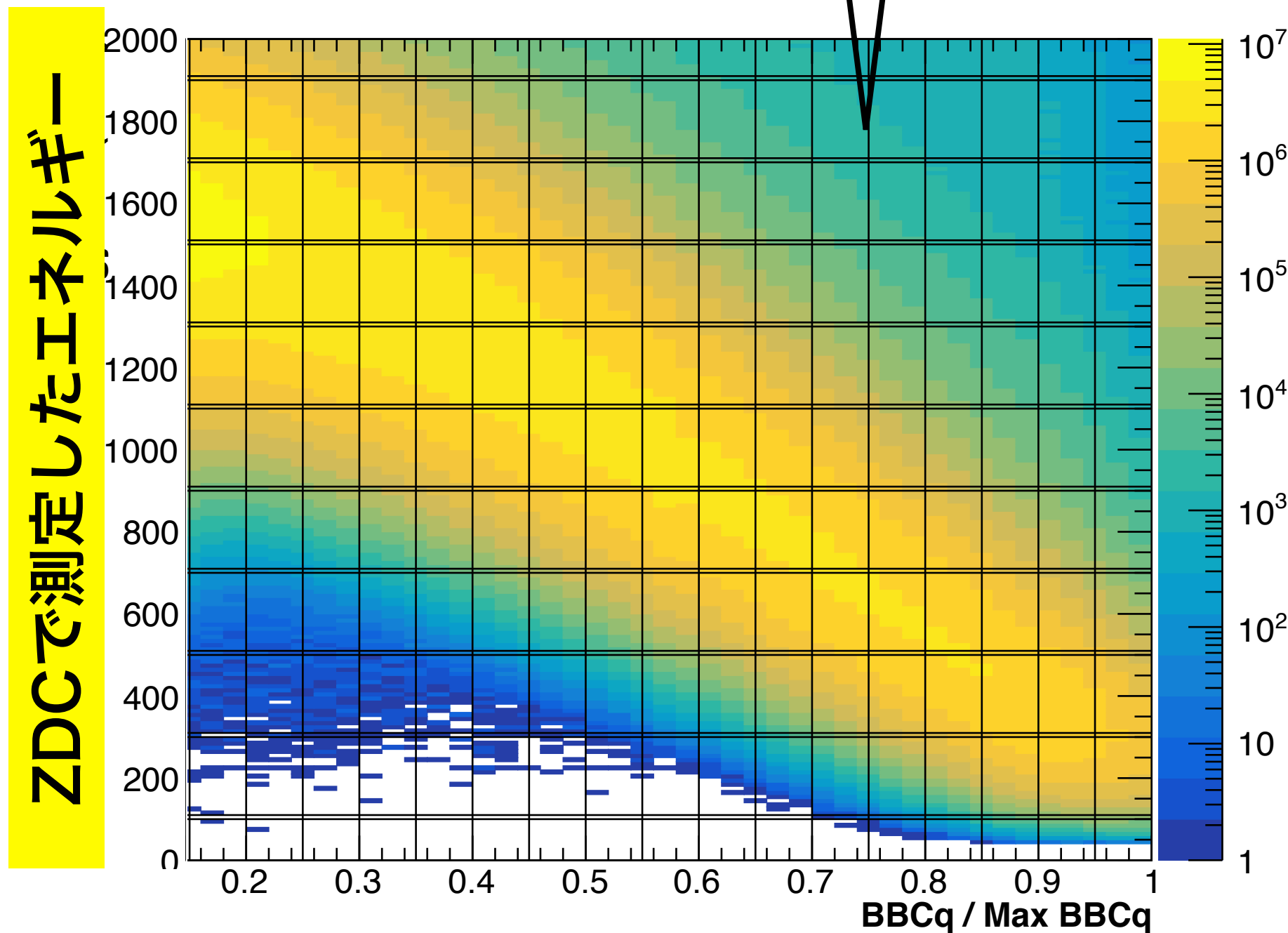
BBCで測定した発生粒子数



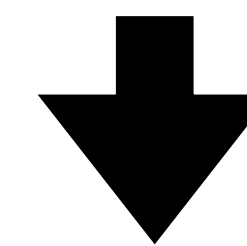
- Spectatorの中性子のエネルギーを測定する($\propto N_{\text{spec}}$)
 → **Zero Degree Calorimeter (ZDC)**
- 衝突によって発生した粒子数を測定
 → **Beam Beam Counter (BBC)**
Forward Silicon Vertex Tracker (FVTX)

- 研究概要

ZDCで測定したエネルギー (ZDCe) ($\propto N_{spec}$) と発生粒子数は負の相関を持つ



ZDCeで測定したエネルギー (ZDCe) + 発生粒子数 = const
ではない



ZDCeが同じで、発生粒子数が異なるイベントについて、その違いが v_2 にどの様に効くのかを調べる

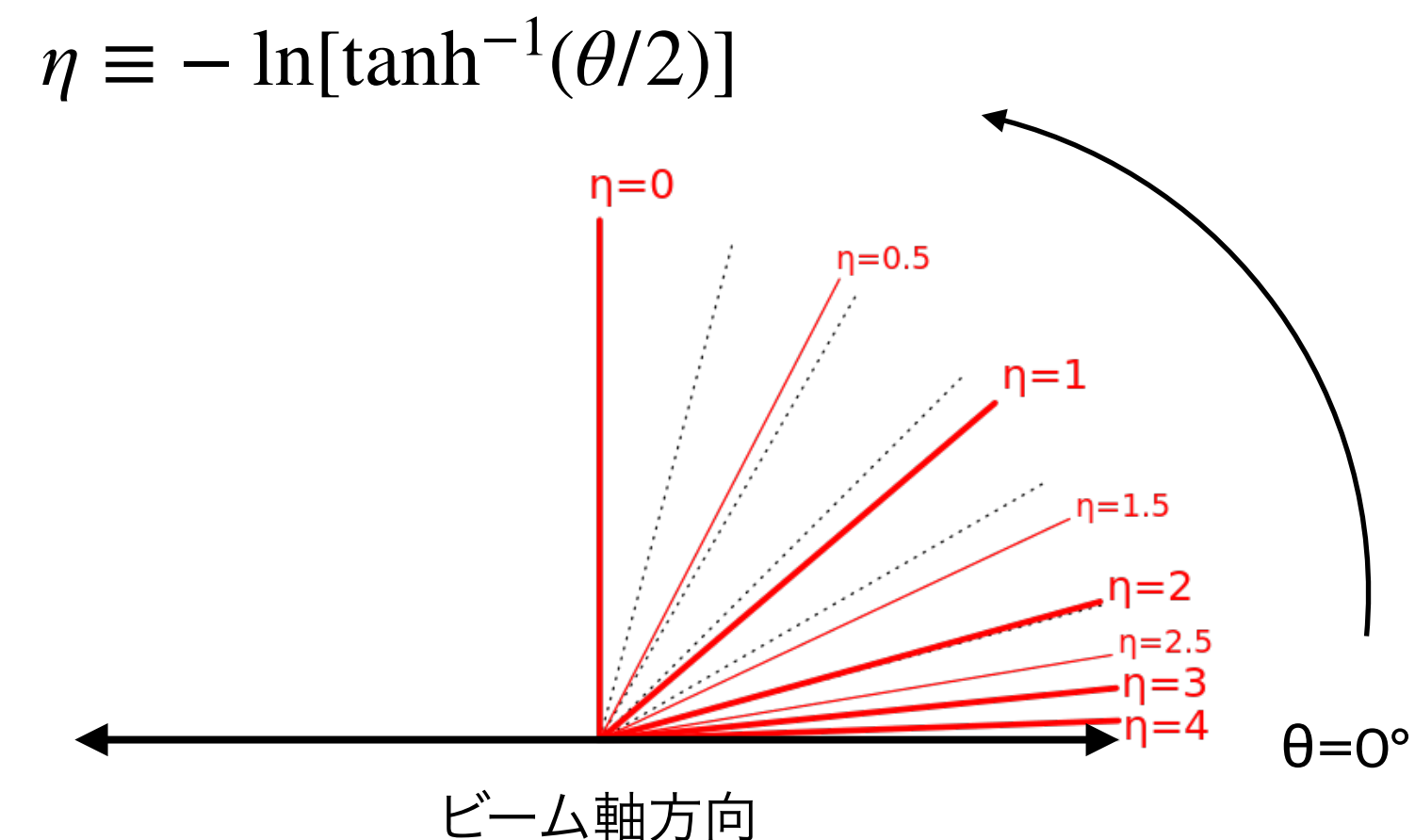
1. ZDCeによるイベント選択を行ったときの v_2 の発生粒子数依存性
2. v_2 の発生粒子数依存性のrapidityによる違い
3. ZDCeによるイベント選択の有無による v_2 の違い

本研究では、発生粒子数の指標として

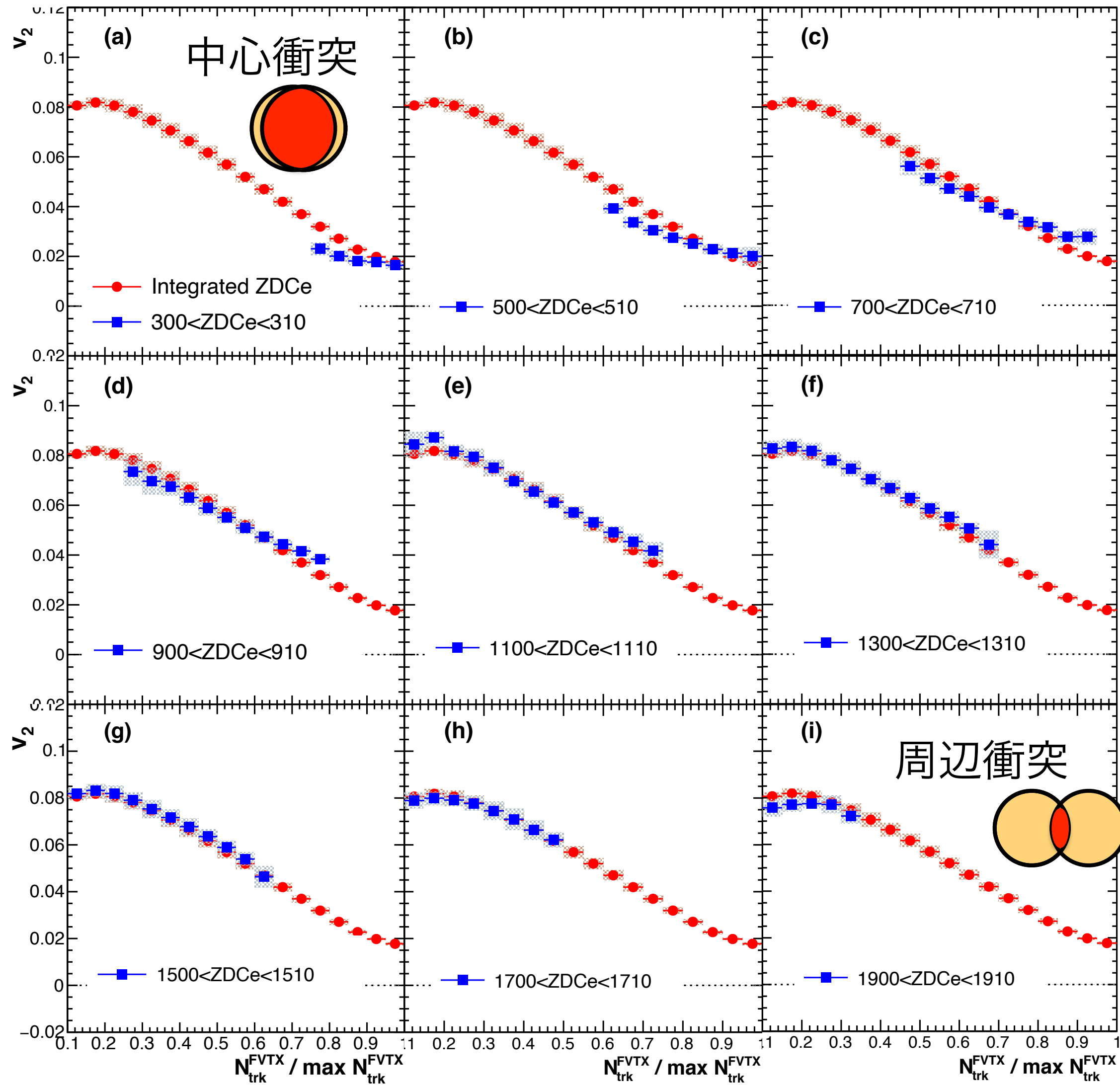
FVTXで測定したトラックの本数： N_{tracks}^{FVTX} ($1.5 < |\eta| < 2.5$)

BBCで測定した電荷総数： Q_{S+N}^{BBC} ($3.5 < |\eta| < 3.9$)

を用いる。

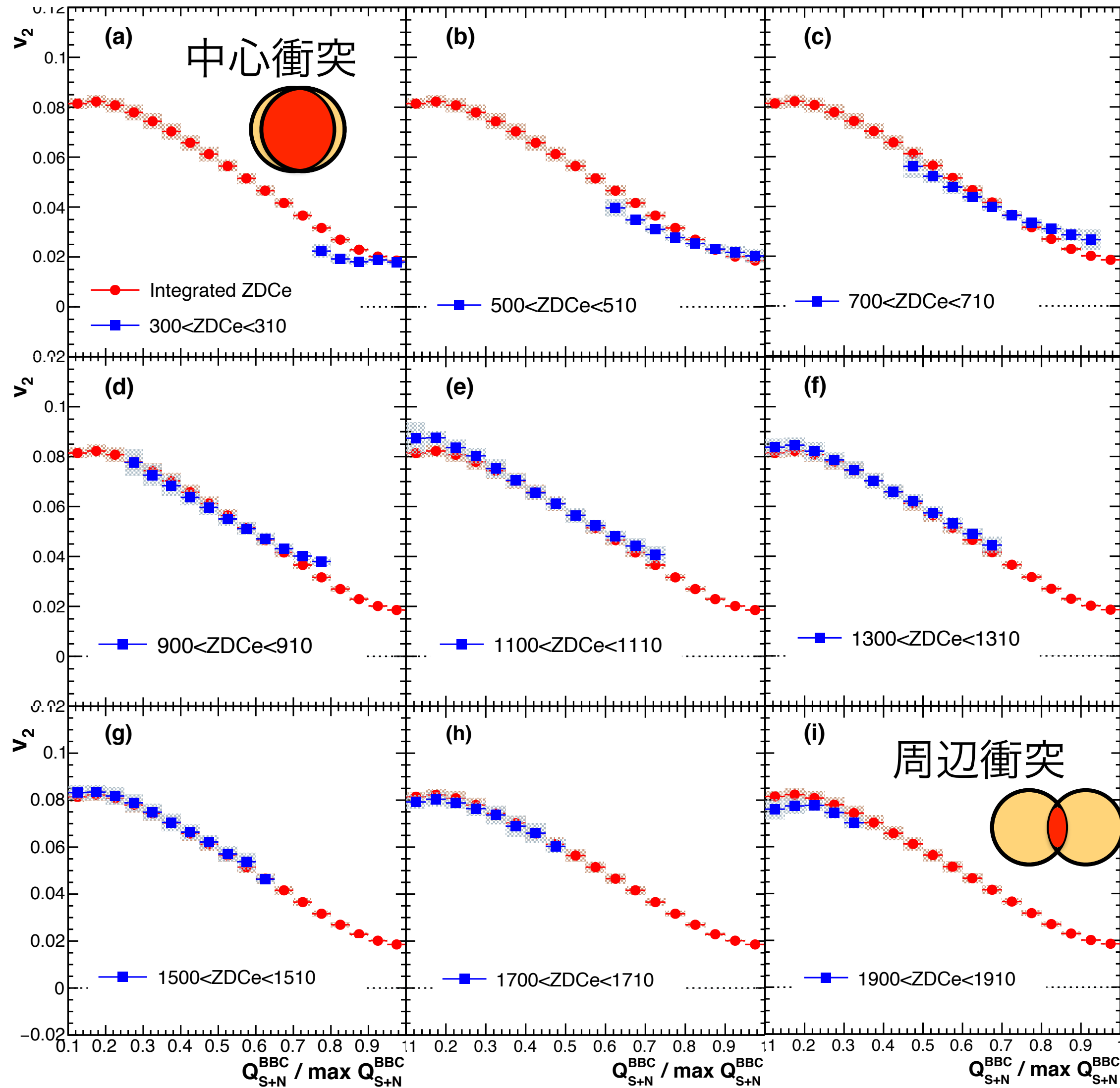


結果： v_2 vs. $N_{\text{tracks}}^{\text{FVTX}}$ ($1.5 < |\eta| < 2.5$)

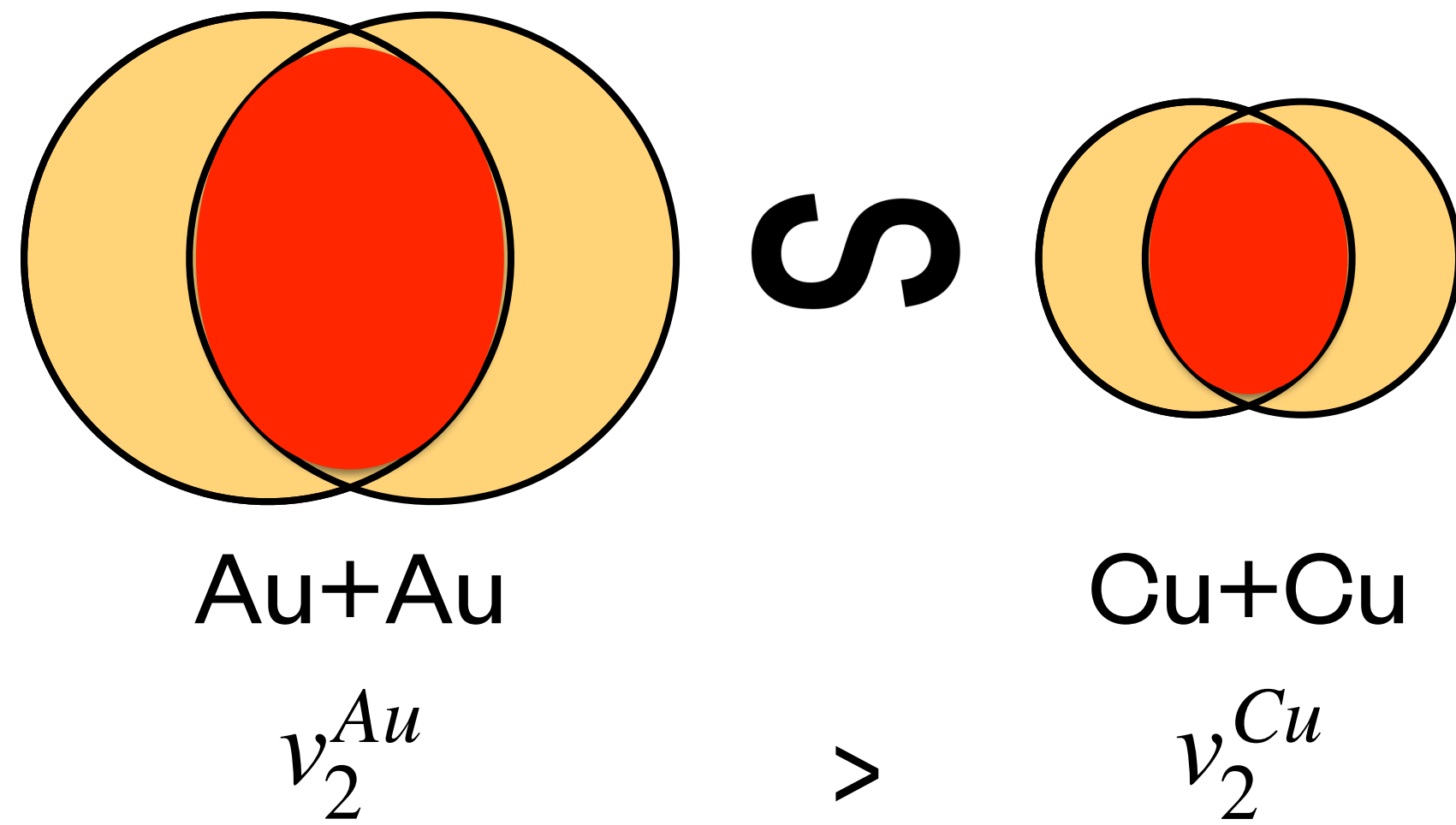


- ZDCeによるイベント分類を9つのクラスに分けて行なった。
 $300 < \text{ZDCe} < 310, 500 < \text{ZDCe} < 510, \dots$
- **赤**：ZDCeによるイベント分類なし
- **青**：ZDCeによるイベント分類を用いた場合
- **どのZDCeクラスにおいても、 v_2 と $N_{\text{tracks}}^{\text{FVTX}}$ に負の相関がある**

結果： v_2 vs. Q_{S+N}^{BBC} ($3.5 < |\eta| < 3.9$)

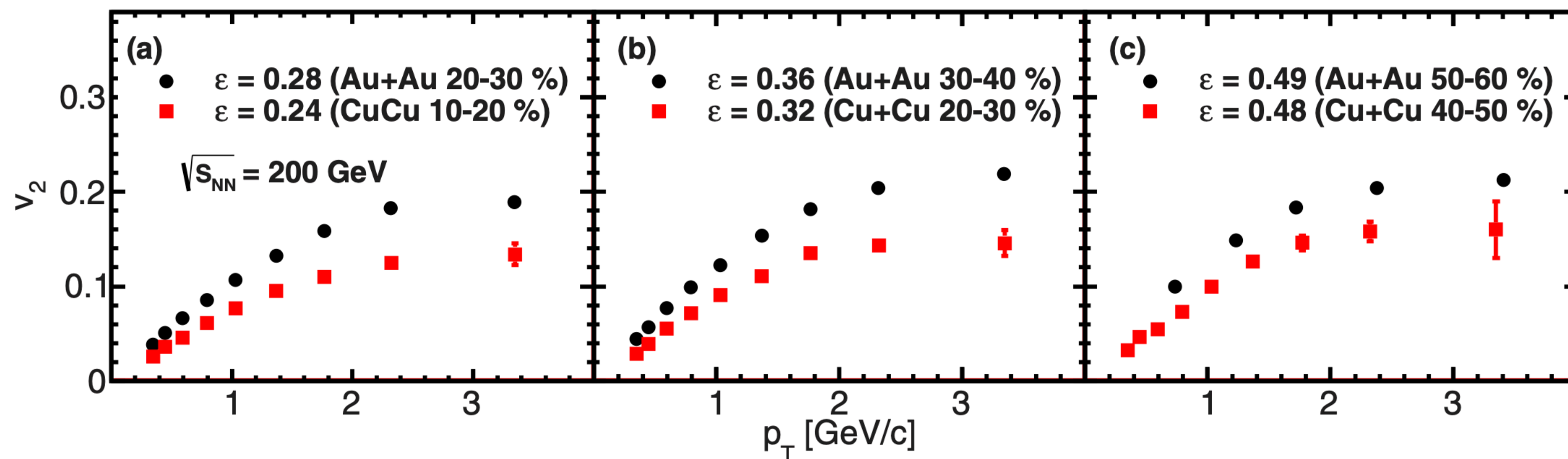


- v_2 と N_{tracks}^{FVTX} の時と同じように、ZDCeを用いて9クラスのイベント分類を行なった
- **赤**：ZDCeによるイベント分類なし
- **青**：ZDCeによるイベント分類を用いた場合
- **どのZDCeクラスにおいても、 v_2 と Q_{S+N}^{BBC} に負の相関がある**
- v_2 vs. N_{tracks}^{FVTX} の結果と同じ

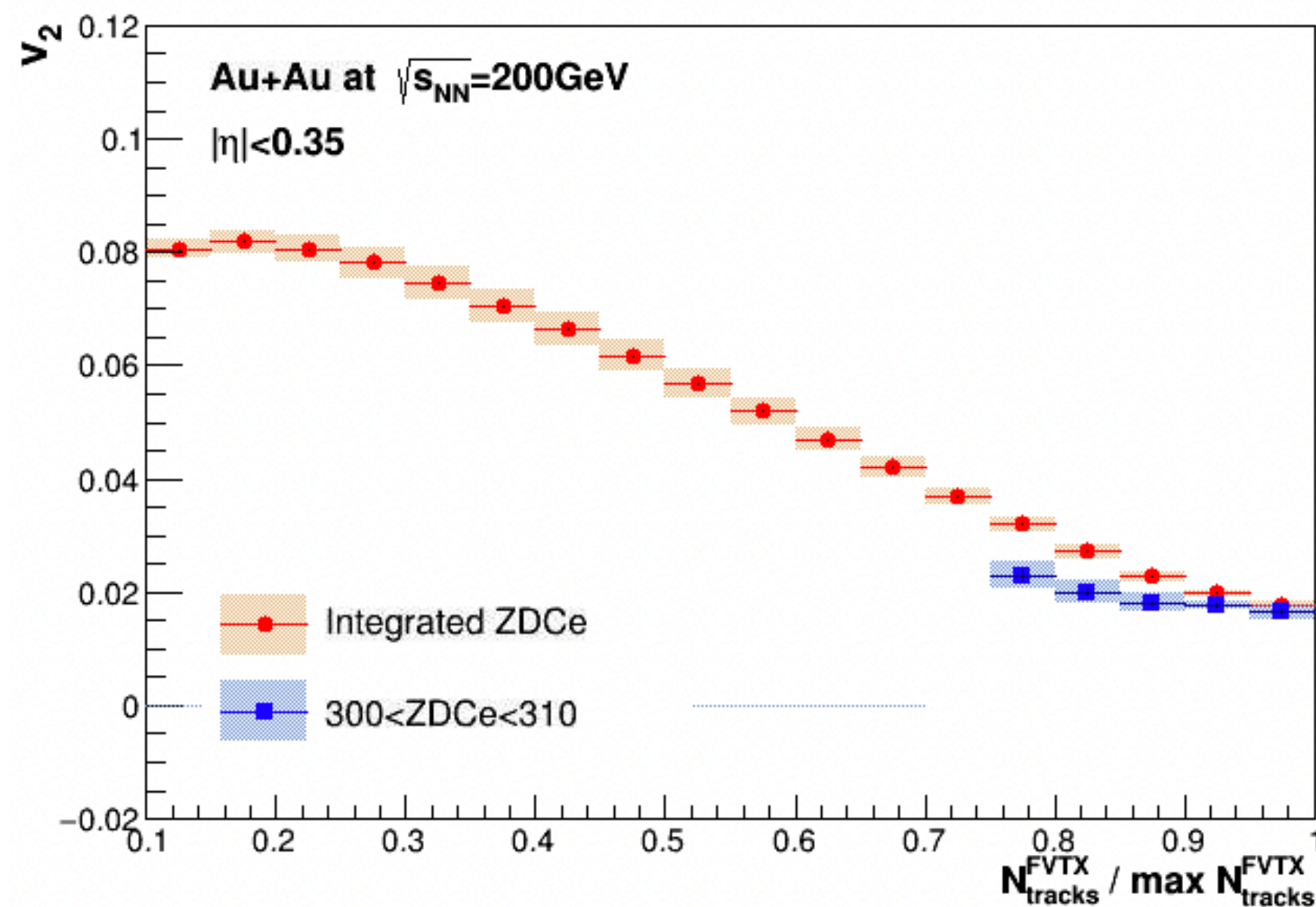


- ZDCeのイベント分類によって、 N_{part} が同じイベントを選ぶと、楕円率が同じイベントを選べると考えていた
 → 楕円率が同じで、反応領域内部に持ち込まれるエネルギーが大きい(発生粒子数) が大きい方が v_2 が大きくなる

Phys. Rev. C **92**, 034913



考察①



- ZDCeのイベント分類によって、 N_{part} が同じイベントを選ぶと、楕円率が同じイベントを選べると考えていた
→ 楕円率が同じで、反応領域内部に持ち込まれるエネルギーが大きい(発生粒子数) が大きい方が v_2 が大きくなる
- 今回の解析結果では、ZDCeのイベント分類を行なっても、発生粒子数と v_2 は負の相関を示した
→ ZDCeによるイベント分類が、どの程度同じ N_{part} または楕円率のイベントを選ぶことができているのか、シミュレーションが必要

結果： v_2 の発生粒子数依存性のrapidityによる違い 22

ZDCeによるイベント選択を用いた、 v_2 vs. Q_{S+N}^{BBC} と v_2 vs. N_{tracks}^{CNT} を測定した際、

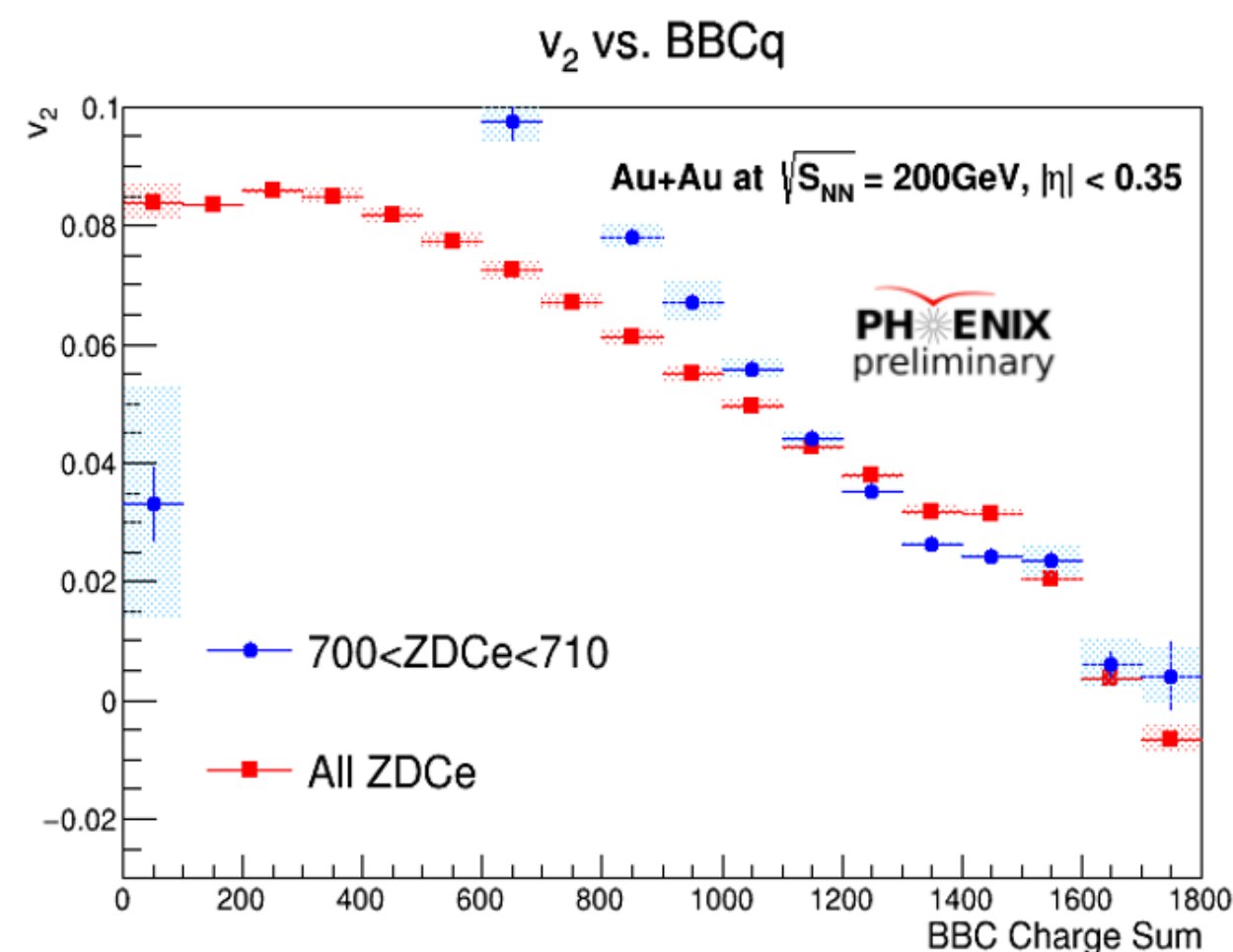
v_2 の Q_{S+N}^{BBC} 依存性と N_{tracks}^{CNT} に違いが見えた

→ 発生粒子数を測定する検出器のrapidity依存性があると仮定し、

N_{tracks}^{FVTX} に依存する v_2 と Q_{S+N}^{BBC} に依存する v_2 を比較した

v_2 を押し上げるバイアスがあることがわかっている

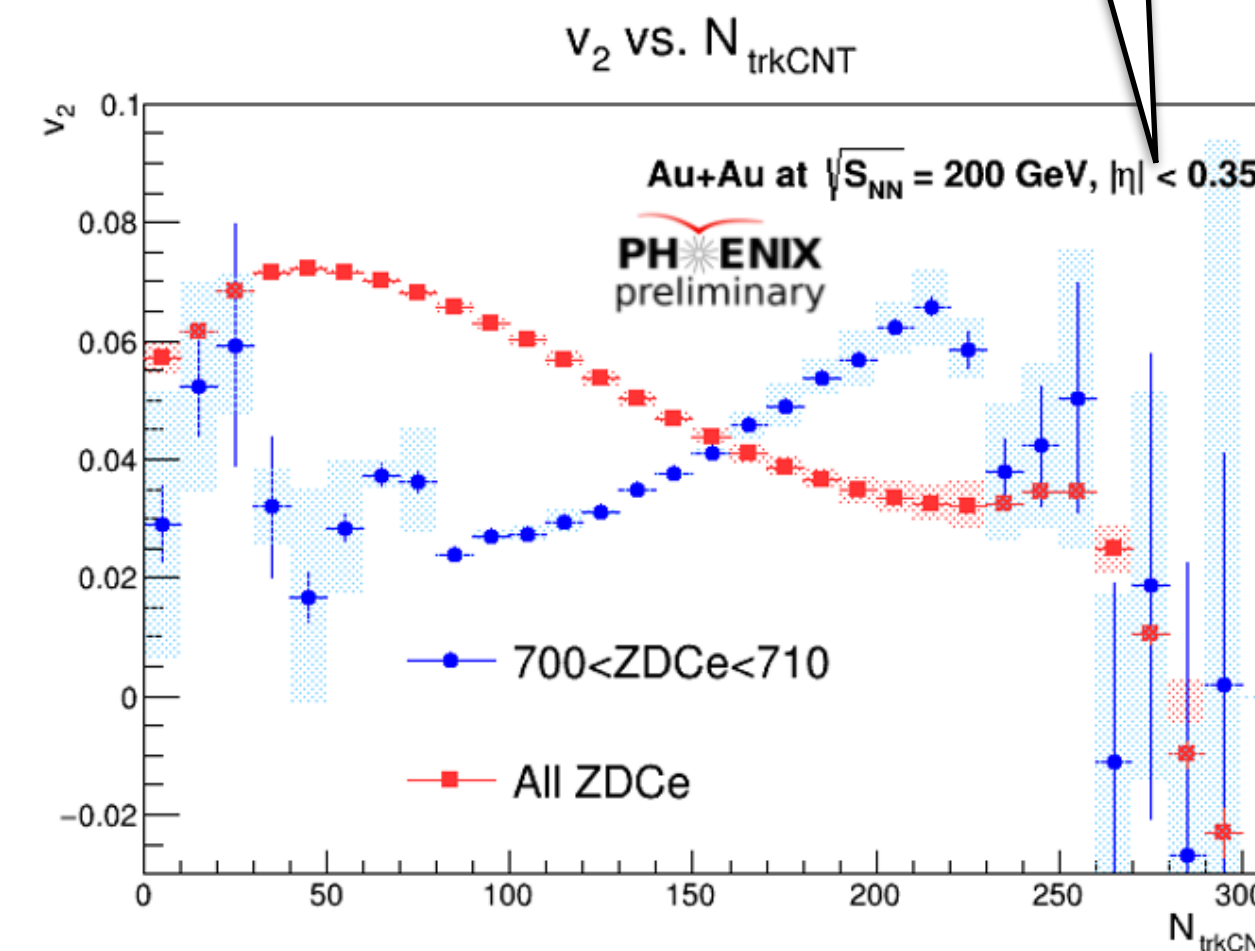
BBC : $3.1 < |\eta| < 3.9$



FVTX : $1.5 < |\eta| < 2.5$

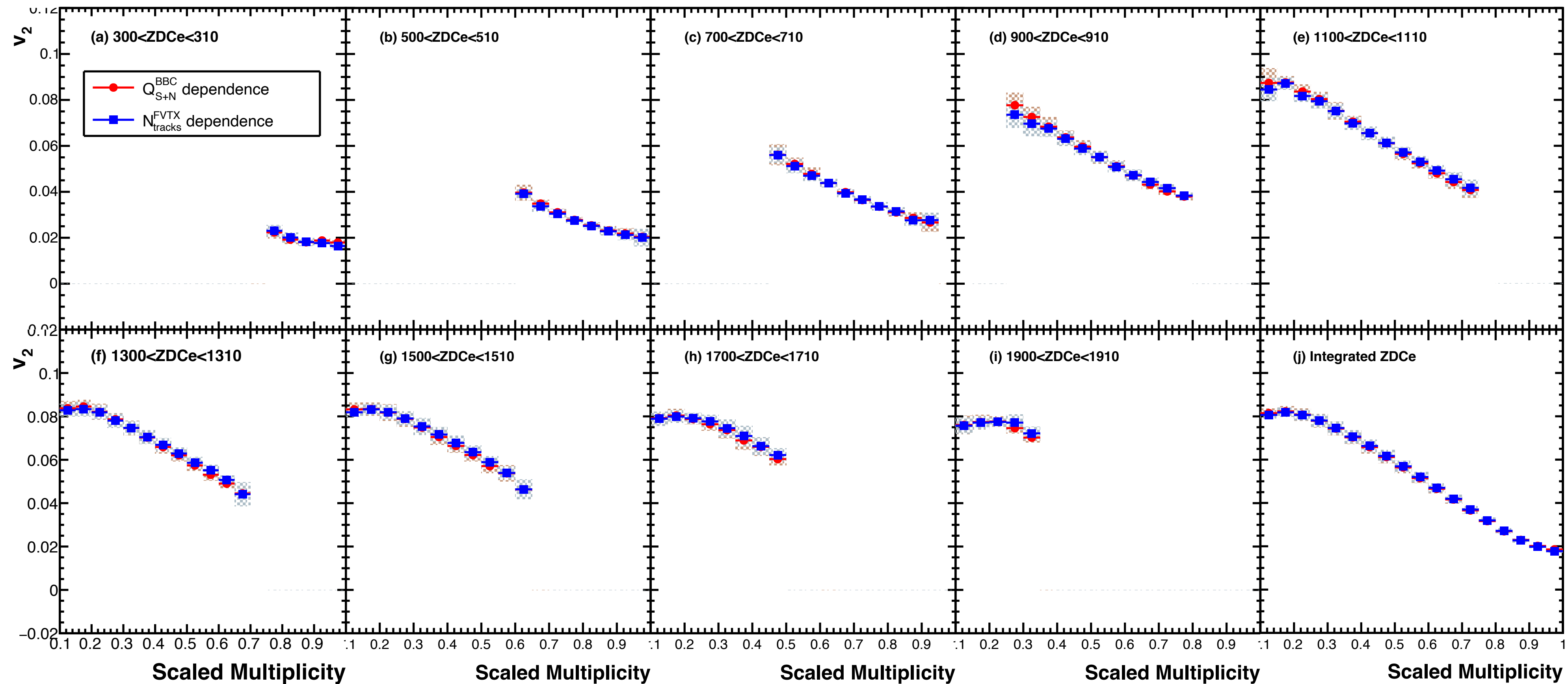


CNT : $|\eta| < 0.35$



結果： v_2 の発生粒子数依存性のrapidityによる違い 23

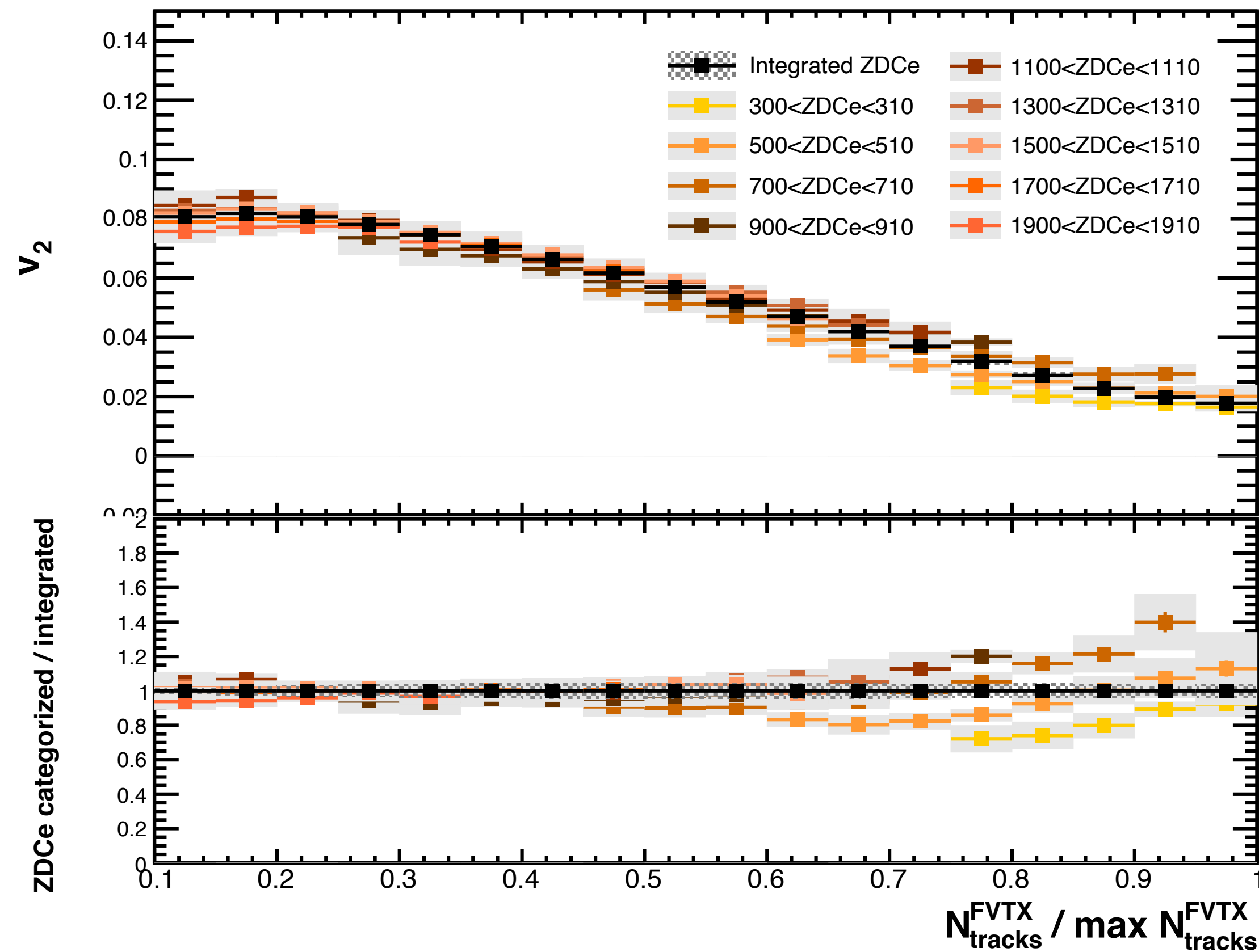
FVTX($1.5 < |\eta| < 2.5$)とBBC($3.1 < |\eta| < 3.9$)の範囲では v_2 の発生粒子数依存性にrapidityによる違いは見られない



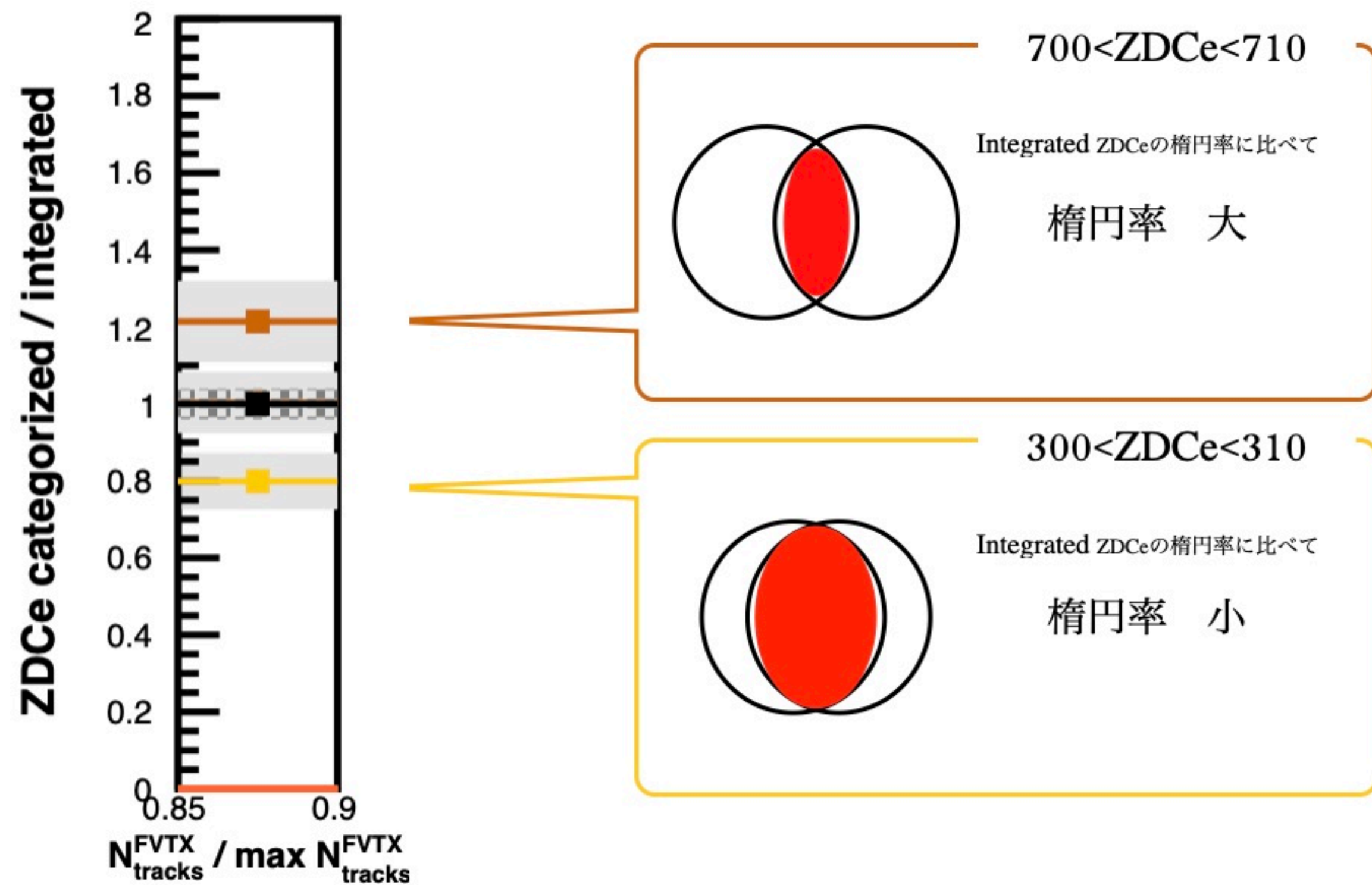
結果：ZDCeによるイベント選択の有無による v_2 の違い 24

Upper: 解析した全てのZDCeイベントクラスでの v_2 の比較

Bottom: ZDCeによるイベント選択を行わずに求めた v_2 と、ZDCeによるイベント選択を行なった v_2 の比



- ZDCeによるイベント選択を行うと、ZDCeによるイベント選択を行わない場合に比べて、発生粒子数が大きいところで v_2 に違いがあることがわかった
- 発生粒子数のみで決定される、中心衝突度の関数として v_2 を見ている先行研究では見られない違い



- 粒子多重度が同じでもZDCeが大きいところでは楕円率が大きく、ZDCeが小さいところで楕円率が小さい

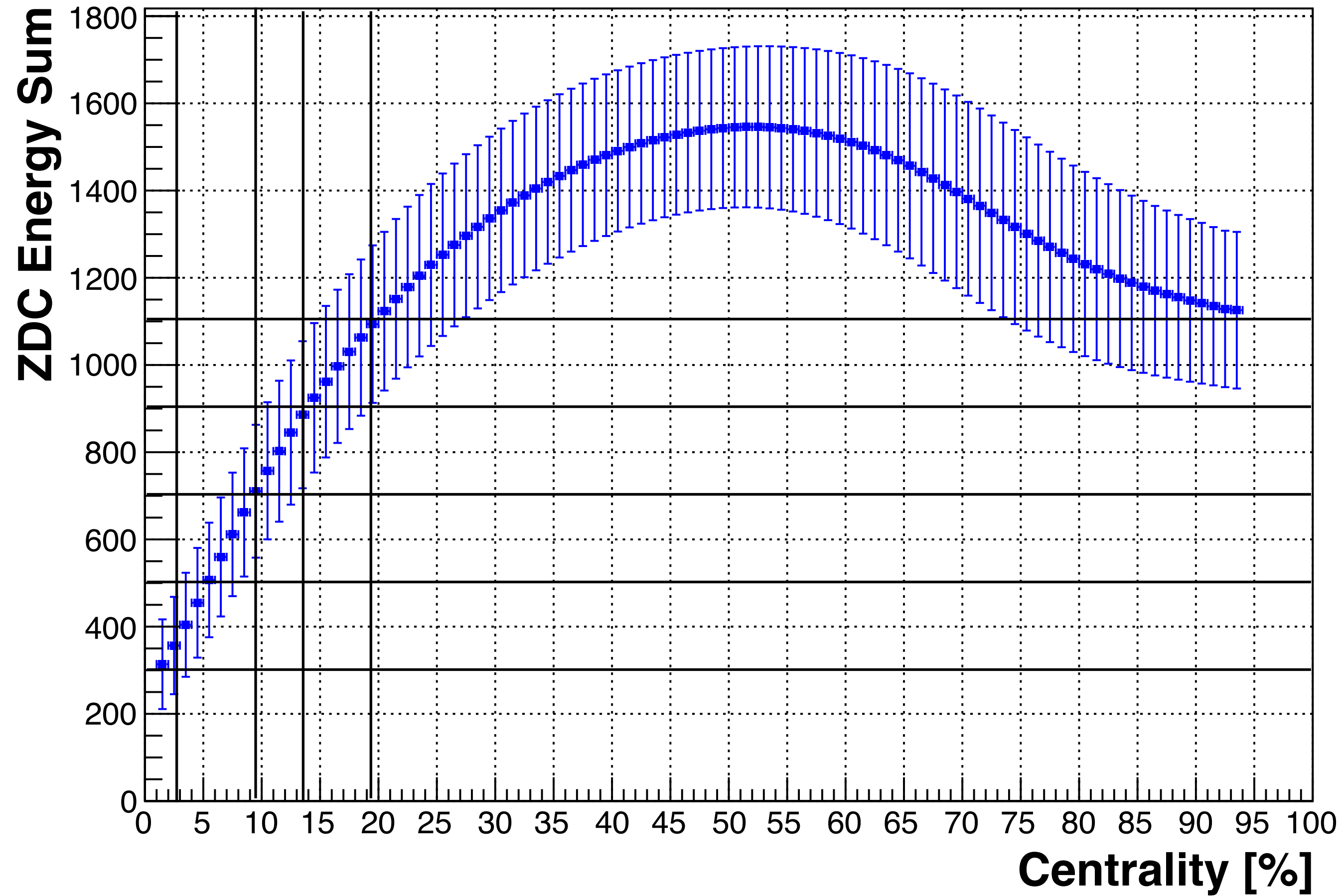
→ ZDCeが小さいところで N_{part} も大きく、ZDCeが大きいところで N_{part} も小さい

→ N_{part} の値は違うが、発生粒子数が同じになるイベントがあることを、 v_2 の結果も示している

- ZDCeによるイベントの分類を行い、 v_2 の N_{tracks}^{FVTX} 依存性と Q_{S+N}^{BBC} 依存性を調べた
- その結果、ZDCeによるイベントの分類を用いても、イベント分類を行わない場合と同様に v_2 は粒子多重度が増えるに従って減少した
 - ZDCeによるイベント分類がどの程度同じ楕円率のイベントを選んでいるのか、シミュレーションの結果と比較する必要がある
- N_{tracks}^{FVTX} 依存に依存する v_2 と Q_{S+N}^{BBC} に依存する v_2 では値に違いがなかった
 - v_2 の粒子多重度を測定する検出器のrapidity依存性は見られない
- 同じ粒子多重度のイベントにおいて、ZDCeの値によって v_2 の値に違いがあることがわかった
 - 粒子多重度のみで決定される中心衝突度の関数として v_2 を見ている場合には見られない違いであり、今後この差がどの程度影響のあるものなのか調べる

Back Up

ZDCと中心衝突度の関係



$300 < \text{ZDCe} < 310 \rightarrow 0\text{-}5\%$

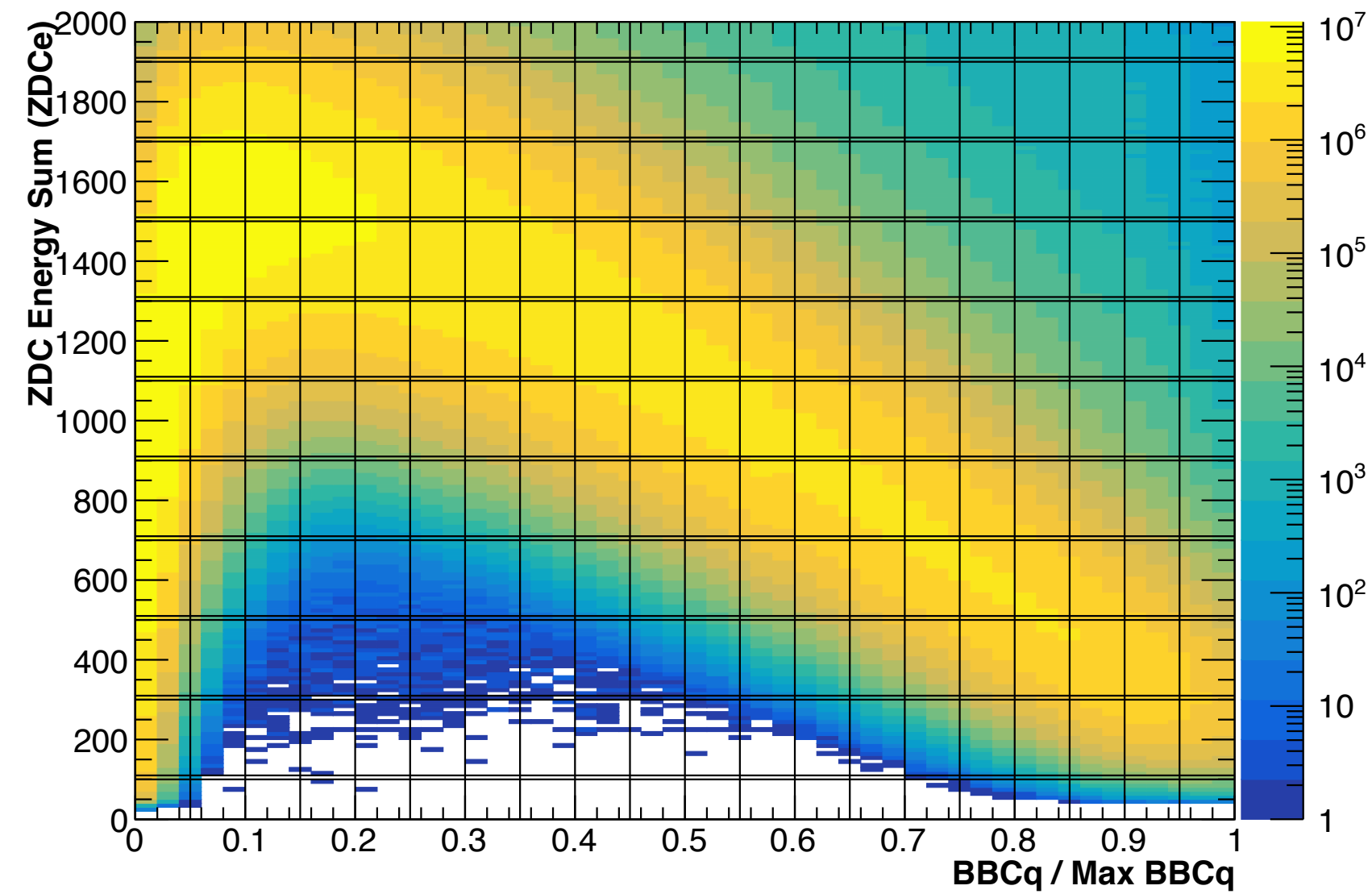
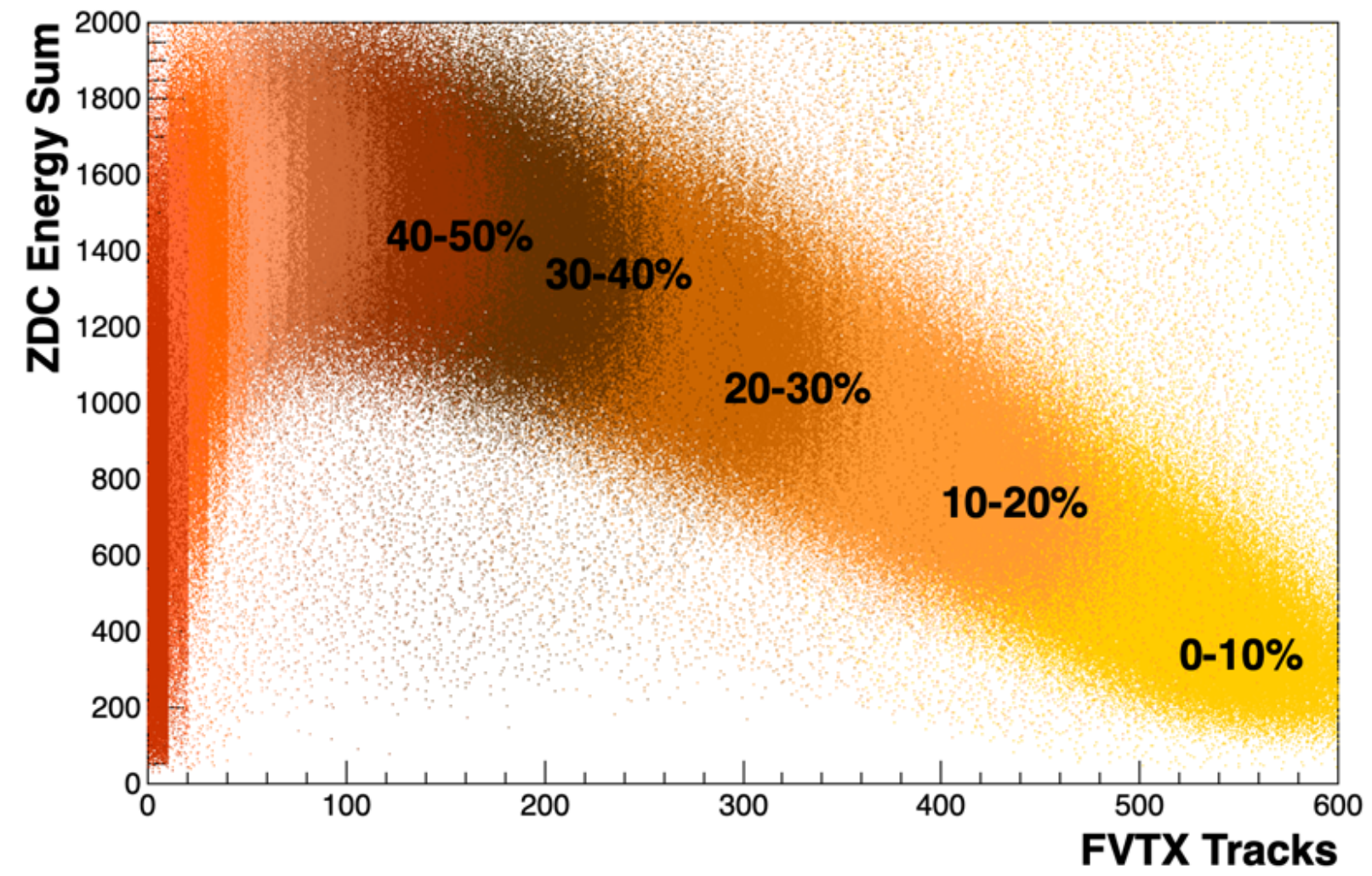
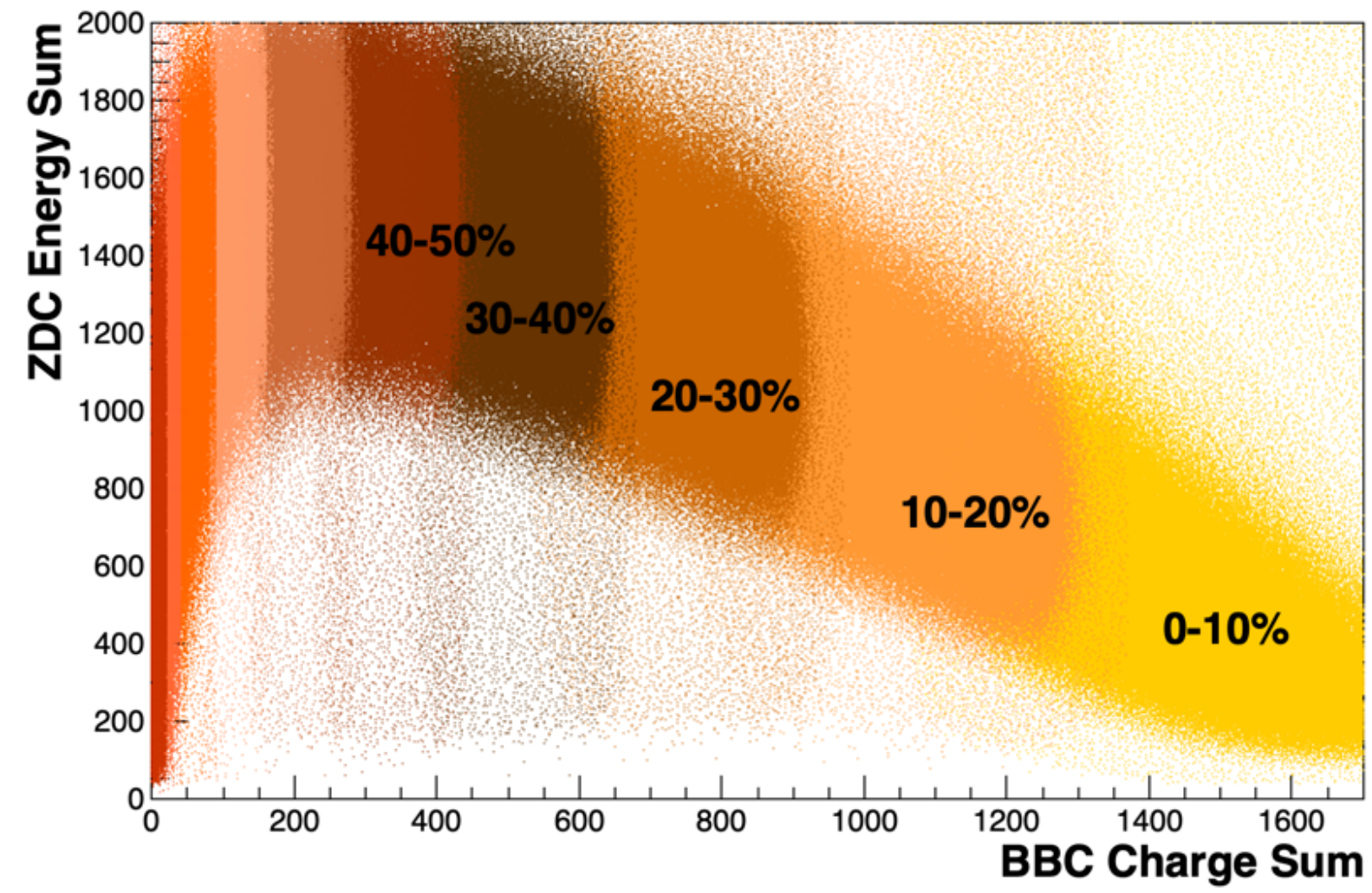
$500 < \text{ZDCe} < 510 \rightarrow 5\text{-}10\%$

$700 < \text{ZDCe} < 710 \rightarrow 5\text{-}10\%$

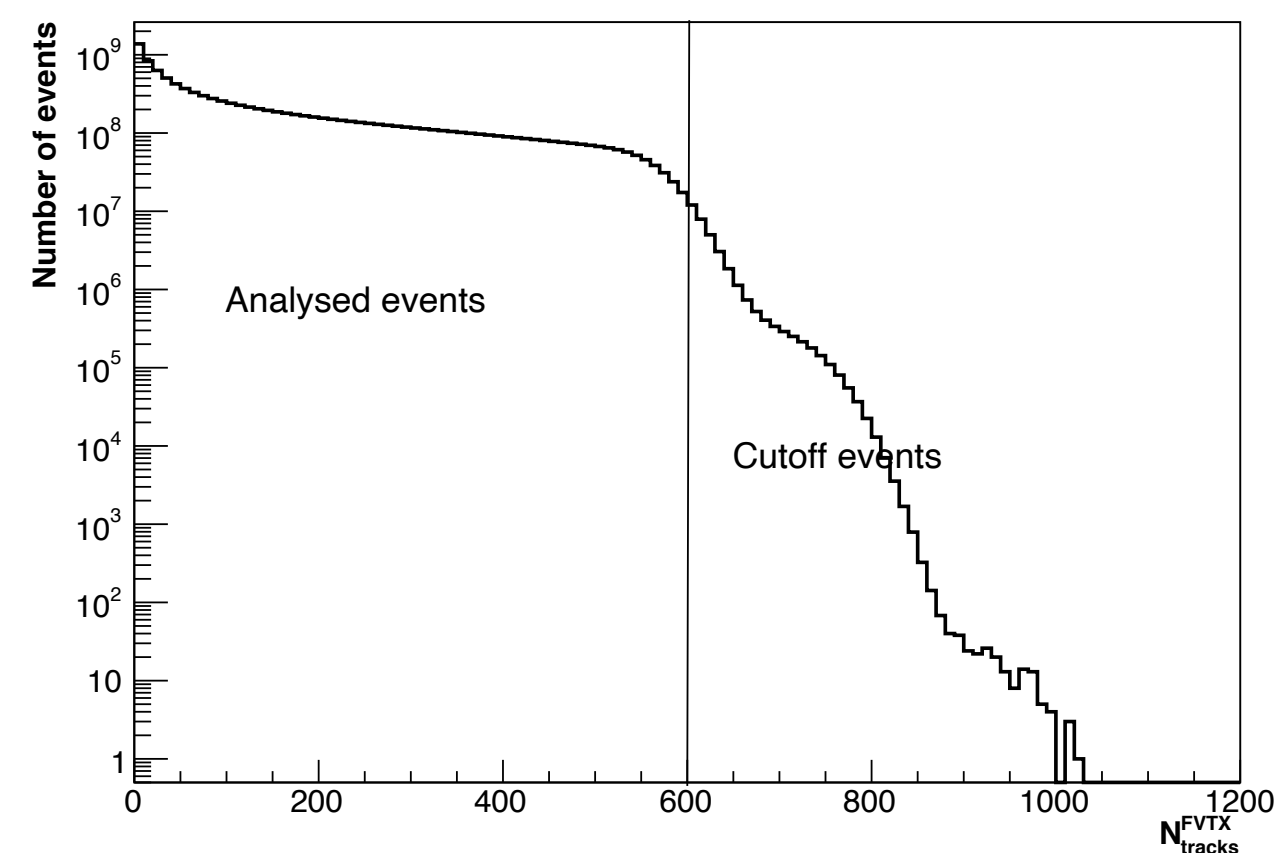
$900 < \text{ZDCe} < 910 \rightarrow 10\text{-}15\%$

$1100 < \text{ZDCe} < 1100 \rightarrow 15\text{-}20\%$

発生粒子数と中心衝突度の関係



$N_{\text{tracks}}^{\text{FVTX}}$ 分布



- それぞれの分布の肩の値で、 $N_{\text{tracks}}^{\text{FVTX}}/\max N_{\text{tracks}}^{\text{FVTX}}$ 、 $Q_{\text{S+N}}^{\text{BBC}}/\max Q_{\text{S+N}}^{\text{BBC}}$ としてスケーリングした

- ZDCeとスケーリング後の $N_{\text{tracks}}^{\text{FVTX}}$ と $Q_{\text{S+N}}^{\text{BBC}}$ の分布が一致している
→スケーリングは正しく行えている

$Q_{\text{S+N}}^{\text{BBC}}$ 分布

