

平成30年度

修士論文発表会

**核子対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**

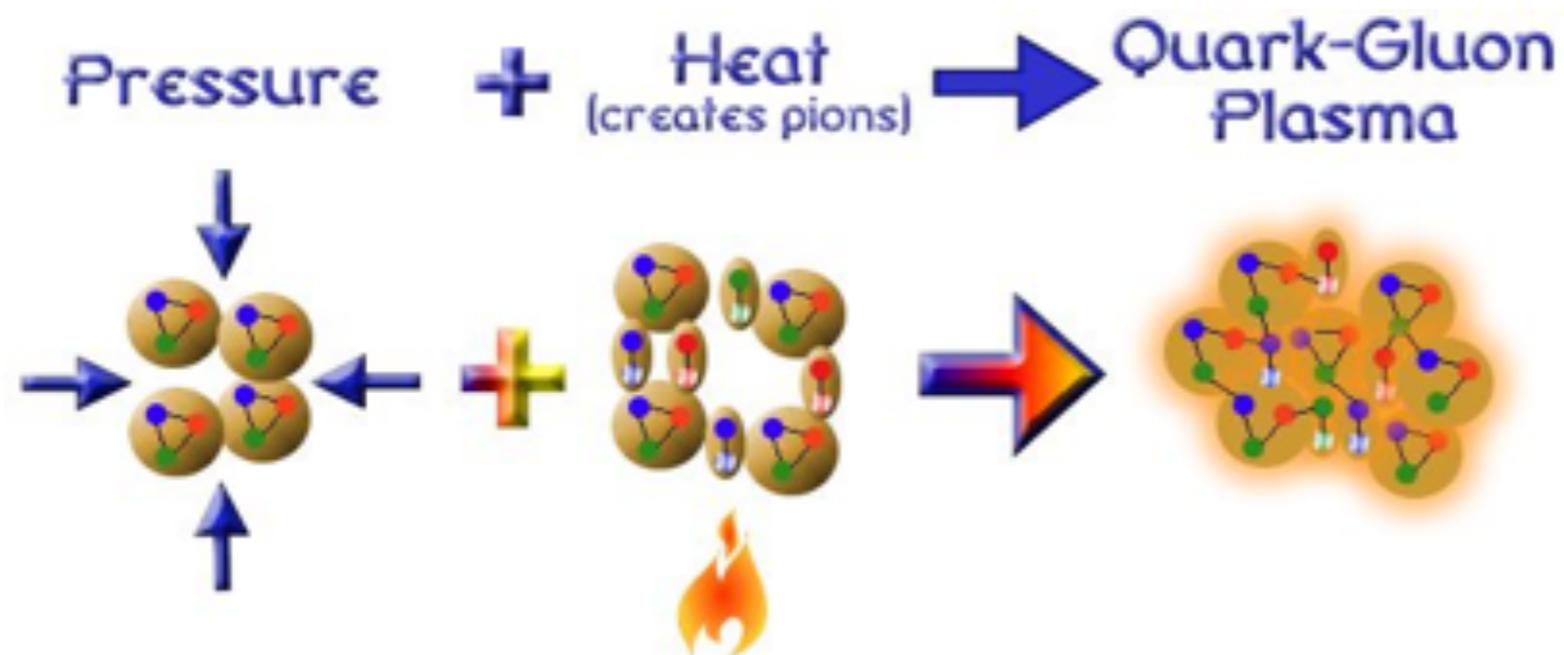
**高エネルギー物理学研究室**

**西谷 理佐**

20190214

# 何を知りたいか？

## クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)



初期宇宙 (約2兆°C) では核子が溶けて、クォークとグルーオンが解放されたQGP状態であったと予想されている

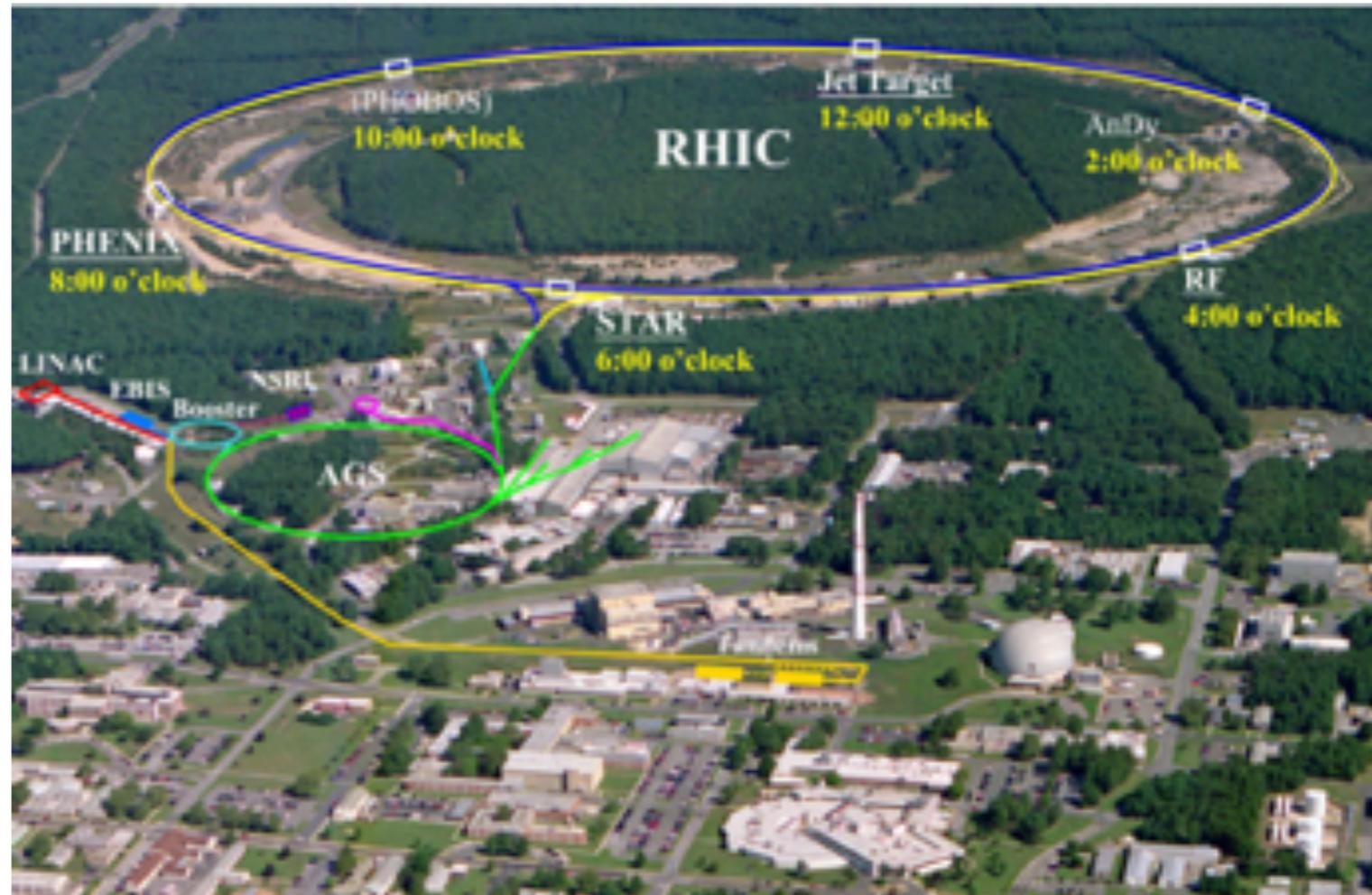
- QGPとは、クォークとグルーオンが高温高圧下でハドロン内部の閉じ込めから解放され形成する流体
- 高エネルギー重イオン衝突を用いてQGPを実現

QGPの性質を定量的に探ることが次の課題

# 高エネルギー重イオン衝突 (1)

- 高エネルギー重イオン衝突型加速器

米国  
ブルックヘブン国立研究所  
RHIC加速器：  
Au+Au@200GeV



- PHENIX実験
- • • RHICでの原子核衝突反応からのQGPの多種多様なシグナルを同時に測定することが目的



# PHENIX 実験の検出器

Beam Beam Counter(BBC):  
centrality

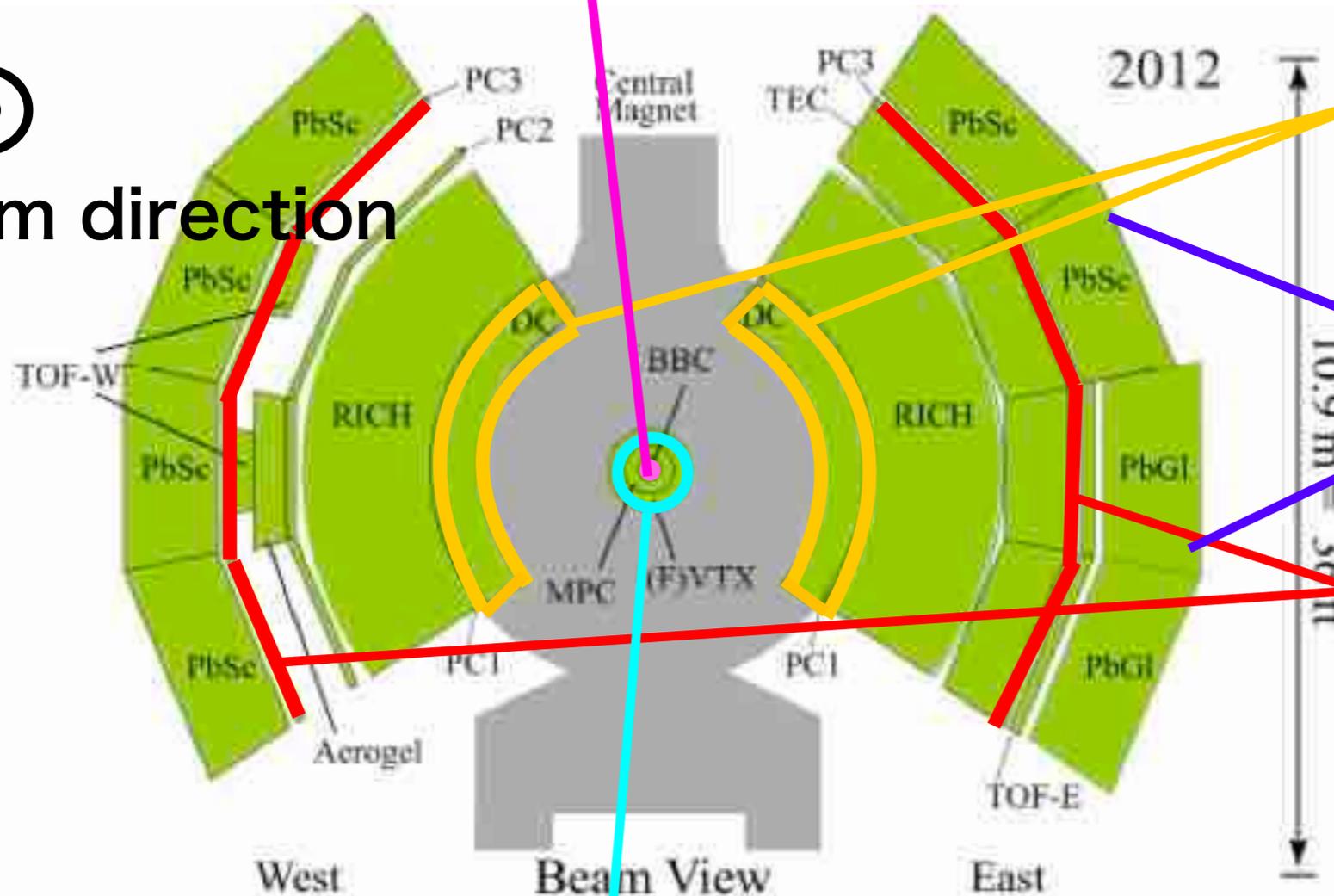
◎  
beam direction

Drift Chamber:  
運動量, 飛跡検出

EMCalorimeter:  
エネルギー・位置

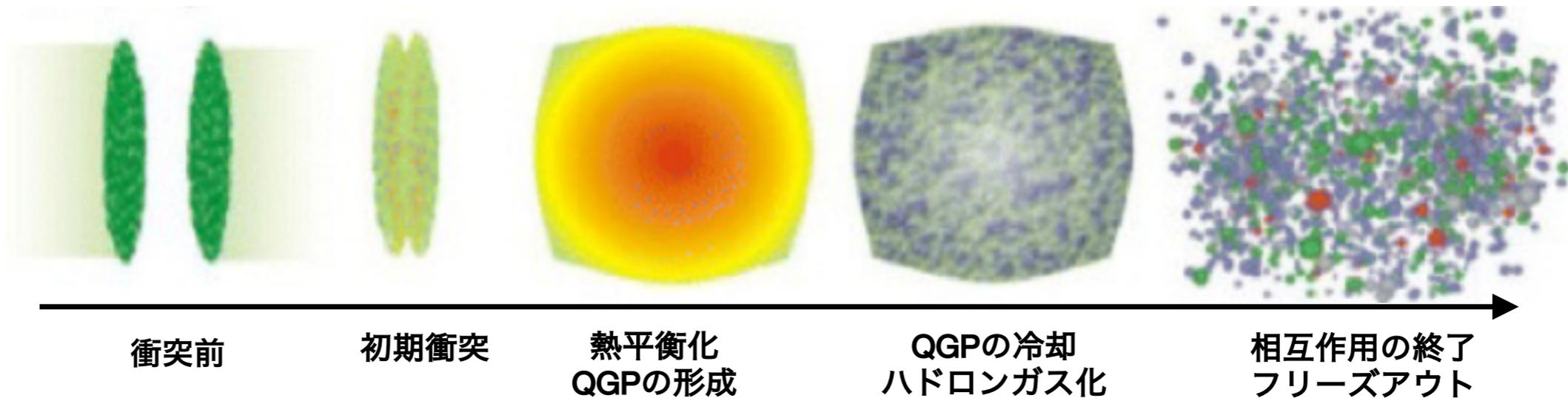
Pad Chamber:  
飛跡検出

FVTX:  
反応平面



# 高エネルギー重イオン衝突 (2)

- 重イオン衝突の時間発展の一般的な描像

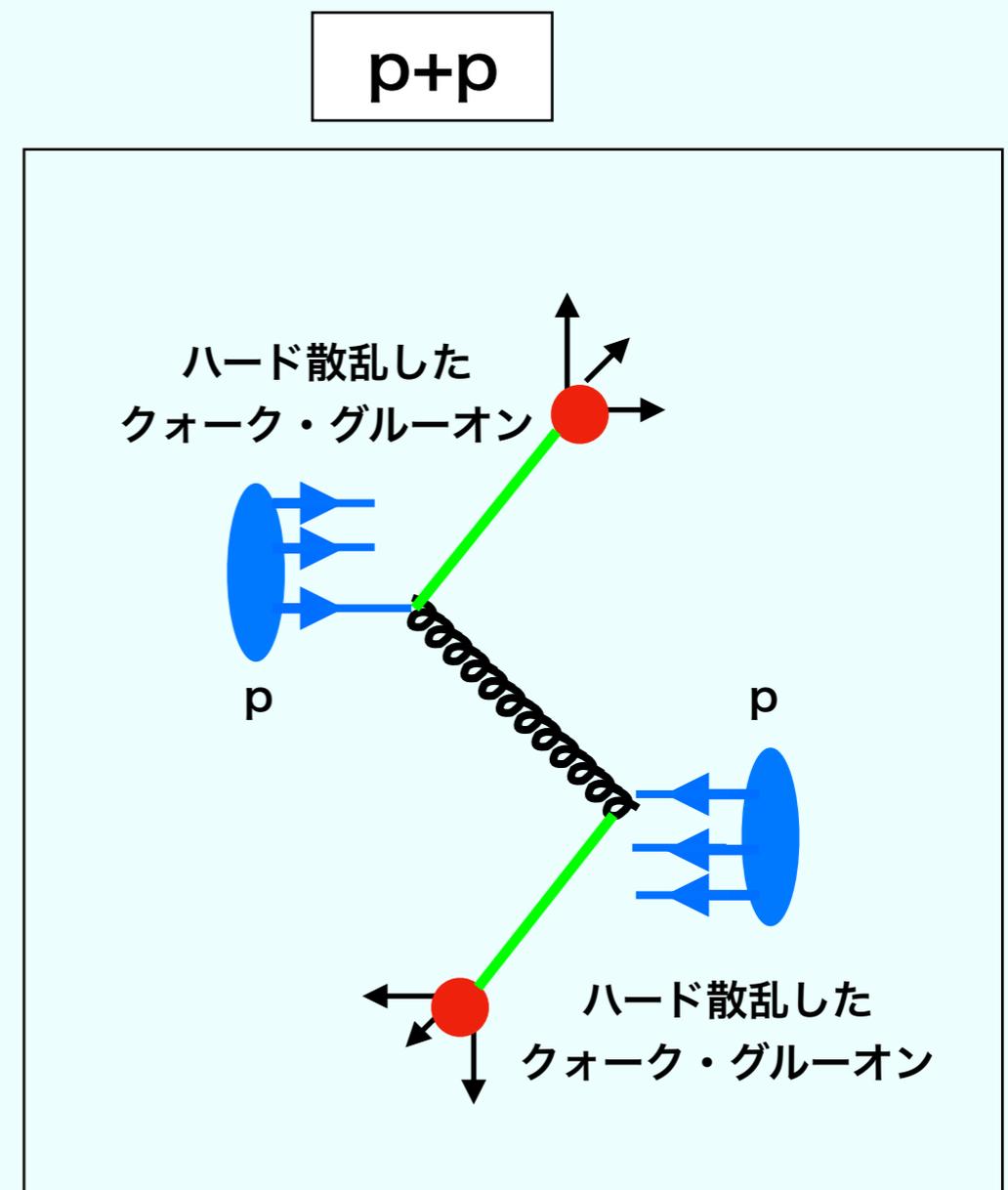
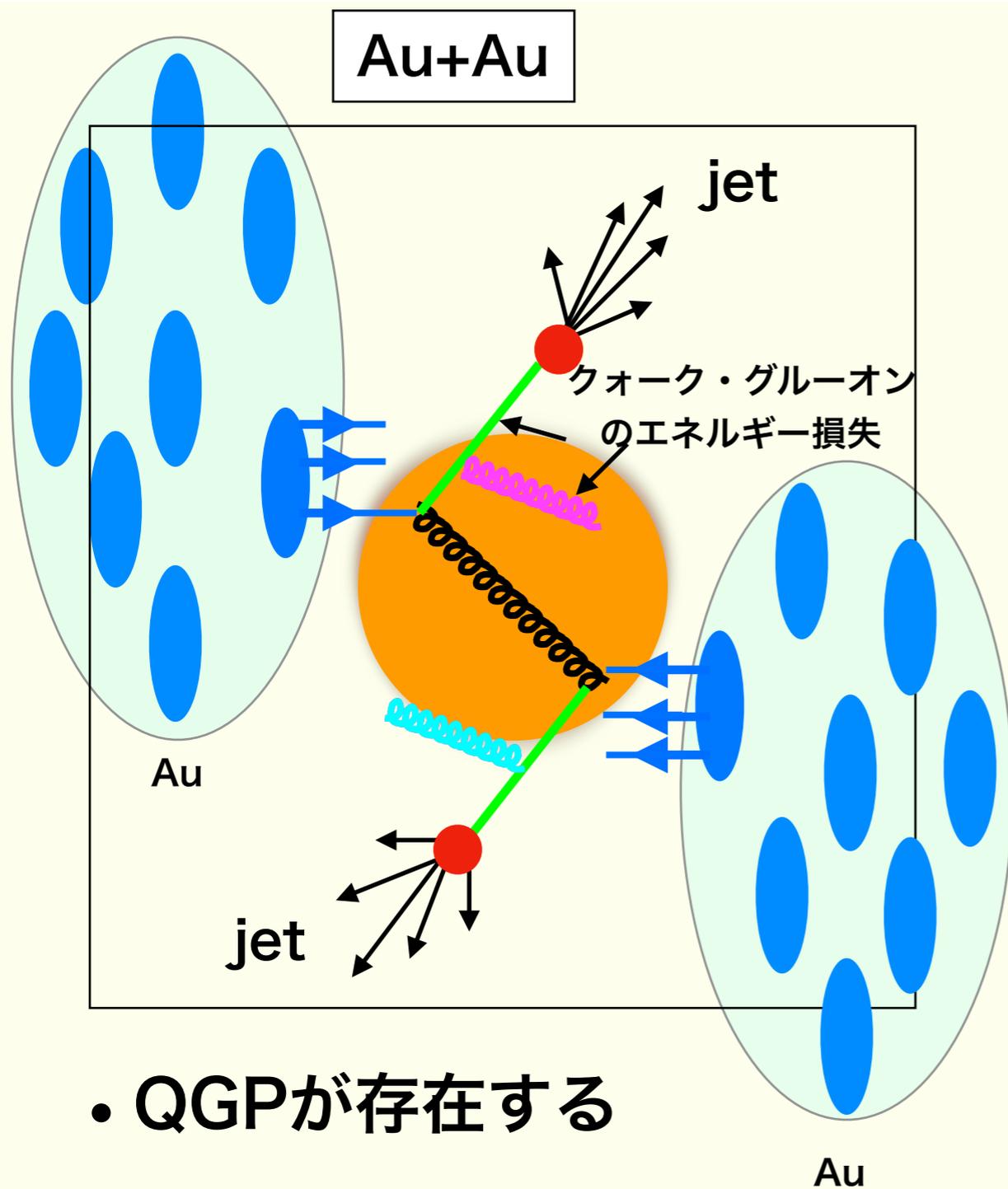


- 重イオン衝突ではQGPを直接観測できない
- 最終的に観測される光子/ハドロン等の測定から逆算してQGPの性質を探る

QGP生成の状況証拠：

粒子の生成抑制      方位角異方性

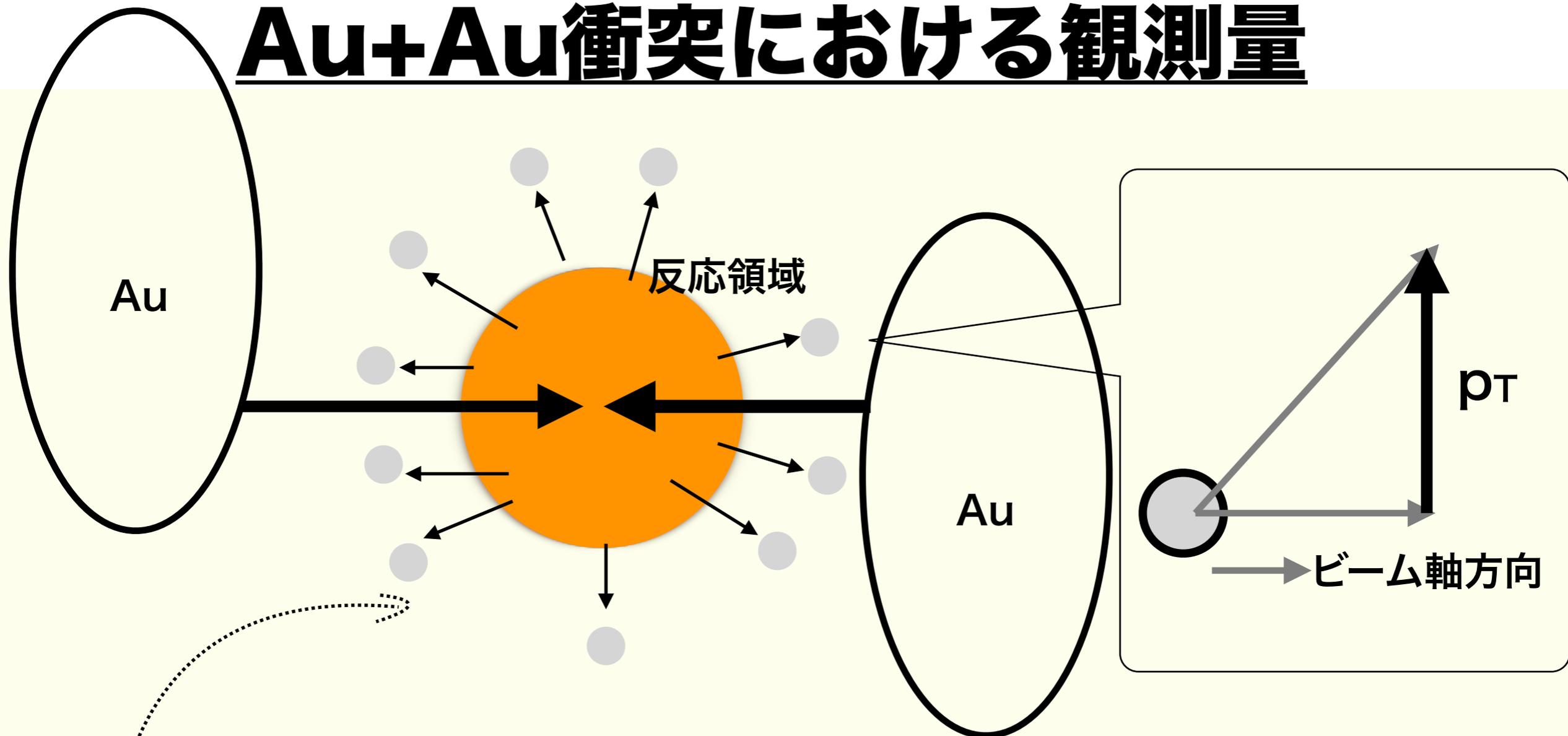
# Au+Au衝突とp+p衝突の違い



反応領域 (QGP) の有無が違い

QGPの影響は、定量的にはQGP中のエネルギー損失として評価されている<sup>6</sup>

# Au+Au衝突における観測量



- 個々の粒子の  
( $p_T$ ,  $\eta$ ,  $\phi$ )を測定

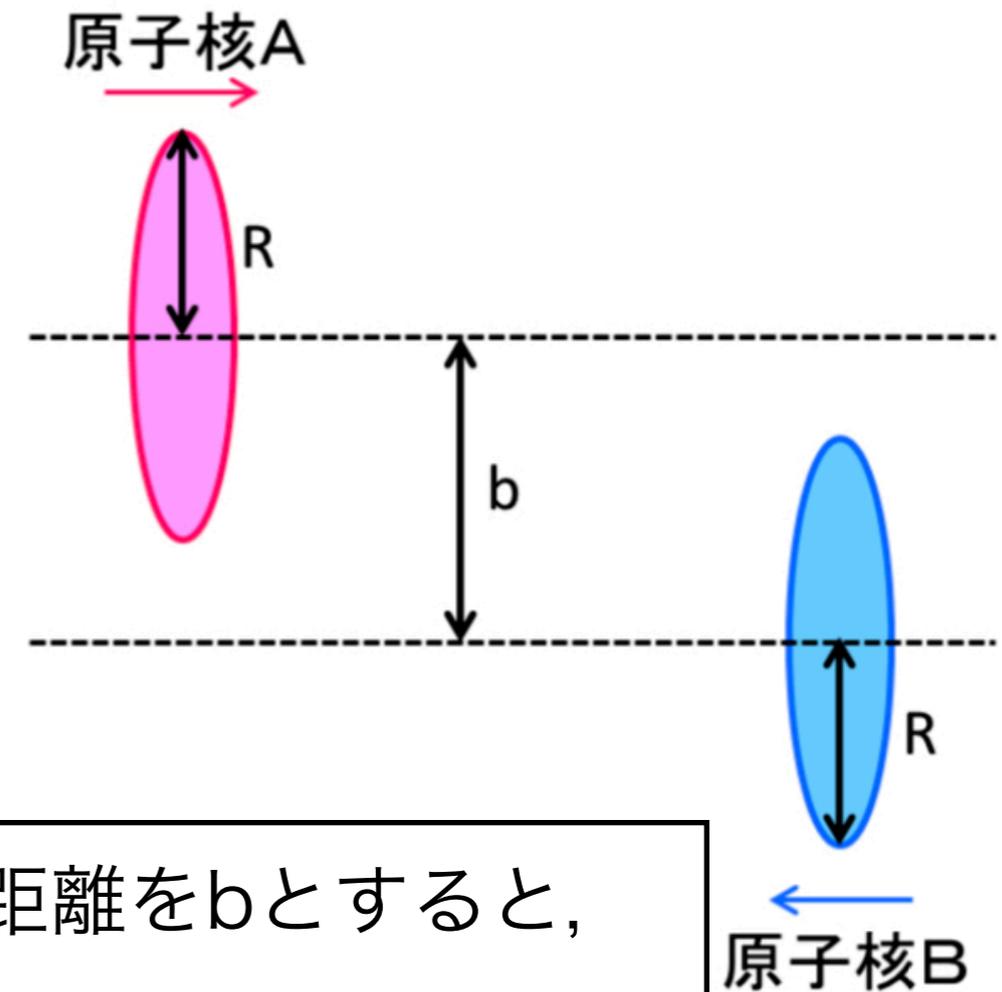
+

- 中心衝突度 (centrality) を測定

横運動量  $p_T$  が大きな散乱  
をハードな散乱と呼ぶ

# 重イオン衝突の特徴 (centrality)

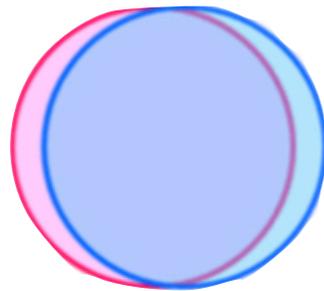
- 重イオンでは衝突ごとに原子核同士の重なり合う領域（反応領域）のサイズが異なる
- これを"**centrality**"という量で表示



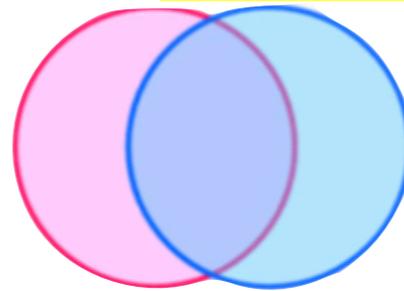
衝突する2つの原子核の中心を通る軌道間の距離を **$b$** とすると、

**$b=0$**

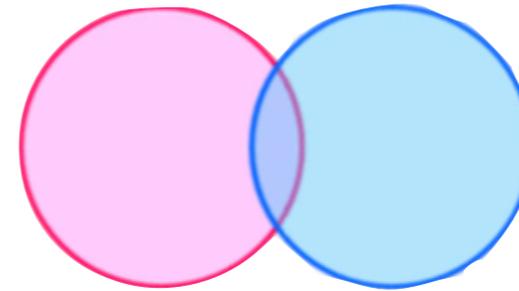
0%



**centrality**



100%



**$b=2R$**

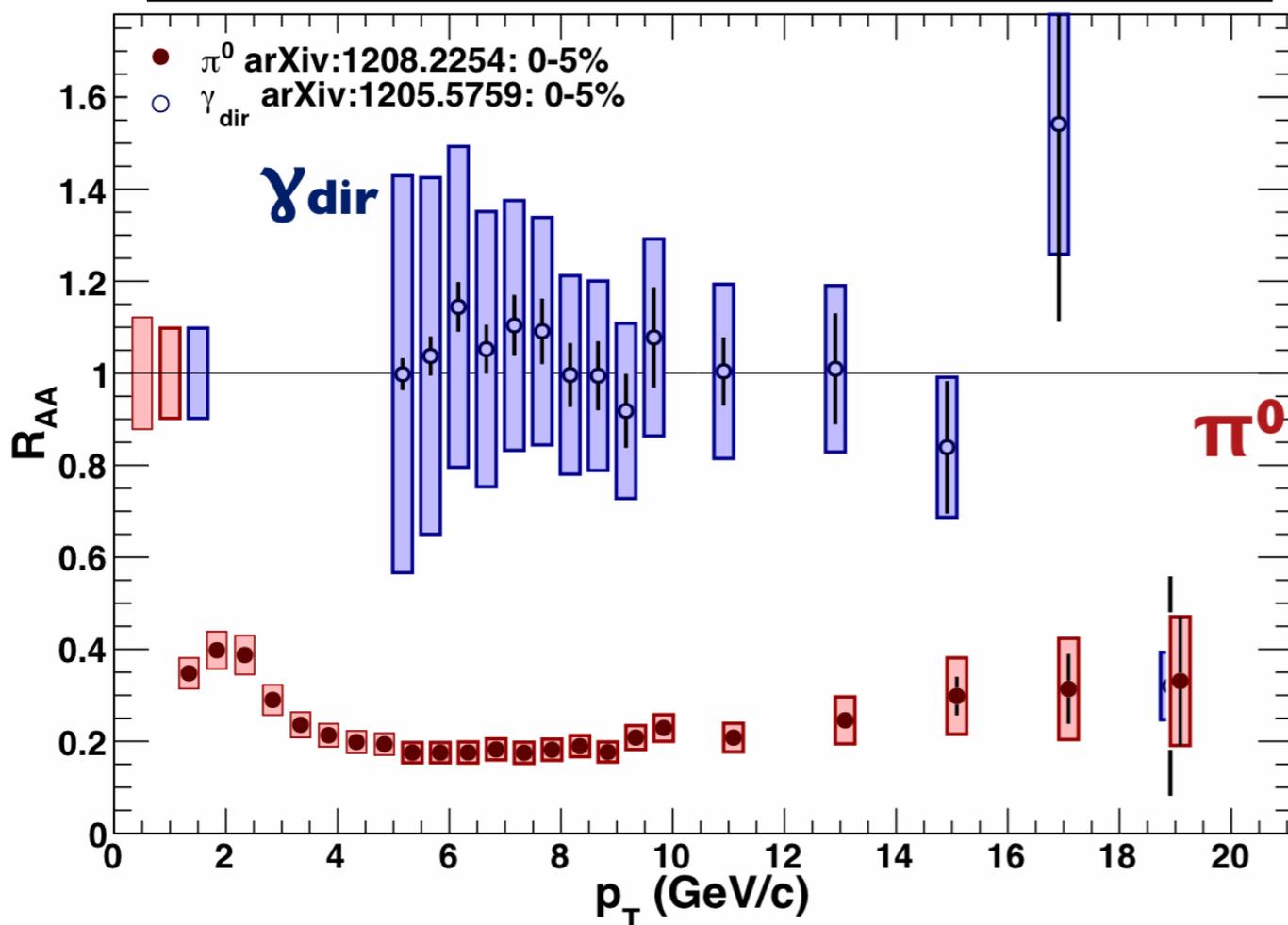
centralityは、実験的にビーム方向に生成される粒子数やその異方性の測定で決定する。

# 粒子の収量抑制の先行研究

## 原子核効果比 $R_{AA}$

- 衝突の数×陽子衝突の収量と金原子核衝突との収量の比
- $R_{AA}=1$ ならば、p+p衝突の単純な重ね合わせであることを意味する

### $\pi^0$ の $R_{AA}$ の先行研究結果



$$R_{AA} = \frac{d^2 N^{AA} / dp_T d\eta}{N_{coll} d^2 N^{pp} / dp_T d\eta}$$

### $\pi^0$ の $R_{AA}$ が1より小さい

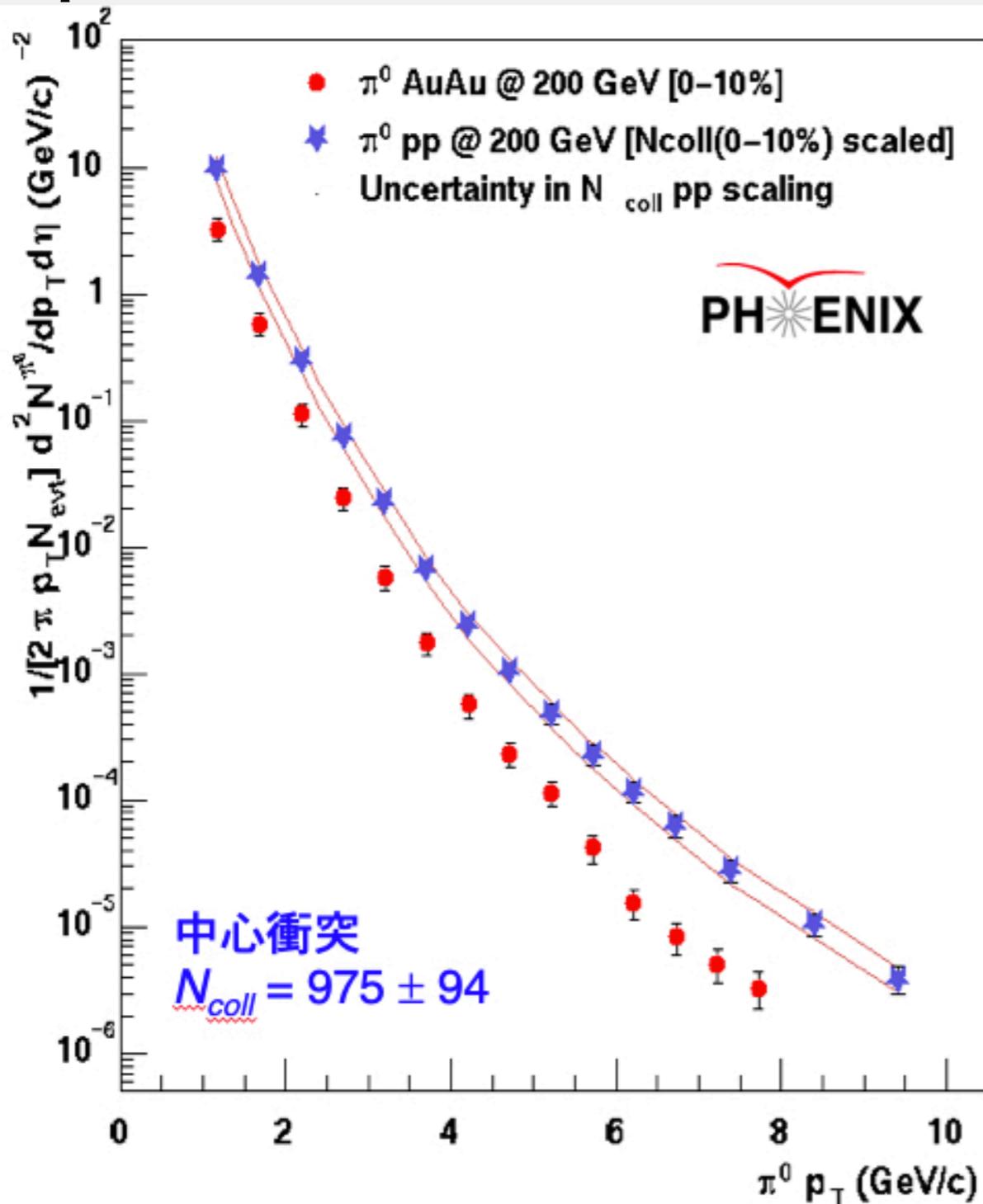
- 重イオン原子核では、 $\pi^0$ の生成が全 $p_T$ 領域で抑制
- 重イオン衝突ではjetの生成も抑制
- $\gamma$ の $R_{AA}$ はほぼ1である
- 原子核の衝突で生成されたQGPの影響と解釈できる

先行研究の原子核効果比 $R_{AA}$ を見ると、

QGPの特性の一つであるエネルギー損失の存在がわかる9

# エネルギー損失の存在の確認

p+p衝突における $\pi^0$ 生成量とAu+Au衝突における $\pi^0$ の生成量との比較



- Au+Au衝突による $\pi^0$ 生成量は、p+p衝突による $\pi^0$ 生成量より抑制される
- 高い $p_T$ 領域になるにつれて、 $\pi^0$ の生成量は急激に減少する

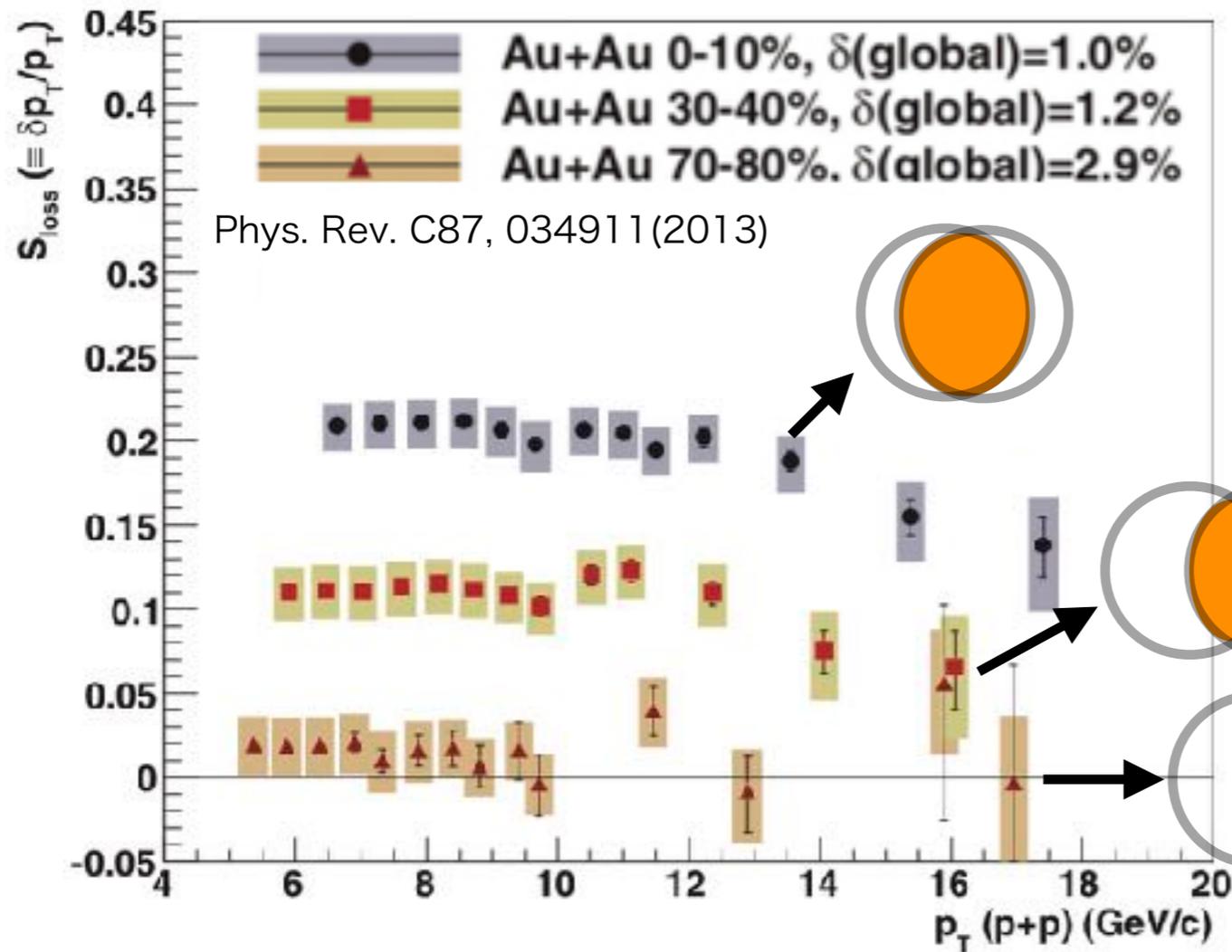
同じ $p_T$ の時のAu+Auの $\pi^0$ 生成量がp+pの $\pi^0$ 生成量より抑制されているため、 $R_{AA}$ が1からずれ、エネルギー損失の存在が確認できる

$p_T$ の差を定量化した横運動量損失 $S_{\text{loss}}$ として議論する→

# QGPのエネルギー損失の評価 (先行研究)

- Au+Au、 p+p 衝突の横運動量損失  $S_{\text{loss}}$

p+p衝突を使用している



$$S_{\text{loss}} = \frac{p_{T}^{\text{pp}} - p_{T}^{\text{AuAu}}}{p_{T}^{\text{pp}}}$$

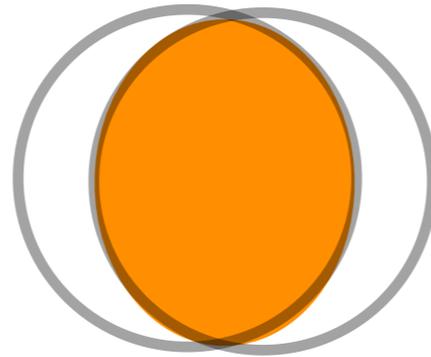
p+pと比較した $p_T$ シフト

高 $p_T$ ハドロンの抑制は、 $S_{\text{loss}}$ として解釈できる

- $S_{\text{loss}}$ は $p_T$ に対してフラット
- 横運動量損失としてエネルギー損失量を見積もることができる
- $S_{\text{loss}}$ は反応領域のサイズが大きくなるにつれて増加する

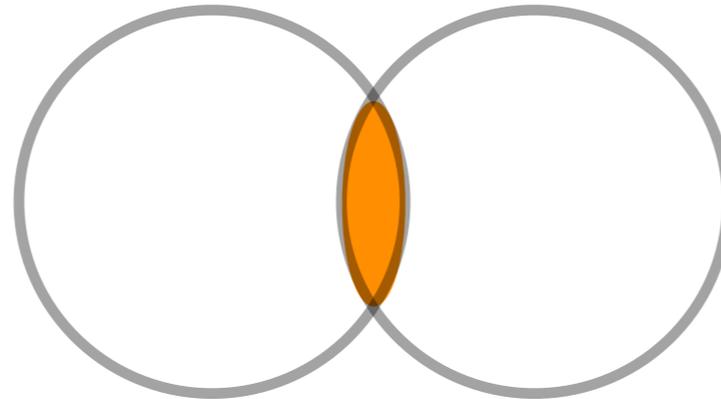
# 従来の方法の解釈と問題点

- $S_{\text{loss}}$  大



反応領域が大きい

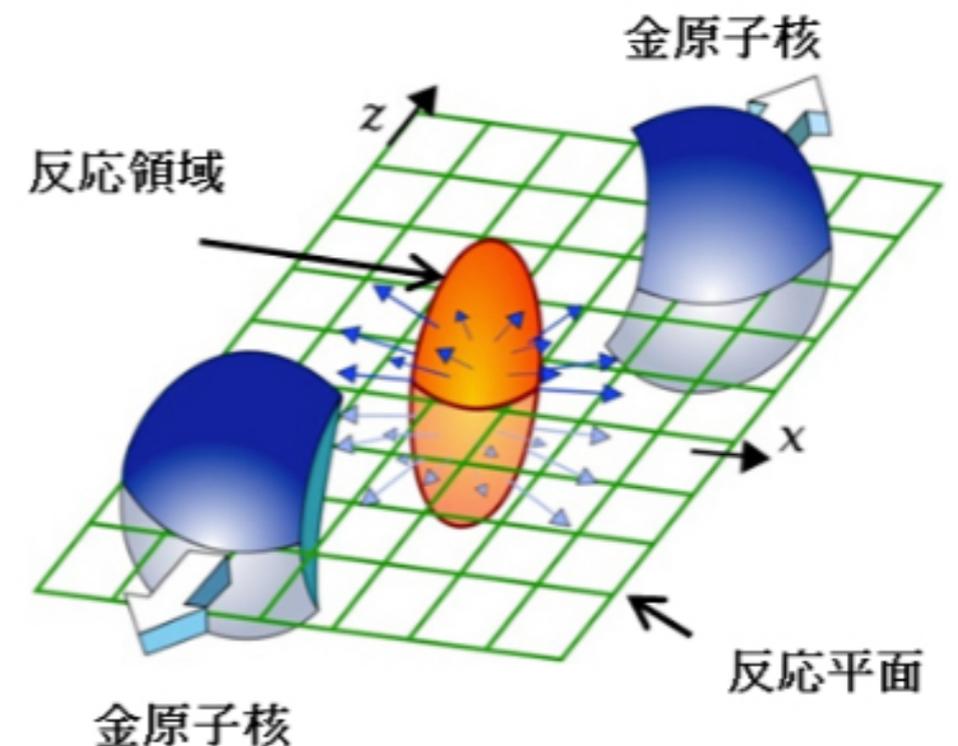
- $S_{\text{loss}}$  小



反応領域が小さい

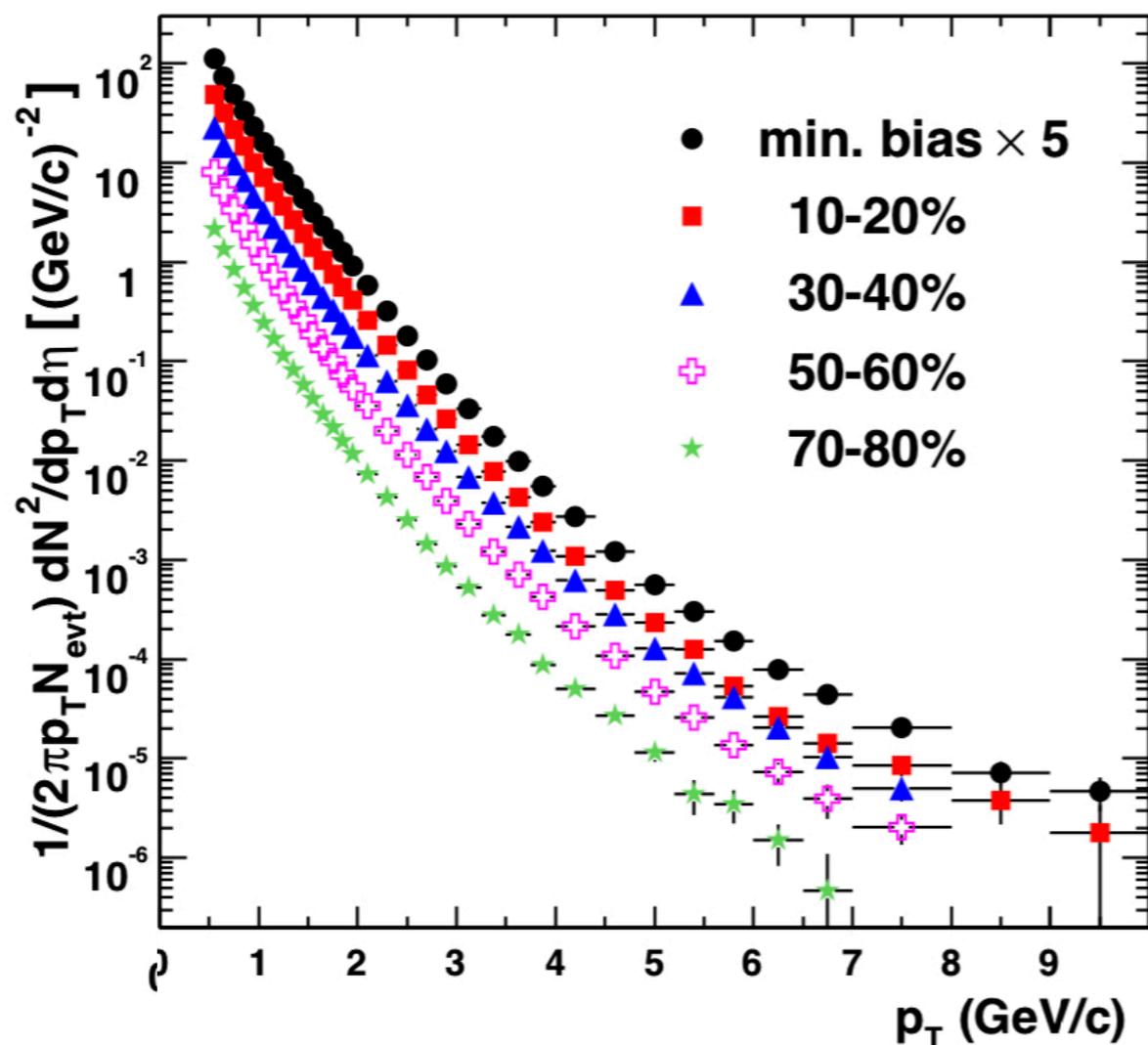
→  $S_{\text{loss}}$ は反応領域の大きさによることはわかる。

ただし、 $S_{\text{loss}}$ の値と反応領域の通過距離との1対1対応は得られない



# エネルギー損失の新しい評価方法

- Au+Au衝突のデータのみを使用
- inclusiveの $p_T$ スペクトラと方位角異方性を用いる



PHENIX Collaboration

Phys. Rev. C **69**, 034910 – Published 30 March 2004

- $p_T$ が増加すると収量は急激に減少

- $\frac{dN}{dp_T}$  はcentralityごとに測定されている

- 同じ $p_T$ ではcentralityが増加する(中心衝突)ほど、 $\frac{dN}{dp_T}$ が減少

- $\frac{dN}{dp_T}$  は方位角方向に平均した観測量

# 方位角異方性 ( $v_2$ ) とは

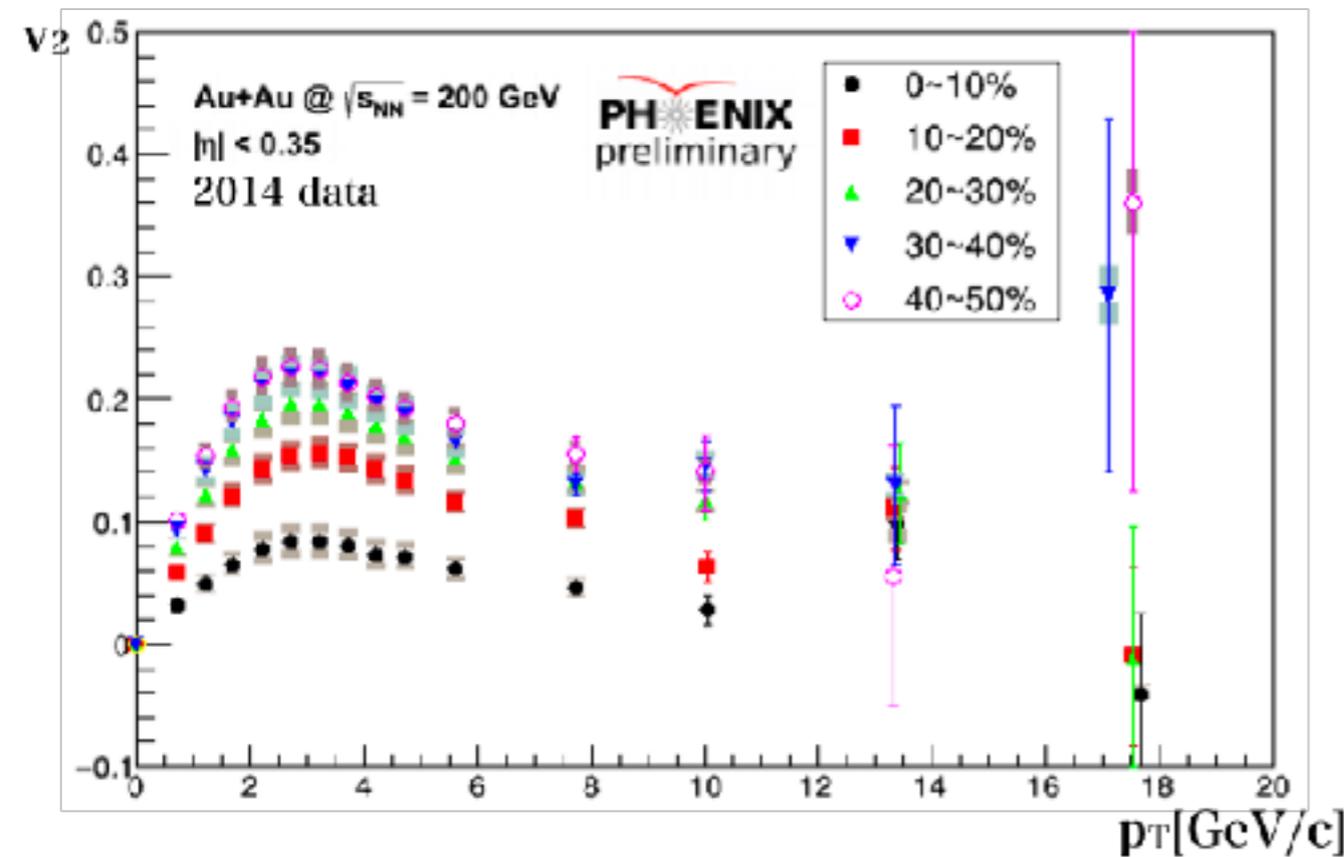
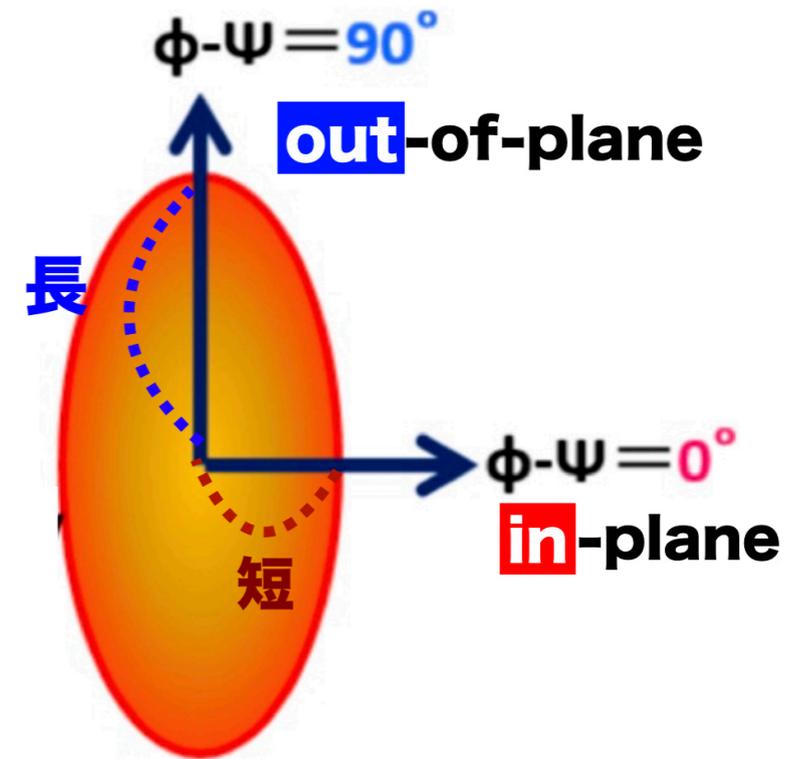
$$\frac{dN}{d\phi} \propto (1 + 2v_2 \cos[2(\phi - \Psi)])$$

粒子の方位角

反応平面の方位角

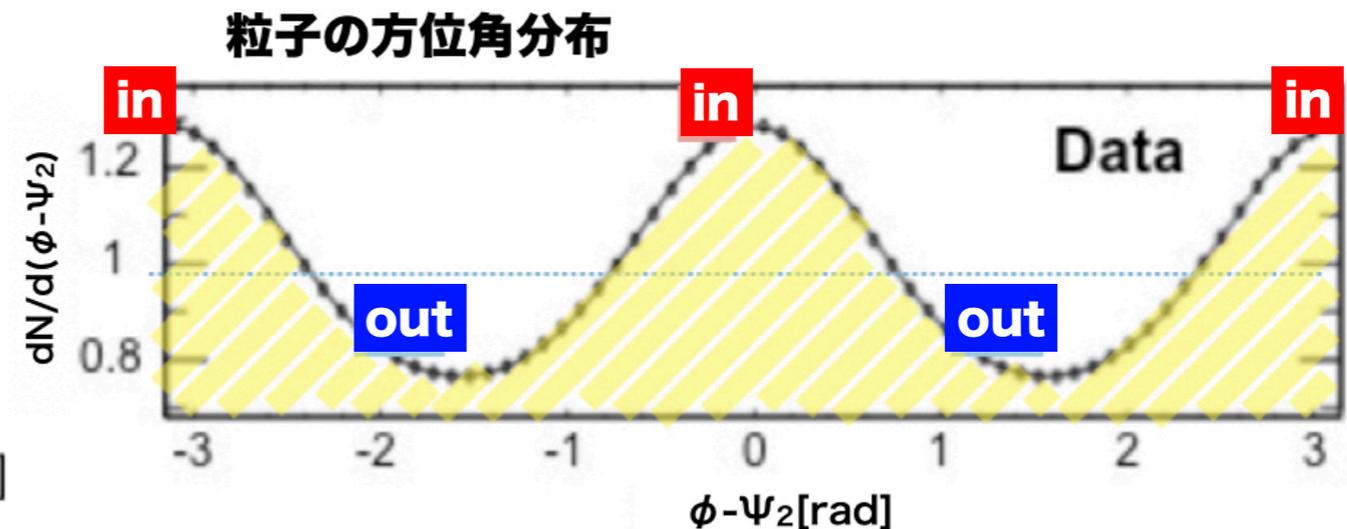
$\phi - \Psi_r = 0^\circ$  の時 **in-plane**

$\phi - \Psi_r = 90^\circ$  の時 **out-of-plane**



**in-plane**の収量  $\propto 1 + 2v_2$

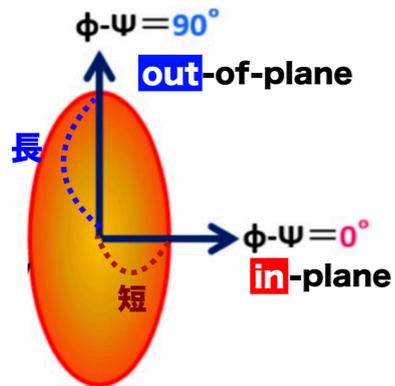
**out-of-plane**の収量  $\propto 1 - 2v_2$



$v_2=0$ の時, 方位角方向に等方的である. 0でない $v_2$ が観測されている. 4

# $v_2 \neq 0$ となる理由

- “QGP領域が経路長の差による”
- → QGP領域のサイズが方位角異方性を持つことが $v_2 \neq 0$ の理由

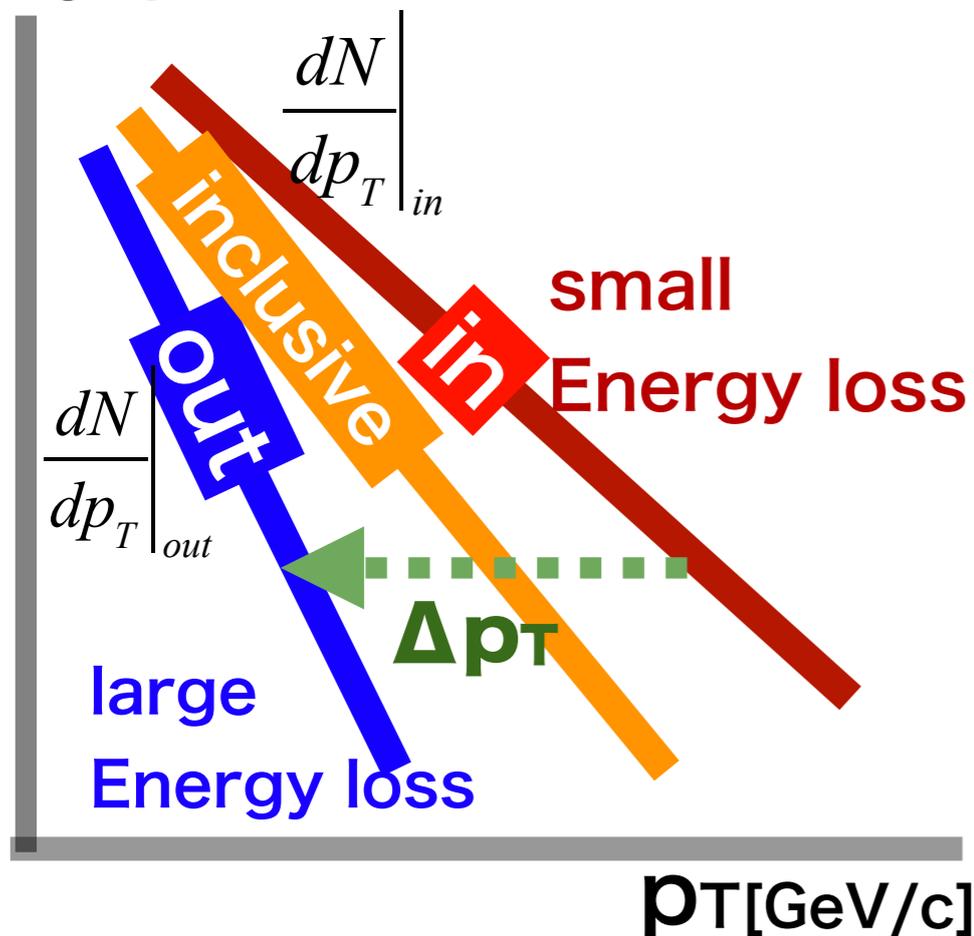


inclusiveの収量  $\frac{dN}{dp_T}$  と  $v_2$  を用いて,

**in**-planeの収量  $\left. \frac{dN}{dp_T} \right|_{in}$  と **out**-of-planeの収量  $\left. \frac{dN}{dp_T} \right|_{out}$  を

得ることができる。

yield



$$\left. \frac{dN}{dp_T} \right|_{in} = \frac{dN}{dp_T} (1 + 2v_2)$$

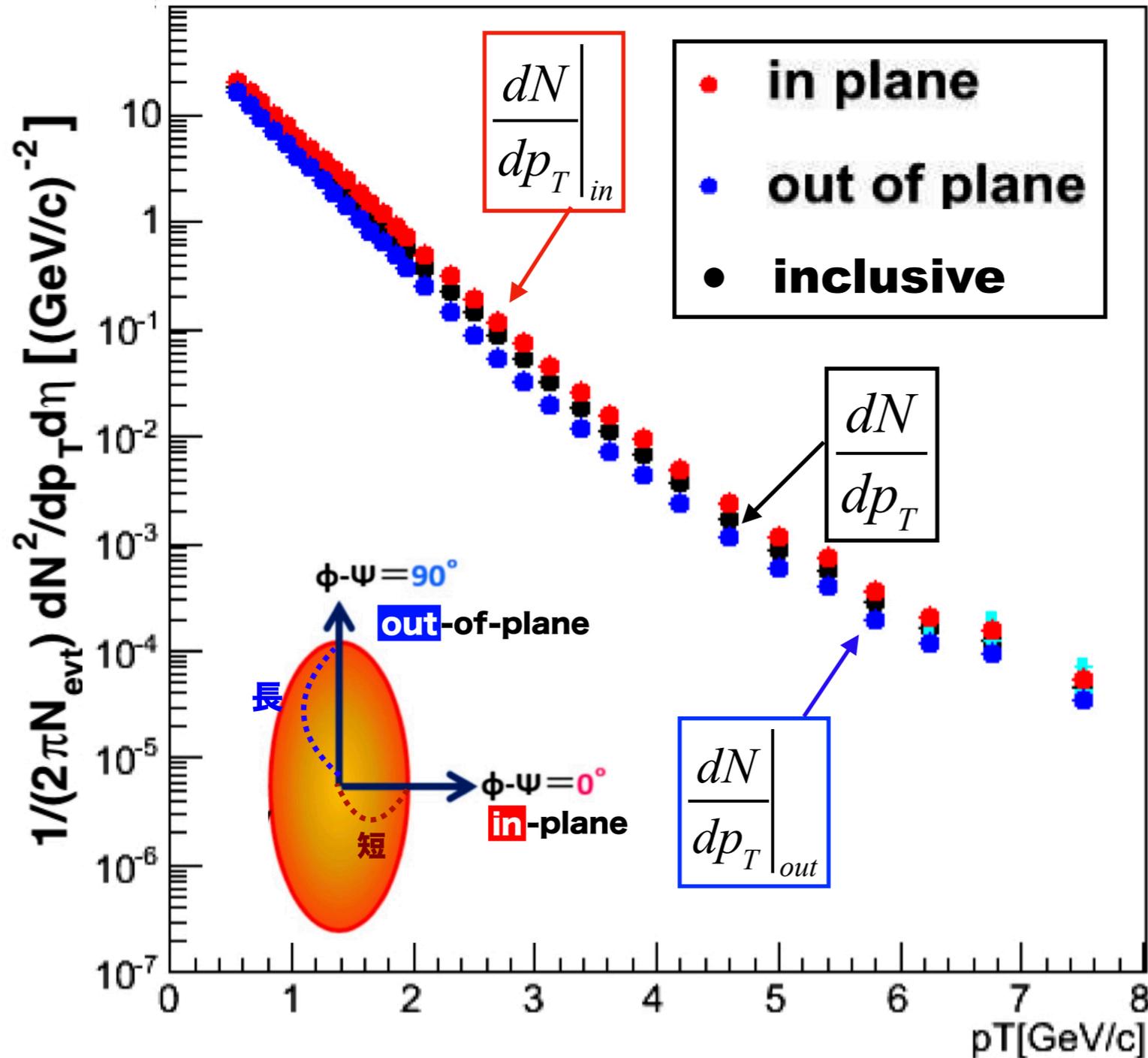
$$\left. \frac{dN}{dp_T} \right|_{out} = \frac{dN}{dp_T} (1 - 2v_2)$$

ハード散乱は方位角方向に等方。

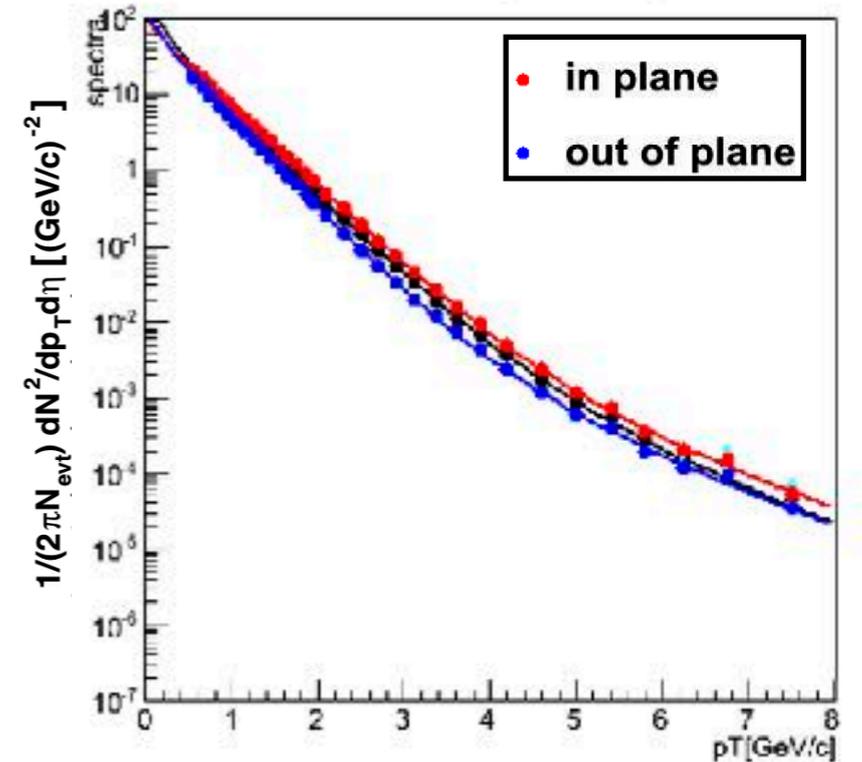
したがって,  $\left. \frac{dN}{dp_T} \right|_{in}$  と  $\left. \frac{dN}{dp_T} \right|_{out}$  が同じになる時の両者の $p_T$ の差 $\Delta p_T$ をQGP中の**in**-plane方向と**out**-of-plane方向のエネルギー損失の差 $\Delta p_T$ とみなせる。

# in-plane, out-of-planeの収量

centrality=20-30 [%]



fitting

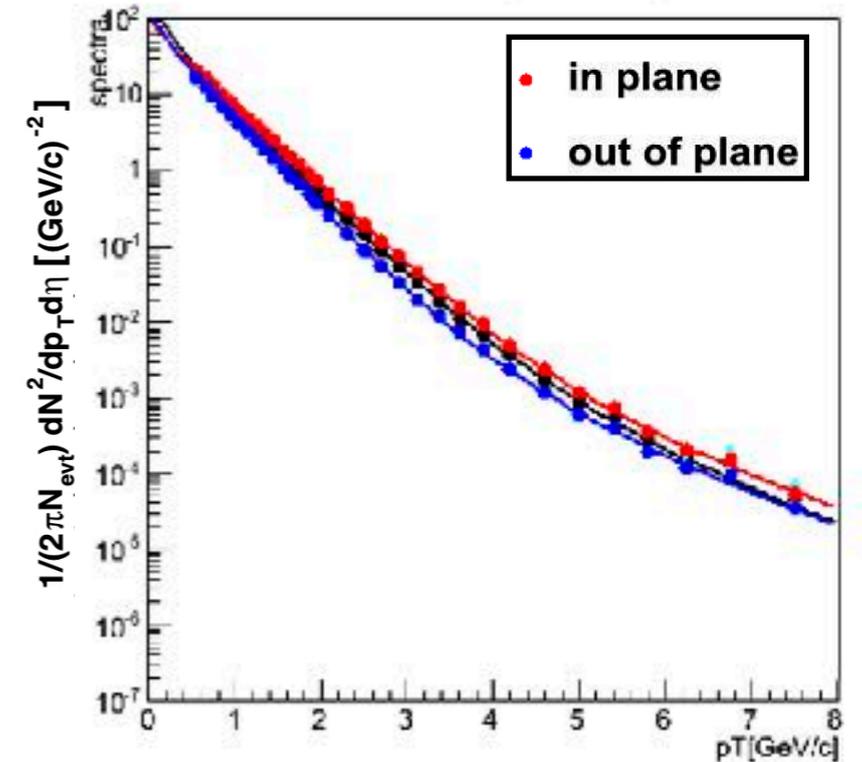
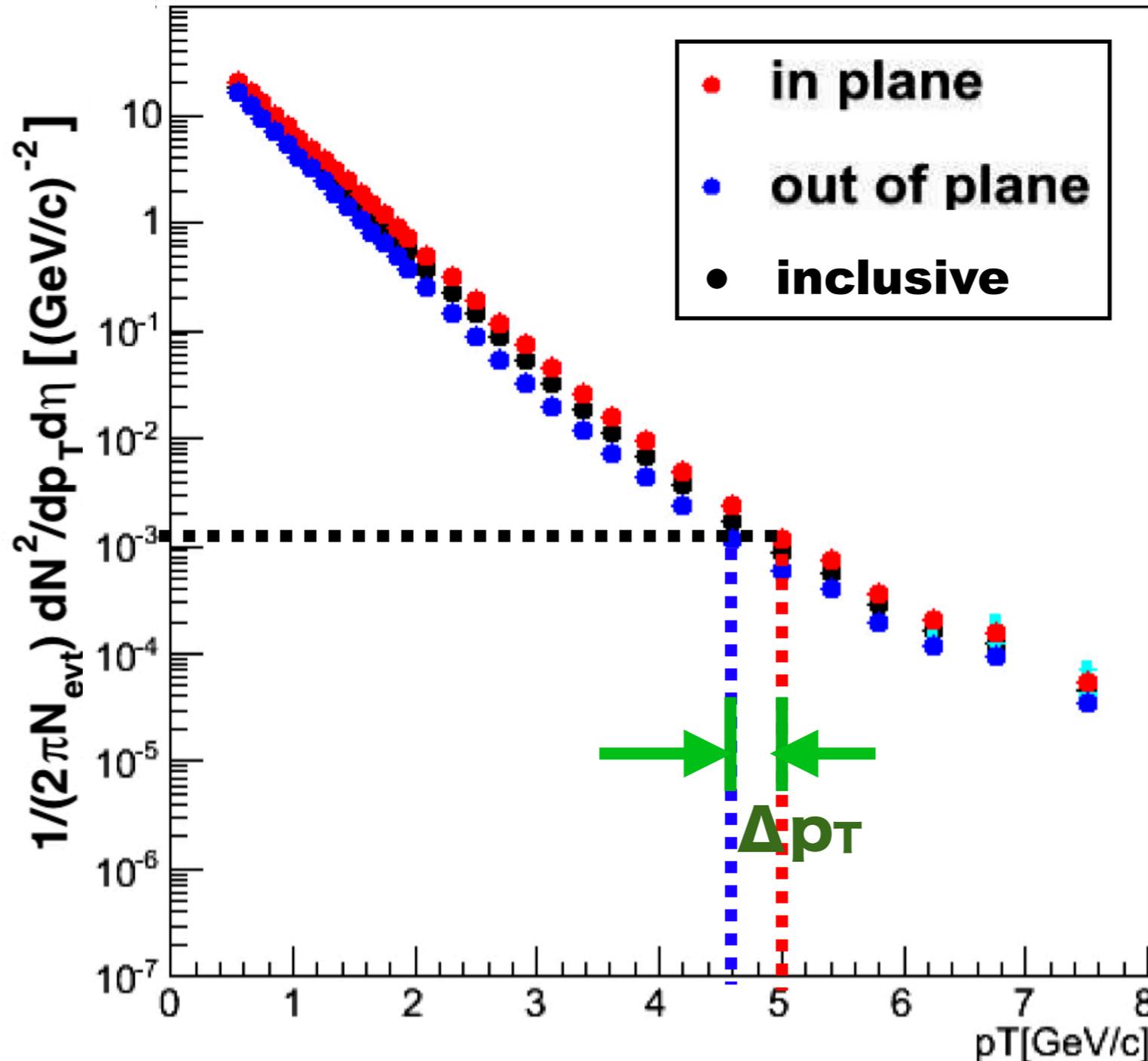


inclusiveの収量  $\frac{dN}{dp_T}$  と  $v_2$  から, in-plane と out-of-plane の収量が得られた。

# In-planeとout-of-planeに放出した粒子のエネルギー損失の差 $\Delta p_T$ の計算

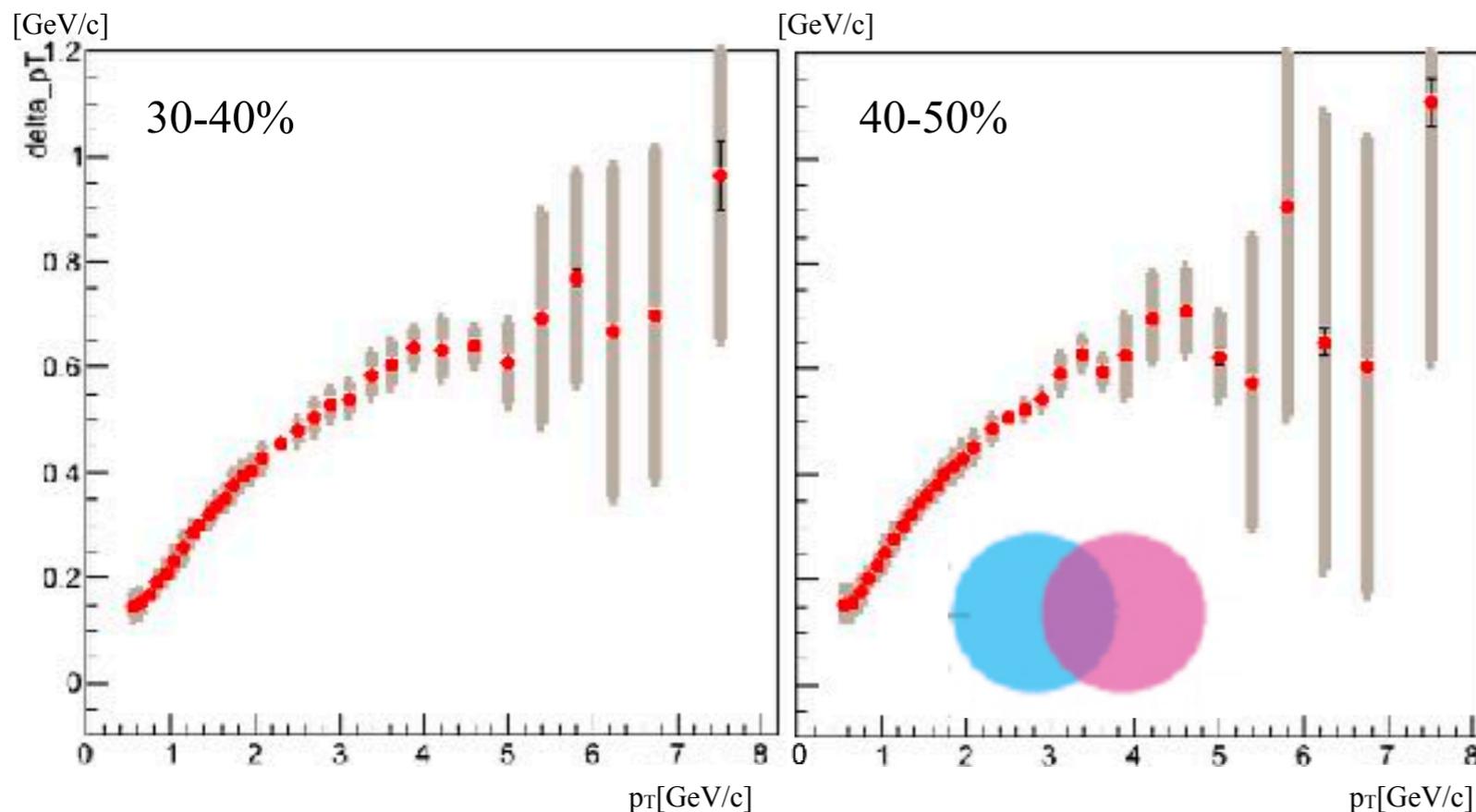
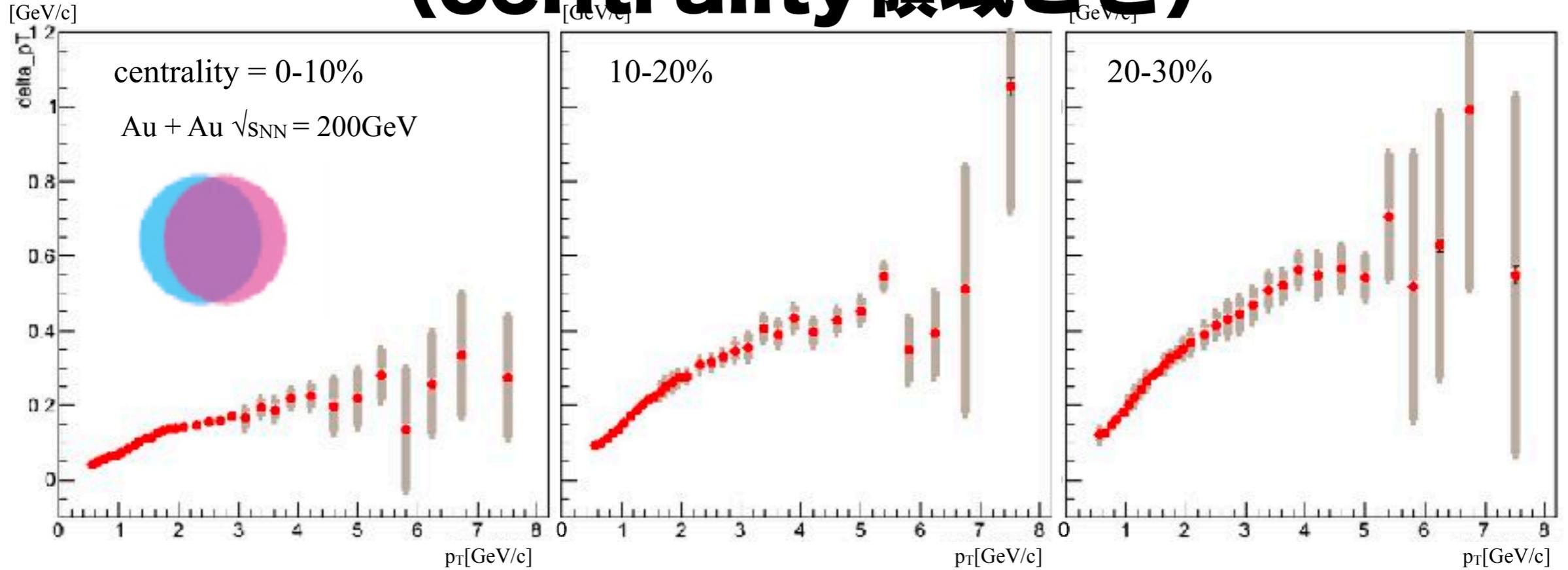
centrality=20-30 [%]

fitting



inclusiveの収量  $\frac{dN}{dp_T}$  と  $v_2$  から, in-plane と out-of-plane の収量が得られた。

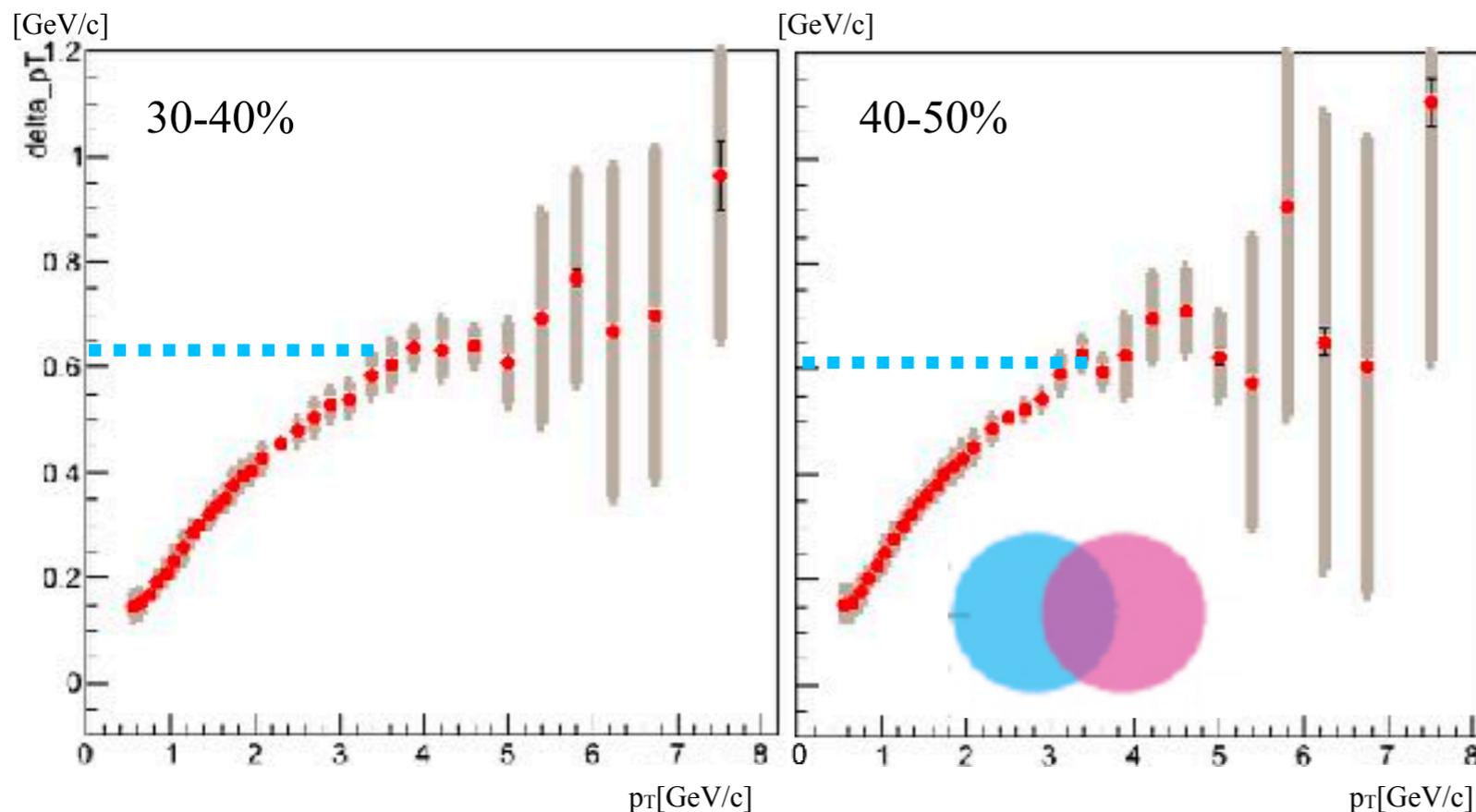
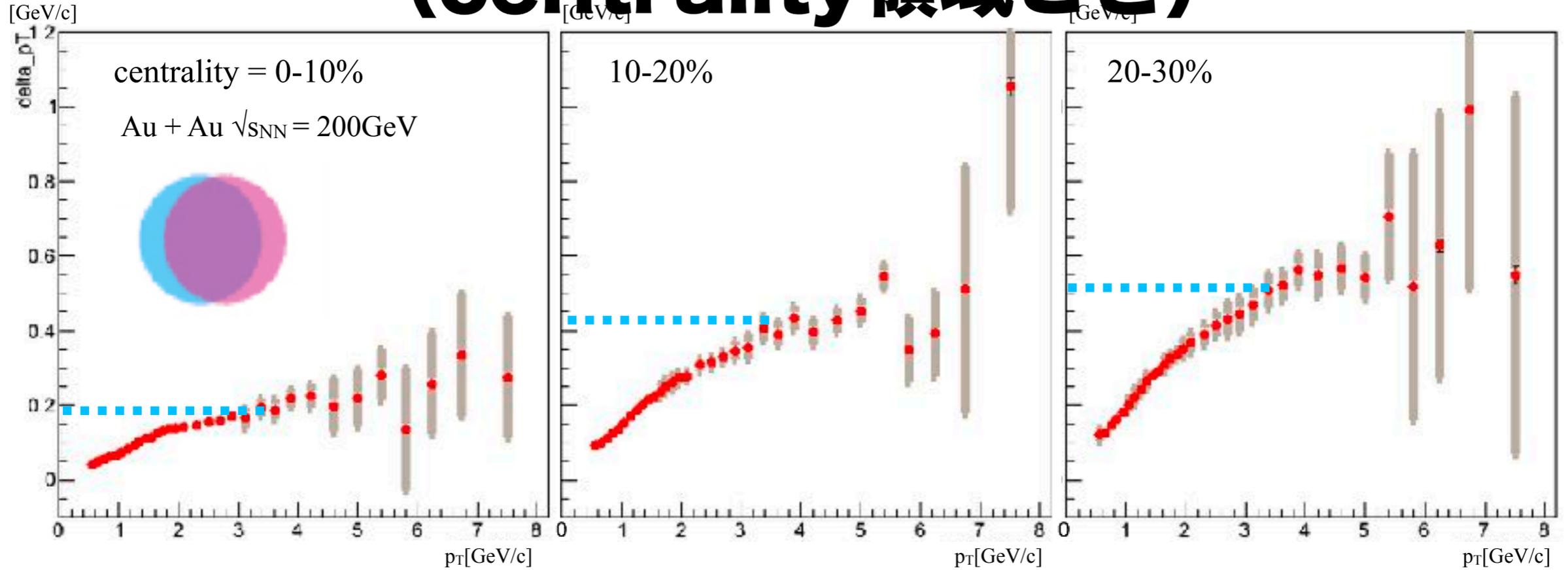
# 結果：エネルギー損失の差 $\Delta p_T$ の $p_T$ 依存性 (centrality領域ごと)



x軸：  
in-plane に放出された  
粒子の  $p_T$   
y軸： $\Delta p_T$

$p_T$  領域で異なる傾向

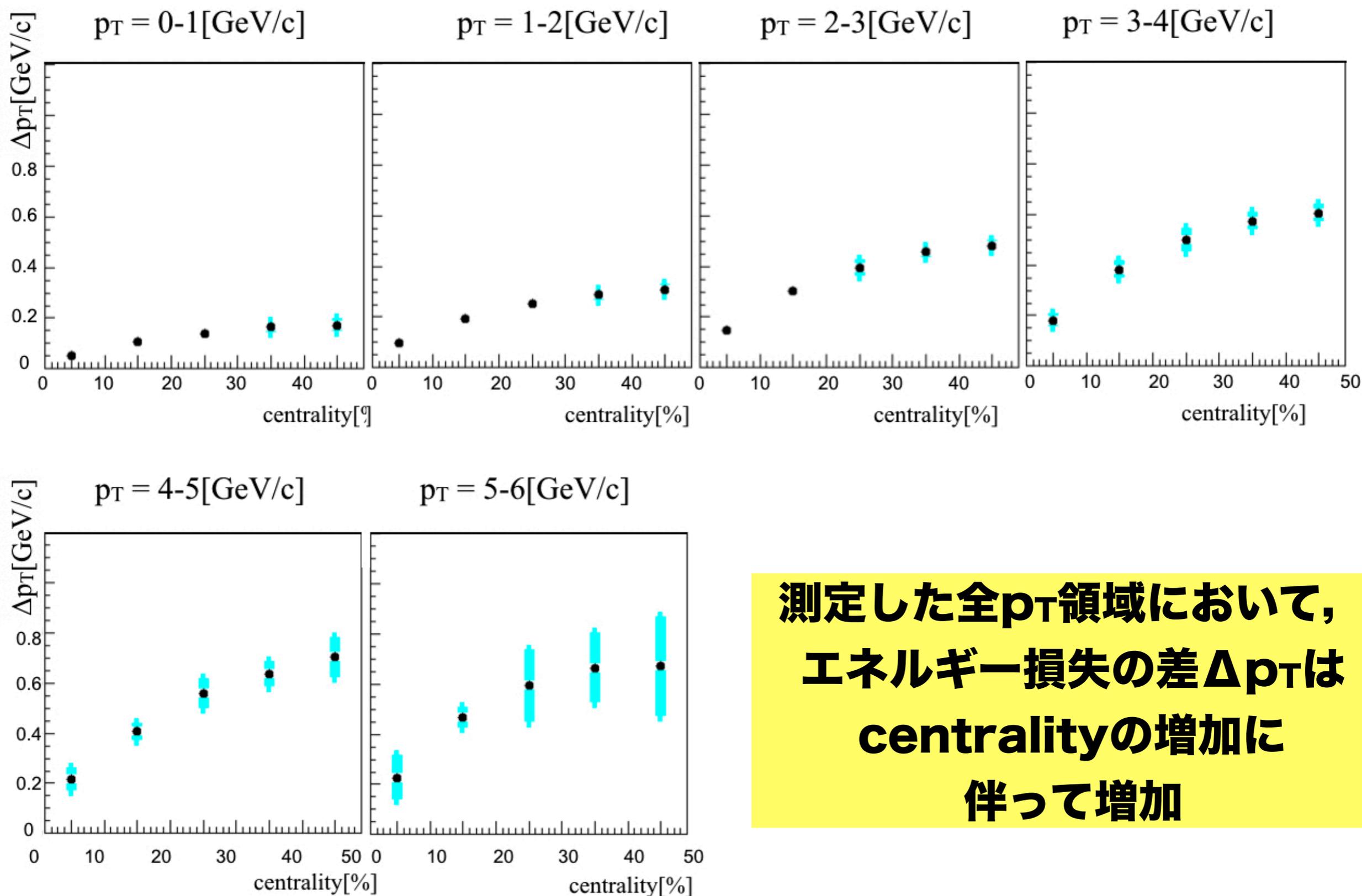
# 結果：エネルギー損失の差 $\Delta p_T$ の $p_T$ 依存性 (centrality領域ごと)



x軸：  
in-plane に放出された  
粒子の $p_T$   
y軸： $\Delta p_T$

$p_T$ 領域で異なる傾向

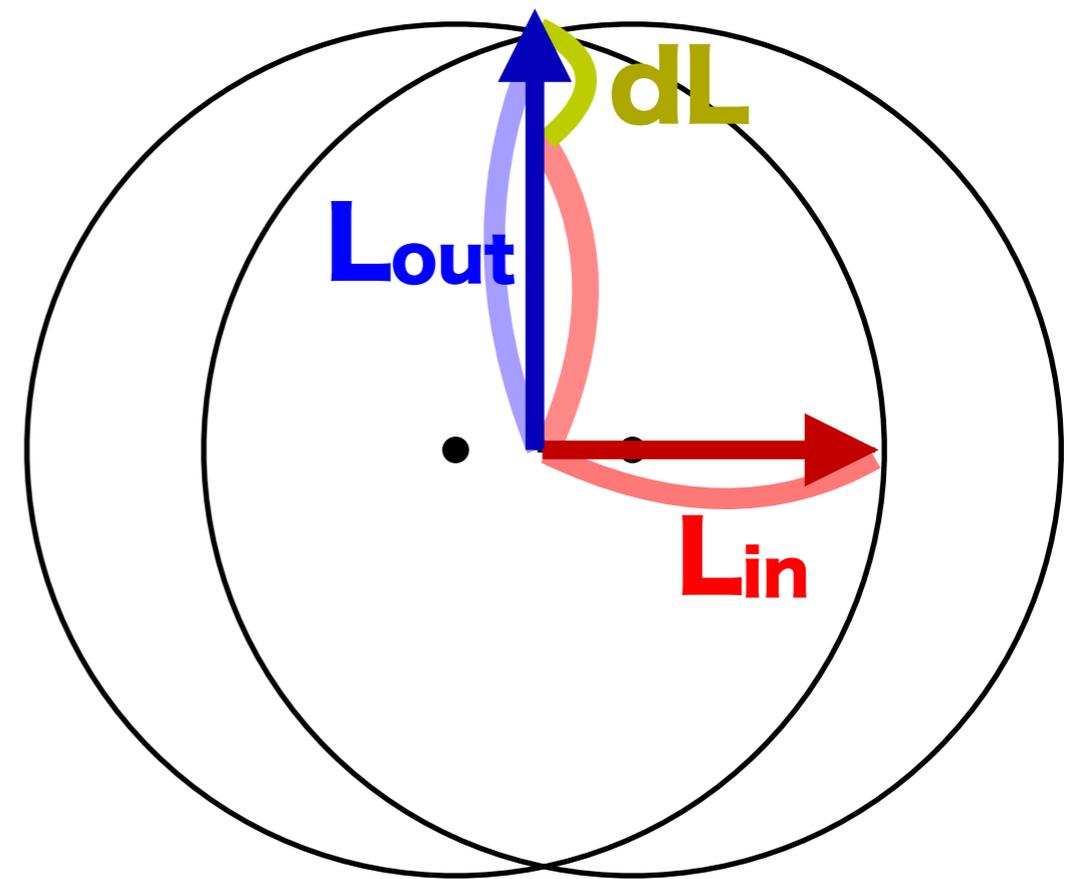
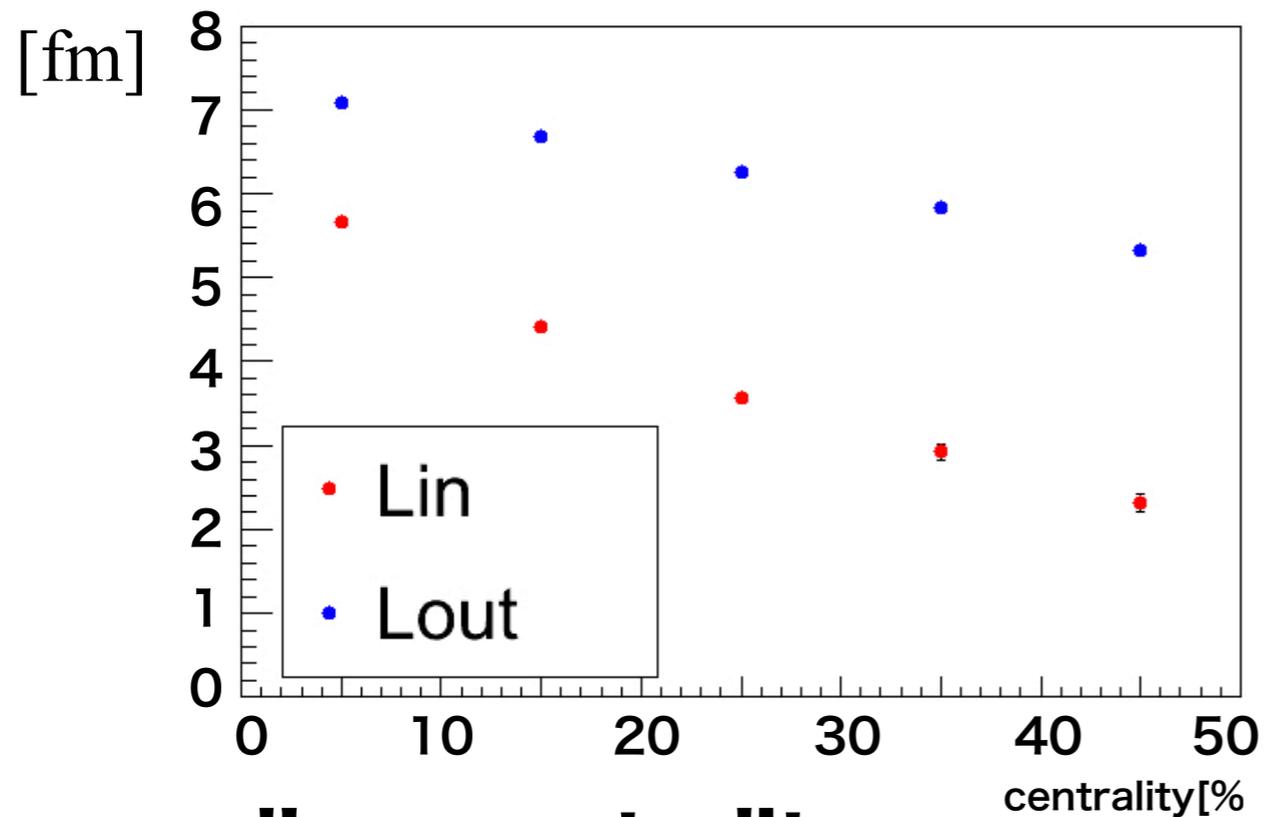
# エネルギー損失の差 $\Delta p_T$ のcentrality依存性



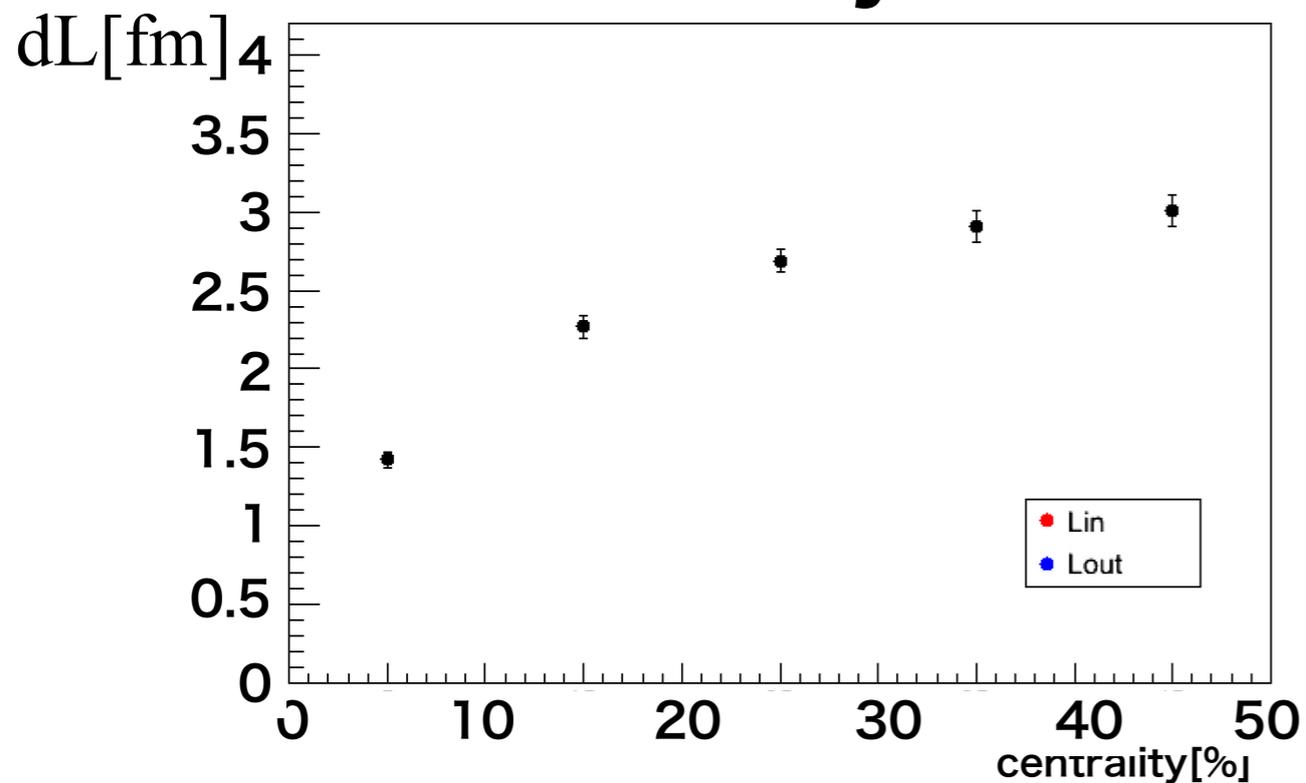
測定した全 $p_T$ 領域において、  
エネルギー損失の差 $\Delta p_T$ は  
centralityの増加に  
伴って増加

# In-planeとout-of-planeの平均経路長の差dL

## $L_{in,out}$ vs centrality

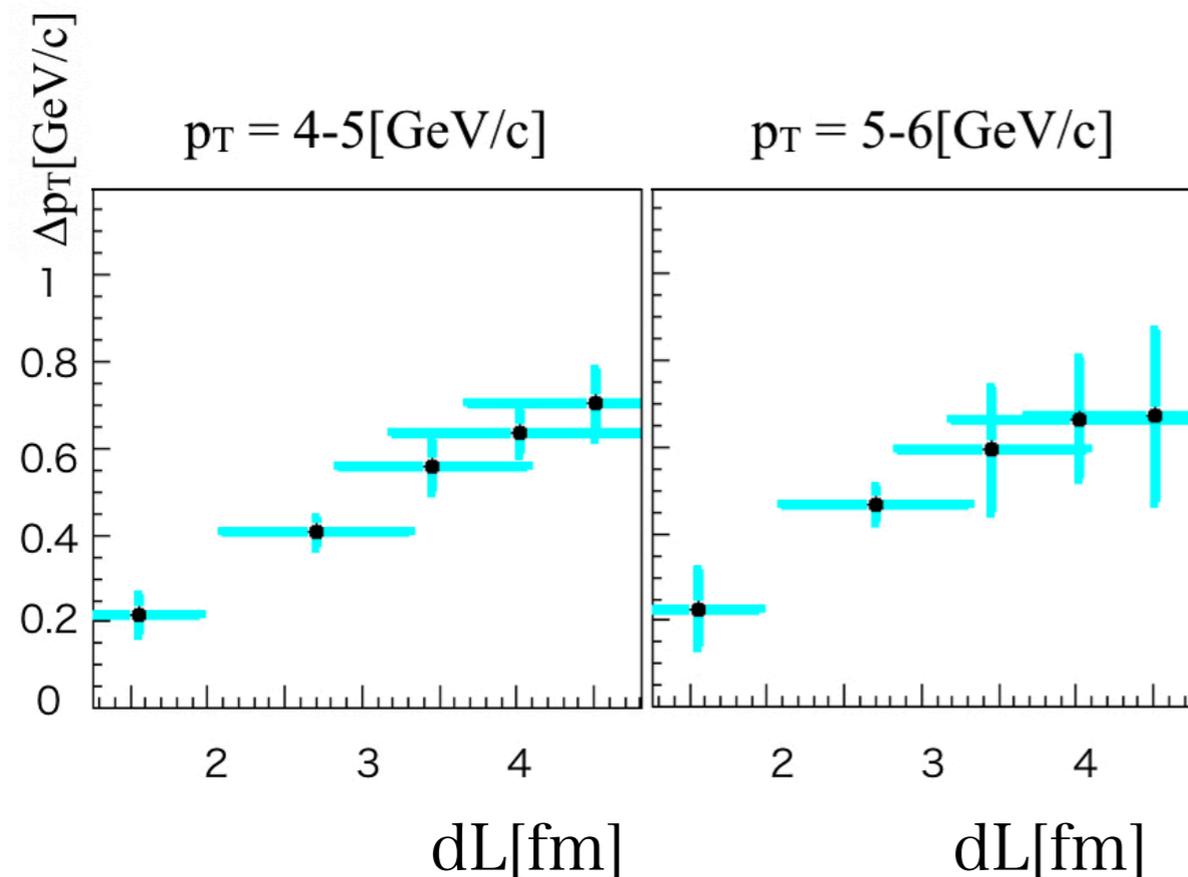
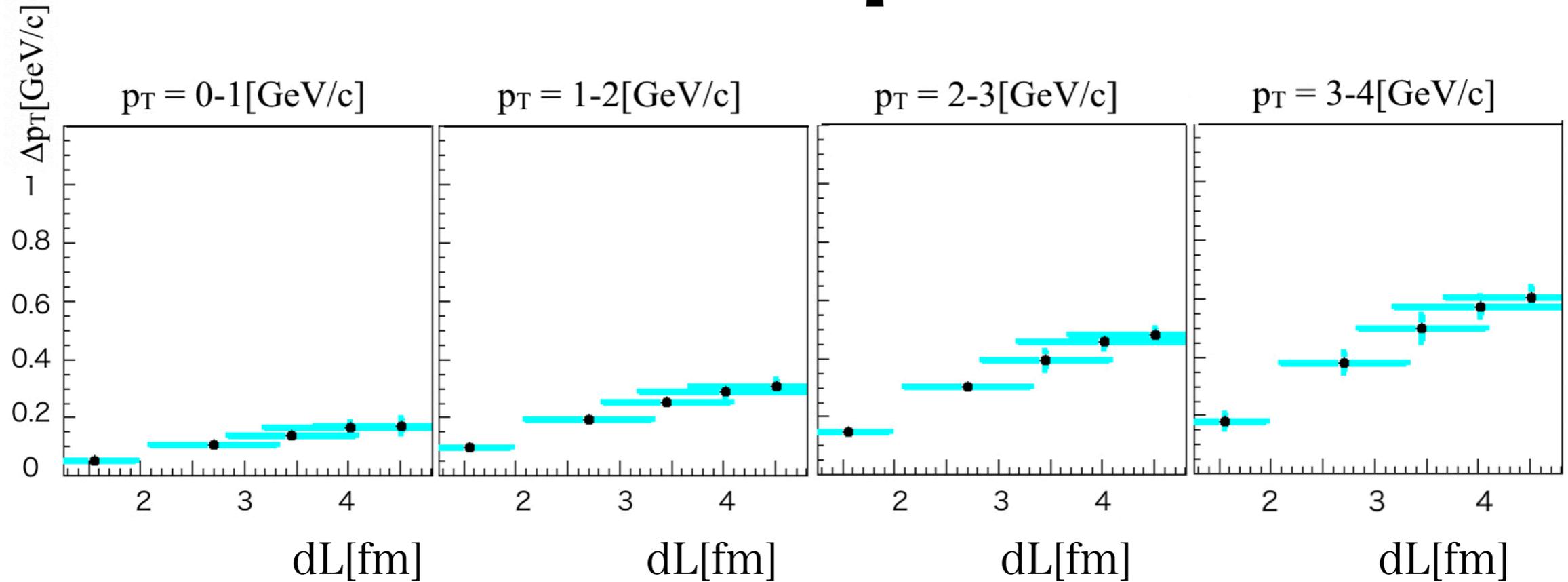


## dL vs centrality



**dLもcentrality  
の増加に伴って増加**

# エネルギー損失の差 $\Delta p_T$ の経路長依存性



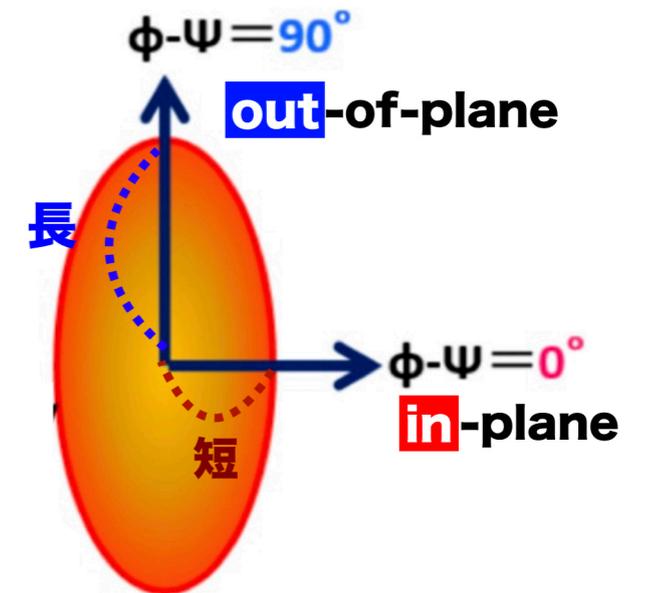
測定した全  $p_T$  領域において、  
エネルギー損失の差  $\Delta p_T$  は  
経路長差  $dL$  の増加に  
ほぼ比例して増加

→  $dL$  で割ることにより経路長の  
依存性を示す

# Summary

- QGP中のエネルギー損失の効果を評価するため、PHENIX実験で測定した粒子の

- 運動量分布 と
- 方位角異方性 ( $v_2$ ) を用いて、



in-planeとout-of-plane方向のエネルギー損失の差 $\Delta p_T$ を得た。  
(パートンのハード散乱における方位角等方性を仮定)

そこから、

- $\Delta p_T$ の横運動量 $p_T$ 依存性
- $\Delta p_T$ の経路長差 $dL$ 依存性

を求めた。

また、この $\Delta p_T$ に対応する経路長差 $dL$ を幾何学的に評価した。

→  $\Delta p_T$ と $dL$ のcentrality依存性がよく似ていることは、求めた $\Delta p_T$ が $dL$ に強く相関していることを示している。

# Next to do

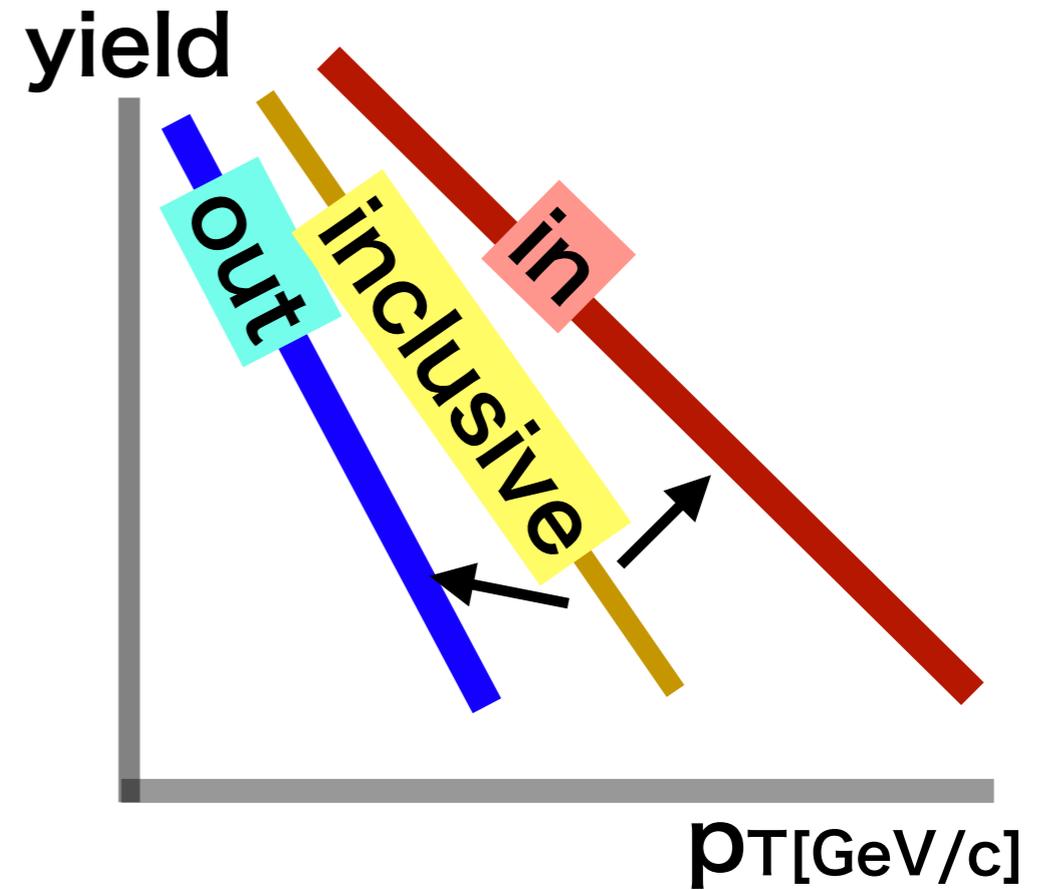
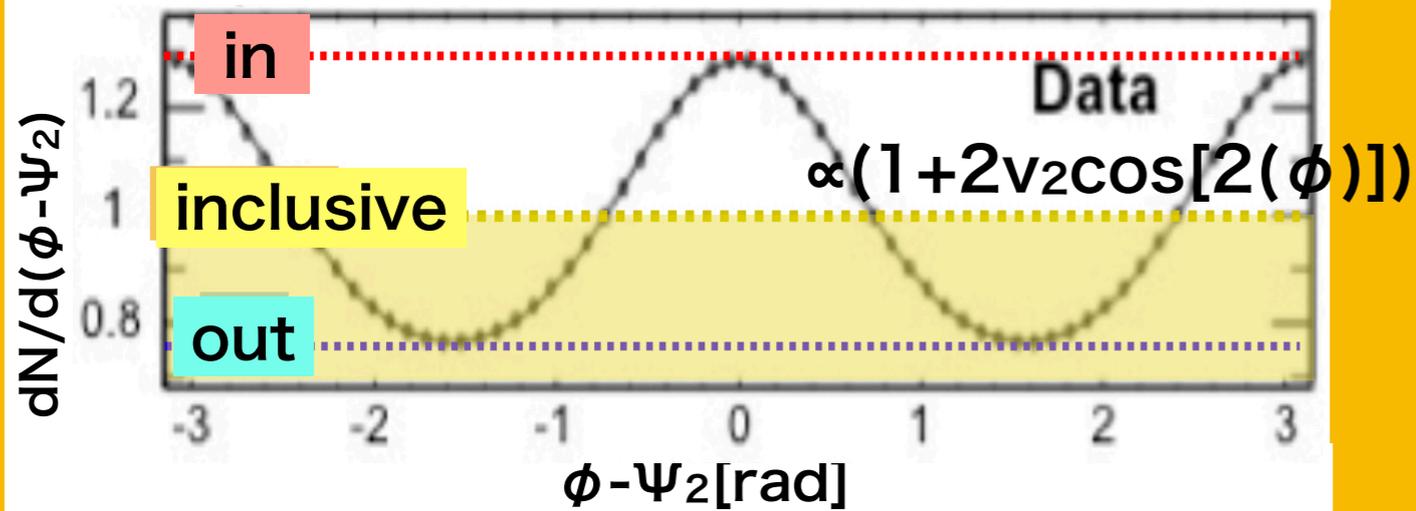
- ① 経路長の差の評価を，中心衝突のみでなく衝突点を衝突領域で一様に分布させて評価する。
- ② エネルギー損失の差 $\Delta p_T$ と平均経路長差 $dL$ から，経路長あたりのエネルギー損失 $dE/dx$ の $p_T$ 依存性を求める。
- ③ S/Nと統計を改良した条件で $v_2$ の測定精度の改良と，より高い $p_T$ 領域における $v_2$ を測定する。

**Back up**

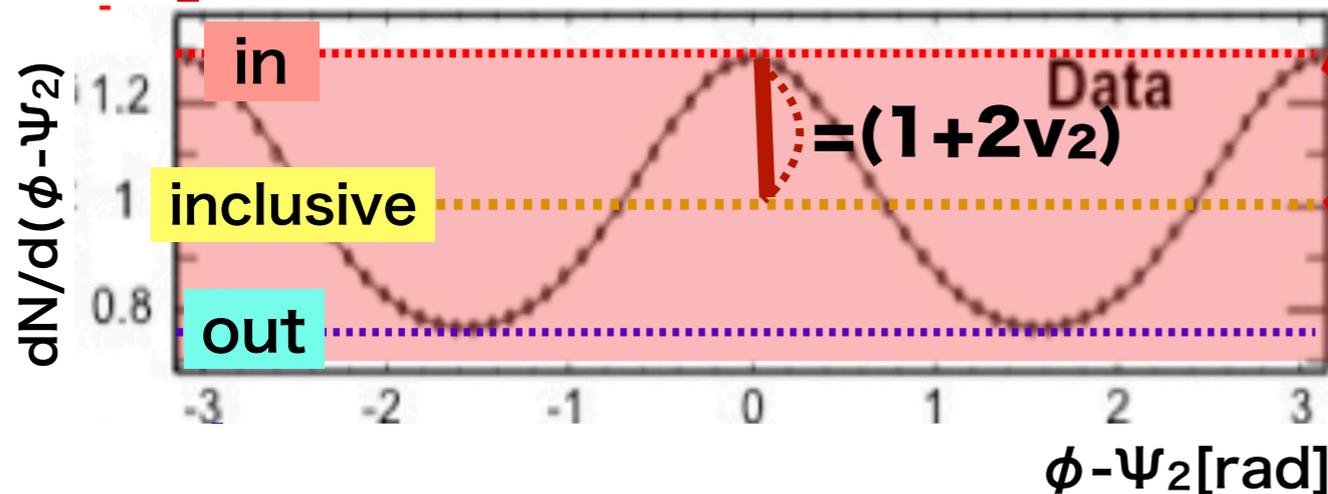
# 解析方法

## inclusive

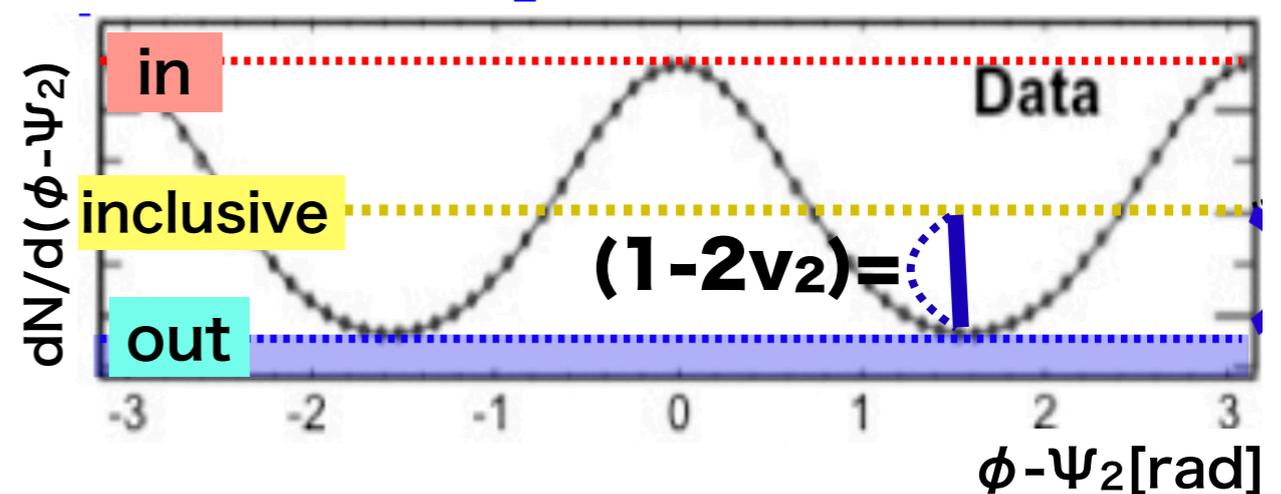
粒子の方位角分布



## in-plane



## out-of-plane



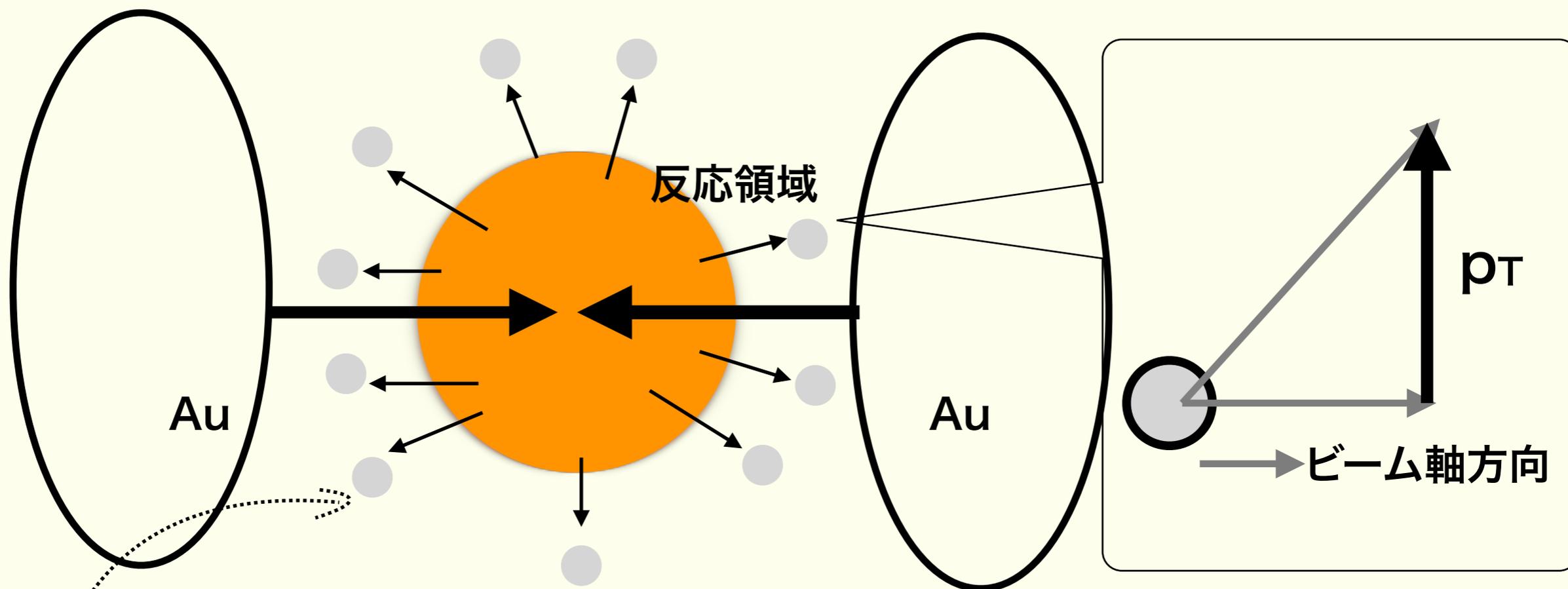
Yield<sub>in</sub> =

**inclusive**  $\times (1 + 2v_2)$

Yield<sub>out</sub> =

**inclusive**  $\times (1 - 2v_2)$

# Au+Au衝突における観測量



- 個々の粒子の  
( $p_T$ ,  $\eta$ ,  $\phi$ )を測定

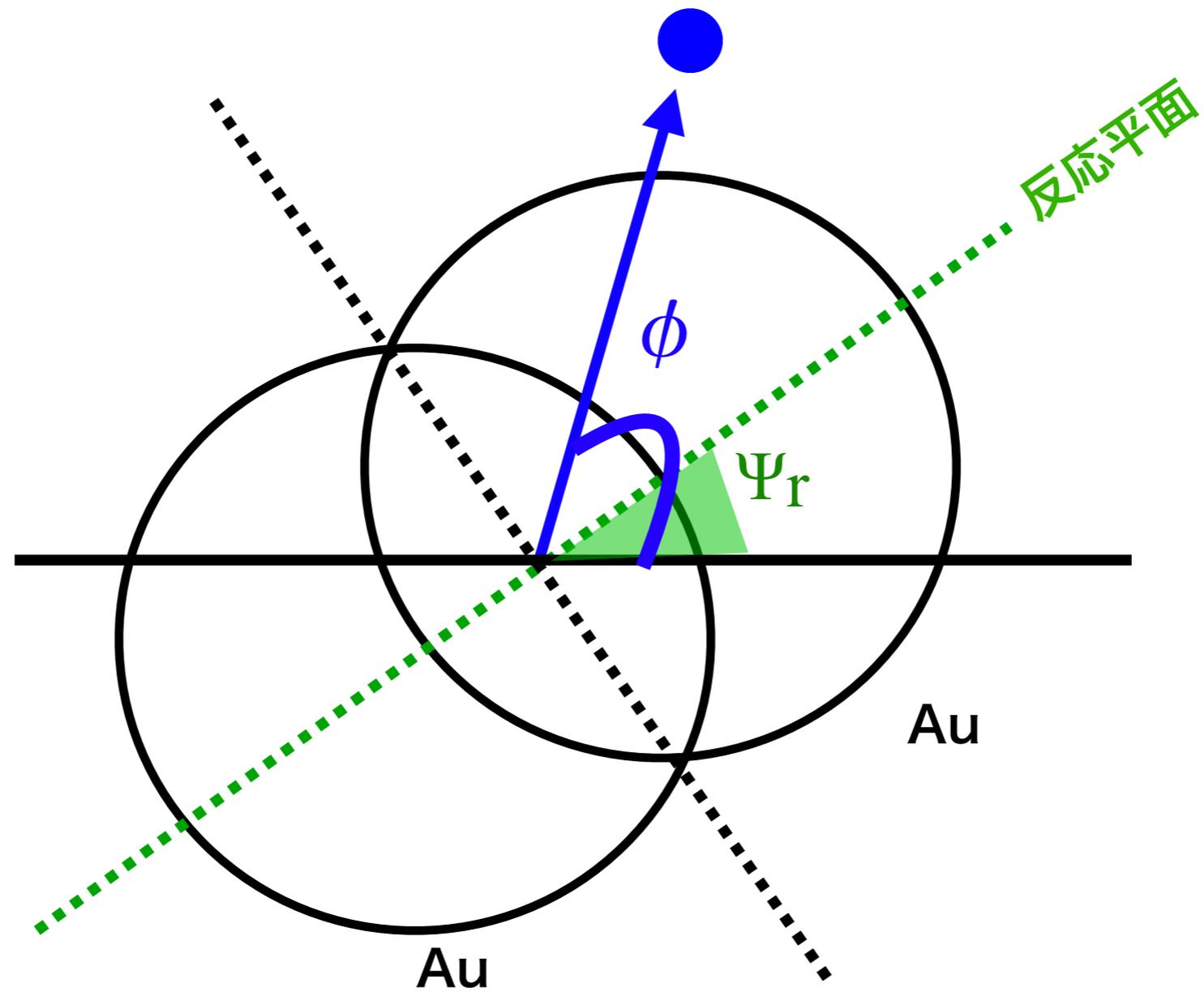
+

速さにかわる運動の大きさの尺度

- 中心衝突度 (centrality) を測定

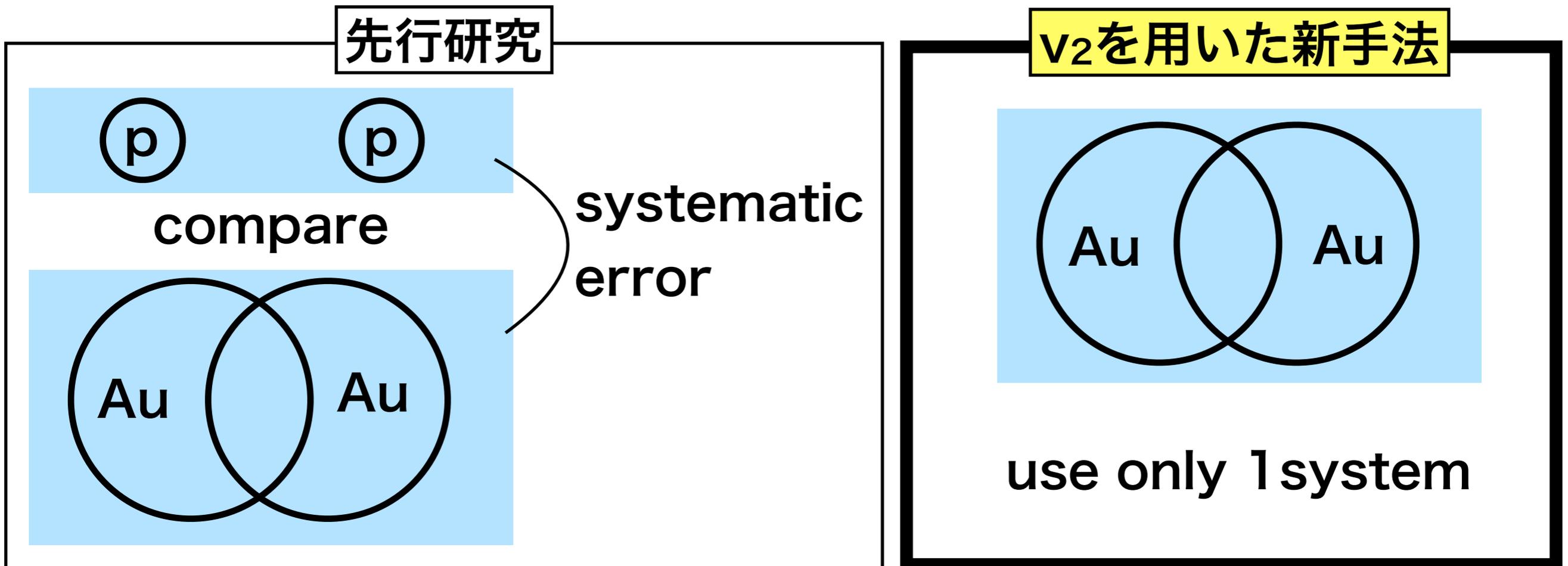
横運動量  $p_T$  が大きな散乱  
をハードな散乱と呼ぶ

# Au+Au衝突における観測量



# なぜv<sub>2</sub>を使うのか

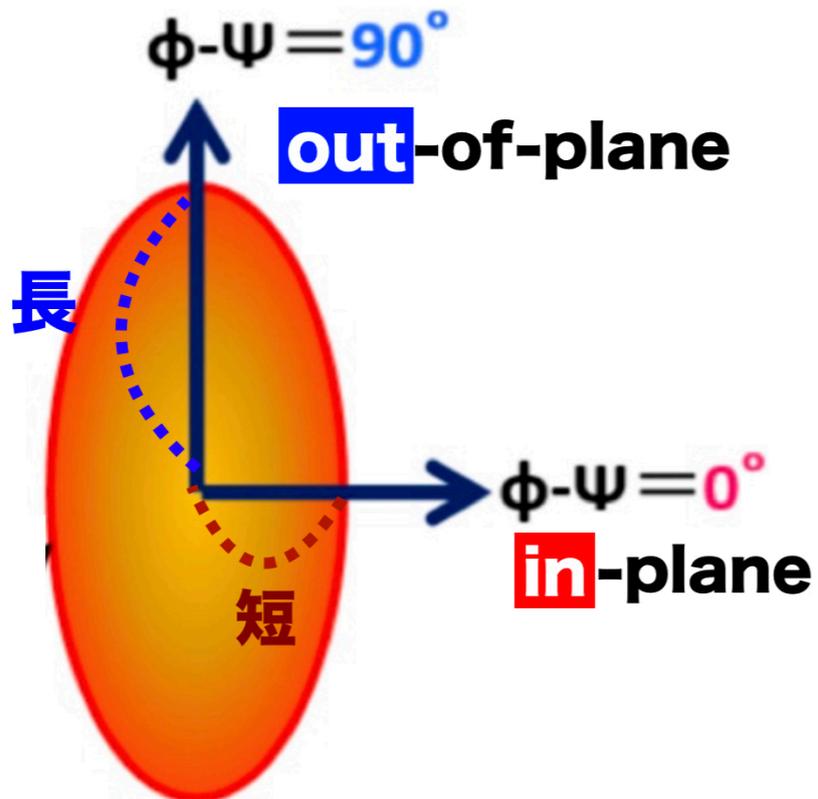
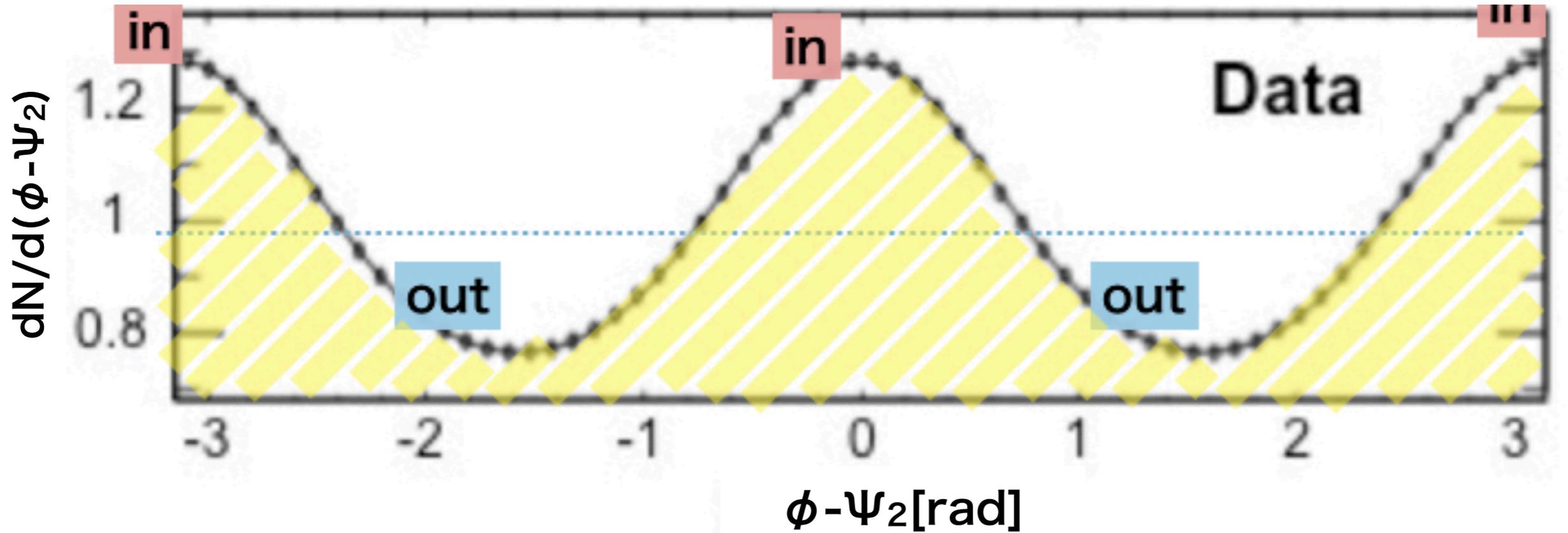
- 1つの衝突システムのみを使用するため、異なるシステム間に発生する系統誤差が入らない



v<sub>2</sub>を使うと1システムのみにおいて、方位角の違いからくるエネルギー損失の議論が可能

# ① Inclusive yield

## 粒子の方位角分布

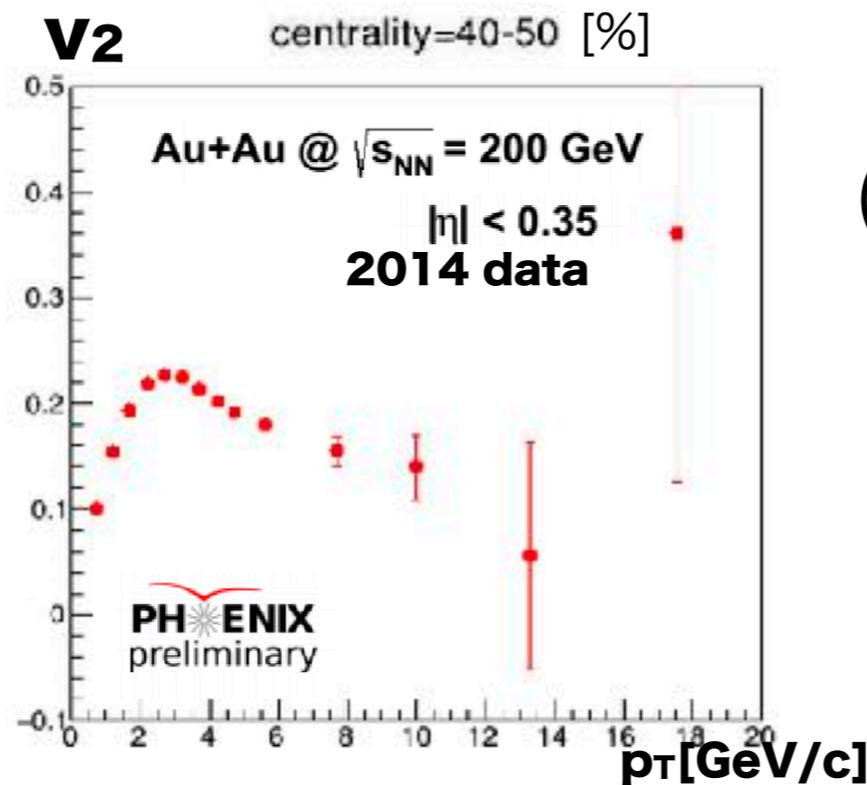
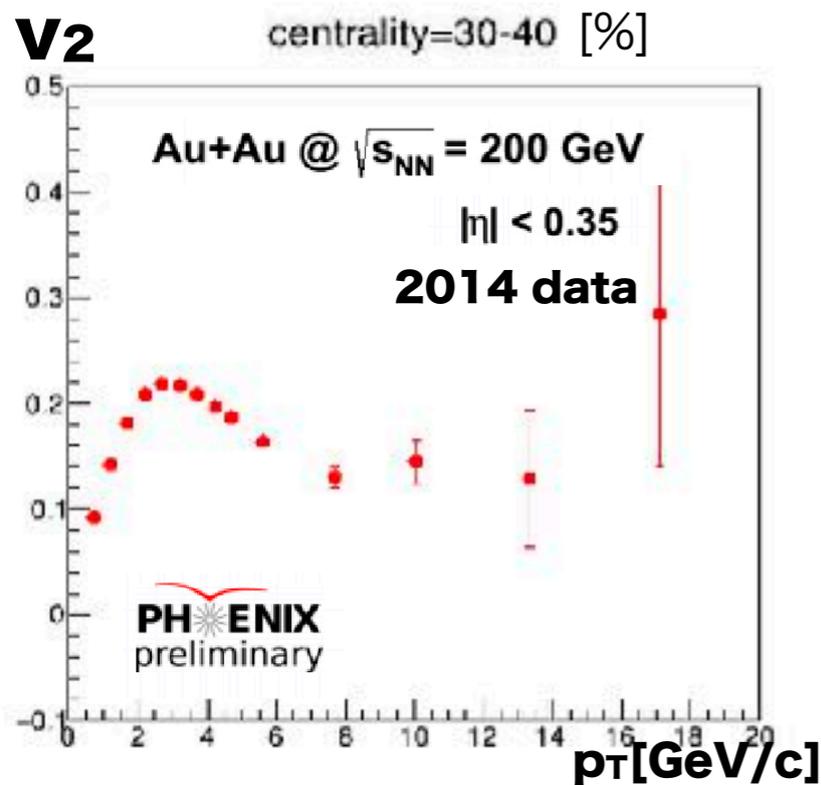
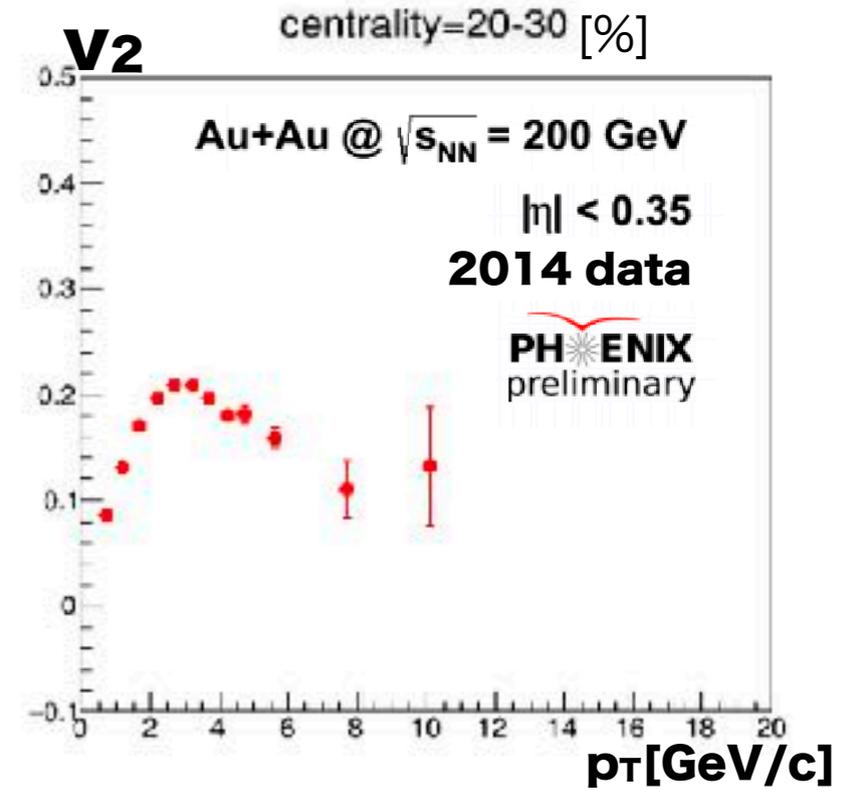
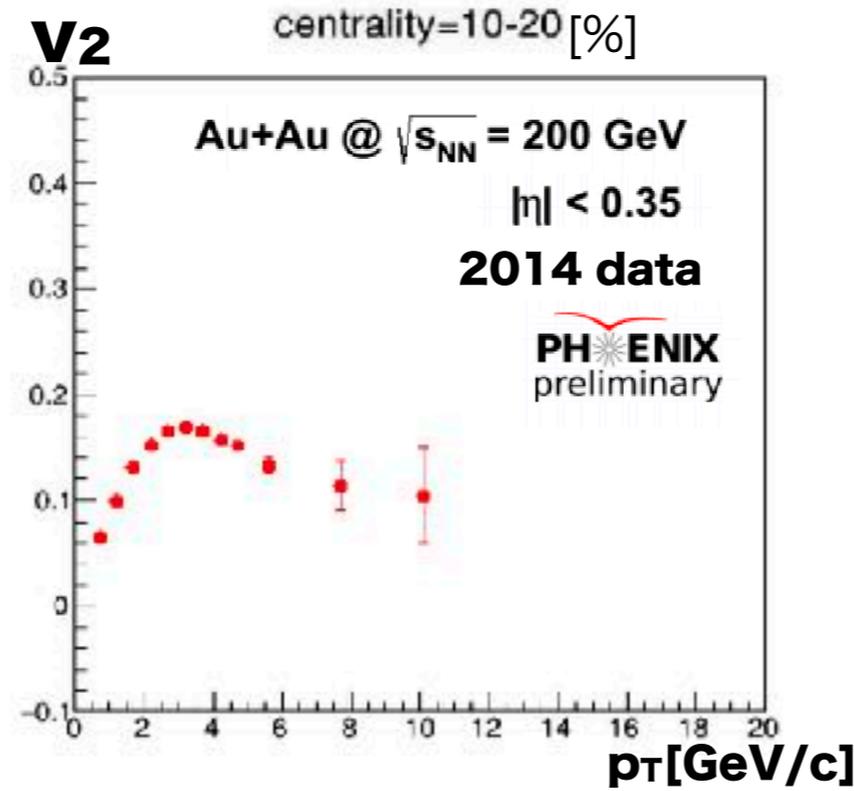
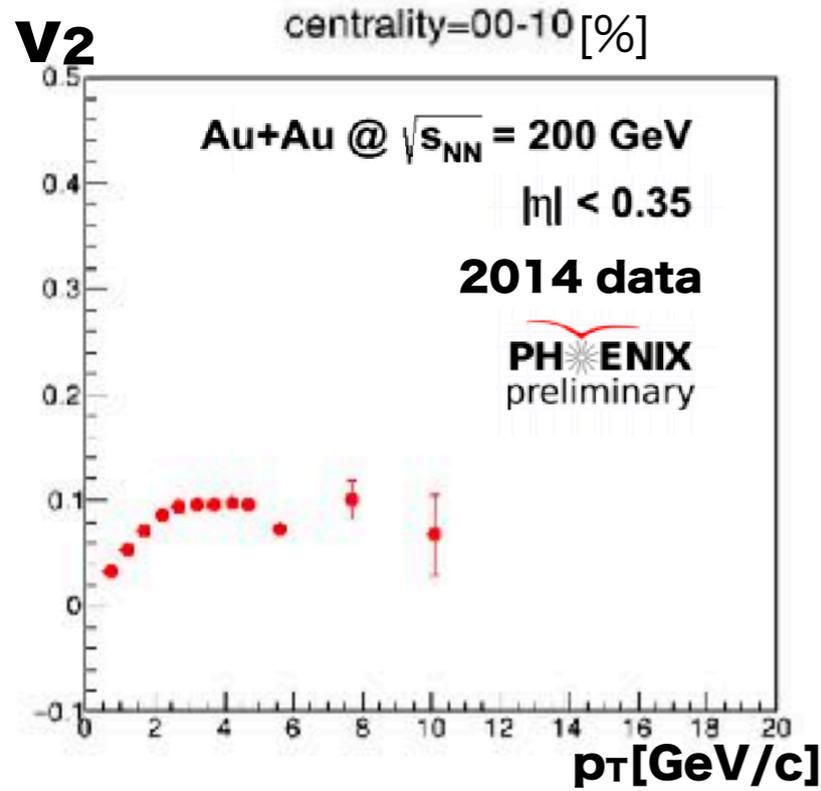


**inclusive yield**  
が既知の量

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

# ② 方位角異方性 $v_2$ の横運動量依存性

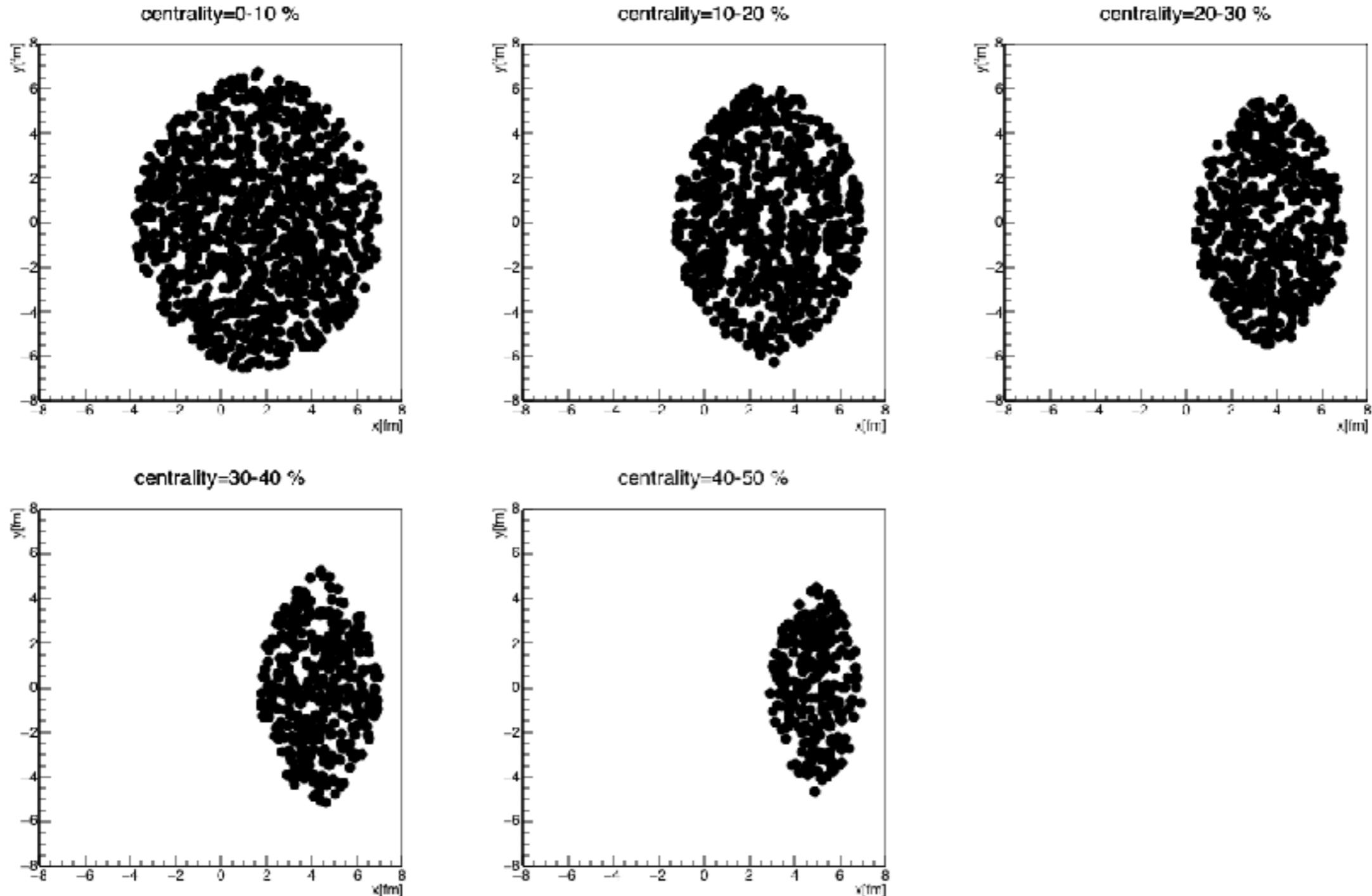
## $v_2$ の測定結果 (PHENIX)



(centrality every 10%)

**方位角異方性 $v_2(p_T)$   
が測定されている**

# より高精度なdLの計算

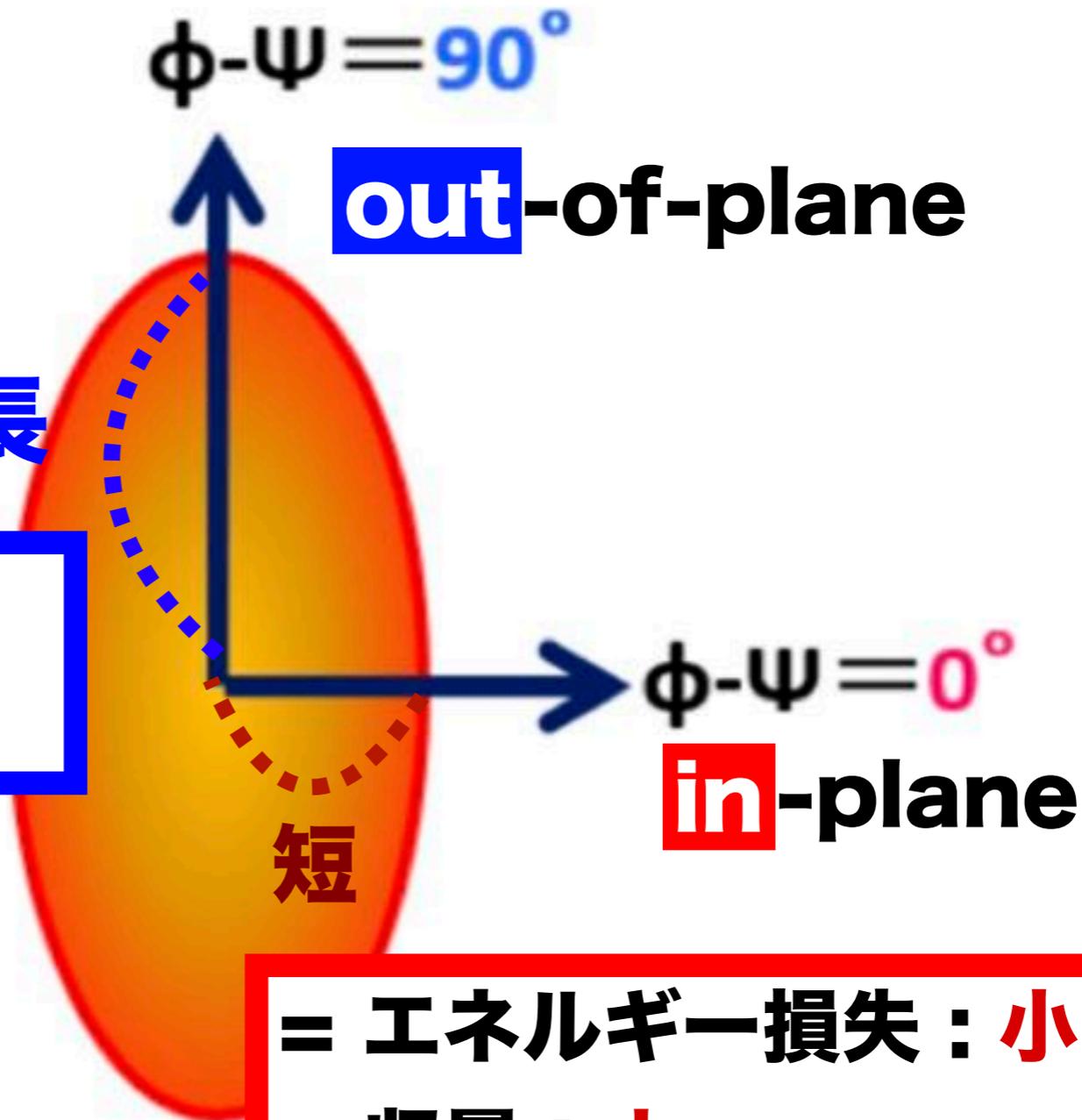


**ランダムに粒子を分布させ、  
より現実的なモデルに基づいた平均のdLを計算する**

# 高 $p_T$ の粒子における $v_2$

粒子がQGPを通  
過する経路長： **長**

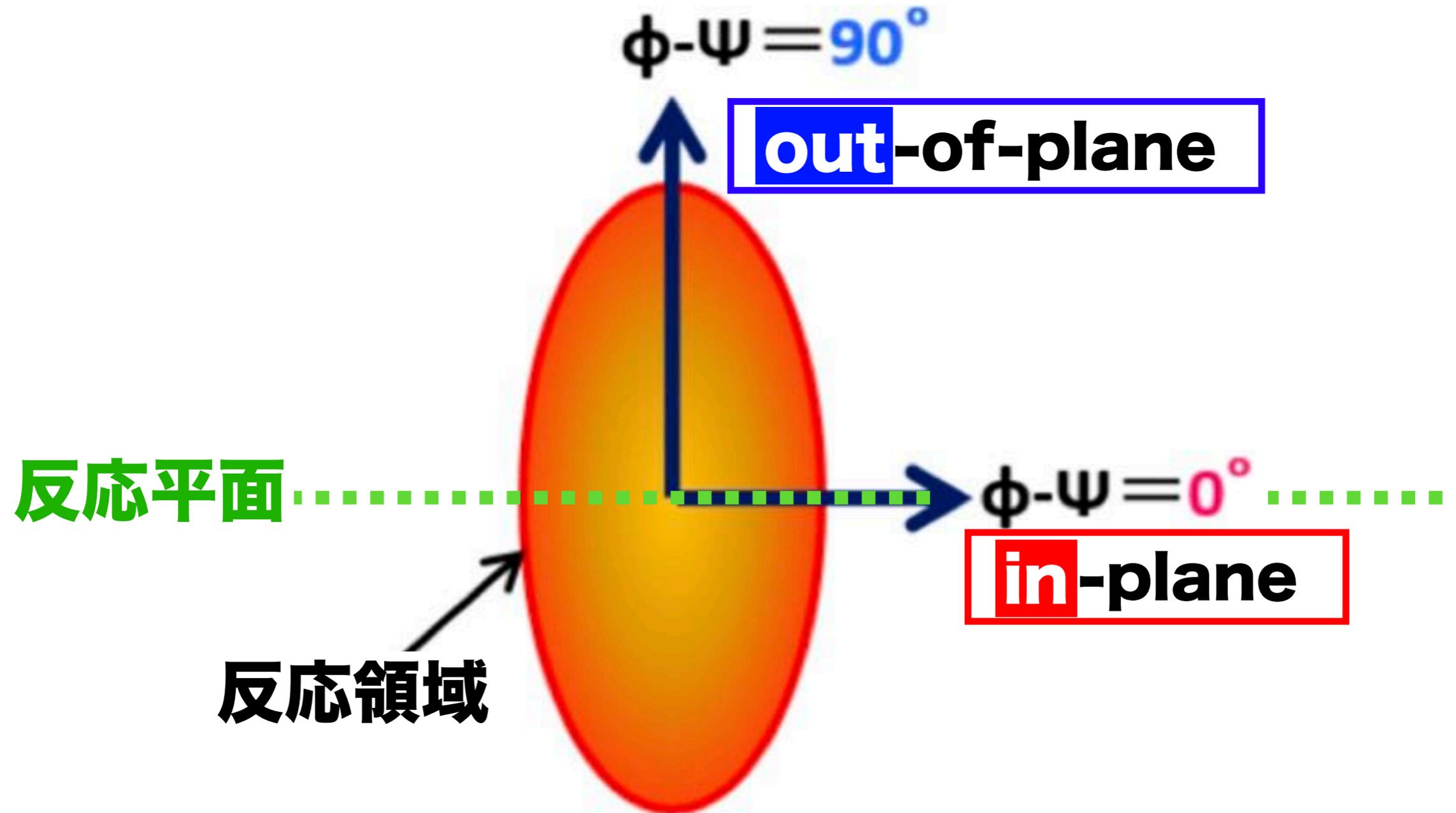
= エネルギー損失： **大**  
= 収量： **小**



= エネルギー損失： **小**  
= 収量： **大**

QGP中を通過する経路長はエネルギー損失の強さに影響

# In-plane & out-of-plane



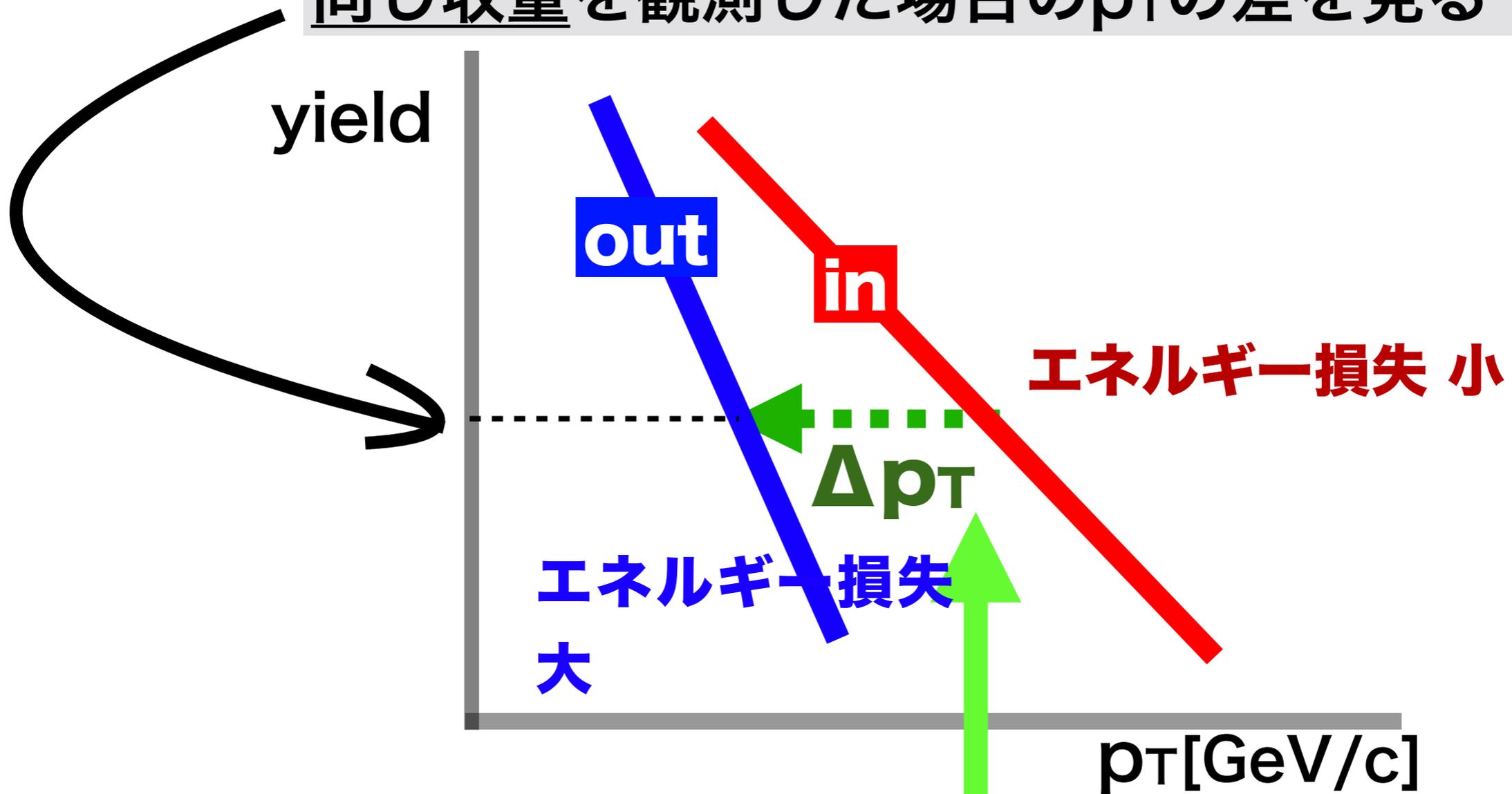
$v_2$ は, **in**-plane と **out**-of-planeとの間の収量の  
違いを表す量

# 横運動量損失 $\Delta p_T$ を

## QGP中のエネルギー損失の指標として用いる

**in**-plane と **out**-of-plane で

同じ収量を観測した場合の  $p_T$  の差を見る

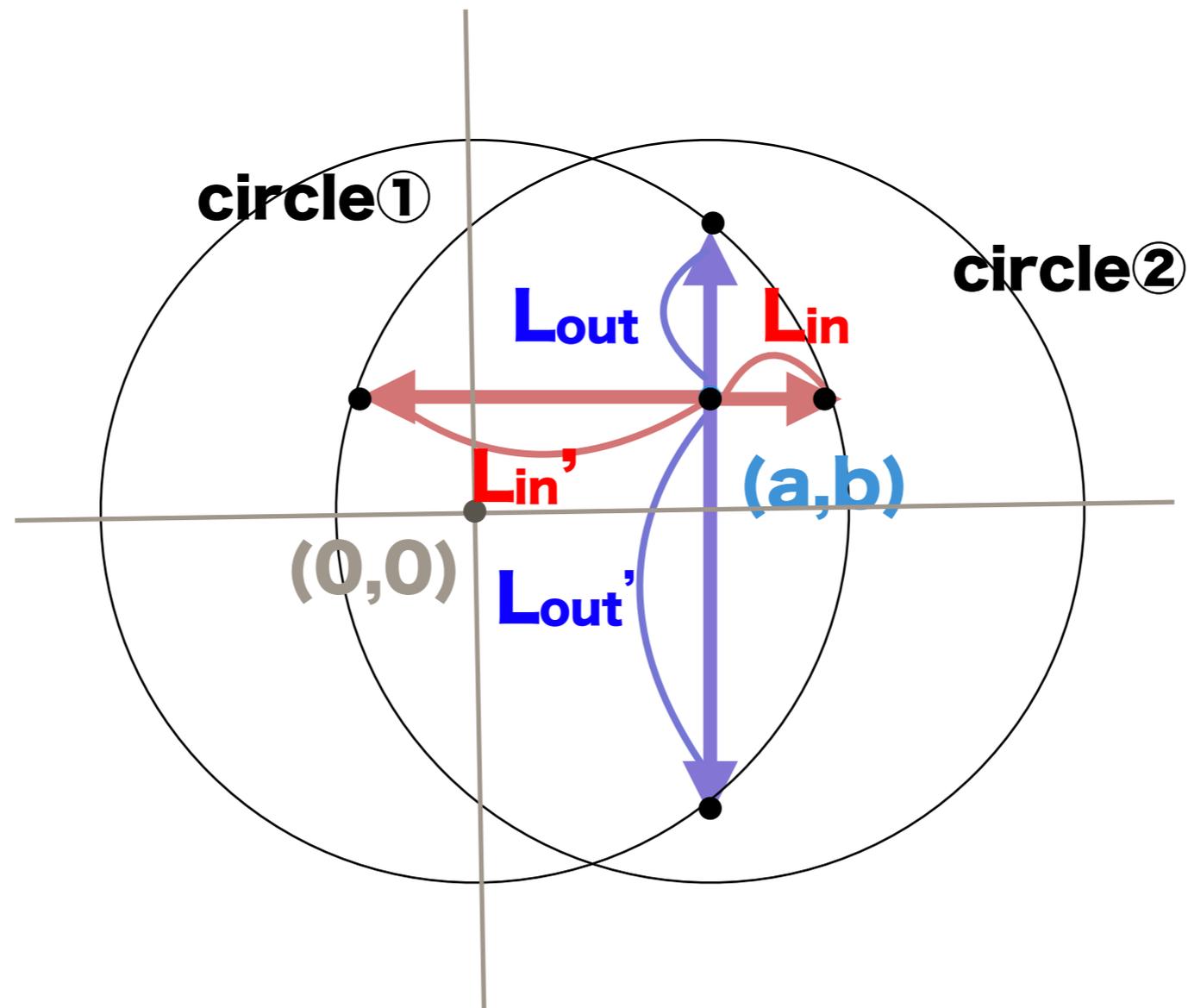


$\Delta p_T$  はエネルギー損失の差に対応している

# 検討しているdLの計算方法

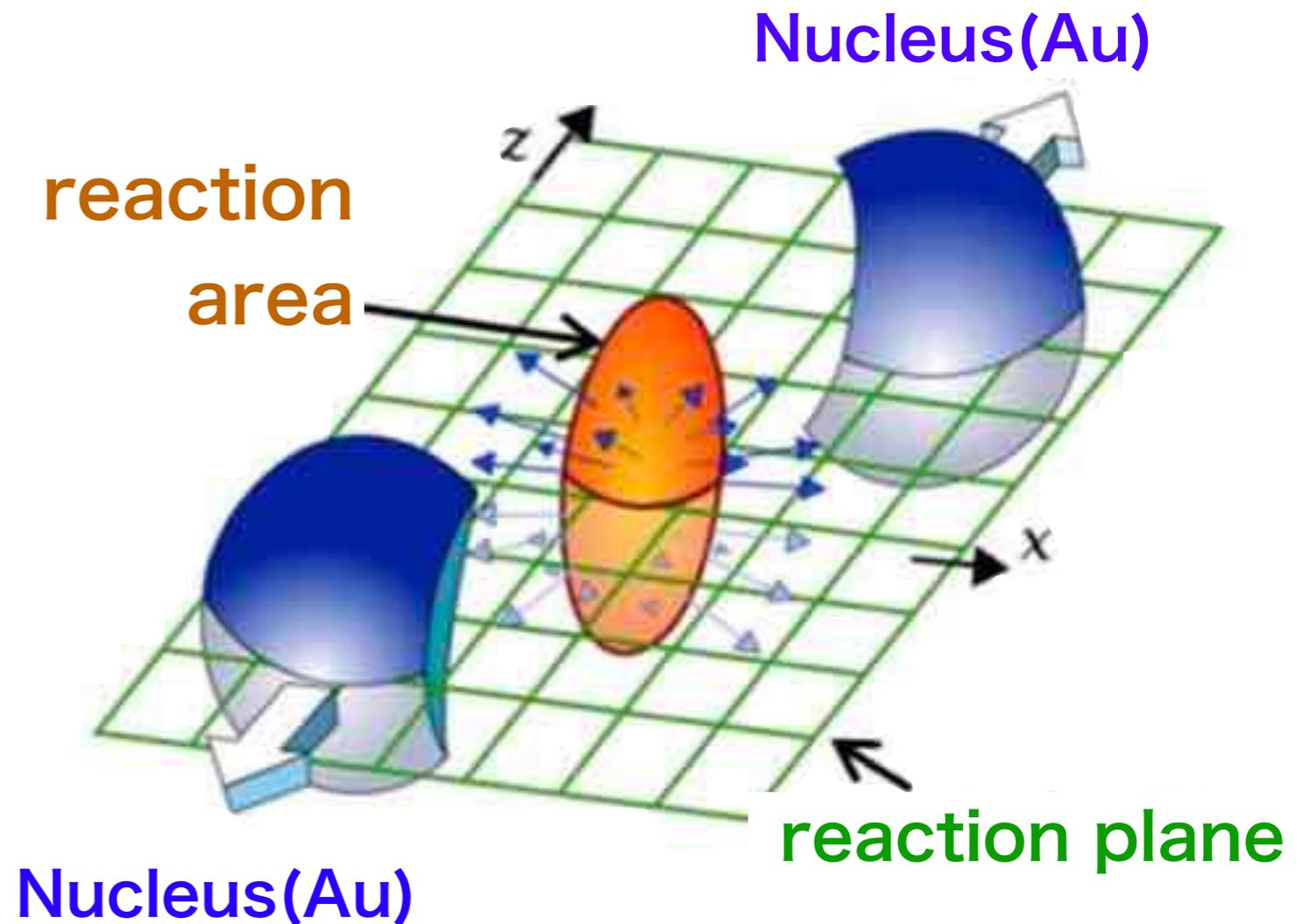
座標(a, b)から放出する粒子を仮定する。

x軸方向とy軸方向についてそれぞれ距離 $L_{in}$ ,  $L_{out}$ をとり、  
全粒子に対する平均経路長dLを決める。



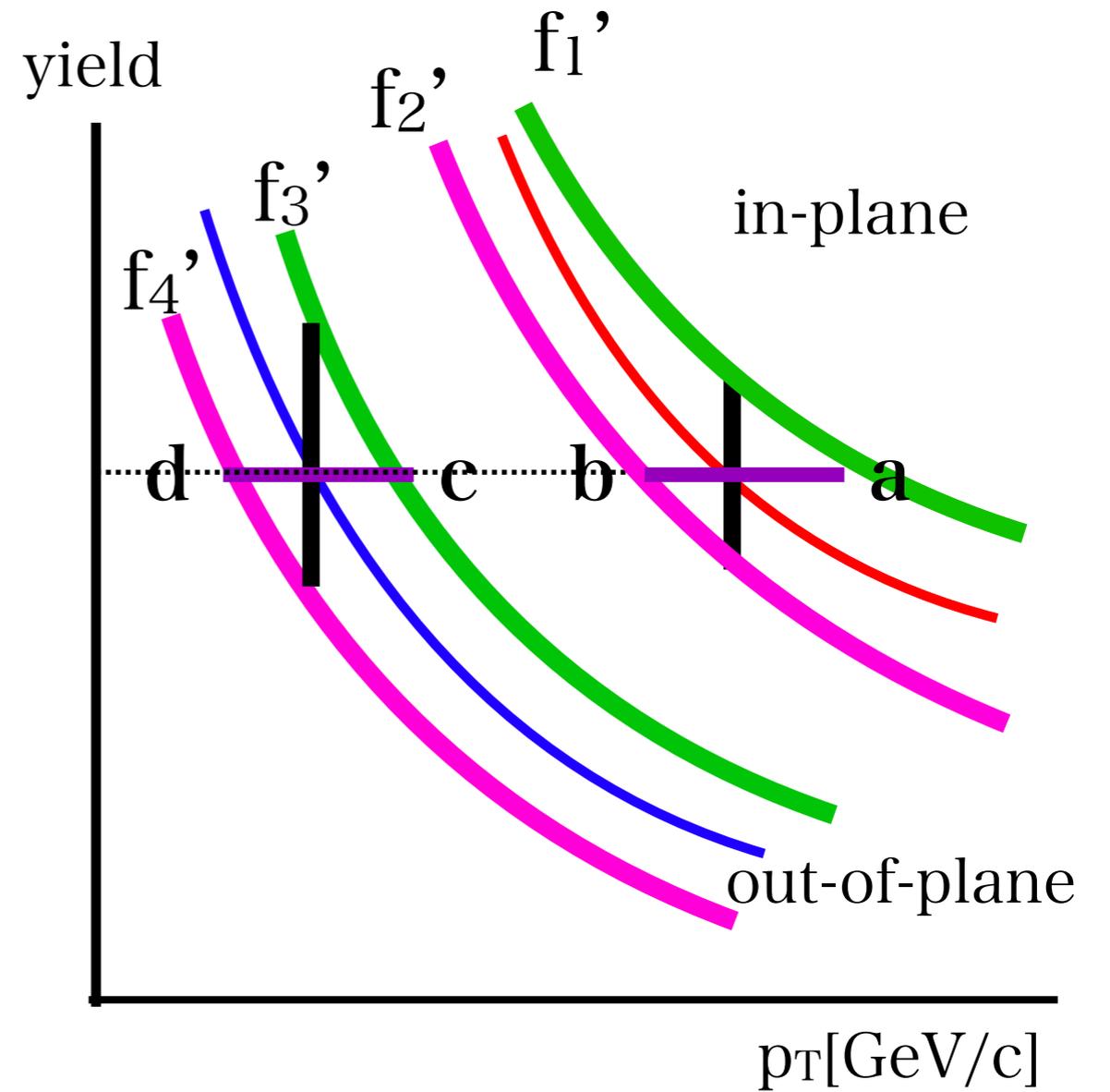
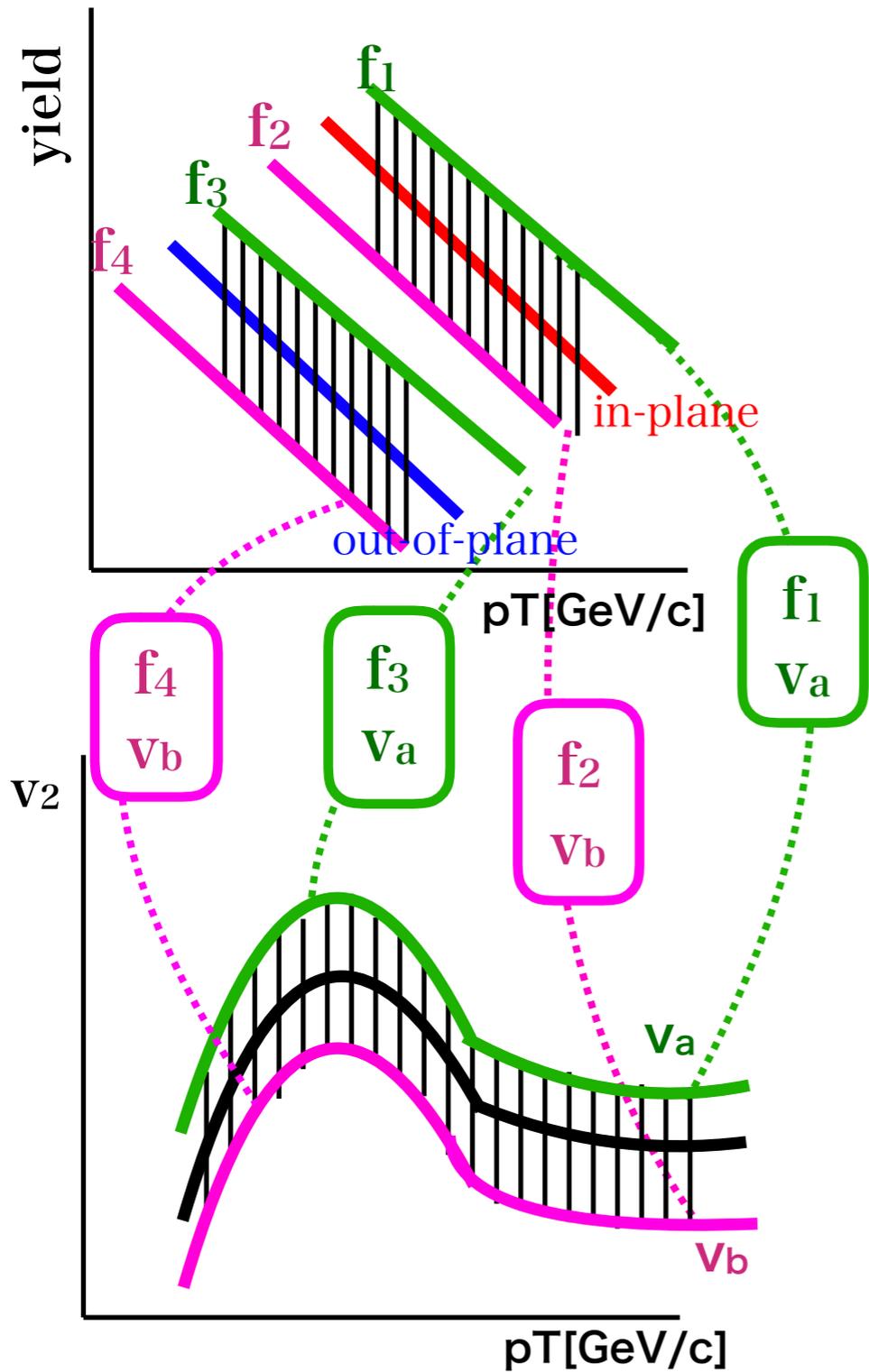
# azimuthal anisotropy

: The property that the number of particles coming out depends on the azimuthal angle



Azimuthal anisotropy is one of the  
properties of QGP

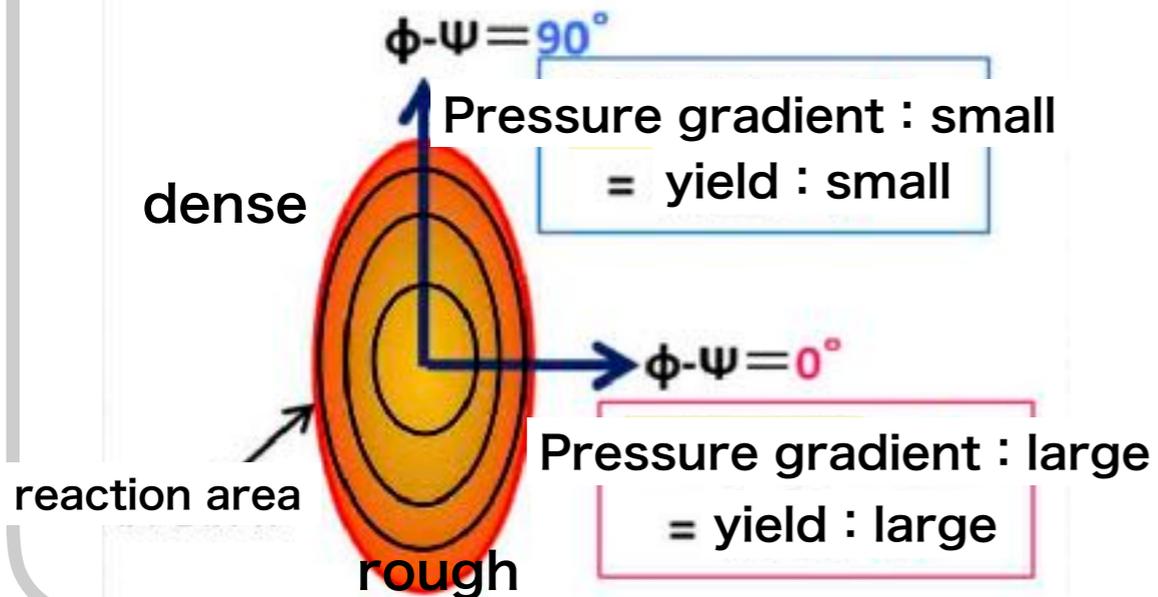
- systematic errors of  $p_T$  spectra



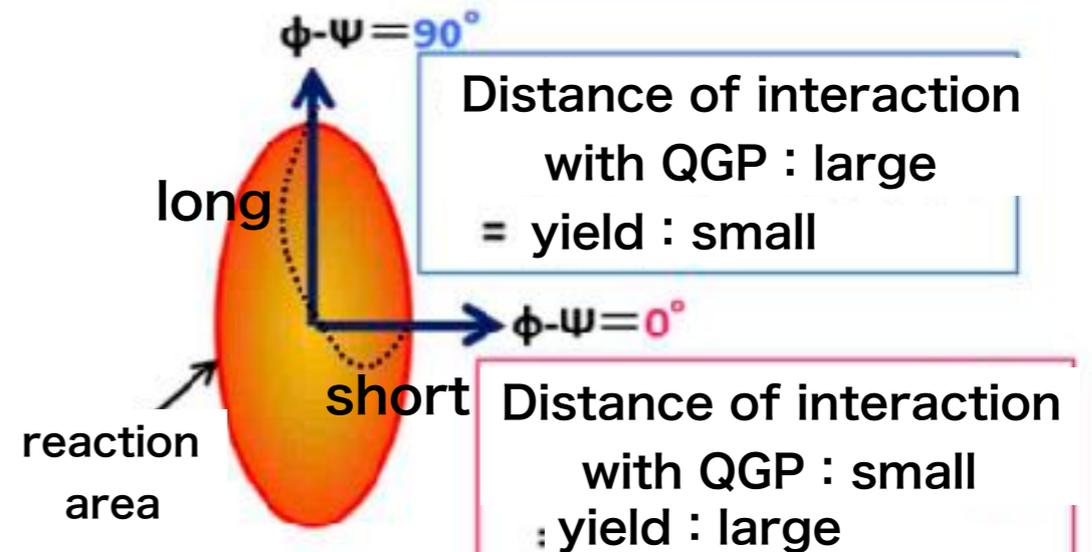
- systematic errors of  $v_2$

# In this research

## Low $p_T$ $v_2$ $\sim 2\text{GeV}/c$



## High $p_T$ $v_2$



- Look at the difference in  $p_T$  when the same yield comes out from yield **in** plane and **out** of plane

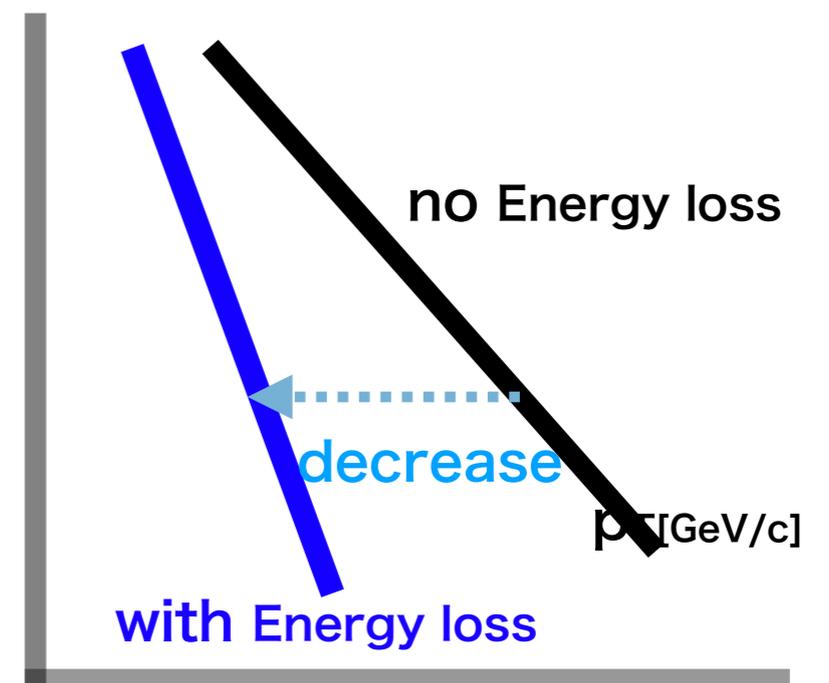
- **in** plane

: The distance of interaction with QGP is short  $\rightarrow$  energy loss: small

- **out** of plane

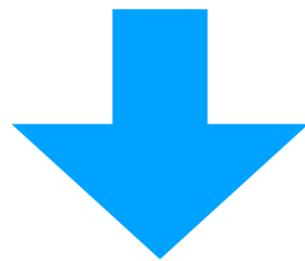
: he distance of interaction with QGP is long  $\rightarrow$  energy loss: large

yield



# $\Delta p_T$ とdLのcentrality増加に伴う増加 から考えられる事

- エネルギー損失の差 $\Delta p_T$ は centralityの増加に伴って増加
- in-planeとout-of-planeの経路差dLは, centralityの増加に伴って増加



以上より、

**エネルギー損失の差 $\Delta p_T$ は経路差dL の増加に伴って増加**

ただし、

**dLの依存性や係数の決定にはより詳しい検討が必要**