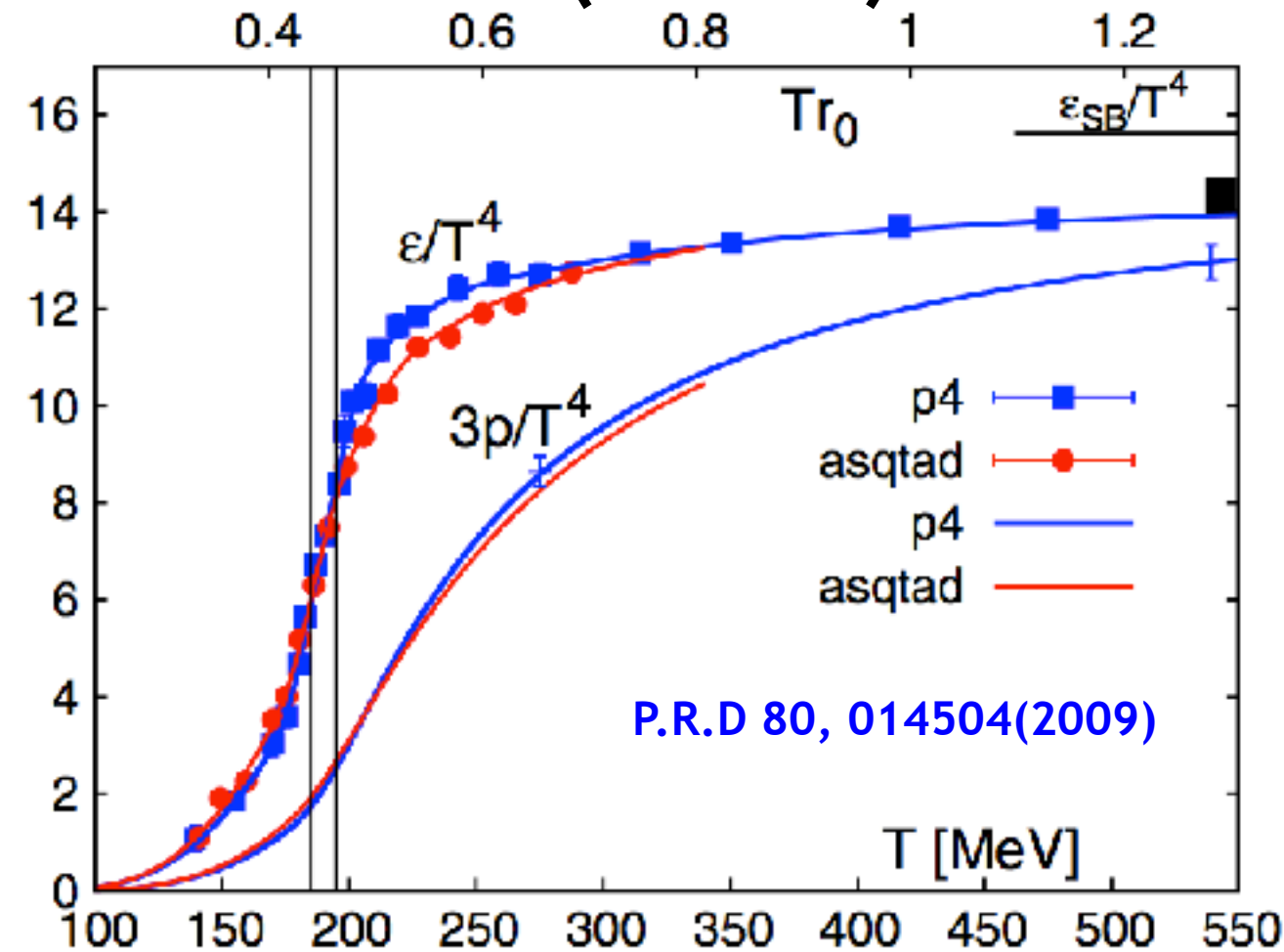
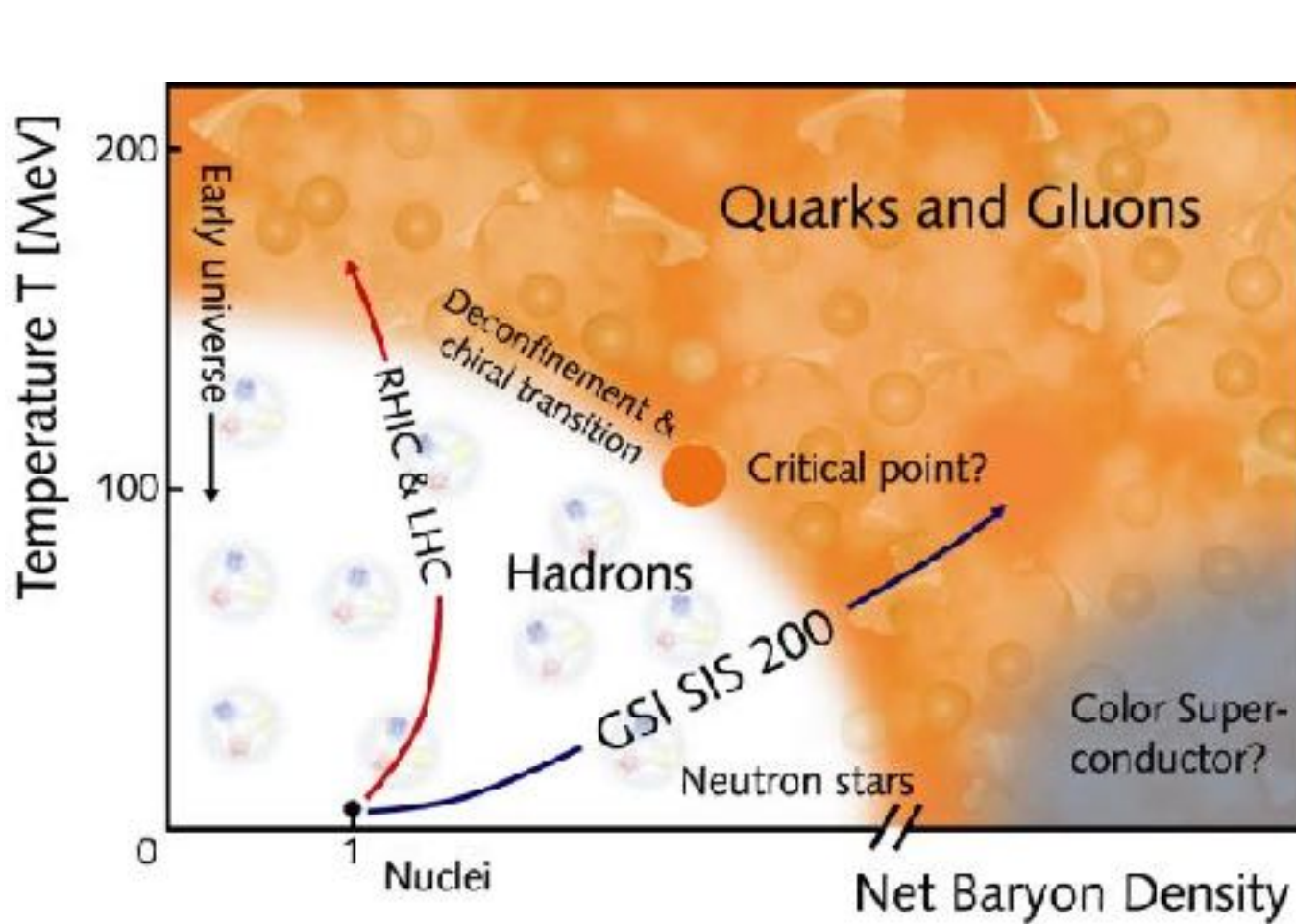


高エネルギー原子核衝突実験における 直接光子の高次方位角異方性を用いた QGP研究

Dec. 12th 2016
Sanshiro Mizuno
sanshiro@bnl.gov

クォークグルーオンプラズマ (QGP)



QCD相図

バリオン密度と温度の相図

格子QCD計算の予想

$$\epsilon \approx 1 \text{ GeV/fm}^3 : T \approx 170 \text{ MeV}$$

- ・ 宇宙初期に存在したとされているQGP物質の性質解明
- ・ 極限の高温高密度によってクォーク、グルーオンが比較的自由に動き回れる状態

大型加速器 (RHIC, LHC)

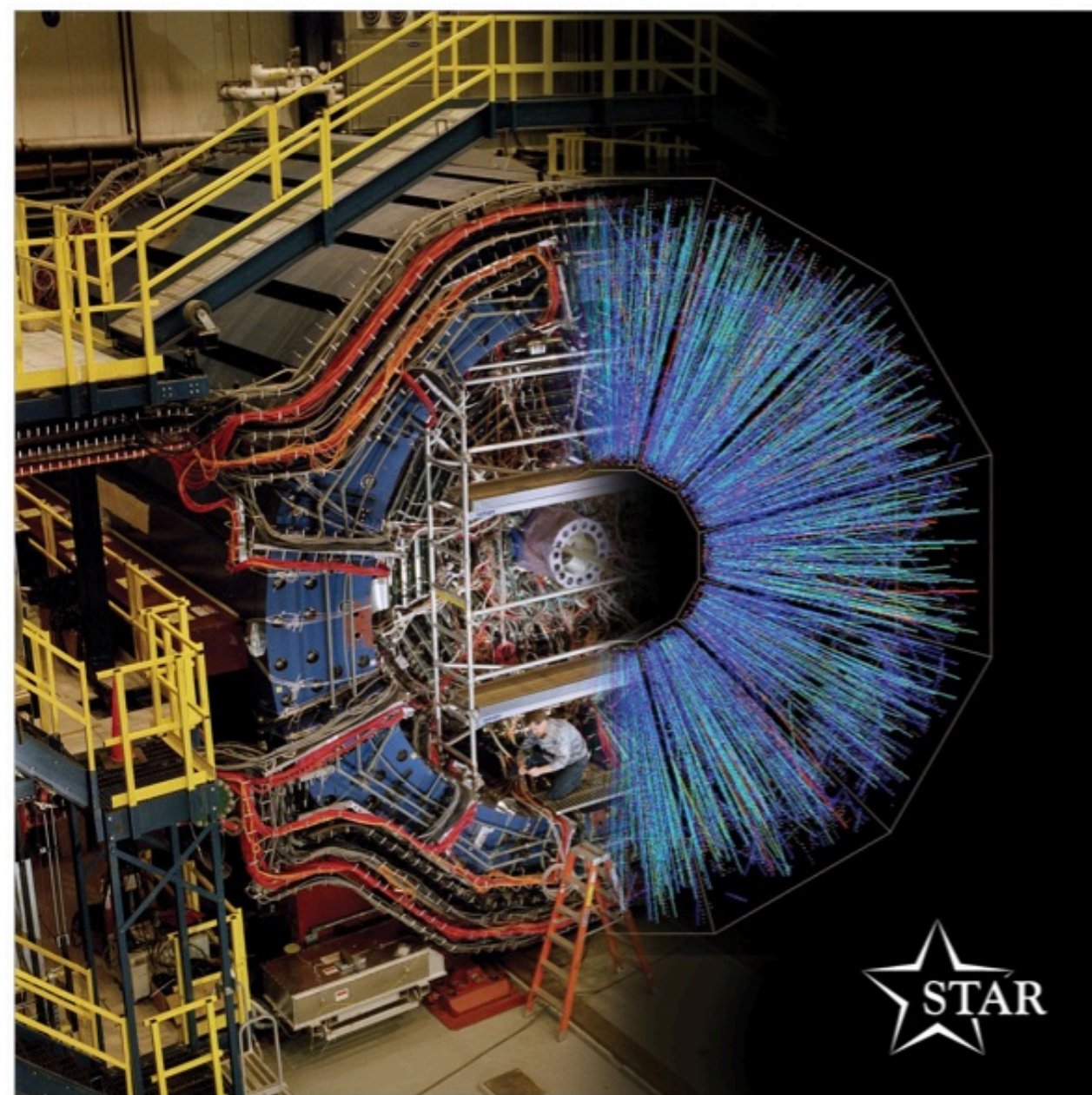
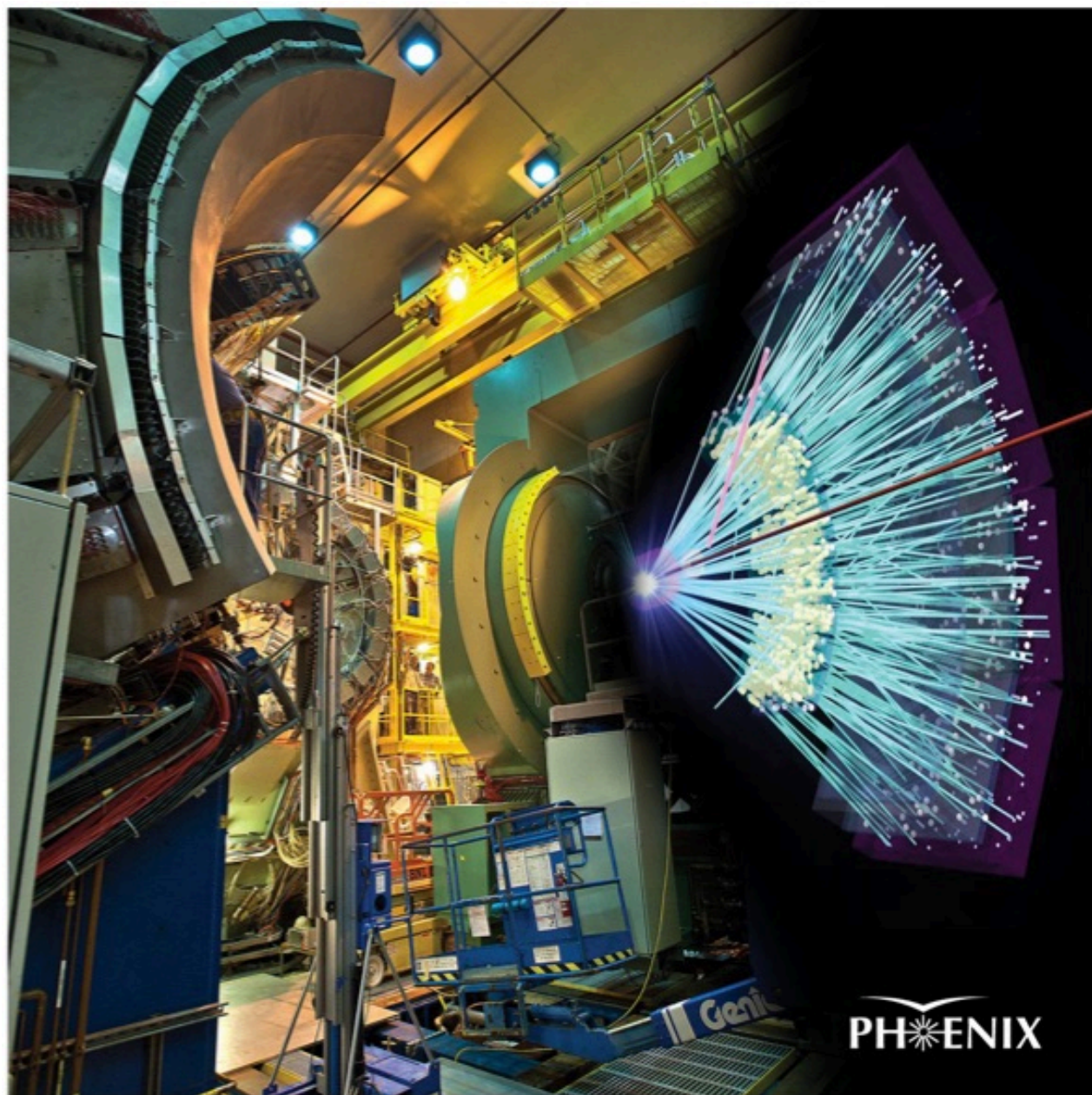


RHIC加速器(アメリカ)

LHC加速器(スイスとフランス)

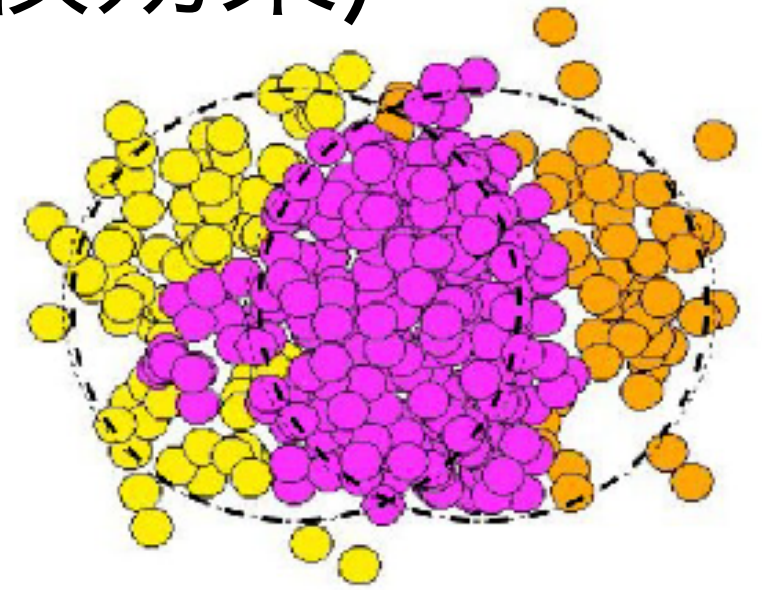
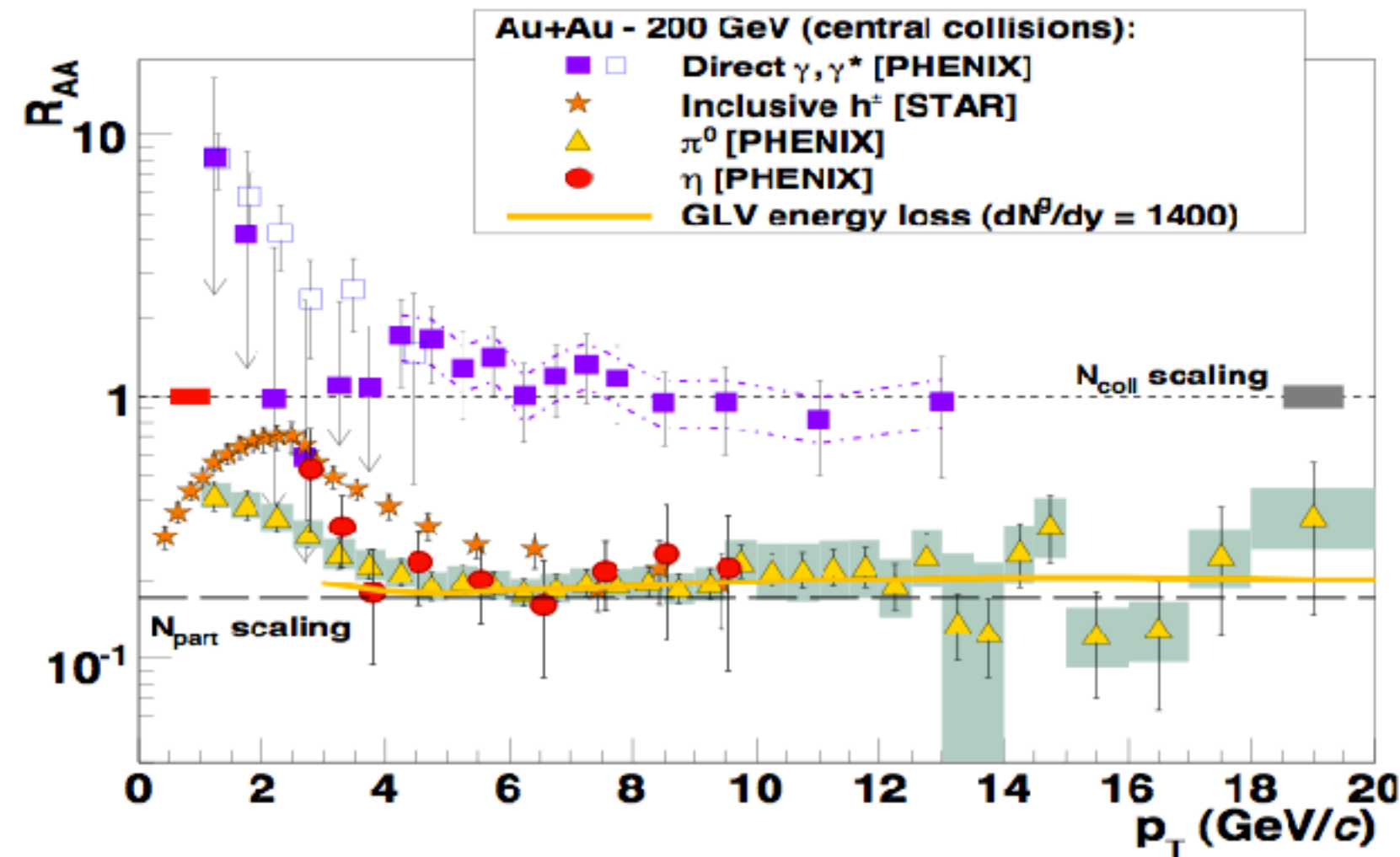
- RHIC : p+p, d+Au, Cu+Cu, Cu+Au, Au+Au **200GeV**
p+p **510GeV**, U+U **193GeV**
- LHC : p+p, p+Pb, Pb+Pb **5.02TeV**

PHENIX実験・STAR実験



- ・ 2つの実験が長年行われていた、
PHENIX：様々な粒子識別のための検出器(sPHENIXになる予定)
STAR： 2π の方位角を覆ったTPC

QGPのシグナル (原子核効果)



$$R_{AA} = \frac{Y_{AA}}{N_{coll} Y_{pp}}$$

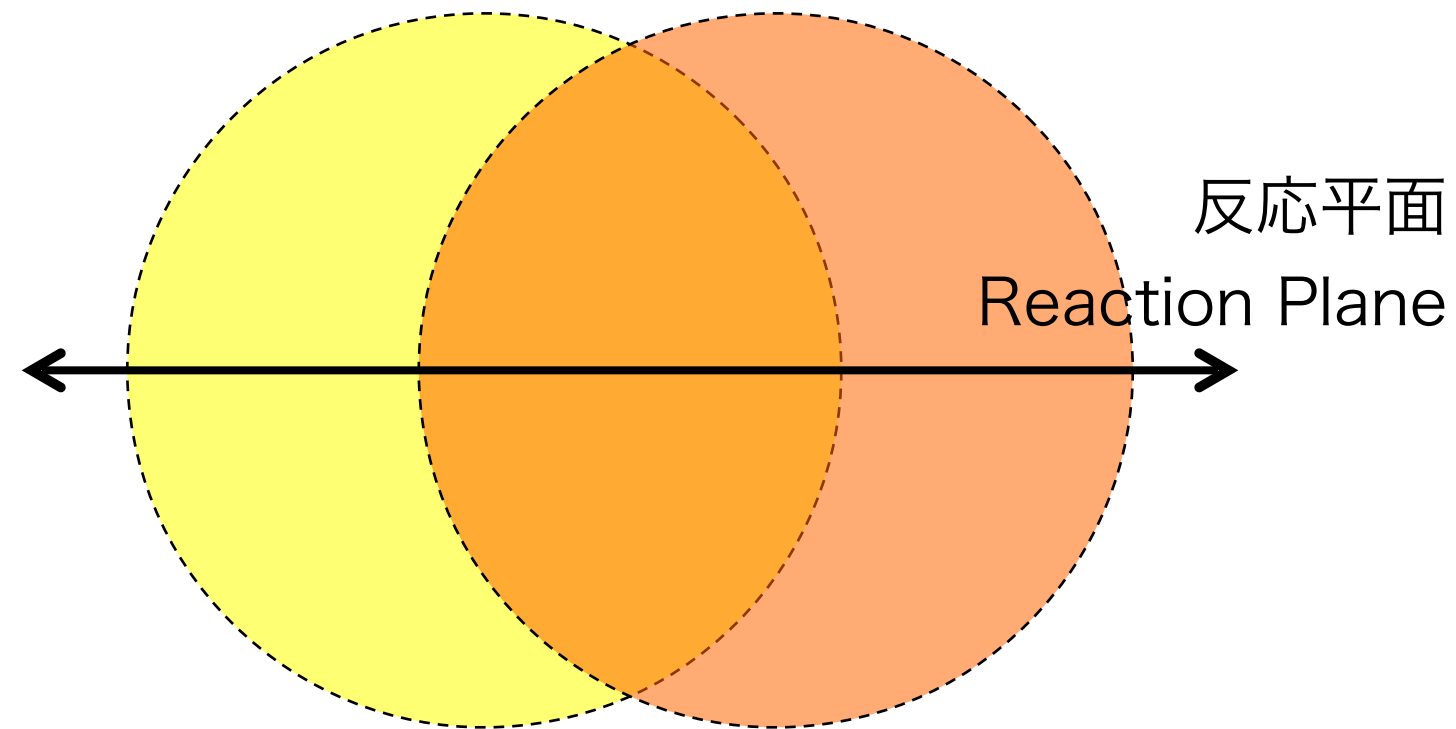
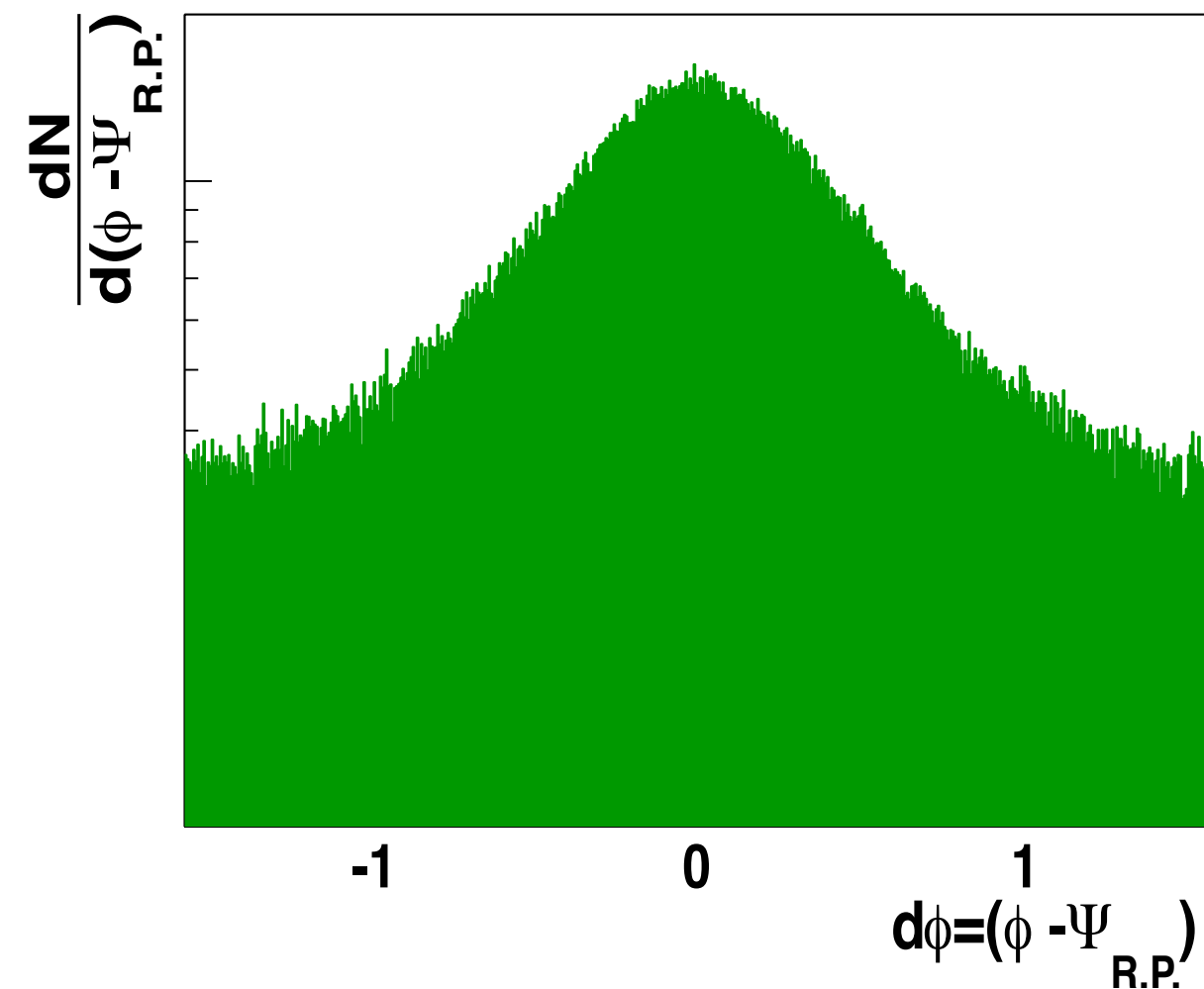
Y_{pp} : 発生粒子数 @ pp

Y_{AA} : 発生粒子数 @ AA

N_{coll} : AA内での核子の
衝突回数

- ・ 単純なppの重ね合わせでは再現できない
何かしらの物質ができている可能性がある

QGPのシグナル (方位角異方性)



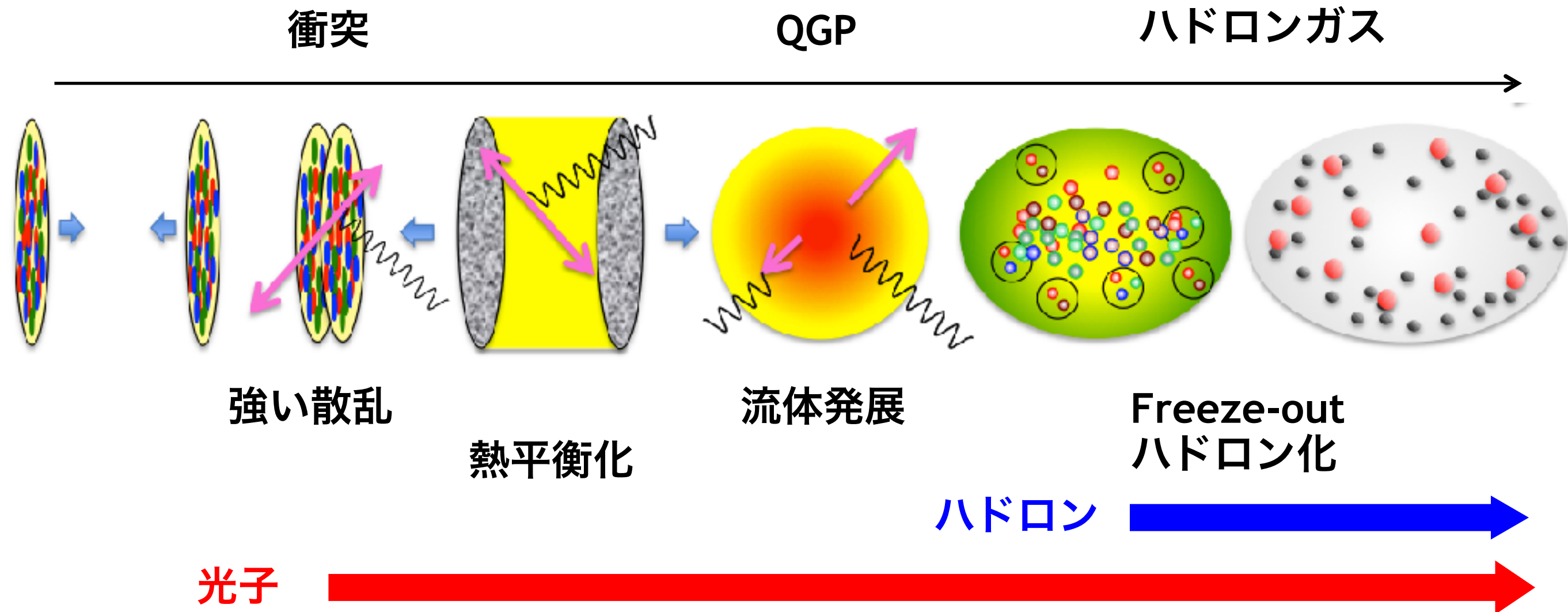
$$N(\Delta\phi - \Psi_{R.P.}) = N_0 [1 + 2v_2 \cos \{2(\phi - \Psi_{R.P.})\}]$$
$$v_2 = \langle \cos \{2(\phi - \Psi_{R.P.})\} \rangle$$

R.P.方向に対する荷電粒子生成数分布

- ・ 単純なppの重ね合わせでは説明できない
粘性を持った液体のような振る舞い

衝突初期の形状に依存している

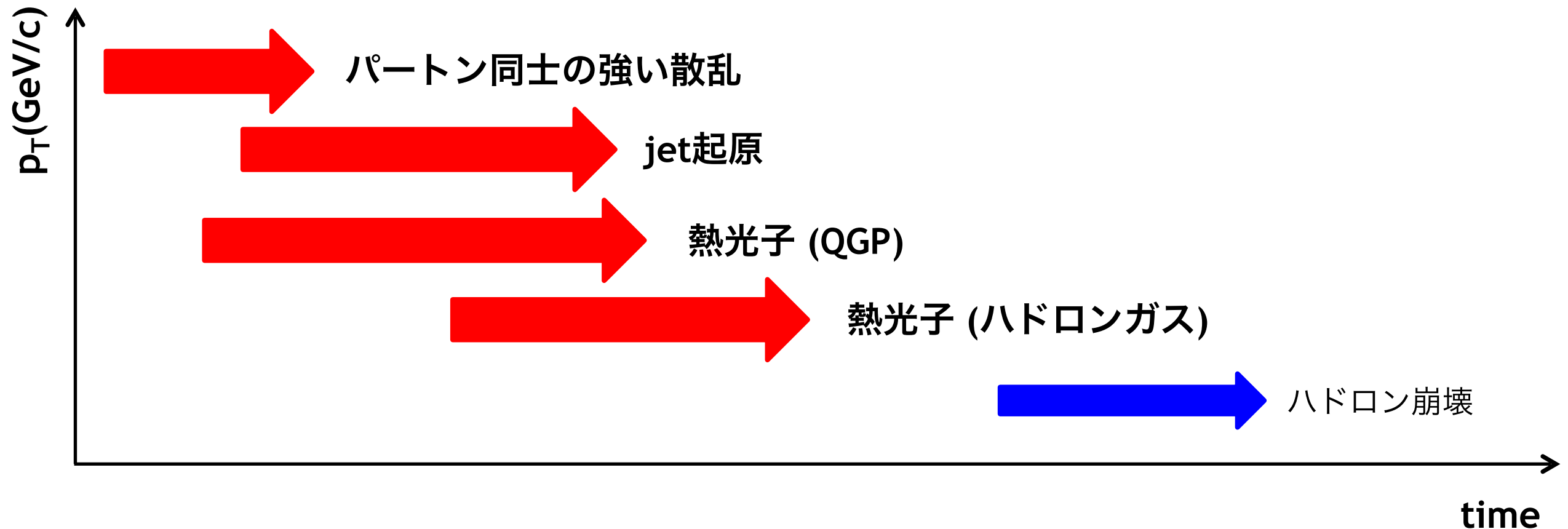
衝突実験の時間発展のイメージ図



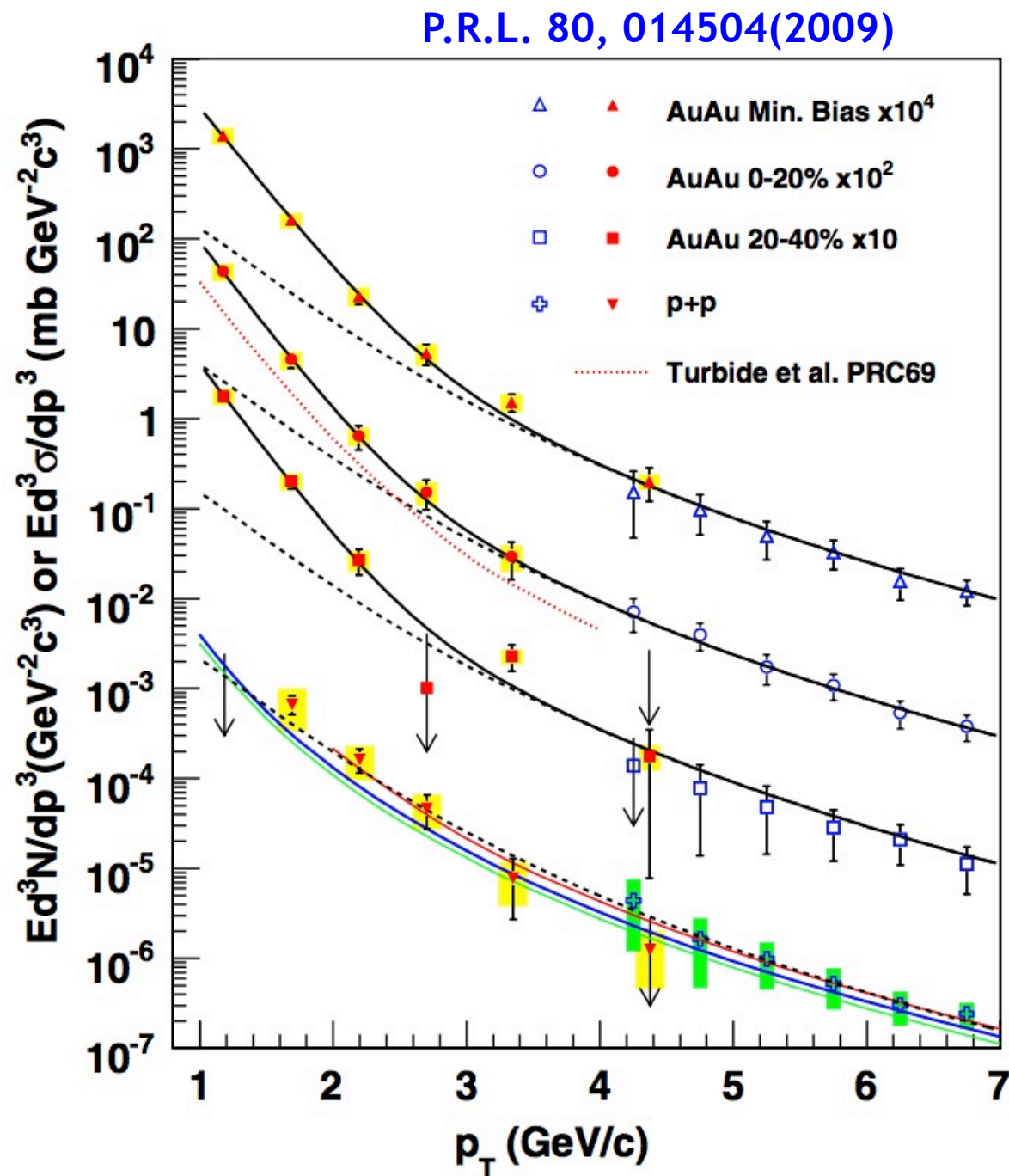
- 光子：様々な起原を持っており常に放出されている
強い相互作用されずにでてくる
- ハドロン：freeze-out後から放出される

直接光子 (= 全光子 - 崩壊光子)

- ・ ハドロンの崩壊からくる光子($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$)以外の全光子
様々な発生起源を持っている
- ・ 起源を特定しながら測定する必要がある
 p_T spectra、方位角異方性 ($v_{2,,}$)



直接光子の生成量の比較



重イオン衝突実験で初めて測定された低い運動量領域の光子生成量分布

収量の差にexponential関数をfitして温度を引き出す

膨張する系の平均温度

Centrality	Effective temperature
0% - 20%	$221 \pm 19 \pm 19$ (MeV)
20% - 40%	$217 \pm 18 \pm 16$ (MeV)
Min	$233 \pm 14 \pm 19$ (MeV)

相転移温度 $\sim 170\text{MeV}$

初期温度(モデル依存)

$300(\tau=0.6\text{fm}/c) - 600(\tau=0.15\text{fm}/c)$ MeV

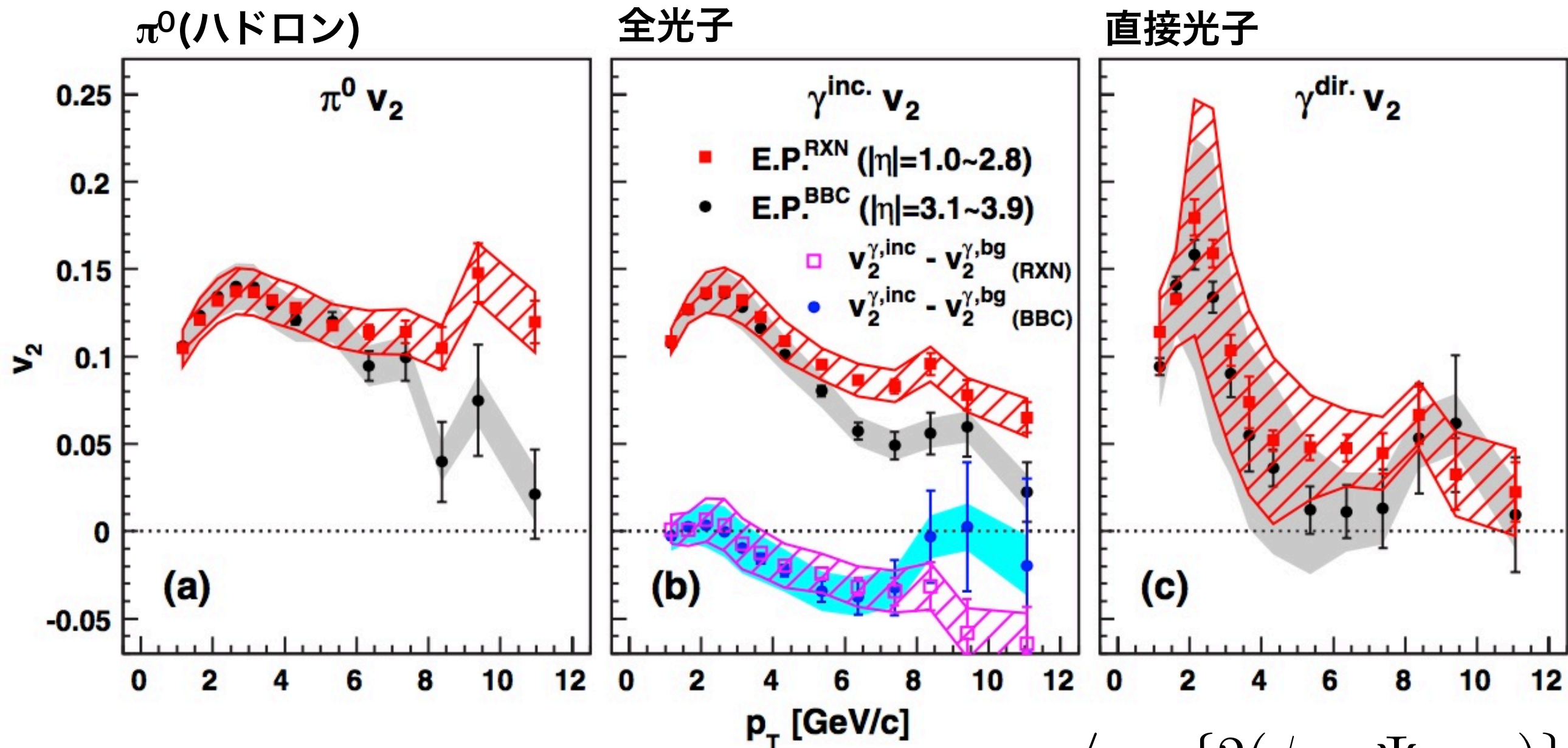
$R_{AA} \sim 10$ ($p_T < 1$): 熱光子が支配的(?)

$R_{AA} \sim 1$ ($4 < p_T$): 衝突初期の光子が支配的(?)

$$R_{AA} = \frac{Y_{AA}}{N_{\text{coll}} Y_{pp}}$$

直接光子の方位角異方性

P.R.L. 109, 122302(2012)

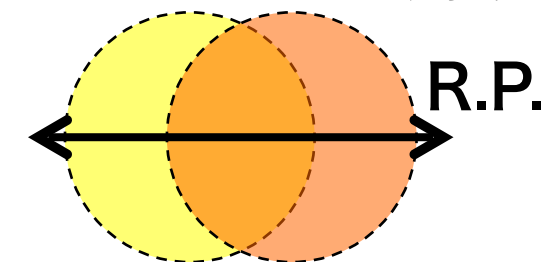


光子 $v_2 \sim \pi^0 v_2$ ($p_T \sim 2$)

光子 $v_2 \sim 0 < \pi^0 v_2$ ($4 < p_T$)

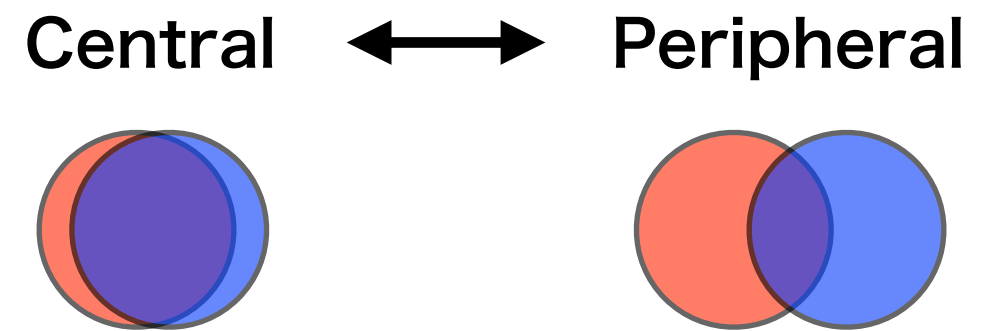
QGPの時間発展とともに大きな $v_2 \rightarrow$ 後期の光子??

$$v_2 = \langle \cos \{2(\phi - \Psi_{R.P.})\} \rangle$$



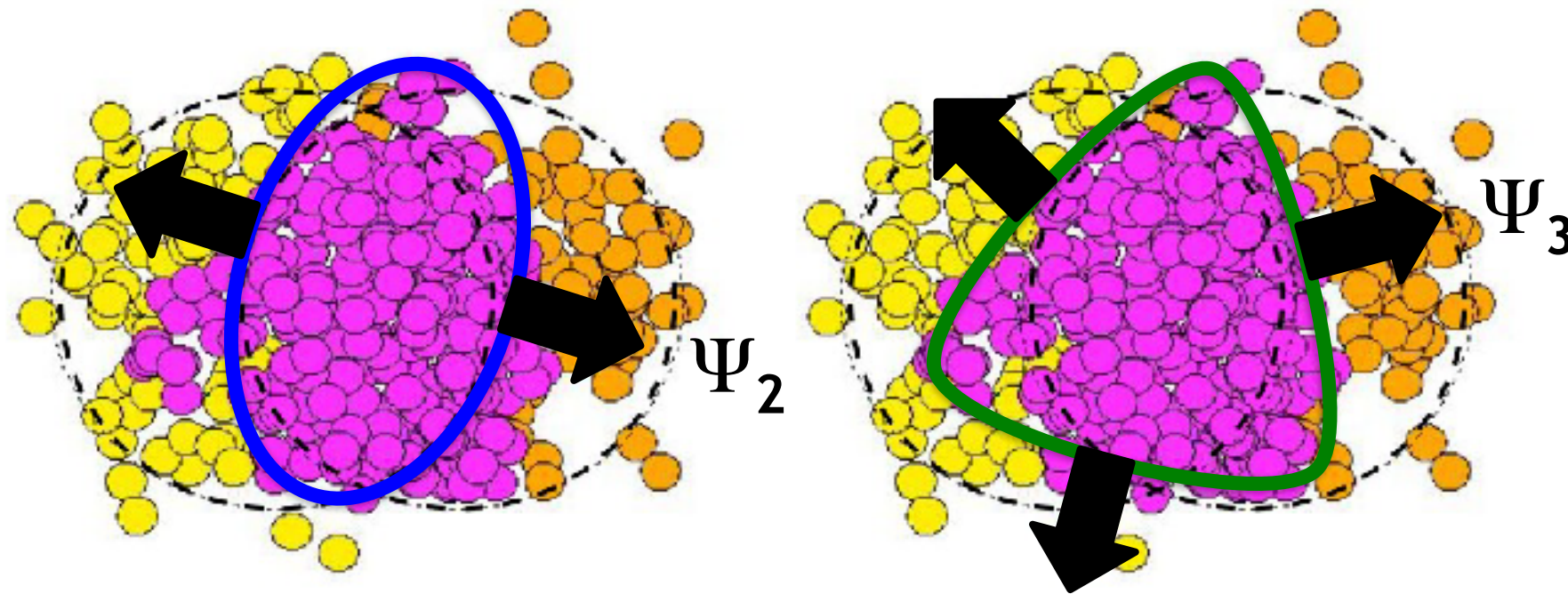
初期の熱光子・後期の熱光子

- 非常に高温からの熱光子が支配的 -> 初期が支配的
熱源の温度：220MeV
ハドロンと同程度の v_2 -> 後期が支配的
Freeze-out温度：100-110MeV
- 膨張する系の温度
 v_2 を大きくする何か新しい物理(磁場?)
- 中心衝突度依存性を調べる
高次方位角異方性の測定



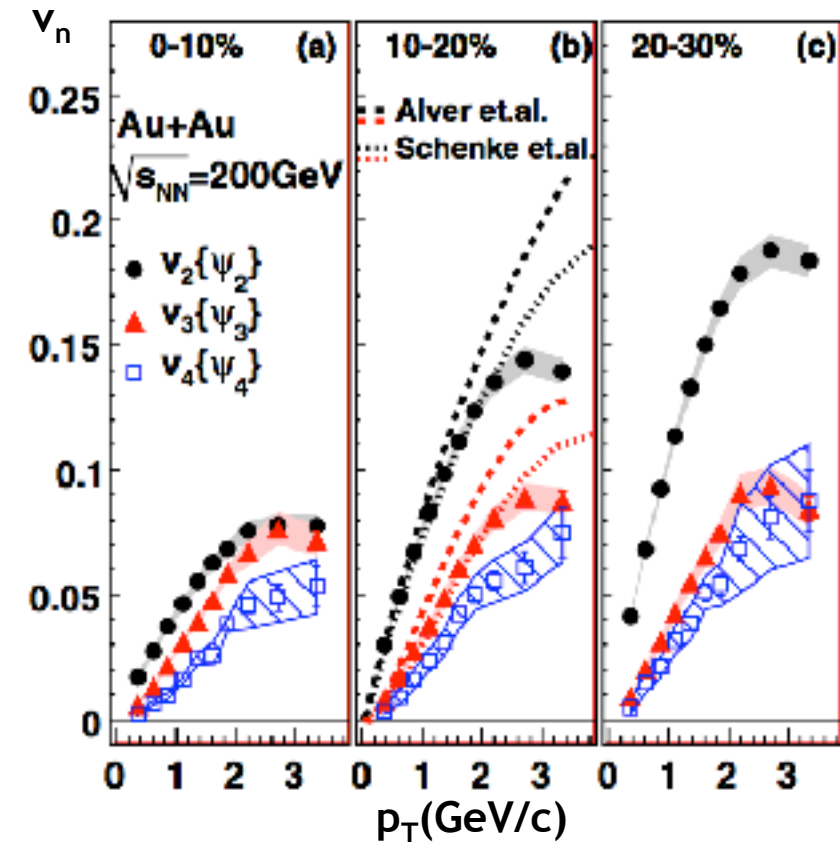
高次方位角異方性

P.R.L. 107,252301



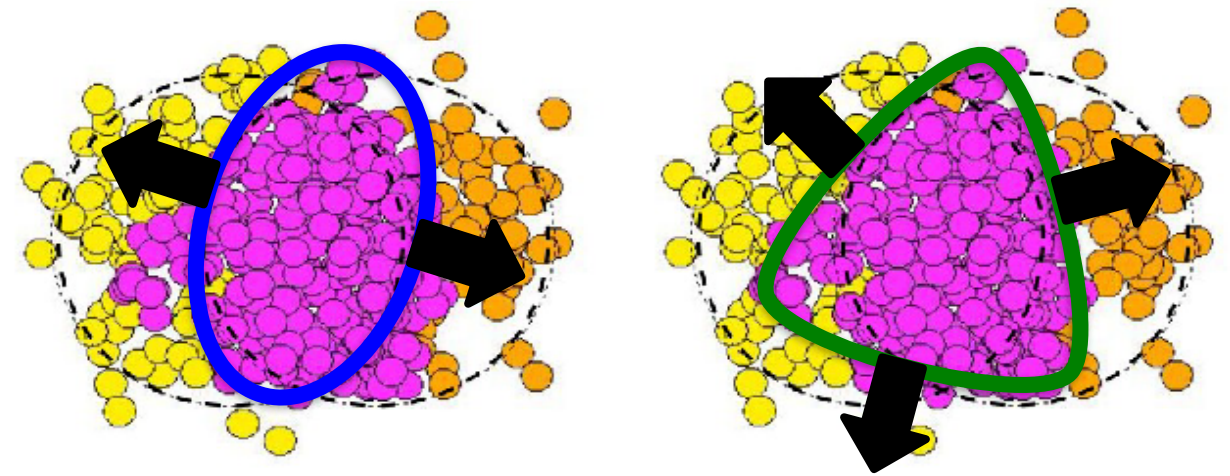
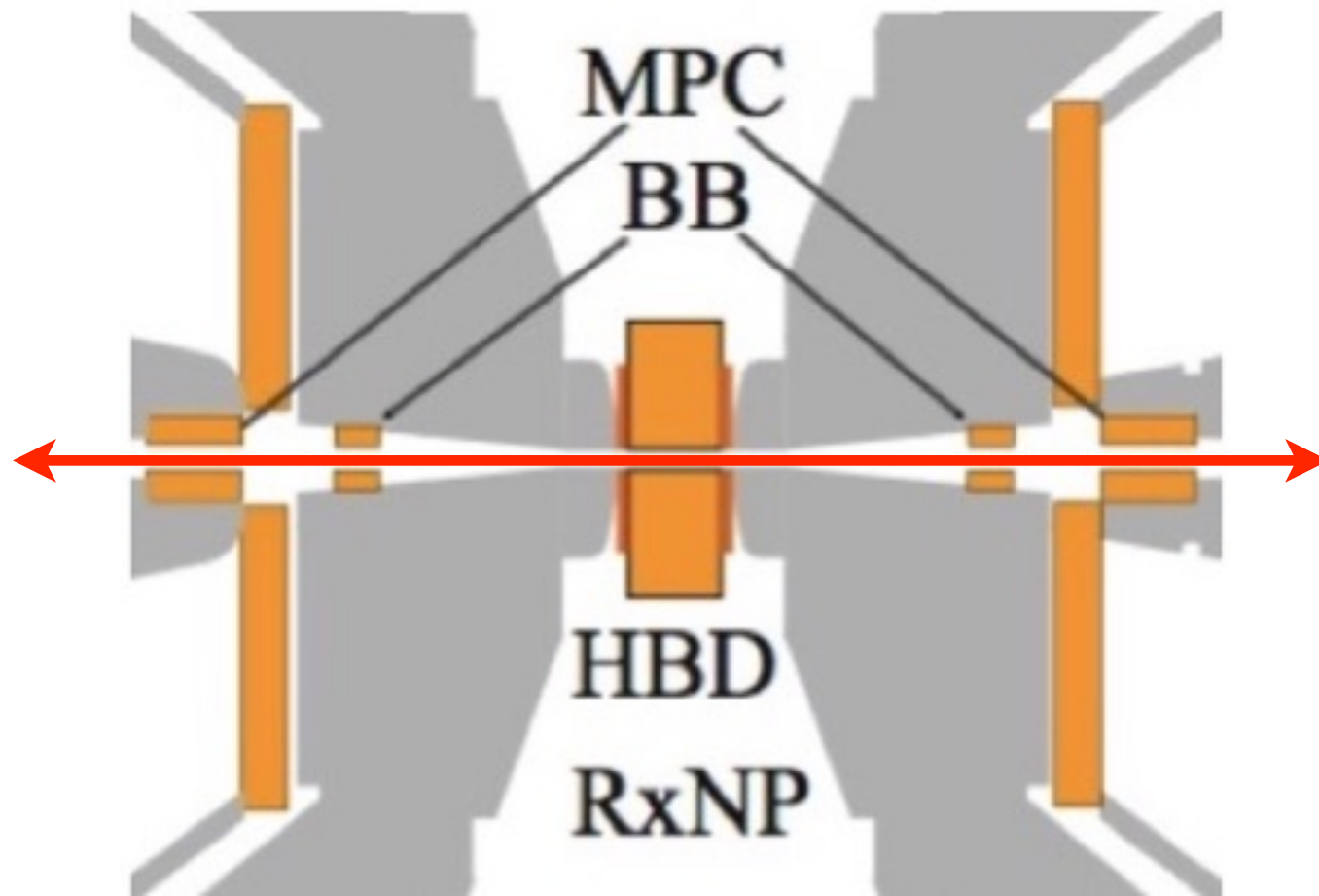
$$N(\Delta\phi - \Psi_n) = N_0 [1 + 2 \sum v_n \cos \{n(\phi - \Psi_n)\}]$$

$$v_n = \langle \cos \{n(\phi - \Psi_n)\} \rangle$$

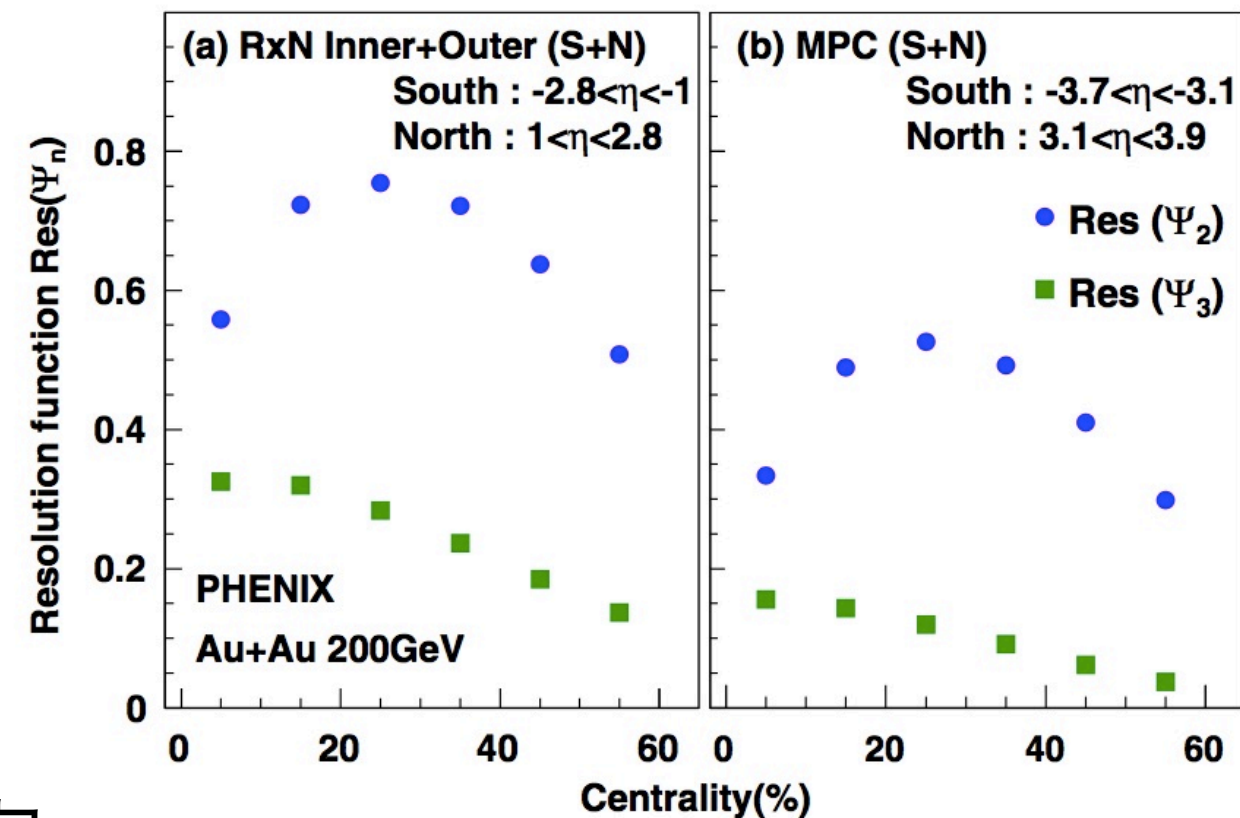


- ・ 2次だけでなく高次を測定することで
光子 v_2 がハドロン v_2 と同程度の大きさを持つ起原を調べる
- ・ 異方性(終状態) \propto 異方性(形状異方性) \times 膨張(QGP+HG)

Event Plane測定



$$\text{Res}(\Psi_n) = \langle \cos \{n (\phi - \Psi_n^{\text{P.P.}})\} \rangle$$



$$Q_x = \sum w_i \cos \{n (\phi - \Psi_n)\}$$

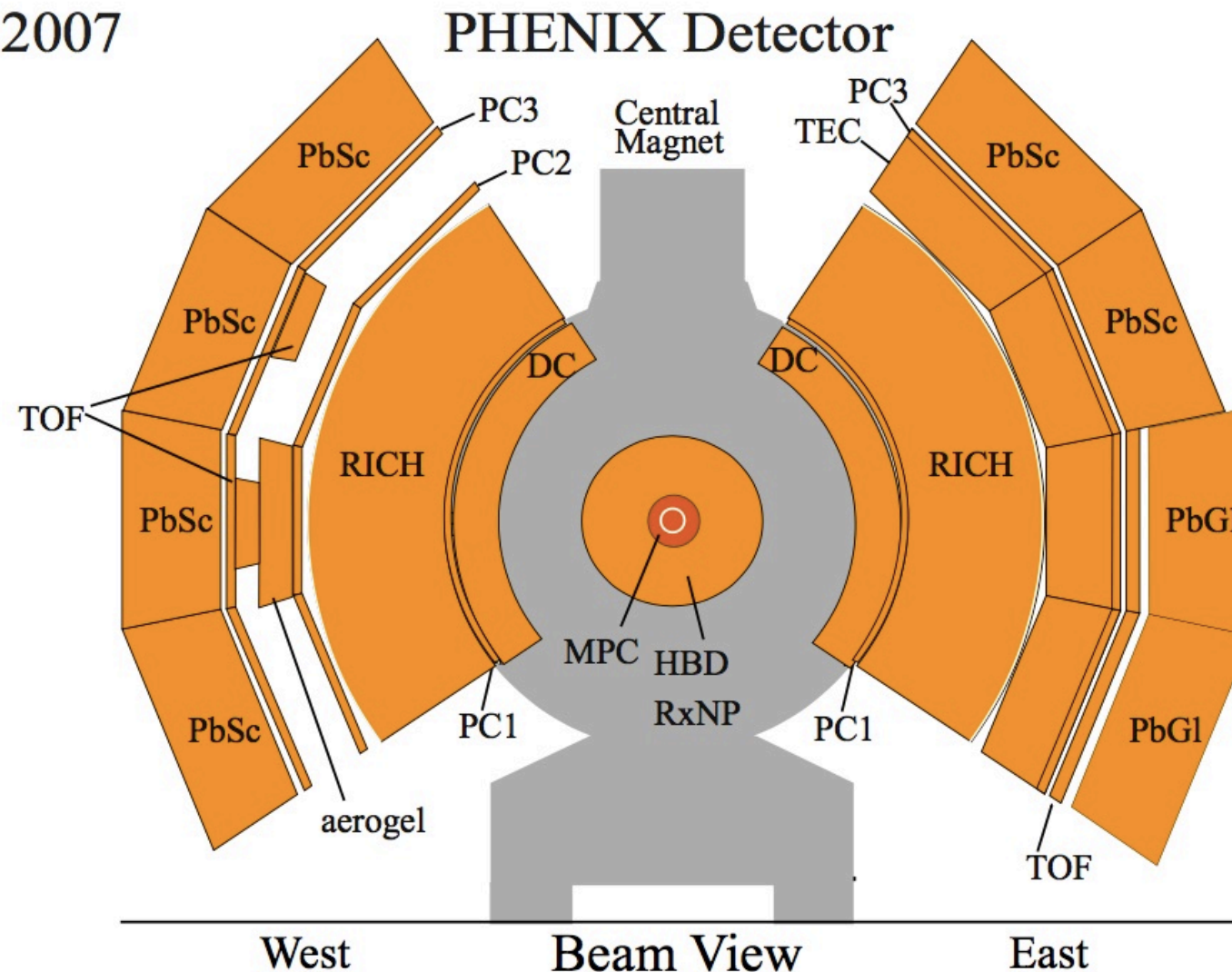
$$Q_y = \sum w_i \sin \{n (\phi - \Psi_n)\}$$

$$\Psi_n = \text{atan2}(Q_y, Q_x) / n$$

- ・ 粒子の発生方向の偏りから測定
形状からくる発生粒子の偏りはどの位置でも同じと仮定

光子の測定

2007



- Electromagnetic calorimeter
high p_T まで測定することができる : $1 < p_T < 15 \text{ GeV}/c$
- Conversion光子($\gamma \rightarrow e^+ + e^-$)を用いる方法
low p_T を測定することができる : $0.2 < p_T \text{ GeV}/c$
統計的に難しい

直接光子の v_n の導出

- 直接光子 = 全光子 - 崩壊光子

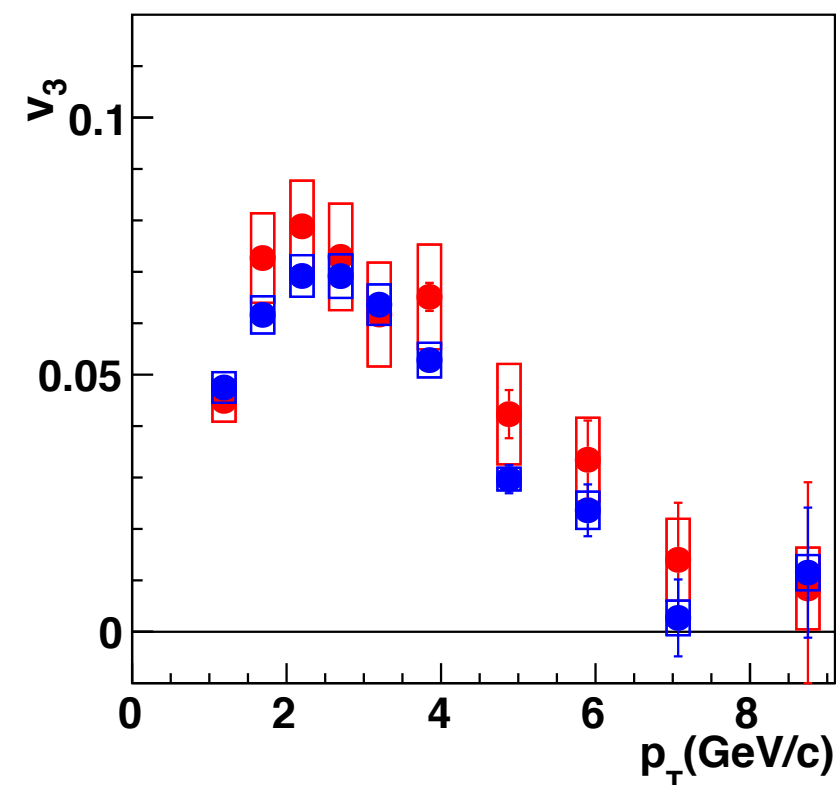
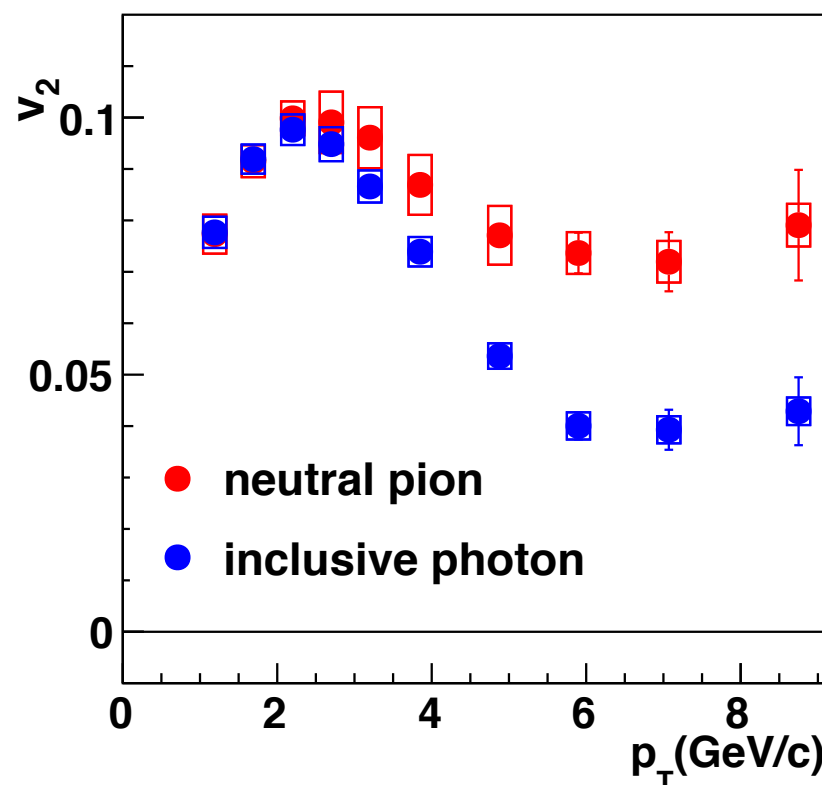
崩壊光子 v_n はシミュレーションを用いて見積もる

π^0 粒子については実験で測定されているが、 η , ω などの粒子は測定が難しい $\rightarrow \pi^0$ の結果から仮定する

$$N_{\text{inc.}} v_n^{\text{inc.}} = N_{\text{dir.}} v_n^{\text{dir.}} + N_{\text{dec.}} v_n^{\text{dec.}}$$

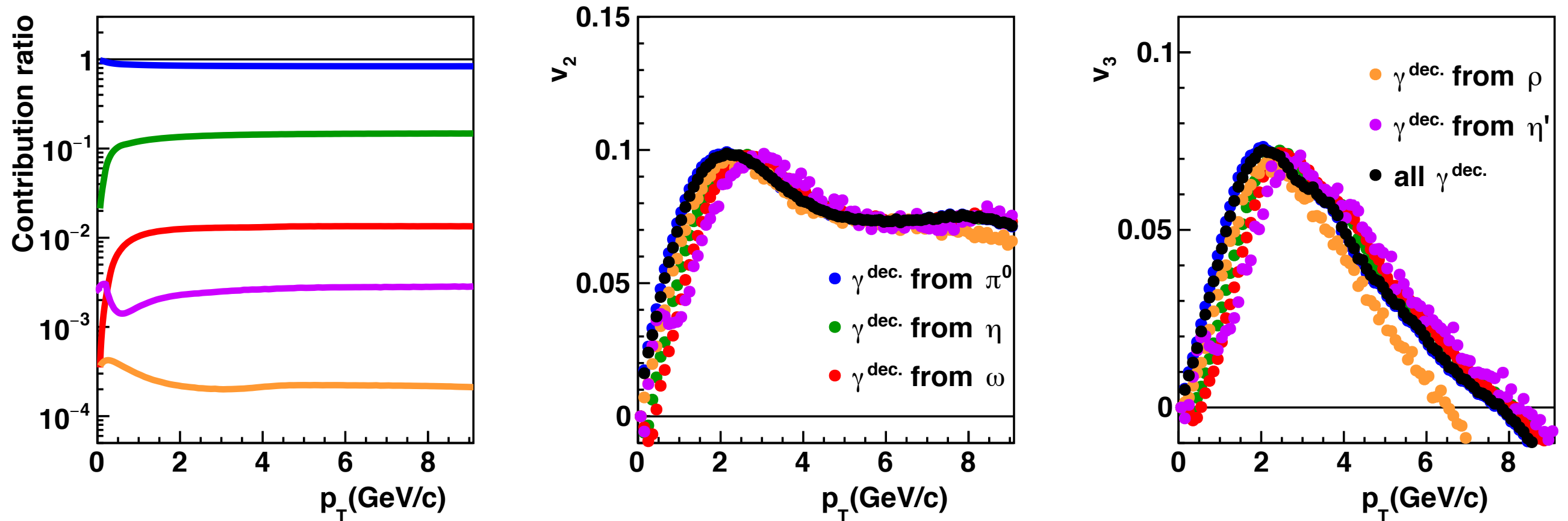
$$v_n^{\text{dir.}} = \frac{R_\gamma v_n^{\text{inc.}} - v_n^{\text{dec.}}}{R_\gamma - 1}$$

$$R_\gamma = N_{\text{inc.}} / N_{\text{dec.}}$$



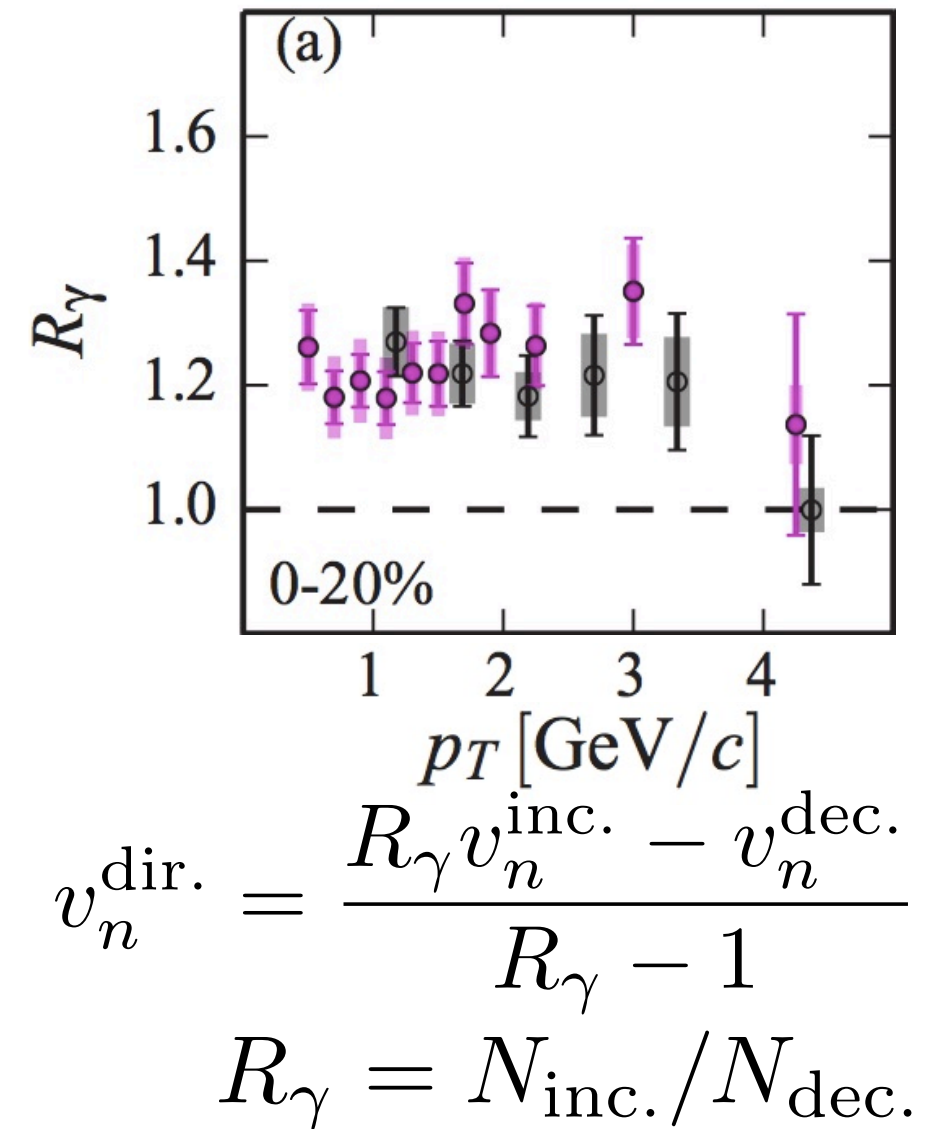
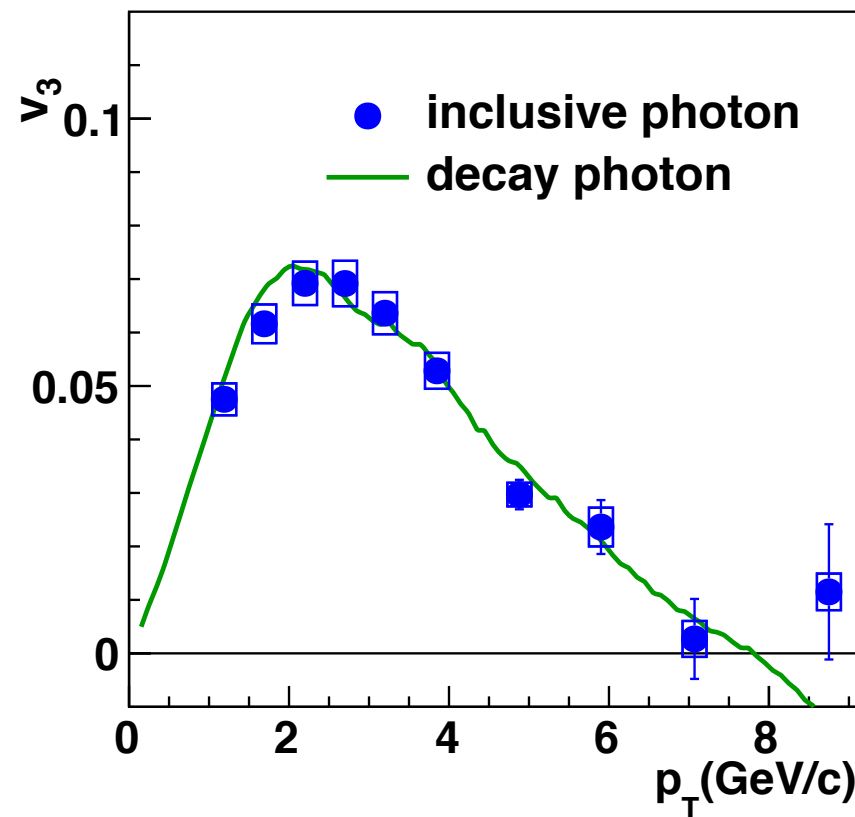
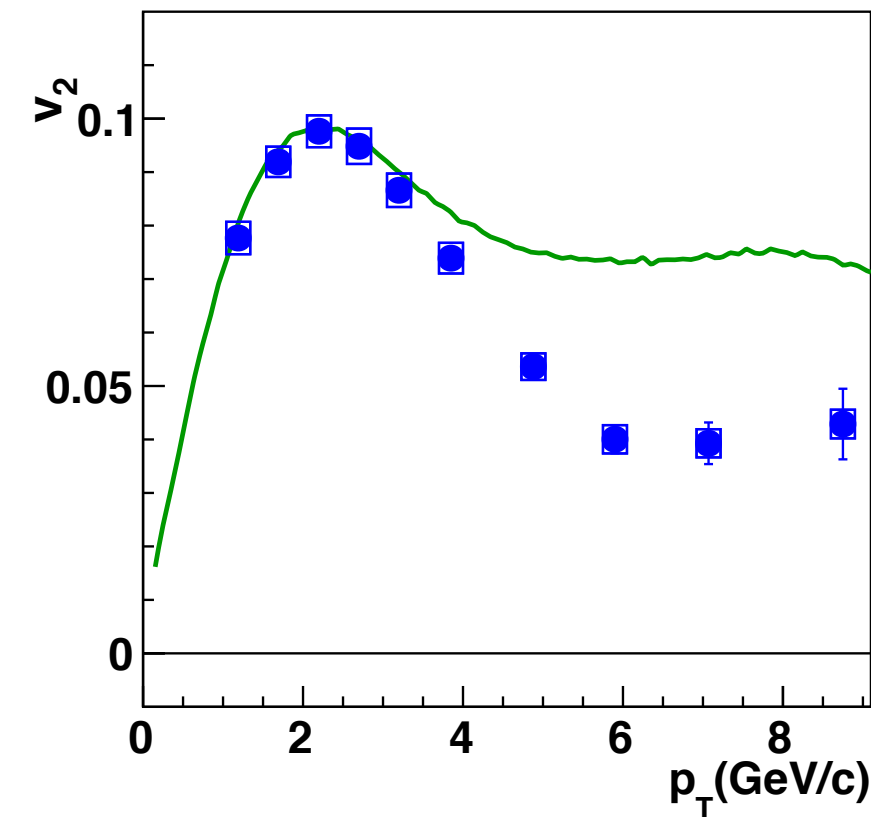
崩壊光子の v_n

それぞれの崩壊光子/全崩壊光子



- π^0 , η , ω , ρ , η' の5粒子を親としてインプット
崩壊光子の割合とそれぞれの v_n をシミュレーションで見積もる
全崩壊光子の v_n を見積もる

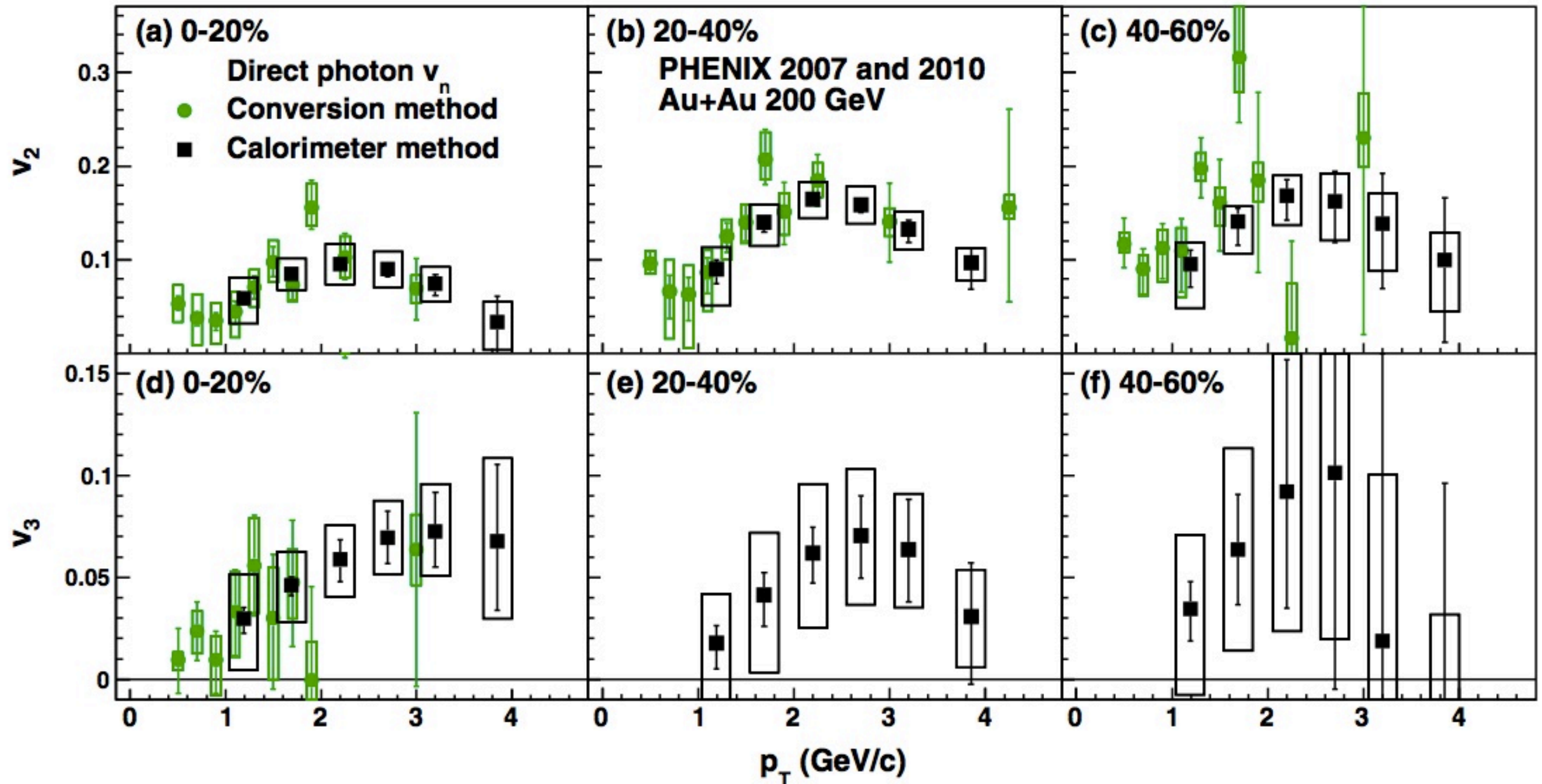
全光子と崩壊光子の比較



- 全光子 v_n と崩壊光子 v_n にわずかな差がある
違いと R_γ から直接光子 v_n を引き出す

直接光子 v_n の比較

P.R.C 94, 064901(2016)



- 高次の項でも有限の値
ハドロンと同程度の v_n 、centrality依存性を持っている
ハドロンと同様に初期形状の異方性を起源としている

まとめ

- ・ 直接光子 v_n の測定

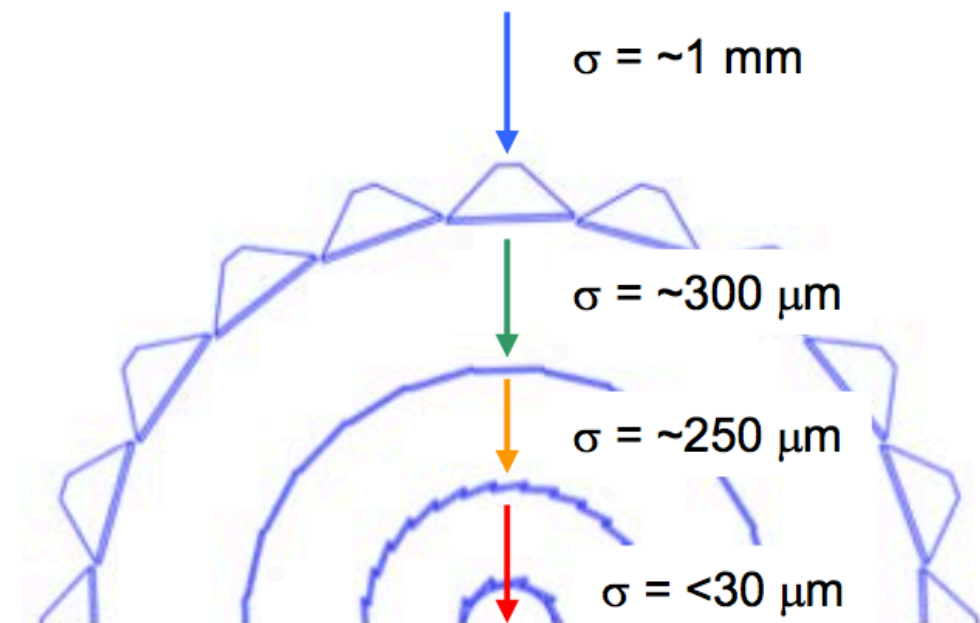
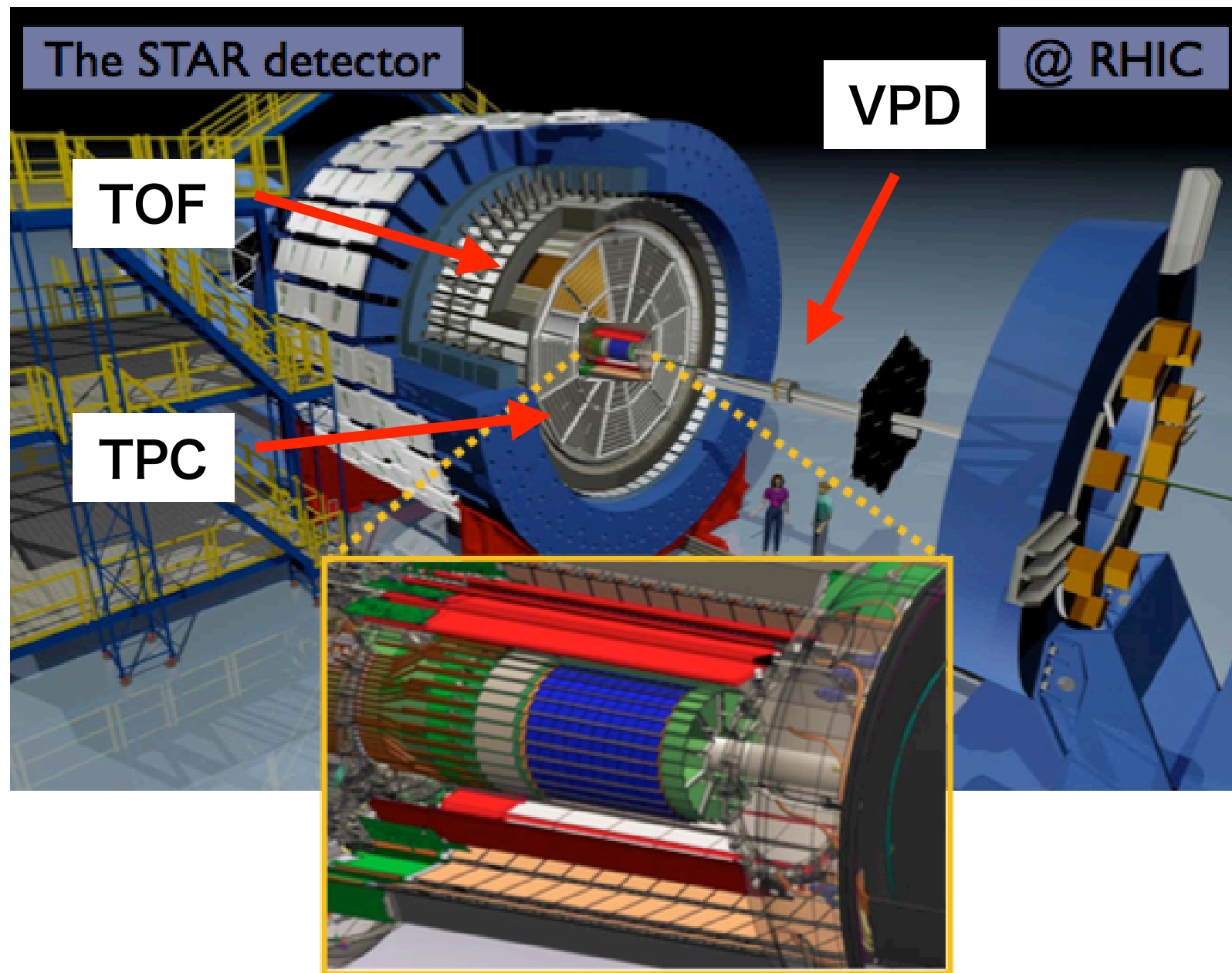
低い p_T 領域はハドロンと同程度の時間から放出される
光子が支配的な可能性がある

モデル計算では収量と v_n を同時に説明することができていない

- ・ 衝突初期にしか生成されない重クォーク解析

直接光子よりもQGPの時間発展について研究できる可能性がある

STAR実験・HFT検出器



Heavy Flavor Tracker (HFT)

Silicon **S**trip **D**etector : $r \sim 22 \text{ cm}$

Intermediate **S**ilicon **T**racker : $r \sim 14 \text{ cm}$

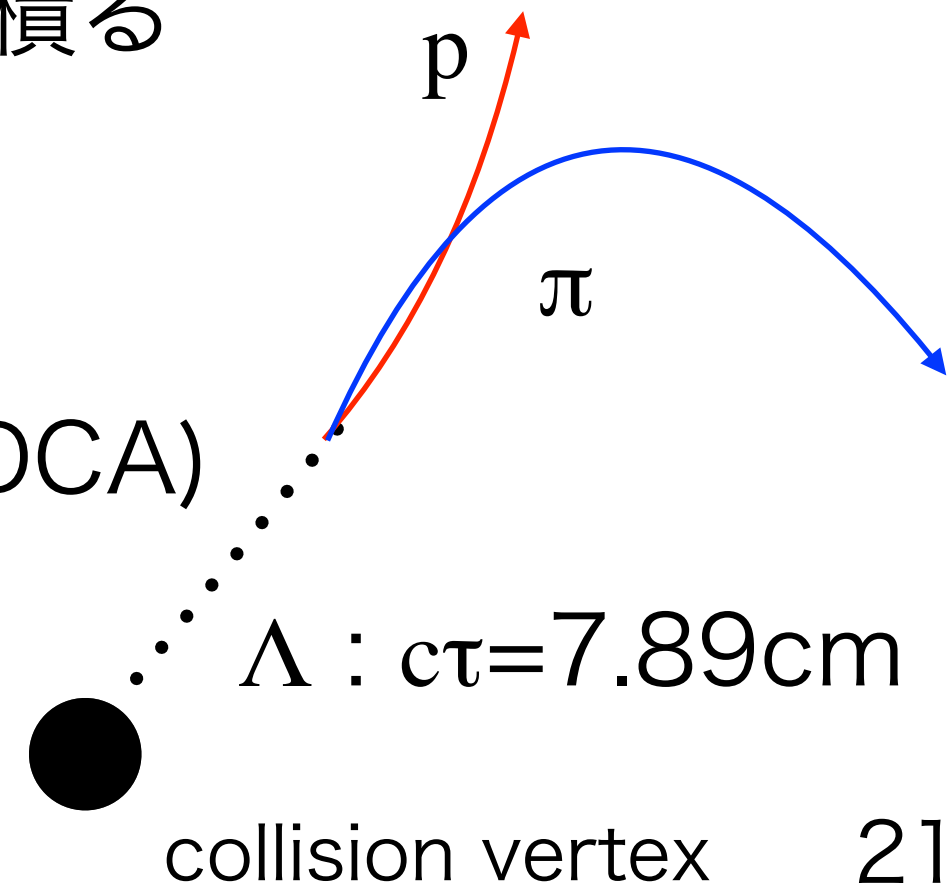
PIXEL : $r \sim 2.8, 8 \text{ cm}$

直接粒子の解析

- ・ HFTを用いた荷電 π , K, pのスペクトラ解析
- ・ 測定される陽子の約40%は Λ 粒子の弱い相互作用による崩壊からくる

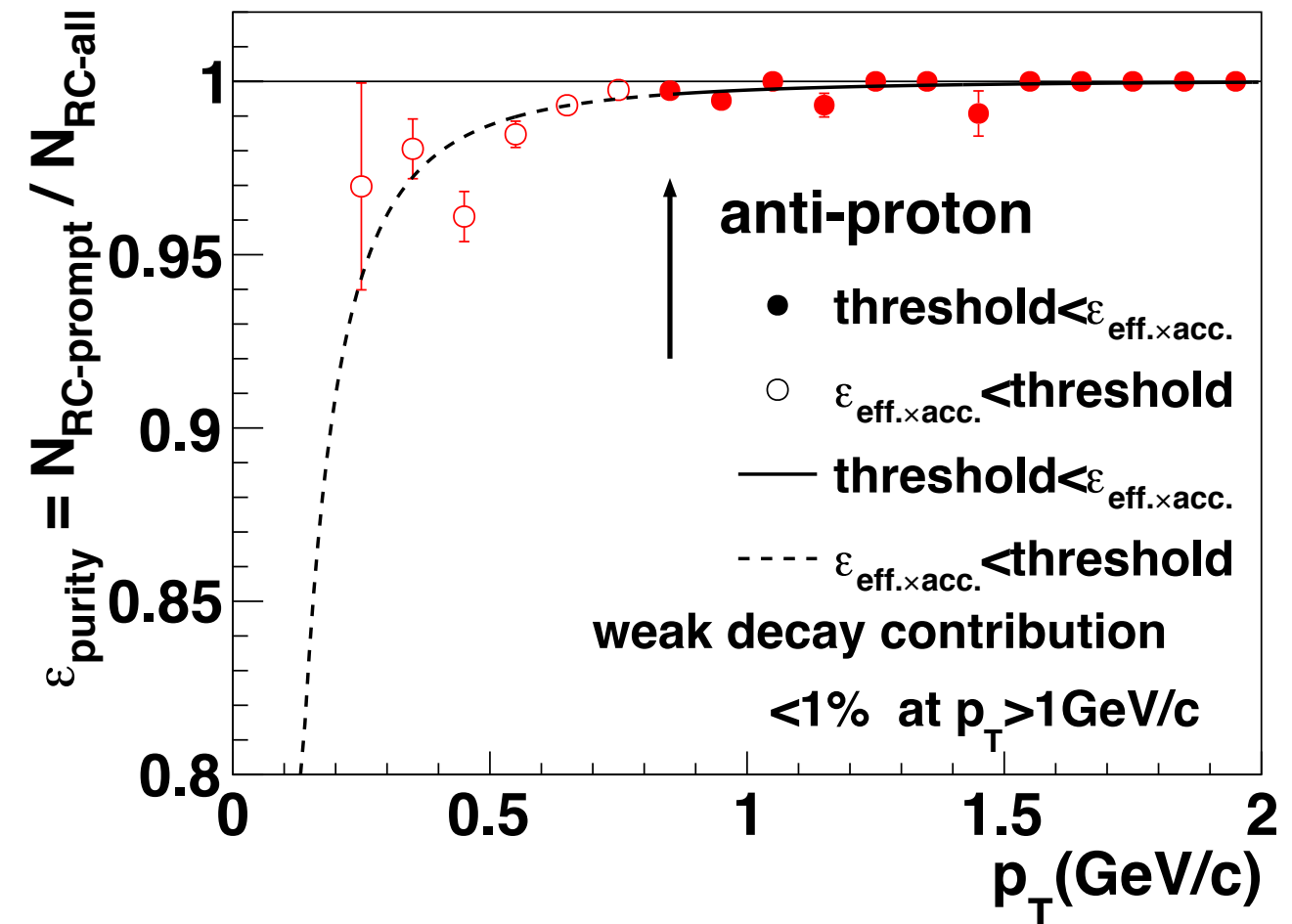
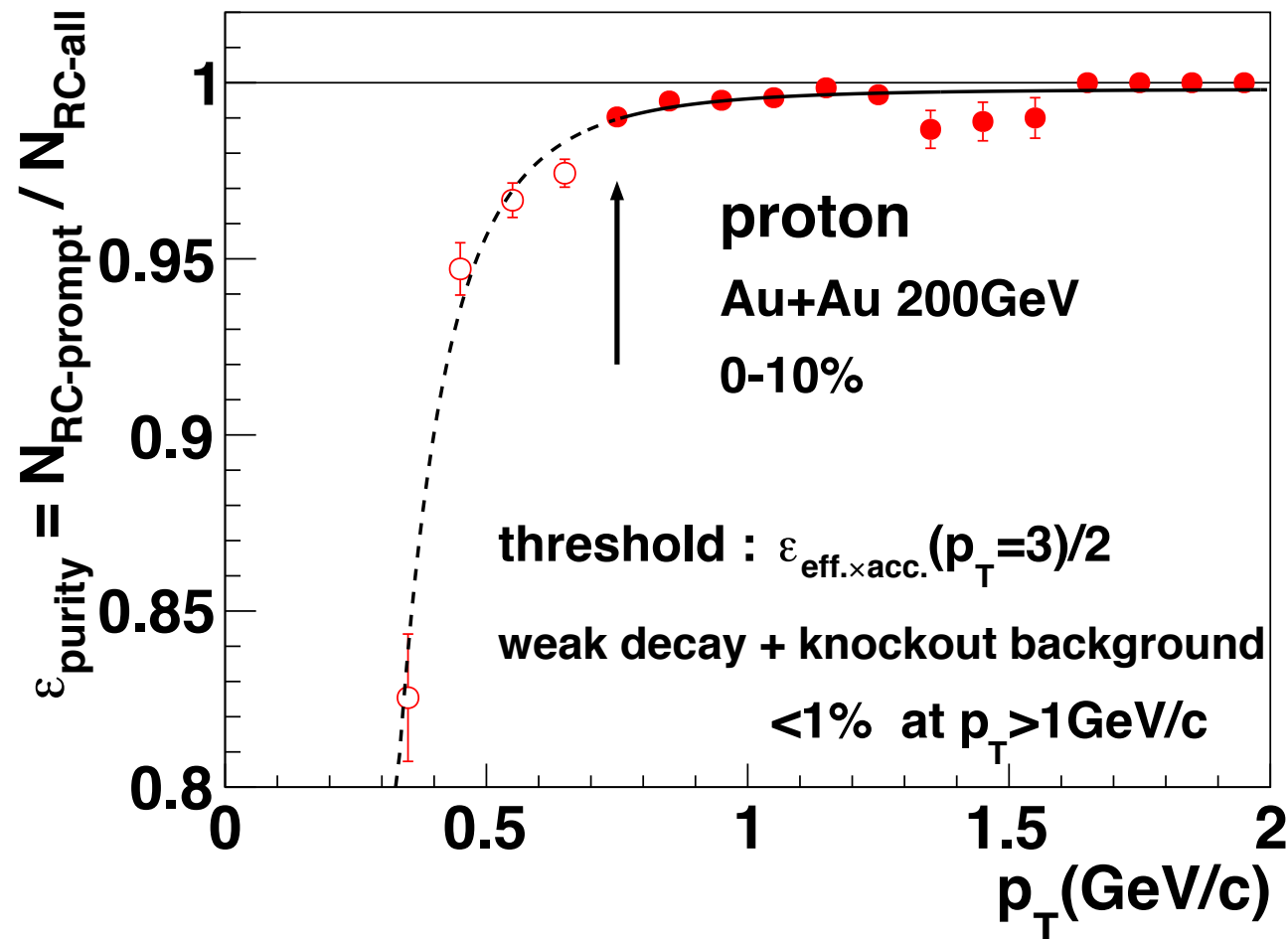
Λ 粒子等の収量から陽子の収量を見積る
全陽子の収量から差をとる

Distance of Closest Approach (DCA)
によって直接測定する



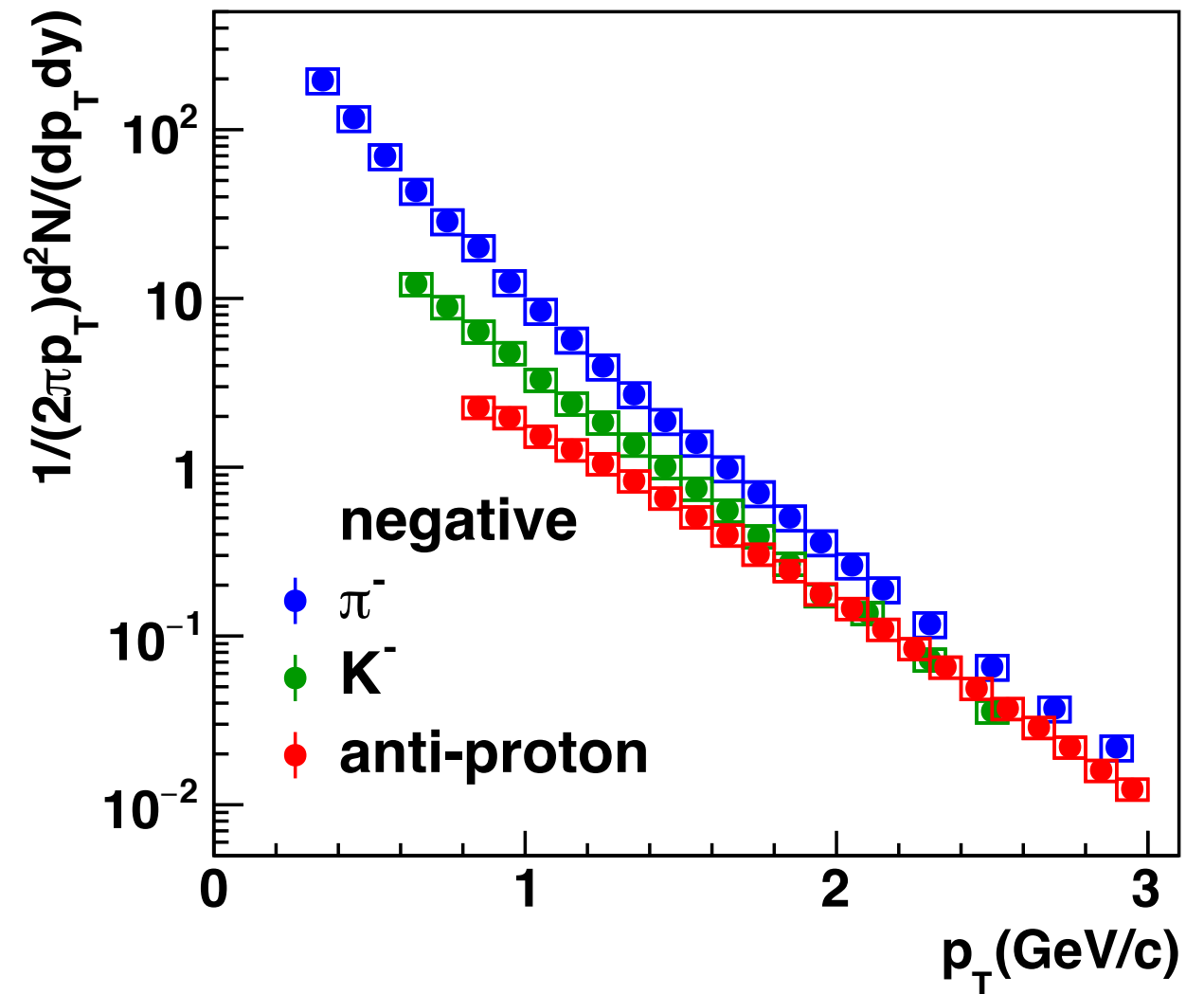
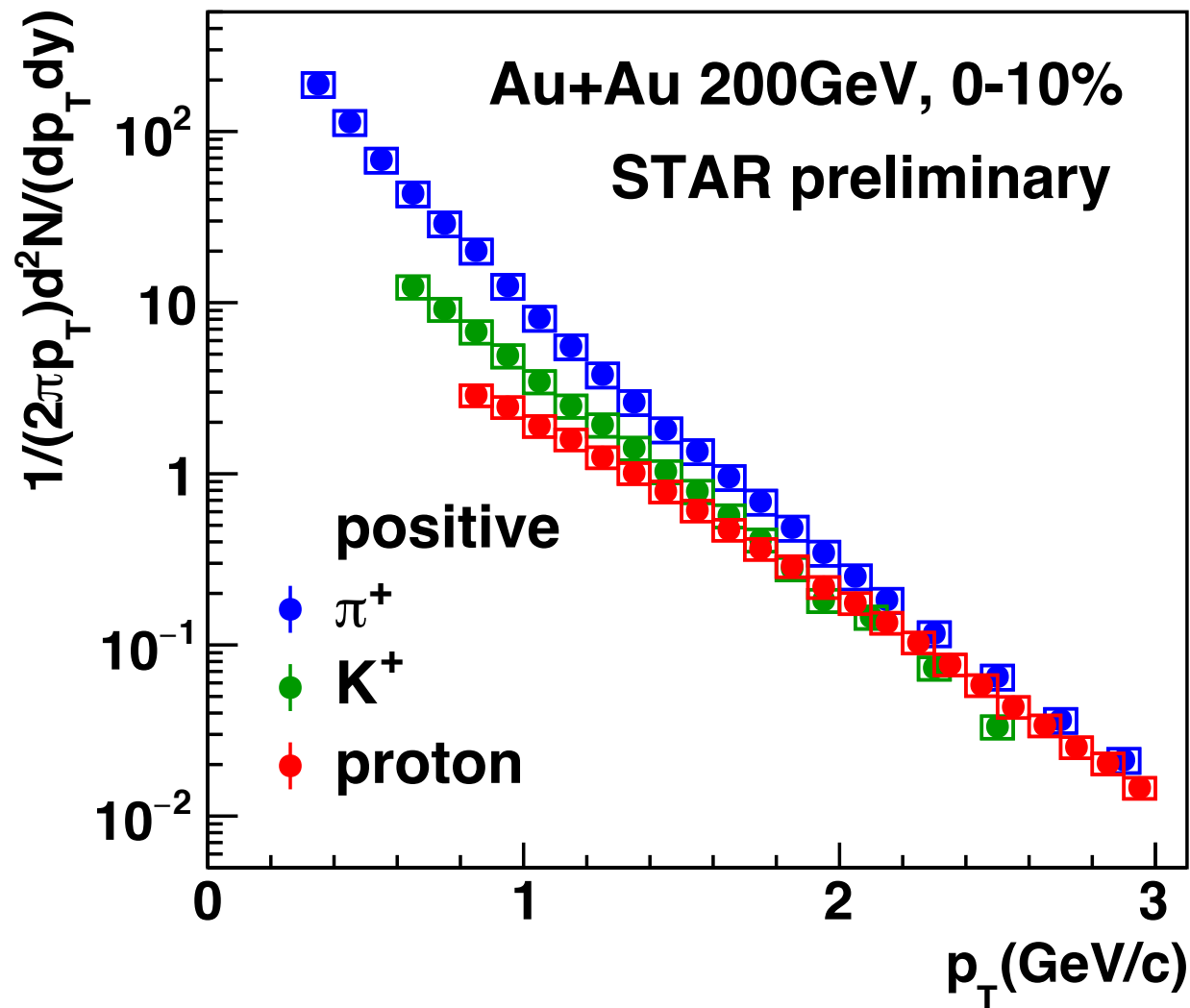
HFTを用いることでのpurity

$$\varepsilon_{\text{purity}} = N_{\text{RC-prompt}} / N_{\text{RC-all}}$$



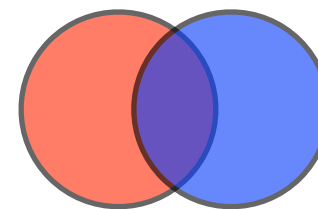
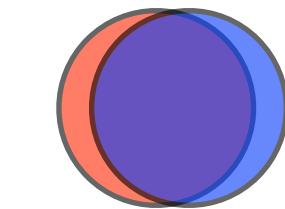
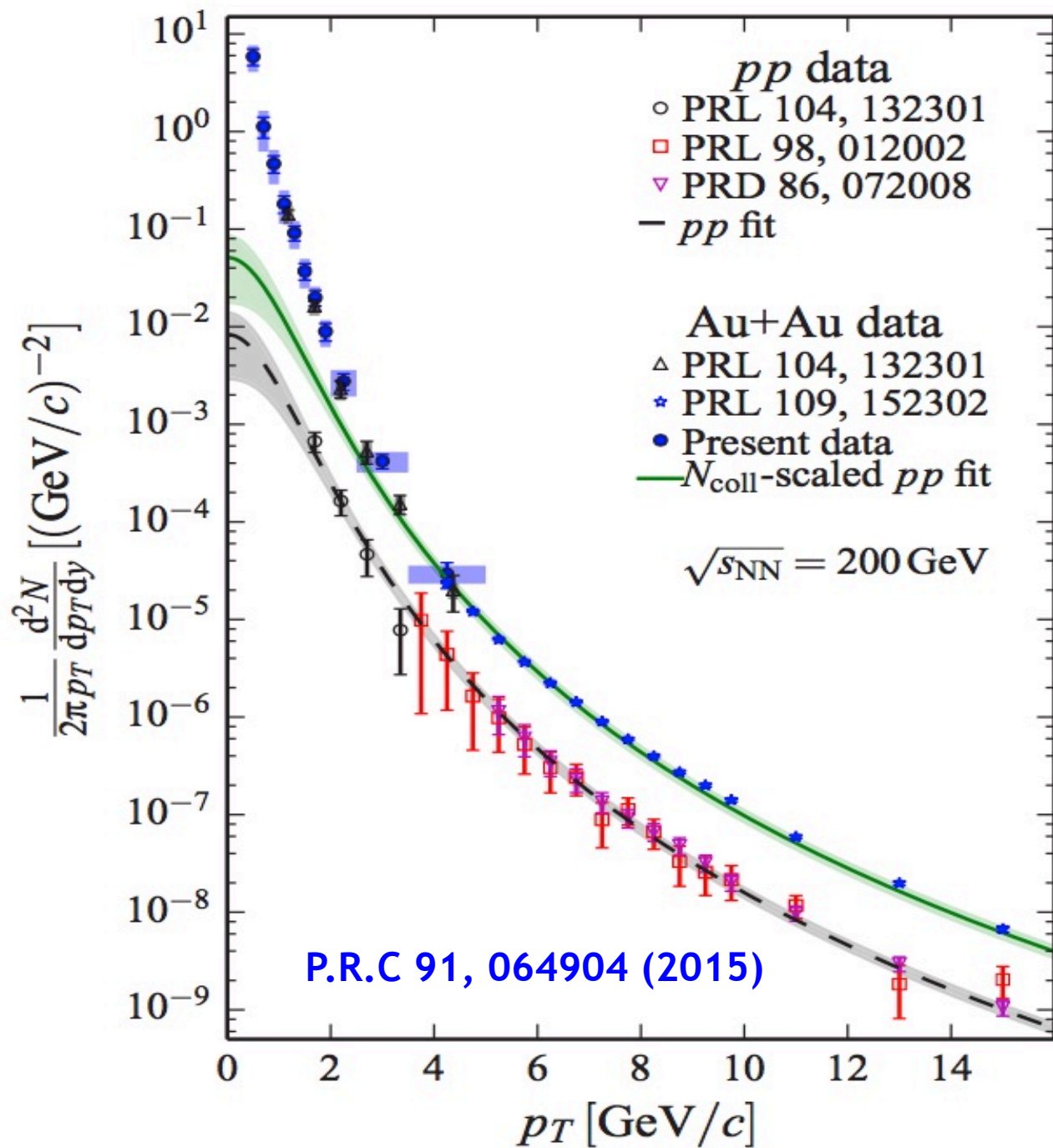
- ・ HFTを用いてDCAのカットを加えることで
99%以上のpurityでprotonの測定ができている

荷電 π , K, pスペクトラ解析



- ・ HFTが入っていることで検出器の補正が大きくなりすぎることで低い p_T での測定がむずがしくなっている
過去の結果とエラーの範囲でよくあっている

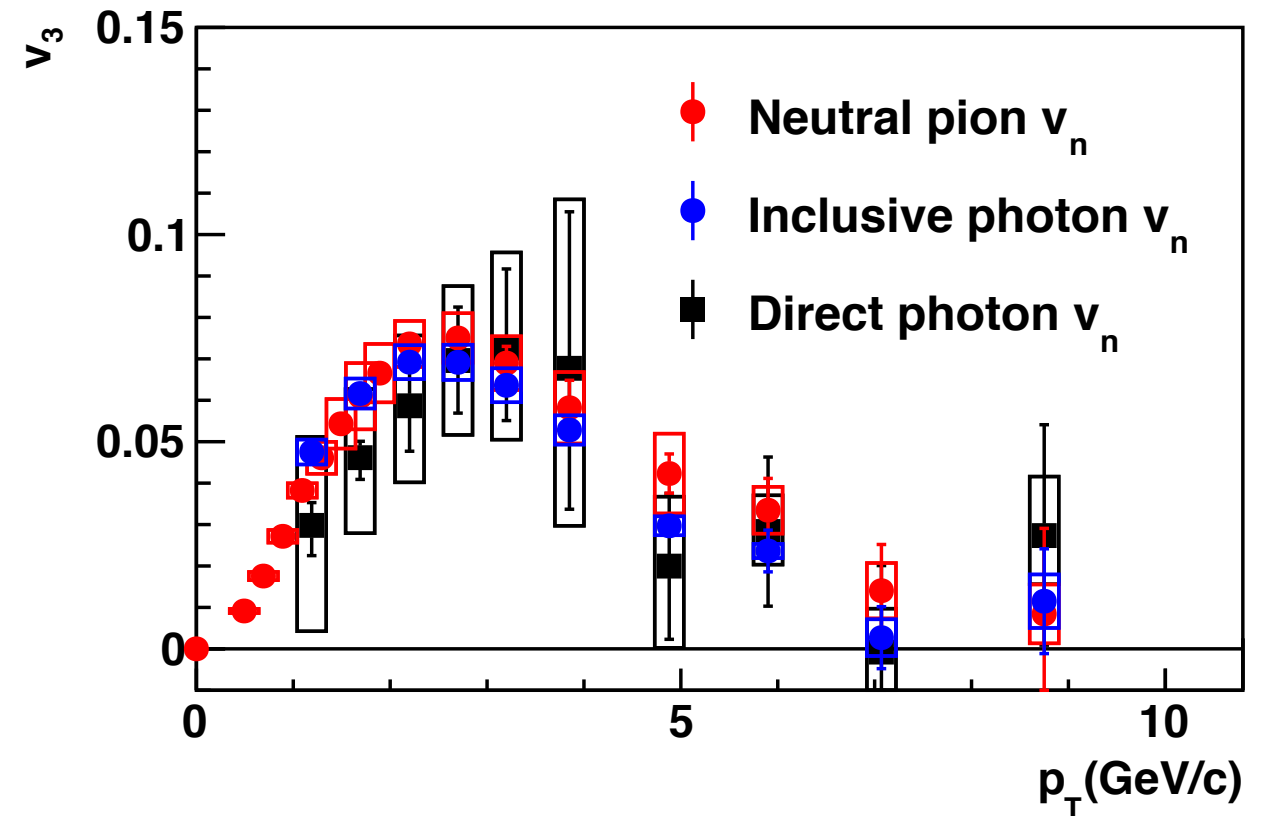
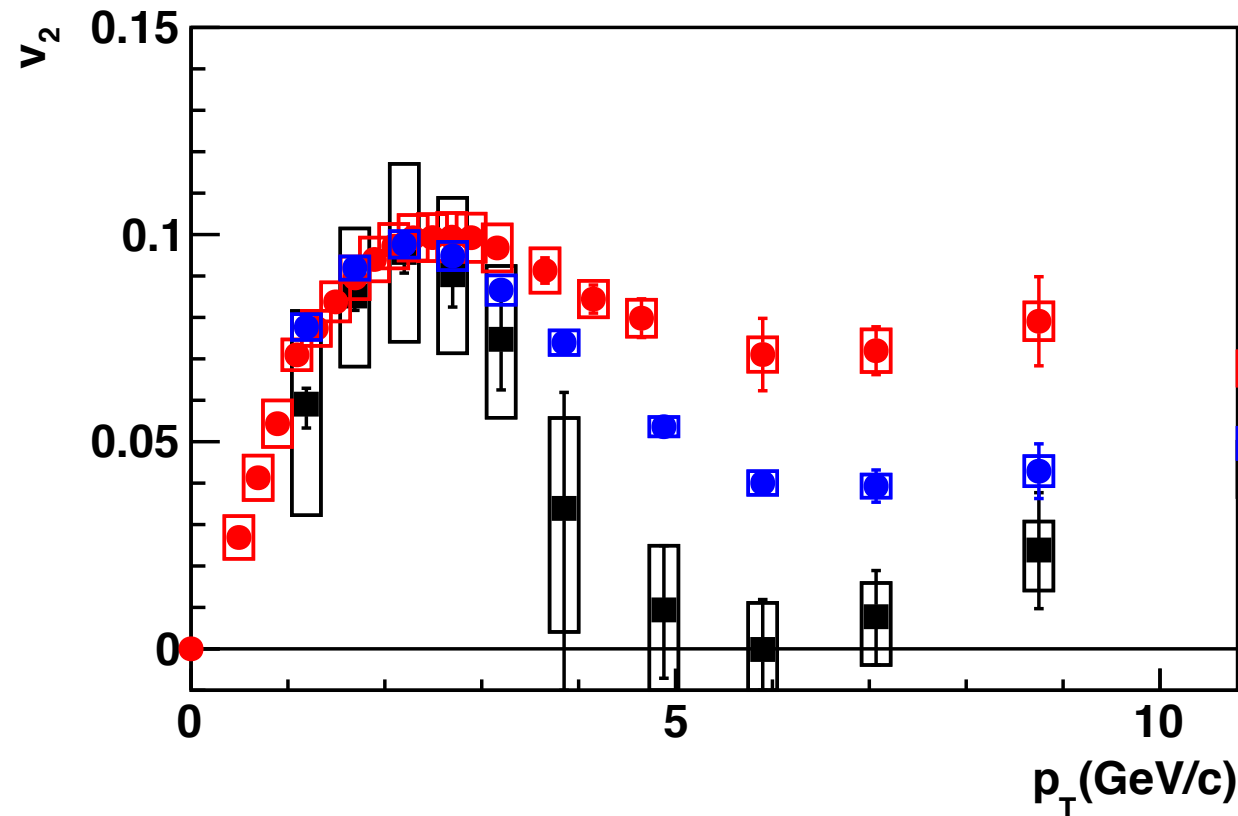
直接光子の生成量の比較



Centrality	Effective temperature
0% - 20%	$239 \pm 25 \pm 7 \text{ (MeV)}$
20% - 40%	$260 \pm 33 \pm 8 \text{ (MeV)}$
40% - 60%	$225 \pm 28 \pm 6 \text{ (MeV)}$

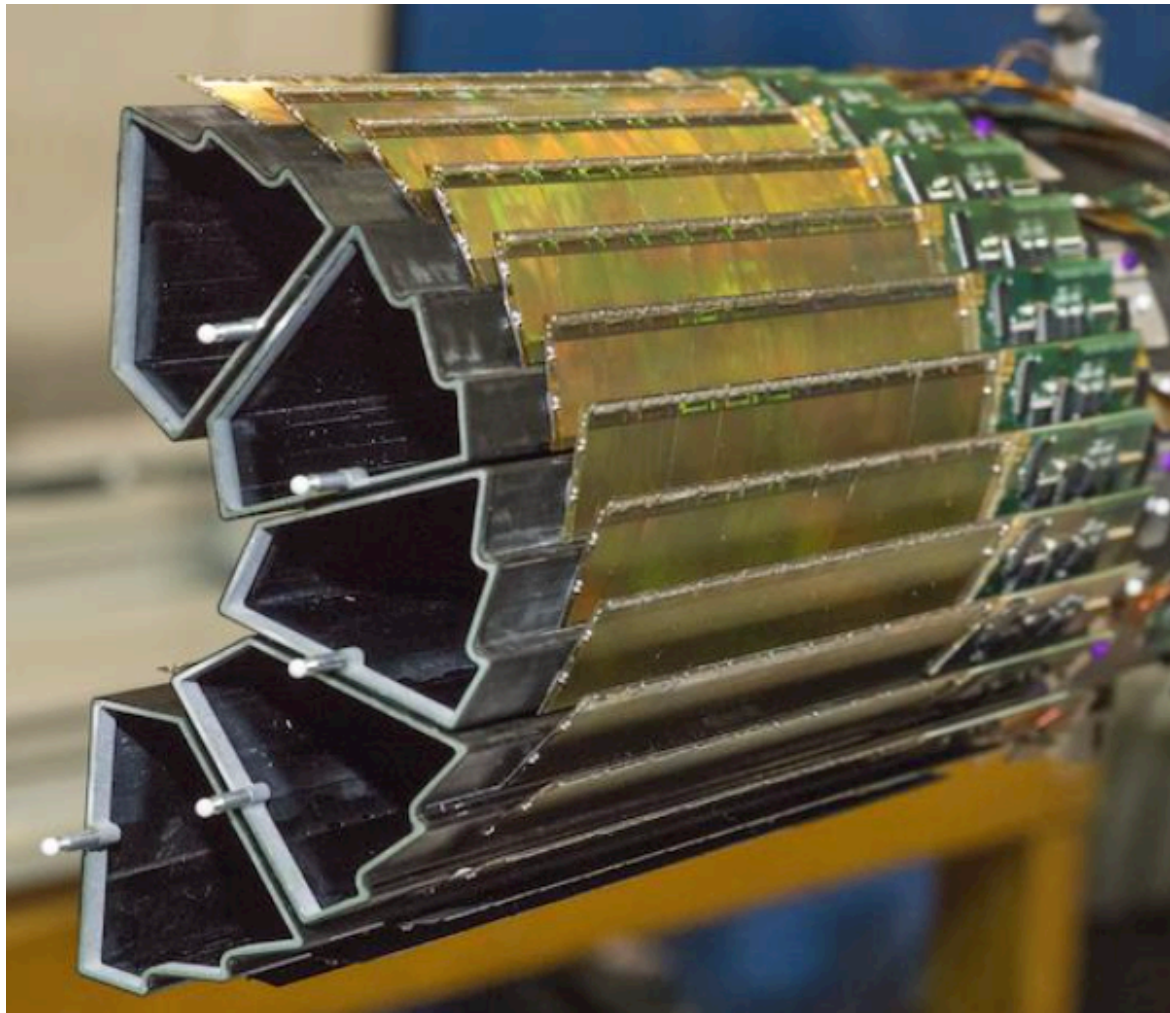
- 粒子密度、膨張速度の違いに依存していない

直接光子 v_n の比較



- ・ 高い運動量からくるハドロンが高い運動量を持つパートン起源とすると
ハドロンと光子の v_n の比較により
高い運動量域($4 < p_T$)での起源の違いを定量的に議論できる可能性がある

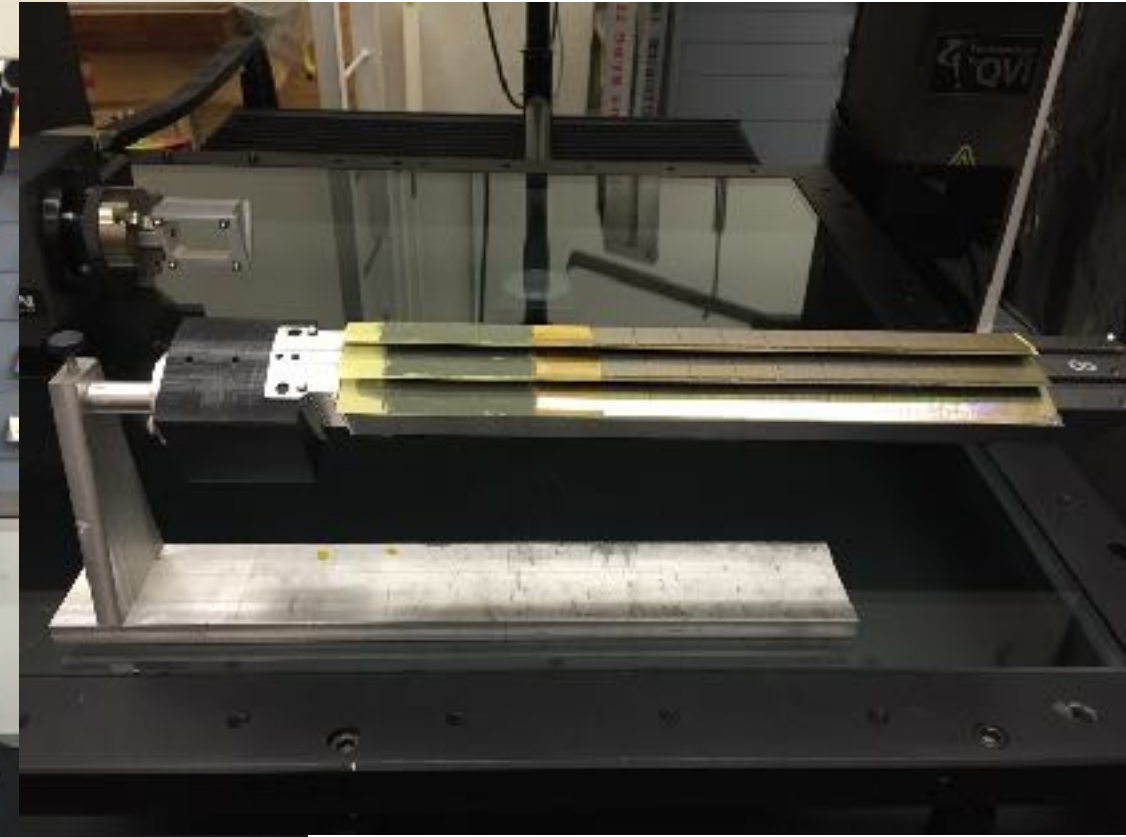
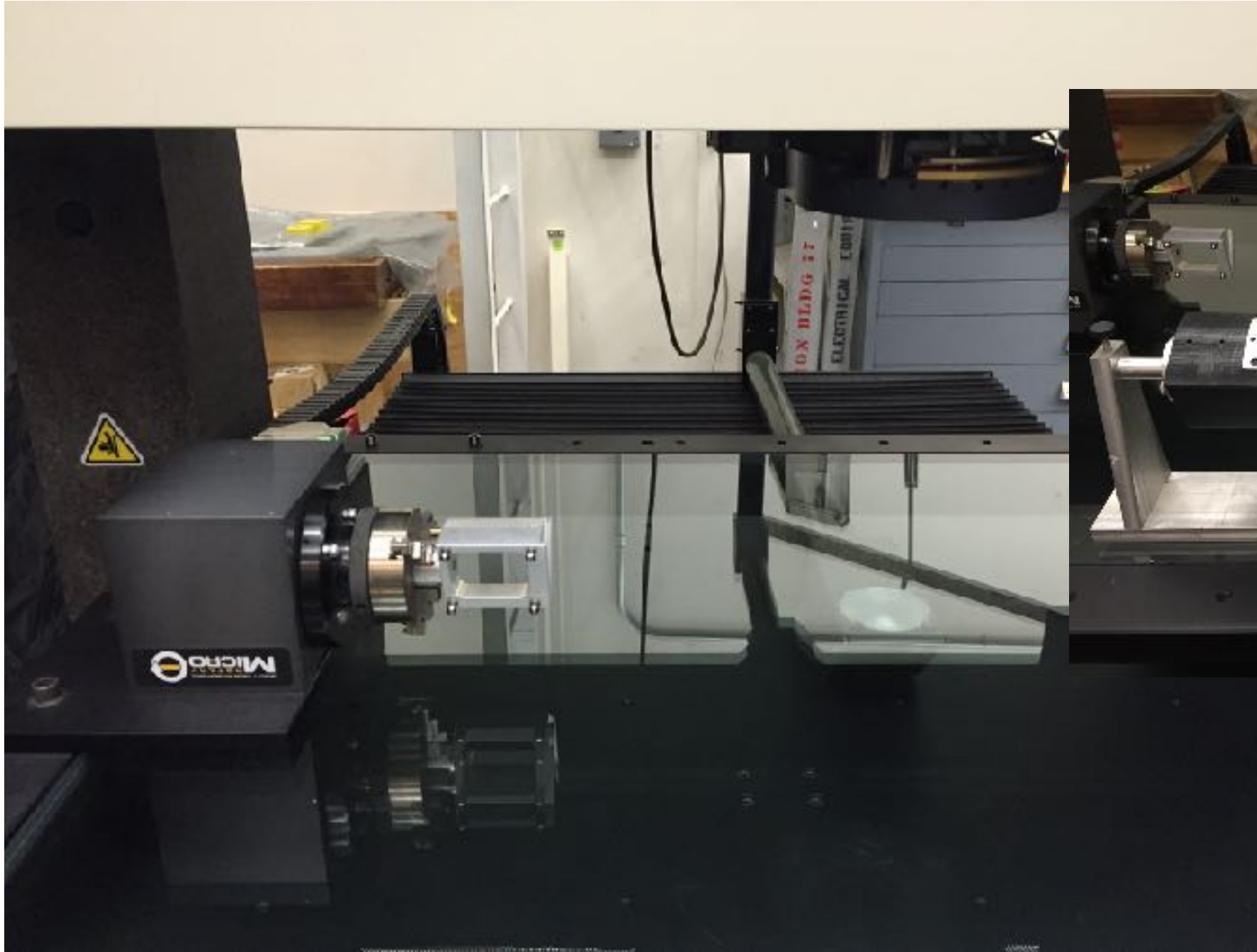
2層構造のPIXEL検出器



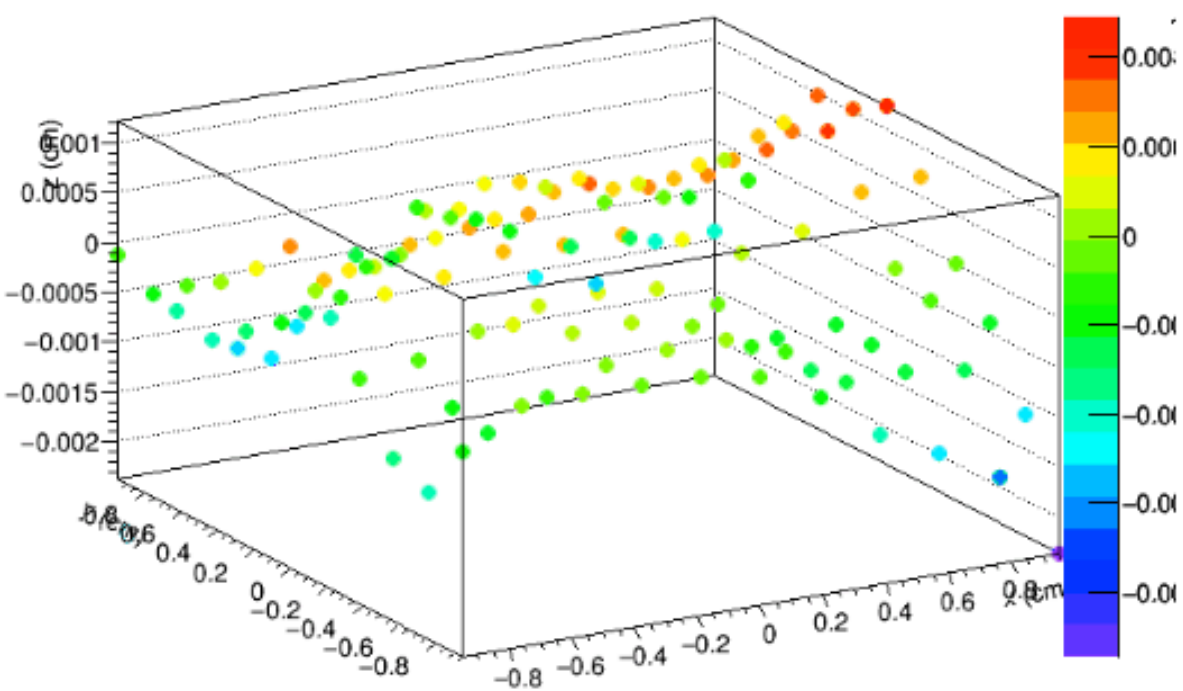
- ・ 2cm x 2cmの領域に
928x960 sensor
内側：10本
外側：30本



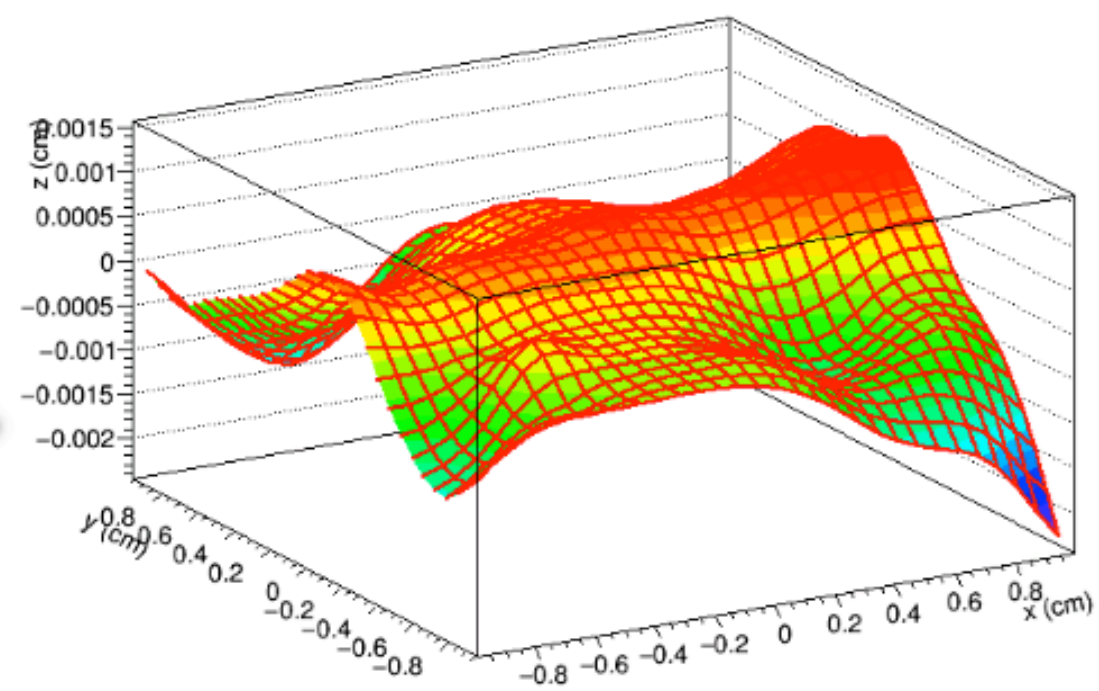
表面構造の調べる



- ・ インストールする前にセクター1個ずつ調べる



TPS



- ・ 表面の構造の理解

PXL alignment steps

1. Right sectors (6-10) are aligned to left sectors (1-5).

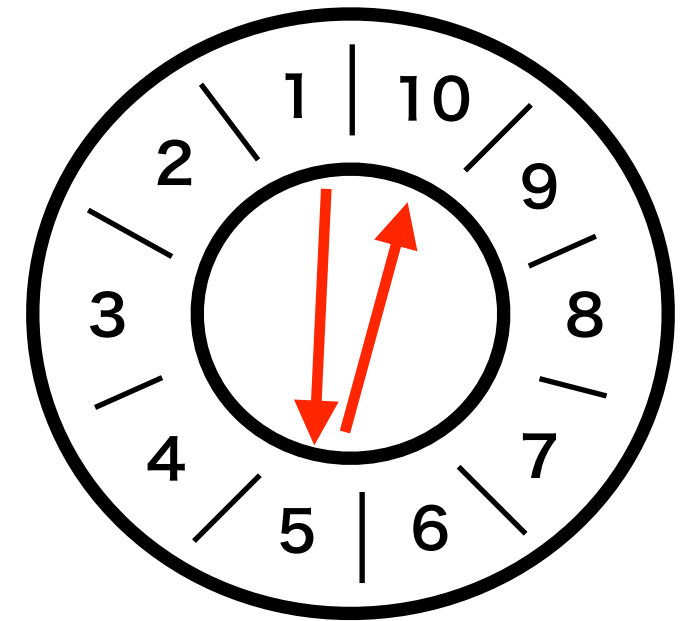
2. Sector to Sector alignment

1(ref)-5 1(ref)-6 1(ref)-7

6(ref)-2 9(ref)-3 10(ref)-4

5(ref)-9 2(ref)-8 5(ref)-10

(ex. sec.10 is aligned to sec.5 and to sec.1)

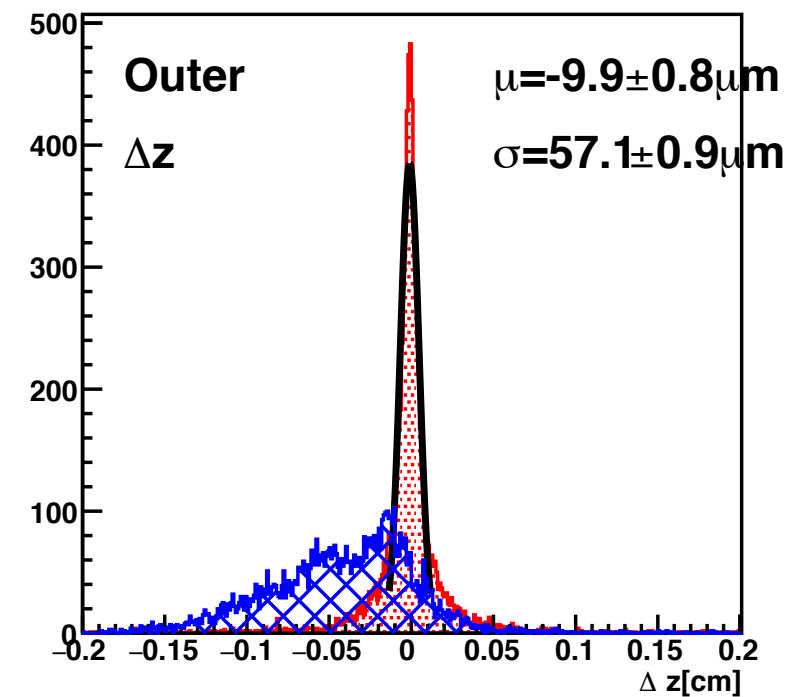
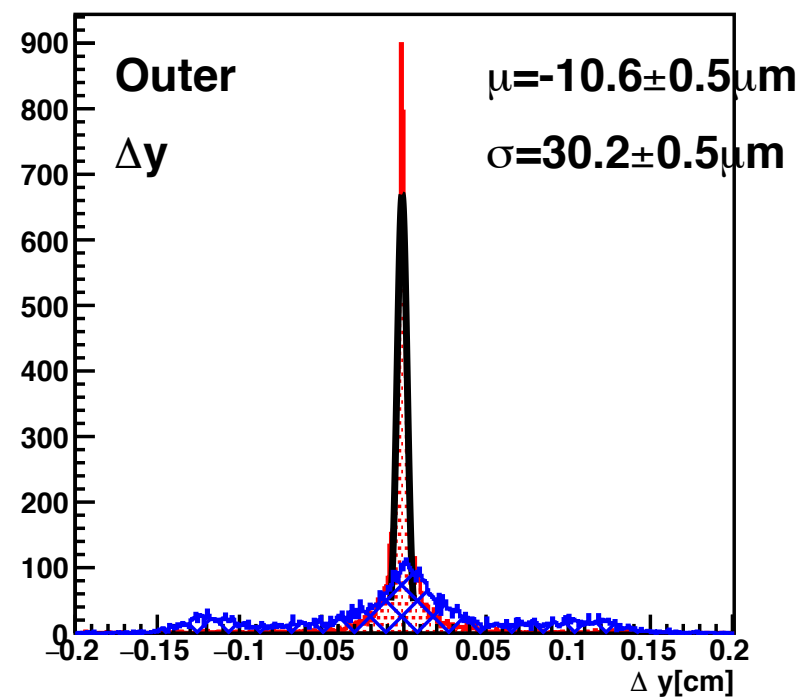
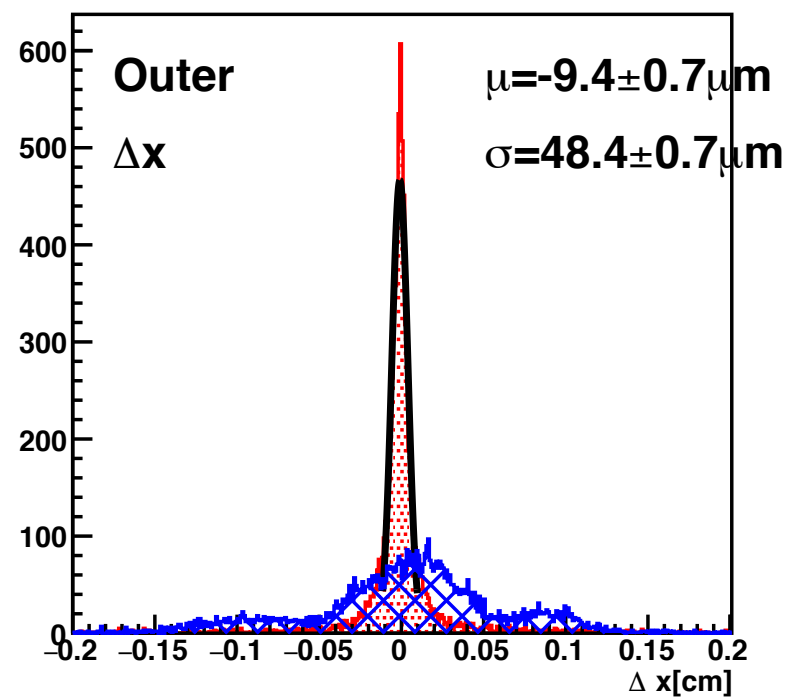
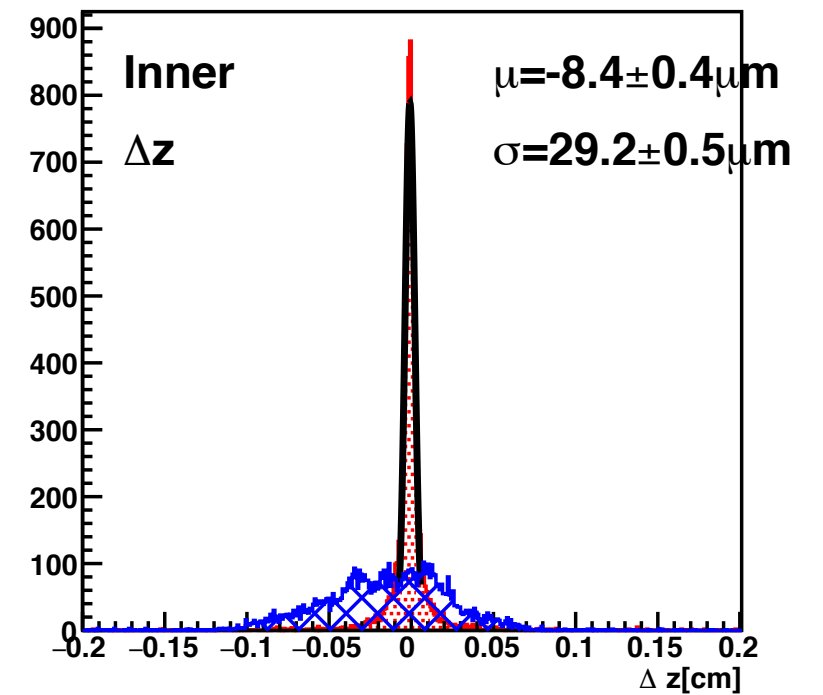
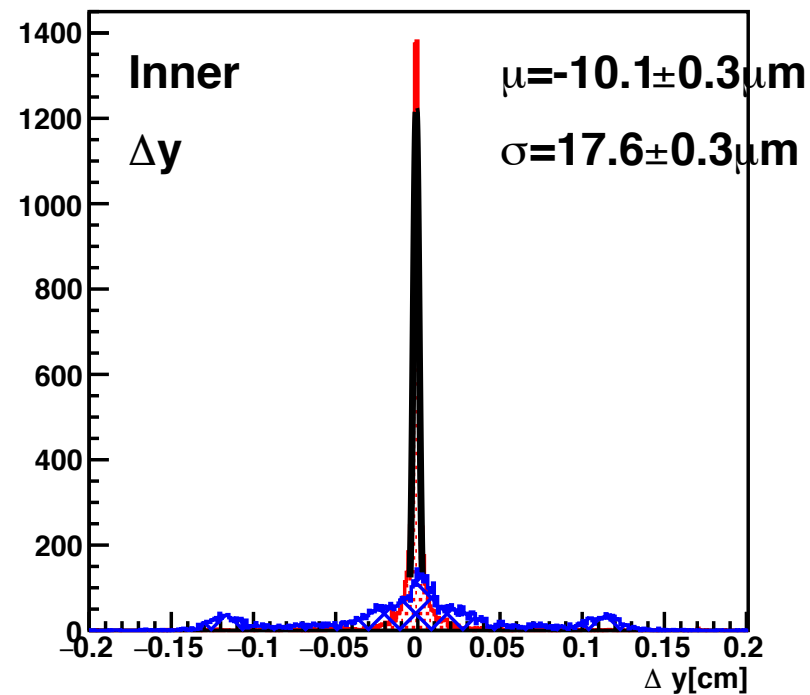
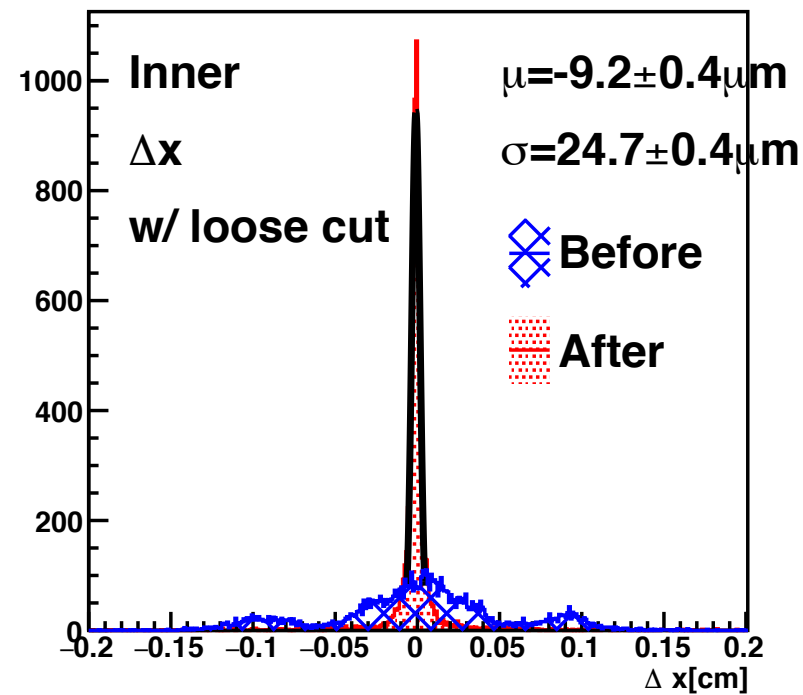


3. In order to obtain more statistics, 3 reference sectors are used for alignment.

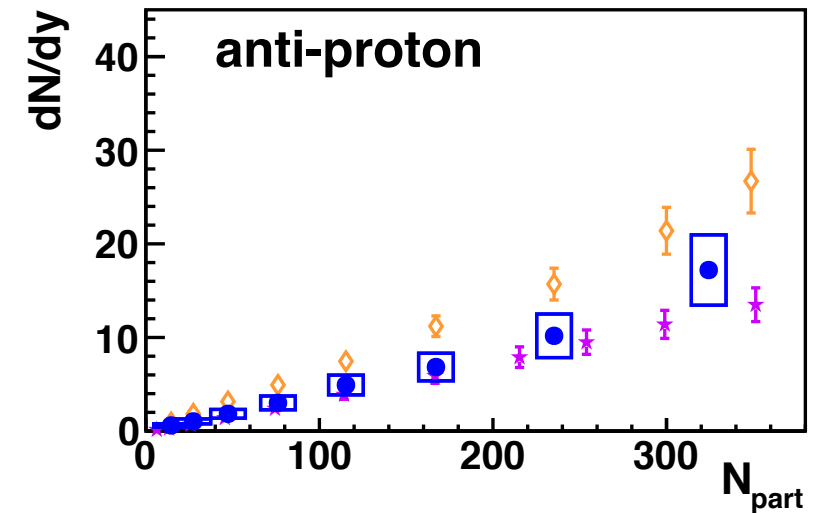
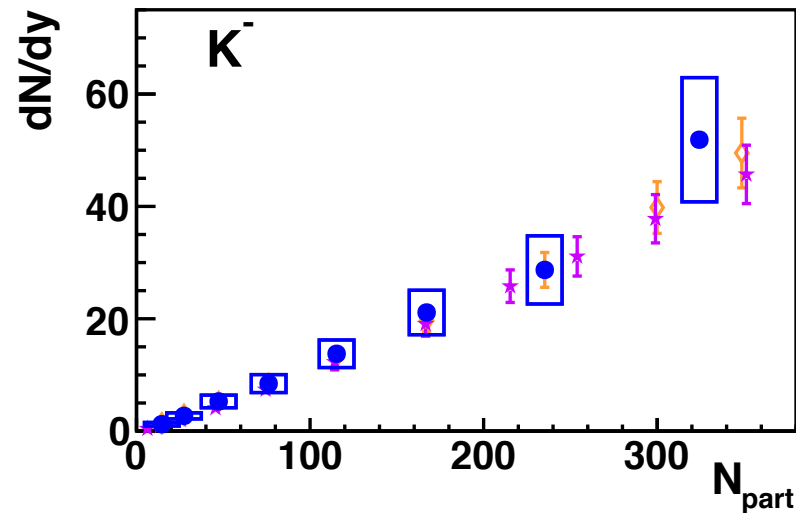
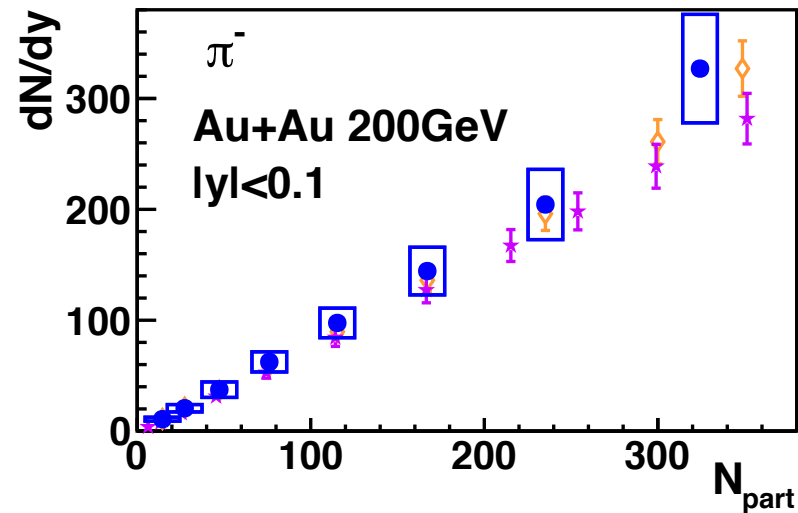
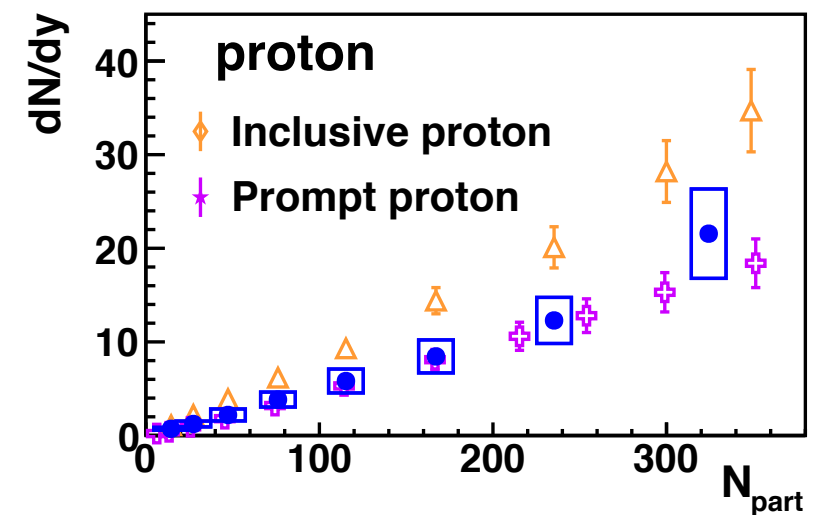
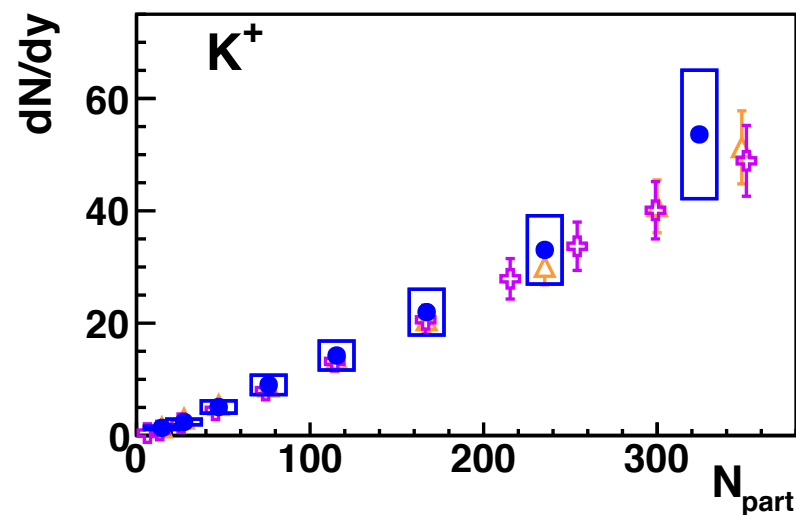
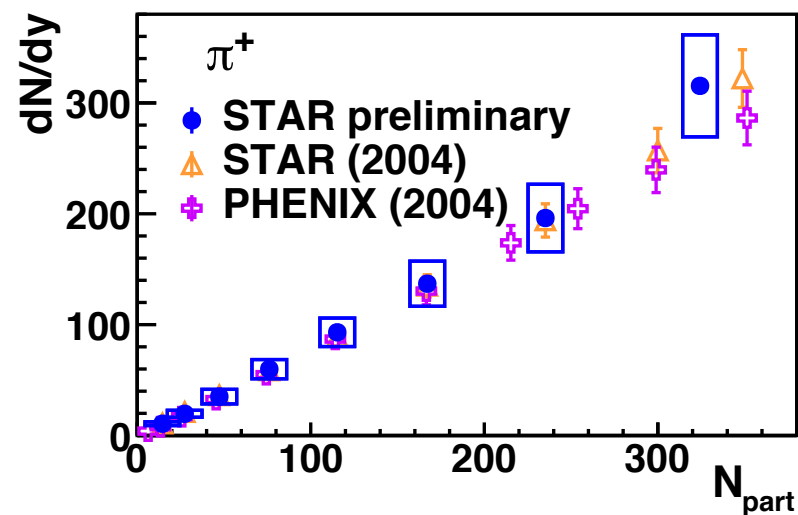
(ex. sec.8 is aligned to sec 2,3,4.)

Sector -> PXL half -> PXL whole -> PST

宇宙線を使ってHFTの相対位置を調べる



dN/dy分布



- ・ エラーの範囲でデータと過去の論文の結果と一致している