

楕円フロー測定で探る RHICからLHCまでのQGP物質

筑波大学 下村 真弥

Heavy Ion Pub @ 名古屋大学

2008/06/16

Outline

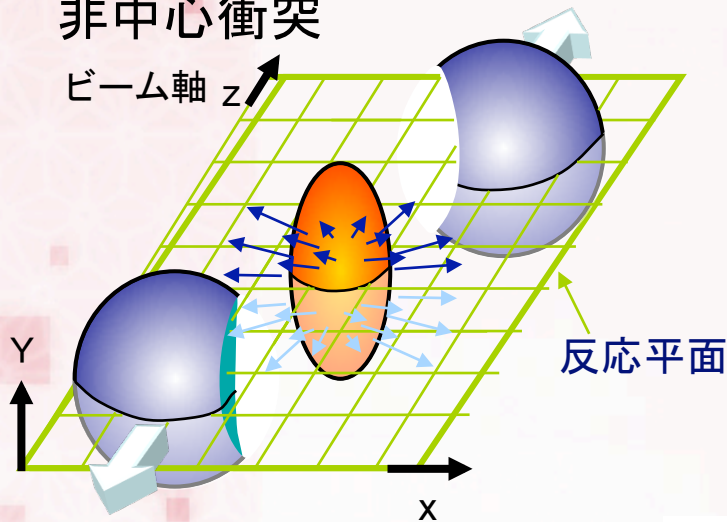
- v_2
- 楕円型フロー (Elliptic Flow)
- 実験結果@RHIC
- まとめ
- LHCで v_2 を測る楽しみ

V₂ってなに？

v₂は、生成される粒子の方位角方向の異方性 (Azimuthal anisotropy) の強度をあらわしている???

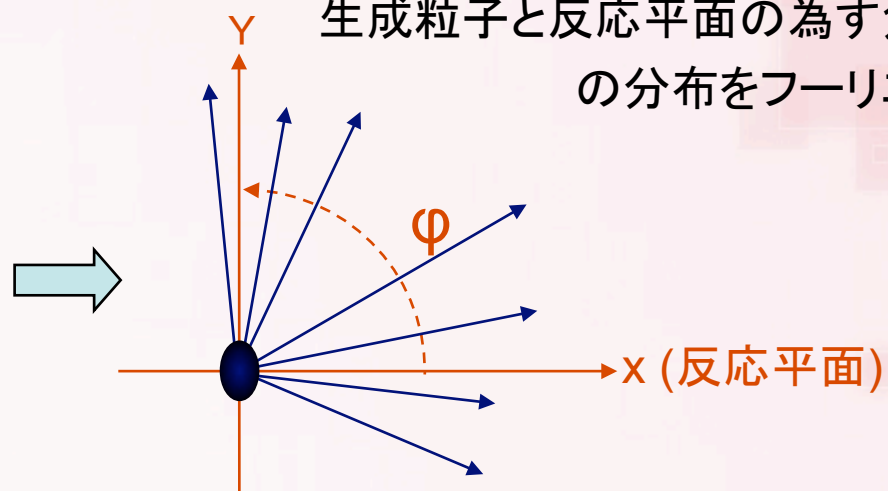
非中心衝突

ビーム軸 z

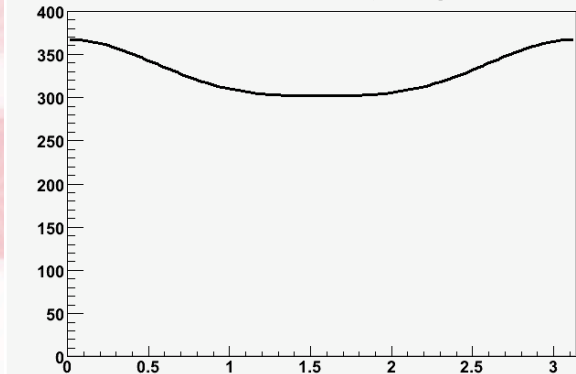


反応平面

生成粒子と反応平面の為す角度φ
の分布をフーリエ展開



ex. φ-Ψの分布



$$\frac{dN}{d(\phi - \Psi)} = N_0(1 + 2v_1 \cos(\phi - \Psi) + 2v_2 \cos(2[\phi - \Psi]) + \dots)$$

$$v_n = \langle \cos(n[\phi - \Psi]) \rangle$$

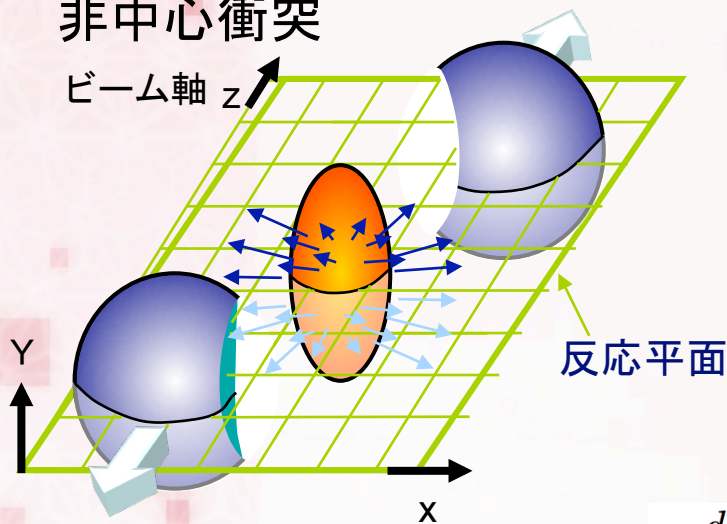
$$dN/d(\phi - \Psi) = N (1 + 2v_2 \cos(2(\phi - \Psi)))$$

V₂ってなに？

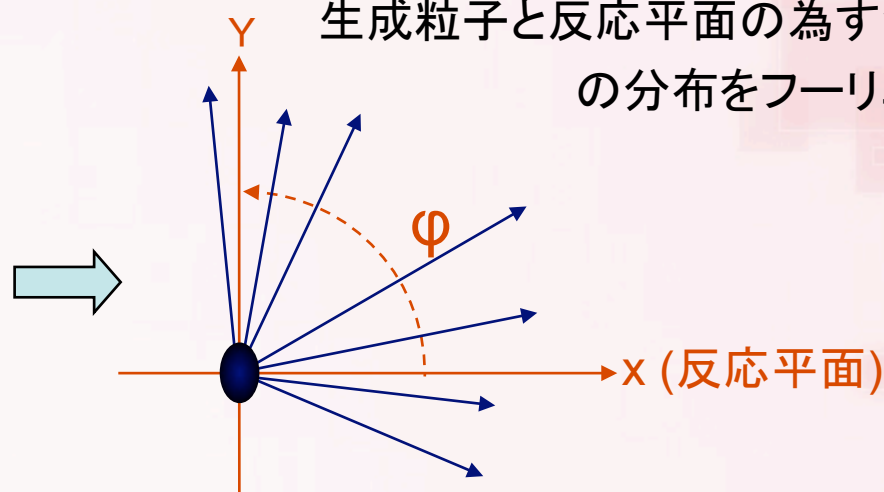
v₂は、生成される粒子の方位角方向の異方性 (Azimuthal anisotropy) の強度をあらわしている???

非中心衝突

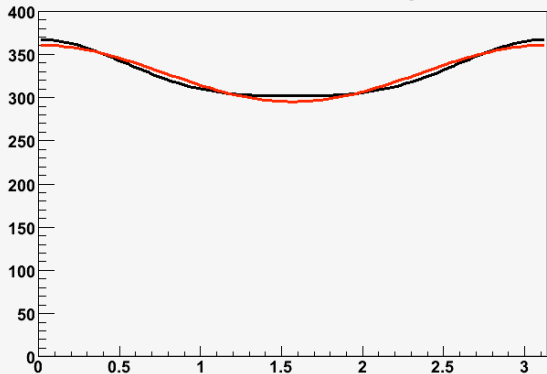
ビーム軸 z



生成粒子と反応平面の為す角度φ
の分布をフーリエ展開



ex. φ-Ψの分布



$$\frac{dN}{d(\phi - \Psi)} = N_0(1 + 2v_1 \cos(\phi - \Psi) + 2v_2 \cos(2[\phi - \Psi]) + \dots)$$

$$v_n = \langle \cos(n[\phi - \Psi]) \rangle$$

$$dN/d(\phi - \Psi) = N (1 + 2v_2 \cos(2(\phi - \Psi)))$$

粒子の収量が、(x方向)>(y方向)なら、v₂>0

v₂ ... 生成粒子の反応平面に対しての楕円率

楕円型フロー (Elliptic Flow) ってなに？

???

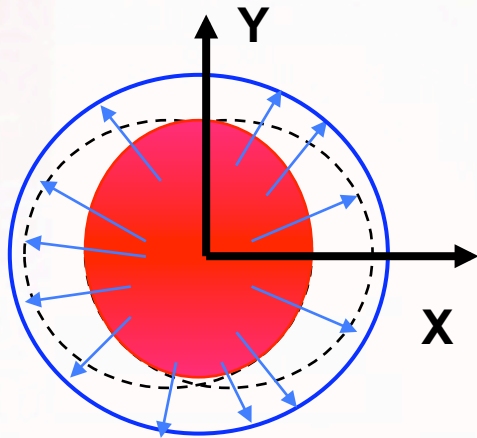
衝突関与部の初期の幾何学的な異方性が運動量空間における方位角異方性となって検出されている。→ 衝突で生成された物質の性質を反映している測定量

???

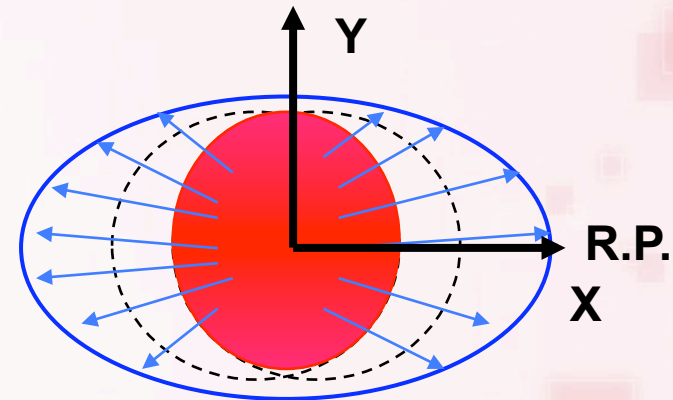
- フロー … 粒子の集団運動
- 楕円型 … x方向とy方向に流れるフローの量が違う。

粒子の平均自由行程 (λ) が衝突関与部の半径 R より十分大きければ、相互作用せず、粒子は等方的に広がる。(圧力勾配もうまれない)

$\lambda \gg R$; 等方的(Isotropic)

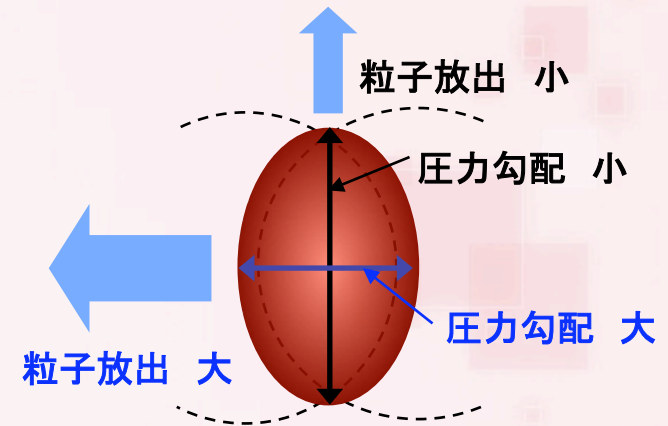
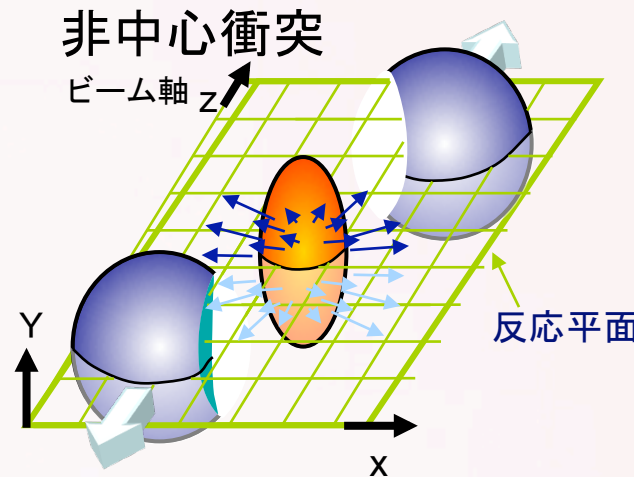


$\lambda \ll R$; 異方的(anisotropic)



もし平均自由行程 (λ) が衝突関与部の半径 R より十分小さければ...

原子核の非中心衝突では、衝突部の初期の形はアーモンド形(幾何学的異方性をもつ)



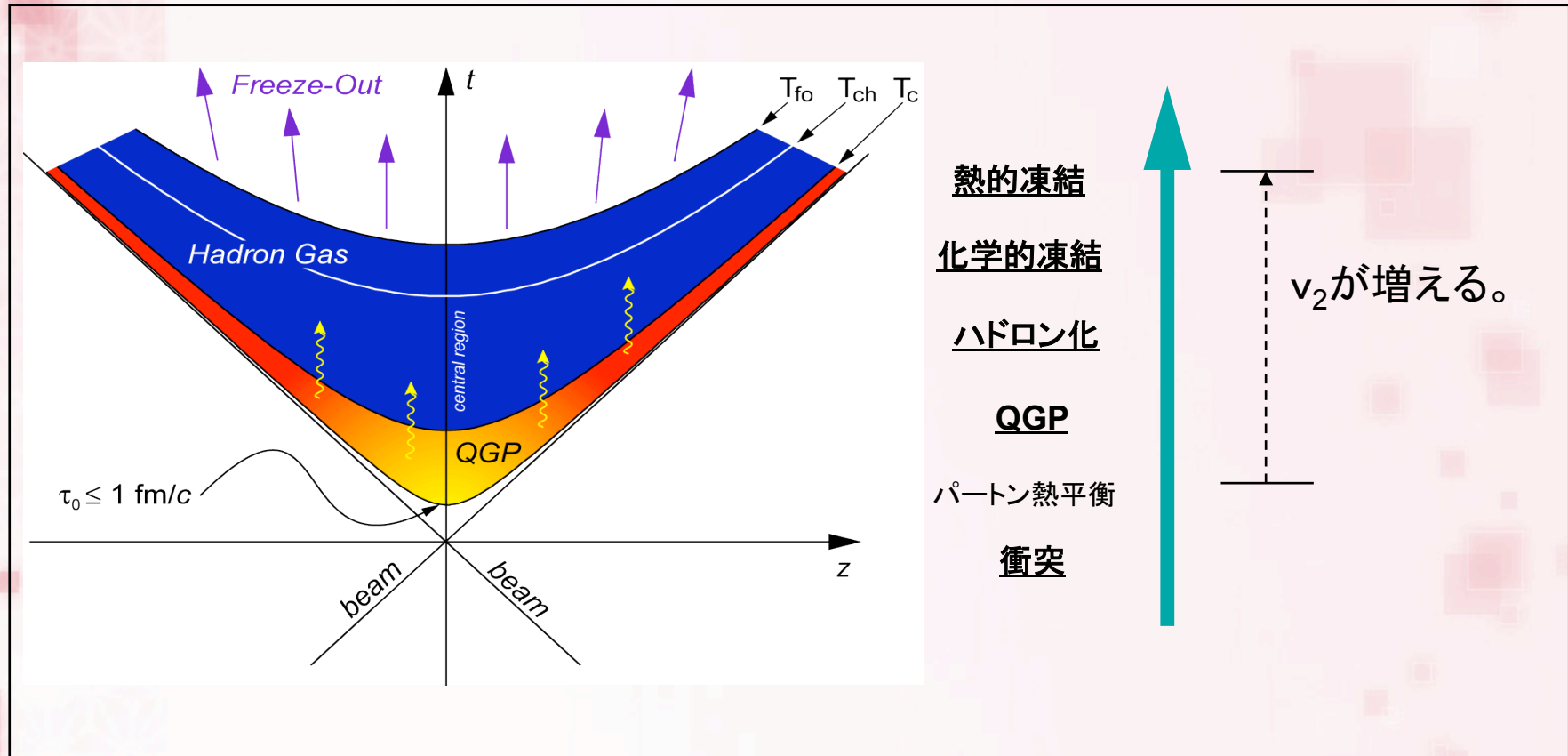
- QGP中でのパートンの平均自由行程 λ が衝突関与部の半径 R に比べて十分に小さいと、系が局所的熱平衡に達して圧力勾配をうむ
 - 粒子の運動量空間での方位角異方性
 - $\lambda \gg R$; isotropic → 自由ガスのように振舞う
 - $\lambda \ll R$; anisotropic → 流体のように振舞う

QGP物質の相互作用 → 圧力勾配 → 楕円型フロー → v_2 が有限

v_2 測定は、衝突関与部の初期の幾何学的な異方性が運動量空間における方位角異方性となって検出されている。→ 衝突で生成された物質の性質を反映している測定量

v_2 は衝突関与部の楕円率と1対1対応と考えられていた。

衝突後の時間発展の描像



相互作用があれば v_2 は、発達する可能性がある。

v_2 は、いつ作られたのか？

実験結果と、そこからわかったこと

- p_T dependence
- species dependence
- Energy dependence
- Size dependence

➤ v_2 というものは、絶対値ではなく比をみているということを常に気にとめてみてください。

Elliptic flow @ Low pT

- RHIC実験では様々な粒子の v_2 が測定され、有限な値を示している！

- 運動量が1.5 GeV/c以下では質量が軽い粒子ほど v_2 が大きくなることが観測されている。

$$v_2(\pi) > v_2(K) > v_2(p)$$

=> 流体力学モデルで説明。

✓ 非常に早い時間での熱平衡を仮定

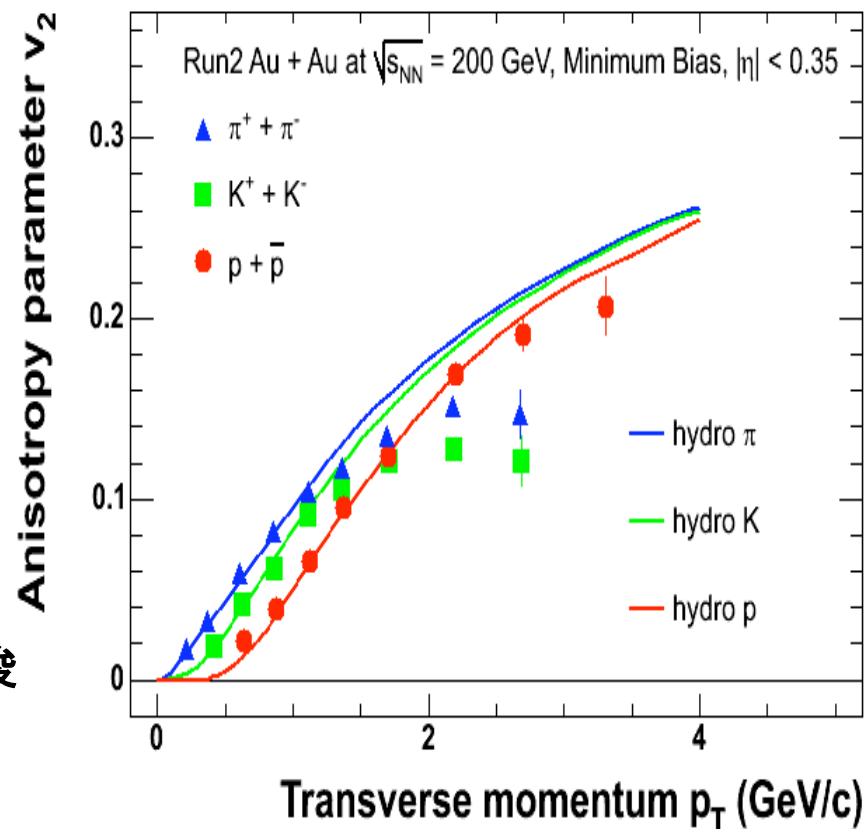
$$\tau_0 = 0.6 \text{ fm/c}$$

=> 系が熱平衡状態になっていることを示唆
強く相互作用する物質の存在

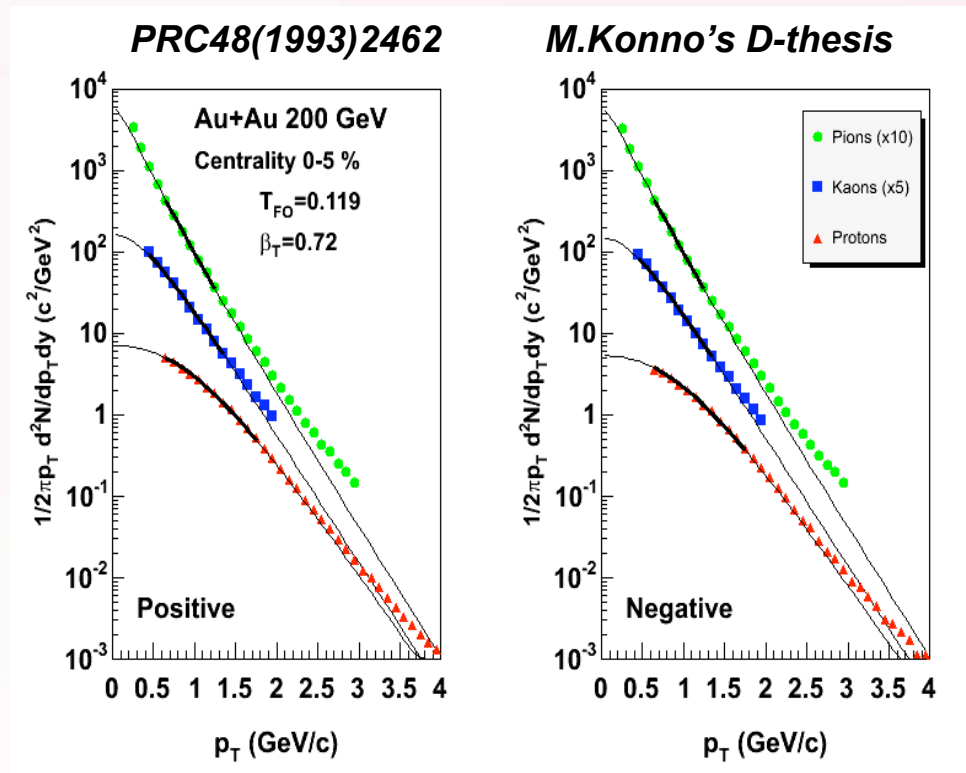
- meson(π, K)とbaryon(p)の v_2 の振る舞いがmid p_T で異なる

金+金、 $\sqrt{s} = 200 \text{ GeV}$

Hydro; Phys. Rev. C 67 (03) 044903
 v_2 ; Phys. Rev. Lett. 91 182301 (2003) PHENIX



補足



- spectra :横運動量分布も、流体力学を使ったモデル(Blast-wave Fit)で説明できている。
- $\pi/K/p$ の質量の違いからくる **radial flow**の効果を含むモデルによって、実験結果が再現でき、p+p実験との差も説明できている。
- → **ハドロン化後**のradial flowが存在

Low p_T では、流体的振る舞い

Elliptic flow @ Mid p_T

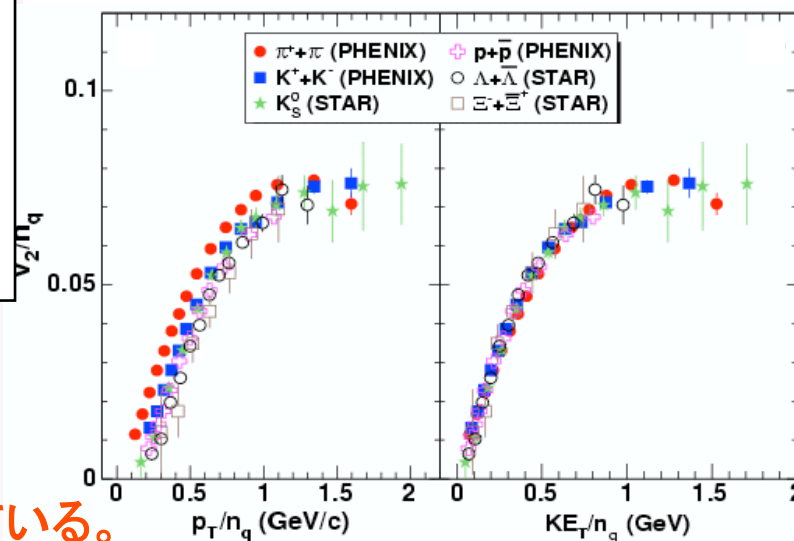
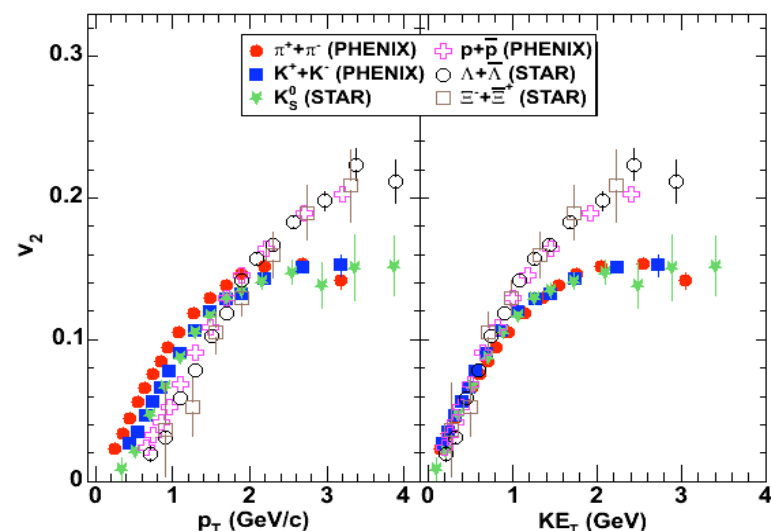
v_2 : Au+Au, $\sqrt{s} = 200\text{GeV}$, MB

Mid p_T ($\sim 1.5\text{GeV}/c < p_T < \sim 4.0\text{GeV}/c$)

- 流体力学モデルで説明できない。
- meson(π, K)とbaryon(p)で v_2 の振る舞いが異なり、クォーク数でスケールする。
 - クォーク数でスケールすると v_2 は同じカーブを描く (**universal v_2** の存在)
- K_{ET} scaling で、質量の効果を取り除くと低い p_T 領域から一致する。
- v_2 の横運動エネルギー依存が粒子種によらずに一致する。(なぜか?)
- ϕ メソンもクォーク数でスケールする。
- u,d,sクォークに比べて重いcクォークも、u,d,sクォークと同程度にflowしているという解析結果もある。(Shingo's D-thesis)

$K_{ET} = m_T - m_0$

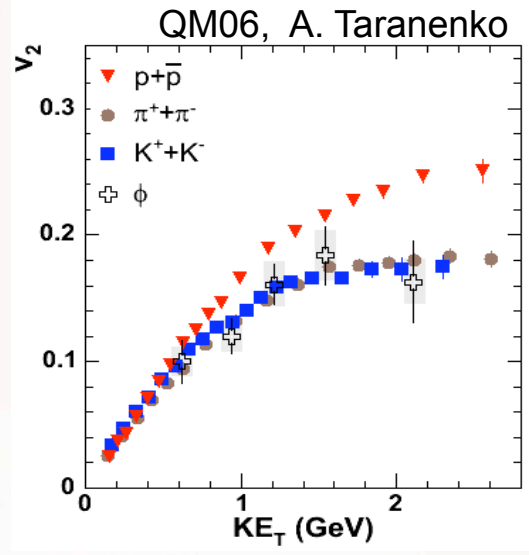
PRL 98, 162301



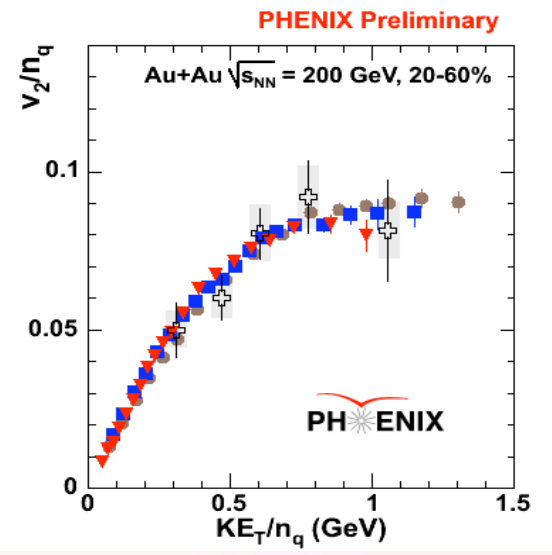
Recombination の描像と一致する。

クォークレベルでflowが決まっていることを示唆している。

補足



STAR preliminary
200 GeV Au+Au



SQM06, M. Oldenburg

- > ϕ の v_2 は、バリオンの v_2 よりメソンの v_2 に近い。
- > s-クォークもクォークレベルでフローがあり、u/dと同程度にフローしている。

Quark Number Scaling

Recombination model

➤ ハドロン化のメカニズムの一つで、近くにある同じぐらいの運動量を持つクォークがくっついてハドロンをつくるというモデル

$q\bar{q} \Rightarrow$ Meson (π, K)

$qqq \Rightarrow$ Baryon (p)

➤ Universalなパートン分布 $w(p_T)$ を仮定

$$E \frac{d^3 N_M}{d^3 p} \approx C_M \cdot w^2(p_T/2)$$

$$E \frac{d^3 N_B}{d^3 p} \approx C_B \cdot w^3(p_T/3)$$

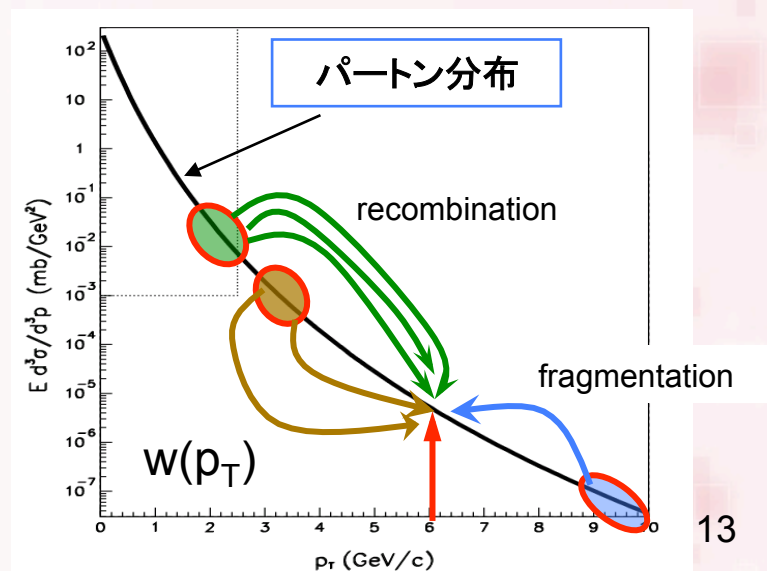
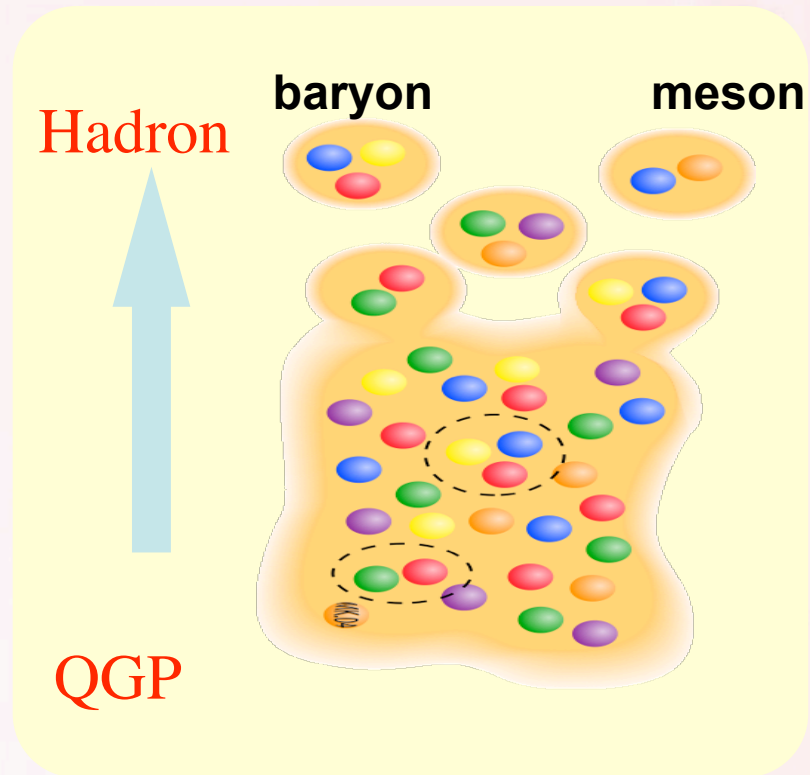
p/π ratio をよく再現している。

v_2 がパートンレベルで決まっていれば以下の式が成り立つ

$$v_{2,M} \approx 2v_{2,q}(p_T/2)$$

$$v_{2,B} \approx 3v_{2,q}(p_T/3)$$

v_2 (200GeV Au+Au) のbaryonとMesonの違いを再現している。



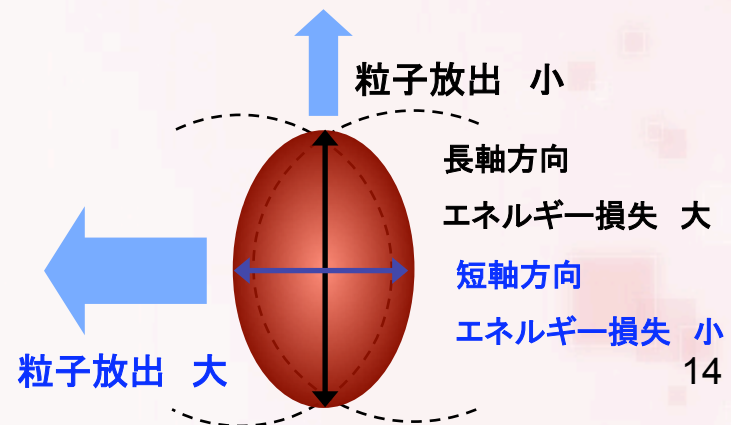
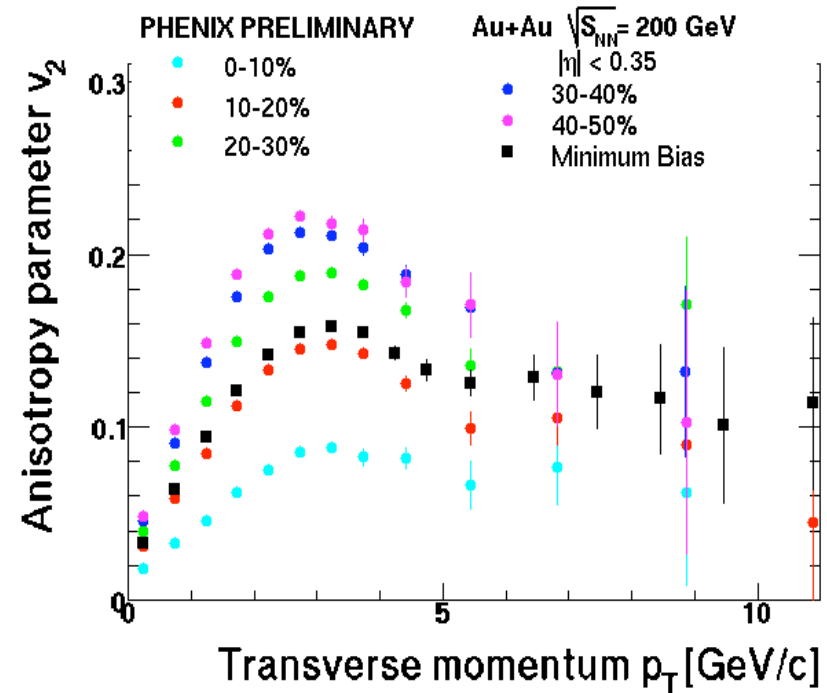
v_2 :これまでの結果@High p_T

金+金、200GeVの結果より

High p_T

- p_T の高い粒子は、初期衝突で作られる高い p_T を持つパートンが破砕して作るジェットに含まれている。
- ジェットは反応平面に関係なく、ランダムにできるはずなので、ジェットからできる高い p_T の粒子の v_2 は、ゼロになるはず???
- ゼロにならない。パートンが高密度物質中でエネルギー損失をし、その量が進む長さによるので、衝突関与部の幾何学的異方性によるため、有限な v_2 がうまれる。

→QGP生成を示唆してる。



比較表

	エネルギー	粒子種	System (CuCu, AuAu)	Size Centrality
scaling		$n_q + K_{ET}$		
AuAu 200	●	●		
AuAu 62				
CuCu 200	●			
CuCu 62				

● 今までにわかっていること

● 調べること

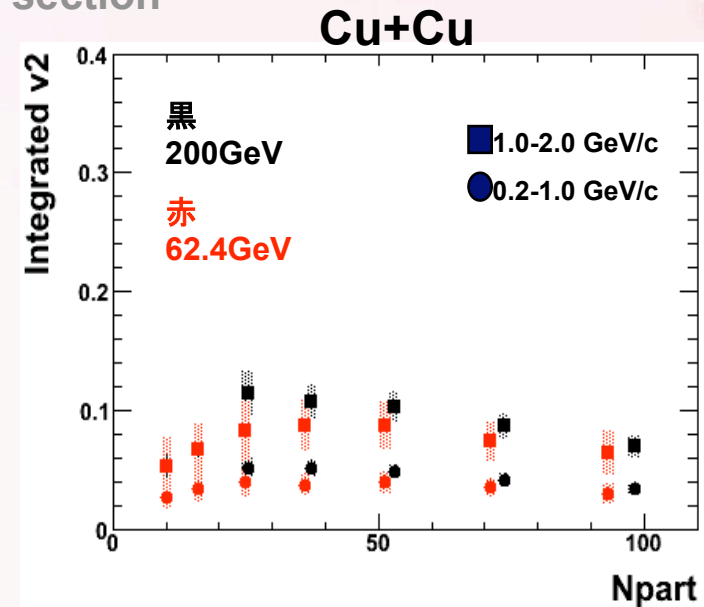
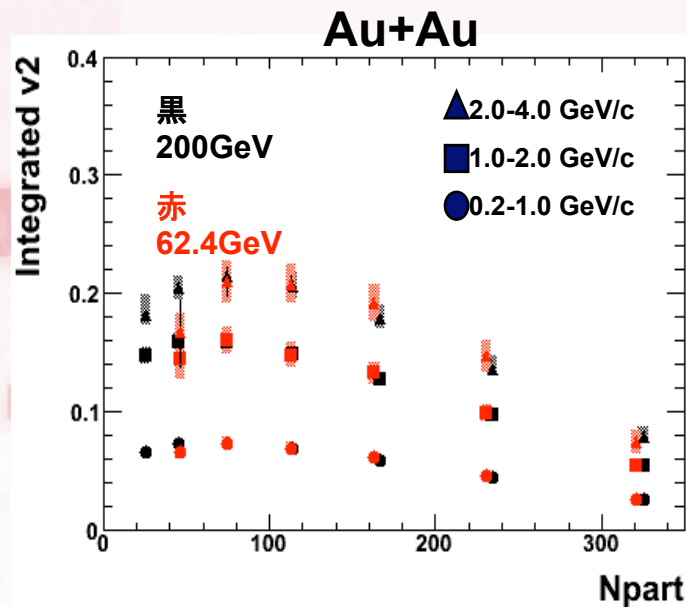
Energy dependence

➤ 比較:

$\sqrt{s} = 62.4$ と 200 GeV

詳しく見るために

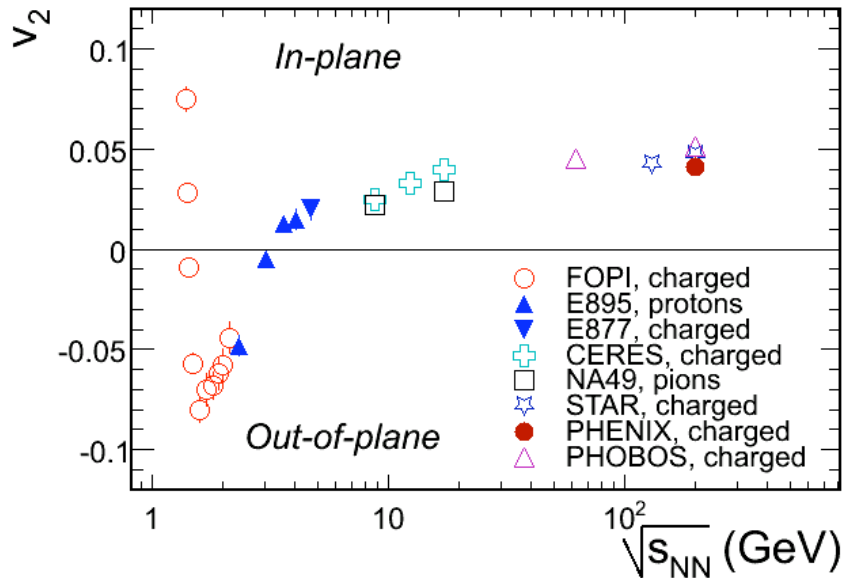
- 中心衝突度(Npart) 別にみる
- サイズの小さいCu+Cuで比較する
- $\pi/K/p$ 粒子識別を行う → next section



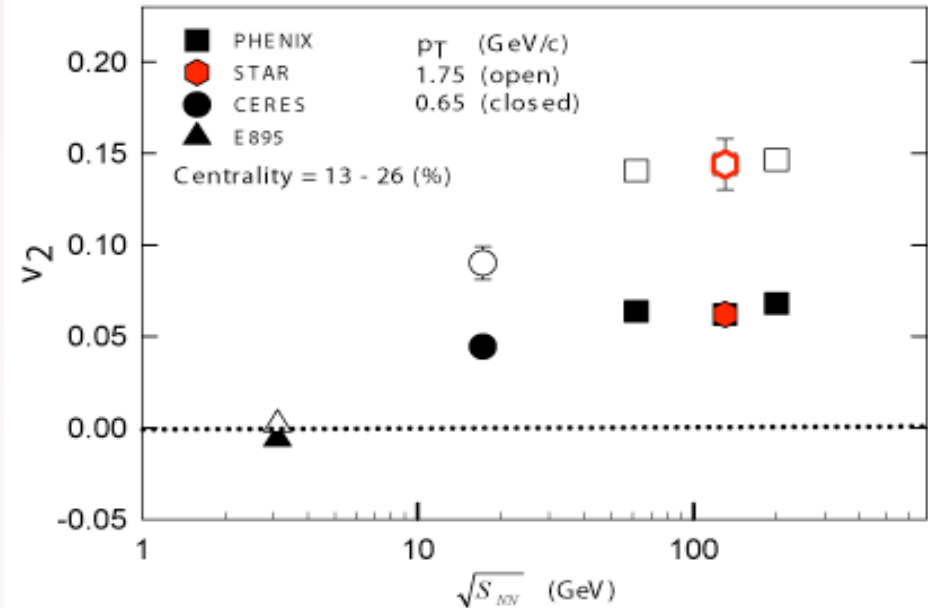
$\sqrt{s}=200$ GeV と 62 GeV の v_2 が一致

→物質が熱平衡状態に達していることを示唆

Energy dependence



PRL 94, 232302



FOPI : Phys. Lett. B612, 713 (2005). E895 : Phys. Rev. Lett. 83, 1295 (1999)
 CERES : Nucl. Phys. A698, 253c (2002). NA49 : Phys. Rev. C68, 034903 (2003)
 STAR : Nucl. Phys. A715, 45c, (2003). PHENIX : Preliminary.
 PHOBOS : nucl-ex/0610037 (2006)

$\sqrt{s}=17\text{GeV}$ (SPS) では、50%に減少している。

RHICエネルギーまでは、エネルギーを上げると v_2 は上がる傾向にあった。

$\sqrt{s} > 62.4 \text{ GeV}$ では、衝突に持ち込むエネルギーが変わっても v_2 は同じ。

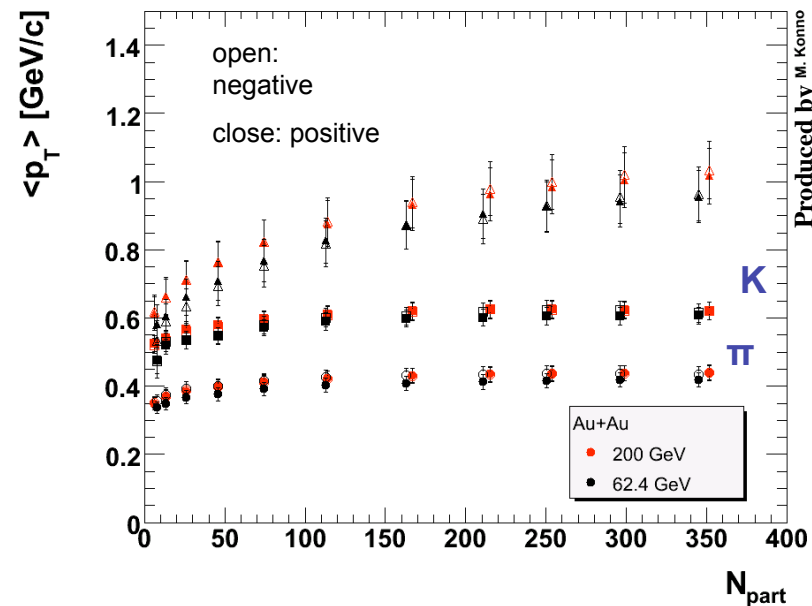
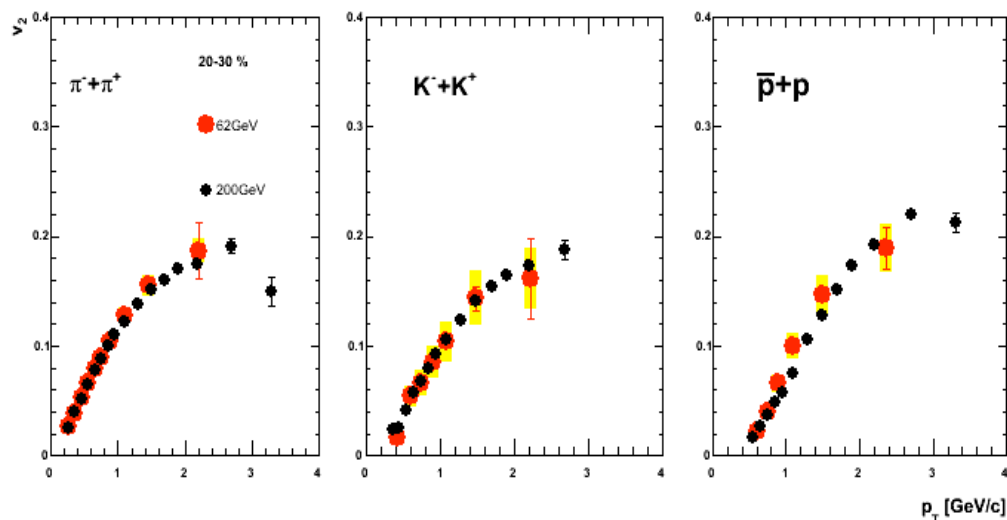
→ RHICのエネルギーでは、物質が熱平衡状態に達していることを示唆

Energy dependence (補足)

- $\pi/K/p$ 粒子識別を行う
- p_T dependence をみる

Mean p_T

Au+Au v_2 vs. p_T



- 62.4 GeV と 200 GeV での $\langle p_T \rangle$ も、 $\pi/K/p$ とも誤差の範囲内で一致している。
- v_2 は、どの p_T 領域でも一致しているといえる。

RHICエネルギー以上の衝突では、完全な熱平衡に達してQGP状態を作るため系全体が理想流体的振る舞いをするため、初期の幾何学的な楕円率が同じならば、in-planeとout-of-planeでの圧力比が一定となり、 v_2 の値が同じになると考えられる。

System Size Dependence

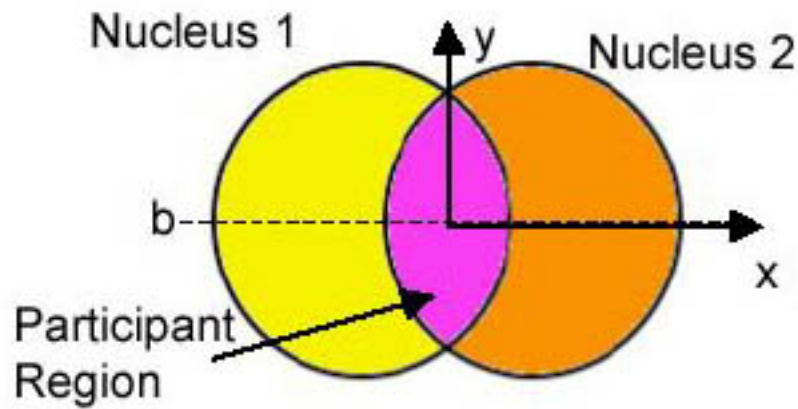
➤ Eccentricity Scaling

System Size を変化させるもの

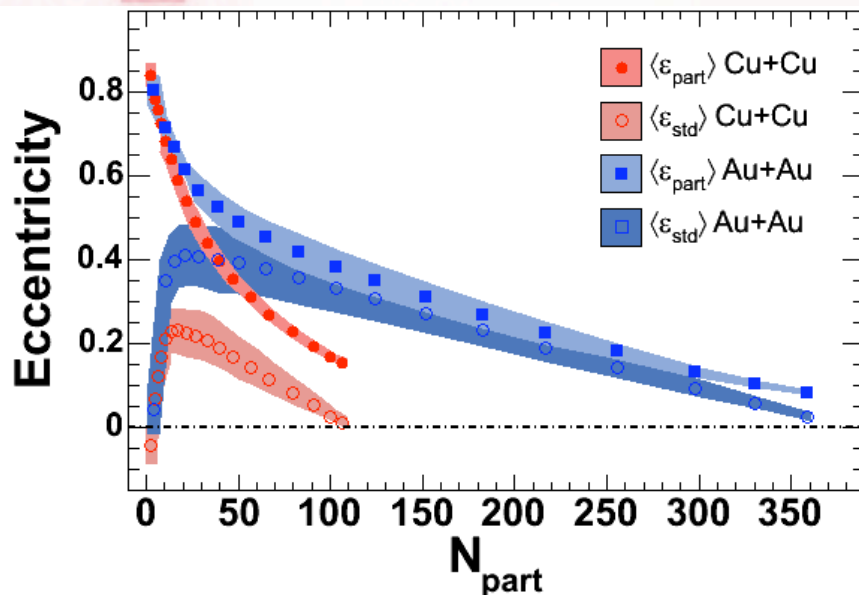
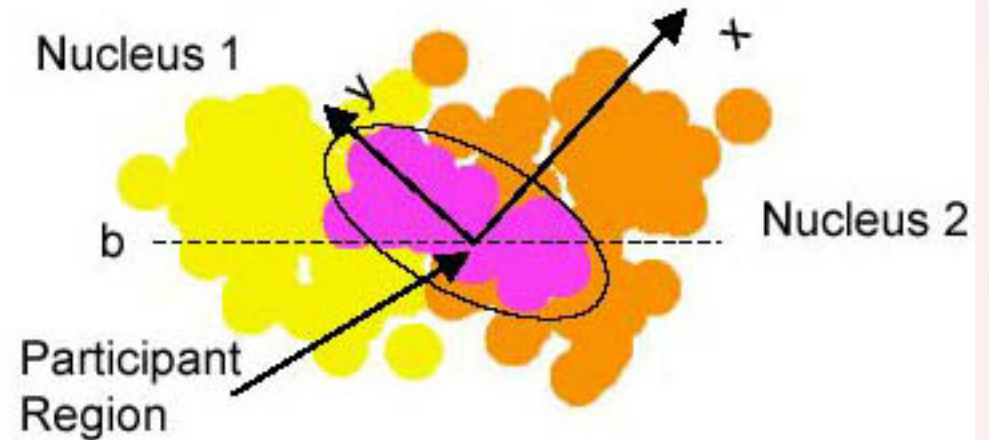
- 衝突原子核種 (Au+Au ,Cu +Cu)
- 衝突中心度 (centrality)

反応関与部の楕円率 (説明)

Standard Eccentricity



Participant Eccentricity



$$\text{Eccentricity} = \frac{\langle y^2 \rangle - \langle x^2 \rangle}{\langle y^2 \rangle + \langle x^2 \rangle}$$

Participant Eccentricity がより実験室の状態に近い。

比較表

	エネルギー	粒子種	System (CuCu, AuAu)	Size Centrality
scaling	変化なし	$n_q + K_{ET}$		
AuAu 200	●	●	●	
AuAu 62			●	
CuCu 200	●		●	
CuCu 62			●	

● 今までにわかっていること

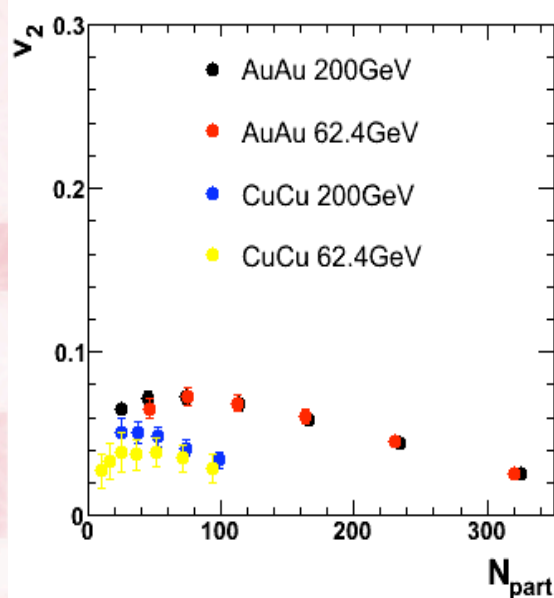
● 調べること

● わかったこと

System size dependence

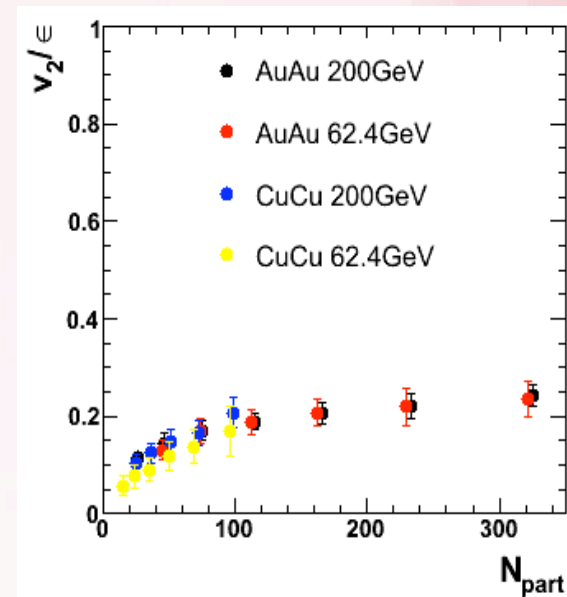
サイズの違うシステムの v_2 をそのeccentricity (楕円率) で規格化して比較する。

v_2 vs. N_{part}



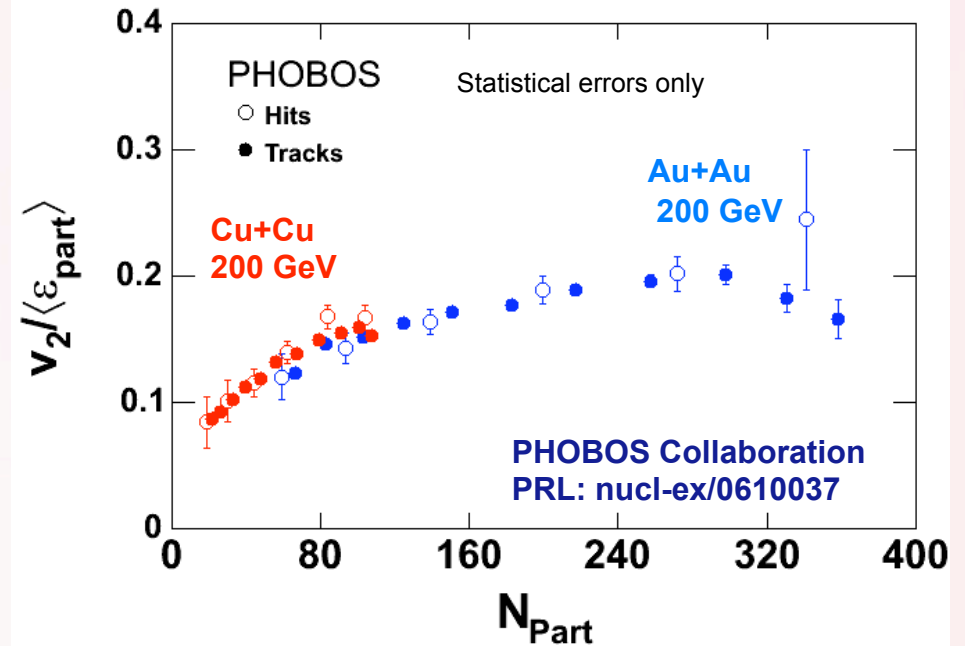
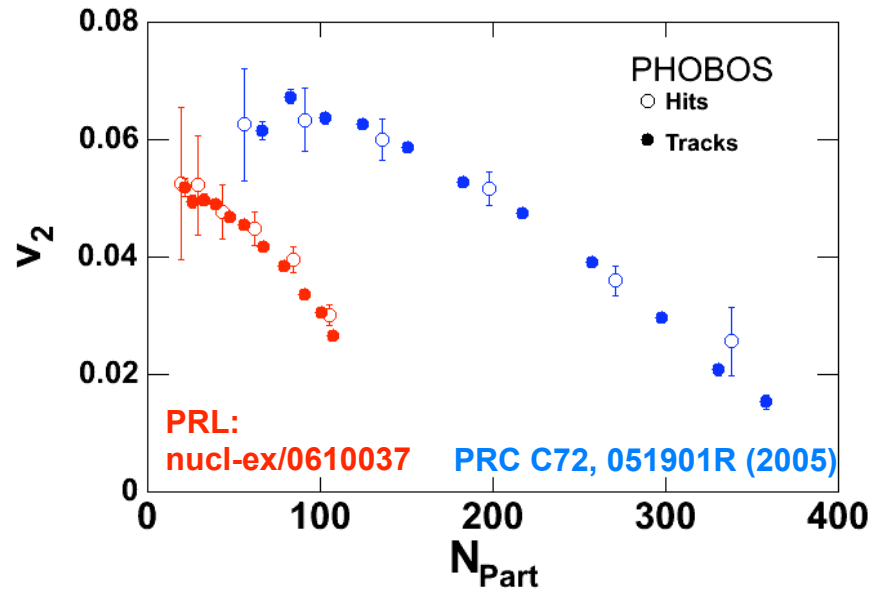
$0.2 < p_T < 1.0$ [GeV/c]

v_2/ϵ vs. N_{part}

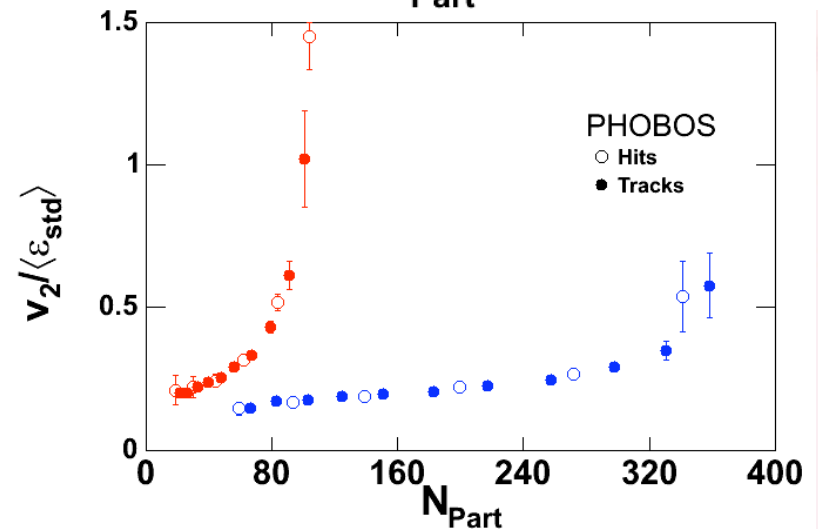


$v_2/\epsilon(\text{Au+Au}) = v_2/\epsilon(\text{Cu+Cu})$ となっている！！

補足



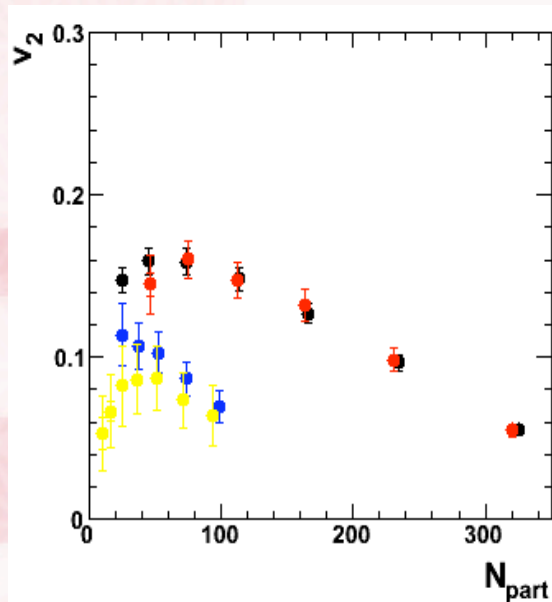
- standard と participant eccentricity の比較。
- standard は、実験での eccentricity の揺らぎを考慮していない。揺らぎの効果は、システムが小さいところで、より影響が大きい。



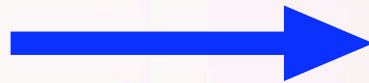
System size dependence

サイズの違うシステムの v_2 をそのeccentricity (楕円率) で規格化して比較する。

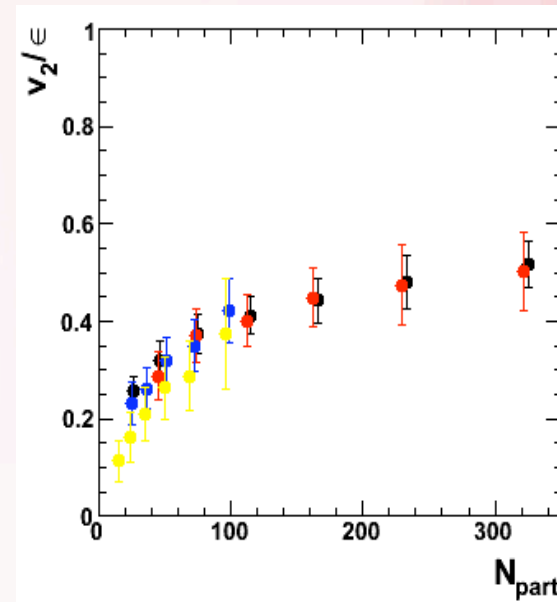
v_2 vs. N_{part}



$1.0 < p_T < 2.0$ [GeV/c]



v_2/ϵ vs. N_{part}

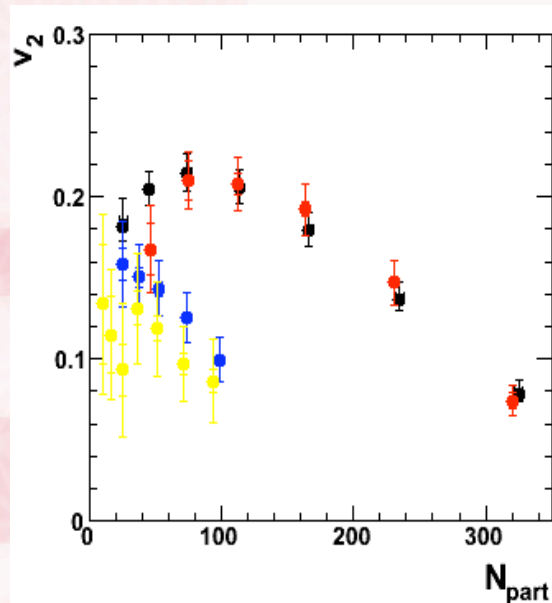


$v_2/\epsilon(\text{Au+Au}) = v_2/\epsilon(\text{Cu+Cu})$ となっている！！

System size dependence

サイズの違うシステムの v_2 をそのeccentricity (楕円率) で規格化して比較する。

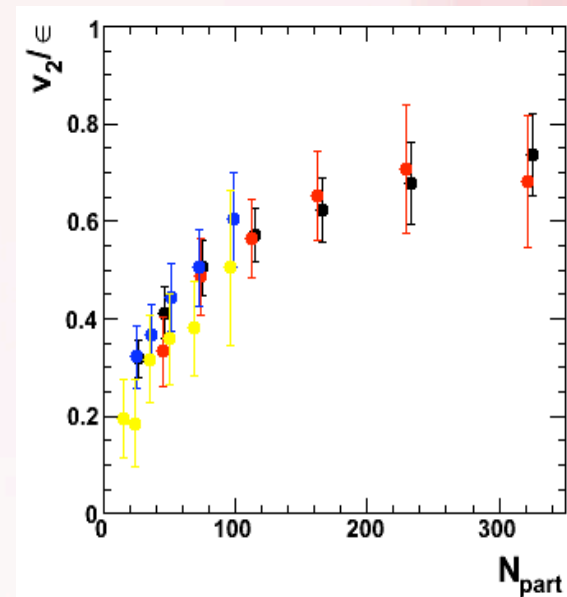
v_2 vs. N_{part}



$2.0 < p_T < 4.0$ [GeV/c]



v_2/ϵ vs. N_{part}



$v_2/\epsilon(\text{Au+Au}) = v_2/\epsilon(\text{Cu+Cu})$ となっている！！

しかし、 v_2/ϵ は、 N_{part} に依存して変化しており、一定値をとらない。

→ v_2 は、 N_{part} が同じなら ϵ で規格化できるが、 ϵ の値だけでは、決まらない。

比較表

	エネルギー	粒子種	System (CuCu, AuAu)	Size Centrality
scaling	変化なし	$n_q + K_{ET}$	eccentricity	
AuAu 200	●	●	●	●
AuAu 62			●	●
CuCu 200	●		●	●
CuCu 62			●	●

● 今までにわかっていること

● 調べること

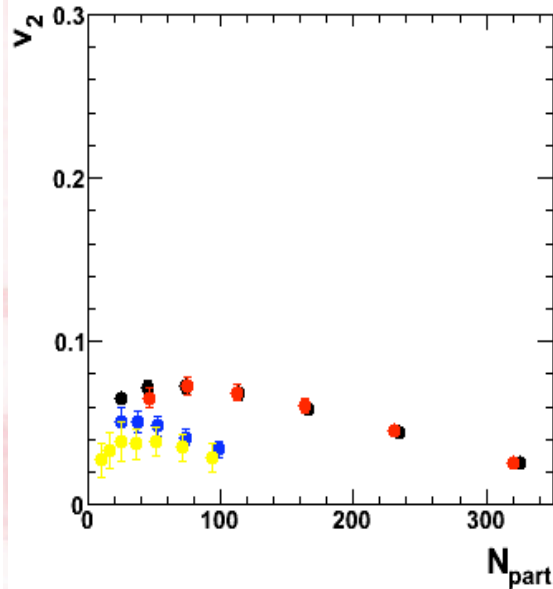
● わかったこと

System size dependence

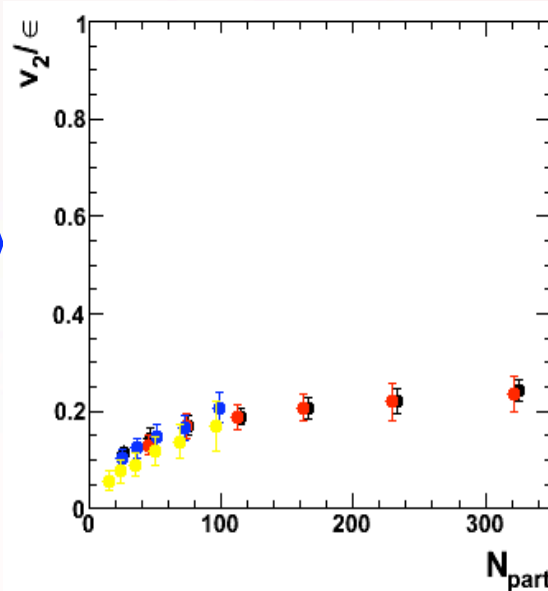
横軸 $N_{\text{part}} \rightarrow N_{\text{part}}^{1/3}$ にすると...

$0.2 < p_T < 1.0$ [GeV/c]

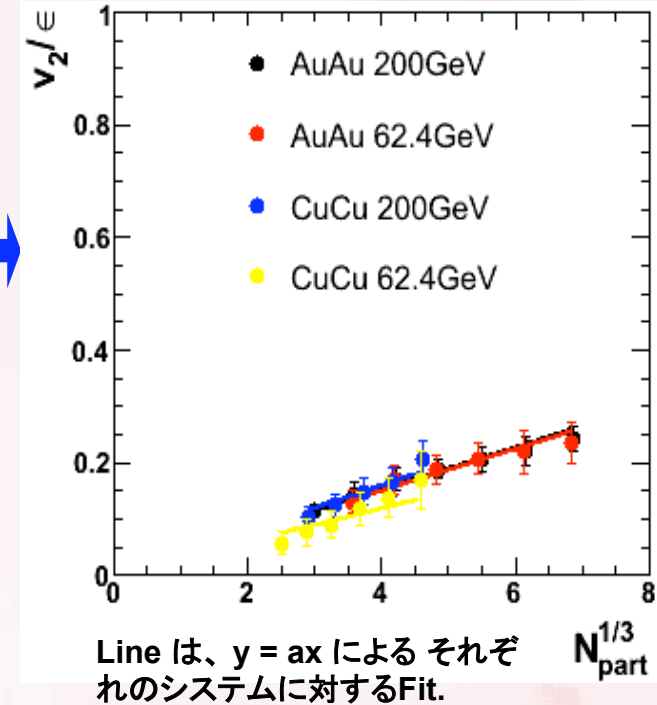
v_2 vs. N_{part}



v_2/ϵ vs. N_{part}



v_2/ϵ vs. $N_{\text{part}}^{1/3}$



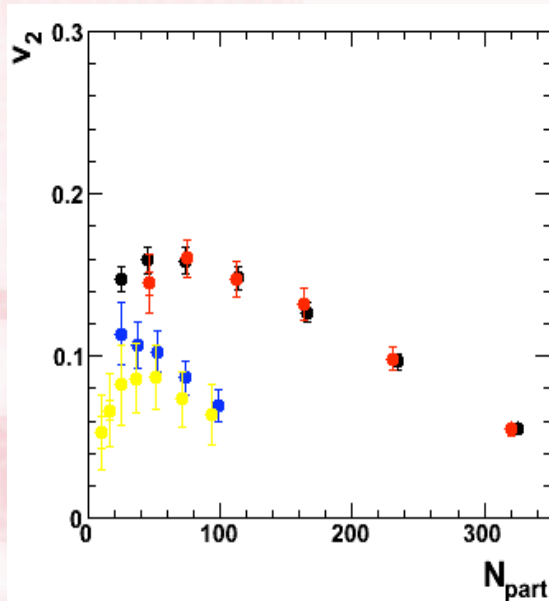
v_2 を eccentricity で規格化した値は N_{part} の $1/3$ 乗に比例して大きくなっている p_T によってその傾きは違う。(System にはよらず、ほぼ一定。)

System size dependence

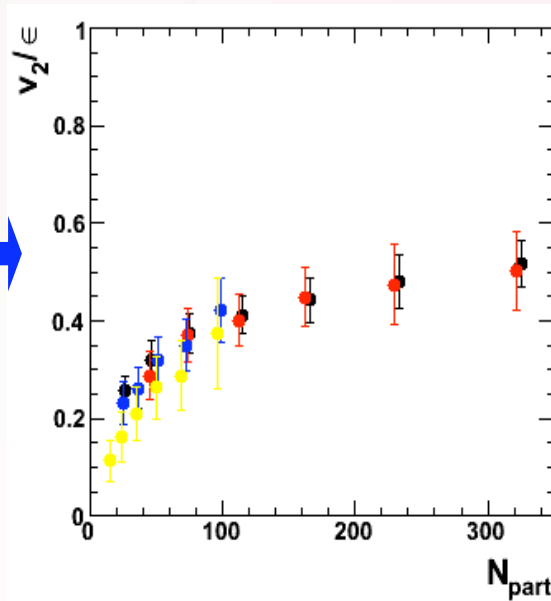
横軸 $N_{\text{part}} \rightarrow N_{\text{part}}^{1/3}$ にすると...

$1.0 < p_T < 2.0$ [GeV/c]

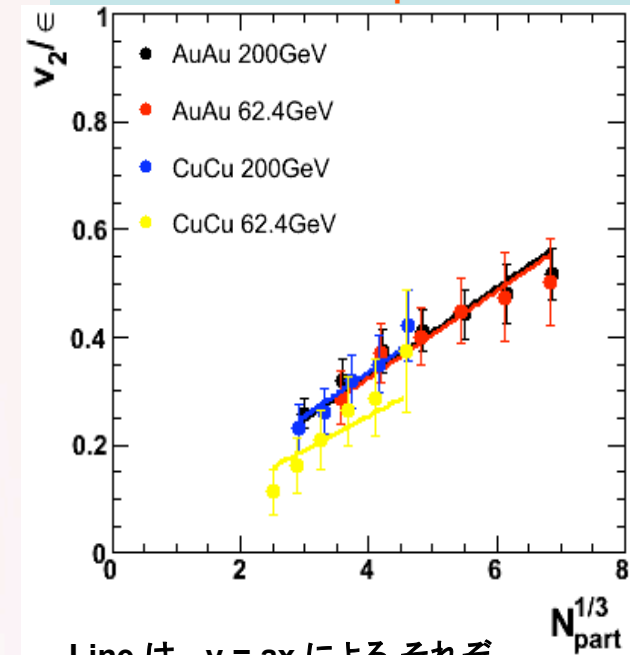
v_2 vs. N_{part}



v_2/ϵ vs. N_{part}



v_2/ϵ vs. $N_{\text{part}}^{1/3}$



Line は、 $y = ax$ によるそれぞれのシステムに対するFit.

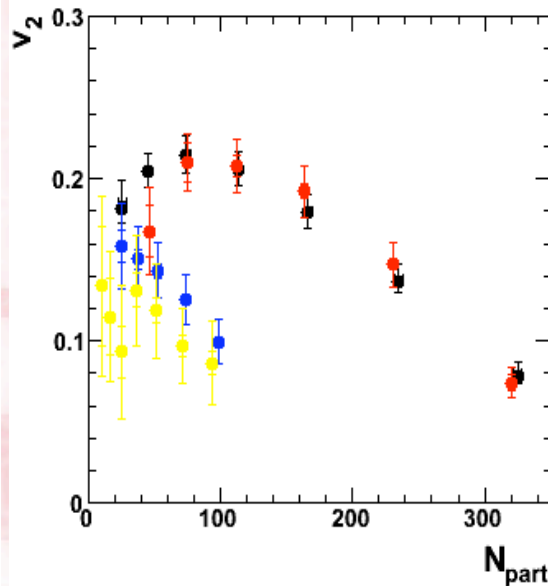
v_2 を eccentricity で規格化した値は N_{part} の $1/3$ 乗に比例して大きくなっている p_T によってその傾きは違う。(Systemにはよらず、ほぼ一定。)

System size dependence

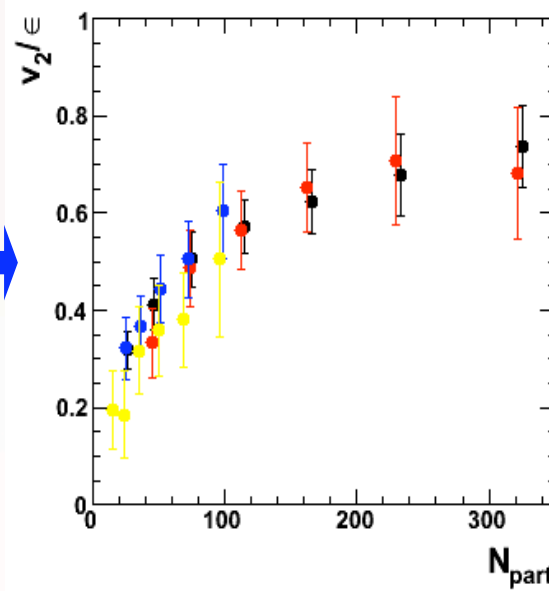
横軸 $N_{\text{part}} \rightarrow N_{\text{part}}^{1/3}$ にすると...

$2.0 < p_T < 4.0$ [GeV/c]

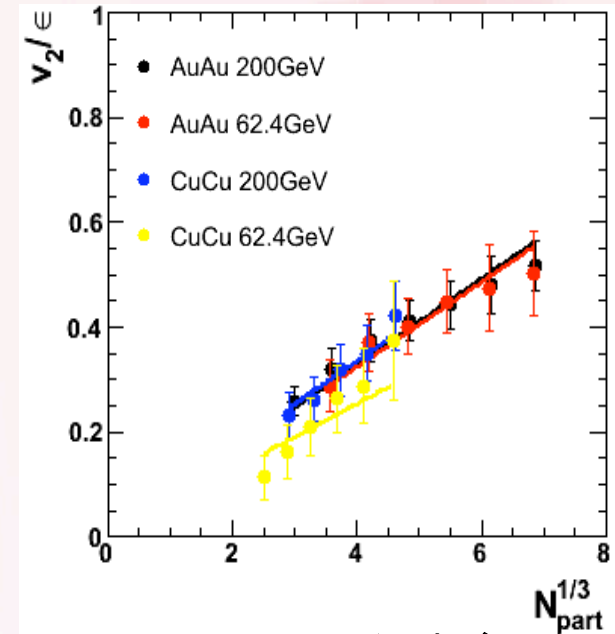
v_2 vs. N_{part}



v_2/ϵ vs. N_{part}



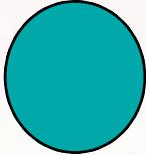





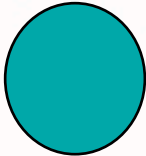




v_2/ϵ vs. $N_{\text{part}}^{1/3}$




Line は、 $y = ax$ によるそれぞれのシステムに対するFit.

v_2 をeccentricityで規格化した値は N_{part} の1/3乗に比例して大きくなっている
 p_T によってその傾きは違う。(Systemにはよらず、ほぼ一定。)

比較表

	エネルギー	粒子種	System (CuCu, AuAu)	Size Centrality
scaling	変化なし	$n_q + K_{ET}$	eccentricity	$N_{part}^{1/3}$
AuAu 200				
AuAu 62				
CuCu 200				
CuCu 62				

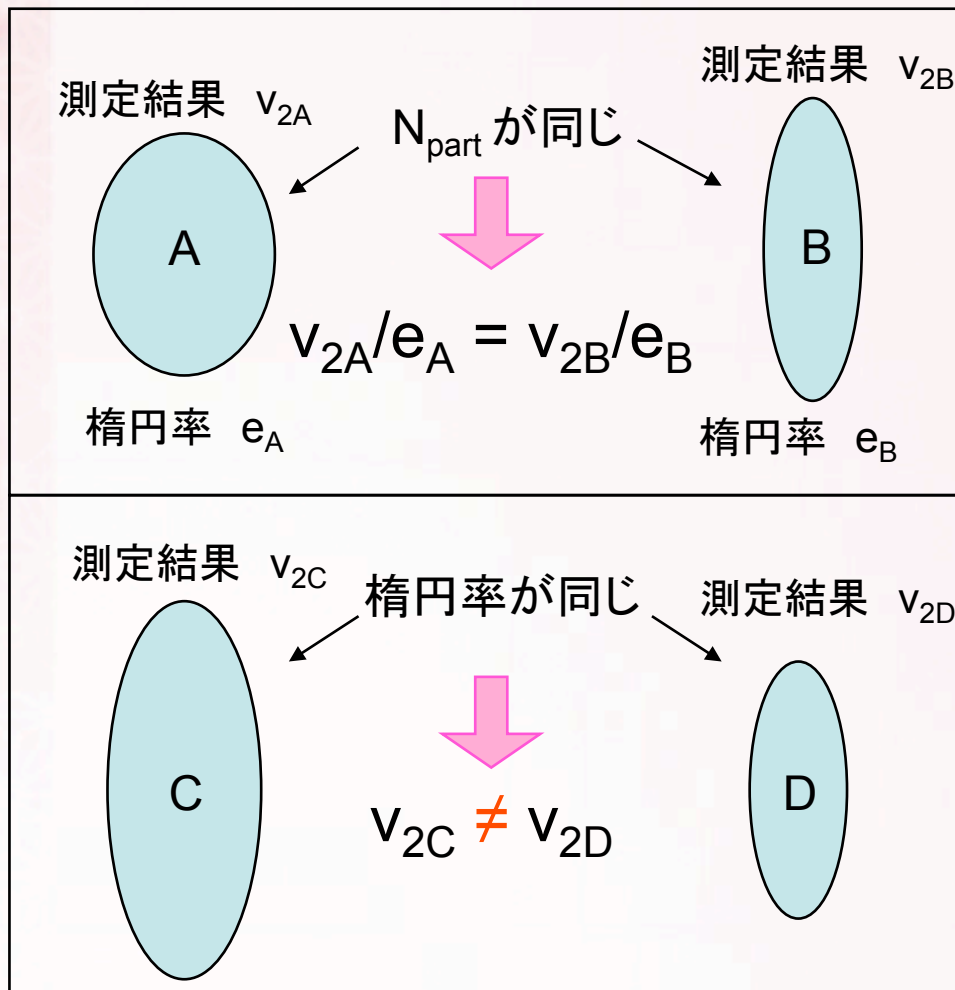
 今までにわかっていること

 調べること

 わかったこと

まとめ(1)

- 衝突関与部の N_{part} が同じなら、衝突時の幾何学的な楕円率で v_2 はスケールする。

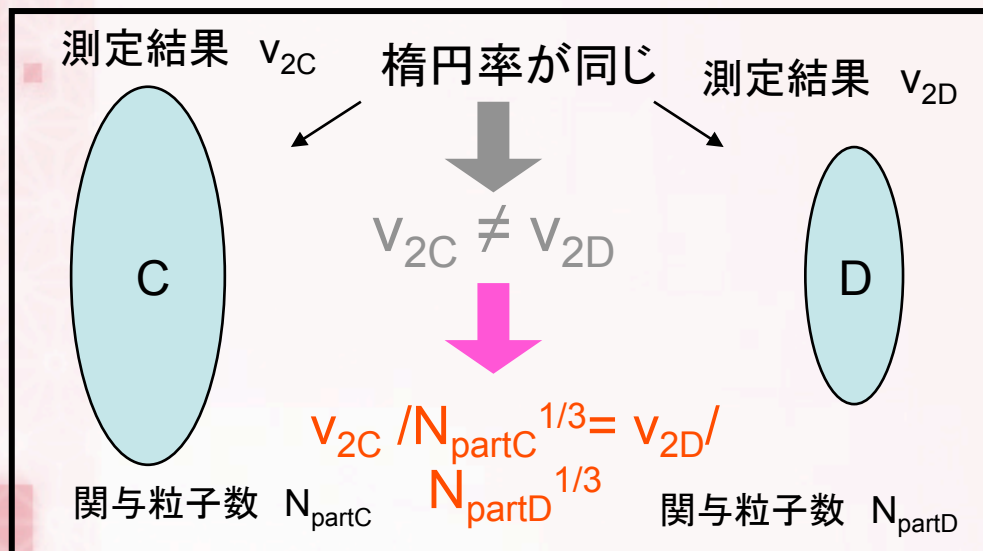


もし v_2 が初期の幾何学的な楕円率のみによって決まっているのならば、 v_2/ϵ は N_{part} によらず同じになるはずだが、そうはなっていない。

このことから、 v_2 を説明するには、初期の幾何学的な楕円率のみでは決まらない+ α の要素が必要で、その要素は、 N_{part} に依存していることがわかる。

まとめ (2)

- 衝突関与部の楕円率が同じなら、(衝突関与粒子)^{1/3}で v_2 はスケールする。

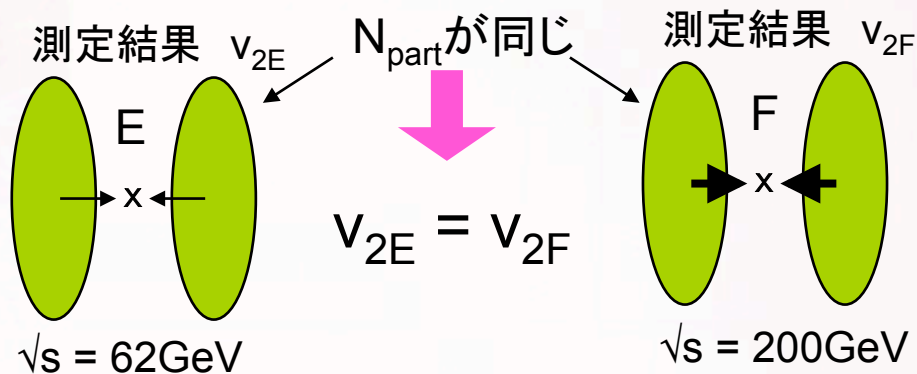


ϵ だけでなく、反応関与部の長さ ($N_{\text{part}}^{1/3}$)で規格化すると、 v_2 が一定になる。

ビーム軸方向の厚みが増え、衝突に持ち込まれる衝突関与部の楕円の単位面積当たりのエネルギーが増えるためか？

$$v_2(200\text{GeV}) = v_2(62.4\text{GeV})$$

であることより、衝突に持ち込まれる単位体積当たりのエネルギーが増えても、 v_2 は変化しないことがわかっている。

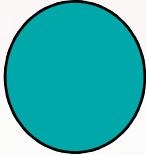






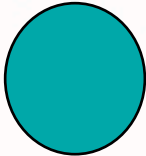








衝突関与部の N_{part} の1/3乗(長さ)に v_2 がfreeze-outするまでの時間が比例していて、その時間に比例して v_2 が発展しているのではないか。

Universal v_2

- Quark number + K_{ET} scaling
- Universal Scaling


比較表

	エネルギー	粒子種	System (CuCu, AuAu)	Size Centrality
scaling	変化なし	$n_q + K_{ET}$	eccentricity	$N_{part}^{1/3}$
AuAu 200				
AuAu 62				
CuCu 200				
CuCu 62				

 今までにわかっていること

 調べること

 わかったこと

 次回お見せします

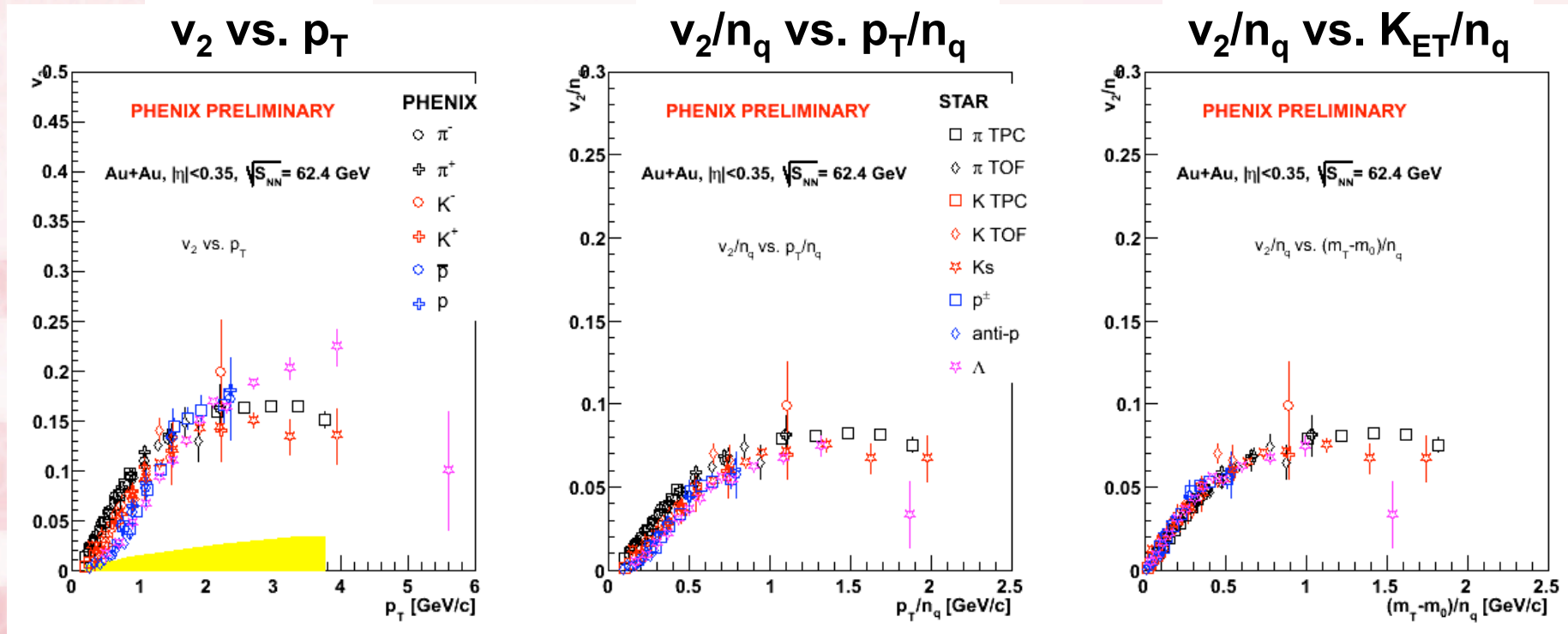
Quark number + K_{ET} scaling (AuAu 62.4 GeV)

PHENIX: Error bars include both statistical and systematic errors.

Centrality 10-40 %

STAR: Error bars include statistical errors. Yellow band indicates systematic errors.

Star results : [Phys. Rev. C 75](#)



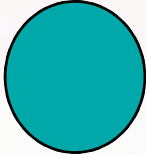






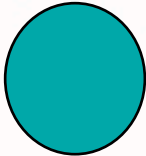





62.4 GeVでもquark number scaling + K_{ET} が成り立っている


粒子種によらず、 $v_2(p_T)/n_{\text{quark}}$ vs. K_{ET}/n_{quark} がuniversalな曲線を描く。

Scaling まとめ

- 衝突エネルギー → 変化なし
- 反応関与部の楕円率 → eccentricity scaling
- 粒子種 → $n_q + K_{ET}$ scaling
- 反応関与粒子数 → $N_{part}^{1/3}$ scaling


比較表

	エネルギー	粒子種	System (CuCu, AuAu)	Size Centrality
scaling	変化なし	$n_q + K_{ET}$	eccentricity	$N_{part}^{1/3}$
AuAu 200				
AuAu 62				
CuCu 200				
CuCu 62				

 今までにわかっていること

 調べること

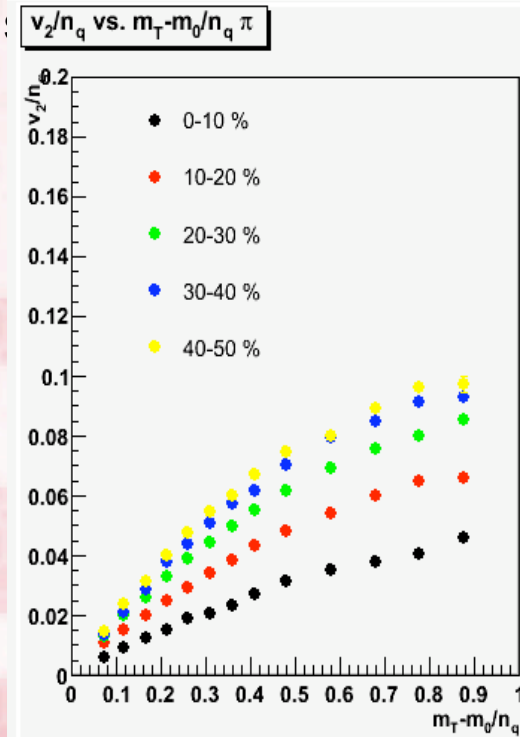
 わかったこと

 次回お見せします

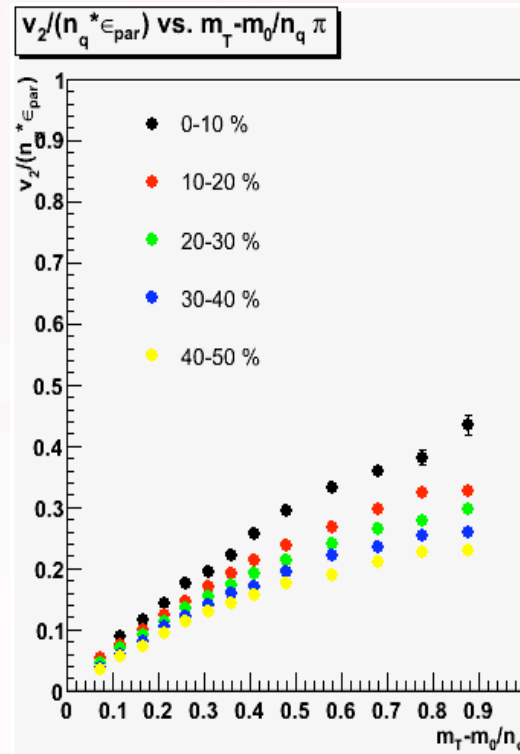
Universal Scaling

Au+Au 200GeV π

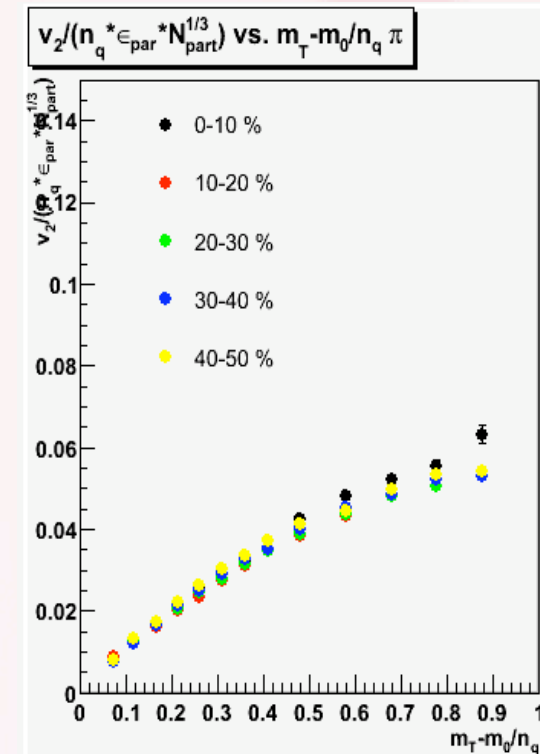
quark number + K_{ET}



+ eccentricity

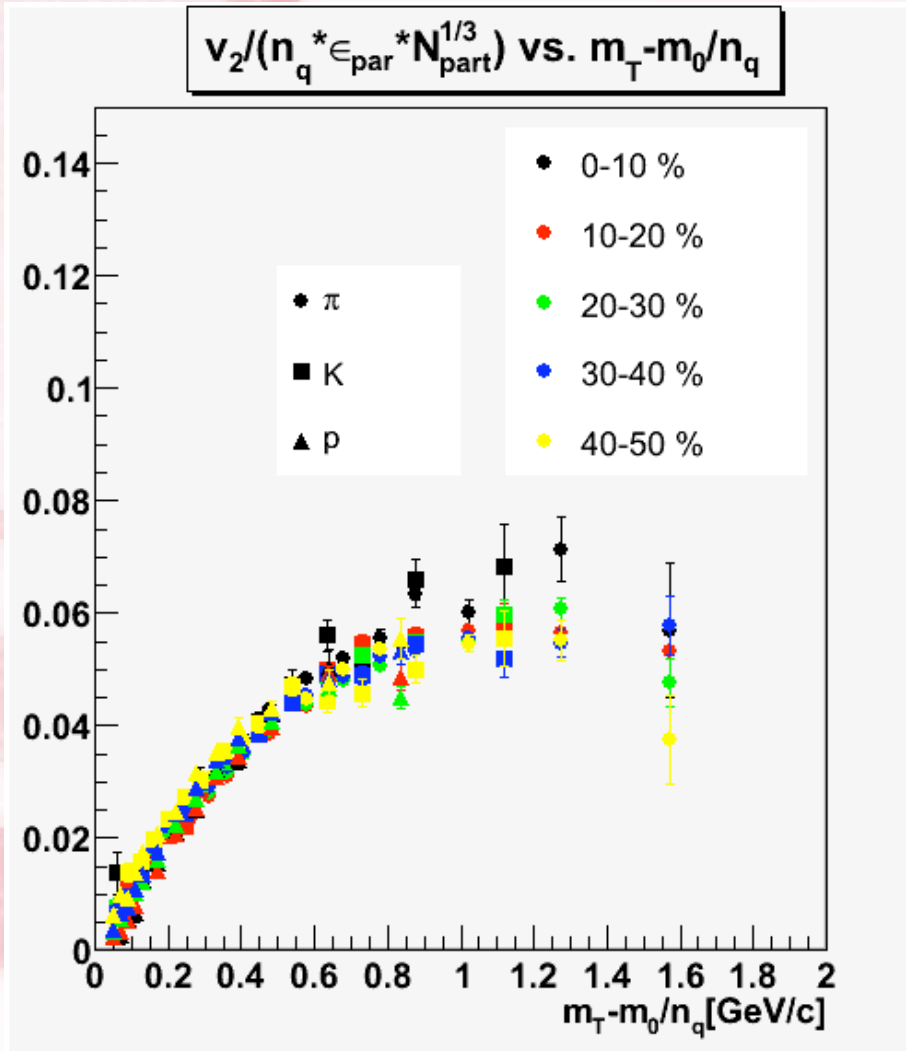


+ $N_{part}^{1/3}$ scaling



$v_2(K_{ET}/n_q)/n_q/e_{par}/N_{part}^{1/3}$ は、中心衝突度によらず一定

Universal Scaling



- ◆ Different System (Au+Au, Cu+Cu)
- ◆ Different Energy (200GeV ~ 62.4GeV)
- ◆ Different Centrality (0-50%)
- ◆ Different particles (π / K / p ...)

$$\frac{v_2(K_{ET} / n_q)}{n_q \times \epsilon \times N_{part}^{1/3}}$$

Universal Curve !!

v_2 生成・発展のまとめ

Low ~ mid p_T

時間 t

原子核衝突

衝突関与部の幾何学的異方性 ϵ が決定

熱平衡状態

ϵ から圧力勾配が決定

系の膨張

v_2 が有限の時間、発展

ハドロン化

quark の種類にはよらないで発展

この発展時間が系の大きさ(長さ)に依存して長くなり、それに比例して v_2 が大きくなる。

フリーズアウト

質量に依存したradial flowが発展

測定

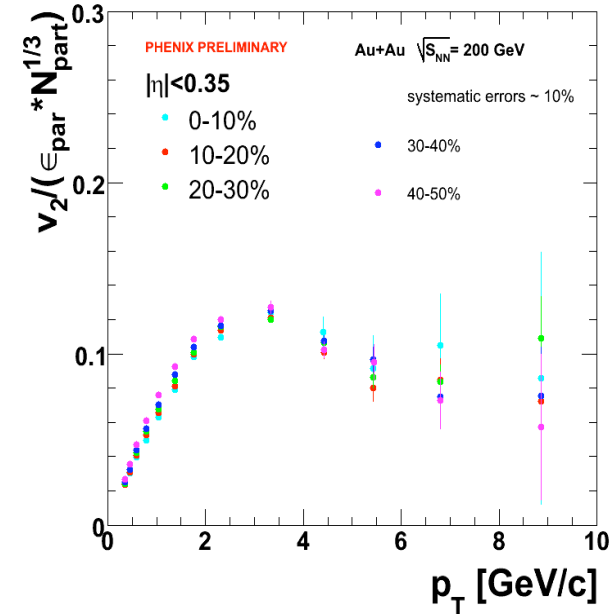
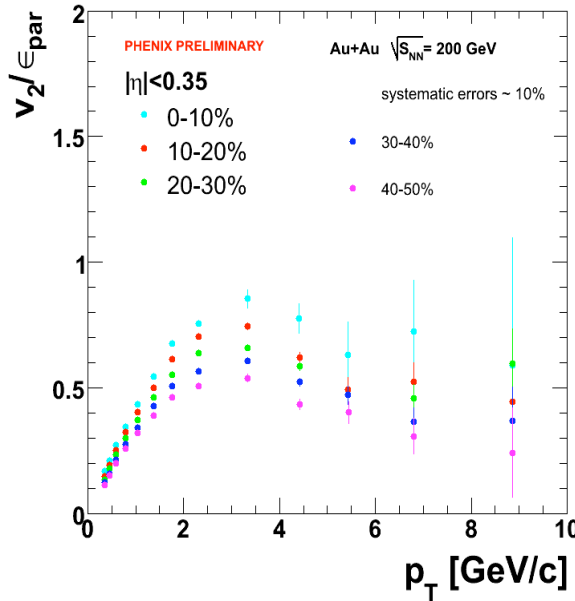
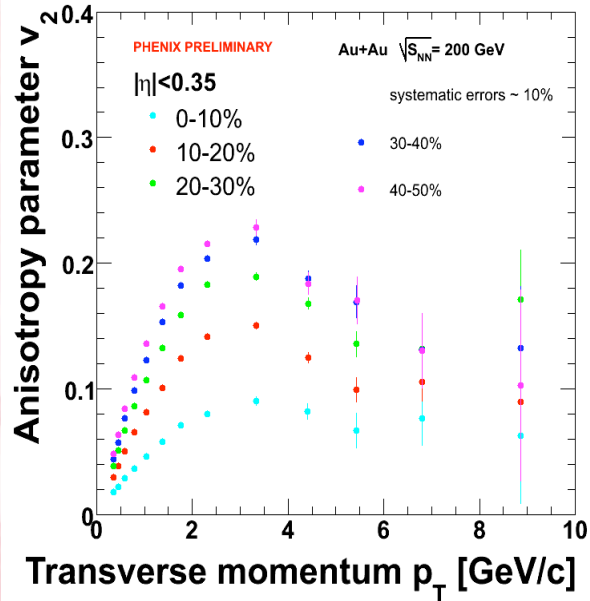
変化しない

High p_T charged hadron v_2

v_2 vs. p_T

eccentricity scaling

+ $N_{part}^{1/3}$ scaling

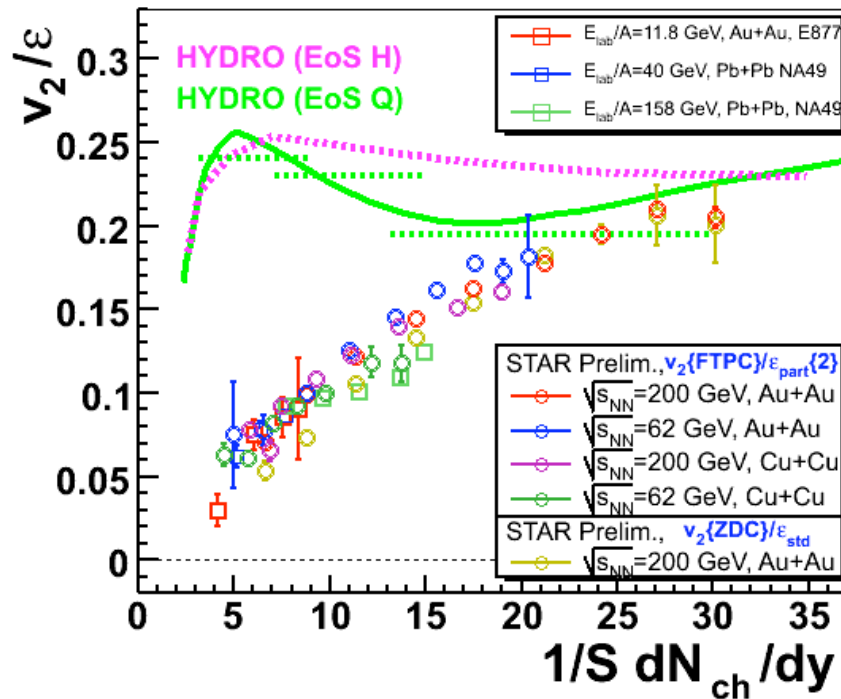


- Low and Mid p_T (~ 4 GeV/c)では、charged hadronもスケールリングが成り立っている。
- High p_T では、スケールリングが成り立っていないようにも見えるが、誤差が大きすぎてはっきりいえない。

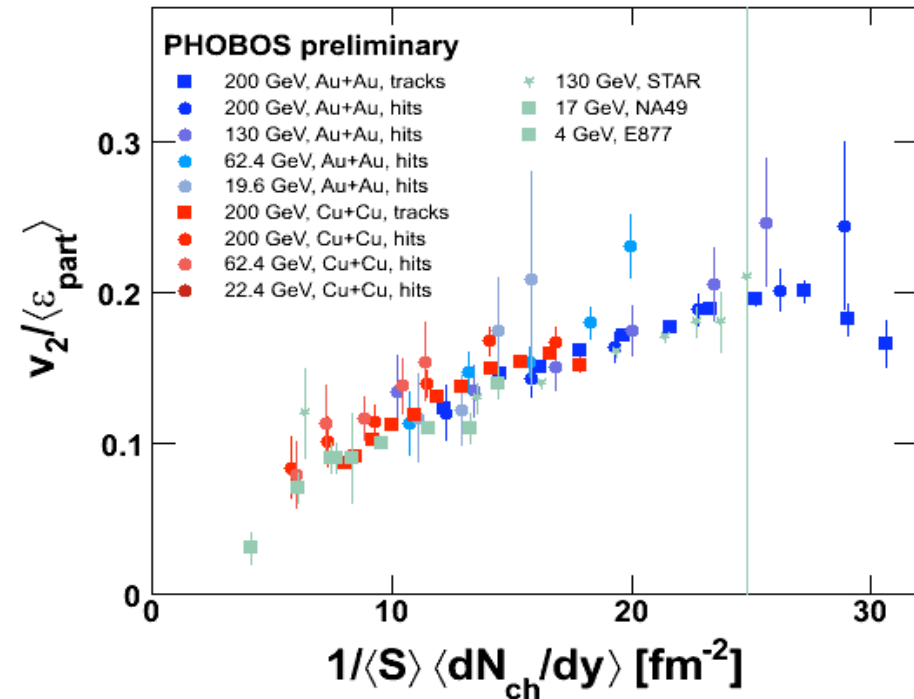
Jet quenching 効果による v_2 にこのスケールリング則が成り立つかどうかは、結論付けられない。→さらに高統計のデータ(ex.Run7)で解析する必要がある。

Scaling (他)

QM2006, S. A. Voloshin



QM2006, R. Nouicer



➤ SPS から RHICまで直線

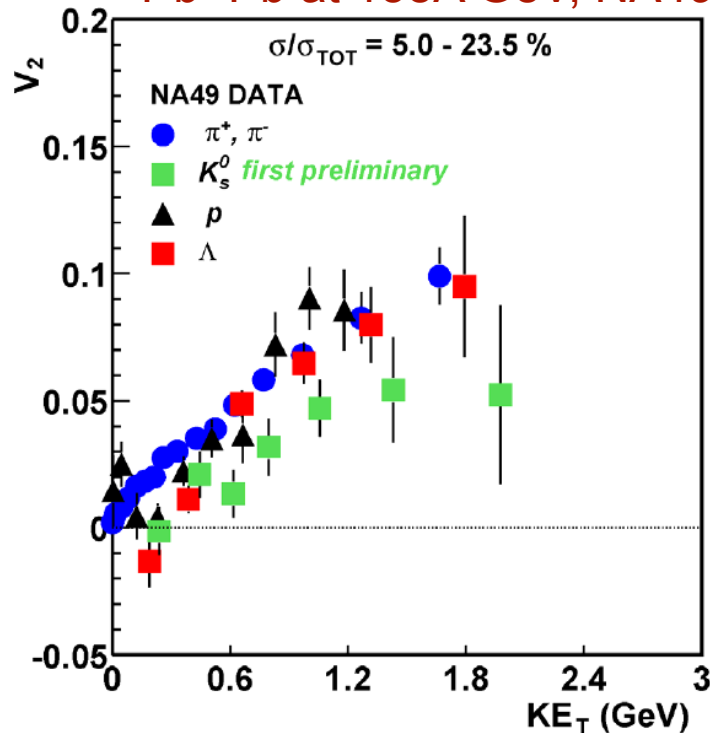
➤ 中心衝突で理想流体を仮定したhydro limitに到達している

Quark number + K_{ET} scaling (PbPb 17.2GeV)

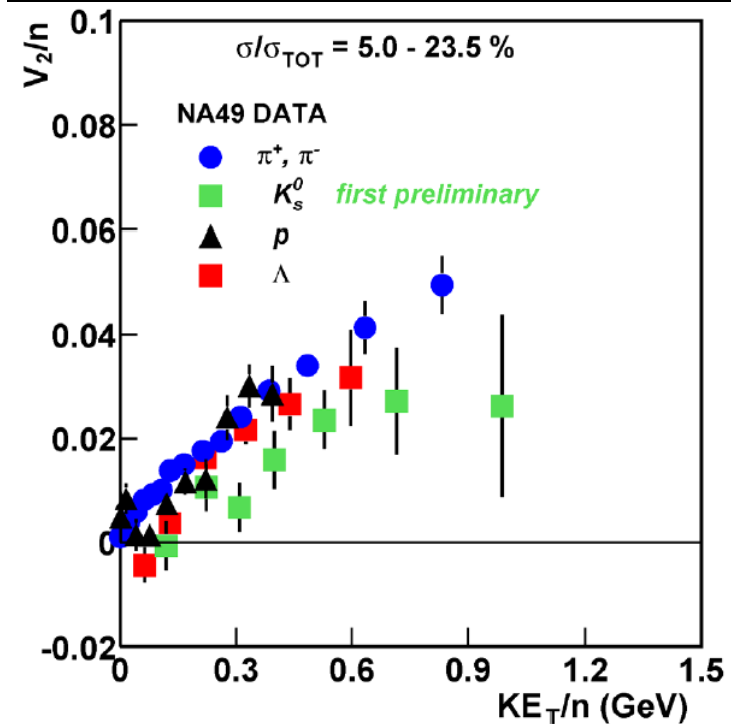
v_2 of p, π, Λ - C. Alt et al (NA49 collaboration) nucl-ex/0606026 submitted to PRL

v_2 of K^0 (preliminary) - G. Stefanek for NA49 collaboration (nucl-ex/0611003)

Pb+Pb at 158A GeV, NA49



Taken from A. Tranenko's talk at QM 2006



SPSでは、成り立っていないようにみえる

- QGPが生成されていないので、クォークレベルでの v_2 が存在しないのか。
エラーが大きすぎて結論づけられない。

Conclusion

- $\sqrt{s} = 62.4 \sim 200\text{GeV}$ では、 $v_2(p_T)$ は同じ。
- 種類の違う粒子の $v_2(p_T)$ は、quark number + K_{ET} scaling でスケールする。ハドロン化した後のクロスセクションが小さい粒子もスケールするので、 v_2 は、パートンレベル(QGP中)で決まっている。
- AuAuとCuCuの $v_2(N_{part})$ は、participant eccentricity でスケールすると、一致する。
- $v_2(p_T) / \epsilon_{par}$ は、 $N_{part}^{1/3}$ に比例している。
 - $v_2(K_{ET}/n_q)/n_q/e_{par}/N_{part}^{1/3}$ は、**Universal Curve**を示す。

v_2 は、初期の幾何学的な異方性だけでなく、それとフリーズアウトまでの時間とで、きまっている。

流体力学モデルの時間発展をおうことが重要。

Direct photon analysis

Inclusive photon

Direct γ

Hadron decay γ

hard scatter

$$v_2 = 0$$

Jet Brems.

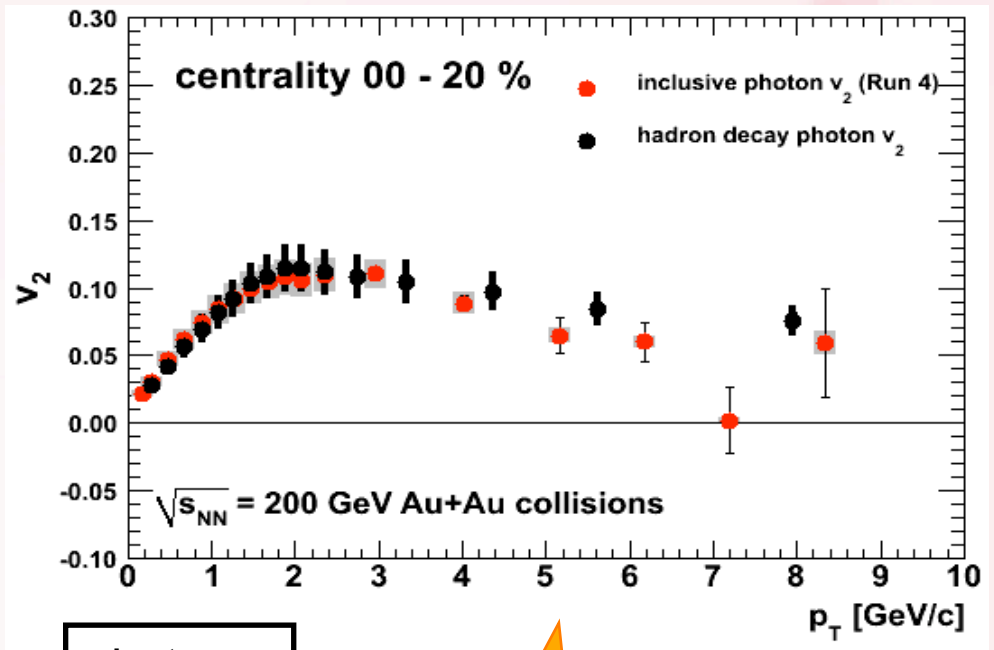
$$v_2 < 0$$

Jet Fragment

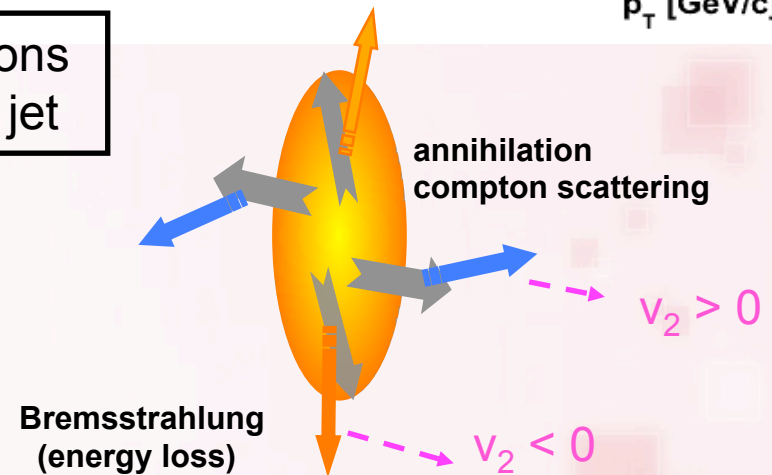
$$v_2 > 0$$

sQGP

$$v_2 \geq 0$$



photons from jet



Direct photon analysis

Direct photon v_2 at 200GeV Au+Au (Run4)

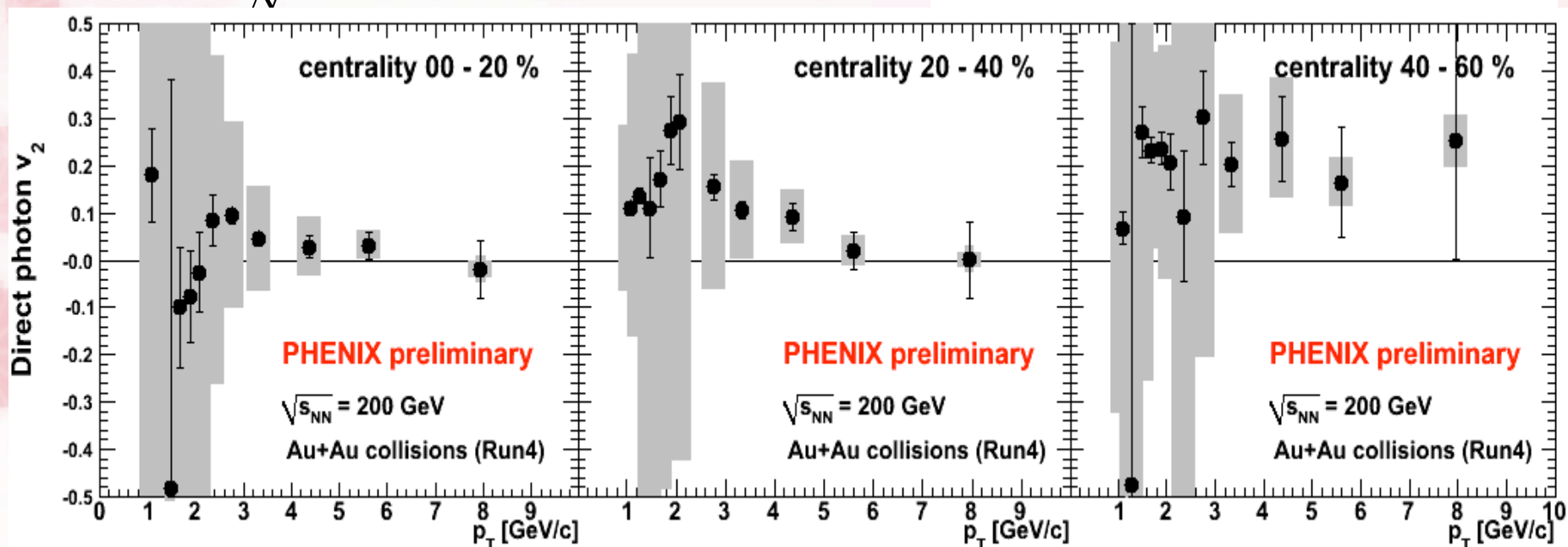
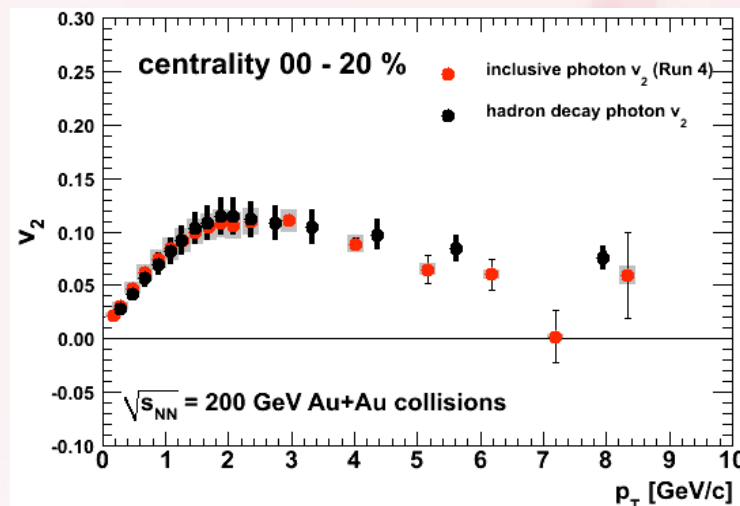
Above to 4GeV/c, equal to 0 ?

In 3 to 4 GeV/c region is Non-zero v_2 ??

Centrality dependence ???

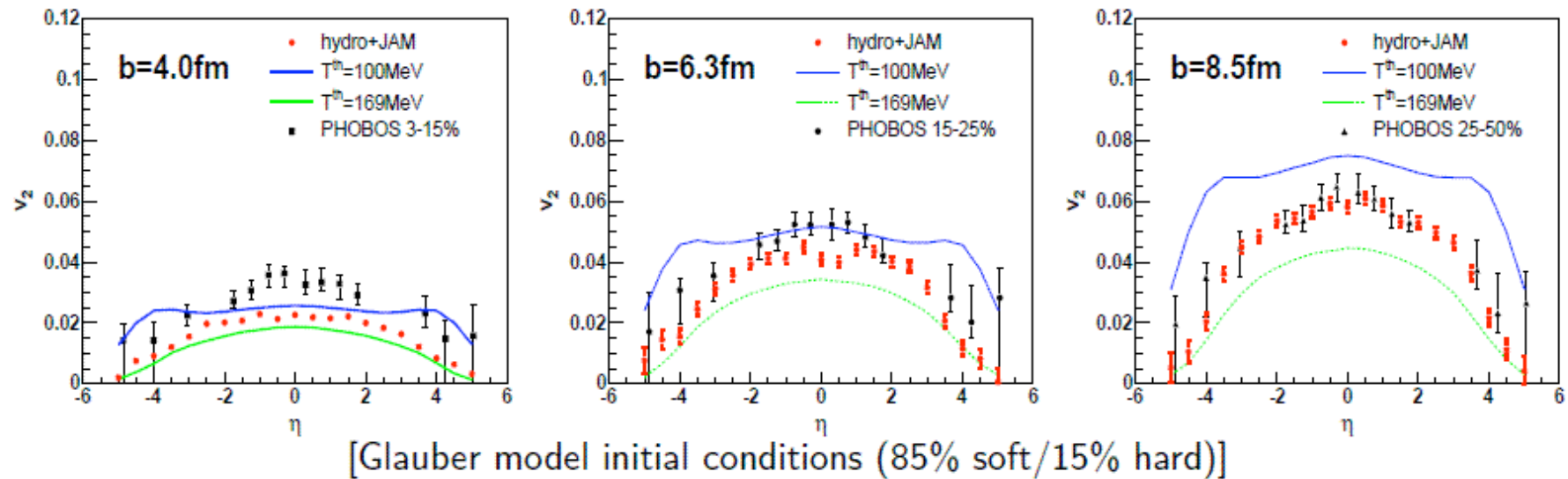
$$v_2^{dir.photon} = \frac{R * v_2^{inc.photon} - v_2^{BG_photon}}{R - 1}$$

$$R = \frac{N^{inc.photon}}{N^{BG_photon}}$$



Rapidity dependence

T. Hirano, U. Heinz, D. Kharzeev, R. Lacey, Y. Nara, PLB 636 (2006) 299



- ラピディティー方向の v_2 を説明するには、QGP流体だけでなくハドロン化した後の散乱が重要になる。

LHCで v_2 を測る楽しみ(1)

☆上がるか下がるか、予測してみよう！

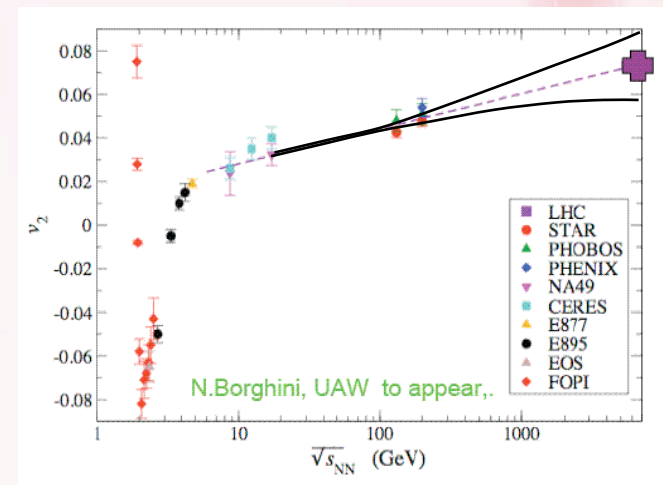
•先ほどの結論から予測すると、、、エネルギーが大きくなると、フリーズアウトまでの時間が長くなるので、 v_2 は、上がる？

•ハイドロリミットに近いとすると、 v_2 は、変わらない？

•大きくエネルギーがあがると、衝突初期のエネルギー密度が上がるので、平均自由行程が長くなり(相互作用がちいさくなって)、 v_2 は下がる？仮にその状態が存在したとしても時間が短く、あまり影響しない？

•流体でなくなる可能性は？

•そもそも物質の状態方程式が変わるかもしれないので、そうなると、圧力勾配が v_2 に変換される変換率が変わるので、 v_2 は変化する？相互作用がより強くなり、 v_2 は上がる？

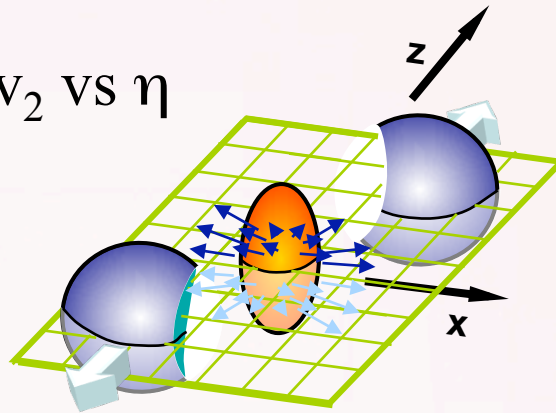


LHCで v_2 を測る楽しみ(2)

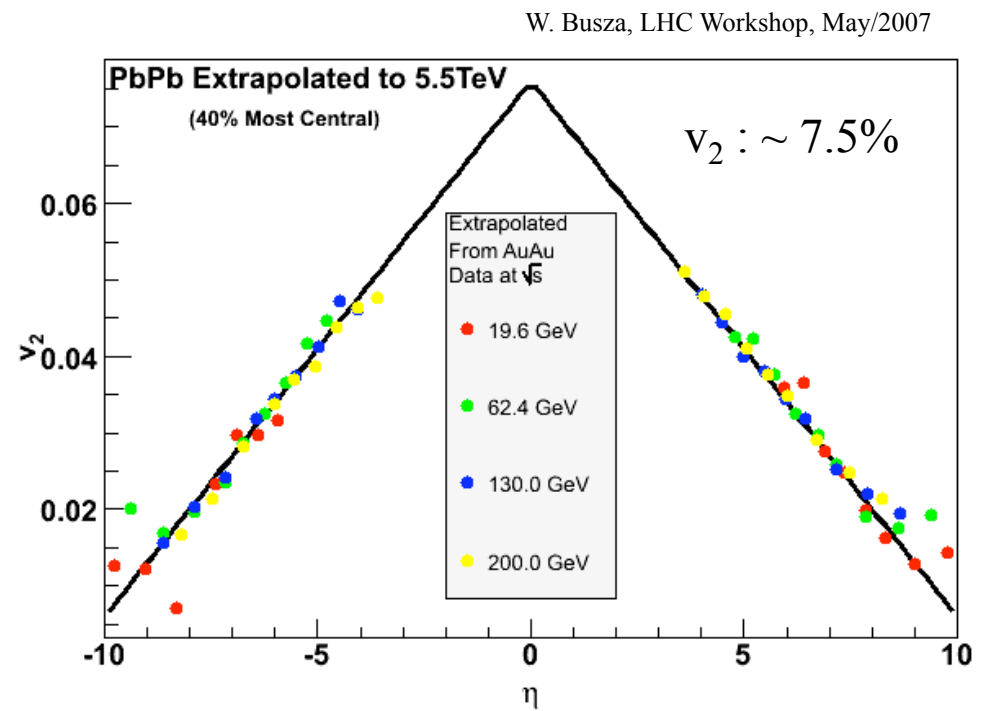
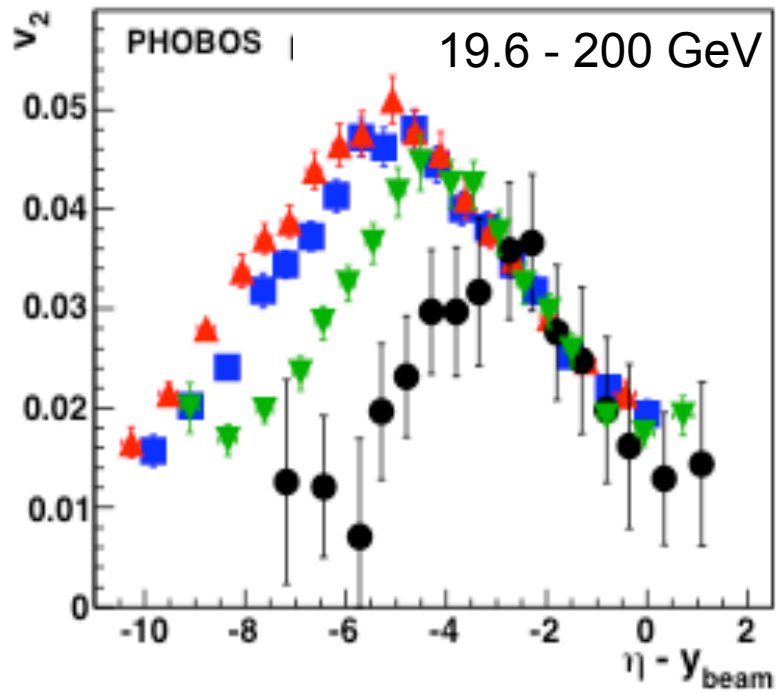
☆新しくわかることは、なにか。

- エネルギー密度があがり、charm、bottom、や j/ψ などの重い粒子がRHICに比べて多くできるので、それらの v_2 を測定し、recombination modelがなりたてば、クォークは同じようにフローしていることがわかる。
- LHCのエネルギーでは、ジェットが増えるので、ジェット抑制による v_2 について、調べられる。
 - v_2 が流体起源かジェット起源かを識別することがますます重要。
- ジェットフラグメントからくる光子は v_2 をもっている。衝突で飛び出すプロンプト光子は、ランダムなので、 v_2 を作らない。高いptでは、光子とハドロン v_2 を比較することにより、ジェットについて調べることができる。
- 今までの規則が成り立つかどうかを調べることも重要。

Elliptic flow: v_2 vs η

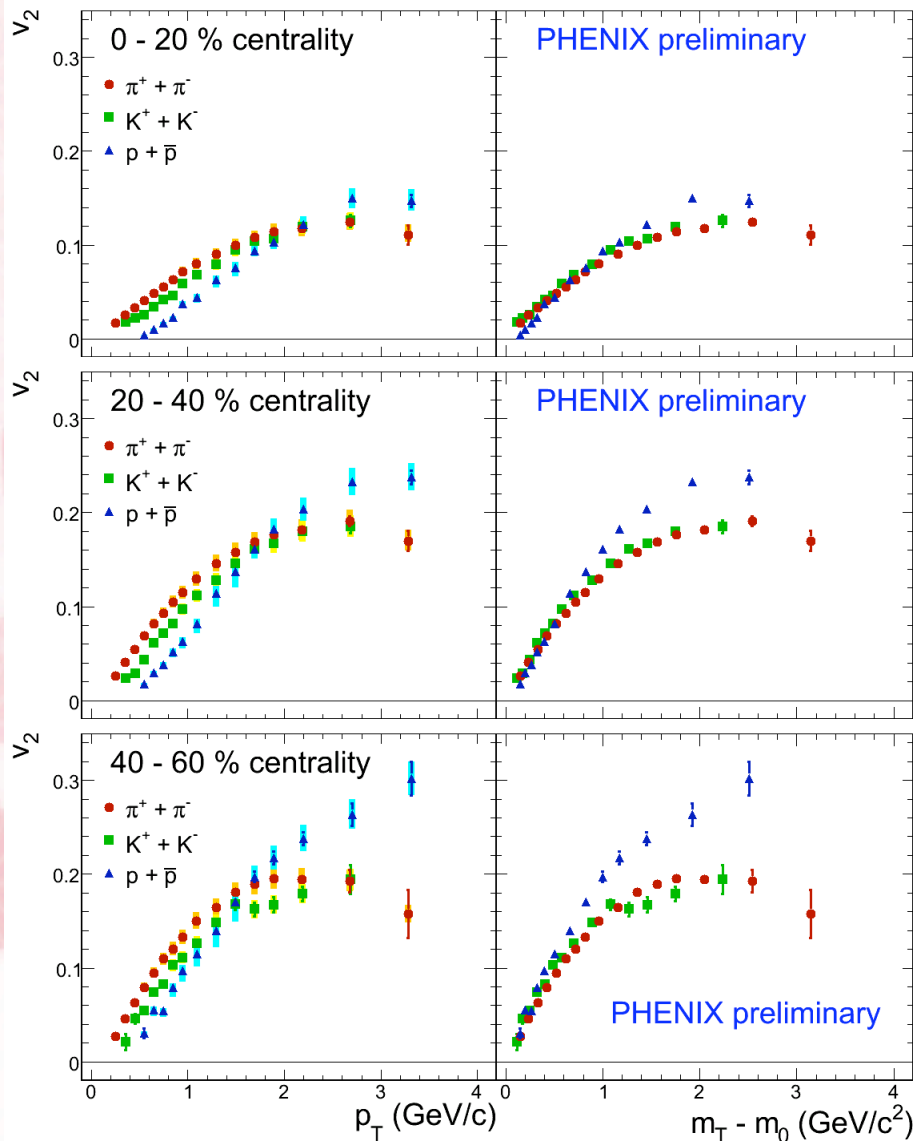


これまでの測定から推測すると、LHCでのmid rapidity での v_2 は増える？



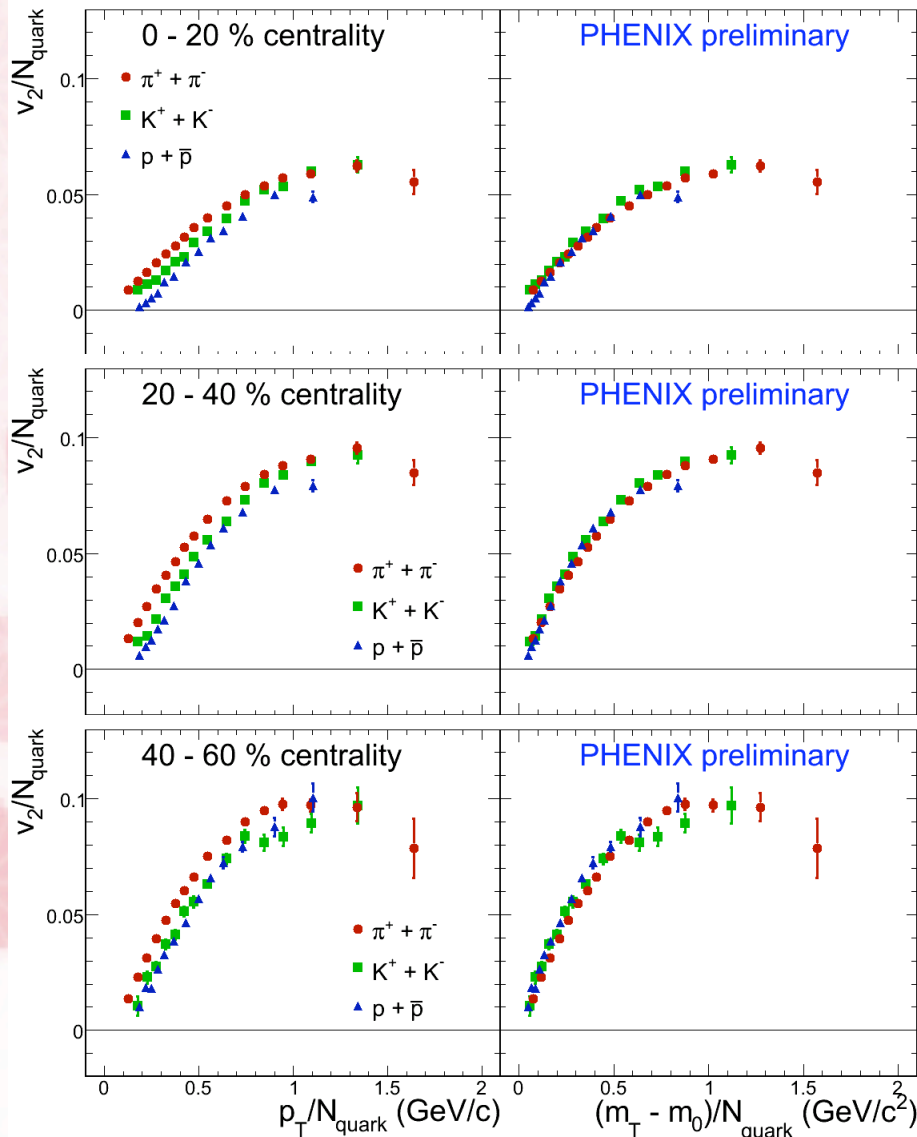
Back Up

“ m_T scaling” of v_2



- $v_2\{\text{BBC}\}$ for identified hadrons
- At low p_T , m_T scaling of v_2
 - Radial flow leads mass ordering of v_2
- Meson-Baryon grouping at intermediate p_T
 - Quark coalescence, recombination

NCQ scaling of v_2



$$v_2^h(p_T) \approx N_q \times v_2^q\left(\frac{p_T}{N_q}\right)$$

➤ NCQ scaling indicate the collective flow evolves in quark level

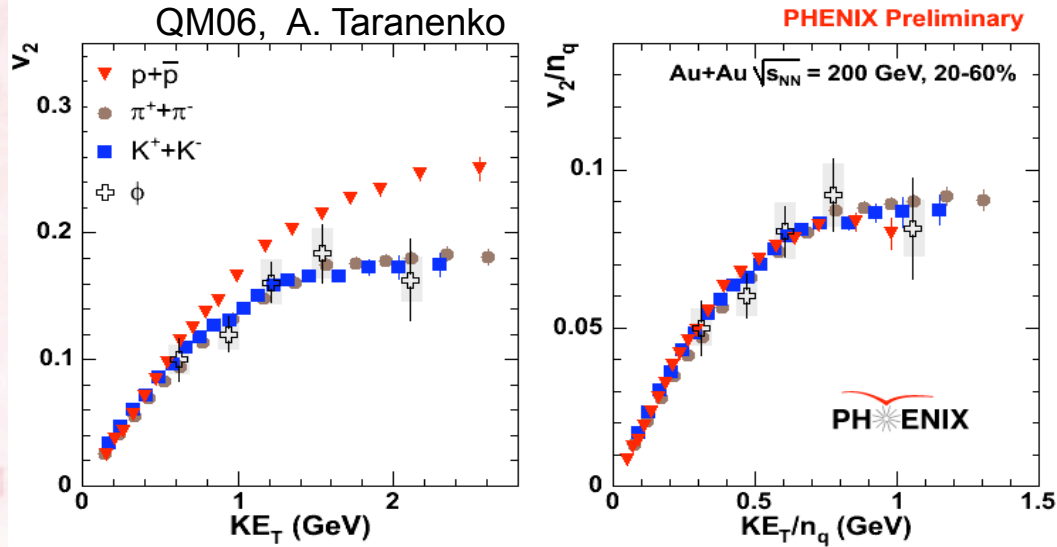
➤ Number of Constituent Quark scaling by quark coalescence / recombination model

➤ Assumption

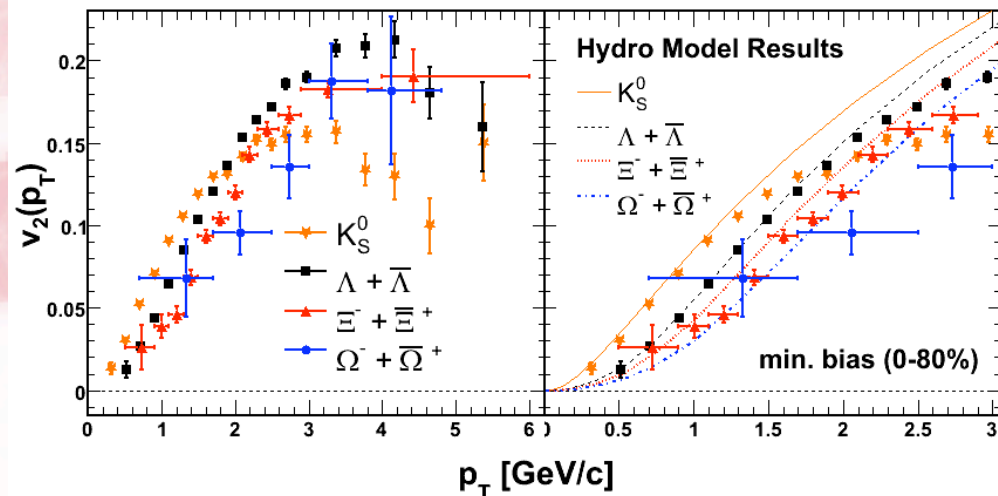
- Exponential p_T spectra
- Narrow momentum spread (δ -function)
- Common v_2 for light quarks (u, d, s)

R. J. Fries, et., al, Phys. Rev. C68, 044902 (2003)
V. Greco, et., al, Phys. Rev. C68, 034904 (2003)

Multi-strange hadrons



- ϕ meson v_2 is more consistent with meson v_2 than baryon v_2
- Show sizable v_2
 - Collectivity at pre-hadronic stage, s-quark flow



4-1. Direct photon analysis

Inclusive photon

Direct γ

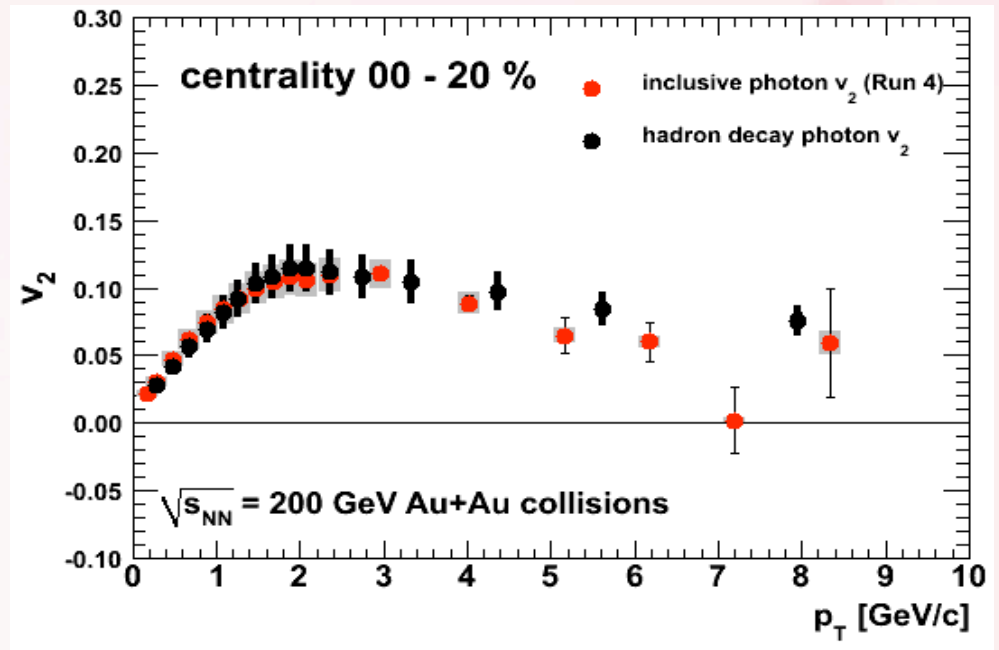
Hadron decay γ

hard scatter

Jet Brems.

Jet Fragment

sQGP



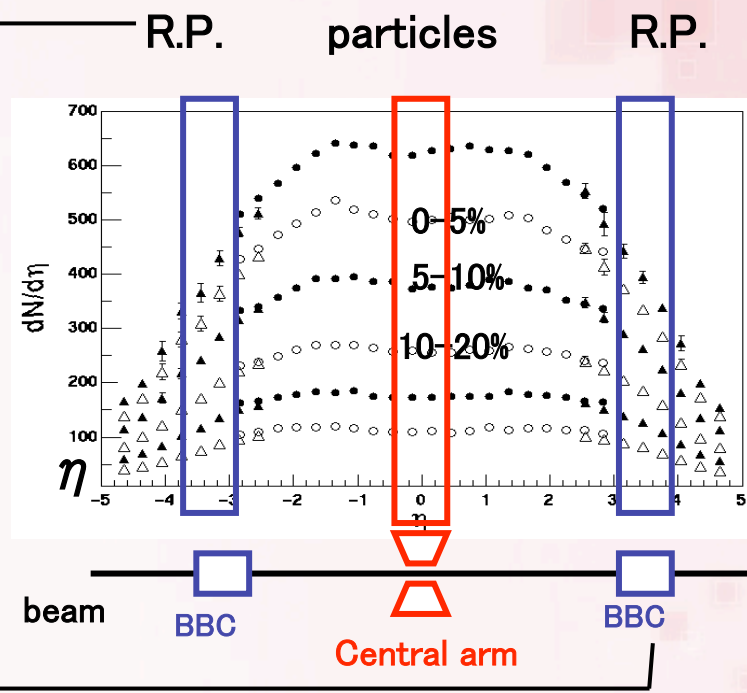
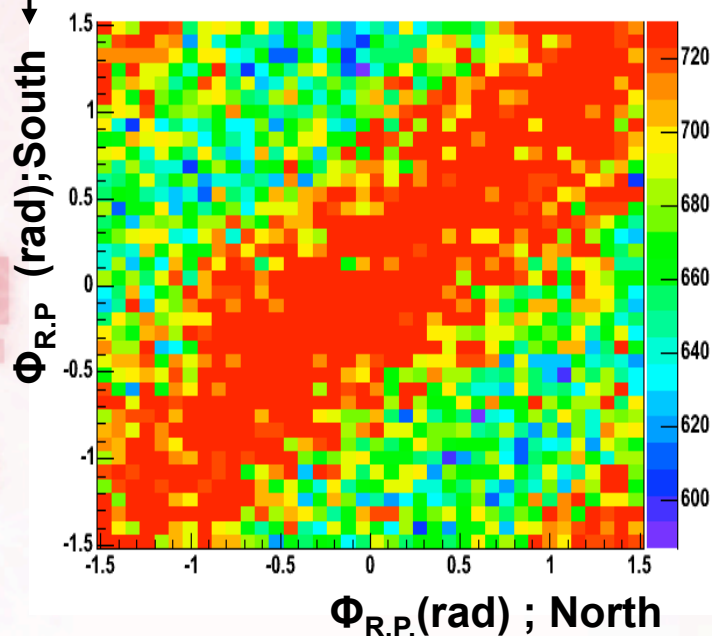
The v_2 is sensitive to the initial geometric overlap zone and pressure gradient. Therefore, direct photon v_2 is considered to depend on the production processes of photons.

Reaction Plane

実験的にimpact parameterを決めることができないので粒子の ϕ を用いて反応平面を決定

$$\tan 2\phi_{RP} = \frac{\sum w_i \sin(2\phi_i)}{\sum w_i \cos(2\phi_i)}$$

* v_2 はその分解能で補正する。



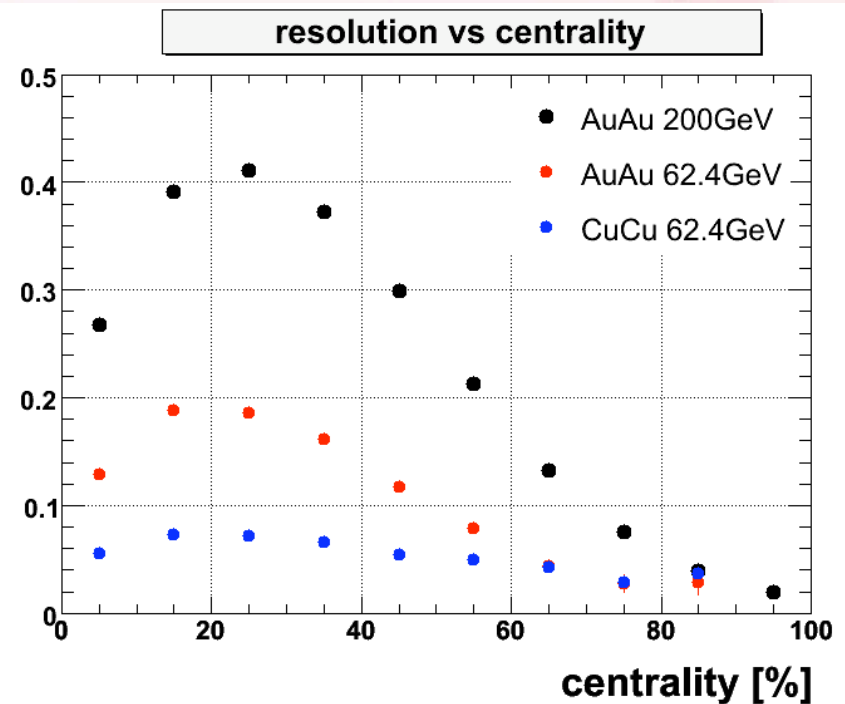
南北にある二つのBBCで測定 ($0 < \phi < 360, |\eta| \sim 3-4$)
別々に決めた反応面に相関 → 測定できている。

Resolution Calculation of Reaction Plane

$$resolution = \langle \cos[2(\Psi_{measured} - \Psi_{true})] \rangle \sim \sqrt{\langle \cos[2(\Psi_A - \Psi_B)] \rangle}$$

$\Psi_{A,B}$: reaction plane determined for each sub sample.

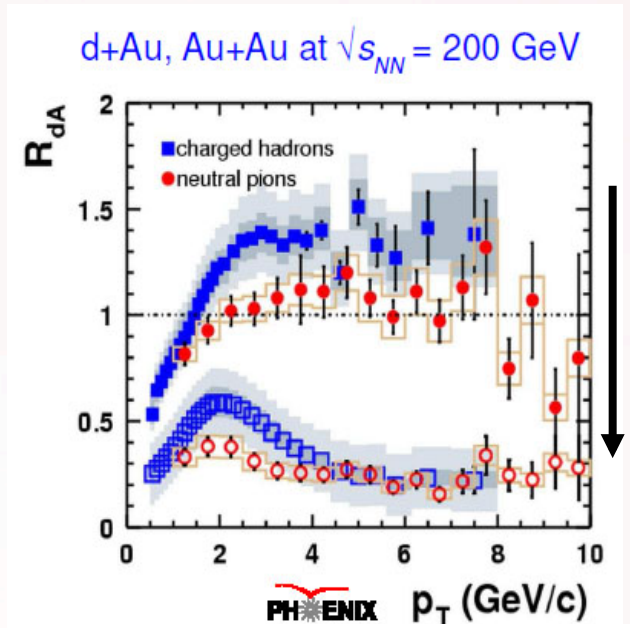
$$v_2^{real} = \frac{v_2^{measured}}{resolution}$$



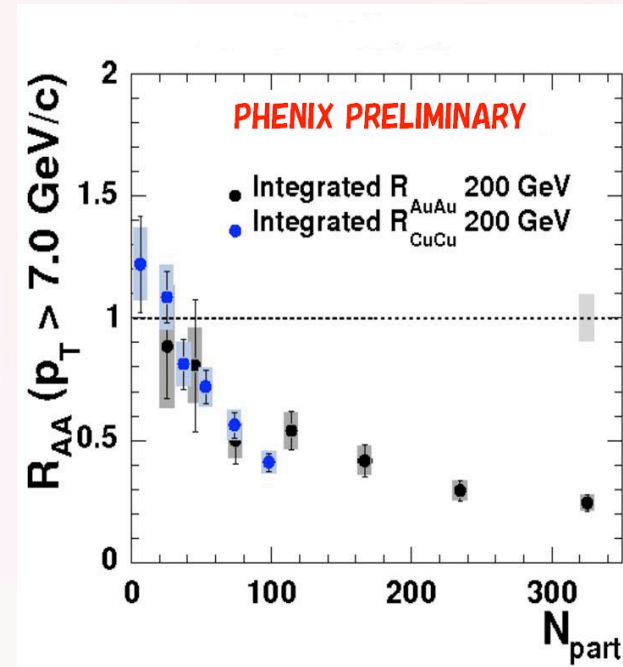
- BBC North + South combined
- $\sqrt{(2 \cdot \langle \cos(2 \cdot (\Psi_S - \Psi_N)) \rangle)} = 1/\text{correction factor}$

$N_{part}^{1/3}$ scaling 補足

金+金、 $\sqrt{s} = 200\text{GeV}$

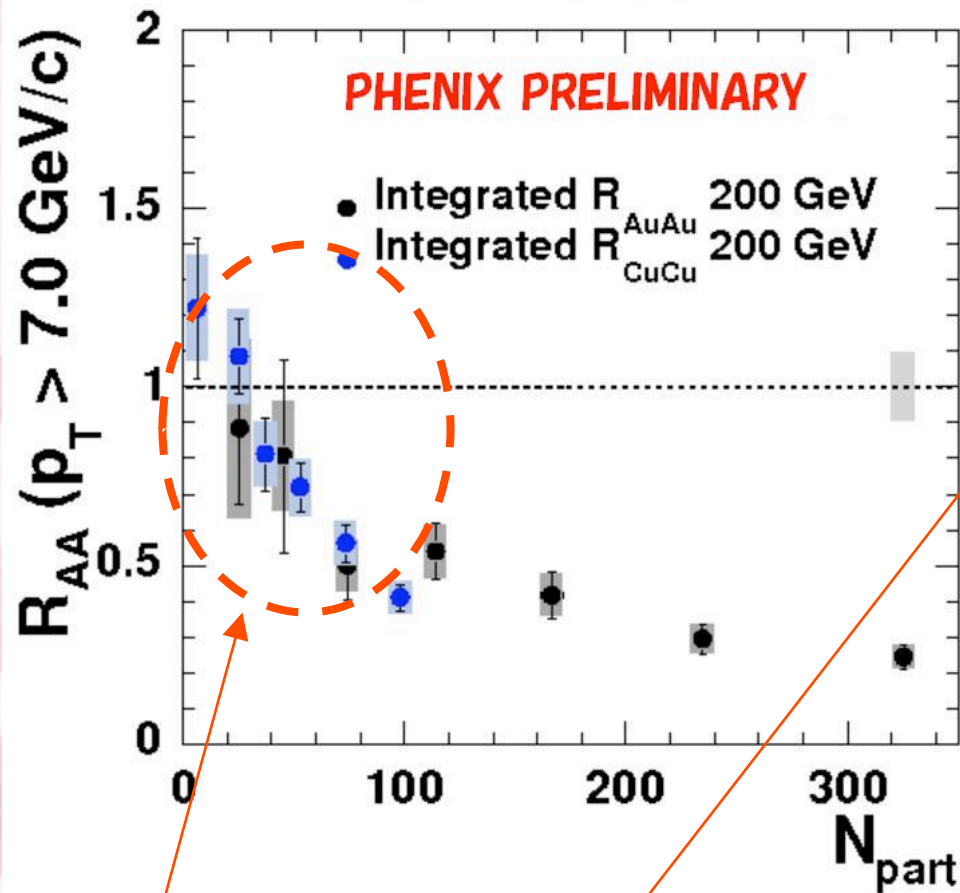


R_{AA} --- p+pの重ね合わせで規格化した値。抑制がなければ、1になる。

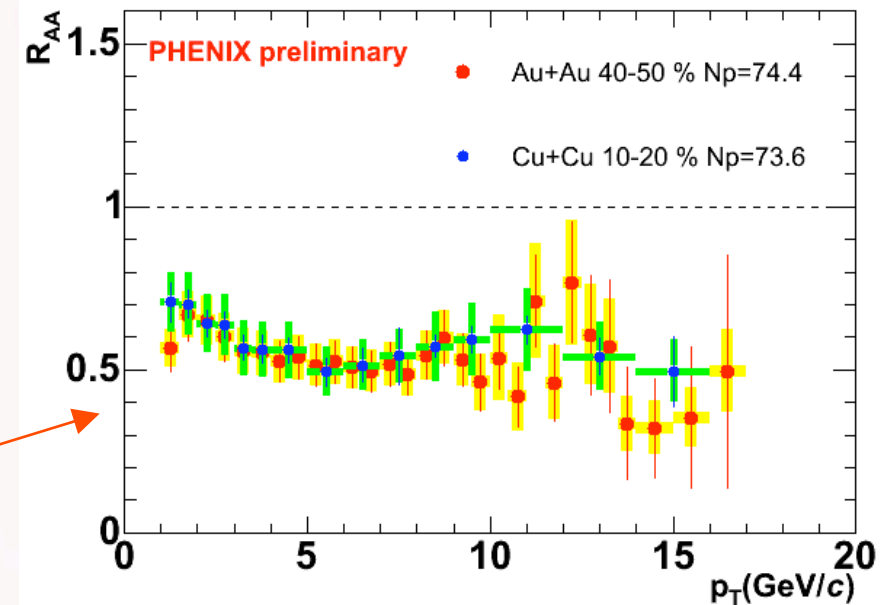
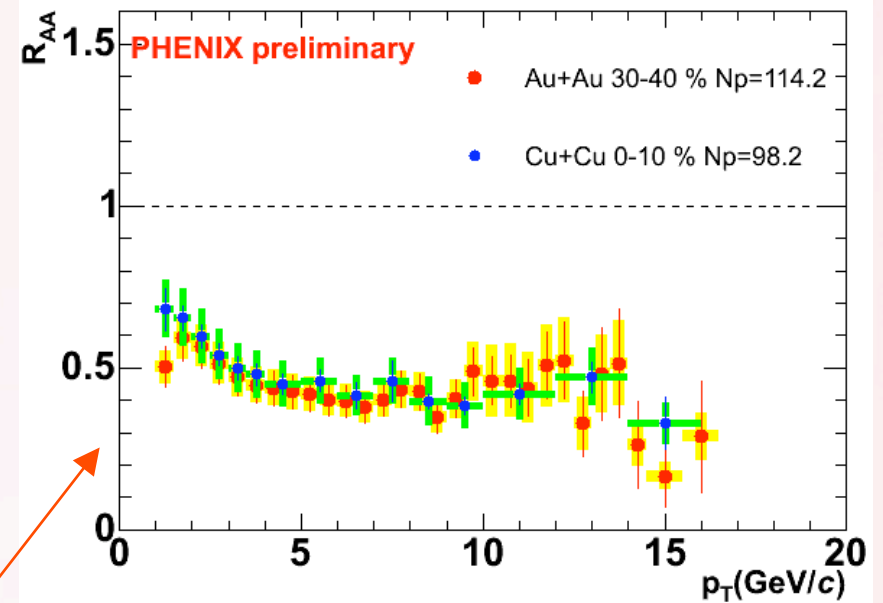


スペクトラ解析からわかる抑制の強さは、systemによらず、 N_{part} が同じなら同じぐらいの値を示す。(Au+AuとCu+Cuの比較) $\rightarrow N_{part}$ で規格化すると一致する。

Comparison between Au+Au and Cu+Cu



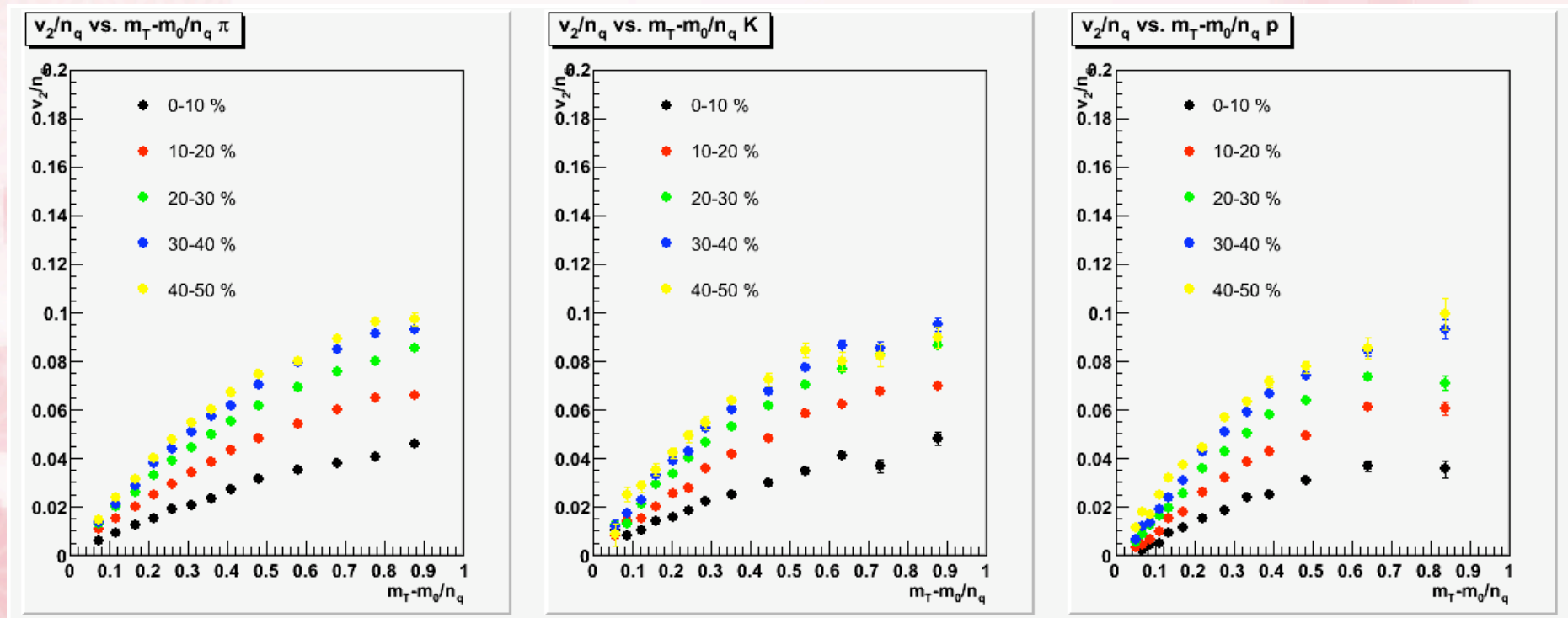
Both behave same at mid central.



Centrality dependence

Au+Au, 200GeV, PID by EMC

Apply quark number and KET scaling.

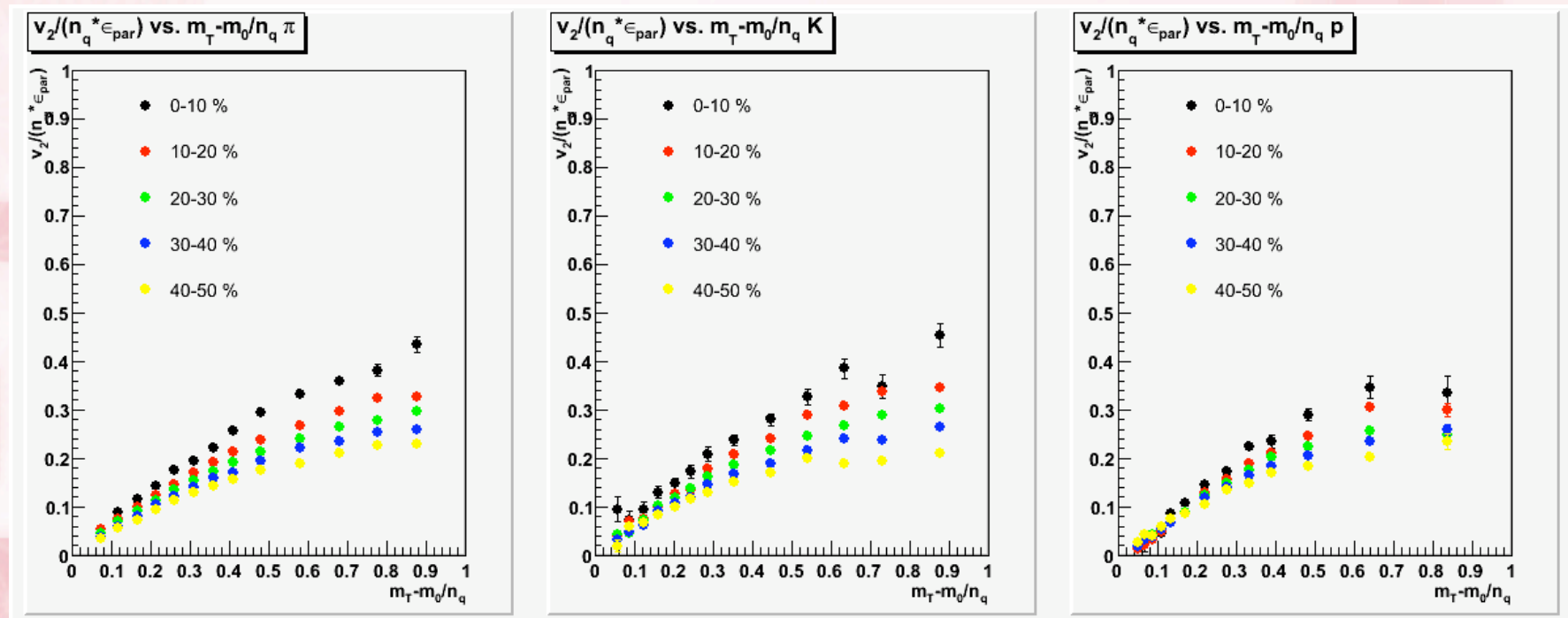


Centrality
dependent.

Centrality dependence

Au+Au, 200GeV, PID by EMC

Apply quark number + KET scaling and eccentricity scaling.

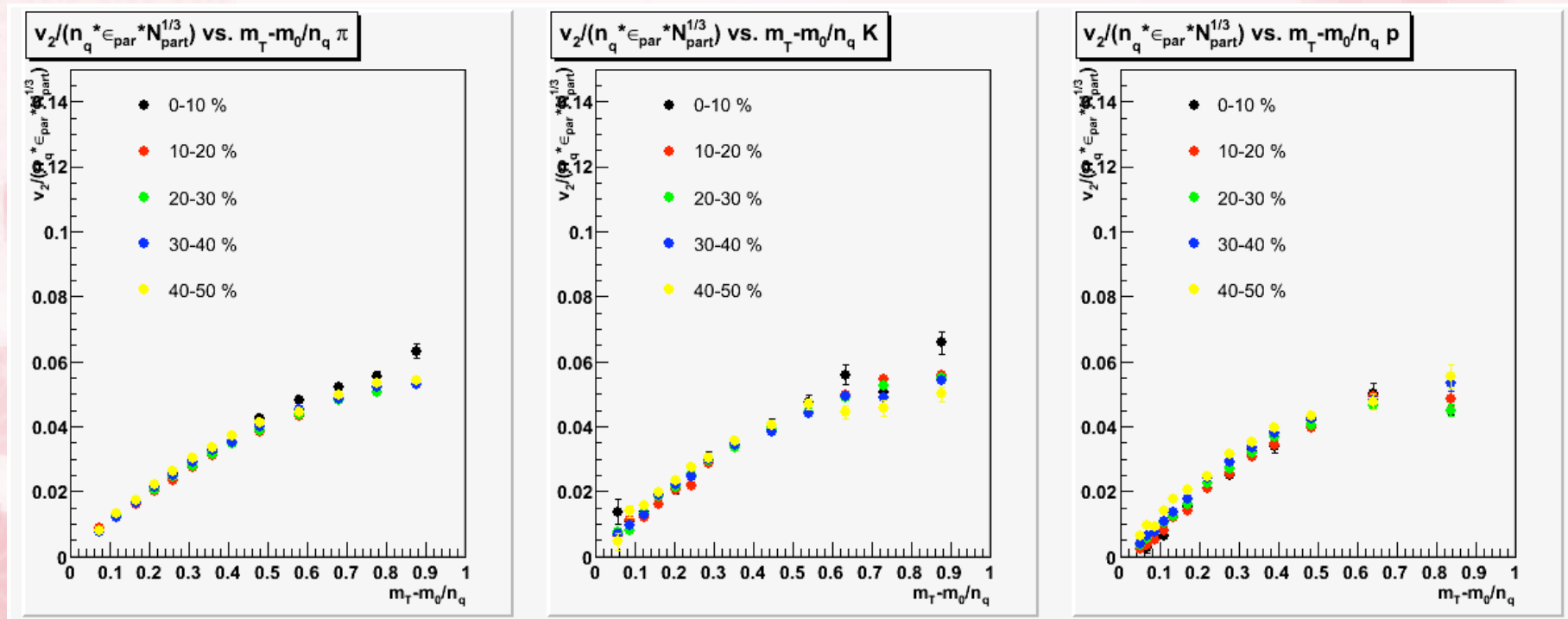


Still centrality dependent remains. Larger v_2 at central collision.

Centrality dependence

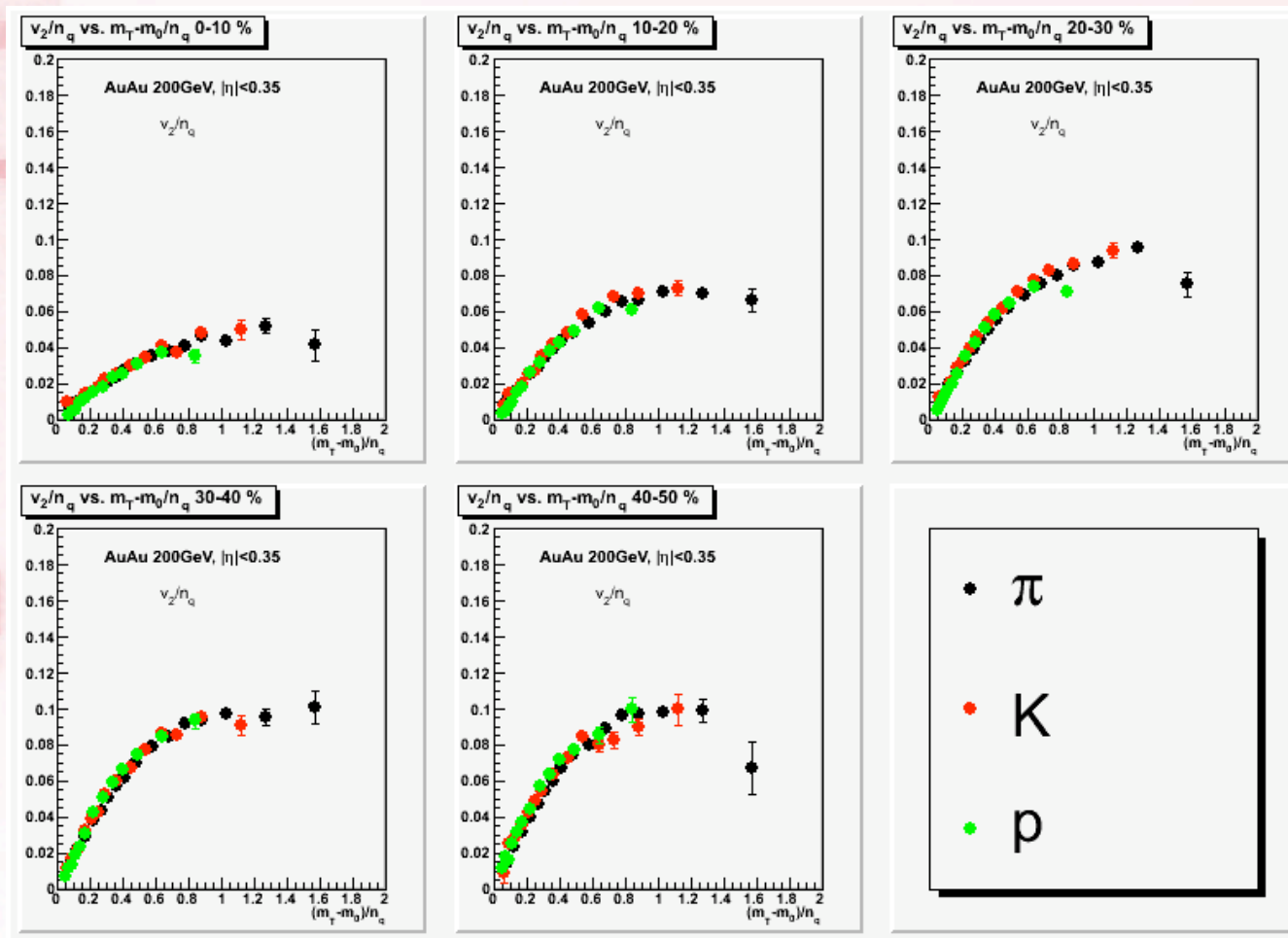
Au+Au, 200GeV, PID by EMC

Apply quark number + KE_T scaling, eccentricity scaling and $N_{part}^{1/3}$ scaling.



Almost consistent within errors at low KE_T .

Quark number + K_{ET} scaling (AuAu 200GeV)



➤ 中心衝突度によらず成り立っている。