

Detection of the multi-parton interactions (MPI) producing the minimal quark gluon plasma (QGP)



下村真弥 (奈良女子大)



コンテンツ

- 高エネルギー原子核実験とQGPの概要
- 方位角異方性の測定とこれまでの実験結果
- 小さい衝突系でのQGP生成起源の検証
- まとめ

クォーク・グルーオンプラズマ (QGP)

クォークとグルーオン (パートン)

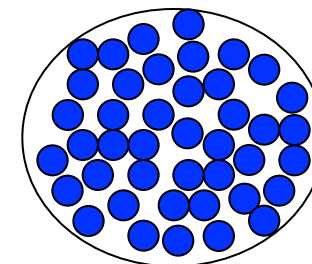
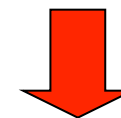
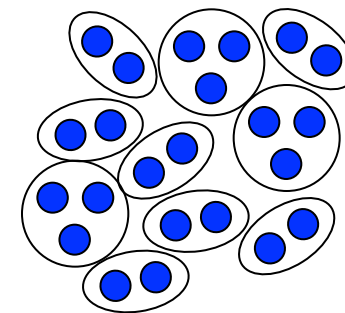
- 陽子・中性子などのハドロンの構成要素
- 量子色力学 (QCD) で記述され、遠距離になると相互作用が大きくなる(強い力)。
- 単独では観測されておらず、ハドロン内では閉じ込め状態にある。



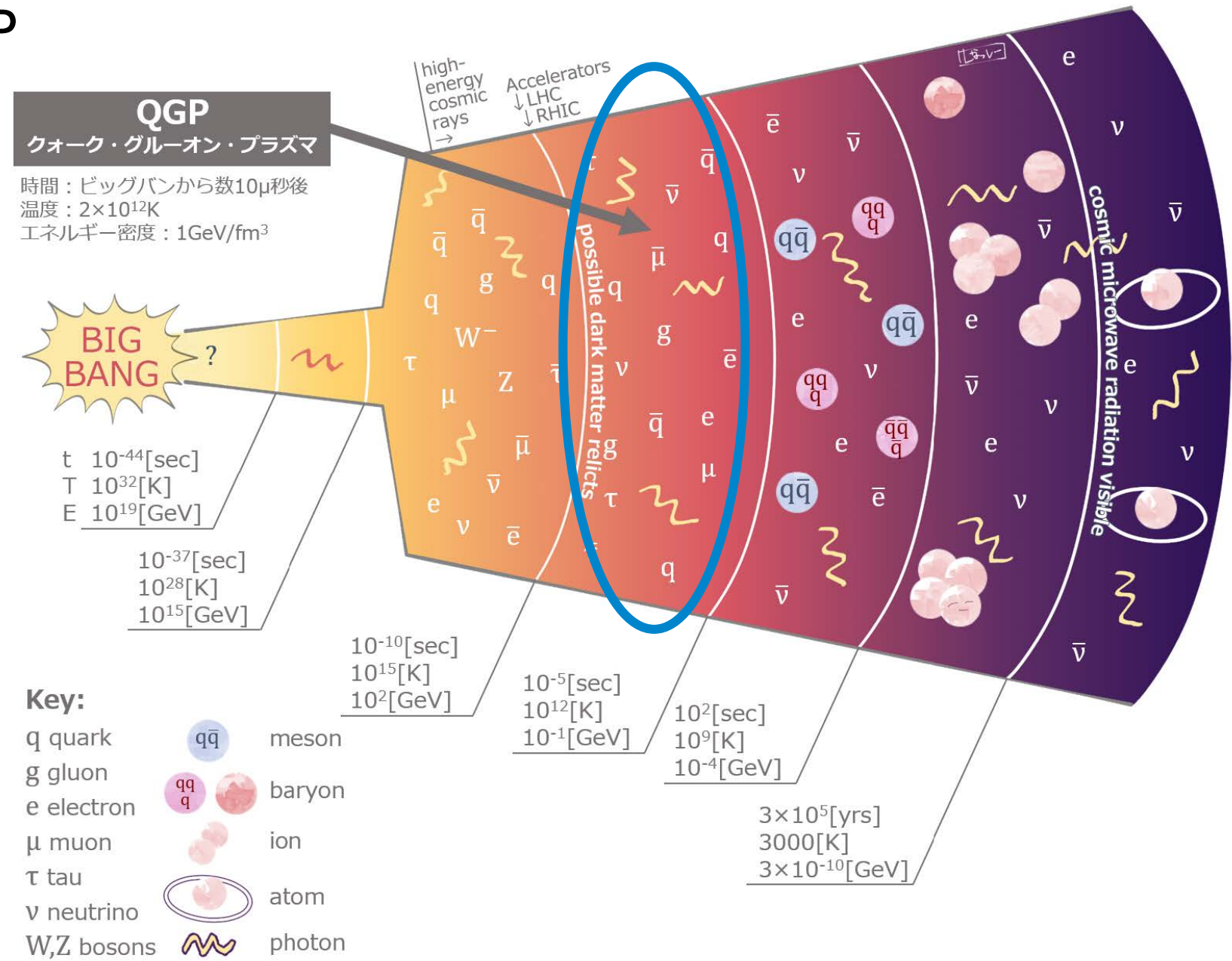
高温高圧にすることによって密度が5~10倍
($T_c \sim 170 \text{ MeV}$) 以上の状態を作り出せたとする
と・・・

クォーク・グルーオンが自由に動ける違う物質相 (QGP) になる。

このような高温高密度状態を実験室で作りだすために高エネルギー重イオン同士の衝突による方法が提案され、相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC・LHC) が建設され研究が進められてきた。



宇宙の歴史とQGP



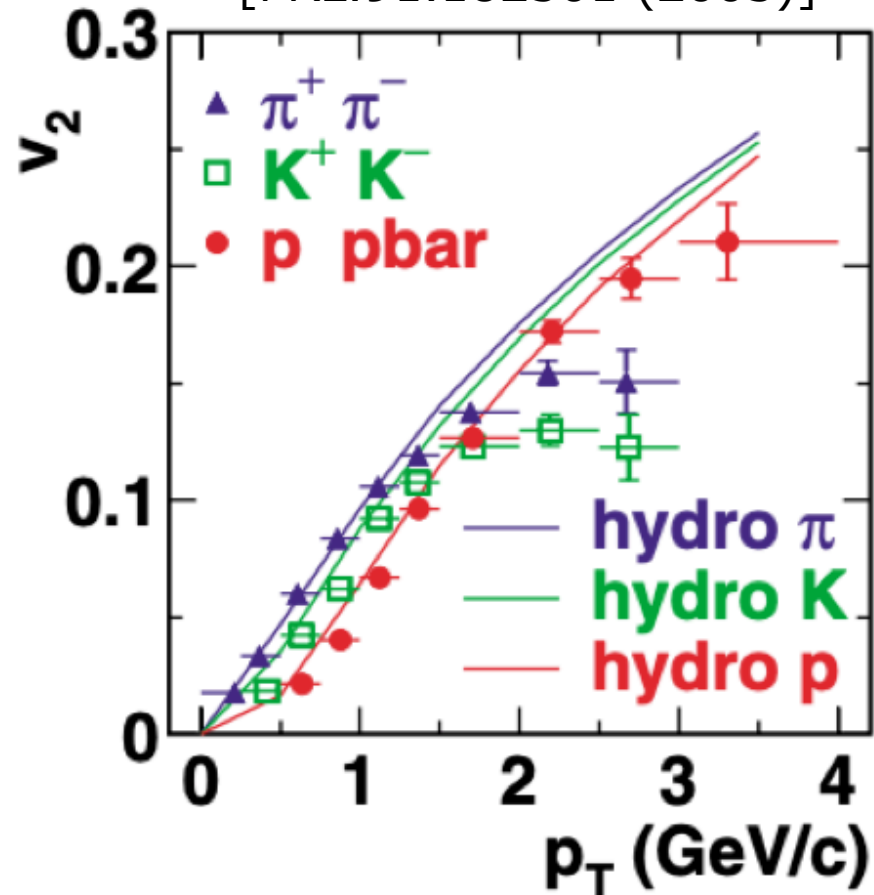
実験の概要

大型加速器で光速近くまで加速した重い原子核同士を正面衝突させて、超高温物質（クォーク・グルーオン・プラズマ QGP）を生成し、その性質を調べる

粒子識別した荷電ハドロン v_2

PHENIX実験

[PRL.91.182301 (2003)]



RHIC実験では様々な粒子の v_2 が測定され、大きな値を示している

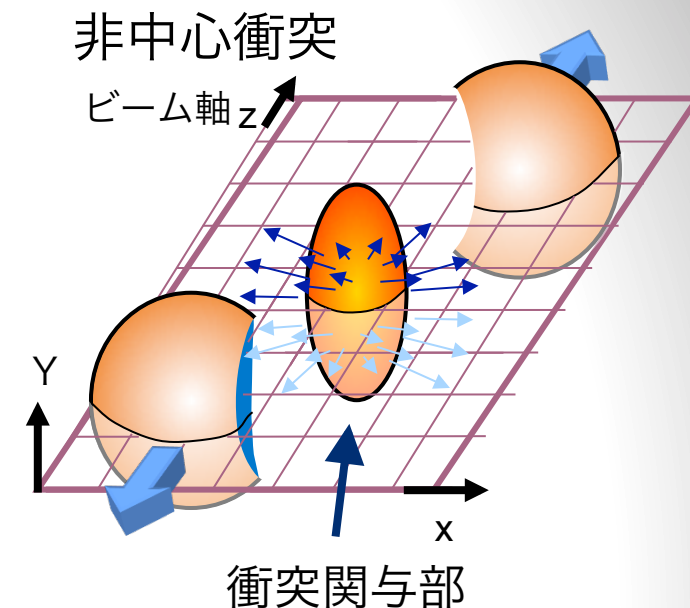
→流体力学モデルで説明。

強結合QGPができている証拠の一つ

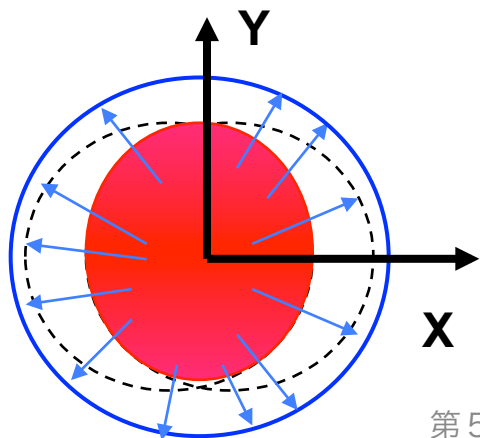
生成物質の検証：方位角異方性

衝突関与部は、初期の幾何学的異方性をもつ

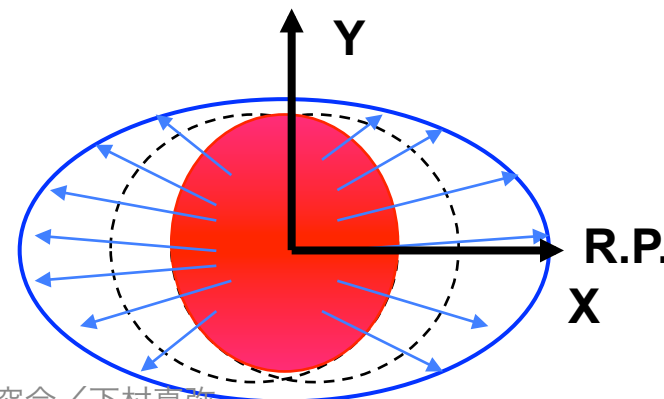
- 粒子の平均自由行程 (λ) が衝突関与部の半径 R より十分大きければ、相互作用せず、粒子は等方的に広がる。→自由ガスの
- λ が R より十分小さければ、系が局所的熱平衡に達して圧力勾配をうむ→流体的



$\lambda \gg R$; 等方的(Isotropic)

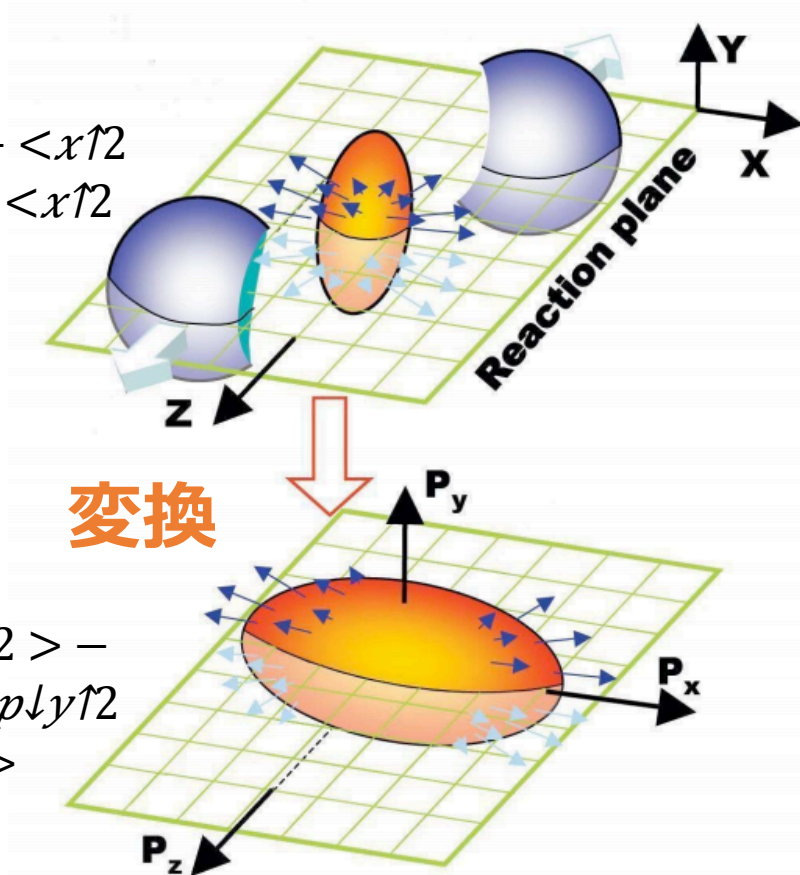


$\lambda \ll R$; 異方的(anisotropic)

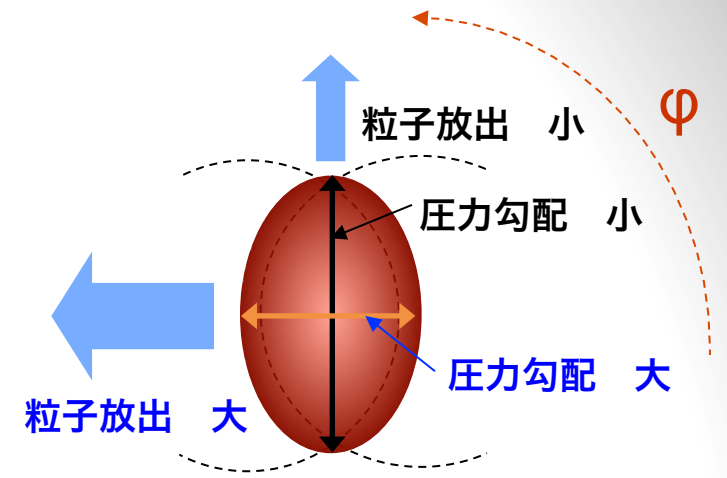


楕円的方位角異方性 v_2

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



$$v_2 \propto \frac{\langle p_y^2 \rangle - \langle p_x^2 \rangle}{\langle p_y^2 \rangle + \langle p_x^2 \rangle}$$



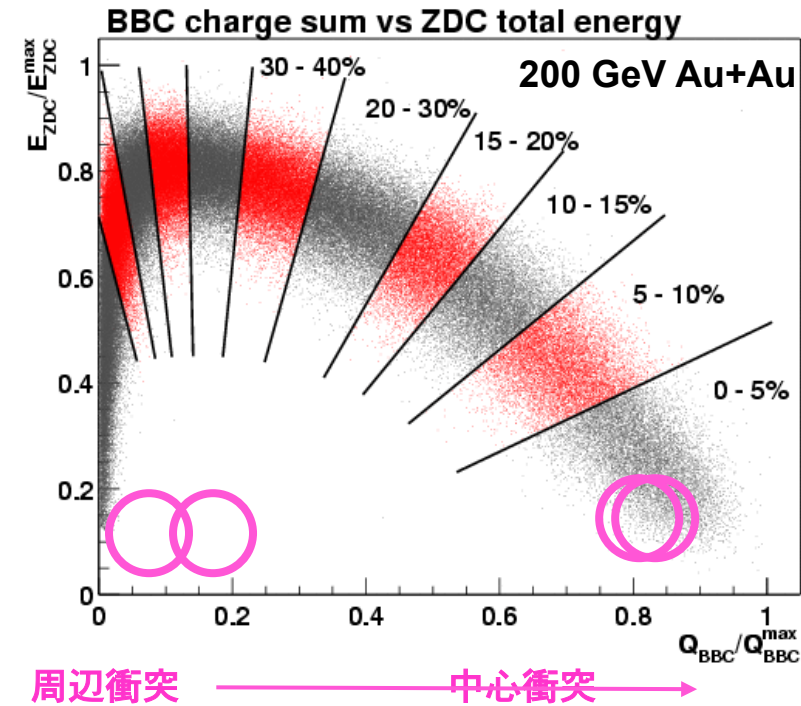
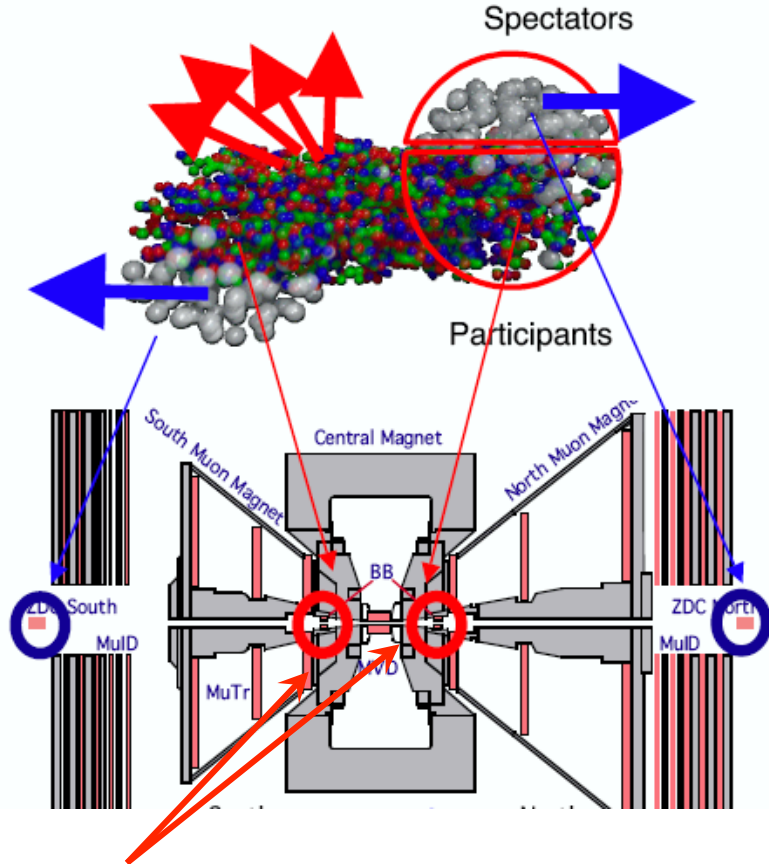
$\lambda \ll R$ なら、幾何学的な異方性 ϵ が運動量空間での異方性 v_2 に変換

生成粒子の方位角分布をフーリエ展開
- 2 次の係数 v_2 が有限になる

$$dN(\phi)/d\phi = N_0(1 + 2v_2 \cos 2\phi)$$

有限 v_2 の原因となる粒子の集団運動を **楕円フロー** と呼ぶ

中心衝突度 (Centrality)



BBCで**粒子多重度**（衝突で発生した粒子数）を測る。

どのくらい原子核同士が中心が近かったか = Centrality [%],

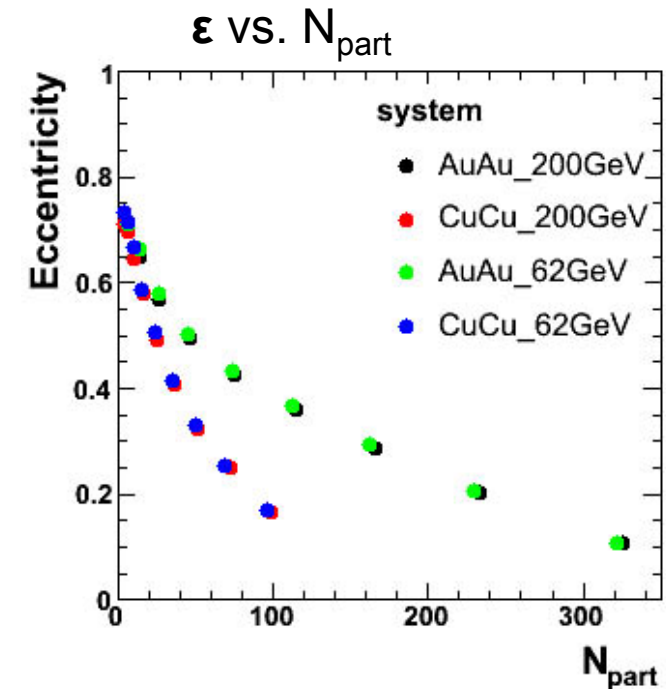
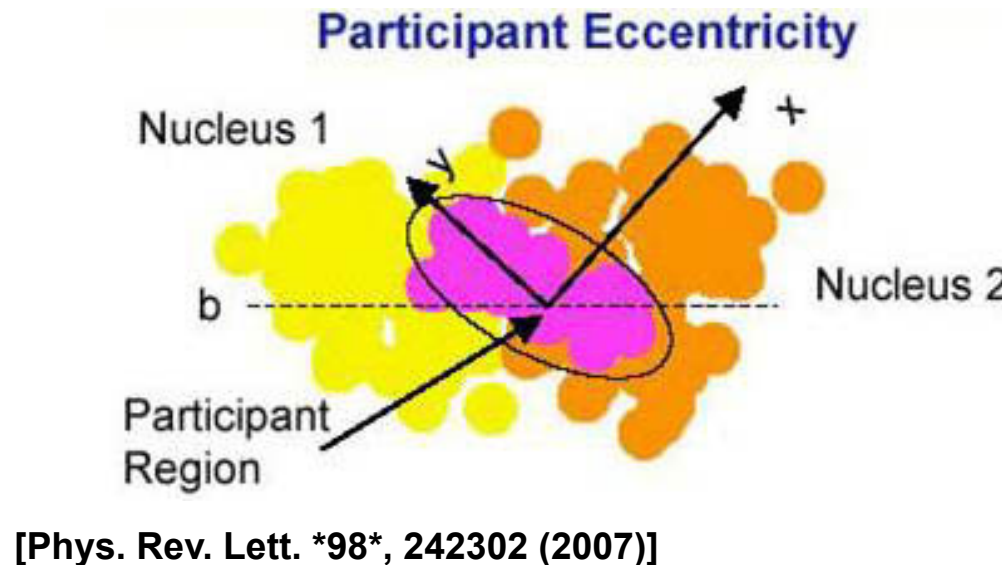
衝突に関与した核子の数 = N_{part}

衝突時の楕円率 (Eccentricity, ϵ)

原子核をwood-Saxon 型でGlauber model を使って発生させて衝突させる、Monte-Carlo simulation により求める。

衝突に関与した粒子を使って楕円の長軸短軸を決めなおす、participant eccentricityを使っている。

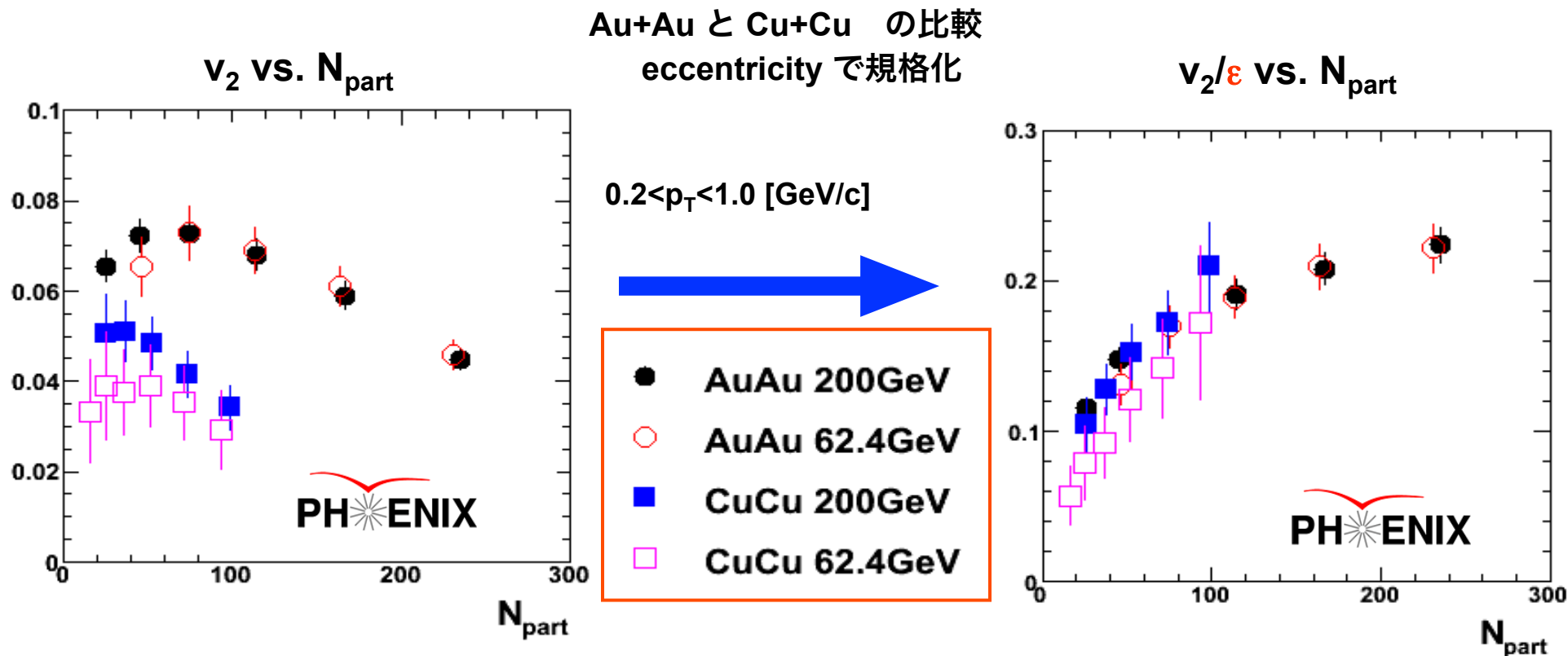
$$\epsilon = \frac{\langle y^2 \rangle - \langle x^2 \rangle}{\langle y^2 \rangle + \langle x^2 \rangle}$$



eccentricity(ϵ) --- 衝突関与核子の幾何学的な楕円率

Eccentricity Scaling (ϵ)

[PRC.92.034913]



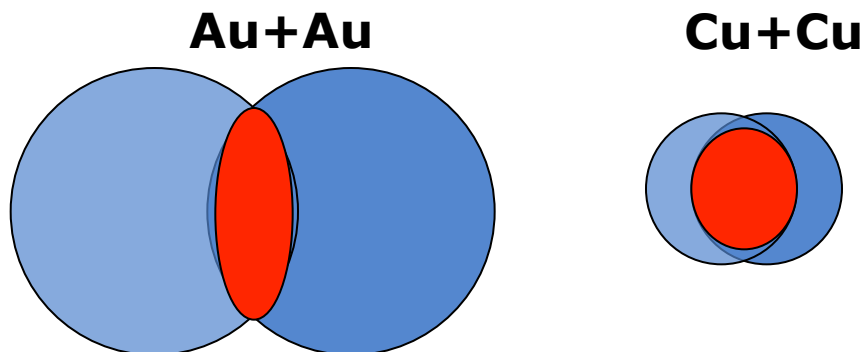
v_2 は、 N_{part} が同じならeccentricityで規格化できる。

→ 早くに熱平衡状態に達していることを示唆

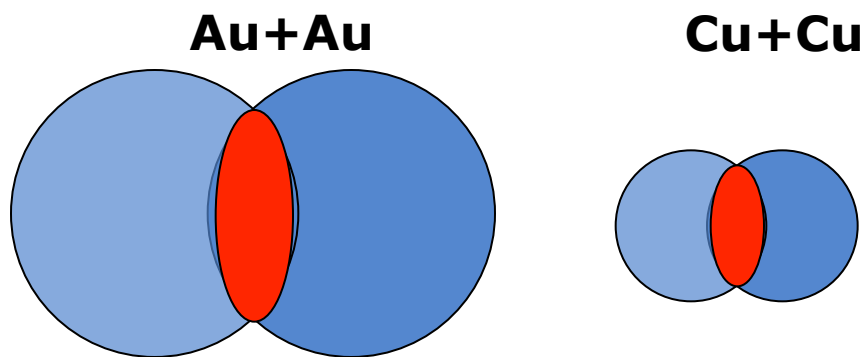
N_{part} に依存して変わる。→ N_{part} が大きくなると v_2/ϵ は、大きくなる。

違うシステムの v_2 比較

同じ N_{part} で楕円率が違う場合は、楕円率でスケールする



同じ楕円率で N_{part} が違う場合は、楕円率でスケールしない

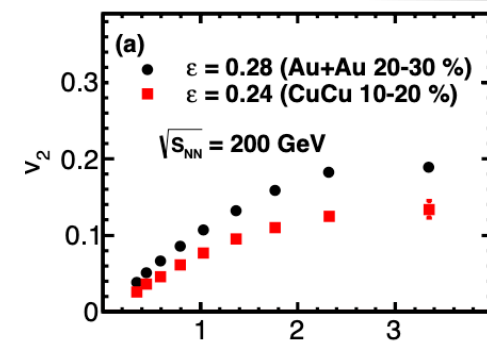
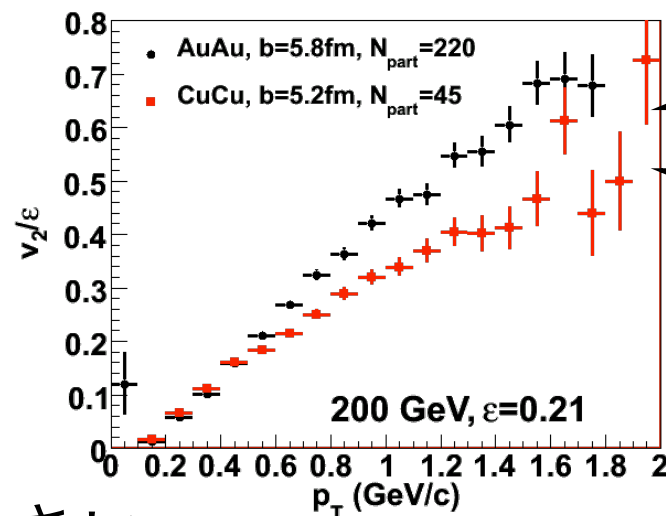
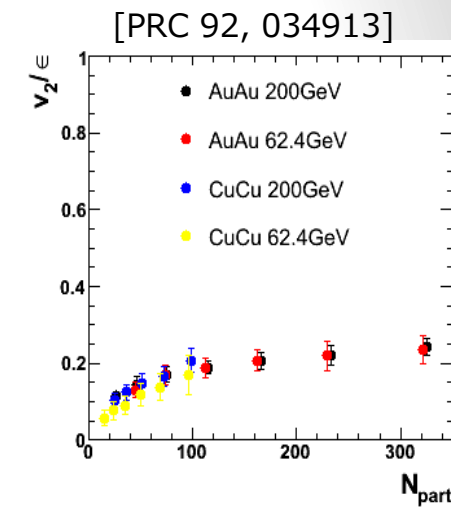
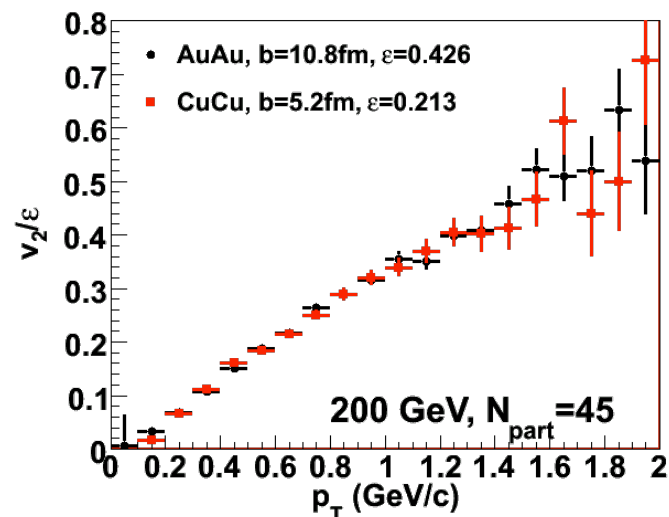


系が大きいと v_2 が大きい

Thanks to T. Hirano

QGP流体+ハドロンガス (Glauber I.C)
のシミュレーション

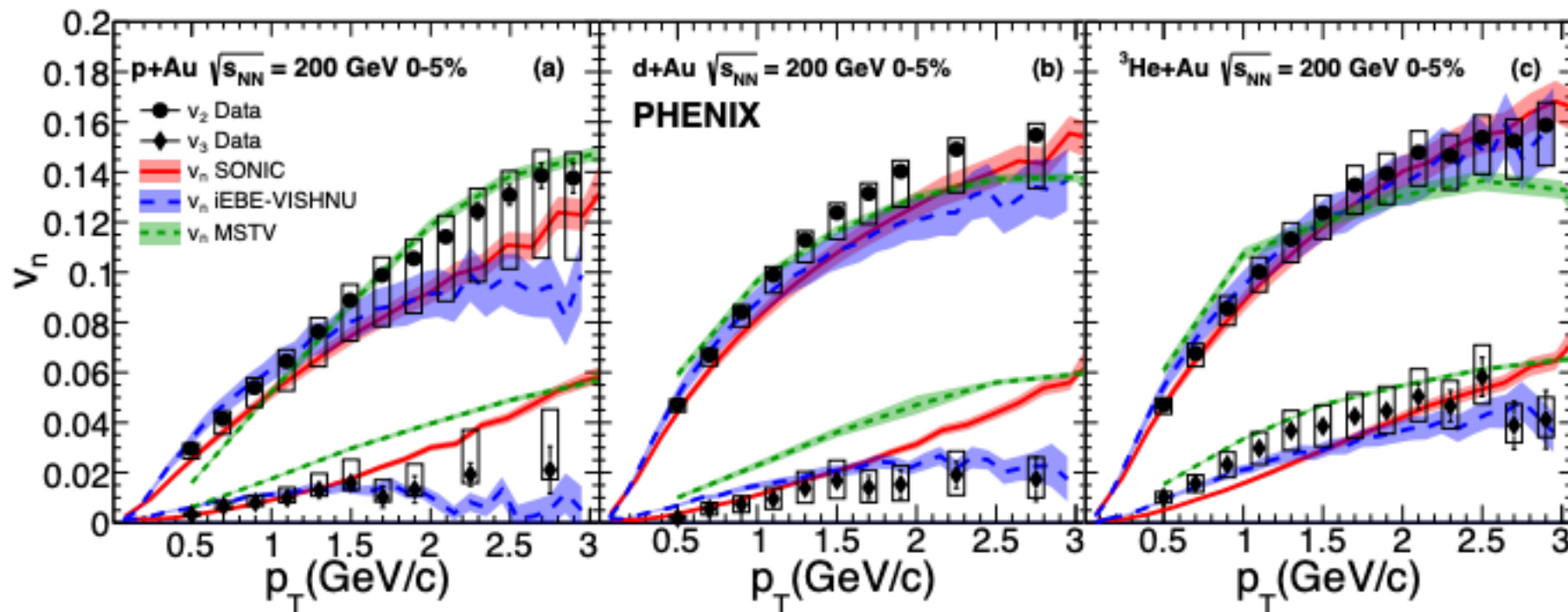
流体シミュレーション
と実験結果が同じ傾向



小さな衝突系での v_2

[Nature Physics 15 214-220(2019)]

[Phys. Rev. C96. 064905]

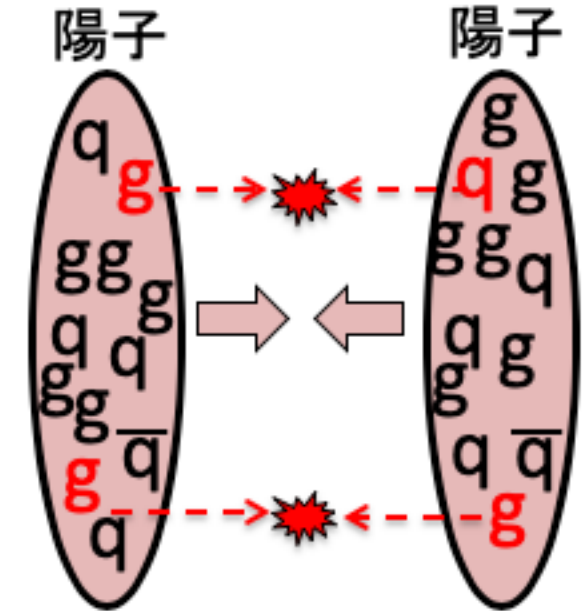


- 小さな衝突系 (d+A,) で発生粒子数(N_m)が多いものだけを選ぶとQGPのような振る舞いがみえる。
- QGPのような高温の物質ができている可能性??どのように??→MPI

Multi Parton Interactions (MPI)

極小QGP発生機構として候補に上がっているのが、MPI

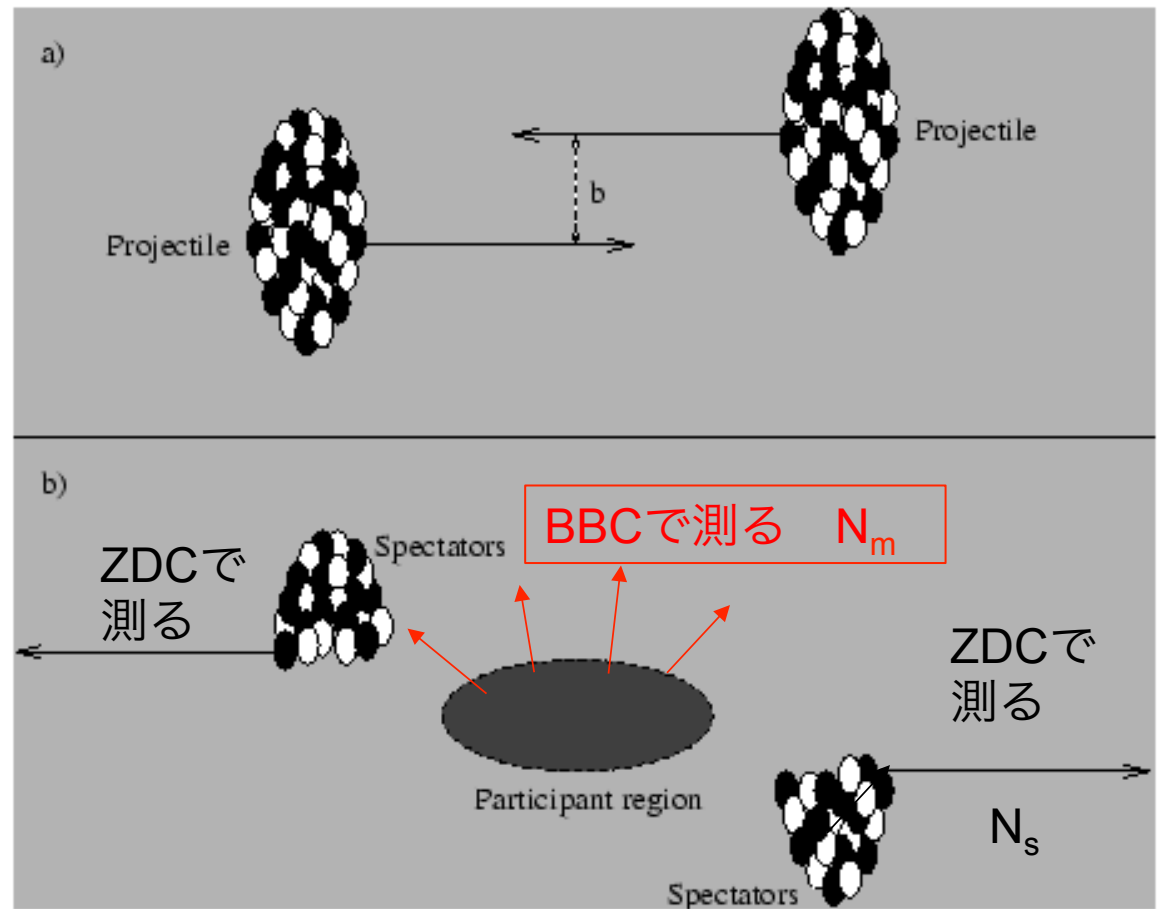
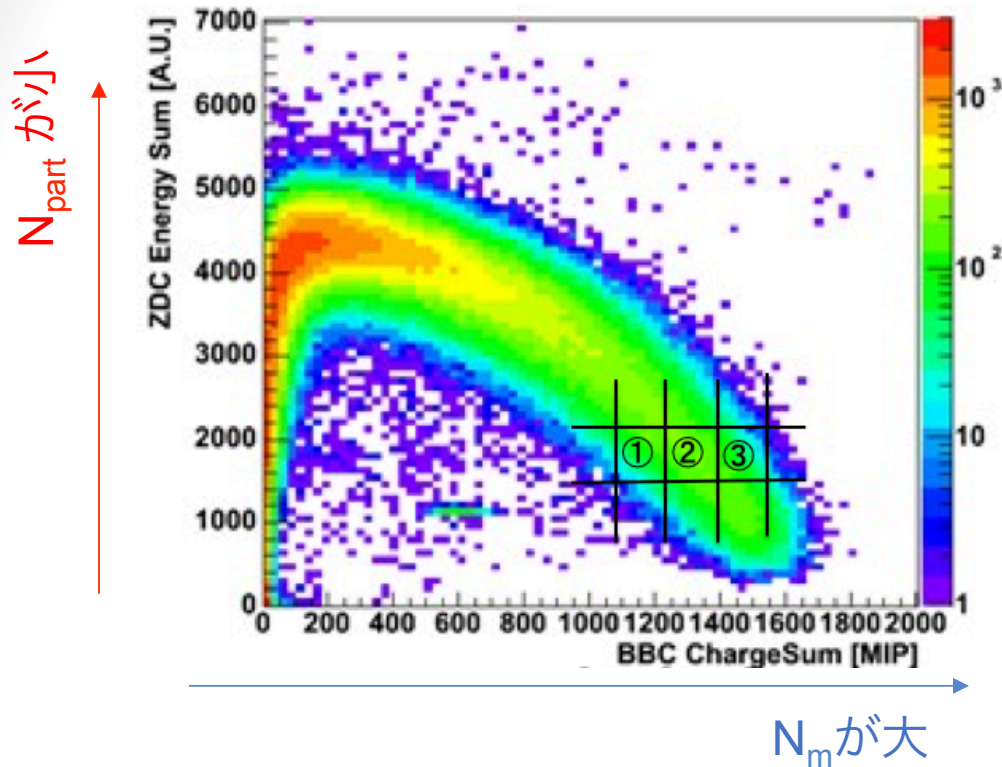
- 核子の中にも原子核同様、内部構造がある
- 構成クォークだけでも3つ
→ 複数当たる可能性
- Sea partons が生成・消滅を繰り返している
→ 複数当たる可能性



本：Multiple parton Interactions at the LHC (<https://doi.org/10.1142/10646> | December 2018)

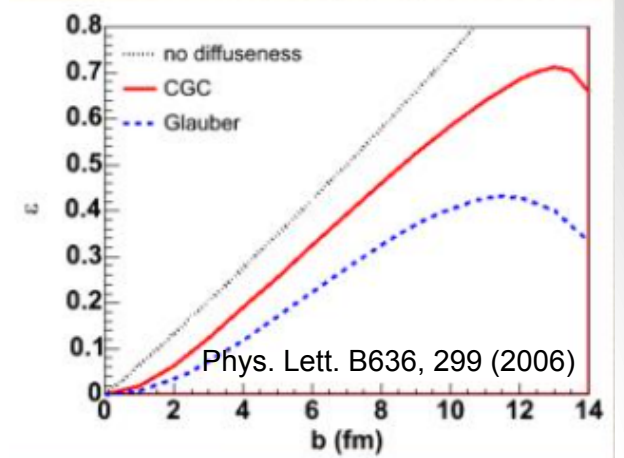
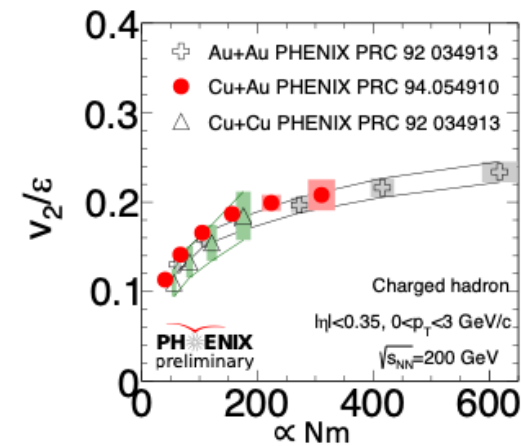
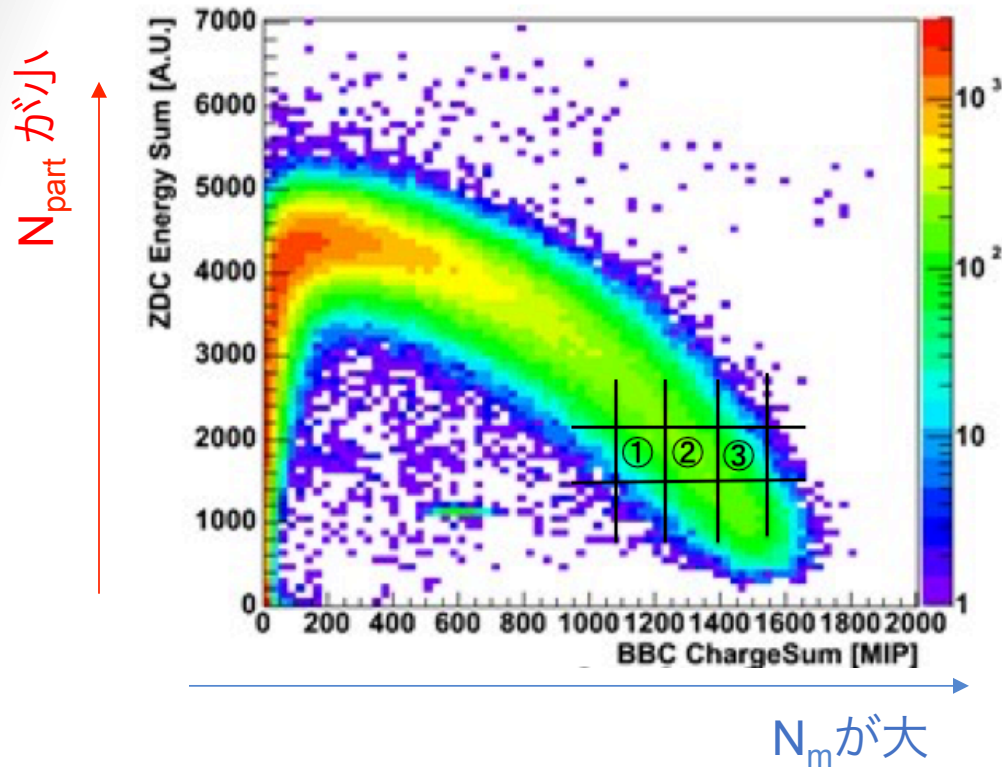
国際研究会：International Workshop on Multiple Partonic Interactions at the LHC (11th in 2019)

MPI@原子核衝突



Multiplicity (N_m) を測る $\neq$ N_{part} を測る = N_s を測る ($N_{part} + N_s = 197$)
 ①②③の様にZDC(N_s)が同じで、BBC(N_m)が違う領域の v_2 を比較する。

MPI@原子核衝突



MPIの効果が強いなら、①→③の変化は、

- N_{part} が増えるようなものなので、 v_2 が大きくなる(はず)
- 内部構造があるので、楕円率が上がる (はず) → v_2 が大きくなる

MPIの効果が見えないなら

- ①、②、③の違いは、ZDCの分解能のみによるので、より中心衝突になっているだけなので、 v_2 は下がり中心衝突度依存性がみえるのみ。

$v_2(\text{①}) < v_2(\text{③})$ となればMPIが起こっている
MPIの効果がなければ、 $v_2(\text{①}) > v_2(\text{③})$

MPI@原子核衝突

途中経過： $v_2(\textcircled{1}) > v_2(\textcircled{3})$ → MPIのシグナルははっきりは見えないが、、、。

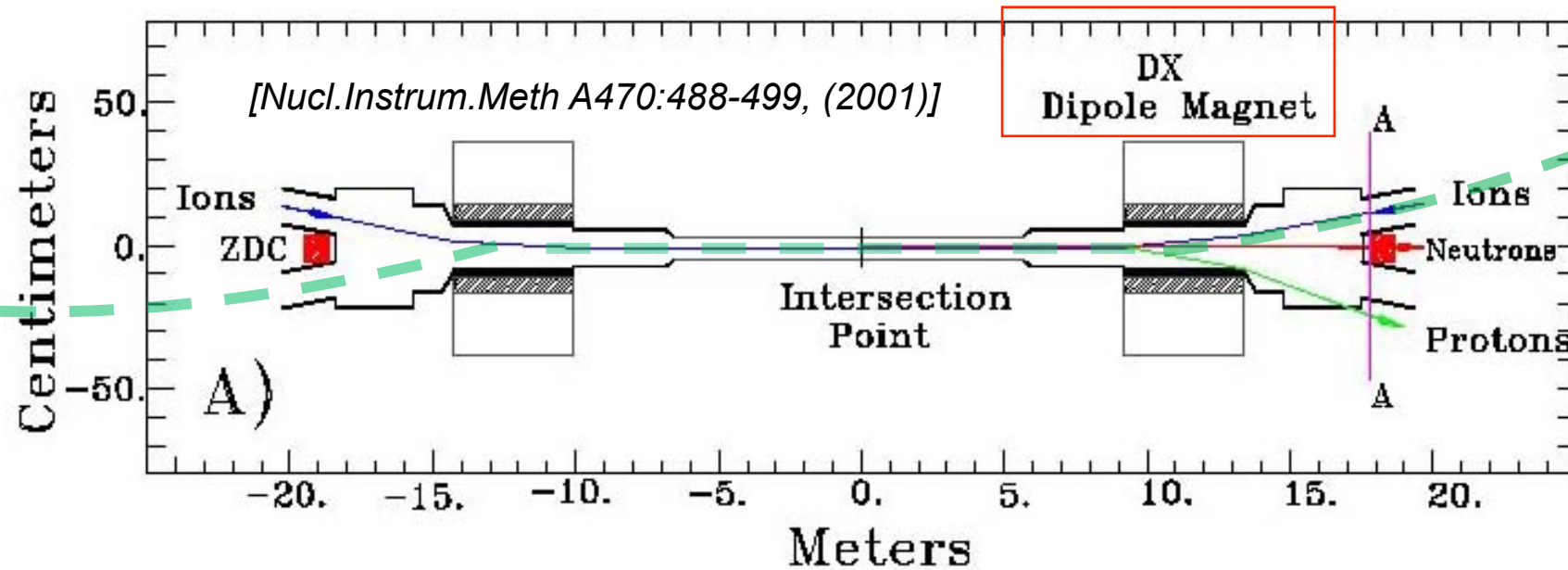
Spectator の測定分解能を上げたい！

精度良く Spectator の数が測れば、精度良く Npart が決められるため、Npart が同じイベントにおける Multiplicity (N_m) 依存性が測れる。

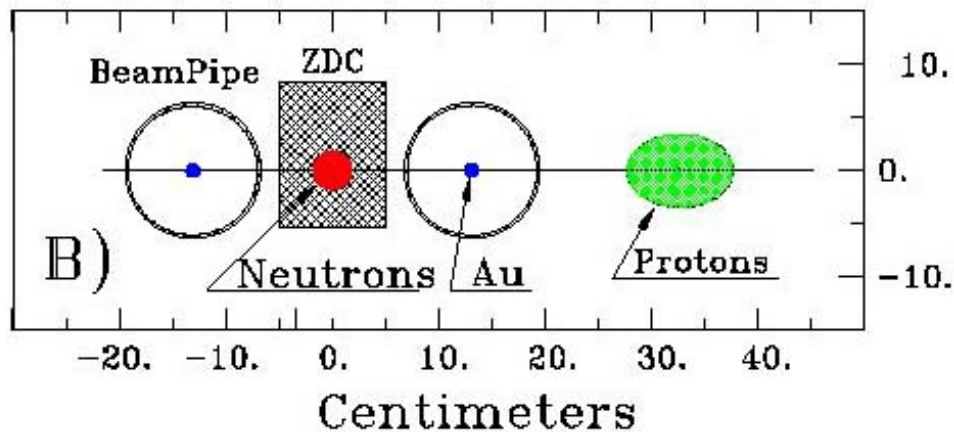


高エネルギー原子核衝突実験に基本的な新軸を導入できる！！

非衝突関与部の測り方（現在）



A-A



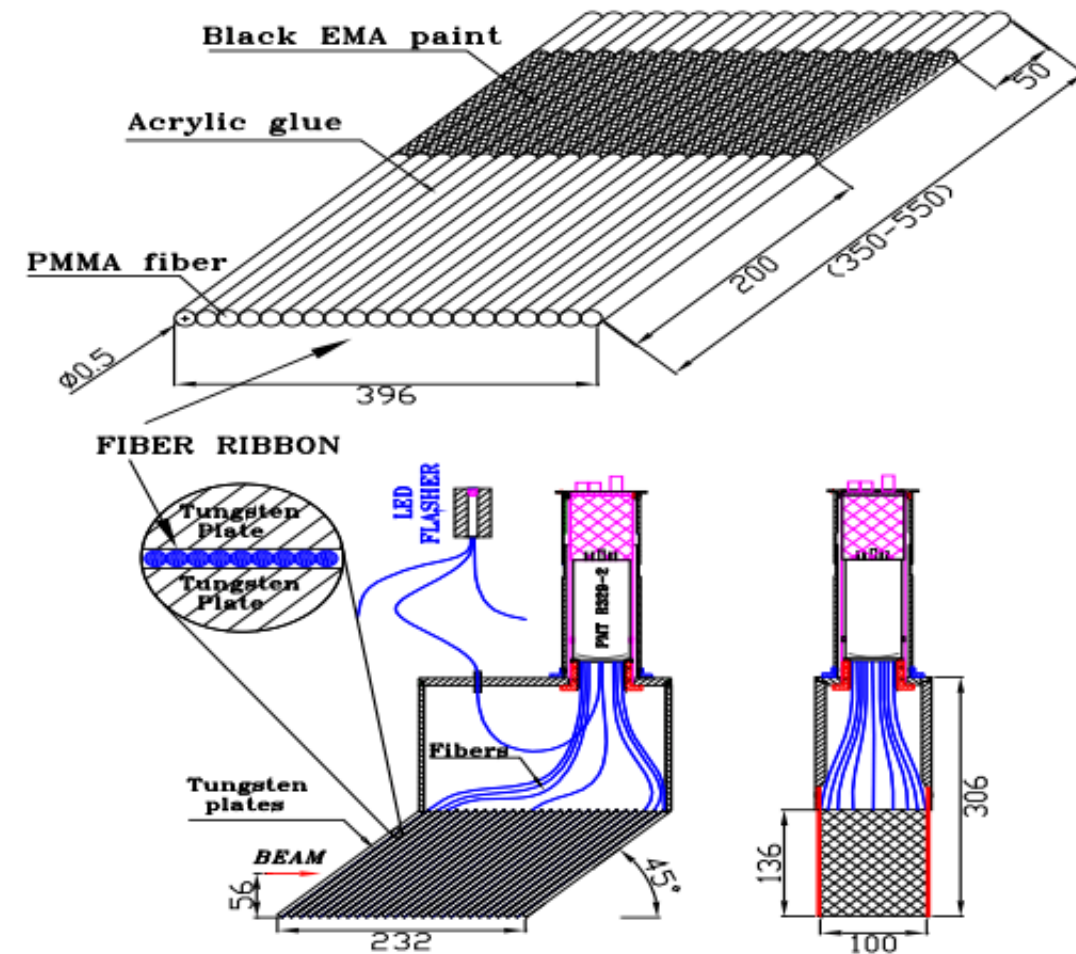
- 衝突で原子核が破壊され中性子と陽子がバラバラになる
- 陽子は磁場で曲げられ、中性子は真っ直ぐ飛ぶ
- ZDC (0度カロリメータ)で中性子のみを捉える

陽子は捨てている。

ハドロンカロリメータシミュレーション

Spectatorの数を精度よく測るハドロンカロリメータのデザインをシミュレーションする

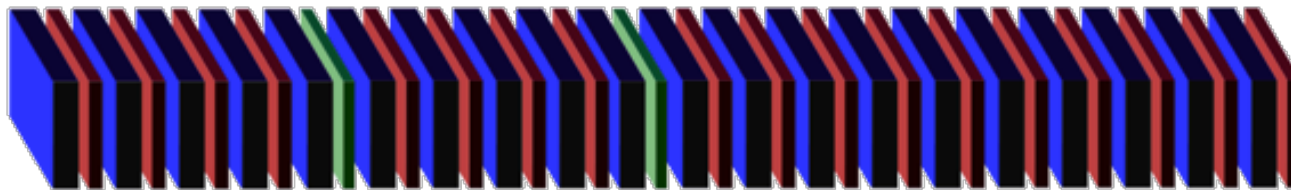
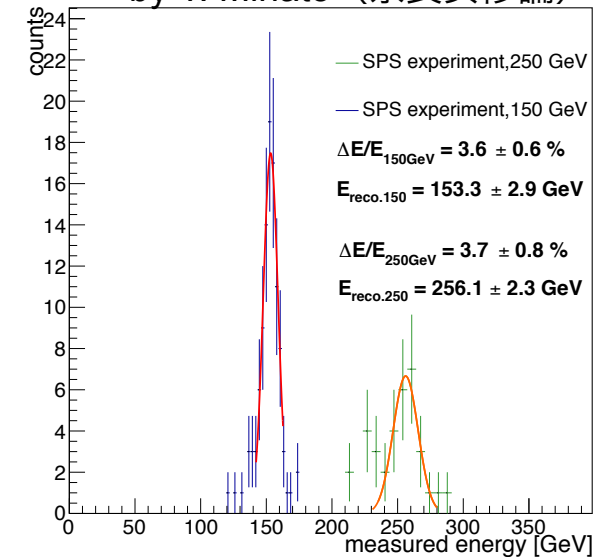
- 現在のRHICのZDCは、縦方向 ($2\lambda_1$, $50X_0$)
 - $\sigma E/E < 20\%$ at $E = 100$ GeV
 - 主にperipheralを検出するためだった
 - 横方向の分割なし
- 陽子まで検出すると分解能を上げられるか？



前方カロリメータ プロジェクト

- FoCal in future ALICE (筑波大・奈良女子大・長崎総科大)
 - $20 X_0$ のサンプリング型電磁カロリメータ
 - 数GeV～数TeVの光子を検出
 - Si とタングステンのサンドイッチ
 - シリコンのPadとPixelカロリメータを組み合わせる
- FoCal in future RHIC (理研・筑波大・奈良女子大)
 - 上記と同様のものをZDCの位置に入れたい
 - Polarizationの測定 (p+Aからの中性子を検出)

by Y. Minato (奈良女修論)



← Si (検出器層) とタングステン(吸収層) $1 X_{10} \times 20$ 層
→

$3.2 < \eta < 5.8$ (超前方領域)

スペクテーターの測定にもFoCal (+ハドロンカロリメータ) が使えないか検証。

まとめ

- 高エネルギー原子核衝突実験で、大きな原子核を使うとQGPができていることが確認されている。
- 小さな衝突系でも粒子多重度がとても高い事象だけに注目すると、QGPのようなシグナルが見える。
- もしQGPのような高温物質ができているとすると、その生成機構は、MPIではないかと考えられている。
- MPIを直接的に検証するのに小さな衝突系でなく、大きな衝突系を使って N_{part} とMultiplicity両方の軸を独立にとって v_2 を測定している。
- N_{part} を測るためのZDCの分解能を向上させてこの新軸での物理解析を可能にしたい。このためのデザインシミュレーションをしたい。

Back Up

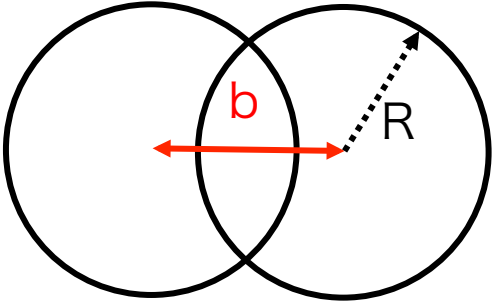
セントラリティーの定義

セントラリティー・・・中心衝突度

- 原子核同士が衝突するときにどのくらい正面から衝突したか。



衝突時の各原子核の中心同士の距離を b (インパクトパラメーター) とすると、セントラリティーは、


$$centrality[\%] = \frac{4\pi \left(\frac{b}{2}\right)^2}{4\pi R^2} \times 100$$