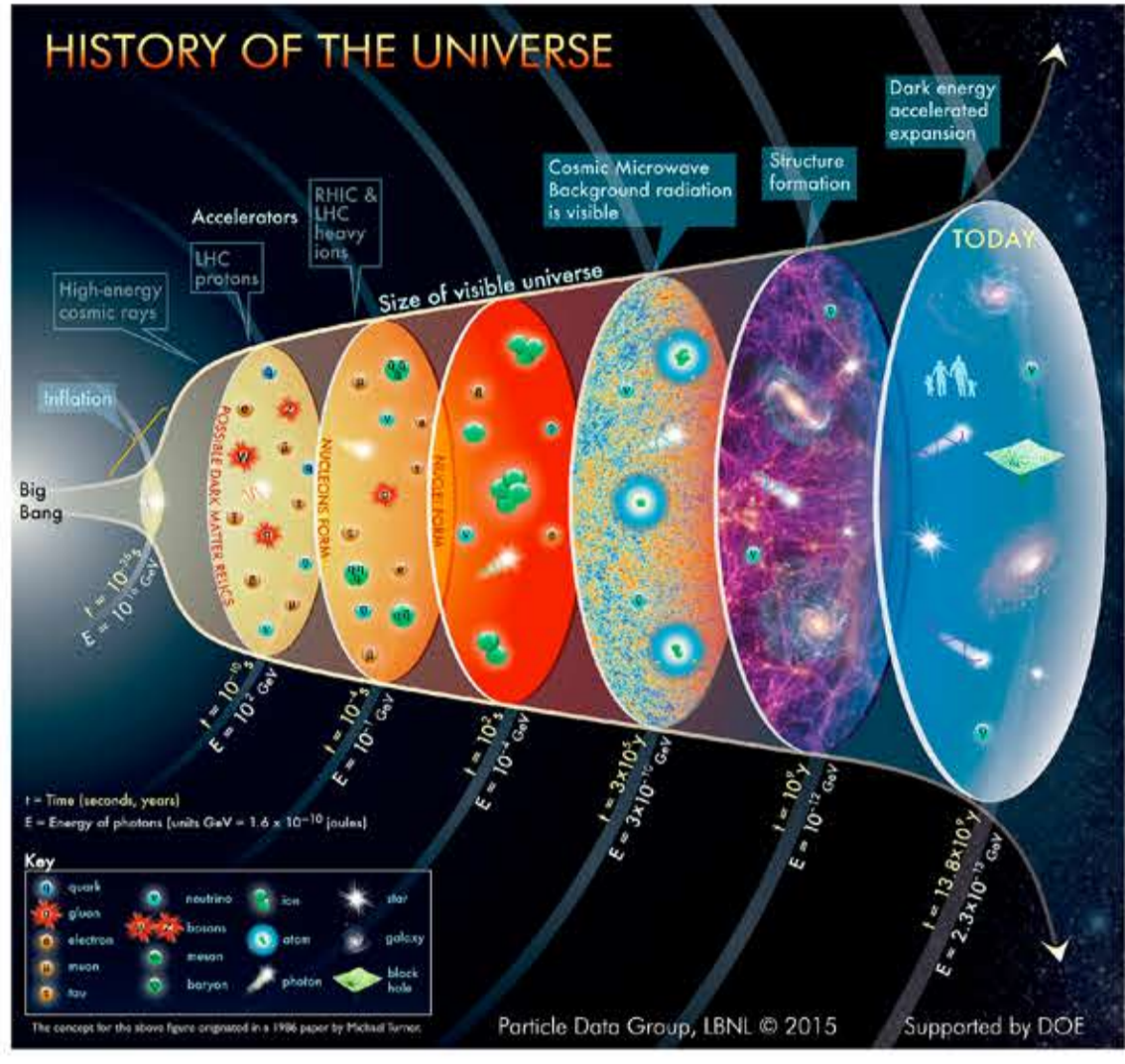


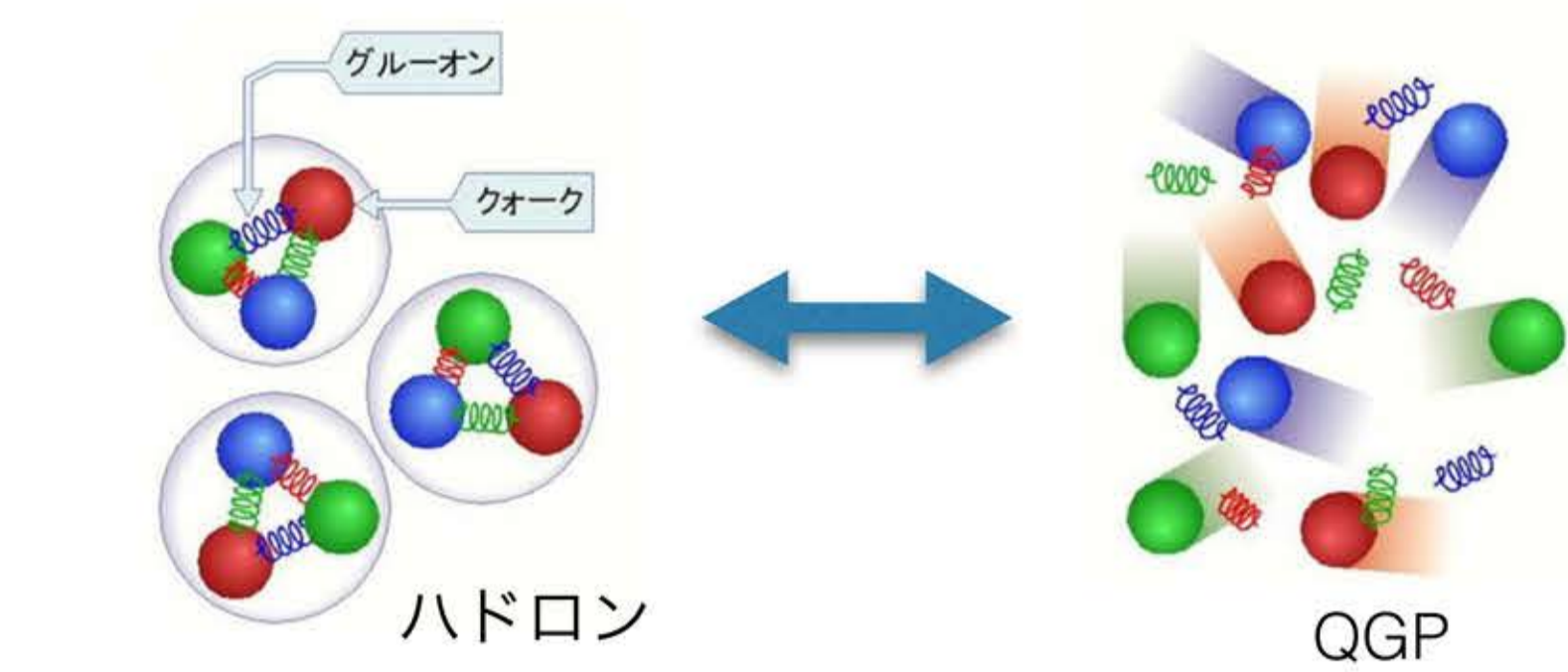
重イオン衝突で探る宇宙初期の高温高密度物質

宇宙の始まりとQGP

- 物質を形作る原子核内の核子（陽子や中性子）はクォークやグルーオンといった素粒子から成るが、高温・高密度においては核子の閉じ込めを破り自由に動き回るようになる。これをクォークグルーオンプラズマ(QGP)と呼ぶ。
- ビッグバン後 10^{-6} 秒の極初期宇宙は数兆度の超高温状態でありQGPが実現していたと考えられている。
 - QGPの研究は物質の根源である素粒子の集団的な振る舞いを明らかにするとともに宇宙の成り立ちを紐解くことに等しい！



宇宙の歴史



←宇宙の晴れ上がりの時期のシグナルと言われている宇宙背景放射

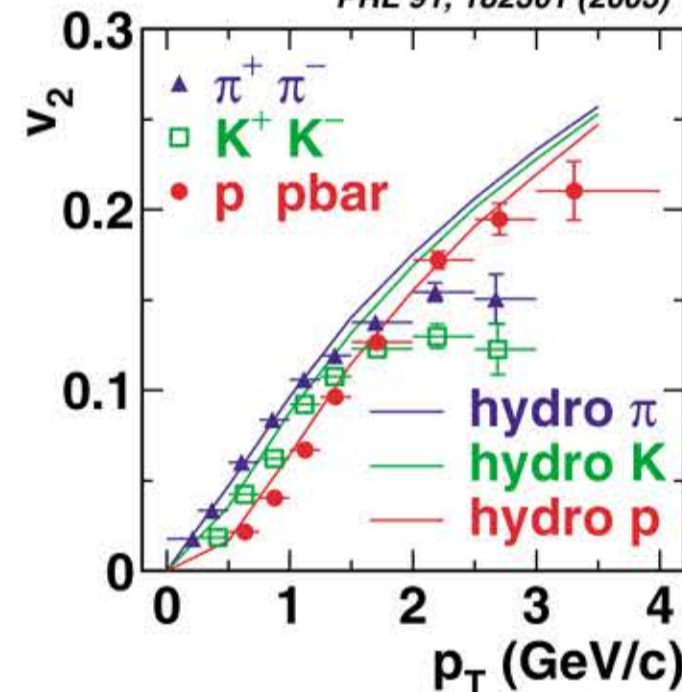
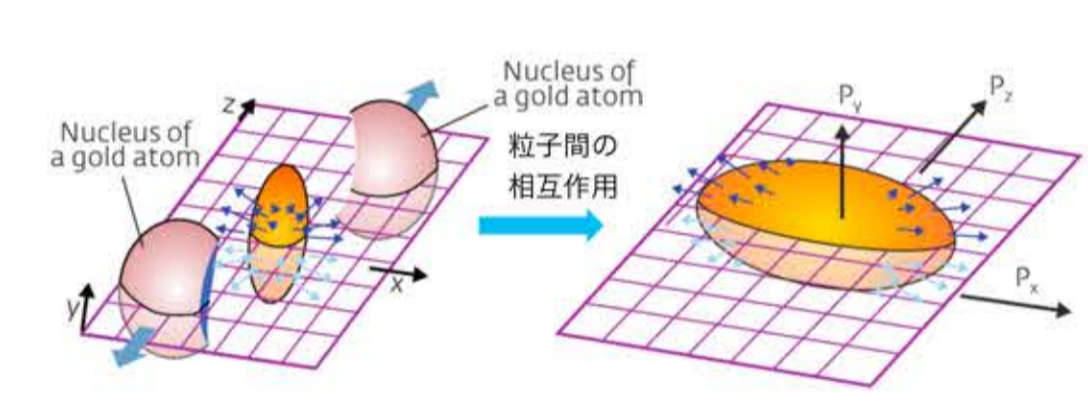
- では宇宙初期に実現していたQGPを直接観測することは可能だろうか？
- 現在観測可能なのはビッグバン後38万年後にあった宇宙の晴れ上がり以降のみ。

→ QGPを観測する唯一の手段は原子核衝突実験！

原子核衝突実験で今までわかってきたこと

QGPの時空発展

- 原子核の衝突関与部は衝突関与部は楕円形状になる
- QGPが気体であれば形状にかかわらず、粒子放出はランダムになる
- QGPが液体だと粒子間の散乱から集団運動ができる
- 楕円形の単軸方向に大きな圧力がかかり運動量の高い粒子が多く生成される
 - 大きな楕円フローができる

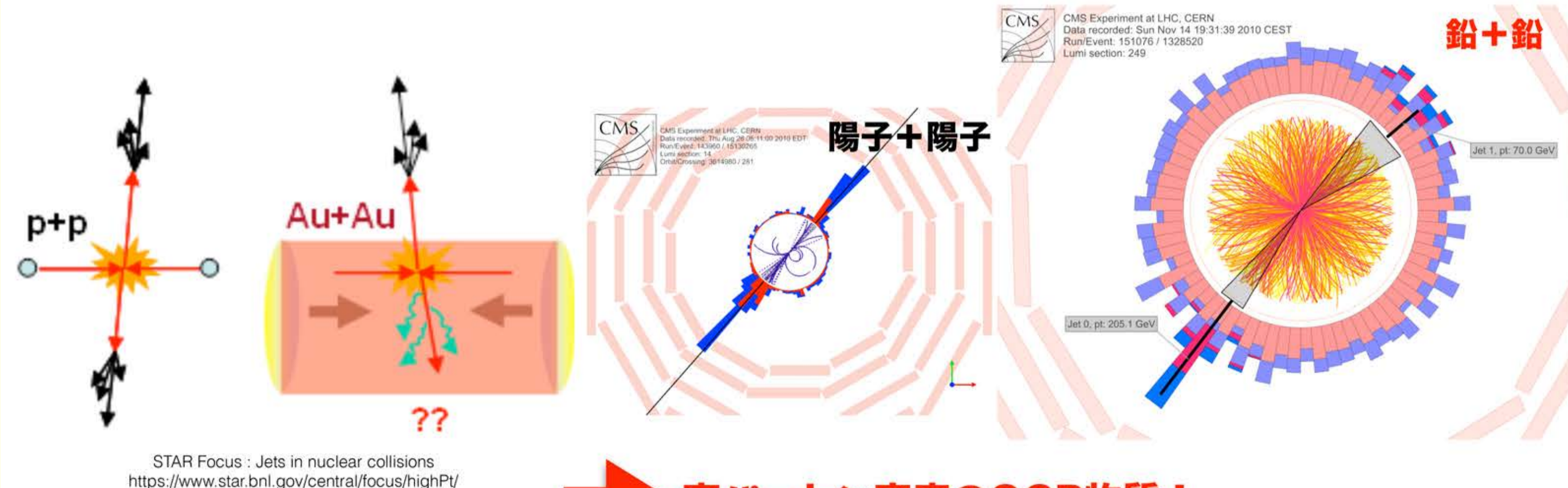


- ✓ RHIC 金+金衝突
- ✓ 大きな楕円フロー
- ✓ 流体が実験をよく再現
- ✓ パートンレベルの集団運動

→ QGPは流体である！

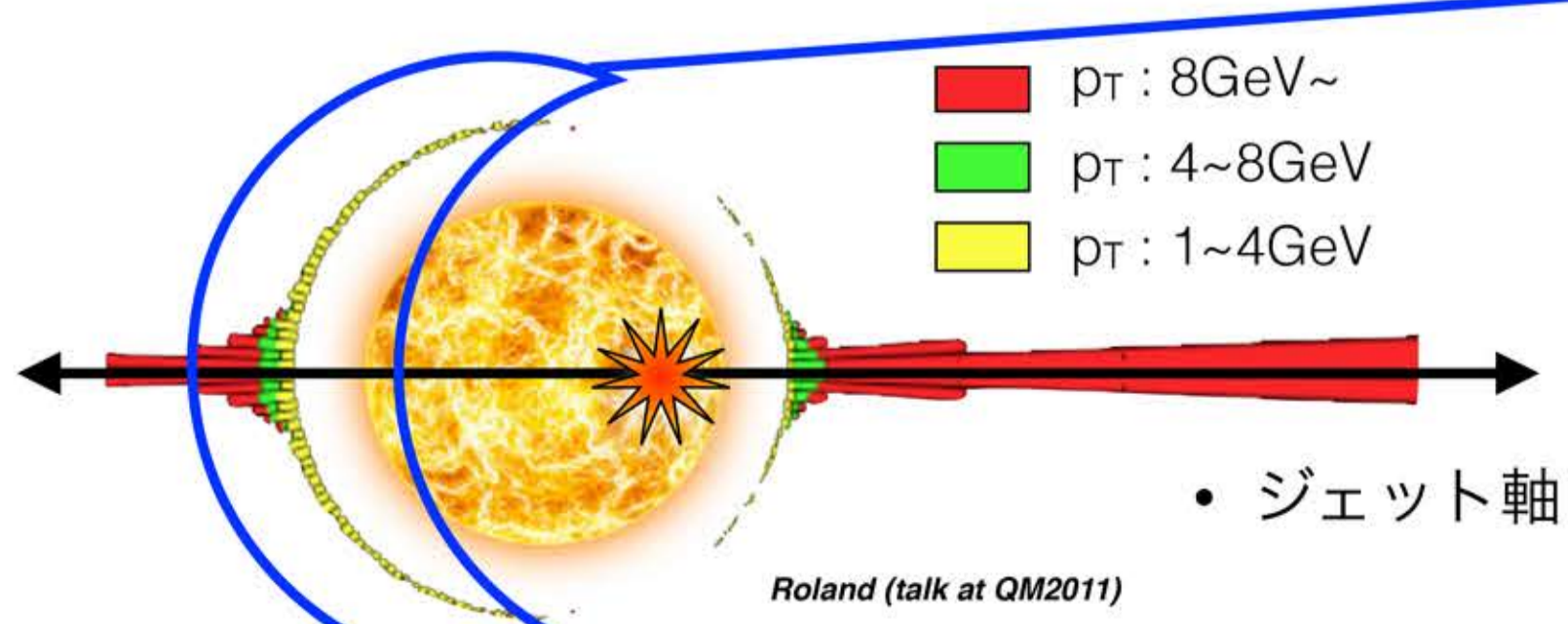
QGPとパートンの相互作用

- 高エネルギー衝突実験では、粒子が大角度に散乱されるジェットという事象がある
- ジェットは大きなエネルギーを持ち、互に対方向(180°)に生成される
- 真空中(陽子+陽子衝突)ではジェット対は同じエネルギーを持つ
- QGP中(鉛+鉛衝突)では片方のジェットが大きくエネルギーを失う



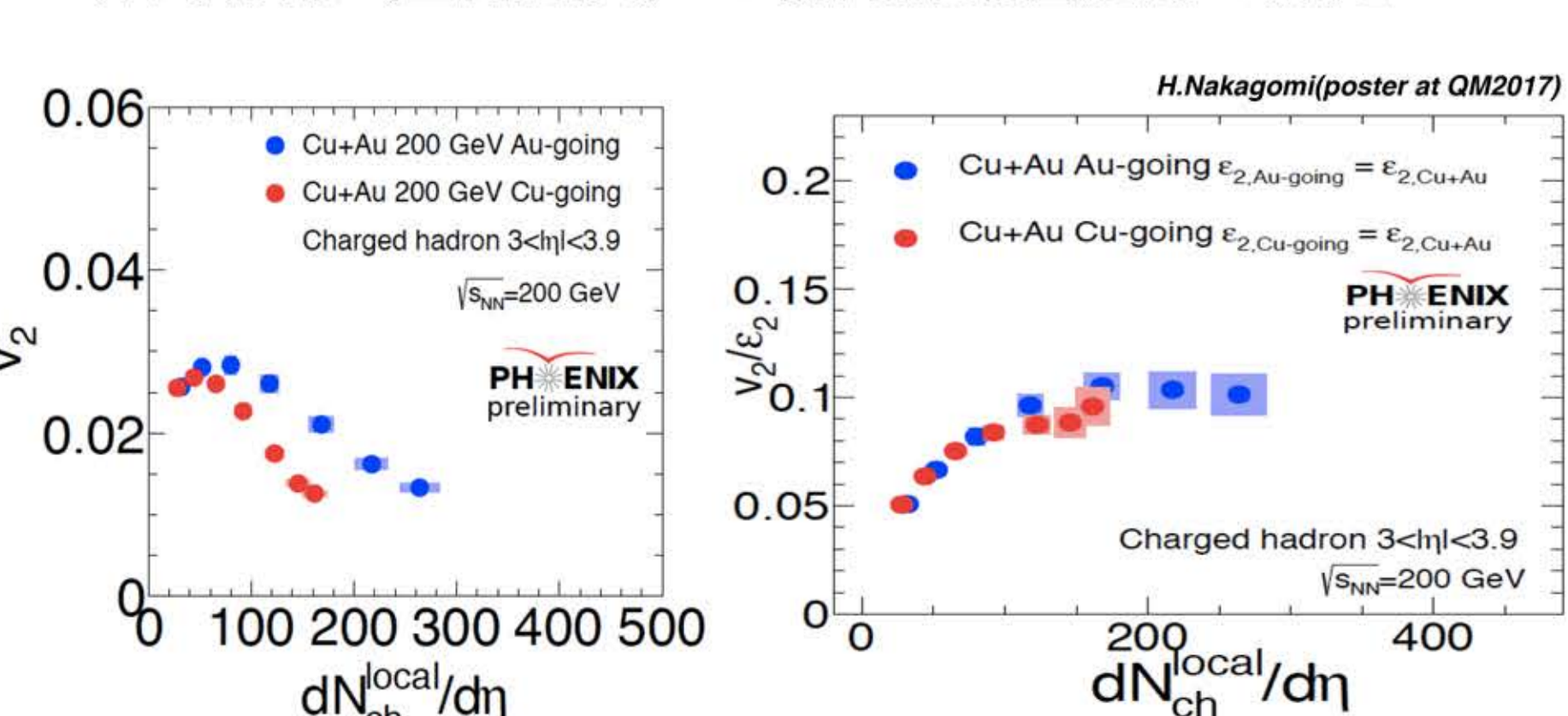
失ったジェットのエネルギーはどこへ？

- ジェットの軸に対する粒子分布を測る
 - 低い運動量の粒子が大角度で生成
- ジェットがQGP中で落としたエネルギーは低い運動量の粒子として大角度に放出されている

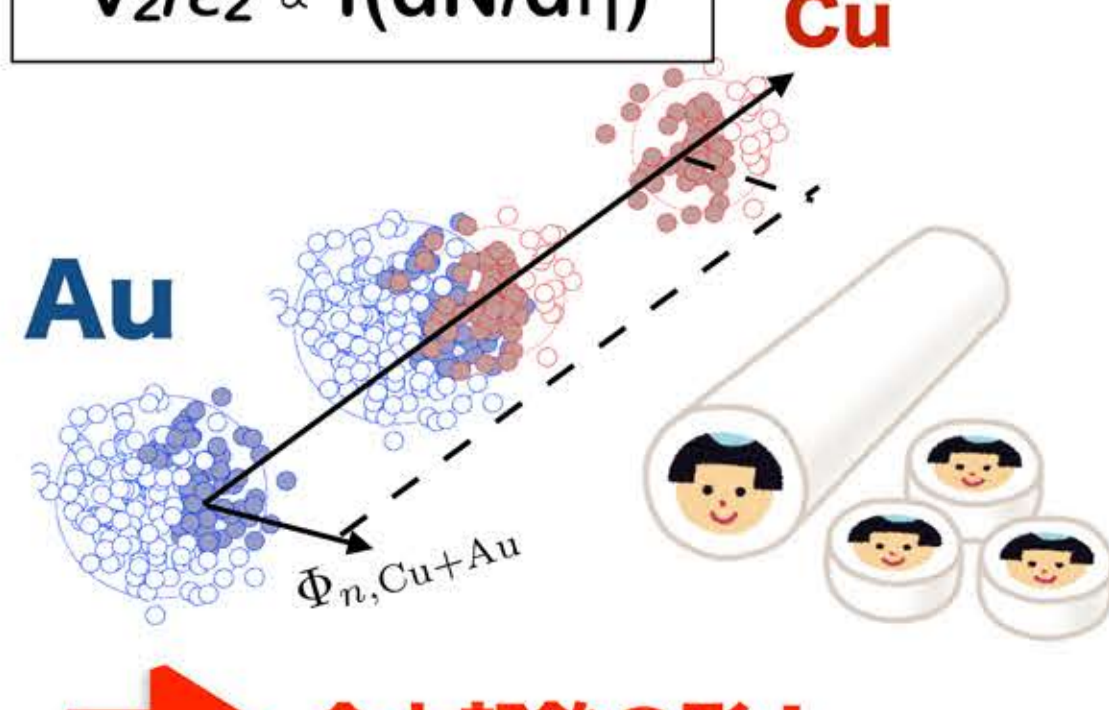


衝突初期はどんな形？

- 非対称系(金銅衝突)の楕円的集団運動の測定



$$v_2/E_2 \propto f(dN/d\eta)$$

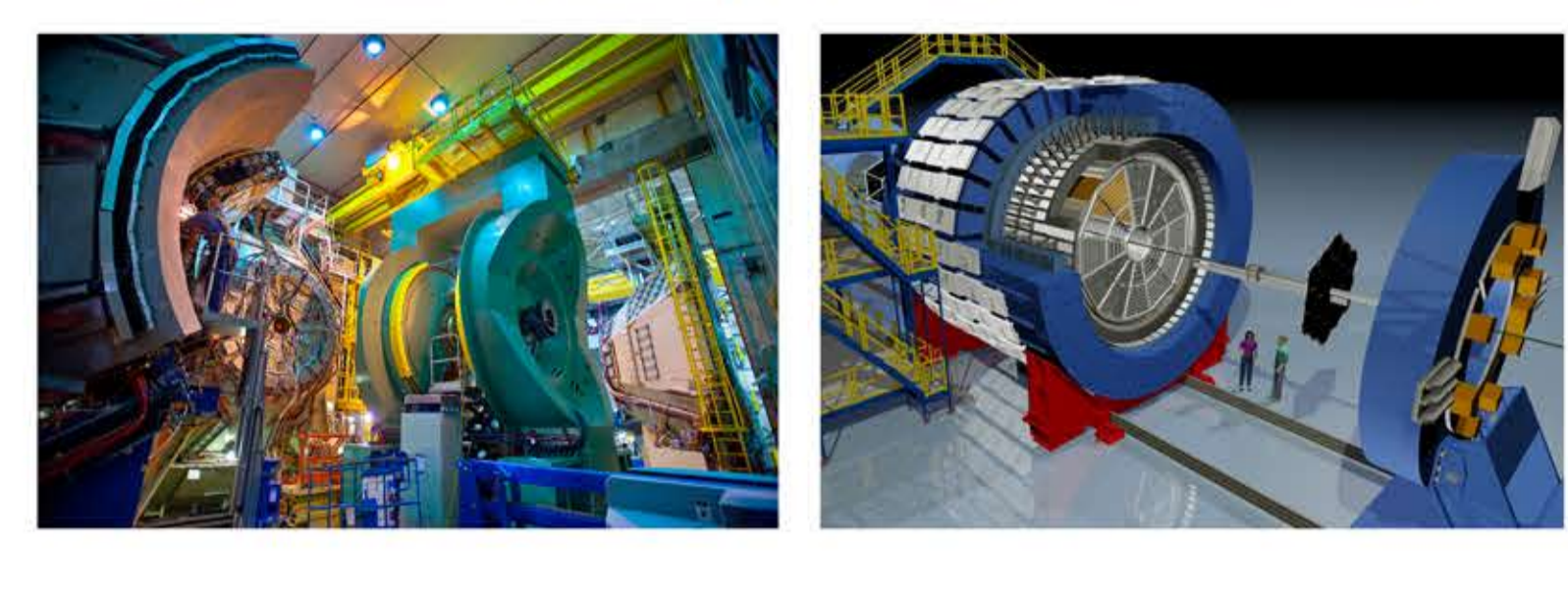
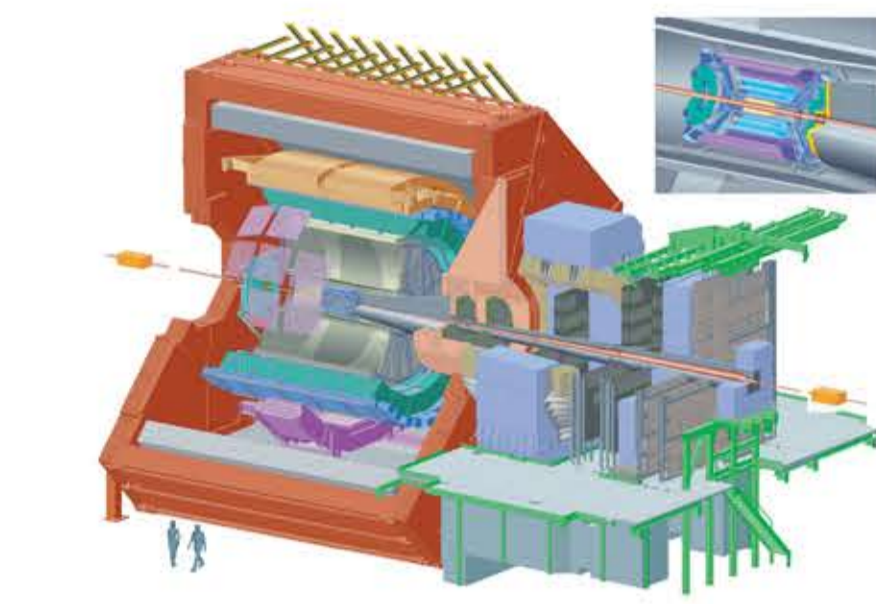
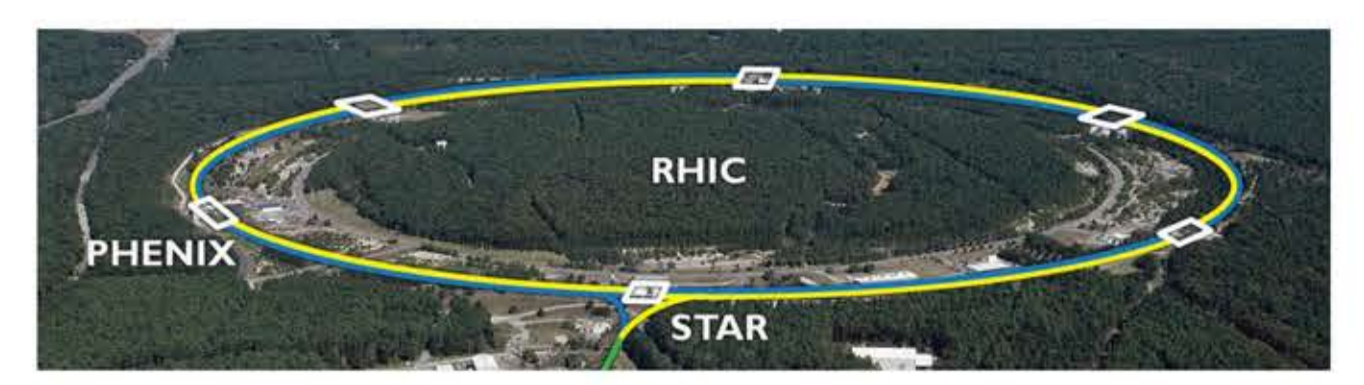


→ 金太郎船の形！

原子核衝突実験

- ほぼ光速まで加速した原子核同士を衝突させることでQGPを生成し、そのシグナルを測定する

CERN LHC加速器 (スイス、ジュネーブ) BNL RHIC加速器 (アメリカ、ニューヨーク)

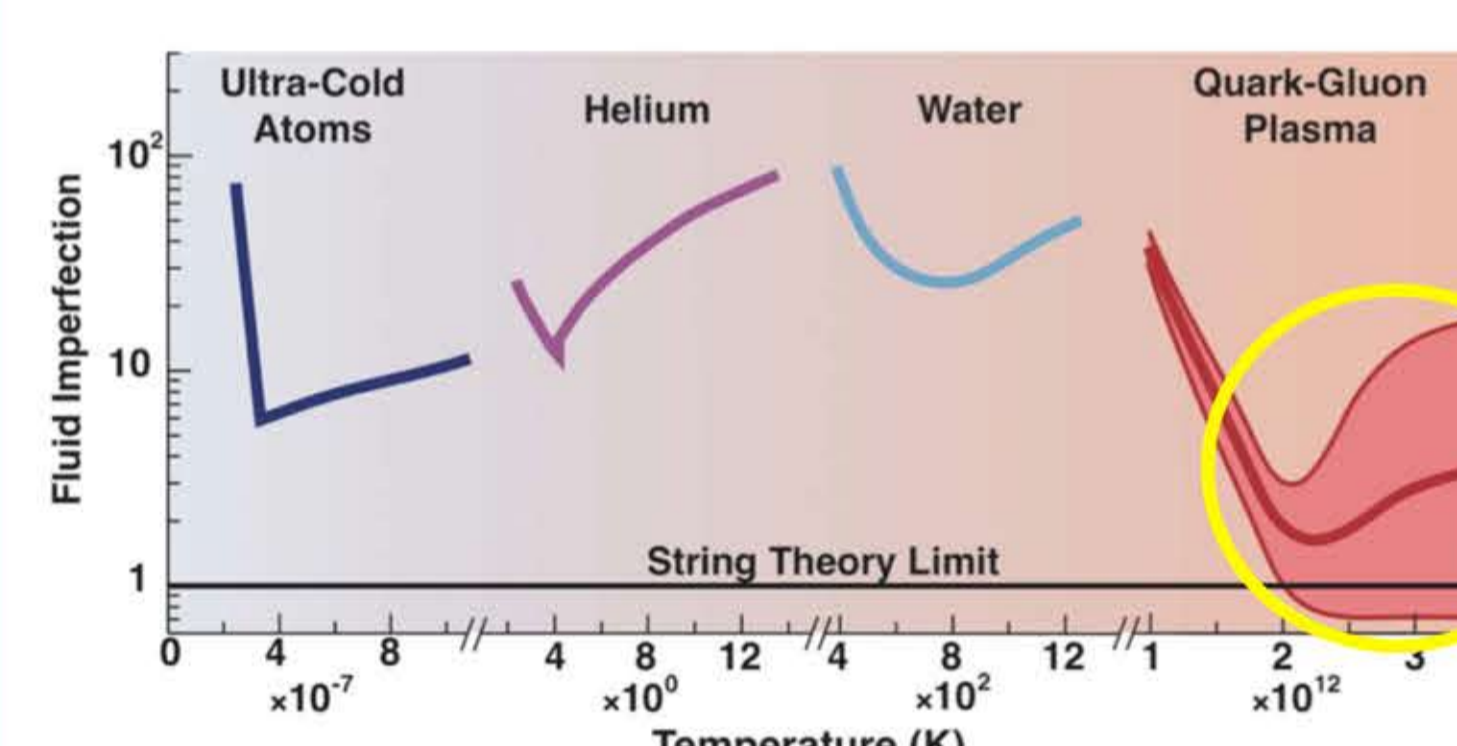
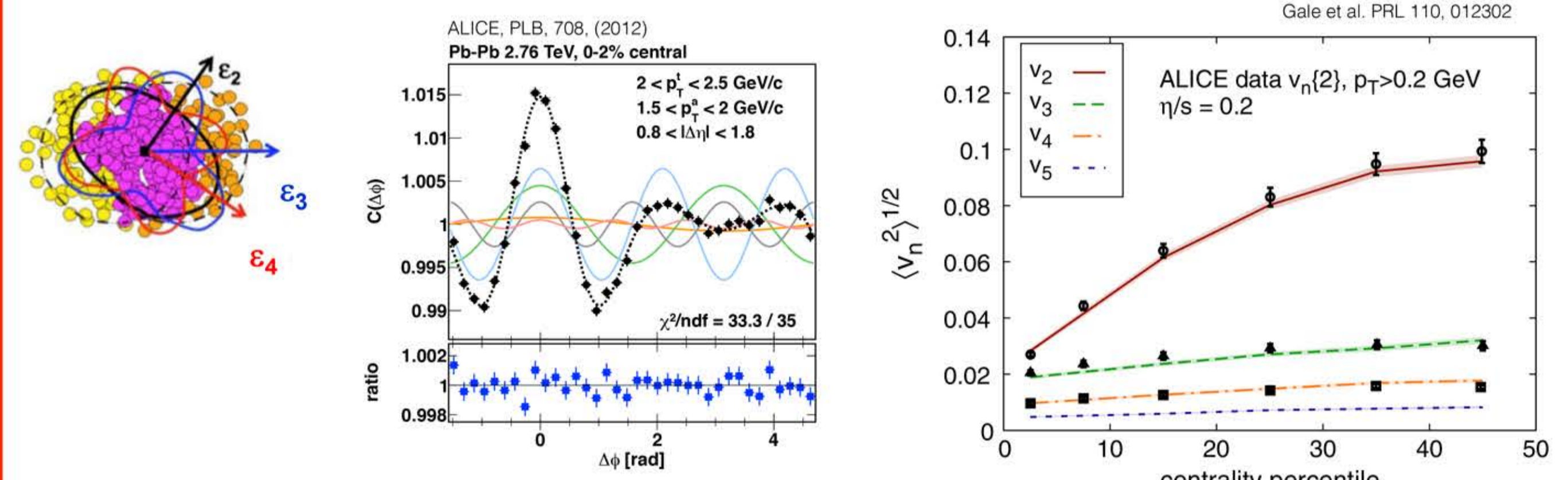


- ALICE実験
 - LHCを用いた他の実験と比べての原子核衝突に特化
 - RHICと比べTeVオーダーの高いエネルギーで衝突可能
 - Pb-Pb原子核衝突実験がメイン
- PHENIX実験、STAR実験
 - 金+金以外にも様々な種類の原子核の衝突が可能
 - PHENIXは2016年で実験データの取得が終了
 - STARでは臨界点探索に向けBeam energy scanが行われた

原子核衝突実験で新しくわかったこと

QGPの粘性はどれくらい？

- ✓ 原子核の衝突関与部は核子数が有限なため高次の空間的な異方性をもつ
- ✓ 核子分布のゆらぎなどから高次方位角異方性が生まれる
- ✓ 高次の集団運動はQGPの粘性に敏感である
- ✓ 流体モデルを比較から粘性係数を求める
 - QGPはどの物質よりも粘性が小さい物質である



- ✓ LHC 鉛+鉛衝突
- ✓ 2, 3, 4, 5次の集団運動
- ✓ 比粘性(量子極限 $4\pi\eta/s \sim 1$)
- ✓ $\eta/s \sim 0.2$ (LHC), 0.12 (RHIC)

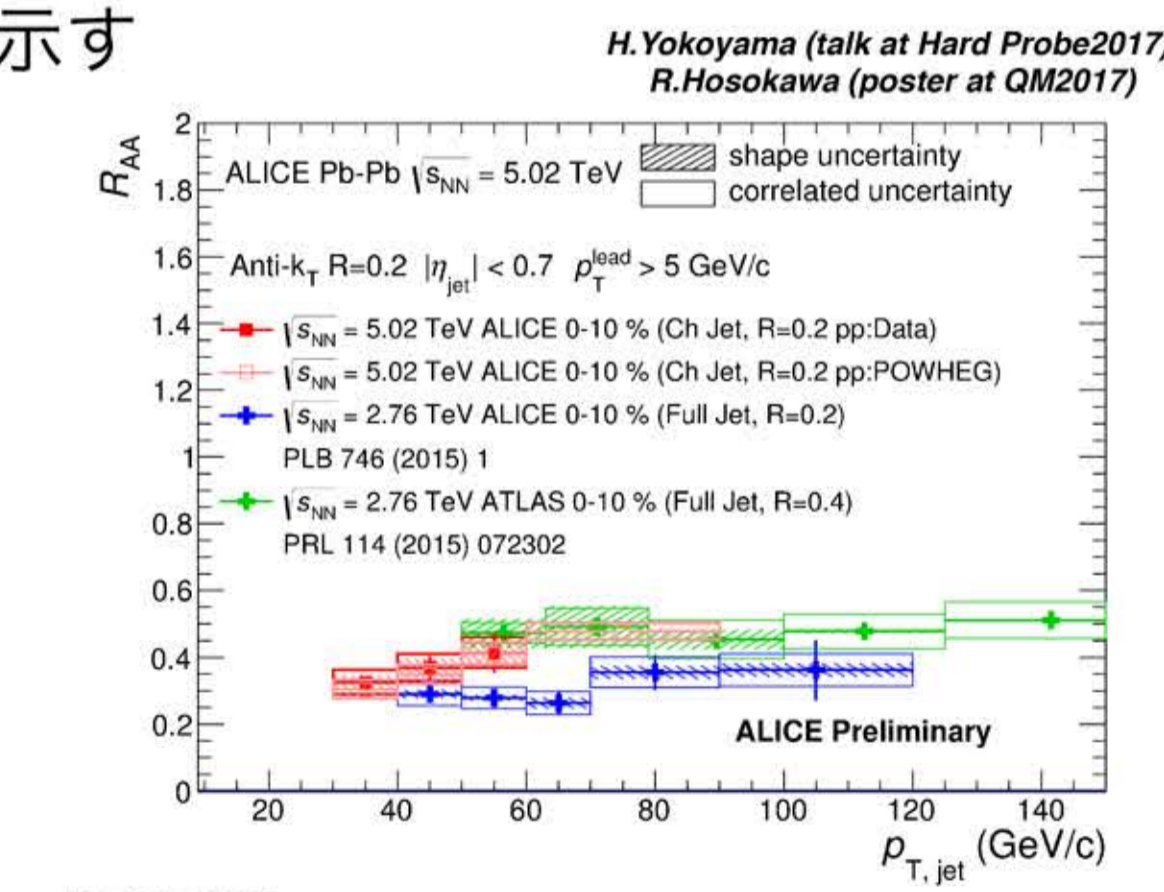
→ QGPは世界で最もサラサラな物質

世界最高エネルギーのジェットはどれくらい抑制されている？

- ✓ R_{AA} : 収量がどれくらい抑制されているかを示す

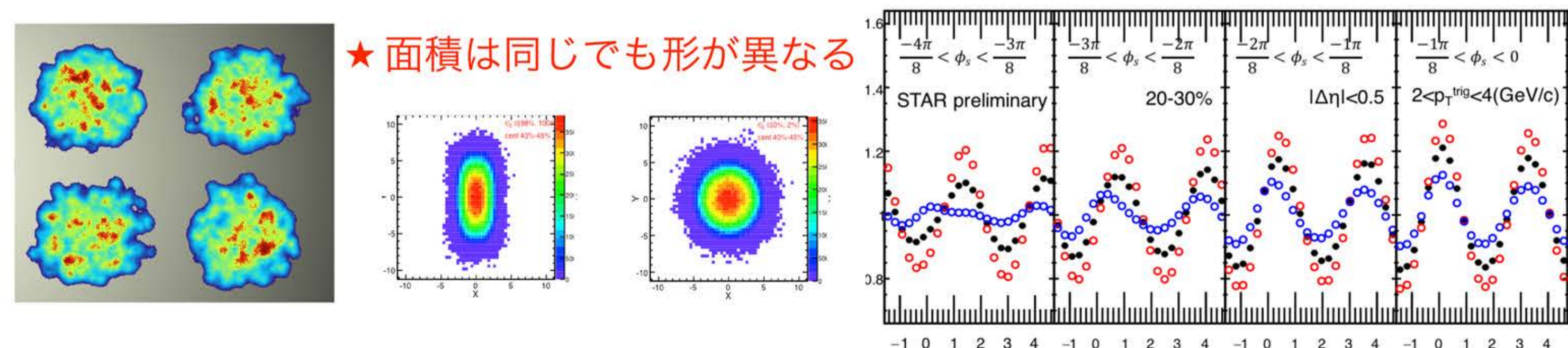
- ジェットが大きく抑制されている
- 衝突エネルギー依存性は大きくない

- ✓ LHC 鉛+鉛衝突 5.02 TeV
- ✓ Full jet (荷電粒子+中性粒子)



衝突初期の形状を選ぶ

- ✓ 同じ中心衝突度においても形状は異なる(核子分布揺らぎ)
- ✓ 粒子の集団運動の強さから初期の楕円形状を選ぶ



QGPはどんな形？

- ✓ 粒子の放出角度ごとに大きさを測り形状を探る
- 初期の楕円形が凍結時にも残っている
- 初期の三角形は凍結時には反転しているかも？

