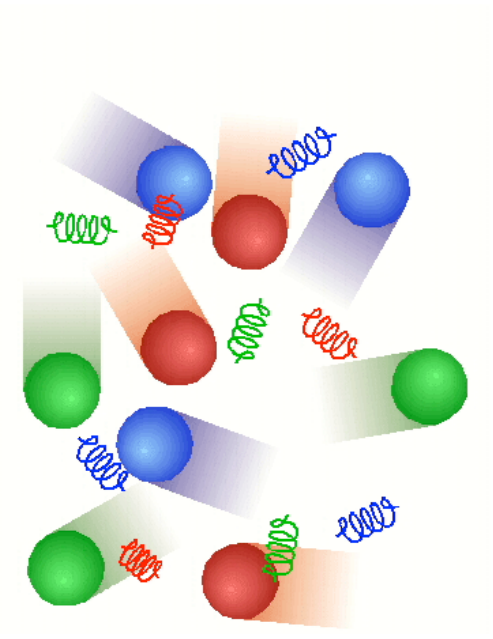


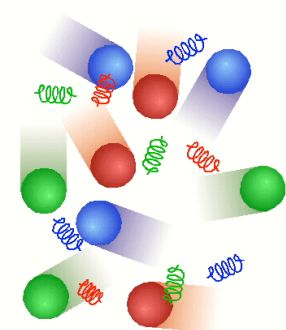
相対論的重イオン衝突実験20年

～QGP signatures～



筑波大学 名誉教授／特命教授
三明康郎

90年代に考えられていたこと



三明「PHENIXの目指すもの」原子核研究36(1993)33
PHENIX, preliminary conceptual design report, 1992

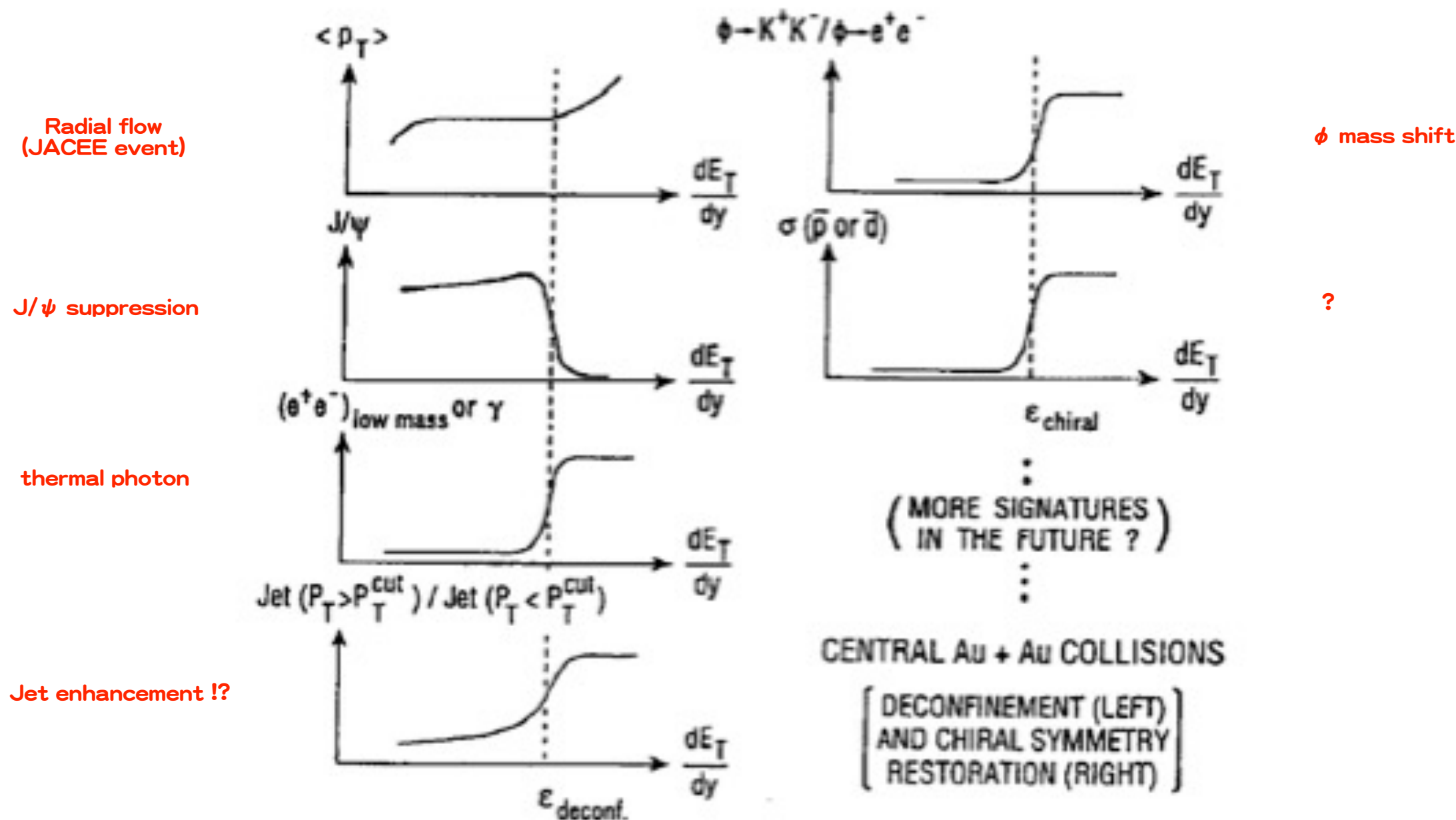


図5. 各種信号に同時に現われると期待されるクォークグルオンプラズマ生成の信号

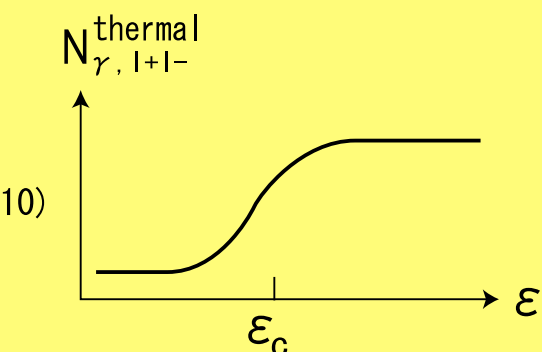
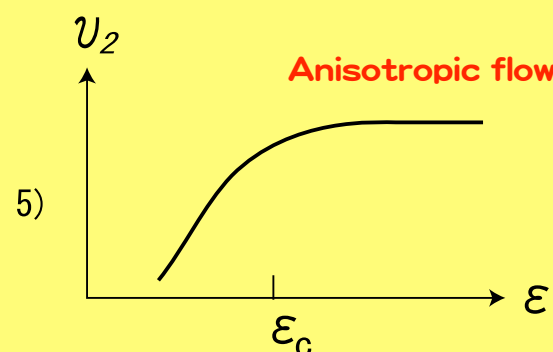
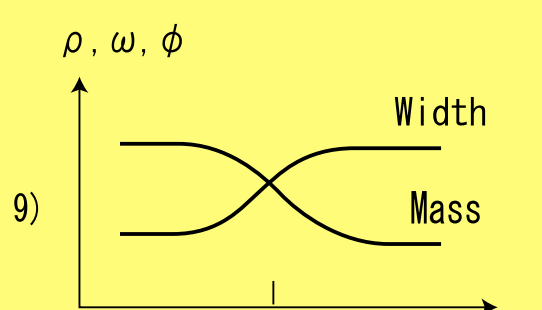
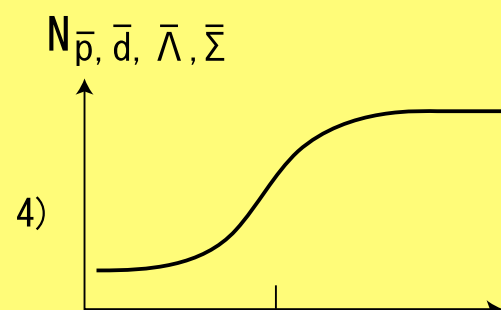
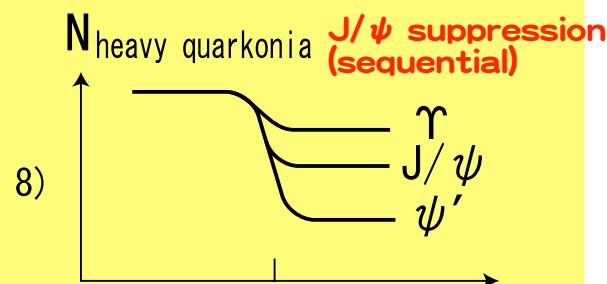
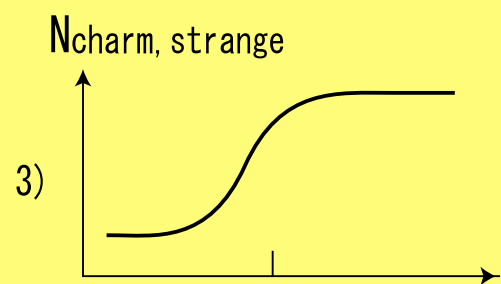
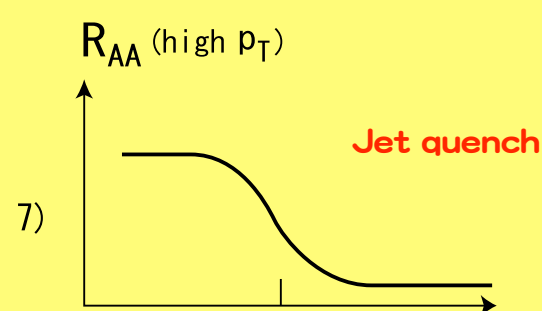
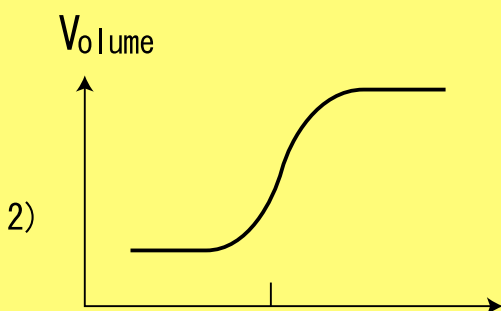
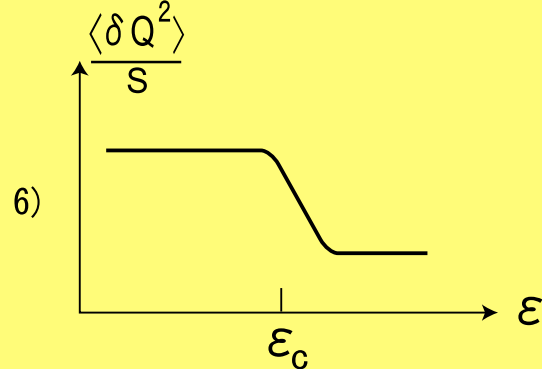
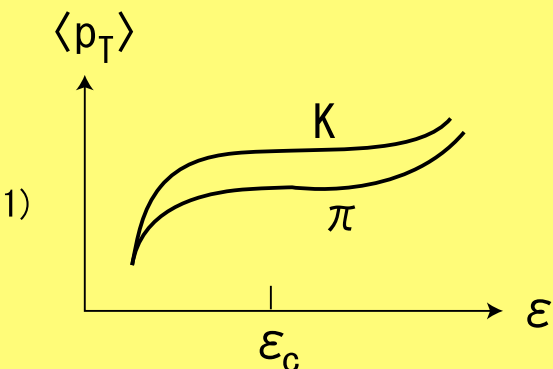
2007年頃

QGP生成の Signature

• 様々な実験的証拠 (Signature)が理論家から 提案された

- ✓ Strangeness Enhancement
- ✓ 巨大ハドロンガスの出現
- ✓ デバイ遮蔽効果 (J/ψ 抑制効果)
- ✓ EoSのSoftening (1次の相転移)
- ✓ 熱的光子による高温状態の直接観測
- ✓ 質量の変化 (前駆現象として)

- ⇒ クォークレベルで統計力学的取り扱いすることが可能であり、かつ、思考経済的にも得すること。
- ⇒ クォークレベルの導入が不可欠な現象が見られること



REVIEW ARTICLE

Open Access

Signatures of QGP at RHIC and the LHC

T. Niida^{1*} and Y. Miake^{1,2}**Abstract**

The progress over the 30 years since the first high-energy heavy-ion collisions at the BNL-AGS and CERN-SPS has been truly remarkable. Rigorous experimental and theoretical studies have revealed a new state of the matter in heavy-ion collisions, the quark-gluon plasma (QGP). Many signatures supporting the formation of the QGP have been reported. Among them are jet quenching, the non-viscous flow, direct photons, and Debye screening effects. In this article, selected signatures of the QGP observed at RHIC and the LHC are reviewed.

Keywords: Quark-gluon plasma, Heavy-ion collisions

1 Introduction

For the study of extremely hot matter, experiments on ultra relativistic heavy-ion collisions have been carried out at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) at center-of-mass per nucleon-nucleon energies of $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 200$ GeV since 2000, and also at the Large Hadron Collider (LHC) at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 - 5.5$ TeV since 2009. Many experimental and theoretical studies have revealed a new state of matter, the quark-gluon plasma (QGP), in these collisions where quarks and gluons are no longer confined within hadrons.

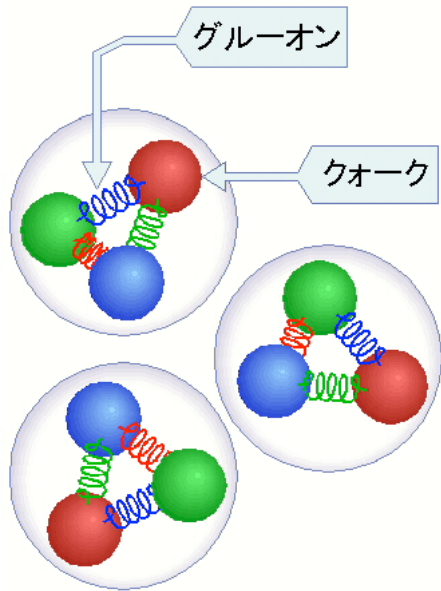
Figure 1 shows a schematic phase diagram of different phases for nuclear matter as functions of temperature and baryon chemical potential μ_B , with conjectured phase boundaries between the QGP and hadrons. Lattice QCD calculations predict a rapid but smooth crossover phase transition around the critical temperature $T_c \approx 155$ MeV at small μ_B [1, 2]. Also, theoretical models suggest a first-order phase transition at high μ_B and the existence of the end point of the phase boundary, called the critical point.

as jet quenching, is discussed in Section 2 and the latter, the hydrodynamic behavior in Section 3. In Section 4, other signatures supporting QGP formation together with related open questions are introduced. Since the signatures of the QGP formation were observed both at RHIC and the LHC, the next question is where the phase transition exists. In Section 5, the beam energy dependences of various observables are discussed in the context of the quantum chromodynamics (QCD) phase diagram.

There are many comprehensive review papers available [5–9]. In this article, selected topics are reviewed, giving views on where we are and where we are going.

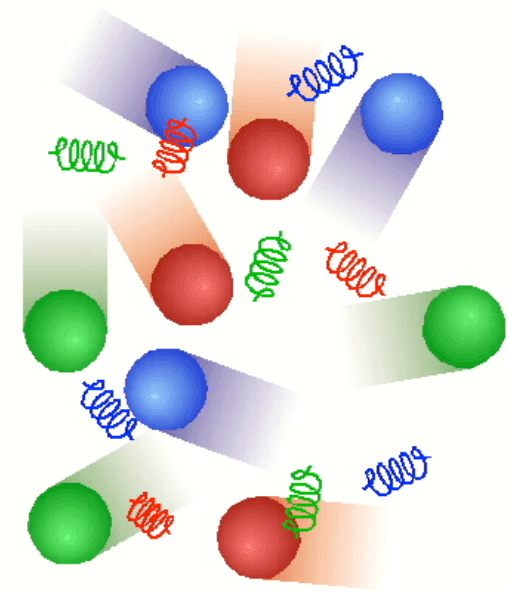
2 Jet quenching—high opacity

External probes are often utilized to see inside matter and study its properties, e.g. the internal structure of hadrons by deep inelastic scattering. In heavy-ion collisions, the system life time is extremely short (~ 10 fm/c) and therefore it is almost impossible to use a literally external probe. Instead such a “tomography” can be performed



①

Fire Ballの 概念の確立



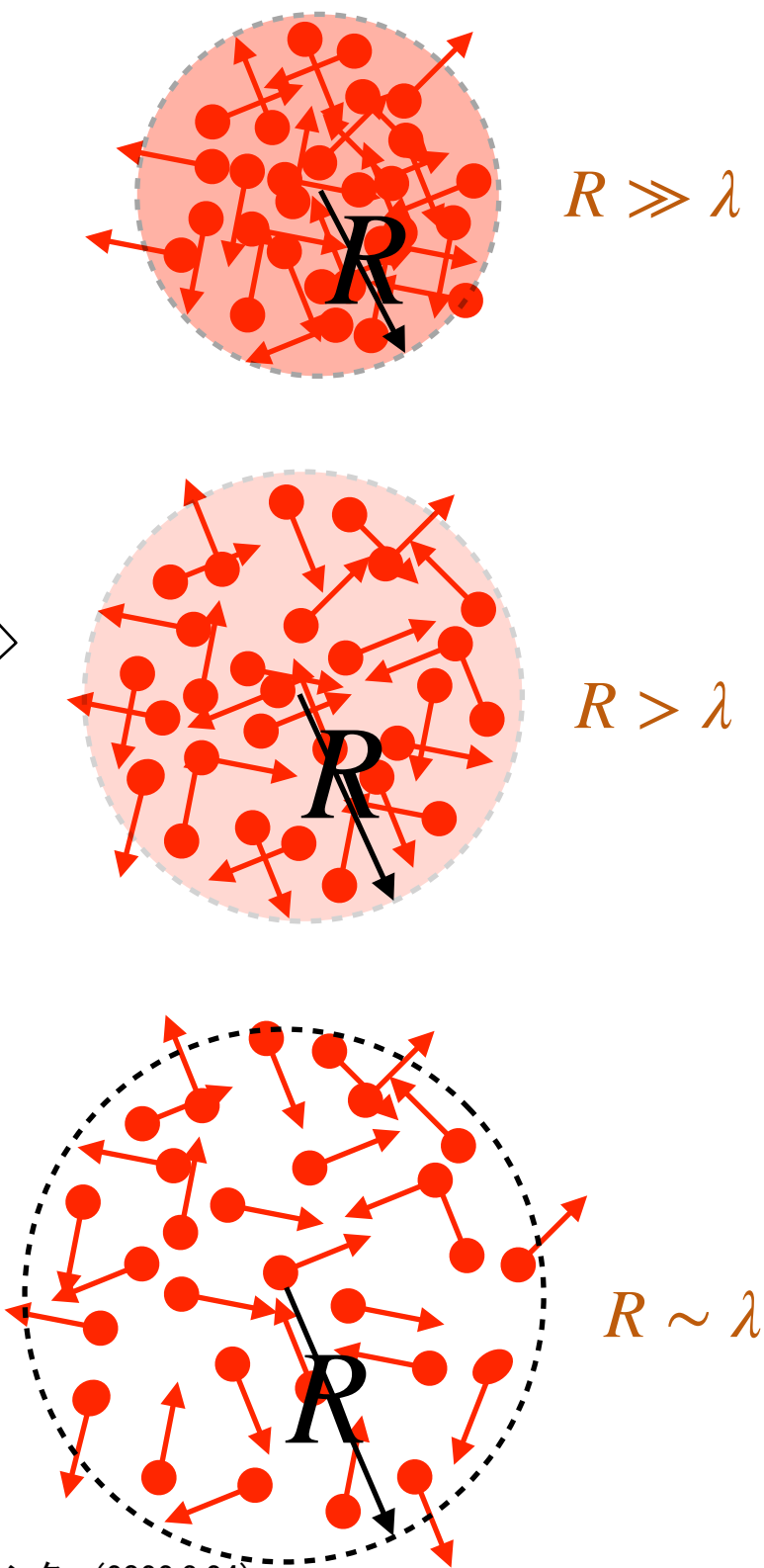
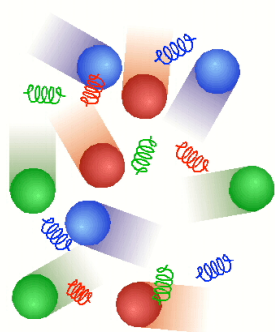
～Freeze-out～



DynamicなAA衝突の標準的描像が確立

膨張を伴う
Dynamicな
プロセス

Freeze-outの概念



✓ 膨張するFireBallを考える

- 当初は互いに衝突し、運動量を互いにやりとりする
- 断熱膨張と共に密度と温度が低下
- 密度低下のために粒子同士の衝突がなくなり各粒子の運動量が固定される瞬間

➡ 運動学的 Freeze-out

✓ 2つの大切なパラメータ

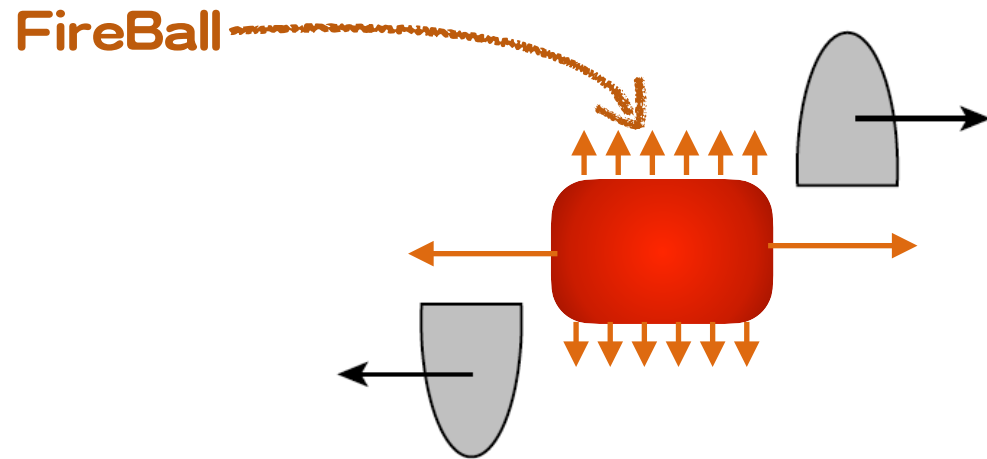
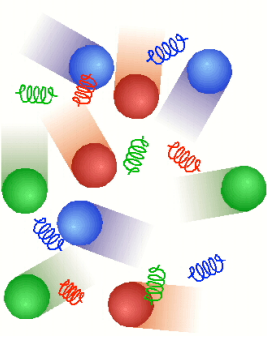
- FireBallの大きさ ; R
- 平均自由行程 ; $\lambda = \frac{1}{n\sigma}$

✓ Freeze-outの条件

$$R \sim \lambda$$

↑ 数密度
↑ 断面積

原子核・原子核衝突の時空発展



✓ 膨張とともに温度低下

- Big Bang ; 3次元膨張
- Little Bang ; 1次元膨張

✓ 2つのFreeze-out

① 化学的 Freeze-out

⇒ 粒子生成が終わる

② 運動学的 Freeze-out

⇒ 運動量のやり取りが終わる

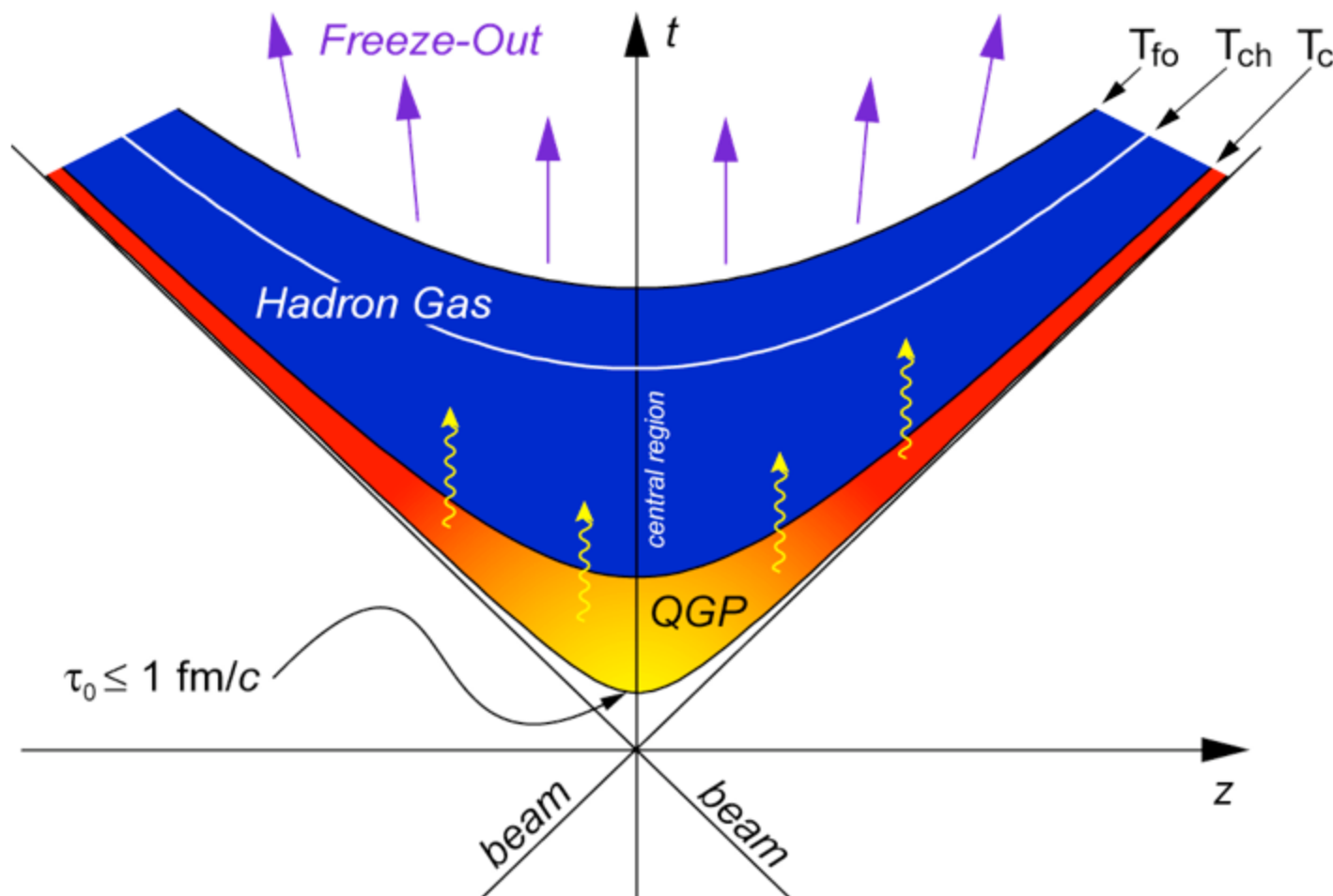
✓ 3つの温度

- T_c ; QGP → ハドロン相転移
- T_{chem} ; 化学平衡温度
- T_{kin} ; 運動学的温度

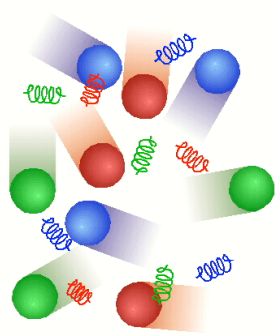


DynamicなAA衝突の標準的描像が確立

Minkowski空間

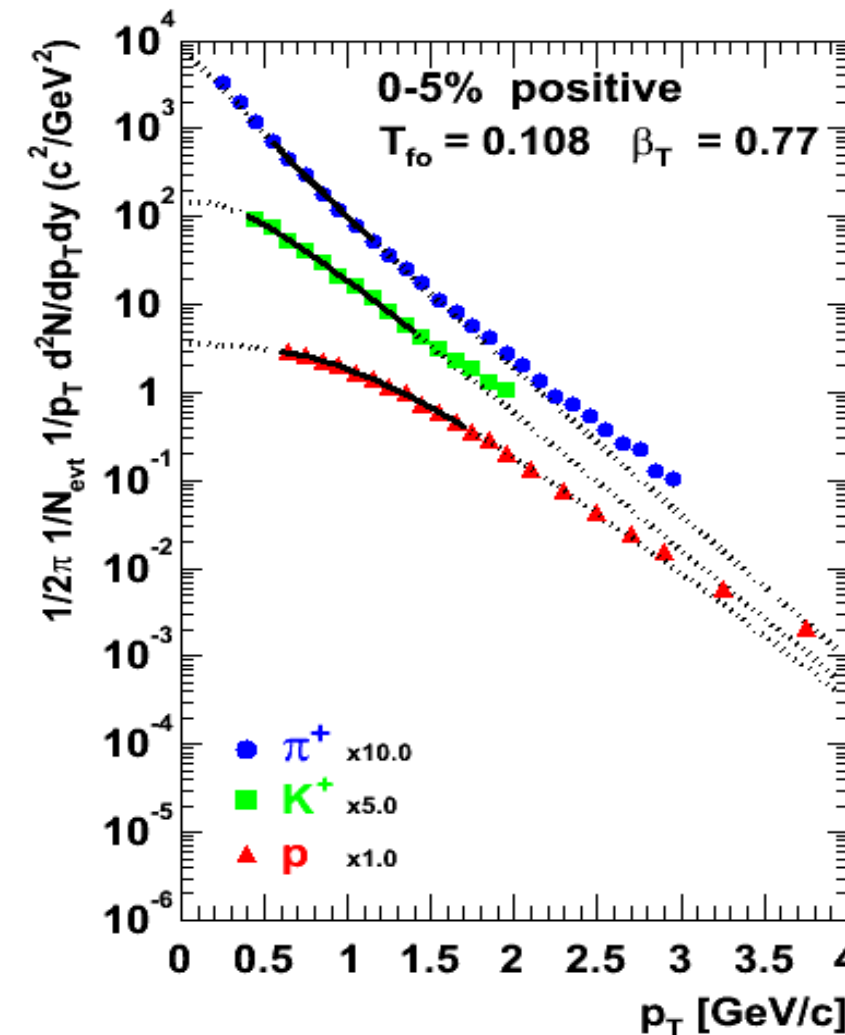
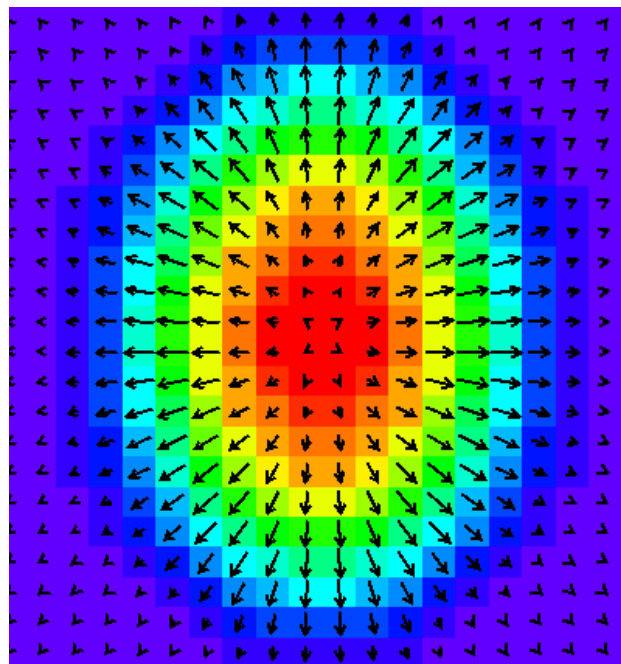


横運動量分布とBlast Wave Model ～ 運動学的 Freezeout ～



PHENIX, PRC69,034909(2004)

爆発的膨張速度の様子



$$\frac{dN}{p_T dp_T} \propto \int_0^R dr m_T I_0\left(\frac{p_T \sinh(\rho)}{T}\right) K_1\left(\frac{m_T \cosh(\rho)}{T}\right)$$

$$\beta = \beta_s(r/R)^n$$

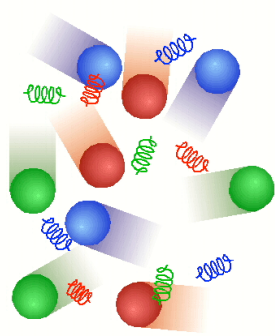
I_0, K_1 ; Bessel functions

✓ 流体力学的膨張模型に基づいて横運動量分布をフィット

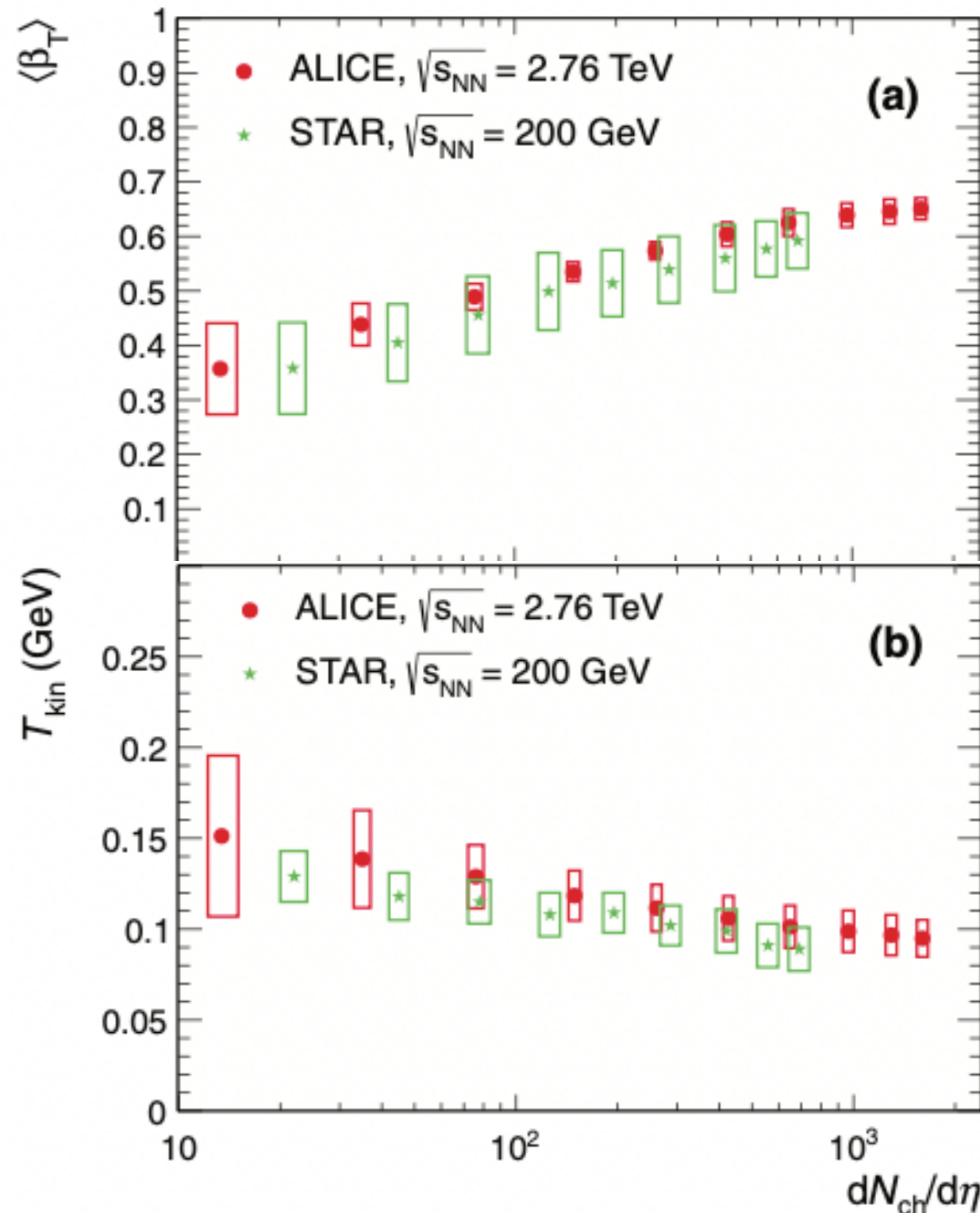
● 例) 温度～100MeV、膨張速度～80%

⇒ フィットする横運動量領域に依存するが、
く 2GeV/c の運動量分布を良く記述できる

RHICとLHCのFEBの比較



ALICE, PRC88(2013)044910



✓ 低横運動量分布をRHIC, LHCで
周辺衝突から中心衝突まで測定
し、BWMで解釈

✓ 横軸； $dN/d\eta$ (多重度)

➡ FireBallの体積に比例

✓ 多重度(Centrality)と共に

● 膨張速度 増加

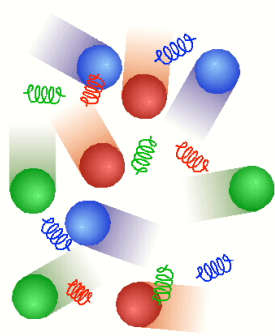
● 温度 低下

➡ 運動学的Freeze-out？

✓ RHICとLHCで良い一致！

● FireBallが大きいほど温度が
低いのはなぜだろう？

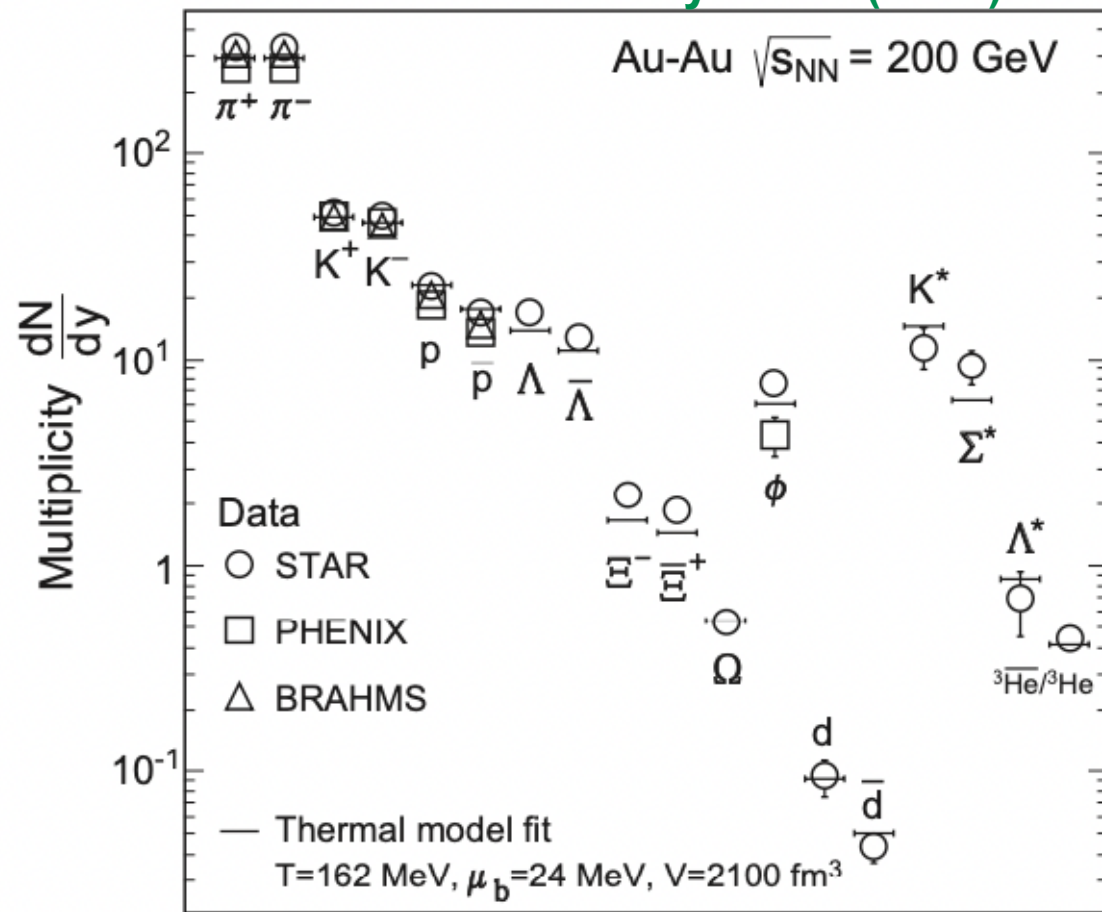
様々な粒子種間の化学平衡 ～ 化学的 Freezeout ～



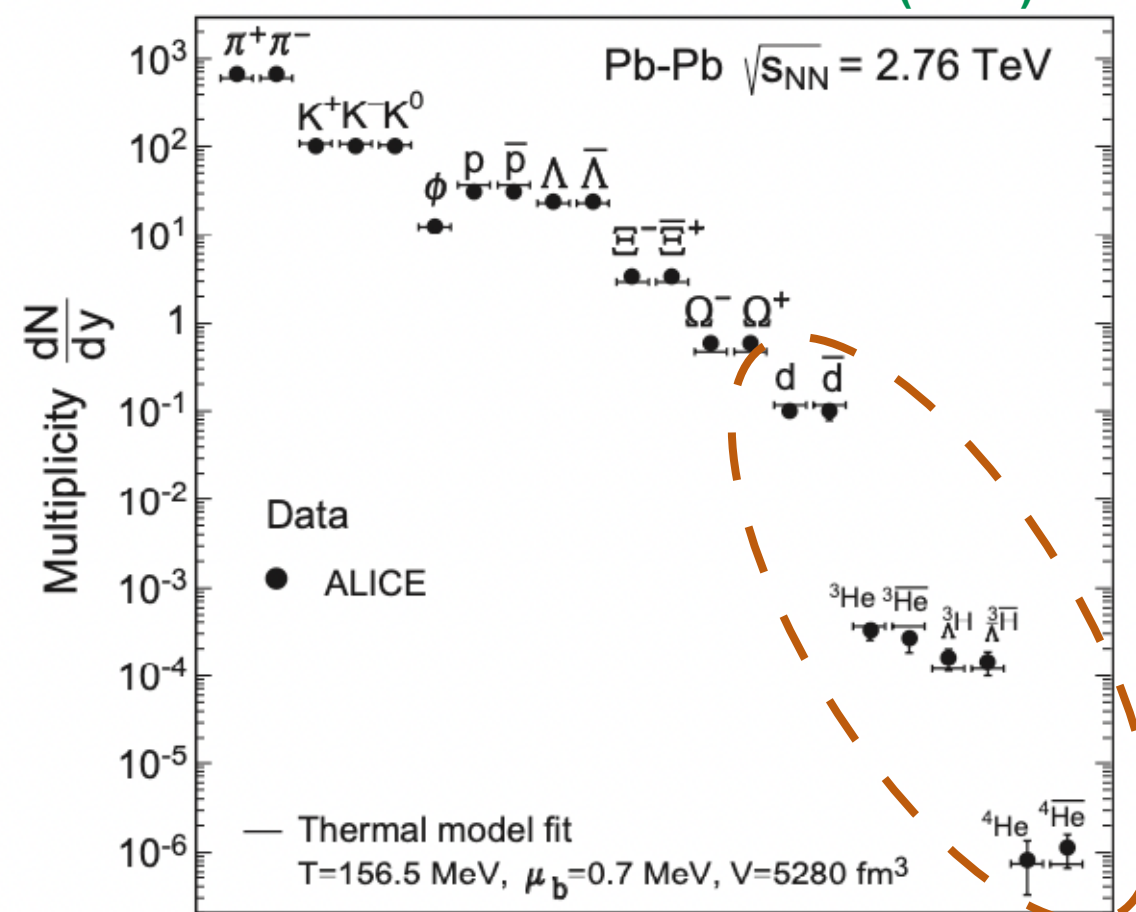
$$n_i = \frac{g_i}{2\pi^2} \int_0^\infty \frac{p^2 dp}{e^{(E_i - \mu_i)/T} \pm 1}$$

$$\frac{dN}{dy} \propto \exp(-m/T_{\text{chem}})$$

Nucl.Phys.A904(2013)535c



Nature 561(2018)321



✓ 様々な種類のハドロンの生成量が温度、化学ポテンシャル、体積というたった3つの変数で説明

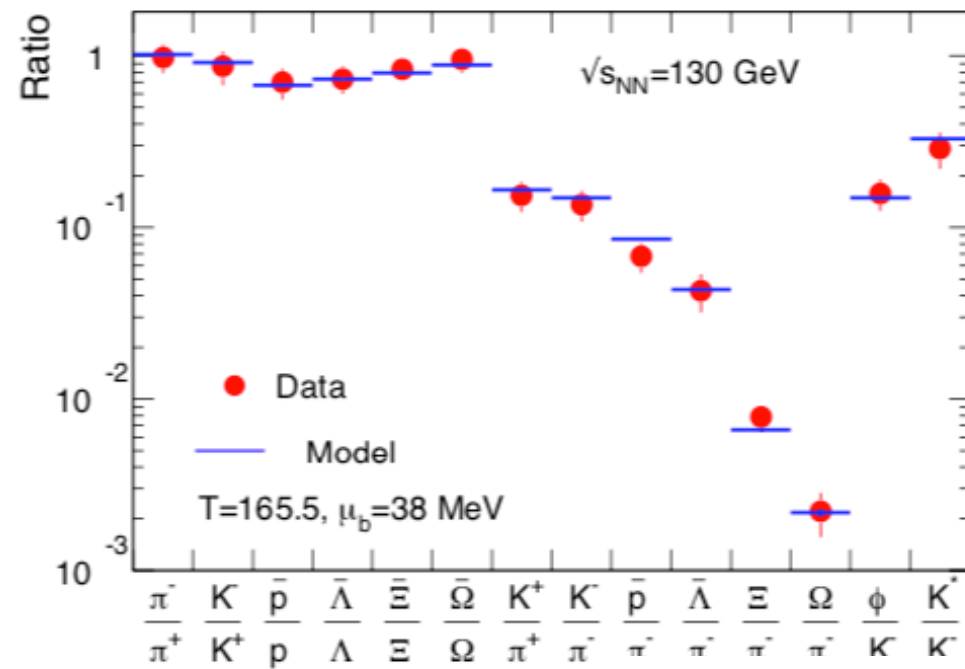
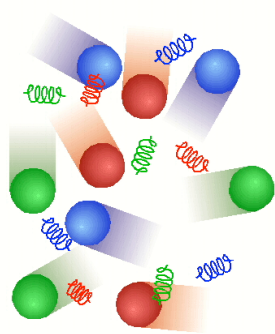
- 3桁～9桁に及ぶ生成量比 (驚異的、偶然とは思えない)

✓ クォークの化学平衡を仮定した統計模型と測定データが良い一致

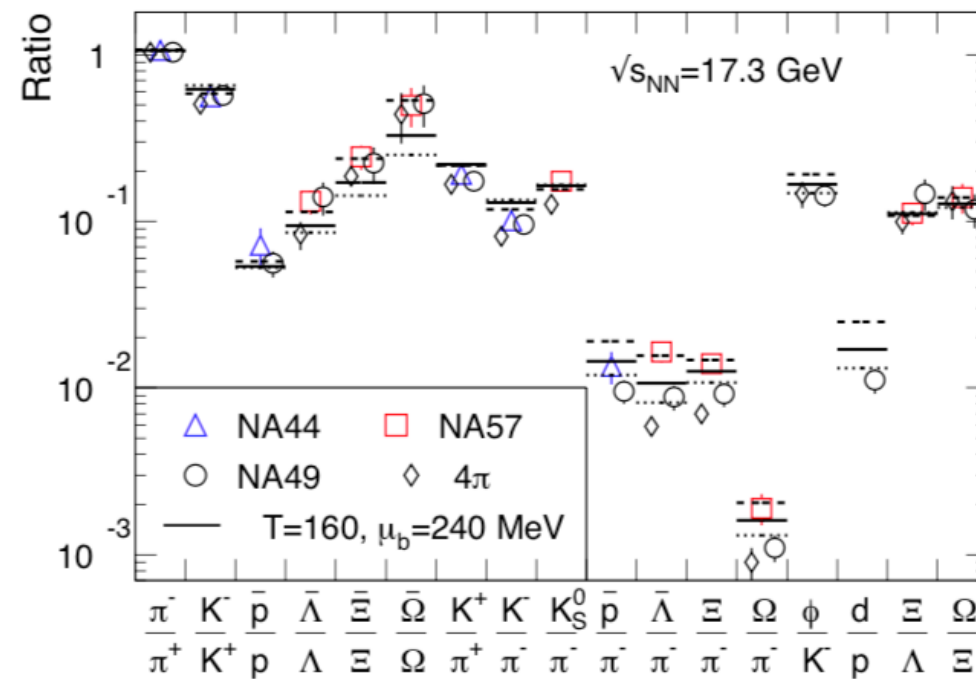
- RHICとLHCでほぼ同じ温度。LHCでは体積が大きい！
- 化学平衡時の温度はLattice QCDが予想する相転移点付近

Nuclear
coalescence
vs. thermal
production?

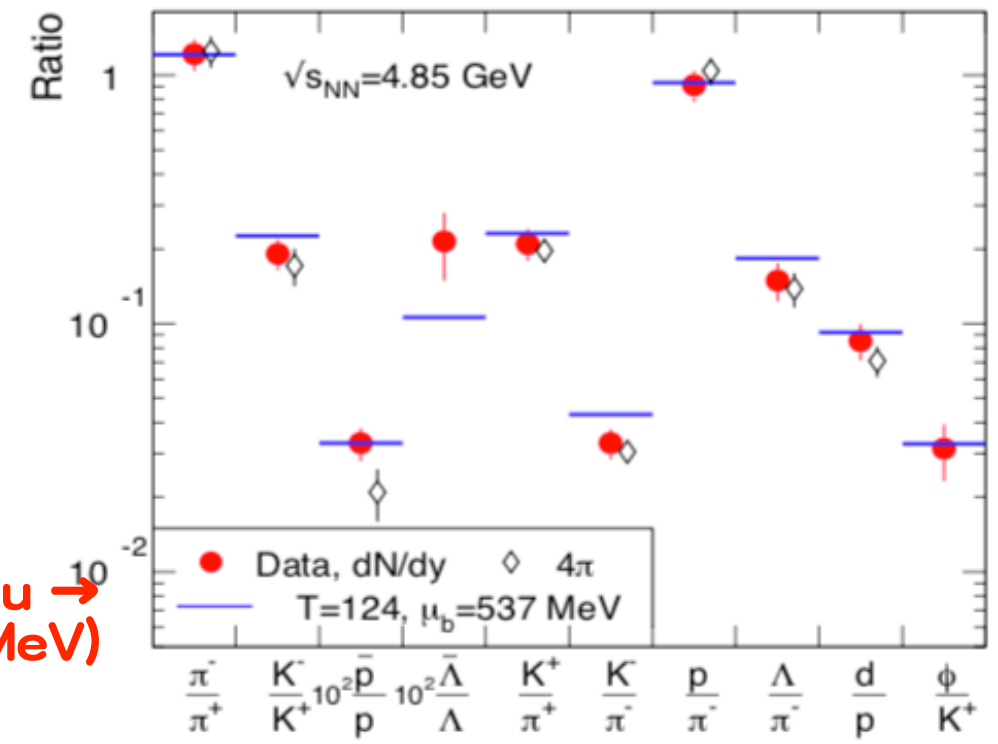
様々なビームエネルギーで解析された 化学平衡温度



← RHIC 130GeV Au+Au
($T = 165.5 \text{ MeV}, \mu_B \sim 38 \text{ MeV}$)

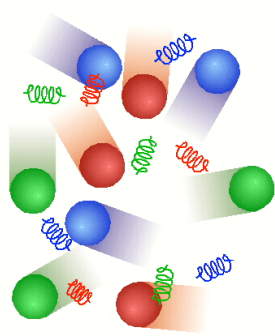


← SPS 17GeV Pb+Pb
($T = 160 \text{ MeV}, \mu_B \sim 240 \text{ MeV}$)

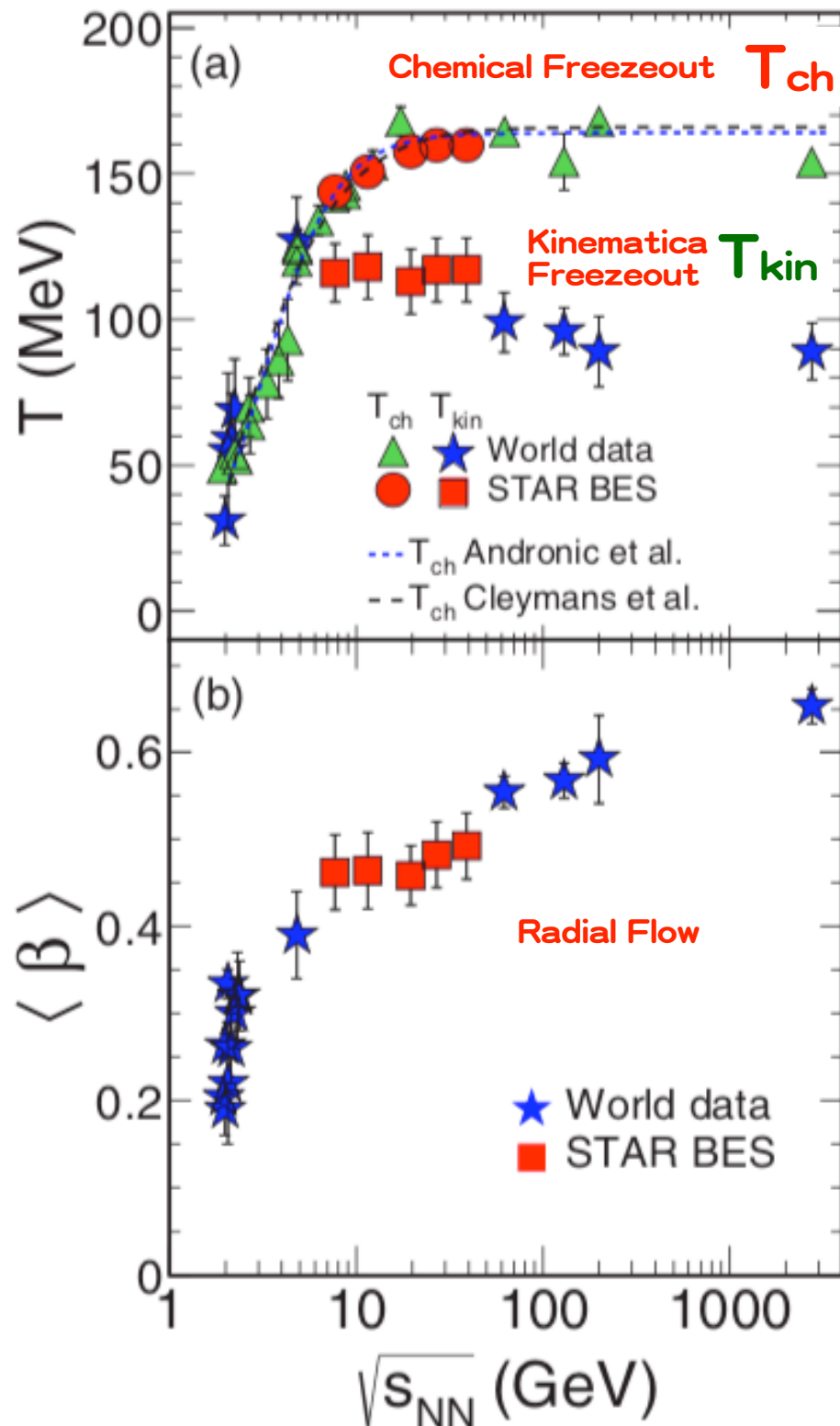


AGS 4.8GeV Au+Au →
($T = 124 \text{ MeV}, \mu_B \sim 537 \text{ MeV}$)

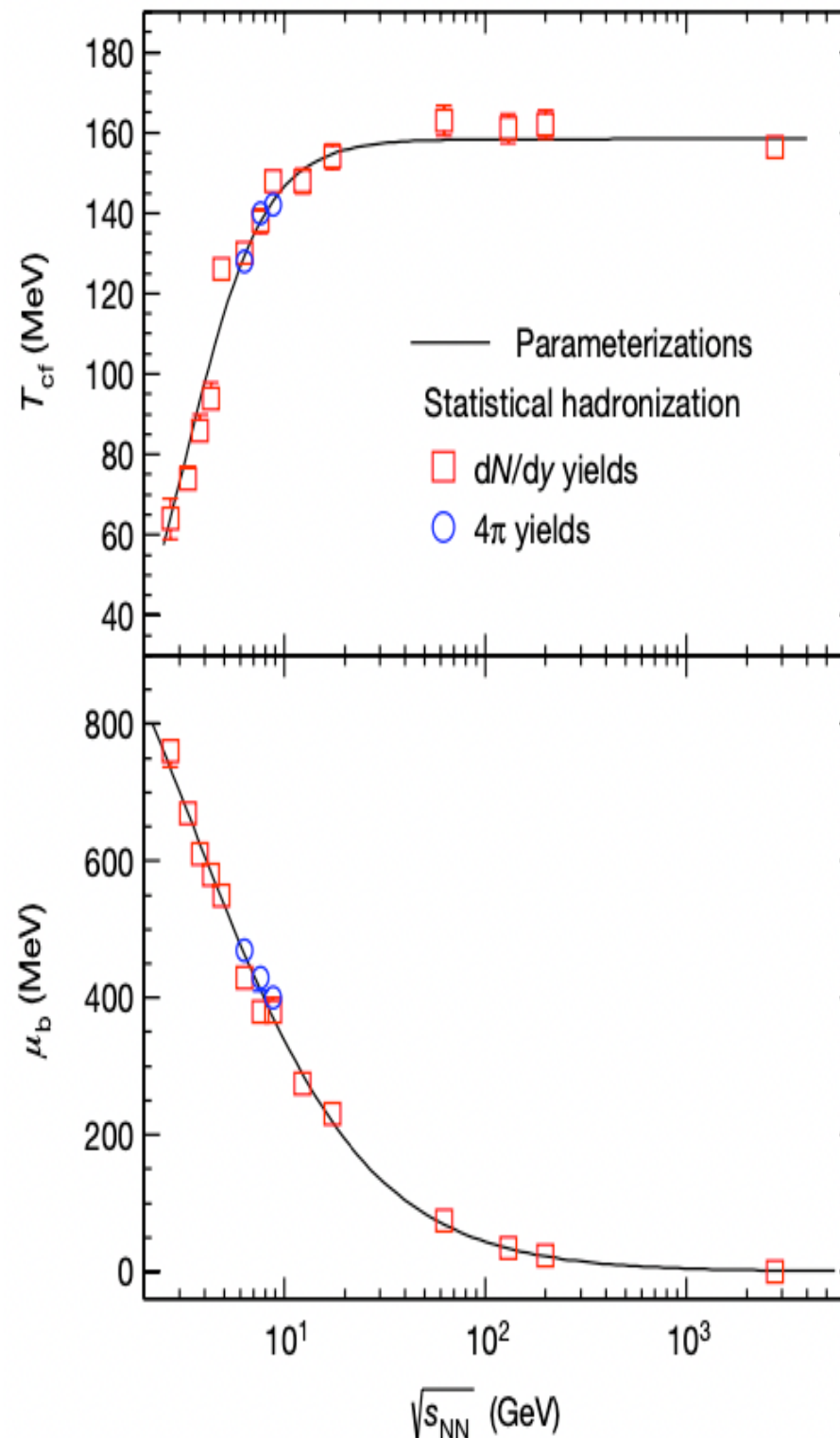
原子核・原子核衝突の様相



STAR, Phys.Rev. C96(2017)044904



Nature 561(2018)321



✓ 化学平衡温度、運動学的温度；

- $\sqrt{s_{NN}} \sim 10$ GeV以上で一定
- $\sqrt{s_{NN}} = 2 \sim 10$ GeVで急速に変化

✓ バリオン密度 μ_B ；

- $\sqrt{s_{NN}} \sim 100$ GeV以上で一定

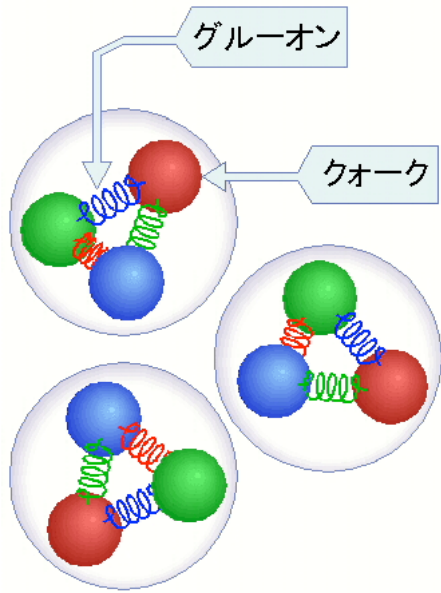
⇒ Bjorken領域

- $\sqrt{s_{NN}} \sim 10$ GeV以下で極めて大きく

⇒ Landau領域

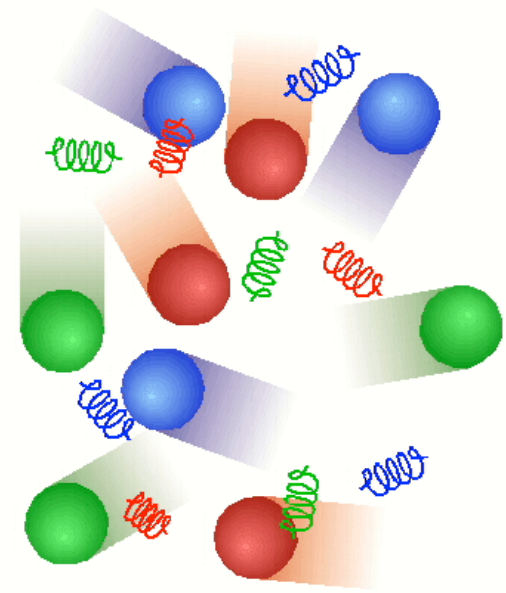
↓
DynamicなAA衝突の標準的描像が確立

↓
精密科学への道筋へ



②

Anisotropic Flow

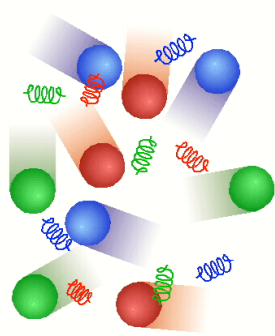


Radial Flowでは信じて
もらえなかった積年の鬱憤

～流体力学的振舞の確立～

↓
統計力学

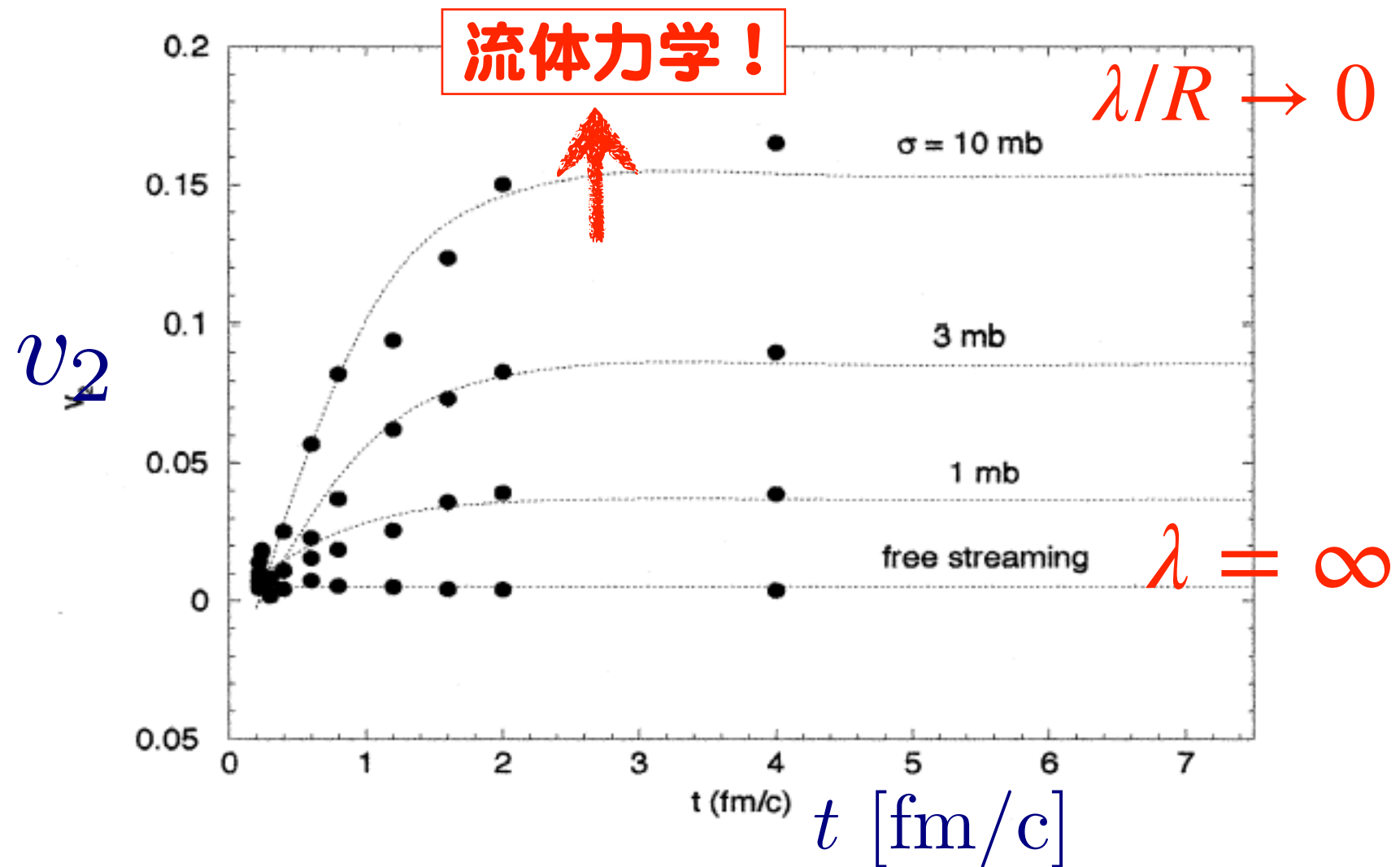
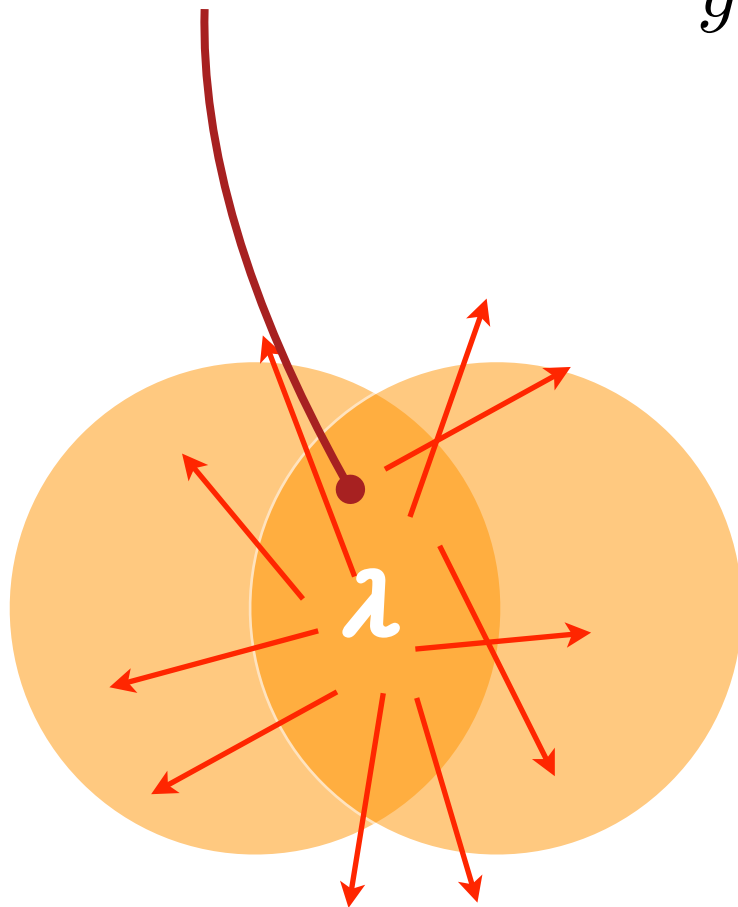
初期状態のアーモンド形状／座標空間異方性から 終状態の運動量空間異方性に変換される様子



初期状態 $\varepsilon_{\text{ecc}} = \left\langle \frac{y^2 - x^2}{y^2 + x^2} \right\rangle$

$\lambda = \frac{1}{n\sigma}$

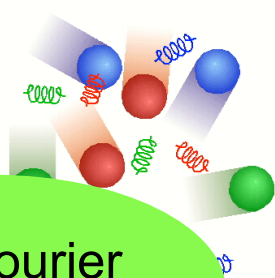
終状態 $v_2 = \left\langle \frac{p_y^2 - p_x^2}{p_y^2 + p_x^2} \right\rangle$



✓ 反応初期に座標空間異方性から運動量空間異方性に変換される！

● ～2fm/c程度の反応初期の密度分布情報を強く反映

流体計算ときっちり比較できる喜び



座標空間
における
Eccentricity

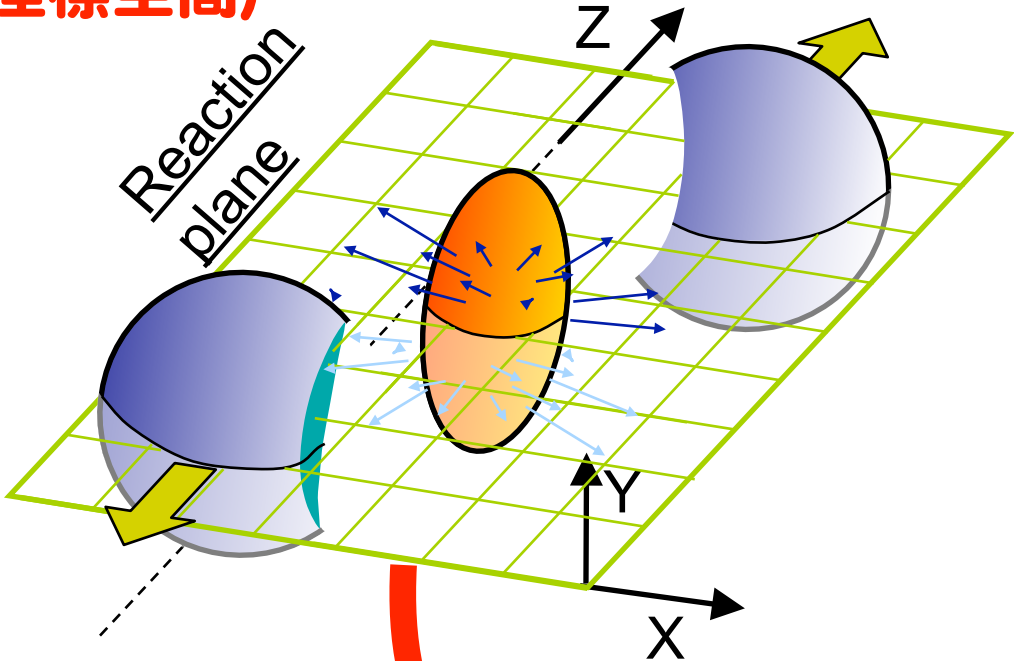
$$\varepsilon_{\text{ecc}} = \left\langle \frac{y^2 - x^2}{y^2 + x^2} \right\rangle$$

運動量空間
における
Eccentricity

$$v_2 = \left\langle \frac{p_y^2 - p_x^2}{p_y^2 + p_x^2} \right\rangle$$

▶ 実験的に初期状態と終状態を測定可

初期状態
(座標空間)



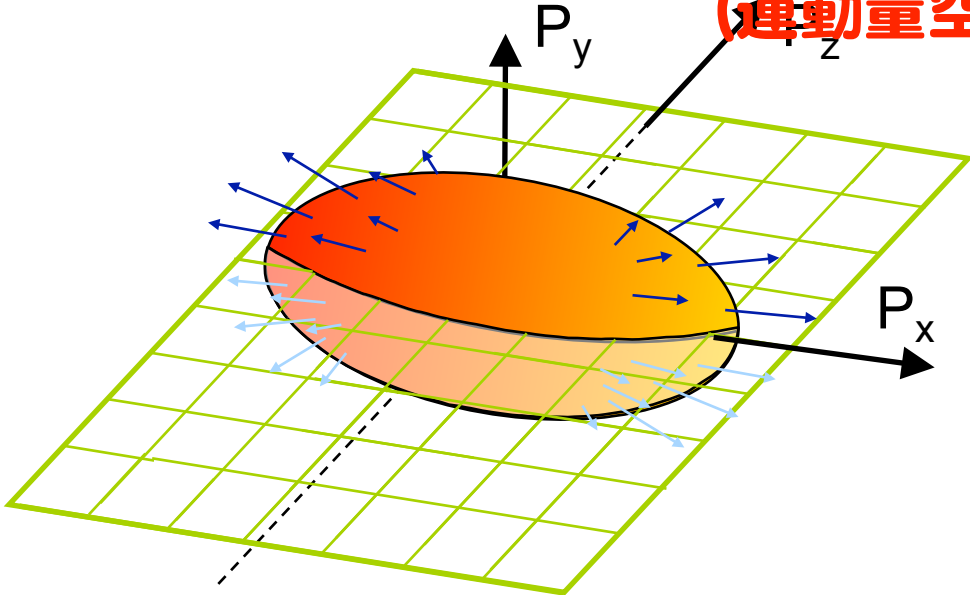
INPUT

実験

比較

理論

終状態
(運動量空間)



OUTPUT

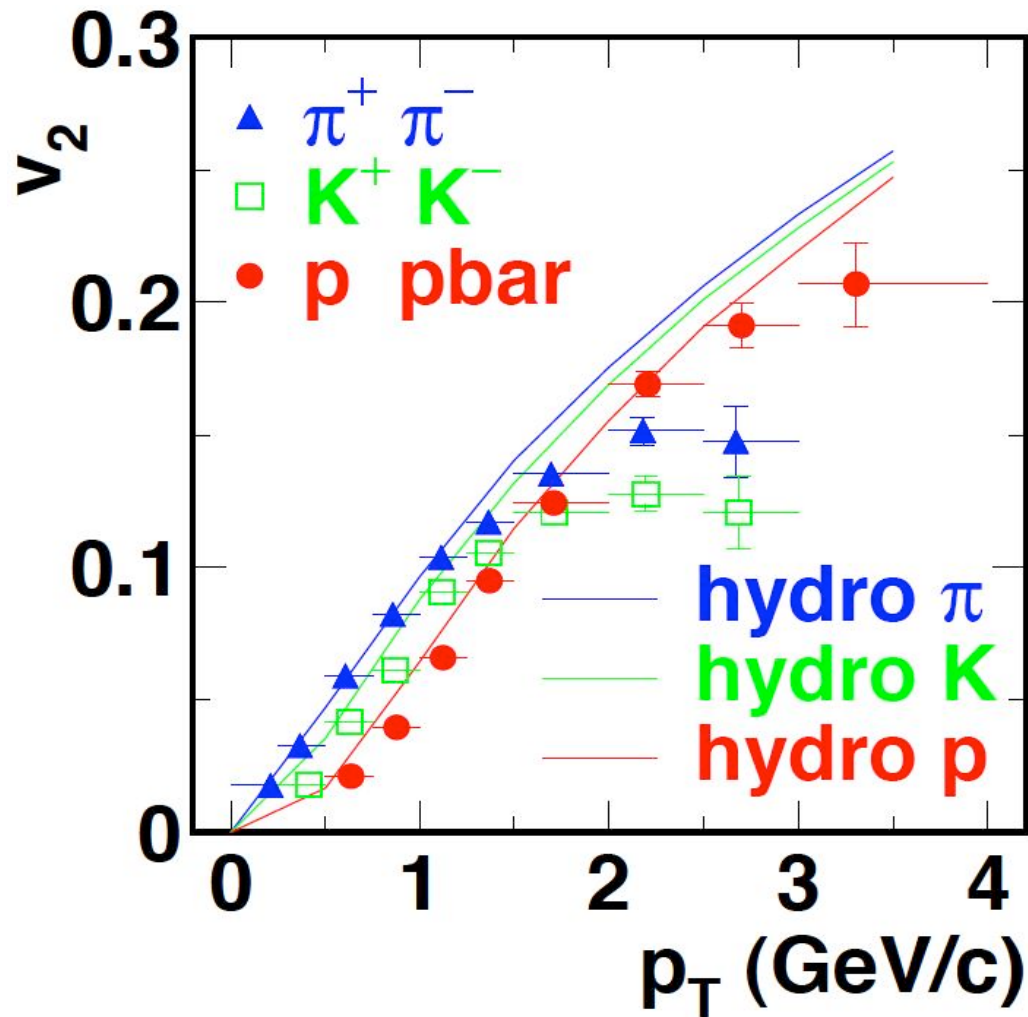
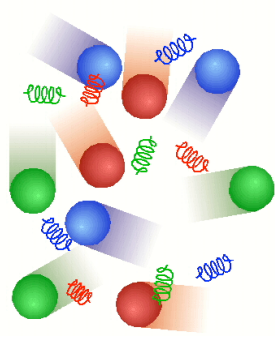
流体力学模型計算

Viscosity, EOSなどのパラメータの検証

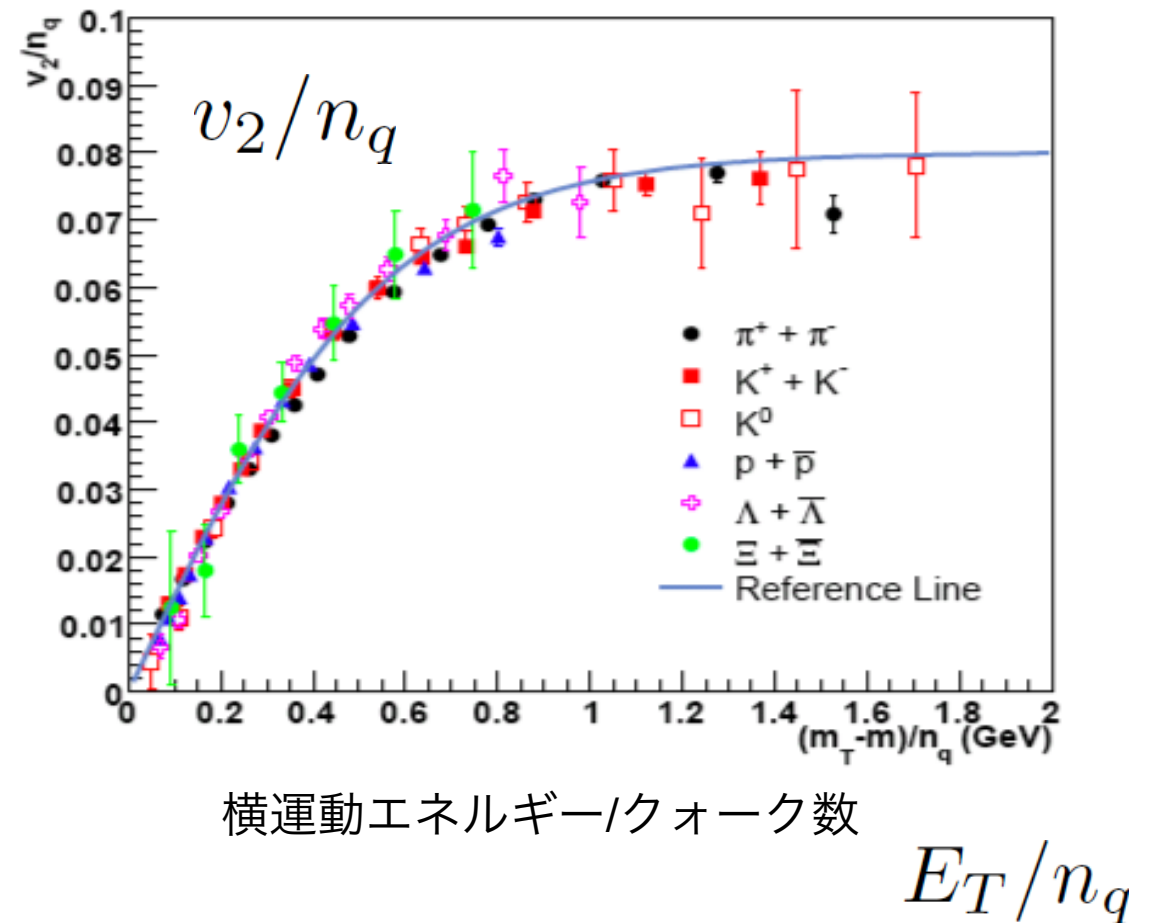
精密科学への道筋

PHENIX TOF粒子識別の成果

大きな方位角異方性 v_2



方位角異方性/クォーク数



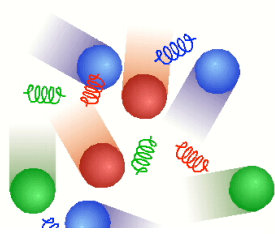
✓大きな楕円的方位角異方性 (v_2) の観測

- 極めて早く熱化している ~ 0.6 fm/c
- 完全流体! $\rightarrow$ 強結合 QGP の発見
- クォーク数 (n_q) スケーリング
 $\rightarrow$ パートンレベルで異方性が生成

v_2 ; 方位角分布のフーリエ第2成分

$$E \frac{d^3N}{d^3p} = \frac{d^2N}{2\pi p_T dp_T dy} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n \cos[n(\phi - \Psi_r)] \right)$$

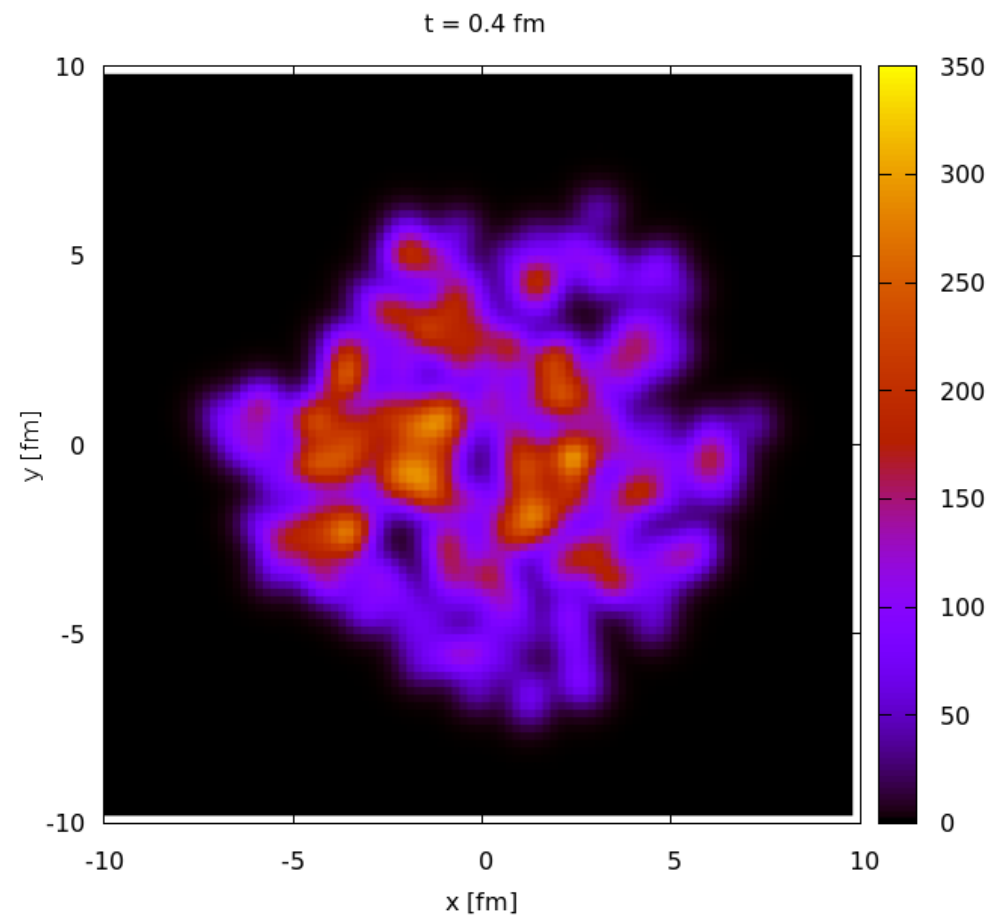
現実の原子核・原子核衝突で起きている揺らぎからQGPの粘性の情報



現実の原子核・原子核衝突では核子数と衝突確率が有限であることから、揺らぎが発生→高次のフーリエ成分

Schenke and Jeon, Phys.Rev.Lett.106:042301

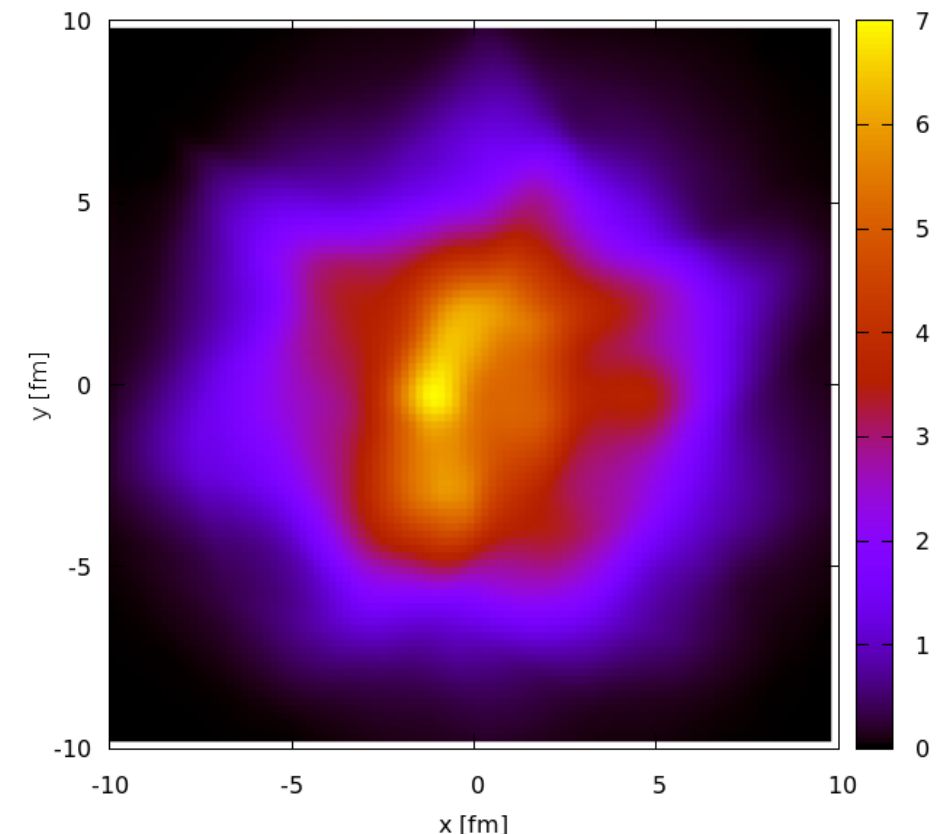
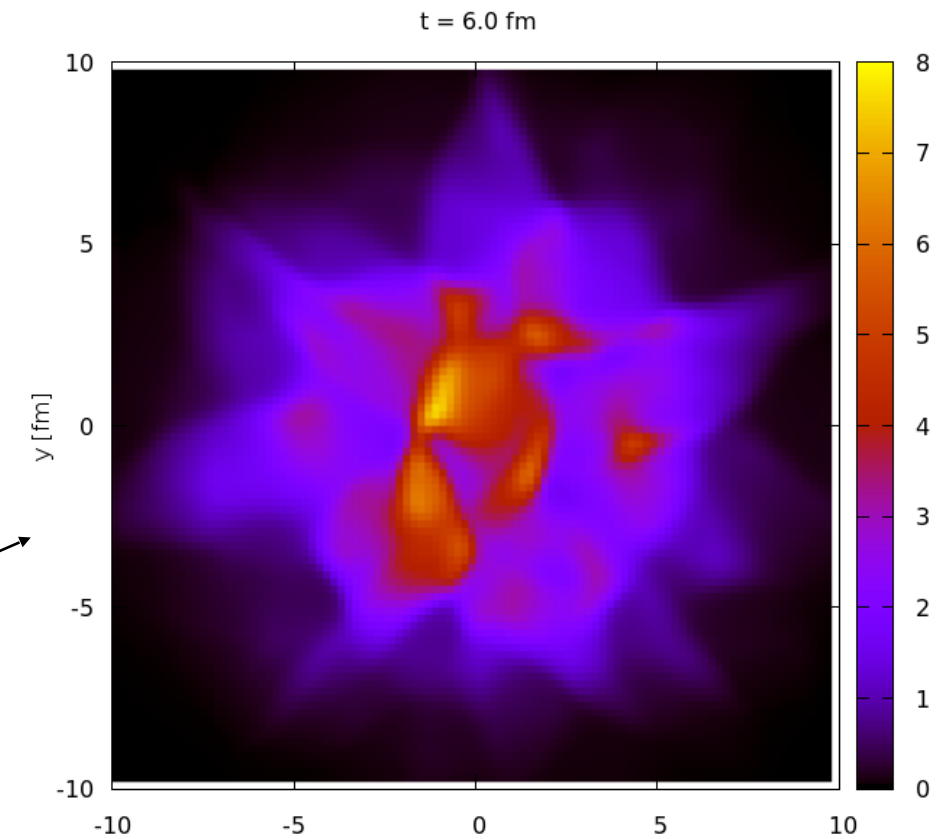
Slide from Marco vanLeeuwen



$$\eta/s = 0$$

時間発展

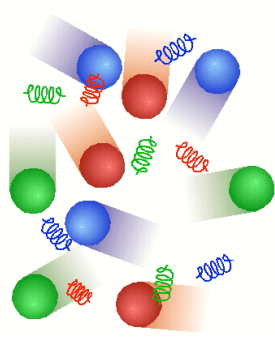
$$\eta/s = 0.16$$



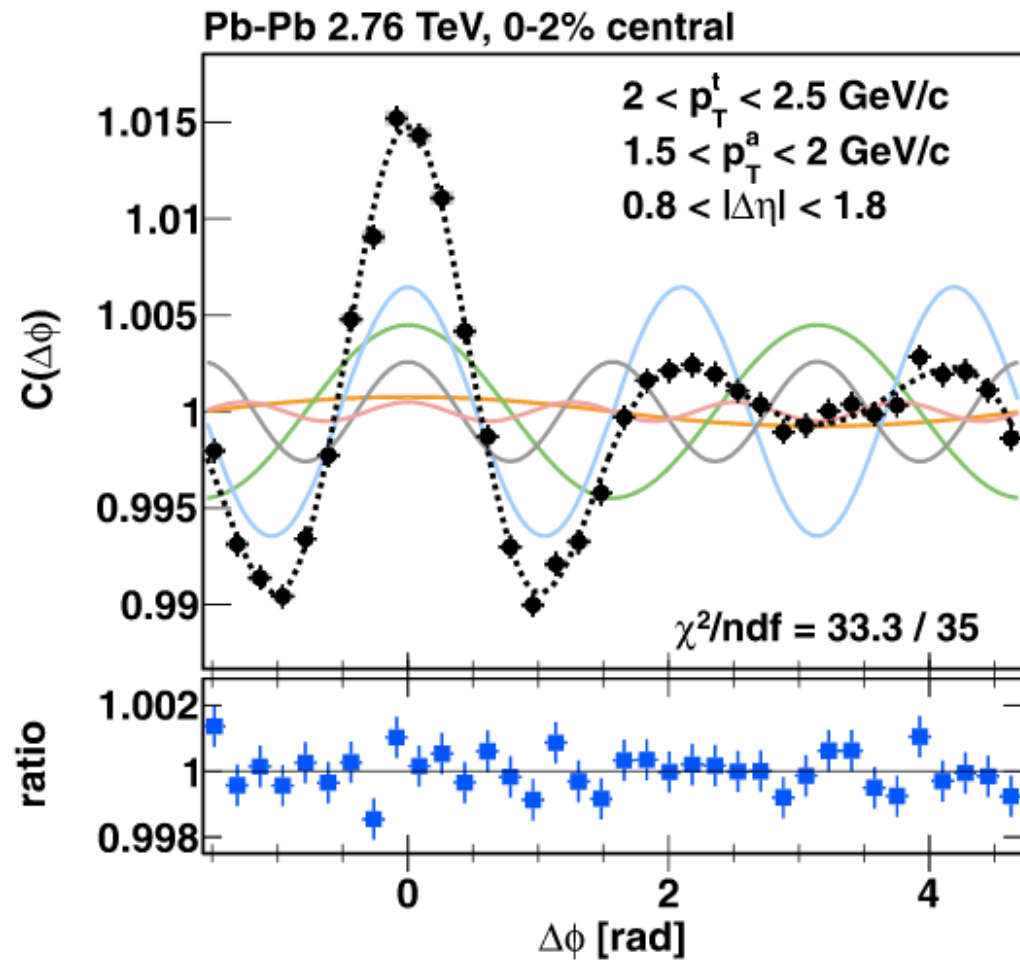
✓ 揺らぎを起源とする高次成分

✓ QGP物性の一つである粘性が反映

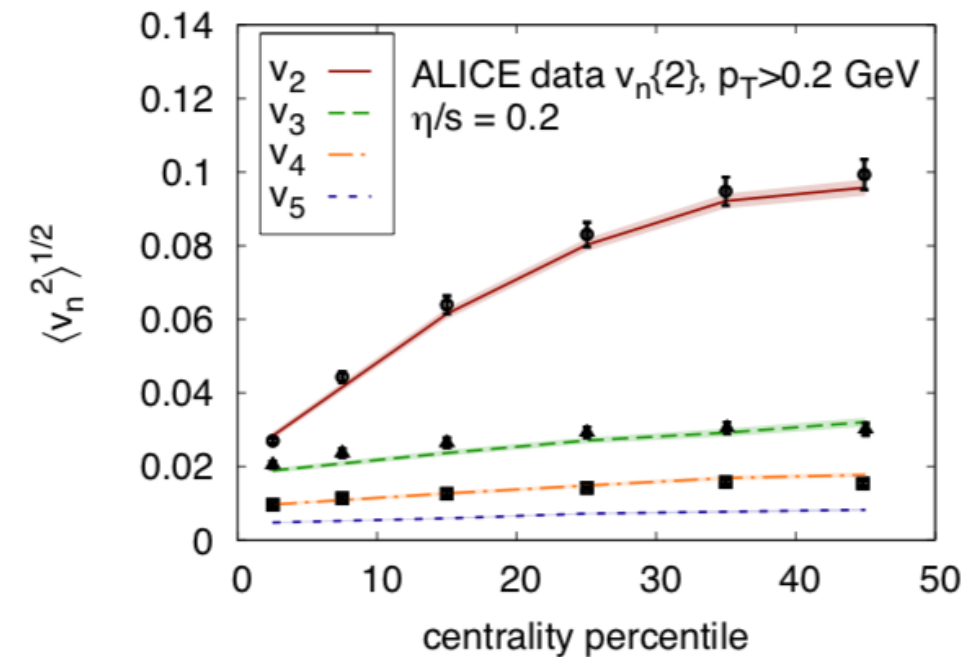
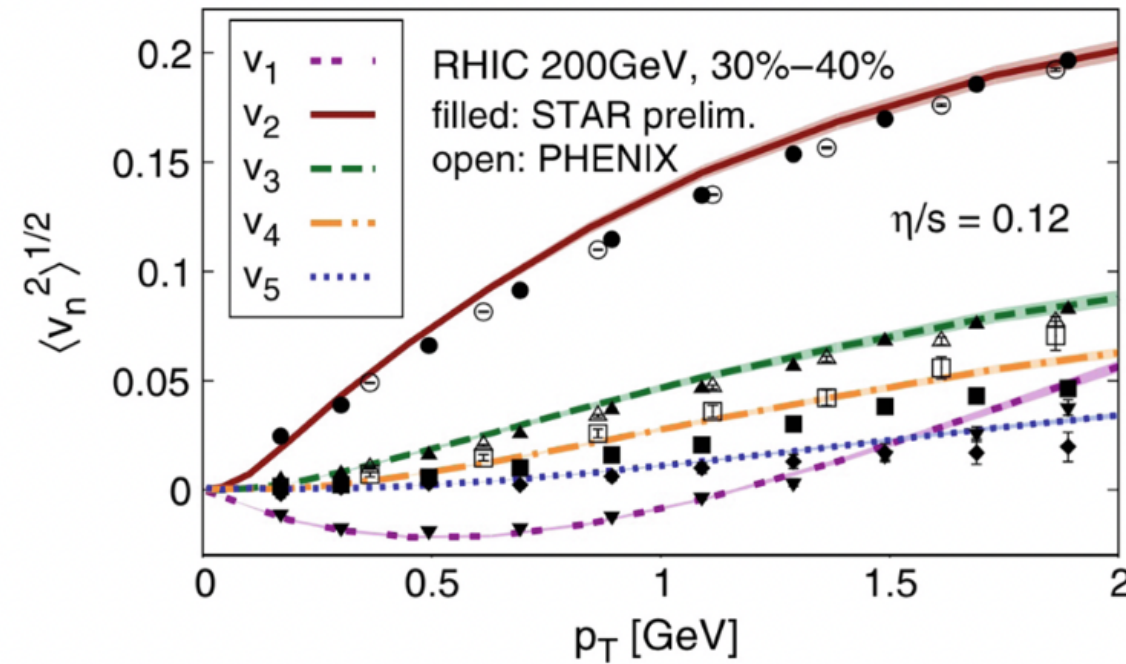
非常に小さい比粘性 (η/s)



ALICE, PLB, 708, (2012)



Gale et al. PRL 110,012302 (2013)



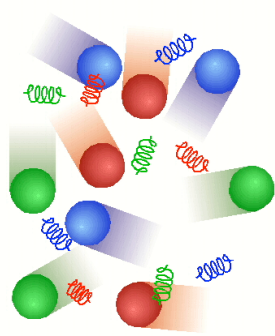
✓ 2粒子方位角相関測定により $v_2 \sim v_5$ までのフーリエ成分測定

● 高統計測定により達成

✓ 流体力学模型との比較により

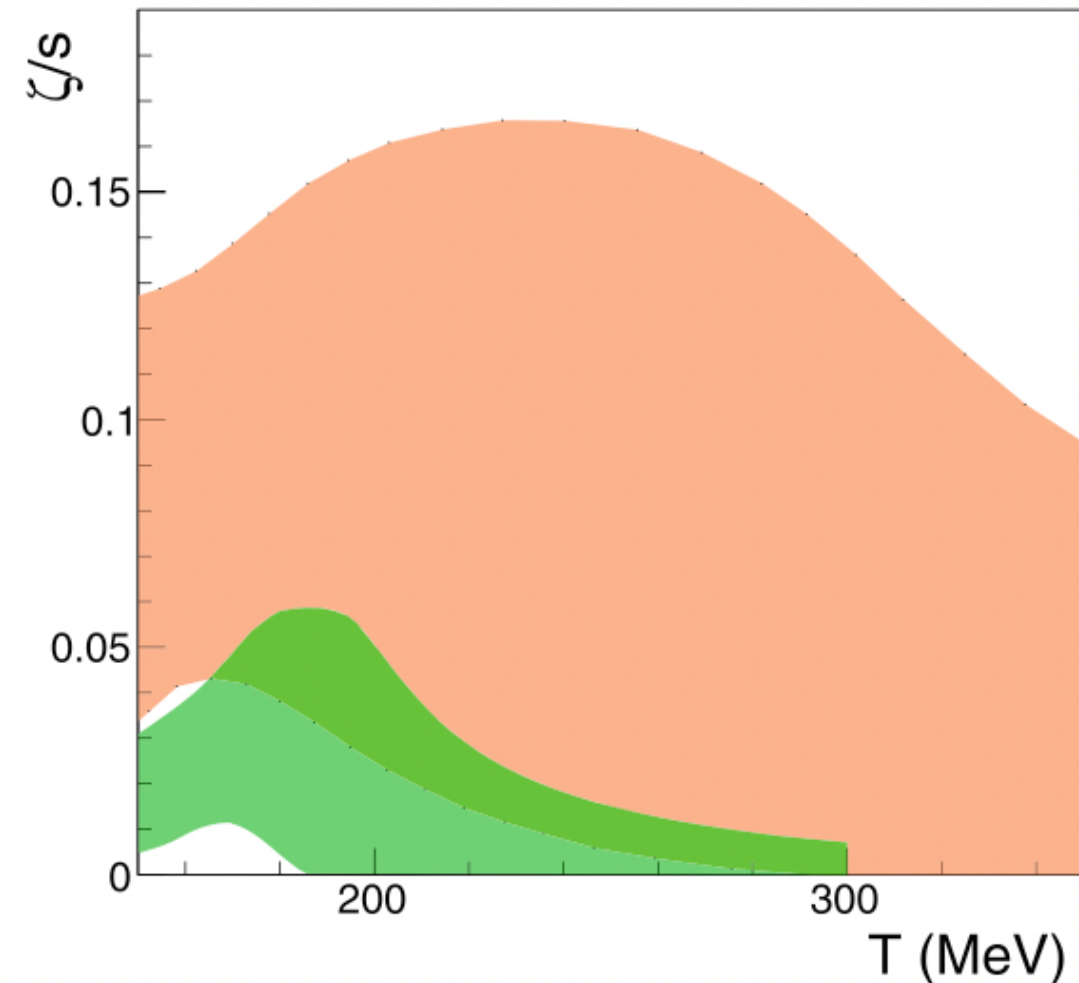
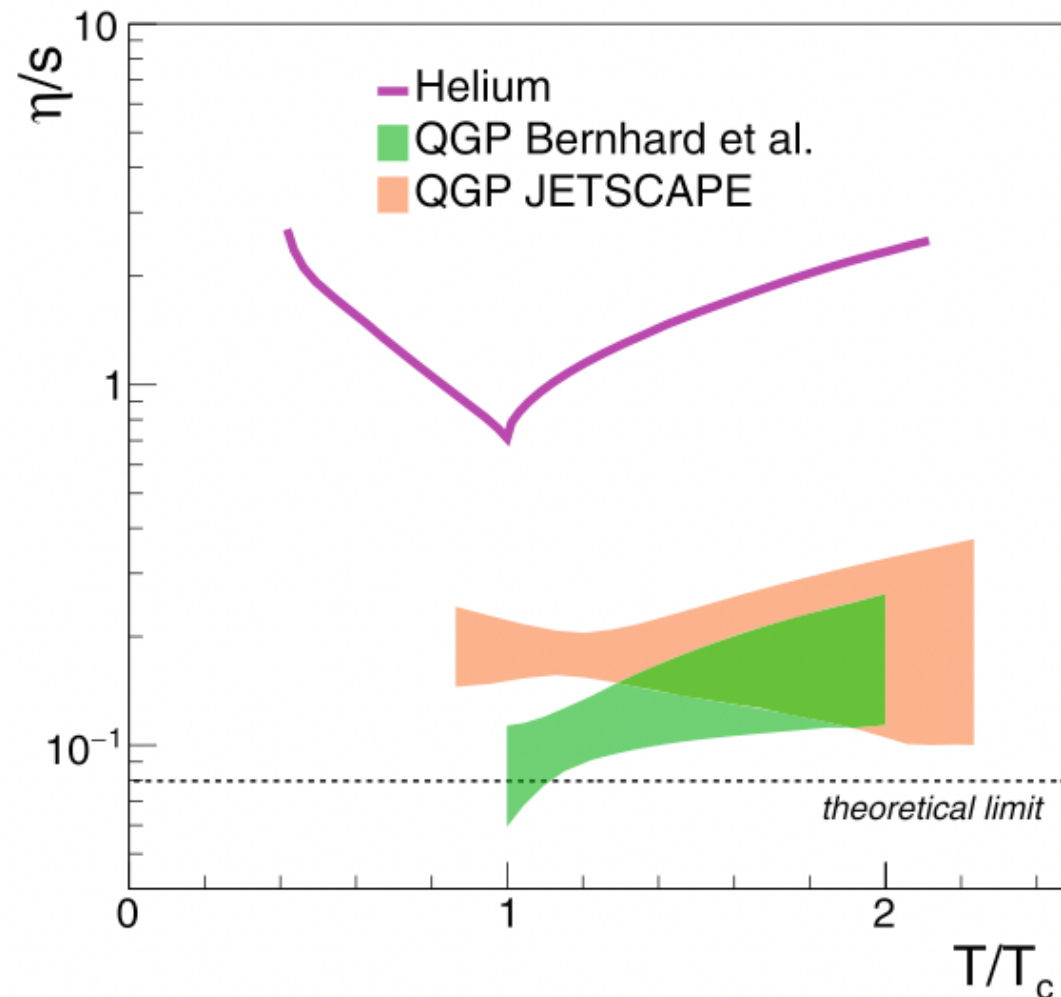
$\eta/s \sim 0.12$ (RHIC) – 0.2 (LHC) と推定 ← 驚異的に小さな粘性 (理想流体)

より詳細な解析 ～ Bayesian Analysis ～



J. E. Bernhard, J. S. Moreland, S. A. Bass, Nat. Phys. 15(11), 1113–1117 (2019)

JETSCAPE, PhysRevLett.126(2021)242301

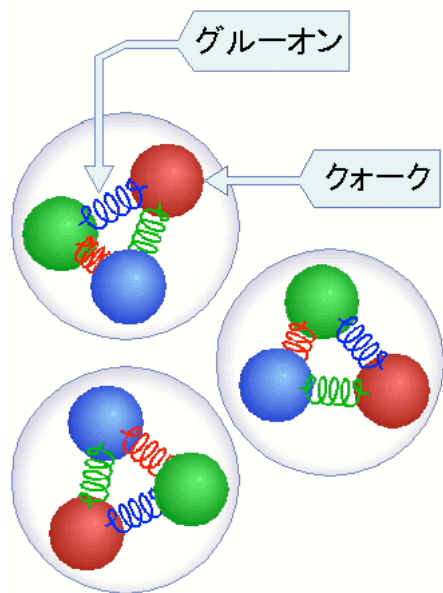


✓ Bayesian Parameter Estimation法による多種の実験データと理論模型の丁寧な比較

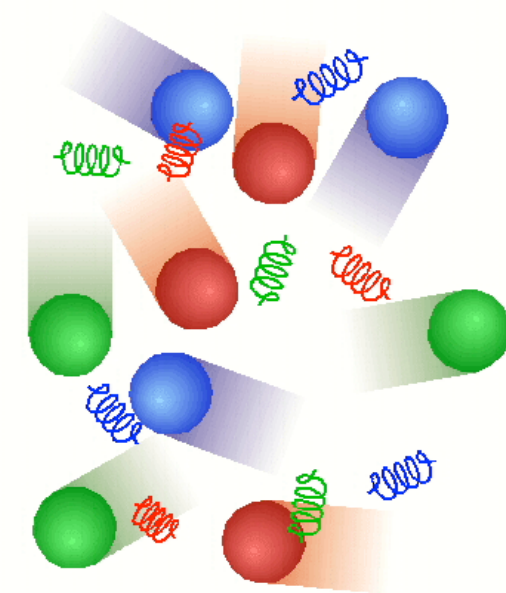
- v1-v4だけでなく、荷電粒子収量、 E_T 、 π 、K、pの平均 p_T も比較対象
- 実験データで理論模型のパラメータ制約範囲を決定する解析手法

←やはり驚異的に小さな粘性

今後さらに精密化できるか？



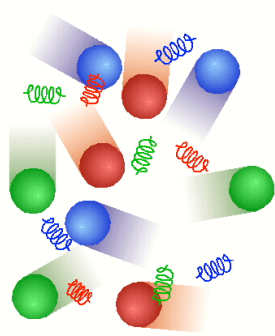
(特) Quark Coalescence



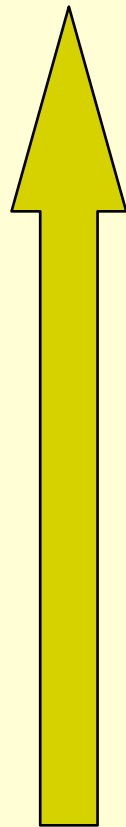
～クォークレベルの自由度～

“クォークレベル” ↓ を如実に示す！

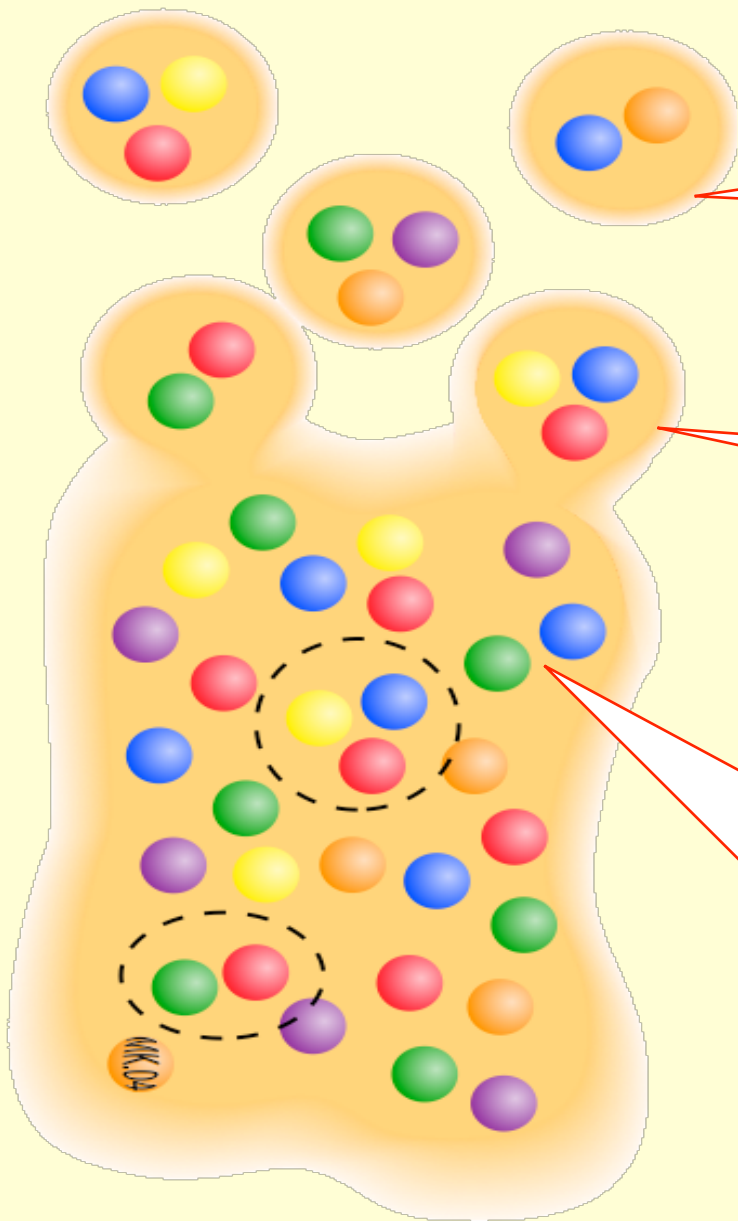
クォーク融合反応 (Quark Coalescence/Recombination)



ハドロン



QGP



✓ QGP特有のハドロン生成メカニズム？

Hadron化するときに運動量空間、座標空間共に近傍にいたクォークが融合する (核子のCoalescence反応は低エネルギー原子核原子核衝突でよく知られた現象)

中間子の運動量分布(2q);

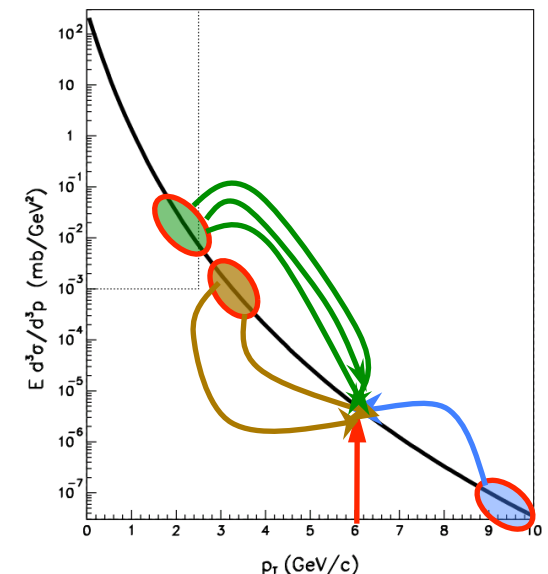
$$W_M(p_t) \approx C_M \cdot w^2(p_t/2)$$

陽子の運動量分布(3q);

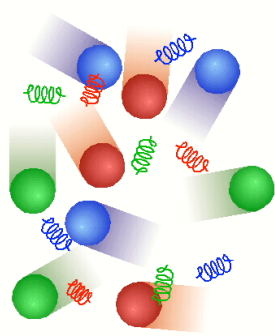
$$W_B(p_t) \approx C_B \cdot w^3(p_t/3)$$

$w(p_t)$;
ユニバーサルな
クォークの
運動量分布

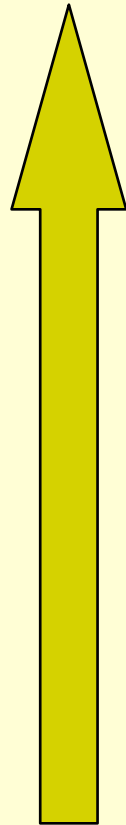
融合確率CBは決して大きくないが、 p_t と共に急速に減少する分布の場合、陽子の $p_t/3$ の方が有利になる



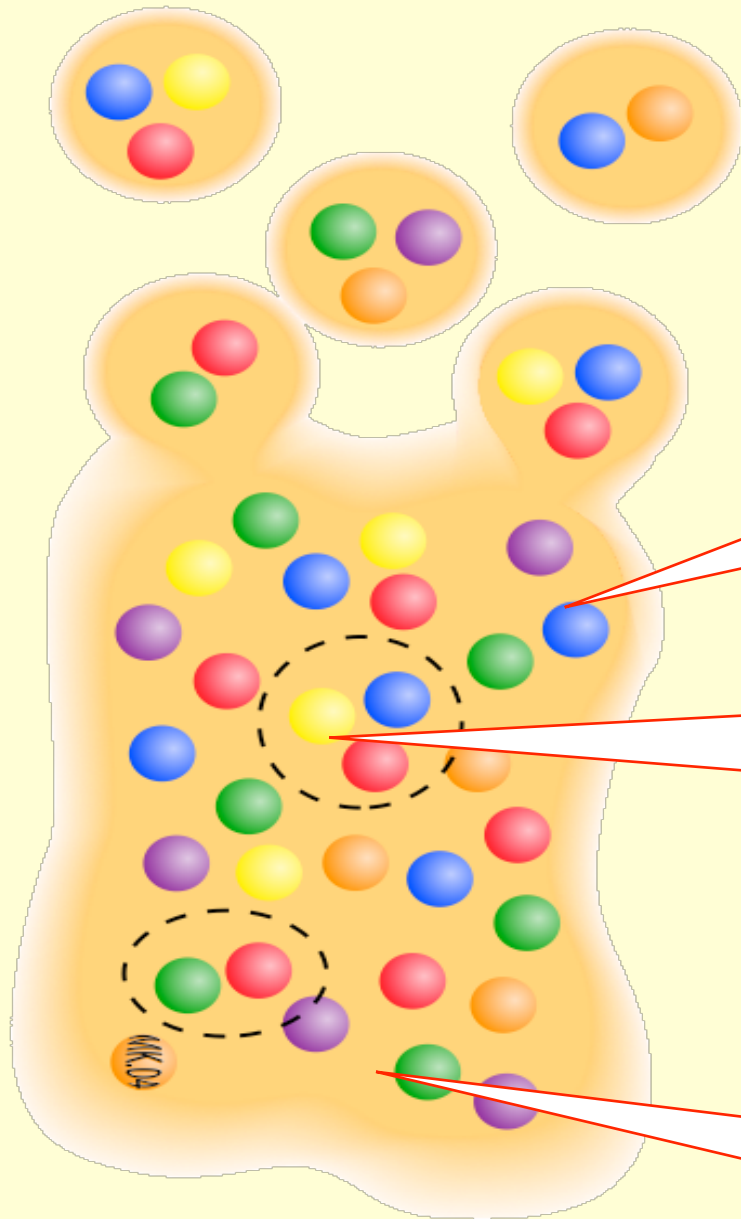
クォーク数スケーリングとクォーク融合反応 ～ QGP特有の粒子生成メカニズム ～



ハドロン



QGP



✓ クォーク融合反応の証拠

→ Quark Number Scaling

中間子の運動量分布(2q);

$$\frac{dN_M}{d\phi} \propto w^2 = (1 + 2v_{2,q} \cos 2\phi)^2$$

$$\approx (1 + 4v_{2,q} \cos 2\phi)$$

クォーク数比 : 2:3

陽子の運動量分布(3q);

$$\frac{dN_B}{d\phi} \propto w^3 = (1 + 2v_{2,q} \cos 2\phi)^3$$

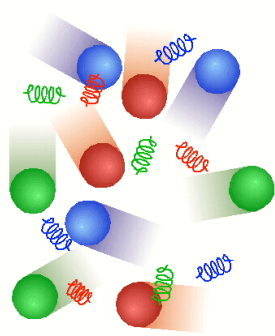
$$\approx (1 + 6v_{2,q} \cos 2\phi)$$

w ; クォークの方位角分布

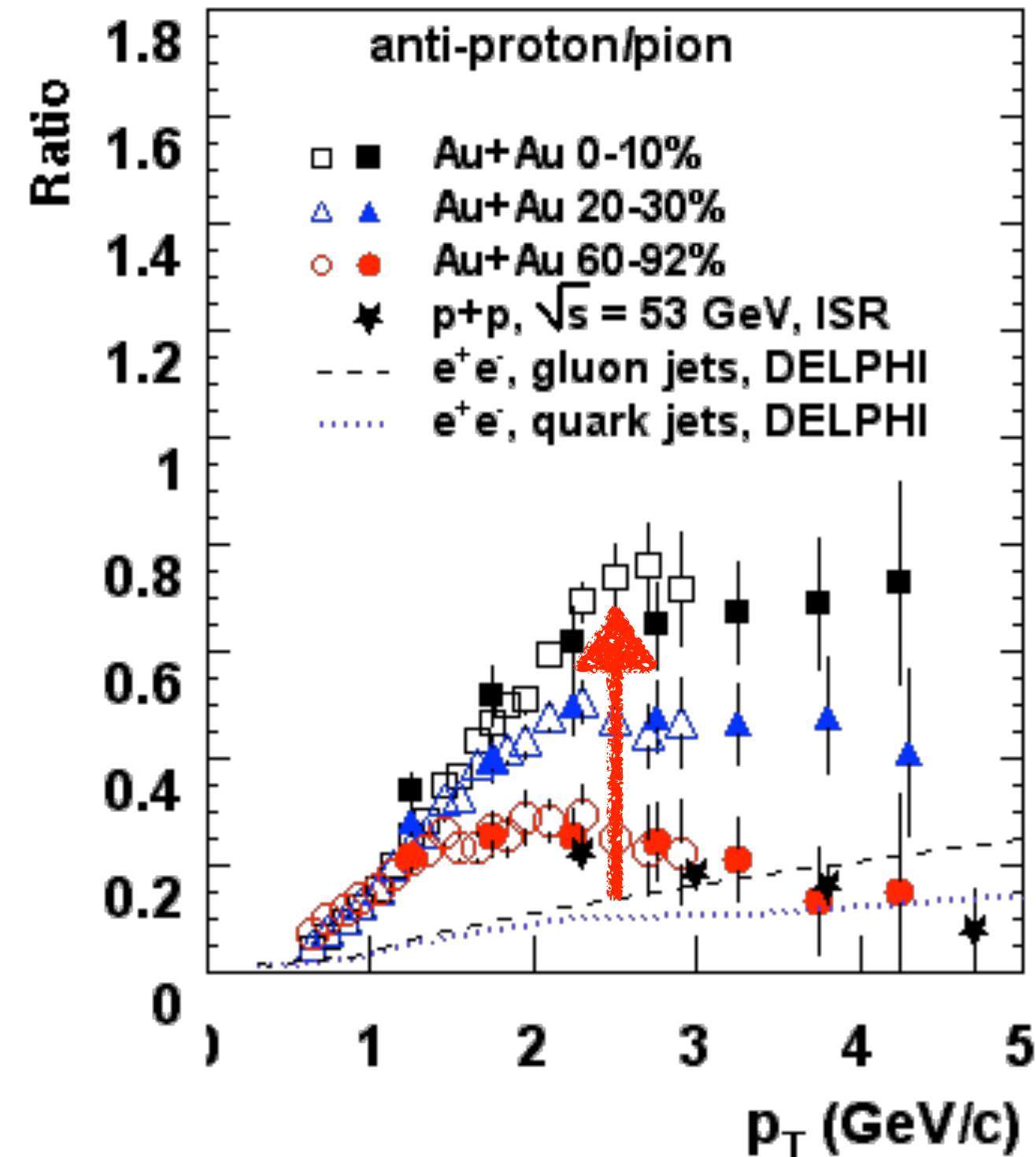
$$w \propto (1 + 2v_{2,q} \cos 2\phi)$$

$$v_{2,M}(p_T) \sim 2v_{2,q}(p_T/2), \quad v_{2,B}(p_T) \sim 3v_{2,q}(p_T/3)$$

バリオン異常生成



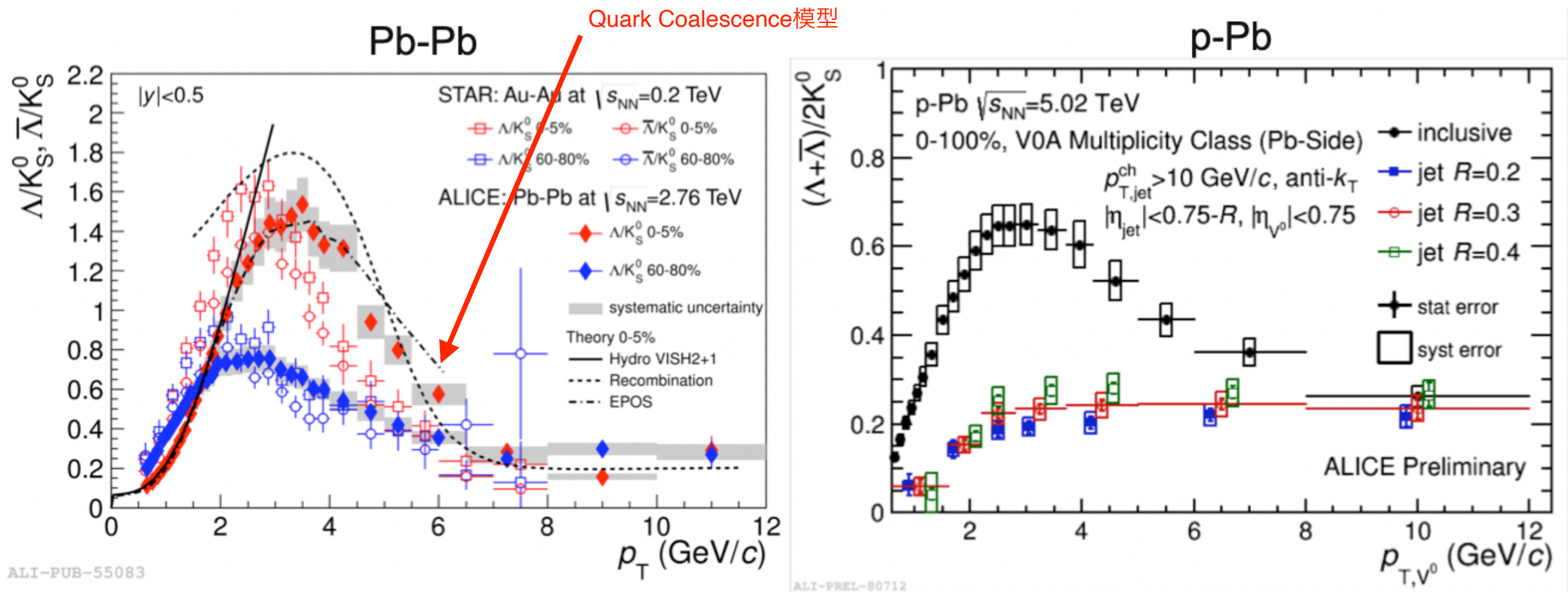
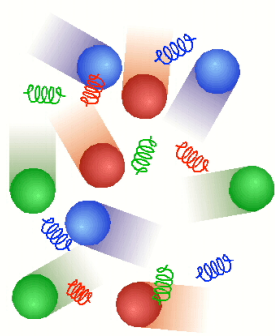
Phenix; P.R.L. 91(2003)172301



- ✓ 高横運動量領域での p/π 比に異常を発見
- ✓ Au+Au周辺衝突では p/π 比は、eeやpp衝突と同等であるが、
- ✓ Au+Au中心衝突では p/π 比は非常に大きい
- ★ Fragmentation process では ee/pp に見られるように $n_p < n_\pi$
- ✓ Au+Au衝突では別の生成機構が！？

↓
**Quark Recombination Model
(Quark Coalescence Model)**

Strangenessを含むバリオンでも



✓ AA中心衝突では陽子と同様にストレンジネスを含むバリオンΛも生成増大

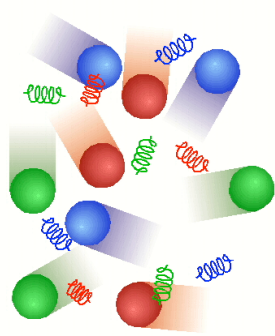
- 同様のCentrality依存性
- RHICとLHCと同程度の効果
- pA衝突は周辺衝突 (pp衝突) と同じ
- Jet中では増大しない

AA中心衝突の3GeV/c付近に現れる固有の現象

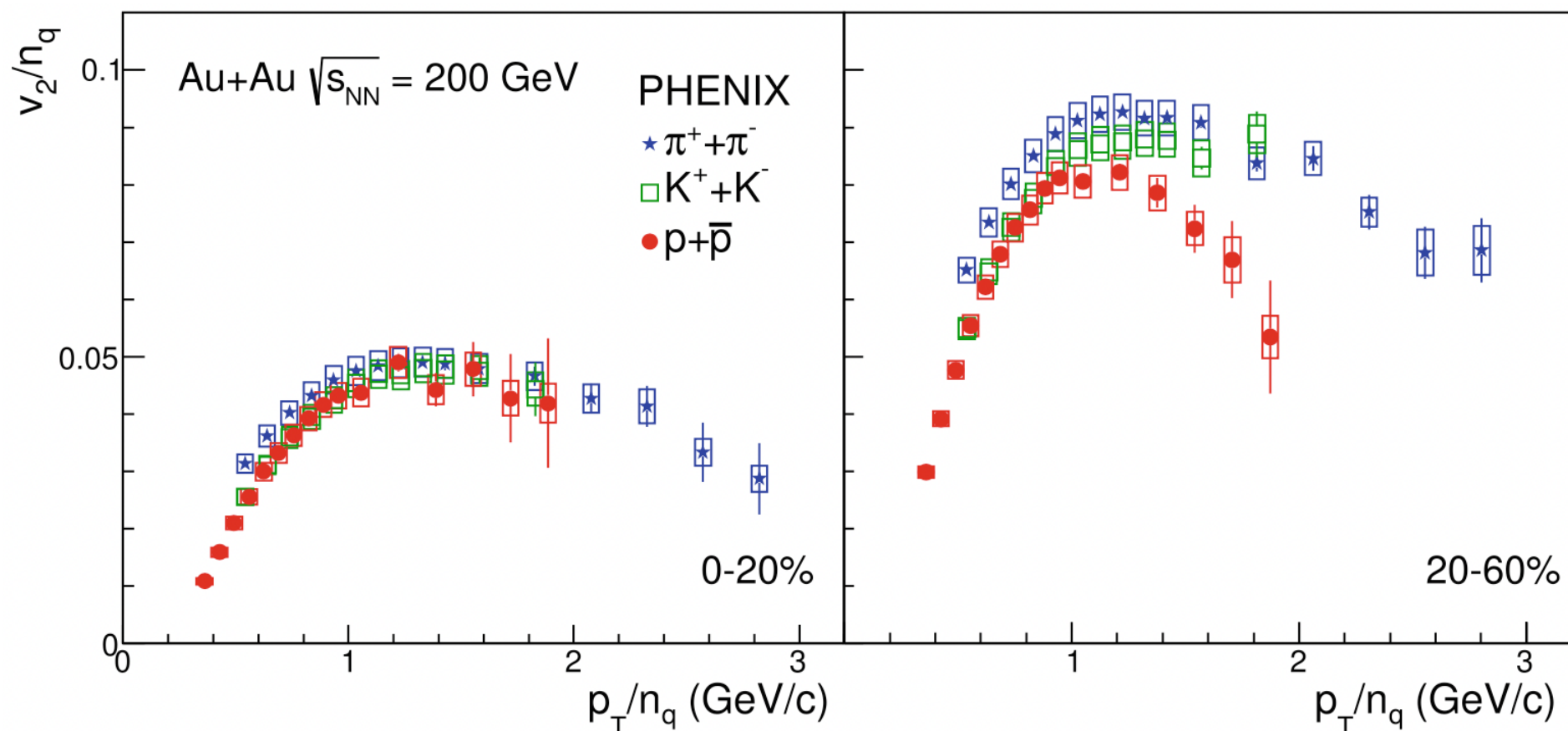


Quark Recombination Model
(Quark Coalescence Model)

クォーク数スケーリングの成立要件？



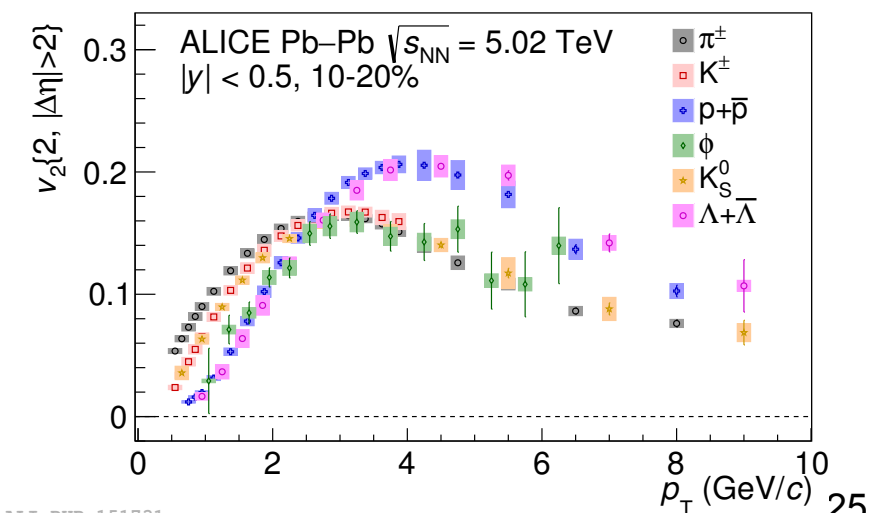
クォーク数スケーリング； $v_{2,M}(p_T) \sim 2v_{2,q}(p_T/2)$, $v_{2,B}(p_T) \sim 3v_{2,q}(p_T/3)$

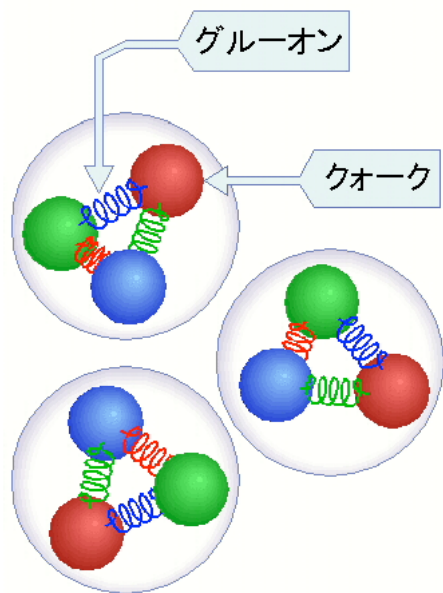


✓ 周辺衝突では、中心衝突ほどよく成立しない

⇒ QGP起源の割合が多いソフトな成分では成立するが、ジェット起源のハードな成分では成り立たない

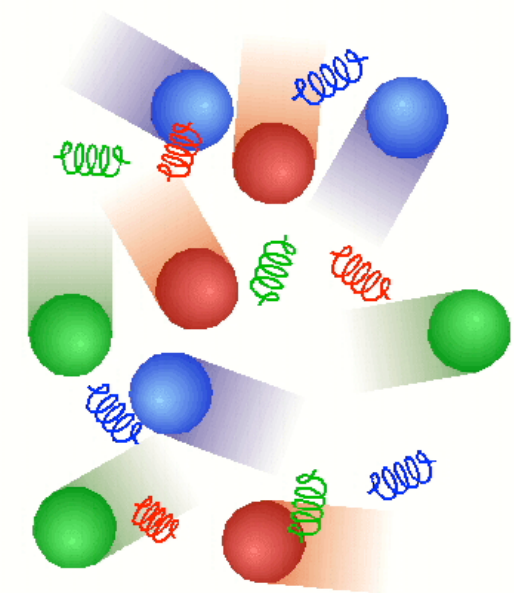
✓ ハード成分の割合が多くなるLHCエネルギーでは
20~30%レベルの成立





③

Jet Quench

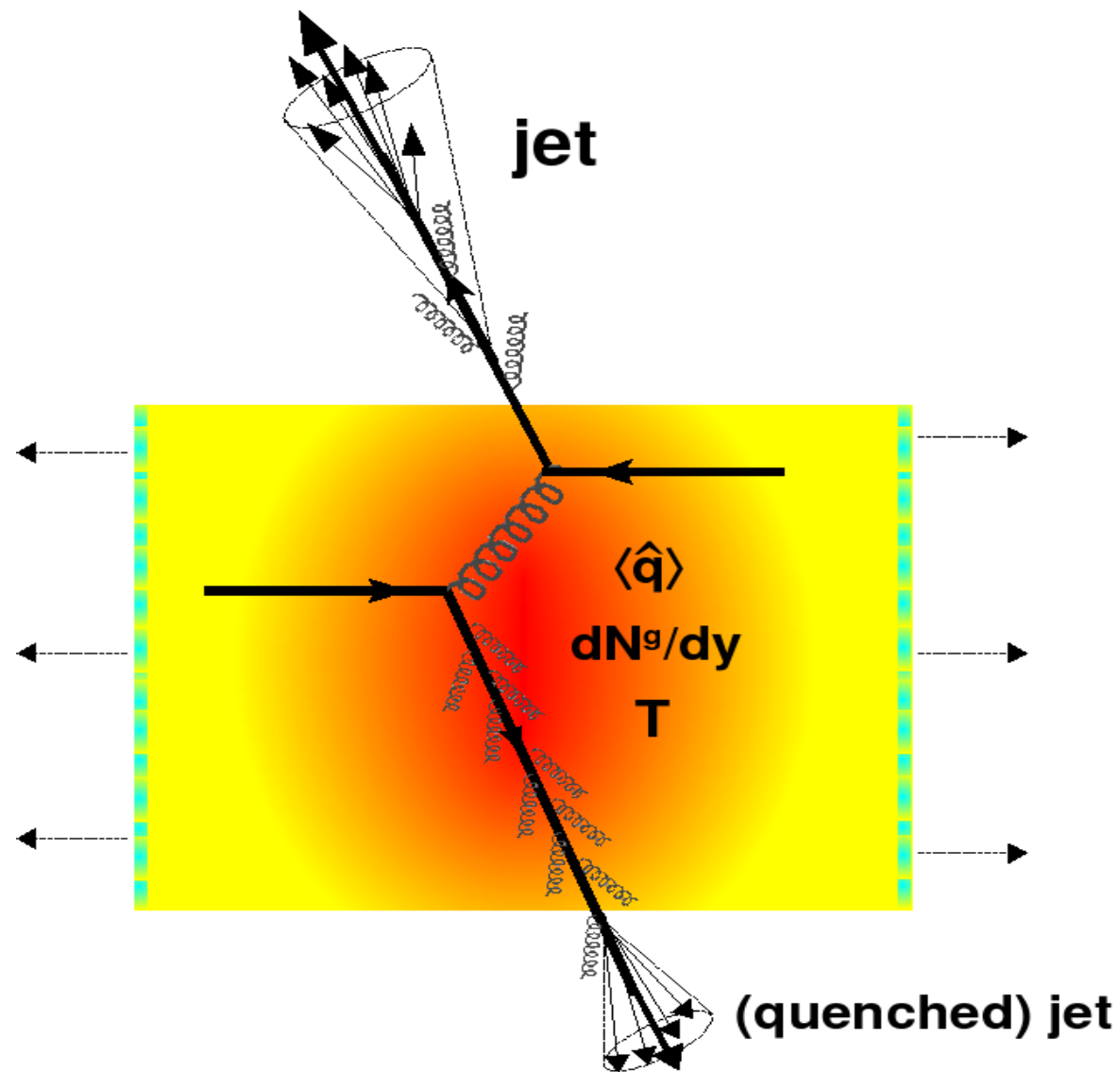
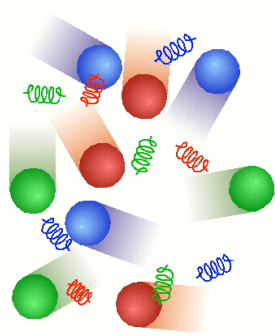


～QGPに特徴的な dE/dx ～



Partonic !

ジェット変貌：Jet Quench



“Jet quenching” in nucleus-nucleus collision.

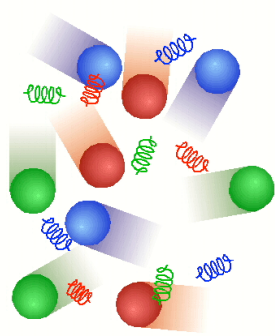
✓ AA衝突で2つのパートンが Hard Scatt. を起こす

- 一つは真空中に飛び出しジェットを生成し、
- 他方は、QGP中を突き抜ける際に特徴的なエネルギー損失を受ける

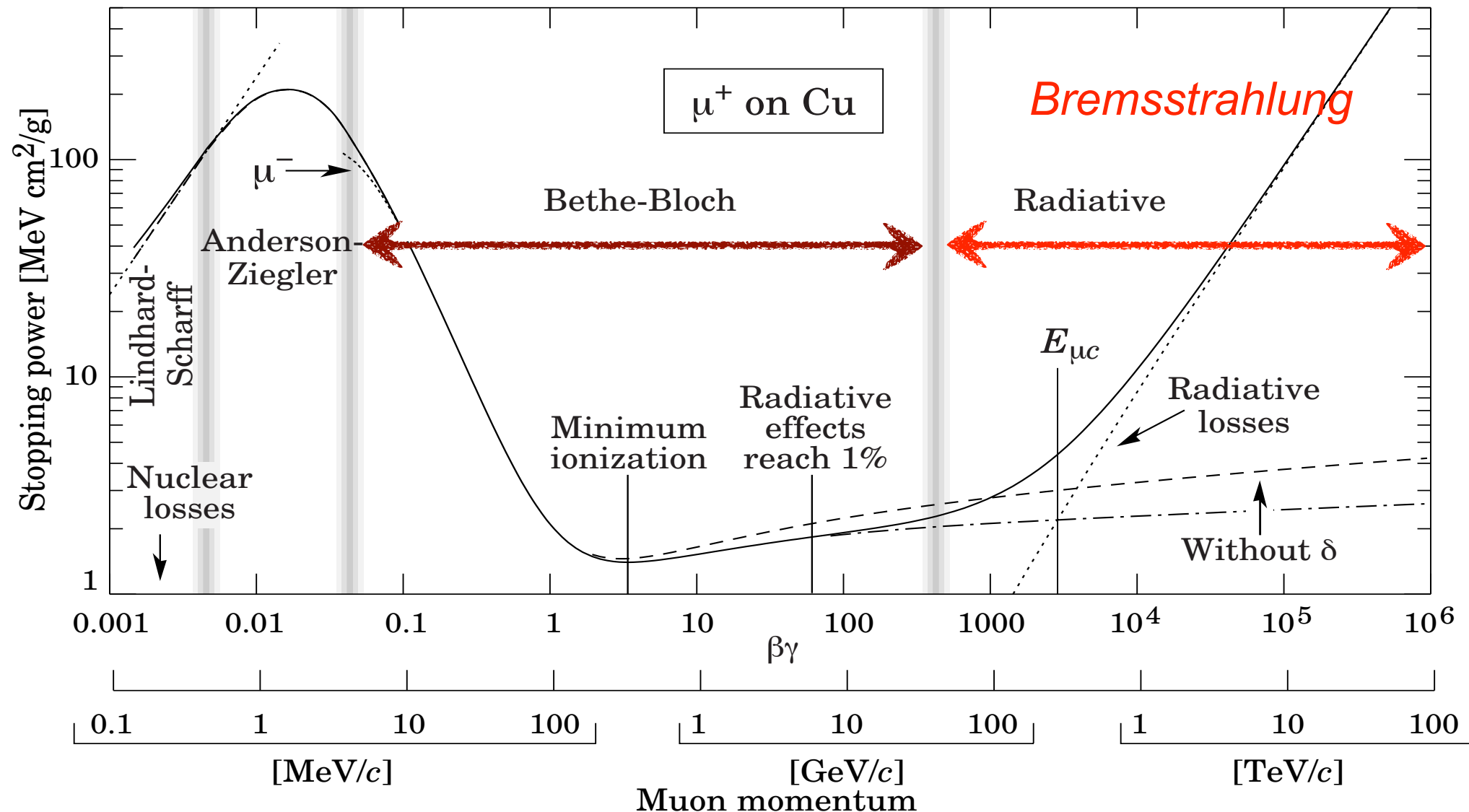
✓ 現れる現象；

- ジェットの消失／減衰
- 高横運動量粒子の減少
- ジェット成分の変化？

QEDにおけるエネルギー損失 ～Bresmsstrahlung～



荷電粒子のエネルギー損失；制動放射も！



衝突型

✓ Bethe-Bloch

放射型

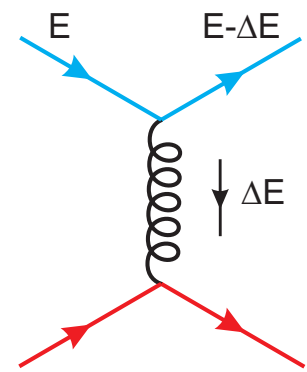
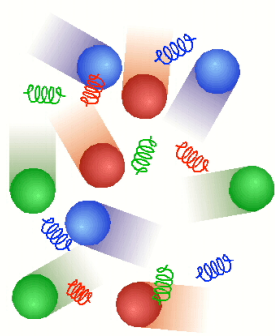
✓ Bethe-Heitler
(thin; $L \ll \lambda$)

✓ Landau-Pomeranchuk-Migdal
(thick; $L \gg \lambda$)

✓ dE/dx の測定から物性情報 → 「プローブ手法」は鉄板

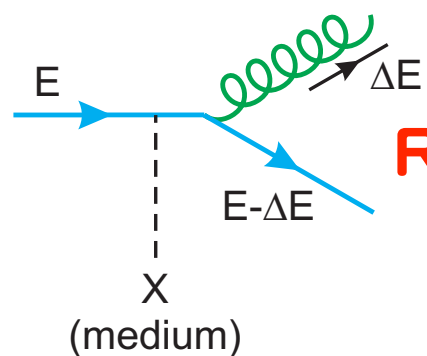
● 例) QEDプラズマ中の dE/dx 測定

QCDにおけるエネルギー損失



Collisional

$$\Delta E \propto \ell^1$$



Radiative

$$\Delta E \propto \ell^2$$

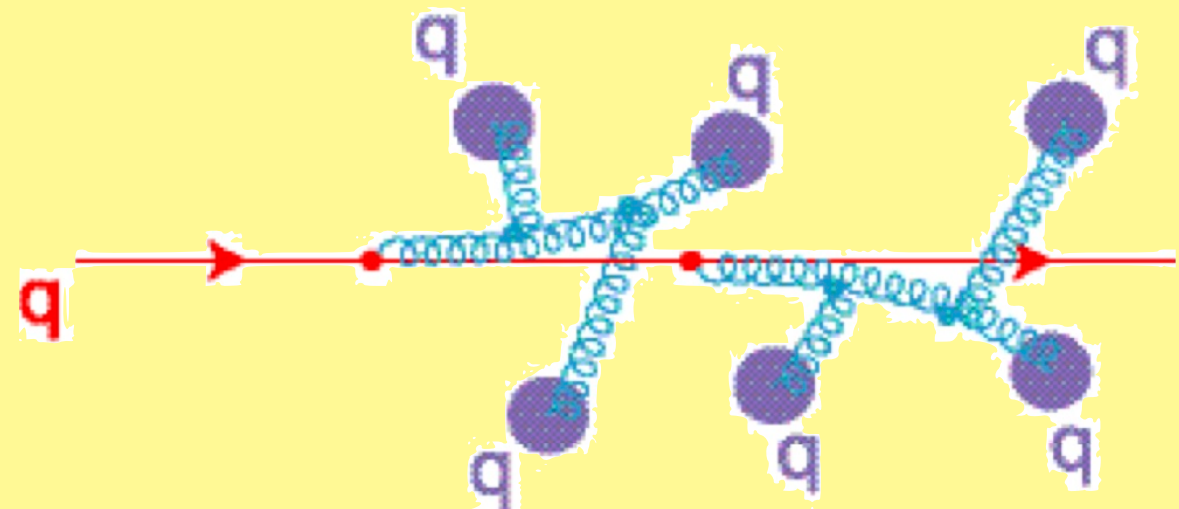
✓ 様々な理論

- 衝突型損失
- 放射型損失

➡ Bethe-Heitler regime

➡ LPM regime

➡ “dead-cone” effect



$$\Delta E \propto \alpha_S C_R \langle \hat{q} \rangle L^2$$

pQCD

理論の示唆するところ

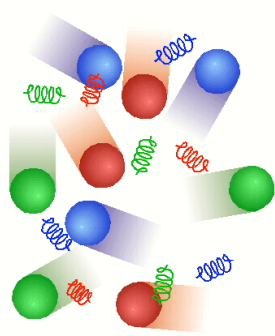
放射型損失が重要

期待される効果;

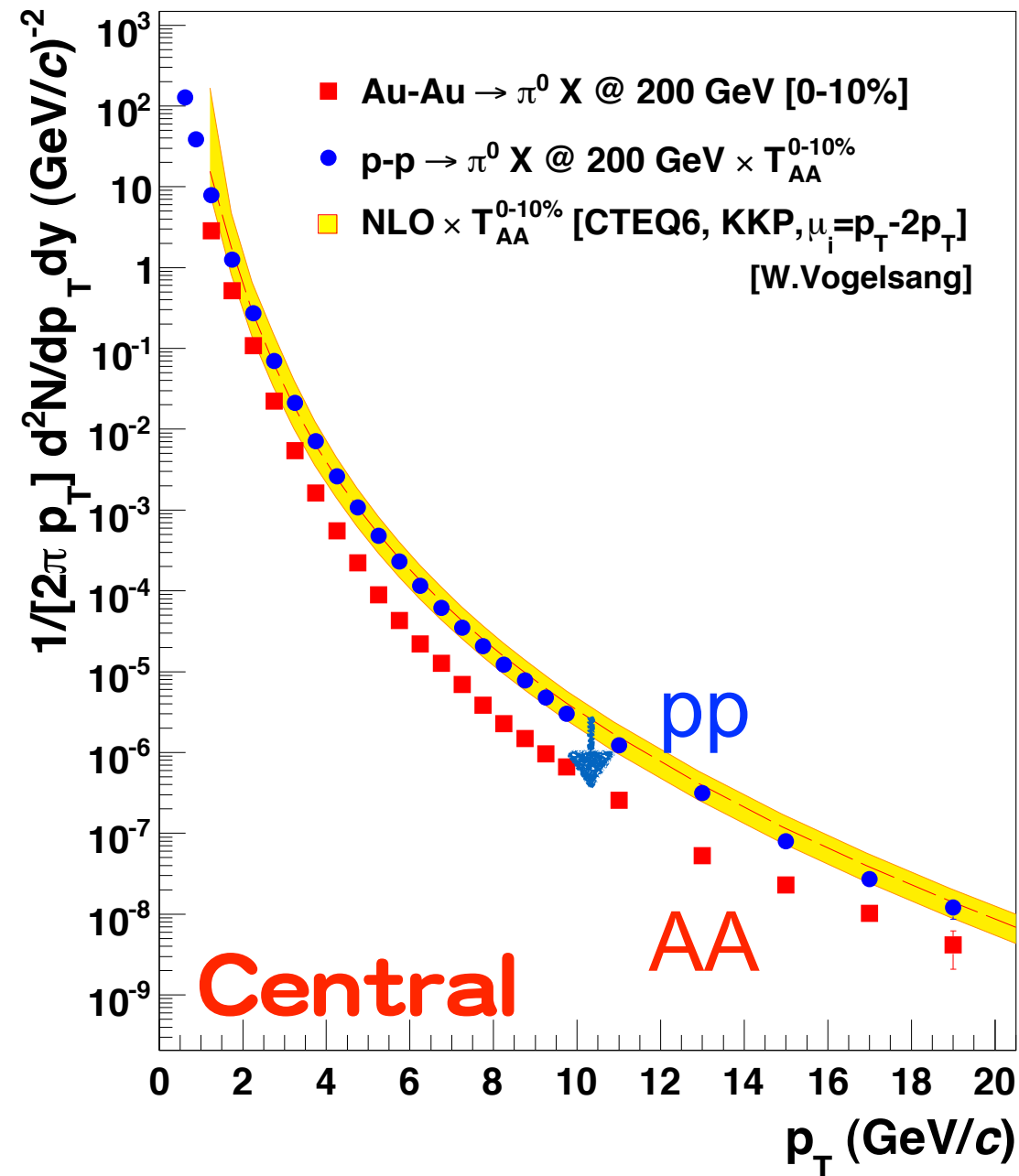
- 高横運動量ハドロンの減少
- back-to back相関の崩れ
- jet fragmentationの変貌
softer, larger multiplicity,
angular broadeningなどなど

$$\Delta E_{\text{gluon}} > \Delta E_{\text{quark}} > \Delta E_{\text{charm}} > \Delta E_{\text{bottom}}$$

高横運動量粒子の減少



Phenix; P.R.L. 91, 232301 (2008), PRD76,051106(2007)



✓ pp衝突の重ね合わせと比較

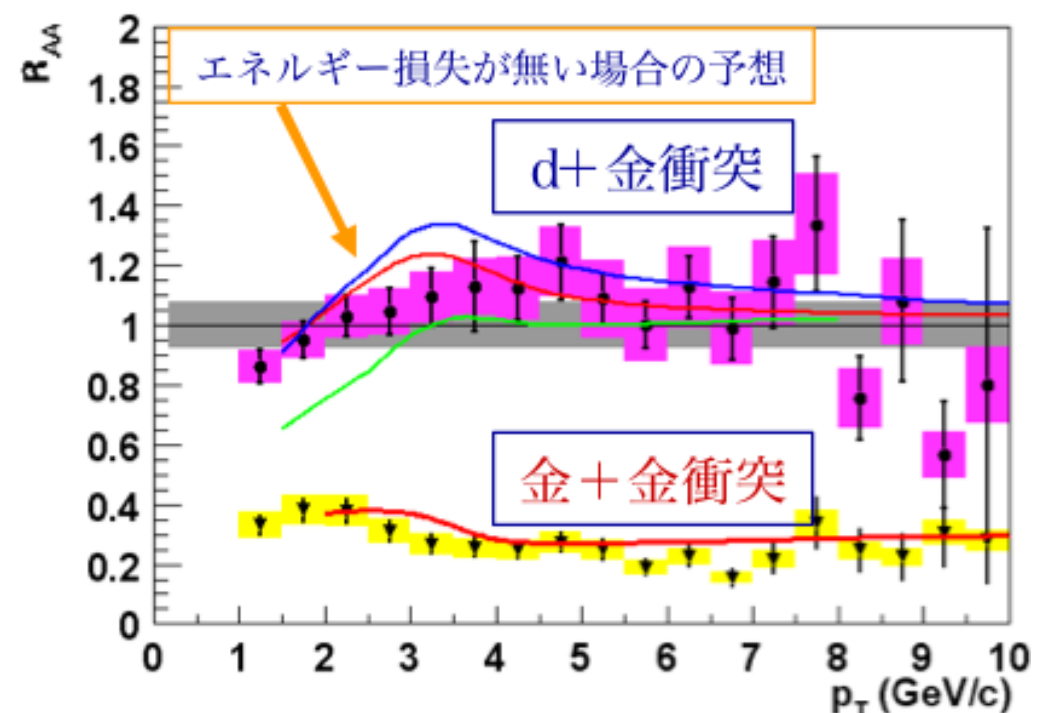
Nuclear Modification Factor;

$$R_{AA} = \frac{\text{"hot/dense QCDmedium"}}{\text{"QCD vacuum"}} = \frac{dn_{AA}/dp_T dy}{\langle N_{\text{binary}} \rangle \cdot dn_{pp}/dp_T dy}$$

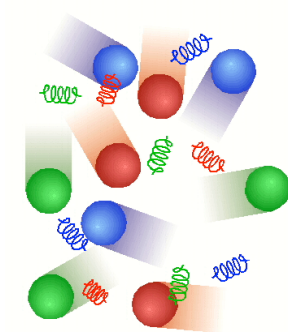
陽子陽子衝突の単なる重ね合わせに比べて多いか、少ないかを示す量

✓ AA中心衝突では高横運動量領域で「減少」

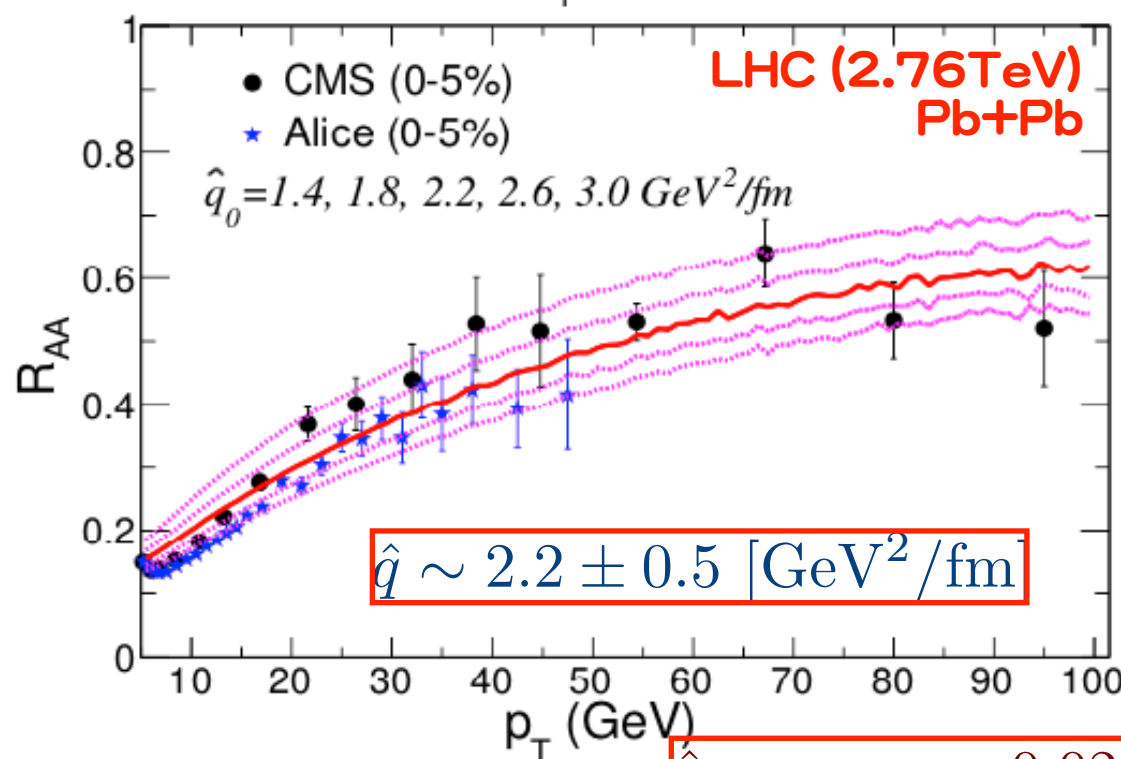
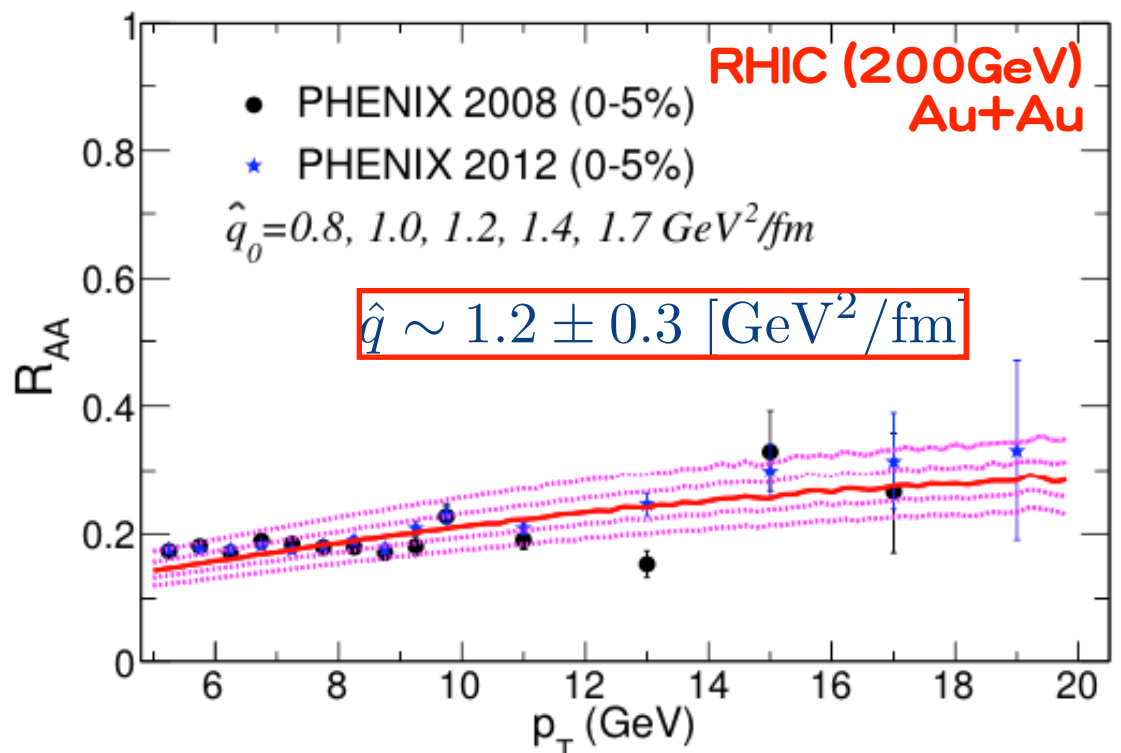
✓ dAuでは見られず、AuAuで見られることから Jet Quenchか？



エネルギー損失量



PRC90(2014)14909



$$\hat{q}_{\text{cold nuclei}} \sim 0.02 [\text{GeV}^2/\text{fm}]$$

✓ 3次元理想流体力学モデルによる時間発展計算の例

← AA衝突標準的描像の恩恵

- Glauber w. Wood-Saxonを仮定
- エネルギー損失量を通常の原子核の場合と比較

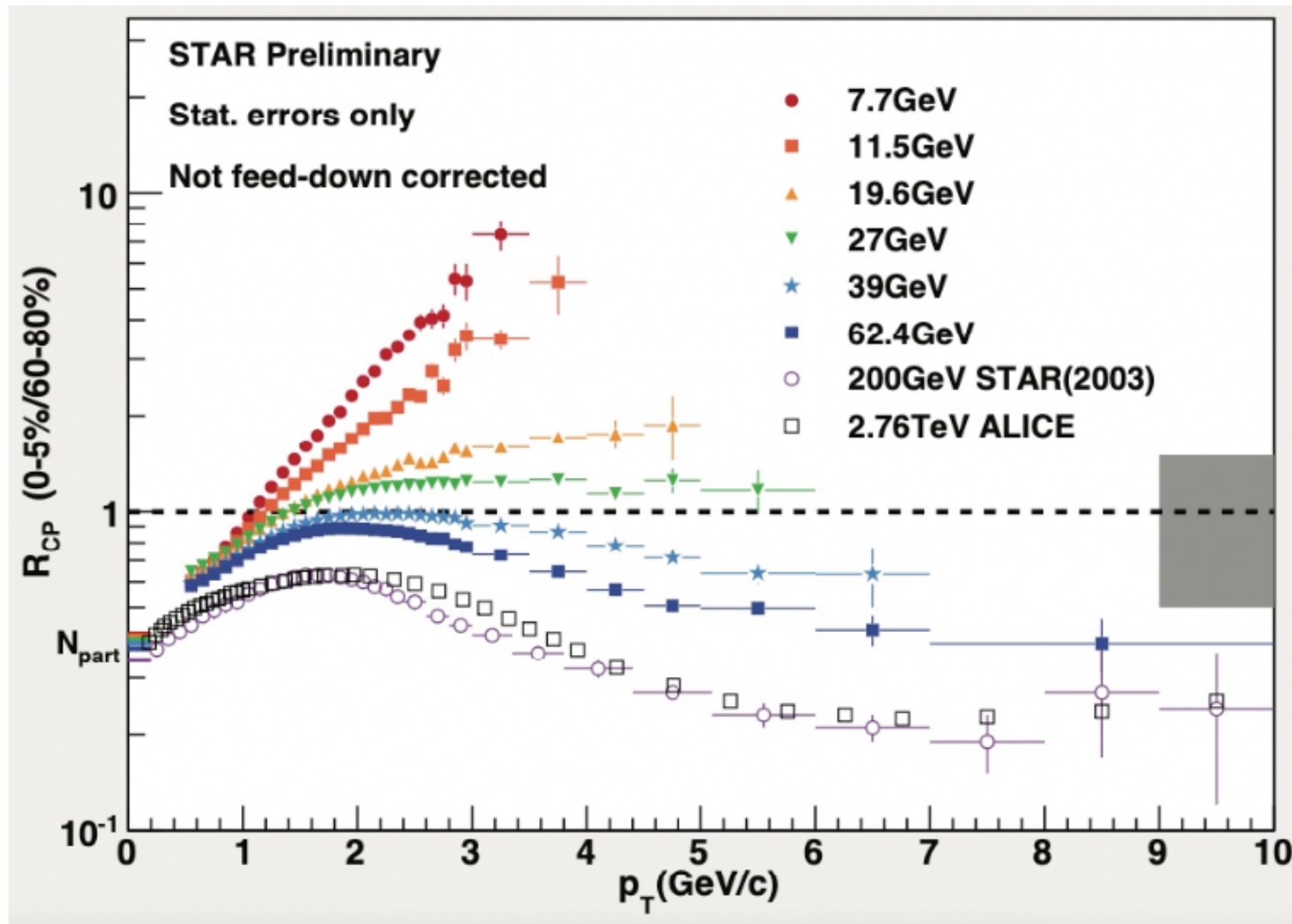
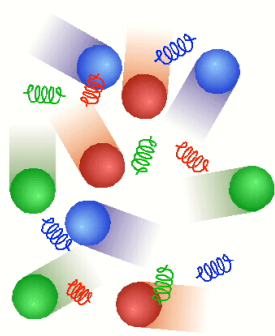
⇒ 50倍以上の dE/dx (損失量)
QGP生成を強く示唆する結果!

✓ RHICからLHCで約2倍に

- パートン密度比 ~ 2

$$\frac{\left(\frac{dN_{\text{ch}}}{dy}\right)_{\text{LHC}}}{\left(\frac{dN_{\text{ch}}}{dy}\right)_{\text{RHIC}}} = \frac{1584}{687} \sim 2$$

R_{AA}の系統的測定 ～衝突エネルギー依存性～



✓ $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 \text{ GeV}$ から 2.76 TeV まで比較

✓ R_{AA} の代わりに R_{CP}

✓ $\sqrt{s_{NN}} < 40 \text{ GeV}$ で $R_{CP} > 1$

- Cronin効果；pA衝突において知られた効果。初期多重散乱のために横運動量が広がる

✓ $\sqrt{s_{NN}} < 40 \text{ GeV}$ では顕著に $R_{CP} < 1$

- 高横運動量で20%程度

✓ 次の課題；

- 有限の dE/dx 効果だとすると、より高横運動量では1に復帰するはず！？
- 粒子種によって違いはあるのだろうか

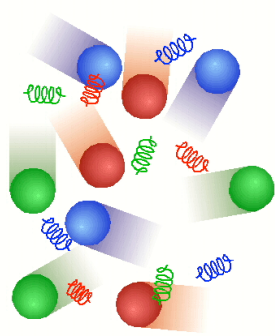
⇒ 強い相互作用をしない粒子では1のはず！？

⇒ チャームやボトムなど重いクォークでは!?

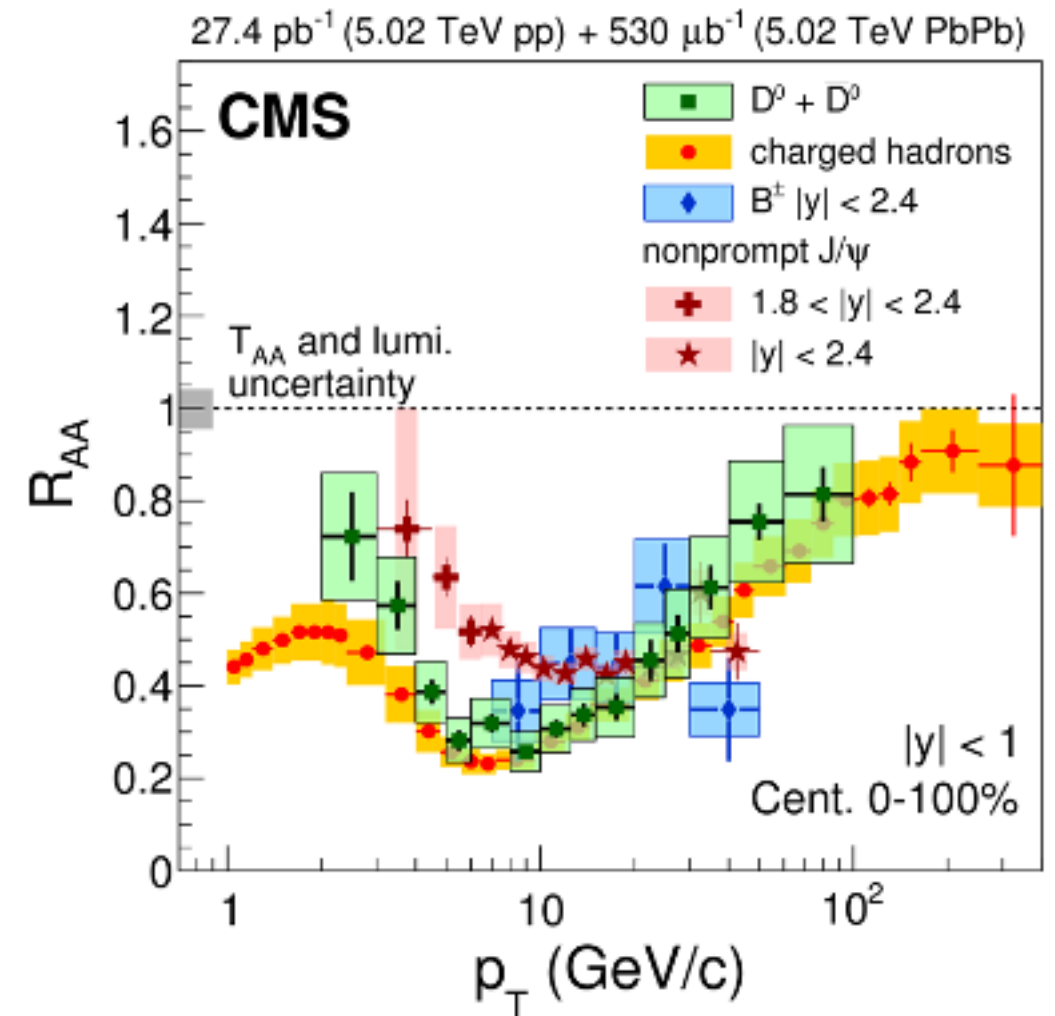
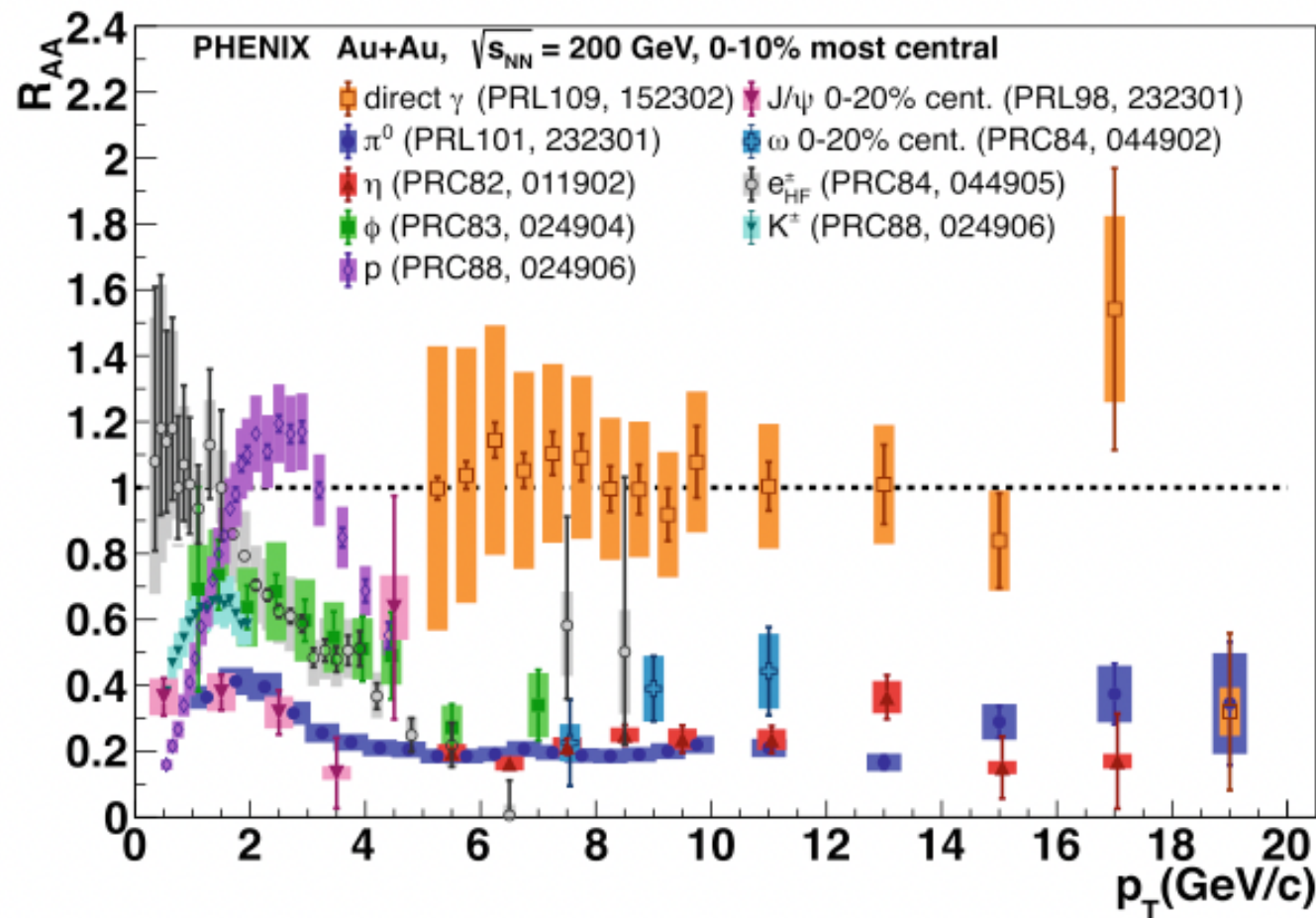
(Jet Quenchの起源を探る)

$$R_{AA} = \frac{\sigma_{AA}}{\langle N_{binary} \rangle \sigma_{pp}} \leftrightarrow R_{CP} = \frac{\sigma_{AA}^{central} / \langle N_{binary}^{central} \rangle}{\sigma_{AA}^{peripheral} / \langle N_{binary}^{peripheral} \rangle}$$

R_{AA} の系統的測定 ～粒子種依存性、RHIC&LHC～



CMS, PLB782(2018)474



✓強い相互作用をしない粒子では1のはず！？

- direct γ はunity!

✓Jet起源の5GeV/c以上では粒子種によらない！？

- 5GeV/c以下はcoalescenceなど粒子種依存複雑

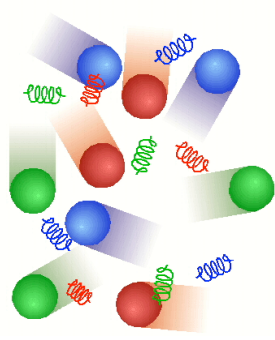
✓ dE/dx は有限の大きさだとすると、高横運動量では1に復帰するはず！？

⇒100GeV/cに向かって1に収束

✓チャームやボトムなど重いクォークでは!?

⇒後ほど、、、

Heavyクォークを含む中間子



https://www.jaxa.jp/article/interview/vol43/p2_j.html



Charmを含む最も軽い中間子

$$D^0 : c\bar{u} : m = 1.86 [\text{GeV}/c^2] : \tau = 4.1 \times 10^{-13} [\text{ns}]$$

$$\text{Hadronic decay} : D^0 \rightarrow K^- \pi^+ (\text{BR} . 3.9\%)$$

$$\text{Semileptonic decay} : D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu_e (\text{BR} . 3.6\%)$$

$$D^+ [c\bar{d}] 1.87 \text{ GeV}/c^2$$

✓ Heavy quark (c,b)の特徴

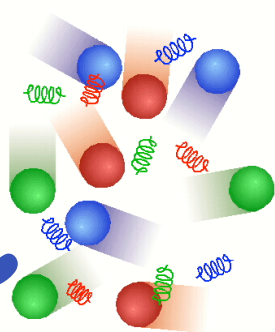
- Light quark(u,d,s)はQGP中で容易に熱的に生成される
- Heavy quarkはQGP温度より質量が大きく熱的に生成されない

➡初期衝突のみで生成され、QGP中を拡散し、ハドロン化

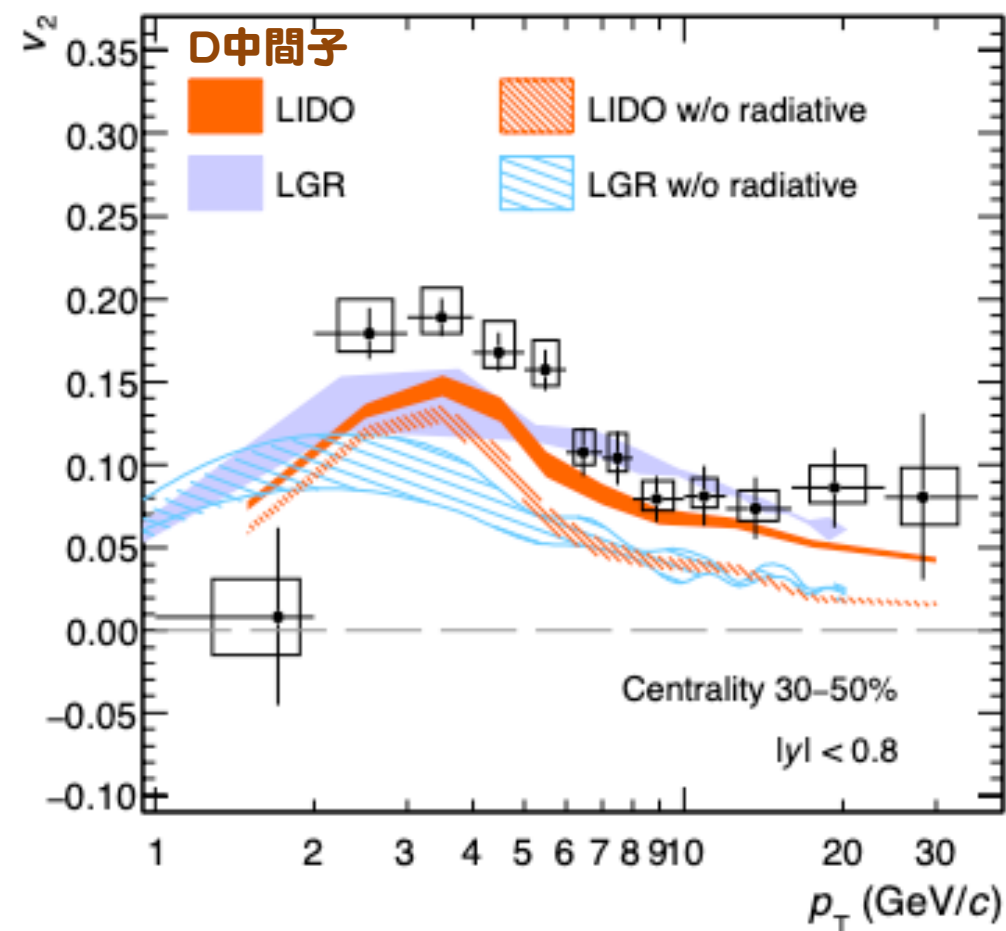
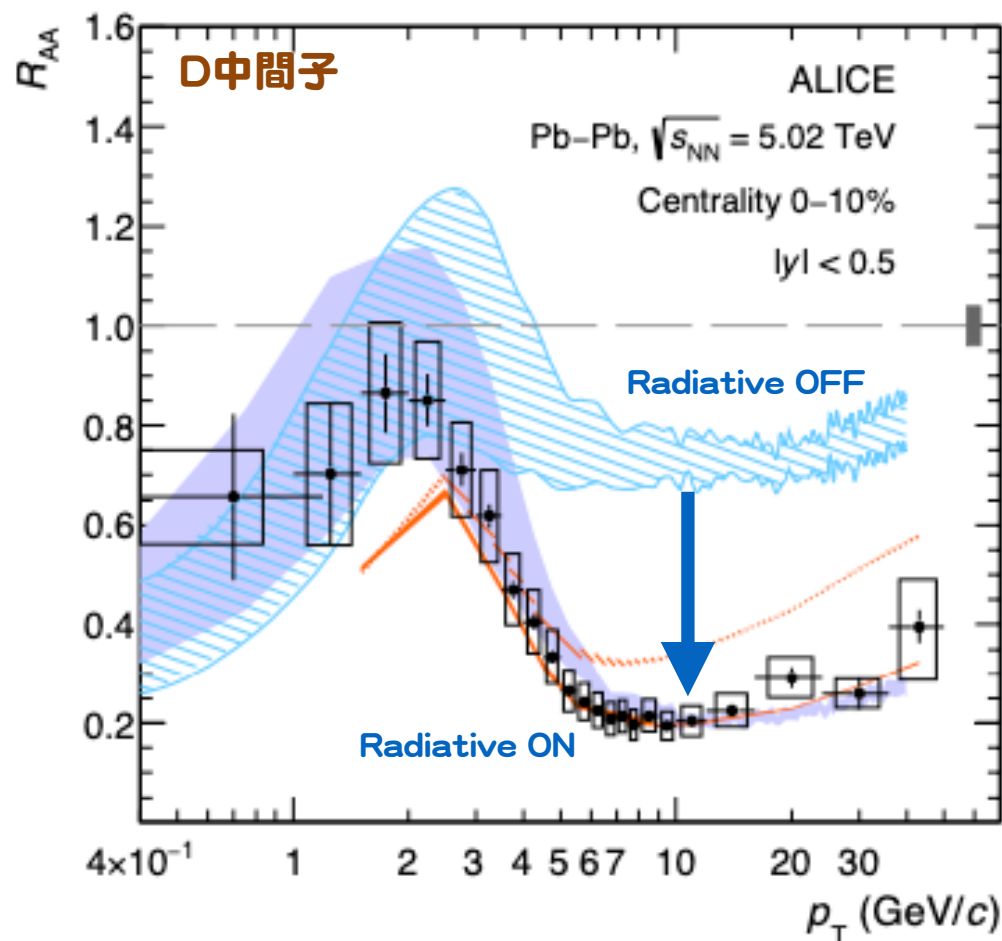
➡生成量はpQCDで良く理解

- 拡散係数などQGP物性の手がかり

Transport Modelとの比較 ～ radiative loss の On/Off ～



ALICE, arXiv:2110.09420



✓ Charm quarkのQGP中の輸送模型

- fragmentationだけでなくrecombinationを含む
- collisional lossだけでなくradiative lossを含む

✓ RadiativeをON/Off比較したところ、

- ➡ 低横運動量領域ではcollisionalが主要
- ➡ 高横運動量領域ではradiativeも必要

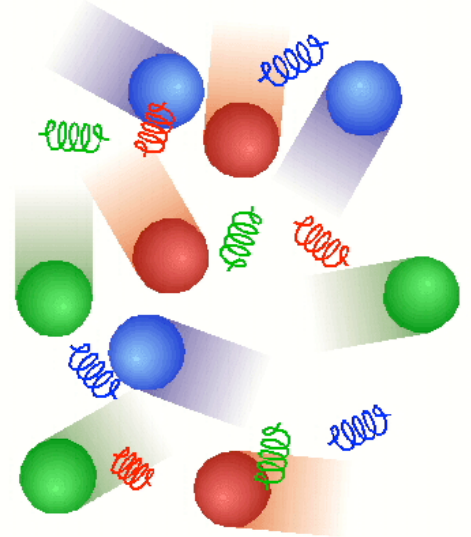
→ 理論的予測と合致する展開
Collisional + Radiative
質量依存性

$$\Delta E_{\text{gluon}} > \Delta E_{\text{quark}} > \Delta E_{\text{charm}} > \Delta E_{\text{bottom}}$$

→ 今後より定量的理解を期待

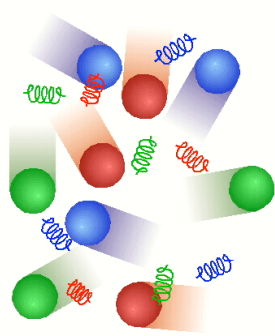
その他

～未だ必ずしも確立されていないけど
大事なトピックス～

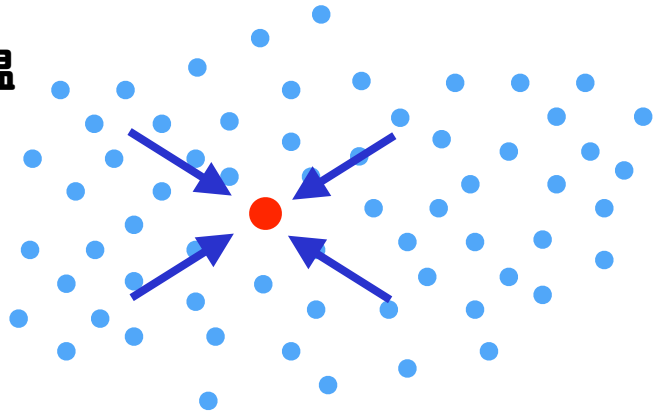


デバイ遮蔽効果
Heavy Flavor
HBT測定によるQGPの寿命
Dilepton Enhancement
QGP droplet ?
Direct Photon Puzzle

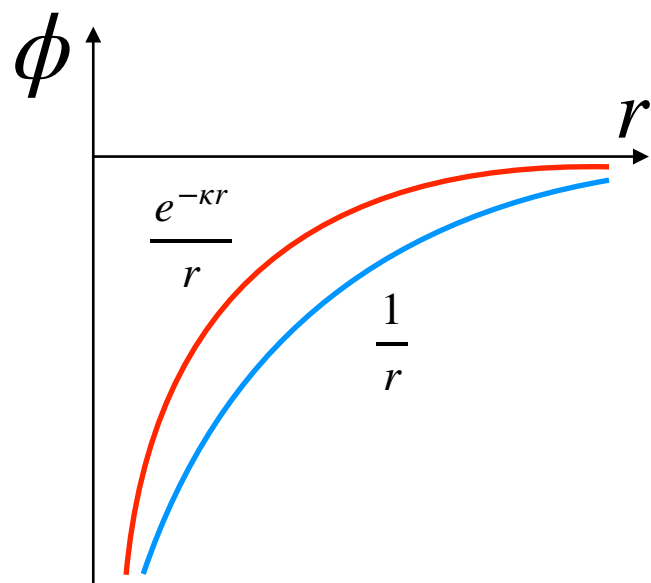
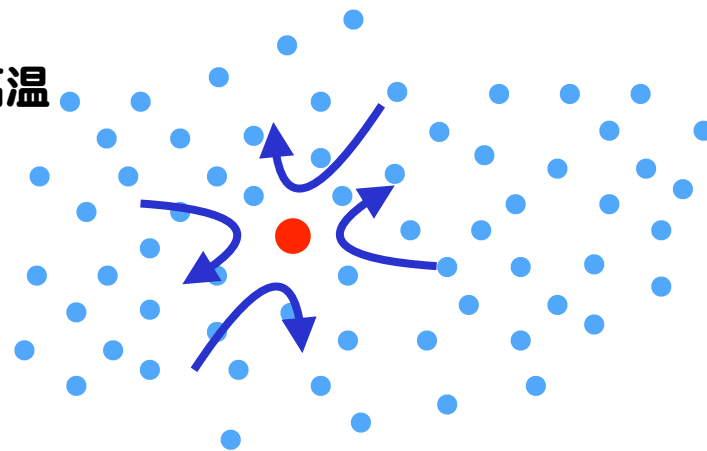
プラズマのデバイ遮蔽効果



低温



高温



✓ プラズマ中に置かれた試験電荷を考える

- プラズマを構成する荷電粒子が動いて、試験電荷の作る電場を遮蔽する
- デバイ半径、デバイ長；遮蔽される距離

⇒ デバイ半径より遠くへは電場が届かない

$$\phi_{\text{vac}} = \frac{1}{r} \rightarrow \phi_{\text{plasma}} = \frac{e^{-kr}}{r} \quad \frac{1}{r_D} = \kappa$$

デバイ半径、デバイ長；

✓ QGP中で同様の効果が働くと、デバイ半径より大きな中間子はQGP中で存在できない

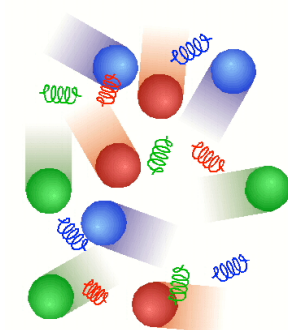
⇒ デバイ遮蔽による抑制効果

✓ デバイ遮蔽の観測に適した中間子の条件

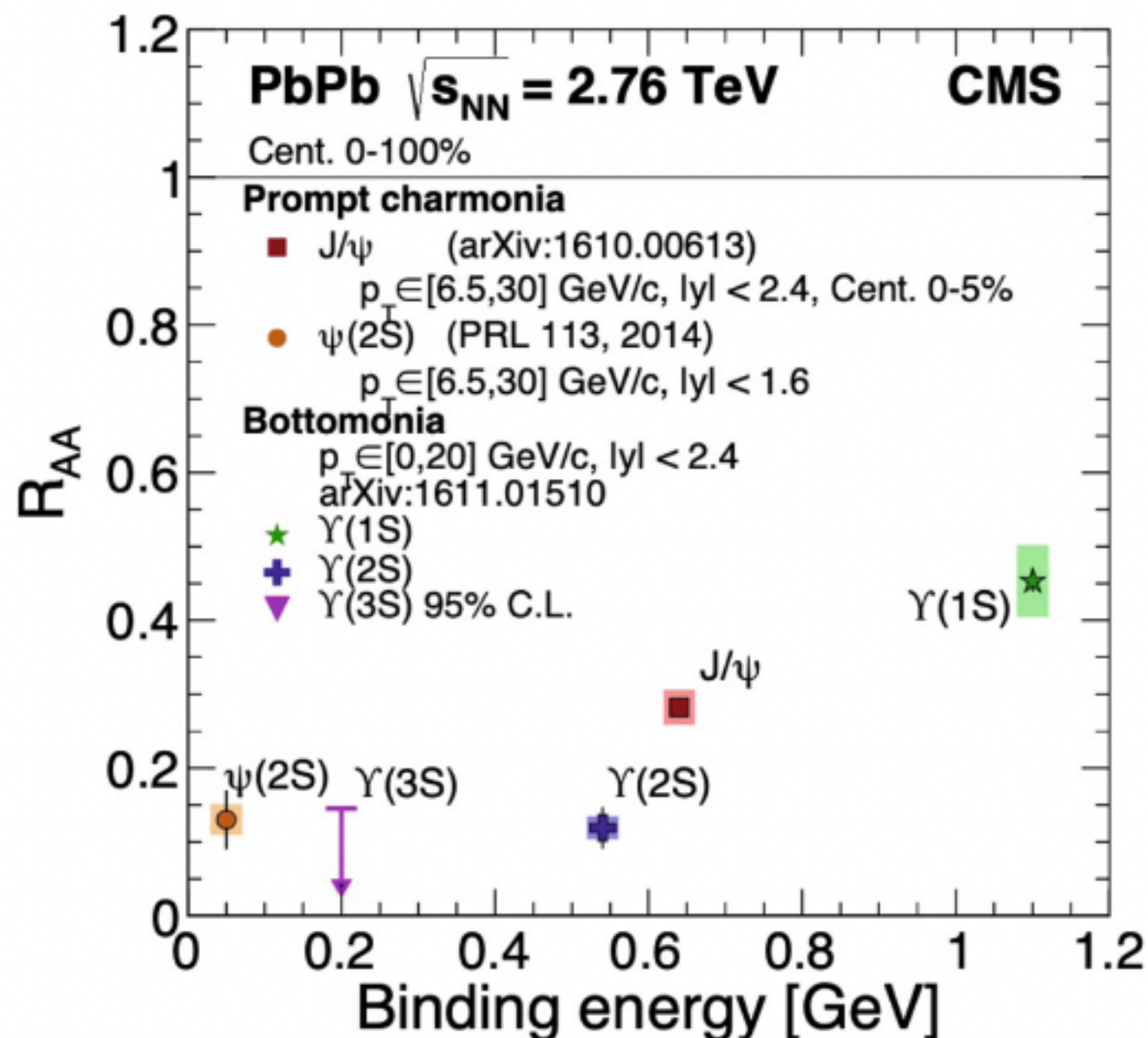
- QGP中やQGP消滅時などに新たに生成されにくいこと
- QGPで期待されるデバイ半径より半径が大きいこと

⇒ チャームクォーク、チャーム反クォークからなる中間子は適当！

Sequential Suppression



STAR PLB797(2019)134917



✓ デバイ半径より大きなCharmoniaは分離する

✓ 束縛エネルギーの小さい（半径の大きい）Charmoniaは、束縛エネルギーの大きい（半径の小さい）Charmoniaより強く抑制される

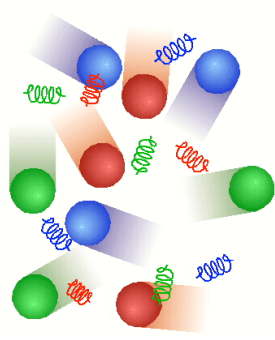
→ Sequential Suppression

✓ LHC CMS実験の測定結果

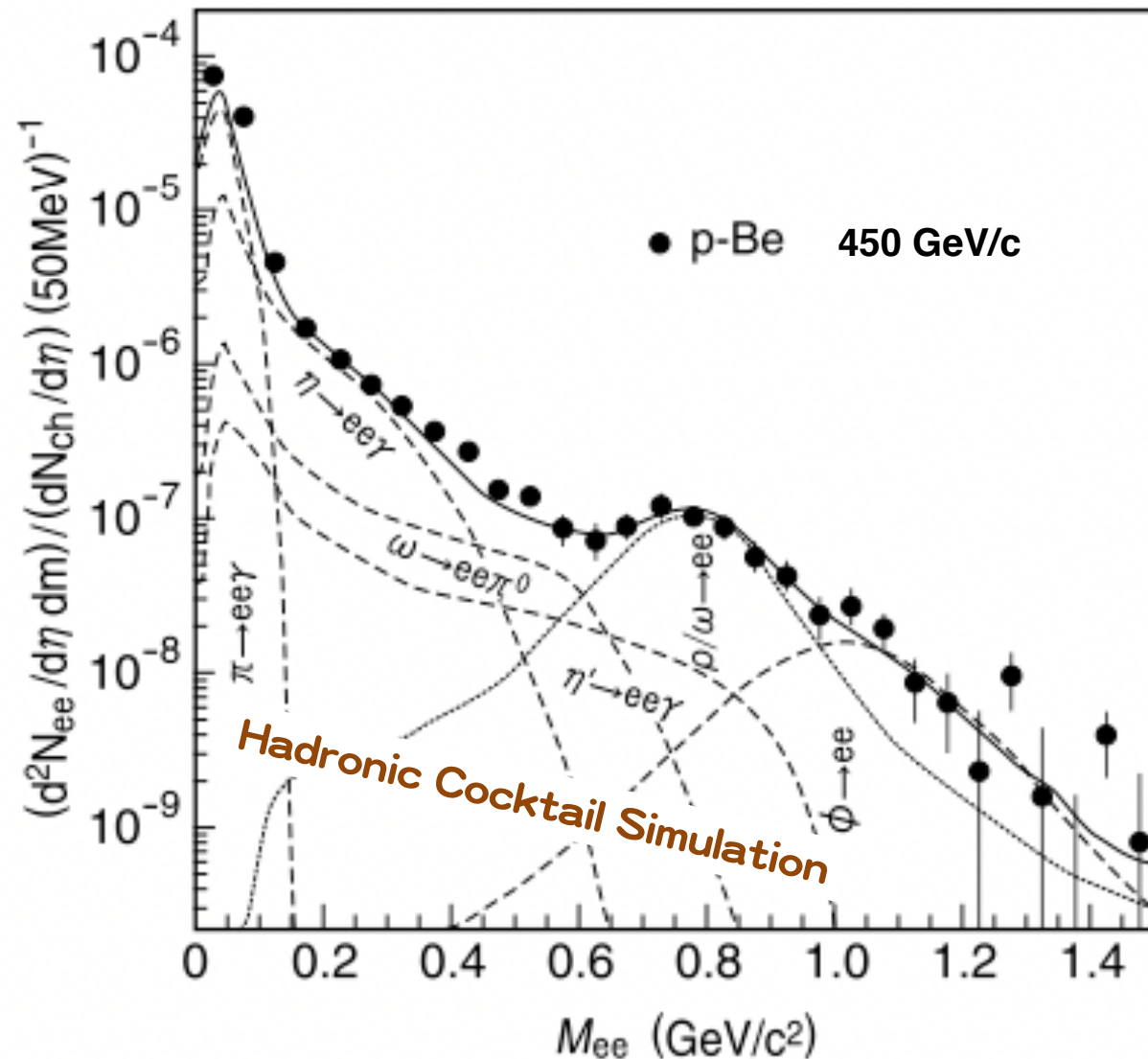
- 束縛エネルギーの小さなCharmonia程、 R_{AA} が小さい（強く抑制）様子が明らかに
- CNMやregenerationの効果は同等ではないかと推測される

→ 当初期待していたほどデバイ遮蔽効果は良い Signatureではなく、その定量的理解は難しい状況ではあるが、QGPによるデバイ遮蔽と矛盾しない

Dilepton測定



CERES, Eur.Phys.J.C4(1999)231



✓ カイラル対称性の回復によって、ベクトル中間子の質量が変化する

- 1.3 fm/c と寿命が短い ρ 中間子は、QGP 相の表面で生成し崩壊するので有利
- ρ 崩壊により放出される電子／ミュオンは強い相互作用をしないので邪魔されない

✓ 測定したDilepton分布から既知のdileptonを引き算していく → 極めて難しい

$$\rho \rightarrow ee$$

$$\omega \rightarrow ee$$

$$\phi \rightarrow ee$$

Dalitz decay

$$\pi \rightarrow ee\gamma$$

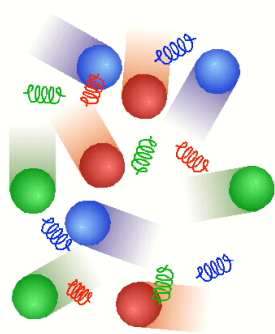
$$\eta \rightarrow ee\gamma$$

$$\eta' \rightarrow ee\gamma$$

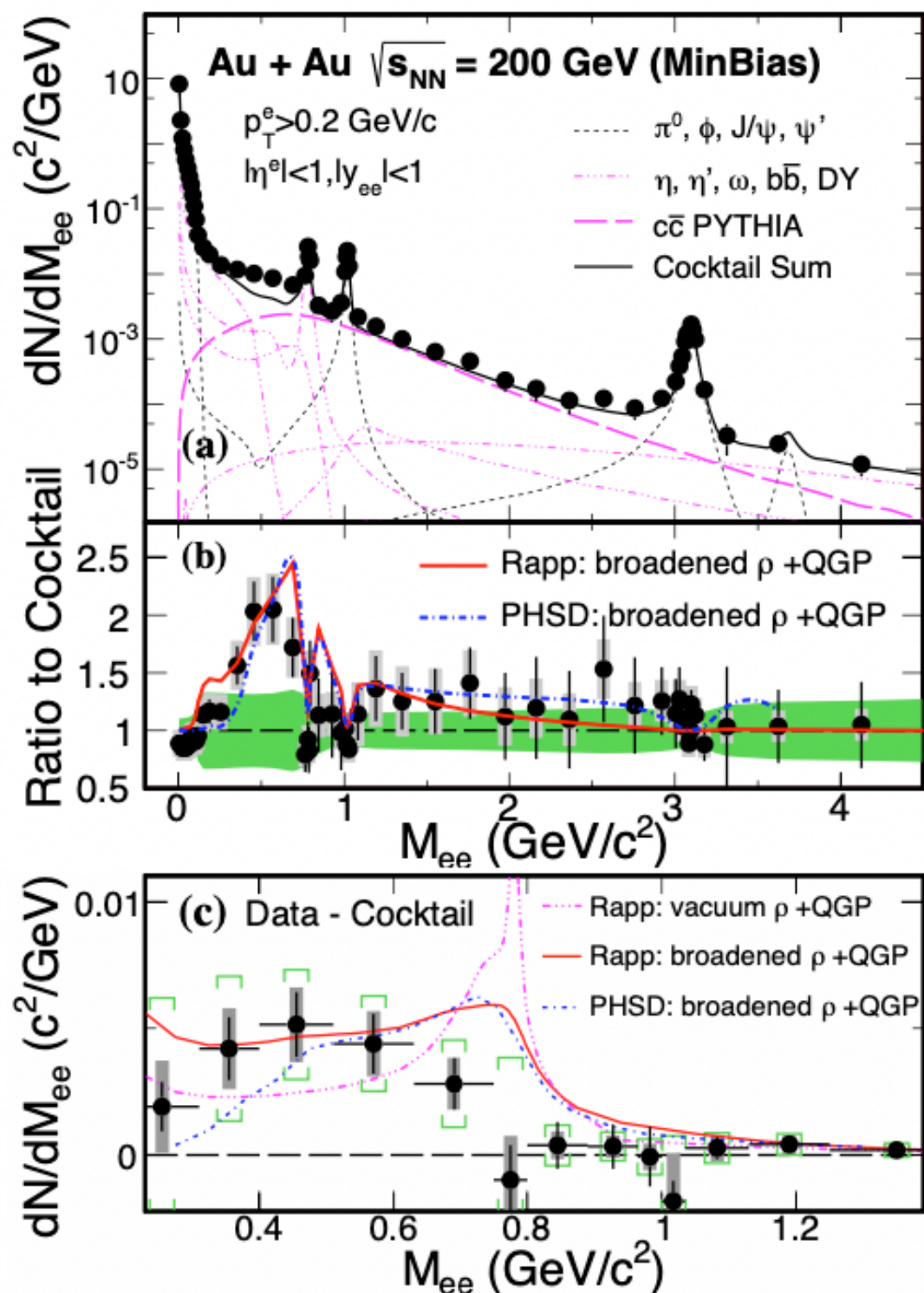
✓ p+Be衝突で生成されたDielectron質量分布を見事に既知のハドロン成分で説明することに成功した！

- Hadronic Cocktail Simulationの成功

Enhancement of low-mass dileptons ~ melting of ρ ?~

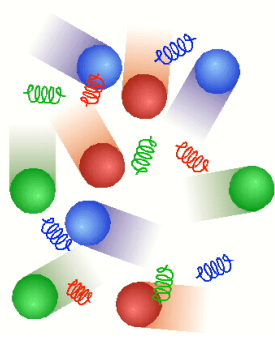


STAR, Phys. Rev. Lett. 113, 022301 (2014)



- ✓ ρ の質量領域でhadronic cocktailに比べて明らかに超過成分がある
- ✓ 真空における ρ の質量分布では説明できない
 - カイラル対称性の回復による ρ 中間子の溶融か？
- ✓ CERN SPS, CERES
Pb+Au@158A GeV

NA60実験の超精密測定



NA60, Phys. Rev. Lett. 96, 162302 (2006)

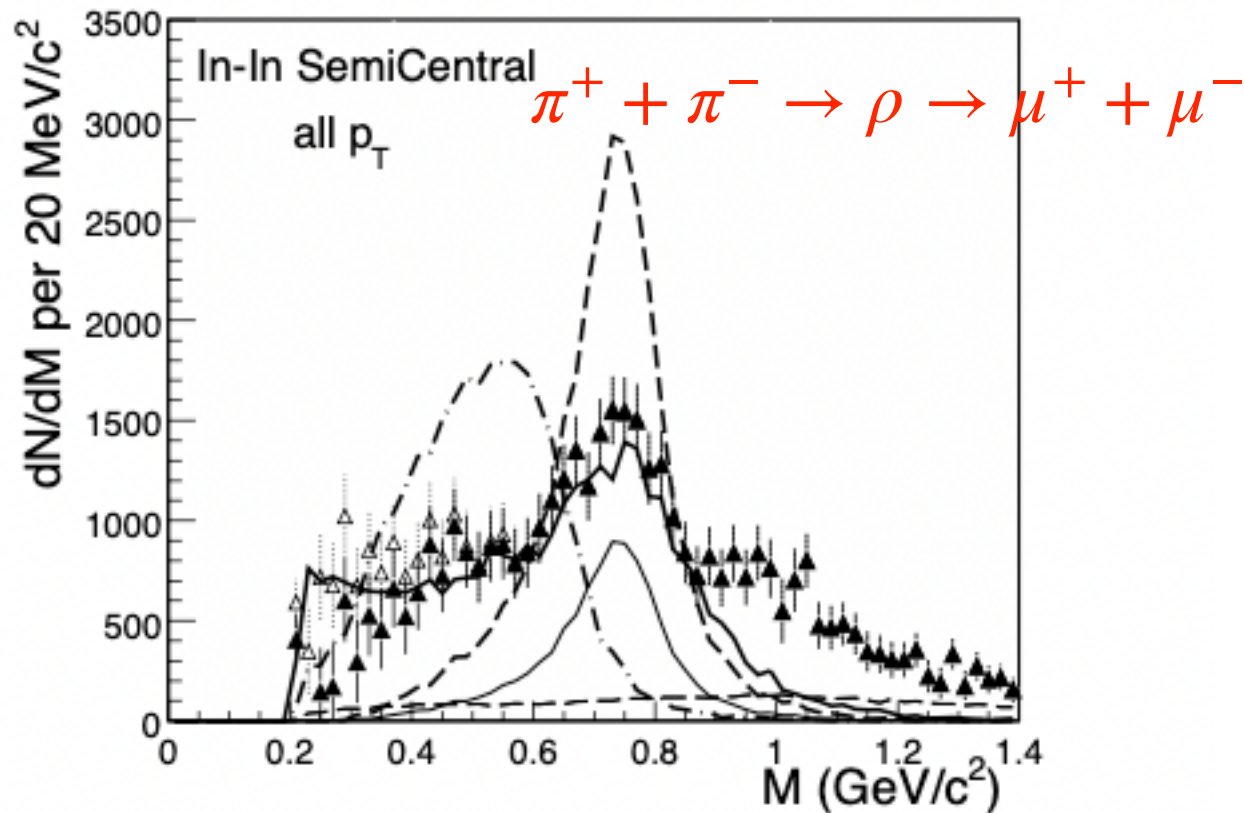


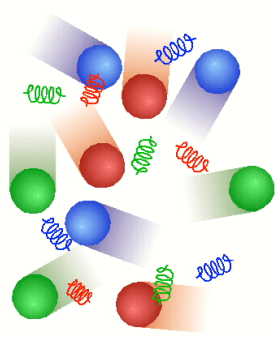
FIG. 4: Comparison of the excess mass spectrum for the semicentral bin to model predictions, made for In-In at $dN_{ch}/d\eta=140$. Cocktail ρ (thin solid), unmodified ρ (dashed), in-medium broadening ρ [4, 5] (thick solid), in-medium moving ρ related to [6, 7] (dashed-dotted). The errors are purely statistical. The systematic errors of the continuum are about 25% (see text). The open data points show the difference spectrum resulting from a decrease of the η yield by 10% (which should also be viewed as a systematic error).

✓ CERN SPS, NA60
In+In@158A GeVにおける
muon pairの超精密測定

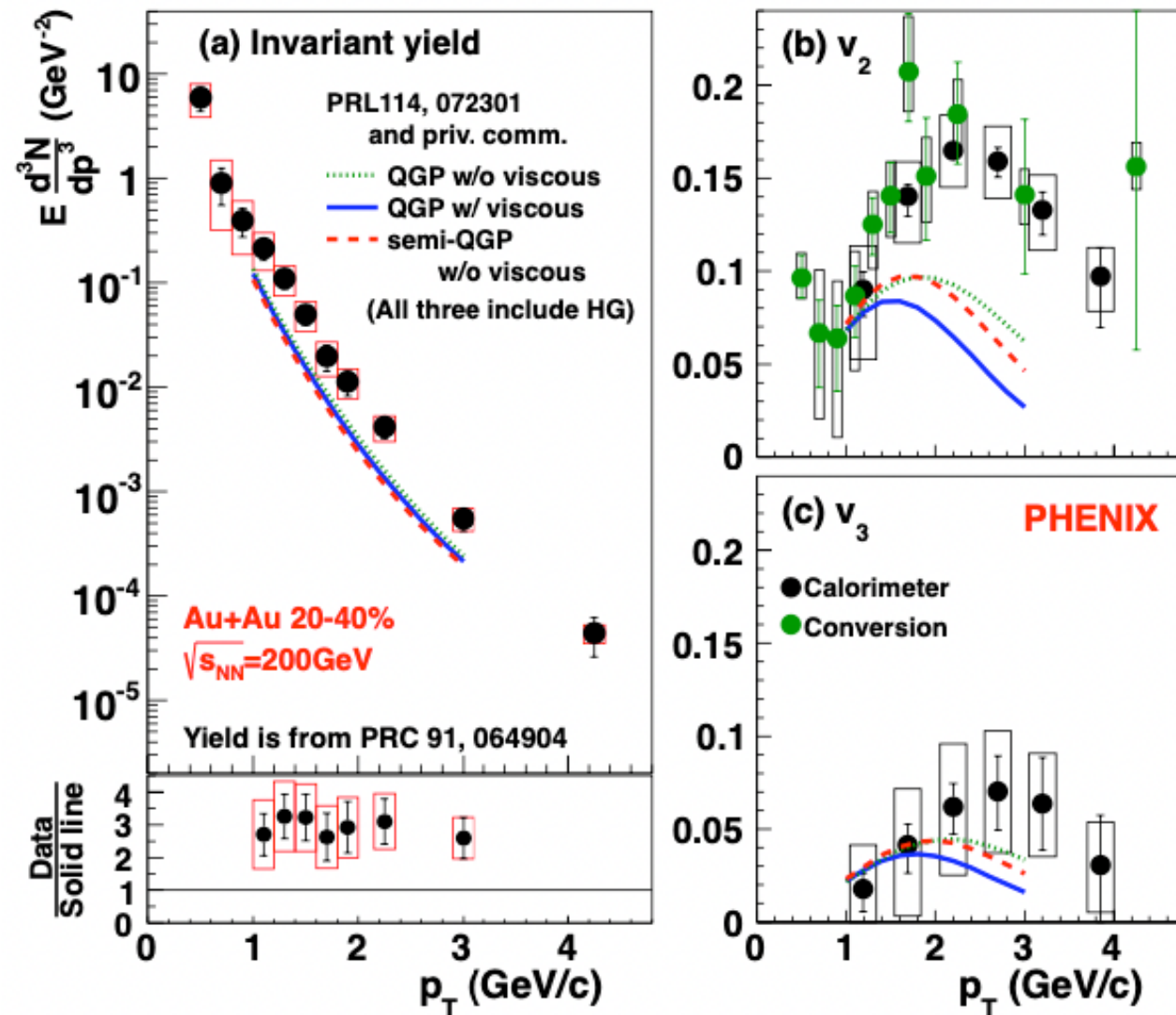
✓ 超過分の質量分布

- Strong broadening
- No shift in mass

Direct Photon Puzzle



Phys. Rev. C. 94(6), 064901 (2016)



$$T_{\text{RHIC}} = 221 \pm 19 \text{ (stat.)} \pm 19 \text{ (syst.)}$$

$$T_{\text{LHC}} = 297 \pm 12 \text{ (stat.)} \pm 41 \text{ (syst.)}$$

✓ 光子は強い相互作用をしないので邪魔されない

✓ Direct Photon ;

- π 中間子、 η 中間子などの崩壊以外の起源
- 衝突初期の熱的放射？

✓ 多くのBackGを差し引いた後の光子分布

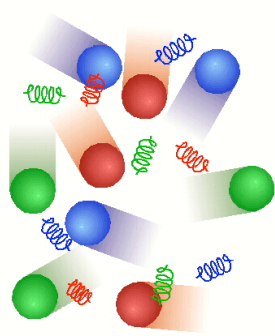
- 高温度の成分

✓ 反応初期に放出されたはずのDirectPhoton
が大きな v_2 や v_3 を示す (→矛盾)

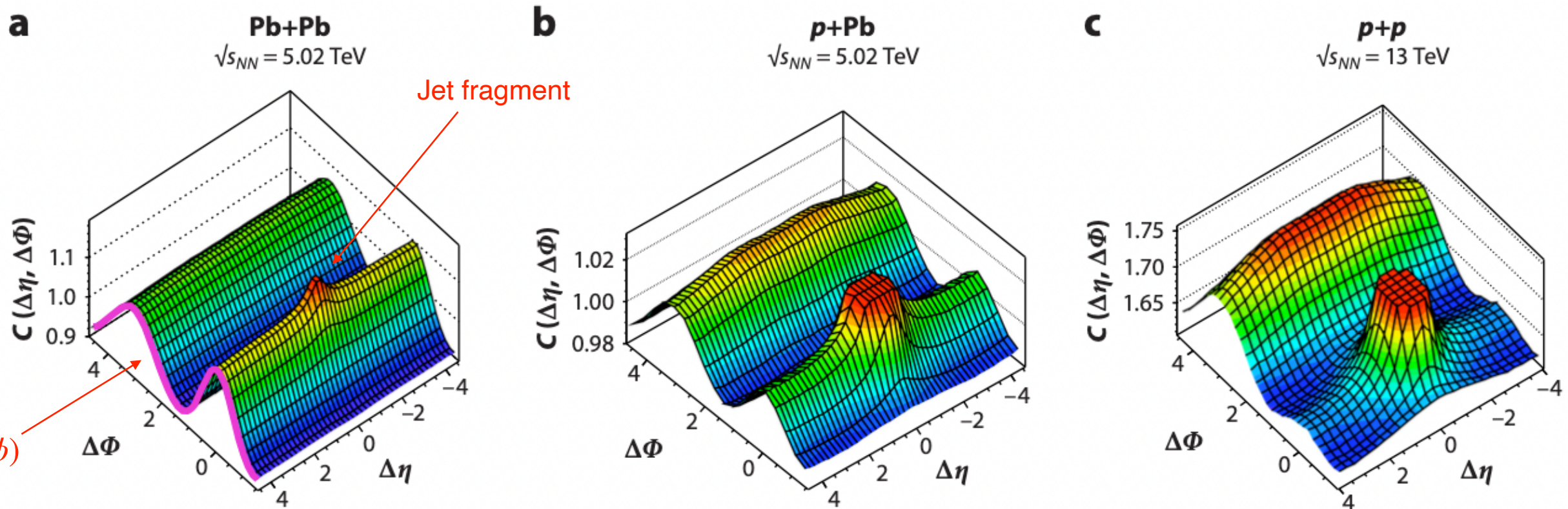
✓ LHCにおいても同様な傾向だが誤差の改善
が必要

- DileptonによるThermal測定
- Direct photonのBE相関測定

QGP droplet? ~ Two Particle Correlation ~



Ann. Rev Nucl. Part. Sci. 68(2018)211

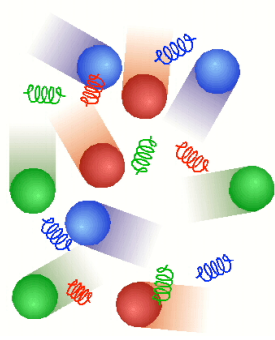


✓ Collectivityを調べるために2粒子相関の比較

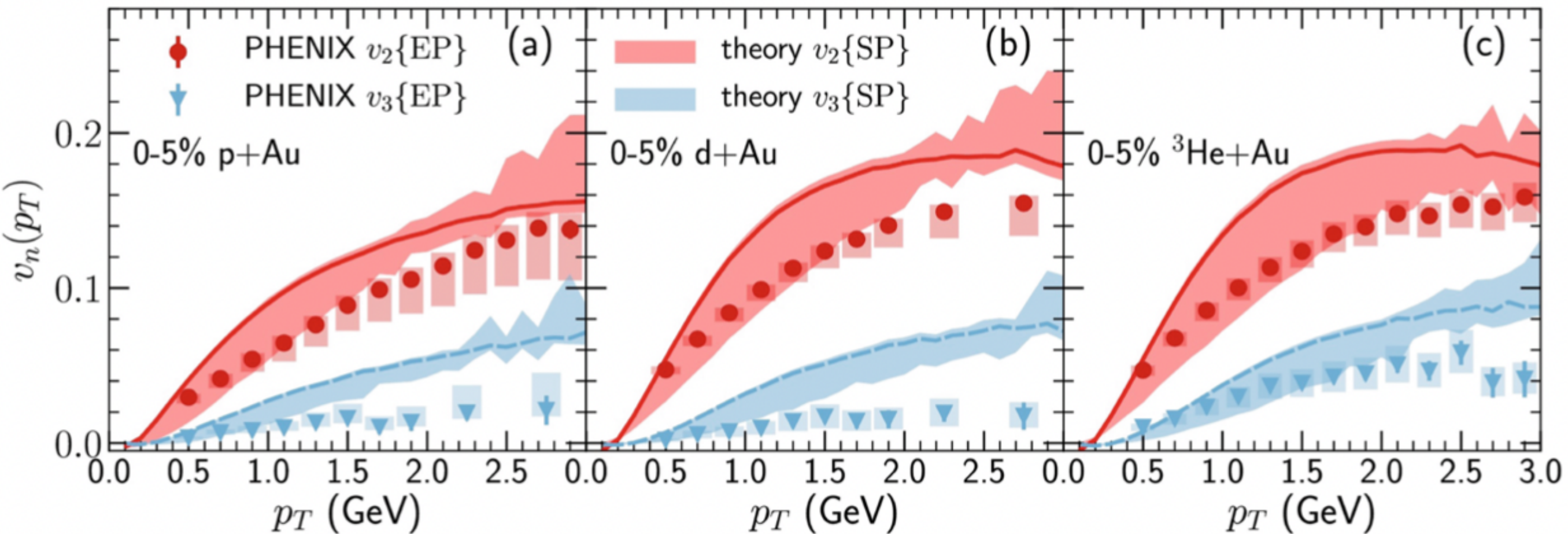
- AA ; $\Delta\phi = 0, \pi$ にピークを作る所謂 $\cos(2\Delta\phi)$ 分布を示し、z軸方向の流体膨張により η 方向に伸びている
- pA, pp ; 程度の違いはあるものの η 方向に伸びている

➡但し、流体以外にもこういった効果を作りうるので要注意

ppやpAの高多重度事象



Nat. Phys. 15(3), 214–220 (2019)



✓ 高エネルギー陽子陽子衝突、陽子原子核衝突において粒子多重度の高い事象を選び出して解析したところ、AA衝突で見られたQGPの証拠が観測された

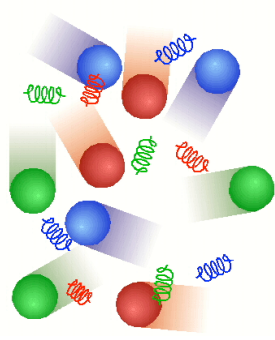
- long-range correlation
- 比較的大きな v_n

✓ Strangeness生成の多重度依存性

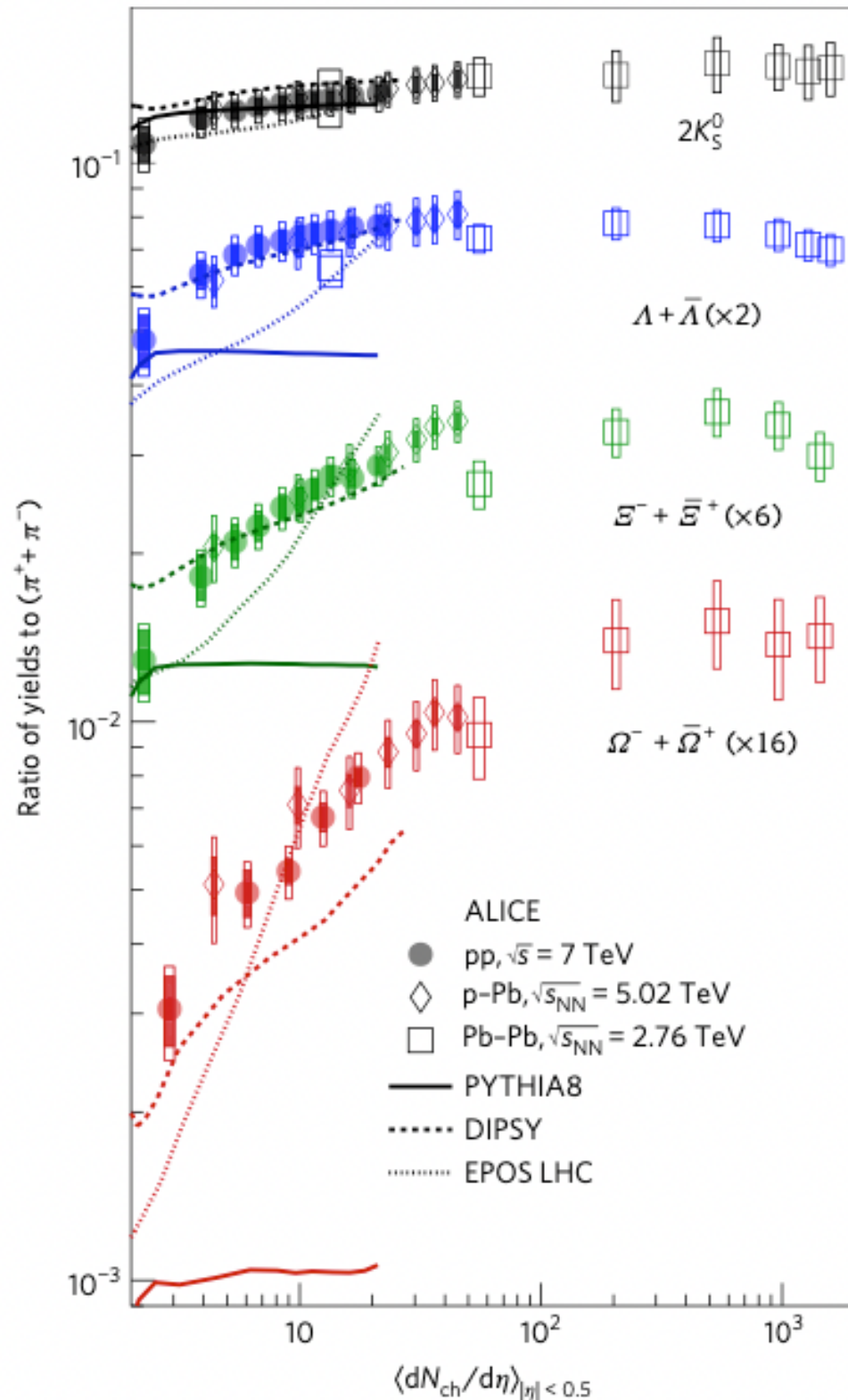
- ➡ QGP dropletが生成されている可能性？
- ➡ 流体力学の適用条件の見直しが必要？

Jet Quenchは観測されていない

s生成の多重度依存性 ~ pp, pA, AA とスムーズに~



ALICE, Nature Phys. 13(2017)535



✓ 多重ストレンジネス生成の多重度依存性を調べたところ、pp, pA, AAと連続的に変化

✓ ストレンジネス生成はQGPで化学平衡到達により増加

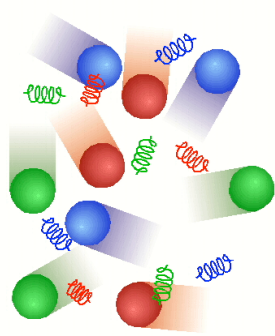
- “QGP signature”

✓ 高多重度pp衝突においてQGP生成が実現しているAAと同等の増加が見られた

➡ QGP dropletが生成されている可能性？

➡ 流体力学の適用条件の見直しが必要？

“QGP Signatures” の現状



✓ 高エネルギー原子核原子核によってQGPが生成

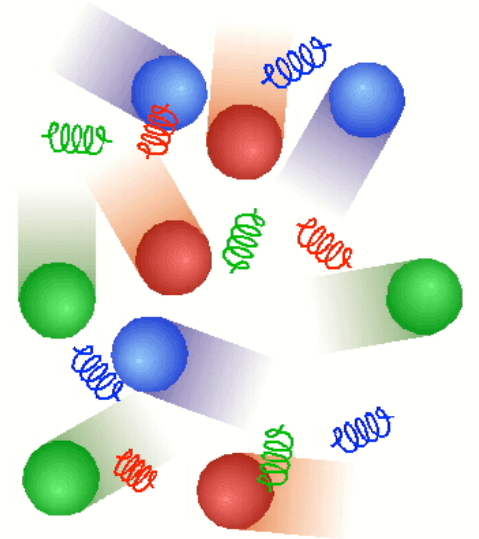
✓ 間接的証拠

- エネルギー密度の推定 $\epsilon_{\text{BJ}} = \frac{1}{\pi R^2} \frac{1}{c\tau_0} \frac{dE_T}{dy}$
 - ➡ 理論の推測するQGP相転移密度より十分大きい
- 原子核原子核の時空発展の理解 (温度、密度)
 - ➡ $T_{\text{QCD}} \sim T_{\text{chem}} > T_{\text{kin}}$
 $T_{\text{Lattice QCD}} = 154 \pm 9 \text{ [MeV]} \iff T_{\text{chem}} = 156.5 \pm 1.5 \text{ [MeV]}$
- クォークレベルの独特な反応や統計力学
 - ➡ Quark Coalescence

✓ 直接的証拠 (確かな～おそらく)

- Jet Quenching (high Opacity)
 - ➡ $(dE/dx)_{\text{AA}} \sim 1.2 - 1.9 \gg (dE/dx)_{\text{Cold Nucleus}} \sim 0.02 \text{ [GeV}^2/\text{fm]}$
 - ➡ 理論的理解 (Collisional + Radiative Process、質量依存性)
- non-viscous flow
 - ➡ 最もサラサラな流体 ;
 $\eta/s \sim 0.1 - 0.2$
- Debye screening
 - ➡ 半径に依存した抑制 (Sequential Suppression)
- ρ melting ??

将来の課題



- 衝突初期状態の探索
- QCD相構造の探索
- Toolとしての高エネルギー衝突
～希少ハドロン間相互作用～
～最強渦、極強電磁場～
- Strangelet探索