

高エネルギー重イオン反応のシミュレーション

北海道大学・大学院理学研究院・物理学部門
大学院理学研究科・宇宙理学専攻
大西 明

Abstract

Relativistic Heavy-Ion Collider (RHIC) 実験に代表される高エネルギー重イオン反応は、初期宇宙を擬似的に実験室で再現することができる等、様々な温度・密度のクォーク・ハドロン・核物質を実験室で探るほぼ唯一の手段であり、また高温・高密度状態におけるQCD相転移の研究も近年大きく進展している。この講義では、高エネルギー重イオン反応研究について概観した後、原子核衝突を理論的に記述するために用いられてきたシミュレーションの方法について解説する。

Contents

- **Over view of QGP Hunting at RHIC (1 コマ)**
- **Basic Ingredients in Heavy-Ion Collision Theory (2-3 コマ)**
 - ◆ **Nuclear Mean Field Dynamics**
 - ◆ **NN two-body (residual) interaction and Cascade Processes**
 - ◆ **Partonic Interaction and String Decay**
 - ◆ **Relativistic Hydrodynamics**
- **Collective Flows in Heavy-Ion Collisions from AGS to RHIC (1-2 コマ)**
 - ◆ **Nuclear MF Effects / Hadronic cascade at RHIC /**
 - ◆ **Jet-Fluid String formation and decay at RHIC**
- **Unsolved Problems at RHIC (1 コマ)**
- **(If I have time) Phase diagram and hadron properties in the strong coupling limit of lattice QCD (1 コマ)**

Overview of QGP Hunting at RHIC

地上で作る小さなビッグバン — クォーク・グルーオン・プラズマの探索 —

Abstract

この世界を構成している「最小」の粒子はクォークであり、クォークが3つ集まって陽子・中性子、そしてさらにこれらが集まって原子核を作っている。

これまではクォークは核子の中に閉じ込められ、単独でみることができなかったが、近年の実験において、クォークがばらばらになった状態、「クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)」が生成された。

初期宇宙では、このQGP状態を経て現在の宇宙の「真空」が作られており、人類は実験室で「小さなビッグバン」を作ったことになる。

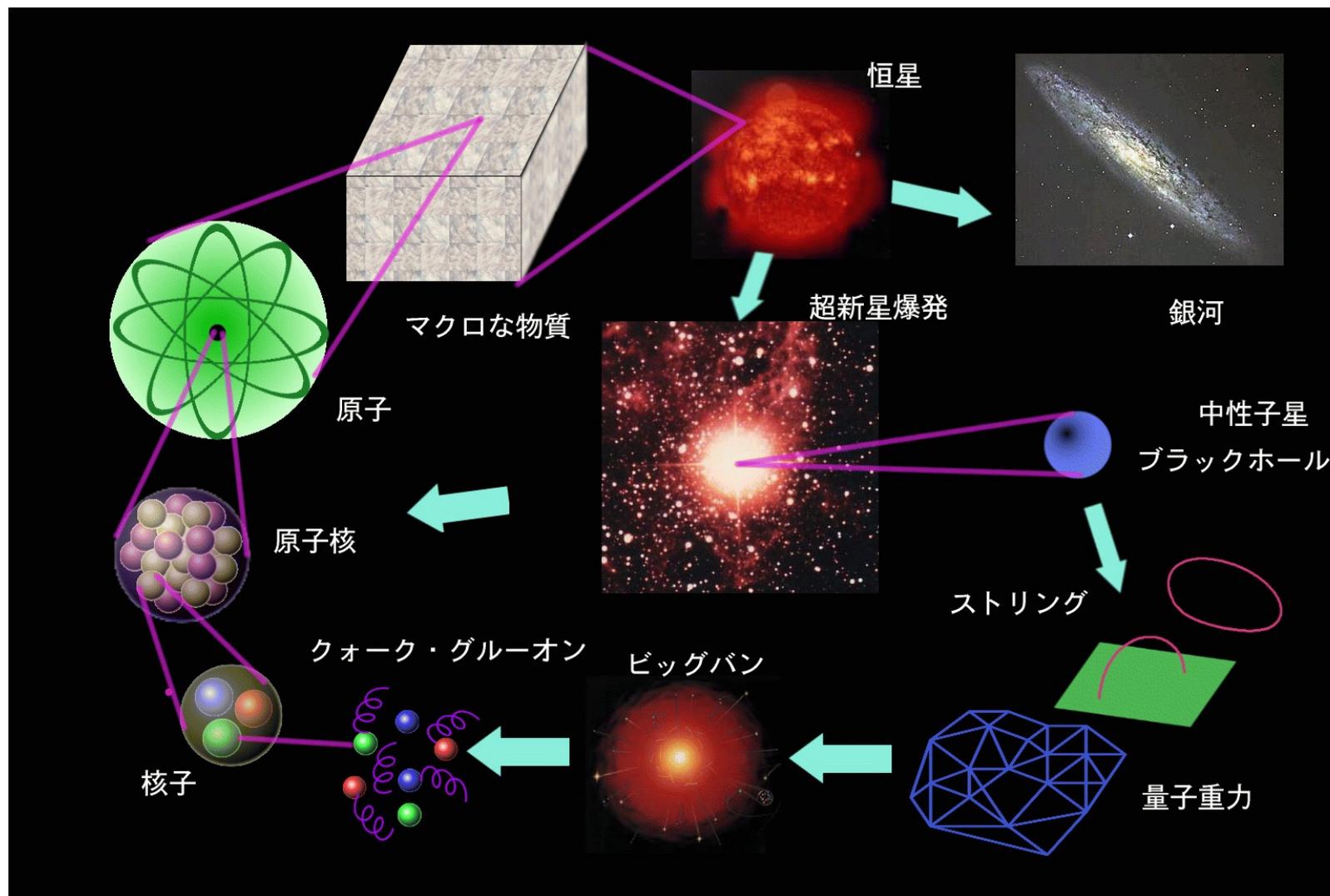
本公演では、現在急速に実験研究が進行しているQGP生成研究と、そこで必要とされているシミュレーション計算の現状について紹介する。

- Introduction
 - ◆ クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)とは何か？
- QGPは見つかったか？
 - ◆ ジェット抑制
 - ◆ 楕円型フロー
- QGP物性の探求へ向けて
 - ◆ 格子QCD計算、流体力学計算、ジェット生成、流体と速いパートンの相互作用
- まとめ

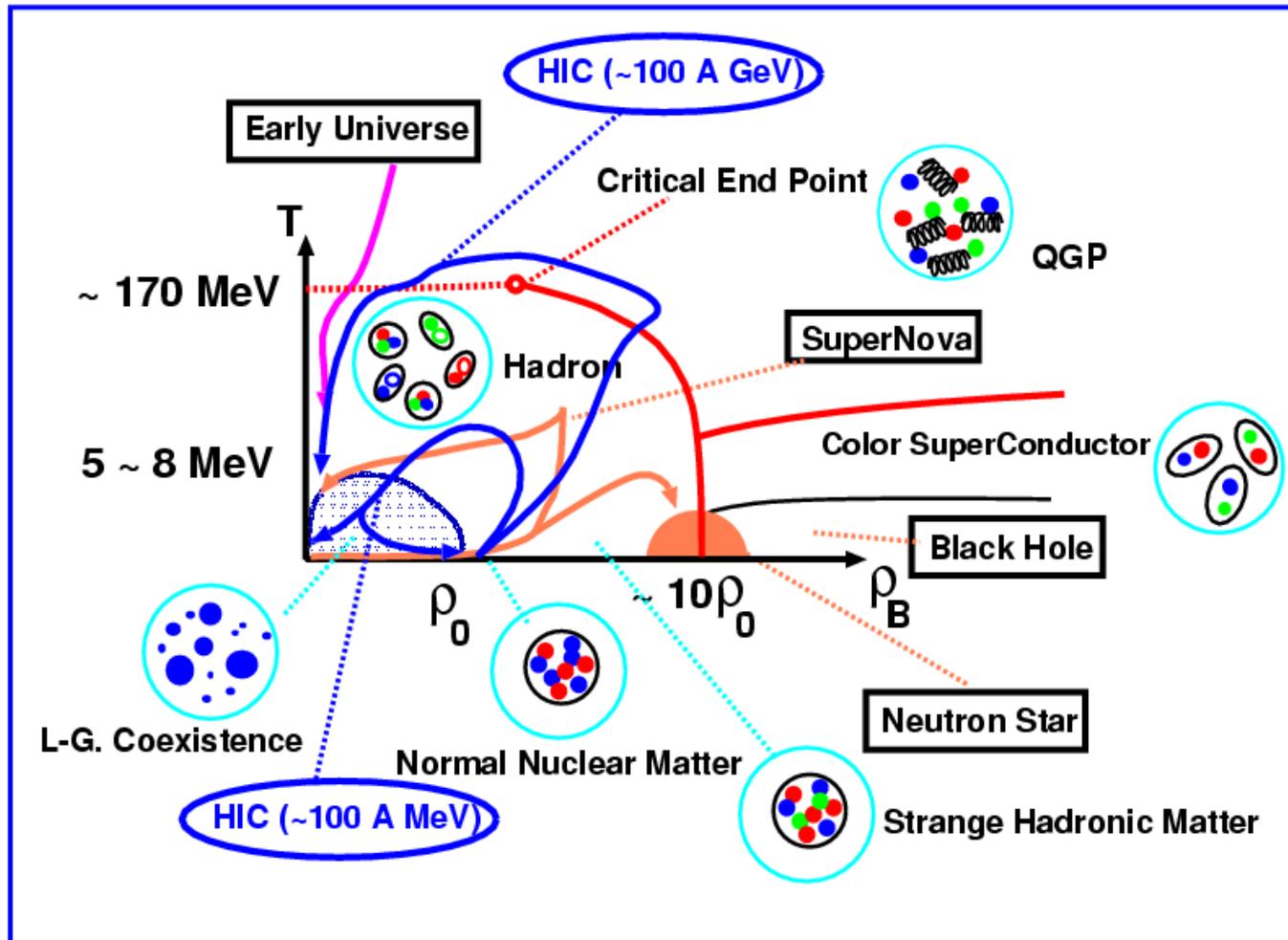
Introduction

物質は何からできているか？

- 原子 → 原子核 → 核子
→ クォーク(=現時点で「最小」と考えられている粒子)

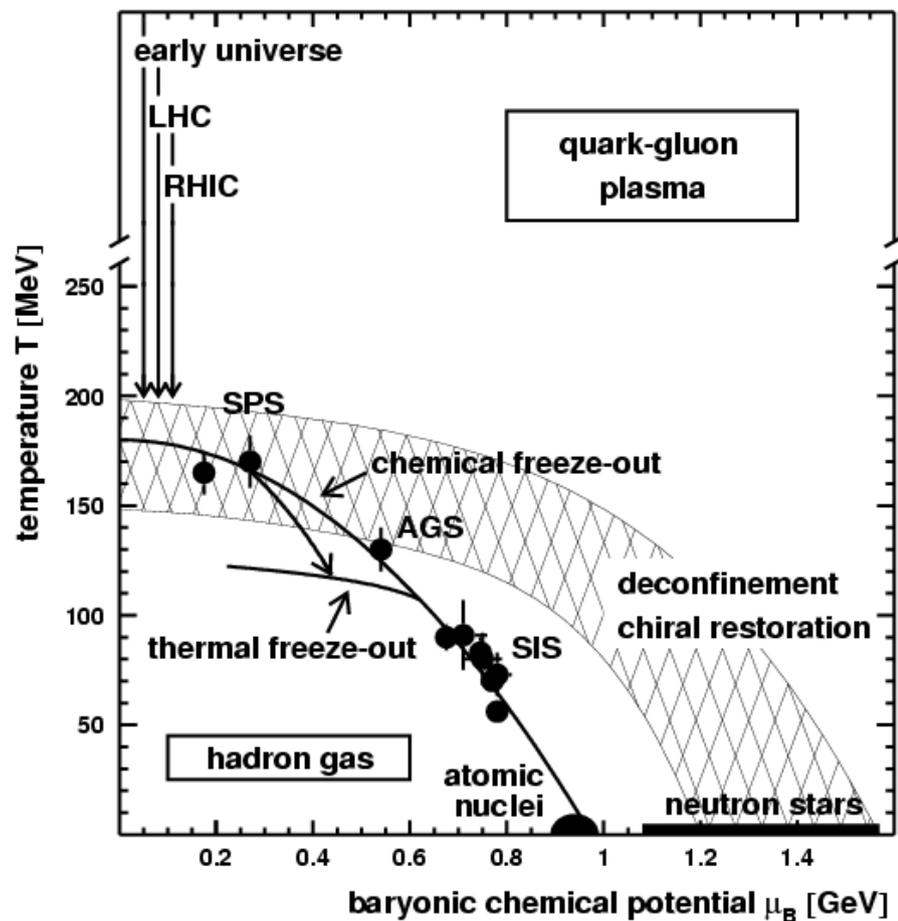


宇宙と地上でのクォーク物質相転移

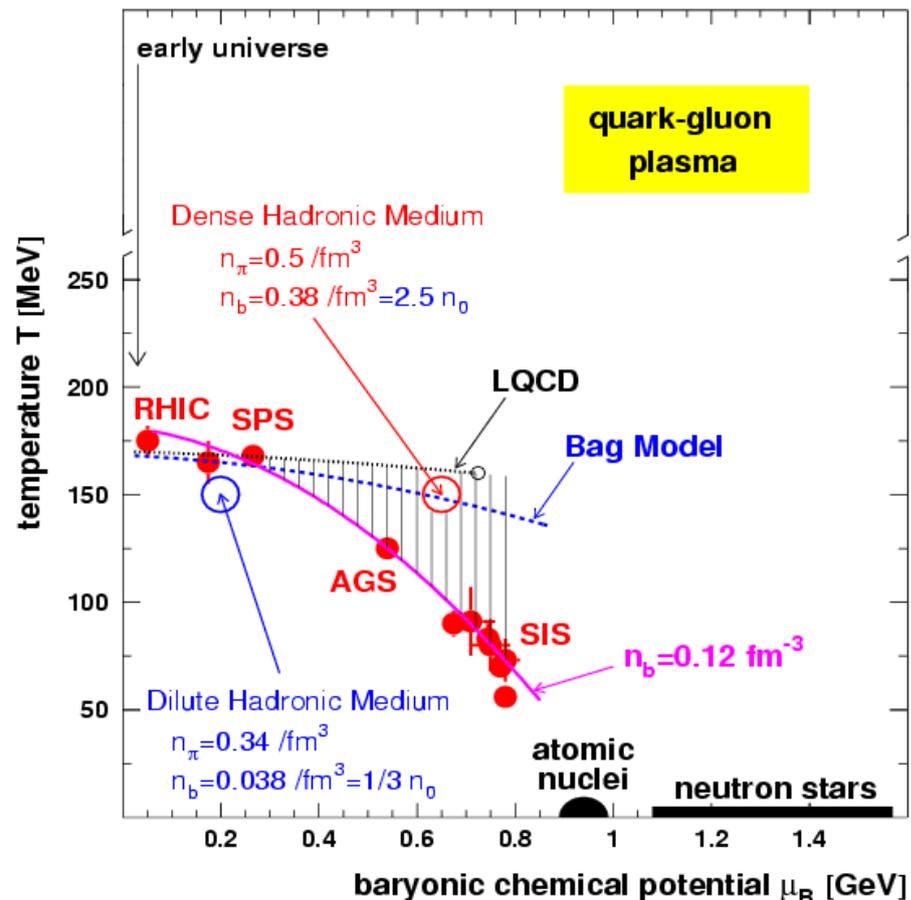


- QGPからハドロン相への相転移(QCD 相転移)
= この宇宙最後の「真空相転移」である！

Experimentally Estimated Phase Diagram



J. Stachel et al., 1998

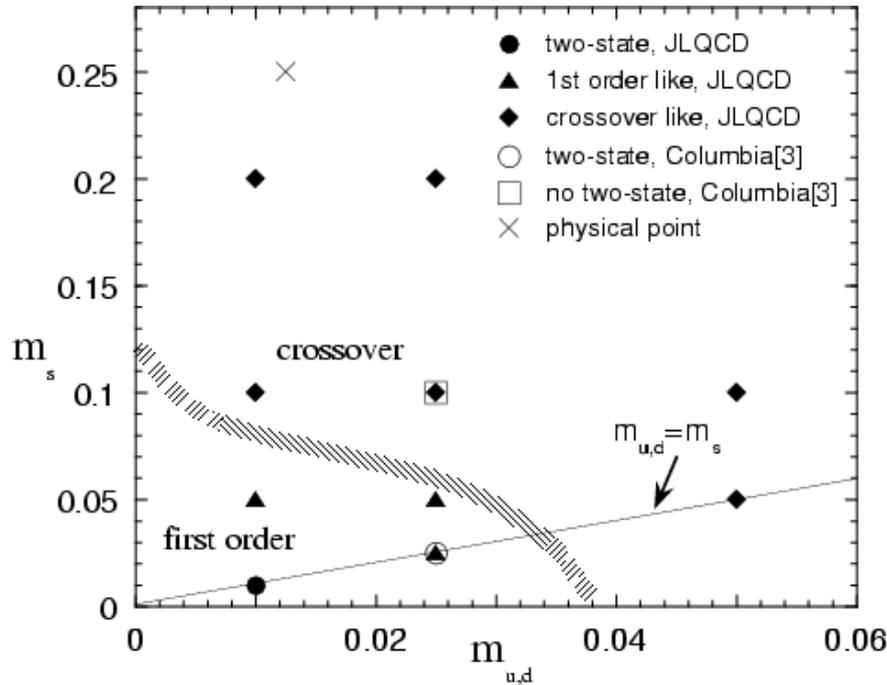


Braun-Munzinger et al., 2002

Chem. Freeze-Out Points are very Close to Expected QCD Phase Transition Boundary

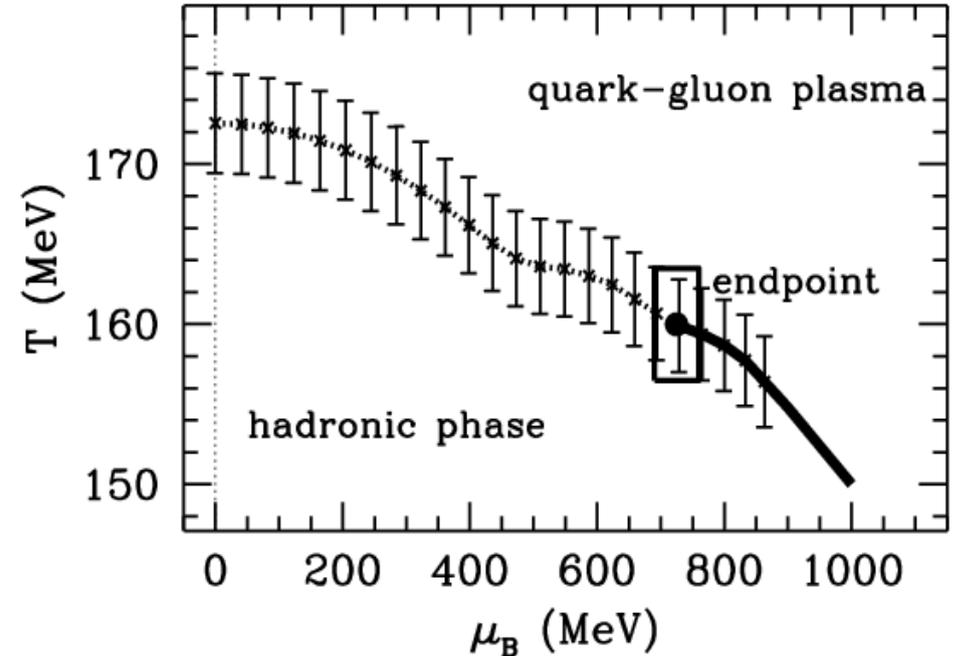
Theoretically Expected QCD Phase Diagram

Zero Chem. Pot.



*JLQCD Collab. (S. Aoki et al.),
Nucl. Phys. Proc. Suppl. 73 (1999) 459.*

Finite Chem. Pot.

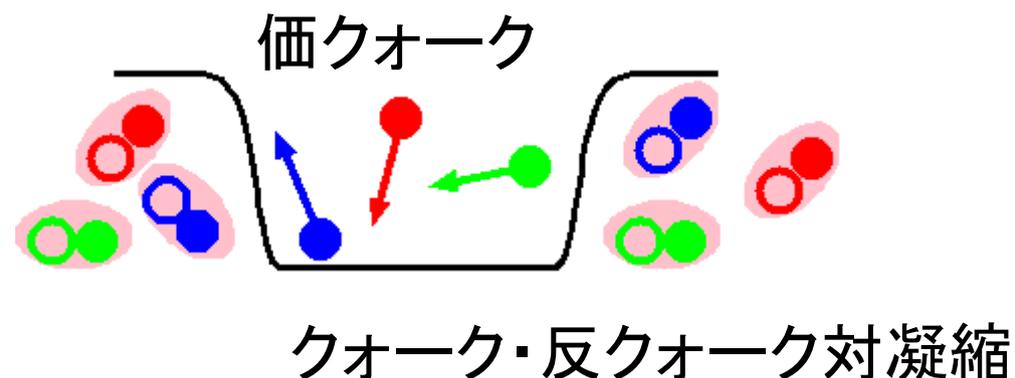
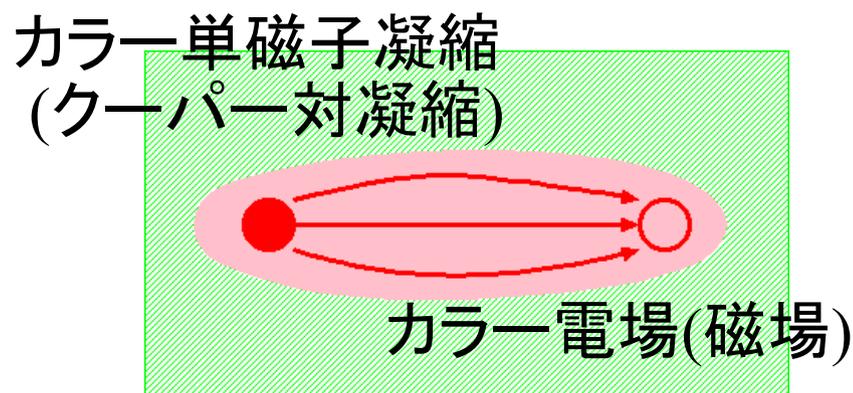


*Finite μ : Fodor & Katz,
JHEP 0203 (2002), 014.*

Zero Chem. Pot. : *Cross Over*
Finite Chem. Pot.: *Critical End Point*

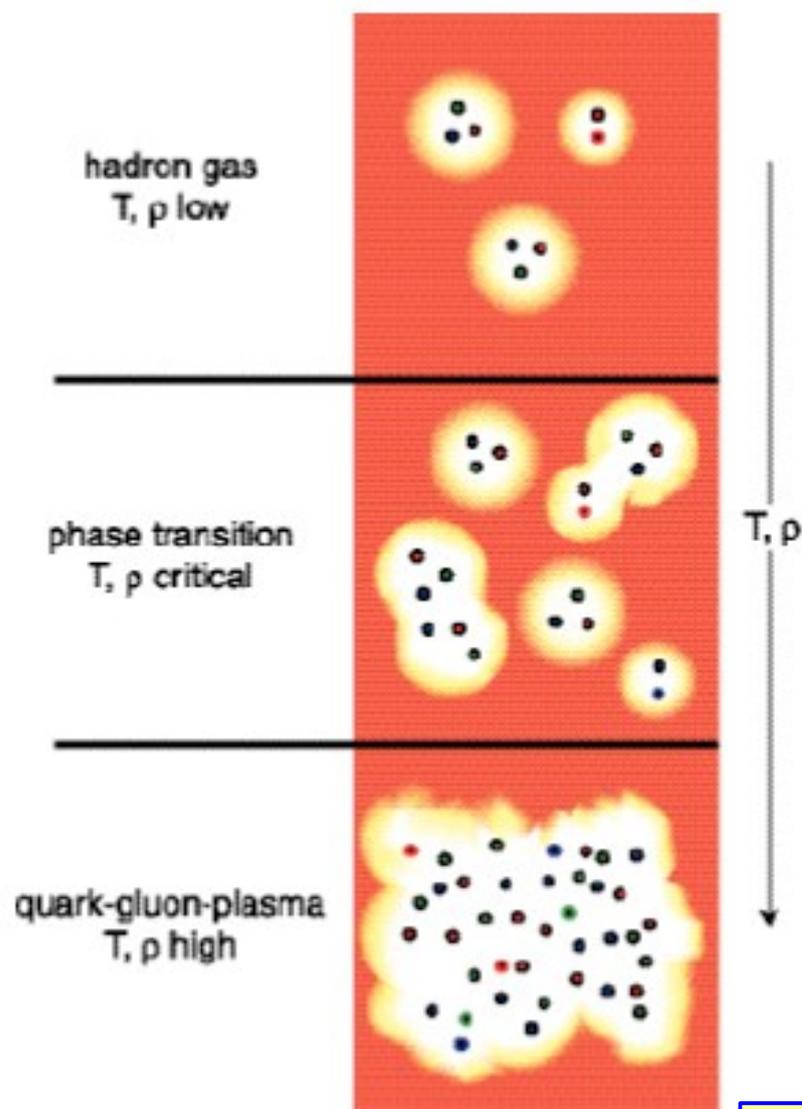
量子色力学 (QCD) の「真空」

- 色の閉じ込め:クォーク間には「ひも」のような力が働く
 - ◆ クォーク間の電場はひも状に絞られている(⇔超伝導体での磁場)
 - ◆ 引き離そうとするとクォーク対が生成されて色は閉じ込められたまま。
- 質量の獲得: 核子は「モーゼの道」の中の3クォーク状態
 - ◆ QCD 真空ではクォーク・反クォーク対が凝縮
 - 凝縮体を「押しよける」のにエネルギーが必要
 - 5 MeVの質量のクォークが3つで1000 MeVの大きな質量



QCD真空には「カラー単磁子」と「クォーク・反クォーク対」の凝縮体

なぜ高温でQGPへの相転移がおこるか？(1)



- ハドロン物質を熱する/圧縮するとどうなるか？
 - ◆ ハドロン(核子や中間子)は、1 fm 程度の大きさを持ち、クォークと力を媒介するグルーオンからできている。(クォーク3つか、クォーク・反クォーク対)
 - ◆ 温度の増加により、多くの中間子が作られる
→ クォーク・反クォークの数が増えて、ハドロンが「重なる」
 - ◆ 核子内部の密度まで圧縮する
→ 核子同士が「重なる」

温度・密度を十分上げれば、
大きな体積でクォークが自由に動き回るはず

なぜ高温でQGPへの相転移がおこるか？ (2)

- 質量0の粒子の大自由エネルギー = - (圧力)
→ ステファン・ボルツマン則 (T^4 に比例)

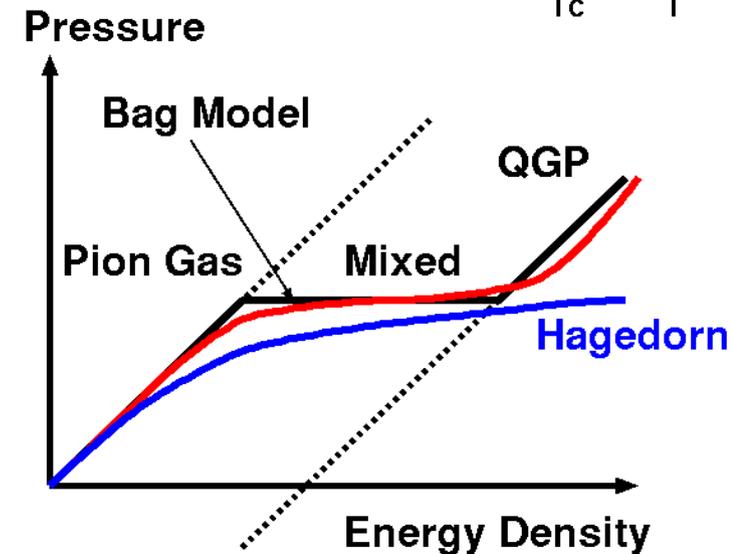
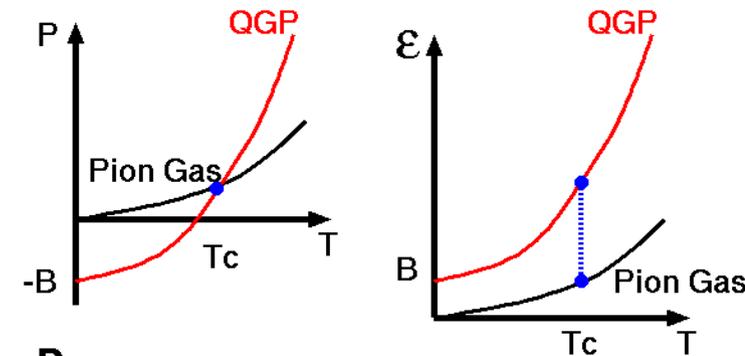
$$\Omega = -PV = -\frac{\pi^2 V}{90} \left(\sum_B g_B + \frac{7}{8} \sum_F g_F \right) T^4$$

- ハドロン相 ~ 3種類の質量0の π 粒子

$$P_\pi = \frac{\pi^2}{30} T^4, \quad \epsilon_\pi = \frac{\pi^2}{10} T^4$$

- QGP ~ 質量0のクォーク・グルーオンと「真空」の負圧力

$$P_{QGP} = \frac{37\pi^2}{90} T^4 - B, \quad \epsilon_{QGP} = \frac{37\pi^2}{30} T^4 + B$$

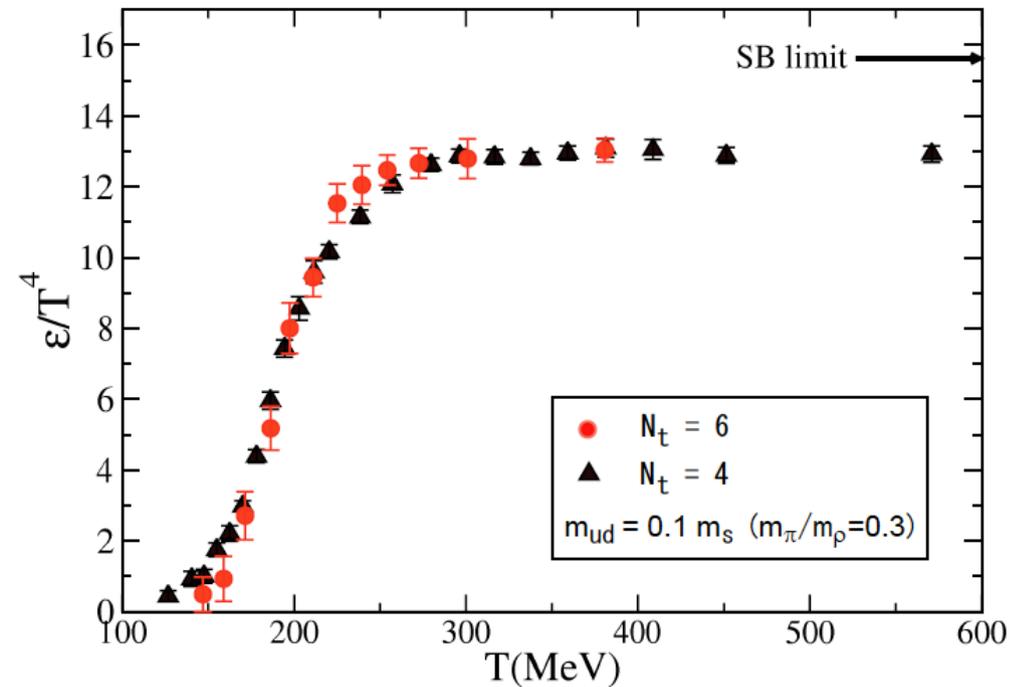
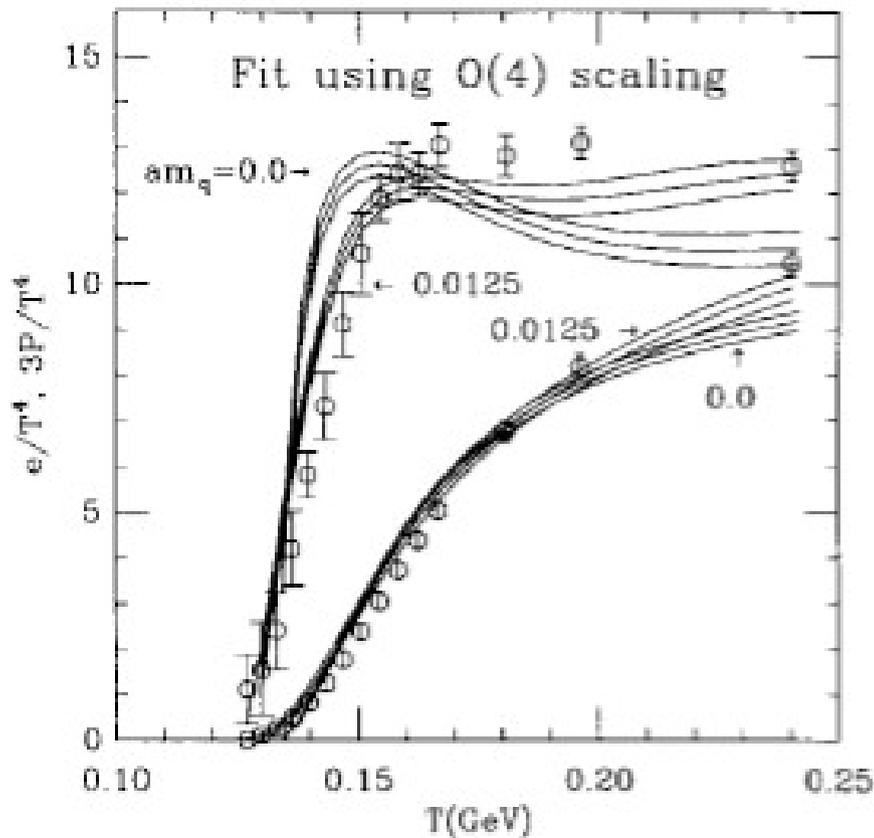


QGPへの相転移 = 自由度増加 + 真空の変化

$$DOF = 2(\text{spin}) \times 2(q, \bar{q}) \times 3(\text{color}) \times 2(\text{flavor}) \times 7/8(\text{Fermion}) + 2(\text{spin}) \times 8(\text{color}) = 37$$

なぜ高温でQGPへの相転移がおこるか？ (3)

- QCDに基づく第一原理計算 = 格子QCD シミュレーション
 - ◆ T^4 で規格化したエネルギー密度と圧力 $\rightarrow T = 150\text{-}200\text{ MeV}$ でエネルギー密度は急激に変化、圧力はやや滑らかに増加 \rightarrow QGP への相転移

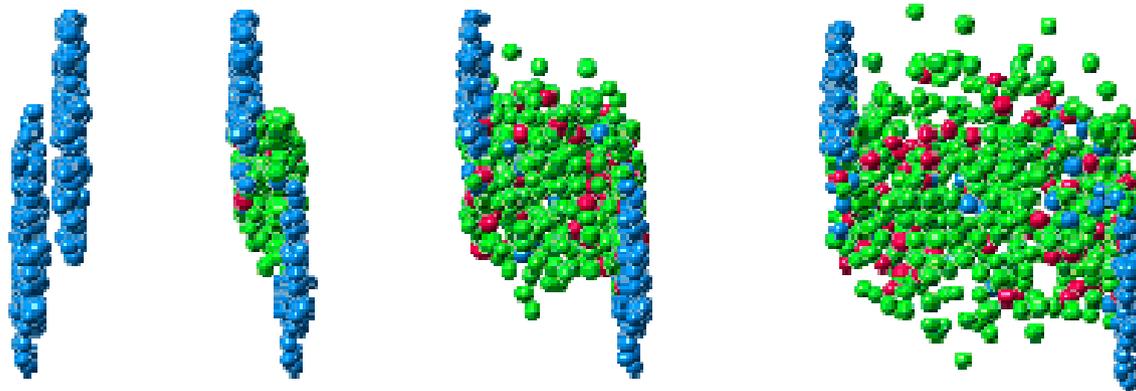


MILC Coll., hep-lat/061001
 $O(a^2)$ improved action
 $N_s/N_t = 2$, inexact R -algorithm.

クォーク・グルーオン・プラズマを作るには？

- クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)
 - ◆ 大きな体積中をクォークとグルーオンが閉じ込めから解放され、凝縮のない単純な真空を動き回っている状態
 - ◆ 初期宇宙等の「超高温状態」($\sim 10^{12}$ K)や、中性子星中心部などの「超高密度状態」($\sim 10^{15}$ g/cc)で実現
 - ◆ 実験室でのQGP生成 → 高エネルギーの重イオン反応

SPS



高エネルギー原子核反応での QGP生成 =地上の “Big Bang” 再現実験

High Energy Heavy-Ion Collision Experiments

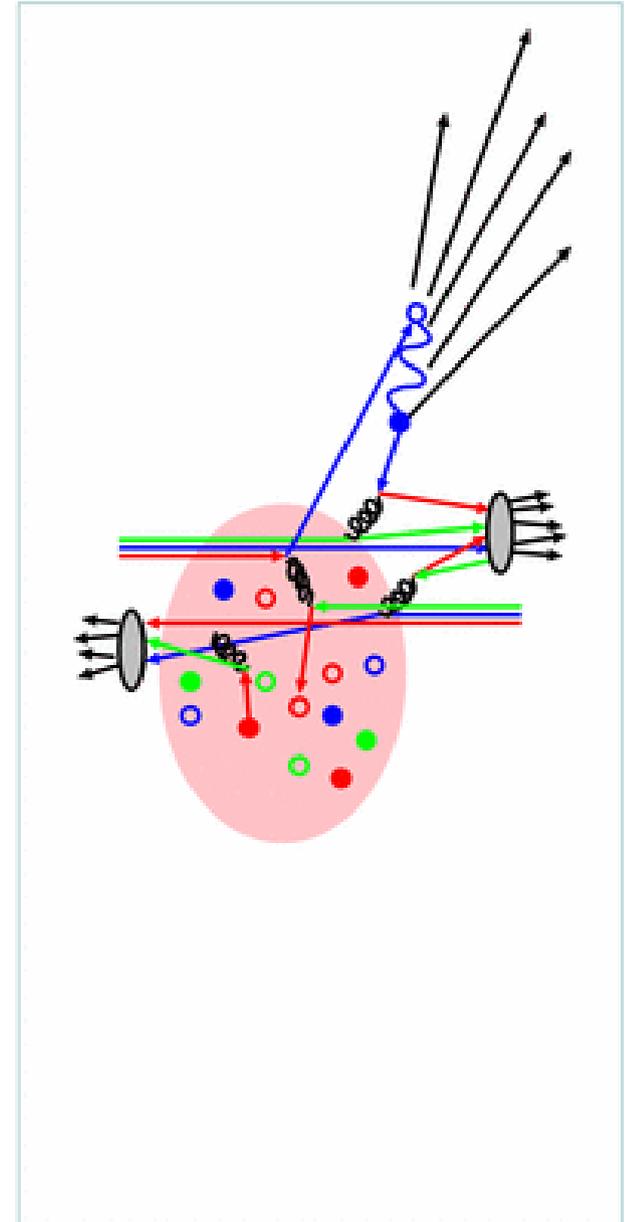
- ランダウの昔から核物理屋は重イオン反応でQGPを作りたかった！
 - ◆ LBL-Bevalac: 800 A MeV
 - ◆ GSI-SIS: 1-2 A GeV
 - ◆ BNL-AGS (1987-): 10 A GeV
 - ◆ CERN-SPS (1987-): 160 A GeV
 - ◆ **BNL-RHIC (2000-): 100+100 A GeV**
 - ◆ **CERN-LHC (2008(?) -): 3 + 3 A TeV**



QGPは見つかったか？
— ジェット抑制と楕円型フロー —

QGP生成のシグナル

- QGP が作られると何が起こるか？
 - ◆ 初期の核子内のパートン (クォーク、グルーオン) の激しい散乱
 - QGPが生成されると、カラー電荷 (クォーク、グルーオン) が熱的に分布
 - **クォークやグルーオンがエネルギーを損失** (ジェット抑制、Jet Quenching)
c.f. 荷電粒子は電子と散乱してエネルギーを損失)
 - ◆ 早い段階で熱平衡化
 - (熱平衡が仮定される) 流体力学的振る舞い



QGP生成の実験的証拠：ジェット抑制 (1)

原子核抑制因子 R_{AB}
=核子衝突と比べた粒子生成率

$$R_{AB} \geq 1 \text{ (抑制なし)}$$

$$R_{AB} < 1 \text{ (抑制あり)}$$

$$R_{AB}(p_T) = \frac{d^2 N / dp_T d\eta}{T_{AB} d^2 \sigma^{pp} / dp_T d\eta}$$

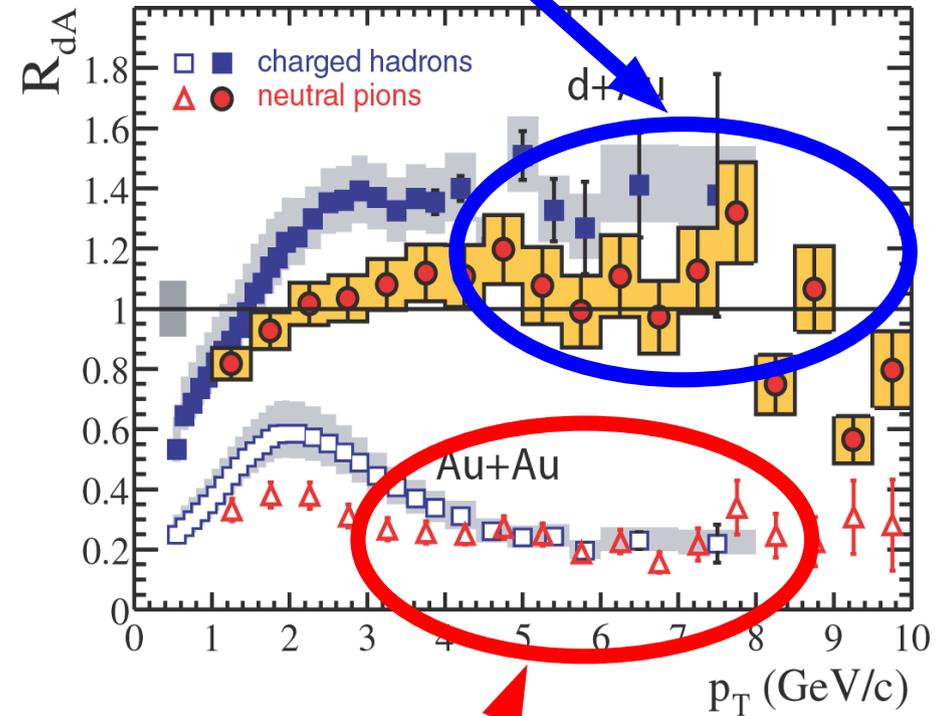
本当にジェット抑制は見えるか？

◆ d+Au 衝突では No !

◆ 大きな原子核衝突では Yes !

エネルギー密度が大きくなったとき
だけ、ジェット抑制が起こる
→ QGP の形成

d + Au: Initial State Effects



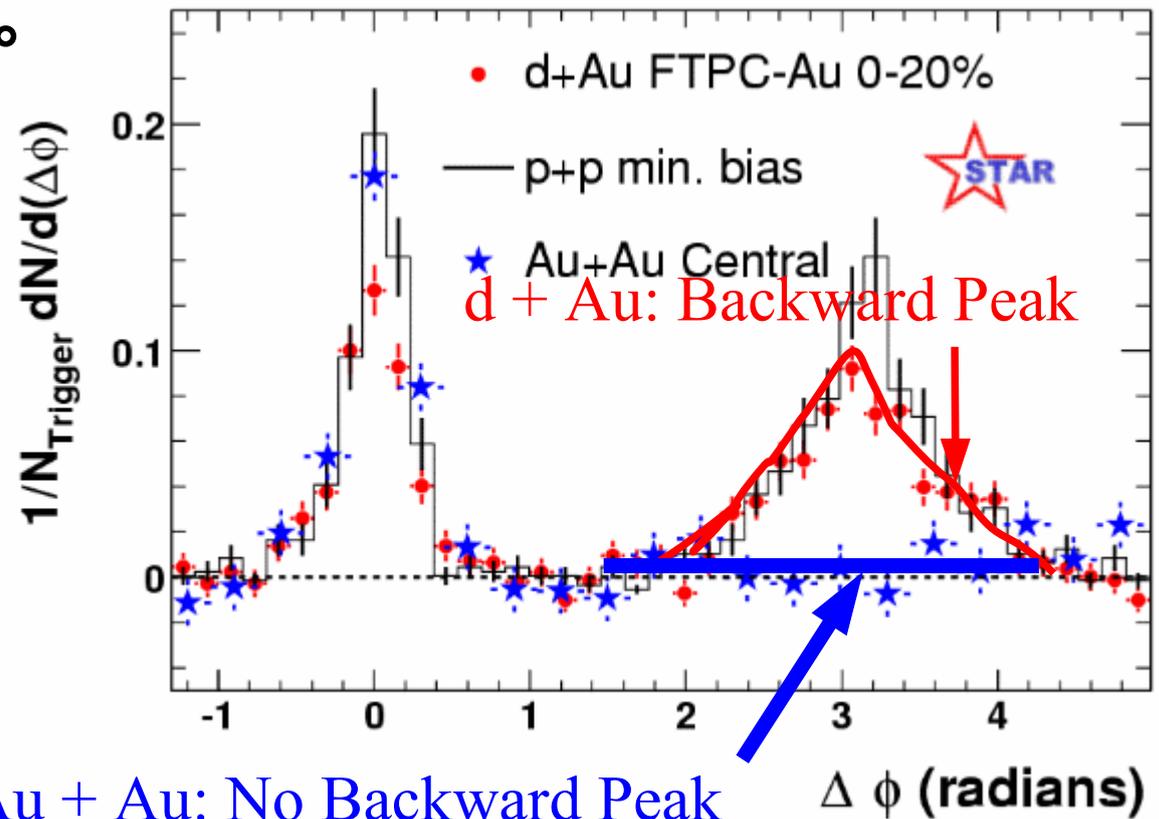
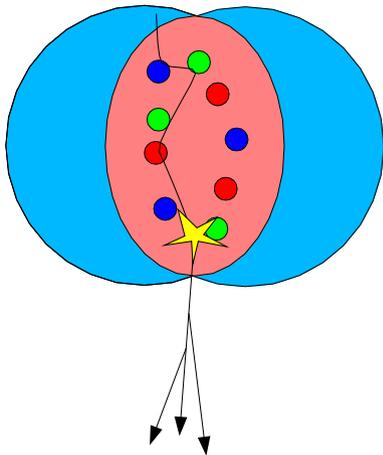
Au + Au: Initial State
+ Final State Effects

QGP生成の実験的証拠：ジェット抑制 (2)

STAR

- ジェットが消えているなら、裏側の相関が消えるはず。

- ◆ d+Au では消えていない
- ◆ Au+Au では消える



ジェットが抑制されると、裏側の相関が見えなくなる
→ ジェットが一本しか見えない
→ QGP 生成のシグナル

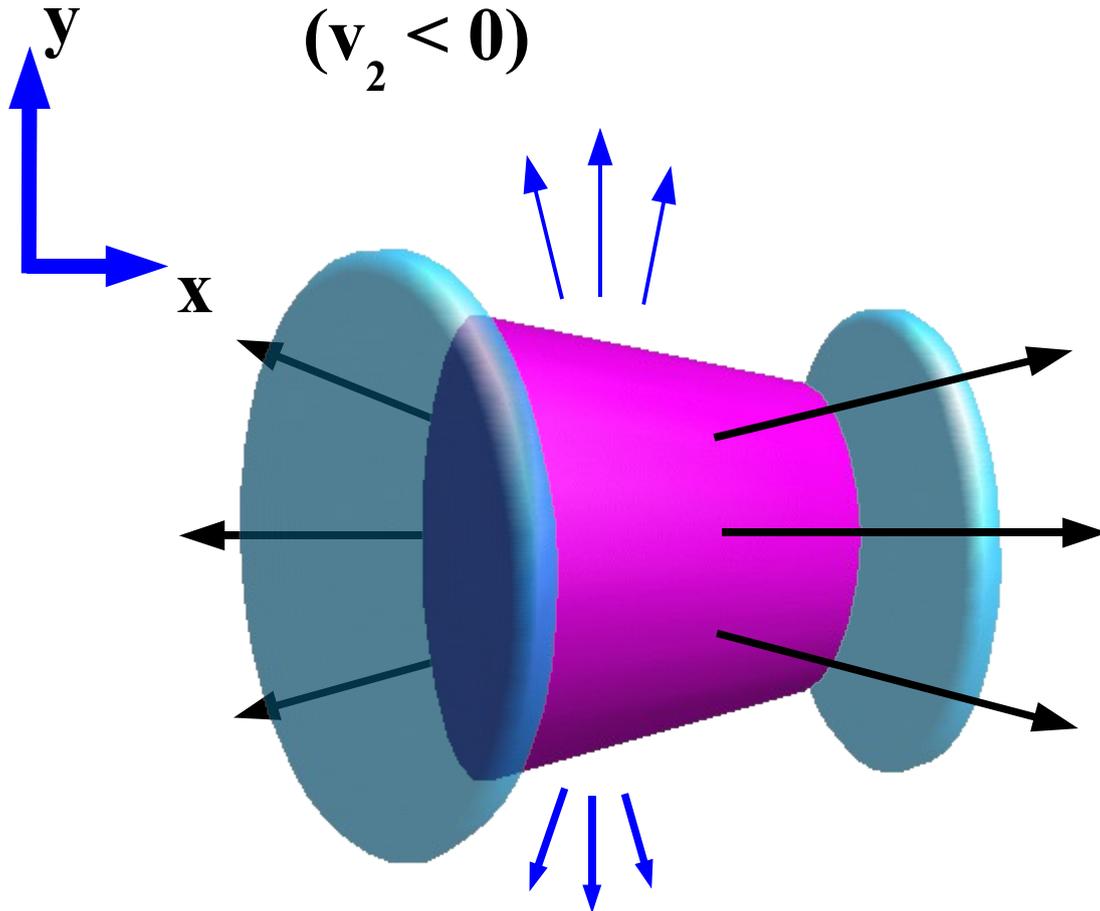
QGP生成の実験的証拠: 強い楕円型フロー(1)

- 楕円型フロー=運動量の方位角異方性

- 反応初期の「空間異方性」が起源
→ 圧力勾配が作られる熱平衡化の速さに依存

Out-of-Plane Flow

$$(v_2 < 0)$$

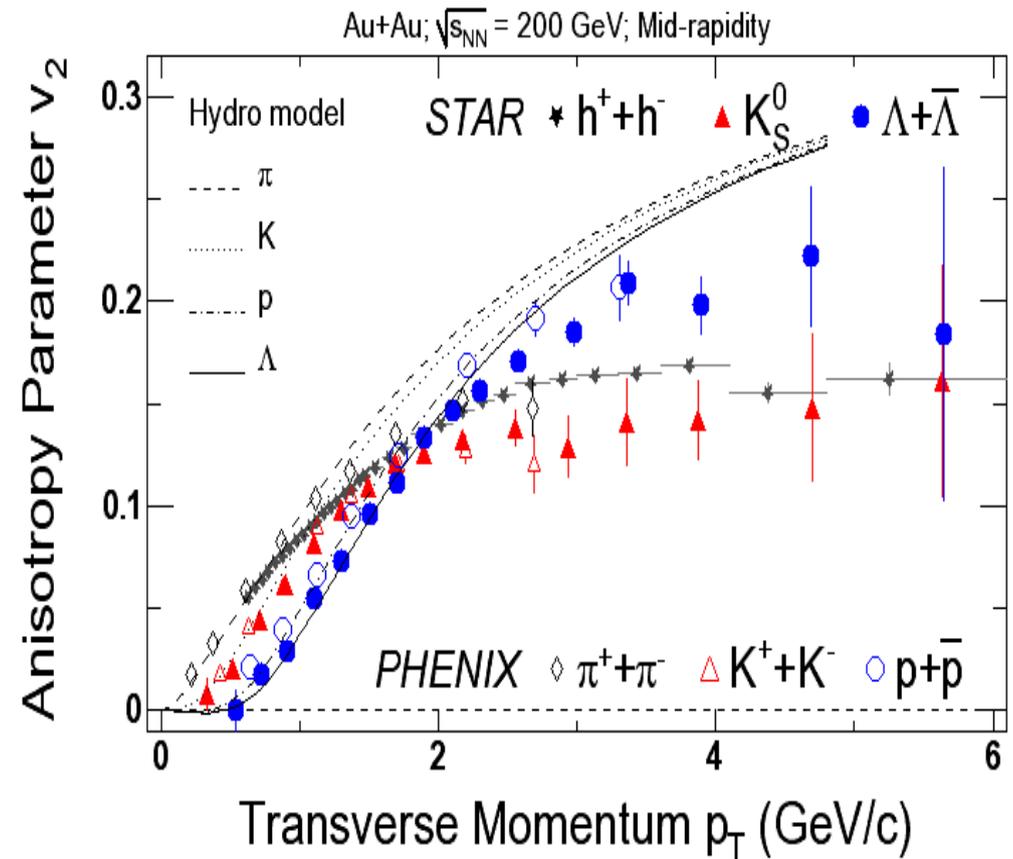
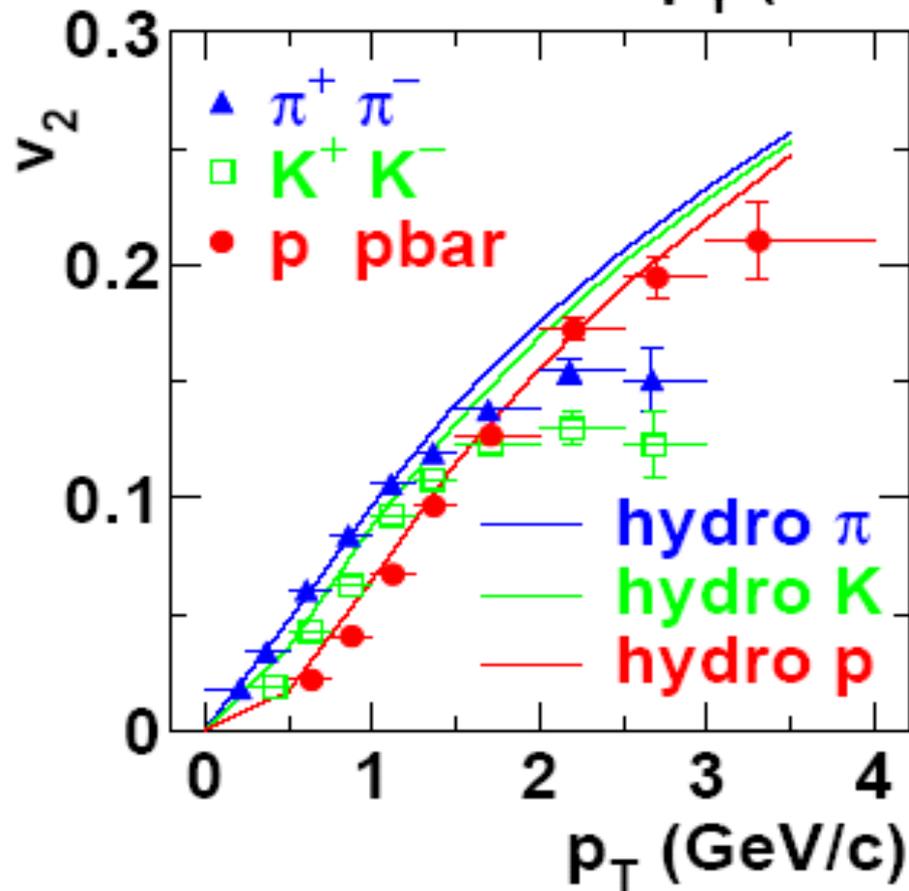


$$v_2 \equiv \left\langle \frac{p_x^2 - p_y^2}{p_x^2 + p_y^2} \right\rangle = \langle \cos 2\phi \rangle$$

In-Plane Flow

$$(v_2 > 0)$$

QGP生成の実験的証拠: 強い楕円型フロー(2)



Low Momentum : Hydrodynamical calc. with Early Thermalization
High Momentum : Reduction from Hydro. calc.

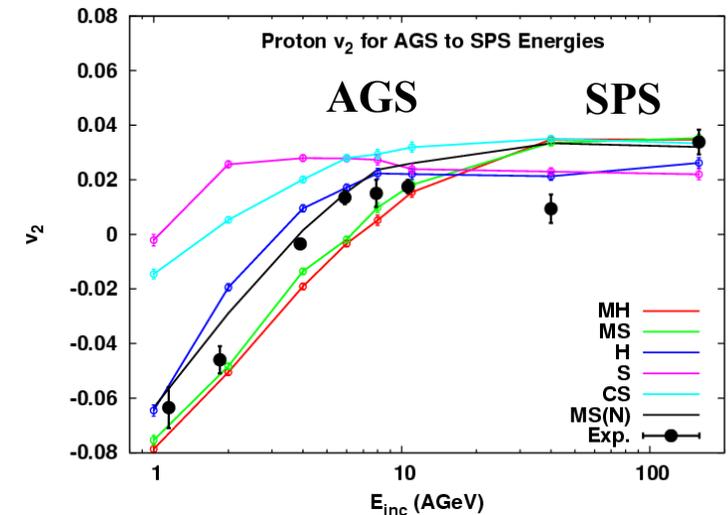
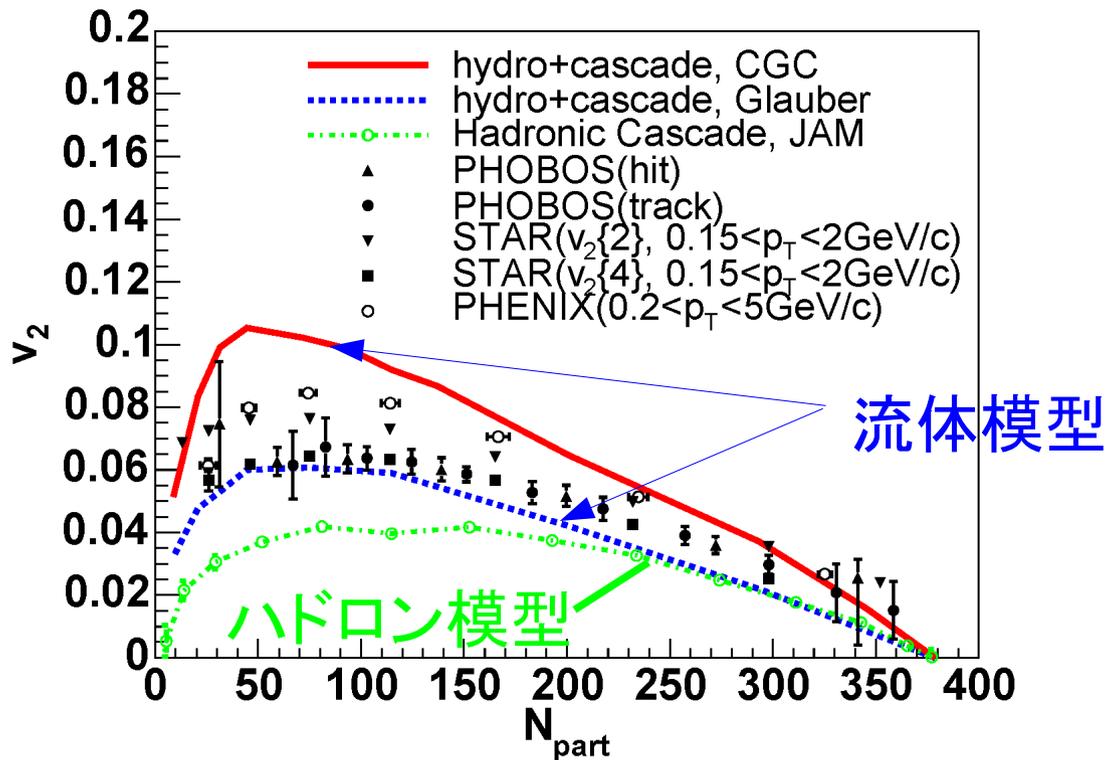
QGP生成の実験的証拠: 強い楕円型フロー(3)

● RHICエネルギーでは強い楕円型フローが見られる

◆ Au+Au: $v_2(\text{Casc.}) < v_2(\text{hydro}) \sim v_2(\text{data})$

- 完全流体のQGP生成を仮定した流体力学模型と無矛盾
→ 非常に小さい shear viscosity ($\eta/s \sim 1/4\pi$) は
AdS/CFT 対応の示唆と一致

◆ 低いエネルギーを説明するハドロン模型とは矛盾



低いエネルギーでの結果
→ ハドロン模型の範囲内

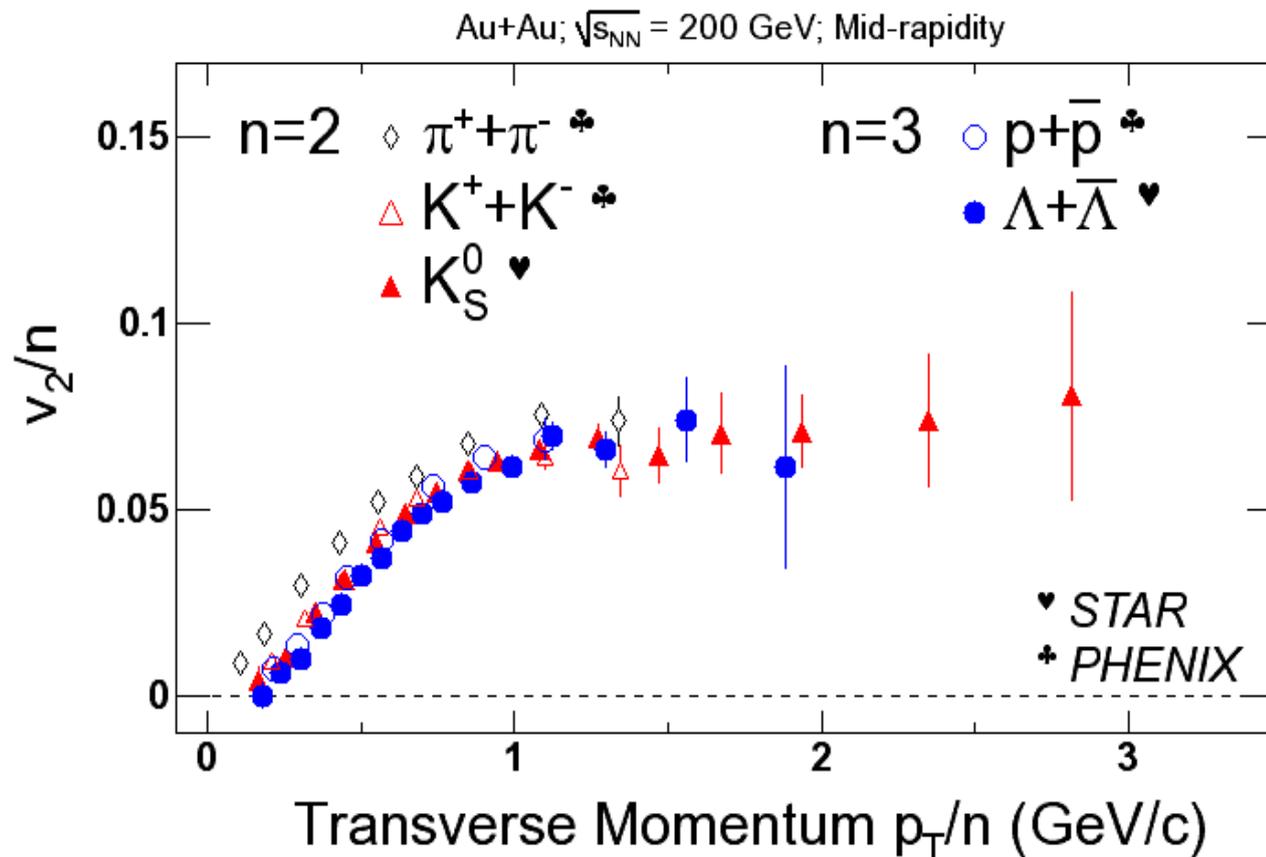
*Isse, AO, Otuka, Sahu, Nara,
PRC 72 ('05), 064908*

QGP生成の実験的証拠: 強い楕円型フロー(4)

Coalescence (Recombination) Picture

Slide by Esumi

$$v_2^{Hadron}(P_T) = n v_2^{Parton}(P_T/n)$$



**Recombination Picture seems to work well
... Parton Elliptic Flow**

QGP 物性の探求へ向けて

「QGP 生成の証拠」のまとめ

- **強いジェット抑制** → **色電荷を持つ粒子の分布**
 - ◆ Nucl. Mod. Factor (R_{AA})、ハドロン方位角相関とともに観測
 - ◆ pp 衝突、d+Au 衝突、SPS までの重イオン衝突で見られず、*RHIC エネルギーの重イオン衝突でのみ観測*
 - ◆ 中心衝突に近いほど強い抑制
- **大きな楕円フロー(v_2)** → **早い熱平衡化**
 - ◆ 非常に早い ($\tau < 1$ fm/c) 段階での熱平衡化が必要
(ハドロンの formation time ($\tau_f \sim 1$ fm/c) と同等の時間での平衡化)
 - ◆ SPS までの v_2 を説明するハドロン-ストリング輸送モデルで足りず、*早い熱平衡化 ($\tau \sim 0.6$ fm/c) を仮定したQGP 流体モデルで説明可*
 - ◆ Constituent Quark Number Scaling ($v_2^h(pT) = n v_2^q(pT/n)$) が成立
→ クォーク段階でのフロー生成
- **化学凍結の温度・化学ポテンシャルが Lattice QCD の予言に近い**

簡単な仮定のもとで“大雑把な性質”の解明はすすんだが....

多くのパズルが残されている...

- 例1: 相対論的な「粘性流体方程式」
→ 共変な定式化さえ、きちんとできていない
- 例2: 高い運動量領域での楕円型フローのデータ
→ 幾何学的な「極限」を越えている！
(流体力学が成功している低 pT 領域と consistent に理解できていない。)
- 例3: J/ψ は cold nuclear matter からの評価より多い
(J/ψ enhancement ?)
→ 重い quark についても再結合を考慮する必要性
- 例4: Ridge 構造、Mach Cone など、生成機構の分からない相関が多く観測されている。
→ Jet は流体中でエネルギーを失うだけではない！

粘性(非完全流体)、非平衡過程、重いクォーク、.....
→ LHC (2008稼働)ではより重要

Summary

- **高エネルギー原子核衝突におけるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 生成**
 - ≈ **地上における小さなビッグバン (Little Bang)**
 - ≈ **宇宙最後の真空相転移のシミュレーション**
 - ◆ 2000年6月稼動のRHICで人類は(おそらく)初めて生成 (21世紀に間に合いました！)
- **QGP生成のシグナル**
 - ◆ 「ジェット抑制」と「強い楕円型フロー」はハドロン模型で説明不可
 - ◆ 他にも楕円型フローのクォーク数スケーリング等のシグナルあり
- **QGP物性の理解へ向けて**
 - ◆ 「QGP 生成の証拠」を超える様々なデータが出てきている
→ high pT v2 問題、J/ψ 問題、Mach Cone、baryon 問題 (Part V へ)
 - ◆ 第一原理計算 (Lattice QCD, perturbative QCD)
+ 現象論 (Hydro, Jet, String, Cascade, Color Glass Condensate, ...)
の両面からの追求が今後も必要

Backups

多くのパズルが残されている...

- 例1: 相対論的な「粘性流体方程式」

 - 共変な定式化さえ、きちんとできていない

- 例2: 高い運動量領域での楕円型フローのデータ

 - 幾何学的な「極限」を越えている！

- ◆ 「極限越え」の例: ジェットと流体パートンの融合によるストリング生成

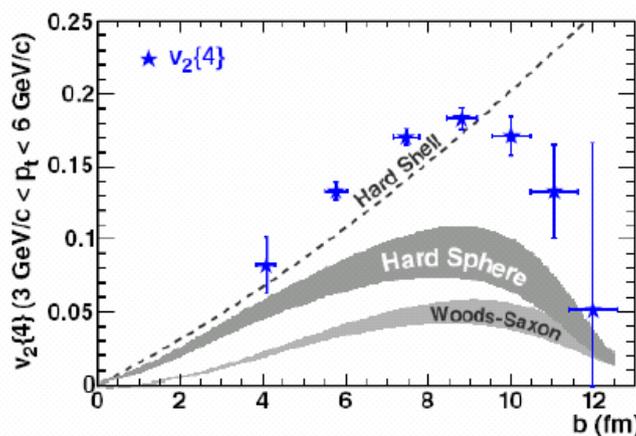
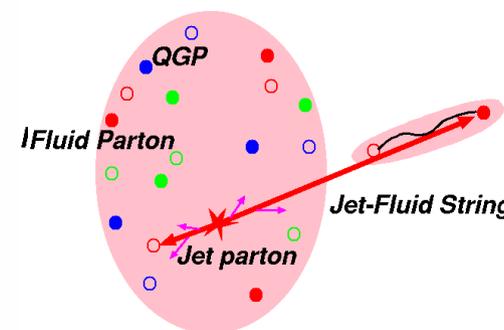
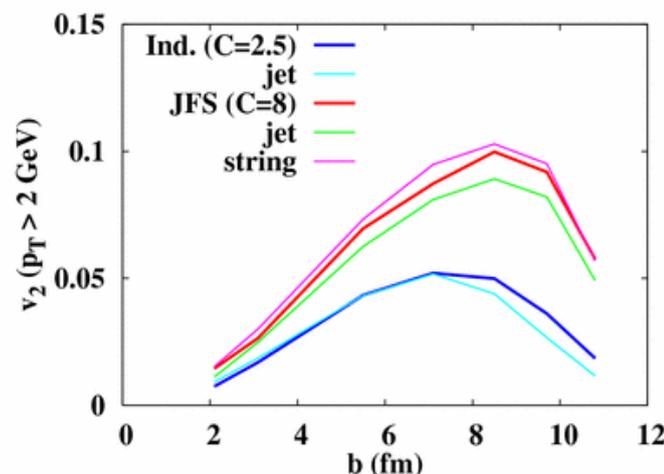


FIG. 4 (color online). v_2 at $3 \leq p_T \leq 6$ GeV/c versus impact parameter, b , compared to models of particle emission by a static source (see text).



Hirano,Isse,Nara,AO,Mizukawa,Yoshino, in prep.

STAR, PRL93, 252301('04)

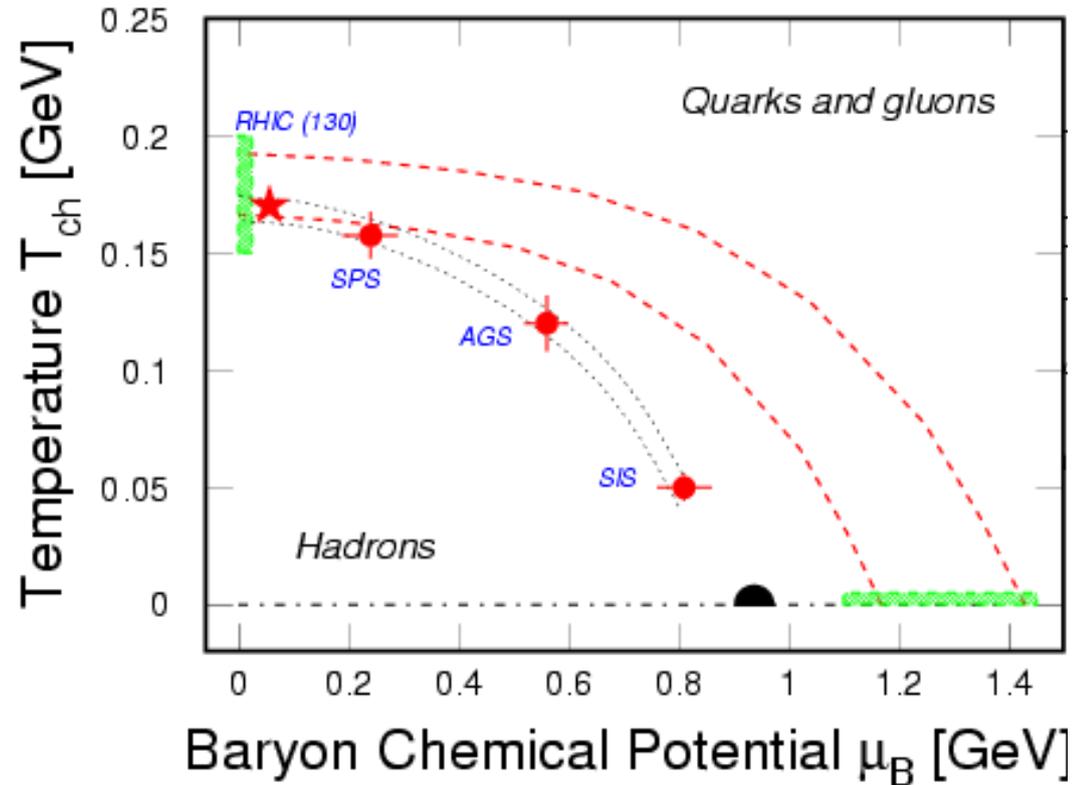
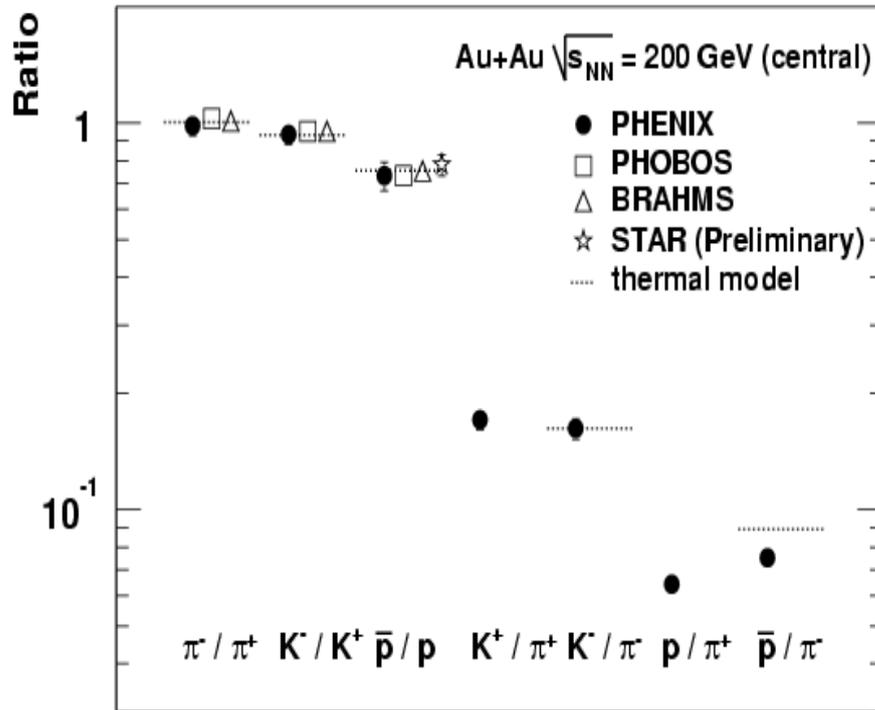
粘性(非完全流体)、非平衡過程

→ より高いエネルギーの原子核衝突(LHC, 2008稼働)では重要

Thermal Freeze-out Parameters from particle ratios

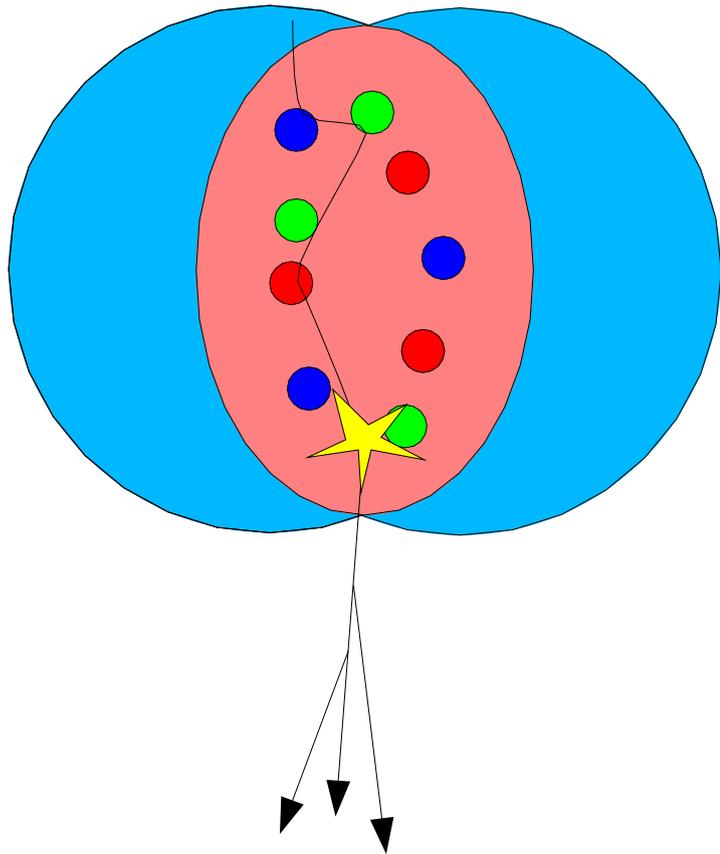
- Almost complete reconstruction of particle ratios by the statistical thermal model.
- Thermal model prediction in AuAu 200 GeV central.

$$T_{\text{ch}} = 177 \text{ MeV}, \quad \mu_{\text{B}} = 29 \text{ MeV}$$



by Esumi, 2003

Jet Energy Loss at RHIC (I)



2003/06/18 Press Release

Colored partons will lose energy
in colored gas environment (=QGP)

Since High Energy Particles are expected
to come from Jet Fragmentation,
they are suppressed if QGP is formed.