

---

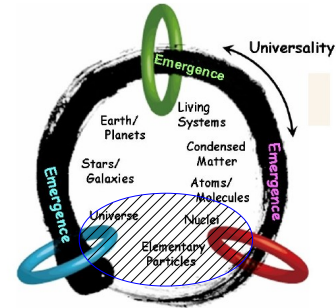
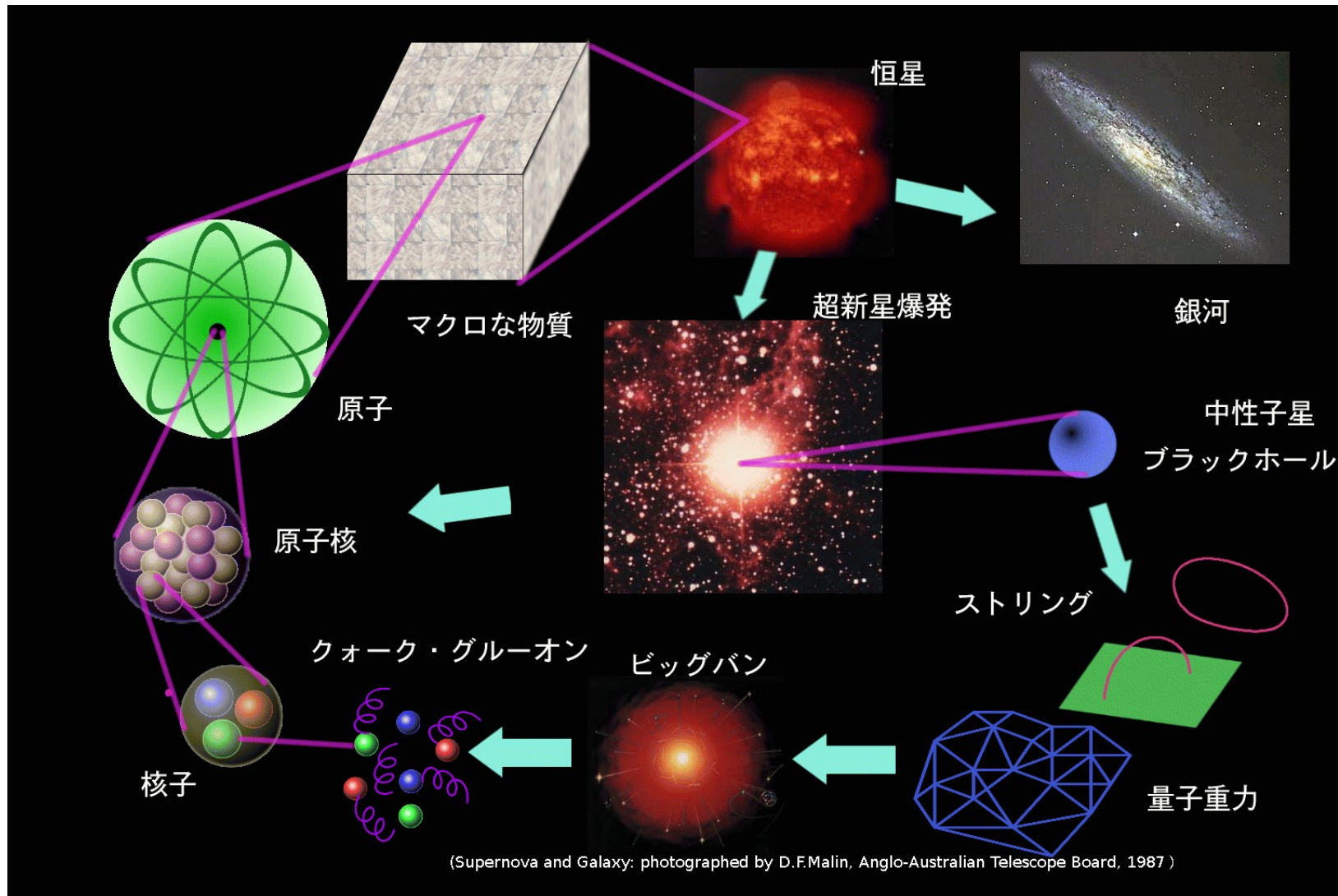
# クォーク・グルーオン・プラズマ状態の物理

大西 明 (基礎物理学研究所)

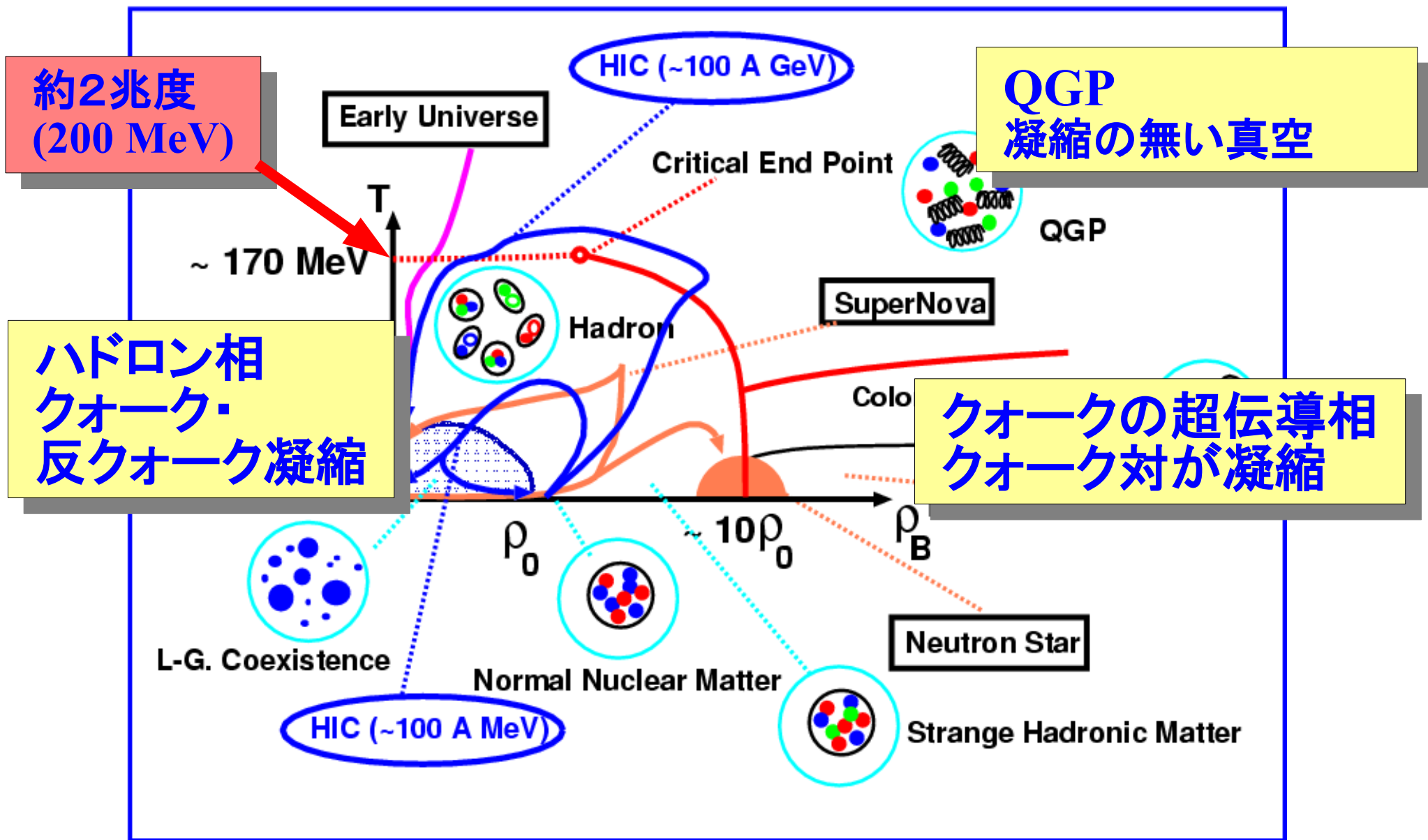
- Introduction
- RHIC における QGP の発見
- QCD 相転移は見えたか？
- まとめ

# 普遍性と創発性 と RHIC

- 原子 → 原子核 → 核子 → クォーク  
クォーク = 現時点で確認されている「最小」の物質の主要構成粒子



# クォーク物質の相図



# RHIC で分かったこと

## ■ RHIC で期待されていたこと

- 様々な観測量の併せ技による QGP の発見

## ■ RHIC で分かったこと

- ジェットの大きなエネルギー損失 (色電荷が分布)
- 流体力学の成功 (局所熱平衡状態の実現、小さな粘性～ストリング?)
- 統計模型的な粒子生成比 (格子 QCD の予言に近い  $(T, \mu)$  状態)
- フローのクォーク数スケーリング (開放されたクォークの集団運動)  
→ パarton (クォーク、グルーオン) が強く相互作用する熱平衡に近い物質が生成された。

## ■ RHIC の意義

- 予想よりもクリアな観測量で QGP 生成に十分な説得力を与えた。
- 予想に反して「強結合 QGP」が作られていること示した。  
→ 大きな実験グループの発表で「ストリング」に初めて言及
- 原子核・素粒子・宇宙の間の新たな関連 (Emergence)

# RHIC で分かったこと

## ■ RHIC で期待されていたこと

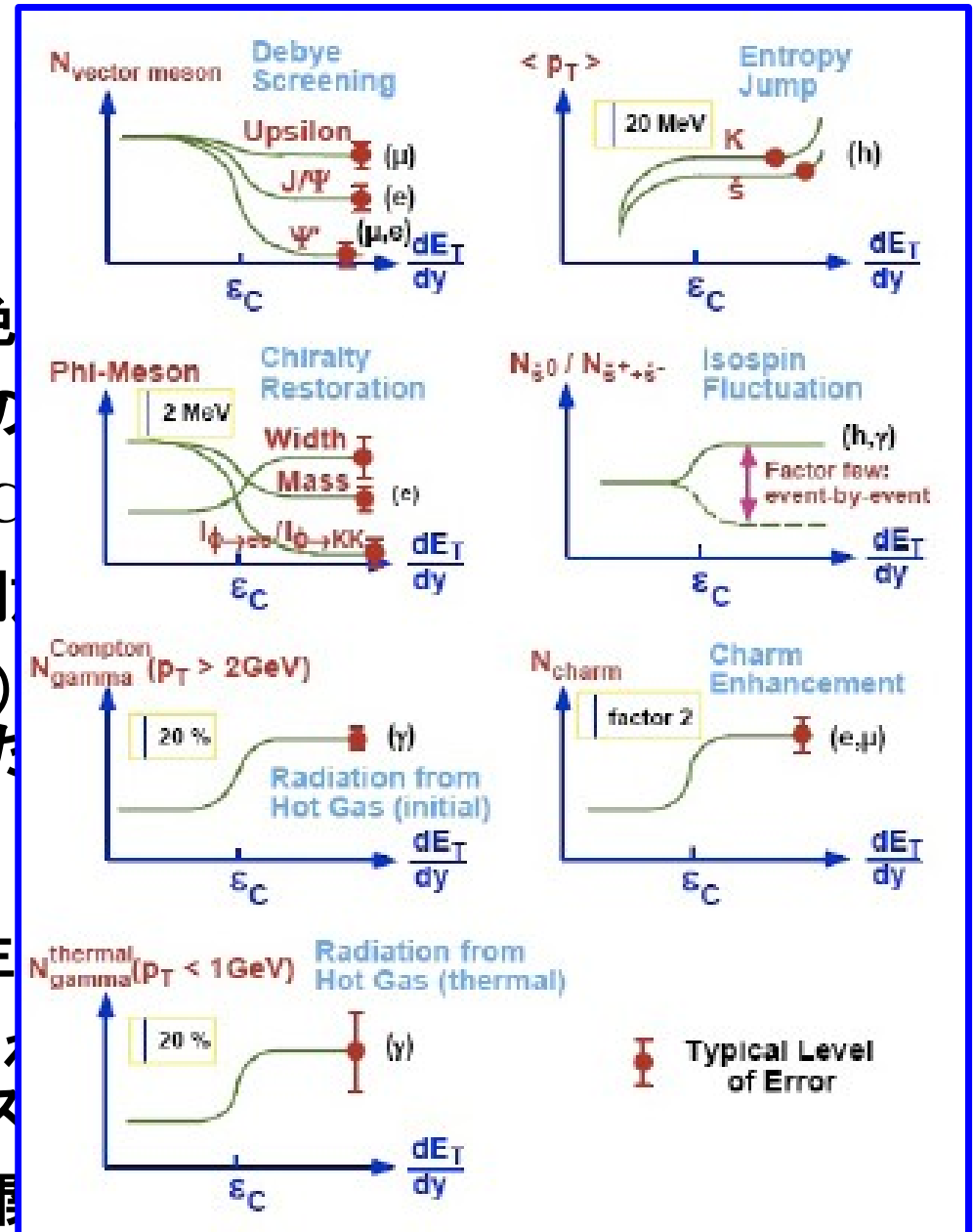
- 様々な観測量の併せ技による QGP

## ■ RHIC で分かったこと

- ジェットの大きなエネルギー損失 (色)
- 流体力学の成功 (局所熱平衡状態の)
- 統計模型的な粒子生成比 (格子 QC)
- フローのクォーク数スケーリング (開
  - パarton (クォーク、グルーオン)
  - 熱平衡に近い物質が生成された

## ■ RHIC の意義

- 予想よりもクリアな観測量で QGP 生
- 予想に反して「強結合 QGP」が作ら
  - 大きな実験グループの発表で「ス
- 原子核・素粒子・宇宙の間の新たな開



# RHIC でまだ分からないこと

## ■ 新たな問題

- QGP のシグナルは一貫して理解されているか？
- QCD 相転移はみえたのか？
- 速い熱平衡化の機構、熱平衡に達する前の動力学は？ (Fukushima)
- カイラル対称性は回復したのか？
- QGP の「音」は聞こえたか？ (Kunihiro)
- 完全流体模型の成功から期待される小さな  $\eta/s$  は AdS/CFT 対応の現われか？ (Hata, Suganuma)
- Ridge 構造は熱平衡以前の状態の鍵か？

QGP の発見から  
「QCD 相転移の理解」、「QGP 物性」、「QGP 以前」へ

---

# RHIC における QGP の発見

# 物質を熱していくと何が起こるか？

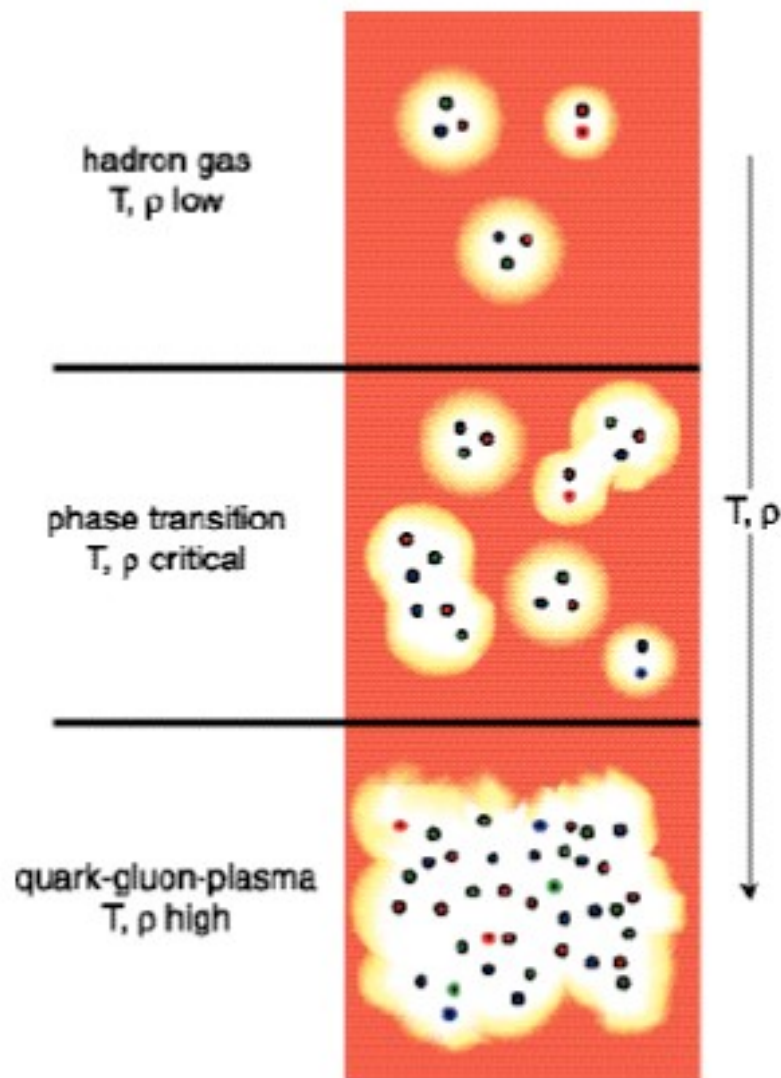
## ■ 理想気体の状態方程式

$$pV = nRT = N(R/N_A) T = NkT$$

$k=1$  とすると、 $10^{10} \text{ K} = 1 \text{ MeV}$

## ■ 物質を熱していくと $N$ は増える！

- $T = 1 \text{ eV}$  ( $\sim 10^4 \text{ K}$ )
  - 原子核と電子の「プラズマ」
  - $N =$  「原子核の数」 + 「電子の数」
- $T = 10 \text{ MeV} \sim 60 \text{ MeV}$ 
  - $N =$  「核子の数」 (原子核が壊れる)
- $T = 60 \text{ MeV} \sim 200 \text{ MeV}$ 
  - $\pi$  粒子が生成されて粒子数が増加
  - $N =$  「核子数」 + 「 $\pi$  粒子の数」
- $T > 200 \text{ MeV}$ 
  - ハドロンが壊れてクォーク・グルーオン・プラズマができる
  - $N =$  「クォーク数」 + 「反クォーク数」 + 「グルーオン数」  $\propto T^3$





# QCD 相転移の簡単な模型

- 自由粒子(質量0)のエネルギーと圧力

$$P = \frac{\pi^2}{90} N_B T^4, \quad \epsilon = \frac{\pi^2}{30} N_B T^4$$

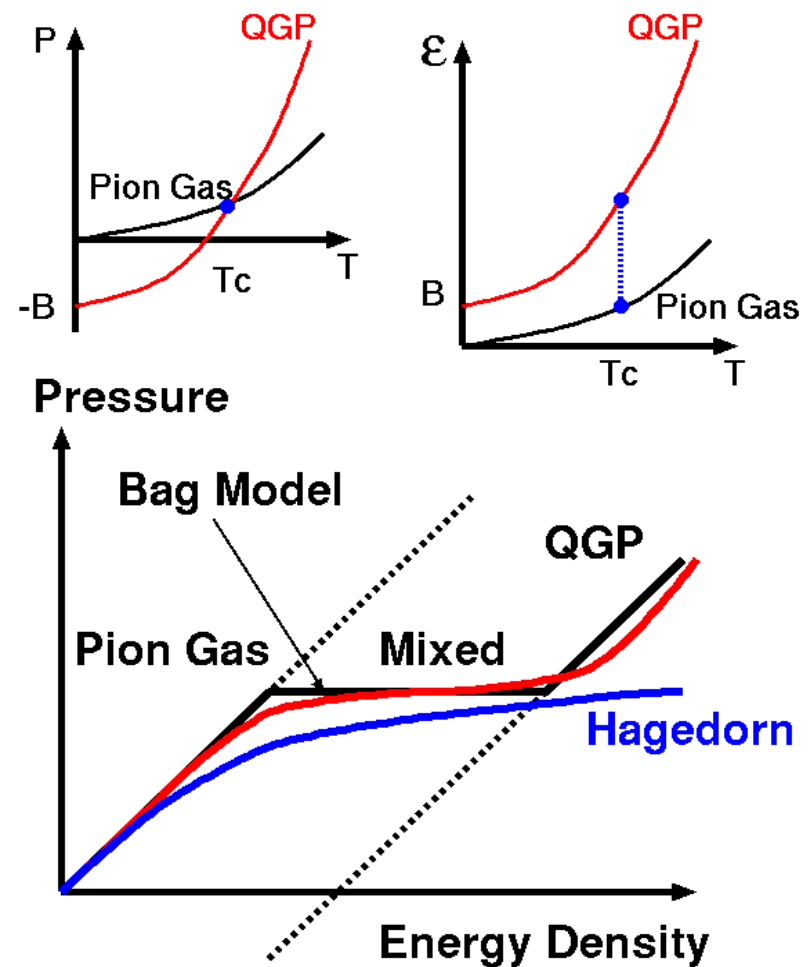
$N_B = \text{Bosonic DOF (7/8 for Fermions)}$

- Hadron Gas ~ 3 pions ( $N_B=3$ )

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

- QGP  $N_B=16(\text{gluon})+24 \times 7/8$  (quarks)  
and Bag Pressure

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



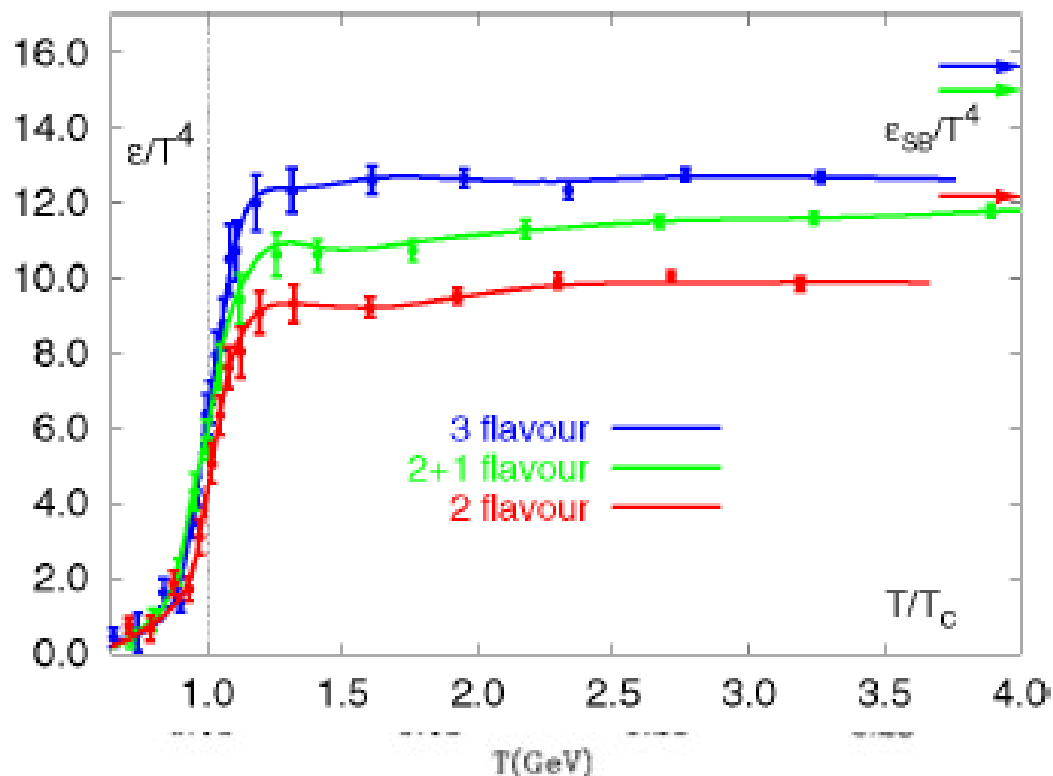
自由度の大きな変化 → 相転移

# 物質を熱していくと何が起こるか？

- 量子色力学 (QCD) に基づく第一原理計算  
= 格子 QCD シミュレーション

- 図:  $T^4$  で規格化したエネルギー密度
- $T = 150\text{-}200\text{ MeV}$  程度で急激なエネルギー密度の変化  
→ QGP への相転移

単純なモデルでも、  
厳密な計算 (格子 QCD) でも  
相転移は起こるはず。  
→ 実験での確認は？  
→ RHIC 実験



# Relativistic Heavy-Ion Collider (RHIC) 実験

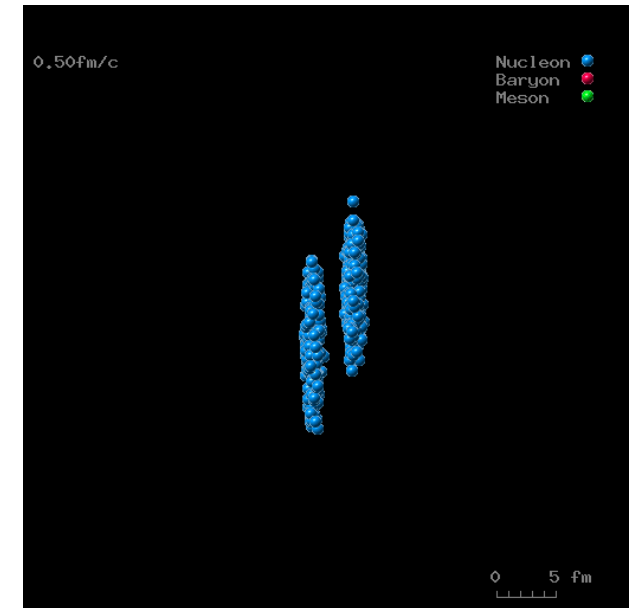
## ■ クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

- 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、熱平衡に達した状態
- 初期宇宙等の「超高温状態」( $\sim 2 \times 10^{12}$  K = 2 兆度) や、中性子星中心部などの「超高密度状態」( $\sim 10^{15}$  g/cc = 千兆 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

## ■ RHIC @ ブルックヘブン国立研究所

- 世界初の衝突型重イオン加速器 (2000 年 ~)
- 100 A GeV + 100 A GeV (核子あたり 100 GeV)
- 実験グループ: STAR, PHENIX + 2 グループ

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 (Little Bang)



# 高エネルギー重イオン反応の kinematics

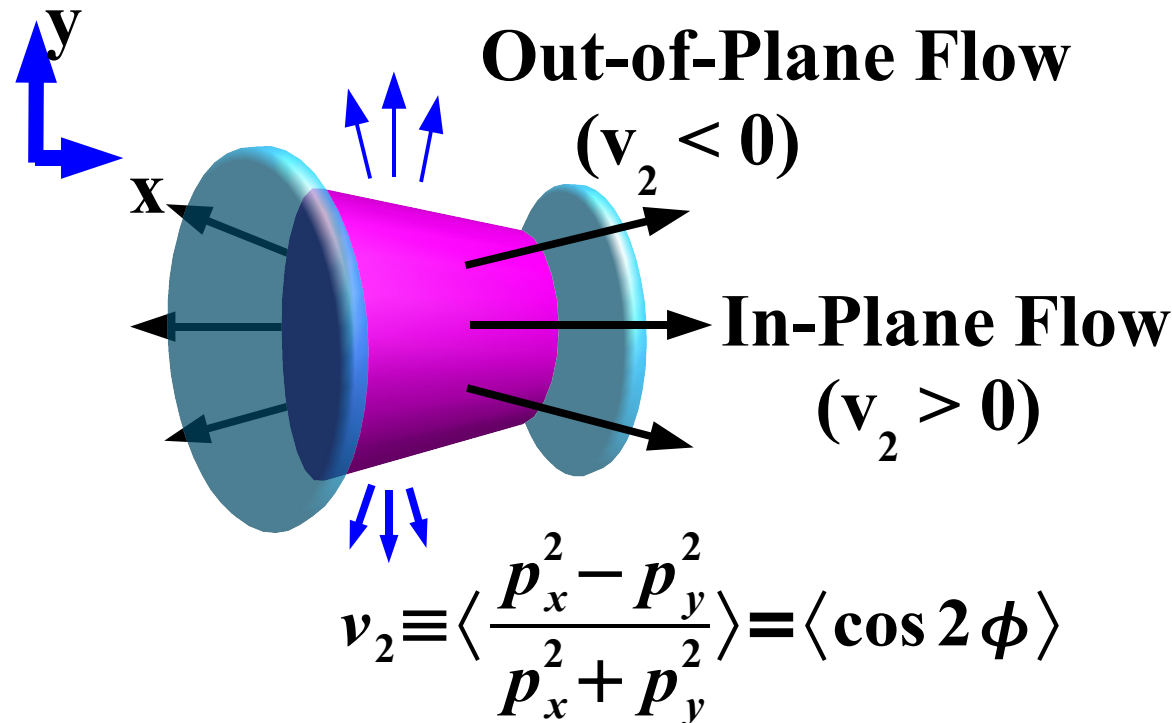
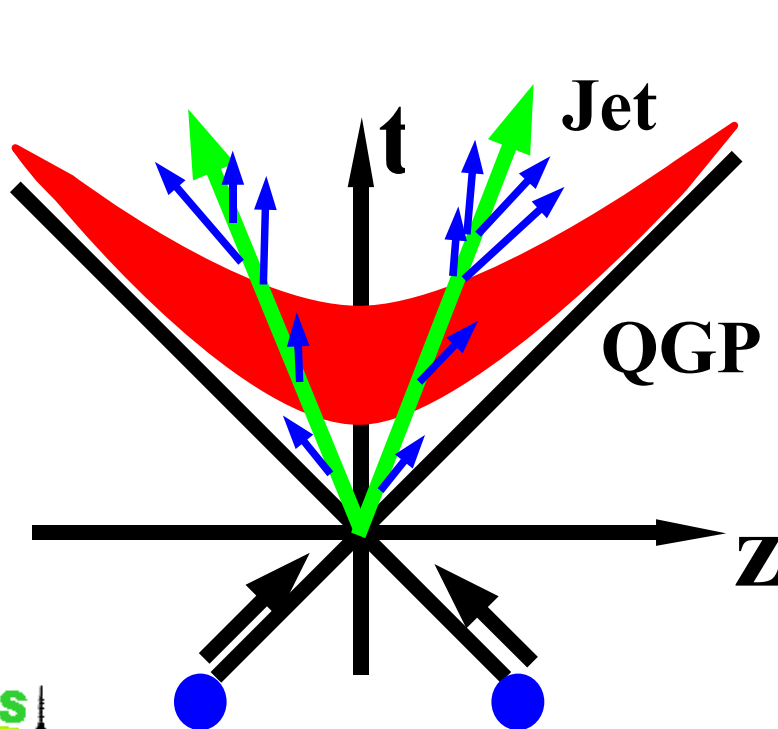
## ■ Bjorken 膨張

- 衝突して通り抜けた原子核の間にほぼ boost invariant な熱い物質ができる  
物質の状態はほぼ固有時間  $\tau$  のみの関数、一定のラピディティ  $y$  で進む

$$\tau = \sqrt{t^2 - z^2}, \quad y = \frac{1}{2} \log \frac{E + p_z}{E - p_z} \quad (\text{相対論的に加法的な速度})$$

- 楕円フロー  $v_2 =$  方位角を  $\phi$  のフーリエ成分。

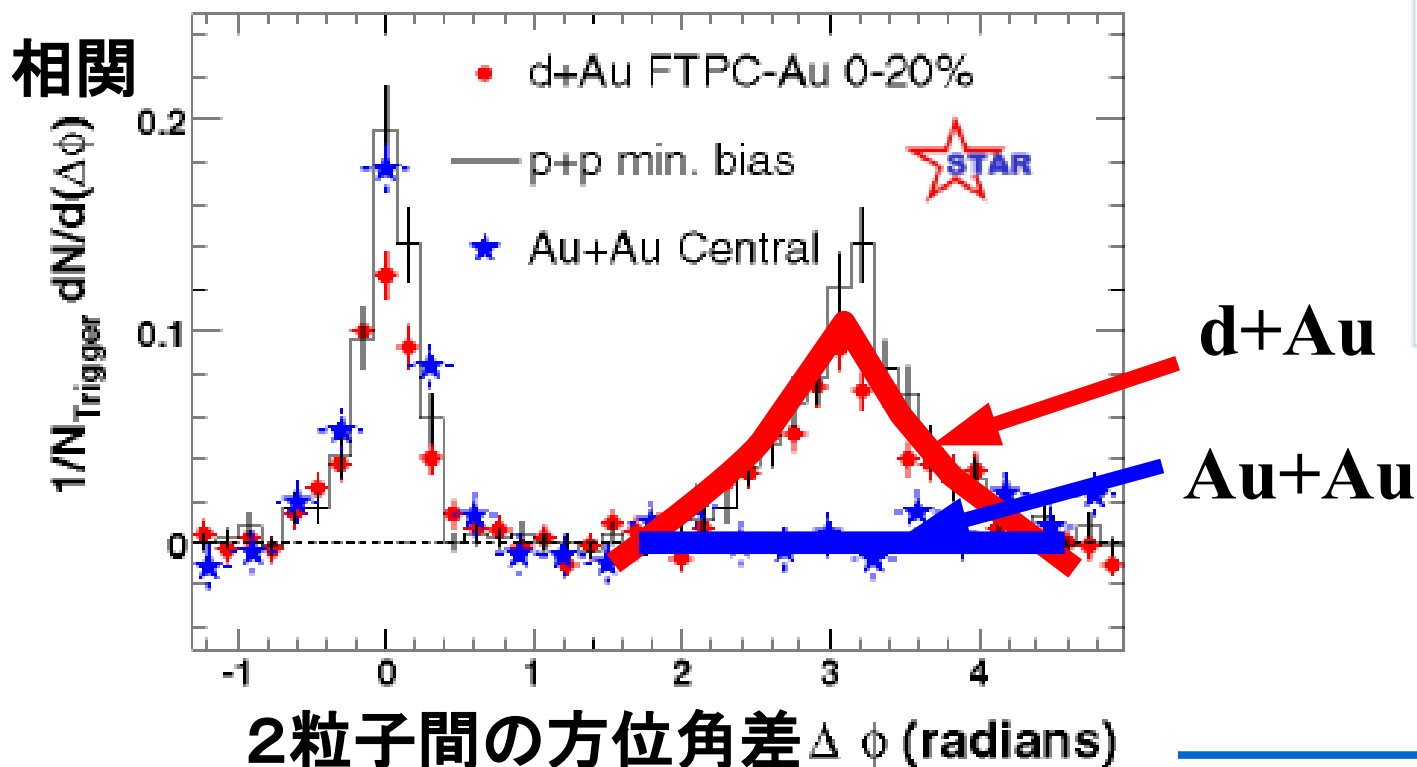
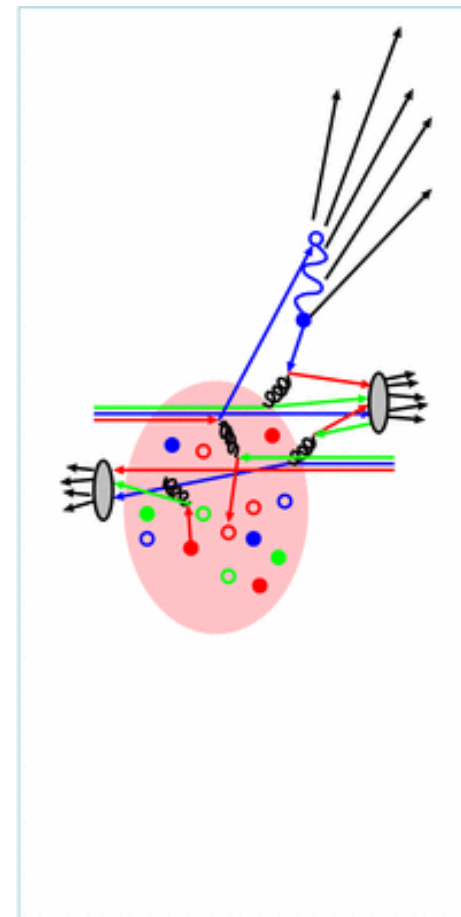
→ 圧力勾配から作られるので、「熱平衡化の度合い」に敏感。



# クォーク・グルーオン・プラズマの発見 (1)

## ■ QGP 中でのジェットのエネルギー損失

- 真空中ではパートン (クォーク、グルーオン) が激しく散乱 + ハドロン化 → 強い方位角 180 度相関
- QGP が作られると色電荷の分布によりパートンがエネルギーを失う → 後方での方位角相関の消失
- RHIC での実験で d+Au ではそのまま、Au+Au 衝突では後方相関が消失



STAR, white paper

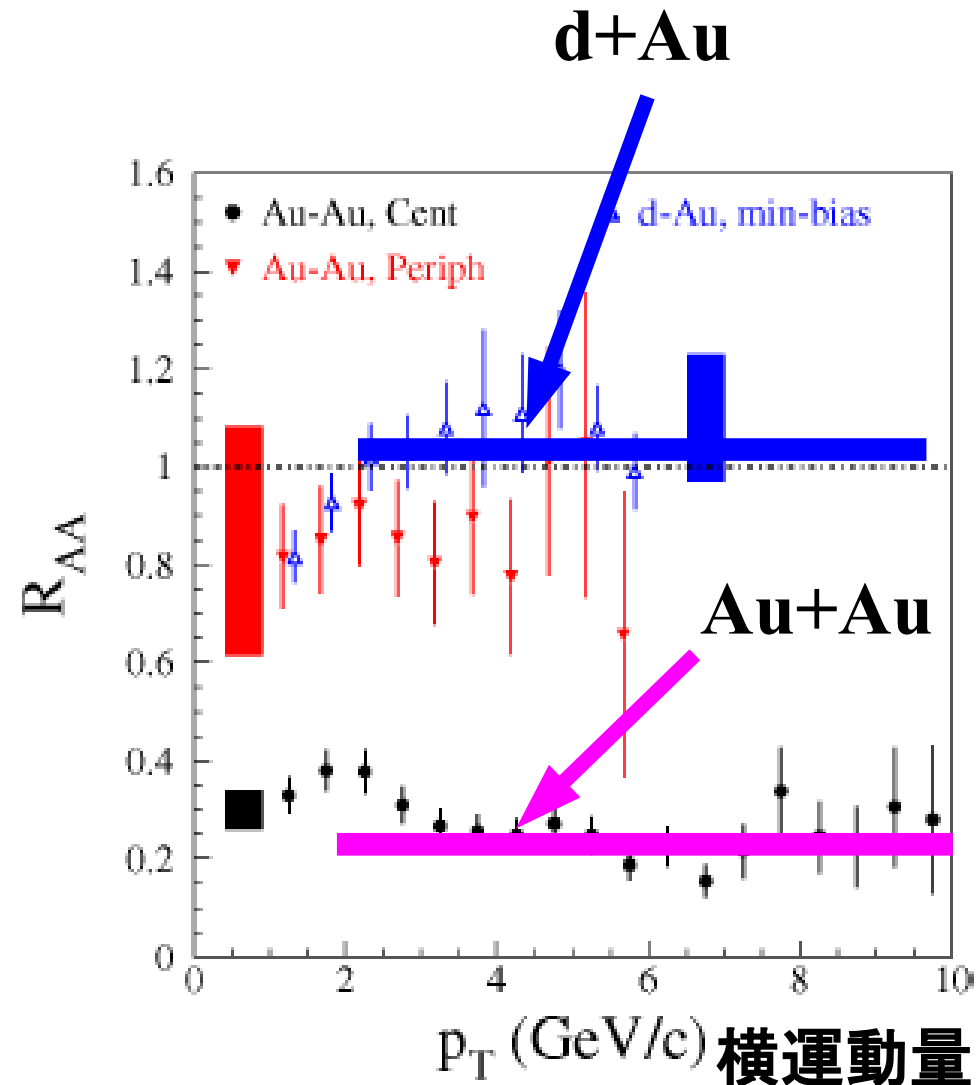
# クォーク・グルーオン・プラズマの発見 (2)

## ■ 高運動量ハドロン抑制

- 高いエネルギーのパートンの抑制  
→ 高いエネルギーのハドロン抑制
- 本当に抑制されているか？

$$R_{AA} = \frac{\text{「実際の生成量」}}{\text{「素過程の重ね合わせ」}}$$

- RHIC での観測  
小さな原子核の衝突 (d+Au)  
→  $R_{AA} \sim 1$   
大きな原子核の衝突 (Au+Au)  
→  $R_{AA} < 1$



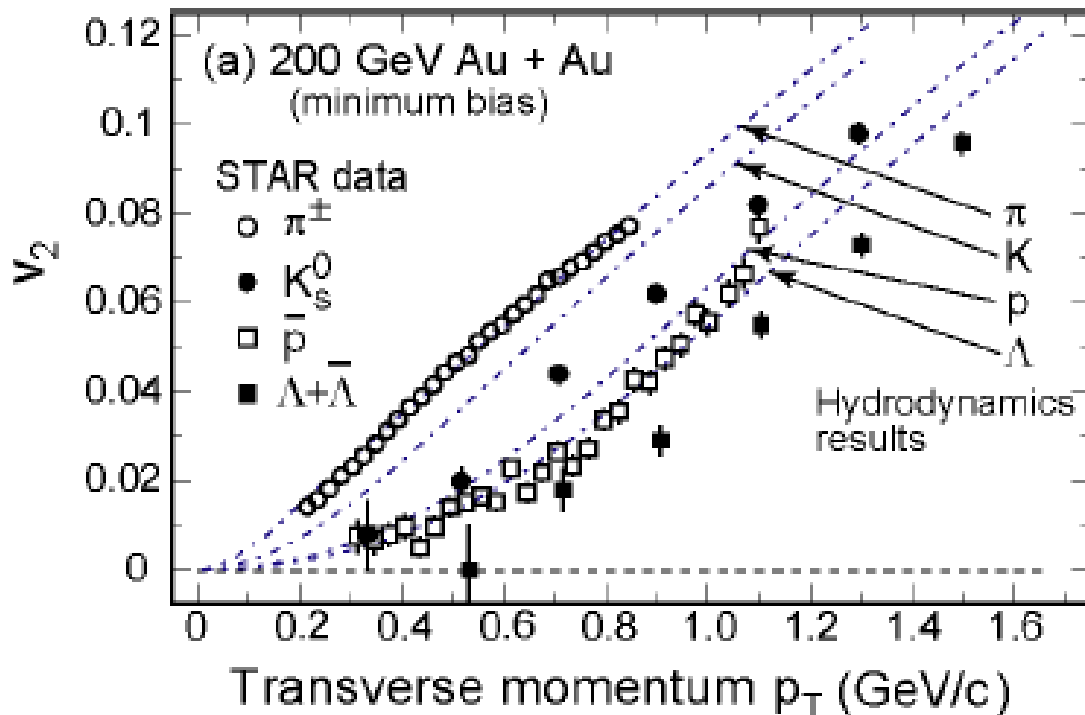
PHENIX White Paper

# クォーク・グルーオン・プラズマの発見 (3)

## ■ 流体模型 (完全流体) の成功

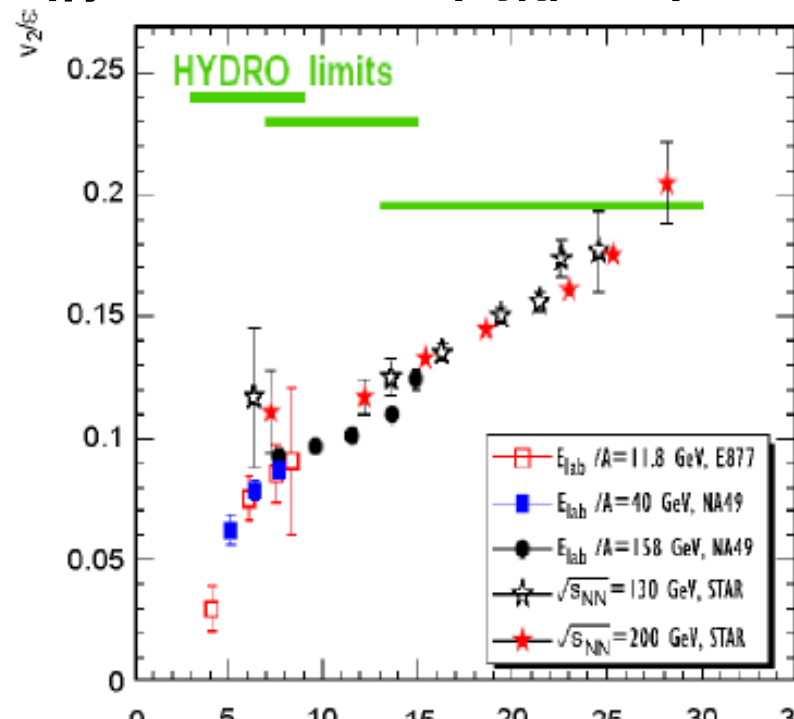
- 入射エネルギーの増加 + クォーク・グルーオンの解放  
 → 粒子密度の増加 → 平均自由行程の減少  
 → 流体模型の適用可能性大
- RHIC での楕円フローデータは完全流体模型で見事に説明可能

## 楕円フロー



横運動量

## 楕円フロー / 空間離心率



面積・ラピディティ当りの粒子生成量

U.W. Heinz, nucl-th/0412094 <sup>(/S) dN<sub>ch</sub>/dy</sup>

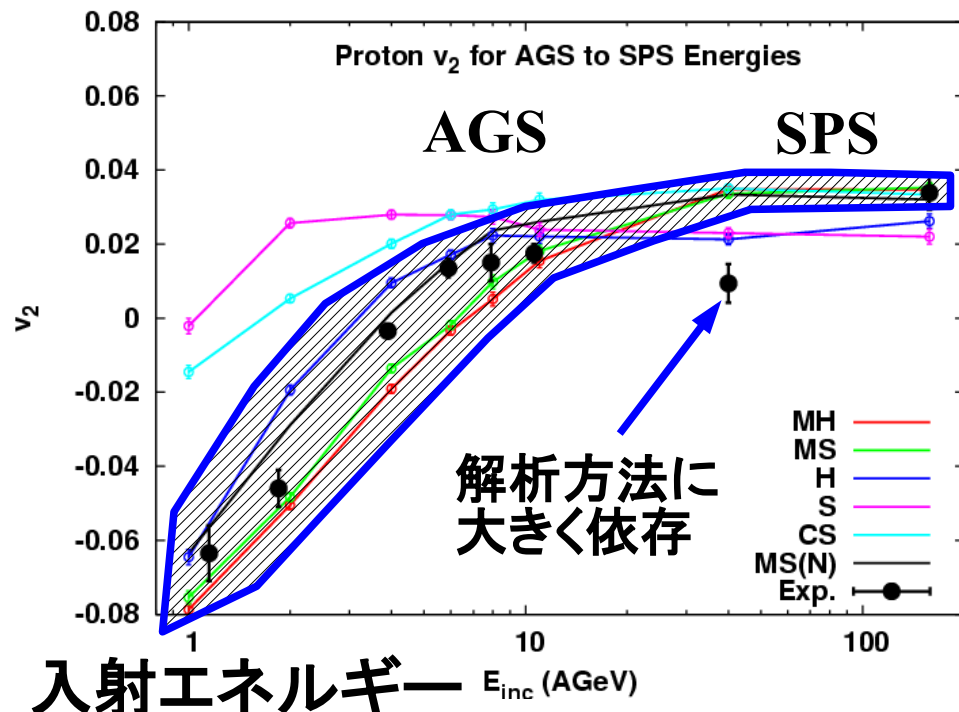
# 本当にクォーク・グルーオン自由度は必要か？

## ■ ハドロン輸送模型での記述

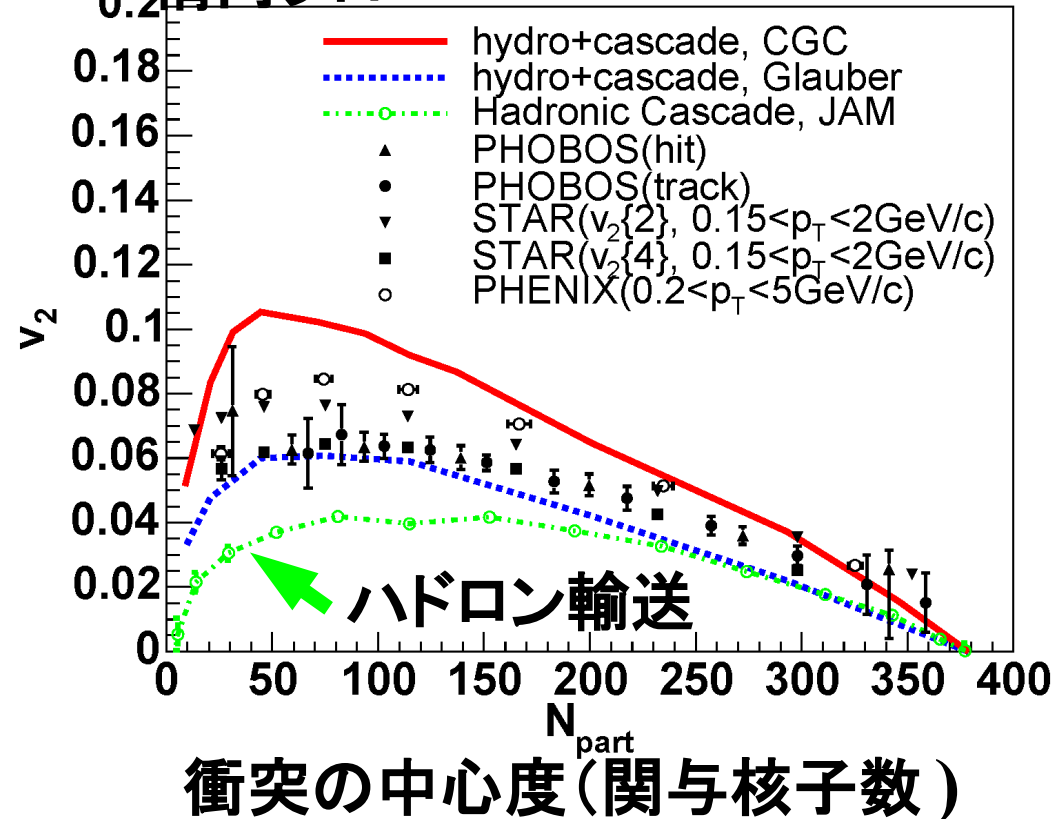
- RHIC よりも低いエネルギーの重イオン反応では楕円フローを説明
- RHIC では楕円フローを過小評価

QGP 生成は  $\sqrt{s}=20$  GeV (SPS) と  $\sqrt{s}=130-200$  GeV (RHIC) の間で始まる

## 楕円フロー



## 楕円フロー



YIPQS Isse, AO, Otuka, Sahu, Nara, 2005

Ohnishi @ PHENIX 研究会, 2009/07/03



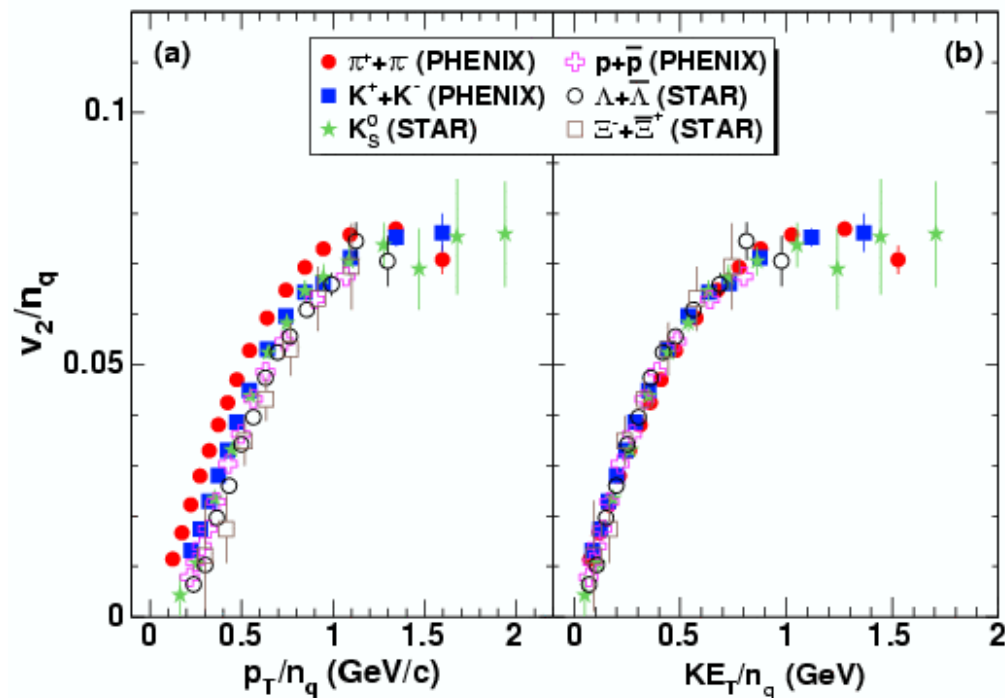
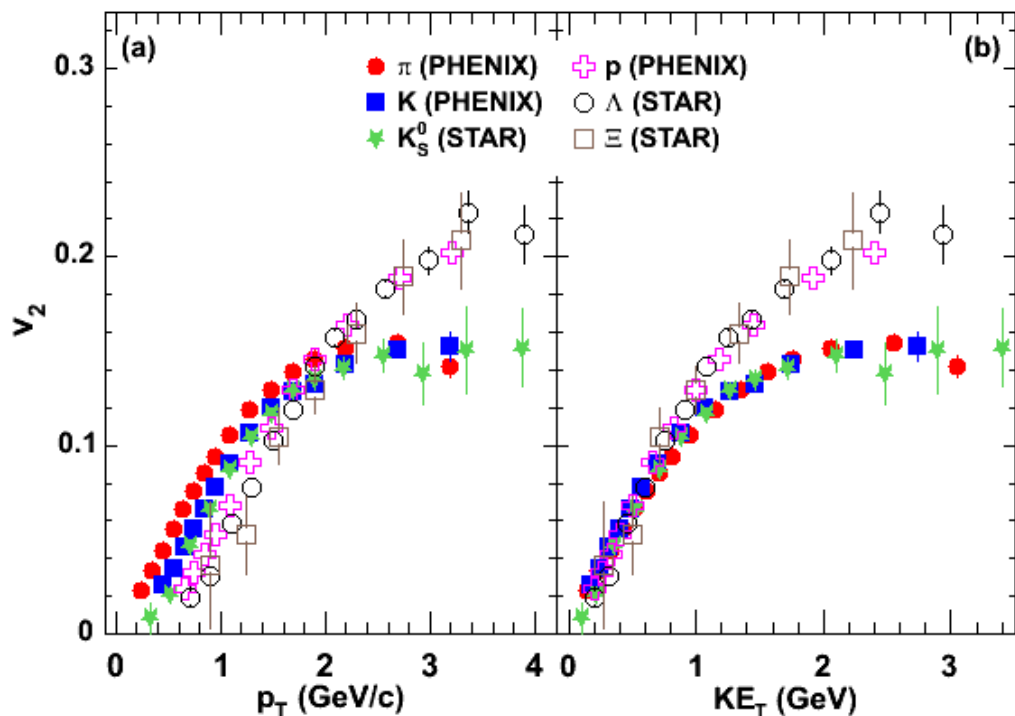
# 楕円フローのクォーク数スケーリング

by Akiba

- $q^{\text{bar}} q \rightarrow$  中間子の場合、分布関数は積  $\rightarrow$  小さなフーリエ係数は和
- $v_2/n_q$  vs  $KE_T/n_q$  ( $KE_T =$  横運動エネルギー) の関係は、  
ハドロンの種類によらない “universal curve” にしたがう  
 $\rightarrow$  「パートンの楕円フロー + Recombination」で説明可能

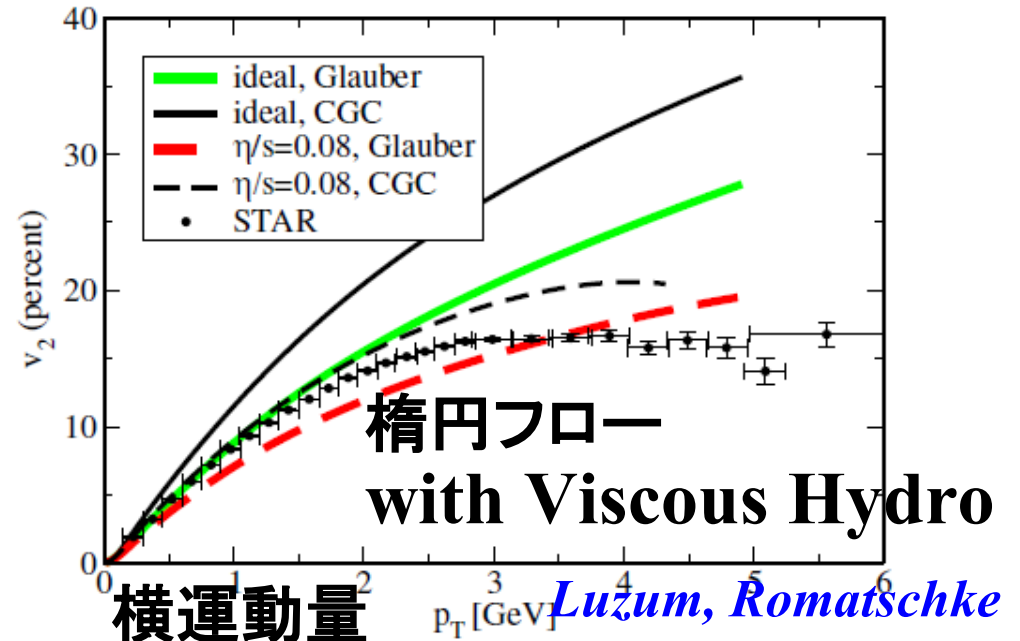
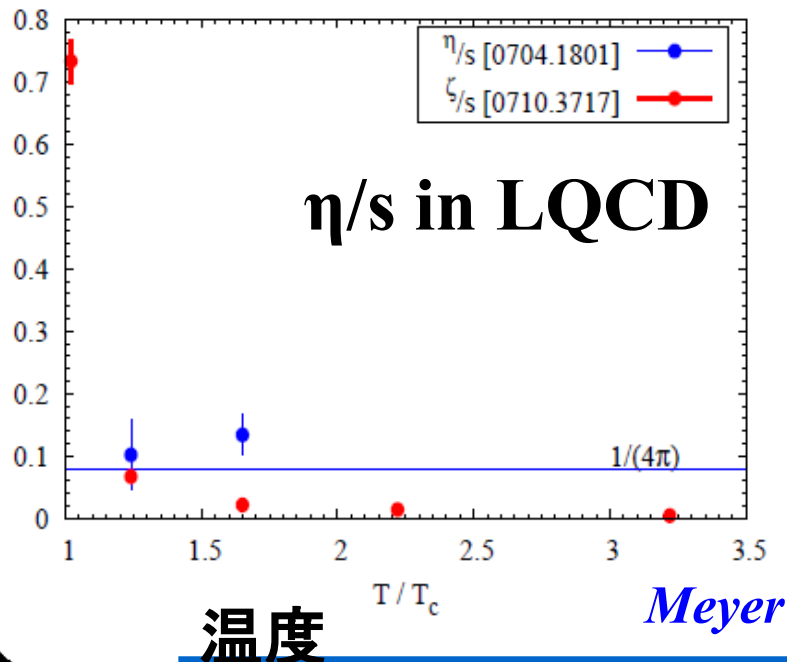
PRL98\_162301

PHENIX



# Perfect or Viscous Hydro ?

- 完全流体模型の成功 (*Hirano et al.; Huovinen et al.; Nonaka et al.*)
  - 少し小さな離心率をだす Glauber 模型から評価した初期条件
  - ハドロン相は輸送模型 (Boltzmann) が better
- Lattice QCD →  $\eta/s$  は AdS/CFT 対応からの予測と consistent (*Meyer*)
- Viscous Hydro → Color Glass Condensate (大きな離心率を出す初期条件) と  $\eta/s=0.08$  が consistent (*Romatschke et al.*)
- Viscous Hydro の方程式の形は? (*E.g. Tsumura, Kunihiro, K. Ohnishi*)



---

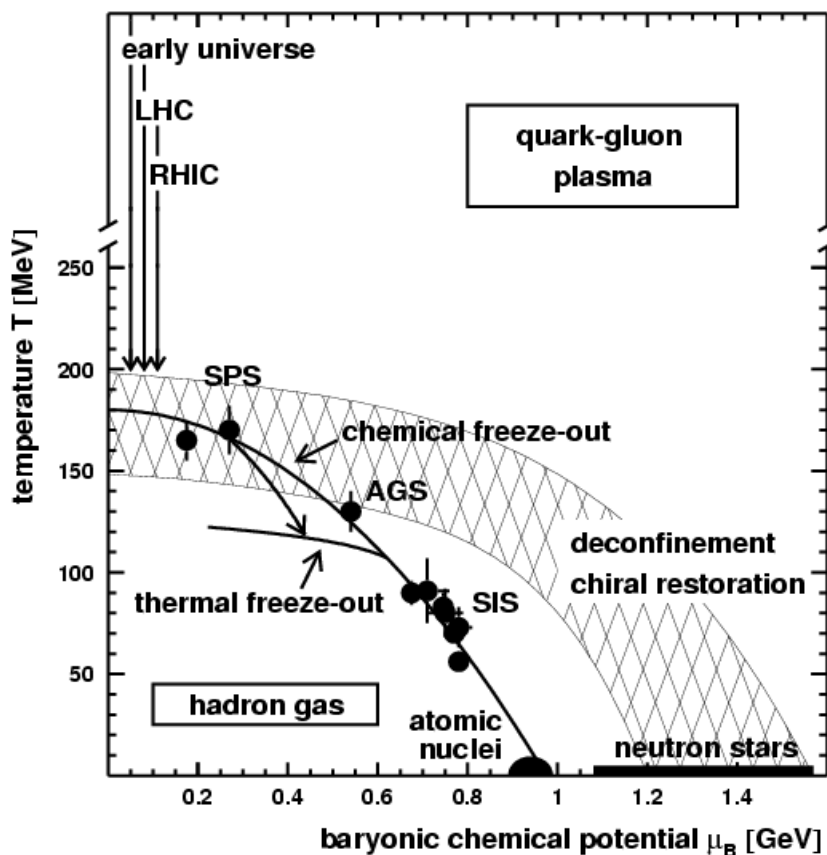
QCD 相転移は見たか？

# RHIC でまだ見えていないもの、分かっていないこと

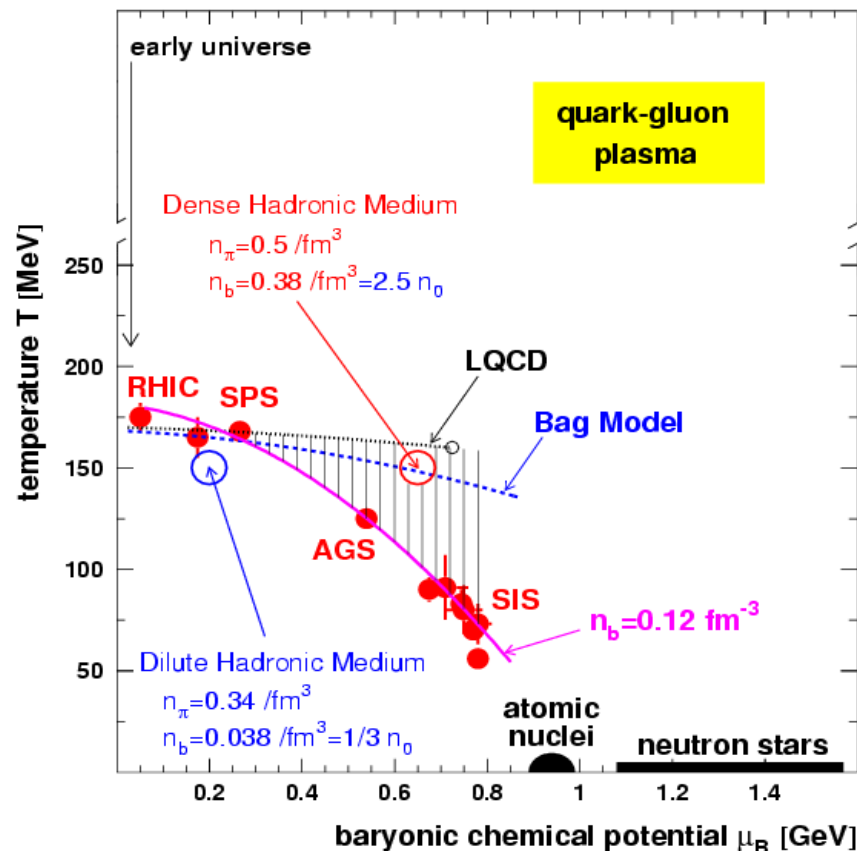
- QGP は見えたようだが、QCD 相転移そのものは見えていない。
  - $\mu=0$  での QCD 相転移は cross over ( 格子 QCD )
    - 入射エネルギーを変化させたときの変化は「連続的」
  - 入射エネルギーを下げると  $\mu>0$  の軌道を通る
    - Critical Point 以上の  $\mu$  になれば1次相転移！
- 熱平衡化の時間は QCD( 摂動論 ) で評価したものよりずっと短い
  - 「初期」時刻を  $\tau \sim 0.6 \text{ fm}/c$  とした流体模型の成功
  - pQCD によれば熱平衡化には  $\tau \sim (2-3) \text{ fm}/c$  必要
    - 何らかの非摂動効果、非平衡効果が必要
- まだきちんと理解されていない多くの現象
  - Mach Cone, Ridge 構造 , 高横運動量でのフロー,  $J/\psi$  抑制・増大, ...

QGP の発見から  
「QCD 相転移の理解」、「QGP 物性」、「QGP 以前」へ

# 実験ではどの温度まで見えているか？



Before RHIC  
(J. Stachel et al., 1998)

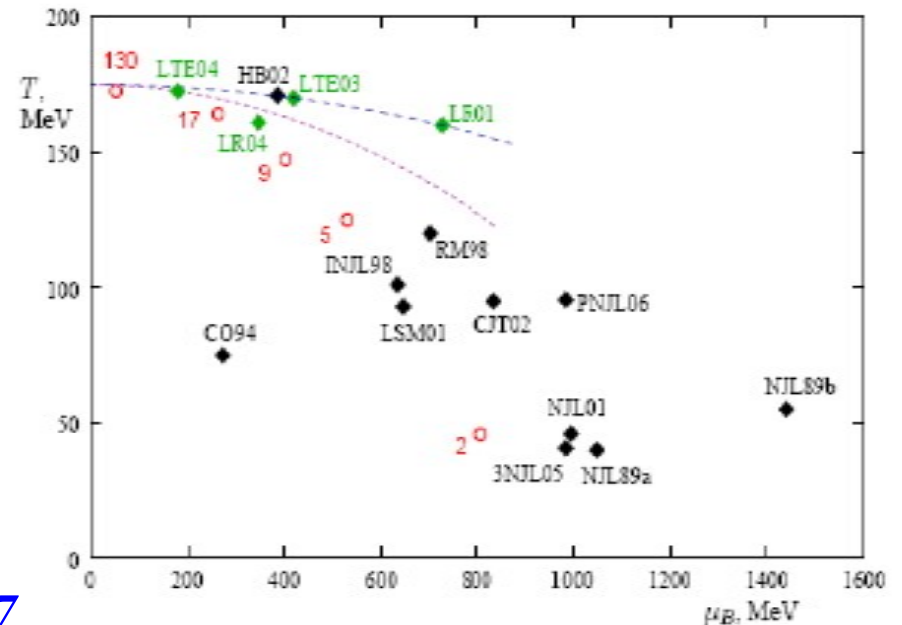
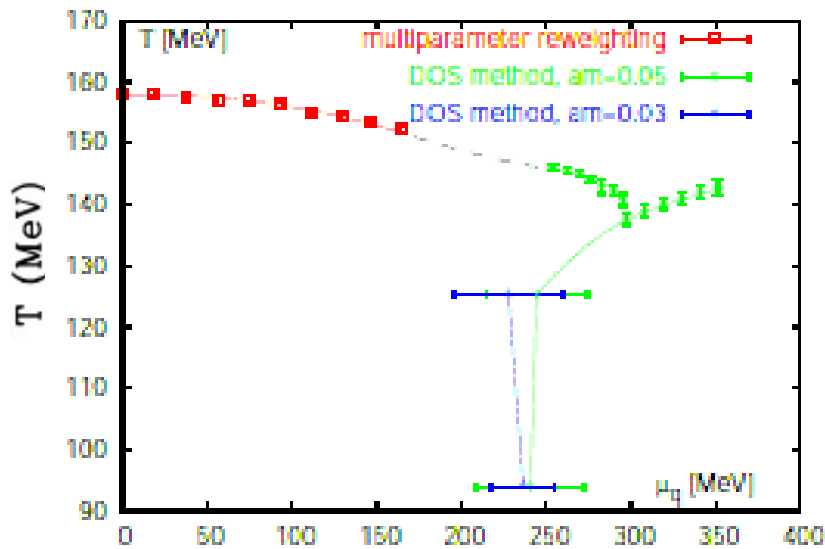


After RHIC (Braun-Munzinger et al.  
J. Phys. G28 (2002) 1971.)

格子 QCD が予言する相転移温度と  
非常に近い温度でハドロンが作られている！

# Where is the Critical Point ?

- Critical End Point=1 次相転移の「終点」 (Asakawa, Yazaki)
  - $\mu = 0$  では cross over (格子 QCD)
  - $T=0$  では 1 次と期待 (強結合 LQCD, NJL 等の有効模型)
- 格子 QCD での CP: 有限  $\mu$  ではサイン問題のため MC が困難  
→ Taylor 展開、虚化学 potential, Canonical, Reweighting, ...
- 有効模型での CP:  $300 \text{ MeV} < \mu_B < 1500 \text{ MeV}$   
(Fukushima; Zhang, Fukushima, Kunihiro; ...)



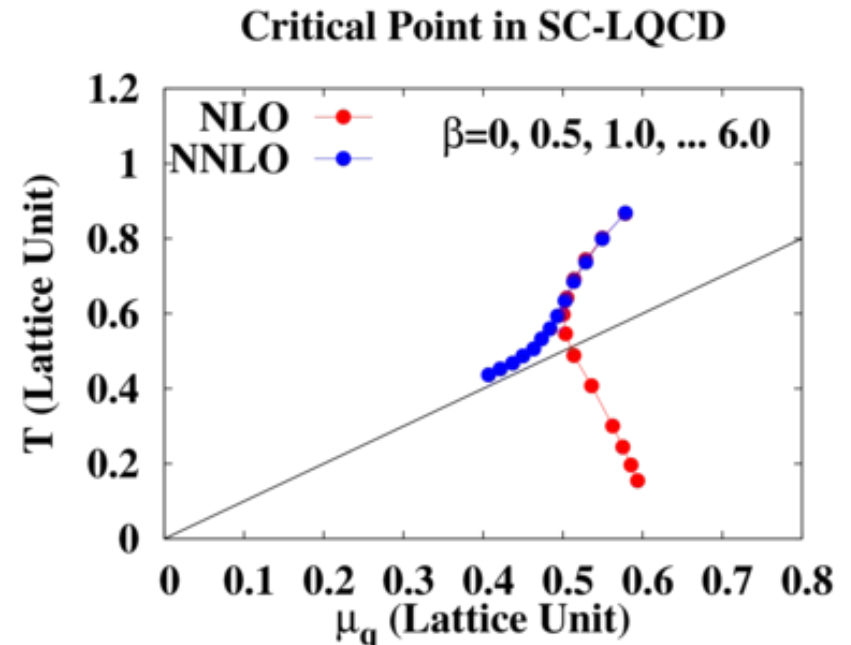
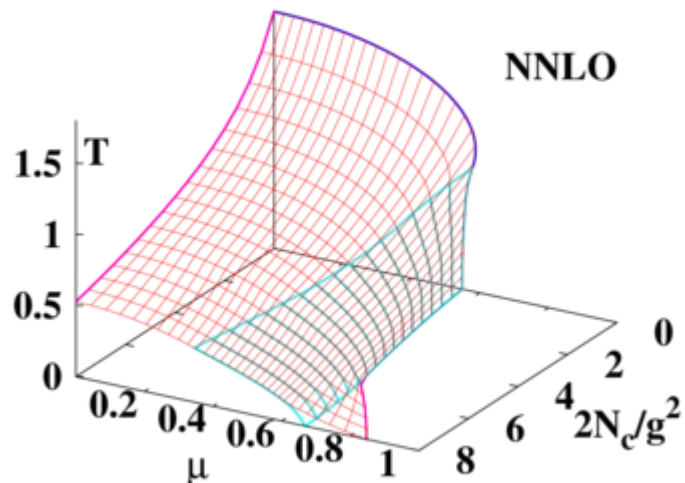
Fodor, Katz, 2004      Fodor, Katz, Schmit, 2007

Ohnishi @ PHENIX 研究会, 2009/07/03

# Phase Diagram and Critical Point in SC-LQCD

## ■ Strong Coupling Lattice QCD

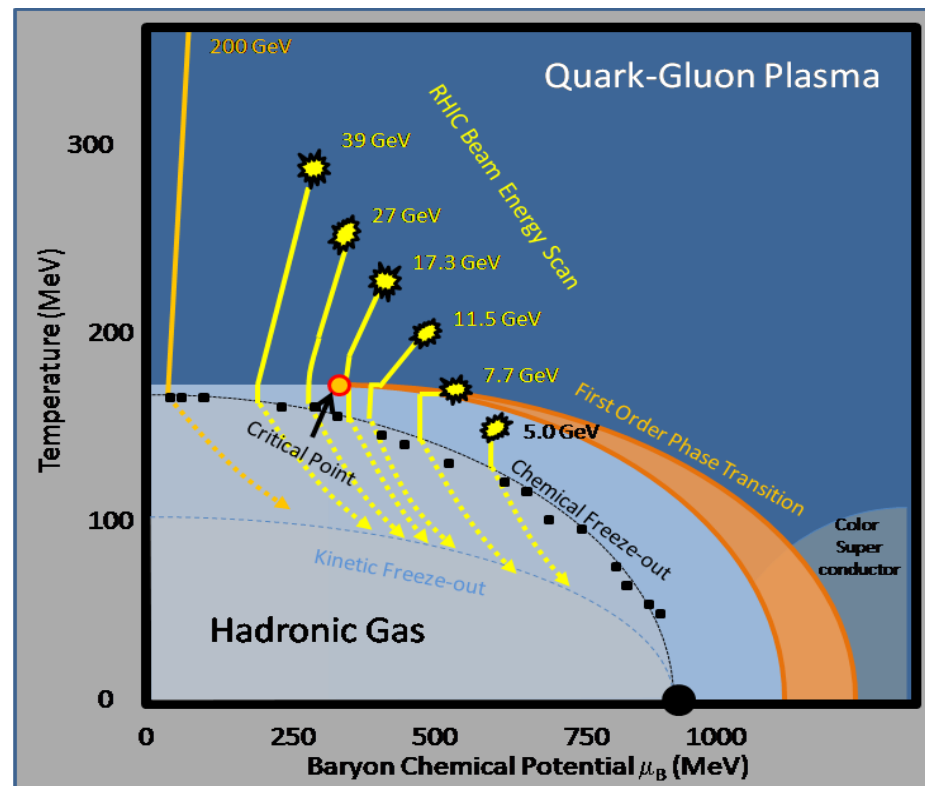
- Strong Coupling Limit ( $g \rightarrow \infty$ ): Lattice 作用においてグルーオンを無視  
→ QCD の非摂動的性質 (閉じ込め、カイラル対称性の自発的破れ) を  
ともに説明 (Wilson; Creutz; Kawamoto, Smit)
- 強結合展開 → グルーオン (plaquette) 効果 (Munster; Faldt, Petersson)
  - NLO ( $1/g^2$ ) → カイラル凝縮 ( $\sigma$ ) + ベクトルポテンシャル ( $\omega$ )  
CP は低温・高密度側に移動 (vector 効果, PNJL (Fukushima) と consistent)
  - NNLO ( $1/g^4$ ) →  $\sigma + \omega + \sigma\omega$  結合  
CP の  $\mu/T$  比はほぼ一定



*Nakano, Miura, AO, in prep.*

# 「相転移」をどうやって見つけるか？

- 永宮 Method → 様々な観測量の変化を同時測定
- Critical Point (CP) or 1st order P.T.
  - Critical Point 近辺で期待されること
    - Fluctuation の増大, Non-Gaussian 揺らぎ (Stephanov, Rajagopal, Shuryak)
    - 軌道の focusing とそれにともなう粒子分布の変化 (Ejiri, Karsch, Laermann, Schmidt; Asakawa, Bass, Muller, Nonaka)
    - 音波の消失 → Mach Cone の消失 (Minami, Kunihiro)
  - 1st order phase transition での期待
    - 密度揺らぎをもつ相転移後の状態からのハドロン化 (Mishustin; Randrup Koch, Majumber, ...)

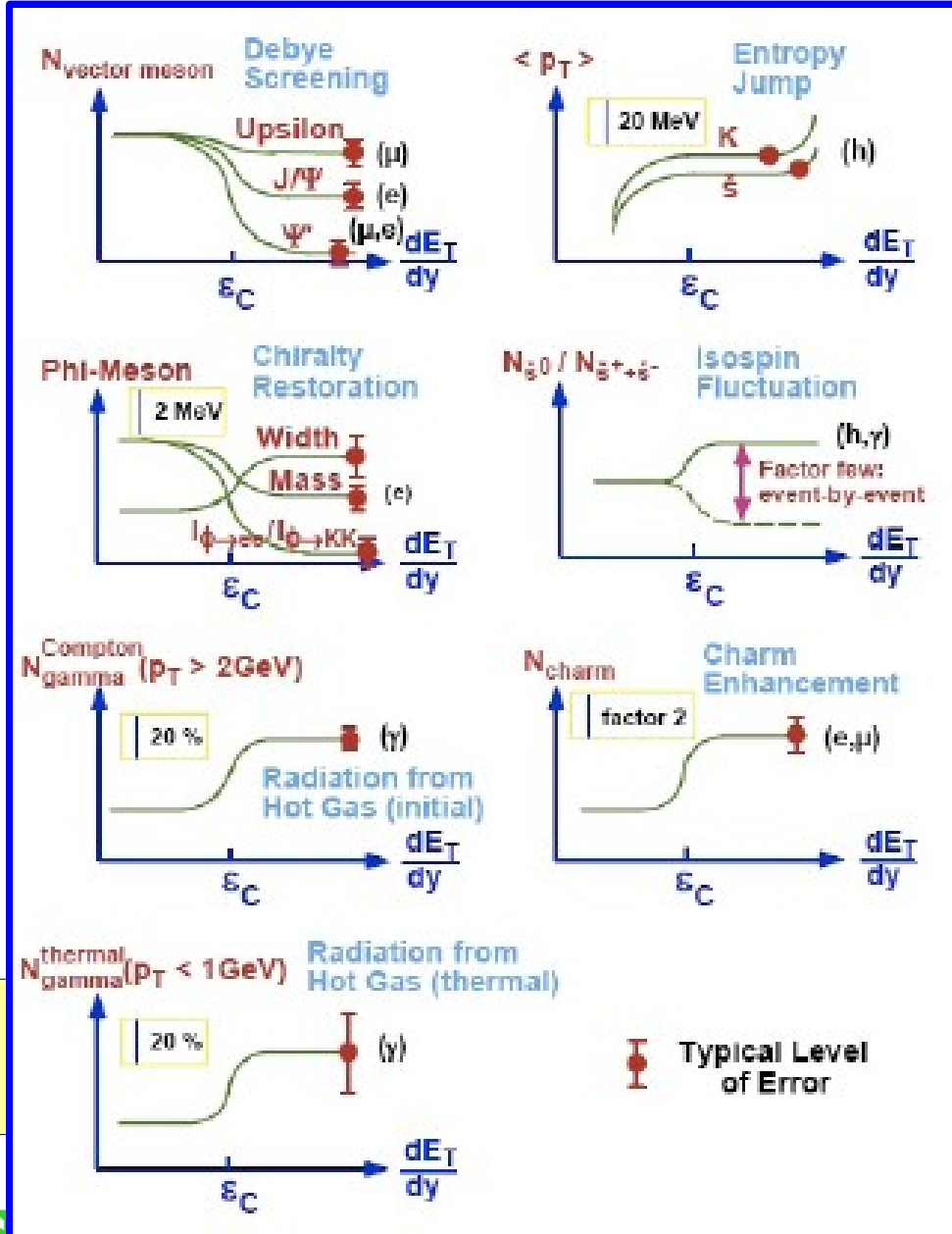


まだまだシグナル候補は未確定  
→ 多くのアイデアが必要



# 「相転移」をどうやって見つけるか？

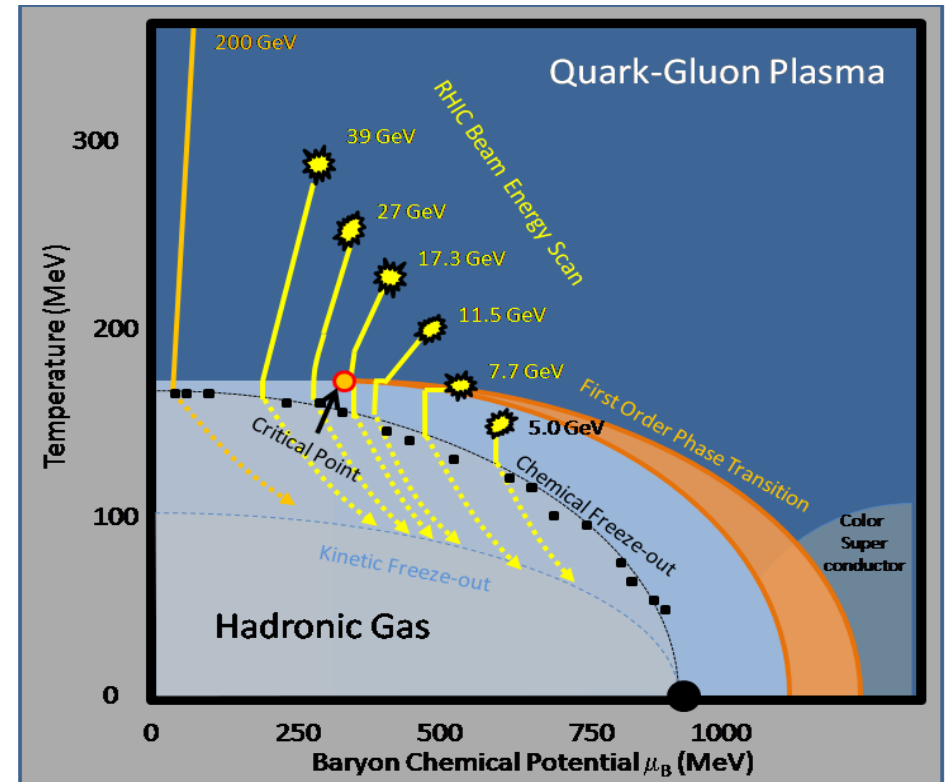
- 永宮 Method → 様々な観測量の変化を同時測定



等らぎ (Stephanov, Rajagopal, Shuryak)

分布の変化

(Sakawa, Bass, Muller, Nonaka)



# RHIC における速い熱平衡化の起源

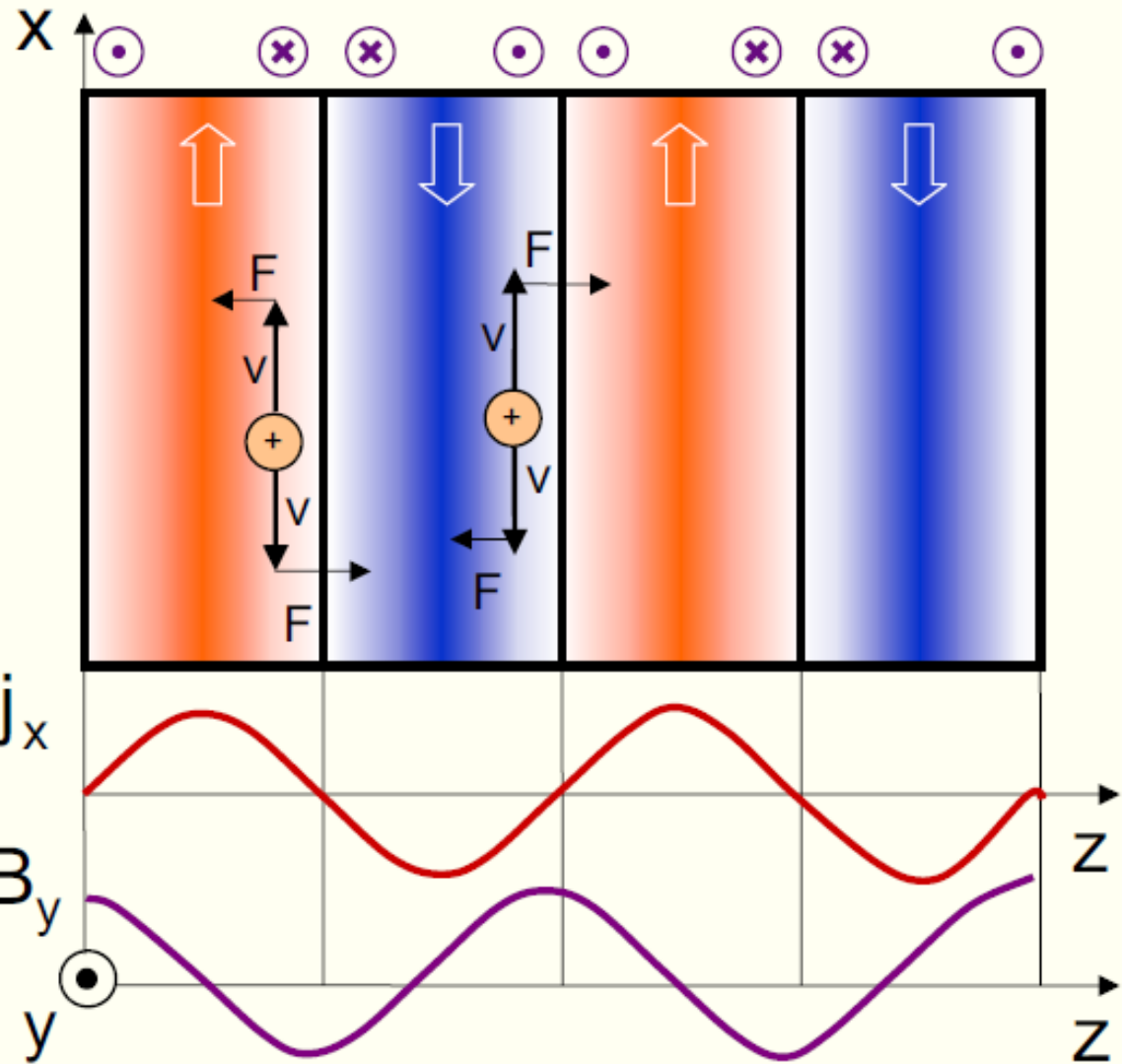
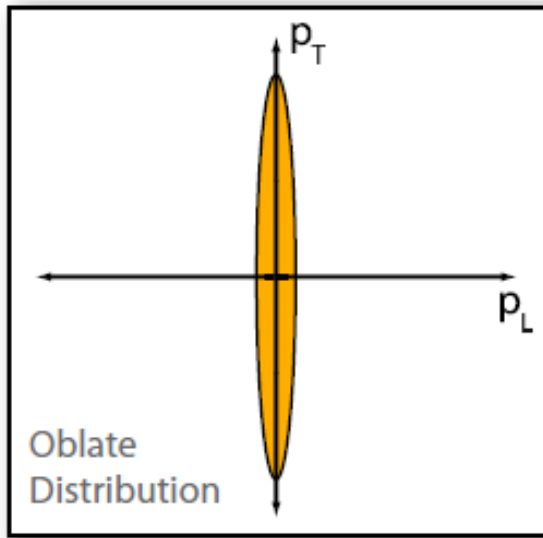
- Early Thermalization ( $\tau \sim 0.6$  fm/c)
  - Glauber type の初期条件 + 完全流体 + 速い熱平衡化  
→  $v_2$  等の RHIC データを広く説明
- 速い熱平衡化の起源は？ → グルーオン場の不安定性が鍵
  - Weibel 不安定性 *Mrowczynski; Dumitru, Schenke, Strickland, Nara*  
= 非等方な運動量分布を持つ粒子がカラー場に不安定性をもたらす
  - Nielsen-Olesen 不安定性 *Iwazaki, Itakura, Fujii*  
= 強い磁場に揺らぎがある場合のカラー場自体の不安定性
- 古典論でのエントロピー増加率  
= Kolmogorov-Sinai (KS) エントロピー (正 Lyapunov 指数の和)
$$S_{KS} = \sum_n \lambda_n \theta(\lambda_n) \quad \delta X_i = \delta X_i(t=0) \exp(\lambda_i t)$$
  - 古典軌道の不安定性 (カオスの振る舞い) がエントロピー生成の起源  
E.g. Biro, Gong, Muller, Trayanov, 1994 →  $\tau = 0.4$  fm/c (?)

## Conjecture

速い熱平衡化はグルーオン場のカオスの性質によりもたらされる！

by Strickland

# Current Filamentation in Abelian (QED) Plasmas



E. Weibel, PRL 2, 83 (1959)

## Analytic study of instability

→ Investigate the effects of fluctuation on a single flux tube

Rapidity dependent ( $p_z$  dependent) fluctuation

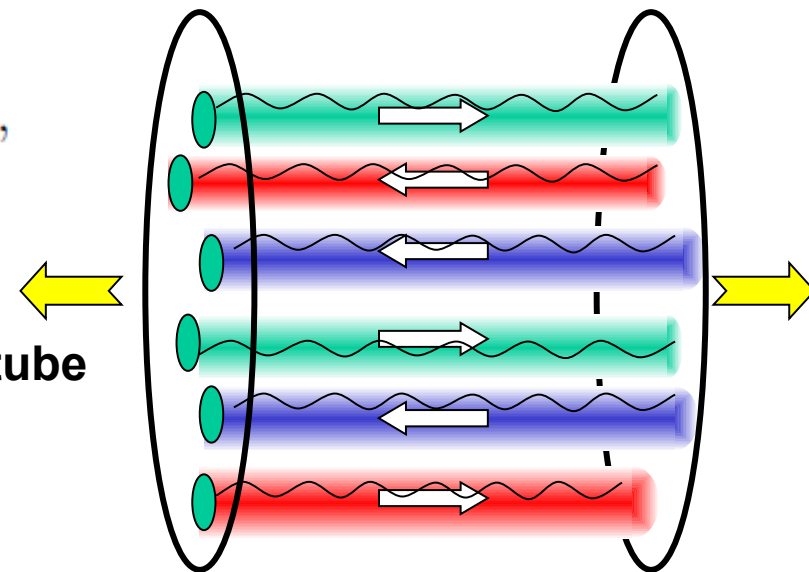
$$A_i = \mathcal{A}_i + a_i(\tau, \eta, x_\perp), \quad A_\eta = \mathcal{A}_\eta + a_\eta(\tau, \eta, x_\perp),$$

Background field = boost invariant Glasma

→ constant magnetic and/or electric field in a flux tube

Consider SU(2) for simplicity

Linearize the equations of motion wrt fluctuations



# Unstable dynamics: towards QGP

[Fujii, Itakura, Iwazaki]

## Equations for fluctuation

SU(2), constant  $B$  and  $E$  directed to 3<sup>rd</sup> color and  $z$  direction

$$\frac{1}{\tau} \partial_\tau (\tau \tilde{a}_+^{(\pm)}) + \left\{ \frac{1}{\tau^2} \left( v \pm \frac{gE}{2} \tau^2 \right)^2 + (2n + |m| + 1 \mp m \pm 2) gB \right\} \tilde{a}_+^{(\pm)} = 0$$

$v$ : conjugate to rapidity  $\eta$

$$\tilde{a}_+^{(\pm)} = e^{iv\eta} (a_+^1 \pm ia_+^2)$$

$$a_+ = a_x + ia_y$$

$B = 0$

$E = 0$

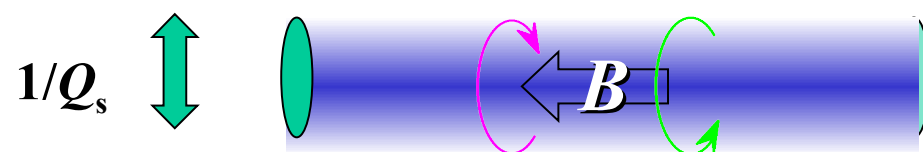
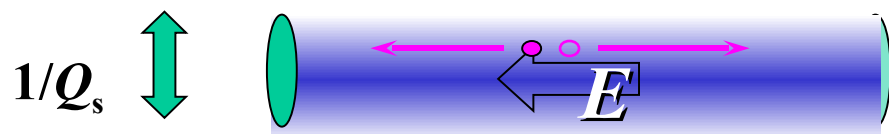
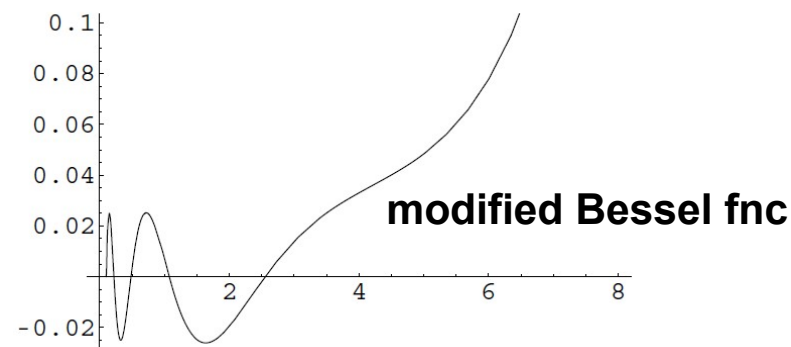
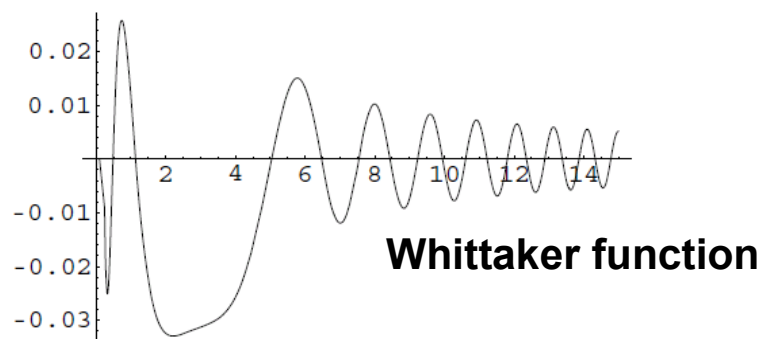
## Schwinger mechanism

Infinite acceleration of massless charged fluctuations.

No amplification of the field

## Nielsen-Olesen instability

Lowest Landau level ( $n = 0$ ) gets unstable due to *non-minimal magnetic coupling*  $-2gB$  (not Weibel instability)



by Itakura

# 非平衡な場の理論でのエントロピーとは？

- 熱化 ~ エントロピーの増大 ~ 位相空間での広がり の指標

$$S_{vN} = -\text{Tr}[\hat{\rho} \log \hat{\rho}] = -\sum_n w_n \log w_n \quad (\rho = \text{密度行列})$$

(c.f. Kadanoff-Baym 方程式でのエントロピー, Berges, Nishiyama, Kita)

- イベントごと (純粋状態) のエントロピー → 粗視化が不可欠
- Wigner 汎関数 (場の理論の古典対応, Muller, Mrowcynski)  
+ 最小波束による粗視化 (Husimi, 1940)  
→ Husimi-Wehrl エントロピー (Kunihiro, I)

- 不安定モードとエントロピー

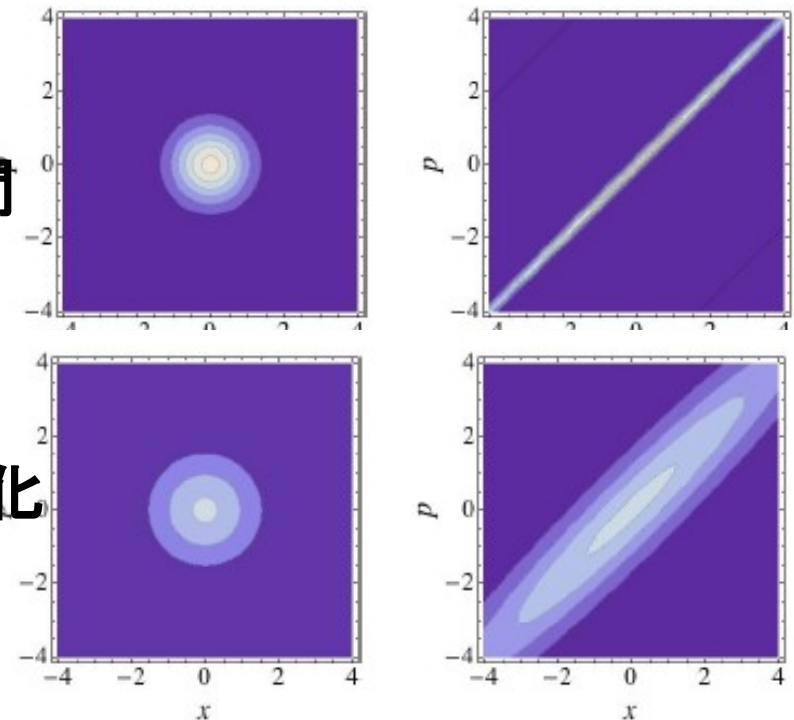
$$H = \frac{p^2}{2} - \frac{\lambda^2}{2} x^2$$

→ 単純な場合には  $dS/dt = \lambda$   
(Kolmogorov-Sinai entropy)

QCD ではどうなるか？  
(KMOS+Takahashi, Yamamoto,  
work in progress)

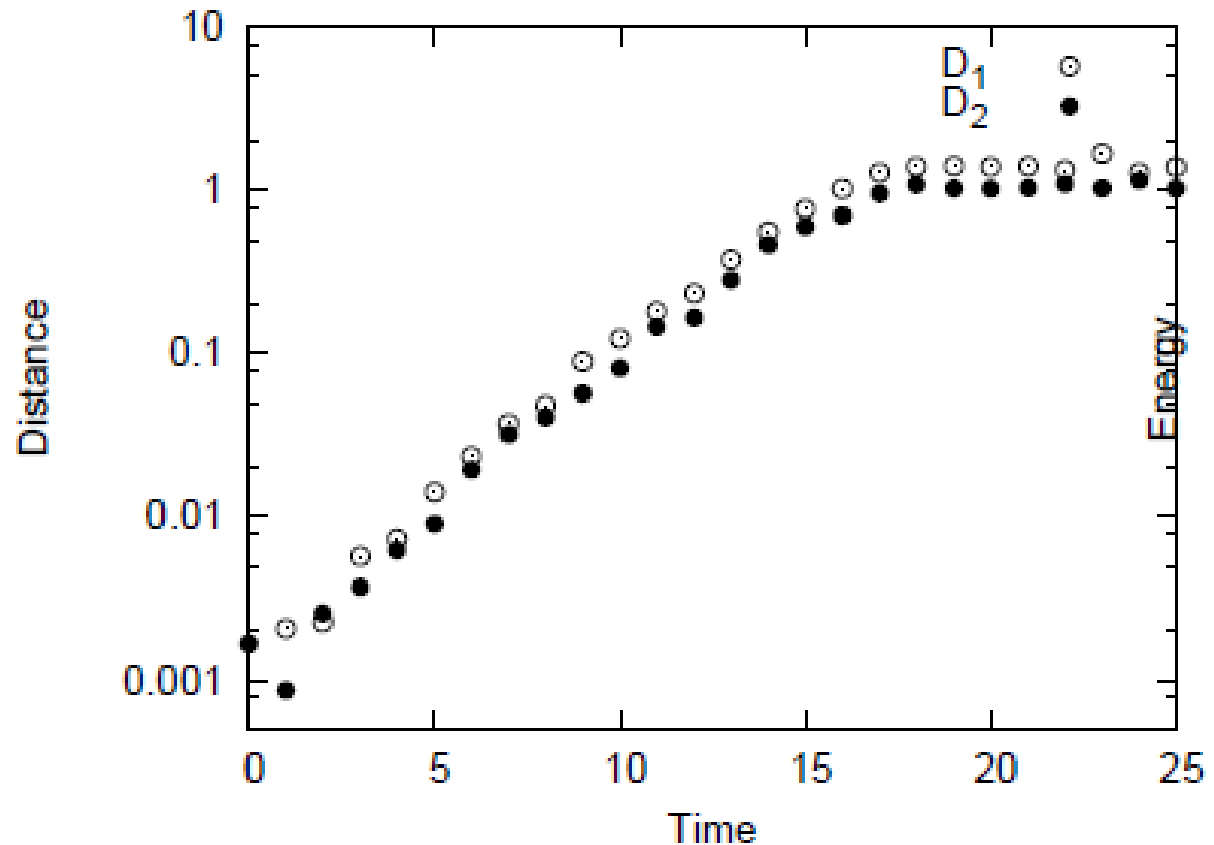
位相  
空間

粗視化



# Example of Chaotic Behavior

- Classical Yang-Mills において、  
初期条件で少しだけ離れた2つの点の距離  
→ Chaotic & Non-Equilibrium な場合には  $\exp(\lambda t)$  で増大  
( $\lambda =$  Lyapunov exponent)  
→ 通る位相空間の増大 = エントロピーの増大



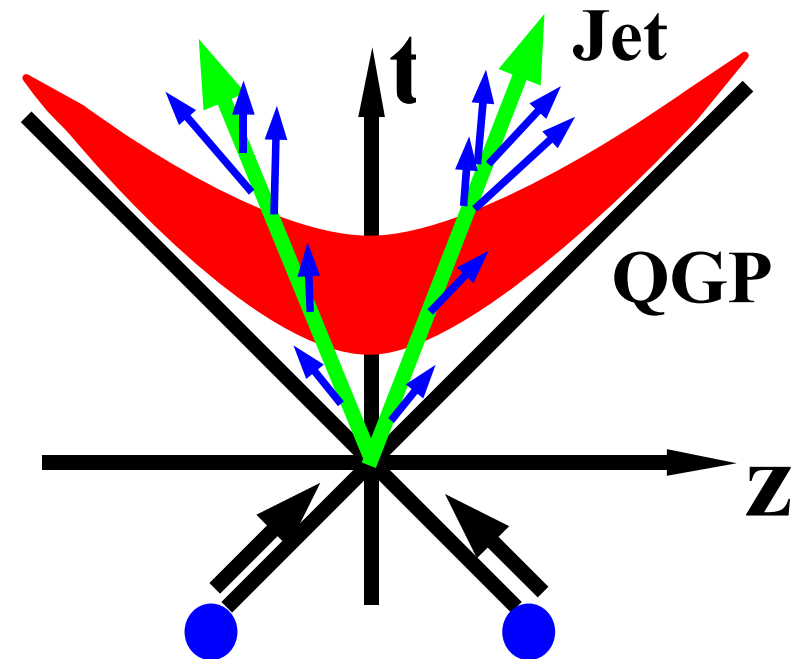
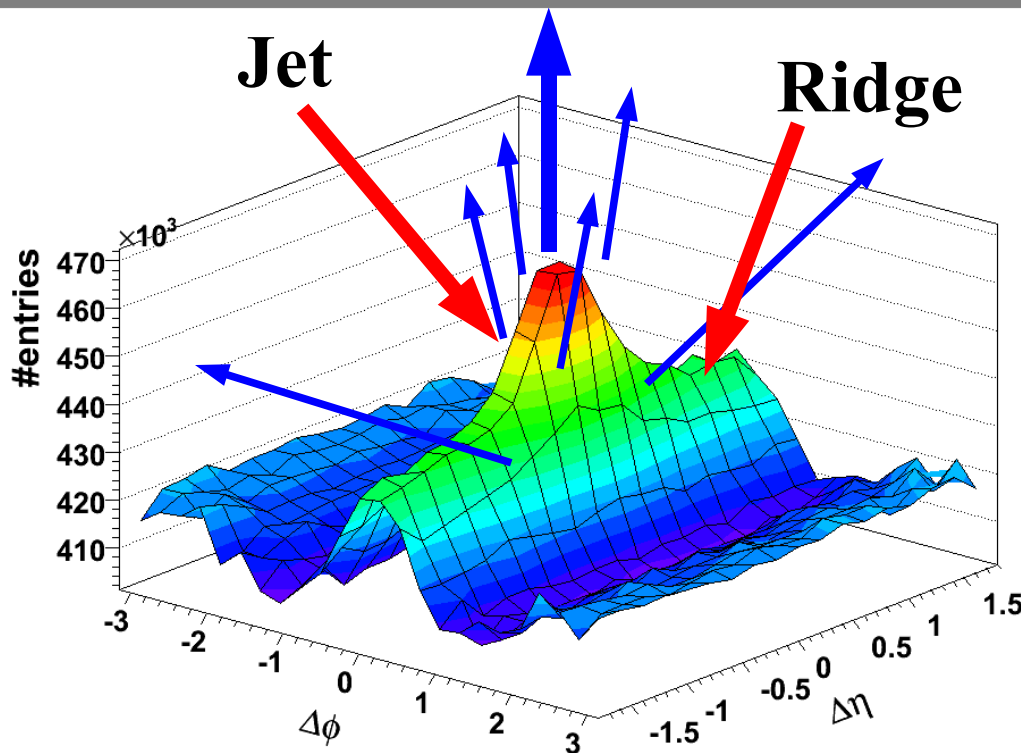
*Kunihiro, Muller, AO, Schafer,  
Takahashi, Yamamoto,  
work in progress*

# ジェットは扇形？

## ■ Ridge 構造

- NN → ある角度内に生成粒子が集中 (ジェット)
- AA → ある「平面内」にジェットが広がっているように見える (リッジ)
- Bjorken 描像 → 大きなラピディティ差 = 大きな終状態での空間の距離

Ridge 構造は Little Bang 直後の情報伝達を示唆！ → 1次元 CMB？





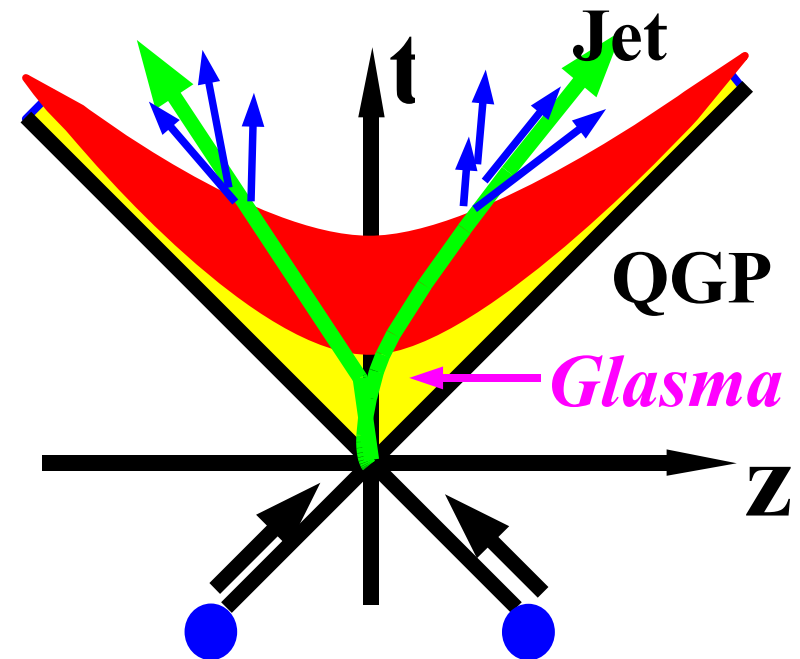
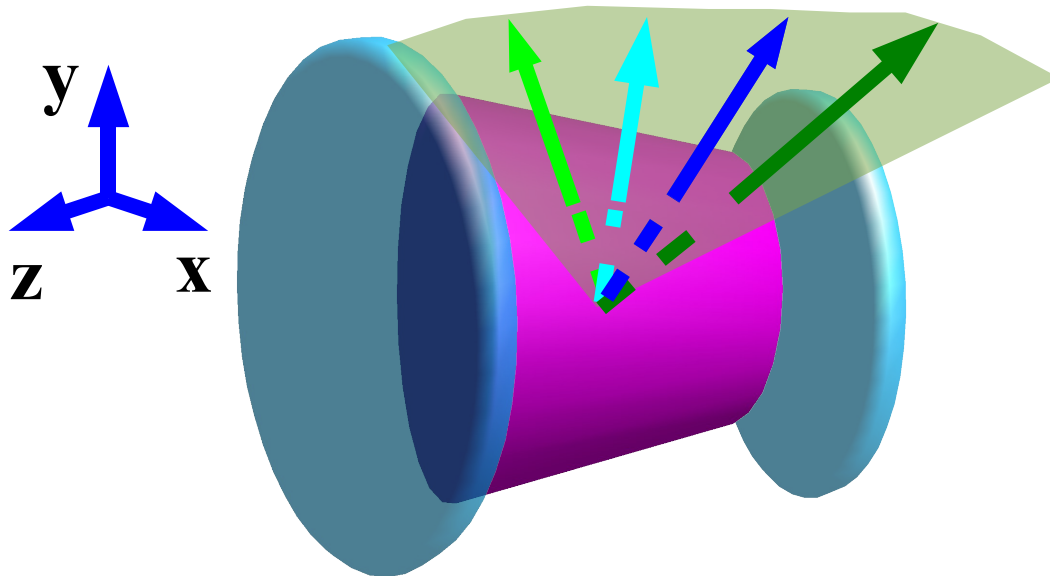
# ジェットは扇形？

- 大きなラピディティ差 ~ 大きな  $z$  方向の速度差  
→ Bjorken 描像 ( $z$  方向には一様膨張) では「大きな赤方偏移」

$$y = \frac{1}{2} \log \frac{E + p_z}{E - p_z} \rightarrow v_z = \tanh y \rightarrow \gamma_z = \cosh y \rightarrow z \simeq 2 \gamma_z = 2 \cosh y$$

ラピディティ差 ~ 2 →  $z \sim 7.5$

- 「遠くの粒子」との相関は、反応初期の相互作用が必要  
→ 熱平衡化前 (QGP が作られる前) の状態 ~ Glasma



# ジェットは扇形？

## ■ 低い横運動量での Ridge の説明例

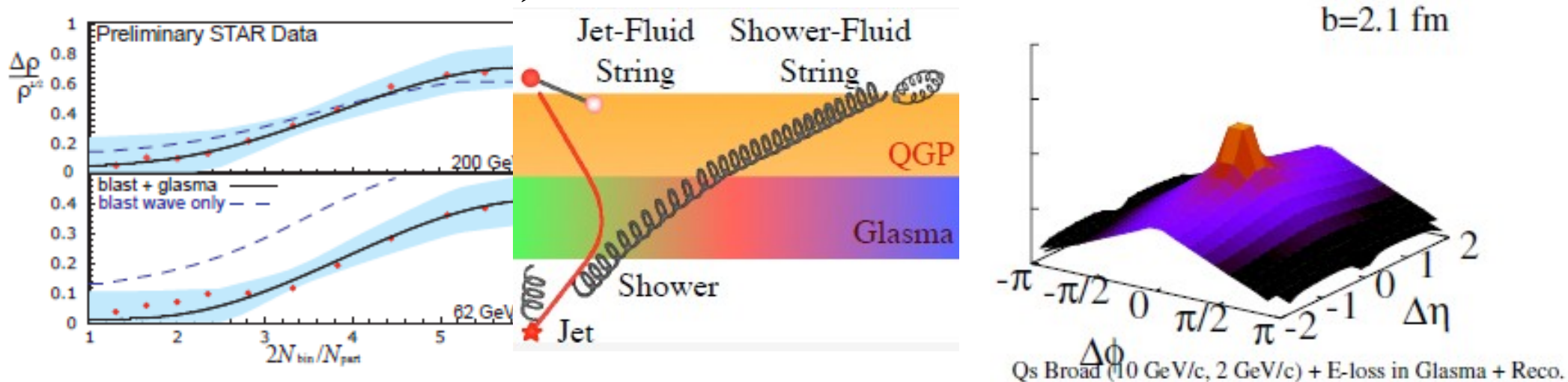
*Dumitru, Gelis, McLerran, Venugopalan; Gavin, McLerran, Moschelli*

- Color Tube の中で作られた粒子は広い  $\eta$  相関をもつ。(Bottom up)  
流体力学的なフローで押し出されると狭い  $\phi$  相関を持ちうる。  
(高い横運動量の粒子は作れない)

## ■ 高い横運動量での Ridge の説明例

*Majumder, Mueller, Bass; Mizukawa, Hirano, Isse, Nara, AO*

- ジェット粒子が放出したシャワー粒子が強い電磁場により曲げられて  
大きなラピディティ差をもって粒子を生成 (Top Down)  
(形・生成量は不十分)



*Gavin, McLerran, Moschelli, 2008*

*Mizukawa, Hirano, Isse, Nara, AO, 2008*

## ■ クォーク・グルーオン・プラズマ状態の物理

- 相転移の物理(相図の物理)
- 高温物質の物性 (QGP 物性)
- 動的な場の理論 / 流体力学 / ボルツマン方程式  
→ 量子論・古典論的な輸送方程式

物理学の多くの側面が関与する問題

- これまでに RHIC で分かってきたこと  
= パarton(クォーク、グルーオン)が強く相互作用する  
熱平衡に近い物質が生成された。
- これから RHIC, LHC の重イオンプログラムで期待されること  
QGP の発見から  
「QCD 相転移の理解」、「QGP 物性」、「QGP 以前」へ
  - 低エネルギー・スキャン → 臨界点、1次相転移の発見
  - 高統計 → QGP 物性の探求(音速、Heavy-Flavor、radiation、...)  
Observational QGP physics、QGP 以前の世界へ

---

*Thank You for Your Attention !*