

# 強結合QCD物質のはなし

浜垣 秀樹

東京大学大学院理学系研究科  
附属原子核科学研究中心

2

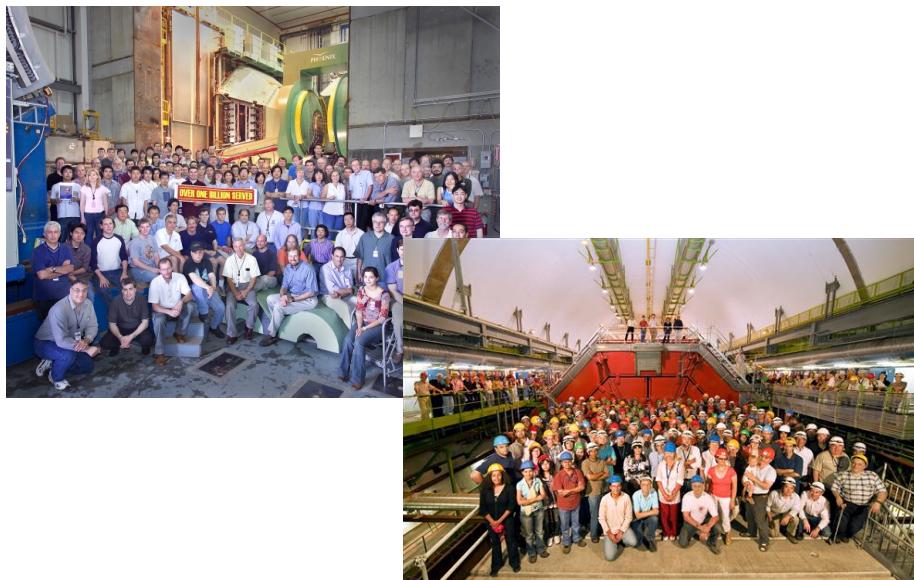
## LBL Bevalac



2013/04/06

Sugimoto symposium at Osaka University

## PHENIX & ALICE



2013/04/06

Sugimoto symposium at Osaka University

3

## はなしの流れ

- 方位角異方性と流体模型
  - 強結合QCD物質
  - 流体模型に関連して残された課題
- エネルギー損失
  - 軽いパートンのエネルギー損失の走行距離依存性
  - 重いクォークのエネルギー損失
- 単光子のパズル
- まとめ

2013/04/06

Sugimoto symposium at Osaka University

4

5

## 方位角異方性と流体模型

2013/04/06

Sugimoto symposium at Osaka University

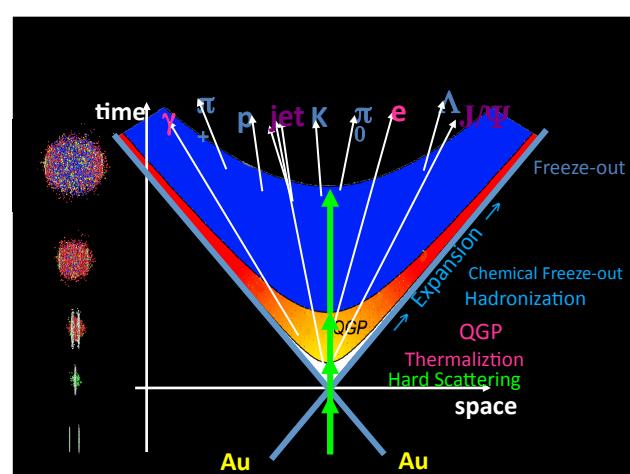
6

## 衝突の時空発展

- 物質の性質の理解は、衝突系の時空発展の理解無しにはなし得ない

系の発展を記述する信頼の  
おける模型無しには、  
データから物質の性質を  
導き出すことは現実的に  
難しい

実験家は熱化と流体的な  
振舞の重要性に、研究の  
早い段階において気がついていた

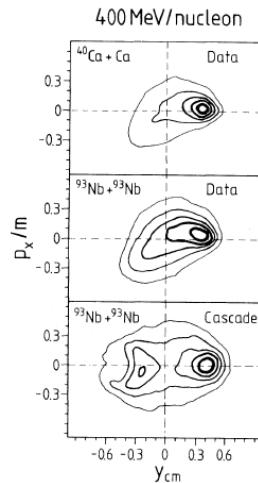
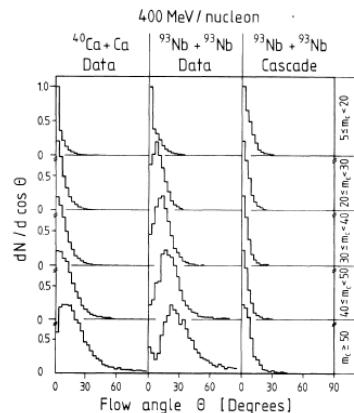


2013/04/06

Sugimoto symposium at Osaka University

## 7 ベバラックにおける流体的振る舞い

- Plastic Ballでの実験
- 入射核片のバウンスオフ
- 中心 rapidity 粒子のサイドスプラッシュ



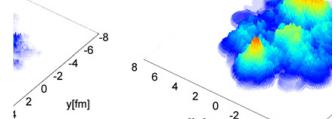
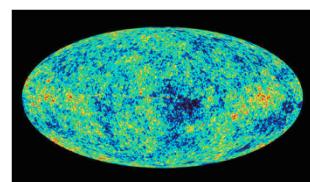
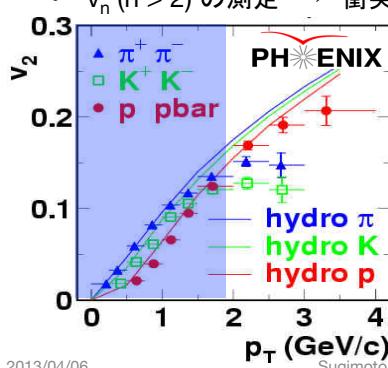
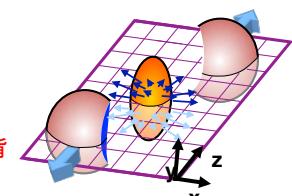
Phys. Rev. Lett. 52, 1590 (1984)  
H. A. Gustafsson, et al.

2013/04/06

Sugimoto symposium at Osaka University

## 8 RHICにおける大きな橿円的流れの発見

- 終状態が、初期状態の幾何学的形状を強く反映
- 大きな方位角異方性を持つための条件
  - 重イオン衝突の特殊事情:「衝突から流体」迄(熱化)の時間が短い
  - $\eta/s$  が小さい → 衝突初期の痕跡が残る = 宇宙背景放射の大構造と類似
- $v_n$  ( $n > 2$ ) の測定 → 衝突初期状態のマップ



2013/04/06

Sugimoto symposium at Osaka University

9

## 小さな $\eta/s$ と相転移

- 小さな比粘性 = 平均自由行程が短い = 強結合
- 現状:  $\eta/s$  の値(fixed)を実験データと粘性流体模型の比較から決める
  - $v_2/e$  は  $\eta/s$  の値に非常に敏感
  - $1 < 4\pi(\eta/s) < 2.5$
  - 大きな不確定性 = ハイドロ開始時の離心率  $\epsilon$ 
    - ハイドロ開始の初期状態(衝突過程 + 熱化過程)
- 通常の物質では  $\eta/s$  は  $T_c$  で極小
  - QCD物質の  $\eta/s$  は非常に小さい
  - QCD物質も、臨界温度近傍で極小?
- $(\epsilon - 3P)/T^4$  (trace anomaly) は  $T_c$  近傍で大きい
  - $T_c$  近傍で  $P < \epsilon/3 \rightarrow$  強い相関を示唆
  - 推量: 小さな  $\eta/s$  は相転移に特有の長距離相関やハドロン構造(閉じ込め)の名残といった効果が重要?
  - AdS/CFT (J. Maldacena: Adv. Theo. Math. Phys. 2, 231, 1998) (強相関の極限) の予言 (P. Kovtun, et al: Phys. Rev. Lett. 94 111601, 2005)
 
$$\frac{\eta}{s} \approx \frac{1}{5} \frac{T}{\pi \sigma_{sr}}$$
  - 格子QCD計算に期待: 温度依存性

Sugimoto symposium at Osaka University

2013/04/06

10

## 流体模型に関する課題

### 流体模型の成功の秘密

- 強結合 = 粘性が小さい (= エントロピー生成が小さい) → 時空発展は準断熱過程

### 課題

- 実験
  - 衝突過程の理解
    - グルーオン飽和
    - 理論との擦り合わせ
- 理論
  - 衝突過程
    - グルーオン飽和
    - 実験との擦り合わせ
  - 熱化過程: 非平衡、非線形、非運動的過程
    - 非常に取り扱いが難しい
    - 物性: 光誘起相転移との類似性
  - 格子QCD計算: EOS,  $\eta/s$

Sugimoto symposium at Osaka University

2013/04/06

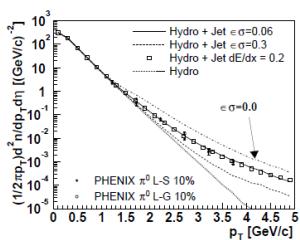
11

## 流体模型は時空発展記述のベース

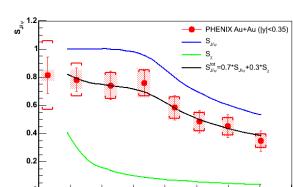
- 「流体模型+動的プロセス」: 実験データとの定量的な比較

### $\pi^0$ yield suppression

T. Hirano and Y. Nara  
PRC66:041901, 2002



### $S_{\pi^0}$

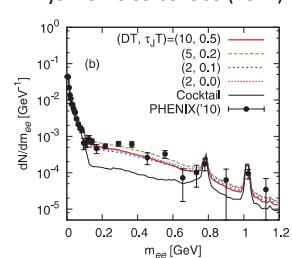


### $J/\psi$ suppression

T. Gunji, H. Hamagaki,  
T. Hatsuda, T. Hirano,  
PRC76:051901, 2007

### Low-mass electron-pair

Y. Akamatsu, H. Hamagaki,  
T. Hatsuda, T. Hirano:  
Phys. Rev. C 85.054903 (2012)



- 大きな問題: 強結合は、系の流体的取り扱いを可能としたが、他方、動的過程を通じての系の性質理解を困難なものにしている

- 系の構成要素は、素のクォークとグルーオン? パーティクル間の強い相関
- 摂動計算はどうやら使えないし、格子QCD計算は動的過程の計算には向き

2013/04/06

Sugimoto symposium at Osaka University

12

## エネルギー損失

2013/04/06

Sugimoto symposium at Osaka University

## エネルギー損失過程

13

- 金+金中心衝突で見られた収量の抑制
  - $\gamma$  と  $(\pi, \eta)$  の振る舞いの明確な違い
  - $\pi$  と  $\eta$  の振る舞いが類似  $\rightarrow$  パートニックな現象

$$R_{AA} = \frac{1}{N_{coll}} \frac{N_{AA}(\mathbf{p}; \mathbf{b})}{N_{pp}(\mathbf{p})}$$

PHENIX Au+Au (central collisions):  
 Direct  $\gamma$  (purple squares)  
 $\pi^0$  (orange triangles)  
 $\eta$  (red circles)  
 GLV parton energy loss ( $dN/dy = 1100$ )

2013/04/06 Sugimoto symposium at Osaka University

## エネルギー損失の走行距離依存性

14

- 静的な媒質における制動輻射過程についての理論予想
  - pQCD:  $L^2$  依存性は、LPM効果(放出グルーオンの破壊的干渉)による
  - AdS/CFT: グルーオン放射はpQCDで取り扱い、グルーオンと媒質との相互作用はAdS/CFT計算  $\rightarrow L^3$  依存性

弱結合(pQCD):  $\Delta E \propto L^2$

強結合(AdS/CFT):  $\Delta E \propto L^3$

- 実験結果は、AdS/CFTをサポート
- パートンのエネルギー依存性?
- 放射されたグルーオンのその後?

(a) WHDG CT: ASW  
 $JR: I - \int dI p_{gA}^{tot}$   
 $JR: I - \int dI p_{gC}^{tot}$

(b) PRL 105, 142301  
 CT: AdS/CFT  
 $JR: I - \int dI p_{gA}^{tot}$   
 $JR: I - \int dI p_{gC}^{tot}$

(c) PHENIX  
 $\beta = 9 \text{ GeV}/c$   
 pQCD

(d) AdS/CFT

2013/04/06 Sugimoto symposium at Osaka University

15

## 重いクオークのエネルギー損失

- 半レプトン崩壊からの単電子測定
- $\pi^0$  と同程度の大きな収量抑制
- 重いクオークをQGP中の重い不純物と看做す
- 相対論的 Langevin 方程式

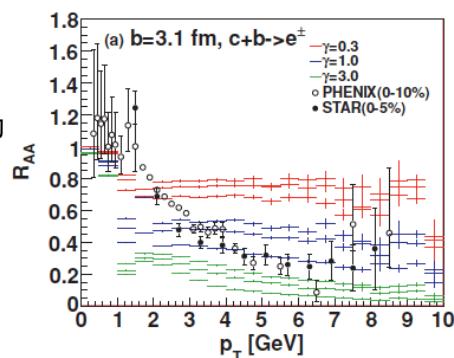
$$\Delta \vec{x}(t) = \frac{\vec{p}}{E(p)} \Delta t,$$

$$\Delta \vec{p}(t) = -\Gamma(p) \vec{p} \Delta t + \vec{\xi}(t).$$

$$\Gamma \equiv \gamma \frac{T^2}{M}.$$

- 実験データ:  $\gamma \sim 1 - 3$
- pQCD計算:  $\gamma \sim 0.3$

$$\Gamma_{\text{AdS/CFT}} = (2.1 \pm 0.5) \frac{T^2}{M}.$$



Y. Akamatsu, T. Hatsuda, T. Hirano,  
PRC 79 (2009) 054907

### これから測定

- 質量依存性:c と b を分離
- 方位角異方性

2013/04/06

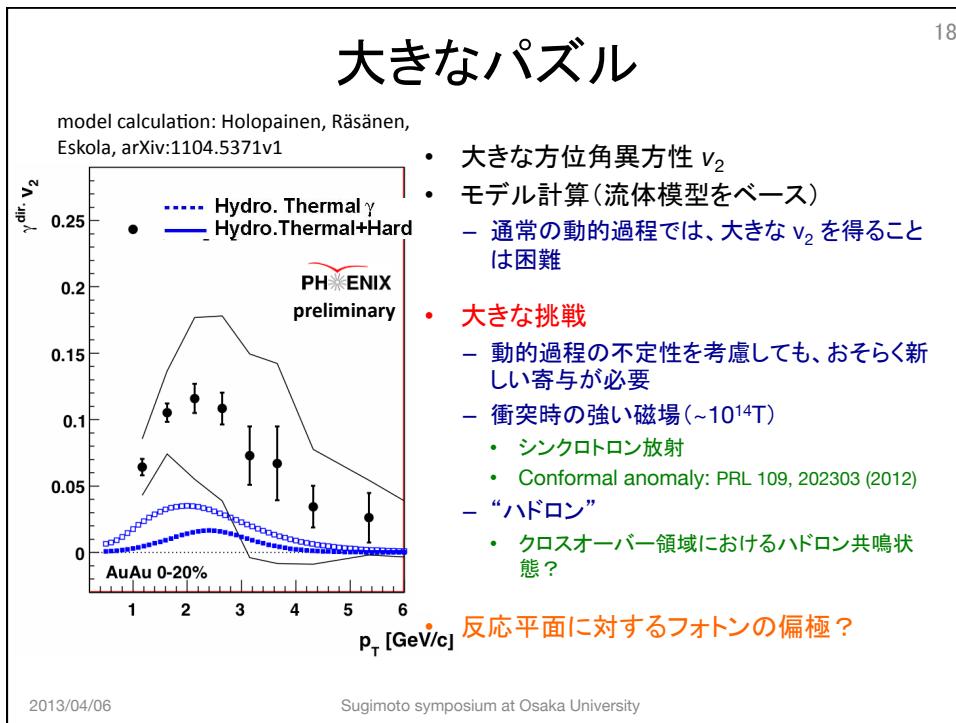
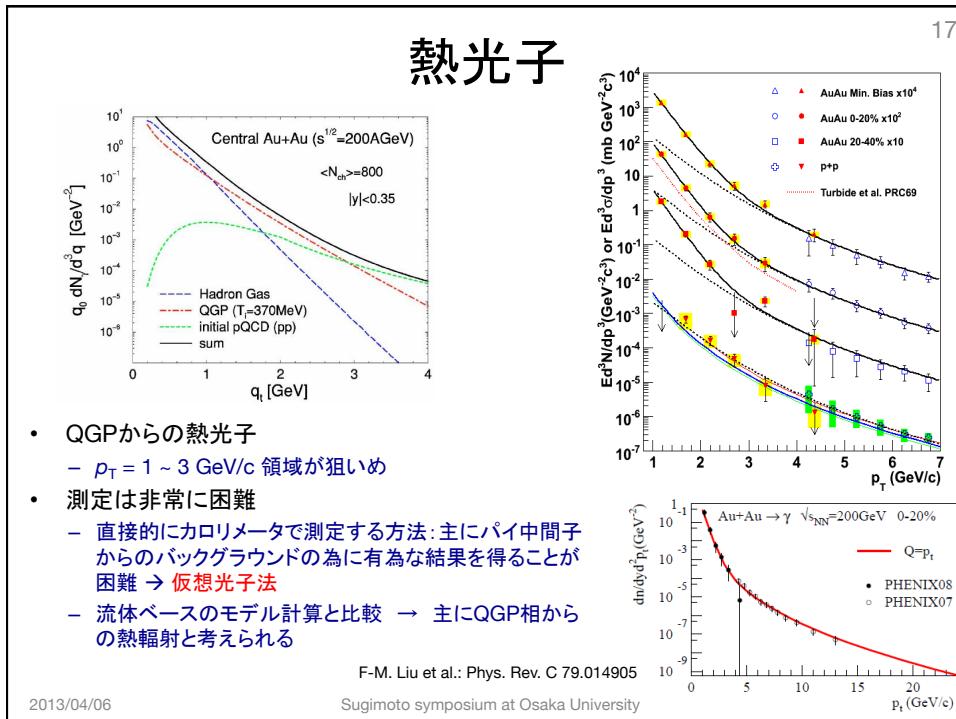
Sugimoto symposium at Osaka University

16

## 単光子

2013/04/06

Sugimoto symposium at Osaka University



19

## まとめ

- QGPは強結合系であるため、流体模型により系の時空発展を記述出来る
  - 課題
    - 初期状態の理解:衝突過程、熱化過程
    - $\eta/s$ :格子QCD計算、温度・相対速度依存性
  - 強結合系 → 動的過程の取り扱いが困難
    - 極端な言い方をすると、AdS/CFT以外の処方箋が無い
      - 素朴な疑問:こんなものを信じて良いのか?
      - 理論の break through が必要
  - エネルギー損失過程
    - 走行距離依存性、重いクォークのエネルギー損失
  - 単光子パズル
    - 収量の増加、大きな  $v_2$  → 通常のシナリオでは、同時に記述することは難しい

&gt;&gt; これから

- Exploration の時代 → Quantitative research の時代
- 高統計、高精度データ → 理論の進展を後押し → 強結合QCD系の理解、新たな知見、サプライズ

2013/04/06

Sugimoto symposium at Osaka University

20

## バックアップ

2013/04/06

Sugimoto symposium at Osaka University

21

## 方位角異方性: 楕円的流れ

- 衝突時の有限の衝突径数時の幾何学的形状 → 終状態における運動量位相空間における振る舞い
  - その相関の強さは生成された媒質の性質とその時空発展の様相によって定まる

\* 短い自由行程 → 流体的 → 大きな異方性  
 \* 長い自由行程 → 自由気体的 → 小さな異方性

2013/04/06 Sugimoto symposium at Osaka University

22

## 小さな比粘性

- 小さな比粘性=平均自由行程が短い=強結合
- 比粘性の値は?
  - 格子QCD計算からは、未だ確かな値は得られていない
  - あるのは、AdS/CFT (J. Maldacena: Adv. Theor. Math. Phys. 2, 231, 1998) の予言くらい (P. Kovtun, D.T. Son, A.O. Starinets, Phys. Rev. Lett. 94 111601, 2005)
- $\eta/s$  の値: 実験データと粘性流体模型の比較
  - $v_2/\varepsilon$  は  $\eta/s$  の値に非常に敏感
    - $v_n$  ( $n > 2$ ) を用いると、更に強い制限
  - $1 < 4\pi(\eta/s)_{QGP} < 2.5$
  - 大きな不確定性=ハイドロ開始時の離心率  $\varepsilon$ 
    - ハイドロ開始の初期状態(衝突過程+熱化過程)がきちんと掌握されていない

$$\frac{\eta}{s} \approx \frac{1}{5} \frac{T}{\pi \sigma v}$$

$$\frac{\eta}{s} = \frac{\hbar}{k} \frac{1}{4\pi}$$

2013/04/06 Sugimoto symposium at Osaka University

23

