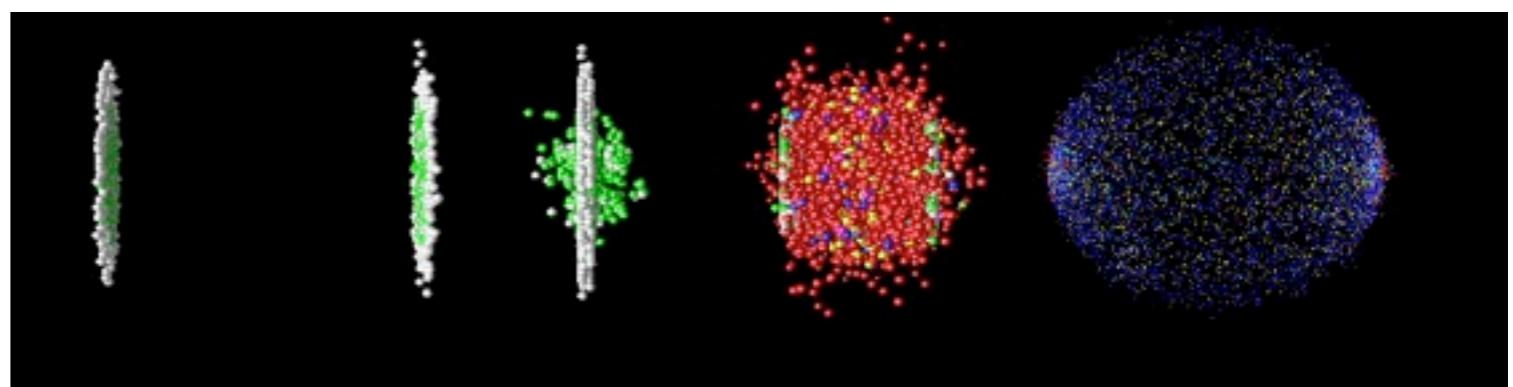
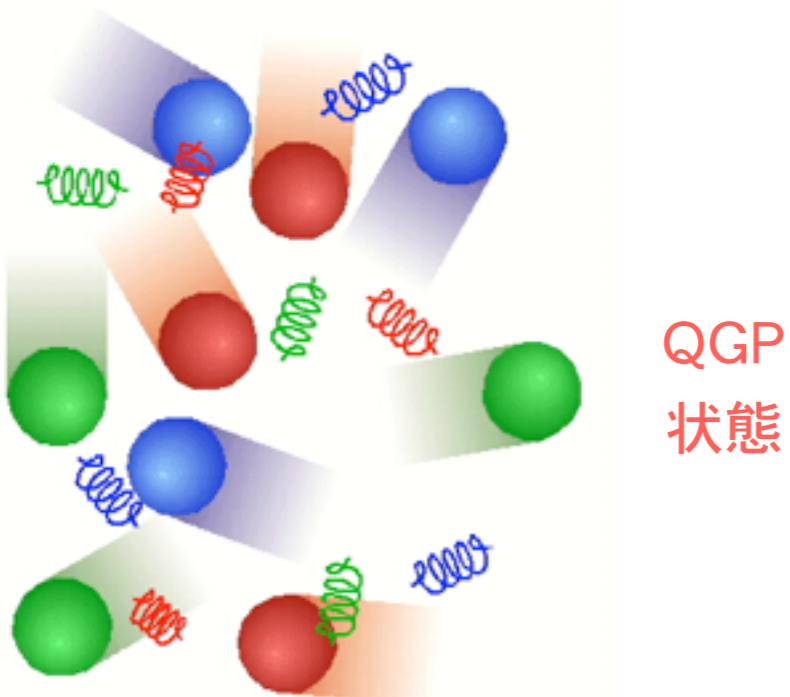


# 高温高密度核物質

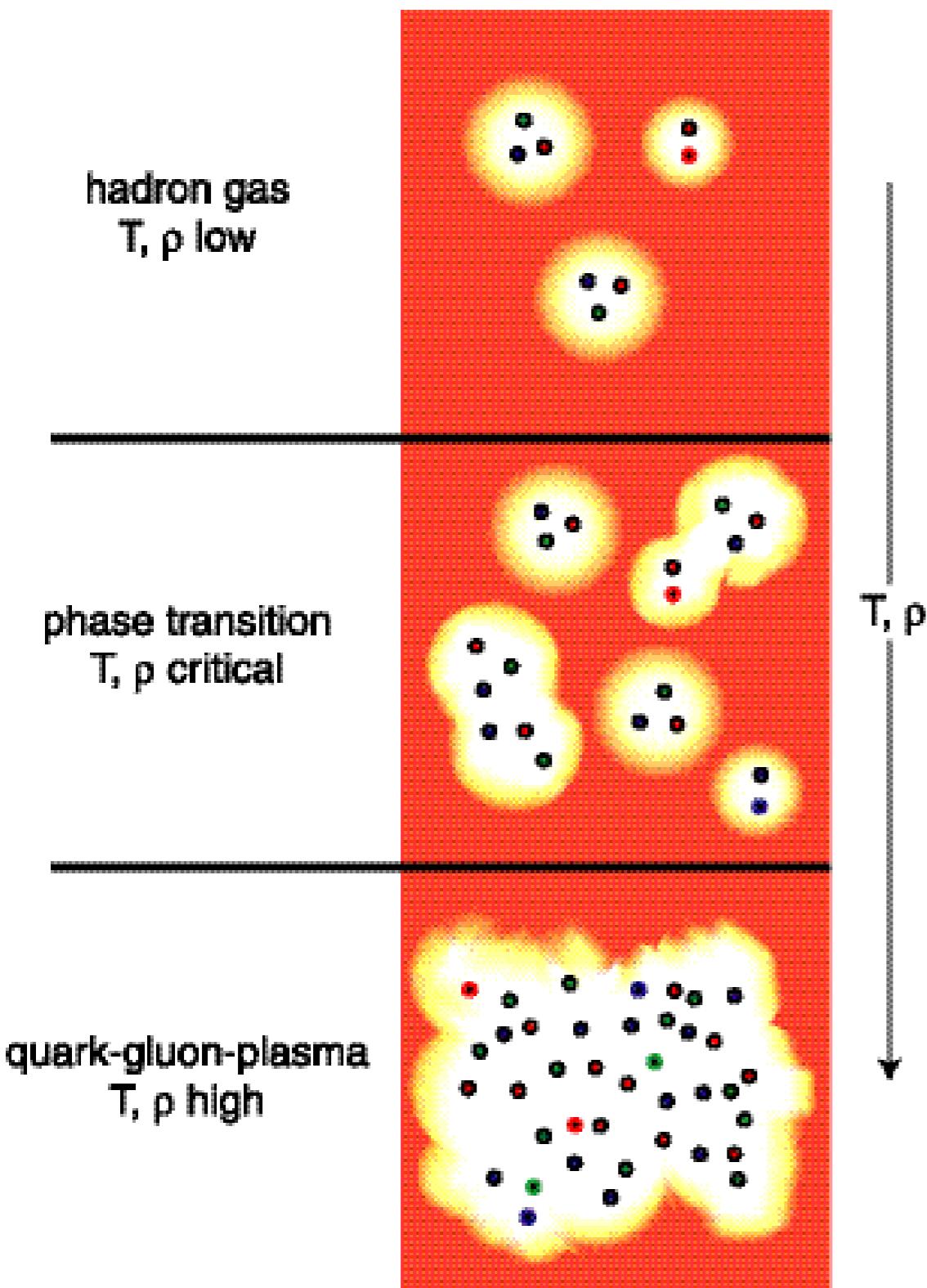
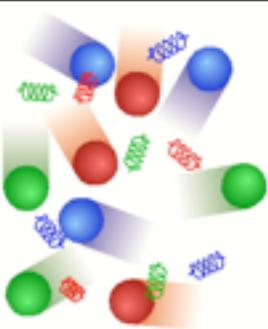
## - 理論と実験計画 -

～ RHICからLHCへ ～

筑波大学 三明康郎



# クオーク・グルオンプラズマ (QGP) とは



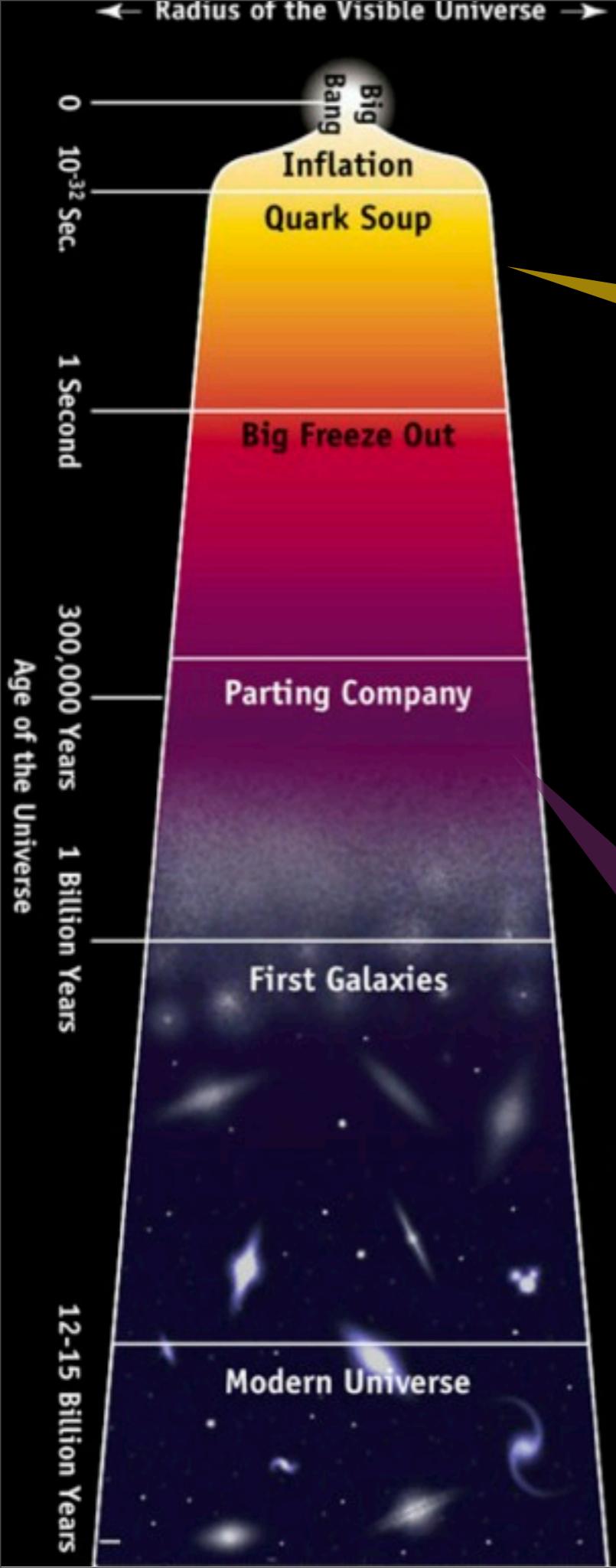
## ✓ ハドロンの構造；

- ハドロン（陽子、中性子や中間子）は、1fm程度の大きさを持ち、クオークとグルオンから構成されている。
- クオークとグルオンはハドロンに閉じ込め
- 量子色力学（QCD）の世界
  - クオークの閉じ込め
  - 漸近的自由度

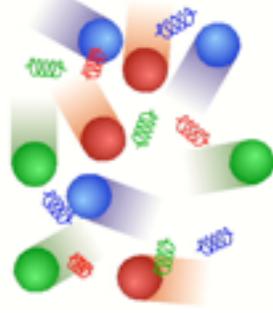
## ✓ 大きさを持つハドロンを狭い空間に多重発生させると（高温・高密度状態）、ハドロンが連結した状態が起こる？

- クオーク・グルオンが比較的大きな体積中を自由に飛び回る状態が実現する。

クオーク・グルオンプラズマ状態

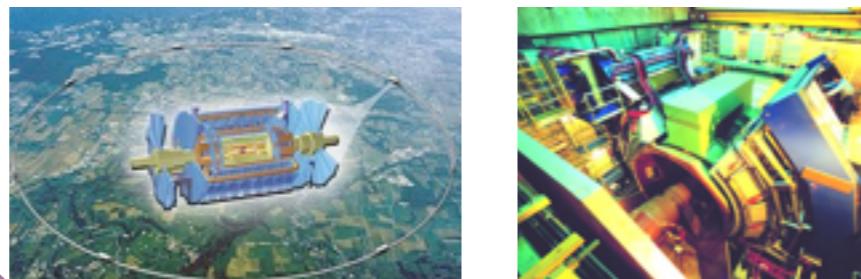


# 宇宙の歴史から見ると、



✓ **QGP → 陽子や中性子**

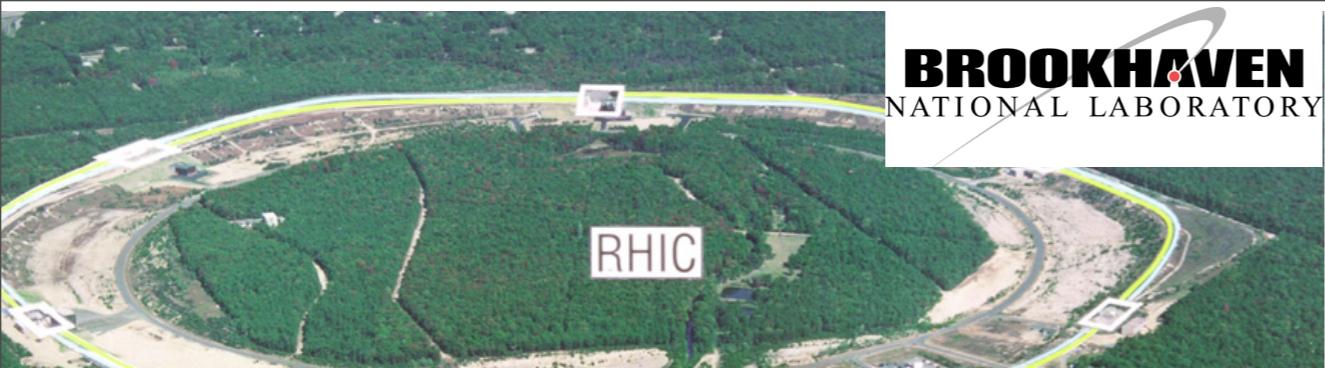
- ・ 時間：ビックバンから数  $\mu$ 秒後
- ・ エネルギー密度： $> 1 \text{ GeV/fm}^3$



✓ **宇宙の晴れ上がり**

- ・ 時間：ビックバンから40万年後
- ・ 温度：2兆度 K





BROOKHAVEN  
NATIONAL LABORATORY



米国・ブルックヘブン国立研究所 (BNL)

RHIC 加速器 (2000-), 周長 3.8 km

$\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV Au+Au}$



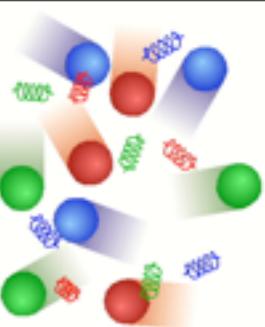
スイス・欧州共同原子核研究機構 (CERN)

LHC 加速器 (2009-), 周長 27 km

$\sqrt{s_{NN}} = 2.76, 5.5 \text{ TeV Pb-Pb}$

## RHIC & LHC

# 高エネルギー重イオン実験の2大拠点

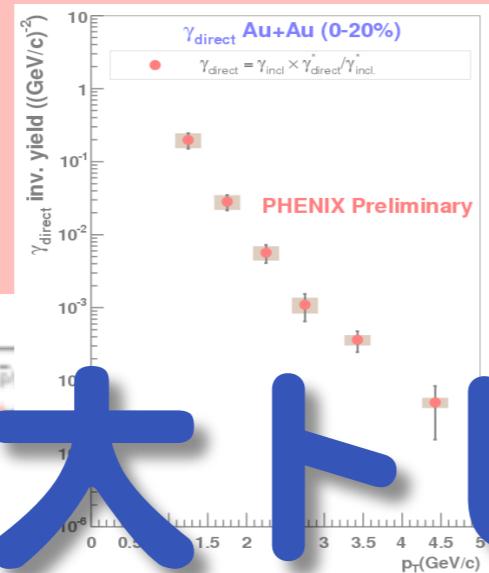


## Very Hot

$$\varepsilon_{Bj} = \frac{1}{\pi R^2} \frac{1}{c \tau_0} \frac{dE_T}{dy}$$

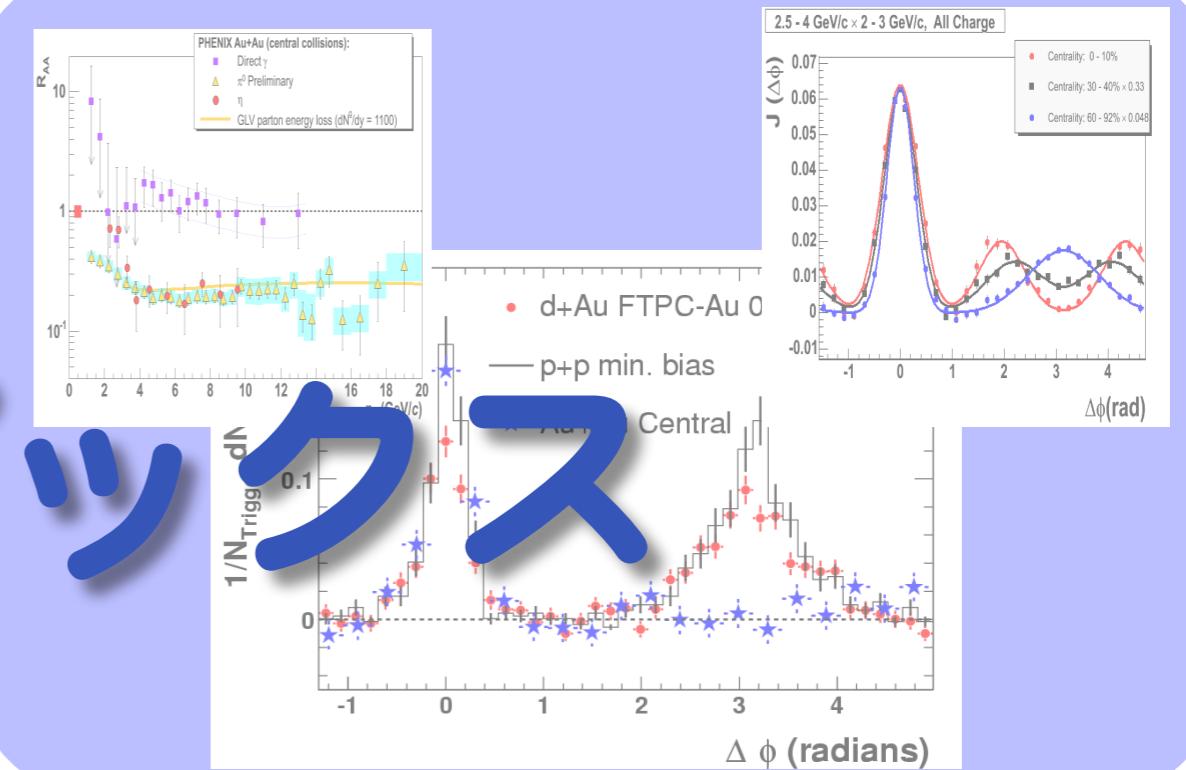
$\approx 4.6 \text{ GeV/fm}^3$

$> \varepsilon_c \approx 0.6 - 1.2 \text{ GeV/fm}^3$

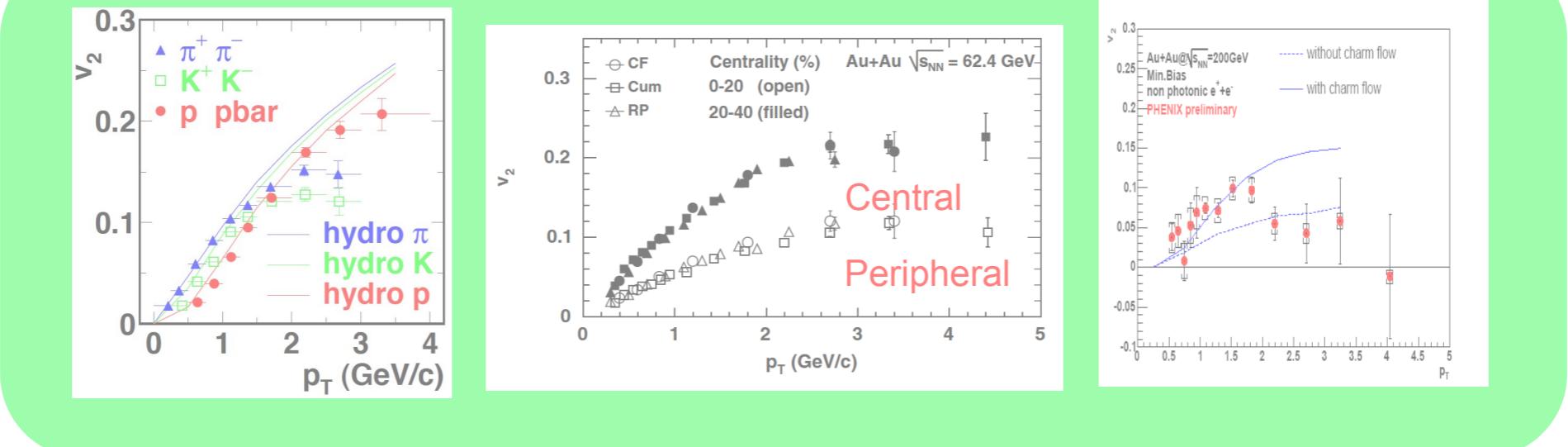


2大トピック

## Char. Energy Loss of Parton

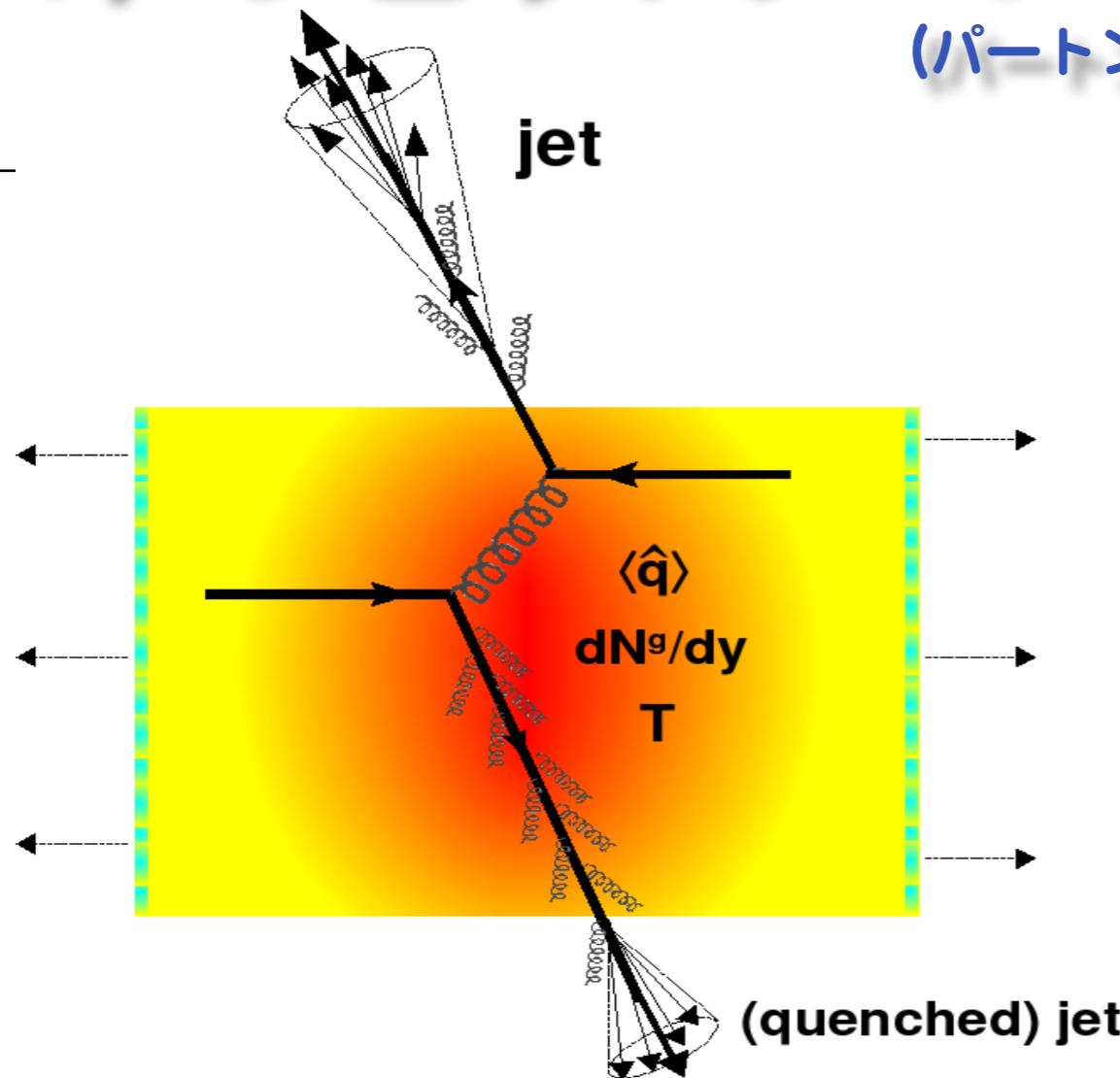
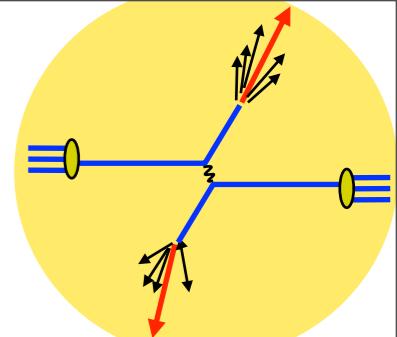


## Very Early thermalization/Strong coupling

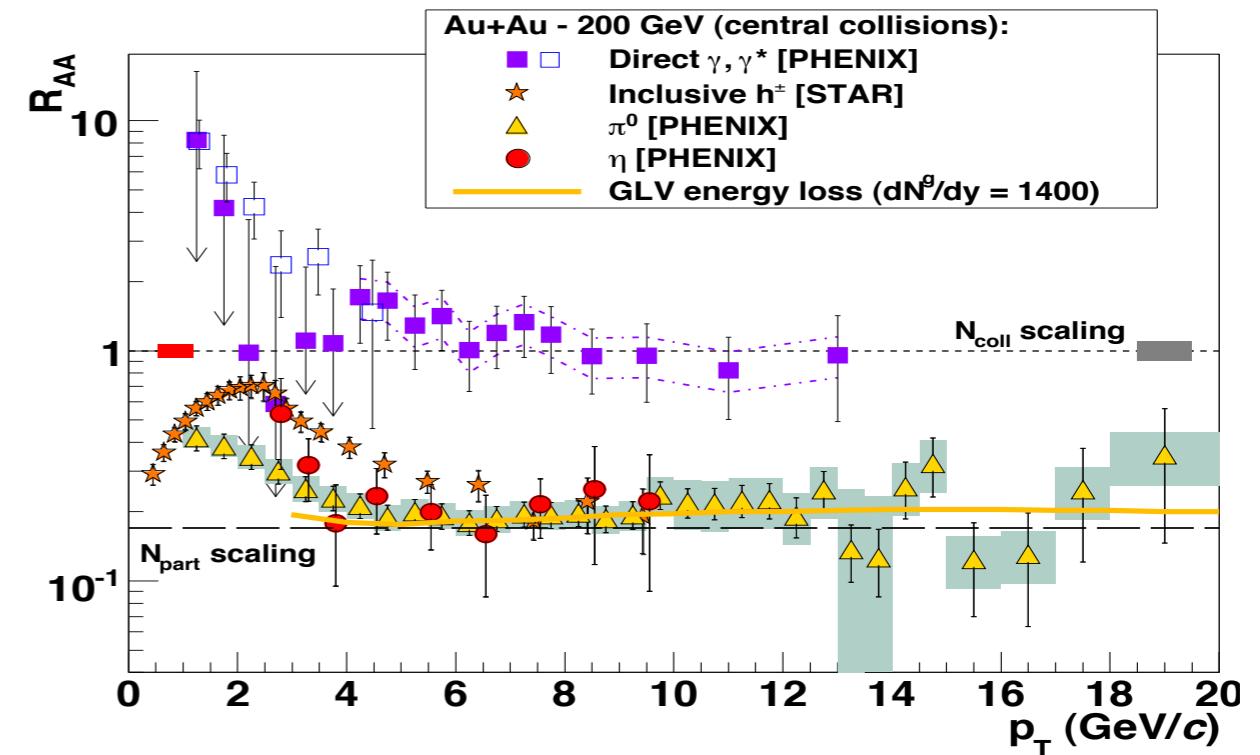


# (1) ジェットクエンチ

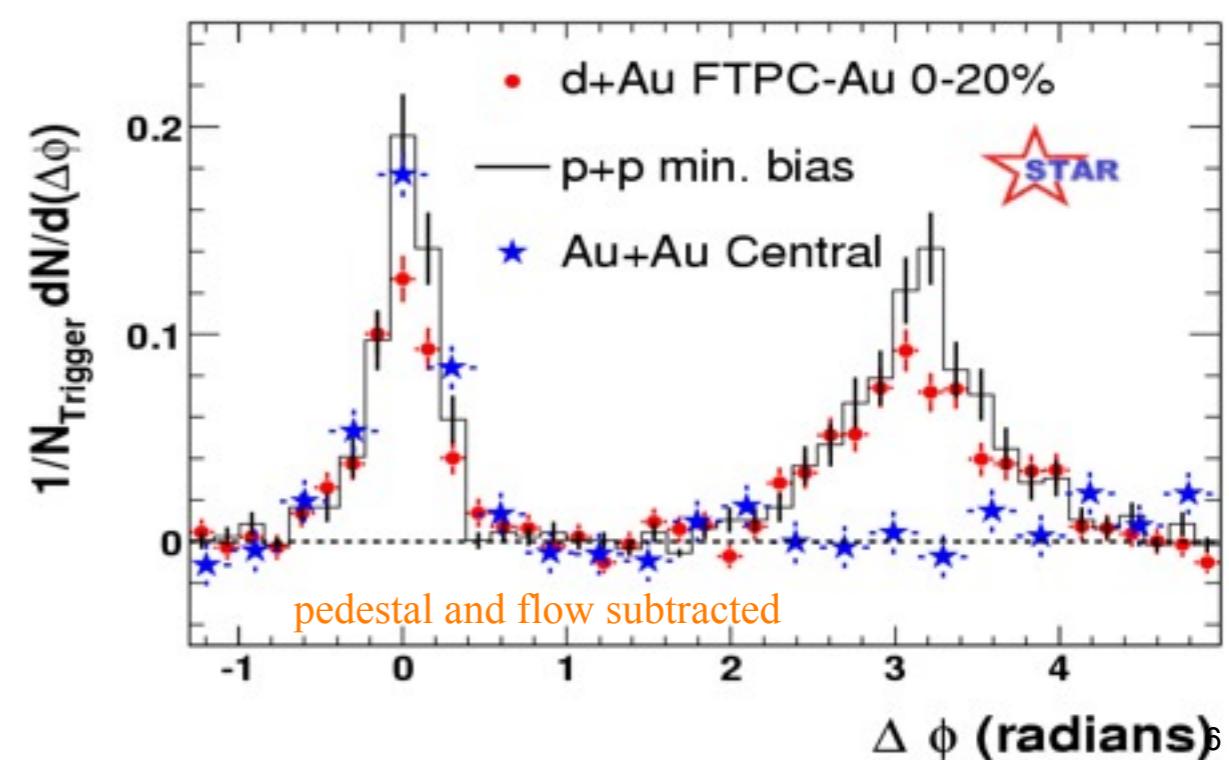
(パートンのQGP中の特徴的エネルギー損失)



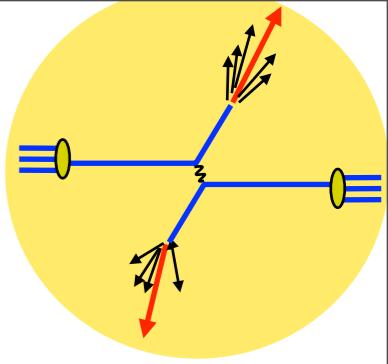
$$R_{AA} = \frac{\text{"hot/dense QCD medium"}}{\text{"QCD vacuum"}} = \frac{dn_{AA}/dp_T dy}{\langle N_{\text{binary}} \rangle \cdot dn_{pp}/dp_T dy}$$



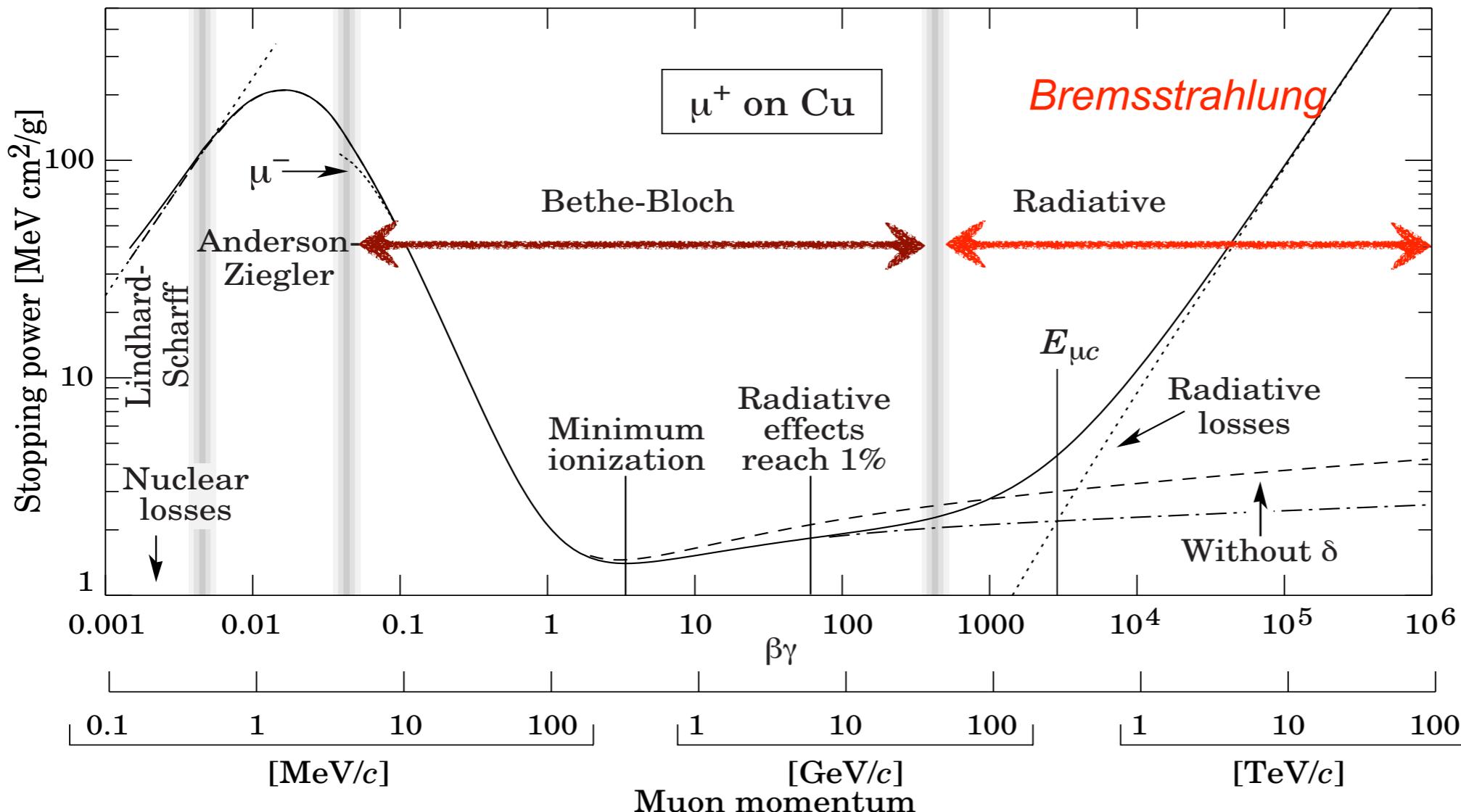
- ✓ 1) 高運動量粒子の減少
  - 低エネルギー衝突では見られない
- ✓ 2) 相反ジェットの消失
- ✓ エネルギー損失~数GeV/fm
  - ハドロンガスでは考えられない
  - →QGP生成の証拠のひとつ



# QED の場合、



Energy loss of charged particle in a matter



Collisional

✓ Bethe-Bloch

Radiative

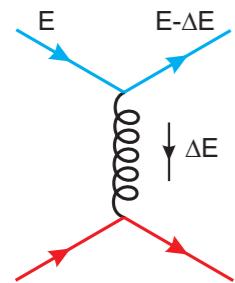
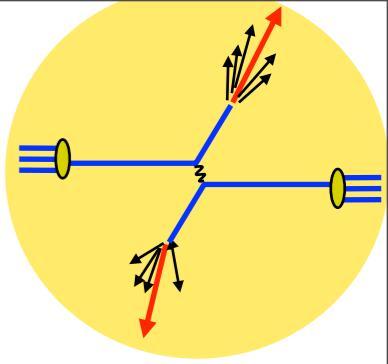
✓ Bethe-Heitler  
(thin;  $L \ll \lambda$ )

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

✓  $dE/dx$  測定 → 物性を決定

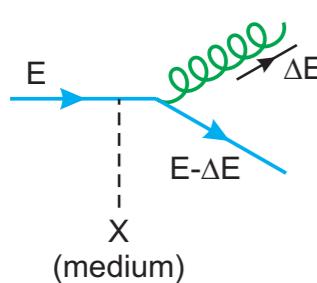
- QED プラズマ中でのエネルギー損失 →  $T$  &  $m_D$  を与える

# QGPに特徴的なエネルギー損失



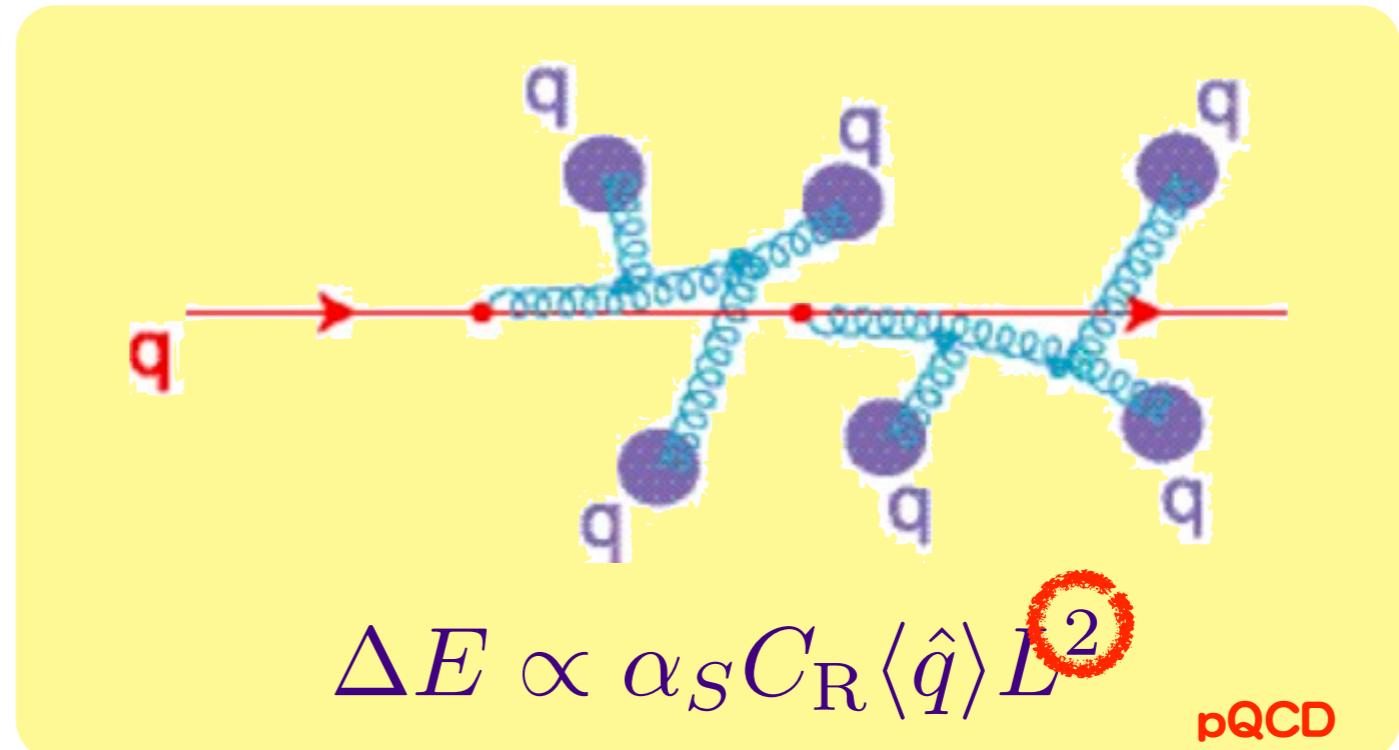
Collisional

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



Radiative

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

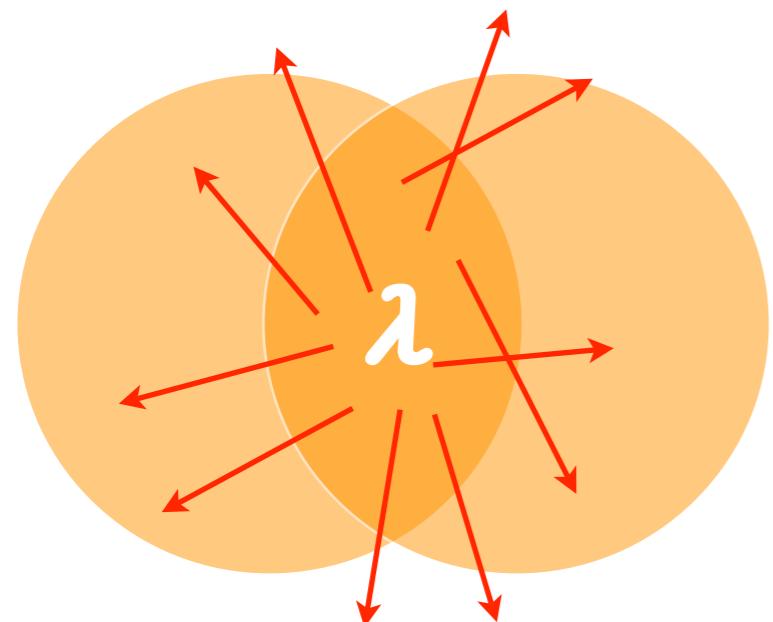
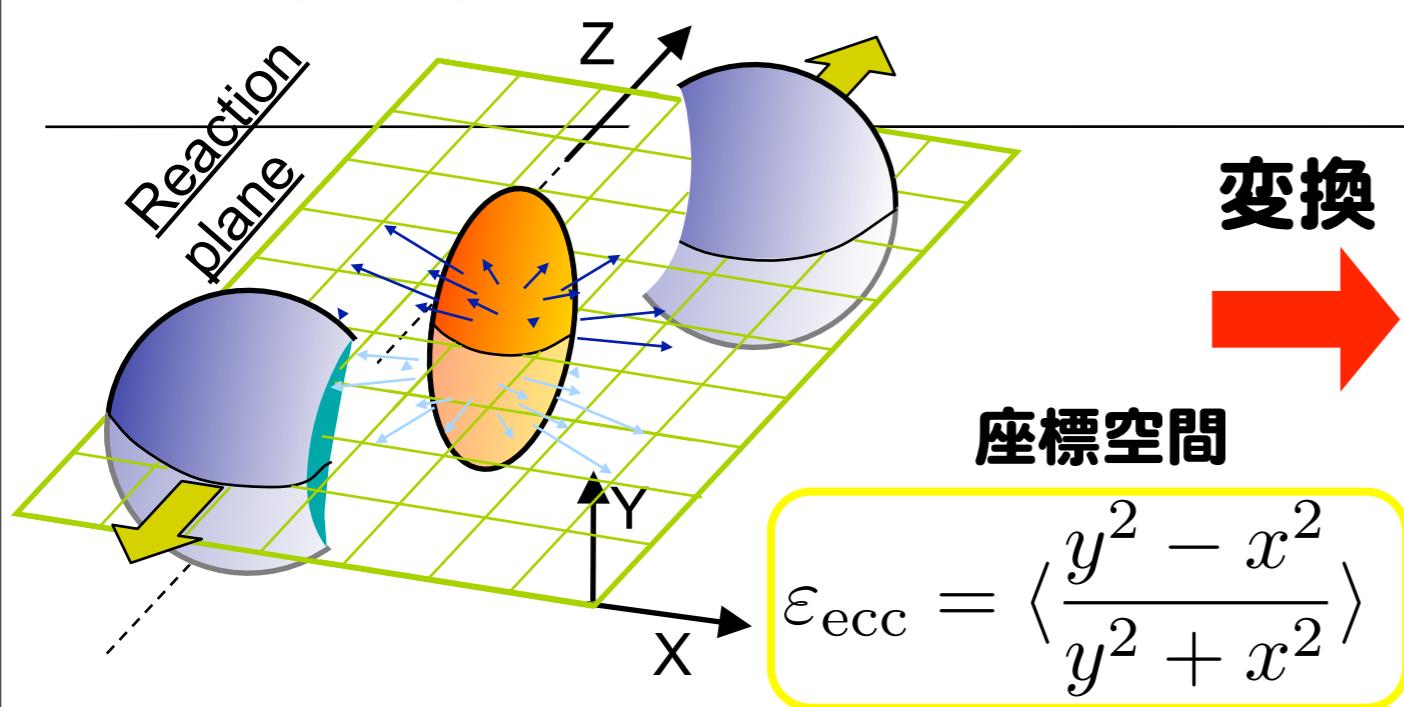
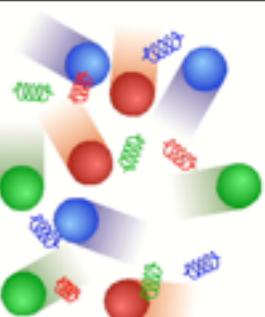


- グルーオン放射によるエネルギー損失が支配的

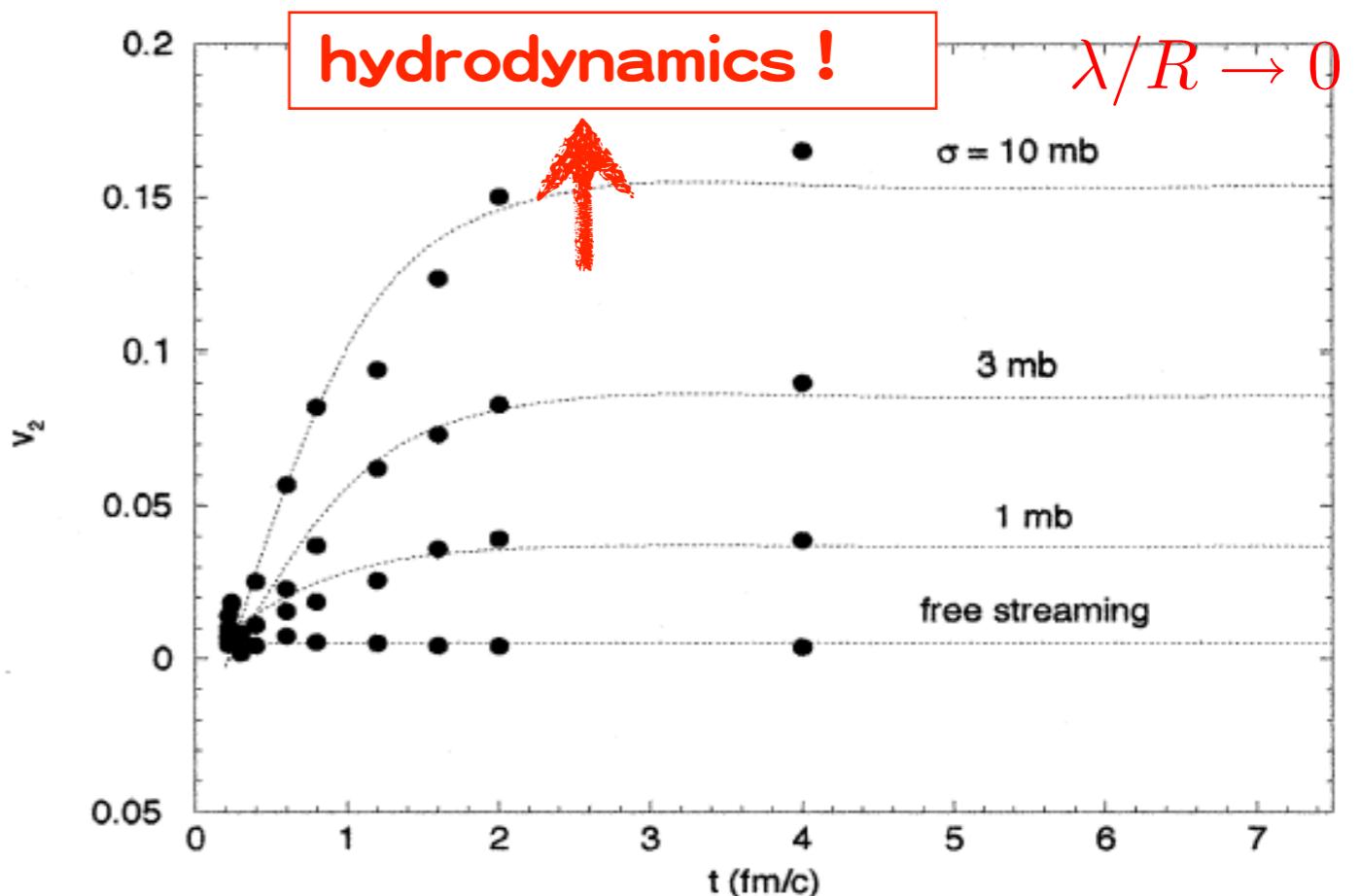
✓  $dE/dx$  測定 → 物性や Jet Tomography

- QGPの物性研究にジェット（高エネルギーパートン）は大変有効なプローブ

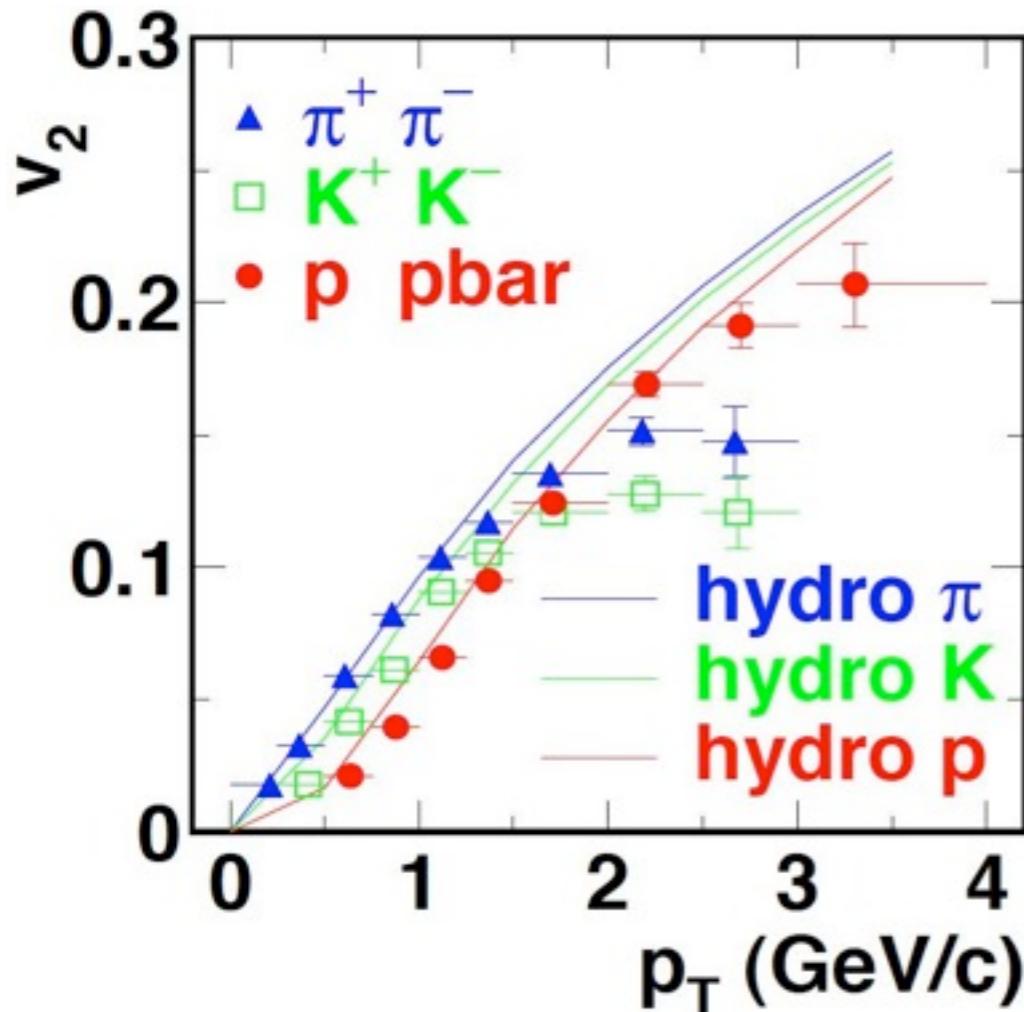
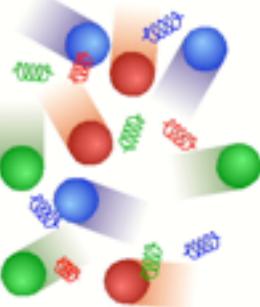
## (2) 方位角異方性



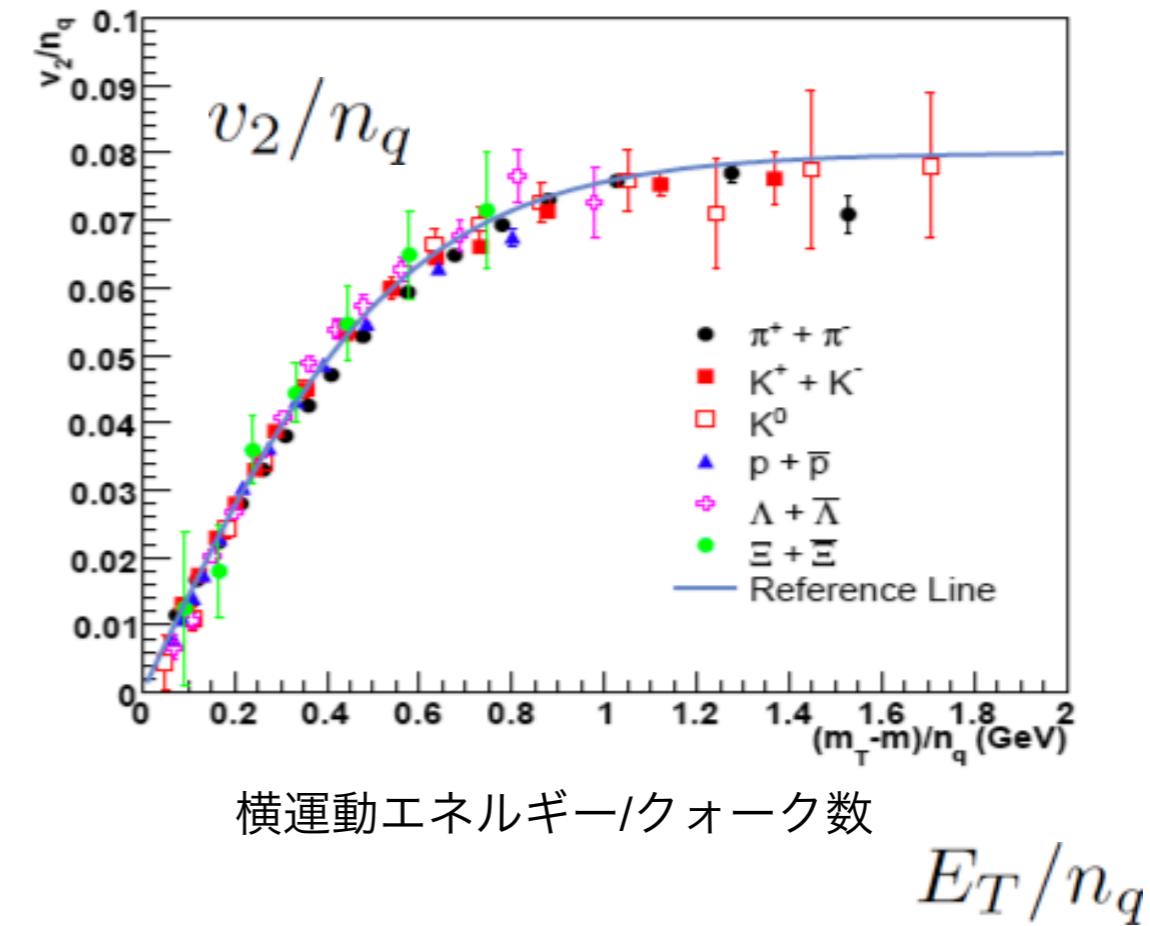
$\lambda/R \rightarrow 0$  と共に変換効率が高く流体力学に近づく



# 大きな方位角異方性 $v_2$



PHENIX PRL 98(2007)162301  
Au+Au 200 GeV



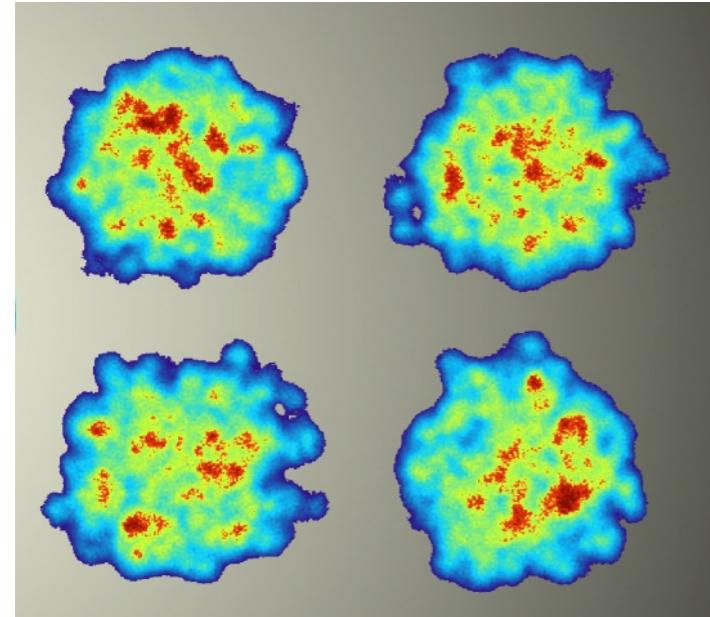
✓ 大きな橢円的方位角異方性 ( $v_2$ ) の観測

- 極めて早い thermalization  $\sim 0.6$  fm/c
- 完全流体! → 強結合 QGP の発見

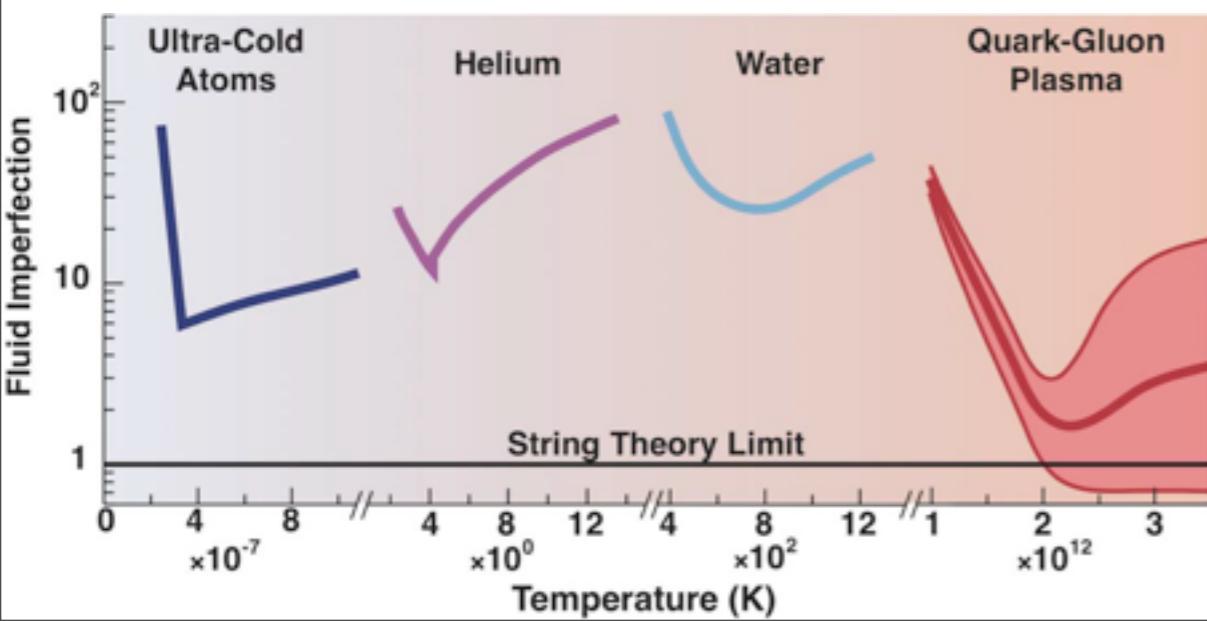
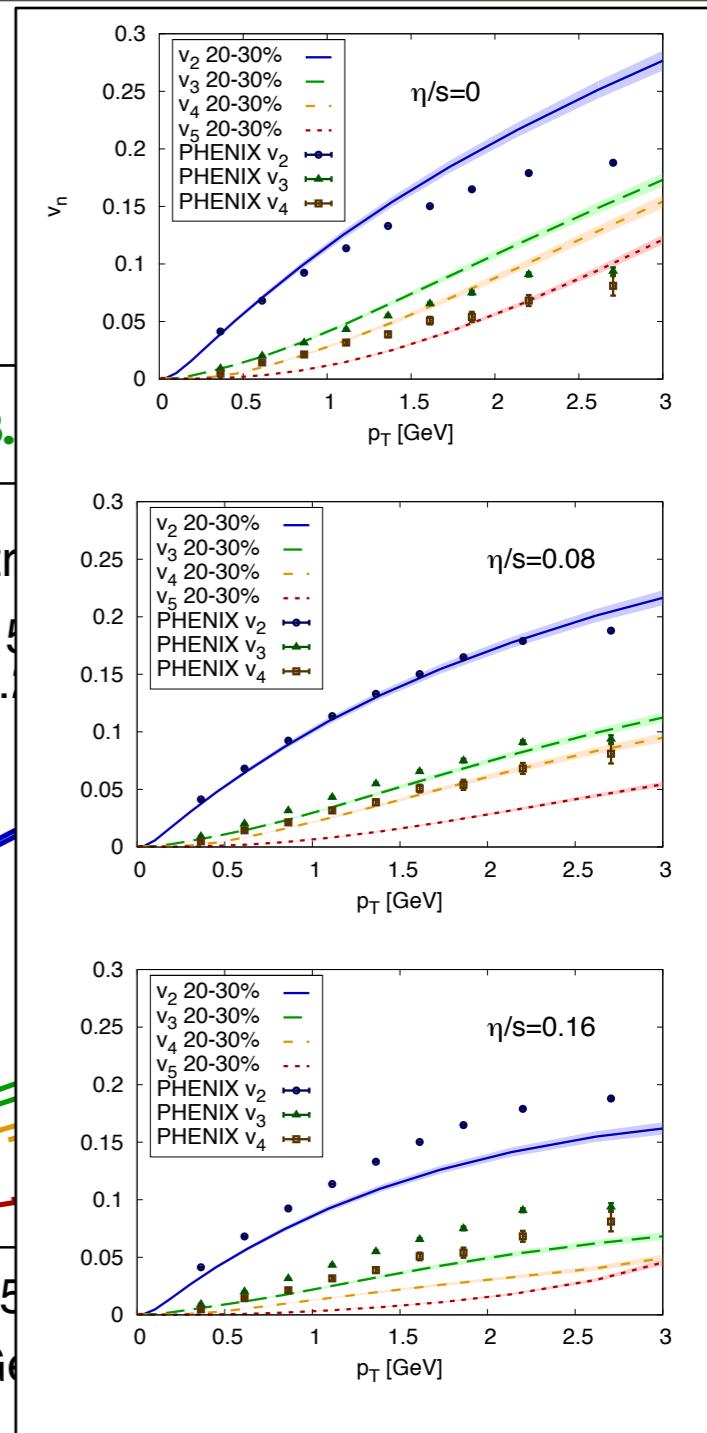
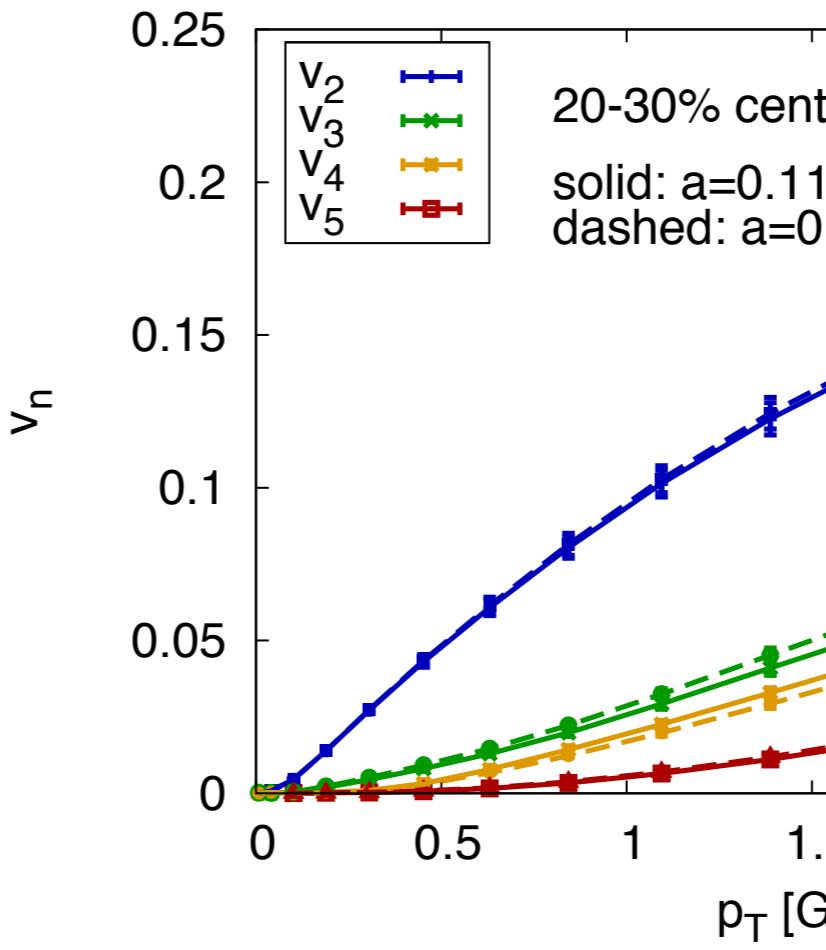
✓ クオーケン数 ( $nq$ ) スケーリング

- → universalな分布、パートンレベルで異方性が決定

# 高次の方位角異方性



## 重イオン衝突の揺らぎ →Higher Harmonics

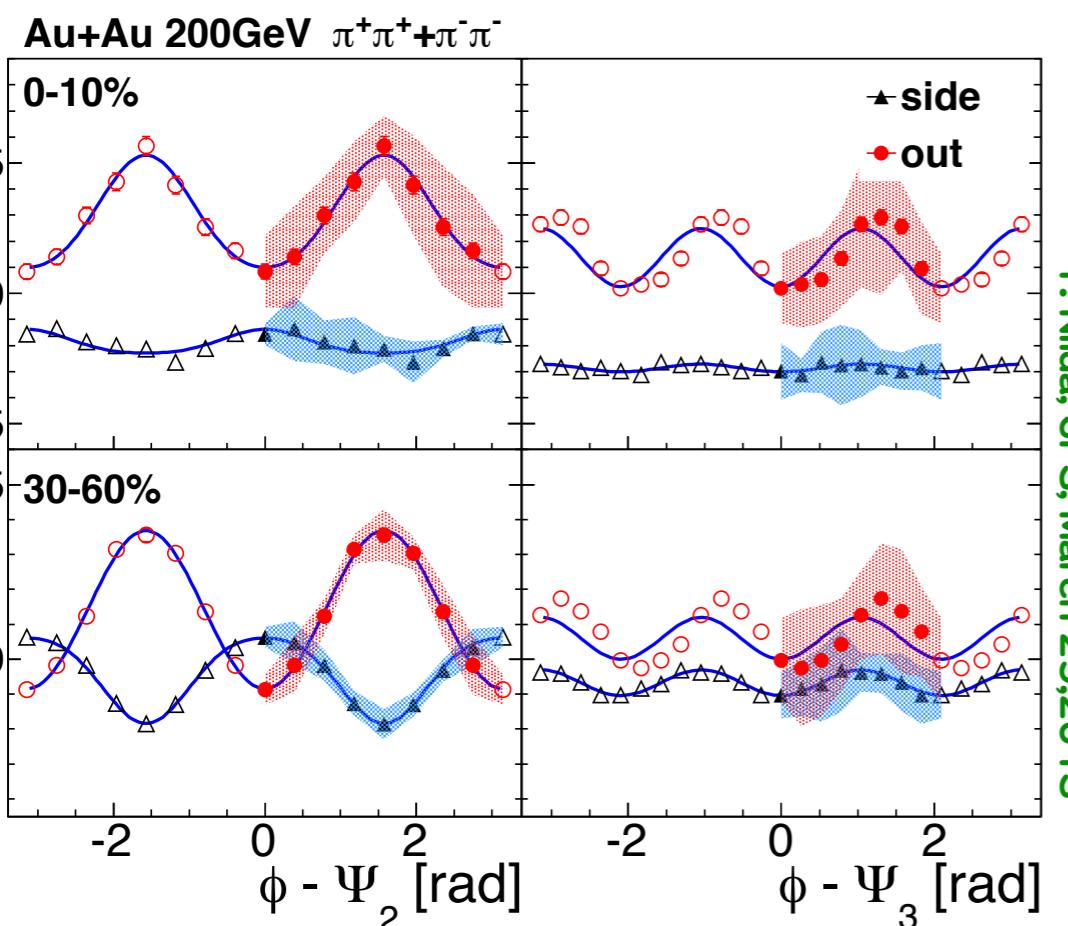
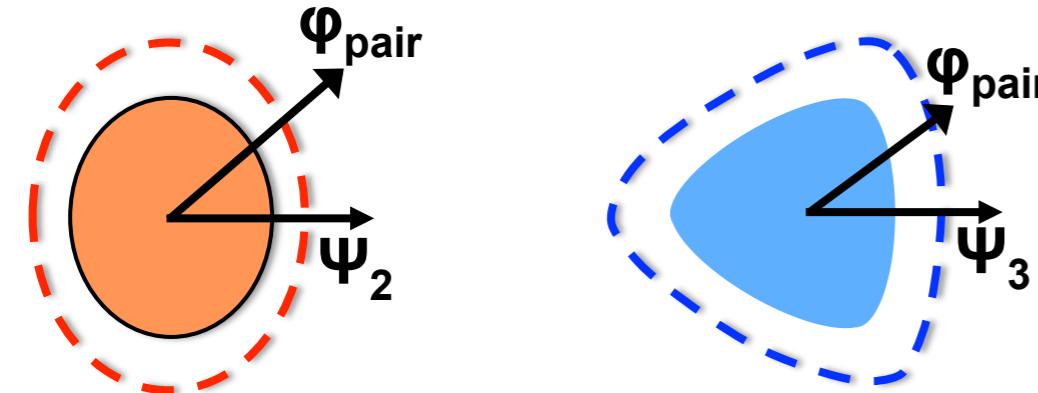


- ✓ RHICにおける方位角異方性  
→ 比ずれ粘性 ( $\eta/s$ ) ~ 0.1 (最小 !!)
  - → ストリング理論における量子リミット ( $1/4\pi$ )!
- ✓ 高次異方性の測定により重イオン衝突の初期条件に制限がかけられるようになってきた (e.g. カラーグラス凝縮 (CGC) など) .

# Sophisticated HBT Analysis

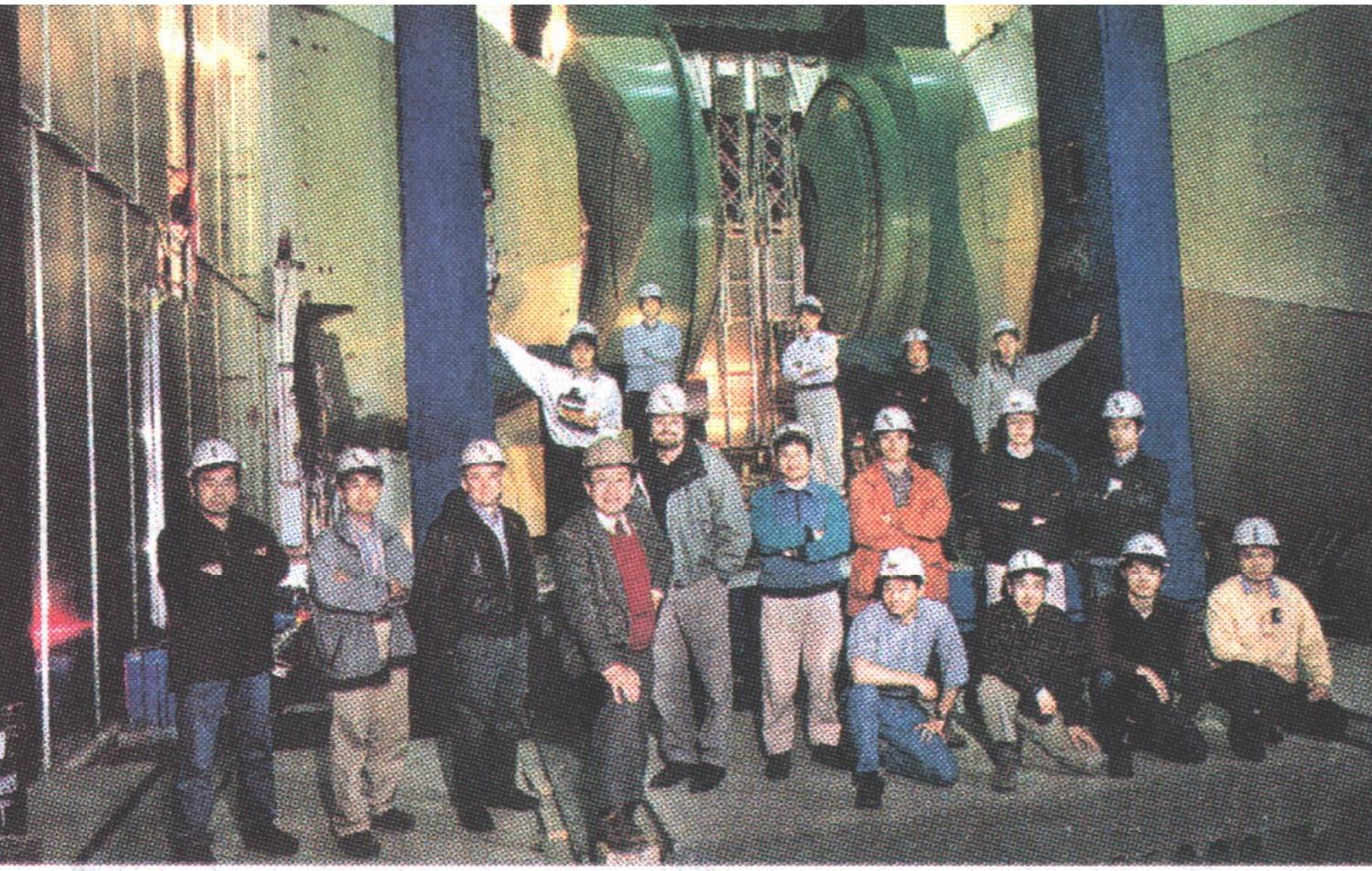


新井田貴文氏



$R_{\text{out}}$  ; Flow により小さく

- ✓ 衝突度を各事象で決定  
→ Centrality 依存性
- ✓ 横運動量依存性  
→  $k_t$  依存性
- ✓ HBT の運動量 3D 解析  
→  $R_{\text{side}}$ 、 $R_{\text{out}}$  を測定
- ✓  $\psi_2$  (反応平面) 、  $\psi_3$  を各事象で決定  
→  $(\phi - \psi_n)$  依存性
- 時空発展の様子  
→  $R_{\text{side}}$  は幾何学的形状を主に反映  
→  $R_{\text{out}}$  は outward flow と life time

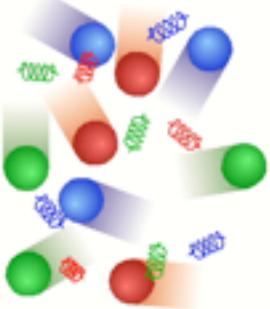


# QGP生成の 主な証拠と 主要論文 (RHIC-PHENIX)

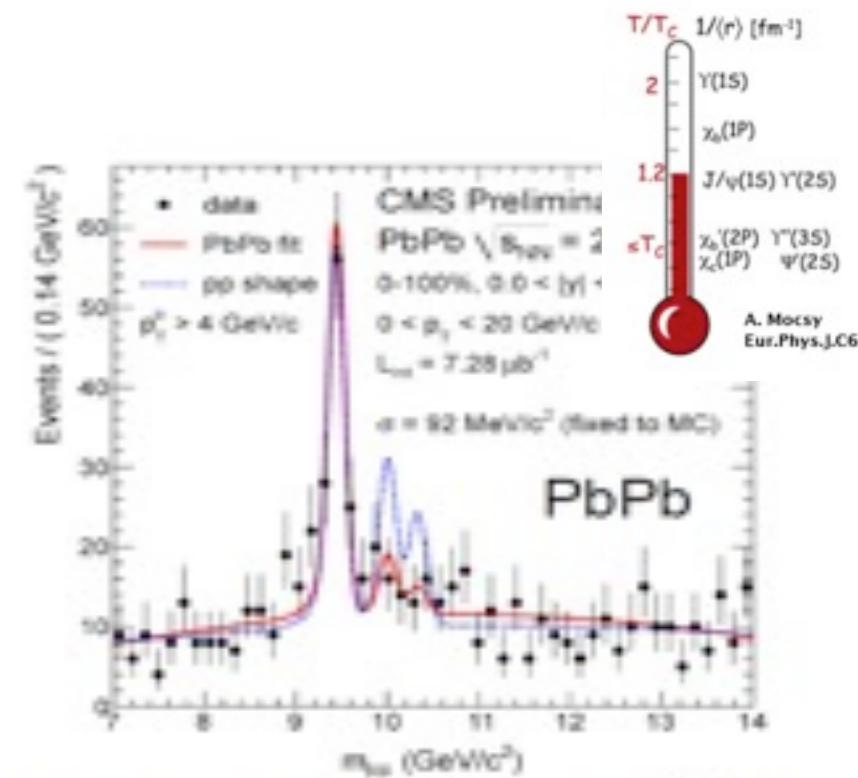
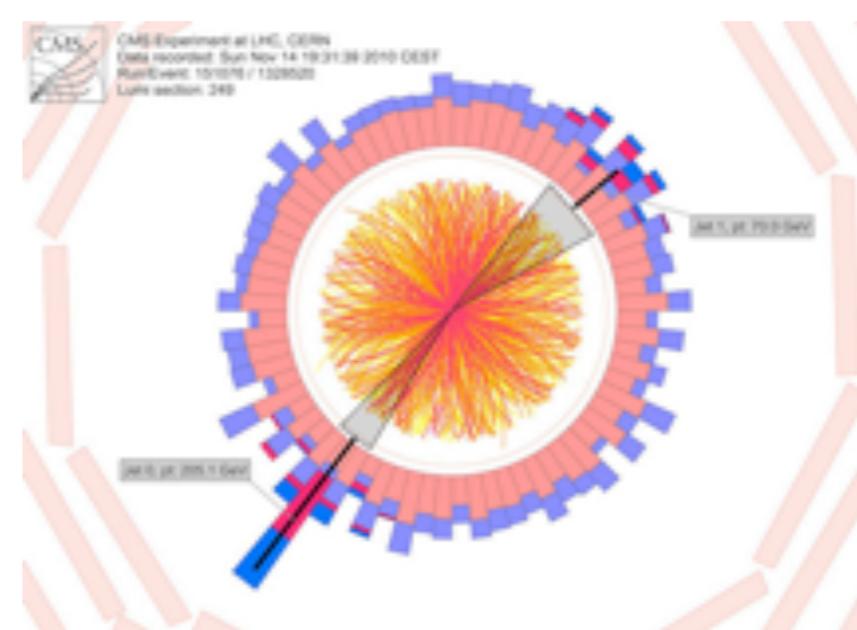
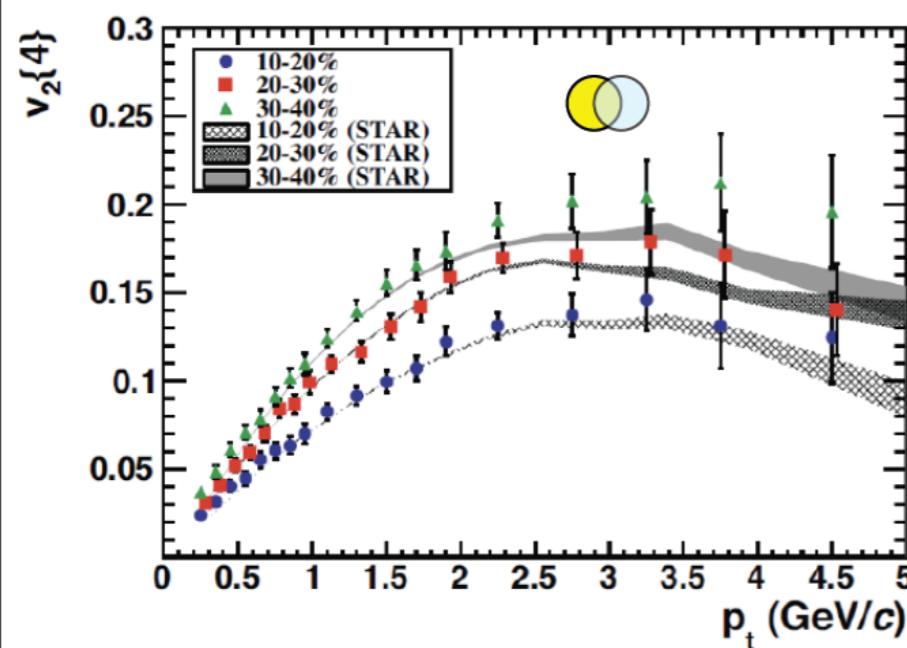
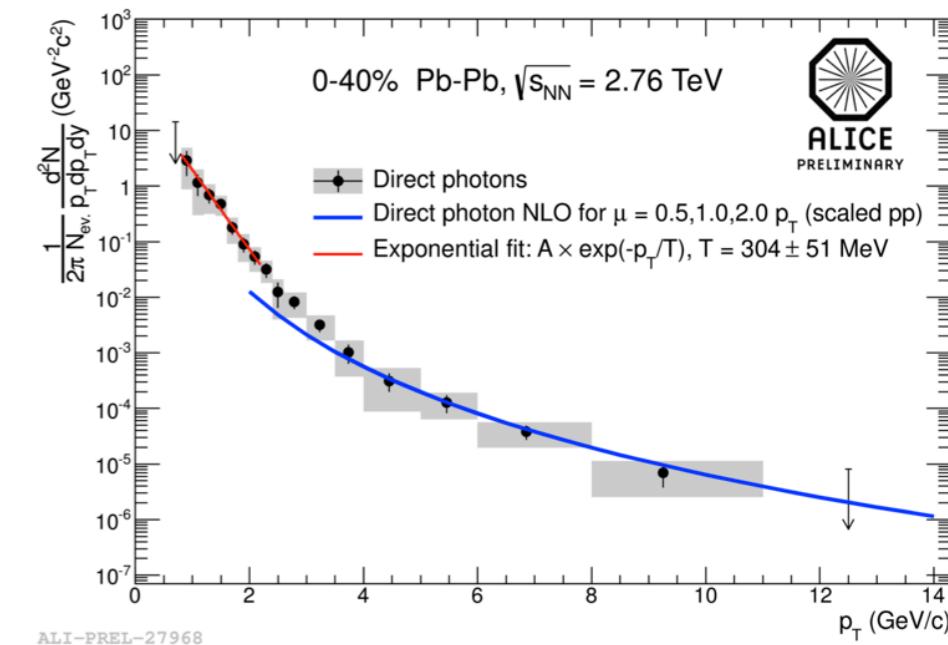
- ★ **PHENIX 実験レビュー論文 (Nucl. Phys. A757, 184-283, (2003)): 引用数 1478.**
- 熱光子の観測 (秋葉, PRL 104 (2010) 132301, 引用数 188) ←超高温物質
- $J/\psi$  抑制 (郡司, PRL 98 (2007) 232301, 引用数 348) ←カラー遮蔽
- 高横運動量ハドロン抑制 (大山, PRL 88 (2002) 022301, 引用数 690) ←ジェット抑制
- 大きな方位角異方性、クォーク数スケーリング (江角, PRL 91 (2003) 182301, 引用数 491) ←強結合QGP、クォーク再結合
- バリオン生成異常 (中條, PRC 69 (2004) 034909, 引用数 552) ←クォーク再結合
- 重クォーク抑制と方位角異方性 (坂井, PRL 98 (2007) 172301, 引用数 418) ←熱平衡

\* 引用数は SPIRES における2013.2.7 現在のもの。名前は日本人で論文作成に主に関わったもの

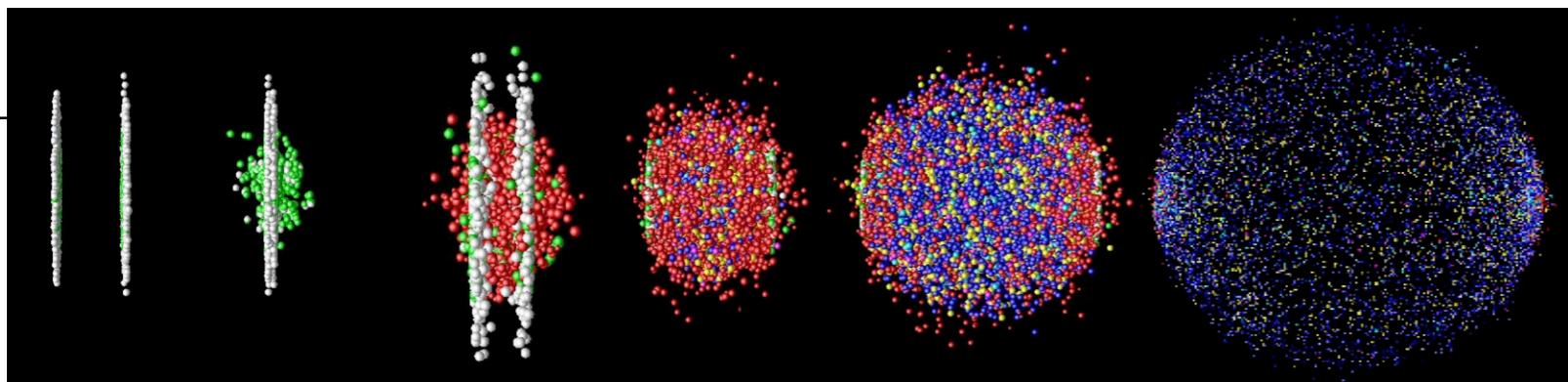
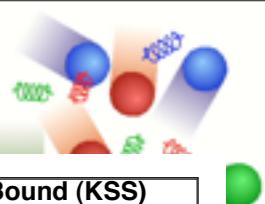
# LHC加速器による重イオン衝突 (2010-) と初期成果



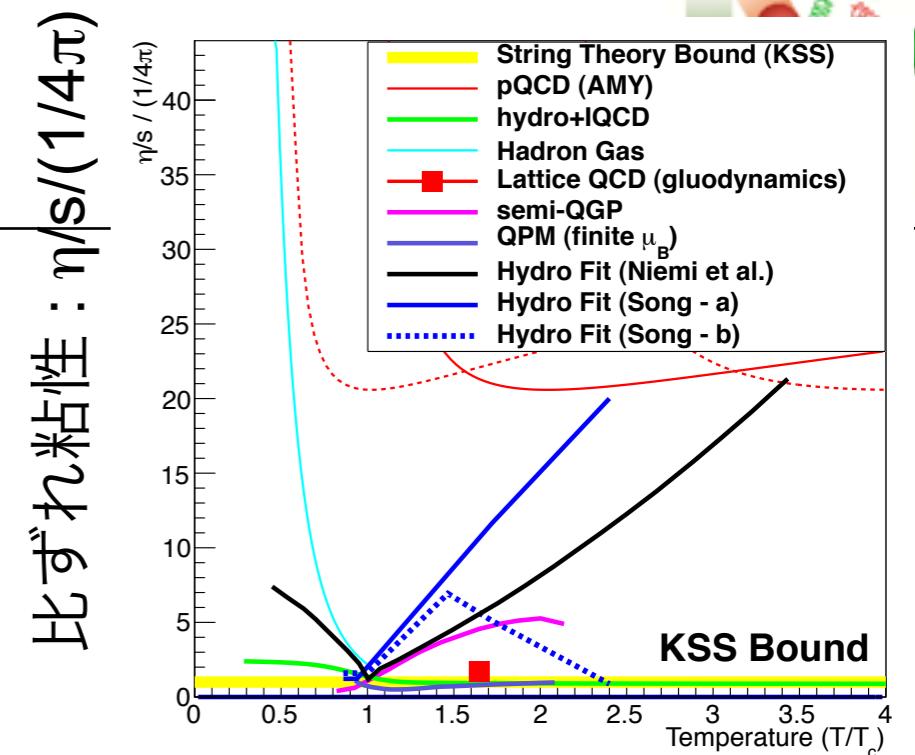
- ✓ 初期温度、RHIC の 1.4 倍を達成。
- ✓ 大きな集団膨張、方位角異方性を確認
- ✓ 大きなジェット抑制の観測
- ✓ 励起  $\Upsilon$  状態の消滅 (高温状態生成の証拠)



# 今後10年間の展開



初期条件→前平衡→パートン散乱→熱化(QGP)→ハドロン生成→膨張



✓ 衝突初期条件の解明 (カラークラス凝縮?)

✓ Thermalizationのメカニズム

✓ QGP物性量(比粘性、輸送係数等)の温度依存性

✓ 相図の構造

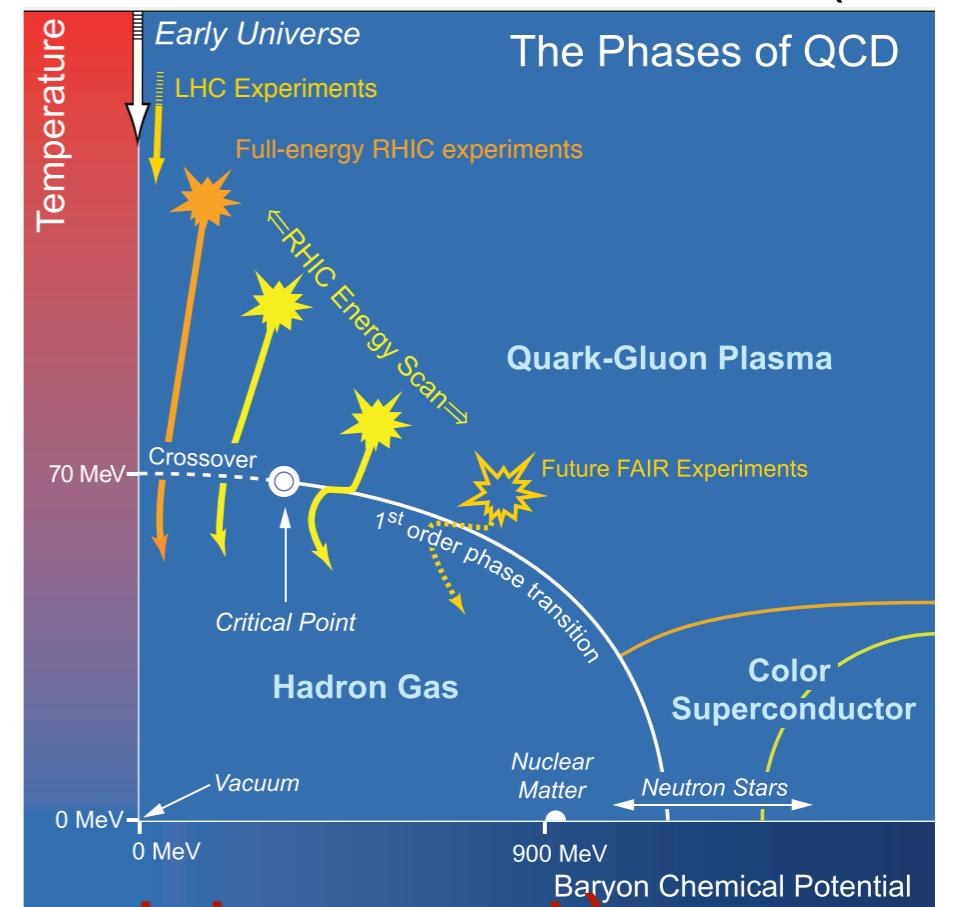
- QCD critical point の探査 (RHIC)



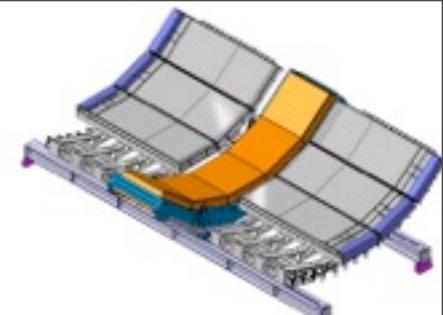
鍵となる測定量：

(1) ジェット (high  $p_T$ )

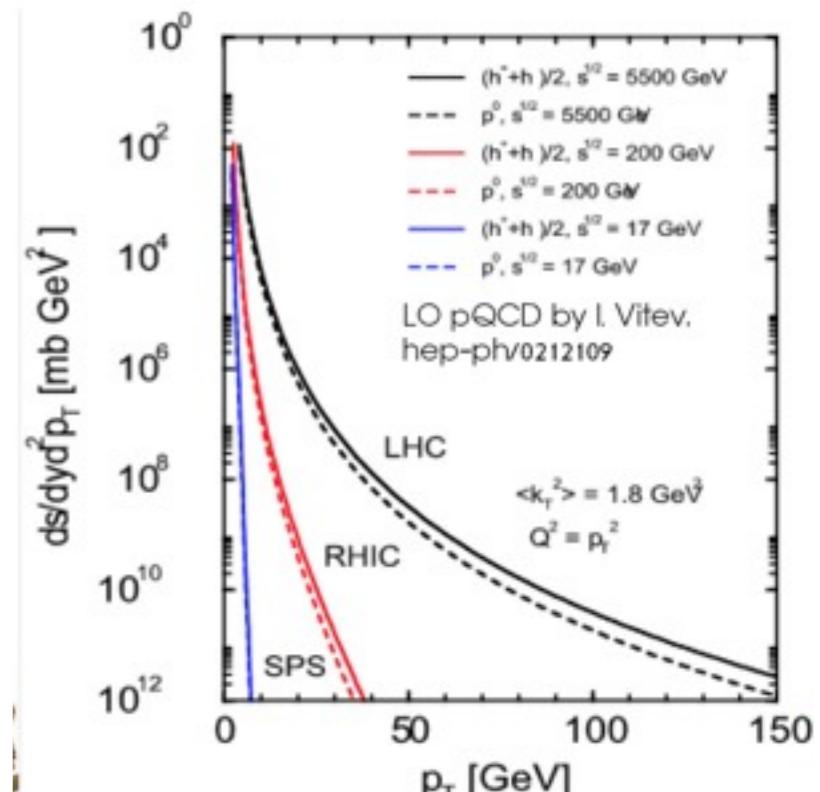
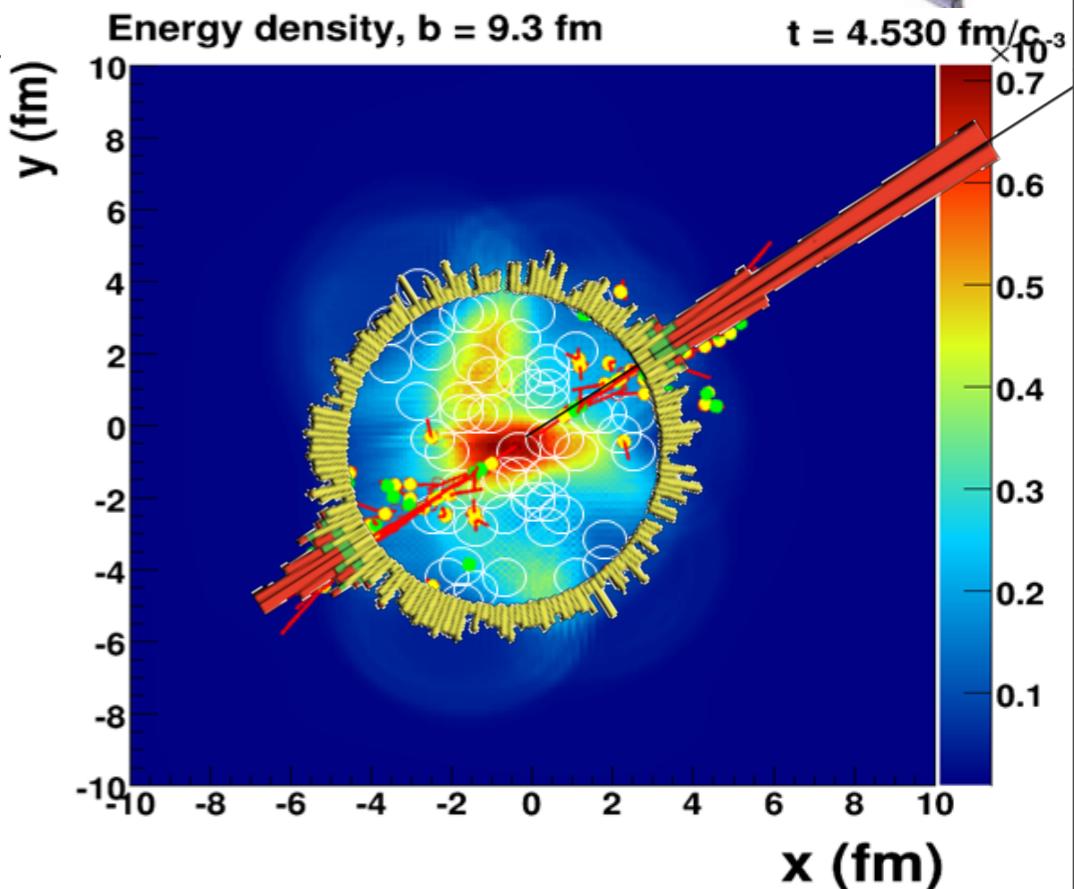
(2) より高次の異方性 (種々のハドロン、フォトン、light quark, heavy quark)



# ジェット測定で分かるQGP物性

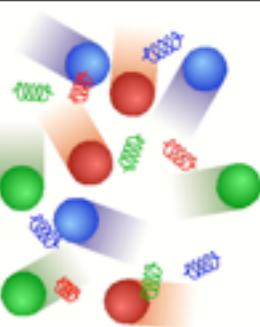


- ✓ LHC エネルギー :
  - RHIC に比べてハードプロセスが支配的
- ✓ ジェットを基軸とした新たな観測量 :
  - ジェット通過によるQGP媒質応答
  - 重クォークジェット、ジェット対、光子-ジェット
  - 失ったエネルギーの再分配、EOS、音速
  - 重いクォークの強結合系QGPとの相互作用 (熱化、相互作用の強さ)
- ✓ → データ読み出し高速化が必要
- ✓ RHIC エネルギー :
  - 既存の装置はジェット測定に特化されてなく、収量や精度の点で、ジェットの直接測定が困難
  - 2 π カロリメータを設置。High  $p_T$  化を図り、RHIC エネルギーでのジェット測定が可能に
  - → ジェットエネルギー損失の温度依存性

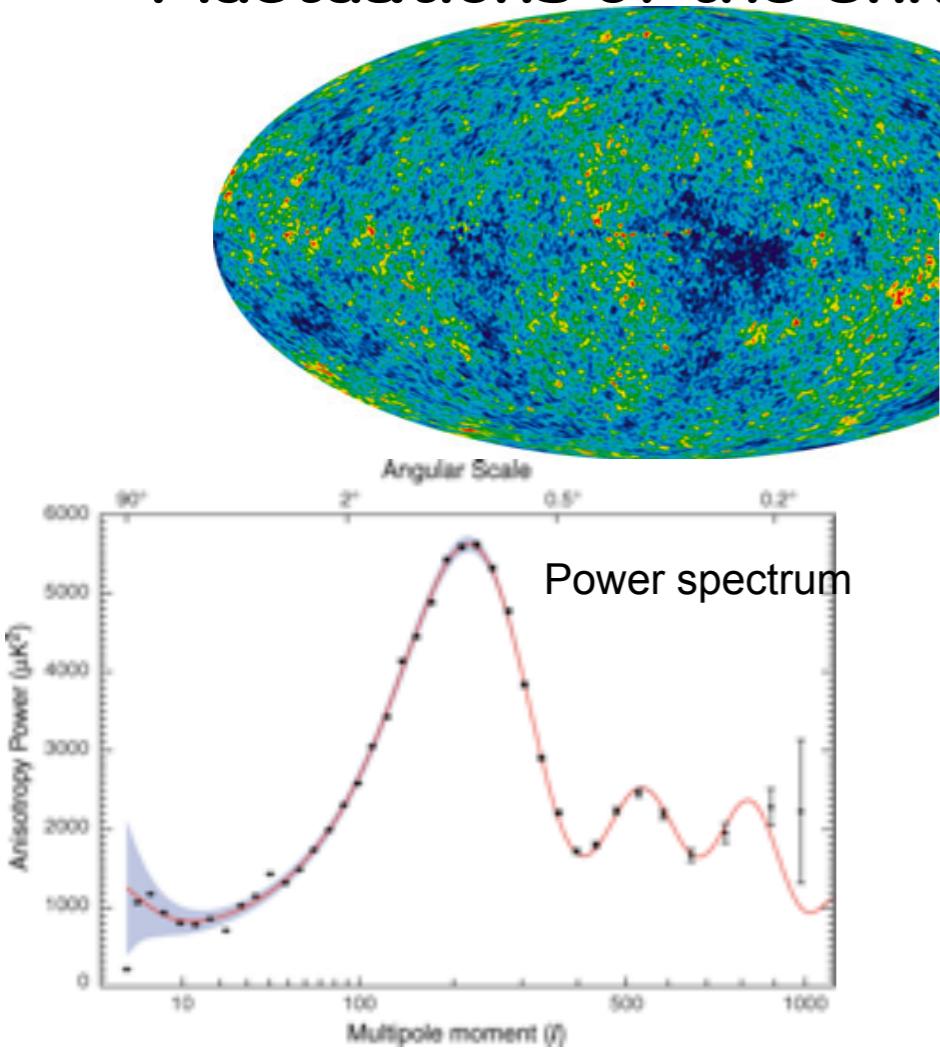


# 高次異方性 (higher harmonics) で分かること

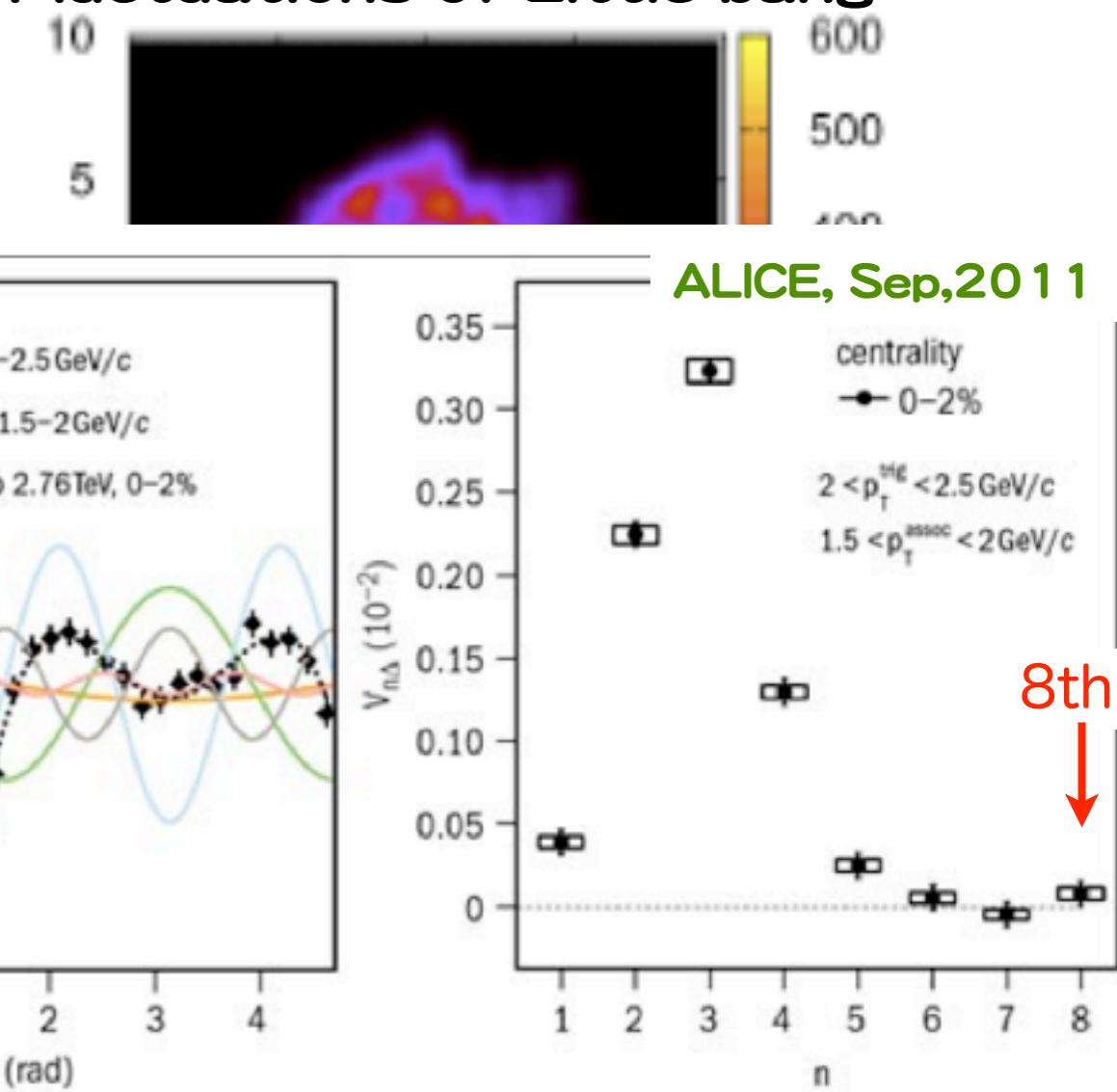
## QGP物性



### Fluctuations of the Universe



### Fluctuations of Little bang



### WMAP

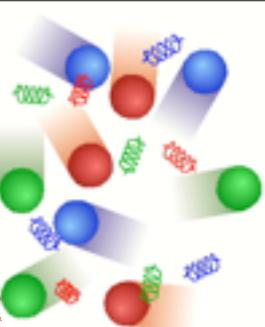
宇宙論パラメータの決定

レアプローブ (種々のハドロン、フォトン、lepton, light quark, heavy quark) の高次異方性測定により、熱化メカニズム、衝突初期条件、QGP物性 (粘性等) がわかる

→ 測定装置の高速化と High- $p_T$  化が鍵

Fig. 1. Left: correlation function for charged hadron pairs from head-on Pb-Pb collisions. Right: corresponding spectrum of Fourier harmonic amplitudes vs  $n$ .

# 今後の計画

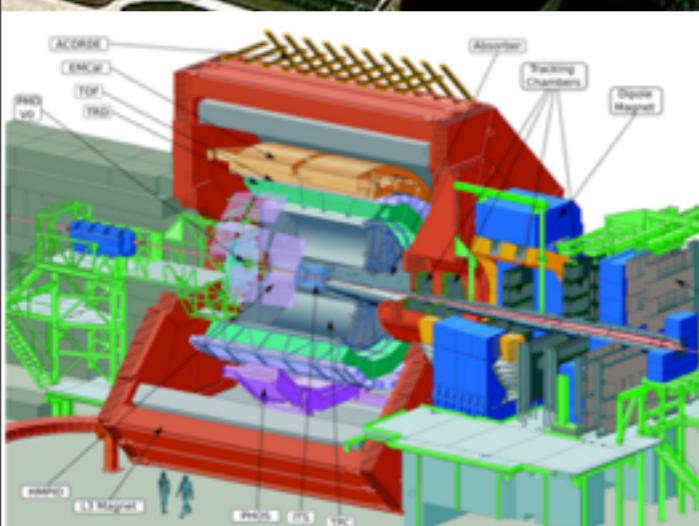
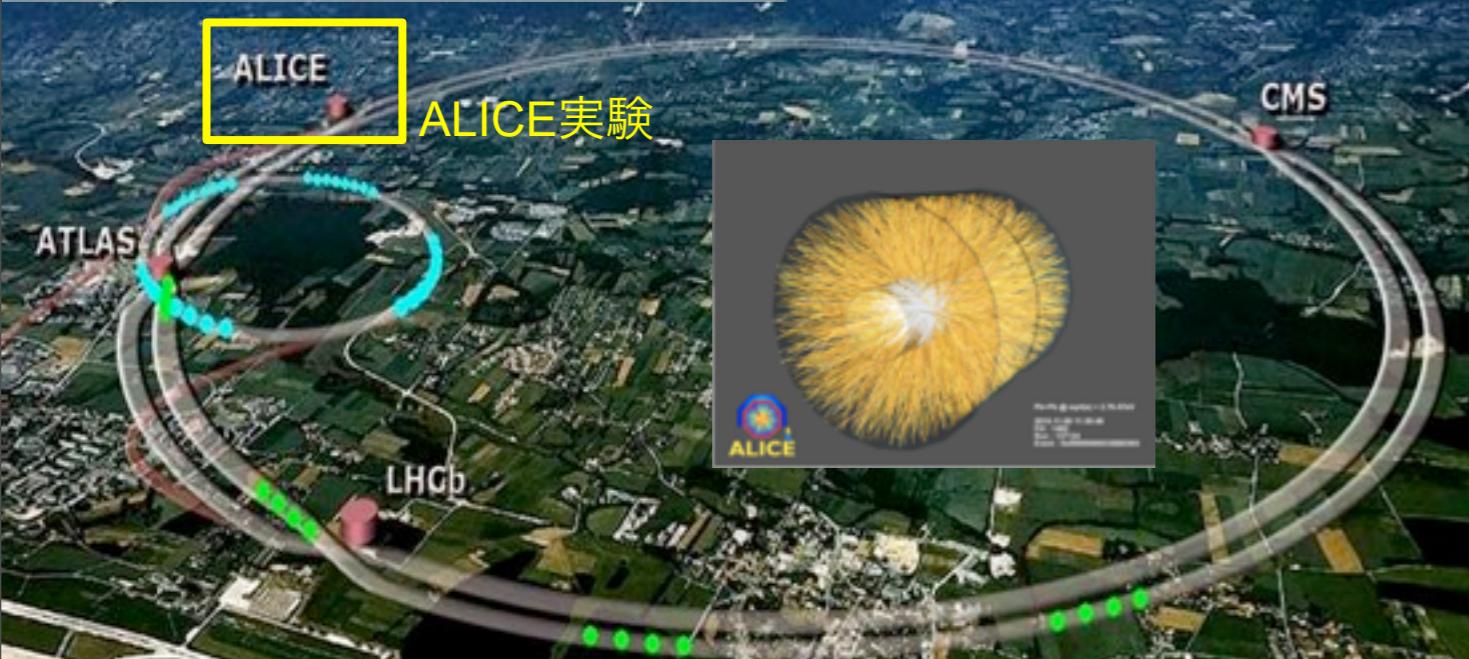


H26-H35. 国内研究拠点（筑波／東大／広島／理研／RCNP） 総額約30億円.  
CERN-ALICE + RHIC-PHENIX実験での新測定器建設・高度化・実験遂行

スイス・欧州共同原子核研究機構 (CERN)

LHC 加速器 (2009-), 周長 27 km

$\sqrt{s_{NN}} = 2.76, 5.5 \text{ TeV Pb-Pb}$

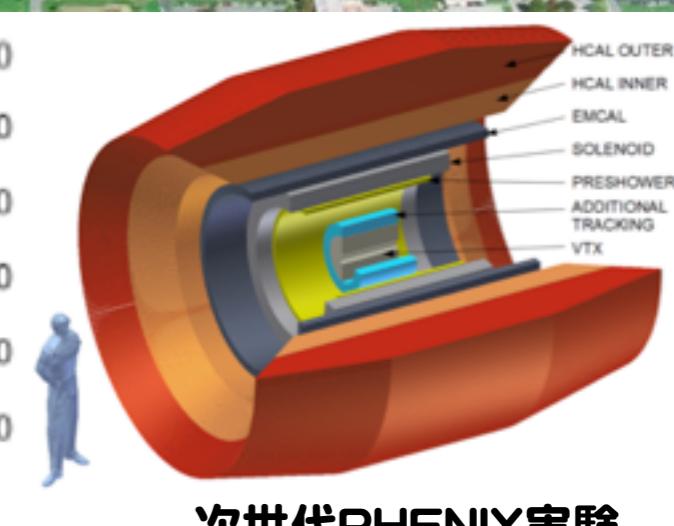
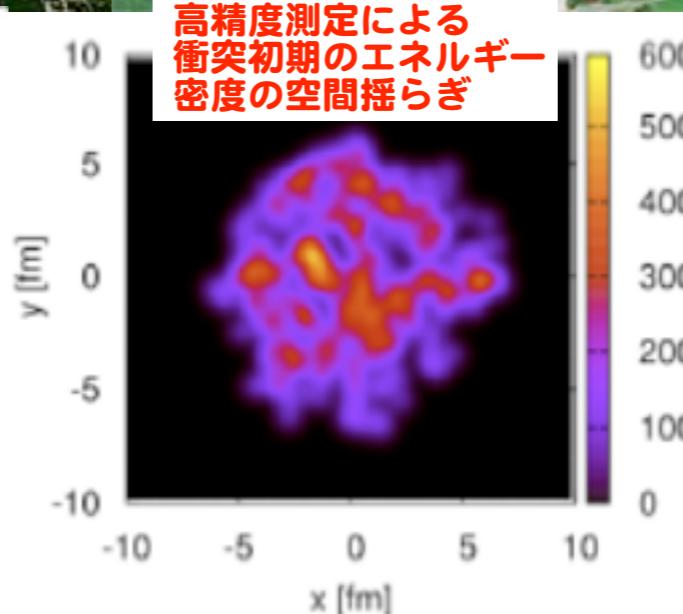
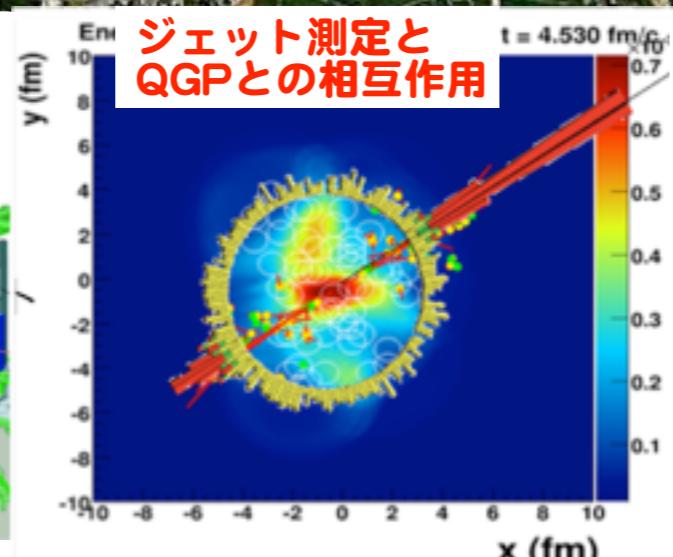
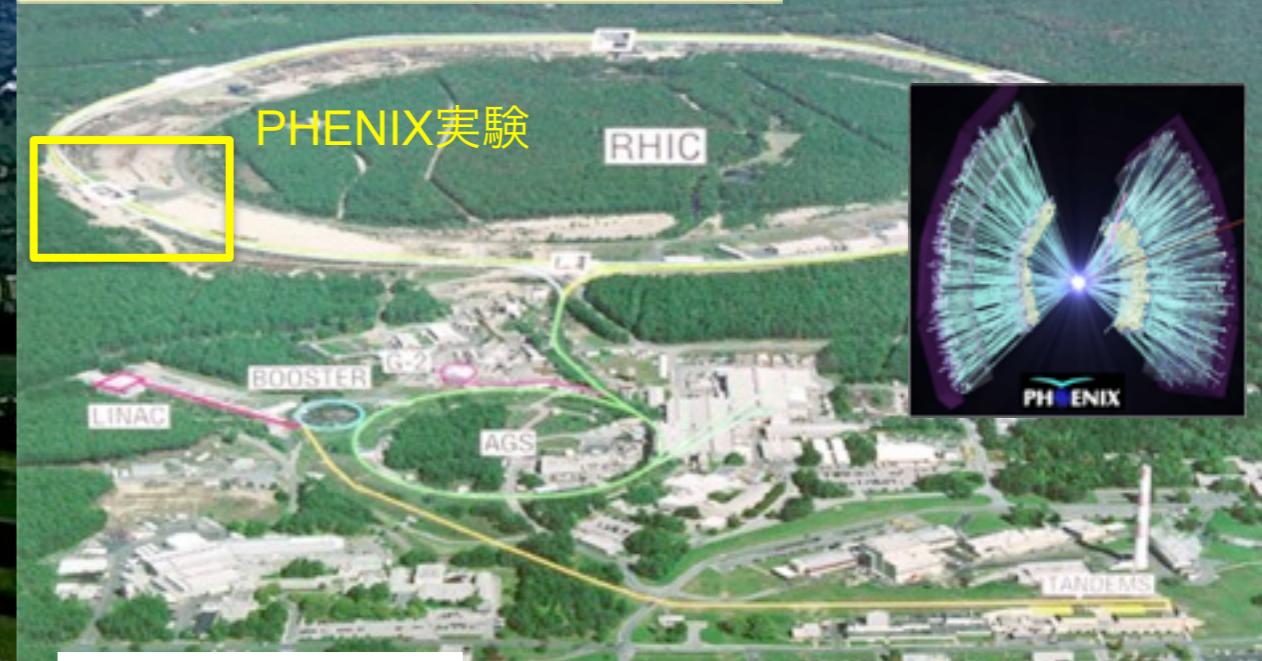


ALICE実験測定器群

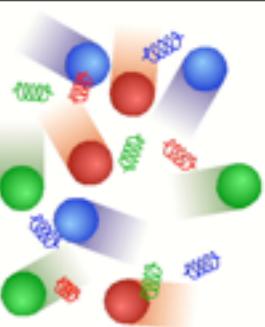
米国・ブルックヘブン国立研究所 (BNL)

RHIC 加速器 (2000-), 周長 3.8 km

$\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV Au+Au}$



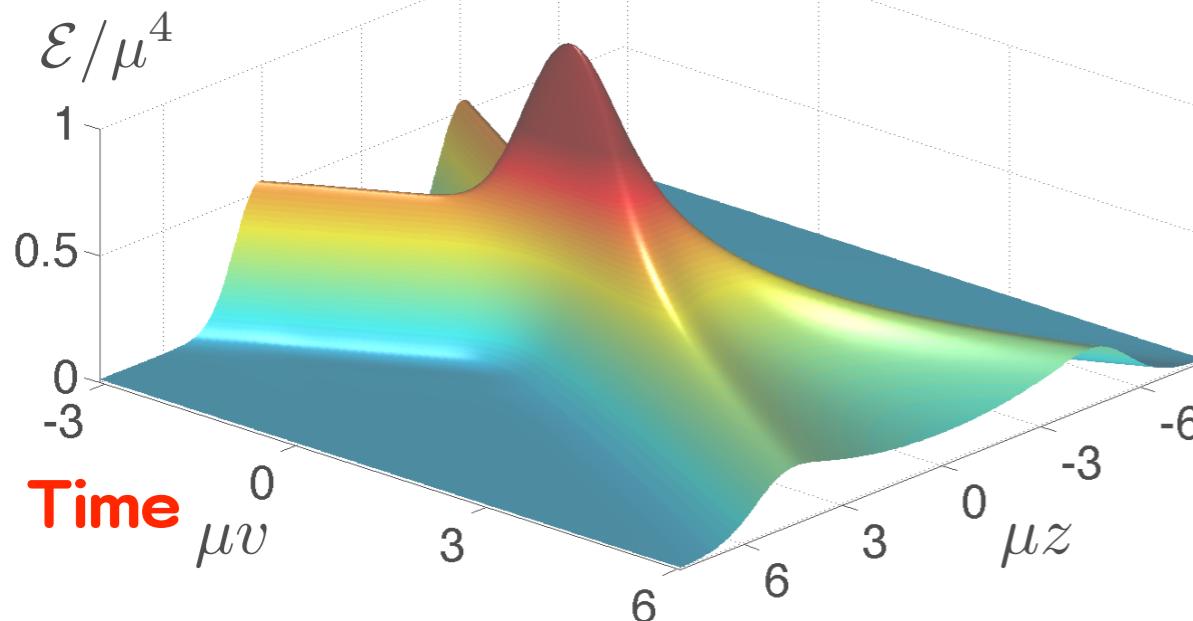
次世代PHENIX実験  
測定器群



# まとめ

Energy density

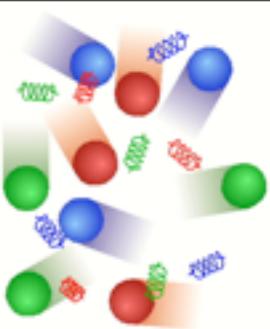
“Holography and colliding gravitational shock waves in asymptotically AdS<sub>5</sub>”  
PRL 106, 021601 (2011)



QGP生成に刺激され、  
ストリング理論の若い  
理論家が多く参入

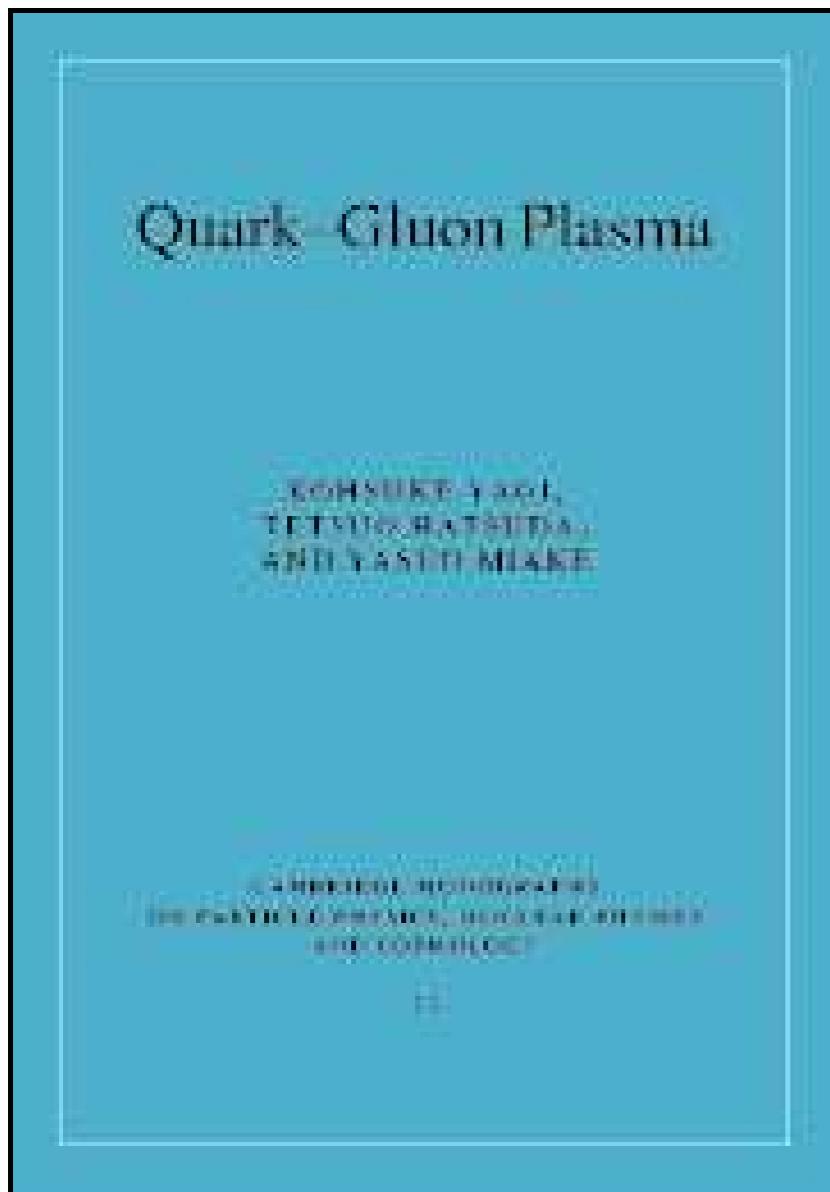
- ✓ 高エネルギー重イオン衝突による高温高密度QCD物質の研究は、原子核物理分野における最も重要な研究課題の一つ。
- ✓ この10年で高温高密度QCD物質の研究が大きく進展した。
  - QGP相生成の確認
  - クオーケルレベルの統計力学、流体力学
- ✓ 今後10年、LHC-ALICE実験、及びRHIC-PHENIX実験の両加速器及び測定器両面において大きな改良時期を迎える、さらなる研究進展が期待。

# 大学院生向けのQGPの教科書！



CAMBRIDGE | Catalogue

[Home](#) > [Catalogue](#) > [Quark-Gluon Plasma](#)



## Quark-Gluon Plasma

Series: [Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology](#)

Kohsuke Yagi

*Urawa University, Japan*

Tetsuo Hatsuda

*University of Tokyo*

Yasuo Miake

*University of Tsukuba, Japan*

Amazonで買えます  
(もちろん中国語版も)

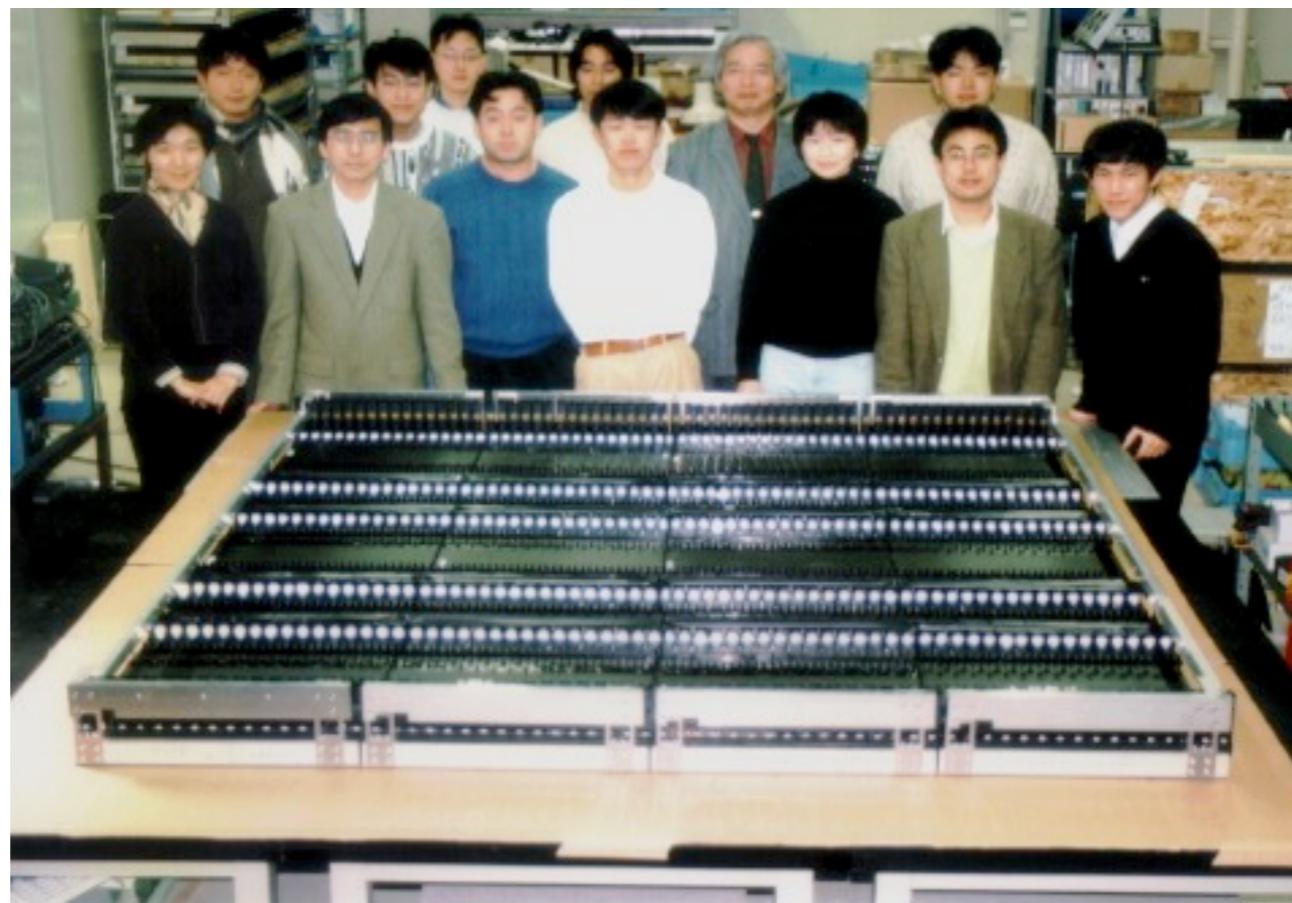
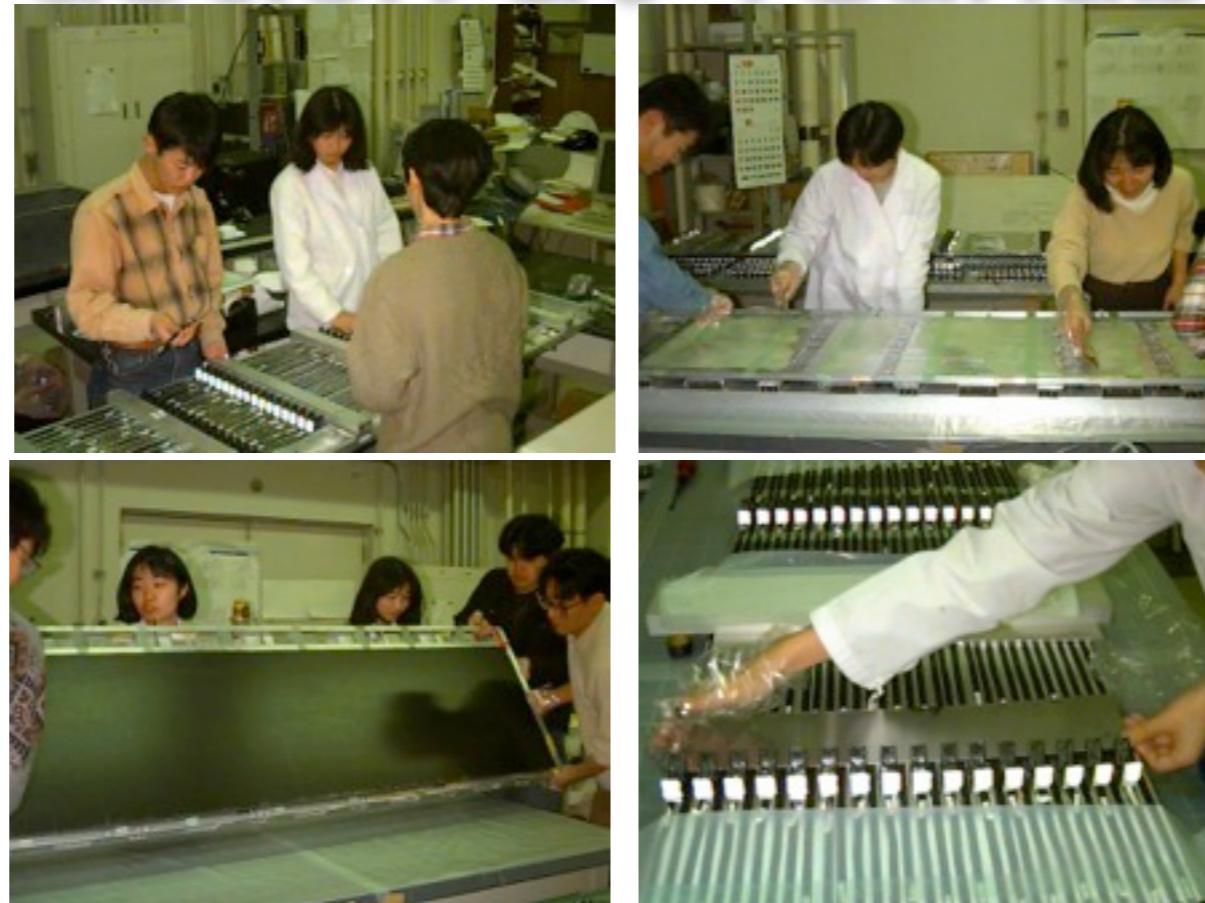
**Hardback** (ISBN-10: 0521561086 | ISBN-13: 9780521561088)

For price and ordering options, inspection copy requests, and reading group information, please  
[UK, Europe, Middle East and Africa](#) | [Americas](#) | [Australia and New Zealand](#)

# 大活躍する大学院生

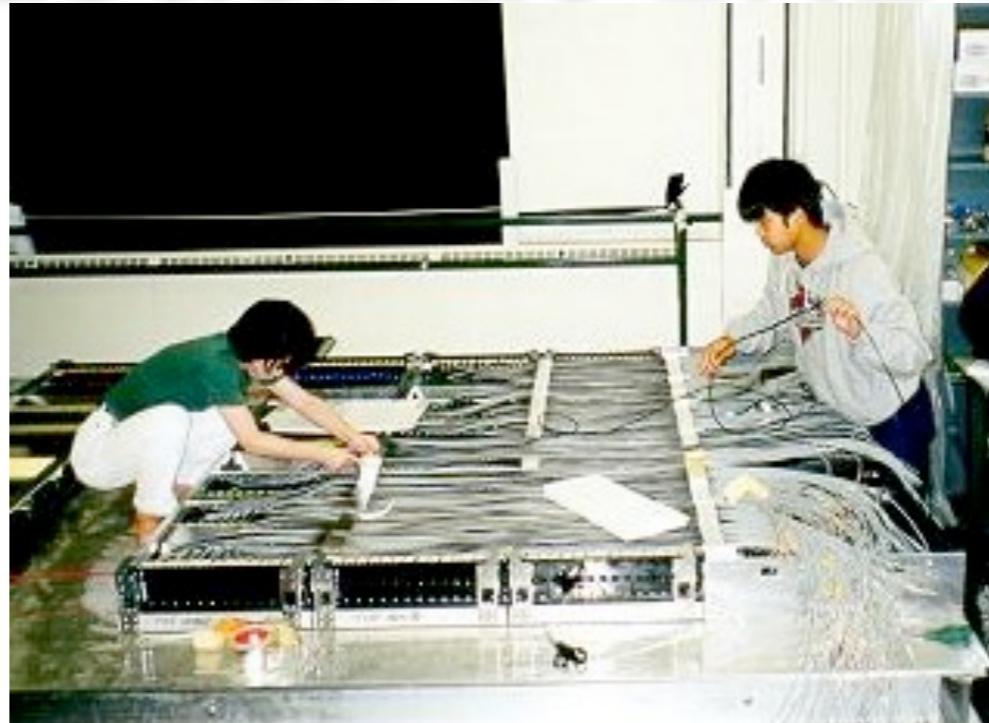
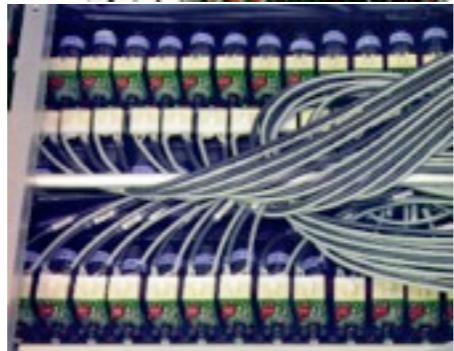


# Construction at Tsukuba (1996-1998)



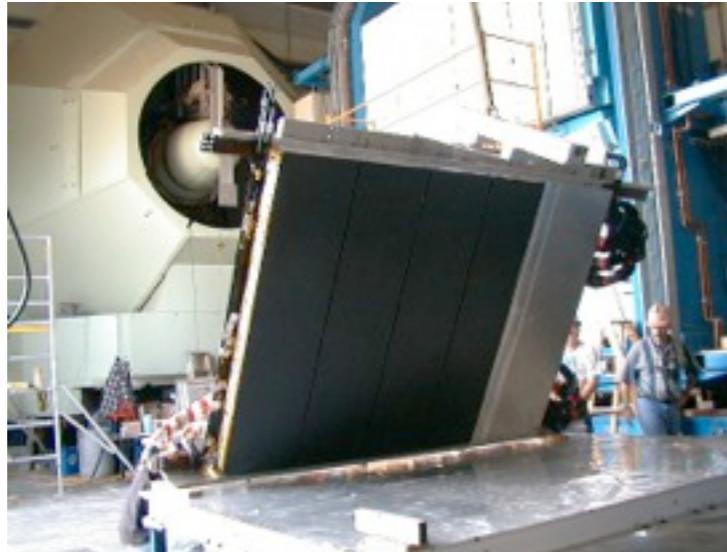
# Construction at BNL

(1998-1999)



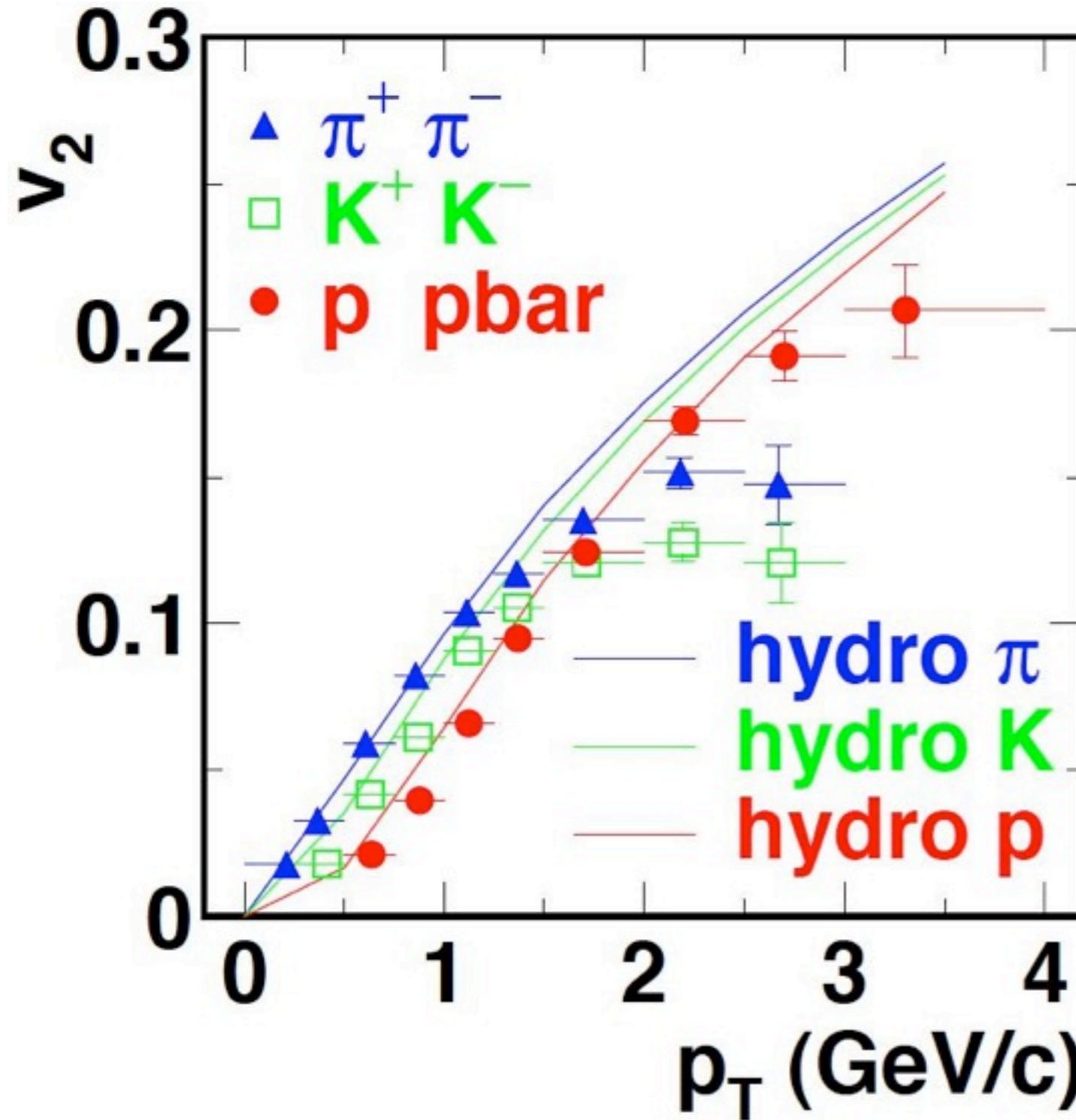
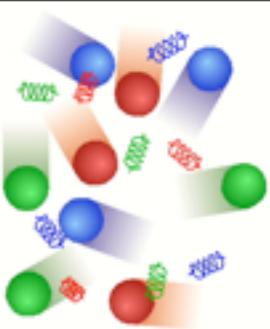
# Installation in PHENIX

(August 1999)



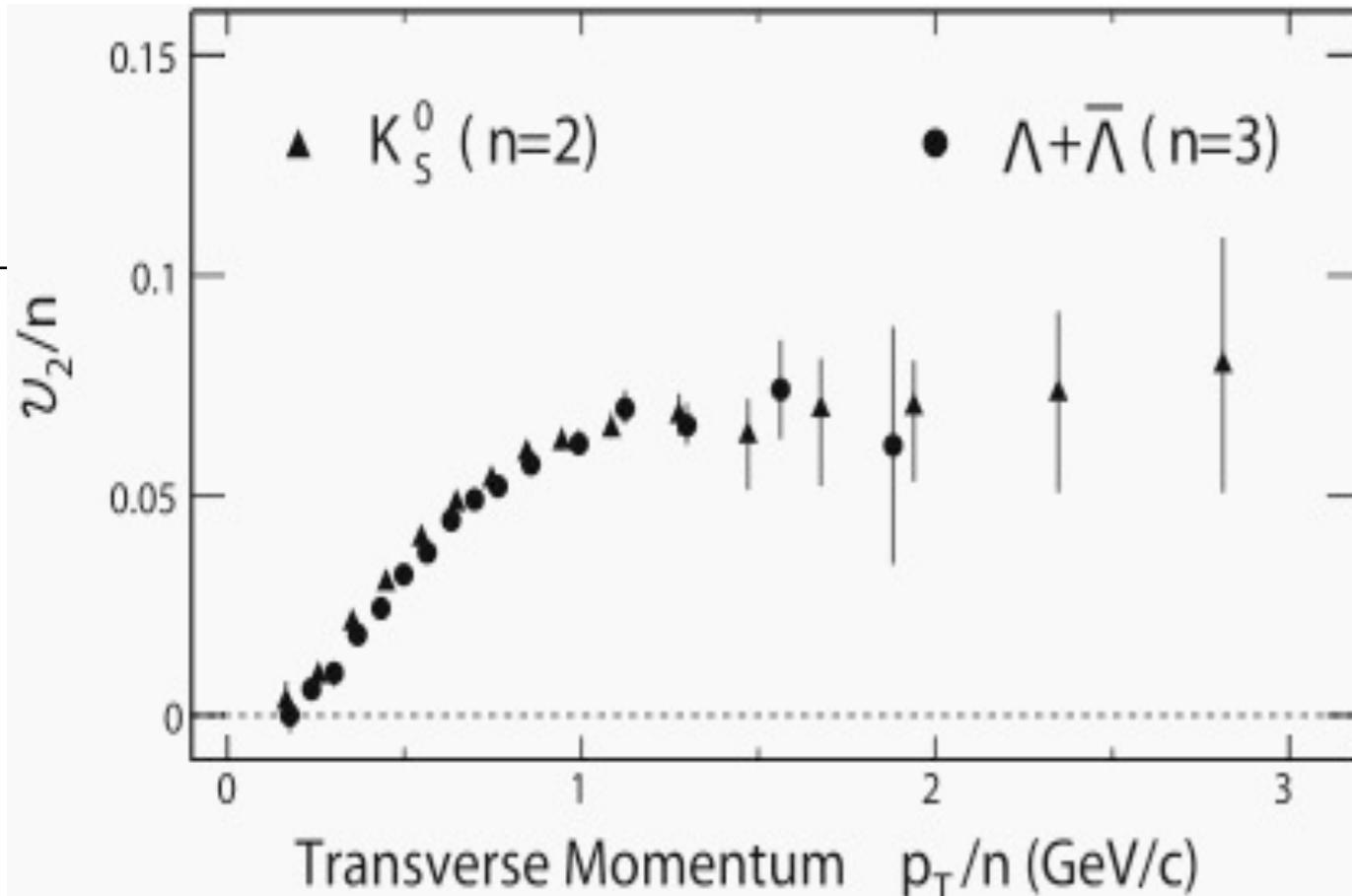


# 大きな方位角異方性

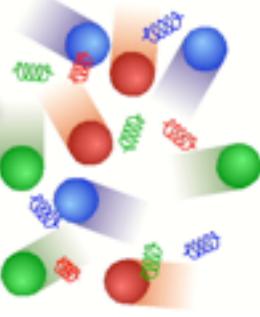


- ✓ 粘性がない完全流体
- 理論模型と良い一致
- 衝突後  $0.6 \text{ fm}/c$  で熱化
- $20 \text{ GeV}/\text{fm}^3$
- ✓ 衝突後  $0.6 \text{ fm}/c$  で熱化出来るメカニズムは?
  - QGP!

## クォーク数(n)スケーリング



# クォークの統計力学的分布



✓ クォーク融合反応の証拠

- Universal quark distribution

中間子の運動量分布(2q);

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

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

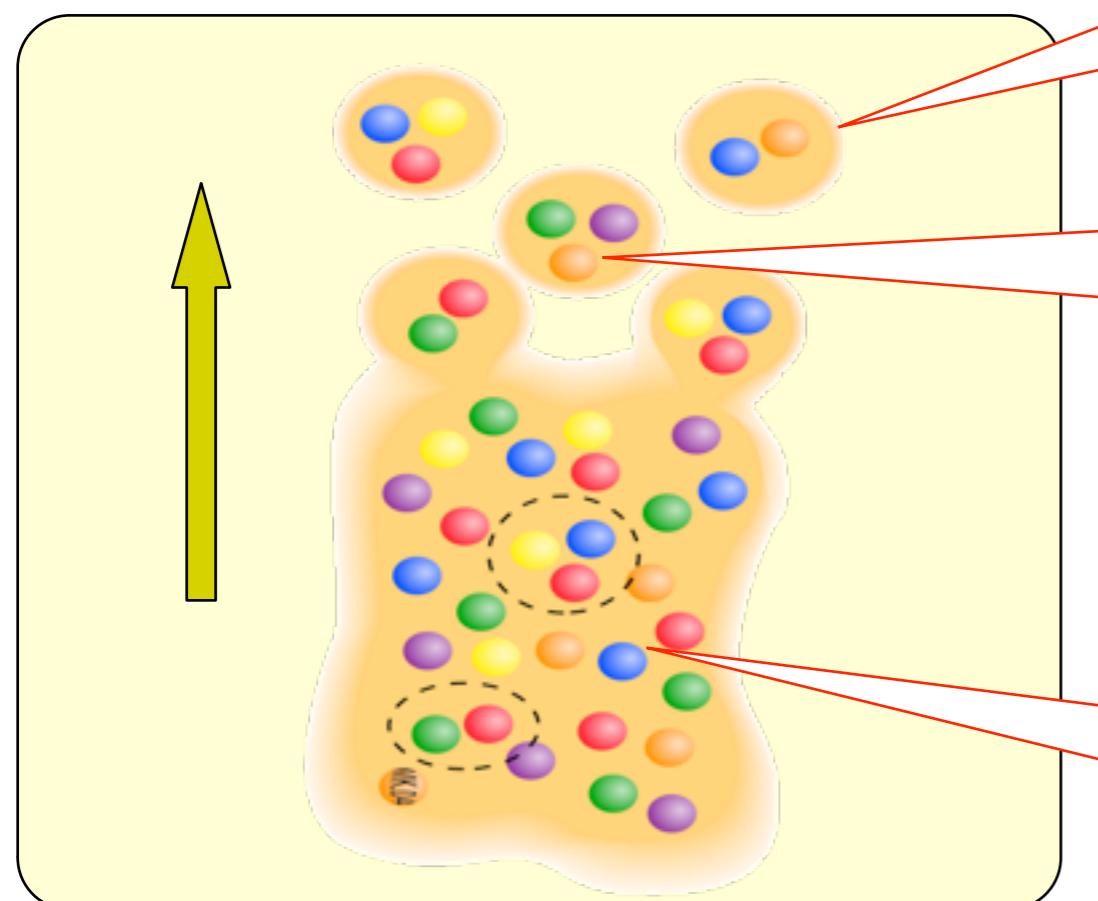
陽子の運動量分布(3q);

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

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

w; クォークの方位角分布

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



# RHIC~LHCの前 (有史以前?)



1974 -	Bevalac
1987 -	AGS
1987 -	SPS
2000 -	RHIC
2009 -	LHC

SPSの頃