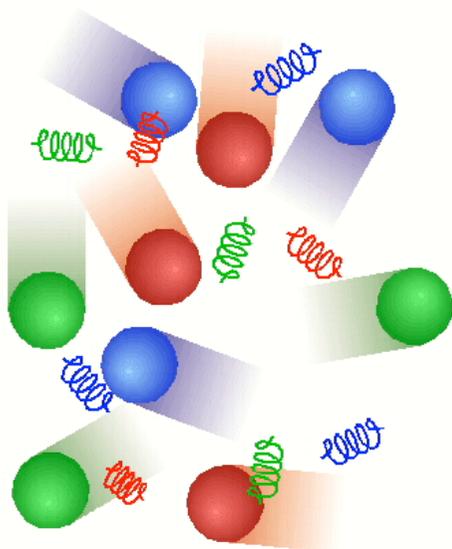
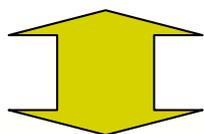


ハドロン
状態

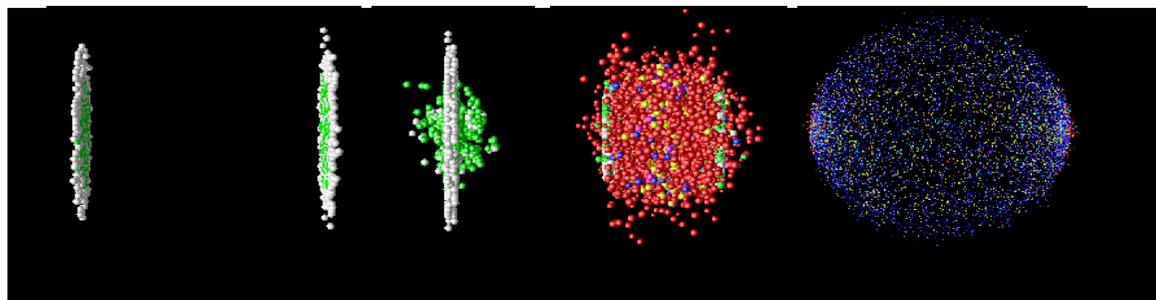
QGPの生成発見から 物性研究へ

～ RHICからLHCへ ～

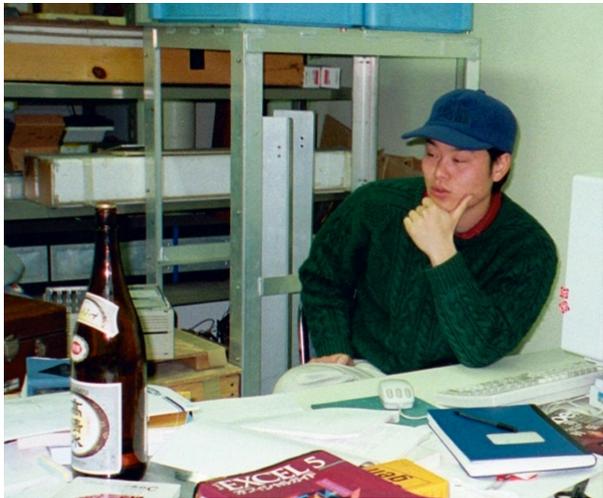
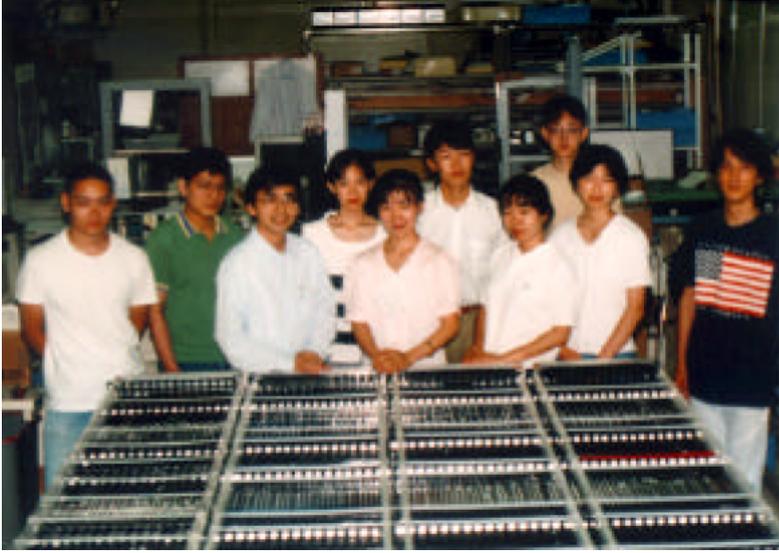


QGP
状態

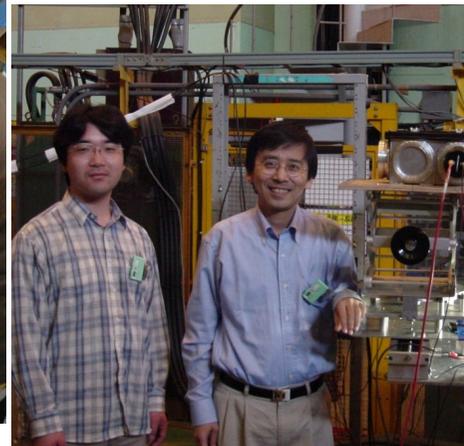
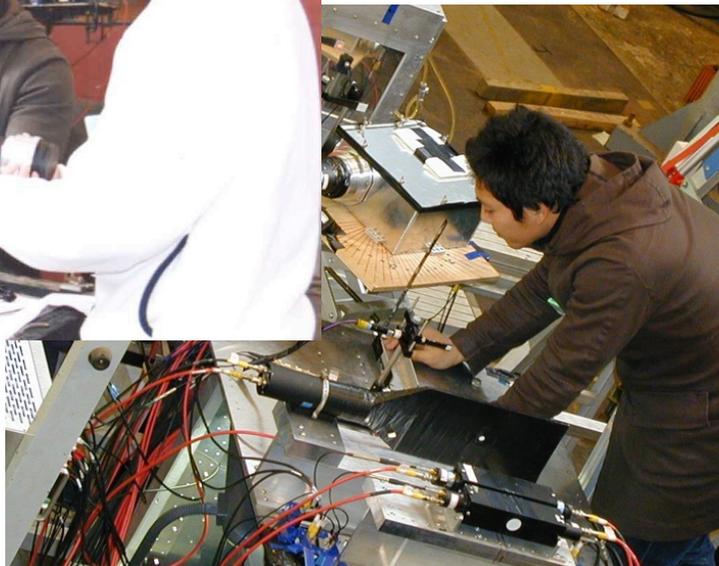
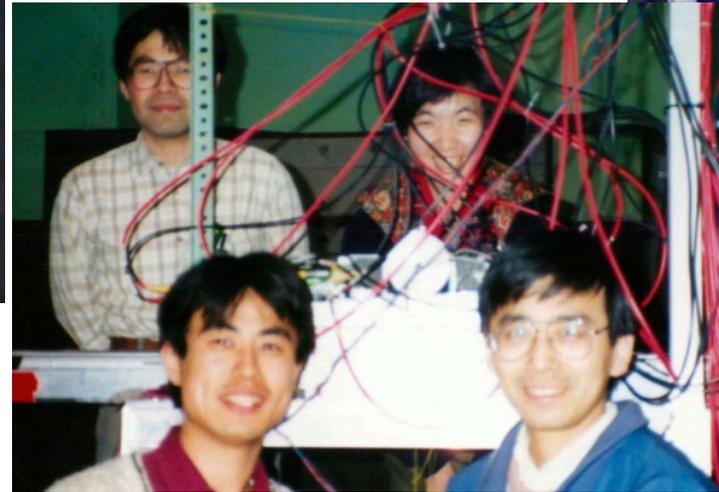
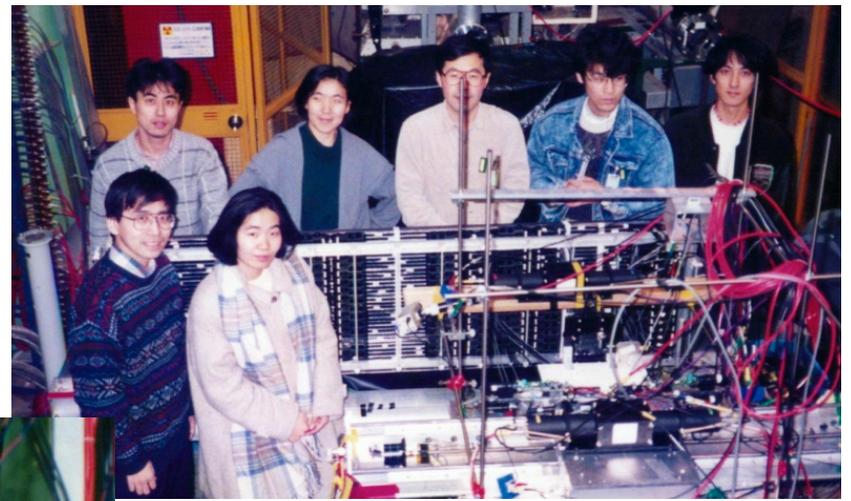
筑波大学 三明康郎



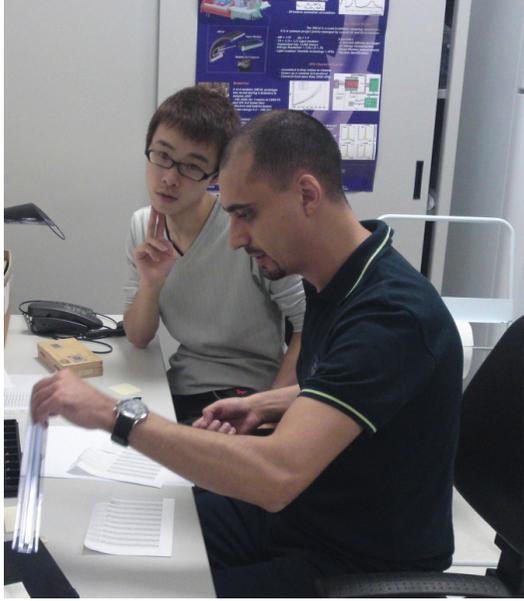
建設



テスト実験



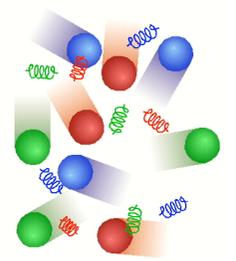
国際



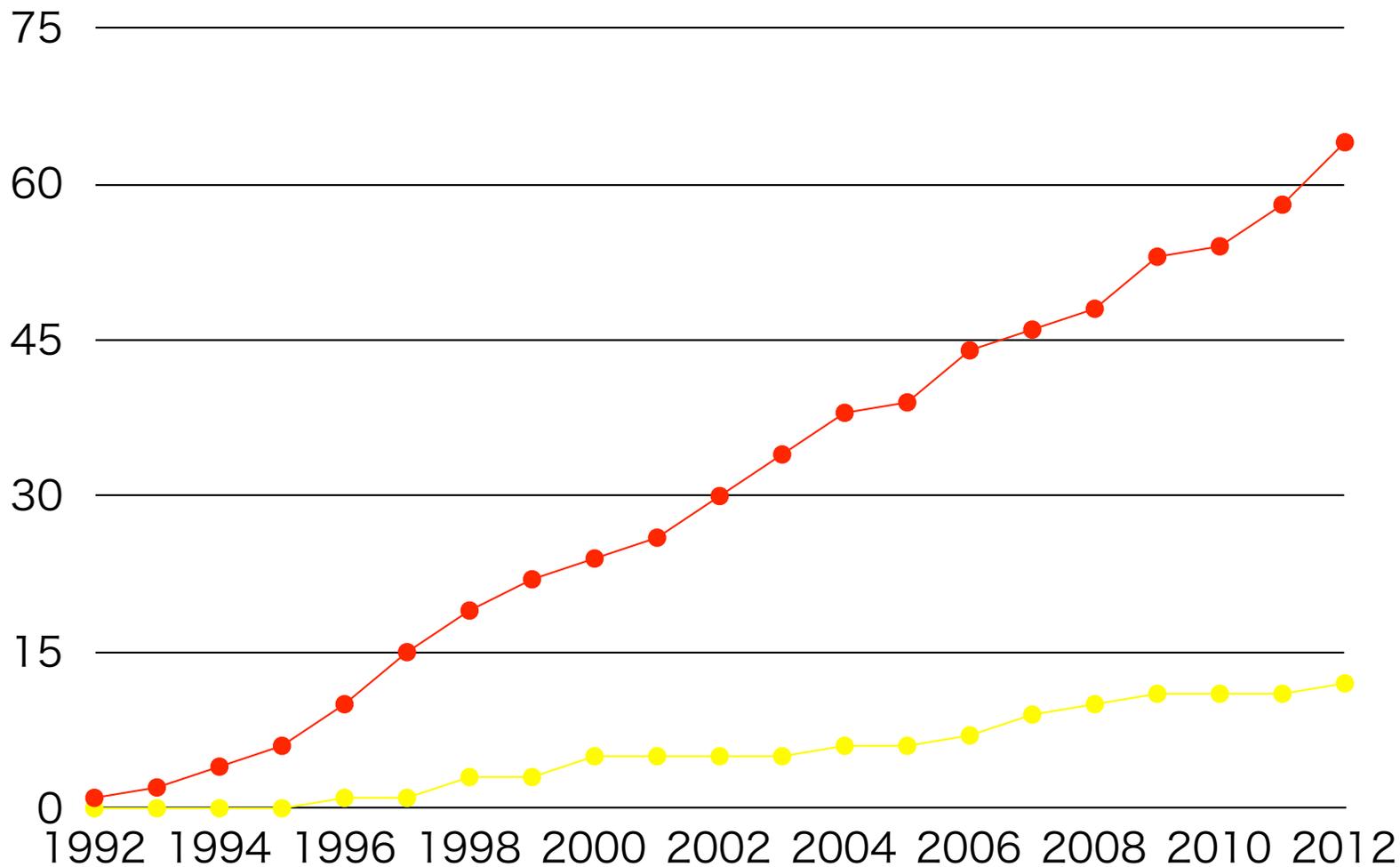
和



H4~H24の学位論文の総数



● 修士論文 ● 博士論文

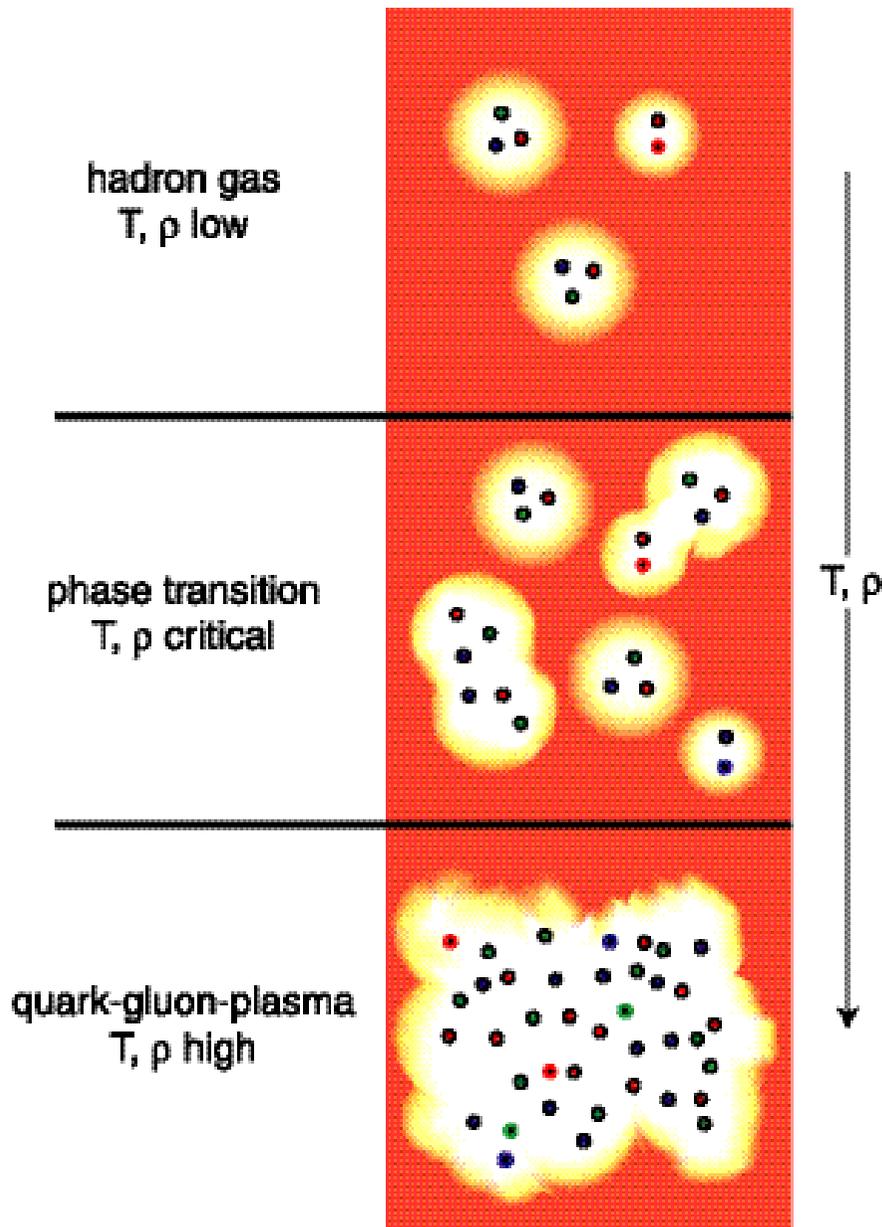
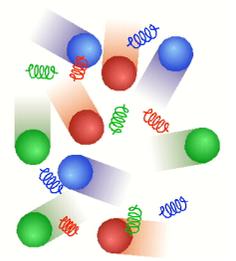


✓ ~20年間

● 修士 ; 64

● 博士 ; 12

クォーク・グルオンプラズマ (QGP) とは



✓ ハドロンの構造 :

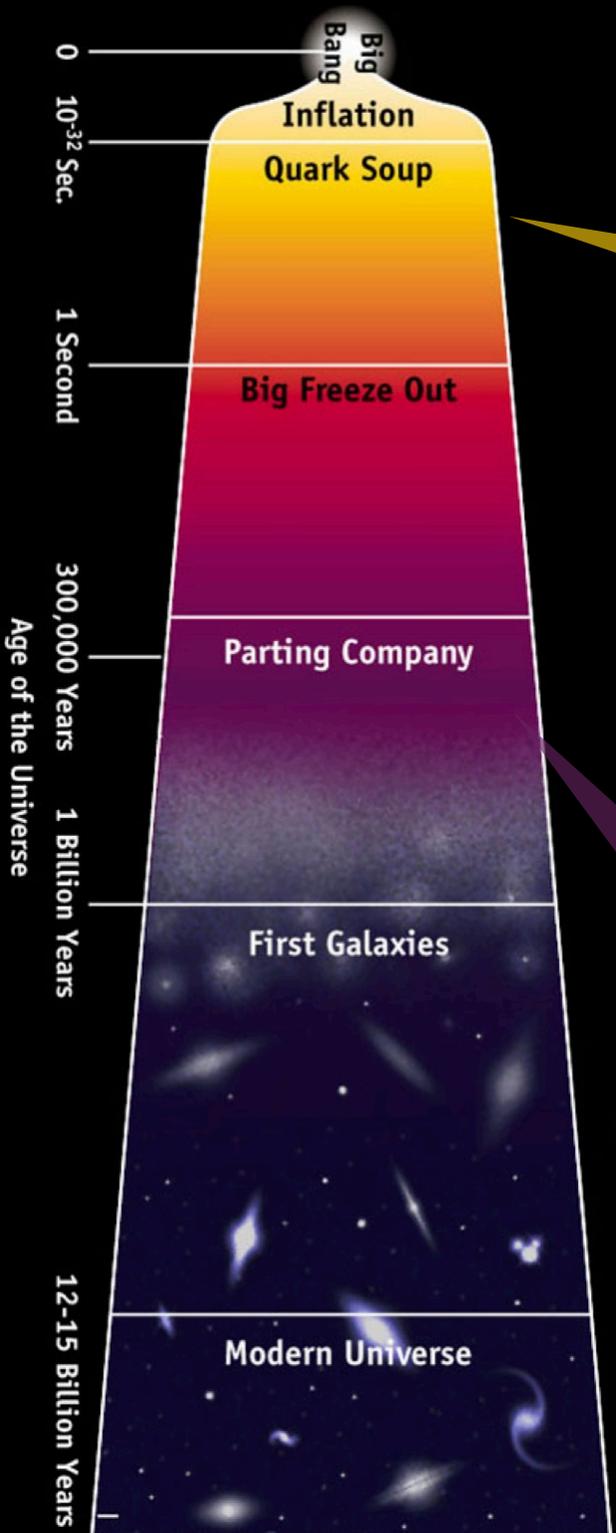
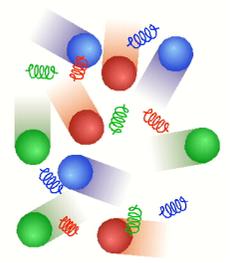
- ハドロン (陽子、中性子や中間子) は、1fm程度の大きさを持ち、クォークとグルオンから構成されている。
- クォークとグルオンはハドロンに閉じ込め
- 量子色力学 (QCD) の世界
 - ➡クォークの閉じ込め
 - ➡漸近的自由度

✓ 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？

- クォーク・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。

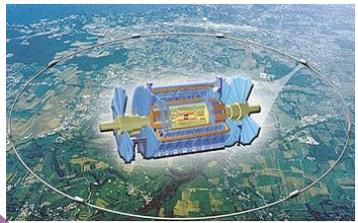
クォーク・グルオンプラズマ状態

宇宙の歴史から見ると、



✓ QGP → 陽子や中性子

- 時間：ビッグバンから数μ秒後
- エネルギー密度：> 1 GeV/fm³



✓ 宇宙の晴れ上がり

- 時間：ビッグバンから40万年後
- 温度：2兆度 K





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

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

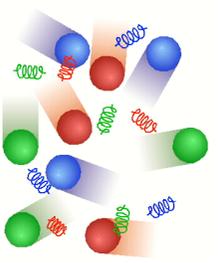
スイス・欧州共同原子核研究機構 (CERN)

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

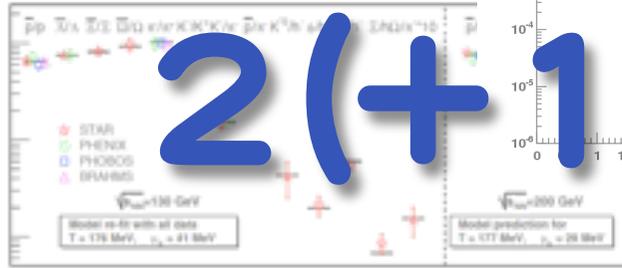
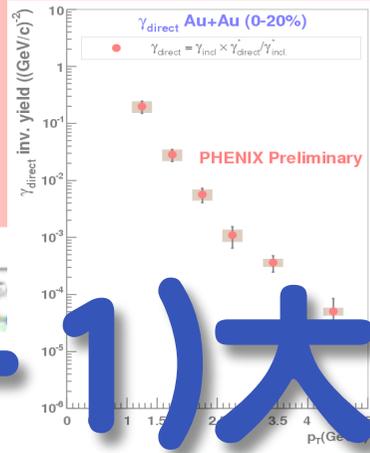


Very Hot

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

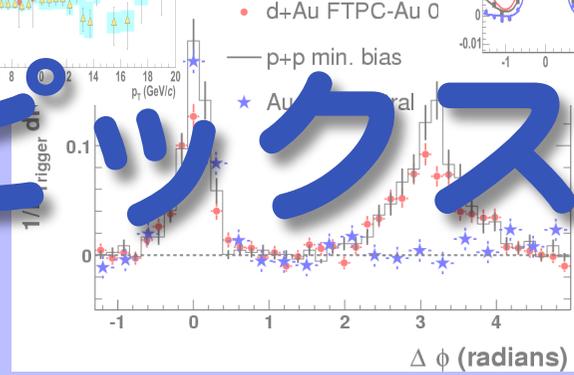
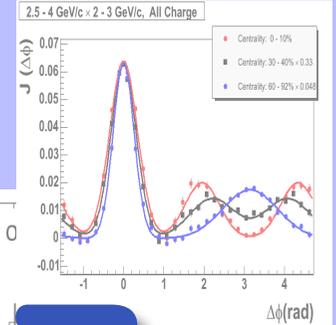
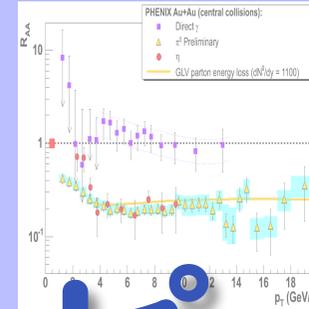
$$\approx 4.6 \text{ GeV/fm}^3$$

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

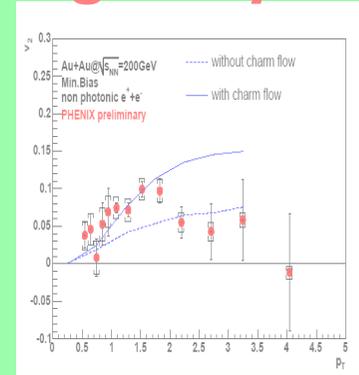
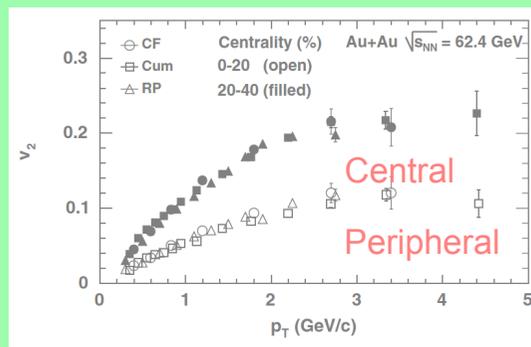
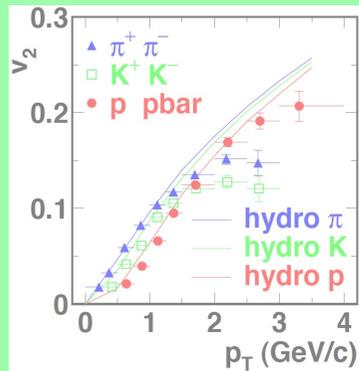


2(+1)大トピックス

Char. Energy Loss of Parton

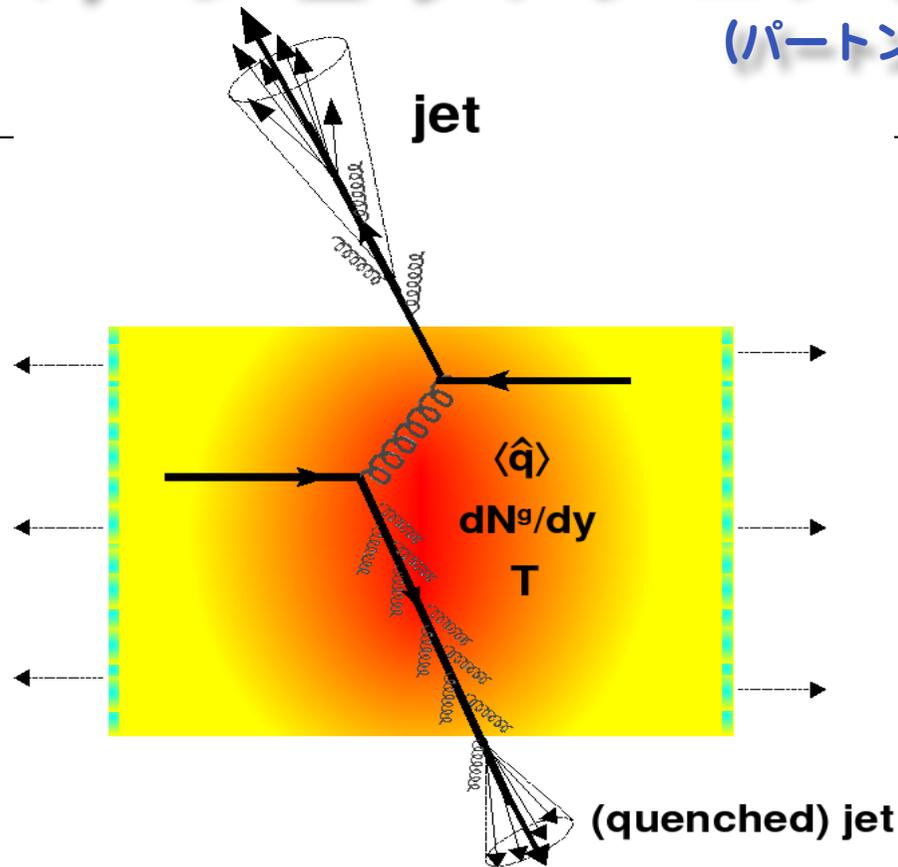
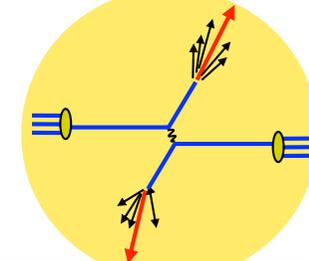


Very Early thermalization/Strong coupling

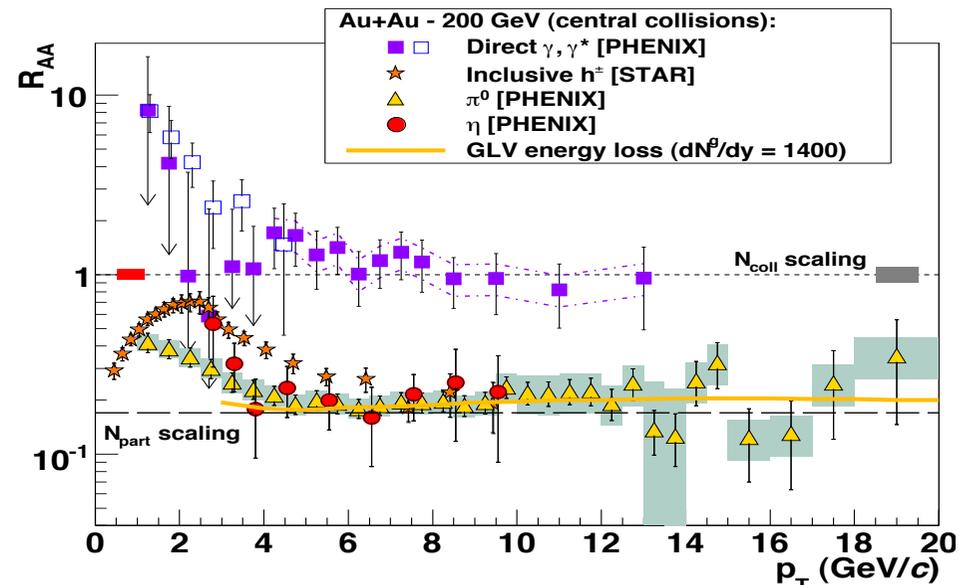


(1) ジェットクエンチ

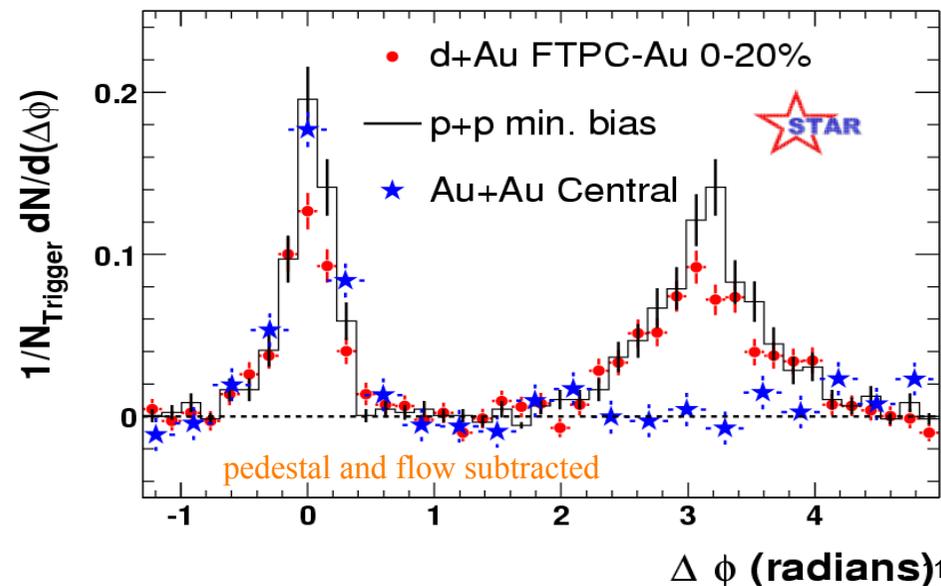
(パートンのQGP中の特徴的エネルギー損失)



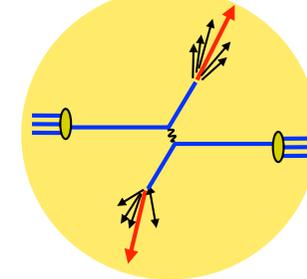
$$R_{AA} = \frac{\text{"hot/dense QCDmedium"}}{\text{"QCD vacuum"}} = \frac{dn_{AA}/dp_T dy}{\langle N_{\text{binary}} \rangle \cdot dn_{pp}/dp_T dy}$$



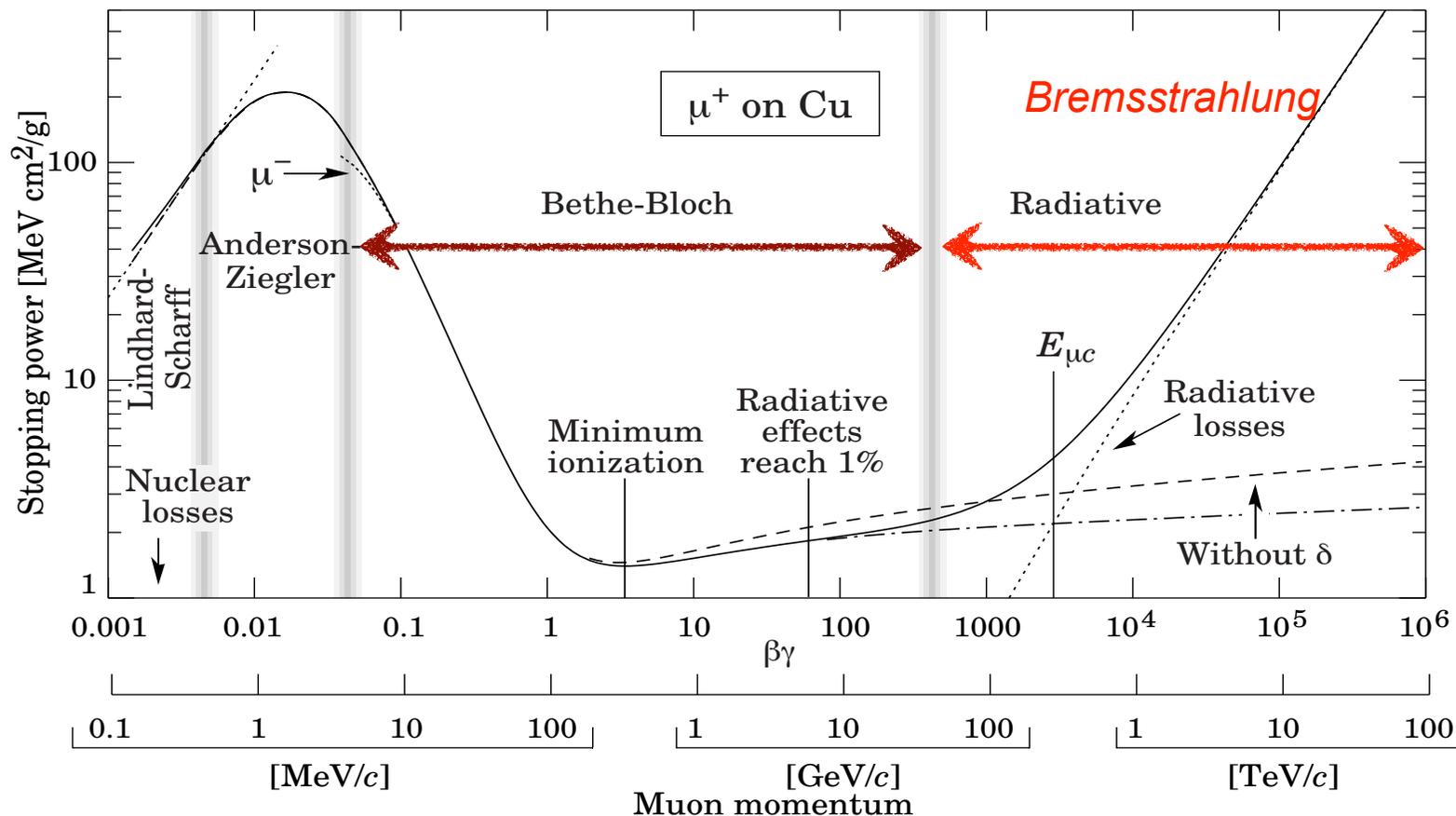
- ✓ 1) 高運動量粒子の減少
 - 低エネルギー衝突では見られない
- ✓ 2) 相反ジェットの消失
- ✓ エネルギー損失～数GeV/fm
 - ハドロンガスでは考えられない
 - →QGP生成の証拠のひとつ



QED の場合、



Energy loss of charged particle in a matter



Collisional

✓ Bethe-Bloch

Radiative

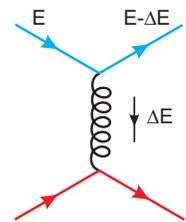
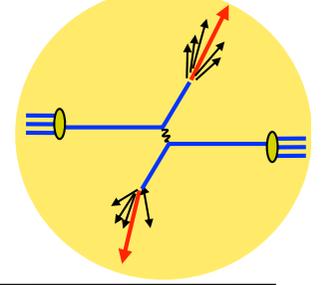
✓ Bethe-Heitler
(thin; $L \ll \lambda$)

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

✓ dE/dx 測定 → 物性を決定

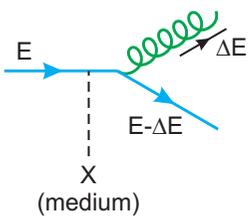
- QEDプラズマ中でのエネルギー損失 → T & m_D を与える

QGPに特徴的なエネルギー損失



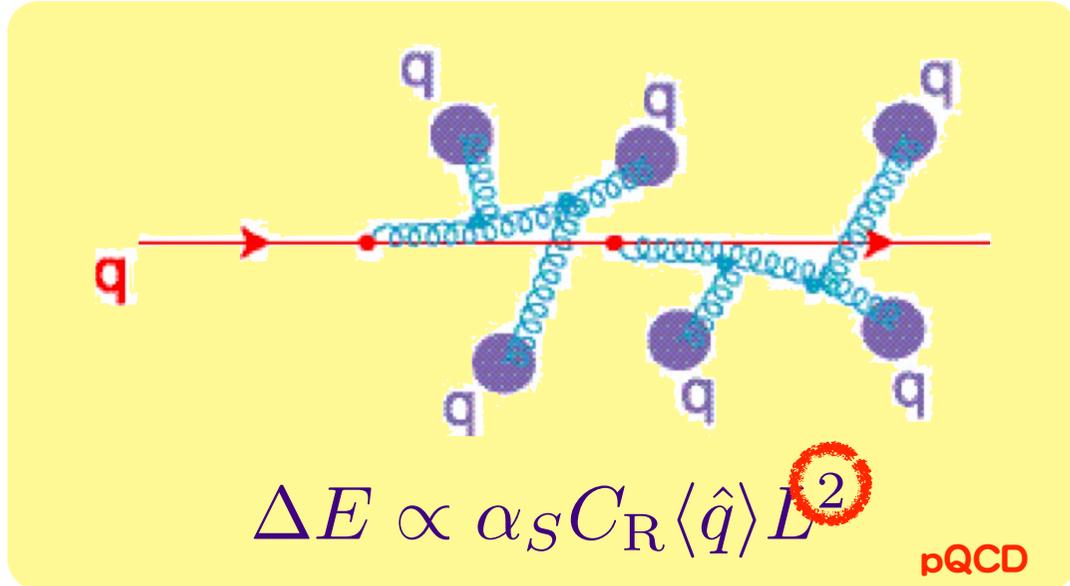
Collisional

$$\Delta E \propto l^1$$



Radiative

$$\Delta E \propto l^2$$

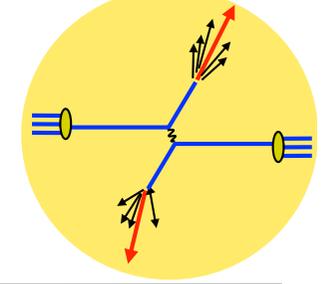


- グルーオン放射によるエネルギー損失が支配的

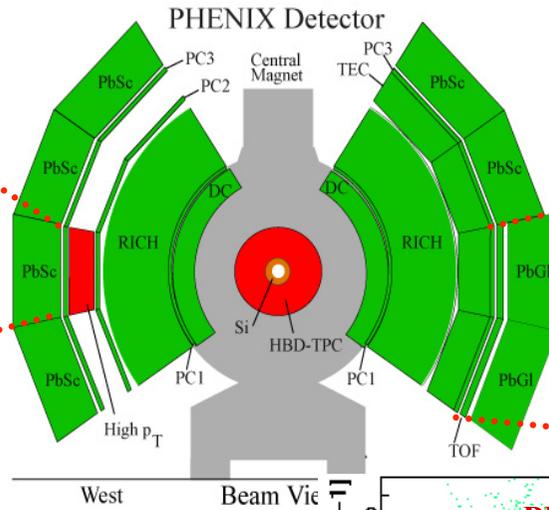
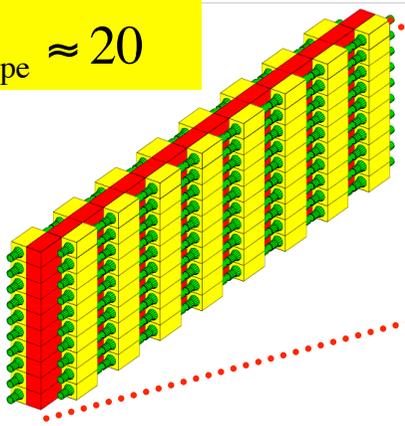
✓ dE/dx 測定 → 物性や Jet Tomography

- 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

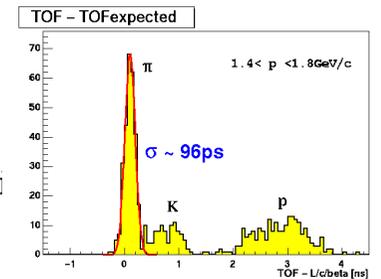
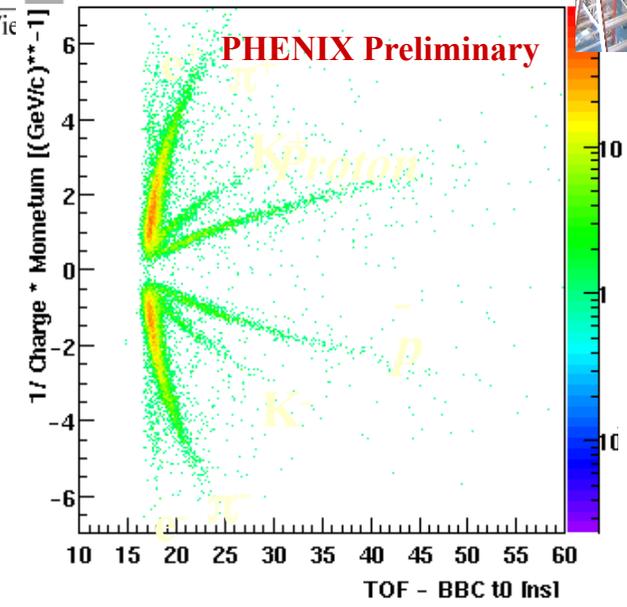
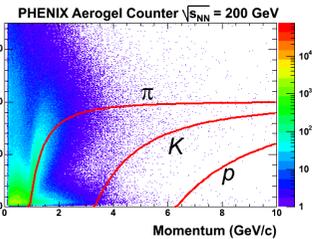
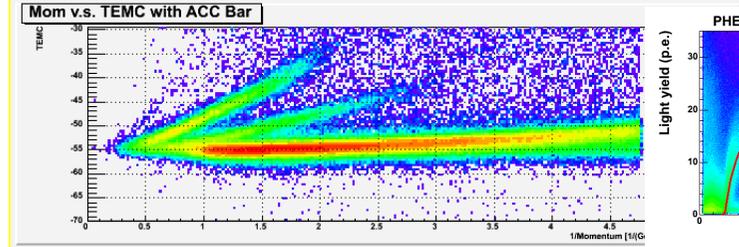
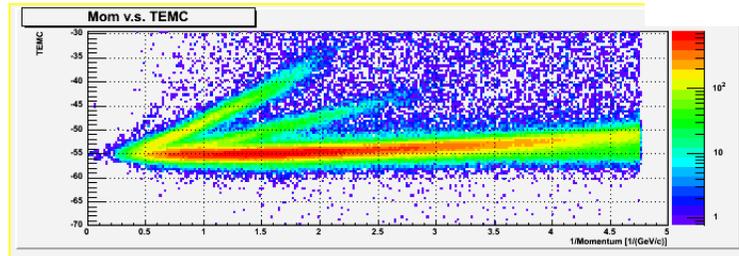
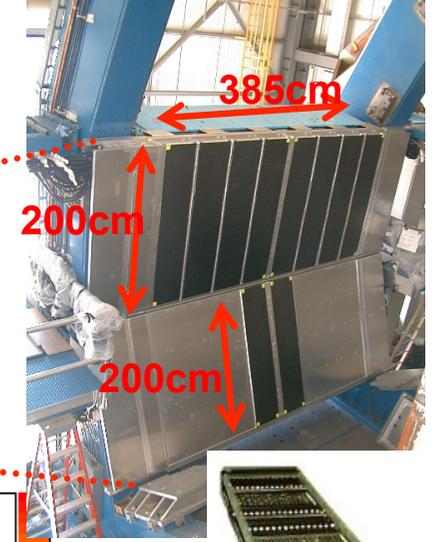
筑波大Gの戦略： 粒子識別



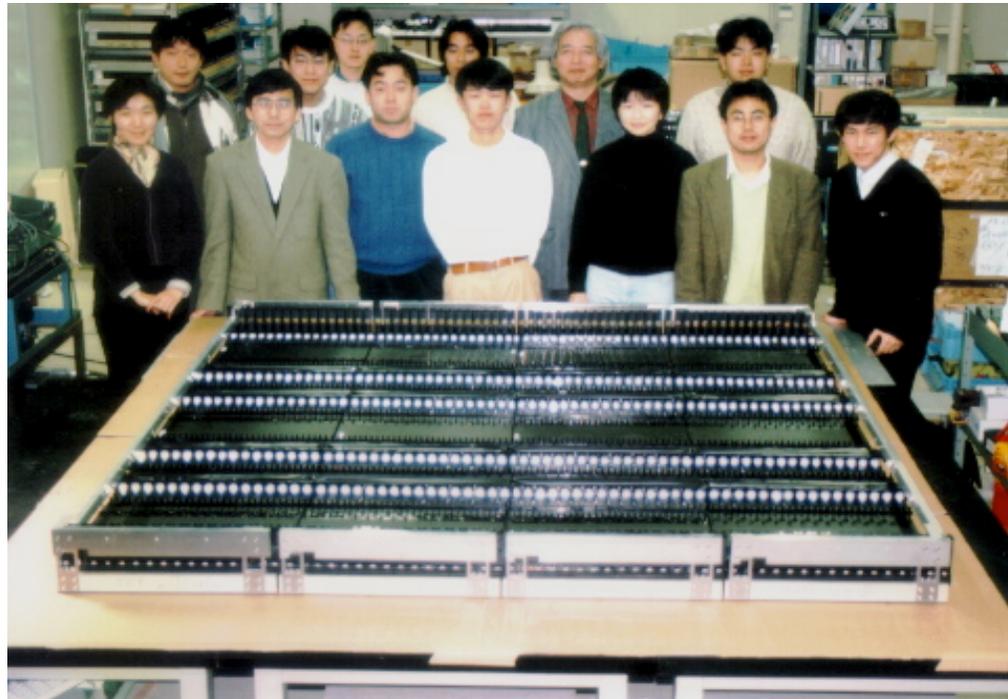
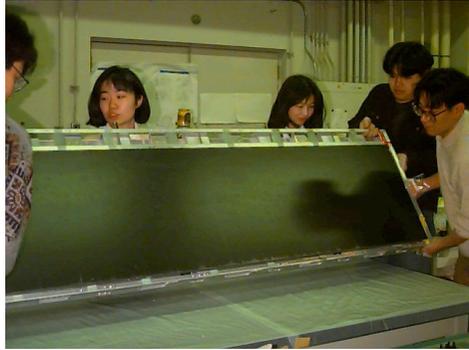
$n_{\text{index}} = 1.012$
 $n_{\text{pe}} \approx 20$



$\sigma_{\text{TOF}} \leq 100\text{ps}$



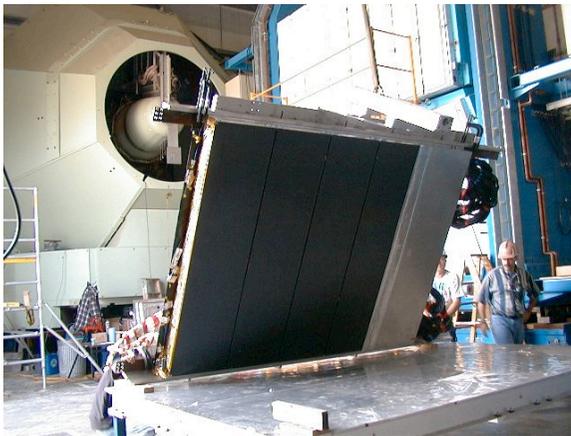
TOF Construction at Tsukuba (1996-1998)



TOF Construction at BNL (1998-1999)



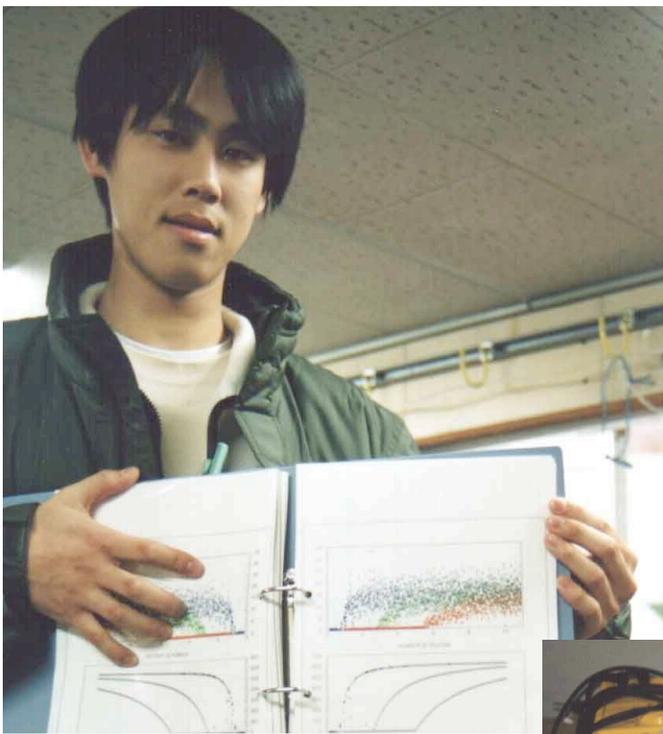
TOF Installation in PHENIX (August 1999)



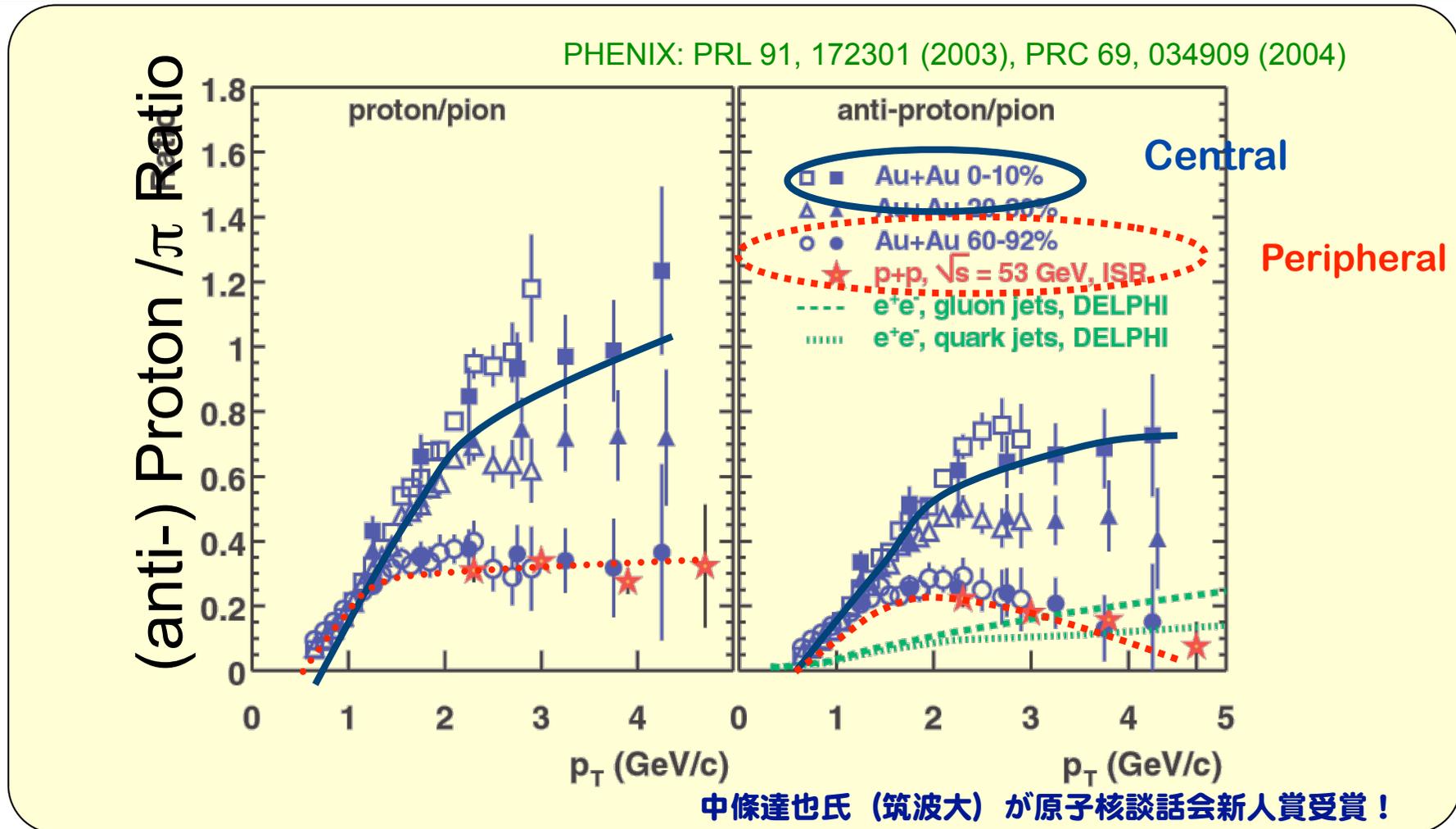
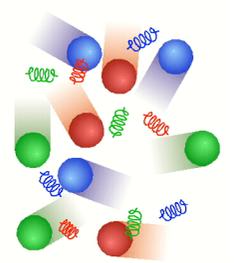
t0 counter



Aerogel Construction & Installation



(2) Surprise! (Baryon Anomaly)

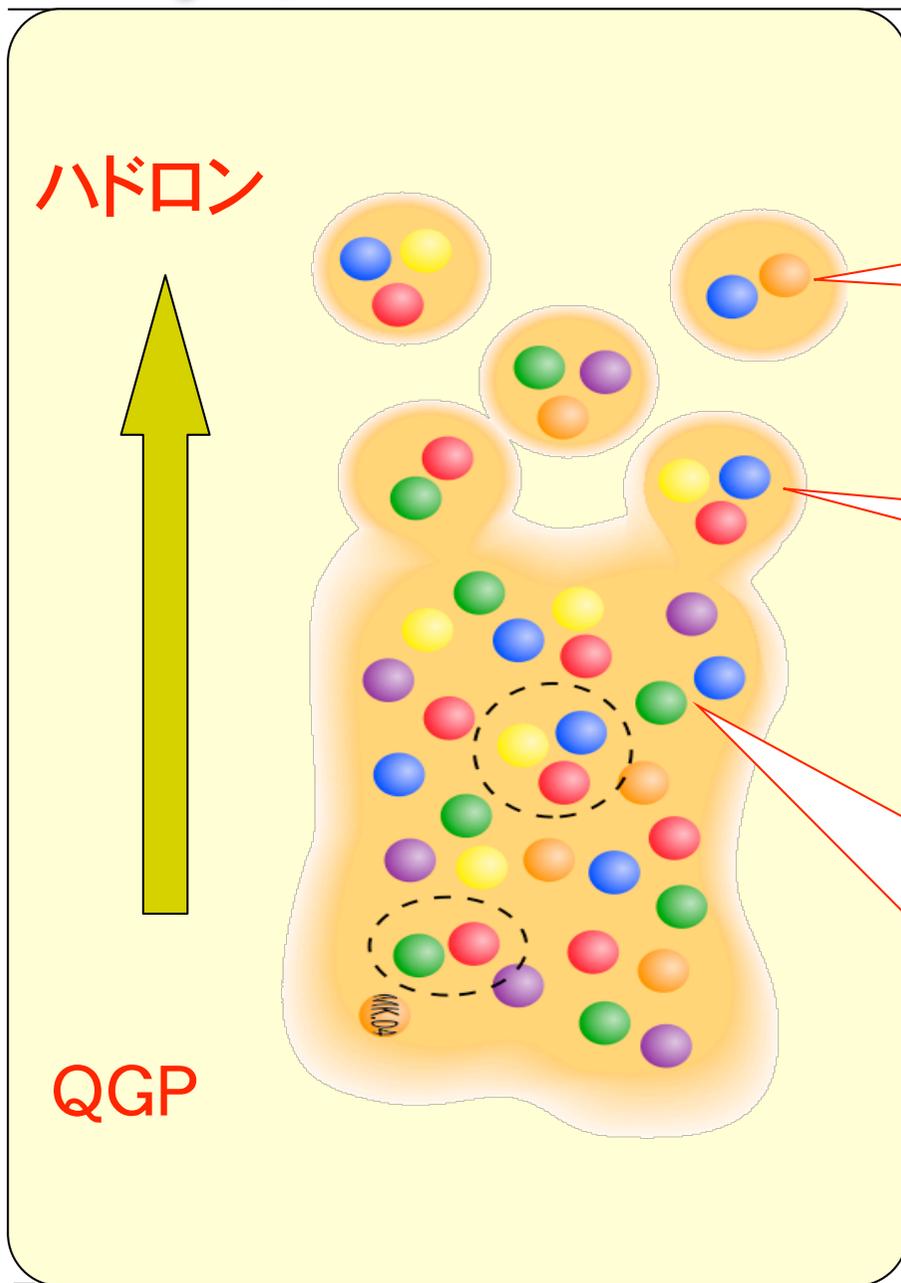
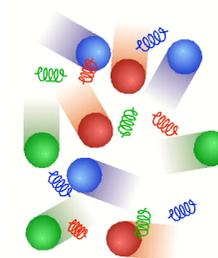


✓ 他の高エネルギー粒子衝突反応に比べて、多くの陽子や反陽子が生成されることを発見!

- 全く異なるハドロン生成メカニズム

➡ 中條達也氏 (現筑波大・講師); 原子核談話会新人賞受賞

クォーク融合反応 (Quark Coalescence)



✓ QGP特有のハドロン生成
メカニズム?

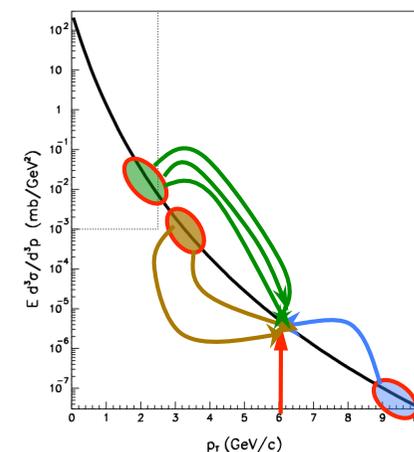
中間子の運動量分布(2q);

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

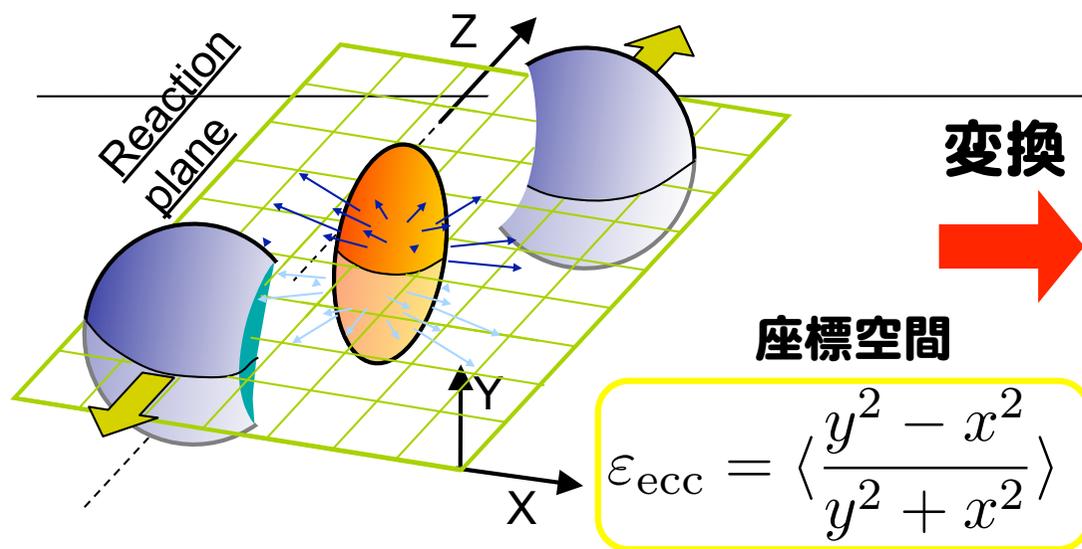
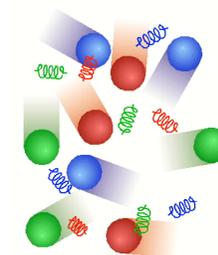
陽子の運動量分布(3q);

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

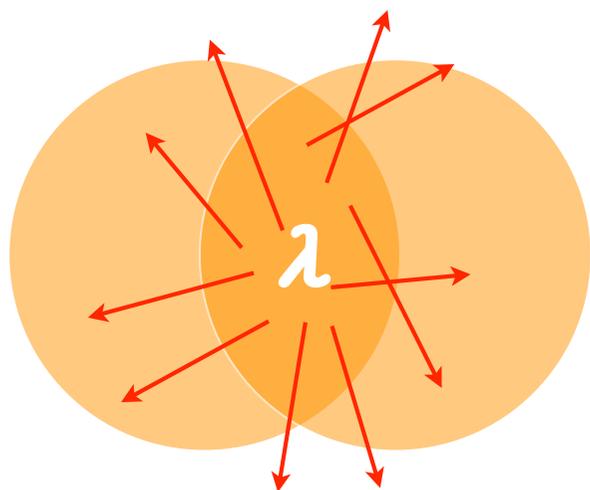
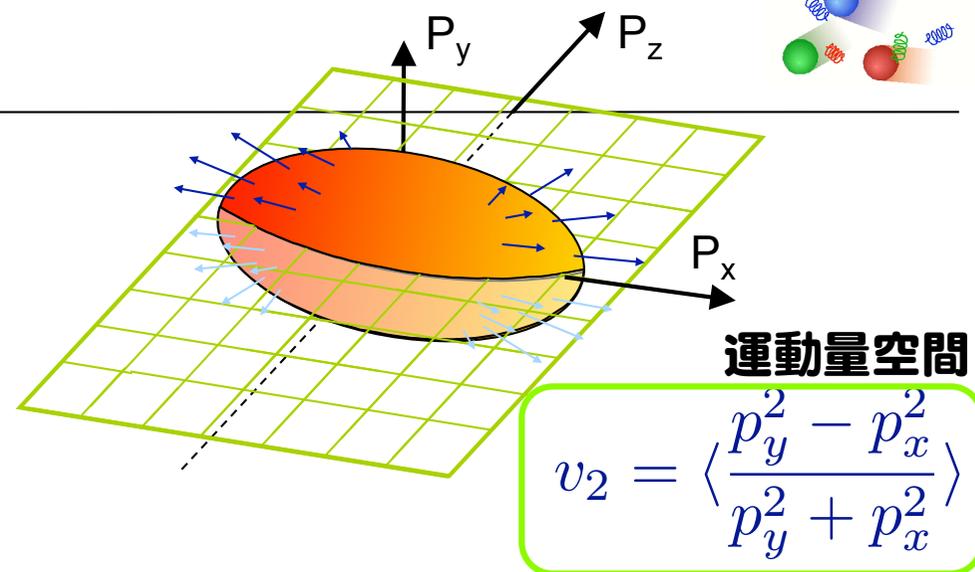
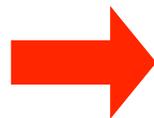
$w(p_t)$;
ユニバーサルな
クォークの
運動量分布
{急激な減少を
示す分布形}



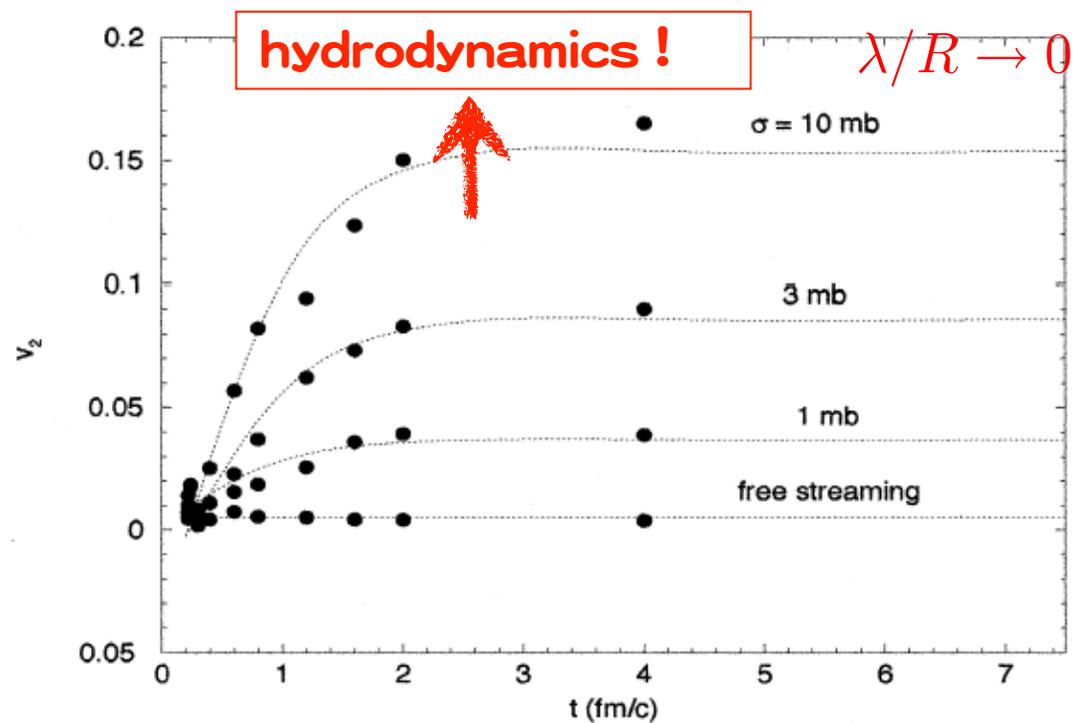
(2) 方位角異方性



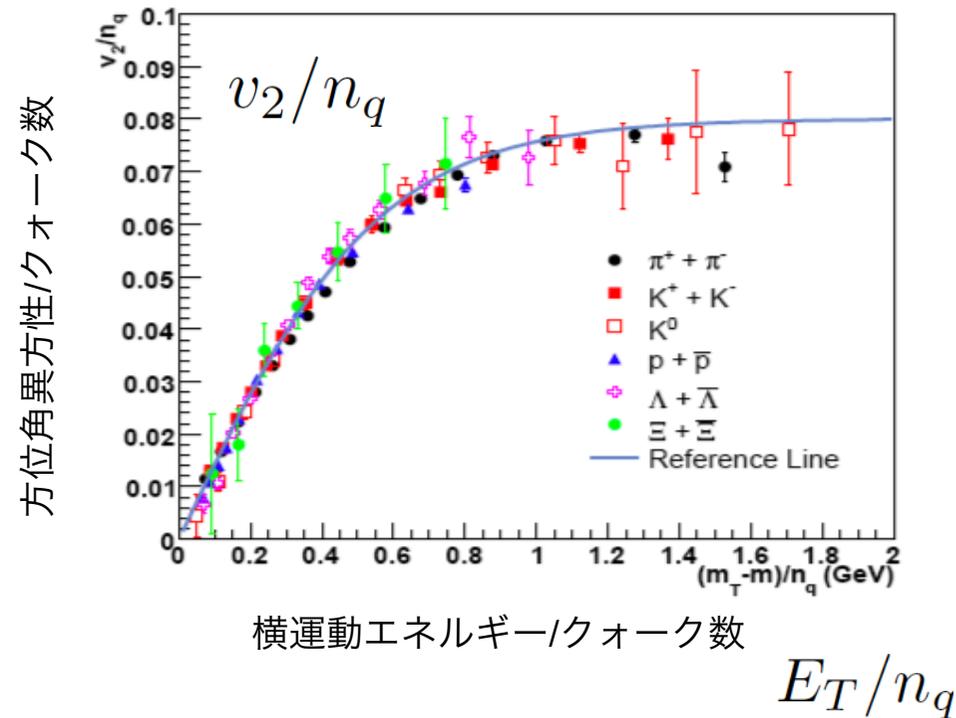
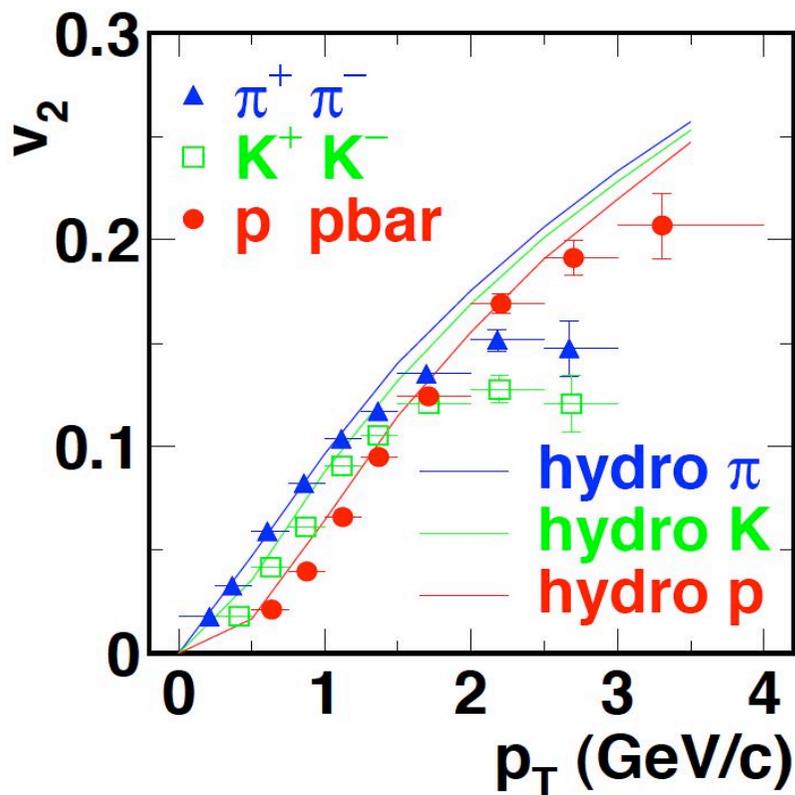
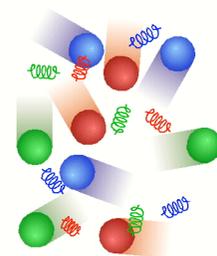
変換



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



大きな方位角異方性 v_2



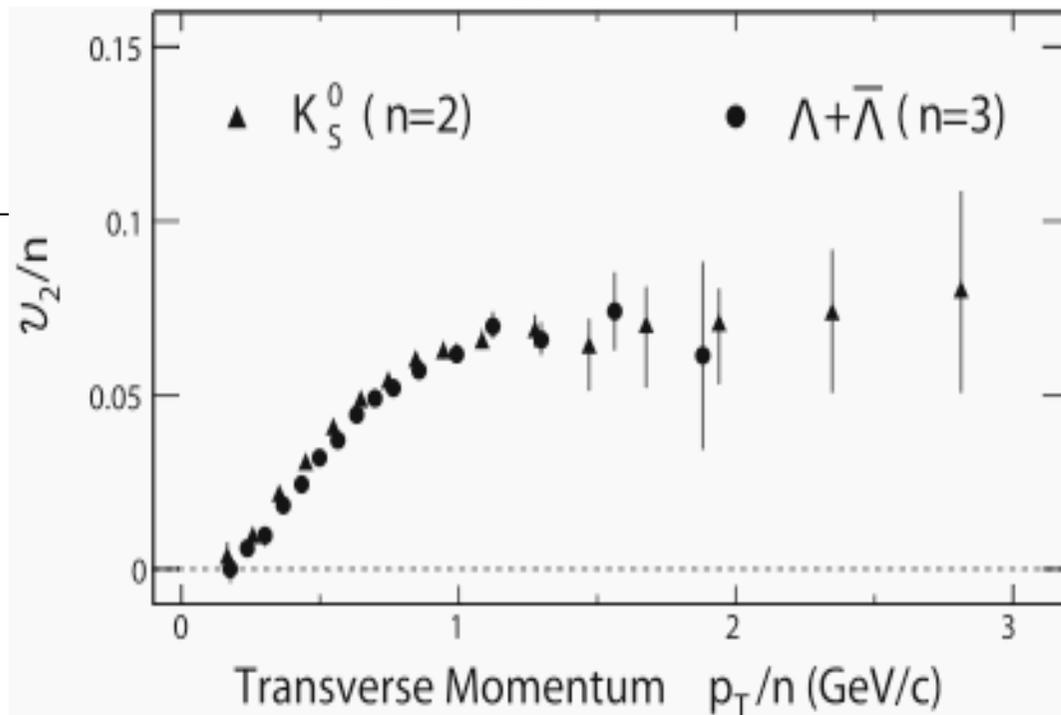
✓ 大きな楕円方位角異方性 (v_2) の観測

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

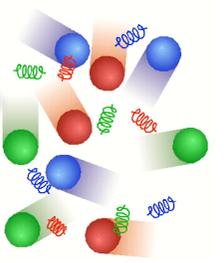
✓ クォーク数 (n_q) スケーリング

- → universalな分布、 パartonレベルで異方性が決定

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);

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

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

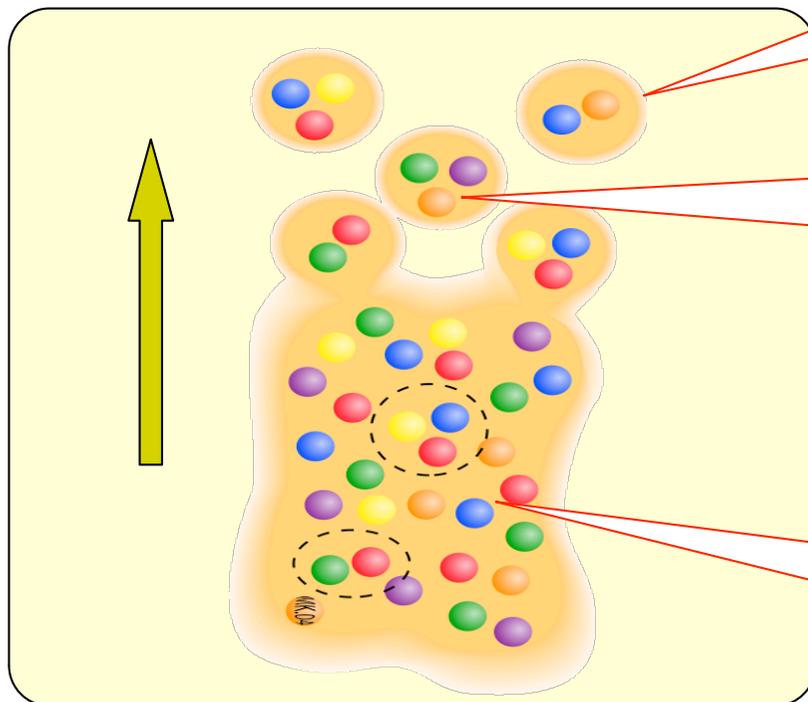
陽子の運動量分布(3q);

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

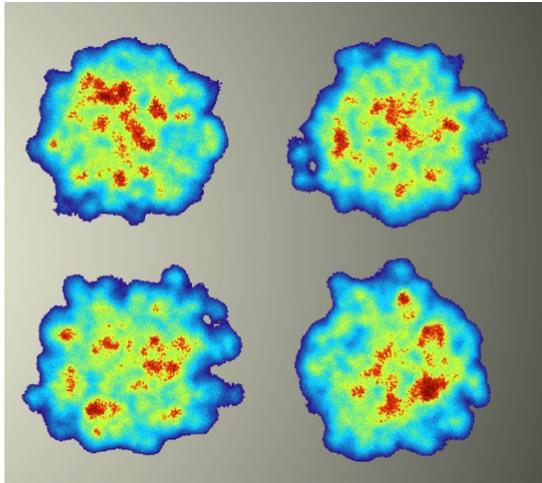
$$\approx (1 + 6v_{2,q} \cos 2\phi)$$

w; クォークの方位角分布

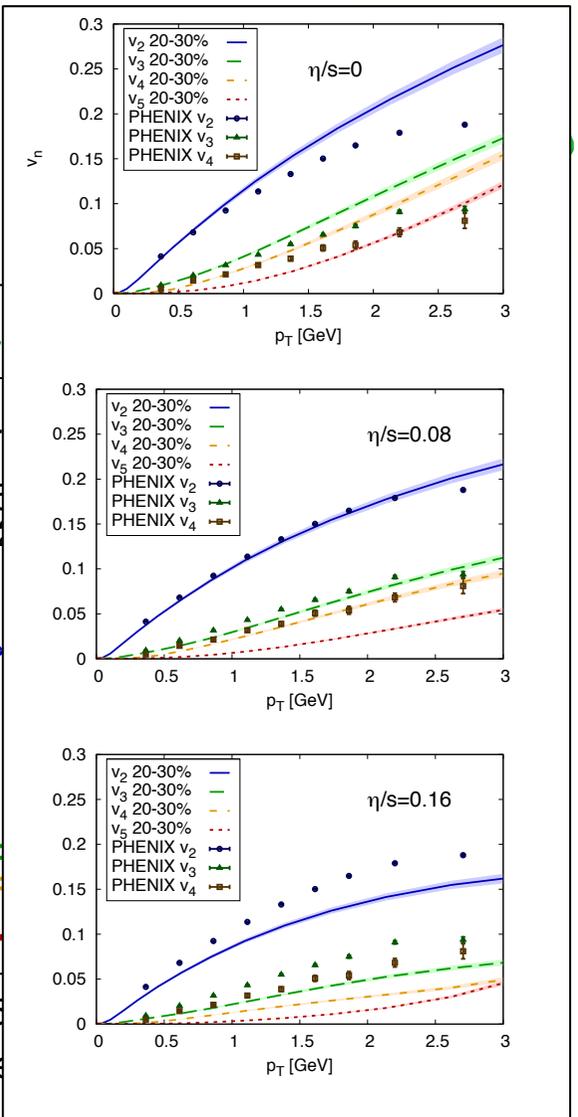
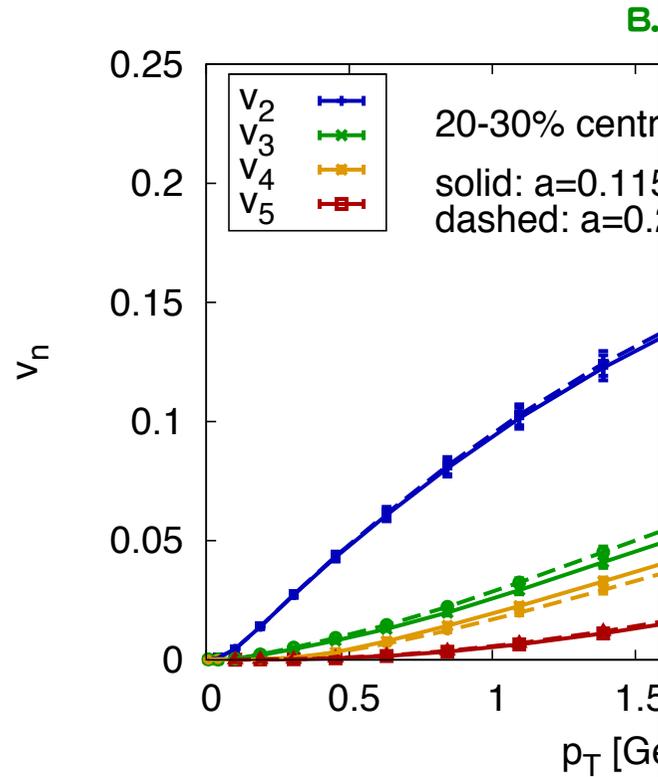
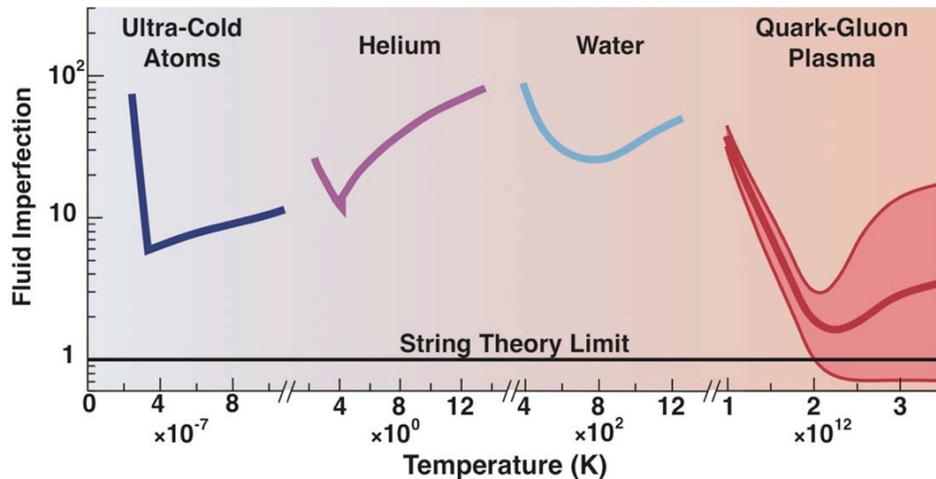
$$w \propto (1 + 2v_{2,q} \cos 2\phi)$$



高次の方位角異方性



重イオン衝突の揺らぎ
→ Higher Harmonics



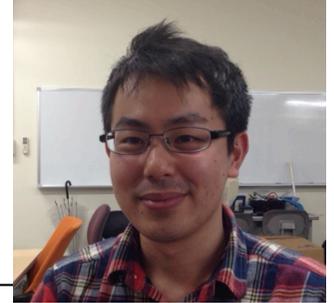
✓ RHICにおける方位角異方性

→ 比ずれ粘性 (η/s) ~ 0.1 (最小!!)

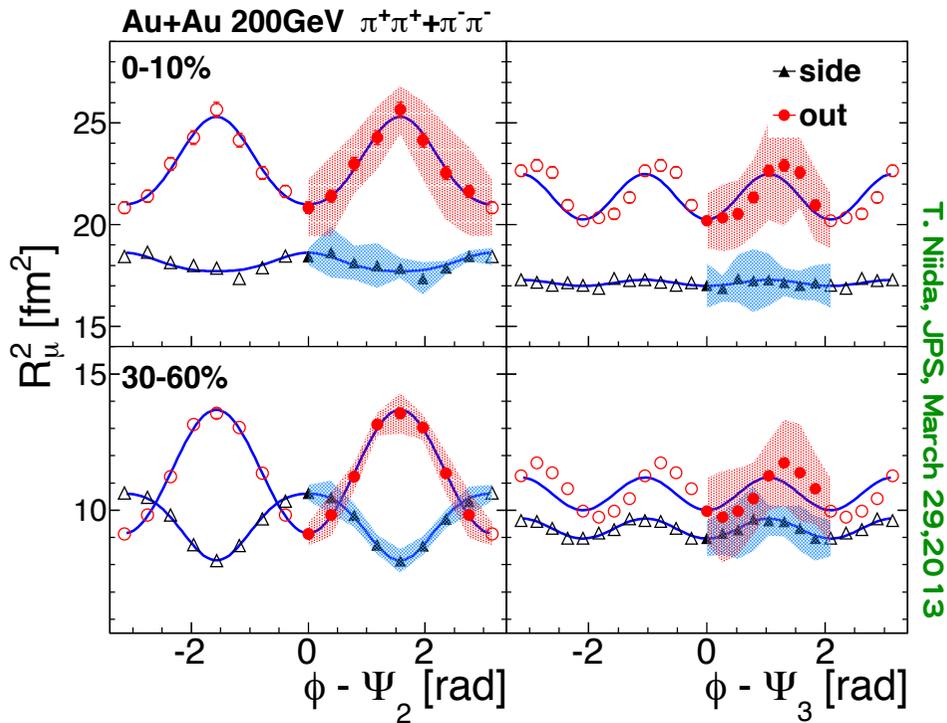
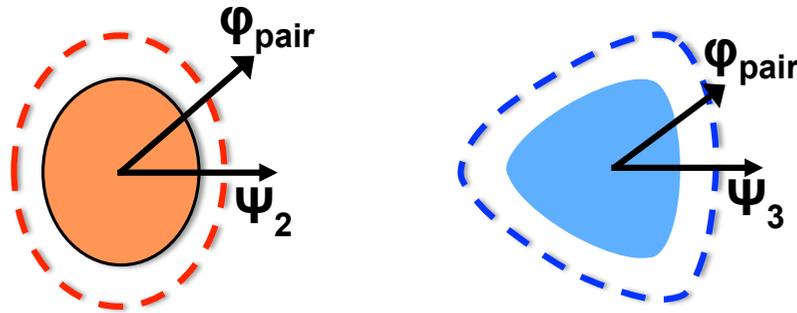
● → ストリング理論における量子リミット ($1/4\pi$)!

✓ 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_{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_{side} 、 R_{out} を測定

✓ ψ_2 (反応平面) 、 ψ_3 を各事象で決定

→ $(\phi - \psi_n)$ 依存性

● 時空発展の様子

→ R_{side} は幾何学的形状を主に反映

→ R_{out} はoutward flowとlife time

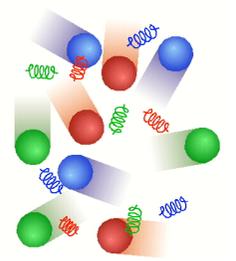


QGP生成の 主な証拠と 主要論文 (RHIC-PHENIX)

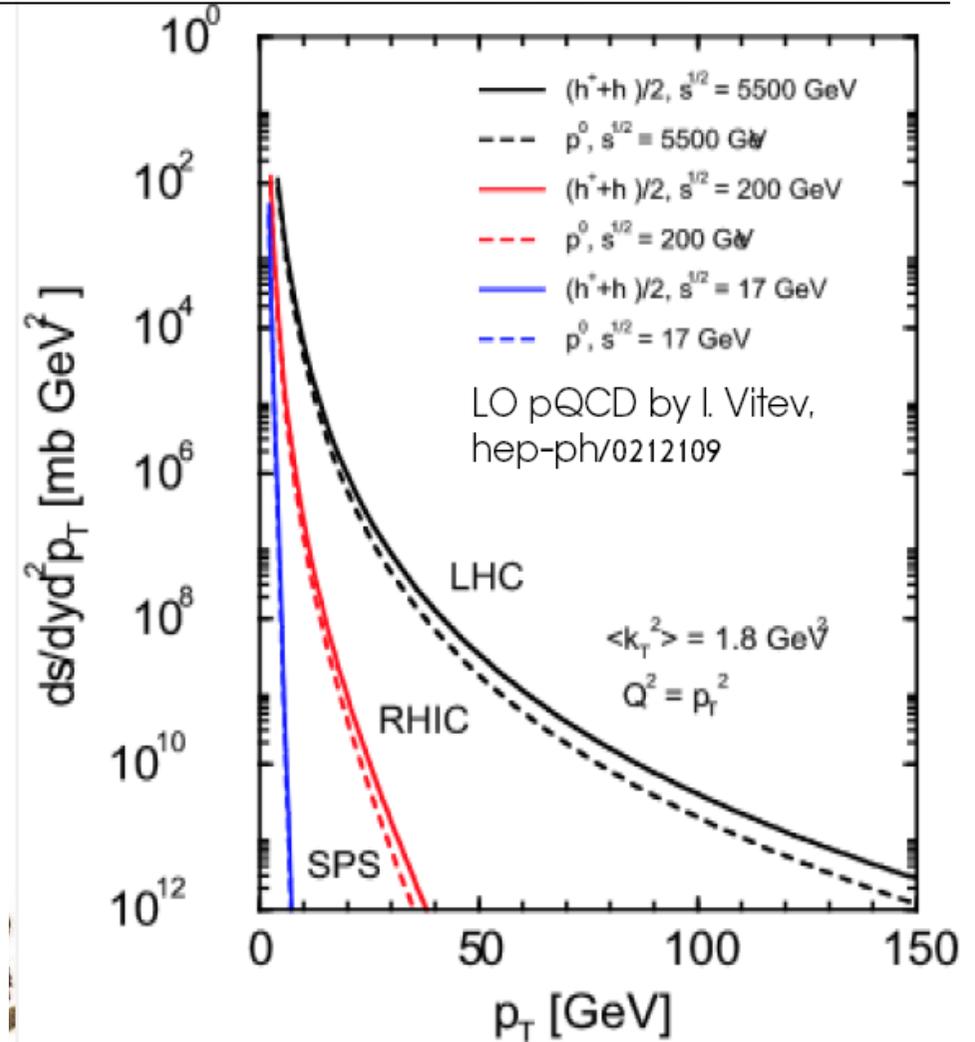
- ★ PHENIX 実験レビュー論文 (Nucl. Phys. A757, 184-283, (2003)): 引用数 1478.
- 熱光子の観測 (秋葉, PRL 104 (2010) 132301, 引用数 188) ←超高温物質
- J/ψ 抑制 (郡司, PRL 98 (2007) 232301, 引用数 348) ←カラー遮蔽
- 高横運動量ハドロン抑制 (大山, PRL 88 (2002) 022301, 引用数 690) ←ジェット抑制
- 大きな方位角異方性、クォーク数スケーリング (江角, PRL 91 (2003) 182301, 引用数 491) ←強結合QGP、クォーク再結合
- 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

RHIC vs LHC



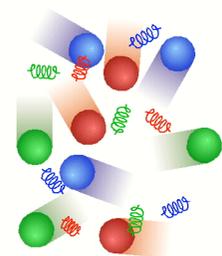
	RHIC	LHC
$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	200	5500
T/T_c	1.9	3.0-4.2
ε (GeV/fm ³)	5	15-60
τ_{QGP} (fm/c)	2-4	>10



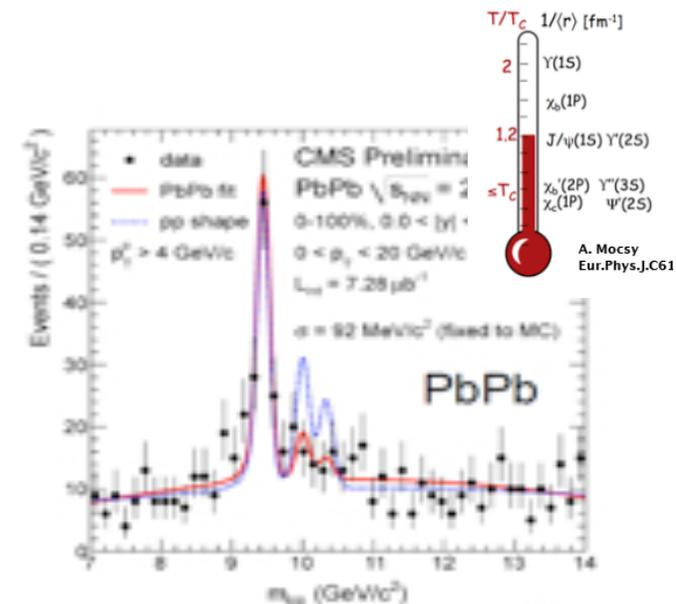
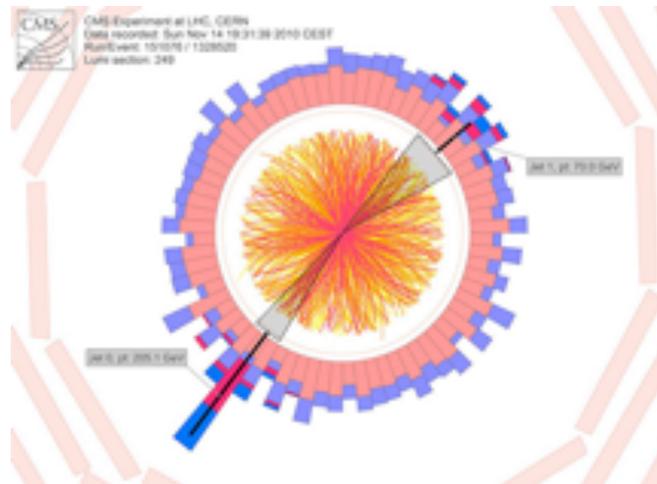
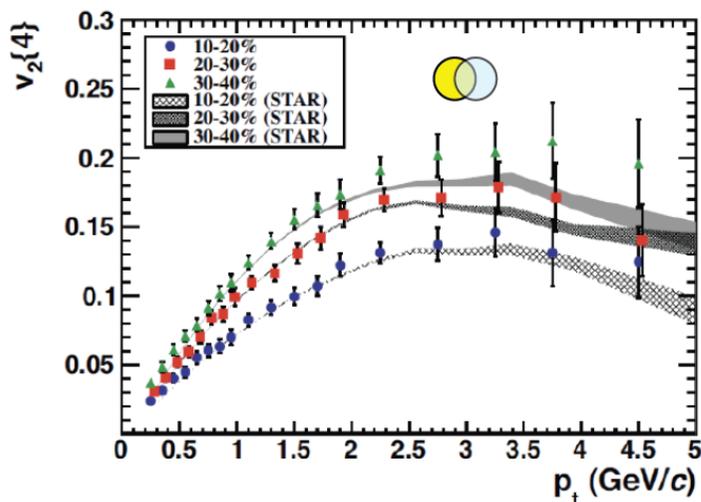
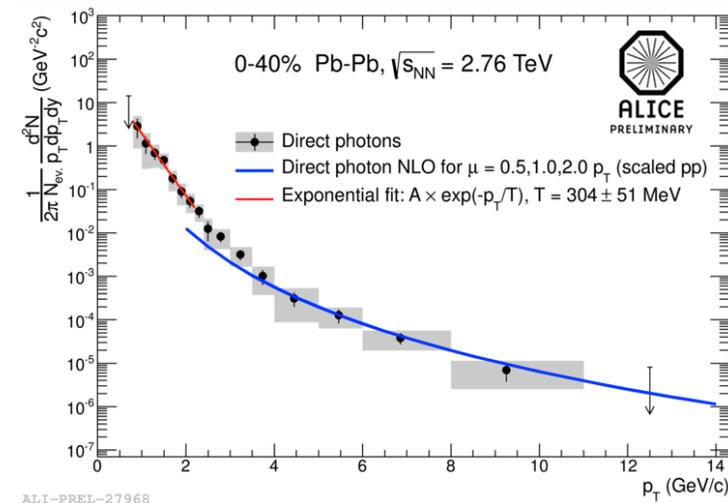
✓ Home work to the LHC, physics of jet quench

➔ LHC has superior advantage in hard probes

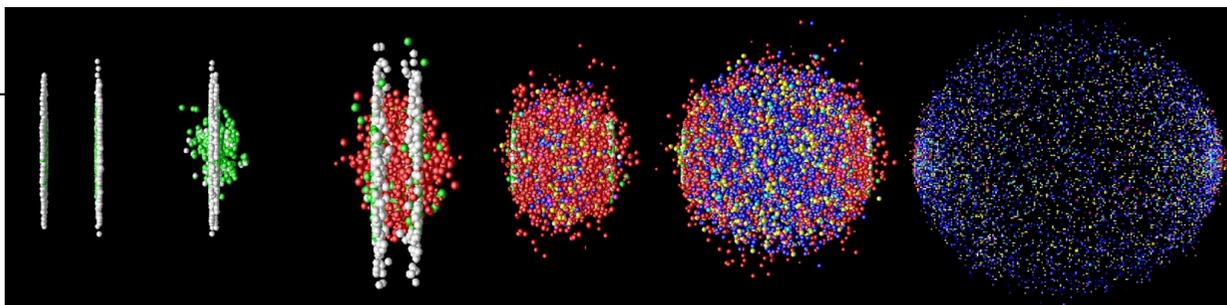
LHC加速器による重イオン衝突 (2010-) と初期成果



- ✓ 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 Υ 状態の消滅 (高温状態生成の証拠)



今後10年間の展開



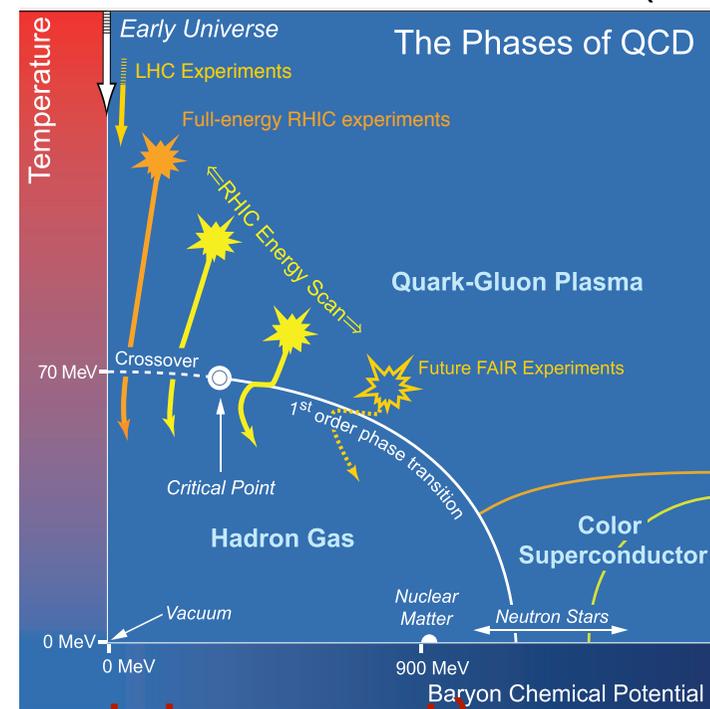
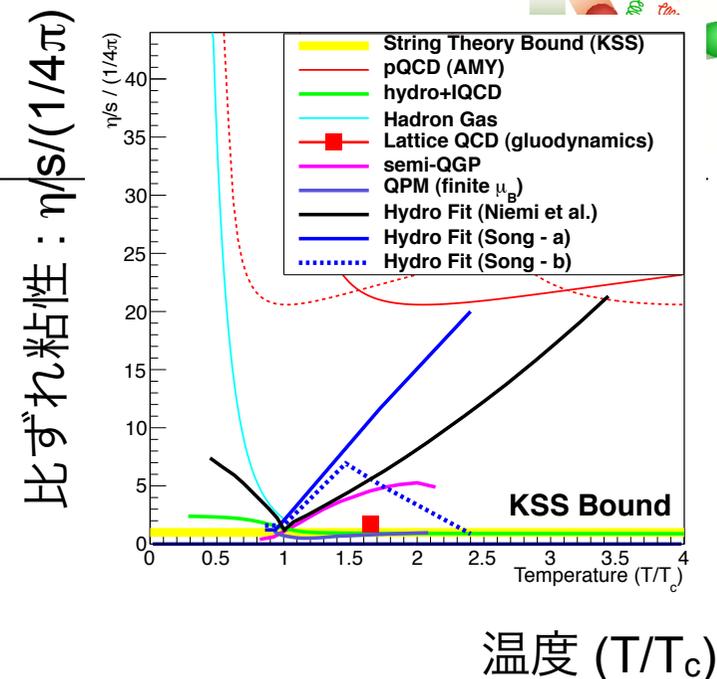
初期条件→前平衡→パートン散乱→熱化(QGP)→ハドロン生成→膨張

- ✓ 衝突初期条件の解明 (カラーグラス凝縮?)
- ✓ 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)

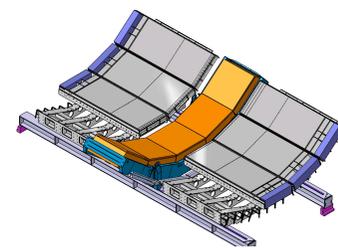


鍵となる測定量：

- (1) ジェット (high p_T)
- (2) より高次の異方性 (種々のハドロン、光子、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

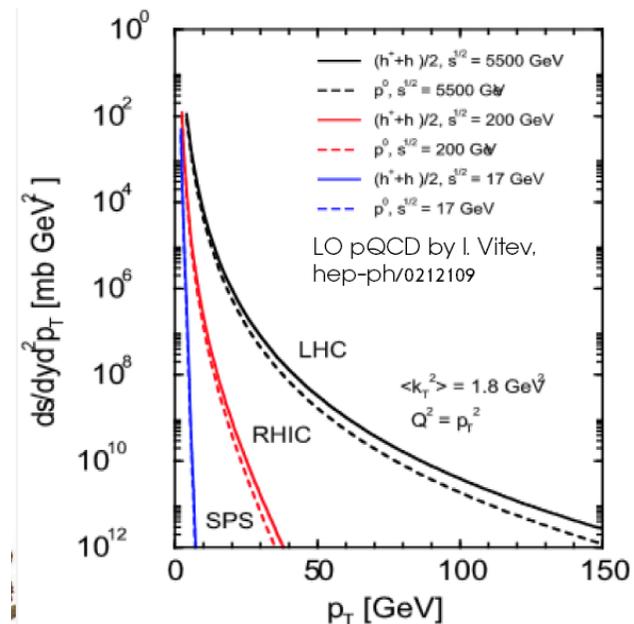
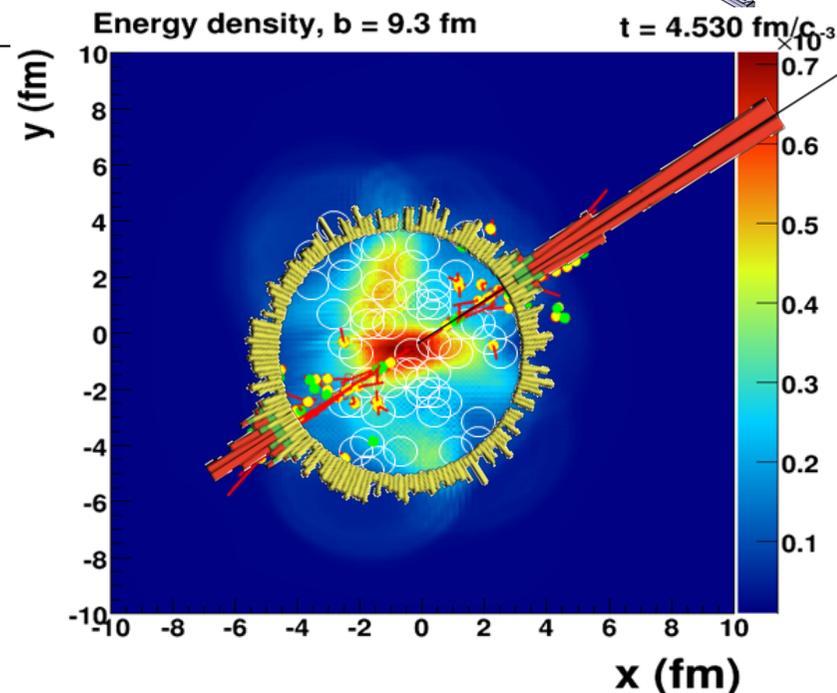
✓ ジェットを基軸とした新たな観測量：

- 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

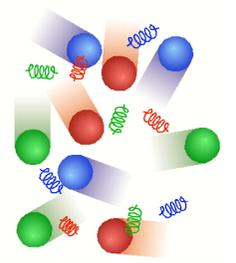
✓ RHIC エネルギー：

- 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

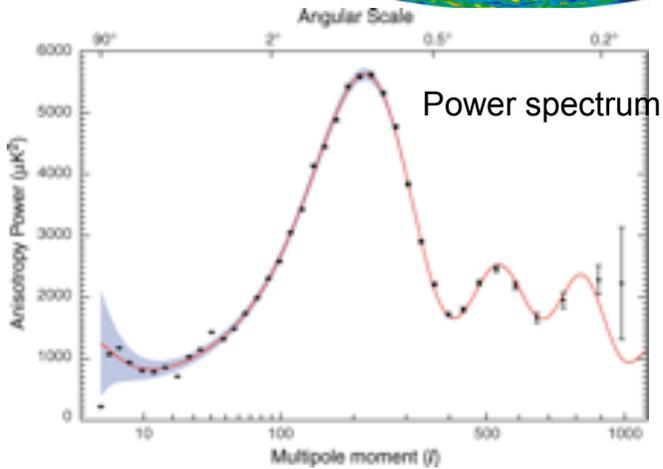
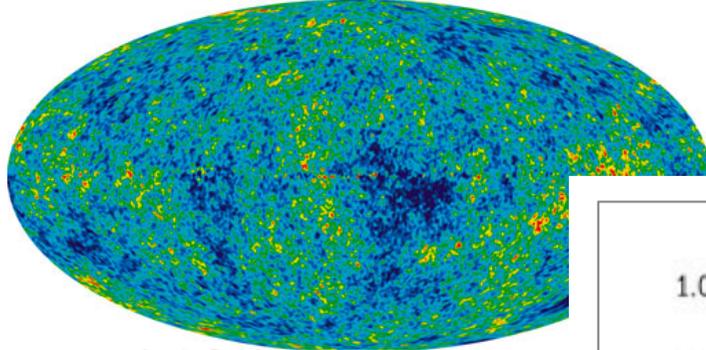


高次異方性 (higher harmonics)で分かる

QGP物性



Fluctuations of the Universe



Fluctuations of Little bang

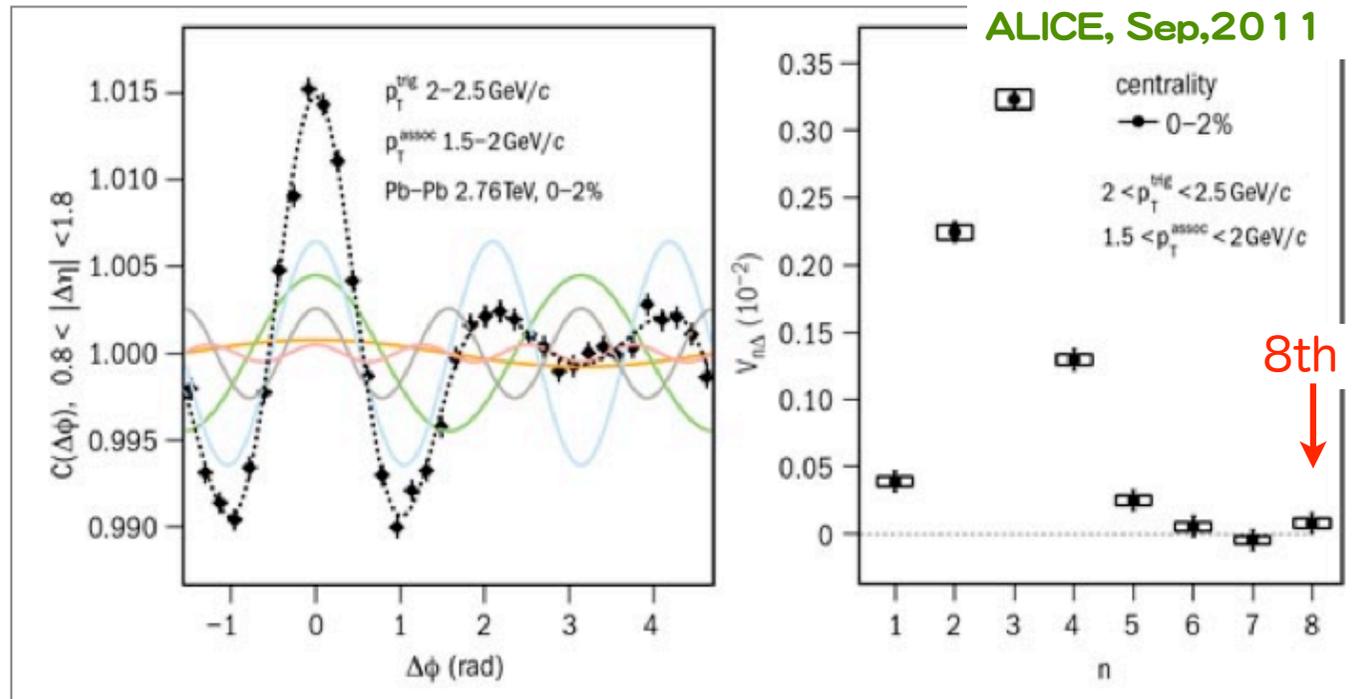
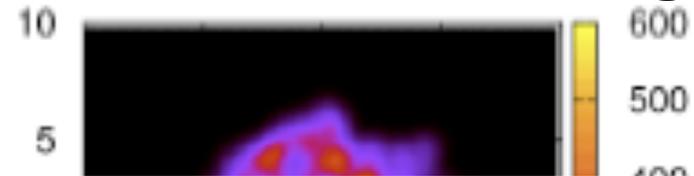


Fig. 1. Left: correlation function for charged hadron pairs from head-on Pb-Pb collisions. Right: corresponding spectrum of Fourier harmonic amplitudes vs n.

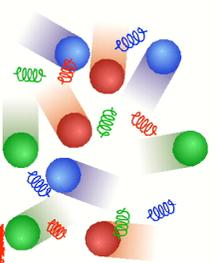
WMAP

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**

今後の計画

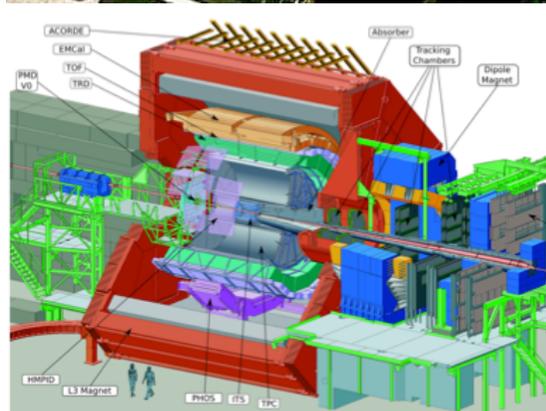


H26-H35. 国内研究拠点（筑波／東大／広島／理研／RCNP） 総額約30億円.
CERN-ALICE + RHIC-PHENIX実験での新測定器建設・高度化・実験遂行

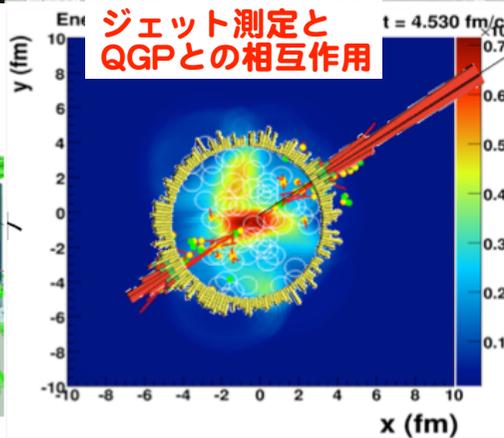
スイス・欧州共同原子核研究機構 (CERN)
LHC 加速器 (2009-), 周長 27 km
 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76, 5.5 \text{ TeV Pb-Pb}$



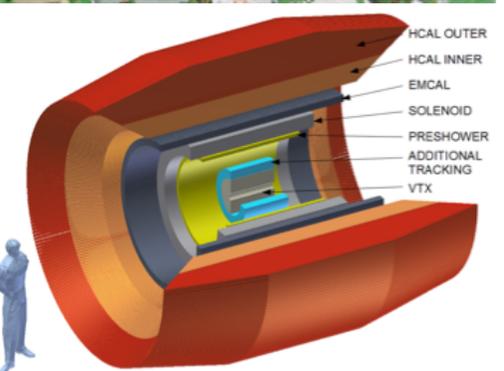
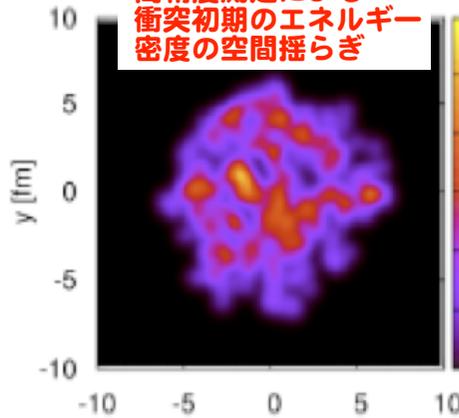
米国・ブルックヘブン国立研究所 (BNL)
RHIC 加速器 (2000-), 周長 3.8 km
 $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV Au+Au}$



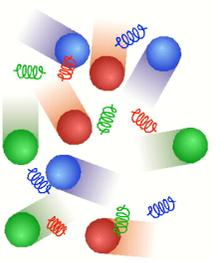
ALICE実験測定器群



高精度測定による
衝突初期のエネルギー
密度の空間揺らぎ



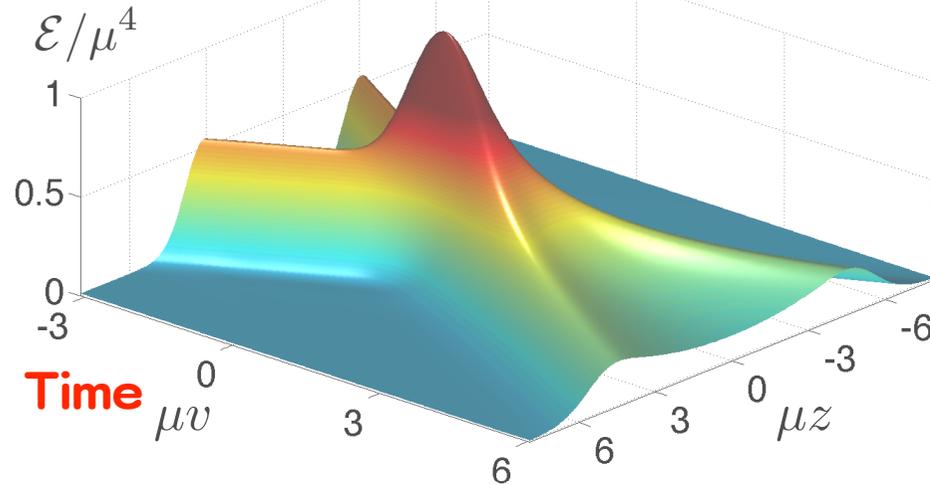
次世代PHENIX実験
測定器群



まとめ

Energy density

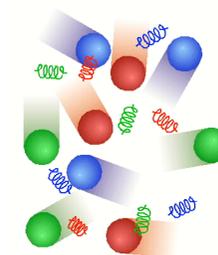
“Holography and colliding gravitational shock waves in asymptotically AdS₅”
PRL 106,021601(2011)



← 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
 - クォークレベルの統計力学、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、さらなる研究進展が期待。

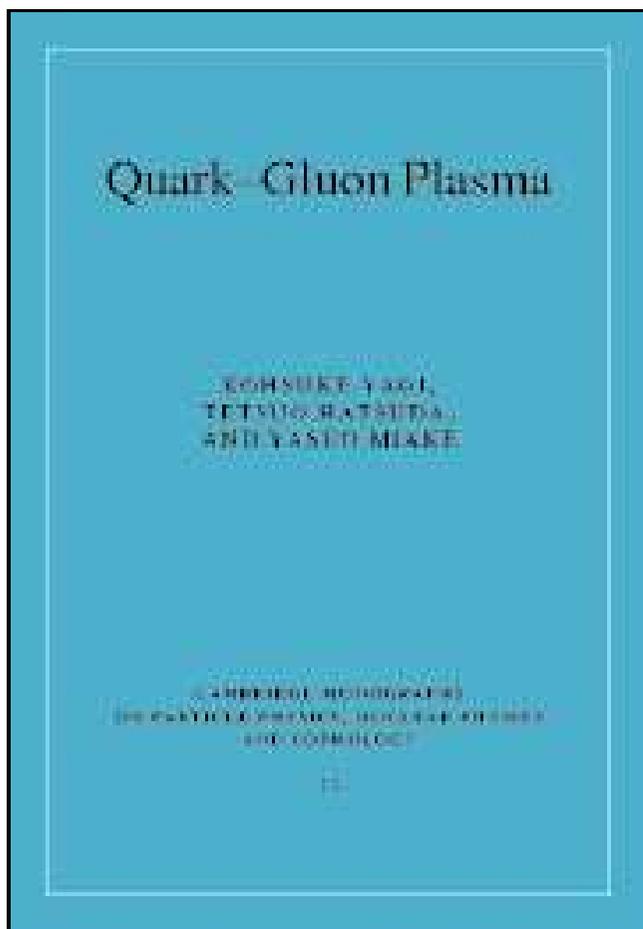
大学院生向けのQGPPの教科書！



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
(まもなく中国語版も)

Hardback (ISBN-10: 0521561086 | ISBN-13: 9780521561086)

For price and ordering options, inspection copy requests, and regional availability, visit our website at [Cambridge University Press](#) | [Americas](#) | [Australia and New Zealand](#)