

高エネルギー重イオン衝突実験による クォーク・グルーオン・プラズマ相の解明

三明康郎（筑波大学 数理物質系長）

秋葉康之（理研仁科センター）、江角晋一（筑波大）、郡司卓（東大CNS）、
志垣賢太（広島大）、杉立徹（広島大）、中條達也（筑波大）、浜垣秀樹（東大CNS）
他 核物理将来計画・高エネルギー重イオンWGメンバー

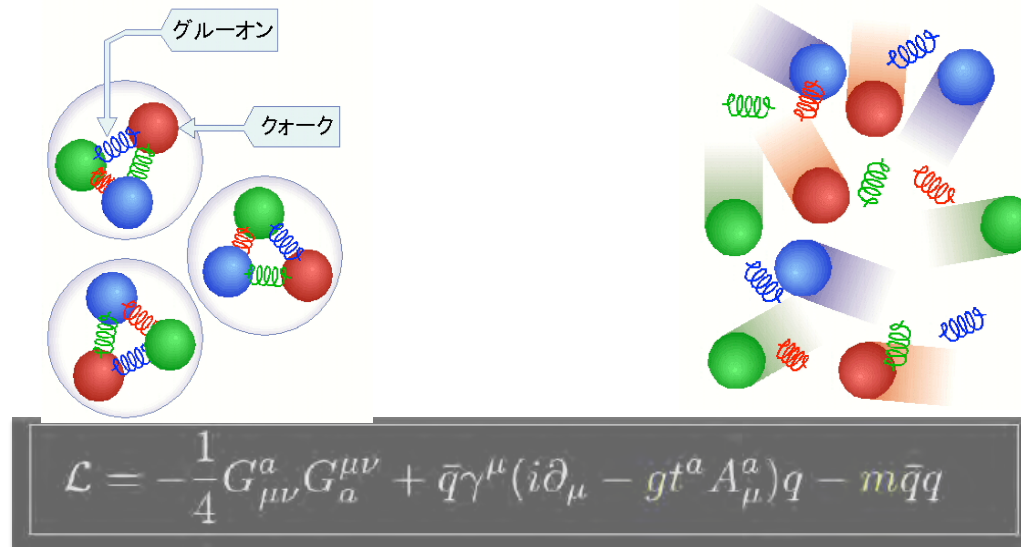
素粒子物理・原子核物理分野の「大型施設計画・大規模研究計画マスタープラン」に関するシンポジウム
（2013年2月8日、乃木坂）

内容

- 1. イントロダクション**
- 2. これまでに分かったこと、日本グループの貢献**
- 3. 今後の研究展開**
- 4. 研究概要、研究計画**
- 5. まとめ**

1. イントロダクション

クォーク・グルーオン・プラズマとは？



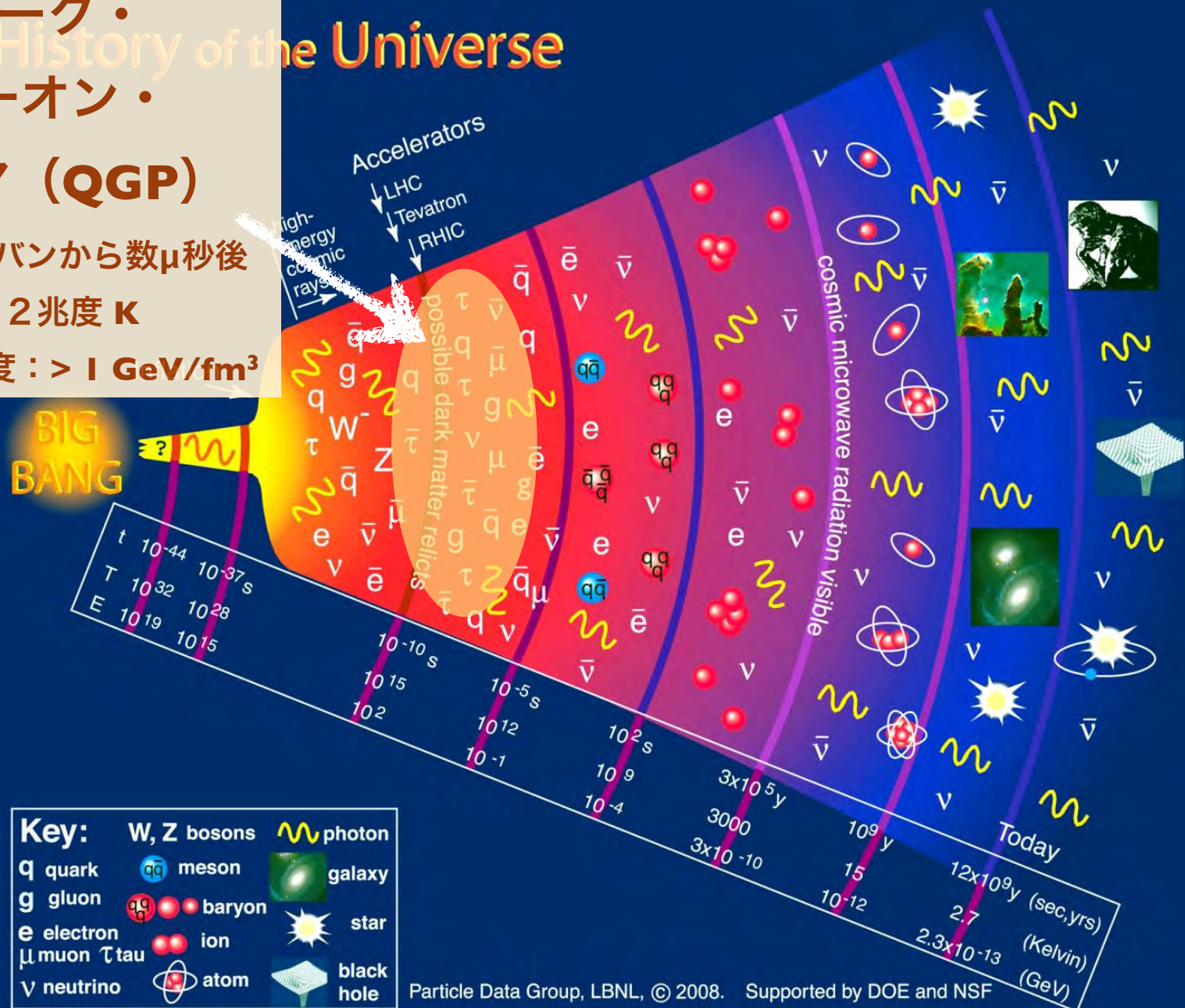
- ハドロンに閉じ込められていたクォークやグルーオンが高温高密度下で解放された状態
- 物質の存在の仕方として未知、かつ新たな状態
- 格子 QCD 計算:
 - 臨界温度 $T_c = 150\text{-}200 \text{ MeV}$,
 - ハドロン相からパートン相 (QGP) へクロスオーバーを予言

クォーク・ グルーオン・ History of the Universe プラズマ (QGP)

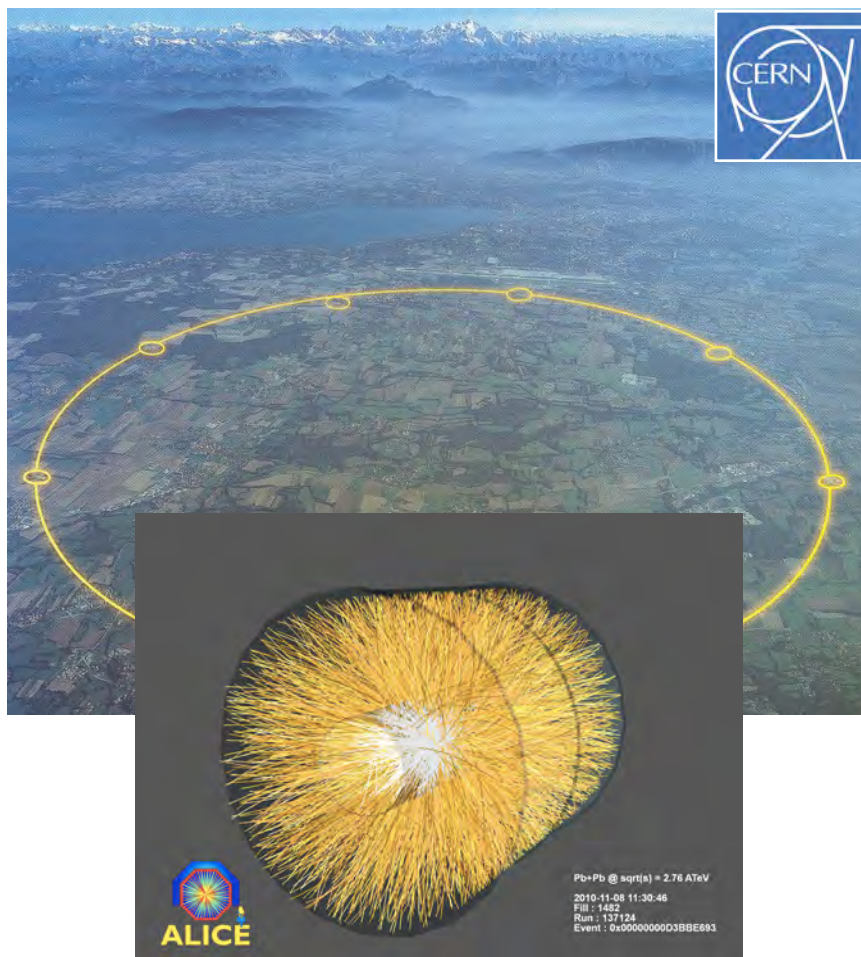
時間：ビッグバンから数 μ 秒後

温度：2兆度 K

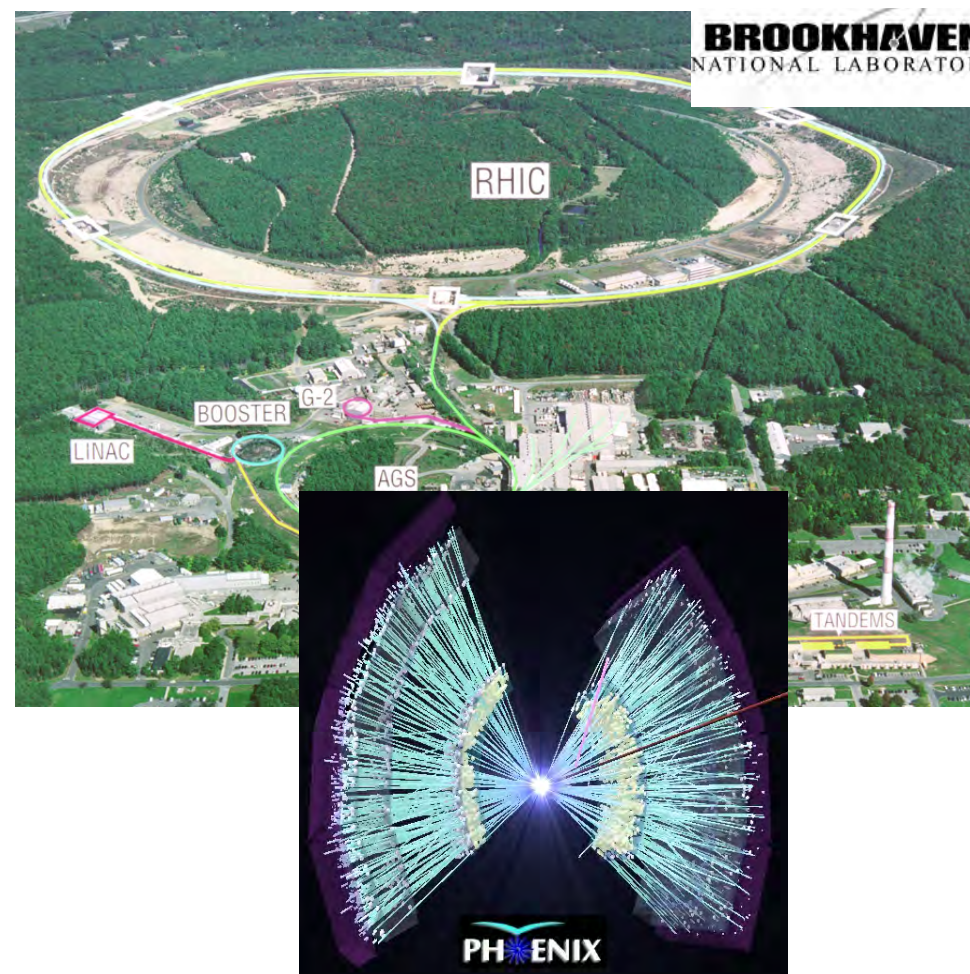
エネルギー密度： $> 1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$



Particle Data Group, LBNL, © 2008. Supported by DOE and NSF



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
 $\sqrt{s_{NN}} = 10\text{-}200 \text{ GeV Au+Au}$

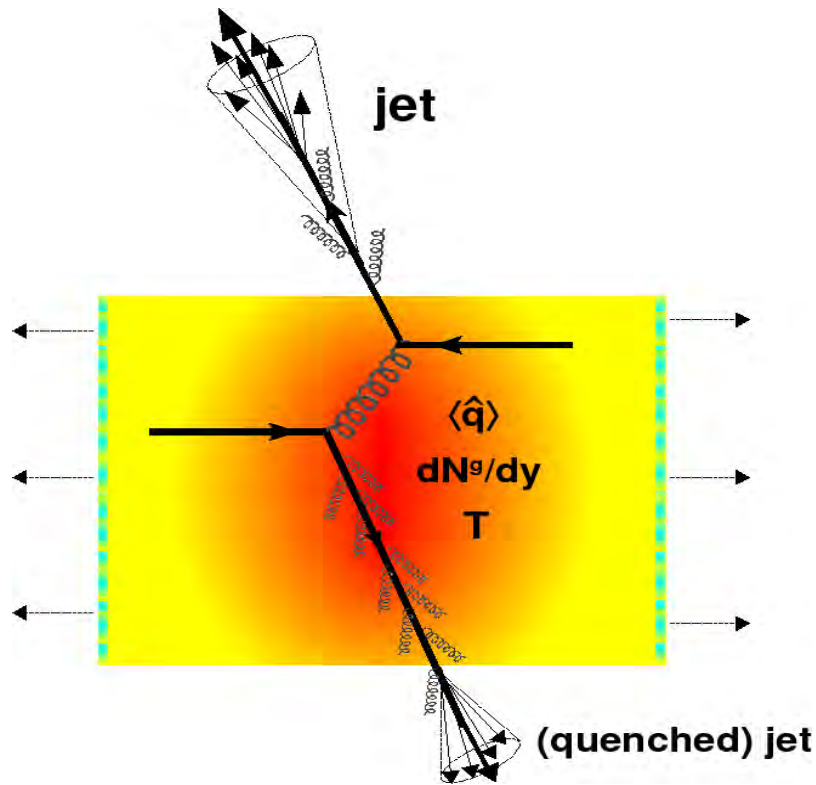
高エネルギー重イオン実験の2大拠点

2. これまでに分かったこと、 日本グループの貢献

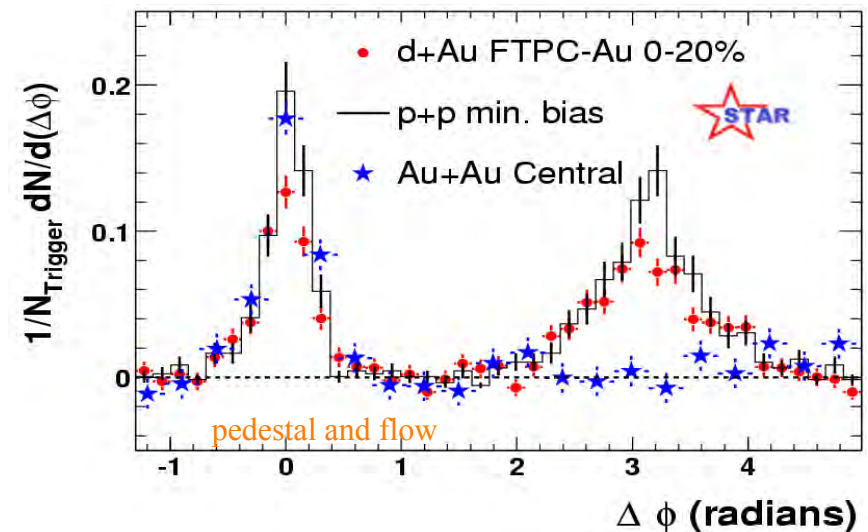
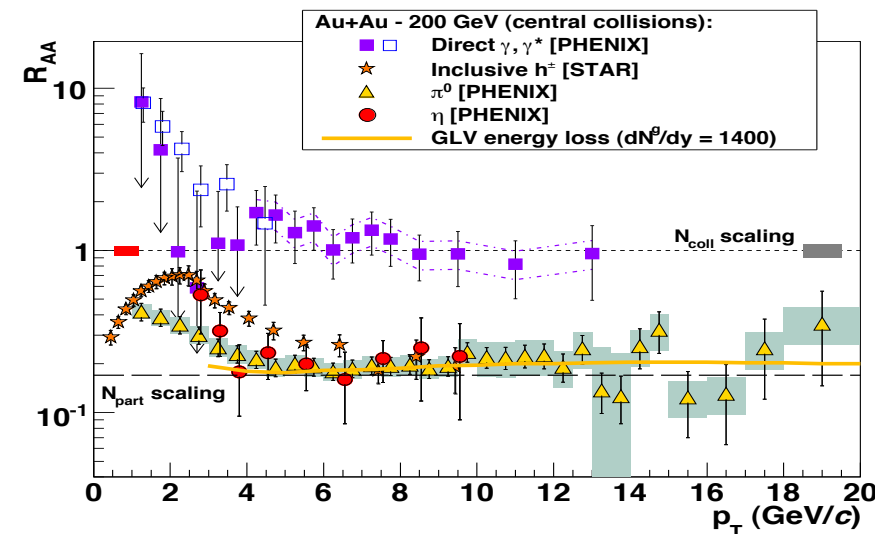


(1) ジェットクエンチング

(パートンのQGP中でのエネルギー損失)



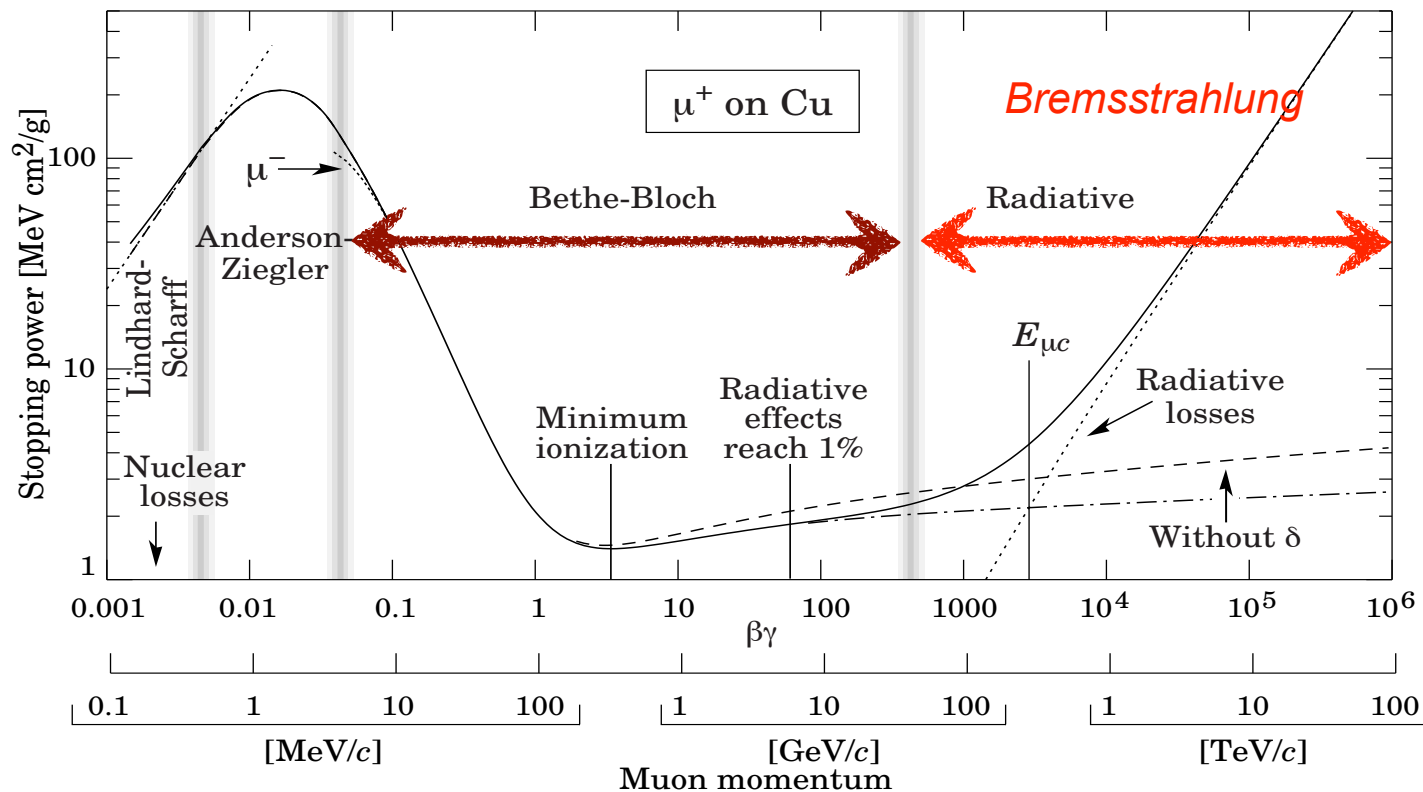
$$R_{AA} = \frac{\text{"hot/dense QCD medium"}}{\text{"QCD vacuum"}} = \frac{dn_{AA}/dp_T dy}{\langle N_{\text{binary}} \rangle \cdot dn_{pp}/dp_T dy}$$



- ✓ 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
 - ハドロンガスではかんがえられない
 - →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

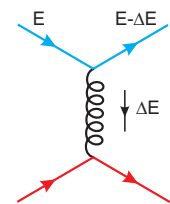
✓ Bethe-Heitler
(thin; $L \ll \lambda$)

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

✓ dE/dx 測定 → 物性を決定

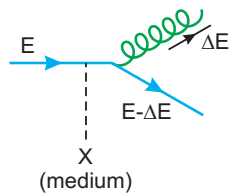
- QEDプラズマ中でのエネルギー損失 → T & m_D を与える

QGPに特徴的なエネルギー損失



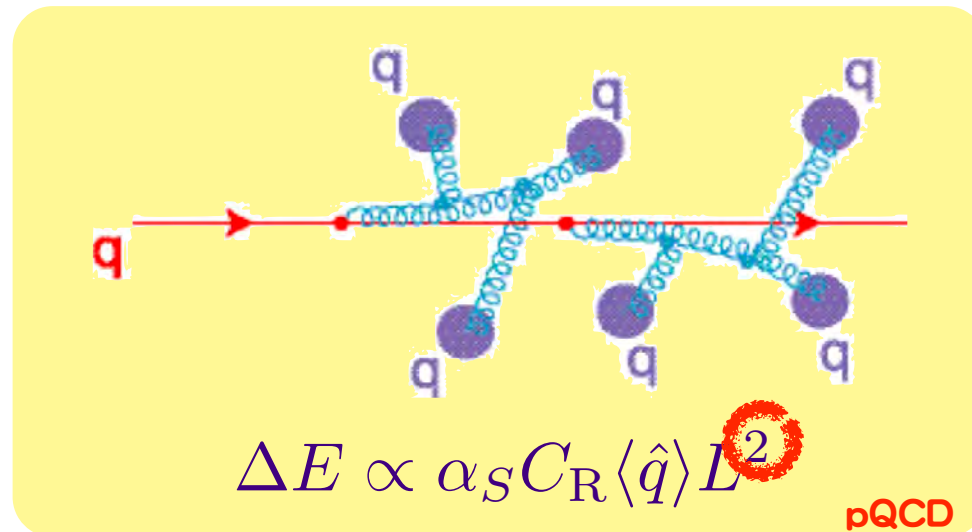
Collisional

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



Radiative

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

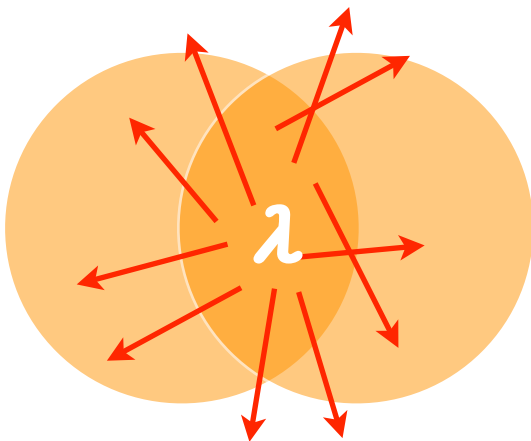
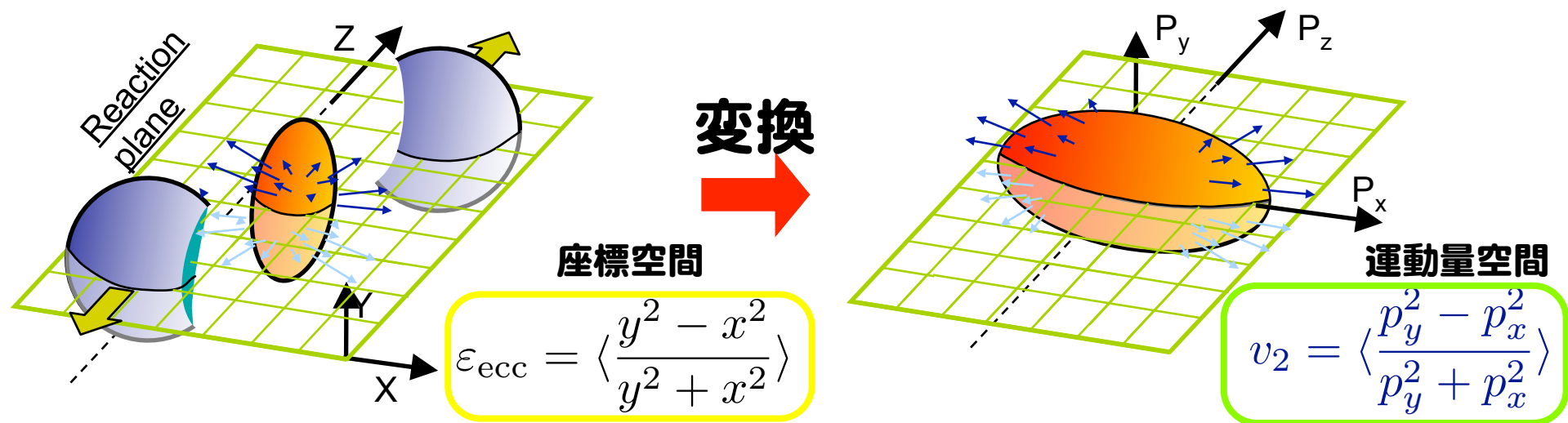


- グルーオン放射によるエネルギー損失が支配的

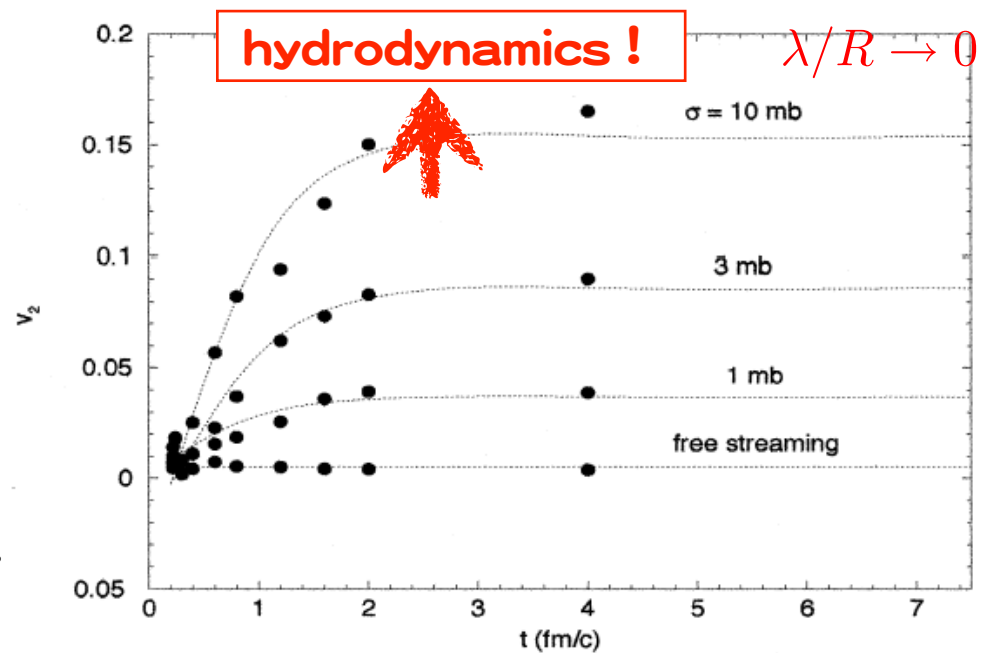
✓ dE/dx 測定 → 物性や Jet Tomography

- 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

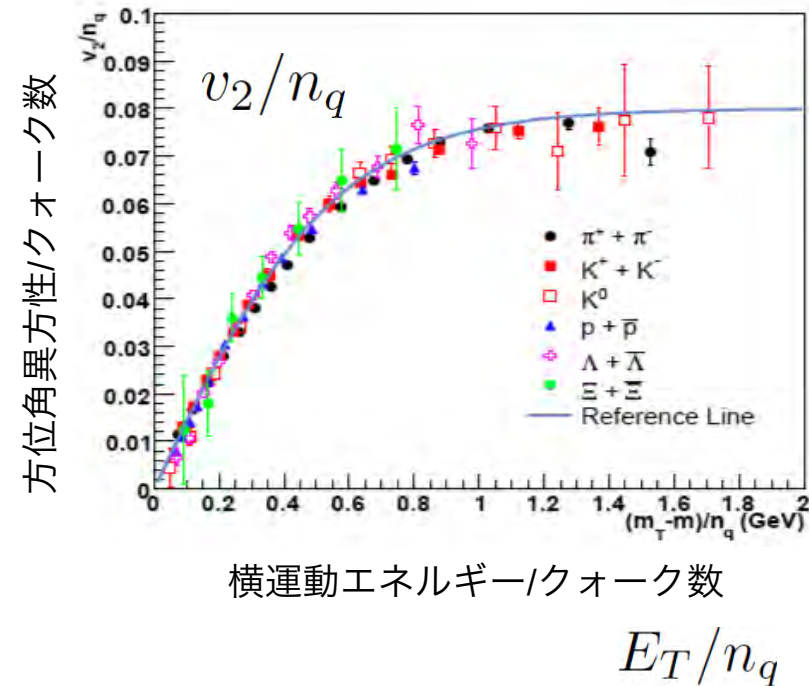
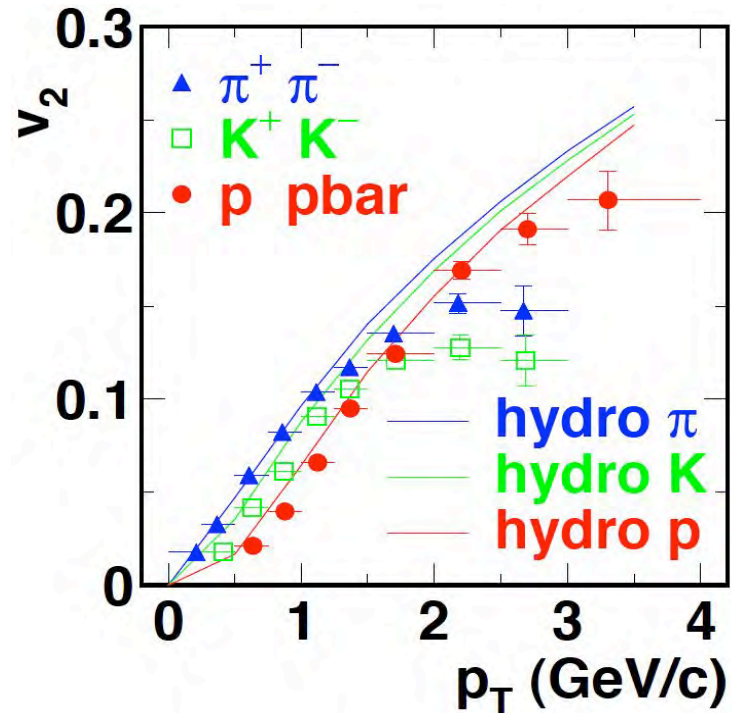


$\lambda/R \rightarrow 0$ と共に変換効率が高く流体力学に近づく



大きな方位角異方性 v_2

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

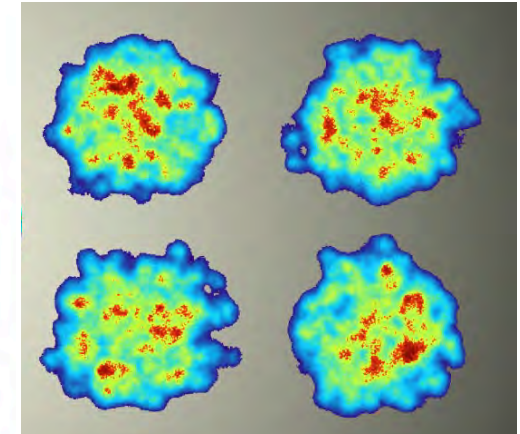
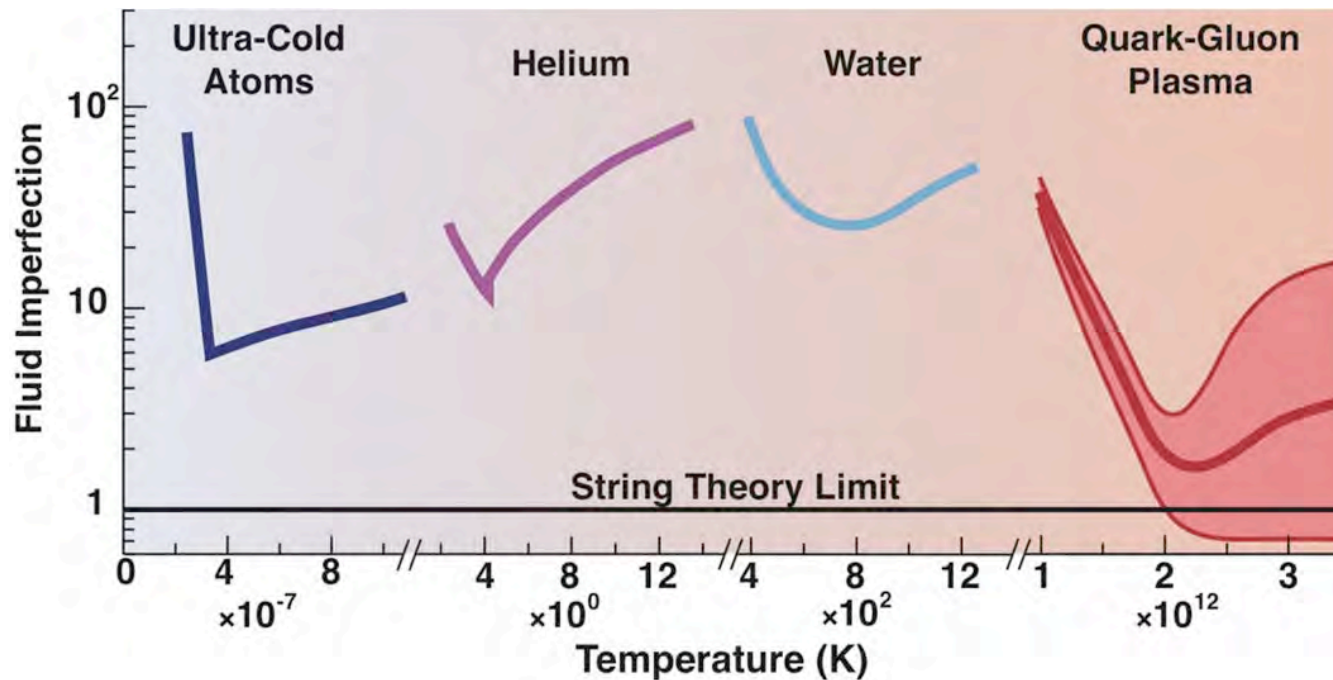


● 大きな楕円的方位角異方性 (v_2) の観測

- 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
→ パartonレベルで異方性が生成

高次の方位角異方性

Higher Harmonics



重イオン衝突の
揺らぎ

- RHICにおける方位角異方性→比ずれ粘性 (η/s) ~ 0.1 = **世界最小の η/s**
→ストリング理論における量子リミット ($1/4\pi$) に近い
- **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) .

QGP生成の主な証拠と主要論文 (RHIC-PHENIX実験)

★ **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

日本グループの貢献 (RHIC-PHENIX実験)

❖ PHENIX 実験コラボレーション (日本グループ)

- ▶ 11 国内研究機関 (スタッフ 49 名、大学院生 37 名)
- ▶ (500 コラボレータ、70 研究機関中)

❖ 実験遂行

- 初代 PHENIX 実験代表：永宮
- PHENIX 実験副代表：秋葉 (現)
- Executive 委員：江角 (現)、浜垣、他
- 物理WGコンビナー：志垣、江角、中條、浜垣、小沢、他

❖ 検出器建設・運用

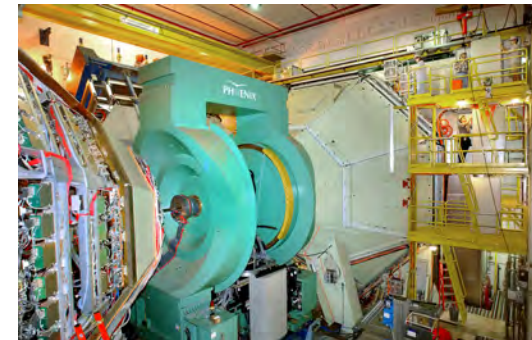
- ビーム-ビーム検出器 (広島大・杉立)
- 飛行時間測定器、エアロジェル検出器 (筑波大・三明)
- リングイメージチェレンコフ検出器 (東京大・浜垣)
- 衝突点シリコン検出器 (理研・秋葉)
- PHENIX CC-J データ解析センター (理研)

❖ 総論文数 (査読出版のみ)：100 本以上、総引用数：10,000 件以上

❖ 日本人博士号取得者：30 名以上

❖ 主な受賞

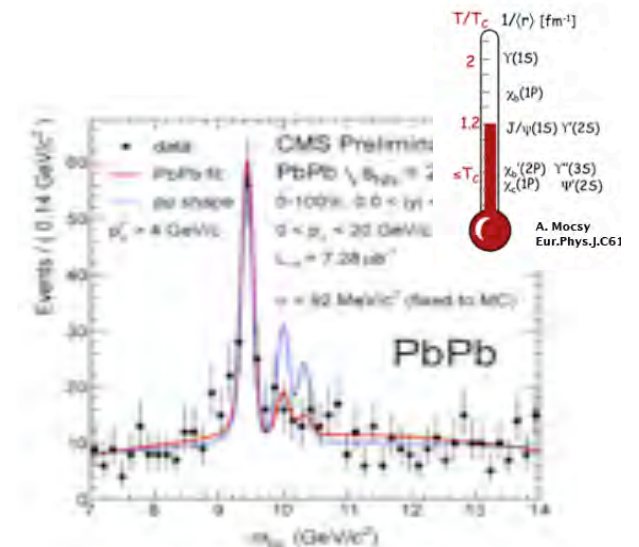
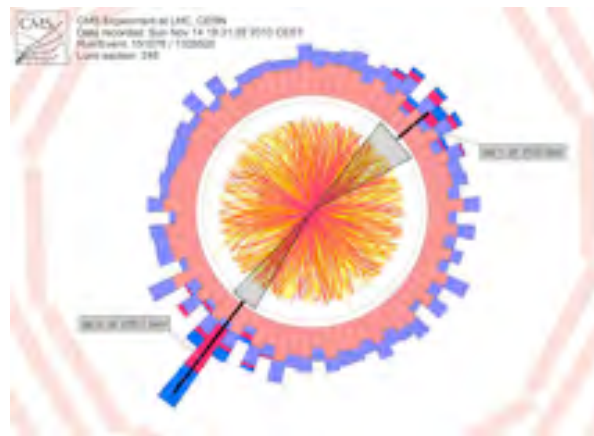
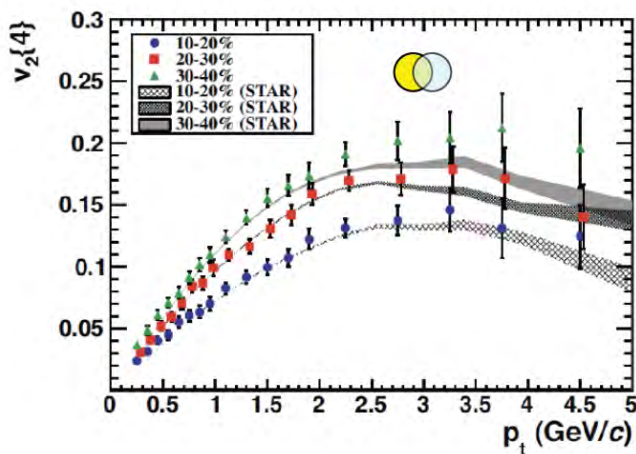
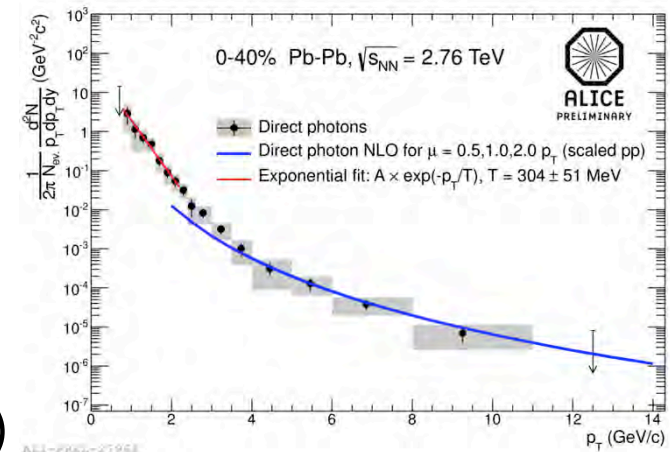
- 2011年度仁科記念賞 (秋葉)
- 原子核談話会新人賞 (郡司 (2009), 深尾 (2009), 坂井 (2008), 中條 (2005))



**日本グループはPHENIX
実験を主導し、強結合
QGPの発見など、QGP
の性質解明に大きく貢献**

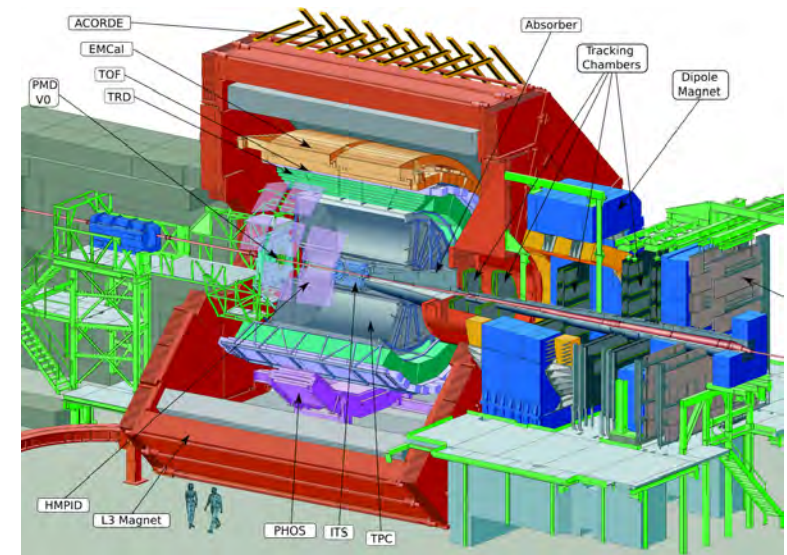
LHC加速器による重イオン衝突（2010-）と初期成果

- 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）



- **ALICE実験コラボレーション(日本グループ)**
 - 4国内研究機関 (スタッフ 11人、大学院生 15人)
- **実験遂行**
 - 物理論文管理委員：浜垣
 - 講演者選定委員：杉立
 - 低質量電子対物理解析部会共同座長：郡司
- **検出器建設&運用**
 - フォトン検出器 (広島大・杉立 (PHOS 副責任者))
 - ダイジェット検出器(筑波大・三明)
 - 遷移放射検出器、前方カロリメータ検出器、GEM-TPC (東京大・浜垣)
- **データ解析拠点**
 - Tier 2 センター (@広島大・責任者 杉立)
- **日本人博士号取得者**：1名 (+ 2名、2013年春取得予定)

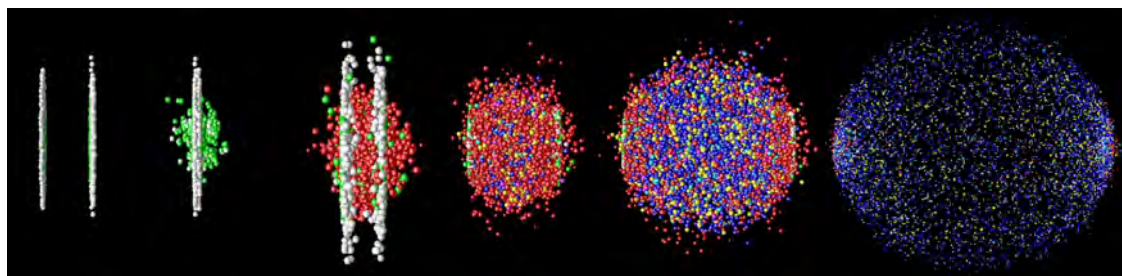
日本グループの貢献 (LHC-ALICE実験)



**2010年より重イオン
実験開始。近年、検出器
増強とデータ解析の両面
で貢献を拡大**

3. 今後の研究展開

まだ分かっていないこと



初期条件→前平衡→パートン散乱→熱化(QGP)→ハドロン生成→膨張

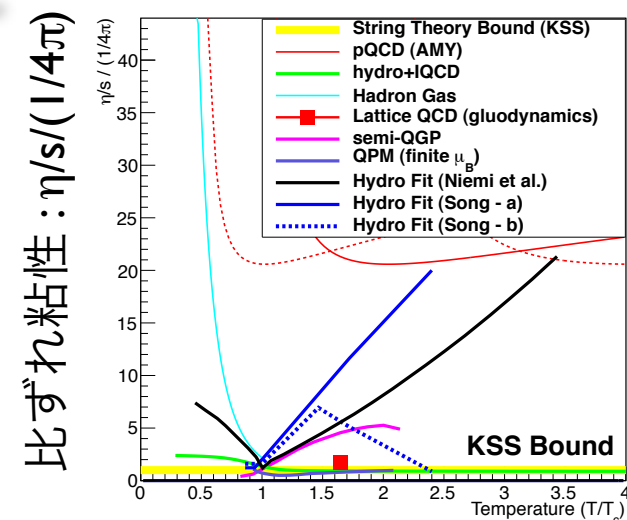
- 衝突初期条件の解明 (カラーグラス凝縮?)
- Thermalizationのメカニズム
- QGP物性量(比粘性、輸送係数等)の温度依存性
- 相図の構造
 - QCD critical point の探査 (RHIC)



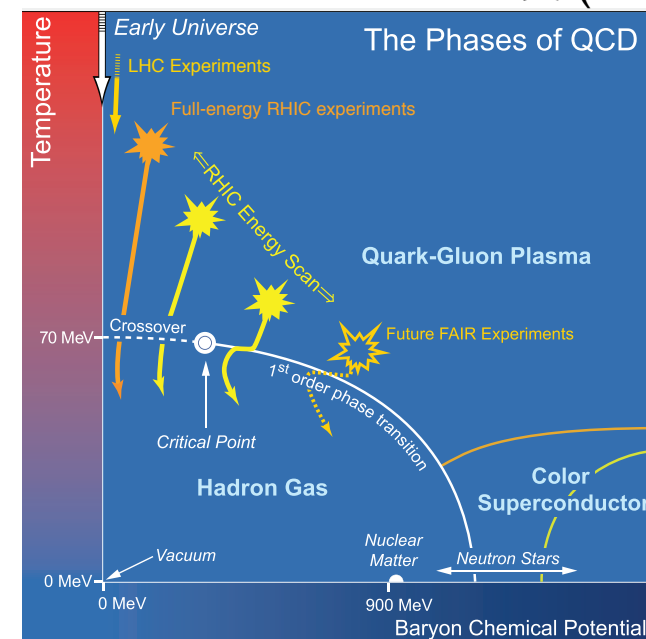
鍵となる測定量：

(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)



温度 (T/T_c)



ジェット測定で分かるQGP物性

LHC エネルギー：

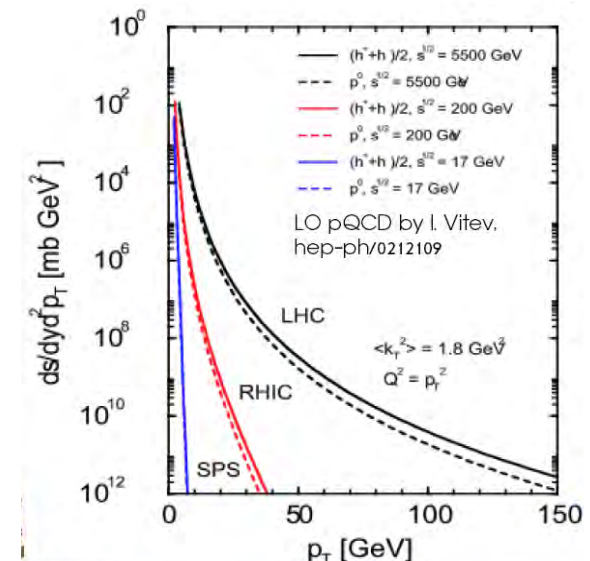
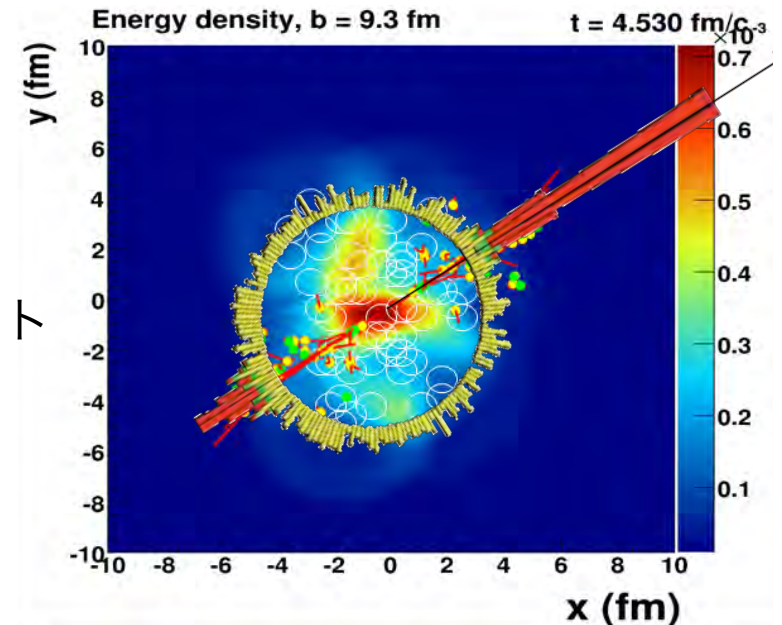
- RHIC に比べてハードプロセスが支配的
- ジェットを基軸とした新たな観測量：
 - ジェット通過によるQGP媒質応答
 - 重クォークジェット、ジェット対、光子-ジェット
 - 失ったエネルギーの再分配、EOS、音速
 - 重いクォークの強結合系QGPとの相互作用（熱化、相互作用の強さ）

→ 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
- 2π 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

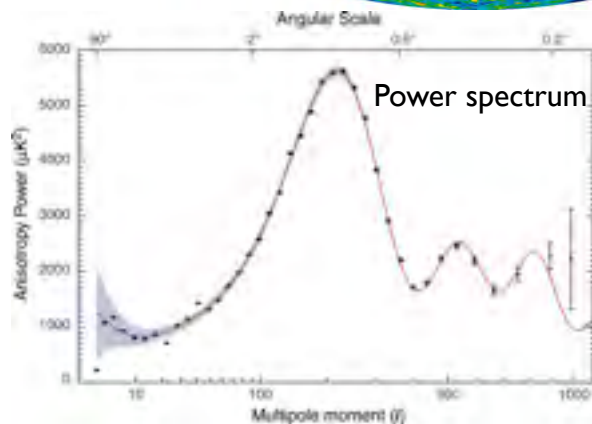
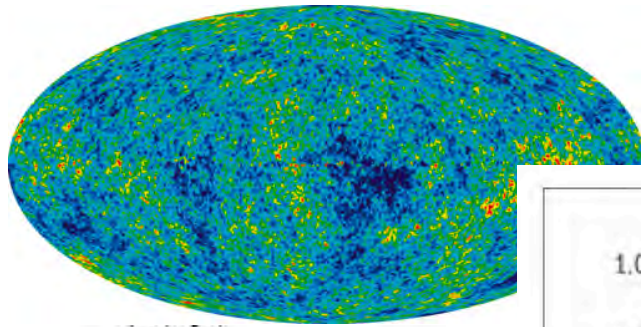
→ ジェットエネルギー損失の温度依存性



高次異方性 (higher harmonics)で分かる

QGP物性

Fluctuations of the Universe



WMAP

宇宙論パラメータの決定

Fluctuations of Little bang

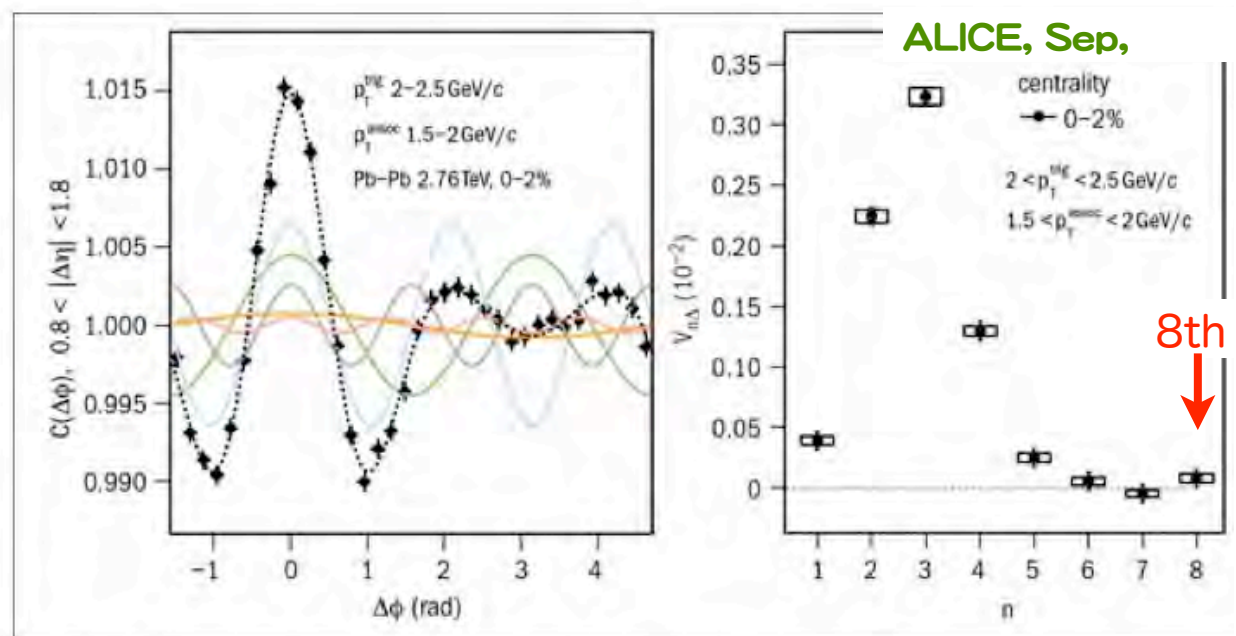
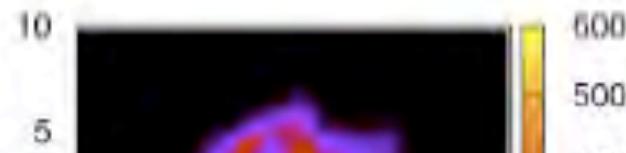


Fig. 1. Left: correlation function for charged hadron pairs from head-on Pb-Pb collisions. Right: corresponding spectrum of Fourier harmonic amplitudes vs n .

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

→ やはり測定装置の高速化と High- p_T 化が鍵

4. 研究概要と計画

研究概要

1) RHIC, LHC での高エネルギー重イオン実験を遂行

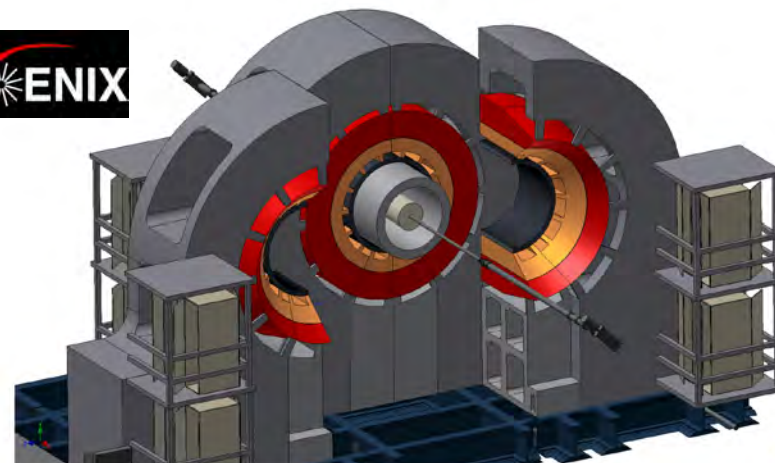
2) 超高温QCD物質の物性研究を推進

- 実験装置の High- p_T 化、高速化により、ジェットを基軸とした測定や、レアプローブ（種々のハドロン、フォトン、lepton, light quark, heavy quark）の高次異方性などの測定を可能に。
 - ➡ QGP物性の精密測定、衝突初期条件の決定、早期熱化の謎の解明
 - ➡ 広範なエネルギー領域 ($\sqrt{s_{NN}}=10 \sim 5500\text{GeV}$) で測定.
- 国内研究拠点を形成、日本主導の研究を展開.

RHIC-PHENIX実験 High- p_T 化

High- p_T 化

ジェット測定強化
重クォーク測定強化

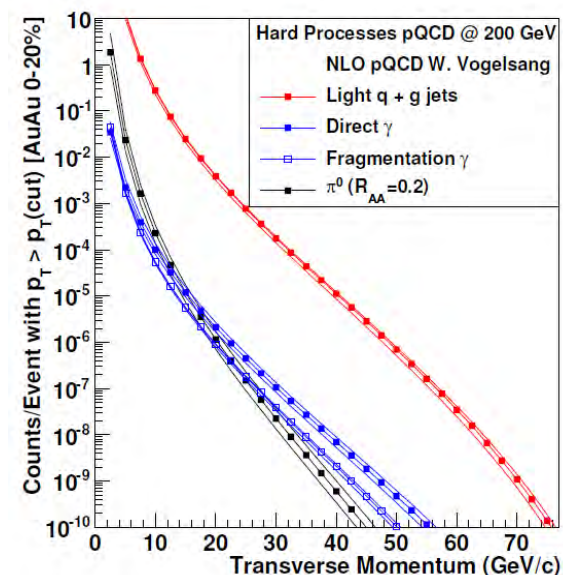


- 測定器の新規建設

PHENIX → sPHENIX

- 日本が建設を主導する検出器：
 - ✓ シリコン飛跡検出器
 - ✓ プレシャワー検出器

ジェット、重クォーク測定から、RHIC
エネルギーでのQGP中でのエネルギー
損失 (輸送係数)の温度依存性を決定



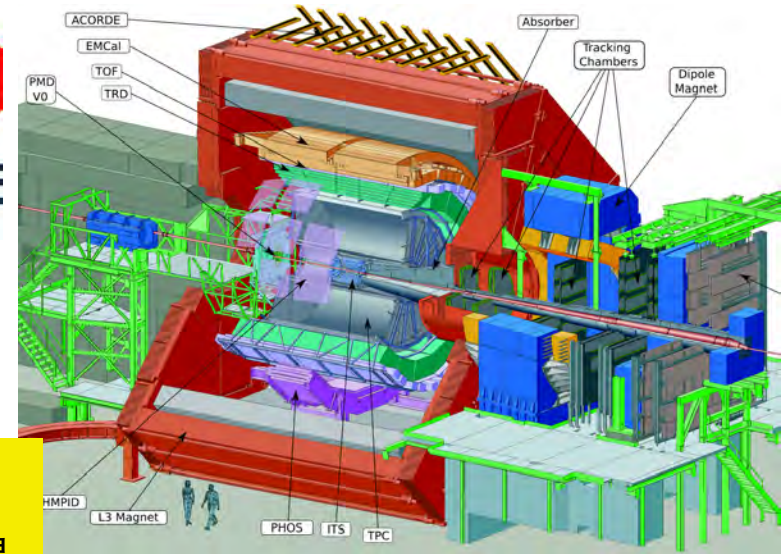
sPHENIX実験: 総額\$20M-30M

BNLの内部レビュー終了、DOE-CD0レビューを待つ段階
arXiv:1207.6378

LHC-ALICE実験 高速化

ALICE 実験測定器の高速化

- 日本グループが担当する検出器：
 - ✓ GEM-TPC連続読出高速化
 - ✓ カロリメータ高速化
- グリッド計算機 (Tier2) の強化



ALICE実験高度化: 総額€40M
LHCCによるendorsement (2012年9月)

LHCの高輝度化、Pb-Pb衝突(50kHz)に対応
全衝突事象を記録し、これまでの100倍のデータ取得
(ATLAS, CMS 実験では不可能)

→ **高精度測定、レア事象へのアクセスが可能に**

物理の目標:

ジェットとともに低運動粒子 (PID含)、重クォークや
光子やレプトン対の方位角異方性を同時測定

→ QGP媒質応答、重クォークと強結合系の相互作用
(熱化、相互作用の強さ) を決定



高エネルギー重イオン研究の 国内拠点形成に向けて

- 今後も日本が主導的に高エネルギー重イオン物理研究を遂行するためには、国内の研究母体（センター）の設立が不可欠。

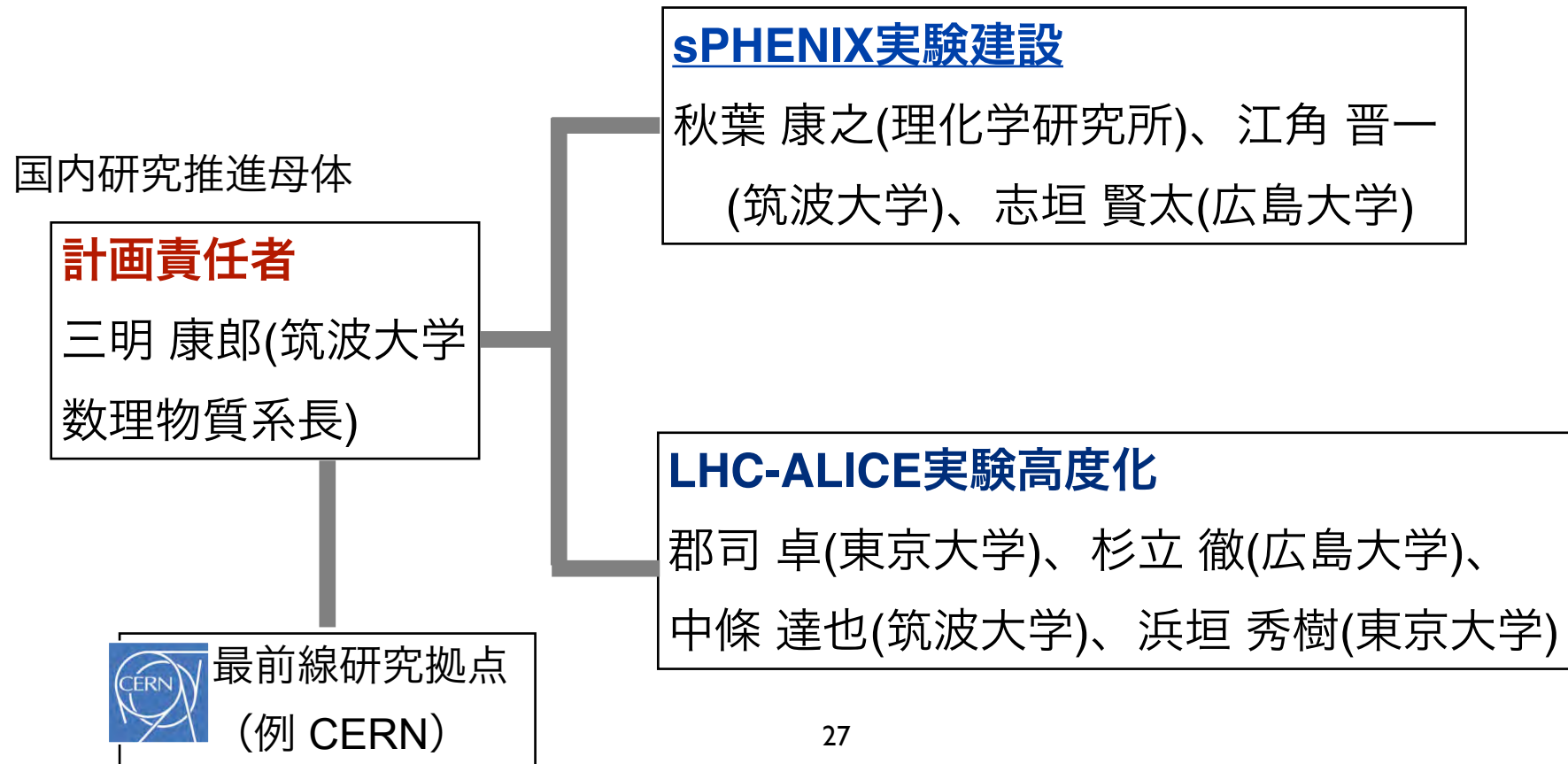
案）筑波大学・数理物質系に素粒子・原子核・宇宙分野が連携した「宇宙史・数物連携研究センター（仮称）」を立ち上げ、研究母体を形成。

さらにCERN 研究所など当センターの海外研究拠点を設置。最前線基地として関連研究を推進すると同時に、大学院生や若手研究者を育成。

- ✓ 大阪大学核物理研究センター(RCNP)、東京大学原子核科学研究センター（CNS）、理化学研究所等を研究母体とする可能性も

研究実行組織

- 参加研究機関：筑波大学、東京大学、広島大学、理化学研究所
- 参加人数：50人程度(含学生、2013年現在)



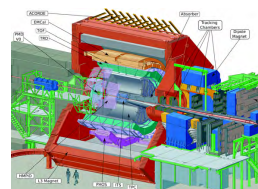
実施期間・年次計画・予算規模

本研究期間 (H26-H35の10年間)

H26-H30

LHC-ALICE実験

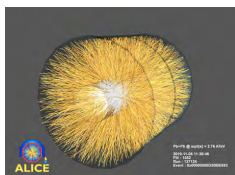
- ・ カロリメーター高速化
 - ・ GEM-TPC高速化
 - ・ グリッド計算機システム強化
- H30年に完成。総額10億円



H31-H35

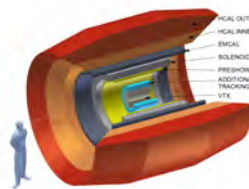
LHC-ALICE実験/RHIC-(s)PHENIX実験の遂行、運営

遂行/運営費(1億円/年 x 10年 = 10億円)



RHIC-sPHENIX実験

- ・ シリコン飛跡検出器R&D, 建設
 - ・ 前置シャワー検出器R&D, 建設
- H30年頃に完成。総額10億円



予算規模

ALICE実験 高速化: ~10億円

sPHENIX実験 High- p_T 化: ~10億円

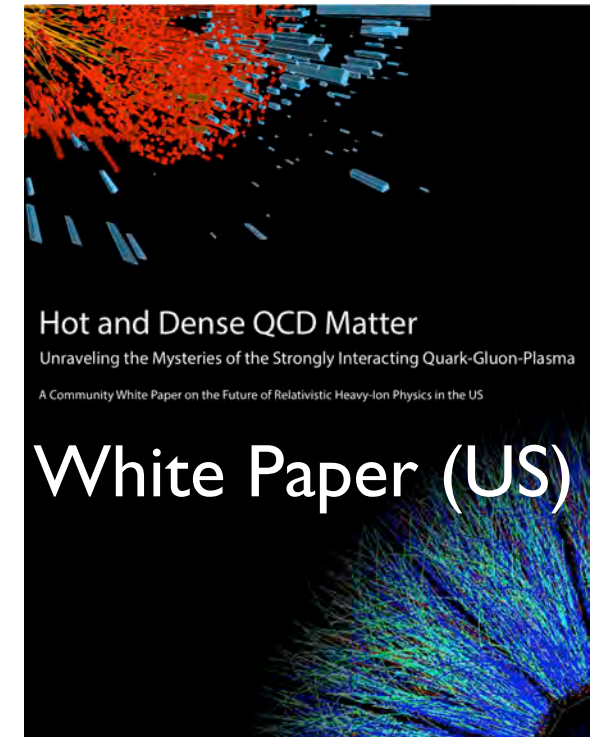
実験運営/遂行費: ~10億円

海外の研究動向

- 欧州、米国ともに今後の長期計画を策定中
- LHC加速器での重イオン物理
 - LHCにおける最高エネルギー重イオン衝突の遂行とQCD物質物性の研究(欧州)
 - NuPECCによるendorsement
- RHIC加速器での重イオン物理

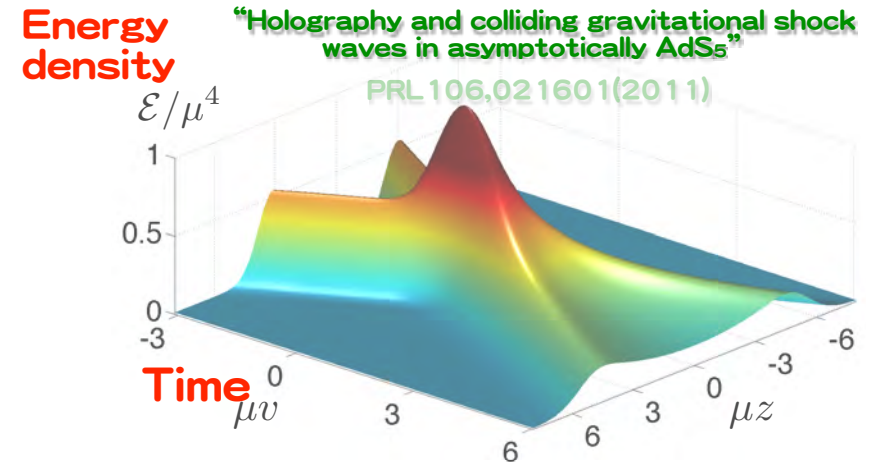
RHICの衝突エネルギースキャン実験 (critical point 探索)、
QGP物性の精密化

- White Paper (Tribble委員会)



欧州・米国ともに、QGPの
「発見」から「精密研究」に
向けた加速器・実験の
高度化プランが進行中

まとめ



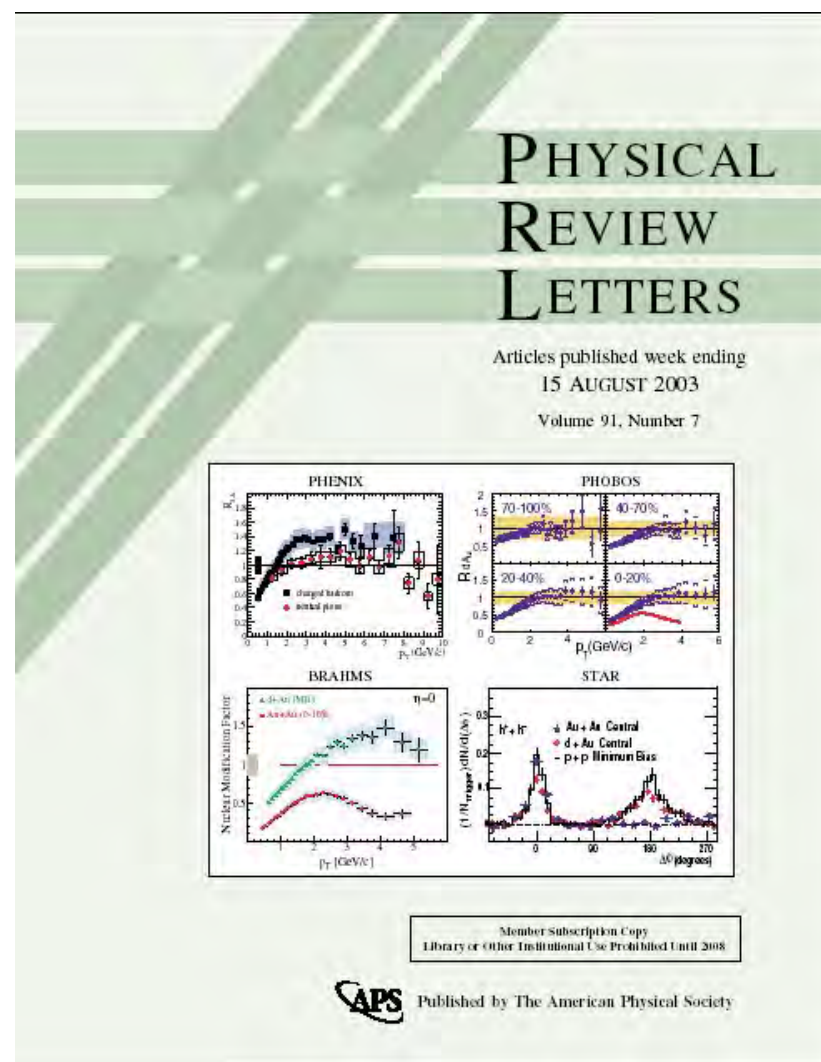
- 高エネルギー重イオン衝突による高温高密度QCD物質の研究は、原子核物理分野における最も重要な研究課題の一つ。
- 当研究への日本グループの寄与は大きく、この10年で高温高密度QCD物質の研究が大きく進展した。
- 欧米の原子核物理コミュニティでも最優先に位置づけられている研究分野。
- 今後10年、LHC-ALICE実験、及び RHIC-PHENIX実験の両加速器及び測定器両面において大きな改良時期を迎え、さらなる研究進展が期待。
- これらの新規プロジェクトにリソースを集中し、今後とも日本グループの主導性を担保、当該分野の発展に寄与する。
- 国内研究センター設立ならびに最前線研究拠点をCERNなどに設置、日本主導の高温高密度QCD物質の研究を展開。

BACKUP SLIDES

RHIC におけるQGPの発見 (2002-2003)



ジェットクエンチの発見
(PHENIX, 2002)



ジェットクエンチ効果が
終状態であることを確認
(PHENIX, PHOBOS, BRAHMS, STAR, 2003)

RHIC における強結合QGPの発見 (2005)

社会

asahi.com トップ > 社会 > その他・話題

宇宙の始まりはしづく? 「クォークは液体」と発表

2005年04月18日23時34分

宇宙誕生の大爆発「ビッグバン」直後に相当する超高温・高密度の状態を再現する実験をしてきた日米の研究者が、物質を形づくる究極の基本粒子クォークが、気体のように自由に飛び回るのでなく、液体のようにつながった状態にあったと考えられる、と発表した。宇宙や物質のなりたちを説明するシナリオがある。

基本粒子クォークとそれらをくっつけるグルーオンという素粒子は、超高温の宇宙の初期に存在していたが、冷えた今の宇宙では、強い力によって引き離され、1個ずつ引き離すのは難しい。

チームは00年から米ブルックヘブン国立研究所の金イオン衝突加速器を使い、金イオン同士を衝突させ、ビッグバン直後の状態を再現した。そこから飛び出した粒子の軌跡を測定し、クォークとグルーオンが液体のようにつながった状態にあったと発表した。

2005年04月19日

サイエンス

ニューストップ > サイエンス > 記事全文

記事全文

宇宙創成:

「ビッグバン直後は液体」「気体説」覆す

東京大学の浜垣秀樹助教授らの研究グループは18日、約140億年前のビッグバン(大爆発)直後、宇宙は液体状態だった、と発表した。気体であると予想されていた従来の説を覆すもので、宇宙創成の解明につながる可能性もある。

宇宙はビッグバンと共に始まったとされる。浜垣助教授らは、米国ブルックヘブン国立研究所の金イオン衝突加速器を使い、金の原子核同士を光速に近いスピードで正面衝突させた。その衝撃で、ビッグバンから100万分の1秒後の温度約2兆度の状態を再現した。

気体であれば、衝突によって中間子などの粒子が四方八方に飛び出る。ところが、実験では水平方向に飛び散る粒子が多かった。宇宙がラグビーボールを立てたような形で、液体でできていたと見ると理論的に合った。

液体は、中間子などを構成する基本粒子のクォークと、クォーク同士を結び付けているグルーオンが溶け合ったものだ。【去石信一】

毎日新聞 2005年4月18日 22時27分



4兆度の超高温達成を確認 (2010)

科学新聞

2010年(平成22年)3月5日(金曜日) (6)

重イオン衝突型加速器「RHIC」で

理化学研究所と高エネルギー加速器研究機構(RIKEN)を中心とする研究グループは、このほど、米ブルックヘブン国立研究所(BNL)の重イオン衝突型加速器「RHIC」を用いて、超高温状態を作り出したことを確認した。この高温は、宇宙の誕生直後の状態と見られる。研究グループは、この高温状態の達成を確認し、その後の研究を進める予定だ。

理研とKEKの研究グループ

4兆度の超高温実現

理化学研究所と高エネルギー加速器研究機構(RIKEN)を中心とする研究グループは、このほど、米ブルックヘブン国立研究所(BNL)の重イオン衝突型加速器「RHIC」を用いて、超高温状態を作り出したことを確認した。この高温は、宇宙の誕生直後の状態と見られる。研究グループは、この高温状態の達成を確認し、その後の研究を進める予定だ。

理化学研究所と高エネルギー加速器研究機構(RIKEN)を中心とする研究グループは、このほど、米ブルックヘブン国立研究所(BNL)の重イオン衝突型加速器「RHIC」を用いて、超高温状態を作り出したことを確認した。この高温は、宇宙の誕生直後の状態と見られる。研究グループは、この高温状態の達成を確認し、その後の研究を進める予定だ。

宇宙最高の「4兆度」 日米チーム実現

現在の宇宙のなかで最も熱い4兆度という超高温状態をつくり出すことに、理化学研究所や東京大、米ブルックヘブン国立研究所などの研究チームが成功した。宇宙が始まった「ビッグバン」から100万分の1秒後の状態を再現したと考えられ、宇宙進化を解明する手がかりになると期待される。米ワシントンで開かれる米国物理学会で15日に発表された。

太陽中心部の25万倍

日刊工業新聞

2010年(平成22年)2月17日 水曜日

24

4兆度Cの高温状態作成

理研・高エネ機構など

理化学研究所と高エネルギー加速器研究機構は16日、米ブルックヘブン国立研究所と共同で、重イオン衝突型加速器「RHIC」を使い、太陽の中心温度の10万倍に当たる約4兆度Cの高温状態を作り出すことに成功したと発表した。実験室で発生できるこれまでの最高温度で、宇宙創成「ビッグバン」の謎の解明につながるものとみられている。

RHICで金原子核同士を光速に近い速度で衝突させた。ビッグバン直後の数十万分の1秒の間、宇宙を満たしていた

粘性がゼロの完全なを生み出したという