

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

1. 序
2. これまでにわかったことと日本グループの寄与
3. 今後の研究内容、研究組織と研究計画
4. まとめ

三明康郎 (筑波大学)

他 高エネルギー重イオン研究グループ

1. 序

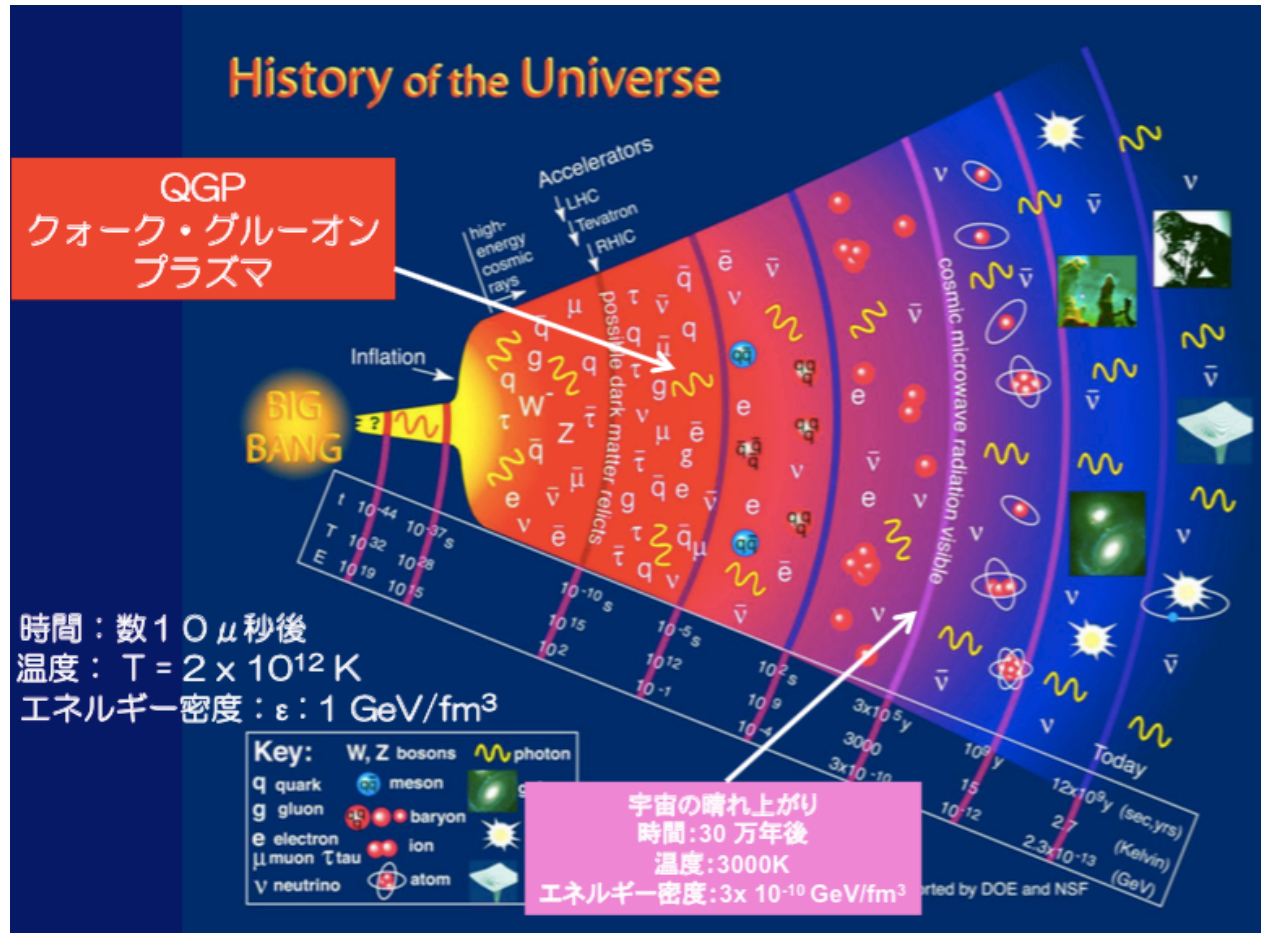
クォーク・グルーオン・プラズマとは？
研究目的、学術的意義

クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)とは？

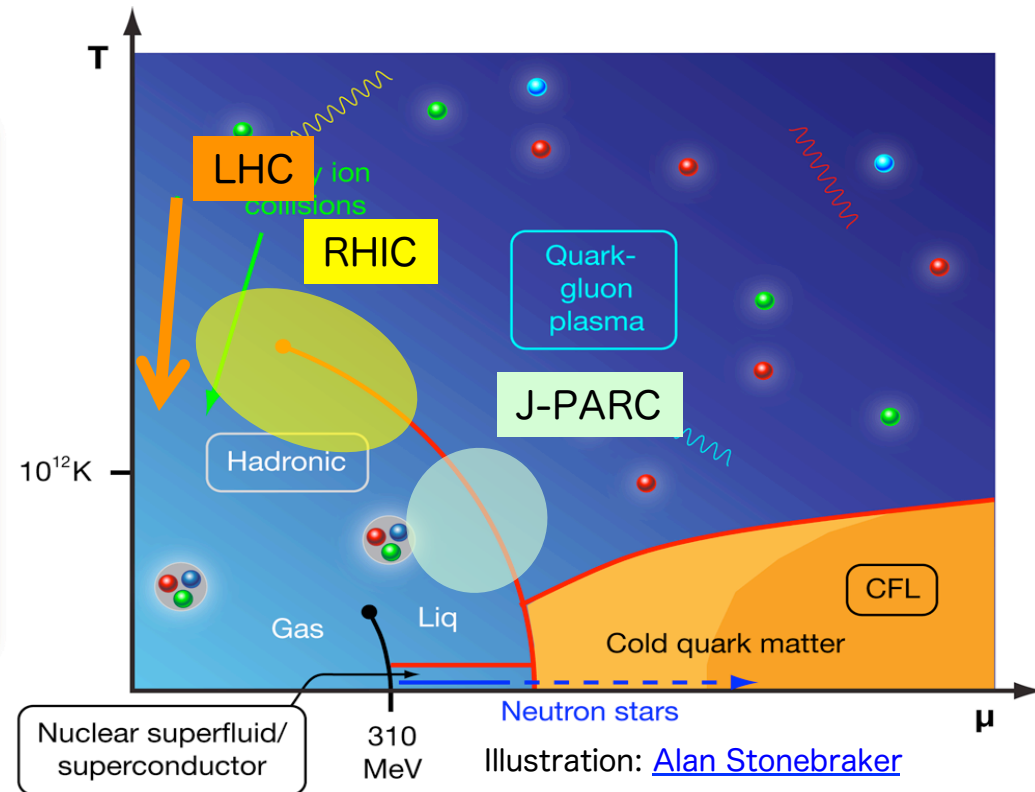
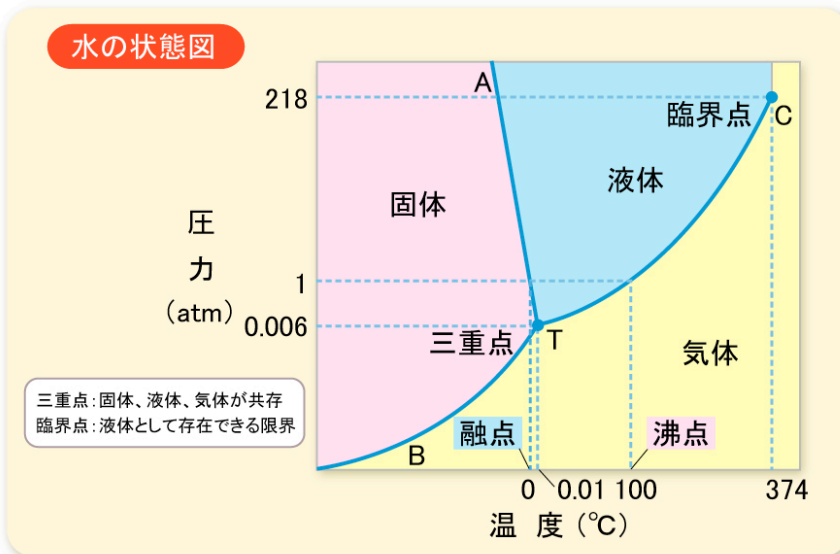


- クォークは通常、ハドロンの中に閉じ込められている。
- ハドロンを加熱($\sim 150\text{MeV}$)、圧縮($\sim 1/\text{fm}^3$)する。
 - クォークがハドロンの閉じ込めから解放されて、クォークとグルーオンから成るプラズマ物質が生成 (クォーク・グルーオン・プラズマ, QGP). 新たな物質の存在相

研究目的① 初期宇宙の理解

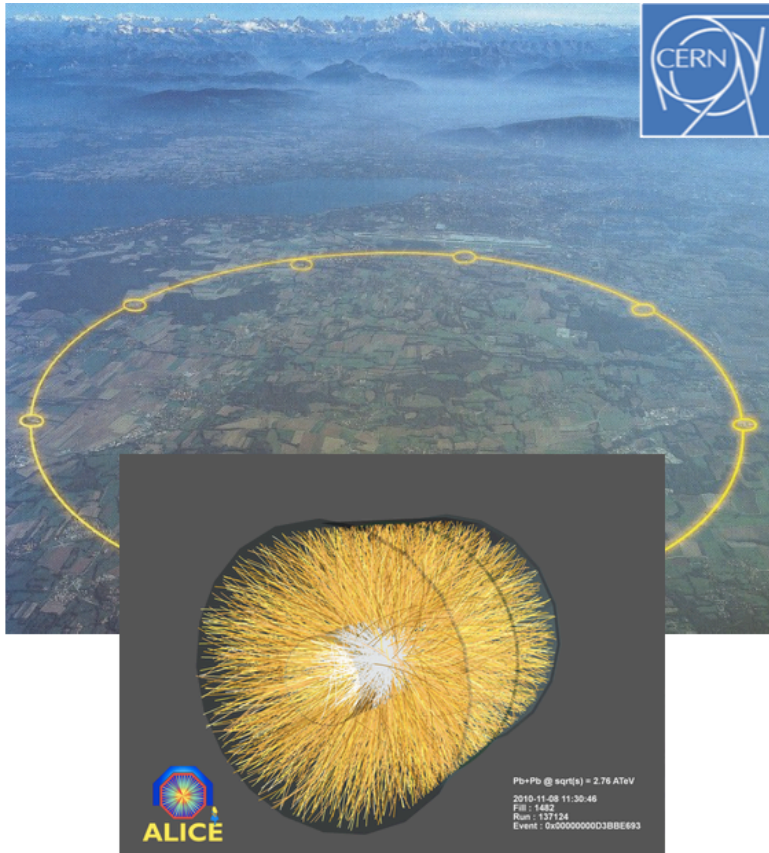


研究目的② 相構造の理解

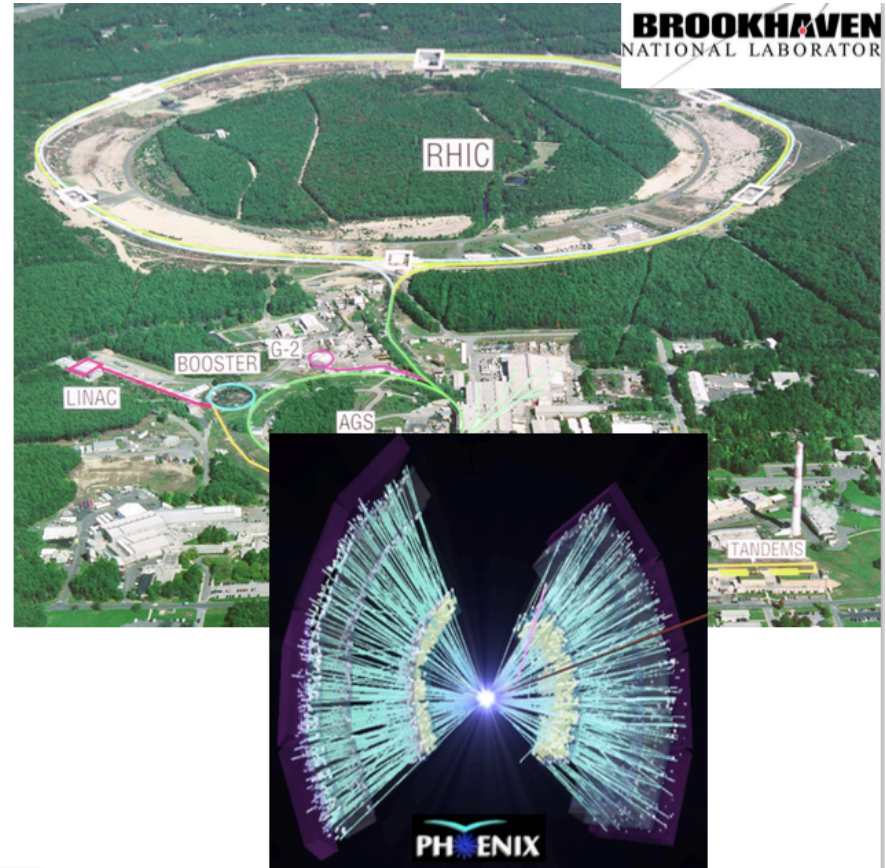


- ハドロン物質の相構造、QGPとの相境界・臨界点を解き明かす。
 - ハドロン物質にも通常物質と同様に豊かな相構造が存在する。
 - 中性子星やクォーク星の理解
 - 相境界がどこにあるかはわかっていない。
- LHC, RHIC, J-PARCの3種の加速器を駆使して探求

現在の高エネルギー重イオン実験拠点



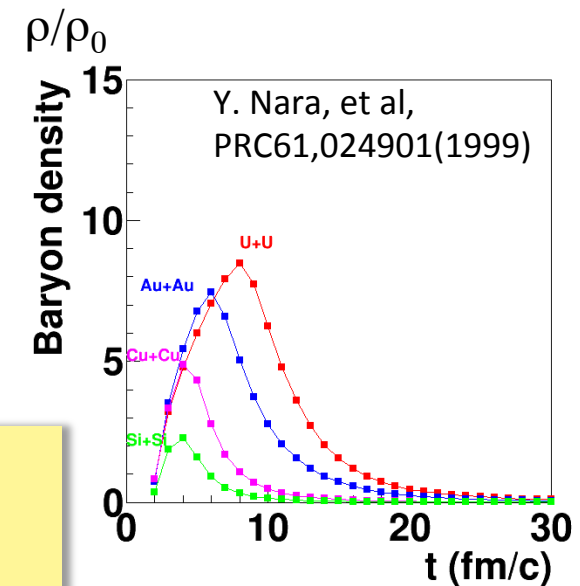
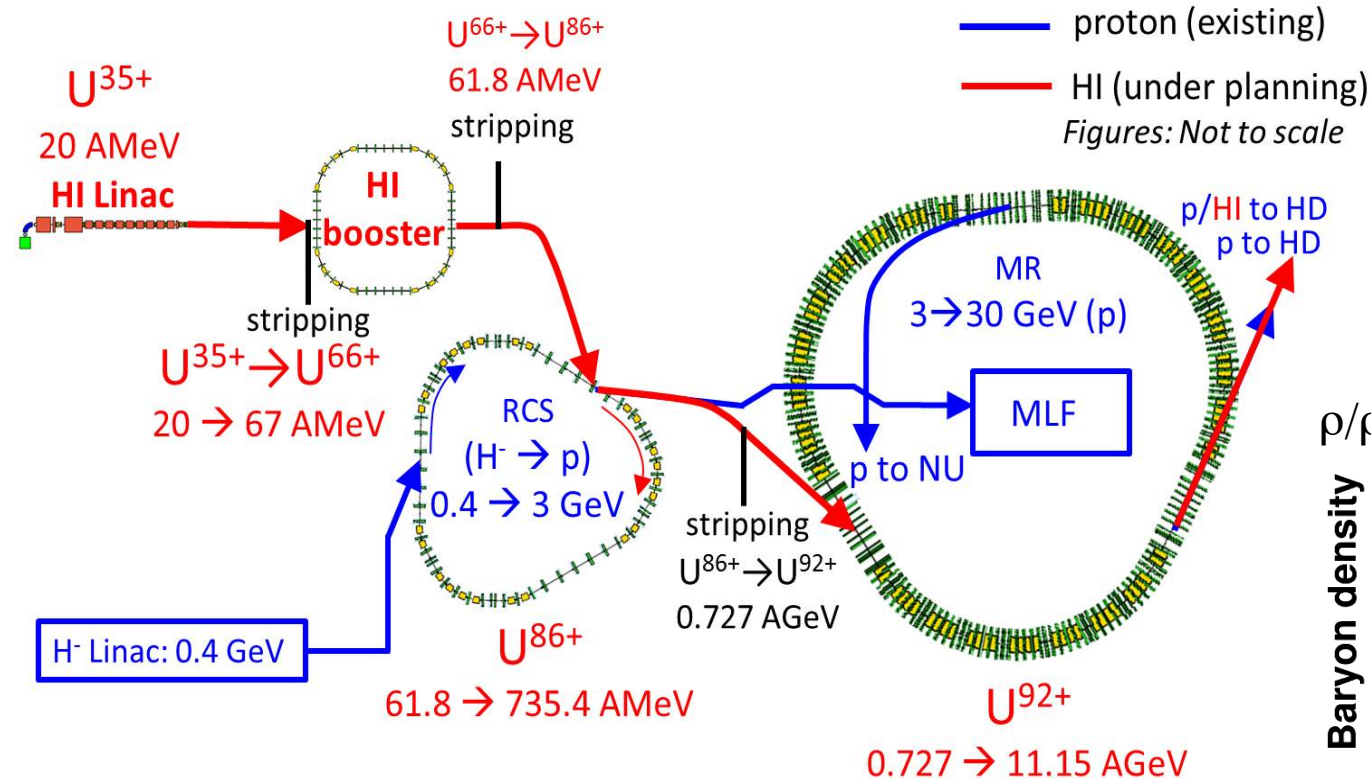
スイス・欧州共同原子核研究機構 (CERN)
 LHC 加速器 (2009-), 周長 27 km
 $\sqrt{s_{NN}} = 2.76, 5.5$ TeV Pb-Pb



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

将来計画(検討中): J-PARC

J-PARCでの重イオン加速案



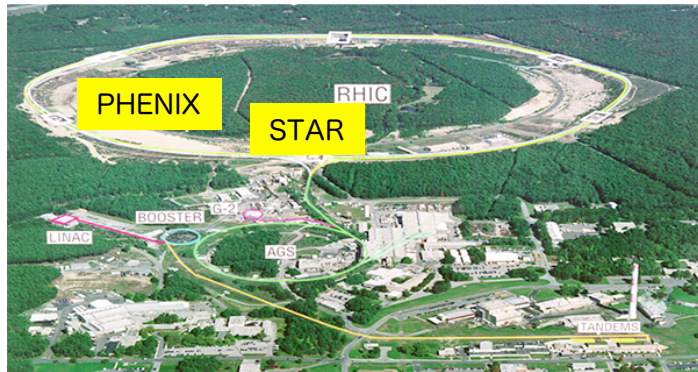
J-PARCでの重イオン加速と重イオン実験を検討中

- 2023頃の実験開始を目指す.
- $\sqrt{s_{NN}} = 2-6$ GeV (RHICの最小エネルギー以下)
- 10^8 Hzの高衝突レート
- LHC, RHICで探索できない $\rho/\rho_0 \sim 5-10$ の高密度状態

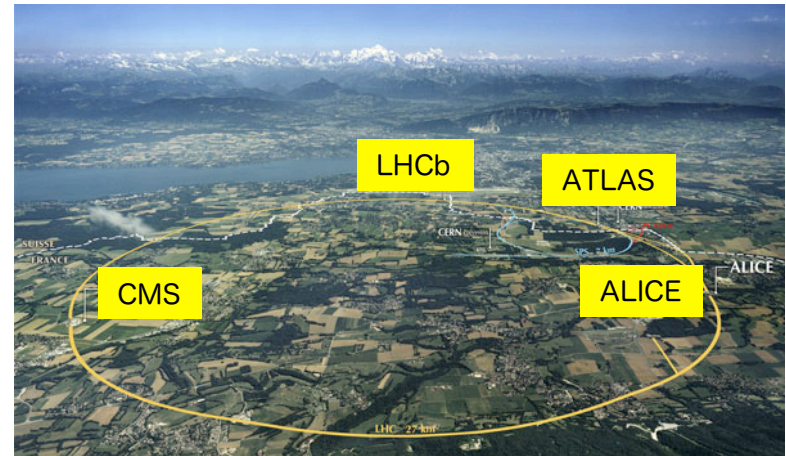
2. これまでに分かったこと 日本グループの成果

日本グループの参画状況

- 国際共同実験RHIC-PHENIX実験, LHC-ALICE実験に参加。



RHIC-PHENIX実験



LHC-ALICE実験

日本グループの寄与 (RHIC-PHENIX実験)

- PHENIX実験
 - 1991年に発足. 2000年より実験開始
 - >500人、75の研究機関
 - 12国内研究機関
- 実験遂行
 - 初代PHENIX実験代表: 永宮
 - 現PHENIX実験代表: 秋葉 (2016-)
 - Executive委員: 江角、浜垣、他
 - 講演者選定委員: 秋葉(現)、中川(現)、下村(現)
 - 物理WGコンビナー: 志垣、江角、中條、浜垣、小沢、他
- 検出器運用
 - ビーム・ビーム検出器: 杉立(代表、広島大)
 - RICH検出器: 浜垣(代表、東大)
 - TOF, AGEL検出器: 三明(代表、筑波大)
 - Si-VTX検出器: 秋葉(代表、理研)
 - PHENIX-CCJ 解析センター: 理研
- 総論文数(査読出版のみ)
 - 154 本、総引用数: 20,000 件以上
- 日本人博士号取得者
 - 43名
- 主な受賞
 - 2011年度仁科記念賞(秋葉)
 - 物理学会新人賞(荒巻(2013))
 - 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
を長きに亘り主導し、
QGP生成の検証や性質解明
に大きく貢献している

日本グループの寄与 (LHC-ALICE実験)

- ALICE実験
 - 1993年に発足. 2009年に実験開始
 - 1550人、151の研究機関
 - 4国内研究機関
- 実験遂行
 - Collaboration board副代表: 浜垣(現)
 - 物理論文管理委員: 浜垣 (現)
 - 講演者選定委員: 杉立 (現)
 - トリガー運用責任者: 大山
 - 月間ランコーディネーター: 大山、郡司
 - 物理WGコンビナー: 大山、O. Busch(現), 郡司 (現)
- 検出器運用
 - フォトン検出器: 杉立(副代表)
 - ダイジェットカロリメータ: 三明、中條(副代表)
 - タイムプロジェクションチェンバー(TPC): 郡司
 - 検出器高度化: 大山、郡司、浜垣、志垣、中條
- データ解析拠点
 - Tier-2センター: 広島大・杉立、筑波大・中條
- 総論文数(査読出版のみ)
 - 139 本以上、総引用数: 10,000 件以上
- 日本人博士号取得者
 - 3名



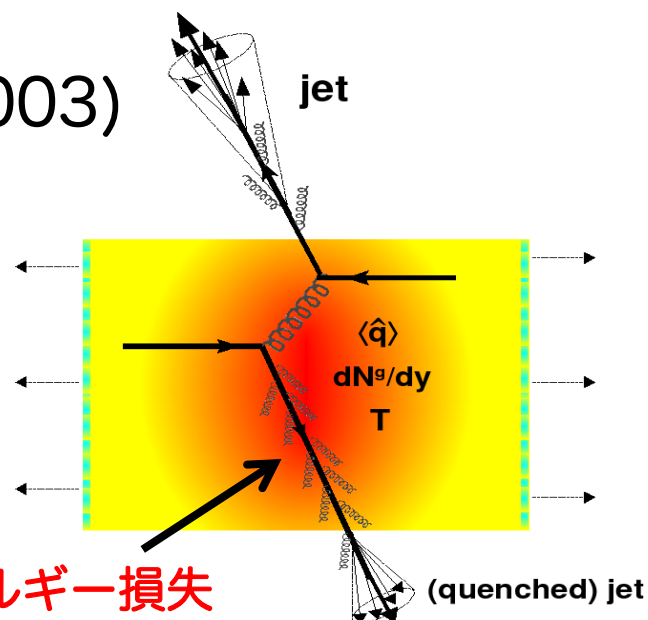
2010年より重イオン実験を開始。
日本グループは、データ解析や検出器増強の両面で貢献を拡大中

QGP生成の証拠①

• パートのエネルギー損失の発見(2003)

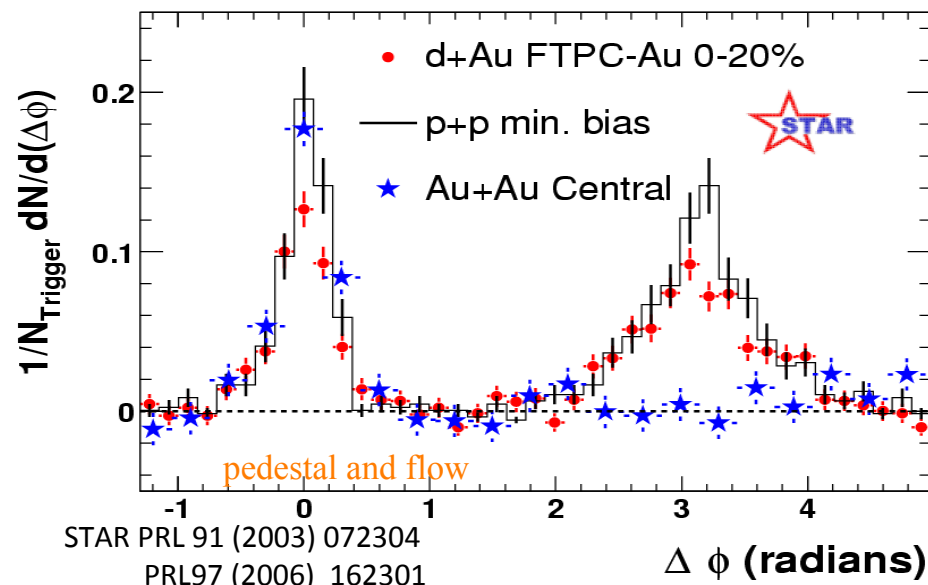
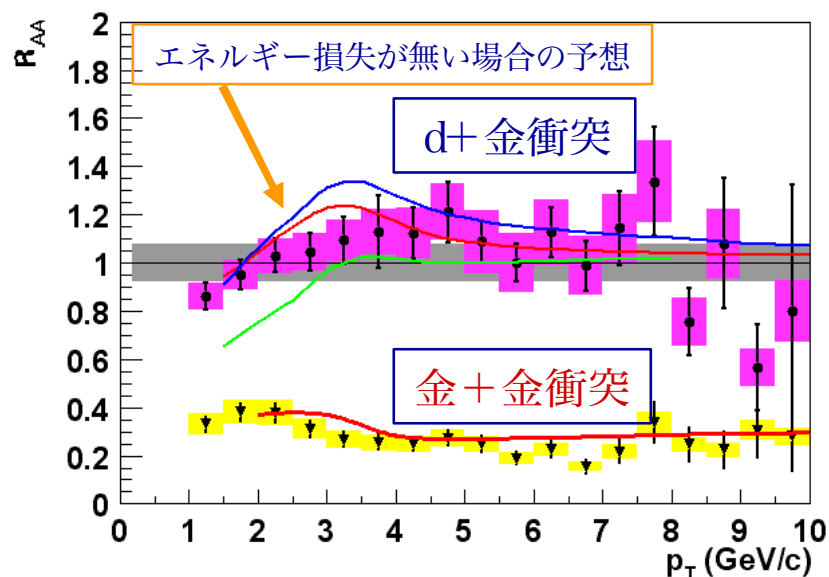
- 高運動量粒子対の消失
- 高運動量粒子の収量減少

→ 高パートン密度のQGP物質



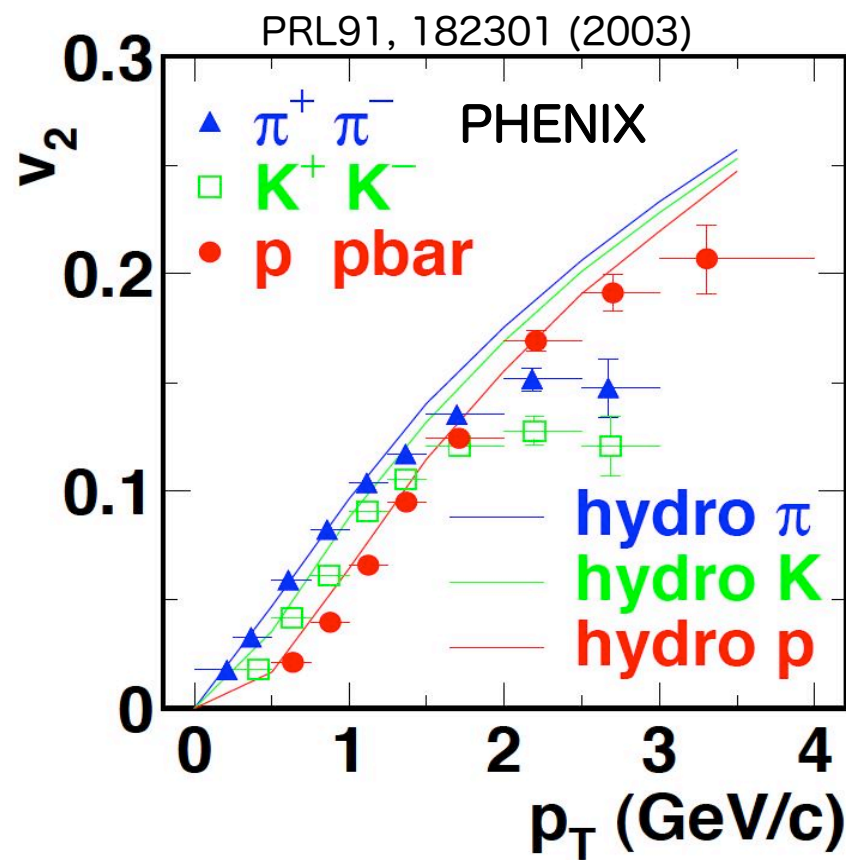
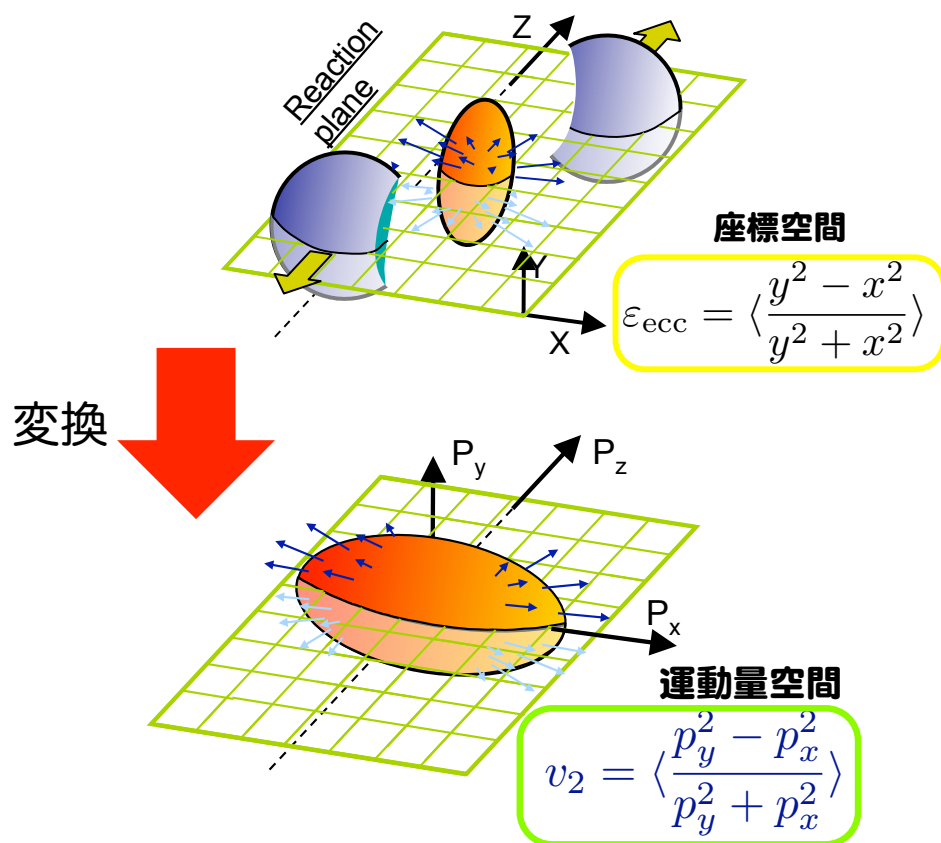
特徴的エネルギー損失

PHENIX (2003)



QGP生成の証拠②

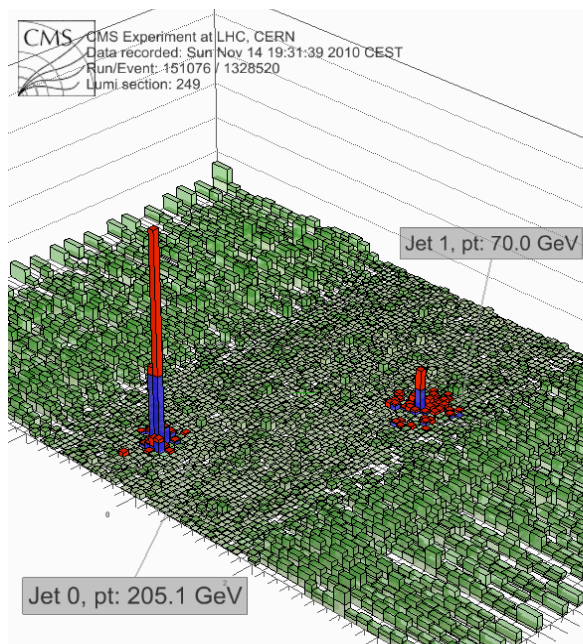
- パートンの集団運動の発見(2005)
 - 大きな楕円方位角異方性(v_2). 流体計算で再現
- 粘性の小さい理想流体パートン物質の生成



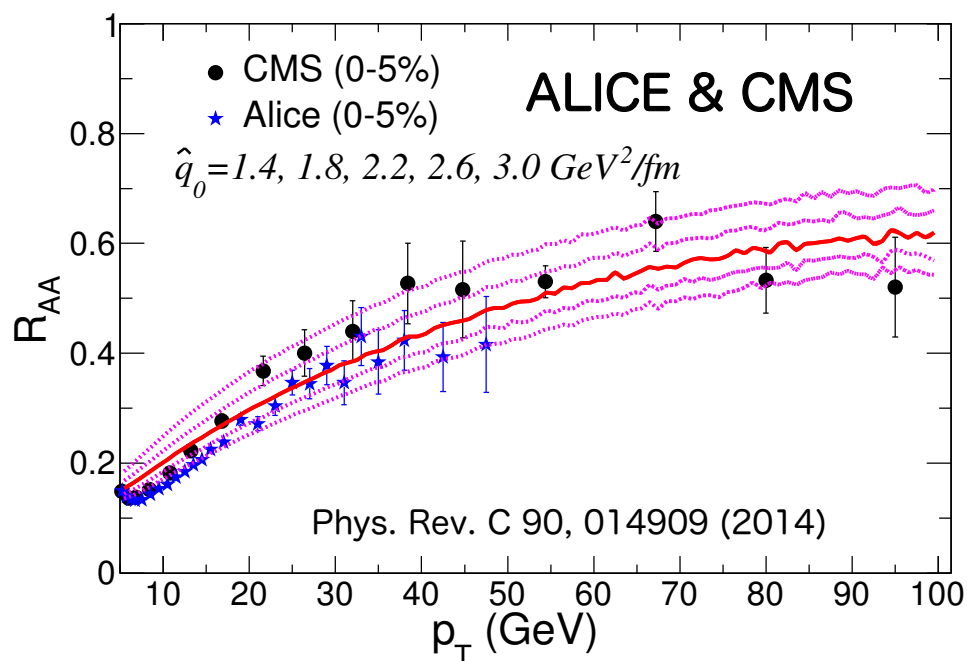
LHCでの物性測定①

- ジェットのエネルギー損失の直接測定
 - 阻止能(単位長さあたりの運動量移行): $q \sim 1.9 \text{ GeV}^2/\text{fm}$
 - 失ったエネルギー \rightarrow 大角度への低運動量粒子生成

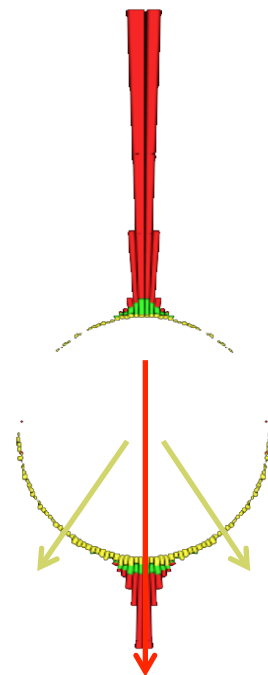
CMSのジェット対イベント



ジェット起源ハドロンの収量抑制量
とエネルギー損失の阻止能(q_0)依存性

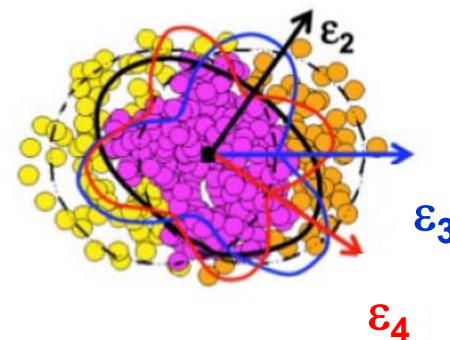


CMS(2011)
ジェット対と
落としたエネルギーの
振る舞い



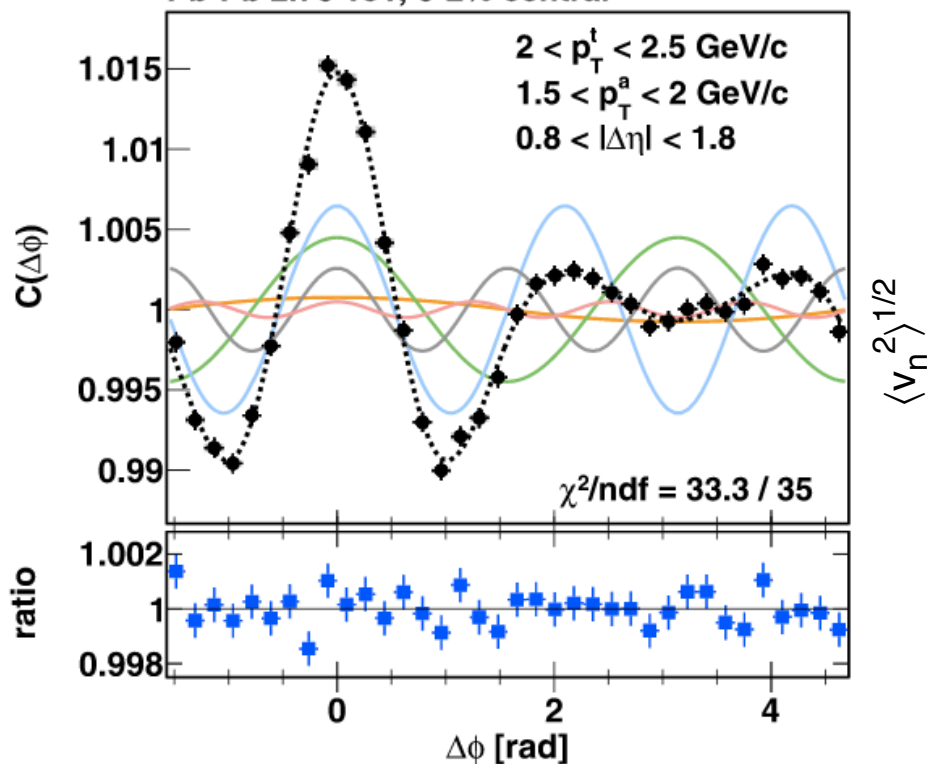
LHCでの物性測定②

- 粘性係数の定量的測定
- 方位角に対する高次の集団運動
 - 比粘性(ずれ粘性/エントロピー): $\eta/s \sim 0.2$

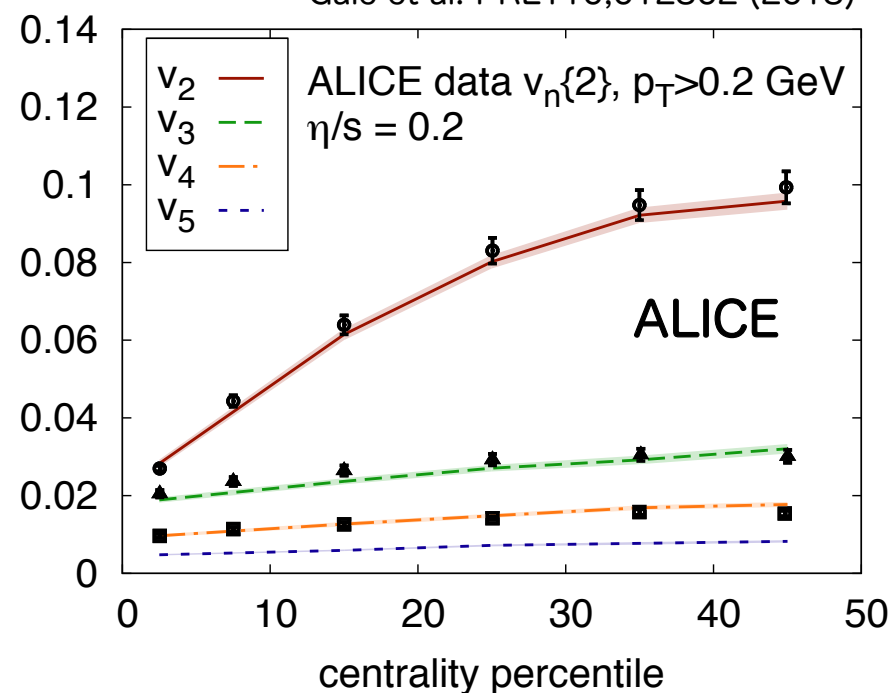


ALICE, PLB, 708, (2012)

Pb-Pb 2.76 TeV, 0-2% central ALICE

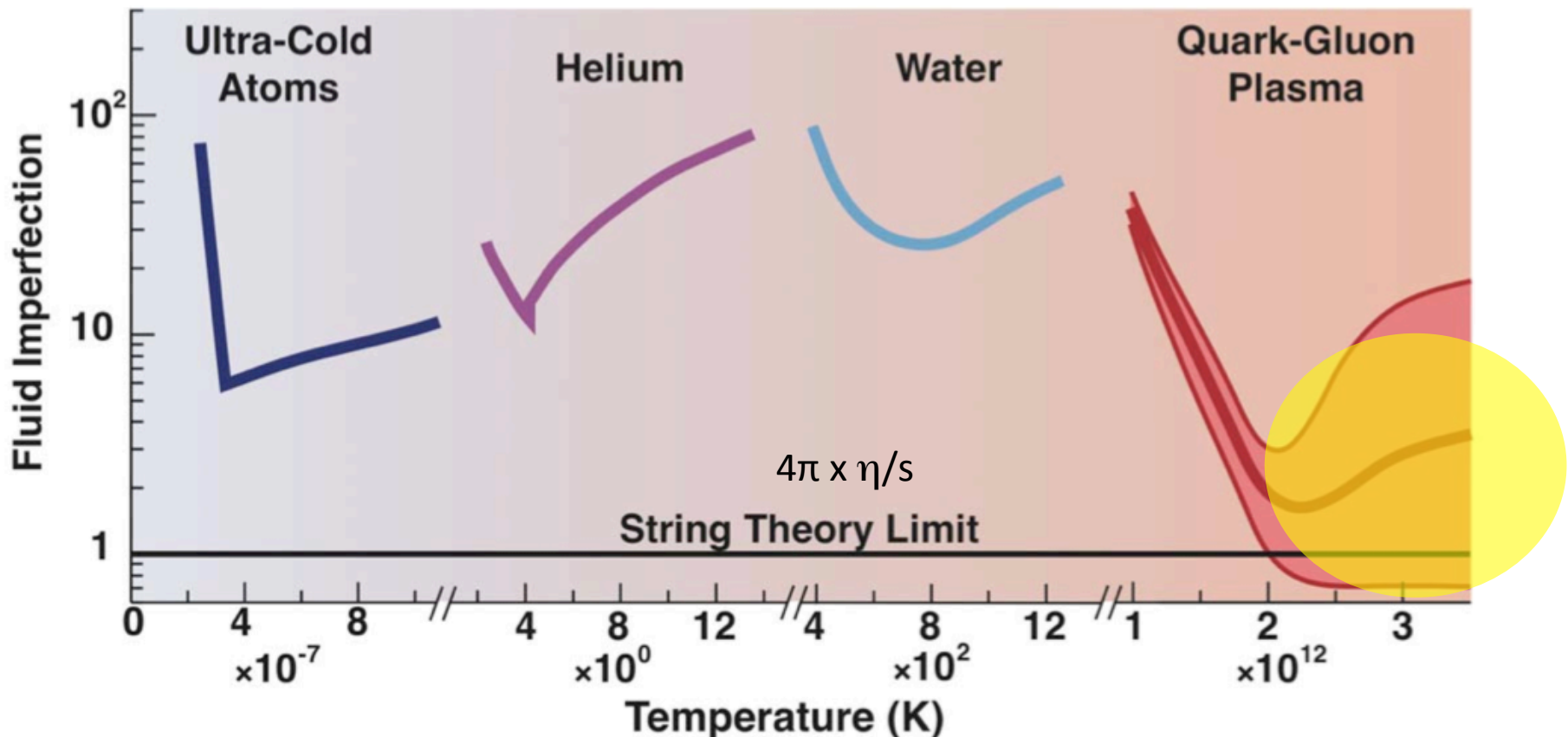


Gale et al. PRL110,012302 (2013)



QGPはサラサラな物質

- 比粘性(ずれ粘性/エントロピー)
 - $\eta/s \sim 0.20$ at LHC, $\eta/s \sim 0.12$ at RHIC
- QGPは、どの物質よりも粘性が小さい“サラサラ”な物質



3. 今後の研究内容、研究組織、 研究計画

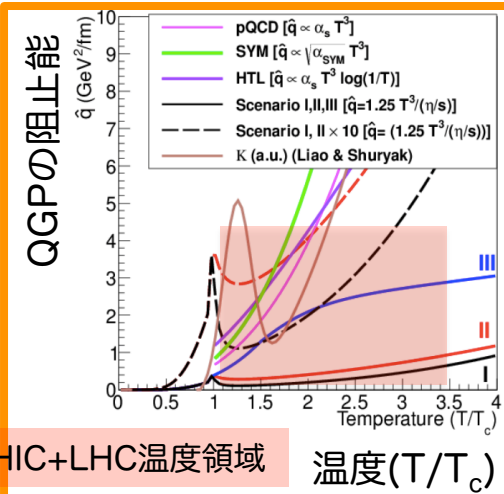
まだ分かっていないこと①

① QGP物性とその温度依存性

- 比ずれ粘性、体積粘性、阻止能、EOSなど

鍵となる測定

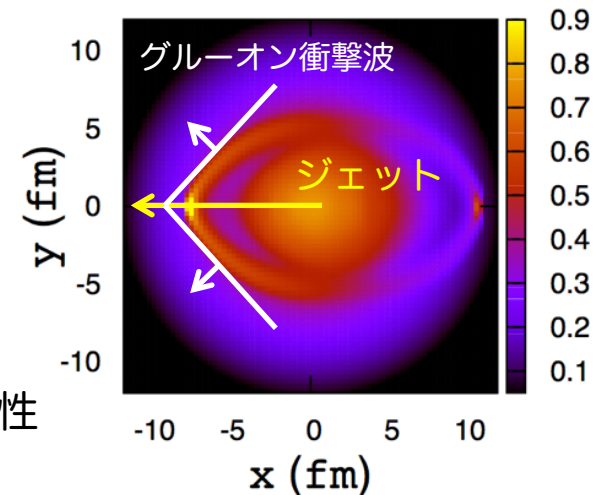
- ジェットや重クォークのエネルギー損失の高精度測定
- レプトン対やフォトンの収量、高次異方性の高精度測定
- 種々のハドロンや重クォークの高次異方性の高精度測定



ジェット測定でわかるQGP物性

- ジェット通過によるQGP媒質応答
失ったエネルギーの伝搬
 - 輸送特性、EOS、音速
- ジェット対、光子-ジェット
 - エネルギー損失の飛距離依存性
- 重クォークジェット
 - エネルギー損失のパートン質量依存性、輸送特性

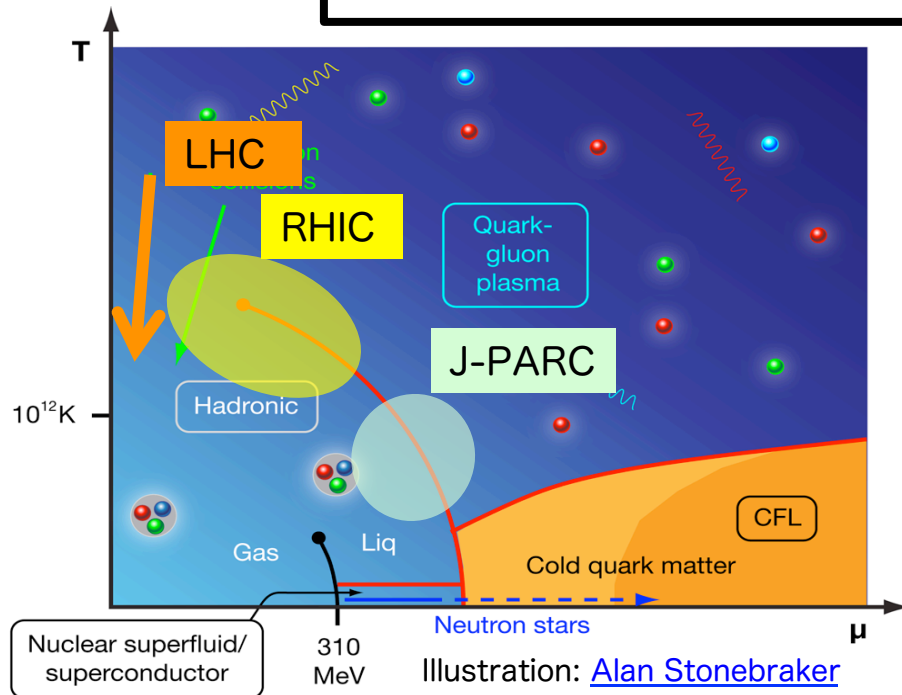
落としたエネルギーの伝搬の様子 (Y. Tachibana)
低運動量粒子の角度分布 → EOS, 音速に依存



LHC-ALICE実験高度化とRHIC-sPHENIX実験で測定可能

まだ分かっていないこと②

② QCD物質の相構造、高密度QGPの性質 － 臨界点、一次相転移



- LHC, RHICで高温領域のQGP生成やその性質がわかりつつある.
- 高密度領域は、理論計算の精度も十分でなく、実験主導の沃野の分野.
- 高温領域のQGP研究の大きな経験・知識・様々な測定量を、高密度領域のQGP研究に生かすことができる. 高密度領域への研究展開が可能に!!
- 重イオン実験の新しい潮流

- 揺らぎ、集団運動の高次異方性、レプトンやフォトンの測定

RHIC-STAR実験での衝突エネルギー走査実験($\sqrt{s_{NN}} < 20$ GeV)やJ-PARCでの重イオン衝突実験が研究の場.

LHC-ALICE実験高度化(2021-)

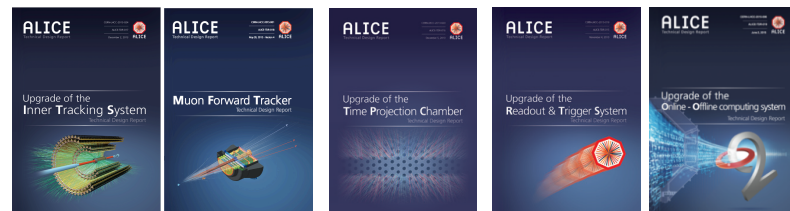
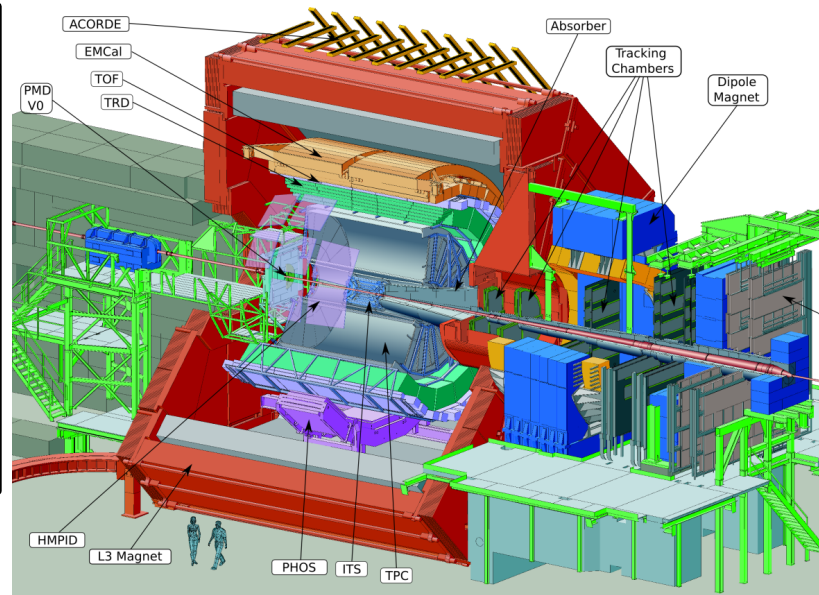
ALICE実験測定器の高速化(2021年完成予定)
日本グループが担当する検出器：

- GEM-TPC連続読出高速化
- 前方シリコン検出器
- カロリメータ高速化
- 高速データ収集系
- グリッド計算機 (Tier2) の強化
- 前方光子測定器(計画)

- 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

物理目標

- 重クォーク、ジェット、フォトン、レプトン対の高精度測定
- QGPの媒質応答、物性の温度依存性



ALICE実験高度化のTDR
(ITS, MFT, GEM-TPC, 読み出し, DAQ)

ALICE実験高度化: 総額€40M
LHCCによるエンドース(2012年9月)

RHIC-sPHENIX実験(2022-)

- 物理目標

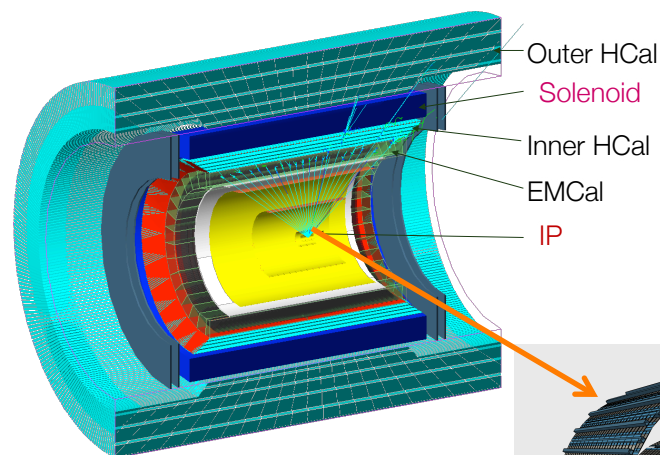
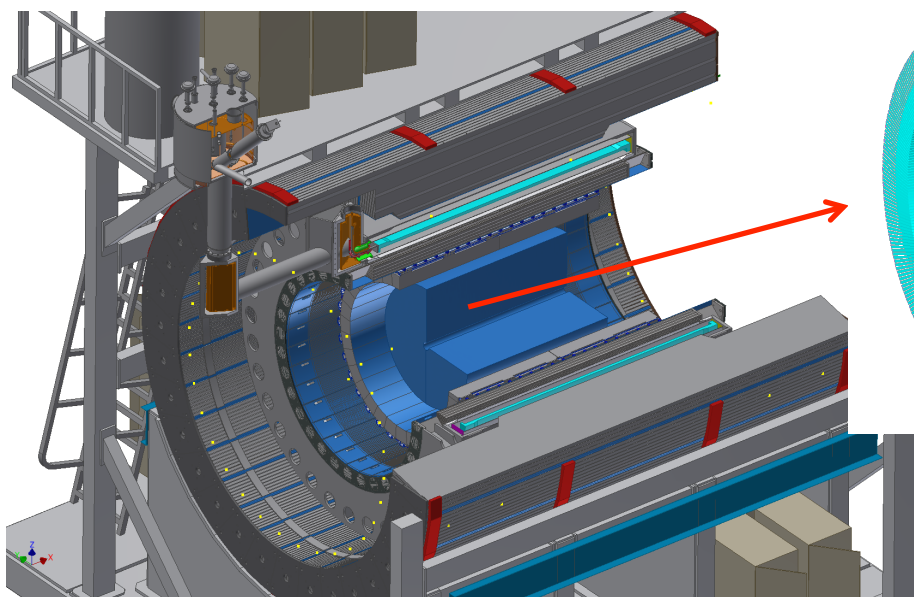
- ジェット、重クォークの高精度測定から、RHICエネルギーでのQGP中でのエネルギー損失や輸送係数の温度依存性を解明

RHIC-sPHENIX実験

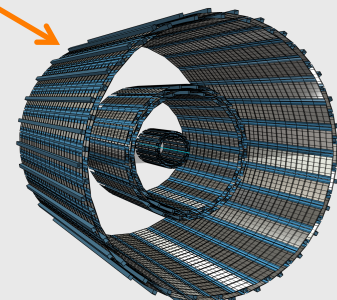
- ジェット、重クォーク、 γ の測定に特化. 2022年から開始予定
- 2015年4月にDOEサイエンスレビューで「勧告なし」の高評価

日本グループが担当する検出器：

- 7層のシリコン飛跡検出器



7層のシリコン
飛跡検出器



RHIC-STAR実験(2019-2020)と J-PARC重イオン実験(2023-)

• 物理目標

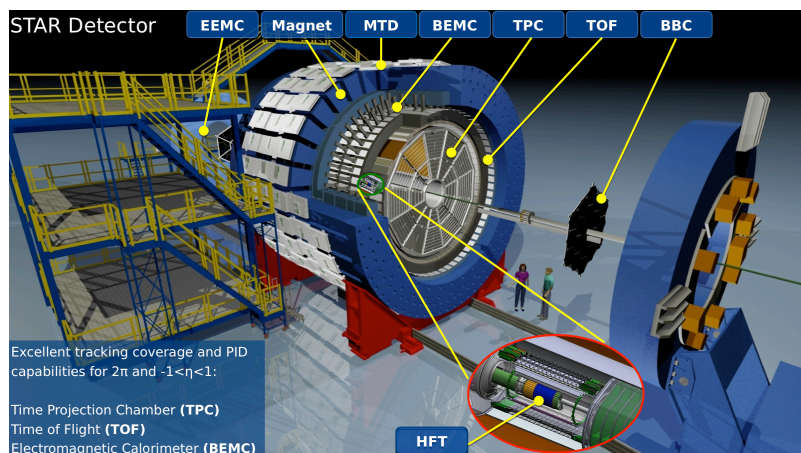
- 衝突エネルギー走査実験(@RHIC-STAR実験)や高ビーム輝度を用いた重イオン実験(@J-PARC)による臨界点の探索、相構造の研究

RHIC-STAR実験 (2019-2020)

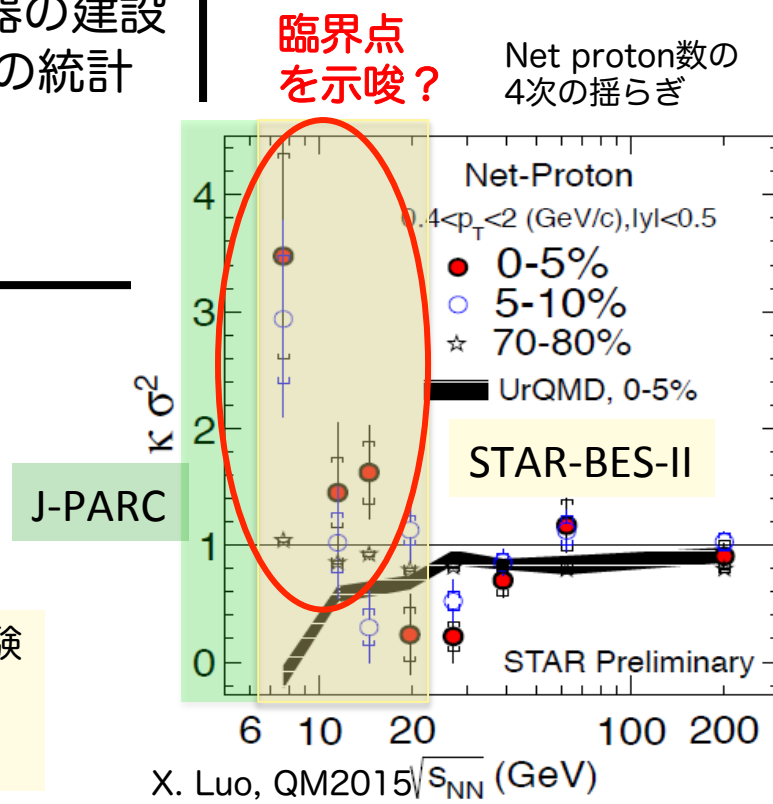
- 日本グループの新規参加. 衝突反応面検出器の建設
- 揺らぎ、集団運動の測定. これまでの10倍の統計

J-PARCでの重イオン実験

- 2023年の開始を目指す.
- $\rho/\rho_0 \sim 5-10$ の高密度物質の研究.



RHIC-STAR実験
12カ国、56機関、
590人からなる
国際共同実験



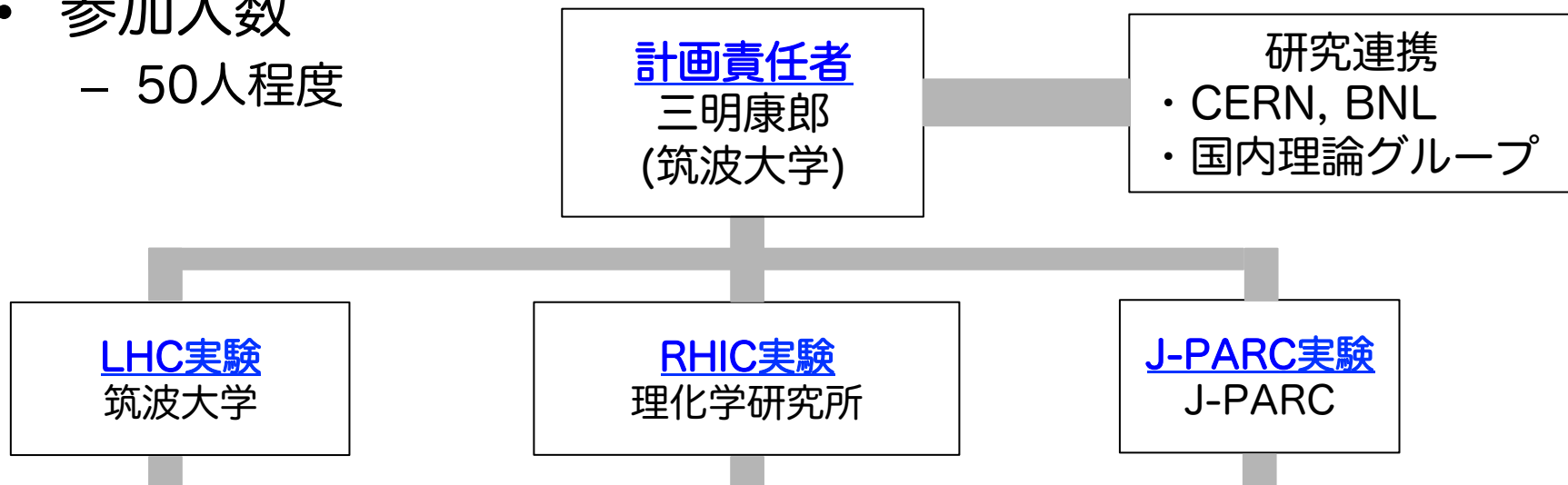
研究実行組織

- 参加機関

- 筑波大学(母体:数理物質融合科学センター)、東京大学、広島大学
- 理化学研究所、長崎総合科学大学、奈良女子大、J-PARC
- (研究協力)大阪大学核物理研究センター
 - ・ ハドロン物理に関する共同研究協力. 重イオン物理のサポート.
- (連携)国内理論グループ

- 参加人数

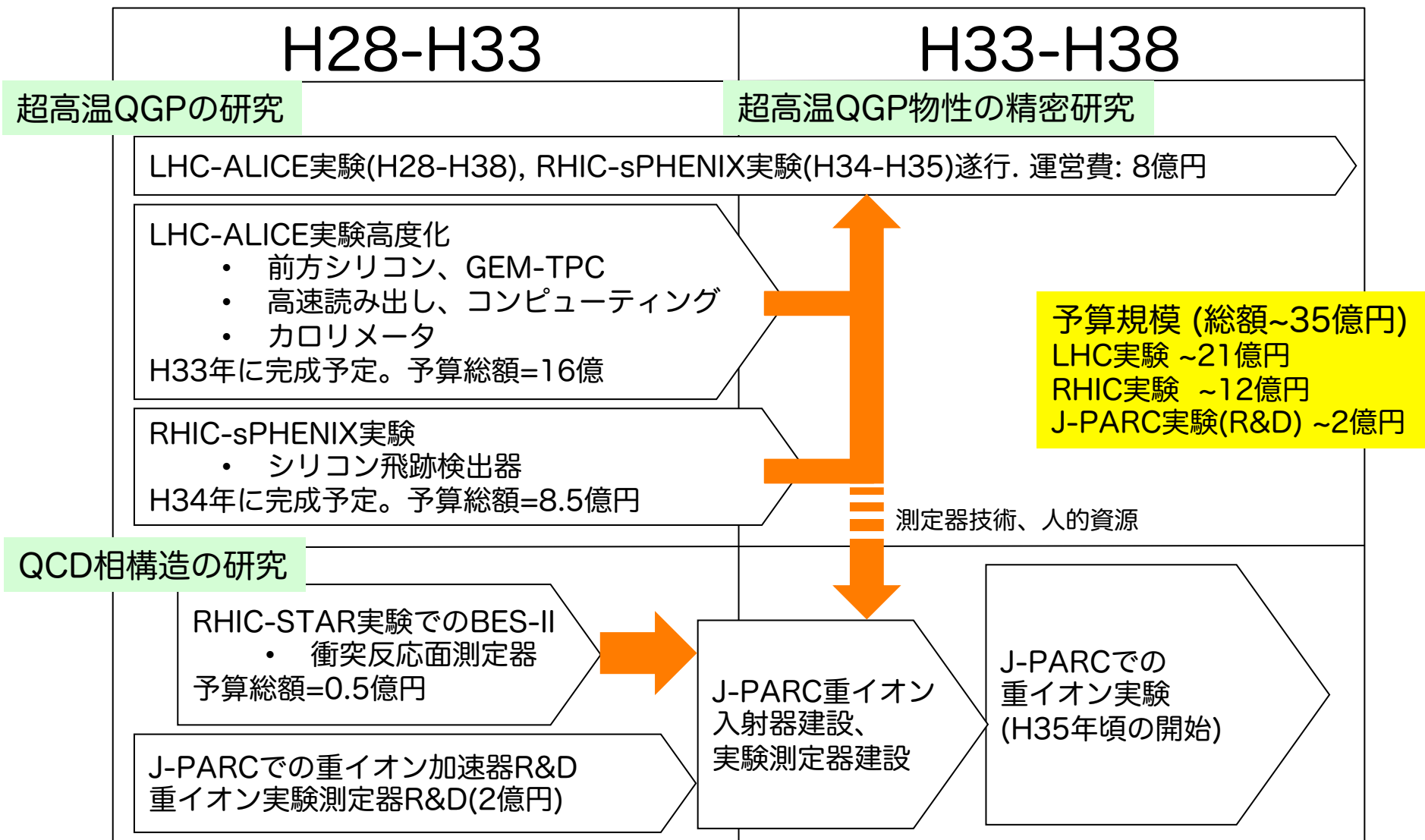
- 50人程度



東京大学、筑波大学、広島大学、理化学研究所、長崎総合科学大学、奈良女子大学、J-PARC

研究計画と予算規模

本研究期間 (H28-H38の10年間)



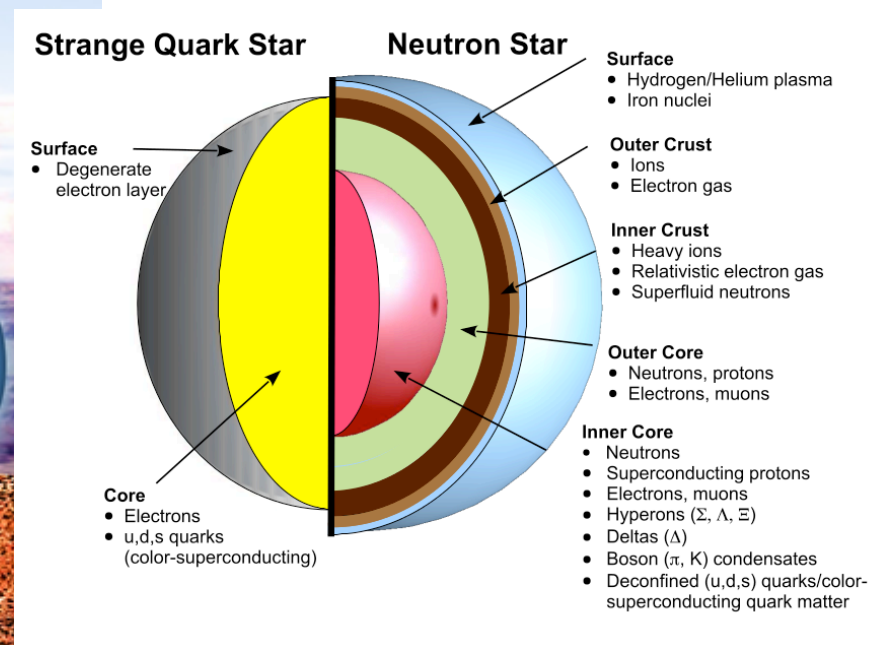
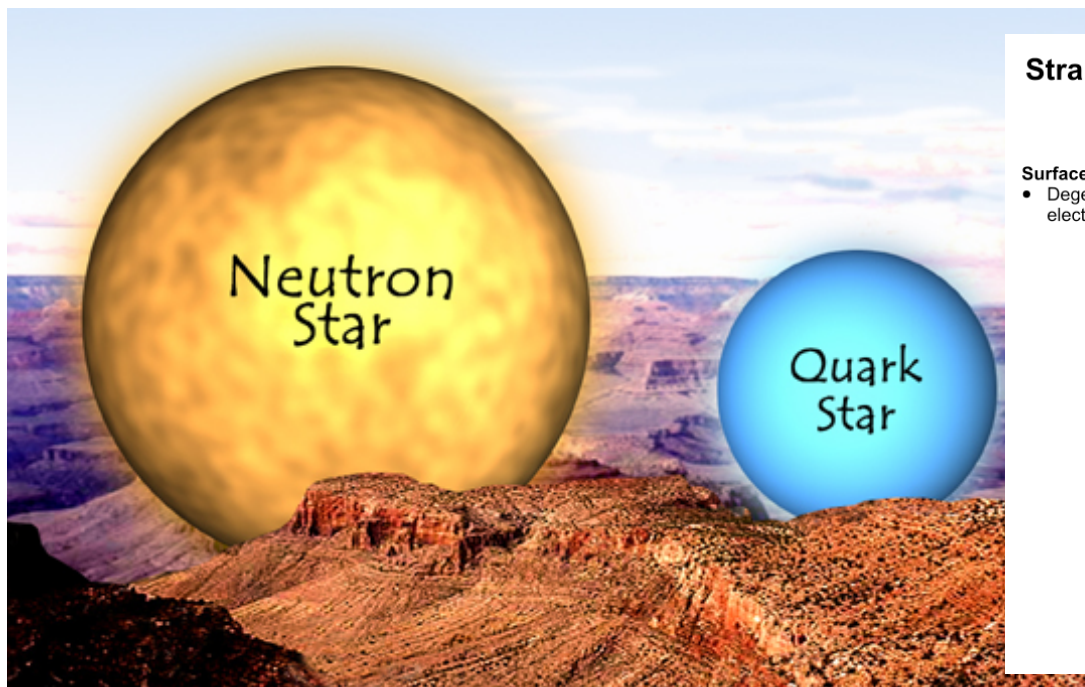
4. まとめ

- 高エネルギー重イオン衝突によるQGPの研究は、原子核物理分野における重要課題の一つ。
 - 初期宇宙、物質創生、QCD物質の相構造、中性子星の内部構造
- 高エネルギー重イオン衝突実験の現状
 - 日本から大きな貢献(RHIC-PHENIX, LHC-ALICE実験)
 - この10年で大きな進展. 発見から物性研究へ
- 高エネルギー重イオン衝突実験の今後
 - RHICとLHCでのQGP物性の精密研究. 初期宇宙の様相のさらなる理解.
 - LHC-ALICE実験高度化、新sPHENIX実験によって、さらなる研究進展が期待
 - RHICでの衝突エネルギー走査実験. QCD物質の相構造の解明.
 - 日本グループのSTAR実験への参加.
 - J-PARCでの重イオン加速と実験. QCD相構造の研究と中性子星の内部構造
 - J-PARCの高ビーム強度を利用.
- これらのプロジェクトを推進し、今後とも日本グループの主導性を確保し、当該分野の発展に寄与する.

バックアップ

研究目的—中性子星の内部構造の理解

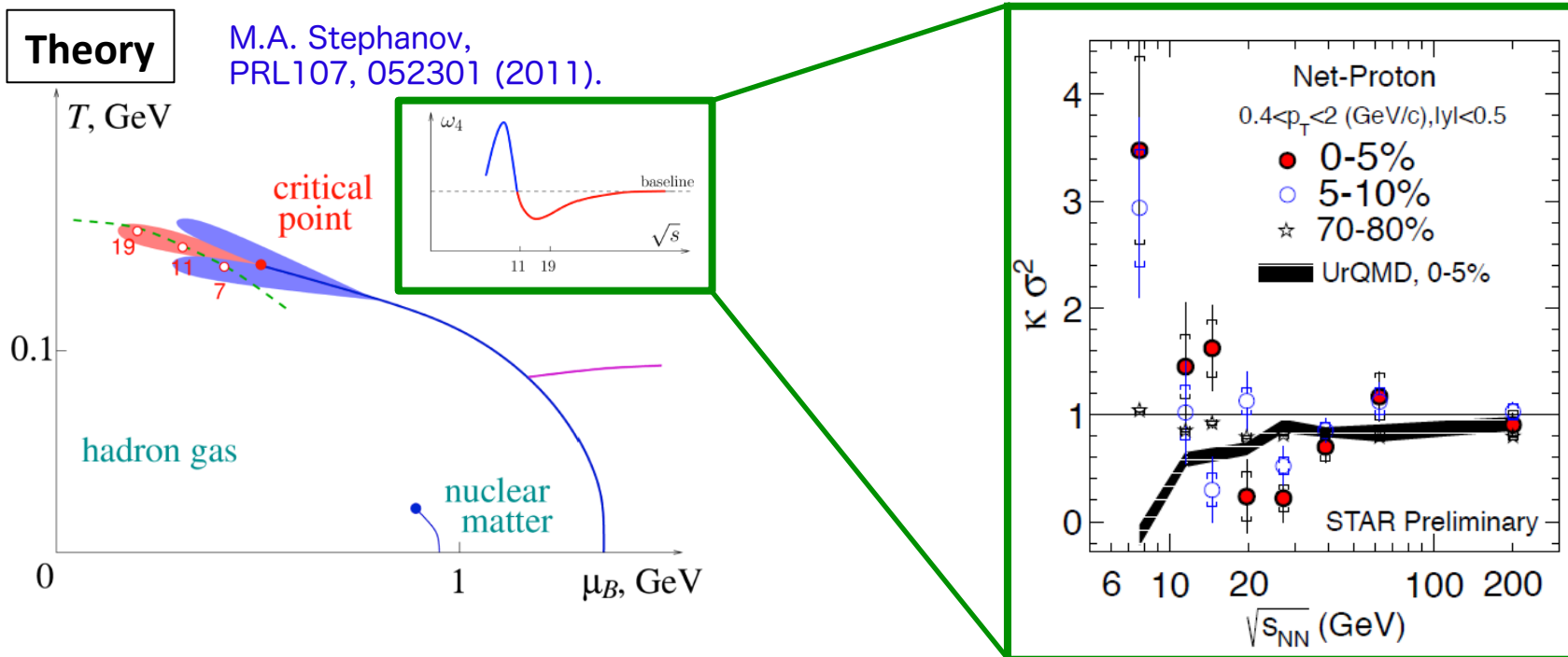
<http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/neutronStars.html>



- 中性子星やクォーク星の内部構造を解き明かす。
 - 中性子星やクォーク星(未発見)は大きな恒星の最後の姿。
 - 高密度なコアが存在し、そこはクォーク・グルーオン・プラズマが実現している可能性がある。

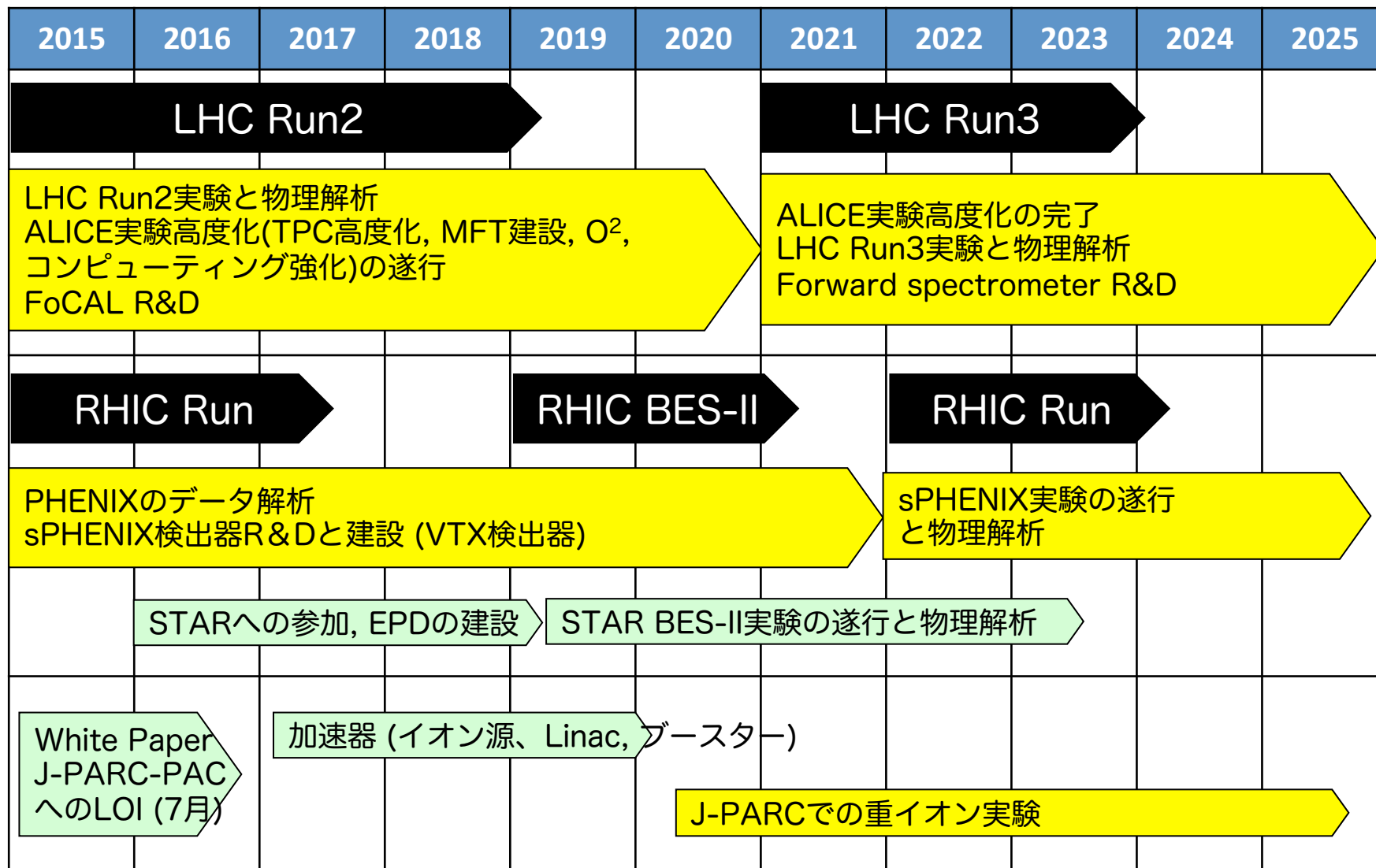
揺らぎの測定で迫る臨界点の探索

- 臨界点近傍では保存量の揺らぎが増大



- 臨界点を示唆する結果はまだない。

研究計画



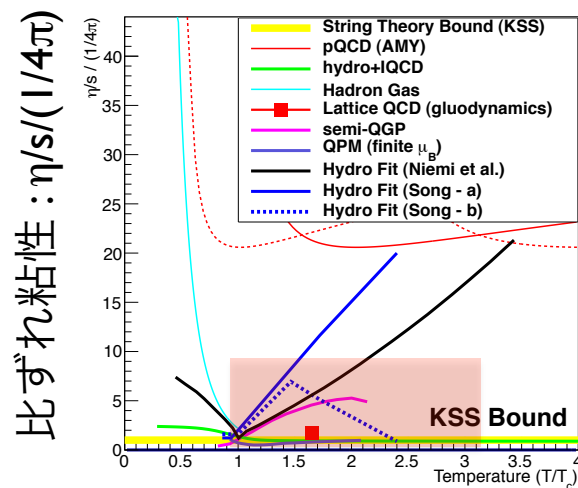
研究予算規模

- LHC実験
 - 検出器高度化(合計:16億円)
 - TPC高度化(5億), MFT建設(2億), コンピューティング(DAQ(2億), Tier-2(2億))
 - FoCALおよびForward Spectrometer(5億)
 - 実験諸経費 (合計: 5億円 (0.5億/年))
 - 合計: 21億円程度
- RHIC実験
 - 検出器高度化 (合計: 9億円)
 - sPHENIX実験用VTX検出器(8.5億)
 - STAR実験用EPD検出器(0.5億)
 - 実験諸経費 (合計: 3億円 (0.3億円/年))
 - 合計: 12億円程度
- J-PARC実験
 - 加速器R&D (1億)
 - 重イオン実験検出器R&D (1億)
 - 合計: 2億円

まだ分かっていないこと①

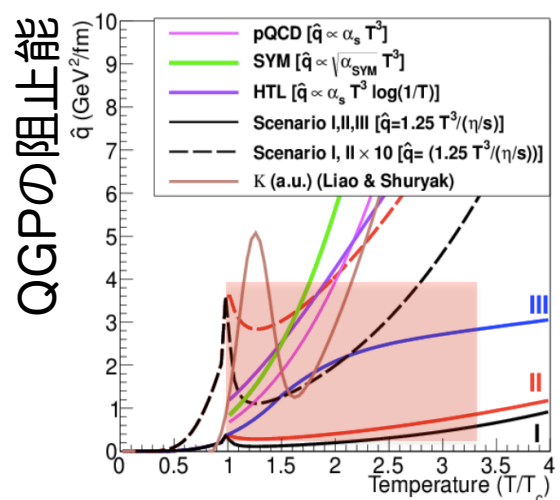
① QGP物性の温度依存性

– 比ずれ粘性、体積粘性、阻止能、EOSなど



RHIC+LHC温度領域

温度 (T/T_c)



温度 (T/T_c)

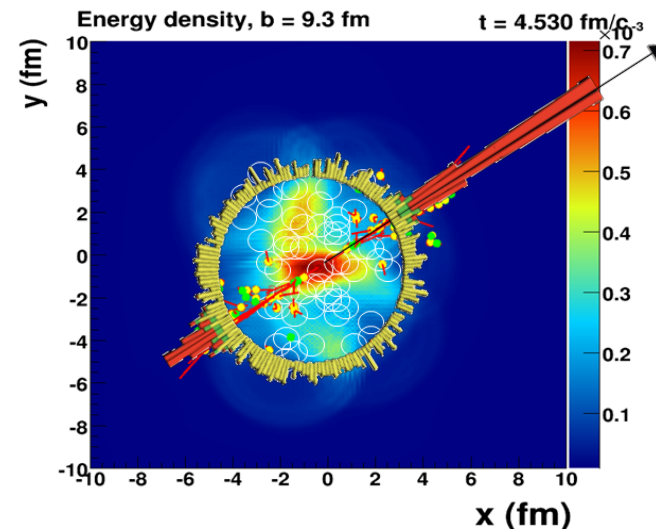
鍵となる測定

- ジェットや重クォークのエネルギー損失の高精度測定 → 阻止能、EOSの決定
- レプトン対やフォトンの収量、高次異方性の高精度測定 → EOS, 温度、粘性の決定
- 種々のハドロンや重クォークの高次異方性の高精度測定 → 粘性の決定

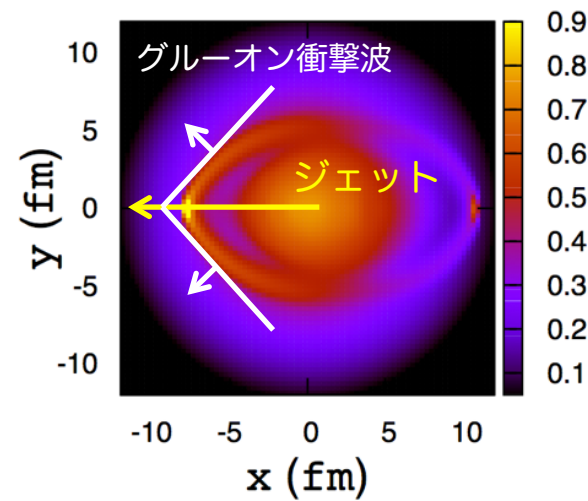
LHC-ALICE実験高度化とRHIC-sPHENIX実験で測定可能

ジェット測定でわかるQGP物性

- LHCで大きな断面積
- 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
 - 輸送特性
 - ジェット対、光子-ジェット
 - エネルギー損失の飛距離依存性
 - 重クォークジェット
 - エネルギー損失のパートン質量依存性
 - 失ったエネルギーの再分配
 - EOS、音速
- RHICとLHCで相補的な測定
 - RHIC
 - T_c 付近の物性
 - LHC
 - T_c から離れたところの物性



落としたエネルギーの伝搬の様子 (Y. Tachibana)
 低運動量粒子の角度分布 \rightarrow EOS, 音速に依存

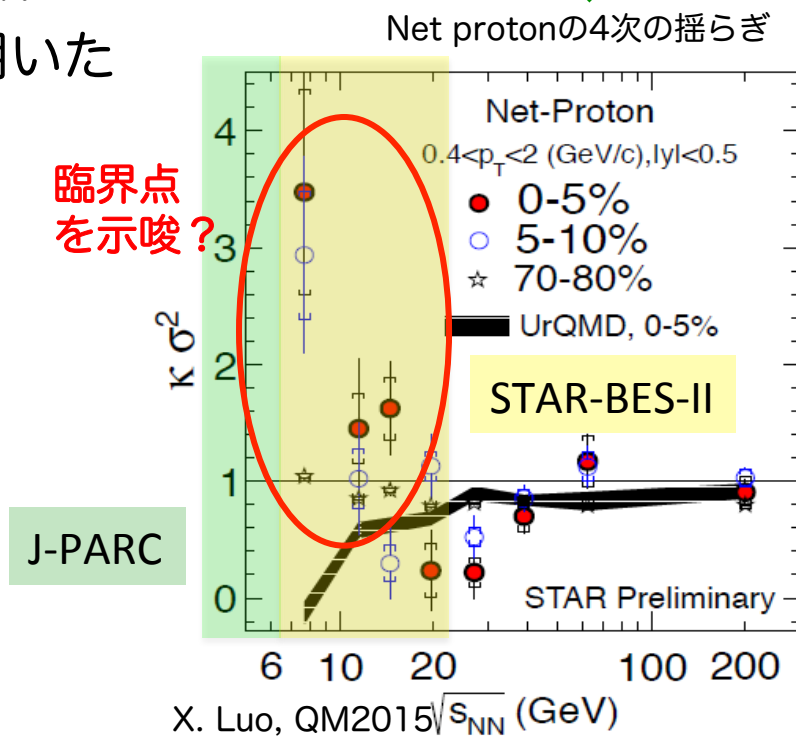
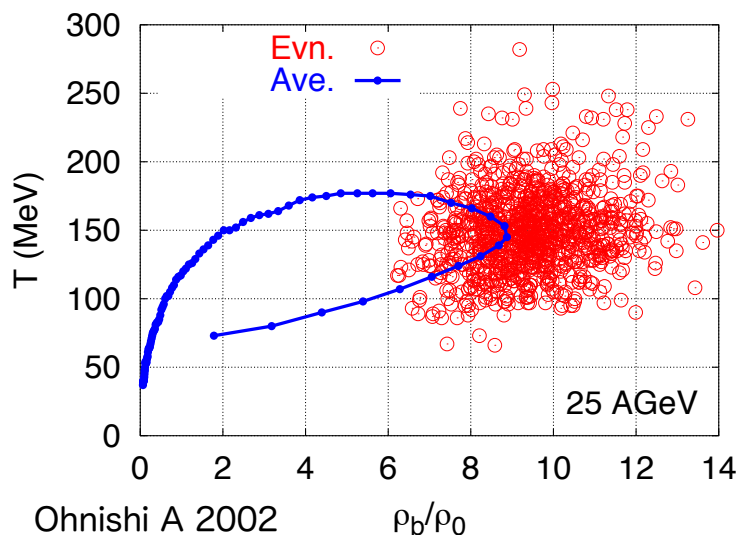


RHIC-STAR実験とJ-PARC重イオン実験

- RHIC-STAR実験での衝突エネルギー走査実験(BES-II)
 - 2019-2020, $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 20$ GeV
 - 揺らぎや集団運動の測定. BES-I(2010-2014)よりx10の統計
 - 日本グループの新規参入. 衝突反応面検出器の建設.
- J-PARCでの重イオン実験 ($\sqrt{s_{NN}} = 2-6$ GeV)

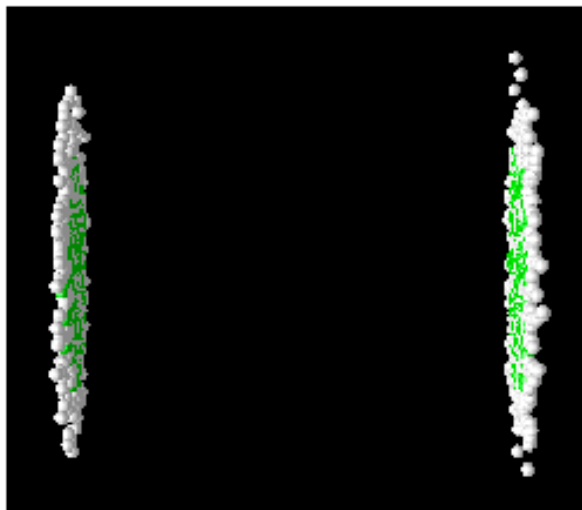
– 世界最高強度のビーム(10^8 Hz)を用いた

レア事象の探索とQCD相構造の研究

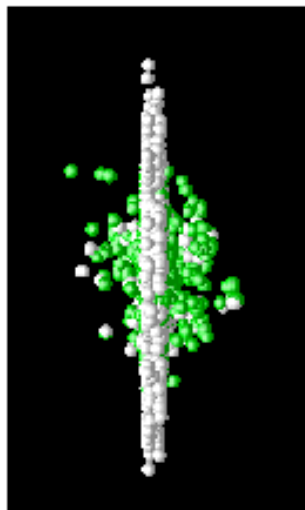


研究手法: 高エネルギー重イオン衝突

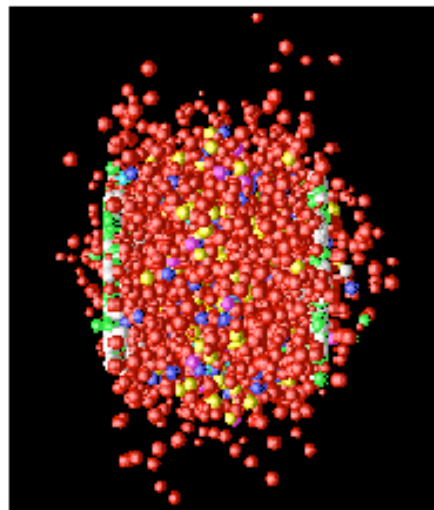
- 光速近くまで加速した重イオン同士を衝突し、衝突直後に数兆度のクォーク・グルーオン・プラズマ（リトルバン）を生成する.



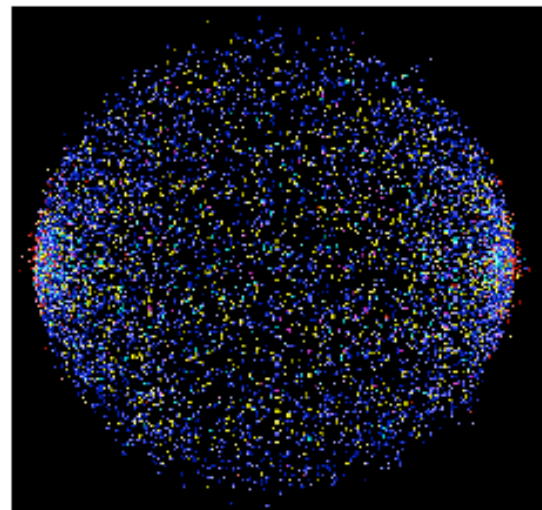
衝突前
・重イオンはほぼ光速で衝突する



衝突直後



クォーク・グルーオン
・プラズマ状態



ハドロン物質
クォーク・グルーオン
・プラズマが膨張し
冷えてハドロン化する

研究概要

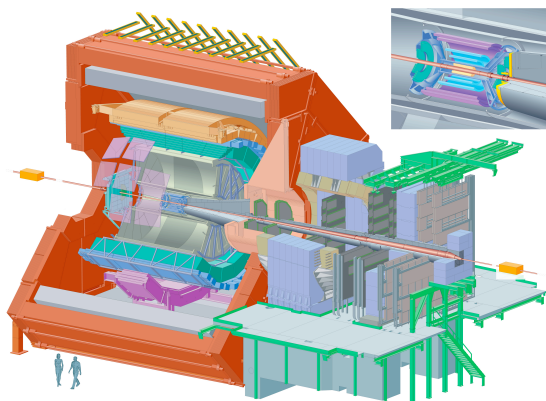
① 超高温QGP物質の物性研究を推進

- ✓ LHC, RHICでの高エネルギー重イオン実験を遂行
- ✓ LHC-ALICE実験高度化、RHIC-sPHENIX実験の推進

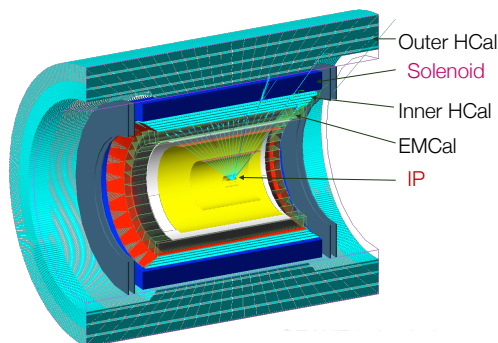
② QCD相構造の研究を推進

- ✓ RHIC-STAR実験での衝突エネルギー走査実験
- ✓ J-PARCでの重イオン実験

LHC-ALICE



RHIC-sPHENIX



RHIC-STAR

