

RHIC/LHC/J-PARC の次期計画； 高エネルギー重イオン衝突の新展開

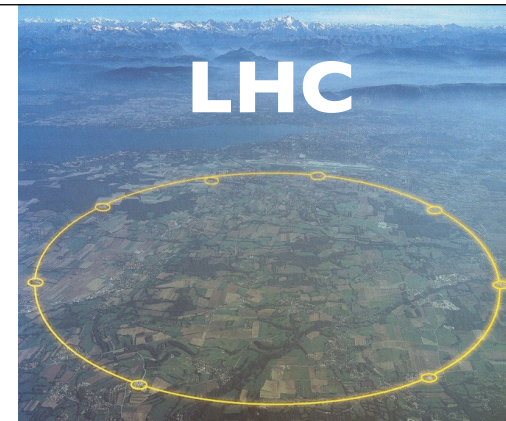
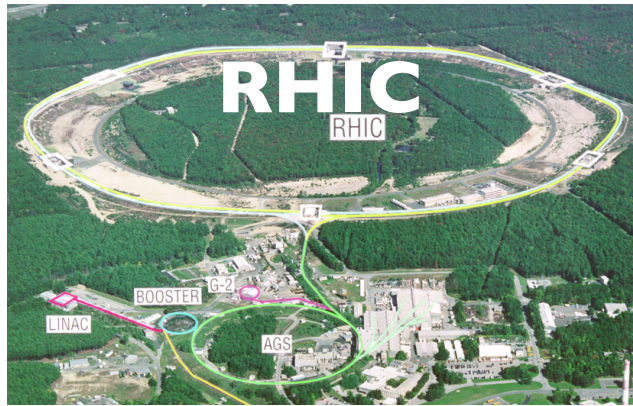
中條 達也

筑波大学 数理物質系 物理学域

2013年日本物理学会秋季大会シンポジウム
「高温クォーク物質研究の最前線: 発見から精密研究へ」

2013年9月21日

1. イントロダクション



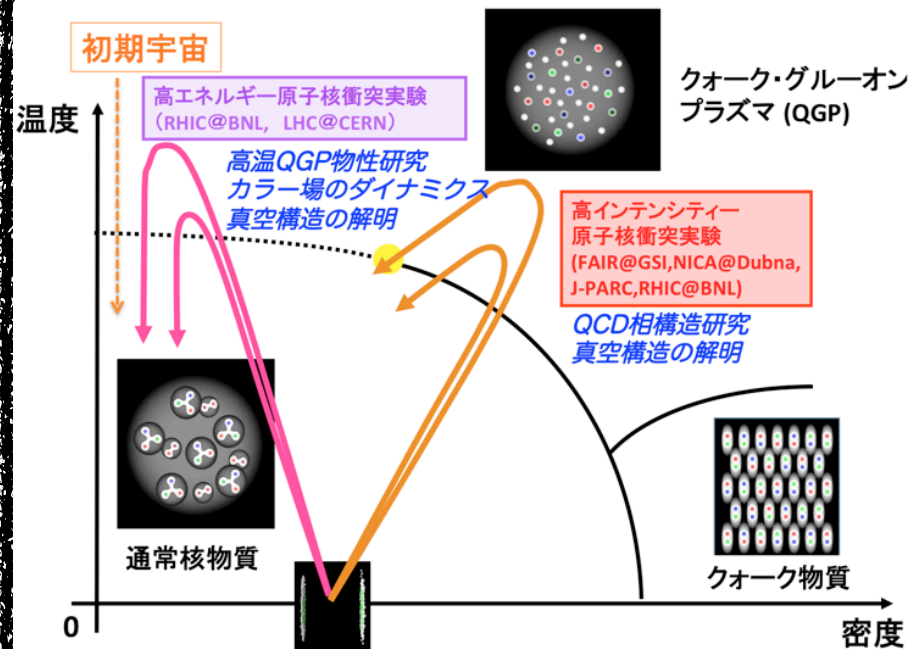
- RHIC 稼働から14年、LHC 稼働から4年が経過。
- 高エネルギー重イオン物理はこの十数年間で**強結合 QGP**の発見、及びその性質に関する様々な知見が得られた。
- 各加速器・実験では大規模な次期高度化計画が進行中
- 本講演では、高エネルギー重イオン衝突の物理において、まだ何が分かっていないのかを精査し、今後10年間に実験的にその課題にどのようにアプローチしようとしているのか？

日本の核物理の将来レポート (2012)

「高エネルギー重イオン」

3つの研究の柱：

- QGP物性の精密研究、熱平衡化機構（ゲージ場のダイナミクス）の研究
- 有限密度QCD相構造の研究
- カイラル対称性の回復現象の研究



「日本の核物理の将来レポート」より抜粋

2. まだ分かっていないこと

高エネルギー重イオンの物理; まだ分かっていないこと

- QGP物性量(比粘性、輸送係数等)の温度依存性
- QGPの応答
- ハドロン質量発現機構
- 衝突初期条件、(早期)熱化機構
- QCD 相構造

キーとなる測定量

- (1) ジェット (**high p_T**)、直接光子
- (2) 高次異方性 (種々のハドロン、フォトン、**light quark, heavy quark**)
- (3) レプトン対精密測定

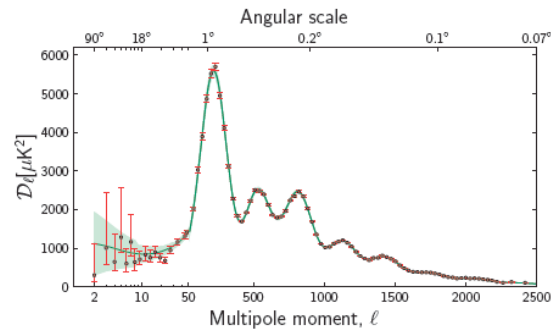
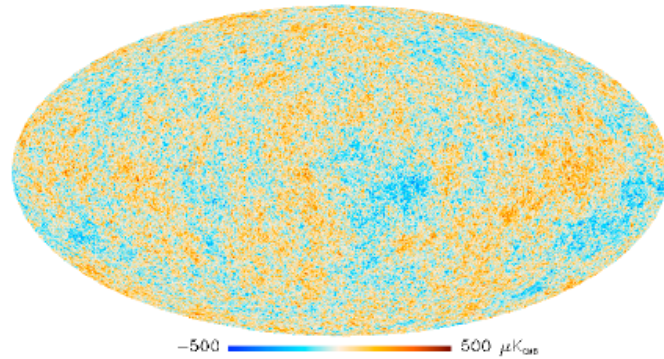


高速化と
high p_T 化が
必須

高次異方性 (higher harmonics)で分かる

QGP物性

Fluctuations of the Universe



Planck (2013)

宇宙論パラメータの決定

Fluctuations of Little bang

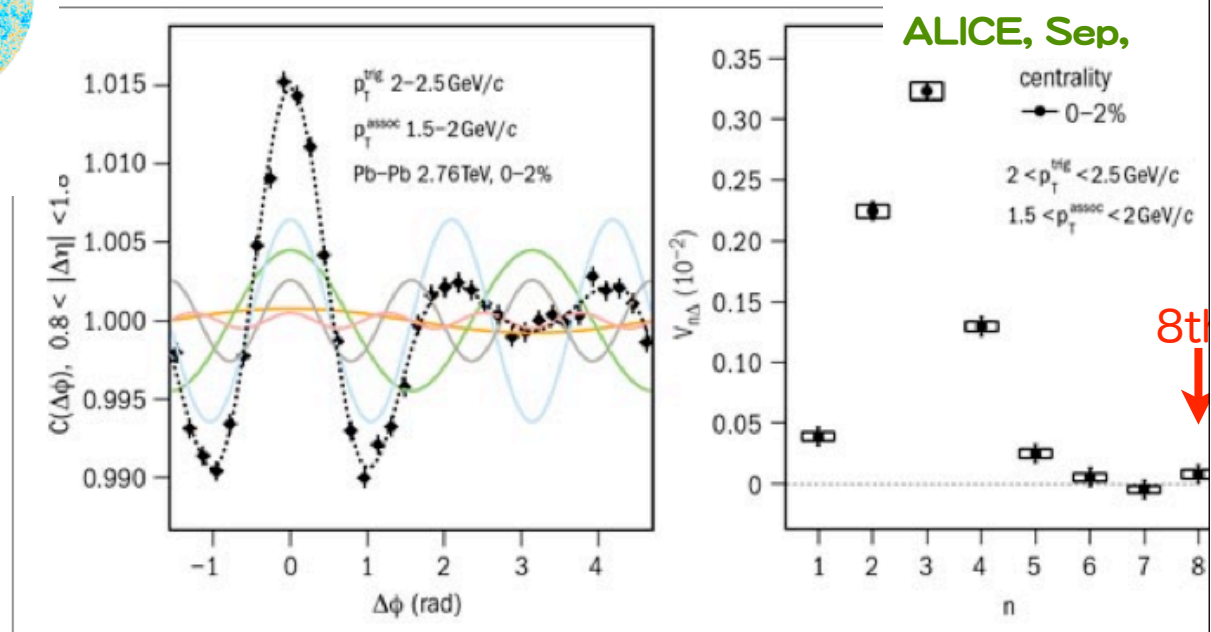
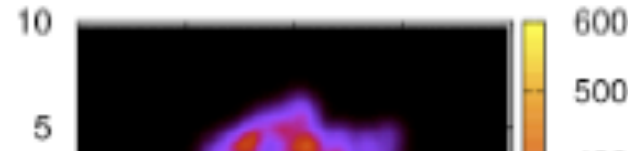
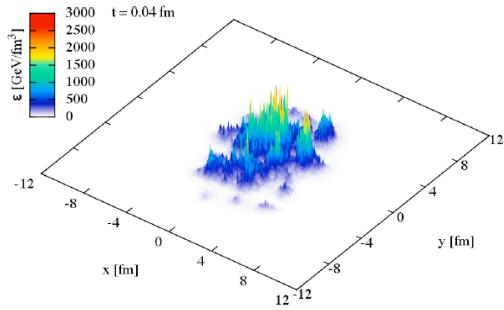


Fig. 1. Left: correlation function for charged hadron pairs from head-on Pb-Pb collisions. Right: corresponding spectrum of Fourier harmonic amplitudes vs n.

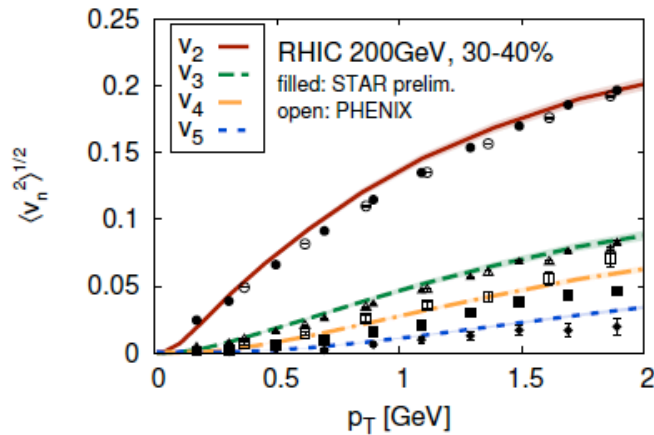
レアプローブ (種々のハドロン、フォトン、lepton, light quark, heavy quark) の高次異方性測定により、熱化メカニズム、衝突初期条件、QGP物性 (粘性等) がわかる

→ 測定装置の高速化と High-p_T 化が鍵

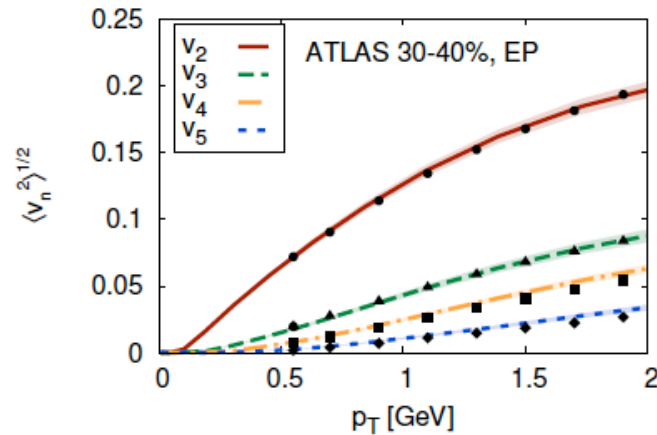


η/s 温度依存性？

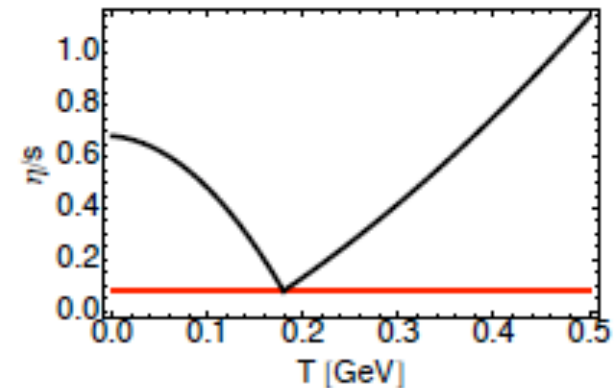
RHIC $\eta/s = 0.12$



LHC $\eta/s = 0.2$



- IP-Glasma モデル (color charge fluctuation)
- 高次異方性の測定と比較、 η/s がRHIC と LHC で異なる可能性
- RHIC で最小の η/s ?
- 温度依存性はあるのか？



Björn Schenke (BNL) RHIC AGS Users' Meeting 2013, BNL
 C. Gale, S. Jeon, B.Schenke,
 P.Tribedy, R.Venugopalan, PRL110, 012302 (2013)

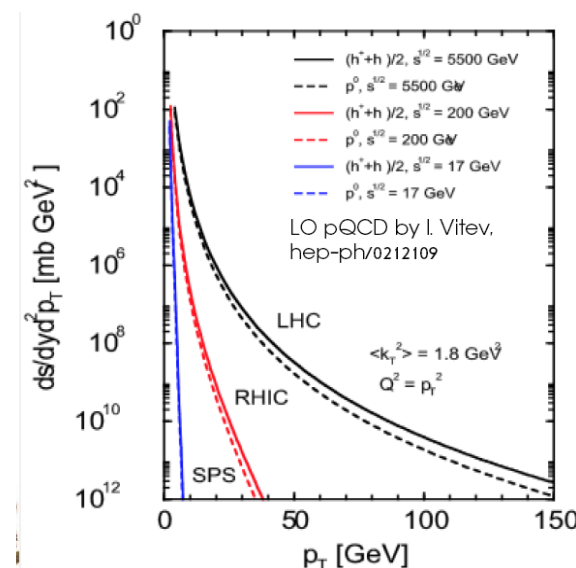
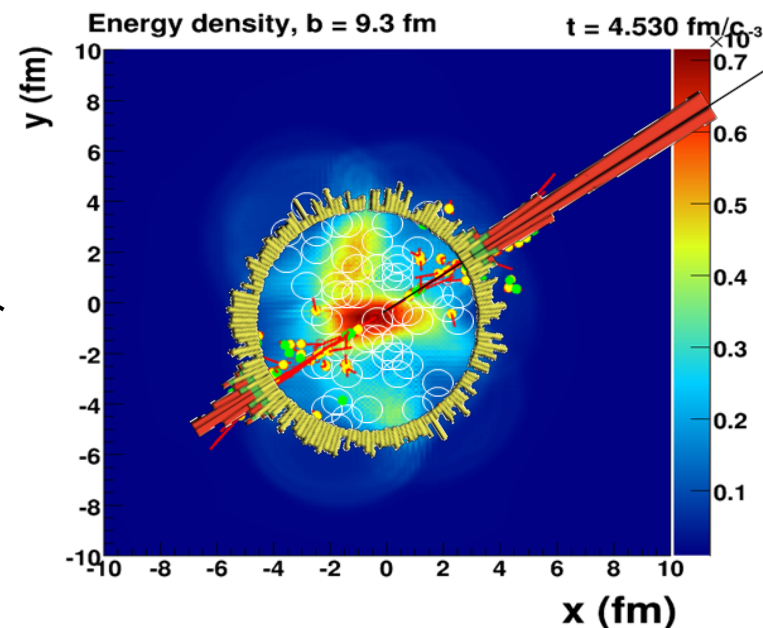
ジェット測定で分かるQGP物性

LHC エネルギー：

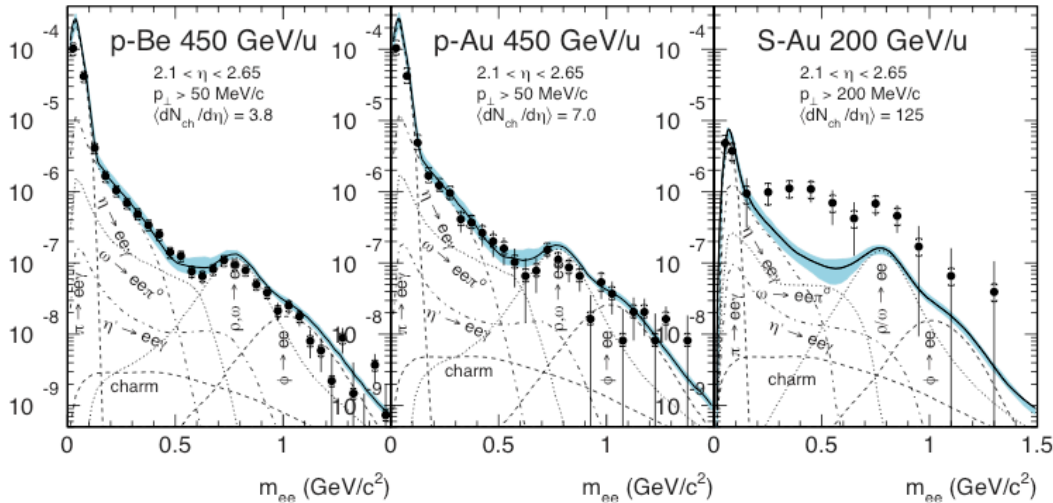
- RHIC に比べてハードプロセスが支配的
 - ジェットを基軸とした新たな観測量：
 - ジェット通過による**QGP媒質応答**
 - 重クォークジェット、ジェット対、光子-ジェット
 - 失ったエネルギーの再分配、EOS、音速
 - 重いクォークの強結合系QGPとの相互作用（熱化、相互作用の強さ）
- **データ読み出し高速化が必要**

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**

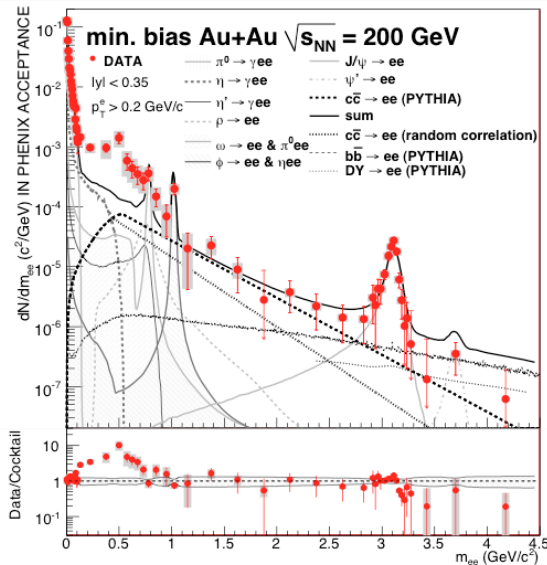


カイラル対称性の回復現象



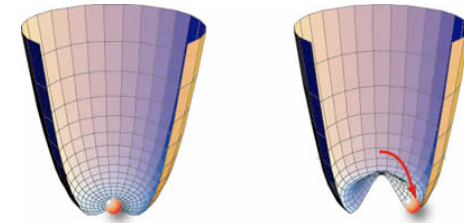
↑ CERES 実験での電子対質量分布(SPS)

A. Agakichiev et al., Phys. Rev. Lett. 75, 1272 (1995).
 A. Agakichiev et al., Eur. Phys. J. C4, 231 (1998).



← PHENIX 実験での電子対質量分布 Au+Au (RHIC)

A. Adare et al., Phys. Rev. C 81, 034911 (2010).



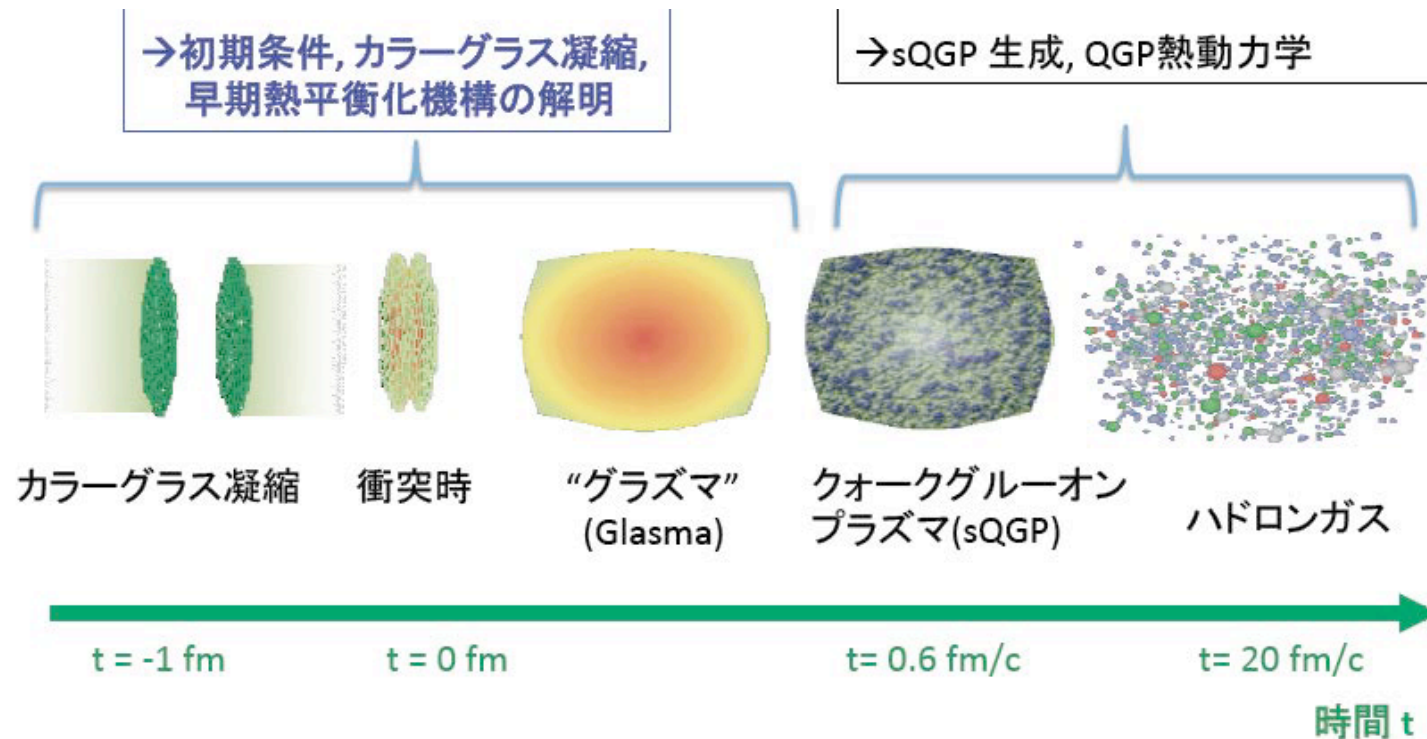
- レプトン対質量分布の余剰成分：
 - 媒質効果による ρ 中間子の broadening の効果と無矛盾
 - 高温領域 (LHC) ではどうか？
 - 高密度領域 (例えば FAIR, J-PARC) では測定されていない

高温側、高密度側の両方のアプローチが不可欠

+

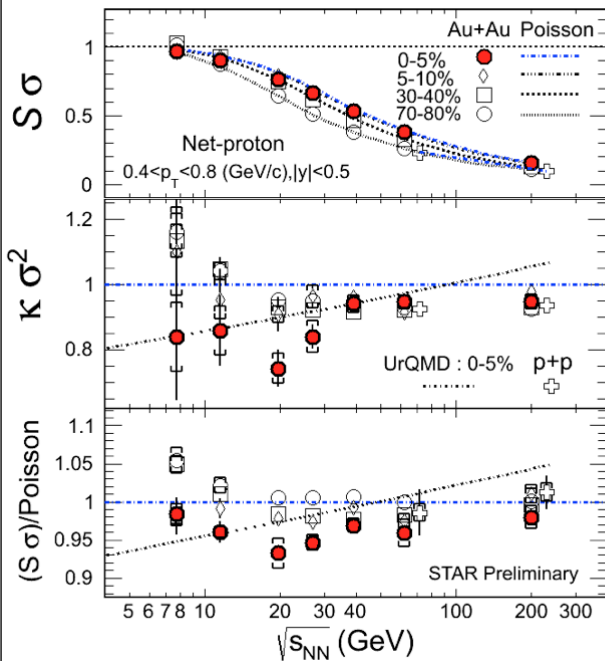
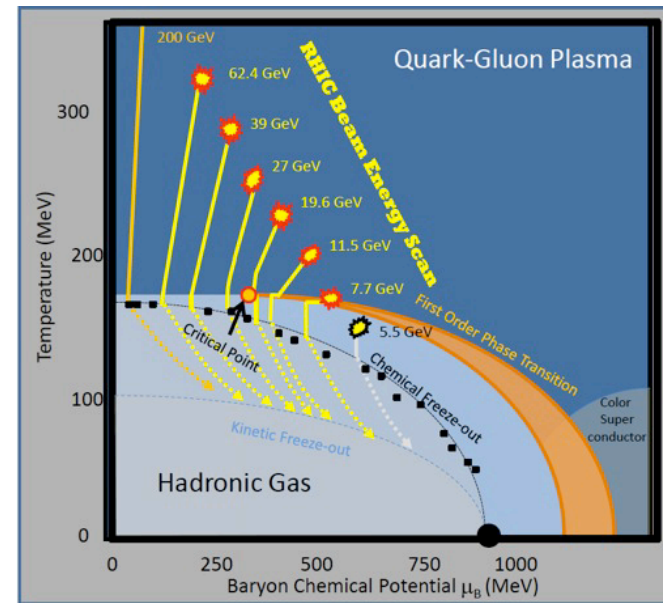
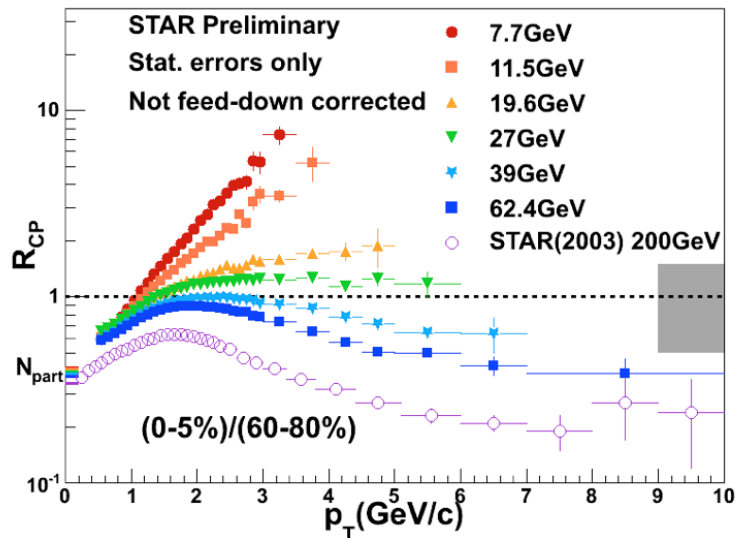
理論の進展

衝突初期条件の決定、早期熱化の謎



- d-Au (RHIC), p-Pb (LHC) の結果には カラーグラス凝縮 (CGC) を示唆するものの、未だ決定的ではない (final state interaction を含むハドロン測定が主)。
- 実験的課題：よりクリーンなプローブによる前方の測定が不可欠 (例：直接光子)
- CGC vs. Glauber 初期条件 → **QGPにおける早期熱化機構の解明へ**

QCD 相図の解明



$$\sigma^2 = \langle (N - \langle N \rangle)^2 \rangle$$

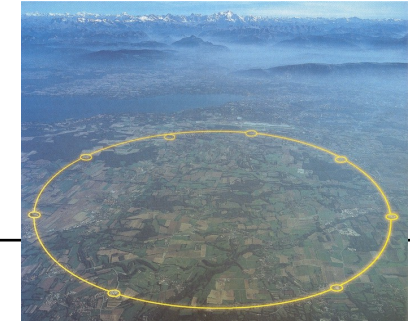
$$S = \langle (N - \langle N \rangle)^3 \rangle / \sigma^3$$


$$\kappa = \langle (N - \langle N \rangle)^4 \rangle / \sigma^4 - 3$$

- RHIC ビームエネルギー スキャン (BES-I; **B**eam **E**nergy **S**can), 7.7 - 62.4 GeV による臨界点探査
 - R_{AA} , v_2 のクォーク数スケーリング、揺らぎ測定など
 - 未だその兆候なし。
- より詳細なスキャン (BES-II) @ RHIC
- J-PARCでの重イオン加速の可能性

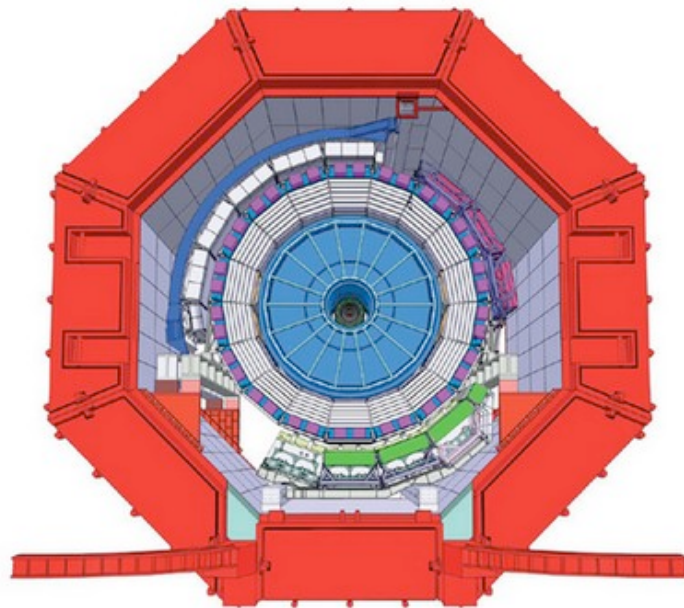
**3. 実験的にどの様に
アプローチするか
(2014 ~ 2025頃まで)**

LHC run plan

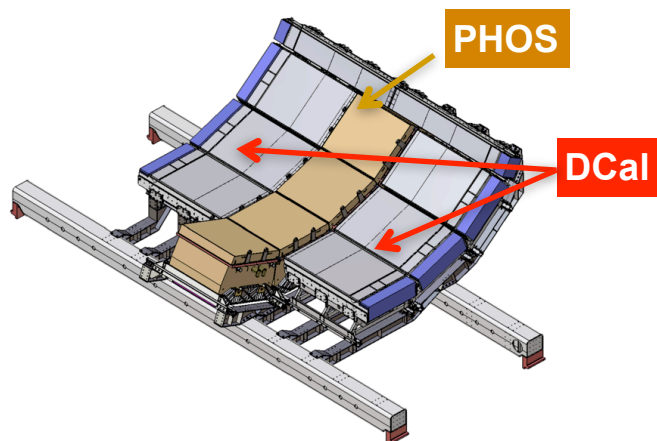


- **2013.02 - 2014:**
 - LHC Long Shutdown 1 (LS1)  **今ココ**
 - **ALICE:** DCAL 電磁カロリメータ検出器導入, 遷移放射 (TRD) 検出器完成
- **2015, 2016, 2017:**
 - デザイン最高エネルギー物理ラン； $v_{SNN} = 5.5 \text{ TeV}$ での Pb-Pb, 14 TeV p-p
- **2018:**
 - LHC Long Shutdown 2 (LS2)
 - LHC 高輝度化に向けた検出器のアップグレード
 - **ALICE upgrade:** 新しいシリコン検出器, GEM-TPC検出器導入 など.
- **2019, 2020, 2021, 2022:**
 - LHC 高輝度物理ラン (p-p, Pb-Pb each year)
 - **50kHz Pb-Pb (今の100倍)での運転**
 - **ALICE:** FOCAL 前方光子検出器導入 (計画中)

ALICE Dijet Calorimeter (= DCal)



■ solenoid magnet (surrounds)	■ TOF
■ ITS (small ring, centre)	■ DCAL
■ TPC ("spoked wheel")	■ EMCAL
■ TRD ("stripes")	■ HMPID



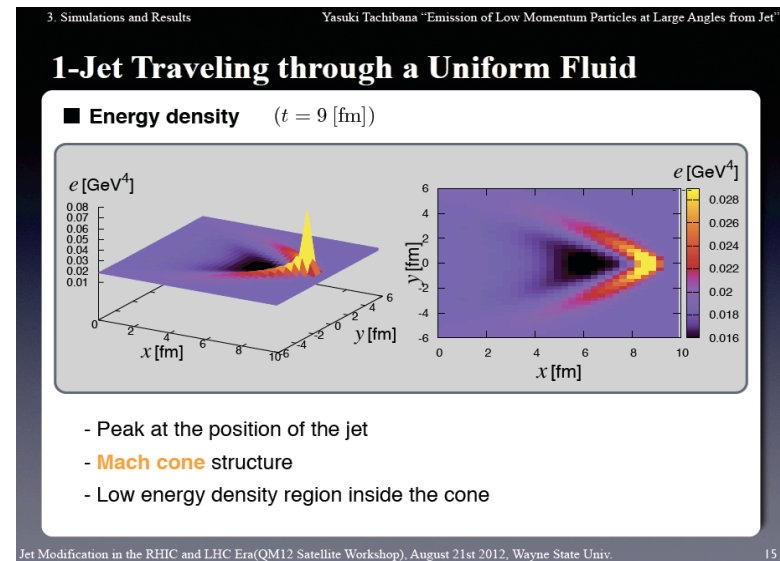
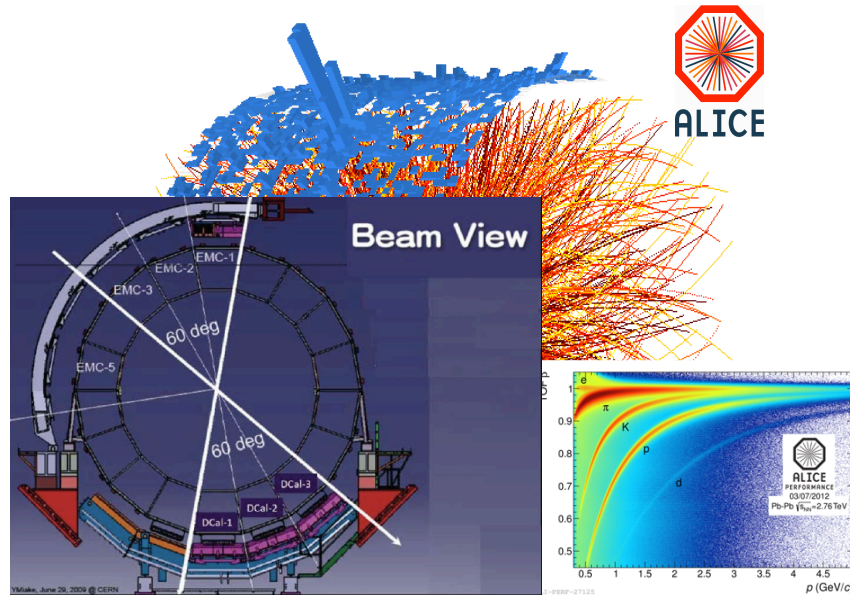
- ・ 中性成分を含む（フル）ダイジェットを測定する電磁カロリメータ（筑波大）
 - $R = 0.4$ コーン半径, $p_T \sim 150 \text{ GeV}/c$ まで。
 - 光子・ジェット対トリガー (L1) 能力向上



DCal スーパーモジュール (2013.09 @ CERN)

DCal 検出器導入による新たな物理

Medium response with jets



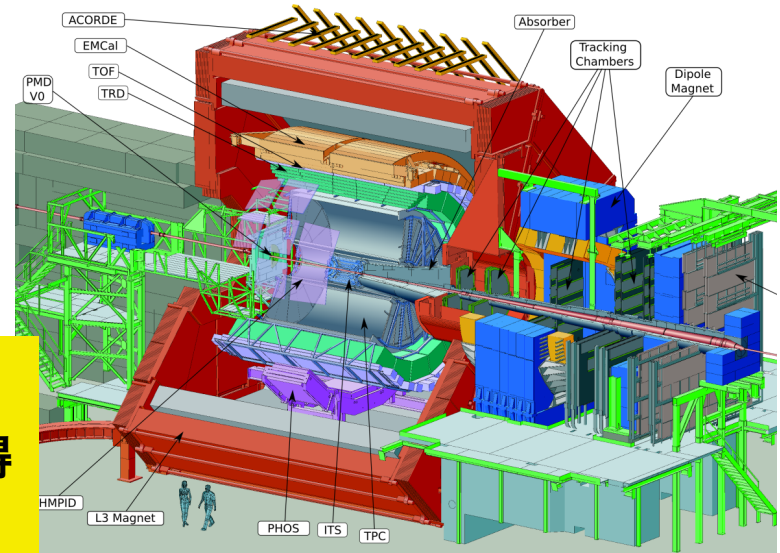
3+1 hydro + jet (Tachibana, Hirano) QM2012

- ALICE の高い荷電粒子識別能力(0.15 – 20 GeV/c) と光子、ジェット同定
 - 低運動量粒子を含むジェット媒質応答の研究
 - QGPバルクな性質 (PID spectra, v_n , HBT) とジェット対エネルギーバランス
 - ジェット-ジェット, γ -ジェット
- アクセス可能性のあるQGP物性量: c_s , EOS by グルーオン衝撃波の観測
- 荷電粒子との同時測定なので、読み出しには TPC 高速化が必須

ALICE実験 高速化 (after LS-2, 2018-)

ALICE 実験測定器の高速化

- ✓ GEM-TPC連続読出高速化 (東大 CNS)
- ✓ PHOSカロリメータ高速化 (広島大)
- ✓ ITS シリコン検出器高速化



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)

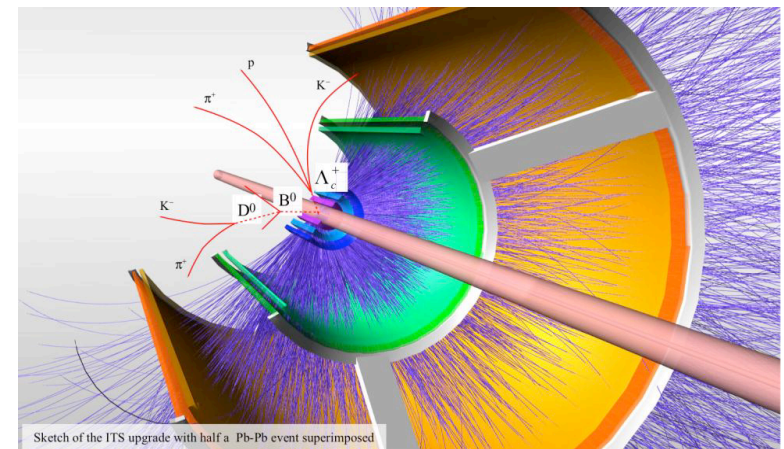
→ 高精度測定、レア事象へのアクセスが可能に

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

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

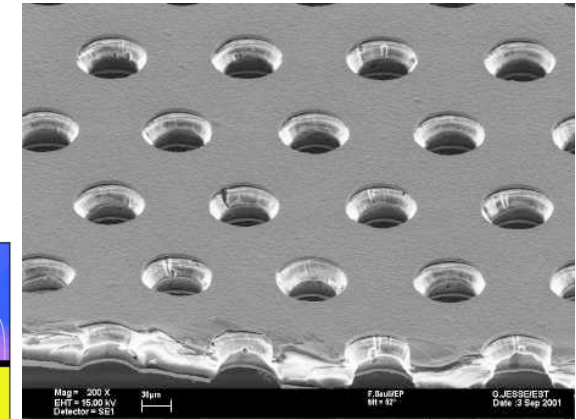
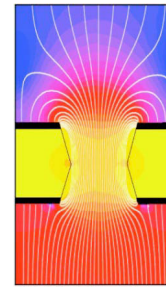
→ QGP媒質応答、重クォークと強結合系の相互作用 (熱化、相互作用の強さ) を決定



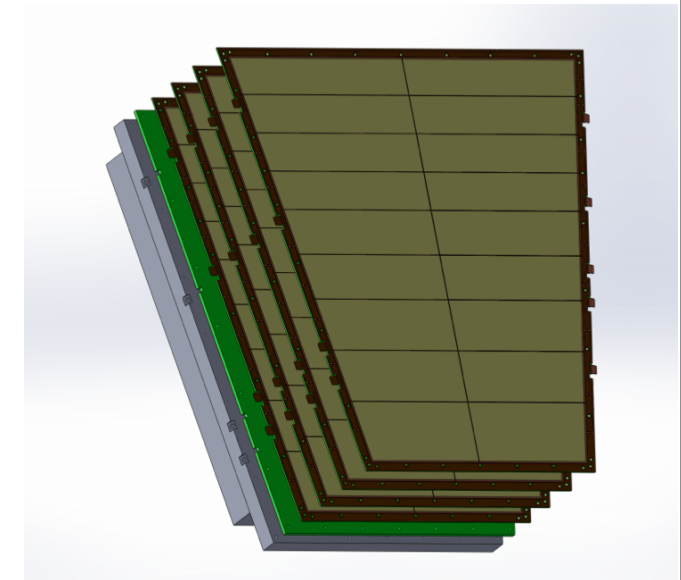
GEM-TPC 高度化

▶ TPC のレート対応能力の強化

- ・ Pb-Pb 衝突の全ての事象を50kHz で読出し
 - ・ 現状は 500 Hz が限度 (MWPC Gating Grid 方式)
- ・ Gating Grid なしで、連続読み出し
- ・ → GEM (Gas Electron Multiplier)
- ・ 2018年インストールに向けてR&D 進行中
 - ・ イオンフィードバック、分解能、安定性の改善
 - ・ プロトタイプ製作、ビームテスト、読み出し回路開発、シミュレーション



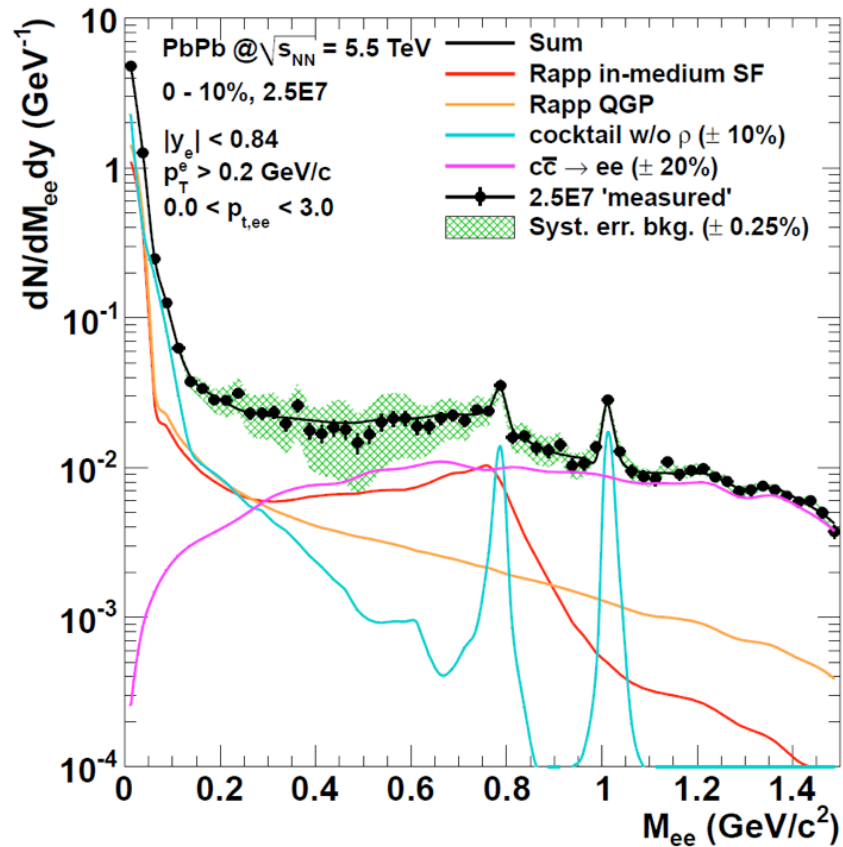
GEM



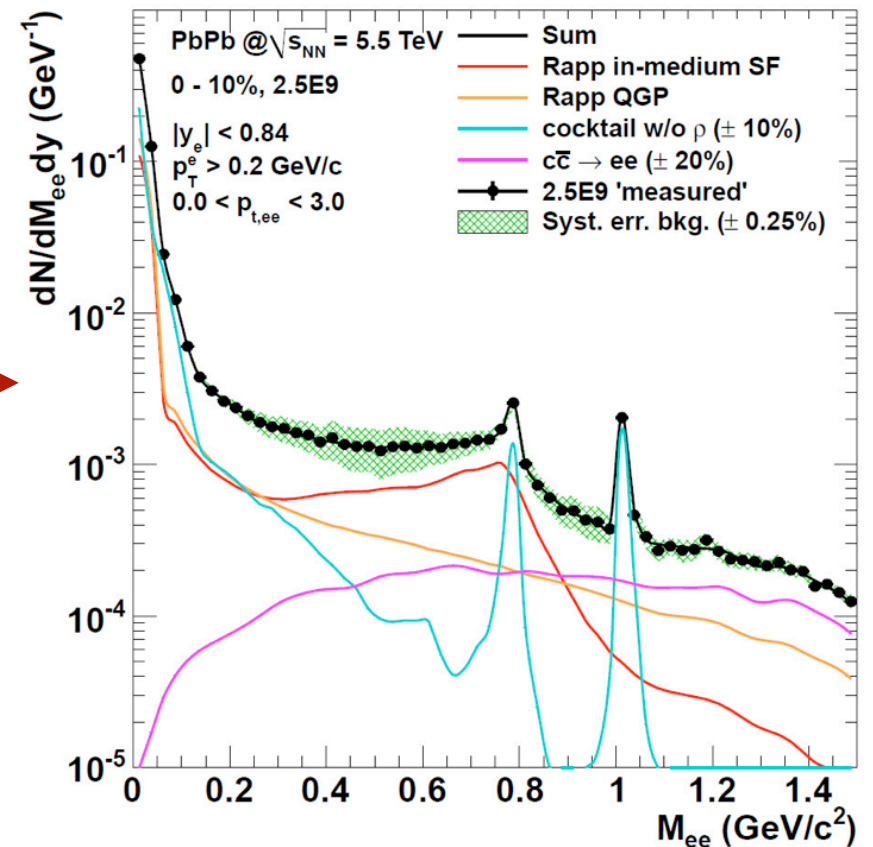
導入予定の GEM-TPC

Expected performance (low-mass di-electron pair), w/ hadronic BG

Before

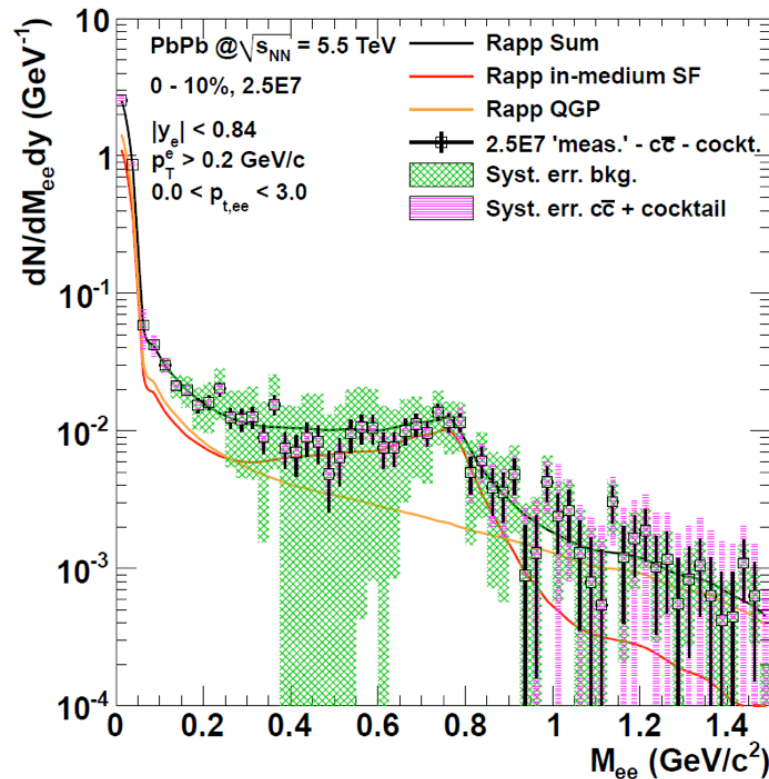


After

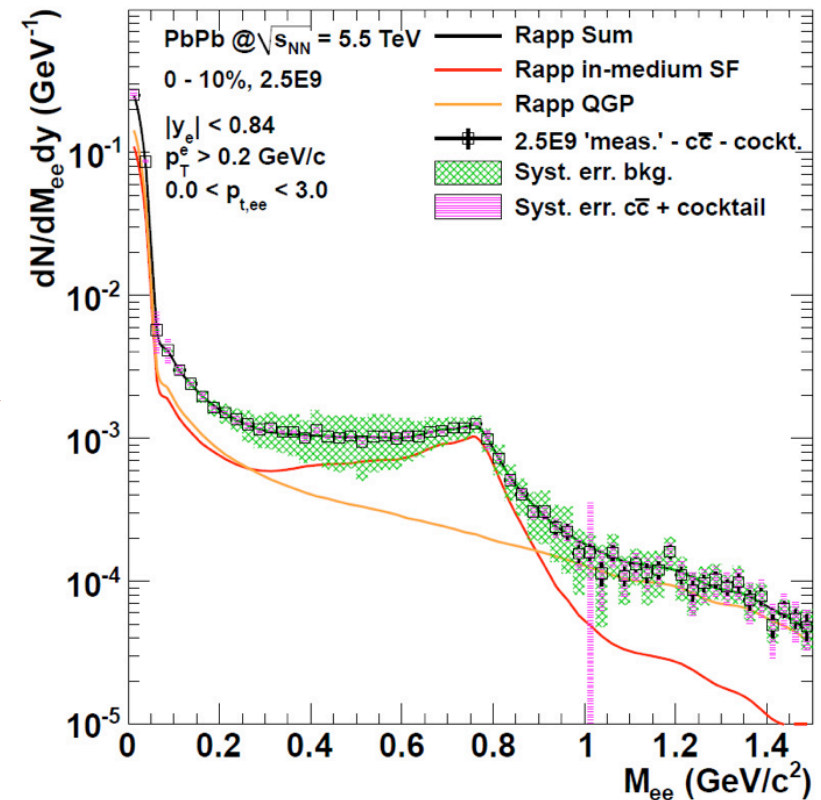


Expected performance (low-mass di-electron pair), w/o hadronic BG

Before



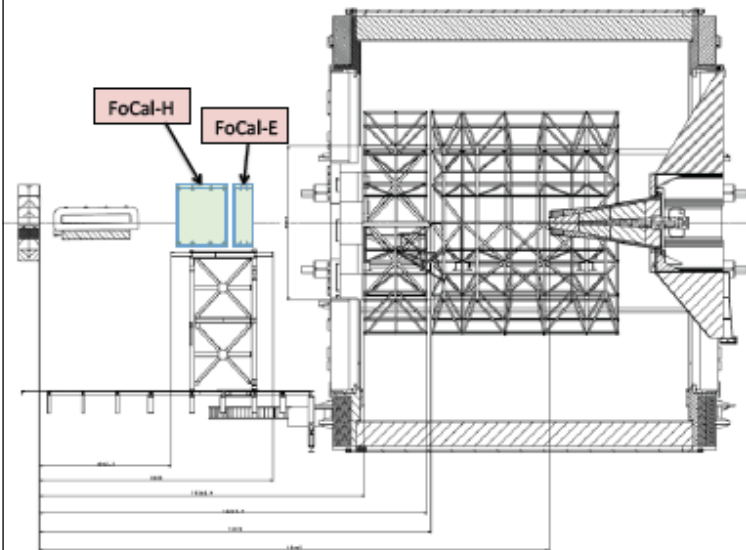
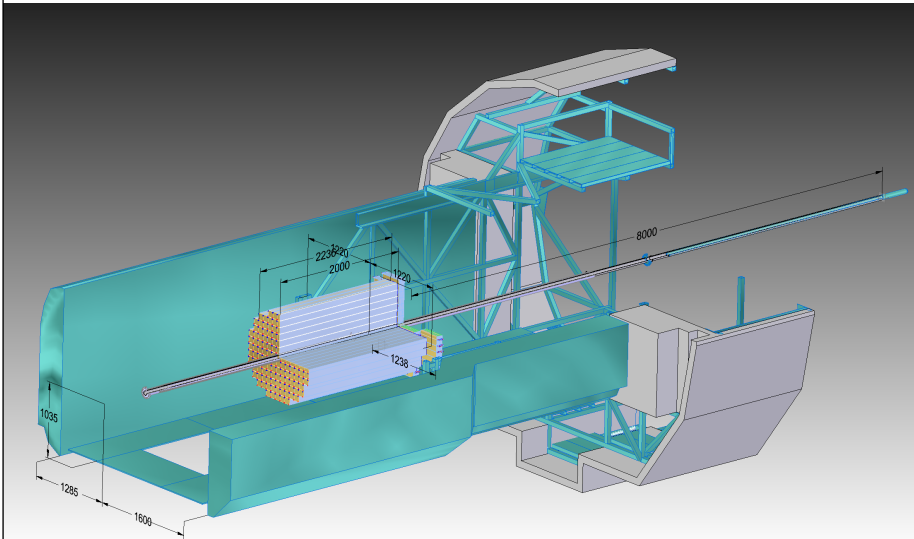
After



アップグレード前後の余剰成分 (シグナル)

→カイラル対称性の回復現象の精密測定へ!

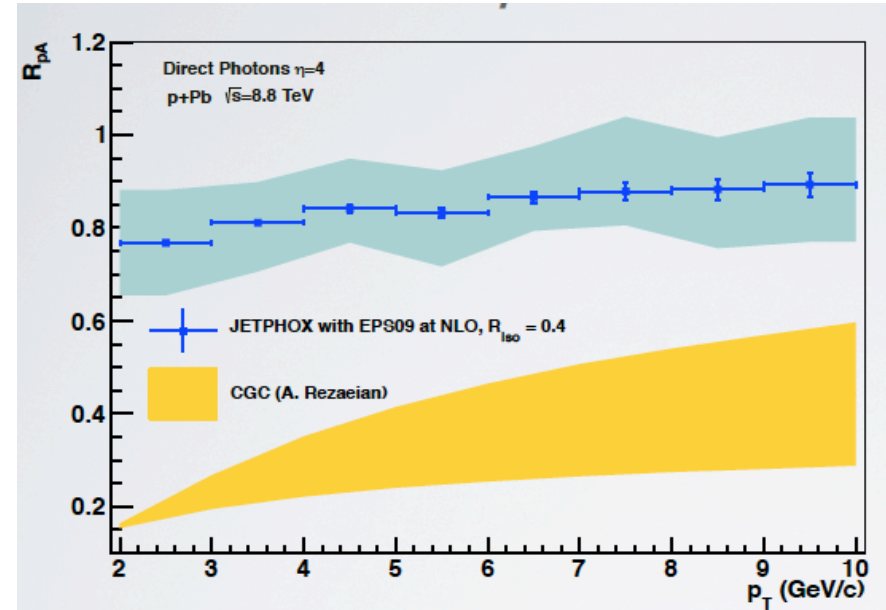
FOCAL 検出器



Direct photon R_{pA} ($\eta=4$)

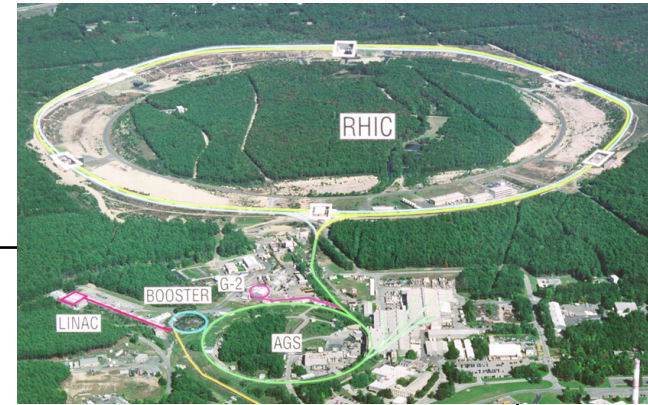
CGC vs. normal nuclear effects

linear evolution, shadowing



- $\eta = 3-5$ をカバーする前方光子検出器 (筑波大、東大CNS)
- 電磁カロリメータとハドロンカロリメータ
- ALICE 実験内で導入を検討中
- 前方での**直接光子測定**により、CGCを検証、衝突初期条件の決定とQGP熱化機構に迫る。

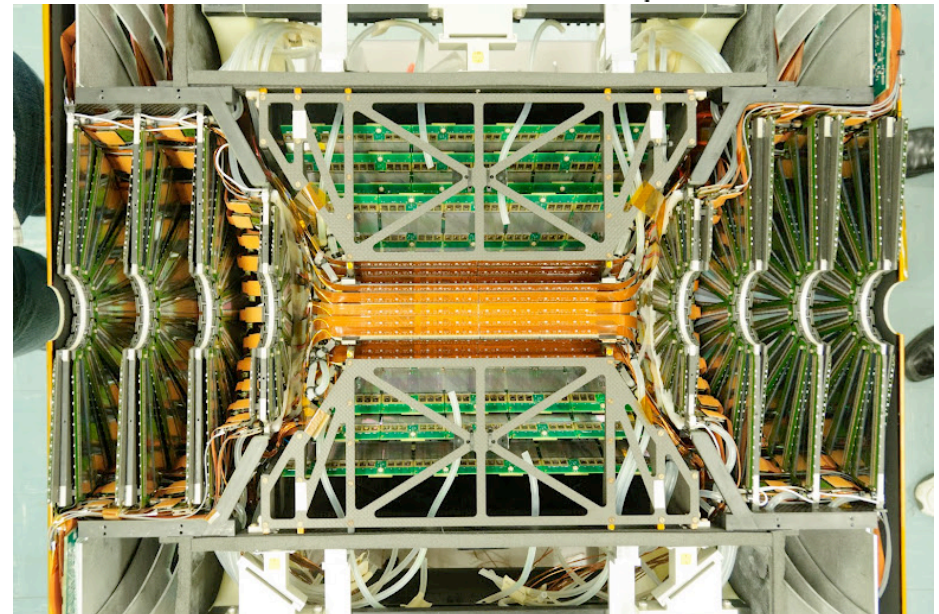
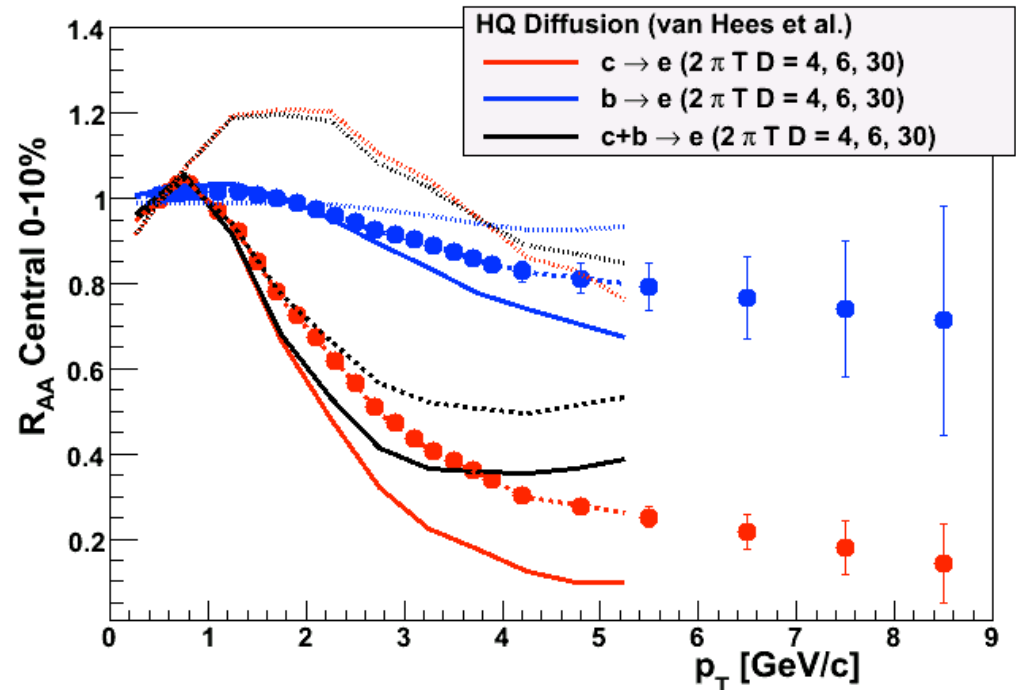
RHIC run plan



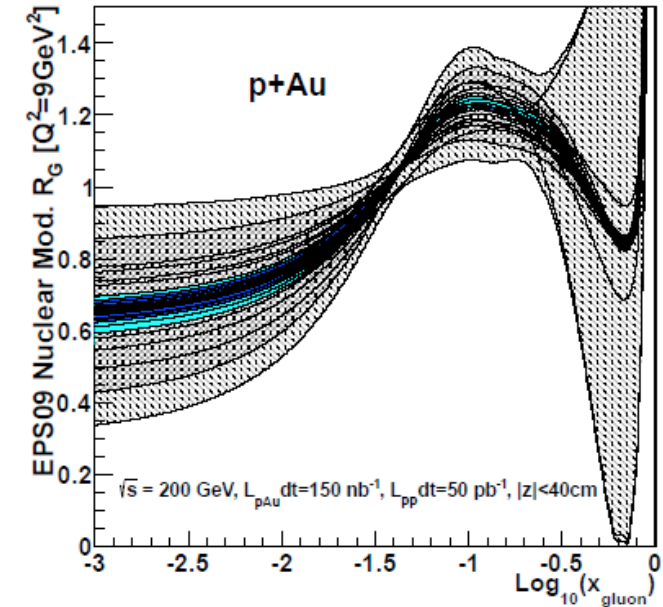
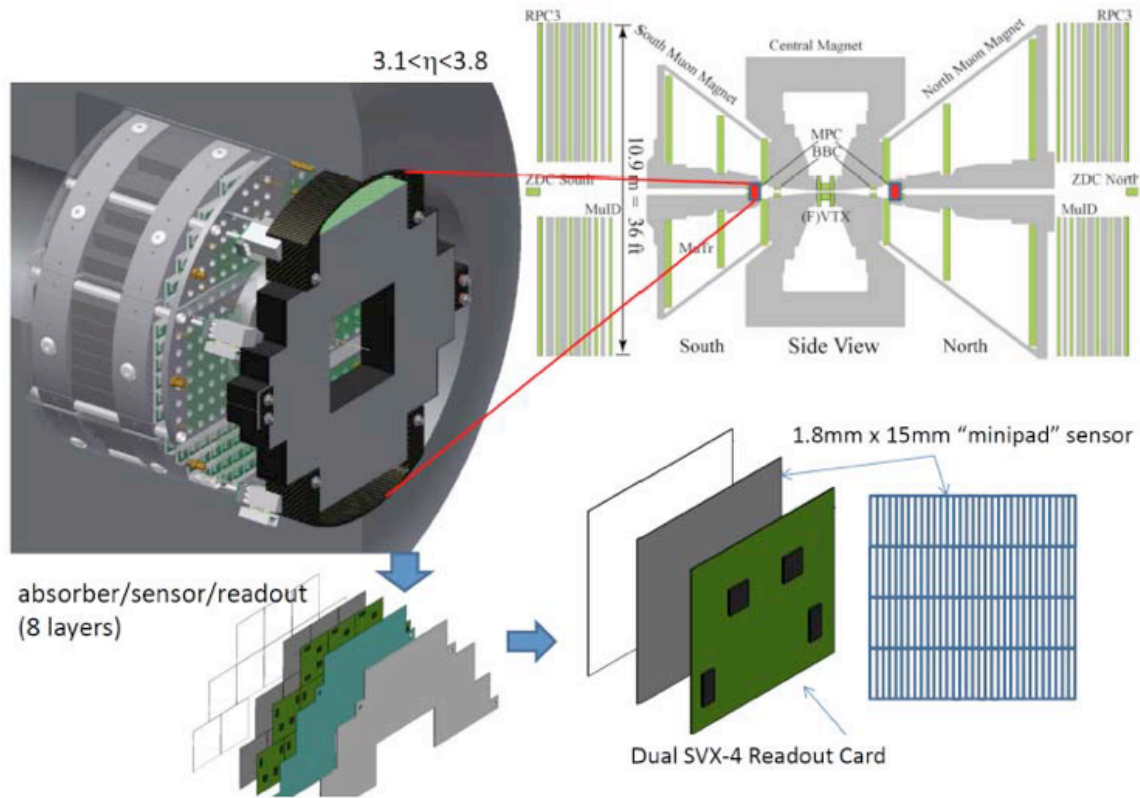
- 2014 (Au+Au 200 GeV with F/VTX),
- 2015 (p-Au, p-Si, p-Cu, p-p, d-Au, $^3\text{He}+\text{Au}$ @ 200 GeV with MPC-EX),
- 2016 (高統計 A+A):
- 2017 (シャットダウン、BES-II 用ルミノシティアップグレード)
- 2018 (**BES-II**), 2019(**BES-II**), **5-20 GeV Au+Au**
- 2020 (シャットダウン、eRHIC 建設開始、sPHENIX 建設)
- 2021, 2022: **sPHENIX**実験
- **Long 200 GeV Au-Au, with sPHENIX, p-p, d-Au 200 GeV**
- 2023, 2024 (シャットダウン、eRHIC/ ePHENIX 建設へ)

F/VTX 検出器

- 2014/15 でのキーとなる検出器
(Au+Au 200 GeV, p-A 200 GeV)
- 前方 FVTX で muon チャンネルでの c/b 分離測定
- **c/bクォークの拡散係数決定**など、重クォーク測定によるQGP物性研究を展開



前方光子検出 (MPC-EX)



- シリコン飛跡検出とプレシャワーによる直接光子及び高運動量 π^0 測定
- 2015 年よりフルで物理運転開始
- low-x の物理、グルーオン飽和、CGC 探査, gluon nPDF に制限

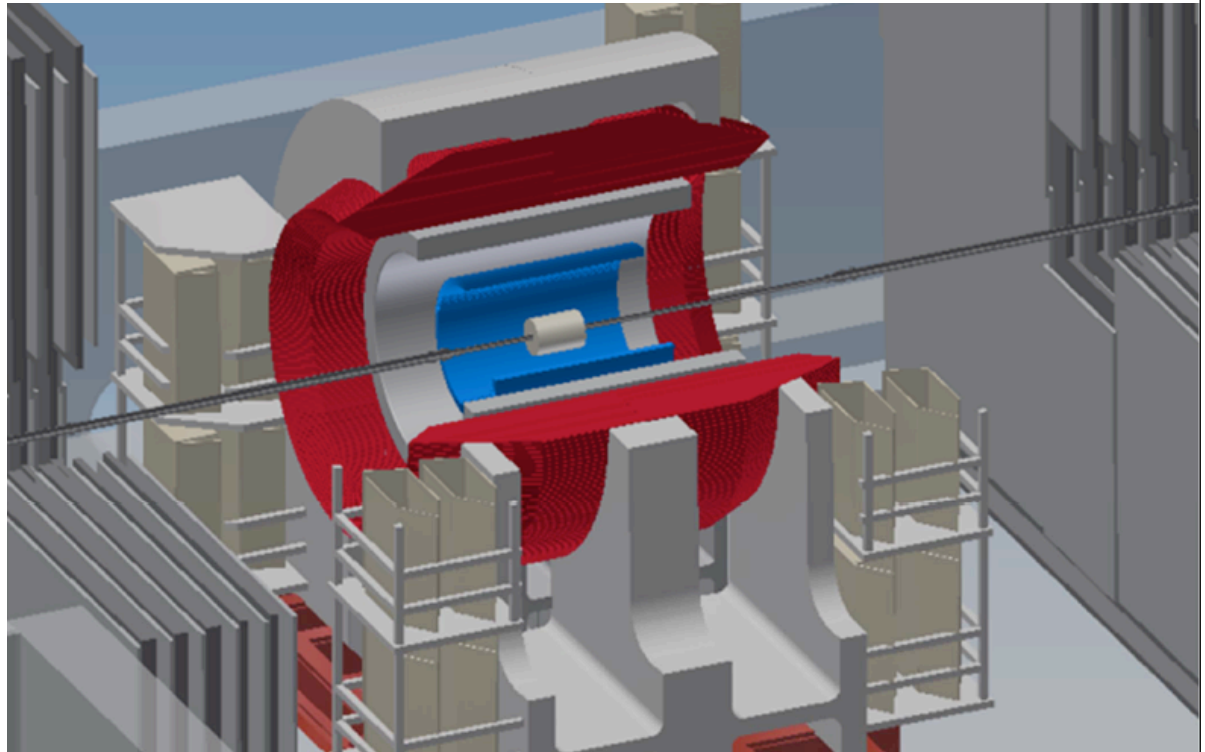
PHENIX実験 High-p_T 化

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**

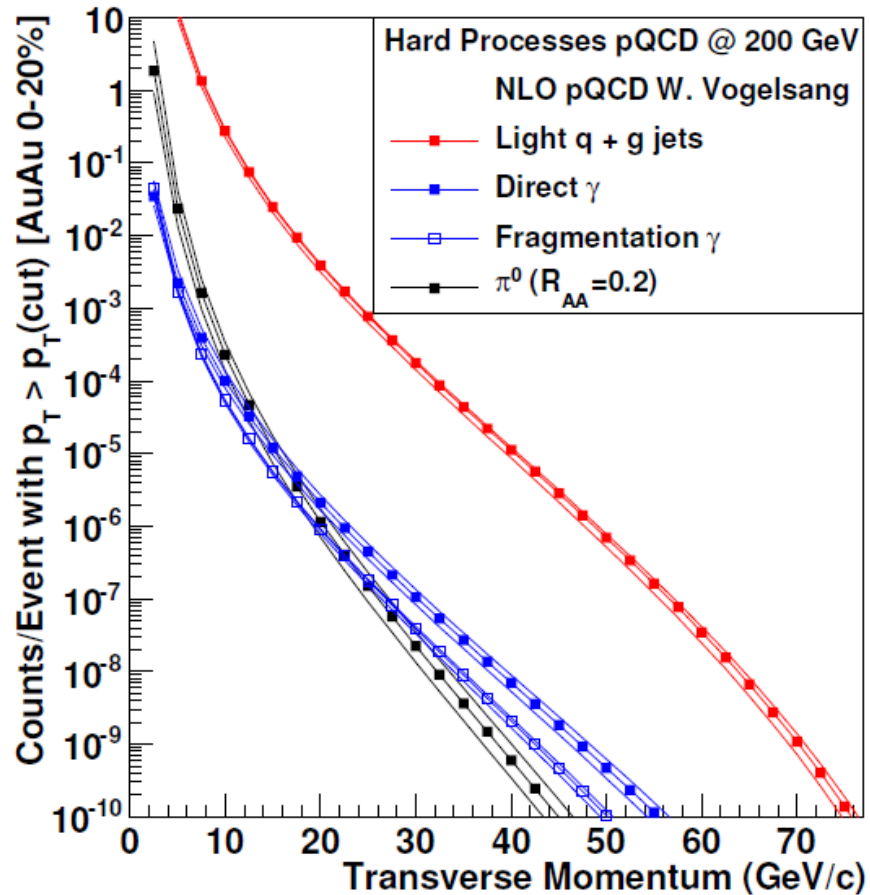
- 日本が建設を主導する検出器：
 - ✓ シリコン飛跡検出器
 - ✓ プレシャワー検出器



sPHENIX実験: 総額\$20M-30M
arXiv:1207.6378

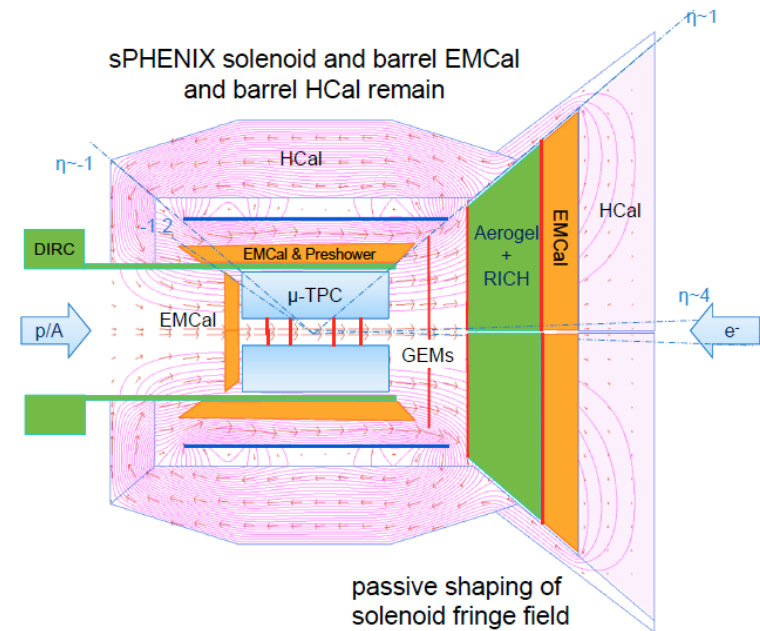
ジェット、重クォーク測定から、RHICエネルギーでのQGP中でのエネルギー損失(輸送係数)の温度依存性を決定

Full jet at RHIC !



- Au+Au中心衝突 @ 200 GeV: 10^6 jets/year with $E_T > 30$ GeV, 80% のそれらのジェットは $|\eta| < 1$ 内に d-jet.
- ➡ RHIC で初のフルジェット測定, A_j 測定、ジェットプロパティの温度依存性 (LHC との違い)

sPHENIX 準備状況



- BaBar のソレノイド電磁石 (内径 140 cm, 長さ 385 cm, 磁場 1.5 T) が入手可能に
- sPHENIX 終了後は ePHENIX 実験として存続を予定

J-PARC における重イオン実験の検討

- **J-PARC:**

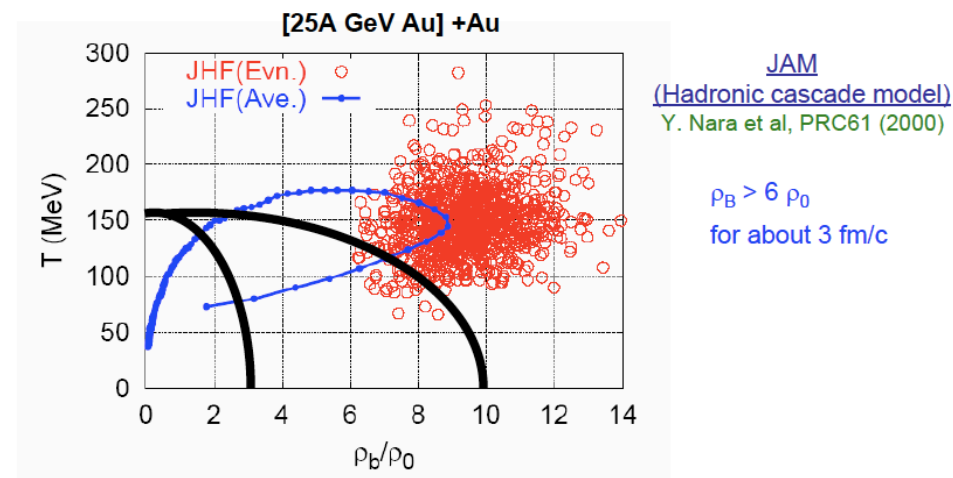
- 高ルミノシティ原子核衝突実験の可能性

- JAEA、J-PARC 加速器、高エネルギー核物理研究者有志が、重イオン計画のインフォーマルな検討を行っている（2011年12月～）。

- **目的:**

- 高バリオン密度におけるQCD相構造解明、QCD臨界点の探索

- 重イオン衝突では、 $5-10 \rho_0$ 程度まで達成可能

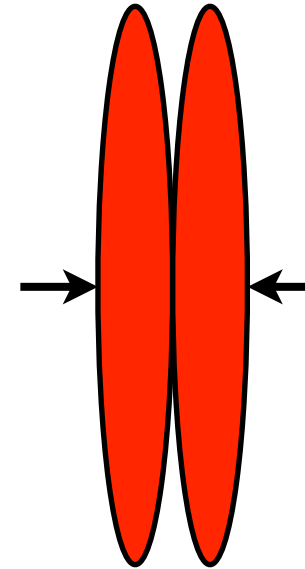


J-PARC 重イオン衝突の物理@10-15GeV/A

($\sqrt{s_{NN}} = 4.5-5.4 \text{ GeV}$)

- 軽イオンから U 重イオンまで加速 (新イオン源; ECR, laser, EBIS)
- AGS では測定しなかった (出来なかった) 物理量を初めて測定

- 物理量のゆらぎ (粒子数、運動量、 v_n 等)
 - QCD 臨界点探査、QCD相図の mapping
- レプトン対(電子, muon)、光子、 σ メソン (?)
 - カイラル対称性回復の研究、熱光子測定
- エキゾティックハドロン/原子核、チャームの物理
 - multiple-strangeness (ストレンジレット探査)
 - 2重、3重ハイパー核
 - チャームハドロン($J/\psi, D$)
- ハドロンガスの物性量測定、高密度核物質の物性



まとめ

- ・ 次期 RHIC, LHC, (J-PARC) における重イオン実験は互いに相補的かつ、ユニークな位置にある。
- ・ 今後 10～20 年、QGP物性、QCD相構造、カイラル対称性の回復現象の研究は新たなフェーズへ突入する可能性を大いに秘めている。

