

RHIC/LHC 実験とその成果



志垣 賢太 ( 広島大学)

日本物理学会 領域 5, 理論核物理, 実験核物理合同シンポジウム

“非平衡物理 - 物性物理とハドロン物理を結ぶ世界”

2013 年 3 月 27 日, 広島大学



- 高エネルギー原子核衝突の物理的興味
- クォーク多体系の実験的探究
 - RHIC-PHENIX, LHC-ALICE
 - クォーク自由度の顕在化
 - 量子色力学相図の探査
- 準静的描像と初期動的過程
- 針路と戦略
 - 高横運動量探針 + 大立体角精密測定
 - → PHENIX/ALICE 実験高度化計画
- まとめ, おわりに

GeV/TeV 原子核衝突の物理的興味



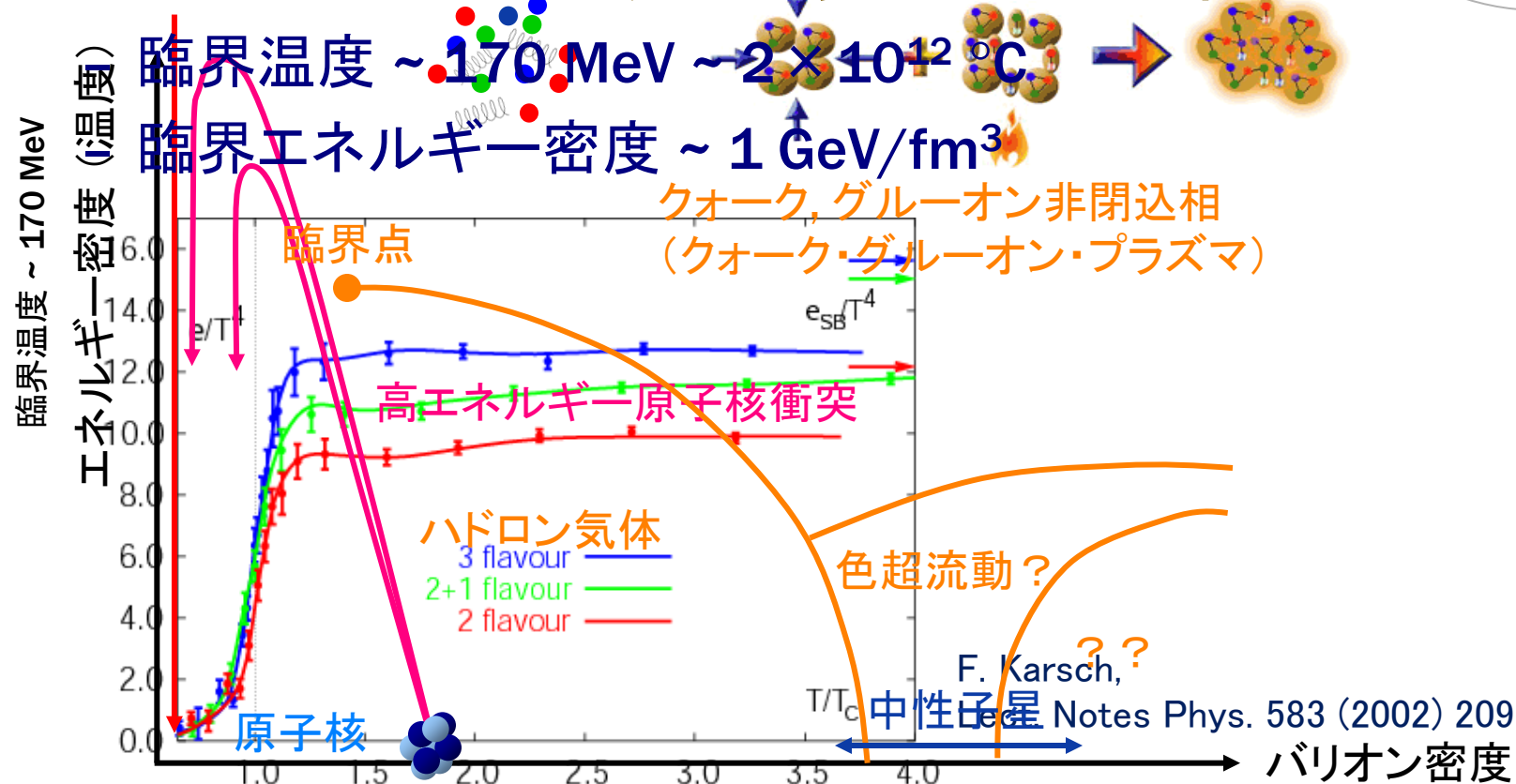
- 強場中の素粒子多体系の挙動と相構造
 - 極限条件における非摂動的量子色力学
 - *cf.* 素粒子単体, 素粒子間素過程
- 宇宙開闢後 $\sim 10^{-5}$ 秒間の状態; 宇宙創成シナリオ
 - クォークの閉込と解放
 - *cf.* 宇宙開闢後 $\sim 10^{-12}$ 秒間の粒子生成と相互作用
- クォーク閉込に伴うハドロン質量発現機構
 - カイラル対称性の自発的破れ
 - *cf.* ヒッグス機構による素粒子質量発現機構

量子色力学相図とクォーク物性

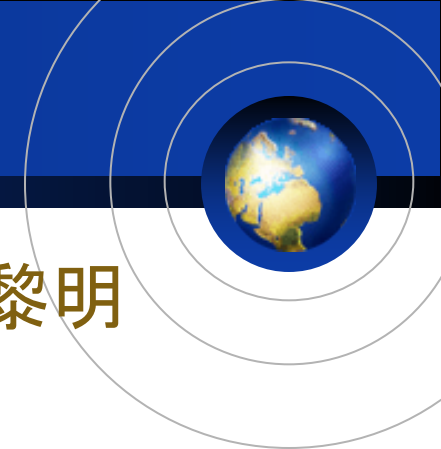


- クォーク, グルーオン非閉込相へ

- 格子量子色力学 (数値計算) による予言



クォーク解放の実験的探究



- 1980年代: 動的過程による生成試行の黎明
 - 中高エネルギー中重原子核
 - 米 LBL-BEVALAC (0.2 – 2.5 A GeV)
- 1990年代: 高密度領域
 - 高エネルギー重原子核 (金, 鉛など)
 - 米 BNL-AGS (11 A GeV ^{197}Au + 固定標的; 終了)
 - 欧 CERN-SPS (200 A GeV ^{208}Pb + 固定標的; 終了)
- 2000年代: 高温 (エネルギー密度) 領域
 - 正面衝突型重原子核加速器によるクォーク再解放
 - 米 BNL-RHIC (100 + 100 A GeV ^{197}Au + ^{197}Au ; 稼働中)
 - 欧 CERN-LHC (2.8 + 2.8 A TeV ^{208}Pb + ^{208}Pb ; 稼働中)



Relativistic Heavy Ion Collider at BNL

RHIC

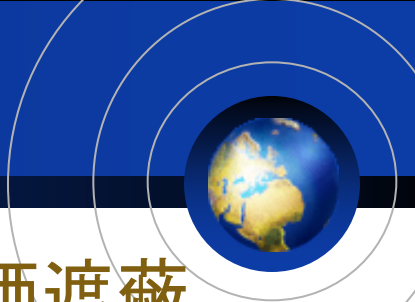
PHENIX

BRAHMS

BOOSTER

- 超伝導シンクロトロン; 周長 3.8 km; 両方向独立
- 重原子核 100 A GeV, (偏極) 陽子 250 GeV
 - Au+Au/Cu+Cu/U+U/Cu+Au/d+Au/p+p/(p+Au/)...
- 4つ (内2つは終了) の相補的実験

新たな物質相の発見



■ パarton由来: クォーク自由度顕在化, 色価遮蔽

- 構成クォーク数スケール

- J/ψ 収量抑制

■ 稠密: クォークのエネルギー損失

- ジェット (高横運動量ハドロン) 収量抑制

- ジェット形状変化

The matter may melt and/or regenerate J/ψ's

■ 強結合: 完全流体

- 流体力学で記述される集団運動

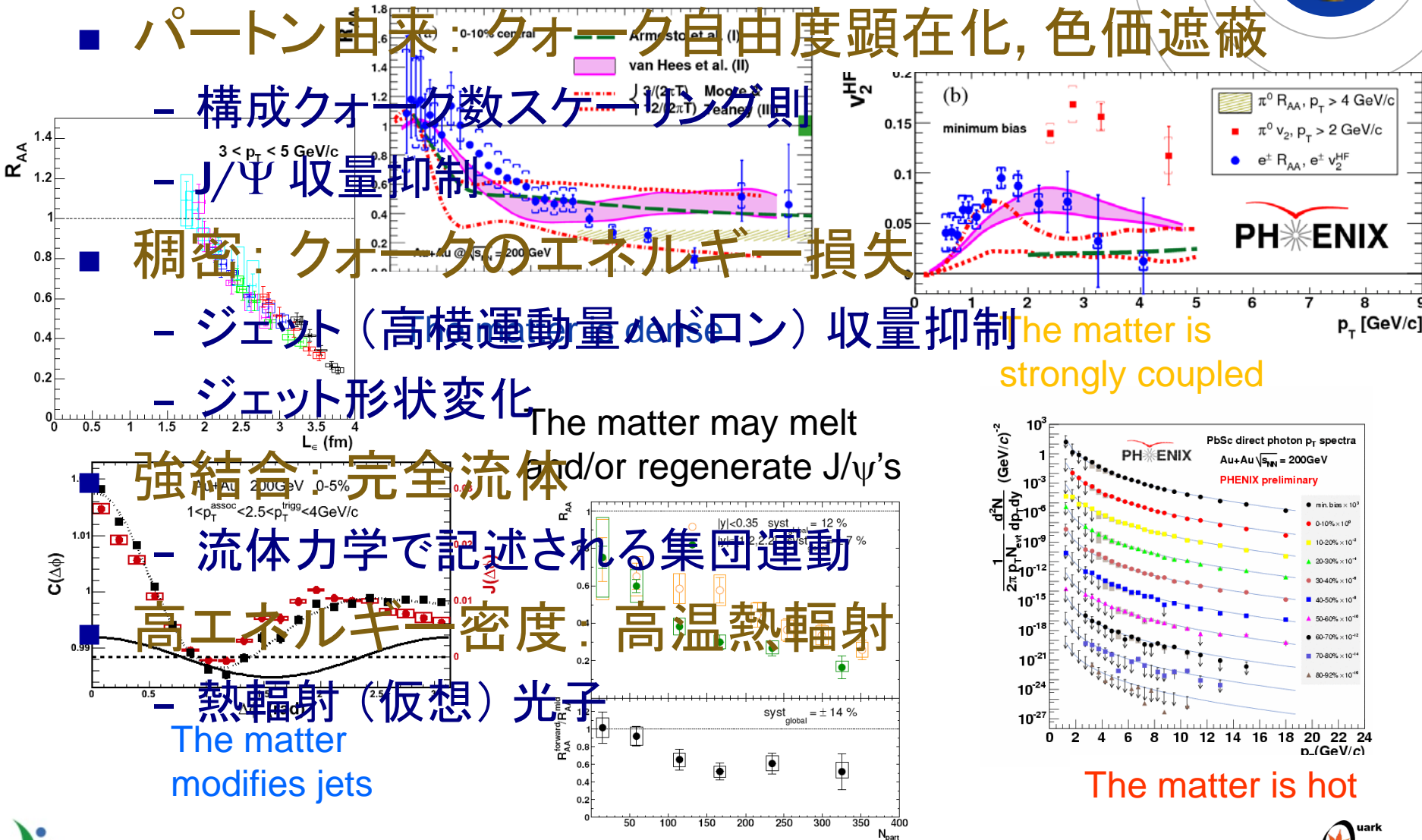
■ 高エネルギー密度: 高温熱輻射

- 熱輻射 (仮想) 光子

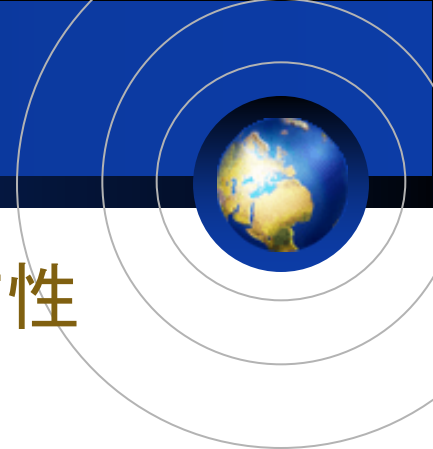
The matter modifies jets

The matter is strongly coupled

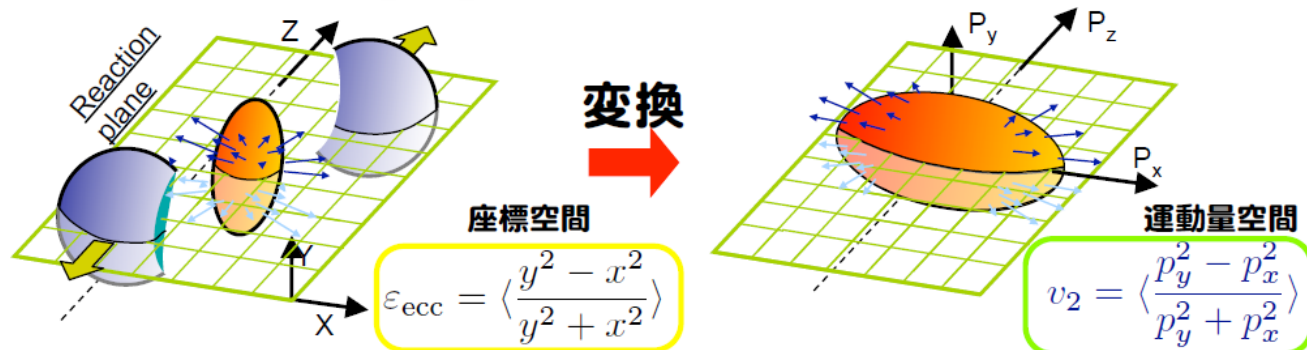
The matter is hot



クォーク自由度の顕在化

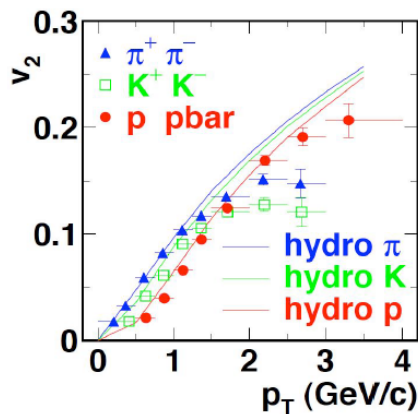


■ 生成粒子の集団運動; 楕円方位角異方性

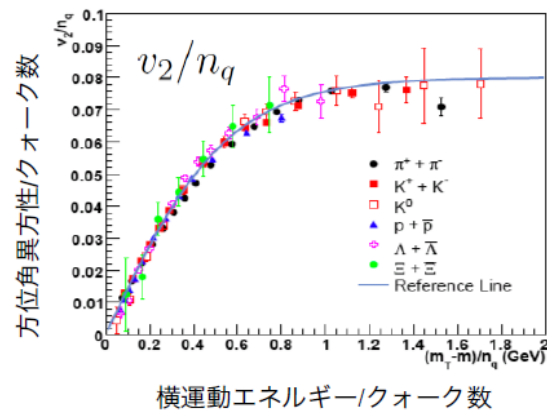


- 大きな異方性 → 早期熱化, 強結合

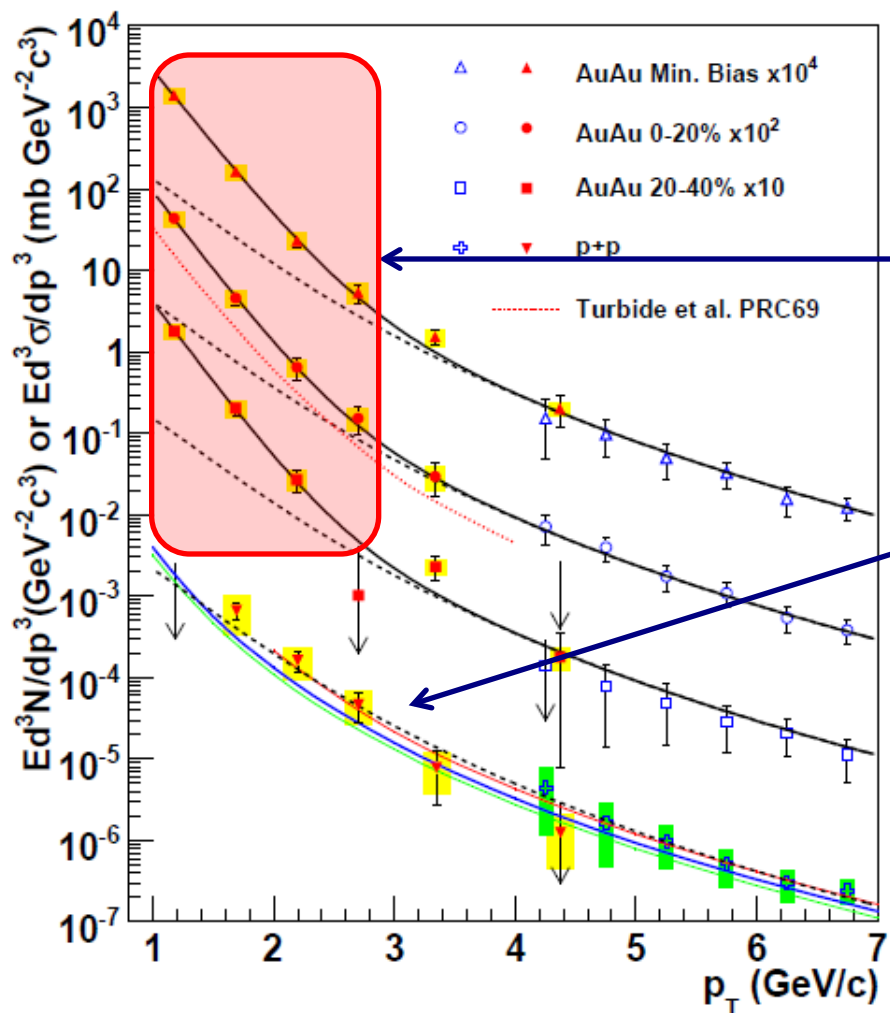
■ 構成クォーク数 (バリオン 3, 中間子 2) スケーリング



PHENIX (A. Adare et al.),
PRL 98, 162301 (2007)
Au+Au 200 GeV



光子スペクトルによる温度測定



■ 金原子核相互衝突:

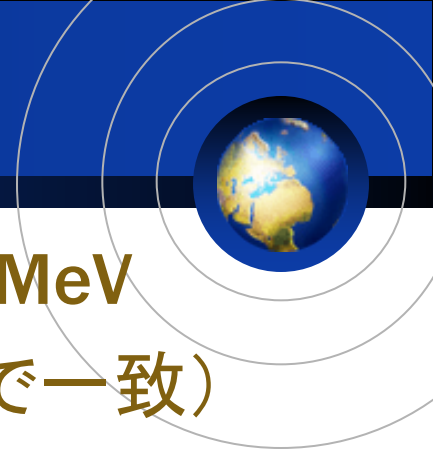
- “熱輻射” 成分を検出
- 勾配 $\sim 221 \pm 19 \pm 19$ MeV

■ cf. 陽子相互衝突:

- 量子色力学計算と一致

PHENIX (A. Adare *et al.*), PRL 104, 132301 (2010)
 NLO pQCD (W. Vogelsang)

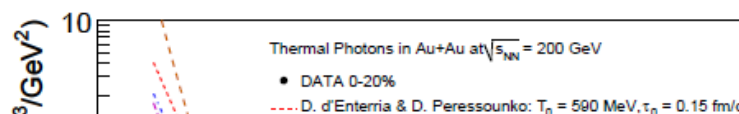
最高到達温度の見積



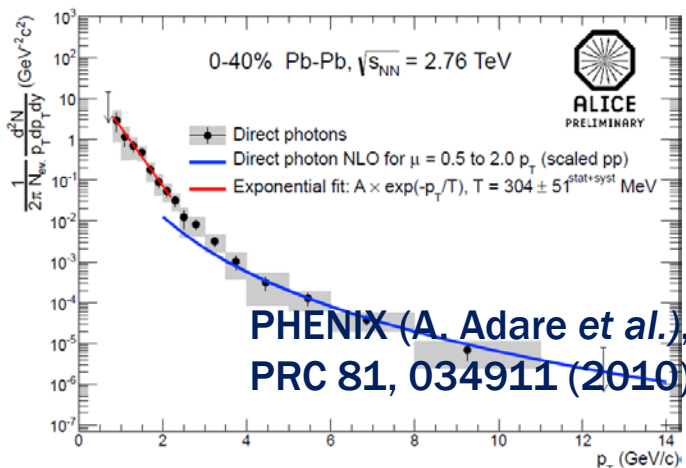
- 初期温度 > 時間平均温度 ~ 勾配 ~ 221 MeV
- 300-600 MeV (模型依存だが 2 倍以内で一致)

- 流体力学模型による記述

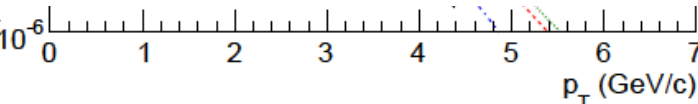
- 熱化時間 0.15-0.6 fm/c



- LHC-ALICE では輻射勾配 ~ 304 ± 51 MeV



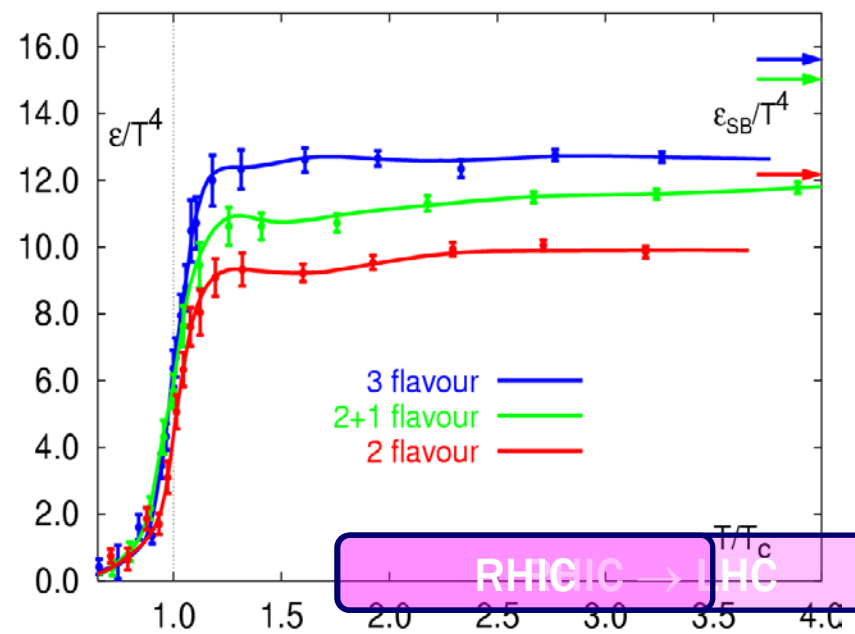
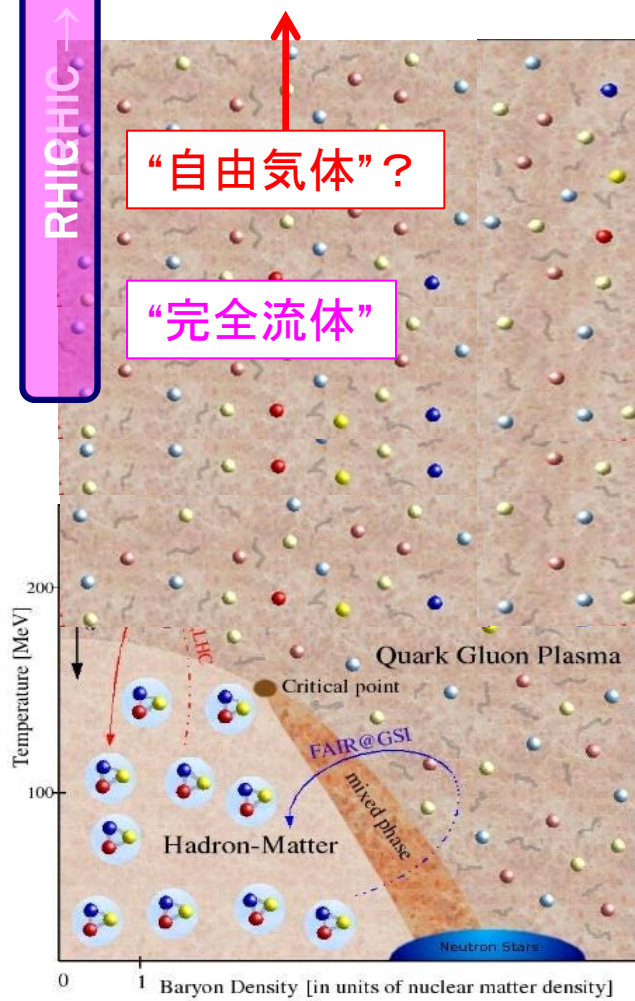
- cf. 相境界温度 ~ 170 MeV



量子色力学相図の探査



RHIC → LHC



A Large Ion Collider Experiment at LHC



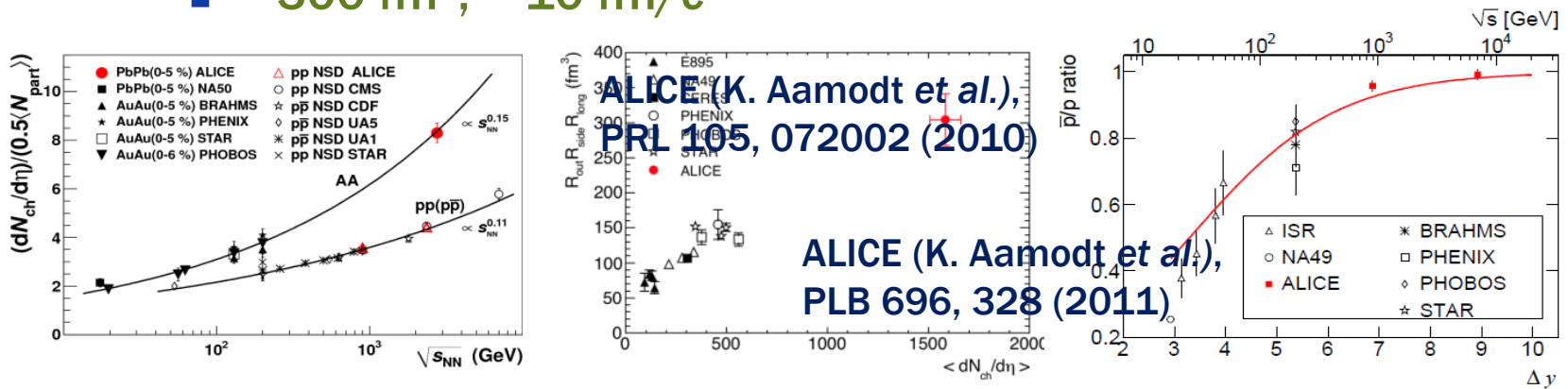
- LHC 唯一の原子核衝突に特化した実験
- 36 か国, 129 機関, > 1,000 人
 - (2013年3月現在)



LHC - クォーク非閉込相の深部探査



- RHIC 以上の高エネルギー密度, 大容積, 長寿命
 - エネルギー密度 ~ 3 倍, 容積 ~ 2 倍, 寿命 ~ 20-30% 増
 - ~ 16 GeV/fm³ (熱化時間 ~ 1 fm/c を仮定)
 - ~ 300 fm³, ~ 10 fm/c



■ 正味のクォーク密度 ~ 0

- 反陽子 / 陽子比 (中間ラピディティ領域)

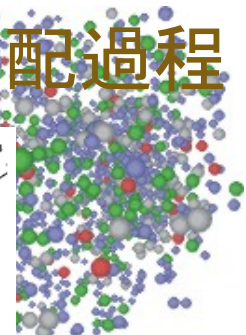
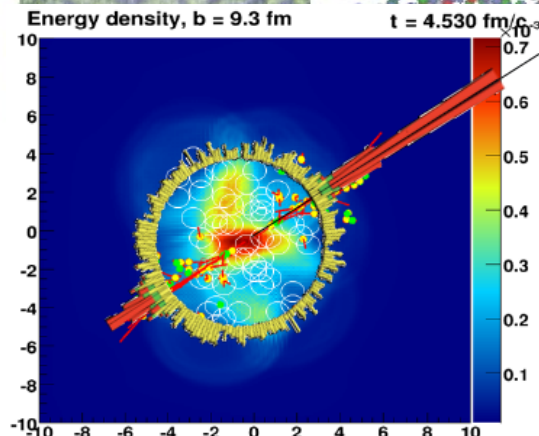
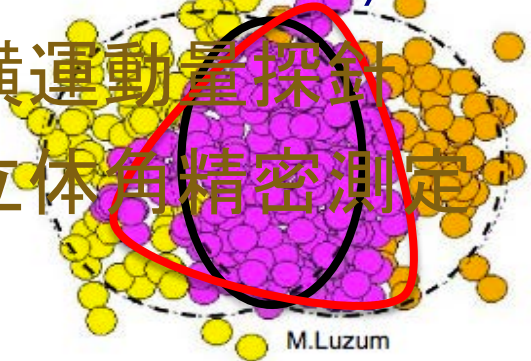
- 陽子 + 陽子 900 GeV: 0.957 ± 0.006 (stat) ± 0.014 (sys)
- 陽子 + 陽子 7 TeV: 0.990 ± 0.006 (stat) ± 0.014 (sys)



準静的描像 ↔ 初期動的過程への迫撃



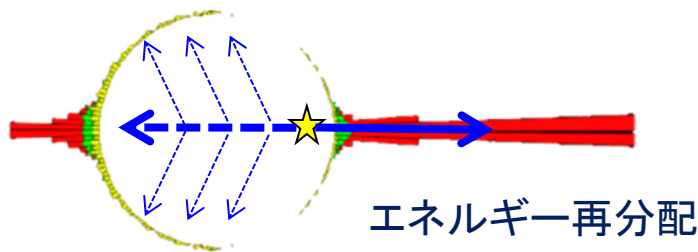
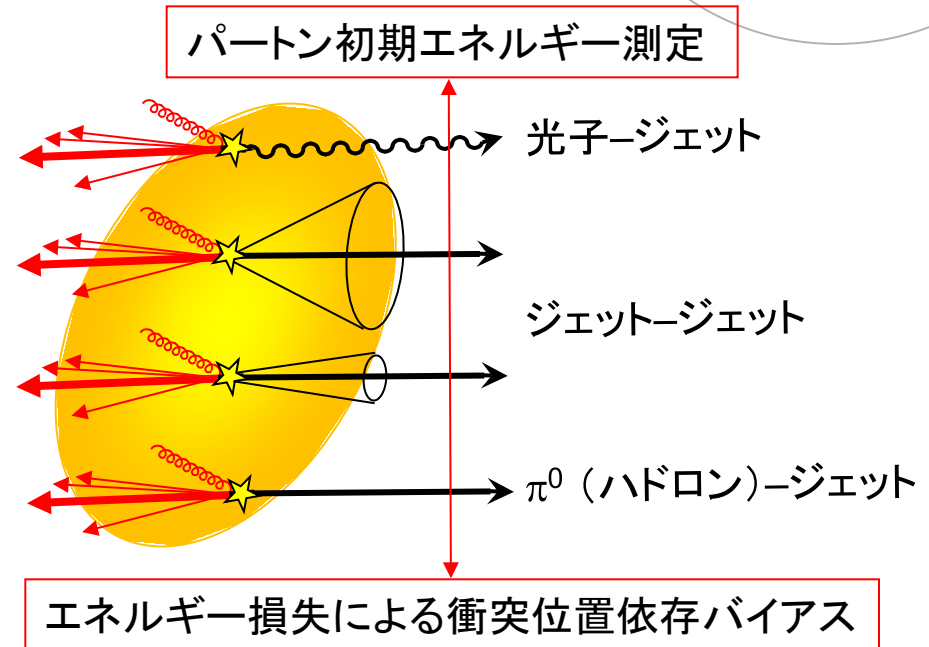
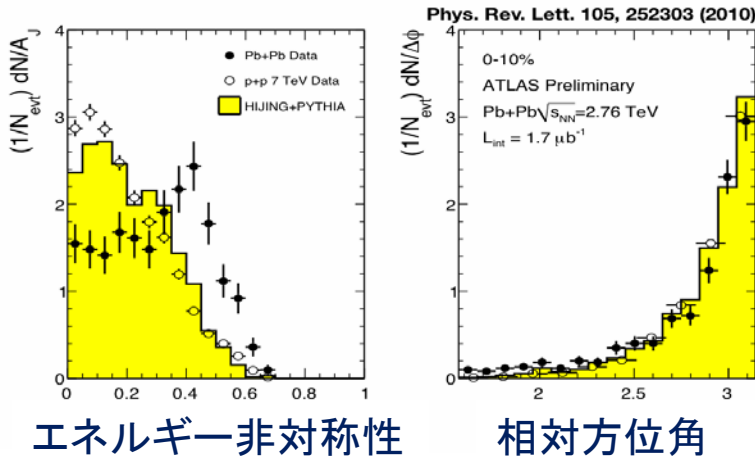
- 局所平衡流体描像
 - 粒子生成, 集団運動
- 初期動的過程の情報は逸失! ?
 - 物理的に興味深い領域
- 初期ゆらぎに起因する生成粒子の高次異方性
- 高横運動量クォークの損失エネルギー再分配過程
 - cf. LHC-ATLAS/CMS 実験
- 高横運動量探針
- 大立体角精密測定



高横運動量探針 + 大立体角精密測定

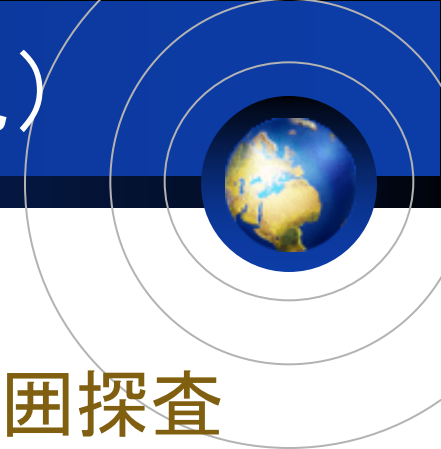


■ 高横運動量探針 (e.g. ジェット) の重要性再認識

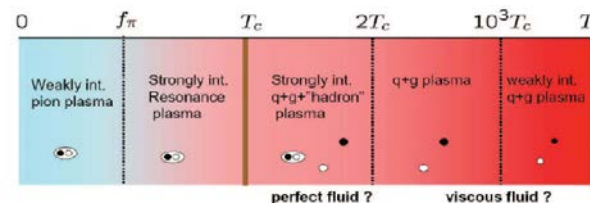


- 硬散乱クォークのエネルギー損失 → 再分配
- 光子-ジェット相関: パートン初期エネルギー基準測定

RHIC/LHC 実験の針路戦略（私見）



- 強場中のクォーク多体系の挙動と相構造
- 臨界点近傍, 遷移領域を含む系統的広範囲探査
 - LHC 最高エネルギー衝突 + RHIC エネルギー探査



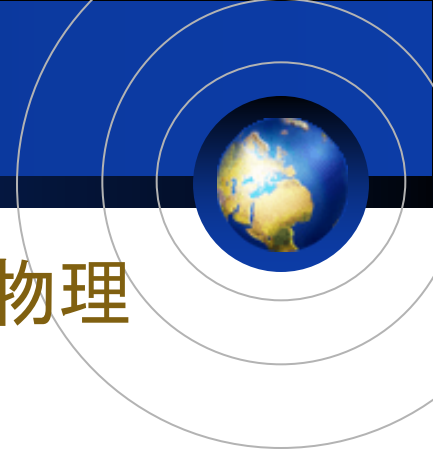
■ 初期動的過程の探究

- 初期ゆらぎに起因する生成粒子の高次異方性
- 高横運動量クォークの損失エネルギー再分配過程
 - → PHENIX/ALICE 実験高度化計画

■ その他の興味深い物理

- 高エネルギー原子核の初期状態
- 高強度電磁場 ($B \sim 10^{14} - 10^{15}$ T) 中の非線形電磁力学

まとめ, おわりに



- 量子色力学が支配するクォーク多体系の物理
 - RHIC と LHC: 相補的両輪
- 積年の高温クォーク非閉込相探索に終止符
- 準静的描像の成功 \leftrightarrow 初期動的過程への迫撃
 - 高エネルギー原子核衝突: 激しい時間発展現象
 - ゆらぎから探る初期過程の知見
 - 高横運動量探針を軸とした新展開
- クォーク物質の挙動と相構造の包括的理解へ
 - 本講演に含めきれない豊穡な物理





- 粒子生成, 重フレーバ, ジェット
 - 29aHA1 二橋, 29aHA4 蜂谷, 29pHA3 渡辺 (大), 29pHA4 辻 (智), 29pHA9 八野
- 時空発展, 二粒子相関
 - 29aHA9 新井田, 29pHA6 Bhom
- 方位角異方性, 集団運動, ゆらぎ
 - 29aHA3 黒澤, 29aHA10 下村, 29aHA11 池田, 29aHA12 水野, 29pHA2 堀
- 低質量電子対, 仮想光子, 強磁場生成
 - 29aHA2 星野, 29aHA5 渡辺 (陽), 29pHA5 辻 (亜)
- 検出器, 高度化計画
 - 26aHC8 林, 27pHD4 寺崎, 27pHD7 山口, 28pHB4 関畑

