

高エネルギー原子核衝突を用いた 極限状態の実験的探究

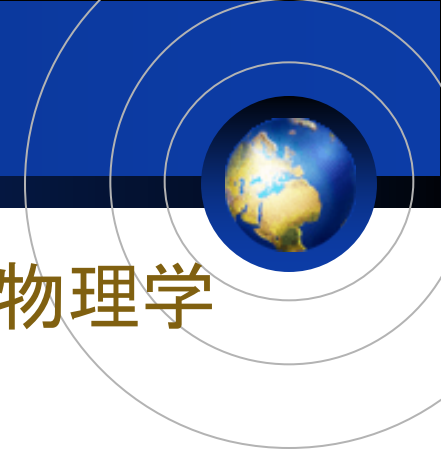


志垣 賢太 ( 広島大学)

原子核三者若手夏の学校 2013

2013年8月8日

愛知県蒲郡市 ホテルたつき



- **高エネルギー原子核衝突 = 実験クォーク物理学**
 - 物理的意義, 興味
 - 非閉込高温パートン物質 “クォーク・グルーオン・プラズマ”
 - 最新状況と展望
 - BNL-RHIC 加速器 PHENIX 実験
 - CERN-LHC 加速器 ALICE 実験
- **極限状態の探究 - 最近の話題から -**
 - 人類による最高到達温度
 - 低粘性極限 “完全流体”
 - 宇宙最高強度磁場
- **カイラル対称性回復とハドロン質量**

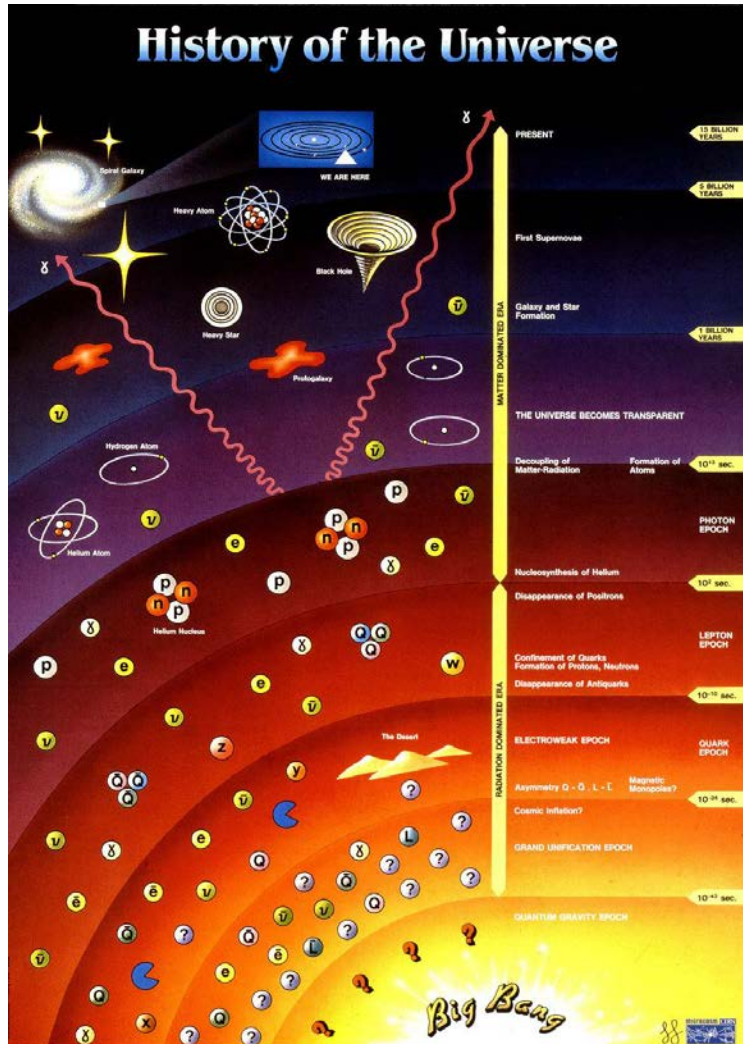
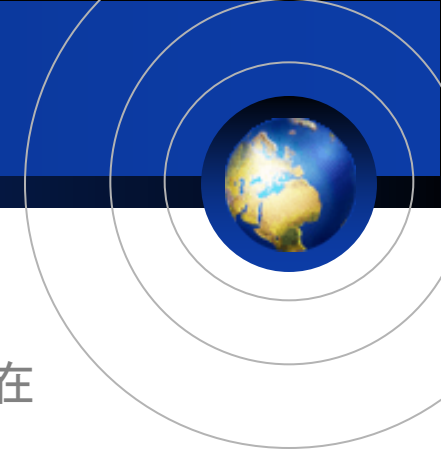
GeV/TeV 原子核衝突の物理的興味



- 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



宇宙の歴史とクォーク物理学



14 by

生命誕生：現在

1 by

銀河・天体の生成

10^{12} s

原子の生成

10^2 s

原子核の生成

10^{-6} s

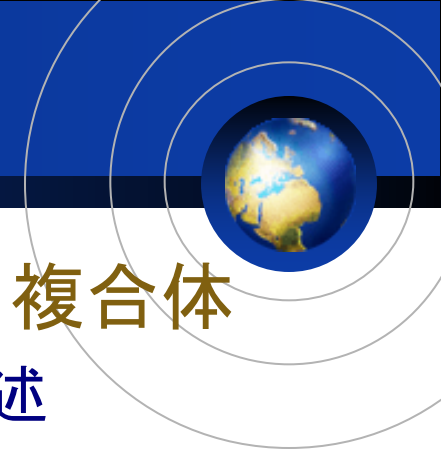
クォークの閉込
反クォークの消滅
クォークの生成

0.00 s

宇宙開闢（ビッグバン）



クォーク - ハドロン画像



■ ハドロン = 「色」を持つクォークの「白色」複合体

- 強い相互作用: 量子色力学 (QCD) により記述

■ 色価間の距離 $\rightarrow \infty$: 位置エネルギー $\rightarrow \infty$

- qqq (例: 赤 + 緑 + 青) = バリオン

- $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ (例: 反赤 + 反緑 + 反青) = 反バリオン

- $q\bar{q}$ (例: 赤 + 反赤) = 中間子

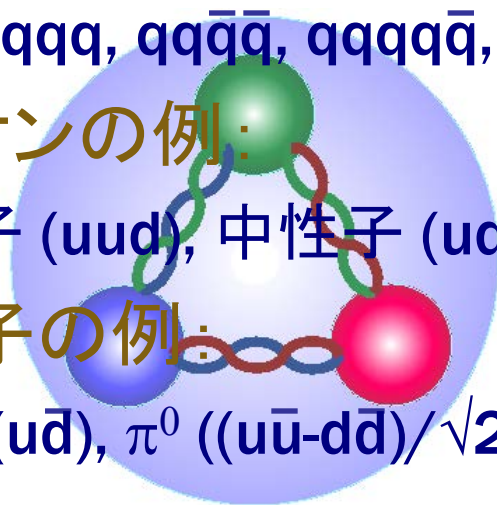
- $qqqqqq, qq\bar{q}\bar{q}, qqqq\bar{q}, \dots ?$

■ バリオンの例:

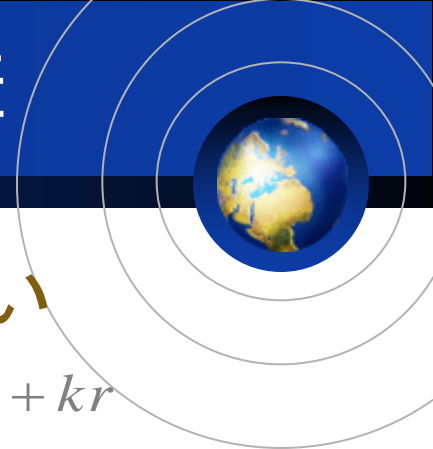
- 陽子 (uud), 中性子 (udd)

■ 中間子の例:

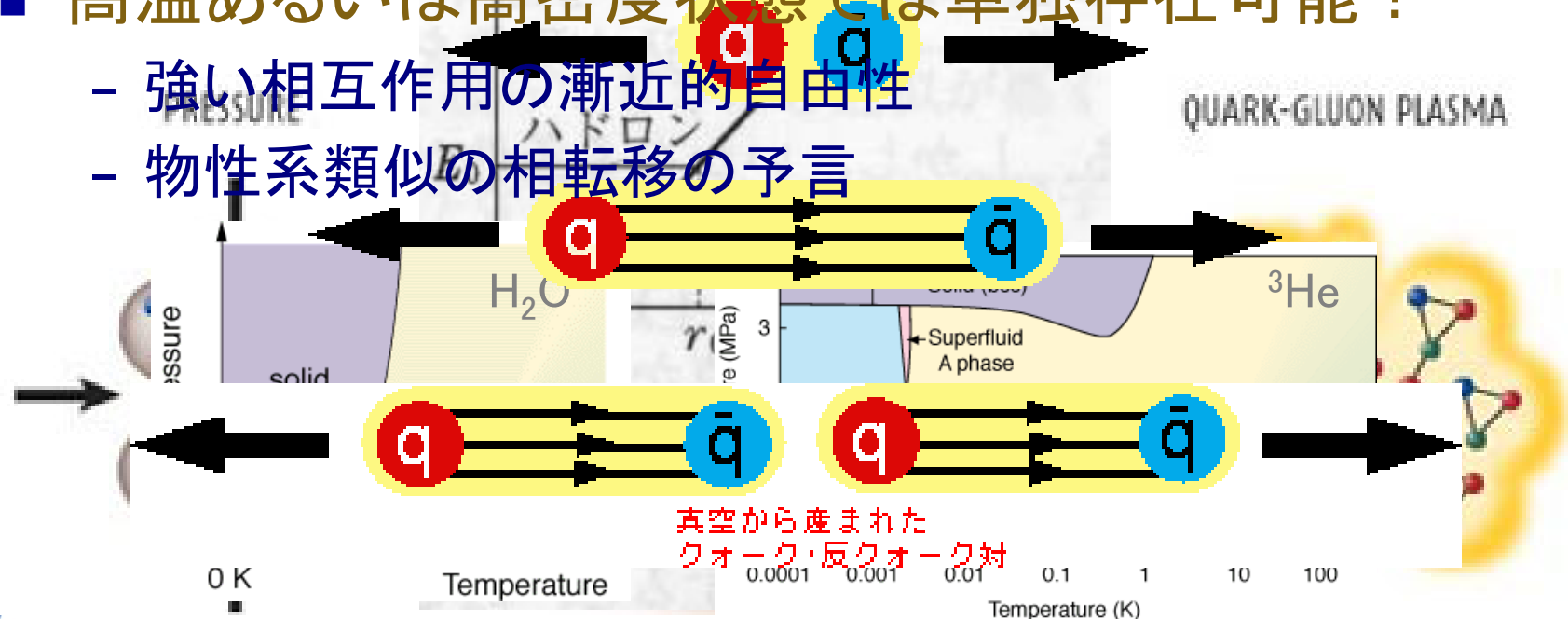
- π^+ ($u\bar{d}$), π^0 ($(u\bar{u}-d\bar{d})/\sqrt{2}$), π^- ($d\bar{u}$)



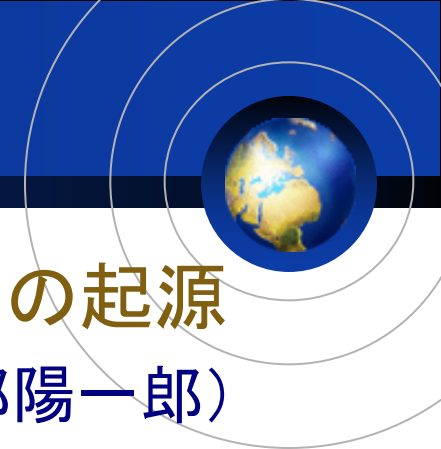
クォークの閉込／(再)開放の機構



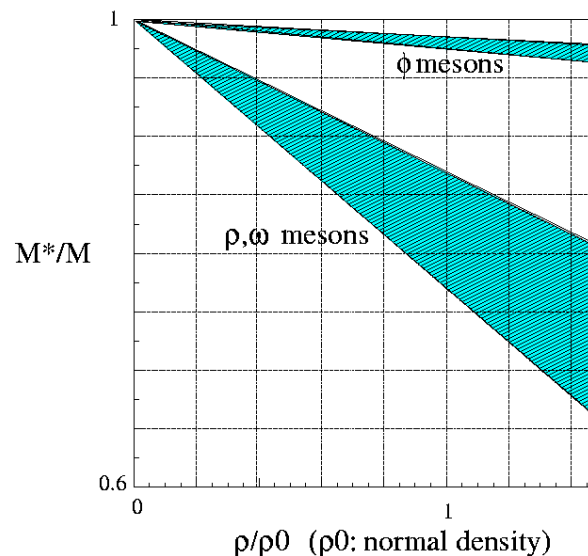
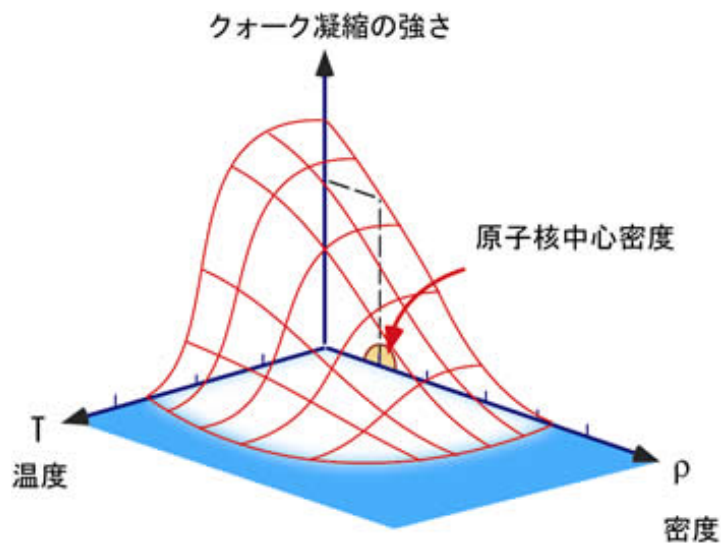
- 基本的素粒子クォークは単独で取出せない
 - 現象論的説明: ポテンシャル $V = -4\alpha_s(r)/3r + kr$
 - クォークと反クォークにエネルギーを与え引離す
→ 新たなクォーク・反クォーク対生成がより安定
- 高温あるいは高密度状態では単独存在可能？



物質質量の主要部分の起源



- ハドロン質量（非暗黒物質質量の98%）の起源
 - カイラル対称性の自発的破れ（1960年 南部陽一郎）
 - クォークの開放と同時にカイラル対称性回復
 - パarton非閉込相ではハドロンは軽くなる？
 - 原子核物質中でもハドロンは軽くなる？
 - クォーク対凝縮（クォーク・反クォーク対の海）で説明



クォークの閉込／開放の物理的意義



■ 極初期宇宙状態（リトルバン）

- 宇宙開闢（ビッグバン）から 10^{-5} 秒以内の物質状態

■ パartonと強い相互作用の基本的性質

- 極限状態の量子色力学

- 高エネルギー密度（温度）極限
- 高原子核物質密度極限

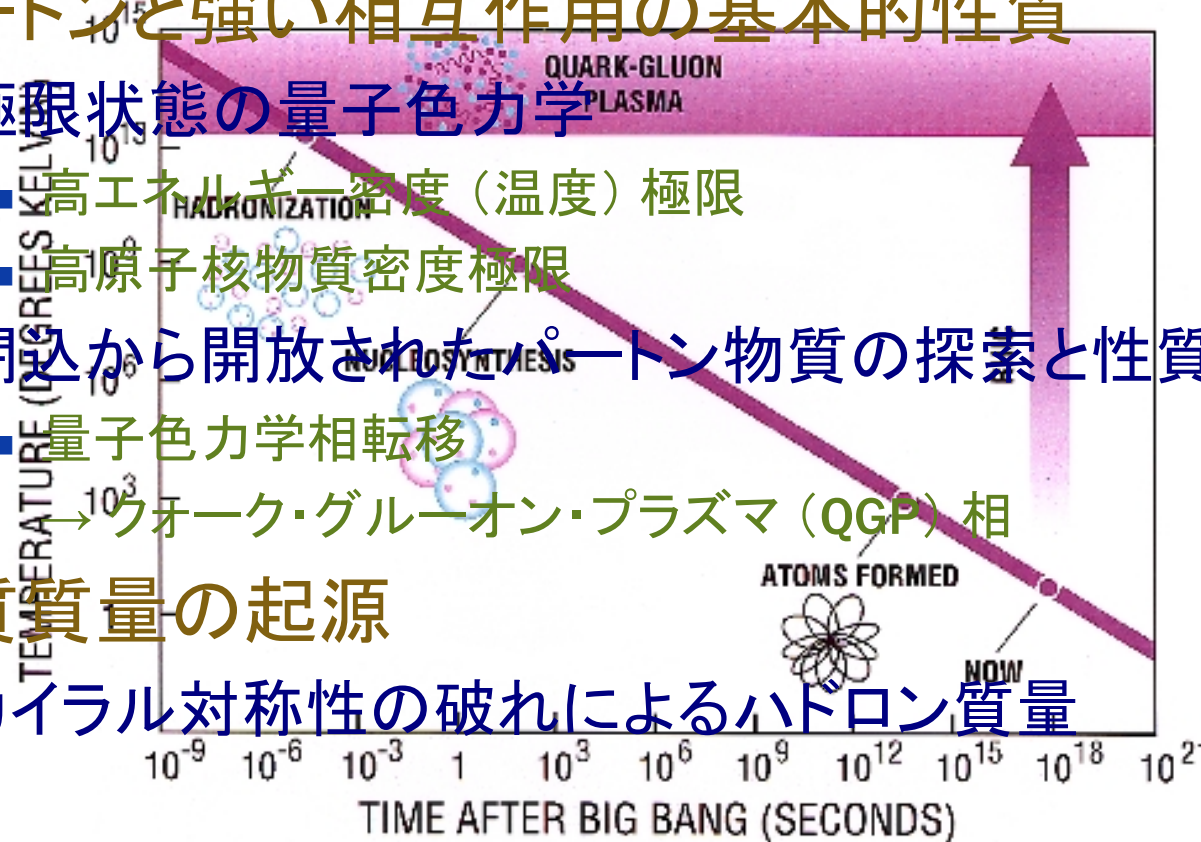
- 閉込から開放されたparton物質の探索と性質探求

- 量子色力学相転移

→ クォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）相

■ 物質質量の起源

- カイラル対称性の破れによるハドロン質量



理論基盤：量子色力学計算



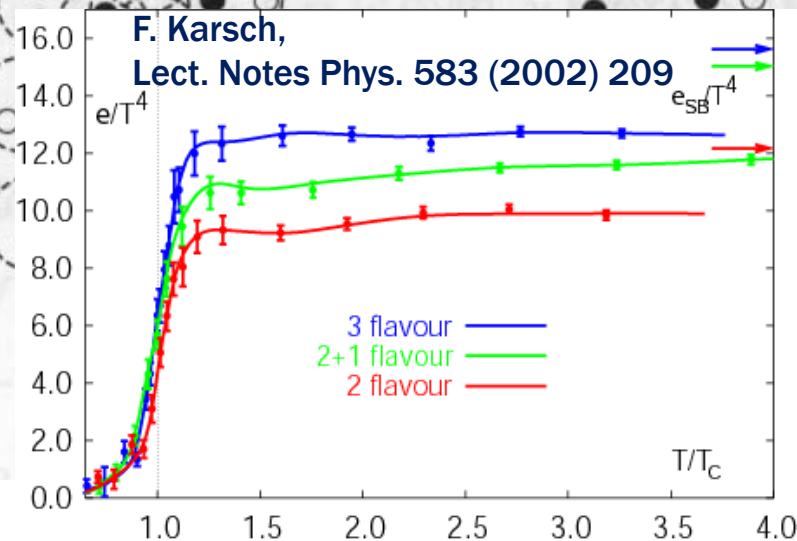
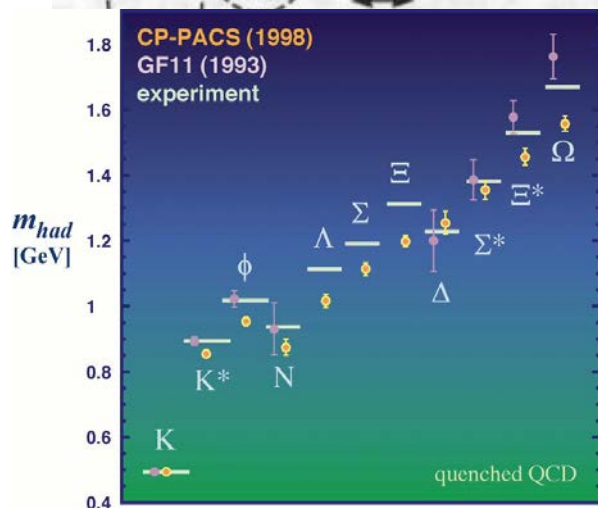
■ 摂動論的量子色力学 (pQCD)

- 高温状態におけるハドロン物質

- $T < T_c \sim m_\pi$ では π 粒子生成にエネルギー分配
- $T > T_c$ では π 粒子密度上昇により色デバイ遮蔽

■ 格子量子色力学 (離散的数値計算) 高温

- クォーク自由度が顕在化する物質相への転移を预言



量子色力学相図とクォーク物性



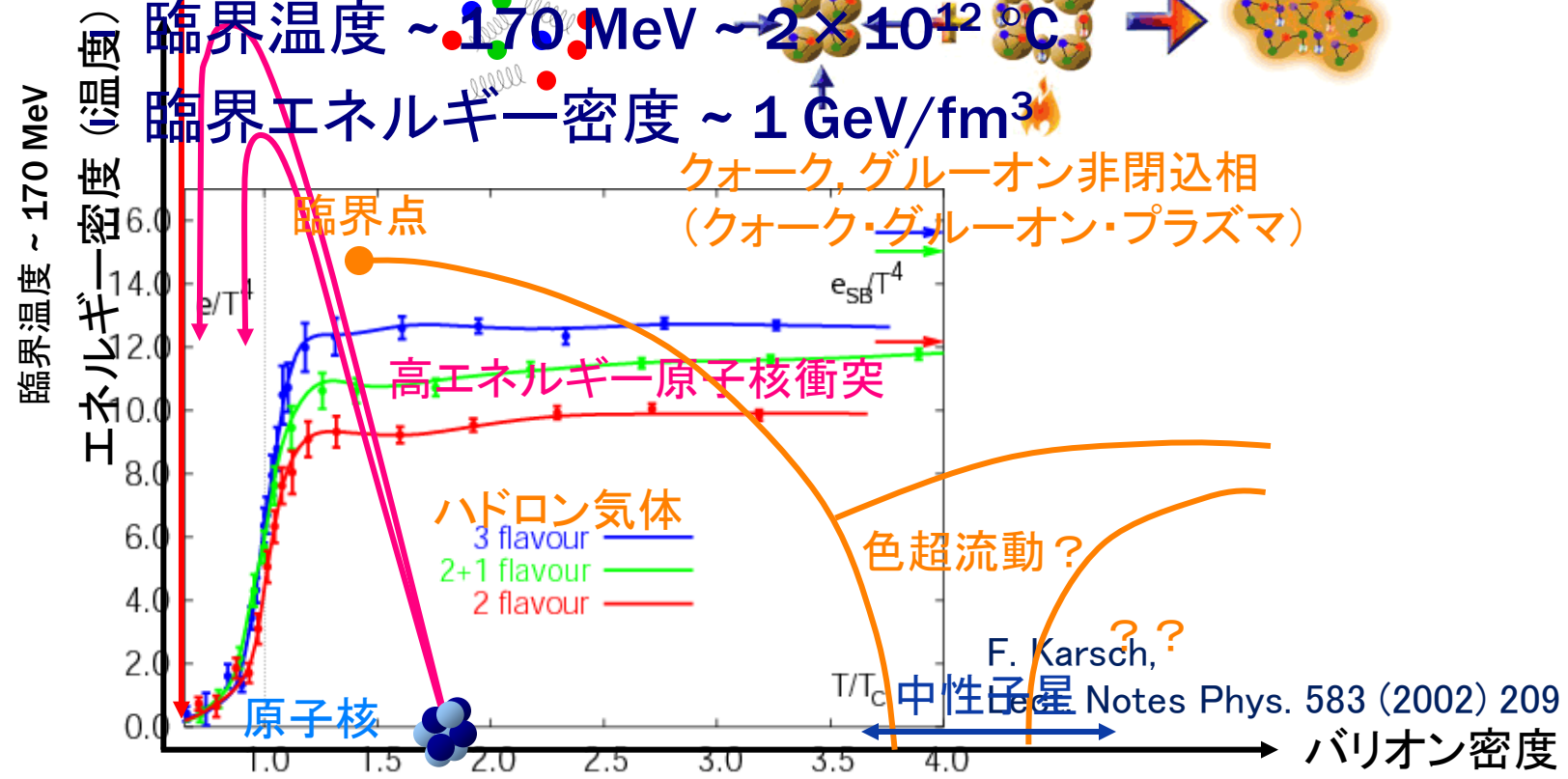
- クォーク, グルーオン非閉込相へ

- 格子量子色力学による相境界の予言 quark-gluon plasma

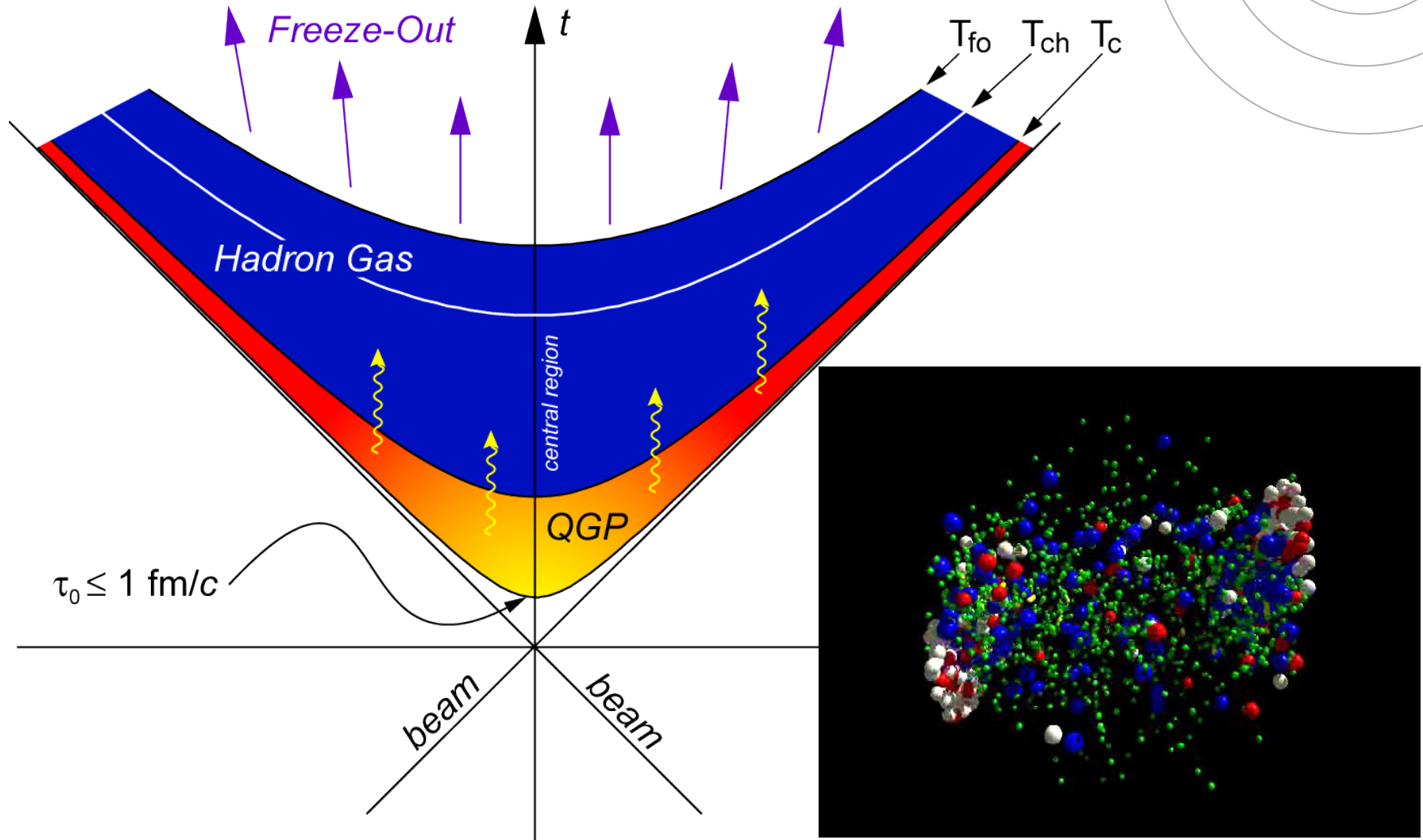
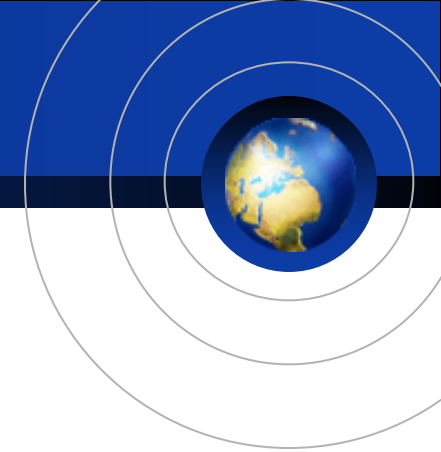
初期宇宙 \rightarrow $\text{quark-gluon plasma}$

臨界温度 $\sim 170 \text{ MeV} \sim 2 \times 10^{12} \text{ }^\circ\text{C}$

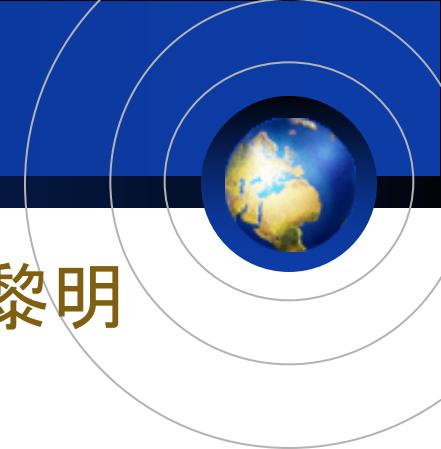
臨界エネルギー密度 $\sim 1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$



高エネルギー原子核衝突



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)



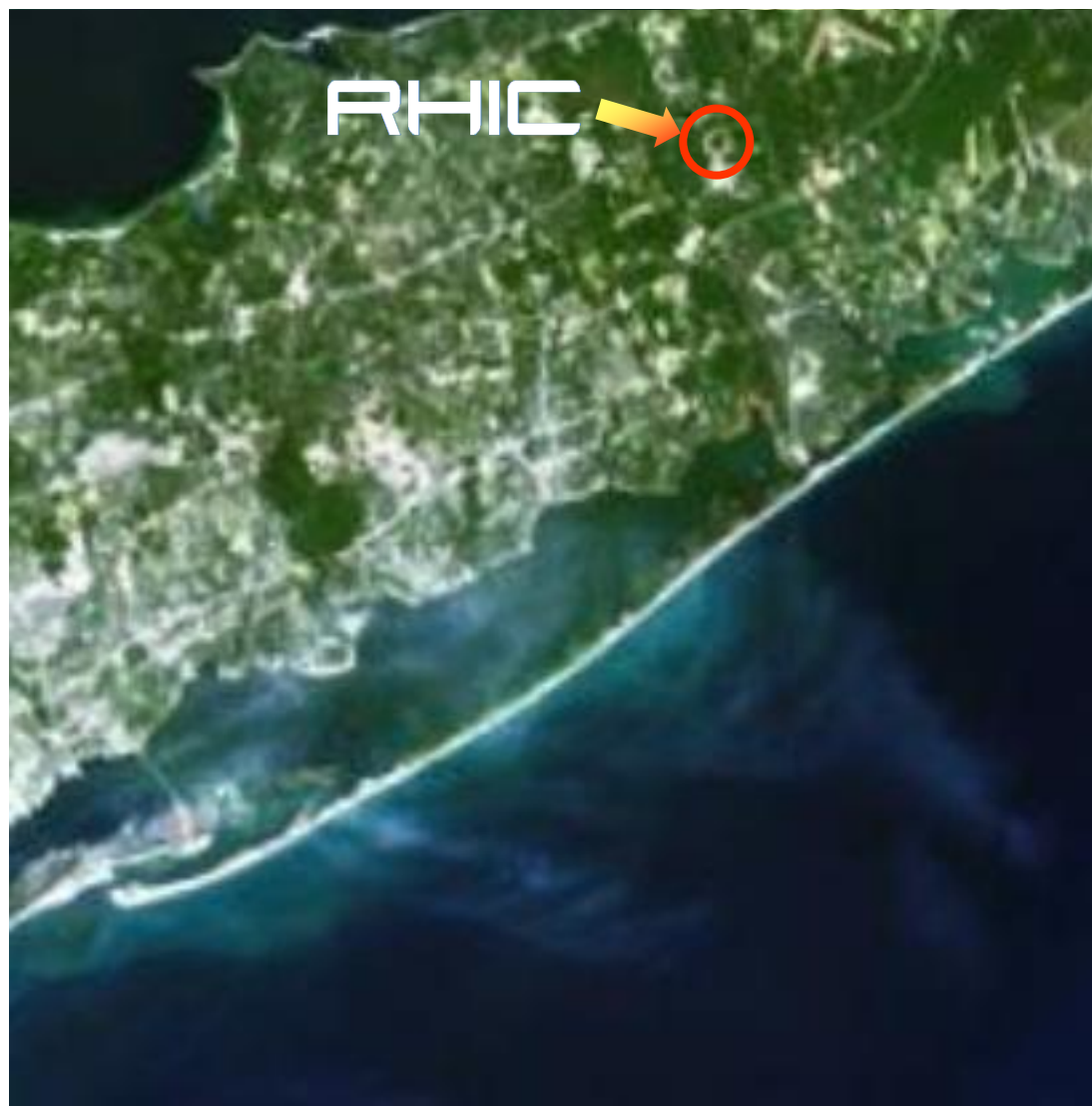
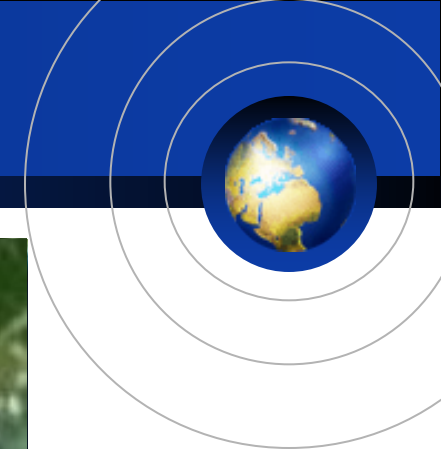
衝突型加速器の利点（と難点）



- 終状態の内部エネルギーの飛躍的向上
 - 衝突系の静止質量（内部エネルギー） \sqrt{s}
 - 固定標的実験では $\sqrt{s} \sim \sqrt{E_{\text{beam}}}$ で増加
 - 衝突型実験では $\sqrt{s} \sim E_{\text{beam}}$ で増加
 - 衝突系の重心運動エネルギーは利用不能
- 固定標的実験に比べた困難
 - 衝突頻度（輝度）を高めるための加速器技術的困難
 - 原則として安定粒子のみ利用可能
 - 実験の自由度に制約



米国ブルックヘブン国立研究所



相対論的重イオン衝突型加速器 RHIC

PHOBOS

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



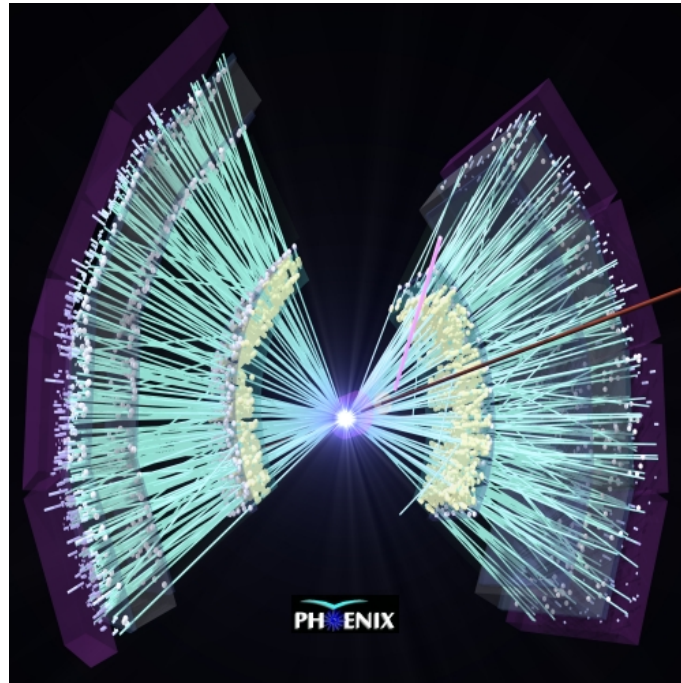
- 多様な測定により多数の物理過程を測定
 - ハドロン, レプトン, 光子の同時測定
 - 希事象の測定に重点
 - 高頻度データ測定・収集能力
 - 多段階の事象選択トリガ
- 高精度測定
 - 高精度の粒子識別
 - 高分解能 4 元運動量測定
 - 広範囲の運動学領域を網羅
- 2000 年夏実験開始、データ収集運転 13 回 (年)



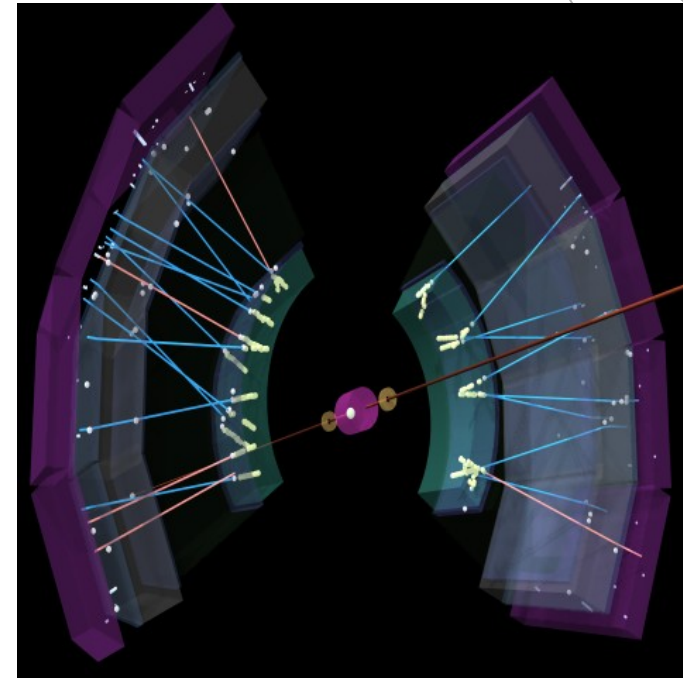
PHENIX が観測する衝突事象の様子



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



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



- $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV の Au+Au 中心衝突事象における荷電粒子生成数 $\sim 5,000$
 - 衝突初期の情報を伝える粒子はごく一部

PHENIX 検出器系



Universidade de São Paulo, Instituto de Física, Caixa Postal 66318, São Paulo CEP05315-970, Brazil
 Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei 11529, Taiwan
 China Institute of Atomic Energy (CIAE), Beijing, People's Republic of China
 Peking University, Beijing, People's Republic of China
 Charles University, Ovocnytrh 5, Praha 1, 116 36, Prague, Czech Republic
 Czech Technical University, Zikova 4, 166 36 Prague 6, Czech Republic
 Institute of Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Na Slovance 2,
 182 21 Prague 8, Czech Republic

Helsinki Institute of Physics and University of Jyväskylä, P.O.Box 35, FI-40014 Jyväskylä, Finland
 Dapnia, CEA Saclay, F-91191, Gif-sur-Yvette, France

Laboratoire Leprince-Ringuet, Ecole Polytechnique, CNRS-IN2P3, Route de Saclay,
 F-91128, Palaiseau, France

Laboratoire de Physique Corpusculaire (LPC), Université Blaise Pascal, CNRS-IN2P3,
 Clermont-Fd, 63177 Aubiere Cedex, France

IPN-Orsay, Université Paris Sud, CNRS-IN2P3, BP1, F-91406, Orsay, France
 SUBATECH (Ecole des Mines de Nantes, CNRS-IN2P3, Université de Nantes)

BP 20722 - 44307, Nantes, France

Institut für Kernphysik, University of Münster, D-48149 Münster, Germany

Debrecen University, H-4010 Debrecen, Egyetem tér 1, Hungary

ELTE, Eötvös Loránd University, H - 1117 Budapest, Pázmány P. s. 1/A, Hungary

KFKI Research Institute for Particle and Nuclear Physics of the Hungarian Academy of Sciences (MTA KFKI RMKI),
 H-1525 Budapest 114, POBox 49, Budapest, Hungary

Department of Physics, Banaras Hindu University, Varanasi 221005, India

Bhabha Atomic Research Centre, Bombay 400 085, India

Weizmann Institute, Rehovot 76100, Israel

Center for Nuclear Study, Graduate School of Science, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo,
 Tokyo 113-0033, Japan

Hiroshima University, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8526, Japan

KEK, High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

Nagasaki Institute of Applied Science, Nagasaki-shi, Nagasaki 851-0193, Japan

RIKEN, The Institute of Physical and Chemical Research, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Physics Department, Rikkyo University, 3-34-1 Nishi-Ikebukuro, Toshima, Tokyo 171-8501, Japan

Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Oh-okayama, Meguro, Tokyo 152-8551, Japan

Institute of Physics, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

Chonbuk National University, Jeonju, Korea

Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

Hanyang University, Seoul 133-792, Korea

KAERI, Cyclotron Application Laboratory, Seoul, South Korea

Korea University, Seoul, 136-701, Korea

Myongji University, Yongin, Kyonggido 449-728, Korea

Department of Physocs and Astronomy, Seoul National University, Seoul, South Korea

Yonsei University, IPAP, Seoul 120-749, Korea

IHEP Protvino, State Research Center of Russian Federation, Institute for High Energy Physics,
 Protvino, 142281, Russia

Joint Institute for Nuclear Research, 141980 Dubna, Moscow Region, Russia

Russian Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

PNPI, Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Leningrad region, 188300, Russia

Saint Petersburg State Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Vorob'evy Gory,
 Moscow 119992, Russia

Department of Physics, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden

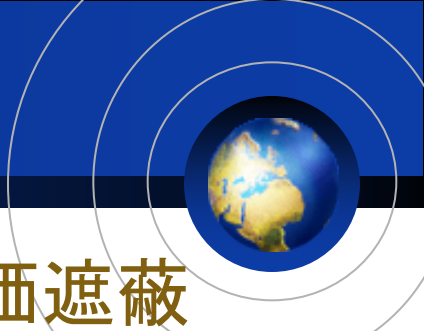
PHENIX

14 Countries; 71 Institutions



Abilene Christian University, Abilene, TX 79699, U.S.
 Baruch College, CUNY, New York City, NY 10010-5518, U.S.
 Collider-Accelerator Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973-5000, U.S.
 Physics Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973-5000, U.S.
 University of California - Riverside, Riverside, CA 92521, U.S.
 University of Colorado, Boulder, CO 80309, U.S.
 Columbia University, New York, NY 10027 and Nevis Laboratories, Irvington, NY 10533, U.S.
 Florida Institute of Technology, Melbourne, FL 32901, U.S.
 Florida State University, Tallahassee, FL 32306, U.S.
 Georgia State University, Atlanta, GA 30303, U.S.
 University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801, U.S.
 Iowa State University, Ames, IA 50011, U.S.
 Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94550, U.S.
 Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87545, U.S.
 University of Maryland, College Park, MD 20742, U.S.
 Department of Physics, University of Massachusetts, Amherst, MA 01003-9337, U.S.
 Morgan State University, Baltimore, MD 21251, U.S.
 Muhlenberg College, Allentown, PA 18104-5586, U.S.
 University of New Mexico, Albuquerque, NM 87131, U.S.
 New Mexico State University, Las Cruces, NM 88003, U.S.
 Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, U.S.
 Department of Physics and Astronomy, Ohio University, Athens, OH 45701, U.S.
 RIKEN BNL Research Center, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973-5000, U.S.
 Chemistry Department, Stony Brook University, SUNY, Stony Brook, NY 11794-3400, U.S.
 Department of Physics and Astronomy, Stony Brook University, SUNY, Stony Brook, NY 11794, U.S.
 Vanderbilt University, Nashville, TN 37235, U.S.

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

■ 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

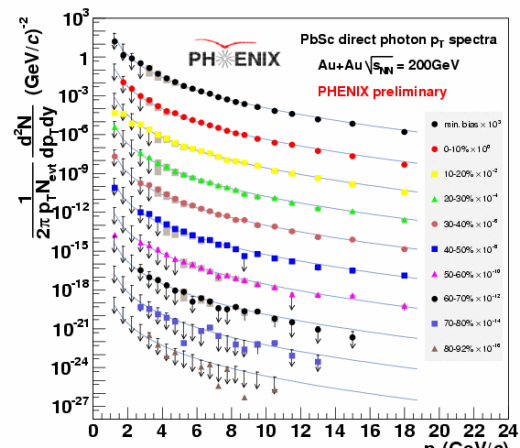
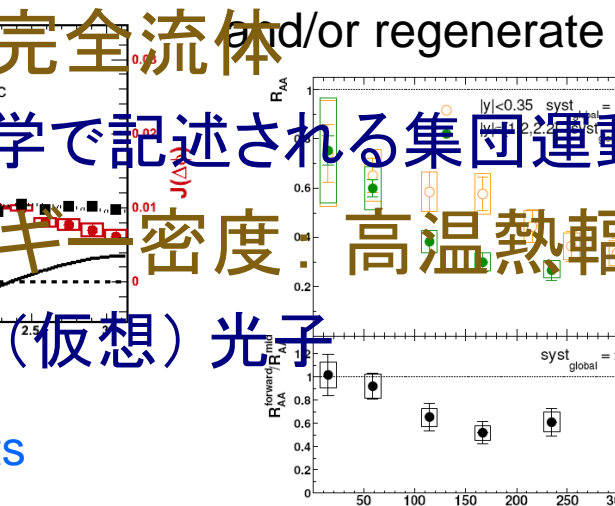
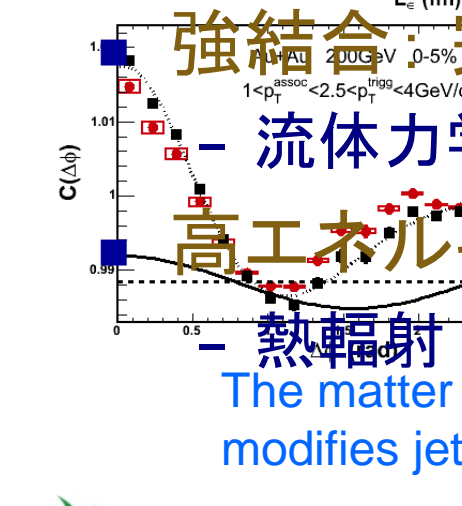
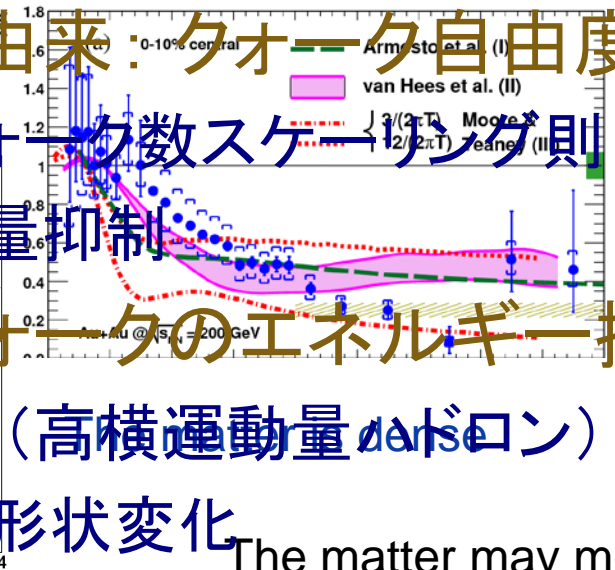
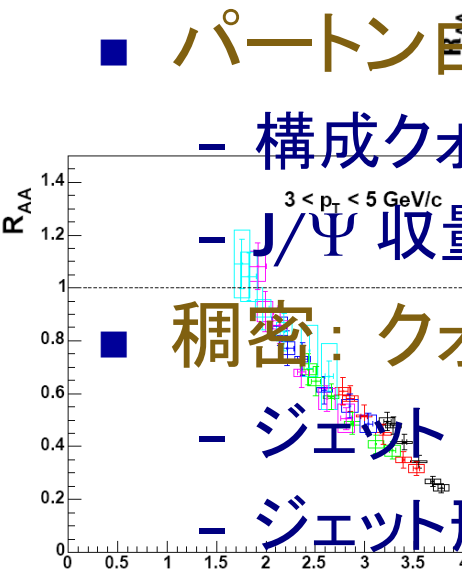
- 熱輻射 (仮想) 光子

The matter modifies jets

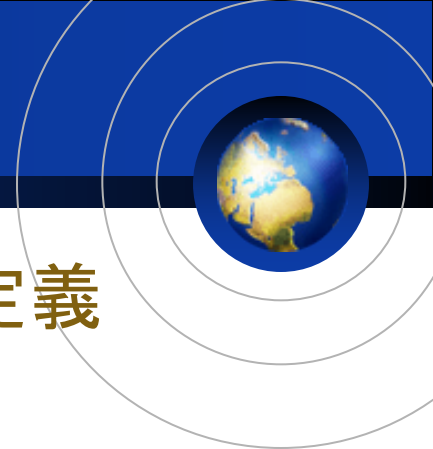
The matter may melt and/or regenerate J/ψ's

The matter is strongly coupled

The matter is hot



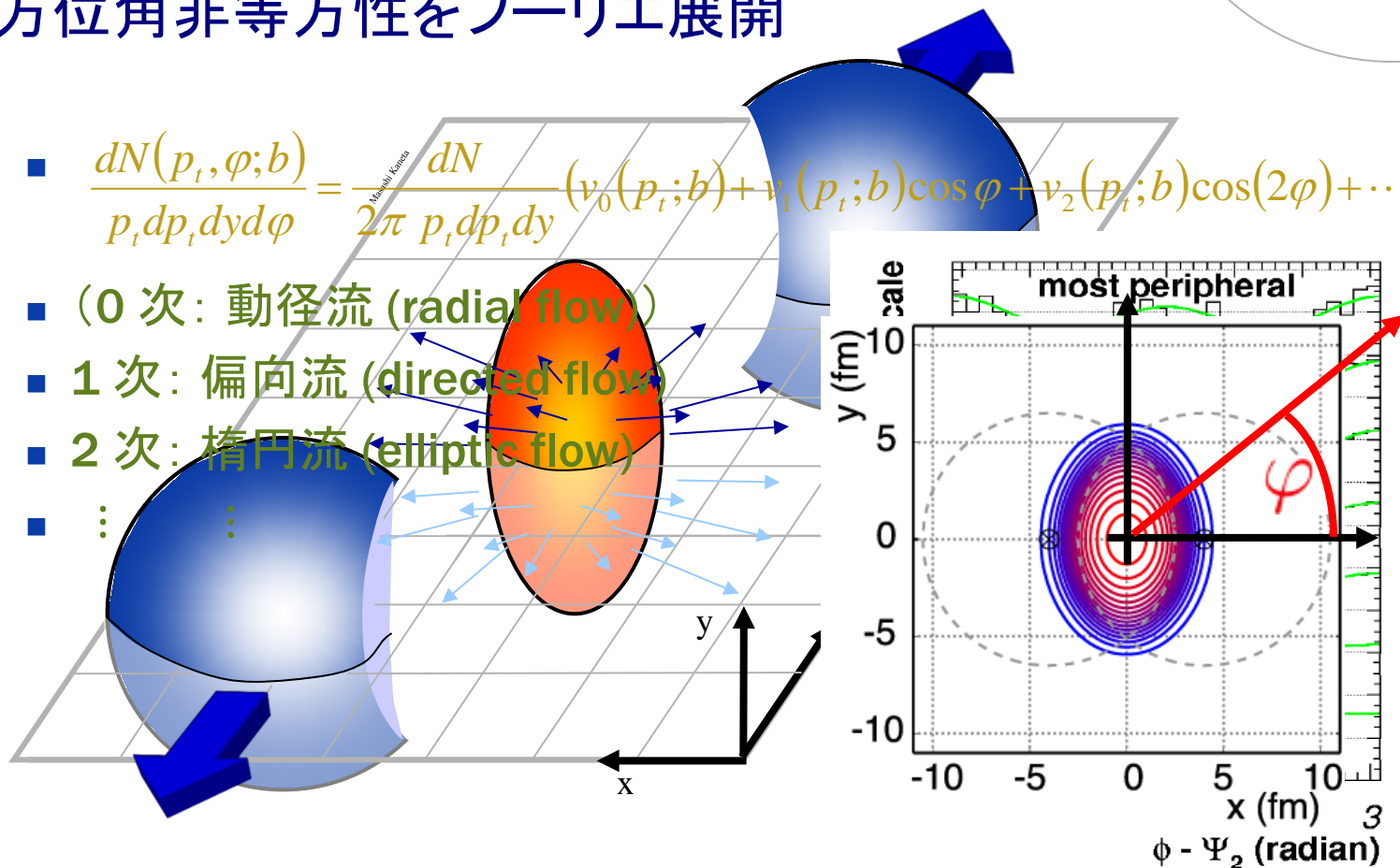
反応平面と集团的運動



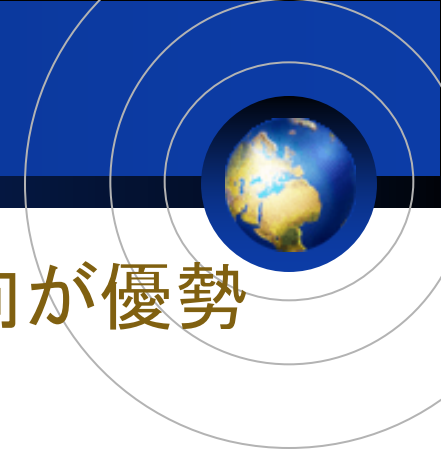
- 反応平面：衝突軸と衝突径数ベクトルで定義
 - 方位角非等方性をフーリエ展開

- $$\frac{dN(p_t, \varphi; b)}{p_t dp_t dy d\varphi} = \frac{dN}{2\pi p_t dp_t dy} (v_0(p_t; b) + v_1(p_t; b) \cos \varphi + v_2(p_t; b) \cos(2\varphi) + \dots)$$

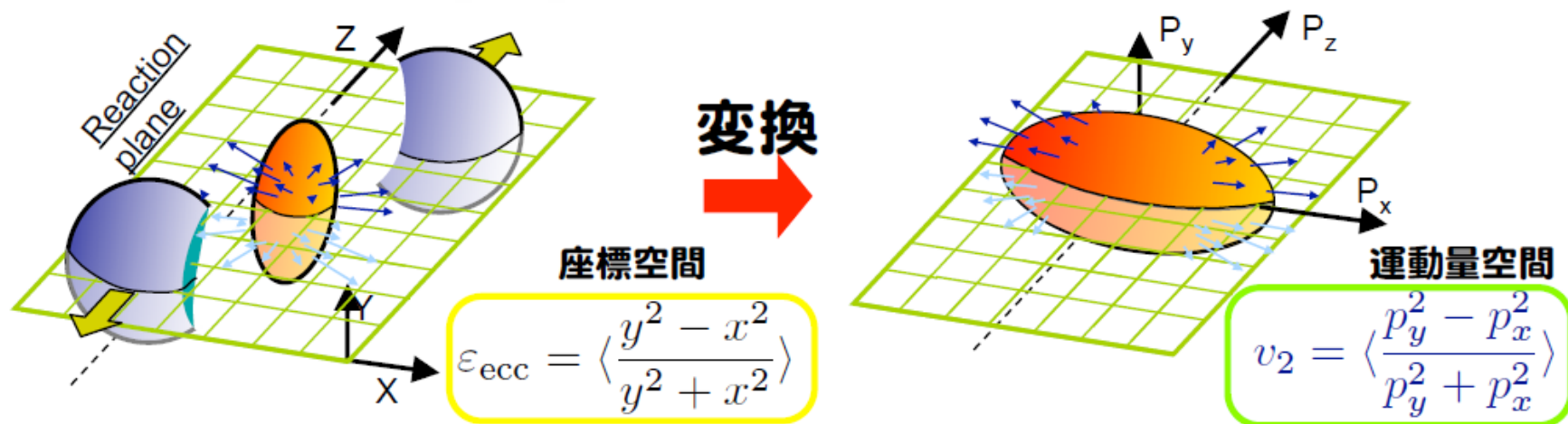
- (0次: 動径流 (radial flow))
- 1次: 偏向流 (directed flow)
- 2次: 楕円流 (elliptic flow)
- ⋮



楕円的方位角異方性 (v_2)



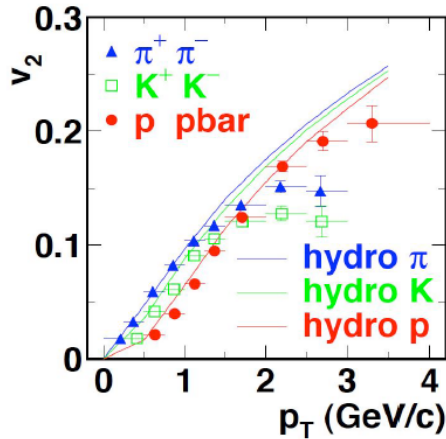
- 低エネルギー衝突では反応平面垂直方向が優勢
 - “スクイズ・アウト”
 - 原子核による吸収効果
- 高エネルギー衝突では反応平面内が優勢
 - 特に高横運動量領域で顕著
 - 座標空間の圧力勾配が運動量空間に転化



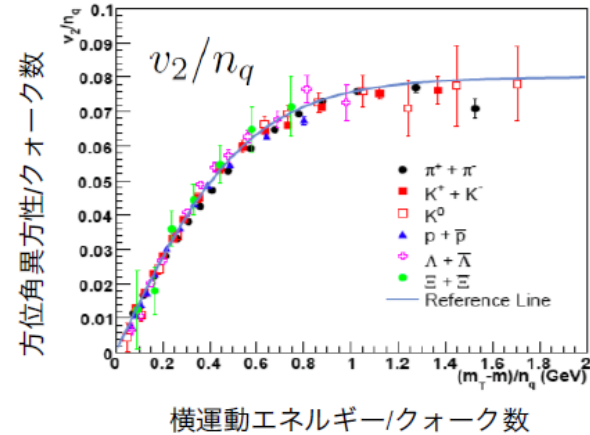
クォーク自由度の顕在化



- 構成クォーク数スケーリング
 - バリオン (qqq) = 3, 中間子 ($q\bar{q}$) = 2



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



- “クォーク 1 個あたり” の非等方性／集団運動



クォーク再結合模型



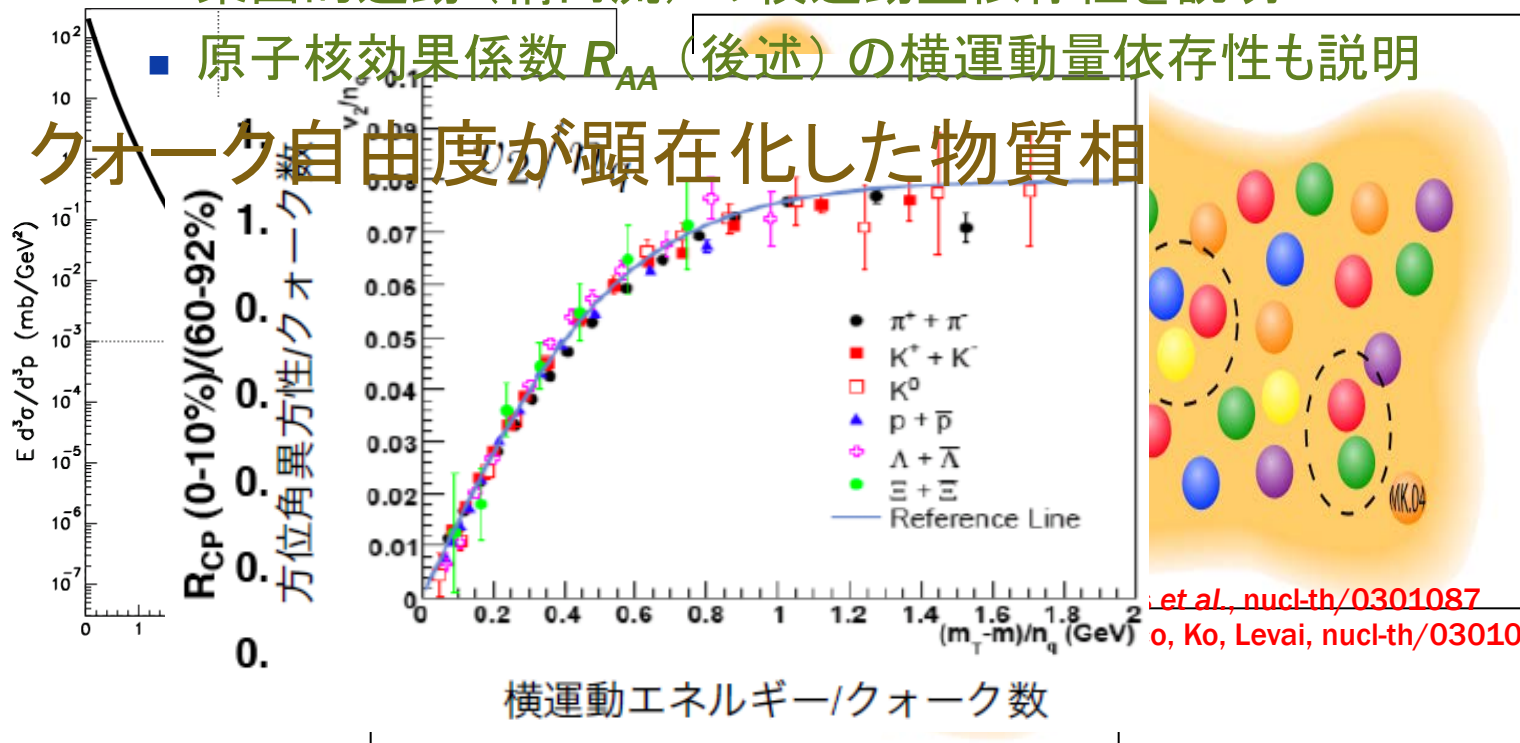
■ 高横運動量ハドロン生成機構

- 真空中の色場破砕 (既知)
- パarton媒質中のクォーク再結合 (新規！)

■ 集団的運動 (楕円流) の横運動量依存性を説明

■ 原子核効果係数 R_{AA} (後述) の横運動量依存性も説明

■ クォーク自由度が顕在化した物質相



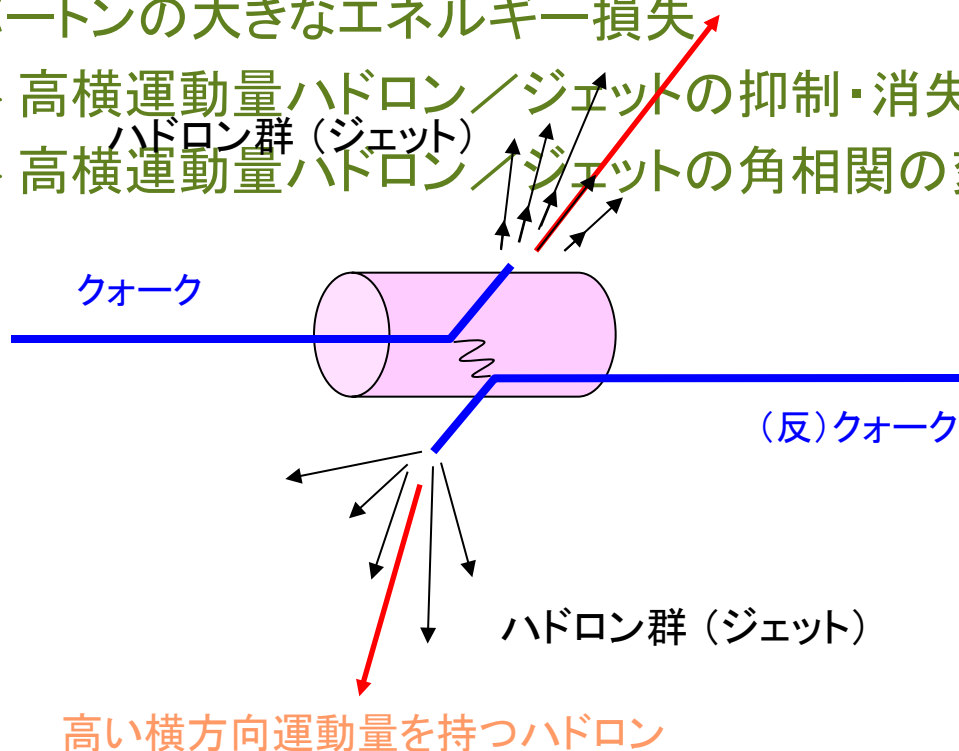
et al., nucl-th/0301087
o, Ko, Levai, nucl-th/0301093



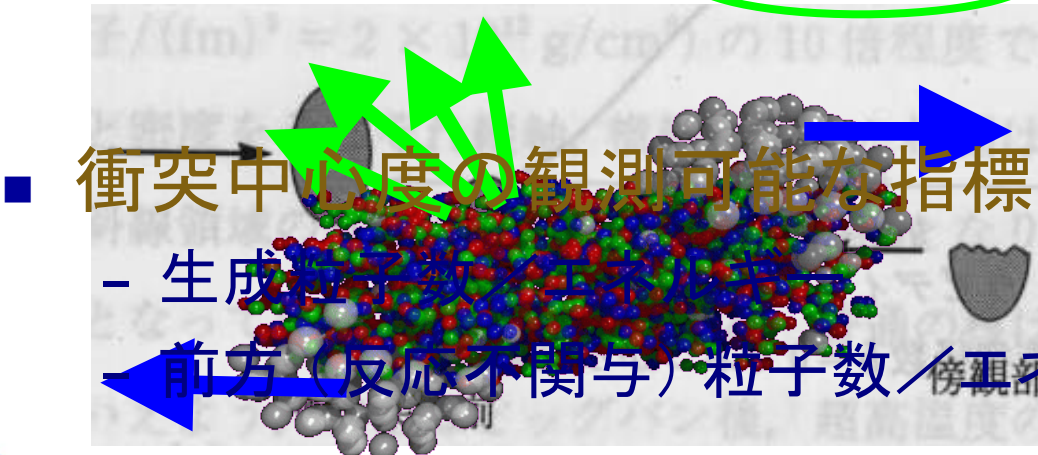
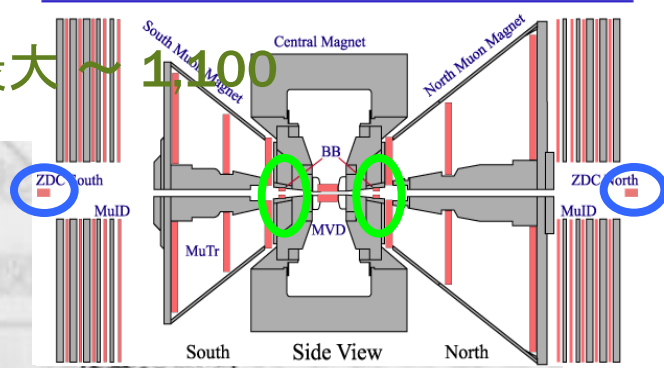
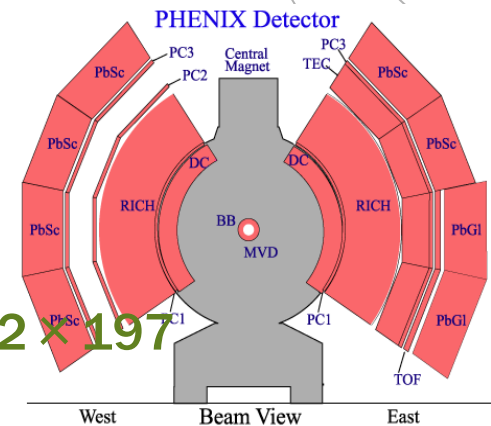
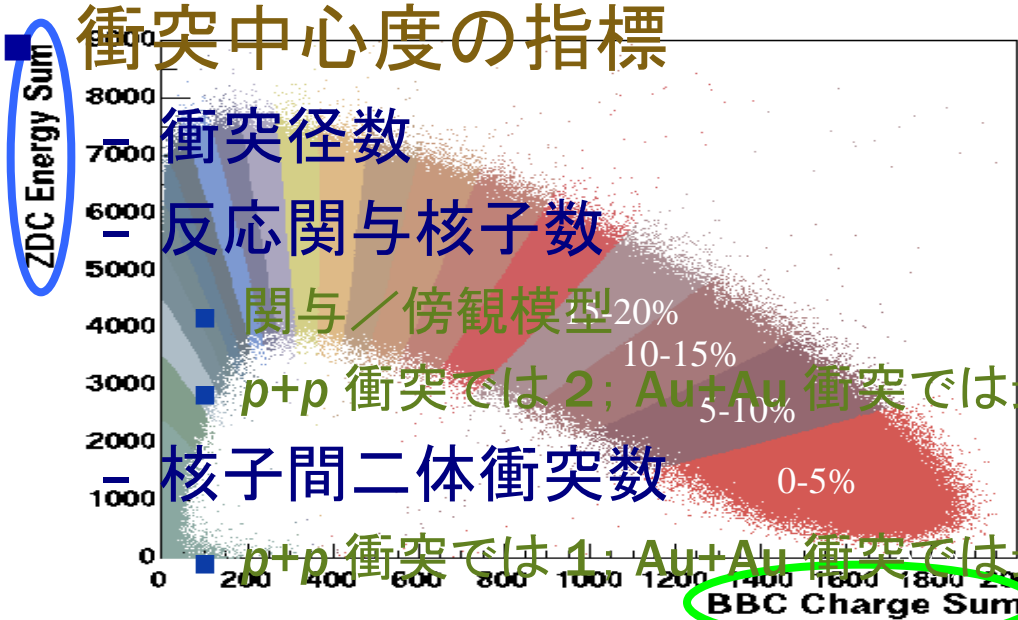
ハドロンジェットの抑制



- ジェット = 高い横運動量を持つハドロン群
 - 初期衝突で強く弾かれたパートンが起源
 - パarton非閉込相中では:
 - パartonの大きなエネルギー損失
 - 高横運動量ハドロン/ジェットの抑制・消失
 - 高横運動量ハドロン/ジェットの角相関の変化



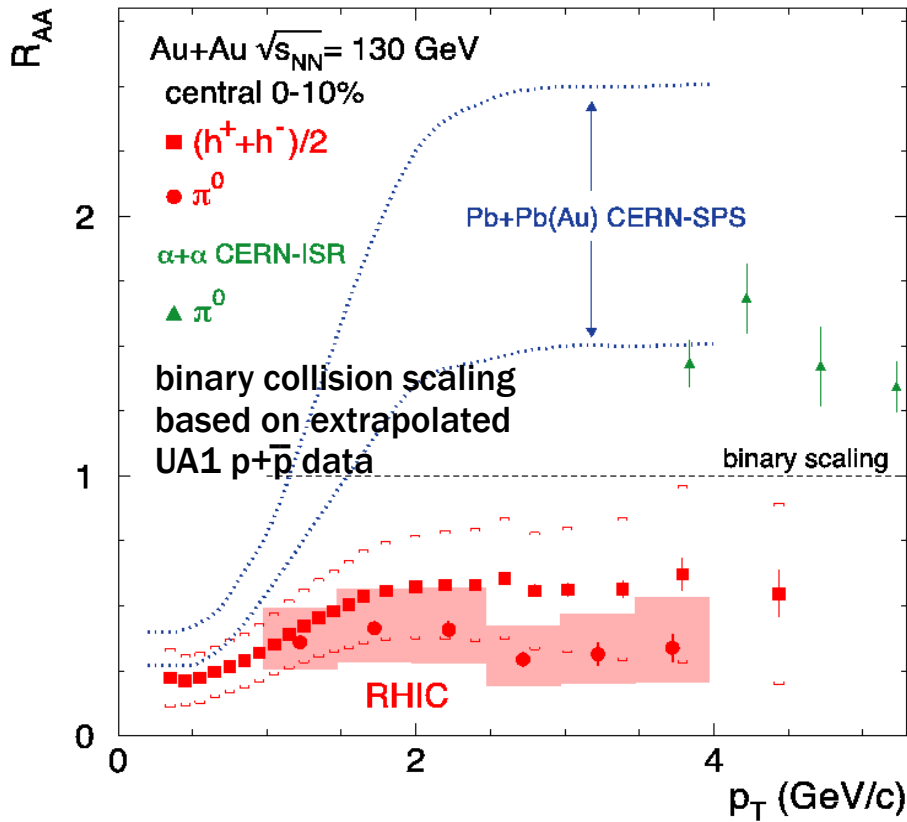
中心（正面）衝突と周辺（かすり）衝突



反応関与部
衝突後



RHIC 1 年め (2000) の主要成果

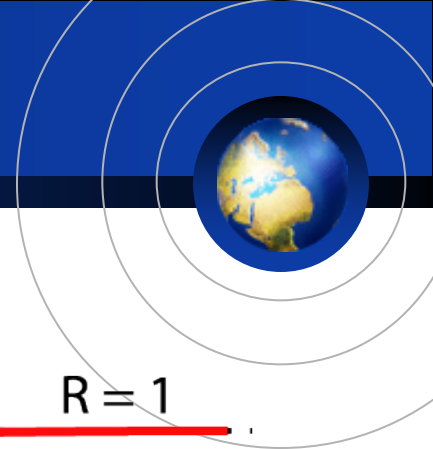


Au+Au at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV
PHENIX PRL 88, 022301 (2002)

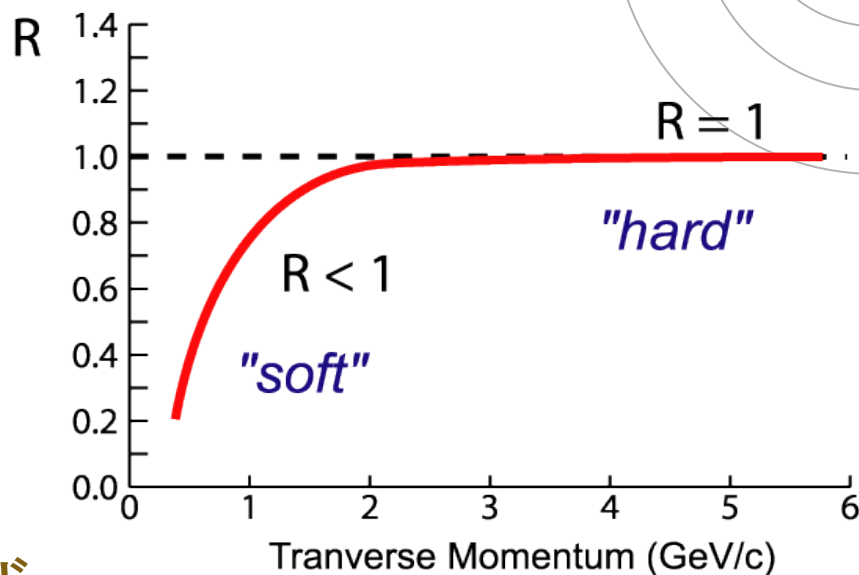
■ Au+Au 中心衝突事象で高横運動量ハドロン抑制



原子核効果係数 R_{AB}



$$R_{AB} = \frac{dN_{AB} / dp_T dy}{\langle N_{coll} \rangle / \sigma_{NN}^{inel} \cdot d\sigma_{pp} / dp_T dy}$$



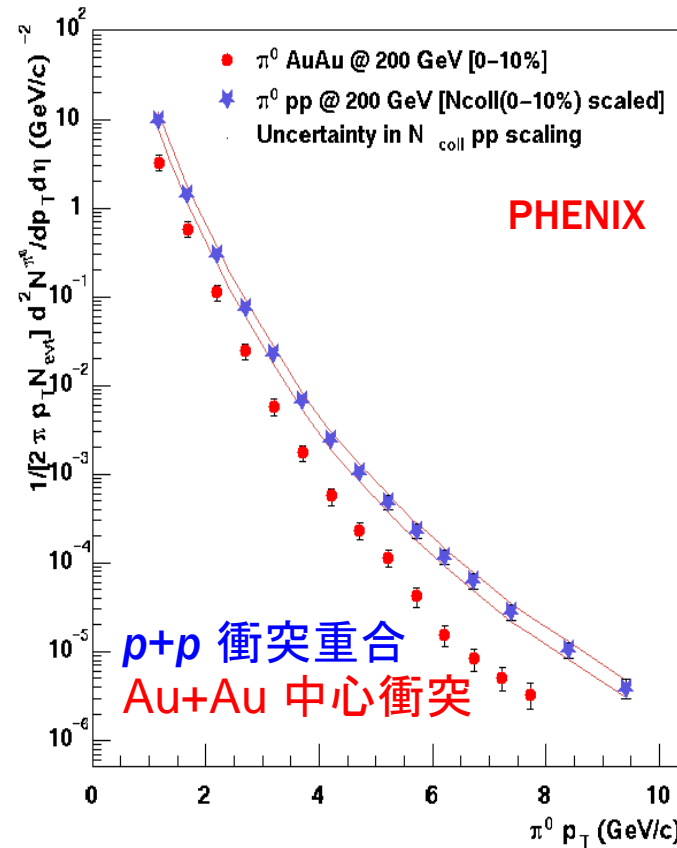
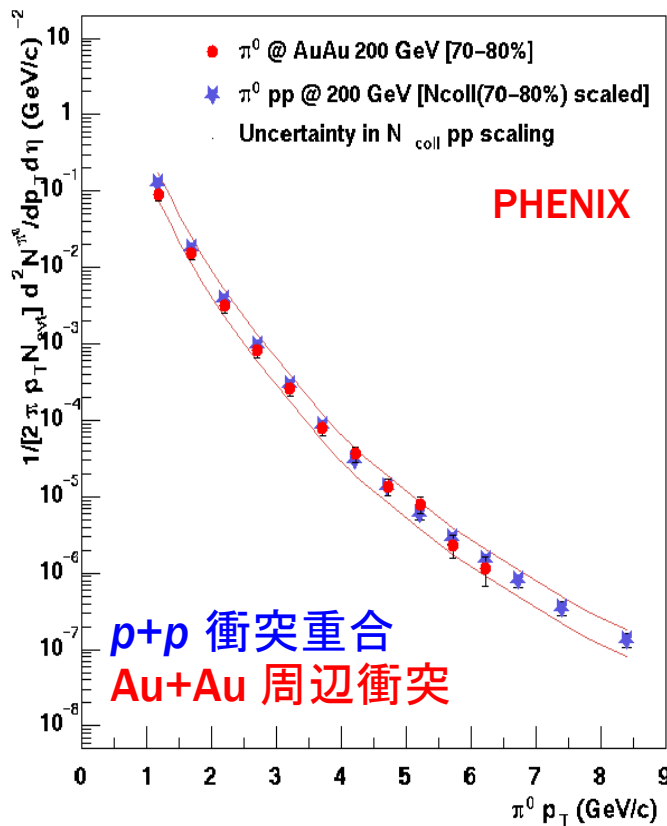
- 原子核効果がなければ:
 - 低横運動量 (= ソフトな) 領域では $R_{AB} < 1$
 - 高横運動量 (= ハードな) 領域では $R_{AB} = 1$
- “抑制” (増加):
 - 高横運動量領域で $R_{AB} < 1$ (> 1)



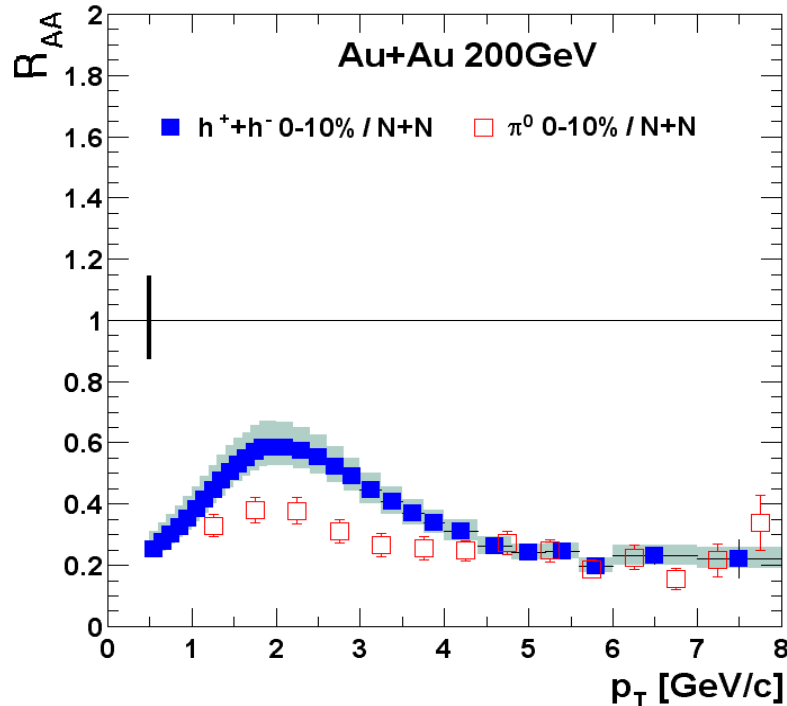
二核子衝突スケーリングからのずれ



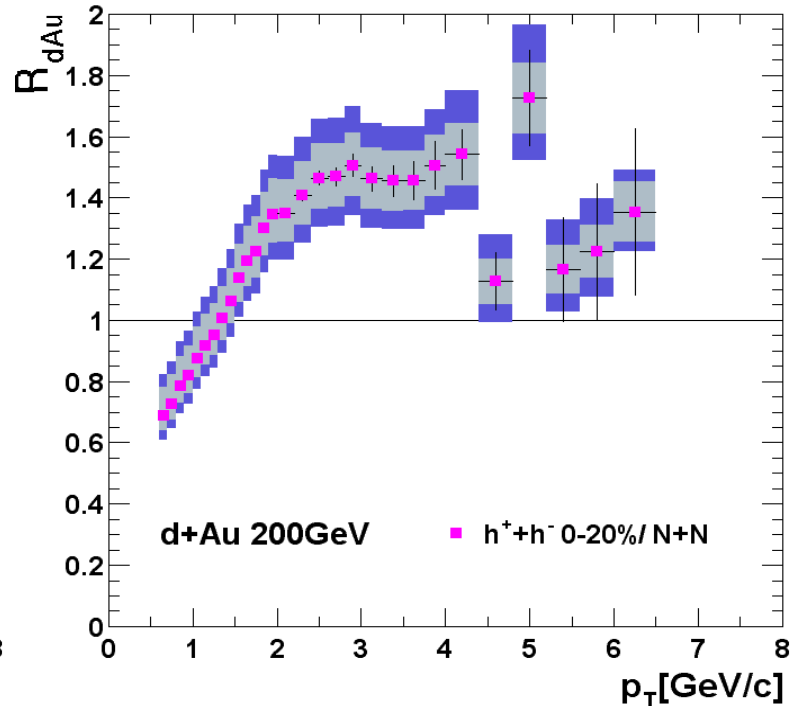
- 周辺衝突（関与核子少）～ 核子間衝突の重合せ
- 中心衝突（関与核子多）→ QGP 相生成の期待



Au+Au 衝突と d+Au 衝突の対照的振舞



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



d+Au \rightarrow $h^{\pm}+X$ at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV
PHENIX

- Au+Au 衝突(左)で中心度に従い「ジェット」抑制
- パarton非閉込相生成の最初の証左 (!) の一つ

PRL の表紙を（再び）飾る $d+Au$ 測定

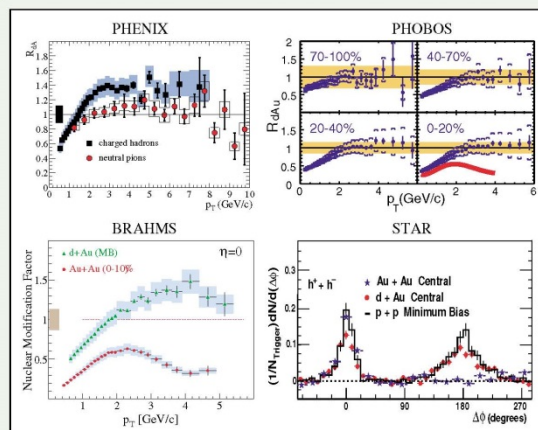


PHYSICAL REVIEW LETTERS

Articles published week ending
15 AUGUST 2003

Volume 91, Number 7

PHENIX



BRAHMS

PHOBOS

STAR

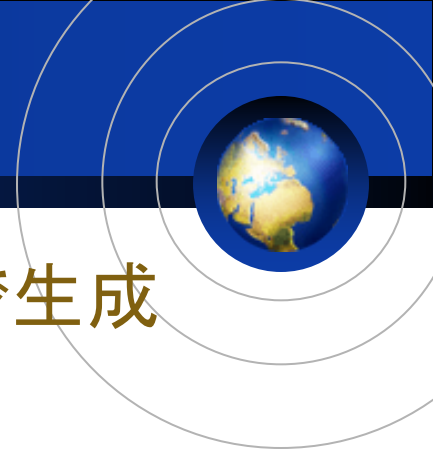
Member Subscription Copy
Library or Other Institutional Use Prohibited Until 2008

APS Published by The American Physical Society

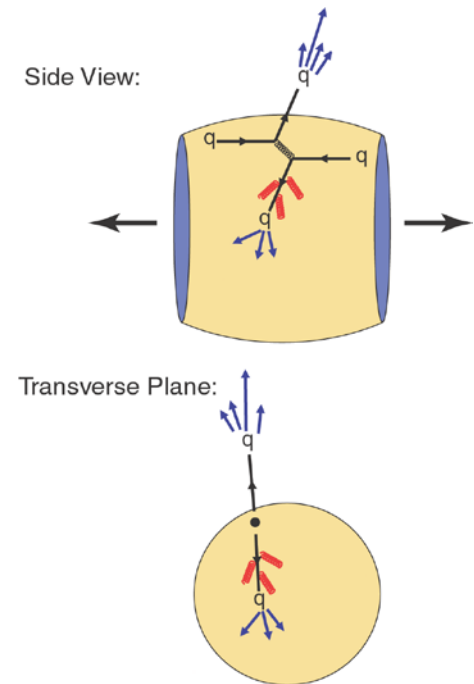
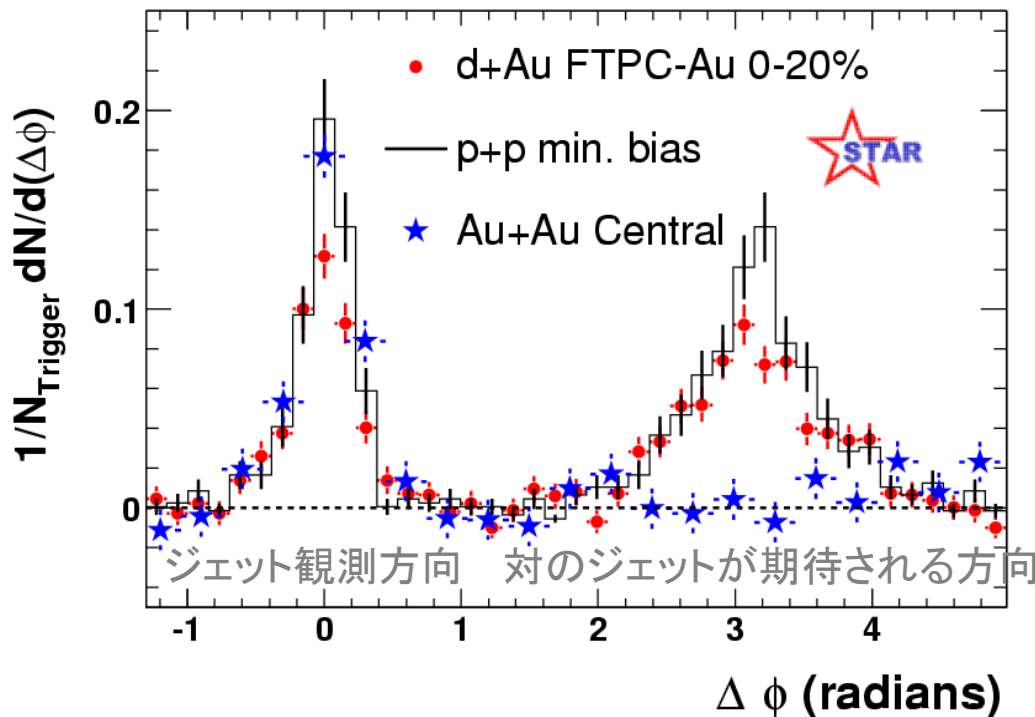
PRL 91 (August, 2003)



「ジェット」対の抑制



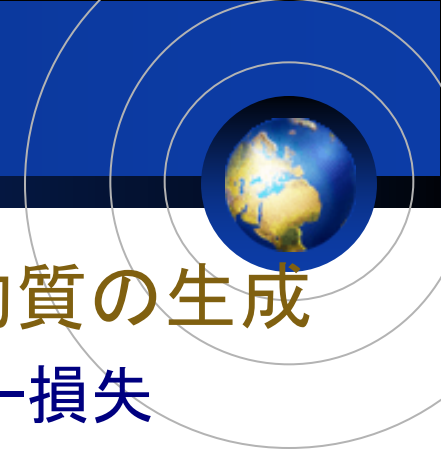
- ジェットは衝突軸から見て反対方向に対で生成



- Au+Au 中心衝突(↑青)でジェット対の一方が消滅



ジェット抑制の観測意義



- 強い終状態相互作用を伴う高温高密度物質の生成
 - 終状態における（軽い）クォークのエネルギー損失
 - 支配的機構：グルーオン制動放射
- クォーク物質の性質探求に向けて：
 - グルーオン密度と温度の定量的理解
 - “ジェット・トモグラフィ”
 - エネルギーの再分配
 - e.g. ジェット - 光子相関
 - 重いクォークのエネルギー損失
 - e.g. 重いクォークを含む中間子の運動量分布



更なる高エネルギー領域へ：LHC



■ ALICE 実験 (+ ATLAS, CMS 実験)

- 量子色力学相転移とクォーク非閉込相の探求

- 極初期宇宙状態の性質
- 素粒子と相互作用の基本性質
- ハドロン質量の起源

■ ATLAS 実験, CMS 実験

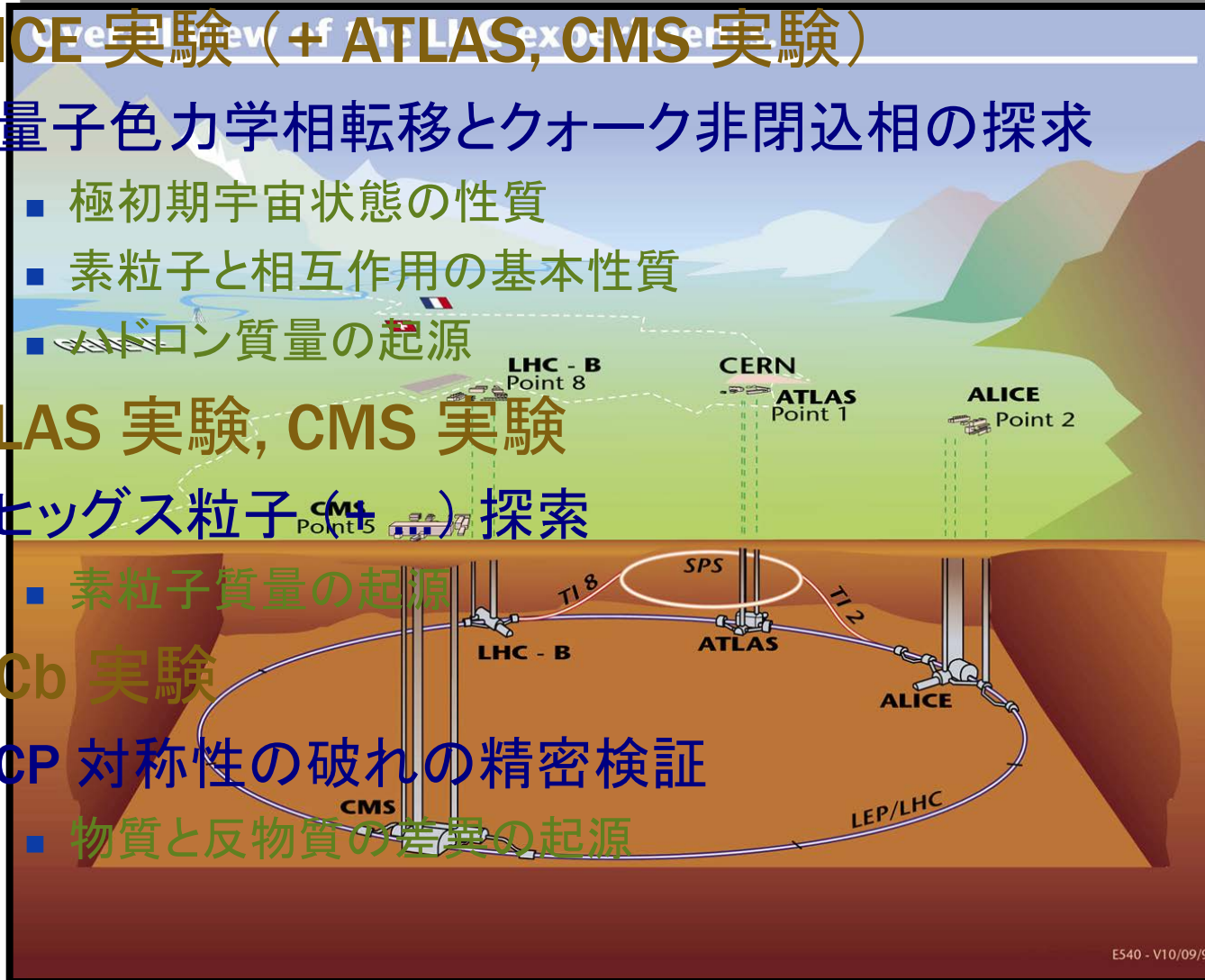
- ヒッグス粒子 (Higgs boson) 探索

- 素粒子質量の起源

■ LHCb 実験

- CP 対称性の破れの精密検証

- 物質と反物質の差異の起源



E540 - V10/09/9.



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)



ALICE (L3) 電磁石 + 検出器架台



タイム・プロジェクトン・チェンバ TPC

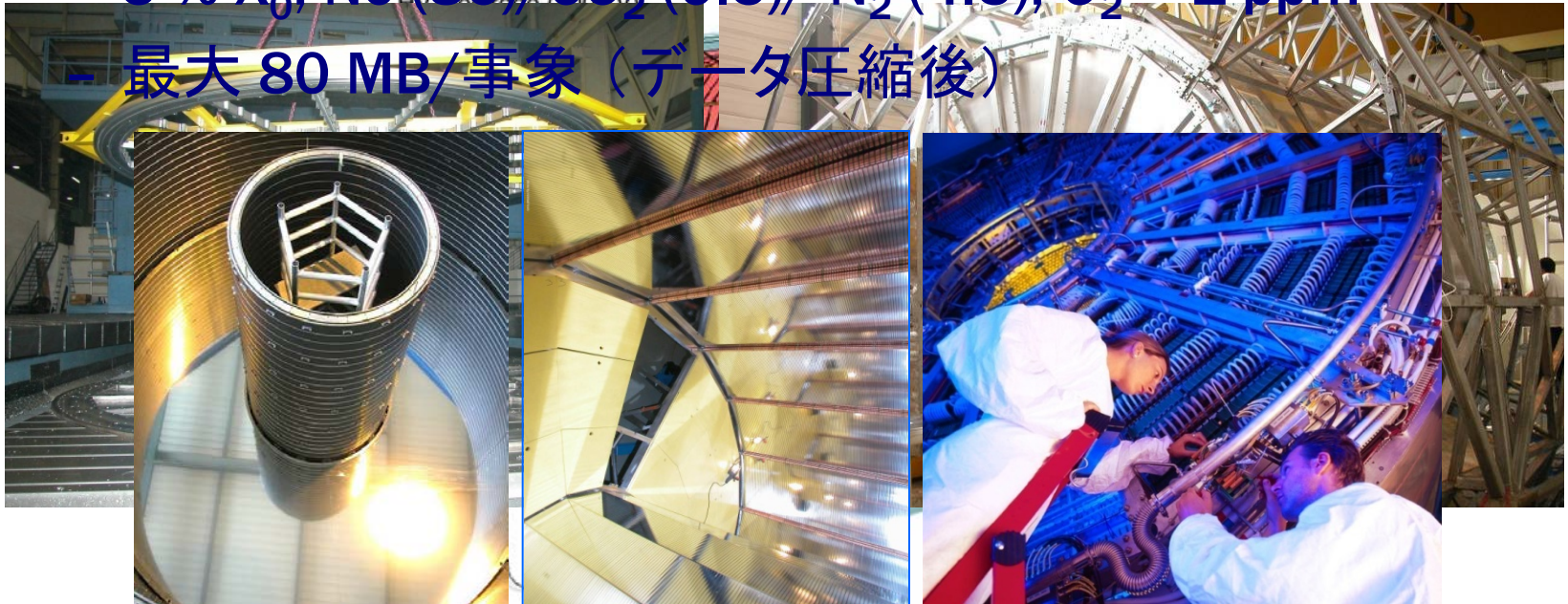


■ 主飛跡検出器

- $|\eta| < 0.9$, 全方位角

■ 史上最大

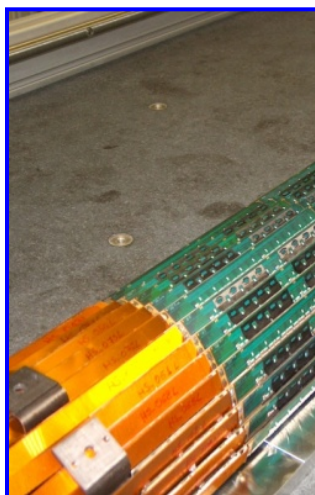
- 88 m³, 長さ 10 m, 直径 5.6 m, 570 k 読出チャンネル
- 3 % X₀, Ne (86)/CO₂ (9.5)/ N₂ (4.5), O₂ ~ 1 ppm
- 最大 80 MB/事象 (データ圧縮後)



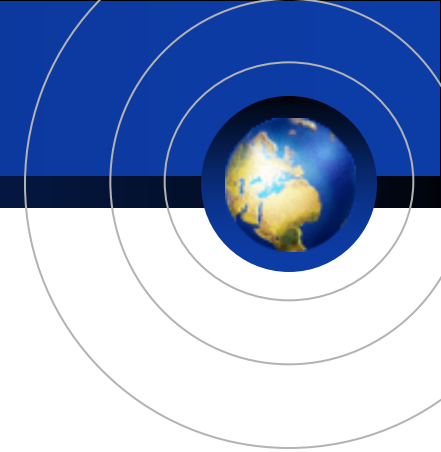
衝突点近傍飛跡検出器 ITS



- 飛跡検出 ($|\eta| < 1$) + 粒子多重度 ($|\eta| < 2$)
- Si ピクセル / ドリフト / ストリップ; 各 2 層
 - $r\phi$ 分解能: 12, 38, 20 μm

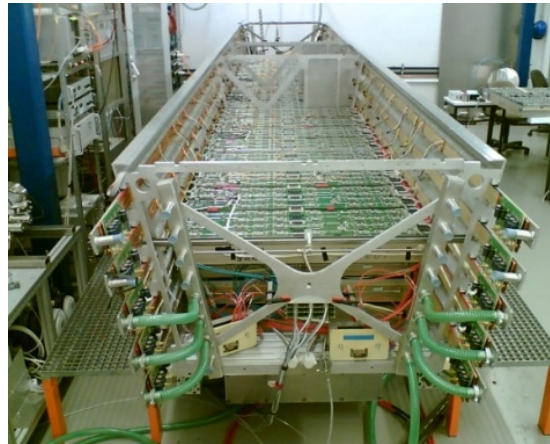
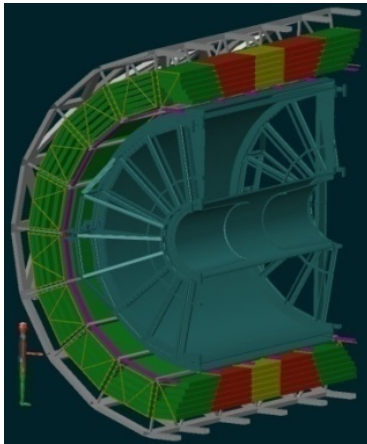


遷移輻射検出器 TRD

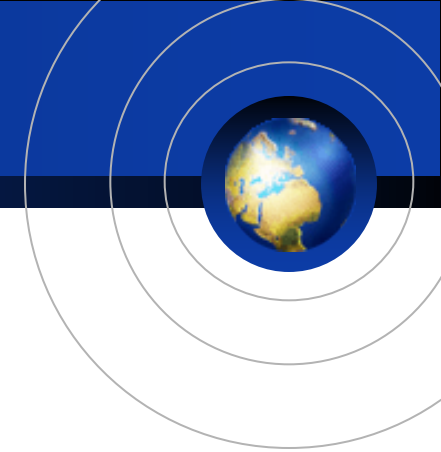


■ 飛跡検出と粒子識別

- $|\eta| < 0.9$, 全方位角
- 分解能 $400 - 600 \mu\text{m}$ ($r\phi$), 23 mm (z)
- e/π 分離識別 > 100 ($p_T > 3 \text{ GeV}/c$)



飛行時間測定器 TOF

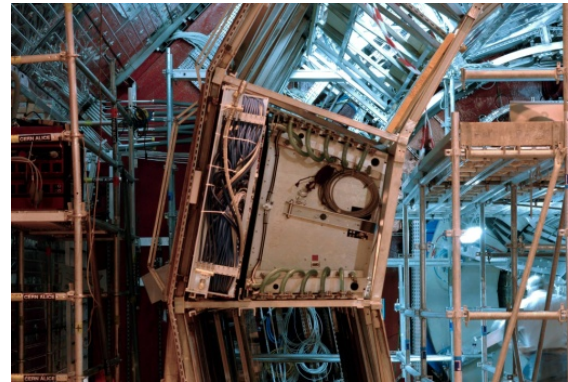


■ ハドロン識別

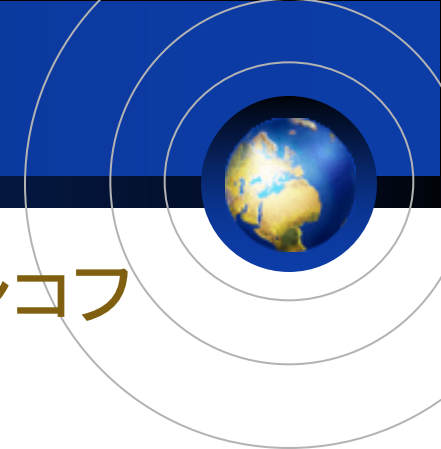
- $|\eta| < 0.9$, 全方位角; 飛行距離 3.7 m

■ MRPC

- 時間分解能 ~ 50 ps, 160 k 読出チャンネル

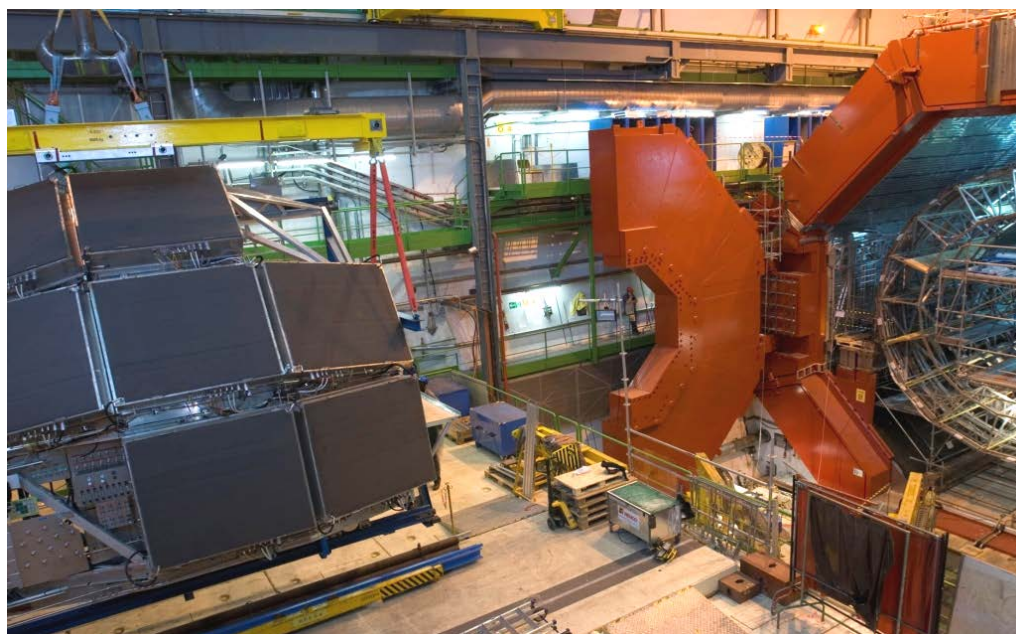
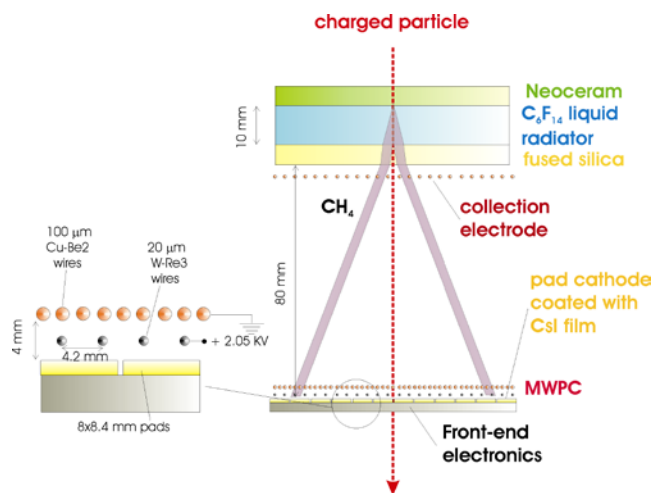


高横運動量粒子識別 HMPID



■ CsI 光カソードを用いたリング集光チェレンコフ

- $\gamma_{th} = 1.57$, $|\eta| < 0.6$, $\Delta\phi = 58^\circ$;
11 m², 16.1 k 読出チャンネル



光子スペクトロメータ PHOS



- 高位置／エネルギー分解能電磁カロリメータ



- 広島大学：開発・建設・運用・解析に参画



前方ミュオン（対）スペクトロメータ



- 前方領域のクォークonia, 重フレーバ
 - $2.4 < \eta < 4.0$
 - 質量分解能: $< 70 \text{ MeV (J/\Psi)}$, $< 100 \text{ MeV (\Upsilon)}$
 - 運動量カットオフ: $4 \text{ GeV}/c$



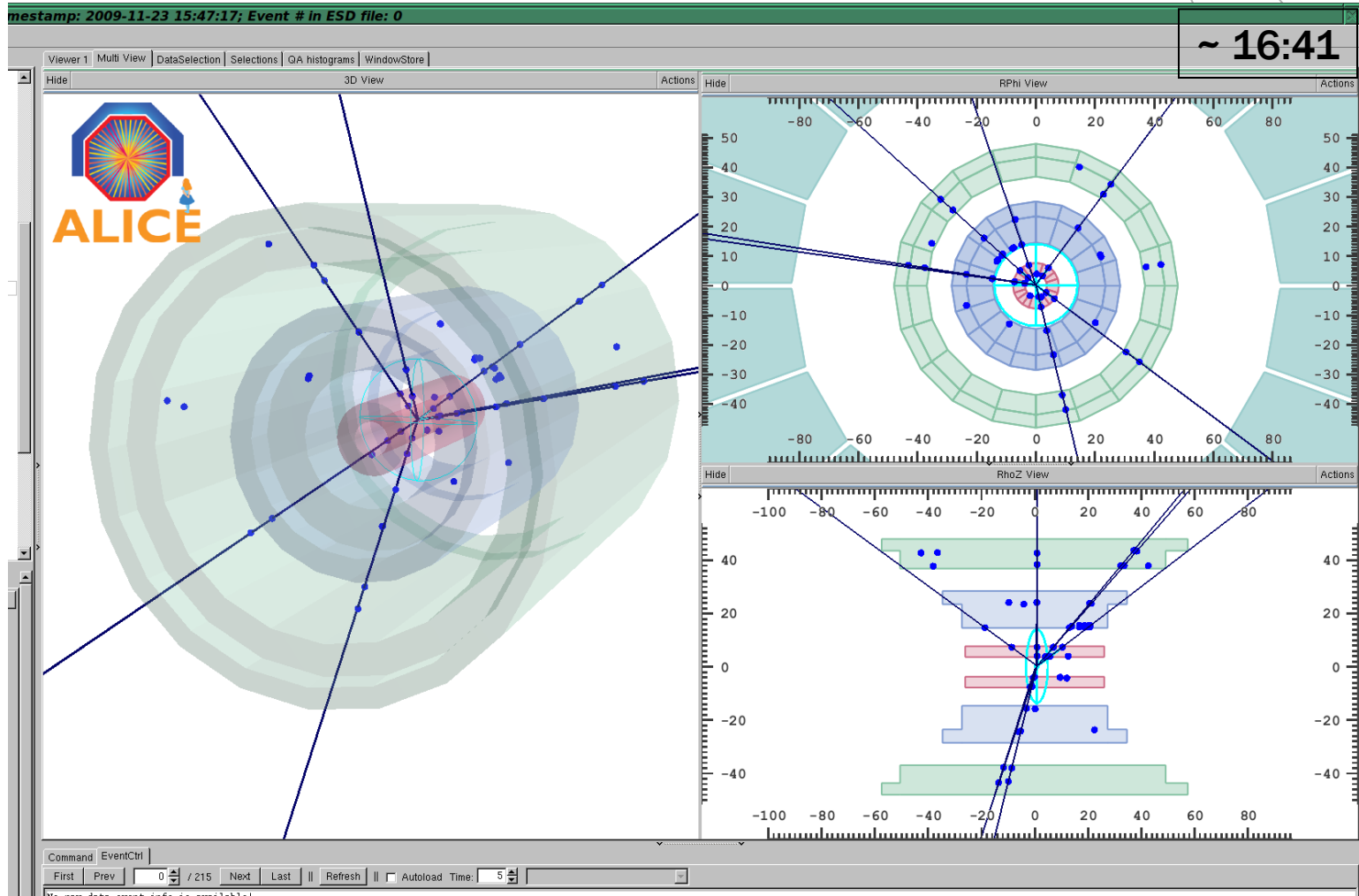
ALICE 実験 2009 年 11 月 23 日



~ 16:35



ALICE 実験最初の衝突事象



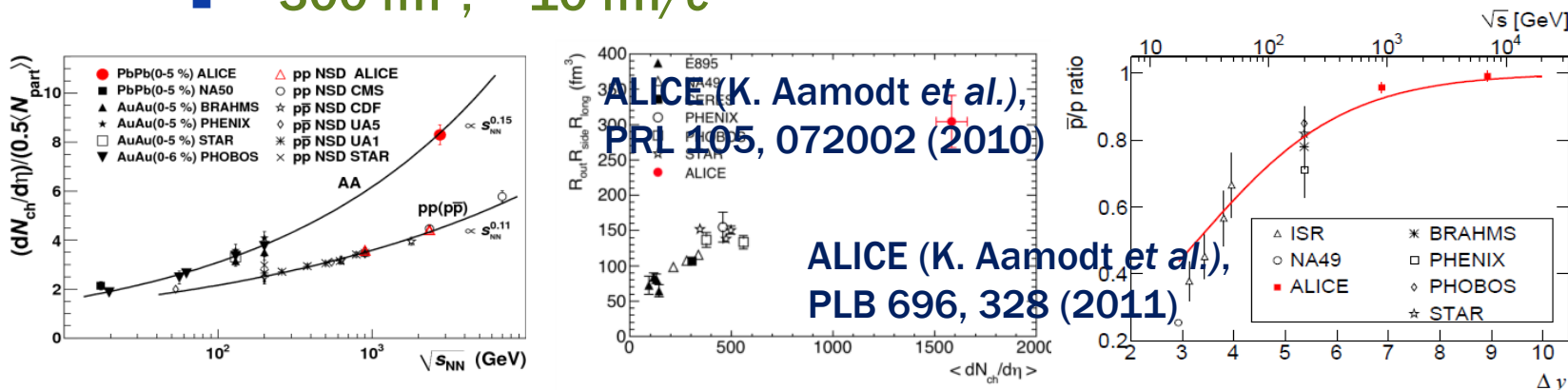
衝突！ 衝突！！ 衝突！！！！



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)

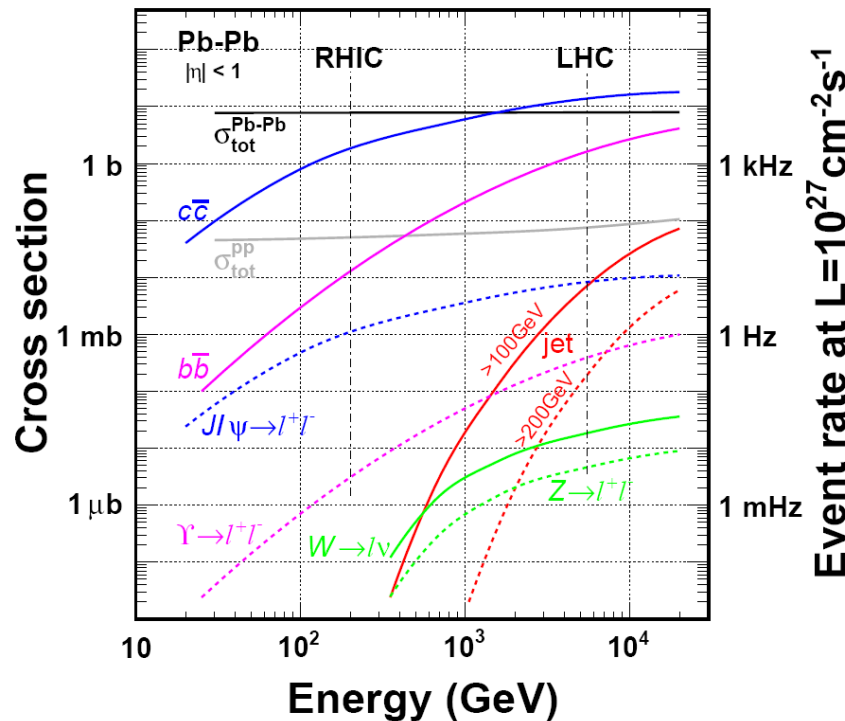
- 陽子 + 陽子 900 GeV: 0.957 ± 0.006 (stat) ± 0.014 (sys)
- 陽子 + 陽子 7 TeV: 0.990 ± 0.006 (stat) ± 0.014 (sys)



より高エネルギーで有用性を増す探針



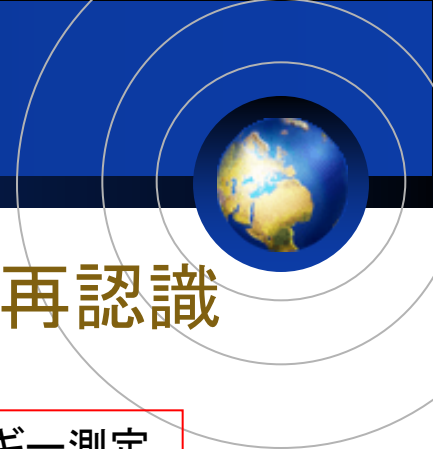
- 高横運動量現象, e.g. ジェット
- 重フレーバ (c, b)



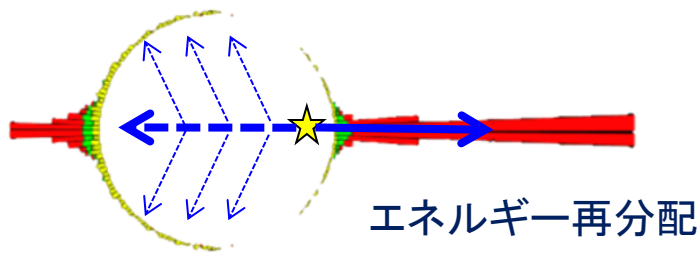
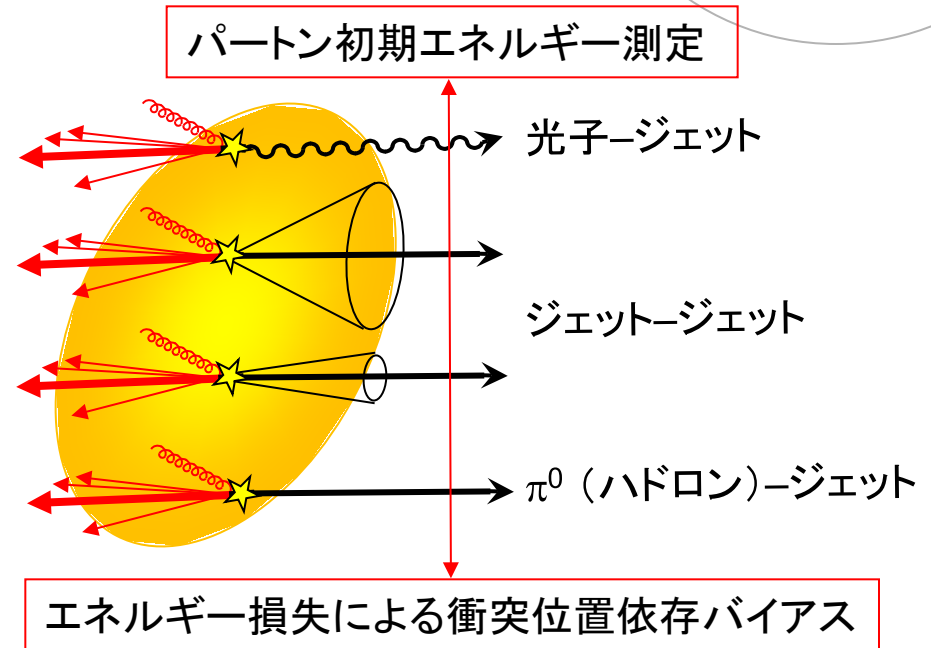
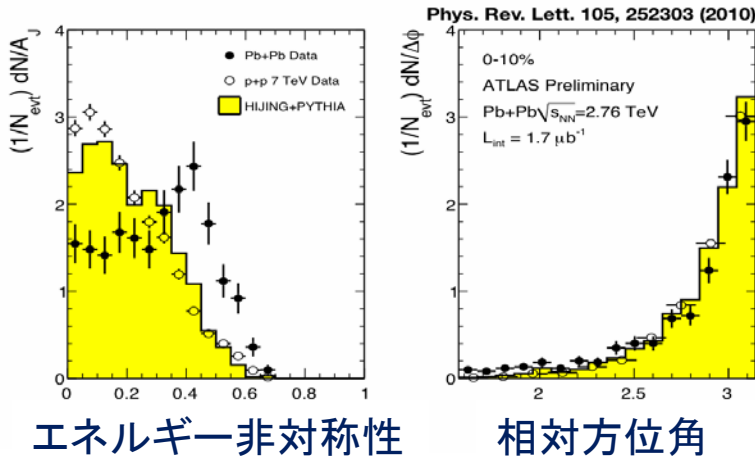
- ALICE/ATLAS/CMS において有用性顕示



LHC 原子核衝突からの知見



■ ジェットなど高横運動量プローブの重要性再認識

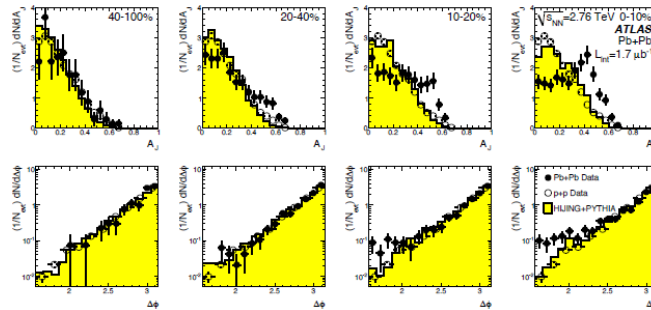


- 硬散乱クォークのエネルギー損失 → 再分配
- 光子-ジェット相関: パートン初期エネルギー基準測定

LHC 加速器におけるジェット測定

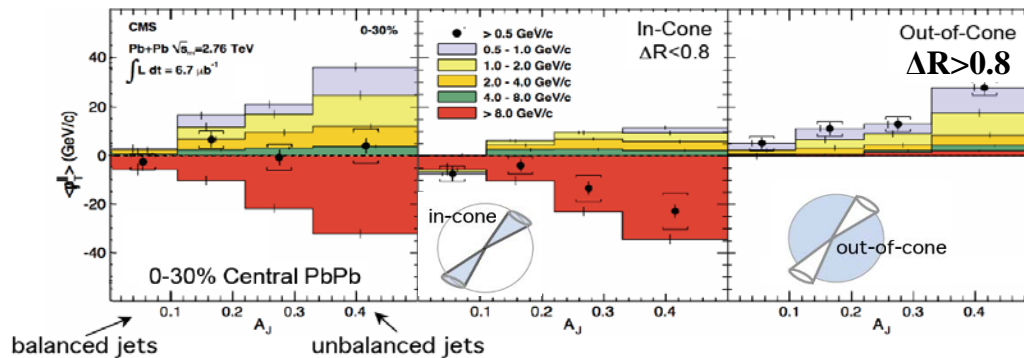


■ 非対称横運動量ジェット対, 単ジェット(!)



ATLAS

■ 広範囲にエネルギー再分配



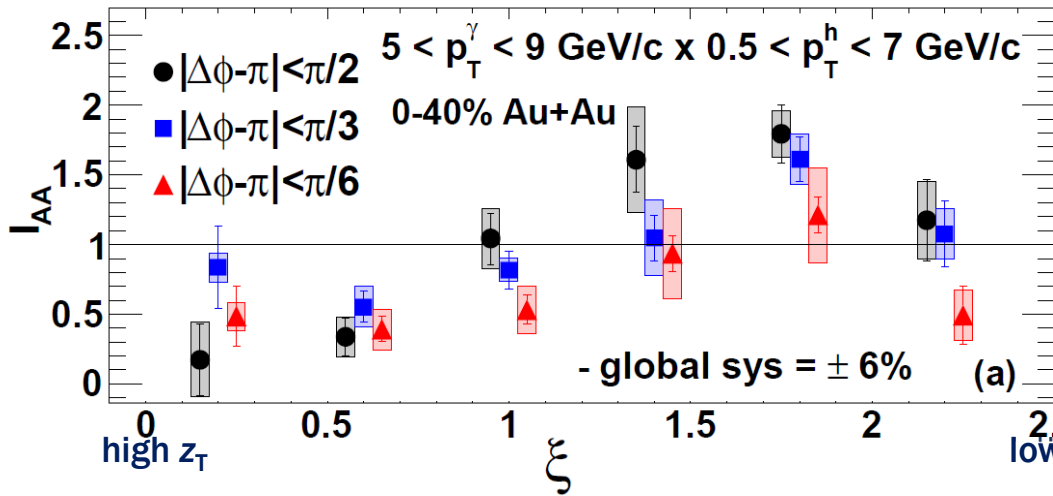
CMS

- $\Delta R > 0.8 \sim \pi/4$

- 低横運動量領域の粒子数増加



ジェットエネルギー損失と再分配

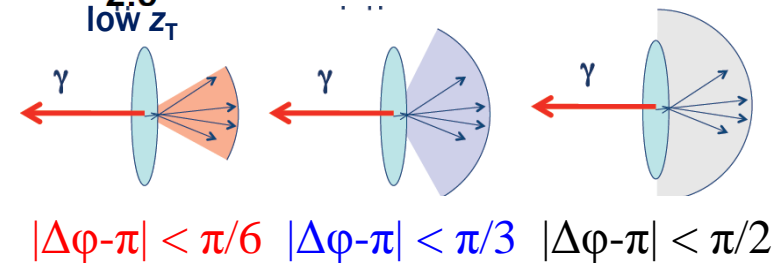


PHENIX

$$I_{AA} = \frac{\text{yield in Au+Au}}{\text{yield in p+p}}$$

$$\xi = \ln(1/z_T)$$

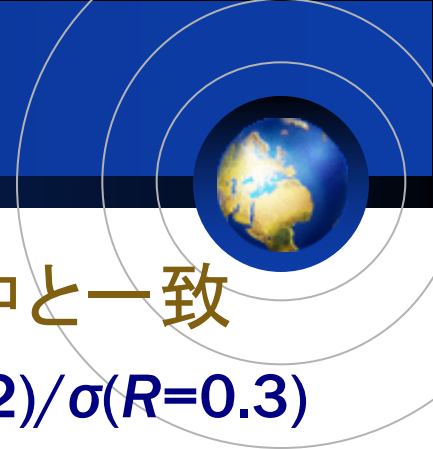
$$z_T = p_T^{\text{hadron}}/p_T^{\text{photon}}$$



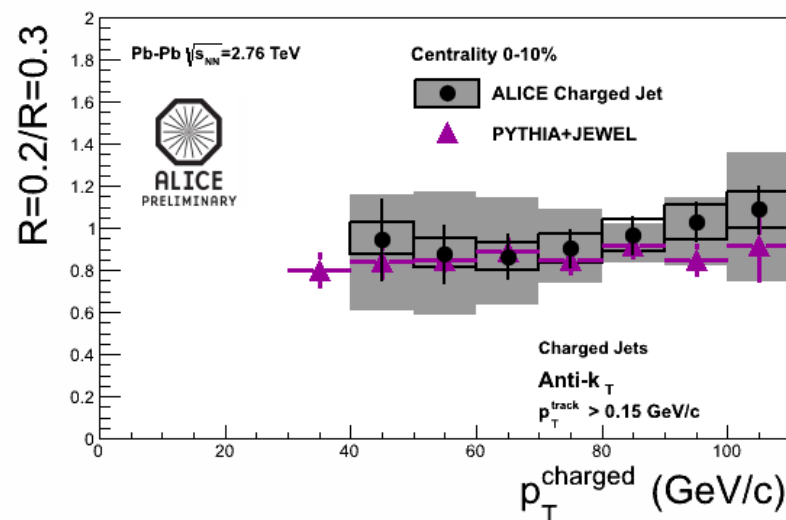
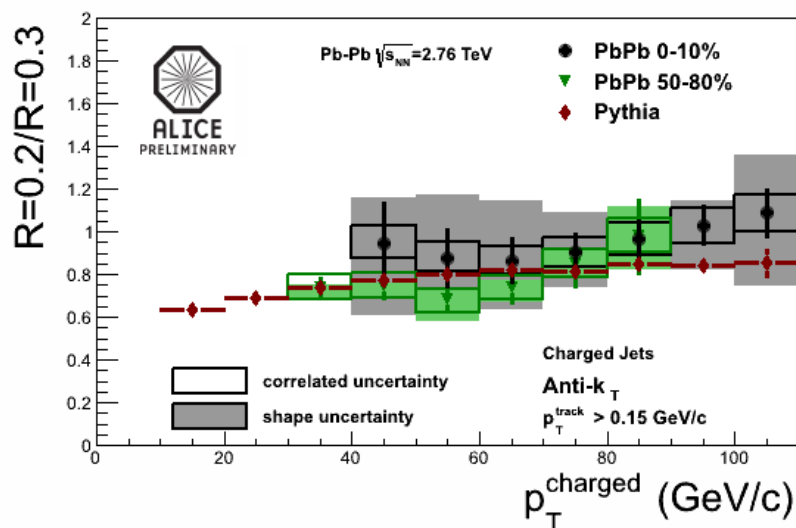
- 狭いジェット半径 → 高横運動量粒子の抑制
 - 対応する低横運動量粒子の増加なし
- 広いジェット半径 → 低横運動量粒子の増加



生存ジェットの形状は不変（？）



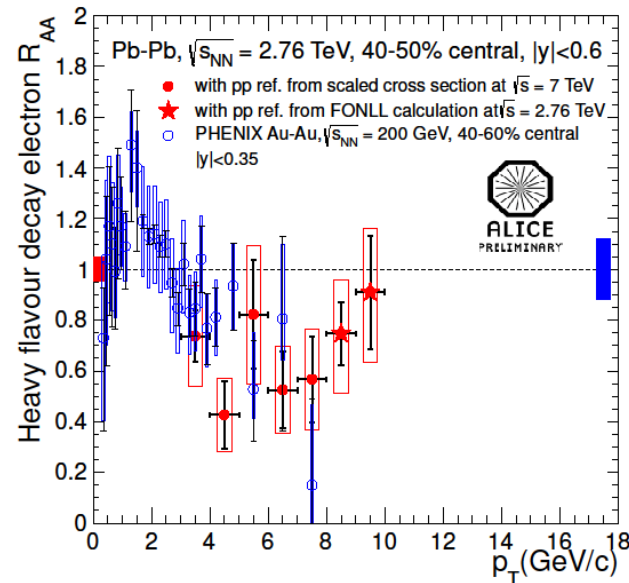
- エネルギー損失後のジェット形状は真空中と一致
 - 異なるジェット半径内のエネルギー比 $\sigma(R=0.2)/\sigma(R=0.3)$
 - 周辺衝突, 中心衝突とも
- ジェット自身の広範囲化は認められず
- エネルギー損失を考慮した理論模型とよい一致



クォーク・フレーバによる微分的測定



- RHIC と LHC で重フレーバの R_{AA} 測定結果一致
 - PHENIX 実験, ALICE 実験
 - c/b クォークを含む中間子の崩壊から生成する単電子

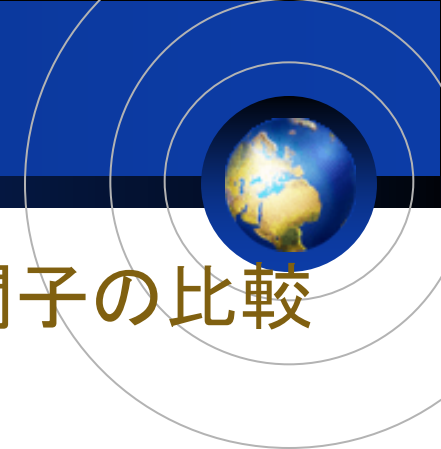


ALI-DER-53859

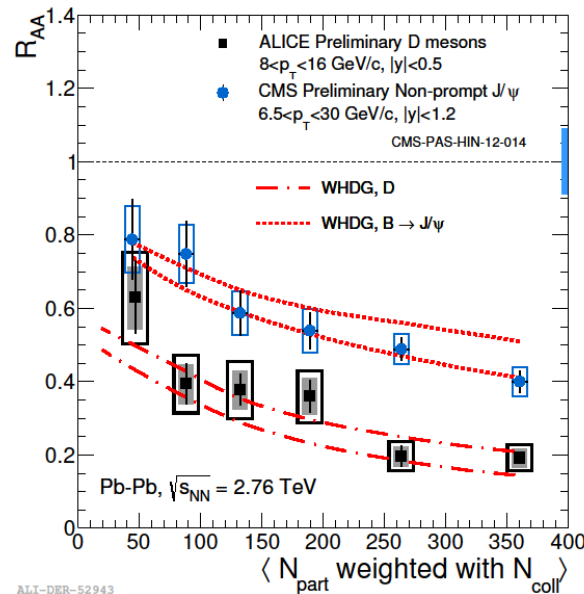
- 課題: c/b 分離; 衝突点近傍検出器が鍵



質量による階層性の予兆(？)



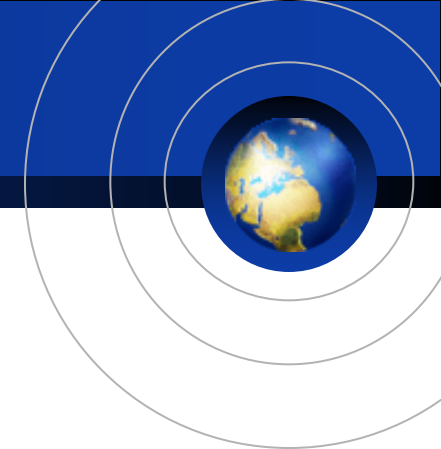
- ほぼ等しい平均横運動量を持つ c/b 中間子の比較
 - c を含む中間子 (D^0, D^+, D^{*+} の平均), ALICE
 - b を含む中間子 (B) の崩壊から二次生成する J/ψ , CMS



- より重い b クォークのエネルギー損失効果低減？



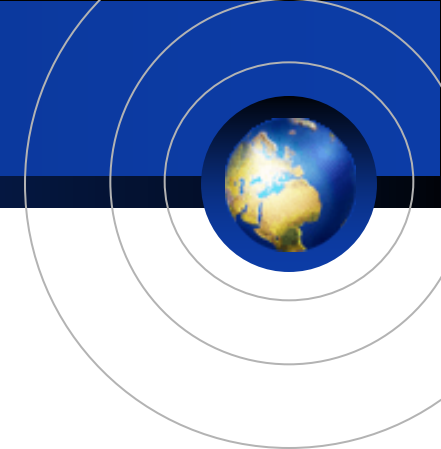
実験クォーク物理学の現状まとめ



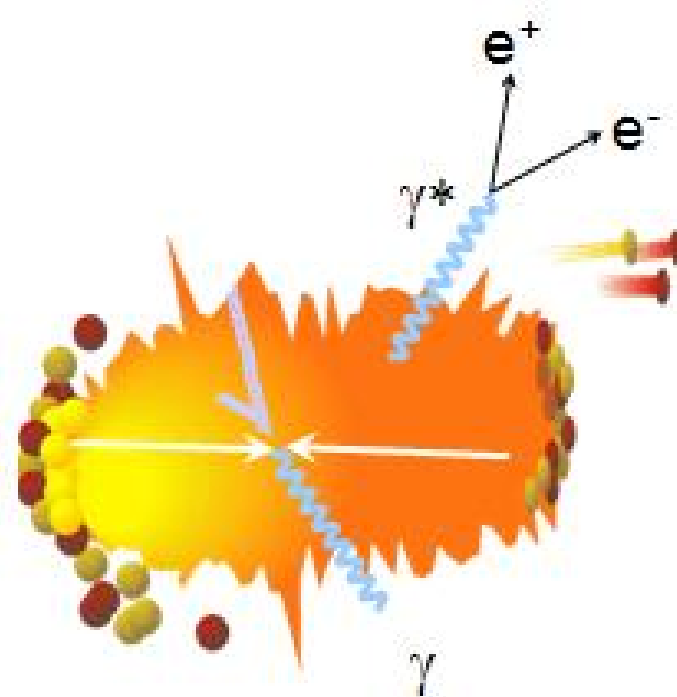
- 高温非閉込パートン物質の存在確立
 - 2000年 RHIC 加速器稼働
 - 積年の量子色力学相転移探索に終止符
- パートン物質の性質探究へ
 - 2009年 LHC 加速器稼働
 - 既に様々な興味深い性質が明らかに



光子 = 温度計



- 熱平衡ならば熱（黒体）輻射
- 輻射光子スペクトル \leftrightarrow 温度



- 実光子と同様に仮想光子も



高エネルギー原子核衝突からの光子



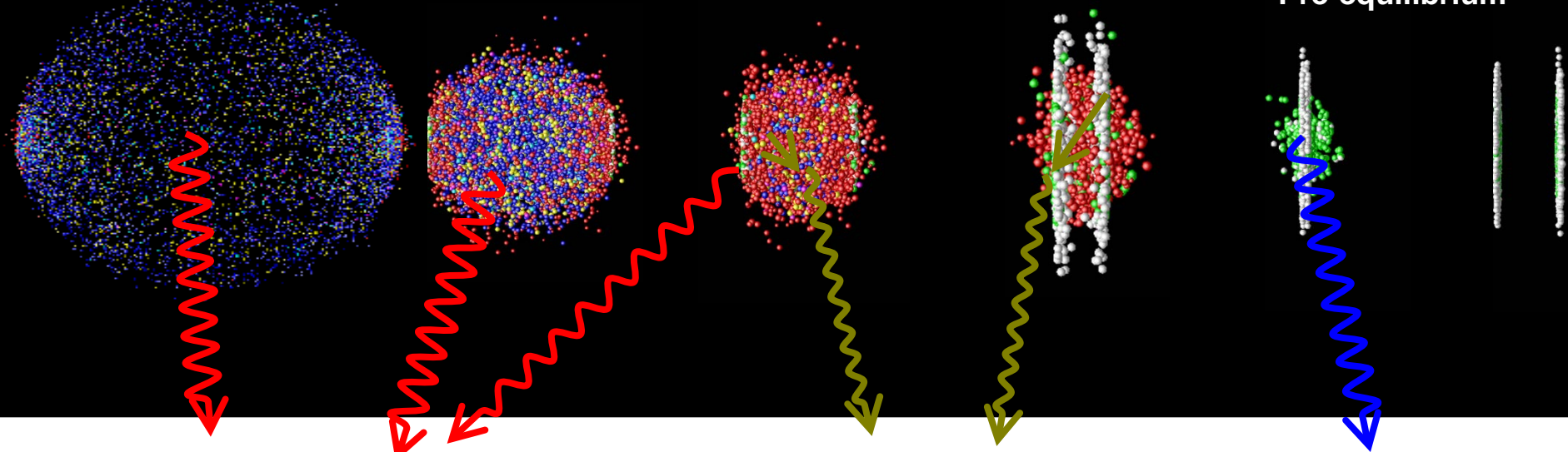
Hadronization
(Freeze-out) +
Expansion

Mixed phase

QGP phase?

Thermalization

Pre-equilibrium



熱光子

パートン相熱輻射
ハドロン相熱輻射

ジェット-媒質相互作用

ジェット-光子転換
ジェット制動放射

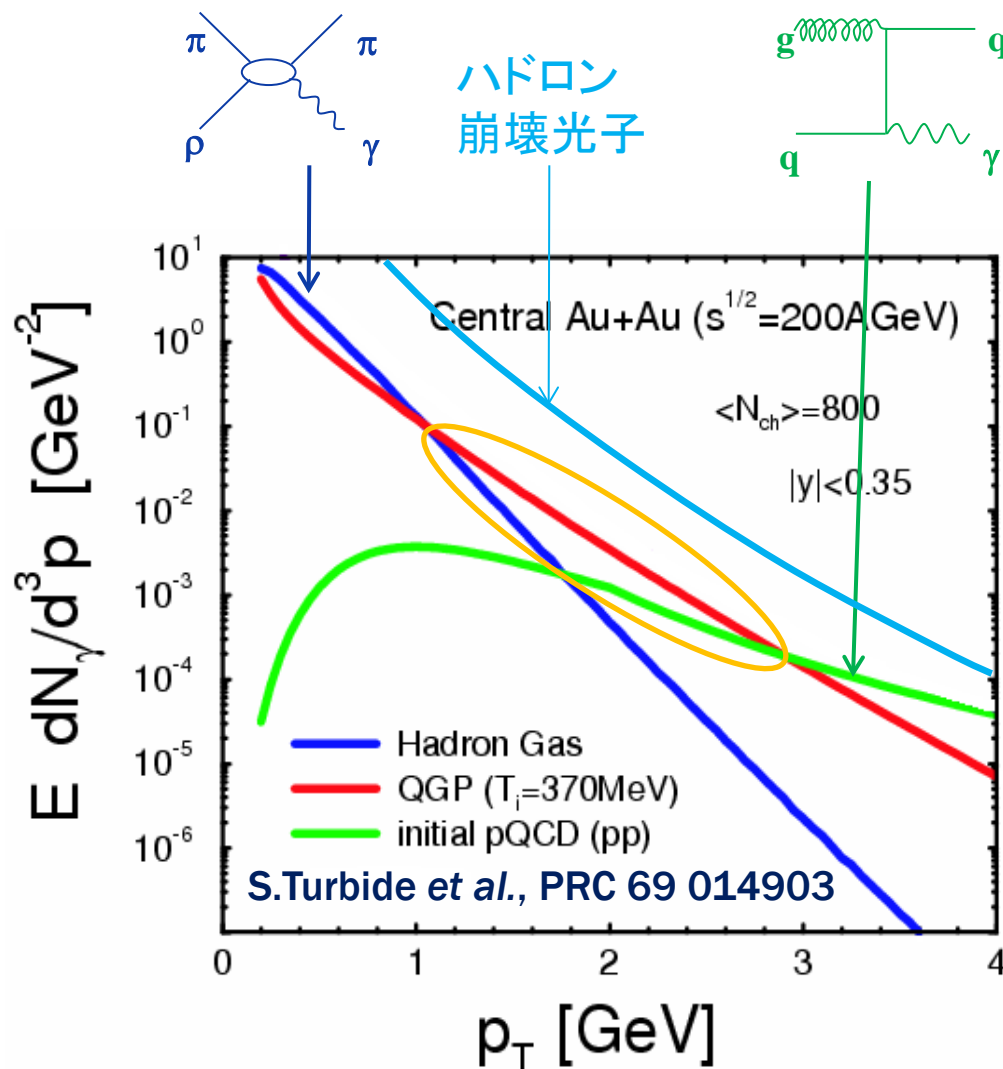
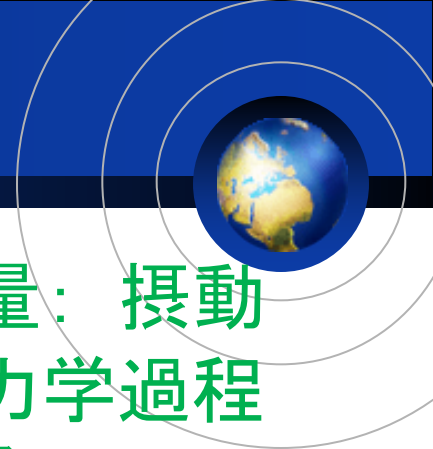
初期光子

コンプトン散乱, 対消滅
色場破碎

時空発展



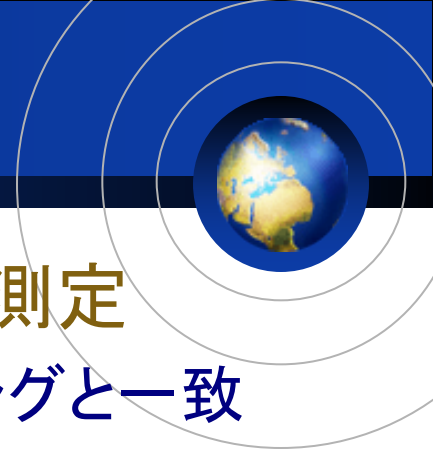
熱輻射光子の探索



- 高横運動量: 摂動的量子色力学過程からの光子
- 低横運動量: ハドロン気体からの光子
- 中間横運動量: QGPからの熱輻射光子が支配的!
- 他の起源からの光子
- 全領域に亘りハドロン崩壊光子

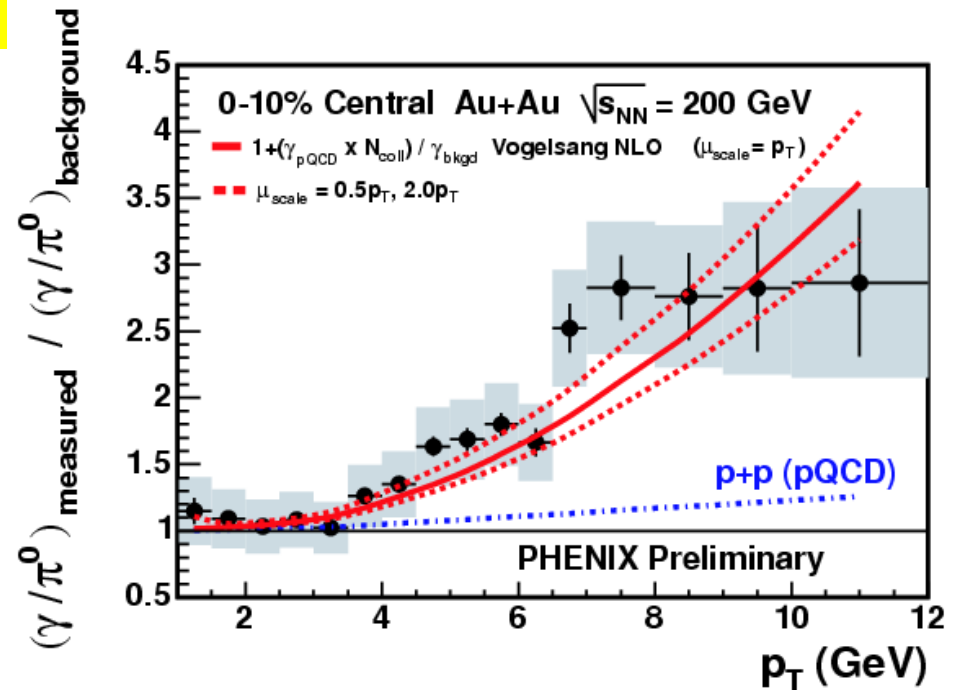
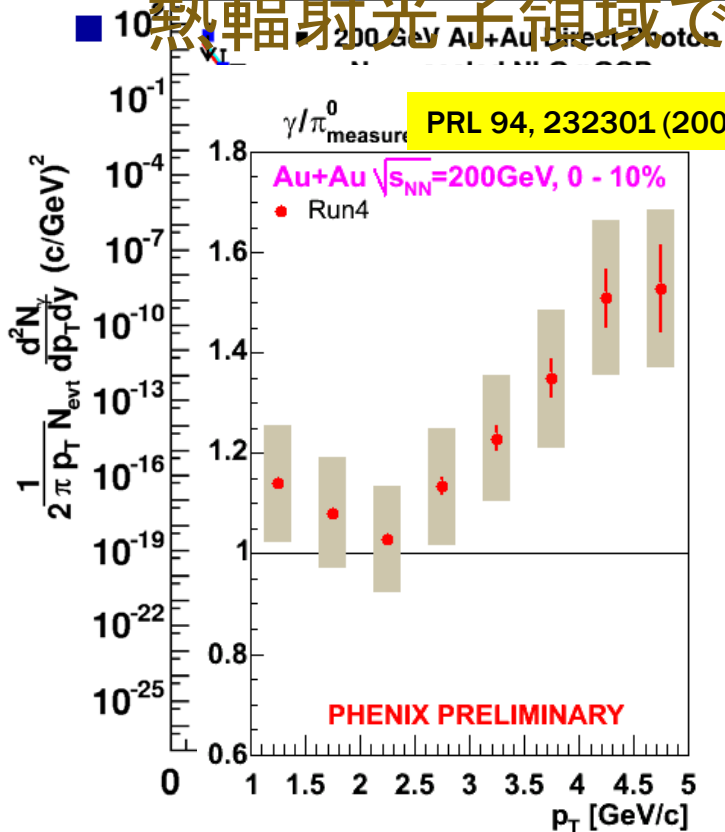


自明な手法：直接生成実光子



- ハドロン崩壊光子を超える“余剰成分”を測定
 - Au+Au 衝突で pQCD × 二対衝突数スケーリングと一致

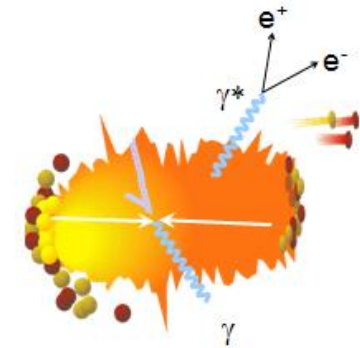
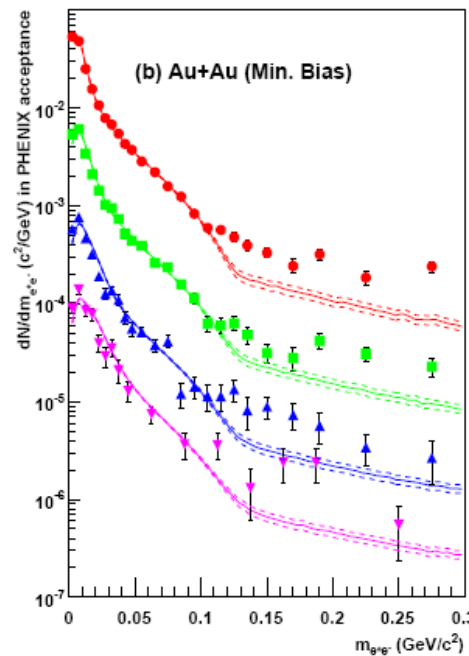
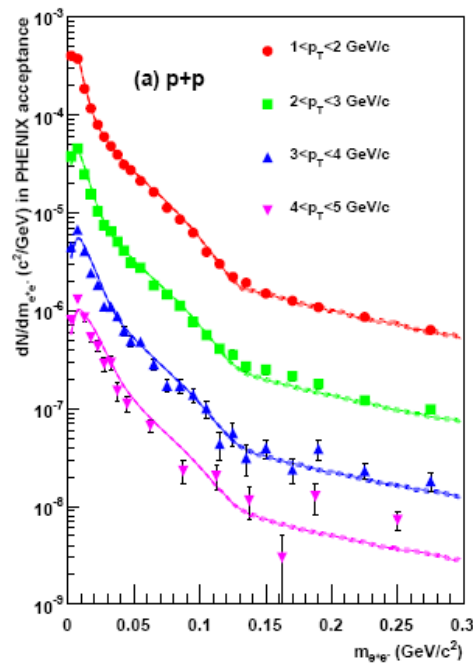
- 熱輻射光子領域では信号対背景雑音比が低く困難



新規提案：“ほとんど実”な仮想光子



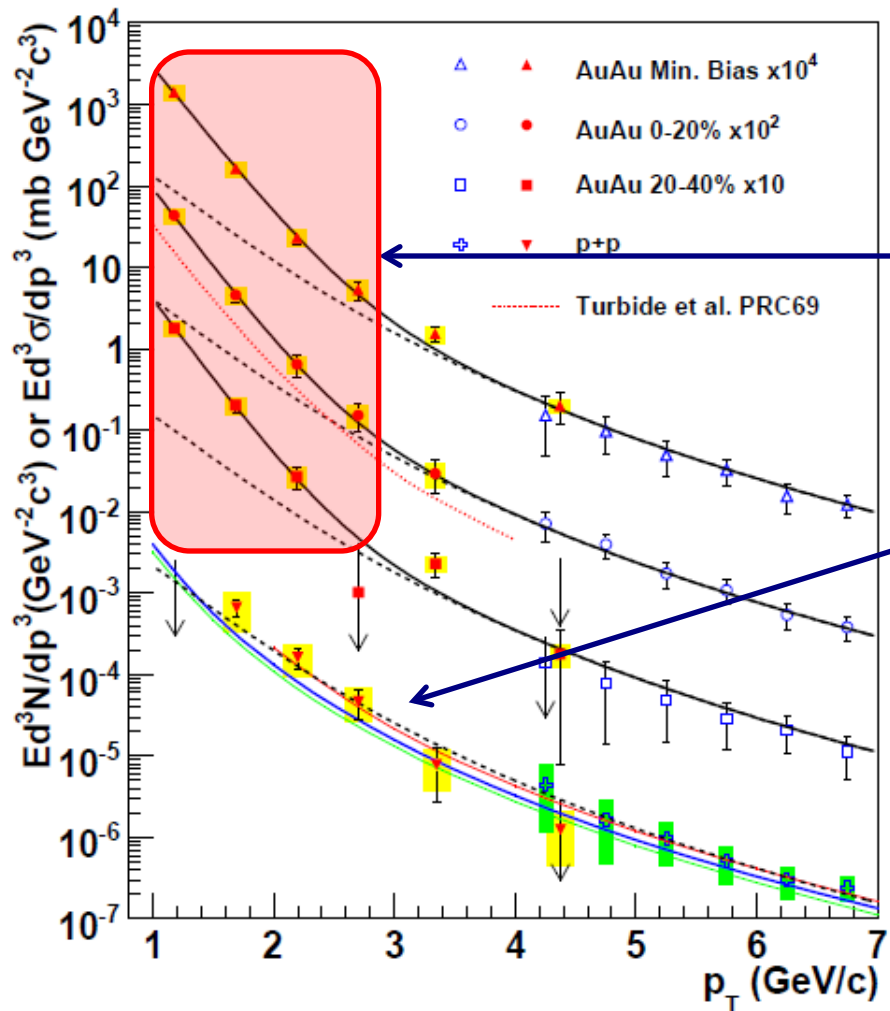
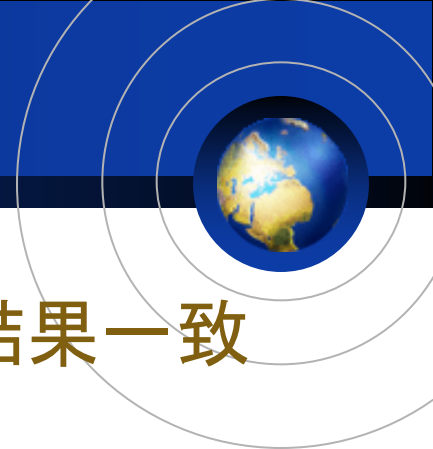
- 低不変質量の電子・陽電子対
- $p+p$: ハドロン崩壊成分 + 高横運動量 pQCD 成分
- $Au+Au$: ~ 135 MeV 以上の不変質量領域に余剰成分
 - π_0 質量以上では π_0 崩壊からの仮想光子が存在しない



A. Adare et al., PRL accepted



直接生成光子スペクトル



■ 両測定手法の結果一致

■ 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

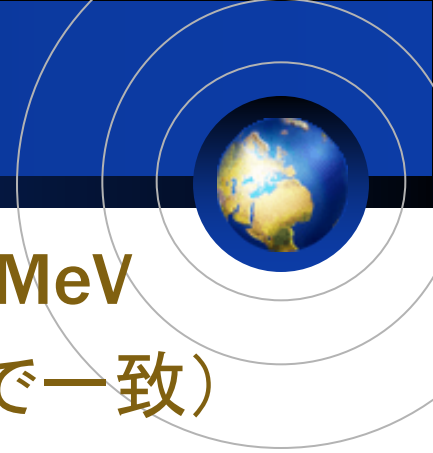
■ cf. 陽子相互衝突：

- 量子色力学計算と一致

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

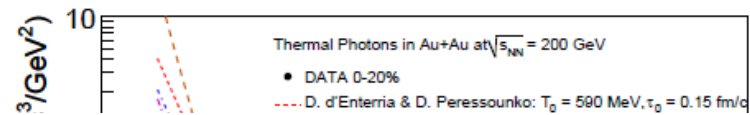


最高到達温度の見積

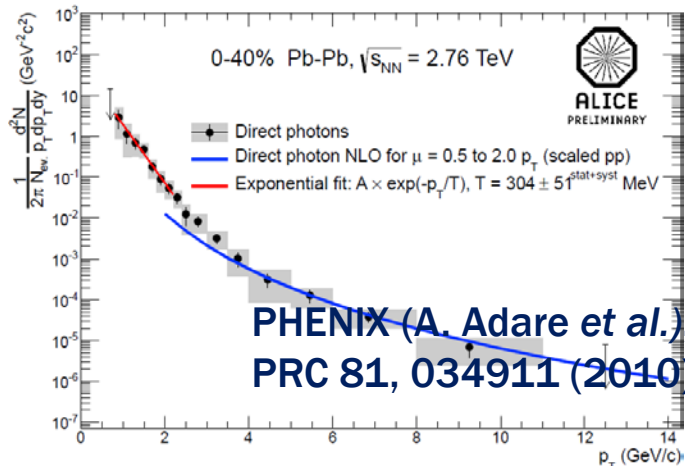


- 初期温度 > 時間平均温度 ~ 勾配 ~ 221 MeV
- 300–600 MeV (模型依存だが 2 倍以内で一致)
 - 流体力学模型による記述

- 熱化時間 0.15–0.6 fm/c



- LHC–ALICE では輻射勾配 ~ 304 ± 51 MeV



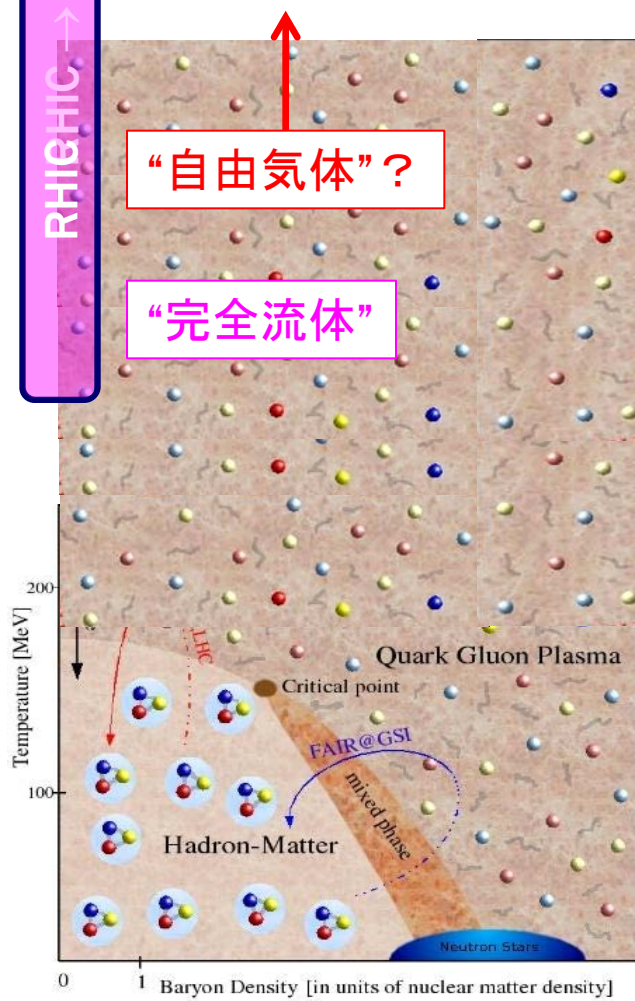
- cf. 相境界温度 ~ 170 MeV



量子色力学相図の探査

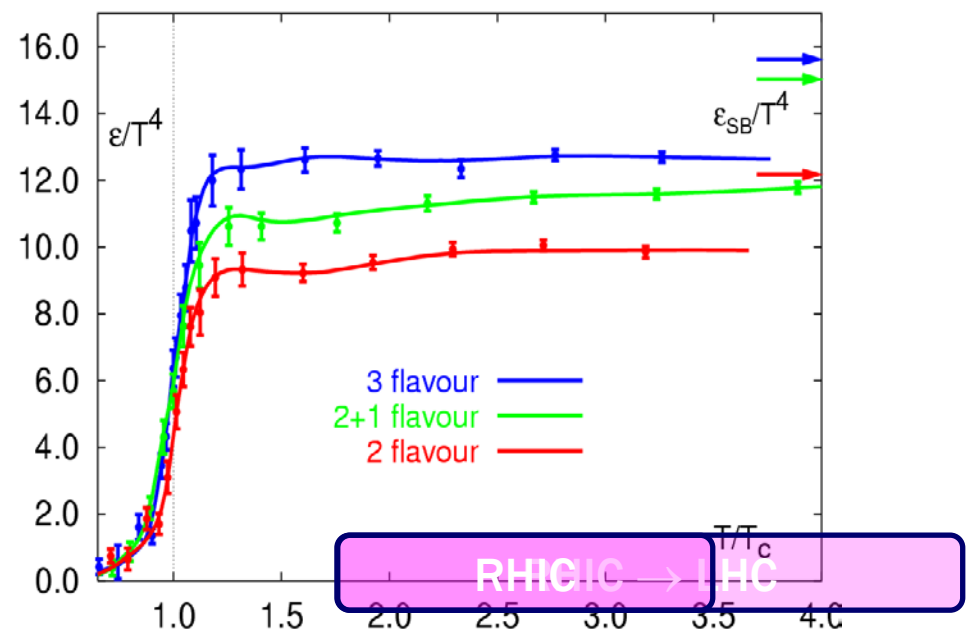


RHIC → LHC

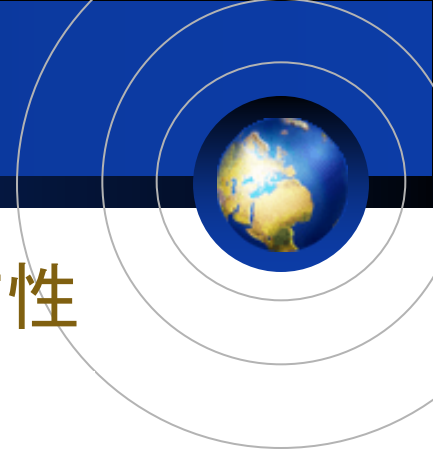


“自由気体”?

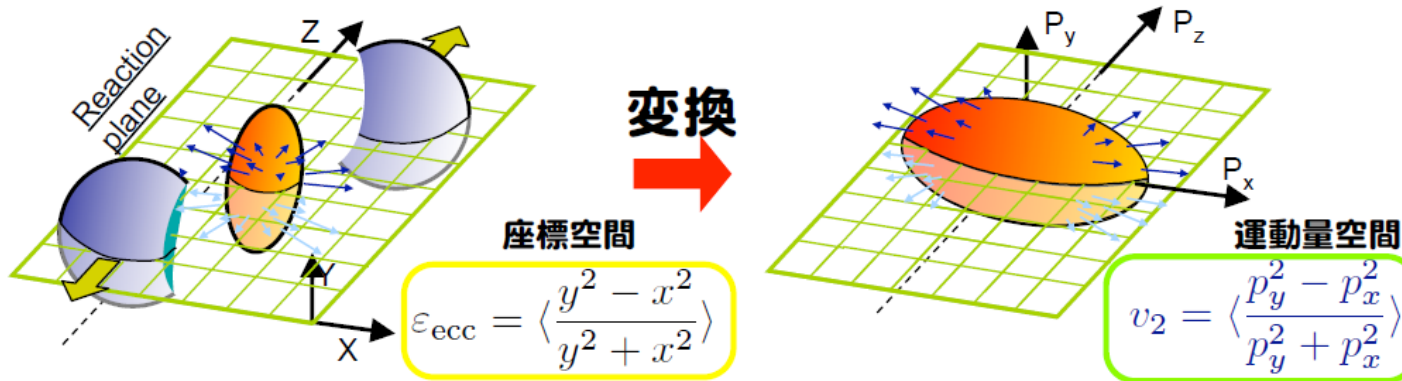
“完全流体”



強結合パートン物質



- 生成粒子の集団運動; 楕円的方位角異方性

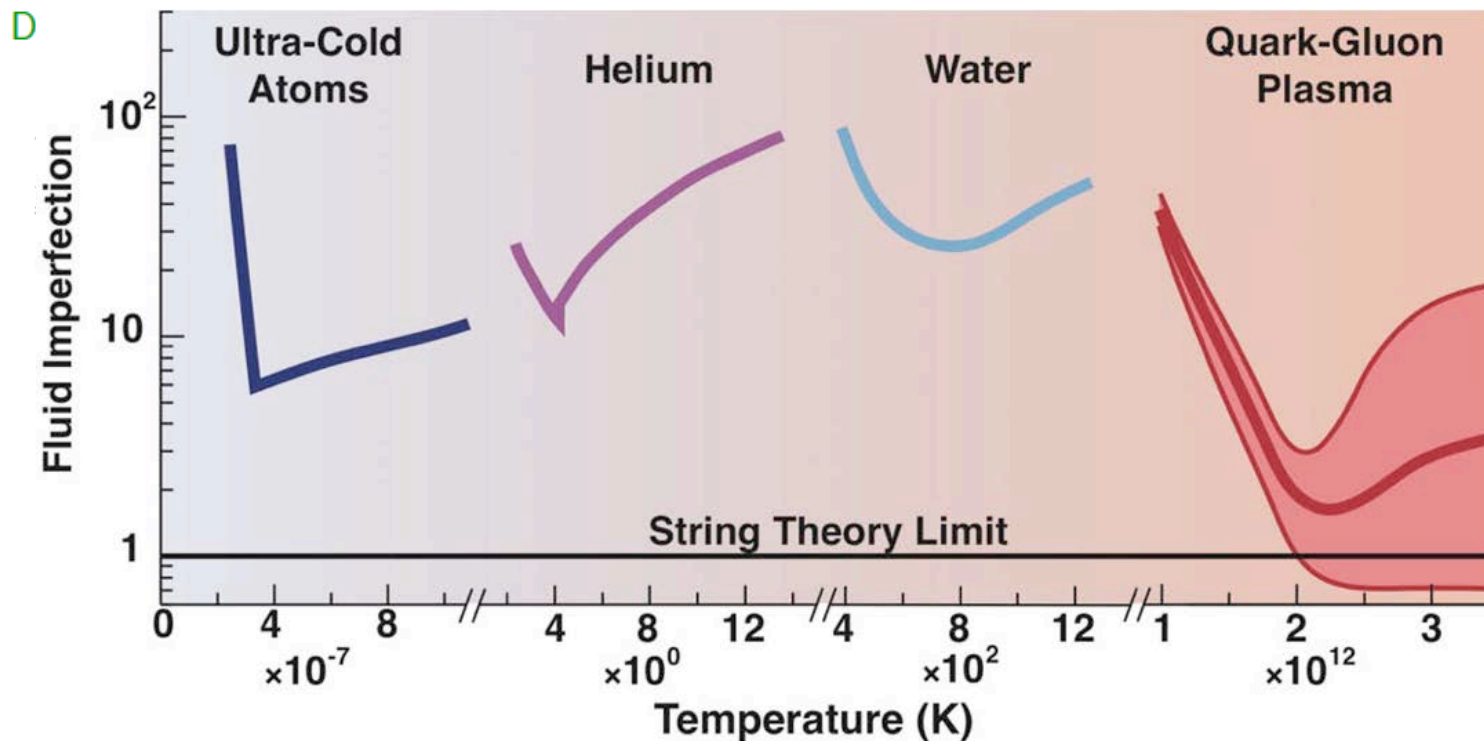


- 大きな異方性 → 強結合, 強相関係画像
 - パarton間相互作用断面積: 大
 - 平均自由行程 $\lambda \ll$ 系の大きさ
- ずれ粘性エントロピー密度比 $\eta/s \sim$ 平均運動量 $\times \lambda$
- $\lambda \rightarrow 0$: $\eta/s \rightarrow 1/4\pi$ (量子統計で許される下限値)

既知物質中で粘性最低：“完全流体”



- QGP: 人類が観測した史上最も完全な流体
 - パarton輸送模型 → 非常に大きな散乱断面積
 - 粘性を考慮した流体模型 → 非常に小さな粘性

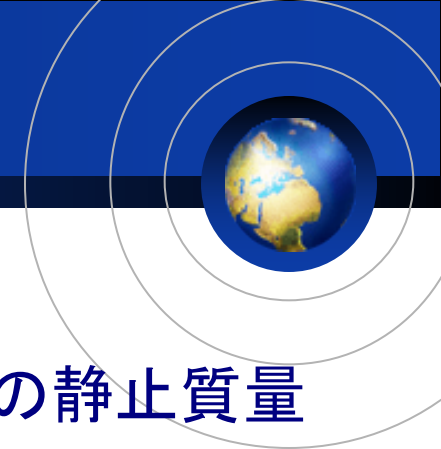


宇宙最高強度磁場の生成



- 高エネルギー原子核相互の非中心衝突
 - 荷電粒子の運動による自然な帰結
 - LHC エネルギー領域で $10^{14} - 10^{15}$ T
 - >> 宇宙最高強度とされる強磁場中性子星表面 $\sim 10^{11}$ T
 - >> 電子の臨界磁場 $m_e^2/e \sim 4 \times 10^9$ T
- 様々な物理現象の議論
 - カイラル磁気効果 (ref. K.Fukushima, D.Khazeev, ...)
 - シンクロトロン放射 (ref. K.Tuchin, K.Itakura, Y.Hidaka, ...)
 - 量子電磁力学の非線形挙動 (ref. K.Itakura, ...)
 - 量子色力学臨界温度の低下
- 高強度磁場自身は未検出





■ 電子の臨界電場／磁場

- コンプトン半径スケールのエネルギー \approx 自身の静止質量
- $eE_c h/m_e c = m_e c^2$; $E_c = m_e^2 c^3 / eh \sim 10^{17}$ V/m
- $eB_c h/m_e c = m_e c$; $B_c = m_e^2 c^2 / eh \sim 10^9$ T

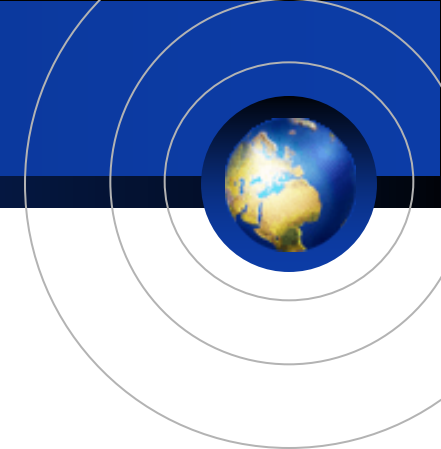
■ 電場の場合：シュヴィンガー機構

- e^+e^- 対生成
- $E > E_c$ の状況考慮は（おそらく）無意味

■ 磁場の場合：非線形 QED 効果

- e.g. $\gamma \rightarrow \gamma \gamma$, $\gamma \rightarrow e^+e^-$, 複屈折, ...

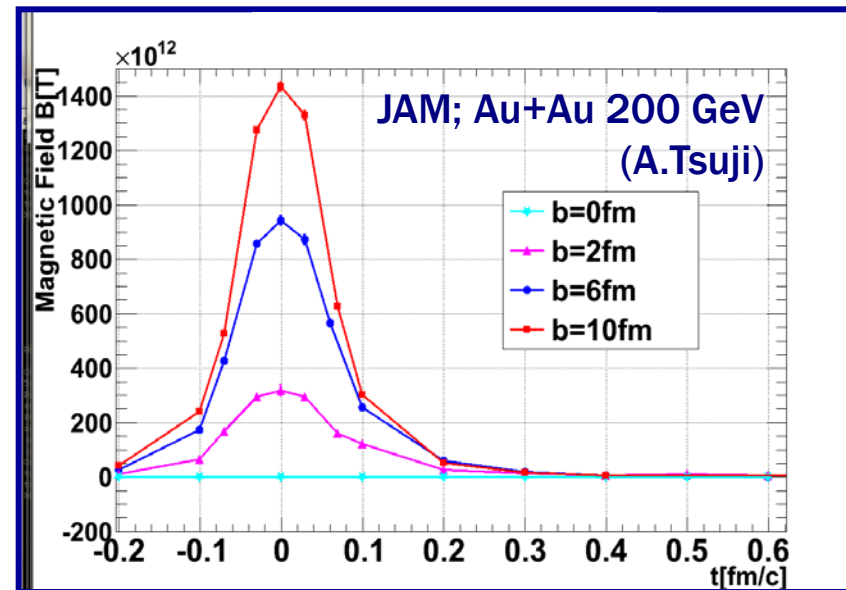
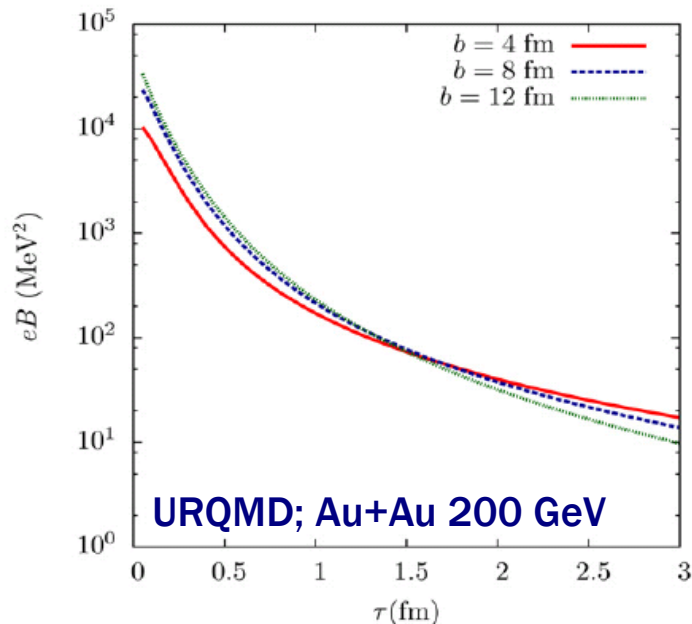
衝突非関与陽子の寄与



■ カスケード模型計算

- 衝突非関与部の陽子の寄与が支配的

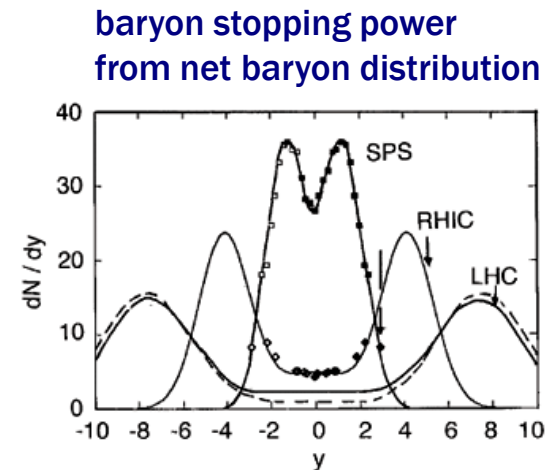
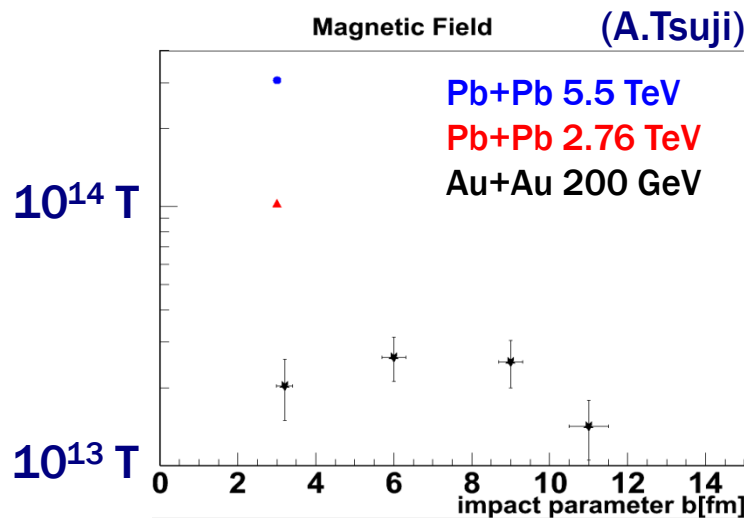
- $10^{14} - 10^{15}$ T at LHC
- ローレンツ収縮のため短寿命 < 1 fm/c
- 臨界磁場 m_e^2/e は数 fm/c 以上持続



衝突関与核子の寄与？



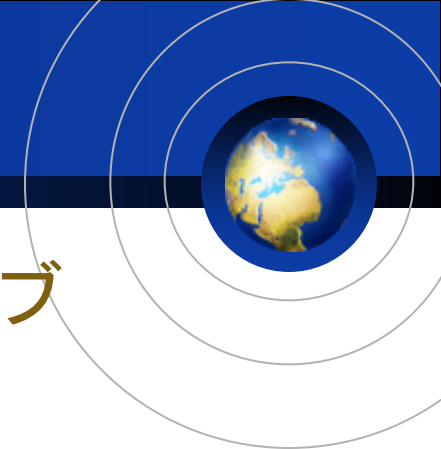
- 完全流体中では長寿命磁場維持？
 - グラウバー模型を用いた“静磁場”近似
 - 有限の原子核阻止能を考慮
 - $10^{13} - 10^{14}$ T at LHC



- 局所速度場を取入れた流体模型の必要



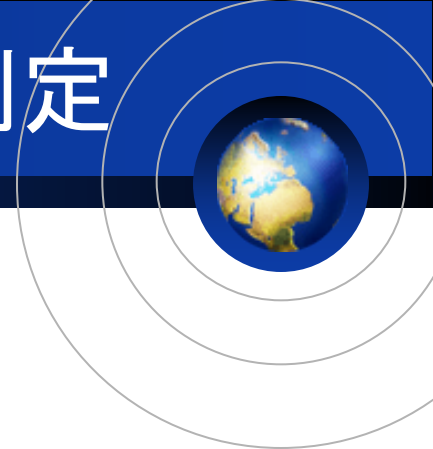
高強度磁場の“直接”検出手段



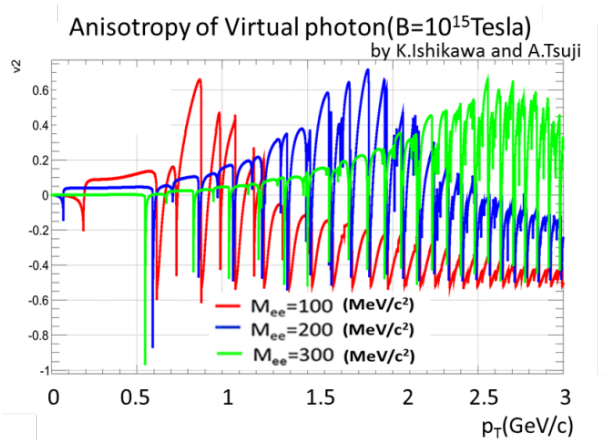
- 必要条件 1: 衝突初期段階起源のプローブ
 - 生成磁場の寿命 $\sim 0.1 \text{ fm}/c$
- 必要条件 2: 電磁的プローブ
- 理想的候補: pQCD 過程からの直接生成 γ/γ^*
- 遅い段階からの γ/γ^* は対照過程として好適
 - e.g. π^0 崩壊光子 / ダリツ崩壊電子対



仮想光子（低質量電子対）偏光測定



- 高強度磁場による偏光の可能性を提唱
 - 実光子偏光は測定困難
 - ハドロン崩壊光子による低い信号／背景雑音比
 - 高エネルギー原子核実験における偏光検出器設置例なし
 - 熱光子探索で有用性を示した仮想光子に着目
- 理論計算による検出実現性の見積



- 偏光度 $o(10^{-1}) \rightarrow$ 検出可能性



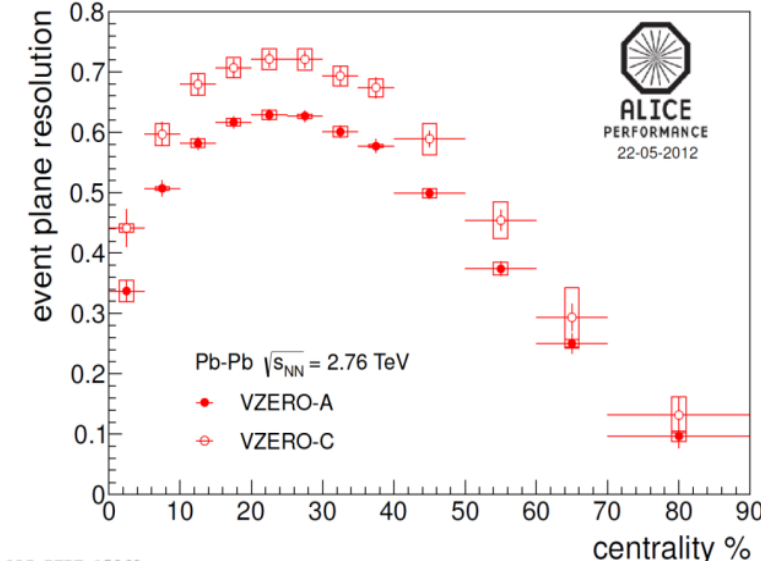
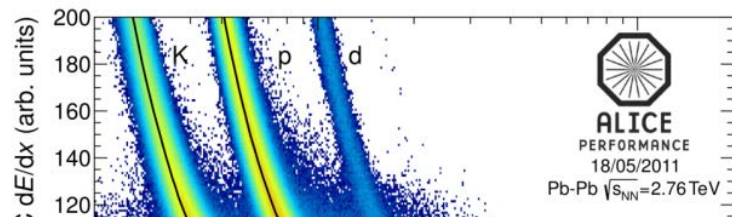
仮想光子偏光測定に用いる検出器群



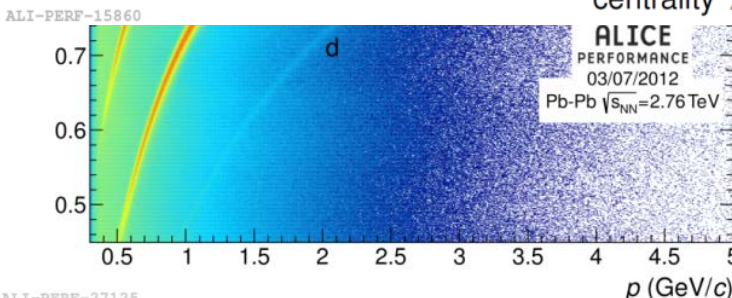
Inner Tracking System
飛跡検出／衝突点測定
(粒子識別)

Time Projection Chamber
飛跡検出／粒子識別

Time Of Flight
粒子識別



VZERO A&C
衝突中心度／反応平面



ALI-PERF-15860

ALI-PERF-27125

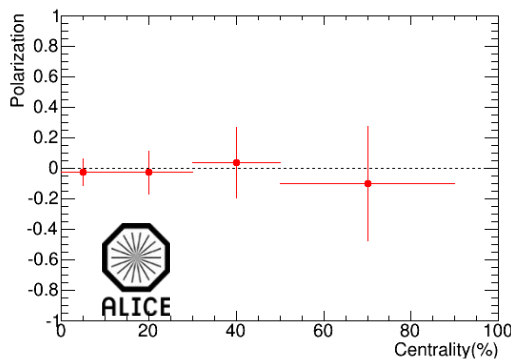


高強度磁場検出に向けた現状

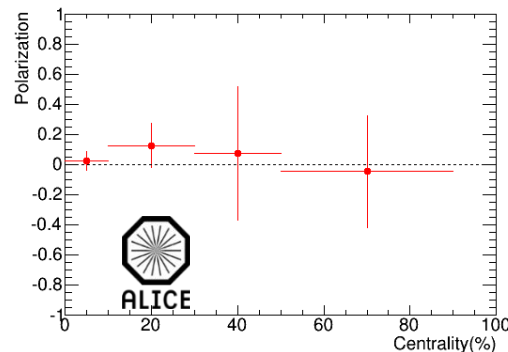


- 偏光が期待される／されない質量領域
 - e.g. 低質量領域ではダリツ崩壊起源仮想光子が支配的

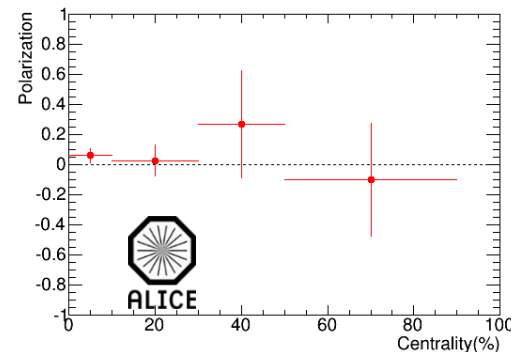
Pb-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV
ALICE work in progress 22/03/2013
EP resolution not corrected



$0 < M_{ee} < 30$ MeV/c²



$120 < M_{ee} < 300$ MeV/c²

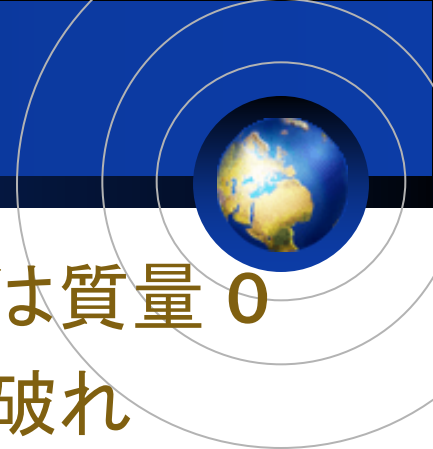


$300 < M_{ee} < 500$ MeV/c²

- 課題: ハドロン起源仮想光子など背景成分の差引
- RHIC-PHENIX 実験, LHC-ALICE 実験で推進中



カイラル対称性と質量発現



- カイラル対称性が成立する世界では粒子は質量 0
- 質量発現の必要条件：カイラル対称性の破れ
 - 注意！ 十分性は全くの別問題；誰が質量を持つのか？
- カイラル対称性の破れの程度指標：クォーク対凝縮
 - クォーク物質の温度, 密度に依存

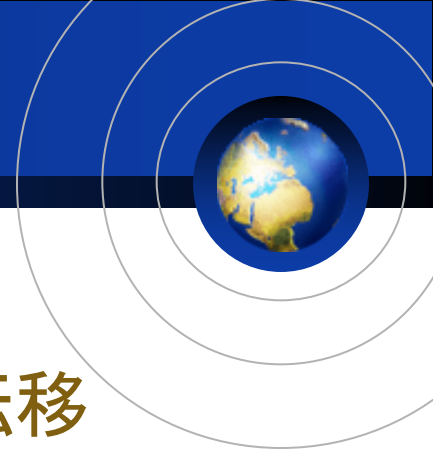


- 超伝導体中の電子対（クーパー対）に対応
 - 南部陽一郎 1961 年
- 質量発現といえばヒッグス機構が有名だが
 - ヒッグス機構も対称性の自発的破れの一つ
 - 南部理論の応用
 - ヒッグス機構による素粒子質量は物質質量の 2% 以下

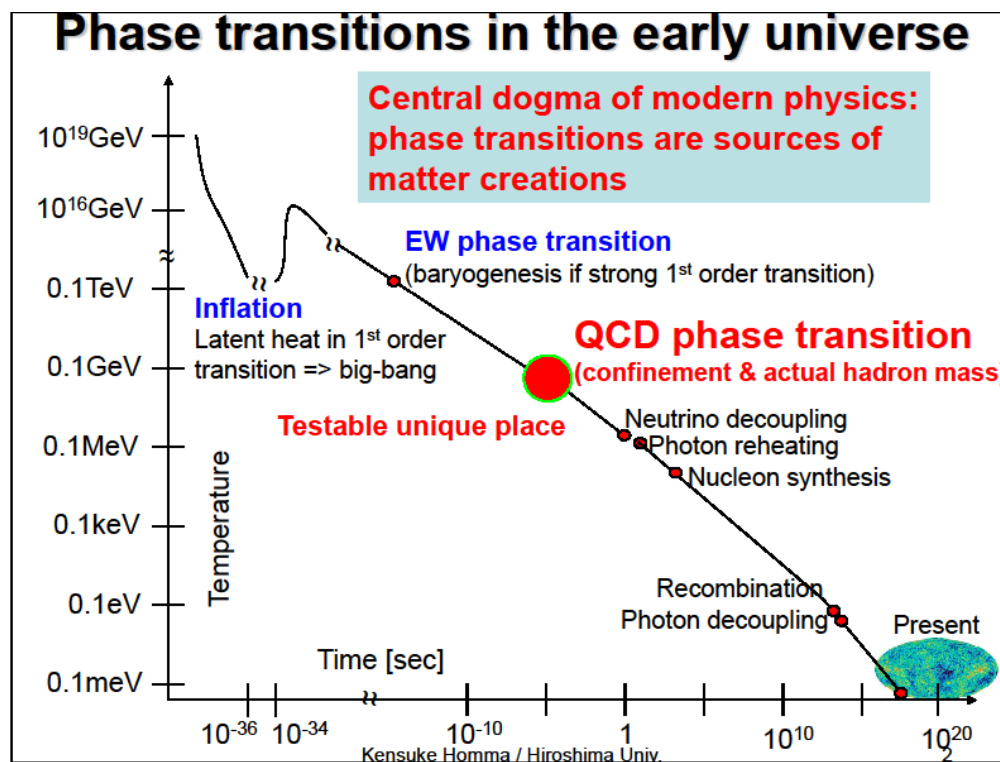
密度



カイラル相転移の特筆すべき意義



- 物質質量発現の本質 (> 98%)
- 極初期宇宙 (~ 10^{-5} 秒) が経験した相転移
- 宇宙の歴史上 (唯一) 実証 (反証) 可能な相転移



カイラル対称性の回復実現



- クォーク閉込からの（再）解放
 - 高温または高クォーク密度
 - $T_c \sim 170 \text{ MeV} \sim 2$ 兆度（太陽表面の 3 億倍, 中心の 10 万倍）
 - 極初期宇宙（ $\sim 10^{-5}$ 秒）, 中性子星, クォーク星, ...
 - クォーク・グルーオン・プラズマ: 高温クォーク物質

クォーク凝縮の消失 = カイラル対称性の回復

- “超伝導” から “常伝導” へ
 - 閉込相転移 \leftrightarrow カイラル相転移 (?)
-

カイラル対称性回復と質量変化探索



- クォークの有効質量低下 = ハドロン質量低下
- 特に軽いベクトル中間子で顕著な影響の予言

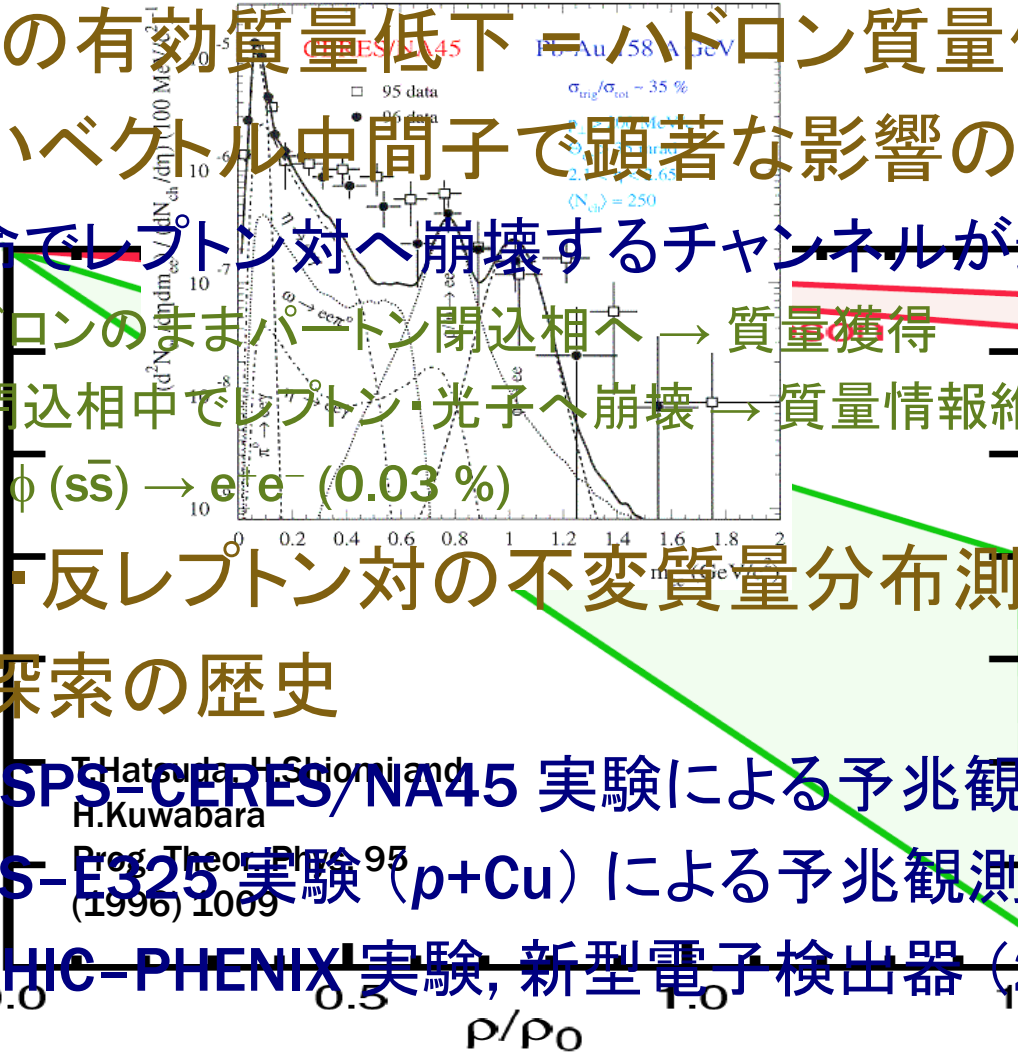
- 短寿命でレプトン対へ崩壊するチャンネルが最適

- ハドロンのままハートン閉込相へ → 質量獲得
- 非閉込相中でレプトン・光子へ崩壊 → 質量情報維持
- e.g. $\phi (s\bar{s}) \rightarrow e^+ e^-$ (0.03 %)

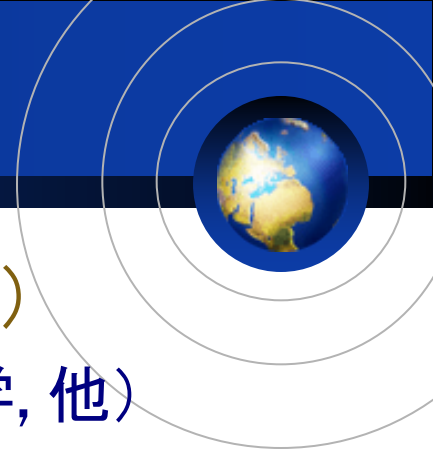
- レプトン・反レプトン対の不変質量分布測定

- 実験的探索の歴史

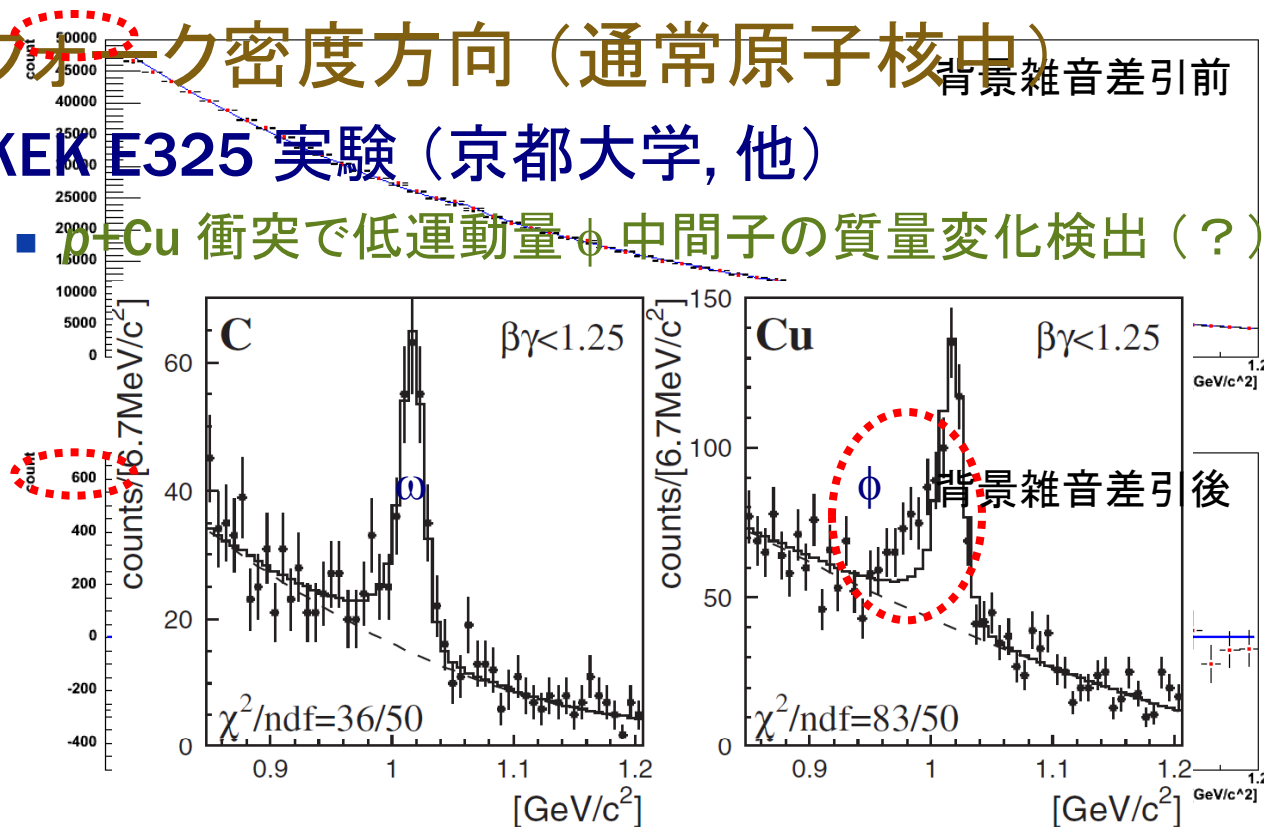
- CERN SPS-CERES/NA45 実験による予兆観測？
- KEK PS-E325 実験 ($p+Cu$) による予兆観測？
- BNL RHIC-PHENIX 実験, 新型電子検出器 (2009 年)



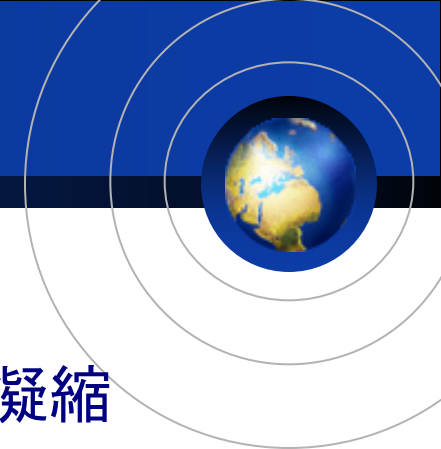
質量変化探索実験



- 高温方向 (クォーク・グルーオン・プラズマ)
 - PHENIX 実験 (広島大学, 東京大学, 筑波大学, 他)
 - Au+Au 衝突で ϕ/ω 中間子の電子対崩壊検出成功
- 高クォーク密度方向 (通常原子核中)
 - KEK E325 実験 (京都大学, 他)
 - p -Cu 衝突で低運動量 ϕ 中間子の質量変化検出 (?)



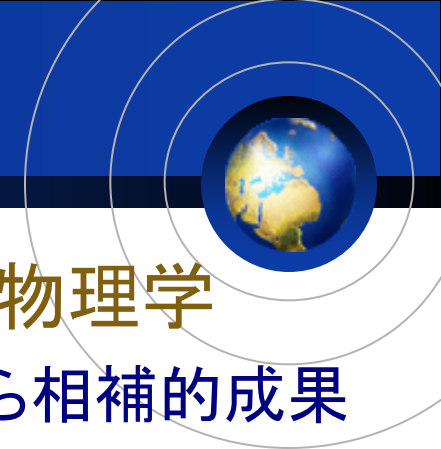
カイラル対称性の自発的破れ



- **カイラル相転移**
 - 物質質量（の大半）の発現機構：クォーク対凝縮
 - 宇宙の歴史上（唯一）実証（または反証）可能な相転移
- **近年の成果：クォークの閉込からの（再）解放**
 - カイラル対称性の（部分的）回復条件は整った
 - クォークの有効質量変化探索進行中
- **南部陽一郎氏の理論の物理的意義の実験的検証**
 - 南部氏が40年以上を経てついに受賞した理由 かも知れない



まとめ (1)



- **高エネルギー原子核衝突 = 実験クォーク物理学**
 - RHIC-PHENIX 実験, LHC-ALICE 実験などから相補的成果
- **多様な物理意義**
 - 強い相互作用が支配する素粒子多体系の挙動と相構造
 - 宇宙開闢後 $\sim 10^{-5}$ 秒間の状態; 宇宙創成シナリオ
 - クォーク閉込に伴うハドロン質量発現機構
- **積年の課題に終止符:**
高温非閉込パートン物質の存在確立
 - 生成粒子集団運動の構成クォーク数スケーリング
 - ジェット／高横運動量粒子のエネルギー損失による抑制
 - 量子色力学の臨界温度予言を超える到達温度



まとめ (2)



- **パートン物質の性質探究へ重点移行中**
 - 強結合 QGP = 低粘性極限 “完全流体”
 - 非閉込クォーク挙動解明へ
 - e.g. エネルギー損失／再分配機構, フレーバ依存性
 - クォークニア温度計
- **未解決課題も**
 - e.g. カイラル対称性回復とハドロン質量起源解明
- **高度化計画／将来計画**
 - LHC/RHIC 加速器高輝度化
 - ALICE 実験高速化 (2019 年頃, 50 倍速)
 - PHENIX 実験先鋭化 (sPHENIX 計画, 2019 年頃)



挿絵出典

- 原子核物理学, 裳華房, 永江知文, 永宮正治
- キッズサイエンティスト <http://kids.kek.jp/>
- ...

