

高エネルギー原子核衝突実験

物理, 歴史, 手法, 展望



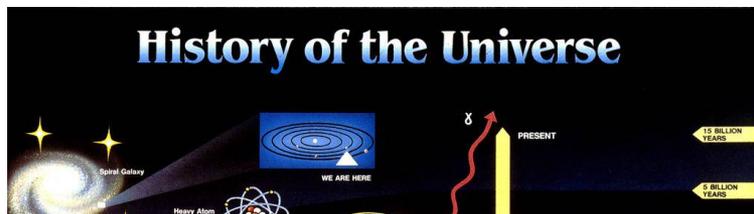
志垣 賢太 ( 広島大学)

チュートリアル研究会

“高エネルギー重イオン衝突の物理：基礎・最先端・課題・展望”

2019年8月19日, 理化学研究所

微小世界の物理 ～ 初期宇宙の物理



138 億年 生命誕生：現在

10 億年 銀河・天体の生成

38 万年 原子の生成

3 分 原子核の生成

10^{-5} 秒 陽子・中性子の生成

10^{-43} 秒 クォークの生成

0.00 秒 宇宙誕生（ビッグバン）



Ouroboros

Eleazar, *Uraltes chymisches Werk*



高エネルギー原子核衝突実験



- (Ultra-)Relativistic Heavy Ion Collisions
- (超) 相対論的重イオン衝突

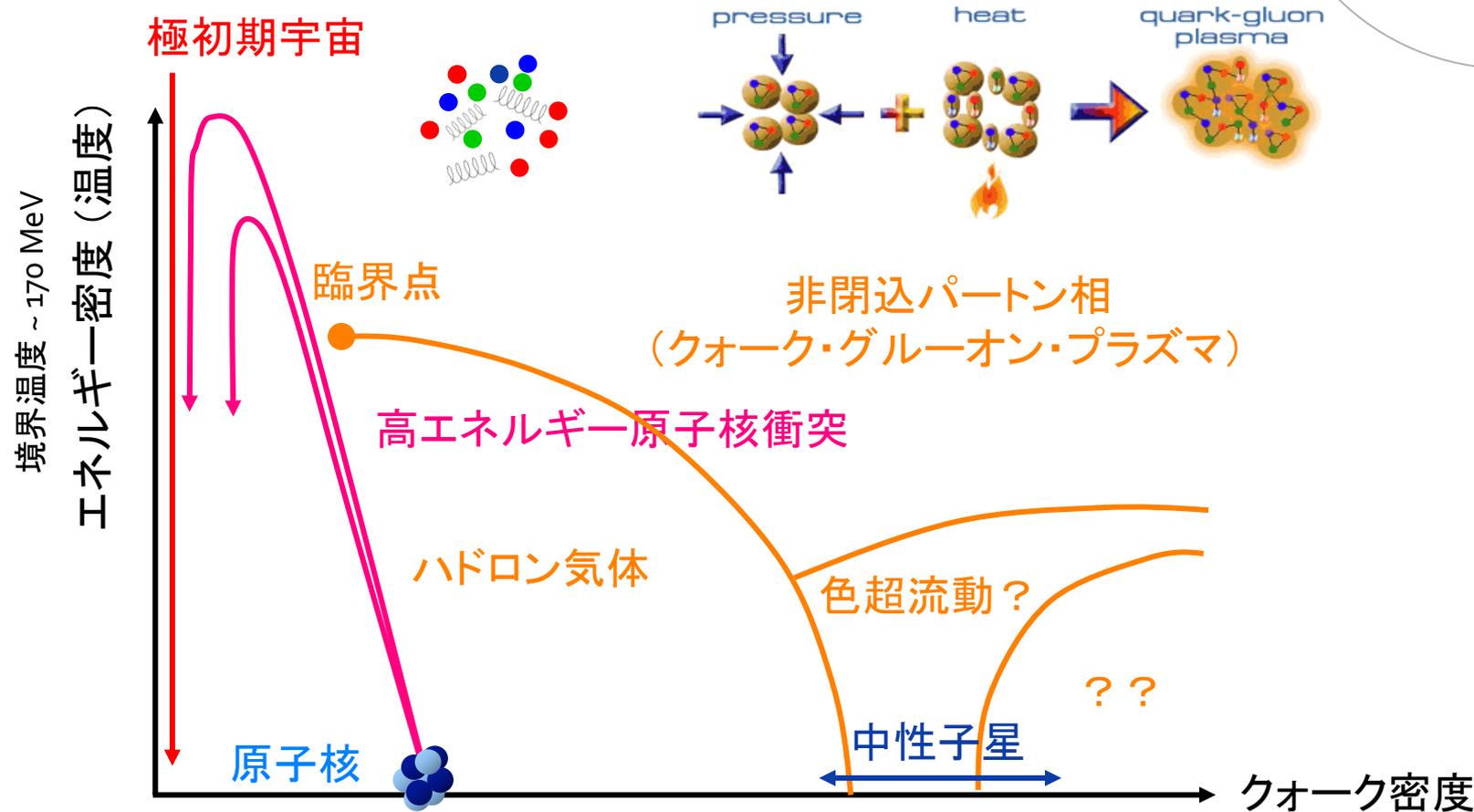
- 原子核：大容積のクォーク（ハドロン）物質
 - 半径 $\sim 1.2 A^{1/3}$ fm
 - 多体系, 熱化
 - *cf.* 電子+陽電子, 陽子+(反)陽子衝突 \rightarrow 素粒子間の素過程
 - 陽子より重い原子核の加速器は稀少
 - 重粒子 (*e.g.* 炭素イオン) 線がん治療
- 高エネルギー密度
 - ハドロン - クォーク相転移



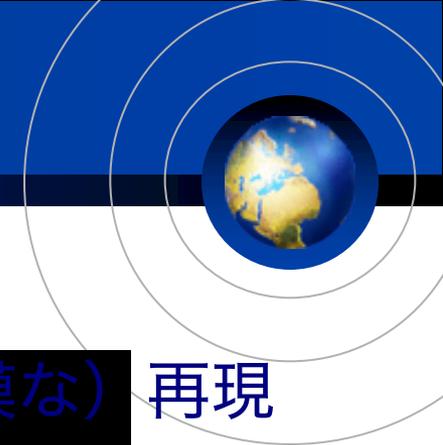
量子色力学相境界を跨ぐ転移



- ビッグバンの $\sim 10 \mu\text{s}$ 後に 1 回だけ経験



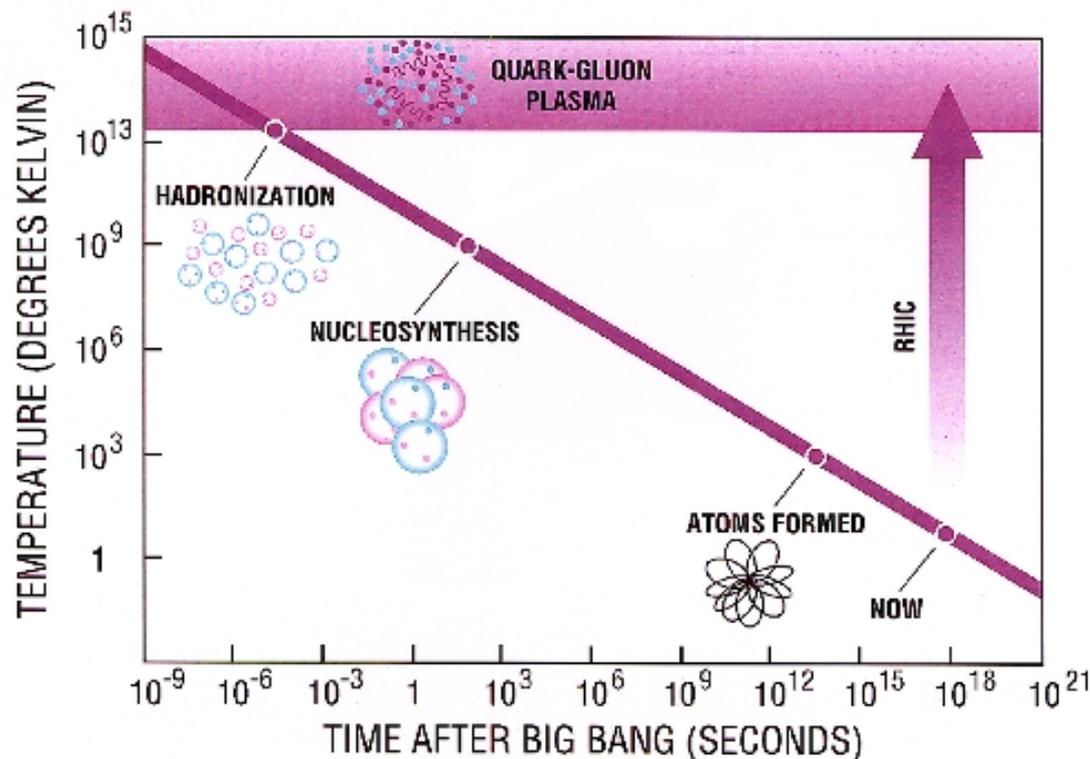
極初期宇宙状態の実験的再現



■ 高エネルギー原子核衝突実験

– “リトルバン” 実験：ビッグバンの（小規模な）再現

■ クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相の探索





■ 先史時代

– Bevalac (1971–)

- (発展課題：永宮さんに訊いてみよう)

■ 固定標的実験

– AGS – E802/859/866, E810/891, E814/877

– SPS – NA34, NA35/49, NA38/50/51/60,
NA44, NA45, WA80/98, WA97/NA57

■ 衝突型実験

– RHIC – BRAHMS, PHENIX, PHOBOS, STAR

– LHC – ALICE, ATLAS, CMS



日本グループ中興の祖：PHENIX



- Pioneering High Energy Nucl. Inter. eXp.
 - “開拓的高エネルギー原子核反応実験”
- 日米を中心に 14 か国, 75 研究機関, 約 500 名
 - 初代実験代表：永宮正治, 現実験代表：秋葉康之
- 2000 年開始, 2016 年データ収集完了



2019/8/19

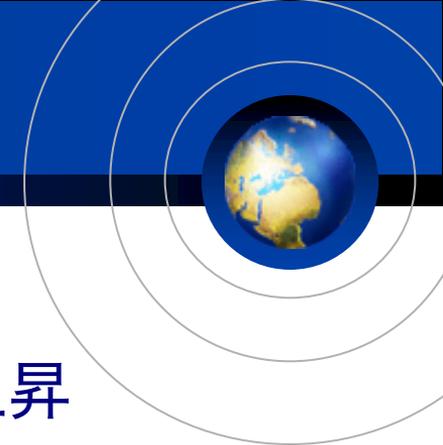
高エネルギー原子核衝突実験- 志垣賢大

6/26

広島大学 極限宇宙研究拠点
CORE+U
Core of Research for the Energetic Universe
HIROSHIMA UNIVERSITY

Quark
Physics
Laboratory
Hiroshima University, Japan

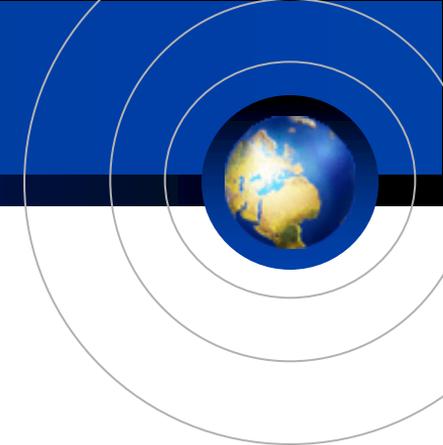
(限られた) 実験パラメータ



- 衝突エネルギー (ビームエネルギー)
 - 時代とともに (現在も) 技術進展により上昇
- 原子核の大きさ (質量数)
 - 時代とともに (1990 年代まで) 技術進展により増加
 - $A \sim 200$ が限界
- 衝突幾何 (中心度)
 - 原子核の大きさに類似の効果
 - 正面衝突 (衝突径数 ~ 0 fm) が基本限界
 - 衝突の内部構造 (?) 選択は可能
- n 体衝突
 - $n > 2$ は現状で実現の見通しなし



衝突エネルギー



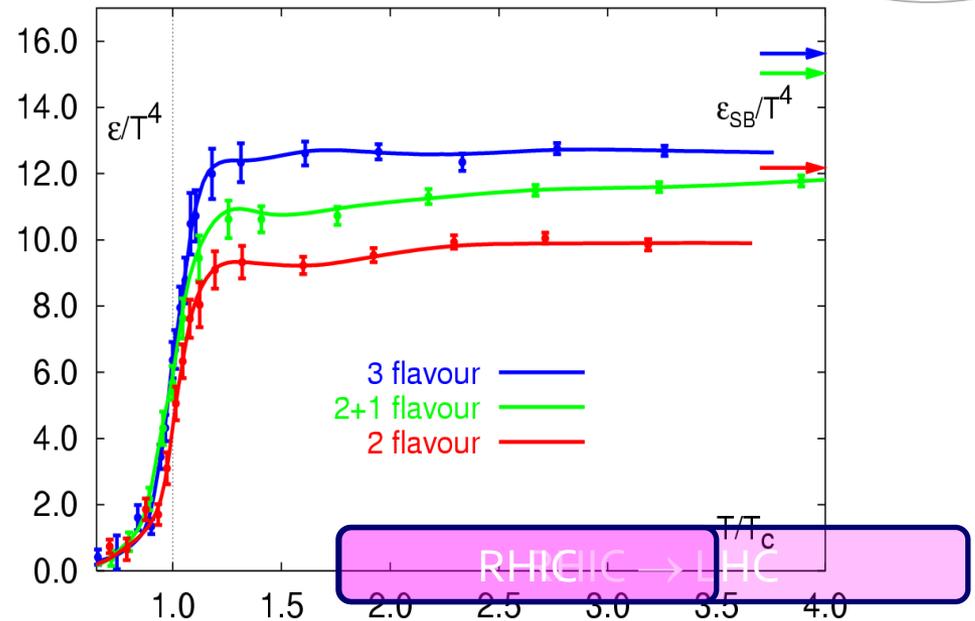
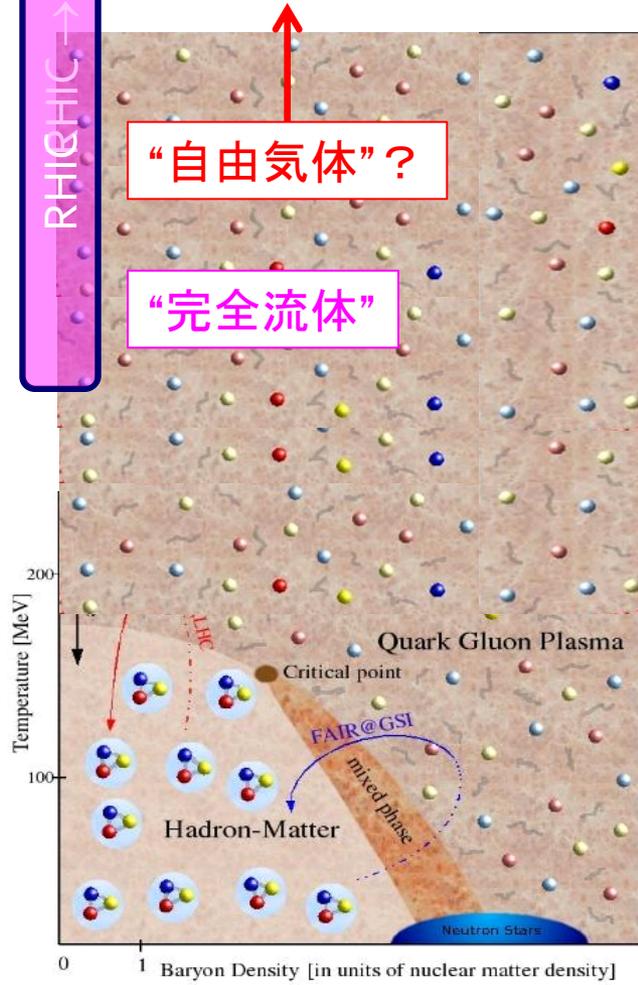
- 重心系エネルギー（内部エネルギー）
 - 固定標的と衝突型を統一的に扱える
- 核子対あたり（核子+核子衝突の重合せ）
 - $\sqrt{s_{NN}}$ （陽子+陽子衝突では \sqrt{s} ）と表記
- 固定標的 $\propto \sqrt{\text{ビームエネルギー}}$
 - AGS ~ 5 GeV, SPS ~ 18 GeV
- 衝突型 $\propto \text{ビームエネルギー}$
 - RHIC ~ 200 GeV, LHC $\sim 5,000$ GeV
- QGP 生成には $\sqrt{s_{NN}} \sim 10$ GeV くらい必要
 - AGS では不足, SPS でぎりぎり?, RHIC は充分



RHIC-PHENIX : 積年の探索に終止符



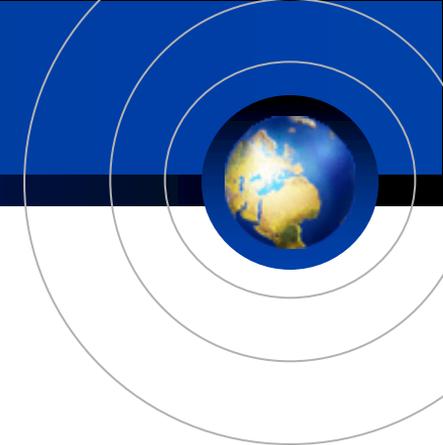
RHIC → LHC



F. Karsch,
Lect. Notes Phys. 583 (2002) 209



測定対象 (“プローブ”, “探針”)



■ ハドロン

- 荷電粒子, 中性粒子
- ジェット

■ レプトン

- 電子, μ 粒子

■ 光子

■ 特定の崩壊粒子を用いた親粒子測定

- π^0 中間子 \Leftrightarrow 光子対
- 仮想光子 \Leftrightarrow レプトン対
- 重フレーバ (重クォーク) を含むハドロン \Leftrightarrow レプトン



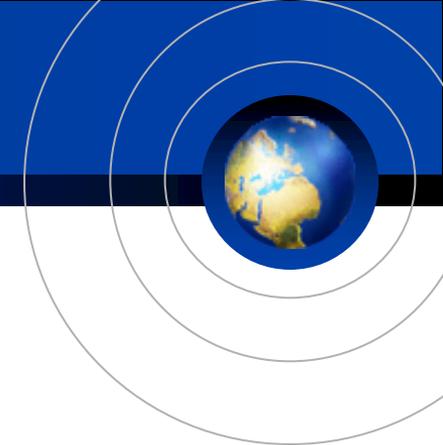
荷電ハドロン測定



- 飛跡測定
 - MWPC, ドリフトチェンバ, パッドチェンバ, MRPC, ...
- 運動量測定
 - 磁気スペクトロメータ
- 粒子識別
 - 既知の質量で判別
 - 飛行時間 (ToF), エネルギー損失 ($-dE/dx$)
- 短寿命の場合は崩壊の識別, 再構成, 補正
- 利点: 高収量 (特殊なハドロンを除く), 高統計
- 難点: 終状態で強い相互作用の擾乱



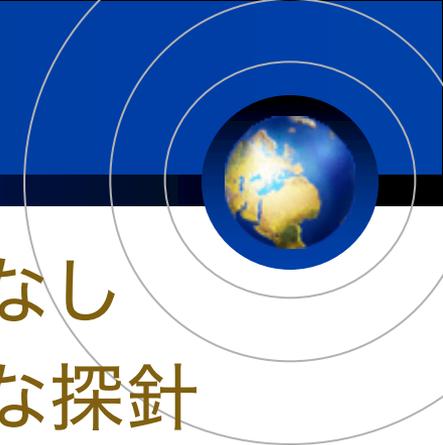
荷電レプトン測定



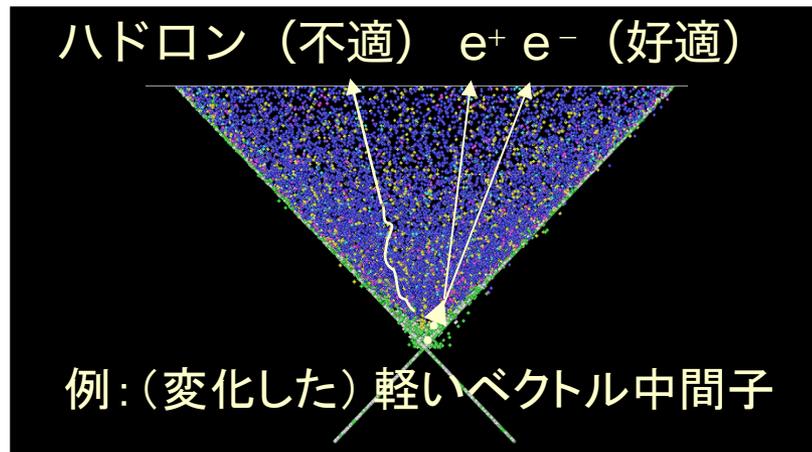
- 飛跡測定
- 運動量測定
- 粒子識別 (レプトン : ハドロン ~ 1 : 100)
 - 電子 : 軽い (511 keV) ~ ほぼ光速 ($\beta \sim 1$)
 - チェレンコフ検出器
 - $-dE/dx$
 - μ 粒子 : 高い物質透過力 (1 GeV/c で鉄 1 m)
 - ハドロン吸収体の下流に飛跡検出器
- 技術的困難を乗り越えた先にある原理的困難
 - 電子 : π^0 中間子などのダリツ崩壊電子
 - μ 粒子 : 透過力の比較的弱い低運動量 μ 粒子



レプトン（電子, μ 粒子）測定！



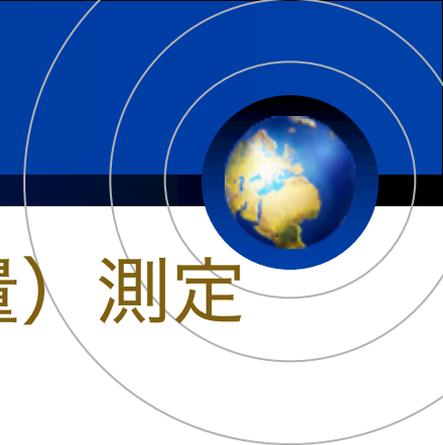
- 終状態ハドロン相の強い力による擾乱なし
- 衝突初期の情報を伝える貴重かつ稀少な探針



- 志垣の積年の研究課題
 - 1995 - 2017 頃 PHENIX 電子対測定
 - 2011 - 2016 頃 ALICE 電子対測定
 - 2014 - 現在 ALICE μ 粒子対測定



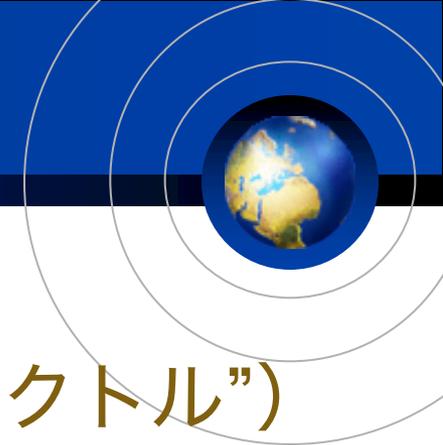
光子測定



- 到達位置（方向），エネルギー（運動量）測定
 - 電磁シャワー（電子対生成+制動放射）
 - 電磁カロリメータ（ \leftrightarrow ハドロンカロリメータ）
 - 二光子分解能
- 粒子識別
 - 荷電粒子飛跡との非マッチング
 - 荷電粒子除去用検出器（薄いシンチレータなど）
- 外部転換光子, 内部転換（仮想）光子
 - $\gamma \rightarrow e^+e^-/\mu^+\mu^-$, $\gamma^* \rightarrow e^+e^-/\mu^+\mu^-$
 - 荷電粒子測定 + 電子/ μ 粒子識別 + 不変質量再構成



物理に繋がる測定量



- 生成粒子数／エネルギー（密度）
- （横）運動量／エネルギー分布（“スペクトル”）
- 量子相関（HBT 相関）
- 集団運動（“フロー”，“ V_n ”）
- ゆらぎ

- 特定の物理背景を持つ粒子
 - 重フレーバ（重クォーク）を含む粒子
 - クォークニア
 - 熱輻射（仮想）光子



衝突エネルギーと主要な探針の変遷



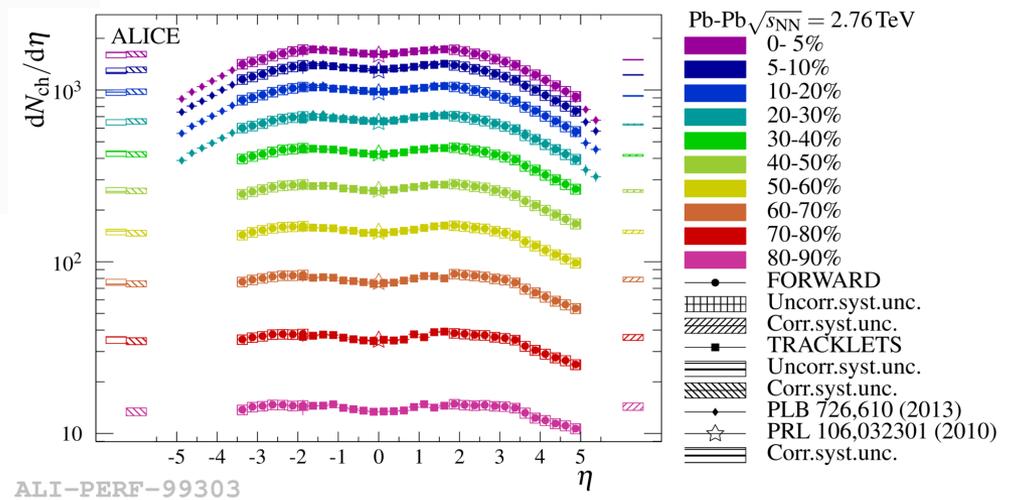
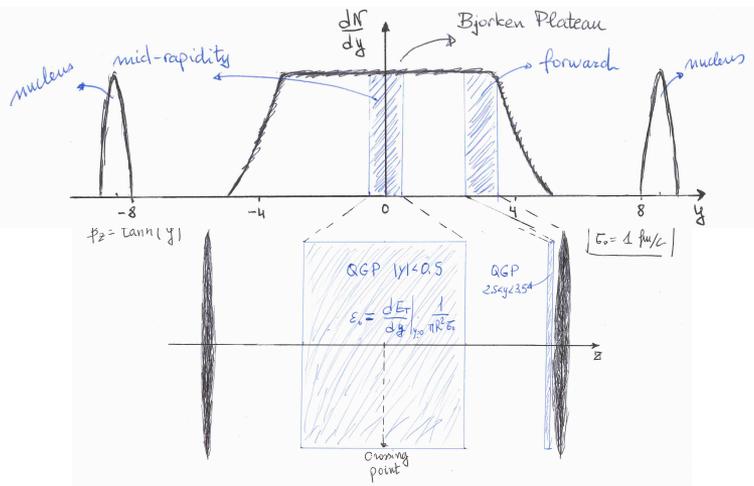
- AGS
 - ハドロン測定により衝突の境界条件確立
- SPS
 - レプトン測定で興味深い発見
 - 直接 (QCD) 光子測定に成功?
- RHIC
 - レプトン, 光子の華々しい成果
 - ジェット: ハドロン測定の新機軸
- LHC
 - ジェット, 重フレーバの一層優位性
 - (μ 粒子測定の新展開可能性)



LHC における μ 粒子測定の新場面



- 中央／前方領域：解放クォーク相の異なる領域
 - QCD 相図の探査



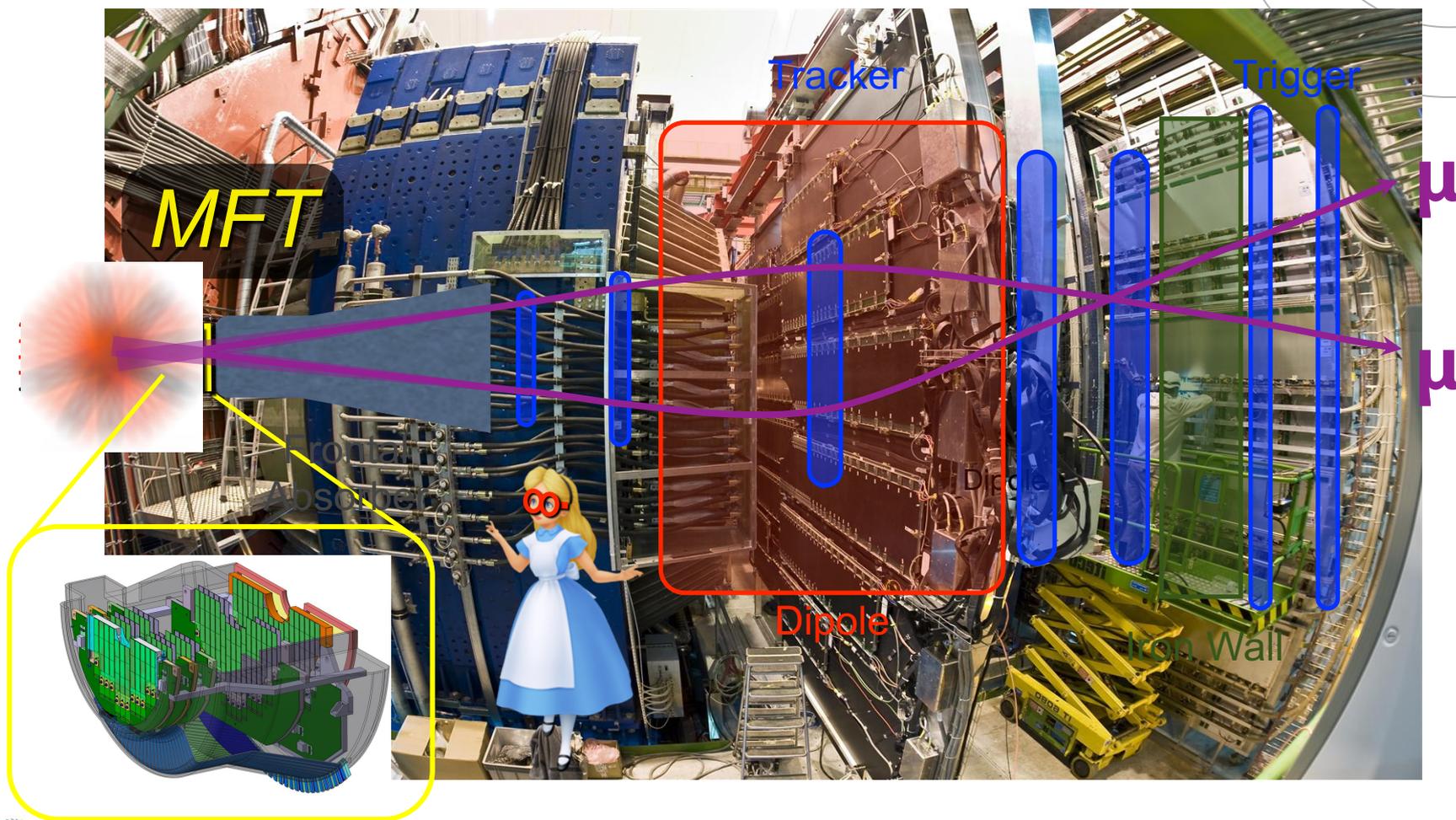
- LHC エネルギーにおける “新領域” の μ 粒子測定
 - 物理的には興味深い “中央” が高エネルギーで拡大
 - 技術的には利点の多い μ 粒子測定に好適な “前方”



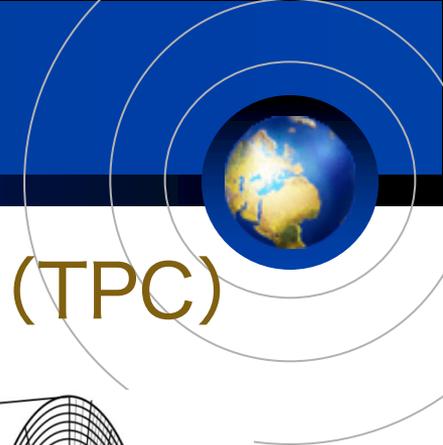
Muon Forward Tracker (2021-)



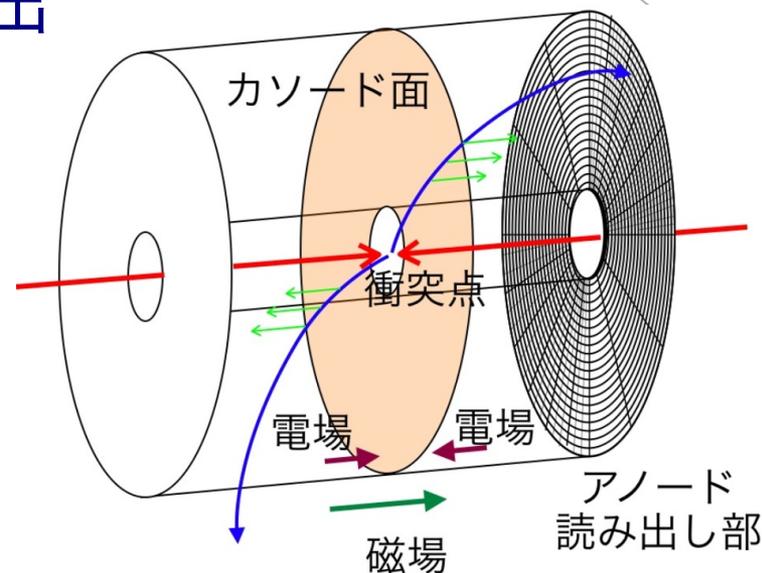
- μ 粒子生成点と μ 粒子対不変質量の分解能向上



検出器技術の進歩 (1)

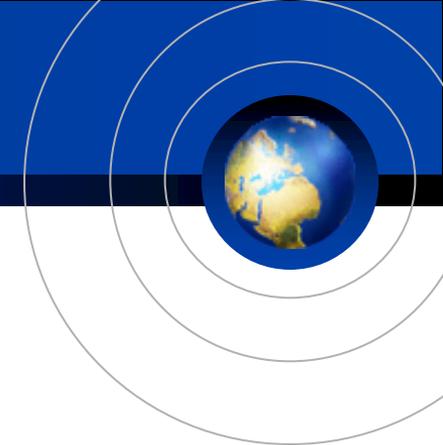


- タイム・プロジェクション・チェンバ (TPC)
 - 3次元, 高多重度飛跡検出



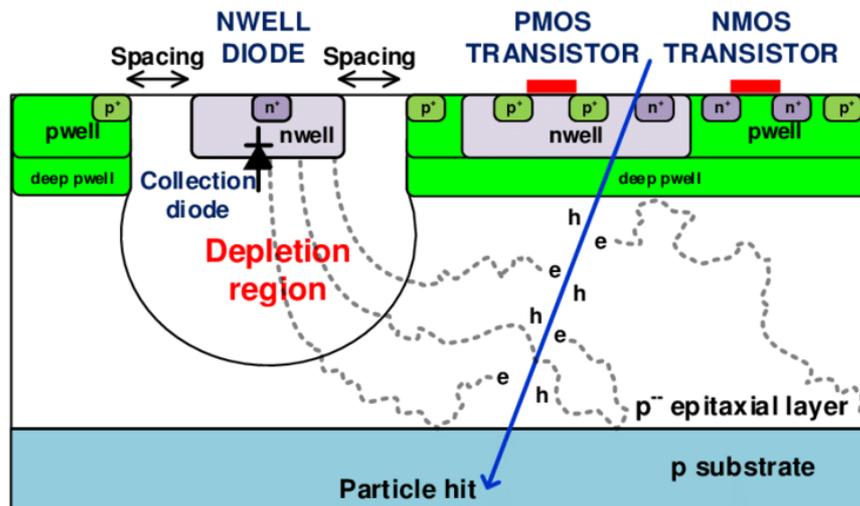
- SLAC-PEP4 (~1982)
- AGS-E866, SPS-NA45 (後期)
- 衝突型実験の一典型: RHIC-STAR, LHC-ALICE
- (ほぼ唯一の) 難点: ドリフト時間のため遅い
 - ALICE 第3期以降は事象トリガを掛けず常時読出

検出器技術の進歩 (2)



■ 半導体 (Si) 飛跡検出器

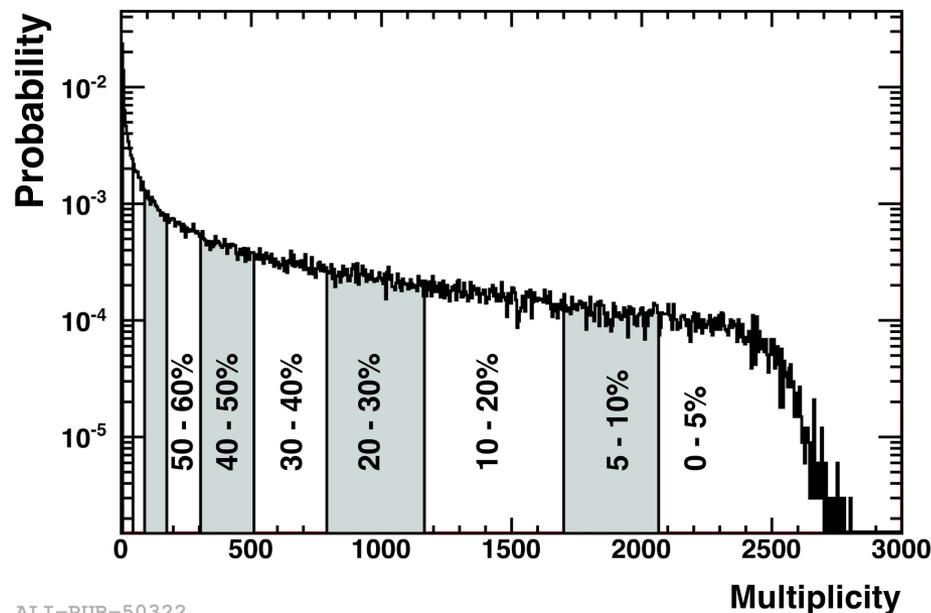
- 高位置分解能 $\sim 10 \mu\text{m}$
- 低物質質量, 高速
- 読出回路も含めて高価格が課題 \rightarrow 急速な安価化
 - モノリシック検出器 (MAPS) (ALICE 第 3 期から導入)
 - ALICE 第 5 期以降に総半導体検出器の構想



高品質データが拓く新規物理機会



- 高精度高統計 → 精密測定
 - 稀事象, 稀粒子
- 陽子+陽子, 陽子+原子核衝突の中の“特殊事象”
 - 近年の注目：高粒子多重度事象
 - 高統計データによる強度の事象選択 (< 0.1%)



ALI-PUB-50322

高エネルギー原子核衝突実験- 志垣賢太

Multiplicity



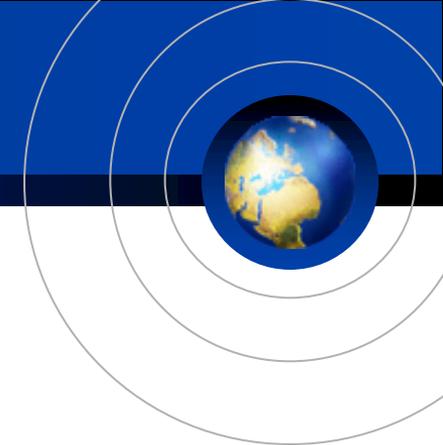
2019/8/19

21/26

広島大学 極限宇宙研究拠点
CORE+U
Core of Research for the Energetic Universe
HIROSHIMA UNIVERSITY

Quark
Physics
Laboratory
Hiroshima University, Japan

今後（～10年間）の方向性

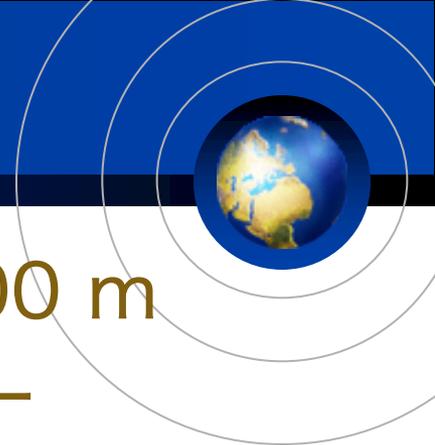


- ✓ 解放クォーク相の探索
- ✓ 解放クォーク挙動
- QGP 生成条件, 機構の解明
- カイラル対称性回復現象探索
- 量子色力学相図, 臨界現象探究

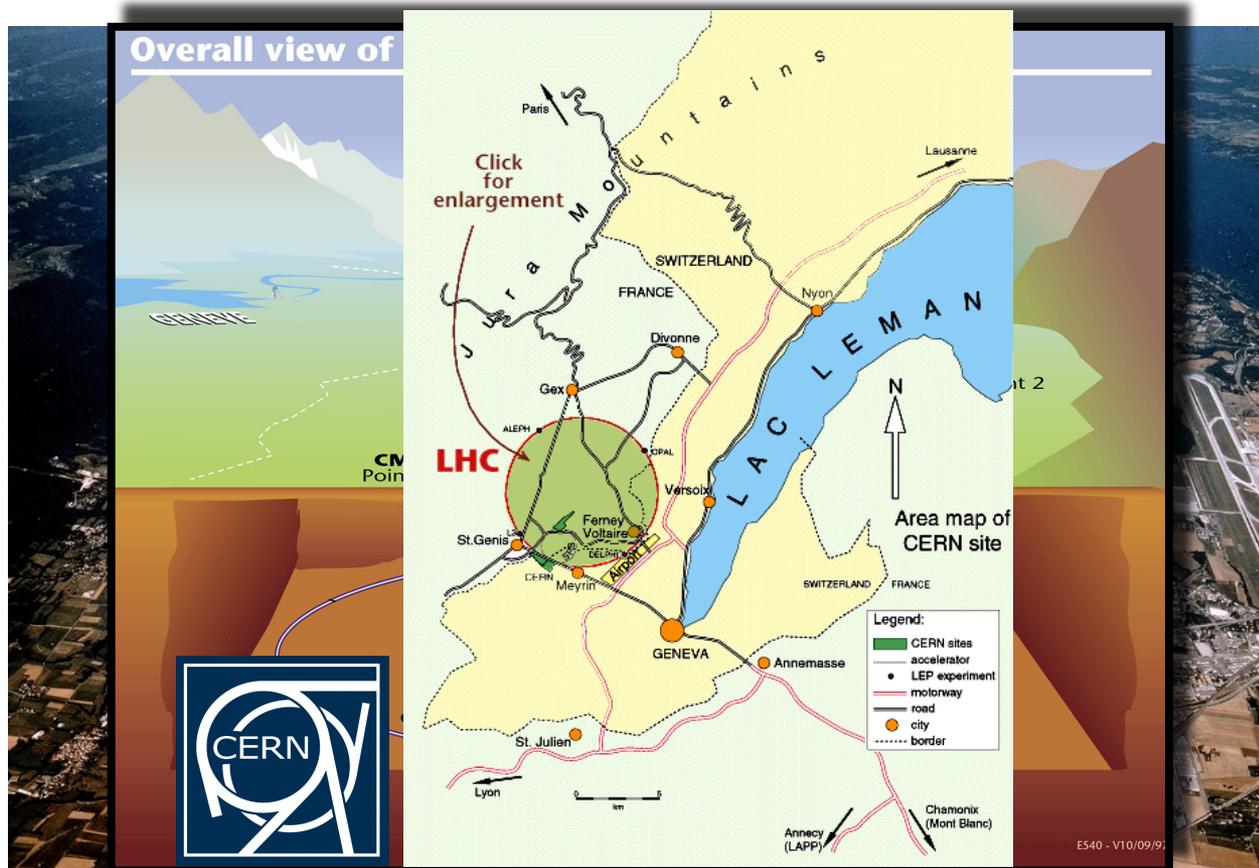
- 続々と現れる新奇的な物理
 - e.g. 宇宙最高強度磁場 ($\sim 10^{15}$ T) による新奇現象
 - QED 非線形効果?
 - カイラル磁気効果?
 - 量子色力学臨界温度への影響?



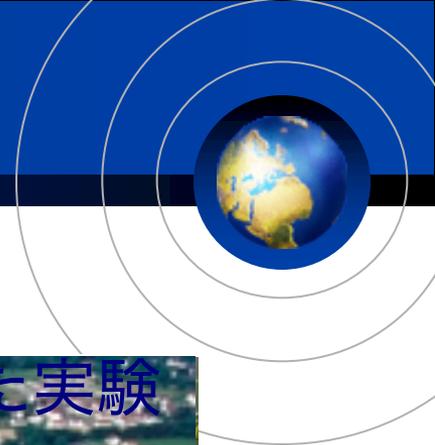
Large Hadron Collider



- 周長 27 km (世界最大), 地下 50-100 m
- RHIC 加速器の 28 倍の衝突エネルギー



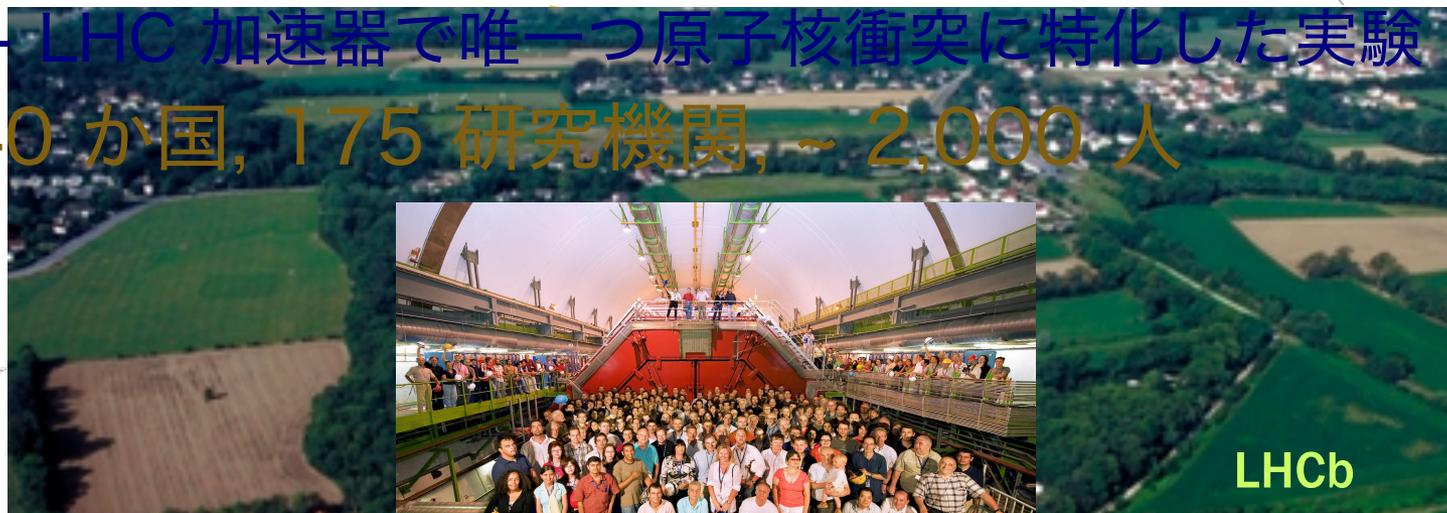
LHC 加速器 ALICE 実験



■ A Large Ion Collider Experiment

— LHC 加速器で唯一つ原子核衝突に特化した実験

■ 40 か国, 175 研究機関, ~ 2,000 人



2019/8/19

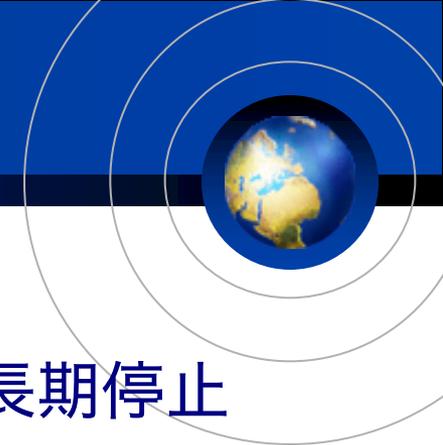
高エネルギー原子核衝突実験- 志垣賢大

24/26

広島大学 極限宇宙研究拠点
CORE-U
Core of Research for the Energetic Universe
HIROSHIMA UNIVERSITY

Quark
Physics
Laboratory
Hiroshima University, Japan

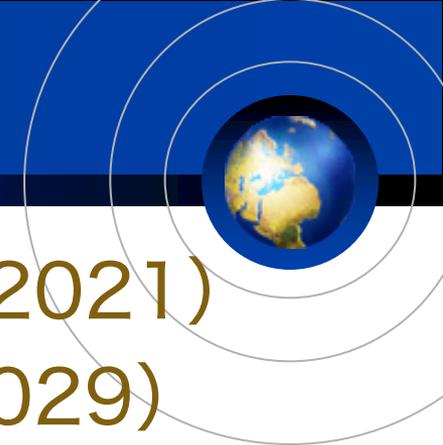
ALICE 実験の段階的物理戦略



- 完了：ジェット, 重フレーバ
 - ✓ 2-3 倍高速化, 新検出器； 2013-2014 長期停止
- 進行中：低中横運動量現象 (ALICE の独壇場)
 - 100 倍高速化, 新検出器； 2019-2020 長期停止
 - 高度化：衝突点近傍飛跡検出器
 - 主飛跡検出器 (東京大学)
 - 共通読出系 (長崎総合科学大学)
 - データ処理 (原研 + …)
 - 新規： 前方 μ 粒子飛跡検出器 (広島大学 + 奈良, 長崎)
- 未定：前方物理？
 - 新検出器； 2024-2026 長期停止？
 - 新規： 前方光子検出器 (筑波大学 + 奈良, 広島)



近未来から更なる将来計画まで



- RHIC-STAR エネルギー走査 (2019-2021)
 - LHC-ALICE 第 3-4 期運転 (2021-2029)
 - RHIC-sPHENIX (2022-2026)
 - FAIR-CBM (2025-)
 - J-PARC-HI (議論中)
 - FCC-HI (議論中)
- 様々な楽しい物理が待っています！

