

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244055

研究課題名(和文) LHC鉛原子核衝突ALICE実験による横運動量抑制現象とQGP熱統計力学状態

研究課題名(英文) Study of pT suppression and thermal properties of QGP with the ALICE experiment in Pb-Pb collisions at LHC

研究代表者

杉立 徹 (SUGITATE, TORU)

広島大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80144806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 29,400,000円

研究成果の概要(和文)：鉛+鉛原子核、陽子+鉛原子核、陽子+陽子衝突のすべてのLHC衝突系で高品位高統計データを取得し、第1期衝突実験期間を完遂した。中性粒子横運動量分布の物理解析を迅速に進め、新たなLHC領域における中性パイ中間子の高横運動抑制現象を明らかにした。単光子エネルギー分布による熱統計状態の解明にも大きな進展を遂げ、鉛+鉛原子核中心衝突事象において摂動的QCD光子分布に重畳する有意な熱輻射単光子成分を認めるに至った。高性能PHOS検出器の実力を発揮した瞬間でもある。LHC鉛原子核衝突の創るクォーク多体系はHagedorn温度を遙かに超える約300MeV、即ち3.5兆度に熱せられた完全量子流体のようである。

研究成果の概要(英文)：We have accumulated high-qualified experimental data in lead-on-lead and proton-on-lead collisions as well as in high-statistic pp reactions, and successfully completed the RUN-1 program at LHC. Studies of high pT suppression with identified neutral pions measured by our PHOS detector have been preceded first, and the results in the new domain have been published. In another subject revealing thermo-statistical properties of QGP created at the LHC, we have attained a remarkable progress observing a significant amount of thermal-radiation-like-photons piled up on a perturbative QCD single photon spectrum in the central lead-on-lead collisions. We consider this indicates extraordinary ability of our PHOS detector built for precise photon physics. The matter created at the LHC seems to be a perfect quantum fluid heated beyond the Hagedorn temperature up to around 300 MeV or 3.5 trillion Celsius degrees.

研究分野：数物系科学

キーワード：クォーク物質 フォトン物理 ALICE実験 クォークグルーオンプラズマ QGP

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー原子核衝突実験による高温クォーク多体系の研究は、米国 RHIC 加速器実験に於ける私たちのクォーク強相関物性と完全流体性の発見【H23年6月パリティ、完全流体を探して】により大きな発展を遂げた。わが国研究組織は欧州 CERN 研究所最新鋭 LHC 加速器に於いてクォーク物性の全容解明に向けた挑戦を続ける。本代表は国際共同研究 ALICE 実験に高性能光子検出器 PHOS を建設導入し、未踏高温のクォーク多体系を探る緻密なフォトン物理を提案し推進してきた【図1】。ALICE 実験は 2009 年 11 月に初めての陽子+陽子衝突を観測し、翌年 3 月には史上最高衝突エネルギー 7TeV に達した。同年 11 月から鉛原子核ビームに切り替え、RHIC 加速器より 1 桁衝突エネルギーを高めた核子対あたり 2.76TeV にて初めての鉛+鉛原子核衝突実験を始動させた。先行研究で構築したわが国研究組織の責任ある研究活動を継承し、LHC 加速器第 1 期衝突実験期間を包括し期待される物理成果を最大限導出するとともに、高輝度衝突実験に向けた検出器改良を進める研究計画が不可欠であった。

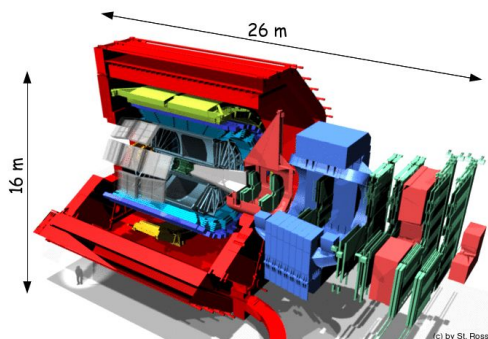


図 1. ALICE 実験装置全体図

2. 研究の目的

私たちのアイデアと技術を活かして共同建設し、本代表が准責任者を務める高性能光子検出器 PHOS を主要測定器とし、米国 RHIC 加速器実験で発見したクォーク物質の高横運動量抑制現象を新たな超高温領域で検証する。2 光子崩壊する中性 (及び) 中間子を同定し、その運動量分布及び生成多重度から到達エネルギー密度及びハドロン析出温度などのクォーク物質生成特性、更に運動量分布の中心衝突度依存性からクォーク物質のエネルギー阻止能を明らかにする。次にハドロン光子成分を差し引いた直接光子エネルギー分布を測定し、摂動的 QCD 過程からの光子とクォーク物質からの熱輻射光子成分に分離し、熱輻射光子のエネルギー分布から熱統計力学状態を特定し、高温クォーク物質の特性解明競争をリードする。これまで全くの異分野と捉えてきた極低温フェルミ/ボーズガスと本研究

対象との関連性も垣間見え、強相関物理を記述するホログラフィー双対性に基づく AdS/CFT 理論の新展開と併せて大きな注目を集める。従って、本研究は衝突エネルギーの単なる増強ではなく、より理想的なクォーク量子多体系の物性を極めることにあり、真反対の超冷却原子分子の創る量子多体系物性と相互理解を遂げながら、最新の純粋理論物理学の深化と進展とともに新たな学問分野を切り拓く先駆的取り組みも重要な観点である。

3. 研究の方法

PHOS 検出器はエネルギー分解能及び 2 粒子分離分解能ともに優れ、他の LHC 実験を寄せ付けない超精密な GeV 領域フォトン検出器である。この特徴を最大限発揮させるために、1 万本以上の検出素子を正確にエネルギー較正する必要がある。先行研究でパイ中間子不変質量分解能として $m/m=7\%$ を達していたが、更なる向上が期待される。LHC 加速器は周回バンチ数を増やししながら次第に陽子衝突輝度を高める。それに伴い、高統計・高品位衝突データによる検出器較正を継続する。

陽子衝突データは原子核衝突により創成したクォーク物質の物性を引き出すための基準となる物理測定量の分布を与えるため、原子核衝突データに増して高品質で高統計な測定が不可欠である。2011 年及び 2012 年の陽子衝突実験から 10^9 事象 (1-2PB/年) を収集する。鉛原子核衝突実験は各年 11 月から約 1 ヶ月予定し、 10^8 事象 (1-2PB/年) を収集記録する。連携研究者/院生と協力しながら中性 中間子生成の先陣を切った物理解析を推進する。RHIC 実験の華々しい成果をもたらせた測定を高精度で迅速に検証することに加えて、RHIC 実験未踏の高横運動量領域を探索できることに重要な意義がある。

PHOS 読出高速化開発を進める。現在は 32ch の検出素子出力を数値化する読出回路基板 (FEC) を 16bits-GTL バスで連結し、バス上に載せた読出制御回路 (RCU) で 14 枚、448ch の FEC データを読み出し、データ収集機能 (DCS) へ転送している。最高読出速度は 860Hz である。5-10 年以内の高輝度衝突実験に備え、検出素子出力を数値化する初段回路 (FEE) からデータ集積装置へ転送する手法を現行の GTL バス方式から高速 point-to-point 転送に変更し、読出速度を 50 倍高速化する。本代表が中心となり、CERN 研究所 RD51 プロジェクトが開発する最新の拡張型読出技術 (SRU=Scalable Readout Unit) の評価検証を行い、本研究期間内に PHOS 検出器高度化計画を纏める。

本代表が率いる日本研究組織は ALICE 実験組織と深い相互理解と強い信頼関係を築いて

いる。本代表は PHOS 検出器准責任者及び ALICE 実験技術審査部会メンバーを務め、大型研究組織の中でしっかりした存在感と発言力を確保している。本研究遂行のもと、中堅研究者は物理解析に近い役割を獲得し、大型国際共同研究組織における発言力と主導力を強化する。

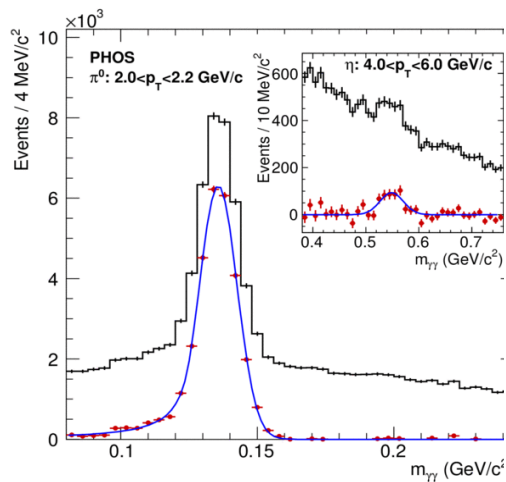


図 2. 中性 中間子不変質量分布

4. 研究成果

LHC第1期衝突実験期間を完遂し、高品位高統計データ収集に成功した。PHOS検出器はパイ中間子に対して $m/m=3.0\%$ [図2] を達成し史上最高性能を証した。核子対当たり2.8TeVの鉛原子核衝突に於ける中性中間子の横運動量抑制現象 [図3, 4] を明らかにし論文発表した。原子核衝突から放射された単光子エネルギー分布の測定にも初めて成功し公表論文に向けて点検中である。更にPHOSを含む複数検出器を組み合わせた測定及び解析も順調に進み、多数のALICE実験公表論文を輩出した。本代表はこれらの成果を纏めて一般向け科学雑誌パリティ (2012年1月丸善出版) に【LHC原子核衝突実験:クォーク物質を探る】を執筆するとともに、ALICE実験専用の日本語HP (<http://alice-j.org/>) を立ち上げた。

ALICE実験は5-10年先を見据えて、第2期実験期間終了時 (LS2=2018年頃) に実験装置の大幅増強を実施する高度化案策定を指示していた。当初計画に沿って本代表を中心にPHOS検出器高度化の検討を進め、2011年10月14日付けで検出器増強部会に提出し受理された。本代表は新規導入するSRU読出装置を国内導入し、動作確認及び読出速度限界テストを継続した。

ALICE実験技術部会は2012年11月、LHC衝突輝度増強が予想以上のテンポで進んでいることに留意し、同時に、競合するATLAS/CMSと第2期衝突実験 (2015年開始) に於いてデータ量の面で不利とならないよう、PHOSを含む

中央検出器群のデータ読出高速化を第2期実験開始前に達成するよう要請した。想定外の事態ではあるが、希少事象なフォトン物理を追求する私たちにとって画期的な判断であり、本研究計画で達成した高度化案策定が正しい方向に導いたと理解する。

ALICE実験高速化を実現するため本研究計画最終年度まで寸断することなくPHOS高度化計画を前倒し実施することとし、機器量産及び実装までを含む高度化プロジェクトを主導した。しかし、読出回路量産を含む実装計画を現行計画最終年度に取り込むには無理があり、他方、H27年度からの新規計画では第2期衝突実験投入に間に合わない。そこで、本研究計画を再構築する最終年度前応募を申請し、本研究計画は平成26年度発足する新たな研究課題に継承することとなった。

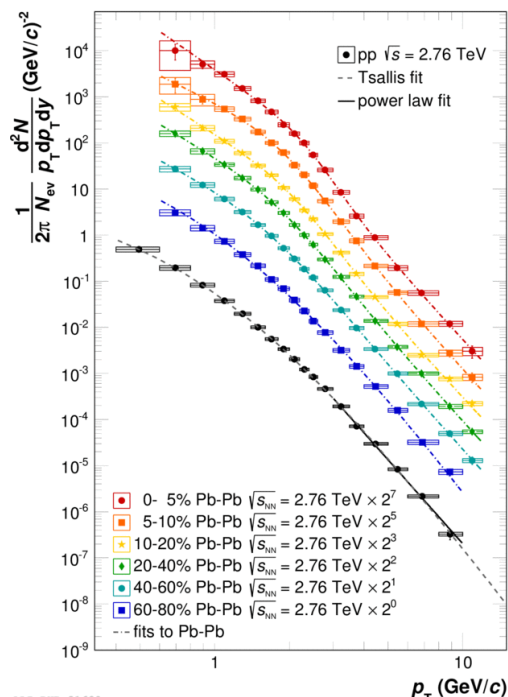


図 3. 陽子衝突及び鉛衝突における中性中間子横運動量分布

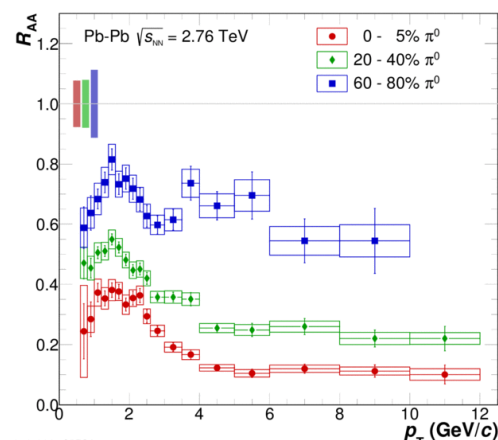


図 4. 鉛衝突における横運動量抑制現象

5 . 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 63 件)

- 1) **Measurement of charged jet suppression in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, ALICE 実験共著 948 名, B. Abelev, T. Sugitate [812 番目], et.al, JHEP 03, 013/1-38, 2014, 査読有, 10.1007/JHEP03(2014)013
- 2) **Multiplicity dependence of pion, kaon, proton and lambda production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV**, ALICE 実験共著 942 名, B. Abelev, T. Sugitate [805 番目], et.al, Physics Letters B728, 25-38, 2014, 査読有, 10.1016/j.physletb.2013.11.020
- 3) **Multi-strange baryon production at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, ALICE 実験共著 943 名, B. Abelev, T. Sugitate [806 番目], et.al, Physics Letters B728, 216-227, 2014, 査読有, 10.1016/j.physletb.2013.11.048
- 4) **Energy dependence of the transverse momentum distributions of charged particles in pp collisions measured by ALICE**, ALICE 実験共著 946 名, B. Abelev, T. Sugitate [809 番目], et.al, European Physical Journal. C73, 2662/1-12, 2013, 査読有, 10.1140/epjc/s10052-013-2662-9
- 5) **Centrality dependence of the pseudorapidity density distribution for charged particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, ALICE 実験共著 979 名, B. Abbas, T. Sugitate [843 番目], et.al, Physics Letters B726, 610-622, 2013, 査読有, 10.1016/j.physletb.2013.09.022
- 6) **Long-range angular correlations of π , K and p in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV**, ALICE 実験共著 946 名, B. Abelev, T. Sugitate [809 番目], et.al, Physics Letters B726, 164-177, 2013, 査読有, 10.1016/j.physletb.2013.08.024
- 7) **Charged kaon femtoscopic correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV**, ALICE 実験共著 1047 名, B. Abelev, T. Sugitate [840 番目], et.al, Physical Review D87, 052016/1-12, 2013, 査読有, 10.1103/PhysRevD.87.052016
- 8) **Transverse Momentum Distribution and Nuclear Modification Factor of Charged Particles in p+Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV**, ALICE 実験共著 976 名, B. Abelev, T. Sugitate [842 番目], et.al, Physical Review Letters 110, 082302/1-11, 2013, 査読有, 10.1103/PhysRevLett.110.082302
- 9) **Net-Charge Fluctuations in Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, ALICE 実験共著 993 名, B. Abelev, T. Sugitate [862 番目], et.al, Physical Review Letters 110, 152301/1-11, 2013, 査読有, 10.1103/PhysRevLett.110.152301
- 10) **Charge separation relative to the reaction plane in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, ALICE 実験共著 986 名, B. Abelev, T. Sugitate [854 番目], et.al, Physical Review Letters 110, 012301/1-11, 2013, 査読有, 10.1103/PhysRevLett.110.012301
- 11) **Centrality dependence of charged particle production at large transverse momentum in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, ALICE 実験共著 986 名, B. Abelev, T. Sugitate [863 番目], et.al, Physics Letters B720, 52-62, 2013, 査読有, 10.1016/j.physletb.2013.01.051
- 12) **Production of $K^*(892)^0$ and $\phi(1020)$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV**, ALICE 実験共著 959 名, B. Abelev, T. Sugitate [829 番目], et.al, European Physical Journal. C72, 2183/1-17, 2012, 査読有, 10.1140/epjc/s10052-012-2183-y
- 13) **Pion, kaon, and proton production in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, ALICE 実験共著 990 名, B. Abelev, T. Sugitate [857 番目], et.al, Physical Review Letters 109, 252301/1-11, 2012, 査読有, 10.1103/PhysRevLett.109.252301
- 14) **K_s^0 - K^0 correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV from the LHC ALICE experiment**, ALICE 実験共著 989 名, B. Abelev, T. Sugitate [858 番目], et.al, Physics Letters B717, 151-161, 2012, 査読有, 10.1016/j.physletb.2012.09.013
- 15) **Neutral pion and eta meson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ TeV and $\sqrt{s} = 7$ TeV**, ALICE 実験共著 973 名, B. Abelev, T. Sugitate [845 番目], et.al, Physics Letters B717, 162-172, 2012, 査読有, 10.1016/j.physletb.2012.09.015
- 16) **Measurement of charm production at central rapidity in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV**, ALICE 実験共著 990 名, B. Abelev, T. Sugitate [858 番目], et.al, JHEP 1207, 191/1-26, 2012, 査読有, 10.1007/JHEP07(2012)191
- 17) **Transverse sphericity of primary charged particles in minimum bias proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$ and 7 TeV**, ALICE 実験共著 983 名, B. Abelev, T. Sugitate [852 番目], et.al, European Physical Journal C72, 2124/1-16, 2012, 査読有, 10.1140/epjc/s10052-012-2124-9
- 18) **Suppression of high transverse momentum D mesons in central Pb-Pb**

- collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, ALICE 実験共著 980 名, B. Abelev, T. Sugitate [853 番目], et.al, JHEP 1209, 112, 2012, 査読有, 10.1007/JHEP09(2012)112
- 19) **Heavy flavour decay muon production at forward rapidity in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV**, ALICE 実験共著 976 名, B. Abelev, T. Sugitate [848 番目], et.al, Physics Letters B708, 265-275, 2012, 査読有, 10.1016/j.physletb.2012.01.063
- 20) **Light vector meson production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV**, ALICE 実験共著 971 名, B. Abelev, T. Sugitate [842 番目], et.al, Physics Letters B710, 557-568, 2012, 査読有, 10.1016/j.physletb.2012.03.038
- 21) **LHC 原子核衝突実験;クォーク物質を探る**, 杉立徹, パリティ, 27 巻 1 号, 47-49 頁, 2012 年, 査読有, <http://pub.maruzen.co.jp>
- 22) **Production of pions, kaons and protons in pp collisions at $\sqrt{s} = 900$ GeV with ALICE at the LHC**, ALICE 実験共著 1061 名, K. Aamodt, T. Sugitate [917 番目], et.al, European Physical Journal C71, 1655/1-30, 2011, 査読有, 10.1140/epjc/s10052-011-1655-9
- 23) **Two-pion Bose-Einstein correlations in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, ALICE 実験共著 921 名, K. Aamodt, T. Sugitate [805 番目], et.al, Physics Letters B696, 328-337, 2011, 査読有, 10.1016/j.physletb.2010.12.053
- 24) **Suppression of charged particle production at large transverse momentum in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, ALICE 実験共著 907 名, K. Aamodt, T. Sugitate [802 番目], et.al, Physics Letters B696, 30-39, 2011, 査読有, 10.1016/j.physletb.2010.12.020

[学会発表](計 10 件)

- 1) Toru Sugitate, **ALICE Activity in Japan**, invited talk at the ALICE Analysis and ALICE Tiar-1/2 workshop, Tsukuba, 3-7 Mar. 2014
- 2) Toru Sugitate, **ALICE Tier-2 Operations in Japan**, invited talk at the ALICE Analysis and ALICE Tiar-1/2 workshop, Tsukuba, 3-7 Mar. 2014
- 3) 杉立 徹, **高エネルギー原子核衝突実験の最前線**, 金沢大学理論物理学セミナー, 30 Nov. 2013
- 4) Toru Sugitate, **Recent results in proton-lead collisions with ALICE at the LHC**, invited talk at the APCTP 2013 LHC Physics Workshop at Korea, Seoul, 6-8 Aug. 2013
- 5) Toru Sugitate, **Status of ALICE Tiar-2 in Japan**, invited talk at the Asia Forum 2013 for ALICE Tiers, Daejeon, 5 Aug. 2013

- 6) Toru Sugitate, **Computing Activity at Hiroshima/Japan**, invited talk at 4th Asian Triangle Heavy-Ion Conference (ATHIC2013), Pusan, 14-17, Nov. 2012
- 7) Toru Sugitate, **A Topical Review of the Recent ALICE Results**, invited talk at APCTP 2012 LHC Physics Workshop at Korea, Seoul, 7-9, Aug. 2012
- 8) Toru Sugitate, **ALICE T2 status at Hiroshima**, invited talk at Asian Community for future Accelerators (ACFA), Kolkata, 6-8, Feb. 2012
- 9) Toru Sugitate, **Photon and jet measurements with ALICE at LHC**, invited talk at APCTP 2011 LHC Physics Workshop at Korea, Seoul, 9-11, Aug. 2011
- 10) Toru Sugitate, **ALICE GRID operation in Japan and upgrade plan**, invited talk at The workshop for ALICE upgrades by Asian countries (2011), Seoul, 7-8, Mar. 2011

[その他]

ホームページ等

<http://alice-j.org>

<http://core-u.hiroshima-u.ac.jp>

<http://www.hepl.hiroshima-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉立 徹 (SUGITATE TORU)

広島大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 80144806

(2) 研究分担者

志垣 賢太 (SHIGAKI KENTA)

広島大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 70354743

(2) 研究分担者

本間 謙輔 (HOMMA KENSUKE)

広島大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 40304399

(3) 連携研究者

三明 康郎 (MIAKE YASUO)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授

研究者番号: 10157422

(3) 連携研究者

浜垣 秀樹 (HAMAGAKI HIDEKI)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号: 90114610

(3) 連携研究者

三好 隆博 (MIYOSHI TAKAHIRO)

広島大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 60335700