

令和元年5月22日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2014～2018

課題番号：26220707

研究課題名(和文)クォーク物性を解き明かすALICE実験フォトン物理の新展開

研究課題名(英文) Photon Physics Revealing Hidden Properties of Quark Matter in the ALICE Experiment

研究代表者

杉立 徹 (Sugitate, Toru)

広島大学・理学研究科・教授

研究者番号：80144806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 144,200,000円

研究成果の概要(和文)：私たちはフォトン検出器PHOS及びジェット対検出器DCALを主要検出器としてALICE実験第2期衝突に臨み、フォトン及びジェット物理を推進した。熱輻射光子解析を主導し、LHC鉛原子核衝突が創る熱源がハドロン物質の限界温度を遙かに超える3.4兆度にまで達していることを明らかにした。また、ジェット対生成のエネルギー非対称性からジェット抑制因子など新たな知見を得た。量子流体モデルに沿って私たちはクォーク物質を概ね理解するに至った。ところが、パートン熱源の物質流など理論モデルでは説明することが難しい現象も発見し、極初期状態(initial stage)解明に挑戦する新たなフォトン物理を展開しつつある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高温クォーク多体系の探求は非摂動的量子色力学(QCD)の振る舞いを理解するに留まらず、極低温に冷却した原子/分子のボーズ凝縮状態、超伝導/超流動量子臨界相転移現象、あるいは極低温原子の光学格子生成や量子もつれといった最先端科学との関連性を映し出す。自発的に対称性の破れた量子場という自然科学の核心的概念がこれらをつなげる。この深遠な相互関係の理解を目指し、理論研究者と最新解析結果について相互理解を深めながら普遍的な拡がりをもった新たな学術領域「強く相互作用する量子多体系」の開拓に挑戦する。

研究成果の概要(英文)：We have carried out our photon and jet physics with the photon spectrometer, PHOS, and the di-jet calorimeter, DCAL, in the ALICE experiment at CERN-LHC, to reveal nature of hot and dense quark matter created in heavy-ion collisions at the highest energy of RUN-2. We have investigated that the matter has been heated up to 3.4 trillion degree Celsius, which is far beyond the Hagedorn limit of hadronic matter, in Pb+Pb central collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.8$ TeV/A. We have also studied the di-jet production and elliptic flow features, comparing with pp and p+Pb data and with hydro-dynamical model predictions. The models explain the features in general, however, we are looking at quite interesting new phenomena, which could be originated from its initial stage of collisions. Our challenge probing the initial stage with photons is underway.

研究分野：実験クォーク物理学

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

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

高温クォーク多体系の実験研究は、米国 RHIC 加速器実験による完全流体性の発見【2011年6月パリティ、完全流体を探して】により大きな飛躍を遂げ、更なる高エネルギー衝突環境を実現する欧州 LHC 加速器実験に引き継がれた。私たちは史上最強フォトン検出器 PHOS を LHC 加速器 ALICE 実験に共同建設し、2009年11月から2013年2月までの第1期衝突実験 (RUN1) を完遂し、鉛原子核衝突@2.8TeV/A が創るクォーク物質について様々な知見を得た【2012年1月パリティ、杉立徹、LHC 原子核衝突実験:クォーク物質を探る】。これまでの成果から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た。新たな学術分野誕生の兆候である。わが国研究組織の責任ある活動を継承し、LHC 加速器が最高性能を発揮する第2期衝突実験全期間 (2015-2017) を包括する新たなフォトン物理の展開が求められた。

2. 研究の目的

欧州 CERN 研究所 ALICE 共同実験に私たち大学チームが建設導入した高分解能フォトン検出器 PHOS (photon spectrometer) 及びジェット対電磁カロリメータ DCAL (di-jet calorimeter) を主要測定器とし、LHC 原子核衝突が創る超高温クォーク物質を解明する。第1期衝突実験データの解析結果を公表論文に仕上げていくとともに、LHC 改修後、初めて実現される未踏衝突エネルギーでの第2期衝突実験全期間 (RUN2=2015-2017年) 【注:RUN2 開始後に2018年まで延長】を包括するフォトン物理を展開し、新たな分野「強く相互作用する量子多体系」の学術的發展を目指す。

3. 研究の方法

研究代表者と研究分担者及び連携研究者は組織的かつ協調的に当初計画の役割分担【図1】を果たし、いずれの取り組みも調書計画通り順調に遂行した。以下、いくつかの重要な経緯を述べる。

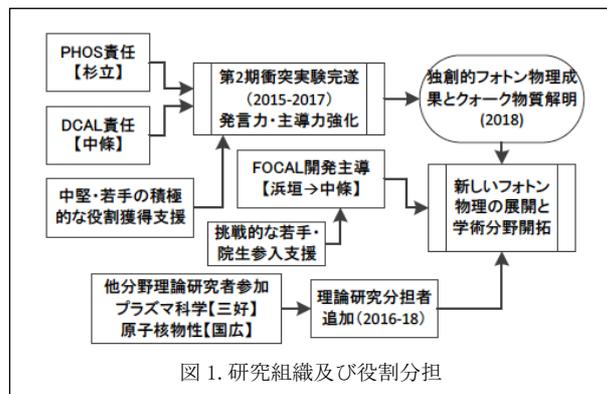


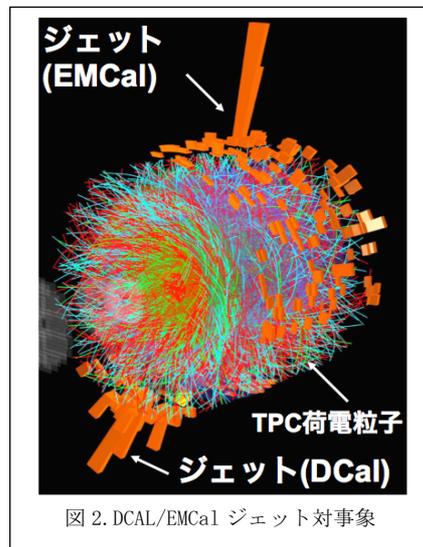
図1. 研究組織及び役割分担

(1) PHOS 高度化への緊急対応: ALICE 技術部会は 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、競合する ATLAS/CMS にデータ量の面で不利にならないよう主要検出器の読出高速化を RUN2 開始前に達成するよう指示した。本代表は PHOS を高速 SRU 読出回路に全面換装する決断を下し、当時支援を受けていた基盤研究(A)は最終年度を待たずに終了し、本研究課題にて研究計画の再構築を図った。従って、本研究課題開始時は PHOS 読出系の全面換装、及び、新規導入する DCAL を統合した事象選別回路の構築導入が急務であった。わが国院生の多大な協力を得ながら新規開発 SRU の読み出しテストを実施し、想定外の干渉や輻輳、雑音混入などを逐次解決した。地上実験室に引き上げられた PHOS モジュールを順次分解し、筐体改造と共に読出回路系を全面換装し、2014年10月、PHOS モジュール4基を順次、LHC 加速器 P2 衝突地点地下 80m に設置する ALICE 実験装置内に DCAL と組み合わせてインストールした。直ちに全ての地下搬入路が閉鎖され、2015年1月から LHC 改修後初めての調整運転が開始された。PHOS 再構築の約 10 ヶ月にわたる厳しい作業はわが国とロシアの連携作業により完遂した。

(2) DCAL 導入とジェット対事象選別機能: 私たち大学チームが主導するジェット対検出器 DCAL を導入し、対向して置く大型電磁カロリメータ EMC との間でジェット対相関測定を行い、1次パトン対が閉じ込めから解放されたクォークとグルーオンで充たされた空間を通過するとき輻射するエネルギー散逸量と方向を他実験 (ATLAS/CMS) では到達できない精度で測定することによりジェット抑制機構を解き明かす。初年次陽子衝突実験に引き続き 2015年10月、RUN2 待望の核子対当たり 5.0TeV/A の鉛+鉛原子核衝突実験を開始した。PHOS、DCAL とともに順調にデータ収集に参加した。衝突エネルギー倍増により飛跡密度が格段に増加したのがオンライン事象表示【図2】からも一目して認められた。同年末までに 150M 事象を収集した。同時に同図は、中條達也 (分担) がわが国院生と取り組んだ第1段 PHOS/DCAL 統合事象選別機能が見事にジェット対事象を選択することに成功した証拠でもある。

(3) 第2期衝突実験実施と物理解析: RUN2/2 年目 (2016年) は陽子衝突に引き続き陽子+鉛原子核衝突、3年目 (2017年) は全衝突期間を陽子衝突実験に充当した。最終年は 2018年5月初め、衝突エネルギー13TeV の陽子衝突を再開した。私たちが運用責任を担う PHOS/DCAL 検出器を

含めて ALICE 実験全体として順調な立ち上がりを示し、10月末の陽子衝突終了までに65/fbの積算衝突輝度を達成した。加速器は引き続き初年次と同じ核子対当たり5.0TeV/Aの鉛+鉛原子核衝突に調整され、11月末までの4週間にALICE実験は過去最高の約900/ μ bの積算輝度データを収集した。私たちはPHOS/DCALが最高性能を発揮するよう日々管理運用に従事するとともに、既得の陽子+陽子衝突及び陽子/鉛+鉛原子核衝突における中性中間子生成及びジェット抑制に関する物理解析を終結させ学会誌に公表した【論文1-3ほか】。初年次(2015年)に収集した5.0TeV/A鉛+鉛原子核衝突の中性中間子解析も私たちが主導し、わが国院生がALICE実験組織を代表して2018年5月、イタリア・ヴェネチア市で開催された最重要国際会議クォークマターにて、その最新結果を初めて口頭発表している。本代表は当初計画通り単光子成分抽出の取り組みを進め、暫定的結果ながら、2015年収集データから摂動的QCD光子分布に重畳する熱輻射光子成分を認めた。1年延長した2018年鉛原子核衝突実験で2015年既得データ統計量を遙かに超える高統計・高品位データが収集できたことは私たち共同研究者にとって極めて大きな収穫ではあるものの、これまで完成域に近づけてきた初年次データの物理解析結果を今後どのように扱うかについて難しい決断を迫られた。



(4) **フォトン物理の新展開と新たな学術分野の開拓**：このように第2期衝突実験期間に豊富な研究成果を約束する獨創性あるフォトン物理を展開するとともに、次期衝突実験には $x=10^{-3}$ という未開領域のグルーオン構造関数に迫る新たな前方物理；カラーガラス凝縮と早期熱平衡化機構解明を切り拓く取り組みを推進した。大型国際共同実験組織の中でも日本の大学チームとしての主体性と独自性を発揮し、わが国理論研究者と協働して新たな学問分野「強く相互作用する量子多体系」の開拓に繋げる。

4. 研究成果

(1) **熱輻射光子**：PHOSは熱輻射光子測定に焦点を絞り本代表がロシア他と共同開発した、エネルギー分解能及び2粒子分離分解能とも圧倒的に優れ、他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。この獨創性を活かして単光子エネルギー分布を測定し、摂動的QCD起源の光子とクォーク物質からの熱輻射光子成分に分離し、熱輻射エネルギー分布からクォーク物質の熱統計力学状態を特定し全容解明に迫る。先行基盤研究(A)から引き継いだ物理解析は、鉛原子核衝突@2.8TeV/Aの創る熱源がハドロン物質の存在限界となるHagedorn温度を遙かに超える3.4兆度($297 \pm 12 \pm 41$ MeV)にまで達していること明らかにした【図3】【論文3】。高エネルギー原子核衝突が創り出す系は光子を熱輻射した。即ち、熱力学的平衡に達した系が存在したことを意味する。しかも、その熱源は非ハドロン状態にあることを証した。熱輻射光子解析における成否は背景雑音光子の定量的差し引きをどこまで正確に不定性なくできるかにある。背景雑音光子の90%以上は中性パイ中間子起源であり、中性パイ中間子生成量を高精度で決定することが不可欠である。私たちはRUN2初年次鉛原子核衝突実験データを解析し、明確な熱輻射光子成分を引き出すことに成功している。従って、PHOSの優位性を最大限発揮する解析手順に不安要素はなく、熱輻射単光子の物質流解析(次節)を含めて準備は整っている。既得データ統計量を遙かに超える高品位・高統計データを最終年次に収集したことを機に、データセットを再構築し、十分な統計を確保して信頼性を極めた成果とすることに同意した。これまでの研究活動を寸断することなく新たな研究計画(基盤研究(B)2019-2021年代表:杉立徹)のもとで取り組む。

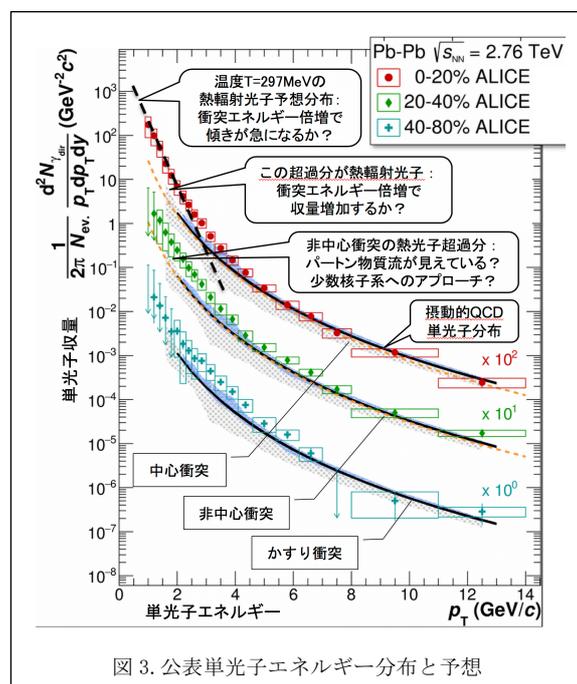


図3. 公表単光子エネルギー分布と予想

(2) **パートン物質流**：熱輻射光子の物理解析過程で私たちは、熱源から等方輻射されるはずの熱光子が何らかのダイナミクスを反映していることに気付いている。衝突極初期の早期平衡化仮説を裏打ちする可能性のある方位角依存性は喫緊の重要課題である。しかし、2015年初年次

データでは不定性ない結果と明確な結論を導き出すことは統計的に困難であった。2018 年最終年データと併せることにより品位・統計とも大幅な改善が期待できる。RUN2 全データから非中心衝突を選択し、物質流に注目したフォトン物理解析を主導する。この解析結果は小数核子系に発現した非ハドロン現象を見極める重要なヒントを与えると期待している。公表データ【図 3】の非中心衝突に熱光子成分を見出していることに注目頂きたい。他実験 (ATLAS/CMS/LHCb) では近づくことのできない私たち ALICE 実験の特色ある着眼である。

(3) **FoCal 開発**: 衝突極初期に発現したと考えられるカラーガラス凝縮や早期平衡化機構の解明に焦点を絞る超前方検出器 FOCAL【図 4】開発拠点を設置し、準備研究を開始した。シリコン半導体 Pad 検出素子 (外形 93mm×93mm×0.32mm, 64(8×8)Pad マトリックス) を国内生産し、β線及び赤外パルス光で静特性を把握するとともに Pad 間のクロストークを注意深く検討した。検出素子をタングステン金属板と組み合わせた 20 層 (20X₀) の試作機を完成させ、ELPH/PS/SPS で性能評価を行った【図 5】。すべて期待通りであり、その結果を 2018 年 8 月、ALICE 実験技術審査部会 (本代表は部会員として同席) で中條達也 (分担) が報告するとともに、ALICE 実験装置内での RUN2 評価テストを提案した。技術審査部会は提案を受け入れた。新しい前方物理開拓に向けて実験組織との意思疎通も不安要素なく、日本グループの強い研究意欲と高いプレゼンスを示す好事例であった。

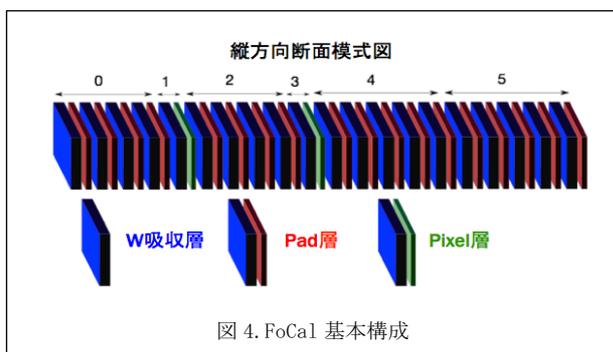


図 4. FoCal 基本構成

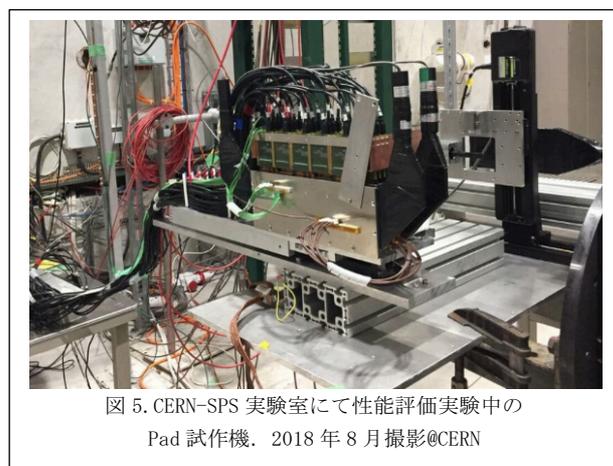


図 5. CERN-SPS 実験室にて性能評価実験中の Pad 試作機. 2018 年 8 月撮影@CERN

(4) **若手支援**: 本代表は国内検討会を毎年主催し、新たな物理を切り拓く挑戦的な取り組みを支援してきた。2015 年、長崎総合科学大学 (大山健)、並びに 2016 年、奈良女子大学 (下村真弥) が ALICE 実験正規機関として参画し、更に 2016 年、JPARC 実験グループ (佐甲博之) が准メンバーとして加わる。何れも 40 代がリードする研究チームであり、日本グループを強化するとともに幅を広げる。本取り組みの重要な成果である。

(5) **新たな学術領域の醸成**: 本研究課題開始 2 年目 2015 年 11 月、当初計画【図 1】を 1 年前倒して、量子流体力学を駆使する原子核理論の国際的なリーダーである野中千穂 (名古屋大) を分担者【役割: 流体理論物理の視点からの検討及び他分野との議論形成】に迎え、プラズマ理論の三好隆博 (広島大)【役割: プラズマ科学の視点からの検討及び他分野との議論形成】と協力して年数回の自由な討論会を開催し、国内外の研究者を含めて広い視野から量子多体系の運動学について議論を深めてきた。三好隆博は専門とするプラズマ物理との類推から、衝突初期に形成されると考えられているカラー・フラックスチューブの再結合 (リコネクション) がクォーク物質の集団運動的力学に与える影響について追求した【学会発表 2, 4】。2016 年クルチャフ研究所 (モスクワ) にて開催した検討会では、「A hint from plasma physics for quark-gluon plasma physics」の研究報告を行い、広く東欧研究者と議論を深め高評価であった。野中千穂は小規模研究会を 2015 年度以来、計 5 回開催し、広い視野から理論系/実験系/観測系/シミュレーション計算系研究の現状を議論し、新しい発展の可能性についての検討を行った。参加者は原子核理論の専門家のみならず、プラズマ物理、宇宙物理学、宇宙線実験など多岐にわたる。

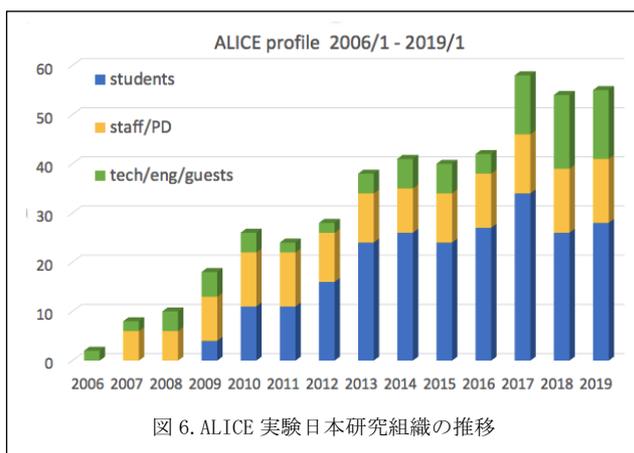


図 6. ALICE 実験日本研究組織の推移

(6) **研究組織強化**: ALICE 実験に参加するわが国研究者、大学院生 (卒業論文に取り組む学部生を一部含む) 及び技術者/ゲストの年間推移 (各年 1 月末時点、本基盤研究実施期間は 2015 年以降に対応) を【図 6】に示す。昨今のわが国の大学を取り巻く環境から研究者数は微

増に留まるが、院生参加者数は着実に増加を続けている。この勢いが、わが国大学研究チームが主体性を維持しながらも研究分野の幅を拓げ地盤を強固にしている。そのこと自体は本研究課題の成果とは言えないが、わが国大学チームが競争的国際社会で先導的に研究を進めていくためには不可欠な要件で有り、わが国の組織代表として極めて重要視し、様々な機会に支援/応援してきた。なお、2017年の技術者/ゲスト数の急増は、2016年にJPARC実験グループが准メンバー（論文共著者外）とし参入したことによる。また、濱垣秀樹（分担）がALICE実験共同研究者会議（Collaboration Board）の准議長に3年間（2014年-2016年）就いたことは、1500名を超える大型研究組織でも、わが国研究者のプレゼンスがしっかりと高いことを示す証左でもある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 152 件）

- 1) ALICE 実験共著 1024 名, S. Acharya, T. Chujo<171 番目>, H. Hamagaki<340 番目>, T. Sugitate<873 番目>, et.al, **Neutral pion and η meson production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV**, European Physical Journal C 78, 624/1-25, 2018, DOI=10.1140/epjc/s10052-018-6013-8（査読有）
- 2) ALICE 実験共著 1026 名, S. Acharya, T. Chujo<173 番目>, H. Hamagaki<338 番目>, T. Sugitate<879 番目>, et.al, **π^0 and η meson production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV**, European Physical Journal C 78, 263/1-26, 2018, DOI=10.1140/epjc/s10052-018-5612-8（査読有）
- 3) ALICE 実験共著 983 名, J. Adam, T. Chujo<172 番目>, H. Hamagaki<337 番目>, T. Sugitate<833 番目>, et.al, **Direct photon production in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, Physics Letters B754, 235-248, 2016, DOI=10.1016/j.physletb.2016.01.020（査読有）

〔学会発表〕（計 30 件）

- 1) Tatsuya Chujo, **Jet physics in ALICE**, UCLA 2019 Santa Fe Jets and Heavy Flavor Workshop, UCLA, Los Angeles, USA, 2019/01
- 2) Takahiro Miyoshi, **Plasma physical problems in high-energy heavy ion collisions**, 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Kanazawa, Japan, 2018/11
- 3) Toru Sugitate, **The Idea of Forward Physics at ALICE-LHC**, APCTP 2018 LHC Physics Workshop at Korea, Konkuk Univ., Seoul, Korea, 2018/08
- 4) Takahiro Miyoshi, Tomohiro Honda, **A hint from electromagnetic plasma physics to quark-gluon plasma physics**, 26th International Toki Conference, Toki, Japan, 2017/12
- 5) Toru Sugitate, **Status of ALICE-Japan and Tiers**, ALICE Calo Meeting in Moscow, National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia, 2016/09

〔その他〕

ホームページ等

<http://alice-j.org/>

<http://aliweb.cern.ch/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：濱垣 秀樹

ローマ字氏名：(Hamagaki, Hideki)

所属研究機関名：長崎総合科学大学

部局名：新技術創成研究所

職名：特命教授

研究者番号（8 桁）：90114610

研究分担者氏名：中條 達也

ローマ字氏名：(Chujo, Tatsuya)

所属研究機関名：筑波大学

部局名：数理物質系

職名：講師

研究者番号（8 桁）：70418622

研究分担者氏名：三好 隆博

ローマ字氏名：(Miyoshi, Takahiro)

所属研究機関名：広島大学

部局名：理学研究科

職名：助教
研究者番号 (8桁)：60335700

研究分担者氏名：野中 千穂
ローマ字氏名：(Nonaka, Chiho)
所属研究機関名：名古屋大学
部局名：基礎理論研究センター
職名：准教授
研究者番号 (8桁)：10432238

(2)研究協力者

研究協力者氏名：國廣 悌二
ローマ字氏名：(Kunihiro, Teiji)

研究協力者氏名：三明 康郎
ローマ字氏名：(Miake, Yasuo)

研究協力者氏名：志垣 賢太
ローマ字氏名：(Shigaki, Kenta)

研究協力者氏名：郡司 卓
ローマ字氏名：(Gunji, Taku)