

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H02177

研究課題名(和文)RIビームの核反応によるテトラ中性子共鳴の検証

研究課題名(英文)Verification of tetra-neutron resonance by nuclear reaction of RI beam

研究代表者

下浦 享 (Shimoura, Susumu)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・協力研究員

研究者番号：10170995

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,500,000円

研究成果の概要(和文)：二重荷電交換反応 $4\text{He}(8\text{He}, 8\text{Be})$ の質量欠損スペクトルにおいて、閾値近傍に4事象発見されたテトラ中性子共鳴の候補の検証を行うことが目的である。同実験の再測定、および無反跳の4中性子を生成可能な、粒子ノックアウト反応 $8\text{He}(p, p)$ の測定が実施された。前者では、エネルギー較正手法を改良した同反応の測定を約2倍のビーム強度で実施し、共鳴候補のエネルギーの系統誤差が約1/10に改善したほぼ同等のスペクトルが得られている。後者では、10倍以上の統計で同じ特徴をもつスペクトルが得られ、テトラ中性子共鳴候補のエネルギーと幅が決定された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性子だけで構成された原子核-原子番号0の元素-の存在は原子核物理学における60年以上にわたる課題であった。本研究の開始直前に発表された4事象発見されたテトラ中性子共鳴の候補は、準安定な状態として4中性子が存在する可能性を示唆した。本研究はこれを検証することを目的に再測定と全く異なる反応を用いた測定を行い、その結果、閾値直上に強く関連したテトラ中性子状態が存在することを示した。

研究成果の概要(英文)：The candidate tetra-neutron resonance reported by the measurement of the $4\text{He}(8\text{He}, 8\text{Be})$ reaction was reexamined. The re-measurements of the same reaction was performed with better accuracy and statistics. The alpha knockout reaction $8\text{He}(p, p)$ reaction was measured, which showed a consistent mass spectrum with 10 times better statistics. The energy and the width of the candidate have been deduced, indicating that the candidate remains 10 times more periods than the reaction time scale.

研究分野：実験核物理

キーワード：RIビーム 中性子多体系 質量欠損核分光 荷電交換反応 アルファノックアウト反応 多核子移行反応

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

中性子だけで構成された原子核-原子番号ゼロの元素-が存在するかは、原子核物理学において古くからの課題である。2中性子系では束縛状態は存在しないが、閾値直上に強く相関した状態があることが知られているが、それより多い系についてはよくわかっていない。4中性子系については、自発核分裂に伴う現象や多核子移行反応、パイ中間子の2重荷電交換反応で探査されたが、長く、有意な事象は得られなかった。その後、不安定核ビーム(RI ビーム)を用いた実験が可能になり、 ^{14}Be 核の核破砕反応で4中性子クラスター(テトラ中性子)の存在が示唆されたが、測定手法は間接的で質量に関する情報が乏しかった。多くの理論計算では束縛状態が予言できないこともあり、準安定な共鳴状態として存在できるかもわかる質量スペクトル測定が求められていた。

本研究開始前に、われわれは、4中性子系の新たな生成手法としてRI ビームを用いた発熱型二重荷電交換反応 $^4\text{He}(^8\text{He},^8\text{Be})$ を測定した。得られた質量スペクトルは、30MeV 付近を中心とした連続分布に加え、テトラ中性子共鳴状態の候補として閾値直上に4事象発見した(有意度 4.7 σ) が、エネルギーに対する系統誤差のため、束縛か非束縛かを決定づけることはできなかった。このような幅の狭いピークは多くの理論では予言できないこともあり、より高い有意度でより精度のよい測定や、別の手法による質量スペクトルの測定が待たれており、本研究を進めることとした。

2. 研究の目的

以下の課題の遂行によりテトラ中性子共鳴を検証することを目的とした。

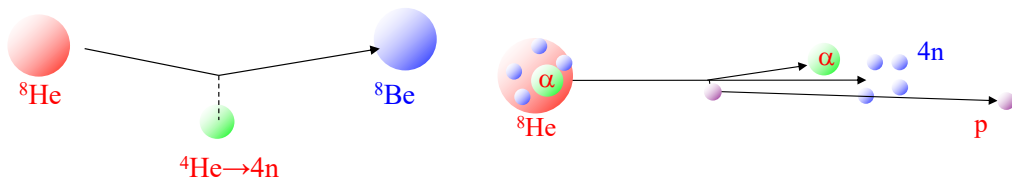
- (1) 高強度 ^8He ビームを用いて発熱型二重荷電交換反応 $^4\text{He}(^8\text{He},^8\text{Be})$ を測定するとともに、同じ実験条件で測定可能な既知の荷電交換反応 $^1\text{H}(^3\text{H},^3\text{He})\text{n}$ の測定により、欠損質量に対する系統誤差を10倍程度高める。
- (2) 無反跳で4中性子系を生成可能な $^8\text{He}(\text{p},\text{p}\alpha)4\text{n}$ 反応を、 ^8He ビームを用いた逆運動学の手法で測定し、その欠損質量スペクトルを得る。

3. 研究の方法

(1)については、理化学研究所 RI ビームファクトリー(RIBF)の高分解能磁気分析器(SHARAQ)および高分解能ビームラインを用い、核子あたり 186MeV の ^8He ビームによる $^4\text{He}(^8\text{He},^8\text{Be})$ 反応および核子当たり 310MeV の ^3H ビームによる $^1\text{H}(^3\text{H},^3\text{He})\text{n}$ の測定を行う。2種のビームは同じ磁気剛性(8.3Tm)であり、測定粒子 ^8Be および ^3He がビームの磁気剛性のほぼ 1/2 であり、ビームライン、磁気分析器とも全く設定を変更せずに測定が可能である。既知の反応を用いることで、質量欠損に対する系統誤差を大幅に改善する。高強度 ^8He ビームを用いて、統計精度の改善を図る。(左図)

(2)については、RIBF の広帯域汎用磁気分析器(SAMURAI)および液体水素標的(MINOS)を用いた $^8\text{He}(\text{p},\text{p}\alpha)4\text{n}$ 反応の測定を実施する。逆運動学の手法により、 ^8He から叩き出された α 粒子と散乱した陽子の運動量ベクトルが測定され、それらと ^8He ビームの運動量から質量欠損が求められる。既知の反応 $^6\text{He}(\text{p},\text{p}\alpha)2\text{n}$ を用いて、運動学の較正を行う。

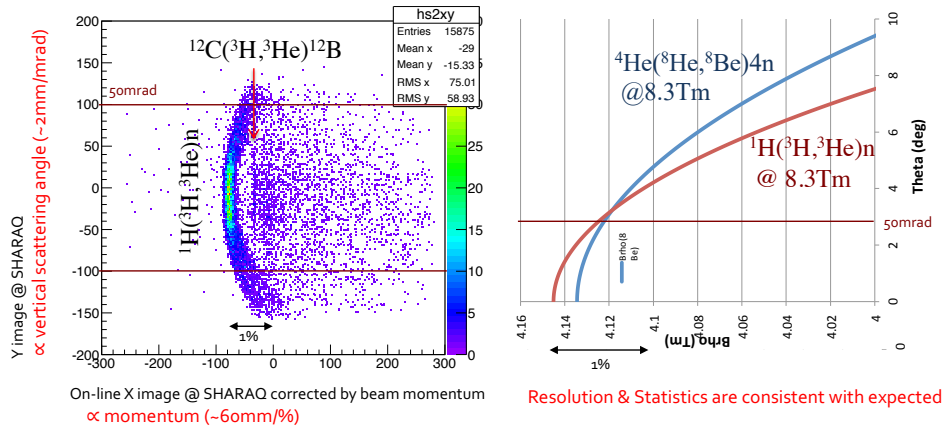
いずれの反応でも、広い励起エネルギーにわたる連続スペクトルが含まれるので、その解析のための手法を開発しテトラ中性子共鳴の検証に用いる。(右図)



4. 研究成果

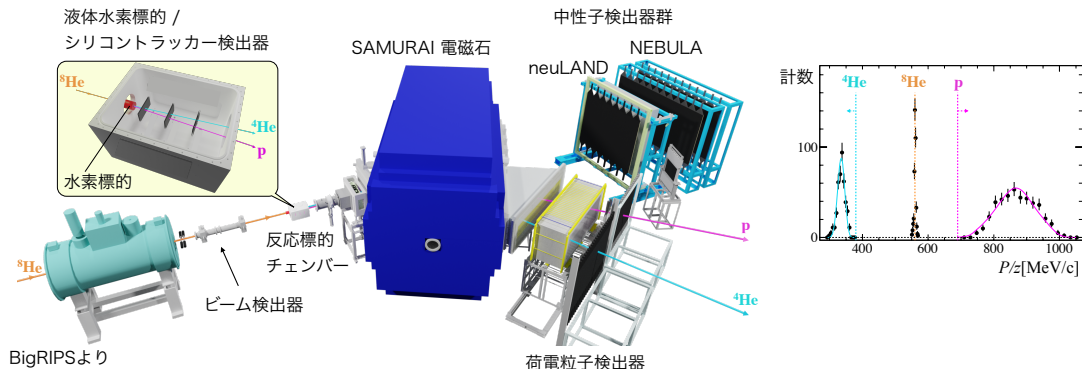
(1) 発熱型荷電交換反応 $^4\text{He}(^8\text{He},^8\text{Be})$ の測定およびその較正

RIBF の SHARAQ および高分解能ビームラインを用いた実験を実施した。3 MHz 程度の高強度ビームの測定のため、飛跡検出器を冗長性をもたせて配置し、SHARAQ 焦点面検出器の読み出しに FADC を用い、 ^8Be から崩壊した2つの α 粒子の測定のためのパルス波形解析を行った。質量欠損の較正のため、全く同じ磁気剛性の実験条件で、 $^1\text{H}(^3\text{H},^3\text{He})\text{n}$ の測定を実施した。標的として使用したポリエチレンに含まれる水素からの同反応および炭素からの $^{12}\text{C}(^3\text{H},^3\text{He})^{12}\text{B}$ 反応からの ^3He 粒子の運動量と散乱角度が測定された。次ページの左図は測定された事象の SHARAQ 焦点面上でのイメージで、横軸が運動量、縦軸が縦方向の散乱角を示している。右図に示した運動学曲線に従う事象分布が得られ、エネルギー較正の系統誤差が 0.1 MeV 程度以下と評価された。

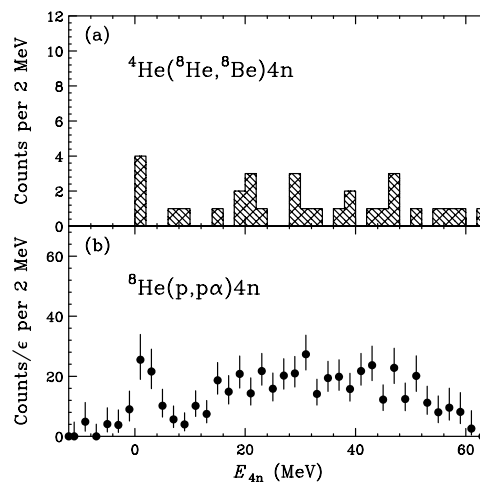


(2) ノックアウト反応 $^8\text{He}(p,p\alpha)4n$ の測定

RIBF の SAMURAI および液体水素標的 MINOS を用いた実験が実施された。左図に実験のセットアップ、右図に測定された陽子、 α 粒子および反応しなかった ^8He ビームの核子あたり運動量を示す。



下図に、測定粒子の運動量ベクトルから導出された、質量欠損スペクトル((b) Nature **606**, 678 (2022); 比較のために検出効率で補正したもの)を、2重荷電交換反応で得られた結果((a) Phys. Rev. Lett. **116**, 052501 (2016))と併せて示す。



(1)と(2)は全く異なる反応であるが、閾値直上の幅の狭いピークと高いエネルギー領域に広がる連続分布というほぼ同じ特徴をもつスペクトルが得られた。ピークのエネルギーは 2.37 MeV (統計誤差 0.38 MeV, 系統誤差 0.44 MeV)、幅は 1.75 MeV (統計誤差 0.22 MeV, 系統誤差 0.30 MeV)と導出された。得られた幅は、反応に資する典型的な時間に比べ 10 倍程度長い状態であることを示唆している。

(3) 他の手法によるテトラ中性子研究のための準備

上記 2 種以外の手法として、低エネルギー多核子移行反応による、無反跳 4 中性子生成の可能性を検討するとともに、低エネルギー RI ビームライン OEDO の整備を行なった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 10件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Michimasa Shin'ichiro, Hwang Jongwon, Yamada Kazunari, Shimoura Susumu, et al.	4. 巻 2019
2. 論文標題 OEDO, the energy-degrading beamline at RI Beam Factory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 043D01 (20 p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hwang Jongwon, Michimasa Shin'ichiro, Shimoura Susumu, et al.	4. 巻 2019
2. 論文標題 Angle-tunable wedge degrader for an energy-degrading RI beamline	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 043D02 (11 p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Shimoura Susumu	4. 巻 133
2. 論文標題 Direct reactions as quantum probes for nuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The European Physical Journal Plus	6. 最初と最後の頁 463-473
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjp/i2018-12343-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 下浦 享	4. 巻 749
2. 論文標題 テトラ中性子の探査	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 ISOTOPE NEWS	6. 最初と最後の頁 7-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 下浦 享	4. 巻 61
2. 論文標題 RIビームを用いたテトラ中性子研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 原子核研究	6. 最初と最後の頁 70-77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Huang S. W., Yang H., Shimoura S., et al.	4. 巻 1643
2. 論文標題 Experimental study of ${}^4\text{n}$ with ${}^8\text{He}(p,2p)$ reaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012090 ~ 012090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1643/1/012090	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Huang S. W., Yang Z. H., Shimoura S., et al.	4. 巻 62
2. 論文標題 Experimental Study of ${}^4\text{n}$ by Directly Detecting the Decay Neutrons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00601-021-01691-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakamoto R., Ito M., Saito A., Shimoura S.	4. 巻 104
2. 論文標題 Extended Migdal-Watson formula to evaluate background strength in binary breakup reactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 34602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.104.034602	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Duer M., Aumann T., Shimoura S., et al.	4. 巻 606
2. 論文標題 Observation of a correlated free four-neutron system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 678 ~ 682
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-022-04827-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Shimoura Susumu, Otsu Hideaki	4. 巻 33
2. 論文標題 Population of Tetra-Neutron System Using RI Beams	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Physics News	6. 最初と最後の頁 1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/10619127.2023.2198911	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計28件 (うち招待講演 24件 / うち国際学会 23件)

1. 発表者名 Susumu Shimoura
2. 発表標題 Few-neutron systems
3. 学会等名 Mini-workshop on "New aspects of few-nucleon systems and related topics" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Susumu Shimoura
2. 発表標題 Slowing-Down Beam Line at RIKEN RIBF -- OEDO
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Physics Conference 2019 (APPC14) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Tetra-neutron and few-body correlations studied by RI-beam experiments
3. 学会等名 New Frontiers in Nuclear Physics and Astrophysics, Antalya, Turkey (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Tetraneutron system populated by double-charge exchange reactions using RI beam
3. 学会等名 The 13th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Tetra-neutron system populated by RI-beam induced reactions
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Few-Body Problems in Physics (FB22) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Masuoka et al.
2. 発表標題 Study of the "tetra-neutron" system via the $4\text{He}(8\text{He},8\text{Be})$ reaction
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Masuoka et al.
2. 発表標題 二重荷電交換反応 $4\text{He}(8\text{He}, 8\text{Be})$ 反応の再測定II
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Tetra-neutron system studied by $(8\text{He}, 8\text{Be})$ reaction
3. 学会等名 GANIL Workshop on Nuclear Structure and Reaction Theories: Building Together for the Future (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Tetra-neutron system populated by RI-beam experiments
3. 学会等名 Critical Stability of Quantum Few-Body Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Tetra-neutron system populated by RI-beam induced reactions
3. 学会等名 実験と観測で解き明かす中性子星の核物質 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Tetra-neutron system populated by nuclear reactions using RI-beam
3. 学会等名 Multiparticle resonances in hadrons, nuclei, and ultracold gases (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Tetraneutron states populated via $4\text{He}(8\text{He},8\text{Be})$ reaction
3. 学会等名 The 11th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics (Cluster16) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Tetra-neutron states populated by $4\text{He}(8\text{He},8\text{Be})$ reaction
3. 学会等名 The 9th international conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Experimental studies of the tetra-neutron system by using RI-beam
3. 学会等名 The 23rd European Conference on Few-Body Problems in Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Charge Exchange Reaction of RI Beam to Populate Exotic States
3. 学会等名 International Nuclear Physics Conference (INPC2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Tetra-neutron system populated by exothermic double-charge exchange reaction $4\text{He}(8\text{He},8\text{Be})$ reaction at 190 MeV/u
3. 学会等名 22nd International Spin Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Tetra-neutron system studied by $4\text{He}(8\text{He},8\text{Be})$
3. 学会等名 ECT* Workshop on Physics beyond the limits of stability: exploring the continuum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Tetra-neutron system studied by $4\text{He}(8\text{He},8\text{Be})$
3. 学会等名 Workshop on Nuclear Cluster Physics (WNCP2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Shimoura
2. 発表標題 Tetra-neutron system populated by reaction of exotic beam
3. 学会等名 ESNT Workshop on Dynamics of highly unstable exotic light nuclei and few-body systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 下浦 享
2. 発表標題 Tetra-neutron system populated by exothermic double-charge exchange reaction
3. 学会等名 基研研究会「核力に基づく核構造、核反応物理の展開」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Susumu Shimoura
2. 発表標題 Direct Reactions as Quantum Probes of Nuclear System
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会 Joint Symposium of JPS Nuclear Physics and Physical Review C (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Susumu Shimoura
2. 発表標題 High-resolution spectroscopy with SHARAQ and advice on HIHR
3. 学会等名 Second International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Susumu Shimoura
2. 発表標題 Experiments on tetra-neutron resonance
3. 学会等名 Developments of Physics of Unstable Nuclei (YKIS2022b) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 下浦 享
2. 発表標題 テトラ中性子と多体相関
3. 学会等名 RCNP研究会「低エネルギー核物理と高エネルギー天文学で読み解く中性子星」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Susumu Shimoura
2. 発表標題 Tetra-neutron system studied by RI-beam experiment
3. 学会等名 The 15th Asia Pacific Physics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 下浦 享
2. 発表標題 非束縛少数多体系の物理
3. 学会等名 市村宗武先生講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	道正 新一郎 (Michimasa Shin'ichiro) (80392140)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教 (12601)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	今井 伸明 (Imai Nobuaki)		
研究 協力者	大田 晋輔 (Ota Shinsuke)		
研究 協力者	矢向 謙太郎 (Yako Kentaro)		
研究 協力者	増岡 翔一郎 (Masuoka Shoichiro)		
研究 協力者	オーマン トーマス (Aumann Thomas)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	オー ナイジェル (Orr Nigel)		
研究協力者	ボームル ディディエ (BeaumeI Didier)		
研究協力者	ホワン ジョンウォン (Hwang Jongwon)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	IPC-Caen	IPN-Orsay		
ドイツ	Darmstadt工科大学			
韓国	IBS			