



## 研究課題名 過去 600 万年間にわたる大気中二酸化炭素濃度と気候の相互作用の解明

北海道大学・大学院地球環境科学研究所・准教授

やまもと まさのぶ  
山本 正伸

研究課題番号：19H05595 研究者番号：60332475

キーワード：気候変動、環境変動、二酸化炭素、温暖化、温室効果、深海掘削

### 【研究の背景・目的】

温室効果は地球表層の温度を決める重要な要素であり、過去の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度を復元することは、地球の気候の歴史を考えるうえで極めて重要である。アイスコアの CO<sub>2</sub> 濃度記録は、過去の気候変動の原因の解明や気候感度の推定に活用されているが、80 万年前以前の CO<sub>2</sub> 濃度の精密復元は行われていない(図 1)。

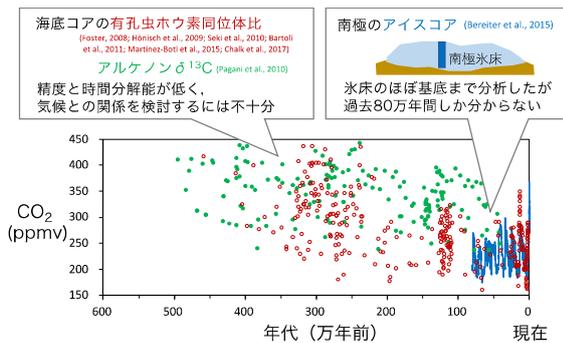


図 1. 過去600万年間のCO<sub>2</sub>濃度復元の現状

申請者らは、インド洋ベンガル湾 U1446 地点の過去 80 万年間の海底堆積物コア中の長鎖脂肪酸の安定炭素同位体比 ( $\delta^{13}C_{FA}$ ) の変動がアイスコア CO<sub>2</sub> 濃度変動と高い負の相関を示すことを見いだした。

本研究では、ベンガル湾の堆積物コアに含まれる長鎖脂肪酸の安定炭素同位体比 ( $\delta^{13}C_{FA}$ ) を測定し、600 万年前から 150 万年前の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度を約 1700 年解像度で復元する。得られたデータにもとづき、鮮新世における気候感度を推定し、温暖期における CO<sub>2</sub> 濃度と全球気温の関係を検討する。さらに、過去 600 万年間の CO<sub>2</sub> 濃度と海洋深層水温度・気温・氷床量変動との関係から、CO<sub>2</sub> 濃度変動の原因を考察し、CO<sub>2</sub> と気候の相互作用を解明する。

### 【研究の方法】

600 万年前から 150 万年前の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度を復元し、鮮新世における気候感度を推定し、CO<sub>2</sub> 濃度変動の原因を考察し、氷期-間氷期変動の起源と 560 万年前の温暖化の原因を解明する。試料は国際深海掘削科学計画 (IODP) において U1445 地点で掘削された堆積物コア試料を用いる。 $\delta^{13}C_{FA}$  を測定し、CO<sub>2</sub> 濃度を復元する。底生有孔虫の酸素同位体比を既知の酸

素同位体比変動曲線と比較し、当てはめることにより、堆積物試料の年代を決定する。

### 【期待される成果と意義】

CO<sub>2</sub> と気候の相互作用の理解を深めることが気候変動の原因を解明することにつながる。しかし、CO<sub>2</sub> 濃度が議論に耐えうる精度で復元されているのはアイスコアがカバーする過去 80 万年間だけであり、それ以前の気候変動については比較できる CO<sub>2</sub> 濃度記録がない。したがって、CO<sub>2</sub> 濃度を過去に遡って復元することは、CO<sub>2</sub> と気候の相互作用について証拠に基づいた議論を可能にするものであり、意義が大きい。

現在進行している温暖化により地表温度が何度上昇するのか推定するためには、気候感度を求めることが必要である。気温が高かった鮮新世(約 300 万年前)の研究から温暖期の気候感度を制約する試みがなされている。この鮮新世の CO<sub>2</sub> 濃度を正確に復元することができれば、気候感度の確度を上げることができ、気候の将来予測に大きく貢献できる。

およそ 270 万年前以降に氷期-間氷期変動が開始した。この変化の原因として、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の減少が有力視されているが、その根拠となる精密な CO<sub>2</sub> 濃度変動記録はまだ得られていない。この時期の CO<sub>2</sub> 濃度を精密に復元することで、CO<sub>2</sub> 濃度の変動の原因と氷期-間氷期変動が卓越する状況の成立に炭素循環がどのように関与したかを検討することが可能になる。

570 万年前から 550 万年前の 20 万年間に全海洋の水温が上昇し、氷床も縮小した。1000 万年スケールで寒冷化が進行してきた中で起きた大きな温暖化として特異であり、注目に値する。この時期の CO<sub>2</sub> 濃度を復元することで、この温暖化に CO<sub>2</sub> 濃度がどのように関与していたのか明らかにすることができる。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

なし

### 【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和 5 年度  
155,500 千円

### 【ホームページ等】

<https://geos.ees.hokudai.ac.jp/yamamoto/>



研究課題名 巨大地震の裏側～巨大化させないメカニズム

東北大学・大学院理学研究科・教授

ひの りょうた  
日野 亮太

研究課題番号：19H05596 研究者番号：00241521

キーワード：海溝型巨大地震、スロースリップ、津波地震、海底地震・地殻変動観測、深海古地震学

【研究の背景・目的】

海溝型地震の巨大化に深く関与するプレート境界断層浅部の挙動は、日本海溝沿いに顕著な空間変化を示す。本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震のような超巨大地震が発生していない日本海溝北部のプレート境界浅部の特性の解明を通して、海溝型地震が巨大化しないメカニズムを理解する。

日本海溝北部では、数年間隔で繰り返し発生するスロースリップと100年オーダーの頻度で発生する海溝軸近傍の中規模すべりイベントである津波地震が主要なすべり欠損の解消過程であると考え、スロースリップのすべり分布と、津波地震の発生履歴(特に頻度)を明らかにし、この領域における海陸プレート間相対運動の収支をモデル化する。

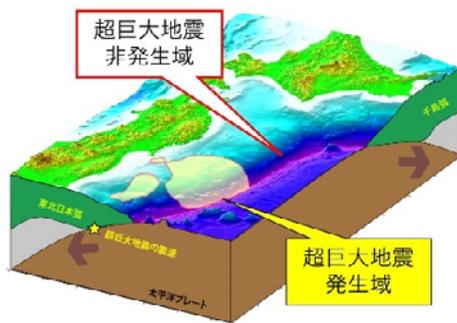


図1 日本海溝沿いの地震発生様式の違い

【研究の方法】

・周期的スロースリップのすべり分布の解明

海陸の地震観測からプレート境界すべりの加速に伴う小繰り返し地震活動からスロースリップの時空間発展の巨視的描像を明らかにする。海底広帯域地震・地殻変動観測を組み合わせ、スロースリップのすべり量分布をプレート境界の最浅部に至るまでの範囲で推定する。

・津波地震の深海古地震学

津波地震に対応する痕跡を日本海溝周辺の深海底堆積物試料から検知し、その年代から津波地震の発生履歴を明らかにする。巨大地震のような厚層タービダイトを伴わない津波地震の痕跡の検知のために、海溝底堆積物コア試料の物性プロファイルの分析と、相対的に小規模なイベント起源の痕跡が残りやすい海溝陸側斜面の試料の採集と分析も進める。

・スロースリップと津波地震の発生モデル構築

調査観測結果を再現するスロースリップと津波地

震のモデルの構築を行う。また、巨大地震が繰り返し発生する日本海溝中部での大規模すべりが北部に伝播しないメカニズムを中部—北部の境界域に特徴的な地形・地質構造をヒントにしてモデル化する。こうしたモデルを総合し、北部でスロースリップと津波地震が卓越し、中部で巨大地震が繰り返し発生する過程を再現する。

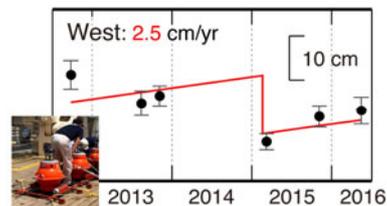


図2 海底GPS観測が捉えたスロースリップによる変動

【期待される成果と意義】

巨大地震が発生する条件を特定することは、地震現象の本質を理解する上で重要であるばかりでなく、将来発生する地震の規模を高い信頼度で想定するために有効である。本研究では、巨大地震の発生域に隣接しながら、大規模すべりが発生したことがない領域に着目することにより、巨大地震が発生しない条件に迫る。巨大地震発生域が共有する特徴とあわせることにより、海溝型地震が巨大化するメカニズムに関する理解を深化させる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Ikehara, K., K., Usami, T. Kanamatsu, et al., Spatial variability in sediment lithology and sedimentary processes along the Japan Trench: Use of deep-sea turbidite records to reconstruct past large earthquakes, Geological Society, London, Special Publications, 456, DOI: 10.1144/SP456.9, 2018.
- Uchida, N., T. Inuma, R. M. Nadeau, R. Bürgmann, R. Hino, Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan, Science, 351, 488-492, doi: 10.1126/science.aad3108, 2016.

【研究期間と研究経費】

令和元年度—令和5年度  
154,900千円

【ホームページ等】

http://jdash.org  
hino@tohoku.ac.jp



**研究課題名** 臨界型非線形数理モデルにおける高次数理解析法の創造

東北大学・大学院理学研究科・教授 おがわ たかよし  
小川 卓克

研究課題番号：19H05597 研究者番号：20224107

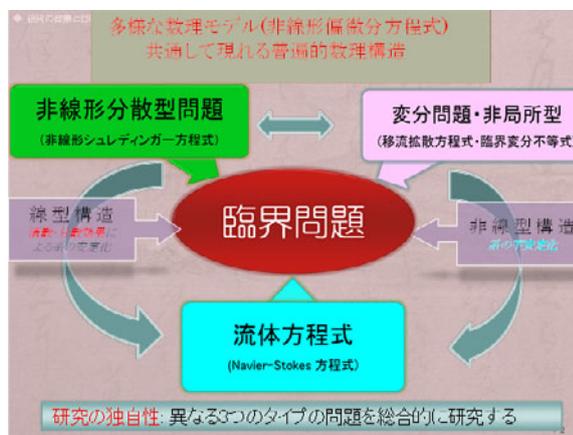
キーワード：非線型偏微分方程式、臨界型函数不等式、臨界函数空間

**【研究の背景・目的】**

多くの数理モデルは物理量の相互作用による非線型偏微分方程式で記述され、線形偏微分作用素に起因する「線形構造」と、物理量の干渉に起因する「非線型構造」を含む。線形構造は消散構造(散逸構造)や分散構造に根ざして、系の安定化に寄与し、物理量の干渉による非線型構造は系を非安定化に導く。これら「線型・安定」構造と「非線型・不安定」構造が釣り合う問題を「**臨界問題**」と呼び本研究の中心的対象とする。数学的にも応用上も重要な問題の多くで、こうした臨界状況が発生し、興味深い数学的現象が現れる。また臨界状況では解析学的に主要な技法である「摂動法」がそのままでは通用しないため解析学的な研究はより困難となる。本研究はこうした臨界性にまつわる問題を研究し、その背後に残されている未開領域ともいえる優臨界問題への足がかりを築くことにある。

**【研究の方法】**

臨界問題の多くは背景にある数理モデルから自然に導かれる質量保存則、運動量保存則、エネルギー、エントロピー保存則、ガリレイ変換普遍性などに加えて、数学的な等角・擬等角保存則といった構造を伴い、それらの無限次元空間内での挙動を詳しく知ることが問題の解決に大いに寄与する。



そして無限次元空間内での汎函数の幾何学的状況を把握し、拮抗する状況がどのような構造により引き起こされるかを研究する。さらに、汎用函数不等式を

より精密化した、いわゆる臨界型函数不等式を研究することが、臨界問題に非常に有効である。そのため函数解析学による函数空間の理解と同時に、不等式の精密化に寄与する実解析学・フーリエ解析の緻密な議論(実補間理論・ウェーブレット理論)を援用し、様々な臨界型函数不等式を確立する。

本研究では、とりわけ臨界型ソボレフ不等式、対数関数を制御するグロスの不等式、ブレジス-ガローエの不等式、および、その双対版と考えられるトゥルディンガー・モーザー型不等式さらには、対数型ソボレフの不等式と対応するシャノン-レニー・エントロピーに対する函数不等式の拡張研究を行う。

対して安定化に寄与する消散構造に対する、定数係数の線形偏微分方程式に対する端点最大正則性や消散-分散混合評価(ストリッカーツ・ブレンナー評価)をオルリッツ空間を用いて精密化する。

**【期待される成果と意義】**

様々な臨界問題の背後にはミレニアム問題として著名な問題を始めとして、重要な未解決問題が軒を連ねる。とりわけ重要な課題として分散性と消散性が同時に存在するモデルにおける解析で、従来、分散性と消散性の解析が互いに相殺し、数学的な証明が困難に陥って、一方の構造をもつ場合に及ぶ成果が得られなかったが、本研究により様々な問題における消散分散構造の分離と非線形干渉による効果の分類が明らかになるにつれて、こうした困難さが解決されるものと考えられる。また臨界函数不等式の確立に伴い、消散・分散効果を伴った様々な解析学的評価群(双線形・三重線型評価、線型消散型評価・線型分散型評価・最大正則性原理)を確立し手法を磨き上げる。

**【当該研究課題と関連の深い論文・著書】**

- 小川 卓克 著「非線型発展方程式の実解析的方法」シュプリンガー現代数学シリーズ 丸善出版 430pp, 2013年. (英語版 Springer より近刊)

**【研究期間と研究経費】**

令和元年度-令和5年度  
100,900 千円

**【ホームページ等】**

<http://www.math.tohoku.ac.jp/~ogawa-staff/>



研究課題名 高次ゆらぎと粒子相関による高密度クォーク核物質の1次相転移と臨界点観測への挑戦

筑波大学・数理物質系・准教授 えすみ しんいち  
江角 晋一

研究課題番号： 19H05598 研究者番号：10323263

キーワード： 臨界点、1次相転移、QCD相構造、クォーク・グルーオン・プラズマ

【研究の背景・目的】

宇宙初期や中性子内部のような高温・高密度の物質状態であるクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)を、重イオン加速器による衝突実験で再現しその性質を調べる事により、量子色力学(QCD)で決まるクォーク核物質のQCD相図(図1)を明らかにする。これまでの研究により高温領域側では、滑らかな相転移であることが判明しつつあるが、高密度領域側ではこのクォーク・ハドロン相転移は境界面が不連続な1次相転移である事が予測される。その1次相転移の終点として臨界点があるとされるが、未だに実験的には確認されていない。クォーク・グルーオン・プラズマ物理にとって、究極の目標であるQCD相構造の解明、つまり1次相転移とQCD臨界点の実験的観測に挑む。

【研究の方法】

高エネルギー領域での原子核衝突実験により得られる高温領域の滑らかなクロスオーバー相転移から、高密度領域に予測されている豊富な相構造に注目し、

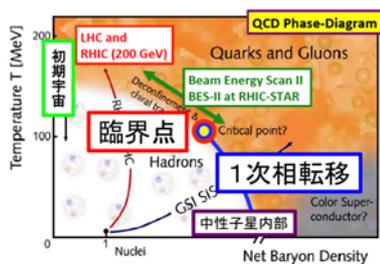


図1 QCD相図

特に RHIC 加速器を用いた低エネルギー限界領域(数 GeV ~ 数 10GeV)で、衝突のビームエネルギーを走査する事により、QCD相図の高密度領域に1次相転移が存在するのか、またその終点となる臨界点が存在するのかを調べる。複雑な高エネルギー原子核衝突環境下でQCD物質の相転移を鋭敏に見極めるために、相転移や臨界現象に対する感度が大きいとされる保存量分布の高次ゆらぎ形状と、低次(特に1次、指向型)の方位角異方性・2粒子(及び、多粒子)相関を衝突のビームエネルギーの関数として測定する。これにより高温・高密度クォーク核物質のQCD相構造と状態方程式を理解する。

【期待される成果と意義】

保存量を全領域で観測すればゆらぎは原理的に無くなるが、選択領域内で測定することにより保存量にゆらぎが観測され、その系の相関長の変化や臨界点を反映し、特に高次ゆらぎは臨界点に対する感度

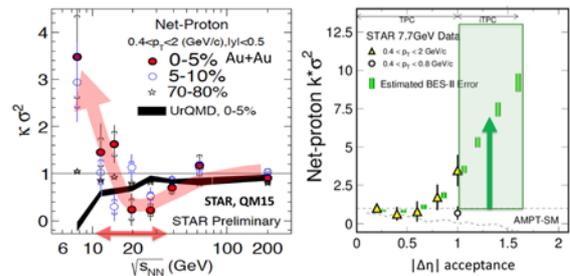


図2 ネット陽子数の4次ゆらぎのエネルギー依存性の現状結果(左)とη領域依存性の予測(右)

が大きいと予測される。図2(左)は第1期エネルギー走査実験(BES1)による4次ゆらぎの結果を示し、低い衝突ビームエネルギー領域で非単調な変化をする兆候を表す。実験と理論のグループの協力体制を作り、実験的な臨界点観測・測定感度を向上し、理論的計算との比較によりゆらぎの起源・発展を導くための解析技術の開発を行う。図2(右)は第2期エネルギー走査実験(BES2)において予測される4次ゆらぎ観測の選択領域依存性を表す。これらにより臨界点や1次相転移の実験的直接的測定感度と、その理論的解釈の精度が格段に改善・向上することが期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Energy dependence of moments of net-proton multiplicity distributions at RHIC, The STAR collaboration, L. Adamczyk, et al.Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 32302
- A general procedure for detector-response correction of higher order cumulants, T.Nonaka, M.Kitazawa, S.Esumi, Nucl. Instr. Meth. A906 (2018) 10-17

【研究期間と研究経費】

令和元年度ー令和5年度  
79,500千円

【ホームページ等】

<http://www.star.bnl.gov>  
<http://www.u.tsukuba.ac.jp/~esumi.shinichi.gn/welcome.html>  
[esumi.shinichi.gn@u.tsukuba.ac.jp](mailto:esumi.shinichi.gn@u.tsukuba.ac.jp)



研究課題名 発展方程式における系統的形状解析及び漸近解析

東京大学・大学院数理科学研究科・教授 いしげ かずひろ  
石毛 和弘

研究課題番号：19H05599 研究者番号：90272020

キーワード：発展方程式、形状解析、漸近解析、冪凹性、爆発問題

【研究の背景・目的】

物理学、化学、生物、天文学等の数理科学上現れる数理モデルの多くは偏微分方程式として記述され、その解の形状解析および漸近解析はその数理モデルの解明に必要不可欠である。特に、拡散現象に関連した数理モデルにおいては、解はある拡散物質の濃度分布の時間の経過によって移ろい行く様を記述し、その解の形状を知りたいと思うのは自然な知的欲求であると考えられる。さらに、爆発や凝集といった非線形特有の特異現象の詳細な解析において解の形状解析と漸近解析は有効な解析手段である。本研究課題では、拡散方程式を中心に発展方程式やその系の解の漸近解析及び形状解析を系統的に行い、様々な発展方程式やその系の解の定性的性質の研究の深化及び未開拓問題の発見・解明を目指す。

【研究の方法】

発展方程式に対する解の形状を研究することは、発展方程式を導入する動機に直結する根源的かつ自然な知的欲求であると共に、爆発や凝集といった非線形現象を詳細に解析するには必要不可欠なものである。本研究課題では、発展方程式およびその系に対して「解の形は？」という素朴かつ根源的問題を問い、解の形のダイナミクスの研究を通して、それに答えようとするものである。本研究は解の形状解析および漸近解析を両輪として進めるものであり、その応用として非線形現象を中心とした様々な未解決問題への挑戦および新たな問題意識の提供を目指す。まず、未だ発展途上にある発展方程式やその系の解の冪凹性の研究について、粘性解理論を用いて系統的に行いつつ、拡散現象における新しい普遍的な凹

性概念の創出や凸性崩壊現象の解明を目指す。また、漸近解析の高次化・精密化を行いつつ汎用を広げ、様々な発展方程式における解に対して、最大点等の解の形状を記述する特徴点等の挙動を解析し、解の形状解析を展開する。さらに、これらの研究の応用・発展として、様々な非線形解析、例えば、楕円型方程式の解の形状や解構造の研究、発展方程式の解の爆発や凝集といった特異現象の解析、結晶成長モデルにおける螺旋構造生成メカニズムの解明等を目指した界面運動解析や高階放物型方程式論の構築、動的境界条件付き発展方程式の解の漸近挙動等の研究を行う。これらの研究には必要に応じて計算機による数値実験からの援用も行っていく。

また、ポスドク研究員やリサーチアシスタントを雇用すると共に、形状解析や爆発問題に関する国際研究集会を開催し、研究成果の発信及び情報収集、さらに国際共同研究を推進する。

【期待される成果と意義】

当該研究組織は形状解析および漸近解析に関する独自の研究視点および研究手法を有しており、それを基に様々な解析手法を合わせることにより、独創的な研究成果を得ることが強く期待できる。また、解の形状解析および漸近解析は解析学の根幹に関わる基礎不等式の研究から様々な非線形現象解析にまで関連する幅広いものであるため、当該研究の研究成果は解析学全体の発展に大きく寄与するものであると考える。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

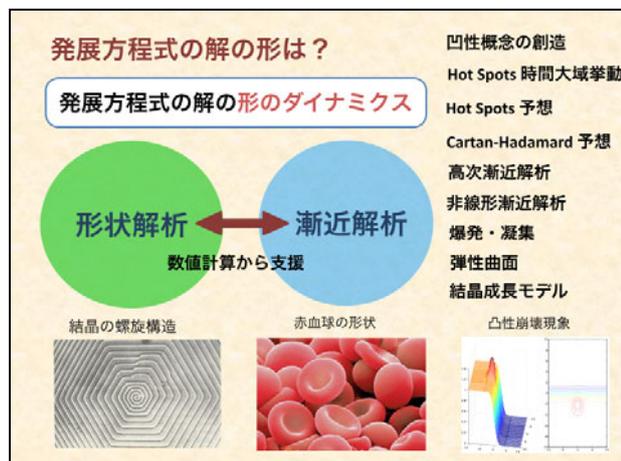
- F. Gazzola, K. Ishige, C. Nitsch, P. Salani 共編著 「Geometric Properties for Parabolic and Elliptic PDE's」 Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, Vol. 176, Springer International Publishing Switzerland (2016).
- K. Ishige and P. Salani, Parabolic power concavity and parabolic boundary value problems, Math. Ann. 358 (2014), 1091–1117.

【研究期間と研究経費】

令和元年度—令和5年度  
107,500 千円

【ホームページ等】

<http://www.ms.u-tokyo.ac.jp/teacher/ishige.html>  
[ishige@ms.u-tokyo.ac.jp](mailto:ishige@ms.u-tokyo.ac.jp)





## 研究課題名 核スピン流の物性科学開拓と核スピン熱電変換

東京大学・大学院工学系研究科・教授

さいとう えいじ  
齊藤 英治

研究課題番号：19H05600 研究者番号：80338251

キーワード：スピントロニクス、スピン流、核スピントロニクス、核スピン流

### 【研究の背景・目的】

本研究は、原子核スピンとスピン流物性を繋ぐ新たな学問領域「核スピン流科学」を建設するものである。スピン流科学では、これまで電子角運動量を利用して多彩な物性機能を作り出してきた。一方で、量子センサーや情報担体として期待されている核スピンを組み込むことができなかった。そこで本研究では、核スピンによるスピン流現象群の開拓を行い、拡大したスピン流物性概念がもたらす新学問の形成を目指す。

スピントロニクスは、電子のスピンを利用することで新しい物性現象や電子機能を創出することを目指した学術分野である。応用面では、磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) の実現など情報社会に不可欠な基盤技術として進化し続けている。スピントロニクス物理が提示した重要概念にスピン流がある。スピン流は電子スピン角運動量の流れであり、電流のスピン版である。スピントロニクス物性の多くは、スピン流の運ぶ角運動量と深く関連しており、スピン流の概念のもとに磁化やフォノンなどの固体中の様々な角運動量概念が統一されてきた。一方で、世界各所での長年の挑戦にも関わらず、量子センサーや情報担体として注目されている核スピンだけはスピン流科学に結び付けられなかった。

そのような中で、研究代表者らは核スピンからスピン流を取り出す現象「核スピンポンピング」を発見した。この発見により核スピン流の検出法が確立され、核スピン流物性開拓の基盤が整った。本研究では、これらの現象群を発見・開拓し、新たな学問領域「核スピンによるスピン流科学」を建設する。

### 【研究の方法】

核スピンポンピングの発見により、核スピンからのスピン流生成が実現された。核スピン波生成による核スピンと電子スピン流の効率的な結合を利用す

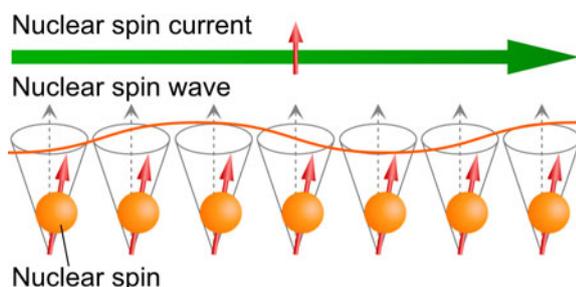


図 1 核スピン流

ることで、核スピンからのスピン流生成が実現される。これは、核スピンとスピン流科学をつなぐ重要な発見である。

この発見により、核スピン流の検出および定量評価の方法が初めて確立された。本手法とこれまで研究代表者らが築き上げてきた電子スピン流科学の学理と実験技術を組み合わせることで、核スピン流現象を発見・開拓し、核スピン流科学の学問を建設することが可能である。

### 【期待される成果と意義】

本研究を通して「核スピン流科学」を建設する。核スピンとスピン流科学をつなげることにより、本質的に新しく利用価値の高い現象群が実現され、より広い体系のスピントロニクス学理体系が構築される。核スピン流科学は、核スピンのプローブとして利用されている固体化学や材料化学、生物学など多くの分野に対してスピントロニクス技術を利用する道をも開く。物性科学としての新たな学問開拓は勿論のこと、汎用性の高い基盤技術の構築も意識し、幅広い科学への貢献を目指す。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- E. Saitoh, M. Ueda, H. Miyajima, and G. Tatara, "Conversion of spin current into charge current at room temperature: Inverse spin-Hall effect" *Applied Physics Letters* **88**, 182509 (2006).
- Y. Shiomi, J. Lustikova, S. Watanabe, D. Hirobe, S. Takahashi, and E. Saitoh, "Spin pumping from nuclear spin waves" *Nature Physics* **15**, 22-26 (2019).
- K. Harii, Y.-J. Seo, Y. Tsutsumi, H. Chudo, K. Oyanagi, M. Matsuo, Y. Shiomi, T. Ono, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Spin Seebeck mechanical force" *Nature Communications* **10**, 2616 (2019).

### 【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和5年度  
158,700 千円

### 【ホームページ等】

<http://saitoh.t.u-tokyo.ac.jp>  
[eizi@ap.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:eizi@ap.t.u-tokyo.ac.jp)

## 【基盤研究(S)】

### 大区分B



## 研究課題名 光格子重元素干渉計による基本対称性破れの発現機構の解明

東京大学・大学院理学系研究科・教授 さけみ やすひろ  
酒見 泰寛

研究課題番号：19H05601 研究者番号：90251602

キーワード：基本対称性、電気双極子能率、光格子重元素干渉計、レーザー冷却分子、バリオン生成

### 【研究の背景・目的】

ヒッグス粒子の発見によって、物質の質量獲得機構の理解をはじめ、素粒子物理学は大きく発展した。この基盤となる標準理論が着実に検証されながらも、物質・反物質対称性（CP対称性）の破れの機構は十分には説明できず、さらに根源的な枠組みが必要となっている。階層問題の解決、ゲージ結合定数の統一、暗黒物質の実体等を説明する考え方の一つである超対称性理論（SUSY）では、標準理論において登場する素粒子各々に、粒子の統計性が異なる相棒粒子（SUSY粒子）の存在が予言されている。

本研究では、CP対称性破れの起源の一つと考えられるSUSY粒子により、量子補正効果として素粒子に発現する電荷分布の偏り（電気双極子能率：EDM）を探索する。特に重い原子系（重元素）や、重元素を構成要素にもつ極性分子等の量子多体系では、相対論効果や原子核変形効果が増大し、素粒子レベルでは極めて小さいEDMが量子増幅されることが示唆されている。原子系で最大の電子EDM増幅度を有する重元素・フランシウム（Fr）の同位体を生成し、そのEDMを系統的に測定することで、反物質消失機構を調べるとともに、電弱バリオン生成のシナリオに制限をつけて、物質創成機構の解明を目指す。

### 【研究の方法】

SUSY粒子が生成・伝搬・消滅を繰り返す量子補正効果により、素粒子に発現するEDMを精密に検出する。EDMが格段に増幅される原子・分子等の量子多体系を量子制御し、EDMの次世代精密量子計測を実現して、CP対称性破れの起源を探る。

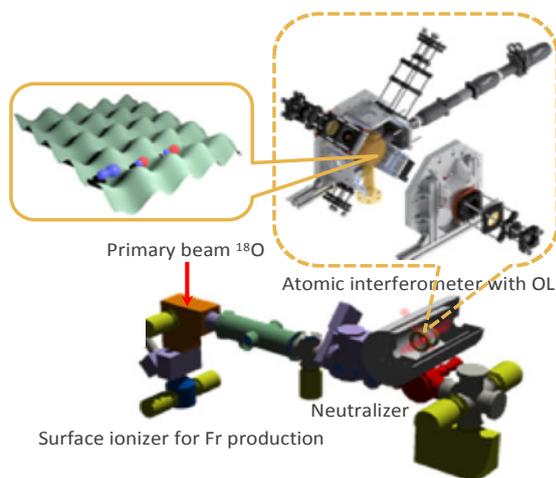


図1 光格子重元素干渉計の概観

重元素Frは、理化学研究所AVFサイクロトロンからの大強度イオンビームと標的核との原子核反応により生成し、オンラインでレーザー冷却を行う手法と、Frのgeneratorとなるアクチニウムを生成し、オフラインでの冷却Fr源を生成する手法を確立する。この冷却Fr源を光格子で形成された原子干渉計（光格子重元素干渉計）に移し、Frのスピン歳差周期を精密計測することで、 $\sim 10^{-30}$  ecmのEDM測定精度を目指す（図1に実験装置の概観を示す）。さらに、極性分子：Fr-Srのレーザー冷却・トラップ技術を開拓し、極性分子内の大きな有効電場を利用した電子EDMのさらなる測定精度向上を実現する。

### 【期待される成果と意義】

素粒子標準理論は様々な現象の説明に成功をおさめているが、理論が有するパラメータの数は不自然であり、より根源的な理解を目指して、現代物理が対象とすべきエネルギーの上限であるプランクスケールまで15桁に及ぶ未踏領域に対して、保存則や対称性の起源を追求する必要がある。本研究では、量子多体系を極端な量子状態に制御することで、量子補正として発現する未知の粒子や対称性破れの効果を増幅し、EDMを探索する超精密量子計測を開拓する。さらに、 $\sim 10$  TeV以上の重いSUSY粒子の質量階層構造の情報を得る。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Correlation Trends in the Hyperfine Structures of  $^{210,212}\text{Fr}$ . B.K.Sahoo, D.K. Nandy, B.P. Das, and Y. Sakemi Phys.Rev. A91 (2015) 042507
- Effective multiple sideband generation using an electro-optic modulator for a multiple isotope magneto-optical trap. A.Uchiyama, K.Harada, and Y.Sakemi et al.Review of Scientific Instruments 89 (2018) 123111

### 【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和5年度  
154,200千円

### 【ホームページ等】

<https://sites.google.com/cns.s.u-tokyo.ac.jp/fundamental-symmetry-group>  
[sakemi@cns.s.u-tokyo.ac.jp](mailto:sakemi@cns.s.u-tokyo.ac.jp)



研究課題名 ファンデルワールス・ヘテロ接合の物理と機能

東京大学・大学院工学系研究科・教授

いわさ よしひろ  
岩佐 義宏

研究課題番号：19H05602 研究者番号：20184864

キーワード：2次元物質、ファンデルワールスヘテロ接合、非線形現象、磁性ヘテロ接合、電界効果

【研究の背景・目的】

近年の物質科学は、原子層1層あるいは数層の物質が安定に存在し、バルクの結晶と大きく異なる性質を示すことを明らかにし、2次元物質という新しい一大分野を形成するにいたりました。2次元物質を自在に積層したファンデルワールス(vdW)ヘテロ接合は、従来の格子整合を前提としたヘテロ接合の枠組みを大きく超えた新しい概念であり、今後その物性・機能の開拓が大きな課題となってきました。

本研究の目的は、vdWヘテロ接合からなる様々な新物質を作製し、単一物質では決して得られない新しい物性を見出すことです。

その中心的なテーマとして、第1に、対称性の破れに起因した非相反輸送現象や異常光起電力効果などの新現象を、第2に隣接する物質との強い近接効果に起因する新しい電子相の形成を取り上げます。さらにこれらの微視的機構を明らかにして、それに基づく新しい機能性の提案を行います。

【研究の方法】

本研究グループは、VdWヘテロ接合を作製する手法として、機械的積層法とMBE法の2つを有する世界的にも稀有のグループです。前者は、積層物質間の相対角度を人為的に制御して、自然には決して存在しない物質を作ります。一方後者では、機械的な方法では不可能な単層物質を作製できるとともに、大面積試料を作製できます。またこれらを組み合わせたvdWヘテロ接合も作製できます。この手法によって得られた試料の、電気抵抗や光伝導性、それらの

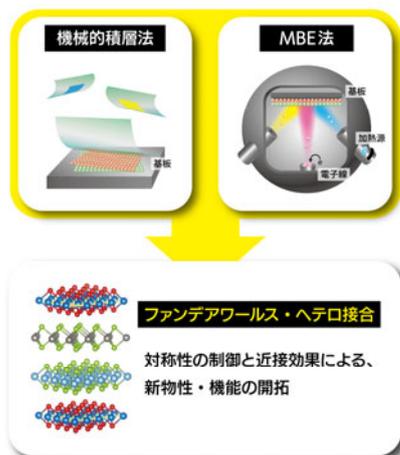


図1

非線形応答などの実験を通して、上記2つの観点から本系の物性を解明します。

【期待される成果と意義】

第1に、2次元物質とそのヘテロ接合の多様性を生かし、空間反転対称性の回転対称性や反転対称性を制御したvdWヘテロ構造を、多様に設計・作製し、そこでの電場に対する2次の非線形応答を明らかにします。これによって、対称性の破れた物質・構造における、ベリー接続、ベリー曲率、ベリー曲率双極子、すなわち運動量空間での量子位相が物性に与える影響を包括的に理解します。特に、pn接合を必要としない異常光伝導現象の効率を、vdWヘテロ接合を用いた最大化を目指します。

第2に、隣接する物質との強い近接効果に起因する物性を物性の開拓を行います。2次元物質が表面のみで構成されていることを利用し、隣接物質の磁気秩序、超伝導などがお互いに近接効果で相互作用しあうことによって、単一物質のみではありえない新たな電子相や機能をvdWヘテロ接合において発現せしめることを目指します。また、光物性の側面からは、従来、一つの物質の中で研究されてきた励起子-マグノン相互作用を、vdW界面を通じた異種物質間に拡張します。この性質を解明するとともに、マイクロ波-可視光変換効率の増強を目指します。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Enhanced intrinsic photovoltaic effect in tungsten disulfide nanotubes, Y.J. Zhang, T. Ideue, M. Onga, F. Qin, R. Suzuki, A. Zak, R. Tenne, J. H. Smet and Y. Iwasa, *Nature*, **570**, 349 (2019).
- Bulk rectification effect in a polar semiconductor T. Ideue, K. Hamamoto, S. Koshikawa, M. Ezawa, S. Shimizu, Y. Kaneko, Y. Tokura, N. Nagaosa & Y. Iwasa, *Nature Physics*, **13**, 578 (2017).

【研究期間と研究経費】

令和元年度-令和5年度  
154,600千円

【ホームページ等】

<http://iwasa.t.u-tokyo.ac.jp/index.html>  
[iwasa@ap.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:iwasa@ap.t.u-tokyo.ac.jp)



**研究課題名** メゾスコピック量子ホール系の低次元準粒子制御と非平衡現象

東京工業大学・理学院・教授 **ふじさわ としまさ**  
**藤澤 利正**

研究課題番号： 19H05603 研究者番号： 20212186

キーワード： メゾスコピック系、量子ホール系、低次元準粒子、非平衡現象

**【研究の背景・目的】**

物性物理学において、準粒子は重要な役割をなす。一電子描像では捉えがたい集団運動を、相互作用に起因する準粒子の描像によって美しく説明できる。本研究の対象である量子ホール系は、強磁場中の二次元電子に現れる二次元トポロジカル絶縁体であり、絶縁化されたバルクにおける特徴的な励起状態や、カイラルエッジにおける一方向伝導など興味深い現象を示す。これらは、図1に示すように、二次元系(バルク)の分数電荷準粒子 ( $e/3$ ,  $e/5$  など) や電子スピンの旋回構造であるスカーミオン、一次元エッジの集団的電荷励起(プラズモン)や集団的スピン励起(スピノン)などの低次元準粒子によって説明することができる。これらの特徴的な準粒子の非平衡状態を制御することで、新しい応用の開拓が期待されている。

本研究の目的は、低次元準粒子の非平衡ダイナミクスを探求することで、量子ホール熱機関やトポロジカル量子工学への応用指針を得ることである。本基盤研究で特に注目する点は、ブレイディング(組紐)操作や量子ホール熱機関に向けた準粒子制御にある。

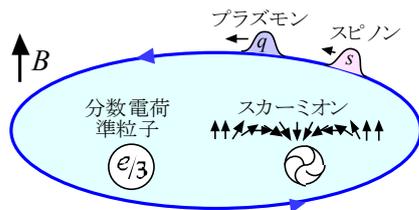


図1 低次元準粒子

**【研究の方法】**

本研究では、AlGaAs/GaAs 半導体テロ構造の量子ホール系を微細加工したメゾスコピック量子ホール系により、非平衡準粒子の制御と応用に関する研究を進める。図2のように、量子ポイント接合(QPC)、量子ドット(QD)、量子アンチドットなどの機能的な素子を集積化し、一次元・二次元系準粒子の“測定系”を構成することで、低次元系特有の準粒子(プラズモン・スピノン・分数電荷・スカーミオンなど)の非平衡状態を評価し、輸送特性(電荷流・スピン流・熱流など)を明らかにする。

例えば、準粒子に起因する電荷・スピン・熱の輸送を走査型偏光分光顕微鏡などの手法を用いて解析する。量子ドットにパルスを印加することで波束を発生し、量子ドット分光器、時間分解電荷測定、雑

音測定などにより多角的な解析を行うことで、準粒子の非平衡ダイナミクスを制御・観測する。また、分数量子ホール領域におけるエッジ構造を明らかにすることや、単一準粒子の制御によってブレイディング(組紐)操作などを設計できる。さらに、熱と仕事の効率的な変換を設計することで、量子ホール熱機関を構築することができる。

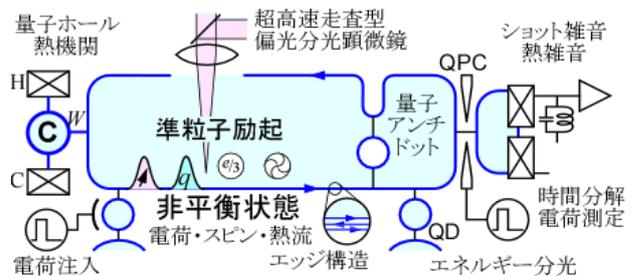


図2 メゾスコピック量子ホール系

**【期待される成果と意義】**

メゾスコピック量子ホール系の実験研究と理論研究により低次元準粒子の非平衡ダイナミクスを探求する。トポロジカル量子工学や量子ホール熱機関に活用することのできる低次元準粒子の操作手法を開拓する計画である。

**【当該研究課題と関連の深い論文・著書】**

- K. Itoh, R. Nakazawa, T. Ota, M. Hashisaka, K. Muraki, and T. Fujisawa, "Signatures of a nonthermal metastable state in copropagating quantum Hall edge channels", Phys. Rev. Lett. 120, 197701-1-5 (2018).
- M. Hashisaka, N. Hiyama, T. Akiho, K. Muraki and T. Fujisawa, "Waveform measurement of charge- and spin-density wavepackets in a chiral Tomonaga-Luttinger liquid", Nature Physics 13, 559-562 (2017).

**【研究期間と研究経費】**

令和元年度ー令和5年度  
153,500 千円

**【ホームページ等】**

<http://fujisawa.phys.titech.ac.jp>  
fujisawa@phys.titech.ac.jp



研究課題名 極端環境下における元素合成過程の解明

大阪大学・大学院理学研究科・教授

かわばた たかひろ  
川畑 貴裕

研究課題番号：19H05604 研究者番号：80359645

キーワード：トリプルアルファ反応、元素合成、アクティブ標的、中性子ビーム

【研究の背景・目的】

観測可能な領域だけでも  $10^{26}$  m という広大な拡がりをもつ宇宙と、 $10^{-15}$  m という極めてミクロな原子核との間には密接な関係がある。宇宙開闢のとき、まだ宇宙には一切の元素が存在していなかった。しかし、現在の宇宙には様々な元素が存在している。すべての元素は 138 億年にわたる宇宙の進化のなかで、原子核反応によって生み出されてきた。

宇宙における元素合成において最も重要な反応のひとつは、 $^4\text{He}$  ( $\alpha$  粒子) が二つの  $\alpha$  粒子の共鳴状態である  $^8\text{Be}$  に捕獲されて  $^{12}\text{C}$  を合成するトリプルアルファ ( $3\alpha$ ) 反応である。しかし、高温・高密度な極端環境下における  $3\alpha$  反応率には、既知の値に比べ数倍から 100 倍も増大する可能性が指摘されており、宇宙における元素合成過程を明らかにするうえで大きな問題となっていた。そこで、本研究課題では、極端環境下における  $3\alpha$  反応率を決定し、宇宙における元素合成過程を明らかにすることを目的とする。

【研究の方法】

図1に示すように、 $3\alpha$  反応では3つの  $\alpha$  粒子の共鳴状態が中間状態として生成される。これらの  $3\alpha$  共鳴状態の大半は再び3つの  $\alpha$  粒子へ崩壊するが、極めて稀に  $^{12}\text{C}$  の基底状態へと崩壊して  $^{12}\text{C}$  を生成する。 $3\alpha$  反応率を決定するには、これらの  $3\alpha$  共鳴状態の基底状態への崩壊分岐比を測定する必要がある

高密度下における  $3\alpha$  反応率

通常温度 ( $\sim 10^8$  K) における  $3\alpha$  反応は、主に  $0_2^+$  状態を経由するが、 $10^9$  K を超える高密度下ではより高い励起エネルギーを持つ  $2_2^+$ ,  $3_1^+$ ,  $0_3^+$  状態の寄与が重要となる。 $0_2^+$  状態と  $2_2^+$  状態から基底状態への崩壊分岐比はすでに知られているが、 $3_1^+$  状態や  $0_3^+$  状態から基底状態への崩壊分岐比は  $10^{-6}$ — $10^{-8}$  と極めて低く、これまで測定されていない。そこで本研究では逆運動学条件下における  $^{12}\text{C}$  からのアルファ非弾性散乱を測定することにより、 $3_1^+$  状態と  $0_3^+$  状態から

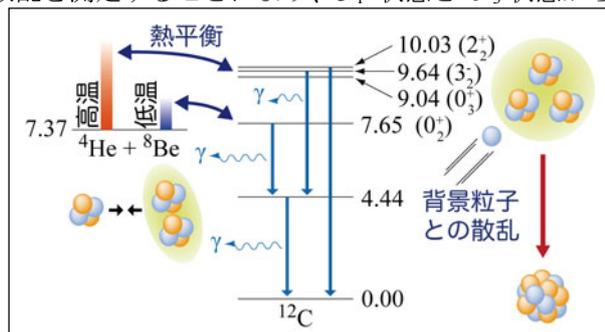


図1  $3\alpha$  反応の模式図

基底状態への崩壊分岐比を決定する。

高密度下における  $3\alpha$  反応率

通常の  $3\alpha$  反応では、中間状態として生成された  $3\alpha$  共鳴状態が  $\gamma$  崩壊により基底状態へと遷移する。一方、高密度な環境下においては周辺の粒子と  $3\alpha$  共鳴状態が吸熱型の非弾性散乱を起こすことにより基底状態へと脱励起する機構を無視できなくなる。特に中性子の非弾性散乱による寄与は大きく、 $3\alpha$  反応率が 100 倍以上に増大すると予測されている。

高密度下における  $3\alpha$  反応率を決定するためには、 $3\alpha$  共鳴状態と中性子の非弾性散乱の断面積を測定する必要があるが、 $3\alpha$  共鳴状態は短寿命であるため、これを実際に測定することは不可能である。そこで、本研究では宇宙における反応の逆反応、すなわち、 $^{12}\text{C}$  の基底状態を  $3\alpha$  共鳴状態へ励起する中性子非弾性散乱の断面積を測定し、詳細釣り合いの原理を用いて  $3\alpha$  共鳴状態と中性子の非弾性散乱断面積を決定する。しかし、逆反応では終状態となる3つの  $\alpha$  粒子のエネルギーが極めて低い ( $< 0.5$  MeV) ため測定は容易でない。そこで、新しいアクティブ標的を開発し、低エネルギー  $\alpha$  粒子の測定を可能とする。

【期待される成果と意義】

宇宙における元素合成過程を明らかにするうえで、 $3\alpha$  反応率は極めて重要なパラメータである。例えば、重力崩壊型の超新星爆発時には高温・高密度の  $^4\text{He}$  相が発現し、 $3\alpha$  反応を経由して重元素が生成されると考えられている。このとき  $3\alpha$  反応率が変化すると、重元素の生成量は劇的に変化する。

本研究課題の遂行によって高温・高密度下における  $3\alpha$  反応率を決定することができれば、超新星爆発時における重元素合成量の予測精度が飛躍的に向上し、これを超新星残骸の観測と比較することで、これまで詳しく理解されていなかった超新星爆発のメカニズムについての知見を得られるようになることが期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

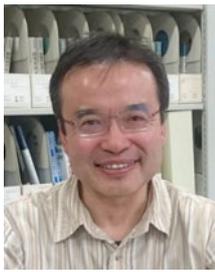
- S. Wanajo et al., *Astrophys. J.* 729, 46 (2011).
- M. Beard et al., *Phys. Rev. Lett.* 119, 112701 (2017).

【研究期間と研究経費】

令和元年度—令和5年度  
132,600 千円

【ホームページ等】

<http://nucl.phys.sci.osaka-u.ac.jp/kawabata@phys.sci.osaka-u.ac.jp>



**研究課題名** あかつきデータ同化が明らかにする金星大気循環の全貌

神戸大学・大学院理学研究科・教授 **はやし よしゆき**  
**林 祥介**

研究課題番号：19H05605 研究者番号：20180979

キーワード：金星大気大循環モデル、金星探査機「あかつき」、スーパーローテーション、データ同化

**【研究の背景・目的】**

金星大気の大気循環構造は今日においてもあまりよく理解されてはいない。とりわけ高度 45-70km 付近にある分厚い雲層のため、大気下部の状況はほとんど未知である。金星大気循環の最も顕著な特徴としては、「スーパーローテーション (4 日循環)」、すなわち、雲層上部で約 100m/s (4 日で金星を一周する風速) に達する高速東西流の存在がある。これは金星本体の自転 (周期 243 日) の数十倍の超回転状態であり、ゆっくり自転する固体惑星から大気へと角運動量を汲み上げ、これを維持する循環構造の解明が気象学の基本的な課題として残されている。

このような状況に対し、我が国の金星探査機「あかつき」は、金星大気に関する世界初の本格気象衛星として金星周回軌道に投入され、4 種類の撮像カメラ群によって金星大気の異なる深さの情報収集を行ってきた。「あかつき」探査以前、金星大気の観測は断片的であり、一方、対比すべき金星大気数値シミュレーションモデルは、表現すべき循環構造が未知なため、手探りの状況にあった。

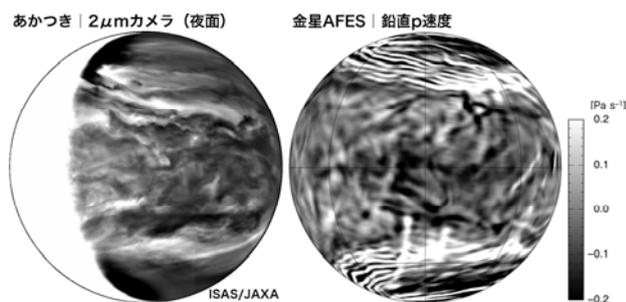


図1 「あかつき」IR2 画像(左)、AFES-Venus による鉛直流(右)(Kashimura et al., 2019).

しかし、「あかつき」で得られた鮮明な画像と、我々が開発を進めている、地球シミュレータ上の金星大気大循環モデル (AFES-Venus) による高解像度数値計算結果との間には、驚くべき類似性が示されていた (図 1)。観測とモデルの比較が可能であることが示唆されたのである。本研究の目的は、今日的な方法の導入によりモデルと観測との比較を実現し、モデル開発を促進し、金星大気の大気循環構造の謎 (スーパーローテーション) に迫ることにある。

**【研究の方法】**

「あかつき」観測・解析と AFES-Venus の開発・数値実験とを「データ同化」の手法を導入する (Sugimoto

et al., 2017) ことにより融合・推進し、観測と矛盾せず力学的に辻褃のあった金星大気大循環場の生成を実現する (図 2)。「あかつき」による電波掩蔽観測、撮像画像群とそこから生成される雲追跡風ベクトルを活用、さらには、雲・放射過程など素過程モデル群を開発導入し「あかつき」観測シミュレーションを実現することによりこれを進める。



図2 「データ同化」による観測とモデルの融合イメージ。

**【期待される成果と意義】**

データ同化で得られた大気場の解析により大気擾乱の存在と構造、物質輸送と雲構造を明らかにし、その理解の上に金星大気の子午面循環と角運動量輸送を掌握、スーパーローテーションに至る金星大気の大気循環構造を明らかにすることを目指す。本研究での試みと、精錬される『あかつき』金星気象データセットは、金星大気ならびに金星を足がかりにした惑星大気一般の理解への礎となるだろう。

**【当該研究課題と関連の深い論文・著書】**

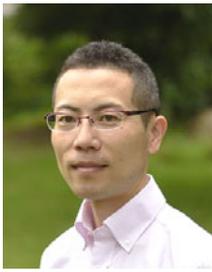
- Kashimura, H., et al., Planetary-scale streak structure reproduced in high-resolution simulations of the Venus atmosphere with a low-stability layer. *Nature Communications*, **10** (23), 1-11, doi:10.1038/s41467-018-07919-y. (2019).
- Sugimoto, N., et al., Development of an ensemble Kalman filter data assimilation system for the Venusian atmosphere. *Scientific Reports*, **7**, 9321, doi:10.1038/s41598-017-09461-1, (2017).

**【研究期間と研究経費】**

令和元年度ー令和5年度  
145,200 千円

**【ホームページ等】**

<http://www.cps-jp.org/~akatsuki/>  
shosuke@gfd-dennou.org



**研究課題名** 純レプトン原子のレーザー分光による電弱統一理論精密検証と新物理探索

岡山大学・異分野基礎科学研究所・准教授

うえたけ さとし  
植竹 智

研究課題番号：19H05606 研究者番号：80514778

キーワード：ミュオニウム、精密レーザー分光、電弱統一理論、新物理探索

【研究の背景・目的】

素粒子の標準理論を超える新物理探索は、基礎物理学の最重要課題である。本研究では、最新の原子分光技術を駆使し、レプトン(素粒子)のみからなる「純レプトン原子」のエネルギー準位を精密に測定する。これにより、標準理論の一部をなす電弱統一理論の精密検証および電子とミュオン粒子に結合する未発見の素粒子(力を媒介する粒子)探索を目指す。

単純な構造の水素原子を用いた原子物理学実験は、20世紀の物理学発展において最も重要な役割を果たしてきた。また、1999年の光コム開発により、レーザー分光で水素のエネルギー準位を精密に測る技術が急速に発展し、水素原子の1S-2S遷移周波数(約 $10^{15}$  Hz)は誤差10 Hzという驚異的な精度で測定できる時代となった。一方、残念ながら水素原子の高精度な理論計算は非常に困難なため検証が進んでいない。これは通常の原子核がハドロン(複合粒子)で構成されることが理由である。最も単純な構造の水素原子でさえ、陽子半径を正確に計算できないことによるエネルギー準位の不定性は100 kHzもあり、実験精度と4桁も乖離している。

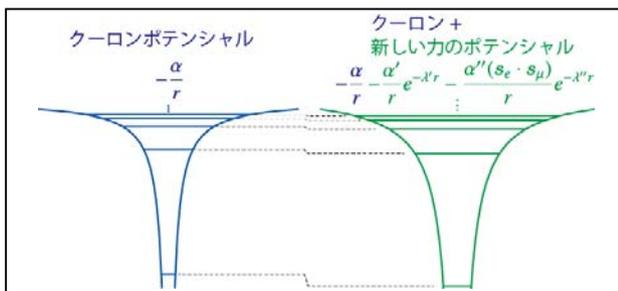


図1：荷電束縛系のポテンシャルとエネルギー準位

【研究の方法】

通常の原子が持つ本質的な困難を、レプトンのみで構成される純レプトン原子：ミュオニウム(Mu:  $\mu^+e^-$ )を用いて解決することが本研究の特徴である。Muは水素原子の同位体と見なせるが、最大の違いは構造のない素粒子のみで構成されることにある。そのため理論と実験の高精度比較・検証が可能である。実際Muのエネルギー準位には、電弱相互作用によるシフトが実験で十分検出可能な大きさ(-65 Hz)で現れることが理論計算でわかっている。過去に行われたMuの分光では、大量のMu生成が困難だったため十分な統計量の測定ができなかった。ところが、この状況はJ-PARCにおける大強度陽子加速器の成功と、それにより大量の高品質ミュオン粒子が得られ

るようになったことで一変した。

本研究では最新の原子分光技術と高品質ミュオン粒子生成技術、そして電弱統一理論の精密計算技術の3つを最大限に活用し、「純レプトン原子」のエネルギー準位を精密に測定する。そして電弱統一理論の計算値と比べることで新物理の影響の有無を調べる。

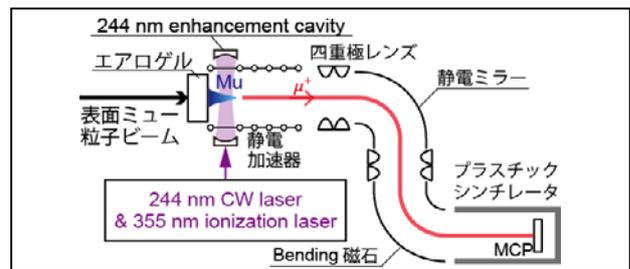


図2：1S-2Sレーザー分光システム

【期待される成果と意義】

Muの1S-2S分光の実験精度を先行研究で得られた値より大幅に向上することで、基礎物理定数であるミュオン粒子質量の精度を現在のCODATA推奨値より大幅に改善する。その結果、現在ミュオン粒子質量の不確かさで制限される様々な物理量の理論精度が向上するため、学術的波及効果が大きい。同時にMuの束縛エネルギーの理論計算精度も向上するため、電弱効果によるエネルギーシフト(-65Hz)の検証が可能となる。もし-65Hzからのずれが観測されれば新物理の影響強く示唆するものとなり、今後の素粒子研究の方向性に大きな影響を与える。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- A. Yamaguchi, S. Uetake, S. Kato, H. Ito, Y. Takahashi, "High-resolution laser spectroscopy of a Bose-Einstein condensate using the ultranarrow magnetic quadrupole transition", *New. J. Phys.* 12, 103001 (2010)
- Y. Miyamoto, S. Uetake, M. Yoshimura *et al.*, "Externally triggered coherent two-photon emission from hydrogen molecules", *PTEP*2015, 081C01 (2015)

【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和5年度  
154,300千円

【ホームページ等】

<http://www.xqw.okayama-u.ac.jp/>



**研究課題名** 広エネルギー領域の精密測定による超高エネルギー宇宙線の源と伝播の統一的解釈

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授 **おぎお しょういち**  
**萩尾 彰一**

研究課題番号：19H05607 研究者番号：20242258

キーワード：宇宙線、化学組成、宇宙線の起源、銀河系、銀河間空間、宇宙物理

**【研究の背景・目的】**

日米韓露比捷 6 カ国の国際共同実験「テレスコープアレイ実験 (TA 実験)」は米国ユタ州で北半球最大の宇宙線観測装置を 2008 年から運用している。

2018 年には  $10^{15.3}$ eV 以上 5 桁におよぶ広い領域のエネルギースペクトルを描き出し、多様な構造があることを示した。銀河系内起源宇宙線の卓越する  $10^{17}$ eV 以下の領域、系内起源宇宙線と系外起源宇宙線がせめぎ合う  $10^{17}$ eV から  $10^{19}$ eV の領域のスペクトルに現れる様々な構造は、系内起源天体の特徴・加速エネルギー限界、銀河磁場による宇宙線の閉じ込め・系外宇宙線の遮断、起源天体の宇宙論的進化、といった豊富な物理を反映している。

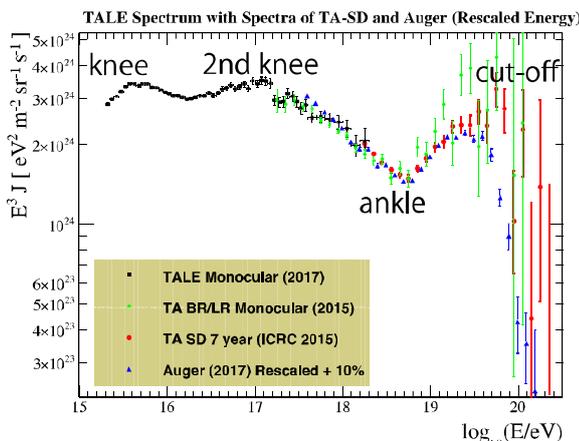


図 1：TA 実験と TALE 実験 FD により観測されたエネルギースペクトル (フラックス×E<sup>3</sup>)

本研究では  $10^{15}$ eV 以上 5 桁におよぶ広い範囲でのエネルギースペクトルと化学組成の精密同時測定を行い、銀河系内／系外宇宙線の源と伝播の統一的解釈のための決定的なデータを得る。



図 2：TALE 実験地表検出器 (SD) の外観。

**【研究の方法】**

TA 実験は 700km<sup>2</sup> をカバーする 507 台の地表検出器 (SD, 1.2km 間隔) と 38 台の大気蛍光望遠鏡 (FD) からなり、さらに「TALE ハイブリッド実験」と呼ばれる、低エネルギー側への検出感度拡張のための高密度配置 30km<sup>2</sup> SD アレイ (80 台、400m 間隔) と高仰角 FD 10 台が追加され、2018 年から稼働している。本研究ではさらに 200m 間隔で 50 台の SD を追加設置し、化学組成測定感度を  $10^{15}$ eV まで下げる。

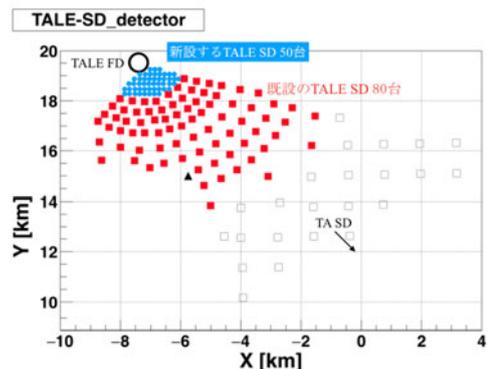


図 3：SD の追加設置計画 (青点 50 台、200m 間隔)

**【期待される成果と意義】**

銀河系内起源宇宙線の化学組成、銀河磁場の乱流成分スケール長、銀河風速度、銀河ハローのサイズ、銀河ハロー内磁場強度、銀河系外宇宙線源天体の宇宙論的進化・宇宙空間分布などに迫るデータを得ることが期待される。このエネルギー領域を単一の装置で、また SD と FD のハイブリッド実験でカバーする世界唯一の装置である。

**【当該研究課題と関連の深い論文・著書】**

- R. U. Abbasi, et al., Ap. J., 865, 1(2018)
- R. U. Abbasi, et al., Ap. J., 858, 76(2018)

**【研究期間と研究経費】**

令和元年度～令和 5 年度  
155,700 千円

**【ホームページ等】**

- <http://www.telescopearray.org>
- <http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp>
- <http://www.cosmicray-ocu.jp>



**研究課題名** CALET 長期観測による銀河宇宙線の起源解明と暗黒物質探索

早稲田大学・理工学術院・名誉教授 **とりい しょうじ**  
**鳥居 祥二**

研究課題番号：19H05608 研究者番号：90167536

キーワード：高エネルギー宇宙線、銀河宇宙線、近傍加速源、暗黒物質、国際宇宙ステーション

**【研究の背景・目的】**

我々は宇宙空間における高精度な宇宙線観測を実現するため、国際宇宙ステーション(ISS)日本実験棟「きぼう」に搭載する観測装置 CALET を開発し、2015年8月から順調な観測を実施している(図1)。CALET は電子観測に最適化された、シャワー粒子のイメージング機能を備えた非常に厚い(30 放射長)カロリメータであり、TeV 領域の電子直接観測が可能な装置である。加えて、CALET は  $Z=1-40$  の電荷測定が可能で、主要な一次原子核成分について数10GeV から1PeV 領域に至る観測を実施している。

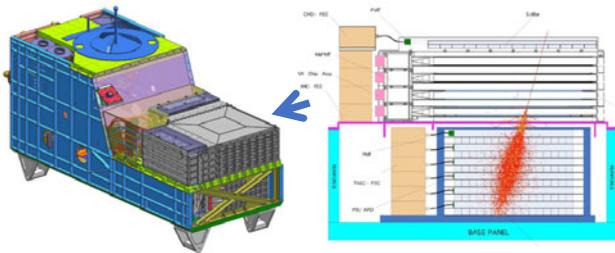


図1：CALET 全体の外観(左)及び観測装置の側面図と1TeV電子シャワーのシミュレーション(右)

このような独創的発想により考案された CALET の優れた性能を駆使して、未開拓な領域での宇宙線各成分の高精度観測を実現することにより、銀河宇宙線の加速・伝播における未解決課題や新たな課題を解決するとともに、電子・ガンマ線観測により宇宙科学最大の謎の一つとされる、暗黒物質の探索を行うことが目的である。

**【研究の方法】**

CALET の観測データは、ISS から「つくば宇宙センター(TKSC)」を経由して、早稲田大学内に構築した「Waseda CALET Operations Center (WCOC)」で受信し、ミッション運用及び科学データ解析を実施している。ミッション運用のためのリアルタイムデータとは別に、ダウンリンク時のデータ欠損を補完した観測データが科学データ解析のために、1時間毎に送信される。そして、装置較正と各種の補正を行ったデータを WCOC 内で定期的作成し、国内外に配布することにより国際共同研究チーム体制で科学データ解析を実施する。

突発的な現象であるガンマ線バーストや重力波イベントについては、即時的な解析が不可欠なため、特に観測生データから直接データ解析を行い、研究者ネットワークにより即時広報を行う。

研究成果はできるだけ速やかに、国内外の会議で公表するとともに、重要な結果は国際的に著名な学術誌に投稿し、WEB 等により広報を行う。

**【期待される成果と意義】**

2000年代に大きく進展した宇宙線の直接観測は、銀河宇宙線の加速・伝播機構を統一的に記述する“標準モデル”をもたらした。本研究では、CALET 長期観測により、原子核成分(ハドロン)と電子成分(レプトン)の双方で“標準モデル”の中心的仮説である「超新星残骸における衝撃波加速と銀河内伝播過程」を直接的に検証する。

原子核成分では100 TeV 領域における加速限界の検出、電子成分ではTeV 領域での近傍加速源の初同定を目指す。いずれの観測も、たとえ未検出であっても銀河宇宙線の加速機構について強力なモデル制限を与える。また、ニッケル核( $Z=28$ )に至る各原子核成分の流束と、2次成分/1次成分の比(ホウ素/炭素など)を、広いエネルギー範囲で高精度に測定して伝播機構の記述を高精度化する。

さらに、全電子の測定結果に見られる特徴的エネルギースペクトルの構造の兆候に着目して、TeV 領域に質量を持つ暗黒物質の検出に挑戦する。

**【当該研究課題と関連の深い論文・著書】**

- “Extended Measurements of Cosmic-ray Electron and Positron Spectrum from 11 GeV to 4.8 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station”, Y.Asaoka, S.Torii, *et al.* (CALET Collaboration), Phys. Rev. Lett. 120, 261102 (7pp) (2018).
- “Direct Measurement of the Cosmic-Ray Proton Spectrum from 50 GeV to 10 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station”, Y.Asaoka, P.S.Morrocchesi, S.Torii, *et al.* (CALET Collaboration), Phys. Rev. Lett. 122, 181102 (2019).

**【研究期間と研究経費】**

令和元年度～令和5年度  
154,800千円

**【ホームページ等】**

<http://calet.jp>  
[torii.shoji@waseda.jp](mailto:torii.shoji@waseda.jp)

## 【基盤研究(S)】

### 大区分B



## 研究課題名 X線・ガンマ線偏光観測で開拓する中性子星超強磁場の物理

理学化学研究所・開拓研究本部・主任研究員

たまたがわ とおる  
玉川 徹

研究課題番号：19H05609 研究者番号：20333312

キーワード：宇宙物理学(実験)、X線・ガンマ線偏光、超強磁場、中性子星、飛翔体観測

### 【研究の背景・目的】

『マグネター(磁石星)と呼ばれる中性子星は、本当に、量子電磁力学(QED)摂動計算が破綻する  $10^{10}$  テスラを超える磁場を持つ極限天体なのだろうか？ そのような天体では、我々の知っている QED は通用するのだろうか？』本研究では、マグネターの強磁場中性子星仮説を、世界初の高感度 X 線・ガンマ線偏光観測により直接検証することを目的とする。

中性子星は、大質量の恒星が超新星爆発した後に残される半径 10km 程度の天体であり、この世に存在する最も高密度の物質(原子核密度の 2-3 倍)である。パルサーと呼ばれる周期的に明滅する中性子星の多くは、 $10^8$  テスラ程度の強い磁場を持つことが知られており、その内部構造や磁場の起源を知るとは、天体物理学・天文学のみならず、素粒子・原子核物理学の重要なテーマの一つである。

中性子星の一種である「マグネター」は、 $10^{10-11}$  テスラもの強磁場を持ち、磁気エネルギーの解放で輝くと信じられている。しかしこれは、あくまで仮説であり、観測による超強磁場の直接検証が世界的に競われている。

### 【研究の方法】

マグネターの超強磁場中性子星仮説を証明するために、以下の 2 つの研究目標を設定する。

(目標 1) 磁場強度が既知の中性子星における QED 効果の検証：サイクロトロン吸収線の存在により磁場が既知の中性子星連星(約  $10^8$  テスラ)で QED 効果(真空共鳴)の存在を検証する。

(目標 2) マグネターにおける真空の複屈折現象の観測： $10^{10}$  テスラ以上でのみ顕著に観測できる QED 効果「真空の複屈折」を捉えることで、マグネターの強磁場中性子星仮説を観測により実証する(図 1)。

これらの目標を実現するために、我々がハードウェアを提供し、コアメンバーとして参加する NASA の X 線偏光観測小型衛星 IXPE (2021 年打上) と、日米共同気球実験 XL-Calibur (2021, 2023 年飛行) を成功させ、世界初の中性子星連星とマグネターの X 線・ガンマ線高感度偏光観測を実現する(図 2)。

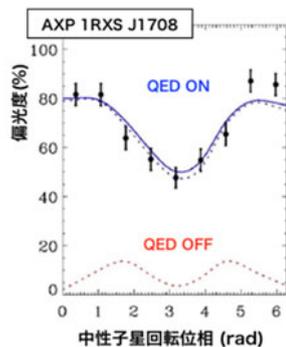


図 1 真空複屈折の有無による偏光度の違い

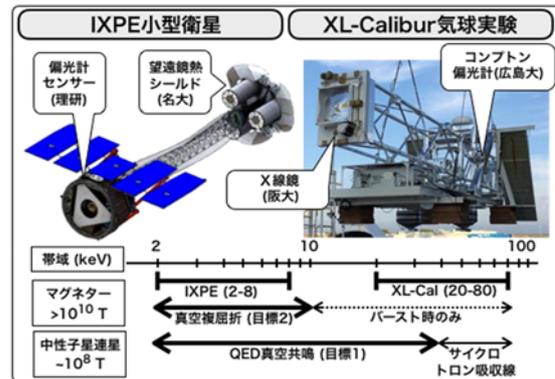


図 2 研究手段と研究目標の関係

### 【期待される成果と意義】

マグネターが超強磁場を持つことを、観測から実証することで、基礎物理学の実験場としての「強磁場高密度核物質」分野を創出する。これは、近年発展の著しい大強度レーザーを用いた電場における QED 極限の観測と相補的であり、宇宙観測と地上実験をつないだ「強い場の物理」の研究進展につながる。また、X 線・ガンマ線偏光観測という新たな手法を切り拓くので、高エネルギー天文学一般に大きな波及効果を及ぼす。

### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- S. O'dell, et al., "The Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE): technical overview", Proc. of SPIE 10699, 10699X1 (2018).
- A. Yatabe and S. Yamada, "Systematic Analysis of the Effects of Mode Conversion on Thermal Radiation from Neutron Stars", Astrophys. J. 850, 185 (2017).

### 【研究期間と研究経費】

令和元年度～令和 5 年度  
142,300 千円

### 【ホームページ等】

<https://astro.riken.jp/ks-xpol.html>



研究課題名 非可換エニオンの電氣的光学的制御

理化学研究所・創発物性科学研究センター・グループディレクター

たるちゃ せいご  
樽茶 清悟

研究課題番号： 19H05610 研究者番号： 40302799

キーワード： 非可換エニオン、トポロジカル超伝導、マヨラナフェルミオン、励起子ポラリトン

【研究の背景・目的】

3次元系の粒子統計は、粒子交換に対して位相変化が  $0$  か  $\pi$  によってボゾンかフェルミオンに分けられる。しかし、2次元以下では位相変化が任意の粒子、エニオンが存在する。その中で非可換統計性のエニオンは、新奇な統計性の研究対象として、またトポロジカルに保護された理想的な量子コンピュータの構成要素として研究が過熱している。しかし、従来のエニオンには安定性、制御性に問題があり、核心の概念、技術には未だ手が付いていない。

本研究では、安定で制御性の高い非可換エニオンを生成し、物理的性質と応用の可能性を探求する。研究対象として、(1) 二重ナノ細線-超伝導体接合、2次元トポロジカル絶縁体-超伝導体接合、(2) 3次元トポロジカル絶縁体によるコルビノ型超伝導接合(2次元トポロジカル超伝導体)、(3) 2次元格子中に作られるポラリトン量子ホール状態、などをとりあげ、エニオンの生成と安定化の技術、及び物理的性質と量子計算への応用の可能性を探求する。

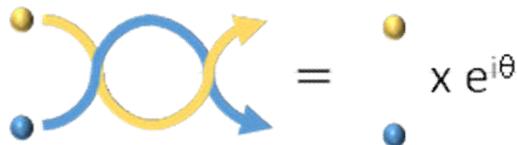


図1 エニオンの交換操作

【研究の方法】

(1) 二重ナノ細線、2次元トポロジカル絶縁体のジョセフソン接合を用いて、無磁場で安定な非可換エニオン(マヨラナ粒子)を生成し、ジョセフソン効果実験により同粒子の存在を実証する。さらに、マトラ粒子の電氣的オンオフ技術を開発し、量子計算の要素としての性能を評価する。

(2) 3次元トポロジカル絶縁体のコルビノ型ジョセフソン接合を実現し、接合内に形成される超伝導渦中心にマヨラナ粒子の生成、操作術を開発する。

(3) 非エルミート型ポテンシャルによるトポロジカル状態の形成と強い粒子相関の導入技術を開発し、それを基盤として、エニオンの安定な生成法、及び超高速光技術による検出、制御法を探求する。

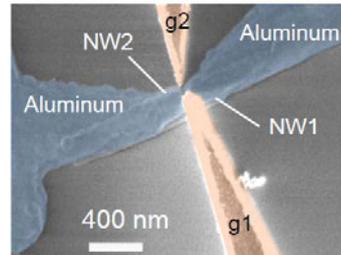


図2 二重ナノ細線と超伝導体の接合

【期待される成果と意義】

近年、量子計算への応用に向けて、非可換エニオンの研究が世界的に活発化している。しかし、応用に必要なエニオンの安定性や制御性、また中心概念となる非可換統計性の物理は未解明のまま残されている。本研究は、独自の方法でエニオンを生成、制御し、その物理を解明することを目指している。これらは従来にない画期的な手法を提供し、また光学的なエニオンの操作という新概念を創製することから基礎、応用において大きい進展が期待される。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- S. Baba, S. Matsuo, S. Tarucha, “Cooper-pair splitting in two parallel InAs nanowires”, *New Journal of Physics* 20, 063021-063028 (2018).
- R.S. Deacon, J. Wiedenmann, S. Tarucha, “Josephson Radiation from Gapless Andreev Bound States in HgTe-Based Topological Junctions”, *Phys. Rev. X*, 7, 021011-1-7 (2017).

【研究期間と研究経費】

令和元年度—令和5年度  
126,800千円

【ホームページ等】

<http://qfsrc.riken.jp/Todai-HP/english/index.html>  
tarucha@riken.jp