



研究課題名 原始惑星系円盤形成領域の化学組成とその進化

東京大学・大学院理学系研究科・教授

やまもと さとし
山本 智

研究課題番号：18H05222 研究者番号：80182624

キーワード：電波天文学

【研究の背景・目的】

「恒星とその周りの惑星系が形成する過程で、どのような物質進化が起こるのか？」これは、太陽系の物質的起源の理解に直結する重要な問題である。本研究では、太陽型原始星天体の化学組成の多様性と惑星系への進化を、ALMA を駆使して探求する。具体的には、(1) 20 個程度の原始星を惑星系サイズよりも細かく解像して観測し、化学的多様性の原始惑星系円盤への進化を捉えること、(2) 数個の代表的原始星天体について ALMA の最高解像度での観測を行い、円盤形成領域の物理・化学進化を明らかにすること、(3) 1 つの分子雲に含まれる原始星天体の化学組成の無バイアス観測によって化学的多様性の起源を探求すること、の 3 つの研究を強力に遂行する。5 年間の集中した研究で、惑星系形成に伴う化学進化の法則性を明らかにし、太陽系の物質的起源の理解を大きく前進させる。

【研究の方法】

本研究では、上記の 3 つの目標を次のようにして達成する。

(1) 化学的多様性の原始惑星系円盤への進化の探求：これについては、5 件の観測が ALMA で採択されている。いずれも原始星近傍数 10 天文単位領域の化学組成に迫るもので、その観測データの解析を進める。さらに、より網羅的な観測のために ALMA への観測提案を行い、5 年間で約 20 個の原始星天体の化学組成分布を調べ、原始惑星系円盤への化学進化の法則性を明らかにする。また、化学反応ネットワーク計算によりその化学過程を探求する。

(2) 原始惑星系円盤形成領域での物理・化学過程の解明：原始惑星系円盤の外縁部と回転落下エンベロープの境界（遠心力バリア）では複雑な物理・化学過程が起こっている。最近の研究では、遠心力バリア近傍でアウトフローが発生している可能性も示唆されつつある。ALMA の最高解像度の観測を行ってその詳細な構造を解明する。

(3) 化学的多様性の起源の探求：これについては、ペルセウス座分子雲、オリオン座分子雲の観測が ALMA で採択され、実行されている。CH₃OH をはじめとする飽和有機分子と、CCH や c-C₃H₂ などの炭素鎖分子の存在量を比較し、化学的多様性を生む原因を統計的に解明する。2 つの領域での解析を進めるとともに、必要な補完観測、および他領域での観測を ALMA に提案して行う。

観測研究と併行して、実験室における分子分光実験を補完的に行う。分子の回転スペクトル線の周波数はデータベースにまとめられているが、その精度は同位体種や高励起遷移などについては必ずしも本研究に必要なレベル（0.01 MHz 程度以下）に達していない場合がある。解析に必要な回転スペクトル線の周波数の精密測定を、理化学研究所のミリ波・サブミリ波分光測定装置を用いて、観測データの解析の進展に即応して進める。

【期待される成果と意義】

本研究は、ALMA を駆使した観測的研究により、惑星系形成領域の化学組成を系統的に解明する初めての試みである。その結果は、原始星エンベロープで見られる化学的多様性が、どのように惑星系形成領域、そして究極的に惑星系にもたらされるかについて、我々の理解を大きく進めることにつながると期待される。それは、今後進展が予想される太陽系小天体探査の結果と併せて、我々の太陽系がどのような初期化学環境の下で形成したかを理解する上で重要な貢献をなすであろう。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Sakai et al., 2014, Nature, 507, 79-80.
- Oya et al. 2016, Astrophys. J. 824, 88 (19 pp).
- Sakai et al. 2017, Mon. Not. R. Astr. Soc. 467, L76-L80.

【研究期間と研究経費】

平成 30 年度－34 年度
144,500 千円

【ホームページ等】

<http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/~submm/>

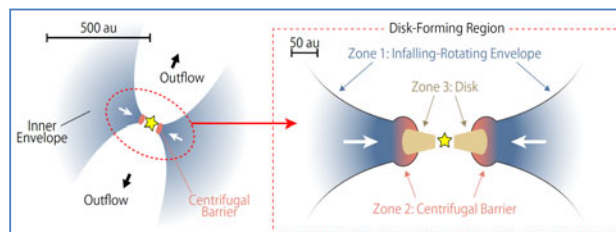


図1 本研究が対象とする惑星系形成領域の模式図。回転落下エンベロープの遠心力バリア近傍で劇的な物理的・化学的变化が生じており、これを解明する。



研究課題名 爆発直後からの観測による Ia 型超新星の起源解明

東京大学・大学院理学系研究科・教授 **どい まもる**
土居 守

研究課題番号：18H05223 研究者番号：00242090

キーワード：Ia型超新星、親星、爆発メカニズム、標準光源、ダークエネルギー

【研究の背景・目的】

Ia 型超新星は鉄などの重い元素の主な供給源であると共に、宇宙の加速膨張の発見に使われた標準光源として大変重要な天体であるが、未だどのような親星が爆発しているのかわかっていない。最近代表者らはすばる望遠鏡を使って爆発後約 0.5 日から Ia 型超新星を観測し、ヘリウムの外層が最初に爆発、その衝撃で白色矮星が熱核暴走を起こした例を発見し、ごく初期の観測が親星を解明する鍵となることを示した。

Ia 型超新星の点火のしくみまたは親星は複数の種類がある可能性がこの他にも示唆されてきており、非常に初期の色やスペクトルを十分な数観測することにより、点火のしくみを分類、親星や爆発の仕組みを解明できる可能性が開けた。

そこで本研究では、新たに整備する観測装置を用いて、爆発直後の Ia 型超新星に対して、これまでと質的に異なる観測データを取得、理論モデルの比較を行うことによって Ia 型超新星の親星と爆発メカニズムを調べ、色と明るさのばらつきの原因を解明する。同時に近赤外線のスペクトルデータベースを作り、Ia 型超新星を静止系近赤外線における標準光源とすることも目指す。

【研究の方法】

本研究提案では、東京大学の口径 1m 広視野木曾シュミット望遠鏡に CMOS カメラ Tomo-e を完成させ、近傍の Ia 型超新星の初期発見に中心的に用いる。

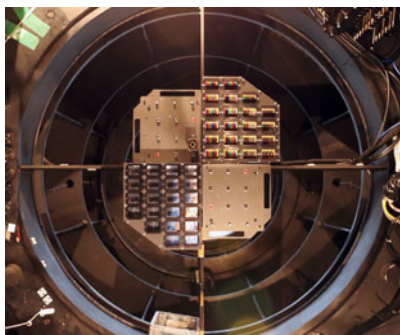


図1 木曾観測所 1m シュミット望遠鏡の主焦点に製作中の広視野 CMOS カメラ Tomo-e。現在 21 個のセンサーが搭載され、残りのセンサーの取り付け準備が進む。

Tomo-e は 84 個の CMOS センサーを搭載、明るい超新星の探索においては世界最高の能力を有し、赤緯-20 度以北の天を 2 時間に一回撮像、星の混んだ領域を除けば、V バンドで 19 等級までの超新星は漏らさず発見できる。

発見された Ia 型超新星を迅速に詳細観測するため、京都大学のせいめい望遠鏡に多色カメラを製作、面分光装置 KOOLS-IFU の観測性能向上を行う。これらによって爆発直後から Ia 型超新星 30 個以上多色・分光観測を行い、理論モデルと比較し、親星と爆発メカニズムを系統的に調べる。

さらに東京大学がチリ・アタカマに建設中の口径 6.5m TAO 望遠鏡に近赤外線シェル分光器 NICE を移設、世界最高地点にあって広く開いた大気の窓を活用して、約 30 個の Ia 型超新星の近赤外線波長域のスペクトルを数日おきに取得、近赤外線波長域でのテンプレートスペクトルを作成する。

【期待される成果と意義】

以上本研究においては、爆発初期から発見される Ia 型超新星約 30 個の詳細観測により、Ia 型超新星の親星と爆発メカニズムを調べ、色と明るさのばらつきの原因、サブクラスの有無を解明する。また、最大光度より十分前に発見された Ia 型超新星約 30 個について、近赤外線で時間変化を含めたスペクトルデータベースを作成し、可視・近赤外線の光度曲線あわせて、Ia 型超新星を静止系近赤外線における標準光源として確立する。

全体として天体物理学において大変重要な Ia 型超新星の起源を理解し、ダークエネルギーすなわち宇宙の加速膨張の謎の解明にむけた基礎作りを行う。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・“A hybrid type Ia supernova with an early flash triggered by helium-shell detonation”, Jiang, J., Doi, M., Maeda, K. et al., Nature, 550, pp.80-83. (2017)
- ・“Photometric properties of intermediate redshift Type Ia supernovae observed by the Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Survey”, Takanashi, N., Doi, M. et al., MNRAS, 465, p.1274-1288 (2017)

【研究期間と研究経費】

平成 30 年度－34 年度
147,400 千円

【ホームページ等】

http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~doi/doi's_project.htm



研究課題名 地球・惑星深部における水素の物質科学

東京大学・大学院理学系研究科・教授 かぎ ひろゆき
鍵 裕之

研究課題番号：18H05224 研究者番号：70233666

キーワード：水素、地球内部、惑星内部、中性子回折

【研究の背景・目的】

水素は太陽系での存在度が最も高く、電子数 1 でシンプルな元素でありながら、さまざまな化学結合状態を取ることができる。その結合多様性から、地球内部、惑星内部を構成する物質の構造や物性を支配しているきわめて重要な元素である。本研究では、J-PARC MLF（大強度陽子加速器施設 物質・生命科学実験施設）に申請者らが中心となって立ち上げた高圧中性子ビームラインを基軸とした高温高压、低温高压といった極限状態での実験から、地球惑星内部の諸問題から着想した水素の物質科学を推進する。本研究では、地球内部、氷惑星・氷衛星内部での水素関連物質の結晶構造、化学組成、安定性を高温-高压、低温-高压と言った極限条件での物性実験と理論計算から明らかにすることを目的とする。本研究の研究対象を図 1 に示す。研究テーマは広範に及ぶが、いずれの研究対象もパルス中性子源を用いた高圧下での中性子回折実験が基軸となる。

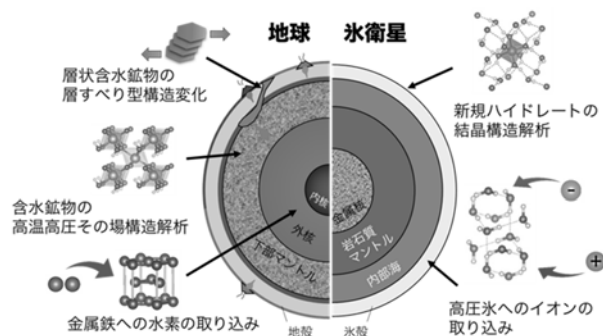


図 1 本研究計画の対象

【研究の方法】

研究は主として J-PARC MLF に設置された高圧中性子回折ビームライン(図 2 参照)、KEK PF に設置された高圧 X 線回折ビームラインを用いて行う。ただし、いずれの加速器施設においても我々が実験に使用できる時間は限定されているため、可能な限り所属機関での実験が行えるように設備を整える。

氷の構造に関しては、氷衛星表層から内部の温度圧力条件において、これまで手つかずであった氷-塩 (MgCl_2 , NaCl , KCl など) 系の相関係、固液境界、ハイドレートの結晶構造を明らかにする。

鉄水素化物に関しては、さまざまな水素含有量条件で最高約 20 GPa, 1200 K の圧力温度条件で放射



図 2 J-PARC MLF BL11 (PLANET)

光 X 線回折実験と中性子回折実験を行うことで、hcp 構造の鉄水素化物の安定領域を決定し、詳細な構造解析から hcp 金属格子の水素誘起体積膨張率、水素原子のサイト占有率とその温度依存性などを明らかにしていく。

【期待される成果と意義】

本研究計画では地球深部、惑星深部を構成する物質中の水素の原子位置を精密に決定することで、地球惑星深部物性を明らかにすることがもっとも重要な科学的成果として期待される。一方で、このような成果は極限状態での軽元素の物質科学に重要な指針を与えることになるだろう。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Hattori et al. (2015) Design and performance of high-pressure beamline PLANET launched at pulsed neutron source at J-PARC. *NIM A*, 780, 55.
- Iizuka-Oku et al. (2017) Hydrogenation of iron in the early stage of Earth's evolution. *Nature Comm.*, 8, 14096, DOI: 10.1038/ncomms14096.

【研究期間と研究経費】

平成 30 年度－34 年度
148,500 千円

【ホームページ等】

<http://www.eqchem.s.u-tokyo.ac.jp>



研究課題名 電子系を舞台とした量子ガラス科学の創成と物性科学への展開

東京大学・大学院工学系研究科・教授 かのだ かずし 鹿野田 一司

研究課題番号：18H05225 研究者番号：20194946

キーワード：分子性固体、強相関電子系、液体とガラス、ソフトマター

【研究の背景・目的】

強く相互作用する電子系が示す多様で創発的な現象は、「強相関電子系の物理学」を肥沃な研究分野へと導いた。その背後にあるものは、電荷やスピンのミクロなスケールでの秩序化である。しかし最近、原子・分子より遥かに長いスケールで不均一に自己組織化し、極めて遅い揺動を示す現象が見出されている。これはソフトマターの特徴に他ならない。本研究では、このように特異的に大きな時空スケールで揺らぐ強相関電子系をソフトマターの代表的な状態であるガラスの見地から研究することで、量子性、電荷、スピン、格子と言った従来のガラスには無い多自由度を有する「電子系を舞台とした量子ガラス」の学理創成に挑む。本研究は、これまで培われてきた強相関電子系の科学とソフトマターの科学を繋ぐ新しい研究領域を創成しようとするもので、ガラスの物理学に電子系への扉が開かれ、電子物性研究にガラスという新しい視座を通して新たな展開が生まれることが期待される（図1）。

【研究の方法】

物理実験、物質合成、理論の3つのグループが緊密に連携して、量子ガラスの探索、電子レオロジーの確立、電子系ガラスの制御に取り組む。

物理実験グループは、NMR、電子輸送、誘電率の測定、および走査型顕微分光顕微鏡を用いて、ガラス形成に特徴的な自己組織化の時空構造を明らかにする（図2）。また、電気／光パルスを用いて、電子ソフトマターの非平衡・平衡状態間の新奇な相制御を行う。物質合成グループは、分子内の原子置換や化学修飾により、電子系にガラス性をもたらす格子

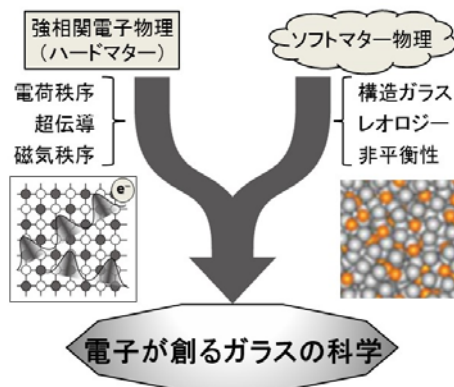


図1 強相関電子系の物理とガラスの物理の融合

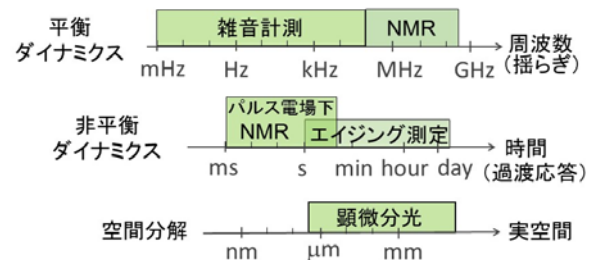


図2 電子ガラスの時空間構造の計測

の幾何学的フラストレーションと電子相関を司る物質パラメータを制御し、電子系ガラスの舞台を設計合成する。また、水素結合におけるプロトン自由度と電子自由度が協奏する新奇な電子系ガラス、ソフトマター系有機結晶を開発する。理論グループは、主に電荷ガラス状態をガラス転移物理の観点からモデル化し、数値解析と理論解析により電子系ガラスに発現する遅いダイナミクスの起源を解明する。

【期待される成果と意義】

本研究は、主に平衡・線形現象を中心に行われてきた従来の電子物性研究に対し、非平衡・非線形現象を本質とする新たな研究領域を切り拓き、従来古典物理学の範疇で研究されてきたソフトマター性と電子系が持つ量子性との両立という極めて根本的な学術的命題に初めて取り組むものである。量子性を持つソフトマター科学が創成され、遅い揺らぎや顕著な非平衡性を用いた電子相制御法が開拓され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】

- ・T. Sato, K. Miyagawa and K. Kanoda, “Electronic crystal growth”, Science **357**, 1378-1381 (2017).
- ・T. Itou, E. Watanabe, S. Maegawa, A. Tajima, N. Tajima, K. Kubo, R. Kato and K. Kanoda, “Slow dynamics of electrons at a metal-Mott insulator boundary in an organic system with disorder”, Sci. Adv. **3**, e1601594-1-6 (2017).

【研究期間と研究経費】

平成30年度－34年度
151,400千円

【ホームページ等】

http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/kanoda_lab/



研究課題名 新しいレプトン対称性の破れの探求

名古屋大学・現象解析研究センター・教授

いいじま とおる
飯嶋 徹

研究課題番号：18H05226 研究者番号：80270396

キーワード：素粒子実験、レプトン、加速器、粒子測定技術

【研究の背景・目的】

B ファクトリー実験における小林-益川理論の検証や LHC 実験でのヒッグス粒子の発見がなされてなお、力の統一や、宇宙の物質優勢、暗黒物質の正体などの謎が残されており、その解明に向けて、標準理論を超える新しい物理の発見が重要となっている。その探求には、粒子の世代（フレーバー）に着目した対称性や保存則の破れが重要な役割を担うと考えられ、これまでにクォークやニュートリノにおけるフレーバー保存則の破れの研究が進んできた。

一方、申請者たちは、第3世代の荷電レプトンであるタウレプトンに注目した独自の研究を進め、B 中間子の弱崩壊ではタウレプトンへの崩壊 ($B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$, $B \rightarrow D^{(*)} \mu \nu$) よりも起きやすい兆候を捉えている。また、B 中間子の稀な崩壊 ($B \rightarrow K^{(*)} e^+ e^-$, $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$) や、ミューオンの異常磁気能率の測定結果においても標準理論からの乖離が報告されている。

こうした状況をふまえ、本研究では、今後5年間に進む国内実験プロジェクト (SuperKEKB/Belle II 実験および J-PARC g-2/EDM 実験) から、未だ未開拓となっている荷電レプトン (電子、ミューオン、タウ) のフレーバーに関する対称性の破れや保存則の破れの有無を明らかにし、新物理の発見を目指す。

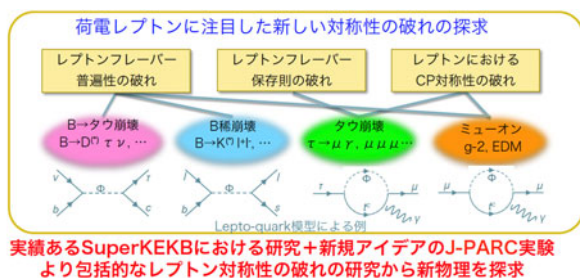


図1：本研究の概要

【研究の方法】

本研究では、これまでの研究で申請者が独自に進めてきた実績ある研究を、Belle II 実験で発展・展開し、B 中間子のタウオンク崩壊におけるレプトン普遍性の破れ、稀崩壊におけるレプトン普遍性の破れ、タウレプトン崩壊におけるレプトン対称性の破れを探求し、そのために必要となる検出器の性能改良、ビッグデータ解析技術の開発を進める。さらに、標準理論からのずれが報告されているミューオン異常磁気能率 (g-2) に関して、Belle II 実験における電子-陽電子衝突断面積の精密測定からハドロン

量子ループの寄与を測定することや、Belle II に向けて開発してきた実験技術の応用によって g-2 実験の性能向上を図るなど、実験プロジェクトを横断した、より包括的な研究展開を進める。

【期待される成果と意義】

Belle II 実験では、本研究期間内に、従来の30倍に及ぶデータを蓄積するとともに、本研究による検出器性能やデータ解析技術の向上により、より早期に、レプトンフレーバー普遍性やレプトンフレーバー保存則の破れから新物理の発見に迫る。これとともに、ミューオン g-2 実験の準備研究を進め実験の開始につなげる。これらの複数の実験結果から、新物理が発見された場合には、その相関により、新物理のモデルに迫るなど、荷電レプトンに関する新しい研究領域が拓かれると期待される。

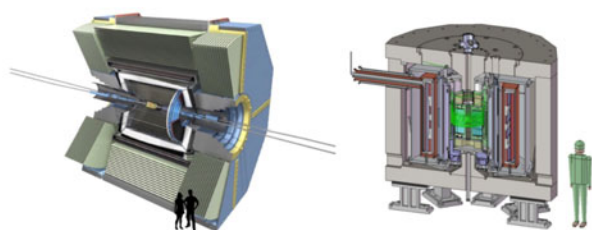


図2：Belle II 実験 (左) および J-PARC g-2/EDM 実験 (右)

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・"Measurement of the τ lepton polarization and $R(D^*)$ in the decay $B \rightarrow D^* \tau \nu$ ", S. Hirose, T. Iijima, K. Hayasaka et al., Phys. Rev. Lett. 118, 211801 (2017).
- ・"Measurement of the branching fraction of $B_0 \rightarrow D^* \tau \nu$ relative to $B_0 \rightarrow D^* l \nu$ decays with a semileptonic tagging method", Y. Sato, T. Iijima, K. Hayasaka et al., Phys. Rev. D94, 072007 (2016).

【研究期間と研究経費】

平成30年度－34年度
147,400千円

【ホームページ等】

<http://wru.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/>

研究課題名 強相関量子凝縮相における回転対称性の破れの検証



京都大学・大学院理学研究科・教授

まつだ ゆうじ
松田 祐司

研究課題番号：18H05227 研究者番号：50199816

キーワード：強相関電子系、量子スピン系、ネマティック転移、回転対称性

【研究の背景・目的】

銅酸化物高温超伝導体、鉄系高温超伝導体、重い電子系化合物に代表される様々な強相関電子系において、結晶格子の回転対称性を自発的に破る電子ネマティック状態が発見されつつある。この状態の解明は、擬ギャップ形成、非従来型超伝導、隠れた秩序、量子臨界点などの長年にわたる凝縮系物理学の大問題と密接に関わっている。さらに絶縁体においても、強い量子揺らぎのために磁気秩序が破壊された量子スピン液体は、近年いくつかの候補物質が発見され、新しい量子凝縮体として大きな注目を集めている。量子スピン液体の基底状態はほとんど理解されておらず、どのような対称性の破れが起こっているかは最大の謎となっている。この系において、結晶の回転対称性を自発的に破る相が存在するかどうかの検証は、トポロジカル秩序等と密接に関係しており、新奇量子相の探索にも強力な指針をもたらすことが期待できる。本研究では、前例のない精度で回転対称性の破れを検出できる様々な装置を開発し、世界に例を見ないユニークな測定を組み合わせることによって、強く相互作用する量子凝縮体の研究にブレークスルーをもたらすことを目指す。

【研究の方法】

本研究では、様々な方法で、回転対称性の破れを検出できる装置を開発する。まず 50mK の極低温から 400K までの室温よりも高い温度の広範囲の温度域で、カンチレバーを用いた磁気トルク測定を行うことのできる装置を開発し、7 T の横磁場印加できる強磁場磁石と、ピエゾ式回転機構を組み合わせることにより(図 1)、これまでよりも一桁高い感度で回転対称性の破れを検出できるようにする。さらに、結晶を精密に一軸圧で制御できる装置と極低温走査トンネル顕微鏡を組み合わせ、回転対称性の破れをミクロに検出する。また、ピエゾ素子を用いて結晶にる装置を開発する。

【期待される成果と意義】

強く相関し合う粒子から構成される量子多体系においては、様々な対称性の破れがあることは知られている。近年、強相関電子系あるいは量子スピン系において、電子やスピン状態が自発的に結晶格子の回転対称性を破ったネマティック状態が、非常に大きな注目を浴びている。本研究により、鉄系超伝導体、銅酸化物高温超伝導体、重い電子系化合物な

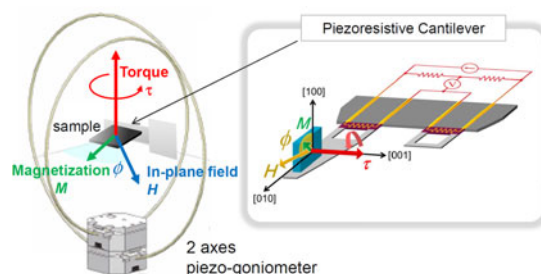


図 1. 超高感度面内磁気トルク測定の様式図。ピエゾ駆動式精密 2 軸ゴニオメータとスプリット型高磁場マグネットを組み合わせ従来にない高感度測定を実現。

どの強相関電子系超伝導体や、イリジウム化合物などの強いスピン・軌道相互作用を持つ強相関電子系、そして新しい量子凝縮相である量子スピン液体における回転対称性の破れを解明する。これらは、強相関凝縮系の長年にわたる問題を解決する鍵となる可能性があるだけでなく、新奇量子相の開拓の強力な指針を与える可能性がある。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Sato, *et al.* "Thermodynamic evidence for a nematic phase transition at the onset of the pseudogap in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ " *Nature Phys.* 13, 1074–1078 (2017).
- S. Kasahara *et al.* "Electronic nematicity above the structural and superconducting transition in $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ " *Nature* 486, 382–385 (2012).
- R. Okazaki *et al.* "Rotational Symmetry Breaking in the Hidden-Order Phase of URu_2Si_2 " *Science* 331, 439–442 (2011).

【研究期間と研究経費】

平成 30 年度－34 年度
152,500 千円

【ホームページ等】

<http://kotai2.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.php>
matsuda@scphys.kyoto-u.ac.jp



研究課題名 光格子中超低温原子気体の軌道及びスピン自由度を
駆使した新量子物性の開拓

京都大学・大学院理学研究科・教授

たかはし よしろう
高橋 義朗

研究課題番号：18H05228 研究者番号：40226907

キーワード：量子エレクトロニクス、冷却原子、量子シミュレーション、光格子

【研究の背景・目的】

進展著しいレーザー冷却による量子縮退気体の研究の中で、特に注目を集めている研究テーマとして光格子と呼ばれる周期的なポテンシャルにナノスケールの極低温原子気体を導入した系(図1)を用いた量子多体系の量子シミュレーションの研究を挙げることができる。光格子中の冷却原子は、格子点間のトンネリング項と格子点内での原子間相互作用項

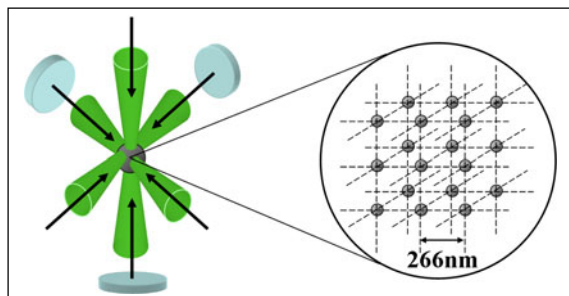


図1 光格子

の2つの項からなるハバードモデルで記述される。このハバードモデルは、遍歴磁性や異方性超伝導などの強相関電子系を記述する大変重要なモデルであり、光格子中の冷却原子系は、ハバードモデルの極めて制御性の良い新たな実験系として注目を浴びている。

このような背景のもと、光格子中に導入された超低温原子気体を用いた量子物性に関する独創的な研究として、特に、非標準的な光格子をデザインすることによって初めて可能となる特異な多重軌道の自由度と、2電子系原子のみが特別に有する高スピン対称性 $SU(N)$ に着目し、その二つの自由度が織りなすユニークな新量子物性を開拓することを目的とする。原子系として、 $SU(N=6)$ 対称性を有するイッテルビウム(Yb)原子量子気体を主な対象とし、非標準型格子として、「平坦バンドを有するリーブ格子」、「基底電子状態と準安定電子状態からなる局在・非局在混合軌道系」、などを系のパラメーターを高度に実時間制御して生成し実験を遂行する。さらに、光格子の超高空間分解能観測・制御技術を開発して上記研究に適用することにより、量子凝縮相の研究における全く新しい高度な量子シミュレーターを実現する。

【研究の方法】

具体的には、Yb 原子量子気体のハバードモデルを実装し、「光リーブ格子の平坦バンドで発現する量子磁性・超流動の物理の解明」、「局在・非局在混合軌道系による局在不純物の物理の解明」、「巨大スピンの $SU(N)$ 量子磁性の物理の解明」、「ユニークな軌道自由度を駆使した新しい可能性の追求」の4つの研究項目を設定して研究を行う。

【期待される成果と意義】

「多重軌道」と「高対称性スピン」の二つの自由度に着目した本研究課題設定は独自性が高く、かつ、申請者がこれまで研究を推進してきた、光格子中の2電子系原子系を用いて、極めて理想的に、高い制御性を持って実現することができるものである。これにより、当該分野の一大アジェンダである量子シミュレーション研究が飛躍的に発展するのは間違いない。さらには凝縮系理論・計算物理などへの学術的な波及効果や、物質設計に対する重要な指針の提示など、科学技術・産業に幅広い意味でインパクト・貢献が期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ T Tomita, S Nakajima, I Danshita, Y Takasu, and Y Takahashi, "Observation of the Mott insulator to superfluid crossover of a driven-dissipative Bose-Hubbard system", **Sci. Advances**, **3**, 2017, e1701513 (1-8).
- ・ S. Taie, H. Ozawa, T. Ichinose, T. Nishio, S. Nakajima, and Y. Takahashi, "Coherent driving and freezing of bosonic matter wave in an optical Lieb lattice", **Sci. Advances**, **1**, 2015, e1500854(1-6).

【研究期間と研究経費】

平成30年度－34年度
144,600千円

【ホームページ等】

<http://yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp/>



研究課題名 新世代中性子構造生物学の開拓

京都大学・複合原子力科学研究所・教授

すぎやま まさあき
杉山 正明

研究課題番号：18H05229 研究者番号：10253395

キーワード：蛋白質ダイナミクス、中性子散乱、重水素化、計算機シミュレーション

【研究の背景・目的】

近年、蛋白質をはじめとする生体高分子の機能解明のために静的な構造解析に加えダイナミクスの理解の必要性が高まっている。そこで、図1に典型的なマルチドメイン蛋白質(MurD)を例にとり、その構造とダイナミクスの相関を示してみる。まず図1(上)によく知られた蛋白質の階層的構造として、構造単位である「アミノ酸」(10^{-11} m - 10^{-10} m)、3次元の構造単位である「ドメイン」(10^{-10} m - 10^{-9} m)、ドメインが連結した「全体構造」(10^{-9} m - 10^{-8} m)、全体構造に他の分子や蛋白質が結合した「会合体」($>10^{-8}\text{ m}$)を示す。次に、各構造に対応するダイナミクスの時間スケールを図1(下)の時空間マップに投影すると、アミノ酸の運動は主として 10^{-15} s - 10^{-12} s (ゾーンⅠ)、ドメインの運動は 10^{-12} s - 10^{-9} s (ゾーンⅡ)、ドメイン間の共同運動は 10^{-9} s - 10^{-6} s (ゾーンⅢ)、蛋白質や分子と解離会合は $<10^{-6}\text{ s}$ (ゾーンⅣ)に存在する。

各階層での運動は分子動力学計算により予測されているが、対応する実験手法をみるとゾーンⅠ・ゾーンⅣでは種々の測定法が存在するが、ゾーンⅡ・ゾーンⅢではダイナミクスを測定する手法がほとんど存在していない。したがって、この領域は測定上の「ミッシングゾーン」となっており、測定手法を確立させることが重要な課題となっている。

中性子分光法はこのミッシングゾーンをカバーする手法であるが、これまでは中性子ビーム強度不足により溶液中の蛋白質のダイナミクスの測定には一部の系を除き実用的な測定手法とはなり得なかった。一方、今世紀に入りJ-PRACをはじめとする高強度中性子源が建設され、そこに設置された分光器群を用いることで、ミッシングゾーンでのダイナミクスを直接測定することが可能になりつつある。

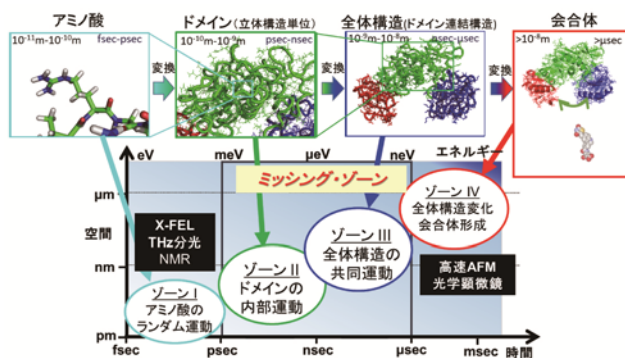


図1 マルチドメイン蛋白質における構造とダイナミクスの相関。(上) 各階層の構造。(下) 時空間マップにおける各階層のダイナミクス。蛋白質はMurD。

本研究では、これらの最新鋭の中性子分光器を駆使する測定・解析手法を開発し、ミッシングゾーンの蛋白質ダイナミクスの解析プロトコルを確立する。この成果をもとに、種々の蛋白質の階層間連携ダイナミクスの解明を目指す。

【研究の方法】

本研究は測定・解析手法の「開発研究」と機能性蛋白質を対象とした「実証研究」の両輪で進める。

開発研究では「高度試料重水素化手法」・「最適測定手法」・「データ解析手法」の開発を行い、「中性子準弾性測定(QENS)法」「中性子スピンエコー(NSE)法」「中性子小角散乱(SANS)法」を用いた測定と分子動力学計算と各測定データを協奏的に利用した解析によりミッシングゾーンでの溶液蛋白質ダイナミクスの解明法を確立する。

実証研究では固いコア領域が連結したマルチドメイン蛋白質としてMurD、柔らかな天然変性領域を持つ蛋白質としてHefに注目し、開発研究の成果を利用して研究を進め、順次対象蛋白質を拡大する。

【期待される成果と意義】

本研究ではモデル系を利用した手法開発を行うだけでなく実際の生物学的研究の要望に則って、実用的な測定・解析手法を構築する。その成果を多くの系に適用することで蛋白質科学における重要な課題の1つである「アミノ酸のランダムな熱運動がドメイン間の共同運動に変換される機構＝階層間連携ダイナミクス」が解明に向かうことが期待できる。

開発する実用的な手法はユーザーに広く開放する。このことで、我が国がJ-PARCを中心として中性子構造生物学における1大拠点となることが期待できる。また、本研究の分担・連携研究者の多くは若手研究者であり、彼らが今後の中性子構造生物学の中核となっていくことも期待できる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ P. Bernadó, M. Sugiyama, et al., BBA General Subjects, 1862 (2018) 253-274.
- ・ R. Inoue, M. Sugiyama, et al., Sci. Rep., 6 (2016) 29208.

【研究期間と研究経費】

平成30年度－34年度
151,600千円

【ホームページ等】

<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSBNG>



研究課題名 中性子電気双極子モーメント探索による時間反転対称性の検証

大阪大学・核物理研究センター・特任教授 はたなか きちじ
畑中 吉治

研究課題番号：18H05230 研究者番号：50144530

キーワード：素粒子、原子核、基本対称性、超冷中性子、電気双極子モーメント

【研究の背景・目的】

宇宙は量子揺らぎにより無から生まれ、インフレーションによる急速な膨張を経て現在の姿となった。初期宇宙は粒子と反粒子が生成・消滅を繰り返す熱平衡状態にある。宇宙は熱膨張と共に冷え、ほとんどの粒子と反粒子は対消滅をして消え、わずかに物質粒子が残った。

現在の物質優勢宇宙となるためには物質・反物質間の対称性 (CP 対称性) の破れが不可欠である。素粒子標準理論では小林・益川理論によりクォークの CP 対称性の破れが説明されている。さらに T2K 実験によりニュートリノでの CP 対称性の破れも観測された。しかし、これらだけでは現在の物質・反物質非対称性を説明するには不十分である。素粒子標準理論を越えた新しい物理が存在する。

永久電気双極子モーメント (EDM) の存在は時間反転対称性 (T 対称性) を破る。ローレンツ対称性から導かれる CPT 保存を仮定すれば T 対称性の破れはすなわち CP 対称性の破れを意味する。新しい物理が何なのかを EDM の探索をプローブとして明らかにする。

【研究の方法】

運動エネルギーが非常に低い (< 300 neV) 超冷中性子 (UCN) を物質容器に溜め込み、電磁場中でのスピン歳差運動周期を精密に測定し、中性子 EDM (nEDM) を探索する。現在の測定感度は統計精度によって制限されている。日本とカナダの国際協力によって TRIUMF 研究所に超冷中性子源 (図 1) を建設する。これまでに開発してきた超流動ヘリウムを用いた超冷中性子発生法を発展させることにより 10^{-27} ecm の感度が可能となる。

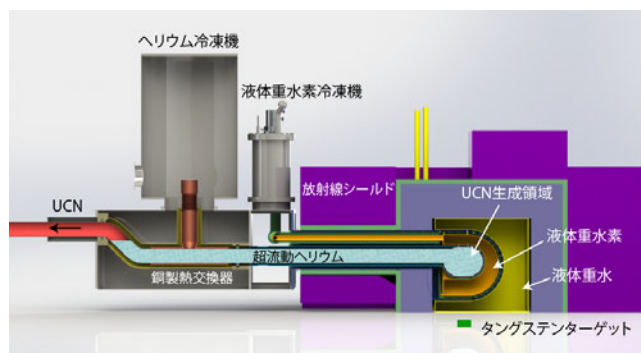


図 1 超冷中性子源模式図

UCN は陽子ビームによる重金属の核破砕反応により生じる高速中性子を冷却することによって生成する。運動エネルギーが meV までの冷却は 300 K の液体重水及び 20 K の液体重水素による中性子弾性散乱を用いて行い、さらにスーパーサーマル法を用いて UCN に変換する。

nEDM は静電磁場中に UCN を保持する容器を設置し、その中で UCN のスピン歳差運動周期を精密に観測することで行う。スピン歳差運動周期はラムゼー共鳴法を用いて測定する。実験における最大の系統誤差は磁場の非一様性及び、時間安定性である。外部磁場を補償する補償コイル、4 重の磁気シールドルームを配置し、磁場の非一様性を 1 nT/m 以下、測定期間中 (典型的に 100 秒) の時間安定性を 1 pT 以下に抑える。

【期待される成果と意義】

素粒子標準理論では nEDM の予想値は $10^{-32} \sim 10^{-31}$ ecm と抑制される。一方で CP 非対称性を内包する SUSY などの新物理では $10^{-28} \sim 10^{-26}$ ecm の大きさの nEDM を予想する。これまでに中性子だけでなく電子や原子核を用いて EDM の探索が行われてきたが、有限の値が観測されたことは無い。nEDM において最も感度の高い実験はフランスの Institute Laue Langevin (ILL) で行われた。この実験では nEDM の大きさに 3.0×10^{-26} ecm の上限値を与えている。この測定の感度は統計精度により制限されており、大強度の UCN 源を開発する本研究で、新物理の予想する nEDM 領域を探索することが可能になる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ R. Golub and J. Pendlebury, Phys. Lett. A 62, 337 (1977)
- ・ J. M. Pendlebury et al., Phys. Rev. D. 92, 092003 (2015)
- ・ Y. Masuda et. al, Phys. Rev. Lett. 108, 134801 (2012)

【研究期間と研究経費】

平成 30 年度－34 年度
152,200 千円

【ホームページ等】

<http://fnp.kek.jp/>



研究課題名 大強度ミュオン源で解き明かす荷電レプトンのフレーバー転換探索の新展開

大阪大学・大学院理学研究科・教授 **くの よしたか**
久野 良孝

研究課題番号：18H05231 研究者番号：30170020

キーワード：素粒子

【研究の背景・目的】

標準理論を超える新物理の探究は素粒子物理の最重要課題である。荷電レプトンのフレーバー転換は、標準理論の枠組みでは起こらないことが知られている。また一方、多くの新物理の理論モデルは将来観測可能なレベルで起こると予言している。したがって、これは新しい物理を発見するベストの現象のひとつである。荷電レプトンのフレーバー転換で重要な過程は、ミュオン原子中でミュオンが電子に転換する過程である。我々は、東海村の J-PARC の世界最高パルス状ミュオンビームを使って、ミュオン電子転換過程を現在の上限値を二桁以上に上回る実験精度で探索する COMET Phase-I 実験 (J-PARC E21 実験) を推進している。本研究の目的は、COMET Phase-I 実験の実験精度を以前よりさらに8倍程度向上することである。

【研究の方法】

研究の方法は、COMET Phase-I 実験の測定器を製作し、その後ミュオン電子転換過程の探索を遂行することである。COMET Phase-I の測定器は円筒ドリフトガスチェンバー (cylindrical drift chamber=CDC) を採用し、その中心にミュオン静止標的を置く。ミュオン静止標的の材質としては、

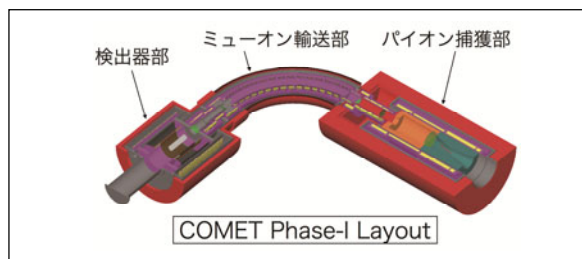


図1 COMET Phase-I

ミュオン原子の寿命が長いアルミニウム(Al)を使う。特に本研究では、ミュオン電子転換過程探索の実験感度を更に向上するために COMET 検出器の高度化を行う。それらを以下に列挙する。(1)ブリッジソレノイドの設置：ミュオン輸送部(磁場3T)から検出器部(磁場1T)に磁場を漸近的になめらかに変化させるために、新たに超伝導ソレノイド(ブリッジソレノイド)を設置する。これにより静止するミュオン量が増えバックグラウンド事象が軽減される。(2)CDCのトリガーカウンターの耐放射線化：CDCのトリガーカウンターの位置では放射線量

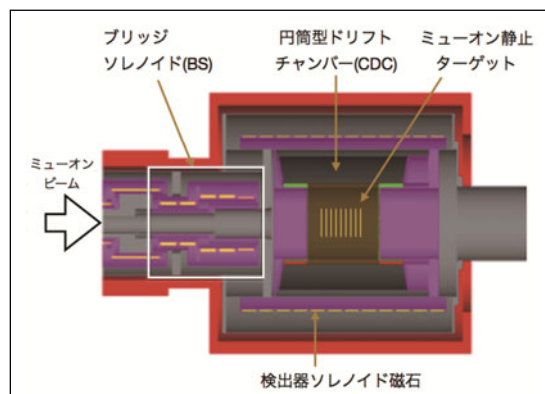


図2 CDC レイアウト

が非常に高いことが予想されている。それで、光検出器としてファインメッシュ型光電子増倍管に変更し、新たに放射線シールドを追加する。(3)CDC検出器の耐放射線化：CDC検出器読み出し回路の耐放射線化を向上させるために、FPGAやパーツの選定を行う。さらに放射線シールドを追加する。

【期待される成果と意義】

本研究の COMET Phase-I では、これまでの実験感度から400倍以上に改善し、ミュオン電子転換過程の発見を目指す。もしミュオン電子転換過程が観測されれば、疑いの余地なく、新しい物理の発見となる。これは素粒子物理学の新しいパラダイム転換を形成するきっかけとなるであろう。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- Y. Kuno, "A Search for Muon-to-electron Conversion at J-PARC: The COMET Experiment", PTEP 2013 (2013) 022C01, DOI : 10.1093/ptep/pts089
- Y. Kuno and Y. Okada, "Muon Decay and Physics beyond the Standard Model", Rev. Mod. Phys. 73 (2001) 151-202, DOI : 10.1103/Rev/ModPhys.73.151

【研究期間と研究経費】

平成30年度－34年度
148,500 千円

【ホームページ等】

<http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp/mlfv/>

【基盤研究(S)】

大区分B



研究課題名 マントル遷移層スラブの軟化と深発地震に関する実験的研究

九州大学・大学院理学研究院・教授 くぼ ともあき
久保 友明

研究課題番号：18H05232 研究者番号：40312540

キーワード：地球内部物質、相転移、変形破壊、高温高压、放射光

【研究の背景・目的】

マントル遷移層に沈み込んだ海洋プレート（遷移層スラブ）の挙動は地球マントル対流を理解する鍵である。本研究では長年未解決とされてきたスラブの軟化と深発地震の発生という2つの問題（図1）に着目する。これまでに相転移による細粒化が変形の局所化を誘起し、岩石の軟化やせん断不安定化をいたる可能性が指摘されているが、遷移層圧力下での実験研究が欠けており実証されていない。本研究では非平衡相転移と変形の相互作用というダイナミックな観点から直接的な実験研究を行い、スラブ地震学の成果と組み合わせ、相転移が遷移層スラブの軟化と深発地震発生に果たしている役割を考察する。

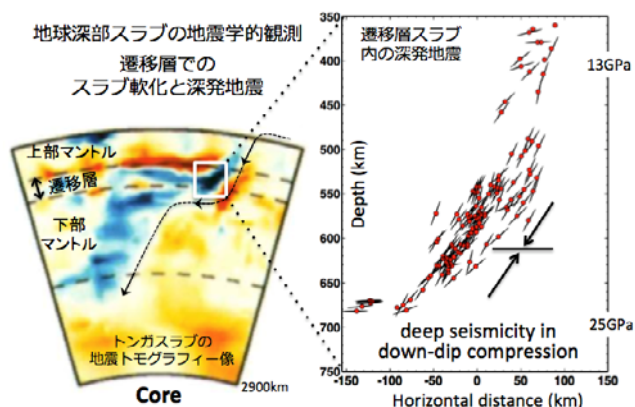


図1 沈み込んだ海洋プレートがマントル遷移層領域で深発地震を起こしながら変形する様子。

【研究の方法】

D-DIA 型高压変形装置および D-111 型高压変形装置を用いて遷移層圧力下においてせん断変形場でオリビンスピネルおよびポストスピネル相転移実験を行う。放射光単色 X 線および acoustic emission (AE)測定システムを組み合わせ、相転移速度曲線と応力-歪み曲線、AE 活動を同時その場測定する（図2）。また回収試料の相転移および変形微細組織を FE-SEM および FIB-TEM を用いて分析し、衝撃変成隕石に見られる組織との比較検討も行う。さらに深発地震からの地震波およびその変換波を解析し、準安定オリビン領域や 660km 不連続面の凹凸、多重不連続面、それらと深発地震の震源分布との関係などを調査する。

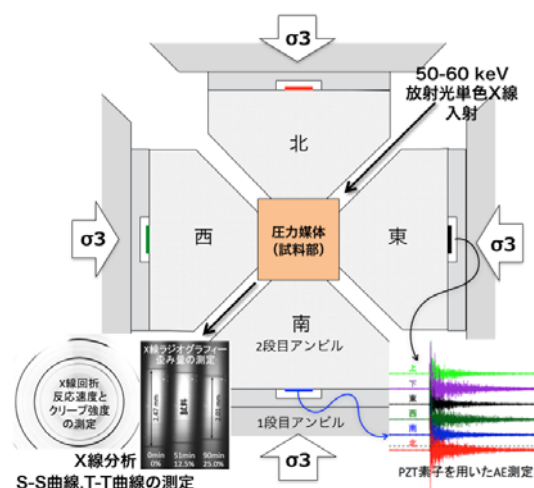


図2 D-DIA型高压変形装置と放射光単色X線を用いた応力-歪み(S-S)曲線、相転移速度(T-T)曲線、AE活動の同時その場測定。

【期待される成果と意義】

遷移層条件下で非平衡相転移と変形の相互作用を直接的に実験研究することが本研究の独自性であり、相転移誘起の軟化、変形の局所化、せん断不安定化が起こる条件を制約し、複雑な変形-相転移相互作用プロセスを明らかにできる可能性がある。放射光高压物質科学と隕石鉱物学、スラブ地震学の研究者が連携して遷移層スラブの未解決問題に取り組むことで、これまでにない新たな概念を発見できる可能性を秘めている。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

Doi N., Kato T., Kubo T., Noda M., Shiraishi R., Suzuki A., Ohtani E., Kikegawa T., Creep behavior during the eutectoid transformation of albite: Implications for the slab deformation in the lower mantle. Earth Planet. Sci. Lett., 388, 92-97, 2014

【研究期間と研究経費】

平成 30 年度－34 年度
108,400 千円

【ホームページ等】

<http://mineral2.geo.kyushu-u.ac.jp/saito/index.html>
kubotomo@geo.kyushu-u.ac.jp



研究課題名 新しい対称性による数論幾何的単数の創出に向けた戦略的研究

慶應義塾大学・理工学部・教授

ばんない けんいち
坂内 健一

研究課題番号：18H05233 研究者番号：90343201

キーワード：数論、数論幾何学

【研究の背景・目的】

Beilinson 予想、玉河数予想、岩澤主予想など、代数体上定義された代数多様体の Hasse-Weil L 関数の特殊値に関する様々な予想は、米国のクレイ研究所主催のミレニアム懸賞問題の 1 つである Birch and Swinnerton-Dyer 予想 (BSD 予想) を特別な場合として含むことなどからも分かるように、現代数学、特に数論幾何の分野において中心的な問題として位置付けられている。

代数多様体が「乗法群」と呼ばれる最も基本的な場合には、対応する Hasse-Weil L 関数が古典的な Riemann ゼータ関数となり、上記予想は様々な研究者の努力により、円分元 (円単数) と呼ばれる motivic な単数を用いて証明されている。これらの予想が乗法群など限られた代数多様体の場合にしか証明されていない最大の理由は、「 L 関数の特殊値」と「数論的な量」双方の情報を内在している motivic な単数が、実施的 1 次元の場合にしか構成されていないことに起因している。

本研究の目的は、将来的に新しい motivic な単数を創出することを視野に入れて、乗法群、楕円曲線や高次元のアーベル多様体など、様々な代数多様体に対して組織的に構成されている【ポリログ】と呼ばれる motivic な対象を研究することである。具体的な目標としては、「代数トーラス」と呼ばれる高次元の代数多様体のポリログを研究し、このポリログの Hodge 実現を具体的に決定し、総実代数体の L 関数の特殊値と関係付けることを目指す。また、以上と並行して、この場合のポリログの motive の構成方法や、 p 進実現、étale 実現を具体的に決定する方法なども合わせて検討する。



図1 研究の概念図

【研究の方法】

本研究では、整数論の専門家である山本修司氏、安田正大氏、岩澤理論の小林真一氏、motive の理論の寺杉友秀氏、 p 進理論の志甫淳氏、作用素環論の勝良健史氏など、関連する分野の専門家と共に、研究を組織的に進めて行く予定である。特に、研究代表者が今まで培ってきた高次元のポリログの Hodge 実現を具体的に記述する方法を、代数トーラスのポリログに適用して計算を進める。高次元のポリログの Hodge 実現から正しく L 関数の値を取り出すためには、Nekovář と Scholl によって提唱されたプレクティックと呼ばれる対称性の理論を展開する必要がある、まずは Hodge 実現、その後並行して motive、 p 進や étale 実現の場合にプレクティックの理論を構築して行く。

【期待される成果と意義】

代数トーラスのポリログの Hodge 実現を具体的に決定して新しく構築したプレクティック構造の理論を用いてうまく値を取り出せることができれば、この場合のポリログと総実代数体の L 関数の特殊値との具体的な関係を証明できると期待される。このような成果が得られれば、代数トーラスの場合に、ポリログから予想の証明に適用可能な motivic な単数の構成の可能性を示唆する結果となる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- J. Nekovář and A. J. Scholl, *Introduction to plectic cohomology*, Advances in the theory of automorphic forms and their L -functions, Contemp. Math., vol. 664, Amer. Math. Soc., Providence, RI, 2016, pp. 321–337.
- K. Bannai, K. Hagihara, S. Kobayashi, K. Yamada, S. Yamamoto, and S. Yasuda, *Category of mixed plectic Hodge structures* (2017), arXiv:1705.05522[math.AG].

【研究期間と研究経費】

平成 30 年度－平成 34 年度
91,900 千円

【ホームページ等】

<http://www.math.keio.ac.jp/~bannai/>
bannai@math.keio.ac.jp



研究課題名 気球太陽望遠鏡による精密偏光観測：恒星大気における磁気エネルギー変換の現場に迫る

自然科学研究機構・国立天文台・
太陽観測科学プロジェクト・准教授

かつかわ ゆきお
勝川 行雄

研究課題番号：18H05234 研究者番号：00399289

キーワード：宇宙・天体プラズマ、太陽物理学、光赤外線天文学、気球搭載装置、国際協力

【研究の背景・目的】

6千度の光球と100万度超のコロナの間に位置する『彩層』は、磁気エネルギーが通過する単なる中間大気層ではなく、通過する過程で強く非線形化し、乱流・衝撃波・ジェットなど時間変化の激しい現象を引き起こす。彩層の動的現象は、さらに、コロナや太陽風への非熱的エネルギー(運動エネルギーと磁気エネルギー)注入を担っている可能性も高いことから、現在の太陽恒星研究において最重要ターゲットとなっている。動的現象が担う磁気エネルギーの輸送・散逸プロセスを理解するためには、光球の乱流と上空へつながる磁場との相互作用による磁気流体的エネルギー発生、彩層における伝播そして散逸を、観測から定量的に決定することが必要である。従来の撮像観測に基づく定性的解釈を脱却するため、口径1mの大気球太陽望遠鏡 SUNRISE で質の高い3次元磁場・速度場を世界に先駆けて取得する。「ひので」衛星等で培った飛翔体偏光分光観測技術を発展させることで、SUNRISE に搭載する高精度偏光分光装置をドイツ・スペインと共同開発する。さらに、電磁流体数値シミュレーションにより光球・彩層の動的現象をモデリングし、SUNRISE 気球観測がもたらす磁場データとの直接比較から、天体プラズマにおける磁気エネルギー輸送・散逸プロセスを解明する。

【研究の方法】

以下の2つのアプローチにより、本研究を進める。

(1) 大気球太陽望遠鏡 SUNRISE による高解像度かつ精密な偏光測定：SUNRISE は口径1mの大型光学望遠鏡を搭載した国際共同気球プロジェクトである。スウェーデンから大西洋上空をカナダまで飛翔し、高度35kmからシーイングの影響の無い高解像度観測と1週間の連続観測を行うことができる。光球・彩層の磁場に感度のある近赤外線域のスペクトル線を高精度に偏光分光観測する装置 SCIP (スキップ; SUNRISE Chromospheric Infrared spectro-Polarimeter) を新たに開発し、SUNRISE 気球に搭載する。SUNRISE の飛翔観測を2021年に実施し、光球と彩層で3次元的な磁場・速度構造とその時間発展を同時に観測する。磁気流体波、中でも磁力線に沿って伝わる横波の Alfvén 波による磁気エネルギー輸送と、衝撃波や磁気リコネクションに伴う温度・速度・磁場の時間変化をとらえる。

(2) 電磁流体数値シミュレーションによる太陽光球・彩層のモデリング：彩層は密度変化が激しく非熱平衡であり、様々な時間・空間スケールの現象が混在する。そのため、大規模数値シミュレーションにより、磁気エネルギー輸送・散逸の鍵を担うプロセス、例えば、磁気流体波の伝播と非線形モード変換、磁気リコネクションによるジェットの駆動を再現する。彩層では加熱・冷却に伴う原子の電離・再結合が動的現象にも影響を及ぼす可能性があり、この効果を数値シミュレーションに取り込む。さらに、非熱平衡輻射輸送計算を行うことで、彩層の動的現象から放射される偏光スペクトルを再現する。モデリングと比較できる良質な観測データを SUNRISE 気球観測で手にすることで、彩層研究を確実に進展させることができる。

【期待される成果と意義】

SUNRISE 気球観測とモデリングの両面から、(1) 磁気流体波の伝播と非線形モード変換、さらに、衝撃波形成の一連のプロセスを実証する。また、(2) 磁気リコネクションを示唆する磁場の不連続構造をとらえ、ジェットとの関係を明らかにする。空間分解した観測から物理量を決定できる唯一の恒星である太陽において磁気エネルギー変換過程を理解することで、共通の過程が働く恒星風や降着円盤風など広範な天体プラズマの加熱研究へ発展させることができる。2020年代に計画されている飛翔体偏光分光観測は SUNRISE のみであり、本研究によって飛翔体彩層磁場観測の優位性を示すことで、将来のより大型の衛星計画へと発展させる足がかりとなる。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・“Penumbra Microjets in Sunspot Chromospheres: Evidence of Magnetic Reconnection”, Katsukawa, Y., Astrophysics and Space Science Library, 449, 201 (2018).
- ・“SUNRISE: Instrument, Mission, Data, First Results”, Solanki, S., ApJL, 723, L127 (2010).

【研究期間と研究経費】

平成30年度～34年度
109,100千円

【ホームページ等】

<https://hinode.nao.ac.jp/SUNRISE/>
yukio.katsukawa@nao.ac.jp



研究課題名 原子核中における中間子質量変化の系統的測定による ハドロン質量起源の研究

理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・専任研究員

よっかいち さとし
四日市 悟

研究課題番号：18H05235 研究者番号：20360670

キーワード：実験核物理、GEM、電子検出器、飛跡検出器、カイラル対称性

【研究の背景・目的】

KEK-PS で 2002 年にデータ取得を終了した E325 実験でベクトル中間子 (ρ , ω , ϕ) の原子核中における質量変化現象の証拠をつかみ、2006-7 年に発表した。これは、2008 年ノーベル賞の南部陽一郎らの提唱した「カイラル対称性の自発的破れによるハドロン質量の生成」というメカニズムの実験的証拠と捉え得る重要な現象である。より詳細な測定が待たれたが、高度な実験技術が要求されるため、現在にいたるまで追試と呼べる実験もほとんど行われていない。この状況下で、E325 実験を高度化した J-PARC E16 実験を提案している。建設中である新一次ビームラインの完成と同時に実験を開始して、系統的な再測定により E325 の結果を約 10 倍のデータ量で再確認し、カイラル対称性の破れの指標である原子核内のクォーク凝縮を導出、さらに質量変化の運動量依存性を得る。

【研究の方法】

J-PARC ハドロン実験施設に現在建設中の新一次ビームラインに新しい電子・陽電子対スペクトロメータを建設し(図 1)、ベクトル中間子の質量分布を測定する。J-PARC MR 加速器からの高強度一次ビーム (30 GeV, 1×10^{10} /pulse) を、標的起源の電子バックグラウンドを抑えるため物質量を減らした極薄の原子核標的 (C 400 μ m、Cu 80 μ m、Pb 30 μ m: 放射長で最大 0.5%) に照射し、 1×10^7 Hz の反応レートに耐える検出器で大立体角をカバーする。GEM 飛跡検出器により位置分解能 100 μ m を達成、 ϕ 中間子の質量分解能は 6~8 MeV となる。電子同定には前段: ハドロンブラインド電子検出器 (HBD、ガスチェレンコフ検出器の一種)、後段: 鉛ガラス電磁カロリメータ (LG) の 2 段構成を用いる。HBD と LG の組み合わせによって、背景雑音となるパイ粒子を電子と誤認する確率を 0.03% まで下げることができる。

【期待される成果と意義】

質量変化の理論によらない解析として、 ϕ 中間子の質量分布を質量変化のない場合想定される形と比較して変形量を系統的に調べる。中間子速度依存性 (速い中間子データサンプルでは、物質中滞在時間が短く変化する数が小さい) および標的原子核サイズ依存性 (大きい原子核では物質中滞在時間が長く変化する数が大きい) を検出して 質量変化の存在を再確認する。

一方、理論にもとづいた質量分布予測との比較を行う。原子核中での崩壊点分布モデルとあわせて、測定した質量分布を再現できるモデルにもとづき中間子の質量減少量 (通常原子核密度換算) を導出し、QCD 和則により原子核内クォーク凝縮に換算する。また、導出した質量変化の運動量依存性は核物質中の中間子の分散関係となる。

こうして、核物質中の中間子質量変化の存在を確立し、変化量など詳細を QCD にもとづく理論計算と比較、QCD 真空の上の素励起としてのハドロンの性質を実験的に解明する。

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- "Evidence for In-Medium Modification of the ϕ meson at Normal Nuclear density", R. Muto et al. Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 042501
- "Experimental signature of the medium modification for rho and omega mesons in 12-GeV p+A reactions", M. Naruki et al. Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 092301
- "In-medium mass modification of vector mesons", S. Yokkaichi, Lecture notes in physics 781 (2009) pp161-193, Springer

【研究期間と研究経費】

平成 30 年度 - 34 年度
150,800 千円

【ホームページ等】

<http://ribf.riken.jp/~yokkaich/E16/E16-index.html>

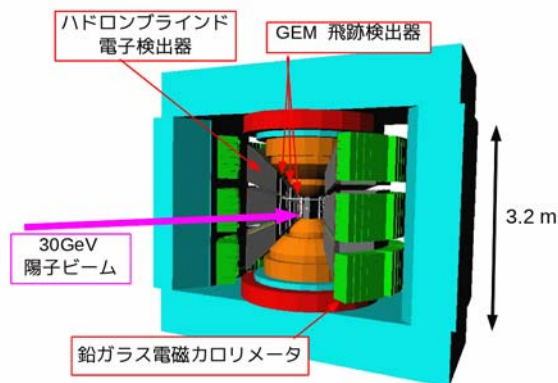


図 1 スペクトロメータ模式図。

本研究ではこのうち中段のみを建設



研究課題名 クォークから中性子星へ：QCD の挑戦

理化学研究所・数理創造プログラム・プログラムディレクター

はつだ てつお
初田 哲男

研究課題番号：18H05236 研究者番号：20192700

キーワード：中性子星、格子量子色力学、バリオン間相互作用、量子多体問題、高密度状態方程式

【研究の背景・目的】

高密度バリオン物質と中性子星の構造解明は、21世紀の原子核物理学における最重要課題の一つであり、素粒子物理学および宇宙物理学の基本問題とも密接に関係している。

特に、連星中性子星の合体事象(GW170817)が重力波と電磁波で同時観測され、この分野の新たな幕が切って落とされた。今後も期待される同様の観測により、中性子星内部の高密度物質や重元素の起源など、原子核物理の長年の課題の解決に向けた研究が急速に進むことが期待されている。

本研究は、中性子星内部における高密度バリオン物質の標準状態方程式を、格子上の量子色力学(QCD)に基づくバリオン間相互作用の第一原理計算と、精密量子多体計算を組み合わせることで構築し、クォークから中性子星を QCD で繋ぐことを目的としている。

【研究の方法】

本研究の代表者と分担者は、格子 QCD による核力やハイペロン力の導出手法の開発や、クラスター変分法による量子多体問題手法の開発を世界に先駆けて行ってきた。本研究では、物理点近傍でのバリオン二体相互作用の系統的計算、中性子星の内部構造に重要な NNN , ΛNN , ΣNN などの三体相互作用の解明を格子 QCD 計算により進め、中性子星の中心核を形成する一様バリオン物質の状態方程式を構築するのに必要な基礎データを提供する。さらに、それに基づいた精密量子多体計算により、有限温度で任意の陽子混在度を持つ中性子星の状態方程式の構築を行う。

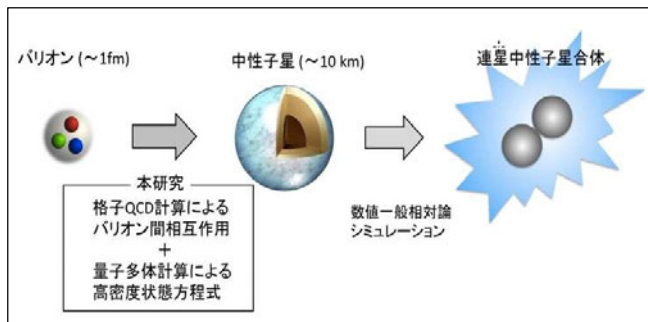


図1 クォークから中性子星合体まで

【期待される成果と意義】

格子 QCD 計算と量子多体計算を組み合わせ、非一様相から一様相までを広範にカバーする標準状態方程式を構築することは、数値一般相対論に基づく連星中性子星合体からの重力波解析や中性子星の構造解明に資するだけでなく、冷却原子気体や液体ヘリウムなど強相関物質科学における理論研究とも密接に関係している。さらに、加速器を用いた重イオン衝突実験で行われているバリオン間相互作用や高密度物質の研究にも直接的に関係している。このように、本研究は、QCD を軸に、宇宙核科学、物質科学、加速器科学を学際的に繋ぐという意義を持つ。

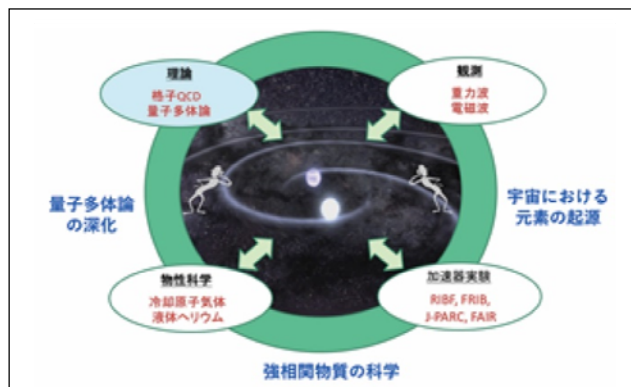


図2 本研究の学際的意義

【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- ・ G. Baym, T. Hatsuda, T. Kojo, P.D. Powell, Y. Song, T. Takatsuka, "From Hadrons to Quarks in Neutron Stars", Rept. Prog. Phys. vol.81, 056902 (2018).
- ・ H. Togashi, E. Hiyama, Y. Yamamoto, M. Takano, "Equation of State for Neutron Stars with Hyperons by the Variational method", Phys. Rev. C93, 035808 (2016)

【研究期間と研究経費】

平成30年度－34年度
91,600千円

【ホームページ等】

<https://ithems.riken.jp/>
thatsuda@iken.jp