

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654201

研究課題名(和文)トロイダル反物質プラズマ生成の基礎研究

研究課題名(英文)A study on the formation method of toroidal antimatter plasmas

研究代表者

齋藤 晴彦(Saitoh, Haruhiko)

東京大学・新領域創成科学研究科・客員共同研究員

研究者番号：60415164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円、(間接経費) 720,000円

研究成果の概要(和文)：トロイダル反物質プラズマを生成する事を念頭に置いて、ダイポール磁場配位における陽電子の挙動を数値計算と実験の両面から調べた。放射線源から供給される高エネルギー陽電子が、ダイポール磁場中で長い軌道長を持つカオス的運動を行う事を明らかにし、効果的な入射方法として応用可能である事を示した。また、RT-1装置において小型のNa-22線源を使用し、消滅ガンマ線の計測による検証実験を行い、数値計算の妥当性を示した。

研究成果の概要(英文)：Aiming for the creation of toroidal antimatter plasmas, the dynamics of positrons in a dipole magnetic field was numerically and experimentally investigated. High energy positrons supplied from a radioactive source have chaotic long orbit lengths in the dipole field, which can be applied to an efficient injection method of positrons into a confinement region. A proof-of-principle experiment was conducted by using a small Na-22 source and a gamma-ray coincidence measurement system in RT-1.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：非中性プラズマ 反物質プラズマ ダイポール磁場

1. 研究開始当初の背景

イオンと電子から構成される通常のプラズマと異なり、等質量の荷電粒子から構成されるペアプラズマには未解明の点が多い。本研究は、電子と、その反粒子である陽電子から構成される電子陽電子ペアプラズマに注目した基礎研究である。電子陽電子系では、構成粒子が非常に低質量（イオンの数千分の1以下）という特徴を生かして、ペアプラズマの波動伝搬特性を高周波領域まで解明し、プラズマの基礎的理解を深める事が出来る。また、電子陽電子プラズマは、パルサー周辺や活動銀河核等の天体磁気圏に広く存在すると考えられている。このため、その基礎特性の解明は、天体現象の素過程について学際的な領域への波及効果が期待される。また、反物質を用いた実験科学は急速に発展中の分野であり、新しい概念による閉じ込め方法を開発する事により、ポジトロニウムの大量生成や反粒子の貯蔵装置等の新分野への応用可能性がある。

閉じ込め方式や生成手法の困難さから、電子陽電子プラズマの実験的研究例は非常に少ないのが現状である。非中性プラズマに標準的に使用される直線型配位では、磁力線方向の閉じ込めに電場を使用するため、異なる電荷符号を持つ電子と陽電子をプラズマとして同時に捕獲する事は原理的に不可能である。近年の先行研究により、端部を持たないトーラス形状のダイポール磁場配位において、非中性（純電子）プラズマの安定生成が実現された。荷電粒子の純磁場閉じ込め方式が確立されれば、原理的に陽電子と電子の同時捕獲が可能であり、ペアプラズマを実験室で生成する事が可能になる。

ダイポール磁場配位がペアプラズマの閉じ込めに有利である一方で、プラズマの生成過程では、高効率の入射方法を確立する事が必要となる。ダイポール磁場では、閉じ込め領域が閉じた磁力線の内部に位置するため、磁力線を横切って荷電粒子をドリフト的に輸送する必要がある。ダイポール磁場中では、プラズマが乱流的な強い揺動を持つ場合に、自発的な内向き輸送が発生し、強磁場領域で高い密度を持つ構造が自己組織化される。これに対して、入手可能なビーム強度が非常に弱い陽電子の場合には、同様の機構による閉じ込め領域へ自発的な入射は期待出来ない。このため、何らかの効果を用いた高効率の粒子入射方法を確立する必要がある。

ダイポール磁場中で荷電粒子の輸送や閉じ込めを特徴付ける上で鍵となるパラメータは、運動に関する3つの断熱不変量である。それぞれの断熱不変量に対応する運動は、ラーマー回転、磁力線に沿った振動、トロイダル方向の周回運動である。系の軸対称性に起因する第三断熱不変量が良い保存量となるのに対して、極めて非一様なダイポール磁場中では、第一及び第二断熱不変量は容易に非保存となる。特に高エネルギー荷電粒子の運

動では、ラーマー回転と磁力線方向のバウンス運動のカップリングを介して不規則運動が発生する。このため、ダイポール磁場中の荷電粒子の運動は一般には非可積分となり、カオスとなる場合がある。線源から供給される荷電粒子がカオス的な運動をする場合には、再結合による消滅の前に長大な軌道長を持つ。トロイダル方向に複数回の周回運動する際に適切な電場を印加して第三断熱不変量を非保存とする事で、さらに径方向の内向き輸送を発生させる事が可能となる。強磁場の閉じ込め領域へと輸送された粒子は、シンクロトロン放射により冷却される事で、プラズマとして保存される可能性がある。こうした効果を、閉じた磁気面内への粒子入射へと応用出来る可能性がある。

また、トロイダル配位における非中性プラズマの研究は新しい研究分野であり、有効な計測方法を確立する必要がある。陽電子に対しては、消滅ガンマ線を用いた高精度の計測が可能であり、トロイダル非中性プラズマの性質を詳細に研究する事が可能となる。

2. 研究の目的

ダイポール磁場中の高エネルギー陽電子の挙動を軌道計算及び実験を通して明らかにする。特に極めて非一様な磁場中での荷電粒子のカオス的運動に注目して、放射線源から供給される高エネルギーの陽電子を効率的に捕獲する可能性を探る。具体的な研究目的は以下の通りである。

- (1) 入手性に優れる Na-22 線源の使用を想定して、高エネルギー陽電子のダイポール磁場中における挙動を解析する。カオスの発生条件と、その軌道長や閉じ込めに与える効果を考察する。
- (2) ダイポール磁場実験装置 RT-1 において、消滅ガンマ線のコインシデンス計測を用いた、トロイダル陽電子プラズマの計測システムを開発する。
- (3) 軌道解析結果に基づいて、開発した計測システムを使用してカオスの効果を実験的に調べ、将来の電子陽電子プラズマ生成を実現するために必要な粒子入射方式について原理検証を行う。

3. 研究の方法

本研究では、軌道解析に基いて、純電子プラズマの安定（300 秒以上）閉じ込めが実証されている RT-1 装置において検証実験を実施する。RT-1 は、超伝導マグネットによりダイポール磁場を生成するプラズマ実験装置である。図 1 に、ダイポール磁場によるプラズマ閉じ込めの概念図を示す。大きな内部揺動を持つ核融合プラズマや大電流電子銃を使用した非中性プラズマでは、対応する時間スケールが長い第三断熱不変量は容易に非保存となる。このため、自発的な内向き輸送が発生して、平衡構造が自己組織化される。これに対して、放射線源から供給される極め

て小電流かつ高エネルギーの陽電子ビームを入射する場合には、第一及び第二断熱不変量の非保存化によるカオスの発生と、その内向き輸送への利用が可能となる。こうした原理を、以下の方法を用いて数値計算及び検証実験を通して明らかにする計画である。

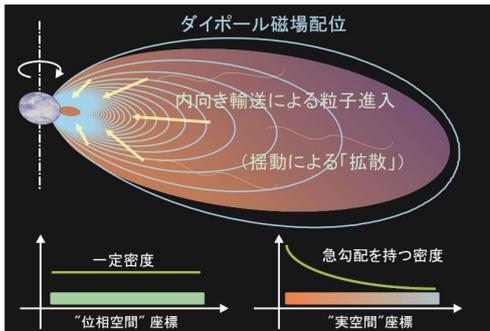


図1 ダイポール磁場配位を使用したプラズマ閉じ込めの概念図。

(1) 陽電子の軌道解析

ダイポール磁場中の荷電粒子の運動が一般には非可積分である事は知られているが、実際にカオスの挙動を示す粒子の軌道条件やその割合を定量的に評価する必要がある。RT-1の生成するダイポール磁場中で、Na-22から供給される高エネルギー陽電子について、相対論的運動方程式を数値的に解いて、断熱不変量の時間発展に着目した解析を行う。放射線源から崩壊により供給される陽電子は幅広いエネルギー分布 (Na-22の場合には最大 546keV) を持つ。こうしたエネルギー広がりを考慮して多数粒子の軌道計算を行う事で消滅までの軌道長を評価し、カオスが与える効果について定量的に調べる。また、長い軌道長を持つ陽電子に対しては、周回運動中に局所的電場を印加する事で、効果的に内向き輸送を発生させる可能性がある。こうした効果を含め軌道解析を実施する。

(2) 計測法の開発

管理区域の指定が無い RT-1 装置では使用可能な Na-22 線源は 1MBq 以下であり、実験に使用する事が出来るビーム強度は非常に小さい。このため、純電子実験で有効に動作した、電流計測を中心としたプラズマ診断は実施が困難である。そこで、新しい計測法として、511keV の消滅ガンマ線の計測によるプラズマ診断システムを RT-1 において開発する。陽電子の消滅位置を高精度で計測するため、2 台の NaI 検出器及びコインシデンスモジュールからなる計測系を整備して、小型線源を使用して校正を行う。

(3) 小型線源を使用した検証実験

RT-1 装置において、1MBq の小型 Na-22 線源を使用してダイポール磁場中で入射実験を行う。ターゲットプローブを使用して消滅ガンマ線の計測を行い、カオスの効果により、線源で直ちに再結合する事なくトロイダル方向に周回可能な粒子の割合を推定する。また、閉じ込め領域の周辺部に配置した電極を使用して局所電場を発生させ、内向き輸送

の効果を検証する。一連の結果を数値計算結果と比較し、数値計算の妥当性を評価すると共に、効果的な入射を実現するために最適な電場印加方法を調べる。

4. 研究成果

軌道解析により、Na-22 線源から供給される陽電子の軌道が RT-1 装置のダイポール磁場内でカオス的となる事を示した。カオスの効果により、陽電子は線源に戻り消滅するまでに長い軌道長を持ち、トロイダル方向に複数回の周回運動が可能である。こうした高エネルギーの陽電子に対して、局所電場を用いて内向き輸送を発生させる可能性を示した。陽電子計測に特化した計測器として、511keV の消滅ガンマ線のコインシデンス計測システムを開発して RT-1 に導入した。これを使用して、得られた軌道計算結果の検証実験を実施し、ダイポール磁場中の陽電子の挙動について探索を進めた。

(1) ダイポール磁場中の陽電子軌道のカオス

RT-1 装置の磁場中で放射線源から供給される範囲の陽電子の運動エネルギーにおいて、ラーマー回転と磁力線に沿ったバウンス運動のカップリングが発生する事が分かった。図2に示す通り、約 20keV を超えるエネルギーを持つ陽電子では、第一及び第二断熱不変量の保存は成立しておらず、両者の時間変動に相関が見られる。これらは磁場の強い非一様性に基づく自発的な効果であり、系の対称性により実現される第三断熱不変量の保存は良好に保たれている。2つの断熱不変量が非保存量となる時、運動の周期性が失われ、図3に示すようにカオス的運動となる。

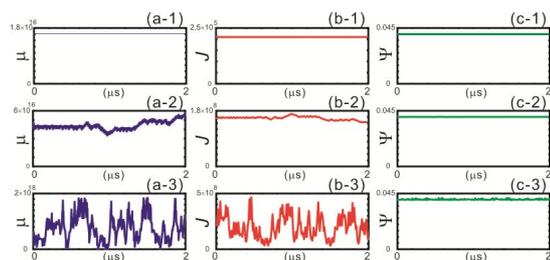


図2 (1) 1keV, (2) 20keV, (3) 100keV の陽電子について、(a) 第一、(b) 第二、(c) 第三断熱不変量の時間変化。

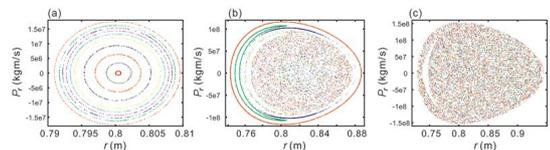


図3 陽電子軌道のポアンカレプロット。粒子の運動エネルギーは図2と同一。

断熱不変量が保存される場合と非保存となる場合の典型的な陽電子軌道を図4に示す。低エネルギーの場合の運動は周期的であり、これは線源から陽電子を供給する場合には、

短い周期運動の後に線源での再結合により消滅する事を示唆する。これに対して、運動エネルギーが大きい場合には、ラーマー回転とバウンス運動のカップリングにより軌道は明確な周期を持たないカオス的となる。

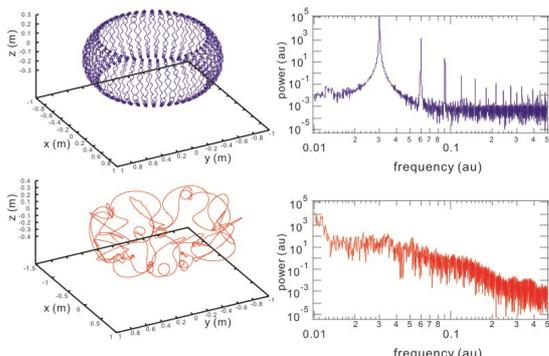


図4 低エネルギー(上段)及び高エネルギー(下段)の場合の典型的な陽電子起動と位置座標の周波数特性。

軌道がカオス的か否かは、断熱不変量が保存されるか否かとよく対応しており、その時間発展を調べる事でカオス状態の判定が可能である。断熱不変量の保存性が保たれなくなる条件は、荷電粒子の運動エネルギーと磁力線に対するピッチ角に強い依存性を持つ。これらをプロットしたものが図5である。磁力線に平行に近い入射を行う場合には約10keV以上で、垂直入射に近くバウンス運動の距離が短い場合には100keV以上で軌道がカオス的となっている。

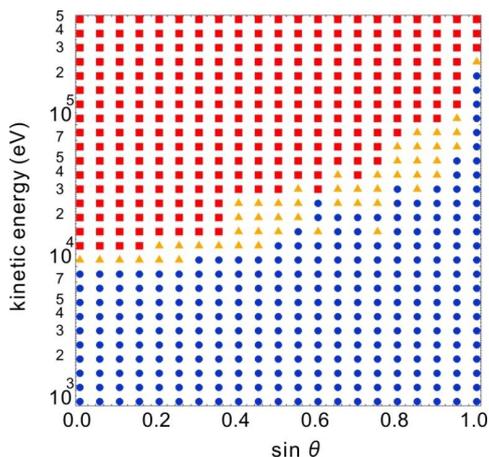


図5 RT-1装置の周辺部から陽電子を入射した時に、運動エネルギー及びピッチ角に対して、軌道がカオス的(●),周期的(○),境界的(△)となる。

図6は、各エネルギーの陽電子をRT-1の周辺部から等方的に入射した際の、線源やコイルで再結合する事なく残存する成分の割合である。高エネルギー陽電子は、カオス的な不規則軌道を取る事により、入射後直ちに線源で消滅する事なく、トロイダル方向への周回運動が可能となる。さらに、Na-22線源から供給される陽電子のエネルギー分布を反

映し、多数の粒子を等方的に入射した際の計算を行った。その評価結果を(3)で実験結果と比較する(図10)。

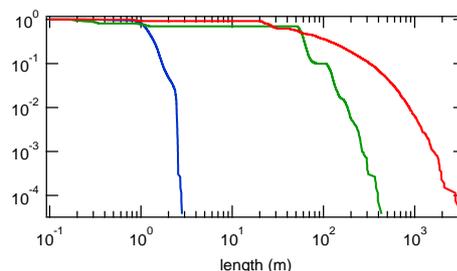


図6 各エネルギー(1, 20, 100keV)の陽電子を等方入射した時の残存粒子割合。

(2) 消滅ガンマ線のコインシデンス計測系

実験を実施するRT-1装置を図7に示す。南東ポートに1MBqのNa-22線源を設置し、対向する北西ポートにターゲットプローブ及び可動式の2組のNaIシンチレーション検出器を配置した。図8は、構成したガンマ線計測システムの概略である。波高分析を行う事で511keVガンマ線の計測を行うと共に、より高精度に消滅位置情報を得るためにコインシデンス計測系を構成した。ターゲットプローブと一体として径方向位置を調整する事で、ターゲット上で消滅したガンマ線のみを計測可能な配置となっている。

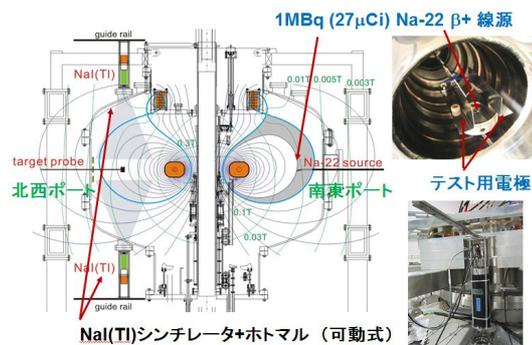


図7 実験を実施したRT-1装置の投影図と、線源及びシンチレーション検出器の構造。

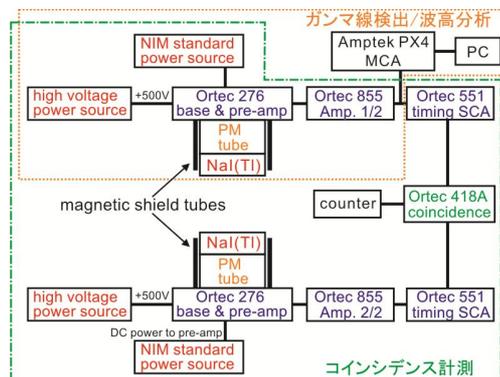


図8 シンチレーション検出器を用いた消滅ガンマ線計測システムの構成図。

(3) 小型線源を使用した陽電子実験 超伝導マグネットによりダイポール磁場

を発生する実験装置 RT-1 において、1MBq の Na-22 線源とシンチレーション検出器による消滅ガンマ線計測を実施した。数値計算から予測される通り、直ちに線源に戻り消滅する成分に加えて、トロイダル方向に周回運動する成分が存在する(図9)。

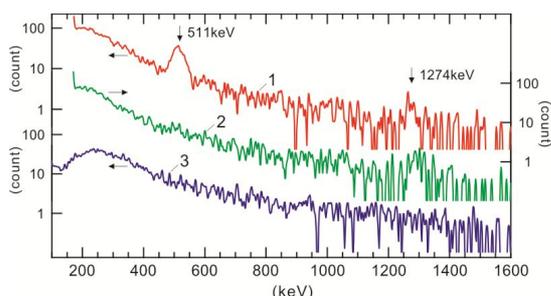


図9 ガンマ線の波高分析結果。(1)トロイダル方向に周回運動し、ターゲットで消滅した陽電子による消滅ガンマ線。(2)ターゲットプロンプが閉じ込め領域外や(3)磁場なしの場合には検出されない。

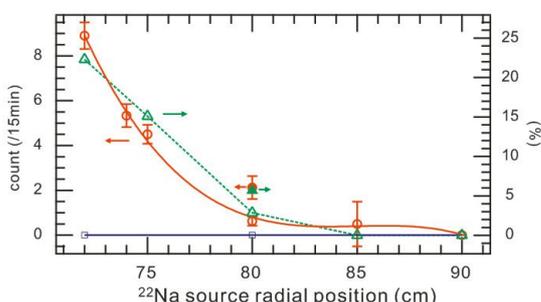


図10 電場印加を行った $r=80\text{cm}$ のデータを含め、ターゲットで発生するガンマ線のカウント数(●)は、(1)で実施した軌道計算値(▲)と良い一致を示す。

コインシデンス計測を使用して、より定量的な数値計算との比較を行った。検出効率の高い上下ポートにシンチレータを固定し、線源位置を変化させた時のカウント数を図10に示す。(1)で実施した数値計算結果を併せて示しており、両者は良い一致を示している。カウント数の絶対値は、減衰と検出率と考慮して予測される値と矛盾しない傾向を示した。線源付近に電極を設置し、トロイダル方向に電場を与える事で径方向へのドリフトを発生させる実験を行った。図10の $r=80\text{cm}$ のデータに示した通り、計測結果は数値計算と一致し、局所電場により径方向輸送を実現可能である事が原理的に示された。

以上、研究開始当初に最終目標として設定した電子陽電子プラズマの生成には至らなかったが、軸対称なダイポール磁場中で陽電子軌道がカオスとなる事を示し、長い軌道長を持ちうる事を示した。さらに、局所電場の印加により系の軸対称性を破壊する事で内向き輸送を発生させ、閉じ込め領域に陽電子を進入させる事が可能である事を明らかにした。また、トロイダル陽電子プラズマの計

測に適した消滅ガンマ線のコインシデンス計測システムを開発して RT-1 に導入し、数値計算に関する検証実験を行い、計算の妥当性を示した。本研究で提案したドリフト入射法を適用して電子陽電子プラズマを生成する事を目標として、大型線源を使用した研究を実施する計画である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

H. Saitoh, T. S. Pedersen, U. Hergenbahn, E. V. Stenson, N. Paschkowski, and C. Hugenschmidt, Recent status of A Positron-Electron Experiment (APEX), *Journal of Physics; Conference Series* **505**, 012045 1-4 (2014) DOI:10.1088/1742-6596/505/1/012045, 査読有。

H. Saitoh, Z. Yoshida, J. Morikawa, Y. Yano, N. Kasaoka, W. Sakamoto, and T. Nogami, Stable confinement of electron plasma and initial results on positron injection in RT-1, *Non-Neutral Plasma Physics VII* (AIP Conference Proceedings **1521**), 63-72 (2013) DOI: 10.1063/1.4796062, 査読有。

[学会発表](計7件)

H. Saitoh, T. S. Pedersen, U. Hergenbahn, E. V. Stenson, N. Paschkowski, and C. Hugenschmidt, Trapping properties of magnetic dipole fields, *Physics of Electron-Positron Plasma Workshop*, 2013年10月11日, Max Planck Institute for Plasma Physics, Greifswald, Germany.

H. Saitoh, T. S. Pedersen, U. Hergenbahn, E. V. Stenson, N. Paschkowski, and C. Hugenschmidt, Recent status of A Positron-Electron Experiment (APEX), 13th International Workshop on Slow Positron Beam Techniques and Applications, 2013年9月20日, Technical University Munich, Germany.

齋藤晴彦, 吉田善章, 矢野善久, 森川惇二, 坂本渉, 笠岡紀和, 磁気圏型装置における陽電子群の空間分布と閉じ込め特性, 日本物理学会2012年秋季大会, 2012年9月20日, 横浜大, 神奈川。

H. Saitoh, Z. Yoshida, J. Morikawa, Y. Yano, N. Kasaoka, and W. Sakamoto, Confinement of a toroidal non-neutral plasma in magnetic dipole, 10th international workshop on non-neutral plasmas, 2012年8月28日, Greifswald, Germany (招待講演)。

H. Saitoh, Z. Yoshida, J. Morikawa, Y. Yano, N. Kasaoka, and W. Sakamoto, Spontaneous formation of peaked density profile in a dipole plasma, 2nd Asian Pacific Transport Working Group Meeting, 2012年5月15日,

Chengdu, China.

齋藤晴彦, 吉田善章, 矢野善久, 森川惇二, 三上季範, 笠岡紀和, 磁気圏型装置における陽電子閉じ込め実験の初期結果, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日, 関西学院大, 兵庫.

H.Saitoh, Z.Yoshida, J. Morikawa, and Y. Yano, Initial results on positron confinement in a magnetospheric configuration, 53rd annual meeting of the APS, Division of plasma physics, 2011 年 11 月 17 日, Salt Lake City, USA.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤 晴彦 (SAITOH, Haruhiko)
東京大学・新領域創成科学研究科・客員
共同研究員
研究者番号: 60415164

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

吉田 善章 (YOSHIDA, Zensho)
東京大学・新領域創成科学研究科・教授
研究者番号: 80182765

毛利 明博 (MOHRI, Akihiro)
京都大学・人間・環境学研究科・名誉教授
研究者番号: 10025926

山崎 泰規 (YAMAZAKI, Yasunori)
理化学研究所・山崎原子物理研究室・上席
研究員
研究者番号: 30114903