

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月23日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21244026

研究課題名（和文） 冷却不安定原子を用いた電子電気双極子能率探索技術の確立

研究課題名（英文） Establishment of the measurement technique of the permanent electric dipole moment on an electron with cooled radioactive atoms.

研究代表者

酒見 泰寛 (SAKEMI YASUHIRO)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・教授

研究者番号：90251602

研究成果の概要（和文）：

物質・反物質の非対称性創成の機構を調べる上で、基本粒子の永久電気双極子能率（EDM）の探索は重要である。本研究では、CP非保存機構の解明をめざし、電子EDMを高精度で探索するために、電子EDMの増幅度が最大である原子量最大のアルカリ原子・放射性元素・フランシウム（Fr）に着目した。FrのEDMを測定するための鍵となる大強度Fr源の開発を行い、融解した標的を用いた新しい表面電離型イオン源の開発に成功した。その結果、Fr引き出し効率35%、一次ビーム（ ^{18}O ）の強度200enAにおいて $\sim 10^6 \text{Fr}^+/\text{s}$ を実現し、EDM測定の本拠であるFr生成・輸送・トラップ技術を確立した。

研究成果の概要（英文）：

The search for the permanent electric dipole moment (EDM) of the elementary particle such as the electron is quite important to understand the evolution mechanism of the baryon asymmetry in the universe. In this research program, to study the mechanism of the CP violation with the high accuracy measurement of the electron EDM, we focus on the radioactive element of the francium (Fr), which has the largest enhancement factor of the electron EDM due to the relativistic effect. The new high intensity thermal ionizer with melting target was successfully developed to produce the Fr with the fusion reaction of the ^{18}O and ^{197}Au . The specifications such as the Fr extraction efficiency of about 35% and production yield with $10^6 \text{Fr}^+/\text{s}$ well sufficient for the EDM search were achieved. We established the experimental techniques of the Fr production, neutralization, and trapping, which were essential for the EDM search.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	19,500,000	5,850,000	25,350,000
2010年度	13,800,000	4,140,000	17,940,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総計	36,800,000	11,040,000	47,840,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：フランシウム 冷却不安定原子 時間反転対称性 表面イオン化器
超対称性 電気双極子能率

1. 研究開始当初の背景

電子等の基本粒子が EDM を持てば、それは直ちに時間反転対称性または CP 対称性の破れを意味する。この基本対称性の研究は時代を超えた意義を有するが、本研究ではこのような一般論にとどまらず、EDM 探索が「機の熟した実験」となる可能性が高いという認識に基づいて提案する。CP 非保存の源となる新しい位相角を備える超対称性理論は、(1)階層問題の解決、(2)ゲージ結合定数の統一、(3)軽いヒッグス質量の示唆、(4)暗黒物質に対する素粒子論的解決等を一挙に実現可能な標準模型を越える枠組として位置づけられており、この理論では EDM は極めて自然に出現し、現在の実験技術で測定可能な範囲にさしかかっている。EDM は、バックグラウンドとなる標準模型からの寄与は無視できるほど小さい。特に最外殻に不対電子をもつアルカリ原子では、相対論効果により原子電荷の 3 乗に比例して電子 EDM が増幅され、微小な EDM の信号を敏感に探り CP 非保存や超対称性破れの機構解明に重要なプローブと考えられる。本研究では電子 EDM 増幅度最大 (895 倍) である原子量最大のアルカリ原子・フランシウム (Fr) に着目した。これまで、重い放射性元素は、この電子 EDM の増幅効果により、EDM 探索の有力な候補と考えられてきたが、オンラインで生成する収量が少なく、真空中にトラップして高精度測定を行うにはいたらなかった。そこで、この研究では、新しい表面電離型イオン源の開発を行い、重イオンビーム (^{18}O) と標的原子核 (^{197}Au) との融合反応 ($^{18}\text{O}+^{197}\text{Au}\rightarrow^{210}\text{Fr}+5\text{n}$) による大強度 Fr 源の実現を目指すこととした。この Fr 源が実現することで、ボーズ凝縮実現の立役者である量子光学先端技術のレーザー冷却・トラップを駆使した次世代 EDM 探索技術を世界に先駆けて確立することが可能となり、EDM 測定の鍵を握る心臓部となる。

2. 研究の目的

CP 非保存の機構解明を目指し、冷却不安定原子を用いた EDM 探索の新しい精密測定方法確立を目的とする。電子 EDM の測定精度は、中性原子における電子 EDM の増幅度を K 、印加電場を E 、観測対象とする原子個数を N 、原子偏極を保持する時間 (コヒーレンス時間) を τ 、測定時間を T とすると、 $\delta d = \hbar / (2 \cdot K \cdot E \cdot \sqrt{N \cdot \tau \cdot T})$ と表される。測定感度の向上には探索技術の質的な変化が求められ、(1) 不安定原子 Fr の増幅度 K が 895 を超えることに着目し、さらに (2) Fr をレーザー冷却・トラップすることでコヒーレンス

時間 τ を飛躍的に長くし、現在の測定精度限界を超えることを目指す。(2)に関しては先行して研究を行った科研費・萌芽研究 (2005 年～2006 年) で見通しをたてており、このアイデア実現には、(1)の Fr をいかに高収量・高効率で生成し測定個数 N を多くするかが成否の鍵を握っている。各実験パラメータの評価から、現在の世界最高精度 $\sim 10^{-26} \text{e} \cdot \text{cm}$ を超える精度を達成し新たな探索領域の扉を開くには、Fr の生成収量 10^6 個/s 以上が必要であり、その実現が本研究の最大の目標である。

そこで、これまで進めてきた Fr 生成の研究に基づき、新しい方式：「一次ビーム (^{18}O) 斜め入射」と「融解標的」の組み合わせによる高収量・高効率表面イオン化器の開発を進め、世界最高収量のフランシウム生成源の実現を目指す。これは、先行する実験において、融合反応で標的内の生成 Fr を外部に引き出す際、標的である金を融点以上の高温に保つときに、生成 Fr の熱拡散による標的表面からの引き出し収量が劇的に増大する結果から着想を得て、ビームの入射方法、金標的、そして金を加熱するオープンの配置を工夫することで、安定した大強度 Fr 生成をめざす方針をたてた。融解標的を用いた表面電離型イオン源の方式は国際的にも例はなく、これまで不安定原子 EDM 探索を困難にしてきた最大の要因である放射性元素生成個数増大の突破口を開き、新しい EDM 探索技術を確立する。

3. 研究の方法

本研究では、電子 EDM の高精度探索の鍵となる世界最高強度フランシウム (Fr) 源 (10^6 個/s 以上) の実現を目指し、一次ビーム (^{18}O) 斜め上方入射融解標的型表面電離イオン化器を開発する。科研費・萌芽研究で開発した磁気光学トラップ装置 (MOT) を表面イオン化器の下流に取り付け、Fr 引き出し効率、ビーム輸送効率、トラップ効率を評価する。現在の EDM 測定精度限界を越えるために必要な Fr 収量を達成することを確認し、レーザー技術を融合した次世代 EDM 探索技術を確立する。図 1 に EDM 測定装置の全体像を示す。

Fr は加速器からの ^{18}O ビームと金標的による融合反応 ($^{18}\text{O}+^{197}\text{Au}\rightarrow^{210}\text{Fr}+5\text{n}$) により生成する。金標的中で生成された Fr を効率よくイオンとして外部に引き出すことがこの実験成功の鍵となり、その心臓部が「表面イオン化器」である。表面イオン化器は、標的中に生成された Fr を熱拡散により標的表面へ移動させ、標的物質 (金) の仕事

関数が Fr のイオン化ポテンシャルより大きいために、 Fr はイオンとして引き出される。標的の温度が高いほど引き出し効率は高くなるが、高温雰囲気中で生成されたイオンビームはエミッタンスが大きく、下流輸送系におけるビーム損失が深刻となる。そこで、設計の方針は、

- ① 標的の融点温度以上で温度を維持する。
 - ② 引き出されるビームエミッタンスを小さくする。
- という2点の実現が重要となる。

CYRICでのレーザー冷却フランシウム生成工場



図1：左から一次ビームが導入され、表面イオン化器で生成された Fr が輸送系により中性化装置まで伝送される。その後、中性 Fr 原子は MOT で冷却・トラップされ、磁気シールド内の光格子に導き、EDM を測定する。

試作機の動作テストにより、金標的の融点近傍で急激に Fr 生成収量が増加し世界最高収量を超えることを確認したが、すぐに生成量は減少し安定した Fr 供給は困難だった。減少する原因は理解されており、通常のビーム入射方法（水平方向）では、融点近傍になると金標的は溶融しはじめ、重力により標的の下部に移動・蓄積されるため、ビームが照射されている部分に Fr を生成するための金が消失したためである。そこで、本研究では、高温オープン容器の底面に金標的を配置し、 ^{18}O ビームを上方から垂直入射させることで、融点近傍で金が溶融してもビーム照射位置から消失しない構造にして安定した高強度 Fr 生成を実現する。この新しい方式は、国際的にも例がなく、 Fr 収量を1~2桁増大させ、探索精度を一気に向上する可能性を持つ。ビームを垂直入射させるために、CYRIC でこれまで (p,n) 荷電移行反応を用いた原子核反応・構造研究に用いてきたビーム入射軸を自在に制御する「Swinger磁石」を活用する。Swinger磁石は、イオンビームを曲げる偏向磁石と収束のための4重極磁石、そしてこれらの磁石を円滑に回転させるための回転軸とカウンターバランス（錘）を磁石の反対側に配置した構造となっている。今回、45度

してビームを斜め45度入射させ、ターゲットは上向きに配置して、融解した状態でも流失しない構造をとり、引き出される Fr イオンは、垂直上方に輸送される電極を配置するようにする（図2）。これらの新しい融解標的型表面イオン化器の設計・開発を進める。

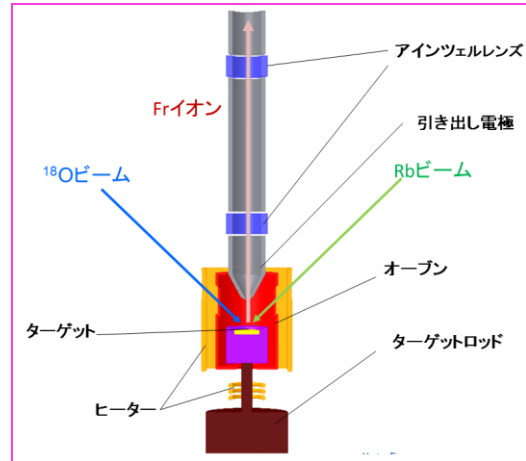


図2：融解標的型表面電離イオン源の構造。金標的が融解した状態でも流失しないよう、ターゲットは垂直上向きに設置されている。斜め45度に2つのポートを設置し、それぞれ加速器からの一次ビーム、そしてオフライン実験用のRb原子ビームを導入できる。

4. 研究成果

① 融解標的型表面電離イオン源

加速器からの一次ビームを斜め45度上方から入射させ、標的は融解させたまま、融合反応で生成された標的中の Fr を高効率で引き出す表面電離型イオン源の開発を行った。タングステンのロッドの先端をお椀状に加工し、その内部に金の標的を配置した。この金を加熱するために、このターゲットロッドの周りをタングステンのプレートで形成されたヒーターで覆い、さらにその周りを3重の円筒形熱シールドで囲む構造とした。このヒーターにより、ターゲットロッドを輻射加熱で、金の融点(1063度)以上に加熱し、融解させた状態で保持する。なお、金標的の表面から引き出される Fr イオンは非常に低エネルギー (~0.数 eV 程度) であり、その軌道は引き出し電極の電場形状に強く依存する。ヒーターには、加熱用の電流を流すため、電流による磁場によって、引き出された Fr イオンがオープン内に閉じ込められないよう、生じる磁場がキャンセルしあうように楕円形の構造とした。さらに電極形状に関して、電場のシミュレーションを行い、イオントラップの評価から引き出しビームのエミッタンスを見積もって、電極の角度、サイズ等の最適化を行った。

さらにターゲットの温度を微調整できるように、図2で示すように、ターゲットロッド下部にコイルヒーターを導入した。典型的な一次ビームのエネルギー・強度は、 180 ビーム、 $E=100$ MeV, $I=1$ μ A であり、ビームスポットサイズは直径 5mm 程度である。ビームによる加熱は、この限られた領域に 100W 程度がつきこまれることとなり、加速器の安定度に依存して、ターゲット温度が変化すると、Fr 収量も不安定になる。これを避けるために、ターゲット直下に、熱電対を配置し、リアルタイムで温度をモニターしながら、この補助ヒーターでターゲット温度が一定になるよう、フィードバックをかける機能をもたせた。設計性能として、1500 度まで加熱、引き出し電圧・5kV が実現できるようなデザインとした。

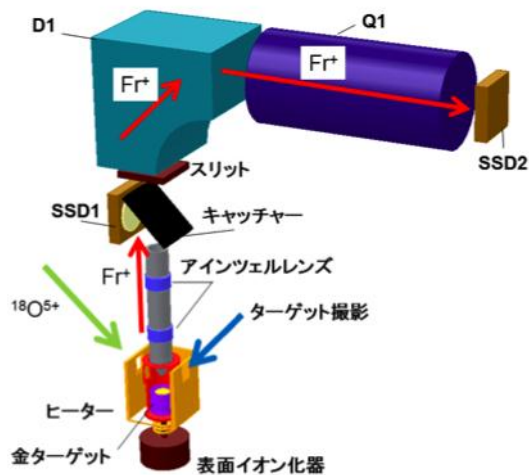


図3：実験セットアップ。表面イオン化器から生成された Fr は上方へ引き出され、SSD 等のビーム診断装置でその収量を測定する。Fr は 90 度の偏向電極を輸送され、収束電極を通過して、下流へ伝送される。

② Fr 生成実験結果

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターの AVF サイクロトロンから供給される 180 ビームを用いて Fr 生成実験を行った。 180 と 197 Au との融合反応により Fr を生成するが、融合反応の断面積は、クーロンバリアより少し高い入射エネルギーで最大となる。そこで、ターゲット中でのエネルギー損失を考慮の上、加速エネルギー 100 MeV とした。一次ビームのビームサイズは、金標的の直径 12.5 mm に収まるように調整し、典型的なビーム強度は 400 enA (80 pnA) であった。実験のセットアップを図3、表面イオン化器直後のビーム診断装置によるスペクトルを図4に示す。スペクトルからわかるように、検出されているのは Fr、および Fr から崩壊して生成される娘核からの α 崩壊が観測され

ており、ほぼ、バックグラウンドのない状態で Fr が引き出されていることが確認された。これは、標的の仕事関数と、融合反応により生成される RI のイオン化ポテンシャルにより決まっており、下流の MOT にバックグラウンドとなる温度の高い RI が混入しないことがあきらかとなった。

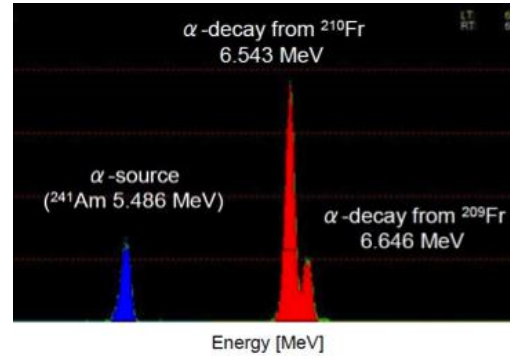


図4：SSD で検出した Fr からの α 崩壊のエネルギースペクトル。

次に、Fr の収量と標的の温度依存性の測定を行った。図5に示すように、標的の温度を 800 度から金の融点を超えて、1000 度以上に上げたときの収量を測定すると、950 度付近で急激な Fr 収量増加が観測された。この結果は再現性を持っており、融解標的中での拡散係数が変化したことから、引き出し効率が向上したと考えられ、950 度という融点以下の温度でこのような相転移が見られたことの原因は、温度をモニターしている熱電対の位置が、実際の金標的の位置から離れているため、ある程度の温度勾配があるためと考えられる。さらに、融解標的において Fr 生成を行うと、引き出し時間が短縮される傾向が見られ、より短寿命の RI 生成・引き出しに有効な構造であることが期待される。これらの結果から、融解標的を安定して維持することで、大強度 Fr 生成源を実現できることを実証した。引き出し効率は 35%、また 200 enA のビームで $\sim 10^6$ Fr⁺/s が達成され、EDM 測定実験に十分な性能を実現した。

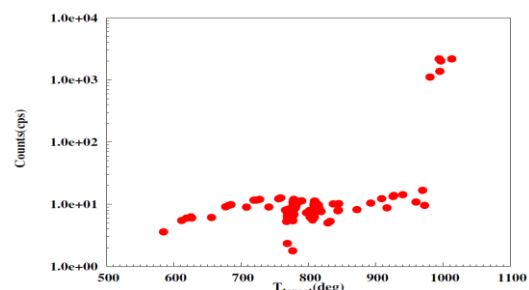


図5：Fr 収量の温度依存性。950 度付近で劇的な収量増加が観測される。

最後に、一次ビーム強度による Fr 収量依存性を測定した。その結果、図 6 に示すように、ビーム強度とともに、リニアに Fr 収量も増加することが確認された。このことは、一次ビーム強度の増強を行うことで、Fr 収量をさらに向上させることができることを示しており、現在、ECR イオン源の増強、そしてイオン源からターゲットまでのイオン光学計算を見直して輸送効率を向上させることで、オンターゲットのビーム強度を増強することを進めている。さらに、引き出し電極直後のアインツェルレンズを改良し、ビームエミッタンスを小さくすることで、下流への伝送効率をよくして、最終的な Fr トラップ個数の増強を進めた。現状の加速器の条件で、すでに EDM 探索に必要な 10^6 Fr⁺/s の収量を実現したが、これらのビーム増強を行うことで、 10^7 Fr⁺/s の収量は実現可能と考えられ、国際的にも、この融合反応を用いた Fr 生成では、最高収量の性能を発揮することが予想される。

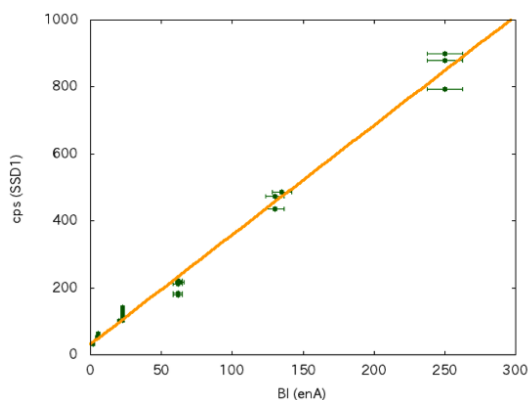


図 6 : Fr 収量のビーム強度依存性。

以上、融解標的型の新しい表面電離型イオン源の開発に成功し、EDM 探索に必要な Fr 引き出し効率、収量を実現することを確認し、実験技術を確認した。Fr の安定供給に向けては、高温で長時間使用時の電極の汚れによるリーク電流の増大等を避ける工夫が必要であることもわかった。なお、中性化装置、MOT は単体での動作試験は終わっているため、震災復旧後、速やかに全体を組み立て、Fr によるトラップ実験を実施する。

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 8 件)

- ① Y.Sakemi et al., Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atom, J.Phys.Conf.Ser.302

(2011) 012051-012056, 査読有, doi:10.1088/1742-6596/302/1/012051

- ② S.Hou, M.Itoh, Y.Sakemi, H.P.Yoshida et al., Radiation hardness of optoelectronic components for the optical readout of the ATLAS inner detector., Nucl.Instrum.Meth. A636 (2011) S137-S142, 査読有, DOI: 10.1016/j.nima.2010.04.098
- ③ T.Wakasa, K.Hatanaka, Y.Sakemi et al., Complete set of polarization transfer observables for the $^{16}\text{O}(p,n)^{16}\text{N}$ reaction at 296 MeV and 0 degree., Phys.Rev. C84 (2011) 014614, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevC.84.014614
- ④ K.Hatanaka, Y.Sakemi et al., A HTS Scanning Magnet and AC Operation., Conf.Proc. C100523 (2010) MOPEB036, 査読有, <http://ipac10.org/>
- ⑤ H.P.Yoshida et al., Present status of search for EDM of francium atom at CYRIC, Proceedings of 4th International workshop on Fundamental Physics using Atoms 2010 29-33, 査読なし
- ⑥ T.Hayamizu, H.P.Yoshida, Y.Sakemi et al., Development of thermal ionizer for the search of the electron electric dipole moment, Proceedings of 4th International workshop on Fundamental Physics using Atoms 2010 107-110, 査読なし
- ⑦ A.Oikawa, M.Itoh, Y.Sakemi et al., Development of the beam transport system for the study on atomic parity non conservation, Proceedings of 4th International workshop on Fundamental Physics using Atoms 2010 111-113, 査読なし
- ⑧ K.Fujita, Y.Sakemi et al., Development of GEM tracking detector for intermediate-energy nuclear experiments., Nucl.Instrum.Meth. A608 (2009) 48-54, 査読有, DOI: 10.1016/j.nima.2009.06.051

[学会発表] (計 10 件)

- ① 川村 広和、酒見 泰寛、その他、冷却不安定原子を用いた対称性検証実験、研究会「核スピン研究と応用」、2011 年 11 月 19 日、東京工業大学
- ② 酒見 泰寛、レプトン双極子モーメントの測定、日本物理学会 2011 年秋季大会・シンポジウム「LHC 時代の Precision Physics」、2011 年 9 月 18 日、弘前大学
- ③ 吉田 英智、Search for permanent

electric dipole moment in Francium、ARIS2011(Advanced in Radioactive Isotope Science)、2011年5月29日、Leuven, Belgium

- ④ 酒見 泰寛、Search for a permanent EDM using laser cooled radioactive atoms (招待講演)、International symposium nanoPHYS' 11 “Nanoscience and Quantum Physics 2011”、2011年1月16日、国際文化会館(東京)
- ⑤ 酒見 泰寛、Searches for a permanent EDM in Francium (招待講演)、International workshop on Violation of discrete symmetries in atoms and nuclei、2010年11月16日、ECT*研究所(イタリア・トレント)
- ⑥ 吉田 英智、Present status of search for EDM of Francium atom at CYRIC (招待講演)、International workshop ‘Fundamental Physics using Atoms 2010’、2010年8月8日、大阪大学・シグマホール
- ⑦ 酒見 泰寛、冷却不安定原子による核物理、研究会「原子核・ハドロン物理学の現在、そして未来」、2010年5月22日、京都テルサ
- ⑧ 酒見 泰寛、Search for permanent electric dipole moment in Francium (招待講演)、International workshop on UCN and Fundamental Neutron Physics : UCN2010、2010年4月9日、大阪大学・核物理研究センター
- ⑨ 村上 哲也、Status report of search for electron EDM using cooled radioactive atoms、SSRI (Nuclear Physics with Slow and Stop Radioisotope) workshop、2010年3月2日、東京工業大学
- ⑩ 酒見 泰寛、フランシウム EDM 探索実験計画、研究会 Fundamental Physics using Atoms、2009年8月4日、東京工業大学

[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

<http://cycgw1.cyric.tohoku.ac.jp/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒見 泰寛 (SAKEMI YASUHIRO)
東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・教授
研究者番号：90251602

(2) 研究分担者

伊藤 正俊 (ITOH MASATOSHI)
東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・助教
研究者番号：30400435
吉田 英智 (YOSHIDA HIDETOMO)
東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・教育研究支援者
研究者番号：20399744
村上 哲也 (MURAKAMI TETSUYA)
京都大学大学院・理学研究科・講師
研究者番号：50219896
畑中 吉治 (HATANAKA KICHIJI)
大阪大学・核物理研究センター・教授
研究者番号：50144530
若狭 智嗣 (WAKASA TOMOTSUGU)
九州大学大学院・理学研究院・准教授
研究者番号：10311771

(3) 連携研究者

()

研究者番号：