

令和元年5月31日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05369

研究課題名(和文) アルミニウム-26のアイソマービーム生成と銀河ガンマ線の生成機構の解明

研究課題名(英文) Production of isomeric Al-26 beam and creation mechanism of galactic gamma rays

研究代表者

山口 英斉 (Yamaguchi, Hidetoshi)

東京大学・大学院理学系研究科・講師

研究者番号：30376529

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：銀河の中心方向からやってくるエネルギー1.8 MeVのガンマ線は、アルミニウム(Al)-26原子核の崩壊に由来する。ところが、Al-26が銀河の中でどのような天体で生成されているのかは、未だ明らかではない。Al-26には基底状態とアイソマーと呼ばれる2種類が存在するが、それぞれの生成・破壊反応が十分に知られていないためである。

本研究では特に、実験に使用するのが困難なAl-26アイソマーを、低エネルギービームとして生成することに成功した。さらに、アイソマービームを用いて、陽子共鳴散乱の実験手法により共鳴を発見した。この共鳴の情報を使えば、今後アイソマー破壊反応の定量的評価が可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河からのAl-26由来ガンマ線観測は、銀河の中で今まさにどのような元素合成が行われているか、またドップラーシフトによって銀河がどのように運動しているかを理解するための有益な情報である。ところが、現在の観測による銀河のアルミニウム-26の生成量と、各種天体のシミュレーションによる生成量の総計には、大きな食い違いがある。本研究により、Al-26のアイソマービームを生成し、その破壊反応に関する直接的情報が初めて得られた。今後食い違いの解消と銀河の精密な理解に結びつくと期待できる。また、本研究で確立したアイソマービーム生成技術は、将来工学的応用が可能な技術と考えられる。

研究成果の概要(英文)：The 1.8-MeV gamma-rays coming from the center of our galaxy originate from the decay of aluminum-26 nuclei. However, it is still uncertain which stellar sites are responsible for their production, because aluminum-26 has a ground state and an isomeric state and the production/destruction processes are not precisely known.

In this study, isomeric aluminum-26 nuclei, which had been difficult to use in experiments, were produced as a low-energy ion beam. The isomeric beam was applied for a measurement based on the method of proton resonant scattering, and several resonances are discovered. With the observed parameters of these resonances, we will be able to evaluate the destruction reaction of aluminum-26 isomer.

研究分野：実験核物理

キーワード：宇宙核物理 不安定核 宇宙ガンマ線 天体核反応 核異性体

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

1991年に打ち上げられたコンプトンガンマ線観測衛星(CGRO)により、宇宙から地球に降り注ぐガンマ線のエネルギーや方位の分布が初めて明らかとなった。CGROの観測によって、 $^{26}\text{Al}$ (ガンマ線のエネルギー1.809 MeV、半減期70万年)による特定原子核由来のガンマ線が発見され、特に銀河の中心方向から高強度のガンマ線がやってくることを確認された。これは、宇宙、特に我々の銀河系において現在も元素合成が行われている確固たる証拠として重要な観測結果であり、銀河の進化を理解するための鍵と考えられている。

ところが、なぜガンマ線の源である $^{26}\text{Al}$ が銀河中心に局在しているのか、どのような環境で生成されているのかは、未だ明らかではない。放出源として想定されている天体は、Wolf-Rayet星、AGB星などの重い星、超新星、新星などがあるが、ガンマ線発生源として特定されるまでには至っていない。その主な原因は、核データの不足にある。

$^{26}\text{Al}$ には基底状態の $^{26}\text{Al}_0$ 、核異性体(アイソマー)の $^{26}\text{Al}_m$ の2種類が存在するが、宇宙ではこの両者がともに熱平衡によって存在し、重要な意味を持つ。ガンマ線の放出量を評価するためには、 $^{26}\text{Al}_0$ 、 $^{26}\text{Al}_m$ の両者がそれぞれどれだけ生成・破壊されるかを、想定される全ての天体の温度に対して決める必要がある。破壊過程の理解が進んでいないのは、実験による反応断面積の評価が難しいためである。第一に挙げられる困難としては、 $^{26}\text{Al}_m$ は半減期6.2秒であり、通常の標的として実験に使用するにはあまりにも半減期が短い。アイソマーは通常の基底状態の不安定核ビームと同様に、ビームとしては実験に使用可能と考えられる。しかし、アイソマーは基底状態との電磁気的分離が困難なこともあり、他の核種のものも含め、散乱・反応実験などに利用された例がほとんど見られない。

### 2. 研究の目的

$^{26}\text{Al}$ ガンマ線の発生源である天体を明らかにするには、様々な天体温度における生成・破壊反応の反応率を調べる必要がある。本研究で特に取り組んだのは、 $^{26}\text{Al}$ 破壊反応、 $^{26}\text{Al}(p, \gamma)$ である。不安定核から不安定核への反応であるが、 $(p, \gamma)$ 反応は直接測定を行うには断面積が $\mu\text{b}$ 程度かそれ以下と小さく、不安定核を用いた実験を行うのは現状では困難である。従って、何らかの工夫により、間接的に反応率を決める必要がある。

本研究の目的は、まず、 $^{26}\text{Al}$ のアイソマー $^{26}\text{Al}_m$ を、高純度ビームとして生成すること、そして、核スピンの0である $^{26}\text{Al}_m$ に対して陽子共鳴散乱の手法を世界で初めて適用し、 $(p, \gamma)$ 反応にかかわる共鳴の観測を行うことである。陽子共鳴散乱により、共鳴が観測されれば、共鳴のパラメータの決定が可能となり、 $^{26}\text{Al}$ 破壊反応、 $^{26}\text{Al}_m(p, \gamma)$ の実験的な評価を行うことができる。また、アイソマービーム生成の技術はそれ自体重要で、今後他の核のアイソマービームを生成し、独自の核構造・反応研究を行う展望が開ける。

### 3. 研究の方法

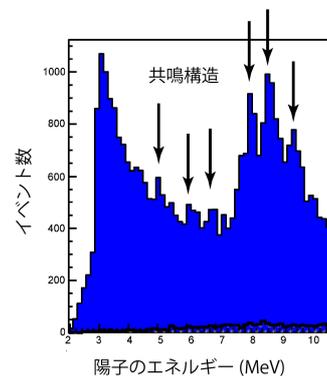
東大CNSが理化学研究所RIBF内で運用する低エネルギー不安定核分離装置「CRIB」を用いて、 $^{26}\text{Al}_m$ アイソマービームを生成した。 $^{26}\text{Mg}$ 1次ビームと水素標的を使用したin-flight法で、 $^{26}\text{Mg}(p, n)^{26}\text{Al}$ 反応により高強度 $^{26}\text{Al}$ 不安定核ビームの生成を目指した。特に、 $^{26}\text{Mg}$ ビームのエネルギーを $^{26}\text{Al}$ が生成され始めるエネルギー、すなわち $^{26}\text{Al}+n$ チャンネルの閾値付近に合わせ、 $^{26}\text{Al}$ ビーム生成を行うことで、 $^{26}\text{Al}$ アイソマーを多量に含むビーム生成を行った。アイソマー純度の決定は、 $^{26}\text{Al}_m$ の $\beta^+$ 崩壊に伴い放出される陽電子と、陽電子が消滅する際に放出される511 keVのガンマ線をNaI検出器アレイで計測することにより行った。

更に、生成した $^{26}\text{Al}_m$ アイソマービームを陽子標的に照射し、「逆運動学の厚い標的」手法で共鳴散乱を測定した。陽子標的として、十分に厚いポリエチレンを使用したため、 $^{26}\text{Al}$ ビームは標的中でエネルギーを失い、やがて完全に静止する。ビームが静止するまでに、標的中の様々なエネルギーにおいて、ある確率で弾性散乱が起こる。それらのエネルギーにおける散乱断面積が一度に測定できるのがこの手法の利点の1つである。シリコン検出器を用いて弾性散乱によって前方に反跳した陽子の位置とエネルギーを測定し、得られた情報から運動学的計算を行い、散乱断面積を計算した。この散乱断面積共鳴のエネルギースペクトル上で、天体核反応にかかわる共鳴の存在を確認できる。

### 4. 研究成果

CRIB装置において $^{26}\text{Mg}$ ビームからin-flight法で $^{26}\text{Al}_m$ アイソマービームを生成することに成功した。1秒間あたり $2 \times 10^5$ 個という比較的高強度の、 $^{26}\text{Al}_m$ と $^{26}\text{Al}_0$ ビームが混在するビームを生成した。さらにガンマ線測定を行い、詳細なシミュレーションと比較することにより、生成されたビームのうちのおよそ50%がアイソマー $^{26}\text{Al}_m$ であることを確認した。

生成したビームを使い、 $^{26}\text{Al}_m$ の陽子共鳴散乱実験を世界で初めて遂行した。陽子共鳴散乱実験中に、標的の条件を変えて、アイソマーの割合を変化させた実験データを得た。また、共鳴散乱の解析コードを開発し、解析を進めることにより、弾性散乱断面積のエネルギースペクトルに、 $^{26}\text{Al}$ の破壊反応を進める大きな共鳴の存在が確認された(右図)。これらの共鳴は、超新星などの高温天体現象において、 $^{26}\text{Al}$ 原子核の破壊反応を増幅する役割を果たすため、 $^{26}\text{Al}$ の生成量問題の解決に寄与する可能性がある。残念ながら最終目的である天体核反応率の評価と、 $^{26}\text{Al}$ の生成量問題の解決には至らなかったが、最終結果には着々と近づいている状態である。



また、これまでの成果に関して、NPA8, OMEG2017, NIC-XVなどの宇宙核物理関係の主要国際会議の場や、その他の核物理関係の国際会議において、積極的に発表を行った。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 16 件)

(1),(2)以外は査読あり。

- (1) H. Yamaguchi, S. Hayakawa, L. Yang, H. Shimizu and D. Kahl, “Direct measurements and detection techniques with low-energy RIBs”, EPJ Web Conf., **184**, 01017 (2018). (6 pages.) DOI: 10.1051/epjconf/201818401017
- (2) H. Shimizu, D. Kahl, H. Yamaguchi, K. Abe, O. Beliuskina, S. M. Cha, K. Y. Chae, A. A. Chen, Z. Ge, S. Hayakawa, N. Imai, N. Iwasa, A. Kim, D. H. Kim, M. J. Kim, S. Kubono, M. S. Kwag, J. Liang, J. Y. Moon, S. Nishimura, S. Oka, S. Y. Park, A. Psaltis, T. Teranishi, Y. Ueno and L. Yang, “Isomeric  $^{26}\text{Al}$  beam production with CRIB”, EPJ Web Conf., **184**, 02013 (2018). (4 pages.) DOI: 10.1051/epjconf/201818402013
- (3) D. Kahl, H. Shimizu, H. Yamaguchi, K. Abe, O. Beliuskina, S. M. Cha, K.Y. Chae, A.A. Chen, Z. Ge, S. Hayakawa, N. Imai, N. Iwasa, A. Kim, D. H. Kim, M. J. Kim, S. Kubono, M. S. Kwag, J. Liang, J. Y. Moon, S. Nishimura, S. Oka, S. Y. Park, A. Psaltis, T. Teranishi, Y. Ueno, L. Yang, “Impact of the  $^{26}\text{mAl}(p, \gamma)$  reaction to galactic  $^{26}\text{Al}$  yield”, AIP Conference Proceedings **1947(1)**, 020003 (2018). (8 pages.) DOI: 10.1063/1.5030807
- (4) S. Hayakawa, K. Abe, O. Beliuskina, S. M. Cha, K. Y. Chae, S. Cherubini, P. Figuera, Z. Ge, M. Gulino, J. Hu, A. Inoue, N. Iwasa, D. Kahl, A. Kim, D. H. Kim, G. Kiss, S. Kubono, M. L. Cognata, M. L. Commara, L. Lamia, M. Lattuada, E. J. Lee, J. Y. Moon, S. Palmerini, C. Parascandolo, S. Y. Park, D. Pierroutsakou, R. G. Pizzone, G. G. Rapisarda, S. Romano, H. Shimizu, C. Spitaleri, X. D. Tang, O. Trippella, A. Tumino, P. Vi, H. Yamaguchi, L. Yang, N. T. Zhang, “Measurements of the neutron-induced reactions on  $^7\text{Be}$  with CRIB by the trojan horse method”, AIP Conference Proceedings **1947(1)**, 020011 (2018). (8 pages.) DOI: 10.1063/1.5030815
- (5) H. Yamaguchi, D. Kahl, S. Hayakawa, L. Yang, H. Shimizu, Y. Sakaguchi, K. Abe, Y. Wakabayashi, T. Hashimoto, T. Nakao, S. Kubono, T. Suhara, N. Iwasa, A. Kim, D. H. Kim, S. M. Cha, M. S. Kwag, J. H. Lee, E. J. Lee, K. Y. Chae, N. Imai, N. Kitamura, P. Lee, J. Y. Moon, K. B. Lee, C. Akers, H. S. Jung, N. N. Duy, L. H. Khiem, C. S. Lee, S. Cherubini, M. Gulino, C. Spitaleri, G. G. Rapisarda, M. L. Cognata, L. Lamia, S. Romano, A. Coc, N. de Sereville, F. Hammache, G. Kiss, S. Bishop, T. Teranishi, T. Kawabata, Y. K. Kwon, D.N. Binh, “Indirect studies on astrophysical reactions at the low-energy RI beam separator CRIB”, AIP Conference Proceedings **1947(1)**, 020022 (2018). (6 pages.) DOI: 10.1063/1.5030826
- (6) D. Kahl, H. Yamaguchi, S. Kubono, A.A. Chen, A. Parikh, D.N. Binh, J. Chen, S. Cherubini, N.N. Duy, T. Hashimoto, S. Hayakawa, N. Iwasa H. S. Jung, S. Kato, Y.K. Kwon S. Nishimura, S. Ota, K. Setoodehnia, T. Teranishi, H. Tokieda, T. Yamada, C. C. Yun and L. Y. Zhang,

“First measurement of  $^{30}\text{S} + \alpha$  resonant elastic scattering for the  $^{30}\text{S}(\alpha, p)$  reaction rate”,  
Phys. Rev. C, **97**, 015802 (2018) (16 pages.) DOI: 10.1103/PhysRevC.97.015802

(7) H. Yamaguchi, D. Kahl, S. Hayakawa, L. Yang, H. Shimizu, Y. Sakaguchi, K. Abe, T. Nakao, T. Suhara, N. Iwasa, A. Kim, D.H. Kim, S.M. Cha, M.S. Kwag, J.H. Lee, E.J. Lee, K.Y. Chae, Y. Wakabayashi, et al.,  
“Nuclear astrophysics projects at the low-energy RI beam separator CRIB”,  
EPJ Web Conf., **165**, 01056 (2017). (4 pages.) DOI: 0.1051/epjconf/201716501056

(8) D. Kahl, H. Shimizu, H. Yamaguchi, K. Abe, O. Beliuskina, S. M. Cha, K. Y. Chae, A. A. Chen, Z. Ge, S. Hayakawa, N. Imai, N. Iwasa, A. Kim, D. H. Kim, M. J. Kim, S. Kubono, M. S. Kwag, J. Liang, J. Y. Moon, S. Nishimura, S. Oka, S. Y. Park, A. Psaltis, T. Teranishi, Y. Ueno and L. Yang,  
“Isomer beam elastic scattering:  $^{26}\text{mAl}(p, p)$  for astrophysics”,  
EPJ Web Conf., **165**, 01030 (2017). (4 pages.) DOI: 0.1051/epjconf/201716501030

(9) H. Yamaguchi, D. Kahl, S. Hayakawa, Y. Sakaguchi, K. Abe, T. Nakao, T. Suhara, N. Iwasa, A. Kim, D.H. Kim, S.M. Cha, M S Kwag, J.H. Lee, E.J. Lee, K.Y. Chae, Y. Wakabayashi, N. Imai, N. Kitamura, P. Lee, J.Y. Moon, K.B. Lee, C. Akers, H.S. Jung, N.N. Duy, L.H. Khiem and C.S. Lee,  
“Study on  $\alpha$ -cluster levels in non-4n nuclei using low-energy RI beams”,  
Journal of Physics: Conference Series, **863**, 012025 (2017). (5 pages.)  
DOI: 10.1088/1742-6596/863/1/012025

(10) D. Kahl, A. A. Chen, S. Kubono, H. Yamaguchi, D. N. Binh, J. Chen, S. Cherubini, N. N. Duy, T. Hashimoto, S. Hayakawa, N. Iwasa, H. S. Jung, S. Kato, Y. K. Kwon, S. Nishimura, S. Ota, K. Setoodehnia, T. Teranishi, H. Tokieda, T. Yamada, C. C. Yun, and L. Y. Zhang,  
“ $^{30}\text{S}(\alpha, p)$  Thermonuclear Reaction Rate from Experimental Level Structure of  $^{34}\text{Ar}$ ”,  
JPS Conf. Proc., **14**, 020510 (2017). (3 pages.) DOI: 10.7566/JPSCP.14.020510

(11) H. Yamaguchi, D. Kahl, S. Hayakawa, Y. Sakaguchi, K. Abe, H. Shimizu, Y. Wakabayashi, T. Hashimoto, S. Cherubini, M. Gulino, C. Spitaleri, G. G. Rapisarda, M. La Cognata, L. Lamia, S. Romano, S. Kubono, N. Iwasa, T. Teranishi, T. Kawabata, Y. K. Kwon, D. N. Binh, L. H. Khiem, N. N. Duy, S. Kato, T. Komatsubara, et al.,  
“Experimental Studies of Light-Ion Nuclear Reactions Using Low-Energy RI Beams”,  
JPS Conf. Proc., **14**, 010503 (2017). (6 pages.) DOI: 10.7566/JPSCP.14.010503

(12) S. Hayakawa, S. Kubono, D. Kahl, H. Yamaguchi, D.N. Binh, T. Hashimoto, Y. Wakabayashi, J. J. He, N. Iwasa, S. Kato, T. Komatsubara, Y. K. Kwon, T. Teranishi,  
“First direct measurement of the  $^{11}\text{C}(\alpha, p)^{14}\text{N}$  stellar reaction by an extended thick-target method”,  
Phys. Rev. C, **93**, 065802 (2016). (8 pages.) DOI: 10.1103/PhysRevC.93.065802

(13) H. Yamaguchi, D. Kahl, S. Hayakawa, Y. Sakaguchi, K. Abe, T. Nakao, T. Suhara, N. Iwasa, A. Kim, D.H. Kim, S.M. Cha, M.S. Kwag, J.H. Lee, E.J. Lee, K.Y. Chae, Y. Wakabayashi, N. Imai, N. Kitamura, P. Lee, J.Y. Moon, K.B. Lee, C. Akers, H.S. Jung, N.N. Duy, L.H. Khiem, and C.S. Lee,  
“Experimental investigation of linear-chain structured nucleus in  $^{14}\text{C}$ ”,  
Phys. Lett. B **766**, 11-16 (2017). DOI: 10/1016/j.physletb.2016.12.050

(14) H. Yamaguchi, D. Kahl, S. Hayakawa, L. Yang, Y. Sakaguchi, K. Abe, H. Shimizu, and CRIB Collaboration,  
“Overview of the activities at the low-energy beam separator CRIB”,  
Il Nuovo Cimento **39C**, 358 (2016). (5 pages.) DOI: 10.1393/ncc/i2016-16358-x

(15) D. Kahl, H. Yamaguchi, H. Shimizu, K. Abe, O. Beliuskina, S. M. Cha, K.Y. Chae, Z. Ge, S. Hayakawa, M.S. Kwag, D. H. Kim, J. Y. Moon, S.Y. Park, L. Yang,  
“Explosive destruction of  $^{26}\text{Al}$ ”,  
Il Nuovo Cimento **39C**, 362 (2016). (5 pages.) DOI: 10.1393/ncc/i2016-16362-2

(16) H. Yamaguchi, D. Kahl, S. Hayakawa, Y. Sakaguchi, Y. Wakabayashi, T. Hashimoto, S. Cherubini, M. Gulino, C. Spitaleri, G.G. Rapisarda, M. La Cognata, L. Lamia, S. Romano, S. Kubono, N. Iwasa, T. Teranishi, T. Kawabata, Y.K. Kwon, D.N. Binh, L.H. Khiem, N.N. Duy,

S. Kato, T. Komatsubara, A. Coc, N. de Sereville, F. Hammache, G. Kiss and S. Bishop,  
“Studying astrophysical reactions with low-energy RI beams at CRIB”,  
EPJ Web of Conferences **117**, 09005 (2016). (8 pages.) DOI: 10.1051/epjconf/201611709005

〔学会発表〕(計 16 件)  
全て口頭発表。

(1) H. Yamaguchi:

“Study on cluster states in unstable nuclei with alpha-resonant scattering”,  
RIBF Nuclear Physics Seminar 2019 年

(2) H. Yamaguchi:

“Studies on nuclear astrophysics and nuclear clustering with low-energy RI beams at CRIB”,  
13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018) (招待講演)(国際学会) 2018 年

(3) H. Yamaguchi:

“Indirect method application for RI-beam experiments”,  
ECT\* Workshop “Indirect Methods in Nuclear Astrophysics” (招待講演)(国際学会) 2018 年

(4) H. Yamaguchi:

“Activities at the low-energy RI beam separator CRIB”,  
RIBF Users Meeting 2018 (国際学会) 2018 年

(5) H. Yamaguchi:

“Study on explosive nuclear synthesis with low-energy RI beams at CRIB”,  
15th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (国際学会) 2018 年

(6) H. Yamaguchi:

“Study on alpha-cluster states via resonant scattering with low-energy RI beams”,  
Workshop on Nuclear Cluster Physics 2017 (WNCP2017) (招待講演)(国際学会) 2017 年

(7) H. Yamaguchi:

“Studying nuclear astrophysics and nuclear clustering at the low-energy RI beam separator CRIB”,  
The International Symposium on Physics of Unstable Nuclei 2017 (ISPUN2017)(招待講演)  
(国際学会) 2017 年

(8) H. Yamaguchi:

“Direct measurements and detection techniques with low-energy RIBs”,  
9th European Summer School on Experimental Nuclear Astrophysics(招待講演)(国際学会)  
2017 年

(9) 山口英斉:

“ $\alpha$  共鳴散乱による不安定核クラスター状態の研究”,  
RCNP 研究会「核子・ストレンジネス多体系におけるクラスター現象」 2017 年

(10) H. Yamaguchi:

“Indirect studies on astrophysical reactions at the low-energy RI beam separator CRIB”,  
The 14th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies  
(OMEG2017) (国際学会) 2017 年

(11) H. Yamaguchi:

“Nuclear astrophysics projects at the low-energy RI beam separator CRIB”,  
The 8th Nuclear Physics in Astrophysics International conference (NPA8) (国際学会) (招待講演)2017 年

(12) H. Yamaguchi:

“Study on  $\alpha$ -cluster levels in non-4n nuclei using low-energy RI beams”,  
11th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics  
(国際学会) 2016 年

(13) H. Yamaguchi:

“Experimental studies of light-ion nuclear reactions using low-energy RI beams”,  
The 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC-XIV) (国際学会) (招待講演) 2016 年

(14) H. Yamaguchi:

“Overview of CRIB projects”  
The Second Sicily-East Asia Workshop on Low Energy Nuclear Physics (SEA2016),  
(国際学会) 2016 年

(15) H. Yamaguchi:

“Recent activities at the low-energy RI beam separator CRIB”  
RIBF users meeting 2016, (国際学会) 2016 年

(16) H. Yamaguchi:

“Overview of recent experiments at CRIB”, SKKU mini workshop,  
Sungkyunkwan University, (国際学会) 2016 年

[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：  
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：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：早川 勢也

ローマ字氏名：(Hayakawa, Seiya)

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院理学系研究科

職名：特任助教

研究者番号(8桁): 00747743