

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18340071
 研究課題名（和文） 超新星爆発のニュートリノ過程の鍵を握る La-138 の新アイソマーのインパクト
 研究課題名（英文） New Isomer in La-138 for supernova neutrino process

研究代表者
 早川 岳人（HAYAKAWA TAKEHITO）
 日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主幹
 研究者番号：70343944

研究成果の概要：

鉄より重い元素の約 99%は中性子捕獲反応で生成されたが、中性子捕獲反応では生成できない 35 核種の p 核と呼ばれる同位体が存在している。La-138 を含む p 核の天体起源を、レーザーコンプトン散乱線、中性子等の量子ビームを用いた原子核実験と、理論研究によってすすめる。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2007 年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	8,500,000	2,550,000	11,050,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核（実験）

1. 研究開始当初の背景

太陽系に存在する鉄より重い元素の約 99%は s 過程、r 過程の 2 つの中性子捕獲反応過程で生成されたと考えられている。その一方で、陽子過剰領域側には中性子捕獲反応では生成できない p 核と呼ばれる 35 核種の同位体が存在している。これらは、同位体比が 0.01～1%と小さいという特徴を有している。最近の我々の研究により、35 核種のうち 27 核種の天体起源が超新星爆発の光核反応（過程）であることを示す証拠を太陽組成に見している（T.Hayakawa, et al., Phys. Rev. Lett. 93, 161102(2004)）。しかし、残りの

La-138 を含む 8 核種の天体起源が残された問題である。

2. 研究の目的

La-138 を含め p 核の天体起源を、近年急速に発達しているレーザーコンプトン散乱線や中性子を用いて探求することが目的である。

3. 研究の方法

a. La-138 の天体起源と原子核宇宙時計
 同じ陽子数で、中性子数が 2 個異なる p 核

と s 核 (遅い中性子捕獲反応過程で生成された原子核) の間にスケールリング則が存在することを太陽組成に発見していた。これは、s 核から p 核が主に超新星爆発の高エネルギー (10MeV 以上) の光による (ν, n) 反応で生成された証拠である。一方、太陽系を構成する物質は銀河系における約 90 億年の元素の進化の結果であり、多数の超新星爆発が寄与している。太陽組成にスケールリング則を発見したことより、個々の超新星爆発の光核反応生成物に対しても、スケールリング則が成り立つはずであるという「過程のユニバーサリティー」を提唱した。このユニバーサリティーを追求するために、異なる物理パラメータの超新星爆発元素合成を計算し、物理パラメータに依存せずに、スケールリング則が成り立つこと及び、そのメカニズムを解明した (T.Hayakawa, et al., *Astrophys. J. Lett.* 48, L47(2006); T.Hayakawa, et al., *Astrophys. J.* 685, 1089 (2008))。3つのメカニズムとは、超新星爆発前に発生する weak s 過程による種核の分布変化、超新星爆発におけるピーク温度が一定になるように元素合成レイヤーの位置が異なること、核反応に依存しないこと、の3点である。また、この実証のために In の同位体分離の天体観測を提唱した。

35 核種の p 核のうち、27 核種の天体起源が ν 過程なので、残りの 8 核種の天体起源が未解明である。これらの天体起源を太陽組成、核反応、隕石研究結果等から議論した。La-138 と Ta-180 は同じグループに属すると考えられる。これらは、陽子数と中性子数が両方奇数の奇奇核であり、ベータ崩壊ではこれらの核種を生成できないため、直接反応で生成する必要がある。また、同位体比は非常に小さく、La-138 が 0.0906%、Ta-180 が 0.012% である。これらの天体起源として、光核反応元素合成過程以外に、宇宙線による核破碎反応、超新星爆発のニュートリノ元素合成過程、s 過程の弱い分岐 (Ta-180 のみ) 等が提案されていた。La-138 についてはニュートリノ過程モデルが太陽組成を定量的に説明することに成功しており最も有力である。

一方、La-138 の基底状態は約 102Gry の半減期でベータ崩壊する長寿命放射性同位体である。長寿命放射性同位体は、元素合成過程の起源となる爆発的天体現象がいつ発生したかを決定するための核宇宙時計として使われており、初期世代星や銀河系の年齢評価等に使われている。長寿命放射性同位体の核種が限られているため、これまで 10 億 ~ 1000 億年の半減期を持つ 6 種類の核宇宙時計 (K-40、Rb-87、Lu-176、Re-187、Th-232、U-238) が知られていた。しかし、これらは s 過程ないし r 過程の年代計測用であり、超新星ニュートリノ元素合成過程の年代計測のための核宇宙時計は知られていなかった。

我々は、La-138 Ce-138 Ce-136 システムの元素合成過程と崩壊様式を詳細に検討し、システムが超新星ニュートリノ過程が起きた宇宙時間を決定するための新しく有効な核宇宙時計であることを提案した (T.Hayakawa, et al., *Physical Review C* 77, 065802(2008))。これら 3 核種は p 核に分類され、La-138 の起源としてはニュートリノ過程が最も有力である。この核宇宙時計は、一つの超新星の影響を強く受けたプレソーラー粒子のような対象物に適用できる。その場合、試料中の La-138、Ce-138、Ce-136 の 3 核種の同位体比から、超新星爆発元素合成が発生した時刻から現在までの時間を計測可能である。

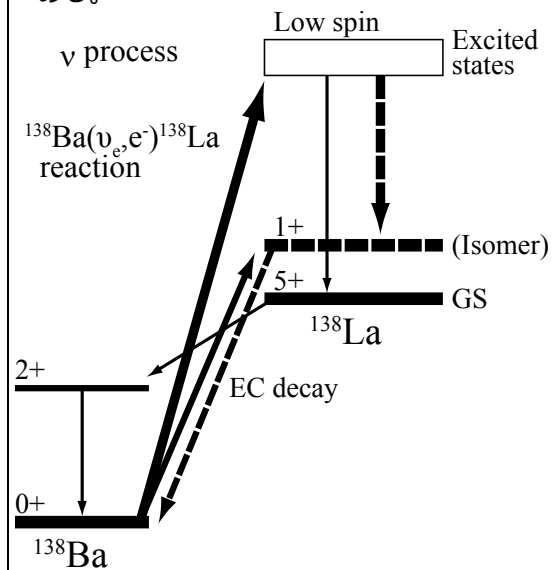


図1 La-138 の生成と崩壊様式

ここで問題になるのは、La-138 の娘核の Ce-138 の初期量である。Ce-138 は主に 0/Ne レイヤーで ν 過程で生成される。一方、La-138 は He レイヤー等でニュートリノ過程で生成される。これらの生成物がランダムに混ざってプレソーラーグレインを形成する。そのため、個々のプレソーラーグレイン中での La-138 と Ce-138 の初期量の比は異なるため、理論的に予測することはできない。そこで、我々は既に述べた「過程のユニバーサリティー」を用いて、Ce-138 の初期量を計算する手法を提案した。

一方、原子核構造の観点から、La-138 には問題がある。La-138 の中性子数は $N=81$ であり、 $N=82$ の魔法数に隣接している。中性子数が同じ Pr-140 の原子核構造を確認すると、基底状態が 1+ であることが判る。殻模型の基本的な考えでは、1+ はエネルギーは低くなく、2+ ないし 3+ 状態が基底状態であるはずである。しかし、現実には 1+ 状態が基底状態であり、何かしらの未解明なメカニズム

によって 1+状態の励起エネルギーが下がっていることを意味する。また、同じメカニズムが La-138 の 1+状態のエネルギーを下げる可能性がある。なお、La-138 の原子核構造は良く研究されていない。仮に 1+状態の励起エネルギーが 72keV より低い場合には、1+状態が第一励起状態になる。La-138 の基底状態は 5+状態であり、この間の遷移は E4 遷移である。その場合、ベータ崩壊が競合することができ、1+状態はベータ崩壊するアイソマーになる可能性がある。その場合、ニュートリノ過程の荷電反応で生成された場合には、La-138 の 1+のような低スピン状態が強く生成され、これらの状態は 1+アイソマーを経由してベータ崩壊してしまう可能性が高い(図 1 参照)。

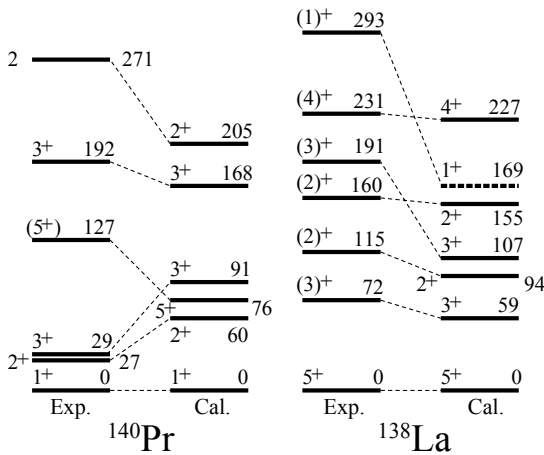


図 2 La-138 と Pr-140 の核構造

我々の論文に対して Neumann-Cosel 等は、最近の La-138 のニュートリノ過程起源を探求するためのガモフ=テラー遷移強度の測定実験(A. Byelikov, et al: Phys. Rev. Lett. 98, 0825014, (2007))は 1+状態のアイソマーが存在しないことを示していることを正式な論文への Comment として指摘した(P. Neumann-Cosel, et al., Phys. Rev. C, 79, 059801(2009)。一方、我々が行った原子核の殻模型計算も同様の結果である(図 2 参照)。したがって、1+アイソマーは存在せず、我々の提案した核宇宙時計は有効であるというのが一連の議論の結論であり、Comment に対する Reply として出版した(T. Hayakawa, et al, Phys. Rev. C, 79, 059802 (2009))。

b. レーザーコンプトン散乱 線による光核実験

既に述べたように、過程では 線と原子核の相互作用によって新しい原子核(同位体)が生成される。このような過程を研究する上で最も重要なツールが、近年急速に発達してきたレーザーコンプトン散乱(LCS) 線である。現在、MeV 領域で実用レベルの LCS

線源は、Duke 大(米) 産業技術総合研究所、Spring-8 の NewSUBARU の 3 箇所しかない。NewSUBARU では 2005 年前後より稼動始めた新しい施設である。NewSUBARU の LCS 線を用いた実験を開始した。線過程研究において、制動放射線源によって(γ, n)反応断面積を放射化法で計測されることは広く行われている。放射化法の分析において、生成された不安定同位体の半減期は反応断面積に反比例する重要な物理量である。しかし、ベータ安定性より 1 個中性子が少ない不安定同位体の半減期は必ずしも十分な信頼性があるとは限らない。そこで、Re-187 原子核時計研究及び、過程研究に寄与する Re-184 の半減期を再測定した。Re-185 をターゲットにして、NewSUBARU の最大 17MeV の LCS 線を照射し、(γ, n)反応で Re-184 を生成する。Re-184 の従来の半減期は約 37 日だったので約 80 日間に亘りベータ崩壊にともなう 線測定を行った。

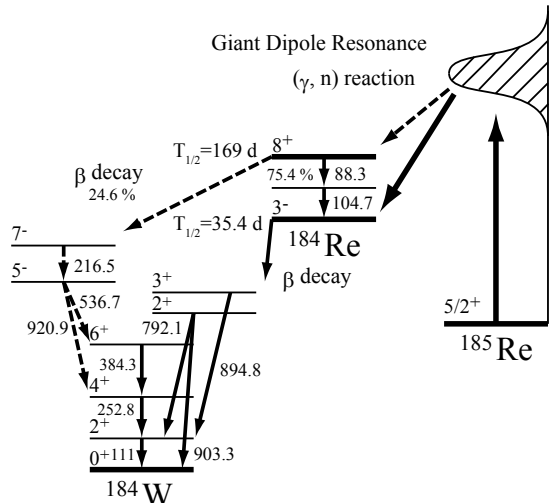


図 3 Re-184 の崩壊スキーム

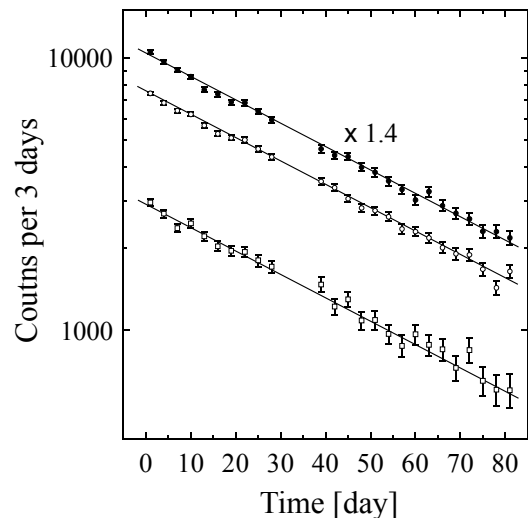


図 4 計測した 792keV、903keV、894keV の線の崩壊曲線。

その結果(図4参照)3本の線の崩壊曲線を得ることができ、その平均値の35.4日の半減期を得ることができた。この値は従来の値より7%短い。放射化法で反応断面積を計測した場合には、7%異なる可能性があることを意味する(T. Hayakawa, et al., Phys. Rev. C74, 065802, (2006))。

Er-164はp核の一つであるが、s過程の寄与が大きいことが判明している。Er-162、164、166の3核種から構成される系に、p核とs核のスケーリング則を適用することでs過程の温度計として用いることができることを指摘している。Ho-164はそのs過程の弱い分岐上に位置する不安体同位体である。その基底状態の半減期を、Re-184と同様の手法で計測した(T. Hayakawa, et al. Phys. Rev.C 77, 068801 (2008))。

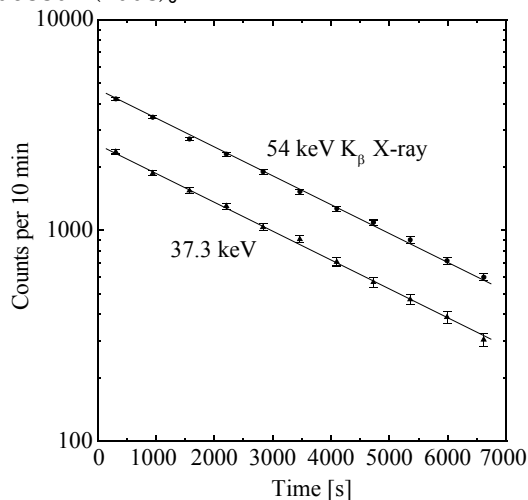


図5 計測したHo-164の崩壊曲線

c. 逆コンプトン線の生成と応用研究

関西光科学研究所には150MeVの電子を加速可能な小型のマイクロトロン加速器が設置されている。このマイクロトロン加速器とNdトロープラーを用いて、約400keVのLCS線の生成を行った(K.Kawase, M.Kando, T.Hayakawa, et al., Rev. Sci. Inst. 79, 053302 (2008))。最大400keVのLCS線を生成し、20 photons/shotの輝度を得た。さらに、LCS線の核蛍光散乱(NRF)を用いた物質の検出法を提案した。個々の核種には固有の励起状態が存在している。測定対象の核種の励起エネルギーに等しいLCS線を照射し、NEF線を計測することで隠蔽された任意の核種を測定する手法である(R. Hajima, T. Hayakawa, et al., J. Nucl. Sci. Tech. 45, 441-451 (2008))。本手法を実証するために、産総研のLCS線を用いて鉄15mm等で遮蔽された試料のNRF測定を行い、本手法の原理実証実験を行った(T. Hayakawa, et al., Rev. Sci. Inst. 80, 045110(2009))。

4. 研究成果

このように、p核の起源を探究し、宇宙核物理、原子核物理、原子力の広い分野に亘り多様な成果を得た。

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19件)

- 1) T.Hayakawa, N.Iwamoto, T.Kajino, T.Shizuma, H.Umeda, K.Nomoto, Astrophysical Journal 648-1, Part2(2006) L47-L50, "Principle of universality of gamma-process nucleosynthesis in core-collapse supernova explosions"
- 2) T.Shizuma, T.Ishii, H.Makii, T.Hayakawa, S.Shigematsu, M.Matsuda, E.Ideguchi, Y. Zheng, M. Liu, T.Morikawa, P.M. Walker, M. Ohi, European Physical Journal A 30-2(2006) 391-396, "Excited states in neutron-rich W produced by an induced neutron transfer reaction"
- 3) T.Hayakawa, S.Miyamoto, Y.Hayashi, K.Kawase, K.Horikawa, S.Chiba, H.Nakanishi, S.Hashimoto, T.Ohta, M.Kando, T.Motsuzuki, T.Kajino, M.Fujiwara, Physical Review C 74-6 065802-1 - 065802-5, "Half-life of Re populated by the reaction from laser Compton scattering rays at the electron storage ring NewSUBARU"
- 4) T.Hayakawa, N.Iwamoto, T.Shizuma, T.Kajino, H.Umeda, K.Nomoto, Eur. Phys. J. A 27, Supplement 1, 123 (2006), "Evidence for p-process nucleosynthesis recorded at the Solar System abundances"
- 5) T.Shizuma, T.Ishii, H.Makii, T.Hayakawa, S.Shigematsu, M.Matsuda, E.Ideguchi, Y.Zheng, M.Liu, T.Morikawa, Eur. Phys. J. A 34, 1 (2007), "Evidence for a

$K^\pi = 1/2^+$ isomer in neutron-rich ^{185}Ta ”

- 6) T.Hayakawa, T.Shizuma, T.Kajino, K.Ogawa, H. Nakada, ,Physical Review C 77, 065802-1-5 (2008), “ ^{138}La - ^{138}Ce - ^{136}Ce nuclear cosmochronometer for supernova neutrino process ”
- 7) T.Hayakawa, N.Iwamoto, T.Kajino, T.Shizuma, H.Umeda, K.Nomoto, Astrophys. J. 685, 1089-1102 (2008), ” Empirical Abundance Scaling laws: its implication for supernova Gamma-process ”
- 8) T. Hayakawa, T. Shizuma, S. Miyamoto, S. Amano, K. Horikawa, K. Ishihara, M. Mori, K. Kawase, M. Kando, N. Kikuzawa, S. Chiba, T. Mochizuki, T. Kajino, and M. Fujiwara, Physical Review C 77, 068801-1-4 (2008), “ Half-life of the ^{164}Ho isomer populated by the (Gamma, n) reaction from laser Compton scattering rays at the electron storage ring NewSUBARU ”
- 9) S.Chiba, H.Koura, T.Hayakawa, T.Maruyama, T.Kawano, T.Kajino, Phys. Rev. C 77, 015809 (2008), ” Direct and semi-direct capture in low-energy (n, gamma) reactions of neutron-rich tin isotopes and its implications for r-process nucleosynthesis ”
- 10) R. Hajima, T. Hayakawa, N. Kikuzawa, E. Minehara, J. Nucl. Sci. Tech. 45, 441-451 (2008), “ Proposal of Nondestructive Assay Using a High-Flux Gamma-Ray Source and Nuclear Resonance Fluorescence ”
- 11) T.Shizuma, T.Ishii, H.Makii, T.Hayakawa, M.Matsuda, S.Shigematsu, E.Ideguchi, Y.Zheng, M.Liu, T.Morikawa, M.Oi, Phys. Rev. C 77, 047303 (2008), “ One-quasiparticle bands in neutron-rich

^{187}W ”

- 12) T.Shizuma, T.Hayakawa, H.Ohgaki, H.Toyokawa, T.Komatsubara, N.Kikuzawa, A.Tamii, H.Nakada, Phys. Rev. C 78, 061303(R) (2008), Fine structure of the magnetic-dipole-strength distribution in ^{208}Pb ”
- 13) K.Kawase, M.Kando, T.Hayakawa, I.Daito, S.Kondo, T.Homma, T.Kameshima, H.Kotaki, L.-M.Chen, Y.Fukuda, Review of Scientific Instruments, 79, 3302 (2008), ” Sub-MeV tunably polarized X-ray production with laser Thomson Backscattering ”
- 14) T.Hayakawa, T.Shizuma, T.Kajino, K.Ogawa, H. Nakada, Phys. Rev. C79, 059802 (2009), “ Reply to "Comment on ' ^{138}La - ^{138}Ce - ^{136}Ce nuclear cosmochronometer for supernova neutrino process'" ”
- 15) S.Amano, K.Horikawa, K.Ishihara, S.Miyamoto, T.Hayakawa, T.Shizuma, T.Mochizuki, Nucl. Instrum. Method, Phys. Res. A, 602, 337-341 (2009), “ Several-MeV Gamma-ray generation at NewSUBARU by laser Compton backscattering ”
- 16)N.Kikuzawa, R.Hajima, N.Nishimori, E.Minehara, T.Hayakawa, T.Shizuma, H.Toyokawa, H.Ohgaki, Applied Physics Express, 2, 036502-1-3, (2009), “ Nondestructive Detection of Heavily Shielded Materials by Using Nuclear Resonance Fluorescence with a Laser-Compton Scattering Gamma-ray Source ”
- 17) T.Shizuma, T.Ishii, H.Makii, T.Hayakawa, M.Matsuda, Eur. Phys. J. A, 39, 263-266 (2009), “ A 3-quasiparticle isomer in neutron-rich ^{183}Ta ”

18) T. Hayakawa, H. Ohgaki, T. Shizuma, R. Hajima, N. Kikuzawa, E. Minehara, T. Kii, H. Toyokawa, REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 80, 045110 (2009), “Non-destructive detection of hidden chemical compounds with laser Compton-scattering gamma rays”

19) K. Ogura, T. Shizuma, T. Hayakawa, A. Yogo, M. Nishiuchi, S. Orimo, A. Sagisaka, A. Pirozhkov, M. Mori, H. Kiriyama, S. Kanazawa, S. Kondo, Y. Nakai, T. Shimoura, M. Tanoue, A. Akutsu, T. Motomura, H. Okada, T. Kimura, Y. Oishi¹, T. Nayuki¹, T. Fujii¹, K. Nemoto¹, H. Daido, Applied Physics Express 2, 066001, (2009), “Proton-induced Nuclear Reactions Using Compact High-Contrast High-Intensity Laser”

〔学会発表〕(計 6件)

- 1) 早川岳人、静間俊行、梶野敏貴、小川建吾、中田仁、超新星爆発におけるニュートリノ過程の原子核宇宙時計の提唱、日本物理学会2006秋の大会、奈良市、2006年6月
- 2) 早川岳人、宮本修治、林由紀雄、川瀬啓悟、堀川賢、千葉敏、中西康介、橋本尚信、太田岳史、神門正城、梶野敏貴、藤原守、ニュースパルの逆コンプトンガンマ線による Re の光核反応、日本物理学会、八王子市、2007年3月
- 3) 早川岳人、岩本信之、梶野敏貴、静間俊行、梅田秀之、野本憲一、超新星爆発の光核反応の元素合成過程、日本物理学会、札幌市、2007年9月
- 4) 早川岳人、静間俊行、宮本修治、天野壮、堀川賢、石原一樹、森道昭、川瀬啓悟、神門正城、菊澤信宏、望月孝晏、梶野敏貴、藤原守、NewSUBARU の逆コンプトンガンマ線による Ho-164 の光核反応による生成と崩壊測定、日本物理学会、大阪市、2008年3月
- 5) 早川岳人、静間俊行、千葉敏、梶野敏貴、初川雄一、岩本信之、篠原伸夫、原田秀郎、s 過程研究のための Cd-113 アイソマーへの熱中性子捕獲反応断面積測定、日本物理学会、山形市、2008年9月
- 6) 早川岳人、岩本信之、梶野敏貴、静間俊行、梅田秀之、野本憲一、p 核の天体起源の探究、日本物理学会、東京、2009年3月

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早川 岳人(HAYAKAWA TAKEHTIO)
日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主幹
研究者番号：70343944

(2) 研究分担者

静間 俊行(SHIZUMA TOSHIYUKI)
日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹
研究者番号：50282299
小松原 哲郎(KOMATSUBARA TETSUROU)
筑波大学・数理物質科学研究科・講師
研究者番号：10195852
藤原 守(FUJIWARA MAMORU)
大阪大学・核物理学研究センター・助教授
研究者番号：00030031
中田 仁(NAKADA HITOSHI)
千葉大学・理学部・助教授
研究者番号：80221448
千葉 敏(CHIBA SATOSHI)
日本原子力研究開発機構・先端基礎科学研究センター・研究主幹
研究者番号：60354883
梶野 敏貴(KAJINO TOSHITAKA)
国立天文台・理論研究部・助教授
研究者番号：20169444

(3) 連携研究者

なし