

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03958

研究課題名(和文) 超新星元素合成によるニュートリノ振動および質量階層の解明

研究課題名(英文) Elucidating neutrino oscillations and mass hierarchy in supernova nucleosynthesis

研究代表者

梶野 敏貴 (Kajino, Toshitaka)

国立天文台・科学研究部・特別客員研究員

研究者番号：20169444

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：太陽系の重元素は、 $p$ 過程( $p$ 過程)、 $s$ 過程、 $r$ 過程、 $i$ 過程、 $s$ 過程に起源を持つと考えられる。未解明であったMoとRuの $p$ 核は極超新星での $p$ 過程が起源であり、同時に炭素12のホイール共鳴状態の脱励起の役割を解明した。太陽系 $r$ 過程元素の約90%がコラプサーと磁気回転駆動型超新星で作られ、残る10%が中性子星連星系合体で作られるとの結論を得た。銀河化学進化理論から、前者二天体からの寄与が宇宙進化において支配的であることを明らかにした。コラプサー $r$ 過程での超ウラン元素の核分裂で生じる中性子によって $i$ 過程と $s$ 過程が続いて起き、希元素(質量数 $\sim 150$ )の組成パターンに強い偶奇性が現れることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

$p$ 核元素群でアイソトープ比が異常に高いMoとRuの起源は、Burbidge-Burbidge-Fowler-Hoyle(1957)の研究以来、未解明であった。極超新星でニュートリノ振動と原子核相互作用が重要な役割を果たす $p$ 過程が起源であることと、炭素12のホイール共鳴状態の脱励起の役割を解明したことは、宇宙核物理、ニュートリノ物理、および核物理学にインパクトを与える。中性子星連星系合体が $r$ 過程元素の主要な起源天体でないことを示し、重力波天体と銀河化学進化の研究にインパクトを与える。コラプサーで $r$ 過程、 $i$ 過程、 $s$ 過程が共存しうことは、太陽系重元素の起源論の解釈に変更を迫る可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Heavy elements in the solar system are thought to originate from  $p$ -process ( $p$ -process),  $s$ -process,  $r$ -process,  $i$ -process and  $s$ -process. We elucidated that the previously unresolved  $p$ -nuclei of Mo and Ru originate from the  $p$  process in hypernovae by clarifying the roles of deexcitation of the Hoyle resonance state in carbon-12. We conclude that about 90% of the solar  $r$ -process elements are produced in collapsars and magneto-rotationally driven supernovae, while the remaining 10% are produced in binary neutron star mergers in recent epoch of cosmic evolution. Our galactic chemical evolution model reveals that the former two contributions are dominant over the entire cosmic history. It was found that the  $i$ - and  $s$ -processes follow the collapsar  $r$ -process due to the abundant neutrons produced by the fission of transuranium elements in the collapsar  $r$ -process, resulting in strong even-odd dependence near  $A = 150$  mass abundance pattern of rare elements.

研究分野：天体核物理、宇宙論、原子核物理

キーワード：元素合成 銀河化学進化 超新星 ニュートリノ振動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

3世代6種類のニュートリノ間の振動現象は完全に解明されておらず、ニュートリノ質量階層は未決定である。ニュートリノと物質との相互作用、およびニュートリノどうしの自己相互作用もまた弱い力があまりに弱すぎるため、地上実験で解明することは困難である。これを可能にし得る超新星ニュートリノの研究に関して、 $\nu$ - $\nu$  散乱によって引き起こされるフレーバー間の振動(集団振動)と電子と衝突して起こる一体場的な振動(MSW 物質振動)の理論的考察はあったが、質量階層を制約する研究はほとんどなされてこなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、ニュートリノ起源核種とrプロセス元素の太陽系組成を再現できる超新星元素合成モデルを構築し、高密度・高温という物理条件下で起きるニュートリノ起源の元素組成の理論予測と高精度の隕石組成分析との詳細な比較から、太陽系形成論と整合性を持つ銀河化学進化モデルを構築して、真空の性質に関する原子炉および長基線ニュートリノ振動実験では得られない高密度でのニュートリノ振動効果に関する新たな知見を宇宙核物理の観点から得ることである。

## 2. 研究の方法

まず、原子核の殻模型と準粒子乱雑位相近似模型を用い、鍵となる超新星ニュートリノ起源核種とr過程元素合成に関わる原子核・ニュートリノ反応断面積を計算し、最新の実験情報を取り入れてデータベースを構築した。次に、さまざまな爆発条件での超新星モデルを構築し、超新星元素合成の計算を実行した。超新星深部で起こる元素合成は、ニュートリノ集団振動効果のみを受け、外層で起こる元素合成は、更にMSW物質振動効果を受ける。それぞれ異なるニュートリノ振動効果を受けた核種を選別し、天文観測および隕石分析の結果と比較して、超新星元素合成から質量階層を制限する方法を提案する。

## 4. 研究成果

超新星元素合成計算結果と隕石分析結果との詳細な比較から、核図表上で質量数が90から100を持ち、原子核の安定線から陽子過剰側に位置してアイソトープ比が異常に大きいp核元素と呼ばれる一群の元素の起源が、極超新星爆発で起きるp過程であることを解明した。(H. Sasaki, Y. Yamazaki, T. Kajino, et al. 2024, Phys. Lett. **B851**, 138581; 他)

太陽系に存在する重元素は、p過程(p過程)、s過程、r過程、 $\nu$ 過程と呼ばれる複数の元素合成過程に起源を持つ原子核からできていると解釈される。これらの研究を組み合わせると重

元素の銀河化学進化に応用し、大質量星の進化の終焉でコラプサーと呼ばれブラックホールを残す爆発天体、および MHD ジェットと呼ばれ中性子星を残す磁気回転駆動型の超新星爆発天体で、鉄より重い元素群の約半数を占める r 過程元素が作られるとの結論を得た。中性子星連星系合体は宇宙進化上ごく最近になって寄与することを明らかにし、太陽系組成の約 10% 程度の寄与であるとの制限を導き出した。( Yuta Yamazaki, Zhenyu He, Toshitaka Kajino, et al. 2022, *Astrophys. J.* **933**, 112; 他 )

磁気回転駆動型超新星とともに r 過程元素の銀河進化で主要な役割を果たすコラプサーでは、超ウラン元素の核分裂で生じる中性子によって r 過程に続いて i 過程と s 過程が起き、希元素 (質量数 ~ 150) の組成パターンに強い偶奇性が現れることを見出した。太陽系近傍でもコラプサーの寄与は大きいと予想され、重元素合成過程で r 過程、i 過程、s 過程が共存しうることは、太陽系重元素の起源の解釈に変更を迫る可能性がある。( Zhenyu He, Toshitaka Kajino, Motohiko Kusakabe, et al. 2024, *Astrophys. J. Lett.* **966**, L37; 他 )

最近の超新星爆発における r 過程の詳細な研究から、超新星深部 (酸素-ネオン-マグネシウム層) で作られる重元素はニュートリノ集団振動効果のみを受け、外層 (ヘリウム層) で作られる軽元素は更に MSW 物質振動効果を受けているため、両方でニュートリノ質量階層への依存性が大きく異なることを見出した。これらの理論計算結果と天文観測および隕石分析の結果との比較から、超新星元素合成から質量階層を制限する宇宙核物理的な方法を提案した。( Xingqun Yao, Toshitaka Kajino, Yudong Luo, et al. 2024, in preparation; H. Ko, D. Jang, M.-K. Cheoun, et al. with T. Kajino, 2022, *Astrophys. J.* **937**, 116; 他 )

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計43件（うち査読付論文 43件/うち国際共著 41件/うちオープンアクセス 43件）

1. 著者名 Maruyama Tomoyuki, Balantekin A. Baha, Cheoun Myung-Ki, Kajino Toshitaka, Kusakabe Motohiko, Mathews Grant J.	4. 巻 824
2. 論文標題 A relativistic quantum approach to neutrino and antineutrino emission via the direct Urca process in strongly magnetized neutron-star matter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136813 ~ 136813
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136813	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Sasaki Hirokazu, Yamazaki Yuta, Kajino Toshitaka, Kusakabe Motohiko, Hayakawa Takehito, Cheoun Myung-Ki, Ko Heamin, Mathews Grant J.	4. 巻 924
2. 論文標題 Impact of Hypernova p-process Nucleosynthesis on the Galactic Chemical Evolution of Mo and Ru	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 29 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac34f8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Maruyama Tomoyuki, Hayakawa Takehito, Kajino Toshitaka, Cheoun Myung-Ki	4. 巻 826
2. 論文標題 Generation of photon vortex by synchrotron radiation from electrons in Landau states under astrophysical magnetic fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136779 ~ 136779
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136779	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Famiano M. A., Mori K., Balantekin A. B., Kajino T., Kusakabe M., Mathews G.	4. 巻 659
2. 論文標題 Relativistic Coulomb screening in pulsational pair instability supernovae	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A97 ~ A97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202142433	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yamazaki Yuta, He Zhenyu, Kajino Toshitaka, Mathews Grant J., Famiano Michael A., Tang Xiaodong, Shi Jianrong	4. 巻 933
2. 論文標題 Possibility to Identify the Contributions from Collapsars, Supernovae, and Neutron Star Mergers from the Evolution of the r-process Mass Abundance Distribution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 112 ~ 112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac721c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ko Heamin, Jang Dukjae, Cheoun Myung-Ki, Kusakabe Motohiko, Sasaki Hirokazu, Yao Xingqun, Kajino Toshitaka, Hayakawa Takehito, Ono Masaomi, Kawano Toshihiko, Mathews Grant J.	4. 巻 937
2. 論文標題 Comprehensive Analysis of the Neutrino Process in Core-collapsing Supernovae	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 116 ~ 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac88cd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Famiano Michael A., Mathews Grant, Balantekin A. Baha, Kajino Toshitaka, Kusakabe Motohiko, Mori Kanji	4. 巻 940
2. 論文標題 Evolution of Urca Pairs in the Crusts of Highly Magnetized Neutron Stars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 108 ~ 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac9bf3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Schatz H, Becerril Reyes A D, Best A, Brown E F, with Kajino, T	4. 巻 49
2. 論文標題 Horizons: nuclear astrophysics in the 2020s and beyond	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 110502 ~ 110502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6471/ac8890	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Gjergo Eda, Sorokin Aleksei G., Ruth Anthony, Spitoni Emanuele, Matteucci Francesca, Fan Xilong, Liang Jinning, Limongi Marco, Yamazaki Yuta, Kusakabe Motohiko, Kajino Toshitaka	4. 巻 264
2. 論文標題 GalCEM. I. An Open-source Detailed Isotopic Chemical Evolution Code	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 44 ~ 44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/aca7c7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kajino Toshitaka	4. 巻 34
2. 論文標題 Underground laboratory JUNA shedding light on stellar nucleosynthesis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Science and Techniques	6. 最初と最後の頁 42-1 ~ 42-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41365-023-01196-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Luo Yudong, Chen Chao, Kusakabe Motohiko, Kajino Toshitaka	4. 巻 2021
2. 論文標題 Impacts of Hawking radiation from primordial black holes in critical collapse model on the light element abundances	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 042 ~ 042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/05/042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Aziz Azni Abdul, Ahmad Nor Sofiah, Ahn S., Aoki Wako, Bhuyan Muruthujaya, Chen Ke-Jung, Guo Gang, Hahn K. I., Kajino Toshitaka et al.	4. 巻 31
2. 論文標題 Progress in nuclear astrophysics of east and southeast Asia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AAPPS Bulletin	6. 最初と最後の頁 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s43673-021-00018-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hou S. Q., Kajino T., Trueman T. C. L., Pignatari M., Luo Y. D., Bertulani C. A.	4. 巻 920
2. 論文標題 New Thermonuclear Rate of $7\text{Li}(d,n)24\text{He}$ Relevant to the Cosmological Lithium Problem	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 145 ~ 145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac1a11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hwang Eunseok, Jang Dukjae, Park Kiwan, Kusakabe Motohiko, Kajino Toshitaka, Balantekin A. Baha, Maruyama Tomoyuki, Ryu Chang-Mo, Cheoun Myung-Ki	4. 巻 2021
2. 論文標題 Dynamical screening effects on big bang nucleosynthesis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 017 ~ 017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/11/017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Maruyama Tomoyuki, Balantekin A. Baha, Cheoun Myung-Ki, Kajino Toshitaka, Kusakabe Motohiko, Mathews Grant J.	4. 巻 824
2. 論文標題 A relativistic quantum approach to neutrino and antineutrino emission via the direct Urca process in strongly magnetized neutron-star matter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136813 ~ 136813
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136813	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sasaki Hirokazu, Yamazaki Yuta, Kajino Toshitaka, Kusakabe Motohiko, Hayakawa Takehito, Cheoun Myung-Ki, Ko Heamin, Mathews Grant J.	4. 巻 924
2. 論文標題 Impact of Hypernova p-process Nucleosynthesis on the Galactic Chemical Evolution of Mo and Ru	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 29 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac34f8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Maruyama Tomoyuki, Hayakawa Takehito, Kajino Toshitaka, Cheoun Myung-Ki	4. 巻 826
2. 論文標題 Generation of photon vortex by synchrotron radiation from electrons in Landau states under astrophysical magnetic fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136779 ~ 136779
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136779	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Famiano M. A., Mori K., Balantekin A. B., Kajino T., Kusakabe M., Mathews G.	4. 巻 659
2. 論文標題 Relativistic Coulomb screening in pulsational pair instability supernovae	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A97 ~ A97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202142433	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhang Li-Yong, He Jian-Jun, Kusakabe Motohiko, He Zhen-Yu, Kajino Toshitaka	4. 巻 927
2. 論文標題 Thermonuclear $^{170}\text{Ni}$ Reaction Rate and Its Astrophysical Implications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 92 ~ 92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac4697	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuta Yamazaki, Zhenyu He, Toshitaka Kajino, Grant J. Mathews, Michael A. Famiano, Xiaodong Tang, Jianrong Shi	4. 巻 -
2. 論文標題 Possibility to identify the contributions from collapsars, SNe, and NSMs from the evolution of the r-process mass abundance distribution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Famiano Michael A., Boyd Richard N., Onaka Takashi, Kajino Toshitaka	4. 巻 3
2. 論文標題 Chiral selection, isotopic abundance shifts, and autocatalysis of meteoritic amino acids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.033025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hayakawa Takehito, Toh Yosuke, Kimura Atsushi, Nakamura Shoji, Shizuma Toshiyuki, Iwamoto Nobuyuki, Chiba Satoshi, Kajino Toshitaka	4. 巻 103
2. 論文標題 Isomer production ratio of the $112\text{Cd}(n, \gamma)113\text{Cd}$ reaction in an s-process branching point	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 45801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.045801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Cheng Hao, Sun Bao-Hua, Zhu Li-Hua, Kusakabe Motohiko, Zheng Yun, He Liu-Chun, Kajino Toshitaka, Niu Zhong-Ming, Li Tian-Xiao, Li Cong-Bo, Wang Dong-Xi, Wang Meng, Li Guang-Shuai, Wang Kang, Song Lin, Guo Ge, Huang Zhi-Yong, Wei Xiu-Lin, Zhao Fu-Wei, Wu Xiao-Guang, Abulikemu Yimuran, Liu Jian-Cheng, Fan Ping	4. 巻 915
2. 論文標題 Measurements of $160\text{Dy}(p, \gamma)$ at Energies Relevant for the Astrophysical $r$ -Process	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 78 ~ 78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac00b1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Maruyama Tomoyuki, Balantekin A. Baha, Cheoun Myung-Ki, Kajino Toshitaka, Mathews Grand J.	4. 巻 260
2. 論文標題 Neutrino and Antineutrino pair-Emission in Strong Magnetic Field in Relativistic Quantum Approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 11029 ~ 11029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202226011029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mori Kanji, Kusakabe Motohiko, Balantekin A. Baha, Kajino Toshitaka, Famiano Michael A.	4. 巻 260
2. 論文標題 Enhancement of Lithium in Red Clump Stars by Neutrino Magnetic Moments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 11016 ~ 11016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202226011016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen Chao, Luo Yudong, Kusakabe Motohiko, Kajino Toshitaka	4. 巻 260
2. 論文標題 Light Element Abundances Constrain Primordial Black Holes in the Critical Collapse Model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 09003 ~ 09003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202226009003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Luo Yudong, Kusakabe Motohiko, Kajino Toshitaka	4. 巻 260
2. 論文標題 Impacts of Strongly Magnetized Degenerate Plasma on the Electron-capture Rates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 07004 ~ 07004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202226007004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Suzuki Toshio, Mori Kanji, Honma Michio, Famiano Michael A., Kajino Toshitaka, Kusakabe Motohiko, Balantekin A. Baha	4. 巻 260
2. 論文標題 Screening Effects on Electron-Capture Rates and Type Ia Supernova Nucleosynthesis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 06004 ~ 06004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202226006004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hayakawa Takehito, Ko Heamin, Cheoun Myung-ki, Kusakabe Motohiko, Kajino Toshitaka, Chiba Satoshi, Nomoto Ken'ichi, Hashimoto Masa-aki, Ono Masaomi, Kawano Toshihiko, Mathews Grant J.	4. 巻 260
2. 論文標題 Nuclear cosmochronometers for supernova neutrino-process	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 02001 ~ 02001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202226002001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yao Xingqun, Kusakabe Motohiko, Kajino Toshitaka, Cherubini Silvio, Hayakawa Seiya, Yamaguchi Hidetoshi	4. 巻 260
2. 論文標題 Supernova Nucleosynthesis, Radioactive Nuclear Reactions and Neutrino-Mass Hierarchy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 01007 ~ 01007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202226001007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ko Heamin, Cheoun Myung-Ki, Ha Eunja, Kusakabe Motohiko, Hayakawa Takehito, Sasaki Hirokazu, Kajino Toshitaka, Hashimoto Masa-aki, Ono Masaomi, Usang Mark D., Chiba Satoshi, Nakamura Ko, Tolstov Alexey, Nomoto Ken'ichi, Kawano Toshihiko, Mathews Grant J.	4. 巻 891
2. 論文標題 Neutrino Process in Core-collapse Supernovae with Neutrino Self-interaction and MSW Effects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L24 ~ L24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab775b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Maruyama Tomoyuki, Balantekin A. Baha, Cheoun Myung-Ki, Kajino Toshitaka, Mathews Grant J.	4. 巻 805
2. 論文標題 -Pair synchrotron emission in neutron-star matter based on a relativistic quantum approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135413 ~ 135413
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135413	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Luo Yudong, Famiano Michael A., Kajino Toshitaka, Kusakabe Motohiko, Balantekin A. Baha	4. 巻 101
2. 論文標題 Screening corrections to electron capture rates and resulting constraints on primordial magnetic fields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 83010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.083010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Famiano Michael, Balantekin A. Baha, Kajino T., Kusakabe M., Mori K., Luo Y.	4. 巻 898
2. 論文標題 Nuclear Reaction Screening, Weak Interactions, and r-process Nucleosynthesis in High Magnetic Fields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 163 ~ 163
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba04d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mathews G. J., Boccioli L., Hidaka J., Kajino T.	4. 巻 35
2. 論文標題 Review of uncertainties in the cosmic supernova relic neutrino background	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 2030011 ~ 2030011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217732320300116	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 He Meng, Zhang Shi-Sheng, Kusakabe Motohiko, Xu Sizhe, Kajino Toshitaka	4. 巻 899
2. 論文標題 Nuclear Structures of $^{170}\text{Zr}$ and Time-dependent Sensitivity of the Weak s-process to the $^{160}\text{Zr}$ Rate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 133 ~ 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba7b4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mori Kanji, Balantekin A. Baha, Kajino Toshitaka, Famiano Michael A.	4. 巻 901
2. 論文標題 Elimination of the Blue Loops in the Evolution of Intermediate-mass Stars by the Neutrino Magnetic Moment and Large Extra Dimensions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 115 ~ 115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abb0e9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mori Kanji, Suzuki Toshio, Honma Michio, Famiano Michael A., Kajino Toshitaka, Kusakabe Motohiko, Balantekin A. Baha	4. 巻 904
2. 論文標題 Screening Effects on Electron Capture Rates and Type Ia Supernova Nucleosynthesis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 29 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abbb32	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mori Kanji, Kusakabe Motohiko, Balantekin A Baha, Kajino Toshitaka, Famiano Michael A	4. 巻 503
2. 論文標題 Enhancement of lithium in red clump stars by the additional energy loss induced by new physics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2746 ~ 2753
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab595	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Famiano Michael A., Boyd Richard N., Kajino Toshitaka, Chiba Satoshi, Mo Yirong, Onaka Takashi, Suzuki Toshio	4. 巻 20
2. 論文標題 Explaining the Variations in Isotopic Ratios in Meteoritic Amino Acids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astrobiology	6. 最初と最後の頁 964 ~ 976
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1089/ast.2019.2186	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Spitaleri C., Typel S., Bertulani C. A., Mukhamedzhanov A. M., Kajino T., et al.	4. 巻 57
2. 論文標題 The $3\text{He}+5\text{He} \rightarrow \alpha+\alpha$ reaction below the Coulomb barrier via the Trojan Horse Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/s10050-020-00324-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hayakawa Takehito, Toh Yosuke, Kimura Atsushi, Nakamura Shoji, Shizuma Toshiyuki, Iwamoto Nobuyuki, Chiba Satoshi, Kajino Toshitaka	4. 巻 103
2. 論文標題 Isomer production ratio of the $\text{Cd}112(n, \gamma)\text{Cd}113$ reaction in an s-process branching point	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 45801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.045801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yudong Luo, Chao Chen, Motohiko Kusakabe and Toshitaka Kajino	4. 巻 in press
2. 論文標題 Impacts of Hawking Radiation from Primordial Black Holes in Critical Collapse Model on Galactic Light Element Abundances.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計34件 (うち招待講演 21件 / うち国際学会 34件)

1. 発表者名 Yao, Xingqun; Kusakabe, Motohiko; Kajino, Toshitaka; Cherubini, Silvio; Hayakawa, Seiya; Yamaguchi, Hidetoshi
2. 発表標題 Supernova Nucleosynthesis, Radioactive Nuclear Reactions and Neutrino-Mass Hierarchy.
3. 学会等名 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hayakawa, Takehito; Ko, Heamin; Cheoun, Myung-ki; Kusakabe, Motohiko; Kajino, Toshitaka; Chiba, Satoshi; Nomoto, Ken'ichi; Hashimoto, Masa-aki; Ono, Masaomi; Kawano, Toshihiko; Mathews, Grant J.
2. 発表標題 Nuclear cosmochronometers for supernova neutrino-process.
3. 学会等名 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Suzuki, Toshio; Mori, Kanji; Honma, Michio; Famiano, Michael A.; Kajino, Toshitaka; Kusakabe, Motohiko; Balantekin, A. Baha
2. 発表標題 Screening Effects on Electron-Capture Rates and Type Ia Supernova Nucleosynthesis.
3. 学会等名 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Luo, Yudong; Kusakabe, Motohiko; Kajino, Toshitaka
2. 発表標題 Impacts of Strongly Magnetized Degenerate Plasma on the Electron-capture Rates.
3. 学会等名 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chen, Chao; Luo, Yudong; Kusakabe, Motohiko; Kajino, Toshitaka
2. 発表標題 Light Element Abundances Constrain Primordial Black Holes in the Critical Collapse Model.
3. 学会等名 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mori, Kanji; Kusakabe, Motohiko; Balantekin, A. Baha; Kajino, Toshitaka; Famiano, Michael A.
2. 発表標題 Enhancement of Lithium in Red Clump Stars by Neutrino Magnetic Moments.
3. 学会等名 The 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Maruyama, Tomoyuki; Balantekin, A. Baha; Cheoun, Myung-Ki; Kajino, Toshitaka; Mathews, Grand J.
2. 発表標題 Neutrino and Antineutrino pair-Emission in Strong Magnetic Field in Relativistic Quantum Approach.
3. 学会等名 The 16th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Overview of Nuclear Astrophysics: Universe is the Laboratory for Fundamental Physics
3. 学会等名 RAON International School in Rare Isotope Science Project (RISP), Institute of Basic Science in Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Isomers, the Key to the Origin of Heavy Elements and Neutrino Mass Hierarchy
3. 学会等名 International Conference on 100 Years of Nuclear Isomers (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 R-process in GW Objects, Supernovae, Collapsars & Neutron Star Mergers, and Galactic Chemo-dynamical Evolution
3. 学会等名 International Workshop on “ The r-process and the nuclear EOS after LIGO ’ s third observing run ” ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Cosmic Radioactivity probing the Epoch of SN or Merger Nucleosynthesis and Neutrino Interactions
3. 学会等名 International Conference on “ Astrophysics with Radioactive Isotopes ” ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Intermediate & slow processes induced by fission neutrons in collapsar r-process jet
3. 学会等名 International Workshop on Opportunities with Neutron Induced Reaction Measurements ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Nucleosynthetic Evidence/Signals for Primordial & Stellar Black Holes and Binaries
3. 学会等名 International Workshop on Relativistic Astrophysics and Gravitation (IWRAG-2021), Tashkent in Uzbekistan, May 12-14, 2021 ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Roles of Nuclear Fission in Collapsar, Merger & SN r-process
3. 学会等名 International ECT* Workshop on “ Probing Nuclear Physics with Neutron Star Mergers ”, ECT*, Trento in Italy, June 12-16, 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Origin of r-process elements in the Universe
3. 学会等名 International ECT* Workshop on “ Key Reactions in Nuclear Astrophysics (KRINA2020) ”, ECT*, Trento in Italy, June 23-24, 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Roles of Fission & Nuclear Reactions in Collapsar (BH), Neutron Star Merger and Supernova
3. 学会等名 International Workshop on “ Nuclear burning in massive stars ”, YITP-Kyoto University & Monash University, July 26-30, 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Nucleosynthetic signals of collective and MSW flavor oscillations in supernova
3. 学会等名 International Workshop INT 21-79W on “ New Directions in Neutrino Flavor Evolution in Astrophysical Systems ”, Institute for Nuclear Theory at Washington University in USA, Sept. 20-24, 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Impact of Hypernova neutrino-p Process Nucleosynthetic on Galactic Chemical Evolution of Mo, Ru and p-nuclei
3. 学会等名 International Workshop on "The Metal-poor Universe 2021", IPMU at University of Tokyo in Japan, Sept. 27-30, 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Hyperons and Neutrinos in Magnetized Proto-Neutron Star and Supernova and Collapsar Nucleosynthesis
3. 学会等名 International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility, Feb. 16-18, 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Explosion mechanism of supernovae and GRBs and JaFNA/UKAKUREN activities
3. 学会等名 Inauguration Symposium of CINA (China Institute for Nuclear Astrophysics), P. R. China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Impact of Nuclear Reactions on Element Genesis in the Big-Bang, Supernovae and Neutron Star Mergers
3. 学会等名 International School of IBS (Institute of Basic Science) on "Nuclear Reactions", Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Roles of Neutrinos in Explosive Nucleosynthesis of Supernovae & Neutron-Star Mergers in Cosmic Evolution
3. 学会等名 International Conference on Neutrino and Nuclear Physics, South Africa (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Impact of Nuclear Reactions on Element Genesis in BBN, SNe and Neutron Star Mergers
3. 学会等名 Yamada Conference LXXII 8th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshitaka Kajino
2. 発表標題 Nucleosynthetic Evidence/Signals for Primordial & Stellar Black Holes and Binaries
3. 学会等名 International Workshop on Relativistic Astrophysics and Gravitation, Uzbekistan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Famiano, Michael; Boyd, Richard; Kajino, Toshitaka; Chiba, Satoshi; Mo, Yirong; Onaka, Takashi; Suzuki, Toshio
2. 発表標題 Connections Between Nuclear Physics and the Origin of Life - Examining the Origin of Biomolecular Chirality.
3. 学会等名 10th European Summer School on Experimental Nuclear Astrophysics, Italy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Luo, Yudong; Kajino, Toshitaka; Kusakabe, Motohiko; A Famiano, Michael
2 . 発表標題 Primordial Nucleosynthesis with a background magnetic field.
3 . 学会等名 10th European Summer School on Experimental Nuclear Astrophysics, Italy (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 G. J. Mathews, A. Kedia, N. Sasankan, M. Kusakabe, Y. Luo, T. Kajino, D. Yamazaki, T. Makki, and M. El Eid
2 . 発表標題 Cosmological Solutions to the Lithium Problem.
3 . 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, Japan (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Heamin Ko, Myung-Ki Cheoun, Motohiko Kusakabe, Takehito Hayakawa, Hirokazu Sasaki, Toshitaka Kajino, and Grant J. Mathews
2 . 発表標題 Neutrino Self-interaction and MSW Effects by an Equi-partitioned Fermi-Dirac Neutrino Luminosity on the Supernova Neutrino-process.
3 . 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, Japan (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Takehito Hayakawa, Motohiko Kusakabe, Toshitaka Kajino, Myung-Ki Cheoun, Heamin Ko, Grant J. Mathews, Alexey Tolstov, Ken'ichi Nomoto, Satoshi Chiba, Toshihiko Kawano, Masa-aki Hashimoto, and Masaomi Ono
2 . 発表標題 Nuclear Cosmochronometer for Supernova Neutrino Process.
3 . 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, Japan (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshio Suzuki, Satoshi Chiba, Takashi Yoshida, A. Baha Balantekin, Toshitaka Kajino, Michio Honma, Yusuke Tsunoda, Naofumi Tsunoda, and Noritaka Shimizu
2. 発表標題 Nuclear Weak Rates for Astrophysical Processes in Stars.
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yudong Luo, Toshitaka Kajino, Motohiko Kusakabe, and Grant. J. Mathews
2. 発表標題 Primordial Magnetic Field and Its Impact on Primordial Nucleosynthesis.
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Motohiko Kusakabe, Myung-Ki Cheoun, K. S. Kim, Masa-aki Hashimoto, Masaomi Ono, Ken'ichi Nomoto, Toshio Suzuki, Toshitaka Kajino, and Grant J. Mathews
2. 発表標題 Effects of the Metallicity on Li and B Production in Supernova Neutrino Process.
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuta Yamazaki, Toshitaka Kajino, and Grant J Mathews
2. 発表標題 Cosmic Evolution of r-process Abundance Pattern: Contribution from Supernovae and Neutron Star Mergers.
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 G. J. Mathews, A. Kedia, N. Sasankan, M. Kusakabe, Y. Luo, T. Kajino, D. Yamazaki, T. Makki, and M. El Eid
2. 発表標題 Cosmological Solutions to the Lithium Problem.
3. 学会等名 International Conference on Lithium in the Universe, Italy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

特になし。
-------

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	Beihang University	Beijing Normal University	China Academy of Science	他3機関
ドイツ	Max Planck Institute	GSI		
イタリア	University of Catania			
韓国	Soongsil University	Institute of Basic Science	Pusan University	他2機関
米国	Michigan State University	University of Notre Dame	Wisconsin University	他2機関

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	University of Notre Dame	University of Wisconsin	Western Michigan University	他3機関
韓国	Soongsil University			
イタリア	University of Catania	University of Trieste	INFN, Laboratori Nazionali del Sud	
中国	Beihang University	Chinese Academy of Science	Shanghai Jiao Tong University	他2機関
トルコ	Mimar Sinan Fine Art University			
米国	University of Notre Dame	University of Wisconsin	Western Michigan University	他2機関
韓国	Soongsil University			
イタリア	University of Catania	University of Trieste	INFN, Laboratori Nazionali del Sud	
中国	Beihang University	Chinese Academy of Science	Shanghai Jiao Tong University	他2機関
トルコ	Mimar Sinan Fine Art University			