

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740185

研究課題名(和文) 硬X線集光望遠鏡による銀河団の電子加速・加熱メカニズムの新展開

研究課題名(英文) Study of a mechanism for accelerating and heating electrons in clusters of galaxies observed with focusing hard X-ray telescopes

研究代表者

北口 貴雄 (Kitaguchi, Takao)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・客員研究員

研究者番号：30620679

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)：NuSTAR衛星に搭載して2012年に宇宙へ打ち上げた硬X線集光望遠鏡を用いて、銀河団をかつてない高感度で観測した。そして銀河団同士の衝突により加速された電子からの非熱的な硬X線および超高温に加熱された電子からの硬X線を探索することで、銀河団のエネルギー進化を調べることを目指した。今のところ観測信号は、以前に報告された熱的X線を硬X線帯まで伸ばすことで説明でき、超過フラックスの上限値および磁場の下限値を最も厳しく求めた。銀河団以外の天体も同望遠鏡で観測し、中強度磁場を持つ白色矮星の放射モデルの拡張を提案し、重力崩壊型超新星残骸からのチタン-44の輝線診断により非対照的な爆発の新証拠を得た。

研究成果の概要(英文)：We observed clusters of galaxies with the first focusing hard X-ray telescope onboard the NuSTAR satellite launched in 2012 to search for non-thermal and super-thermal hard X-rays, which allow us to study a mechanism for accelerating and heating plasma and estimate a cluster-scale energy budget. No significant excess emission above known X-rays from the hot gas is found so far. The lowest upper limit of the flux and the highest lower limit of the magnetic field were determined. In addition, new observations of other objects with the telescope require an extended emission model of an accreting white dwarf with a moderately strong magnetic field, and reveal new evidence on asymmetric explosion of core collapse supernovae by means of the diagnosis with the nuclear decay lines of Ti-44.

研究分野：高エネルギー宇宙物理実験

キーワード：国際研究者交流 アメリカ 宇宙X線 銀河団

1. 研究開始当初の背景

銀河団は宇宙最大の自己重力系であり、その重力ポテンシャルには数千万度の電離ガスが大量に閉じ込められていて、X線で明るく輝いている。銀河団ガスの総質量は宇宙の全バリオンの数割となるため、銀河団ガスからのX線を調べれば、宇宙規模のエネルギー輸送がわかる。

銀河団は銀河群および小さな銀河団が衝突合体を繰り返すことで、現在の姿に進化してきた。その成長過程で生じた衝撃波、断熱圧縮、および磁気乱流は、宇宙の重力エネルギーを粒子の加速および加熱エネルギーに変換できることが、数値シミュレーションにより明らかになりつつある。これら加速および加熱電子は、より高エネルギーのX線(硬X線)を放射すると予想されている。したがって硬X線を高感度に観測することで、銀河団でのプラズマ加速・加熱メカニズムに迫れ、それらのエネルギー収支を見積もることができる。しかしこのような硬X線はとても暗いと予想され、実際に撮像はもちろん行われておらず、高感度の分光観測も不足している。

2. 研究の目的

銀河団ガスの加速・加熱メカニズムを調べて、エネルギー収支を観測的に見積もることを目指し、宇宙硬X線集光望遠鏡を用いて、加速電子からの非熱的な硬X線の探査および超高温に加熱された電子からの硬X線の分光撮像を行う。

加速された電子は、銀河団磁場と相互作用し、非熱的なシンクロトロン電波を放射する。実際に全銀河団の数割から広がった電波放射が観測されており、銀河団スケールでの電子の加速現象が確認されている。しかし銀河団磁場の強度は不確かであり、シンクロトロン電波の観測のみでは、加速電子のエネルギー総量は見積もれない。加速電子はシンクロトロン電波以外に、宇宙マイクロ波背景放射の光子を逆コンプトン散乱して、ベキ型スペクトルを持つ非熱的な硬X線を放射すると予想される。加速電子と既知のマイクロ波背景放射との相互作用による硬X線を観測し、電波放射と比較することで、磁場強度の導出、仮定した放射プロセスの検証、そして加速電子のエネルギー総量の見積りができる。

異常に加熱された銀河団ガスからの硬X線制動放射の空間分布を世界で初めて撮像し、通常の銀河団ガスの分布と比較する。2つのガスの圧力差は大きいので、超高温ガスは磁場による閉じ込めおよび断熱により、通常の銀河団ガスと安定して共存しているはずで、それが正しいければ超高温ガスは磁場に沿って分布しているかもしれない。超高温ガスからの硬X線を検出した際には、硬X線イメージからこの推測を検証する。

3. 研究の方法

アメリカ NASA の小型衛星 NuSTAR に搭

載した硬X線集光望遠鏡を使って、銀河団を観測した。この望遠鏡は、初めて硬X線をブラッグ反射鏡で集光して、撮像分光観測をする機能を持つ。その集光能力により1分角を切る分解能で天体イメージを撮像し、今までより2桁近く暗い硬X線を検出することができる。

銀河団からの硬X線はとても弱い信号なので、信頼性の高い観測結果を出すために、望遠鏡の宇宙空間での性能評価を行い、その系統誤差をできる限り小さくすることを、観測の事前準備として行った。

4. 研究成果

(1) 硬X線集光望遠鏡の宇宙での性能評価

硬X線集光望遠鏡を搭載する NuSTAR 衛星を、2012年6月に地球周回の低軌道に打ち上げた。私は打ち上げ直後に渡米し、衛星開発チームと顔を合わせて議論しながら、望遠鏡の宇宙空間での性能を、天体および機上較正線源からのX線を使って評価した(雑誌論文17)。特に焦点面に置いたピクセル型 CdZnTe 半導体X線検出器の軌道上での実証は、私が主著となり論文を出版し、国際および国内学会で発表した(雑誌論文9、学会発表3,8)。

(2) 硬X線集光望遠鏡による銀河団の観測

宇宙空間での性能検証の後、NuSTAR 衛星は広がった電波放射を持ち、近傍かつX線で明るい3つの銀河団(弾丸銀河団、かみのけ座銀河団、Abell 2256)を観測した。弾丸銀河団から良質なX線データを得たものの、そのスペクトルは従来の銀河団プラズマからの熱的放射で説明ができ、非熱的X線フラックスの上限値および磁場強度の下限値を最も厳しく導いた(雑誌論文5)。残り2天体でも、視野外からの迷光など望遠鏡の応答を調査中だが、同じく非熱的および超高温なX線を有意に検出してない。

(3) 硬X線集光望遠鏡による銀河団以外の天体の観測

銀河団を分光観測して、そのスペクトルパラメータを正確に得るために、上記(1)で焦点面検出器の応答モデルを構築した。このモデルは他の天体のスペクトルフィッティングにも応用できる。そのため作成した応答モデルを一般公開して他天体に流用し、モデルの検証を行いつつ、科学成果の最大化に貢献した。以下に銀河団以外の天体での成果の例を示す。

粒子加速の兆候のある白色矮星を持つ連星系 AE Aquarii を硬X線集光望遠鏡で観測したところ、以前に報告された狭パルス放射は見当たらず粒子加速を追認できなかった。代わりにパルス幅は広く今までより高温の放射を検出した。観測したX線は、標準的な降着柱からの放射モデルでは表せず、それを降着率の低い場合まで拡張することで説明

できることを示し、主著論文としてまとめた(雑誌論文 4,13、学会発表 5,6,12)。

重力崩壊型で若い超新星残骸を2つ観測して、爆発時に合成されたチタン-44 から出る硬X線輝線を検出し、その空間分布や中心エネルギーの赤方偏移から、星が非対称に爆発したことを突き止めた(雑誌論文 1, 12)。私は輝線検出の有意性を高めるため、焦点面検出器の応答モデルを精査したことおよび日本語のプレスリリースを行うことを担当した。

(4) 将来衛星への搭載を目指したX線偏光計の開発

将来の宇宙観測器として、磁場を介した加速現象の新たなプローブとなり得るX線偏光計を開発した。私は偏光計応答シミュレータの開発や、開発した偏光計を放射光施設に持ち込んでシンクロトロン直線偏光X線を当てて性能評価することを責任担当した(雑誌論文 7,8,14,19、学会発表 1,2,4,7,9,10,11)。開発してきたX線偏光計をNASAの小型衛星に載せて打ち上げるため、日米の研究者と共同でミッション提案書を作成しNASAへ提出した。

研究成果を総括すると、銀河団のような広がった天体に対する望遠鏡の正確な応答モデルの作成が遅れていて、当初予定していた非熱的または超高温な硬X線の発見には至っていない。ただし点源に対するデータ解析方法は確立し、期待通りの科学成果が出ている。また宇宙の新しい目となり得るX線偏光計の開発は順調で、それを搭載する衛星ミッションを提案した。以上より、本研究はトータルで見てもおおむね順調に進展した。

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. Boggs, S. E.; Harrison, F. A.; Miyasaka, H.; Grefenstette, B. W.; Zoglauer, A.; Fryer, C. L.; Reynolds, S. P.; Alexander, D. M.; An, H.; Barret, D.; Christensen, F. E.; Craig, W. W.; Forster, K.; Giommi, P.; Hailey, C. J.; Hornstrup, A.; Kitaguchi, T.; (他 11 名), “⁴⁴Ti gamma-ray emission lines from SN1987A reveal an asymmetric explosion”, *Science*, Volume 348, Issue 6235, pp. 670-671 (2015), DOI: 10.1126/science.aaa2259, 査読有
2. Grefenstette, Brian W.; Reynolds, Stephen P.; Harrison, Fiona A.; Humensky, T. Brian; Boggs, Steven E.; Fryer, Chris L.; DeLaney, Tracey; Madsen, Kristin K.; Miyasaka,

Hiromasa; Wik, Daniel R.; Zoglauer, Andreas; Forster, Karl; Kitaguchi, Takao; (他 7 名), “Locating the Most Energetic Electrons in Cassiopeia A”, *The Astrophysical Journal*, Volume 802, Issue 1, article id. 15, (2015), DOI: 10.1088/0004-637X/802/1/15, 査読有

3. Hayashida, M.; Nalewajko, K.; Madejski, G. M.; Sikora, M.; Itoh, R.; Ajello, M.; Blandford, R. D.; Buson, S.; Chiang, J.; Fukazawa, Y.; Furniss, A. K.; Urry, C. M.; Hasan, I.; Harrison, F. A.; Alexander, D. M.; Balokovic, M.; Barret, D.; Boggs, S. E.; Christensen, F. E.; Craig, W. W.; Forster, K.; Giommi, P.; Grefenstette, B.; Hailey, C.; Hornstrup, A.; Kitaguchi, T.; (他 26 名), “Rapid Variability of Blazar 3C 279 during Flaring States in 2013-2014 with Joint Fermi-LAT, NuSTAR, Swift, and Ground-Based Multi-wavelength”, *The Astrophysical Journal*, In press, (2015), 査読有
4. Kitaguchi, Takao; An, Hongjun; Rana, Vikram R.; Kaspi, Victoria M.; Gotthelf, Eric V.; Harrison, Fiona A.; Boggs, Steven E.; Christensen, Finn E.; Craig, William W.; Hailey, Charles J.; Stern, Daniel; Zhang, Will W. “Preliminary Hard X-Ray Results of AE Aquarii Observed with NuSTAR”, *Proceedings of the MG13 Meeting on General Relativity*, pp. 2443-2446 (2015), DOI: 10.1142/9789814623995_0464, 査読無
5. Wik, Daniel R.; Hornstrup, A.; Molendi, S.; Madejski, G.; Harrison, F. A.; Zoglauer, A.; Grefenstette, B. W.; Gastaldello, F.; Madsen, K. K.; Westergaard, N. J.; Ferreira, D. D. M.; Kitaguchi, T.; C. J.; (他 7 名), “NuSTAR Observations of the Bullet Cluster: Constraints on Inverse Compton Emission”, *The Astrophysical Journal*, Volume 792, Issue 1, article id. 48, (2014), DOI: 10.1088/0004-637X/792/1/48, 査読有
6. Takeuchi, Yoko; Kitaguchi, Takao; Hayato, Asami; Tamagawa, Toru; Iwakiri, Wataru; Asami, Fumi; Yoshikawa, Akifumi; Kaneko, Kenta; Enoto, Teruaki; Black, Kevin; Hill, Joanne E.; Jahoda, Keith, “Properties of the flight model gas electron multiplier for the GEMS mission”, *Proceedings of the SPIE*, Volume 9144, id. 91444N, (2014), DOI: 10.1117/12.2057159, 査読無
7. Enoto, Teruaki; Black, J. Kevin;

- Kitaguchi, Takao; Hayato, Asami; Hill, Joanne E.; Jahoda, Keith; Tamagawa, Toru; Kaneko, Kenta; Takeuchi, Yoko; Yoshikawa, Akifumi; Marlowe, Hannah; Griffiths, Scott; Kaaret, Philip E.; Kenward, David; Khalid, Syed, "Performance verification of the Gravity and Extreme Magnetism Small explorer (GEMS) x-ray polarimeter" Proceedings of the SPIE, Volume 9144, id. 91444M, (2014), DOI: 10.1117/12.2056841, 查読無
8. Kitaguchi, Takao; Tamagawa, Toru; Hayato, Asami; Enoto, Teruaki; Yoshikawa, Akifumi; Kaneko, Kenta; Takeuchi, Yoko; Black, Kevin; Hill, Joanne; Jahoda, Keith; Krizmanic, John; Sturmer, Steven; Griffiths, Scott; Kaaret, Philip; Marlowe, Hannah, "Monte-Carlo estimation of the inflight performance of the GEMS satellite x-ray polarimeter", Proceedings of the SPIE, Volume 9144, id. 91444L, (2014), DOI: 10.1117/12.2057334, 查読無
 9. Kitaguchi, Takao; Bhalerao, Varun; Cook, W. R.; Forster, Karl; Grefenstette, Brian W.; Harrison, Fiona A.; Madsen, Kristin K.; Mao, Peter H.; Miyasaka, Hiromasa; Rana, Vikram R., "Inflight performance and calibration of the NuSTAR CdZnTe pixel detectors", Proceedings of the SPIE, Volume 9144, id. 91441R, (2014). DOI: 10.1117/12.2057342, 查読無
 10. Madsen, Kristin K.; Harrison, Fiona A.; An, Hongjun; Boggs, Steven E.; Christensen, Finn E.; Cook, Rick; Craig, William W.; Forster, Karl; Fuerst, Felix; Grefenstette, Brian; Hailey, Charles J.; Kitaguchi, Takao; Markwardt, Craig; Mao, Peter; Miyasaka, Hiromasa; Rana, Vikram R.; Stern, Daniel K.; Zhang, William W.; Zoglauer, Andreas; Walton, Dominic; Westergaard, Niels J., "The nuclear spectroscopic telescope array (NuSTAR) high-energy X-ray mission", Proceedings of the SPIE, Volume 9144, id. 91441P, (2014), DOI: 10.1117/12.2056643, 查読無
 11. An, H.; Kaspi, V. M.; Archibald, R.; Bachetti, M.; Bhalerao, V.; Bellm, E. C.; Beloborodov, A. M.; Boggs, S. E.; Chakrabarty, D.; Christensen, F. E.; Craig, W. W.; Dufour, F.; Forster, K.; Gotthelf, E. V.; Grefenstette, B. W.; Hailey, C. J.; Harrison, F. A.; Hascoët, R.; Kitaguchi, T.; (他 10 名), "NuSTAR results and future plans for magnetar and rotation-powered pulsar observations", *Astronomische Nachrichten*, Vol.335, Issue 3, p.280-284, (2014), DOI: 10.1002/asna.201312032, 查読有
 12. Grefenstette, B. W.; Harrison, F. A.; Boggs, S. E.; Reynolds, S. P.; Fryer, C. L.; Madsen, K. K.; Wik, D. R.; Zoglauer, A.; Ellinger, C. I.; Alexander, D. M.; An, H.; Barret, D.; Christensen, F. E.; Craig, W. W.; Forster, K.; Giommi, P.; Hailey, C. J.; Hornstrup, A.; Kaspi, V. M.; Kitaguchi, T.; (他 11 名), "Asymmetries in core-collapse supernovae from maps of radioactive ⁴⁴Ti in Cassiopeia A", *Nature*, Volume 506, Issue 7488, pp. 339-342, (2014), DOI: 10.1038/nature12997, 查読有
 13. Kitaguchi, Takao; An, Hongjun; Beloborodov, Andrei M.; Gotthelf, Eric V.; Hayashi, Takayuki; Kaspi, Victoria M.; Rana, Vikram R.; Boggs, Steven E.; Christensen, Finn E.; Craig, William W.; Hailey, Charles J.; Harrison, Fiona A.; Stern, Daniel; Zhang, Will W., "NuSTAR and Swift Observations of the Fast Rotating Magnetized White Dwarf AE Aquarii", *The Astrophysical Journal*, Volume 782, Issue 1, article id. 3, (2014), DOI: 10.1088/0004-637X/782/1/3, 查読有
 14. Takeuchi, Y.; Tamagawa, T.; Kitaguchi, T.; Yamada, S.; Iwakiri, W.; Asami, F.; Yoshikawa, A.; Kaneko, K.; Enoto, T.; Hayato, A.; Kohmura, T.; the GEMS/XACT team, "Property of LCP-GEM in Pure Dimethyl Ether at Low Pressure", *Journal of Instrumentation*, volume 9, C01002, (2014), DOI:10.1088/1748-0221/9/01/C01002, 查読無
 15. An, Hongjun; Hascoët, Romain; Kaspi, Victoria M.; Beloborodov, Andrei M.; Dufour, François; Gotthelf, Eric V.; Archibald, Robert; Bachetti, Matteo; Boggs, Steven E.; Christensen, Finn E.; Craig, William W.; Grefenstette, Brian W.; Hailey, Charles J.; Harrison, Fiona A.; Kitaguchi, Takao; Kouveliotou, Chryssa; Madsen, Kristin K.; Markwardt, Craig B.; Stern, Daniel; Vogel, Julia K.; Zhang, William W., "NuSTAR Observations of Magnetar 1E 1841-045", *The Astrophysical Journal*, Volume 779, Issue 2, article id. 163, (2013), DOI: 10.1088/0004-637X/779/2/163, 查読有

16. Tsuchiya, H.; Enoto, T.; Iwata, K.; Yamada, S.; Yuasa, T.; Kitaguchi, T.; Kawaharada, M.; Nakazawa, K.; Kokubun, M.; Kato, H.; Okano, M.; Tamagawa, T.; Makishima, K., "Hardening and Termination of Long-Duration gamma Rays Detected Prior to Lightning", Physical Review Letters, vol. 111, Issue 1, id. 015001, (2013), DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.015001, 査読有
 17. Harrison, Fiona A.; Craig, William W.; Christensen, Finn E.; Hailey, Charles J.; Zhang, William W.; Boggs, Steven E.; Stern, Daniel; Cook, W. Rick; Forster, Karl; Giommi, Paolo; Grefenstette, Brian W.; Kim, Yunjin; Kitaguchi, Takao; (他 68 名) "The Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR) High-energy X-Ray Mission", The Astrophysical Journal, Volume 770, Issue 2, article id. 103, (2013), DOI: 10.1088/0004-637X/770/2/103, 査読有
 18. Kaspi, V. M.; An, H.; Bachetti, M.; Bellm, E.; Beloborodov, A. M.; Boggs, S.; Chakrabarty, D.; Christensen, F.; Craig, B.; Dufour, F.; Harrison, F.; Gotthelf, E. V.; Kitaguchi, T.; Kouveliotou, C.; Mori, K.; Pivovarov, M.; Stern, D.; Vogel, J. K.; Zhang, W.; NuSTAR Team, "NuSTAR observations of rotation-powered pulsars and magnetars", Proceedings of the International Astronomical Union, Volume 291, pp. 331-336, (2013), DOI: 10.1017/S1743921312024027, 査読無
 19. Gendreau, Keith; Arzoumanian, Zaven; Asami, Fumi; Baker, Robert; Balsamo, Erin; Black, Kevin; Duran-Aviles, Carlos; Enoto, Teruaki; Gregory, Kyle; Hahne, Devin; Hayato, Asami; Hill, Joe; Huegel, Fred; Iwahashi, Takanori; Iwakiri, Wataru; Jahoda, Keith; Jalota, Lalit; Kaaret, Philip; Kaneko, Kenta; Kenyon, Steven; Kitaguchi, Takao; (他 12 名), "The x-ray advanced concepts testbed (XACT) sounding rocket payload", Proceedings of the SPIE, Volume 8443, article id. 84434V, (2012), DOI: 10.1117/12.926418, 査読無
- [学会発表](計 12 件)
1. 北口貴雄, 他 9 名, 「Spring-8 によるマイクロパターンガス偏光計の詳細な性能評価」, 日本天文学会, W125a, 大阪府吹田市, 2015 年 3 月 20 日
 2. 北口貴雄, 他 9 名, 「X線の直線偏光・分光・到達時間を測定できるマイクロパターンガス検出器の開発」, 日本物理学会, 19aSH-4, 佐賀県佐賀市, 2014 年 9 月 19 日
 3. T. Kitaguchi, V. Bhalerao, W. R. Cook, K. Forster, B. W. Grefenstette, F. A. Harrison, K. K. Madsen, P. H. Mao, H. Miyasaka, V. R. Rana, "Inflight performance and calibration of the NuSTAR CdZnTe pixel detectors", SPIE, Canada Montreal, 2014 年 6 月 24 日
 4. T. Kitaguchi, T. Tamagawa, A. Hayato, T. Enoto, A. Yoshikawa, K. Kaneko, Y. Takeuchi, K. Black, J. Hill, K. Jahoda, J. Krizmanic, S. Sturmer, S. Griffiths, P. Kaaret, H. Marlowe, "Monte-Carlo estimation of the inflight performance of the GEMS satellite X-ray polarimeter", SPIE, Canada Montreal, 2014 年 6 月 23 日
 5. T. Kitaguchi, 他 13 名, "NuSTAR and Swift Observations of the Fast rotating Magnetized White Dwarf AE Aquarii", Suzaku-MAXI conference, 愛媛県松山市, 2014 年 2 月 19 日
 6. T. Kitaguchi, 他 8 名, "NuSTAR and Swift Observations of the Intermediate Polar AE Aquarii", 日本天文学会, 東京都三鷹市, J202a, 2014 年 3 月 20 日
 7. T. Kitaguchi, 他 9 名, "Performance Evaluation of Micro-pattern Gas Polarimeter with Synchrotron X-ray Beamline", 日本物理学会, 22aSP-8, 高知県高知市, 2013 年 9 月 22 日
 8. T. Kitaguchi, 他 28 名, "Inflight Performance and Calibration of the Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR)", 日本物理学会, 27pBE-10, 広島大学東広島市, 2013 年 3 月 27 日
 9. 北口貴雄, 「宇宙 X線の偏光を測定する GEM-TPC の検出応答シミュレータの開発」, MPG09, 長崎県長崎市, 2012 年 12 月 7 日
 10. 北口貴雄, 玉川徹, 早藤麻美, 榎戸輝揚, 山田真也, 岩橋孝典, 阿佐美ふみ, 吉川瑛文, 武内陽子, 岩切渉, 幸村孝由, 金子健太, 「X線偏光観測衛星 GEMS に搭載するガス検出器の宇宙環境でのバックグラウンドの見積り」, 日本天文学会, W39a, 大分県大分市, 2012 年 9 月 20 日
 11. T. Kitaguchi, T. Tamagawa, T. Iwahashi, J. Swank, K. Jahoda, T. Kallman, J. Hill, K. Black, W. Baumgartner, A. Hayato, J. Krizmanic, S. Sturmer, "Monte-Carlo Estimation of In-orbit Background for X-ray Polarimeter onboard GEMS", 39th COSPAR, India Mysor, 2012 年 7 月 16 日

12. T. Kitaguchi, V. Rana, F. Harrison, D. Stern, V. Kaspi, T. Tamagawa, “ Observation Plans of X-rays from White Dwarfs with NuSTAR and Future Polarimeters ”, 13th Marcel Grossmann Meeting, Sweden Stockholm, 2012 年 7 月 5 日

〔その他〕

1. プレスリリース
http://www.riken.jp/pr/press/2014/20140220_1/
2. 国際学会の企画運営
<http://www-heaf.hepl.hiroshima-u.ac.jp/cluster1503/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

北口 貴雄 (Takao Kitaguchi)

独立行政法人理化学研究所

仁科加速器研究センター

客員研究員

研究者番号 : 30620679