

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800138

研究課題名(和文) 時間分解原子核乾板多段シフターの大面積化・長時間化のための研究開発

研究課題名(英文) Development of time-resolved multi-stage shifter

研究代表者

高橋 覚 (Takahashi, Satoru)

神戸大学・人間発達環境学研究科・学術研究員

研究者番号：40402432

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：大面積化・長時間化を実現するための新型多段シフター(ローラー駆動方式)を考案し、試作機を三鷹光器社と製作した。動作・性能試験を進め、要求駆動再現性1ミクロンを切る良い駆動再現性が得られつつある。

2015年JAXA豪州気球実験において、多段シフターを導入し、ミリ秒オーダーに迫る時間分解能を達成し、将来的なパルサー位相ごとの偏光測定の展望を拓いた。

2014-2015、2016年に、J-PARCニュートリノビーム照射実験T60に多段シフターを導入し、126.7日にわたり秒レベルの時間分解能(時間分解数 ~ 10 の6乗)を実現しつつあるとともに、INGRID検出器とのハイブリッド解析を確立した。

研究成果の概要(英文)：Based on the invention, a prototype of the roller-driven model was co-developed with Mitaka Kohki Co., Ltd. from August 2014. Currently, working and performance tests are ongoing and a required accuracy of within 1 micron is being obtained.

~Millisecond time resolution in a balloon-borne experiment, ~second time resolution for 126.7 days in an accelerator neutrino experiment and ~ 10 to the 6th power time-resolved numbers are being achieved.

研究分野：素粒子宇宙物理学(実験)

キーワード：原子核乾板 時間分解能 ガンマ線 ニュートリノ 宇宙線 加速器実験

1. 研究開始当初の背景

時間分解原子核乾板多段シフター(多段シフター)は、本来時間分解能を持たない原子核乾板に秒以下の時間分解能の付与を可能にし、気球搭載原子核乾板ガンマ線望遠鏡を実現する。大面積で長時間の気球フライト観測を実現することにより、従来の宇宙高エネルギーガンマ線観測に対して、一桁近く優れた角度分解能での撮像観測、およびこの帯域では有意な観測がなされていない偏光観測を可能にする(GRAINE計画)。また、多段シフターの大面積化・長時間化は、原子核乾板を使った新たな加速器実験や宇宙線観測の可能性を拓く。

2. 研究の目的

本研究開発では、従来型(ステージ板スライド方式)の単純な拡張では困難な大面積化・長時間化を実現するためのモデルのプロトタイプを目的とする。

3. 研究の方法

大面積・長時間モデル(ローラー駆動方式)の概念設計をおこない、仕様を固めた。従来型の多段シフターを共同開発してきた三鷹光器社と議論を重ね、詳細設計を仕上げた。そして、実際に大面積・長時間モデルの試作機を構築した。

4. 研究成果

(1)新型多段シフター試作機

クイックな駆動テストをおこない、設計値程度の駆動再現性が得られていることが確認できた。また、詳細な挙動理解のための試験手法を検討し、そのために必要な装置を選定した。また、動作・性能試験のための環境を構築した。そして、実際に動作・性能試験をおこない、駆動再現性1マイクロメートルを切るような良い精度が得られることを実証し、新型多段シフターが実現可能である見通しが得られた。また、更なる軽量化を見据えた改良を施した。これにより、開口面積あたりの重量が従来型多段シフターの5分の1となる飛躍的な軽量化を実現し、気球実験における大展開面積(トータル ~ 10 平方メートル)の実現見通しが得られた。

エマルジョンガンマ線望遠鏡による科学観測に向けた気球実験の検討・概念設計を進めた。口径面積10平方メートルで、気球フライト時間1-2日から科学観測を開始できる見通しを得た。新型多段シフターによって、そのような気球実験は実現可能であり、エマルジョンガンマ線望遠鏡の科学観測気球実験の展望を拓いた。

(2)多段シフターの気球実験への導入

これまでに開発を進めてきた2015年気球実験で用いる多段シフターについて、低温特性の大幅な改良や、ステージ間ギャップを詰める改良に成功し、2015年気球実験において

ミリ秒オーダーでの運用が実現可能な状況に到達できた。

エマルジョンガンマ線望遠鏡の性能実証を目指し、2015年5月12日に、アリススプリングスにおいて、JAXA 豪州気球実験を行い、口径面積3780 cm^2 、14.4時間(高度37kmの水平浮遊11.5時間)の気球フライトをやり遂げた。本気球実験に、口径面積3780 cm^2 を持つ従来型の多段シフターを実装し、ミリ秒オーダーの時間分解能を狙った運用を達成した。現在、フライトデータ解析を進めている。多段シフターにおいては、ミリ秒オーダーに迫る時間分解能を達成し、パルサーの位相分解解析の展望を拓いた。

2015年気球実験は、JAXA 大気球実験室の現体制において、初めてとなるオーストラリアでの気球実験であったが、JAXA 大気球実験室の成功、および我々も先行実験としての役割を果たし、オーストラリア気球実験は今後も継続される方針となった。2015年気球実験で得られた経験・実績を基に、ガンマ線収量の拡大を図り、望遠鏡の総合的な性能実証のための、2018年JAXA 豪州気球実験が採択された。

今後、口径面積・フライト時間の拡大を図り、科学観測 phase への移行を目指す。科学観測開始を実現するための気球実験の実現可能性を検討した。本研究開発において進めている新型多段シフターの実現により、2015年気球実験の10-30倍程度の大面積化が見出されることを見出した。また、ユニットサイズ拡大に伴う総消費電力の低減により、搭載電池量をおおよそ3分の1に減らせる軽量化・低コスト化が見出された。これらを併せ、科学観測気球実験の展望を拓いた。

(3)多段シフターの加速器ニュートリノ実験への導入

J-PARCにおいて原子核乾板を使ったニュートリノ反応精密測定実験T60を進めており、2014年度に実現可能性を実証するために、標的質量 $\sim \text{kg}$ で、 \sim 月スケールの照射を繰り返した。原子核乾板検出器のタイムスタンパーとして、従来型の小型多段シフター(口径面積125 cm^2)を実装し、通算126.4日にわたり安定した長期運用を達成した。2015年度に、データ解析をおこない、実際に原子核乾板の飛跡に \sim 秒の時間情報を付与した。また、時間情報も併せたニュートリノ反応事象再構成の実現や、原子核乾板検出器の後方に位置する粒子識別を目的とした INGRID 検出器との対応付けを達成し、ハイブリッド解析が実現可能であることを実証した。

次に、標的質量や照射期間の拡大を図り、検出器性能実証を目指す。2015年豪州気球実験後に回収した従来型の大型多段シフター(口径面積3780 cm^2)を調整・試験し、2016年1月にJ-PARCに実装した。そして、連続126.7日にわたり安定した長期運用に成功した。

現在、照射データ解析を進めており、多段

シフターについては126.7日にわたり秒レベルの時間分解能(時間分解数 ~ 10 の6乗)を実現しつつある。

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 11 件)

- ① 高橋 覚、青木茂樹、”多段シフターによる時間軸をもつ原子核乾板検出器の開発”、日本物理学会誌(掲載決定)、査読有
- ② Satoru Takahashi, Shigeki Aoki, “GRAINE project, prospects for scientific balloon-borne experiments”, *Advances in Space Research, Special Issue: Origins of Cosmic Rays* (掲載決定), 査読有
- ③ K. Yamada, S. Takahashi et al., "First demonstration of emulsion multi-stage shifter for accelerator neutrino experiment in J-PARC T60", *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2017) (掲載決定), 査読有, DOI: 10.1093/ptep/ptx083
- ④ Keita Ozaki, Satoru Takahashi, Shigeki Aoki, Keiki Kamada, Taichi Kaneyama, Ryo Nakagawa, Hiroki Rokujo, “Demonstration of polarization sensitivity of emulsion-based pair conversion telescope for cosmic gamma-ray polarimetry”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 833 (2016) 165–168, 査読有, DOI: 10.1016/j.nima.2016.07.033
- ⑤ Satoru Takahashi, Shigeki Aoki, Kaname Hamada, Toshio Hara, Tatsuki Inoue, Katsumi Ishiguro, Atsushi Iyano, Hiroaki Kawahara, Koichi Kodama, Ryosuke Komatani, Masahiro Komatsu, Tetsuya Kosaka, Motoaki Miyanishi, Fukashi Mizutani, Misaki Morishita, Kunihiro Morishima, Mitsuhiko Nakamura, Naotaka Naganawa, Toshiyuki Nanano, Akira Nishio, Kimio Niwa, Naoto Otsuka, Keita Ozaki, Hiroki Rokujo, Osamu Sato, Emi Shibayama, Atsumu Suzuki, Ryo Tanaka, Yurie Tateishi, Shuichi Tawa, Misato Yabu, Kyohei Yamada, Saya Yamamoto, Masahiro Yoshimoto, "GRAINE 2015, a balloon-borne emulsion γ -ray

telescope experiment in Australia", *Prog. Theor. Exp. Phys.* 073F01 (2016) 1–12, 査読有, DOI: 10.1093/ptep/ptw089

- ⑥ 高橋 覚、青木茂樹、“原子核乾板ガンマ線望遠鏡による宇宙ガンマ線観測計画 GRAINE”, *日本写真学会誌*, 第 78 巻, 第 4 号, 228-234, 2015 年 11 月, 査読有
- ⑦ K. Ozaki, S. Aoki, K. Kamada, T. Kosaka, F. Mizutani, E. Shibayama, S. Takahashi, Y. Tateishi, S. Tawa, K. Yamada, H. Kawahara, N. Otsuka and H. Rokujo, “Development of new-type nuclear emulsion for a balloon-borne emulsion gamma-ray telescope experiment”, *JINST* 10 P12018 (2015) 1–11, 査読有, DOI: 10.1088/1748-0221/10/12/P12018
- ⑧ N. Agafonova, S. Takahashi et al. (151 人、139 番目), "Discovery of τ Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment", *Phys. Rev. Lett.* 115, 121802 (2015) 1–7, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.121802
- ⑨ Satoru Takahashi, Shigeki Aoki, Keiki Kamada, Saki Mizutani, Ryo Nakagawa, Keita Ozaki and Hiroki Rokujo, "GRAINE project: The first balloon-borne, emulsion gamma-ray telescope experiment", *Prog. Theor. Exp. Phys.* 043H01 (2015) 1–28, 査読有, DOI: 10.1093/ptep/ptv046
- ⑩ 高橋 覚、青木茂樹、尾崎 圭太、小坂 哲矢、柴山 恵美、立石 友里恵、田輪 周一、水谷 深志、山田 恭平、大塚 直登、河原 宏晃、六條 宏紀、”原子核乾板望遠鏡による宇宙ガンマ線観測計画 GRAINE のための時間分解多段シフターの開発”、応用物理学会放射線分科会誌「放射線」Vol.40 No.3 (2015) 127-131, 査読有
- ⑪ N. Agafonova, S. Takahashi et al. (148 人、132 番目), "Observation of tau neutrino appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment", *Prog. Theor. Exp. Phys.* 101C01 (2014) 1–10, 査読有, DOI: 10.1093/ptep/ptu132

[学会発表] (計 49 件)

- ① 高橋 覚、他、GRAINE 計画：科学観測実験の展望、日本物理学会年次大会、2017. 3. 17、大阪大学(大阪府)

- ② 水谷深志、高橋覚、他、GRAINE 計画:2015 年豪州気球実験報告 2、日本物理学会年次大会、2017. 3. 17、大阪大学(大阪府)
- ③ 山田恭平、高橋覚、他、時間分解原子核乾板多段シフターの大面積化、稼働時間拡大のための新型機構の開発、日本物理学会年次大会、2017. 3. 17、大阪大学(大阪府)
- ④ 呉坪健司、高橋覚、他、J-PARC T60 : 原子核乾板を用いた時間分解型多段シフターの解析状況 1、日本物理学会年次大会、2017. 3. 17、大阪大学(大阪府)
- ⑤ 丸嶋利嗣、高橋覚、他、J-PARC T60 : 原子核乾板を用いた時間分解型多段シフターの解析状況 2、日本物理学会年次大会、2017. 3. 17、大阪大学(大阪府)
- ⑥ 高橋覚、GRAINE、偏光 RG 会議、2017. 3. 20、大阪大学(大阪府)
- ⑦ 高橋覚、他、高角度分解能・偏光感度をもつ気球搭載大口径原子核乾板ガンマ線望遠鏡による高エネルギーガンマ線観測計画 GRAINE、宇宙科学シンポジウム、2017. 1. 5、宇宙科学研究所(神奈川県)
- ⑧ Satoru Takahashi, GRAINE project, gamma-ray observations by balloon-borne emulsion telescope with a high angular resolution, polarization sensitivity and large-aperture-area, 高エネルギーガンマ線でみる極限宇宙 2016、2016. 12. 15、東京大学(千葉県)
- ⑨ 高橋覚、A development of time-resolved emulsion detector、新学術領域研究「ニュートリノフロンティア」研究会 2016、2016. 11. 28、山代温泉(石川県)
- ⑩ 高橋覚、他、GRAINE 計画: 科学観測実験の展望、画像関連学会連合会第 3 回秋季合同大会、2016. 11. 17、京都工芸繊維大(京都府)
- ⑪ 呉坪健司、高橋覚、他、加速器ニュートリノ実験における大面積多段シフターの解析、画像関連学会連合会第 3 回秋季合同大会、2016. 11. 17、京都工芸繊維大(京都府)
- ⑫ 山田恭平、高橋覚、他、GRAINE 実験次期フライトに向けた新型多段シフターの開発、画像関連学会連合会第 3 回秋季合同大会、2016. 11. 17、京都工芸繊維大(京都府)
- ⑬ 高橋覚、他、GRAINE 計画: 科学観測実験の展望、大気球シンポジウム、2016. 11. 1、宇宙科学研究所(神奈川県)
- ⑭ 尾崎圭太、高橋覚、他、GRAINE 2015 年気球実験データ解析報告 2、大気球シンポジウム、2016. 11. 1、宇宙科学研究所(神奈川県)
- ⑮ 高橋覚、他、GRAINE 計画: 科学観測実験の展望、日本物理学会秋季大会、2016. 9. 21、宮崎大学(宮崎県)
- ⑯ 尾崎圭太、高橋覚、他、GRAINE 計画: 2015 年豪州気球実験の結果報告 (2)、日本物理学会秋季大会、2016. 9. 21、宮崎大学(宮崎県)
- ⑰ 山田恭平、高橋覚、他、高統計観測のための時間分解原子核乾板多段シフターの大面積化及び稼働時間拡大に関する研究開発、日本物理学会秋季大会、2016. 9. 21、宮崎大学(宮崎県)
- ⑱ 丸嶋利嗣、高橋覚、他、J-PARC T60 : 時間分解原子核乾板多段シフターの大面積化と解析状況、日本物理学会秋季大会、2016. 9. 21、宮崎大学(宮崎県)
- ⑲ S. Takahashi et al., GRAINE, COSMIC GAMMA-RAY OBSERVATIONS WITH BALLOON-BORNE EMULSION TELESCOPE, 41st COSPAR Scientific Assembly(口頭発表が受理されたが政情不安のため中止)、2016. 7. 30、Istanbul(Turkey)
- ⑳ 高橋覚、他、多段シフターによる時間分解型原子核乾板検出器の開発、日本写真学会年次大会、2016. 6. 8、東京工業大学(神奈川県)
- 21 Satoru Takahashi, et al., The 34th International Cosmic Ray Conference, 2015. 7. 30, The Hague (Netherlands)
- 22 水谷深志、高橋覚、他、GRAINE 2015 年度豪州気球実験多段シフター解析、日本天文学会、2015. 9. 9、甲南大学(兵庫県)
- 23 Satoru Takahashi, et al., GRAINE project: An overview and status of the 2015 balloon-borne experiment with emulsion gamma-ray telescope, The 34th International Cosmic Ray Conference, 2015. 07. 30, The Hague (Netherlands)
- 24 高橋覚、他 GRAINE collaboration、GRAINE 計画: 2015 年豪州気球実験報告、日本天文学会、2015. 09. 09、甲南大学

- (兵庫県)
- 25 水谷 深志、高橋 覚、他 GRAINE collaboration、GRAINE 2015 年度豪州気球実験多段シフター解析、日本天文学会、2015. 09. 09、甲南大学 (兵庫県)
- 26 高橋 覚、他 GRAINE collaboration、GRAINE 計画：2015 年豪州気球実験報告、日本物理学会、2015. 09. 25、大阪市大 (大阪府)
- 27 山田恭平、高橋 覚、他 J-PARC T60 実験グループ、J-PARC T60 実験：時間分解原子核乾板多段シフターの解析状況、日本物理学会、2015. 09. 25、大阪市大 (大阪府)
- 28 水谷 深志、高橋 覚、他 GRAINE collaboration、GRAINE 2015 年豪州気球実験：多段シフターのフライトデータ解析、日本物理学会、2015. 09. 25、大阪市大 (大阪府)
- 29 高橋 覚、他 GRAINE collaboration、GRAINE 計画：2015 年豪州気球実験 全体報告、大気球シンポジウム、2015. 11. 05、ISAS/JAXA (神奈川県)
- 30 高橋 覚、他 GRAINE collaboration、GRAINE 計画：2015 年豪州気球実験報告、画像関連学会連合会、2015. 11. 19、京都工芸繊維大学(京都府)
- 31 Satoru Takahashi for the GRAINE collaboration、GRAINE 計画、ニュートリノフロンティア研究会、2015. 12. 01、湯河原 (神奈川県)
- 32 Satoru Takahashi、GRAINE 計画、CRC タウンミーティング、2015. 12. 20、東京大学柏キャンパス (千葉県)
- 33 高橋 覚、他 GRAINE collaboration、GRAINE 計画：2015 年豪州気球実験報告、宇宙科学シンポジウム、2016. 01. 06、ISAS/JAXA (神奈川県)
- 34 高橋 覚、他、多段シフターによる時間分解型原子核乾板検出器の開発、固体飛跡検出器研究会、2016. 03. 14、福井大学 (福井県)
- 35 松本明佳、高橋 覚、他、原子核乾板による J-PARC ニュートリノ実験 T60：原子核乾板に時間分解情報付与を行う大面積多段シフターの導入、固体飛跡検出器研究会、2016. 03. 14、福井大学 (福井県)
- 36 山田恭平、高橋 覚、他、原子核乾板による J-PARC ニュートリノ実験 T60：時間分解多段シフターの導入、固体飛跡検出器研究会、2016. 03. 14、福井大学 (福井県)
- 37 高橋 覚、GRAINE 計画、偏光観測 RG 研究会、2016. 03. 18、中央大学 (東京都)
- 38 高橋 覚、他、多段シフターによる時間分解型原子核乾板検出器の開発、日本物理学会、2016. 03. 19、東北学院大学 (宮城県)
- 39 山田恭平、高橋 覚、他、J-PARC T60 実験：スケールアップに向けた大型多段シフターの導入、日本物理学会、2016. 03. 19、東北学院大学 (宮城県)
- 40 高橋 覚、GRAINE 計画、高宇連研究会、2016. 03. 23、東京理科大学 (東京都)
- [その他]
- ① 日本写真学会進歩賞、「エマルションガンマ線望遠鏡のための時間分解原子核乾板多段シフターの開発」、2014 年度
- ② 日本物理学会第 21 回論文賞、“Observation of tau neutrino appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 101C01 (2014)”, 2016 年
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
高橋 覚 (TAKAHASHI Satoru)
神戸大学・大学院人間発達環境学研究科・研究員
研究者番号：40402432
- (2) 研究協力者
青木 茂樹 (AOKI Shigeki)
六條 宏紀 (ROKUJO Hiroki)
尾崎 圭太 (OZAKI Keita)
水谷 深志 (FUKASHI Mizutani)
山田 恭平 (YAMADA Kyohei)
呉坪 健司 (KURETSUBO Kenji)
松本 明佳 (MATSUMOTO Haruka)
丸嶋 利嗣 (MARUSHIMA Toshitsugu)