

## 学位論文の審査結果の要旨

本論文は、宇宙線の太陽の影を用いて太陽磁場を研究したものである。エネルギーが  $1 \text{ TeV}$  ( $10^{12} \text{ eV}$ ) 以上の宇宙線は太陽地球間をほぼ直進し、太陽の背後から飛来する宇宙線は遮蔽される。このため、地球で太陽方向から飛来する宇宙線の強度を観測すると、太陽方向に強度の欠損が観られる。これが太陽の影で、その深さ（強度欠損の大きさ）や見かけの中心位置が太陽磁場の影響を受けて変動することが、先行研究によって示唆されている。これは宇宙線が陽子を主成分とする荷電粒子であるため、こうした太陽の影の変動を調べることにより、太陽磁場の変動をモニターすることが可能である。

本論文は、チベット高原における空気シャワー実験で観測された太陽の影を、太陽磁場モデルにもとづく詳細なシミュレーション結果と比較することで、大きく分けて以下の二つの結果を導いている。

第一の結果は影の深さの変動に関するもので、太陽活動極大期にシミュレーションからの顕著なズレが観られることを発見した。太陽活動極大期には太陽面爆発に伴う太陽質量放出（Coronal Mass Ejection: CME）が頻発し、太陽地球間に「宇宙嵐」と呼ばれる激しい変動を引き起こすが、その複雑な様相は未だシミュレーションには組み込まれていない。本論文は、太陽の影の観測期間を CME の発生時とそれ以外に分けて解析し、シミュレーションからのずれが CME の発生時に特に顕著であり、それ以外の期間には目立っていないことを示した。このことから、シミュレーションとのずれの原因が太陽の影に与える CME の影響にあると結論している。この結果は、太陽の影に対する「宇宙嵐」の影響を示した世界初の結果である。

第二の結果は影の中心位置のズレに関するものである。太陽地球間では、太陽磁場の磁力線が太陽から出る極性の磁区（Away sector）と太陽に入る極性の磁区（Toward sector）が、太陽の自転に伴い交互に観測される。したがって正電荷粒子である宇宙線の軌道は、異なる磁区の太陽磁場中を運動する際に逆向きの偏向を受け、地球から見た見かけの影の中心位置が、磁区に応じて北または南にズレて観測される。本論文はこのズレの様子を実際に観測データから導き、ズレの絶対値が、磁場中での荷電粒子軌道の偏向から期待される通り、宇宙線のリジディティーに逆比例していることを示した。一方、観測されるズレの絶対値は、シミュレーションによる期待値を約 1.5 倍上回っていることを発見し、その原因が、現在広く用いられている太陽磁場モデルが太陽地球間磁場強度を過小評価していることにあると結論している。このことは、太陽の影を用いて太陽磁場強度を定量的に評価できることを示した世界初の成果である。また、モデルによる磁場強度の過少評価の原因が、太陽風が惑星間空間へ引き出しているコロナ磁場の磁束（open magnetic flux）の過小評価にあると結論している。open magnetic flux は、地球近傍で観測される低エネルギー宇宙線強度を支配する重要な物理パラメータとして知られており、本論文の結論はこの点でも学会に大きなインパクトを与えられとされる。この成果は、審査付き発表論文（Amenomori et al., *Physical Review Letters*, **120**, 031101, 2018）として公表済みである。この成果については、学位論文第 7 章にまとめられている。

また、本論文は、以上の結果を得るために空気シャワーを起こす一次宇宙線のエネルギー決定精度を向上する解析法の開発も行っており、その成果は審査付き発表論文（Kawata et al.,

Experimental Astronomy, **44**, 1, 2017) として公表済みである。この成果については、学位論文第 4 章にまとめられている。更に、上記第一の成果も現在学術誌に投稿中であり（審査付き発表論文 Amenomori et al., Astrophysical Journal Letters）、学位論文第 6 章にまとめられている。

#### 公表主要論文名

- M. Amenomori, X. J. Bi, D. Chen, T. L. Chen, W. Y. Chen, S. W. Cui, Danzengluobu, L. K. Ding, C. F. Feng, Zhaoyang Feng, Z. Y. Feng, Q. B. Gou, Y. Q. Guo, H. H. He, Z. T. He, K. Hibino, N. Hotta, Haibing Hu, H. B. Hu, J. Huang, H. Y. Jia, L. Jiang, F. Kajino, K. Kasahara, Y. Katayose, C. Kato, K. Kawata, M. Kozai, Labaciren, G. M. Le, A. F. Li, H. J. Li, W. J. Li, C. Liu, J. S. Liu, M. Y. Liu, H. Lu, X. R. Meng, T. Miyazaki, K. Mizutani, K. Munakata, T. Nakajima, Y. Nakamura, H. Nanjo, M. Nishizawa, T. Niwa, M. Ohnishi, I. Ohta, S. Ozawa, X. L. Qian, X. B. Qu, T. Saito, T. Y. Saito, M. Sakata, T. K. Sako, J. Shao, M. Shibata, A. Shiomi, T. Shirai, H. Sugimoto, M. Takita, Y. H. Tan, N. Tateyama, S. Torii, H. Tsuchiya, S. Udo, H. Wang, H. R. Wu, L. Xue, Y. Yamamoto, K. Yamauchi, Z. Yang, A. F. Yuan, T. Yuda, L. M. Zhai, H. M. Zhang, J. L. Zhang, X. Y. Zhang, Y. Zhang, Yi Zhang, Ying Zhang, Zhaxisangzhu, and X. X. Zhou (The Tibet ASy Collaboration) “Evaluation of the Interplanetary Magnetic Field Strength Using the “Cosmic-Ray Shadow” of the Sun”, Physical Review Letters, 120 巻, 031101 頁 (2018 年 1 月掲載)
- K. Kawata, T. K. Sako, M. Ohnishi, M. Takita, Y. Nakamura, K. Munakata “Energy determination of gamma-ray induced air showers observed by an extensive air shower array”, Experimental Astronomy, 44 巻, 1 号, 1–9 頁 (2017 年 10 月掲載)
- M. Amenomori, X. J. Bi, D. Chen, T. L. Chen, W. Y. Chen, S. W. Cui, Danzengluobu, L. K. Ding, C. F. Feng, Zhaoyang Feng, Z. Y. Feng, Q. B. Gou, Y. Q. Guo, H. H. He, Z. T. He, K. Hibino, N. Hotta, Haibing Hu, H. B. Hu, J. Huang, H. Y. Jia, L. Jiang, F. Kajino, K. Kasahara, Y. Katayose, C. Kato, K. Kawata, M. Kozai, Labaciren, G. M. Le, A. F. Li, H. J. Li, W. J. Li, C. Liu, J. S. Liu, M. Y. Liu, H. Lu, X. R. Meng, T. Miyazaki, K. Mizutani, K. Munakata, T. Nakajima, Y. Nakamura, H. Nanjo, M. Nishizawa, T. Niwa, M. Ohnishi, I. Ohta, S. Ozawa, X. L. Qian, X. B. Qu, T. Saito, T. Y. Saito, M. Sakata, T. K. Sako, J. Shao, M. Shibata, A. Shiomi, T. Shirai, H. Sugimoto, M. Takita, Y. H. Tan, N. Tateyama, S. Torii, H. Tsuchiya, S. Udo, H. Wang, H. R. Wu, L. Xue, Y. Yamamoto, K. Yamauchi, Z. Yang, A. F. Yuan, T. Yuda, L. M. Zhai, H. M. Zhang, J. L. Zhang, X. Y. Zhang, Y. Zhang, Yi Zhang, Ying Zhang, Zhaxisangzhu, and X. X. Zhou (The Tibet ASy Collaboration) “Influence of Interplanetary Coronal Mass Ejection on the Sun's Shadow Observed by the Tibet-III Air Shower Array”, Astrophysical Journal Letters に投稿中