

令和 3 年度 (2022) 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名	和文：宇宙線による太陽の影を用いた太陽周辺磁場の時間変動の研究		
	英文：A study on variation of interplanetary magnetic field with the cosmic-ray shadow by the sun.		
研究代表者	国立情報学研究所	准教授	西澤 正己
参加研究者	信州大学 理学部	特任教授	宗像 一起
	信州大学 理学部	教授	加藤 千尋
	信州大学 大学院理工学研究科		浅野 駿太
	日本大学 生産工学部	准教授	塩見 昌司
	東京大学 宇宙線研究所	教授	瀧田 正人
	東京大学 宇宙線研究所	助教	川田 和正
	東京大学 宇宙線研究所	特任助教	佐古 崇志
研究成果概要	<p>1991年から実験を始めたが、サイクル 22 の最盛期の後半 (1991~1993年) のデータから、“太陽の影”が見かけの位置から太陽半径の 3 倍近く西南西にずれていた。その位置も年毎にかなり動いた。最静穏期 (1996~1997年) には太陽双極子磁場と地磁気の極性が逆で安定していたため、宇宙線による“影”のずれが相殺して見かけの太陽中心に静止していたことが 10TeV 領域で確認された。これは簡単なモデルを用いたシミュレーションでも再現された。1999年に拡張された 7.5m 間隔の Tibet-III アレイで観測した 2000年のデータでは 3~15TeV のエネルギー領域で“太陽の影”は全く掻き消えていた。これは、黒点数の増加による局所磁場に太陽双極子磁場が乱されて宇宙線粒子が散乱されたためと思われるが、全く予想しなかった新しい知見である。2006~2009年には太陽活動は最静穏期を迎えたが、われわれの予想通り、太陽双極子磁場と地磁気の極性がそろって、“太陽の影”が地磁気だけのずれの 2 倍になるかどうか確認することに大きな興味があった。2008年から 2009年の解析の結果、ほぼ予想通りの結果になっていることが確認できた。この実験は、太陽活動の移り変わりに伴う“影”の時間的な変動を観測していることで、太陽活動の極大、極小の時期だけを観測すればよいと言うものではなく、常時観測を続けていかねばならないのが特徴である。2014年からのデータについては、校正中のためまだ分析できていないが、2013年には、1996年から 2009年までの「太陽の影」の変化を利用して、太陽コロナ磁場を予測する 2 つの理論モデルを検証した。その結果、太陽近傍の電流は磁場構造に影響しないと仮定した PFSS モデルよりも、太陽近傍の電流が磁場構造に与える影響を考慮した CSSS モデルが「太陽の影」の実験結果をよく再現することが分かった。これは、銀河宇宙線を用いて太陽コロナ磁場の検証を行った世界で初めての成果である。この結果は PRL に掲載され [1]、“Editor’s Suggestions”としてハイライト論文に選定された。また、米国物理学会 (APS) の運営するウェブサアワイト Physics (Synopsis) で紹介文付きで取り上げられた。また、3TeV から 100TeV の領域で、太陽の影のエネルギー依存性や太陽の自転による太陽地球間磁場のセクター構造に対しての依存性に関する結果は 2018年 1月に PRL 採録されている [5]。さらに低エネルギー領域では CME の影響を受けていることを示唆する結果が得られており、この結果は 2018年 6月に APJ に採録されている [6]。</p> <p>2021年度の研究グループではガンマ線天源 [10]、Diffuse ガンマ線 [11] 等の分析を重点的に行ったため、太陽磁場関係では学術誌投稿などの大きな成果は出ていない。しかし、これまでの報告 [8, 9] (右図) をさらに進め、データの kys リブレーションと共に、太陽の影の東西方向のずれと IMF の Bz 成分との関連の詳細な分析を中心に進めているところである。</p>		
	<p>10TeVでのズレ <math>\alpha</math> の Bz 依存性</p> <p>東西のズレ</p> <p>南北のズレ</p> <p>黒: 南北方向のずれ <math>\alpha_{obs}</math></p> <p>黒: MC</p> <p>Red: MC <math>\alpha = 1.5</math></p> <p>傾きの差 2.1 <math>\sigma</math> (統計誤差のみ)</p> <p>一次直線でフィッティング</p> <p><math>\alpha_{obs} = (-0.09 \pm 0.04) \cdot B_z^{IMF} + (0.20 \pm 0.02)</math></p> <p><math>\alpha_{MC} = (-0.00 \pm 0.01) \cdot B_z^{IMF} + (0.225 \pm 0.007)</math></p> <p>MCに含まれない(突発的な)IMF Bz 変動によって太陽の影の東西のズレが変化することを示唆</p>		

## References

- 1) "Probe of the Solar Magnetic Field Using the Cosmic-Ray Shadow" of the Sun", M. Amenomori, et al., Physical Review Letters, 111, 011101 (2013)
- 2) "Interplanetary Coronal Mass Ejection and the Sun's Shadow Observed by the Tibet Air Shower Array", K. Kawata et al., 35<sup>th</sup> ICRC (2017)
- 3) "Solar magnetic field strength and the "Sun's Shadow"", Y. Nakamura et al., 35<sup>th</sup> ICRC (2017)
- 4) 中村佳昭, 他The Tibet AS<sub>γ</sub> Collaboration, 「チベット空気シャワーアレイで観測された太陽の影による太陽磁場構造の研究10」, 日本物理学会2018年春季大会 (東京理科大学), 22aK308-10 (2018)
- 5) "Evaluation of the Interplanetary Magnetic Field Strength Using the "Cosmic-Ray Shadow" of the Sun", M. Amenomori, et al., Physical Review Letters, 120, 031101 (2018.01)
- 6) "Influence of Earth-directed Coronal Mass Ejections on the Sun's Shadow Observed by the Tibet-III Air Shower Array", M. Amenomori et al., The Tibet AS<sub>γ</sub> Collaboration, The Astrophysical Journal, 860, 13 (2018.06)
- 7) "First Detection of Photons with Energy beyond 100 TeV from an Astrophysical Source", M. Amenomori et al., Phys. Rev. Lett. 123, 051101
- 8) "Can we estimate the variation of the z-component of the interplanetary magnetic field from the sun shadow?", Y. Nakamura et al. PoS(36<sup>th</sup> ICRC 2019)1132
- 9) 中村佳昭, 他The Tibet AS<sub>γ</sub> Collaboration, 「チベット空気シャワーアレイで観測された太陽の影による太陽磁場構造の研究11」, 日本物理学会2018年秋季大会 (山形大学), 19aT13-9(2019)
- 10) "Potential PeVatron supernova remnant G106.3+2.7 seen in the highest-energy gamma rays", M. Amenomori et al., Nature Astronomy 5, pages 460-464 (2021)
- 11) "First Detection of sub-PeV Diffuse Gamma Rays from the Galactic Disk: Evidence for Ubiquitous Galactic Cosmic Rays beyond PeV Energies", M. Amenomori et al. (Tibet AS<sub>γ</sub> Collaboration), Phys. Rev. Lett. 126, 141101 – Published 5 April 2021