

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17626

研究課題名(和文) 銀河宇宙線中の太陽の影による太陽近傍磁場の診断

研究課題名(英文) Probe of the Solar Coronal Magnetic Field Using the Sun Shadow in the Galactic Cosmic Rays

研究代表者

川田 和正 (KAWATA, Kazumasa)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：10401291

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：太陽によって宇宙線が遮られる現象を「太陽の影」と呼ぶ。チベット高原で稼働中の宇宙線検出器で観測された「太陽の影」とその数値シミュレーションの比較を行い、太陽フレアなどに伴うコロナ質量放出(CME)が「太陽の影」に影響を及ぼしていることを明らかにした。また、太陽地球間の惑星間空間磁場の強度において、太陽の影からの推測とモデルとの間に1.5倍程度の不一致を確認した。本研究成果は、直接観測の難しい太陽地球間の磁場の検証において有用なデータとなるであろう。

研究成果の概要(英文)：The Sun blocks cosmic rays from the direction of the Sun and casts a shadow in the cosmic rays, so-called Sun shadow. We observed the Sun shadows with the cosmic-ray detector in Tibet highland, and these shadows were compared with the MC simulations. As a result, we found the influence of the coronal mass ejection (CME) on the Sun shadow. Furthermore, we found an inconsistency between the interplanetary magnetic field strength derived from the Sun shadow and the model expectation. These results will be useful data to probe the magnetic fields between the Sun and the Earth which are difficult to measure directly.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：太陽磁場 コロナ磁場 惑星間空間磁場 宇宙線 太陽活動 コロナ質量放出

1. 研究開始当初の背景

太陽には太陽内部で生成され、近傍のコロナ領域に伸びる太陽コロナ磁場が存在する。また、太陽は11年の活動周期を持ち、近年では2001年頃と2013年頃が極大期であり、太陽黒点や太陽フレアの増加が観測された。太陽活動静穏期(1996年頃と2008年頃)では、太陽コロナ磁場は南北に極を持つダイポール型に近い形の磁場が形成され、極大期に近づくにつれてマルチポールの複雑な磁場へと変容していく。Parkerモデルによると、太陽表面の磁場は太陽風とよばれる高速プラズマ流(地球近傍で300-1000km/s)に凍結されて惑星間空間を伝わり太陽圏全体を満たしていると考えられている(太陽風磁場)。そして、ほぼ11年の太陽活動周期で南北の極を入れ替えながら変動を繰り返し、複雑に入り組んだ太陽圏磁場を形成している。太陽表面上の磁場は、ゼーマン効果を利用して光学望遠鏡で詳細に観測することができ、近年の「ひので衛星」などでは目覚ましい成果を挙げている。また、人工衛星によって地球衛星軌道上の磁場の直接観測も行われている。しかし、太陽コロナ磁場を含む太陽近傍磁場は直接観測が難しく、様々な理論モデルによって推定されているのが現状である。他にも、宇宙探査機であるユリシーズやボイジャーなどにより、太陽から離れた場所のピンポイント観測があるものの、特に太陽近傍の領域は高温・高放射線の過酷な環境であるために、最新の宇宙探査機であっても近づくことができず情報が不足している。1957年にクラークは荷電粒子である宇宙線が太陽磁場の影響を受けるため、「太陽の影」(=宇宙線が太陽によって遮られる現象)が変化すると予想した。本研究では、チベット空気シャワーアレイで観測された宇宙線の「太陽の影」を用いて、太陽活動に伴って変動する太陽コロナ磁場と太陽風磁場のモデル検証を行い、太陽-地球間磁場の全体構造を明らかにしていく。

2. 研究の目的

これまでの研究では、特に10TeV宇宙線中の「太陽の影」の"深さ"に注目して太陽磁場モデルの検証を行ってきたが、本研究では「太陽の影」の"方向"の情報も合わせて利用して、より精密なモデル検証を目指す。また、「太陽の影」の"方向"は、観測エネルギーに反比例して実際の太陽の方向から大きくずれるので、観測エネルギーの閾値を3TeVに下げることによって、より鮮明なモデル検証が可能となる。さらに、太陽から放出されたCMEは、3-4日間かけて地球に到来し、地球-太陽間の太陽風磁場を歪曲する。図1のようにMHD(磁気流体力学)シミュレーションなどにより、CME発生時の磁場構造が計算されているが、CME発生時に「太陽の影」がどのような影響を受けるのか、また、推測される磁場モデルの検証を目指す。

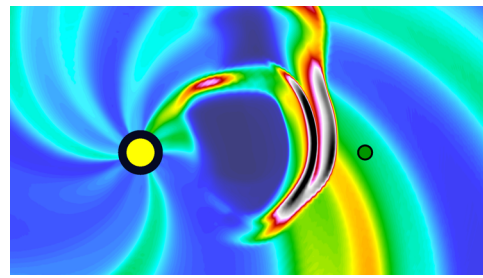


図1 (Credit : NOAA) MHDシミュレーションで予測されるCME発生時の太陽-地球間の磁場構造。左の白丸が太陽、右の黒丸が地球。

3. 研究の方法

(1) データ解析

2000年以降に取得されている3TeV宇宙線のデータを用い、「太陽の影」の解析を行った。本研究では特に「太陽の影」の"方向"に着目して解析を行った。太陽-地球間の惑星間空間磁場には、太陽に向かう方向(Toward)と、太陽から遠ざかる方向(Away)に分けられるセクター構造が存在する(図1のスパイラル状の明暗)。定性的にセクターがTowardの場合は、「太陽の影」は実際の太陽の方向から南にずれ、Awayの場合は南にずれる。ずれの大きさは観測Rigidity(観測エネルギーを原子番号(Z)で割ったもの)に反比例しているため、これを数値シミュレーションと比較し、モデルの検証を行う。また、2000年以降の年ごとの太陽の影の深さについても太陽活動との相関をとり、数値シミュレーションと比較検討を行う。

(2) 高速シミュレーションコードの開発

申請者がこれまでに確立したシミュレーションの方法は、以下の様な手順である。
(i) 一次宇宙線スペクトルを仮定し空気シャワーを生成。(ii) 空気シャワー中の二次粒子を検出器シミュレーションへ渡し検出条件を課す。(iii) 検出条件を満たした空気シャワーを実データと同手順で解析。(iv) 解析で残った空気シャワーの一次宇宙線を地球から太陽へ逆軌道を計算。(v) 太陽に当たった粒子の初期発射方向に角度分解能を考慮し「太陽の影」を再現。

想定する磁場は、地磁気+太陽風磁場+太陽コロナ磁場である。設定可能な磁場モデルは、太陽風磁場はスパイラル状のParkerモデル、太陽コロナ磁場に対しては2つの理論モデルがある。一つは太陽近傍を流れる電流は局所的には磁場構造に影響しないとするPotential Field Source Surface (PFSS)モデルで、他方は電流が磁場構造に反映するように構築されたCurrent Sheet Source Surface (CSSS)モデルである。両モデルは、米国のキットピーク真空太陽望遠鏡で得られた太陽表面の磁場情報からコロナ領域の磁場を推測している。

本計画では、より磁場に敏感な 3TeV 領域の宇宙線中の「太陽の影」のデータ解析し多数の太陽磁場モデルの検証を行う。しかし、宇宙線エネルギーが 1/3 になると曲がり角が 3 倍大きくなり、従来のシミュレーションでは、宇宙線の軌道の計算時間が 10 倍程度になり現実的ではない。上述の手順(4)で、粒子の発射方向の範囲の最適化を行い、軌道計算の回数を減少させる。

4. 研究成果

本課題では、3TeV 領域の「太陽の影」のデータ解析を行い、それに対応する数値シミュレーションを開発した。高密度空気シャワーアレイ (Tibet-III) で 2000 年以降に観測された 3TeV 領域の「太陽の影」について数値シミュレーションと比較した結果、以下のことを明らかにした。

(1) 2000 年から 2009 年までの「太陽の影」の深さの時間変化を解析し数値シミュレーションと比較したところ、活動極大期(2000-2002 年)においてシミュレーションに比べて観測結果が統計的に有意に浅いことがわかった (図 2 a)。そこで地球近辺で影響を及ぼしている CME のカタログを用いて、CME が太陽表面で発生してから、地球を過ぎ去るまでの期間を解析から取り除き再解析をおこなった。その結果、モデルが観測を良く再現することが分かった(図 2b)。モデルには CME のような短期間の変動は考慮されておらず、この結果は「太陽の影」に CME が影響をおよぼすことを最初に示した成果である。

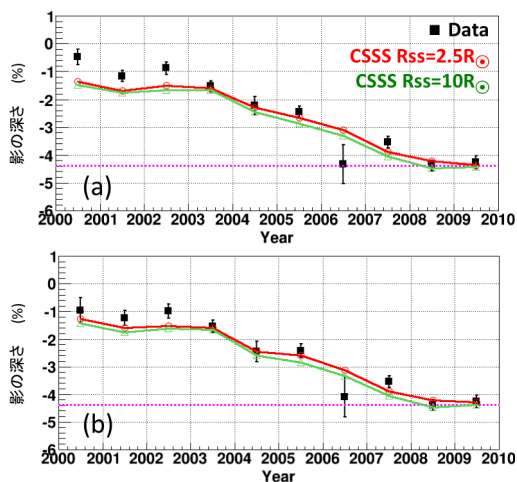


図 2 「太陽の影」の深さの年変動。■ : データ、赤線 : シミュレーション 1 (CSSS モデル ソース面の距離=2.5 太陽半径)、緑線 : シミュレーション 2 (CSSS モデル ソース面の距離=10 太陽半径)。(a) 観測された全期間を解析。(b) CME 発生期間を解析から取り除いた場合。

(2) 惑星間空間磁場のセクター構造の向き (Toward/Away) に伴い変動する「太陽の影」の解析を行った。その結果、「太陽の影」の方向はセクターが Toward の場合は太陽の視位置から南へずれ、Away の場合は北へずれることを確認した(図 3)。さらに、すれの大きさが宇宙線のエネルギーが低くなるほど大きくなることを示した。さらに詳細に数値シミュレーションと比較した結果、観測のずれの方が統計的に有意に大きいことが判明した。この違いについては、太陽コロナ磁場モデルに使用している太陽表面磁場の系統的な誤差によるものか、磁場モデル自身の不定性によるものと考えている。

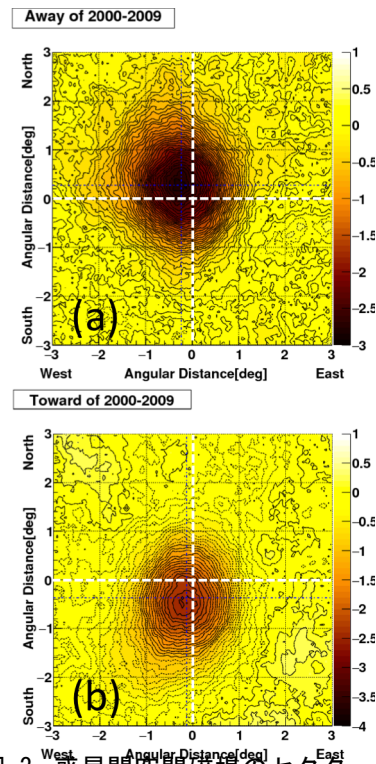


図 3 惑星間空間磁場のセクター構造の向きで分けた場合の太陽の影。(a) Away (b) Toward

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 3 件)

- ① M. Amenomori, K. Kawata et al., Northern Sky Galactic Cosmic Ray Anisotropy between 10 and 1000 TeV with the Tibet Air Shower Array, The Astrophysical Journal, 査読有, 836, 153(7pp) (2017)
- ② 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, 査読有, [掲載]

- 確定] (2017)
- ③ M. Amenomori, K. Kawata et al., Search for Gamma Rays above 100 TeV from the Crab Nebula with the Tibet Air Shower Array and 100 m² Muon Detector, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 813, 98-102 (2015)

[学会発表] (計 14 件)

- ① K. Kawata, et al., [発表確定], ALPAQUITA Array in the ALPACA Project, 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017), 釜山(大韓民国), 2017年7月12日~20日
- ② K. Kawata, Y. Nakamura, K. Munakata, et al., [発表確定], Interplanetary Coronal Mass Ejection and the Sun's Shadow Observed by the Tibet Air Shower Array, 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017), 釜山(大韓民国), 2017年7月12日~20日
- ③ Y. Nakamura, K. Kawata, K. Munakata, et al., [発表確定], Interplanetary Coronal Mass Ejection and the Sun's Shadow Observed by the Tibet Air Shower Array, 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017), 釜山(大韓民国), 2017年7月12日~20日
- ④ 中村佳昭, 川田和正, 宗像一起, 他 (チベット AS γ 共同研究者), 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 7, 日本物理学会年会, 大阪大学 豊中キャンパス (大阪府豊中市), 2017年3月17日
- ⑤ 宗像一起, 川田和正, 中村佳昭, 他 (チベット AS γ 共同研究者), 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 6, 日本物理学会年会, 大阪大学 豊中キャンパス (大阪府豊中市), 2017年3月17日
- ⑥ 川田和正, [招待講演] Probe of the Solar Magnetic Field Using the Cosmic-Ray Sun Shadow, H28年度 ISEE 研究集会-太陽圏シンポジウム, 名古屋大学 ISEE (愛知県名古屋市), 2017年3月2日
- ⑦ 川田和正, 他 (チベット AS γ 共同研究者), チベット高原での高エネルギー宇宙線の研究, 平成 28 年度東京大学宇宙線研究所共同利用発表会, 東京大学宇宙線研究所 (千葉県柏市), 2016年12月10日
- ⑧ K. Kawata (ALPACA Collaboration), [招待講演] ALPACA Project : 100 TeV Gamma Ray Observation in the Southern Sky, Workshop on a wide field-of-view Southern Hemisphere TeV gamma ray observatory, プエブラ(メキシコ), 2016年11月10日
- ⑨ 中村佳昭, 川田和正, 宗像一起, 他 (チベット AS γ 共同研究者), 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 5, 日本物理学会秋の分科会, 宮崎大学 木花キャンパス (宮崎県宮崎市), 2016年9月24日
- ⑩ 川田和正, 中村佳昭, 宗像一起, 他 (チベット AS γ 共同研究者), 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 4, 日本物理学会秋の分科会, 宮崎大学 木花キャンパス (宮崎県宮崎市), 2016年9月24日
- ⑪ 川田和正 (ALPACA Collaboration), [招待講演] ALPACA 実験-南米ボリビア高地における 100TeV 領域ガンマ線観測計画, 研究会-Sub-PeV ガンマ線による天体観測から迫る Knee 領域宇宙線の起源, 東京大学宇宙線研究所 (千葉県柏市), 2016年8月8日
- ⑫ 川田和正, [招待講演] ボリビア・チャカルタヤ山での太陽の影の観測計画, H27 年度 ISEE 研究集会-太陽圏シンポジウム, 名古屋大学 ISEE (愛知県名古屋市), 2016年3月4日
- ⑬ 川田和正, 中村佳昭, 宗像一起, 他 (チベット AS γ 共同研究者), チベット空気シャワーアレイで観測された太陽の影, 日本物理学会 秋の分科会, 大阪市立大学 (大阪府大阪市), 2015年9月25日
- ⑭ K. Kawata, Energy Determination and Gamma/Hadron Separation Using the Lateral Distribution of EAS for the 100 TeV Gamma-Ray Astronomy, ICRC2015, ハーグ(オランダ), 2015年7月2日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

東京大学宇宙線研究所チベット AS γ 実験

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/em/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川田 和正 (KAWATA, Kazumasa)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号: 10401291

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

宗像 一起 (MUNAKATA Kazuoki)

中村 佳昭 (NAKAMURA Yoshiaki)