Multipoint Observations and Modeling of the 2021 November 4 Forbush Decrease Using Solar Orbiter, CSES-01, and Ground-based Neutron Monitor Data

การสำรวจโดยละเอียดของระยะอิสระเฉลี่ยในทิศขนานกับสนามแม่เหล็กของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ประเภทประตอนและอิเล็กตรอน

(S. Benella, M. Laurenza, M. Martucci, **D. Ruffolo,** Q. Hu, G. Nicolaou, C. J. Owen, M. Stumpo, C. Plainaki, F. Palma, M. Piersanti, M. Sorbara, A. Sotgiu, and R. Sparvoli 2025, Multipoint observations and modeling of the 2021 November 4 Forbush decrease using Solar Orbiter, CSES-01, and ground-based neutron monitor data, *Astrophys. J.,* **986,** 142 (IF=4.8) https://doi.org/10.3847/1538-4357/add329)

During their propagation in the heliosphere, interplanetary coronal mass ejections (ICMEs) interact with galactic cosmic ray (GCR) particles, modifying their spectrum and driving anisotropies. We analyze the first large Forbush decrease (FD) of Solar Cycle 25 on 2021 November 3–5 by using multipoint in situ observations and neutron monitors (including the Princess Sirindhorn Neutron Monitor, PSNM, in Thailand – see Figure) to study the association between FD characteristics and the ICME. We use the Grad–Shafranov reconstruction to infer the magnetic field configuration of the ICME. We model the neutron monitor response through primary spectrum and anisotropy. The primary spectrum is parameterized with the force-field approximation and the anisotropy is modeled through a spherical harmonic expansion. We optimize the model parameters during the FD by using ground-based observations provided by the worldwide neutron-monitor network. The model's results are compared with space-based measurements of the differential proton flux measured by the High Energy Particle Detector (HEPD-01) on board the CSES-01 satellite and of the integral counts of both HEPD-01 and the High Energy Telescope on board the Solar Orbiter. Anisotropy develops during the ICME passage, within the magnetic flux rope (MFR), and is found to be bidirectional. The force-field parameterization of the primary GCR fluxes based on ground-based measurements is found to be in very good agreement with spacecraft observations in the sub-GeV range. The GCR anisotropy obtained by fitting the model to ground-based observations is consistent with interplanetary magnetic field observations. The results suggest that the local magnetic field has a substantial axial component that is aligned to the MFR axis, and determines the GCR anisotropy at the typical neutron monitor energies.

ระหว่างการเคลื่อนที่ผ่านฮีลิโอสเฟียร์ ก้อนมวบจากโคโรนาระหว่างดาวเคราะห์ (interplanetary coronal mass ejections; ICMEs) ปฏิสัมพันธ์กับอนุภาครังสีคอสมิกจากกาแล็กซี (galactic cosmic rays; GCRs) จนเปลี่ยนสเปกตรัมและสร้างแอนไอโซโทรปีของอนุภาค เราวิเคราะห์การลดลงแบบฟอร์บุช (Forbush decrease; FD) ขนาด

ใหญ่ครั้งแรกของวัฏจักรที่ 25 ของดวงอาทิตย์ ระหว่างวันที่ 3-5 พ.ย. ปี ค.ศ. 2021 โดยใช้การสังเกตอินซิทูจากตำแหน่งต่าง ๆ และจากเครื่องตรวจวัดนิวตรอน รวมทั้งเครื่องตรวจวัดนิวตรอนสิรินธรในประเทศไทย (Princess Sirindhorn Neutron Monitor; PSNM ดังแสดงในรูป) เพื่อศึกษาความเกี่ยวข้องระหว่างสมบัติของ FD และ ICME เราใช้ริคอนสตรักชันแบบกราด-ซาฟรานอฟเพื่อหารูปแบบของสนามแม่เหล็กใน ICME เราจำลองความตอบสนองของเครื่องตรวจวัดนิวตรอนต่อสเปกตรัมและแอนไอโซโทรปีของรังสีคอสมิก โดยใช้การประมาณแบบสนามแรงเพื่อพารามิเตอร์ไรซ์สเปกตรัมนั้น และการกระจายในสเฟริกัลป์ฮาร์มอนิกส์เพื่อจำลองแอนไอโซโทรปี เราหาพารามิเตอร์ที่เหมาะที่สุดระหว่าง FD โดยใช้จากวัดจากพื้นโลกโดยเครือข่ายเครื่องตรวจวัดนิวตรอนทั่วโลก ผลจากแบบจำลองได้เทียบกับผลการวัดฟลักซ์ดิฟเฟอร์เรนเชียลของอนุภาคโปรตอนในอวกาศโดยเครื่องวัด High Energy Particle Detector (HEPD-01) บนดาวเทียม CSES-01 และการนับอินทิกรัลของทั้ง HEPD-01 และ High Energy Telescope บนยานอวกาศ Solar Orbiter มีแอนไอโซโทรปีเกิดขึ้นระหว่างการผ่านของ ICME ภายในเชือกฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux rope; MFR) และพบว่าอนุภาคไหลในทั้งสองทิศทาง การพารามิเตอร์ไรซ์แบบสนามแรงของฟลักซ์ GCR จากการวัดบนพื้นดินนั้น สอดคล้องอย่างดีมากกับผลการวัดโดยยานอวกาส ณ พลังงานต่ำกว่า 1 GeV แอนไอโซโทรปีของ GCR ที่ได้จากการฟิตแบบจำลองกับผลการวัดจากพื้นดินนั้น สอดคล้องกับผลการวัดสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ ผลบ่งบอกว่าสนามแม่เหล็กใกล้โลกมีองค์ประกอบสำคัญตามแกน MFR ซึ่งกำหนดแอนไอโซโทรปีของ GCR ณ พลังงานที่วัดโดยเครื่องตรวจวัดนิวตรอน

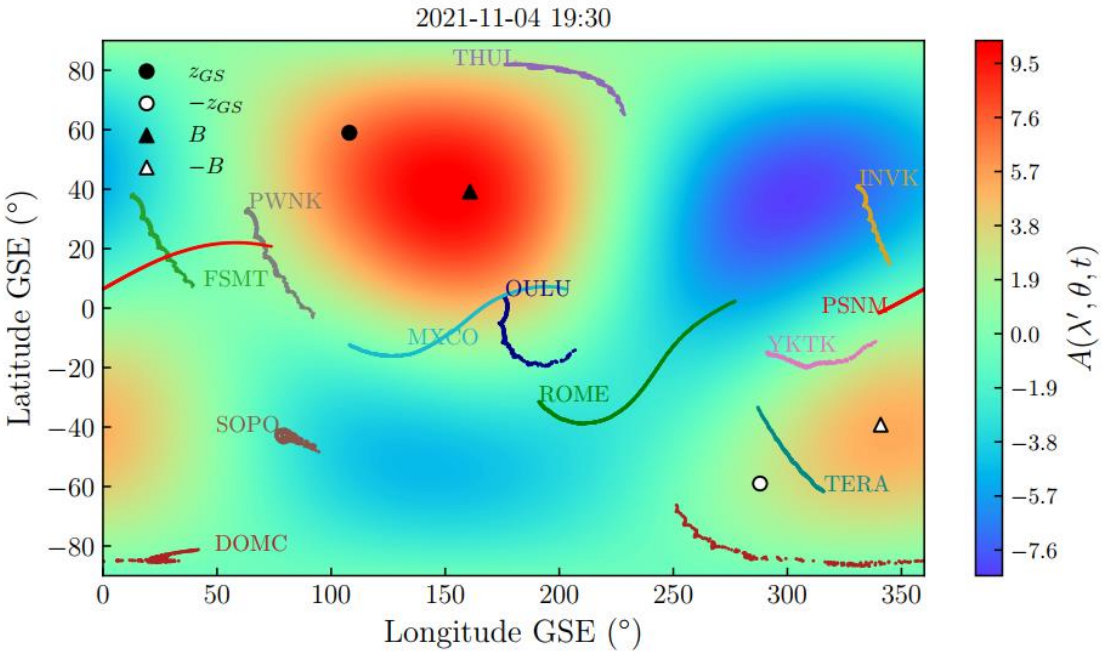

Figure 10. Anisotropy map obtained at the closest approach to the MFR core on November 4 at 19:30 UT. The colored dots indicate the asymptotic directions of a subset of the NMs used in the study. The filled (empty) circle indicates the parallel (antiparallel) direction to the MFR axis. The filled (empty) triangle denotes the parallel (antiparallel) direction to the IMF.