

Variation in Path Lengths of Turbulent Magnetic Field Lines and Solar Energetic Particles

การเปลี่ยนแปลงระยะเส้นทางของเส้นสนามแม่เหล็กปั่นป่วนและอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์

(W. Sonsrrettee, P. Chuychai, A. Seripienlert, P. Tooprakai, A. Sáiz, D. Ruffolo*, W. H. Matthaeus, and R. Chhiber, Variation in Path Lengths of Turbulent Magnetic Field Lines and Solar Energetic Particles, *Astrophys. J.*, **967**, 97 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad3d58>)

Modeling of time profiles of solar energetic particle (SEP) often considers transport along a large-scale magnetic field with a fixed path length from the source to the observer. Here, we point out that variability in the turbulent field line path length can affect the fits to SEP data and the inferred mean free path and injection profile. To explore such variability, we perform Monte Carlo simulations of homogeneous 2D MHD + slab magnetic turbulence in spherical geometry and trace trajectories of field lines and full particle orbits, considering protons from a narrow or wide angular region near the Sun, corresponding to an impulsive or gradual solar storm, respectively. We analyze the simulation results in terms of field line and particle path length statistics for $1^\circ \times 1^\circ$ pixels in heliolatitude and heliolongitude at 0.35 and 1 au from the Sun, for different values of the turbulence amplitude b/B_0 and turbulence geometry as expressed by the slab fraction f_s . Maps of the most probable path lengths of field lines and particles at each pixel exhibit systematic patterns that reflect the fluctuation amplitudes experienced by the field lines, which in turn relate to the local topology of 2D turbulence. We describe the effects of such path length variations on SEP time profiles, both in terms of path length variability at specific locations and the motion of the observer with respect to turbulence topology during the course of the observations.

การจำลองโปรไฟล์เวลาของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ (solar energetic particles, SEPs) บ่อยครั้งจะพิจารณาการขนส่งตามสนามแม่เหล็กเสกกลใหญ่ด้วยระยะเส้นทางคงที่จากแหล่งอนุภาคผู้สังเกต ในที่นี้ เราชี้แจงว่า การเปลี่ยนแปลงในระยะเส้นทางของเส้นสนามแม่เหล็กปั่นป่วนนั้น ส่งผลกระทบต่อการตีข้อมูล SEP และการอนุมานเส้นทางอิสระเฉลี่ยและอินเจกชันโปรไฟล์ เพื่อสำรวจการเปลี่ยนแปลงนั้น เราได้ทำการจำลองแบบมอนติคาร์โลของความปั่นป่วนแม่เหล็กแบบ 2D MHD + slab ที่สม่าเสมอ ในเรขาคณิตทรงกลม และได้ตามเส้นทางของเส้นสนามแม่เหล็กและอนุภาค โดยพิจารณาโปรตอนจากบริเวณเชิงมุมที่แคบหรือกว้างใกล้ดวงอาทิตย์ เพื่อสอดคล้องกับพายุสุริยะแบบอิมพัลซีฟหรือแกรดวล ตามลำดับ เราได้วิเคราะห์ผลการจำลองในเชิงสถิติของระยะเส้นทางของเส้นสนามและอนุภาค ณ พิกเซล $1^\circ \times 1^\circ$ ของละติจูดสุริยะและลองจิจูดสุริยะที่ระยะ 0.35 และ 1 au จากดวงอาทิตย์ โดยใช้ค่าต่าง ๆ ของแอมพลิจูดความปั่นป่วน b/B_0 และเรขาคณิตความปั่นป่วนด้วยสัดส่วน slab f_s แผนที่ของระยะเส้นทางที่มีโอกาสสูงสุดของเส้นสนามและอนุภาค ณ แต่ละพิกเซลนั้น แสดงรูปแบบเชิงระบบซึ่งสะท้อนถึงความแปรปรวนตามเส้นทางของเส้นสนาม ซึ่งเป็นผลจากโทโพโลยีเฉพาะจุดของความปั่นป่วนแบบ 2D เราอธิบายถึง

ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงระยะเส้นทางเช่นนี้ ต่อโปรไฟล์เวลาของ SEP ทั้งเชิงการเปลี่ยนแปลงระยะเส้นทางเฉพาะจุด และเชิงการเคลื่อนที่ของผู้สังเกตเทียบกับโทโพโลยีความปั่นป่วนระหว่างการสังเกต

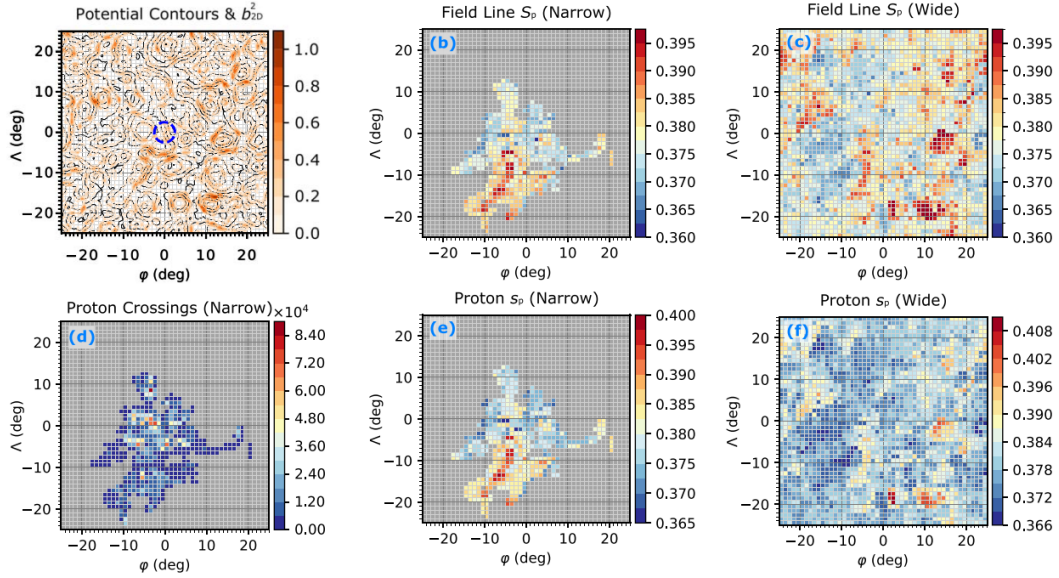


Figure 5. Maps in heliolongitude φ and heliolatitude Λ at radius $r_A = 0.35$ au: (a) Contours of equal magnetic potential $a(\Lambda, \varphi)$, derived from a 2D MHD simulation of turbulence, and resulting $|b^{2D}|^2$ (color scale). (b) Most probable (peak) path length in each pixel of (Λ, φ) for field lines traced from a circle of radius 2.5 at $r_0 = 0.1$ au (blue-dashed circle in (a)), to model the distribution of field lines connected to the narrow injection region of an impulsive solar event. (c) Like (b), for field lines traced from all locations at $r_0 = 0.1$ au, to model the distribution of field lines connected to the wide injection region of a gradual solar event. (d) Number of crossings at 0.35 au in each angular pixel for 1 MeV protons traced from the narrow injection region. (e) Peak length for crossings of 1 MeV protons traced from the narrow injection region. (f) Like (e), but for the wide injection region. There are systematic variations in path length and arrival time that relate to the topology of 2D turbulence. The spatial pattern of peak proton path lengths closely follows that for field lines, which in turn have longer path lengths in pixels where (a) indicates a strong 2D fluctuation field.