A Detailed Survey of the Parallel Mean Free Path of Solar Energetic Particle Protons and Electrons

การสำรวจโดยละเอียดของระยะอิสระเฉลี่ยในทิศขนานกับสนามแม่เหล็กของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ ประเภทประตอนและอิเล็กตรอน

(J. T. Lang, R. D. Strauss*, N. E. Engelbrecht, J. P. van den Berg, N. Dresing, **D. Ruffolo,** and R. Bandyopadhyay 2024, A Detailed Survey of the Parallel Mean Free Path of Solar Energetic Particle Protons and Electrons, *Astrophys. J.,* **971,** 105 (IF=4.8)
https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ad55c3)

In this work, more than a dozen solar energetic particle (SEP) events are identified where the source region is magnetically well connected to at least one spacecraft at 1 au. The observed intensity–time profiles, for all available proton and electron energy channels, are compared to results computed using a numerical one-dimensional SEP transport model in order to derive the parallel mean free paths (pMFPs) as a function of energy (or rigidity) at 1 au. These inversion results are then compared to theoretical estimates of the pMFP, using observed turbulence quantities with observationally motivated variations as input. For protons, a very good comparison between inversion and theoretical results is obtained. It is shown that the observed inter-event variations in the inversion pMFP values can be explained by natural variations in the background turbulence values. For electrons, there is relatively good agreement with pMFPs derived assuming the damping model of dynamical turbulence, although the theoretical values are extremely sensitive to the details of the turbulence dissipation range, which themselves display a high level of variation.

ในงานนี้ มีการคัดเลือกเหตุการณ์อนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ (solar energetic particles, SEPs) ซึ่งมีแหล่งกำเนิดที่เชื่อมตามเส้นสนามแม่เหล็กเป็นอย่างดีกับยานอวกาศ ณ ระยะทาง 1 au จากดวงอาทิตย์ เกินจำนวนหนึ่งโหล รูปแบบของความเข้มของ SEP ต่อเวลา สำหรับทุกช่วงพลังงานของโปรตอนและอิเล็กตรอน ถูกเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองหนึ่งมิติ เพื่อหาระยะอิสระเฉลี่ยในทิศขนานกับสนามแม่เหล็ก (parallel mean free paths, pMFPs) ต่อพลังงานหรือริจิดิตี ณ 1 au ผลอินเวอร์ชันเหล่านี้ถูกเปรียบเทียบกับค่า pMPFs ที่คาดการณ์ทางทฤษฎี โดยป้อนค่าอินพุทจากค่าความปั่นป่วนที่พบ พร้อมความแปรเปลี่ยนที่เป็นไปได้จากประสบการณ์การวัด สำหรับอนุภาคโปรตอน เปรียบเทียบได้ดีมาก และความแปรเปลี่ยนระหว่างเหตุการณ์ใน pMFP จากอินเวอร์ชันนั้น สามารถอธิบายจากความแปรเปลี่ยนของระดับความปั่นป่วนพื้นหลังทางธรรมชาติ สำหรับอนุภาคอิเล็กตรอน มีการเปรียนเทียบที่ค่อนข้างดีกับค่า pMFP จากทฤษฎีการหน่วงความปั่นป่วนตามเวลา ถึงแม้ว่าค่าทางทฤษฎีไวมาก ๆ ต่อรายละเอียดความปั่นป่วนในย่านของดิสสิเพชัน ซึ่งมีความแปรเปลี่ยนในระดับที่สูง

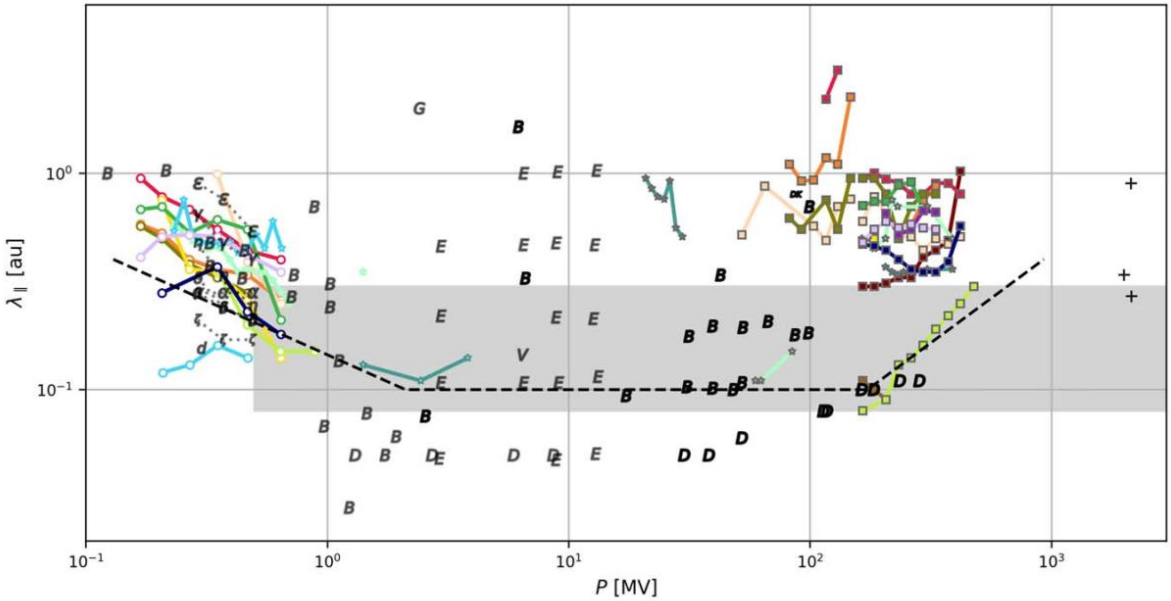

Figure 8. Summary of all the pMFP results from fitting the events listed in Table 1 as a function of their corresponding rigidity (in mega-volts). The particle species are predominantly separated into the left and right sides of the figure; the electrons are open markers on the left and the protons are closed-face markers on the right. Each color indicates an event (corresponding to the colors in Figure 3), and each marker style indicates a different spacecraft; SOHO is denoted by square markers, Wind by circles, and STA by stars. The dashed black line marking a valley shape provides the trend seen by Dröge (2000). The gray-shaded region shows the so-called Palmer consensus values (Palmer 1982). See the text for external data point details.