

Observed Fluctuation Enhancement and Departure from WKB Theory in Sub-Alfvénic Solar Wind

การสังเกตการเพิ่มความแปรปรวนและความแตกต่างจากทฤษฎี WKB ในลมสุริยะที่ช้ากว่าความเร็วอัลฟ์เวน (D. Ruffolo*, P. Thepthong, P. Pongkitiwanchakul, S. Roy, F. Pecora, R. Bandyopadhyay, R. Chhiber, A. V. Usmanov, M. Stevens, S. Badman, O. Romeo, J. Wang, J. Goodwill, M. L. Goldstein, and W. H. Matthaeus, Observed Fluctuation Enhancement and Departure from WKB Theory in Sub-Alfvénic Solar Wind, *Astrophys. J. Lett.*, **977**, L19 (8.8) <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad9727>)

In the research community focused on solar wind fluctuations, which determine the transport of space radiation to Earth, an exciting event is NASA's Parker Solar Probe mission, which launched in 2018 and subsequently had 7 Venus encounters that moved its orbit successively closer to the Sun. An important milestone of this mission is the first ever sampling of sub-Alfvénic solar wind, which is defined as solar wind at a speed V slower than the Alfvén speed V_A of waves traveling along magnetic field lines. Note that V starts from zero at the Sun and accelerates to about 400 km/s at around 20 solar radii (while the Earth orbits at 212 solar radii). Meanwhile $V_A \sim 1000$ km/s near the Sun and reduces to ~ 60 km/s at Earth orbit. Then the Alfvén Mach number is defined by $M_A = V/V_A$ and the point $M_A = 1$ where the solar wind speed rises to match the Alfvén speed is called the Alfvén point or Alfvén surface or Alfvén transition zone, and solar wind closer to the Sun with $M_A < 1$ is referred to as sub-Alfvénic.

The first author, together with US collaborators, published a major paper (Ruffolo et al. 2020) in which we analyzed PSP data and “switchbacks” in which the interplanetary magnetic field temporarily reverses. We proposed that switchbacks and solar wind turbulence are generated by shear in the solar wind velocity near the Alfvén transition zone ($M_A \approx 1$), and we predicted that when PSP would survey sub-Alfvénic wind, there should not be switchbacks according to our mechanism. And indeed, later PSP results confirmed our predictions: no switchbacks have been observed in sub-Alfvénic solar wind!

In the present work, we have analyzed PSP data on the energy per volume of magnetic and velocity fluctuations (see Figure), and we compared our results with the standard view since the dawn of the space age that most fluctuations are non-interacting fossil Alfvén waves propagating outward from the Sun. In that case, the energy density should obey WKB theory (dashed lines). When analyzing in terms of the distance r from the Sun (right panels), we are superposing numerous solar wind streams and we cannot compare directly with WKB theory. We therefore prefer to analyze the evolution of solar wind fluctuations in terms of Alfvén Mach number M_A . We find that the results

are completely incompatible with WKB theory. Therefore, solar wind fluctuation energy is not dominated by non-interacting fossil Alfvén waves, and in comparison with the evolution expected from WKB theory, there is a great enhancement in fluctuation energy at $M_A < 1$ and $M_A \approx 1$, which is consistent with our 2020 theory that fluctuations are generated by velocity shear near $M_A \approx 1$.

ในสังคมนักวิจัย ด้านความปั่นป่วนแม่เหล็กในลมสุริยะ ซึ่งกำกับการขนส่งของกัมมันตรังสีจากอวกาศสู่โลกนั้น เหตุการณ์ที่น่าตื่นเต้นเป็นภารกิจ Parker Solar Probe (PSP) ขององค์กร NASA ซึ่งขึ้นไปสู่อวกาศในปี 2018 และในเวลาต่อมาได้มีการปรับวงโคจร 7 ครั้ง เพื่อเข้าใกล้ดวงอาทิตย์มากขึ้นตามลำดับ Milestone ที่สำคัญของภารกิจนี้เป็นการสำรวจลมสุริยะแบบ sub-Alfvénic เป็นครั้งแรก ซึ่งการเป็น sub-Alfvénic นิยามจากการเทียบระหว่างความเร็วลมสุริยะ (V) และความเร็วของคลื่น Alfvén (V_A) ที่เคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็ก โดย V เริ่มใกล้ศูนย์ที่ดวงอาทิตย์ และเร็วมากขึ้นจนประมาณ 400 km/s ณ ประมาณ 20 เท่าของรัศมีดวงอาทิตย์ (เพื่อเปรียบเทียบ โลกโคจรตรงประมาณ 212 เท่าของรัศมีดวงอาทิตย์) ส่วน V_A จะสูงมาก (ระดับ ~ 1000 km/s) ใกล้ดวงอาทิตย์ และลดลงจน ~ 60 km/s ใกล้ระยะของโลก มีการนิยาม Alfvén Mach number โดย $M_A = V/V_A$ โดยจุดที่ $M_A = 1$ คือความเร็วลมสุริยะขึ้นมาจนเท่ากับความเร็ว Alfvén นั้น เรียกว่า Alfvén point หรือ Alfvén surface หรือ Alfvén transition zone และลมสุริยะที่ใกล้ดวงอาทิตย์ยิ่งกว่านั้น โดย $M_A < 1$ เรียกว่า sub-Alfvénic

ผู้เขียนชื่อแรก พร้อมเพื่อนร่วมงานในสหรัฐฯ ได้มีผลงานที่ตั้งใจในวงการนี้ (Ruffolo et al. 2020) ซึ่งวิเคราะห์ข้อมูลจาก PSP และปรากฏการณ์ switchbacks ที่สนามแม่เหล็กกลับด้านชั่วคราว โดยเราเสนอว่า switchbacks และความปั่นป่วนโดยทั่วไปเกิดจากความเฉือน (shear) ในความเร็วลมสุริยะใกล้ Alfvén transition zone ($M_A \approx 1$) โดยเราพยากรณ์ว่า เมื่อยาน PSP เข้าไปสำรวจลมสุริยะ sub-Alfvénic ไม่ควรมี switchbacks ตามกลไกของเรา ต่อมา ผลจากยาน PSP สอดคล้องกับสิ่งที่เราพยากรณ์ โดยไม่พบ switchbacks เลย

ในผลงานล่าสุด เราได้วิเคราะห์ข้อมูลจาก PSP เกี่ยวกับพลังงานความแปรปรวนในสนามแม่เหล็กและความเร็วของลมสุริยะ ดังรูป โดยเทียบกับความคิดที่แพร่หลายในวงการ ตั้งแต่ยุคเริ่มแรกของการสำรวจอวกาศ ว่าแปรปรวนนั้นส่วนใหญ่เป็นคลื่น Alfvén ที่เคลื่อนที่ออกจากดวงอาทิตย์โดยไม่มีอันตรกิริยาระหว่างทาง (non-interacting fossil Alfvén waves) โดยถ้าเป็นอย่างนั้น ควรสอดคล้องกับทฤษฎี WKB (เส้นประในรูป) เมื่อวิเคราะห์ในผลในเทอมของระยะทางจากดวงอาทิตย์ r (ด้านขวาของรูป) เรากำลังศึกษาผลจากลำธาร (streams) ต่าง ๆ ในลมสุริยะ และไม่สามารถเทียบกับทฤษฎี WKB โดยตรงได้ เราจึงได้วิเคราะห์วิวัฒนาการของความแปรปรวนในลมสุริยะในเทอมของ Alfvén Mach number M_A ด้วย จนพบว่าพลังงานความแปรปรวนไม่สอดคล้องอย่างยิ่งกับทฤษฎี WKB จึงเป็นการพิสูจน์ว่าความแปรปรวนในพบโดยทั่วไปในลมสุริยะ ไม่ใช่ non-interacting fossil Alfvén waves และถ้าเทียบกับเส้นแนวโน้มจากทฤษฎี WKB (เส้นประ) จึงแสดงว่ามีการเพิ่มพลังงานอย่างมากในระยะ $M_A < 1$ และ $M_A \approx 1$ ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอของเรา ว่าความแปรปรวนแรงขึ้นอย่างมากในช่วง $M_A \approx 1$ เนื่องจากผลของความเฉือนในความเร็วลมสุริยะ

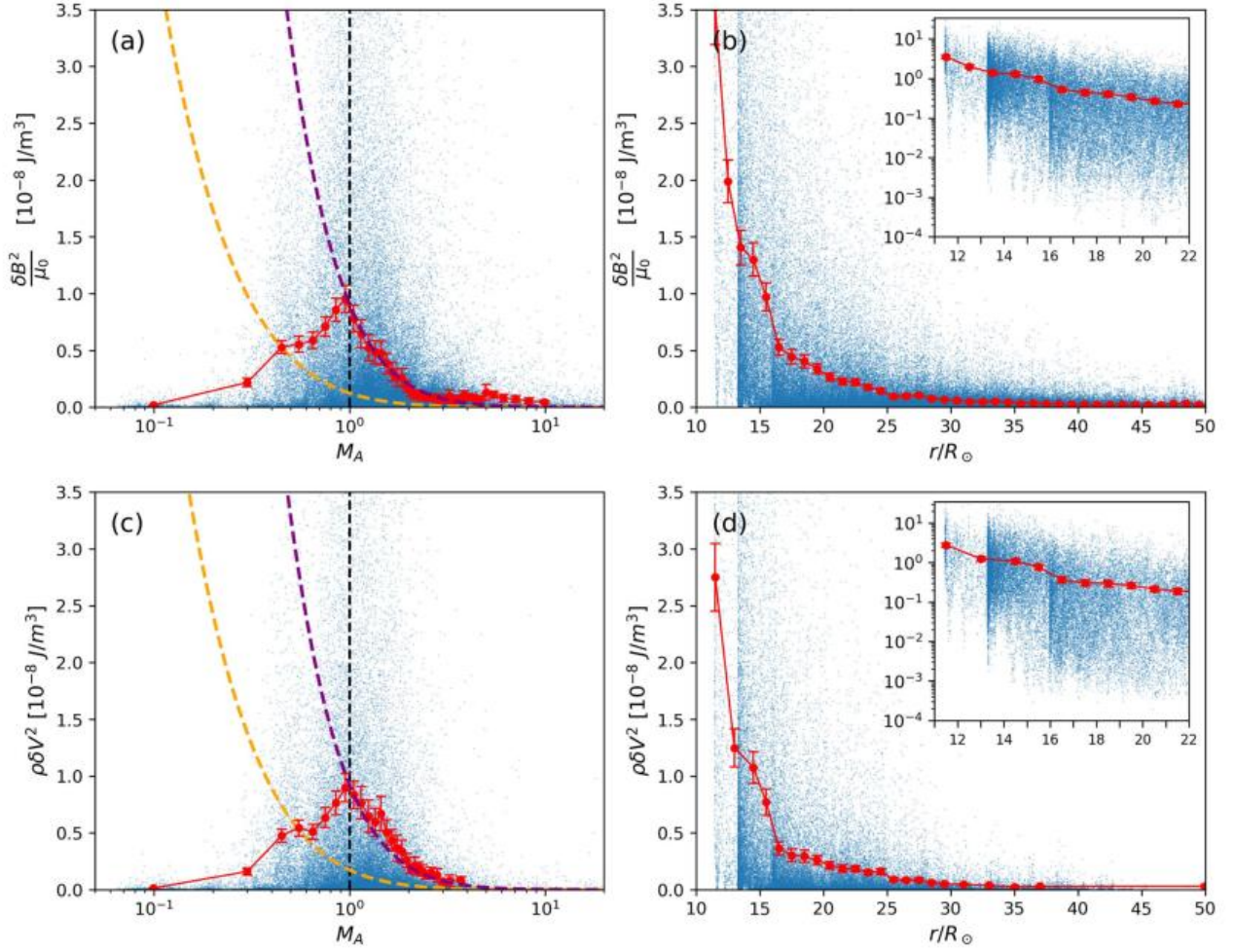


Figure 1. Solar wind fluctuation energy per unit volume vs. Alfvén Mach number M_A and radial distance r for PSP data during orbits 8–17. Each blue point shows a 1 minute averaged value. Red circles indicate the mean value in each bin, where bins are combined until they have at least 100 data points, and each error bar indicates the standard error of the mean of data in that bin. Magnetic fluctuation energy per volume: (a) $\delta B^2/\mu_0$ vs. M_A and (b) vs. r/R_\odot . Velocity fluctuation energy per volume: (c) $\rho\delta V^2$ vs. M_A and (d) vs. r/R_\odot . M_A is computed using the density data set described in the text. Velocity fluctuation is computed only when SPAN-i data satisfy quality conditions described in the text. The evolutionary trend predicted from WKB theory for “fossil” Alfvénic fluctuations that propagate outward without interaction, $\mathcal{E} \propto [M_A(M_A + 1)^2]^{-1}$ (dashed curves in panels (a) and (c)), fails to explain the PSP data for sub-Alfvénic solar wind, i.e., for $M_A < 1$. The discrepancy implies that most solar wind fluctuation energy does not originate near the solar surface but rather is strongly enhanced in situ at $0.5 \lesssim M_A \lesssim 1$.