Magnetic Switchback Formation: A Review of Proposed Mechanisms

กำเนิดการย้อนกลับของสนามแม่เหล็ก : รีวิวกลไกที่เสนอมา

(P. Wyper*, J. Squire, E. Pariat, O. V. Agapitov, J. F. Drake, N. Magyar, W. H. Matthaeus, L. Matteini, **D. Ruffolo,** V. Réville, C. Shi, M. Shoda, M. Swisdak, M. Velli, M. Akhavan-Tafti, B. Gannouni, R. Lionello, M. S. Madjarska, M. J. Owens, N. E. Raouafi, A. C. Sterling, and D. Tripathi 2026, Magnetic Switchback Formation: A Review of Proposed Mechanisms, *Space Sci. Rev.,* **222,** 43 (IF=7.4) https://doi.org/10.1007/s11214-026-01296-5)

Magnetic switchbacks are large amplitude deflections of the magnetic field within the solar wind. They are Alfvénic in character and so are associated with a spike in velocity and a generally small variation in local plasma density. Early orbits of NASA's Parker Solar Probe revealed that the solar wind near (but not very near) the Sun is dominated by these structures, and therefore, they may be playing an important role in the energy budget and acceleration of the young solar wind. In this review, we present an overview of different mechanisms that have been proposed for how switchbacks could be formed. We group the mechanisms by whether they predominantly act in the low solar atmosphere or within the solar wind (in situ). We focus on mechanisms that can create reversals of the ambient magnetic field direction and, thus, account for the most extreme perturbations. The general consensus is that mechanisms in the lower solar atmosphere do not form such reversals on their own but provide the seed perturbations, flows, or particle beams necessary for in situ mechanisms to create switchbacks within the solar wind. Switchback observations thus likely contain an imprint of the coronal source of the seed perturbation or flow, which is evolved further locally by one of several plausible in situ mechanisms. We discuss the strengths and weaknesses of each mechanism and outline future observational and theoretical tests that could help differentiate between them.

การย้อนกลับของสนามแม่เหล็กคือการเบี่ยงทิศอย่างมากของสนามแม่เหล็กในลมสุริยะ มีลักษณะอัลฟ์เวนิก จึงมาควบคู่กับการพรวดขึ้นในความเร็ว แต่มักมีการเปลี่ยนแปลงน้อยในความหนาแน่น ในการโคจรรอบดวงอาทิตย์เริ่มแรก ยาน Parker Solar Probe ขององค์กร NASA เปิดเผยว่าโครงสร้างเหล่านี้มีบทบาทมากในลมสุริยะใกล้ดวงอาทิตย์ (แต่ไม่ใกล้มาก) ดังนั้นอาจมีบทบาทสำคัญสำหรับพลังงานและการเร่งลมสุริยะในระยะนั้น ในการรีวิวครั้งนี้เราเสนอภาพรวมของกลไกต่าง ๆ ที่เสนอมาเกี่ยวกับกำเนิดการย้อนกลับ เราแบ่งกลุ่มกลไกตามการเกิดในบรรยากาศดวงอาทิตย์ชั้นต่ำ หรือภายในลมสุริยะ เราเน้นกลไกที่สร้างการย้อนกลับเกิน 90 องศาและการรบกวนที่แรงที่สุด มีการเห็นด้วยกันว่ากลไกในบรรยากาศดวงอาทิตย์ชั้นต่ำไม่ทำให้เกิดการย้อนกลับด้วยตัวเอง แต่สามารถเป็น "เมล็ด" ในแง่ของการรบกวน การไหล หรือลำอนุภาคที่จำเป็นสำหรับกลไกกำเนิดการย้อนกลับภายในลมสุริยะ ดังนั้น การสังเกตการย้อนกลับน่าจะมีร่องรอยของแหล่งในโคโรนาสำหรับเมล็ดนั้น ซึ่งมีวิวัฒนาการเพิ่มเติมด้วยหนึ่งในกลไกที่

เป็นไปได้ในลมสุริยะ เราปรึกษาจุดแข็งและจุดอ่อนของแต่ละกลไก และวิธีทดสอบในอนาคตด้วยการสังเกตหรือศึกษาทางทฤษฎีที่อาจจะช่วยแยกแยะได้

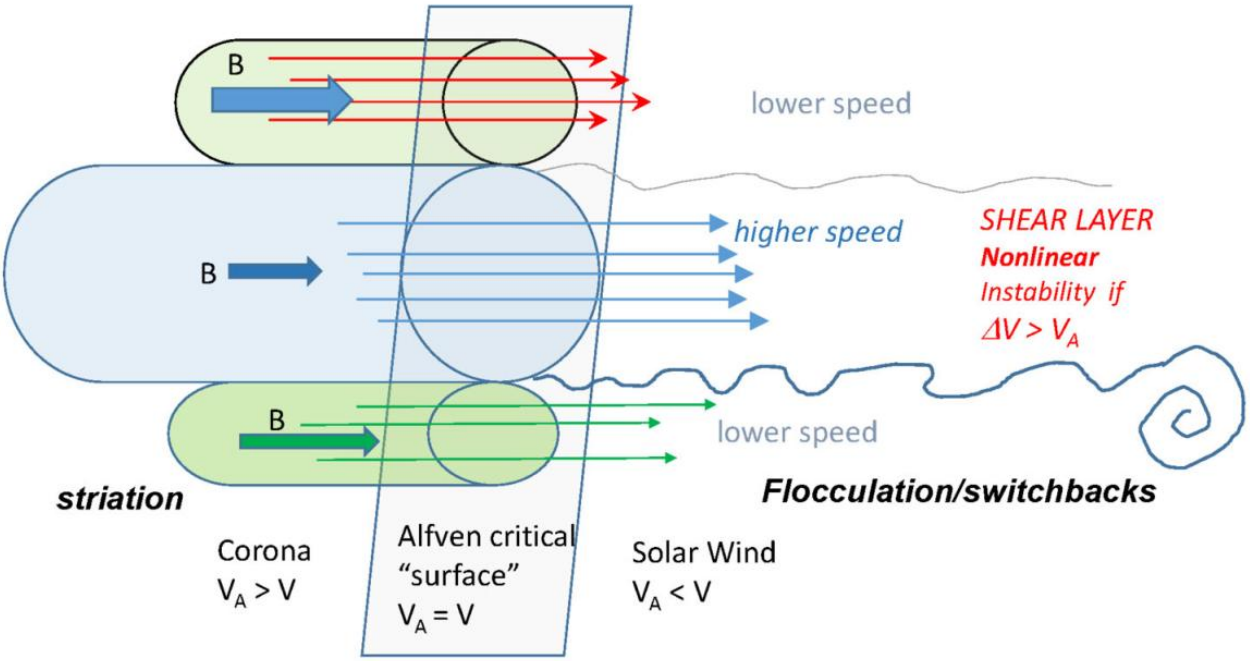

Fig. 17 Sketch showing the hypothesis that switchbacks are formed by shear-driven dynamics outside the Alfvén critical zone, see text for details. Figure reproduced and modified with permission from Ruffolo et al. (2020), copyright by AAS