Flow Crossover and Parallel Outflow during Collisionless Magnetic Reconnection

การไหลข้ามและไหลออกในทิศขนานระหว่างการเชื่อมต่อใหม่ของเส้นสนามแม่เหล็กแบบไร้การชน

(T. Pianpanit, K. Malakit*, P. Prapan, **D. Ruffolo,** P. Pongkitiwanichakul, P. Suetrong, M. Shay, and P. Cassak 2006, Flow Crossover and Parallel Outflow during Collisionless Magnetic Reconnection, *Phys. Rev. Lett.,* **136,** 085201 (IF=9.0) https://doi.org/10.1103/whtm-nvkp)

Using particle-in-cell simulations that label ions and electrons according to their initial inflow region, we find that during 2D collisionless magnetic reconnection, the bulk flow of the plasma from each inflow side crosses paths with plasma from the other inflow side and crosses the midplane before being redirected into an outflow jet. This feature, which we term “flow crossover,” implies mechanisms to generate bulk motion in a direction parallel to the magnetic field. We find that ions and electrons undergo different parallel driving mechanisms, leading to different flow crossover patterns. The parallel bulk flow for ions is generated more locally within the ion diffusion region, whereas the parallel bulk flow for electrons is mostly generated outside the electron diffusion region. Consequently, the reconnection outflows are more of a parallel flow than a perpendicular flow, especially for the electron outflow. The flow crossover and the parallel outflow patterns occur not only in symmetric reconnection but also in the more complex scenario of a guide-field asymmetric reconnection, suggesting that it is a general feature of collisionless magnetic reconnection. Because the plasma outflow on one side of the midplane mostly originates from the inflow plasma on the other side, we predict that near an asymmetric reconnection site in a collisionless space plasma, in situ observations across the outflow region could reveal locally reversed gradients in plasma properties. These results are potentially important for quantifying transport across the dayside magnetopause of Earth and other planets and the energy partition in reconnection, including electron and ion heating.

จากการจำลองแบบอนุภาคในเซลล์ด้วยการแปะฉลากไอออนและอิเล็กตรอนตามด้านที่ไหลเข้ามา เราพบว่าในการเชื่อมต่อใหม่ของเส้นสนามแม่เหล็กแบบไร้การชนนั้น กระแสพลาสมาที่ไหลเข้าจากแต่ละด้านจะข้ามกับกระแสจากอีกด้านหนึ่ง และข้ามระนาบกลาง ก่อนที่จะเปลี่ยนทิศทางเข้าสู่กระแสที่ไหลออก พฤติกรรมนี้ ซึ่งเราเรียกเป็น “การไหลข้าม” บ่งชี้ถึงกลไกที่สร้างกระแสขนานกับสนามแม่เหล็ก เราพบว่าไอออนและอิเล็กตรอนมีกลไกขับเคลื่อนในทิศขนานที่ต่างกัน ซึ่งนำไปสู่รูปแบบการไหลข้ามที่แตกต่างกัน กระแสขนานของไอออนเกิดในท้องถิ่นของเขตการฟุ้งของไอออน ขณะที่การไหลข้านของอิเล็กตรอนเกิดข้างนอกเขตการฟุ้งของอิเล็กตรอน ดังนั้น การไหลออกมีลักษณะไหลขนานมากกว่าตั้งฉาก โดยเฉพาะในกรณีของอิเล็กตรอน รูปแบบการไหลข้ามและไหลออกในทิศขนานเกิดขึ้น ทั้งในการเชื่อมต่อใหม่แบบสมมาตร และในกรณีที่สับซ้อนมากขึ้นด้วยสนามแม่เหล็กนำและรูปแบบอสมมาตร ซึ่งบ่งชี้ว่าเป็นพฤติกรรมทั่วไปของการเชื่อมต่อใหม่แบบไร้การชน เนื่องจากการไหลออกของพลาสมาในด้านหนึ่งของ

ระนาบกลางกำเนิดจากการไหลเข้าจากอีกด้านหนึ่งเป็นหลัก เราพยากรณ์ว่า ใกล้บริเวนการเชื่อมต่อใหม่แบบอสมมาตรในพลาสมาไร้การชนในอวกาศ การวัดพลาสมาบริเวณการไหลออกอาจจะพบเกรเดียนท์ในสมบัติของพลาสมาที่สลับในท้องถิ่น ผลลัพธ์เหล่านี้มีศักยภาพที่จะสำคัญในการคำนวณการขนส่งข้ามแมกนิโตพอสในด้านกลางวันของโลกและดาวเคราะห์อื่น และการแบ่งระหว่างพลังงานประเภทต่าง ๆ ในการเชื่อมต่อใหม่ รวมถึงการให้ความร้อนสู่อิเล็กตรอนและไอออน

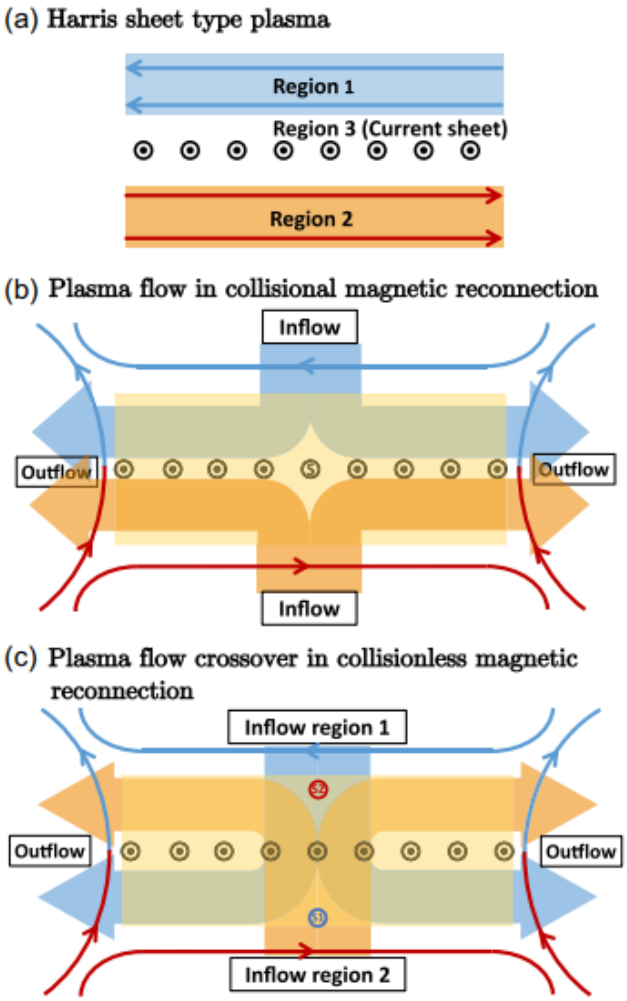

FIG. 1. (a) For a Harris sheet initial configuration, the plasma particles can be labeled by their initial region, where the inflow regions 1 and 2 are separated by the current sheet region 3. Dark-colored arrows indicate magnetic field lines. (b) Illustration of plasma flow (light-colored arrows) in collisional magnetic reconnection. The yellow rectangle indicates the diffusion region, and "S" is the stagnation point. (c) Illustration of our finding of plasma flow crossover in collisionless magnetic reconnection. Now there are separate stagnation points for flow from each inflow region, labeled "S1" and "S2," located opposite the midplane from the initial inflow region.