

โครงสร้างแผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์และขบวนที่เวียนซ้ำของ แอนไอโซโทรปีที่เพิ่มขนาดของรังสีคอสมิกกาแล็กติกในวัฏจักรสุริยะ ต่ำสุดที่ 23

Structures of Heliospheric Current Sheet and Recurrent Trains of Enhanced Anisotropy of Galactic Cosmic Rays in the 23rd Solar Minimum Cycle

ธนา ยีรัมย์,^{1*} งามพล แสงดอกไม²
Thana Yeeram,^{1*} Ngampol Saengdokmai²

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ตามรอบ 27 วันและการเวียนซ้ำของขบวนแอนไอโซโทรปีที่เพิ่มขนาดขึ้นของรังสีคอสมิกกาแล็กติก ที่สังเกตการณ์โดยสถานีตรวจวัดนิวตรอนสิรินธร ดอยอินทนนท์ ด้วยความแข็งแกร่งทางแม่เหล็กขีดเริ่ม 16.8 กิกะโวลต์ พบว่า มีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงการออกจากช่วงต่ำสุดของวัฏจักรสุริยะที่ 23 เราได้เสนอแนวคิดใหม่ว่าการลดทอนที่ไม่สมมาตรของรังสีคอสมิกเกิดจากการลอยเลื่อนของรังสีคอสมิกตามแผ่นกระแสที่ยกตัวขึ้นไม่เท่ากันในแนวละติจูดของดวงอาทิตย์ เป็นผลให้เกรเดียนต์ความหนาแน่นลัพธ์ของรังสีคอสมิก (∇n) เกิดขึ้นในทิศทางเดียว ซึ่งเกี่ยวข้องกับขบวนแอนไอโซโทรปีที่มีขนาดเพิ่มขึ้นที่ขึ้นอยู่กับการทิศทางของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ \mathbf{B} สอดคล้องกับกลไกแอนไอโซโทรปีเกรเดียนต์ $\mathbf{B} \times \nabla n$ เราสรุปว่า แผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์มีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลาสั้นในรอบ 27 วันของความเข้มและแอนไอโซโทรปีของรังสีคอสมิกกาแล็กติกในเฮลิโอสเฟียร์ด้านใน

คำสำคัญ: รังสีคอสมิก ลมสุริยะ แอนไอโซโทรปี แผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์

Abstract

The 27-day variations in the intensity and recurrent trains of enhanced diurnal anisotropy (DA) of Galactic cosmic rays (GCRs) as observed by the Princess Sirindhorn neutron monitor at Doi

¹ อาจารย์, ² นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

¹ Lecturer, ² Master degree candidate student, Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

* Corresponding author: Thana Yeeram, Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

Inthanon with cutoff rigidity of 16.8 GV are associated with changing structures of the heliospheric current sheet (HCS), especially during declining phase of the 23rd solar minimum cycle. We proposed that an asymmetric GCR modulation is contributed by GCR drift along the asymmetric helio-latitudes of the tilted HCS. The HCS drift thus provided a unidirectional latitudinal gradient of GCRs (∇n) which associated with the recurrent trains of enhanced DA. Most of the enhanced DA depend on the sign of the interplanetary magnetic field \mathbf{B} , along a $\mathbf{B} \times \nabla n$ gradient anisotropy, We conclude that the structures of the HCS play a role in the 27-day variations in GCR intensity and recurrences in diurnal variation under solar minimum conditions in the inner heliosphere.

Keywords: cosmic rays, solar wind, anisotropy, Heliospheric current sheet

บทนำ

ในช่วงที่ใกล้กิจกรรมสุริยะต่ำสุด พบว่ามีโครงสร้างของลมสุริยะขนาดใหญ่ กิ่งเสถียรในอวกาศระหว่างดาวเคราะห์ และหมุนร่วมกับดวงอาทิตย์ด้วยคาบเวลาประมาณ 27 วัน โครงสร้างเหล่านี้ประกอบด้วย 1) ลมสุริยะความเร็วสูงที่ขยายตัวออกจากหลุมโคโรนา (coronal holes) ด้วยความเร็วในแนวรัศมีประมาณ 450-800 กิโลเมตรต่อวินาที 2) บริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วม (corotating interaction regions) ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบกอดอัดที่เกิดจากลมสุริยะความเร็วสูงปะทะกับลมสุริยะความเร็วต่ำ และ 3) แผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์ (Heliospheric current sheet) ซึ่งแบ่งเฮลิโอสเฟียร์ออกเป็นบริเวณทางแม่เหล็กที่ต่างขั้วกัน โดยหลุมโคโรนาเป็นบริเวณขนาดใหญ่ของพลาสมาความหนาแน่นต่ำบนดวงอาทิตย์ และสนามแม่เหล็กเปิดออกสู่อวกาศ กล่าวคือเป็นสนามขั้วเดี่ยวที่เข้าหรือออกจากดวงอาทิตย์ที่มีแผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์คั่นกลาง รูปแบบโดยรวมของหลุมโคโรนาและขั้วทางแม่เหล็กจะถูกจัดเป็นโครงสร้างในอวกาศเป็นสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ที่หมุนไปกับดวงอาทิตย์¹ ด้วยรูปแบบเซ็คเตอร์ที่สลับกันไปของสนามแม่เหล็กที่ชี้เข้าหาหรือออกจากดวงอาทิตย์เมื่อสังเกตจากโลก

การแปรผันประจำวันของรังสีคอสมิกกาแล็กติกได้รับผลกระทบจากโครงสร้างลมสุริยะที่หมุนไปกับดวงอาทิตย์ ด้วยลักษณะแนวโน้มที่เวียนซ้ำ² การแปรผันประจำวันเกิดขึ้นจากการหมุนรอบตัวเองของโลกในขณะที่ทิศทางในการวัดของเครื่องมือวัดบนพื้นโลก เช่น เครื่องตรวจวัดนิวตรอน กวาดผ่านท้องฟ้าด้วยคาบเวลา 1 วัน จากการศึกษาพบว่า รังสีคอสมิกที่มีพลังงานถึง 500 GeV ได้รับผลกระทบจากดวงอาทิตย์และสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ซึ่งบ่งชี้ถึงความไม่สม่ำเสมอตามทิศทางหรือแอนไอโซโทรปีประจำวัน (diurnal anisotropy) ที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีคอสมิก³ เวกเตอร์แอนไอโซโทรปีประจำวันโดยเฉลี่ยเป็นผลมาจากความสมดุลระหว่างการพาในแนวรัศมีของอนุภาครังสีคอสมิกโดยลมสุริยะและการพุ่งเข้าของอนุภาครังสีคอสมิกกาแล็กติกตามเส้นสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์^{3,4} ในกรอบที่หมุนพร้อมไปกับดวงอาทิตย์พบว่า การพาและการพุ่งในแนวขนาน (กล่าวคือ การพุ่งที่ขนานไปกับสนามแม่เหล็กระดับมหภาค) สามารถที่จะหักล้างกันไปได้ ทำให้การกระจายตัวของรังสีคอสมิกกาแล็กติกแทบจะไม่มีกรไหลสุทธิอยู่เลย ส่วนในกรอบอ้างอิงของโลกนั้น ผู้สังเกตจะเห็นการไหลสุทธิของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่หมุนร่วมซึ่งเข้าสู่โลกจากทิศทาง 18 ชั่วโมงท้องถิ่นของผู้สังเกต ถ้า

ปราศจากผลการลอยเลื่อน (drift) หรือการพุ่งในแนวตั้งฉาก จะสังเกตเห็นกระแสอนุภาคตั้งที่เป็นแอนไอโซโทรปีที่มีหมุนร่วมโดยเฉลี่ยไปตามทิศทางของวงโคจรโลก การแปรผันแบบชั่วคราวอาจส่งผลกระทบต่อทิศทางของแอนไอโซโทรปีดังกล่าว และบางครั้งอาจสร้างขบวน (train) ของแอนไอโซโทรปีประจำวันที่ยาวตัวมากและเวียนซ้ำแบบรอบ 27 วันซึ่งคงอยู่เป็นเวลาหลายวัน^{5,6} งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาวิเคราะห์ขบวน แอนไอโซโทรปีที่เพิ่มขนาดในช่วงที่กิจกรรมบนดวงอาทิตย์มีค่าต่ำสุด (Solar minimum conditions) ของวัฏจักรสุริยะที่ 23 เพื่อศึกษากลไกที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มและแอนไอโซโทรปีของรังสีคอสมิกกาแล็กติกในระหว่างเฟสต่ำสุดของวัฏจักรสุริยะ เพื่อจะช่วยให้ทราบถึงธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลงในระยะสั้นที่มีต่อสภาพอวกาศที่อยู่ใกล้โลกได้

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ข้อมูลรังสีคอสมิกและวิธีวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกได้มาจากสังเกต โดยสถานีตรวจวัดนิวตรอนสิรินธร ซึ่งภายในได้บรรจุหลอดวัดนิวตรอนจำนวน 18 หลอด ชนิดมาตรฐาน NM64 สถานีตรวจวัดนิวตรอนสิรินธรตั้งอยู่บริเวณยอดดอยอินทนนท์ ประเทศไทย ณ ความสูงประมาณ 2,560 เมตร และมีพิกัดภูมิศาสตร์ที่ 18.59 องศาเหนือ และ 98.49 องศาตะวันออก ค่าขีดเริ่มความเข้มเกร็งทางแม่เหล็กในแนวตั้งขนาด 16.8 GV เป็นค่าสูงสุดสำหรับสถานีตรวจวัดนิวตรอนใดๆ ในโลก

ข้อมูลการนับนิวตรอนรายชั่วโมงที่ผ่านการแก้ความดันอากาศแล้วในช่วงตุลาคม 2007 ถึง ตุลาคม 2010 ถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (harmonic analysis) โดยการกำจัดค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ราย 24 ชั่วโมงออกไป ในวันที่มีข้อมูลขาดหายไปมากกว่า 3 ชั่วโมงจะไม่ถูก

นำมาใช้ในการวิเคราะห์ และข้อมูลที่ว่างถึง 3 ชั่วโมงจะถูกเติมเต็มด้วยการอินเทอร์โพลชัน (interpolation)

ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับแต่ละวัน (เวลาสากล, UT) นั้น อัตราการนับย่อยๆ F จะเป็นฟังก์ชันกับเวลา แล้วถูกพิตกับฟังก์ชันไซน์ของความถี่ $\omega = 2\pi / 8.64 \times 10^4$ วินาที หรือ 2π เรเดียนต่อวัน

$$F(t) = D_x \cos \omega t + D_y \sin \omega t \quad (1)$$

เมื่อ D_x และ D_y คือองค์ประกอบของแอนไอโซโทรปีประจำวัน และ t คือเวลาที่เริ่มต้นของวันในหน่วย UT จากวิธีนี้ เราสามารถบ่งบอกแอมพลิจูดลัพท์และเวลาที่รังสีคอสมิกเข้ามามากที่สุด (เฟส) ของแอนไอโซโทรปีประจำวันของรังสีคอสมิกกาแล็กติกได้

ข้อมูลพลาสมาระหว่างดาวเคราะห์

ใช้ข้อมูลรายชั่วโมงของค่าเฉลี่ยพลาสมาในอวกาศระหว่างดาวเคราะห์จากเครื่องมือ MAG และ SWEAPM ของยานอวกาศ Advanced Composition Explorer (ACE) และ OMNIWeb เรานิยามเซ็คเตอร์หัวแม่เหล็กของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์โดยการใช้องค์ประกอบเฉลี่ยรายชั่วโมงของสนามแม่เหล็กในพิกัด Geocentric Solar Ecliptic (GSE) ที่ซึ่งแกน x ชี้จากโลกไปยังดวงอาทิตย์ แกน z ชี้ไปยังขั้วเหนือของระนาบสุริยะวิถี และแกน y ชี้ไปยังทิศที่ทำให้ระบบมือขวาสมบูรณ์ ส่วนเซ็คเตอร์ของสนามแม่เหล็กที่ชี้เข้าหาดวงอาทิตย์และออกจากดวงอาทิตย์ นิยามสัมพันธ์กับมุมปกติ 45 องศาของทิศทางสนามแม่เหล็กเฉลี่ยแบบเกลียวพาร์กเกอร์ (Parker spiral) ในระนาบสุริยะวิถี กล่าวคือสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ถูกกำหนดว่ามีทิศชี้เข้าหาเมื่อ $B_x > B_y$ และมีทิศชี้ออกเมื่อ $B_y > B_x$ การยกตัวของแผ่นกระแสได้รับการคำนวณจากการวิเคราะห์พื้นผิวกำเนิดสนามศักย์ (Potential Field Source Surface; PFSS) ของ Wilcox Solar Observatory (WSO)

magnetograms สนามแม่เหล็กจากโคโรนาถูกคำนวณจากการสังเกตสนามโฟโตสเฟียร์ของดวงอาทิตย์ด้วยแบบจำลองสนามศักย์ โดยสนามดังกล่าวจะถูกบังคับให้อยู่ในแนวรัศมี ณ พื้นผิวกำเนิด ณ ตำแหน่ง 2.5 เท่าของรัศมีดวงอาทิตย์ เพื่อประมาณผลกระทบของลมสุริยะที่กำลังเร่งที่มีต่อโครงสร้างสนามดังกล่าว⁷

ผลการทดลอง

การแปรผันของแอนไอโซโทรปีประจำวันของรังสีคอสมิกกัลกติกในรอบ 27 วัน

เราพบการเพิ่มขนาดแอนไอโซโทรปีที่เกิดขึ้นเวียนซ้ำ (แอมพลิจูด $\geq 0.25\%$ ต่อเนื่องกันตั้งแต่ 7 วัน) ในหลายรอบการหมุนของดวงอาทิตย์ในช่วงปี 2007-2008 โดยแอนไอโซโทรปีประจำวันมีแนวโน้มที่ขยายตัวหรือลดขนาดตามทิศทางของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ที่สังเกตได้ในแต่ละรอบการหมุนของดวงอาทิตย์เกี่ยวข้องกับโครงสร้างเอียงของหลุมโคโรนาที่เป็นสาเหตุของการเพิ่มเกรเดียนต์รังสีคอสมิกไปทางทิศใต้แล้วส่งผลกระทบต่อ การเพิ่มหรือลดขนาด

ของแอนไอโซโทรปี⁶ ในปี 2009 ไม่พบขบวนการแอนไอโซโทรปีที่ขยายตัว อย่างไรก็ตามในช่วงปี 2010 ได้พบขบวนการแอนไอโซโทรปีที่ขยายตัวมากดังแสดงใน Figure 1 และใน Table 1 โดยมีแอมพลิจูดโดยเฉลี่ยสูงกว่าในช่วงปี 2007-2008 และพบการเปลี่ยนแปลงอยู่ 3 รูปแบบคือ (ก) การขยายตัวหนึ่งครั้ง ที่ส่วนใหญ่อยู่ ในทิศสนามแม่เหล็กพุ่งเข้าดวงอาทิตย์ในระหว่าง การหมุนครึ่งต้น (Carrington Rotation ระยะเวลา 27.23 วัน) CR2092-CR2093 (ข) การขยายตัวซ้ำๆ ที่ส่วนใหญ่อยู่ในทิศสนามแม่เหล็กพุ่งออกจากดวงอาทิตย์ ระหว่าง CR2093-CR2096 (ค) การขยายตัวซ้ำๆ ที่ยึดออกทั้งในทิศสนามแม่เหล็กเข้าและออกดวงอาทิตย์ในระหว่าง CR2097-CR2098 และเป็นที่น่าสนใจว่า ขบวนการแอนไอโซโทรปี ที่เพิ่มขนาดขึ้น (บ่งชี้ด้วยลูกศร) ส่วนใหญ่ไม่ได้อยู่ในบริเวณของความสุริยะความเร็วสูงที่มาจากหลุมโคโรนา บ่งชี้ว่า ลมสุริยะความเร็วสูงไม่น่าจะเป็นสาเหตุของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแอนไอโซโทรปี

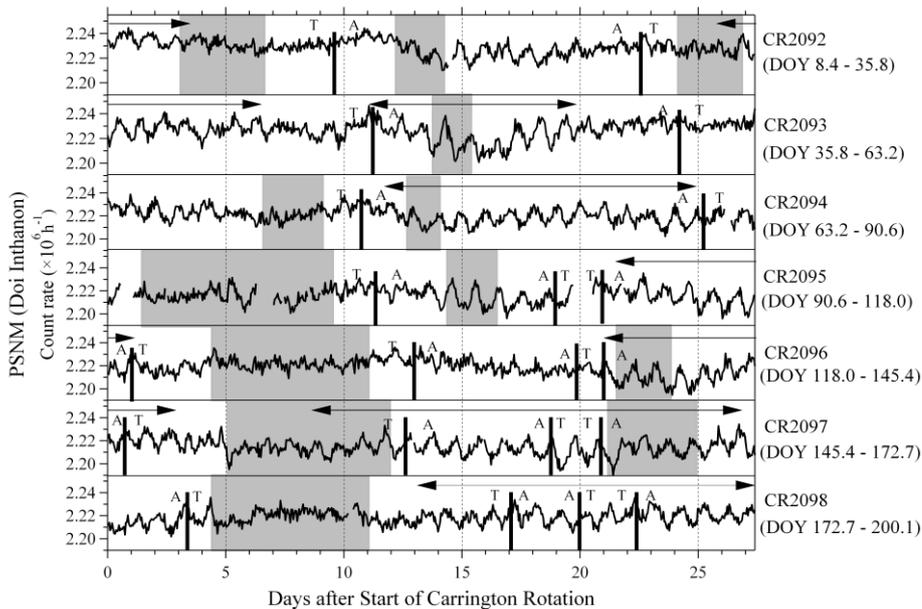


Figure 1 Count rate of the Princess Sirindhorn Neutron Monitor at Doi Inthanon as a function of time, showing recurrent trains of enhanced diurnal anisotropy (DA) in 2010, indicated by arrows,

compared with magnetic sectors (toward, T, or away, A) for seven successive Carrington rotations, CR2092-2098. Shaded areas represent HSSs with solar wind speed $\geq 450 \text{ km s}^{-1}$.

การแปรผันของแอมพลิจูดแอนไอโซโทรปีใกล้เคียงกับแผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์ มีค่าต่ำกว่าบริเวณใกล้เคียง แต่มักจะพบฟลักซ์รังสีคอสมิกปริมาณมาก และบริเวณกึ่งกลางของแต่ละเซ็กเตอร์แม่เหล็กมักพบการเพิ่มของแอนไอโซโทรปีอย่างมากซึ่งเป็นบริเวณเดียวกับที่ฟลักซ์โดยเฉลี่ยของรังสีคอสมิกมีปริมาณลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งจาก CR2092-CR2096 จากลักษณะดังกล่าวบ่งชี้ว่า ฟลักซ์รังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้ทั่วโลกไม่ถูกลดทอนที่บริเวณแผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์

แต่ฟลักซ์รังสีคอสมิกจะถูกลดทอนเมื่อโลกอยู่ในตำแหน่งบนหรือล่างของแผ่นกระแส โดยเฉพาะบริเวณกึ่งกลางเซ็กเตอร์ ดังนั้นการยกตัวของแผ่นกระแสอาจมีผลต่อปริมาณฟลักซ์รังสีที่ลดลง และสิ่งที่น่าสนใจที่สุดก็คือแอนไอโซโทรปีกลับมีขนาดมากที่สุดบริเวณกึ่งกลางเซ็กเตอร์แล้วค่อยๆ ลดขนาดลงสู่บริเวณรอยต่อเซ็กเตอร์ แสดงให้เห็นถึงกลไกแบบไล่ระดับ เมื่อพิจารณาผลของเกรเดียนต์ในแนวละติจูดของอนุภาครังสีคอสมิกต่อแอนไอโซโทรปี

Table 1 Trains of enhanced diurnal anisotropy at Doi Inthanon during 2010

Day of year	Duration (day)	Diurnal variation (%)		Phase	Magnetic sector
		Max	Mean	Mean \pm s.d. (LT)	
1-11	11	0.38	0.30	15.2 \pm 1.3	<i>Toward & Away</i>
34-42	9	0.53	0.39	16.8 \pm 1.6	<i>Toward</i>
48-56	9	0.75	0.55	15.9 \pm 1.0	<i>Mostly in Away</i>
75-88	14	0.54	0.42	17.9 \pm 1.0	<i>Mostly in Away</i>
112-119	8	0.63	0.55	16.3 \pm 1.3	<i>Mostly in Away</i>
139-148	10	0.64	0.46	16.8 \pm 1.9	<i>Mostly in Away</i>
154-172	19	0.74	0.49	17.3 \pm 1.1	<i>Toward & Away</i>
186-201	16	0.50	0.40	16.9 \pm 2.1	<i>Toward & Away</i>
250-259	10	0.70	0.60	18.1 \pm 2.1	<i>Mostly in Toward</i>
Note: Italicized data refer to recurrent trains					

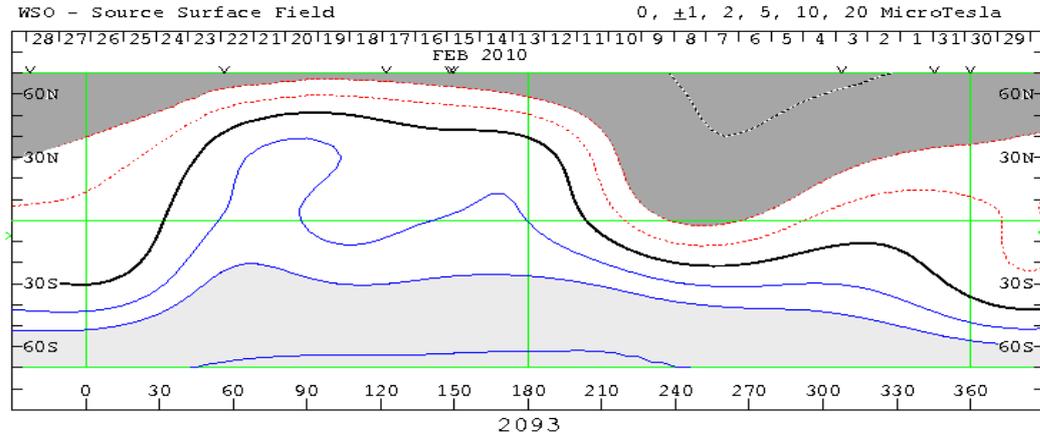


Figure 2 Reversed time plot of a Wilcox Solar observatory (WSO) synoptic chart for Carrington rotation (CR) 2093. Thick line represents the heliospheric current sheet (HCS). Above and below the HCS indicate the Toward and Away sectors, respectively.

เนื่องจากแอนไอโซโทรปีประจำวันสังเกตได้ในระนาบสุริยะวิถีซึ่งได้จากปริมาณเกรเดียนต์ในแนวละติจูดในรังสีคอสมิกกัลเล็คติก อาจเขียนได้เป็น

$$A_e = r_g \frac{B_e}{B} G_z \quad (2)$$

เมื่อ e แทนระนาบสุริยะวิถี (ระนาบ x,y) และ $G_z = (\partial n / \partial x) / n$ คือเกรเดียนต์ย่อยในแนวละติจูด จะเห็นได้ว่า เมื่อรังสีคอสมิกมีรัศมีโร r_g เท่ากัน ในสนามแม่เหล็กที่ราบเรียบ แอนไอโซโทรปีจะแปรผันตรงกับเกรเดียนต์ในแนวละติจูด โดยการลอยเลื่อนตามแผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์ อาจมีผลมากในกรณีนี้ เนื่องจากเมื่อแผ่นกระแสยกตัวสูงในทิศทางหนึ่งๆ รังสีคอสมิกที่เคลื่อนที่ไปตามแผ่นกระแสเข้าสู่ระบบสุริยะ จะถูกลดทอนในทิศทางนั้นซึ่งลดทอนได้มากที่สุดบริเวณกึ่งกลางของเซกเตอร์แม่เหล็ก จึงเป็นผลให้เกิดเกรเดียนต์ไปในทิศทางตรงกันข้ามซึ่งมีความหนาแน่นของรังสีคอสมิกมากกว่า เช่น ใน CR2093 ดัง Figure 2 เป็นตัวอย่างของเหตุการณ์ที่แอนไอโซโทรปีประจำวันเพิ่มขึ้นสูงสุด เมื่อแผ่นกระแสยกตัวขึ้นไปทางเหนือของดวงอาทิตย์ ทำให้เกรเดียนต์รังสีคอสมิกมีทิศไปทางใต้ พร้อมทั้งสนามแม่เหล็กมีทิศชี้ออกไปจากดวงอาทิตย์ จึง

มีฟลักซ์เสริมเข้ามาในทิศ 18 LT ตามกลไกแอนไอโซโทรปีเกรเดียนต์ $\mathbf{B} \times \nabla n$ แอนไอโซโทรปีประจำวันจึงขยายตัวขึ้นนั่นเอง และเมื่อพิจารณาในกรณีที่แผ่นกระแสยกตัวไปทางใต้ จะเกิดเกรเดียนต์ไปในทางเหนือของดวงอาทิตย์ และเมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศชี้เข้าหาดวงอาทิตย์ ย่อมทำให้เกิดฟลักซ์เสริมเข้ามาในทิศ 18 LT เช่นเดียวกัน ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการสังเกตการณ์ใน CR2092-CR2098

สรุปและวิจารณ์ผล

การเวียนซ้ำของการขยายตัวของแอนไอโซโทรปีประจำวันในช่วงปี 2010 ยังไม่เป็นที่เข้าใจ เราจึงได้นำเสนอแนวคิดว่า ปรากฏการณ์การเพิ่มหรือลดขนาดแอนไอโซโทรปีประจำวันในระยะที่ออกจากช่วงต่ำสุดของวัฏจักรสุริยะอาจเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของแผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์ในอวกาศระหว่างดาวเคราะห์ที่ยกตัวสูงและเกิดขึ้นเวียนซ้ำตามรอบการหมุนของดวงอาทิตย์ และโครงสร้างดังกล่าวได้ส่งผลต่อการเพิ่มขนาดของแอนไอโซโทรปีได้สูงกว่าที่พบในช่วงปี 2007-2008 กล่าวคือจากการสังเกตการณ์โดยยานอวกาศใกล้โลก พบกระแสลมสุริยะความเร็วสูงและบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมจำนวนน้อยมาก และไม่ได้

เกิดขึ้นเวียนซ้ำในช่วงปี 2010⁸ ซึ่งต่างกับในช่วงปี 2007-2008 ที่พบโครงสร้างของลมสุริยะความเร็วสูงและบริเวณอันตรกิริยาหมุนที่เวียนซ้ำจำนวนมาก และแผ่นกระแสมีความราบเรียบมากกว่า จากการแปรผันความเข้มและแอนไอโซโทรปีของรังสีคอสมิกกาแล็กติก บ่งชี้ว่า การลอยเลื่อนตามแผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์ส่งผลต่อการขนส่งและลดทอนอนุภาครังสีคอสมิกพลังงานสูง ณ อวกาศใกล้โลก

แผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์เป็นโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่และมีความสำคัญในเฮลิโอสเฟียร์ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์หรือความเข้มรังสีคอสมิก การทำนายผลการลอยเลื่อนต่อการลดทอนรังสีคอสมิกที่สำคัญคือ รังสีคอสมิกที่ส่วนใหญ่เป็นโปรตอนจะเข้าสู่เฮลิโอสเฟียร์มาตามแผ่นกระแสที่วางตัวอยู่ใกล้ระนาบศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์ในระหว่าง $qA < 0$ และมาจากทิศทางเชิงขั้วดวงอาทิตย์ในระหว่าง $qA > 0$ ซึ่งการเดินทางของรังสีคอสมิกใช้เวลามากขึ้นในระหว่าง $qA < 0$ เนื่องจากความเป็นคลื่นของแผ่นกระแส ทำให้ความล่าช้า (time lag) มากขึ้น

หลักฐานเชิงทฤษฎีของผลกระทบของแผ่นกระแสต่อการแปรผันของรังสีคอสมิกกาแล็กติก อาจเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองของสนามแม่เหล็กในเฮลิโอสเฟียร์ และแผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์ที่เกิดจากการขยายตัวของลมสุริยะโดยมีพื้นผิวเป็นระนาบที่เอียงทำมุมกับศูนย์สูตรดวงอาทิตย์⁹ โดยพบว่าความเอียงหรือความเป็นคลื่น (waviness) ของแผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์ที่แปรเปลี่ยนจากช่วงต่ำสุดไปยังช่วงสูงสุดของวัฏจักรสุริยะ มีผลต่อการลดทอนความเข้มของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่เดินทางเข้าสู่ระบบสุริยะ^{10,11} ปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกและความเอียงของแผ่นกระแสในระหว่างช่วง $qA < 0$ มีความเด่นชัด¹² โดยแผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์ในระหว่างช่วงต่ำสุดนี้มีมุมเอียงเพิ่มขึ้นมากกว่าสองวัฏจักรที่แล้ว

แบบจำลองการลอยเลื่อนชี้ว่า การลดทอนรังสีคอสมิกโดยแผ่นกระแสจะมีผลเด่นชัดในช่วงที่ $qA < 0$ ซึ่งเป็นช่วงการศึกษาของงานวิจัยนี้ เนื่องจากอนุภาคเคลื่อนที่โดยการลอยเลื่อนมาตามแผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์ จึงส่งผลให้รังสีคอสมิกใช้เวลาเพิ่มขึ้นตามเส้นทางนี้ เมื่อความเอียงของแผ่นกระแสมากขึ้น นำไปสู่การหน่วงอะเดียบาติกมากขึ้น ทำให้ฟลักซ์ของรังสีคอสมิกลดลง โครงสร้างของแผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์ในอวกาศระหว่างดาวเคราะห์เกี่ยวข้องกับเกรเดียนต์รังสีคอสมิกในแนวละติจูดจากการแปรผันของรังสีคอสมิกโดยกลไกการลอยเลื่อน เมื่อรังสีคอสมิกเคลื่อนที่ผ่านแผ่นกระแสนี้ จะกลับทิศหรือเปลี่ยนเฟสไป 180 องศา แล้วอนุภาคจะลอยเลื่อนไปตามแผ่นกระแสเข้าไปเข้ามา เราจึงพิจารณาการโต้ตอบที่ส่งผลต่อการลดทอนรังสีคอสมิก Burger และคณะ¹³ ได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความยาววิถีของรังสีคอสมิกที่ลอยเลื่อนไปตามแผ่นกระแสสามารถหาได้ในพจน์ของมุมเอียงของแผ่นกระแส โดยการเพิ่มขึ้นของความยาววิถีได้ลดขนาดของความเร็วยลอยเลื่อนตามแผ่นกระแส จึงนำไปสู่การลดลงของความเข้มโปรตอนใกล้โลกในช่วงที่ $qA < 0$ แล้วลอยเลื่อนสู่บริเวณขั้วเฮลิโอสเฟียร์ ในขณะที่ช่วง $qA > 0$ ไม่ได้รับผลกระทบดังกล่าวเพราะอนุภาคไม่ลอยเลื่อนตามแผ่นกระแส¹¹ จากกลไกดังกล่าวจึงอาจอธิบายถึงการลดทอนรังสีคอสมิกตามแผ่นกระแสที่ยกตัวสูงในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เช่น การยกตัวมากของแผ่นกระแสไปทางเหนือ ย่อมทำให้ความยาววิถีของรังสีคอสมิกเพิ่มขึ้นในทิศเหนือ ความเร็วยลอยเลื่อนตามแผ่นกระแสลดลง ความเข้มรังสีคอสมิกจึงลดลงในทางเหนือ ในขณะที่ความเข้มรังสีคอสมิกทางตอนใต้มีมากกว่า จึงพบเกรเดียนต์ความหนาแน่นรังสีคอสมิกไปทางทิศใต้ เป็นต้น และเกรเดียนต์รังสีคอสมิกได้ส่งผลให้เกิดขบวนการแอนไอโซโทรปีที่มีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นและเวียนซ้ำด้วยกระบวนการเกรเดียนต์ $\mathbf{B} \times \nabla n$

การที่ทิศทางเกรเดียนต์ขึ้นอยู่กับการยกตัวของแผ่นกระแสพบว่าสอดคล้องกับการสังเกตการณ์ที่พบความไม่สมมาตร (เหนือ-ใต้) ในการลดทอนรังสีคอสมิกในเฮลิโอสเฟียร์จุดในระหว่างการกวาดไปของยาน Ulysses^{14,15} Simpson และคณะ¹⁶ ได้สรุปว่า ฟลักซ์รังสีคอสมิกส่วนเกินที่พบทางขั้วเหนือของเฮลิโอสเฟียร์เมื่อเปรียบเทียบกับทางขั้วใต้ เป็นผลมาจากการความไม่สมมาตรที่เลื่อนมาทางทิศใต้ 10 องศาของสมมาตรการลดทอนโดยเฮลิโอสเฟียร์ในมาตราขนาดใหญ่ ไม่ใช่ขนาดและค่าเบี่ยงเบนของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ และมีข้อสันนิษฐานว่า แผ่นกระแสที่เอียง¹⁶ และเลื่อนไปทางใต้¹⁷ อาจมีผลต่อเกรเดียนต์ในแนวละติจูดของรังสีคอสมิก ผู้วิจัยยังได้ทำนายการกระจายตัวของรังสีคอสมิกพลังงานสูงในวงจักร $A < 0$ โดยใช้เงื่อนไขเดียวกันกับการกวาดไปของยาน Ulysses พบว่าได้ผลที่แตกต่างจากวงจักร $A > 0$ เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ของรังสีคอสมิกเทียบกับแผ่นกระแส กล่าวคือ ที่พลังงาน 2.2 GeV (อยู่ในอันดับของงานวิจัยนี้) พบว่า เกรเดียนต์ในแนวละติจูดระหว่างขั้วทั้งสองกับศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์มีทิศเข้าหาแผ่นกระแส แต่มีลักษณะไม่สมมาตรอย่างชัดเจน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ทุนวิจัยนี้ ศาสตราจารย์ ดร. David Ruffolo ที่ได้อำนวยความสะดวกรังสีคอสมิกที่ตรวจวัดโดยสถานีตรวจวัดนิวตรอนสิรินธร ดอยอินทนนท์ รวมทั้ง ดร. Alejandro Saiz สำหรับการคำนวณฮาร์โมนิกส์

เอกสารอ้างอิง

- Hundhausen AJ, Sime DG, Hansen RT, Hansen SF. Polar coronal holes and cosmic-ray modulation. *Sci* 1980;207:761-3.
- Pomerantz MA, Duggal SP. The cosmic ray solar diurnal anisotropy. *Space Sci Rev* 1971; 12:75-130.
- Rao UR. Solar modulation of Galactic cosmic radiation. *Space Sci Rev* 1972;12:719-809.
- Forman MA, Gleeson LJ. Cosmic ray stream-ing and anisotropies. *Astrophys Space Sci* 1975;32:77-94.
- Duldig M L, Humble JE. Enhanced cosmic ray diurnal variations in Mawson and Hobart neutron monitor and underground data records. *Proceedings of the Astronomical Society of Australia* 1990;8:268-73.
- Yeeram T, Ruffolo D, Sáiz A, Kamyran N, Nutaro T. Corotating solar wind structures and recurrent trains of enhanced diurnal variation in Galactic cosmic rays. *ApJ* 2014;784(2):id. 136, 11 pp.
- Schatten KH, Wilcox JM, Ness N.F. A model of interplanetary and coronal magnetic fields. *Sol Phys* 1969;6:442-455.
- Yeeram T. Effects of corotating solar wind structures on 27-day variations in Galactic cosmic rays observed by the Princess Sirindhorn neutron monitor. 2014. PhD Thesis.
- Jokipii JR, Thomas B. Effects of drift on the transport of cosmic rays. IV - Modulation by a wavy interplanetary current sheet. *ApJ* 1981;243:1115-22.
- Kóta J. Drift - the essential process in losing energy. *Proceedings of 16th ICRC* 1979;3:13.

11. Kóta J, Jokipii JR. Effects of drift on the transport of cosmic rays. VI - A three-dimensional model including diffusion. *ApJ* 1983;265:573-81.
12. Aslam OPM, Badruddin. Solar modulation of cosmic rays during the declining and minimum phases of Solar cycle 23: comparison with past three Solar cycles. *Sol Phys* 2012;279(1):269-88.
13. Burger R A, Moraal H, Potgieter MS. On the Inclusion of a wavy neutral sheet in two-dimensional drift models. *Proceedings of the 20th ICRC* 1987;3:283.
14. Simpson JA, Zhang Ming, Bame S. A Solar polar north-south asymmetry for cosmic-ray propagation in the heliosphere: the ULYSSES pole-to-pole rapid transit. *ApJ* 1996;465:L69-74.
15. Heber B, Dröge W, Kunow H, Müller-Mellin R, Wibberenz G, Ferrando P, et al. Spatial variation of ~106 MeV proton fluxes observed during the Ulysses rapid latitude scan: Ulysses COSPIN/KET results. *JGR* 1996;23:1513-16
16. Potgieter MS, Burger RA, Ferreira SES. Mod-ulation of cosmic rays in the heliosphere from Solar minimum to maximum: a theoretical perspective. *Space Sci Rev* 2001;97(1/4):295-307.
17. Smith EJ, Jokipii JR, Kóta J, Lepping RP, Szabo A. Evidence of a north-south asymmetry in the heliosphere associated with a southward displacement of the heliospheric current sheet *ApJ* 2000;533(2):1084-9.