



การลดแบบฟอร์บุชที่เวียนซ้ำของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกในวัฏจักรทางแม่เหล็กสุริยะแบบ
บวกและแบบลบ

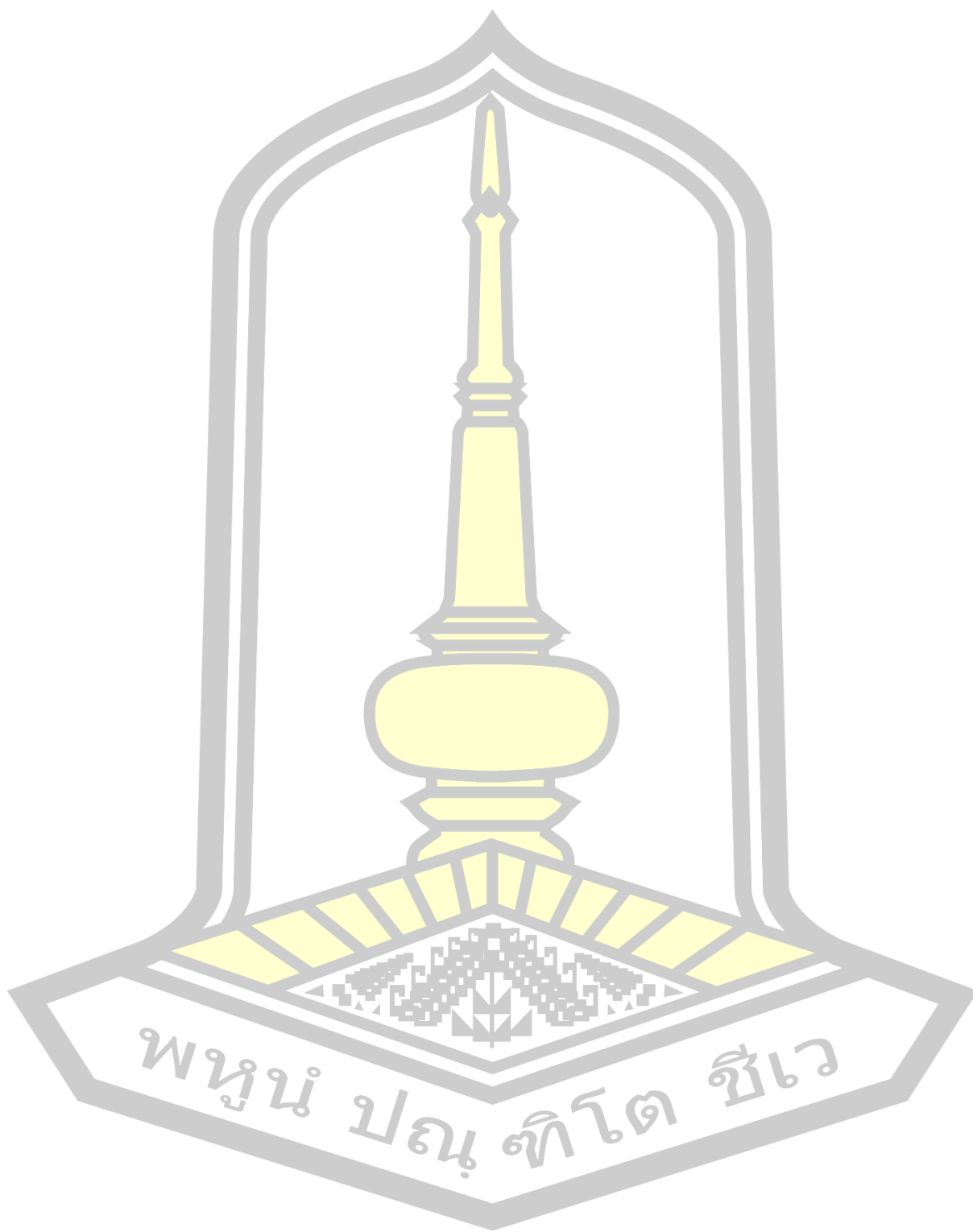
วิทยานิพนธ์
ของ
อรอมา กัลยา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

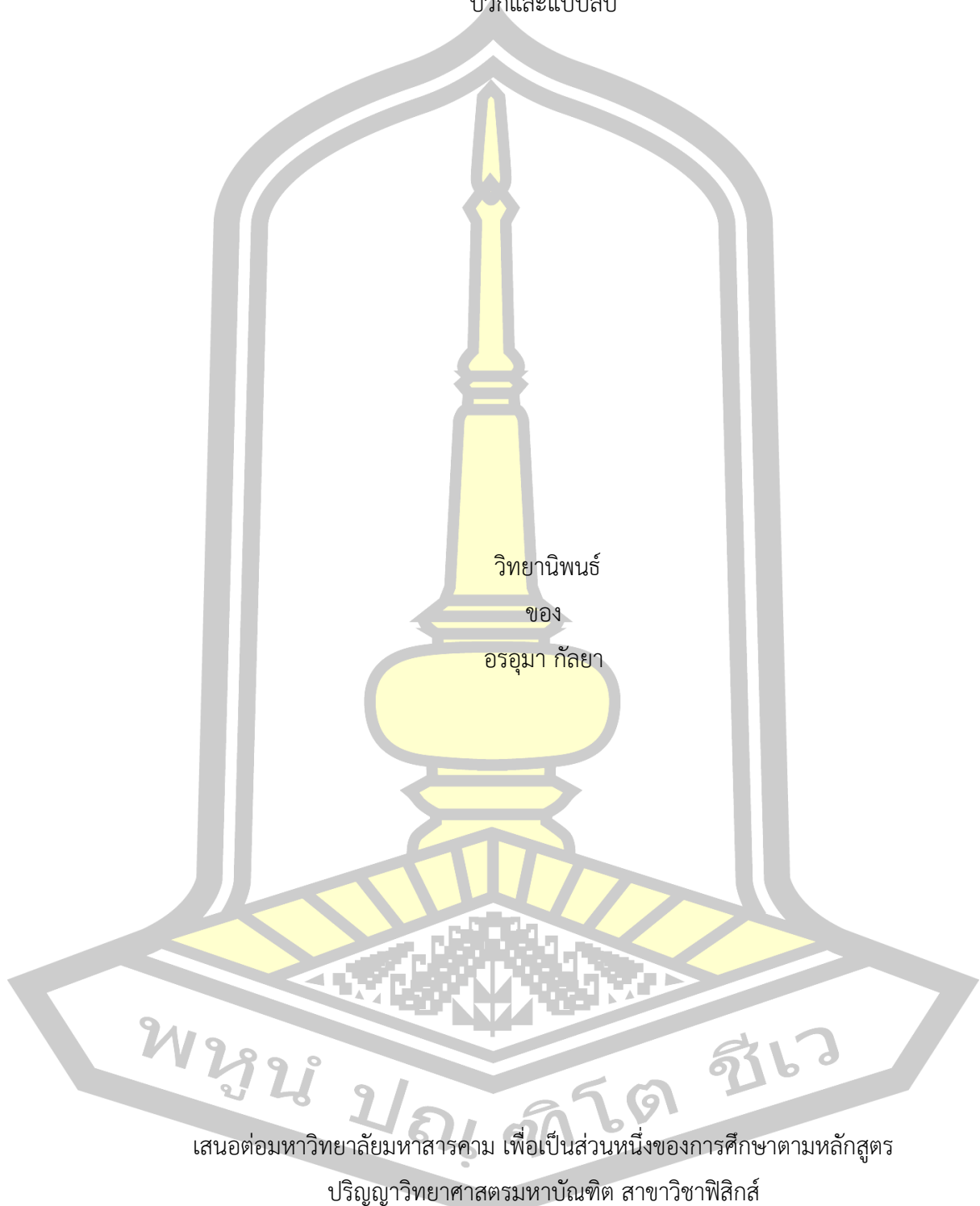
มิถุนายน 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



พหุมนุ ปณ ทิโต ชีเว

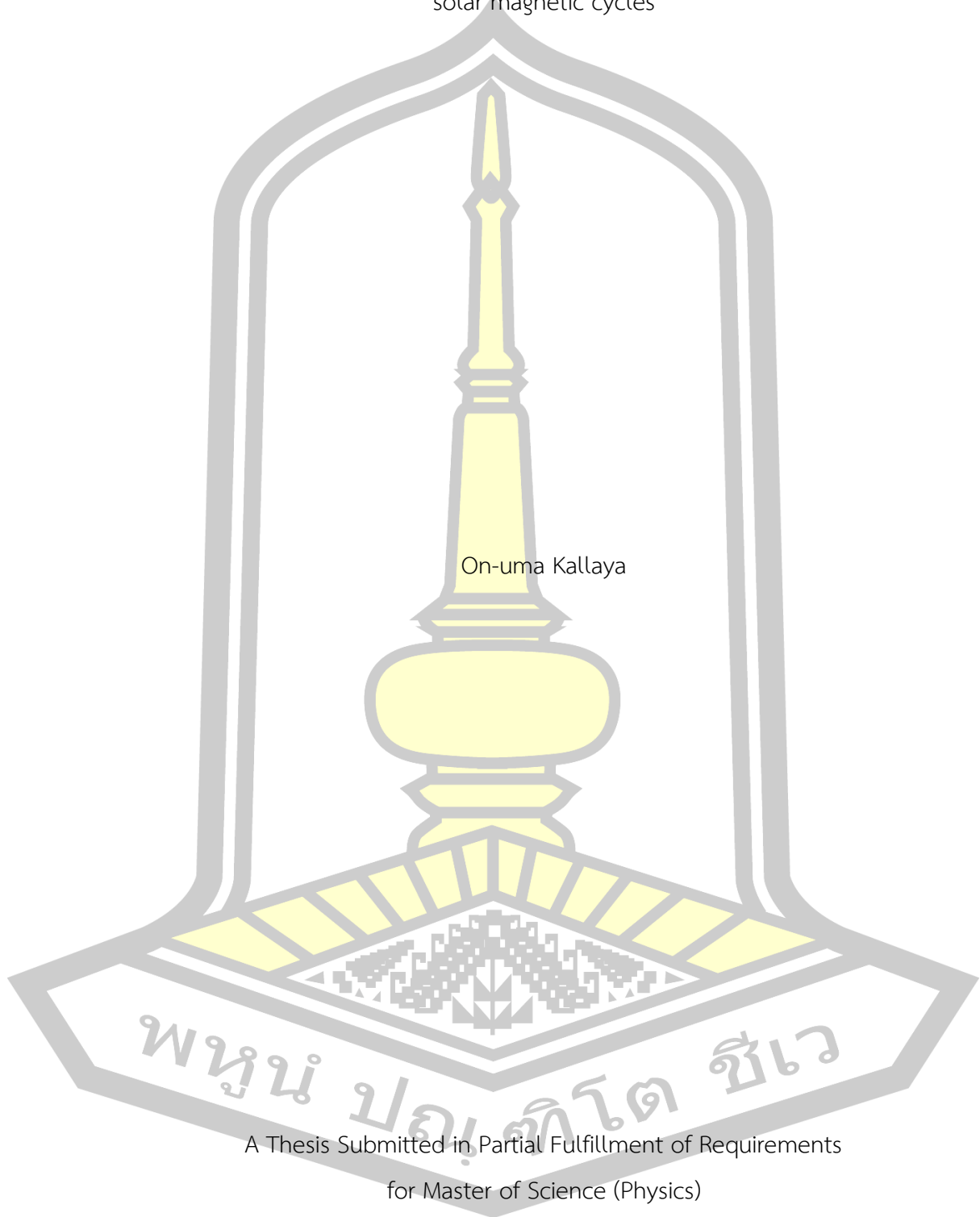
การลดแบบฟอร์บุชที่เวียนซ้ำของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกในวัฏจักรทางแม่เหล็กสุริยะแบบ
บวกและแบบลบ



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มิถุนายน 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Recurrent Forbush decreases of galactic cosmic ray intensity in positive and negative
solar magnetic cycles



On-uma Kallaya

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (Physics)

June 2021

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวอรอุมา กัลยา แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา ฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ธานินทร์ นุตโร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. ธนา ยีรัมย์)

กรรมการ

(รศ. ดร. ชีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ขวัญทัย วงศาพร)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(ศ. ดร. ไพโรจน์ ประมวล)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

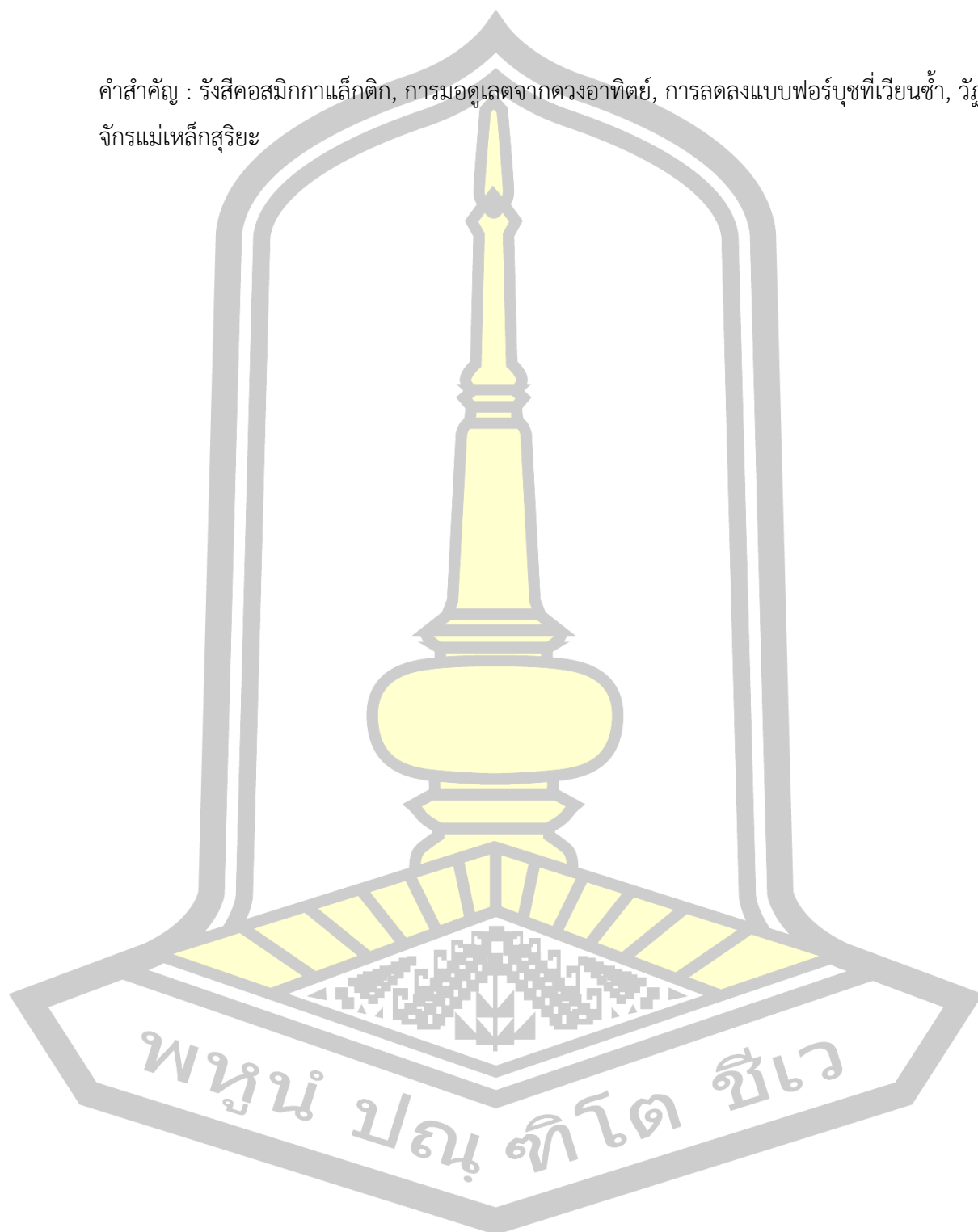
ชื่อเรื่อง	การลดลงแบบพอร์บู่ชที่เวียนซ้ำของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกในวัฏจักรทางแม่เหล็กสุริยะแบบบวกและแบบลบ		
ผู้วิจัย	อรอมา กัลยา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนา ยีรัมย์		
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	ฟิสิกส์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในระยะสั้นของรังสีคอสมิกกาแล็กติกตามรอบการหมุนของดวงอาทิตย์ที่เรียกว่า การลดลงแบบพอร์บู่ชที่เวียนซ้ำ ที่ตรวจวัดโดยสถานีตรวจวัดนิวตรอนที่มีค่าความเข้มเกร็งทางแม่เหล็กช่วงตัดต่างกันในระยะวัฏจักรทางแม่เหล็กสุริยะแบบบวก ($A > 0$) ในปี ค.ศ. 2015-2016 ของวัฏจักรสุริยะที่ 24/25 และแบบลบ ($A < 0$) ในปี ค.ศ. 2008-2011 ของวัฏจักรสุริยะที่ 23/24 โดยช่วงเวลาที่ศึกษาเป็นระยะที่กัมมันตภาพสุริยะมีระดับต่ำ จากการวิเคราะห์การลดลงแบบพอร์บู่ชที่เวียนซ้ำในช่วง $A < 0$ จำนวน 70 เหตุการณ์ และในช่วง $A > 0$ จำนวน 35 เหตุการณ์ พบว่าขนาดของการลดลงแบบพอร์บู่ชที่เวียนซ้ำมีค่าต่ำลงสำหรับสถานีที่มีค่าความเข้มเกร็งทางแม่เหล็กช่วงตัดสูงขึ้น และการลดลงแบบพอร์บู่ชที่เวียนซ้ำของสถานีทางซีกโลกเหนือถูกมอดูเลตมากกว่าทางซีกโลกใต้ สอดคล้องกับลักษณะทางโครงสร้างของลมสุริยะความเร็วสูงที่หมุนร่วมกับดวงอาทิตย์ จากการวิเคราะห์ร่วมกับความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ที่วัดโดยยานอวกาศ Advanced Composition Explorer พบว่า ขนาดของการลดลงแบบพอร์บู่ชที่เวียนซ้ำในช่วง $A < 0$ (2008-2011) มีความเกี่ยวข้องมากที่สุดกับ B_{\max}^s และ V_{\max}^s (ค่าสูงสุดจากค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุด บ่งชี้ว่า B_{\max}^s และ V_{\max}^s เป็นพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับขนาดของการลดลงแบบพอร์บู่ชที่เวียนซ้ำ ในทางกลับกัน B_{\max} และ V_{\max} (ค่าสูงสุดที่สังเกตได้) ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่ำกว่า ส่วนในกรณีของ ΔB และ ΔV (ความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าฐาน) ไม่สามารถใช้อ้างอิงเทียบกับขนาดของการลดลงแบบพอร์บู่ชได้ เมื่อพิจารณาการขึ้นกับวัฏจักรแม่เหล็กสุริยะพบว่า B_{\max}^s และ V_{\max}^s และพารามิเตอร์อื่นๆ ไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดการลดลงแบบพอร์บู่ชที่เวียนซ้ำในช่วง $A > 0$ (2015-2016) และจากการวิเคราะห์ค่าแกมมา (ความชันของกราฟเชิงลอการิทึมระหว่างแอมพลิจูดกับค่าความเข้มเกร็ง) บ่งชี้ว่าการดริฟต์มีผลมากที่สุดต่อขนาดการลดลงแบบพอร์บู่ชที่เวียนซ้ำตามทิศทางของการดริฟต์ของอนุภาคในแผ่นกระแสสุริยะมณฑลตามแบบจำลองการดริฟต์ ในช่วง $A > 0$ และในช่วง $A < 0$ พบว่าการมอดูเลตรังสีคอสมิกกาแล็กติกแบบไม่สมมาตรตามแผ่นกระแสสุริยะมณฑลที่เกี่ยวข้องกับการลดลงแบบพอร์บู่ช

ที่เวียนเช้าที่มากขึ้นของสถานีทางซีกโลกเหนือ

คำสำคัญ : รั้งสี่คอสุมิกกาแล็กติก, การมอดูเลตจากดวงอาทิตย์, การลดลงแบบฟอร์บุงที่เวียนเช้า, วัฏจักรแม่เหล็กสุริยะ



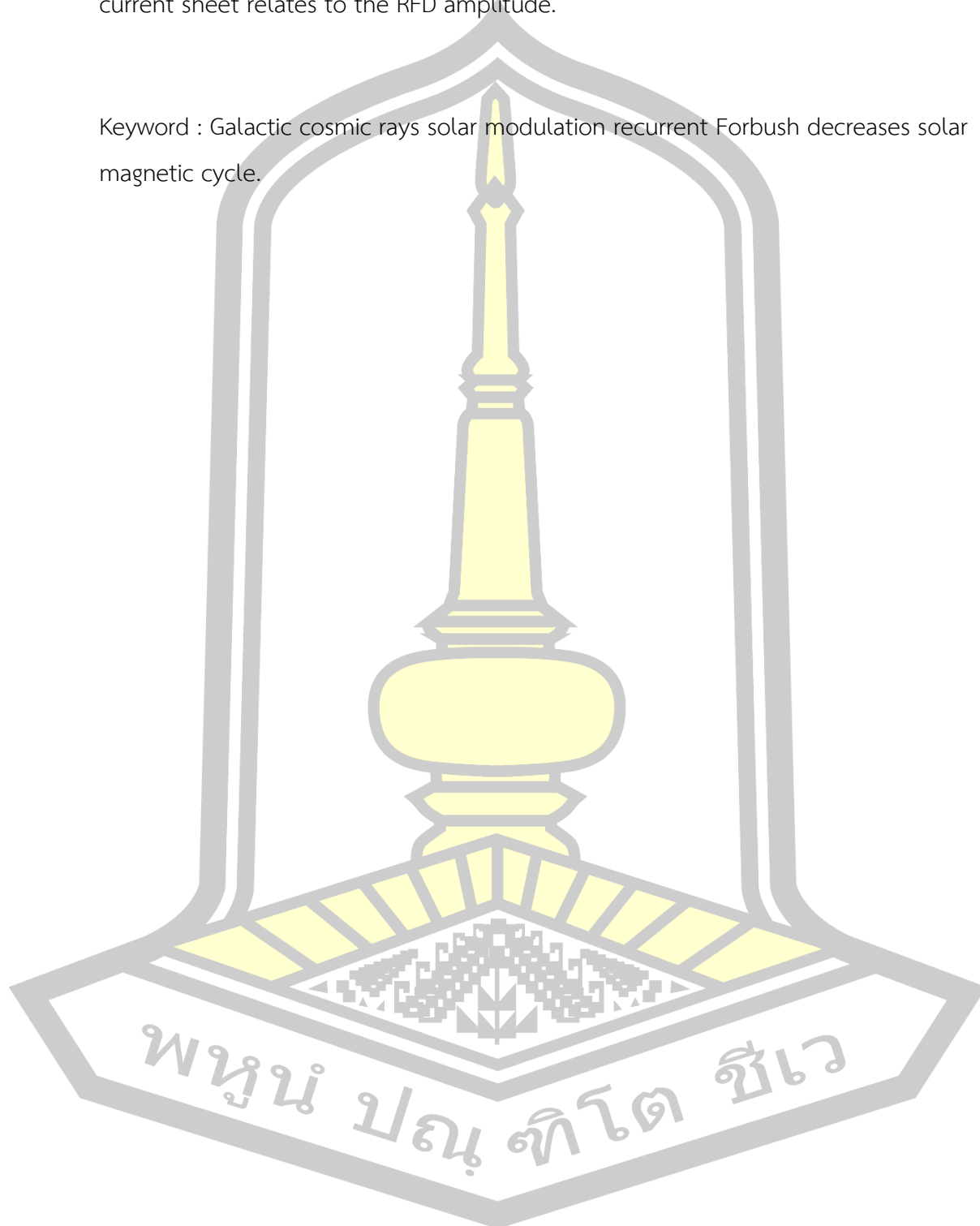
TITLE	Recurrent Forbush decreases of galactic cosmic ray intensity in positive and negative solar magnetic cycles		
AUTHOR	On-uma Kallaya		
ADVISORS	Assistant Professor Thana Yeerm , Ph.D.		
DEGREE	Master of Science	MAJOR	Physics
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2021

ABSTRACT

The objective of this research is to study the short-term variations in cosmic Galactic cosmic rays along the rotation of the Sun, known as recurrent Forbush decreases (RFDs), measured by neutron monitors with different magnetic cutoff rigidity (P_c) during the positive solar magnetic cycle epoch ($A>0$) in 2015-2016 of solar cycle 24/25 and negative epoch ($A<0$) in 2008-2011 of the solar cycle 23/24. The study time periods are in low solar activity. The analysis of RFDs of 70 events during during $A<0$ and 35 events during $A>0$ RFD indicated that the magnitude of the RFDs is lower for higher P_c stations. The RFD amplitude of stations in the northern hemisphere is more modulated than in the southern hemisphere. This corresponds to the structural characteristics of the high-speed solar wind stream that corotates with the Sun. Combined analysis with solar wind speeds and interplanetary magnetic fields measured by the Advanced Composition Explorer spacecraft found that the in the $A<0$ epoch, B_{max}^s, V_{max}^s (smoothed max) is most relevant to the magnitude of RFDs, giving the highest correlation coefficient (r). B_{max}, V_{max} (the maximum observed value) on the other hand, gives a smaller value of r fall $\Delta B, \Delta V$ (difference between peak and base values), cannot be used to refer to the true maximum in the range $A>0$ epoch. B_{max}^s, V_{max}^s and other parameters have no relation to the RFD amplitude. From the analysis of gamma (the slope of the log curve between the amplitude and the stiffness value) indicates that drift has the greatest effect on the magnitude of the RFDs that recurs in the direction of the drift of particles in the current sheet. Following the drift model in $A>0$ and $A<0$ it was

found that the asymmetrical cosmic-galactic cosmic ray modulation along the solar current sheet relates to the RFD amplitude.

Keyword : Galactic cosmic rays solar modulation recurrent Forbush decreases solar magnetic cycle.



กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนา ยีรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ สั่งสอน ให้มีความมุ่งมั่นพยายามในการทำงานวิจัยและคอยให้โอกาสในหลายๆเรื่อง พร้อมทั้งคอยให้ความช่วยเหลือในทุกปัญหาทั้งในการทำงานและการใช้ชีวิต

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร. ชีรวงศ์ เหล่าสุวรรณ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญฤทัย วงศาพร ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการตรวจสอบและแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธานินทร์ นุตโร ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามทุกท่านที่ให้ความกรุณาอบรมสั่งสอนและความรู้ในการทำงานวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อพิชัย กัลยา และคุณแม่ศิริพร กัลยา ที่เป็นกำลังใจในทุกเรื่องของชีวิตและคอยสนับสนุนในทุกๆเรื่องไม่เคยห่าง

อรอุมา กัลยา

พนุน ปณฺ ทิโต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....	5
2.1 รังสีคอสมิกกาแล็กติกใกล้โลก.....	5
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของรังสีคอสมิกกาแล็กติก.....	5
2.1.2 อนุภาคและองค์ประกอบของรังสีคอสมิก (abundances of the elements).....	6
2.1.3 การชนในบรรยากาศโลกและเครื่องตรวจวัดนิวตรอน.....	7
2.1.4 สเปกตรัมพลังงาน และการมอดูเลตด้วยวัฏจักรสุริยะ (energy spectra and modulation with the solar cycle).....	9
2.2 โครงสร้างลมสุริยะและสนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์.....	12
2.2.1 ลมสุริยะ.....	12
2.2.2 สนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์.....	12

2.2.3	ลมสุริยะความเร็วสูงและบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วม	14
2.3	ทฤษฎีการมอดูเลตรังสีคอสมิกโดยดวงอาทิตย์	16
2.4	แบบจำลองการลอยเลื่อนของรังสีคอสมิก	17
2.5	การลดลงแบบพอร์บุช	22
2.6	การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้า	24
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	27
3.1	การออกแบบงานวิจัย	27
3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการ	27
3.3	ข้อมูลสังเกตการณ์	28
3.3.1	ข้อมูลรังสีคอสมิกกาแล็กติก	28
3.3.2	ข้อมูลพลาสมาในลมสุริยะ	29
3.4	วิธีการศึกษา	29
	ชั้นแรก ศึกษาและดาวโหลดข้อมูล	30
	ชั้นที่สอง เตรียมข้อมูล	32
	ชั้นที่สาม วิเคราะห์ข้อมูลการฟื้นตัวของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติก	32
	ชั้นที่สี่ นำข้อมูลมาทำการพล็อตกราฟ	32
3.5	วิธีวิเคราะห์ข้อมูล	32
	1) การประมาณค่าเชิงเส้นระหว่างข้อมูลที่หายไป (Linear interpolation)	32
	2) การวิเคราะห์การหาขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้า	34
	3) การวิเคราะห์ความชันของสเปกตรัมหรือค่าแกมมา	35
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการอภิปราย	36
4.1	ขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้า	56
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ากับความเร็วลมสุริยะและ สนามแม่เหล็กขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้า	66

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแกร่งทางแม่เหล็กขีดเริ่มกับแอมพลิจูดของการลดลงแบบพอร์
 บุษที่เวียนซ้า..... 93

4.4 อภิปรายผล 98

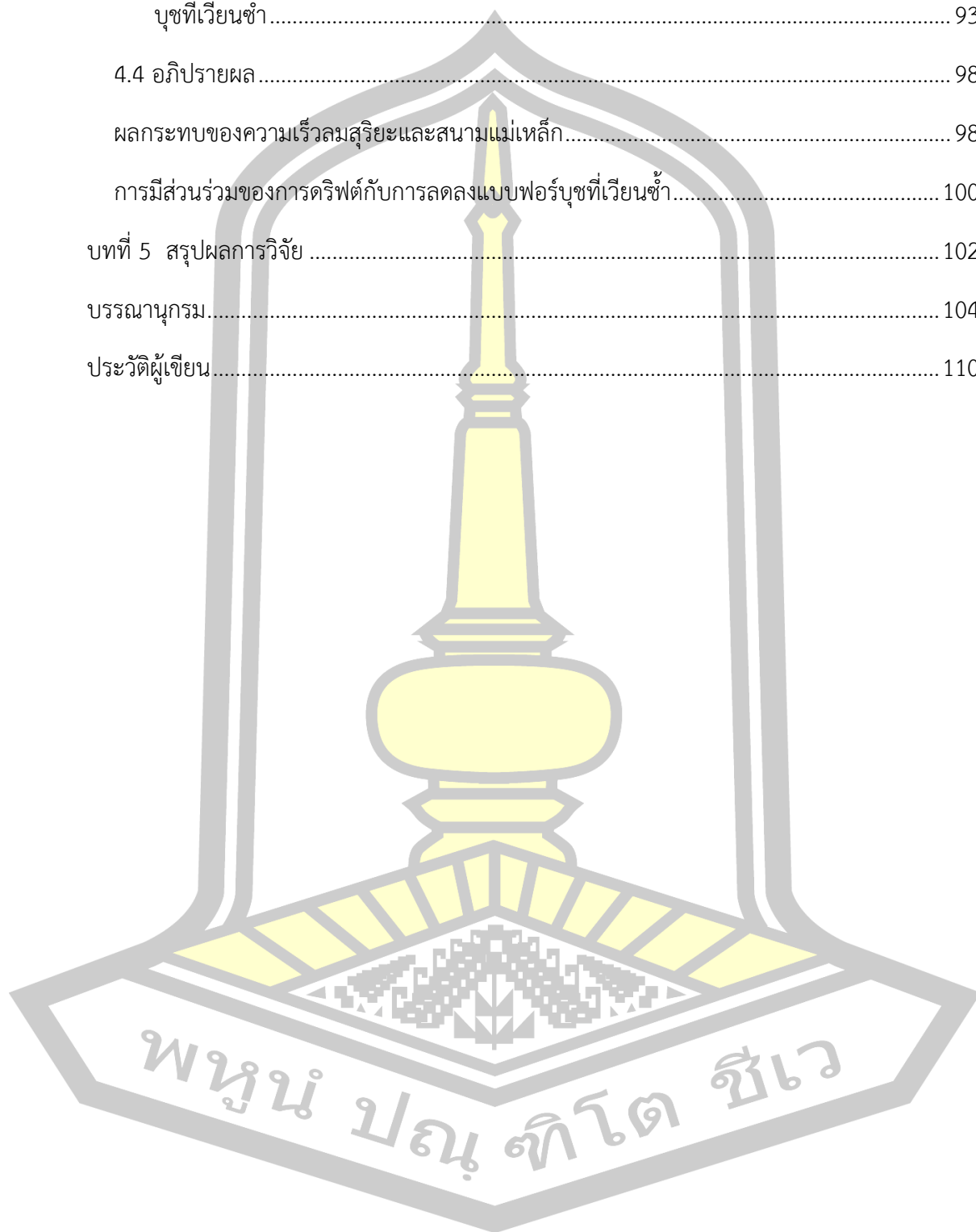
ผลกระทบของความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็ก..... 98

การมีส่วนร่วมของการดริฟต์กับการลดลงแบบพอร์บุษที่เวียนซ้า..... 100

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 102

บรรณานุกรม..... 104

ประวัติผู้เขียน..... 110



สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่ 2.1 การชนกันของรังสีคอสมิกปฐมภูมิกับอะตอมในบรรยากาศโลกและผลผลิตที่ได้จากการชนในรูปรังสีคอสมิกทุติยภูมิทั้ง 3 รูปแบบ [9].....	7
รูปที่ 2.2 ความแตกต่างสเปกตรัมพลังงานของรังสีคอสมิกที่ตรวจวัดบนโลก จากการสังเกตด้านบนชั้นบรรยากาศของโลก ได้แก่ สเปกตรัมไฮโดรเจน ฮีเลียม คาร์บอน และเหล็ก ดังแสดงในภาพ แสดงให้เห็นถึงเส้นที่บสเปกตรัมที่ไม่เกิดการมอดูเลตของไฮโดรเจน ฟลักซ์นิวเคลียสของฮีเลียมต่ำกว่าประมาณ 60 MeV เกิดจากฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้นขององค์ประกอบ 4He ที่ผิดปกติ [11].....	10
รูปที่ 2.3 การมอดูเลตของฟลักซ์รังสีคอสมิกกาแล็กติกกับวัฏจักรกิจกรรมสุริยะ [12].....	11
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์และลมสุริยะ [16]	14
รูปที่ 2.5 บริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วม เมื่อ FS คือ คลื่นกระแทกด้านหน้า, IF คือรอยต่อของลมสุริยะ และ RS คือ คลื่นกระแทกด้านหลัง [17]	15
รูปที่ 2.6 แบบจำลองแผนภาพของขั้วคู่เอียงของแกนแม่เหล็ก, M, จะเอียงกับส่วนที่เกี่ยวกับแกนหมุน, ลมสุริยะเข้าเสียดลอดออกมาจากแถบธารอนุภาค (streamer) ที่อยู่รอบๆสนามแม่เหล็กดวงอาทิตย์, เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กเอียงวิวัฒนาการเป็นคลื่นแผ่นกระแสสุริยมณฑล (HCS) บริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมเดินทางไปข้างหน้า (F) และย้อนกลับ (R) [19].....	16
รูปที่ 2.7 ภาพแสดงวัฏจักร 11 ปีและ 22 ปี ในการมอดูเลตโดยดวงอาทิตย์ของรังสีคอสมิกที่สังเกตโดยสถานีตรวจวัดนิวตรอน Hermanus ในแอฟริกาใต้ ณ ความแข็งเกร็งขีดเริ่ม 4.6 GV ในพจน์ของร้อยละโดย 100% อยู่ในเดือนมีนาคม ค.ศ. 1987 [20].....	17
รูปที่ 2.8 ผังภาพของการเดินทางของรังสีคอสมิกผ่านระบบสุริยะ (มองด้านข้าง) รังสีคอสมิกเดินทางมาถึงโลกตามเส้นทางที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับขั้วทางแม่เหล็กสุริยมณฑล โดยแผ่นกระแสสุริยมณฑลแทนด้วยเส้นสีดำที่กว้างไปมาและทำมุมเอียง 15° อนุภาคประจุบวกเคลื่อนที่ตามแผ่นกระแสและตัดข้ามแผ่นกระแสโดยการพุ่งในช่วง $A < 0$ ในทางตรงข้ามอนุภาคพุ่งได้โดยตรงในระหว่างคาบเวลา $A > 0$ ดังนั้นเวลาในการเดินทางและการสูญเสียพลังงานสามารถแปรเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญขึ้นอยู่กับคาบเวลาของวัฏจักรสุริยะ และขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของอนุภาครังสีคอสมิก เส้นโค้งแทนขอบเขตระบบสุริยะซึ่งขึ้นอยู่กับบริเวณใกล้กับเขตหยุดสุริยะหรือสิ้นสุดการกระแทก [21].....	19
รูปที่ 2.9 ผังภาพรูปแบบของสนามแม่เหล็กสุริยมณฑลในช่วงต่ำสุดของกัมมันตภาพสุริยะที่ 23/24 [15].....	20

รูปที่ 2.10 เส้นทางการอนุภาคประจุบวกที่ข้ามระนาบสุริยวิถีในการประมาณแบบแผ่นกระแสเรียบ และสนามแม่เหล็กอย่างง่าย พบว่าการเคลื่อนที่โดยรวมของอนุภาคประจุบวกมีทิศเข้าสู่ศูนย์กลางระบบสุริยะเสมอ ในขณะที่อนุภาคมีประจุลบมีเส้นทางที่ตรงกันข้ามคือลอยเลื่อนออกนอกระบบสุริยะ (ดวงอาทิตย์อยู่ทางซ้าย) [15]	20
รูปที่ 2.11 สเปกตรัมพลังงานจากการคำนวณทั่วโลก สำหรับทั้งสองวัฏจักรแม่เหล็กสุริยะ ในกรณีมุมเอียงเป็น 10 องศา และ 75 องศา [22].....	21
รูปที่ 2.12 การตอบสนองของความเข้มอนุพัทธ์ของโปรตอนทั่วโลก (ณ พลังงาน $E = 1 \text{ GeV}$) ต่อการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงในทั้งสองวัฏจักรแม่เหล็กสุริยะภายใต้สมมติฐานของการลอยเลื่อนอุดมคติ [22].....	22
รูปที่ 2.13 (ซ้าย) การฉายภาพ ICME ที่ซับซ้อนและการลดลงแบบพอร์บุชเมื่อ ICME เข้าชนประสานงาน (A) และที่ปีก (B) (ขวา) ปริมาณรังสีคอสมิกที่สถานีตรวจวัดนิวตรอน McMurdo, SouthPole, Thule, Oulu, Newark, Rome, Athens, Tibet, และดอยอินทนนท์ (สถานีตรวจวัดนิวตรอนสิรินธร) [28]	24
รูปที่ 3.1 พิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานที่ตั้งสถานีตรวจวัดนิวตรอน	29
รูปที่ 3.2 แสดงหน้าเว็บไซต์ OMNIWeb.....	30
รูปที่ 4.1 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาลมสุริยะที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2008, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย McMurdo, Fort smith, Inuvik, Thule	37
รูปที่ 4.2 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาลมสุริยะที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2008, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย Newark, Moscow, Hermanus, Baksan	38
รูปที่ 4.3 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาลมสุริยะที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี	

ค.ศ.2016, ดัชนี Dst,ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย Newark, Moscow, Hermanus, Baksan	53
รูปที่ 4.18 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาลมสุริยะที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2016, ดัชนี Dst,ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย Potchefstroom, Mexico, Tsumeb, Tibet, PSNM.....	54
รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เชิงเส้นของขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำและ B^S_{max} ของแต่ละสถานีของปี ค.ศ.2008-2011	77
รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เชิงเส้นของขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำและ V^S_{max} ในช่วงปี ค.ศ.2008-2011	78
รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B_{max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011	79
รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B_{max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011	79
รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B^S_{max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011	80
รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B^S_{max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011	80
รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V_{max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011	81
รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V_{max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011	81
รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V^S_{max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011	82
รูปที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V^S_{max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011	82

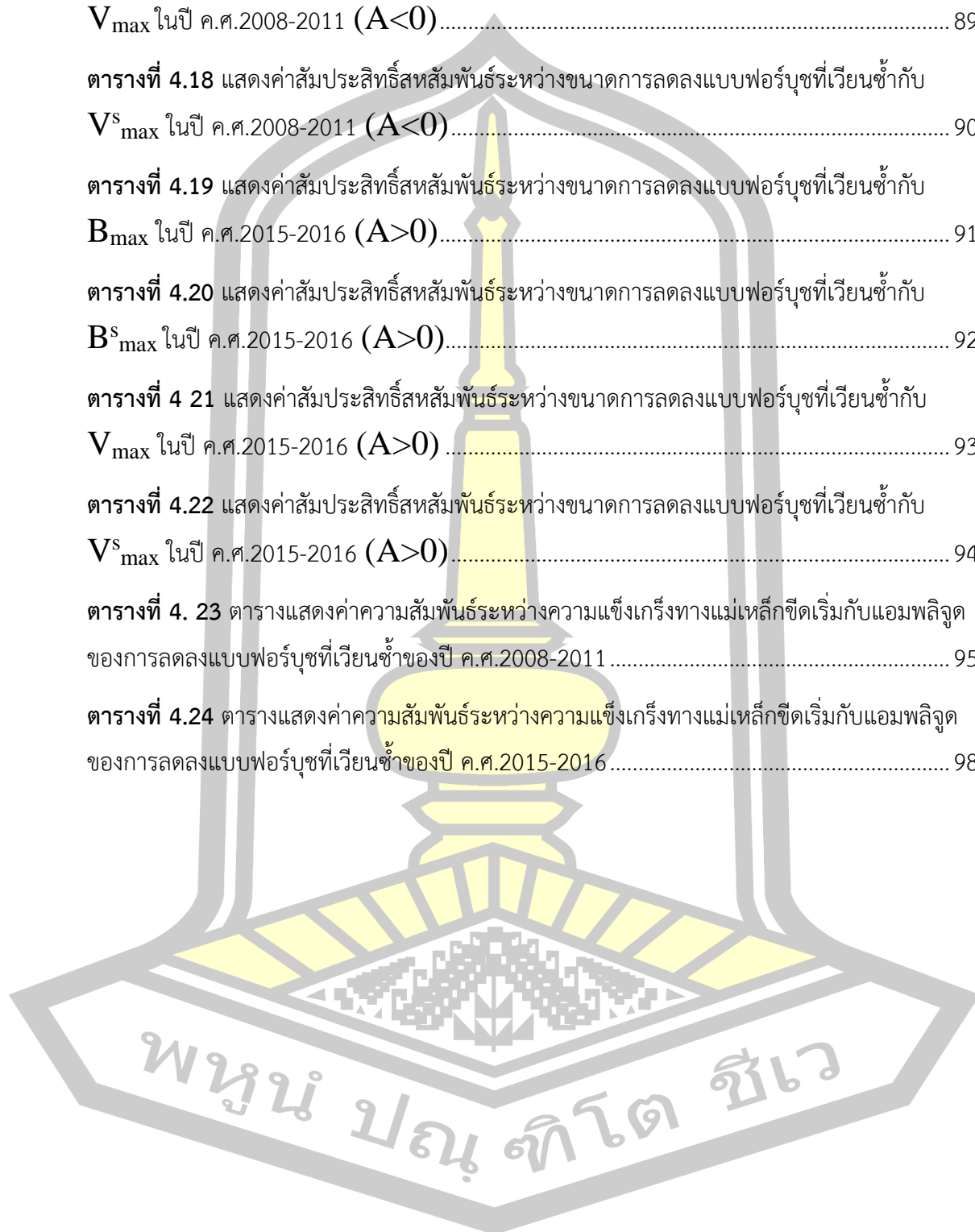
รูปที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B_{\max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ ของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016.....	83
รูปที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B_{\max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ ของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016.....	83
รูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B^S_{\max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ ของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016.....	84
รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B^S_{\max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ ของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016.....	84
รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V_{\max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ ของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016.....	85
รูปที่ 4.34 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V_{\max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ ของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016.....	85
รูปที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V^S_{\max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ ของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016.....	86
รูปที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V^S_{\max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ ของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016.....	86
รูปที่ 4. 37 รูปแสดงค่าแกมมาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงทางแม่เหล็กซีตเริ่มกับแอมพลิจูด ของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของปี ค.ศ.2008-2011.....	99
รูปที่ 4. 38 แสดงค่าแกมมาของความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงทางแม่เหล็กซีตเริ่มกับแอมพลิจูด ของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของปี ค.ศ.2015-2016.....	100

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของสถานีตรวจวัดนิวตรอน.....	28
ตารางที่ 4.1 ขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ ของปี ค.ศ.2008.....	56
ตารางที่ 4.2 ขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ ของปี ค.ศ.2009.....	59

ตารางที่ 4.3	ขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้า ของปี ค.ศ.2010	60
ตารางที่ 4.4	ขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้า ของปี ค.ศ.2011	61
ตารางที่ 4.5	ขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้า ของปี ค.ศ.2015	62
ตารางที่ 4.6	ขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้า ของปี ค.ศ.2016	63
ตารางที่ 4.7	ขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้า ของปี ค.ศ.2008-2011 ($A < 0$) และ ค.ศ. 2015-2016 ($A > 0$)	65
ตารางที่ 4.8	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ากับ ความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันของปี ค.ศ.2008	68
ตารางที่ 4.9	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ากับ ความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันของปี ค.ศ.2009	70
ตารางที่ 4.10	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ากับ ความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันของปี 2010	71
ตารางที่ 4.11	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ากับ ความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันของปี ค.ศ.2011	72
ตารางที่ 4.12	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ากับ ความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันของปี ค.ศ.2015	73
ตารางที่ 4.13	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ากับ ความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันของปี ค.ศ.2016	74
ตารางที่ 4.14	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาด การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ากับ ความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกัน ในปี ค.ศ.2008-2011 ($A < 0$) และในปี ค.ศ. 2015-2016 ($A > 0$)	75
ตารางที่ 4.15	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ากับ B_{max} ในปี ค.ศ.2008-2011 ($A < 0$)	87
ตารางที่ 4.16	แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ากับ B_{max}^S ในปี ค.ศ.2008-2011 ($A < 0$)	88

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับ V_{\max} ในปี ค.ศ.2008-2011 ($A < 0$).....	89
ตารางที่ 4.18 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับ V^S_{\max} ในปี ค.ศ.2008-2011 ($A < 0$).....	90
ตารางที่ 4.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับ B_{\max} ในปี ค.ศ.2015-2016 ($A > 0$).....	91
ตารางที่ 4.20 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับ B^S_{\max} ในปี ค.ศ.2015-2016 ($A > 0$).....	92
ตารางที่ 4.21 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับ V_{\max} ในปี ค.ศ.2015-2016 ($A > 0$).....	93
ตารางที่ 4.22 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับ V^S_{\max} ในปี ค.ศ.2015-2016 ($A > 0$).....	94
ตารางที่ 4.23 ตารางแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงทางแม่เหล็กขีดเริ่มกับแอมพลิจูดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของปี ค.ศ.2008-2011.....	95
ตารางที่ 4.24 ตารางแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงทางแม่เหล็กขีดเริ่มกับแอมพลิจูดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของปี ค.ศ.2015-2016.....	98



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

รังสีคอสมิกกาแล็กติก (galactic cosmic ray) เป็นรังสีคอสมิกที่มาจากนอกระบบสุริยะซึ่งถูกเร่งจากกระบวนการอื่นในกาแล็กซีทางช้างเผือก เช่นการเร่งด้วยคลื่นกระแทกในซากมหานวดารา (supernova) เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าและพลังงานสูงจากอวกาศ มีพลังงานเริ่มต้นประมาณ 10^8 eV/nucleon ถึง 10^{18} eV/nucleon รังสีคอสมิกกาแล็กติกที่เดินทางจากแหล่งกำเนิดมาถึงสุริยมณฑลชั้นใน (inner heliosphere) ของระบบสุริยะ มีการแปรผันความเข้มโดยกลไกทางพลวัตทางแม่เหล็กและความร้อนจากดวงอาทิตย์ กล่าวคือ ตามทฤษฎีการมอดูเลตโดยดวงอาทิตย์ (solar modulation) นั้น รังสีคอสมิกจะชนปะทะกับลมสุริยะที่เคลื่อนที่ออกจากดวงอาทิตย์ในลักษณะของศูนย์กลางการชนของสนามแม่เหล็กในลมสุริยะที่มีการแกว่งและปั่นป่วนมากโดยทำให้เกิดกระบวนการพา (convection) และการฟุ้ง (diffusion) ในสุริยมณฑลส่วนความโค้งและเกรเดียนต์ของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์รวมถึงแผ่นกระแสสุริยมณฑลทำให้เกิดการลอยเลื่อน (drift) ของอนุภาครังสีคอสมิก และการขยายตัวของลมสุริยะทำให้อัตราการสูญเสียพลังงานลง [1]

การศึกษาการแปรผันความเข้มของรังสีคอสมิกกาแล็กติกด้วยมาตรเวลาที่ต่างกันและภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ของกิจกรรมทางแม่เหล็กของดวงอาทิตย์เป็นเรื่องที่มีประโยชน์ในการทำความเข้าใจฟิสิกส์ของอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคที่มีประจุและสนามแม่เหล็ก พลวัตของโครงสร้างสุริยมณฑล (heliosphere) ซึ่งทรงกลมพลาสมาขนาดใหญ่ที่ครอบระบบสุริยะที่ตอบสนองต่อการแปรผันเหล่านี้และเพื่อเข้าใจกลไกทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการมอดูเลตความเข้มของรังสีคอสมิกกาแล็กติก [2] แม้ว่าจะมีการศึกษาการมอดูเลตความเข้มรังสีคอสมิกมาหลายสิบปีแล้ว หัวข้อนี้ก็ยังคงเป็นเรื่องที่มีการค้นคว้าอย่างมากเพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมที่กำลังเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของดวงอาทิตย์และผลกระทบที่มีต่อรังสีคอสมิกกาแล็กติก

ก่อนที่จะสิ้นสุดวัฏจักรสุริยะที่ 23 นั้นได้เกิดกัมมันตภาพสุริยะต่ำสุดเป็นเวลายาวนาน และกัมมันตภาพสุริยะสูงสุดในวัฏจักรสุริยะที่ 24 ได้ลดลงต่ำที่สุดนับจากวัฏจักรที่ 14 ในการศึกษาความเข้มของรังสีคอสมิกในช่วงที่ผิดปกติเหล่านี้ใช้ข้อมูลของพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับกัมมันตภาพสุริยะประกอบด้วย พลาสมาในสุริยมณฑล สนามแม่เหล็ก และแผ่นกระแสสุริยมณฑล โดยแบ่งช่วงเวลาการศึกษาออกเป็น 3 ระยะ คือ ระยะกัมมันตภาพสุริยะต่ำที่เกิดขึ้นยาวนาน ระยะที่กัมมันตภาพสุริยะเริ่มสูงขึ้น และระยะกัมมันตภาพสุริยะสูงสุดที่มีจำนวนจุดดำน้อยที่สุด ซึ่งใช้ข้อมูลของรังสีคอสมิกจากสถานีตรวจวัดนิวตรอนที่ตั้งอยู่ทั่วโลกที่มีความแข็งแกร่งทางแม่เหล็กขีดเริ่มต่างกัน พบว่าความล่าช้าระหว่างความเข้มรังสีคอสมิกและพารามิเตอร์สุริยะมีค่าแตกต่างกันในทั้งสามระยะเวลา

การแปรผันความเข้มรังสีคอสมิกต่อการแปรผันของพารามิเตอร์ของพลาสมาและสนามแม่เหล็กและ มุมเอียงตอบสนองเร็วกว่า ณ ความแข็งเกร็งซิดเริ่มต่ำกว่าในทุกระยะเวลาของกัมมันตภาพสุริยะ โดย อัตราการลดลงของความเข้มรังสีคอสมิกตามมุมเอียงมีความเหมือนกันในระยะกัมมันตภาพสุริยะต่ำที่ เกิดขึ้นยาวนานและระยะกัมมันตภาพสุริยะสูงสุดที่มีจำนวนจุดดำน้อยที่สุด ส่วนสเปกตรัมพลังงานก็มี เลขชี้กำลังเทียบเท่ากันในทั้งสองระยะ ผลการศึกษาจึงบ่งชี้ว่ากลไกการขนส่งพื้นฐานทั้งสี่กลไก คือ กลไกการพา, การฟุ้งโดยสนามแม่เหล็ก, การหน่วงอะเดียบาติกและการลอยเลื่อนมีการเปลี่ยนแปลงไป ตลอดวัฏจักรสุริยะที่ 24 [2]

ฟลักซ์รังสีคอสมิกกาแล็กติกมีแนวโน้มการแปรผัน (มอดูเลต) ในระยะยาวที่ผูกพันกับจำนวน จุดดำ (sunspot) บนดวงอาทิตย์เรียกว่า วัฏจักรจุดดำ ซึ่งแปรผันไปด้วยคาบเวลาประมาณ 11 ปี (จากจำนวนมากที่สุดไปยังมากที่สุดของวัฏจักรที่อยู่ติดกัน) อย่างไรก็ตามวัฏจักรที่แท้จริงของฟลักซ์ รังสีคอสมิกคือเวลาประมาณ 22 ปีเรียกว่า วัฏจักรเฮล ซึ่งตรงกับคาบเวลาของวัฏจักรทางแม่เหล็ก สุริยะ (สนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์กลับขั้วทุก 11 ปี) กล่าวคือการแปรผันของฟลักซ์รังสีคอสมิกมี ลักษณะปลายแหลมในยุคแม่เหล็กเชิงลบ $A < 0$ (สนามแม่เหล็กดวงอาทิตย์มีทิศจากใต้ไปเหนือ เช่น วัฏจักรสุริยะที่ 21 (1981-1990) และ 23 (2002-2011)) แต่มีลักษณะปลายโค้งในยุคแม่เหล็กเชิง บวก $A > 0$ (สนามแม่เหล็กดวงอาทิตย์มีทิศพุ่งจากเหนือไปได้ เช่น วัฏจักรสุริยะที่ 20 (1970-1979) และ 22 (1992-2000)) ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีความสมนัยกับทฤษฎีการลอยเลื่อน (drift) ใน สนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์โดยรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่เดินทางในสุริยมณฑล (บริเวณที่โอบ ล้อมระบบสุริยะด้วยผลของลมสุริยะ) ภายใต้อิทธิพลของการลอยเลื่อนแบบเกรเดียนต์และแบบโค้ง จะได้รับผลจากแผ่นกระแสสุริยมณฑลซึ่งวางตัวอยู่ใกล้ระนาบศูนย์สูตรดวงอาทิตย์และแบ่งแยกครึ่ง ทรวงกลมของสนามแม่เหล็กดวงอาทิตย์ที่มีทิศตรงข้ามกันและมุมระหว่างระนาบของแผ่นกระแสกับ ระนาบศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์เรียกว่า “มุมเอียง” (tilt angle) ของแผ่นกระแสที่คาดว่า เป็น ศูนย์กลางของทฤษฎีการลอยเลื่อนของการมอดูเลตรังสีคอสมิกกาแล็กติก โดยเฉพาะในยุค $A < 0$ เมื่อ รังสีคอสมิกเดินทางเข้าสู่สุริยมณฑลตามแผ่นกระแสสุริยมณฑลย่อมได้รับผลจากมุมเอียงดังกล่าวที่ เพิ่มสูงขึ้นตามวัฏจักรสุริยะที่มีกิจกรรมมากขึ้น (ในยุค $A > 0$ รังสีคอสมิกเข้าสู่ระบบสุริยะจากขั้ว เหนือใต้ จึงไม่ได้รับผลจากความเอียงของแผ่นกระแสสุริยมณฑล) [3]

การลดลงแบบพอร์บู่เป็นการลดลงของปริมาณรังสีคอสมิกกาแล็กติกในช่วงเวลาสั้นๆเกิดขึ้น เมื่อดวงอาทิตย์เกิดการปะทุและปลดปล่อยกลุ่มอนุภาคจำนวนมากภายในเวลาอันสั้นแล้วเคลื่อนที่ ออกมาสู่ตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์พร้อมกับคลื่นกระแทกซึ่งก่อให้เกิดมีการเปลี่ยนแปลง สนามแม่เหล็กและความหนาแน่นของตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ เมื่อกลุ่มอนุภาคจำนวนมากที่เกิด จากการปะทุและคลื่นกระแทกเคลื่อนที่มาถึงโลก การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวก่อให้เกิดการกระเจิงของ อนุภาครังสีคอสมิกออกไปจากโลก [4]

ระยะเวลาของการลดลงแบบพอร์บุชของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกมีระยะเวลาดั้งแต่ 10 ชั่วโมง จนถึง 2-3 วัน แต่ระยะเวลาการฟื้นตัวเฉลี่ยประมาณ 5-10 วัน ในขณะที่ระยะเวลาการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำครั้งต่อไปจะมากกว่าหรือใกล้เคียงกับระยะเวลาการฟื้นตัว ระยะเวลาเฉลี่ยของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ คือ 10-14 วัน บางครั้งผลของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำอาจสังเกตจากการลดลงแบบพอร์บุชที่เกิดขึ้นในระยะเวลาประมาณ 27 วันก่อนหน้า แต่อย่างไรก็ตามก็ไม่ได้เป็นเช่นนั้นเสมอไป จนถึงปัจจุบันก็ยังไม่เป็นที่เข้าใจนักเกี่ยวกับการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำและการแปรผันของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกใน 27 วัน [5]

ในงานวิจัยที่ผ่านมา Dumbovic [6] และคณะได้ทำการศึกษาการลดลงแบบพอร์บุชของรังสีคอสมิกกาแล็กติกในระยะสั้นในปี ค.ศ.1998-2005 โดยการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนของลมสุริยะแบบต่างๆ ซึ่งข้อมูลความเข้มรังสีคอสมิกได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนภาคพื้นดินและข้อมูลของลมสุริยะที่บันทึกโดยยานอวกาศ นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์การลดต่ำลงและการเพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็ก จากการวิเคราะห์พบความแตกต่างของความสัมพันธ์ระหว่างการรบกวนลมสุริยะ จากการวิเคราะห์ทั้งหมดพบว่าระยะเวลาของการมอดูเลตรังสีคอสมิกมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาของการรบกวนจากลมสุริยะ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของรังสีคอสมิกกาแล็กติกในช่วงวัฏจักรสุริยะที่ 23/24 และวัฏจักรสุริยะที่ 24/25 ในช่วงที่กัมมันตภาพสุริยะ (solar activity) มีค่าต่ำสุด (solar minimum conditions) โดยในช่วงวัฏจักรสุริยะที่ 23/24 เป็นวัฏจักรเชิงลบ และระยะลดต่ำของวัฏจักรที่ 24 เป็นวัฏจักรแม่เหล็กเชิงบวก โดยในช่วงกัมมันตภาพสุริยะต่ำหมายถึงช่วงเวลาที่สูง (กิจกรรมทางแม่เหล็กของดวงอาทิตย์ เช่น แฟลร์สุริยะ และการขับมวลสารคอโรนา มีปริมาณน้อยมาก) เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบทฤษฎีลอยเลื่อนซึ่งเป็นกลไกหนึ่งที่มีมอดูเลตรังสีคอสมิกในระบบสุริยะ อีกทั้งบริเวณอันตรกิริยาหมุนรวม และแผ่นกระแสสุริยมณฑล อาจมีผลต่อการแปรผันของแอมพลิจูดการมอดูเลตความเข้มรังสีคอสมิกแบบเวียนซ้ำหรือการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำในระดับที่ต่างกันและขึ้นอยู่กับระดับความแข็งแกร่งทางแม่เหล็ก (โมเมนต์ต่อประจุ) ซึ่งการศึกษาในเรื่องนี้ยังไม่เป็นที่เข้าใจมากนัก จึงมีความจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม อีกทั้งเพื่อตรวจสอบการขึ้นอยู่กับพลังงานของการลอยเลื่อนในระดับความแข็งแกร่งที่ต่างกัน โดยการใช้ข้อมูลรังสีคอสมิกที่ตรวจวัดโดยสถานีตรวจวัดนิวตรอนที่กระจายอยู่ในบริเวณต่างๆ ทั่วโลก

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. ศึกษาการแปรผันแอมพลิจูดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำตามความแข็งแกร่งทางแม่เหล็กในวัฏจักรทางแม่เหล็กสุริยะแบบบวกและแบบลบ

2. ศึกษาการแปรผันความเข้มรังสีคอสมิกภาคเล็กติกในระยะลดลงและเพิ่มขึ้นของกัมมันตภาพสุริยะในวัฏจักรสุริยะแบบบวกและแบบลบ

3. สังเคราะห์แนวคิดทฤษฎีเพื่ออธิบายการลดลงแบบพอร์บซุซที่เวียนซ้า

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ช่วงเวลาที่ศึกษาคือ วัฏจักรสุริยะที่ 23/24 ช่วงปี ค.ศ. 2008-2011 และวัฏจักรสุริยะที่ 24/25 ช่วงปี ค.ศ. 2015-2016

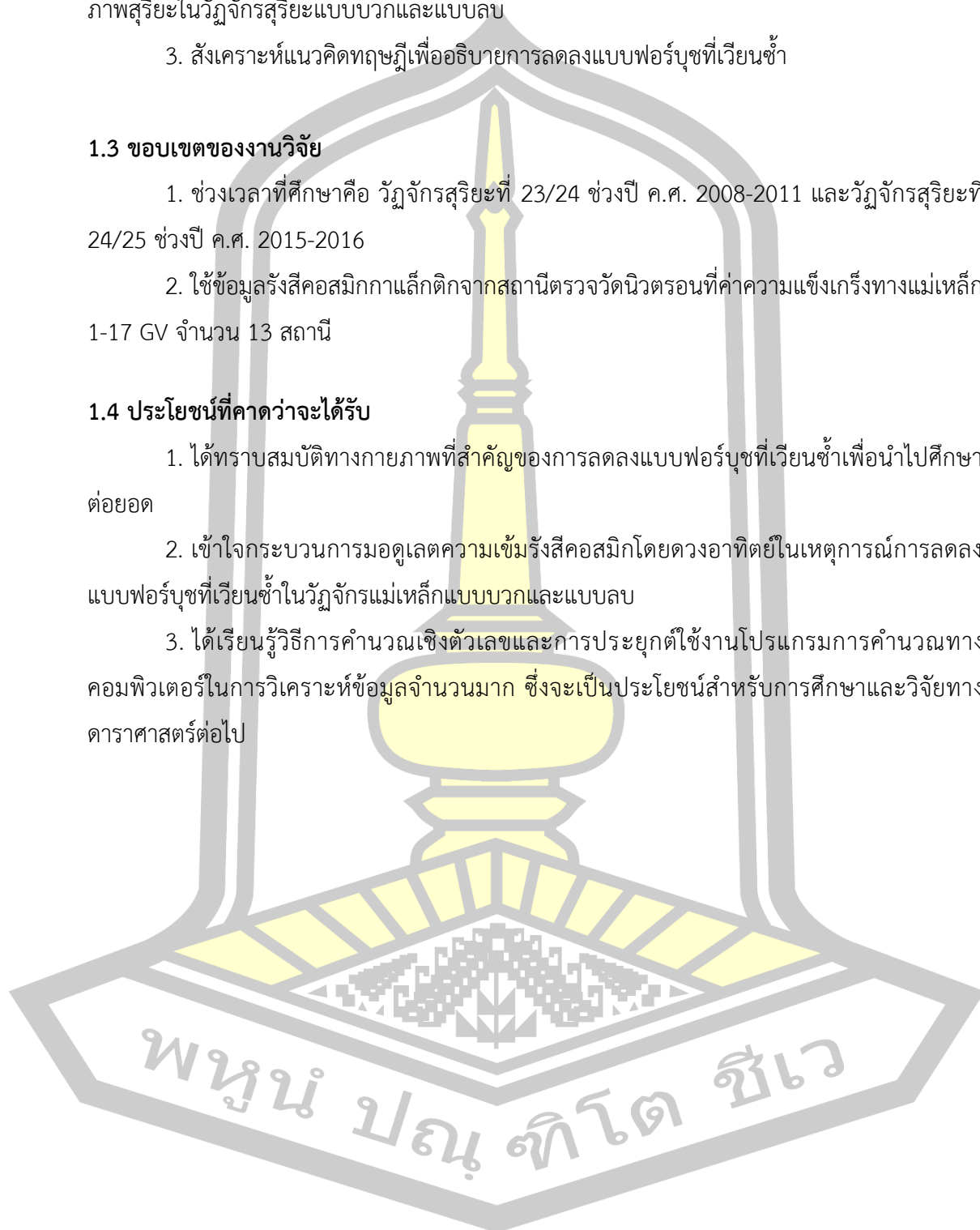
2. ใช้ข้อมูลรังสีคอสมิกภาคเล็กติกจากสถานีตรวจวัดนิวตรอนที่ค่าความเข้มเกร็งทางแม่เหล็ก 1-17 GV จำนวน 13 สถานี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของการลดลงแบบพอร์บซุซที่เวียนซ้าเพื่อนำไปศึกษาต่อยอด

2. เข้าใจกระบวนการมอดูเลตความเข้มรังสีคอสมิกโดยดวงอาทิตย์ในเหตุการณ์การลดลงแบบพอร์บซุซที่เวียนซ้าในวัฏจักรแม่เหล็กแบบบวกและแบบลบ

3. ได้เรียนรู้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขและการประยุกต์ใช้งานโปรแกรมการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาและวิจัยทางดาราศาสตร์ต่อไป



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและปริทัศน์เอกสารข้อมูล

2.1 รังสีคอสมิกกาแล็กติกใกล้โลก

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของรังสีคอสมิกกาแล็กติก

การสังเกตการณ์รังสีคอสมิกกาแล็กติกที่อยู่ใกล้โลกทำให้เราทราบเกี่ยวกับองค์ประกอบ แหล่งที่มาและการเดินทางของรังสีคอสมิกในอวกาศ รังสีคอสมิกกาแล็กติกคือการแตกตัวเป็นไอออนของนิวเคลียสที่เกิดขึ้นนอกระบบสุริยะ มีพลังงานเริ่มต้นประมาณ 10^8 eV/nucleon ถึง 10^{18} eV/nucleon รังสีคอสมิกกาแล็กติกส่วนใหญ่มาจากภายในกาแล็กซีทางช้างเผือกและรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่มีพลังงานสูงมากที่สุดมาจากซากมหานวดารา ซึ่งอนุภาคที่มีพลังงานสูงที่สุดที่มาจากกาแล็กซีนั้นมีปริมาณน้อยมากส่งผลให้รังสีคอสมิกกาแล็กติกส่วนใหญ่เป็นสสารที่มีพลังงานน้อย จากการศึกษาองค์ประกอบของรังสีคอสมิกกาแล็กติกและสเปกตรัมพลังงานนำไปสู่การทำความเข้าใจถึงต้นกำเนิดของสสาร นอกจากนี้รังสีคอสมิกกาแล็กติกได้รับการสันนิษฐานว่าเดินทางเข้าสู่ระบบสุริยะในปริมาณเท่ากันทุกทิศทางหรือไอโซโทรปี (isotropic) แต่เมื่อพิจารณาทิศทางและปริมาณรังสีคอสมิกกาแล็กติกโดยละเอียดพบว่ามีค่าไม่สม่ำเสมอตามทิศทางหรือแอนไอโซโทรปี (anisotropy) ขึ้นอยู่กับอิทธิพลหรือเงื่อนไขในอวกาศที่เกิดจากดวงอาทิตย์ การเกิดขึ้นของเหตุการณ์แอนไอโซโทรปี ณ บริเวณสุริยมณฑล (heliosphere) เกิดขึ้นเมื่อรังสีคอสมิกกาแล็กติกเข้าสู่ในระบบสุริยะและชนกับชั้นบรรยากาศโลก รังสีคอสมิกกาแล็กติกส่วนใหญ่จะเดินทางแบบสุ่ม (random walk) และขนานกับสนามแม่เหล็กที่มีความไม่ราบเรียบ จากกลไกการพาและการสูญเสียพลังงานแบบอะเดียบาติกจะสอดคล้องกับการแปรผันของลมสุริยะความเร็วสูงและสอดคล้องกับการลอยเลื่อน (drifts) ของอนุภาครังสีคอสมิกกาแล็กติกที่ควงส่วตามเส้นสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่อยู่ในอวกาศจะสอดคล้องกับการแปรผันของลมสุริยะ และในกรณีสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของรังสีคอสมิกกาแล็กติกเป็นบางบริเวณในอวกาศ

รังสีคอสมิกกาแล็กติกหรืออนุภาคพลังงานสูงได้รับการค้นพบในปี ค.ศ. 1912 โดย Victor Hess ซึ่งได้ลอยขึ้นไปพร้อมบอลลูนที่ระดับความสูง 5 กิโลเมตร และค้นพบว่ารังสีคอสมิกกาแล็กติกมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามระดับความสูง จึงสรุปว่ารังสีคอสมิกกาแล็กติกมีแหล่งที่มาจากภายนอกโลกในช่วงเวลานั้นเขาเรียกการแผ่รังสีทะลุ (penetrating radiation) จากภายนอกนี้ว่า “Höhenstrahlung” ต่อมาในปี ค.ศ. 1927 Clay เป็นคนแรกที่รายงานถึงผลกระทบจากระดับความสูง ซึ่งบริเวณที่ใกล้กับเส้นศูนย์สูตรจะพบการแผ่รังสีต่ำกว่าบริเวณละติจูดสูง จากการคำนวณของ Störmer ในเรื่องของวิถีอนุภาคในสนามแม่เหล็กโลกซึ่งสามารถนำมาใช้อธิบาย ในปี ค.ศ. 1930 ถึง

ผลกระทบจากระดับความสูงทำให้เข้าใจได้ว่าเกิดจากสนามแม่เหล็กโลกที่ป้องกันการเข้ามาของอนุภาคที่มีพลังงานสูงเหล่านี้ รังสีคอสมิกได้ค้นพบความเข้มรังสีคอสมิกในปริมาณสูงสุดที่ระดับความสูงประมาณ 15 กิโลเมตร โดย Pfozter ในปี ค.ศ. 1936 ผลที่ได้นี้เกิดจากการอันตรกิริยาระหว่างรังสีคอสมิกและอะตอมในชั้นบรรยากาศ ที่เรียกว่า “atmospheric cascade” ในปี ค.ศ. 1937 Forbush ได้สังเกตเห็นการลดลงของรังสีคอสมิกกาแล็กติกในช่วงพายุแม่เหล็กที่รุนแรง (การลดลงแบบฟอว์บุช) เป็นหลักฐานชิ้นแรกที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมบนดวงอาทิตย์กับการเปลี่ยนแปลงของรังสีคอสมิกกาแล็กติก นับจากนั้นมาสเปกตรัมพลังงาน, องค์ประกอบและการมีรูปแบบชั่วคราวของรังสีคอสมิกกาแล็กติกได้รับการบันทึกและศึกษาโดยเครื่องไอออนแชมเมอร์, เครื่องตรวจจับนิวตรอน, ยานอวกาศและเครื่องมือวัดอื่นๆ [7]

2.1.2 อนุภาคและองค์ประกอบของรังสีคอสมิก (abundances of the elements)

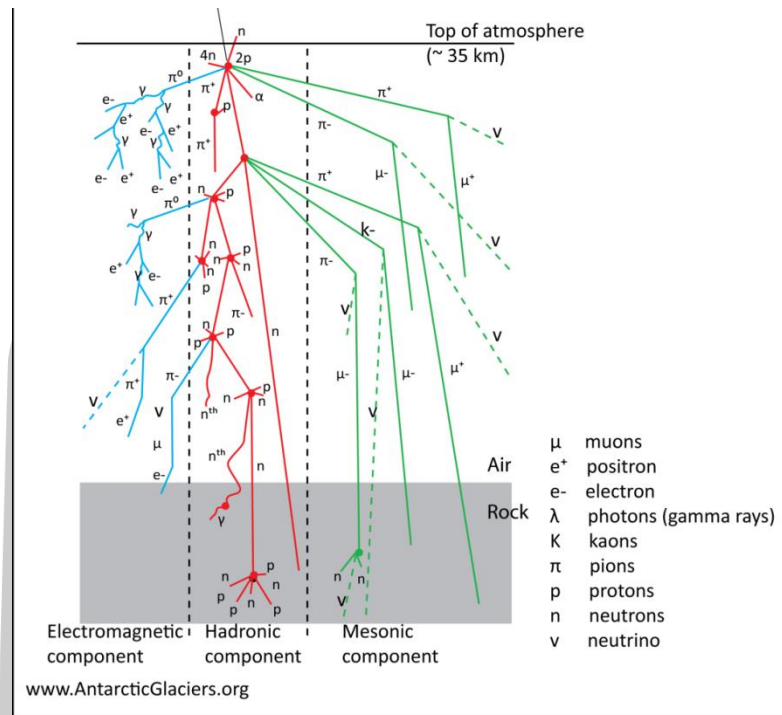
พลั๊กซ์ของรังสีคอสมิก คือความเข้มของรังสีคอสมิกที่ขึ้นอยู่กับพื้นที่และเวลาที่เข้ามาด้านบนของชั้นบรรยากาศมีลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบที่แตกต่างกัน รังสีคอสมิกประกอบด้วย

1) ประมาณ 98% ของอนุภาค เป็นนิวเคลียสของไฮโดรเจน และธาตุอื่นๆ (ประมาณ 87% เป็นโปรตอน ประมาณ 12% เป็นฮีเลียม และประมาณ 1% เป็นนิวเคลียสของธาตุหนัก)

2) ประมาณ 2% เป็นอิเล็กตรอนและอนุภาคย่อยอื่นๆ เช่น มิวออน

อนุภาคทางเคมีของรังสีคอสมิกให้ข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับแหล่งที่มาของรังสีคอสมิกและกระบวนการฟุ้งจากแหล่งที่มาเข้าสู่โลกของเรา สำหรับอนุภาคองค์ประกอบในระบบสุริยะมีแหล่งที่มาจากชั้นโฟโตสเฟียร์ของดวงอาทิตย์สามารถนำมาอธิบายเกี่ยวกับดวงดาวจากการสังเกตเนื่องจากการดูดกลืนการสะท้อนโดยไอออนของอะตอม และโมเลกุลแก๊สในชั้นโฟโตสเฟียร์ของดวงอาทิตย์ [8]





รูปที่ 2.1 การชนกันของรังสีคอสมิกปฐมภูมิกับอะตอมในบรรยากาศโลกและผลิตผลที่ได้จากการชน ในรูปรังสีคอสมิกทุติยภูมิทั้ง 3 รูปแบบ [9]

2.1.3 การชนในบรรยากาศโลกและเครื่องตรวจวัดนิวตรอน

รังสีคอสมิกที่เดินทางมาถึงโลกจะถูกคัดกรองพลังงานโดยสนามแม่เหล็กในแมกนีโตสเฟียร์ของโลกซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแกร่งทางแม่เหล็กขีดเริ่ม (magnetic cutoff rigidity) คือ

$$P_c = \frac{pc}{ze} \quad (2.1)$$

มีหน่วย GV เมื่อ p คือโมเมนตัม c คือความเร็วแสง และ z คือจำนวนประจุ กล่าวคือรังสีคอสมิกที่มีพลังงานสูงเกินกว่าค่าขีดเริ่มในแต่ละบริเวณของแมกนีโตสเฟียร์ของโลก (magnetosphere) และจะต้องมีความแข็งแกร่งมากกว่า 1 GV (ค่าขีดเริ่มบรรยากาศ) เท่านั้นจึงจะทะลุเข้าสู่บรรยากาศโลกของท้องถิ่นนั้นได้ รังสีคอสมิกที่เข้ามาได้นี้เรียกว่า “รังสีคอสมิกปฐมภูมิ” ซึ่งจะชนกับอะตอมในบรรยากาศแล้วผลิต “รังสีคอสมิกทุติยภูมิ” ได้แก่ นิวตรอน มิวออน และอนุภาคย่อยอื่นๆ ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า ฝนอนุภาคเชิงบรรยากาศ (atmospheric shower) แสดงดังรูปที่ 2.1

การชนในชั้นบรรยากาศส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยนิวคลีออน ที่ชั้นต่ำสุดของชั้นพลังงานทั้งหมดองค์ประกอบในชั้นจะกลายเป็นนิวคลีออนเกือบทั้งหมดด้วยพลังงาน < 1 GeV โดยการลดระดับพลังงานของนิวคลีออนตลอดการชนกัน และกระบวนการรวมกลุ่มกันซึ่งจะเกิดการแตกตัวทางนิวเคลียร์ไปยังระดับพื้น ที่อยู่ในภาวะสมดุลที่ความลึกในชั้นบรรยากาศโดยแต่ละการแตกตัวทาง

นิวเคลียร์จะให้อนุภาคโดยเฉลี่ยเป็นโปรตอนและนิวตรอนจำนวนหลายอนุภาค ซึ่งเรียกว่า “นิวคลีออนที่เกิดจากการแตกตัว” หรือโปรตอนที่สูงสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วโดยการแตกตัวเป็นไอออน และนิวตรอนจะมีพลังงานลดลงโดยชนกับไนโตรเจน (N) และออกซิเจน (O) ในชั้นบรรยากาศโลก กลายเป็นนิวตรอนที่ชะลอตัวช้าลง ซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า 30 MeV ในชั้นบรรยากาศ โดยอนุภาคเหล่านี้มีพลังงานและปริมาณลดลงตามระดับความสูงจากบรรยากาศชั้นบนสู่ระดับพื้นดินโดยนิวคลีออนที่เกิดจากการแตกตัวในชั้นบรรยากาศที่พบมากที่สุด ได้แก่ นิวตรอน ซึ่งมีช่วงชีวิตที่ยาวนานและสามารถตรวจวัดโดยเครื่องตรวจวัดนิวตรอน (neutron monitor) ซึ่งเป็นเครื่องมือหลักที่ใช้สำหรับศึกษาการแปรผันของรังสีคอสมิกภาคเล็กติก เนื่องจากการแปรผันของปริมาณนิวตรอนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณรังสีคอสมิกภาคเล็กติกนอกโลก มีจำนวนกว่า 50 แห่ง กระจายบนภาคพื้นโลกที่มีค่าเชิงเกร็งทางแม่เหล็กชี้ตริเริ่มแตกต่างกัน นอกจากนี้องค์ประกอบนิวตรอนให้ผลที่ใกล้เคียงมากที่สุดตรงตามเงื่อนไขในการศึกษารูปแบบความเข้มปฐมภูมิของอนุภาคพลังงานต่ำได้เป็นอย่างดีลักษณะของอันตรกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดจากรังสีคอสมิกปฐมภูมิและรังสีคอสมิกทุติยภูมิในชั้นบรรยากาศมีความสำคัญในการพัฒนาการออกแบบเครื่องตรวจวัดภาคพื้นดินที่ใช้สำหรับการตรวจวัดฟลักซ์รังสีคอสมิกปฐมภูมิซึ่งเครื่องตรวจวัดนิวตรอนจึงมีความเหมาะสมสำหรับการบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องของความเข้มรังสีคอสมิกปฐมภูมิ

เครื่องตรวจวัดนิวตรอนได้มีการพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกในปีพ.ศ. 2491 โดย เจ เอ ซิมป์สัน (J. A. Simpson) แห่งมหาวิทยาลัยชิคาโก ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อศึกษาเกี่ยวกับรังสีคอสมิกที่มีพลังงานสูง (ระดับ GeV) กล่าวคือ อนุภาคพลังงานสูงที่มาจากอวกาศ (ซึ่งมาโดยธรรมชาติ) เครื่องตรวจวัดนิวตรอนมีเสถียรภาพสูงและมีการตั้งที่ตำแหน่งต่างๆบนพื้นโลกโดยอาศัยประโยชน์จากสนามแม่เหล็กโลกในการคัดเลือกอนุภาคที่มีระดับพลังงานต่างๆกันมีค่าการบำรุงรักษาเพียงเล็กน้อย เครื่องวัดนิวตรอนแบบนี้สามารถให้ข้อมูลที่มีคุณค่าสูงในทางวิทยาศาสตร์ได้เป็นเวลาเกินหนึ่งทศวรรษ หรือแม้กระทั่งถึงห้าทศวรรษเลยทีเดียว เช่น สถานีโคลแมกซ์ ที่โคโลราโด ประเทศสหรัฐอเมริกา [10]

นิวตรอนที่เข้ามายังอุปกรณ์ตรวจวัดนี้เป็นผลมาจากการที่รังสีคอสมิกชั้นต้นชนกับโมเลกุลของอากาศแล้วปล่อยนิวตรอนออกมา เมื่อนิวตรอนนี้เข้ามาที่อุปกรณ์ตรวจวัดจะผ่านตัวสะท้อนไปยังโพรวิวเซอร์อาจชนกับนิวเคลียร์ตะกั่วในโพรวิวเซอร์ซึ่งจะปล่อยนิวตรอนออกมาประมาณ 5 อนุภาคเข้าไปชนกับมอนิเตอร์และนิวตรอนจะถูกลดพลังงานลงจนสามารถทำปฏิกิริยากับก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์ (BF₃) ภายในหลอดวัดนิวตรอนและให้สัญญาณออกมายังตัวควบคุมผ่านระบบคอมพิวเตอร์ ดังนั้นจึงสามารถตรวจวัดจำนวนนิวตรอนที่มาชนกับโบรอนได้ และจำนวนนิวตรอนที่วัดได้นี้ก็จะแปรผันตรงกับจำนวนรังสีคอสมิกชั้นต้นที่มาชนกับชั้นบรรยากาศ [9]

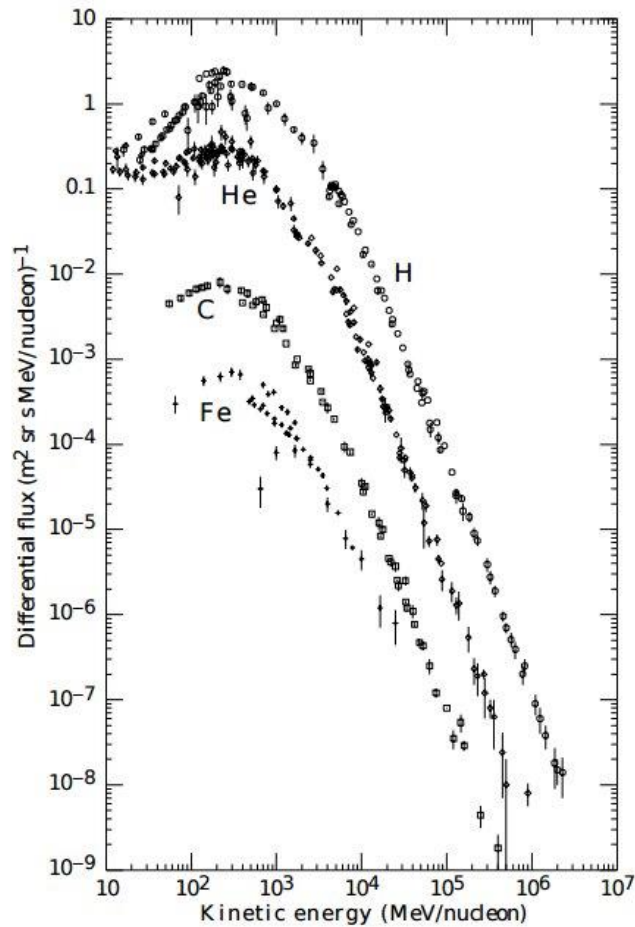
2.1.4 สเปกตรัมพลังงาน และการมอดูเลตด้วยวัฏจักรสุริยะ (energy spectra and modulation with the solar cycle)

พื้นฐานของการวัดรังสีคอสมิก คือการวัดสเปกตรัมพลังงานที่อยู่บนโลก จากการบันทึกรังสีคอสมิกที่แก๊สจากเครื่องตรวจจับนิวตรอนในระยะเวลายาวในความเป็นจริงแล้วช่วงเวลาสเปกตรัมพลังงานจะมีพิสัยของพลังงานที่กว้างมากซึ่งแสดงให้เห็นถึงสเปกตรัมของโปรตอน ฮีเลียมคาร์บอน และนิวเคลียสของเหล็ก เป็นฟังก์ชันของพลังงานจลน์ต่อนิวคลีออนของอนุภาค ในช่วงเวลาในช่วงที่กิจกรรมบนดวงอาทิตย์ต่ำ โดยเห็นว่าสเปกตรัมพลังงานมีการกระจายพลังงานตามกฎกำลังของพลังงาน ครอบคลุมพิสัยพลังงานมากกว่า 1 GeV สเปกตรัมพลังงานสามารถเขียนเป็น

$$N(E)dE = KE^{-\gamma} dE \quad (2.2)$$

พลังงานแสดงในเทอมของพลังงานจลน์ต่อนิวคลีออน ส่วนดัชนี γ อยู่ในพิสัย 2.5-2.7 พลังงานของรังสีคอสมิกที่แก๊สบางส่วนมีพลังงานเริ่มต้นที่ 10 MeV ซึ่งรังสีคอสมิกที่แก๊สจะมีพลังงานสูงมากกว่านี้ สเปกตรัมมีความชันในเชิงบวกจนถึงจุดๆ หนึ่งประมาณ 100 MeV แต่สเปกตรัมพลังงานของนิวคลีโอทุกชนิดมีการมอดูเลตที่เด่นชัดเมื่อเทียบกับความสัมพันธ์กับกฎกำลังของพลังงานสำหรับอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่าประมาณ 10 GeV คุณลักษณะนี้เรียกว่าการมอดูเลตโดยดวงอาทิตย์ (solar modulation) ที่เกี่ยวข้องกับการไหลออกของลมสุริยะที่ไหลออกไปในทิศทางตรงข้ามกับการพุ่งของรังสีคอสมิกเข้ากาแล็กซีที่เข้ามาถึงโลก สเปกตรัมเหล่านี้จึงได้รับผลกระทบอย่างมากจากการมอดูเลตในระบบสุริยะ

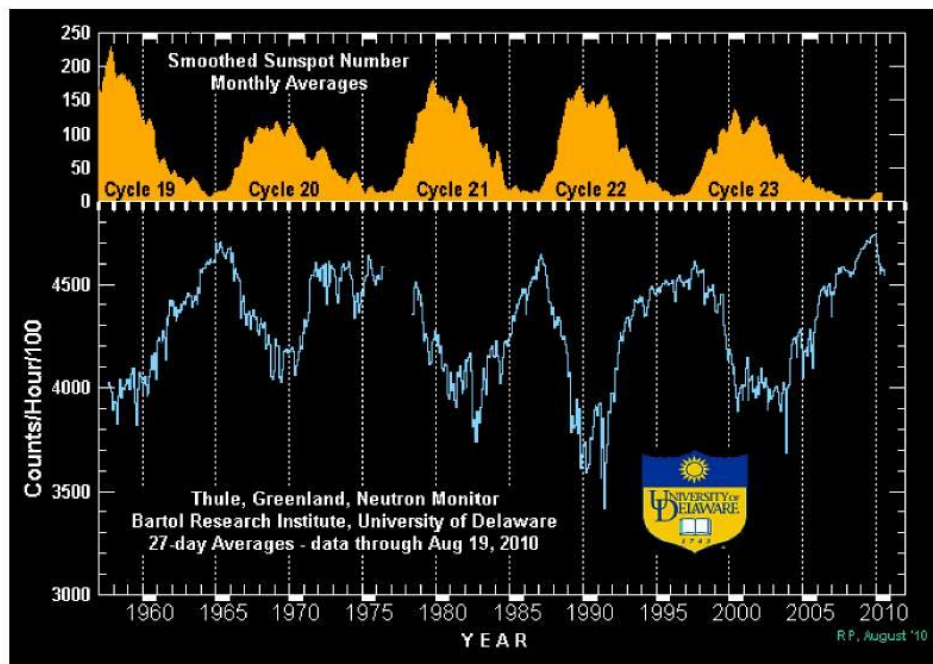
พหุ ประถมศึกษา



รูปที่ 2.2 ความแตกต่างสเปกตรัมพลังงานของรังสีคอสมิกที่ตรวจวัดบนโลก จากการสังเกตด้านบนชั้นบรรยากาศของโลก ได้แก่ สเปกตรัมไฮโดรเจน ฮีเลียม คาร์บอน และเหล็ก ดังแสดงในภาพ แสดงให้เห็นถึงเส้นที่บสเปกตรัมที่ไม่เกิดการมอดูเลตของไฮโดรเจน ฟลักซ์นิวเคลียสของฮีเลียมต่ำกว่าประมาณ 60 MeV เกิดจากฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้นขององค์ประกอบ 4He ที่ผิดปกติ [11]

นอกจากนี้สเปกตรัมพลังงานยังขึ้นอยู่กับความรุนแรงที่เกิดจากกิจกรรมบนดวงอาทิตย์ รังสีคอสมิกจะมีความเข้มสูงสุดในช่วงกิจกรรมสุริยะต่ำสุด (solar minimum) ดังภาพประกอบที่ 2.2 อีกนัยหนึ่งความเข้มของรังสีคอสมิกจะต่ำสุดถ้าสังเกตในช่วงกิจกรรมสุริยะสูงสุด (solar maximum) ก็คือจะตรงข้ามกันเนื่องจากกิจกรรมบนดวงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้นค่าของการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมพลังงานจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องอนุภาคของรังสีคอสมิกกาแล็กติกสามารถเข้าสู่ระบบสุริยะได้แต่การที่กิจกรรมบนดวงอาทิตย์มีมากขึ้นก็ยิ่งรบกวนสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ให้สัทหรือยับยั้งการพุ่งของอนุภาครังสีคอสมิกที่มีพลังงานต่ำกว่าประมาณ 1 GeV เข้ามายังโลกพลังงานหรือค่าสภาพความแข็งแรงทางแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับารมอดูเลตโดยดวงอาทิตย์ นอกจากนี้ยังสามารถเห็นได้โดย

การเปรียบเทียบจากเครื่องตรวจวัดอัตราการนับนิวตรอนของค่าสภาพความแข็งเกร็งทางแม่เหล็กที่แตกต่างกัน ณ ช่วงเวลาสั้นๆ ดังภาพประกอบที่ 2.3 ฟลักซ์รังสีคอสมิกกาเล็กติกที่แปรเปลี่ยนไปตามการพุ่งจากภายนอกตลอดจนภายในบริเวณสุริยมณฑลเข้ามายังโลก



รูปที่ 2.3 การมอดูเลตของฟลักซ์รังสีคอสมิกกาเล็กติกกับวัฏจักรกิจกรรมสุริยะ [12]

มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างสเปกตรัมพลังงานขององค์ประกอบที่แตกต่างกัน องค์ประกอบบางอย่างมีสเปกตรัมพลังงานคล้ายกับเหล็ก เช่น นิกเกิล และคาร์บอน แต่องค์ประกอบชนิดอื่น เช่น โบรอน ไทเทเนียม วาเนเดียม และโพแทสเซียมจะมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นรังสีคอสมิกสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดโดยชนิดที่หนึ่งคือองค์ประกอบปฐมภูมิ เช่น เหล็กที่ถูกเร่งด้วยอนุภาคขนาดใหญ่จากแหล่งที่มา ได้แก่ ซากมหานวดาราและประเภทที่สองคือองค์ประกอบทุติยภูมิ เช่น โบรอน จะถูกสร้างขึ้นโดยการเกิดอันตรกิริยาทางนิวเคลียร์ขององค์ประกอบปฐมภูมิกับนิวเคลียสของอะตอมและโมเลกุลแก๊สระหว่างดวงดาวโดยเรียกกระบวนการนี้เรียกว่าสโพลเลชัน (spallation) [10]

2.2 โครงสร้างลมสุริยะและสนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์

2.2.1 ลมสุริยะ

ลมสุริยะ (solar wind) เป็นอนุภาคประจุความเร็วสูงที่ถูกปล่อยมาจากดวงอาทิตย์ทุกทิศทางตลอดเวลาหรืออาจถูกมองว่าเป็นอนุภาคที่หลุดออกมาจากชั้นโคโรนา (corona) ของดวงอาทิตย์ ซึ่งมีอุณหภูมิสูงและไม่เสถียรอย่างมากออกสู่บริเวณระหว่างดาวเคราะห์ ลมสุริยะประกอบด้วย อิเล็กตรอนและโปรตอน อาจมีไอออนหนักรวมอยู่บ้างเล็กน้อย เช่น แอลฟา ออกซิเจน และเหล็ก เป็นต้น ลมสุริยะถูกปล่อยออกมาจากชั้นบรรยากาศโคโรนาของดวงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง ลมสุริยะมีความเร็วลมตั้งแต่ 200 ถึง นับพัน km/s โดยเฉลี่ยประมาณ 400 km/s ลมนี้ทำให้เกิดการสูญหายของมวลมากกว่า 1 ล้านตันต่อวินาที ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับมวลของดวงอาทิตย์ทั้งหมด ลมสุริยะทำให้รูปร่างของสนามแม่เหล็กของโลกเปลี่ยนไปและการแปรปรวน (fluctuation) ของความเร็ว ความหนาแน่น ทิศทางของลมสุริยะยังส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมของอวกาศอีกด้วย ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นจากการที่อนุภาคจากลมสุริยะปะทะเข้ากับแมกนีโทสเฟียร์ก็คือ แสงขั้วโลก (aurora) หรือแสงเหนือแสงใต้ (northern and southern light) ดวงอาทิตย์ประกอบไปด้วยพลาสมาร้อนและสนามแม่เหล็กเป็นวงเข้าและออกตามผิวของดวงอาทิตย์ บางแห่งบนผิวดวงอาทิตย์พลาสมาจะถูกกักขังไว้ในสนามแม่เหล็กวงปิด แต่ถ้าหากว่าความดันของพลาสมามากกว่าแรงของสนามแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กความเข้มต่ำจะถูกไล่เลียงออกมาพร้อมพลาสมาที่ไหลออกจากดวงอาทิตย์ในรูปของลมสุริยะนั่นเอง

ลมสุริยะจำแนกได้เป็นสองประเภทคือ ลมสุริยะความเร็วต่ำและลมสุริยะความเร็วสูง โดยลมสุริยะความเร็วสูงมีจุดกำเนิดจากช่องโหว่โคโรนา (coronal holes) ส่วนลมสุริยะความเร็วต่ำกระจายตัวอยู่บริเวณธารกระแสเฮลเม็ต (helmet streamer) ลมสุริยะทั้งสองประเภทนี้มีความแตกต่างกันที่ความเร็ว ความหนาแน่นของโปรตอน ฟลักซ์มวล และปริมาณฮีเลียม แต่มีความคล้ายกันที่ความหนาแน่นฟลักซ์ของพลังงานและโมเมนตัม [13]

2.2.2 สนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์

เราเรียกสนามแม่เหล็กที่ถูกลาออกมากพร้อมทั้งพลาสมาในลมสุริยะว่า “สนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์” (interplanetary magnetic field: IMF) และเนื่องจากดวงอาทิตย์มีการหมุนรอบตัวเองทุกๆ 27 วัน ทำให้สนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์มีลักษณะเป็นรูปเกลียวกันหอย (archimedean spiral) มีชื่อเรียกเฉพาะว่า “เกลียวพาร์เกอร์” (Parker spiral) ดังรูปที่ 2.5 โดยสามารถเขียนสมการของมุมเกลียวระหว่างทิศทางของเส้นสนามกับเวกเตอร์ในแนวรัศมีจากดวงอาทิตย์ได้ว่า

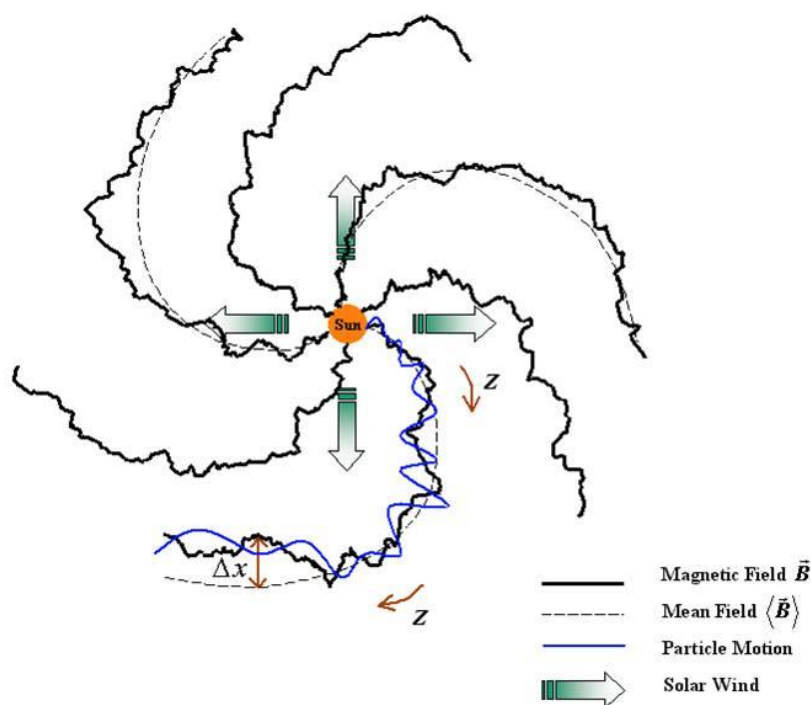
$$\tan \psi = \frac{(r - r_0)\Omega_{\odot} \sin \theta}{V} \quad (2.3)$$

เมื่อ r_0 เป็นระยะทางของพื้นผิวกำเนิด $\Omega_{\odot} = 2.7 \times 10^{-6} \text{ rad s}^{-1}$ เป็นความถี่เชิงมุมรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ θ เป็นมุมโคละติจูดของผู้สังเกต และ V คือความเร็วลมสุริยะ ได้ว่า ณ วงโคจรของโลกหรือ 1 หน่วยดาราศาสตร์ ได้ $r\Omega_{\odot} \approx 400 \text{ kms}^{-1} \sim V$ ดังนั้นสายกระแสจึงทำมุมที่ $\psi \sim 45^\circ$ กับทิศทางในแนวรัศมี [14] และโครงสร้างสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์เขียนได้เป็น

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 (\mathbf{e}_r - \tan \psi \mathbf{e}_\phi) \quad (2.4)$$

นอกจากนี้ยังพบว่า สนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์นี้มีความไม่ราบเรียบโดยมีการแกว่งย่อยๆ อยู่ในอันเกิดจากความปั่นป่วนของชั้นโคโรนา แต่โดยภาพรวมการแกว่งเหล่านี้ยังมีแนวโน้มอยู่ในรูปเกลียวพาร์เกอร์ [15]

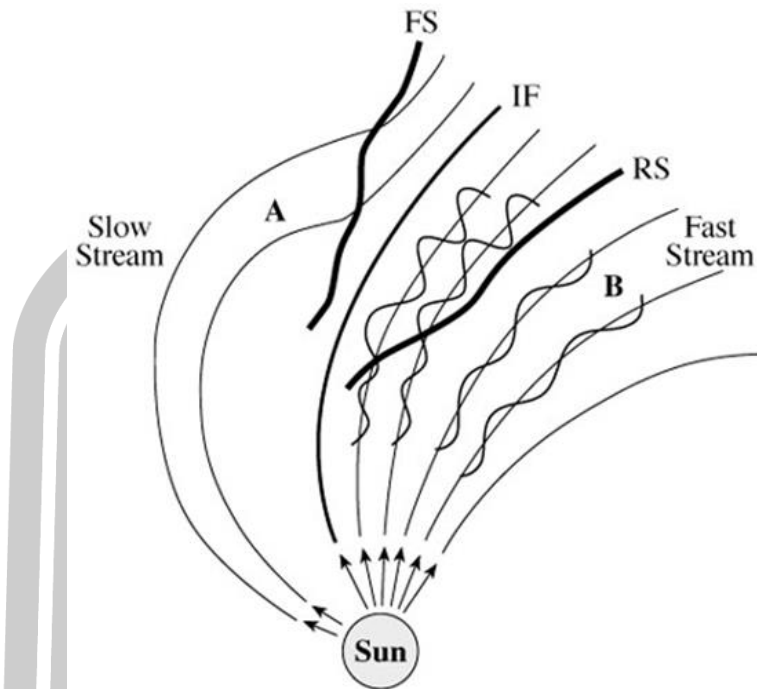




รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์และลมสุริยะ [16]

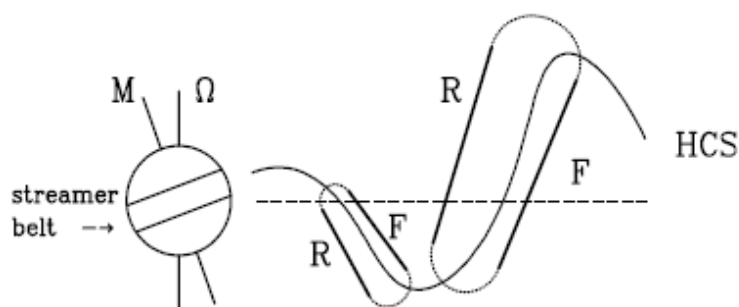
2.2.3 ลมสุริยะความเร็วสูงและบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วม

บริเวณบนโพโตสเฟียร์ของดวงอาทิตย์ที่มีกัมมันตภาพสูง พบเส้นสนามแม่เหล็กพุ่งออกและพุ่งเข้าในลักษณะของวงสนามแม่เหล็ก (magnetic loops) แต่จะมีบริเวณขนาดใหญ่ใกล้กับขั้วเหนือใต้ของดวงอาทิตย์ที่เป็นบริเวณมืดของชั้นโคโรนาในช่วงคลื่นรังสีเอ็กซ์และอัลตราไวโอเล็ตที่มีเส้นสนามพุ่งออกไปไกลมาก ๆ ก่อนที่จะพุ่งกลับเข้ามาเราเรียกบริเวณนั้นว่า ช่องโหว่โคโรนา (coronal holes) ซึ่งเป็นบริเวณที่ลมสุริยะความเร็วสูงพุ่งออกมาจากชั้นบรรยากาศดวงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง ซึ่งอนุภาคเหล่านี้มีพลังงานสูงและเคลื่อนที่หนีแรงโน้มถ่วงของดวงอาทิตย์ด้วยอัตราเร็วสูง เนื่องจาก การปะทุบนพื้นผิวทำให้สสารบางส่วนหลุดออกมาในรูปของอนุภาค (อิเล็กตรอน โปรตอน) เมื่ออนุภาคเข้าสู่ชั้นโคโรนาที่มีอุณหภูมิมากกว่า 1 ล้านเคลวิน ทำให้อนุภาคถูกเร่งจนมีพลังงานได้ถึง 1,000 eV จากนั้นลมสุริยะความเร็วสูงซึ่งมีความเร็ว $\geq 450 \text{ km s}^{-1}$ ปะทะกับลมสุริยะความเร็วต่ำ ซึ่งมีความเร็วน้อยกว่า 400 km s^{-1} ที่อยู่ด้านหน้า ทำให้เกิดบริเวณที่มีการกอดอัดของพลาสมาและความดันพลวัตและสนามแม่เหล็กอย่างสูง เรียกว่า บริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วม (corotating interaction region) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 บริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วม เมื่อ FS คือ คลื่นกระแทกด้านหน้า, IF คือรอยต่อของลมสุริยะ และ RS คือ คลื่นกระแทกด้านหลัง [17]

จากรูปที่ 2.5 เมื่อกระแสลมสุริยะความเร็วสูงที่ถูกปลดปล่อยมาจากช่องโหว่คอโรนาปะทะกับกระแสลมสุริยะความเร็วต่ำ ทำให้เกิดบริเวณอันตรกิริยาร่วมในอวกาศระหว่างดาวเคราะห์ (สนามแม่เหล็กของกระแสลมสุริยะความเร็วต่ำมีความโค้งมากกว่าในสนามแม่เหล็กของกระแสลมสุริยะความเร็วสูง) เกิดหน้าสัมผัสกระแส (interface) ที่อยู่ระหว่างกระแสเร็วและช้าในลมสุริยะ บริเวณอันตรกิริยาจะสิ้นสุดลงโดยจะมีการกระแทกไปข้างหน้าและกระแทกย้อนกลับ ซึ่งการเกิดขึ้นของบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมนั้นเป็นปัจจัยควบคุมการปิดกั้นรังสีคอสมิกกาแล็กติกในระยะสั้น แต่ก็สามารถยับยั้งไม่ให้รังสีคอสมิกเข้ามาถึงโลกได้ในปริมาณมาก อีกทั้งการขยายตัวตามแนวละติจูดของบริเวณอันตรกิริยาร่วมมีผลต่อการป้องกันรังสีคอสมิกกาแล็กติกเฉพาะแห่ง บริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมแพร่ออกไปเหมือนกับกระแส มีการบีบอัดและการพุ่งเข้าไปด้านหน้าของหน้าสัมผัสกระแส ลมสุริยะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการเพิ่มขึ้นทั้งความเร็วลมสุริยะ อุณหภูมิและความดัน กระบวนการเร่งการพุ่ง ทำให้ทิศทางของของลมสุริยะเปลี่ยนไปที่ขอบด้านหน้าลมสุริยะจะถูกเบี่ยงเบนออกไปทางทิศตะวันตกที่ขอบด้านหลังจะมีความเร็วแตกต่างกัน เมื่อความเร็วถูกเร่งที่บริเวณด้านหน้าก็จะแพร่ขยายไปถึงด้านหลัง [18] บริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมวางตัวอยู่ใกล้กับแผ่นกระแสสุริยมณฑล (heliospheric current sheet) ที่แบ่งขั้วแม่เหล็กของดวงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2. 6 แบบจำลองแผนภาพของขั้วคู่เอียงของแกนแม่เหล็ก, M , จะเอียงกับส่วนที่เกี่ยวข้องกับแกนหมุน, ลมสุริยะเข้าเล็ดลอดออกมาจากแถบธารอนุภาค (streamer) ที่อยู่รอบๆสนามแม่เหล็กดวงอาทิตย์, เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กเอียงวิวัฒนาการเป็นคลื่นแผ่นกระแสสุริยมณฑล (HCS) บริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมเดินทางไปข้างหน้า (F) และย้อนกลับ (R) [19]

2.3 ทฤษฎีการมอดูเลตรังสีคอสมิกโดยดวงอาทิตย์

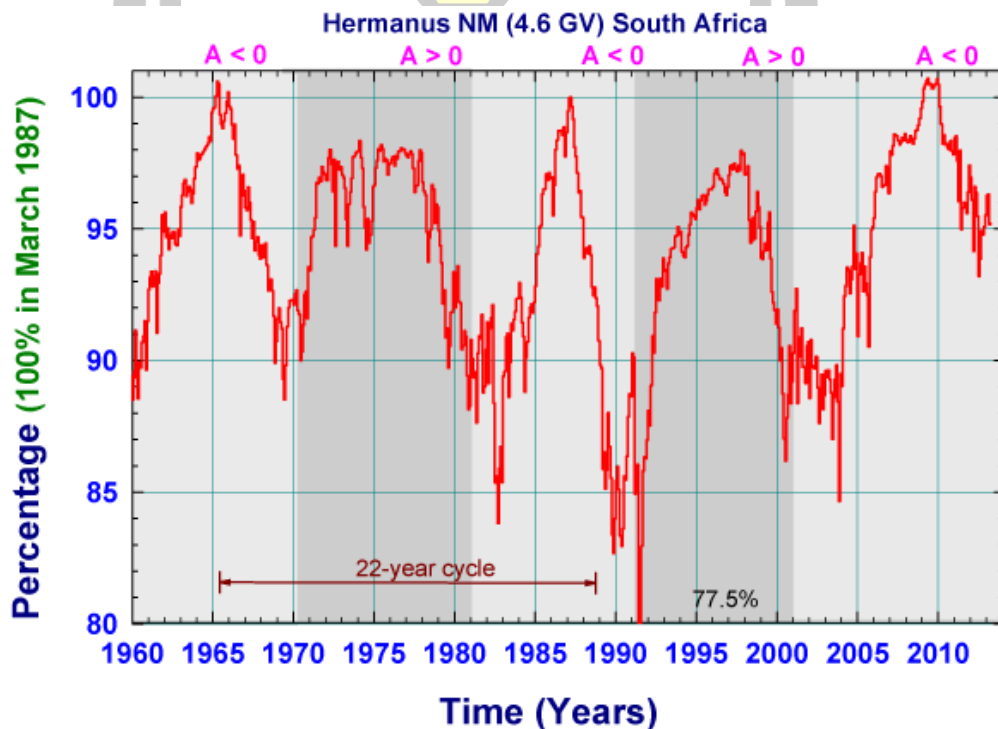
สนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ประกอบด้วยความไร้ระเบียบที่มีขนาด 10^5 - 10^7 km ซึ่งมีความใกล้เคียงกับรัศมีไจโรหรือลามอร์ของอนุภาครังสีคอสมิกทั่วไป Parker (ปี ค.ศ.1958) ซึ่งให้เห็นผลกระทบของการชนของอนุภาครังสีคอสมิกพลังงานต่ำกับความไร้ระเบียบในสนามแม่เหล็กลมสุริยะในลักษณะของอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค-คลื่น ทำให้เกิดการกระเจิงจากการชนหรือการสะท้อนไปมาของรังสีคอสมิกตามเส้นของสนามที่มีขนาดใหญ่ กล่าวคืออนุภาครังสีคอสมิกมีการเคลื่อนที่แบบสุ่มในกรอบอ้างอิงของสนามแม่เหล็กที่ไร้ระเบียบ [1] เมื่อการชนกันมีนัยสำคัญหรือเกิดขึ้นบ่อยครั้ง เมื่อเทียบกับความถี่ไซโคลตรอน (cyclotron) ได้ว่าการพุ่งไปตามหรือข้ามเส้นของสนามแม่เหล็กมีความสำคัญ ในทางตรงกันข้าม เมื่อการชนมีน้อยครั้ง การพุ่งไปตามเส้นสนามกลายเป็นกลไกที่มีความสำคัญ

สมการขนส่งรังสีคอสมิก (cosmic ray transport equation) มีจุดกำเนิดจากสมการความต่อเนื่อง ซึ่งกล่าวว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของอนุภาคในปริมาตรหนึ่งจะต้องเท่ากับอัตราการไหลของอนุภาคของผิวที่ปิดรอบปริมาตรนั้น รวมกับอัตราที่อนุภาคถูกสร้างหรือทำลาย เช่น การแตกตัว กลับมารวมตัวใหม่ การชนไม่ยืดหยุ่น

อนุภาครังสีคอสมิกในการไหลของกระแสลมสุริยะและสนามแม่เหล็กในสุริยมณฑลได้รับผลกระทบมาจากปรากฏการณ์ขนส่งต่างๆ ซึ่งสมการพื้นฐานสำหรับการขนส่งและการมอดูเลตรังสีคอสมิก เขียนเป็น [1]

$$\frac{\partial U}{\partial t} = - \mathbf{V} + \langle \mathbf{v}_D \rangle \cdot \nabla U + \nabla \cdot \mathbf{K}_s \cdot \nabla U + \frac{1}{3} \nabla \cdot \mathbf{V} \frac{\partial U}{\partial \ln P} \quad (2.5)$$

เมื่อ U \mathbf{r}, P, t คือความหนาแน่นอนุพันธ์ (differential density) ของรังสีคอสมิก \mathbf{V} คือความเร็วลมสุริยะ $\langle \mathbf{v}_D \rangle$ คือความเร็วลอยเลื่อน \mathbf{K}_s คือเทนเซอร์การฟุ้งแบบสมมาตร และ P คือความเข้มเกร็งทางแม่เหล็ก สมการนี้ประกอบด้วยกลไกขนส่งรังสีคอสมิกตามทางขวาของสมการ ประกอบด้วย 1) การพา (convection) ของรังสีคอสมิกออกไปโดยลมสุริยะ 2) การลอยเลื่อน (drift) ของรังสีคอสมิกในสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ที่มีเกรเดียนต์และความโค้ง รวมทั้งผลของแผ่นกระแสสุริยะมณฑล 3) การฟุ้งของรังสีคอสมิกนอกระบบสุริยะมาตามสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ และ 4) การหน่วงอะเดียบาติกจากการขยายตัวของลมสุริยะและการสูญเสียพลังงานในการเดินทางจากแหล่งกำเนิด



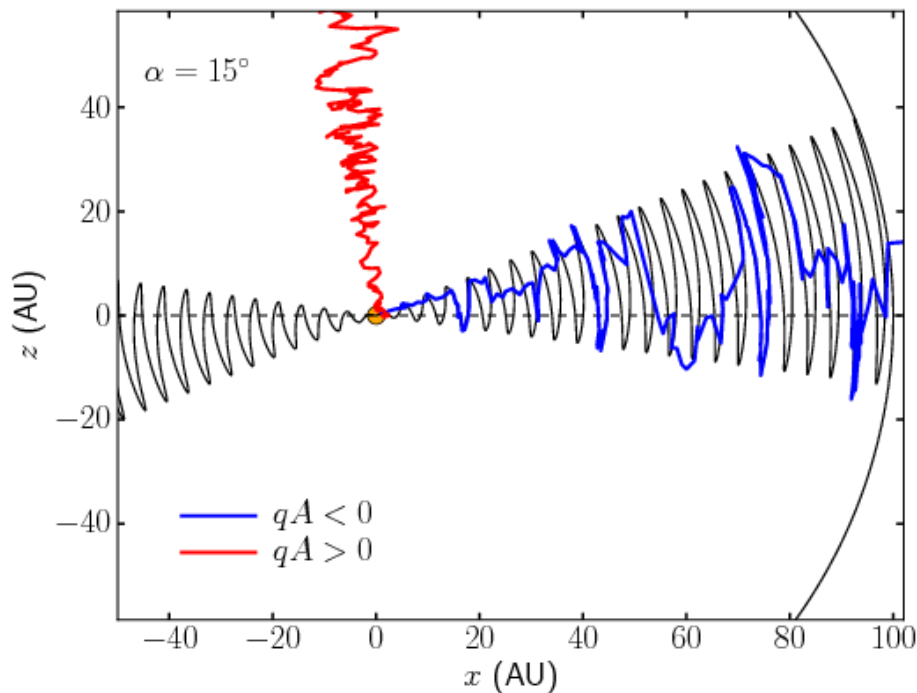
รูปที่ 2.7 ภาพแสดงวัฏจักร 11 ปีและ 22 ปี ในการมอดูเลตโดยดวงอาทิตย์ของรังสีคอสมิกที่สังเกตโดยสถานีตรวจวัดนิวตรอน Hermanus ในแอฟริกาใต้ ณ ความเข้มเกร็งขีดเริ่ม 4.6 GV ในพจน์ของร้อยละโดย 100% อยู่ในเดือนมีนาคม ค.ศ. 1987 [20]

2.4 แบบจำลองการลอยเลื่อนของรังสีคอสมิก

จากการตรวจวัดพบว่า ฟลักซ์รังสีคอสมิกกาแล็กติกมีแนวโน้มการแปรผัน (มอดูเลต) ในระยะยาวที่ผูกพันกับจำนวนจุดดำ (sunspot) บนดวงอาทิตย์เรียกว่า วัฏจักรจุดดำ ซึ่งแปรผันไปด้วย

คาบเวลาประมาณ 11 ปี (จากจำนวนมากที่สุดไปยังมากที่สุดของวัฏจักรที่อยู่ติดกัน) อย่างไรก็ตาม วัฏจักรที่แท้จริงของพลังค์รังสีคอสมิกคือเวลาประมาณ 22 ปีเรียกว่า วัฏจักรเฮล ซึ่งตรงกับคาบเวลาของวัฏจักรทางแม่เหล็กสุริยะ (สนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์กลับขั้วทุก 11 ปี) กล่าวคือการแปรผันของพลังค์รังสีคอสมิกมีลักษณะปลายแหลมในยุคแม่เหล็กเชิงลบ $A < 0$ (สนามแม่เหล็กดวงอาทิตย์มีทิศจากใต้ไปเหนือ เช่น วัฏจักรสุริยะที่ 21 (1981-1990) และ 23 (2002-2011)) แต่มีลักษณะปลายโค้งในยุคแม่เหล็กเชิงบวก $A > 0$ (สนามแม่เหล็กดวงอาทิตย์มีทิศพุ่งจากเหนือไปใต้ เช่น วัฏจักรสุริยะที่ 20 (1970-1979) และ 22 (1992-2000)) รูปที่ 2.7 ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีความสมนัยกับทฤษฎีการลอยเลื่อน (drift) ในสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ โดยรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่เดินทางในสุริยมณฑล (บริเวณที่โอบล้อมระบบสุริยะด้วยผลของลมสุริยะ) ภายใต้อิทธิพลของการลอยเลื่อนแบบเกรเดียนต์และแบบโค้ง จะได้รับผลจากแผ่นกระแสสุริยมณฑล ซึ่งวางตัวอยู่ใกล้ระนาบศูนย์สูตรดวงอาทิตย์และแบ่งแยกครึ่งทรงกลมของสนามแม่เหล็กดวงอาทิตย์ที่มีทิศตรงข้ามกัน และมุมระหว่างระนาบของแผ่นกระแสกับระนาบศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์เรียกว่า “มุมเอียง” (tilt angle) ของแผ่นกระแส ที่คาดว่าป็นศูนย์กลางของทฤษฎีลอยเลื่อนของการมอดูเลตรังสีคอสมิกกาแล็กติก โดยเฉพาะในยุค $A < 0$ เมื่อรังสีคอสมิกเดินทางเข้าสู่สุริยมณฑลตามแผ่นกระแสสุริยมณฑล [3] ย่อมได้รับผลจากมุมเอียงดังกล่าวที่เพิ่มสูงขึ้นตามวัฏจักรสุริยะที่มีกิจกรรมมากขึ้น (ในยุค $A > 0$ รังสีคอสมิกเข้าสู่ระบบสุริยะจากขั้วเหนือได้ จึงไม่ได้รับผลจากความเอียงของแผ่นกระแสสุริยมณฑล) รูปที่ 2.8 การที่ขั้วแม่เหล็กไม่ได้วางทับพอดีกับแกนการหมุนของดวงอาทิตย์ ทำให้แผ่นกระแสสุริยมณฑลทำมุมเอียงเทียบกับระนาบศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์ โดยมุมเอียงนี้แปรเปลี่ยนไปเป็นคาบเมื่อดวงอาทิตย์หมุนรอบตัวเอง การแปรผันนี้ถูกชักลากเข้าสู่ระบบสุริยะโดยลมสุริยะและทำให้แผ่นกระแสกระเพื่อมเป็นคลื่นออกไปในแนวรัศมีและแนวละติจูดโดยสามารถอธิบายได้ในรูปมุมเอียงของแผ่นกระแส โดยในช่วงที่กัมมันตภาพสุริยะต่ำสุดพบว่า มุมเอียงมีค่าน้อยหรือในช่วง 5-10 องศา ในขณะที่ในช่วงกัมมันตภาพสูงสุด มุมเอียงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากก่อนที่จะมีการกลับขั้วของสนามแม่เหล็กดวงอาทิตย์ โดยการกลับขั้วเกิดขึ้นทุกประมาณ 11 ปี

พูนุ ปณฺ ทิโต ชิว



รูปที่ 2.8 ภาพของการเดินทางของรังสีคอสมิกผ่านระบบสุริยะ (มองด้านข้าง) รังสีคอสมิกเดินทางมาถึงโลกตามเส้นทางที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับขั้วทางแม่เหล็กสุริยมณฑล โดยแผ่นกระแสสุริยมณฑลแทนด้วยเส้นสีดำที่บีบตัวไปมาและทำมุมเอียง 15° อนุภาคประจุบวกเคลื่อนที่ตามแผ่นกระแสและตัดข้ามแผ่นกระแสโดยการพุ่งในช่วง $A < 0$ ในทางตรงข้ามอนุภาคพุ่งได้โดยตรงในระหว่างคาบเวลา $A > 0$ ดังนั้นเวลาในการเดินทางและการสูญเสียพลังงานสามารถแปรเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญขึ้นอยู่กับคาบเวลาของวัฏจักรสุริยะ และขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของอนุภาครังสีคอสมิก เส้นโค้งแทนขอบเขตระบบสุริยะซึ่งขึ้นอยู่กับบริเวณใกล้กับเขตหยุดสุริยะหรือสิ้นสุดการกระแทก [21]

ความเร็วลอยเลื่อนเฉลี่ยของการกระจายตัวของรังสีคอสมิกที่ใกล้สภาพไอโซโทรปิก (nearly-isotropic particle) ของรังสีคอสมิกกาแล็กติกคือ

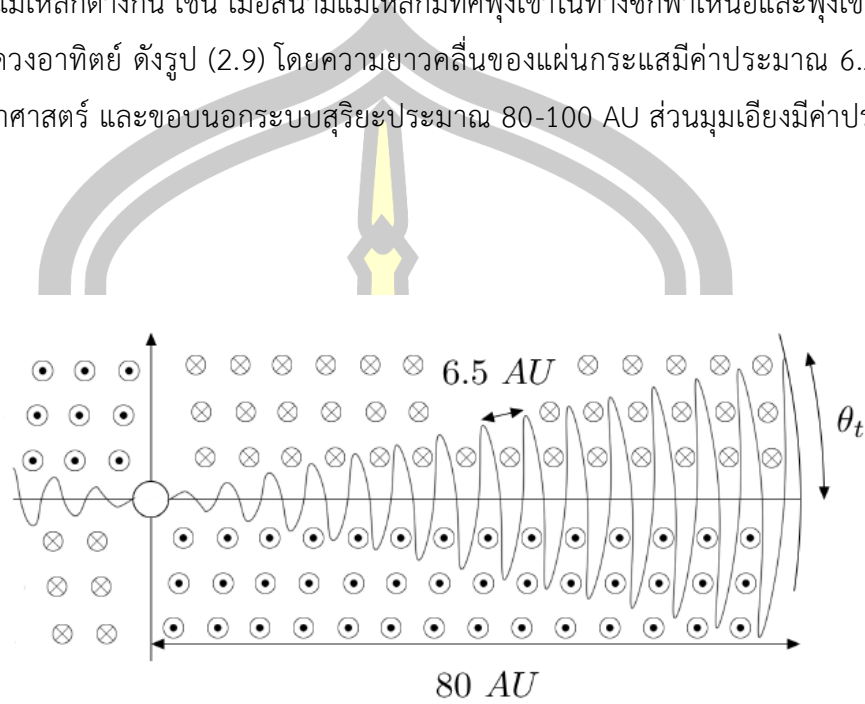
$$\mathbf{v}_d = \nabla \times \kappa_T \mathbf{e}_B \quad (2.6)$$

เมื่อ \mathbf{e}_B คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของสนามแม่เหล็ก \mathbf{B} โดย

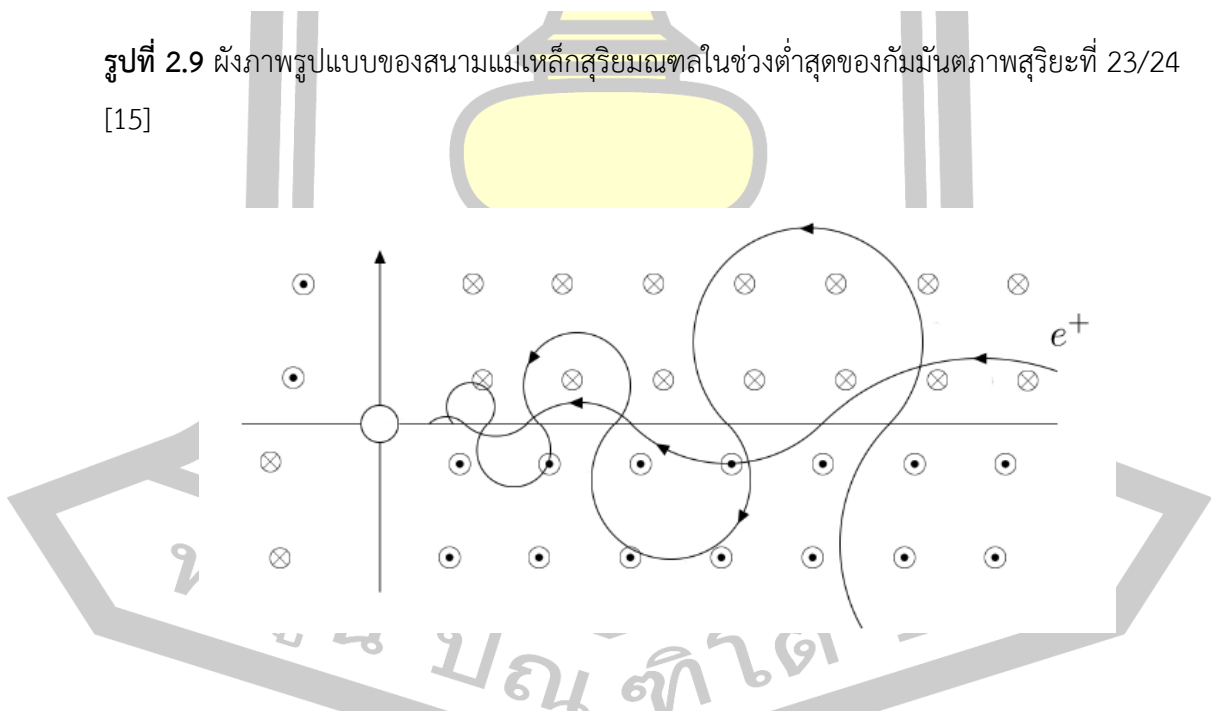
$$\kappa_T = \frac{pv}{3qB} \equiv \frac{\beta P}{3B} \quad (2.7)$$

เมื่อ p คือโมเมนตัมของอนุภาค v คืออัตราเร็ว $\beta = v/c$ และ P คือความแข็งแรงทางแม่เหล็ก

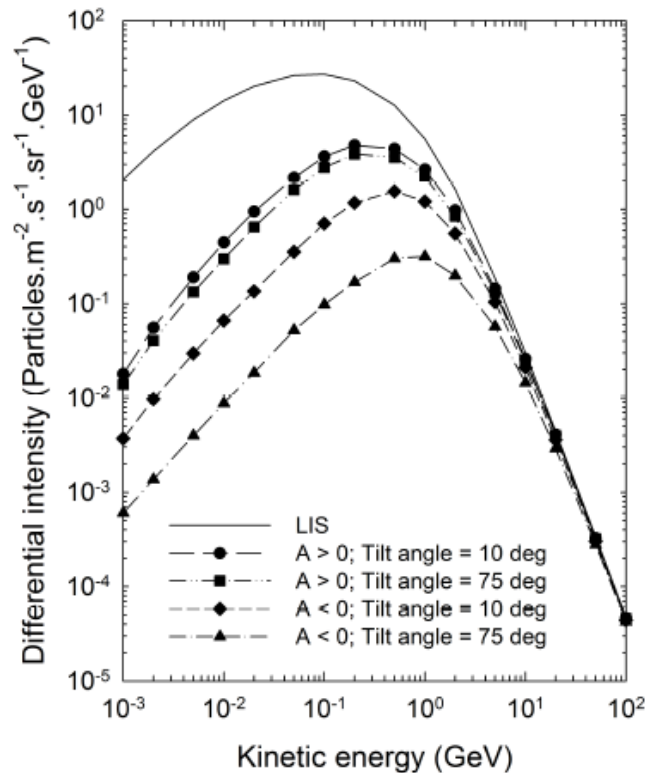
แผ่นกระแสสุริยมณฑลวางตัวเป็นรูปคลื่นในแนวละติจูดในสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ที่มีขั้วทางแม่เหล็กต่างกัน เช่น เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งเข้าในทางซีกฟ้าเหนือและพุ่งเข้าในทางซีกฟ้าใต้ของดวงอาทิตย์ ดังรูป (2.9) โดยความยาวคลื่นของแผ่นกระแสมีค่าประมาณ 6.5 AU หรือหน่วยดาราศาสตร์ และขอบนอกระบบสุริยะประมาณ 80-100 AU ส่วนมุมเอียงมีค่าประมาณ 10 องศา



รูปที่ 2.9 ผังภาพรูปแบบของสนามแม่เหล็กสุริยมณฑลในช่วงต่ำสุดของกัมมันตภาพสุริยะที่ 23/24 [15]



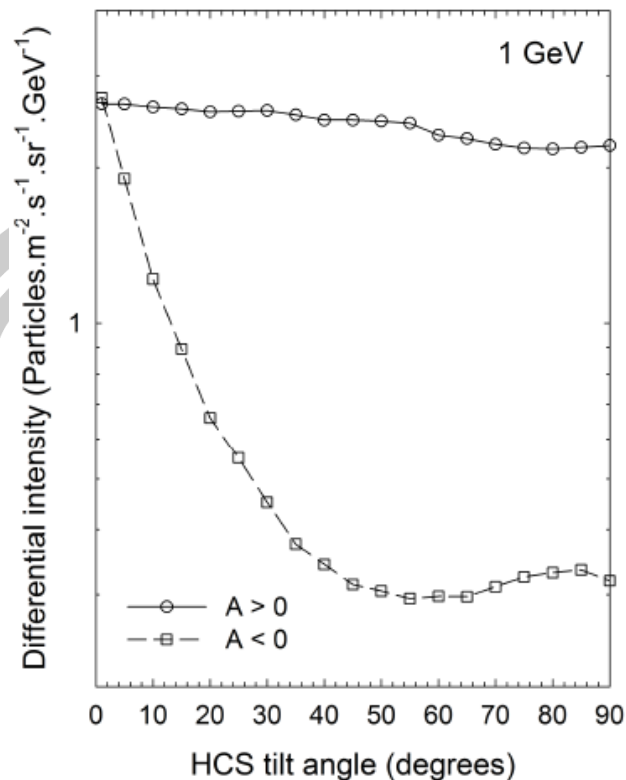
รูปที่ 2.10 เส้นทางของอนุภาคประจุบวกที่ข้ามระนาบสุริยวิถีในการประมาณแบบแผ่นกระแสเรียบและสนามแม่เหล็กอย่างง่าย พบว่าการเคลื่อนที่โดยรวมของอนุภาคประจุบวกมีทิศเข้าสู่ศูนย์กลางระบบสุริยะเสมอ ในขณะที่อนุภาคมีประจุลบมีเส้นทางที่ตรงกันข้ามคือลอยเลื่อนออกนอกระบบสุริยะ (ดวงอาทิตย์อยู่ทางซ้าย) [15]



รูปที่ 2.11 สเปกตรัมพลังงานจากการคำนวณที่โลก สำหรับทั้งสองวัฏจักรแม่เหล็กสุริยะ ในกรณีมุมเอียงเป็น 10 องศา และ 75 องศา [22]

การแปรผันของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงของแผ่นกระแสสุริยมณฑล รูปที่ 2.11 แสดงสเปกตรัมพลังงานที่คำนวณจากแบบจำลองการมอดูเลตสำหรับรังสีคอสมิกโปรตอน โดยคำตอบแสดงในช่วงวัฏจักรขั้วแม่เหล็กสุริยมณฑล $A > 0$ (สี่เหลี่ยมและวงกลมทึบ) และ $A < 0$ (สามเหลี่ยมและข้ามหลามตัด) พบว่า ความเข้มในช่วง $A > 0$ มีค่าสูงกว่าในช่วง $A < 0$ ยกเว้นที่พลังงานสูงสุด และมีความเข้มสูงสำหรับมุมเอียงน้อย (10 องศา) มากกว่ามุมเอียงมาก (75 องศา)

รูปที่ 2.12 แสดงความเข้มโปรตอนที่ตอบสนองที่โลกสำหรับพลังงานจลน์ $E = 1$ GeV ต่อการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงสำหรับวัฏจักรแม่เหล็กที่ต่างกัน ซึ่งสำหรับ $A > 0$ มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มที่ลดลงเพียงเล็กน้อย แต่สำหรับ $A < 0$ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความเข้มอย่างมาก กล่าวคือความเข้มรังสีคอสมิกลดลงอย่างมากเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นถึงมุม 55 องศา แล้วจึงมีระดับค่อนข้างคงที่และหมายเหตุว่า ความเข้มโปรตอนมีค่าสูงที่สุดเมื่อมุมเอียงเป็นศูนย์ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแบบจำลองลอยเลื่อน



รูปที่ 2.12 การตอบสนองของความเข้มอนุพัทธ์ของโปรตอนทั่วโลก (ณ พลังงาน $E = 1 \text{ GeV}$) ต่อการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงในทั้งสองวัฏจักรแม่เหล็กสุริยะภายใต้สมมติฐานของการลอยเลื่อนอุดมคติ [22]

เนื่องจากสนามแม่เหล็กโดยรวมของดวงอาทิตย์ประกอบด้วยครึ่งซีกของขั้วทางแม่เหล็กที่ตรงข้ามกันซึ่งถูกแบ่งออกโดยแผ่นกระแสสุริยมณฑล ทำให้ การลอยเลื่อนความโค้งและเกรเดียนต์มีผลต่อการเดินทางของรังสีคอสมิกกาแล็กติก [23] แบบจำลองการลอยเลื่อนทำนายการขึ้นอยู่กับมุมเอียงของแผ่นกระแสอย่างมากในยุค $A < 0$ เมื่ออนุภาคประจุบวกซึ่งส่วนใหญ่เป็นรังสีคอสมิกโปรตอนเดินทางเข้าสู่สุริยมณฑล ดังนั้นความเอียงจึงเป็นปัจจัยหลักของการมอดูเลตความเข้มรังสีคอสมิก [3] อย่างไรก็ตาม การสังเกตการณ์การมอดูเลตที่หมุนร่วมกับดวงอาทิตย์ในยุค $A > 0$ มีการลดลงมากกว่ายุค $A < 0$ [24]

2.5 การลดลงแบบฟอรัซ

การสังเกตการณ์ครั้งแรกเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงชั่วคราวของรังสีคอสมิกในโลก ได้รับการค้นพบโดย Forbush (1937) [5] การศึกษาการเปลี่ยนแปลงชั่วคราวของสเปกตรัมพลังงานของรังสีคอสมิกกาแล็กติกแสดงให้เห็นว่าการลดลงอย่างรวดเร็วของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกในช่วง

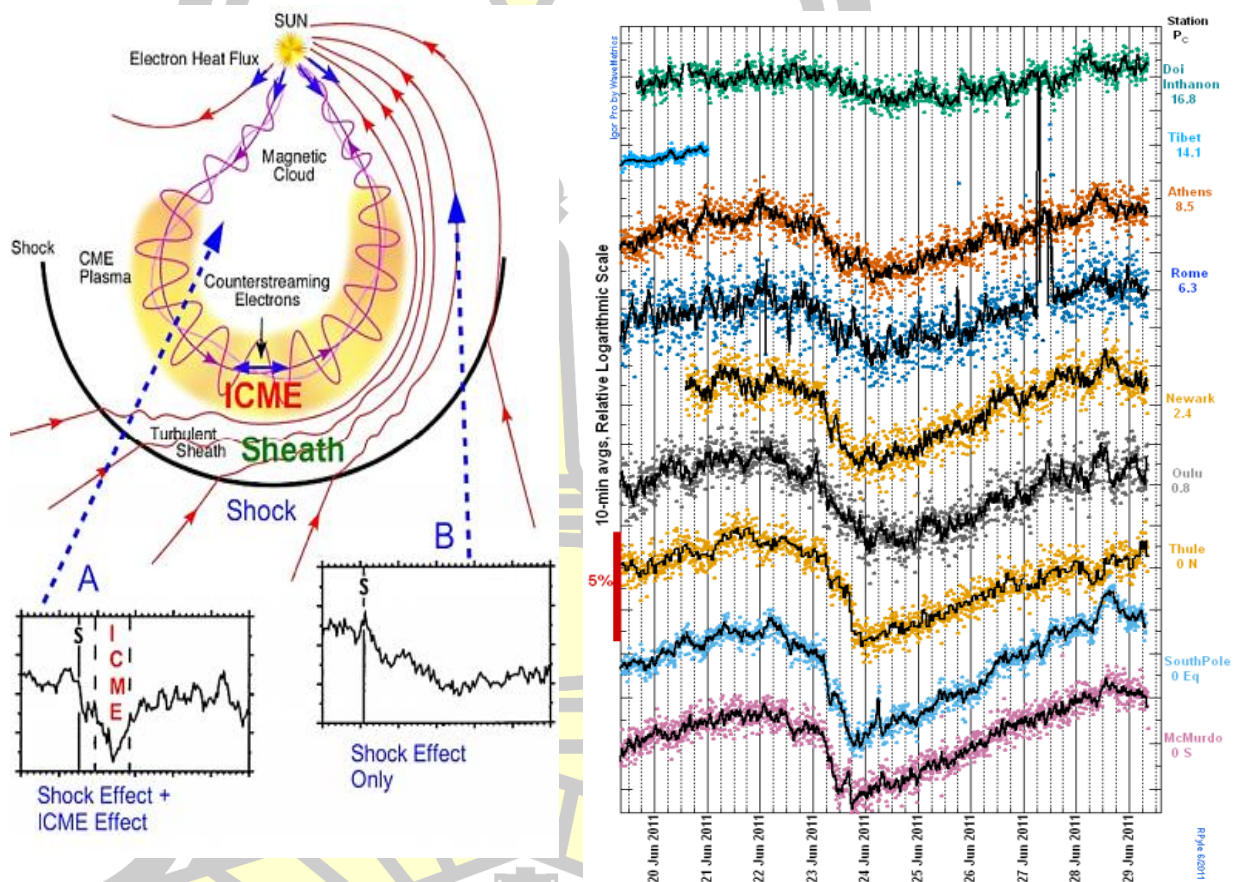
1-2 วันและจะค่อยๆฟื้นตัวใน 5-7 วันเรียกว่า การลดลงแบบฟอร์บช (Forbush decreases : Fds) โดยจะเกิดขึ้นหลังจากเกิดการปะทุและปลดปล่อยกลุ่มมวลอนุภาคจำนวนมากของดวงอาทิตย์ ปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นแบบสุ่มในช่วงเวลาที่ไม่สม่ำเสมอ ในช่วงนี้ความถี่ของกัมมันตภาพสุริยจะ จะสูงสุด การลดลงแบบฟอร์บชมีสามประเภทพื้นฐาน (1) ที่เกิดจากคลื่นกระแทกและการพ่น (2) ที่เกิดจากการคลื่นกระแทกเท่านั้นและ (3) ที่เกิดจากการพ่นเท่านั้น แอมพลิจูดการลดลงแบบฟอร์บช ของรังสีคอสมิกกาแล็กติกจะพบความแตกต่างระหว่างการเริ่มต้นและและการสิ้นสุดการลดลงแบบฟอร์บช โดยแอมพลิจูดการลดลงแบบฟอร์บชของรังสีคอสมิกกาแล็กติกขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแกร่งทางแม่เหล็ก [5]

คลื่นกระแทกระหว่างดาวเคราะห์สามารถสกัดกั้นรังสีคอสมิกกาแล็กติกในเรื่อร้อย MeV ถึง GeV การลดลงแบบฟอร์บชสังเกตได้ในข้อมูลจากสถานีตรวจวัดนิวตรอนภายหลังเหตุการณ์อนุภาคทรงพลังสุริย (solar energetic particle: SEP) ขนาดใหญ่ ซึ่งได้รับการตีความว่าเป็นการมอดูเลตที่ไม่ปกติต่อรังสีคอสมิกกาแล็กติกโดยเมฆแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ที่ถูกปลดปล่อยในรูปของ ICME การมอดูเลตเหล่านี้สามารถตรวจวัดได้แม้ในระยะไกล อาทิเช่น ที่เกิดจากเหตุการณ์การลุกจ้า-CME ด้านหลังดวงอาทิตย์โดยไม่มีการเพิ่มขึ้นของอนุภาคใกล้โลก [25] โดย CME ประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ ICME และช็อคที่ถูกขับอยู่ด้านหน้า ทั้งสองส่วนนี้ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ โดยเงื่อนไขสำคัญของ ICME ได้แก่ การลดลงของอุณหภูมิพลาสมาและแม่เหล็กที่แสดงการหมุนอย่างราบเรียบของสนามแม่เหล็ก

การลดลงแบบฟอร์บชมีการเปลี่ยนแปลงสองชั้นคือ มีการลดความเข้มรังสีคอสมิกเมื่อช็อคเคลื่อนที่ผ่านไป ติดตามมาด้วยการลดลงที่มากขึ้นเมื่อผู้สังเกตเข้าสู่มวลที่ถูกพ่นที่ขั้วขั้วทำให้เกิดคลื่นกระแทก แสดงดังรูปที่ 2.13 (ซ้าย) โดยค่าต้นแบบการลดลงของความเข้มสำหรับพลังงาน 500 MeV คือ ~2% ที่เกิดจากช็อค และ ~5% สำหรับการลดลงที่เกิดจากมวลที่ถูกพ่น (ejecta) การลดลงเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน (ภายในเรื่อนาที) แต่มีระยะฟื้นตัวที่ยาวนานเป็นเวลาหลายวัน ในทำนองเดียวกัน พลักซ์รังสีคอสมิกที่วัดโดยสถานีตรวจวัดนิวตรอนในเหตุการณ์ฟอร์บชมีความคล้ายคลึงกับที่วัดในอวกาศ (รูปที่ 2.13 (ขวา))

ICMEs หรือ MCs รบกวนสนามแม่เหล็กและพลาสมาในอวกาศระหว่างดาวเคราะห์และส่งผลให้ปริมาณรังสีคอสมิกที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีสัดส่วนของการลดลงมากที่สุด 25% [26] ก่อนจะค่อย ๆ ฟื้นระดับแบบชี้กำลังสู่สภาวะปกติภายในระยะเวลาประมาณ 3-10 วัน อย่างไรก็ตาม ปริมาณการลดลงแบบฟอร์บช ณ แต่ละสถานีตรวจวัดนิวตรอนมีระดับที่ไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 2.13 (ขวา) โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแกร่งช่วงตัดทางแม่เหล็กโลก

($P_c = pc / ze$) ซึ่งบ่งบอกถึงค่าต่ำสุดของโมเมนตัมต่อประจุที่จะสามารถต้านทานการเบี่ยงเบนโดยสนามแม่เหล็กโลกแล้วผ่านเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ ณ แต่ละตำแหน่งบนผิวโลก และพบว่า ขนาดของการลดลงเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มเกร็งทางแม่เหล็กช่วงดึกมีค่าลดลง การปริทัศน์โดย Lockwood [27] ได้สรุปถึงการขึ้นอยู่กับความเข้มเกร็งทางแม่เหล็กของขนาดที่ลดลงและเวลาในการฟื้นตัว เวลาเริ่มต้นและแอนไอโซทรอปีและการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์ก่อนหน้านี้



รูปที่ 2.13 (ซ้าย) การฉายภาพ ICME ที่ขับเคลื่อนและการลดลงแบบพอร์บุชเมื่อ ICME เข้าชนประสานงาน (A) และที่ปิก (B) (ขวา) ปริมาณรังสีคอสมิกที่สถานีตรวจวัดนิวตรอน McMurdo, SouthPole, Thule, Oulu, Newark, Rome, Athens, Tibet, และดอยอินทนนท์ (สถานีตรวจวัดนิวตรอนสิรินธร) [28]

2.6 การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นใน 27 วันในฟลักซ์ของรังสีคอสมิกที่สังเกตโดยสถานีตรวจวัดนิวตรอนบน พื้นโลกในกรอบซินนอดิก (บางครั้งเรียกว่า การแปรผันราย 26 วัน หากสังเกตโดยยานอวกาศ) มีความเกี่ยวข้องกับสมสุริยะและโครงสร้างสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ที่หมุนรวมไป

ตามคาบการหมุน 27 วัน ของดวงอาทิตย์ กล่าวคือพลาสมาและสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ในลมสุริยะ และองค์ประกอบของความเข้มรังสีคอสมิกทั้งหมดมีลักษณะกึ่งเสถียรในรอบประมาณ 27 วันซึ่งมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับวิวัฒนาการของของไหลคอโรนาของดวงอาทิตย์ โดยผลของการมอดูเลตความเข้มรังสีคอสมิกโดยโครงสร้างลมสุริยะที่หมุนร่วมไปกับดวงอาทิตย์ทำให้เกิดการลดลงของความเข้มรังสีคอสมิกแบบเวียนที่บางครั้ง เรียกว่า การลดลงแบบฟอรัชชี่ที่เวียนซ้ำ (recurrent Forbush decrease) โดยมีระดับการลดลงประมาณ 1-5 % โดยส่งผลต่ออนุภาครังสีคอสมิกกาแล็กติกที่เดินทางเข้าสู่สุริยมณฑลรวมไปถึงอิเล็กตรอนโยเวียนที่เป็นส่วนประกอบหลักของสุริยมณฑลในช่วงพลังงาน 5–30 MeV การลดลงแบบฟอรัชชี่โดย ICME มีความโดดเด่นในระยะสูงสุดของกัมมันตภาพสุริยะ แต่การลดลงแบบฟอรัชชี่ที่เวียนซ้ำมีความโดดเด่นอย่างมากในระยะลดต่ำและเพิ่มขึ้นของกัมมันตภาพสุริยะ [29] อนึ่ง การลดลงแบบฟอรัชชี่โดยการปลดปล่อยก้อนมวลคอโรนา ระหว่างดาวเคราะห์มีความโดดเด่นในระยะสูงสุดของกัมมันตภาพสุริยะ และการลดลงแบบฟอรัชชี่ที่เวียนซ้ำมีความโดดเด่นอย่างมากในระยะลดต่ำและเพิ่มขึ้นของกัมมันตภาพสุริยะ การเปลี่ยนแปลงในรอบ 7 วันของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างลมสุริยะที่หมุนร่วมไปกับดวงอาทิตย์ได้รับการสังเกตและการศึกษาเป็นเวลานาน จากการสังเกตพบว่า บริเวณอันตรายที่หมุนร่วมสามารถกีดกันรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่เดินทางเข้าสู่ระบบสุริยะได้ชั่วคราวในลักษณะการลดลงของฟลักซ์รังสีคอสมิก เนื่องจากโครงสร้างนี้เป็นเหมือนเกราะทางแม่เหล็กที่สามารถเบี่ยงเบนทิศทางสะท้อน หรือกระเจิงให้ มีการลดการฟุ้งของรังสีคอสมิกที่เข้าสู่ระบบสุริยะลดลง คล้ายโครงสร้างปรากฏแบบฟุ้ง อีกทั้งลมสุริยะความเร็วสูงที่ติดตามบริเวณอันตรายที่หมุนร่วมสามารถสกัดหรือมอดูเลตปริมาณรังสีคอสมิกที่เข้ามาด้วยกระบวนการพาโดยลมสุริยะ กล่าวคือรังสีคอสมิกที่ถูกพาไปพร้อมลมสุริยะได้ชนกับรังสีคอสมิกที่เข้ามาให้กระเจิงรังสีคอสมิกออกไป โดยอัตราการนับปริมาณรังสีคอสมิกจะลดลงชั่วคราว (ถูกมอดูเลต) ตามด้วยระยะการฟื้นตัวภายหลังของกระแสลมสุริยะความเร็วสูงได้แสดงให้เห็นว่าบริเวณอันตรายที่หมุนร่วมมีผลอย่างชัดเจนต่อการมอดูเลตความเข้มรังสีคอสมิกแบบราย 27 วัน [30] CIRs ส่งผลกระทบต่อในระยะสั้นของการเปลี่ยนแปลงรังสีคอสมิกที่ถูกผลักดันโดยโครงสร้างลมสุริยะที่หมุนร่วม ผ่านการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติการฟุ้งของอนุภาคในอวกาศระหว่างดาวเคราะห์บางตำแหน่งในละติจูดที่ต่ำและละติจูดกลาง โดยแอมพลิจูดของการลดลงแบบฟอรัชชี่ที่เวียนซ้ำมีค่ามากที่สุดบริเวณละติจูดกลางและลดลงตามละติจูดที่เพิ่มขึ้นของดวงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามจากการสังเกต CIRs และการลดลงแบบฟอรัชชี่ของรังสีคอสมิกโดยยานอวกาศ Ulysses สำหรับละติจูดที่มากกว่า 40°S ที่แม่ไม่พบโครงสร้างของ CIRs ที่เปลี่ยนแปลงในรอบ 27 วัน แต่กลับยังคงพบการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีคอสมิกราย 27 วันอยู่ แสดงให้เห็นว่าการมอดูเลตที่เกิดขึ้นกับของอนุภาคแบบระดับใหญ่ไม่ใช่ปรากฏการณ์แบบท้องถิ่น อีกทั้งพบว่า แอมพลิจูดของการลดลงของ GCRs ถูกควบคุมด้วยกลไกการมอดูเลตและการเดินทางของอนุภาคที่เป็นฟังก์ชันของค่า

สภาพความแข็งแรงทางแม่เหล็กของอนุภาคมากกว่าที่จะเป็นฟังก์ชันของพลังงานต่อนิวคลีออน (การเปลี่ยนแปลงความเข้มที่เกิดขึ้นกับฮีเลียมประจุเดียวมีค่ามากกว่าที่เกิดขึ้นกับโปรตอน) ซึ่งสอดคล้องกับค่าสภาพความแข็งแรงทางแม่เหล็กสำหรับการเปลี่ยนแปลงในราย 27 วัน

การศึกษาการลดลงแบบพหุคูณที่เว็บบางระหว่าง 0.3 และ 1.0 AU [25] ได้แสดงให้เห็นถึงสหสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมสุริยะและขนาดของการลดลง โดยในบริเวณกอดัดที่อยู่ด้านหน้าลมสุริยะความเร็วสูงมีการลดลงของฟลักซ์รังสีคอสมิกมีความสัมพันธ์กับความเร็วและสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีความสัมพันธ์แบบเดียวระหว่างการเพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็กกับการลดลงของรังสีคอสมิก จึงไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์แบบ $K_{\infty} \propto 1/B$ ส่วนผลจากการดริฟต์เกรเดียนต์และความโค้งในสนามแม่เหล็กทำนายเกรเดียนต์ในแนวละติจูดของความเข้มที่ถูกจัดเรียงรอบๆ แผ่นกระแสสุริยมณฑล ดังนั้นการมอดูเลตความเข้มจึงได้รับการสังเกตไกลจากแผ่นกระแส และการดริฟต์ที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคออกจากบริเวณอันตรายิกิริยาหมุนร่วมอันเนื่องมาจากสนามความเข้มสูงทำให้เกิดการลดลงของรังสีคอสมิกได้

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของฟลักซ์รังสีคอสมิกนอกจากจะเกี่ยวข้องกับบริเวณอันตรายิกิริยาหมุนร่วมแล้ว ยังเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของแผ่นกระแสสุริยมณฑลอันมีลักษณะที่เว็บบางในอวกาศระหว่างดาวเคราะห์ในบริเวณละติจูดต่ำและละติจูดกลางในช่วงกัมมันตภาพสุริยะมีระดับต่ำทั้งสองเป็นแหล่งข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับกลไกการขนส่งรังสีคอสมิก อาทิเช่น การพุ่ง การดริฟต์เกรเดียนต์และความโค้ง หรือข้อมูลทางอ้อมของการมอดูเลตโดยตรงจากอภิตยในสุริยมณฑล

ถึงแม้ว่าบริเวณอันตรายิกิริยาหมุนร่วมไม่สามารถสร้างผลกระทบโดยรวมหรือในระยะยาวต่อรังสีคอสมิก แต่การศึกษาสนามแม่เหล็กและการวัดรังสีคอสมิกโดยยาน Voyager ในสุริยมณฑลด้านนอก ได้ตระหนักว่าการพุ่งของอนุภาคที่ถูกลดลงในสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นภายในบริเวณอันตรายิกิริยา ได้เป็นสาเหตุของการลดลงของรังสีคอสมิก ซึ่งเป็นการแสดงออกถึงการแปรผันรังสีคอสมิกในระยะวัฏจักร 11 ปี อันเป็นผลมาจากการสะสมการรบกวนบริเวณอันตรายิกิริยาภายในสุริยมณฑล

พูนุ ปณุกิตโต ชิว

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบงานวิจัย

สำหรับกรอบแนวคิดงานวิจัยนี้คือ การวิเคราะห์ข้อมูลการสังเกตรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่แปรผันตามแอมพลิจูดของการลดลงแบบพอร์บู่ในวัฏจักรทางแม่เหล็กสุริยะแบบบวกและแบบลบตามความเข้มเกร็งทางแม่เหล็ก ในวัฏจักรสุริยะที่ 23/24 และวัฏจักรสุริยะที่ 24/25

ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ 1) ข้อมูลความเร็วลมสุริยะและข้อมูลสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์จากฐานข้อมูลยานอวกาศ ACE (Advanced Composition Explorer) เพื่อบ่งชี้ถึงขนาดความเร็วลมสุริยะและทิศทางของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ 2) ข้อมูลของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตการณ์โดยสถานีตรวจวัดนิวตรอนที่มีค่าความเข้มเกร็งทางแม่เหล็กแตกต่างกันจำนวน 13 สถานี เพื่อเปรียบเทียบการแปรผันของรังสีคอสมิกกาแล็กติกในบริเวณที่มีค่าความเข้มเกร็งทางแม่เหล็กที่แตกต่างกัน เพื่อจำแนกการลดลงแบบพอร์บู่และหาแอมพลิจูดของการลดลงแบบพอร์บู่โดยหาผลต่างของการมอดูเลตความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติก เพื่อศึกษาการแปรผันแอมพลิจูดของการลดลงแบบพอร์บู่ที่เวียนซ้ำตามความเข้มเกร็งทางแม่เหล็กในวัฏจักรทางแม่เหล็กสุริยะแบบบวกและแบบลบเพื่อศึกษาการแปรผันความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกในระยะลดลงและเพิ่มขึ้นของกัมมันตภาพสุริยะในวัฏจักรสุริยะแบบบวกและแบบลบและในขั้นสุดท้ายเป็นการนำความรู้และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องหรือแนวความคิดใหม่เพื่ออธิบายถึงกลไกที่เป็นสาเหตุที่แท้จริงของการแปรผันของรังสีคอสมิกกาแล็กติกภายใต้เงื่อนไขสุริยะที่แปรเปลี่ยนไปเพื่ออธิบายการลดลงแบบพอร์บู่ที่เวียนซ้ำ

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการ

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

3.2.1 คอมพิวเตอร์

- Processor : Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50GHz 2.50GHz
- Installed memory (RAM) : 8.00 GB
- System type : 64-bit Operating System

3.2.2 โปรแกรม Igor Pro 6.10

3.2.3 โปรแกรม Microsoft Excel

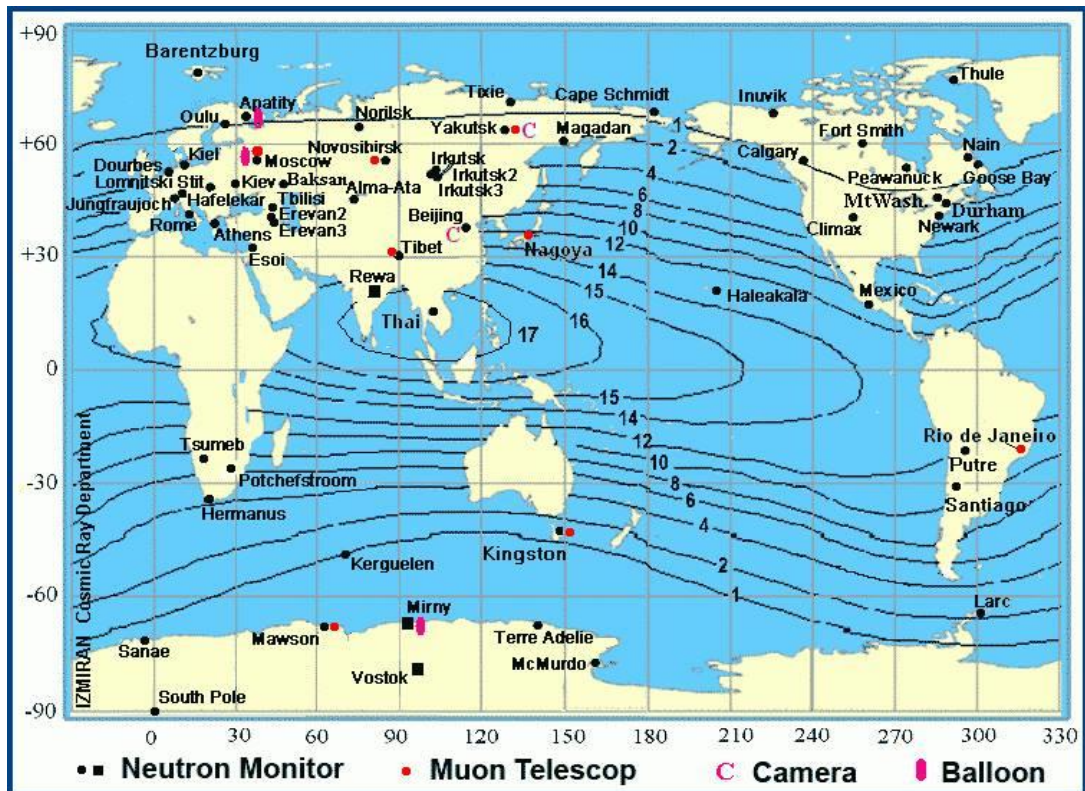
3.3 ข้อมูลสังเกตการณ์

3.3.1 ข้อมูลรังสีคอสมิกกาแล็กติก

ข้อมูลการนับนิวตรอนรายชั่วโมงที่ได้รับการปรับแก้ความดันอากาศแล้วในช่วงมกราคม ค.ศ. 2008 ถึง ธันวาคม ค.ศ.2011 และ ในช่วงมกราคม ค.ศ.2015 ถึง ธันวาคมค.ศ. 2016 จาก 13 สถานีที่มีความเข้มเกร็งซีดเริ่มที่แตกต่างกันดังตารางที่ 3.1 และดังรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของสถานีตรวจวัดนิวตรอน

Station	Location	Altitude (m)	Latitude (degree)	Longitude (degree)	Cutoff rigidity (GV)
McMurdo	Antarctica	48	77.9S	166.6E	1.0
Thule	Greenland	26	76.5N	68.7W	1.0
Fort smith	Canada	180	60.0N	111.9W	1.0
Inuvik	Canada	21	68.4N	133.7W	1.0
Newark	Delaware	50	39.7N	75.7W	2.1
Moscow	Russia	200	55.47N	37.32E	2.4
Hermanus	South Africa	26	-34.42S	19.23E	4.9
Baksan	Russia	170	43.28N	42.69E	5.7
Potchefstroom	South Africa	1,351	-26.68S	27.10E	7.2
Mexico	Mexico	2,274	19.33N	260.82E	8.6
Tsumeb	South Africa	1240	-19.12S	17.35E	9.2
Tibet	China	4300	30.11N	90.53E	14.1
PSNM	Thailand	2,560	18.59N	98.49E	16.8



รูปที่ 3.1 พิกัดทางภูมิศาสตร์ของสถานที่ตั้งสถานีตรวจวัดนิวตรอน

3.3.2 ข้อมูลพลาสมาในลมสุริยะ

ศึกษาข้อมูลลมสุริยะความเร็วสูงและข้อมูลสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์แบบรายชั่วโมง ในช่วงปี 2008-2011 และ 2015-2016 จาก OMNIWeb site ขององค์การนาซา (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>) และยานอวกาศ Advanced Composition Explorer (ACE: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html>)

3.4 วิธีการศึกษา

ใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจวัดนิวตรอน 13 สถานี ในช่วงความเข้มเกร็งทางแม่เหล็กขีดเริ่มน้อยกว่า 17 GV และทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลในช่วงวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2008 ถึง 31 ธันวาคม ค.ศ. 2011 และ 1 มกราคม ค.ศ. 2015 ถึง 31 ธันวาคม ค.ศ. 2016 เมื่อได้ทำการวางแผนและได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลทางทฤษฎีแล้ว ในขั้นตอนต่อไปเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนทั้ง 13 สถานีโดยใช้ซอฟต์แวร์การคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์

เมื่อได้ทำการวางแผนและได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลทางทฤษฎีแล้วในขั้นตอนต่อไปเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนทั้ง 13 สถานีโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์

ขั้นแรก ศึกษาและดาวโหลดข้อมูล

3.4.1 ข้อมูลสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์และลมสุริยะความเร็วสูงแบบรายชั่วโมง ในช่วงปี 2008-2011 และ 2015-2016 จาก OMNIWeb site ขององค์การนาซา (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) เข้าใช้บริการของเว็บไซต์ที่สามารถให้ข้อมูลสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์และลมสุริยะความเร็วสูง คือไปที่เว็บไซต์ <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>

2) ทำการเลือกข้อมูลแบบรายชั่วโมง โดยเลือกที่ Low resolution OMNIWeb (1-hour, 1 and 27 days, 1963 - current)

The screenshot shows the OMNIWeb Plus website interface. The header includes the NASA logo, 'GODDARD SPACE FLIGHT CENTER Space Physics Data Facility', and a search bar. The main navigation menu has options like '+ HOME', '+ DATA & ORBITS', '+ VITMO ModeWeb', '+ SCIENCE ENABLED', and '+ AND MORE'. The main content area is titled 'OMNIWeb Plus' and describes the data available. A sidebar on the left lists various data sources and tools. The main content area shows a tree view of data categories, with 'Low resolution OMNIWeb (1-hour, 1 and 27 days, 1963 - current)' highlighted in a red box.

รูปที่ 3.2 แสดงหน้าเว็บไซต์ OMNIWeb

3) ทำการเลือกแบบ Plots, listings, output files

4) ทำการเลือกข้อมูลแบบรายการ (List data) > รายชั่วโมง (Hourly averaged) > เปลี่ยนวันที่ ตามที่กำหนด คือ 1 มกราคม ค.ศ. 2008 ถึง 31 ธันวาคม ค.ศ.2011 และ 1 มกราคม ค.ศ. 2015 ถึง 31 ธันวาคม ค.ศ.2016 > และเลือกข้อมูลสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์และลมสุริยะความเร็วสูง>Submit

3.4.2 ข้อมูลความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่ได้มีการปรับแก้ความดันบรรยากาศแล้วแบบรายชั่วโมงจาก 13 สถานี ที่มีความเข้มเกร็งที่แตกต่างกัน คือ

1. McMurdo Neutron Monitor (ความเข้มเกร็งขีดเริ่ม 1.0 GV)
2. Thule Neutron Monitor (ความเข้มเกร็งขีดเริ่ม 1.0 GV)
3. Fort smith Neutron Monitor (ความเข้มเกร็งขีดเริ่ม 1.0 GV)
4. Inuvik Neutron Monitor (ความเข้มเกร็งขีดเริ่ม 1.0 GV)
5. Newark Neutron Monitor (ความเข้มเกร็งขีดเริ่ม 2.1 GV)
6. Moscow Neutron Monitor (ความเข้มเกร็งขีดเริ่ม 2.4 GV)
7. Hermanus Neutron Monitor (ความเข้มเกร็งขีดเริ่ม 4.9 GV)
8. Baksan Neutron Monitor (ความเข้มเกร็งขีดเริ่ม 5.7 GV)
9. Potchefstroom Neutron Monitor (ความเข้มเกร็งขีดเริ่ม 7.2 GV)
10. Mexico Neutron Monitor (ความเข้มเกร็งขีดเริ่ม 8.6 GV)
11. Tsumeb Neutron Monitor (ความเข้มเกร็งขีดเริ่ม 9.2 GV)
12. Tibet Neutron Monitor (ความเข้มเกร็งขีดเริ่ม 14.1 GV)
13. Princess Sirindhorn Neutron Monitor (ความเข้มเกร็งขีดเริ่ม 16.8 GV)

จากเว็บไซต์ Network of Cosmic ray Stations

(<http://cr0.izmiran.ru/common/links.htm#Neutron%20Monitor>)

มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ทำการดาวน์โหลดข้อมูลความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่ได้มีการปรับแก้ความดันบรรยากาศแล้ว จาก

เว็บไซต์<http://cr0.izmiran.ru/common/links.htm#Neutron%20Monitor>

2) ทำการเลือกสถานีที่เราต้องการศึกษาความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่ได้มีการปรับแก้ความดันบรรยากาศแล้ว> เลือกวันที่จะศึกษา คือวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2008 ถึง 31 ธันวาคม ค.ศ.2011 และวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2015 ถึง 31 ธันวาคม ค.ศ.2016 > เลือกแบบรายชั่วโมง > Corrected for Pressure> digits

3) ทำการคัดลอกข้อมูลความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่ได้มีการปรับแก้ความดันบรรยากาศแล้ว แล้วนำไปวางที่ Microsoft Excel

ขั้นที่สอง เตรียมข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนมาทำการเตรียมข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel โดยการตัดข้อมูลที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูง (เป็นศูนย์ หรือค่าที่ต่างจากค่าอื่นมากๆ) เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลโดยนำข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนมาทำการเตรียมข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel โดยการตัดข้อมูลที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงและค่าที่เป็นศูนย์ออก

ขั้นที่สาม วิเคราะห์ข้อมูลการฟื้นตัวของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติก

โดยการวิเคราะห์ข้อมูลบนพื้นฐานของเกณฑ์ดังต่อไปนี้

1. ควรมีการลดลงของฟลักซ์รังสีคอสมิกอย่างรวดเร็ว ตามด้วยการฟื้นตัวช้าๆ
2. ไม่ควรมีช่องว่างข้อมูลใดๆ ในช่วงเวลาของความเข้มต่ำสุด หรือช่องว่างข้อมูลอื่นๆ ≥ 3 วัน
3. ไม่ควรมีการลดลงอย่างฉับพลัน 3 วันก่อนหรือ 12 วันหลัง จากการเริ่มของการลดลง
4. ให้ความเวลาในการเริ่มของแต่ละการลดลง เป็น 0 ชั่วโมง

ขั้นที่สี่ นำข้อมูลมาทำการพล็อตกราฟ

นำข้อมูลที่ผ่านมาการวิเคราะห์ข้อมูลบนเกณฑ์ของแต่ละสถานีนี้นำมาพล็อตกราฟ โดยใช้โปรแกรม Igor Pro 6.10 เพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูลหาแอมพลิจูดและเวลาการฟื้นตัวของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติก

ขั้นที่ห้า วิเคราะห์ข้อมูลการแปรผันความเข้มของรังสีคอสมิกกาแล็กติก โดยการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการฟูเรียร์ และการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ ตามลำดับ ด้วยโปรแกรม Igor Pro

ขั้นที่หก หาแอมพลิจูดของการลดลงแบบฟอรัซที่เว็วินซ้ำโดยวิธีการ moving average แล้วหายอดของการลดลงของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติก

ขั้นที่เจ็ด หาคาบการแปรผันของรังสีคอสมิกกาแล็กติกในแต่ละระยะโดยวิธีแบบฟูเรียร์

ขั้นที่แปด หาสหสัมพันธ์ระหว่างลมสุริยะกับรังสีคอสมิกกาแล็กติก, สนามแม่เหล็กกับรังสีคอสมิกกาแล็กติก

3.5 วิธีวิเคราะห์ข้อมูล

1) การประมาณค่าเชิงเส้นระหว่างข้อมูลที่หายไป (Linear interpolation)

วิธีที่ง่ายที่สุด คือ การประมาณค่าเชิงเส้น (บางครั้งเรียกว่า lerp) พิจารณาตัวอย่างข้างต้น ประมาณ $F(2.5)$ ซึ่ง 2.5 อยู่กึ่งกลางระหว่าง 2 และ 3 ซึ่งเป็นที่เหมาะสมที่จะใช้ $F(2.5)$ อยู่กึ่งกลางระหว่าง $f(2) = 0.9093$ และ $f(3) = 0.1411$ ซึ่งให้ค่าเท่ากับ 0.5252

โดยการประมาณค่าเชิงเส้นใช้สองจุดข้อมูล (x_a, y_a) , และ (x_b, y_b) และ interpolant

โดย

$$y = y_a + (y_b - y_a) \frac{x - x_a}{x_b - x_a} \quad \text{ที่จุด } (x, y) \quad (3.1)$$

$$\frac{y - y_a}{y_b - y_a} = \frac{x - x_a}{x_b - x_a} \quad (3.2)$$

$$\frac{y - y_a}{x - x_a} = \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \quad (3.3)$$

สมการก่อนหน้าี้ระบุว่า ความชันของเส้นตรงใหม่ (ระหว่าง x_a, y_a) และ (x, y) เป็นเช่นเดียวกับความชันของเส้นระหว่าง (x_a, y_a) และ (x_b, y_b)

เป็นสถิติที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเช่นหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรคู่หนึ่งๆ ที่อาจมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งค่าสหสัมพันธ์ที่คำนวณได้เรียกว่า “ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์” (Correlation coefficient) ซึ่งสถิติสำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ มีหลายชนิดซึ่งการเลือกใช้แบบใดนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขหลายประการ โดยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ในการทดสอบว่าตัวแปรสองตัวมีความสัมพันธ์กันหรือไม่ในความสัมพันธ์เชิงเส้น เราจะใช้เงื่อนไขของค่าสหสัมพันธ์ r ซึ่งเขียนเป็นสมมติฐานทางสถิติ ได้ดังนี้

$$H_0: r = 0 \quad (\text{ตัวแปรสองตัวไม่มีความสัมพันธ์กัน})$$

$$H_0: r \neq 0 \quad (\text{ตัวแปรสองตัวมีความสัมพันธ์กัน})$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson's coefficient) การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ r สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$r = \sum \frac{Z_x Z_y}{N} \quad (3.4)$$

เป็นสูตรที่คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้ค่ามาตรฐาน โดยเราดัดแปลงค่า X และ Y จากคะแนนดิบให้เป็นค่ามาตรฐาน (Z_x, Z_y) ก่อน

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2] \cdot [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (3.5)$$

โดย

$$SS_x = \sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n} \quad (3.6)$$

$$SS_y = \sum Y^2 - \frac{\sum Y^2}{n} \quad (3.7)$$

$$SS_{xy} = \sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{n} \quad (3.8)$$

เมื่อคำนวณค่า r แล้วผู้วิจัยอาจต้องทราบว่าค่าสหสัมพันธ์ที่คำนวณได้นั้นมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ สามารถทำได้โดยนำค่า r ไปคำนวณเป็นค่าสถิติที (t-test) คือ

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (3.9)$$

โดยมีค่าความเสรี (df) เท่ากับ $n-2$ ซึ่งค่า t ที่คำนวณได้นำไปเทียบกับค่าวิกฤตของที่ได้จากตารางวิกฤตหรือสามารถเทียบได้กับตารางค่าวิกฤตของค่าสหสัมพันธ์เพียร์สันได้โดยตรงโดยใช้ค่า $df = n-2$ โดยถ้าค่า r ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าวิกฤตแสดงว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ค่าที่ไปเทียบนี้ไม่ต้องคิดเครื่องหมาย)

2) การวิเคราะห์การหาขนาดของการลดลงแบบฟอรับซุชที่เวียนซ้ำ

ในการกำหนดความกว้างของขนาดการลดลงแบบฟอรับซุชที่เวียนซ้ำได้ทำเป็นค่าเฉลี่ยรายวันของอัตราการนับรังสีคอสมิกภาคเล็กตึก กระบวนการของการหาขนาดของการลดลงแบบฟอรับซุชที่เวียนซ้ำสามารถหาได้จาก

$$\delta J/J = (N - N_0)/N_0 \quad (3.10)$$

ของการแปรผันความเข้มไอโซโทปัมพัทธ์ของรังสีคอสมิกภาคเล็กตึกที่มีค่าความเข้มเกร็งทางแม่เหล็กต่างกัน

โดย N คือ อัตราการนับเฉลี่ยรายวัน

N_0 คือ อัตราการนับเฉลี่ยรายวันก่อนเกิดฟอรับซุช

การลดลงแบบฟอรับซุชที่เวียนซ้ำถูกเลือกจากเกณฑ์ต่อไปนี้

1. อัตราการนับของรังสีคอสมิกภาคเล็กตึกลดลงอย่างต่อเนื่องอย่างน้อยสองวันติดต่อกันโดยสัมพันธ์กับบริเวณอันตรายกิริยาของกระแสและกระแสสมสุริยะความเร็วสูง
2. ขนาดของการลดลงแบบฟอรับซุชที่เวียนซ้ำควร $<4\%$
3. ไม่ควรมีการเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างกะทันหันของความเข้มของรังสีคอสมิกภาคเล็กตึกเนื่องจากการลดลงแบบฟอรับซุชจะเกิดในช่วงจะเกิดในช่วง 3 วัน ก่อนที่จะเริ่มการลดลงแบบฟอรับซุชที่เวียนซ้ำภายใต้เงื่อนไขที่พิจารณา

4. ไม่ควรมีช่องว่างข้อมูลใดๆในช่วงเวลาที่มีความเข้มข้นสีคอสมิกกาเล็กติดต่อกันที่สุดหรือไม่ควรมีช่องว่างข้อมูลอื่น ≥ 1 วัน

จากนั้นคำนวณขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำและตรวจสอบทางสถิติต่อไปเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์และลมสุริยะโดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี

1. ค่าสูงสุดที่สังเกตได้ (B_{max}, V_{max})
2. ค่าสูงสุดที่ผ่านการ smooth (B_{max}^s, v_{max}^s)

จุดประสงค์คือเพื่อค้นหาว่าพารามิเตอร์ใดที่เกี่ยวข้องมากที่สุดที่ทำให้เกิดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าเหล่านี้ได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เราตั้งค่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) การทดสอบขั้นพื้นฐานใช้สมมติฐาน H_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $\gamma = 0$ ซึ่งในกรณีนี้จะใช้สถิติ t และ F ในการคำนวณ

$$t = \gamma / \sqrt{(1 - \gamma)^2 / n - 2} \quad (3.11)$$

เมื่อ n คือ จำนวนเหตุการณ์

$$F = (1 + |\gamma|) / (1 - |\gamma|) \quad (3.12)$$

เราสามารถประเมินค่าความเชื่อมั่นของความสัมพันธ์ทางสถิติได้ การพึ่งพาทางสถิติสังเกตได้ระหว่างพารามิเตอร์ได้ดังนี้ $\gamma < 0.3$ แทบไม่มีความสัมพันธ์, $0.3 < \gamma < 0.5$ มีความสัมพันธ์กันเล็กน้อย, $0.5 < \gamma < 0.7$ มีความสัมพันธ์ปานกลาง $\gamma > 0.7$ มีความสัมพันธ์กันมาก

- 3) การวิเคราะห์ความชันของสเปกตรัมหรือค่าแกมมา

แอมพลิจูดการลดลงของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำแปรผันค่าความแข็งแกร่งทางแม่เหล็กขีดเริ่ม

$$A \propto P_c^{-\gamma} \quad (3.13)$$

$$A = K P_c^{-\gamma} \quad (3.14)$$

ใช้ค่าล็อกทั้งสองข้างของสมการ ได้ว่า

$$\log A = \log K - \gamma \log P_c \quad (3.15)$$

บทที่ 4

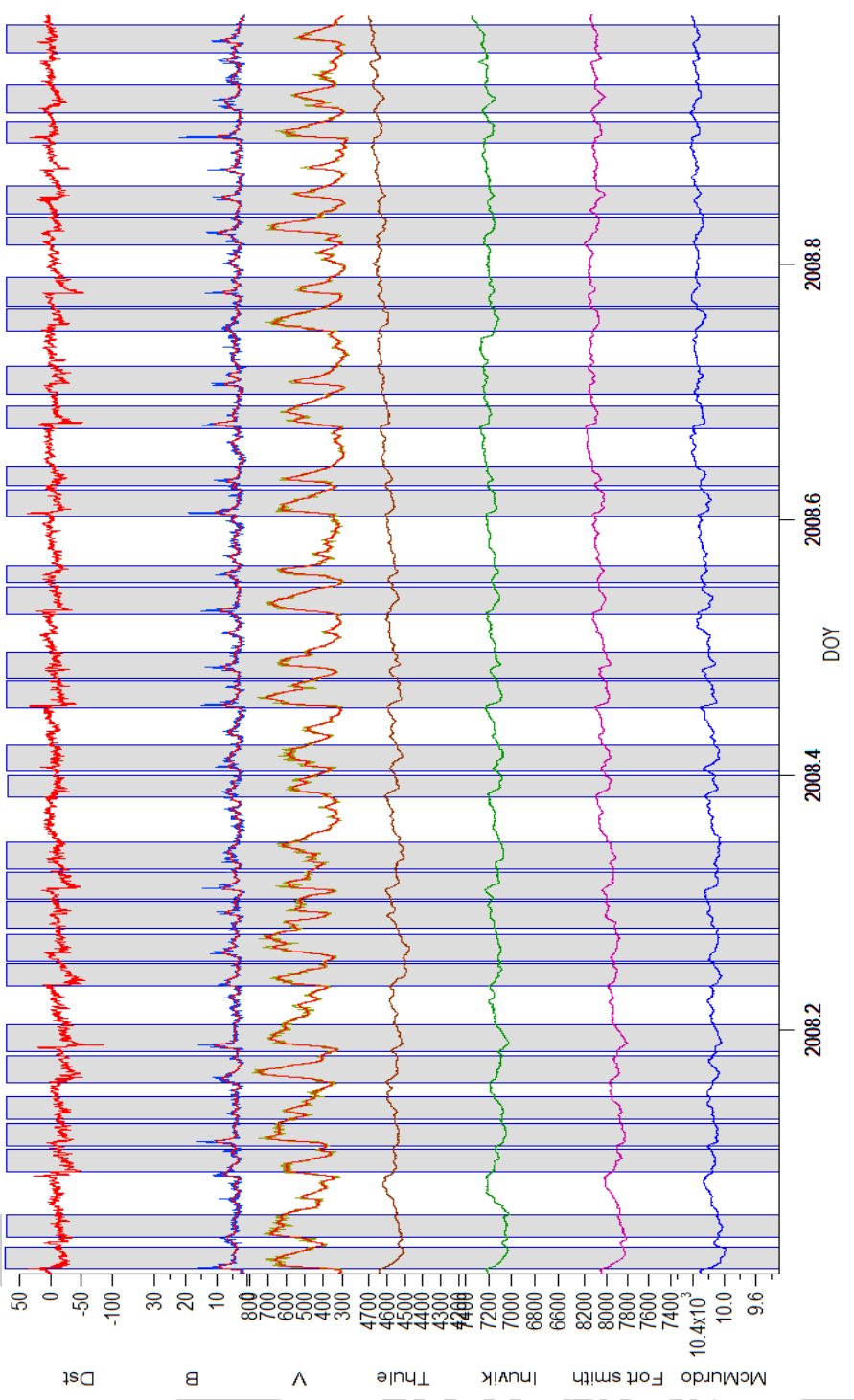
ผลการวิจัยและการอภิปราย

ในบทนี้เป็นการแสดงผลและอภิปรายผลการศึกษาศึกษาจากการศึกษาวิเคราะห์การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกจากผลของลมสุริยะความเร็วสูงที่ระดับความเข้มเกร็งทางแม่เหล็กต่างกันในวัฏจักรสุริยะต่ำสุดที่ 23/24 คือในช่วงปี ค.ศ. 2008-2011 และในวัฏจักรสุริยะที่ 24/25 คือในช่วงปี ค.ศ. 2015-2016 โดยรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่มีความเข้มเกร็งทางแม่เหล็กขีดเริ่มที่แตกต่างกัน ในการศึกษาการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกนี้จะใช้สถานีตรวจวัดนิวตรอนที่มีค่าความเข้มเกร็งทางแม่เหล็กที่แตกต่างกัน เพื่ออธิบายเกี่ยวกับการแปรผันความเข้มของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัฏจักรสุริยะต่ำสุดที่ 23/24 และในวัฏจักรสุริยะที่ 24/25 การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำและตัวแปรลมสุริยะของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติก ข้อมูลรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่ได้รับการปรับแก้ความดันหลายชั่วโมงได้มาจากสถานีตรวจวัดนิวตรอนทั้ง 13 สถานีที่มีค่าความเข้มเกร็งทางแม่เหล็กแตกต่างกันซึ่งอยู่ในตำแหน่งต่างๆบนโลกซึ่งกระจายในละติจูดจากขั้วหนึ่งไปยังขั้วหนึ่ง

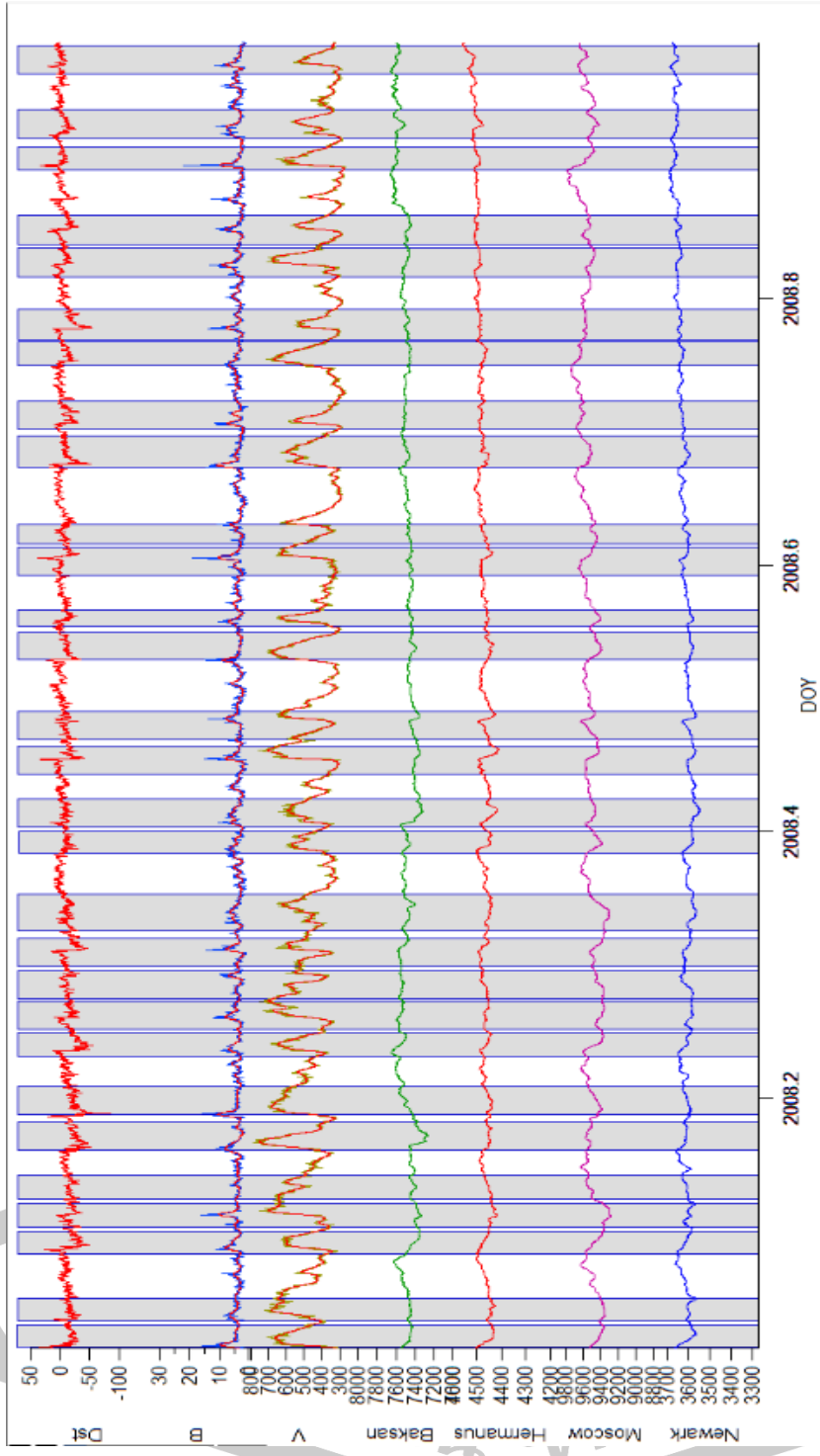
งานวิจัยขั้นนี้ได้ศึกษาการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกในวัฏจักรสุริยะต่ำสุดที่ 23/24 เป็นวัฏจักรสุริยะแบบบวกและในวัฏจักรสุริยะที่ 24/25 เป็นวัฏจักรสุริยะแบบลบ ($A < 0$) คือช่วงปี ค.ศ. 2008-2011 และวัฏจักรสุริยะแบบบวก ($A > 0$) คือช่วงปี ค.ศ. 2015-2016 โดยวัฏจักรสุริยะแบบลบ ($A < 0$) สนามแม่เหล็กสุริยะจะพุ่งออกจากขั้วโลกเหนือไปขั้วโลกใต้ ส่วนและวัฏจักรสุริยะแบบบวก ($A > 0$) สนามแม่เหล็กจะพุ่งออกจากขั้วโลกใต้ไปขั้วโลกเหนือ

ในการกำหนดความกว้างของขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำได้ทำเป็นค่าเฉลี่ยรายวันของอัตราการนับรังสีคอสมิกกาแล็กติก กระบวนการของการหาขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ

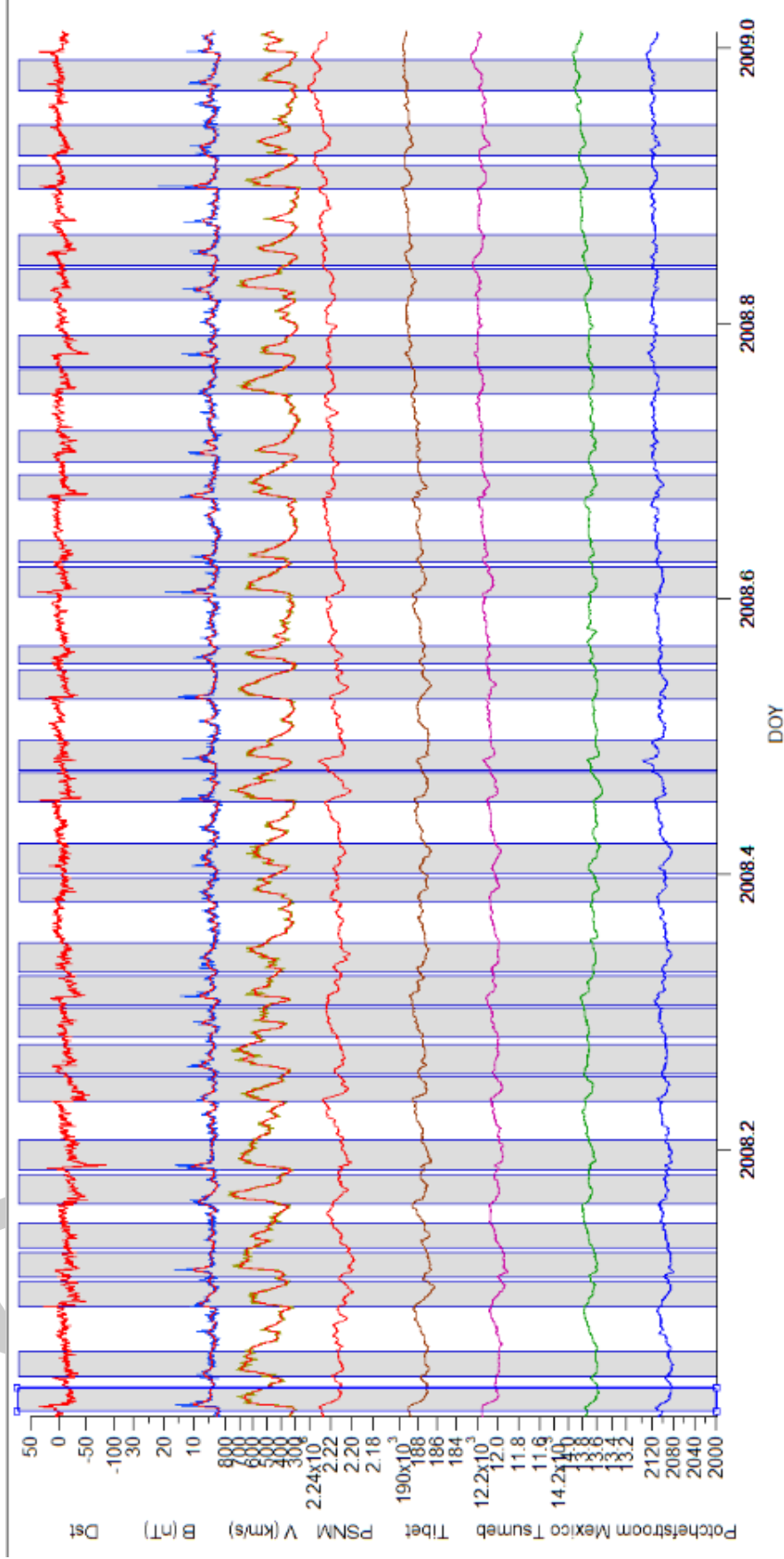
จากการสังเกตเราสามารถระบุได้เหตุการณ์ การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ ในช่วง $A < 0$ ได้ 70 เหตุการณ์ และในช่วง $A > 0$ 35 เหตุการณ์ เหตุการณ์ที่กล่าวมาข้างต้นดังรูป



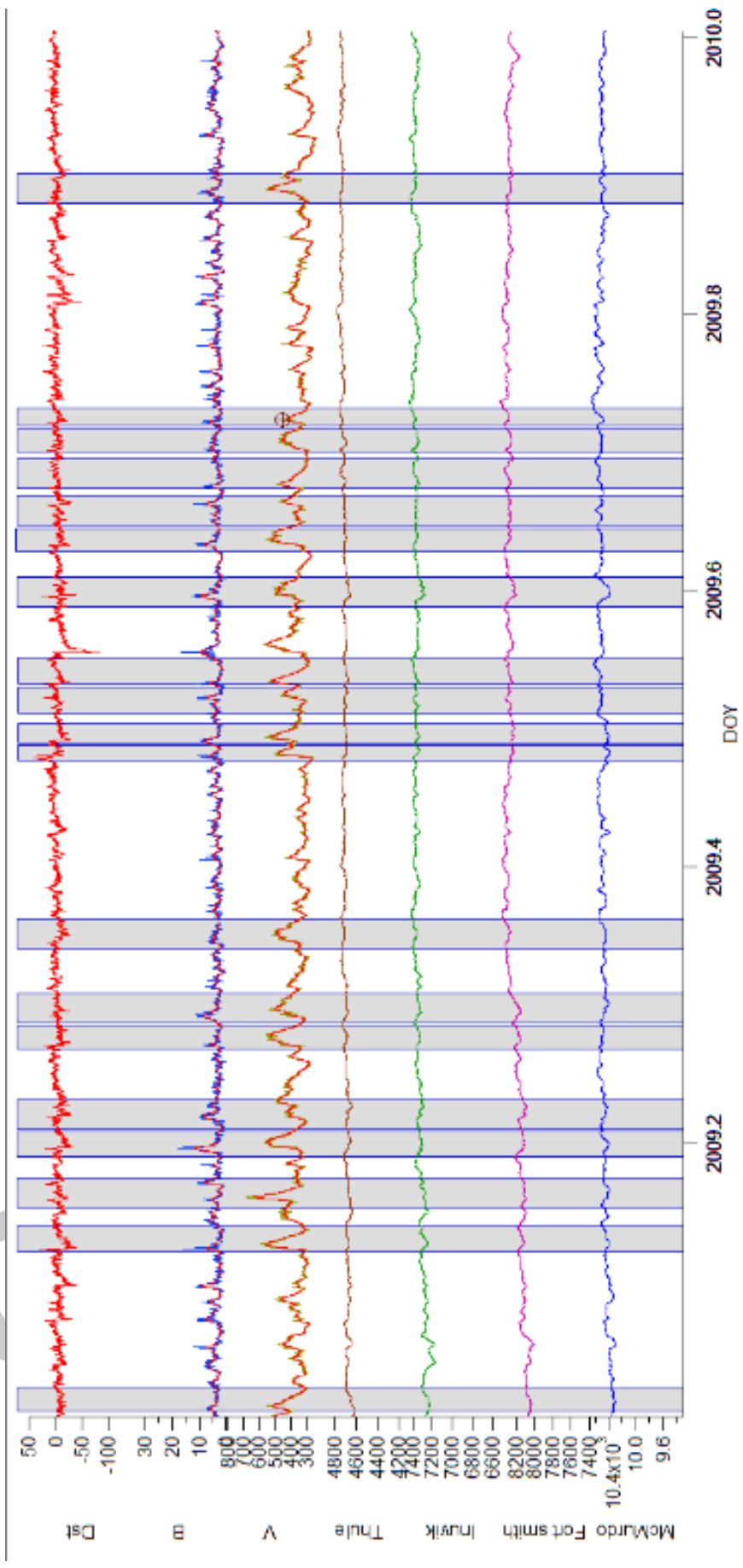
รูปที่ 4.1 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสเฟียร์ที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์ชที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2008, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย McMurdo, Fort smith, Inuvik, Thule



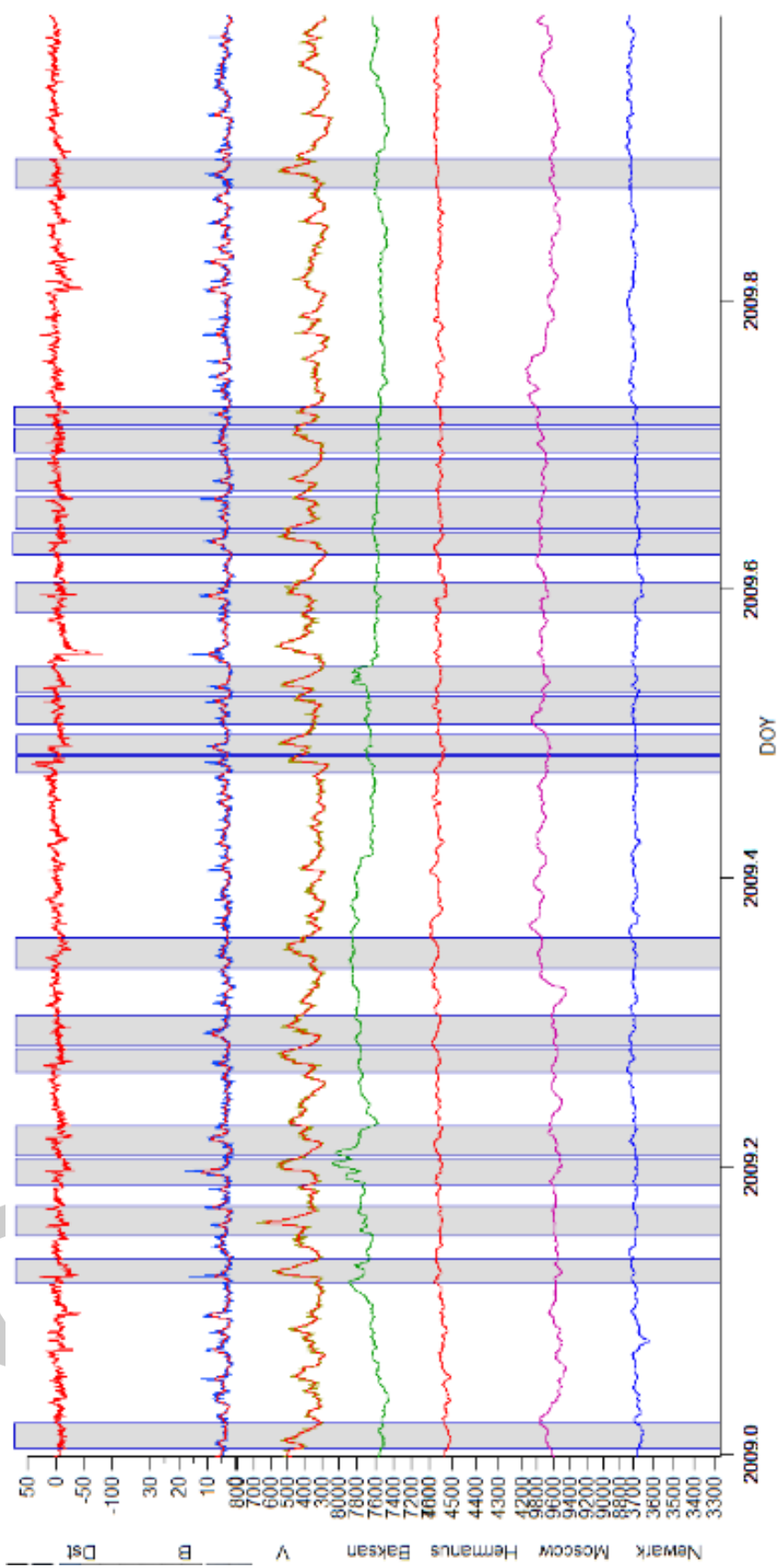
รูปที่ 4.2 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสเฟียที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์บูซที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2008, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย Newark, Moscow, Hermanus, Baksan



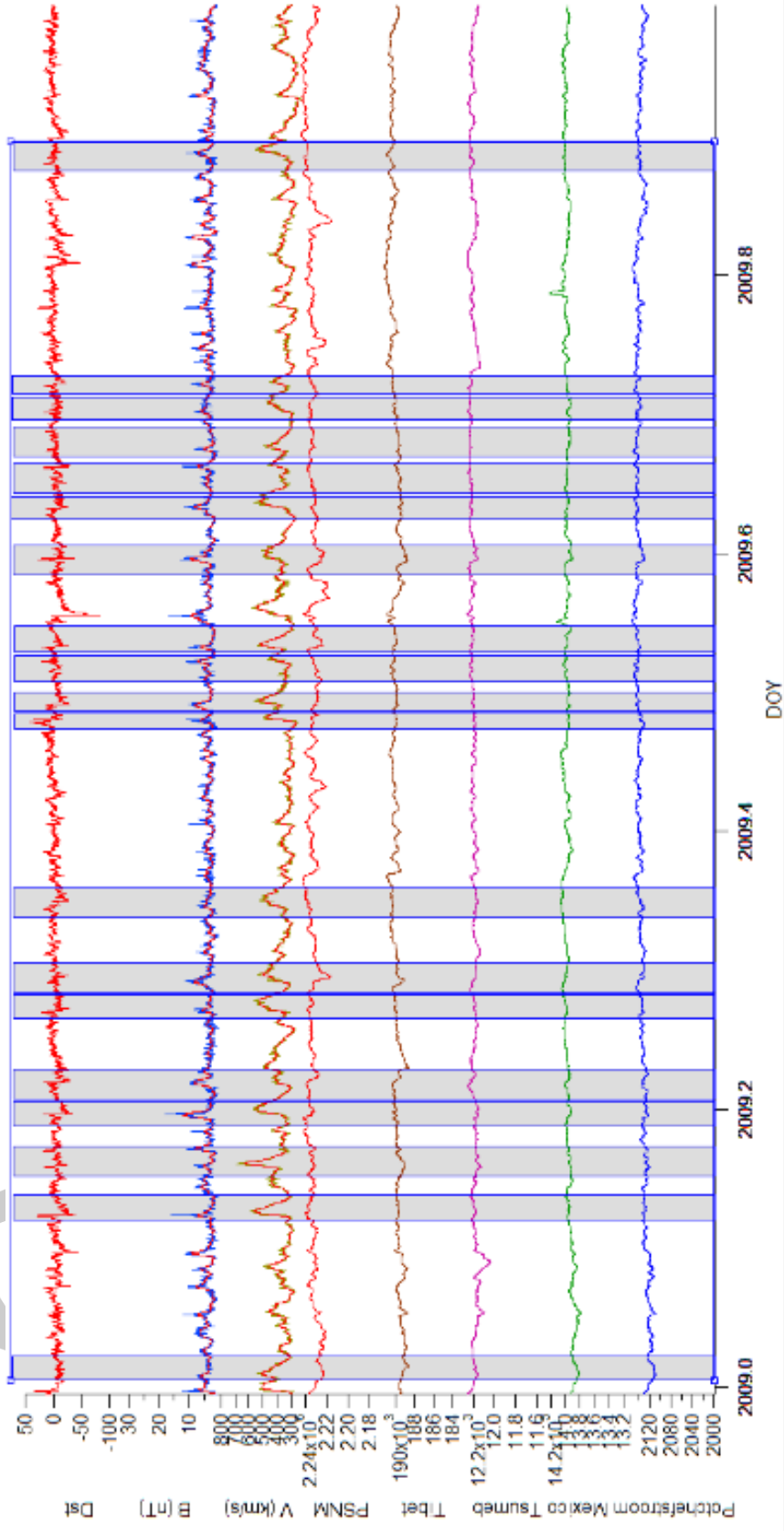
รูปที่ 4.3 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสเฟียร์ที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์ซุที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่ตั้งเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2008, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย Potchefstroom, Mexico, Tsumeb, Tibet, PSNM



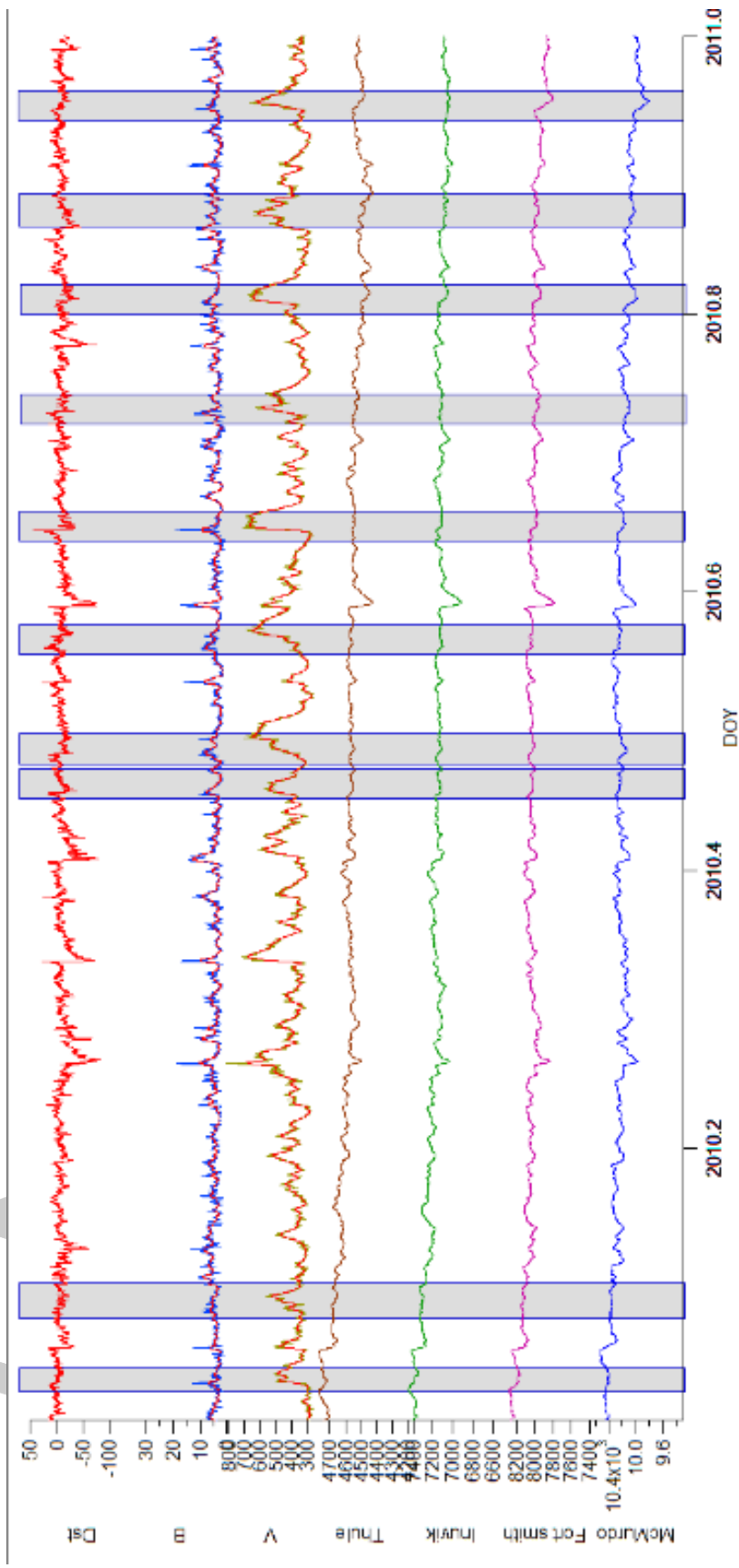
รูปที่ 4.4 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสเฟียร์ที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์บูที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2009, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย McMURDO, Fort smith, Inuvik, Thule



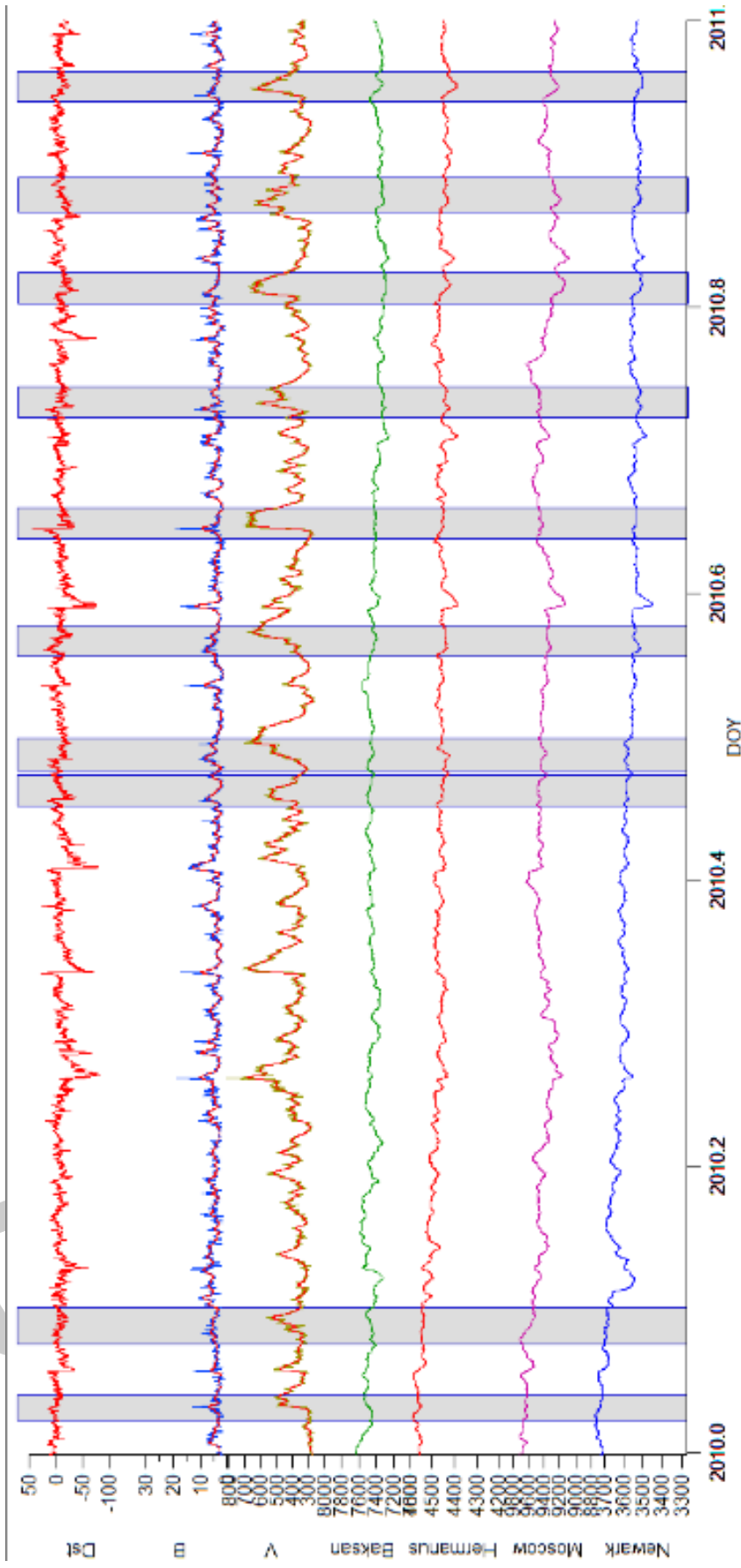
รูปที่ 4.5 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสเฟียร์ที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์ซุพีเวินซ์ในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2009, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติก ที่วัดโดย Newark, Moscow, Hermanus, Baksan



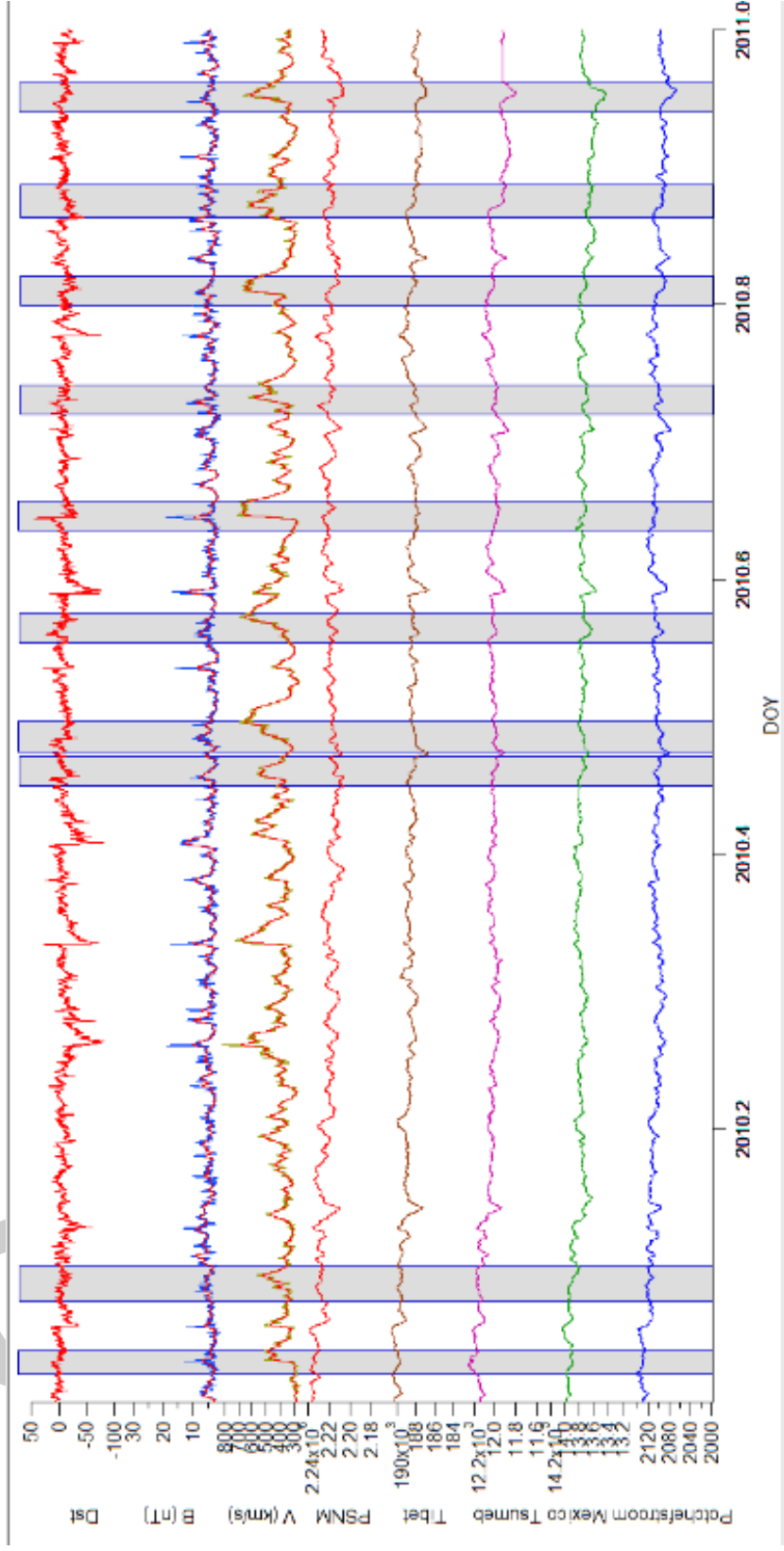
รูปที่ 4.6 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสเฟียร์ที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์ชที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2009, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย Potchefstroom, Mexico, Tsumeb, Tibet, PSNM



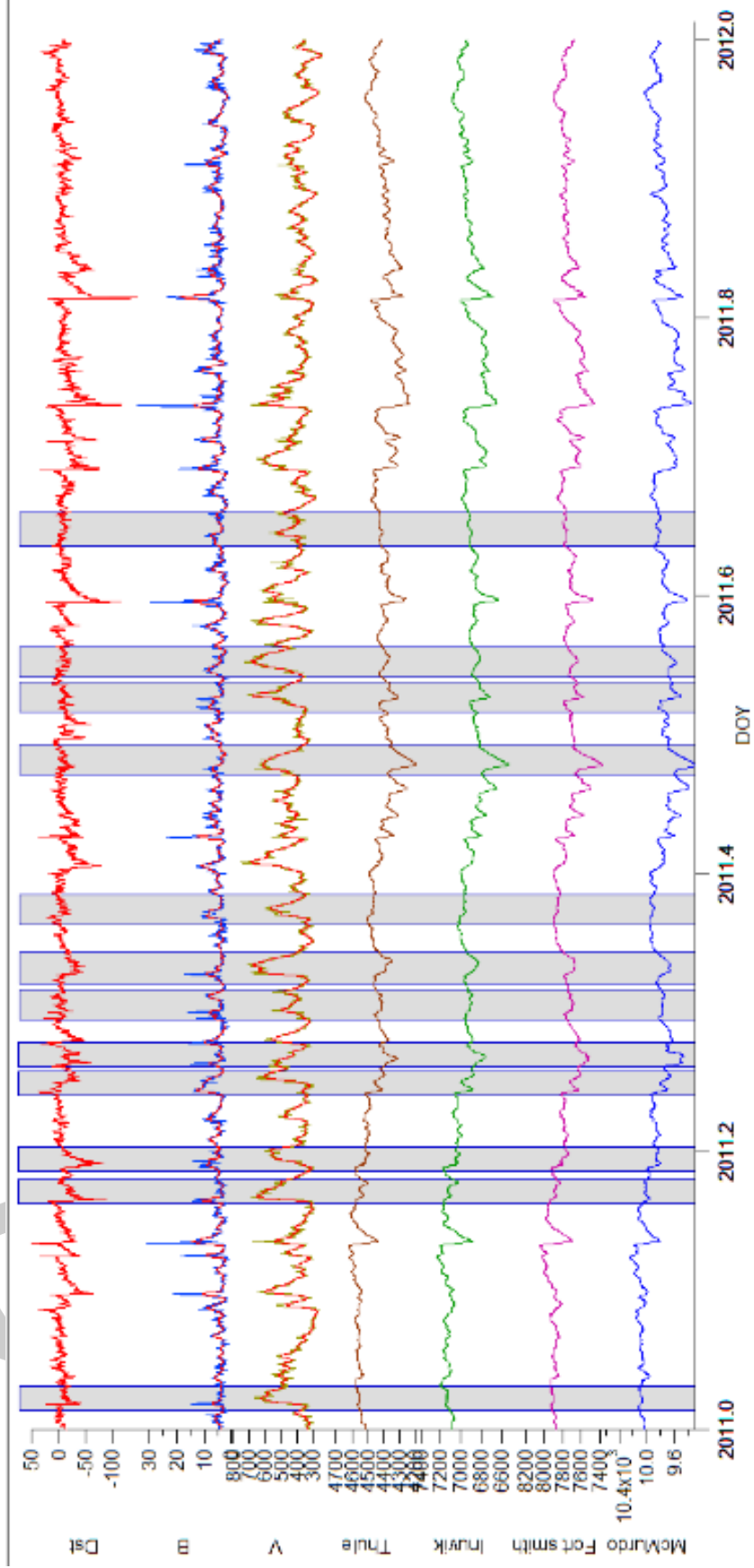
รูปที่ 4.7 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสเฟียร์ที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์ชที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2010, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย McMUrdo, Fort smith, Inuvik, Thule



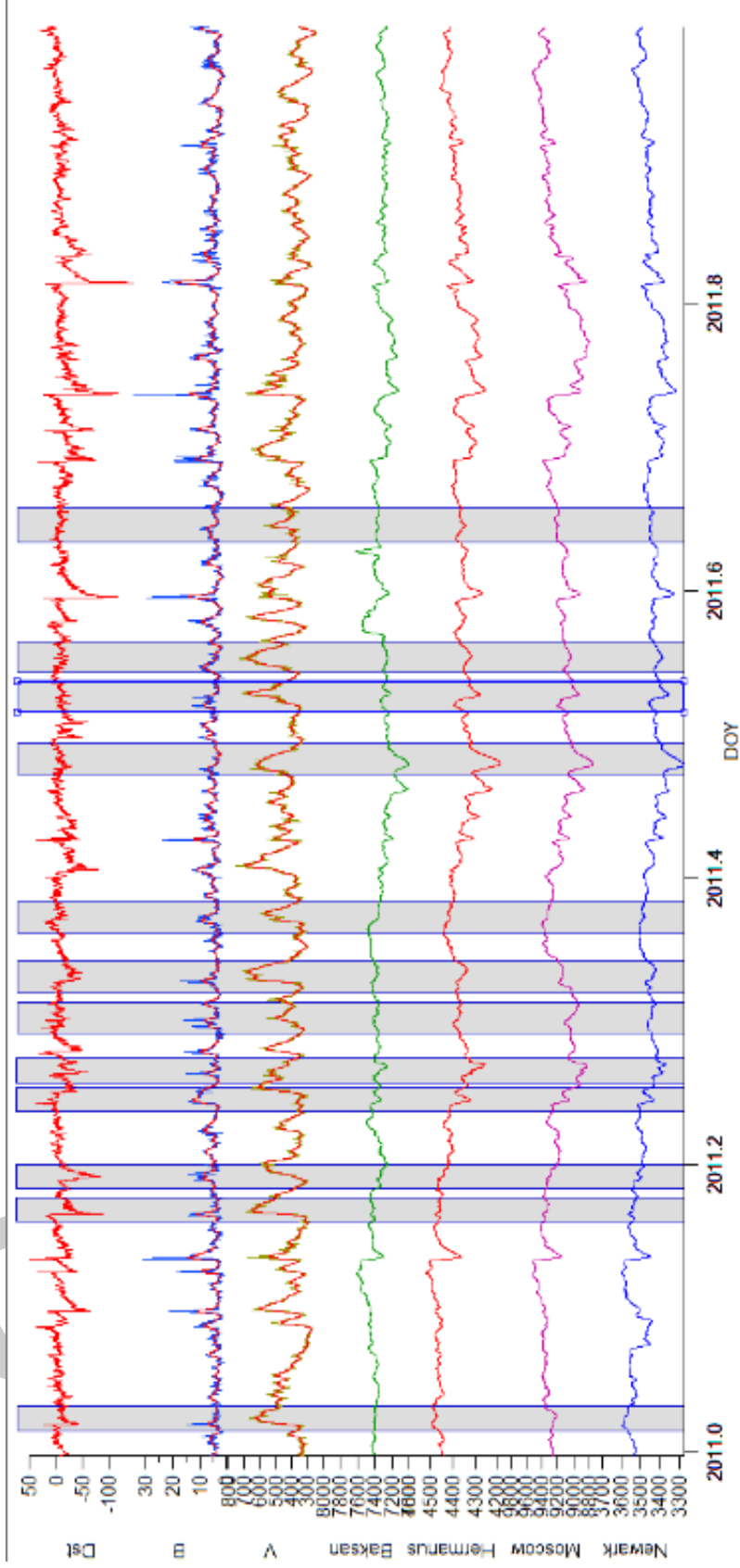
รูปที่ 4.8 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาลมสุริยะที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์ชที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีดาวจรวดนิวตรอนในปี ค.ศ.2010, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย Newark, Hermanus, Moscow, Baksan



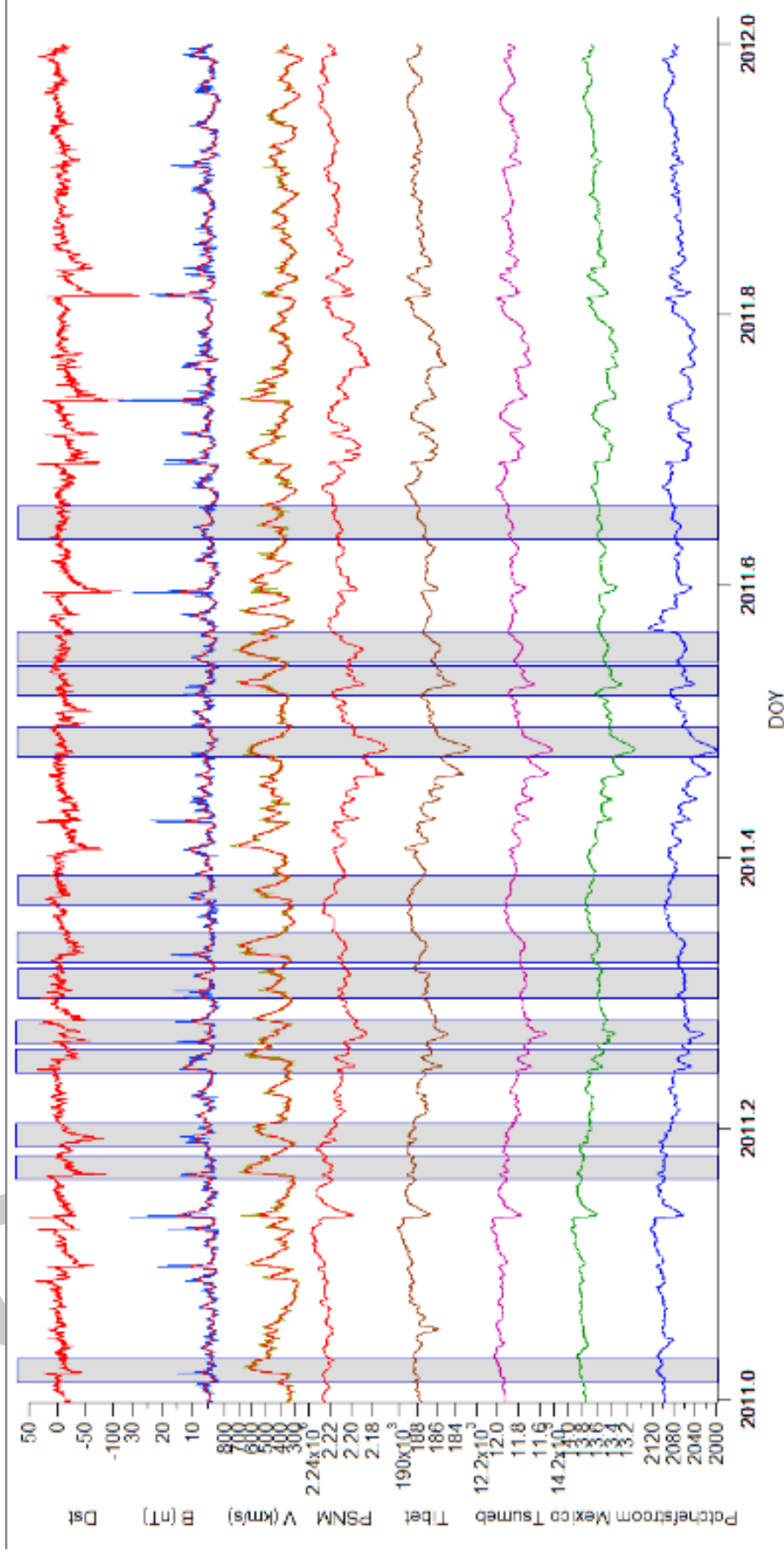
รูปที่ 4.9 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสเฟียที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์ชที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2010, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย Potchefstroom, Mexico, Tsumeb, Tibet, PSNM



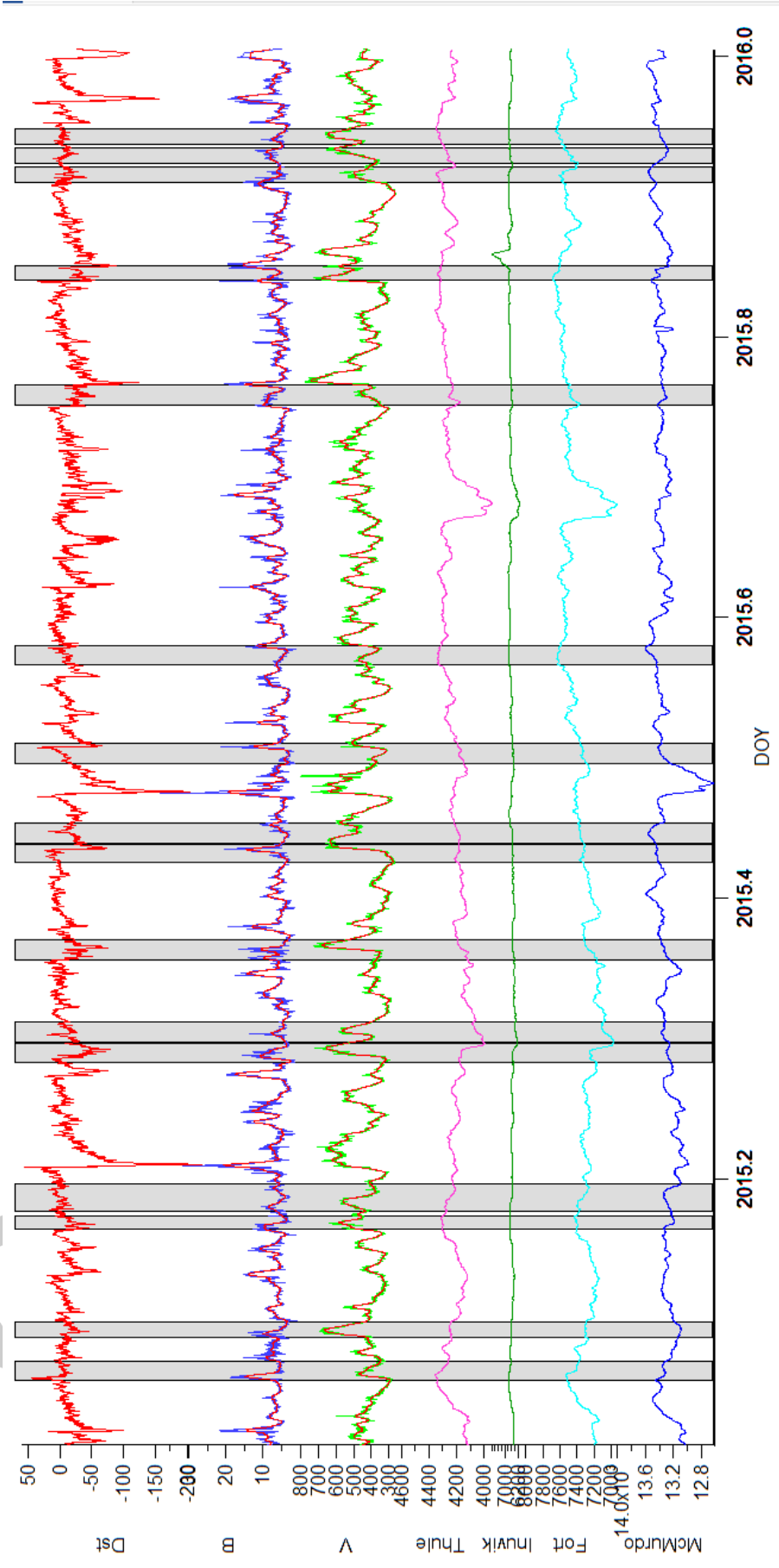
รูปที่ 4.10 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสเฟียร์ที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์ซุที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่ตั้งเกตได้จากสถานีดาวจรวดนิวตอรอนในปี ค.ศ.2011, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย McMURDO, Fort smith, Inuvik, Thule



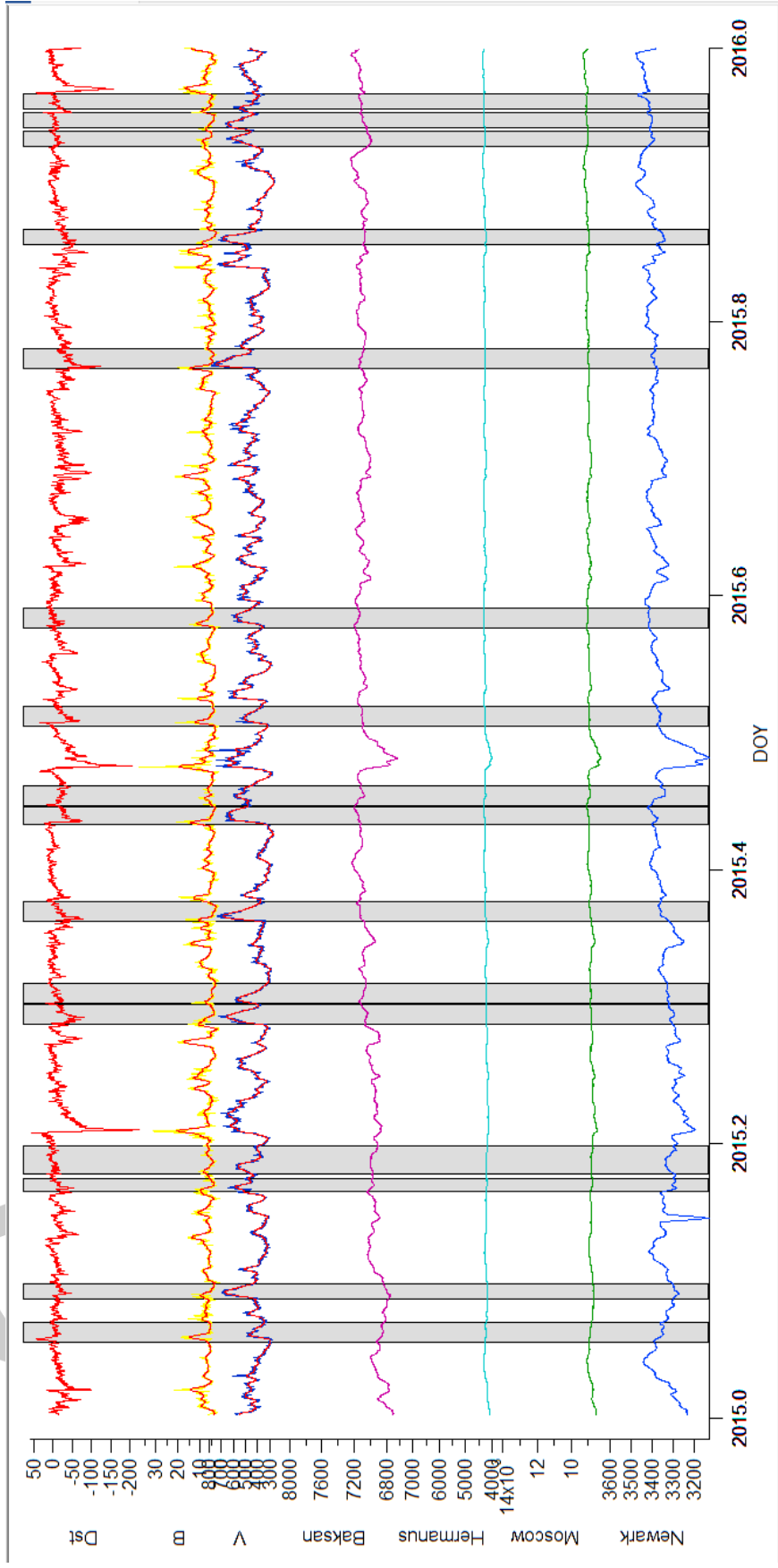
รูปที่ 4.11 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสุริยະที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์บูชที่เรซินเข้าในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2011, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยະ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย Newark, Moscow, Hermanus, Baksan



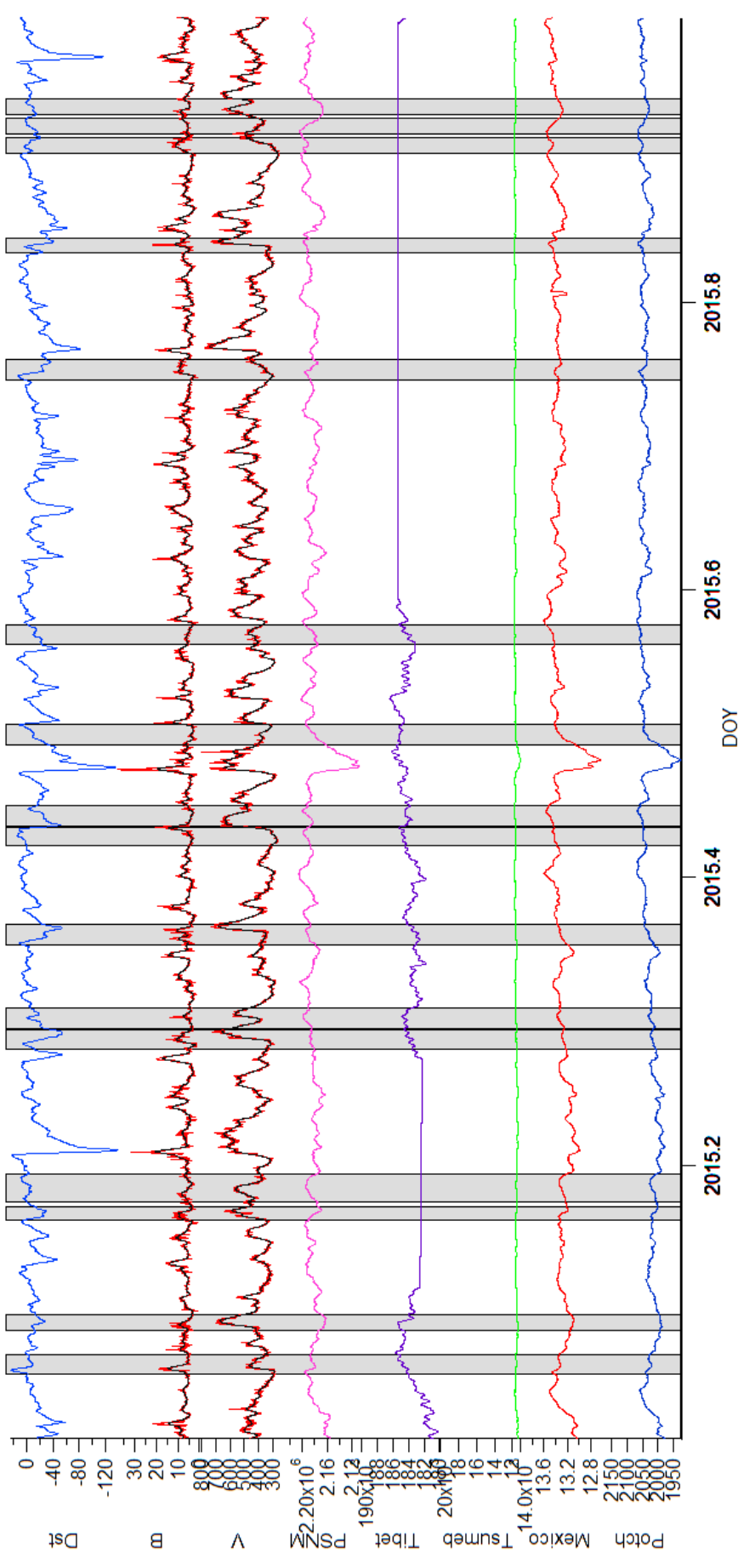
รูปที่ 4.12 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสเฟียร์ที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์บูซที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2011, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย Potchefstroom, Mexico, Tsumeb, Tibet, PSNM



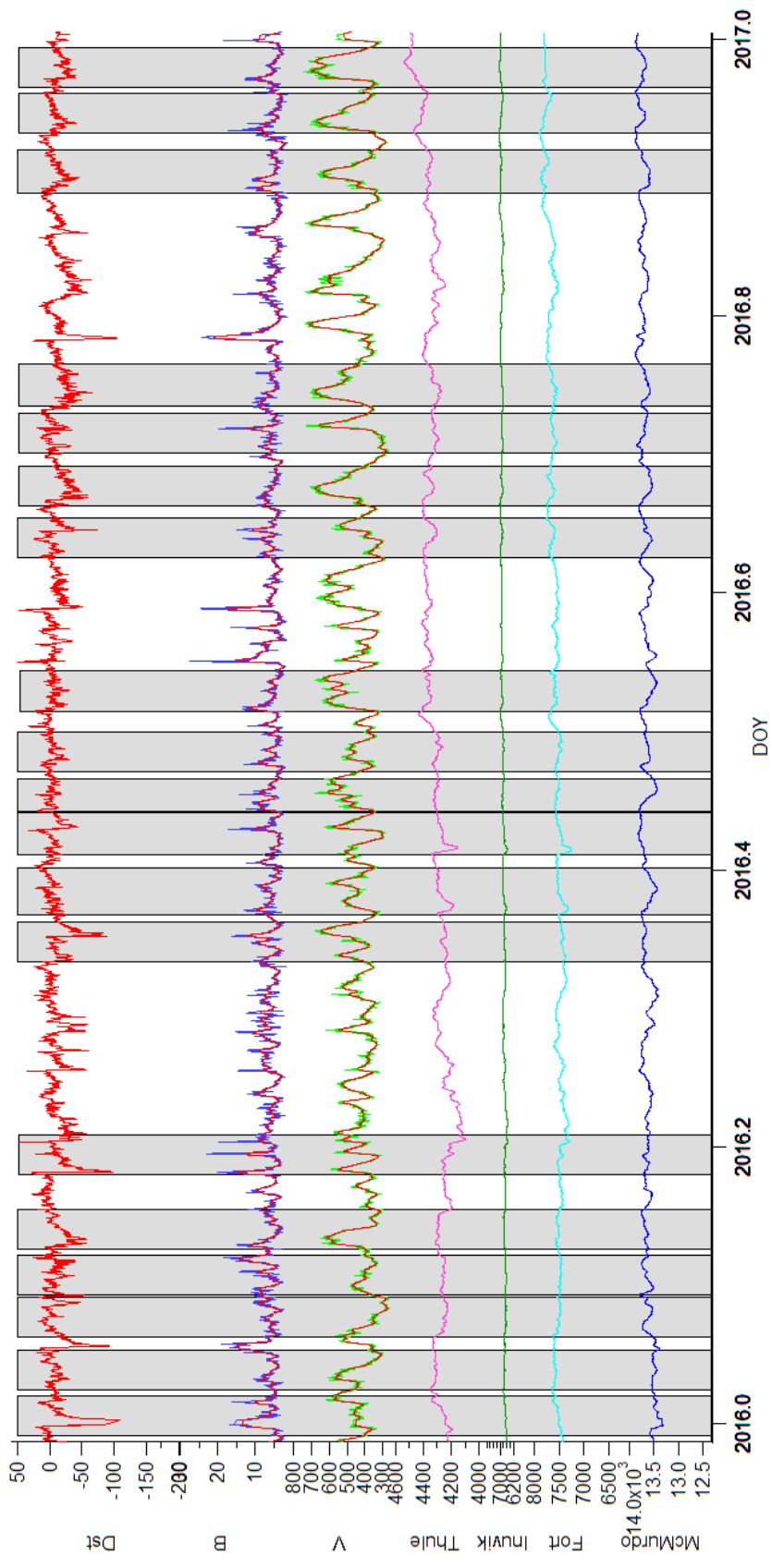
รูปที่ 4.13 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาลมสุริยะที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์บ์ซึ่เว้นซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่ตั้งเกิดได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2015, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย McMurdo, Fort smith, Inuvik, Thule



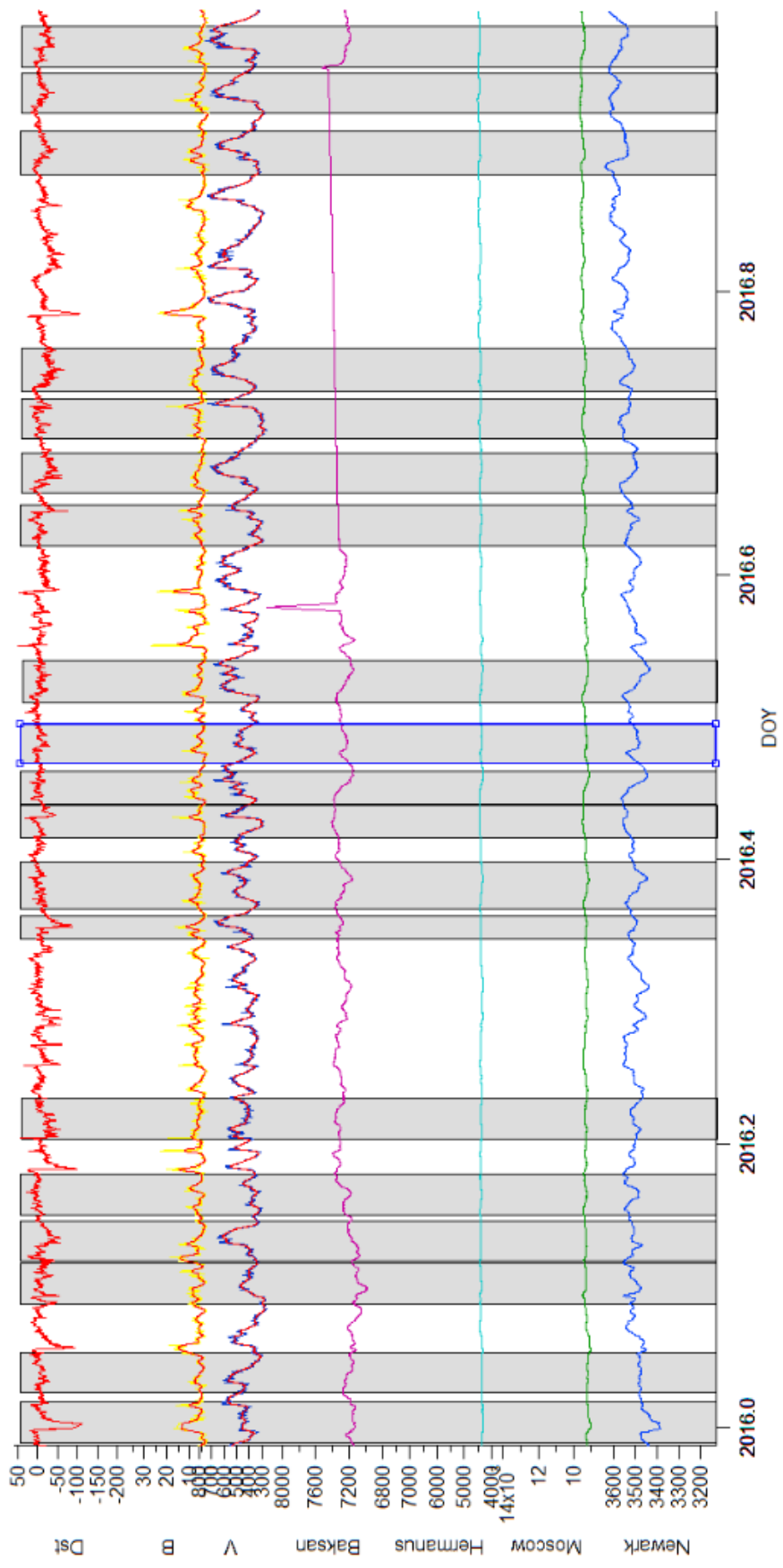
รูปที่ 4.14 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาลมสุริยะที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์บซ์ที่เย็นซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2015, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย Newark, Moscow, Hermanus, Baksan



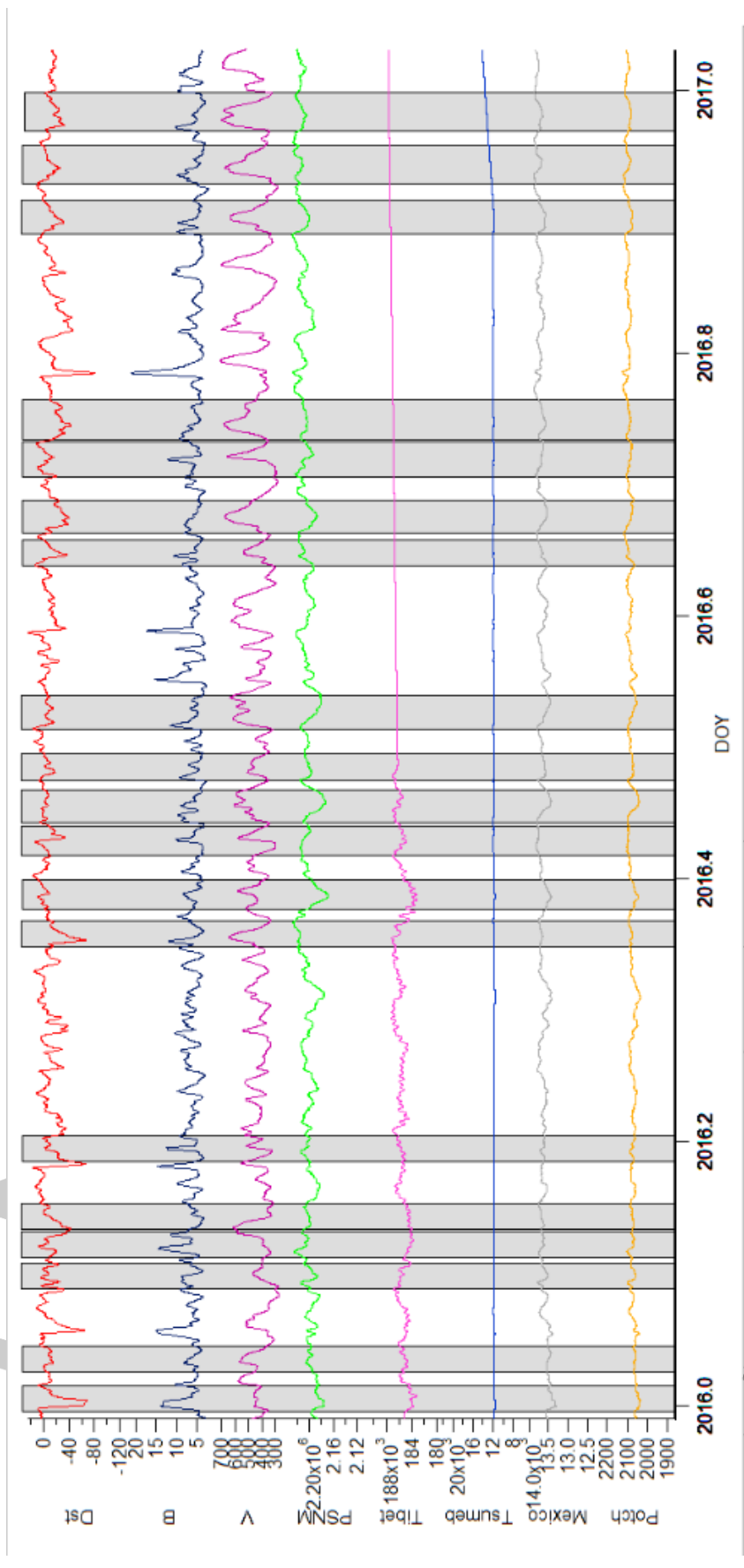
รูปที่ 4.15 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสเฟียร์ที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์บซุที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดทรอนในปี ค.ศ.2015, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย Potchefstroom, Mexico, Tsumeb, Tibet, PSNM



รูปที่ 4.16 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสเฟียร์ที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์ซุที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่ตั้งสังเกตจากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2016, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย McMurdo, Fort smith, Inuvik, Thule



รูปที่ 4.17 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสเฟียร์ที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์บัพที่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2016, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย Newark, Moscow, Hermanus, Baksan



รูปที่ 4.18 แสดงความแปรปรวนของพลาสมาสเฟียร์ที่สังเกตได้จากยานอวกาศ ACE และการลดลงแบบพอร์บ์ซึ่เวียนซ้ำในความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนในปี ค.ศ.2016, ดัชนี Dst, ขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์, ความเร็วลมสุริยะ, อัตราการนับของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่วัดโดย Potchefstroom, Mexico, Tsumeb, Tibet, PSNM

จากการวิเคราะห์พบว่าดัชนีสอดคล้องกับเหตุการณ์การปลดปล่อยก้อนมวลคอโรนา โดยทั่วไปเกิดจากกระแสการหมุนของบริเวณแอนตรกิริยาหมุนร่วม/ลมสุริยะความเร็วสูง การลดลงแบบพอร์บুซที่เวียนซ้ำจะถูกระบุเป็นพื้นที่สีเทาซึ่งเกือบจะสมมาตรและสัมพันธ์กับกระแสการหมุนของบริเวณแอนตรกิริยาหมุนร่วม/ลมสุริยะความเร็วสูง

งานวิจัยชิ้นนี้กำหนดระยะเวลาการถดถอยมากกว่าหรือเท่ากับ 3 วัน การถดถอยของรังสีคอสมิกกาแล็กติกส่วนใหญ่อยู่ใกล้ขอบกระแส (เป็นบริเวณที่ลมสุริยะสูงขึ้น) การถดถอยสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณใกล้เคียงกับลมสุริยะความเร็วสูง เวลาเริ่มต้นของการลดลงแบบพอร์บุซที่เวียนซ้ำจะแตกต่างกันไปในแต่ละสถานีเนื่องจากสถานีตั้งอยู่ในทิศทางมาของ UT และ ความไม่สมมาตรของทิศทางมายังโลก



4.1 ขนาดของการลดลงแบบพหุคูณที่เรียนซ้ำ

จากการวิเคราะห์ทางสถิติของปี ค.ศ.2008-2011 และ ค.ศ.2015-2016 ดังตารางที่

ตารางที่ 4.1 ขนาดของการลดลงแบบพหุคูณที่เรียนซ้ำ ของปี ค.ศ.2008

เหตุการณ์ที่	Baksan	Fort Smith	Hermanus	Inuvik	McMurdo	Mexico	Moscow	Newark	Patchef- stroom	PSNM	Thule	Tibet	Tsumeb
1	1.516336	2.93704	1.712523	2.612799	3.172893	1.407223	1.698836	2.729915	1.448754	0.910134	2.986916	1.076674	1.331468
2	0.496093	0.996425	0.786415	0.717036	1.076277	0.751061	0.897851	1.30834	0.755394	0.467003	0.829268	0.473623	0.326931
3	2.223662	1.903078	1.049665	1.481996	1.533411	0.983821	2.035474	1.758258	1.237556	0.688244	1.377525	1.123125	1.072892
4	1.547716	1.045954	0.736388	1.293117	1.283647	0.809182	2.404016	1.519801	0.91091	0.649941	0.766807	0.596775	0.805773
5	2.64058	1.22451	1.056369	1.267742	1.51208	1.012589	0.870454	1.35255	0.964132	0.868099	1.375024	0.830065	0.851007
6	2.518216	1.59346	0.636312	1.615558	1.000701	0.712896	1.458819	0.869426	0.649654	0.566634	1.374346	0.600266	0.661734
7	2.064237	1.160133	0.991377	1.542084	1.398732	0.907487	2.44365	1.706225	1.087101	1.104638	2.094945	0.864495	0.956759
8	0.969168	0.977109	0.486382	0.573933	1.214654	0.61864	1.076407	1.005438	0.611887	0.452442	1.331507	0.451061	0.449807
9	0.578545	0.673902	0.278603	0.566942	0.806073	0.522326	0.659217	0.709413	0.4347	0.282308	0.965457	0.322517	0.395931
10	1.468976	1.341612	0.991146	1.758992	1.711971	1.155556	1.888491	1.086977	1.037356	0.555995	1.683579	0.77459	0.757157
11	1.52227	0.827391	0.584061	1.056571	0.730915	0.315573	1.699874	1.257064	0.937139	0.733488	0.899896	0.638026	0.563894
12	1.29474	1.730769	1.302487	1.44967	1.627414	0.814731	2.125242	1.459766	0.852709	0.445027	1.757696	0.579759	0.882056
13	3.001522	1.097791	1.473645	1.231178	2.009688	1.178922	1.264422	1.284327	1.194045	0.516794	1.601397	0.6553	0.73
14	0.579171	0.600251	0.495067	0.45695	0.812482	0.484492	0.489642	6.216112	0.450237	0.347056	0.597333	0.356025	0.245175
15	1.119072	1.652533	1.866576	1.95832	1.981823	1.00891	1.666374	1.086007	1.054735	1.095346	1.772963	0.782826	0.859007
16	1.481759	1.36123	1.51327	1.281593	1.760834	1.182049	1.643394	1.844521	1.388311	1.067411	1.281551	0.673895	0.917711
17	1.292657	1.468788	1.143589	1.57574	2.016854	0.61088	2.124609	1.098673	0.841141	0.809864	1.56628	0.800068	0.744161
18	0.883043	0.805175	0.53124	0.740835	0.724926	0.928824	1.417503	0.818963	0.424695	0.588738	1.110119	0.341143	0.30223
19	0.935447	1.426378	1.059539	1.34942	1.620382	0.878701	1.961554	1.244449	0.847197	0.77014	1.10411	0.771421	0.83826
20	0.536228	1.007	0.558622	0.764507	0.72844	0.469134	0.716381	0.907012	0.488686	0.225778	0.84591	0.328584	0.539383

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

เหตุการณ์ที่	Baksan	Fort Smith	Hermanus	Inuvik	McMurdo	Mexico	Moscow	Newark	Potchef- stroom	PSNM	Thule	Tibet	Tsumeb
21	1.442282	1.45218	1.041593	1.283004	1.545504	1.17583	1.993029	1.568837	1.218456	0.557832	1.132938	0.885594	0.91555
22	0.397612	0.698266	0.456215	0.553608	1.117442	0.803037	1.03316	0.422945	0.5674	0.183654	0.571142	0.210986	0.193201
23	0.963975	1.13044	0.769414	2.158949	1.656428	0.526673	1.212881	0.668555	0.780665	0.448846	1.323216	0.30676	0.585164
24	0.71483	0.777575	0.252194	0.731588	1.031967	0.257107	0.494334	0.572204	0.563645	0.184825	0.514611	0.35967	0.246342
25	1.036485	1.617979	0.053093	1.437814	1.3166	0.733986	2.943748	0.865392	0.605112	0.255697	1.127992	0.471673	0.38979
26	0.916443	1.136811	0.411833	0.817146	0.762432	0.466714	4.660805	0.76193	0.525765	0.222156	0.916494	0.399159	0.775859
27	1.502856	0.439423	0.289708	0.401983	0.816562	0.191651	1.234674	0.899656	0.337922	0.166299	0.368001	0.15171	0.17397
28	1.222058	1.046228	0.621534	1.265985	1.152038	0.763855	3.134399	0.862719	0.684061	0.367075	1.219845	0.544028	0.651343
29	1.063206	0.321242	0.685412	0.492177	0.770778	0.552562	1.183087	1.13182	0.280484	0.472948	0.571485	0.255284	0.34461

	Bmax	Bmin	delB	Vmax	Vmin	delV	Dstmax	Dstmin	Bmax_s	Bmin_s	delB_s	Vmax_s	Vmin_s	delV_s	Baks
1	15.8	1.6	14.2	711	305	406	37	-30	10.1	2.0333	8.0667	666.875	305.542	361.333	1.51
2	8.8	2	6.8	720	380	340	11	-34	6.8625	3.85833	3.00417	685.75	401.625	284.125	0.49
3	11.4	2	9.4	632	311	321	27	-49	8.35	2.8	5.55	603.083	335.75	267.333	2.22
4	16.4	2.4	14	748	331	417	7	-36	10.2708	3.55833	6.71247	697.708	357.458	340.25	1.54
5	11.1	1.8	9.3	784	335	449	3	-52	8.408333	2.55833	5.850003	753.75	352.042	401.708	2.64

6	16	1.7	14.3	704	317	387	21	-86	10.8333	2.93333	7.89997	687.125	328.333	358.792	2.511
7	9.5	1.9	7.6	687	360	327	13	56	7.225	2.85833	4.36667	648.375	384.208	264.167	2.067
8	11.9	2	9.9	752	330	422	11	-33	8.4875	2.84167	5.64583	706.75	344.083	362.667	0.967
9	10.1	1.5	8.6	601	357	244	3	-33	7.20417	2.625	4.57917	553.125	373.625	179.5	0.571
10	14.5	1.3	13.2	658	333	325	14	-46	7.975	1.95833	6.01667	593.958	345.958	248	1.467
11	8.4	2.2	6.2	948	378	570	6	-24	6.50417	2.60833	3.89584	621.5	403.125	218.375	1.521
12	8.3	2.2	6.1	603	312	291	11	-29	6.625	2.55	4.075	569.333	333.125	236.208	1.291
13	10.6	1.6	9	645	334	311	16	-21	6.60417	2.47917	4.125	591.8333	356.708	235.1253	3.00
14	8.1	1.8	6.3	519	347	172	8	-16	6.34583	2.64583	3.7	489	366.75	122.25	0.571
15	14.8	0.8	14	760	294	466	35	-41	8.22083	1.9625	6.25833	704.417	307.042	397.375	1.111
16	13.8	2.5	11.3	648	323	325	9	-29	8.07083	2.9	5.17083	632.167	334.417	297.75	1.48
17	15	2.4	12.6	708	303	405	24	-34	9.18333	2.875	6.30833	683.125	308.375	374.75	1.293
18	10.3	1.7	8.6	652	290	362	13	-27	7.15833	2.60833	4.55	631.25	302.792	328.458	0.881
19	19.3	1.4	17.9	658	299	359	39	-33	10.3833	2.425	7.9583	630.875	317.125	313.75	0.933
20	10.8	1.6	9.2	636	322	314	9	-26	6.84583	2.3125	4.53333	603.792	341.958	261.834	0.533
21	14.5	2	12.5	632	294	338	19	-51	11.4292	2.875	8.5542	602.833	304.375	298.458	1.442
22	11.7	1.5	10.2	587	280	307	10	-31	7.67917	2.2125	5.46667	561.417	291.792	269.625	0.397
23	8.4	2.5	5.9	715	298	417	14	-29	7.16667	3.08333	4.08334	669.208	314.375	354.833	0.967
24	13.9	1.7	12.2	550	297	253	12	-54	7.75417	2.44167	5.3125	524.333	305.833	218.5	0.711
25	13.5	1.1	12.4	711	297	414	15	-22	9.39583	2.2375	7.15833	676.833	304.875	371.958	1.033
26	11.1	2.1	9	575	283	292	22	-29	8.17917	2.50417	5.675	552.75	290.375	262.375	0.911
27	13.1	1.3	11.8	525	279	246	17	-29	7.025	1.7875	5.2375	476	292.875	183.125	1.507
28	21.9	1.6	20.3	658	266	392	35	-12	10.0958	2.29167	7.80413	606.583	272.25	334.333	1.221
29	11.6	1.5	10.1	558	282	276	21	-11	7.97083	2.55833	5.4125	531.917	302.083	229.834	1.067

ตารางที่ 4.2 ขนาดของการลดลงแบบพหุคูณที่เรียนซ้ำ ของปี ค.ศ.2009

เหตุการณ์	Baksan	Fort Smith	Hermanus	Inuvik	McMurdo	Mexico	Moscow	Newark	Potchefstroom	PSNM	Thule	Tibet	Tsumeb
1	1.626933	1.482153	1.1161	1.565155	1.341703	0.911427	1.003835	1.402531	1.043234	0.651664	2.011907	0.514695	0.779299
2	2.034293	0.80999	0.683141	1.108739	0.670987	0.316995	0.852613	0.754377	0.394035	0.417044	0.657613	0.223154	0.374866
3	1.744373	0.542157	0.272527	0.310936	0.858917	0.286728	0.272795	0.482531	0.408961	0.278885	0.433646	0.239575	0.461401
4	4.343611	1.208966	0.715611	0.899443	1.250131	0.560782	1.462948	0.653687	0.625863	0.498609	1.517651	0.295267	0.437508
5	2.730108	1.015043	0.790269	0.90099	0.732374	0.525242	0.989992	0.860717	0.626196	0.552809	1.030912	0.931295	0.619511
6	0.53062	0.815444	0.407777	0.590572	0.517259	0.341711	0.593882	0.931116	0.41463	0.297075	0.784334	0.146709	0.169703
7	0.825693	1.081982	0.790008	0.894361	1.177566	0.518131	0.57963	0.798263	0.748924	0.769661	1.159658	0.678653	0.404881
8	0.615876	0.630588	0.570414	0.624786	0.489827	0.201947	0.587099	0.690005	0.68497	0.275852	0.568547	0.112856	0.236226
9	1.291252	0.652407	0.923027	0.84444	0.730758	0.198272	0.48333	0.597397	0.527282	0.289118	0.772628	0.115746	0.235905
10	0.640047	0.437036	0.52727	0.527833	0.431918	0.274808	0.557167	0.389945	0.373397	0.210088	0.372215	0.143659	0.211211
11	0.584649	0.599922	0.314331	0.539364	0.365535	0.358492	0.710012	0.622608	0.511847	0.160157	0.708004	0.164899	0.250891
12	2.276954	0.499645	0.594172	0.588928	0.590898	0.415175	0.946935	1.028199	0.353812	0.650082	0.717404	0.218076	0.244497
13	0.975303	1.108333	1.176849	1.202897	1.617644	0.816449	1.042173	1.190154	0.832902	0.535324	1.236205	0.554414	0.708895
14	0.837086	0.75774	0.910273	0.524643	0.491179	0.326424	0.424828	0.679132	0.480725	0.295781	0.575841	0.232964	0.295694
15	0.309097	0.225975	0.257389	0.233461	0.502794	0.219549	0.535779	0.276628	0.449498	0.186773	0.276695	0.336126	0.1617
16	0.377349	0.690785	0.390392	0.628997	0.80488	0.411046	0.543725	0.430745	0.462987	0.236518	0.639592	0.14382	0.173171
17	0.643673	0.850638	0.407456	0.886629	0.582811	0.476078	0.817597	0.616058	0.517802	0.376387	1.11313	0.233386	0.270138
18	0.645092	0.712092	0.135545	0.398988	0.95321	0.200852	0.45575	0.493885	0.451575	0.220508	0.435728	0.10396	0.273465
19	0.710052	0.637483	0.324661	0.79995	0.919806	0.228153	0.607522	0.291407	0.375312	0.174926	0.567335	0.485193	0.391407

ตารางที่ 4.3 ขนาดของการลดลงแบบพหุคูณที่เวียมซ่า ของปี ค.ศ.2010

เหตุการณ์ที่	Baksan	Fort Smith	Hermanus	Inuvik	McMurdo	Mexico	Moscow	Newark	Potchefstroom	PSNM	Thule	Tibet	Tsumeb
1	1.241562	0.936455	0.352236	1.120764	0.468319	0.353106	0.410527	0.642706	0.322038	0.280056	0.735919	0.337422	0.758188
2	1.199043	0.417522	0.379023	0.575408	0.474463	1.179943	1.967701	0.691796	0.791001	0.30818	0.751107	0.306747	0.355364
3	1.065738	0.800343	0.770903	0.867834	0.684712	0.834286	0.516805	0.584716	0.793448	0.458734	0.820115	0.502207	0.491915
4	1.071921	1.122352	1.219575	0.883238	1.243851	0.928846	1.003422	1.062762	0.795079	0.340135	0.67669	0.619418	0.50558
5	1.10096	0.864371	0.978084	0.801504	1.197043	1.242236	0.732633	1.314466	0.980722	0.463138	0.745832	0.499457	0.711189
6	0.334994	1.004152	0.724382	0.846346	1.19912	0.792363	0.704207	0.539215	0.449562	0.575092	0.592825	0.313546	0.386432
7	0.607562	0.851542	0.747719	0.547797	0.98573	0.722997	0.624245	0.7253	0.760782	0.665695	0.72579	0.429442	0.391577
8	0.735069	1.192112	1.334697	1.05536	1.801786	0.794749	1.906544	1.703939	0.909531	0.620682	1.367533	0.540008	0.631779
9	1.380409	1.036756	0.904812	0.971015	1.484876	0.575831	1.365055	1.405784	0.994455	0.493726	1.181327	0.550785	1.321239
10	2.022016	2.482923	1.507493	0.485477	2.36372	1.832265	1.966724	1.295331	1.519028	0.649737	1.849376	0.624282	1.24156

ตารางที่ 4.4 ขนาดของการลดลงแบบพหุคูณที่เวียนซ้ำ ของปี ค.ศ.2011

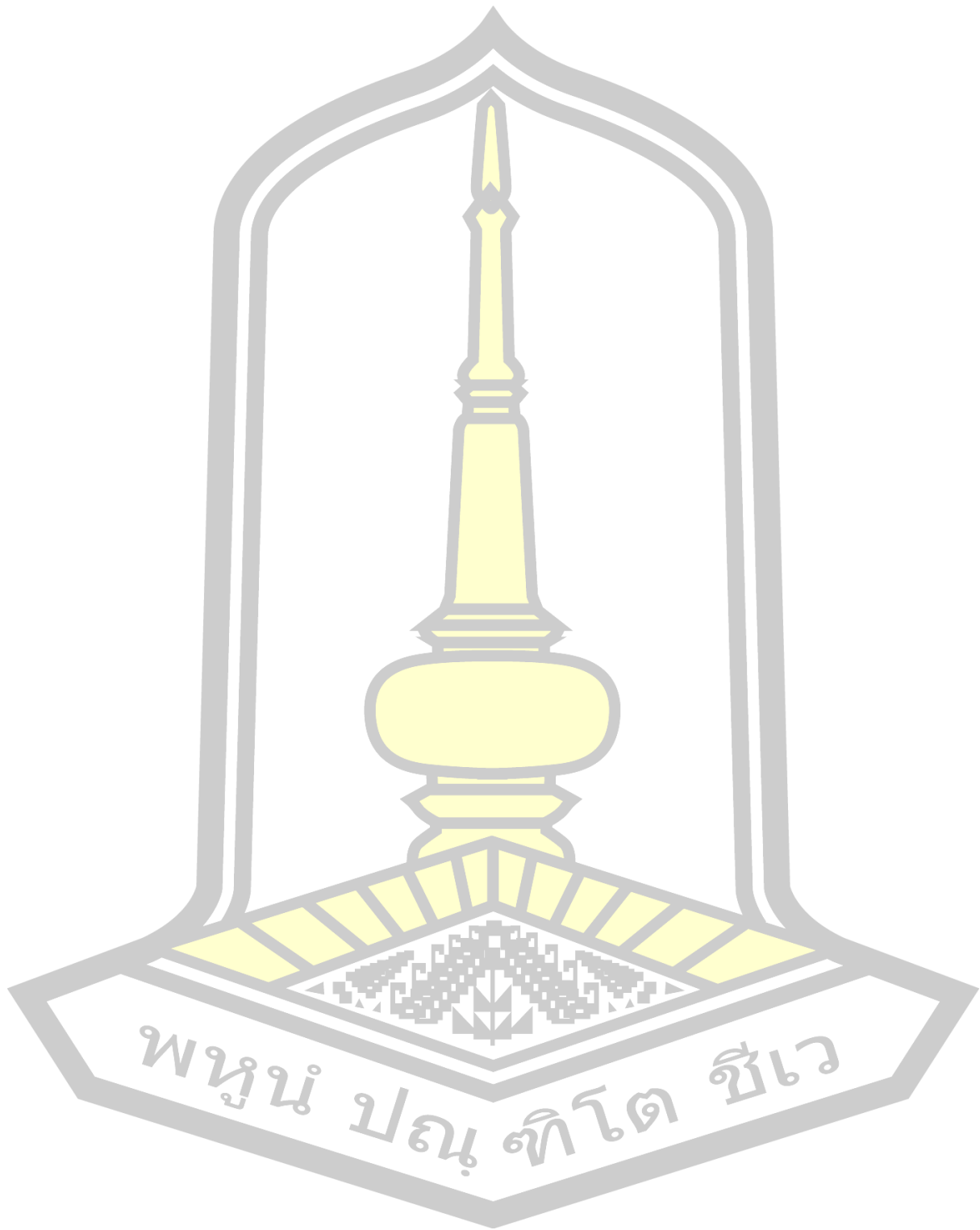
เหตุการณ์ที่	Baksan	Fort Smith	Hermanus	Inuvik	McMurdo	Mexico	Moscow	Newark	Potchefstroom	PSNM	Thule	Tibet	Tsumeb
1	0.307972	0.402235	0.594946	0.238925	0.532803	0.232501	0.580853	0.491761	0.559679	0.313468	0.348779	0.227573	0.162656
2	1.108709	1.228583	0.612447	0.589663	0.625704	0.40403	1.261868	1.105707	0.592345	0.459064	0.670886	0.408345	0.603036
3	2.071164	2.7025	3.05878	3.520415	3.62132	2.278648	3.482195	3.379981	0.149923	1.326431	3.297529	1.456161	2.283866
4	0.828896	1.074297	0.968641	0.909228	0.892955	0.611196	0.995386	0.95899	0.521076	0.530796	1.445327	0.399539	0.697975
5	0.784635	1.209153	0.81826	0.9568	0.686519	0.293428	1.711582	0.773366	0.791305	0.390468	1.110446	0.3744	0.516399
6	0.997603	1.581609	1.316463	2.007164	1.870076	0.914837	1.457734	1.606712	0.882646	0.394435	2.675135	0.67981	0.894161
7	1.433334	0.644931	0.654006	0.968804	0.803558	0.627107	1.067616	0.853785	0.4874	0.490059	1.096093	0.509807	0.43856
8	3.272489	4.049161	3.024876	4.14327	4.165107	2.549166	3.482952	3.525889	2.541418	1.433918	4.211746	1.869033	2.438154
9	1.631218	2.610365	0.285786	2.894593	3.429762	2.647076	3.047381	2.986478	2.210601	1.318845	2.714196	1.970892	2.087847
10	0.778093	1.198267	0.954267	1.219735	1.888332	0.532812	1.15716	1.192272	0.932309	0.906198	1.425373	0.575449	0.756917
11	1.161158	1.298305	1.147619	1.184672	1.388914	0.677357	0.681196	0.964299	1.112676	0.450927	1.356833	0.327005	0.478308
12	0.631615	0.609066	1.052188	0.624251	0.861327	0.58715	0.464276	0.391962	0.867026	0.396789	0.640457	0.525261	0.558073

ตารางที่ 4.5 ขนาดของการลดลงแบบพหุคูณที่เวียนซ้ำ ของปี ค.ศ.2015

เหตุการณ์ที่	Baksan	Fort Smith	Hermanus	Inuvik	McMurdo	Mexico	Moscow	Newark	Potchefstroom	PSNM	Thule	Tibet	Tsumeb
1	1.262565	2.369484	1.170656	1.543249	1.268476	1.061158	1.434996	1.53352	1.021589	0.768197	1.502063	0.99525	1.129697
2	0.991544	0.716211	0.532806	1.29218	0.770341	0.607441	0.625978	1.052714	0.494531	0.724185	0.972662	0.022468	0.523373
3	1.238914	1.363223	1.029034	1.914904	1.031884	1.251826	1.293175	2.292772	1.163475	1.11981	1.971605	0.556662	1.374532
4	2.39439	0.845093	0.935252	1.681308	0.656593	0.831565	0.711484	1.458513	1.152092	0.848485	1.302934	0.567225	0.973041
5	1.380443	3.959169	0.814086	4.136969	1.472213	0.487057	0.50555	0.884678	0.791806	0.248456	4.486133	0.677729	0.599883
6	0.824103	1.749309	0.62239	1.632343	4.040968	0.467119	0.585064	0.335328	0.625492	0.489267	1.946317	1.096392	0.572303
7	0.927805	1.504199	1.058237	1.339202	2.108254	0.582176	1.260085	1.653749	0.790547	0.399448	2.136696	1.057493	0.586068
8	1.22662	0.765166	1.171388	0.570826	1.36645	0.919965	1.222614	1.23131	0.732464	0.760263	0.592373	0.896844	0.733605
9	1.284041	1.049624	1.439987	2.69558	0.794383	1.529764	1.881978	1.848216	1.482467	0.417007	1.109289	0.809006	1.215961
10	0.27246	0.730403	0.40096	0.985234	3.158236	0.496875	0.433534	0.543581	0.341707	0.671896	1.271064	0.384892	0.453951
11	0.963341	1.355992	0.858827	0.846774	2.110672	0.992355	0.887867	0.291398	0.700612	0.997095	1.596199	0.72245	0.822955
12	1.046025	1.424163	0.840672	1.85273	2.176475	0.436049	1.269091	1.090494	0.969104	0.596821	1.200637	0.001079	0.546015
13	0.933696	1.931367	0.654603	13.231	1.103911	0.607141	0.931911	1.221122	0.893231	0.904944	2.173227	0.00054	0.558976
14	1.684168	1.878625	1.139542	2.081416	1.618447	1.147618	1.182859	1.546444	0.855817	0.749865	1.353971	0.00054	0.902724
15	0.643492	0.881893	0.661996	0.924256	1.072616	0.488748	0.549542	1.373291	0.70288	0.499176	0.800996	0.001079	0.579688
16	1.493283	1.034471	1.090605	1.120553	3.329348	1.355668	2.428076	1.538577	0.997035	0.750805	1.319129	0.025903	0.505615

ตารางที่ 4.6 ขนาดของการลดลงแบบพหุคูณที่เวียนซ้ำ ของปี ค.ศ.2016

เหตุการณ์ที่	Baksan	Fort Smith	Hermanus	Inuvik	McMurdo	Mexico	Moscow	Newark	Potchefstroom	PSNM	Thule	Tibet	Tsumeb
1	1.583152	1.927076	1.863731	1.661962	1.467242	1.871632	2.728187	2.716328	1.511936	0.925285	3.106279	0.994269	1.088727
2	1.829096	1.029786	0.830792	1.007112	1.0478	0.838513	1.092033	0.53485	0.800386	0.478397	1.098648	0.830809	0.483654
3	2.359893	1.122138	1.440861	0.889214	1.890156	1.599709	1.244834	1.239089	1.214884	1.031293	1.112259	1.060122	1.472947
4	1.920825	0.816625	2.137071	1.375018	0.990985	1.977309	2.102037	2.272433	1.983149	1.257558	0.657889	0.475973	0.005909
5	2.075041	1.559964	1.393418	1.634059	2.177331	1.041705	1.579095	2.43551	1.704115	1.276257	1.705633	0.542498	0.010128
6	1.360424	1.825282	1.04746	1.338034	0.582685	0.971935	1.452951	0.85049	0.950017	0.705262	1.911391	0.653837	1.221146
7	1.108602	1.041477	0.796252	1.095219	2.812283	0.629091	1.24229	1.228586	0.645099	0.778848	1.250537	0.824619	0.482023
8	2.708048	3.021187	2.418304	3.277623	2.426537	1.992381	3.283536	2.585397	2.439595	2.286379	2.803497	1.509138	2.201631
9	1.103363	3.485298	1.012837	2.973571	1.752523	0.751075	1.48254	0.977084	0.65642	0.483347	2.894581	1.196747	0.66078
10	3.086097	1.232848	2.838292	1.013823	2.112999	2.632609	3.660184	3.488884	2.937983	1.706304	0.860117	0.877531	1.500579
11	1.355637	1.943953	1.79449	1.141083	3.359135	1.449286	1.760951	1.897558	1.404	0.882368	1.708925	0.476175	1.092336
12	2.865245	2.197543	2.604305	1.956565	1.6142	2.500889	3.927722	3.545802	2.216798	1.579691	2.079807	0.040243	2.082267
13	0.315242	2.231873	1.684205	2.256155	2.73929	1.855409	1.683583	1.968102	2.003126	1.157579	2.277528	0.046604	1.542326
14	0.125279	2.134881	2.083216	2.528373	1.797144	1.957915	2.427125	2.345884	2.038209	1.398173	2.017454	0.03855	1.485877
15	0.122312	1.811219	1.862823	1.300833	2.162188	1.528995	1.715913	1.661627	1.383598	1.425926	1.218046	0.037456	1.378662
16	0.135808	1.709735	1.842037	1.777042	1.747601	1.358275	1.772638	1.993214	1.158248	0.563441	1.73893	0.041717	1.12867
17	0.140045	1.99908	1.84088	1.282396	3.167539	1.64736	2.1892	2.880235	1.853729	1.297105	1.169425	0.043222	2.169694
18	1.129695	3.002978	1.822507	3.050378	1.548551	1.565538	1.654165	1.550283	1.855765	0.74462	2.05729	0.044797	4.600086
19	0.91852	0.706359	1.392719	1.828454	1.443067	1.505691	1.419662	2.162324	1.339273	0.883905	2.110074	0.036777	3.548168



จากการวิเคราะห์ทางสถิติค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานของปี ค.ศ.2008-2011 และ ค.ศ.2015-2016 ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ขนาดของการลดลงแบบพอร์บซุชที่เวียนซ้ำ ของปี ค.ศ.2008-2011 ($A < 0$) และ ค.ศ. 2015-2016 ($A > 0$)

Station	Events	Year	Mean	Medain
Thule	29	2008	1.21±0.54	1.13
	19	2009	0.82±0.43	0.71
	10	2010	0.94±0.40	0.75
	12	2011	1.75±1.20	1.39
	16	2015	1.61±0.89	1.34
	19	2016	1.78±0.69	1.74
McMurdo	29	2008	1.34±0.55	1.28
	19	2009	0.79±0.35	0.73
	10	2010	1.19±0.59	1.20
	12	2011	1.73±1.30	1.14
	16	2015	1.44±0.82	1.25
	19	2016	1.93±0.73	1.80
Hermanus	29	2008	0.82±0.45	0.74
	19	2009	0.60±0.30	0.57
	10	2010	0.89±0.38	0.84
	12	2011	1.21±0.09	0.96
	16	2015	0.90±0.28	0.89
	19	2016	1.72±0.57	1.82
Mexico	29	2008	0.77±0.30	0.76
	19	2009	0.40±0.20	0.34
	10	2010	0.93±0.41	0.81
	12	2011	1.03±0.90	0.62
	16	2015	1.05±0.74	1.03
	19	2016	1.56±0.55	1.57

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

Station	Events	Year	Mean	Median
PSNM	29	2008	0.55±0.28	0.52
	19	2009	0.37±0.18	0.30
	10	2010	0.49±0.14	0.48
	12	2011	0.70±0.42	0.47
	16	2015	0.81±0.39	0.72
	19	2016	1.10±0.46	1.03

ค่าเฉลี่ยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากโดยบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงมากในแต่ละเหตุการณ์ หมายความว่าค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานอธิบายแนวโน้มศูนย์กลางของชุดข้อมูลทางสถิติ ค่าเฉลี่ยมีข้อเสียที่จะได้รับผลกระทบจากค่าเดียวที่สูงเกินไปหรือต่ำเกินไปเมื่อเทียบกับส่วนที่เหลือของกลุ่ม ตัวอย่างในขณะที่ค่ามัธยฐานบางครั้งเป็นตัวชี้วัดที่ดีกว่า ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าสถานีที่มีค่าความแข็งแรงเส้นทางแม่เหล็กที่สูงมีค่าขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนช้า น้อยกว่าสถานีที่มีค่าความแข็งแรงเส้นทางแม่เหล็กที่ต่ำของแต่ละปีซึ่งบ่งบอกว่าเป็นการพึ่งพาความแข็งแรงเส้นทางแม่เหล็ก สำหรับค่าความแข็งแรงเดียวกันเช่น Thule และ McMurdo ค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานของแอมพลิจูดจะเทียบเคียงกันได้ทั้งสองขั้วแม่เหล็ก สังเกตว่าแอมพลิจูดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนช้า ของ Mexico และ Hermanus โดยเฉพาะในปี ค.ศ.2008 และ ค.ศ.2010 นั้นค่อนข้างใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าค่าความแข็งแรงเส้นทางแม่เหล็กของ Mexico (อยู่ทางตอนเหนือ) จะสูงกว่า Hermanus (อยู่ทางตอนใต้) สิ่งเหล่านี้บ่งชี้ว่า การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนช้าของสถานีทางซีกโลกเหนือได้รับการมอดูเลตมากกว่าทางซีกโลกใต้อดคล้องกับลักษณะของโครงสร้างของลมสุริยะความเร็วสูงในรอบการหมุนของดวงอาทิตย์ การมอดูเลตรังสีคอสมิกกาแล็กติกแบบไม่สมมาตรตามแผ่นกระแสสุริยะมณฑลที่เกี่ยวข้องกับการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนช้าที่มากขึ้นของสถานีทางซีกโลกเหนือ สุดท้ายนี้เราพบว่าสำหรับสถานีที่มีละติจูดคล้ายกันเช่น Mexico และ PSNM จะขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแรงเส้นทางแม่เหล็ก เมื่อพิจารณาการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนช้าของสองขั้วแม่เหล็กพบว่าแอมพลิจูดของ $A > 0$ มากกว่า $A < 0$ สิ่งนี้สามารถอธิบายได้ว่าสำหรับอนุภาคที่มีค่าความแข็งแรงเส้นทางแม่เหล็กต่ำจะได้รับผลกระทบจากการดริฟต์มากกว่า สำหรับ $A > 0$ รังสีคอสมิกกาแล็กติกจะลดลงจากขั้วไปยังเส้นศูนย์สูตรแล้วจึงผันจากสนามแม่เหล็กความเข้มสูงในกระแสการหมุนของบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วม (ใกล้เส้นศูนย์สูตร) ที่ทำให้เกิดการลดลงของรังสีคอสมิกกาแล็กติก สำหรับ $A < 0$ การดริฟต์รอยตรงมายังโลกและความ

หนาแน่นเพิ่มขึ้นที่เส้นศูนย์สูตรและทำให้รังสีคอสมิกกาแล็กติก ถดถอยเมื่ออนุภาคมีความแข็งแกร่งทางแม่เหล็กสำหรับอนุภาคที่มีความแข็งแกร่งทางแม่เหล็กสูงกว่าค่าวิกฤตจะทำหน้าที่ทำให้ความหนาแน่นลดลง แอมพลิจูดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำใกล้เคียงกันสำหรับปี ค.ศ.2011 และ ค.ศ.2015

นอกจากนี้เราพบว่าแอมพลิจูดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำแตกต่างกันไปในแต่ละปี แม้ว่าจะอยู่ในวัฏจักรเดียวกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในปี 2009 มีกิจกรรมสุริยะต่ำและความเร็วสุริยะอ่อนลง แอมพลิจูดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำจึงต่ำที่สุดและมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของปี ค.ศ. 2011 แอมพลิจูดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำมีขนาดมากขึ้นในช่วงที่มีกิจกรรมสุริยะสูงแสดงให้เห็นถึงการพึ่งพาของดวงอาทิตย์ผลลัพธ์ของงานชิ้นนี้สอดคล้องกับผลของ Richardson และคณะ [25] โดยการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ มีความโดดเด่นมากขึ้นเมื่อ $A > 0$ ลักษณะเฉพาะอาจเกี่ยวกับการแพร่กระจายของอนุภาคที่ขึ้นอยู่กับขั้วสนามแม่เหล็ก



4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพหุคูณที่เรียนช้กับความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กขนาดของหลอดลงแบบพหุคูณที่เรียนช้

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของขนาดการลดลงแบบพหุคูณที่เรียนช้กับความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กของแต่ละปีในปี ค.ศ.2008-2011 ($A < 0$) และในปี ค.ศ.2015-2016 ($A > 0$) จะแสดงดังตาราง

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าสัมพันธ์สัมพัทธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพหุคูณที่เรียนช้กับความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันของปี ค.ศ.2008

เหตุการณ์ที่	Bmax	Bmin	delB	Vmax	Vmin	delV	Dstmax	Dstmin	Bmax_s	Bmin_s	delB_s	Vmax_s	Vmin_s	delV_s
1	15.8	1.6	14.2	711	305	406	37	-30	10.1	2.0333	8.0667	666.875	305.542	361.333
2	8.8	2	6.8	720	380	340	11	-34	6.8625	3.85833	3.00417	685.75	401.625	284.125
3	11.4	2	9.4	632	311	321	27	-49	8.35	2.8	5.55	603.083	335.75	267.333
4	16.4	2.4	14	748	331	417	7	-36	10.2708	3.55833	6.71247	697.708	357.458	340.25
5	11.1	1.8	9.3	784	335	449	3	-52	8.408333	2.55833	5.850003	753.75	352.042	401.708
6	16	1.7	14.3	704	317	387	21	-86	10.8333	2.93333	7.89997	687.125	328.333	358.792
7	9.5	1.9	7.6	687	360	327	13	56	7.225	2.85833	4.36667	648.375	384.208	264.167
8	11.9	2	9.9	752	330	422	11	-33	8.4875	2.84167	5.64583	706.75	344.083	362.667
9	10.1	1.5	8.6	601	357	244	3	-33	7.20417	2.625	4.57917	553.125	373.625	179.5
10	14.5	1.3	13.2	658	333	325	14	-46	7.975	1.95833	6.01667	593.958	345.958	248
11	8.4	2.2	6.2	948	378	570	6	-24	6.50417	2.60833	3.89584	621.5	403.125	218.375
12	8.3	2.2	6.1	603	312	291	11	-29	6.625	2.55	4.075	569.333	333.125	236.208
13	10.6	1.6	9	645	334	311	16	-21	6.60417	2.47917	4.125	591.8333	356.708	235.1253
14	8.1	1.8	6.3	519	347	172	8	-16	6.34583	2.64583	3.7	489	366.75	122.25
15	14.8	0.8	14	760	294	466	35	-41	8.22083	1.9625	6.25833	704.417	307.042	397.375
16	13.8	2.5	11.3	648	323	325	9	-29	8.07083	2.9	5.17083	632.167	334.417	297.75
17	15	2.4	12.6	708	303	405	24	-34	9.18333	2.875	6.30833	683.125	308.375	374.75
18	10.3	1.7	8.6	652	290	362	13	-27	7.15833	2.60833	4.55	631.25	302.792	328.458

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

เหตุการณ์ที่	Bmax	Bmin	delB	Vmax	Vmin	delV	Dstmax	Dstmin	Bmax_s	Bmin_s	delB_s	Vmax_s	Vmin_s	delV_s
19	19.3	1.4	17.9	658	299	359	39	-33	10.3833	2.425	7.9583	630.875	317.125	313.75
20	10.8	1.6	9.2	636	322	314	9	-26	6.84583	2.3125	4.53333	603.792	341.958	261.834
21	14.5	2	12.5	632	294	338	19	-51	11.4292	2.875	8.5542	602.833	304.375	298.458
22	11.7	1.5	10.2	587	280	307	10	-31	7.67917	2.2125	5.46667	561.417	291.792	269.625
23	8.4	2.5	5.9	715	298	417	14	-29	7.16667	3.08333	4.08334	669.208	314.375	354.833
24	13.9	1.7	12.2	550	297	253	12	-54	7.75417	2.44167	5.3125	524.333	305.833	218.5
25	13.5	1.1	12.4	711	297	414	15	-22	9.39583	2.2375	7.15833	676.833	304.875	371.958
26	11.1	2.1	9	575	283	292	22	-29	8.17917	2.50417	5.675	552.75	290.375	262.375
27	13.1	1.3	11.8	525	279	246	17	-29	7.025	1.7875	5.2375	476	292.875	183.125
28	21.9	1.6	20.3	658	266	392	35	-12	10.0958	2.29167	7.80413	606.583	272.25	334.333
29	11.6	1.5	10.1	558	282	276	21	-11	7.97083	2.55833	5.4125	531.917	302.083	229.834

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพหุคูณที่เรียนรู้เกี่ยวกับความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันของปี ค.ศ.2009

เหตุการณ์	Bmax	Bmin	delB	Vmax	Vmin	delV	Dstmax	Dstmin	Bmax_s	Bmin_s	delB_s	Vmax_s	Vmin_s	delV_s
1	12.5	1.1	11.4	578	287	291	36	-19	7.17917	1.56667	5.6125	514.625	296.917	217.708
2	16.1	1.4	14.7	587	288	299	30	-38	7.35	2.29167	5.05833	559.5	302.292	257.208
3	8.7	1.5	7.2	688	364	324	16	-23	5.64167	2.12917	3.5125	630.25	396.667	233.583
4	17.9	1.1	16.8	566	305	261	19	-32	11.8958	2.14167	9.75413	548.042	324.875	223.167
5	9.9	2.4	7.5	496	309	187	18	-27	8.6625	2.93333	5.72917	483.208	306.125	177.083
6	8.4	1.2	7.2	548	306	242	22	-27	5.97083	2.11667	3.85416	525.542	339.625	185.917
7	11.2	2	9.2	536	306	230	10	-25	8.70417	3.14583	5.58334	500.417	312.125	188.292
8	7.2	1.1	6.1	520	327	193	16	-26	5.3875	2.12083	3.26667	492.042	341.375	150.667
9	10.8	1.2	9.6	498	256	242	42	-14	6.33333	2.375	3.95833	477.25	263.75	213.5
10	10.1	2.4	7.7	562	362	200	13	-28	8.22917	2.775	5.45417	528	384.667	143.333
11	10.7	1.5	9.2	467	300	167	21	-6	7.4125	2.18333	5.22917	443.542	313	130.542
12	10.2	1.3	8.9	540	338	202	21	-25	6.29167	1.99167	4.3	520.708	357.042	163.666
13	12.9	2	10.9	515	323	192	27	-36	9.65	2.72917	6.92083	488.083	348.208	139.875
14	11.6	1.5	10.1	559	266	293	13	-26	8.60833	1.82917	6.77916	520.25	272.417	247.833
15	12.3	1.6	10.7	471	326	145	17	-29	7.49583	2.0375	5.45833	447	338.625	108.375
16	8.1	0.8	7.3	493	324	169	12	-9	5.36667	1.70417	3.6625	464.833	338.75	126.083
17	8.3	2.5	5.8	473	286	187	17	-15	6.15	3.2	2.95	459.542	294.042	165.5
18	9.2	1.8	7.4	459	310	149	16	-22	6.14167	2.7375	3.40417	426.958	330.125	96.833
19	10.9	1.2	9.7	556	285	271	10	-12	7.2	2.36667	4.83333	531.75	304.417	227.333

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บู่ที่เรียนรู้เกี่ยวกับความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันของปี 2010

เหตุการณ์ที่	Bmax	Bmin	delB	Vmax	Vmin	delV	Dstmax	Dstmin	Bmax_s	Bmin_s	delB_s	Vmax_s	Vmin_s	delV_s
1	13	2.4	10.6	514	289	225	14	-13	6.875	3.32917	3.54583	490.833	293.958	196.875
2	9.3	3.1	6.2	562	308	254	8	-24	6.42917	3.81667	2.6125	527.917	330.875	197.042
3	10.7	2.1	8.6	571	335	236	17	-36	7.775	2.49583	5.27917	541.375	343.958	197.417
4	10.2	1.3	8.9	698	303	395	16	-31	8.275	2.42083	5.85417	648.417	309.458	338.959
5	9.7	2.9	6.8	689	331	358	24	-31	8.16667	3.325	4.84167	649.792	341.125	308.667
6	18.9	2.4	16.5	705	265	440	44	-34	9.57917	2.42917	7.15	666.292	279.5	386.792
7	12.2	1.4	10.8	629	300	329	19	-32	9.275	2.85	6.425	585.333	327.917	257.416
8	9.3	2.2	7.1	675	351	324	3	-41	8.04583	3.92917	4.11666	645.667	369.792	275.875
9	11.3	2.6	8.7	639	276	363	9	-45	9.325	3.78333	5.54167	614.333	294.333	320
10	12	2.3	9.7	660	316	344	11	-25	7.47083	3.2	4.27083	624.75	325.042	299.708

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพหุคูณที่เรียนรู้กับความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันของปี ค.ศ.2011

เหตุการณ์ที่	Bmax	Bmin	delB	Vmax	Vmin	delV	Dstmax	Dstmin	Bmax_s	Bmin_s	delB_s	Vmax_s	Vmin_s	delV_s
1	14.6	2.5	12.1	662	327	335	24	-42	7.01667	3.57917	3.4375	623.667	344.667	279
2	14.1	2.9	11.2	599	431	168	5	-64	8.6375	4.24167	4.39583	563.542	436.833	126.709
3	15.2	2.6	12.6	655	298	357	12	-60	11.6917	3.49167	8.20003	607.958	322.833	285.125
4	15.4	1.5	13.9	599	318	281	32	-48	10.1292	2.80417	7.32503	558.375	343.917	214.458
5	15.9	2.3	13.6	555	314	241	29	-26	8.12083	3.025	5.09583	500.292	321.5	178.792
6	17.3	2.6	14.7	705	341	364	3	-47	9.5625	3.49583	6.06667	677.583	338.25	339.333
7	11.2	2.5	8.7	598	314	284	22	-22	9.41667	3.71667	5.7	566.375	326.5	239.875
8	10.5	1.8	8.7	665	364	301	8	-30	7.54167	2.65	4.89167	614.417	385.333	229.084
9	12.8	2.9	9.9	710	341	369	2	-28	8.5375	3.35	5.1875	681.333	347.25	334.083
10	10.4	1.9	8.5	733	345	388	6	-24	8.94583	2.56667	6.37916	685	361.25	323.75
11	14.1	3.2	10.9	687	304	383	15	-40	9.6	3.69167	5.90833	640.042	317.667	322.375
12	9.9	3.2	6.7	569	343	226	10	-22	7.79583	3.63333	4.1625	526.3042	372.667	526.2669

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพหุคูณที่เรียงเข้ากับความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันของปี ค.ศ.2015

เหตุการณ์ที่	Bmax	Bmin	delB	Vmax	Vmin	delV	Dstmax	Dstmin	Bmax_s	Bmin_s	delB_s	Vmax_s	Vmin_s	delV_s
1	18.8	4.4	14.4	488	281	207	44	-20	14.8958	5.4	9.4958	469.208	294.958	174.25
2	13.9	3.2	10.7	695	381	314	6	-46	10.1583	3.47167	6.68663	670.417	392.458	277.959
3	12.6	2.4	10.2	643	323	320	8	-54	9.80417	3.7	6.10417	587.5	340.417	247.083
4	10.4	2.9	7.5	576	405	171	16	-21	8.55	3.89167	4.65833	561.333	431.708	129.625
5	15.6	1.5	14.1	723	294	429	12	-79	10.8125	2.32083	8.49167	655.583	315.583	340
6	13.6	3.7	9.9	583	379	204	20	-27	7.7875	4.35833	3.42917	562.5	393.5	169
7	16.4	2.5	13.9	731	336	395	-4	-76	10.5657	2.75	7.8157	684.042	347.792	336.25
8	20.5	3.2	17.3	661	298	363	24	-73	14.5375	3.3875	11.15	635.792	296.792	339
9	10.8	3.5	7.3	600	447	153	-7	-44	8.10833	4.85	3.25833	577.333	455.583	121.75
10	21.2	2.4	18.8	575	309	266	34	-67	12.3667	3.32917	9.03753	510.458	313.917	196.541
11	14.7	1.1	13.6	613	342	271	18	-29	11.6542	3.2625	8.3917	580.25	356.667	223.583
12	20.4	2.4	18	775	377	398	-9	-124	14.9208	3.675	11.2458	743.417	393.458	349.959
13	19.4	1.4	18	720	368	352	-6	-82	15.3792	2.65	12.7292	684.208	409	275.208
14	11.9	4.3	7.6	655	353	302	11	-28	9.42583	4.7667	4.65913	611.125	365.625	245.5
15	13.8	2.9	10.9	600	383	217	26	-47	9.28333	4.27917	5.00416	546	386.083	159.917
16	15.9	2.3	13.6	598	368	230	-10	-78	15.0458	3	12.0458	542.958	393.042	149.916

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพหุคูณที่เขียนขึ้นกับความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกันของปี ค.ศ. 2016

เหตุการณ์ที่	Bmax	Bmin	deB	Vmax	Vmin	delV	Dstmax	Dstmin	Bmax_s	Bmin_s	deB_s	Vmax_s	Vmin_s	delV_s
1	16.9	3.4	13.5	490	331	159	21	-110	13.7583	4.3625	9.3958	481.583	357.375	124.208
2	10.5	2.6	7.9	606	321	285	14	-30	8.10417	3.925	4.17917	567.167	335.542	231.625
3	8.9	2.4	6.5	467	261	206	17	-21	7.60833	3.44583	4.1625	460.125	274.833	185.292
4	11.1	2.7	8.4	484	276	208	16	-53	8.8125	3.575	5.2375	470.458	291.458	179
5	18.5	3.1	15.4	649	328	321	26	-57	14.4167	4.07083	10.34587	616.292	333.75	282.542
6	22.9	3	19.9	590	306	284	22	-75	12.3	3.3625	8.9375	550.083	325.583	224.5
7	16.3	2.5	13.8	682	366	316	5	-88	11.9167	3.41667	8.50003	646.5	376.75	269.75
8	13	4.4	8.6	594	350	244	22	-21	9.925	5.125	4.8	548.083	357.667	190.416
9	17.3	2.7	14.6	625	289	336	32	-44	10.2042	3.525	6.6792	584.292	301.208	283.084
10	14.2	2.9	11.3	678	339	339	21	-28	9.5625	3.2875	6.275	607.917	346.833	261.084
11	13.1	2	11.1	528	331	197	14	-30	9.34167	2.75125	6.59042	506.375	347.792	158.583
12	13.2	2.4	10.8	679	312	367	21	-31	11.5917	3.65417	7.93753	638.333	322.292	316.041
13	14.8	2.9	11.9	584	284	300	24	-74	10.7458	4.73333	6.01247	538.583	296.125	242.458
14	9.7	3.3	6.4	708	326	382	20	-59	8.25	3.9375	4.3125	677.917	340.25	337.667
15	19.9	2.7	17.2	727	263	464	19	-35	12.0167	3.99167	8.02503	659.125	282.375	376.75
16	10.8	3.6	7.2	705	348	357	0	-66	9.2	4.20417	4.99583	684.042	354.792	329.25
17	12.6	1.8	10.8	668	328	340	12	-46	9.72917	3.7875	5.94167	634.417	334.833	299.584
18	17.1	1.7	15.4	710	285	425	16	-41	9.80833	3.2	6.60833	674.708	290.417	384.291
19	12.8	2.3	10.5	745	350	395	9	-40	10.2625	2.9375	7.325	703.667	353.125	350.542

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับความเร็วลมสุริยะ และสนามแม่เหล็กของแต่ละปีจะแสดงดังตารางที่ 4.14

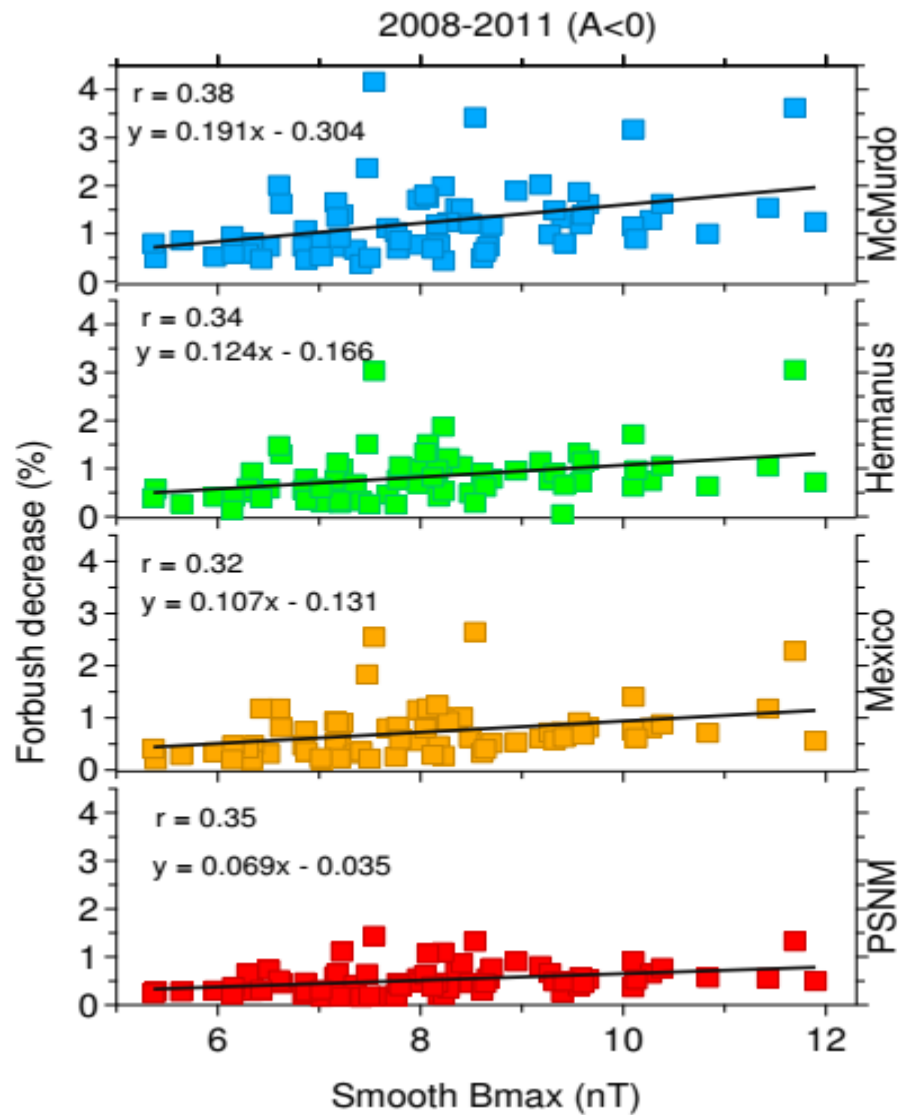
ตารางที่ 4.14 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาด การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับความเร็วลมสุริยะและสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกัน ในปี ค.ศ.2008-2011 ($A < 0$) และในปี ค.ศ. 2015-2016 ($A > 0$)

Year	RFD versus	NM station				
		Thule	McMurdo	Hermanus	Thule	PSNM
2008	B_{max}	0.14	0.30	0.16	0.27	0.16
	ΔB	0.14	0.28	0.14	0.26	0.13
	B_{max}^s	0.22	0.34	0.14	0.37	0.22
	V_{max}	0.35	0.23	0.25	0.17	0.53
	ΔV	0.35	0.28	0.25	0.19	0.49
	V_{max}^s	0.49	0.42	0.37	0.43	0.37
2009	B_{max}	0.40	0.42	0.42	0.34	0.32
	ΔB	0.39	0.42	0.41	0.31	0.28
	B_{max}^s	0.44	0.46	0.49	0.45	0.38
	V_{max}	0.07	0.18	0.42	0.09	0.17
	ΔV	0.24	0.22	0.34	0.13	0.20
	V_{max}^s	0.04	0.13	0.13	0.04	0.17
2010	B_{max}	-0.23	-0.01	-0.22	-0.21	0.25
	ΔB	-0.24	0.02	-0.15	-0.25	0.29
	B_{max}^s	-0.13	0.29	0.22	-0.28	0.58
	V_{max}	0.16	0.67	0.71	0.34	0.53
	ΔV	0.02	0.55	0.50	0.18	0.44
	V_{max}^s	0.21	0.71	0.72	0.32	0.55
2011	B_{max}	0.00	-0.17	-0.04	-0.16	-0.31
	ΔB	0.06	-0.14	0.01	-0.15	-0.25
	B_{max}^s	0.29	0.22	0.33	0.20	0.20
	V_{max}	0.45	0.54	0.13	0.40	0.45
	ΔV	0.42	0.48	0.18	0.36	0.37
	V_{max}^s	0.42	0.51	0.06	0.39	0.41
2008-2011	B_{max}	0.21	0.23	0.18	0.16	0.18
	ΔB	0.19	0.20	0.15	0.11	0.15
	B_{max}^s	0.35	0.38	0.34	0.32	0.35
Year	RFD	NM station				

	versus	Thule	McMurdo	Hermanus	Thule	PSNM
2008-2011	V_{max}	0.37	0.44	0.31	0.38	0.50
	ΔV	0.34	0.43	0.30	0.35	0.44
	V_{max}^s	0.41	0.51	0.34	0.45	0.51
2015-2016	B_{max}	0.09	-0.13	-0.30	-0.39	-0.17
	ΔB	0.13	-0.18	0.29	-0.43	-0.22
	B_{max}^s	0.07	0.08	-0.20	-0.13	0.03
	V_{max}	0.14	-0.03	-0.03	-0.12	-0.01
	ΔV	0.10	0.02	0.14	0.00	0.15
	V_{max}^s	0.10	-0.04	-0.05	-0.13	-0.05

แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสถานีแต่ละสถานีจากต่ำไปสูง (จากซ้ายไปขวา) เราได้ตรวจสอบทั้งค่า t และ F ตามลำดับ สำหรับค่าที่เกินค่าวิกฤตและต้องปฏิเสธ H_0 (สำหรับสมมติฐาน H_0 คือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น 0) ค่าของ γ ที่ตรงตามเงื่อนไขจะแสดงตัวหนาซึ่งส่วนใหญ่จะพบในกรณีของ B_{max}^s และ V_{max}^s ส่วนในกรณีของ B_{max} และ V_{max} หรือ ΔB และ ΔV ให้ค่า γ ที่ใกล้เคียงกันซึ่งไม่สามารถปฏิเสธ H_0 ได้เนื่องจากค่า t และ F ต่ำกว่าค่าวิกฤต

งานวิจัยนี้ระบุว่า มีความแตกต่างกันในแต่ละปีของแต่ละภูมิภาคแม่เหล็กดังนี้ ความสัมพันธ์เชิงบวกของขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับลมสุริยะและสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ ในช่วง $A < 0$ มากกว่า $A > 0$ สำหรับความสัมพันธ์ของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำและสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ γ จะมีค่าสูงสุด สำหรับกรณี B_{max}^s ของปี ค.ศ.2009 ของสถานีส่วนมาก สิ่งเหล่านี้บ่งชี้ว่าสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นความปั่นป่วนของสนามแม่เหล็กในกระแสการหมุนของบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมทำหน้าที่เป็นอุปสรรคในการแพร่กระจายซึ่งส่งผลกระทบต่อ การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำในช่วงกิจกรรมสุริยะต่ำ ค่าติดลบของ γ ส่วนมากอยู่ในช่วงปี 2010 ของ Thule และ Mexico ส่วนที่ McMurdo แสดงความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกันของ RFD และ V_{max}^s โดยรวมแล้ว γ จะอยู่ในช่วง 0.13-0.58 (มีความสัมพันธ์กันเล็กน้อย) พบว่าในปี ค.ศ.2010-2011 มีความสัมพันธ์กันเล็กน้อย โดยเฉลี่ยแล้วในปี ค.ศ.2008-2011 ความสัมพันธ์ของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำและ B_{max}^s จะสัมพันธ์กันค่อนข้างน้อยซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.19 โดยแสดงลักษณะการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เชิงเส้นของขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำและ B_{max}^s ของแต่ละสถานีของปี ค.ศ.2008-2011

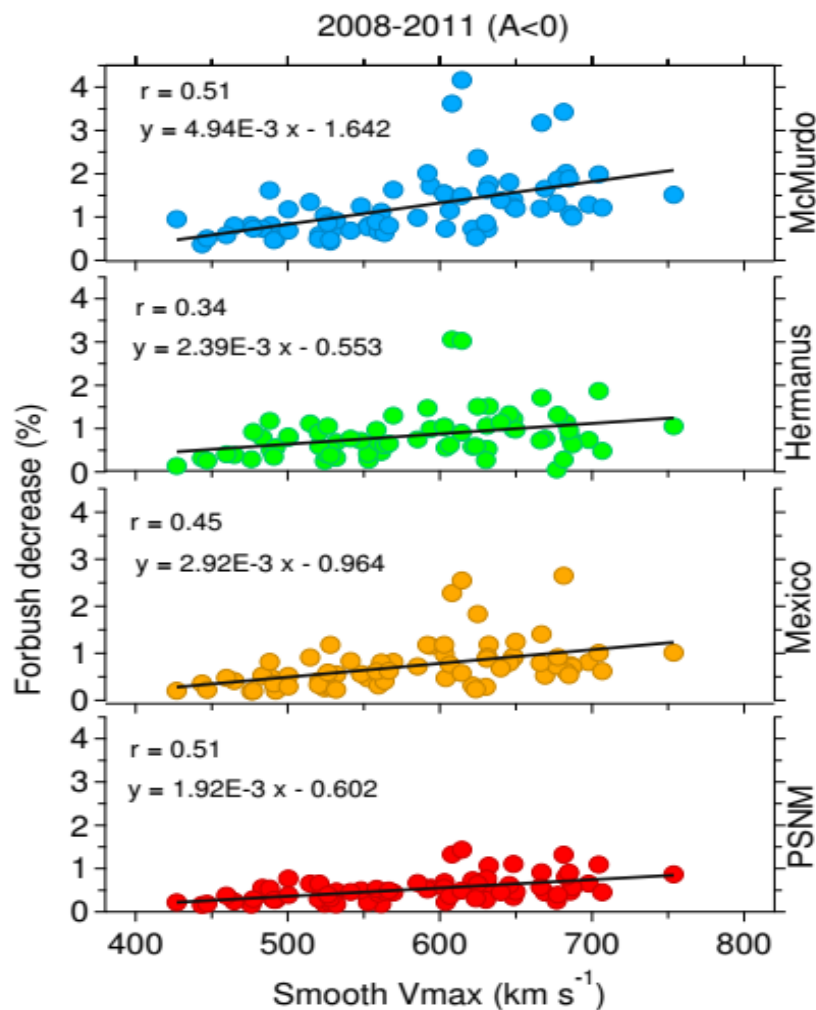


รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เชิงเส้นของขนาดการลดลงแบบฟอรัชที่เวียนซ์และ B_{\max}^s ของแต่ละสถานีของปี ค.ศ.2008-2011

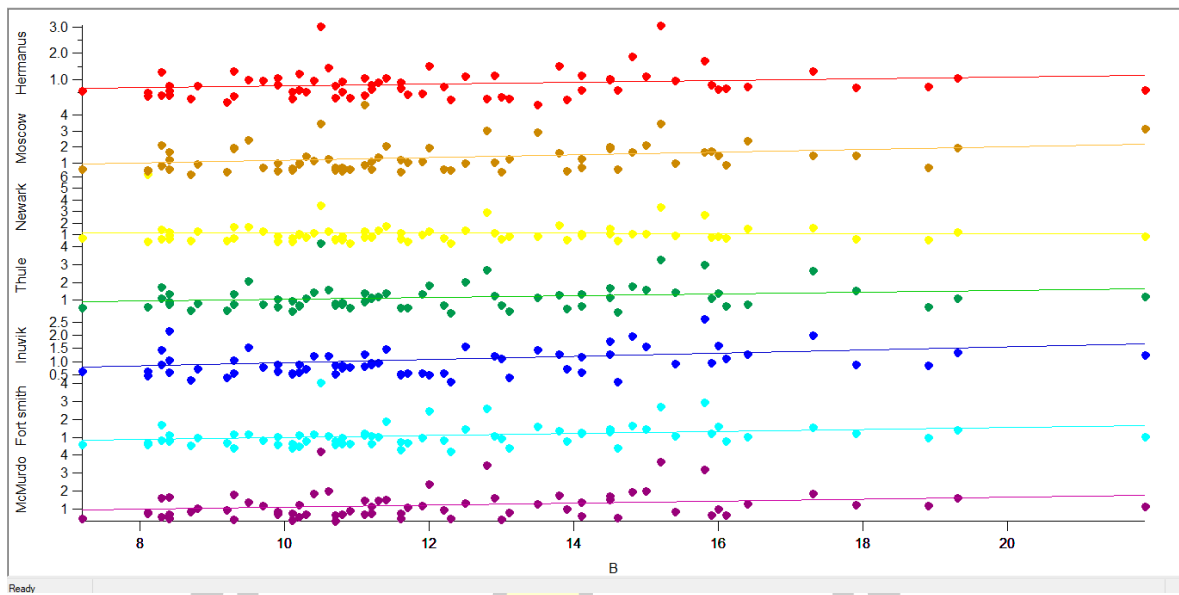
สามารถเห็นได้ว่าความชันของกราฟ (% / nT) ลดลงจากสถานีที่มีค่าความเข้มแรงแม่เหล็กต่ำไปสถานีที่มีค่าความเข้มแรงแม่เหล็กสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวของกับความเข้มแรงแม่เหล็ก ความสัมพันธ์ของการลดลงแบบฟอรัชที่เวียนซ์และลมสุริยะในช่วง $A < 0$ จะสัมพันธ์มากกว่า $A > 0$ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า γ สูงที่สุด (จะมีความสัมพันธ์กันอย่างมาก) ในกรณี V_{\max}^s ของปี ค.ศ.2010 ที่ McMurdo และ Hermanus ซึ่งตั้งอยู่ทางซีกโลกใต้ อย่างไรก็ตามในปี ค.ศ.2009 ในกรณีของขนาดการลดลงแบบฟอรัชที่เวียนซ์และ V_{\max}^s ค่า γ มีค่าต่ำสุด

จากการวิเคราะห์พบว่าที่สถานี McMurdo แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับ V_{\max}^s มีความสัมพันธ์มากกว่าสถานี Thule ยกเว้นปี ค.ศ.2008 ในปี ค.ศ. 2011 γ แสดงถึงความสัมพันธ์ที่เล็กน้อยถึงปานกลางแม้ว่าจะไม่สามารถปฏิเสธค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น 0 ได้ โดยปกติแล้วปี ค.ศ.2010 ถึง ค.ศ.2011 γ จะอยู่ในช่วง 0.21 ถึง 0.72 (ความสัมพันธ์เล็กน้อยถึงมาก) โดยเฉพาะสำหรับปี ค.ศ.2008-2011 ความสัมพันธ์ของลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำและ V_{\max}^s อยู่ในระดับปานกลางซึ่งมีความสัมพันธ์ที่ดีกว่า B_{\max}^s

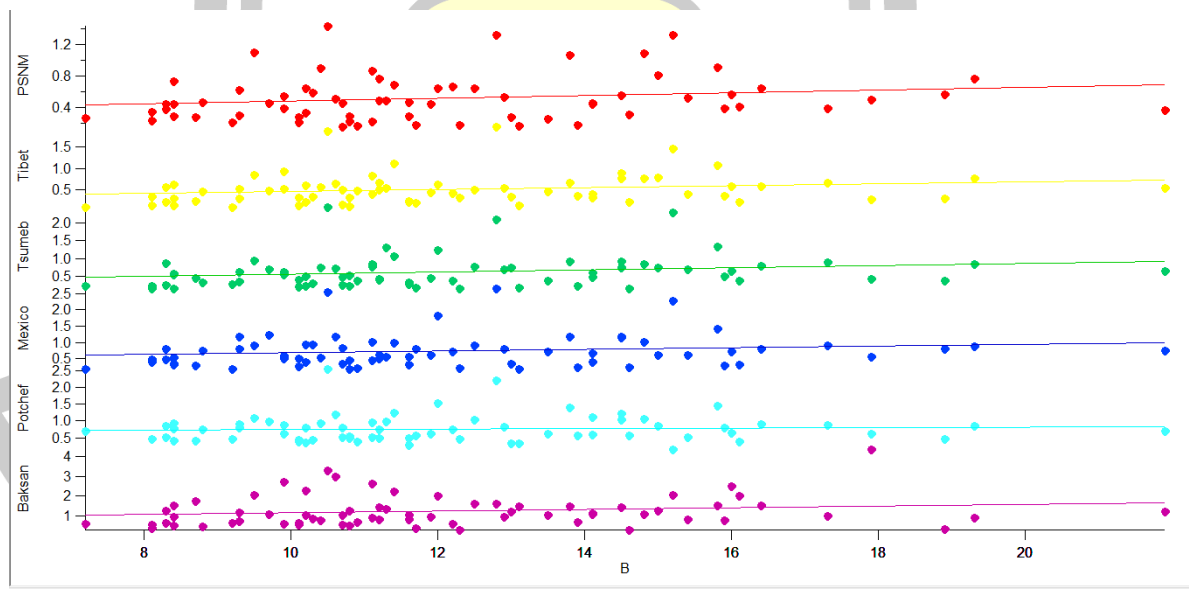
คุณลักษณะนี้แตกต่างกันบ้างสำหรับ ICMEs ที่ความแรงและความผันผวนของสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นมีความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงลักษณะการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เชิงเส้นของขนาดลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำและ V_{\max}^s ของแต่ละสถานียกเว้น Thule



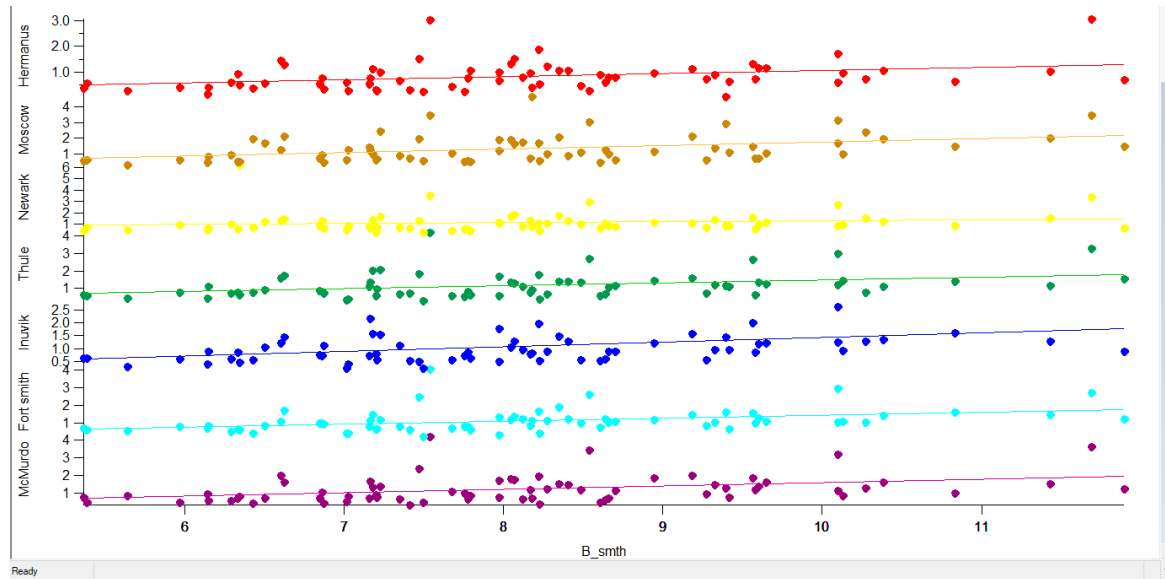
รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เชิงเส้นของขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำและ V_{\max}^s ในช่วงปี ค.ศ.2008-2011



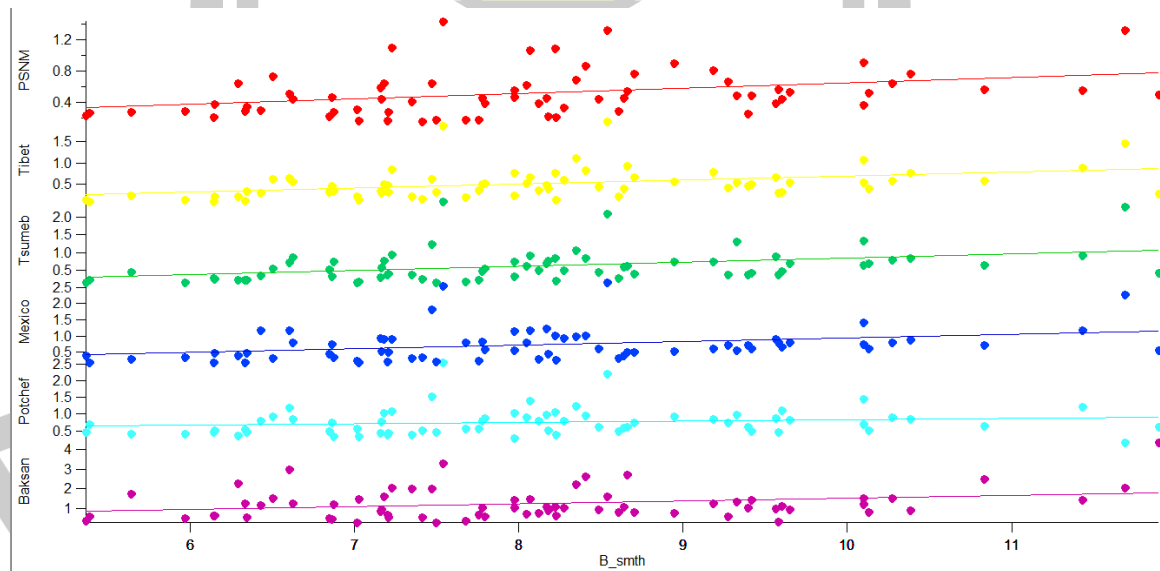
รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B_{\max} และขนาดของการลดลงแบบฟอร์บุชที่เวียนซ้ำของ
สถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011



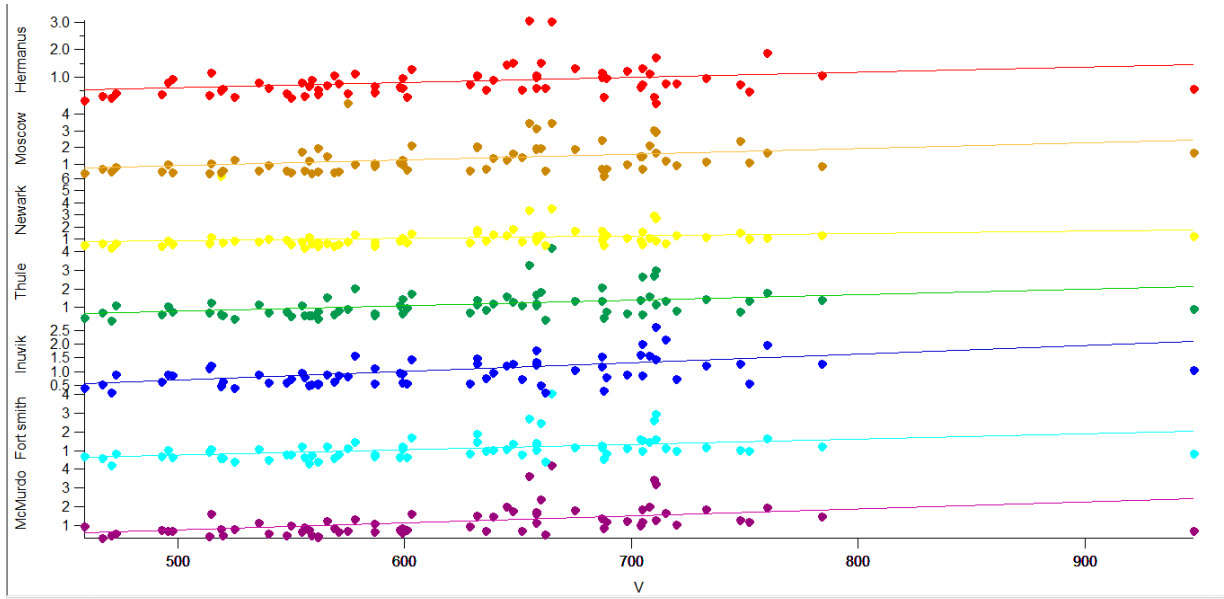
รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B_{\max} และขนาดของการลดลงแบบฟอร์บุชที่เวียนซ้ำของ
สถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011



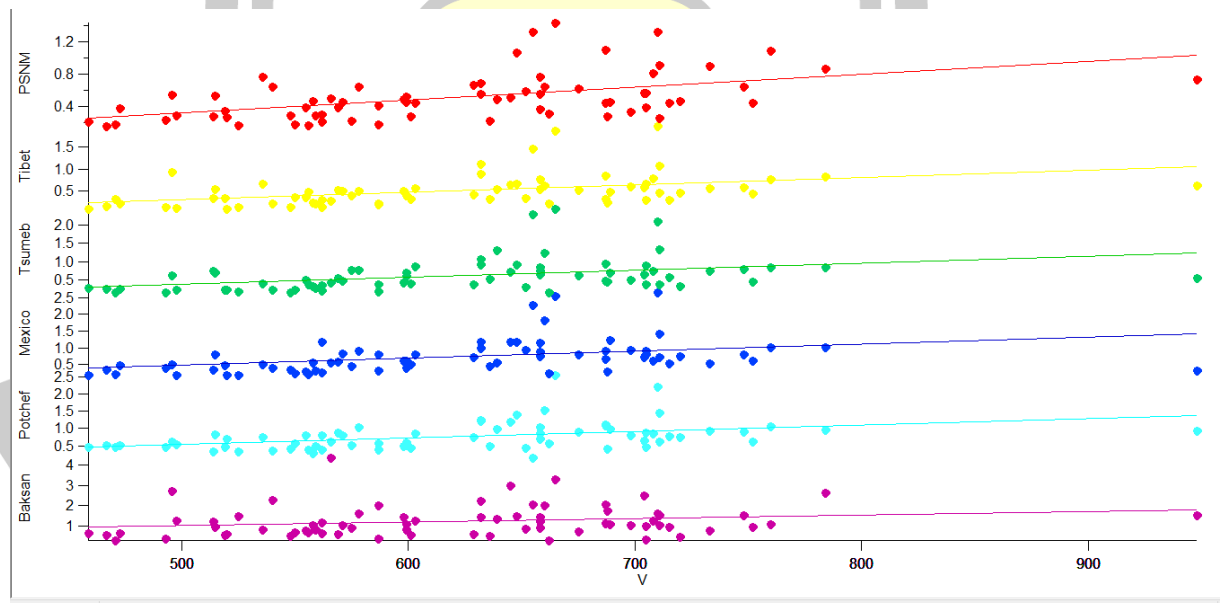
รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B^S_{max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บูชที่เวียนซ์้าของ
สถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011



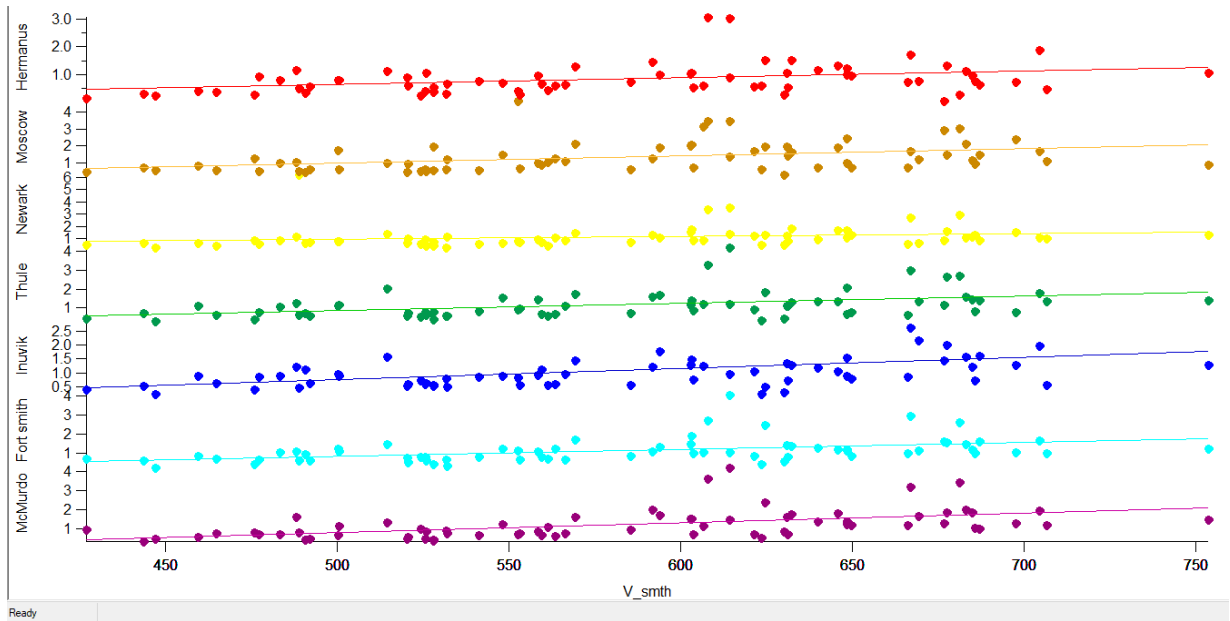
รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B^S_{max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บูชที่เวียนซ์้าของ
สถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011



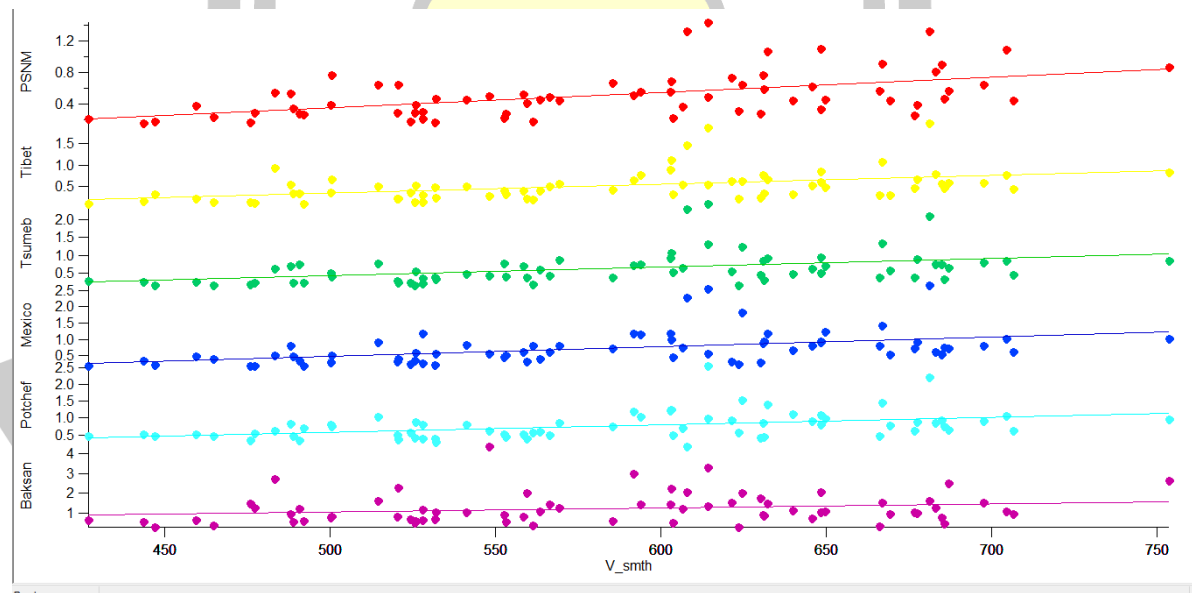
รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V_{\max} และขนาดของการลดลงแบบฟอร์บุชที่เวินซ้ำของ สถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011



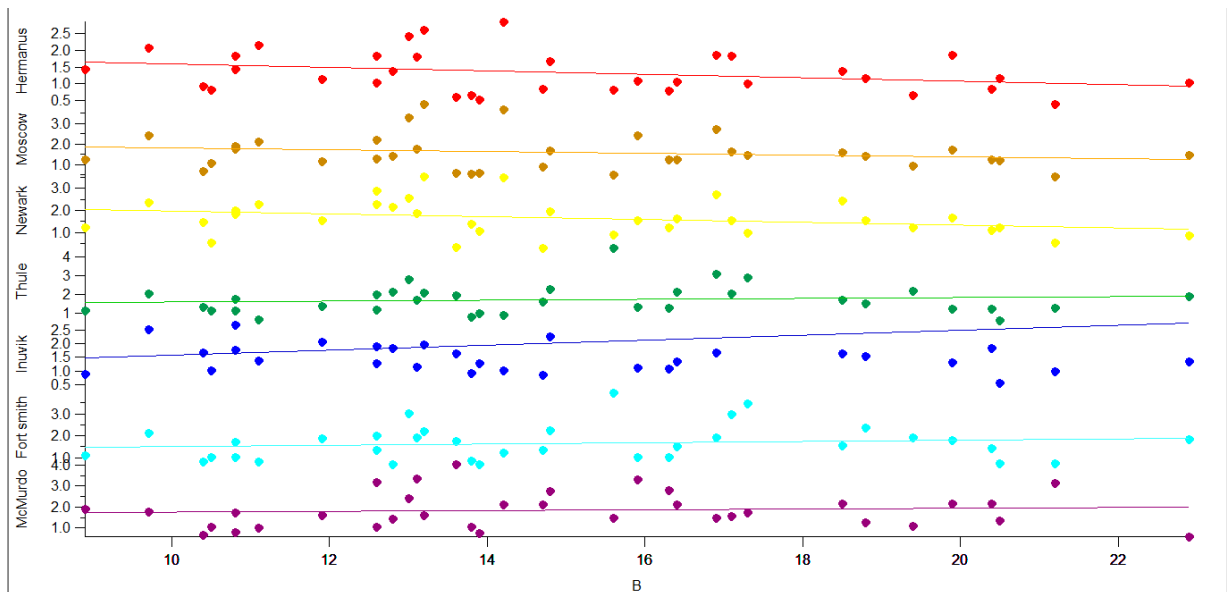
รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V_{\max} และขนาดของการลดลงแบบฟอร์บุชที่เวินซ้ำของ สถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011



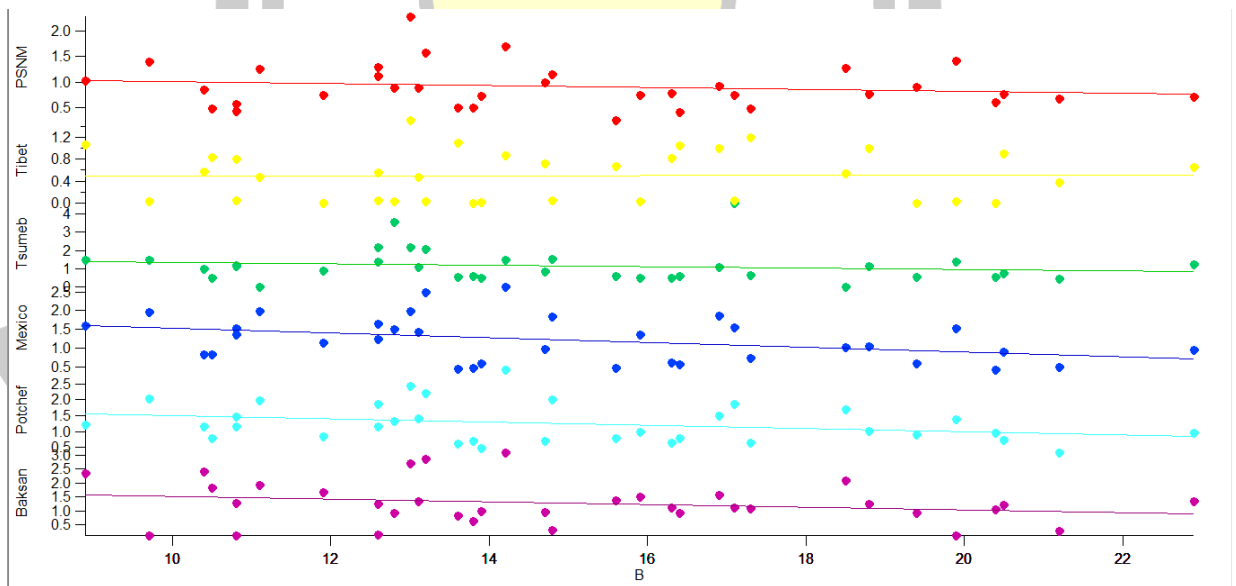
รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V_{\max}^s และขนาดของการลดลงแบบพอร์บู่ชที่เวียนซ้ำ
ของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011



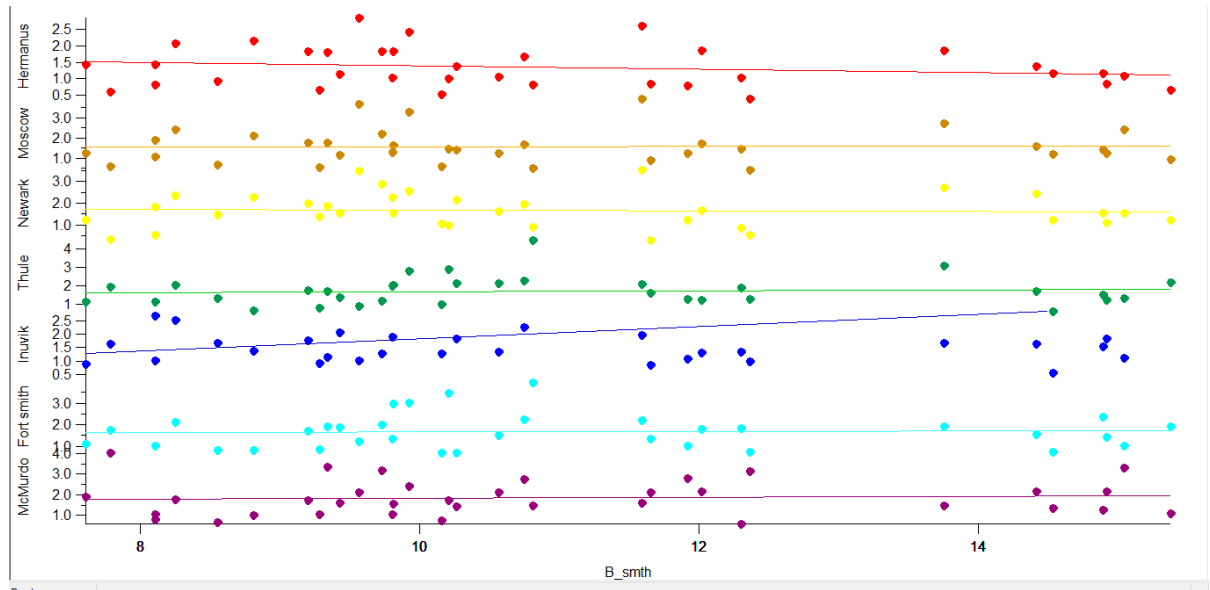
รูปที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V_{\max}^s และขนาดของการลดลงแบบพอร์บู่ชที่เวียนซ้ำ
ของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2008-2011



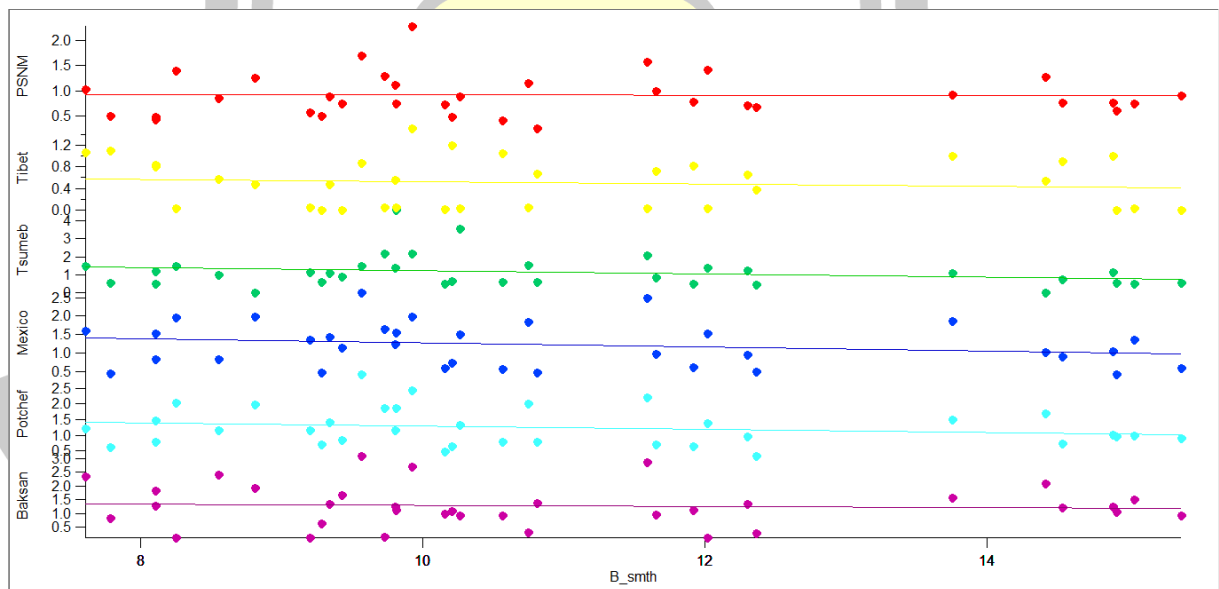
รูปที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B_{max} และขนาดของการลดลงแบบฟอร์บุชที่เวียนซ้ำของ สถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016



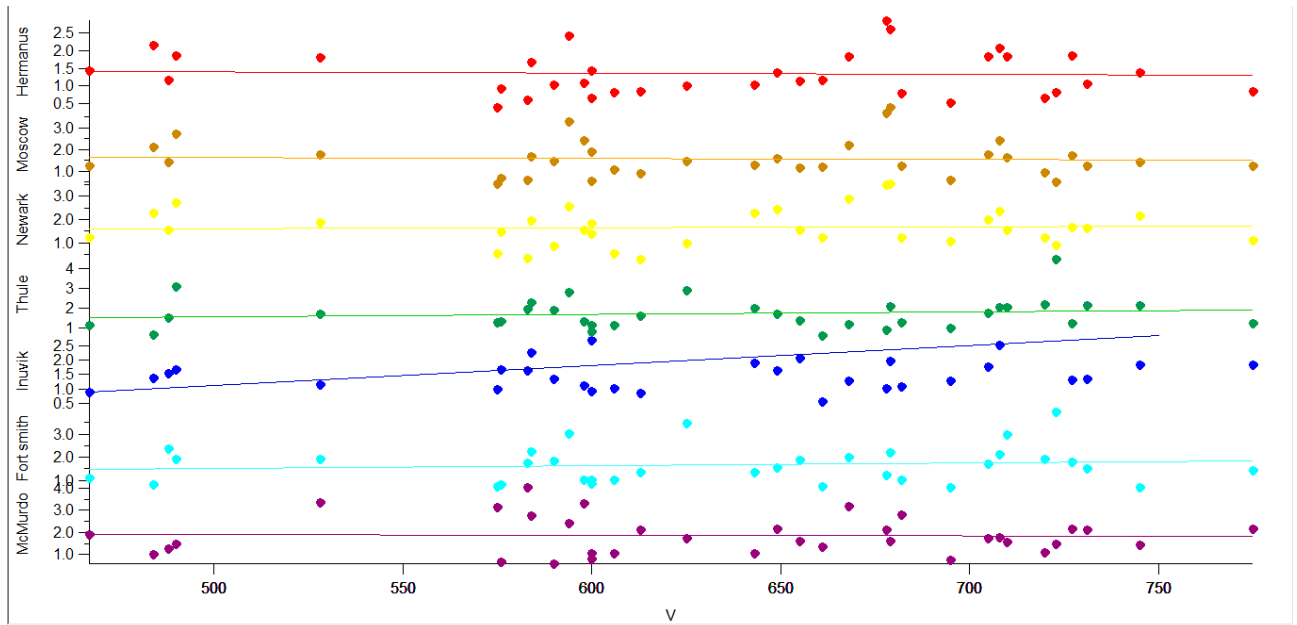
รูปที่ 4.30 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B_{max} และขนาดของการลดลงแบบฟอร์บุชที่เวียนซ้ำของ สถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016



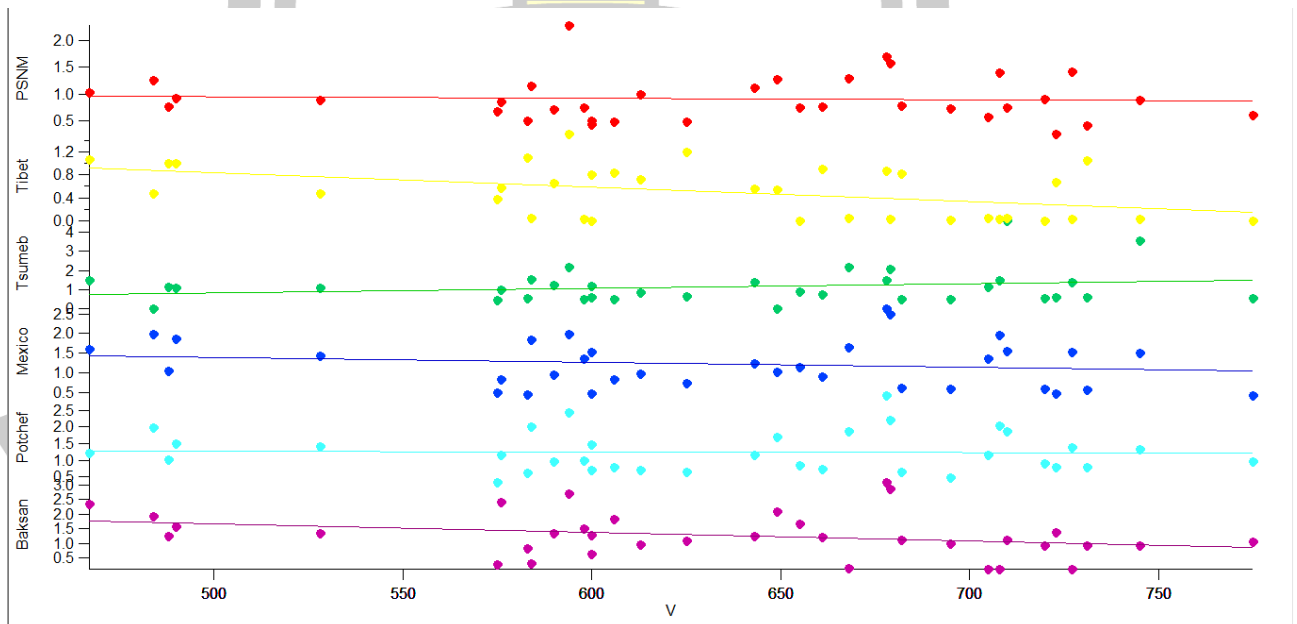
รูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B_{smth}^s และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016



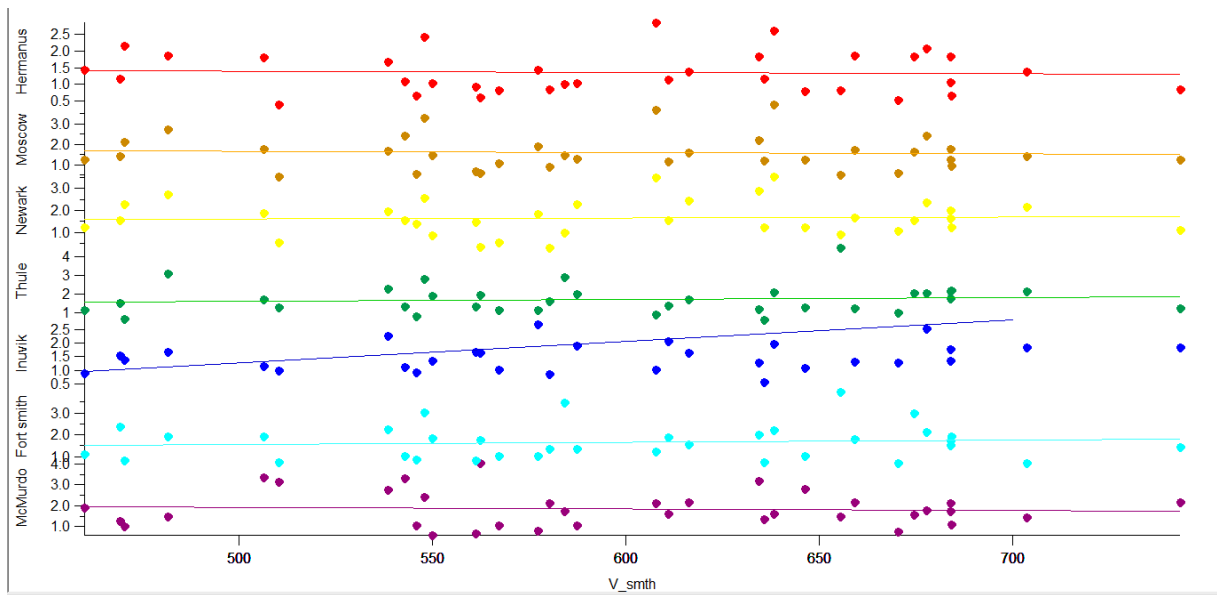
รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ B_{smth}^s และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016



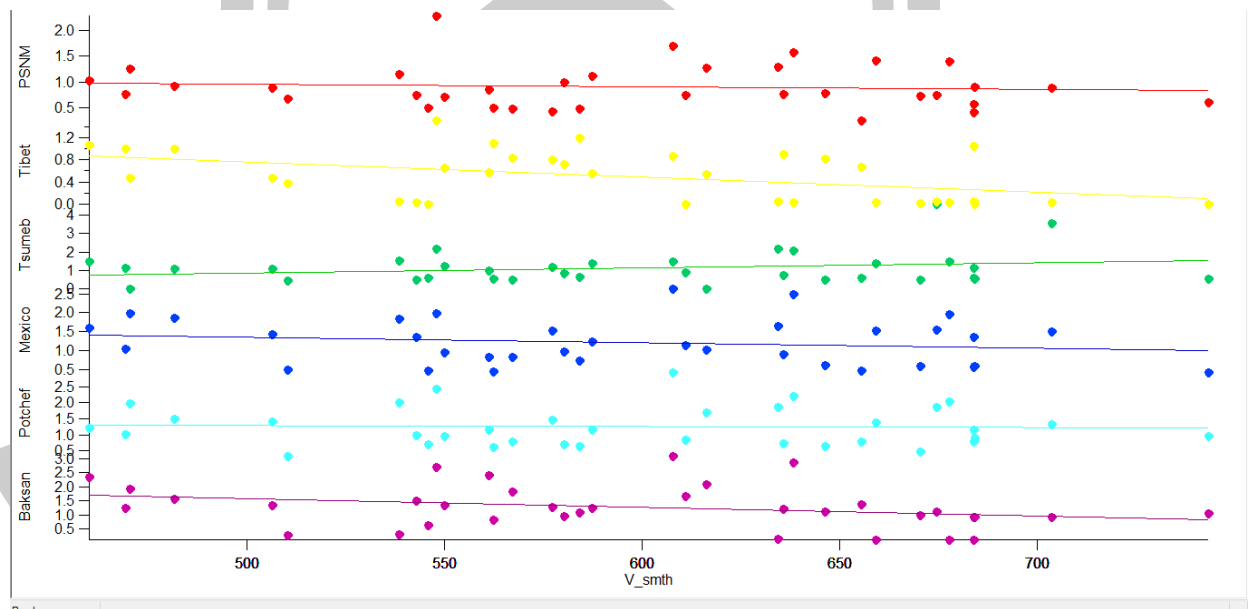
รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V_{max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของ สถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016



รูปที่ 4.34 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V_{max} และขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของ สถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016



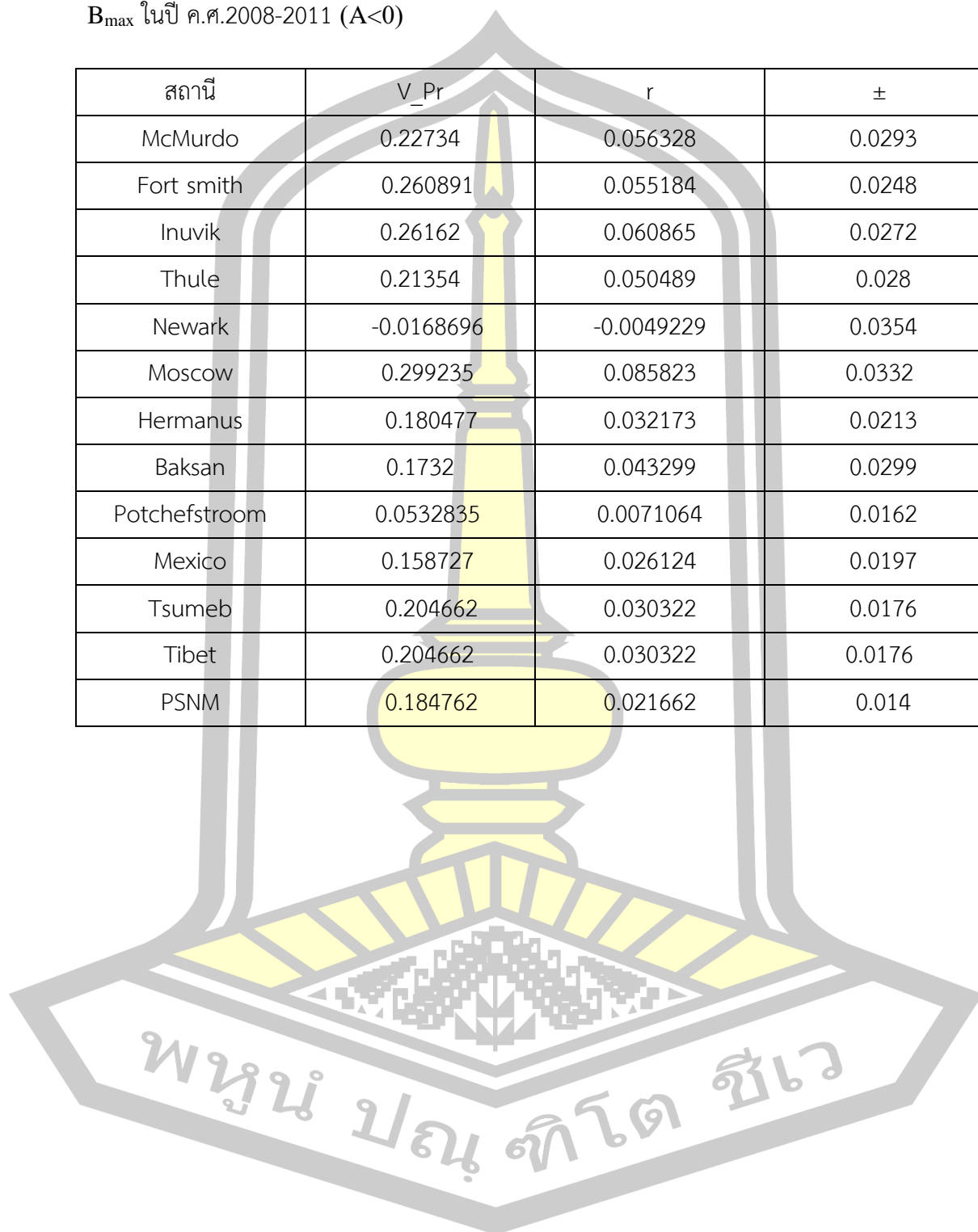
รูปที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V_{smth}^s และขนาดของการลดลงแบบพอร์บู่ชี่เวียนซ้ำ
ของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016



รูปที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์การถดถอยของ V_{smth}^s และขนาดของการลดลงแบบพอร์บู่ชี่เวียนซ้ำ
ของสถานีตรวจวัดนิวตรอนในช่วงปี ค.ศ.2015-2016

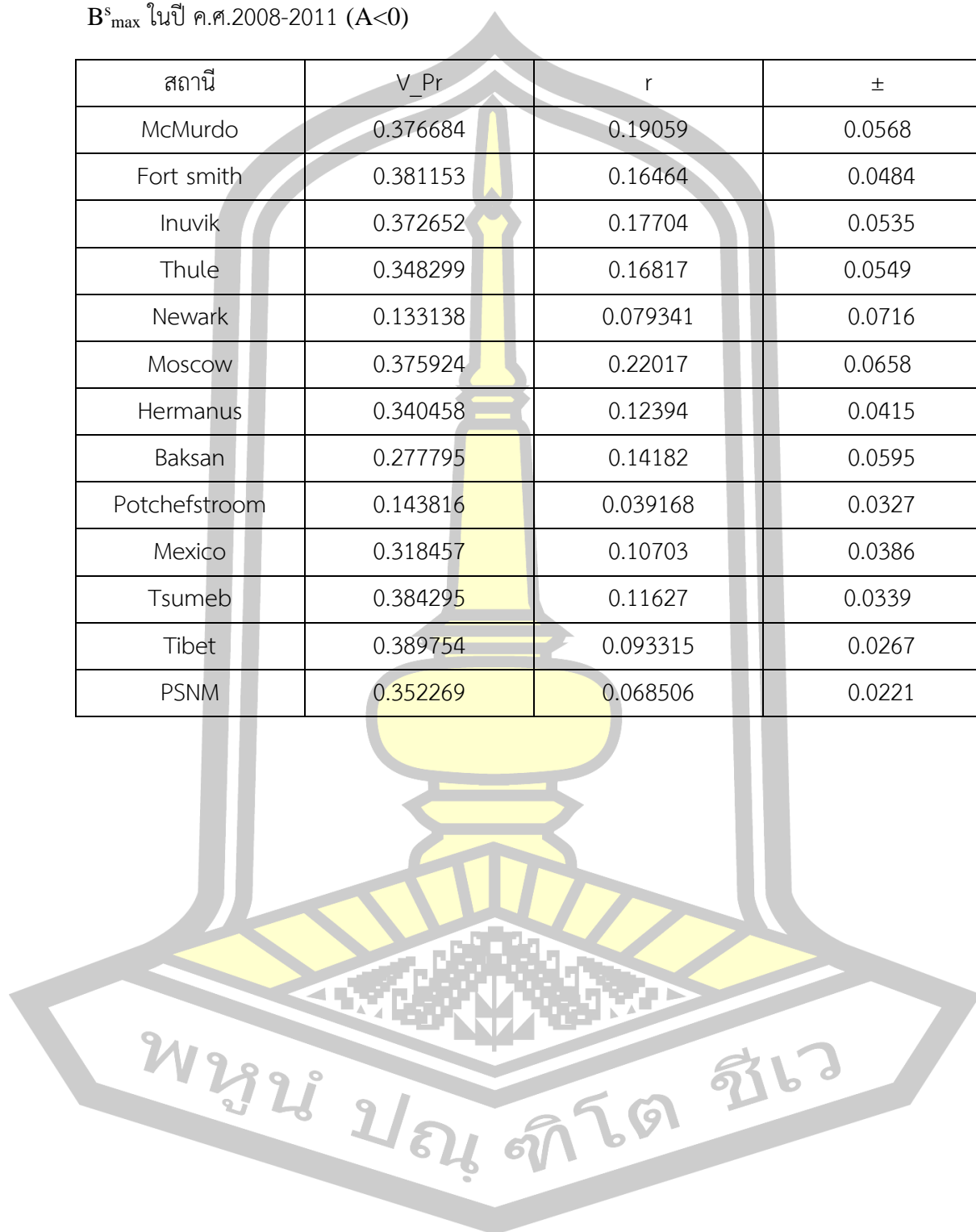
ตารางที่ 4.15 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับ B_{\max} ในปี ค.ศ.2008-2011 ($A < 0$)

สถานี	V_Pr	r	±
McMurdo	0.22734	0.056328	0.0293
Fort smith	0.260891	0.055184	0.0248
Inuvik	0.26162	0.060865	0.0272
Thule	0.21354	0.050489	0.028
Newark	-0.0168696	-0.0049229	0.0354
Moscow	0.299235	0.085823	0.0332
Hermanus	0.180477	0.032173	0.0213
Baksan	0.1732	0.043299	0.0299
Potchefstroom	0.0532835	0.0071064	0.0162
Mexico	0.158727	0.026124	0.0197
Tsumeb	0.204662	0.030322	0.0176
Tibet	0.204662	0.030322	0.0176
PSNM	0.184762	0.021662	0.014



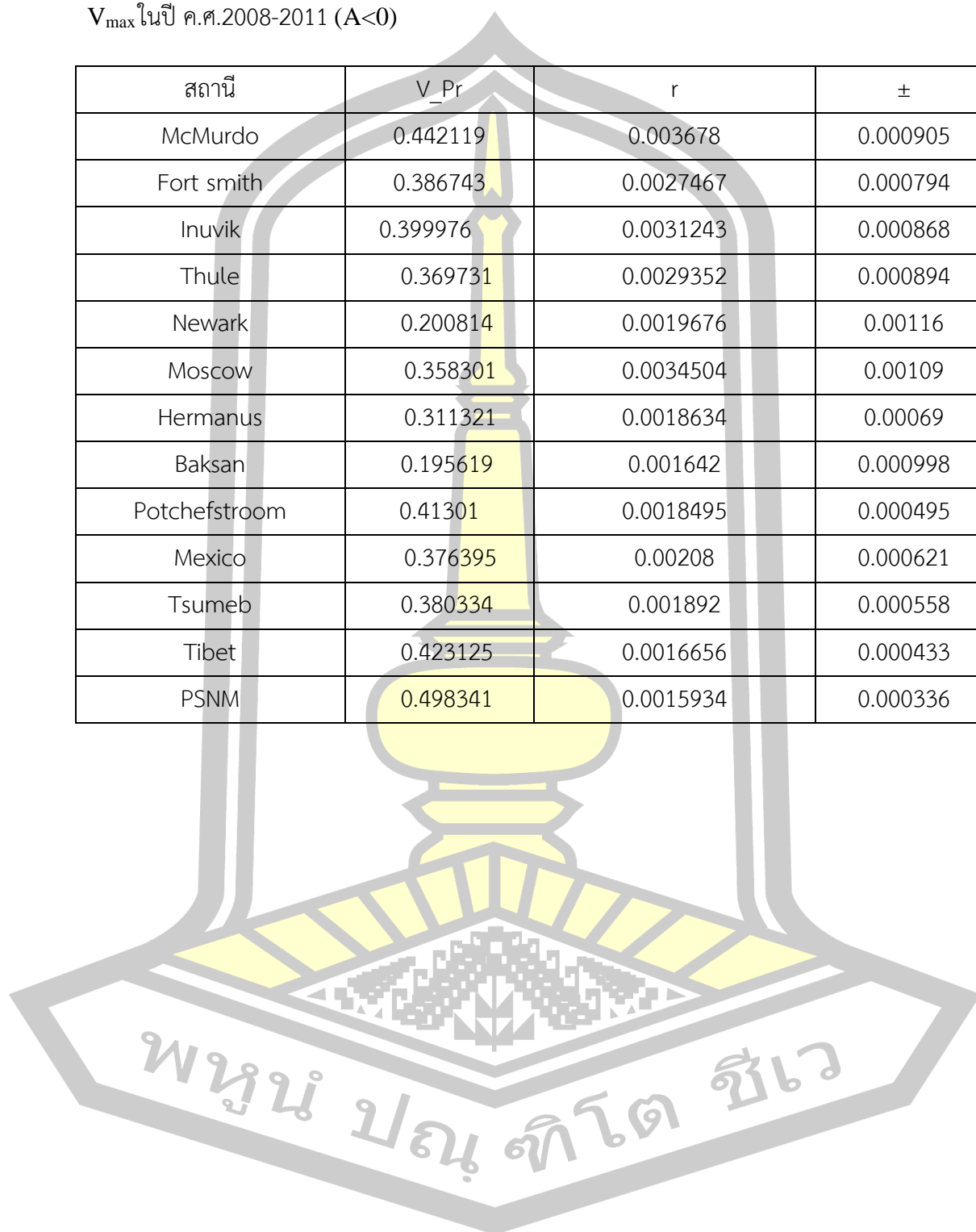
ตารางที่ 4.16 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุซที่เวียนซ้ำกับ B^s_{max} ในปี ค.ศ.2008-2011 ($A < 0$)

สถานี	V_Pr	r	±
McMurdo	0.376684	0.19059	0.0568
Fort smith	0.381153	0.16464	0.0484
Inuvik	0.372652	0.17704	0.0535
Thule	0.348299	0.16817	0.0549
Newark	0.133138	0.079341	0.0716
Moscow	0.375924	0.22017	0.0658
Hermanus	0.340458	0.12394	0.0415
Baksan	0.277795	0.14182	0.0595
Potchefstroom	0.143816	0.039168	0.0327
Mexico	0.318457	0.10703	0.0386
Tsumeb	0.384295	0.11627	0.0339
Tibet	0.389754	0.093315	0.0267
PSNM	0.352269	0.068506	0.0221



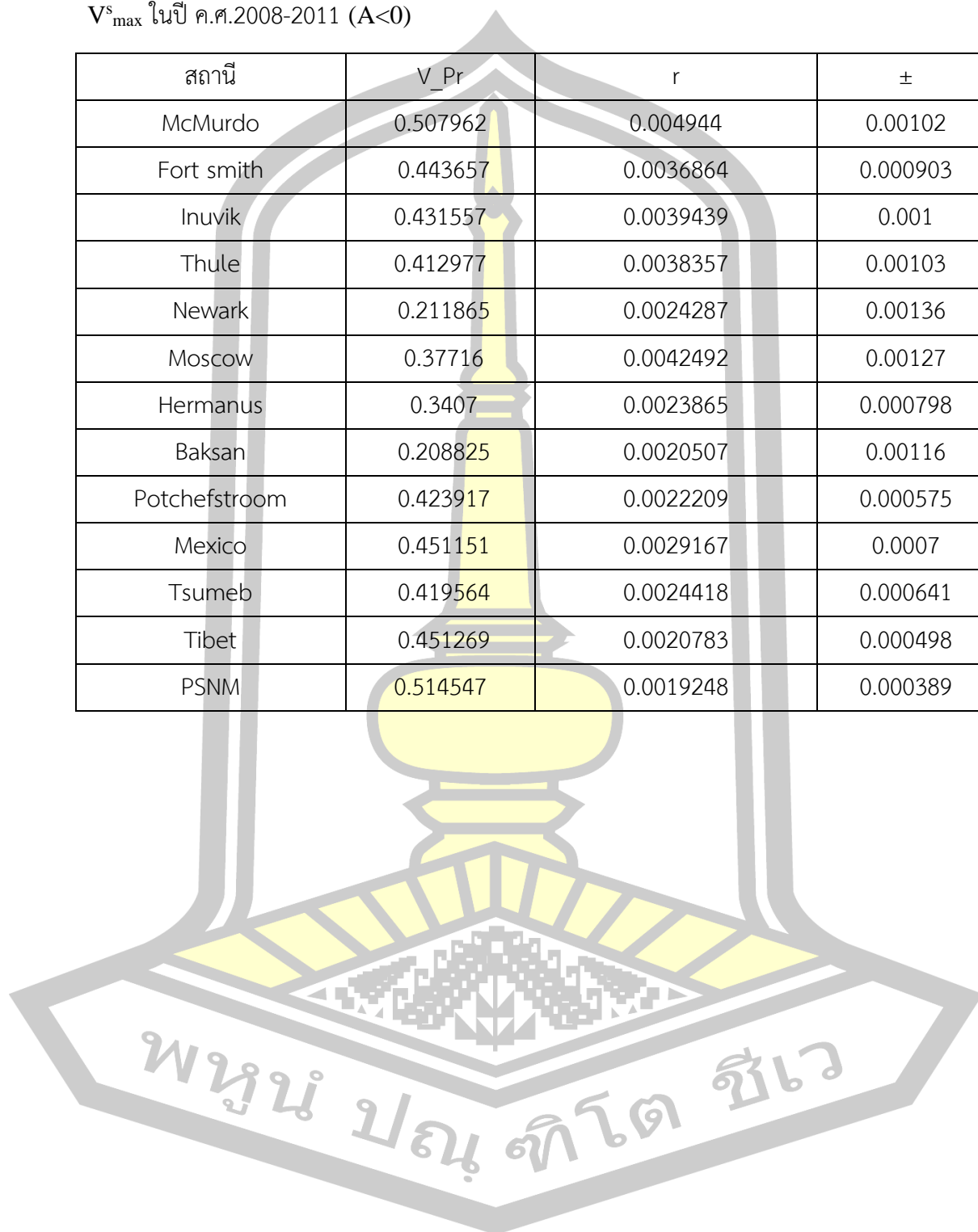
ตารางที่ 4.17 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุซที่เวียนซ้ำกับ V_{\max} ในปี ค.ศ.2008-2011 ($A < 0$)

สถานี	V_{Pr}	r	\pm
McMurdo	0.442119	0.003678	0.000905
Fort smith	0.386743	0.0027467	0.000794
Inuvik	0.399976	0.0031243	0.000868
Thule	0.369731	0.0029352	0.000894
Newark	0.200814	0.0019676	0.00116
Moscow	0.358301	0.0034504	0.00109
Hermanus	0.311321	0.0018634	0.00069
Baksan	0.195619	0.001642	0.000998
Potchefstroom	0.41301	0.0018495	0.000495
Mexico	0.376395	0.00208	0.000621
Tsumeb	0.380334	0.001892	0.000558
Tibet	0.423125	0.0016656	0.000433
PSNM	0.498341	0.0015934	0.000336



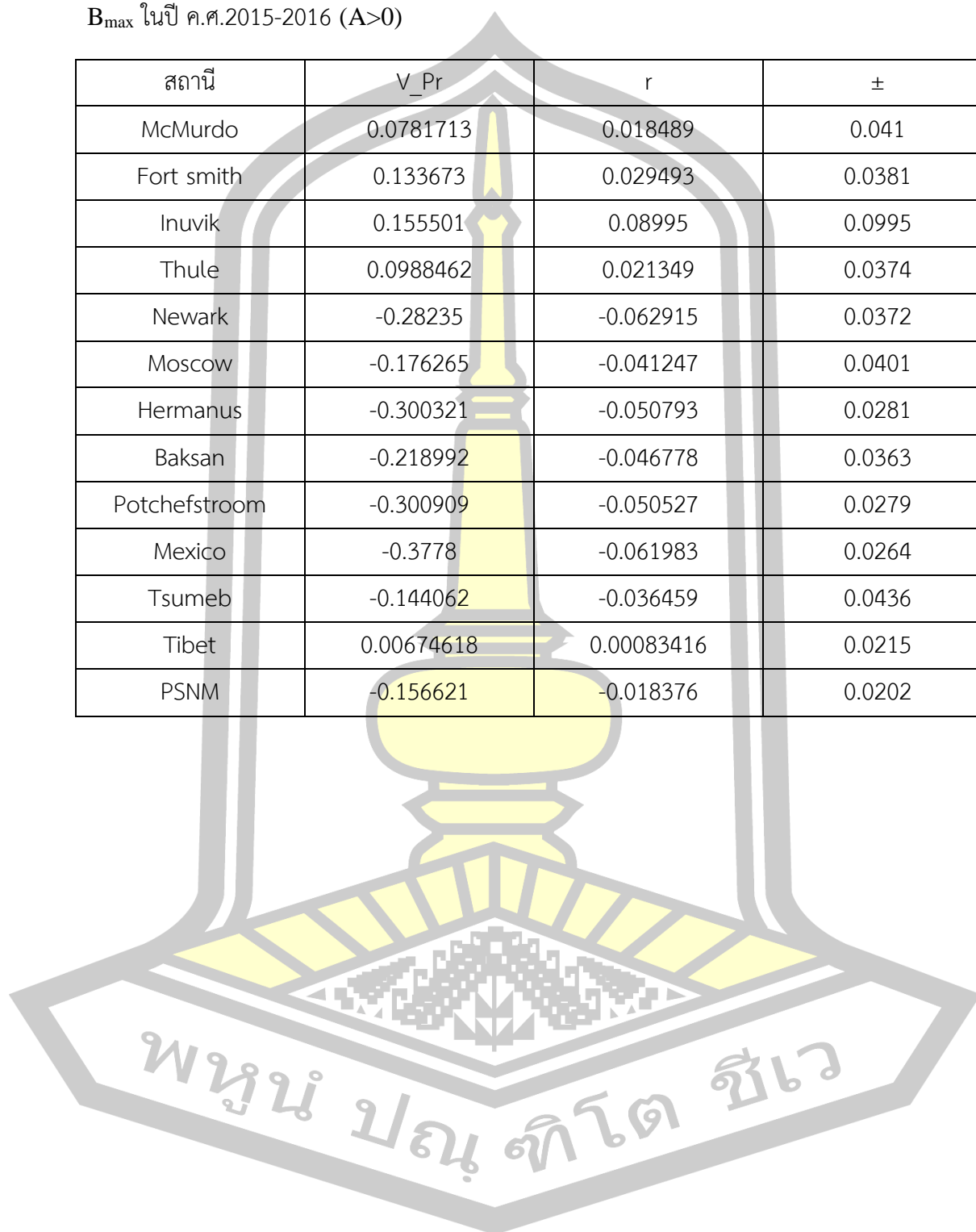
ตารางที่ 4.18 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุซที่เวียนซ้ำกับ V_{\max} ในปี ค.ศ.2008-2011 ($A < 0$)

สถานี	V_Pr	r	±
McMurdo	0.507962	0.004944	0.00102
Fort smith	0.443657	0.0036864	0.000903
Inuvik	0.431557	0.0039439	0.001
Thule	0.412977	0.0038357	0.00103
Newark	0.211865	0.0024287	0.00136
Moscow	0.37716	0.0042492	0.00127
Hermanus	0.3407	0.0023865	0.000798
Baksan	0.208825	0.0020507	0.00116
Potchefstroom	0.423917	0.0022209	0.000575
Mexico	0.451151	0.0029167	0.0007
Tsumeb	0.419564	0.0024418	0.000641
Tibet	0.451269	0.0020783	0.000498
PSNM	0.514547	0.0019248	0.000389



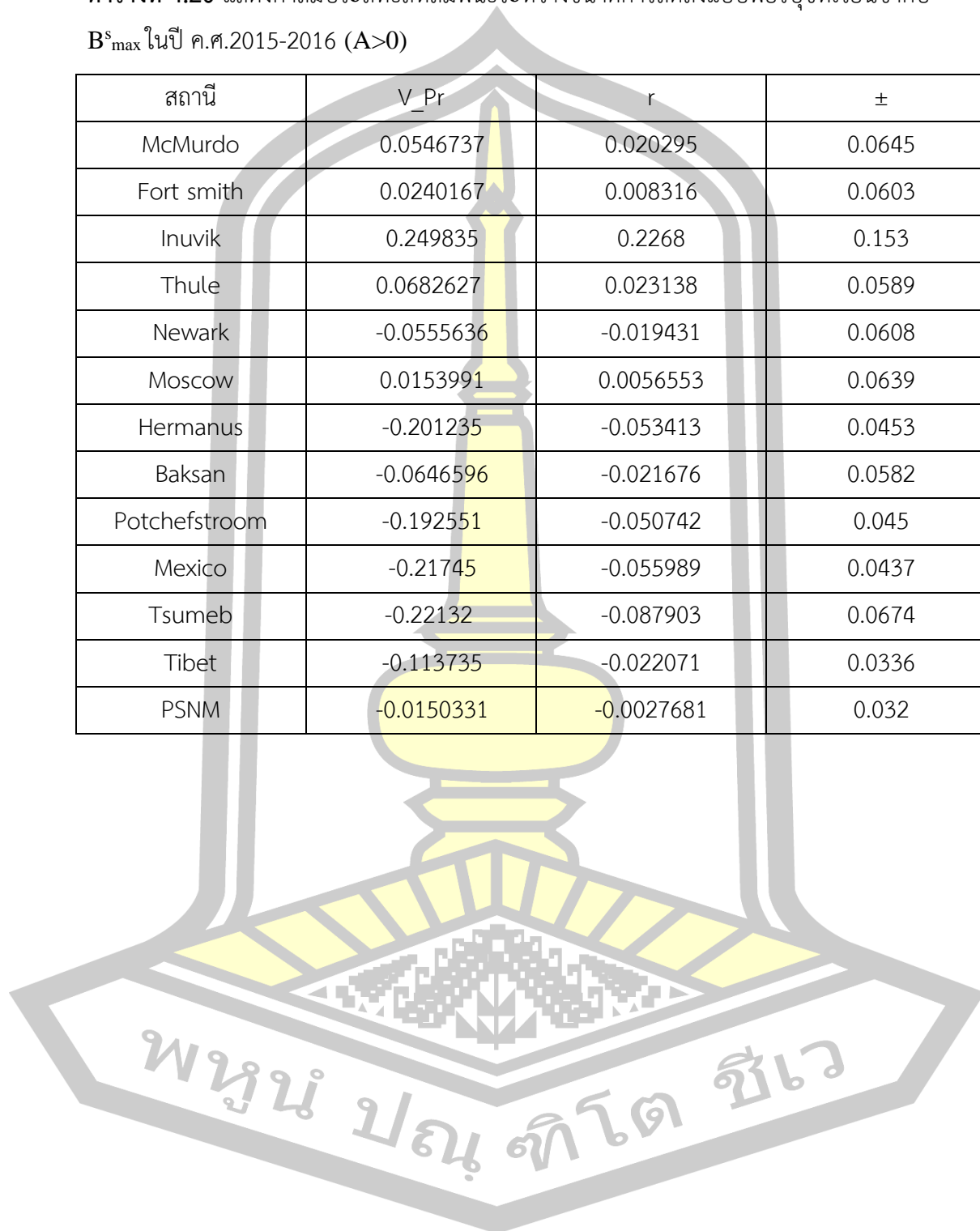
ตารางที่ 4.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุซที่เวียนซ้ำกับ B_{max} ในปี ค.ศ.2015-2016 ($A>0$)

สถานี	V_Pr	r	±
McMurdo	0.0781713	0.018489	0.041
Fort smith	0.133673	0.029493	0.0381
Inuvik	0.155501	0.08995	0.0995
Thule	0.0988462	0.021349	0.0374
Newark	-0.28235	-0.062915	0.0372
Moscow	-0.176265	-0.041247	0.0401
Hermanus	-0.300321	-0.050793	0.0281
Baksan	-0.218992	-0.046778	0.0363
Potchefstroom	-0.300909	-0.050527	0.0279
Mexico	-0.3778	-0.061983	0.0264
Tsumeb	-0.144062	-0.036459	0.0436
Tibet	0.00674618	0.00083416	0.0215
PSNM	-0.156621	-0.018376	0.0202



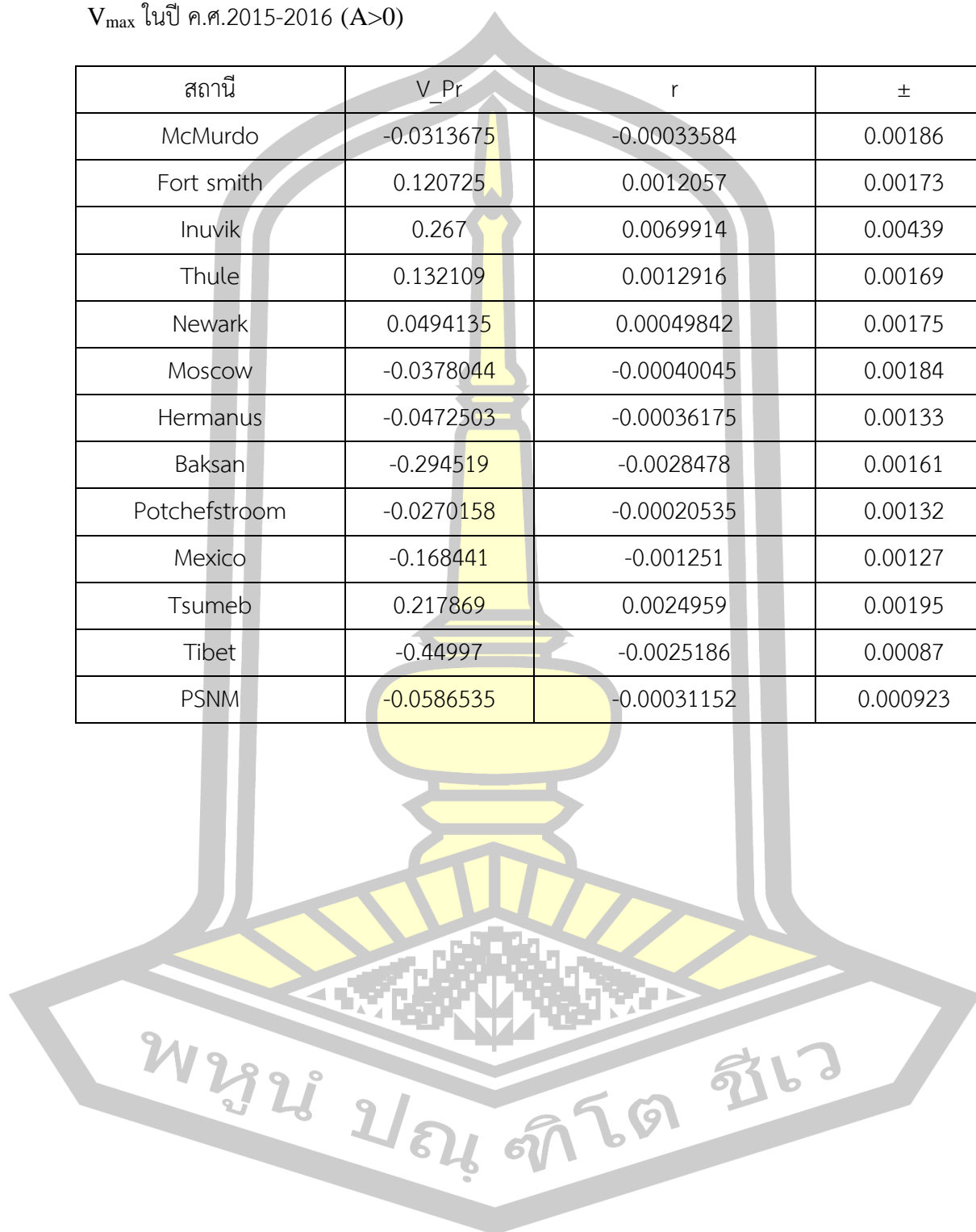
ตารางที่ 4.20 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บู้ชที่เวียนซ้ำกับ B^s_{\max} ในปี ค.ศ.2015-2016 ($A>0$)

สถานี	V_Pr	r	±
McMurdo	0.0546737	0.020295	0.0645
Fort smith	0.0240167	0.008316	0.0603
Inuvik	0.249835	0.2268	0.153
Thule	0.0682627	0.023138	0.0589
Newark	-0.0555636	-0.019431	0.0608
Moscow	0.0153991	0.0056553	0.0639
Hermanus	-0.201235	-0.053413	0.0453
Baksan	-0.0646596	-0.021676	0.0582
Potchefstroom	-0.192551	-0.050742	0.045
Mexico	-0.21745	-0.055989	0.0437
Tsumeb	-0.22132	-0.087903	0.0674
Tibet	-0.113735	-0.022071	0.0336
PSNM	-0.0150331	-0.0027681	0.032



ตารางที่ 4 21 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับ V_{\max} ในปี ค.ศ.2015-2016 ($A>0$)

สถานี	V_{Pr}	r	\pm
McMurdo	-0.0313675	-0.00033584	0.00186
Fort smith	0.120725	0.0012057	0.00173
Inuvik	0.267	0.0069914	0.00439
Thule	0.132109	0.0012916	0.00169
Newark	0.0494135	0.00049842	0.00175
Moscow	-0.0378044	-0.00040045	0.00184
Hermanus	-0.0472503	-0.00036175	0.00133
Baksan	-0.294519	-0.0028478	0.00161
Potchefstroom	-0.0270158	-0.00020535	0.00132
Mexico	-0.168441	-0.001251	0.00127
Tsumeb	0.217869	0.0024959	0.00195
Tibet	-0.44997	-0.0025186	0.00087
PSNM	-0.0586535	-0.00031152	0.000923



ตารางที่ 4.22 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับ V^s_{max} ในปี ค.ศ.2015-2016 ($A>0$)

สถานี	V_Pr	r	±
McMurdo	-0.0718625	-0.0008329	0.00201
Fort smith	0.0906766	0.00098036	0.00187
Inuvik	0.278094	0.0078827	0.00474
Thule	0.102822	0.0010882	0.00183
Newark	0.0442818	0.00048352	0.0019
Moscow	-0.0526026	-0.00060319	0.00199
Hermanus	-0.0470231	-0.00038971	0.00144
Baksan	-0.298526	-0.0031248	0.00174
Potchefstroom	-0.038524	-0.00031698	0.00143
Mexico	-0.17599	-0.0014149	0.00138
Tsumeb	0.224091	0.002779	0.0021
Tibet	-0.445233	-0.0026977	0.000944
PSNM	-0.0900438	-0.00051769	0.000997

จากการวิเคราะห์พบว่าทุกกรณีในช่วง $A<0$ (ค.ศ.2008-2011) B^s_{max} และ V^s_{max} มีความเกี่ยวข้องมากที่สุดซึ่งให้ค่า γ สูงสุดตามที่ระบุไว้ดังตารางที่ 3 ซึ่งบ่งชี้ว่า B^s_{max} และ V^s_{max} เป็นพหุนามที่ปรับเปลี่ยนความเข้มของรังสีคอสมิกกาแล็กติก ในทางกลับกัน B_{max} และ V_{max} ให้ค่า γ น้อยกว่าเนื่องจากสเกลเวลาเป็นรายชั่วโมงทำให้รังสีคอสมิกกาแล็กติกลดลงสั้นกว่า ส่วนในกรณีของ ΔB และ ΔV ค่า γ มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งไม่อาจใช้เพื่ออ้างอิงค่าสูงสุดที่แท้จริงได้และเริ่มมีความสัมพันธ์ในการกำหนดขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำในที่สุดพบว่า ในช่วง $A>0$ (ค.ศ. 2015-2016) B^s_{max} และ V^s_{max} และพหุนามอื่น ๆ ไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำนอกจากนี้เรายังวิเคราะห์ข้อมูลของปี ค.ศ.2015 และ ค.ศ.2016 แยกออกจากกันและพบผลลัพธ์ที่คล้ายกันของปี ค.ศ.2015 และ ค.ศ.2016

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงทางแม่เหล็กซีตเริ่มกับแอมพลิจูดของการลดลงแบบฟอร์บุชที่เวียนซ้ำ

ตารางที่ 4. 23 ตารางแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงทางแม่เหล็กซีตเริ่มกับแอมพลิจูดของการลดลงแบบฟอร์บุชที่เวียนซ้ำของปี ค.ศ.2008-2011

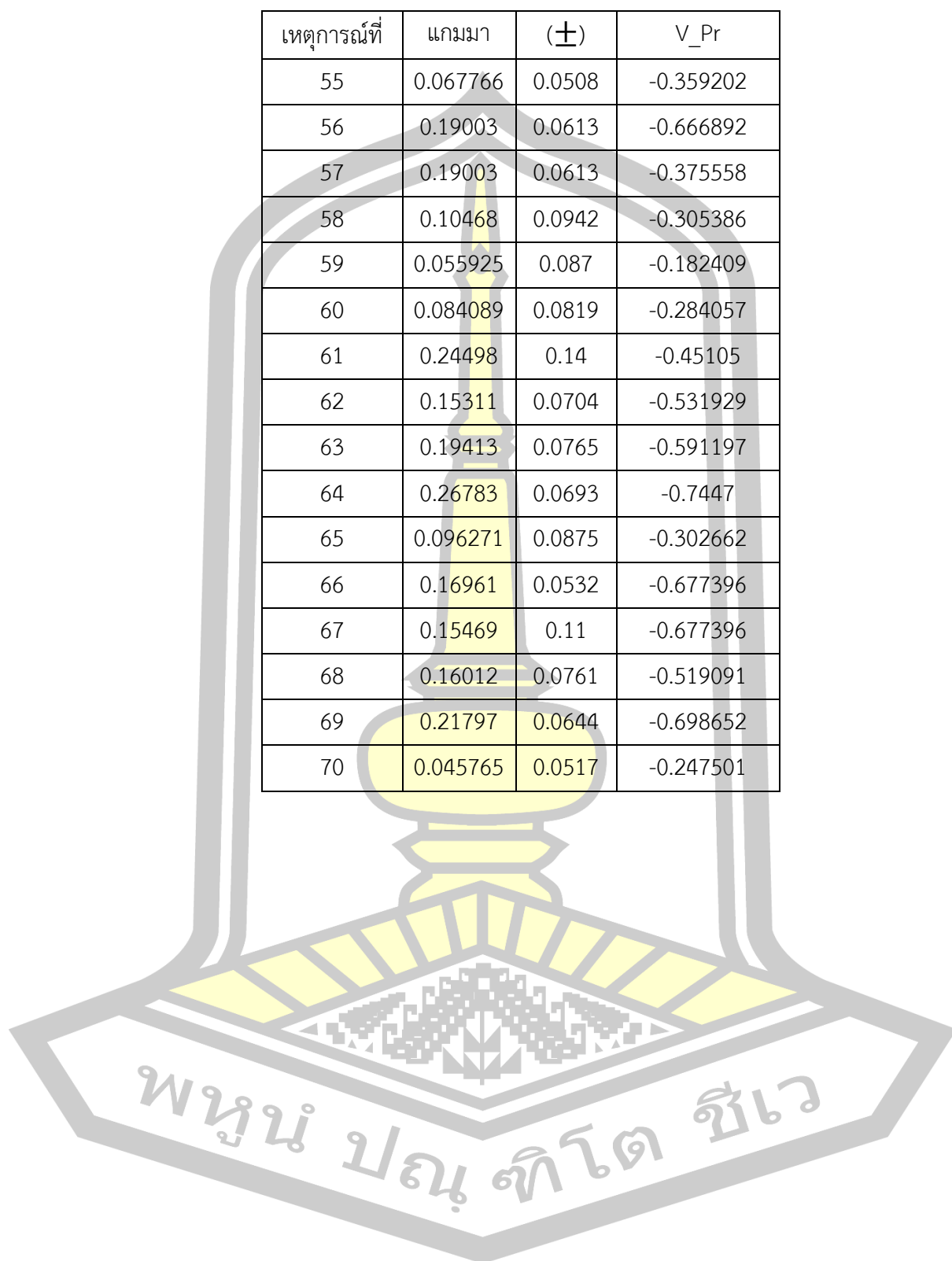
เหตุการณ์ที่	แกมมา	(±)	V_Pr
1	0.37776	0.0344	-0.953633
2	0.24692	0.104	-0.564573
3	0.18972	0.0873	-0.531303
4	0.17738	0.121	-0.390841
5	0.11446	0.119	-0.26813
6	0.27439	0.139	-0.496445
7	0.18132	0.0843	-0.527699
8	0.27814	0.0872	-0.677569
9	0.2819	0.134	-0.519684
10	0.2775	0.107	-0.597836
11	0.14751	0.13	-0.311129
12	0.39234	0.0664	-0.862689
13	0.22609	0.114	-0.496346
14	0.25882	0.219	-0.323435
15	0.24693	0.0808	-0.661617
16	0.14753	0.0793	-0.473107
17	0.29167	0.122	-0.569029
18	0.22496	0.153	-0.390481
19	0.22613	0.0555	-0.761925
20	0.33776	0.0966	-0.710569
21	0.18934	0.0894	-0.521646
22	0.37274	0.149	-0.585815
23	0.44572	0.104	-0.77914
24	0.37535	0.111	-0.700112
25	0.5263	0.236	-0.540998

ตารางที่ 4.23 (ต่อ)

เหตุการณ์ที่	แกมมา	(±)	V_Pr
26	0.37688	0.163	-0.55471
27	0.39233	0.183	-0.526921
28	0.31507	0.139	-0.547552
29	0.13043	0.179	-0.206285
30	0.30297	0.0626	-0.813095
31	0.30332	0.146	-0.514175
32	0.12022	0.18	-0.189074
33	0.32848	0.178	-0.46973
34	0.085787	0.133	-0.182702
35	0.42921	0.0947	-0.794406
36	0.18893	0.0855	-0.537786
37	0.34514	0.176	-0.491649
38	0.41595	0.17	-0.576712
39	0.24977	0.149	-0.436675
40	0.34966	0.106	-0.690856
41	0.16989	0.179	-0.263597
42	0.26736	0.0585	-0.797018
43	0.23881	0.0983	-0.574287
44	0.094591	0.0982	-0.267926
45	0.41046	0.147	-0.627373
46	0.34655	0.131	-0.607172
47	0.4197	0.136	-0.665201
48	0.31268	0.123	-0.591088
49	0.17597	0.0783	-0.544447
50	0.010197	0.119	-0.0247566
51	0.043731	0.0874	-0.142967
52	0.087325	0.106	-0.231465
53	0.024967	0.113	-0.0636019
54	0.14907	0.103	-0.386611

ตารางที่ 4.23 (ต่อ)

เหตุการณ์ที่	แกมมา	(±)	V_Pr
55	0.067766	0.0508	-0.359202
56	0.19003	0.0613	-0.666892
57	0.19003	0.0613	-0.375558
58	0.10468	0.0942	-0.305386
59	0.055925	0.087	-0.182409
60	0.084089	0.0819	-0.284057
61	0.24498	0.14	-0.45105
62	0.15311	0.0704	-0.531929
63	0.19413	0.0765	-0.591197
64	0.26783	0.0693	-0.7447
65	0.096271	0.0875	-0.302662
66	0.16961	0.0532	-0.677396
67	0.15469	0.11	-0.677396
68	0.16012	0.0761	-0.519091
69	0.21797	0.0644	-0.698652
70	0.045765	0.0517	-0.247501

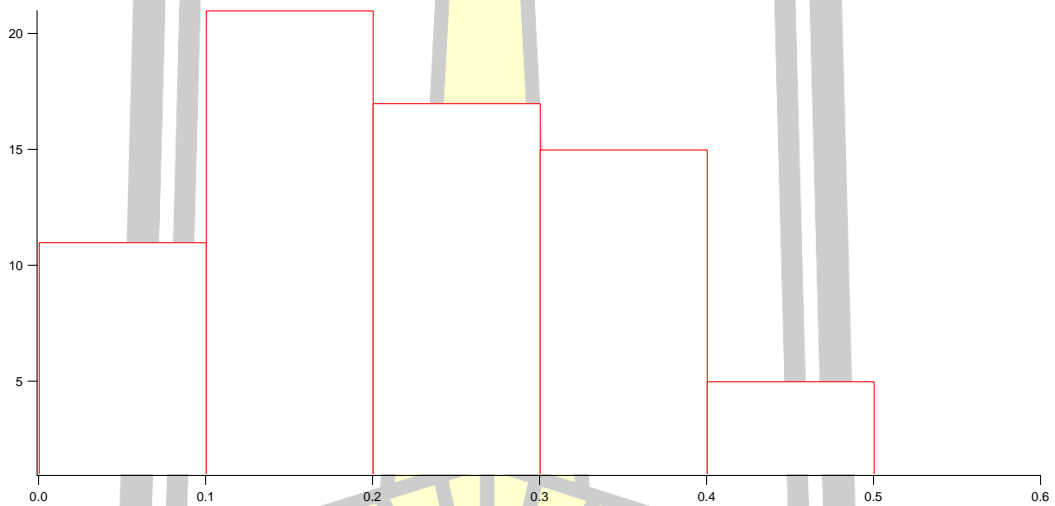


ตารางที่ 4.24 ตารางแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแกร่งทางแม่เหล็กขีดเริ่มกับแอมพลิจูดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของปี ค.ศ.2015-2016

เหตุการณ์ที่	แกมมา	(±)	V_Pr
1	0.27713	0.182	-0.402688
2	0.19074	0.0662	-0.639501
3	0.068835	0.085	-0.22756
4	0.028745	0.0955	-0.0866074
5	0.070214	0.0505	-0.372395
6	0.34564	0.108	-0.67733
7	0.43127	0.367	-0.321087
8	0.53664	0.337	-0.417215
9	0.46956	0.328	-0.382103
10	0.33818	0.329	-0.284418
11	0.12908	0.0689	-0.475522
12	0.19499	0.0607	-0.679985
13	0.40834	0.153	-0.610289
14	0.22886	0.174	-0.355424
15	0.29452	0.168	-0.451659
16	0.43135	0.157	-0.621814
17	0.13883	0.106	-0.365862
18	0.12488	0.106	-0.333449
19	0.017602	0.0802	0.0660061
20	-0.67144	0.432	-0.424251
21	0.7617	0.366	-0.53146
22	0.045864	0.112	-0.122072
23	-0.30395	0.0949	-0.694755
24	0.13995	0.0476	-0.663448
25	0.39879	0.146	-0.635122
26	0.054488	0.159	-0.102982
27	0.29051	0.109	-0.625855

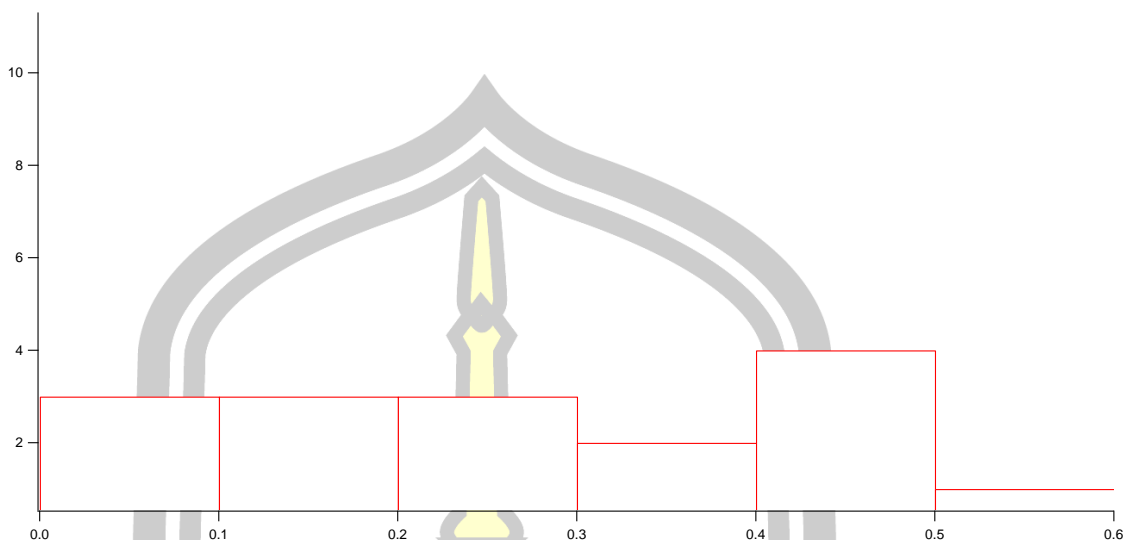
ตารางที่ 4.24 (ต่อ)

เหตุการณ์ที่	แกมมา	(±)	V_Pr
28	0.40782	0.326	-0.35296
29	0.52938	0.298	-0.471767
30	0.55	0.352	-0.426236
31	0.51244	0.331	-0.423106
32	0.57944	0.311	-0.490097
33	0.5292	0.341	-0.423931
34	0.41248	0.315	-0.366805
35	0.23681	0.325	-0.214754



รูปที่ 4.37 รูปแสดงค่าแกมมาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแกร่งทางแม่เหล็กขีดเริ่มกับแอมพลิจูดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของปี ค.ศ.2008-2011

วิทยุ ปณ ทิโต ชีเว



รูปที่ 4. 38 แสดงค่าเกมมาของความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแกร่งทางแม่เหล็กขีดเริ่มกับแอมพลิจูดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของปี ค.ศ.2015-2016

สามารถเห็นการลดลงของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติกจากสถานีที่มีค่าความแข็งแกร่งทางแม่เหล็กต่ำไปสถานีที่มีค่าความแข็งแกร่งทางแม่เหล็กสูง ซึ่งบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแกร่งทางแม่เหล็ก ความสัมพันธ์ของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำและลมสุริยะในช่วง $A < 0$ จะสัมพันธ์มากกว่า $A > 0$ คุณลักษณะนี้แตกต่างกันบ้างสำหรับ ICMEs ที่ความแรงและความผันผวนของสนามแม่เหล็กมีค่ามากขึ้นมีความสัมพันธ์กัน

4.4 อภิปรายผล

ผลกระทบของความเร็วมสุริยะและสนามแม่เหล็ก

โครงสร้างเชิงพื้นที่ของลมสุริยะและสนามแม่เหล็กในการอธิบายการถ่ายเทของรังสีคอสมิกกาแล็กติกเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงชั่วคราวของรังสีคอสมิกกาแล็กติก ในช่วง $A < 0$ จะสังเกตเห็นการไหลเข้ามาของโลกของรังสีคอสมิกกาแล็กติก โดยการแพร่, การล่องลอย, การพา ดังนั้นการแปรผันของลมสุริยะเป็นระยะสั้นๆ จึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของรังสีคอสมิกกาแล็กติกชั่วคราว เราพบว่าขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับลมสุริยะมีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลางในเหตุการณ์การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำคุณลักษณะดังกล่าวพบว่าลมสุริยะมีการสะกັดกันในระดับปานกลางของความเข้มรังสีคอสมิกกาแล็กติก ในช่วงกิจกรรมสุริยะต่ำในช่วง $A < 0$ ลมสุริยะมีบทบาทสำคัญต่อการถดถอยของรังสีคอสมิกกาแล็กติกใกล้โลก ยิ่งลมสุริยะมีค่ามากเท่าไรก็จะพารังสีคอสมิกกาแล็กติกออกไปมาก

ในปี 2009 ลมสุริยะเฉลี่ยมีค่าประมาณ 500 km/s ในขณะที่ปีอื่นๆ จะอยู่ประมาณ 590-620 km/s ดังนั้นการพาของรังสีคอสมิกกาแล็กติกในปี ค.ศ.2009 จึงน้อยกว่าปีอื่นๆซึ่งส่งผลทำให้ขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ มีค่าน้อยผลลัพธ์ของเราดูเหมือนจะตรงข้ามกับงานก่อนหน้าของ Richardson [25] ซึ่งพบว่า มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างน้อยของ 2 วัฏจักร Gupta และ Badruddin [31] ได้รวมช่วงเวลาของกิจกรรมสุริยะต่ำของปี ค.ศ.1974 ถึง ค.ศ.1996 และทำการวิเคราะห์ความเข้มของรังสีคอสมิกกาแล็กติกแบบ superpose epoch พบว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างรูปแบบที่เกิดซ้ำ 27 วันในช่วง $A>0$ และความเร็วลมสุริยะในช่วง $A<0$ เหตุผลที่ให้ผลลัพธ์ที่ตรงข้ามกันยังไม่เป็นที่เข้าใจยิ่งนักและเป็นเรื่องที่น่าสนใจซึ่งคาดว่าอาจขึ้นอยู่กับลักษณะของวัฏจักรสุริยะ ขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์มีความสัมพันธ์ค่อนข้างน้อยในช่วง $A<0$ สามารถอธิบายได้ว่าการยับยั้งการแพร่ของรังสีคอสมิกกาแล็กติกบางส่วนเกิดจากสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นในบริเวณอันตรกิริยาหมุนรวม อย่างไรก็ตามระดับความปั่นป่วนของสนามแม่เหล็กก็มักจะสูงขึ้นตามหน้าสัมผัสกระแส ดังนั้นจึงไม่อาจพบสนามแม่เหล็กในบริเวณอันตรกิริยาหมุนรวม Shaikh [32] พบว่ามีโครงสร้างสนามแม่เหล็กภายในบริเวณอันตรกิริยาของกระแสและพื้นที่ปั่นป่วนช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ในแนวตั้งฉากและทำให้ความเข้มของรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่สังเกตได้บนโลกลดลงสัมประสิทธิ์สัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำและ , ค่อนข้างน้อย การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำขึ้นอยู่กับลักษณะของการรบกวนระหว่างดาวเคราะห์มากกว่าการรบกวนที่เกิดขึ้นเป็นระยะๆ

เมื่อเร็วๆนี้ GUO และ Florinski [33] ได้เสนอแบบจำลองซึ่งไม่ได้วัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสนามแม่เหล็กเขาพบว่ากรมอดูเลตรังสีคอสมิกกาแล็กติกค่อนข้างเป็นอิสระจากความเข้มสนามแม่เหล็กและไม่ขึ้นกับประสิทธิภาพของสนามแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่ค้นพบในช่วงกิจกรรมสุริยะต่ำมีแนวโน้มที่จะไปถึงขอบด้านท้ายของลมสุริยะความเร็วสูงซึ่งไม่สอดคล้องกับการสังเกต Wawrzynczak [5] พบการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำที่ถือว่าการเปลี่ยนแปลงชั่วคราวของความปั่นป่วนของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ทำให้ขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำน้อยลง Richardson [34] ชี้ให้เห็นว่าข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงเหตุการณ์ต่อเหตุการณ์และความสัมพันธ์โดยละเอียดระหว่างการมอดูเลตของลมสุริยะเป็นสิ่งสำคัญ

เป็นเรื่องที่น่าสนใจที่จะกล่าวถึงการขาดความสัมพันธ์ของขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับลมสุริยะในช่วง $A>0$ (ค.ศ.2015-2016) การเปลี่ยนแปลงของขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำนั้นคาดว่าจะเกิดจากกระแสสุริยะที่มีความสัมพันธ์น้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงลมสุริยะและ

สนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์สาเหตุที่เป็นไปได้คือปริมาณการกระจายของอนุภาคและด้วยเหตุนี้จึงหมายถึงความเป็นอิสระต่อกันจึงมีแนวโน้มที่จะแตกต่างกันในแต่ละกระแสสุริยะ

การมีส่วนร่วมของการดริฟต์กับการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ

ผลลัพธ์ของเราสามารถตีความได้โดยพิจารณาทิศทางของการดริฟต์ของอนุภาคในแผ่นกระแสสุริยมณฑลตามแบบจำลองการดริฟต์ ในช่วง $A > 0$ อนุภาคที่มีประจุบวกจะลอยจากละติจูดสูงและลงมาที่เส้นศูนย์สูตรและมีแนวโน้มที่จะออกนอกโลกไปตามแผ่นกระแสสุริยมณฑล การดริฟต์ควรมีความสำคัญในการลดลงของรังสีคอสมิกกาแล็กติกใกล้โลกเพราะว่าฟลักซ์จะลอยออกไปเมื่อสนามแม่เหล็กสูงขึ้นในบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมร่วมกับการพา, การหน่วงอะเดียบาติกและการกระเจิงของรังสีคอสมิกกาแล็กติกตามพื้นที่บริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมใกล้กับระนาบเส้นศูนย์สูตรโลกซึ่งขัดขวางการแพร่ของฟลักซ์รังสีคอสมิกกาแล็กติกที่จะเข้ามา อย่างไรก็ตามเนื่องจากการดริฟต์ของฟลักซ์อาจจะมีอิทธิพลมากกว่าการพาและการกระเจิง มีความสัมพันธ์กันเล็กน้อยระหว่าง การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำกับลมสุริยะและสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ การดริฟต์ของอนุภาคออกจากบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมเนื่องจากสนามแม่เหล็กภายนอกบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมมีความเข้มข้นมากกว่าภายใน บริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วม

ในทางตรงกันข้ามในช่วง $A < 0$ การดริฟต์และการแพร่ในแนวเส้นศูนย์สูตรมักจะเสริมซึ่งกันและกันในขณะที่รังสีคอสมิกกาแล็กติกจะถูกกำเลียงด้วยลมสุริยะความเร็วสูงจากดวงอาทิตย์ ภายใต้สถานการณ์เหล่านี้ขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำควรมีขนาดเล็กในช่วง $A > 0$ ยิ่งไปกว่านั้นยังได้รับอิทธิพลเล็กน้อยจากสนามแม่เหล็กและความปั่นป่วนของสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นในบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมโดยเฉพาะรังสีคอสมิกกาแล็กติกที่มีรัศมีใหญ่โรเทียบได้กับสนามแม่เหล็กอาจจะกระเจิงผ่านปฏิสัมพันธ์ของอนุภาคคลื่น อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของรังสีคอสมิกกาแล็กติกได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กในบริเวณอันตรกิริยาของกระแส/บริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมน้อยกว่าการปลดปล่อยก่อนมวลคอโรนาระหว่างดาวเคราะห์ เนื่องจากสนามแม่เหล็กในบริเวณอันตรกิริยาของกระแส/บริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมไม่เข้มข้นเท่าในการปลดปล่อยก่อนมวลคอโรนาระหว่างดาวเคราะห์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับอนุภาคที่มีค่าความแข็งเกร็งทางแม่เหล็กสูง ความเป็นไปได้อีกประการหนึ่งของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ คือการดริฟต์ของอนุภาคเนื่องจากรัศมีและความโค้งในสนามแม่เหล็กของสุริยมณฑลที่จะบ่งบอกการไล่ระดับความเข้มข้นของละติจูดซึ่งเกี่ยวกับแผ่นกระแสสุริยมณฑล ดังนั้นการมอดูเลตความเข้มข้นที่สังเกตได้จากระยะห่างระหว่างแผ่นกระแสสุริยมณฑลที่สังเกต

จากโลกและสิ่งเกิดจากยานอวกาศจะแตกต่างกันไป การมอดูเลตจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อมุมเอียงของแผ่นกระแอสสุริยมณฑลเพิ่มขึ้นเช่นในวัฏจักรสุริยะที่สูงขึ้น (ค.ศ.2010-2011) ดังนั้นในระหว่างขั้นตอนเหล่านี้พบว่าขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของกิจกรรมสุริยะสูงจะมากกว่าขนาด การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของกิจกรรมสุริยะต่ำเมื่อมีการดริฟต์และการแพร่กระจายของกระบวนการไดนาโม ดังนั้นในปี ค.ศ.2009 กิจกรรมสุริยะต่ำจะมีการลดขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำลงเล็กน้อยตามที่สังเกตได้ การจำลองตามสมการเชิงอนุพันธ์ของสมการการดริฟต์และการแพร่เป็นอุปสรรคตามแผ่นกระแอสสุริยมณฑลซึ่งระบุถึงความแตกต่างของขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำ



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานชิ้นนี้ศึกษาเหตุการณ์การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ่าของปี ค.ศ.2008 ถึง ค.ศ.2011 ได้ 70 เหตุการณ์ ($A < 0$) และปี ค.ศ.2015 ถึง ค.ศ.2016 ได้ 35 เหตุการณ์ ($A > 0$) ภายใต้เกณฑ์ของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ่าเราใช้ข้อมูลรังสีคอสมิกภาคเล็กติดจาก 13 สถานีที่มีค่าความแข็งแรงเกร็งทางแม่เหล็กช่วงตัดต่างกันเราตรวจสอบลักษณะของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ่ารวมถึงความสัมพันธ์กับลมสุริยะและขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ในช่วง 2 วัฏจักรผลมีดังนี้

1. แอมพลิจูดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ่าในวัฏจักร $A > 0$ มีแนวโน้มมากกว่า $A < 0$
2. มีการอาศัยกิจกรรมสุริยะพบว่าขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ่าต่ำสุดในปี ค.ศ. 2009 ซึ่งเป็นช่วงที่กิจกรรมสุริยะต่ำสุดและขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ่าจะสูงขึ้นในช่วงที่มีกิจกรรมสุริยะสูงขึ้น
3. ขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ่า ในปี ค.ศ.2016 ($A > 0$) มีขนาดใหญ่กว่าปี ค.ศ. 2008 ($A < 0$) เนื่องจากจะพบอนุภาคที่ค่าความแข็งแรงเกร็งทางแม่เหล็กสูงเช่นที่สถานี Hermanus, Mexico และ PSNM
4. การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ่าของสถานีทางซีกโลกเหนือมีการมอดูเลตมากกว่าสถานีทางซีกโลกใต้ของปี ค.ศ.2008 และ ค.ศ.2010 ซึ่งสิ่งเหล่านี้ได้อยู่ภายใต้ความไม่สมมาตรของลมสุริยะความเร็วสูงและแผ่นกระแสสุริยมณฑลของแต่ละปี
5. ความสัมพันธ์ของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ่ากับความเร็วมสุริยะและขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ของ $A < 0$ มากกว่า $A > 0$
6. ในช่วง $A < 0$ (ปี ค.ศ.2008-2011) B_{max}^s และ V_{max}^s สัมพันธ์กับขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ่ามากที่สุด
7. ขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ่าเทียบกับ V_{max}^s และลมสุริยะจะมีความสัมพันธ์กันอย่างมากจากกระแสหนึ่งสู่กระแสหนึ่งในช่วง $A < 0$
8. ไม่มีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันระหว่างขนาดของการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ่าและการเพิ่มขึ้นของสนามแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องกับลมสุริยะและบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วม ใน $A > 0$
9. ความสัมพันธ์ของขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ่า กับ V_{max} จะมีค่ามากกว่า B_{max} ในช่วง $A < 0$

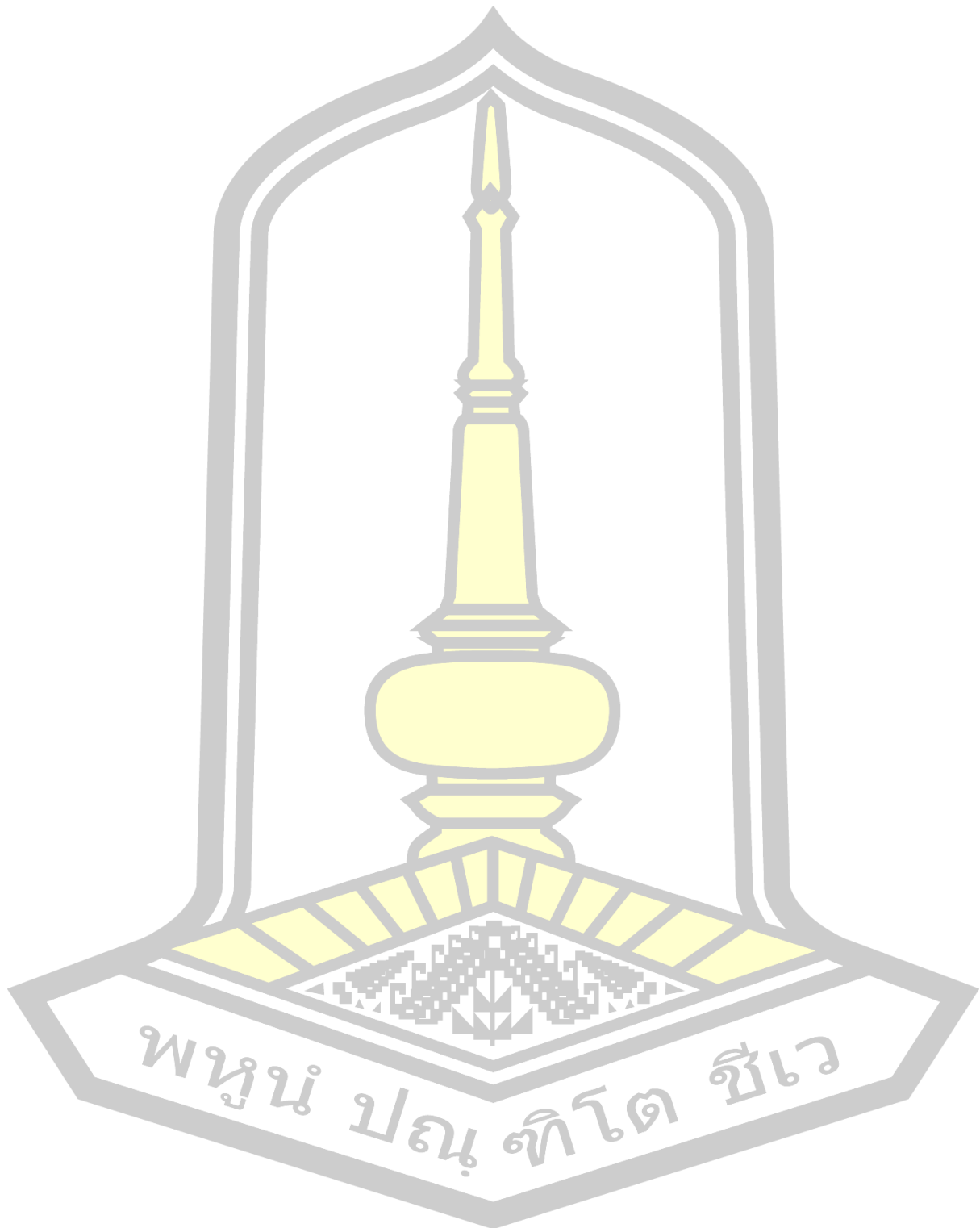
10. ในกิจกรรมสุริยะของปี ค.ศ.2009 ($A < 0$) ขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำสัมพันธ์กับขนาดของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์มากกว่า V_{\max}

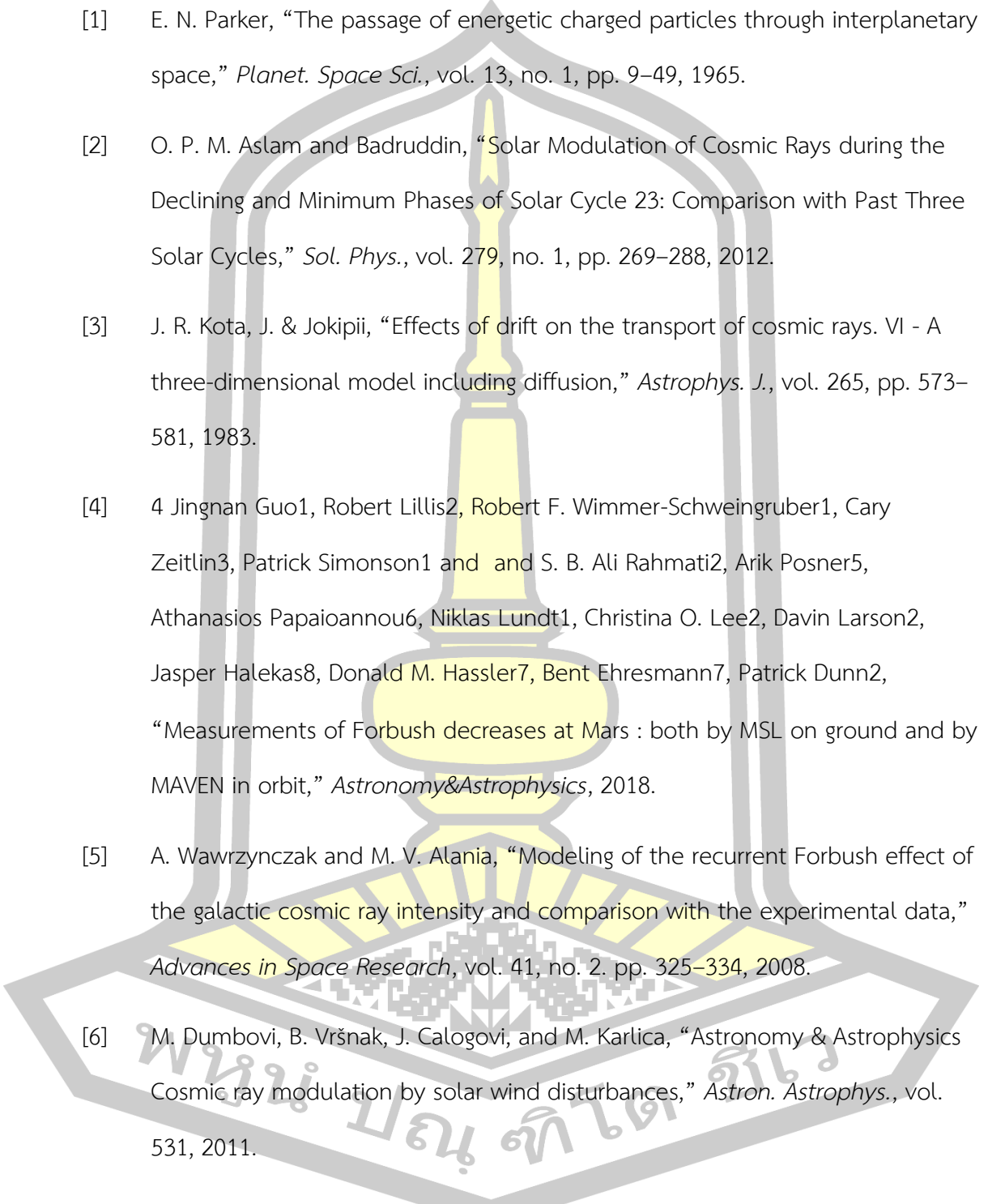
11. การดริฟต์มีผลมากที่สุดต่อขนาดการลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของ $A < 0$ และ $A > 0$

การศึกษาเพิ่มเติมนี้อาจได้รับความเข้าใจเกี่ยวกับบทบาทสัมพัทธ์ของกลไกการมอดูเลตที่แตกต่างกันของโครงสร้างกระแสการหมุนของ การลดลงแบบพอร์บุชที่เวียนซ้ำของความแตกต่างของขั้วแม่เหล็กสุริยะจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการมอดูเลตที่เกิดซ้ำเพื่อให้ข้อมูลเชิงลึกใหม่ๆ เกี่ยวกับการมอดูเลตทั่วโลกของรังสีคอสมิกกาแล็กติก



บรรณานุกรม



- 
- [1] E. N. Parker, "The passage of energetic charged particles through interplanetary space," *Planet. Space Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 9–49, 1965.
- [2] O. P. M. Aslam and Badruddin, "Solar Modulation of Cosmic Rays during the Declining and Minimum Phases of Solar Cycle 23: Comparison with Past Three Solar Cycles," *Sol. Phys.*, vol. 279, no. 1, pp. 269–288, 2012.
- [3] J. R. Kota, J. & Jokipii, "Effects of drift on the transport of cosmic rays. VI - A three-dimensional model including diffusion," *Astrophys. J.*, vol. 265, pp. 573–581, 1983.
- [4] 4 Jingnan Guo¹, Robert Lillis², Robert F. Wimmer-Schweingruber¹, Cary Zeitlin³, Patrick Simonson¹ and and S. B. Ali Rahmati², Arik Posner⁵, Athanasios Papaioannou⁶, Niklas Lundt¹, Christina O. Lee², Davin Larson², Jasper Halekas⁸, Donald M. Hassler⁷, Bent Ehresmann⁷, Patrick Dunn², "Measurements of Forbush decreases at Mars : both by MSL on ground and by MAVEN in orbit," *Astronomy&Astrophysics*, 2018.
- [5] A. Wawrzynczak and M. V. Alania, "Modeling of the recurrent Forbush effect of the galactic cosmic ray intensity and comparison with the experimental data," *Advances in Space Research*, vol. 41, no. 2. pp. 325–334, 2008.
- [6] M. Dumbovi, B. Vršnak, J. Calogovi, and M. Karlica, "Astronomy & Astrophysics Cosmic ray modulation by solar wind disturbances," *Astron. Astrophys.*, vol. 531, 2011.
- [7] M.-B. Kallenrode, "Galactic cosmic ray," *University of Lneburg, 21332 Luneburg, Germany*. University of Luneburg, 21332 Luneburg, Germany, 2001.
- [8] M. S. LONGAIR, *High Energy Astrophysics*. New York: Published in the United

States of America by Cambridge University Press, 2011.

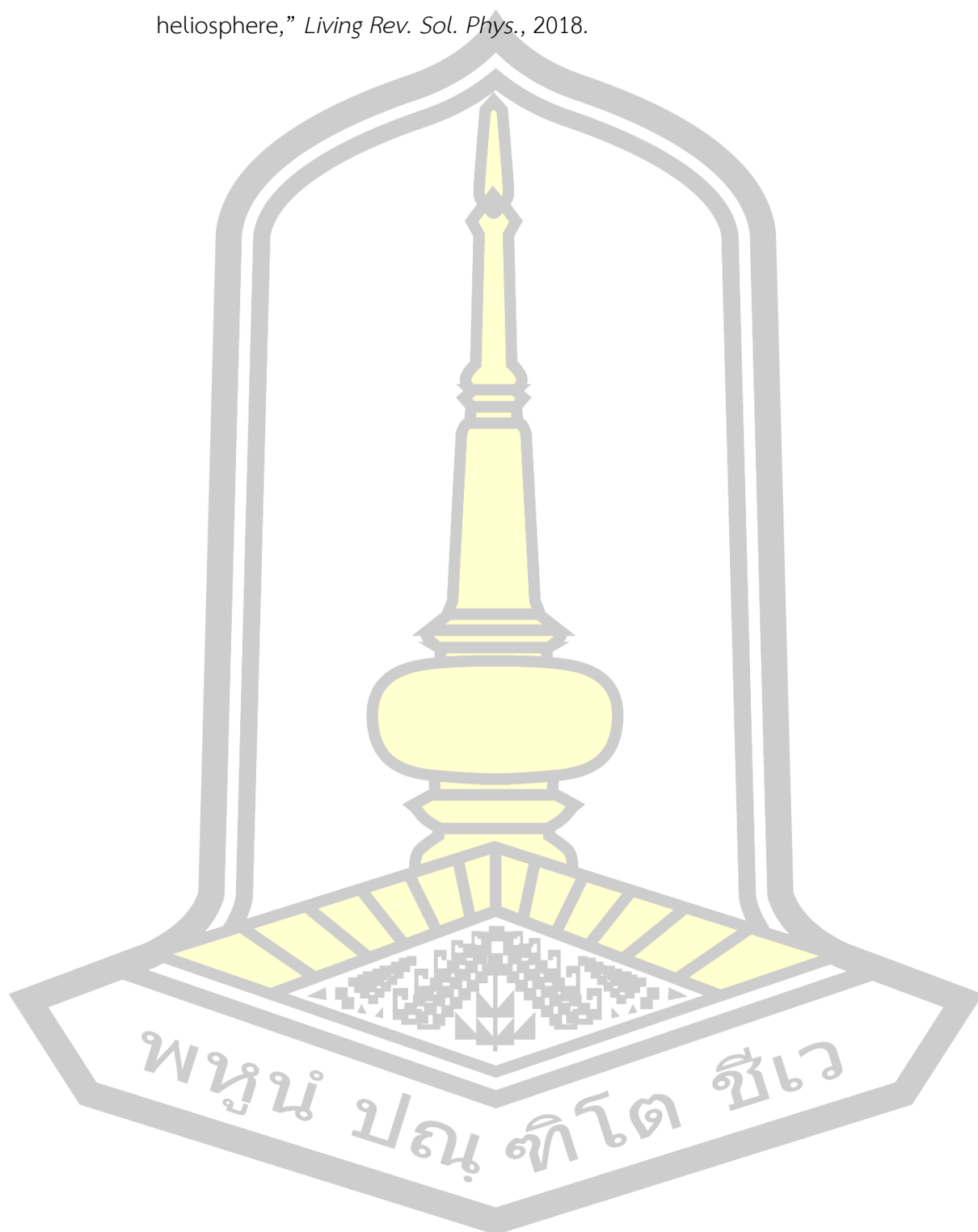
- [9] and S. B. T. J. A. Simpson, W. Fonger, “Cosmic Radiation Intensity-Time Variations and Their Origin. I. Neutron Intensity Variation Method and Meteorological Factors,” *Phys. Rev. JOURNALS Arch.*, vol. 90, no. 5, p. 934, 1953.
- [10] I. A. Mironova *et al.*, “Energetic Particle Influence on the Earth’s Atmosphere,” *Space Sci. Rev.*, vol. 194, no. 1–4, pp. 1–96, Nov. 2015.
- [11] J. A. Simpson, “Elemental and Isotopic Composition of the Galactic Cosmic Rays,” *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, vol. 33, pp. 323–382, 1983.
- [12] J. Bieber, K. Copeland, P. Evenson, and J. Hoffman, “Participants.”
- [13] S. R. Cranmer *et al.*, “Origins of the Ambient Solar Wind: Implications for Space Weather The Scientific Foundation of Space Weather Edited by Rudolf,” *Space Sci. Rev.*, vol. 212, pp. 1345–1384, 2017.
- [14] M. S. Potgieter, E. E. Vos, R. Munini, M. Boezio, and V. Di Felice, “MODULATION of GALACTIC ELECTRONS in the HELIOSPHERE during the UNUSUAL SOLAR MINIMUM of 2006-2009: A MODELING APPROACH,” *Astrophysical Journal*, vol. 810, no. 2. 2015.
- [15] J. P. Roberts, “PAMELA through a Magnetic Lens.” Department of Physics and Astronomy, New York University, New York, 2012.
- [16] D. Ruffolo, “Transport and Acceleration of Solar Energetic Particles from Coronal Mass Ejection Shocks.” International Astronomical Union, 2005.
- [17] Bruce T. Tsurutani, “The Interplanetary Causes of Magnetic Storms: A Review.” Space Physics and Astrophysics Section Jet Propulsion Laboratory, California

Institute of Technology Pasadena, California, 1996.

- [18] L. F. Burlaga N. F. Ness F. B. McDonald, “Magnetic fields and cosmic rays in the distant heliosphere at solar maximum: Voyager 2 observations near 32 AU during 1990,” *Geophys. Res.*, 1995.
- [19] J. Kóta J.R. Jokipii, “MODELING OF 3-D COROTATING COSMIC-RAY STRUCTURES IN THE HELIOSPHERE,” *Space Sci. Rev.*, vol. 83, no. 1–2, pp. 137–145, 1998.
- [20] M. S. Potgieter, “Solar modulation of cosmic rays,” *Living Rev. Sol. Phys.*, vol. 10, 2013.
- [21] and T. L. Ilias Cholis, Dan Hooper, “A predictive analytic model for the solar modulation of cosmic rays,” 2016. [Online]. Available: <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.93.043016>.
- [22] R. D. Strauss, M. S. Potgieter, I. Büsching, and A. Kopp, “Modelling heliospheric current sheet drift in stochastic cosmic ray transport models,” *Astrophysics and Space Science*, vol. 339, no. 2. pp. 223–236, 2012.
- [23] W. B. Jokipii, J. R., Levy, E. H., & Hubbard, “Effects of particle drift on cosmic-ray transport.pdf,” *Astrophys. J.*, 1977.
- [24] J. Newkirk, G. and L. A. Fisk, “Variation of cosmic rays and solar wind properties with respect to the heliospheric current sheet. I - Five-GeV protons and solar wind speed,” *Geophys. Res.*, 1985.
- [25] I. G. Richardson, H. V Cane, and G. Wibberenz, “A 22-year dependence in the size of near-ecliptic corotating cosmic ray depressions during five solar minima,” vol. 104, 1999.
- [26] U. Kiel and H. V Cane, “The relationship between recurring cosmic ray

- depressions and corotating solar wind streams at 1 AU: IMP 8 and Helios 1 and 2 anticoincidence guard rate observations,” vol. 101, pp. 483–496, 1996.
- [27] J. A. Lockwood, “Forbush decreases in the cosmic radiation,” *Space Science Reviews*, vol. 12, no. 5, pp. 658–715, 1971.
- [28] I. G. Richardson and H. V. Cane, “Galactic Cosmic Ray Intensity Response to Interplanetary Coronal Mass Ejections/Magnetic Clouds in 1995 - 2009,” *Sol. Phys.*, vol. 270, no. 2, pp. 609–627, 2011.
- [29] I. A. N. G. Richardson, “UNCORRECTED PROOF ! ENERGETIC PARTICLES AND COROTATING INTERACTION REGIONS IN THE SOLAR WIND,” vol. 12, pp. 1–110, 2004.
- [30] M. McKibben, R. B., Connell, J. J., Lopate, C., Simpson, J. A., & Zhang, “Cosmic Ray Modulation in the 3-D Heliosphere,” *Space Sci. Rev.*, vol. 72, no. 1–2, pp. 367–378, 1995.
- [31] V. G. Badruddin, “Solar magnetic cycle dependence in corotating modulation,” pp. 185–195, 2009.
- [32] Z. I. Shaikh and A. N. Raghav, “Evolution of planar magnetic structure within the stream interaction region and its connection with a recurrent Forbush decrease 1 INTRODUCTION 2 DATA AND METHODOLOGY 3 OBSERVATIONS AND INTERPRETATION,” vol. 5080, pp. 5075–5080, 2020.
- [33] X. Guo and V. Florinski, “GALACTIC COSMIC-RAY INTENSITY MODULATION BY COROTATING INTERACTION REGION STREAM INTERFACES AT 1 au,” *Astrophys. J.*, vol. 826, no. 1, pp. 1–13, 2016.

- [34] I. G. Richardson, “Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere,” *Living Rev. Sol. Phys.*, 2018.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวอรอุมา กัลยา
วันเกิด วันที่ 24 มีนาคม พ.ศ.2535
สถานที่เกิด มหาสารคาม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน 164 หมู่9 ตำบลบ่อใหญ่ อำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม 44130
ประวัติการศึกษา พ.ศ.2557 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต (วท.บ.)
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
พ.ศ.2564 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
(วท.ม.) สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนัน ปณฺ ทิโต ชีเว