



การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ในช่วงวัฏจักรดวง

อาทิตย์ที่ 24



สุจิตรา เฟ็งภักดี

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ในช่วงวัฏจักรดวง
อาทิตย์ที่ 24



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ในช่วงวัฏจักร

ดวงอาทิตย์ที่ 24"

ของ สุจิตรา เฟ็งภักดี

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญเรืองฤทธิ์ จันทน์นอก)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิวาณี ขำล้ำเลิศ)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรรัตน์ ศรีสวัสดิ์)

อนุมัติ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มณีสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ ในช่วงวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24
ผู้วิจัย	สุจิตรา เฟ็งภักดี
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิราณี ขำล้ำเลิศ
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2563
คำสำคัญ	การระเบิดบนดวงอาทิตย์, วัฏจักรดวงอาทิตย์, ลมสุริยะ, สภาวะอวกาศ, คลื่นกระแทก

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วิเคราะห์การระเบิดบนดวงอาทิตย์ในรอบวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24 โดยเลือกศึกษาเหตุการณ์การปะทุที่สนใจเป็นสามช่วง วิเคราะห์และจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคฮีเลียม (He) ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ ด้วยสมการขนส่ง Ruffolo 1998 ใช้ข้อมูลจากยานอวกาศ ACE จากอุปกรณ์ SIS และพีดีเปรียบเทียบข้อมูลด้วยวิธีกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุด เพื่อหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคบนดวงอาทิตย์ด้วยการแก้ไขปัญหาแบบย้อนกลับ และ FWHM พบว่า เหตุการณ์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553 เป็นการปะทุช่วงต้นของวัฏจักร ความแรงของรังสีเอกซ์ M8.3 ตำแหน่งปะทุ คือ N23E15 พบว่าค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานมากขึ้น และจากการคำนวณระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลกมีค่าลดลงเมื่อพลังงานของอนุภาคเพิ่มขึ้นและการปะทุนี้เกิดทางด้านตะวันออกของดวงอาทิตย์จึงทำให้อนุภาคเกิดการพุ่งอยู่ในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์นาน เหตุการณ์ วันที่ 9 สิงหาคม 2554 เป็นการปะทุช่วงสูงสุดของวัฏจักร ความแรงของรังสีเอกซ์ X6.9 ตำแหน่งปะทุ คือ N18W68 พบว่าค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 0.3 AU และระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มีค่าประมาณ 1 ชั่วโมง เหตุการณ์นี้เกิดที่ด้านตะวันตกของดวงอาทิตย์ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่งที่สนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์เชื่อมโดยตรงกับโลก (60° W) และพบการปลดปล่อยมวลสารจากชั้นโคโรนาเกิดขึ้นในช่วงใกล้กับช่วงสูงสุดที่มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ ทำให้เกิดการพุ่งของอนุภาคน้อย และเหตุการณ์ วันที่ 6 กันยายน 2560 เป็นการปะทุช่วงท้ายของวัฏจักรแต่เป็นการปะทุที่มีความรุนแรงสูงสุด ความแรงของรังสีเอกซ์ X9.3 ตำแหน่งปะทุ คือ S10W30 พบการปล่อยมวลสารจากชั้นโคโรนาในช่วงสูงสุดของการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ และตรวจพบการระเบิดบนดวงอาทิตย์ในวันเดียวกันที่ระดับ X2.2 พบว่าระยะทางอิสระเฉลี่ยมีค่าค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 1.408-1.532 AU และมีระยะเวลาการปลดปล่อย

อนุภาคนานประมาณ 2-6 ชั่วโมง อนุภาคเกิดการฟุ้งอยู่ในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์นาน



Title	AN ANALYSIS OF THE PARTICLE PROPAGATION OF SOLAR FLARES DURING 24 TH SOLAR CYCLE.
Author	SUJITRA PENGPHAKDI
Advisor	Assistant Professor Dr. Thiranee Khumlumlert
Academic Paper	Thesis M.S. in Applied Physics, Naresuan University, 2020
Keywords	Solar flare, Solar cycle, Solar wind, Space weather, Shock wave

ABSTRACT

The research analyzed the solar flares from the Sun on 24th solar cycle. We have selected three violent solar events. The propagation of the solar energetic particles of these solar flares was analyzed by simulating the various energy level with the transport equation of Ruffolo (1998) by using the data solar particles from the SIS instrument on the ACE spacecraft, and fitted by the linear least squares technique. We found that the injection time by the deconvolution technique and FWHM (full width at half maximum). The results showed that in the beginning of the solar cycle which is on 12 February 2010 with the X-Ray class of M8.3, the eruption position on the Sun was N23E15 the mean free path of the particles increases as the energy level increases and the injection time of the particles from the Sun decreases when the energy levels increases and this solar flares was the east of the Sun as a result the particles diffuse in interplanetary medium for a long time. The solar flares on 9 August 2011 was in the mid the solar cycle with the X-Ray class of X6.9, the eruption position on the Sun was N18W68 the results showed that the mean free path of the particles approximately closed to 0.3 AU and the injection time of the particles from the Sun was about an hour this event was on the western of the Sun nearby magnetic field position between interplanetary magnetic field and Earth (60°W) and we found the CME on the peak of X-Ray injection as there was a less diffusion on the particle distribution. The solar flare on 6 September 2560 was at the end of the solar cycle with the highest X-Ray class of X9.3, the eruption position on

the Sun was S10W30. We found CME in peak of X-Ray class and we found the other solar flare in the same day at the X-Ray class of X2.2, the results showed that the mean free path was very high in the range 1.408-1.532 AU and the injection time of the particles from the Sun was about 2-6 hours as there us particle diffusion in interplanetary medium for a long time.



ประกาศคุณูปการ

การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ให้ความช่วยเหลือทุกท่านที่กรุณาเสียสละเวลาและให้คำแนะนำเป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. ชีราณี ขำล้ำเลิศ ที่กรุณาเสียเวลาให้คำแนะนำ ปรึกษา ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบและปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ งานวิจัยมีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดียิ่ง เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สำหรับความรัก ความอบอุ่น ความปรารถนาดี ให้การอบรมสั่งสอนและสนับสนุนในด้านการศึกษา ตลอดจนเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้สามารถผ่านพ้นอุปสรรคต่าง ๆ ไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศ.ดร.เดวิด รูฟโฟโล อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์สมการขนส่ง และโปรแกรมเบื้องต้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่อำนวยความสะดวก เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ที่สนับสนุนงบประมาณในการนำเสนอผลงานวิจัย

ขอขอบคุณโครงการ “การวิเคราะห์ผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงตามเส้นสนามแม่เหล็กจากอวกาศเข้ามายังชั้นบรรยากาศโลก” สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ประจำปีงบประมาณ 2564

สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันพึงจะมีจากการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณความดีทั้งหมดให้แก่ผู้มีพระคุณ ตลอดจนคณาจารย์จากมหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ผู้วิจัย

สุจิตรา เพ็งภักดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
ประกาศคุุณุปการ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา.....	1
จุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
โครงสร้างของดวงอาทิตย์.....	4
วัฏจักรสุริยะ (Solar cycle).....	5
ปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ (Thermonuclear Reaction).....	7
การระเบิดอย่างรุนแรงบนดวงอาทิตย์ (Solar flare).....	8
ลมสุริยะ (Solar wind).....	11
การปล่อยมวลสารจากโคโรนา (Coronal Mass Ejection; CME).....	12
รังสีคอสมิก (Cosmic rays).....	13
สนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ (interplanetary magnetic field, IMF).....	15

สมการการขนส่งที่อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูง (Transport equation)..	15
การแก้สมการ Partial Differential.....	23
วิธี FWHM (Full Width at Half Maximum).....	25
ยานอวกาศ ACE (advanced composition explorer).....	26
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	30
การเลือกเหตุการณ์ในการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากการปะทุบนดวงอาทิตย์..	30
การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของการปะทุที่ผิวดวงอาทิตย์.....	31
การดาวน์โหลดข้อมูลที่ตรวจวัดจากยานอวกาศ ACE.....	38
ขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลที่ได้จากยานอวกาศเพื่อการจำลอง.....	39
การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคและการเปรียบเทียบข้อมูล.....	44
การเปรียบเทียบข้อมูล.....	46
หาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค.....	48
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	51
ผลการเปรียบเทียบข้อมูล.....	56
ผลการหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค.....	58
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	61
บรรณานุกรม.....	63
ประวัติผู้วิจัย.....	67
ภาคผนวก.....	68

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แสดงการจำแนกระดับความรุนแรงของการปลดปล่อยรังสีเอกซ์.....	10
ตารางที่ 2 อธิบายพจน์ของสมการที่ 3	22
ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของการปะทุ.....	30
ตารางที่ 4 ลักษณะเด่นของการปะทุ	34
ตารางที่ 5 แสดงตัวอย่างข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ SIS บนยานอวกาศ ACE และค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจากยานอวกาศของอนุภาค He สำหรับเหตุการณ์การปะทุในวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010.....	40
ตารางที่ 6 ตารางค่าต่าง ๆ ในขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลของธาตุฮีเลียม	43
ตารางที่ 7 ค่าระยะทางอิสระเฉลี่ย และระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคที่ได้จากการจำลองอนุภาค He สำหรับเหตุการณ์ต่าง ๆ.....	59

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างของดวงอาทิตย์ [1].....	4
ภาพที่ 2 แสดงจำนวนจุดมืดบนดวงอาทิตย์ในช่วงปี 2008-2019 [5].....	6
ภาพที่ 3 ตัวอย่างปริมาณจุดดำบนดวงอาทิตย์ตั้งแต่เริ่มต้นวัฏจักร ถึงช่วงท้ายวัฏจักร	6
ภาพที่ 4 ละติจูดของจุดดำที่เกิดขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2413-2543.....	7
ภาพที่ 5 ลักษณะการปะทุของดวงอาทิตย์ในย่านรังสีเอกซ์ แสดงถึงเส้นขอบความเข้มของรังสีเอกซ์พลังงานสูง และเส้นแรงแม่เหล็กที่วนเป็นวงขณะที่เกิดการปะทุบนดวงอาทิตย์ [8].....	9
ภาพที่ 6 แสดงรังสีคอสมิกปฐมภูมิปะทะกับอะตอมในชั้นบรรยากาศของโลกที่ก่อให้เกิด	14
ภาพที่ 7 แสดงโครงสร้างของสนามแม่เหล็กกระหว่างดาวเคราะห์และลมสุริยะ [19].....	15
ภาพที่ 8 การพาของพลาสมาเชิงระบบ ภาพที่ 9 การพาของพลาสมาแบบเชิงสุ่ม	16
ภาพที่ 10 แสดงค่ามุมระยะช่วงเกลียว (pitch angle) θ ระหว่างทิศความเร็วของอนุภาคและทิศทางเส้นสนามแม่เหล็ก	19
ภาพที่ 11 การหาค่า Full Width at Half Maximum.....	25
ภาพที่ 12 ภาพจำลองส่วนประกอบของยานอวกาศ ACE [23]	27
ภาพที่ 13 แสดงเครื่องมือตรวจวัด SIS บนยานอวกาศ ACE.....	28
ภาพที่ 14 ภาพถ่ายเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553.....	31
ภาพที่ 15 ภาพถ่ายเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 9 สิงหาคม 2554.....	32
ภาพที่ 16 ภาพถ่ายเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 6 กันยายน 2560 [28].....	32
ภาพที่ 17 ค่าระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์ในวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553.....	33
ภาพที่ 18 ค่าระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์ในวันที่ 9 สิงหาคม 2554.....	33

ภาพที่ 19 ค่าระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์ในวันที่ 6 กันยายน 2560	34
ภาพที่ 20 แสดงค่าฟลักซ์ของธาตุฮีเลียม จากเครื่องมือ SIS ที่วัดได้ในวันที่ 11-17 กุมภาพันธ์ 2553.....	35
ภาพที่ 21 แสดงค่าฟลักซ์ของธาตุฮีเลียม จากเครื่องมือ SIS ที่วัดได้ในวันที่ 8-14 สิงหาคม 2554.....	35
ภาพที่ 22 แสดงค่าฟลักซ์ของธาตุฮีเลียม จากเครื่องมือ SIS ที่วัดได้ในวันที่ 5-11 กันยายน 2560.....	36
ภาพที่ 23 กราฟแสดงความเร็วลมสุริยะในวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553	36
ภาพที่ 24 กราฟแสดงความเร็วลมสุริยะในวันที่ 9 สิงหาคม 2554.....	37
ภาพที่ 25 กราฟแสดงความเร็วลมสุริยะในวันที่ 6 กันยายน 2560	37
ภาพที่ 26 แสดงหน้าเว็บไซต์ที่สามารถเลือกดาวน์โหลดเฉพาะข้อมูลที่ต้องการ	38
ภาพที่ 27 ค่าความหนาแน่นของอนุภาคฮีเลียม เทียบกับเวลา	40
ภาพที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า log ของโมเมนตัมกับค่า log ของสเปกตรัม ของฟลักซ์	44
ภาพที่ 29 การเปรียบเทียบข้อมูลสำหรับธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV/n...47	
ภาพที่ 30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง x^2 และค่าระยะทางอิสระเฉลี่ย	47
ภาพที่ 31 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV/n.....	48
ภาพที่ 32 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	50
ภาพที่ 33 แสดงจุดมีดบนดวงอาทิตย์ของรอบวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24 ช่วงปี ค.ศ. 2008 – 2019.....	51
ภาพที่ 34 การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ของการปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553	52

ภาพที่ 35 ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคสำหรับธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 4.032, 5.390, 6.685, 8.418 และ 11.493 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010.....	52
ภาพที่ 36 การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ของการปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 9 สิงหาคม 2011....	53
ภาพที่ 37 ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคสำหรับธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 4.032, 5.390, 6.685, 8.418 และ 11.493 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 9 สิงหาคม 2011.....	53
ภาพที่ 38 การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ของการปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 6 กันยายน 2017...54	54
ภาพที่ 39 ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคสำหรับธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 4.032, 5.390, 6.685, 8.418 และ 11.493 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 6 สิงหาคม 2017	54
ภาพที่ 40 ค่าการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาสำหรับธาตุ He ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.847 AU ที่ระดับพลังงาน 4.032, 5.390, 6.685, 8.418 และ 11.493 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010	55
ภาพที่ 41 การกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาสำหรับธาตุ He ที่พลังงาน 4.032 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.6, 0.8, 1 และ 1.2 AU สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010.....	55
ภาพที่ 42 ข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 8.418 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010	56
ภาพที่ 43 ข้อมูลจากการจำลองของธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 8.418 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010	56
ภาพที่ 44 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 8.418 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010.....	57

ภาพที่ 45 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 8.418 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010 ภายใต้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล.....	57
ภาพที่ 46 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 8.418 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010 มีระยะเวลาการปลดปล่อย 1004.1 นาที	58
ภาพที่ 47 การกระจายตัวของอนุภาคที่บันทึกจากสถานีตรวจวัดนิวตรอน สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010	60
ภาพที่ 48 การกระจายตัวของอนุภาคที่บันทึกจากสถานีตรวจวัดนิวตรอน สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 9 สิงหาคม 2011	60
ภาพที่ 49 การกระจายตัวของอนุภาคที่บันทึกจากสถานีตรวจวัดนิวตรอน สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 6 กันยายน 2017	60
ภาพที่ 50 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ ฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 4.032 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.847 AU สำหรับวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010	69
ภาพที่ 51 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ ฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 5.390 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.329 AU สำหรับวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010	69
ภาพที่ 52 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ ฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 6.685 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.489 AU สำหรับวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010	70
ภาพที่ 53 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ ฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 8.418 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 1.007 AU สำหรับวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010	70

ภาพที่ 54 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 11.493 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 1.14 AU สำหรับวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010.....	71
ภาพที่ 55 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 4.032 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.719 AU สำหรับวันที่ 11 สิงหาคม 2011.....	71
ภาพที่ 56 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 5.390 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.504 AU สำหรับวันที่ 11 สิงหาคม 2011.....	72
ภาพที่ 57 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 6.685 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.388 AU สำหรับวันที่ 11 สิงหาคม 2011.....	72
ภาพที่ 58 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 8.418 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.325 AU สำหรับวันที่ 11 สิงหาคม 2011.....	73
ภาพที่ 59 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 11.493 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.356 AU สำหรับวันที่ 11 สิงหาคม 2011.....	73
ภาพที่ 60 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 4.032 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 1.408 AU สำหรับวันที่ 6 กันยายน 2017.....	74
ภาพที่ 61 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 5.309 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.914 AU สำหรับวันที่ 6 กันยายน 2017.....	74

ภาพที่ 62 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 6.685 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 1.531 AU สำหรับวันที่ 6 กันยายน 2017	75
ภาพที่ 63 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 8.418 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 1.532 AU สำหรับวันที่ 6 กันยายน 2017	75
ภาพที่ 64 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 11.493 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.475 AU สำหรับวันที่ 6 กันยายน 2017	76
ภาพที่ 65 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียมที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 1329.549 นาที่ สำหรับวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010	76
ภาพที่ 66 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียมที่ระดับพลังงาน 5.390 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 272.02 นาที่ สำหรับวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010.....	77
ภาพที่ 67 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียมที่ระดับพลังงาน 6.685 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 859.006 นาที่ สำหรับวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010.....	77
ภาพที่ 68 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียมที่ระดับพลังงาน 8.418 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 1004.1 นาที่ สำหรับวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010.....	78
ภาพที่ 69 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียมที่ระดับพลังงาน 11.493 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 1231.714 นาที่ สำหรับวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010	78
ภาพที่ 70 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียมที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 43.967 นาที่ สำหรับวันที่ 9 สิงหาคม 2011.....	79
ภาพที่ 71 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียมที่ระดับพลังงาน 5.390 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 97.695 นาที่ สำหรับวันที่ 9 สิงหาคม 2011.....	79
ภาพที่ 72 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียมที่ระดับพลังงาน 6.685 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 45.429 นาที่ สำหรับวันที่ 9 สิงหาคม 2011.....	80

ภาพที่ 73 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุซีเลียมที่ระดับพลังงาน 8.418 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 35.660 นาที่ สำหรับวันที่ 9 สิงหาคม 2011.....	80
ภาพที่ 74 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุซีเลียมที่ระดับพลังงาน 11.493 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 414.928 นาที่ สำหรับวันที่ 9 สิงหาคม 2011	81
ภาพที่ 75 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุซีเลียมที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 136 นาที่ สำหรับวันที่ 6 กันยายน 2017.....	81
ภาพที่ 76 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุซีเลียมที่ระดับพลังงาน 5.390 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 198 นาที่ สำหรับวันที่ 6 กันยายน 2017.....	82
ภาพที่ 77 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุซีเลียมที่ระดับพลังงาน 6.685 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 171 นาที่ สำหรับวันที่ 6 กันยายน 2017.....	82
ภาพที่ 78 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุซีเลียมที่ระดับพลังงาน 8.418 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 359 นาที่ สำหรับวันที่ 6 กันยายน 2017.....	83
ภาพที่ 79 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุซีเลียมที่ระดับพลังงาน 11.493 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 113 นาที่ สำหรับวันที่ 6 กันยายน 2017	83

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าปรากฏการณ์ทางธรรมชาติต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายนอกโลก มีอิทธิพลอย่างมากต่อโลกของเรา เนื่องจากเป็นปรากฏการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อหรือทำให้เกิดความเสียหายกับโลก ได้แก่ ปรากฏการณ์ที่เกิดจากดวงอาทิตย์ เนื่องจากบริเวณผิวของดวงอาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ทำให้มีนักวิทยาศาสตร์พยายามศึกษาเพื่อให้เข้าถึงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ เพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาไว้ล่วงหน้าก่อนที่จะเกิดความเสียหาย ปรากฏการณ์หนึ่งที่เกิดบนดวงอาทิตย์และส่งผลกระทบต่อโลกของเรา คือ ปรากฏการณ์การปะทุที่ผิวดวงอาทิตย์ (solar flare) เป็นการระเบิดใหญ่ที่เกิดขึ้นบนชั้นบรรยากาศของดวงอาทิตย์ชั้นโครโมสเฟียร์ (chromosphere) โดยเหตุการณ์ดังกล่าวสามารถส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า ระบบอิเล็กทรอนิกส์ และโทรคมนาคมในวงกว้าง ได้แก่ ระบบการสื่อสาร ระบบนำทาง ความเสียหายต่อดาวเทียม โรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ ชั้นบรรยากาศโลก การปะทุที่ผิวดวงอาทิตย์จะเกิดมากหรือน้อยสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงบนดวงอาทิตย์อย่างเป็นรอบวัฏจักรที่เรียกว่าวัฏจักรสุริยะ

วัฏจักรสุริยะ (solar cycle) 1 รอบจะใช้ระยะเวลาโดยประมาณ 11 ปี ซึ่งปัจจุบันดวงอาทิตย์อยู่ในรอบวัฏจักรที่ 24 เป็นรอบที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณจุดมืดรวมถึงการปะทุของดวงอาทิตย์ โดยการปะทุบนดวงอาทิตย์เป็นการระเบิดใหญ่ในบรรยากาศของดวงอาทิตย์ชั้นโครโมสเฟียร์ มักเกิดขึ้นเหนือรอยต่อระหว่างขั้วของสนามแม่เหล็ก เกิดขึ้นเมื่อพลังงานภายในสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นภายในชั้นบรรยากาศโครโมสเฟียร์ถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็วในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกือบทุกช่วงความยาวคลื่น ตั้งแต่คลื่นวิทยุ (radio wave) แสงที่ตามนุษย์มองเห็น (visible light) รังสีเอ็กซ์ (x-rays) และรังสีแกมมา (gamma rays) ส่วนใหญ่การปะทุที่ผิวดวงอาทิตย์จะเกิดในบริเวณกัมมันต์ (active regions) หรือบริเวณรอบ ๆ จุดบนดวงอาทิตย์ (sunspots) ซึ่งมีสนามแม่เหล็กความเข้มสูงออกมาจากผิวดวงอาทิตย์ชั้นโฟโตสเฟียร์ (photosphere) สู่อวกาศชั้นโคโรนา (corona) ในการปะทุแต่ละครั้งจะมีการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงออกมา (solar energetic particle)

เมื่ออนุภาคถูกปล่อยออกมาจากบริเวณพื้นผิวชั้นโคโรนาของดวงอาทิตย์ อนุภาคจะเคลื่อนที่เป็นเกลียวตามเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่อยู่ในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ (interplanetary medium) ซึ่งอนุภาคพลังงานสูงนั้นอยู่ในรูปของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเรียกว่า พลาสมา (plasma)

อนุภาคอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวเคลียสของธาตุหนักอื่น ๆ จะถูกเร่งความเร็วจนเข้าใกล้ความเร็วแสงภายในบรรยากาศชั้นโคโรนาของดวงอาทิตย์ โดยการปะทุจะปลดปล่อยพลังงานออกมาอย่างรุนแรง มีอุณหภูมิสูงถึงหลายล้านเคลวิน พร้อมกับปล่อยอนุภาคประจุไฟฟ้าออกมาอย่างรวดเร็ว

ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จะศึกษาลักษณะทางกายภาพ และการปะทุบนพื้นผิวดวงอาทิตย์รวมไปถึงการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ในลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเกลียวตามเส้นสนามแม่เหล็กแบบอาร์คิมิดีสบนมายังโลก ตลอดช่วงวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24 โดยใช้ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคพลังงานสูงที่ได้จากยานอวกาศ (advanced composition explorer, AEC) โดยเลือกเหตุการณ์การปะทุจริง ให้ครอบคลุมการปะทุในช่วงวัฏจักรที่ 24 (ค.ศ. 2008-2019) เลือกเหตุการณ์ที่มีความรุนแรงโดยดูจากค่าระดับของรังสีเอกซ์ที่มีความรุนแรงสูง การตรวจพบอนุภาคที่เดินทางมายังโลกมีความต่อเนื่องของข้อมูลตามเวลา งานวิจัยนี้จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยสมการขนส่งอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลก โดยใช้โปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาซีบนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ เพื่อวิเคราะห์หาระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากการปะทุบนดวงอาทิตย์มายังโลกเทียบกับการปะทุที่เกิดขึ้นจริงจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในช่วงวัฏจักรที่ 24 ดังนั้นข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาใช้ทำนาย และเตือนภัยล่วงหน้า เพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดจากการได้รับผลกระทบเนื่องจากอนุภาคพลังงานสูง

จุดมุ่งหมายของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาโครงสร้าง ลักษณะทางกายภาพ และการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ จากเหตุการณ์การปะทุที่เกิดขึ้นจริงตลอดช่วงวัฏจักรที่ 24
2. เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลอนุภาคพลังงานสูง และการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอวกาศที่เกิดขึ้นเนื่องจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ จากการศึกษาโดยยานอวกาศ
3. เพื่อศึกษาการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มายังโลกโดยสมการขนส่งอนุภาค และการแก้ปัญหาโดยวิธีการเชิงตัวเลข
4. วิเคราะห์การระเบิดบนดวงอาทิตย์ที่เหตุการณ์ในช่วงวัฏจักรที่ 24 จากเหตุการณ์การระเบิดจริง

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของดวงอาทิตย์ และลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงที่เกิดจากการปะทุบนดวงอาทิตย์ และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในรอบวัฏจักรที่ 24
2. วิเคราะห์ และเลือกเหตุการณ์การปะทุจริงที่สนใจ และศึกษาลักษณะการปะทุบนดวงอาทิตย์ จากข้อมูลของอนุภาคพลังงานสูงที่วัดได้จากยานอวกาศต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

3. ศึกษาสมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ และแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูง จากดวงอาทิตย์มายังโลก

4. จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ที่เคลื่อนที่มายังโลก ด้วยสมการการขนส่งอนุภาค และแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการเชิงตัวเลข โดยใช้โปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาซีบนระบบปฏิบัติการลินุกซ์

5. วิเคราะห์ระยะเวลาการปลดปล่อยของอนุภาคพลังงานสูงจากการปะทุบนดวงอาทิตย์ เทียบกับการปะทุที่เกิดขึ้นจริง สำหรับเหตุการณ์การปะทุในช่วงวัฏจักรที่ 24



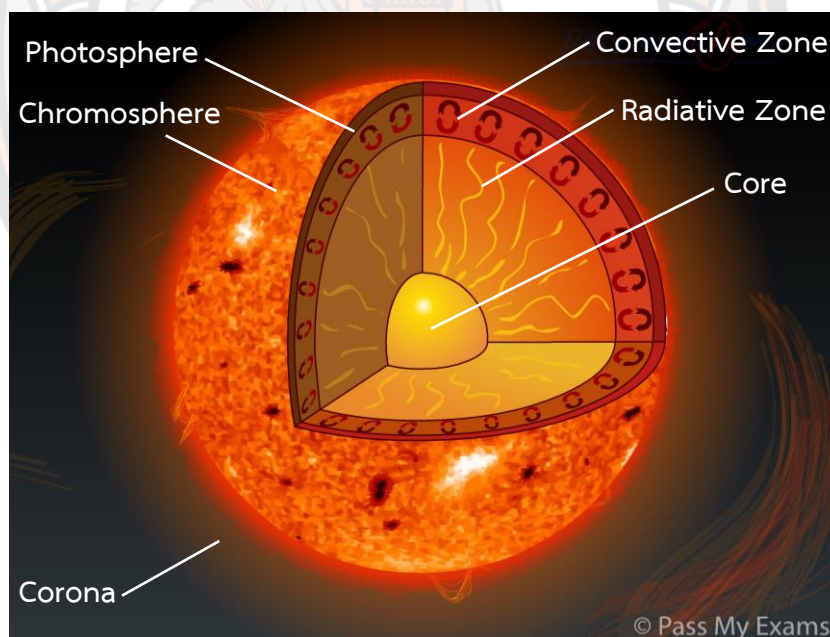
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงสร้างของดวงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ซึ่งเป็นศูนย์กลางของระบบสุริยะ (solar system) ที่มีโลก และดาวเคราะห์อื่นเป็นบริวาร โดยดวงอาทิตย์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4×10^6 กิโลเมตร หรือประมาณ 10^9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของโลก และมีมวลเท่ากับ 1.99×10^{30} กิโลกรัม หรือประมาณ 3×10^5 แสนเท่าของมวลโลก

ดวงอาทิตย์มีโครงสร้างประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ บริเวณใจกลาง บริเวณแผ่รังสี บริเวณพาความร้อน และชั้นบรรยากาศ โดยบรรยากาศชั้นในสุด คือ โฟโตสเฟียร์ ถัดขึ้นมาคือ โครโมสเฟียร์ และบรรยากาศชั้นนอกสุดคือ โคโรนา โครงสร้างดังกล่าวมีความสำคัญกับกระบวนการกำเนิดพลังงานภายในดวงอาทิตย์ และถ่ายเทพลังงานออกมาสู่อวกาศภายนอก แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างของดวงอาทิตย์ [1]

โครงสร้างภายในของดวงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่

1. ใจกลางหรือแกนของดวงอาทิตย์ (core) แกนของดวงอาทิตย์เป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1.5×10^7 เคลวิน ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ฟิวชัน และปลดปล่อยพลังงานออกมาจำนวนมาก
2. ชั้นการแผ่รังสี (radiation zone) เป็นบริเวณที่อยู่เหนือชั้นมาจากแกนกลางของดวงอาทิตย์ ชั้นการแผ่รังสีจะเป็นส่วนรับ และดูดกลืนรังสีที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นในแกนกลางของดวงอาทิตย์ และถ่ายเทพลังงานออกมาในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อุณหภูมิของชั้นนี้จะลดลงตามรัศมีที่เพิ่มขึ้น
3. ชั้นการพาความร้อน (convective zone) เป็นชั้นที่รับพลังงานความร้อนขึ้นมาจากชั้นการแผ่รังสี และถ่ายเทพลังงานออกสู่ผิวชั้นนอกของดวงอาทิตย์โดยการเคลื่อนที่ของก๊าซ

ชั้นบรรยากาศของดวงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 3 ชั้น ได้แก่

1. โฟโตสเฟียร์ (photosphere) เป็นชั้นแสงสว่างของดวงอาทิตย์ที่เรามองเห็นเป็นดวงสว่าง มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 4,000-6,000 เคลวิน เป็นชั้นบาง ๆ แต่มีความสว่างมาก
2. โครโมสเฟียร์ (chromosphere) เป็นบรรยากาศชั้นบาง ๆ สูงขึ้นจากชั้นโฟโตสเฟียร์ มีอุณหภูมิ 6,000-20,000 เคลวิน เป็นชั้นที่เกิดปรากฏการณ์ รุนแรงบนดวงอาทิตย์ เช่น พวยก๊าซ (prominence) การปะทุซึ่งเป็นการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ออกสู่อวกาศระหว่างดาวเคราะห์ และเกิดก๊าซร้อนเป็นไอพ่นขึ้นสู่ระดับสูงที่เรียกว่า “สปิคูล” [2]
3. โคโรนา (corona) เป็นบรรยากาศชั้นนอกสุดของดวงอาทิตย์ มีอุณหภูมิสูงประมาณ 1×10^6 เคลวิน แผ่บริเวณมากกว่า 5 เท่าของตัวดวงอาทิตย์ มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปตามปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในตัวดวงอาทิตย์ สามารถมองเห็นบรรยากาศชั้นนี้ได้ขณะเกิดสุริยุปราคาเต็มดวง เมื่อดวงจันทร์เคลื่อนบังส่วนโฟโตสเฟียร์จะเห็นเป็นแสงสว่างแผ่ออกมาโดยรอบ [3](1)

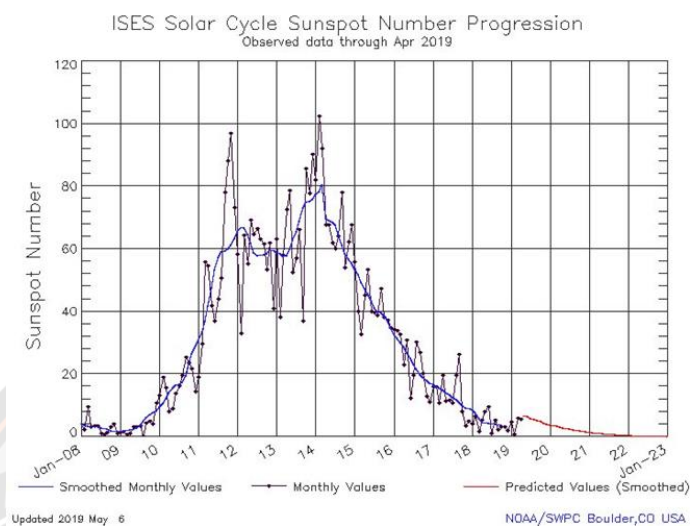
องค์ประกอบทางเคมีของดวงอาทิตย์โดย มวลสาร 70.67% ของดวงอาทิตย์เป็นไฮโดรเจน และ 27.43% เป็นฮีเลียม ส่วนที่เหลือจะเป็นคาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน และโลหะต่าง ๆ มวลสารของดวงอาทิตย์มีสถานะเป็นพลาสมา กล่าวคือ ประกอบด้วยไอออนบวก และอิเล็กตรอนอิสระ

ดวงอาทิตย์มีระยะห่างจากโลกเฉลี่ยประมาณ 1.5×10^{11} เมตร หรือประมาณ 150 ล้านกิโลเมตร นักวิทยาศาสตร์ได้กำหนดระยะทางนี้ว่า 1 หน่วยดาราศาสตร์ (astronomical unit; AU) และใช้หน่วยนี้บอกระยะทางในระบบสุริยะ [4](2)

วัฏจักรสุริยะ (Solar cycle)

วัฏจักรสุริยะ คือ รอบของการเปลี่ยนแปลงปริมาณจุดมืดบนดวงอาทิตย์ สำหรับ 1 รอบวัฏจักรสุริยะจะใช้ระยะเวลาประมาณ 11 ปี ปริมาณของจุดมืดนั้นในช่วงต่ำสุด (solar minimum) อาจมีเพียง 2-3 จุด แต่ในช่วงที่มีมากที่สุด (solar maximum) อาจมีมากกว่า 160-200 จุด ในช่วงเริ่มวัฏ

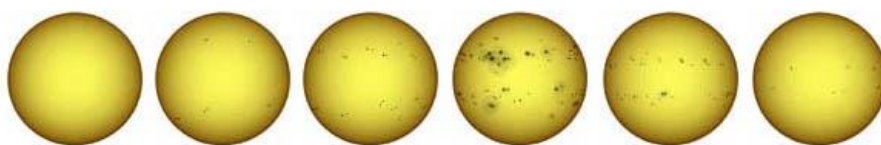
จักรหรือรอบใหม่จะมีปริมาณของจุดมืดน้อย และจะมีปริมาณจุดมืดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และมากที่สุด ในช่วงกลางวัฏจักรแล้วค่อยๆ น้อยลงในช่วงปลายวัฏจักรก่อนจะเริ่มนับรอบใหม่อีกครั้ง โดยการเริ่มวัฏจักรสุริยะใหม่เป็นช่วงที่ขั้วแม่เหล็กของดวงอาทิตย์เกิดการสลับขั้วเหนือขั้วใต้



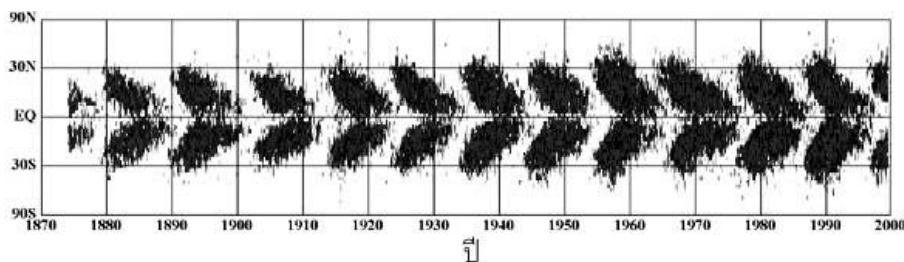
ภาพที่ 2 แสดงจำนวนจุดมืดบนดวงอาทิตย์ในช่วงปี 2008-2019 [5]

จากภาพที่ 2 แสดงถึงแผนภูมิแสดงจุดดำบนดวงอาทิตย์ในรอบวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24 เริ่มต้นตั้งแต่ปี 2008 โดยปริมาณของจุดมืดเพิ่มขึ้นสูงสุด และได้ค่อยๆ ลดลงมาหลังปี 2014 จากภาพปริมาณจุดมืดจะลดลงต่ำสุดในช่วงปี 2019 เพื่อจะเริ่มเข้าสู่วัฏจักรสุริยะที่ 25 ต่อไป [6]

ตำแหน่งของการเกิดจุดดำ หลังจากดวงอาทิตย์ผ่านช่วงต่ำสุดและกำลังจะเริ่มวัฏจักรใหม่ จุดดำจะเกิดขึ้นที่บริเวณละติจูดประมาณ 35 องศา ทั้งซีกเหนือและซีกใต้ หลังจากนั้นจุดดำจะเลื่อนไหลไปรอบ ๆ ดวงอาทิตย์ตามการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ พร้อมเคลื่อนเข้าหาเส้นศูนย์สูตรอย่างช้า ๆ แต่ก็บริเวณเส้นศูนย์สูตรไม่พบจุดดำเนื่องจากบริเวณนี้จุดดำสลายตัวไป แสดงดังภาพที่ 3 จุดดำที่เกิดขึ้นใหม่จะเกิดขึ้นที่ละติจูดเริ่มต้นต่ำ แล้วเคลื่อนเข้าหาเส้นศูนย์สูตรในลักษณะเดียวกัน จุดเริ่มต้นของการเกิดจุดดำจะเปลี่ยนตำแหน่งแบบนี้เรื่อย ๆ จนกระทั่งใกล้ถึงช่วงต่ำสุดของวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ละติจูดเฉลี่ยประมาณ 7 องศา ทั้งซีกเหนือและซีกใต้ และเมื่อนำตำแหน่งของจุดดำมาเขียนเป็นแผนภูมิ โดยให้แกนนอนเป็นเวลา และแกนตั้งเป็นละติจูดของจุดดำ แผนภูมิที่ได้จะมีลักษณะเหมือนผีเสื้อมาเรียงต่อกัน แผนภูมินี้จึงมีชื่อเรียกเฉพาะว่า แผนภูมिरูปผีเสื้อ (butterfly diagram) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 3 ตัวอย่างปริมาณจุดดำบนดวงอาทิตย์ตั้งแต่เริ่มต้นวัฏจักร ถึงช่วงท้ายวัฏจักร

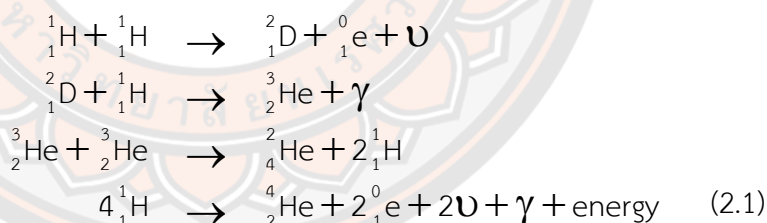


ภาพที่ 4 ละติจูดของจุดดำที่เกิดขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2413-2543

ปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ (Thermonuclear Reaction)

ในเอกภพมีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนมากที่สุด เช่นเดียวกับบนดวงอาทิตย์ ซึ่งบริเวณใจกลางดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิประมาณ 15×10^6 K ปกติแล้วนิวเคลียส 2 นิวเคลียสจะผลัดกันตามแรงดึงดูด เนื่องจากมีประจุบวกเหมือนกัน แต่ที่แกนกลางของดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงมากพอและมีความหนาแน่นมากจนกระทั่งนิวเคลียสทั้งสองสามารถเอาชนะแรงดึงดูดและเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันได้ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันบนดวงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 2 ปฏิกิริยา คือ วัฏจักร CNO และปฏิกิริยาโปรตอน-โปรตอน (proton-proton)

1. ปฏิกิริยาโปรตอน-โปรตอน หรือ P-P Chain เป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ประเภทฟิวชันที่เกิดการรวมตัวกันของอะตอมที่มีขนาดเล็กหรือน้ำหนักเบา เกิดเป็นอะตอมของธาตุขนาดใหญ่หรือมีน้ำหนักมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาฟิวชันเกิดจากการรวมกันของอะตอมไฮโดรเจน 4 ตัว ได้เป็นอะตอมฮีเลียม โดยมีกระบวนการดังนี้



จากสมการที่ (2.1) แสดงได้ว่าปฏิกิริยาโปรตอน-โปรตอน เกิดจากโปรตอนของไฮโดรเจน 4 ตัว รวมกันเป็นนิวเคลียสของฮีเลียม 1 ตัว อนุภาคโพซิตรอน 2 ตัว อนุภาคนิวตริโน 2 ตัว รังสีแกมมา และพลังงาน

เนื่องจากมวลของโปรตอน 1 อนุภาค = 1.6726×10^{-27} kg

มวลของโปรตอน 4 อนุภาค = 6.6904×10^{-27} kg

มวลของฮีเลียม 1 อะตอม = 6.6447×10^{-27} kg

ดังนั้น มวลที่หายไป = $(6.6904 \times 10^{-27}) - (6.6447 \times 10^{-27})$ kg = 4.57×10^{-29} kg

มวลที่หายไปเปลี่ยนเป็นโฟตอนของรังสีแกมมา โดยสามารถคำนวณหาพลังงานได้จากสมการมวล-พลังงานของอัลเบิร์ตไอน์สไตน์ คือ

$$E = mc^2$$

$$E = (4.57 \times 10^{-29} \text{ kg}) (3 \times 10^8 \text{ m/s}^2)$$

$$E = 4.11 \times 10^{-12} \text{ J}$$

เมื่อ E คือ พลังงานซึ่งเปลี่ยนรูปมาจากมวลสาร (J)

M คือ มวลสาร (kg)

C คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 (m/s) [7]

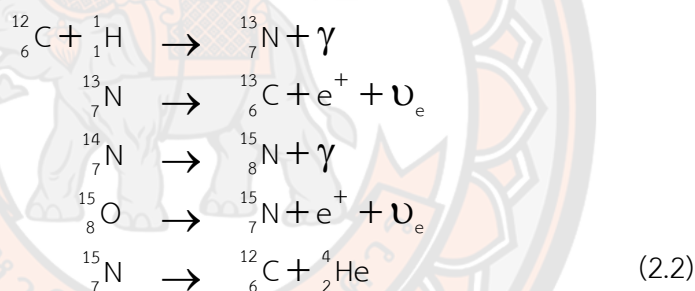
เมื่อ $1 \text{ eV} = 1.60201 \times 10^{-19} \text{ J}$ ทำการแปลงหน่วยจาก J ให้เป็น eV จะได้ว่า

$$E = \frac{4.11 \times 10^{-12}}{1.60201 \times 10^{-19}} \text{ eV}$$

$$E = 38.70 \text{ MeV}$$

ดังนั้น ในการเกิดปฏิกิริยา 1 ครั้ง มีค่าพลังงานเกิดขึ้น 38.70 MeV

2. วัฏจักร CNO (Carbon – Nitrogen – Oxygen Cycle) เป็นปฏิกิริยาที่มีการสร้างฮีเลียมจากไฮโดรเจนเกิดเป็นคาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจนออกมา โดยมีกระบวนการดังนี้

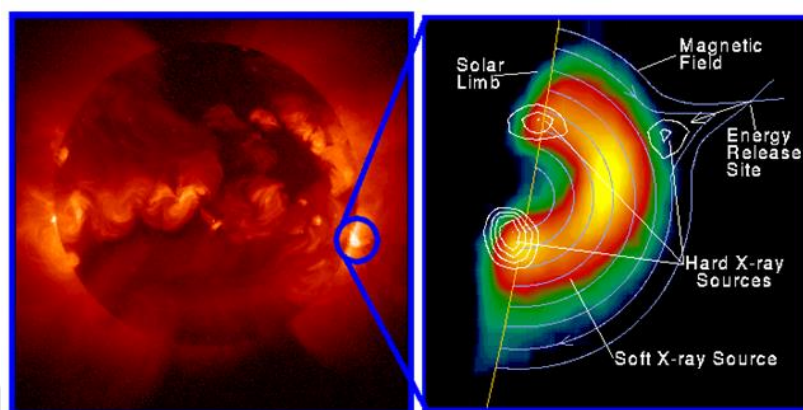


พลังงานที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในรูปของรังสีแกมมาจะแผ่กระจายออกจากบริเวณต้นกำเนิดในใจกลางของดวงอาทิตย์ และเนื่องจากเนื้อสารของดวงอาทิตย์ประกอบด้วยอะตอมของธาตุต่าง ๆ มีปริมาณมากอยู่ส่วนใจกลาง รังสีแกมมาจึงไม่ทะลุผ่านออกมาถึงพื้นผิวดวงอาทิตย์ได้ แต่จะถ่ายเทเป็นรังสีซึ่งมีพลังงานน้อยกว่า กลายเป็นแสงสว่างและความร้อน แผ่กระจายจากผิวดวงอาทิตย์ออกสู่อวกาศ

การระเบิดอย่างรุนแรงบนดวงอาทิตย์ (Solar flare)

การระเบิดอย่างรุนแรงบนดวงอาทิตย์หรือที่เรียกว่า Solar flare เป็นการระเบิดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแปรปรวนบนดวงอาทิตย์ทำให้มีพลังงานมากพอที่จะสามารถชนะแรงดึงดูดของเส้นสนามแม่เหล็กทำให้เกิดการไหลของอนุภาคที่มีพลังงานสูงจำนวนมากออกสู่อวกาศระหว่างดาวเคราะห์ ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตั้งแต่คลื่นวิทยุ แสงที่ตามนุษย์มองเห็น รังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา แสดงถึงภาพที่ 5 การระเบิดบนดวงอาทิตย์จะเพิ่มความรุนแรงมากขึ้น ถ้าเกิดการปล่อยมวลสารจากชั้นบรรยากาศนอกสุดของดวงอาทิตย์ที่เรียกว่าชั้นโคโรนาตามมา (Coronal Mass Ejection; CMEs)

ทำให้อนุภาคที่ออกจากดวงอาทิตย์มีความรุนแรงมากขึ้น และสามารถเคลื่อนที่มายังโลกได้ยาวนานขึ้นและมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยอัตราการเกิดการปะทุบนดวงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับวัฏจักรสุริยะ ใน 1 รอบวัฏจักรสุริยะใช้เวลาประมาณ 11 ปี ช่วงสูงสุดของวัฏจักรดวงอาทิตย์จะเกิดจุดมืดจำนวนมาก ซึ่งมีผลทำให้การปะทุเกิดขึ้นได้บ่อยครั้ง



ภาพที่ 5 ลักษณะการปะทุของดวงอาทิตย์ในย่านรังสีเอกซ์ แสดงถึงเส้นขอบความเข้มของรังสีเอกซ์พลังงานสูง และเส้นแรงแม่เหล็กที่วนเป็นวงขณะที่เกิดการปะทุบนดวงอาทิตย์ [8]

การปะทุส่วนมากจะเกิดบริเวณกัมมันต์หรือรอบ ๆ จุดมืดบนดวงอาทิตย์ ซึ่งมีสนามแม่เหล็กความเข้มสูงออกมาจากผิวดวงอาทิตย์ชั้นโฟโตสเฟียร์สู่บรรยากาศชั้นโคโรนา อนุภาคอิเล็กตรอน โปรตอน และนิวเคลียสของธาตุหนักอื่น ๆ จะถูกเร่งความเร็วจนเข้าใกล้ความเร็วแสงภายในบรรยากาศชั้นโคโรนาของดวงอาทิตย์ โดยกระบวนการเกิดการปะทุของดวงอาทิตย์ สามารถแยกช่วงของการเกิดได้เป็น 3 ระยะ ได้แก่

1. ระยะก่อนปรากฏการณ์ (precursor stage) จะมีการกระตุ้นการปลดปล่อยพลังงานของสนามแม่เหล็กออกมา ทำให้รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (soft x-ray) แผ่ออกมาในระยะนี้
2. ระยะกระตุ้น (impulsive stage) ซึ่งเป็นระยะที่โปรตอน และอิเล็กตรอน ถูกเร่งจนมีพลังงานจลน์มากกว่า 1 MeV ซึ่งทำให้ระยะนี้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาหลายช่วงคลื่น เช่น คลื่นวิทยุ รังสีเอกซ์พลังงานสูง (hard x-ray) และรังสีแกมมา
3. ระยะการสลายตัวของรังสี (decay stage) ในระยะนี้ความเข้มของรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (soft x-ray) จะค่อยๆ ลดลง การปะทุจะขยายตัวสู่บรรยากาศชั้นโคโรนาที่เป็นบรรยากาศชั้นนอกสุดของดวงอาทิตย์ ประกอบด้วยแก๊สที่มีความหนาแน่นต่ำ แต่มีอุณหภูมิสูงนับล้านองศาเคลวิน ซึ่งสามารถมองเห็นได้ในช่วงความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำ

การปะทุของดวงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะทางกายภาพ คือ

1. การปะทุแบบทันทีทันใด (Impulsive Solar Flare) เป็นการปะทุที่มีการปลดปล่อยจำนวนอนุภาคอิเล็กตรอนในปริมาณที่สูง ใช้เวลาในการปลดปล่อยพลังงานอนุภาคในเวลาสั้น ซึ่งเวลาการปลดปล่อยจะน้อยกว่า 30 นาที โดยความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่ออนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่ผ่านโลก การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน Fe/O และ $^3\text{He} / ^4\text{He}$ มีค่าเป็น 4 เท่าของค่าที่พบในโคโรนา และจะไม่มี การปลดปล่อยมวลสารจากชั้นโคโรนาตามมาที่หลังการปะทุ ลมสุริยะมีความเร็วและรุนแรงอยู่ในระดับปกติ (ประมาณ 400 km/hr) มักไม่เกิดปรากฏการณ์คลื่นกระแทกตามมา

2. การปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual Solar Flares) เป็นการปะทุที่มีการปลดปล่อยจำนวนอนุภาคพลังงานสูง ได้แก่ โปรตอนจำนวนมาก การปะทุในลักษณะนี้จะเกิดการเร่งอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์หรือเรียกว่า การปลดปล่อยอนุภาคมวลสารจากชั้นโคโรนา ลมสุริยะมีความเร็วและรุนแรงอยู่ในระดับปกติขึ้นจนกลายเป็นพายุสุริยะ โดยการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปส่วนใหญ่จะใช้เวลาในการปลดปล่อยอนุภาคนานมากกว่า 30 นาที [9]

ระดับความรุนแรงในการปะทุบนดวงอาทิตย์

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่งออกมาจากดวงอาทิตย์ที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนและมีความเกี่ยวเนื่องตลอดช่วงการเกิดการปะทุบนดวงอาทิตย์ ก็คือ รังสีเอกซ์ การจำแนกระดับความรุนแรงของการปะทุบนดวงอาทิตย์ เราจะใช้รังสีเอกซ์เป็นเกณฑ์ในการแยกประเภทการปะทุ โดยรังสีเอกซ์มีความสว่างที่ความยาวคลื่นอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ระดับของรังสีเอกซ์ [10] จะแบ่งตามระดับความรุนแรงของการปะทุ ดังนี้ ขนาดเล็กที่สุดจะอยู่ในระดับ A ตามด้วย B, C, M และ X ซึ่งแสดงถึงพลังงานที่เกิดจากการปะทุเพิ่มขึ้น 10 เท่าของแต่ละตัวอักษร ตัวอย่างเช่น ระดับ X จะมีพลังงาน 10 เท่า ของระดับ M และมีค่าพลังงานเป็น 100 เท่าของระดับ C นอกจากนี้ตัวอักษรแต่ละตัวจะมีตัวเลขบอกระดับขนาด 1-9 ระดับ ความเข้มรังสีสูงสุดอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.1-0.8 nm ของรังสีเอกซ์ซึ่งวัดได้บริเวณใกล้โลก [11] แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงการจำแนกระดับความรุนแรงของการปลดปล่อยรังสีเอกซ์

ระดับการปะทุ (Class)	ความเข้มรังสีเอกซ์ (W/m^2)
A	10^{-8} - 10^{-7}
B	10^{-7} - 10^{-6}
C	10^{-6} - 10^{-5}
M	10^{-5} - 10^{-4}
X	$>10^{-4}$

ในแต่ละระดับการประทุบนดวงอาทิตย์อาจส่งผลกระทบต่อโลกได้แตกต่างกันไปตามความรุนแรงที่เกิดขึ้น ดังนี้

X class flare เป็นรังสีเอกซ์ที่มีระดับความรุนแรงสูงมาก ส่วนใหญ่ก่อให้เกิดคลื่นวิทยุตลอดทั่วดาวเคราะห์ และมีระยะเวลาการปลดปล่อยที่ยาวนาน โดยมีความรุนแรงตั้งแต่ 10^{-4} วัตต์ต่อตารางเมตร ขึ้นไป

M class flare เป็นรังสีเอกซ์ที่มีระดับความรุนแรงปานกลาง โดยทั่วไปจะปลดปล่อยคลื่นวิทยุขนาดสั้นซึ่งเป็นต้นเหตุที่มีผลกระทบต่อขั้วโลกเหนือ โดยมีความรุนแรงอยู่ในช่วง 10^{-5} - 10^{-4} วัตต์ต่อตารางเมตร

C class flare เป็นรังสีเอกซ์ที่มีระดับความรุนแรงน้อย มีผลกระทบต่อโลกน้อยมาก โดยมีความรุนแรงอยู่ในช่วง 10^{-6} - 10^{-5} วัตต์ต่อตารางเมตร

B class flare เป็นรังสีเอกซ์ที่มีระดับความรุนแรงน้อยมาก ไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อโลก โดยมีความรุนแรงอยู่ในช่วง 10^{-7} - 10^{-6} วัตต์ต่อตารางเมตร

A class flare เป็นรังสีเอกซ์ที่มีระดับความรุนแรงปกติ ไม่ส่งผลกระทบต่อโลก โดยมีความรุนแรงอยู่ในช่วง 10^{-8} - 10^{-7} วัตต์ต่อตารางเมตร [12], [13]

ลมสุริยะ (Solar wind)

ลมสุริยะ คือ การไหลของอนุภาคพลังงานสูงของดวงอาทิตย์เข้าสู่ที่ว่างระหว่างดาวเคราะห์ ซึ่งมีต้นกำเนิดจากบรรยากาศชั้นโคโรนาของดวงอาทิตย์ โดยมีองค์ประกอบเป็นธาตุไฮโดรเจน (H) ร้อยละ 95 แอลฟา (${}^4\text{He}$) ร้อยละ 4 และธาตุอื่น ๆ จากการเกิดปฏิกิริยาฟิวชัน CNO ร้อยละ 1 ซึ่งชั้นบรรยากาศโคโรนานี้มีอุณหภูมิสูงถึง 10^6 เคลวิน โดยที่อนุภาคพลังงานสูงนี้จะเคลื่อนที่จากชั้นบรรยากาศโคโรนาของดวงอาทิตย์สู่ที่ว่างระหว่างดาวเคราะห์เนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาคในชั้นโคโรนาที่สูงกว่าความหนาแน่นในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ทำให้อนุภาคไหลออกจากชั้นโคโรนาได้ อนุภาคที่ไหลออกจากชั้นโคโรนานี้เราเรียกว่า พลาสมา และเนื่องจากอนุภาคที่ไหลออกมานั้นมีประจุไฟฟ้าจึงถูกพาให้เคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ออกมาจากดวงอาทิตย์ โดยลมสุริยะนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงประมาณ 450 km/s ใช้เวลาเดินทางมายังโลกประมาณ 4 วัน แต่อัตราเร็วของลมสุริยะนั้นก็ยังคงขึ้นอยู่กับละติจูด โดยลมสุริยะที่เกิดบริเวณขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ของดวงอาทิตย์จะมีอัตราเร็วมากกว่าลมสุริยะที่เกิดบริเวณเส้นศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์ เมื่ลมสุริยะแผ่มาถึงโลกอนุภาคพลังงานสูงจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลก โดยปกติลมสุริยะจะไม่ทำอันตรายกับชั้นบรรยากาศหรือสิ่งมีชีวิตบนโลก เนื่องจากโลกมีสนามแม่เหล็กหุ้มอยู่โดยรอบ แต่ที่บริเวณขั้วโลกเหนือและใต้เป็นบริเวณที่เส้นสนามแม่เหล็กมีรัศมีความโค้งน้อย ดังนั้นอนุภาคบางส่วนจะสามารถวิ่งตามเส้นสนามแม่เหล็กลงมาใกล้ผิวโลกและถ่ายเท

พลังงานให้กับบรรยากาศชั้นบน ทำให้โมเลกุลของก๊าซในบรรยากาศถูกกระตุ้น หลังจากนั้นโมเลกุลของก๊าซในชั้นบรรยากาศจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงเกิดเป็นแสงสีต่าง ๆ เรียกว่า แสงเหนือแสงใต้ (Aurora)

การปะทุอย่างรุนแรงของดวงอาทิตย์ที่มาพร้อมกับลมสุริยะ นอกจากทำให้เกิดปรากฏการณ์แสงเหนือแสงใต้แล้วยังส่งผลกระทบต่ออีกอย่าง คือ ผลกระทบกับดาวเทียม อนุภาคพลังงานสูงในลมสุริยะสามารถชนกับแผงโซลาร์เซลล์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมดาวเทียม บางครั้งอาจทำให้บนพื้นโลกไม่สามารถสื่อสารกับดาวเทียมได้ ข้อมูลสูญหายใช้งานไม่ได้ เพื่อความปลอดภัยควรปิดการใช้งานในขณะที่มีการปะทุ เพราะความรุนแรงของลมสุริยะจะทำให้เกิดความเสียหายน้อยลง บางครั้งมีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เช่น การสื่อสารทางคลื่นวิทยุ ในบางครั้งทางทหารเรือและทหารอากาศในสหรัฐ จะได้รับผลกระทบของอนุภาคพลังงานสูงที่เดินทางมายังโลก และมีผลต่อการสื่อสารกับเรือหรือเครื่องบิน การทหารสหรัฐฯ จึงสนใจทุ่มเทงบประมาณเพื่อศึกษาวิจัยเกี่ยวกับดวงอาทิตย์ และพายุสุริยะ [14]

การปล่อยมวลสารจากโคโรนา (Coronal Mass Ejection; CME)

การปลดปล่อยมวลสารจากโคโรนาเป็นปรากฏการณ์ที่ดวงอาทิตย์มีการปลดปล่อยมวลสารจากชั้นบรรยากาศโคโรนาของดวงอาทิตย์ออกมา อนุภาคที่ถูกปลดปล่อยออกมาเป็นอนุภาคที่มีประจุและพลังงานสูงซึ่งถูกปล่อยตามออกมาด้วยความเร็วสูงถึงพันกิโลเมตรต่อวินาที การปล่อยมวลสารจากโคโรนานี้มักจะเกิดร่วมกับการปะทุที่ผิวดวงอาทิตย์แบบค่อยเป็นค่อยไป แต่ในบางครั้งการปล่อยมวลสารจากดวงอาทิตย์อาจเกิดขึ้น โดยไม่เกิดการปะทุที่ผิวกี่ได้

โดยเหตุการณ์การปล่อยมวลสารที่โคโรนาจะเริ่มจากสนามแม่เหล็กแบบคู่ขั้วจากโพรงดวงอาทิตย์ (Solar hole) โดยขยายตัวออกไปในชั้นโคโรนา จากนั้นเส้นสนามแม่เหล็กบางเส้นเชื่อมต่อกันอีกครั้ง จุดที่เชื่อมต่อกันค่อย ๆ ขยายตัวสูงขึ้น ซึ่งภายในเส้นสนามแม่เหล็กบรรจุมวลสารไว้ จนในที่สุดความดันภายในเส้นสนามแม่เหล็กสามารถชนะแรงดึงของสนามแม่เหล็กแล้วปลดปล่อยมวลสารออกมา การปล่อยมวลสารจากโคโรนาขนาดใหญ่จะมีมวลสาร มวลสารของดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปอย่างรวดเร็วในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์และกระแทกกับดาวเคราะห์และยานอวกาศที่อยู่ในเส้นทางของมวลสาร ขณะที่ดวงอาทิตย์ในช่วงสูงสุดของวัฏจักรจะปล่อยมวลสารจากโคโรนาประมาณ 3 ครั้งต่อวัน อย่างไรก็ตามขณะที่ดวงอาทิตย์อยู่ในช่วงต่ำสุดของวัฏจักร ดวงอาทิตย์จะปล่อยมวลสารจากโคโรนาเพียง 1 ครั้งต่อ 5 วันเท่านั้น ความเร็วสูงสุดของมวลสารจากดวงอาทิตย์จะมีความเร็วสูงถึง 2,000 กิโลเมตรต่อวินาที :ซึ่งมีความเร็วมากเมื่อเทียบกับลมสุริยะซึ่งมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 400 กิโลเมตรต่อวินาที ความเร็วที่มากนี้ทำให้เกิดการปะทะกัน และเกิดคลื่นกระแทกในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ [12], [13]

คลื่นกระแทก (Shock wave) คือ บริเวณที่ของไหลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วพบในของไหลด้วยกันหรือของไหลกับสิ่งกีดขวาง โดยพิจารณาคลื่นกระแทกที่ความไม่ต่อเนื่องของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความดัน ความเร็วของของไหล และอื่น ๆ โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่คลื่นกระแทกยังไม่เคลื่อนที่ผ่านซึ่งเรียกว่า ด้านหน้าของคลื่นกระแทก (upstream) และส่วนที่คลื่นกระแทกเคลื่อนที่ผ่านไปแล้วเรียกว่าด้านหลังของคลื่นกระแทก (downstream)

รังสีคอสมิกหรืออนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ถูกเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นจากการเร่งของคลื่นกระแทก อนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่เข้าไปในสนามแม่เหล็กที่มีความไม่เรียบ (turbulent field line) อนุภาคสามารถสะท้อนกลับถ้าชนกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นมาก ณ จุดที่เกิดคลื่นกระแทก และเส้นสนามที่ไม่เรียบคือสิ่งกีดขวางในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ถ้าอนุภาคส่วนหน้าของคลื่นกระแทกชนกับความไม่เรียบของสนามแม่เหล็กจะทำให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น และเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่กลับมายังบริเวณด้านหลังของคลื่นกระแทกก็จะไปชนกับความไม่เรียบของสนามแม่เหล็กอีกผลของการชนคืออนุภาคมีความเร็วลดลง ดังนั้นวัฏจักรของการชนอนุภาคมีทั้งได้รับและสูญเสียอย่างไรก็ตามท้ายที่สุดจะได้รับพลังงาน จึงเป็นเหตุผลว่าการไหลของพลาสมาบริเวณด้านหน้าของคลื่นกระแทก จะมีความเร็วมากกว่าการไหลพลาสมาบริเวณด้านหลังของคลื่นกระแทก [15]

รังสีคอสมิก (Cosmic rays)

รังสีคอสมิก คือ อนุภาคพลังงานสูงที่กระจายอยู่ทั่วไปในอวกาศ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วแสงและพุ่งเข้าชนกับสนามแม่เหล็กในทุกทิศทุกทาง อนุภาคพลังงานสูงเหล่านี้เรียกรวม ๆ ว่ารังสีคอสมิก สามารถจำแนกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้โดยใช้แหล่งกำเนิดอนุภาคเป็นตัวจำแนกได้ดังนี้

1. อนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ (Solar energetic particle; SEPs)

คือ รังสีคอสมิกหรืออนุภาคพลังงานสูงที่มาจากดวงอาทิตย์ อนุภาคเหล่านี้เกิดจากการระเบิดที่บริเวณผิวของดวงอาทิตย์ และถูกเร่งให้มีพลังงานสูงจากอิทธิพลแวลดล้อม เช่น ลมสุริยะ มีค่าพลังงานอยู่ในช่วง $10^5 - 10^7$ eV องค์ประกอบส่วนใหญ่ประกอบด้วย อนุภาคโปรตอน (proton) และอนุภาคนิวตรอน (neutron)

2. อนุภาคพลังงานสูงจากกาแล็กซี (Galactic cosmic ray; GCRs)

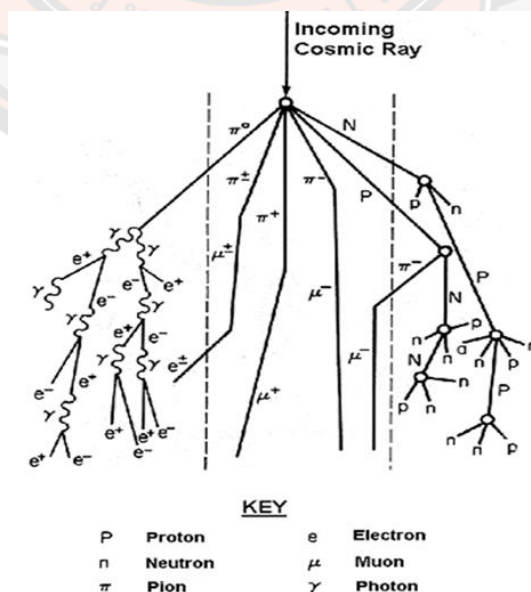
คือ รังสีคอสมิก หรืออนุภาคพลังงานสูงที่มาจากระบบสุริยะ ถูกเร่งโดยกระบวนการของกาแล็กซีทางช้างเผือก อนุภาคส่วนใหญ่เป็นอนุภาคโปรตอน มีพลังงานอยู่ในช่วง $10^7 - 10^{19}$ eV อนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่เข้ามายังโลกตลอดเวลา แต่เมื่อมีเหตุการณ์การระเบิดที่รุนแรงในชั้น

บรรยากาศของดวงอาทิตย์อนุภาคเหล่านี้ได้รับอิทธิพลจากคลื่นกระแทกทำให้ปริมาณของอนุภาคพลังงานสูงที่มาจากนอกระบบสุริยะนี้ลดลง

3. อนุภาคพลังงานสูงจากนอกกาแล็กซี (Extragalactic cosmic rays; EGCRs)

คือ อนุภาคพลังงานสูงที่มาจากนอกกาแล็กซีบางครั้งอาจเคลื่อนที่เข้ามาในระบบสุริยะได้ เช่น การระเบิดซูเปอร์โนวา อาจมีพลังงานสูงสุดถึง 10^{20} eV

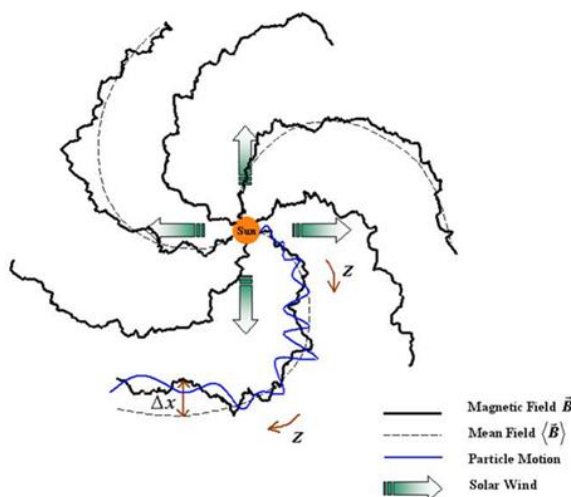
รังสีคอสมิกส่วนใหญ่เป็นอนุภาคที่มีประจุ เกิดการเบี่ยงเบนได้ในสนามแม่เหล็กโลก รังสีคอสมิกมีพลังงานสูงมากโดยมีพลังงานอยู่ระหว่าง 100 MeV ถึง 10 GeV บางครั้งอาจสูงถึง 10^{20} eV ซึ่งสูงกว่าพลังงานของอนุภาคที่อยู่บนโลกประมาณหนึ่งล้านเท่า รังสีคอสมิกที่อยู่นอกอวกาศก่อนที่จะเคลื่อนที่มาชนกับชั้นบรรยากาศของโลกเราเรียกว่า รังสีคอสมิกปฐมภูมิ (primary cosmic rays) ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยโปรตอนประมาณ 90% อนุภาคแอลฟาหรือไอออนของธาตุอื่น ๆ มีประมาณ 9% และอิเล็กตรอนประมาณ 1% เมื่อรังสีคอสมิกพุ่งเข้าชนกับชั้นบรรยากาศของโลกจะเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคต่างๆ เราเรียกว่ารังสีคอสมิกทุติยภูมิ (secondary cosmic ray) ประกอบไปด้วยอนุภาคไพออน (pion, π) อนุภาคไพออนจะสลายตัวอย่างรวดเร็วเกิดเป็นอนุภาคมิวออน (mion, μ) อนุภาคนิวตรอน (neutron, n) และรังสีแกมมา (gamma, γ) การแตกตัวของรังสีคอสมิกสามารถแสดงดังภาพที่ 6 อนุภาคเหล่านี้จะถูกชั้นบรรยากาศโลกดูดกลืนแล้วลดจำนวนลงตามระดับความสูงจากชั้นบรรยากาศถึงพื้นผิวโลก ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานรังสีคอสมิกปฐมภูมิ การที่อนุภาคพุ่งเข้าชนกับชั้นบรรยากาศโลกในแต่ละครั้งมีระดับพลังงานที่ไม่เท่ากัน ทำให้โอกาสที่จะตรวจพบอนุภาคพลังงานสูงมีค่าไม่เท่ากันตามไปด้วย [16], [17]



ภาพที่ 6 แสดงรังสีคอสมิกปฐมภูมิปะทะกับอะตอมในชั้นบรรยากาศของโลกที่ก่อให้เกิด

สนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ (interplanetary magnetic field, IMF)

อนุภาคที่เกิดจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ออกมาสู่ที่ว่างระหว่างดาวเคราะห์ โดยอนุภาคส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนและโปรตรอน ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเหล่านี้จะเคลื่อนที่เป็นเกลียวตามเส้นแรงสนามแม่เหล็กมายังโลก ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงโครงสร้างของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์และลมสุริยะ [19]

สนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์นี้ไม่ได้เป็นเส้นตรงตามแนวรัศมี เนื่องจากลมสุริยะลากเส้นสนามแม่เหล็กออกมาผ่านที่ว่างระหว่างดาวเคราะห์ สนามแม่เหล็กที่อยู่ระหว่างดาวเคราะห์นี้เราเรียกว่า “สนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์” (interplanetary magnetic field) และดวงอาทิตย์มีการหมุนรอบตัวเอง โดยดวงอาทิตย์หมุนรอบตัวเองครบ 1 รอบ ใช้เวลาประมาณ 27 วัน จึงทำให้สนามแม่เหล็กมีลักษณะเป็นเกลียว มีชื่อเรียกเฉพาะว่า กังหันพาร์คเกอร์ (parker spiral) ตั้งชื่อตาม Eugene Parker นักวิทยาศาสตร์คนแรกที่อธิบายปรากฏการณ์นี้ [19]

สมการการขนส่งที่อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูง (Transport equation)

อนุภาคพลังงานสูงที่ออกมาจากดวงอาทิตย์เป็นอนุภาคที่มีประจุ ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีลักษณะเป็นเกลียวรอบเส้นสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากดวงอาทิตย์ เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ทำให้เกิดแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กตามกฎของโลเรนตซ์ (Lorentz force Law) เป็นไปตามสมการ

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.3)$$

เมื่อ \vec{F} คือ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก (N)
 q คือ อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า (C)
 \vec{v} คือ ความเร็วของอนุภาค km/s
 \vec{B} คือ สนามแม่เหล็ก (T)

เนื่องจากเส้นสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากดวงอาทิตย์นั้นจะมีความเข้มลดลงตามระยะทางจึงทำให้สนามแม่เหล็กมีลักษณะค่อย ๆ บานออก เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ตามระยะทางในแนวแกน z เพิ่มขึ้น ตามนิยามของความยาวโฟกัส (focusing length) ดังสมการ

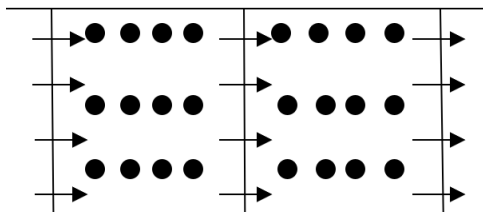
$$\frac{1}{L(z)} = -\frac{1}{B} \frac{dB}{dz} \quad (2.4)$$

เมื่อ $L(z)$ คือ ความยาวของเส้นสนามแม่เหล็กตามระยะในแนวแกน z (AU)
 B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (T)
 z คือ ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์มายังโลก (AU)

ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคในอวกาศที่เคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กไม่เรียบ หรือมีความแปรปรวนนั้น สามารถอธิบายการกระจายตัวของอนุภาคได้จากสมการการแพร่ - การพา (diffusion - convection equation) โดยเราจะพิจารณาการกระจายตัวของอนุภาคใน 1 มิติ สามารถเขียนฟังก์ชันได้เป็น

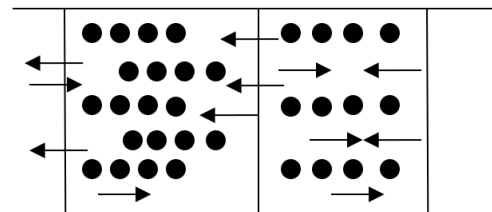
$$f(x, t) = \frac{dN}{dx} \quad (2.5)$$

เมื่อ N คือ จำนวนอนุภาคในเซลล์



$$x - \frac{\Delta x}{2} \quad x \quad x + \frac{\Delta x}{2}$$

ภาพที่ 8 การพาของฟลักซ์เชิงระบบ



$$x - \frac{\Delta x}{2} \quad x \quad x + \frac{\Delta x}{2}$$

ภาพที่ 9 การพาของฟลักซ์แบบเชิงสุ่ม

กำหนดให้ฟลักซ์ (flux) ;

s = จำนวนอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านจุดจุดหนึ่ง

$$s = \frac{\text{จำนวนอนุภาค}}{\Delta t} = v f(x, t)$$

$$\text{จำนวนอนุภาคในเซลล์} = f(x, t) \cdot \Delta x$$

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของ $f(x, t) \cdot \Delta x$ และ $S(x, t)$ ตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ผ่านเซลล์ในทิศตามแนวแกน x ได้เป็น

$$\frac{\partial}{\partial t}(f \cdot \Delta x) = s\left(x - \frac{\Delta x}{2}\right) - s\left(x + \frac{\Delta x}{2}\right) \quad (2.6)$$

เมื่อ $\Delta x \rightarrow 0$

$$\frac{\partial f(f \cdot \Delta x)}{\partial t} = - \frac{\partial s(x,t)}{\partial x} \quad (2.7)$$

เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาจะประกอบไปด้วยการเปลี่ยนแปลงเชิงระบบ (systematic process) และการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม (random process) ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงเชิงระบบคือการที่อนุภาคเคลื่อนที่ในเซลล์ในทิศทางเดียวกันและมีความเร็วเท่ากัน ดังภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงเชิงระบบนี้หรือฟลักซ์การพา (convective flux) คือ

$$s(x,t)_{\text{convective}} = \left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right) f(x,t) \quad (2.8)$$

และการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม คือการที่อนุภาคเคลื่อนที่แบบสุ่มหรือไม่เป็นระเบียบ แสดงดังภาพที่ 9 จากภาพจะเห็นว่าฟลักซ์ของอนุภาคทางซ้ายมีความหนาแน่นมากกว่าทางขวามือหรือเรียกว่า ฟลักซ์การแพร่ (diffusive flux) จากกฎของฟิค (Ficks law) กล่าวว่

$$s(x,t)_{\text{diffusive}} = -\alpha \left(\frac{\partial f(x,t)}{\partial x}\right) \quad (2.9)$$

$$s(x,t)_{\text{diffusive}} = -D \left(\frac{\partial f(x,t)}{\partial x}\right) \quad (2.10)$$

นำสมการ (2.9.6) และสมการ (2.9.8) แทนลงในสมการ (2.9.5) จะได้

$$\frac{\partial f(x,t)}{\partial t} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\Delta x}{\Delta t} f(x,t) \right]}_{\text{การเปลี่ยนแปลงเชิงระบบ}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial f(x,t)}{\partial x} \right]}_{\text{การเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม}} \quad (2.11)$$

การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่สลายตัวตามเวลาสามารถอธิบายได้ด้วยสมการการฟุ้งอนุภาค (Diffusion equation) ซึ่งมีรูปสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ดังสมการ

$$D \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{\partial F}{\partial t} = 0 \quad (2.12)$$

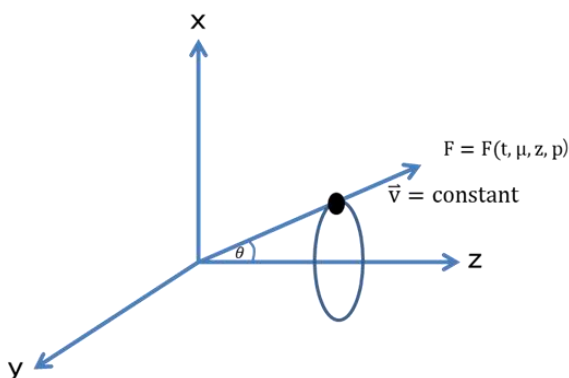
เมื่อ	D	คือ	สัมประสิทธิ์การฟุ้ง
	∂_x	คือ	ช่วงระยะที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน
	∂_t	คือ	ช่วงเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านระยะ ∂x
	$\frac{\partial F}{\partial t}$	คือ	การกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาที่ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงเชิงระบบ และการเปลี่ยนแปลงเชิงสุ่ม
	$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}$	คือ	พลักซ์ของอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ไหลผ่านระยะ ∂x

ในการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาจากทฤษฎี Fokker-Planck ร่วมกับสมการการฟุ้งของอนุภาคโดยพิจารณาการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลา และไม่พิจารณาการชนกันของอนุภาคได้ ดังสมการ

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial (a_i F)}{\partial a_i} = Q \quad (2.13)$$

เมื่อ	Q	คือ	ฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาค (พจน์แหล่งกำเนิด ; Source term)
	F	คือ	ฟังก์ชันการแพร่กระจายของอนุภาค (Distribution function)
	$\frac{\partial F}{\partial t}$	คือ	การกระจายตัวของพลักซ์ของอนุภาคตามเวลาที่ประกอบไปด้วยการเปลี่ยนแปลงเชิงระบบ (First order) + การเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม (Second order)
	a_i	คือ	พารามิเตอร์ของตัวแปรอิสระต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ได้แก่ t, μ , z และ P

เมื่อ t คือ เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลก, μ คือ ตัวกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าหรือออกจากดวงอาทิตย์ โดยที่ $\mu = \cos\theta$, Z คือ ระยะทางตามเส้นสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์มายังโลก (AU) และ P คือ โมเมนตัมของอนุภาค (MeV/c) โดยตัวแปรอิสระต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 10 แสดงค่ามุมระยะช่วงเกลียว (pitch angle) θ ระหว่างทิศความเร็วของอนุภาคและทิศทางเส้นสนามแม่เหล็ก

จากภาพที่ 10 เมื่อพิจารณาตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคลังงานสูงจากดวงอาทิตย์จะเห็นว่าอนุภาคลังงานสูงเป็นอนุภาคที่มีประจุ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคจึงเคลื่อนที่เป็นเกลียวมาตามเส้นสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว \vec{v}

เมื่อพิจารณาตัวแปรอิสระในพจน์ของการเปลี่ยนแปลงเชิงระบบ มีตัวแปรของการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงระยะทางตามเส้นสนามแม่เหล็กในแนวแกน z
2. การเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม
3. การเปลี่ยนแปลงของ μ เมื่อ μ คือตัวแปรที่แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค

$\mu = \cos\theta$; θ คือ มุมระหว่างความเร็ว \vec{v} ของอนุภาคกับทิศของสนามแม่เหล็กในแกน z หรือเรียกว่ามุมระยะช่วงเกลียว โดยที่

$\theta > 90^\circ$, $\mu < 0$ อนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าหาดวงอาทิตย์

$\theta < 90^\circ$, $\mu > 0$ อนุภาคจะเคลื่อนที่ออกจากดวงอาทิตย์

การพิจารณาตัวแปรอิสระในการเคลื่อนที่ของอนุภาคในพจน์ของการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม เนื่องจากเส้นสนามแม่เหล็กบนดวงอาทิตย์มีความแปรปรวนสูงโดยมีสาเหตุมาจากลมสุริยะ ตัวแปรอิสระในพจน์ของการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม คือการเปลี่ยนแปลง μ ตามเส้นสนามแม่เหล็กที่มีความแปรปรวน

ดังนั้นจากสมการฟอร์กเกอร์แพลงก์ ซึ่งเป็นสมการที่อธิบายความหนาแน่นของอนุภาคในระยะทางตามเส้นสนามแม่เหล็กในแนวแกน z ด้วยความเร็ว \vec{v} โดยใช้เวลาในการเคลื่อนที่ t เมื่อพิจารณาตัวแปรอิสระต่าง ๆ จึงเป็นไปตามสมการ คือ

$$\frac{\partial F(t, \mu, z, p)}{\partial t} = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\Delta z}{\Delta t} \right) - \frac{\partial}{\partial \mu} \left(\frac{\Delta \mu}{\Delta t} \right) - \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\Delta p}{\Delta t} \right)}_{\text{การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์เชิงระบบ}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial \mu} \left[\frac{\varphi \mu}{2} \frac{\partial}{\partial \mu} \left(\frac{E'}{E} \right) \right]}_{\text{การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แบบสุ่ม}} \quad (2.14)$$

เมื่ออัตราส่วนของอนุภาคจากกรอบลมสุริยะเทียบกับกรอบหยุดนิ่งหาได้จาก

$$\frac{E'}{E} = \frac{1 - (\mu v_{sw} \sec \psi)}{c^2} \quad (2.15)$$

และฟังก์ชันการแพร่กระจาย $F(t, \mu, z, p) = \frac{d^3 N}{dz d\mu dp}$ (2.16)

เมื่อ N คือ จำนวนอนุภาค

จากสมการ (2.14) นี้ ในการพิจารณาเราจะพิจารณาในกรอบดังนี้

1. พิจารณาในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง (fixed frame)
2. พิจารณาในกรอบของลมสุริยะ (solar wind frame)
3. พิจารณาแบบผสม (mixed frame)

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงที่ออกจากดวงอาทิตย์โดยใช้สมการพื้นฐานฟอร์กเกอร์แพลงก์ซึ่งเมื่อรวมอิทธิพลต่าง ๆ ที่เกิดจากตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Jokipii 1971) [20] การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่บานออก และผลเนื่องจากลมสุริยะในกรอบของการพิจารณาต่าง ๆ แล้วจะได้สมการขนส่งที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงเป็นไปตามสมการของส่งของ Rufolo 1995 [21] ซึ่งเป็นรูปแบบของสมการขนส่งคือ

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial z} \mu v F && \text{(streaming)} \\
& -\frac{\partial}{\partial z} \left(1 - \frac{\mu^2 v^2}{c^2} \right) v_{sw} \sec \Psi F && \text{(convection)} \\
& -\frac{\partial}{\partial \mu} \left(\frac{v(1-\mu^2)}{2L(z)} \right) \left(1 + \frac{\mu v_{sw} \sec \Psi}{v} - \frac{\mu v_{sw} v \sec \Psi}{c^2} \right) F && \text{(focusing)} \\
& + \frac{\partial}{\partial \mu} v_{sw} \left(\cos \Psi \frac{d}{dr} \sec \Psi \right) \mu (1-\mu^2) F && \text{(differential convection)} \\
& + \frac{\partial}{\partial \mu} \frac{\varphi(\mu)}{2} \frac{\partial}{\partial \mu} \left(1 - \frac{\mu v_{sw} v \sec \Psi}{c^2} \right) F && \text{(scattering)} \\
& + \frac{\partial}{\partial p} p v_{sw} \left[\frac{\sec \Psi}{2L(z)} (1-\mu^2) + \cos \Psi \frac{d}{dr} (\sec \Psi) \mu^2 \right] F && \text{(deceleration)}
\end{aligned} \tag{2.17}$$

เมื่อ	F	คือ	ฟังก์ชันการแพร่กระจาย
	t	คือ	เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลก (min)
	z	คือ	ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์มายังโลก (AU)
	$\mu = \cos \theta$	คือ	แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเคลื่อนที่เข้าหรือออกจากดวงอาทิตย์
	θ	คือ	มุมระหว่างทิศของความเร็วของอนุภาคกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก
	P	คือ	โมเมนตัมของอนุภาค (MeV/c)
	$\varphi(\mu)$	คือ	สัมประสิทธิ์การกระเจิงของอนุภาคที่กระทำกับเส้นสนามแม่เหล็ก
	v	คือ	ความเร็วของอนุภาค (AU/min)
	v_{sw}	คือ	ความเร็วของลมสุริยะ (AU/min)
	Ψ	คือ	มุมระหว่างเวกเตอร์ที่แสดงทิศทางของอนุภาคตามแนวรัศมีกับเวกเตอร์ที่แสดงทิศทางของเส้นสนามแม่เหล็ก (degree)

c	คือ	ความเร็วแสง (AU/min)
$L(z)$	คือ	ความยาวของเส้นสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะบานออกตามระยะทาง โดยความแรงของสนามแม่เหล็กจะลดลงตามระยะทางของเส้นสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น; $\frac{1}{L(z)} = -\frac{1}{B} \frac{dB}{dz}$
$\frac{E'}{E}$	คือ	อัตราส่วนระหว่างพลังงานรวมในกรอบอ้างอิงของลมสุริยะ กับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง โดยในแต่ละเทอมของสมการสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาค ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อธิบายพจน์ของสมการที่ 3

พจน์	อธิบาย
Streaming	เป็นพจน์ที่อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเส้นสนามแม่เหล็กในแกน z
Convection	เป็นพจน์ที่อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเส้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการพาของลมสุริยะ
Focusing	เป็นพจน์ที่แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เป็นผลตามโฟกัสอะเดียแบติก (adiabatic focusing) โดยความเข้มของสนามแม่เหล็กลดลงเมื่อระยะทางตามเส้นสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น
Differential convection	เป็นพจน์แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมสุริยะตามตำแหน่ง โดยพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลง μ เทียบกับเวลา t ในกรอบของลมสุริยะ ซึ่งในพจน์นี้จะไม่ผลจากการโฟกัส เนื่องจาก $p_{\perp} = 0$
Sacttering	เป็นพจน์ที่แสดงลักษณะการกระเจิงของอนุภาคในกรอบของลมสุริยะในการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม
Deceleration	เป็นพจน์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมที่ขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นของสนามแม่เหล็กในกรอบลมสุริยะที่ระดับพลังงานต่าง ๆ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าระยะทางอิสระเฉลี่ย (λ) ที่ดีที่สุดสำหรับการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงที่จะสามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กก่อนที่จะเกิดการชนกับความไม่เรียบของสนามแม่เหล็ก โดยกำหนดให้

$$\lambda = \frac{3D}{v} \quad (2.18)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วของอนุภาค (AU/min)

D คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงในอวกาศ

แทนค่าสมการที่ (2.9.16) ในสมการขนส่ง (2.9.15) ในสมการพจน์ scattering ซึ่งเป็นพจน์ที่พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาค $\varphi(\mu)$ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสัมประสิทธิ์การกระเจิงของอนุภาคโดยมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การกระเจิงในอวกาศ (D) ดังนี้

$$D = \frac{v^2}{4} \int_{-1}^1 \left(\frac{1-\mu^2}{\varphi(\mu)} \right)^2 d\mu \quad (2.19)$$

$$\varphi(\mu) = A |\mu|^{(q-1)} (1-\mu^2) \quad (2.20)$$

เมื่อ A คือ แอมพลิจูดที่อนุภาคเคลื่อนที่เป็นเกลียวตามเส้นสนามแม่เหล็กที่ได้จากความสัมพันธ์

$$\frac{A}{V} = \frac{3 |\mu|^{q-1} (1-\mu^2)}{4 (2-q) \lambda} \quad (2.21)$$

เมื่อ q คือ ดัชนีการฟุ้งของอนุภาคในการศึกษาครั้งนี้ใช้ $q=1.5$

เมื่อได้สมการขนส่งที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กระหว่างดวงอาทิตย์กับโลกแล้ว เราจะเลือกใช้การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยวิธีการเชิงตัวเลขต่อไป (finite difference method)

การแก้สมการ Partial Differential

สำหรับวิธีการแก้สมการ Partial Differential Equation การแก้สมการ Finite Different การหาค่า $y(x)$ สำหรับ $x \in [a,b]$ โดยการประมาณ $y_i \approx y(x_i)$ เมื่อ $x_i \in [a,b]$ โดยเราจะแบ่งกริดหรือแบ่งจำนวนช่องตามแนวแกน x เป็น

$$N = \frac{b-a}{\Delta x}, x_0 = a, x_1 = a + \Delta x, x_2 = a + 2\Delta x, \dots$$

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x_i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \quad \text{forward difference}$$

$$= \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta x} \quad \text{backward difference}$$

$$= \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta x} \quad \text{centered difference} \quad (2.22)$$

ในการเลือกวิธีการใดในการวิเคราะห์ปัญหาเชิงตัวเลข เราจำเป็นต้องวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน สำหรับการประมาณแบบ forward difference

$$\begin{aligned} \frac{y(x_{i+1}) - y(x_i)}{\Delta x} &= \frac{y(x_i)\Delta x + \frac{1}{2}y''(x_i)(\Delta x)^2 + \dots - y(x_i)}{\Delta x} \\ &= y'(x_i) + \frac{1}{2}y''(x_i)\Delta x + \dots \\ &\alpha O(\Delta x) \end{aligned} \quad (2.23)$$

สำหรับการประมาณแบบ backward difference

$$\begin{aligned} \frac{y(x_i) - y(x_{i-1})}{\Delta x} &= \frac{y(x_i) - \left[y(x_i) - y'(x_i)\Delta x + \frac{1}{2}y''(x_i)(\Delta x)^2 - \dots \right]}{\Delta x} \\ &= y'(x_i) - \frac{1}{2}y''(x_i)\Delta x + \dots \\ &\alpha O(\Delta x) \end{aligned} \quad (2.24)$$

สำหรับการประมาณแบบ centered difference

$$\begin{aligned} \frac{y(x_{i+1}) - y(x_{i-1}))}{2\Delta x} &= \frac{y(x_i) + y'(x_i)\Delta x + \frac{1}{2}y''(x_i)(\Delta x)^2 + \frac{1}{6}y'''(x_i)(\Delta x)^3 + \dots}{2\Delta x} \\ &\quad - \frac{\left[y(x_i) - y'(x_i)\Delta x + \frac{1}{2}y''(x_i)(\Delta x)^2 - \frac{1}{6}y'''(x_i)(\Delta x)^3 + \dots \right]}{2\Delta x} \\ &= \frac{-2y'(x_i)\Delta x + \frac{2}{6}y'''(x_i)(\Delta x)^3 + \dots}{2\Delta x} \\ &= y'(x_i) + \frac{1}{6}y'''(x_i)(\Delta x)^3 + \dots \\ &\alpha O(\Delta x)^2 \end{aligned} \quad (2.25)$$

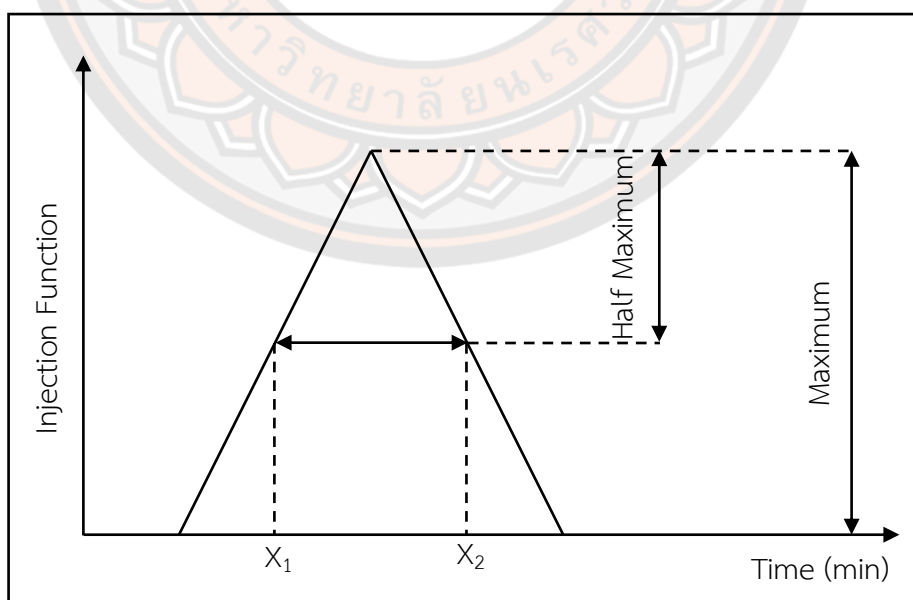
วิธีการเชิงตัวเลข เป็นกระบวนการในการแก้ไขปัญหาโดยใช้คณิตศาสตร์ เพื่อง่ายต่อการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยและแก้สมการด้วยการเขียนโปรแกรม ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้วิธีผลต่างจำกัด (finite difference method) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายต่อการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยแบบเชิงเส้นและค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดโดย และสามารถนำมาใช้หาผลเฉลยของสมการขนส่ง Ruffolo (1995,1998) [21], [22] โดยคำตอบที่ได้จะเป็นค่าความหนาแน่นของอนุภาค $f(t, \mu, z, p)$ มีหน่วยเป็น $\text{particle}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{MeV}/n)$

วิธี FWHM (Full Width at Half Maximum)

วิธี FWHM เป็นวิธีการหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค โดยหาได้จากความกว้างเต็มที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด คือ ค่าความกว้างของระดับจากสูงสุดของกราฟลดลงมาครึ่งหนึ่ง ซึ่งเป็นวิธีการหาระยะเวลาการปลดปล่อยของอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลก เมื่อเราได้ฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาค ซึ่งอยู่ในลักษณะของรูปสามเหลี่ยม เมื่อแกน x คือ เวลาในการปลดปล่อยอนุภาค และแกน y คือ ฟังก์ชันการปลดปล่อย แสดงดังภาพที่ 11 และสามารถหาค่าของระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคได้ ดังนี้

$$\text{Half Maximum} = \frac{\text{Maximum}}{2}$$

$$\text{FWHM} = X_1 - X_2 = \text{ระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค}$$



ภาพที่ 11 การหาค่า Full Width at Half Maximum

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธี FWHM ในการหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค เนื่องจากช่วงที่อนุภาคเริ่มปะทุขึ้น และช่วงที่อนุภาคเริ่มสลายตัวหลังการปะทุนั้น ข้อมูลจะมีความแปรปรวนสูง ดังนั้น ข้อมูลช่วงที่ลดลงมาครึ่งหนึ่งหรือ 50% จากจุดสูงสุด ข้อมูลจะมีความถูกต้องและแม่นยำกว่าช่วงอื่น ๆ และยังเป็นการสอดคล้องกับการจัดเตรียมข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนรวมทั้งหมดจากการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลา

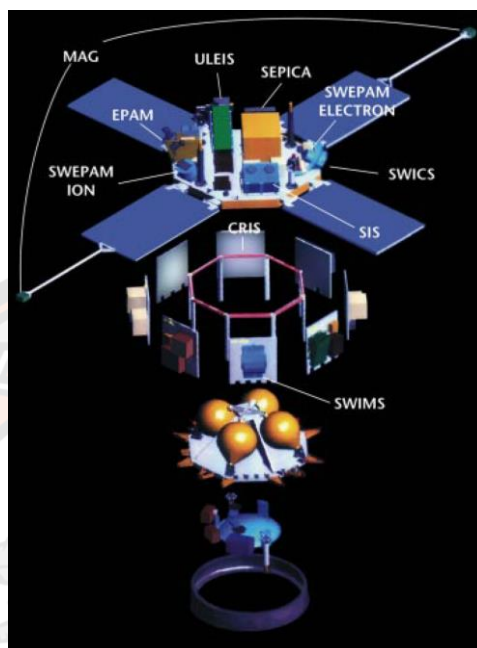
ยานอวกาศ ACE (advanced composition explorer)

งานวิจัยนี้เราได้ใช้ข้อมูลจากยานอวกาศ ACE โดยยานอวกาศ ACE ปฏิบัติการครั้งแรกเมื่อวันที่ 22 เมษายน 2548 เป็นยานอวกาศที่ใช้ในการสำรวจและตรวจวัดอนุภาคต่าง ๆ ที่มาจากดวงอาทิตย์ และอนุภาคที่มาจากแหล่งอื่น ๆ ที่เคลื่อนที่มายังโลก มีขนาดความกว้างของตัวยานประมาณ 1.6 เมตร และมีความสูงประมาณ 1 เมตร น้ำหนักของยานอวกาศเมื่อรวมกับถังเชื้อเพลิงประมาณ 758 กิโลกรัม แสดงในภาพจำลองส่วนประกอบของยานอวกาศ ACE ดังภาพที่ 10

เครื่องมือที่ติดตั้งบนยานอวกาศ ACE มีทั้งหมด 9 ชิ้น คือ 6 ตัววัด และ 3 ตัวปรับสัญญาณ ดังนี้

1. CRIS; the cosmic ray isotope spectrometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดและศึกษาไอโซโทปของรังสีคอสมิก มีระดับพลังงานอยู่ในช่วง $\sim 100-600$ MeV/n
2. SIS; the solar isotope spectrometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด และศึกษาอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ มีระดับพลังงานอยู่ในช่วง $\sim 10-100$ MeV/n
3. ULEIS; the ultra low energy isotope spectrometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด และศึกษาอนุภาคพลังงานต่ำที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ มีระดับพลังงานอยู่ในช่วง $\sim 0.2-10.0$ MeV/n
4. SWEPAM; solar wind electron proton alpha monitor เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดพลาสมาของลมสุริยะ และความหนาแน่นของอนุภาค ซึ่งเป็นเวลาจริงของลมสุริยะขณะสำรวจ
5. MAG; the ACE magnetic field experiment เป็นเครื่องมือที่วัดทิศทางของสนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์
6. EPAM; electron, proton, and alpha monitor เป็นเครื่องมือที่บอกถึงความหนาแน่น และพลังงานของโปรตอน อนุภาคแอลฟา และอิเล็กตรอน โดยวัดพลังงานของอนุภาคที่มีประจุในช่วง $0.3-0.4$ MeV/n
7. SWIMS; solar wind ion mass spectrometer เป็นเครื่องมือที่แสดงค่าของส่วนประกอบต่าง ๆ ของไอออนของลมสุริยะ ขอบเขต สิ่งที่เกี่ยวข้องให้เกิดการเปลี่ยนแปลง และการเร่งอนุภาคในลมสุริยะ ตลอดจนลักษณะทางกายภาพของไอออนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ของลมสุริยะ

8. SWICS; solar wind ionic charge spectrometer ทำหน้าที่เหมือนกับเครื่องมือ SWIMS
9. SEPICA; the solar energetic particle ionic charge analyzer เป็นเครื่องมือที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของการพุ่งของอนุภาคจากการปะทุบนดวงอาทิตย์



ภาพที่ 12 ภาพจำลองส่วนประกอบของยานอวกาศ ACE [23]

โดยอุปกรณ์ทั้งหมดใช้ตรวจวัดอนุภาคได้แก่ประจุ มวล พลังงาน ทิศทางการเคลื่อนที่ตามเวลา อุปกรณ์ทั้งหมดมีประโยชน์ในการศึกษาเกี่ยวกับจุดกำเนิดของอนุภาคเข้าใจถึงวิวัฒนาการของระบบสุริยะ และกระบวนการที่เกี่ยวข้อง อุปกรณ์บนยานอวกาศ ACE ส่วนใหญ่จะใช้เพื่อศึกษาอิเล็กตรอน และกลุ่มของไอโซโทปซึ่งมีพลังงานสูง กล่าวคือมีการเคลื่อนที่เร็วและยังเป็นไอออน โดยในงานวิจัยนี้เราได้ใช้เครื่องมือวัด SIS

อุปกรณ์ SIS เป็นอุปกรณ์การวัดอนุภาคที่ถูกออกแบบเพื่อการวัดอนุภาคพลังงานสูงของธาตุ He ถึง Ni ($Z=2$ ถึง 28) ที่มีระดับพลังงานอยู่ในช่วง ~ 10 ถึง 100 MeV/n เมื่อเกิดการปะทุบนดวงอาทิตย์ความหนาแน่นของอนุภาคจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เครื่องมือ SIS จะสามารถตรวจวัดไอโซโทปของรังสีคอสมิกช่วงพลังงานต่ำที่มาจากดวงอาทิตย์ และสามารถตรวจวัดรังสีคอสมิกที่มาจากกาแล็กซีอื่น ๆ ได้ ลักษณะของเครื่องตรวจวัด SIS ดังภาพ 12 มีรูปแบบเป็นทรงเรขาคณิตขนาดเท่ากัน $40 \text{ cm}^2\text{-sr}$ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าดาวเทียมที่ใช้วัดอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ห้วงวัดของ SIS ถูกสร้างขึ้นด้วยซิลิกอน ประกอบด้วย 2 ชั้น เรียกว่า M_1 และ M_2 โดยมีพื้นที่หน้าตัดประมาณ 33.9 cm^2 และหนา 0.06 mm เหมือนกันทั้งสองชั้น เมื่อเกิดเหตุการณ์การปะทุ หัววัดจะทำการวัดอนุภาคที่ผ่านเข้ามายังหัววัด M_1 และผ่านไปยัง M_2 แล้วเก็บข้อมูลอยู่ในรูปของความหนาแน่นของ

อนุภาคที่ผ่านหัววัดแยกตามระดับพลังงานของอนุภาคตามเวลา และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่หัววัด [23]



ภาพที่ 13 แสดงเครื่องมือตรวจวัด SIS บนยานอวกาศ ACE

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D. Ruffolo, T. Khumlumert, and W. Youngdee, 1998 [22] ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในด้วงกลางระหว่างดาวเคราะห์ พบว่าอนุภาคพลังงานสูงมีฟลักซ์ของอนุภาค และการกระจายตัวในทุกทิศทาง เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของอนุภาคตามเวลา สามารถหาค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยของการกระเจิงในด้วงกลางระหว่างดาวเคราะห์ได้ โดยการพัฒนาเทคนิคในการฟิตข้อมูลที่ดีที่สุดในฟังก์ชันการปลดปล่อย 2 วิธี คือรูปแบบการปลดปล่อยเชิงเส้นแบบสามเหลี่ยม (piecewise linear profile) และรูปแบบเรด (reid profile) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ใช้กับฟังก์ชันการปลดปล่อยของโปรตอนที่วัดได้จากยานอวกาศไอเอสอี 3 (international sun/earth explorer 3, ISEE3) โดยสมมติให้รูปแบบการปลดปล่อยใกล้เคียงกัน โดยเลือกเหตุการณ์การปะทุเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม ค.ศ. 1981 เป็นการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป และเหตุการณ์ วันที่ 2 มกราคม ค.ศ. 1982 เป็นเหตุการณ์การปะทุแบบทันทีทันใด สำหรับอนุภาคโปรตอนที่ระดับพลังงานสูง (75-147 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์) พบว่าการปล่อยมวลสารจากโคโรนาทำให้เกิดคลื่นกระแทก และทำให้เกิดการเร่งอนุภาคโปรตอนประมาณ 100 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ หลังจากเคลื่อนที่ออกจากดวงอาทิตย์

Ruffolo et al. [21] Bieber et al. [24] ได้ศึกษาการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยใช้สมการการขนส่งนำผลการจำลองมาฟิตเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงจากยานอวกาศ ทำให้เราสามารถหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลก และสามารถหาระยะทางมากที่สุดที่

อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กโดยสะท้อนกลับเนื่องจากความไม่เรียบของสนามแม่เหล็ก ระยะทางที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์ว่าอนุภาคที่มาจากดวงอาทิตย์จะใช้เวลาานเท่าไรก่อนจะเดินทางมาถึงโลก ด้วยวิธี deconvolution technique

T. Khumlumlert, and Kasanuk [27] ได้ศึกษาอนุภาคที่ออกจากดวงอาทิตย์เป็นอนุภาคที่มีประจุ จึงมีการเคลื่อนที่เป็นเกลียวตามแนวเส้นสนามแม่เหล็ก เราสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคได้โดยการวิเคราะห์จากข้อมูลที่ตรวจวัดได้จริงจากยานอวกาศได้แก่ ยานอวกาศ ACE (advanced composition explorer) เพื่อศึกษาจำนวนอนุภาคที่เข้ามายังเครื่องวัดแยกออกเป็นประเภทอนุภาค และระดับพลังงานของอนุภาค และยานอวกาศ GOES (the geostationary operational environment satellite) ใช้ศึกษาข้อมูลสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ในอวกาศ ทั้งในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลง และช่วงปกติบนดวงอาทิตย์ โดยเลือกเหตุการณ์การปะทุอย่างรุนแรงที่เกิดขึ้นจริงบนดวงอาทิตย์



บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การเลือกเหตุการณ์ในการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากการปะทุบนดวงอาทิตย์

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยศึกษาปรากฏการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลอนุภาคพลังงานสูง และการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอวกาศที่เกิดขึ้นเนื่องจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ โดยศึกษาจากลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์ และระยะเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มาถึงโลกสำหรับการปะทุในรอบวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24 โดยใช้ข้อมูลจริงจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ที่บันทึกโดยยานอวกาศ ACE (Advanced composition explorer) อนุภาคที่เลือกวิเคราะห์ คือ อนุภาคฮีเลียม (He) และเลือกเหตุการณ์ที่สนใจโดยดูจากระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือบนยานอวกาศ GOES โดยเลือกเหตุการณ์การปะทุจริงบนดวงอาทิตย์เป็นสามช่วง ได้แก่ วันที่ 12 สิงหาคม 2010 สำหรับช่วงเริ่มต้นของวัฏจักร วันที่ 9 สิงหาคม 2011 สำหรับช่วงสูงสุดของวัฏจักร และ วันที่ 6 กันยายน 2017 สำหรับช่วงท้ายของวัฏจักร โดยลักษณะทางกายภาพและลักษณะเด่นของการปะทุ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของการปะทุ

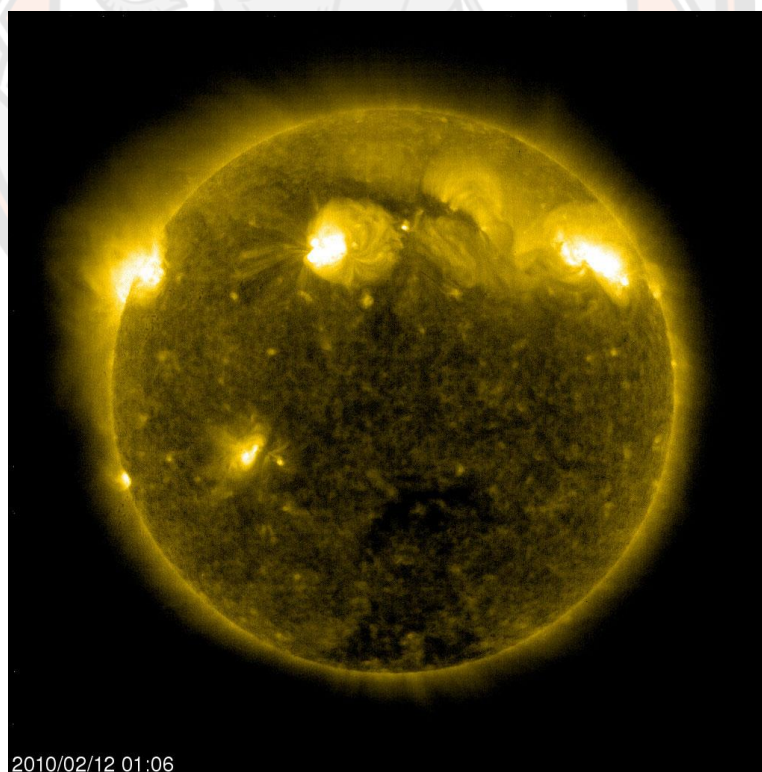
เหตุการณ์ในรอบวัฏจักร	ระดับความรุนแรง	วันที่เกิดการปะทุ	ตำแหน่ง	เวลาการปะทุ (UT)		
				เริ่ม	สูงสุด	สิ้นสุด
ช่วงเริ่มต้น	M8.3	12/02/2010	N23E15	11:09	11:26	11:28
ช่วงสูงสุด	X6.9	09/08/2011	N18W68	07:48	08:05	08:08
ช่วงท้าย	X9.3	06/09/2017	S10W30	11:53	12:02	12:10

ข้อมูลที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากการดาวน์โหลดข้อมูลจากเว็บไซต์ <http://www.srl.caltech.edu/ACE/> ข้อมูลที่ได้จากเว็บไซต์นี้นำมาจากยานอวกาศ ACE วัดโดยเครื่องมือ SIS เพื่อใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ โดยข้อมูลที่ได้จากยานอวกาศประกอบด้วย เวลา (นาทิจ) ความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลา ($\text{particles}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{MeV}/\text{n})$) และความคลาดเคลื่อนของอนุภาค มาใช้เป็นข้อมูลในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ตามเส้นสนามแม่เหล็ก ด้วยสมการการขนส่งอนุภาคของ Ruffolo ในโปรแกรมที่เขียนบนระบบปฏิบัติการลี

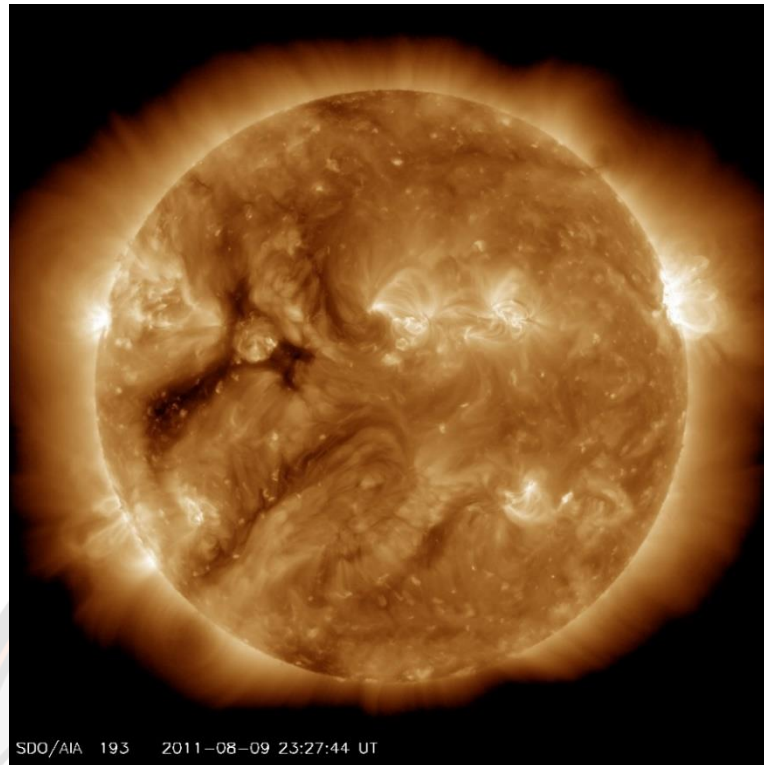
นุกซ์ จากนั้นนำผลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยข้อมูลที่สามารถนำมาจำลองได้ จำเป็นต้องมีค่าความต่อเนื่องของค่าพลาสมาอนุภาคแบบต่อเนื่อง

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของการปะทุที่ผิวดวงอาทิตย์

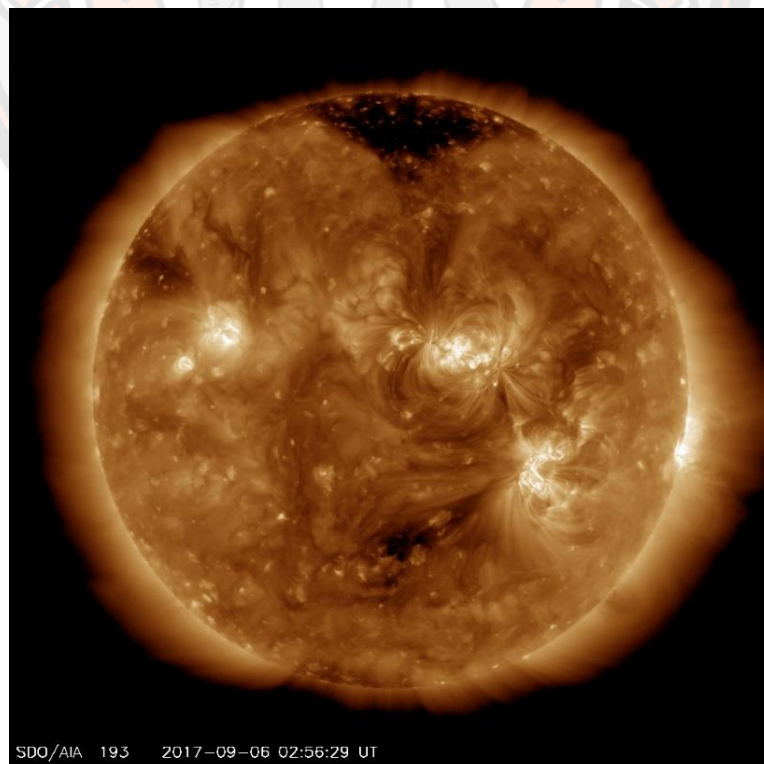
ในงานวิจัยนี้จากการศึกษาผู้วิจัยได้เลือกปรากฏการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ในช่วงวัฏจักร ดวงอาทิตย์ที่ 24 โดยแบ่งการปะทุออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงต้นของวัฏจักร มีระดับความรุนแรง M8.3 เกิดการปะทุในวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553 เกิดการระเบิดที่ตำแหน่ง N23E15 ดังภาพ 14 เริ่มเกิดการปะทุเวลา 11:19 - 11:28 UT คิดเป็นระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค 13 นาที ช่วงสูงสุดของวัฏจักร มีระดับความรุนแรง X6.9 เกิดการปะทุในวันที่ 9 สิงหาคม 2554 เกิดการระเบิดที่ตำแหน่ง N18W68 ดังภาพ 15 เริ่มเกิดการปะทุเวลา 7:08 - 8:08 UT คิดเป็นระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค 20 นาที และ ช่วงท้ายวัฏจักร มีระดับความรุนแรง X9.3 เกิดการปะทุในวันที่ 6 กันยายน 2560 ดังภาพ 16 เกิดการระเบิดที่ตำแหน่ง S10W30 เริ่มเกิดการปะทุเวลา 15:53 - 12:10 UT คิดเป็นระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค 17 นาที โดยภาพที่ 17, 18 และ 19 เป็นการปะทุที่มีความรุนแรงระดับ M8.3, X6.9 และ X9.3 ตามลำดับ



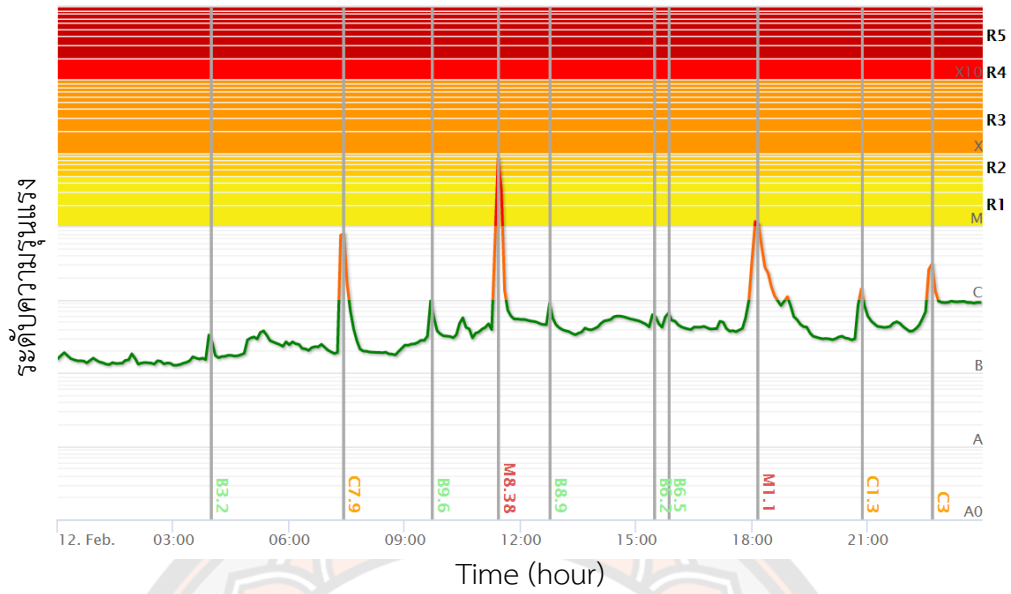
ภาพที่ 14 ภาพถ่ายเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553



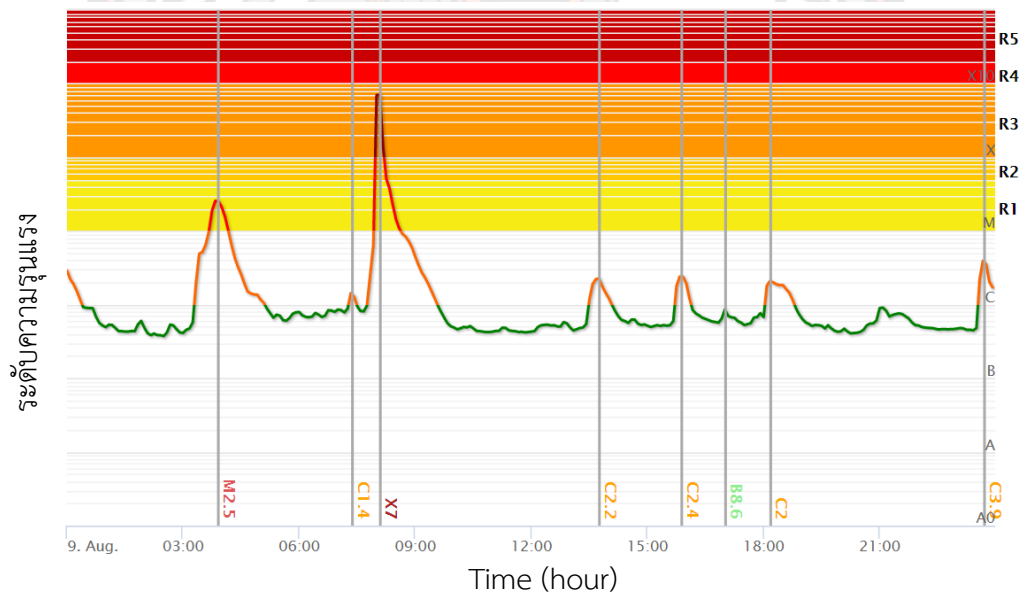
ภาพที่ 15 ภาพถ่ายเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 9 สิงหาคม 2554



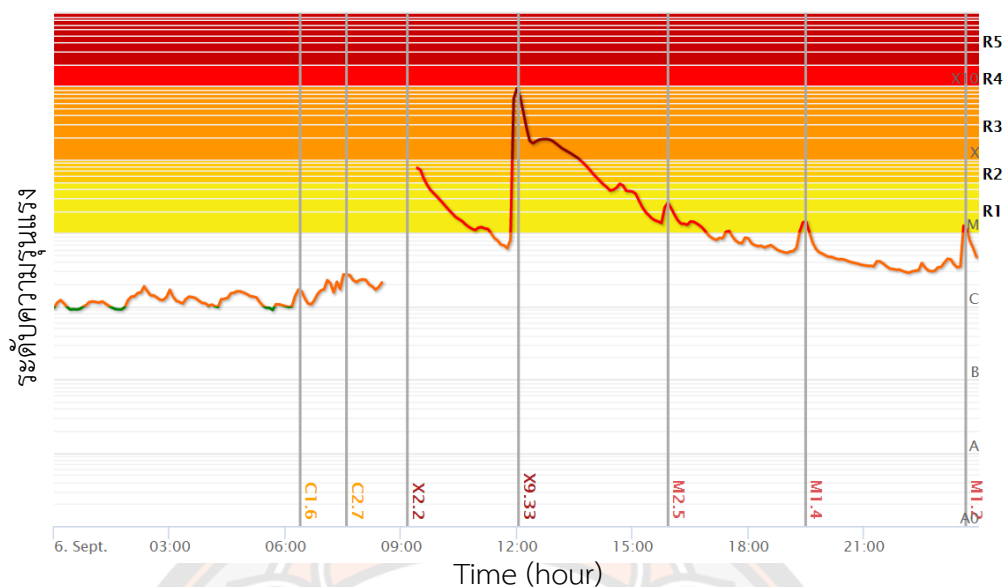
ภาพที่ 16 ภาพถ่ายเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 6 กันยายน 2560 [28]



ภาพที่ 17 ค่าระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์ในวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553



ภาพที่ 18 ค่าระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์ในวันที่ 9 สิงหาคม 2554



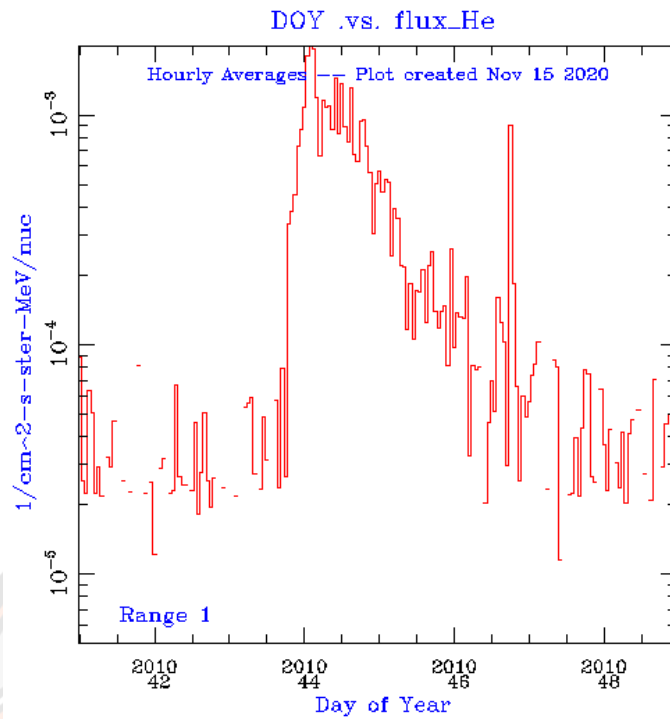
ภาพที่ 19 ค่าระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์ในวันที่ 6 กันยายน 2560

จากภาพแสดงระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์ ในช่วงวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24 ทั้ง 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงเริ่มต้นของวัฏจักร เกิดการปะทุวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553 ช่วงสูงสุดของวัฏจักร เกิดการปะทุวันที่ 9 สิงหาคม 2554 และช่วงท้ายของวัฏจักร เกิดการปะทุวันที่ 6 กันยายน 2560 โดยแสดงข้อมูลลักษณะทางกายภาพของเหตุการณ์นี้ ดังตารางที่ 4

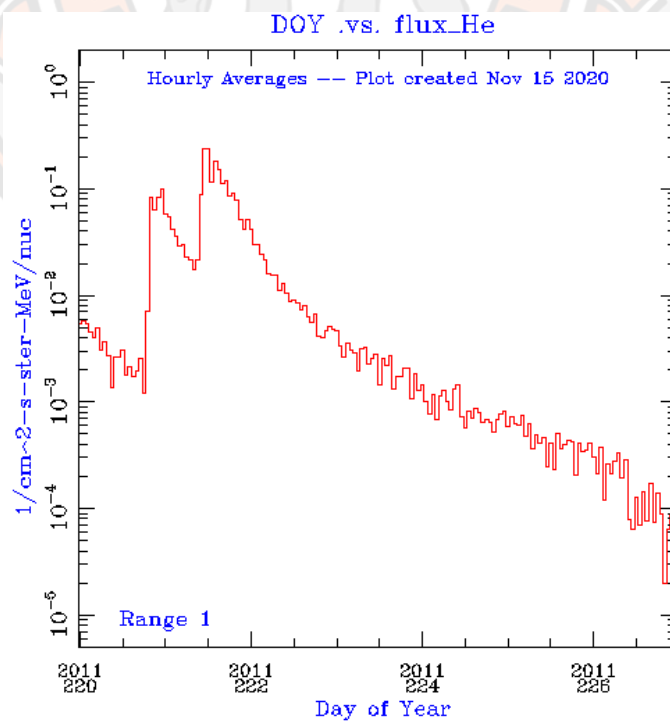
ตารางที่ 4 ลักษณะเด่นของการปะทุ

วัฏจักร	เหตุการณ์การปะทุ	ลักษณะเด่น
เริ่มต้นวัฏจักร	12 ก.พ. 2010	อยู่ในช่วงเริ่มต้นของวัฏจักรปี ค.ศ. 2008-2010 พบเหตุการณ์ที่มีการปะทุรุนแรงในระดับ M-class และข้อมูลมีความต่อเนื่องของจำนวนอนุภาคตามเวลา
สูงสุดวัฏจักร	9 ส.ค. 2011	อยู่ในช่วงสูงสุดของวัฏจักรปี ค.ศ. 2011-2014 พบการระเบิดในระดับ X-class ครั้งแรก
ท้ายวัฏจักร	6 ก.ย. 2017	ช่วงท้ายวัฏจักรปี ค.ศ. 2015-2019 พบการระเบิดที่รุนแรงสูงสุดในระดับ X-class ที่ระดับ X9.3

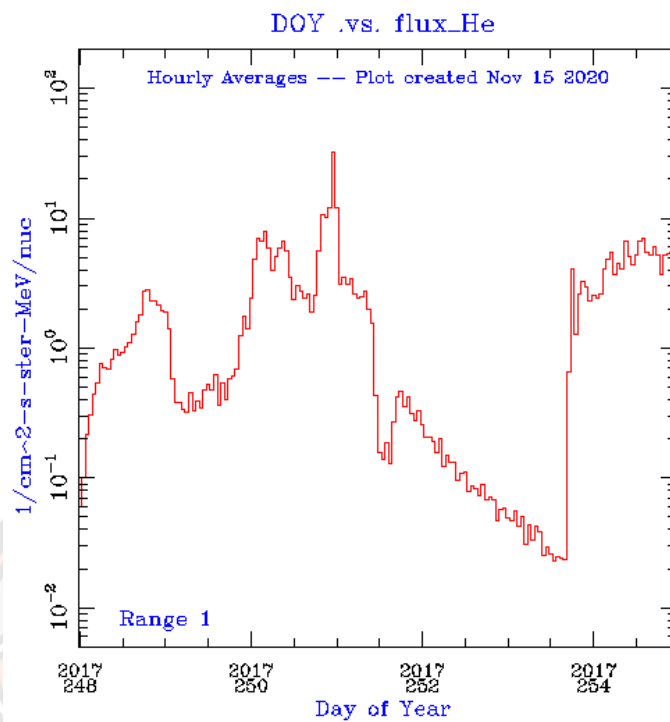
เนื่องจากค่าความเข้มของรังสีเอกซ์เป็นเพียงการสังเกตการณ์เบื้องต้นของเหตุการณ์การปะทุ เพื่อนำไปสู่การเลือกศึกษาข้อมูลของค่าความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาที่ตรวจวัดได้จากยานอวกาศ ของเหตุการณ์ที่ครอบคลุมในช่วงวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24 ของทั้ง 3 เหตุการณ์ เพื่อคัดสรรข้อมูลเพิ่มเติม และลดลงของข้อมูลตรวจวัดได้ดังแสดงในภาพที่ 20, 21 และ 22



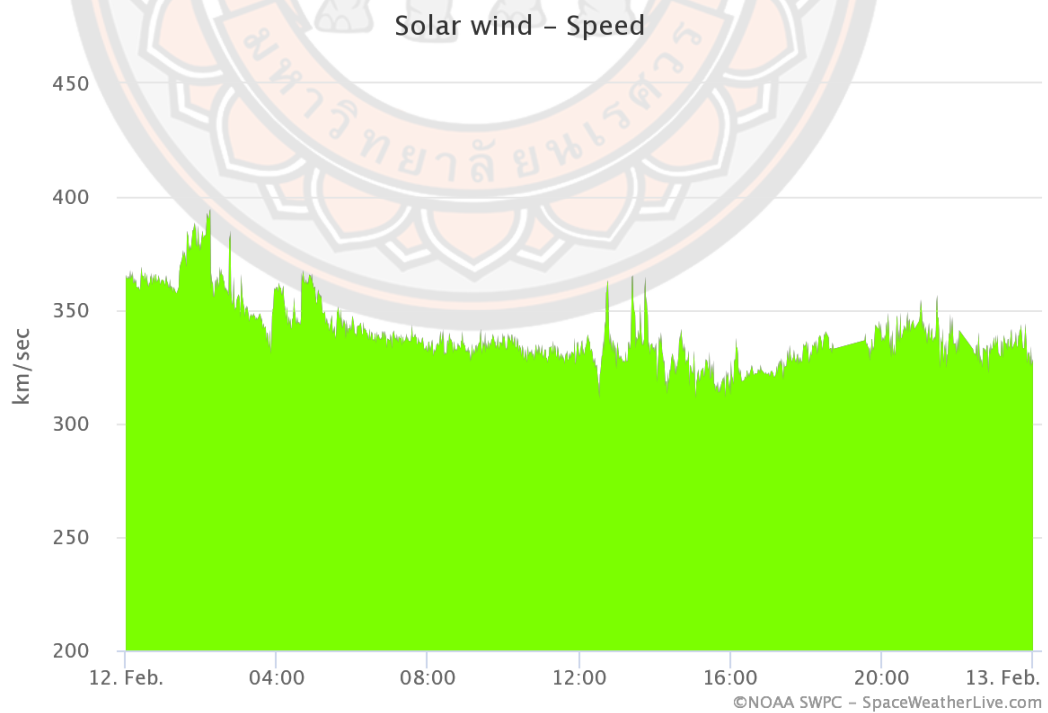
ภาพที่ 20 แสดงค่าฟลักซ์ของธาตุฮีเลียม จากเครื่องมือ SIS ที่วัดได้ในวันที่ 11-17 กุมภาพันธ์ 2553



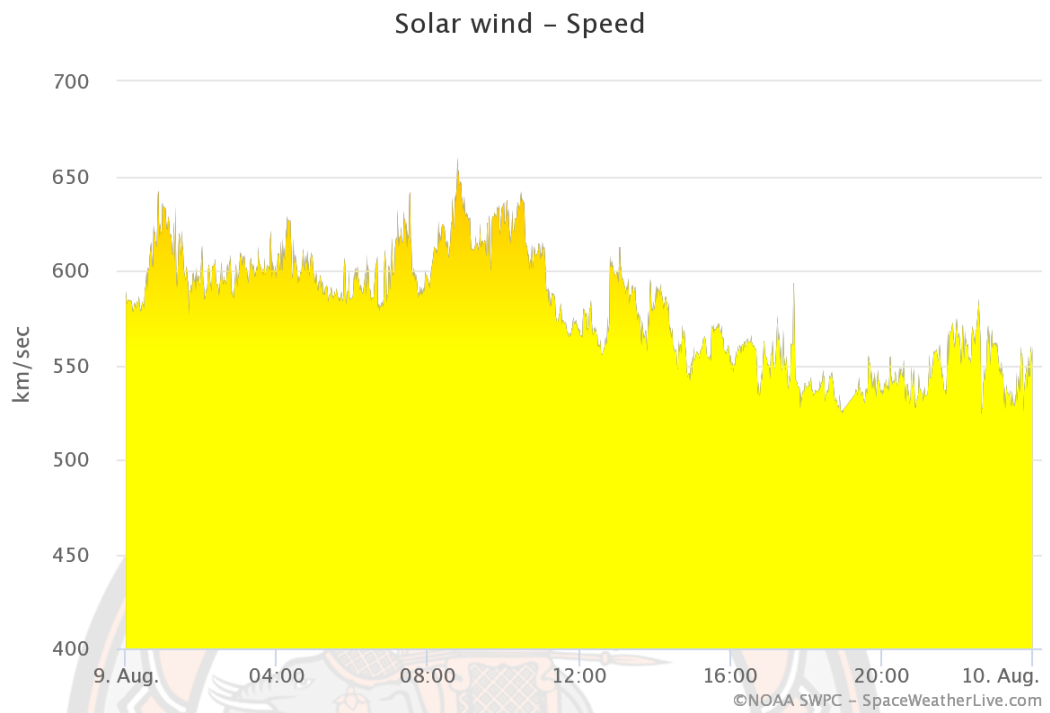
ภาพที่ 21 แสดงค่าฟลักซ์ของธาตุฮีเลียม จากเครื่องมือ SIS ที่วัดได้ในวันที่ 8-14 สิงหาคม 2554



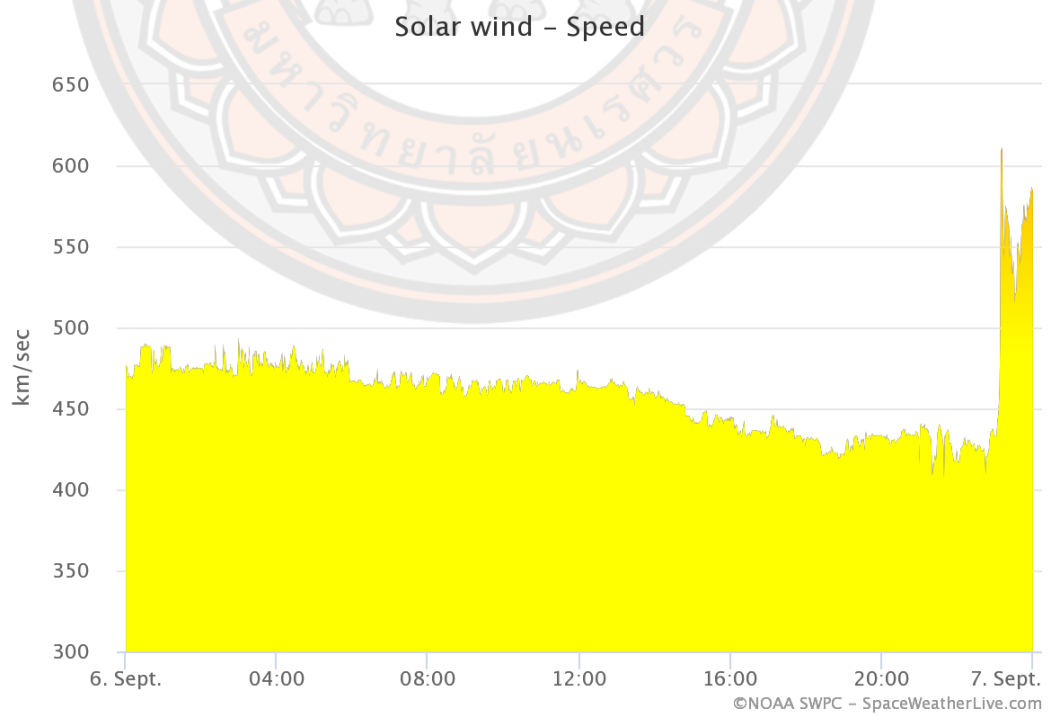
ภาพที่ 22 แสดงค่าฟลักซ์ของธาตุฮีเลียม จากเครื่องมือ SIS ที่วัดได้ในวันที่ 5-11 กันยายน 2560



ภาพที่ 23 กราฟแสดงความเร็วลมสุริยะในวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553



ภาพที่ 24 กราฟแสดงความเร็วลมสุริยะในวันที่ 9 สิงหาคม 2554



ภาพที่ 25 กราฟแสดงความเร็วลมสุริยะในวันที่ 6 กันยายน 2560

จากภาพ 23-25 พบว่า ช่วงต้นของวัฏจักร วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553 มีความเร็วลมสุริยะอยู่ที่ 340.9 km/s ช่วงสูงสุดของวัฏจักร วันที่ 9 สิงหาคม 2554 มีความเร็วลมสุริยะอยู่ที่ 551.5 km/s และช่วงท้ายของวัฏจักร วันที่ 6 กันยายน 2560 มีความเร็วลมสุริยะอยู่ที่ 575 km/s

การดาวน์โหลดข้อมูลที่ตรวจวัดจากยานอวกาศ ACE

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของการปะทุบนดวงอาทิตย์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนั้น สามารถเข้าไปศึกษาได้ที่เว็บไซต์ <http://www.srl.caltech.edu/ACE/> ซึ่งข้อมูลที่ได้จากเว็บไซต์นี้นำมาจากยานอวกาศ ACE วัดโดยเครื่องมือ SIS ที่เปิดให้ผู้สนใจสามารถเข้าไปดาวน์โหลดข้อมูลปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ และในระบบสุริยะ การใช้ข้อมูลมีขั้นตอนดังนี้

1. คลิก “Online Data” เพื่อเข้าสู่การดาวน์โหลดข้อมูลออนไลน์
2. คลิก “Level 2 (Verified)” เพื่อเข้าไปเลือกเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด
3. คลิก “SIS Data” เลือกข้อมูลจากเครื่องมือ SIS

เลือกช่วงวันของข้อมูลที่ต้องการในช่อง Hourly Averages เนื่องจากในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาเหตุการณ์การปะทุที่ครอบคลุมทั้งวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24 เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงต้นของวัฏจักร วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553 และช่วงสูงสุดของวัฏจักร วันที่ 9 สิงหาคม 2554 ช่วงท้ายของวัฏจักร วันที่ 6 กันยายน 2560 คิดเป็นจำนวนวันในรอบปี คือ วันที่ 43, 221 และ 249 ของปี จึงเลือกใช้ข้อมูลช่วงวันที่ 43/2010 – 48/2010, 221/2011 - 226/2011 และ 249/2017 – 254/2017 ในที่นี้ยกตัวอย่างการเลือกช่วงวันของข้อมูลของวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010 แสดงดังภาพที่ 26

1. คลิก “GO” เพื่อไปสู่การดาวน์โหลด
2. คลิก “SIS Hourly Averages Element Fluxes” เพื่อเปิดดูข้อมูลที่ได้จากการดาวน์โหลด

Time (UT)	<input type="checkbox"/> year	<input type="checkbox"/> day	<input type="checkbox"/> hour	<input type="checkbox"/> min	<input type="checkbox"/> sec	<input type="checkbox"/> year (float)	<input type="checkbox"/> day (float)	<input type="checkbox"/> ACE epoch
Element Fluxes	<input checked="" type="checkbox"/> He	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> N	<input type="checkbox"/> O	<input type="checkbox"/> Ne	<input type="checkbox"/> Na	<input type="checkbox"/> Mg	<input type="checkbox"/> Al
Element Counts	<input checked="" type="checkbox"/> He cnt	<input type="checkbox"/> C cnt	<input type="checkbox"/> N cnt	<input type="checkbox"/> O cnt	<input type="checkbox"/> Ne cnt	<input type="checkbox"/> Na cnt	<input type="checkbox"/> Mg cnt	<input type="checkbox"/> Al cnt
Other Info	<input type="checkbox"/> uptime fraction		<input type="checkbox"/> solar activity					

or [check here to select all the data \(over 100 columns!\)](#)

Starting "YR/DOY": Ending "YR/DOY": (Example: 98/37, note: no leading zeros)

Choose Data Format: X-Y Plot Text file download Text on Screen

ภาพที่ 26 แสดงหน้าเว็บไซต์ที่สามารถเลือกดาวน์โหลดเฉพาะข้อมูลที่ต้องการ

เลือกค่าต่าง ๆ ของข้อมูลที่จะดาวน์โหลดประกอบไปด้วย เวลา ความหนาแน่นของอนุภาค และจำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยเวลาของธาตุต่าง ๆ จากนั้นกำหนดช่วงวันที่ต้องการในช่อง Starting และ Ending เลือกรูปแบบข้อมูล Data format เป็นแบบ Text file download และเลือก Retrieve data เพื่อดาวน์โหลดข้อมูล ซึ่งข้อมูลที่ได้ประกอบด้วยเวลา (hour) ความหนาแน่นของอนุภาค (particle/s-cm²-sr-MeV/n) และจำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยเวลาที่ตกกระทบหัววัด (counts)

ขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลที่ได้จากยานอวกาศเพื่อการจำลอง

การศึกษาในครั้งนี้เราใช้ข้อมูลที่วัดได้จริงจากเครื่องมือ SIS บนยานอวกาศ ACE โดยนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าตั้งต้นที่จำเป็นสำหรับโปรแกรมในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค ซึ่งประกอบด้วยค่าต่าง ๆ ดังนี้

1. หาค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเนื่องจากยานอวกาศ

เนื่องจากข้อมูลที่วัดได้จากยานอวกาศจะมีความคลาดเคลื่อนจากยานอวกาศ (σ_{stat}) ด้วย ดังนั้นจึงนำข้อมูลที่วัดได้มาหาค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเนื่องจากยานอวกาศ โดยค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมีค่าเท่ากับ ความหนาแน่นของอนุภาค หรือค่าฟลักซ์ของอนุภาค โดยหารด้วยรากที่สองของจำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยเวลา

$$\sigma_{\text{stst}} = \frac{\text{flux}}{\sqrt{\text{counts}}} \quad (3.1)$$

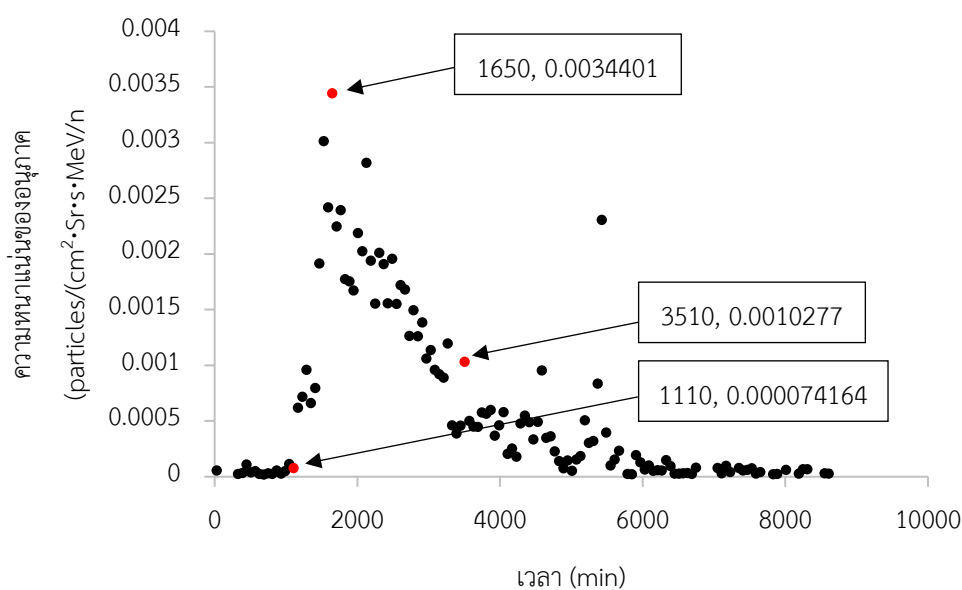
เมื่อ σ_{stat}	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเนื่องจากยานอวกาศ
flux	คือ ความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
counts	คือ จำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยเวลาที่ตกกระทบหัววัด

โดยตัวอย่างข้อมูลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงตัวอย่างข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ SIS บนยานอวกาศ ACE และค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจากยานอวกาศของอนุภาค He สำหรับเหตุการณ์การปะทุในวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010

เวลา (min)	ความหนาแน่นของอนุภาค He (particle/s cm ² sr MeV/n)	จำนวนอนุภาคที่วัดได้ (counts)	ความคลาดเคลื่อน
30	0.0000529	2	3.74059E-05
330	0.000022307	1	0.000022307
390	0.000029329	1	0.000029329
450	0.00010513	4	0.000052565
510	0.000034657	1	0.000034657
570	0.000047936	2	3.38959E-05
630	0.000021536	1	0.000021536

จากนั้นนำค่าความหนาแน่นของอนุภาค และเวลา มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ โดยให้แกนนอนเป็นเวลา (นาที) และแกนตั้งแทนค่าความหนาแน่นของอนุภาค (particles/(s·cm²·Sr·MeV/n)) เพื่อหาค่าตั้งต้นที่จำเป็นในการจำลองการเคลื่อนที่ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นของอนุภาคที่เวลาเริ่มต้น สูงสุด และเวลาที่ความหนาแน่นของอนุภาคลดลงมากครั้งหนึ่ง



ภาพที่ 27 ค่าความหนาแน่นของอนุภาคฮีเลียม เทียบกับเวลา

จากภาพที่ 27 เราทราบได้ว่าค่าความหนาแน่นของอนุภาคฮีเลียมที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV/n โดยพบอนุภาคเริ่มเพิ่มขึ้นในนาทิตี่ 1110 มีค่าสูงสุดในนาทิตี่ 1650 และลดลงมาครึ่งหนึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 3510 นาที

2. หาค่ามวลที่แท้จริง (Real mass) ของแต่ละอนุภาค

$$\text{Real mass} = \frac{(931.5 \frac{\text{MeV}}{c^2})A}{Z} \quad (3.2)$$

เมื่อ Z คือ เลขมวล (mass number)
 A คือ มวลอะตอม (atomic mass)
 Real mass คือ มวลที่แท้จริงของอนุภาค (m_0)

2.1 คำนวณหาค่า Real mass ของอนุภาค He

$$\text{Real mass of Helium} = \frac{(931.5)(4.0026) \frac{\text{MeV}}{c^2}}{4}$$

$$\text{Real mass of Helium} = 932.105 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

3. หาค่าพลังงานเฉลี่ยแต่ละระดับพลังงาน (KE)

$$\text{พลังงานเฉลี่ย (KE)} = \frac{\text{พลังงานสูงสุด} + \text{พลังงานต่ำสุด}}{2} \quad (3.3)$$

4. ทหาระยะทางของเส้นสนามแม่เหล็กที่ถูกดึงโดยลมสุริยะ (R)

จากสมการ
$$R = \frac{v_{sw} \times 0.002291}{\cos(\text{longitude})} \quad (3.4)$$

เมื่อ R คือ ระยะทางของเส้นสนามแม่เหล็กที่ถูกดึงโดยลมสุริยะ
 v_{sw} คือ ความเร็วลมสุริยะ (1 km/s=0.002291 AU/min)
 Longitude คือ ค่ามุมของการปะทะบนดวงอาทิตย์เมื่อสังเกตจากโลก (องศา) จากนั้นจะนำค่าของข้อมูลที่จัดเตรียมได้ทั้งหมดไปใช้เป็นค่าตั้งต้นในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่อไป

5. การหาระยะทางระหว่างตำแหน่งยานอวกาศกับดวงอาทิตย์ (USERR)

จากสมการ

$$\text{USERR} = \frac{1 \text{ AU}}{1 + 0.0017 \cos \left[\left(\frac{\text{DOY} - 2}{360} \right) \times 360 \right]} - 0.01 \quad (3.5)$$

เมื่อ USERR คือ ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของยานอวกาศกับดวงอาทิตย์ (AU)

DOY คือ วันที่เกิดการปะทุโดยนับจำนวนวันในรอบ 1 ปี

6. การหาค่าโมเมนตัมที่ระดับพลังงานต่าง ๆ ของแต่ละธาตุ

การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เราทำการศึกษากการกระจายตัวของอนุภาคในแต่ละโมเมนตัม แต่ข้อมูลที่เรได้จากยานอวกาศนั้นเป็นข้อมูลของค่าระดับพลังงาน ซึ่งค่าโมเมนตัมนั้นเราสามารถหาได้

จากสมการ

$$p = \sqrt{\frac{(E_k - m_0 c^2)^2 - (m_0 c^2)^2}{c^2}} \quad (3.6)$$

เมื่อ E_k คือ พลังงานเฉลี่ยของแต่ละระดับพลังงาน

p คือ โมเมนตัม (MeV/n)

C คือ ความเร็วแสง (AU/min)

m_0 คือ มวลที่แท้จริงของแต่ละธาตุ (kg)

7. การหาค่าอัตราส่วนของความเร็วลมสุริยะต่อความเร็วแสง

จากสมการ

$$\beta = \frac{v_{sw}}{c} \quad (3.7)$$

เมื่อ v_{sw} คือ ความเร็วลมสุริยะ (AU/min)

c คือ ความเร็วแสง (AU/min)

8. การหาค่าความเร็ว และระยะทางสูงสุดของอนุภาคในแต่ละระดับพลังงานจากความสัมพันธ์

จากสมการ

$$\begin{aligned} v_{\max} &= \beta c \\ s &= v_{\max} t \end{aligned} \quad (3.8)$$

เมื่อ v_{\max} คือ ความเร็วสูงสุดของแต่ละระดับพลังงาน (AU/min)

- β คือ อัตราส่วนของความเร็วลมสุริยะต่อความเร็วแสง
 t คือ ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาค (min)
 s คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค
 c คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 0.1202 (AU/min)

9. การหาค่าอัตราส่วนของฟลักซ์สูงสุดในแต่ละระดับพลังงานเทียบกับฟลักซ์สูงสุดในระดับพลังงานที่ 1 เพื่อนำไปใช้ในการเป็นค่าตั้งต้นของฟลักซ์ในระดับพลังงานถัดไป

$$\text{สเปกตรัมของฟลักซ์ระดับพลังงานที่ } N = \frac{\text{ฟลักซ์สูงสุดในระดับพลังงาน } N}{\text{ฟลักซ์สูงสุดในระดับพลังงานต่ำสุด}} \quad (3.9)$$

ตารางที่ 6 ตารางค่าต่าง ๆ ในขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลของธาตุฮีเลียม

E (Mev/n)	m_0 (MeV/c ²)	P (MeV/c)	B	V (AU/min)	log P	Spectrum	log spectrum	S (AU)
4.032	932.107	86.793	0.092	0.0111	1.938	1	0	64.190
5.390	932.107	100.388	0.107	0.0128	2.001	0.581	-0.23552	74.138
6.684	932.107	111.833	0.119	0.0143	2.048	0.334	-0.47586	82.476
8.417	932.107	125.552	0.133	0.0160	2.098	0.126	-0.89806	92.423
11.493	932.107	146.826	0.155	0.0187	2.166	0.102	-0.99001	107.731
15.622	932.107	171.372	0.180	0.0217	2.233	-	-	125.193
22.959	932.107	208.153	0.217	0.0261	2.318	-	-	150.895
34.769	932.107	256.957	0.265	0.0319	2.4098	-	-	183.999

จากตารางที่ 6 แสดงข้อมูลของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงาน 4.03215 MeV/n

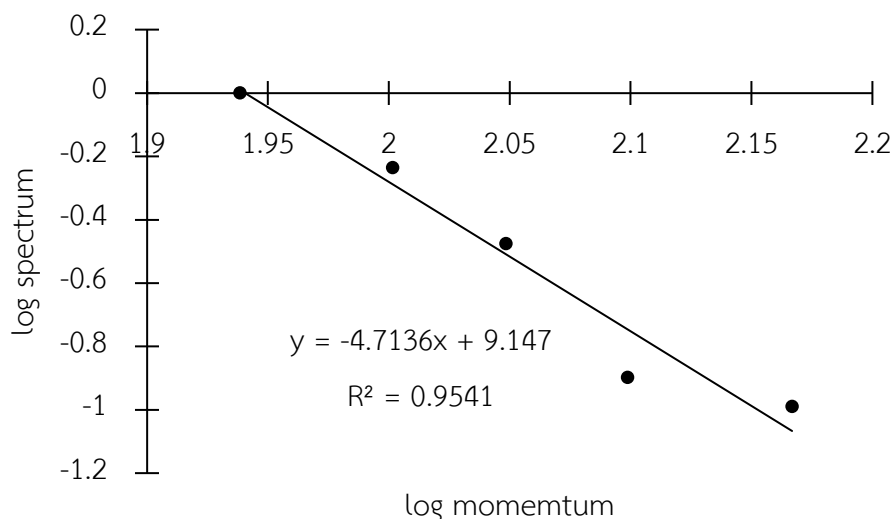
- เมื่อ E คือ พลังงานเฉลี่ยของพลังงานสูงสุด และพลังงานต่ำสุด
 m_0 คือ มวลที่แท้จริง (kg)
 P คือ ค่าโมเมนตัม (MeV/C)
 Beta (B) คือ ค่าอัตราส่วนของความเร็วลมสุริยะต่อความเร็วแสง
 V คือ ความเร็วของอนุภาคที่ระดับพลังงานต่าง ๆ (AU/min)
 S คือ ระยะทางสูงสุดที่อนุภาคเคลื่อนที่ได้ (AU)

10. หาค่าคงที่การสลายตัวของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มีแนวโน้มของการสลายตัวที่ลดลงอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นไปตามกฎกำลัง (Power's law) ดังสมการ

$$\frac{dE}{dN} \propto E^{-\gamma} \quad (3.10)$$

เมื่อ E	คือ	พลังงานของอนุภาค (MeV/n)
N	คือ	จำนวนอนุภาคในแต่ละระดับพลังงาน (particle)
γ	คือ	ค่าคงที่ของการลดลงของอนุภาคแต่ละระดับพลังงาน

การสลายตัวของอนุภาคนั้น สามารถพิจารณาได้จากความชันของกราฟ ระหว่างค่า log momentum กับค่า log spectrum ดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า log ของโมเมนตัมกับค่า log ของสเปกตรัมของฟลักซ์

จากภาพ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log momentum และ log spectrum (อัตราส่วนฟลักซ์) ซึ่งได้ความชันของเส้นตรงที่ลดลงของพลังงานของอนุภาคในแต่ละระดับพลังงานนำไปใช้เป็นตัวตั้งต้นในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่อไป

การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคและการเปรียบเทียบข้อมูล

เมื่อเราได้ข้อมูลจากยานอวกาศและข้อมูลการเตรียมค่าตั้งต้นจากตาราง 6 เพื่อใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยใช้สมการขนส่ง Ruffolo ดังสมการ (2.17) ที่เขียนในโปรแกรมภาษาซีบนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ และแก้สมการโดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข เพื่อหาค่าฟลักซ์ของอนุภาคตามเวลาที่ระยะทางอิสระเฉลี่ยต่าง ๆ เมื่อได้ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค เราจะนำ

ข้อมูลมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงจากยานอวกาศ โดยวิธีการฟิตแบบกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุด (linear least squares fitting) เพื่อหาค่าระยะทางอิสระเฉลี่ย (mean free path) และวิเคราะห์หาระยะเวลาของการปลดปล่อยอนุภาค (injection time) โดยใช้วิธีความกว้างเต็มที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด (FWHM) ซึ่งโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาซีบนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ ประกอบด้วยโปรแกรมทั้งหมด 9 โปรแกรม คือ

1. wind.c คือ โปรแกรมหลักในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยโปรแกรมจะรับค่าตัวแปรต่าง ๆ จากข้อมูลที่ใช้ในการจำลองและเรียกไฟล์จากโปรแกรมอื่นมาทำการประมวลผล ซึ่งค่าที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะถูกปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับการจำลอง โดยมีตัวแปรดังนี้ คือ

Start	คือ	ระยะทางเริ่มต้นในการจำลอง (AU)
Stop	คือ	ระยะทางสุดท้ายของการจำลอง (AU)
S_step	คือ	ระยะของการเพิ่มขึ้นของระยะทาง (AU)
Prints	คือ	การพิมพ์ในช่วงระหว่าง (AU)
nmu	คือ	จำนวนจุดของ μ
length	คือ	ความยาวในการจำลอง (AU)
np	คือ	จำนวนโมเมนตัม
p[1...np]	คือ	โมเมนตัมของแต่ละพลังงาน (MeV/n)
m	คือ	มวลของอนุภาค (MeV/c ²)
betasw	คือ	อัตราส่วนของความเร็วลมสุริยะต่อความเร็วแสง
lamda	คือ	ระยะทางอิสระเฉลี่ย (AU)
q	คือ	ดัชนีกำลังของการกระเจิง
printextra	คือ	การสั่งพิมพ์ข้อมูลออกทางหน้าจอหรือไม่ (0 ไม่พิมพ์ / 1 พิมพ์)

2. decel.c เป็นโปรแกรมสำหรับการประมวลผลในพจน์ของการสลายตัวแบบค่อยเป็นค่อยไป ตามสมการ Ruffolo 1998

3. field.c คือ โปรแกรมในการประมวลผลการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเส้นสนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ โดยจะคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงในพจน์ของการโพกัสแบบบอดีแบบดิ๊กหรือการบานออกของเส้นสนามแม่เหล็ก รวมถึงผลกระทบของลมสุริยะในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมย่อยที่ใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ของสมการขนส่ง

4. initial.c คือ โปรแกรมที่ใช้กำหนดการตั้งต้นของการกระจายตัวของอนุภาคเพื่อใช้ในการประมวลผลการจำลองการเคลื่อนที่
 5. inject.c คือ โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณการปลดปล่อยอนุภาค
 6. nrutil.c คือ โปรแกรมที่ใช้สำรองพื้นที่ในหน่วยความจำ
 7. printout.c คือ โปรแกรมควบคุมการแสดงผลของข้อมูลที่ต้องการ
 8. stream.c เป็นโปรแกรมที่พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามแนวแกน z โดยการพาของลมสุริยะ
 9. tridag.c คือ โปรแกรมสำหรับการแก้สมการเมตริกซ์
- ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค โปรแกรม wind.c จะรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ของข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ แล้วทำการจำลองการเคลื่อนที่และนำผลออกมาจัดเก็บไว้ในไฟล์ชื่อ intense.dat เพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูลต่อไป

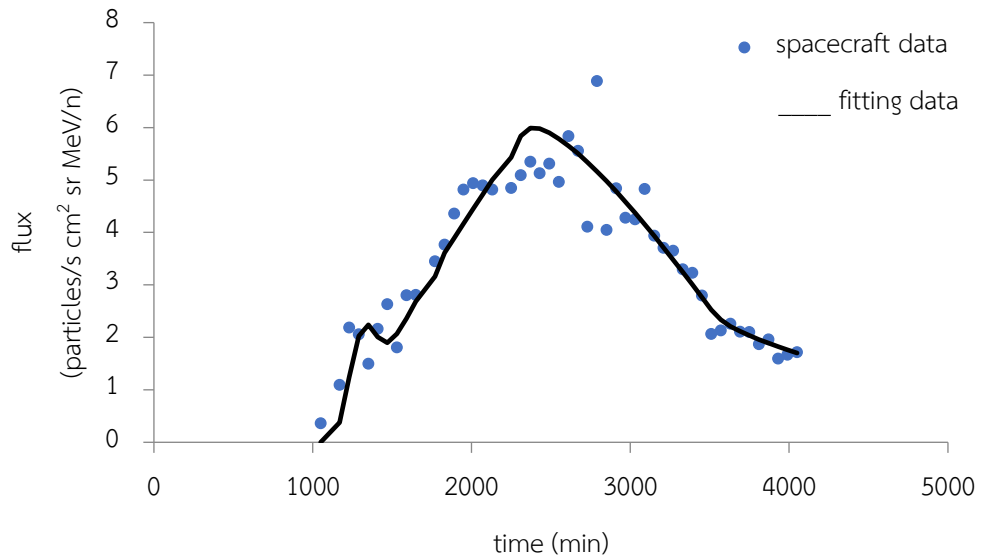
การ-fit-เปรียบเทียบข้อมูล

เมื่อได้ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคแล้ว จากนั้นเราจะทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากยานอวกาศกับผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยใช้เทคนิคการ-fit-ข้อมูลแบบกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุด (linear least squares fitting) โดยมีรูปแบบดังสมการดังนี้

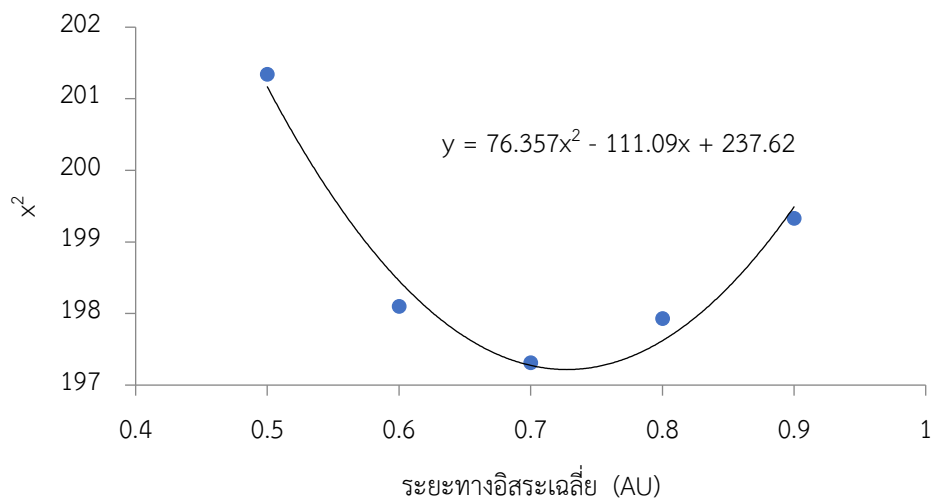
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{y_n - y_{(x_n)}}{\sigma_n} \right]^2 \quad (3.11)$$

เมื่อ χ^2	คือ	ผลรวมของค่าความแตกต่างกำลังสองของข้อมูลจำนวน n
y_n	คือ	ข้อมูลจริงจากยานอวกาศในไฟล์ข้อมูลพลักซ์ของอนุภาคตามเวลา
$y_{(x_n)}$	คือ	ข้อมูลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในรูปแบบไฟล์ counts.dat
σ_n	คือ	ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลแต่ละจุด
n	คือ	จำนวนของข้อมูล

ผลการฟิตข้อมูลแสดงดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 การฟิตเปรียบเทียบข้อมูลสำหรับธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV/n



ภาพที่ 30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง χ^2 และค่าระยะทางอิสระเฉลี่ย

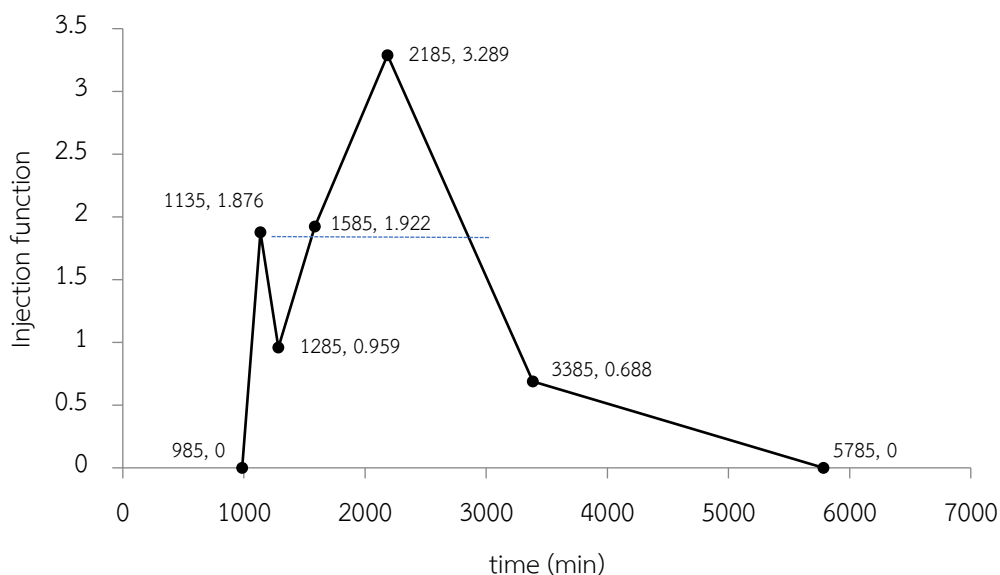
เราจะทำการฟิตข้อมูลระยะทางการจำลองระยะทางอิสระเฉลี่ยค่าต่าง ๆ เทียบกับข้อมูลจริง เพื่อหาแนวโน้มค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ให้ค่า χ^2 ค่าต่ำที่สุด จากค่าข้างเคียงทั้งหมด 5 จุด เพื่อหาแนวโน้มค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ให้ค่า χ^2 ต่ำสุด จากเส้นแนวโน้มแบบพาราโบลา ดังแสดงในภาพที่

เมื่อได้ค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุด จากเส้นแนวโน้มเฉลี่ย นำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบข้อมูลอีกครั้ง จะได้ค่า x^2 ออกมา ซึ่งทั้งหมดนี้จะรายงานค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุดของอนุภาคฮีเลียมที่พลังงาน 4.032 MeV/n

หาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค

การพิตข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากยานอวกาศ กับข้อมูลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค เมื่อได้ค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยที่เหมาะสมแล้ว ผลการพิตข้อมูลจะได้ฟังก์ชันของการปลดปล่อยอนุภาคตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปเขียนกราฟเพื่อหาระยะเวลาของการปลดปล่อยอนุภาคได้ โดยในการศึกษาครั้งนี้เราใช้วิธีการหาระยะเวลาของการปลดปล่อยอนุภาคด้วยวิธี FWHM (Full Width at Half Maximum)

การหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคโดยการใช้เทคนิควิธี FWHM หรือวิธีความกว้างเต็มที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด คือการหาค่าความกว้างของระดับจากจุดสูงสุดของกราฟลดลงมาครึ่งหนึ่ง ซึ่งเป็นวิธีการหาระยะเวลาการปลดปล่อยของอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลก โดยเมื่อเราได้ฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาคตามเวลา เราจะนำข้อมูลที่นำมาทำการเขียนกราฟ โดยแกน y คือฟังก์ชันการปลดปล่อย และแกน x คือเวลาในการปลดปล่อยอนุภาค ดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV/n

กราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม เราสามารถหาค่าของระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคด้วยวิธี FWHM ได้ดังนี้

1. หาค่าครึ่งหนึ่งจากจุดที่สูงที่สุดของสามเหลี่ยมการปลดปล่อย (Half Maximum)

$$\text{Half Maximum} = \frac{y_2}{2} = \frac{3.289}{2} = 1.645$$

2. หาสมการเส้นตรงจาก $y = mx + c$

หาค่าความชัน (slop) $m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ ใช้คู่อันดับที่ (985, 0) และ (1135, 1.876)

$$m = \frac{1.876 - 0}{1135 - 985} = 0.0125$$

3. หาค่า c จากการแทนค่าของคู่อันดับ (x, y) ลงไปในสมการ $y = mx + c$

ได้ค่า $1.876 = 0.0125(1135) + c$
 $c = -12.312$

4. นำค่า Half Maximum, m และ c แทนในสมการ $y = mx + c$

จาก $y = mx + c$
 $1.645 = 0.0125x_a - 12.312$
 จะได้ว่า $x_a = 1116.490$

5. คำนวณหาจุด x_b ตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 โดยคำนวณหาความชันจากคู่อันดับ (1135, 1.876) และ (1286, 0.959)

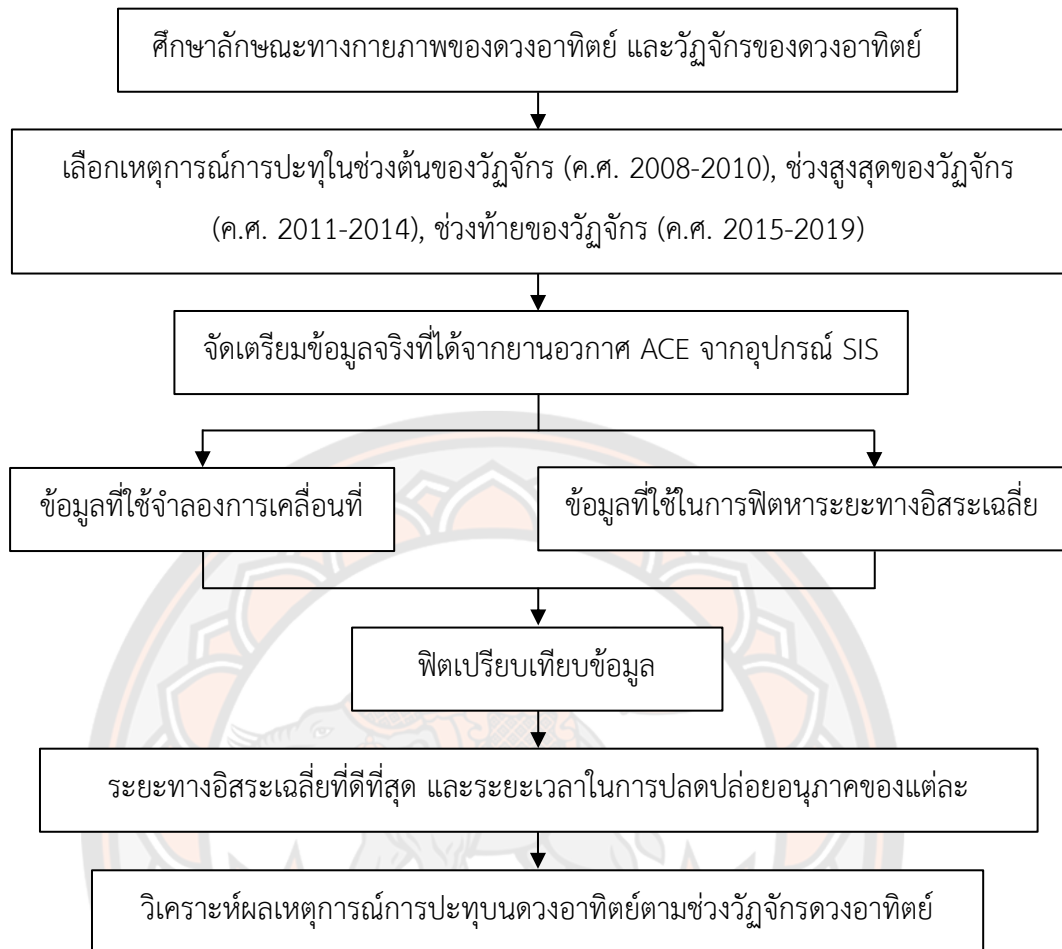
จะได้ค่า $x_b = 1172.868$ นาที

6. คำนวณหาระยะเวลาการปลดปล่อยได้จาก

$$x_b - x_a = 1116.490 - 1172.868 = 56.378 \text{ นาที}$$

7. คำนวณหาระยะเวลาการปลดปล่อยจากคู่อันดับ (1285, 0.688) และ (1585, 1.922) ลบกับระยะเวลาการปลดปล่อยจากคู่อันดับ (2185, 3.289) และ (3385, 0.688) ได้ระยะเวลาการปลดปล่อยเท่ากับ $1498.5514 - 2943.708 = 1445.157$ นาที

จากวิธีการดำเนินงานทั้งหมดสามารถสรุปเป็นแผนผังการดำเนินงาน แสดงดังภาพที่ 32

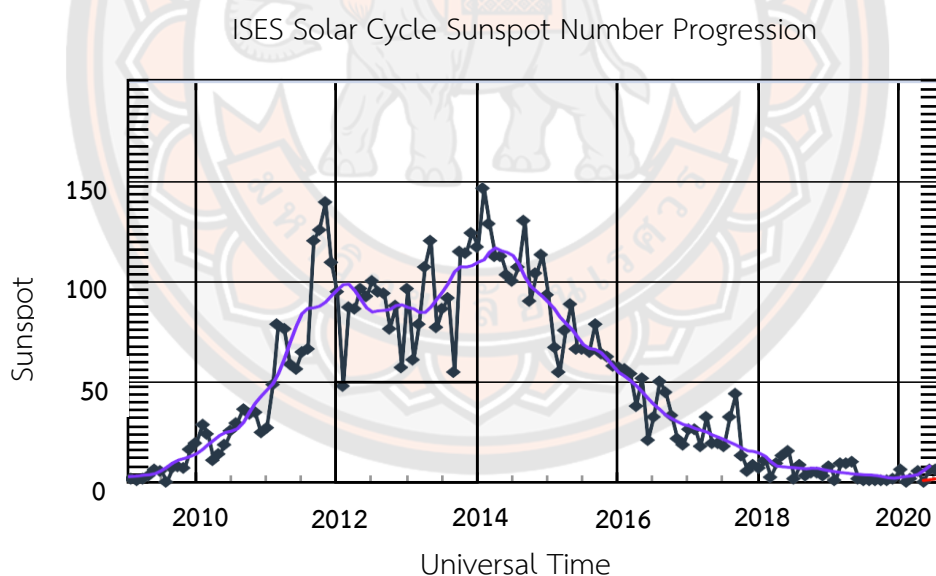


ภาพที่ 32 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4

ผลการวิจัย

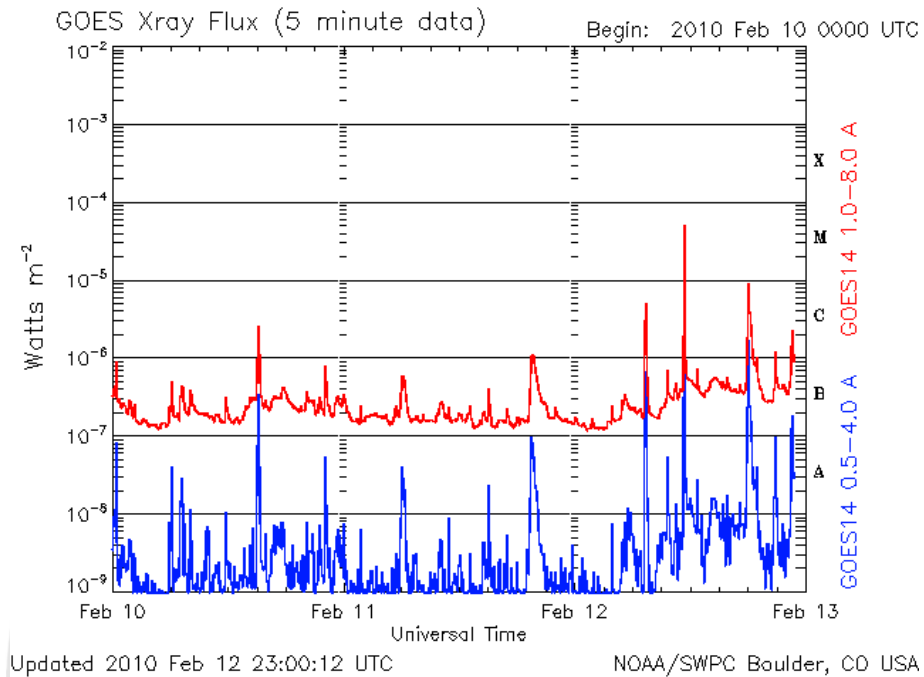
จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ที่เคลื่อนที่มายังโลกของ เหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ โดยใช้ข้อมูลที่บันทึกได้จากเครื่องมือ SIS บนยานอวกาศ ACE เลือกวิเคราะห์อนุภาคฮีเลียม ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ ลักษณะการระเบิดบนดวงอาทิตย์ของ อนุภาคที่ครอบคลุมในรอบวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24 กราฟของวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24 แสดงดังภาพที่ 33 โดยศึกษาในช่วงเริ่มต้นของวัฏจักร ช่วงสูงสุดของวัฏจักร และช่วงท้ายของวัฏจักร ช่วงเริ่มต้น ของวัฏจักรครอบคลุมตั้งแต่ปี ค.ศ. 2008 – 2010 ช่วงสูงสุดของวัฏจักรครอบคลุมตั้งแต่ปี ค.ศ. 2011 – 2014 และช่วงท้ายของวัฏจักรครอบคลุมตั้งแต่ปี ค.ศ. 2015 – 2019 เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของ อนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ โดยสมการขนส่งของ Ruffolo 1998 ที่ใช้โปรแกรมภาษาซีในการ แก้สมการเชิงตัวเลขบนระบบปฏิบัติการลินุกซ์



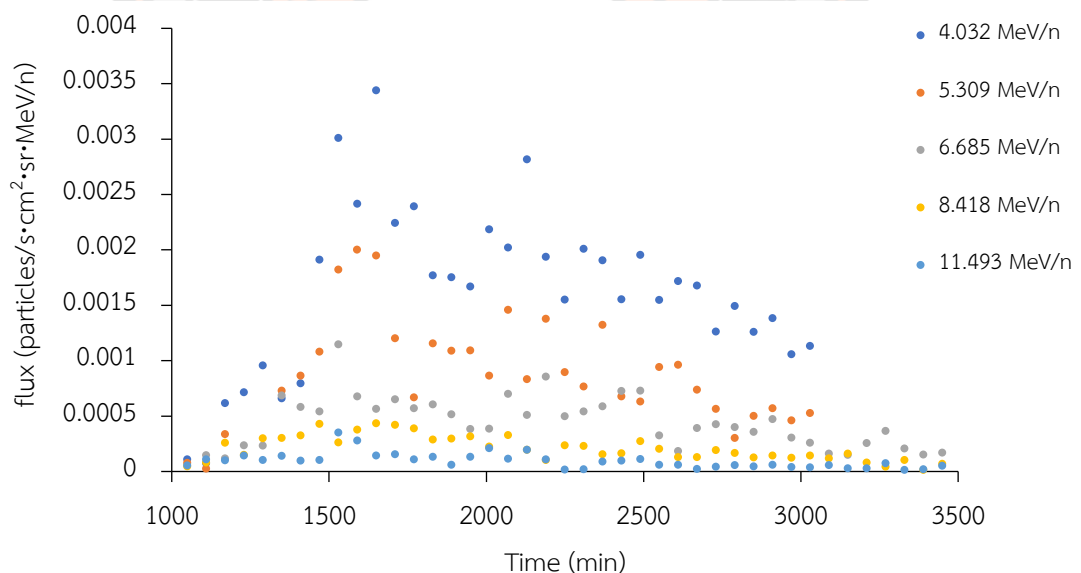
ภาพที่ 33 แสดงจุดมืดบนดวงอาทิตย์ของรอบวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24 ช่วงปี ค.ศ. 2008 – 2019

จากข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอนุภาค ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองที่ได้จาก อวกาศของแต่ละเหตุการณ์ประกอบไปด้วย ข้อมูลของรังสีเอกซ์ ความเร็วลมสุริยะ การกระจายตัว ของอนุภาคตามเวลา ของทั้ง 3 เหตุการณ์ การเตรียมข้อมูลงานวิจัยนี้จะได้ชุดข้อมูลอนุภาคของธาตุ He ทั้ง 5 ระดับพลังงาน ที่ได้จากยานอวกาศ ACE ได้แก่ ข้อมูลการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ ความเร็วลม

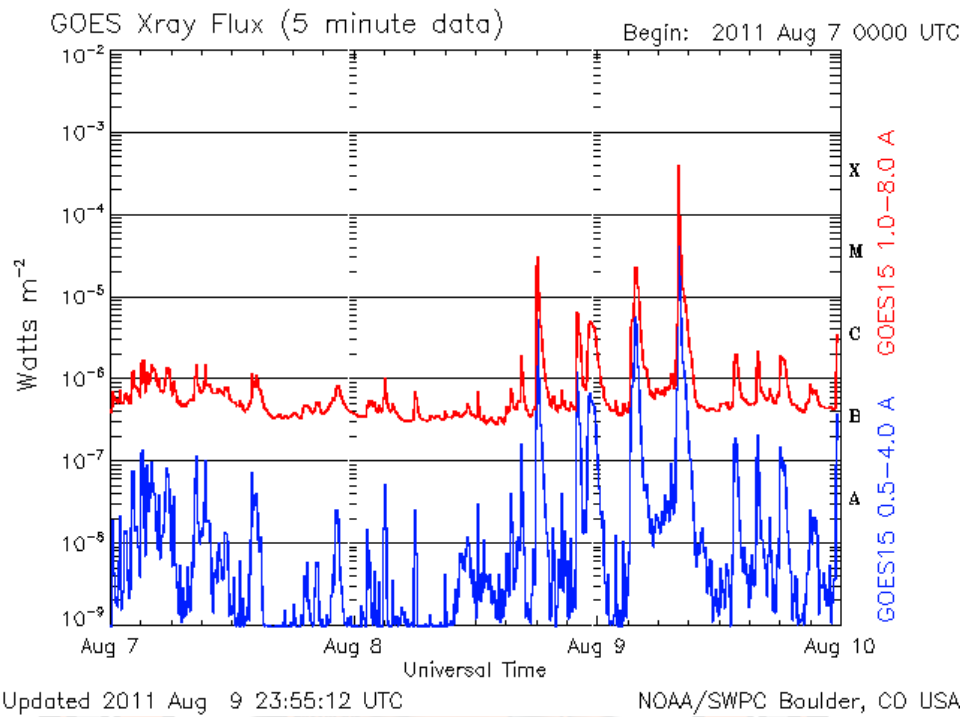
สุริยะ และข้อมูลความหนาแน่นของอนุภาค ช่วงต้นของวัฏจักร แสดงดังภาพที่ 34 - 36 ช่วงสูงสุดของวัฏจักร แสดงดังภาพที่ 37 - 39 ช่วงท้ายของวัฏจักร แสดงดังภาพที่ 40 - 42



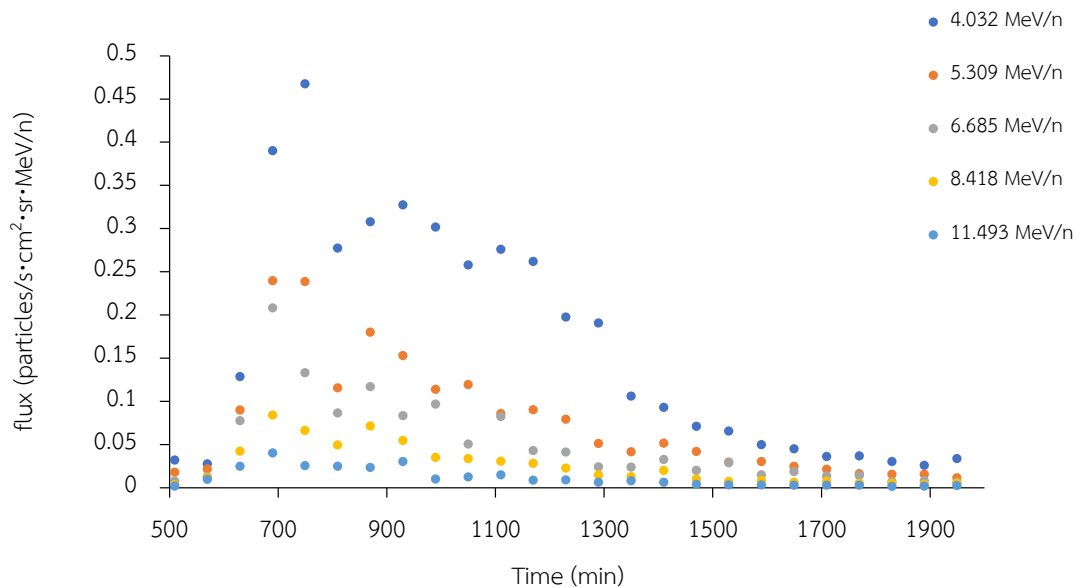
ภาพที่ 34 การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ของการปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2553



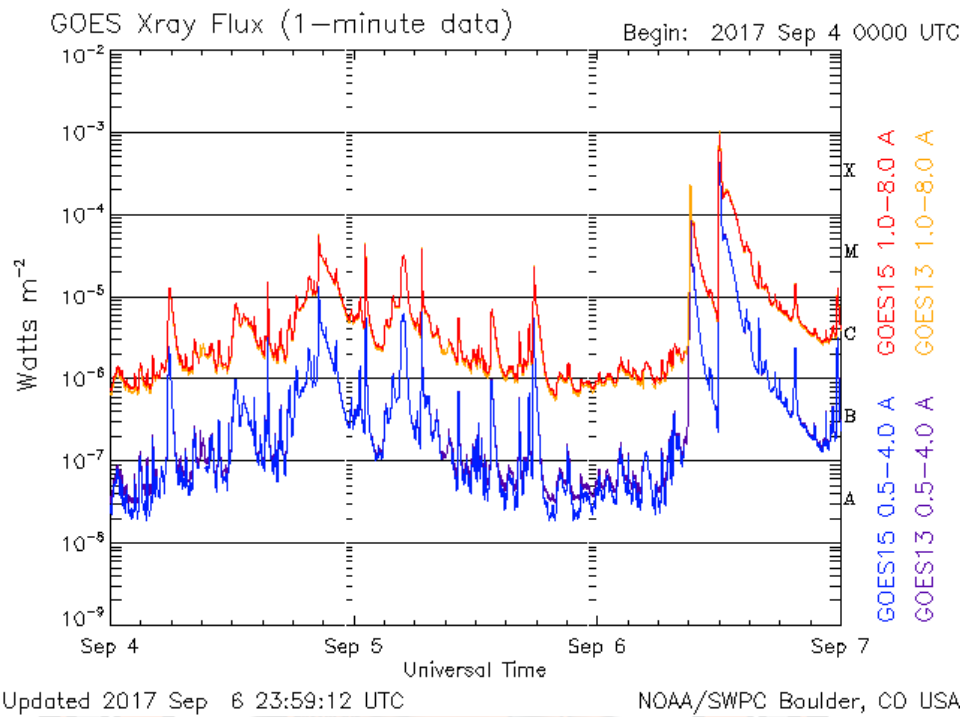
ภาพที่ 35 ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคสำหรับธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 4.032, 5.390, 6.685, 8.418 และ 11.493 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010



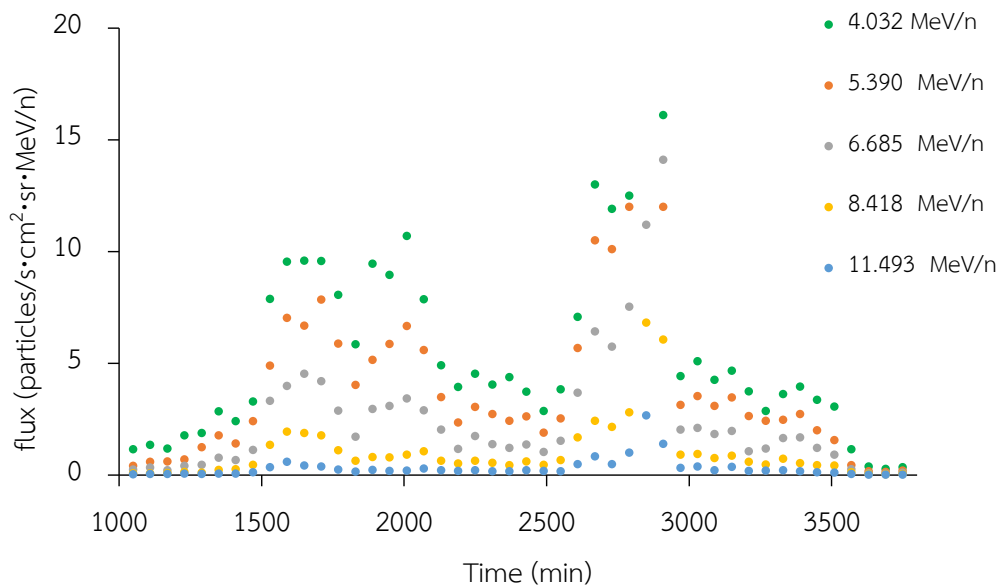
ภาพที่ 36 การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ของการปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 9 สิงหาคม 2011



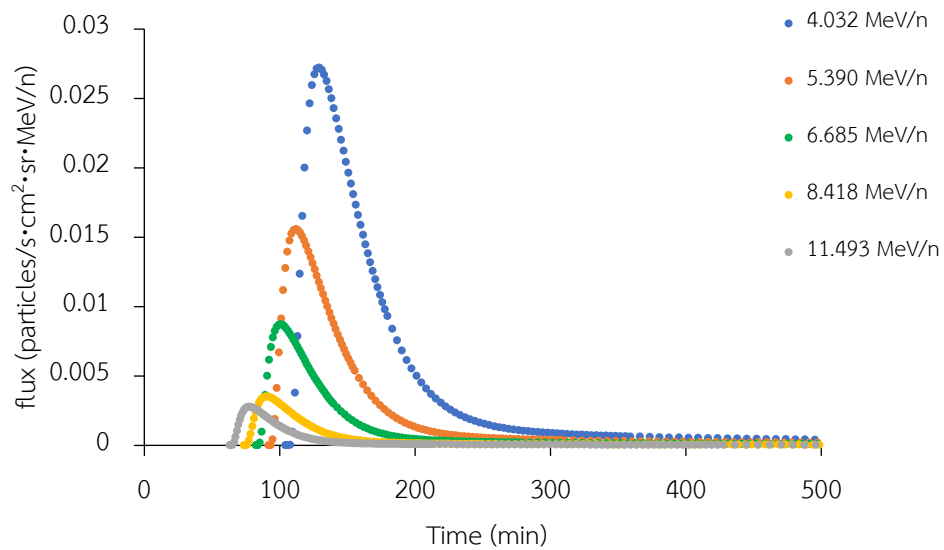
ภาพที่ 37 ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคสำหรับธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 4.032, 5.390, 6.685, 8.418 และ 11.493 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 9 สิงหาคม 2011



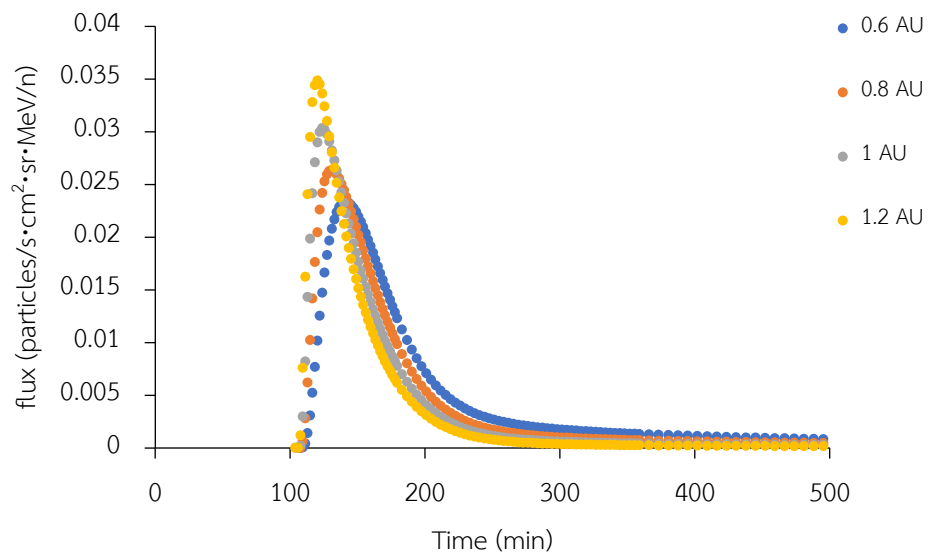
ภาพที่ 38 การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ของการปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 6 กันยายน 2017



ภาพที่ 39 ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคสำหรับธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 4.032, 5.390, 6.685, 8.418 และ 11.493 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 6 สิงหาคม 2017



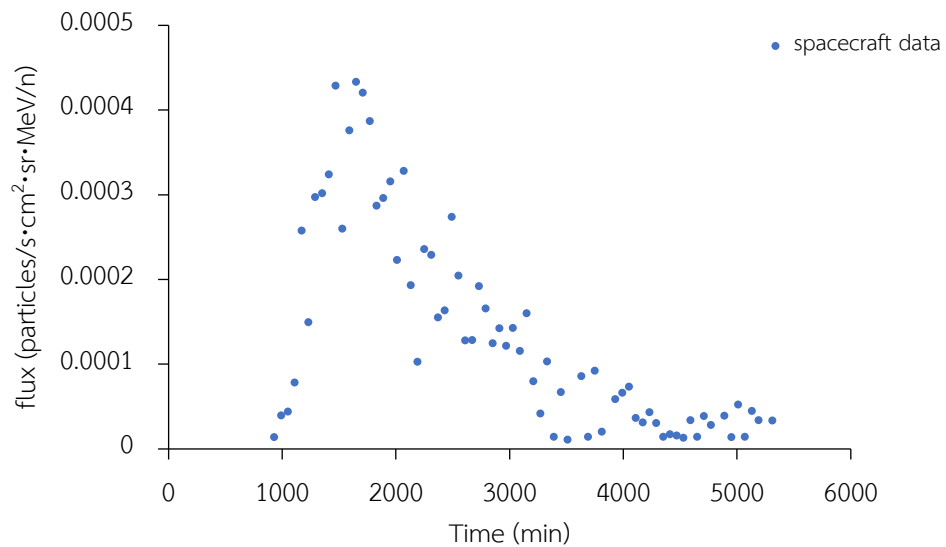
ภาพที่ 40 ค่าการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาสำหรับธาตุ He ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.847 AU ที่ระดับพลังงาน 4.032, 5.390, 6.685, 8.418 และ 11.493 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010



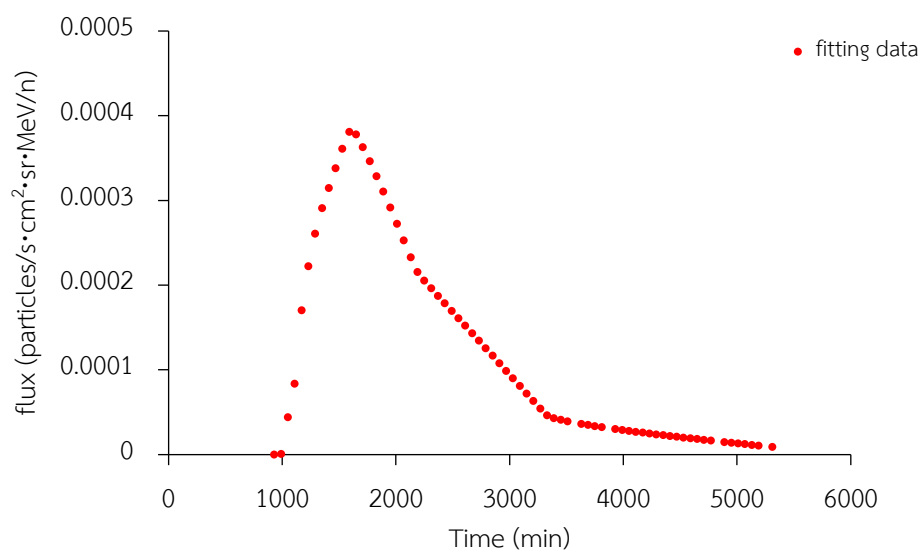
ภาพที่ 41 การกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาสำหรับธาตุ He ที่พลังงาน 4.032 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.6, 0.8, 1 และ 1.2 AU สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010

ผลการฟิตเปรียบเทียบข้อมูล

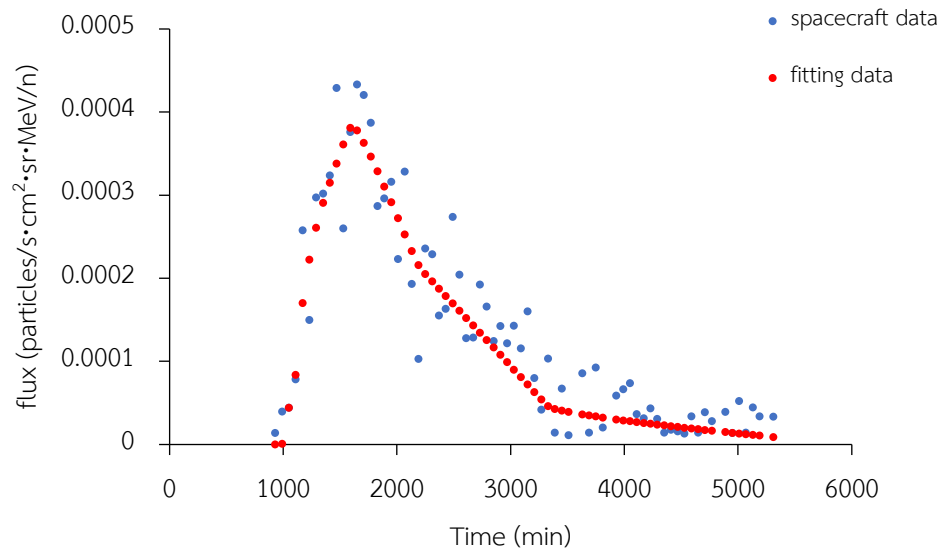
ผลการฟิตเปรียบเทียบข้อมูลจริงที่ได้จากยานอวกาศ แสดงในภาพที่ 45 กับข้อมูลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค แสดงในภาพที่ 46 โดยใช้วิธีการฟิตแบบกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุด โดยกราฟจะแสดงผลการฟิตจากระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุดในแต่ละระดับพลังงาน ผลการฟิตในช่วงต้นของวิถีจักร สำหรับวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010 ดังแสดงดังภาพที่ 47



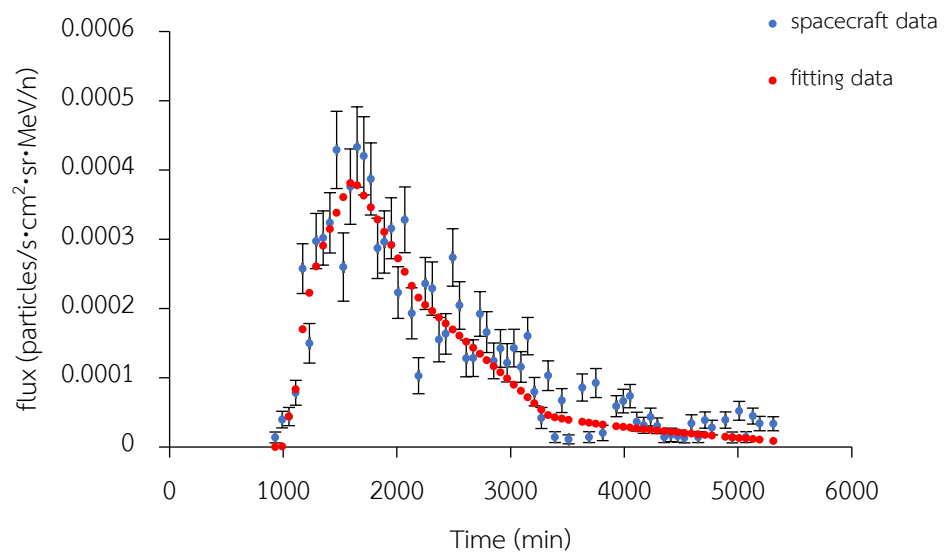
ภาพที่ 42 ข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 8.418 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010



ภาพที่ 43 ข้อมูลจากการจำลองของธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 8.418 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010



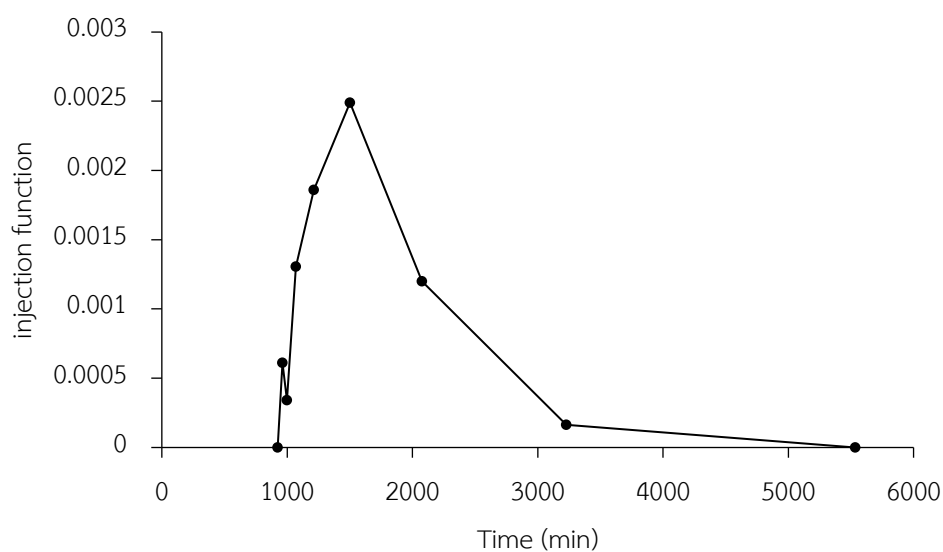
ภาพที่ 44 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 8.418 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010



ภาพที่ 45 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 8.418 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010 ภายใต้อัฒานค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

ผลการหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค

การหาค่าระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ จากกราฟแสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อย โดยใช้วิธีความกว้างเต็มที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด ผลการหาระยะเวลาการปลดปล่อยของอนุภาคในช่วงต้นของวัฏจักร ของวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010 ช่วงสูงสุดของวัฏจักร วันที่ 9 สิงหาคม 2011 และช่วงท้ายของวัฏจักร วันที่ 6 กันยายน 2017 ดังแสดงในภาพที่ 49



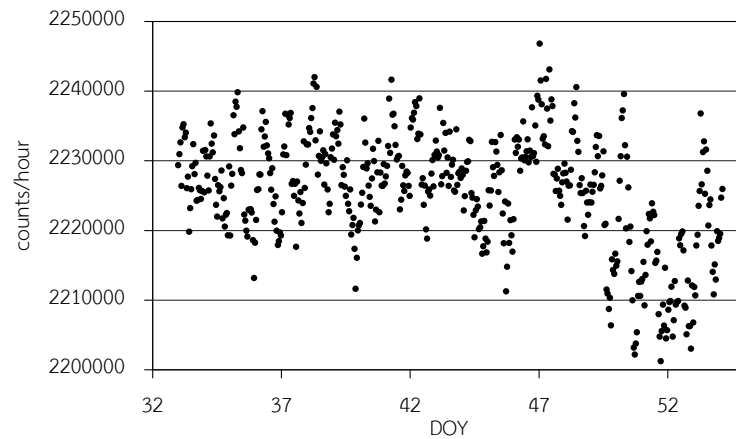
ภาพที่ 46 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุ He ที่ระดับพลังงาน 8.418 MeV/n สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010 มีระยะเวลาการปลดปล่อย 1004.1 นาที

จากผลการพิตพบว่าการจำลอง และข้อมูลจริงจากยานอวกาศ เพื่อหาระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุด และระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 7

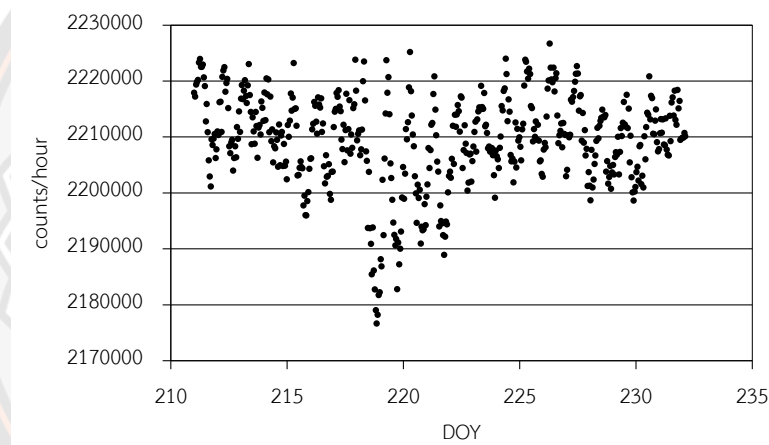
ตารางที่ 7 ค่าระยะทางอิสระเฉลี่ย และระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคที่ได้จากการจำลองอนุภาค He สำหรับเหตุการณ์ต่าง ๆ

เหตุการณ์ในวัฏจักร	ระดับพลังงาน (MeV/n)	ระยะทางอิสระเฉลี่ย $\lambda \pm \Delta\lambda$ (AU)	ระยะเวลาการ ปลดปล่อย (นาทิจ)
12 กุมภาพันธ์ 2553	4.032	0.847 ± 0.288	1329.549
	5.390	0.329 ± 0.080	272.02
	6.685	0.489 ± 0.473	859.006
	8.418	1.007 ± 0.516	1004.1
	11.493	1.140 ± 1.266	1231.714
9 สิงหาคม 2554	4.032	0.719 ± 0.488	43.967
	5.390	0.667 ± 0.066	45.732
	6.685	0.388 ± 0.062	45.429
	8.418	0.325 ± 0.474	35.660
	11.493	0.548 ± 0.064	30.708
6 กันยายน 2560	4.032	1.408 ± 0.042	136
	5.390	0.914 ± 0.076	198
	6.685	1.531 ± 0.097	171
	8.418	1.532 ± 0.121	359
	11.493	0.475 ± 0.143	113

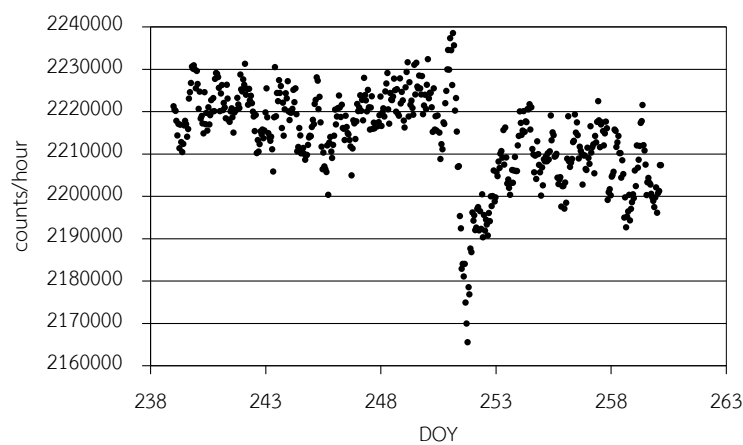
การศึกษาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงจำนวนอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านเข้ามาของโลกที่บันทึกโดยสถานีตรวจวัดนิวตรอนสิรินธร ช่วงต้นของวัฏจักร วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010 ช่วงสูงสุดของวัฏจักร วันที่ 9 สิงหาคม 2011 และช่วงท้ายของวัฏจักร 6 กันยายน 2017 ข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 49-51



ภาพที่ 47 การกระจายตัวของอนุภาคที่บันทึกจากสถานีตรวจวัดนิวตรอน สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010



ภาพที่ 48 การกระจายตัวของอนุภาคที่บันทึกจากสถานีตรวจวัดนิวตรอน สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 9 สิงหาคม 2011



ภาพที่ 49 การกระจายตัวของอนุภาคที่บันทึกจากสถานีตรวจวัดนิวตรอน สำหรับการระเบิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 6 กันยายน 2017

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ที่มีความรุนแรงและครอบคลุมในช่วงวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24 โดยการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ด้วยสมการขนส่งอนุภาค และแก้สมการด้วยวิธีเชิงตัวเลขด้วยวิธีการผลต่างจำกัด (Finite difference method) แล้วนำผลการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคมาเปรียบเทียบข้อมูลจริงที่ได้จากเครื่องมือ SIS บนยานอวกาศ ACE ด้วยวิธีกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุด (linear least squares) เพื่อคำนวณหาระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุด และใช้วิธี FWHM (full width at half maximum) ในการคำนวณหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มายังโลก

จากการศึกษาเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ ที่เกิดขึ้นในช่วงวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24 ของทั้งสามเหตุการณ์ ได้แก่ ช่วงต้นของวัฏจักร ช่วงสูงสุดของวัฏจักร และช่วงท้ายของวัฏจักร เพื่อวิเคราะห์ลักษณะเด่นหรือความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในช่วงวัฏจักรดวงอาทิตย์ที่ 24 จากการวิเคราะห์อนุภาคฮีเลียม (He) ที่ระดับพลังงานต่าง ๆ พบว่าเหตุการณ์การปะทุ ณ วันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2010 เป็นการปะทุช่วงต้นของวัฏจักร มีระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์สูงสุดอยู่ที่ระดับ M8.3 ซึ่งมีระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์สูงสุดในช่วงต้นของวัฏจักรใน 2 ปีแรก (ค.ศ. 2008-2010) เริ่มระเบิดที่เวลา 11:19 UT และสิ้นสุดที่เวลา 11:28 UT คิดเป็นระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคที่วัดได้จากดวงอาทิตย์ 9 นาที และจากผลการจำลองด้วยสมการการเคลื่อนที่พบว่าที่ระยะทางอิสระเฉลี่ยที่อนุภาคเคลื่อนที่ได้มีความแปรปรวนสูงอยู่ในช่วง 0.489-1.007 AU และระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคมีค่าอยู่ในช่วง 859.006-1329.549 นาที เหตุการณ์ดังกล่าวได้รับผลกระทบจากตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ค่อนข้างสูง ไม่พบคลื่นกระแทกในช่วงเวลาของการปะทุ และเนื่องจากเป็นเหตุการณ์ที่ไม่มี ความรุนแรงและเกิดทางด้านตะวันออกของดวงอาทิตย์จึงทำให้อนุภาคเกิดการพุ่งอยู่ในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ นานเหตุการณ์การปะทุ ณ วันที่ 9 สิงหาคม 2010 เป็นการปะทุช่วงสูงสุดของวัฏจักร มีระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์อยู่ที่ระดับ X6.9 ซึ่งพบระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์ครั้งแรกในช่วงสูงสุดของวัฏจักร (ค.ศ. 2011-2014) ระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคที่วัดได้จากดวงอาทิตย์ 20 นาที โดยเริ่มระเบิดที่เวลา 07:48 UT และสิ้นสุดที่เวลา 08:08 UT พบคลื่นกระแทกจากการตรวจพบคลื่นวิทยุประเภทที่ 2 เวลา 08:01 UT แสดงถึงการตรวจพบการปลดปล่อยมวลสารจากชั้น

โคโรนา ซึ่งอยู่ในช่วงเวลาที่เกิดการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์หลังเกิดการปะทุไป แล้ว 13 นาทีและจากผลการจำลองด้วยสมการการเคลื่อนที่พบว่าระยะทางอิสระเฉลี่ยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.3 AU และมีระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคอยู่ในช่วง 35-45 นาที ซึ่งพบว่าเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดที่ตำแหน่ง N18W68 ด้านตะวันตกของดวงอาทิตย์ที่ตำแหน่ง 68 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่งที่สนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์เชื่อมโดยตรงระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก (60°W) การปลดปล่อยรังสีเอกซ์ที่มีระดับความรุนแรงสูง และการปลดปล่อยมวลสารจากโคโรนาเกิดขึ้นในช่วงใกล้กับช่วงสูงสุดที่มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ จึงทำให้ส่งผลต่อการเร่งของอนุภาค และส่งผลทำให้เกิดการพุ่งของอนุภาคน้อย ทำให้ระยะเวลาการปลดปล่อยที่วัดได้ใกล้เคียงกับกับระยะเวลาที่วัดจากดวงอาทิตย์และเหตุการณ์การปะทุ ณ วันที่ 6 กันยายน 2017 เป็นการปะทุช่วงท้ายของวัฏจักร มีระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์อยู่ที่ระดับ X9.3 ซึ่งมีระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์สูงสุดแต่เกิดในช่วงท้ายของวัฏจักร (ค.ศ. 2015-2019) เริ่มระเบิดที่เวลา 11:53 UT สิ้นสุดที่เวลา 12:10 UT ระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคที่วัดได้จากดวงอาทิตย์ใช้เวลาปลดปล่อย 17 นาที พบคลื่นกระแทกโดยมีการตรวจพบคลื่นวิทยุประเภทที่ 2 เวลา 12:02 UT และคลื่นวิทยุประเภทที่ 4 เวลา 12:01 UT แสดงถึงการตรวจพบการปลดปล่อยมวลสารจากโคโรนาในช่วงสูงสุดของการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ และจากผลการจำลองด้วยสมการการเคลื่อนที่พบว่าระยะทางอิสระเฉลี่ยมีค่าค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 1.408-1.532 AU ระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคมีช่วงเวลาที่ยาวนานประมาณ 2-6 ชั่วโมง เหตุการณ์ดังกล่าวมีการตรวจพบการระเบิดบนดวงอาทิตย์ในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกันที่ระดับ X2.2 ในวันเดียวกันและเหตุการณ์วันนี้มีการตรวจพบความเสียหายบนโลก ได้แก่ ปรากฏการณ์ของแสงออโรรา (Aurora) ในบางประเทศของสหรัฐอเมริกา [8]

บรรณานุกรม



1. Physics. The Sun [Internet]. 2020; Accessed 2020 October 20. Available from: <http://www.passmyexams.co.uk/GCSE/physics/structure-of-the-sun.html>.
2. วุฒิสักดิ์ กาญจนภา. การวิเคราะห์เหตุการณ์การปะทุและสภาพแวดล้อมในอวกาศในช่วงสูงสุดของวัฏจักรที่ 24 บนดวงอาทิตย์. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2561.
3. SPACE WEATHER PREDICTION CENTER. SOLAR CYCLE PROGRESSION. [Internet]. 2020; Accessed 2020 July 5. Available from: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>.
4. สุวรรณดี ป. การวิเคราะห์การระเบิดบนดวงอาทิตย์ที่มีความรุนแรงในช่วงท้ายวัฏจักรสุริยะที่ 24 [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2563.
5. วิมุติ วสะหลาย. เรื่องจริงของพายุสุริยะ. [อินเทอร์เน็ต]. 2543 [เข้าถึงเมื่อ 1 ก.ค. 2563]. เข้าถึงได้จาก: <http://thaiastro.nectec.or.th/library/article/228/>.
6. SPACE WEATHER PREDICTION CENTER. SOLAR CYCLE 24 STATUS AND SOLAR CYCLE 25 UPCOMING FORECAST. [Internet]. 2561; Accessed 2020 July 3. Available from: <https://www.swpc.noaa.gov/news/solar-cycle-24-status-and-solar-cycle-25-upcoming-forecast>.
7. กาญจนา บุญทรัพย์. การวิเคราะห์หาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจากการปะทุบนดวงอาทิตย์ สำหรับเหตุการณ์วันที่ 24 [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2554.
8. Yohkoh. A Flaring Loop at the Solar Limb as Seen by Yohkoh. [Internet]. 1992; Accessed 2020 July 5. Available from: <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/flareimage.htm>.
9. จิราณี ขำล้ำเลิศ, นลินี เอี่ยมสะอาด. การวิเคราะห์เหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ที่มีความรุนแรงตามประเภทการปะทุในช่วงปี พ.ศ. 2554-2556. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 18; 2559.
10. จิราณี ขำล้ำเลิศ, วุฒิสักดิ์ กาญจนภา, พรพิตรา ทิพรราช, พรวิบูลย์ สุขรัมย์, รุ่งทิวา ยิ้มบุญเกิด. การวิเคราะห์อิทธิพลของสภาพอวกาศการระเบิดบนดวงอาทิตย์และอนุภาคพลังงานสูงที่ส่งผลต่อสนามแม่เหล็กโลกและความแปรปรวนของอนุภาคพลังงานสูงที่เข้ามาถึงโลก [รายงานการวิจัย]. 2558.
11. สมานชาญ จันทร์เอี่ยม, คมสันต์ ฐรี, รอยาลี มามะ, อธิยุทธ์ ลอยลิบ, สุวนิตย์ วุฒสังข์. พายุสุริยะ มหันตภัยหรือปรากฏการณ์ธรรมชาติ. พิมพ์ครั้งที่ 2. เชียงใหม่: สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ; 2561.

12. Priest ER. The magnetohydrodynamics of energy release in solar flares. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Physical and Engineering Sciences*. 1991;336(1643):363-80.
13. บัญชา ธนบุญสมบัติ. เข้าใจ “พายุสุริยะ” ให้ลึกกว่าข่าวในสื่อ. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ; 2555.
14. นลินี เอี่ยมสะอาด. การวิเคราะห์ความสม่ำเสมอทุกทิศทางของอนุภาคจากดวงอาทิตย์ [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2549.
15. Malakit K. Magnetic mirroring effect on the motion of energetic particles in plasma compressions: Chulalongkorn University; 2002.
16. Gaisser TK, Engel R, Resconi E. *Cosmic rays and particle physics*: Cambridge University Press; 2016.
17. Schlaepfer H, editor *Cosmic rays 2003*: ISSI.
18. Deiaaware U. COSMIC RAYS AND EARTH. [Internet]. 2000; Accessed 2020 July 5 Available from: <http://neutronm.bartol.udel.edu/catch/cr2.html>.
19. แผนภูมิอากาศ กขอ.คปอ. สนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ (The Interplanetary Magnetic Field). [Internet]. Accessed 2020 July 4 Available from: https://www.weather.rtaf.mi.th/climate/SpaceWeather/SolarWind_page2.html
20. Jokipii JR. Propagation of cosmic rays in the solar wind. *Reviews of Geophysics*. 1971;9(1):27-87.
21. Ruffolo D. Effect of adiabatic deceleration on the focused transport of solar cosmic rays. arXiv preprint astro-ph/9408056. 1994.
22. Ruffolo D, Khumlumlert T, Youngdee W. Deconvolution of interplanetary transport of solar energetic particles. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 1998;103(A9):20591-602.
23. Stone EC, Frandsen A, Mewaldt R, Christian E, Margolies D, Ormes J, et al. The advanced composition explorer. *Space Science Reviews*. 1998;86(1):1-22.
24. Krüger H, Moraal H, Bieber J, Clem J, Evenson P, Pyle K, et al. A calibration neutron monitor: Energy response and instrumental temperature sensitivity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2008;113(A8).

25 Khumlumlert T, Kasanuk N. (2008). An influence of the particle acceleration at the earth by coronal mass ejection. In Proceering 4th Mahasarakham University Research Conference (p. 13). Mahasarakham University.

