

การวิเคราะห์การระเบิดบนดวงอาทิตย์ที่มีความรุนแรงในช่วงท้ายวัฏจักรสุริยะที่ 24




วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์  
มีนาคม 2563  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง “การวิเคราะห์การระเบิดบนดวงอาทิตย์ที่มีความรุนแรงในช่วงท้ายวัฏจักรสุริยะที่ 24”  
ของ นางสาวปรีดาภรณ์ สุวรรณดี  
ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญเรืองฤทธิ์ จันทน์นอก)

  
.....ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชिरานี ขำลำเลิศ)

  
.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพชรรัตน์ ศรีสวัสดิ์)

อนุมัติ

  
.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มุณีสว่าง)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

9 ส.ค. 2563

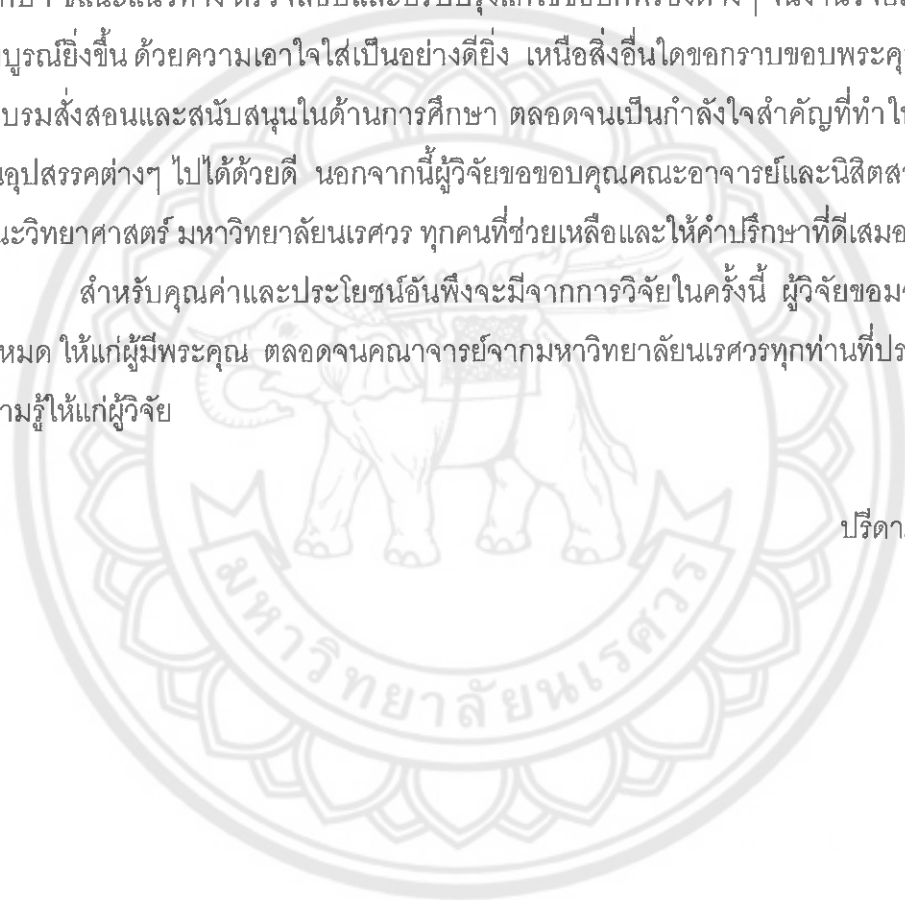
## ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายได้ด้วยความกรุณาจากหลายท่าน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือทุกท่านที่กรุณาเสียสละเวลาและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าเป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบและปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ งานวิจัยมีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดียิ่ง เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้อบรมสั่งสอนและสนับสนุนในด้านการศึกษา ตลอดจนเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้สามารถผ่านพ้นอุปสรรคต่างๆ ไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะอาจารย์และนิสิตสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ทุกคนที่ช่วยเหลือและให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา

สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันพึงจะมีจากการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบคุณความดีทั้งหมด ให้แก่ผู้มีพระคุณ ตลอดจนคณาจารย์จากมหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ผู้วิจัย

ปรีดาภรณ์ สุวรรณดี



ชื่อเรื่อง	การวิเคราะห์การระเบิดบนดวงอาทิตย์ที่มีความรุนแรงในช่วงท้าย วัฏจักรสุริยะที่ 24
ผู้วิจัย	ปรีดาภรณ์ สุวรรณดี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิราณี ขำล้ำเลิศ
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2562
คำสำคัญ	การปะทุบนดวงอาทิตย์ ลมสุริยะ คลื่นกระแทก สภาพอวกาศ การปล่อยมวลสารจากคอโรนา

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วิเคราะห์เหตุการณ์การระเบิดบนดวงอาทิตย์ที่มีความรุนแรงเป็นอันดับสองของวัฏจักรสุริยะที่ 24 ซึ่งเป็นรอบวัฏจักรปัจจุบัน เหตุการณ์นี้เป็นการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปในวันที่ 10 กันยายน 2017 ซึ่งอยู่ในช่วงท้ายของวัฏจักร โดยมีระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์ X8.2 มีระยะเวลาการระเบิด 56 นาที ตำแหน่งที่เกิดการปะทุคือ S09W83 มีความเร็วลมสุริยะ 522 กิโลเมตร/วินาที ซึ่งผู้วิจัยได้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคฮีเลียม คาร์บอน ออกซิเจน และเหล็กที่ระดับพลังงาน 4.032 – 90.856 MeV/n จำลองการเคลื่อนที่ด้วยสมการขนส่ง Ruffolo 1998 ใช้วิธีการเชิงตัวเลขแบบผลต่างจำกัด (finite difference method) ในการแก้สมการและใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์ SIS (Solar Isotope Spectrometer) บนยานอวกาศ ACE (Advanced Composition Explorer) เพื่อเป็นค่าตั้งต้นในการจำลองการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาและ เปรียบเทียบข้อมูลระหว่างข้อมูลจริงจากยานอวกาศกับผลการจำลองด้วยวิธีกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุด เพื่อหาระยะทางอิสระเฉลี่ยของอนุภาค ผลที่ได้พบว่าเมื่อระดับพลังงานของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยของอนุภาคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับพลังงาน ระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลกมีค่าประมาณ 201.174 - 1713.172 นาที พบความแปรปรวนของผลการฟิตข้อมูลที่ระดับพลังงานต่ำและระดับพลังงานสูงของอนุภาค เนื่องจากอนุภาคพลังงานต่ำได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมในอวกาศ และเครื่องมือบนยานอวกาศตรวจพบอนุภาคพลังงานสูงน้อยทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้มาก การปะทุในครั้งนี้ตรวจพบการปล่อยมวลสารจากชั้นคอโรนา (CME) ที่เวลา 16:04 UT ส่งผลให้เวลาในการปลดปล่อยที่จำลองได้นั้นมากกว่าข้อมูลจากยานอวกาศ เหตุการณ์การปะทุนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อโลกเนื่องจากค่าการสั่นสะเทือนของสนามแม่เหล็กโลก (Kp index) มีค่าระดับ 4

**Title** AN ANALYSIS OF THE VIOLENT SOLAR FLARE TOWARD THE  
END OF 24<sup>TH</sup> SOLAR CYCLE.

**Author** Preedaporn Suwandee

**Advisor** Assistant Professor Thiranee Khumlumlert, Ph.D.

**Academic Paper** Thesis M.S. in Physics,  
Naresuan University, 2019

**Keywords** solar flare, solar wind, shock wave, space weather,  
coronal mass ejection

### ABSTRACT

This research analyzed the second violent solar flare on the 24<sup>th</sup> solar cycle, which was the current solar cycle. This gradual solar flare was on September 10, 2017. The X-ray class of this solar flare was X8.2, and its injection time was 56 minutes. The eruption position on the Sun was S09W83. The solar wind speed was 522 km/s. The propagation of the solar energetic particles of this solar flare was analyzed by the transport simulation of Helium, Carbon, Oxygen, and Iron elements in the energy range of 4.032-90.856 MeV/n. This research simulated the transport equation of Ruffolo 1998 with the technique of finite different method. We used data from a SIS (Solar Isotope Spectrometer) instrument on the Advanced Composition Explorer Spacecraft. The fitting results of the spacecraft data and the simulation results by the technique of piecewise linear least square fitting to find the mean free path which increases as increasing energy. The injection time from the sun to the Earth was 201.174 - 1713.172 minutes. We found the fluctuation of the fitting results at the low and high energy range of particles, because of the particles at low energy were easily affected by the space environment, and the detected particles at high energy were less, which affected the uncertainty of data. The coronal mass injection was detected on the end time of this flare, which affected the increasing injection time. This solar flare didn't affect the variation of the Earth's magnetic field, because the Kp index of this flare was equal to 4.

## สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ.....	1
	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
	วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
	ขอบเขตการวิจัย.....	2
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
	แนวทางการดำเนินงาน.....	3
2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
	โครงสร้างของดวงอาทิตย์.....	4
	วัฏจักรสุริยะ (Solar Cycle).....	5
	ปรากฏการณ์เทอร์โมนิวเคลียร์ (Thermonuclear Reaction).....	6
	จุดมืดบนดวงอาทิตย์ (Sun sport).....	8
	การปะทุบนดวงอาทิตย์ (Solar Flare).....	9
	ลมสุริยะ (Solar wind).....	12
	การปล่อยมวลสารจากโคโรนา (Coronal Mass Ejection : CME).....	13
	รังสีคอสมิก (Cosmic rays).....	14
	เส้นสนามแม่เหล็กแบบเกลียวอาร์คิมิดีส.....	15
	สมการการขนส่งที่อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูง.....	20
	ยานอวกาศ ACE (Advanced Composition Explorer).....	26
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
3	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	31
	ศึกษาการเกิดการปะทุบนดวงอาทิตย์และการเปลี่ยนแปลง ของดวงอาทิตย์ตามวัฏจักร.....	31
	ค้นคว้าเพื่อคัดเลือกปรากฏการณ์ลูกจ๋าของดวงอาทิตย์.....	36
	ดาวน์โหลดข้อมูลที่เก็บจากยานอวกาศ ACE.....	40

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลเพื่อการจำลอง.....	41
การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคและการเปรียบเทียบข้อมูล.....	47
การวิเคราะห์สภาพอากาศ.....	52
4 ผลการวิจัย.....	58
ผลการเปรียบเทียบข้อมูล.....	58
ผลการหาค่าระยะเวลาการปลดปล่อยของอนุภาค.....	60
5 วิเคราะห์ผลและสรุปผลการวิจัย.....	64
บรรณานุกรม.....	66
ภาคผนวก.....	70
ประวัติผู้วิจัย.....	97

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงระดับความรุนแรงในการปะทุบนดวงอาทิตย์.....	11
2 แสดงพจน์ของสมการขนส่ง สมการที่ (2.10.16).....	26
3 แสดงข้อมูล 50 เหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ในรอบวัฏจักรสุริยะที่ 24.....	31
4 แสดงลักษณะทางกายภาพของเหตุการณ์วันที่ 10 กันยายน 2017.....	37
5 แสดงตัวอย่างข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ SIS บนยานอวกาศ ACE และค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจากยานอวกาศของอนุภาคฮีเลียม.....	42
6 แสดงค่าต่างๆในขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลของอนุภาคฮีเลียม.....	46
7 แสดงข้อมูลการปะทุบนดวงอาทิตย์ในเดือนกันยายน.....	53
8 แสดงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการปะทุบนดวงอาทิตย์ตามระดับ kp index.....	57
9 แสดงค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยและระยะเวลาการปลดปล่อยของอนุภาค แต่ละธาตุ.....	62



## สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
1	โครงสร้างดวงอาทิตย์.....	4
2	แสดงจำนวนจุดมืดบนดวงอาทิตย์ในช่วงปี 2008 - 2019.....	6
3	พิกัดทรงกลม.....	16
4	ลักษณะของสนามแม่เหล็กที่ออกจากดวงอาทิตย์ในพิกัดทรงกลม.....	17
5	การพาของฟลักซ์แบบเชิงระบบ.....	21
6	การพาของฟลักซ์แบบเชิงสุ่ม.....	21
7	แสดงค่ามุม $\theta$ และทิศทางเส้นสนามแม่เหล็ก.....	23
8	ภาพจำลองส่วนประกอบของยานอวกาศ ACE.....	27
9	แสดงเครื่องมือตรวจวัด SIS บนยาน ACE.....	28
10	แสดงค่าระดับความรุนแรงของการปะทุระดับ $x$ ในช่วงวัฏจักรที่ 24.....	34
11	แสดงความหนาแน่นของอนุภาคฮีเลียม คาร์บอน ออกซิเจน และเหล็ก วันที่ 6-17 กันยายน 2017.....	35
12	ภาพถ่ายเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 10 กันยายน 2017.....	36
13	ค่าระดับความรุนแรงของรังสีเอ็กซ์ ในวันที่ 10 กันยายน 2017.....	37
14	การปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 8-10 กันยายน 2017.....	38
15	แสดงค่าฟลักซ์ของธาตุฮีเลียม คาร์บอน ออกซิเจน และเหล็กจากเครื่องมือ SIS ที่วัดได้ ในวันที่ 9-16 กันยายน 2017.....	39
16	กราฟแสดงความเร็วลมสุริยะในวันที่ 10 กันยายน 2017.....	40
17	แสดงหน้าเว็บไซต์ที่สามารถเลือกดาวโหลดเฉพาะข้อมูลที่ต้องการ.....	41
18	ค่าความหนาแน่นของอนุภาคฮีเลียมเทียบกับเวลา.....	43
19	กราฟความสัมพันธ์ค่า $\log$ ของโมเมนต์กับค่า $\log$ ของสเปกตรัมของฟลักซ์.....	47
20	การเปรียบเทียบข้อมูลสำหรับธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV/n.....	50
21	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $x^2$ และค่าระยะทางอิสระเฉลี่ย.....	50
22	แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV....	51
23	แสดงค่าสนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์จากเครื่องมือ MAG.....	54
24	แสดงค่าอัตราส่วนขององค์ประกอบของธาตุ Fe/O จากเครื่องมือ SWICS.....	54

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ตาราง		หน้า
25	แสดงแถบของแสงออโรราในบริเวณขั้วใต้ของโลก ในวันที่ 10 กันยายน 2017.....	55
26	กราฟแสดงค่าดัชนี kp ในวันที่ 9-11 กันยายน 2017.....	56
27	การเปรียบเทียบข้อมูลธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงาน 4.032-11.493 MeV/n.....	58
28	การเปรียบเทียบของธาตุคาร์บอน ที่ระดับพลังงาน 9.839- 28.883 MeV/n.....	59
29	การเปรียบเทียบของธาตุออกซิเจน ที่ระดับพลังงาน 98.538-33.847 MeV/n.....	59
30	การเปรียบเทียบของธาตุเหล็ก ที่ระดับพลังงาน 13.002-60.559 MeV/n.....	60
31	แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงาน 4.032-11.493 MeV/n.....	60
32	แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุคาร์บอน ที่ระดับพลังงาน 9.839-28.883 MeV/n.....	61
33	แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุออกซิเจน ที่ระดับพลังงาน 8.538-33.847 MeV/n.....	61
34	แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุเหล็ก ที่ระดับพลังงาน 13.002-60.559 MeV/n.....	62

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่สำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อโลกของเราคือ ปรากฏการณ์ที่เกิดจากดวงอาทิตย์ เนื่องจากบริเวณผิวของดวงอาทิตย์เกิดการปะทุอยู่ตลอดเวลา ถ้าการปะทุมีขนาดใหญ่หรือมีความรุนแรงมากกว่าระดับปกติ เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการระเบิดบนดวงอาทิตย์ (solar flare) เกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอนุภาคพลังงานสูงซึ่งเหตุการณ์การปะทุจะมีแนวโน้มเกิดขึ้นบ่อยที่สุดในช่วงกลางวัฏจักรสุริยะ (solar cycle) โดย 1 รอบวัฏจักรสุริยะจะมีระยะเวลาโดยประมาณ 11 ปี ซึ่งปัจจุบันดวงอาทิตย์อยู่ในรอบวัฏจักรที่ 24 (ค.ศ. 2008 - 2019) การปะทุบนดวงอาทิตย์มักเกิดขึ้นบริเวณใกล้จุดมืดซึ่งเป็นบริเวณที่สนามแม่เหล็กมีความแปรปรวนสูง เป็นสาเหตุทำให้เกิดพายุสุริยะพร้อมทั้งมีการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูง ซึ่งอนุภาคเหล่านี้เป็นอนุภาคที่มีประจุจะเคลื่อนที่เป็นเกลียวตามเส้นสนามแม่เหล็กแบบอาร์คิมิดีส (Archimedean spiral magnetic field) ทำให้อนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กเข้ามายังโลกได้ หากการปะทุบนดวงอาทิตย์มีความรุนแรงอาจทำให้ดาวเทียมเสียหาย ระบบสื่อสารทางวิทยุขัดข้องหรืออาจเกิดไฟฟ้าดับในแถบใกล้ขั้วโลกได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะทางกายภาพและการปะทุบนพื้นผิวดวงอาทิตย์ รวมไปถึงการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ในลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเกลียวตามเส้นสนามแม่เหล็กอาร์คิมิดีสมายังโลก โดยใช้ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคพลังงานสูงที่ได้จากยานอวกาศ Advanced Composition Explorer (ACE) โดยเลือกเหตุการณ์การปะทุจริงในวันที่ 10 กันยายน 2017 เนื่องจากเป็นเหตุการณ์ที่มีความรุนแรงโดยพิจารณาจากค่าของรังสีเอกซ์ที่ระดับ X8.2 และพิจารณาจากการตรวจพบอนุภาคของธาตุที่เดินทางมายังโลกที่มีความต่อเนื่องของข้อมูล ซึ่งได้เลือกวิเคราะห์ธาตุฮีเลียม คาร์บอน ออกซิเจน และเหล็ก โดยจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยสมการขนส่งอนุภาคและจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้โปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาซีบนระบบปฏิบัติการอูบุนตุ เพื่อวิเคราะห์ระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากการปะทุบนดวงอาทิตย์มายังโลกเทียบกับการปะทุที่เกิดขึ้นจริง ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาใช้ทำนายและเตือนภัยล่วงหน้าเกี่ยวกับสภาพอวกาศเพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดผลกระทบของอนุภาคพลังงานสูงที่เคลื่อนที่มายังโลก

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เกิดจากการปะทุบนดวงอาทิตย์ที่มีความรุนแรงในช่วงท้ายของรอบวัฏจักรดวงอาทิตย์และสภาพแวดล้อมในอวกาศขณะเกิดการปะทุ
2. เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลอนุภาคพลังงานสูงและสภาพสิ่งแวดล้อมภายในอวกาศจากการตรวจวัดโดยยานอวกาศ ACE
3. เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มายังโลกด้วยสมการการเคลื่อนที่และแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข
4. เพื่อคำนวณหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจากการปะทุบนดวงอาทิตย์
5. เพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคจากการปะทุบนดวงอาทิตย์จากการคำนวณกับการปะทุที่เกิดขึ้นจริง

### ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของดวงอาทิตย์และลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงที่เกิดจากการปะทุบนดวงอาทิตย์และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในรอบวัฏจักรที่ 24
2. เลือกเหตุการณ์การปะทุจริงที่สนใจและศึกษาลักษณะการปะทุบนดวงอาทิตย์จากข้อมูลของอนุภาคพลังงานสูงที่วัดได้จากยานอวกาศ ACE
3. ศึกษาสมการการเคลื่อนที่และแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มายังโลก
4. จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค ด้วยสมการขนส่งอนุภาคและแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาซีบนระบบปฏิบัติการอุบันต
5. วิเคราะห์ระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากการปะทุบนดวงอาทิตย์เทียบกับการปะทุที่เกิดขึ้นจริง

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้เกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของดวงอาทิตย์ การปะทุบนดวงอาทิตย์ และการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากการปะทุบนดวงอาทิตย์
2. มีความเข้าใจและสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงโดยใช้สมการขนส่งอนุภาคและการนำวิธีการเชิงตัวเลขมาใช้ในการแก้ปัญหาทางฟิสิกส์ได้

3. สามารถทราบถึงผลกระทบที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มายังโลกเนื่องจากการปะทุบนดวงอาทิตย์

4. มีทักษะในการใช้คอมพิวเตอร์ในการแก้ปัญหาทางฟิสิกส์

#### แนวทางการดำเนินงาน

1. ศึกษาข้อมูลการปะทุบนพื้นผิวดวงอาทิตย์ ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงและรอบวัฏจักรของดวงอาทิตย์

2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในรอบวัฏจักรดวงอาทิตย์

3. ศึกษาข้อมูลอนุภาคพลังงานสูงและสภาพอวกาศจากยานอวกาศ

4. เลือกเหตุการณ์ในการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่

5. จัดเตรียมข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์จากยานอวกาศ ACE และข้อมูลที่จำเป็นเพื่อใช้เป็นค่าตั้งต้นในการจำลอง

6. จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค ด้วยสมการขนส่งอนุภาค โดยใช้โปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาซีบนระบบปฏิบัติการอูบุนตุ

7. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการจำลองร่วมกับสมการการเคลื่อนที่และข้อมูลจริงจากยานอวกาศ

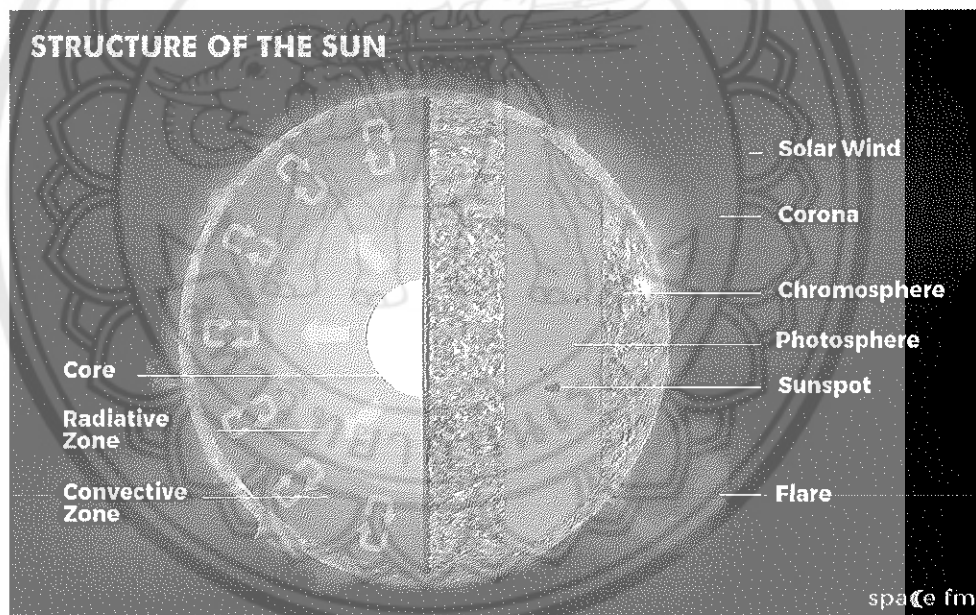
8. สรุป วิเคราะห์ผลการวิจัยและเขียนเล่มรายงาน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### โครงสร้างของดวงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ที่อยู่บริเวณใจกลางระบบสุริยะที่มีดาวเคราะห์ต่างๆ เป็นดาวบริวารรวมถึงโลกด้วย ดวงอาทิตย์มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ  $1.4 \times 10^6$  km และมีมวล  $1.989 \times 10^{30}$  kg ดวงอาทิตย์มีโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ ตัวดวงอาทิตย์ และบรรยากาศของดวงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพ 1



ภาพ 1 โครงสร้างดวงอาทิตย์ [1]

#### 1. ตัวดวงอาทิตย์ แบ่งเป็น 3 ชั้น คือ

1.1 ใจกลาง (Core) หรือแกนปฏิกิริยานิวเคลียร์ (Fusion core) อยู่บริเวณใจกลางของดวงอาทิตย์มีขนาดประมาณ 0.25 เท่าของรัศมีดวงอาทิตย์ แรงโน้มถ่วงของดวงอาทิตย์ทำให้มวลสารกดทับกันจนอุณหภูมิที่ใจกลางสูงประมาณ  $1.5 \times 10^7$  K เป็นแหล่งเกิดปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์

สร้างพลังงานมหาศาลของดวงอาทิตย์ เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันหลอมอะตอมของไฮโดรเจนให้กลายเป็นฮีเลียมและปลดปล่อยพลังงานออกมา

1.2 บริเวณแผ่รังสี (Radiation Zone) ขนาดประมาณ 0.86 ของรัศมีดวงอาทิตย์ เป็นบริเวณที่พลังงานจากใจกลางดวงอาทิตย์แผ่รังสีออกสู่ชั้นนอกของดวงอาทิตย์ พลังงานที่เกิดขึ้นจากแก่นปฏิกรณ์นิวเคลียร์ถูกนำขึ้นสู่ชั้นบนโดยการแผ่รังสีด้วยอนุภาคโฟตอน

1.3 บริเวณพาพลังงาน (Convection Zone) เป็นชั้นที่นำพลังงานจากชั้นแผ่รังสีออกสู่ผิวดวงอาทิตย์ พลังงานที่เกิดขึ้นไม่สามารถแผ่สู่อวกาศได้โดยตรง เนื่องจากมวลของดวงอาทิตย์เต็มไปด้วยแก๊สไฮโดรเจนซึ่งเคลื่อนที่หมุนวนด้วยกระบวนการพาความร้อน พลังงานจากภายในจึงถูกพาออกสู่พื้นผิวดวงอาทิตย์ด้วยการหมุนวนของแก๊สร้อน แก๊สที่ร้อนกว่าจะพาพลังงานขึ้นสู่ด้านบนของผิวดวงอาทิตย์ แก๊สที่เย็นกว่าจะจมลงสู่ด้านล่าง

2. บรรยากาศของดวงอาทิตย์ แบ่งเป็น 3 ชั้น คือ

2.1 โฟโตสเฟียร์ (Photosphere) เป็นชั้นของแสงสว่างของดวงอาทิตย์ที่เรามองเห็นเป็นดวงสว่าง มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 4,000–6,000 K เป็นชั้นบางๆ แต่มีความสว่างมาก

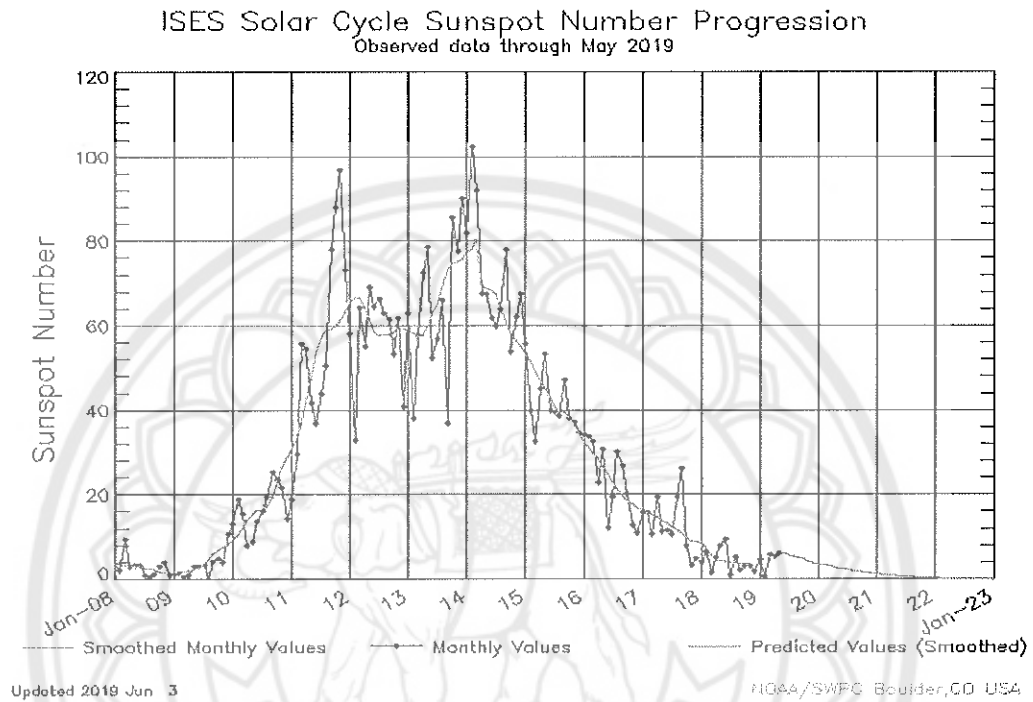
2.2 โครโมสเฟียร์ (Chromosphere) เป็นบรรยากาศบางๆ สูงขึ้นจากชั้นโฟโตสเฟียร์มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 6,000–20,000 K เป็นชั้นที่เกิดปรากฏการณ์รุนแรงบนดวงอาทิตย์ เช่น พวยก๊าซ เส้นสายยาวของลำก๊าซ หรือการปะทุบนดวงอาทิตย์

2.3 คอโรนา (Corona) เป็นบรรยากาศชั้นนอกสุดของดวงอาทิตย์ มีอุณหภูมิสูงประมาณ  $1 \times 10^6$  K แม้อาณาเขตกว้างไกลออกไปได้มากกว่า 5 เท่าของตัวดวงอาทิตย์ มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปตามปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในตัวดวงอาทิตย์ สามารถมองเห็นบรรยากาศชั้นนี้ได้เฉพาะขณะเกิดสุริยุปราคาเต็มดวง เมื่อดวงจันทร์เคลื่อนไปบังส่วนโฟโตสเฟียร์จะเห็นเป็นแสงสว่างแผ่ออกมาโดยรอบ [1]

### วัฏจักรสุริยะ (Solar Cycle)

วัฏจักรสุริยะ คือรอบของการเปลี่ยนแปลงปริมาณจุดมืดบนดวงอาทิตย์ สำหรับ 1 รอบวัฏจักรสุริยะจะใช้ระยะเวลาประมาณ 11 ปี ปริมาณของจุดมืดนั้นในช่วงต่ำสุด (Solar Minimum) อาจมีเพียง 2-3 จุด แต่ในช่วงที่มีมากที่สุด (Solar Maximum) อาจจะมีมากกว่า 160 - 200 จุด ในช่วงเริ่มวัฏจักรหรือรอบใหม่จะมีปริมาณของจุดมืดน้อยและจะมีปริมาณจุดมืดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมากที่สุดในช่วงกลางวัฏจักรแล้วค่อยๆ น้อยลงในช่วงปลายวัฏจักรก่อนจะเริ่มนับรอบ

ใหม่อีกครั้ง โดยการเริ่มวัฏจักรสุริยะใหม่จะยึดเอาช่วงที่ขั้วแม่เหล็กของดวงอาทิตย์เกิดการสลับขั้วเหนือขั้วใต้



ภาพ 2 แสดงจำนวนจุดมืดบนดวงอาทิตย์ในช่วงปี 2008 - 2019 [31]

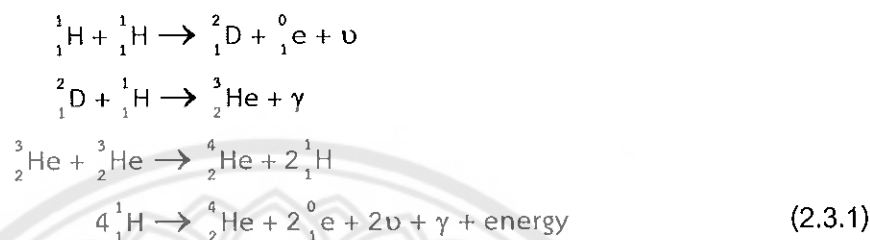
จากภาพ 2 แสดงถึงรอบวัฏจักรสุริยะที่ 24 เริ่มต้นตั้งแต่ปี 2008 โดยปริมาณของจุดมืดเพิ่มขึ้นสูงสุดและได้ค่อยๆ ลดลงมาหลังปี 2014 หากเป็นไปตามลักษณะนี้ ปริมาณจุดมืดจะลดลงต่ำสุดในช่วงปี 2019 เพื่อจะเริ่มเข้าสู่วัฏจักรสุริยะที่ 25 ต่อไป [2]

### ปรากฏการณ์เทอร์โมนิวเคลียร์ (Thermonuclear Reaction)

ในเอกภพมีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนมากที่สุด เช่นเดียวกับบนดวงอาทิตย์ด้วย ซึ่งบริเวณใจกลางดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิประมาณ  $15 \times 10^6$  K ปกติแล้วนิวเคลียส 2 นิวเคลียสจะผลัดกันตามแรงคูลอมบ์ เนื่องจากมีประจุบวกเหมือนกัน แต่ที่แกนกลางของดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงมากพอและมีความหนาแน่นมากจนกระทั่งนิวเคลียสทั้งสองอยู่ใกล้กันมากจนสามารถเอาชนะแรงคูลอมบ์และเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันได้ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันบนดวงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 2 ปฏิกิริยา คือ วัฏจักร CNO และปฏิกิริยาโปรตอน-โปรตอน (proton-proton)



1. ปฏิกิริยาโปรตอน-โปรตอน (proton-proton) หรือ P-P Chain เป็นปฏิกิริยานิวเคลียร์ประเภทฟิวชั่น เป็นปฏิกิริยาที่เกิดการรวมตัวกันของอะตอมที่มีขนาดเล็กหรือน้ำหนักเบา เกิดเป็นอะตอมของธาตุขนาดใหญ่หรือมีน้ำหนักมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาฟิวชั่นเกิดจากการรวมกันของอะตอมไฮโดรเจน 2 ตัวได้เป็นอะตอมฮีเลียม โดยมีกระบวนการดังนี้



จากสมการที่ (2.3.1) แสดงได้ว่าปฏิกิริยาโปรตอน-โปรตอน เกิดจากโปรตอนของไฮโดรเจน 4 ตัว รวมกันเป็นนิวเคลียสของฮีเลียม 1 ตัว อนุภาคโพซิตรอน 2 ตัว อนุภาคนิวตริโน 2 ตัว รังสีแกมมา และพลังงาน

เนื่องจากมวลของโปรตอน 1 อนุภาค =  $1.6726 \times 10^{-27}$  kg

มวลของโปรตอน 4 อนุภาค =  $6.6904 \times 10^{-27}$  kg

มวลของฮีเลียม 1 อะตอม =  $6.6447 \times 10^{-27}$  kg

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

มวลที่หายไปเปลี่ยนเป็นโฟตอนของรังสีแกมมา โดยสามารถคำนวณหาพลังงานได้

จากสมการมวล-พลังงานของอัลเบิร์ตไอน์สไตน์ คือ

$$\begin{aligned} E &= mc^2 \quad (2.3.2) \\ E &= (4.57 \times 10^{-29} \text{ kg}) (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ E &= 4.11 \times 10^{-12} \text{ J} \end{aligned}$$

เมื่อ E คือ พลังงานซึ่งเปลี่ยนรูปมาจากมวลสาร (J)

m คือ มวลสาร (kg)

c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/s [3]

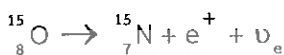
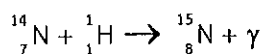
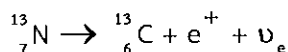
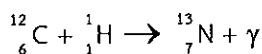
เมื่อ  $1 \text{ eV} = 1.60201 \times 10^{-19} \text{ J}$  ทำการแปลงหน่วยจาก J ให้เป็น eV จะได้ว่า

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

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

ดังนั้นในการเกิดปฏิกิริยา 1 ครั้ง มีค่าพลังงานเกิดขึ้น 38.70 MeV

2. วัฏจักร CNO (Carbon - Nitrogen - Oxygen Cycle) เป็นปฏิกิริยาที่มีการสร้างฮีเลียมจากไฮโดรเจนโดยให้คาร์บอน ไนโตรเจนและออกซิเจนออกมา โดยมีกระบวนการดังนี้



พลังงานที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในรูปของรังสีแกมมาจะแผ่กระจายออกจากบริเวณต้นกำเนิดในใจกลางของดวงอาทิตย์ และเนื่องจากเนื้อสารของดวงอาทิตย์ประกอบด้วยอะตอมของธาตุต่างๆ มีปริมาณมากห่อหุ้มส่วนใจกลางอยู่ รังสีแกมมาจึงไม่สามารถทะลุผ่านออกมาถึงพื้นผิวดวงอาทิตย์ได้ แต่จะมีการถ่ายเทและแปรสภาพเป็นรังสีซึ่งมีพลังงานน้อยกว่า กลายเป็นแสงสว่างและความร้อนแผ่กระจายจากผิวดวงอาทิตย์ออกสู่อวกาศ

### จุดมืดบนดวงอาทิตย์ (Sunspots)

จุดมืดบนดวงอาทิตย์เป็นปรากฏการณ์บนพื้นผิวดวงอาทิตย์ที่สังเกตเห็นได้ง่ายที่สุด เมื่อมองผ่านแผ่นกรองแสงจะเห็นเป็นจุดสีดำบนชั้นโฟโตสเฟียร์และอาจมีการรวมกลุ่มกันเป็นกระจุกจนมีพื้นที่หลายพันล้านตารางกิโลเมตร โครงสร้างของจุดมืดบนดวงอาทิตย์ไม่ได้มีลักษณะดำมืดแต่เพียงอย่างเดียว แต่ละจุดจะมีลักษณะซ้อนกันสองชั้น โดยจุดดำชั้นใน (umbra) จะมีสีดำเข้มส่วนจุดดำชั้นนอก (penumbra) ซึ่งล้อมรอบอยู่จะมีลักษณะจางกว่าและมีรั้วลายเป็นเส้นในแนวรัศมี โดยทั่วไปแล้วพื้นที่ส่วนจุดมืดชั้นนอกมักมีพื้นที่มากกว่า บางครั้งอาจมากถึง 80% ของพื้นที่จุดมืดทั้งหมด บริเวณจุดมืดชั้นนอกเป็นบริเวณที่มีการไหลของแก๊สจากบริเวณจุดมืดชั้นในไปสู่พื้นที่นอกจุดมืดเมื่อแก๊สไหลออกไปนอกจุดมืดชั้นนอกแล้วจะเปลี่ยนทิศพุ่งขึ้นตั้งฉากกับผิวของดวงอาทิตย์จนถึงชั้นโครโมสเฟียร์ หลังจากนั้นจึงย้อนกลับพุ่งลงในใจกลางของจุดมืดอีกครั้งเป็นวัฏจักรต่อไป

จุดมืดบนดวงอาทิตย์มีการเกิดขึ้นและสลายตัวตลอดเวลา โดยปกติแล้วจุดมืดแต่ละจุดจะมีอายุประมาณไม่เกินสองสัปดาห์ แต่ก็อาจมีบางจุดที่มีอายุยาวนานนับเดือน ถึงแม้ว่าจุดมืดชั้นในจะเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดบนดวงอาทิตย์จนมองเห็นเป็นสีดำสนิท แต่มันก็ยังมีอุณหภูมิสูงถึง 4,000 K ในความเป็นจริงแก๊สที่มีอุณหภูมิขนาดนี้จะมีแสงสว่างมาก แต่สาเหตุที่เราเห็นเป็นสีดำนั้นเนื่องจากพื้นผิวของดวงอาทิตย์โดยรอบจุดมืดหรือโฟโตสเฟียร์มีความสว่างมากกว่ามาก เพราะมีอุณหภูมิสูงถึง 6,000 K ส่วนบริเวณจุดมืดชั้นนอกนั้นมีอุณหภูมิต่ำกว่า

โฟโตสเฟียร์เพียงเล็กน้อย คือประมาณ 5,600 K ในขณะที่ความสว่างของจุดมืดบนดวงอาทิตย์จะน้อยกว่าที่อื่นๆ แต่สนามแม่เหล็กบริเวณนี้กลับมีความเข้มข้นสูงมาก เราพบว่าสนามแม่เหล็กจะมีทิศจะพุ่งออกจากจุดมืดพร้อมๆ กับนำเอาแก๊สร้อนจากภายใต้พื้นผิวดวงอาทิตย์ขึ้นมาด้วย สนามแม่เหล็กที่จุดมืดอาจมีความเข้มข้นสูงถึง 0.2-0.4 T รูปร่างและทิศทางของสนามแม่เหล็กจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะของกลุ่มจุดมืด กล่าวคือบริเวณที่มีจุดมืดเป็นคู่ สนามแม่เหล็กจะพุ่งขึ้นออกจากจุดมืดจุดหนึ่งสู่บรรยากาศชั้นบนเหนือโฟโตสเฟียร์ แล้วเลี้ยวโค้งวกกลับลงสู่จุดมืดอีกจุดหนึ่งที่อยู่คู่กัน จุดมืดสองจุดนี้จึงมีขั้วแม่เหล็กที่ตรงข้ามกันเสมอ เหมือนกับแม่เหล็กแบบเกือกม้าที่ติดอยู่บนผิวดวงอาทิตย์ เราเรียกสนามแม่เหล็กรูปร่างแบบนี้ว่า สนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์ (bipolar)

บริเวณที่มีจุดมืดรวมกลุ่มกันเป็นกระจุกขนาดใหญ่จะมีรูปร่างของสนามแม่เหล็กที่ซับซ้อนมากขึ้น แต่ยังคงเป็นสนามแม่เหล็กปิด (closed magnetic field) ส่วนจุดมืดที่เป็นจุดเดี่ยว ไม่รวมกลุ่มหรือเข้าคู่กับจุดมืดอื่นสนามแม่เหล็กจะพุ่งออกจากจุดมืดขึ้นไปและสาดออกไปสู่อวกาศโดยไม่วกกลับเข้ามา เป็นสนามแม่เหล็กเปิด (Open magnetic field) ซึ่งเป็นช่องทางที่มวลสารจำนวนมากจากดวงอาทิตย์พุ่งทะลุสู่อวกาศและเป็นส่วนหนึ่งของการเกิดลมสุริยะ [4]

จุดมืดบนดวงอาทิตย์ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กที่แปรปรวนเนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ที่ไม่เท่ากันตามละติจูด บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์ใช้เวลาหมุนรอบตัวเองประมาณ 25 วัน ส่วนบริเวณขั้วเหนือและขั้วใต้ของดวงอาทิตย์ใช้เวลาประมาณ 36 วัน ซึ่งนานกว่าจึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กบิดเบือน [5,6]

### การปะทุบนดวงอาทิตย์ (Solar Flare)

การปะทุหรือการลุกจ้า (Flare) คือการเกิดแสงสว่างวาบขึ้นบนพื้นผิวดวงอาทิตย์ภายในบรรยากาศชั้นโคโรนาและบรรยากาศชั้นโครโมสเฟียร์ จะเกิดขึ้นบริเวณสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มข้น

#### 1. กระบวนการเกิดการปะทุบนดวงอาทิตย์มี 3 ระยะ ได้แก่

1.1 ระยะก่อนปรากฏการณ์ (precursor stage) คือการกระตุ้นการปลดปล่อยพลังงานของสนามแม่เหล็ก รั้งสีเอกซ์พลังงานต่ำจะแผ่ออกมาในระยะนี้

1.2 ระยะกระตุ้น (impulsive stage) โปรตอนและอิเล็กตรอนจะถูกเร่งจนมีพลังงานจลน์มากกว่า 1 MeV ในระยะนี้ คลื่นวิทยุ รั้งสีเอกซ์พลังงานสูงและรั้งสีแกมมาจะแผ่ออกมา

1.3 ระยะสลายตัวของรังสี (decay stage) ความเข้มของรังสีเอกซ์พลังงานต่ำจะค่อยๆ ลดลง ภายในเวลาไม่กี่วินาทีหรือนานนับชั่วโมง การปะทุจะขยายตัวสู่บรรยากาศชั้นคอโรนาที่เป็น บรรยากาศชั้นนอกสุดของดวงอาทิตย์ ประกอบด้วยแก๊สที่มีความหนาแน่นต่ำแต่มีอุณหภูมิสูงนับ ล้านองศาเคลวิน ส่วนการปะทุที่มีอุณหภูมิประมาณ  $10^8$  K สามารถมองเห็นได้ในย่านรังสีเอกซ์ พลังงานต่ำ

การปะทุบนดวงอาทิตย์เกิดขึ้นเมื่อพลังงานภายในสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นภายใน ชั้นบรรยากาศโครโมสเฟียร์ถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว โดยจะปรากฏออกมาในลักษณะของการ ตัดขาดของเส้นสนามแม่เหล็ก เมื่อเกิดการขีดขาดของเส้นสนามแม่เหล็กที่ผิวดวงอาทิตย์ทำให้ออนุภาคที่ถูกกักอยู่ใต้เส้นสนามแม่เหล็กดันตัวออกมาจนเกิดการระเบิดอย่างรุนแรง พลังงานถูกปลดปล่อยออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกย่านความถี่ตั้งแต่คลื่นที่มีความยาวคลื่นยาว อย่าง คลื่นวิทยุแสงที่ตามนุษย์มองเห็น รังสีเอกซ์ ไปจนถึงคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นอย่างรังสีแกมมา ส่วนใหญ่การปะทุบนดวงอาทิตย์จะเกิดในบริเวณรอบๆจุดมืด โดยทั่วไปการปะทุบนดวงอาทิตย์จะปลดปล่อยพลังงานในระดับ  $10^{20}$  J/s สำหรับการปะทุที่รุนแรงอาจมากถึง  $10^{25}$  J/s [7,8]

## 2. การปะทุบนดวงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะทางกายภาพคือ

2.1 การปะทุแบบทันทีทันใด (Impulsive Solar Flares) เป็นการปะทุที่มีการปลดปล่อยจำนวนอนุภาคอิเล็กตรอนในปริมาณที่สูง ใช้เวลาในการปลดปล่อยพลังงานอนุภาคในเวลาสั้น ซึ่งเวลาการปลดปล่อยจะน้อยกว่า 30 นาที โดยความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่ออนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่ผ่านโลก การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน Fe/O และ  $^3\text{He}/\text{He}$  มีค่าเป็น 4 เท่าของค่าที่พบในคอโรนา และจะไม่มีกรปลดปล่อยมวลสารจากชั้นคอโรนาตามมาที่ หลังการปะทุ ลมสุริยะมีความเร็วและรุนแรงอยู่ในระดับปกติ ไม่เกิดปรากฏการณ์คลื่นกระแทกตามมา

2.2 การปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual Solar Flares) เป็นการปะทุที่มีการปลดปล่อยจำนวนอนุภาคพลังงานสูงได้แก่ โปรตอนจำนวนมาก การปะทุในลักษณะนี้จะเกิดการเร่งอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์หรือเรียกว่า การปลดปล่อยอนุภาคมวลสารจากชั้นคอโรนาลมสุริยะมีความเร็วและรุนแรงกว่าปกติขึ้นจนกลายเป็นพายุสุริยะ โดยการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปจะใช้เวลาในการปลดปล่อยอนุภาคนานมากกว่า 30 นาที [9]

## 3. ระดับความรุนแรงในการปะทุบนดวงอาทิตย์

การจำแนกการปะทุบนดวงอาทิตย์จะแบ่งตามระดับความรุนแรงของการปะทุดังนี้ ขนาดเล็กที่สุดจะอยู่ในระดับ A ตามด้วย B, C, M, และ X ซึ่งแสดงถึงพลังงานที่เกิดจากการลุกจ้า

เพิ่มขึ้น 10 เท่าของตัวอักษรแต่ละตัว ตัวอย่างเช่น ระดับ X จะมีค่าพลังงาน 10 เท่า ของระดับ M และมีค่าพลังงานเป็น 100 เท่าของระดับ C นอกจากนี้ตัวอักษรแต่ละตัวจะมีตัวเลขระดับขนาด 1-9 ระดับ ความเข้มรังสีสูงที่สุดในช่วงความยาวคลื่น 0.1–0.8 nm ของรังสีเอกซ์ซึ่งวัดได้บริเวณ โกลด์โลก แสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 แสดงระดับความรุนแรงในการปะทุบนดวงอาทิตย์

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

ในแต่ละระดับการปะทุบนดวงอาทิตย์อาจส่งผลกระทบต่อโลกได้แตกต่างกันไปตาม ความรุนแรงที่เกิดขึ้นดังนี้

X Class Flare มีระดับความรุนแรงสูงมาก ส่วนใหญ่ก่อให้เกิดคลื่นวิทยุตลอดทั่วดาวเคราะห์และมีระยะเวลาการปลดปล่อยที่ยาวนาน โดยมีความรุนแรงตั้งแต่  $10^{-4}$  W/m<sup>2</sup> ขึ้นไป

M Class Flare เป็นระดับความรุนแรงปานกลาง โดยทั่วไปจะปลดปล่อยคลื่นวิทยุขนาด สั้นด้วย โดยมีความรุนแรงอยู่ในช่วง  $10^{-5} - 10^{-4}$  W/m<sup>2</sup>

C Class Flare เป็นระดับความรุนแรงน้อย ไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อโลกมากนัก โดยมีความรุนแรงอยู่ในช่วง  $10^{-6} - 10^{-5}$  W/m<sup>2</sup>

B Class Flare เป็นระดับความรุนแรงน้อยมาก ไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อโลก โดยมีความรุนแรงอยู่ในช่วง  $10^{-7} - 10^{-6}$  W/m<sup>2</sup>

A Class Flare เป็นระดับความรุนแรงปกติ ไม่ส่งผลกระทบต่อโลก โดยมีความรุนแรงอยู่ในช่วง  $10^{-8} - 10^{-7}$  W/m<sup>2</sup> [7,10]

### ลมสุริยะ (Solar wind)

ลมสุริยะ คือการไหลของอนุภาคพลังงานสูงเคลื่อนที่หนีแรงโน้มถ่วงของดวงอาทิตย์ ซึ่งมีต้นกำเนิดจากบรรยากาศชั้นโคโรนาของดวงอาทิตย์ โดยมีองค์ประกอบเป็นธาตุไฮโดรเจน (H) ร้อยละ 95 แอลฟา ( ${}^4\text{He}$ ) ร้อยละ 4 และดูจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิวชั่น CNO ร้อยละ 1 ซึ่งชั้นบรรยากาศโคโรนานี้มีอุณหภูมิสูงถึง  $10^6$  K โดยที่อนุภาคพลังงานสูงนี้จะเคลื่อนที่จากชั้นบรรยากาศโคโรนาของดวงอาทิตย์ที่ว่างระหว่างดาวเคราะห์เนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาคในชั้นโคโรนาที่สูงกว่าความหนาแน่นในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ทำให้อนุภาคไหลออกจากชั้นโคโรนาได้ อนุภาคที่ไหลออกจากชั้นโคโรนานี้เราเรียกว่า พลาสมา (plasma) และเนื่องจากอนุภาคที่ไหลออกมานั้นมีประจุไฟฟ้ามันจึงถูกพาให้เคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ออกมาจากดวงอาทิตย์ โดยลมสุริยะนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงประมาณ 450 km/s ใช้เวลาในการเดินทางมายังโลกประมาณ 4 วัน แต่อัตราเร็วของลมสุริยะนั้นก็ยังไม่อยู่กับขั้วขั้วขั้ว โดยลมสุริยะที่เกิดบริเวณขั้วโลกเหนือกับใต้ของดวงอาทิตย์จะมีอัตราเร็วมากกว่าลมสุริยะที่เกิดบริเวณเส้นศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์ เมื่อลมสุริยะแผ่มาถึงโลกอนุภาคพลังงานสูงจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกซึ่งช่วยป้องกันโลกไว้ โดยปกติแล้วลมสุริยะจะไม่ทำอันตรายกับบรรยากาศหรือสิ่งมีชีวิตบนโลก เนื่องจากโลกมีสนามแม่เหล็กหุ้มอยู่โดยรอบ แต่ที่บริเวณขั้วโลกเหนือและใต้เป็นบริเวณที่เส้นสนามแม่เหล็กมีรัศมีความโค้งน้อย ดังนั้นอนุภาคบางส่วนจะสามารถวิ่งตามเส้นสนามแม่เหล็กลงมาใกล้ผิวโลกและถ่ายเทพลังงานให้กับบรรยากาศชั้นบน ทำให้โมเลกุลของก๊าซในชั้นบรรยากาศถูกกระตุ้นหลังจากนั้นโมเลกุลของก๊าซในชั้นบรรยากาศจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงเกิดแสงสีต่างๆ เรียกว่าแสงเหนือแสงใต้ (Aurora)

การปะทุอย่างรุนแรงของดวงอาทิตย์ที่มาพร้อมกับลมสุริยะนอกจากทำให้เกิดปรากฏการณ์แสงเหนือแสงใต้แล้ว ผลกระทบอีกอย่างคือ ผลกระทบกับดาวเทียม อนุภาคพลังงานสูงในลมสุริยะสามารถชนกับแผงโซลาร์เซลล์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมดาวเทียม บางครั้งอาจทำให้บนพื้นโลกไม่สามารถสื่อสารกับดาวเทียมได้ ข้อมูลสูญหายใช้งานไม่ได้ ถ้าจะให้ปลอดภัยควรปิดการใช้งานในขณะที่มีการปะทุ เพราะความรุนแรงของลมสุริยะจะทำให้เกิดความเสียหายน้อยลง บางครั้งมีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เช่น การสื่อสารทางคลื่นวิทยุในบางครั้งทางทหารเรือและทหารอากาศในสหรัฐฯ จะได้รับผลกระทบของอนุภาคพลังงานสูงที่เดินทางมายังโลกและมีผลต่อการสื่อสารกับเรือหรือเครื่องบิน การทหารสหรัฐฯ จึงสนใจทุ่มเทงบประมาณเพื่อศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับดวงอาทิตย์และพายุสุริยะ [11]

### การปล่อยมวลสารจากคอไรนา (Coronal Mass Ejection : CME)

การปล่อยสารจากคอไรนาเป็นปรากฏการณ์ที่ดวงอาทิตย์มีการปลดปล่อยมวลสารจากชั้นบรรยากาศคอไรนาของดวงอาทิตย์ออกมา อนุภาคที่ถูกปลดปล่อยออกมาเป็นอนุภาคที่มีประจุและพลังงานสูงซึ่งถูกปล่อยตามออกมาด้วยความเร็วสูงถึงพันกิโลเมตรต่อวินาที การปล่อยมวลสารจากคอไรนาก็มักจะเกิดร่วมกับการปะทุที่ผิวดวงอาทิตย์แบบค่อยเป็นค่อยไป แต่ในบางครั้งการปล่อยมวลสารจากคอไรนาอาจเกิดขึ้นเดี่ยวๆโดยไม่เกิดการปะทุที่ผิวก็ได้

โดยเหตุการณ์การปล่อยมวลสารที่คอไรนาจะเริ่มจากสนามแม่เหล็กแบบคู่ขั้วจากโพรงดวงอาทิตย์ (solar hole) โดยขยายตัวออกไปในชั้นคอไรนา จากนั้นเส้นสนามแม่เหล็กบางเส้นเชื่อมต่อกันอีกครั้ง จุดที่เชื่อมต่อกันค่อยๆขยายตัวสูงขึ้นซึ่งภายในเส้นสนามแม่เหล็กบรรจุมวลสารไว้ จนในที่สุดแรงดันภายในเส้นสนามแม่เหล็กขณะแรงดึงของสนามแม่เหล็กและปลดปล่อยมวลสารออกมา ซึ่งการปล่อยมวลสารจากคอไรนาขนาดใหญ่นั้นจะมีมวลสารเป็นล้านๆตันและมีความเร็วหลายล้านไมล์ต่อชั่วโมง หลังจากนั้นมวลสารของดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปอย่างรวดเร็วในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์และกระแทกอย่างแรงกับดาวเคราะห์และยานอวกาศที่อยู่ในเส้นทางของมวลสาร ขณะที่ดวงอาทิตย์อยู่ในช่วงสูงสุด ดวงอาทิตย์จะปล่อยมวลสารจากคอไรนาประมาณ 3 ครั้งต่อวัน อย่างไรก็ตามขณะที่ดวงอาทิตย์อยู่ในช่วงต่ำสุดดวงอาทิตย์จะปล่อยสารจากคอไรนาเพียง 1 ครั้งต่อ 5 วันเท่านั้น ความเร็วสูงสุดของมวลสารจากดวงอาทิตย์จะมีความเร็วสูงถึง 2,000 km/s แสดงให้เห็นว่ามีความเร็วมากเมื่อเทียบกับลมสุริยะซึ่งมีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 400 km/s ความเร็วที่มากกว่ากันหลายเท่าทำให้เกิดการปะทะกันและเกิดคลื่นกระแทกในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ [12,13]

คลื่นกระแทก (shock wave) คือบริเวณที่ของไหลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะพบในของไหลด้วยกันหรือของไหลกับสิ่งกีดขวาง โดยพิจารณาคลื่นกระแทกที่ความไม่ต่อเนื่องของของไหลเช่น ความหนาแน่น ความดัน ความเร็วของของไหลและอื่นๆ โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนที่ คลื่นกระแทกยังไม่เคลื่อนที่ผ่านซึ่งเรียกว่า ด้านหน้าของคลื่นกระแทก (upstream) ส่วนที่คลื่นกระแทกเคลื่อนที่ผ่านไปแล้วซึ่งเรียกว่าด้านหลังคลื่นกระแทก (downstream)

รังสีคอสมิกหรืออนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ถูกเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นจากการเร่งของคลื่นกระแทก อนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่เข้าไปในสนามแม่เหล็กที่มีความไม่เรียบ (turbulent field line) อนุภาคสามารถสะท้อนกลับถ้าชนกับความหนาแน่นสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นมาก ณ จุดที่เกิดคลื่นกระแทกพลาสมาจะไหลจากด้านหน้าของคลื่นกระแทกไปยังด้านหลังของคลื่น

กระแทกและเส้นสนามที่ไม่เรียบคือสิ่งที่ขัดขวางในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ความไม่เรียบของสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่จากส่วนหน้าไปยังด้านหลังของคลื่นกระแทก ถ้าอนุภาคส่วนหน้าของคลื่นกระแทกชนกับความไม่เรียบของสนามแม่เหล็กจะทำให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น และเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่กลับมาถึงบริเวณด้านหลังของคลื่นกระแทกก็จะไปชนกับความไม่เรียบของสนามแม่เหล็ก อีกผลของการชนคืออนุภาคมีความเร็วลดลง ดังนั้นวัฏจักรของการชนอนุภาคมีทั้งได้รับและสูญเสีย อย่างไรก็ตามท้ายที่สุดจะได้รับพลังงาน เหตุผลเพราะว่าการไหลของพลาสมาบริเวณด้านหน้าของคลื่นกระแทก จะมีความเร็วมากกว่าการไหลพลาสมาบริเวณด้านหลังของคลื่นกระแทก [14]

### รังสีคอสมิก (Cosmic rays)

รังสีคอสมิก (Cosmic rays) คืออนุภาคพลังงานสูงกระจายอยู่ทั่วไปในอวกาศ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วแสงและพุ่งเข้าชนกับสนามแม่เหล็กในทุกทิศทุกทาง อนุภาคพลังงานสูงเหล่านี้เรียกรวมๆ ว่ารังสีคอสมิก สามารถจำแนกเป็นประเภทต่างๆ ได้โดยใช้แหล่งกำเนิดอนุภาคเป็นตัวจำแนกได้ดังนี้

#### 1. อนุภาคพลังงานสูงจากนอกกาแล็กซี (Extragalactic cosmic rays)

รังสีคอสมิกที่มาจากนอกกาแล็กซีที่บางครั้งอาจเคลื่อนที่เข้ามาในระบบสุริยะได้ถูกเร่งจากกระบวนการทางฟิสิกส์หลายอย่าง เช่น การระเบิดซูเปอร์โนวา มีระดับพลังงานสูงสุด  $10^{20}$  eV และยังไม่สามารถอธิบายการเกิดรังสีคอสมิกประเภทนี้ด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ได้

#### 2. อนุภาคพลังงานสูงจากกาแล็กซี (Galactic cosmic rays)

รังสีคอสมิกที่มาจากนอกระบบสุริยะ ถูกเร่งจากกระบวนการอื่นของกาแล็กซีทางช้างเผือก ส่วนใหญ่ประกอบด้วยอนุภาคโปรตอน มีระดับพลังงานอยู่ในช่วงระหว่าง  $10^7$ - $10^{19}$  eV รังสีคอสมิกชนิดนี้มีการเคลื่อนที่เข้ามาถึงโลกตลอดเวลา แต่เมื่อมีเหตุการณ์การปะทุที่รุนแรงบนผิวดวงอาทิตย์ รังสีคอสมิกจากดวงอาทิตย์และการเกิดคลื่นกระแทกจะทำให้ปริมาณของรังสีคอสมิกที่มาจากนอกระบบสุริยะนี้เพิ่มขึ้น

#### 3. อนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ (Solar Energetic Particles)

รังสีคอสมิกที่มาจากดวงอาทิตย์เกิดจากการปะทุที่บริเวณผิวของดวงอาทิตย์ ถูกเร่งด้วยลมสุริยะ มีระดับพลังงานอยู่ช่วง  $10^5$ - $10^7$  eV องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นอนุภาคโปรตอนและอนุภาคนิวตรอน

รังสีคอสมิกส่วนใหญ่เป็นอนุภาคที่มีประจุ จึงสามารถเกิดการเบี่ยงเบนได้ในสนามแม่เหล็กโลก รังสีคอสมิกมีพลังงานสูงมากโดยมีพลังงานอยู่ในระหว่าง 100 MeV ถึง 10 GeV



บางครั้งอาจสูงถึง  $10^{20}$  eV ซึ่งสูงกว่าพลังงานของอนุภาคที่อยู่บนโลกประมาณหนึ่งล้านเท่า รังสีคอสมิกที่อยู่ในอวกาศก่อนที่จะเคลื่อนที่มาชนกับชั้นบรรยากาศของโลกเราเรียกว่า รังสีคอสมิกปฐมภูมิ (primary cosmic rays) ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยโปรตอนประมาณ 90% อนุภาคแอลฟาหรือไอออนของธาตุอื่นประมาณ 9% และอิเล็กตรอนประมาณ 1% เมื่อรังสีคอสมิกพุ่งเข้าชนกับชั้นบรรยากาศของโลกจะเกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคต่างๆ เราเรียกว่า รังสีคอสมิกทุติยภูมิ (secondary cosmic ray) ประกอบไปด้วยอนุภาคไพออน ( $\pi^\pm$ ) อนุภาคไพออนจะสลายตัวอย่างรวดเร็วเกิดเป็นอนุภาคมิวออน ( $\mu$ ) อนุภาคนิวตรอน (neutron, n) และรังสีแกมมา ( $\gamma$ ) อนุภาคเหล่านี้จะถูกชั้นบรรยากาศโลกดูดกลืนแล้วลดจำนวนลงตามระดับความสูงจากชั้นบรรยากาศถึงพื้นผิวโลก ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานรังสีคอสมิกปฐมภูมิ การที่อนุภาคพุ่งเข้าชนกับชั้นบรรยากาศโลกในแต่ละครั้งมีระดับพลังงานที่ไม่เท่ากัน ทำให้โอกาสที่จะตรวจพบอนุภาคพลังงานสูงมีค่าไม่เท่ากันตามไปด้วย [15,16]

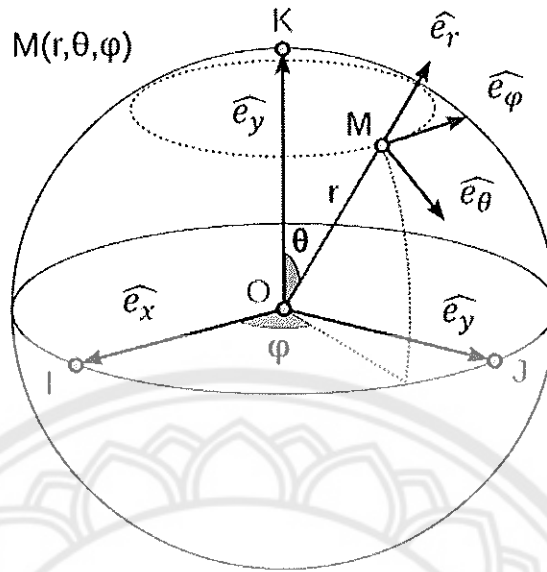
### เส้นสนามแม่เหล็กแบบเกลียวอาร์คิมิดีส

การปะทุบนดวงอาทิตย์มีการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจำนวนมากเข้าสู่ตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ อนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กที่ถูกลากออกจากดวงอาทิตย์โดยการพาของลมสุริยะ เส้นสนามแม่เหล็กเกิดการบิดเกลียวเป็นรูปก้นหอย หรือเกลียวอาร์คิมิดีส (Archimedean spiral) เนื่องจากดวงอาทิตย์มีการหมุนรอบตัวเองตลอดเวลา ซึ่งเราจะพิจารณาเส้นสนามแม่เหล็กนี้ในพิกัดทรงกลมตามแนวรัศมีของเส้นสนามแม่เหล็ก โดยที่

$$d\vec{l} \times \vec{B} = 0 \quad (2.9.1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.9.2)$$

เมื่อ  $d\vec{l}$  คือ พิกัดทรงกลม และ  $\vec{B}$  คือ สนามแม่เหล็ก มีแรงทางไฟฟ้าเป็นศูนย์เนื่องจากอนุภาคมีประจุเคลื่อนที่ขนานกับสนามแม่เหล็ก



ภาพ 3 พิกัดทรงกลม

จากสมการ (2.9.1) เมื่อพิจารณาสนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์ในพิกัดทรงกลมในภาพ 3

พิกัดทรงกลม 
$$d\vec{l} = dr\hat{e}_r + r d\theta\hat{e}_\theta + r \sin\theta d\phi\hat{e}_\phi \quad (2.9.3)$$

สนามแม่เหล็ก 
$$\vec{B}(r, \theta, \phi) = B_r\hat{e}_r + B_\theta\hat{e}_\theta + B_\phi\hat{e}_\phi \quad (2.9.4)$$

จาก  $d\vec{l} \times \vec{B} = 0$

$$d\vec{l} \times \vec{B} = (rd\theta B_\phi - B_\theta r \sin\theta d\phi)\hat{e}_r + (B_r \sin\theta d\phi - B_\phi dr)\hat{e}_\theta + (B_\theta dr - B_r r d\theta)\hat{e}_\phi \quad (2.9.5)$$

พิจารณาองค์ประกอบตามแนว  $\hat{e}_r$  จะได้

$$\begin{aligned} rd\theta B_\phi &= B_\theta r \sin\theta d\phi \\ \frac{rd\theta}{B_\theta} &= \frac{r \sin\theta d\phi}{B_\phi} \end{aligned} \quad (2.9.6)$$

พิจารณาองค์ประกอบตามแนว  $\hat{e}_\theta$  จะได้

$$\begin{aligned} B_r r \sin\theta d\phi &= B_\phi dr \\ \frac{r \sin\theta d\phi}{B_\phi} &= \frac{dr}{B_r} \end{aligned} \quad (2.9.7)$$

พิจารณาองค์ประกอบตามแนว  $\hat{e}_\phi$  จะได้

$$\begin{aligned} B_\theta dr &= B_r r d\theta \\ \frac{dr}{B_r} &= \frac{rd\theta}{B_\theta} \end{aligned} \quad (2.9.8)$$

ทำการเทียบสมการ (2.9.6) , (2.9.7) และ (2.9.8) จะได้ว่า

$$\frac{dr}{B_r} = \frac{rd\theta}{B_\theta} = \frac{r\sin\theta d\varphi}{B_\varphi} \quad (2.9.9)$$

จากสมการ (2.9.9) เขียน  $\vec{B}$  ในองค์ประกอบต่างๆ ให้อยู่ในรูปของ  $B_r(r, \theta, \varphi)$

$$B_r(r, \theta, \varphi) = B_r(r, \theta, \varphi)$$

$$B_\theta(r, \theta, \varphi) = r \frac{d\theta}{dr} B_r(r, \theta, \varphi) \quad (2.9.10)$$

$$B_\varphi(r, \theta, \varphi) = r\sin\theta \frac{d\varphi}{dr} B_r(r, \theta, \varphi)$$

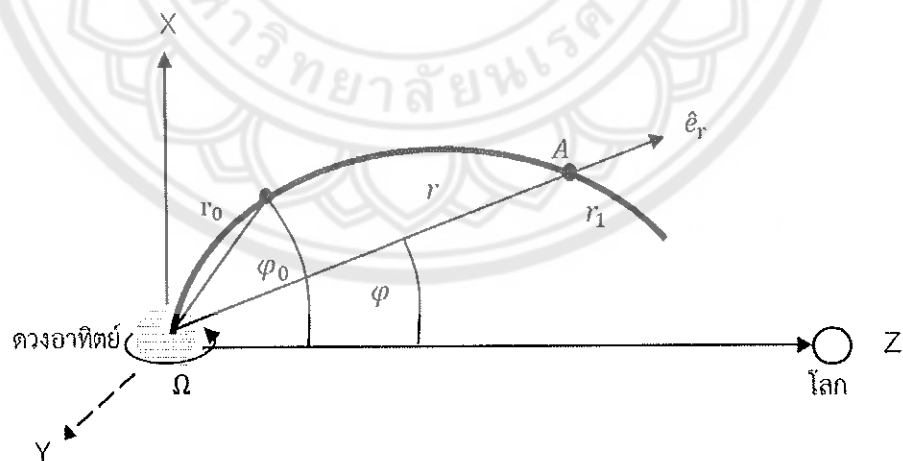
จากข้างต้นที่กล่าวมา ในการจำลองของปาร์เกอร์ (Parker spiral) ให้  $B_\theta = 0$  เนื่องจากเราจะพิจารณาสนามแม่เหล็กในระนาบของเส้นศูนย์สูตร (equatorial plane) ดังนั้นความสัมพันธ์ของ  $\vec{B}(r, \theta, \varphi)$  ในองค์ประกอบต่างๆ จึงเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$B_r(r, \theta, \varphi) = B_r(r, \theta, \varphi)$$

$$B_\theta(r, \theta, \varphi) = 0 \quad (2.9.11)$$

$$B_\varphi(r, \theta, \varphi) = r\sin\theta \frac{d\varphi}{dr} B_r(r, \theta, \varphi)$$

ต่อไปพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่ามุม  $\varphi$  และรัศมี  $r$  ของสนามแม่เหล็กที่ออกจากดวงอาทิตย์จากภาพ 4



ภาพ 4 ลักษณะของสนามแม่เหล็กที่ออกจากดวงอาทิตย์ในพิกัดทรงกลม

เนื่องจากดวงอาทิตย์หมุนรอบตัวเองด้วยความเร็วเชิงมุม ( $\Omega$ ) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับมุม ( $\varphi$ ) ที่สนามแม่เหล็กกระทำในแนวรัศมี ( $r$ ) ดังสมการ (2.9.12) จากความเร็วเชิงมุมคือการกระจัดเชิงมุมที่เปลี่ยนไปในหนึ่งหน่วยเวลา

$$\Omega = \frac{\varphi_0 - \varphi}{t} = -\frac{|\Delta\varphi|}{\Delta t} \quad (2.9.12)$$

ค่า  $-|\Delta\varphi|$  แสดงว่า ถ้าค่า  $\varphi$  มีค่ามาก จะใช้เวลาน้อย ถ้าค่า  $\varphi$  มีค่าน้อย จะใช้เวลามาก

เมื่อ  $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$  และ  $\Delta t = t - t_0$

พิจารณารัศมีของอนุภาคที่เคลื่อนที่ตามความเร็วลมสุริยะจากสมการ

$$r = v_{sw} t$$

$$\frac{dr}{dt} = v_{sw}$$

$$r - r_0 = v_{sw} (t - t_0)$$

$$\Delta r = v_{sw} \Delta t$$

(2.9.13)

แทนค่า  $\Delta t$  จากสมการ (2.9.12) ลงในสมการที่ (2.9.13) จะได้

$$\Delta r = v_{sw} \frac{\varphi_0 - \varphi}{\Omega}$$

$$\Delta r = -\frac{v_{sw} \Delta\varphi}{\Omega}$$

$$\frac{\Delta r}{\Delta\varphi} = -\frac{v_{sw}}{\Omega}$$

$$\frac{dr}{d\varphi} = -\frac{v_{sw}}{\Omega}$$

(2.9.14)

เมื่อ  $\varphi$  คือ มุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับแนวรัศมีเมื่อเวลา  $t$  ณ ตำแหน่ง  $r_1$  (rad)

$\varphi_0$  คือ มุมที่สนามแม่เหล็กกระทำกับแนวรัศมีเมื่อเวลาเริ่มต้น  $t_0$  (rad)

$r$  คือ ระยะทางจากดวงอาทิตย์มายังตำแหน่ง A (km)

$v_{sw}$  คือ ความเร็วของลมสุริยะ (km/s)

$\Omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมในการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ =  $2.7 \times 10^{-6}$  rad/s

นำสมการ (2.9.14) แทนลงในสมการ (2.9.11) จะได้ค่าสนามแม่เหล็กในแนว  $\hat{e}_\varphi$  เป็น

$$B_\varphi(r, \theta, \varphi) = r \sin\theta \left( -\frac{\Omega}{v_{sw}} \right) B_r(r, \theta, \varphi) \quad (2.9.15)$$

ดังนั้น ค่าสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  กลายเป็น

$$\vec{B}(r, \theta, \varphi) = B_r(r, \theta, \varphi) \hat{e}_r - \frac{\Omega}{v_{sw}} r \sin \theta B_r(r, \theta, \varphi) \hat{e}_\varphi$$

$$\vec{B}(r, \theta, \varphi) = B_r(r, \theta, \varphi) \left( \hat{e}_r - \frac{\Omega}{v_{sw}} r \sin \theta \hat{e}_\varphi \right) \quad (2.9.16)$$

จากสมการแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์  $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$  เมื่อพิจารณาทฤษฎีไดโพลาร์เจเนซิสจะได้ค่าสนามแม่เหล็ก  $\vec{\nabla} \cdot \vec{B}$  ในพิกัดทรงกลมคือ

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = \frac{\partial B_r}{\partial r} + \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial B_\varphi}{\partial \varphi} = 0$$

ไดโพลาร์เจเนซิสของสนามเวกเตอร์ในระบบพิกัดทรงกลมแสดงดังนี้

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial r^2}{\partial r} B_r - \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta B_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial B_\varphi}{\partial \varphi} = 0 \quad (2.9.17)$$

จากเงื่อนไขข้างต้นให้  $B_\theta = 0$  และแทนค่า  $B_\varphi$  จากสมการ (2.9.11) ลงในสมการ (2.9.17) จะได้

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial r^2}{\partial r} B_r - \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\Omega}{v_{sw}} r \sin \theta B_r \right) = 0$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial r^2}{\partial r} B_r - \left( \frac{\Omega}{v_{sw}} \right) \frac{\partial B_r}{\partial \theta} = 0 \quad (2.9.18)$$

จากสมการ (2.9.18) จะเป็นจริงได้เมื่อ  $B_r$  ไม่ขึ้นกับ  $\theta$  และค่า  $r^2 B_r$  เป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับ  $r$  แต่ขึ้นกับ  $\theta$  ได้ ดังนั้น กำหนดให้

$$B_r = \frac{A(\theta)}{r^2} \quad (2.9.19)$$

กำหนดให้  $r_1$  เป็นจุดอ้างอิง สนามแม่เหล็ก  $B_r = B_1$  ดังนั้น

$$A(\theta) = B_1 r_1^2$$

แทนค่า  $A(\theta)$  ลงในสมการที่ (2.9.19) จะได้

$$B_r = \frac{B_1 r_1^2}{r^2} \quad (2.9.20)$$

แทนค่าสมการ (2.9.20) ลงในสมการ (2.9.16) จะได้

$$\vec{B}(r, \theta, \varphi) = \frac{B_1 r_1^2}{r^2} \left( \hat{e}_r - \frac{\Omega}{v_{sw}} r \sin \theta \hat{e}_\varphi \right) \quad (2.9.21)$$

ในสมการ (2.9.21) เป็นสมการที่แสดงลักษณะของสนามแม่เหล็กที่ออกจากดวงอาทิตย์แบบเกลียวอาร์คิมิดีสหรือเกลียวพาร์เกอร์ในพิกัดทรงกลมโดยมีลักษณะของสนามแม่เหล็กในองค์ประกอบต่างๆ ดังสมการต่อไปนี้

$$B_r = \frac{B_1 r_1^2}{r^2} \quad \text{แสดงลักษณะของสนามแม่เหล็กในรัศมี}$$

$$B_\theta = 0 \quad \text{ไม่มีสนามแม่เหล็กในแนว } \theta$$

$$B_\phi = -\frac{B_1 \Omega r_1^2 \sin\theta}{v_{sw} r} \quad \text{แสดงลักษณะของสนามแม่เหล็กในแนว } \phi \text{ [17,18]}$$

### สมการการขนส่งที่อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูง

อนุภาคพลังงานสูงที่ออกมาจากดวงอาทิตย์เป็นอนุภาคที่มีประจุและเป็นกลางทางไฟฟ้า ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีลักษณะเป็นเกลียวรอบเส้นสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากดวงอาทิตย์ ระหว่างดวงอาทิตย์กับตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ทำให้เกิดแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กตามกฎของแรงโลเรนตซ์ (Lorentz force Law) เป็นไปตามสมการ

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.10.1)$$

เมื่อ  $\vec{F}$  คือ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก (N)

$q$  คือ อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า (c)

$\vec{v}$  คือ ความเร็วของอนุภาค (km/s)

$\vec{B}$  คือ สนามแม่เหล็ก (T)

เนื่องจากเส้นสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากดวงอาทิตย์นั้นจะมีความเข้มลดลงตามระยะทางจึงทำให้สนามแม่เหล็กมีลักษณะค่อยุบานออก เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ตามระยะทางในแนวแกน  $z$  เพิ่มขึ้น ตามนิยามของความยาวโฟกัส (focusing length) ดังสมการ

$$\frac{1}{L(z)} = -\frac{1}{B} \frac{dB}{dz} \quad (2.10.2)$$

เมื่อ  $L(z)$  คือ ความยาวของเส้นสนามแม่เหล็กตามระยะทางในแนวแกน  $z$  (AU)

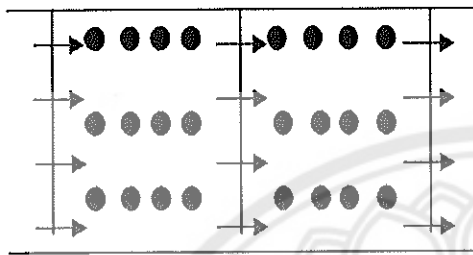
$B$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (T)

$z$  คือ ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์มายังโลก (AU)

ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคในอวกาศที่เคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กไม่เรียบหรือมีความแปรปรวนนั้น สามารถอธิบายการกระจายตัวของอนุภาคได้จากสมการการแพร่-การพา

(diffusion-convection equation) โดยเราจะพิจารณาการกระจายตัวของอนุภาคใน 1 มิติ สามารถเขียนฟังก์ชันได้เป็น [19] เมื่อ  $N$  คือ จำนวนอนุภาคในเซลล์

$$f(x,t) = \frac{dN}{dx} \quad (2.10.3)$$

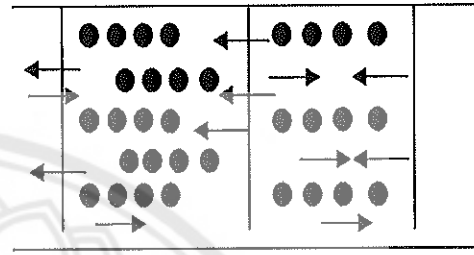


$$x - \frac{\Delta x}{2}$$

$$x$$

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

ภาพ 5 การพาของฟลักซ์แบบเชิงระบบ



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

$$x$$

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

ภาพ 6 การพาของฟลักซ์แบบเชิงสุ่ม

กำหนดให้ ฟลักซ์ (flux) ;

$S =$  จำนวนอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านจุดๆหนึ่งในเวลา  $t$

$$S = \frac{\text{จำนวนอนุภาค}}{\Delta t} = vf(x,t)$$

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

(2.10.4)

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

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

เมื่อ  $\Delta x \rightarrow 0$

$$\frac{\partial f(x,t)}{\partial t} = - \frac{\partial S(x,t)}{\partial x} \quad (2.10.5)$$

เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาจะประกอบไปด้วยการเปลี่ยนแปลงเชิงระบบ (systematic process) และการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม (random process) ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงเชิงระบบ คือการที่อนุภาคเคลื่อนที่ในเซลล์ในทิศทางเดียวกันและมีความเร็วเท่ากันดังภาพ 5 การเปลี่ยนแปลงเชิงระบบนี้หรือฟลักซ์การพา (convective flux) คือ

$$S(x,t)_{\text{convective}} = \left( \frac{\Delta x}{\Delta t} \right) f(x,t) \quad (2.10.6)$$

และการเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม คือการที่อนุภาคเคลื่อนที่แบบสุ่มหรือไม่เป็นระเบียบ ซึ่งแสดงได้ดังภาพ 6 จากภาพจะเห็นว่าฟลักซ์ของอนุภาคทางซ้ายมีความหนาแน่นมากกว่าทางขวามือหรือเรียกว่า ฟลักซ์การแพร่ (diffusive flux) จากกฎของฟิค (Ficks law) กล่าวว่

$$S(x, t)_{\text{diffusive}} \propto - \left( \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right) \quad (2.10.7)$$

$$S(x, t)_{\text{diffusive}} = -D \left( \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right) \quad (2.10.8)$$

นำสมการ (2.10.6) และสมการ (2.10.8) แทนลงในสมการ (2.10.5) จะได้

$$\frac{\partial f(x, t)}{\partial t} = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\Delta x}{\Delta t} f(x, t) \right]}_{\text{การเปลี่ยนแปลงเชิงระบบ}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[ D \frac{\partial f(x, t)}{\partial x} \right]}_{\text{การเปลี่ยนแปลงเชิงสุ่ม}} \quad (2.10.9)$$

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

$$D \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{\partial F}{\partial t} = 0 \quad (2.10.10)$$

เมื่อ  $D$  คือ สัมประสิทธิ์การฟุ้ง  
 $\partial x$  คือ ช่วงระยะที่อนุภาคเคลื่อนที่  
 $\partial t$  คือ ช่วงเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านระยะ  $\partial x$   
 $\frac{\partial F}{\partial t}$  คือ จำนวนอนุภาคตามเวลา  
 $\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}$  คือ ฟลักซ์ที่ไหลผ่านระยะ  $\partial x$

ในการศึกษานี้จะจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยใช้สมการพอร์กเกอร์แพลงก์ที่มีพื้นฐานมาจากสมการการแพร่ของอนุภาคตามเวลา และได้พัฒนาปรับปรุงโดย Ruffolo 1998 เป็นสมการอธิบายการขนส่งอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ ดังสมการ

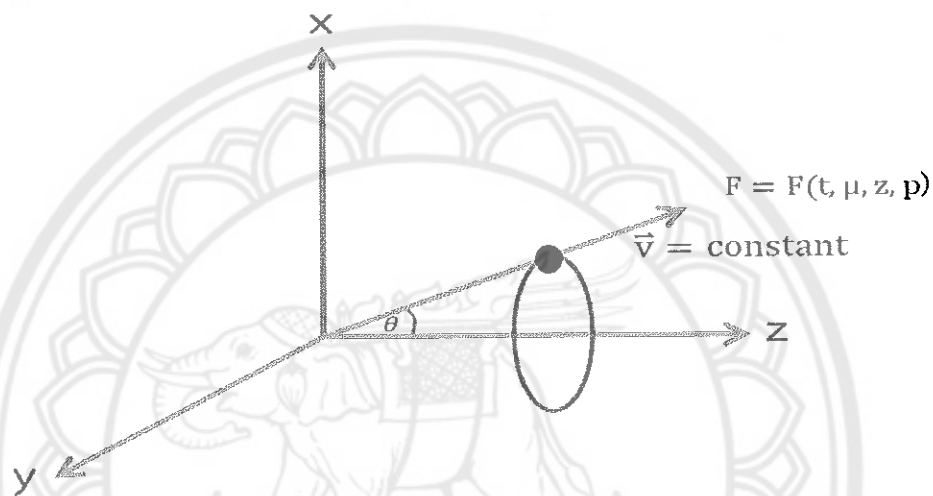
$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(a_i F)}{\partial a_i} = Q \quad (2.10.11)$$

เมื่อ  $Q$  คือ ฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาค (พจน์แหล่งกำเนิด ; source term)  
 $F$  คือ ฟังก์ชันการแพร่กระจายของอนุภาค (Distribution function)



$\frac{\partial F}{\partial t}$  คือ การกระจายตัวของฟังก์ชันของอนุภาคตามเวลา

$a_i$  คือ พารามิเตอร์ของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ หรือตัวแปรอิสระในเทอม  $t, \mu, z,$  และ  $p$  เมื่อ  $t$  คือเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลก (s) ,  $\mu$  คือตัวกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าหรือออกจากดวงอาทิตย์ โดยที่  $\mu = \cos \theta$  ,  $z$  คือระยะทางตามเส้นสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์มายังโลก (AU) และ  $p$  คือโมเมนตัมของอนุภาค



ภาพ 7 แสดงค่ามุมระยะช่วงเกลียว (pitch angle)

จากภาพ 7 เมื่อพิจารณาตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์จะเห็นว่าอนุภาคพลังงานสูงเป็นอนุภาคที่มีประจุ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคจึงเคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว  $\vec{v}$

เมื่อพิจารณาตัวแปรอิสระในพจน์ของการเปลี่ยนแปลงเชิงระบบ มีตัวแปรของการเปลี่ยนแปลงดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงระยะทางตามเส้นสนามแม่เหล็กในแนวแกน  $z$
2. การเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม
3. การเปลี่ยนแปลงของ  $\mu$  เมื่อ  $\mu$  คือตัวแปรที่แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค  $\mu = \cos \theta$  ,  $\theta$  คือมุมระหว่างความเร็ว  $\vec{v}$  ของอนุภาคกับทิศของสนามแม่เหล็กในแกน  $z$  หรือมุมระยะช่วงเกลียว

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

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

การพิจารณาตัวแปรอิสระในการเคลื่อนที่ของอนุภาคแสดงในพจน์ของการเปลี่ยนแปลงเชิงสุ่ม เนื่องจากเส้นสนามแม่เหล็กบนดวงอาทิตย์มีความแปรปรวนสูงโดยมีสาเหตุมาจากลมสุริยะ ตัวแปรอิสระในพจน์ของการเปลี่ยนแปลงเชิงสุ่ม คือการเปลี่ยนแปลง  $\mu$  ตามเส้นสนามแม่เหล็กที่มีความแปรปรวน

ดังนั้นจากสมการเฟอร์กอร์เพลงก์ ซึ่งเป็นสมการที่อธิบายความหนาแน่นของอนุภาคในระยะทางตามเส้นสนามแม่เหล็กในแนวแกน  $z$  ด้วยความเร็ว  $\vec{v}$  โดยใช้เวลาในการเคลื่อนที่  $t$  เมื่อพิจารณาตัวแปรอิสระต่างๆจึงเป็นไปตามสมการ คือ

$$\frac{\partial F(t, \mu, z, p)}{\partial t} = \underbrace{-\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\Delta z}{\Delta t} F \right) - \frac{\partial}{\partial \mu} \left( \frac{\Delta \mu}{\Delta t} F \right) - \frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{\Delta p}{\Delta t} F \right)}_{\text{การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์เชิงระบบ}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial \mu} \left[ \frac{\varphi(\mu)}{2} \frac{\partial}{\partial \mu} \left( \frac{E'}{E} F \right) \right]}_{\text{การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์เชิงสุ่ม}} \quad (2.10.12)$$

เมื่ออัตราส่วนของอนุภาคจากกรอบลมสุริยะเทียบกับกรอบหยุดนิ่งหาได้จาก

$$\frac{E'}{E} = \frac{1 - (\mu v v_{sw} \sec \Psi)}{c^2} \quad (2.10.14)$$

และฟังก์ชันการแพร่กระจาย 
$$\frac{\partial F(t, \mu, z, p)}{\partial z \partial \mu \partial p} = \frac{d^3 N}{dz d\mu dp} \quad (2.10.15)$$

เมื่อ  $N$  คือ จำนวนอนุภาค

จากสมการ 2.10.12 นี้ ในการพิจารณาเราจะพิจารณาในกรอบดังนี้

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

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงที่ออกจากดวงอาทิตย์โดยใช้สมการพื้นฐานเฟอร์กอร์เพลงก์ซึ่งเมื่อรวมอิทธิพลต่างๆ ที่เกิดจากตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่บานออกและผลเนื่องจากลมสุริยะในกรอบของการพิจารณาต่างๆแล้วจะได้สมการขนส่งที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงเป็นไปตามสมการขนส่งของ Ruffolo [10] ซึ่งเป็นรูปแบบของสมการของส่งคือ

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

(2.10.16)

เมื่อ

- F คือ ฟังก์ชันการแพร่กระจาย
- t คือ เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลก (min)
- z คือ ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์มายังโลก (AU)
- $\mu = \cos \theta$  แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคว่าเคลื่อนที่เข้าหรือออกจากดวงอาทิตย์
- $\theta$  คือ มุมระหว่างทิศของความเร็วของอนุภาคกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก
- P คือ โมเมนตัมของอนุภาค (MeV/c)
- $\varphi(\mu)$  คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงของอนุภาคที่กระทำกับเส้นสนามแม่เหล็ก
- v คือ ความเร็วของอนุภาค (AU/min)
- $v_{sw}$  คือ ความเร็วของลมสุริยะ (AU/min)
- $\psi$  คือ มุมระหว่างเวกเตอร์ที่แสดงทิศทางของอนุภาคตามแนวรัศมีกับทิศทางของเส้นสนามแม่เหล็ก
- c คือ ความเร็วแสง (AU/min)
- L(z) คือ ความยาวของเส้นสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะบานออกตามระยะทางสนามแม่เหล็กที่เพิ่ม
- $\frac{E'}{E}$  คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานรวมในกรอบอ้างอิงของลมสุริยะกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง [18]

ตาราง 2 แสดงพจน์ของสมการขนส่ง สมการที่ (2.10.16)

พจน์	อธิบาย
Streaming	เป็นพจน์ที่อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเส้นสนามแม่เหล็กในแกน z
Convection	เป็นพจน์ที่อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเส้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการพาของลมสุริยะ
Focusing	เป็นพจน์ที่แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เป็นผลตามโฟกัสอะเดียแบติก (adiabatic focusing) ที่พิจารณาในกรอบอ้างอิงที่หยุดนิ่งและกรอบของลมสุริยะ
Differential convection	เป็นพจน์แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของลมสุริยะตามตำแหน่ง โดยพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลง $\mu$ เทียบกับเวลา $t$ ในกรอบของลมสุริยะ ซึ่งในพจน์นี้จะไม่เป็นผลจากการโฟกัส เนื่องจาก $p_{\perp}=0$
Scattering	เป็นพจน์ที่แสดงลักษณะการกระเจิงของอนุภาคในกรอบของลมสุริยะในการเปลี่ยนแปลงเชิงสุ่ม
Deceleration	เป็นพจน์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมที่ขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามเส้นของสนามแม่เหล็กในกรอบของลมสุริยะ

ยานอวกาศ ACE (Advanced Composition Explorer)

งานวิจัยชิ้นนี้เราได้ใช้ข้อมูลจากยานอวกาศ ACE โดยยานอวกาศ ACE ปฏิบัติการครั้งแรกเมื่อวันที่ 22 เมษายน 2005 เป็นยานอวกาศที่ใช้ในการสำรวจและตรวจวัดอนุภาคต่างๆ ที่มาจากดวงอาทิตย์และอนุภาคที่มาจากแหล่งอื่นๆ ที่เคลื่อนที่มายังโลก มีขนาดความกว้างของตัวยานประมาณ 1.6 m และมีความสูงประมาณ 1 m มีน้ำหนักยานอวกาศเมื่อรวมกับถังเชื้อเพลิงประมาณ 758 kg แสดงในภาพจำลองส่วนประกอบของยานอวกาศ ACE ดังภาพ 8 [13]

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

1. CRIS (The Cosmic Ray Isotope Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดและศึกษาไอโซโทปของรังสีคอสมิก ที่มีระดับพลังงานอยู่ในช่วง 100-600 MeV/n
2. SIS (The Solar Isotope Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด และศึกษาอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ ที่มีระดับพลังงานอยู่ในช่วง 10-100 MeV/n

3. ULEIS (The Ultra Low Energy Isotope Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด และศึกษาอนุภาคพลังงานต่ำที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ ที่มีระดับพลังงานอยู่ในช่วง 0.2-10 MeV/n

4. SWEPAM (Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor) เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด พลาสมาของลมสุริยะ และความหนาแน่นของอนุภาค ซึ่งเป็นเวลาจริงของลมสุริยะขณะสำรวจ

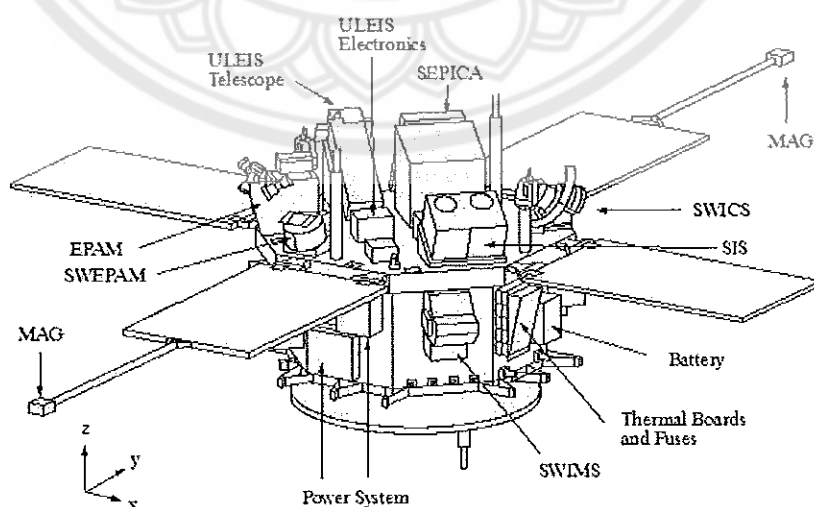
5. MAG (The ACE Magnetic Field Experiment) เป็นเครื่องมือที่วัดทิศทางของ สนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์

6. EPAM (Electron, Proton, and Alpha Monitor) เป็นเครื่องมือที่บอกถึงความหนาแน่น และพลังงานของโปรตอน อนุภาคแอลฟา และอิเล็กตรอน โดยวัดพลังงานของอนุภาคที่มีระดับ พลังงานอยู่ในช่วง 0.3–0.4 MeV/n

7. SWIMS (Solar Wind Ion Mass Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่แสดงค่าของ ส่วนประกอบต่างๆ ของไอออนของลมสุริยะ ขอบเขต สิ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง และการเร่ง อนุภาคในลมสุริยะ ตลอดจนลักษณะทางกายภาพของไอออนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ของลม สุริยะ

8. SWICS (Solar Wind Ionic Charge Spectrometer) ทำหน้าที่เหมือนกับเครื่องมือ SWIMS

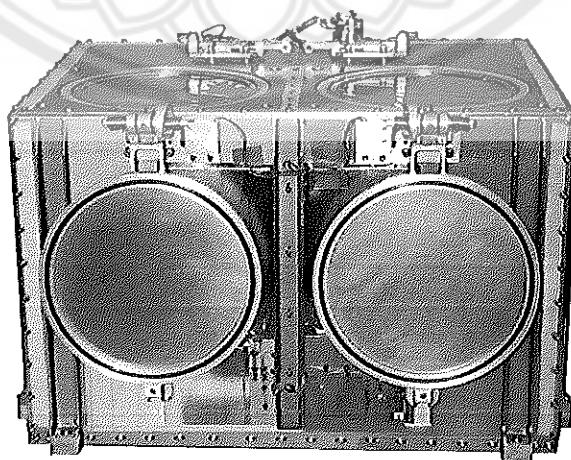
9. SEPICA (The Solar Energetic Particle Ionic Charge Analyzer) เป็นเครื่องมือที่ทำ หน้าที่เก็บข้อมูลของการพุ่งของอนุภาคจากการปะทุบนดวงอาทิตย์



ภาพ 8 ภาพจำลองส่วนประกอบของยานอวกาศ ACE [20]

โดยที่อุปกรณ์ทั้งหมดใช้ตรวจวัดอนุภาคได้แก่ประจุ มวล พลังงาน ทิศทางของการเคลื่อนที่ตามเวลา อุปกรณ์ทั้งหมดเป็นประโยชน์ในการศึกษา เพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับจุดกำเนิดของอนุภาคเข้าใจถึงวิวัฒนาการของระบบสุริยะและกระบวนการที่เกี่ยวข้องอุปกรณ์บนยานอวกาศ ACE ส่วนใหญ่จะใช้เพื่อศึกษาอิเล็กตรอนและกลุ่มของไอโซโทปซึ่งมีพลังงานสูง กล่าวคือมีการเคลื่อนที่เร็วและยังเป็นไอออน โดยในงานวิจัยนี้เราได้ใช้เครื่องมือวัด Solar Isotopic Spectrometer (SIS)

อุปกรณ์ The Solar Isotope Spectrometer (SIS) เป็นอุปกรณ์การวัดอนุภาคที่ถูกออกแบบเพื่อการวัดอนุภาคพลังงานสูงของธาตุ He ถึง Ni ( $Z=2$  ถึง 28) ที่มีระดับพลังงานอยู่ในช่วง  $\sim 10$  ถึง 100 MeV/n และศึกษาอนุภาคพลังงานสูงที่ปลดปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ ที่มีพลังงานอยู่ในช่วง  $\sim 10$  ถึง 100 MeV/n เมื่อเกิดการปะทุบนดวงอาทิตย์ความหนาแน่นของอนุภาคจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เครื่องมือ SIS จะสามารถตรวจวัดไอโซโทปของอนุภาคจากชั้นคอโรนาขณะเดียวกันในสภาวะปกติเครื่องมือ SIS จะสามารถตรวจวัดไอโซโทปของรังสีคอสมิกในช่วงพลังงานต่ำที่มาจากดวงอาทิตย์ และสามารถตรวจวัดรังสีคอสมิกที่มีจากกาแล็กซีอื่นๆ ได้ ลักษณะของเครื่องตรวจวัด SIS ดังภาพ 9 SIS มีรูปแบบเป็นทรงเรขาคณิตขนาดเท่ากับ  $40 \text{ cm}^2 \text{ sr}$  ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าดาวเทียมที่ใช้วัดอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ห้วงวัดของ SIS ถูกสร้างขึ้นด้วยซิลิกอน ประกอบด้วยสองชั้นเรียกว่า  $M_1$  และ  $M_2$  โดยมีพื้นที่หน้าตัดประมาณ  $33.9 \text{ cm}^2$  และหนา  $0.06 \text{ mm}$  เหมือนกันทั้งสองชั้น เมื่อเกิดเหตุการณ์การปะทุ ห้วงวัดจะทำการวัดอนุภาคที่ผ่านเข้ามายังห้วง  $M_1$  และผ่านไปยัง  $M_2$  แล้วเก็บข้อมูลอยู่ในรูปของความหนาแน่นของอนุภาคที่ผ่านห้วงวัดแยกตามระดับพลังงานของอนุภาคตามเวลาและค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่ห้วงวัด [20]



ภาพ 9 แสดงเครื่องมือตรวจวัด SIS บนยาน ACE [20]

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D.Ruffolo et al. [21] ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในดักกลางระหว่างดาวเคราะห์ พบว่าฟลักซ์ของอนุภาคมีการกระจายตัวในทุกทิศทาง สำหรับอนุภาคพลังงานสูงเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของอนุภาคตามเวลาสามารถหาค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยของการกระเจิงในดักกลางระหว่างดาวเคราะห์ได้โดยการพัฒนาเทคนิคในการฟิตข้อมูลที่ดีที่สุดในฟังก์ชันการปลดปล่อย 2 วิธี คือรูปแบบการปลดปล่อยเชิงเส้นแบบสามเหลี่ยม (piecewise linear profile) และรูปแบบเรด (reid profile) ซึ่งทั้ง 2 เทคนิคนี้ใช้กับฟังก์ชันการปลดปล่อยของโปรตอนที่วัดได้จากยานอวกาศ ISEE3 (International Sun/Earth Explorer 3) โดยสมมติให้รูปแบบการปลดปล่อยใกล้เคียงกัน สำหรับเหตุการณ์การปะทุเมื่อวันที่ 20 กรกฎาคม 1981 เป็นการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปและเหตุการณ์ ณ วันที่ 2 มกราคม 1982 เป็นเหตุการณ์การปะทุแบบทันทีทันใด สำหรับเหตุการณ์ก่อนหน้านี้จะมีระยะเวลาการปลดปล่อยสั้นมาก สำหรับอนุภาคโปรตอนที่ระดับพลังงานสูง (75-147 MeV) พบว่าการปล่อยมวลสารจากคอโรนาทำให้เกิดคลื่นกระแทกและทำให้เกิดการเร่งอนุภาคโปรตอนประมาณ 100 MeV หลังจากอนุภาคเคลื่อนที่ออกจากดวงอาทิตย์

A K Singh et al. [22] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปรากฏการณ์การปลดปล่อยมวลคอโรนา การปะทุบนดวงอาทิตย์ พายุแม่เหล็กโลกและตัวแปรอื่นๆ ในช่วงวัฏจักรสุริยะ 23 (ปี 1999-2005) พบว่าบางครั้งอาจมีปะทุได้โดยไม่มีการปลดปล่อยมวลคอโรนา และบางครั้งอาจมีการปลดปล่อยมวลคอโรนาได้โดยไม่เกิดการปะทุบนดวงอาทิตย์ หากการปลดปล่อยมวลคอโรนาที่มีความเร็ว 1,000 km/s หรือสูงกว่าจะก่อให้เกิดพายุแม่เหล็กโลกที่มีความรุนแรง เรายังสรุปได้ว่าเหตุการณ์การปลดปล่อยมวลคอโรนาที่มีความเร็วสูง (เมื่อวันที่ 18 พฤศจิกายน 2003 วันที่ 7 พฤศจิกายน 2004 วันที่ 14 กรกฎาคม 2000 และวันที่ 4 พฤศจิกายน 2001) ทำให้เกิดคลื่นกระแทกจากลมสุริยะในกลุ่มหมอกของสนามแม่เหล็ก เช่น การปลดปล่อยมวลคอโรนาที่มีความเร็วมากกว่า 1,000 km/s ทำให้เกิดคลื่นกระแทกในระหว่างการแพร่กระจายของมวลคอโรนา เกิดการปะทะกับลมสุริยะ และสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ส่งผลต่อการเกิดพายุแม่เหล็กโลก

Bimal Pande et al. [23] ได้ศึกษาเหตุการณ์การปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากการปะทุบนดวงอาทิตย์ในปี 2010-2014 ในรอบวัฏจักรสุริยะที่ 24 ได้เลือกเหตุการณ์การปะทุที่วัดความรุนแรงจากรังสีเอกซ์ที่ระดับ M ขึ้นไป มีการแบ่งระดับการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูง แบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ weak (ความเข้มของโปรตอน  $\leq 1$  pfu) ระดับ minor ( $1 \text{ pfu} < \text{ความเข้มของโปรตอน} < 10 \text{ pfu}$ ) และ ระดับ major ( $\geq \text{ความเข้มของโปรตอน} 10 \text{ pfu}$ ) เราใช้ข้อมูลจาก GOES สำหรับเหตุการณ์การปลดปล่อยอนุภาคที่มีความเข้มมากกว่า 1 pfu และข้อมูลจาก SOHO/ERNE

(Energetic and Relativistic Nuclei and Electron) สำหรับเหตุการณ์ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 1 pfu พบว่าส่วนใหญ่แหล่งที่มาของอนุภาคพลังงานสูง มาจากการระเบิดที่ตั้งอยู่ในด้านตะวันตกของดวงอาทิตย์ และบางส่วนอยู่ในด้านตะวันออกแต่มีความเร็วสูงเมื่อเทียบกับเหตุการณ์จากทิศตะวันตก เหตุการณ์การปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงระดับ major เกิดจากการปลดปล่อยมวลคอโรนาแบบ Halo และมีความเร็วสูง ส่วนเหตุการณ์ปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงระดับ minor และ wear เกิดจากความเร็วของมวลคอโรนาที่ค่อนข้างต่ำ แหล่งที่มาของการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงส่วนใหญ่อยู่ในซีกเหนือซึ่งแสดงถึงความไม่สมดุลของซีกเหนือและใต้ พบความสัมพันธ์ที่ลดลงระหว่างฟลักซ์ของรังสีเอ็กซ์และความเข้มข้นของอนุภาค และพบความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นระหว่างความเร็วมวลคอโรนาและความเข้มข้นของอนุภาคพลังงานสูง

C. R. A. Augusto et al. [24] ได้ศึกษาการปะทุบนดวงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นในวันที่ 10 กันยายน 2017 มีระดับความรุนแรง X8.2 เหตุการณ์ครั้งนี้มีความรุนแรงในอันดับสองในรอบวัฏจักรสุริยะที่ 24 ซึ่งพบการปะทุภายใต้สามเหตุการณ์ที่น่าสนใจคือ เหตุการณ์แรก ณ ตำแหน่ง AR2673 ในทางตะวันตกของขอบดวงอาทิตย์ ไม่พบสนามแม่เหล็กที่เชื่อมต่อกับโลก เหตุการณ์ที่สองที่ตำแหน่งเดียวกัน พบการกระจายตัวของอนุภาคภายในบริเวณ heliosphere solar cycle (HCS) และเหตุการณ์ที่สาม เกิดการปะทะกันเมื่อมีการปะทุเกิดขึ้นขณะโลกเคลื่อนที่ผ่าน HCS เราคาดว่า HCS ส่งผลต่อสนามแม่เหล็กระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก และเป็นจริงหากอนุภาคโปรตอนถูกเร่งโดยคลื่นกระแทก (จนถึงพลังงานประมาณ 2 GeV) ในช่วงสนามแม่เหล็กทั่วโลก (ค่าสนามแม่เหล็กสุริยะเป็นบวก  $A > 0$  ใน 10 กันยายน 2017) อนุภาคเคลื่อนที่ออกจากดวงอาทิตย์เป็นแผ่น จากการวิเคราะห์ตามเวลาเราพบว่าสัญญาณที่ตรวจพบจากการปะทุนี้สอดคล้องกับขั้นตอนต่างๆ ของการปะทุ การปลดปล่อยพลังงานในช่วงการปะทุ สังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของรังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์ที่เก็บข้อมูลโดย RHESSI และ Fermi GBM ที่เวลา 15:57 UT ในขณะที่พลังงานถูกปลดปล่อยแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยสังเกตจากการเพิ่มขึ้นของรังสีเอ็กซ์ที่บันทึกโดยยานอวกาศ GOES และสูงสุดที่เวลา 16:06 UT ฟลักซ์โปรตอนของ GOES ยังสอดคล้องกับการปลดปล่อยพลังงานในการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป อนุภาคโปรตอนจากดวงอาทิตย์ถูกเร่งโดยคลื่นกระแทกจนมีความเร็วประมาณ 948 km/s การจำแนกพายุรังสีสุริยะโดยใช้ NOAA Space Weather Scale ที่มีสเกลตั้งแต่ S1-S5



### บทที่ 3

#### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

##### ศึกษาการเกิดการปะทุบนดวงอาทิตย์และการเปลี่ยนแปลงของดวงอาทิตย์ตามวัฏจักร

ปรากฏการณ์บนดวงอาทิตย์ ที่สำคัญได้แก่ปรากฏการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์และระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทางมายังโลก โดยเราได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงและปรากฏการณ์ต่างๆ ในรอบวัฏจักรสุริยะที่ 24 และเลือกเหตุการณ์ที่สนใจโดยดูจากระดับความรุนแรงและการตรวจพบอนุภาคที่เดินทางมายังโลก เพื่อนำมาวิเคราะห์หาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคของการปะทุบนดวงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับข้อมูลจริง ซึ่งตรวจวัดได้จากเครื่องมือบนยานอวกาศ GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite Spacecraft) ในการเลือกเหตุการณ์ที่ใช้ในการศึกษาโดยศึกษาจากข้อมูลเหตุการณ์ในรอบวัฏจักรที่ 24 ถูกจัดเรียงลำดับความรุนแรงที่มีค่าสูงสุด 50 อันดับแรก แสดงในตาราง 3

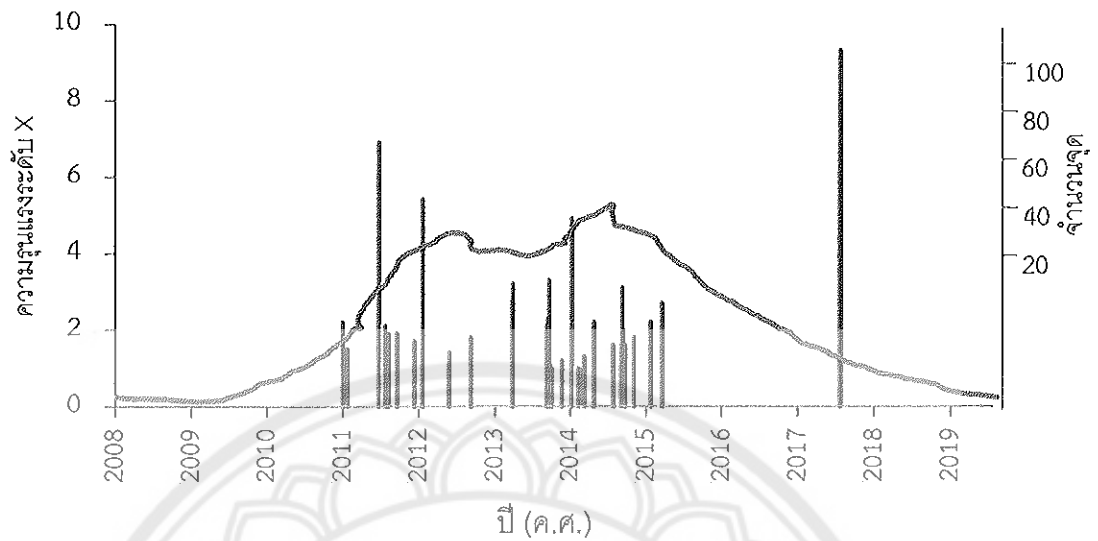
ตาราง 3 แสดงข้อมูล 50 เหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ในรอบวัฏจักรสุริยะที่ 24

ระดับความรุนแรง	วันที่เกิดการปะทุ	ลำดับจุดมืด	เวลาการปะทุ (UT)		
			เริ่มต้น	สูงสุด	สิ้นสุด
X9.3	6/9/2017	2673	11:53	12:02	12:10
X8.2	10/9/2017	2673	15:35	16:06	16:31
X6.9	9/8/2011	1263	07:48	08:05	08:08
X5.4	7/3/2012	1429	00:02	00:24	00:40
X4.9	25/2/2014	1990	00:39	00:49	01:03
X3.3	5/11/2013	1890	22:07	22:12	22:15
X3.2	14/5/2013	1748	00:00	01:11	01:20
X3.1	24/10/2014	2192	21:07	21:41	22:13
X2.8	13/5/2013	1748	15:48	16:05	16:16
X2.7	5/5/2015	2339	22:05	22:11	22:15

ตาราง 3 (ต่อ)					
ระดับความ รุนแรง	วันที่เกิด การปะทุ	ลำดับจุดมืด	เวลาการปะทุ (UT)		
			เริ่มต้น	สูงสุด	สิ้นสุด
X2.3	29/10/2013	1875	21:42	21:54	22:01
X2.2	15/2/2011	1158	01:44	01:56	02:06
X2.2	10/6/2014	2087	11:36	11:42	11:44
X2.2	11/3/2015	2297	16:11	16:22	16:29
X2.2	6/9/2017	2673	08:57	09:10	09:17
X2.1	6/9/2011	1283	22:12	22:20	22:24
X2.1	25/10/2013	1882	14:51	15:03	15:12
X2.0	26/10/2014	2192	10:04	10:56	11:18
X2.0	27/10/2014	2192	14:12	14:47	15:09
X1.9	24/9/2011	1302	09:21	09:40	09:48
X1.9	3/11/2011	1339	20:16	20:27	20:32
X1.8	7/9/2011	1283	22:32	22:38	22:44
X1.8	23/10/2012	1598	03:13	03:17	03:21
X1.8	20/12/2014	2242	00:11	00:28	00:55
X1.7	27/1/2012	1402	17:37	18:37	18:56
X1.7	13/5/2013	1748	01:53	02:17	02:32
X1.7	25/10/2013	1882	07:53	08:01	08:09
X1.6	10/9/2014	2158	17:21	17:45	18:20
X1.6	22/10/2014	2192	14:02	14:28	14:50
X1.6	7/11/2014	2205	16:53	17:26	17:34
X1.5	9/3/2011	1166	23:13	23:23	23:29
X1.5	10/6/2014	2087	12:36	12:52	13:03
X1.4	22/9/2011	1302	10:29	11:01	11:44
X1.4	12/7/2012	1520	15:37	16:49	17:30
X1.3	7/3/2012	1430	01:05	01:14	01:23

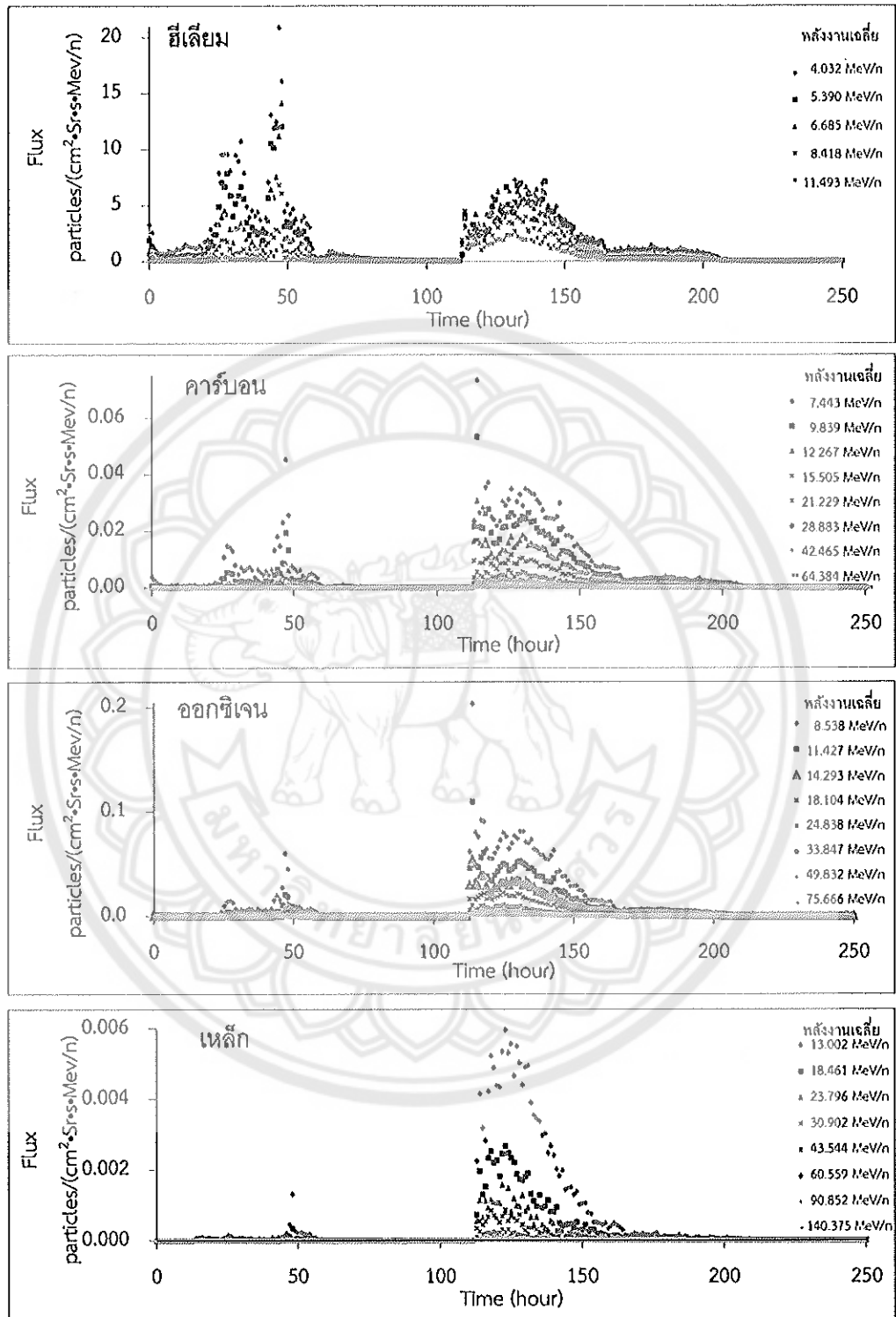
ตาราง 3 (ต่อ)					
ระดับความ รุนแรง	วันที่เกิด การปะทุ	ลำดับจุดมืด	เวลาการปะทุ (UT)		
			เริ่มต้น	สูงสุด	สิ้นสุด
X1.3	25/4/2014	2035	00:17	00:27	00:38
X1.3	7/9/2017	2673	14:20	14:36	14:55
X1.2	15/5/2013	1748	01:25	01:48	01:58
X1.2	7/1/2014	1944	18:04	18:32	18:58
X1.1	5/3/2012	1429	02:30	04:09	04:43
X1.1	6/7/2012	1515	23:01	23:08	23:14
X1.1	8/11/2013	1890	04:20	04:26	04:29
X1.1	10/11/2013	1890	05:08	05:14	05:18
X1.1	19/10/2014	2192	04:17	05:03	05:48
X1.0	28/10/2013	1875	01:41	02:03	02:12
X1.0	19/11/2013	1893	10:14	10:26	10:34
X1.0	29/3/2014	2017	17:35	17:48	17:54
X1.0	11/6/2014	2087	08:59	09:06	09:10
X1.0	25/10/2014	2192	16:55	17:08	18:11
M9.9	1/1/2014	1936	18:40	18:52	19:03

จากข้อมูลในตาราง 3 เป็นเหตุการณ์การปะทุที่มีระดับความรุนแรงมากที่สุด 50 เหตุการณ์ตามลำดับ ในช่วงวัฏจักรที่ 24 ของดวงอาทิตย์ โดยพบว่าในเดือนกันยายน 2017 เกิดการระเบิดที่รุนแรงถึง 4 ครั้ง คือปรากฏการณ์การปะทุในวันที่ 6, 7 และ 10 กันยายน 2017



ภาพ 10 แสดงค่าระดับความรุนแรงของการปะทุระดับ x ในช่วงวัฏจักรสุริยะที่ 24

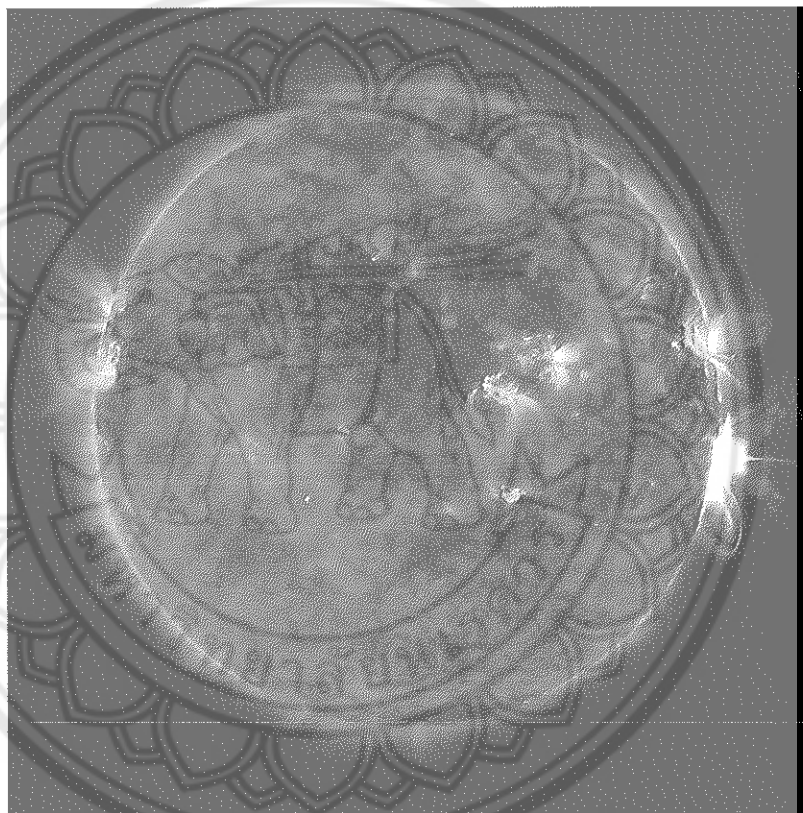
จากภาพ 10 แสดงถึงค่าระดับความรุนแรงที่เกิดในรอบวัฏจักรที่ 24 ของดวงอาทิตย์ ในช่วงปี ค.ศ. 2008-2019 ในระดับความรุนแรง X ขึ้นไป จำนวน 49 ครั้ง และค่าเฉลี่ยของจำนวนจุดมืด พบว่าระดับความรุนแรงสูงสุดอยู่ที่ X9.3 ในวันที่ 6 กันยายน 2017 และรองลงมาคือ X8.2 ในวันที่ 10 กันยายน 2017 ซึ่งเป็นช่วงทำยวัฏจักรที่มีค่าเฉลี่ยของจุดมืดน้อย เราจึงนำข้อมูลความหนาแน่นของอนุภาคฮีเลียม คาร์บอน ออกซิเจน และเหล็ก ที่วัดได้จากยาน ACE ตั้งแต่วันที่ 6-17 กันยายน 2017 มาแสดงในรูปของกราฟความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลา ดังแสดงในภาพ 11



ภาพ 11 แสดงความหนาแน่นของอนุภาคซีเลียม คาร์บอน ออกซีเจน และฮีเลียม  
วันที่ 6 – 17 กันยายน 2017

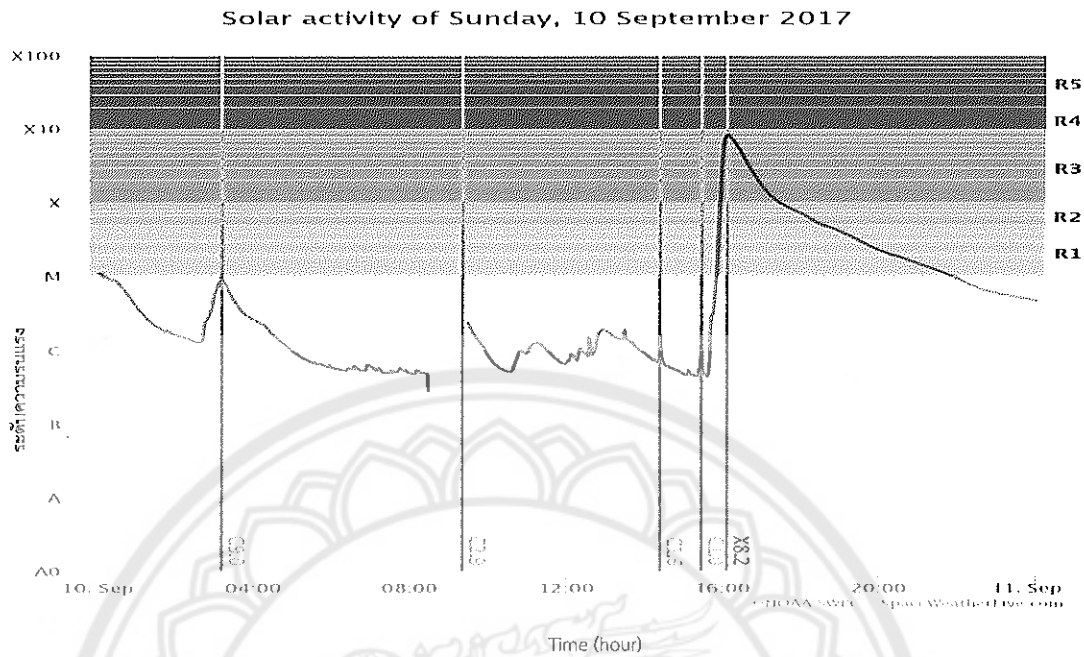
### ค้นคว้าเพื่อคัดเลือกปรากฏการณ์ลูกจ้ำของดวงอาทิตย์

จากสถิติการปะทุที่ผิวดวงอาทิตย์ ในช่วงต้นเดือนกันยายน ปี 2017 เกิดการปะทุขึ้นบ่อยครั้งตั้งแต่วันที่ 6-10 กันยายน 2017 เราพบว่าเหตุการณ์ที่เกิดการปะทุบนดวงอาทิตย์ในวันที่ 10 กันยายน 2017 ซึ่งมีความรุนแรงเป็นอันดับสองของวัฏจักรสุริยะที่ 24 มีการตรวจวัดปริมาณธาตุได้มากกว่าเหตุการณ์ที่รุนแรงเป็นอันดับหนึ่งโดยพิจารณาจากการความหนาแน่นของอนุภาคที่วัดได้ในภาพ 11 โดยเหตุการณ์นี้เกิดการระเบิดที่ตำแหน่ง S09W83 ที่แสดงในภาพ 12



ภาพ 12 ภาพถ่ายเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 10 กันยายน 2017 [25]

แสงสว่างที่ด้านขวาของดวงอาทิตย์ในภาพ 12 เป็นการปะทุที่มีความรุนแรงระดับ X8.2 ในวันที่ 10 กันยายน 2017 ภาพแสดงการรวมกันของความยาวคลื่นของแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความร้อนสูงจากลำดับของพื้นที่จุดมืดที่ AR2673

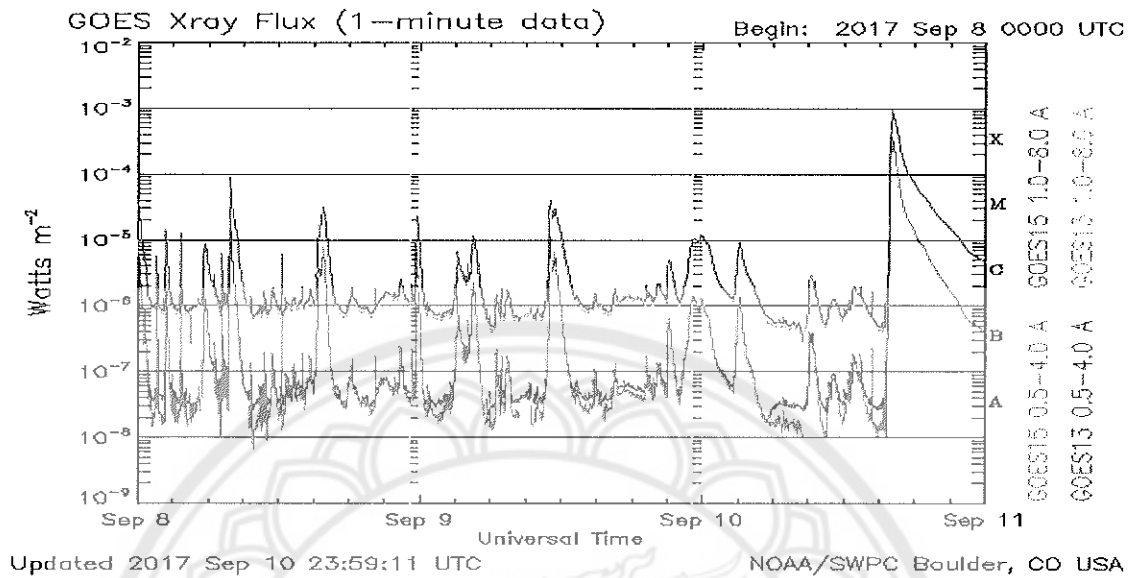


ภาพ 13 ค่าระดับความรุนแรงของรังสีเอ็กซ์ ในวันที่ 10 กันยายน 2017 [26]

จากภาพแสดงระดับความรุนแรงของรังสีเอ็กซ์ ตั้งแต่เวลา 00.00 UT – 24.00 UT ของวันที่ 10 กันยายน 2017 พบว่าเกิดการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปเนื่องจากมีระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคมากกว่า 30 นาที โดยมีระดับความรุนแรงสูงสุดที่ X8.2 ในเวลา 16.06 UT โดยข้อมูลลักษณะทางกายภาพของเหตุการณ์นี้แสดงดังตาราง 4

ตาราง 4 แสดงลักษณะทางกายภาพของเหตุการณ์วันที่ 10 กันยายน 2017

ลักษณะทางกายภาพ	รายละเอียด
วัฏจักรของดวงอาทิตย์	รอบที่ 24
ระดับความรุนแรงของรังสี	X8.2
เริ่มปะทุเวลา	15.35 UT
สิ้นสุดการปะทุเวลา	16.31 UT
ระยะเวลาการปะทุ	56 นาที
ตำแหน่งการปะทุ	S09W83
ความเร็วลมสุริยะ	522 km/s

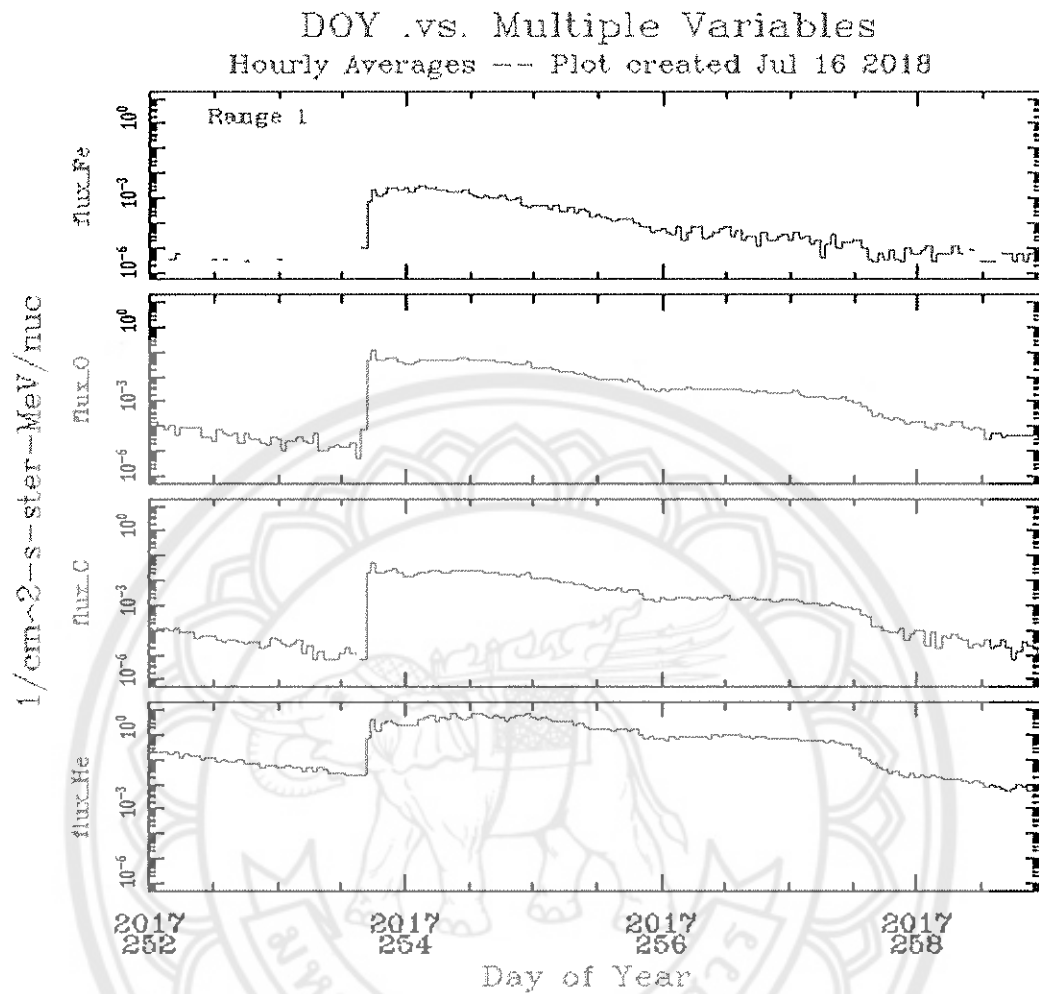


ภาพ 14 การปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ วันที่ 8-10 กันยายน 2017 [26]

การเกิดการปะทุที่ผิวดวงอาทิตย์สามารถบอกความรุนแรงได้จากค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่วัดได้ในหน่วย  $Watts/m^2$  โดยแบ่งระดับความรุนแรงจากน้อยไปมาก คือ A, B, C, M และ X ดังแสดงในภาพที่ 3.4 และ 3.5 แสดงความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่วัดจากยานอวกาศ GOES พบว่าในวันที่ 10 กันยายน 2017 มีการปะทุในระดับความรุนแรงสูงสุดที่ X8.2 ความเข้มของรังสีเอ็กซ์เข้าใกล้  $10^{-3} Watts/m^2$

เนื่องจากค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์เป็นเพียงการสังเกตการณ์เบื้องต้นของเหตุการณ์การปะทุ เพื่อนำไปสู่การเลือกศึกษาข้อมูลของค่าความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาที่ตรวจวัดได้จากยานอวกาศ ของเหตุการณ์ในช่วงวันที่ 10 กันยายน 2017 เพื่อดูอัตราการเพิ่มและลดลงของข้อมูลได้ตรวจวัดได้ที่แสดงในภาพ 15

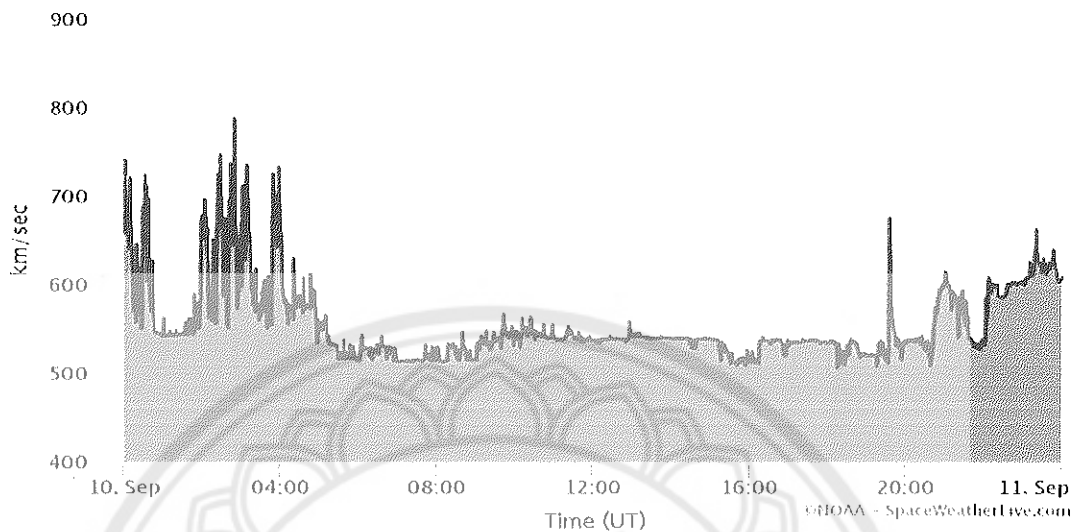




ภาพ 15 แสดงค่าฟลักซ์ของธาตุฮีเลียม คาร์บอน ออกซิเจน และเหล็ก จากเครื่องมือ SIS ที่วัดได้ในวันที่ 9-16 กันยายน 2017 [27]

จากภาพ 15 ค่าฟลักซ์ของธาตุฮีเลียม คาร์บอน ออกซิเจน และเหล็ก ที่วัดได้จากเครื่องมือ SIS บนยานอวกาศ ACE ที่วัดได้ในวันที่ 9-16 กันยายน 2017 ตรงกับวันที่ 252-259 ของปี มีค่าเพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 10 กันยายน 2017 หรือวันที่ 253 ของปี และมีค่าลดลงตามเวลา

### Solar wind speed on Sunday, 10 September 2017



ภาพ 16 กราฟแสดงความเร็วลมสุริยะในวันที่ 10 กันยายน 2017 [28]

จากภาพ 16 พบว่าความเร็วของลมสุริยะในวันที่ 10 กันยายน 2017 มีความเร็วตั้งแต่ 511 ถึง 784 km/s โดยในเวลา 16.06 UT เป็นเวลาที่มีการปลดปล่อยอนุภาคมากที่สุด มีความเร็วลมสุริยะ 522 km/s

#### ดาวนิโหลดข้อมูลที่ตรวจวัดจากยานอวกาศ ACE

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของการปะทุของดวงอาทิตย์นั้นสามารถเข้าไปศึกษาได้ที่เว็บไซต์ [www.srl.caltech.edu/ACE](http://www.srl.caltech.edu/ACE) ซึ่งเป็นเว็บไซต์ของยานอวกาศ ACE ที่เปิดให้ผู้สนใจสามารถเข้าไปดาวนิโหลดข้อมูลปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์และในระบบสุริยะ การใช้ข้อมูลเริ่มจากเข้าไปที่หน้าเว็บไซต์ ACE มีขั้นตอนดังนี้

1. คลิก " Online Data " เพื่อเข้าสู่การดาวนิโหลดข้อมูลออนไลน์
2. คลิก " Level 2 (Verified) " เข้าไปเลือกประเภทเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด
3. คลิก " SIS Data " เลือกข้อมูลจากเครื่องมือ SIS

เลือกช่วงวันของข้อมูลที่ต้องการในช่อง Hourly Averages เนื่องจากในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาเหตุการณ์การปะทุในวันที่ 10 กันยายน 2017 คิดเป็นจำนวนวันในรอบปีคือ วันที่ 253 ของปี จึงเลือกใช้ข้อมูลช่วงวันที่ 253/2017-260/2017 ดังแสดงในภาพ 17

1. คลิก " GO " เพื่อไปสู่การดาวนิโหลด

2. คลิก " SIS Hourly Averages Element Fluxes " เพื่อเปิดดูข้อมูลที่ได้จากการดาวนโหลด

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 checked="" type="checkbox"/> N	<input checked="" type="checkbox"/> O	<input type="checkbox"/> Ne	<input type="checkbox"/> Na	<input type="checkbox"/> Mg	<input type="checkbox"/> Al
Element Counts	<input type="checkbox"/> Si	<input type="checkbox"/> S	<input type="checkbox"/> Ar	<input type="checkbox"/> Ca	<input checked="" type="checkbox"/> Fe	<input type="checkbox"/> Ni		
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

ภาพ 17 แสดงหน้าเว็บไซต์ที่สามารถเลือกดาวนโหลดเฉพาะข้อมูลที่ต้องการ [27]

เลือกค่าต่างๆ ของข้อมูลที่จะดาวนโหลดประกอบไปด้วย เวลา ความหนาแน่นของอนุภาค และจำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยเวลาของธาตุต่างๆ จากนั้นกำหนดช่วงวันที่ต้องการในช่อง Starting และ Ending เลือกรูปแบบข้อมูล Data format เป็นแบบ Text file download และเลือก Retrieve data เพื่อดาวนโหลดข้อมูล ซึ่งข้อมูลที่ได้ประกอบด้วยเวลา (hour) ค่าความหนาแน่นของอนุภาค ( $\text{particle/s cm}^2 \text{ sr MeV/n}$ ) และจำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยเวลาที่ตกกระทบหัววัด (counts)

ขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลเพื่อการจำลอง

การศึกษาในครั้งนี้เราใช้ข้อมูลที่วัดได้จริงจากเครื่องมือ SIS (Solar Isotopic Spectrometer) บนยานอวกาศ ACE โดยนำข้อมูลที่ได้อมาคำนวณหาค่าตั้งต้นที่จำเป็นสำหรับโปรแกรมในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค ซึ่งประกอบด้วยค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. หาค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเนื่องจากยานอวกาศ

เนื่องจากข้อมูลที่วัดได้จากยานอวกาศจะมีความคลาดเคลื่อนจากยานอวกาศ ( $\sigma_{\text{stat}}$ ) ด้วย ดังนั้นจึงนำข้อมูลที่วัดได้มาหาค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเนื่องจากยานอวกาศ โดยค่า

ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของอนุภาคหรือค่าฟลักซ์ของอนุภาคโดยหารด้วยรากที่สองของจำนวนอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยเวลา

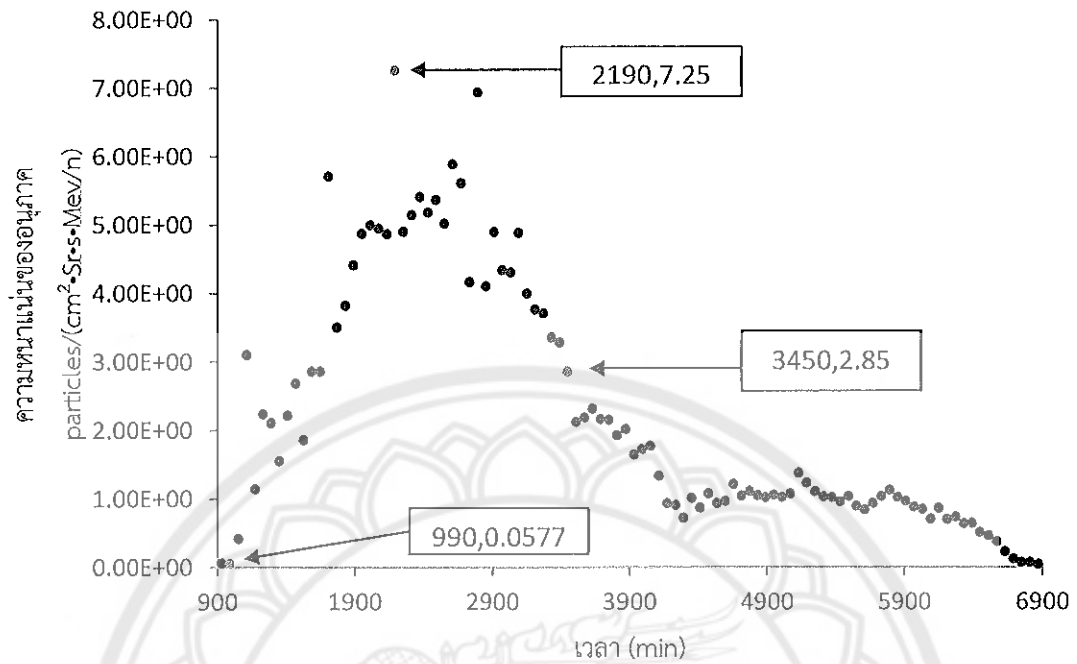
$$\sigma_{\text{stat}} = \frac{\text{flux}}{\sqrt{\text{counts}}} \quad (3.4.1)$$

เมื่อ  $\sigma_{\text{stat}}$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเนื่องจากยานอวกาศ  
 flux คือ ความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่  
 counts คือ จำนวนอนุภาคต่อหน่วยเวลาที่ตกกระทบหัววัด

ตาราง 5 แสดงตัวอย่างข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือ SIS บนยานอวกาศ ACE และค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจากยานอวกาศของอนุภาคฮีเลียม

เวลา (min)	ความหนาแน่นของอนุภาค ฮีเลียม (particle/s cm <sup>2</sup> sr MeV/n)	จำนวนอนุภาคที่วัด ได้ (counts)	ความคลาด เคลื่อน
30	0.1170	118	0.01080
90	0.1080	123	0.00977
150	0.0971	115	0.00905
210	0.1010	121	0.00915
270	0.0963	115	0.00898
330	0.0890	123	0.00802
390	0.1050	129	0.00923
450	0.0785	129	0.00691
510	0.0670	100	0.00670
570	0.0706	119	0.00647
630	0.0788	126	0.00702

จากนั้นนำค่าความหนาแน่นของอนุภาคและเวลามาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ โดยให้แกนนอนแทนเวลาหน่วยเป็นนาที และแกนตั้งแทนค่าความหนาแน่นของอนุภาคหน่วยเป็น particles/(s cm<sup>2</sup>·Sr·MeV/n) เพื่อหาค่าตั้งต้นที่จำเป็นในการจำลองการเคลื่อนที่ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นของอนุภาคที่เวลาเริ่มต้น สูงสุด และเวลาที่ความหนาแน่นของอนุภาคลดลงมาครึ่งหนึ่ง



ภาพ 18 ค่าความหนาแน่นของอนุภาคฮีเลียมเทียบกับเวลา

จากภาพ 18 เราทราบได้ว่าค่าความหนาแน่นของอนุภาคของธาตุฮีเลียมที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV/n โดยพบอนุภาคเริ่มเพิ่มขึ้นในเวลาที่ 990 มีค่าสูงสุดในเวลาที่ 2190 และลดลงมาครึ่งหนึ่งเมื่อเวลาผ่านไป 3450 นาที

2. หาค่ามวลที่แท้จริง (Real mass) ของแต่ละอนุภาค

$$\text{Real mass} = \frac{(931.5 \frac{\text{MeV}}{c^2})A}{Z} \tag{3.4.2}$$

เมื่อ Z คือ เลขมวล (mass number)

A คือ มวลอะตอม (atomic mass)

Real mass คือ มวลที่แท้จริงของอนุภาค ( $m_0$ )

2.1 คำนวณหาค่า real mass ของอนุภาค He

$$\begin{aligned} \text{Real mass of Helium} &= \frac{(931.5)(4.0026) \frac{\text{MeV}}{c^2}}{4} \\ \text{Real mass of Helium} &= 932.105 \frac{\text{MeV}}{c^2} \end{aligned}$$

## 2.2 คำนวณหาค่า real mass ของอนุภาค C

$$\text{Real mass of Carbon} = \frac{(931.5)(12.001) \frac{\text{MeV}}{c^2}}{12}$$

$$\text{Real mass of Carbon} = 932.354 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

## 2.3 คำนวณหาค่า real mass ของอนุภาค O

$$\text{Real mass of Oxygen} = \frac{(931.5)(15.9994) \frac{\text{MeV}}{c^2}}{15}$$

$$\text{Real mass of Oxygen} = 933.563 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

## 2.4 คำนวณหาค่า real mass ของอนุภาค Fe

$$\text{Real mass of iron} = \frac{(931.5)(55.847) \frac{\text{MeV}}{c^2}}{55}$$

$$\text{Real mass of iron} = 945.845 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

## 3. หาค่าพลังงานเฉลี่ยแต่ละระดับพลังงาน (KE)

$$\text{พลังงานเฉลี่ย (KE)} = \frac{\text{พลังงานสูงสุด} + \text{พลังงานต่ำสุด}}{2} \quad (3.4.3)$$

## 4. หาระยะทางของเส้นสนามแม่เหล็กที่ถูกดึงโดยลมสุริยะ (R)

$$\text{จากสมการ } R = \frac{v_{sw} \times 0.002291}{\cos(\text{longitude})} \quad (3.4.4)$$

เมื่อ R คือ ระยะทางของเส้นสนามแม่เหล็กที่ถูกดึงโดยลมสุริยะ

$v_{sw}$  คือ ความเร็วลมสุริยะ (1 km/s=0.00291 AU/min)

longitude คือ ค่ามุมของการปะทะนดวงอาทิตย์เมื่อสังเกตจากโลก (องศา)

จากนั้นจะนำค่าของข้อมูลที่จัดเตรียมได้ทั้งหมดไปใช้เป็นค่าตั้งต้นในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่อไป

## 5. การหาระยะระหว่างตำแหน่งยานอวกาศกับดวงอาทิตย์ (USERR)

$$\text{จากสมการ } \text{USERR} = \frac{1\text{AU}}{1+0.0017 \cos \text{ine} \left[ \left( \frac{\text{DOY}-2}{360} \right) \times 360 \right]} - 0.01 \quad (3.4.5)$$

เมื่อ USERR คือ ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของยานอวกาศกับดวงอาทิตย์ (AU)

DOY คือ วันที่เกิดการปะทุโดยนับจำนวนวันในรอบหนึ่งปี

6. การหาค่าโมเมนตัมที่ระดับพลังงานต่างๆของแต่ละธาตุ

การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เราทำการศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคในแต่ละโมเมนตัม แต่ข้อมูลที่เราได้จากยานอวกาศนั้นเป็นข้อมูลของค่าระดับพลังงาน ซึ่งค่าโมเมนตัมนั้น

เราสามารถหาได้ จากสมการ 
$$p = \frac{\sqrt{(E_k + m_0 c^2)^2 - (m_0 c^2)^2}}{c^2} \quad (3.4.6)$$

เมื่อ  $E_k$  คือ พลังงานเฉลี่ยของแต่ละระดับพลังงาน (MeV/n)

$p$  คือ โมเมนตัม (MeV/c)

$c$  คือ ความเร็วแสง (AU/min)

$m_0$  คือ มวลที่แท้จริงของแต่ละธาตุ (kg)

7. การหาค่าอัตราส่วนของความเร็วลมสุริยะต่อความเร็วแสง

จากสมการ 
$$\beta_{sw} = \frac{v_{sw}}{c} \quad (3.4.7)$$

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

$c$  คือ ความเร็วแสง (AU/min)

8. การหาค่าความเร็วและระยะทางสูงสุดของอนุภาคในแต่ละระดับพลังงานจากความสัมพันธ์

จากสมการ 
$$v_{max} = \beta c$$
  
$$S = v_{max} t \quad (3.4.8)$$

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

$\beta$  คือ อัตราส่วนของความเร็วลมสุริยะต่อความเร็วแสง

$t$  คือ ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของอนุภาค (min)

$S$  คือ ระยะทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (AU)

$c$  คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 0.1202 (AU/min)

9. การหาค่าอัตราส่วนของฟลักซ์สูงสุดในแต่ละระดับพลังงานเทียบกับฟลักซ์สูงสุดในระดับพลังงานที่ 1 เพื่อไปใช้ในการเป็นค่าตั้งต้นของฟลักซ์ในระดับพลังงานถัดไป

สเปกตรัมของฟลักซ์ระดับพลังงานที่  $N = \frac{\text{ฟลักซ์สูงสุดในระดับพลังงาน } N}{\text{ฟลักซ์สูงสุดในระดับพลังงานต่ำสุด}} \quad (3.4.9)$

ตาราง 6 แสดงค่าต่างๆในขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูลของธาตุฮีเลียม

E	$m_0$	P	B	V	log P	Spec	log	S
(MeV/ n)	(MeV/ $c^2$ )	(MeV/ c)		(AU/ min)		trum	spec trum	(AU)
4.032	932.105	86.793	0.092	0.0111	1.938	1	0	48.143
5.390	932.105	100.388	0.107	0.0128	2.001	0.983	0.00725	55.603
6.684	932.105	111.833	0.119	0.0143	2.048	0.92	0.03621	61.857
8.417	932.105	125.552	0.133	0.0160	2.098	0.593	0.22687	69.317
11.493	932.105	146.825	0.155	0.0187	2.166	0.364	0.43873	80.798
15.622	932.105	171.372	0.180	0.0217	2.233	-	-	93.895
22.959	932.105	208.153	0.217	0.0261	2.318	-	-	113.17
34.769	932.105	256.956	0.265	0.0319	2.409	-	-	137.99

จากตารางแสดงการเตรียมข้อมูลของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงาน 4.03215 MeV/n

เมื่อ E	คือพลังงานเฉลี่ยของพลังงานต่ำสุดและพลังงานสูงสุด
$m_0$	คือ มวลที่แท้จริง (kg)
P	คือ ค่าโมเมนตัม (MeV/c)
Beta (B)	คือ ค่าอัตราส่วนของความเร็วลมสุริยะต่อความเร็วแสง
V	คือ ความเร็วของอนุภาคที่ระดับพลังงานต่างๆ (AU/min)
S	คือ ระยะทางสูงสุดที่อนุภาคเคลื่อนที่ได้ (AU)

#### 10. หาค่าคงที่ของการสลายตัวของอนุภาค

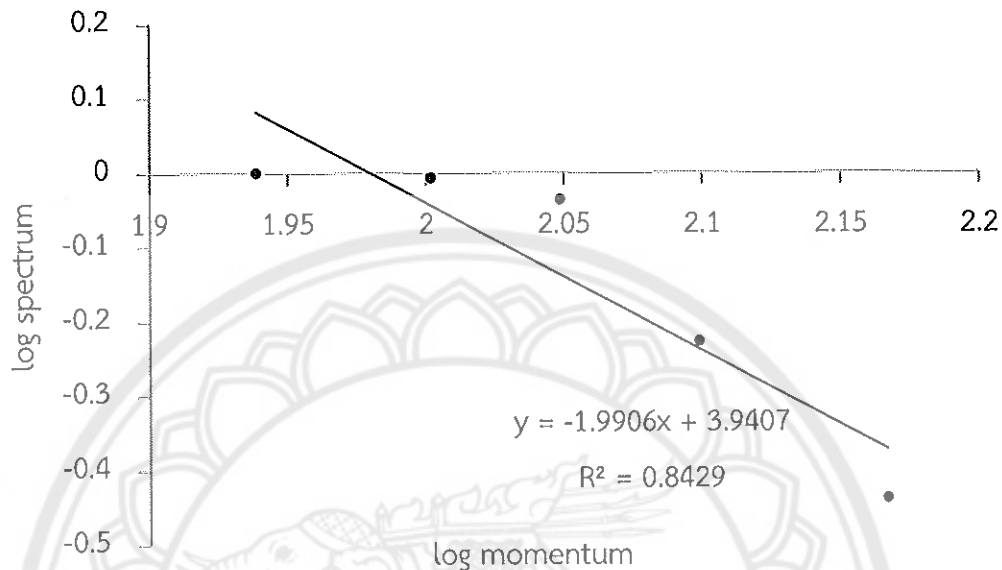
เนื่องจากการสลายตัวของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มีแนวโน้มของการสลายตัวที่ลดลงอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นไปตามกฎกำลัง (Power's law) ดังสมการ

$$\frac{dE}{dN} \propto E^{-\gamma} \quad (3.4.10)$$

เมื่อ E	คือ พลังงานของอนุภาค (MeV/n)
N	คือ จำนวนอนุภาคในแต่ละระดับพลังงาน (particle)
$\gamma$	คือ ค่าคงที่ของการลดลงของอนุภาคแต่ละระดับพลังงาน



การสลายตัวของอนุภาคนั้น สามารถพิจารณาได้จากความชันของกราฟ ระหว่างค่า log momentum กับค่า log spectrum ดังแสดงในภาพ 19



ภาพ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า log ของโมเมนตัมกับค่า log ของสเปกตรัมของฟลักซ์

จากภาพ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log momentum และ log spectrum (อัตราส่วนของฟลักซ์) ซึ่งได้ความชันของเส้นตรงที่ลดลงของพลังงานของอนุภาคในแต่ละระดับพลังงาน นำไปใช้เป็นค่าตั้งต้นในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่อไป

#### การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคและการเปรียบเทียบข้อมูล

เมื่อเราได้ข้อมูลจากยานอวกาศและข้อมูลการเตรียมค่าตั้งต้นจากราย 6 เพื่อใช้ในการจำลองการของอนุภาคโดยใช้สมการขนส่ง Ruffolo ดังสมการ 2.10.16 ที่เขียนในโปรแกรมภาษาซีบนระบบปฏิบัติการอุบันตุ และแก้สมการโดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข เพื่อหาค่าฟลักซ์ของอนุภาคตามเวลาที่ระยะทางอิสระเฉลี่ยค่าต่างๆ เมื่อได้ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค เราจะนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงจากยานอวกาศ โดยวิธีการฟิตแบบกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุด (linear least squares fitting) เพื่อหาค่าระยะเวลากอิสระเฉลี่ย (mean free path) และวิเคราะห์หาระยะเวลาของการปลดปล่อยอนุภาค (injection time) โดยใช้วิธีความกว้างเต็มที่ครึ่งหนึ่งของ

ค่าสูงสุด (FWHM) ซึ่งโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษาซีและประมวลผลบนปฏิบัติการลินุกซ์ ประกอบด้วยโปรแกรมทั้งหมด 9 โปรแกรม คือ

1. wind.c คือ โปรแกรมหลักในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยโปรแกรมจะรับค่าตัวแปรต่างๆ จากข้อมูลที่ใช้ในการจำลองและเรียกไฟล์จากโปรแกรมอื่นมาทำการประมวลผล ซึ่งประกอบด้วย 3 โปรแกรมย่อยในการประมวลผลคือ

Main () คือ โปรแกรมที่ใช้สำหรับค่าตั้งต้นต่างๆ ที่ใช้จำลอง

Element () คือ โปรแกรมสำหรับคำนวณค่าคงที่ต่างๆ และเก็บไว้ในรูปของเมตริกซ์ เพื่อใช้ในโปรแกรม step ()

Step () คือ โปรแกรมสำหรับการประมวลผลจากตำแหน่งเดิมไปยังตำแหน่งถัดไป

โดยค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะอยู่ในไฟล์ชื่อว่า in ซึ่งประกอบด้วยไฟล์ย่อยคือ in1 ถึง in10 ซึ่งค่าที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะถูกปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับการจำลอง โดยมีตัวแปรดังนี้ คือ

Start คือ ระยะทางเริ่มต้นในการจำลอง (AU)

Stop คือ ระยะทางสุดท้ายของการจำลอง (AU)

S\_step คือ ระยะของการเพิ่มขึ้นของระยะทาง (AU)

Prints คือ การพิมพ์ในช่วงระหว่าง (AU)

nmu คือ จำนวนจุดของ  $\mu$

length คือ ความยาวในการจำลอง (AU)

np คือ จำนวนโมเมนต์

p[1...np] คือ โมเมนต์ของแต่ละพลังงาน (MeV/n)

m คือ มวลของอนุภาค (MeV/c<sup>2</sup>)

betasw คือ อัตราส่วนของความเร็วลมสุริยะต่อความเร็วแสง

lamda คือ ระยะทางอิสระเฉลี่ย (AU)

q คือ ดัชนีกำลังของการกระเจิง

printextra คือ การส่งพิมพ์ข้อมูลออกทางหน้าจอหรือไม่ (0 ไม่พิมพ์ / 1 พิมพ์)

2. decel.c เป็นโปรแกรมสำหรับการประมวลผลในพจน์ของการสลายตัวแบบค่อยเป็นค่อยไป Ruffolo 1998 ประกอบด้วย 2 โปรแกรม คือ

decal () คือ โปรแกรมย่อยสำหรับหาค่าความหน่วง

ci () คือ โปรแกรมย่อยสำหรับการคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ ณ ตำแหน่งต่างๆ

3. field.c คือ โปรแกรมในการประมวลผลการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเส้นสนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ โดยจะคำนวณหาความสัมพันธ์การกระเจิงในพจน์ของการโฟกัสแบบอะเดียแบติกหรือการบานออกของเส้นสนามแม่เหล็ก รวมถึงผลกระทบของลมสุริยะในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วยโปรแกรมย่อยที่ใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆของสมการขนส่ง

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 จะรับค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ แล้วทำการจำลองการเคลื่อนที่และนำผลออกมาจัดเก็บไว้ในไฟล์ชื่อ intense.dat เพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูลต่อไป

1. การเปรียบเทียบข้อมูล

เมื่อได้ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคแล้ว จากนั้นเราจะทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากยานอวกาศกับผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยใช้เทคนิคการฟิตข้อมูลแบบกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุด (linear least squares fitting) โดยมีรูปแบบดังสมการดังนี้

$$x^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{y_n - y(x_n)}{\sigma_n} \right]^2 \quad (3.5.10)$$

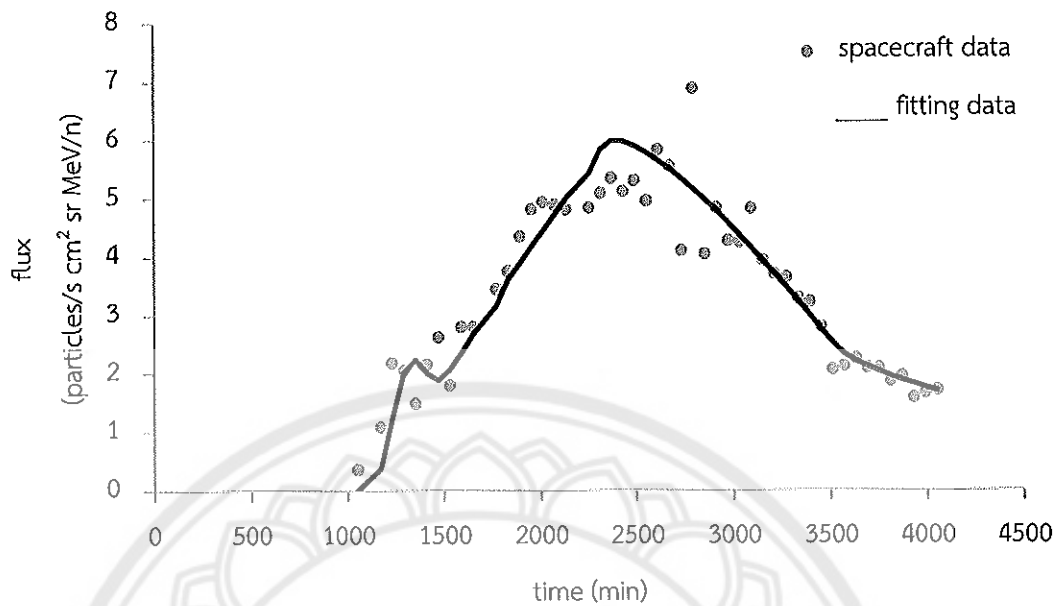
เมื่อ  $x^2$  คือ ผลรวมของค่าความแตกต่างกำลังสองของข้อมูลจำนวน n

$y_n$  คือ ข้อมูลจริงจากยานอวกาศในไฟล์ข้อมูลฟลักซ์ของอนุภาคตามเวลา

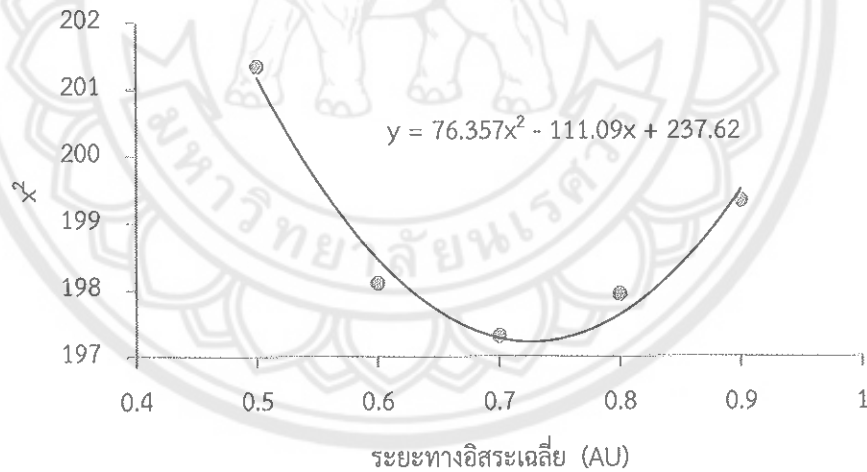
$y(x_n)$  คือ ข้อมูลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในรูปแบบไฟล์ counts.dat

$\sigma_n$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลแต่ละจุด

n คือ จำนวนของข้อมูล



ภาพ 20 การฟิตเปรียบเทียบข้อมูลสำหรับธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV/n



ภาพ 21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $x^2$  และค่าระยะทางอิสระเฉลี่ย

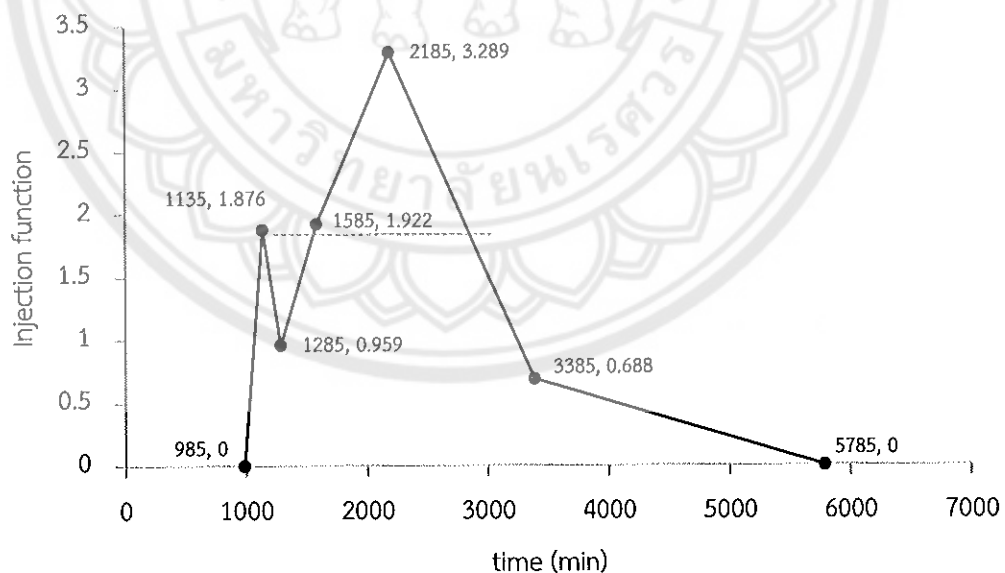
เราจะทำการฟิตข้อมูลระยะทางการจำลองระยะทางอิสระเฉลี่ยค่าต่างๆเทียบกับข้อมูลจริง เพื่อหาค่า  $x^2$  ค่าต่ำสุด จากค่าข้างเคียงทั้งหมด 5 จุด เพื่อหาแนวโน้มค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ให้ค่า  $x^2$  ต่ำสุด จากเส้นแนวโน้มแบบพาราโบลา ดังแสดงในภาพ 21

เมื่อได้ค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุด จากเส้นแนวโน้มเฉลี่ย นำค่าที่ได้ไปฟิตเปรียบเทียบ ข้อมูลอีกครั้ง จะได้ค่า  $\chi^2$  ออกมา ซึ่งทั้งหมดนี้จะรายงานค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุดของ อนุภาคฮีเลียมที่พลังงาน 4.032 MeV/n

## 2. หาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค

การฟิตข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากยานอวกาศกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองการ เคลื่อนที่ของอนุภาค เมื่อได้ค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยที่เหมาะสมแล้ว ผลการฟิตข้อมูลจะได้ฟังก์ชัน ของการปลดปล่อยอนุภาคตามเวลา ซึ่งสามารถนำไปเขียนกราฟเพื่อหาระยะเวลาของการ ปลดปล่อยอนุภาคได้ โดยในการศึกษาครั้งนี้เราใช้วิธีการหาระยะเวลาของการปลดปล่อยอนุภาค ด้วยวิธี FWHM (Full Width at Half Maximum)

การหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคโดยการใช้เทคนิควิธี FWHM หรือวิธีความกว้าง เต็มที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด คือการหาค่าความกว้างของระดับจากจุดสูงสุดของกราฟลดลงมา ครึ่งหนึ่ง ซึ่งเป็นวิธีการหาระยะเวลาการปลดปล่อยของอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลก โดยเมื่อ เราได้ฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาคตามเวลา เราจะนำข้อมูลที่ได้มาทำการเขียนกราฟ โดยแกน y คือฟังก์ชันการปลดปล่อยและแกน x คือเวลาในการปลดปล่อยอนุภาค ดังภาพ 22



ภาพ 22 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV/n

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

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

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

$$1.876 = 0.0125(1135) + c$$

ได้ค่า  $c = -12.312$

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

จาก  $y = mx + c$

$$1.645 = 0.0125 x_a - 12.312$$

จะได้ว่า  $x_a = 1116.490$  นาที

5. คำนวณหาจุด  $x_a$  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. คำนวณหาระยะเวลาการปลดปล่อยจาก จากคู่อันดับ (1285,0.959) และ (1585,1.922) ลบกับระยะเวลาการปลดปล่อยจาก จากคู่อันดับ (2185,3.289) และ (3385,0.688)

ได้ระยะเวลาการปลดปล่อยเท่ากับ  $1498.5514 - 2943.708 = 1445.157$  นาที

ดังนั้นเมื่อนำระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคสี่เหลี่ยมที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV ทั้งสองช่วงมารวมกัน ได้ค่าระยะเวลาการปลดปล่อยเท่ากับ 1501.535 นาที

### การวิเคราะห์สภาพอากาศ

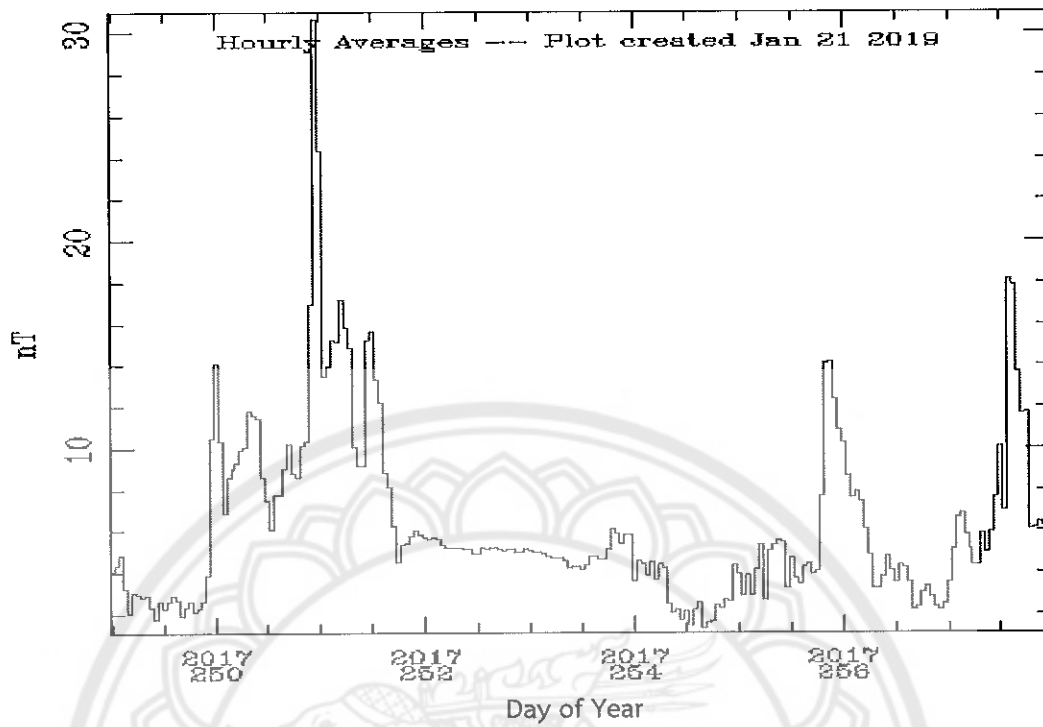
ผลที่เกิดปรากฏการณ์หรือเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดจากกิจกรรมบนดวงอาทิตย์ เช่น การปะทุที่ผิวดวงอาทิตย์ การปลดปล่อยก้อนมวลจากคอโรนา หรือการเกิดพายุสุริยะ ทำให้อนุภาคในอวกาศโดยเฉพาะอนุภาคที่มีประจุ มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค

ที่เคลื่อนที่มายังโลก เราจึงทำการศึกษาสภาพอวกาศในช่วงของการเกิดเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ในเดือนกันยายน 2017 พบว่ามีเหตุการณ์การปะทุที่มีความรุนแรงระดับ M จำนวน 28 ครั้ง และความรุนแรงระดับ X จำนวน 4 ครั้ง ในช่วง 6-10 กันยายน 2017 พบการปะทุบริเวณจุดมืดที่ขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว ในตำแหน่งการปะทุ AR2673 การณ์ในวันที่ 6 กันยายน 2017 มีความรุนแรงมากที่สุดคือ X9.3 และในวันที่ 10 กันยายน 2017 มีความรุนแรงที่ X8.2 ซึ่งมีความรุนแรงเป็นอันดับที่สองของวัฏจักรที่ 24 [29] โดยแสดงข้อมูลเบื้องต้นในตาราง 7

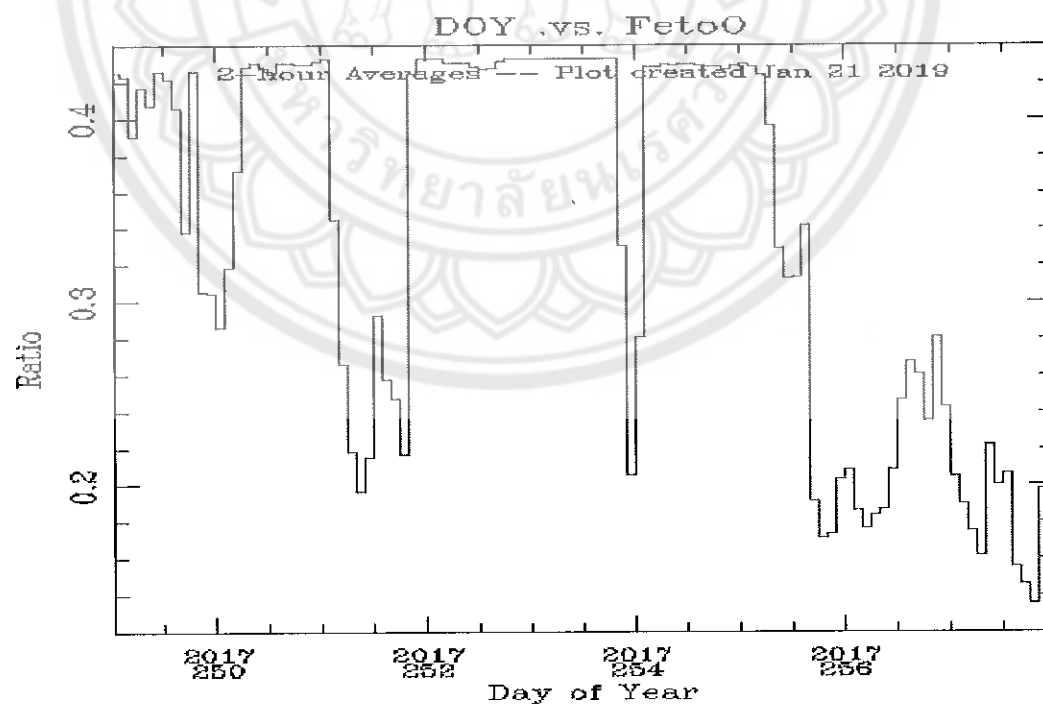
ตาราง 7 แสดงข้อมูลการปะทุบนดวงอาทิตย์ในเดือนกันยายน

วันที่เกิดการปะทุ	เวลาการปะทุเริ่ม (UT)	เวลาการปะทุสิ้นสุด (UT)	ระดับความรุนแรง	Active Area	การปลดปล่อยมวลคอโรนา
6/10/2017	08:48	09:59	X2.2	2673	ไม่พบ
	11:53	12:10	X9.3	2673	Type II
7/10/2017	10:11	10:18	M7.3	2673	Type IV
	14:20	14:55	X1.3	2673	Type II
8/10/2017	07:40	07:58	M8.1	2673	ไม่พบ
10/10/2017	15:35	16:31	X8.2	2673	Type II, IV

จากเหตุการณ์การปะทุ ในวันที่ 10 กันยายน 2017 ตรวจพบคลื่นวิทยุประเภทที่ II และประเภทที่ IV ซึ่งบ่งชี้ว่าเกิดคลื่นกระแทกในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์จากการปลดปล่อยมวลคอโรนา [5] ค่าสนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์จากเครื่องมือ MAG บนยานอวกาศ ACE ที่วัดได้ในวันที่ 6-14 กันยายน 2017 จากภาพ 23 พบว่าค่าสนามแม่เหล็กในหน่วยนาโนเทสลา มีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 7-8 กันยายน 2017



ภาพ 23 แสดงค่าสนามแม่เหล็กในดักกลางระหว่างดาวเคราะห์จากเครื่องมือ MAG [27]

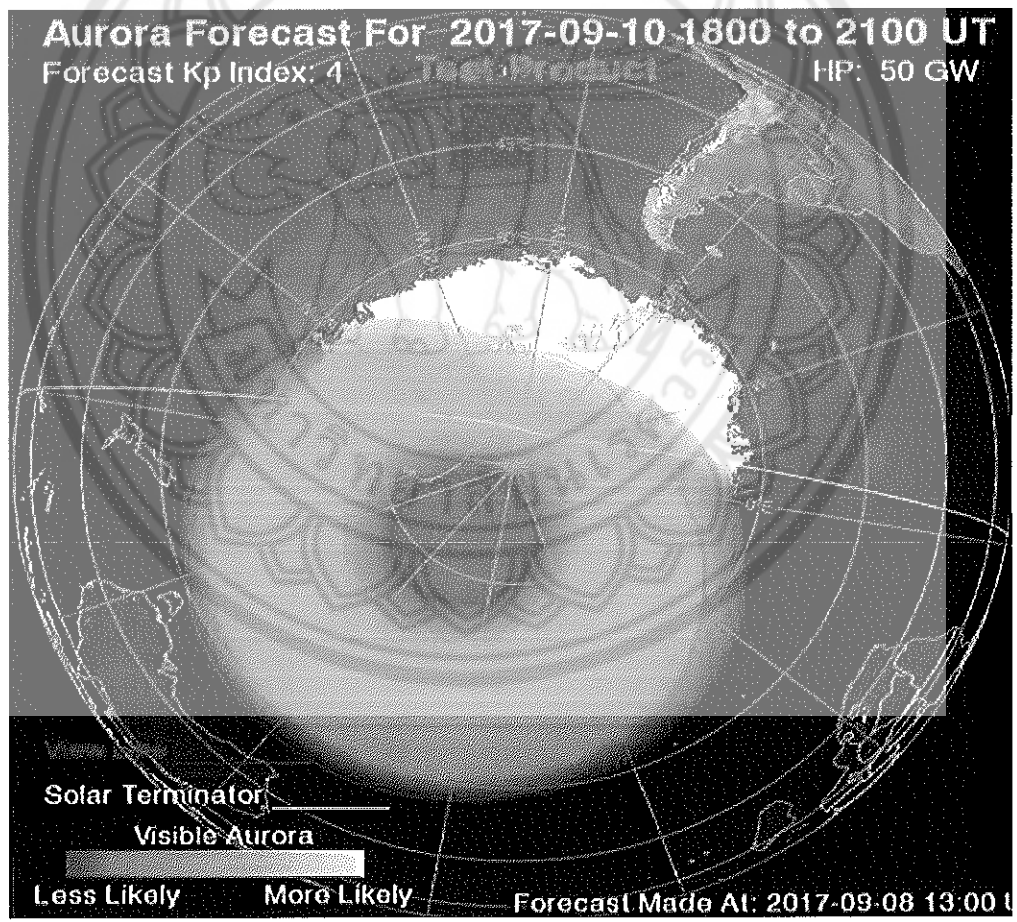


ภาพ 24 แสดงค่าอัตราส่วนองค์ประกอบของธาตุ Fe/O จากเครื่องมือ SWICS [27]



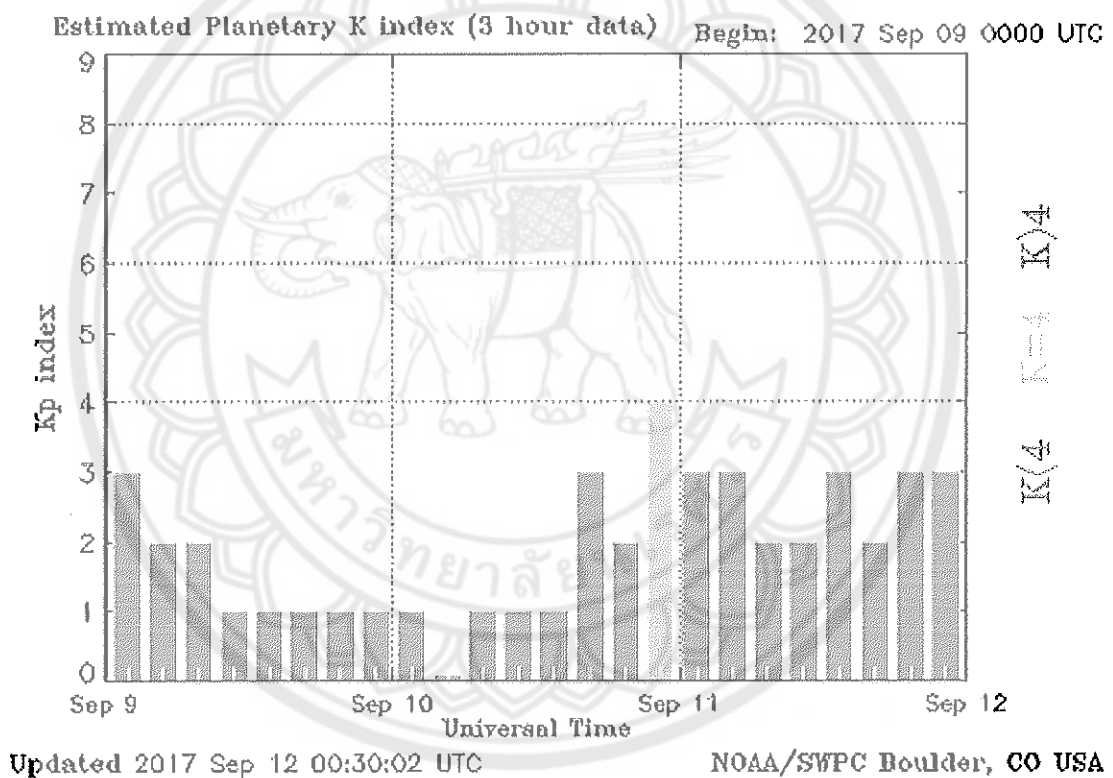
จากภาพ 24 แสดงอัตราส่วนองค์ประกอบของธาตุ Fe/O จากเครื่องมือ SWICS (Solar Wind Ionic Charge Spectrometer) พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นในวันที่ 10 กันยายน 2017 และลดลงอย่างรวดเร็ว ในวันที่ 12 กันยายน 2017

เหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ที่มีการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงให้เคลื่อนที่มายังโลก ซึ่งอิเล็กตรอนและไอออนที่ถูกกระตุ้นโดยลมสุริยะนี้ บางส่วนถูกนำพาไปยังขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ ที่ซึ่งอนุภาคสามารถเจาะลึกลงไปในพื้นที่บนของชั้นบรรยากาศโลกได้ง่าย อะตอมของธาตุที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศโลกถูกกระตุ้นจากอนุภาคพลังงานสูงที่ทะลุเข้ามาให้อยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้น เมื่ออะตอมเหล่านี้กลับสู่ระดับเดิม เกิดการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในรูปแบบของแสงสีต่างๆ เรียกว่าแสงเหนือ-แสงใต้ (aurora) ก่อตัวเป็นวงรอบบริเวณขั้วโลก แสดงในภาพ 25



ภาพ 25 แสดงแถบของแสงออโรราในบริเวณขั้วใต้ของโลกในวันที่ 10 กันยายน 2017 [32]

ภาพ 25 แสดงโมเดลพยากรณ์แสดงความเข้มและตำแหน่งของแสงออโรรา ตามที่คาดไว้ สำหรับวันที่ 10 กันยายน 2017 เวลา 18.00 – 21.00 UT ด้านที่สว่างนั้นแสดงถึงพื้นที่บนโลกในเวลากลางวันและด้านมืดแสดงถึงเวลากลางคืน หรือเส้นเทอร์มิเนเตอร์จะแสดงเป็นพื้นที่ที่เปลี่ยนจากด้านกลางวันเป็นกลางคืน เมื่อวันที่ 10 กันยายน 2017 พบค่าการสั่นสะเทือนของสนามแม่เหล็กโลกที่ดัชนี kp 4 ที่แสดงในภาพ 26 ทำให้มองเห็นแสงออโรราได้ในบางพื้นที่ เช่นทางตอนใต้ของนครนิวยอร์ก ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อโลกหรือระบบการสื่อสารทางวิทยุจากการปะทุในครั้งนี้



ภาพ 26 กราฟแสดงค่าดัชนี kp ในวันที่ 9-11 กันยายน 2017 [30]

เมื่อวันที่ 10 กันยายน 2017 พบค่า kp index = 4 ซึ่งไม่ได้อยู่ในระดับที่ส่งผลกระทบต่อระบบนำร่องดาวเทียมหรือระบบสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุ ที่เทียบได้ตามตาราง 8

ตาราง 8 แสดงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการปะทุบนดวงอาทิตย์ ตามระดับ kp index [33]

Kp index	ระดับความรุนแรง	ผลกระทบ
9	รุนแรงที่สุด	ระบบป้องกันไฟฟ้าขัดข้อง ระบบจ่ายไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ หม้อแปลงไฟฟ้าได้รับความเสียหาย อาจเกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวของยานอวกาศ ปัญหาการรับและส่งสัญญาณดาวเทียม และการติดตามตำแหน่งดาวเทียม ระบบนำร่องคลื่นวิทยุความถี่ต่ำใช้การไม่ได้หลายชั่วโมง
8	รุนแรงมาก	ระบบจ่ายไฟทำงานผิดพลาด เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวยานอวกาศ ปัญหาการติดตามตำแหน่งดาวเทียม ระบบนำร่องคลื่นวิทยุความถี่ต่ำถูกรบกวน
7	รุนแรง	ระบบนำร่องดาวเทียมและคลื่นวิทยุความถี่ต่ำอาจมีปัญหาได้เป็นครั้งคราว พบปรากฏการณ์ออโรราในเขตละติจูด 50 องศา
6	ปานกลาง	การแพร่คลื่นวิทยุความถี่สูงในละติจูดสูงมีสัญญาณลดลง พบปรากฏการณ์ออโรราในเขตละติจูด 55 องศา
5	เล็กน้อย	ผลกระทบต่อการทำงานของดาวเทียมเล็กน้อย พบปรากฏการณ์ออโรราในเขตละติจูดสูง

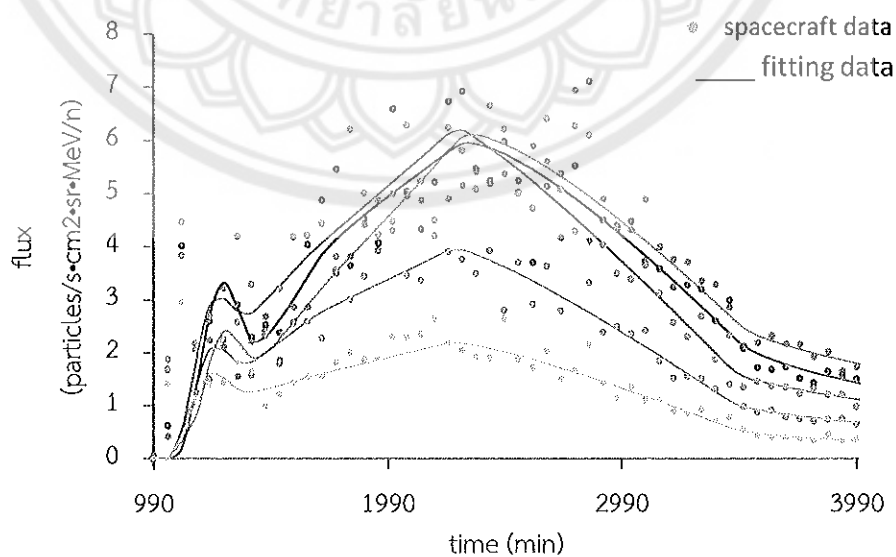
## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

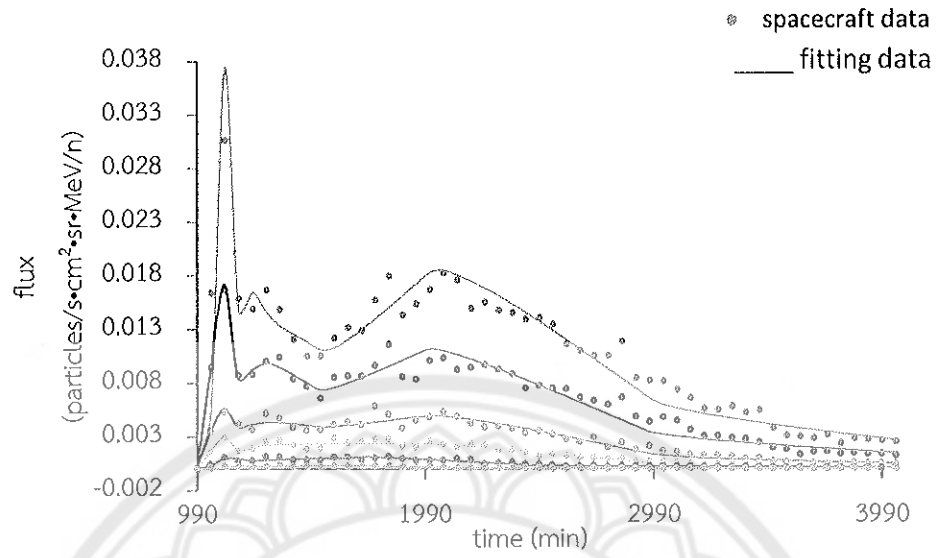
จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ที่เคลื่อนที่มายังโลกของเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ในวันที่ 10 กันยายน 2017 เป็นเหตุการณ์การปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป สามารถสรุปข้อมูลของเหตุการณ์การปะทุในครั้งนี้ได้ดังตาราง 9 โดยใช้ข้อมูลที่บันทึกได้จากเครื่องมือ SIS บนยานอวกาศ ACE เลื่อนวิเคราะห์อนุภาคพลังงานสูงของธาตุฮีเลียม คาร์บอน ออกซิเจน และเหล็ก ที่ระดับพลังงานต่างๆ เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ โดยใช้สมการขนส่งของ Ruffolo 1998 ที่ใช้โปรแกรมภาษาซีในการแก้สมการเชิงตัวเลขบนระบบปฏิบัติการอุบนตุ โดยข้อมูลลักษณะทางกายภาพของเหตุการณ์นี้ดังแสดงในตาราง 4 เกิดการปลดปล่อยมวลคอโรนาที่เวลา 16.04 UT คือหลังจากการปะทุ 29 นาที

#### ผลการเปรียบเทียบข้อมูล

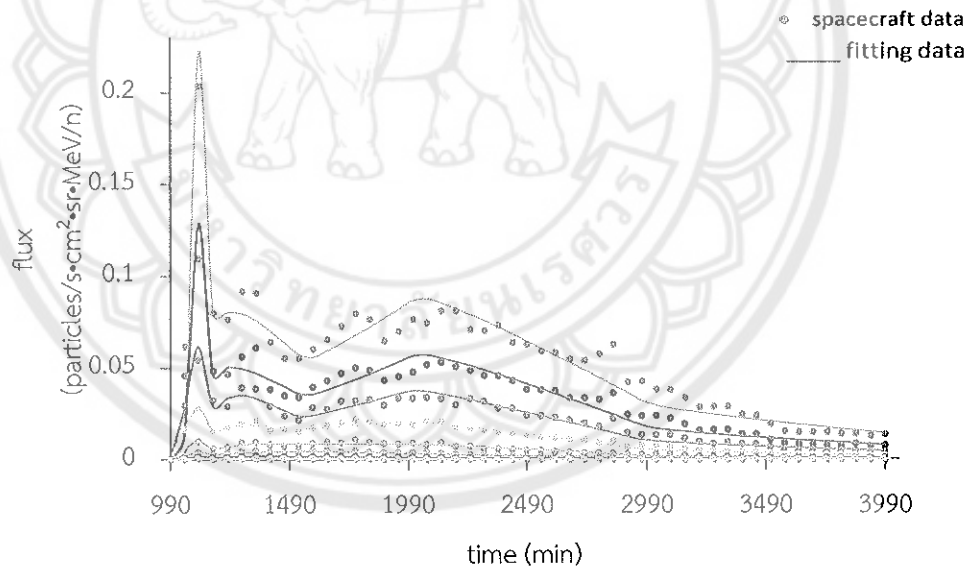
ผลการเปรียบเทียบข้อมูลจริงที่ได้จากยานอวกาศกับข้อมูลที่ได้จากการจำลอง โดยใช้วิธีการพีตแบบกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุด โดยกราฟจะแสดงผลการพีตจากระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุดในแต่ละระดับพลังงาน



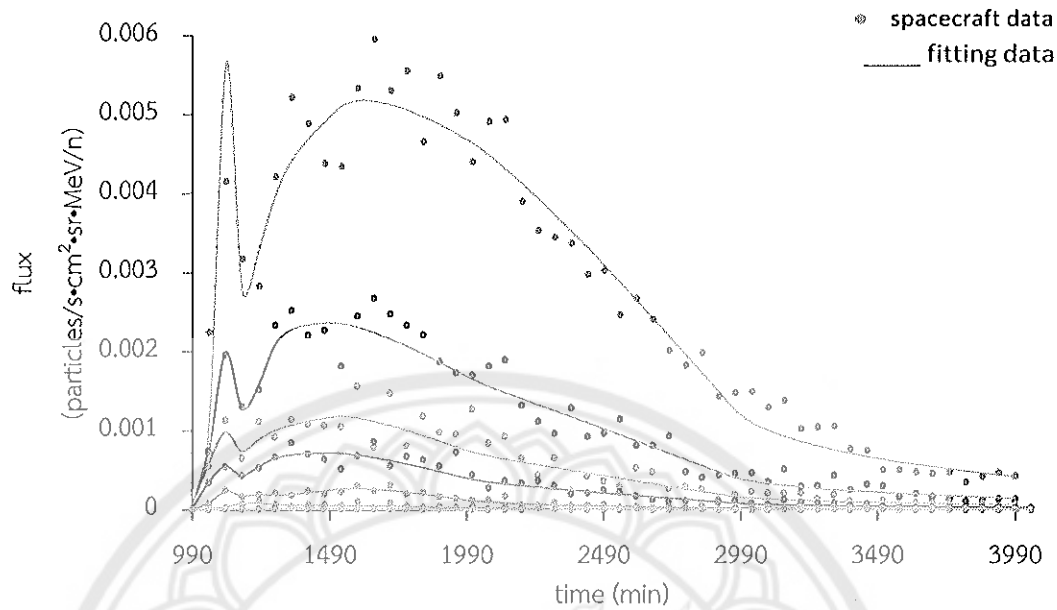
ภาพ 27 การพีตเปรียบเทียบข้อมูลธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงาน 4.032-11.493 MeV/n



ภาพ 28 การเปรียบเทียบของธาตุคาร์บอน ที่ระดับพลังงาน 12.267 -- 64.384 MeV/n



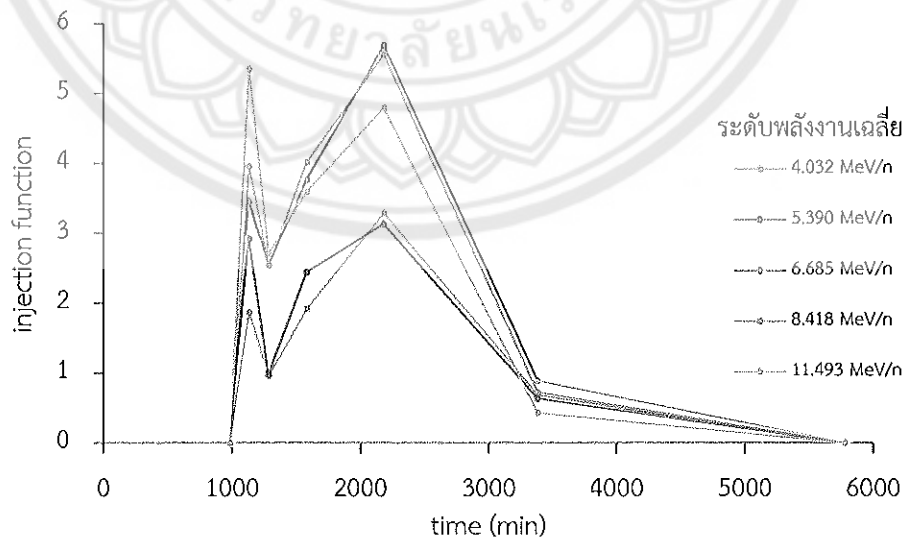
ภาพ 29 การเปรียบเทียบของธาตุออกซิเจน ที่ระดับพลังงาน 8.538 - 75.665 MeV/n



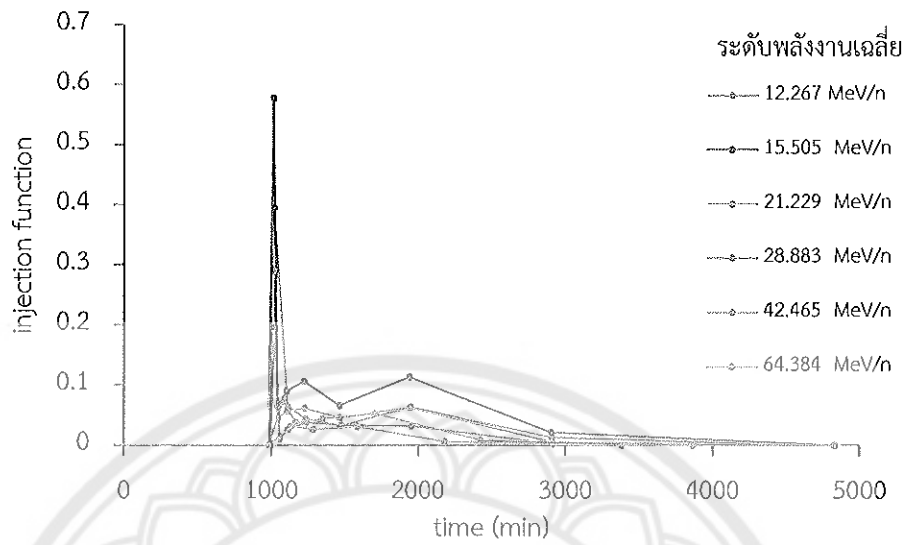
ภาพ 30 การฟิตเปรียบเทียบของธาตุเหล็ก ที่ระดับพลังงาน 13.002 – 90.852 MeV/n

#### ผลการหาระยะเวลาการปลดปล่อยของอนุภาค

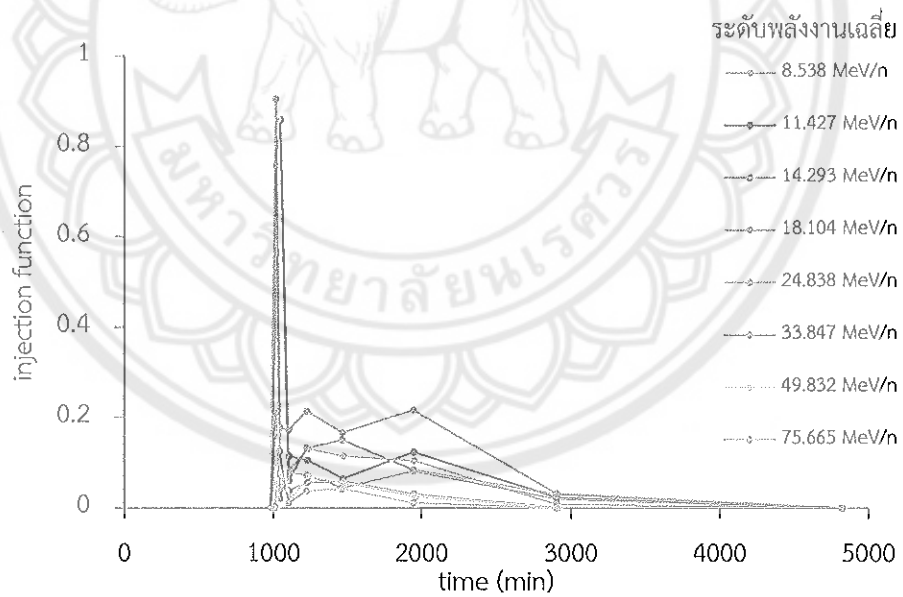
การหาค่าระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ จากกราฟ แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อย โดยใช้วิธีความกว้างเต็มที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด



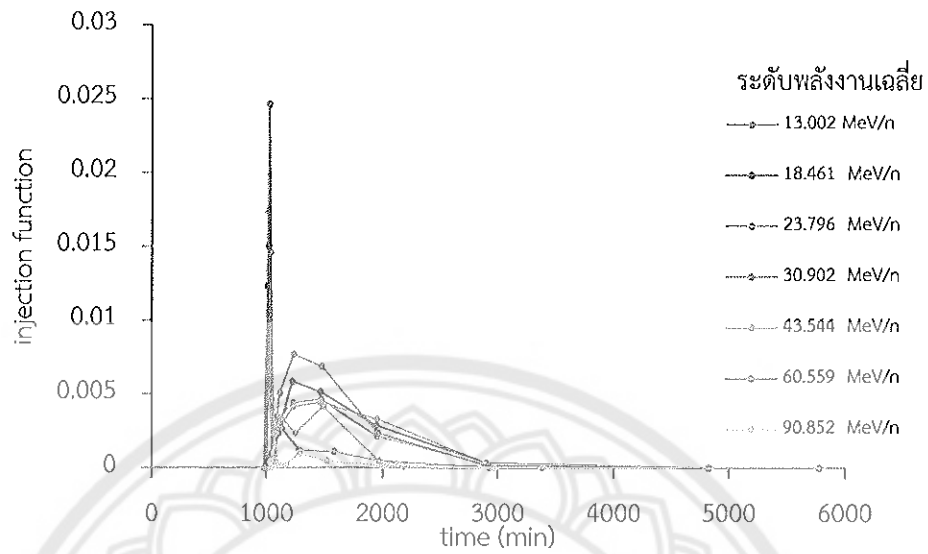
ภาพ 31 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงาน 4.032-11.493 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 1501.535 - 1713.172 นาที



ภาพ 32 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุคาร์บอน ที่ระดับพลังงาน 12.267 – 64.384 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 569.200 - 952.617 นาที



ภาพ 33 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุออกซิเจนที่ระดับพลังงาน 8.538 – 75.665 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 201.918 – 626.245 นาที



ภาพ 34 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุเหล็ก ที่ระดับพลังงาน 13.002 - 90.852 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 201.174 – 403.386 นาที

ตาราง 9 แสดงค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยและระยะเวลาการปลดปล่อยของอนุภาคแต่ละธาตุ

ธาตุ	พลังงานเฉลี่ย (MeV/n)	ระยะทางอิสระเฉลี่ย (AU)	ระยะเวลาการปลดปล่อย (min)
ซิลิเนียม	4.032	0.727±0.045	1501.535
	5.390	0.575±0.075	1707.904
	6.685	0.988±0.015	1666.434
	8.418	0.838±0.045	1713.172
	11.493	0.662±0.056	1707.401
คาร์บอน	12.267	0.736±0.103	569.200
	15.505	0.950±0.069	774.784
	21.229	0.622±0.054	608.514
	28.883	0.559±0.169	507.648
	42.465	0.920±0.058	952.617
	64.384	0.973±0.074	888.553



ตาราง 9 (ต่อ)

ธาตุ	พลังงานเฉลี่ย (MeV/n)	ระยะทางอิสระเฉลี่ย (AU)	ระยะเวลาการปลดปล่อย (min)
ออกซิเจน	8.538	0.941±0.068	557.624
	11.427	0.867±0.152	566.421
	14.293	1.026±0.053	541.871
	18.104	0.948±0.070	626.245
	24.838	0.640±0.065	585.787
	33.847	0.415±0.070	326.472
	49.832	0.544±0.086	201.918
เหล็ก	75.665	0.812±0.046	223.697
	13.002	0.556±0.067	317.979
	18.461	0.618±0.061	403.386
	23.796	0.608±0.035	341.621
	30.902	0.558±0.097	327.109
	43.544	0.435±0.109	329.150
	60.559	0.649±0.890	213.307
90.852	0.442±0.066	201.174	

จากตาราง 9 พบว่าระยะทางอิสระเฉลี่ยของอนุภาค มีระยะทางอิสระเฉลี่ยมีค่าเฉพาะของแต่ละอนุภาค และพบว่าระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคมีค่าเป็นช่วงเวลาเฉพาะสำหรับอนุภาคต่างๆ

## บทที่ 5

### วิเคราะห์ผลและสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ที่มีความรุนแรงในช่วงท้ายวัฏจักรสุริยะที่ 24 โดยการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ด้วยสมการขนส่งอนุภาค Ruffolo และแก้สมการด้วยวิธีการเชิงตัวเลข Finite different แล้วนำผลการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ได้มาเปรียบเทียบเทียบกับข้อมูลจริงที่ได้จากเครื่องมือ SIS จากยานอวกาศ ACE ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้น (linear least squares) เพื่อคำนวณหาระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุด และใช้วิธี FWHM (Full Width at Half Maximum) ในการคำนวณหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจากการปะทุบนดวงอาทิตย์ ซึ่งตามสมมติฐานระยะทางอิสระเฉลี่ยของอนุภาคจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับพลังงาน เนื่องจากพลังงานที่เพิ่มขึ้นจะเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กดวงอาทิตย์ได้ในระยะทางที่ไกลก่อนที่จะเกิดการกระเจิงเนื่องจากความไม่เรียบของเส้นสนามแม่เหล็กมากกว่าอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่าและค่าระยะเวลาการปลดปล่อยจะมีค่าลดลงตามระดับพลังงานของอนุภาคที่ค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลกด้วยระยะเวลาที่สั้นกว่าอนุภาคที่มีพลังงานต่ำ อนุภาคที่มีพลังงานต่ำจะเกิดการกระเจิงและพุ่งในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์นานกว่า จากการศึกษาดูเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นในวันที่ 10 กันยายน 2017 ซึ่งเป็นเหตุการณ์ปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป เริ่มปะทุ ณ เวลา 15:35 UT และสิ้นสุดระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค ณ เวลา 16:31 UT รวมระยะเวลาการปลดปล่อย 56 นาที มีระดับความรุนแรงของรังสีเอ็กซ์ X8.2 ที่ตำแหน่ง S09W83 มีความเร็วลมสุริยะ 522 กิโลเมตร/วินาที มีการตรวจพบคลื่นวิทยุประเภทที่ II และ IV เมื่อเวลา 16:04 UT โดยเลือกศึกษาข้อมูลที่มีความต่อเนื่องของการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของอนุภาคตามเวลาของธาตุฮีเลียม คาร์บอน ออกซิเจน และเหล็ก จากอุปกรณ์ SIS บนยานอวกาศ ACE

พบว่าอนุภาคของธาตุฮีเลียมมีระยะทางอิสระเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.575-0.989 AU ซึ่งมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรกและช่วงท้ายเมื่อระดับพลังงานเพิ่มขึ้น ส่วนระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคอยู่ในช่วง 1501.535-1713.172 นาที มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับพลังงานและลดลงในบางช่วง อนุภาคของธาตุดูคาร์บอนมีระยะทางอิสระเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.559-0.973 AU ซึ่งมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นในช่วงท้ายเมื่อระดับพลังงานเพิ่มขึ้น ส่วนระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคอยู่ในช่วง 569.200-952.617 นาที มีแนวโน้มลดลงในช่วงแรกและช่วงท้ายเมื่อระดับพลังงาน

เพิ่มขึ้น อนุภาคของธาตุออกซิเจนมีระยะทางอิสระเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.415-1.026 AU ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและช่วงท้ายเมื่อระดับพลังงานเพิ่มขึ้น ส่วนระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคอยู่ในช่วงเวลา 201.918-626.245 นาที มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับพลังงานเพิ่มขึ้น อนุภาคของธาตุเหล็กมีระยะทางอิสระเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.435-0.649 AU ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงในบางระดับพลังงาน ส่วนระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคอยู่ในช่วงเวลา 201.174-403.386 นาที มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับพลังงานเพิ่มขึ้น พบว่าระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคแต่ละธาตุมีค่าเฉพาะเป็นธาตุๆ และพบว่าธาตุที่มีพลังงานสูงจะมีระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคที่สั้น ได้แก่ ออกซิเจนและเหล็ก ส่วนธาตุที่มีพลังงานต่ำจะมีระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคที่ยาวนานกว่า

เนื่องจากเหตุการณ์การปะทุในวันที่ 10 กันยายน 2017 เป็นการปะทุที่มีการปลดปล่อยมวลคอโรนาตามมาที่หลังจากการปะทุ จึงก่อให้เกิดการเร่งอนุภาคในด้วงกลางระหว่างดาวเคราะห์ และเกิดปรากฏการณ์คลื่นกระแทก จึงส่งผลให้อนุภาคในด้วงกลางระหว่างดาวเคราะห์มีความแปรปรวนสูง ซึ่งความแปรปรวนเหล่านี้มีผลต่อการศึกษาเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ในครั้งนี้ ซึ่งพบว่าระยะเวลาที่อนุภาคเคลื่อนใช้ในการเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลกยาวนานมาก เนื่องจากการปะทุนี้เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทางซีกตะวันตกของดวงอาทิตย์ คือ 83 องศาตะวันตก และเกิดคลื่นกระแทกระหว่างการปะทุ จึงทำให้ระยะเวลาที่อนุภาคจะพุ่งในอวกาศจึงมีค่ามากกว่าปกติ เหตุการณ์การปะทุนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อโลกเนื่องจากค่าการสิ้นสะท้อนของสนามแม่เหล็กโลก (Kp index) มีค่าระดับ 4



## บรรณานุกรม

1. รวิน ระวีวงศ์. ดวงอาทิตย์ [อินเทอร์เน็ต]. 2558. [สืบค้นเมื่อวันที่ 1 ก.ค. 2561].  
จาก: [http://mcpswis.mcp.ac.th/html\\_edu/cgibin/mcp/main\\_php/print\\_informed.php?id\\_count\\_inform=29845](http://mcpswis.mcp.ac.th/html_edu/cgibin/mcp/main_php/print_informed.php?id_count_inform=29845).
2. วัฏจักรสุริยะที่ 24 กำลังจะสิ้นสุดลง [อินเทอร์เน็ต]. 2556. [สืบค้นเมื่อเมื่อวันที่ 1 ก.ค. 2561] จาก: <http://jimmysoftwareblog.com/node/8482>.
3. กาญจนา บุญทรัพย์. การวิเคราะห์หาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจากการปะทุบนดวงอาทิตย์ สำหรับเหตุการณ์วันที่ 24 พฤศจิกายน 2543. [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต]. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2554.
4. วิมุติ วสะหลาย. sunspot เรื่องจริงของพายุสุริยะ [อินเทอร์เน็ต]. 2559. [สืบค้นเมื่อวันที่ 19 ก.ค. 2561]. จาก:  
<http://thaiastro.nectec.or.th/library/solarstormfacts/solarstormfacts.html>
5. ธีรยุทธ์ ลอยลิบ. สนามแม่เหล็กบนดวงอาทิตย์ (Magnetic Fields of the Sun) [อินเทอร์เน็ต]. 2555. [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 มิ.ย. 2562]. จาก: <http://www.narit.or.th/index.php/nso/85-magnetic-fields-of-the-sun>.
6. สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ. พายุสุริยะ [อินเทอร์เน็ต]. 2561. [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 มิ.ย. 2562]. จาก: <https://th.wikipedia.org/wiki/พายุสุริยะ>
7. สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ. การลุกจ้าของดวงอาทิตย์ [อินเทอร์เน็ต]. 2545. [สืบค้นเมื่อวันที่ 23 มิ.ย. 2562]. จาก: [http://astro.phys.sc.chula.ac.th/IHY/Solar\\_storm/Flare.htm](http://astro.phys.sc.chula.ac.th/IHY/Solar_storm/Flare.htm)
8. Kim Tolbert. (2018) Rhesi. Gordon Holman, Retrieved on 18 July 2018 from <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhesi3/>
9. ทิราณี ขำล้ำเลิศ, นลินี เขียมสะอาด, วุฒิสักดิ์ กาญจนภา, พรพิตรา ทิพราช, พรวิบูลย์ สุขรัมย์, รุ่งทิศา ยี่มบุญเกิด. การวิเคราะห์เหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ที่มีความรุนแรงตามประเภทการปะทุในช่วงปี พ.ศ. 2554-2556. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2559;18:1-9.
10. ทิราณี ขำล้ำเลิศ. การวิเคราะห์อิทธิพลของสภาพอวกาศการระเบิดบนดวงอาทิตย์และอนุภาคพลังงานสูงที่ส่งผลต่อสนามแม่เหล็กโลกและความแปรปรวนของอนุภาคพลังงานสูงที่เข้ามาถึงโลก. รายงานการวิจัย; พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2559.

11. นลินี เขียมสะอาด. การวิเคราะห์ความสม่ำเสมอทุกทิศทางของอนุภาคจากดวงอาทิตย์. [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2549.
12. Priest, E. R. The magneto hydrodynamics of energy release in solar flares. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 1991;336:363-380.
13. บัญชา อนุญสมบัติ. เข้าใจพายุสุริยะให้ลึกกว่าข่าวในสื่อ. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ. 2555;66:61-76.
14. Malakit, K. Magnetic Mirroring Effect on the Motion of Energetic Particle in Plasma Compression, Master Thesis. Bangkok: Chulalongkorn University; 2002.
15. Thomas K. Graisser. Cosmic rays and particle physics. United Kingdom: Great Britain by the university press; 1990.
16. Hansjörg Schlaepfer. Cosmic rays. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London; 2003.
17. นิกร พันธุ์ธ. การเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์. [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2549.
18. D.Ruffolo. Effect of adiabatic deceleration on the focused transport of solar cosmic rays. Astrophysical Journal; 1995. 442(2), 861-874.
19. Malakit, K. Magnetic mirroring effect on the motion of energetic Particle in plasma compressions. Bangkok: Chulalongkorn University; 2002.
20. Stone, E. C, et al. The Advanced Composition Explorer[Internet]; 1998. [Retrieved on July 16,2018]. from : <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-issions/content/-/article/ace>.
21. Ruffolo D., Khumlumlert T. and Yongdee W. Deconvolution of interplanetary transport of solar energetic particles. Journal of Geophysical Research; 1998. 9(103), 591-602.
22. A K Singh , A Tonk and R Singh Department. Prospective of coronal mass ejections, solar flares and geomagnetic storms. India ,University of Lucknow; 2014.
23. Bimal Pande, Seema Pande, Ramesh Chandra and Mahesh Chandra. Solar flares, CMEs and solar energetic particle events during solar cycle 24. India; 2017.

24. C. R. A. Augusto, C.E. Navia and M. N. De Oliveira. Relativistic Proton levels from region AR2673 and the heliospheric current sheet as a sun-earth magnetic connection. Instituto de Fisica , Universidade Federal Fluminense, Brazil; 2018.
25. Karen C. Fox. Sun Erupts With Significant Flare[Internet]. NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt, USA; 2017. [Retrieved September 11, 2018]. From : <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/active-region-on-sun-continues-to-emit-solar-flares>
26. Space Weather Live. Viewing archive[Internet]; 2017. [Retrieved September 11, 2018]. From : <https://www.spaceweatherlive.com/en/archive/2017/09/10/xray>.
27. ACE Science Center. ACE SIS Level 2 Data[Internet]; 2017. [Retrieved September 11, 2018]. from : <http://www.srl.caltech.edu/cgi-bin/dib/rundibviewsisl2/ACE/ASC/DATA/level2/sis>
28. Space Weather Live. Solar wind. [Retrieved September 11, 2018]. from : <https://www.spaceweatherlive.com/en/archive/2017/09/10/aurora>; 2017.
29. Lina Tran. September 2017's Intense Solar Activity Viewed From Space. NASA's Goddard Space Flight Center[Internet]. Greenbelt, USA. [Retrieved September 11, 2018]. From : <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/september-2017s-intense-solar-activity-viewed-from-space>; 2017.
30. Teo Blaškovic. Second strongest of the cycle. Retrieved September 11, 2018, from <https://watchers.news/2017/09/10/x-class-solar-flare-september-10-2017-x8-2/>; 2017.
31. Space Weather Prediction Center. Solar Cycle Progression[Internet]; 2019 [Retrieved July 15, 2018]. From : <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>; 2019.
32. Space Weather Prediction Center. Aurora - 3 day forecast[Internet]; 2019. [Retrieved August 13, 2019]. From : <https://www.swpc.noaa.gov/node/114>; 2019.
33. กรมควบคุมการปฏิบัติทางอากาศ. GEOMAGNETIC STORMS[อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ; 2562. [สืบค้นเมื่อวันที่ 16 ต.ค. 2562]. จาก: <https://www.weather.rtaf.mi.th/climate/SpaceWeather/>

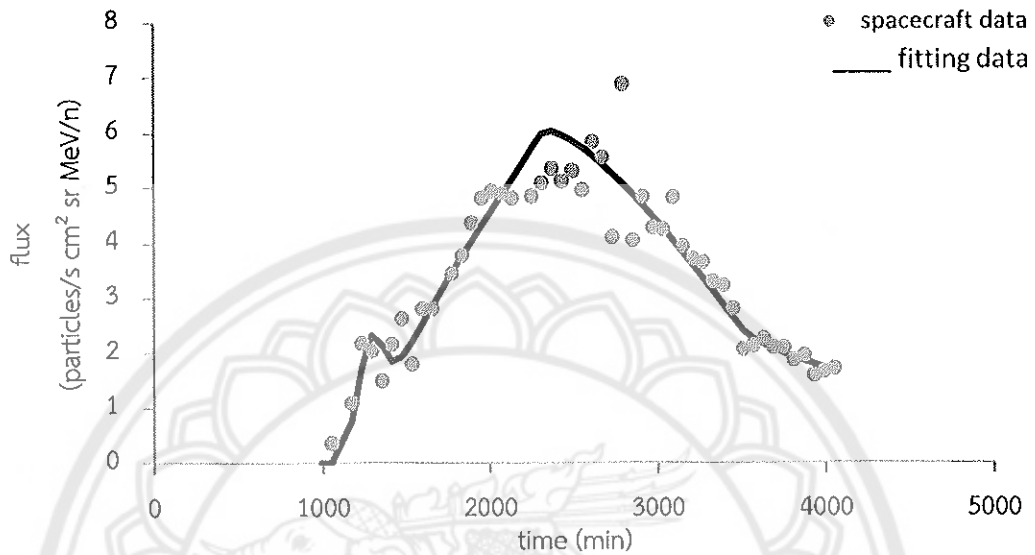


ภาคผนวก

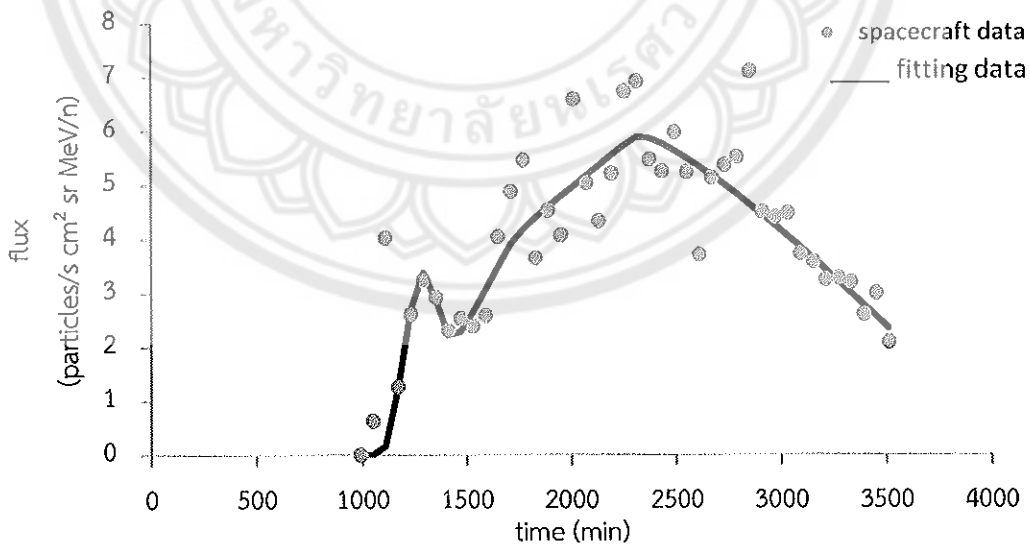
มหาวิทยาลัยขอนแก่น



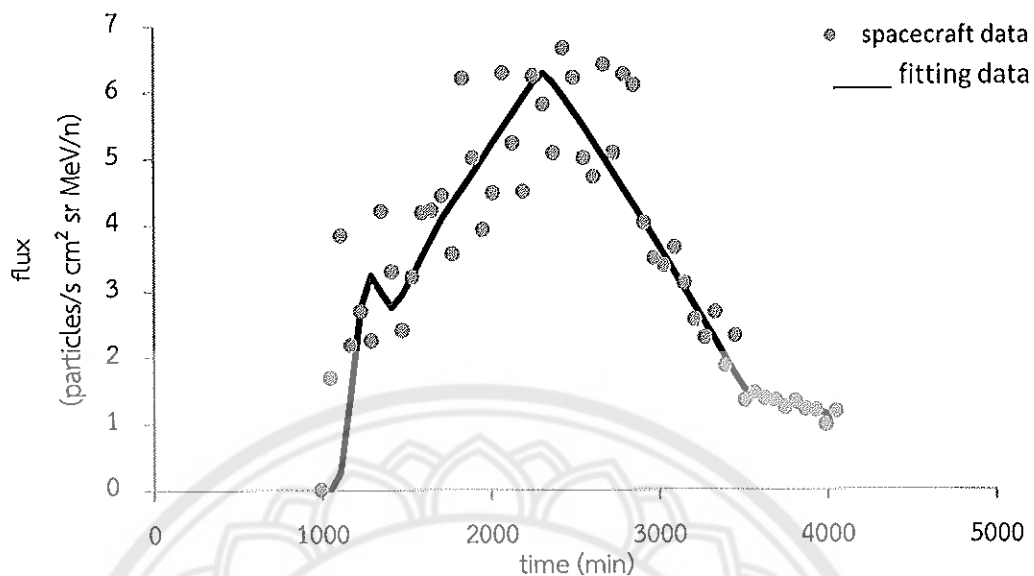
ภาคผนวก ก ผลการจำลองความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาที่ฟิตเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือ SIS



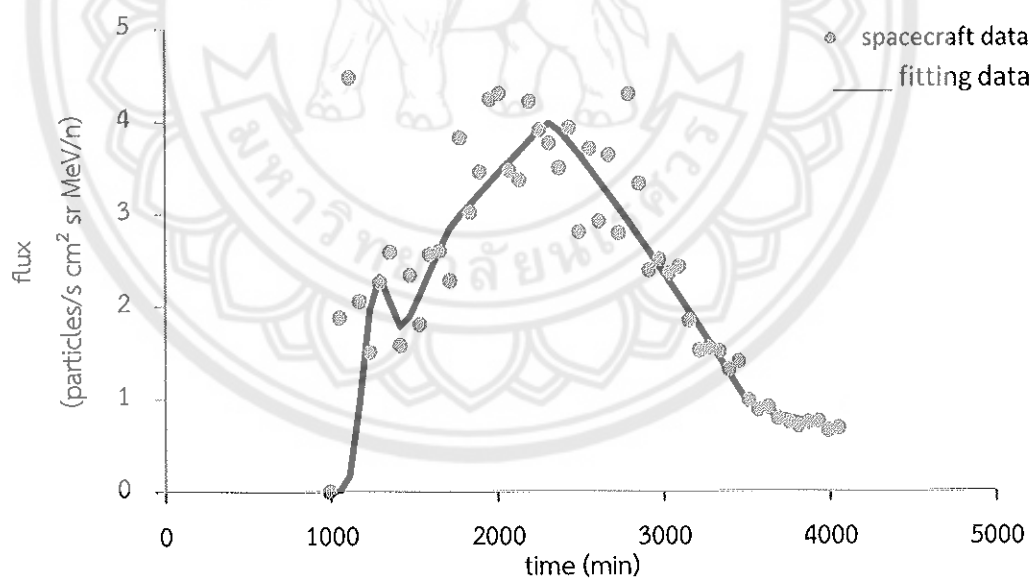
ภาพ 35 การฟิตเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 4.032 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.727 AU



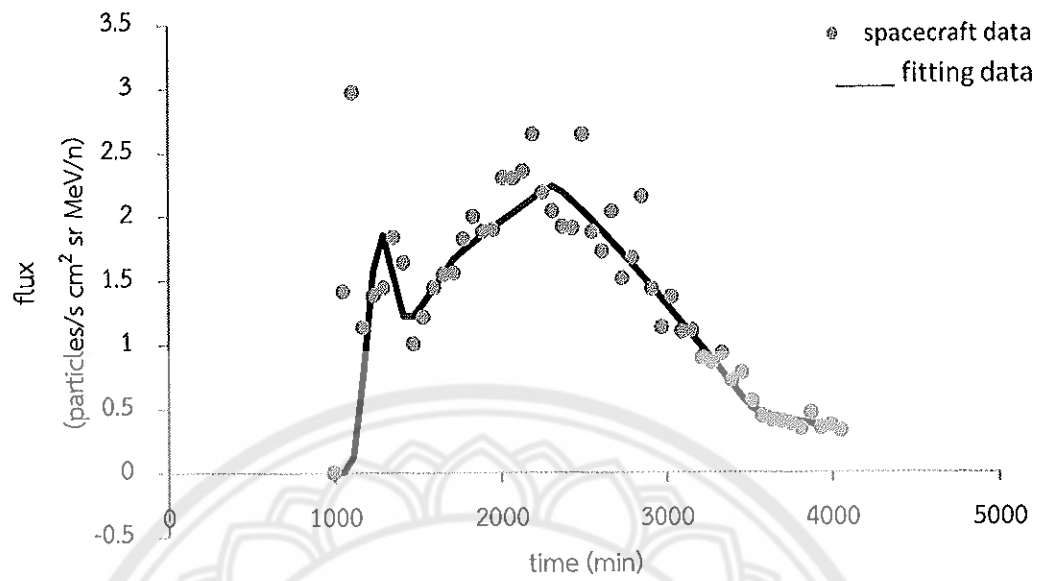
ภาพ 36 การฟิตเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุฮีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 5.390 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.575 AU



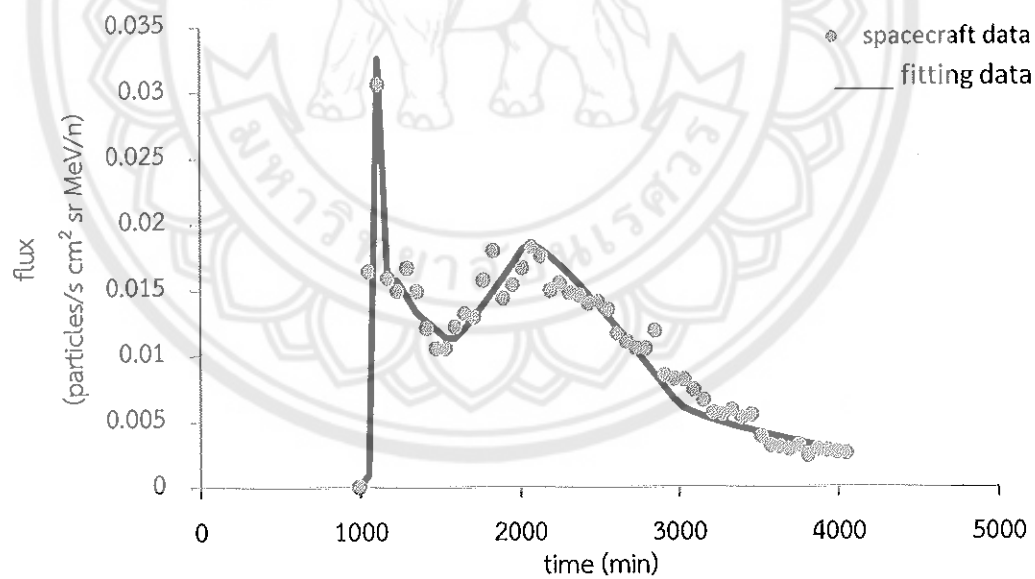
ภาพ 37 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุซีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 6.685 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.988 AU



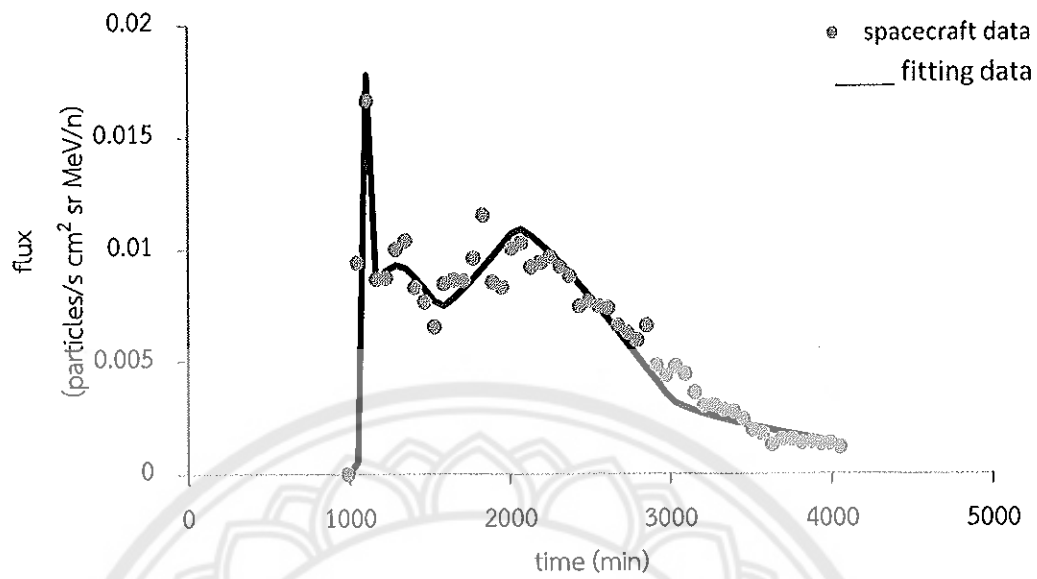
ภาพ 38 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุซีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 8.418 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.838 AU



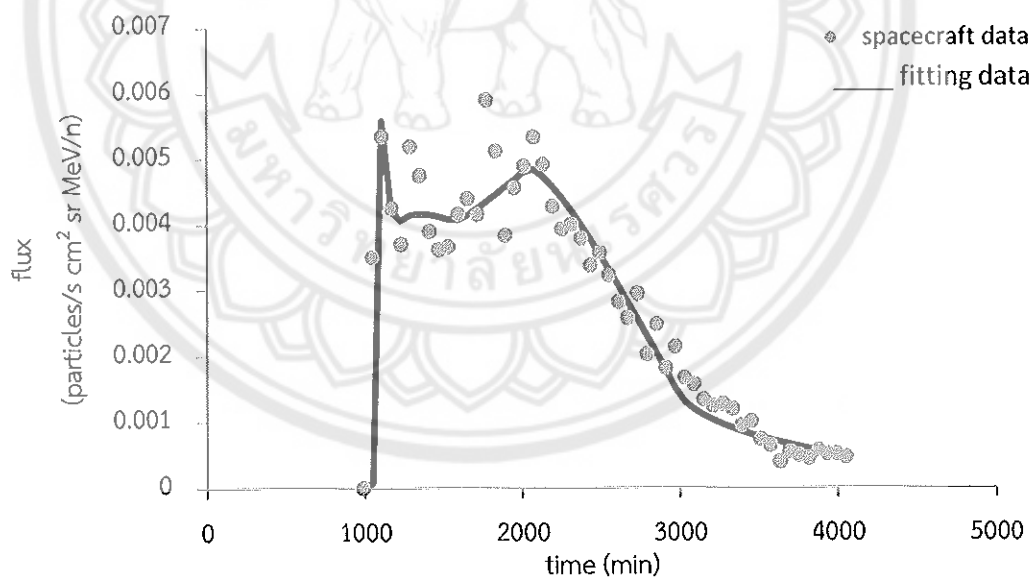
ภาพ 39 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุซีเลียม ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 11.493 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.662 AU



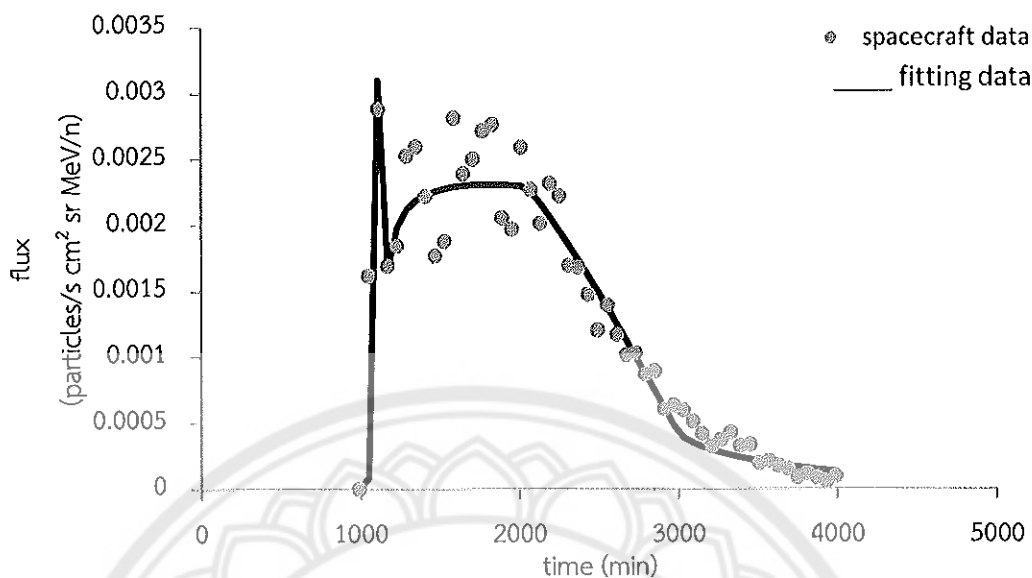
ภาพ 40 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุคาร์บอน ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 12.267 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.736 AU



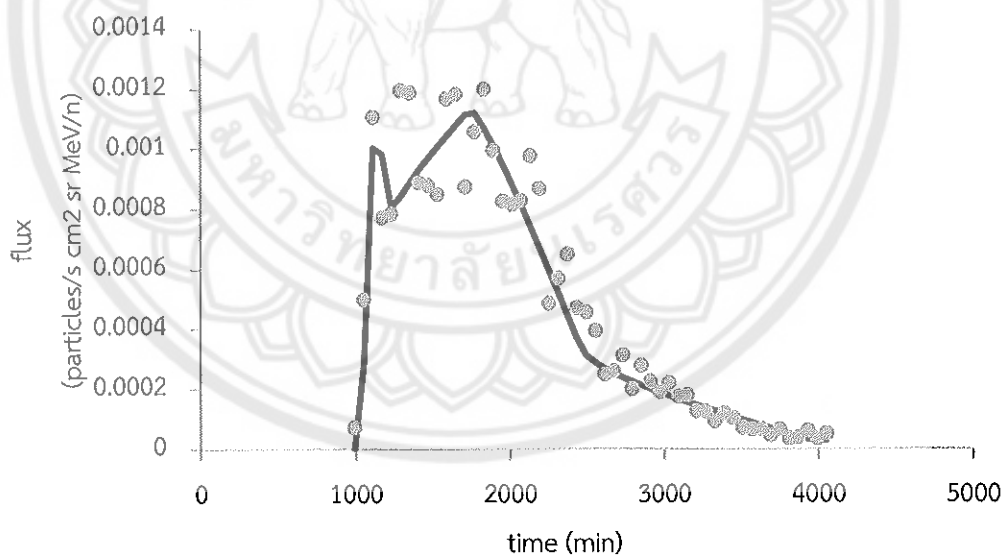
ภาพ 41 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุคาร์บอน ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 15.505 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.950 AU



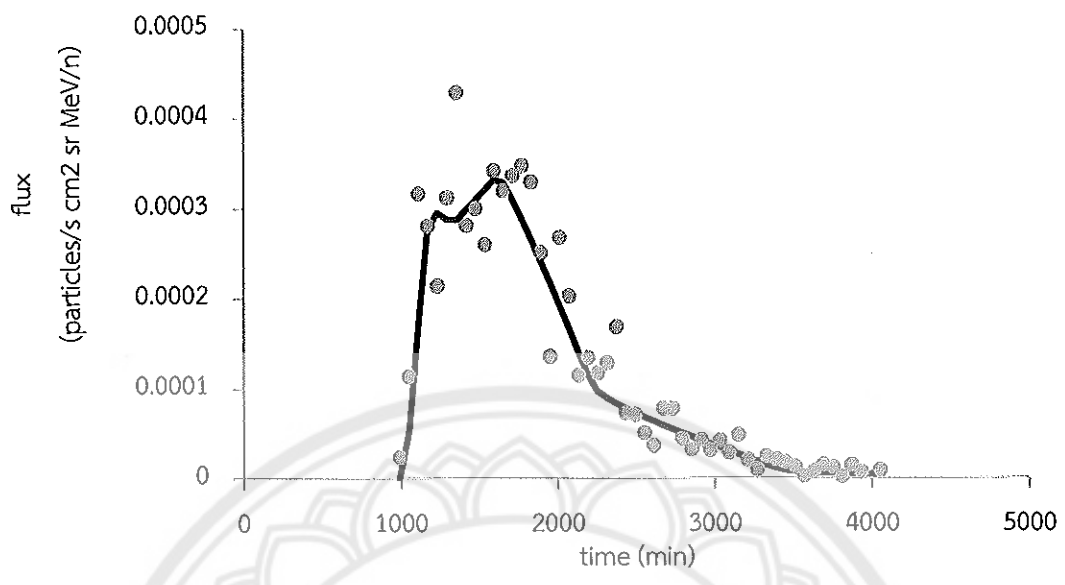
ภาพ 42 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุคาร์บอน ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 21.229 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.622 AU



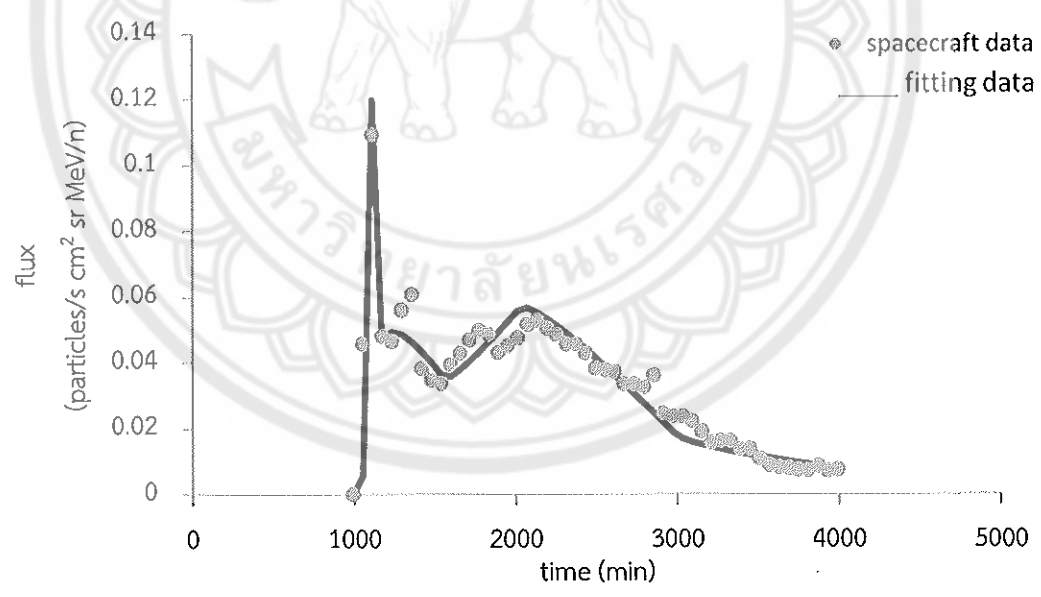
ภาพ 43 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุคาร์บอน ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 28.883 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.559 AU



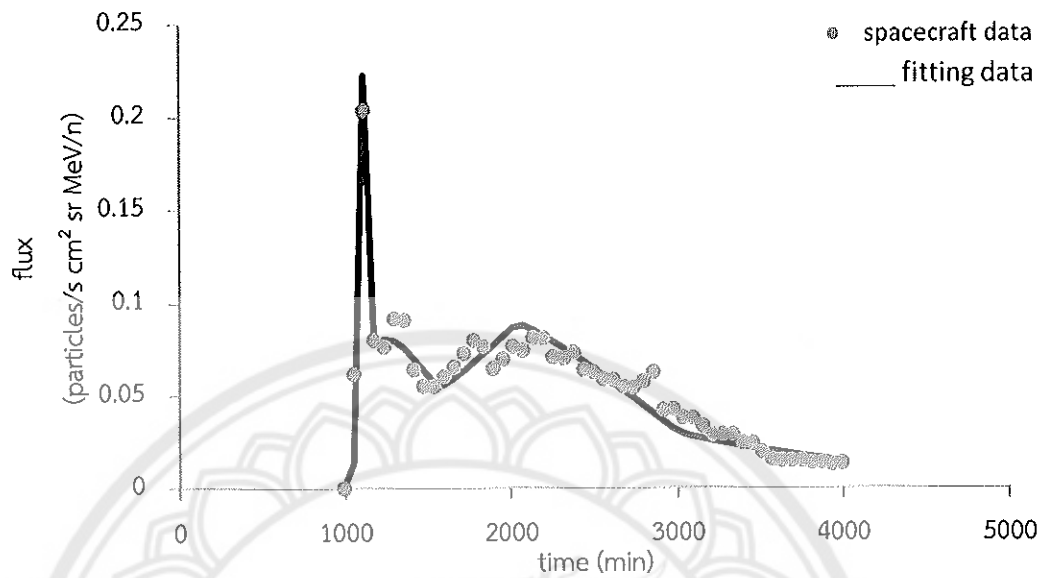
ภาพ 44 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุคาร์บอน ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 42.465 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.920 AU



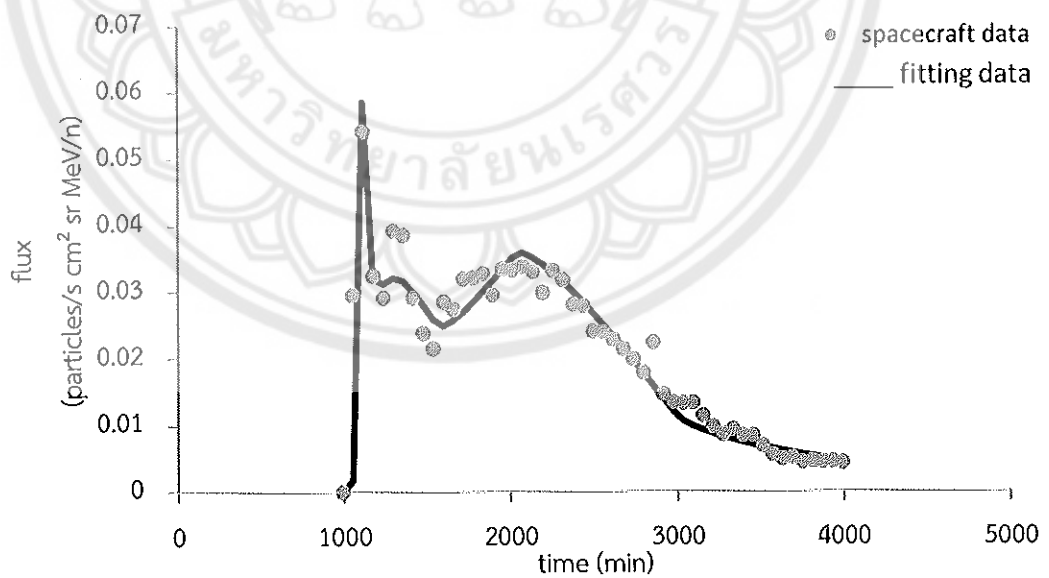
ภาพ 45 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุคาร์บอน ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 64.384 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.973 AU



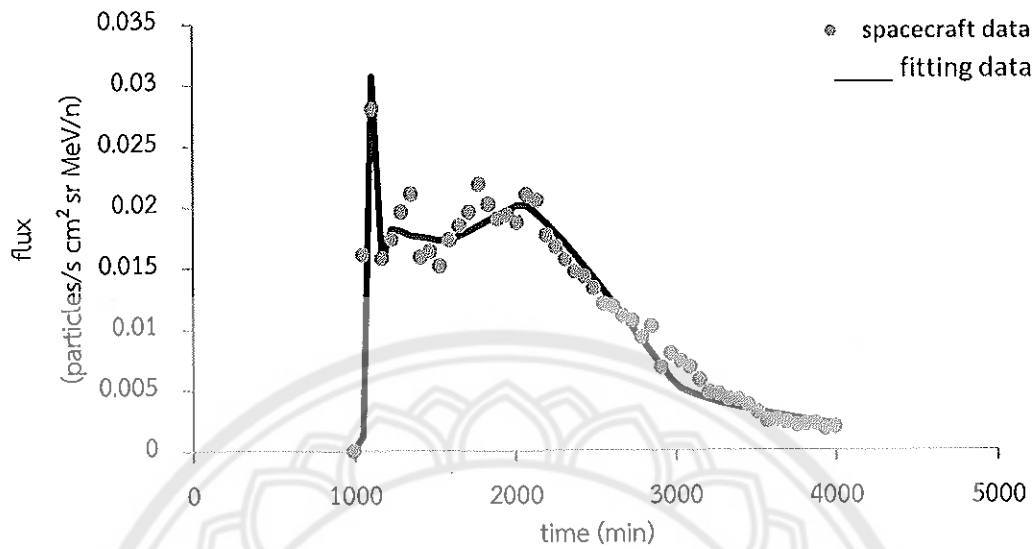
ภาพ 46 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุออกซิเจน ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 8.538 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.941 AU



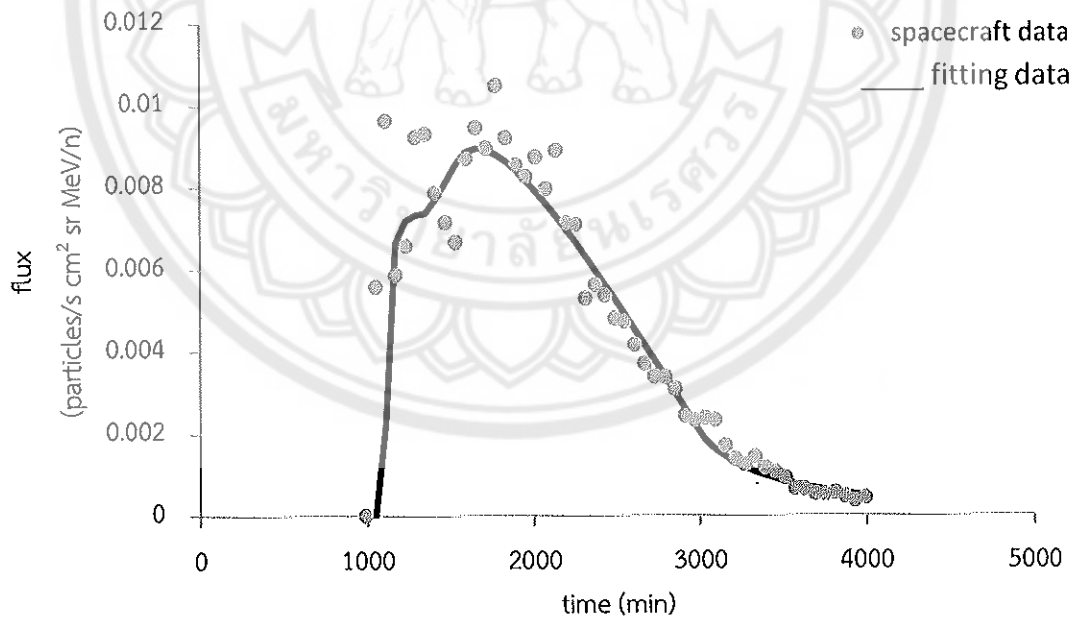
ภาพ 47 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ ออกซิเจน ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 11.427 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.867 AU



ภาพ 48 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ ออกซิเจน ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 14.293 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 1.026 AU

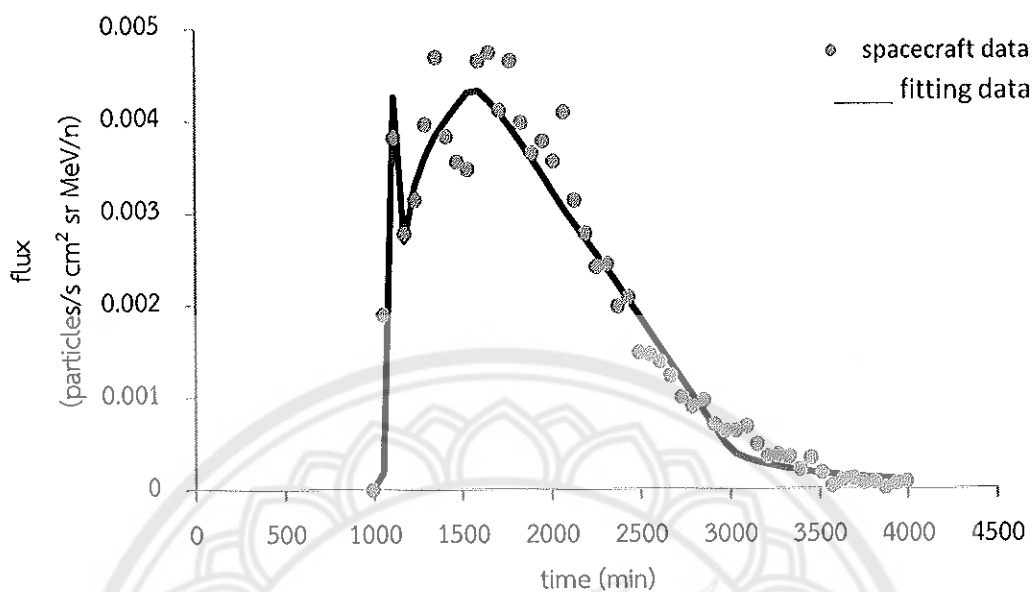


ภาพ 49 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ ออกซิเจน ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 18.104 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.948 AU

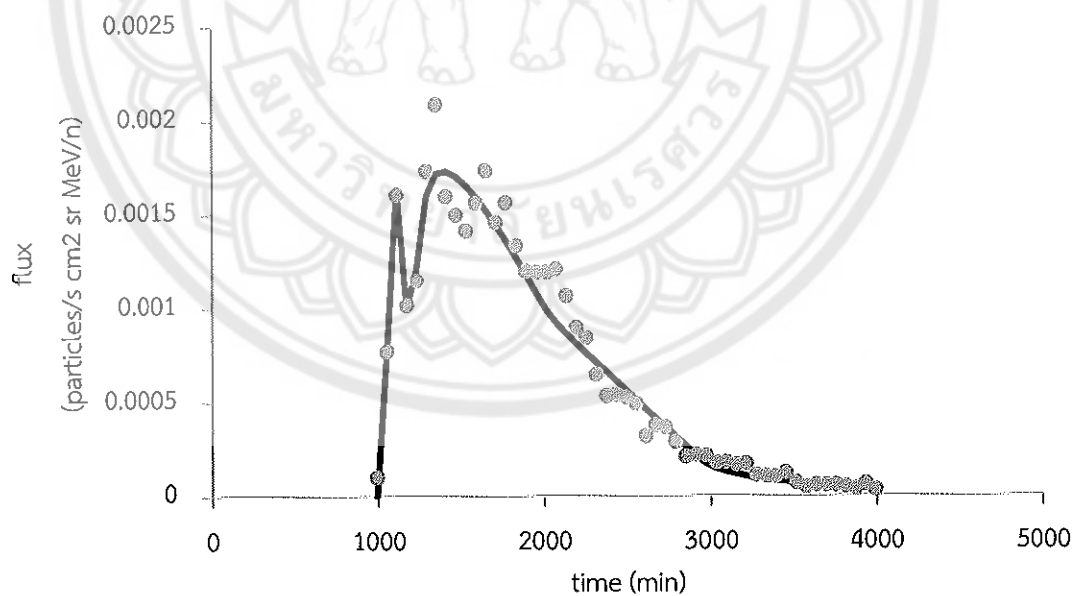


ภาพ 50 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ ออกซิเจน ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 24.838 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.640 AU

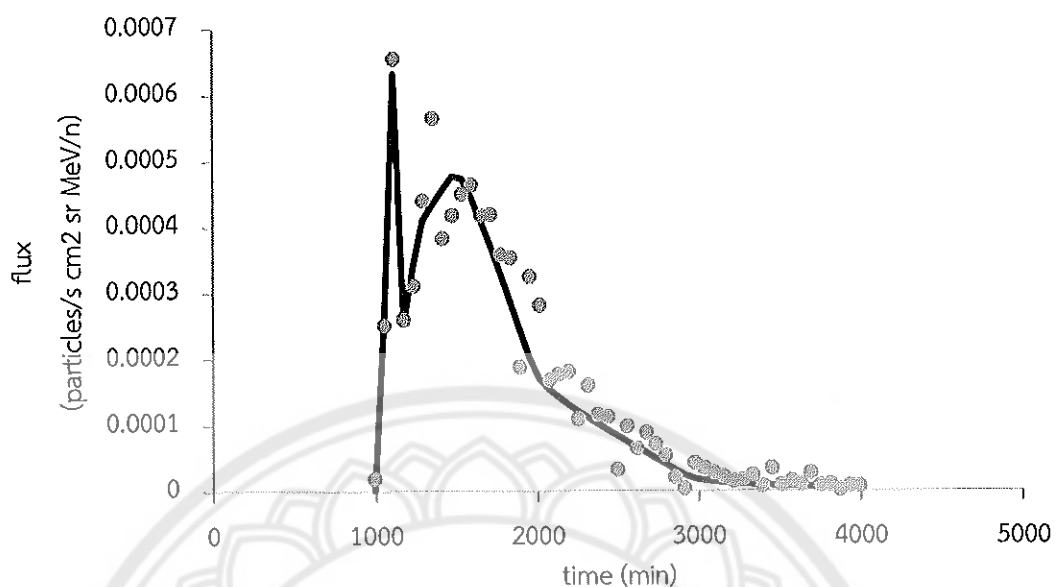




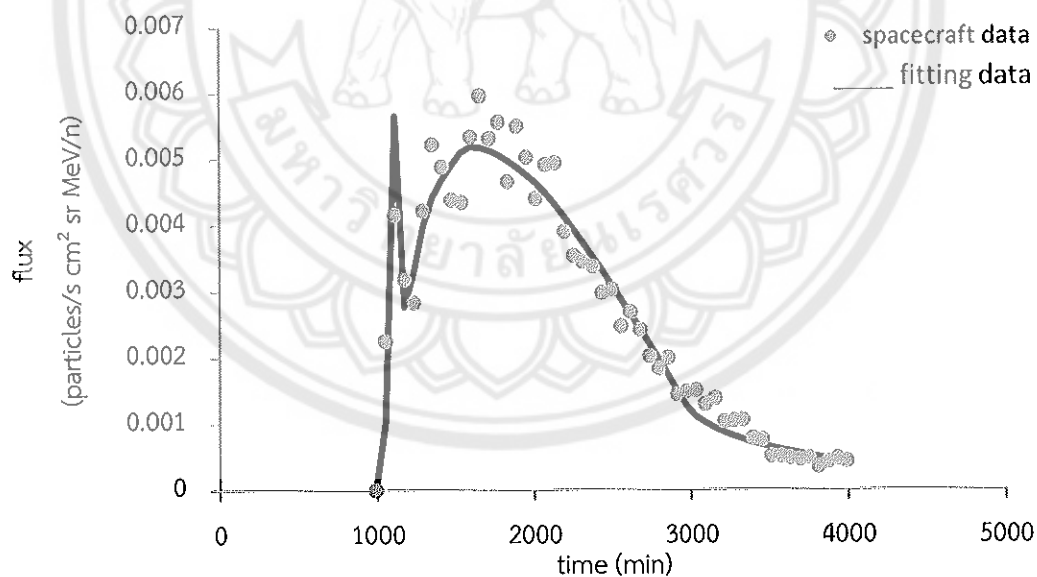
ภาพ 51 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ ออกซิเจน ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 33.847 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.415 AU



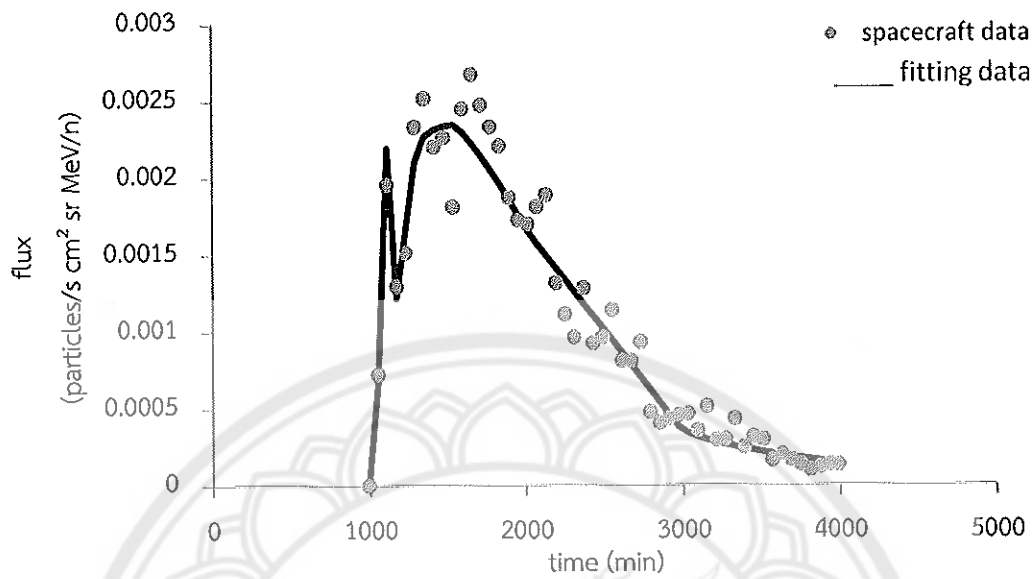
ภาพ 52 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ ออกซิเจน ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 49.832 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.544 AU



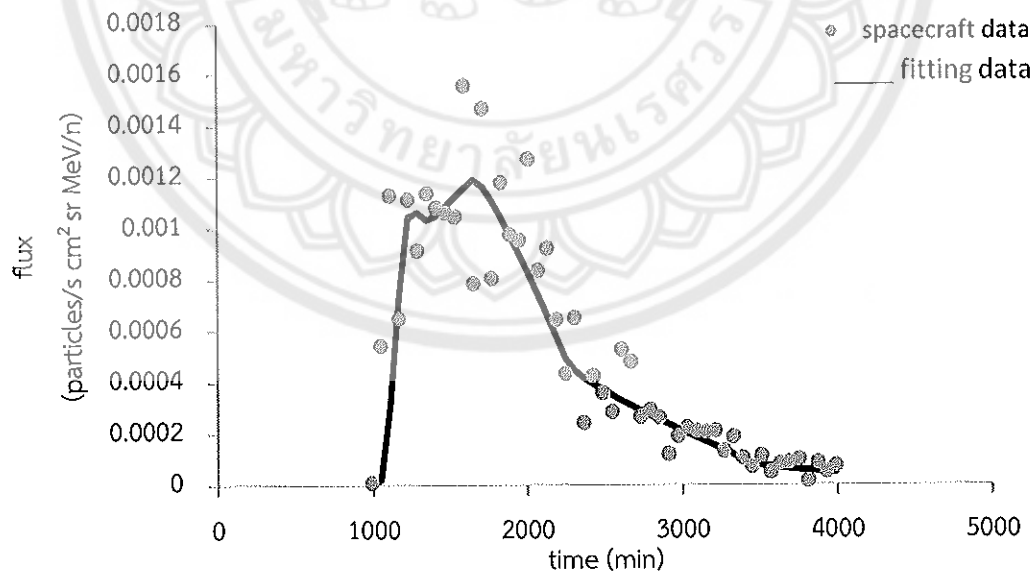
ภาพ 53 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุออกซิเจน ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 75.665 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.812 AU



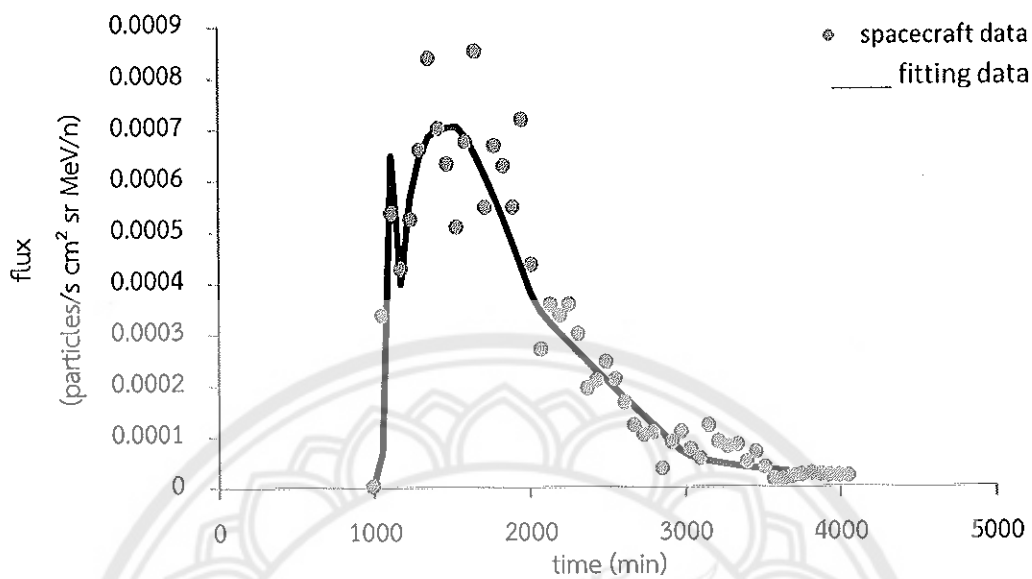
ภาพ 54 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุเหล็ก ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 13.002 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.556 AU



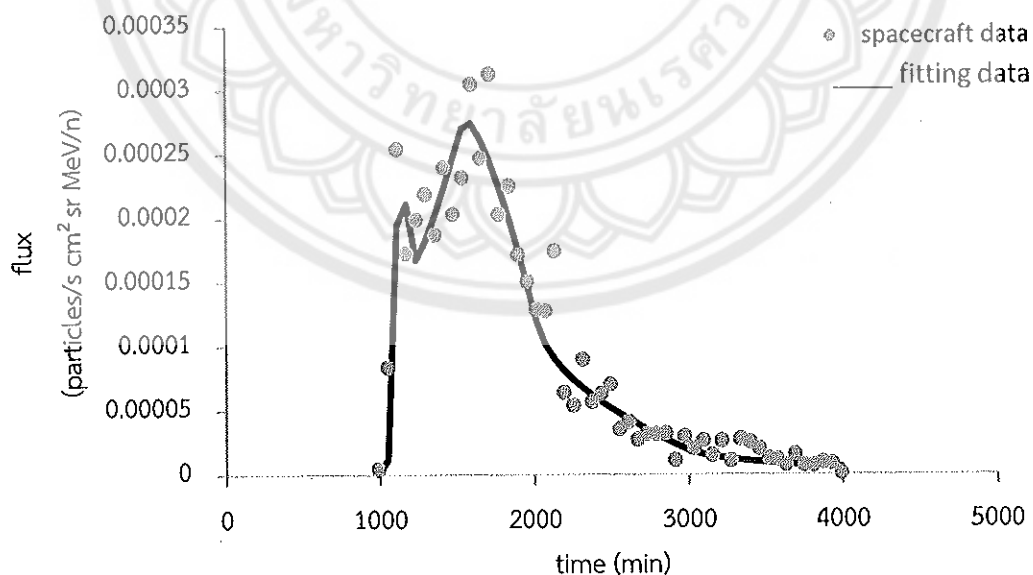
ภาพ 55 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุเหล็ก ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 18.461 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.618 AU



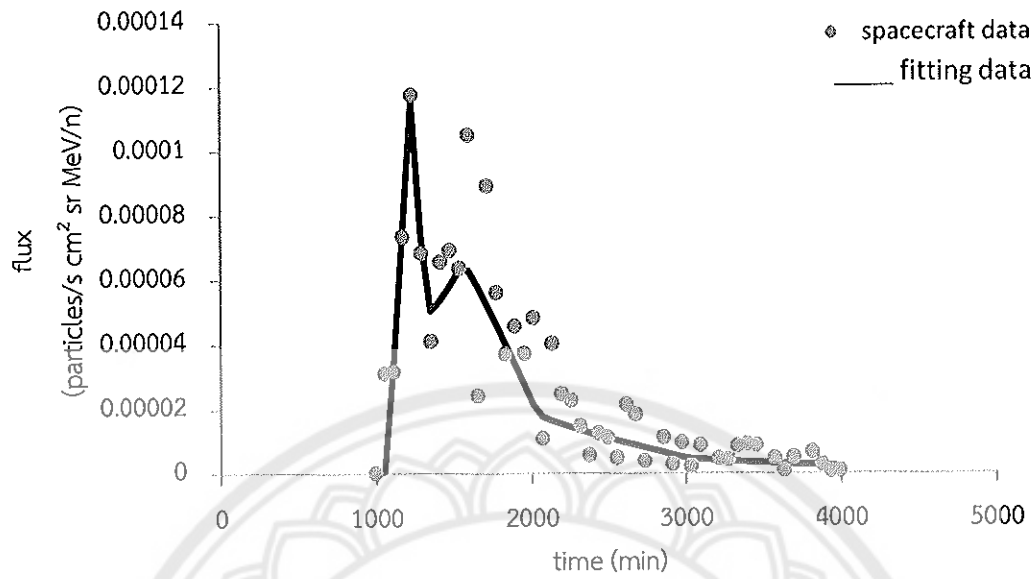
ภาพ 56 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุเหล็ก ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 23.796 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.608 AU



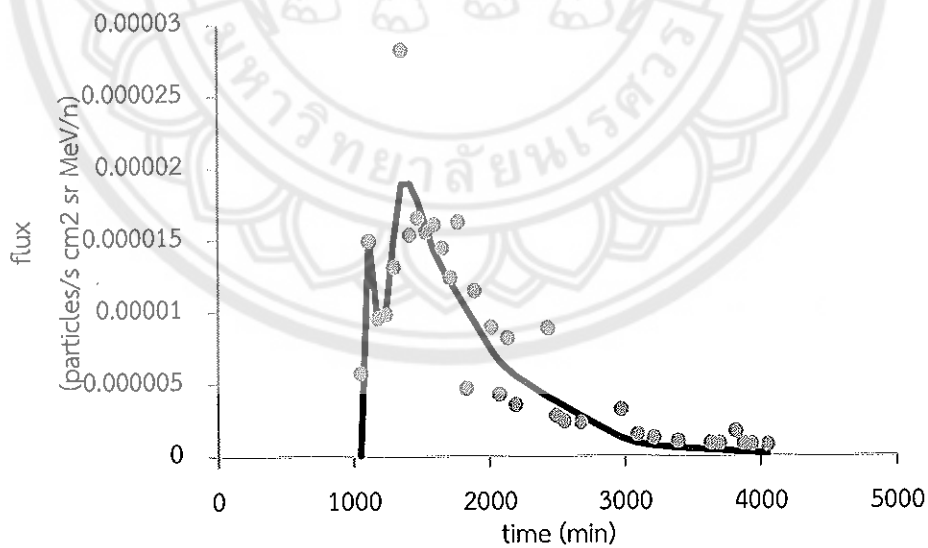
ภาพ 57 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ  
เหล็ก ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 30.902 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.558 AU



ภาพ 58 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุ  
เหล็ก ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 43.544 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.435 AU

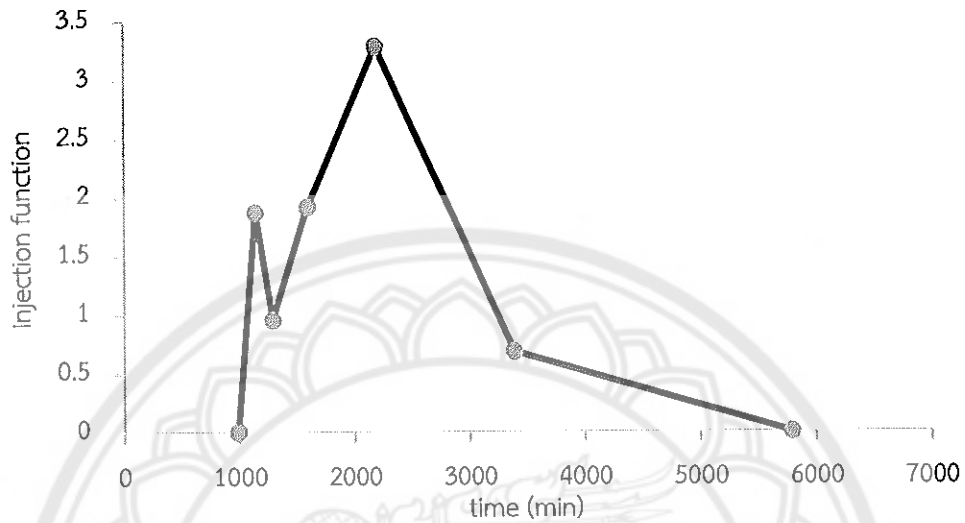


ภาพ 59 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุเหล็ก ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 60.559 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.649 AU

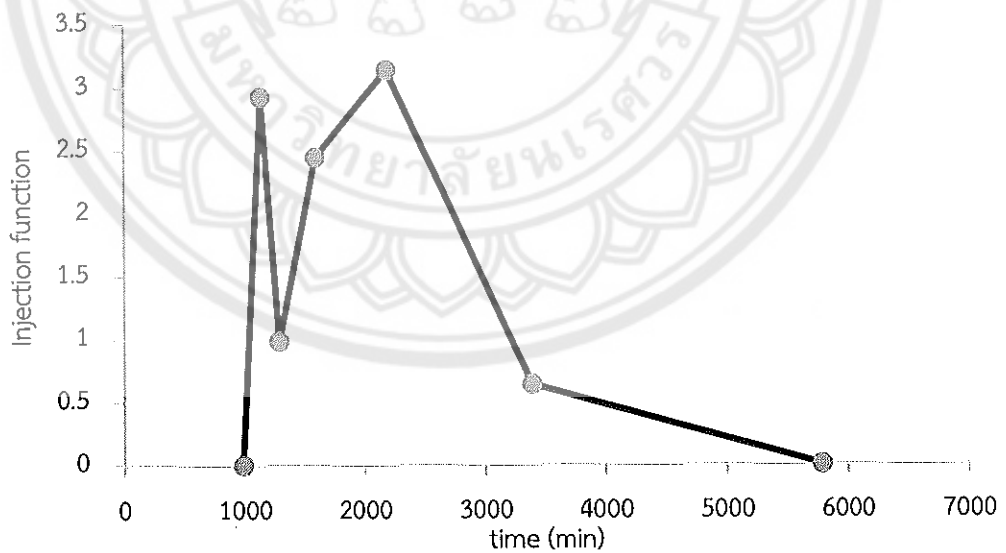


ภาพ 60 การเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองเทียบกับข้อมูลจากยานอวกาศของธาตุเหล็ก ที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 90.852 MeV/n ที่ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.442 AU

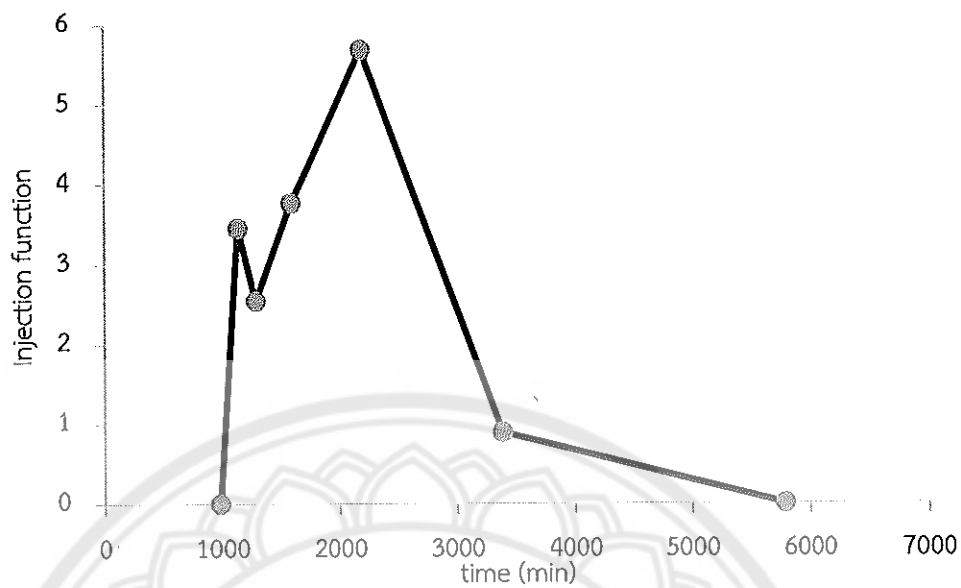
ภาคผนวก ข กราฟแสดงผลสามเหลี่ยมเพื่อหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจากการปะทุดวงอาทิตย์



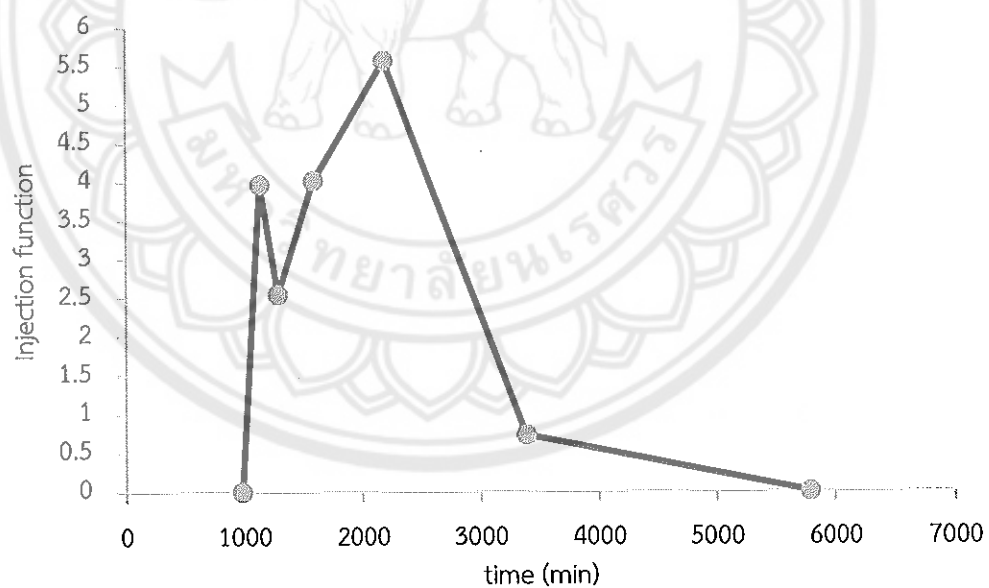
ภาพ 61 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียมที่ระดับพลังงาน 4.032 MeV มีระยะเวลาการปลดปล่อย 1501.535 นาที



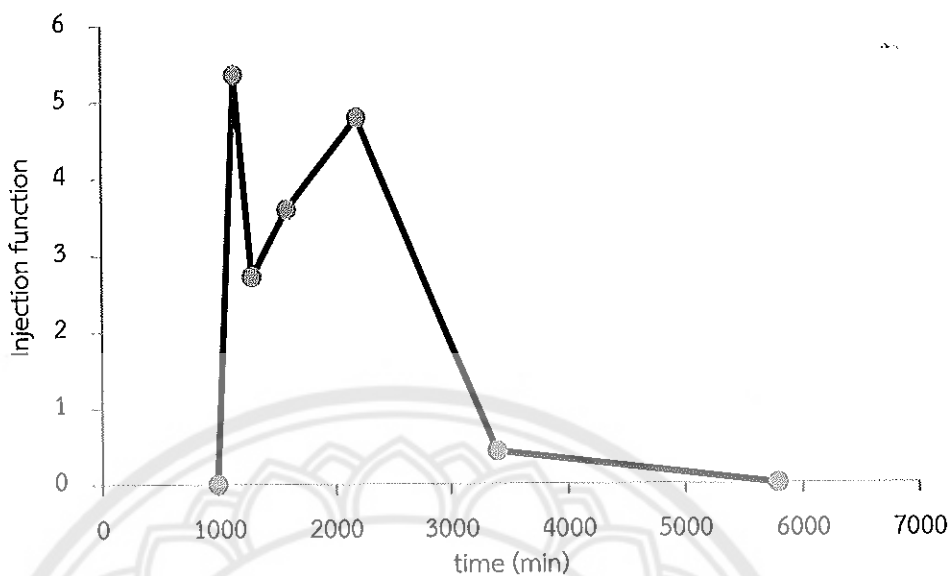
ภาพ 62 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียมที่ระดับพลังงาน 5.390 MeV มีระยะเวลาการปลดปล่อย 1707.904 นาที



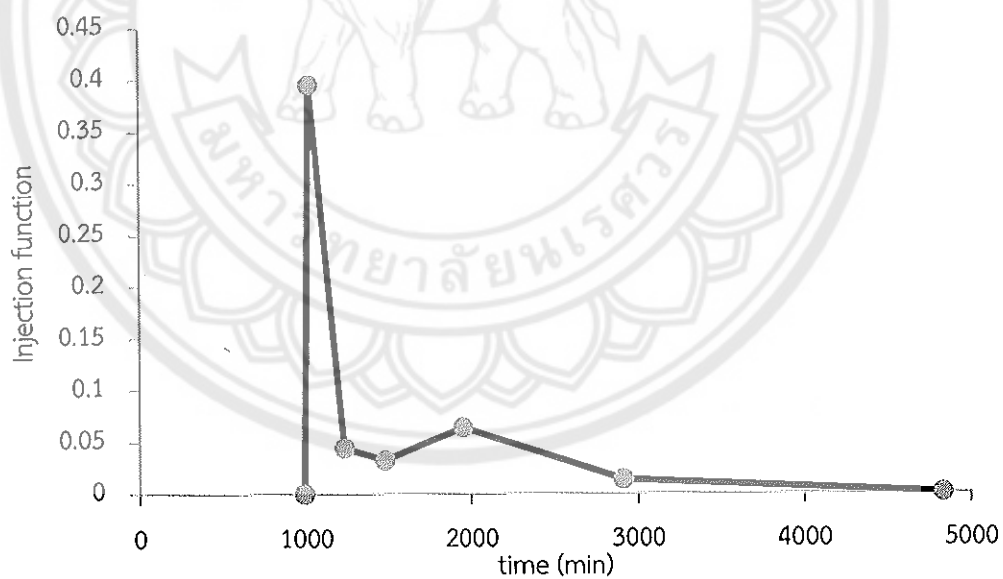
ภาพ 63 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุลิเทียมที่ระดับพลังงาน 6.685 MeV  
มีระยะเวลาการปลดปล่อย 1666.434 นาที



ภาพ 64 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุลิเทียมที่ระดับพลังงาน 8.418 MeV  
มีระยะเวลาการปลดปล่อย 1713.172 นาที

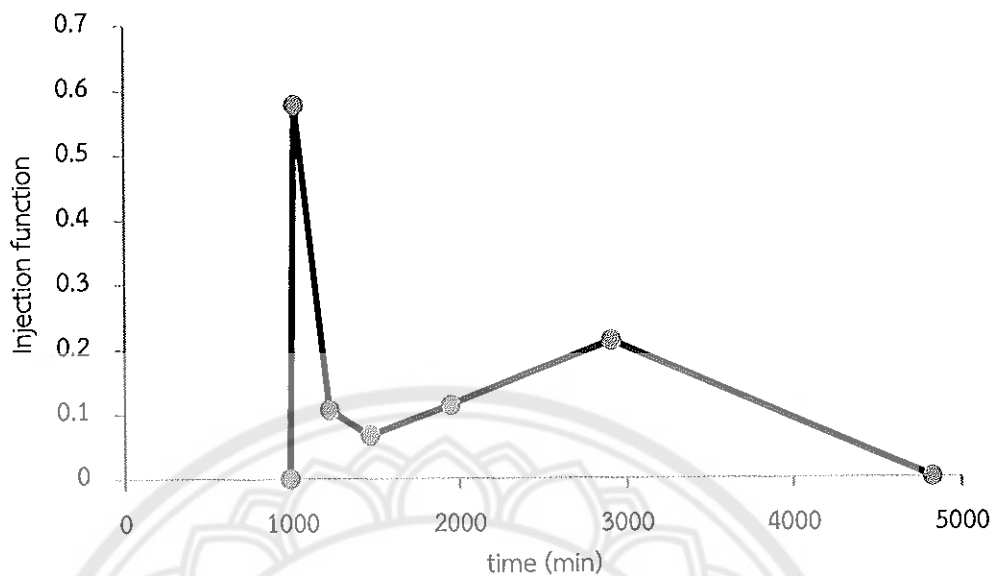


ภาพ 65 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุลิเทียมที่ระดับพลังงาน 11.493 MeV  
มีระยะเวลาการปลดปล่อย 1707.401 นาที

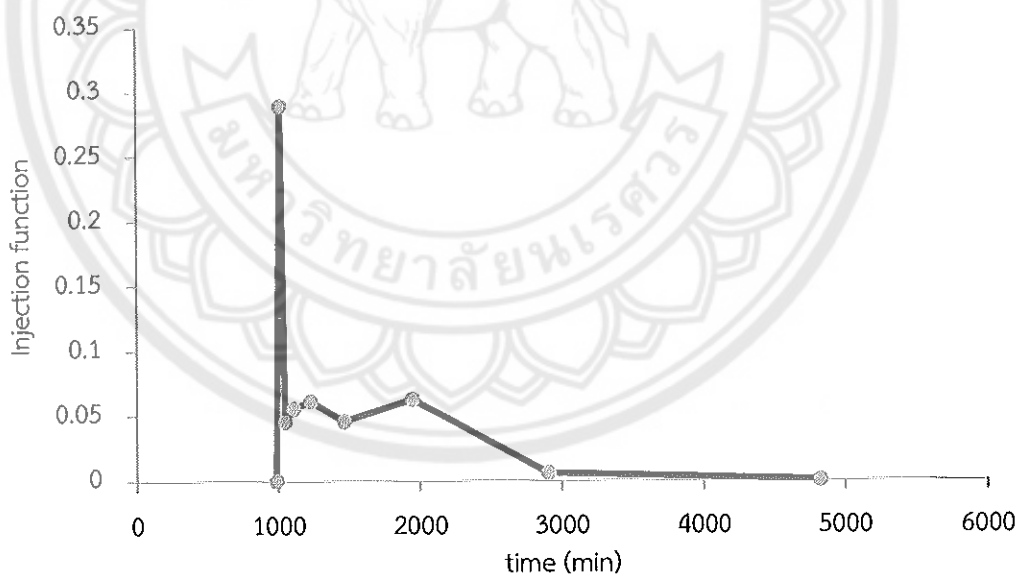


ภาพ 66 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุคาร์บอนที่ระดับพลังงาน 12.267  
MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 569.200 นาที

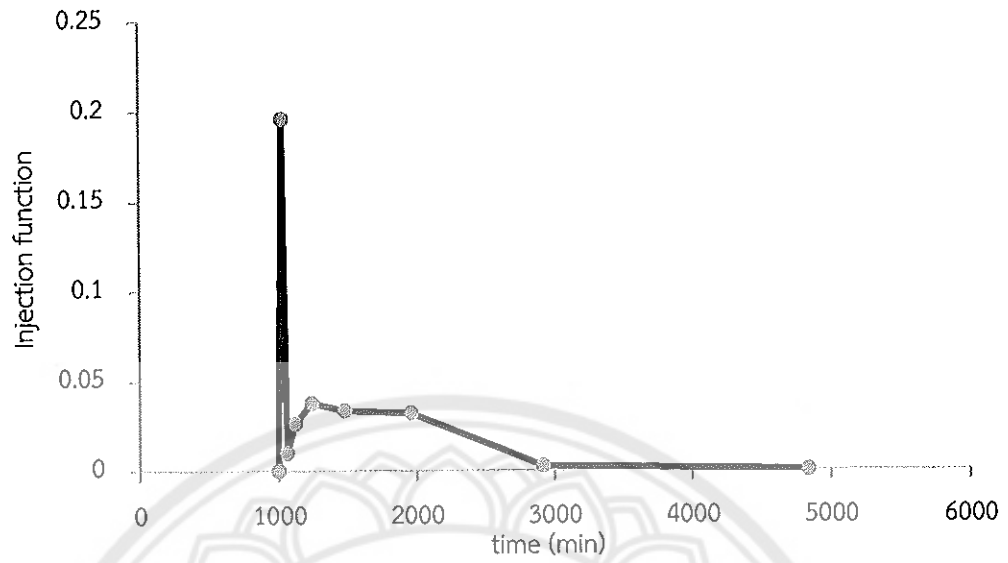




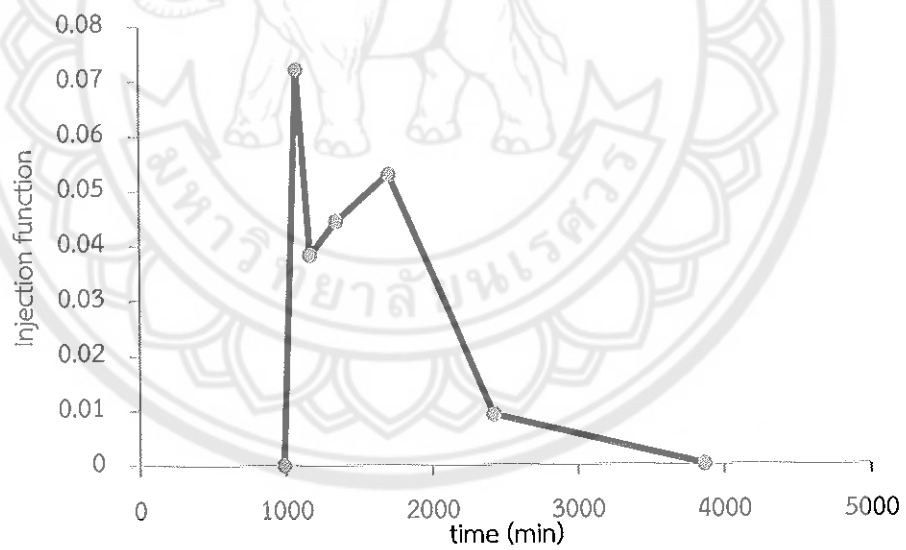
ภาพ 67 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุคาร์บอนที่ระดับพลังงาน 15.505 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 774.784 นาที



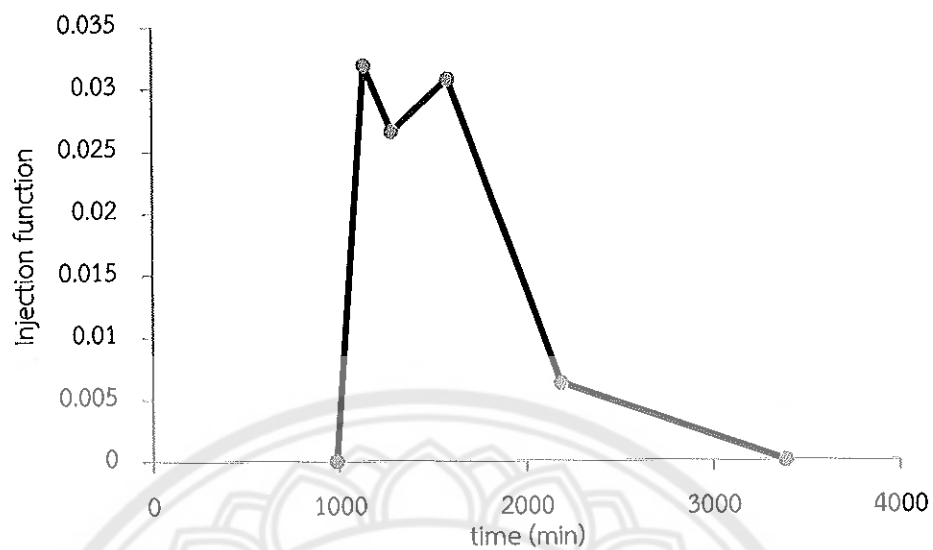
ภาพ 68 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุคาร์บอนที่ระดับพลังงาน 21.229 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 608.514 นาที



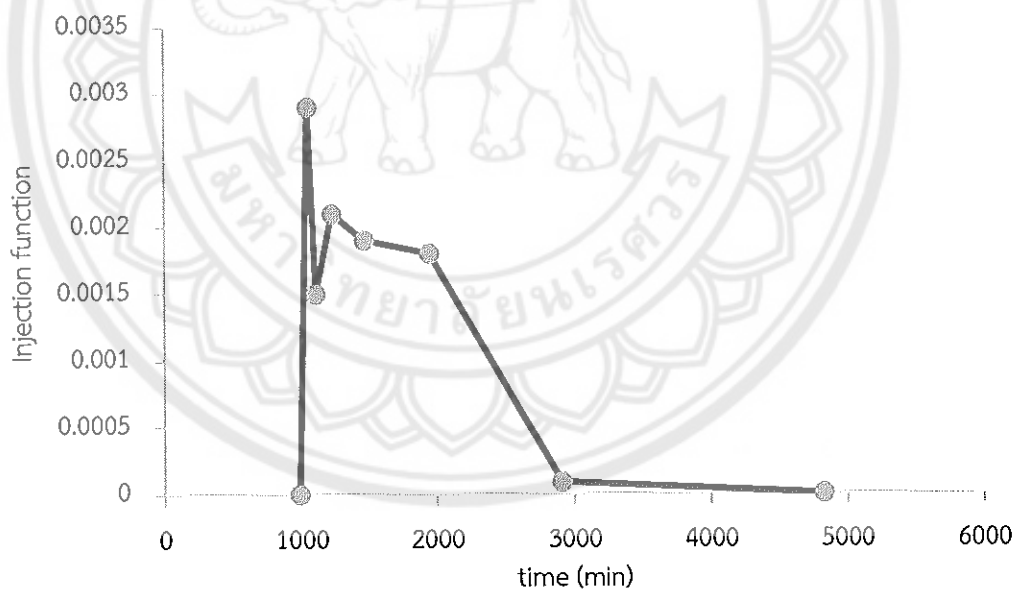
ภาพ 69 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุคาร์บอนที่ระดับพลังงาน 28.883 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 570.648 นาที



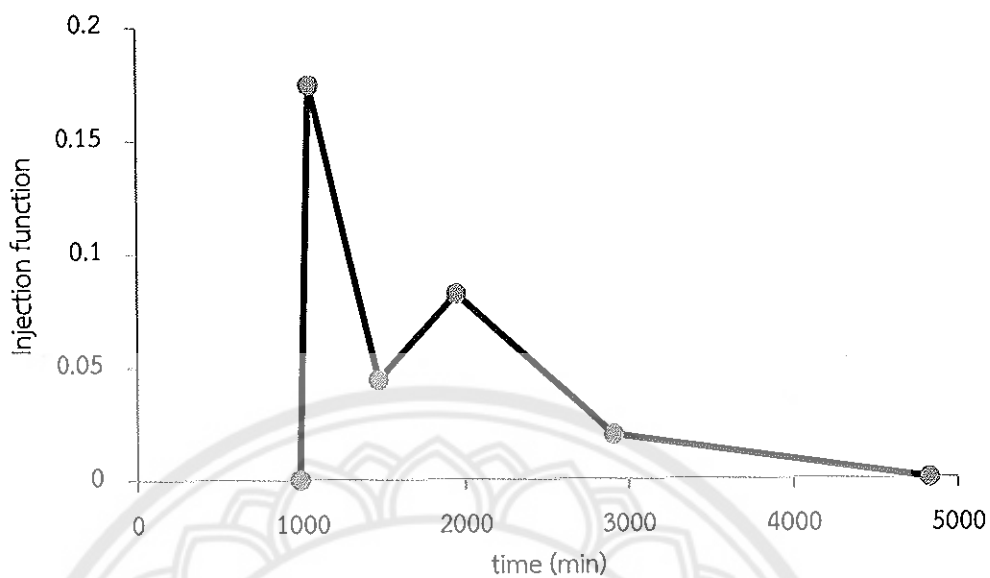
ภาพ 70 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุคาร์บอนที่ระดับพลังงาน 42.465 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 952.617 นาที



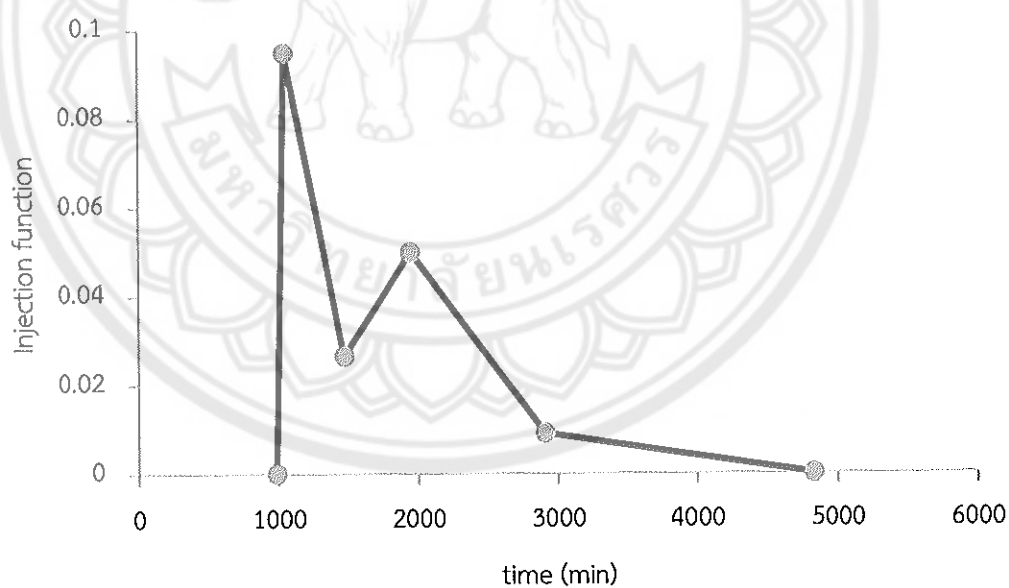
ภาพ 71 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุคาร์บอนที่ระดับพลังงาน 64.384 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 888.553 นาที



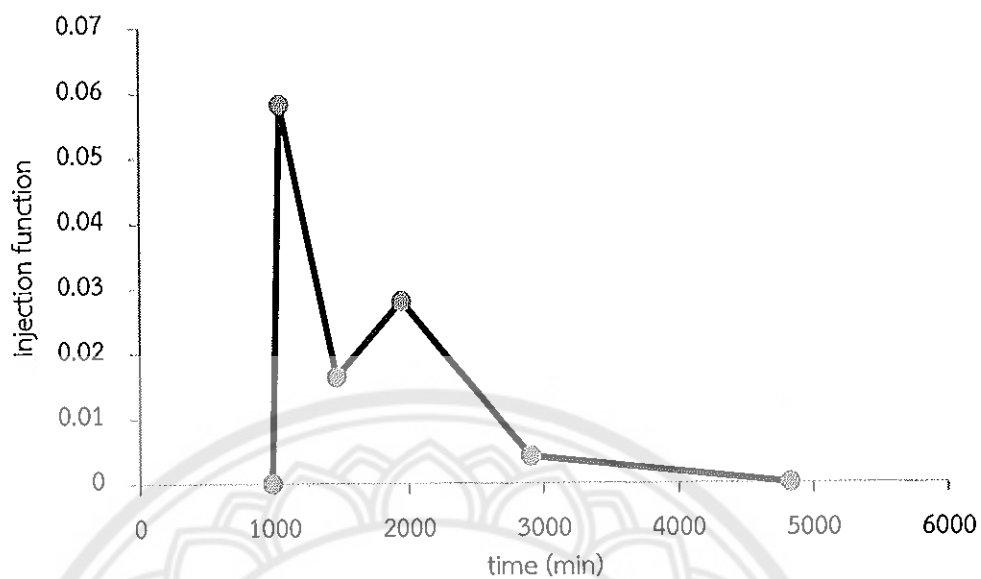
ภาพ 72 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุออกซิเจนที่ระดับพลังงาน 8.538 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 557.624 นาที



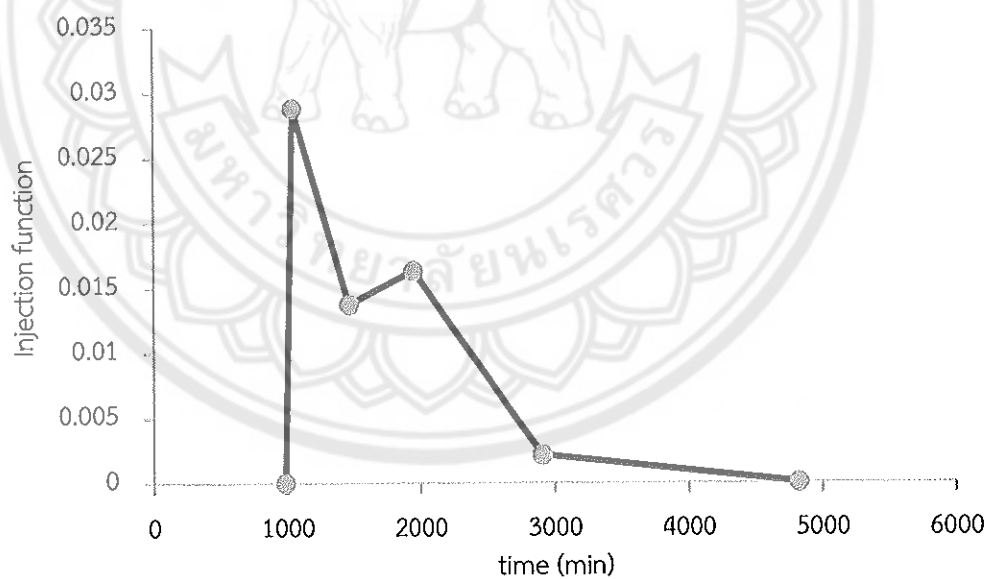
ภาพ 73 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุออกซิเจนที่ระดับพลังงาน 11.427 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 566.421 นาที



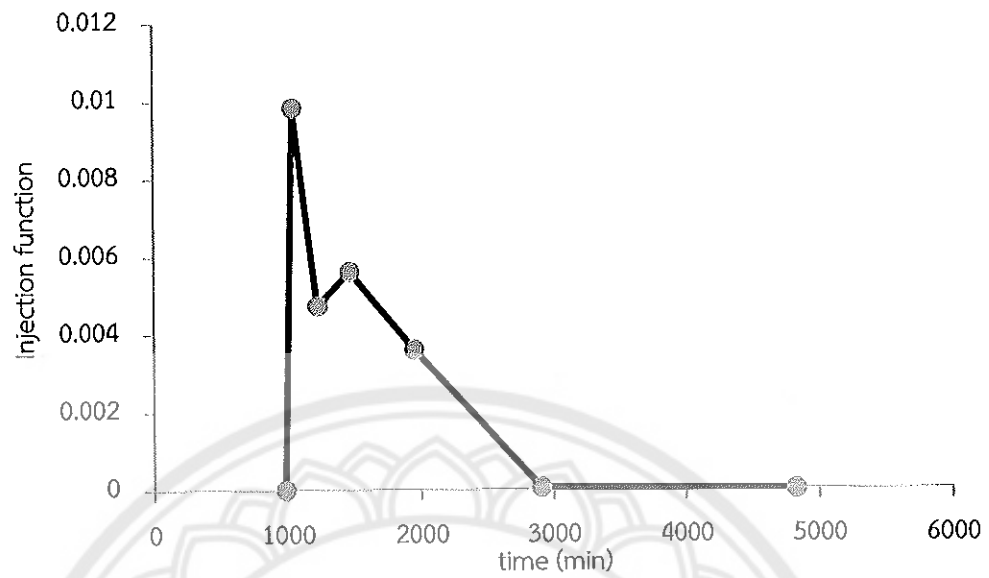
ภาพ 74 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุออกซิเจนที่ระดับพลังงาน 14.293 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 541.871 นาที



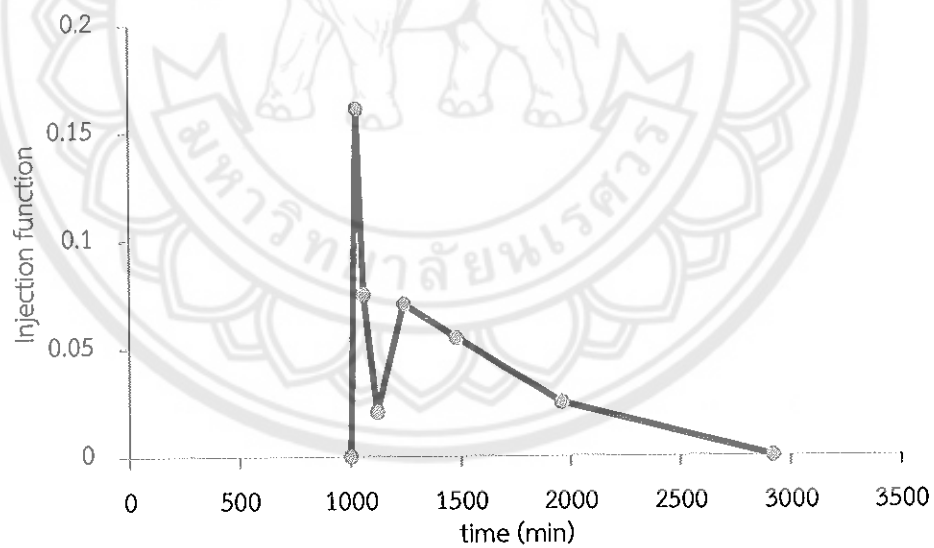
ภาพ 75 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุออกซิเจนที่ระดับพลังงาน 18.104 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 626.245 นาที



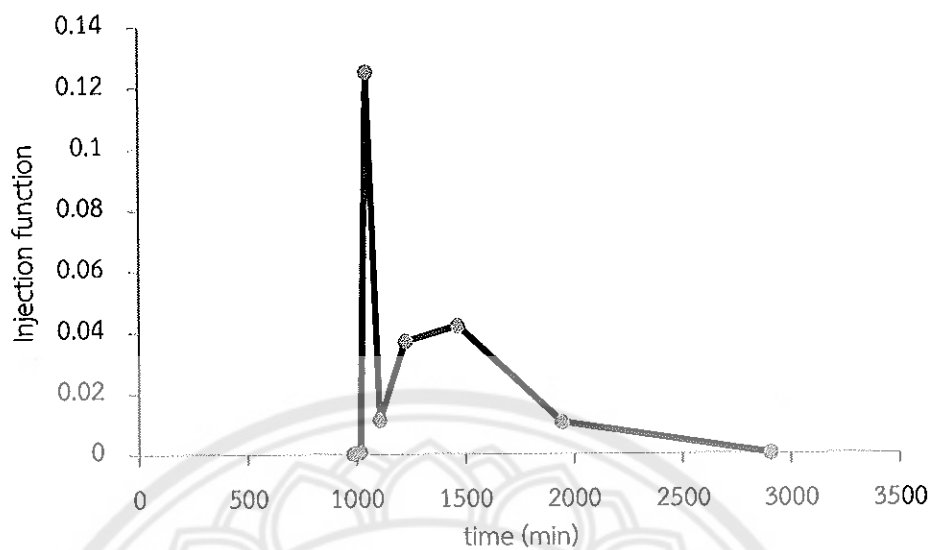
ภาพ 76 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุออกซิเจนที่ระดับพลังงาน 24.838 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 585.787 นาที



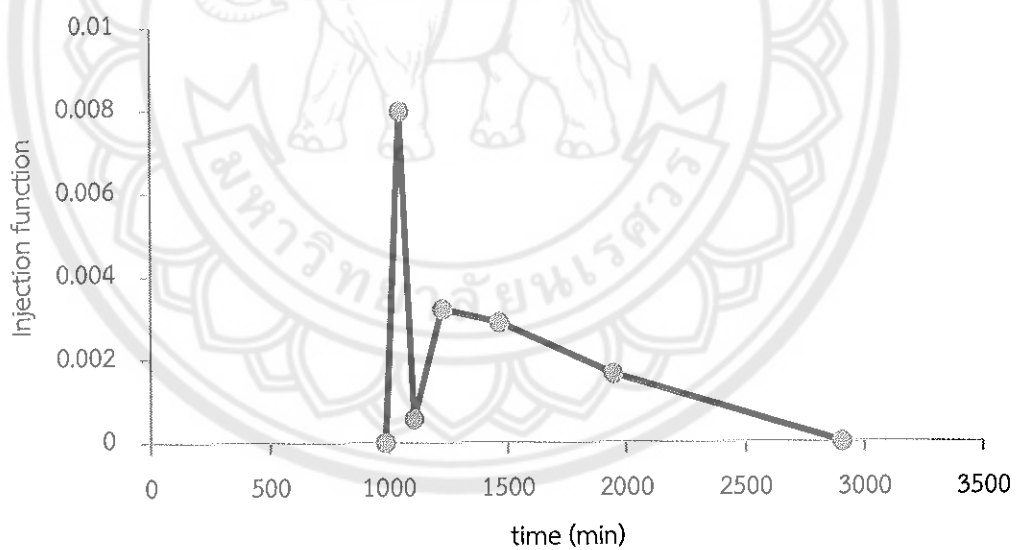
ภาพ 77 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุออกซิเจนที่ระดับพลังงาน 33.847 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 326.472 นาที



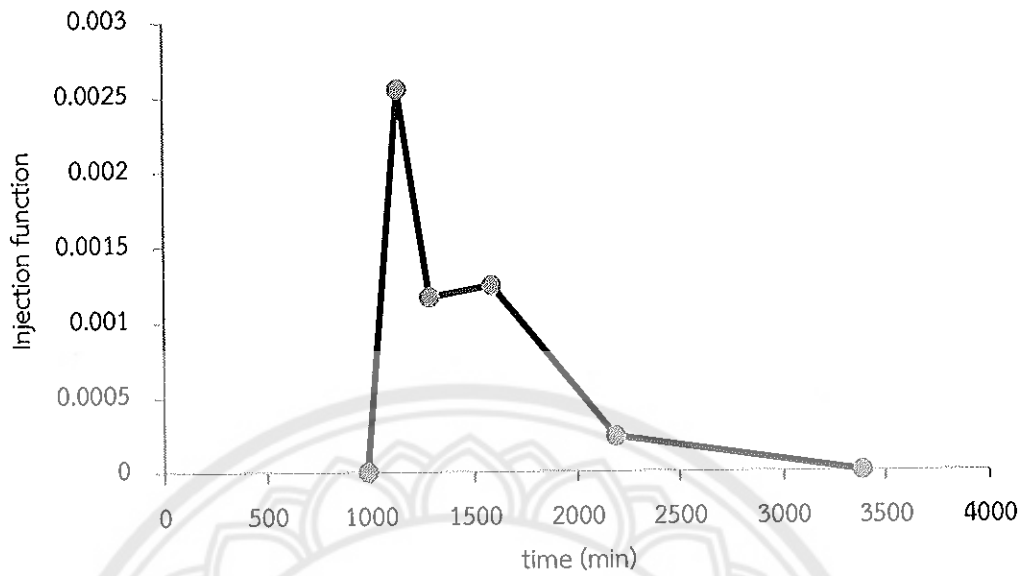
ภาพ 78 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุออกซิเจนที่ระดับพลังงาน 49.832 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 201.918 นาที



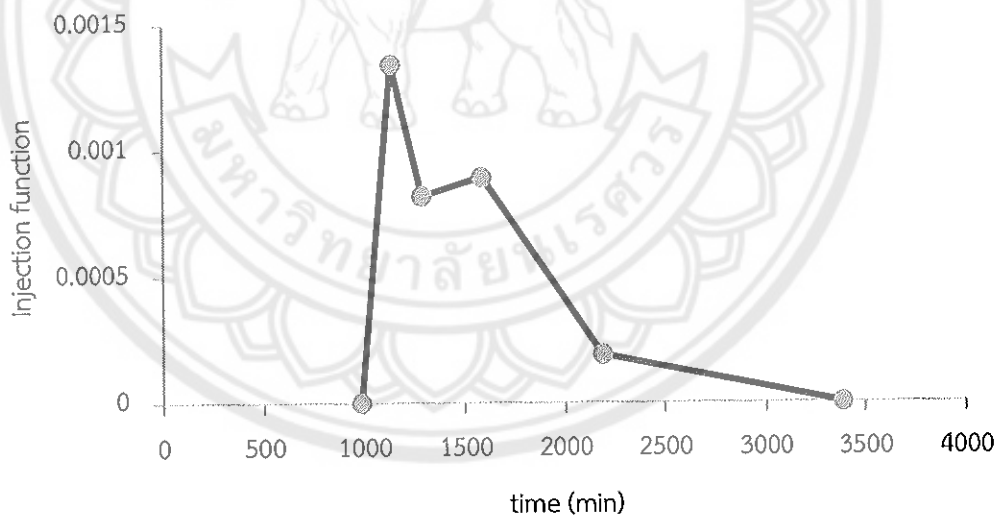
ภาพ 79 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุออกซิเจนที่ระดับพลังงาน 75.665 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 223.697 นาที



ภาพ 80 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุเหล็กที่ระดับพลังงาน 13.002 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 317.979 นาที

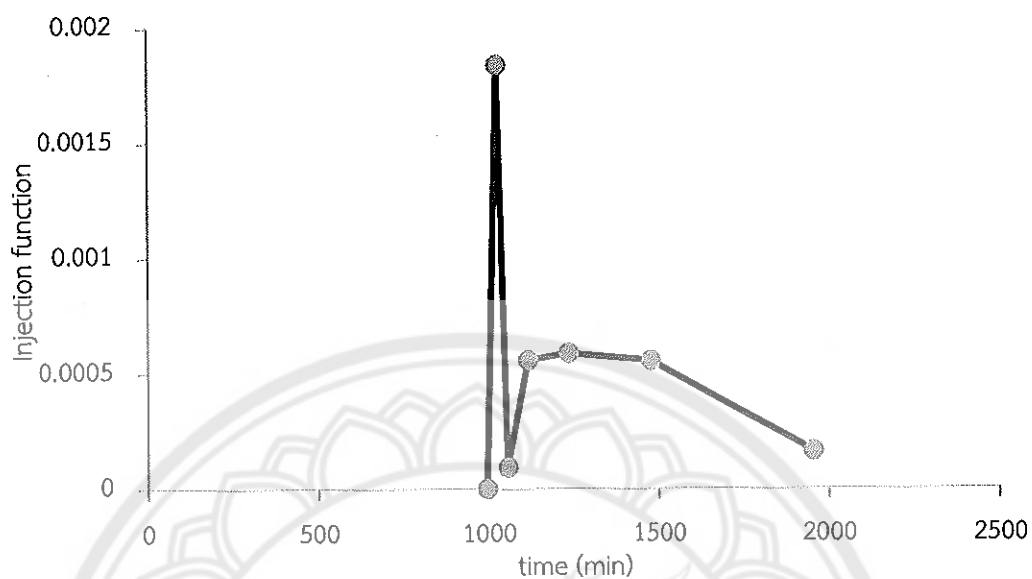


ภาพ 81 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุหนักที่ระดับพลังงาน 18.461 MeV/n  
มีระยะเวลาการปลดปล่อย 403.386 นาที

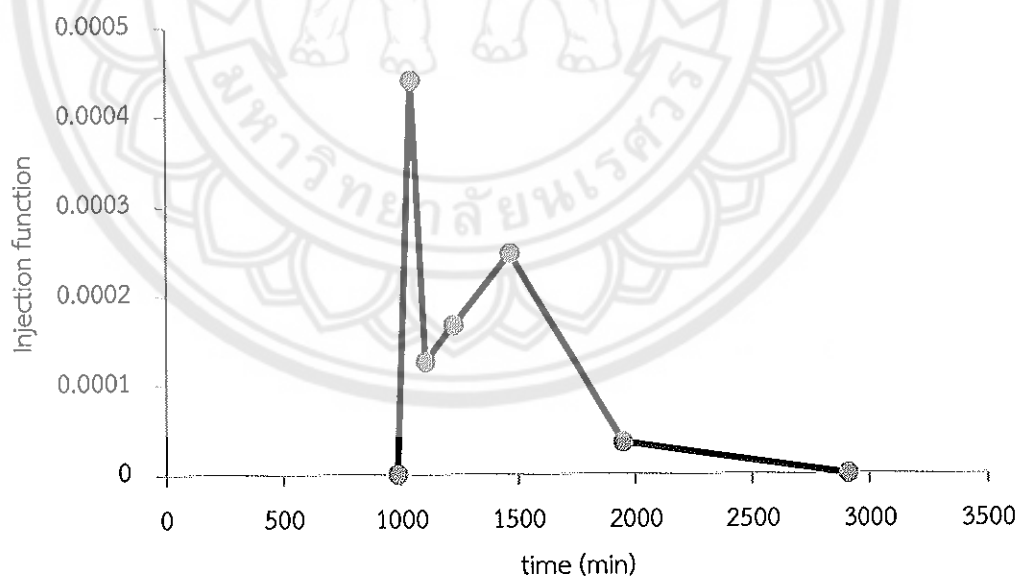


ภาพ 82 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุหนักที่ระดับพลังงาน 23.796 MeV/n  
มีระยะเวลาการปลดปล่อย 341.621 นาที

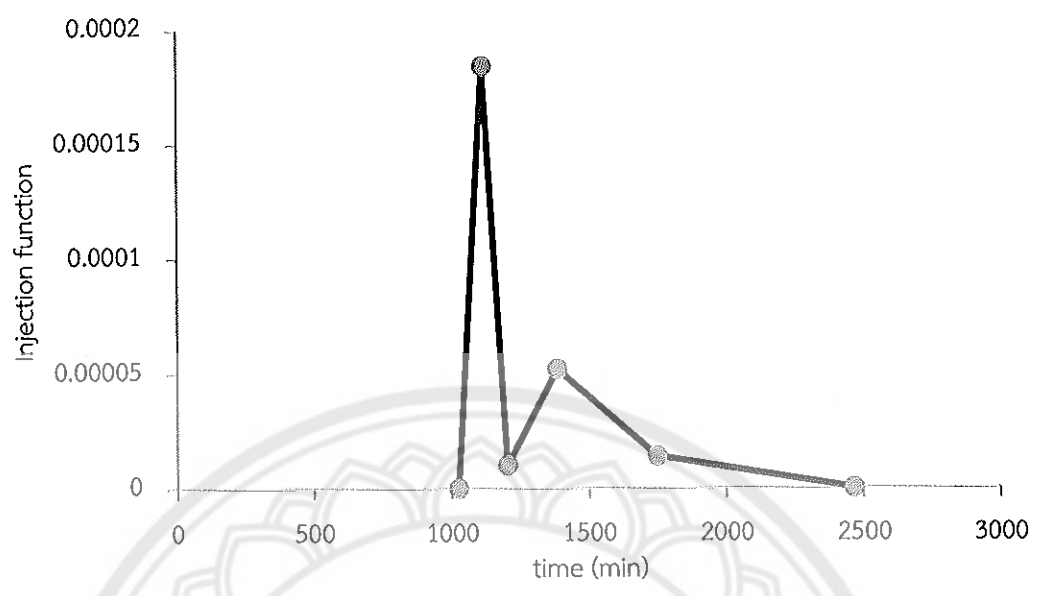




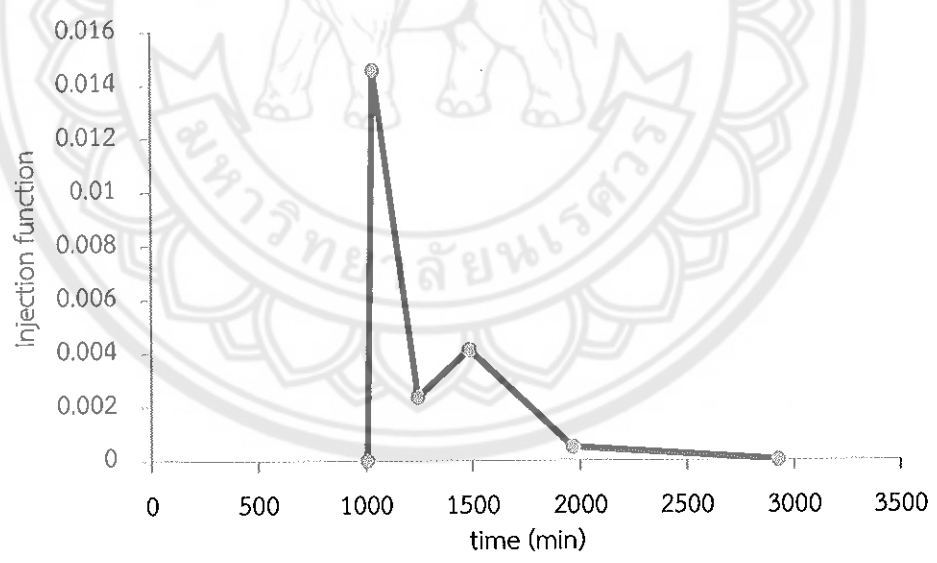
ภาพ 83 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุเหล็กที่ระดับพลังงาน 30.902 MeV/n  
มีระยะเวลาการปลดปล่อย 327.109 นาที



ภาพ 84 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุเหล็กที่ระดับพลังงาน 43.544 MeV/n  
มีระยะเวลาการปลดปล่อย 329.150 นาที



ภาพ 85 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุเหล็กที่ระดับพลังงาน 60.559 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 213.307 นาที



ภาพ 86 แสดงผลสามเหลี่ยมการปลดปล่อยของธาตุเหล็กที่ระดับพลังงาน 90.852 MeV/n มีระยะเวลาการปลดปล่อย 201.174 นาที