

**เอกสารประกอบการประชุม
นำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ
ครั้งที่ 21**

**The Proceeding of
The 21st National Graduate Research
Conference**

จัดโดย

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิต

26 พฤษภาคม 2554

การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ในวัฏจักรที่ 23 และ 24

THE PROPAGATION ANALYSIS OF THE SOLAR ENERGETIC PARTICLE
IN DURING 23 AND 24 SOLAR CYCLES

วัชร อันทจักร¹ กาญจนา บุญทรัพย์² และ ศศ. ดร. ทิราณี จำล้าเลิศ³

บทคัดย่อ

การระเบิดบนดวงอาทิตย์ส่งผลกระทบต่อโลกทั้งการสื่อสารและการปฏิบัติงานของดาวเทียมและนักบินอวกาศ จากงานวิจัยของ Uwahoro, J. พบว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์เกิดขึ้นเป็นวัฏจักรในทุกๆ 11 ปี และในปัจจุบันดวงอาทิตย์อยู่ในรอบวัฏจักรที่ 24 งานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยเลือกวิเคราะห์การระเบิดที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2543 และวันที่ 3-5 เมษายน 2553 ซึ่งเป็นเหตุการณ์การระเบิดในวัฏจักรที่ 23 และ 24 ตามลำดับ วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลกโดยใช้สมการขนส่งของ Ruffolo 1995 (พ.ศ. 2538) จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข และหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคโดยการเปรียบเทียบข้อมูลด้วยวิธี Linear Least Square Fitting พบว่าการระเบิดในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2543 ได้ระยะทางอิสระเฉลี่ยสูงกว่า 1 AU ซึ่งมีความรุนแรงของเหตุการณ์มากกว่าในวันที่ 5 เมษายน 2553 ที่มีระยะทางอิสระเฉลี่ยต่ำกว่า 1 AU เพราะการระเบิดในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2543 มีการตรวจพบคลื่นกระแทกเกิดขึ้น ซึ่งใช้เวลาในการปลดปล่อยอนุภาคเป็นเวลา 22 นาที งานวิจัยในครั้งนี้ทำให้ทราบระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคสามารถทำนายเหตุการณ์ที่อาจจะเกิดขึ้นและเตือนภัยล่วงหน้า พร้อมทั้งหาแนวทางป้องกัน และแก้ไขได้ทันทั่วทั้ง

คำสำคัญ : วัฏจักรดวงอาทิตย์ การปะทุบนดวงอาทิตย์ คลื่นกระแทก อนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์

ABSTRACT

The explosions on the Sun affect the Earth satellite communication systems and the operations of astronauts. According to the research of Uwahoro, J., the phenomenon on the Sun occurs every 11 years. The sun is currently staying in the 24th solar cycle. In this research, the writers analyze the explosions on the sun on November 24, 2000 and on April 3-5, 2010 which are the explosions of the 23rd and 24th solar cycles, respectively. Using the transport equation of Ruffolo 1995, we simulate the solar particle propagation using numerical techniques, and find the time of particle released using the technique of piecewise "Linear Least Squares Fitting". We have found that the mean free path of the solar event on November 24th, 2000 was more than 1 AU, whereas it was less than 1 AU for the solar event on April 5th, 2010. The shock waves with the time of particle release 22 minutes has also been detected. From this research data, we knew the release time of the particle events which can be used to predict situations that may occur and give the early warning.

KEYWORDS : SOLAR CYCLE, SOLAR FLARE, SHOCK WAVE, SOLAR ENERGETIC PARTICLE

¹นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก

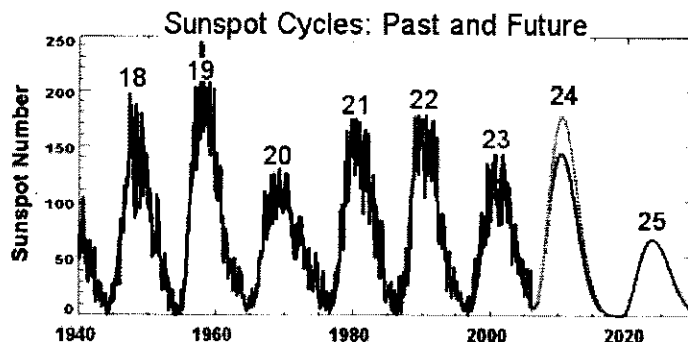
²นิสิตปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก

³อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก

1. บทนำ

ดวงอาทิตย์เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อโลก โดยปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ ปรากฏการณ์การระเบิดอย่างรุนแรงบนดวงอาทิตย์ (solar flare) เป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อโลก โดยปรากฏการณ์นี้จะมีการปลดปล่อยรังสีและอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่มาถึงโลกโดยเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ คือ ปรากฏการณ์แสงเหนือแสงใต้ เกิดการเปลี่ยนแปลงอนุภาคที่มีประจุในชั้นบรรยากาศทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบสื่อสารส่งผลกระทบต่อดาวเทียม ยานอวกาศและนักบินอวกาศที่ทำงานนอกโลกเมื่อปะทะกับอนุภาคพลังงานสูงโดยตรงการเกิดปรากฏการณ์บนดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เพิ่มขึ้นและลดลงอยู่เสมออย่างเป็นวัฏจักร ปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงบนดวงอาทิตย์กำลังเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นของวัฏจักรที่ 24 ซึ่งกำลังเป็นที่สนใจว่าในรอบวัฏจักรที่ 24 นี้ดวงอาทิตย์จะส่งความรุนแรงมายังโลกมากน้อยเพียงใด

วัฏจักรการปะทุบนดวงอาทิตย์ครั้งที่ผ่านมามีวัฏจักรที่ 23 (ปี ค.ศ. 1997-2008) และปัจจุบันกำลังเข้าสู่ช่วงเริ่มต้นของวัฏจักรที่ 24 ในงานวิจัยครั้งนี้จึงเลือกวิเคราะห์เหตุการณ์การปะทุในช่วงเริ่มต้นของวัฏจักรที่ 23 และการปะทุที่มีความรุนแรงในวัฏจักรที่ 24 โดยการวิเคราะห์ข้อมูลจริงที่เกิดขึ้นจากการปะทุบนดวงอาทิตย์ นำมาใช้เป็นค่าตั้งต้นในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงเพื่อหาค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยที่อนุภาคพลังงานสูงสามารถเคลื่อนที่ไปได้ตามเส้นสนามแม่เหล็กได้ไกลที่สุดก่อนที่จะเกิดการกระเจิง โดยวิธีการพีดีเปรียบเทียบผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยสมการการเคลื่อนที่เปรียบเทียบกับข้อมูลค่าความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาที่เกิดขึ้นจริงจากยานอวกาศ โดยงานวิจัยนี้ใช้สมการขนส่งของ Ruffolo 1995, 1998 อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคและจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (finite different method) วิเคราะห์ผลของเหตุการณ์ที่เลือกเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับการระเบิดบนดวงอาทิตย์ในช่วงรอบวัฏจักรที่ผ่านมา



ภาพที่ 1 วัฏจักรที่ผ่านมาและปัจจุบันบนดวงอาทิตย์

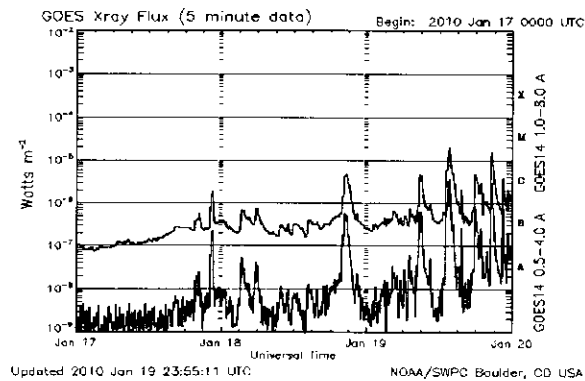
ที่มา <http://board.palungjit.com/attachment.php?attachmentid=286746&d=1204279493>

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกปลดปล่อยมาจากดวงอาทิตย์ โดยใช้สมการขนส่งของ Ruffolo 1995, 1998 พร้อมทั้งจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงโดยใช้ข้อมูลพื้นฐานจากการระเบิดที่เกิดขึ้นจริงบนดวงอาทิตย์ที่วัดได้จากเครื่องมือ SIS (The Solar Isotope Spectrometer) ซึ่งทำการวัดอนุภาคที่มีพลังงานในช่วง $\sim 10-100$ MeV/n เครื่องมือ ULEIS (Ultra Low Isotope Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดและศึกษาอนุภาคพลังงานต่ำที่ปลดปล่อยออกจากดวงอาทิตย์ ที่มีระดับพลังงานอยู่ในช่วง 0.02-14 MeV/n โดย

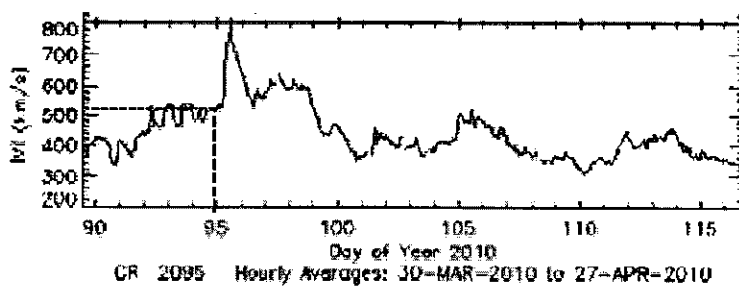
อุปกรณ์ทั้งสองติดตั้งบนยานอวกาศ ACE (The Advanced Composition Explorer) โดยที่หัววัดของทั้งสองอุปกรณ์จะทำการวัดอนุภาคที่ผ่านเข้ามาเมื่อเกิดเหตุการณ์การปะทุเกิดขึ้นและเก็บข้อมูลอยู่ในรูปของความหนาแน่นของอนุภาคที่ผ่านหัววัด ที่ระดับพลังงานต่างๆ ตามเวลา และค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่หัววัด

งานวิจัยนี้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มายังโลกในช่วงเริ่มต้นวัฏจักรที่ 24 และเหตุการณ์การระเบิดบนดวงอาทิตย์ที่มีความรุนแรงในรอบวัฏจักรที่ 23 ของดวงอาทิตย์ เราจึงเลือกวิเคราะห์เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงบนดวงอาทิตย์ในช่วงเริ่มต้นวัฏจักรที่ 23 คือวันที่ 24 พฤศจิกายน 2543 และช่วงเริ่มต้นวัฏจักรที่ 24 ได้เลือกวันที่ 19 มกราคม 2553 และวันที่ 5 เมษายน 2553 โดยการเลือกเหตุการณ์ทั้ง 3 เหตุการณ์นี้ ผู้วิจัยวิเคราะห์จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยเหตุการณ์การปะทุในวันที่ 19 มกราคม 2553 พบว่ามีการปะทุบนดวงอาทิตย์ในระดับความเข้มรังสีเอกซ์ที่ M Class และต่อมากหลังจากนั้น 24 ชั่วโมงก็พบการปะทุที่ระดับ M class อีก 4 ครั้งที่ทำเน้างเดิม (ความเข้มรังสีเอกซ์ระดับ M เป็นระดับความรุนแรงปานกลาง โดยทั่วไปจะปลดปล่อยคลื่นวิทยุขนาดสั้น โดยมีความรุนแรงอยู่ในช่วง $10^{-5} - 10^{-4} \text{ W/m}^2$) แสดงดังภาพที่ 2



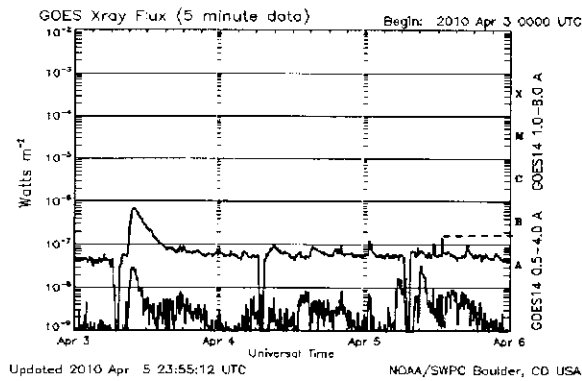
ภาพที่ 2 แสดงการปลดปล่อยรังสีเอกซ์วันที่ 19 มกราคม 2553 ที่ได้จากยานอวกาศ GOSE

สำหรับเหตุการณ์การปะทุในวันที่ 5 เมษายน 2553 พบว่าหลังจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ทำให้เกิดความรุนแรงของสนามแม่เหล็กสูงในระดับ K7 ซึ่งเป็นระดับที่สามารถส่งผลกระทบต่อมายังโลกได้ และความเร็วมสุริยะหลังเกิดการปะทุสูงถึง 800 กิโลเมตรต่อวินาทีดังแสดงในรูปที่ 3 (ความเร็วมสุริยะภาวะปกติมีค่าประมาณ 400 กิโลเมตรต่อวินาที) และระดับความรุนแรงของการปะทุอยู่ที่ระดับ B1-2 ดังแสดงข้อมูลในภาพที่ 4



ภาพที่ 3 กราฟแสดงค่าความเร็วมสุริยะของเหตุการณ์การปะทุที่ผิวของดวงอาทิตย์ วันที่ 5 เมษายน 2553 มีความเร็วมสุริยะสูงสุดประมาณ 800 km/s

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาของการปะทุทั้ง 2 เหตุการณ์พบว่าลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในการปะทุวันที่ 19 มกราคม 2553 มีการกระจายตัวของอนุภาคไม่สมมาตรและมีความคลาดเคลื่อนสูง จนไม่สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในวันที่ 5 เมษายน 2553 โดยจัดเตรียมข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาในแต่ละระดับพลังงาน



ภาพที่ 4 แสดงการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ในวันที่ 5 เมษายน 2553 ที่ตรวจวัดได้จากยานอวกาศ GOSE

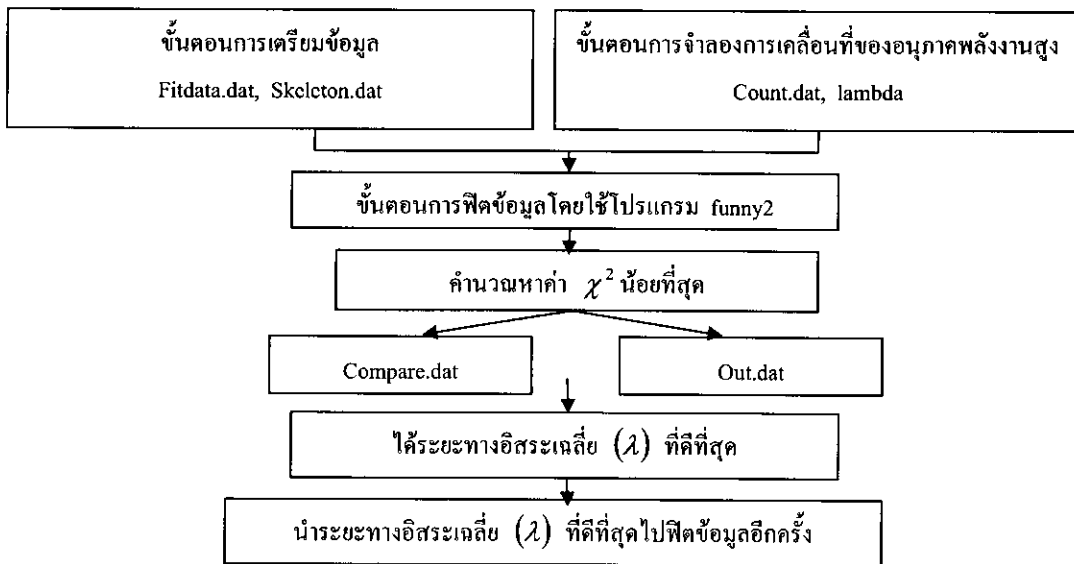
ผู้วิจัยวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกปลดปล่อยมาจากดวงอาทิตย์ โดยใช้สมการขนส่งของ Ruffolo 1995, 1998 ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูง โดยสมการที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นดังสมการ

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

เมื่อ F คือ ฟลักซ์ของการกระจายตัวของอนุภาค, t คือ เวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลก (min), Z คือ ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์มายังโลก (AU), $\mu = \cos \theta$ คือ ค่าแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค, θ คือ มุมระหว่างทิศของความเร็วกับทิศทางการเคลื่อนที่, P คือ โมเมนต์ัมของอนุภาค (MeV/n), $\varphi(\mu)$ คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงของอนุภาคที่กระทำกับเส้นสนามแม่เหล็ก, v คือ ความเร็วของอนุภาค (AU/min), v_{sw} คือ ความเร็วของลมสุริยะ (AU/min), Ψ คือ มุมระหว่างทิศทางของอนุภาคตามแนวรัศมีกับเวกเตอร์ทิศทางเส้นสนามแม่เหล็ก (degree), c คือ ความเร็วแสง มีค่า 0.1202 AU/min, L(z) คือ ความยาวของเส้น

สนามแม่เหล็กที่บานออกตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น; $\frac{1}{L} = \frac{dB}{Bdz} \cdot \frac{E'}{E}$ คือ อัตราส่วนของพลังงานรวมของอนุภาคในกรอบ
ลมสุริยะกับกรอบหยุดนิ่ง

ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่จะให้ความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาที่ระยะทางอิสระเฉลี่ยค่าต่างๆ และ
ทำการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากข้อมูลจริงจาก
ยานอวกาศ โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบข้อมูลแบบกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุดแบบสามเหลี่ยม (Piece Wise Linear
Least Squares Fitting) เพื่อหาระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุดที่อนุภาคเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลก (Ruffolo et. al.,
1998) โดยแผนผังการดำเนินงานแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แผนภาพแสดงขั้นตอนการฟิตข้อมูล

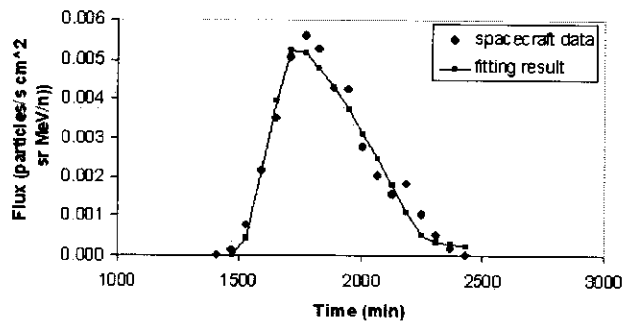
3. ผลการวิจัยอภิปรายผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกเหตุการณ์การปะทุที่เกิดขึ้นจริงบนดวงอาทิตย์ 2 เหตุการณ์คือ การปะทุที่มีความ
รุนแรงสูงในรอบวัฏจักรที่ 23 ในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2543 โดยเริ่มเกิดการปะทุที่เวลา 14.51 UT ความเร็วลม
สุริยะ 316.89 กิโลเมตรต่อวินาที ตรวจพบคลื่นกระแทกที่เวลา 15.12 UT ระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์ขณะเกิด
การปะทุที่ระดับ X2.3 และเหตุการณ์ที่สองคือการปะทุในช่วงเริ่มต้นวัฏจักรที่ 24 ในวันที่ 3-5 เมษายน 2553 เกิด
การปะทุที่เวลา 08.00 UT ความเร็วลมสุริยะที่ 631.9 กิโลเมตรต่อวินาที ระดับความรุนแรงของรังสีเอกซ์ที่ B1 ไม่
ตรวจพบคลื่นกระแทกในขณะที่เกิดการปะทุ จากการวิเคราะห์ลักษณะการสลายตัวของอนุภาคพลังงานสูงจากข้อมูล
อนุภาคที่ปลดปล่อยตามเวลาขณะเกิดการระเบิดบนดวงอาทิตย์โดยการหาค่าความชันระหว่างค่าโมเมนต์ของอนุภาค
และค่าสเปกตรัมของอนุภาคได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงความชันระหว่างค่าโมเมนต์และค่าสเปกตรัมของอนุภาค

ธาตุ	วันที่ 3 – 5 เมษายน 2553	วันที่ 24 พฤศจิกายน 2543
3He	-5.403	-
4He	-5.911	-
C	-	-6.6771
O	-5.878	-5.9718
Fe	-5.716	-6.3303
Ne-s	-6.257	-
H	-4.975	-

การปะทุในวันที่ 5 เมษายน 2553 ใช้ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาค He ที่ระดับพลังงานต่างๆ จากอุปกรณ์ SIS ตรวจสอบสนามแม่เหล็กที่มีความรุนแรงในระดับที่โลกสามารถรับรู้ได้ที่ระดับ Kp-7 (Kp เป็นเกณฑ์แสดงความรุนแรงของพายุแม่เหล็ก แบ่งเป็น Kp5 = Minor, Kp6 = Moderate, Kp7 = Strong, Kp8 = Severe และ Kp9 = Extreme) และเกิดแสงเหนือแสงใต้ในวันที่ 6 เมษายน 2010 ที่เวลา 01:35 UT และเมื่อทำการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคเพื่อนำผลการจำลองการเคลื่อนที่มาพิคเปรียบเทียบกับข้อมูลความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาที่วัดจริงจากยานอวกาศได้ระยะทางอิสระเฉลี่ยที่อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กได้ไกลสุดก่อนที่จะกระเจิงเนื่องจากความไม่เรียบของเส้นสนามแม่เหล็กของอนุภาค He ที่ระดับพลังงาน 4.085, 5.435 และ 6.71 MeV/n มีค่า 0.936, 1.111 และ 1.147 AU และตัวอย่างผลการพิคเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการกระจายตัวของอนุภาคจริงดังแสดงในภาพที่ 6 ในขณะที่ระยะทางอิสระเฉลี่ยในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2543 สำหรับอนุภาค He และ C มีค่าเท่ากับ 0.298381 – 0.990907 AU และ 0.606462 – 1.126001 AU ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2



ภาพที่ 6 แสดงผลการพิคข้อมูลอนุภาค He ระดับพลังงาน 4.085 MeV/n ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.936 AU

ตารางที่ 2 แสดงระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุดที่ได้จากการพิคข้อมูล

ธาตุ	พลังงาน (MeV/n)		ระยะทางอิสระเฉลี่ย, λ (AU)	
	E_{min}	E_{max}	วันที่ 3 – 5 เมษายน 2553	วันที่ 24 พฤศจิกายน 2543
He	3.43	4.74	0.936	0.364176
	4.74	6.13	1.111	0.386818
	6.13	7.29	1.147	0.298381
	7.29	9.72	-	0.590781
	9.72	13.59	-	0.704951
	13.59	17.96	-	0.990907
	17.96	29.35	-	0.937724
C	6.43	8.62	-	0.606462
	11.23	13.40	-	0.911235
	13.40	17.94	-	1.110653
	17.94	25.12	-	1.126001

4. สรุปผลการวิจัย

การผลการวิเคราะห์ค่าความชันที่แสดงการสลายตัวของอนุภาค โดยที่ค่าความชันที่มากแสดงว่าอนุภาคเกิดการเพิ่มขึ้นและสลายตัวอย่างรวดเร็ว ถูกรบกวนจากตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์น้อย และเมื่อวิเคราะห์ร่วมกับระยะทางอิสระเฉลี่ยที่แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงไปตามเส้นสนามแม่เหล็กก่อนที่จะกระเจิงเนื่องจากความไม่เรียบของเส้นสนามแม่เหล็ก โดยที่ค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยยังมีค่าสูงแสดงว่าอนุภาคเกิดการกระเจิงน้อย มีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ไกล ผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้พบว่าแนวโน้มของระยะทางอิสระเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับพลังงานเพิ่มขึ้น แสดงว่าอนุภาคเกิดการฟุ้งกระจายในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์น้อย แสดงว่าอนุภาคเมื่อมีพลังงานสูงขึ้นไปตามเส้นสนามแม่เหล็กได้มากกว่าอนุภาคพลังงานต่ำ อนุภาคที่มีพลังงานต่ำจะเกิดการฟุ้งในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ได้มากกว่าอนุภาคพลังงานสูง และจากการวิเคราะห์การปะทุในช่วงเริ่มต้นของวัฏจักรที่ 24 บนดวงอาทิตย์ซึ่งพบการเปลี่ยนแปลงจากจำนวนจุดดำที่เกิดขึ้นและจากการบันทึกข้อมูลที่ได้จากยานอวกาศเป็นครั้งแรก พบว่าเหตุการณ์ยังไม่รุนแรงเพราะเราพบเฉพาะอนุภาคจากอุปกรณ์ที่วัดอนุภาคที่มีระดับพลังงานน้อยกว่า 10 MeV/n ในขณะที่การปะทุในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2543 มีความรุนแรงสูงสามารถตรวจพบอนุภาคในหัววัดที่วัดระดับพลังงานสูงตั้งแต่ 10 MeV/n ขึ้นไป อีกทั้งยังพบคลื่นกระแทกเกิดขึ้นตามหลังการปะทุจึงส่งผลให้เกิดความรุนแรงของความเข้มของสนามแม่เหล็กในระดับที่โลกสามารถรับได้ (K-7)

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ งบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปี 2553 ที่สนับสนุนงบประมาณในการวิจัย, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สำหรับสถานที่และคอมพิวเตอร์ในการประมวลผล และศาสตราจารย์ ดร.เควิด รูฟโฟโล มหาวิทยาลัยมหิดล สำหรับสมการการเคลื่อนที่และโปรแกรมการจำลอง

6. เอกสารอ้างอิง

- Pongkitiwanchakul, P., Ruffolo, D. "Sawtooth mechanism of particle acceleration at shocks in random magnetic fields." *Astrophysical Journal*. (2005) : 194–215.
- Ruffolo, D. "Effect of adiabatic deceleration on the focused transport of solar Cosmic rays." *Astrophysics Journal*. 2 (1995) : 861-874.
- Ruffolo, D. Khumlumlert, T. & Youngdec, W. "Deconvolution of interplanetary transport of solar energetic particles." *Journal of Geophysical Research*, 9 (1998) : 20, 591-20, 602.
- Ruffolo, D., Tooprakai, P., Rujiwarodom, M., Khumlumlert, T., Wechakama, M., Bieber, J. W., Evenson P., and Pyle, R. "Relativistic solar protons on 1989 october 22: injection and transport along both legs of a closed interplanetary magnetic loop." *Astrophysical Journal*. (2005) : 1186–1205.
- Saiz, A., Ruffolo, D., Bieber, J. W., Evenson, P., and Pyle, R. "Anisotropy signatures of solar energetic particle transport in a closed interplanetary magnetic loop." *Astrophysical Journal*. (2007) : 650-658.
- Uwamahoro, J., AnneMcKinnell, L., Cilliers, P.J. "Forecasting solar cycle 24 using neural networks" *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 71 (2009) 569–574.