

## บทที่ 1

### บทนำ

งานวิจัยเรื่อง อนุภาคพลังงานสูงที่มากกระทบโลกจากอวกาศ (An Energetic Particle Impacting Earth from Space) นี้ เป็นการศึกษาอนุภาคที่เคลื่อนที่จากอวกาศมายังโลกที่สามารถตรวจวัดได้จากยานอวกาศที่ปฏิบัติงานอยู่นอกโลก โดยอนุภาคเหล่านี้สามารถส่งผลกระทบต่างๆ ให้แก่โลกของเราได้ โดยอนุภาคที่มาจากนอกโลกที่สำคัญมาจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ และในปัจจุบันนี้ดวงอาทิตย์กำลังเข้าสู่รอบการเปลี่ยนแปลงรอบใหม่ หรือที่เรียกว่าวัฏจักรดวงอาทิตย์ (solar cycle) โดยจะมีช่วงที่ดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดในช่วงปี พ.ศ. 2555 และ 2556 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงบนดวงอาทิตย์ที่เห็นได้ชัดคือการระเบิดบนดวงอาทิตย์ จึงเป็นที่มาของการศึกษาอนุภาคที่ส่งผลกระทบต่อโลก

### ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันผู้คนต่างให้ความสนใจกับปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าปรากฏการณ์เหล่านั้นส่งผลกระทบต่อโลก และเมื่อวันที่ 10 กันยายน 2551 ที่ผ่านมา ได้มีการทดลองครั้งยิ่งใหญ่จากองค์การวิจัยนิวเคลียร์ (European Organization for Nuclear Research) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าว่าเอกภพเกิดขึ้นได้อย่างไร ซึ่งใช้งบประมาณสูงถึง 260,000 ล้านบาท โดยให้อนุภาคโปรตอนวิ่งเข้าชนกัน ด้วยความเร็วเกือบเท่าความเร็วแสง ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวเป็นที่วิเศษและพูดถึงกันมาก เนื่องจากคนส่วนใหญ่กลัวถึงภัยหรือผลกระทบที่จะตามมา ดังนั้นถ้าเราสามารถเข้าใจปรากฏการณ์ต่างๆ ในธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับอนุภาคพลังงานสูงที่อยู่นอกโลก และการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากนอกโลกเข้ามาปะทะกับโลกแล้ว เราก็จะเข้าใจและหาทางป้องกันได้อย่างถูกต้องและทันเวลา ผู้วิจัยและคณะเล็งเห็นเห็นความสำคัญในส่วนนี้ จึงได้ทำการศึกษาอนุภาคพลังงานสูงที่สามารถเคลื่อนที่เข้ามากระทบกับโลกของเรา โดยผลการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงที่เคลื่อนที่เข้ามากระทบโลกที่เราพบได้แก่ การเกิดปรากฏการณ์แสงเหนือแสงใต้ (Aurora) ที่บริเวณขั้วโลก การเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องขณะที่เกิดพายุสุริยะสำหรับโรงไฟฟ้าที่ตั้งอยู่ในบริเวณขั้วโลก การขัดข้องของระบบสื่อสารบนเครื่องบิน การขาดการติดต่อกับดาวเทียมที่โคจรอยู่นอกโลก หรือผลกระทบต่อการทำงานของนักบินอวกาศที่ปฏิบัติงานอยู่นอกโลก เหล่านี้เป็นผลที่จะเกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากอวกาศเข้ามาปะทะโลก ดังนั้นถ้าเราสามารถเข้าใจในพฤติกรรม การเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านี้ เราจะสามารถวิเคราะห์และแจ้งการเตือนภัยล่วงหน้าแก่หน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องอาทิเช่นผลความเสียหายที่มีต่อดาวเทียม ระบบไฟฟ้าของประเทศต่างๆ การติดต่อสื่อสารกับเครื่องบิน การปฏิบัติงานของนักบินอวกาศ เพื่อที่จะสามารถวางแผนแก้ไขได้

ทันเวลาและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น คณะผู้วิจัยจึงจะทำการศึกษานิวภาคพลังงานสูงที่ตรวจพบได้จากสถานีอวกาศทั้งที่ติดตั้งบนพื้นโลก และที่ติดตั้งหรือปฏิบัติงานอยู่นอกโลก โดยทำการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคพร้อมทั้งทำการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงเทียบกับสมการการชนสัง โดยวิเคราะห์รวมถึงผลของสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค และในงานวิจัยนี้จะเน้นการศึกษาข้อมูลอนุภาคที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดอนุภาคบนพื้นโลก หรือสถานีตรวจวัดนิวตรอน (Neutron Monitors) ซึ่งเป็นสถานีตรวจวัดอนุภาคที่ติดตั้งตามจุดต่างๆ บนโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง 1 ใน สถานีเหล่านั้นมีสถานีตรวจวัดนิวตรอนที่ติดตั้งในประเทศไทย ณ ดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นสถานีตรวจวัดนิวตรอนที่สามารถวัดอนุภาคที่มีพลังงานสูงสุดคือประมาณ 17 GV ที่เคลื่อนที่เข้ามายังโลกได้ ดังนั้นการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้จึงเป็นการศึกษานิวภาคที่มีพลังงานสูงที่สุดที่เคลื่อนที่มาประทะโลก และผลการศึกษาที่ได้จะสามารถแจ้งผลการเตือนภัยล่วงหน้าถึงผลกระทบที่จะมีต่อโลกได้ 4-6 ชั่วโมง ซึ่งจะเร็วกว่าที่องค์การ NASA (National Aeronautics and Space Administration) ใช้เตือนภัยจากการศึกษาข้อมูลจากยานอวกาศนอกโลก ACE (The Advanced Composition Explorer) ซึ่งเตือนภัยได้ล่วงหน้า 1 ชั่วโมง งานวิจัยนี้จึงเป็นข้อมูลที่น่าสนใจและเกี่ยวข้องกับงานด้านโทรคมนาคมและความมั่นคงของประเทศ

#### วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. สามารถวิเคราะห์และเข้าใจพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากนอกโลกที่เคลื่อนที่เข้ามายังโลกได้โดยการศึกษาข้อมูลอนุภาคพลังงานสูงที่ตรวจวัดได้จากยานอวกาศภายนอกโลก
2. สามารถเข้าใจสภาพแวดล้อมในอวกาศที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากนอกโลกเข้ามายังโลกได้
3. สามารถเข้าใจและสามารถเลือกใช้ข้อมูลอนุภาคพลังงานสูงที่ตรวจวัดได้จากสถานีตรวจวัดอนุภาคบนพื้นโลก หรือสถานีตรวจวัดนิวตรอน ณ จุดต่างๆ ที่ติดตั้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อเป็นการป้องกันภัยและความเสียหายที่จะเกิดขึ้นแก่อุปกรณ์และการปฏิบัติงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งบนโลกและนอกโลก
4. สามารถพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพในการจำลองและวิเคราะห์ผลการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงมายังโลกได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

### ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลอนุภาคพลังงานสูงที่ตรวจวัดได้จริงจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่ปฏิบัติงานอยู่นอกโลก
2. วิเคราะห์ผลของสภาพแวดล้อมในอวกาศหรือตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงหรือความแปรปรวนของข้อมูลที่วัดได้
3. วิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลอนุภาคพลังงานสูงที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอนที่ติดตั้งบนพื้นโลกตามจุดต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สถานีตรวจวัดนิวตรอนสิรินธร ในประเทศไทย
4. ปรับปรุงเทคนิคและวิธีการทางคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงที่มากกระทบโลกที่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทั้งที่ตรวจวัดนอกโลกและที่ติดตั้งบนพื้นโลก
5. วิเคราะห์ผลที่ได้ทั้งจากข้อมูลจริงที่ตรวจวัดได้และที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ มาใช้เป็นแนวทางในการเตือนภัยล่วงหน้า และเทียบกับวัฏจักรการเพิ่มจำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์

### ทฤษฎีสัมมูลฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

อนุภาคพลังงานสูงจากภายนอกโลกเคลื่อนที่เข้ามายังโลกได้มีการตรวจพบครั้งแรกจากการส่งบอลลู่นพร้อมทั้งเครื่องอิเล็กทรอนิกส์โคป ขึ้นไปบนท้องฟ้าและพบว่ายิ่งบอลลู่นลอยสูงขึ้นจำนวนอนุภาคที่ตรวจพบยังมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นแทนที่จะมีจำนวนลดลง การค้นพบว่ามีอนุภาคจากภายนอกโลกเคลื่อนที่เข้ามายังโลกนี้ เกิดขึ้นโดย วิกเตอร์ ฟรานซิส เฮสส์ (Victor Francis Hess) นักฟิสิกส์ชาวออสเตรีย - อเมริกัน ซึ่งเป็นที่มาของการค้นพบรังสีคอสมิก (Cosmic Ray) ซึ่งเป็นรังสีที่มาจากนอกโลก รังสีคอสมิกมีพลังงานสูงมากถึง 1020 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นรังสีที่อยู่นอกโลก (Primary cosmic rays) ส่วนใหญ่ประกอบด้วยอนุภาคโปรตอนถึง 90% นอกนั้นเป็นนิวคลีไอน์ของฮีเลียมและธาตุหนักต่างๆ เมื่ออนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่เข้ามาชนกับอนุภาคที่อยู่ในชั้นบรรยากาศโลก อนุภาคปฐมภูมิเหล่านี้จะแตกตัวเป็นอนุภาคต่างๆ ที่เรียกรังสีคอสมิกทุติยภูมิหรืออนุภาคทุติยภูมิ (Secondary cosmic rays) ได้แก่อนุภาคไพออน มิวออน นิวตรอน และรังสีแกมมา โดยอนุภาคทุติยภูมินี้จะลดจำนวนลงตามระดับความสูงที่เข้าสู่พื้นโลก อนุภาคเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่โลกได้ตามเส้นทางของสนามแม่เหล็กที่ห่อหุ้มโลก โดยจะเคลื่อนที่เข้ามาได้มากที่สุดตามบริเวณขั้วโลกซึ่งเป็นบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กโลกอยู่อย่างหนาแน่น อนุภาคเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อนักบินอวกาศที่ปฏิบัติงานอยู่ในอวกาศเนื่องจากจะได้รับปริมาณรังสีมากเกินไปที่กำหนดในขณะที่อนุภาคพลังงานสูงเคลื่อนที่ผ่าน หรือสร้างความเสียหายแก่ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งกับยานอวกาศเนื่องจากได้รับปริมาณอนุภาคและกระแสไฟฟ้าเกินกำหนด จากที่เราทราบว่าอนุภาคที่เคลื่อนที่มาปะทะกับโลกและที่สามารถตรวจพบได้คืออนุภาคนิวตรอน ซึ่งสามารถตรวจจับอนุภาคนี้ได้โดยสถานีตรวจวัดนิวตรอนที่จุดต่างๆ บนพื้นโลก โดย

อนุภาคนิวตรอนที่วัดได้จะต้องมีพลังงานสูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งนิวตรอนที่ตรวจวัดโดยสถานีตรวจวัดนิวตรอนสิรินธร ในประเทศไทย ซึ่งมีพลังงานสูงถึง 17 GV เมื่อเราทราบข้อมูลอนุภาคพลังงานสูงที่วัดได้บนโลกแล้วเราจะสามารถใช้อัตราอนุภาคที่วัดได้จริงมาเป็นตัวแปรต้นและค่าในการจำลองเพื่อแสดงพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่โดยสมการการขนส่งอนุภาคจากภายนอกโลกมายังโลก ระยะทางและพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของอนุภาคจะนำมาใช้วิเคราะห์หาระยะเวลาที่อนุภาคใช้ในการเดินทางมาถึงโลก เพื่อเป็นแนวทางในการเตือนภัยล่วงหน้าก่อนที่อนุภาคพลังงานสูงเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อโลกได้ทัน

### การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอนุภาคพลังงานสูงที่เคลื่อนที่เข้ามายังโลก พบว่าอนุภาคพลังงานสูงส่วนใหญ่ที่เคลื่อนที่เข้ามายังโลกมาจากดวงอาทิตย์หรือที่เราเรียกว่า อนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ (Solar Energetic Particles] SEPs) หรือในชื่อเดิมคืออนุภาครังสีคอสมิก (Ruffolo, Khumlumlert, & Youngdee 1998; Ruffolo and Khumlumlert 1995; Ruffolo et. al. 2006; Bieber et. al. 2004) อนุภาคพลังงานสูงเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กที่เชื่อมต่อระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก (Ruffolo, Khumlumlert & Youngdee 1998; Ruffolo and Khumlumlert 1995) พบว่าอนุภาคที่เคลื่อนที่มายังโลกจะทวีความรุนแรงขึ้นถ้าเกิดปรากฏการณ์การระเบิดบนดวงอาทิตย์ร่วมด้วย และในการระเบิดบนดวงอาทิตย์นั้นในบางครั้งจะมีการปลดปล่อยมวลสารจากชั้นโคโรนาตามมาซึ่งจะส่งผลให้เกิดคลื่นกระแทกในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ส่งผลให้อนุภาคที่เข้ามากระทบโลกมีพลังงานสูงขึ้นอย่างมาก (Sheeley et al. 1983; Mason, Gloeckler, and Hovestadt, 1984; Reames 1990) โดยเราสามารถสังเกตการณ์เพิ่มขึ้นหรือการเปลี่ยนแปลงจำนวนอนุภาคได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดอนุภาคต่างๆ ทั้งที่อยู่บนโลกและอยู่ภายนอกโลก เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์และจำลองพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยวิธีการเชิงตัวเลข เพื่อนำมาใช้เตือนภัยก่อนที่อนุภาคเหล่านี้จะเคลื่อนที่เข้ามายังโลกได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้คือ

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาอนุภาคพลังงานสูงที่มาจาก การระเบิดอย่างรุนแรงบนดวงอาทิตย์

การระเบิดอย่างรุนแรงที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ (Solar Flare) จะปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจำนวนมากออกจากดวงอาทิตย์เข้าสู่ตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ (Pallavicini, Serio, and Vaiana 1977) โดยแบ่งการระเบิดบนดวงอาทิตย์ได้เป็น 2 ประเภทคือ การปะทุแบบทันทีทันใด (impulsive flare) และการปะทุอย่างค่อยเป็นค่อยไป (gradual flare) โดยสังเกตจากระยะเวลาของการปลดปล่อยปริมาณรังสีเอ็กซ์ (Cliver et al. 1989) และการปะทุของทั้ง 2 นี้ยังมี

ลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน และลักษณะหนึ่งที่สำคัญคือในการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป มักจะมีการพ่นมวลคอโรนา (coronal mass ejection, CME) ตามมา ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การเรื่ออนุภาคขณะเคลื่อนที่ในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ให้มีพลังงานที่สูงขึ้น (Sheeley et al. 1983; Mason, Gloeckler, and Hovestadt, 1984; Reames 1990) และการระเบิดบนดวงอาทิตย์จะเกิดขึ้น มากหรือน้อยครั้งนั้นยังสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงบนดวงอาทิตย์ตามวัฏจักร (Solar Cycle) ใน ทุก 11 ปี (Khumlumert & Kasanuk 2008) หลักฐานที่แสดงว่าเกิดการปะทุหรือการระเบิดบนดวง อาทิตย์คือข้อมูลอนุภาคที่ตรวจพบได้ทั้งยานอวกาศและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดตั้งบนโลก (Ruffolo, Khumlumert & Youngde 1998; Ruffolo and Khumlumert 1995) ข้อมูลอนุภาคที่เกิดจาก เหตุการณ์การระเบิดที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้ แบ่งเป็นข้อมูลอนุภาคที่ตรวจวัดได้จาก ยานอวกาศที่โคจรอยู่นอกโลก และ ข้อมูลอนุภาคจากสถานีตรวจวัดนิวตรอนที่ติดตั้งบนพื้นโลก

### ข้อมูลอนุภาคที่ตรวจวัดได้จากยานอวกาศและสถานีตรวจวัดนิวตรอน

ปัจจุบันมียานอวกาศจำนวนมากที่ถูกส่งขึ้นไปในอวกาศเพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษาด้าน วิทยาศาสตร์อวกาศ แหล่งข้อมูลเหล่านี้จึงเปิดกว้างให้นักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยเข้ามาศึกษา ค้นหาข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการวิจัยได้อย่างกว้างขวาง โดยยานอวกาศที่ถูกส่งขึ้นไปเพื่อการศึกษา เกี่ยวกับอนุภาคพลังงานสูงต่างๆ ที่อยู่ในอวกาศได้แก่ ยานอวกาศ ACE (The Advanced Composition Explorer) ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ จำนวน 10 ชุด โดยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา องค์ประกอบต่างๆ ของอนุภาคที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ สนามแม่เหล็กในตัวกลาง ระหว่างดาวเคราะห์ องค์ประกอบของลมสุริยะ ณ เวลาต่างๆ และจำนวนอนุภาคต่างๆ ที่ตรวจวัด ได้ในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ (Khumlumert & Kasanuk 2008; Mason et al. 1999; Möbius et al. 1999) ข้อมูลองค์ประกอบอนุภาคและความหนาแน่นอนุภาค ณ เวลาต่างๆ ในตัวกลางระหว่าง ดาวเคราะห์นี้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ลักษณะสภาพอวกาศและคำนวณถึง ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับโลกล่วงหน้าได้ จึงมีนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยใช้ข้อมูลที่วัดได้นี้มา ศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่วัดได้เพื่อนำมาใช้ปรับปรุงการอธิบายและการจำลองการ เคลื่อนที่ของอนุภาคที่เคลื่อนที่มากกระทบโลกให้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด ผลงานวิจัยที่ เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากยานอวกาศ ACE ได้แก่

การศึกษาความหนาแน่นของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ด้วยเครื่องมือที่ติดตั้งบน ยานอวกาศ ACE สำหรับเหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ในระหว่างวันที่ 4-6 พฤศจิกายน 1997 (Mason et al. 1999; Khumlumert 2001) ในการศึกษาทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ ของอนุภาคจากลักษณะข้อมูลความหนาแน่นอนุภาคตามเวลาที่วัดได้ซึ่งสอดคล้องกับเหตุการณ์ที่ เกิดขึ้นจริงในกรณีการปะทุที่มีขนาดใหญ่และมีการปลดปล่อยมวลสารจากชั้นคอโรนาซึ่งเป็นชั้น บรรยากาศชั้นนอกสุดของดวงอาทิตย์ตามมา นอกจากนี้ Möbius et al. (1999) ได้ทำการศึกษา

ข้อมูลสถานะประจุของไอออน ณ พลังงานต่างๆ ของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์ ในเหตุการณ์เดียวกัน โดยใช้ข้อมูลจาก ACE พบว่าข้อมูลนี้เป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญในการเข้าใจถึงกลไกการเร่งและการเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านี้ได้

ในส่วนของข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอน สถานีตรวจวัดนิวตรอนได้พัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี 2491 โดย J.A. Simpson โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์และจากภายนอกโลกที่มีระดับพลังงาน GeV ซึ่งยานอวกาศทั่วไปสามารถตรวจวัดอนุภาคได้ที่ระดับพลังงานหลัก 100 MeV ซึ่งยานอวกาศที่ตรวจจับอนุภาคที่มีพลังงานสูงสุดคือ GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) ที่มีค่าพลังงานเฉลี่ยที่ 260 MeV สถานีตรวจวัดอนุภาคนิวตรอนสามารถตรวจวัดอนุภาคที่ระดับพลังงานเฉลี่ย 1.4 GeV และโดยเฉพาะอย่างยิ่งสถานีตรวจวัดนิวตรอนสิรินธรสามารถวัดอนุภาคที่มีพลังงานสูงถึง 1.7 GeV เนื่องจากประเทศไทยอยู่บนเส้นศูนย์สูตรของสนามแม่เหล็กโลก ดังนั้นอนุภาคที่สามารถทะลุผ่านชั้นบรรยากาศโลกมาถึงสถานีตรวจวัดนิวตรอนสิรินธรได้ต้องมีพลังงานสูงมาก (Bieber et. al. 2008) ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ข้อมูลอนุภาคจากสถานีตรวจวัดนิวตรอนได้แก่ การศึกษาข้อมูลการปะทุที่ดวงอาทิตย์ ณ วันที่ 14 กรกฎาคม 2000 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์เหตุการณ์นี้เป็นข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดนิวตรอน (neutron monitors) เหตุการณ์นี้อาจเรียกในอีกชื่อหนึ่งว่า Bastille Day เนื่องจากวันที่ 14 กรกฎาคม ของทุกปีตรงกับวันชาติฝรั่งเศส เหตุการณ์นี้มีความรุนแรงมากและมีการปล่อยมวลสารจากโคโรนาตามมา ในงานชิ้นนี้ได้มีการปรับปรุงโปรแกรมให้สอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างสนามแม่เหล็กแบบคอขวดลงในส่วนของการขนส่งของ Ruffolo (1995) ที่ส่งผลให้เกิดการสะท้อนกลับของอนุภาคในบริเวณคอขวดของสนามแม่เหล็ก และสามารถนำมาอธิบายลักษณะข้อมูลที่ตรวจวัดได้เป็นอย่างดี (Bieber et al. 2002) และการศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากการปะทุในวันที่ 22 ตุลาคม 1989 ที่ทำการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปตามเส้นสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ด้านแบบวงปิด (Both Legs of a closed interplanetary Magnetic Loop) (Ruffolo et. al. 2006)

### การวิเคราะห์พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลกด้วยวิธีการเชิงตัวเลข

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการปรับปรุงเทคนิคและวิธีการเชิงตัวเลขที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เข้ามายังโลกให้มีประสิทธิภาพรวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น คณะผู้วิจัยจึงต้องศึกษาและทำความเข้าใจสมการที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากภายนอกโลกมายังโลก สมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงมายังโลกได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยการรวมผลของอิทธิพลต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค อาทิเช่น ผลความแปรปรวนของตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ผลของลมสุริยะ (Solar wind) โดย Jokipii (1966) เริ่มใช้สมการ Fokker-Planck มาอธิบายการฟุ้งของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ โดยศึกษา

อิทธิพลของการเคลื่อนที่แบบพ่น (streaming) ของอนุภาคและการกระจายตัวเนื่องจากการกระเจิง (Scattering) ของอนุภาคตามเส้นสนามแม่เหล็ก โดยพิจารณาสัมประสิทธิ์ของการกระเจิงแบบมุมชี้ (Pitch angle scattering) (Jokipii 1971; Earl 1973) สมการที่ได้อธิบายการกระจายตัวของอนุภาคพลังงานสูงในรูปฟังก์ชันของระยะทางตามเส้นสนามแม่เหล็กและโคไซน์ของมุมชี้ (มุมระหว่างทิศของความเร็วของอนุภาคกระทำกับเส้นสนามแม่เหล็ก) ซึ่งต่อมา Earl (1976) ได้พัฒนาสมการการขนส่งโดยรวมผลของการเปลี่ยนแปลงมุมชี้เนื่องจาก adiabatic focusing (Roelof 1969) ส่งผลให้เกิดการบานออกของเส้นสนามแม่เหล็กเมื่อระยะไกลออกจากดวงอาทิตย์ ต่อมา Ruffolo (1995) พิจารณาผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ใน 2 กรอบอ้างอิงคือ กรอบอ้างอิงผู้สังเกตที่พิจารณาโครงสร้างสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์คงที่ในสเกลขนาดใหญ่ และกรอบอ้างอิงลมสุริยะที่พิจารณาผลจากความไม่เรียบเนื่องจากลมสุริยะในกระบวนการการกระเจิงของอนุภาคในสเกลขนาดเล็ก ในการที่แยกพิจารณาออกเป็น 2 กรอบอ้างอิงนี้เพื่อให้ง่ายและสะดวกในขั้นตอนของการจำลองการเคลื่อนที่นี้ด้วยวิธีการเชิงตัวเลข

วิธีการเชิงตัวเลขที่นำมาใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์นี้ ได้มีการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ finite difference เป็นครั้งแรกโดย Ng & Wong (1979) หลังจากนั้นก็มีผู้พยายามปรับปรุงเทคนิคและวิธีการเพื่อให้ได้การจำลองที่ถูกต้องแม่นยำและรวดเร็วมากขึ้นโดยใช้เทคนิคและวิธีการที่ต่างกัน (Earl 1987; Ruffolo 1991; Pauls & Burger 1994) เทคนิคและวิธีการในการจำลองสมการการเคลื่อนที่นี้ได้พัฒนาขึ้นอีกครั้งโดย Ruffolo (1995) ที่ได้พัฒนาส่วนต่างๆ ของโปรแกรมให้สอดคล้องกับผลกระทบที่เกิดขึ้นจริงกับอนุภาคขณะเคลื่อนที่เนื่องจากการพาของลมสุริยะ Ruffolo & Khumlumert (1995) ได้ใช้โปรแกรมที่พัฒนาแล้วนี้อธิบายระยะทางอิสระเฉลี่ยของอนุภาคตามเส้นสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ถูกปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์ และล่าสุด Nutaro, Riyavong, & Ruffolo (2001) ได้พัฒนาประสิทธิภาพของโปรแกรมให้มีความรวดเร็วขึ้นโดยการนำวิธีการ TVD (Total Variation Diminishing) มาปรับปรุงในบางส่วนของโปรแกรม การปรับปรุงและพัฒนาในส่วนนี้ของโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ยังพัฒนาจนสามารถนำมาใช้ศึกษาผลกระทบของคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ (Ruffolo 1999; Leerunnavarat, Ruffolo, & Bieber 2003) เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการอธิบายการเร่งอนุภาคจากดวงอาทิตย์ให้มีพลังงานสูงขึ้นได้ และเร็วๆ นี้มีการศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากการปะทุในวันที่ 22 ตุลาคม 1989 ที่ทำการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคไปตามเส้นสนามแม่เหล็กทั้ง 2 ด้านแบบวงปิด (Both Legs of a closed interplanetary Magnetic Loop) (Ruffolo et. al. 2006) ซึ่งเป็นการพัฒนาปรับปรุงทั้งสมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่และเทคนิคในการวิเคราะห์ข้อมูลให้เหมาะสมและถูกต้อง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันเราให้ความสนใจเกี่ยวกับโลกและการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับโลก มีปรากฏการณ์หนึ่งที่สามารถเกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อโลกได้ นั่นก็คือ การปะทุที่ผิวของดวงอาทิตย์ (solar flare) ซึ่งเป็นการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงออกจากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่สู่ตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์และมายังโลกในที่สุด โดยอนุภาคเหล่านี้จะอยู่ในรูปของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า นอกจากนั้นแล้วยังมีอนุภาคในชั้นบรรยากาศนอกสุดของดวงอาทิตย์ที่ถูกพัดออกมาจากดวงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องเรียกว่า ลมสุริยะ (solar wind) ซึ่งถูกพัดออกมาจากบรรยากาศชั้นโคโรนาของดวงอาทิตย์ เมื่ออนุภาคที่ถูกปลดปล่อยออกจากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในชั้นบรรยากาศของโลก จะทำให้ก๊าซที่อยู่ในชั้นบรรยากาศเกิดการแตกตัว และปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสง โดยแสงที่ปลดปล่อยออกมาจะมีลักษณะเฉพาะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคในอากาศที่ถูกกระตุ้น เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า แสงเหนือแสงใต้ (aurora) นอกจากการเกิดปรากฏการณ์แสงเหนือแสงใต้ แล้วอนุภาคที่ถูกปลดปล่อยออกจากดวงอาทิตย์เหล่านี้ยังส่งผลกระทบต่อระบบสื่อสาร และมีผลกระทบต่อมนุษย์อวกาศเนื่องจากเมื่อดวงอาทิตย์ปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจำนวนมากมนุษย์อวกาศจะมีโอกาสได้รับปริมาณรังสีจากอนุภาคเหล่านี้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของอนุภาคจากดวงอาทิตย์ยังส่งผลกระทบต่อสนามแม่เหล็กบริเวณขั้วโลกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ของโรงไฟฟ้าลัดวงจร ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลของความถี่ของการเกิดและความรุนแรงเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่เพิ่มขึ้น และลดลงอยู่เสมออย่างเป็นวัฏจักรจากการปะทุที่ผิวของ ดวงอาทิตย์ที่เป็นวัฏจักรนี้เองทำให้นักวิทยาศาสตร์สามารถทราบได้ว่าปัจจุบันนี้เป็นช่วงเริ่มต้น วัฏจักรใหม่ที่ 24 ของดวงอาทิตย์

ดังนั้นในการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้จะศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจาก ดวงอาทิตย์มายังโลกสำหรับการปะทุในช่วงเริ่มต้นวัฏจักรที่ 24 ของดวงอาทิตย์ เพื่อจะสามารถบอกได้ว่าแนวโน้มความรุนแรงจากการปะทุที่ผิวของดวงอาทิตย์ในรอบนี้จะรุนแรงมากน้อยเพียงใดและจะเป็นไปตามคำทำนายที่บอกว่าโลกจะแตกในปี 2012 จริงหรือไม่ ดังนั้นเพื่อเป็นพื้นฐานในการเข้าใจพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงที่เคลื่อนที่เข้ามาถึงโลก ผู้วิจัยจึงขออธิบายทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงมายังโลกดังนี้

#### อนุภาคพลังงานสูง (Solar energetic particles)

อนุภาคพลังงานสูงที่ส่งผลกระทบต่อระบบสื่อสาร โทรคมนาคม และระบบไฟฟ้าที่สำคัญคืออนุภาคพลังงานสูงที่มาจากนอกโลก และอนุภาคพลังงานสูงที่มาจากนอกโลกนี้ส่วนใหญ่

เป็นอนุภาคที่เกิดจากการปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์ที่เราเรียกว่า อนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ อนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์เกิดจากการปะทุอย่างรุนแรงที่ผิวของดวงอาทิตย์ที่เรียกว่า solar flare และถ้าเกิดการปล่อยมวลจากจากชั้นโคโรนา (corona) ซึ่งเป็นชั้นบรรยากาศชั้นนอกสุดที่ห่อหุ้มดวงอาทิตย์ จำทำให้อนุภาคที่ถูกปลดปล่อยจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์มีความรุนแรงเพิ่มขึ้น เราเรียกการปล่อยมวลสารจากชั้นโคโรนาว่า coronal mass ejection (CMEs) การปลดปล่อยอนุภาคจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์นี้เป็นขบวนการหลักอย่างหนึ่งในการแปลงพลังงานแม่เหล็กให้เป็นพลังงานความร้อน และมวลสารที่ปล่อยจากชั้นโคโรนาจะเป็นตัวเร่งอนุภาคเมื่อเคลื่อนที่ออกมาจากดวงอาทิตย์อีกครั้งหนึ่ง ทั้งการระเบิดบนดวงอาทิตย์และการปล่อยมวลสารจากชั้นโคโรนาก็จะปลดปล่อยอนุภาคที่มีพลังงานสูงและอิเล็กตรอนจากดวงอาทิตย์เข้าสู่ตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ เราเรียกอนุภาคเหล่านี้ว่า อนุภาครังสีคอสมิก (solar cosmic ray) หรืออนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ (solar energetic particles; SEPs) อนุภาคพลังงานสูงที่ปลดปล่อยออกมานี้ประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุร้อยละ 98 และอิเล็กตรอนกับโพซิตรอนร้อยละ 2 นิวคลีไอของไฮโดรเจน ฮีเลียม และธาตุหนักอื่นๆ อนุภาคพลังงานสูงเหล่านี้มีช่วงพลังงานที่กว้างมากจาก  $10^6 - 10^{21}$  eV อนุภาคพลังงานสูงที่มีช่วงพลังงานที่  $10^3 - 10^8$  eV จะถูกเร่งที่บริเวณใกล้กับดวงอาทิตย์ อนุภาคพลังงานสูงเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อโลก โดยผลการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงที่เคลื่อนที่เข้ามากระทบโลกที่เราพบได้แก่ การเกิดปรากฏการณ์แสงเหนือแสงใต้ (Aurora) ที่บริเวณขั้วโลก การเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องขณะที่เกิดพายุสุริยะสำหรับโรงไฟฟ้าที่ตั้งอยู่ในบริเวณขั้วโลก การขัดข้องของระบบสื่อสารบนเครื่องบิน การขาดการติดต่อกับดาวเทียมที่โคจรอยู่นอกโลก หรือผลกระทบต่อการทำงานของนักบินอวกาศที่ปฏิบัติงานอยู่นอกโลก เหล่านี้เป็นผลที่จะเกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากอวกาศเข้ามาปะทะโลก

อนุภาคพลังงานสูงนอกจากจะมาจากการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์แล้ว ยังมีอนุภาคบางส่วนเกิดจากการเกิดคลื่นกระแทกที่บริเวณขอบของระบบสุริยะ หรือมาจากกาแล็กซี่อื่นๆ ด้วย ซึ่งเราเรียกอนุภาคเหล่านี้ว่า Galactic cosmic ray (GCRs) และเนื่องจากอนุภาคพลังงานสูงที่เราสามารถศึกษาและวิเคราะห์ได้ในปัจจุบันนี้ได้จากการวัดอนุภาคโดยยานอวกาศที่โคจรอยู่นอกโลก ซึ่งทำการวัดอนุภาคที่มาจากดวงอาทิตย์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงขออธิบายอนุภาคพลังงานสูงที่เกิดจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ในหัวข้อต่อไป

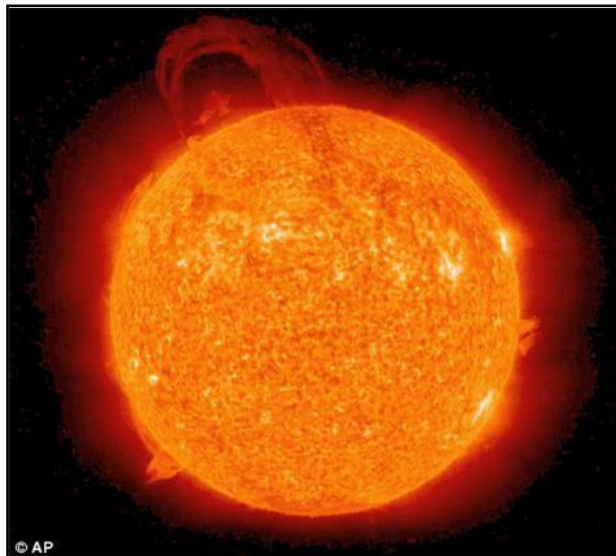
### การระเบิดบนดวงอาทิตย์ (solar flare)

การระเบิดอย่างรุนแรงบนดวงอาทิตย์จะเกิดขึ้นในส่วนชั้นโครโมสเฟียร์ (Cromosphere) ของดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นชั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงบนดวงอาทิตย์อย่างรุนแรง โดยมีการเปลี่ยนของอุณหภูมิตั้งแต่ระดับ 4800 เคลวิน ถึง 20000 เคลวิน การระเบิดบนดวงอาทิตย์จะเกิดขึ้นและ

ปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงทั้งที่มีและไม่มีประจุออกมา อนุภาคที่มีประจุจะมีค่าประจุที่สูงกว่าปกติมาก เราสามารถแบ่งการปะทุบนดวงอาทิตย์ได้ 2 ประเภทคือ การปะทุแบบทันทีทันใด (Impulsive solar flare) และการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual solar flare)

1. การปะทุแบบทันทีทันใด (Impulsive Solar Flares) การปะทุแบบทันทีทันใดเป็นการปะทุที่มีการปลดปล่อยจำนวนอนุภาคอิเล็กตรอนในปริมาณที่สูง และใช้ระยะเวลาในการปลดปล่อยพลังงานและอนุภาคสั้น (น้อยกว่า 1 ชั่วโมง) ไม่มีการตรวจพบการปลดปล่อยก้อนมวลสารจากดวงอาทิตย์ (Coronal Mass Ejection, CME) ภายหลังจากการปะทุ ทำให้ไม่เกิดปรากฏการณ์คลื่นกระแทก (Shock Wave) ในระยะเวลา 1 ปี จะเกิดเหตุการณ์การปะทุแบบทันทีทันใดบ่อยประมาณ 1,000 ครั้ง

2. การปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual Solar Flares) การปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปมีการปลดปล่อยจำนวนอนุภาคพลังงานสูงได้แก่โปรตอนในปริมาณที่สูง และใช้ระยะเวลาในการปลดปล่อยพลังงานและอนุภาคนาน (ในระดับวัน) การปะทุประเภทนี้จะมีการปลดปล่อยก้อนมวลสารจากดวงอาทิตย์ (Coronal Mass Ejection, CME) ซึ่งสามารถวัดได้โดยการตรวจวัดคลื่นวิทยุในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ภายหลังจากที่เกิดการระเบิดบนดวงอาทิตย์ ก่อให้เกิดปรากฏการณ์คลื่นกระแทก (Shock Wave) ตามมา ในระยะเวลา 1 ปี จะเกิดเหตุการณ์การปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปประมาณ 100 ครั้ง ซึ่งน้อยกว่าการเกิดเหตุการณ์การปะทุแบบทันทีทันใด



ภาพที่ 2.1 แสดงการปะทุบนดวงอาทิตย์

ที่มา <http://beta.i3.in.th/content/view/2375>

ในการจำแนกประเภทการปะทุจากที่ดูจากระยะเวลาที่เกิดการปะทุ ซึ่งเราสามารถหาระยะเวลาที่เกิดการปะทุได้จากข้อมูลการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์บนดวงอาทิตย์ ในการจำแนกระดับความรุนแรงของการปะทุบนดวงอาทิตย์ โดยใช้รังสีเอ็กซ์เป็นเกณฑ์ โดยรังสีเอ็กซ์มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1 - 8 อังสตรอม และสามารถแบ่งระดับความรุนแรงได้ออกเป็น 5 ระดับ คือ A, B, C, M และ X ซึ่งวัดได้บริเวณใกล้โลก โดยยานอวกาศ GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite Spacecraft) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการจำแนกระดับความรุนแรงของการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์

ระดับ	ความเข้ม ( $W/m^2$ ) ของรังสีเอ็กซ์ ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 1 - 8 อังสตรอม
A	$10^{-8} - 10^{-7}$
B	$10^{-7} - 10^{-6}$
C	$10^{-6} - 10^{-5}$
M	$10^{-5} - 10^{-4}$
X	$>10^{-4}$

โดยที่ X Class Flare เป็นรังสีเอ็กซ์ที่มีระดับความรุนแรงสูง ส่วนใหญ่ก่อให้เกิดคลื่นวิทยุทั่วดาวเคราะห์ และเป็นพายุรังสีที่ระยะเวลายาวนานที่สุด

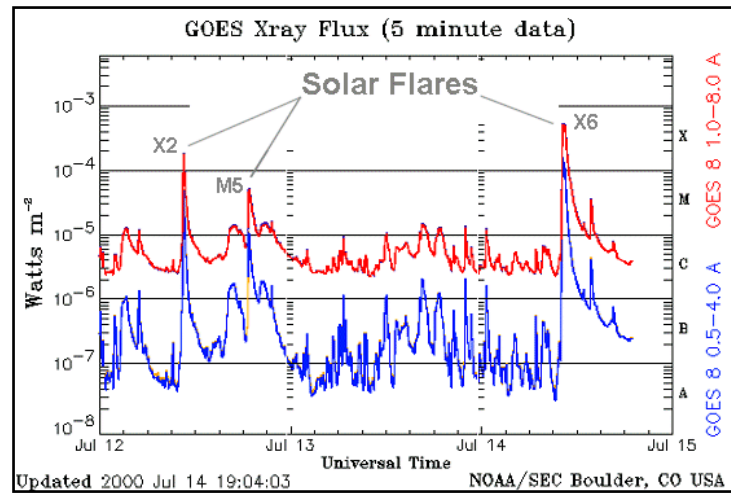
M Class Flare เป็นรังสีเอ็กซ์ที่มีระดับความรุนแรงปานกลาง โดยทั่วไปจะเป็นคลื่นวิทยุขนาดสั้น ซึ่งเป็นต้นเหตุที่มีผลกระทบต่อขั้วโลกเหนือ พายุรังสีขนาดเล็กมักเกิดจากการปะทุระดับ M นี้ เปรียบเทียบกันระหว่าง X และ M

C Class Flare เป็นรังสีเอ็กซ์ที่มีระดับความรุนแรงน้อย มีผลกระทบต่อโลกน้อยมาก

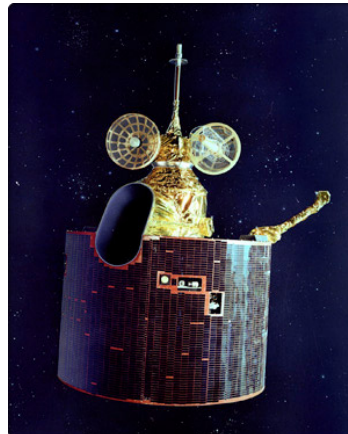
B Class Flare เป็นรังสีเอ็กซ์ที่มีระดับความรุนแรงปกติ โดยทั่วไปไม่มีผลกระทบต่อโลก

A Class Flare เป็นรังสีเอ็กซ์ที่มีระดับความรุนแรงปกติ โดยทั่วไปไม่มีผลกระทบต่อโลก

และภาพตัวอย่างภาพแสดงความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่บันทึกตามเวลา จากยานอวกาศ GOES ที่บันทึกการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ โดยเส้นสีน้ำเงินแสดงความเข้มรังสีเอ็กซ์ที่ความยาวคลื่น 0.5-4 อังสตรอม และเส้นสีแดงแสดงความเข้มรังสีเอ็กซ์ที่ความยาวคลื่น 1-8 อังสตรอม ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แสดงการปะทุบนดวงอาทิตย์ โดยดาวเทียม NOAA  
ในเดือนกรกฎาคม 2543 ที่มา <http://www.thaispaceweather.com/class.html>



ภาพ 2.3 ยานอวกาศ GOES

เราสามารถสรุปการแบ่งประเภทของการปะทุทั้ง 2 ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตาราง 2.2 แสดงลักษณะทางกายภาพที่ต่างกันของการปะทุบนดวงอาทิตย์ 2 ประเภท

ลักษณะทางกายภาพ	การปะทุแบบทันทีทันใด	การปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป
ระยะเวลาการปลดปล่อย x-ray	< 1 ชั่วโมง	> 1 ชั่วโมง
ระยะที่ตรวจพบรังสีเอ็กซ์สูงจากชั้นโฟโตสเฟียร์	น้อยกว่า $10^4$	มากกว่า $5 \times 10^4$ km
อัตราส่วน e/p	$\sim 0.1 - 1$	ต่ำ
คลื่นวิทยุที่ตรวจพบ	III, v	II, Iv
Coronal mass ejection	น้อยมาก	เกิดประมาณ 96%
กลไกการเร่งอนุภาค	ไม่เกิดคลื่นกระแทก	เกิดคลื่นกระแทก

เราพบว่า การตรวจพบคลื่นวิทยุประเภทต่างๆ สามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกการปะทุบนดวงอาทิตย์ได้ โดยประเภทคลื่นวิทยุสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตาราง 2.3 แสดงการจำแนกประเภทของคลื่นวิทยุ

ประเภทของคลื่นวิทยุ	ลักษณะ
1	เป็นคลื่นวิทยุที่มีอายุยาวนาน (ชั่วโมงหรือวัน) เกิดจากการเปล่งแสงสว่างจ้า ในช่วงอุณหภูมิ $10^7 - 10^9$ เคลวิน การระเบิดของคลื่นวิทยุประเภทนี้มีพายุของคลื่นรบกวนมากกว่าประเภทอื่น ๆ
2	มีความถี่อยู่ในช่วง 0.1 – 100 MHz ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความถี่อย่างช้า ๆ นี้เป็นการกระตุ้นการเคลื่อนตัวออกสู่ภายนอกด้วยความเร็ว 1,000 km/s อีกทั้งเป็นเหตุทำให้เกิดปรากฏการณ์คลื่นกระแทก
3	เกิดขึ้นพร้อมกับการปะทุดวงอาทิตย์มีความถี่อยู่ในช่วง 0.1 – 1,000 MHz มีความเร็วประมาณ 150 Mm/s
4	มีการแผ่คลื่นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างกว้างขวางและต่อเนื่อง ภายหลังเกิดการปะทุแบบทันทีทันใด 1 ชั่วโมง การแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของการระเบิดของคลื่นวิทยุประเภทที่ 4 มีความสัมพันธ์กับการปล่อยรังสีแบบซินโครตรอน สืบเนื่องจากพลังงานของอิเล็กตรอนในกลุ่มหมอกแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ออกไปในอวกาศด้วยความเร็วหลายล้านเมตรต่อวินาที

### ลมสุริยะ (Solar Wind)

ลมสุริยะเป็นภาวะปกติที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ที่เป็นการไหลของอนุภาคจากชั้นบรรยากาศของดวงอาทิตย์ออกสู่อวกาศระหว่างดาวเคราะห์ หรือกล่าวได้ว่าลมสุริยะคือกระแสของอนุภาคประจุไฟฟ้าความเร็วสูงที่ถูกปล่อยออกมาทุกทิศทุกทางอย่างต่อเนื่องจากบรรยากาศชั้นโคโรนา (corona) ของดวงอาทิตย์ซึ่งมีอุณหภูมิสูงสุ่มบริเวณระหว่างดาวเคราะห์ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ความเร็วของลมสุริยะมีขนาดตั้งแต่ 200 ถึง 800 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แต่โดยเฉลี่ยแล้วลมสุริยะมีความเร็วประมาณ 400 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และจะใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลกประมาณ 4 วัน ลมสุริยะเป็นกระแสอนุภาคที่ไหลออกมาจากดวงอาทิตย์ดังนั้นองค์ประกอบของลมสุริยะจึงคล้ายกับดวงอาทิตย์ ส่วนใหญ่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนและโปรตอน อาจมีไอออนหนักรวมอยู่เล็กน้อย มีพลังงานเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 10-100 eV กระแสอนุภาคเหล่านี้มีอุณหภูมิและความเร็วที่แตกต่างกันออกไปตามช่วงเวลา ลมสุริยะเป็นส่วนทำให้เกิดปรากฏการณ์อื่นที่เกี่ยวข้องได้แก่ พายุแม่เหล็กโลก (geomagnetic storm) ซึ่งเป็นต้นเหตุทำให้ไฟฟ้าขัดข้องบนโลก ออโรรา (หรือปรากฏการณ์แสงเหนือ-แสงใต้) ลมสุริยะที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์จะมีความรุนแรงสูงมาก ออโรรา (Aurora) หรือ แสงเหนือแสงใต้ (Northern and Southern light) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการที่อนุภาคจากลมสุริยะปะทะกับไอออนของธาตุในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) เมื่ออนุภาคเหล่านี้ชนกันก็จะเกิดการถ่ายเทพลังงาน และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน ซึ่งรวมทั้งแสงในช่วงที่มองเห็น ปรากฏให้เห็นเป็นแถบสีสวยงามบนท้องฟ้า ที่ระดับความสูง 80-160 กิโลเมตร ดังแสดงในภาพที่ 2.3 แต่เราไม่สามารถมองเห็นออโรราได้ในประเทศไทย เพราะอนุภาคจากลมสุริยะจะสามารถผ่านเข้ามาถึงบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้เฉพาะในบริเวณสนามแม่เหล็ก

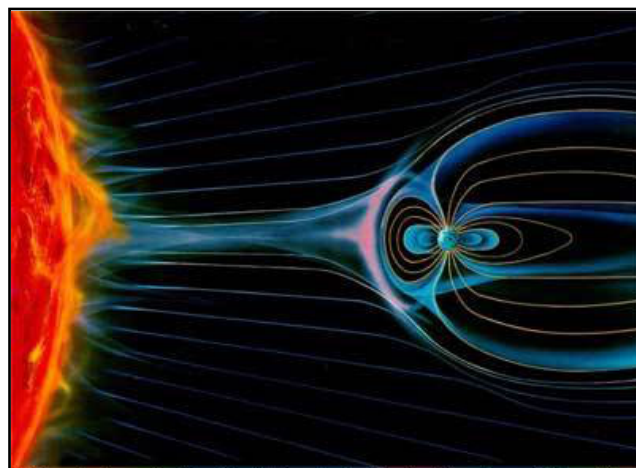


ภาพที่ 2.4 แสดงภาพถ่ายออโรรา ที่เกิดขึ้นในวันที่ 21 ตุลาคม ค.ศ. 1999 จากคอนเนกติกัตฮิลล์ นิวเจอร์ซีย์ ที่มา <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/278/cosmos/52.htm>

ลมสุริยะ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ลมสุริยะที่มีความเร็วสูง (Fast Solar Wind) อนุภาคจะมีความเร็วประมาณ 800 กิโลเมตร/วินาที (km/s) ซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากหลุมโคโรนา (Coronal Hole) ใช้เวลาเดินทางมาถึงโลกประมาณ 10 วัน
2. ลมสุริยะที่มีความเร็วต่ำ (Slow Solar Wind) อนุภาคจะมีความเร็วประมาณ 400 กิโลเมตร/วินาที (km/s) ซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากบริเวณใกล้เคียงเส้นศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์

เมื่อลมสุริยะปะทะกับสนามแม่เหล็กโลกทำให้สนามแม่เหล็กโลกแปรปรวน และเนื่องจากเส้นแรงแม่เหล็กโลกพุ่งเข้าและพุ่งออกจากขั้วโลกเหนือ และขั้วโลกใต้ในแนวตั้ง ดังนั้น อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าจากลมสุริยะจึงเคลื่อนที่ควงสว่านรอบเส้นแรงแม่เหล็กโลก วิ่งเข้าสู่บรรยากาศโลกทางขั้วเหนือหรือขั้วใต้ แต่ไม่สามารถผ่านเข้ามาในแนวเส้นศูนย์สูตร นอกจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงมากเท่านั้น ซึ่งการแปรปรวน (fluctuation) ของความเร็ว ความหนาแน่น และทิศทางของลมสุริยะนั้นส่งผลต่อสภาพแวดล้อมของอวกาศ เช่น ระดับชั้นของการแผ่รังสีของไอออนและการแทรกสอดของคลื่นวิทยุจะถูกทำให้เปลี่ยนค่าจากระดับร้อยละ ไปเป็นระดับพันๆ ได้ นอกจากนี้ รูปร่าง และตำแหน่งของ magnetopause และ bow shock ก็จะถูกเปลี่ยนแปลง ณ ระดับรัศมีโลกที่ต่างๆ ได้อีกด้วย ซึ่งปรากฏการณ์เหล่านี้รวมแล้วเรียกว่า สภาพอวกาศ (Space weather) อนุภาคพลังงานสูงพวกนี้ บางครั้งทำความเสียหายให้แก่ ยานอวกาศ ดาวเทียม และระบบโทรคมนาคม ดังนั้นการฝ้าสังเกตจุดดวงอาทิตย์ พวยก๊าซ และการปะทุบนดวงอาทิตย์ จึงเป็นการพยากรณ์สภาพอวกาศ (space weather) และแจ้งเตือนล่วงหน้าได้

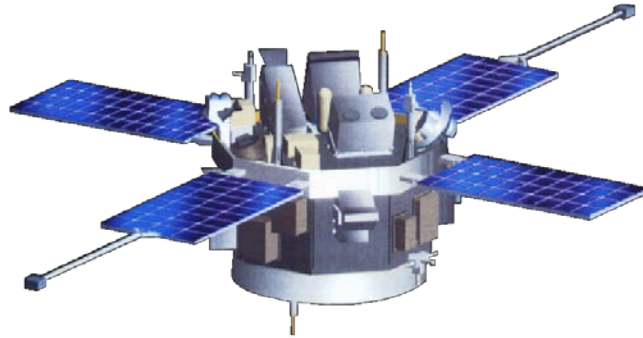


ภาพที่ 2.5 แสดงลมสุริยะที่ออกมาจากดวงอาทิตย์กระทบกับสนามแม่เหล็กของโลก  
ที่มา [http://www.thaispaceweather.com/IHY/Interplanetary\\_space/IP\\_solar\\_wind.htm](http://www.thaispaceweather.com/IHY/Interplanetary_space/IP_solar_wind.htm)

### ยานอวกาศ ACE

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาค และสภาพแวดล้อมในอวกาศที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มายังโลก เราสามารถวิเคราะห์ข้อมูลเหล่านี้ได้จากยานอวกาศที่โคจรอยู่ในอวกาศ โดยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกวิเคราะห์ข้อมูลอนุภาคพลังงานสูงที่มากระทบโลกจากยานอวกาศ ACE (The advanced composition explorer) โดยเราสามารถเลือกวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ เหล่านี้เราเลือกข้อมูลจากยานอวกาศที่สอดคล้องกับเหตุการณ์การปะทุที่

เกิดขึ้นจริง ยานอวกาศ ACE ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ทำหน้าที่ในการวิเคราะห์ และบันทึกข้อมูลจากดวงอาทิตย์ที่แตกต่างกันแสดงดังภาพ 2.5



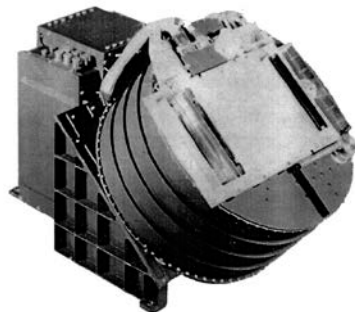
ภาพ 2.6 ยานอวกาศ The Advanced Composition Explorer (ACE)

ที่มา: [http://cse.ssl.berkeley.edu/stereo\\_solarwind/img/missionsFolder/ace.gif](http://cse.ssl.berkeley.edu/stereo_solarwind/img/missionsFolder/ace.gif)

โดยข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์จากยานอวกาศ ได้แก่

1. ค่าปริมาณความเข้มรังสีเอกซ์ ได้จากข้อมูลยานอวกาศ GOES
2. ค่าความเร็วลมสุริยะ ได้จากข้อมูลของอุปกรณ์ Solar Wind Parameters (SWEPAM)

จากยานอวกาศ ACE เป็นข้อมูลความเร็วของอนุภาคตามเวลา (km/s)



ภาพ 2.7 แสดงเครื่องมือ SWEPAM

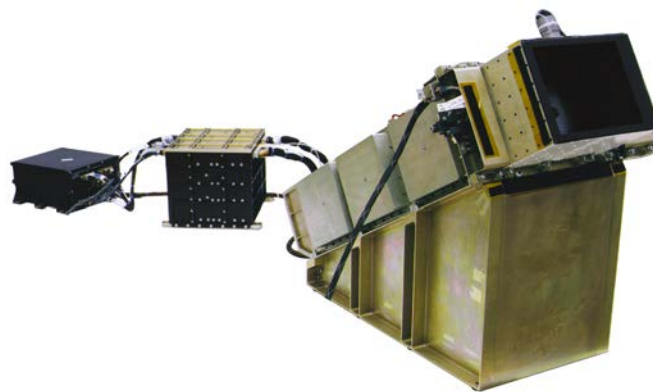
ที่มา: <http://swepam.lanl.gov/swepampics/swepam-i.JPG> [21]

3. ข้อมูลอนุภาคพลังงานสูงจากอุปกรณ์ The Solar Isotope Spectrometer (SIS) แสดงดังภาพ 2.8 และอนุภาคพลังงานต่ำจากอุปกรณ์ The Ultra Low Energy Isotope Spectrometer (ULEIS) แสดงดังภาพ 2.9 จากยานอวกาศ ACE โดยทำการวัดอนุภาคในช่วงพลังงาน 10 - 100 และ 0.2 - 1.0 MeV/n ตามลำดับ



ภาพ 2.8 แสดงเครื่องมือ (SIS)

ที่มา: [http://www.srl.caltech.edu/ACE/CRIS\\_SIS/sis.html](http://www.srl.caltech.edu/ACE/CRIS_SIS/sis.html) [23]



ภาพ 2.9 แสดงเครื่องมือ (ULEIS)

ที่มา: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/Gallery/gallery.html> [24]

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากนอกโลกที่เคลื่อนที่เข้ามายังโลก โดยวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยใช้สมการการชนส่งที่อธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงตามเส้นสนามแม่เหล็ก โดยกำหนดค่าให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงเหล่านี้่อนุรักษ์พลังงาน หรือค่าโมเมนตัมมีค่าคงที่เฉพาะค่าในแต่ละระดับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงจัดเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเวลาที่ถูกบันทึกโดยยานอวกาศ ACE ด้วยอุปกรณ์ SIS โดยเริ่มต้นผู้วิจัยต้องทำความเข้าใจสมการการเคลื่อนที่ที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงตามเส้นสนามแม่เหล็ก และสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่นี้ โดยงานวิจัยนี้ใช้สมการการชนส่งของ Ruffolo 1995, 1998 โดยมีพื้นฐานจากสมการ Fokker plank's equation

#### สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูง

จากที่กล่าวมาข้างต้น สมการที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีพื้นฐานจากสมการ Fokker planck equation ที่อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงตามเส้นสนามแม่เหล็ก ณ เวลาต่างๆ โดยไม่พิจารณาผลของการชนกันของอนุภาค จึงไม่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานเกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่

อนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เมื่อเกิดการปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุจากดวงอาทิตย์ การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะมีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเกลียวรอบเส้นสนามแม่เหล็กระหว่างดวงอาทิตย์กับตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ (Interplanetary magnetic field line)

การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่สลายตัวตามเวลาแสดงได้ดังสมการที่เรียกว่า สมการการฟุ้งอนุภาค (Diffusion equation) ซึ่งรูปสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ดังสมการ

$$D \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{\partial F}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

เมื่อ	D	คือ	สัมประสิทธิ์การฟุ้ง
	$\partial x$	คือ	ช่วงระยะที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน
	$\partial t$	คือ	ช่วงเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านระยะ $\partial x$
	$\frac{\partial F}{\partial t}$	คือ	จำนวนอนุภาคตามเวลา

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \text{ คือ ฟลักซ์ที่ไหลผ่านระยะ } \partial x$$

ในการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาจากทฤษฎี Fokker - Planck มีพื้นฐานจากสมการการฟุ้งของอนุภาคโดยพิจารณาการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลา และไม่พิจารณาการชนกันของอนุภาคตั้งสมการ

เมื่อ

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{a}_i F)}{\partial a_i} = Q \quad (3.2)$$

เมื่อ  $Q$  คือ ฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาค (หรือ Source term)

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

ด้วยการเปลี่ยนแปลงเชิงระบบ (First order) + การเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม (Second order)

$a_i$  คือ พารามิเตอร์ของตัวแปรอิสระต่าง ๆ

งานวิจัยนี้พิจารณาตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้องได้แก่ การเคลื่อนที่ของอนุภาคตามระยะทาง ( $z$ ) การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงแปลงตามเส้นสนามแม่เหล็ก ( $z$ ) เมื่อพิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค  $\mu$  โดยที่  $\mu$  คือค่าโคไซน์ของมุม  $\theta$  และ  $\theta$  คือมุมระหว่างทิศของความเร็วของอนุภาคกับทิศทางของเส้นสนามแม่เหล็ก (ในแนวแกน  $z$ ) และ โมเมนตัมของอนุภาค ( $p$ ) จากสมการ (3.2) จะกลายเป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(t, \mu, z, p)}{\partial t} = & \underbrace{-\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\Delta z}{\Delta t} F \right) - \frac{\partial}{\partial \mu} \left( \frac{\Delta \mu}{\Delta t} F \right) - \frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{\Delta p}{\Delta t} F \right)}_{\text{การเปลี่ยนแปลงเชิงระบบ}} \\ & + \underbrace{\frac{\partial}{\partial \mu} \left( \frac{\varphi(\mu)}{2} \frac{\partial}{\partial \mu} \left( \frac{E'}{E} F \right) \right)}_{\text{การเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\varphi(\mu)$  คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงของอนุภาคที่กระทำกับสนามแม่เหล็ก

$\frac{E'}{E}$  คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานรวมในกรอบอ้างอิงของลมสุริยะกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

เมื่อพิจารณาผลของสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากดวงอาทิตย์ตามเส้นสนามแม่เหล็กมายังโลก จะได้สมการขนส่งที่อธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์และผลกระทบต่างๆ ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial F}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial z} \mu v F && \text{(streaming)} \\
 & -\frac{\partial}{\partial z} \left(1 - \mu^2 \frac{v^2}{c^2}\right) v_{sw} \sec \psi F && \text{(convection)} \\
 & -\frac{\partial}{\partial \mu} \frac{v}{2L(z)} + \left(1 - \mu \frac{v_{sw}}{v} \sec \psi - \mu \frac{v_{sw} v}{c^2} \sec \psi\right) (1 - \mu^2) F && \text{(focusing)} \\
 & + \frac{\partial}{\partial \mu} v_{sw} \left(\cos \psi \frac{d}{dr} \sec \psi\right) (1 - \mu^2) F && \text{(differential convection)} \\
 & + \frac{\partial}{\partial \mu} \frac{\varphi(\mu)}{2} \frac{\partial}{\partial \mu} \left(1 - \mu \frac{v_{sw} v}{c^2} \sec \psi\right) F && \text{(scattering)} \\
 & + \frac{\partial}{\partial p} p v_{sw} \left[\frac{\sec \psi}{2L(z)} (1 - \mu^2) + \cos \psi \frac{d}{dr} (\sec \psi) \mu^2\right] F && \text{(deceleration)}
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

เมื่อ  $F$  คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวของอนุภาค  
 $t$  คือ เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลก (min)  
 $z$  คือ ระยะทางที่อนุภาคพลังงานสูงเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์มายังโลก (AU)

$\mu = \cos \theta$  คือ แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เข้าหรือออกจากดวงอาทิตย์

$\theta$  คือ มุมระหว่างทิศของความเร็วของอนุภาคที่กระทำกับเส้นสนามแม่เหล็ก  
 $P$  คือ โมเมนตัมของอนุภาค (MeV/c)  
 $v$  คือ ความเร็วของอนุภาค (AU/min)  
 $v_{sw}$  คือ ความเร็วของลมสุริยะ (AU/min)  
 $\psi$  คือ มุมระหว่างเวกเตอร์ที่แสดงทิศทางของอนุภาคตามแนวรัศมีกับ

เวกเตอร์ที่แสดงทิศทางของเส้นสนามแม่เหล็ก (Degree)

$c$  คือ ความเร็วแสง (AU/min)  
 $B$  คือ ขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็ก  
 $L(z)$  คือ ความยาวโฟกัสของเส้นสนามแม่เหล็ก ที่มีลักษณะบานออกตาม

ระยะทางสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น เมื่อ  $\frac{1}{L(z)} = -\frac{1}{B} \frac{dB}{dz}$

$\frac{E'}{E}$  คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานรวมในกรอบอ้างอิงของลมสุริยะกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

เนื่องจากในการศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าระยะทางอิสระเฉลี่ย ( $\lambda$ ) ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงที่สามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กก่อนที่จะเกิดการชนกับความไม่เรียบของสนามแม่เหล็ก โดยกำหนดให้

$$\lambda = \frac{3D}{v} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $v$  คือ ความเร็วของอนุภาค (AU/min)

$D$  คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงในอวกาศ

แทนค่าสมการ (3.5) ในสมการขนส่ง (3.4) ในสมการพจน์ scattering ซึ่งเป็นพจน์ที่พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาค ( $\mu$ ) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสัมประสิทธิ์การกระเจิงของอนุภาค ( $\varphi(\mu)$ ) โดยมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การกระเจิงในอวกาศ ( $D$ ) ดังนี้

$$D = \frac{v^2}{4} \int_{-1}^1 \frac{(1-\mu^2)^2}{\varphi(\mu)} d\mu \quad (3.6)$$

$$\varphi(\mu) = A|\mu|^{q-1}(1-\mu^2) \quad (3.7)$$

เมื่อ  $A$  คือ แอมพลิจูดที่อนุภาคเคลื่อนที่เป็นเกลียวตามเส้นสนามแม่เหล็กที่ได้จากความสัมพันธ์

$$\frac{A}{v} = \frac{3}{4} \frac{|\mu|^{q-1}(1-\mu^2)}{(2-q)\lambda} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $q$  คือ ดัชนีการฟุ้งของอนุภาค ในการศึกษานี้ใช้  $q = 1.5$

เมื่อได้สมการการขนส่งที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงๆ ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กที่เชื่อมต่อระหว่างดวงอาทิตย์กับโลกแล้ว ผู้วิจัยเลือกใช้การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคเพื่อหาระยะเวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลกโดยการจำลองการเคลื่อนที่ด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (Finite difference method)

### วิธีการเชิงตัวเลขที่ใช้จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค

เนื่องจากสมการขนส่งของ Ruffolo, et.al., 1998 จะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ซึ่งมีตัวแปรอิสระหลายตัว ซึ่งเป็นการยากในการหาคำตอบหรือผลเฉลยของสมการได้โดยตรง ดังนั้นเราสามารถใช่วิธีผลต่างอันตะ (Finite difference) เมื่อทราบ

เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) มาใช้ในการหาคำตอบสมการขนส่ง โดยวิธีการในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคเริ่มต้นจากสมการการแพร่ของอนุภาค เมื่อ  $f(x_i, t_n)$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -D \frac{\partial S}{\partial x} \quad \text{เมื่อ } S = -D \frac{\partial f}{\partial x}$$

แทนค่า S ลงในสมการจะได้

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( -D \frac{\partial f}{\partial x} \right) = D \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$$

เมื่อ S คือ flux หรือ จำนวนอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านจุดๆ หนึ่งในเวลา t

f คือ ฟลักซ์ของอนุภาค

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่

จำนวนอนุภาคไหล = อนุภาคไหลเข้า - อนุภาคไหลออก

$$\frac{\partial}{\partial t} (f \cdot \Delta x) = S \left( x - \frac{\Delta x}{2} \right) - S \left( x + \frac{\Delta x}{2} \right) \quad (3.9)$$

อัตราการไหลของอนุภาค

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f^{n+1}(x_i) - f^n(x_i)}{\Delta t} = \frac{S \left( x - \frac{\Delta x}{2} \right) - S \left( x + \frac{\Delta x}{2} \right)}{\Delta x} \quad (3.10)$$

เมื่อ  $n = 0, 1, 2, \dots$

$$\frac{f^{n+1}(x_i) - f^n(x_i)}{\Delta t} = \frac{-D \left( x_i - \frac{\Delta x}{2} \right) [f(x_i) - f(x_{i-1})] + D \left( x_i + \frac{\Delta x}{2} \right) [f(x_{i+1}) - f(x_i)]}{(\Delta x)^2}$$

กำหนดให้

$$r = \frac{D \Delta t}{(\Delta x)^2}$$

เมื่อ  $x =$  ระยะห่าง 1 ช่วง

$$f^{n+1}(x_i) - f^n(x_i) = -r [f(x_i) - f(x_{i-1})] + r [f(x_{i+1}) - f(x_i)]$$

$$= -rf(x_i) + rf(x_{i-1}) + rf(x_{i+1}) - rf(x_i)$$

$$f^{n+1}(x_i) = f^n(x_i) + r [f(x_{i-1}) - 2f(x_i) + f(x_{i+1})] \quad (3.11)$$

ในสมการ (3.11) นี้ สามารถจำลองด้วยวิธีการเชิงตัวเลขแบบต่างๆ ดังนี้คือ

## 1. วิธีชัดแจ้ง (Explicit method)

หลักการ คือ จากสมการ (3.11) จัดค่าเท่าให้อยู่ด้านขวามือทั้งหมด โดยกำหนด  $n+1$  เป็นค่าใหม่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นและ  $n$  เป็นค่าเก่าที่เวลาดั้งต้นและในพจน์ซ้ายมือของสมการ (3.11) กำหนดให้  $f$  เป็นค่า  $n$  ทั้งหมด

จากสมการตั้งต้น สมการ (3.11) จะได้สมการเป็น

$$f^{n+1}(x_i) - f^n(x_i) = r[f^n(x_{i-1}) - 2f^n(x_i) + f^n(x_{i+1})]$$

$$f^{n+1}(x_i) = f^n(x_i) + r[f^n(x_{i-1}) - 2f^n(x_i) + f^n(x_{i+1})]$$

$$\therefore f^{n+1}(x_i) = rf^n(x_{i-1}) + (1-2r)f^n(x_i) + rf^n(x_{i+1}) \quad (3.12)$$

เมื่อ  $i = 1, 2, 3, \dots, N-1$

จากสมการ (3.12) นำมาแก้สมการโดยใช้เมทริกซ์ในการแก้สมการ โดยการแทนค่า  $i$  แต่ละค่าลงในสมการจะได้

$$f^{n+1}(x_1) = rf^n(x_0) + (1-2r)f^n(x_1) + rf^n(x_2) \quad , i=1$$

$$f^{n+1}(x_2) = rf^n(x_1) + (1-2r)f^n(x_2) + rf^n(x_3) \quad , i=2$$

$$f^{n+1}(x_3) = rf^n(x_2) + (1-2r)f^n(x_3) + rf^n(x_4) \quad , i=3$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$f^{n+1}(x_{N-1}) = rf^n(x_{N-2}) + (1-2r)f^n(x_{N-1}) + rf^n(x_N) \quad , i=N-1$$

วิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน

$$\text{จากสมการตั้งต้น } f^{n+1}(x_i) - f^n(x_i) = +r[f(x_{i-1}) - 2f(x_i) + f(x_{i+1})]$$

พิจารณาพจน์  $f(x_{i-1}) - 2f(x_i) + f(x_{i+1})$  โดยใช้วิธีการกระจายอนุกรมเทเลอร์

$$f(x_{i-1}) = f(x_i) \quad (3.13)$$

$$f(x_{i-1}) = f(x_i) + \Delta x f'(x_i) + \frac{(\Delta x)^2}{2} f''(x_i) + \frac{(\Delta x)^3}{6} f'''(x_i) + \dots \quad (3.14)$$

$$f(x_{i-1}) = f(x_{i-1}) + 2\Delta x f'(x_{i-1}) + \frac{(2\Delta x)^2 f''(x_{i-1})}{2} + \frac{(2\Delta x)^3 f'''(x_{i-1})}{6} + \dots \quad (3.15)$$

แทนค่าสมการ (3.13), (3.14) และสมการ (3.15) ลงใน

$$f(x_{i-1}) - 2f(x_i) + f(x_{i+1}) \text{ จะได้}$$

$$f(x_{i-1}) - 2f(x_i) + f(x_{i+1}) = f(x_{i-1}) - 2f(x_i - 1) - 2\Delta x f'(x_{i-1}) - (\Delta x)^2 f''(x_{i-1})$$

$$- \frac{1}{3}(\Delta x)^3 f'''(x_{i-1}) + \dots + f(x_{i-1}) + 2(\Delta x) f'(x_{i-1})$$

$$+ 2(\Delta x)^2 f''(x_{i-1}) + \frac{2}{3}(\Delta x)^3 f'''(x_{i-1}) + \dots \quad (3.16)$$

$$f(x_{i-1}) - 2f(x_i) + f(x_{i+1}) \approx (\Delta x)^2 f''(x_{i-1}) - \frac{1}{3}(\Delta x)^3 f'''(x_{i-1}) \dots$$

$$+ 2(\Delta x)^2 f''(x_{i-1}) + \frac{2}{3}(\Delta x)^3 f'''(x_{i-1}) + \dots$$

$$\therefore f(x_{i-1}) - 2f(x_i) + f(x_{i+1}) \approx f''(x_i, t) + O(\Delta x)^2$$

เมื่อ  $O(\Delta x)^2$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนในลำดับที่ 2 จากสมการตั้งต้นพิจารณา

ในพจน์

$$f^{n+1}(x_i) - f^n(x_i)$$

$$f^{n+1}(x_i) - f^n(x_i) = \frac{D\Delta t}{(\Delta x)^2} [f(x_{i-1}) - 2f(x_i) + f(x_{i+1}))], \quad r = \frac{D\Delta t}{(\Delta x)^2}$$

$$\frac{f^{n+1}(x_i) - f^n(x_i)}{\Delta t} = \frac{\partial f(x_i)}{\partial t}$$

ดังนั้น

$$\frac{f^{n+1}(x_i) - f^n(x_i)}{\Delta t} = \frac{\partial f(x_i)}{\partial t} \approx O(\Delta t)$$

เมื่อ  $O(\Delta t)$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อน ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมด จะได้ดัง  
สมการ

$$\text{error} \propto O(\Delta t) + O(\Delta x)^2 \quad (3.17)$$

## 2. วิธีโดยปริยาย (implicit method)

หลักการ คือ จัดค่าใหม่ให้อยู่ด้านขวามือทั้งหมด จากสมการตั้งต้นในสมการ (3.11) โดยกำหนดให้  $n+1$  เป็นค่าใหม่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และ  $n$  เป็นค่าเก่าที่เวลาดั้งต้นและในพจน์ ซ้ายมือของสมการ (3.11) กำหนดให้  $f$  เป็นค่า  $n+1$  ทั้งหมด จาก สมการตั้งต้น สมการ (3.11) จะได้ สมการเป็น

$$\begin{aligned} f^{n+1}(x_i) - f^n(x_i) &= r[f^{n+1}(x_{i-1}) - 2f^{n+1}(x_i) + f^{n+1}(x_{i+1})] \\ f^n(x_i) &= f^{n+1}(x_i) - r f^{n+1}(x_{i-1}) + 2f^{n+1}(x_i) - r f^{n+1}(x_{i+1}) \\ \therefore f^n(x_i) &= -r f^{n+1}(x_{i-1}) + (1+2r) f^{n+1}(x_i) - r f^{n+1}(x_{i+1}) \end{aligned} \quad (3.18)$$

เมื่อ  $i = 1, 2, 3, \dots, N-1$

จากสมการ (3.18) นำมาแก้สมการ โดยใช้เมทริกซ์ในการแก้สมการ โดยแทนค่า  $i$  แต่ละค่าลงในสมการ (3.18) จะได้

$$\begin{aligned} -r f^{n+1}(x_0) + (1+2r) f^{n+1}(x_1) - r f^{n+1}(x_2) &= f^n(x_1) & , i=1 \\ -r f^{n+1}(x_1) + (1+2r) f^{n+1}(x_2) - r f^{n+1}(x_3) &= f^n(x_2) & , i=2 \\ -r f^{n+1}(x_2) + (1+2r) f^{n+1}(x_3) - r f^{n+1}(x_4) &= f^n(x_3) & , i=3 \\ \vdots & & \vdots \\ -r f^{n+1}(x_{N-2}) + (1+2r) f^{n+1}(x_{N-1}) - r f^{n+1}(x_N) &= f^n(x_{N-1}), i=N-1 \end{aligned}$$

เขียนในรูปเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} (1+2r) & -r & 0 & \cdots & 0 \\ -r & (1+2r) & -r & \ddots & \vdots \\ 0 & -r & (1+2r) & -r & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & \cdots & 0 & -r & (1+2r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f^{n+1}(x_1) \\ f^{n+1}(x_2) \\ f^{n+1}(x_3) \\ \vdots \\ f^{n+1}(x_{N-1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r f^{n+1}(x_0) + f^n(x_1) \\ f^n(x_2) \\ f^n(x_3) \\ \vdots \\ f^n(x_{N-1}) \end{bmatrix}$$

ในการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนนั้น จะใช้วิธีการกระจายอนุกรมเทเลอร์ เช่นเดียวกับวิธีซัดเจ็ง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดจะได้ดังสมการ

$$\text{error} \propto O(\Delta t) + O(\Delta x)^2 \quad (3.19)$$

3. วิธีแครงค์-นิโคลสัน (Crank-Nicolson method) เป็นการรวมวิธีซัดเจ็งและวิธีโดยปริยายไว้ด้วยกัน

$$\text{จาก } r = \frac{D\Delta t}{(\Delta x)^2} \text{ กำหนดให้ } r = 2S \text{ จากวิธีซัดเจ็งในสมการ (3.14)}$$

$$f^{n+1}(x_i) = r f^n(x_{i-1}) + (1-2r) f^n(x_i) + r f^n(x_{i+1}) \quad (3.20)$$

และจากวิธีโดยปริยายในสมการ (3.20)

$$f^n(x_i) = -r f^{n+1}(x_{i-1}) + (1+2r) f^{n+1}(x_i) - r f^{n+1}(x_{i+1}) \quad (3.21)$$

นำสมการ (3.20) + (3.21) จะได้

$$-r f^{n+1}(x_{i-1}) + (2+2r) f^{n+1}(x_i) - r f^{n+1}(x_{i+1}) = r f^n(x_{i-1}) + (2-2r) f^n(x_i) + r f^n(x_{i+1})$$

แทนค่า  $r = 2S$  และนำ 2 หารตลอดสมการ จะได้

$$-S f^{n+1}(x_{i-1}) + (1+2S) f^{n+1}(x_i) - S f^{n+1}(x_{i+1}) = S f^n(x_{i-1}) + (1-2S) f^n(x_i) + S f^n(x_{i+1}) \quad (3.22)$$

เมื่อ  $i = 1, 2, 3, \dots, N-1$

จากสมการ (3.22) นำมาแก้สมการโดยใช้เมทริกซ์ในการแก้สมการ โดยแทนค่า  $i$  แต่ละค่าลงในสมการ (3.22) จะได้

$$-S f^{n+1}(x_0) + (1+2S) f^{n+1}(x_1) - S f^{n+1}(x_2) = S f^n(x_0) + (1-2S) f^n(x_1) + S f^n(x_2) \quad , i=1$$

$$-S f^{n+1}(x_1) + (1+2S) f^{n+1}(x_2) - S f^{n+1}(x_3) = S f^n(x_1) + (1-2S) f^n(x_2) + S f^n(x_3) \quad , i=2$$

$$\begin{aligned}
-Sf^{n+1}(x_2) + (1+2S)f^{n+1}(x_3) - Sf^{n+1}(x_4) &= Sf^n(x_2) + (1-2S)f^n(x_3) + Sf^{n+1}(x_4) \\
&\vdots & \vdots \\
-Sf^{n+1}(x_{N-2}) + (1+2S)f^{n+1}(x_{N-1}) - Sf^{n+1}(x_N) &= Sf^n(x_{N-2}) + (1-2S)f^n(x_{N-1}) + Sf^{n+1}(x_N)
\end{aligned}$$

, i=3  
:  
, i=N-1

เขียนในรูปเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix}
(1+2S) & -S & 0 & \cdots & 0 \\
-S & (1+2S) & -S & \ddots & \vdots \\
0 & -S & (1+2S) & -S & 0 \\
\vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\
0 & \cdots & 0 & -S & (1+2S)
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
f^{n+1}(x_1) \\
f^{n+1}(x_2) \\
f^{n+1}(x_3) \\
\vdots \\
f^{n+1}(x_{N-1})
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
(1-2S) & S & 0 & \cdots & 0 \\
S & (1-2S) & S & \ddots & \vdots \\
0 & S & (1-2S) & S & 0 \\
\vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\
0 & \cdots & 0 & S & (1-2S)
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
f^n(x_1) \\
f^n(x_2) \\
f^n(x_3) \\
\vdots \\
f^n(x_{N-1})
\end{bmatrix}
+
\begin{bmatrix}
S[f^{n+1}(x_0) + f^n(x_0)] \\
0 \\
0 \\
\vdots \\
0
\end{bmatrix}$$

ค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดจึงเป็นดังสมการ (3.23)

$$\text{error} \propto O(\Delta t)^2 + O(\Delta x)^2 \quad (3.23)$$

งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี Crank Nicolson ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในรูปของค่าความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลา โดยเลือกเหตุการณ์การปะทุที่เกิดขึ้นจริงบนดวงอาทิตย์ และกำหนดค่าตั้งต้นต่างๆ ที่จำเป็นในการจำลองการเคลื่อนที่ โดยการจำลองการเคลื่อนที่นั้น ผู้วิจัยใช้การเขียนโปรแกรมการจำลองด้วยภาษาซี และประมวลผลบนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ ดังจะกล่าวต่อไป

#### การจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคและการเปรียบเทียบข้อมูล

ผู้วิจัยนำค่าตั้งต้นที่เกี่ยวกับการจำลองการเคลื่อนที่จัดทำเป็นค่าป้อนให้โปรแกรม โดยข้อมูลดังกล่าวได้จากยานอวกาศ ซึ่งได้แก่ เวลา พลังค์ของอนุภาคและค่าความคลาดเคลื่อน เพื่อนำมาใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยใช้สมการขนส่ง Ruffolo ในโปรแกรมภาษาซีใน

ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ และแก้สมการโดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข เพื่อหาค่าพังก์ชันของอนุภาคตามเวลา จากนั้นนำผลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคมาฟิตข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงที่ได้จากยานอวกาศ โดยใช้วิธีการฟิตแบบกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุด (linear least squares fitting) เพื่อหาระยะทางอิสระเฉลี่ยที่น้อยที่สุด และหาค่าระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคโดยใช้วิธีความกว้างเต็มทีครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด (Full Width at Half Maximum, FWHM) จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากระยะทางอิสระเฉลี่ย (mean free path) และระยะเวลา การปลดปล่อยอนุภาค (Injection time) ทั้งในทิศทางเดียวและในทิศต่างๆ รวมถึง

การพิจารณาถึงผลกระทบเนื่องจากมวลสารจากคอโรนา

โดยโปรแกรมที่ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากสมการขนส่ง Ruffolo ประกอบไปด้วยการไหลของอนุภาค (streaming) การกระเจิงของมุมระยะช่วงเกลียว (pitch-angle scattering) ความยาวโฟกัสแบบแอดิแบติก (adiabatic focusing) การหน่วงแบบแอดิแบติก (adiabatic deceleration) และการปลดปล่อย (injection) ดังนั้นในการจำลองการขนส่งของอนุภาคเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จึงใช้โปรแกรมที่เขียนจากภาษาซี โดยมีโปรแกรมที่ใช้ทั้งหมด 9 โปรแกรม คือ

1. Wind. C จะเป็นโปรแกรมหลักในการจำลองการขนส่งของอนุภาค โดยทำการรับค่าตัวแปรต่าง ๆ จากผู้ใช้งานและเรียกไฟล์อื่น ๆ มาทำการประมวลผลซึ่ง Wind. C โดยตัวแปรที่ใช้ประกอบไปด้วย

starts	ระยะทางเริ่มต้นของการจำลอง $s = vt$ (AU)
stops	ระยะทางสุดท้ายของการจำลอง $s = vt$ (AU)
sstep	ระยะทางการเพิ่มขึ้นของ $s$ (AU)
prints	การพิมพ์ในช่วงระหว่าง (AU)
nmu	จำนวนจุดของ $\mu$
length	ความยาวในการจำลอง(AU)
np	จำนวนโมเมนตัม
p[1...np]	ค่าโมเมนตัมในแต่ละระดับพลังงาน (energy units)
m	มวลของธาตุ (energy units)
betasw	อัตราส่วนของความเร็วลมสุริยะต่อความเร็วแสง
ambda	ระยะทางอิสระเฉลี่ย (AU)
q	ดัชนีกำลังของการกระเจิง
printextra	การสั่งให้พิมพ์ข้อมูลหรือไม่ (0 ไม่พิมพ์/1 พิมพ์)

2. decel.c เป็นโปรแกรมสำหรับประมวลผลของสมการขนส่งอนุภาคของ Ruffolo

3. field.c เป็นโปรแกรมในการประมวลผลการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเส้นสนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์
4. initial.c เป็นโปรแกรมที่ใช้กำหนดการตั้งต้นเพื่อใช้ในการประมวลผลการจำลองการเคลื่อนที่
5. inject.c เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณเกี่ยวกับการปลดปล่อยอนุภาค
6. nrutil.c เป็นโปรแกรมสำหรับใช้ในการสำรองพื้นที่ในหน่วยความจำ
7. printout.c เป็นโปรแกรมสำหรับการแสดงผลของข้อมูลที่ต้องการ
8. stream.c เป็นโปรแกรมที่พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคเนื่องจากการพาของลมสุริยะตามแนวแกน z
9. tridag.c เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการแก้สมการเมตริกซ์

โดยผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ จะเป็นข้อมูลความหนาแน่นอนุภาคตามเวลา ผู้วิจัยจะทำการหาค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุดที่อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กได้ไกลสุดก่อนที่จะกระเจิงเนื่องจากความไม่เรียบของเส้นสนามแม่เหล็ก โดยวิธีการฟิตแบบกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุด (linear least squares fitting)

การฟิตแบบกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุดเป็นเทคนิคที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคกับข้อมูลจริงที่วัดได้จากยานอวกาศแบบกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุดโดยแสดงผลในค่าของผลรวมของค่าความแตกต่างระหว่างจุดข้อมูลจริงกับข้อมูลจากการจำลองกำลังสอง ( $\chi^2$ ) หรือเรียกว่า chi-square ดังสมการ

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[y_n - y(x_n)]^2}{\sigma_n^2} \quad (3.30)$$

เมื่อ  $\chi^2$  คือ ผลรวมของค่าความแตกต่างกำลังสองของข้อมูลจำนวน n ตัว

$y_n$  คือ ข้อมูลจริงจากยานอวกาศ

$y(x_n)$  คือ ข้อมูลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค

$\sigma_n$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลแต่ละจุด

เมื่อเราได้ระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุด ผู้วิจัยจะทำการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ Deconvolution technique เพื่อหาฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาคบนดวงอาทิตย์ และใช้วิธี Full width at half maximum เพื่อหาระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคต่อไป

งานวิจัยนี้เป็นการใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับไปหาคำตอบของปัญหา เนื่องจากเราสามารถรู้คำตอบของปัญหา เราก็จะสามารถย้อนจากคำตอบไปสู่ปัญหาได้ ถ้าให้ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันตอบสนองที่โลก และฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์ มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$R(t) = \int_0^t G(t-t')I(t')dt' \quad (3.31)$$

เมื่อ  $t$  คือ เวลาที่โลก

$t'$  คือ เวลาที่ดวงอาทิตย์

$I(t')$  คือ ฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาคตามเวลาที่ดวงอาทิตย์

$G(t-t')$  คือ ฟังก์ชันการตอบสนองเนื่องจากสมการขนส่งของอนุภาค

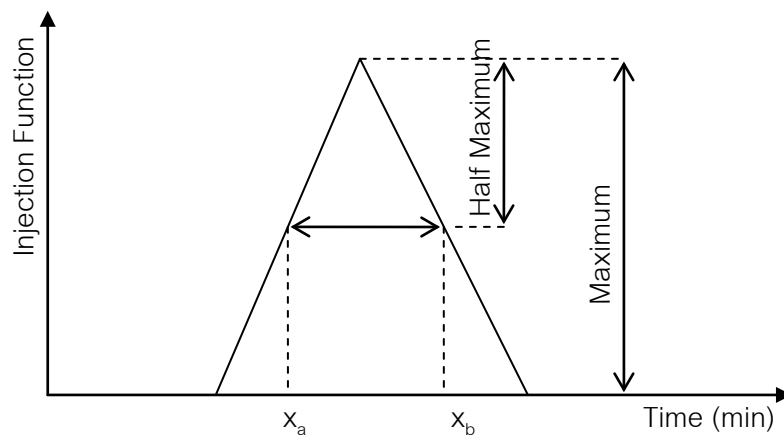
$R(t)$  คือ ฟังก์ชันตอบสนองที่โลก ซึ่งแสดงค่าฟลักซ์ของอนุภาคตามเวลาที่ตรวจวัดได้ที่โลกหรือจากยานอวกาศ

ดังนั้น ถ้าเราทราบฟังก์ชันการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่วัดได้ที่โลกแล้ว  $R(t)$  เราจะสามารถแก้ปัญหาย้อนกลับไปหาฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาคที่ดวงอาทิตย์ได้  $I(t')$

การหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจาก ความกว้างเต็มที่ครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด (Full Width at Half Maximum, FWHM) คือ ค่าความกว้างของระดับจากจุดสูงสุดของกราฟลดลงมาครึ่งหนึ่ง ซึ่งเป็นวิธีการหาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลก โดยเมื่อเราได้ฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาคซึ่งจะอยู่ในรูปลักษณะของรูปสามเหลี่ยม ดังภาพ 3.1 เมื่อ แกน  $y$  คือ ฟังก์ชันการปลดปล่อยและแกน  $x$  คือ เวลาในการปลดปล่อยอนุภาค จากภาพ เราสามารถหาค่าของระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค (FWHM) ได้ดังนี้

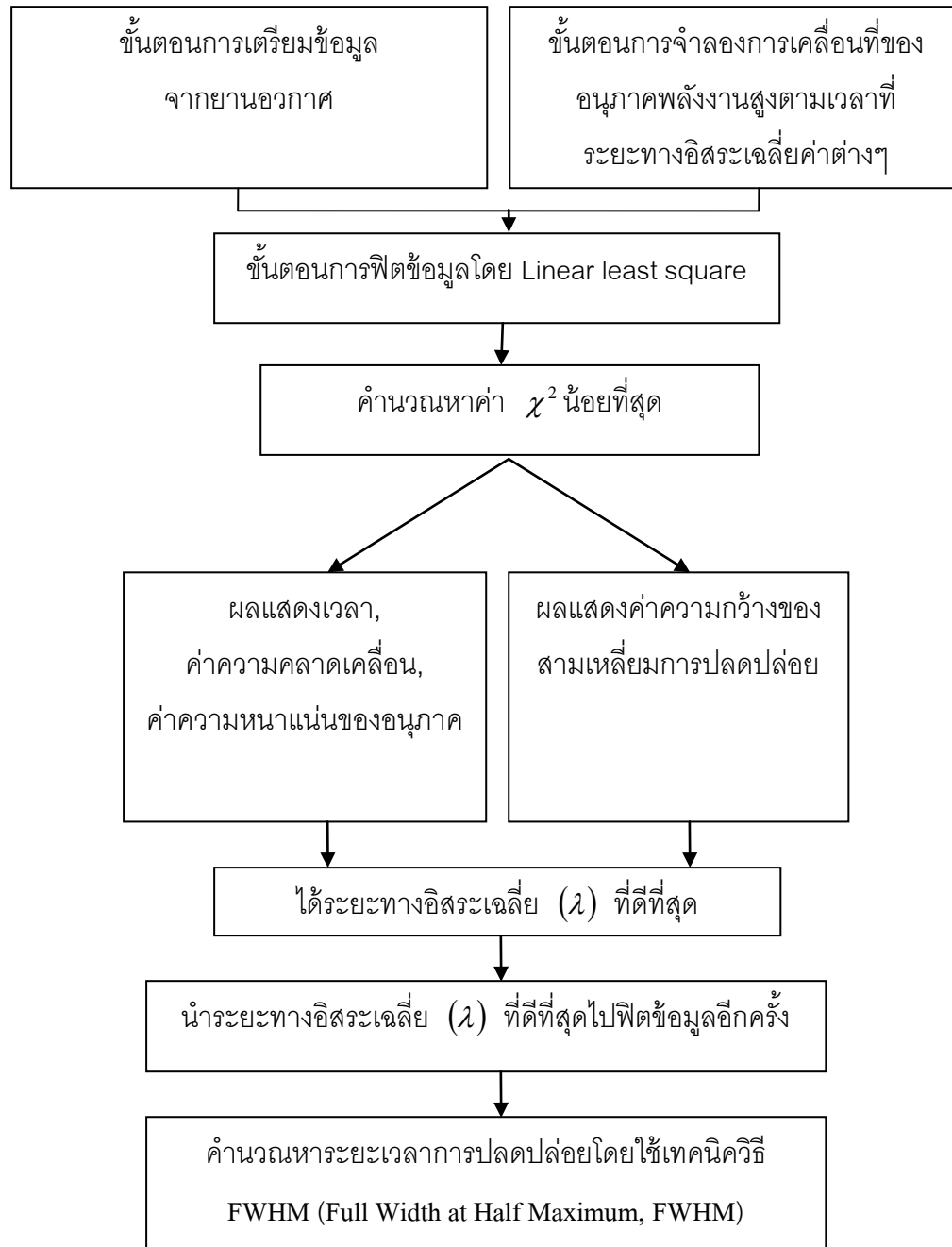
$$\text{Half Maximum} = \text{Maximum}/2$$

$$\text{FWHM} = x_b - x_a = \text{ระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค (injection time)}$$



ภาพ 3.1 แสดงการหาค่า FWHM

โดยค่าระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคที่ได้จะทำให้เราสามารถประมาณระยะเวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลกได้ เพื่อเราจะได้มีเวลาในการแจ้งเตือนภัยที่อาจจะเกิดขึ้นได้ งานวิจัยนี้สามารถสรุปวิธีดำเนินการวิจัยดังแผนภาพต่อไปนี้

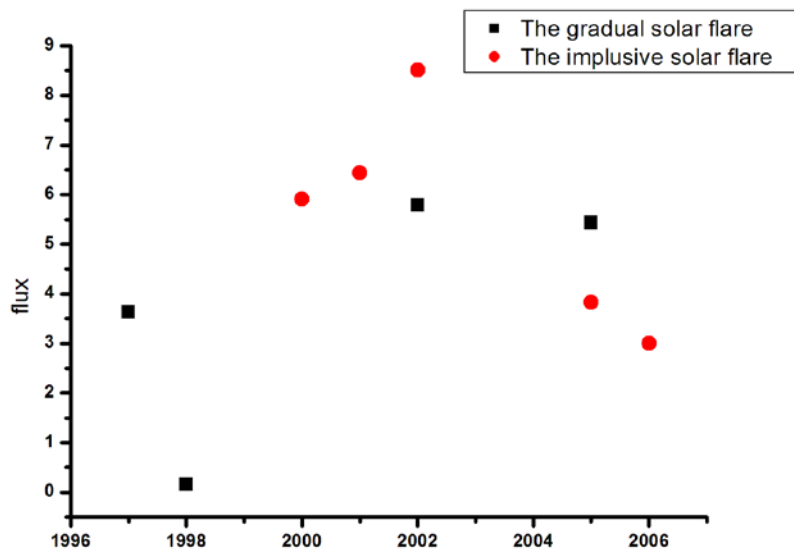


ภาพที่ 3.2 แสดงแผนภาพขั้นตอนการฟิตข้อมูล

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

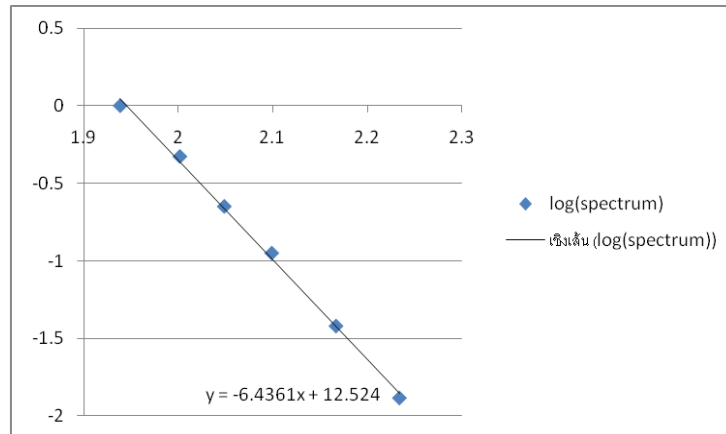
งานวิจัยนี้เลือกเหตุการณ์การปะทุจริงที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ และวิเคราะห์หาค่าโมเมนตัมของแต่ละธาตุที่วิเคราะห์พร้อมทั้งกำหนดระยะเวลาที่จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลก โดยเริ่มขึ้นสำรวจเหตุการณ์การปะทุที่เกิดขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 2007-2011 เพื่อให้สอดคล้องกับรอบวัฏจักรที่ผ่านมา และวิเคราะห์ว่าพบการปะทุประเภททันทีทันใดและค่อยเป็นค่อยไปอย่างไร้ โดยผลการวิเคราะห์ประเภทการปะทุดังแสดงในภาพ 4.1



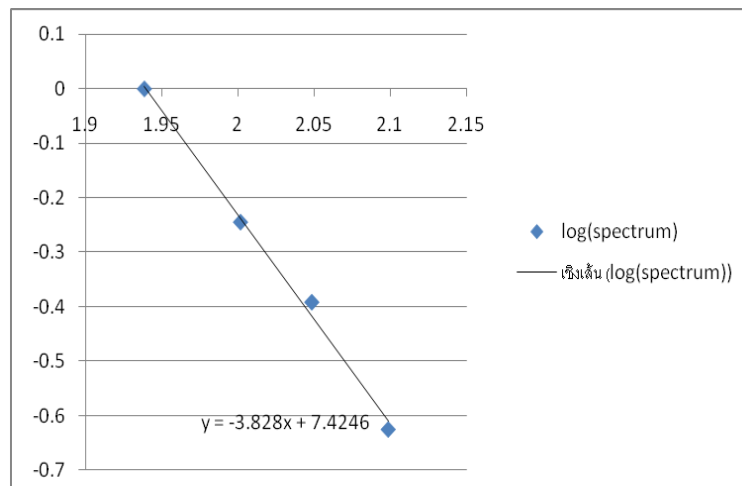
ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการปะทุของอนุภาคแบบค่อยเป็นค่อยไปและแบบทันทีทันใด

โดยพบว่าแนวโน้มความรุนแรงของการปะทุบนดวงอาทิตย์สอดคล้องกับรอบการเปลี่ยนแปลงบนดวงอาทิตย์ หรือที่เรียกว่าวัฏจักรบนดวงอาทิตย์ โดยเหตุการณ์ที่เลือกวิเคราะห์จะเลือกเฉพาะเหตุการณ์ที่มีความรุนแรงของการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ที่สูง

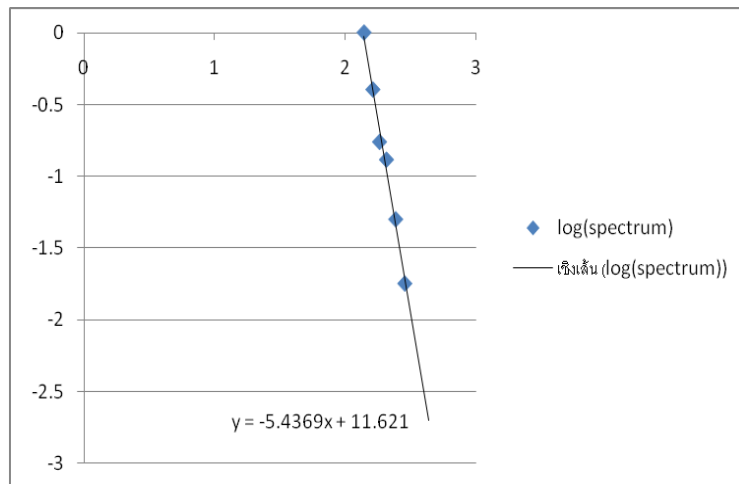
และเมื่อวิเคราะห์การสลายตัวของสเปกตรัมของอนุภาคเพื่อใช้เป็นค่าคงที่ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค พบว่าในแต่ละเหตุการณ์มีความรุนแรงในการปะทุและสลายตัวแตกต่างกัน แต่ส่วนใหญ่จะมีค่าคงที่ที่สูงกว่าสถานการณ์การปะทุปกติ ซึ่งจะมีค่าคงที่การสลายตัวอยู่ที่ 3.2 เปรียบเทียบกับค่าความชันดังแสดงในภาพที่ 4.2



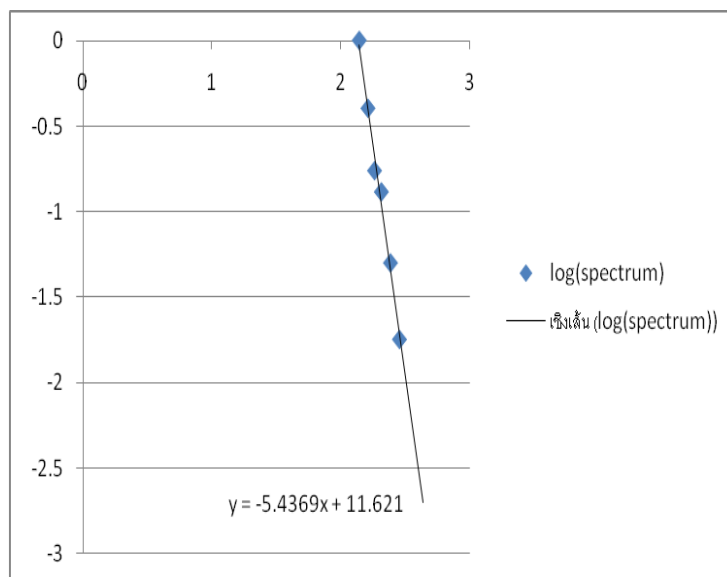
ภาพที่ 4.2 แสดงค่าความชันการปะทุแบบทันทีทันใดของธาตุดอกซิเจนในปี 2001



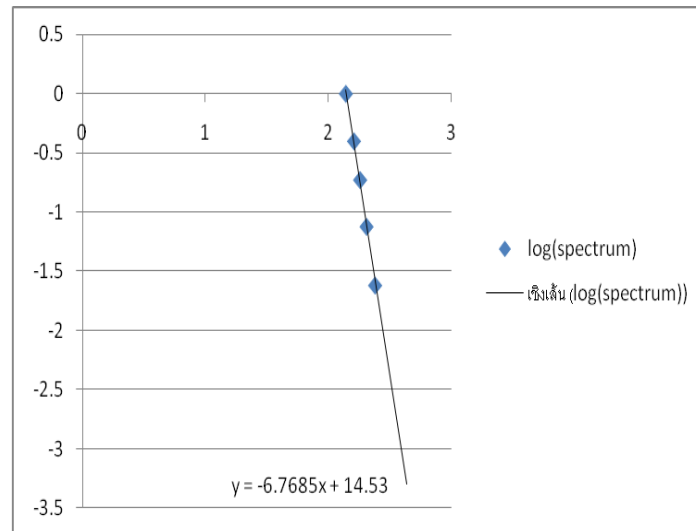
ภาพที่ 4.3 แสดงค่าความชันการปะทุแบบทันทีทันใดของธาตุดอกซิเจนในปี 2005



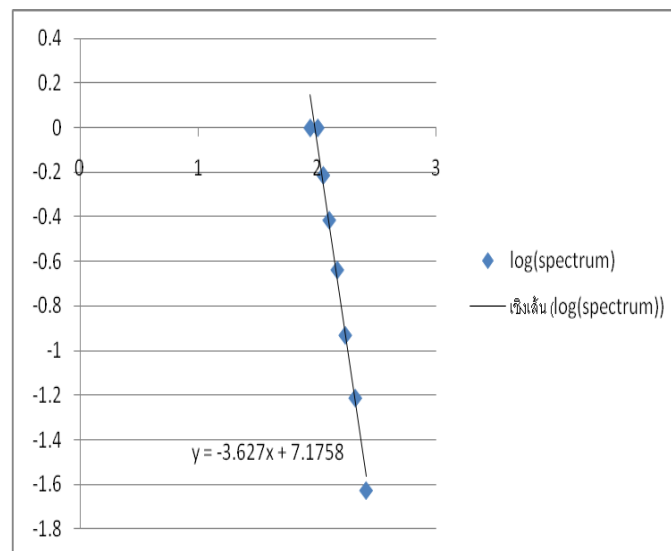
ภาพที่ 4.4 แสดงค่าความชันการปะทุแบบทันทีทันใดของธาตุออกซิเจนในปี 2006



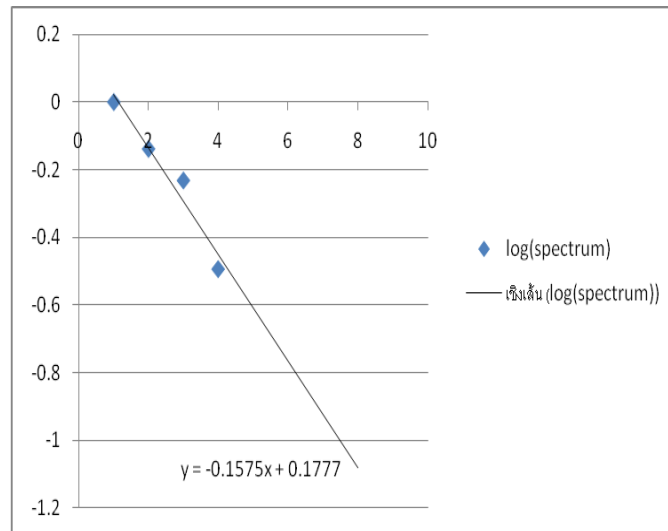
ภาพที่ 4.5 แสดงค่าความชันการปะทุแบบทันทีทันใดของธาตุแมกนีเซียมในปี 2003



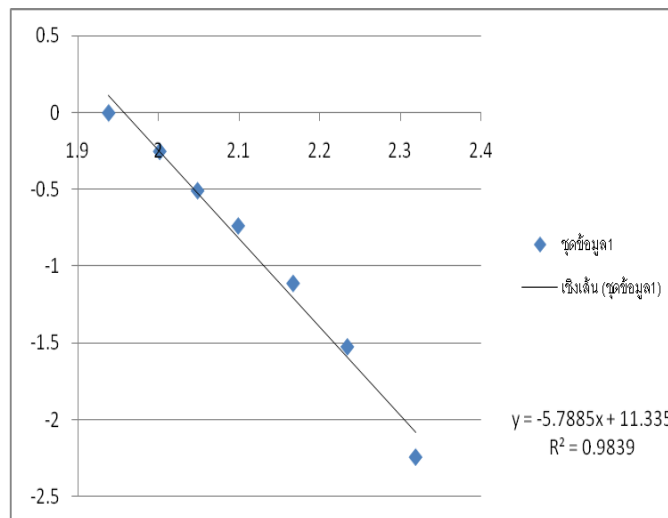
ภาพที่ 4.6 แสดงค่าความชันการปะทุแบบทันทีทันใดของธาตุแมกนีเซียมในปี 2005



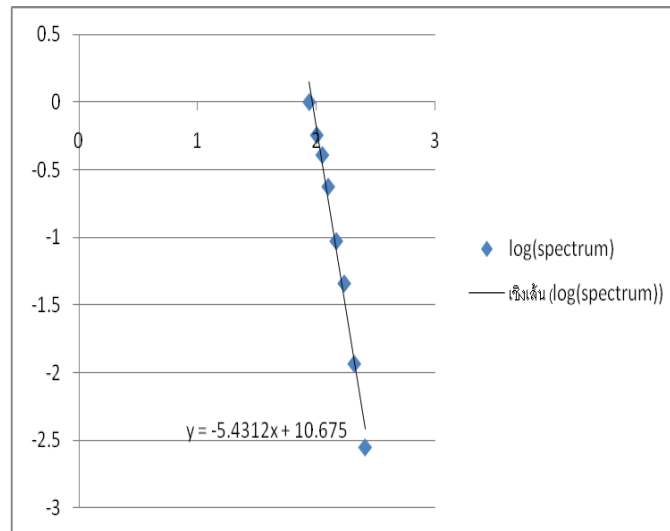
ภาพที่ 4.7 แสดงค่าความชันการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปของธาตุฮีเลียมในปี 1997



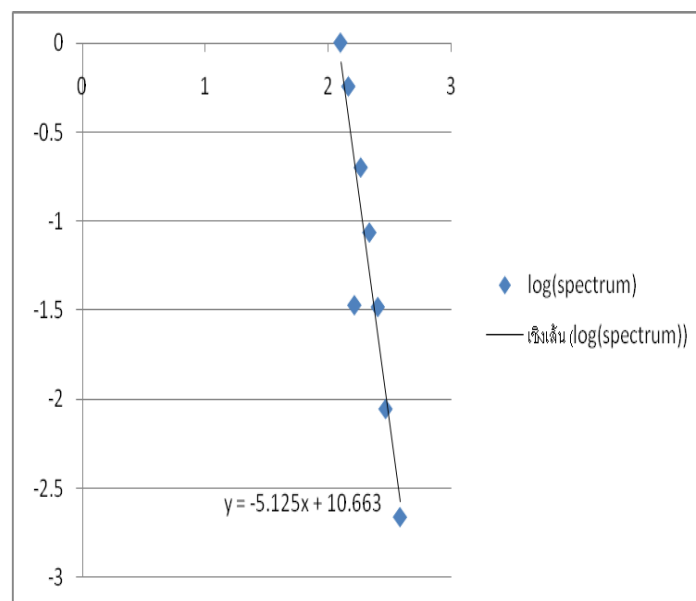
ภาพที่ 4.8 แสดงค่าความชันการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปของธาตุฮีเลียมในปี 1998



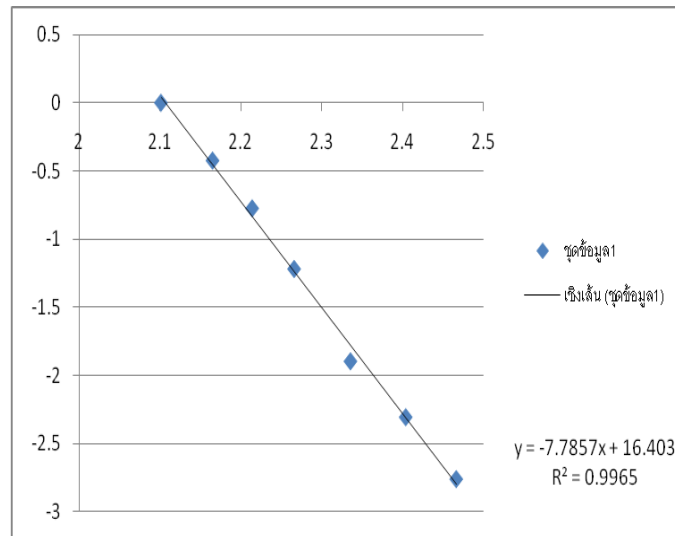
ภาพที่ 4.9 แสดงค่าความชันการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปของธาตุฮีเลียมในปี 2002



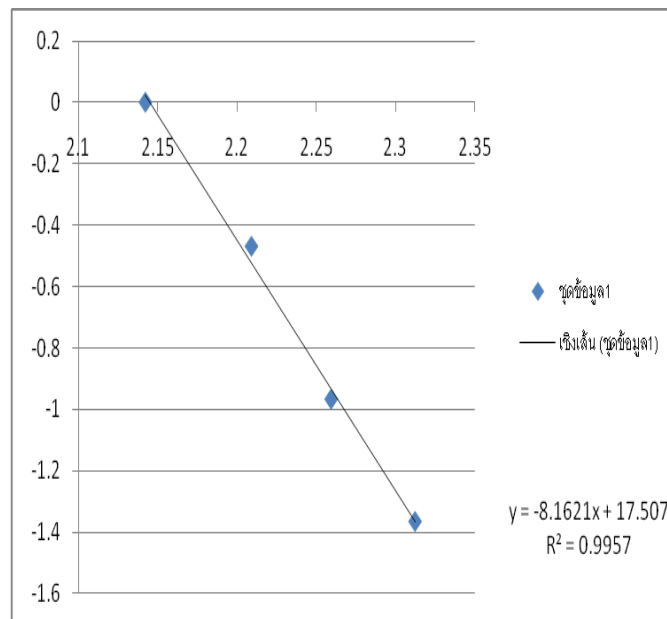
ภาพที่ 4.10 แสดงค่าความชันการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปของธาตูลิเทียมในปี 2005



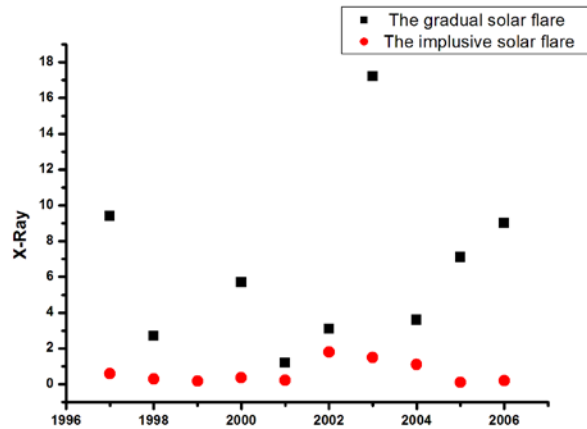
ภาพที่ 4.11 แสดงค่าความชันการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปของธาตุดอกซิเจนในปี 2001



ภาพที่ 4.12 แสดงค่าความชันการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปของธาตุออกซิเจนในปี 2002



ภาพที่ 4.13 แสดงค่าความชันการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปของธาตุแมกนีเซียมในปี 2002



ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่ารังสีเอ็กซ์ของการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปและแบบทันทีทันใด ของรอบวัฏจักร

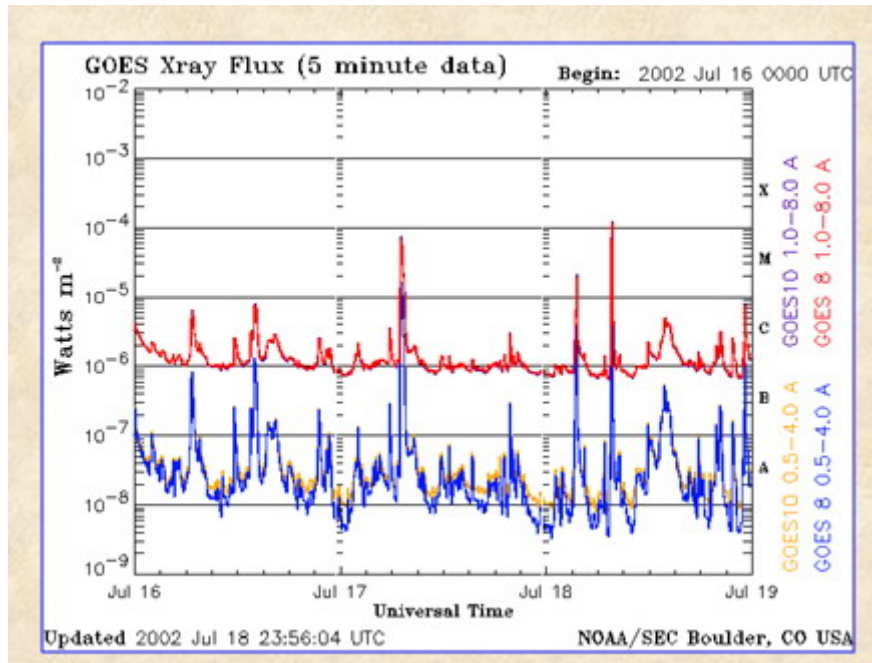
จากผลการวิเคราะห์ค่าสเปกตรัมของการปะทุใต้เหตุการณ์ต่างๆ ทั้งการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปและการปะทุแบบทันทีทันใด พบว่ามีค่าคงที่การสลายตัวสูงกว่าสเปกตรัมการสลายตัวของอนุภาคลังงานสูงที่วัดได้ในอวกาศโดยมีค่าทั่วไปที่ 3.2 แต่ที่วิเคราะห์ได้พบว่าถ้าเป็นการปะทุแบบทันทีทันใดจะมีค่าคงที่การสลายตัวระหว่าง 3.8-6.8 และการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปอยู่ที่ 3.6-8.2 โดยค่าคงที่การสลายตัวจะมากในช่วงปีที่มีการปะทุสูงสุดในรอบวัฏจักร

และเมื่อเลือกเหตุการณ์ตัวอย่างของการปะทุแต่ละประเภทเพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่โดยเลือกเหตุการณ์การปะทุวันที่ 18 กรกฎาคม 2545 เป็นเหตุการณ์ตัวอย่างของการปะทุแบบทันทีทันใด และเหตุการณ์วันที่ 24 สิงหาคม 2545 เป็นตัวอย่างการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยการปะทุทั้ง 2 นี้เกิดในช่วงการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของวัฏจักรที่ 23 ของดวงอาทิตย์ โดยลักษณะทางกายภาพของการปะทุทั้ง 2 เหตุการณ์คือ

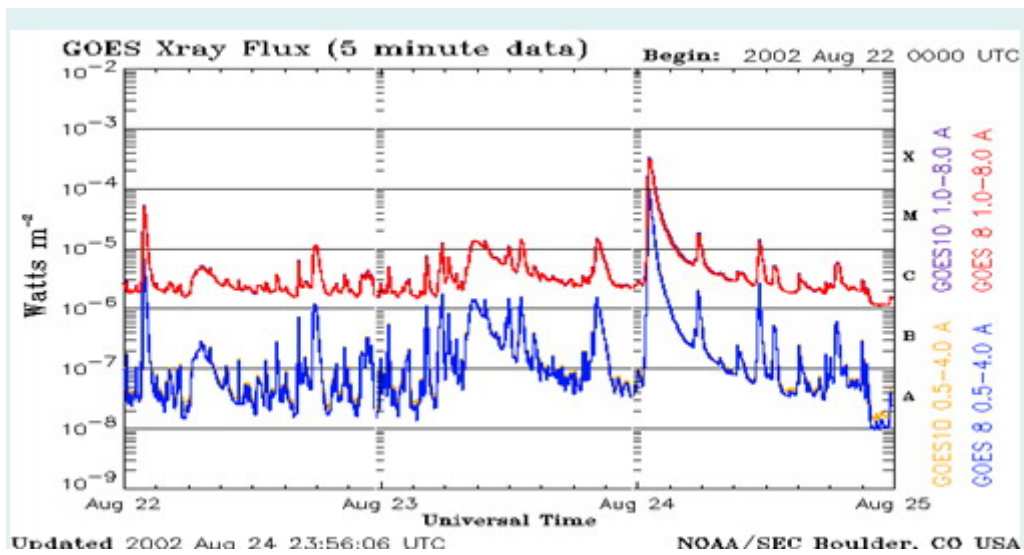
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทั่วไปของเหตุการณ์ที่เลือก

เหตุการณ์	การปะทุแบบทันทีทันใด	การปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป
ลักษณะ	18 กรกฎาคม 2545	24 สิงหาคม 2545
ระดับความรุนแรงรังสีเอ็กซ์	X1.8	X3.1
ความเร็วลมสุริยะ	409.65 km/s	
ระยะเวลาปลดปล่อยอนุภาค	25 นาที	82 นาที
ตรวจพบคลื่นวิทยุ	I, III	II, IV
คลื่นกระแทก	ไม่พบ	พบ

โดยข้อมูลการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ดังแสดงในภาพ 4.15 และ 4.16

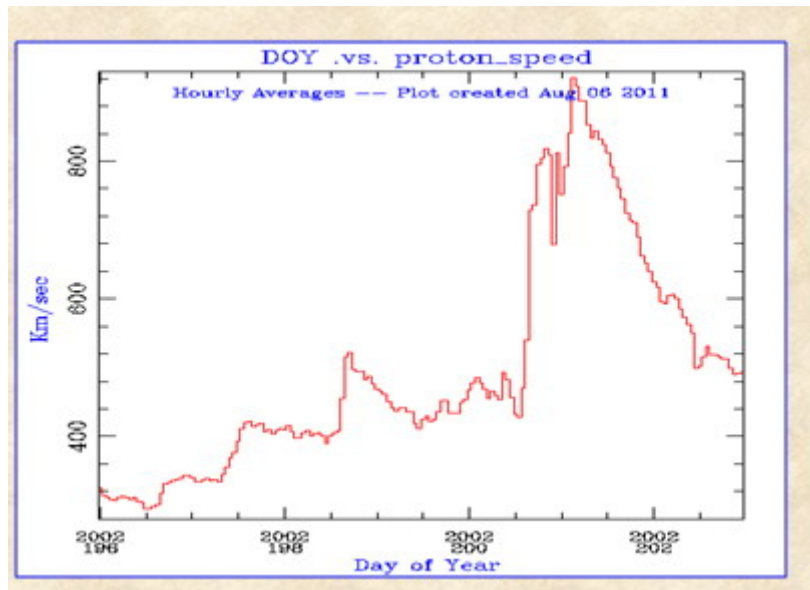


ภาพที่ 4.15 แสดงการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์สำหรับการปะทุวันที่ 18 กรกฎาคม 2545

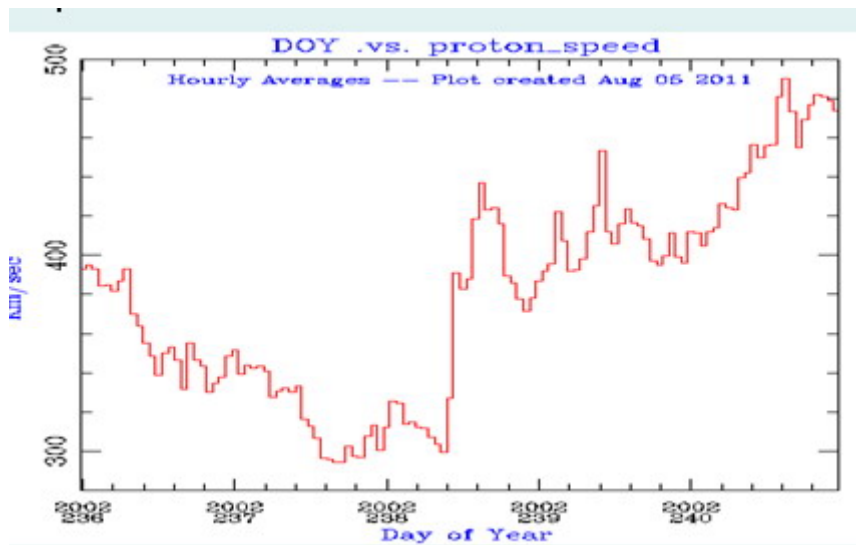


ภาพที่ 4.16 แสดงการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์สำหรับการปะทุวันที่ 24 สิงหาคม 2545

โดยข้อมูลความเร็วลมสุริยะดังแสดงในภาพที่ 4.17 และ 4.18

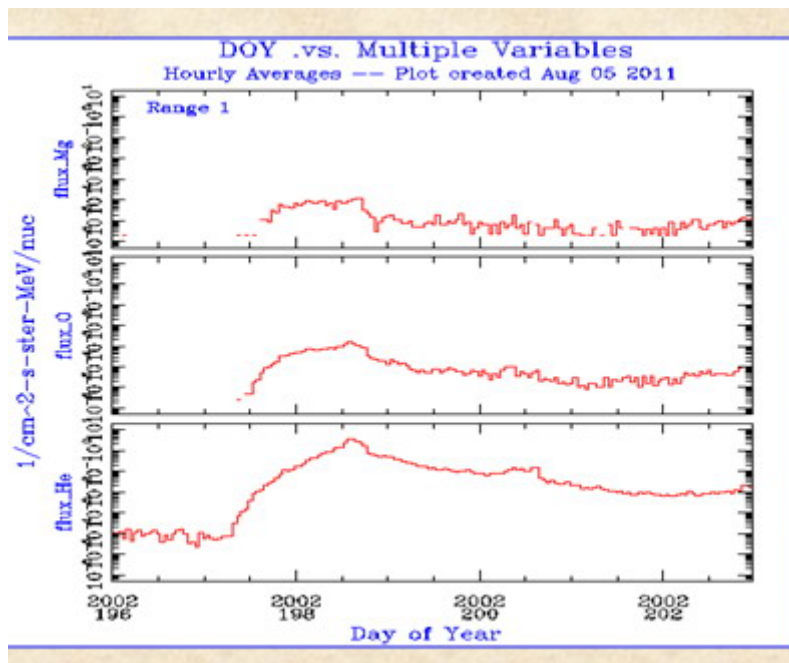


ภาพที่ 4.17 แสดงความเร็วลมสุริยะของวันที่ 18 กรกฎาคม 2545

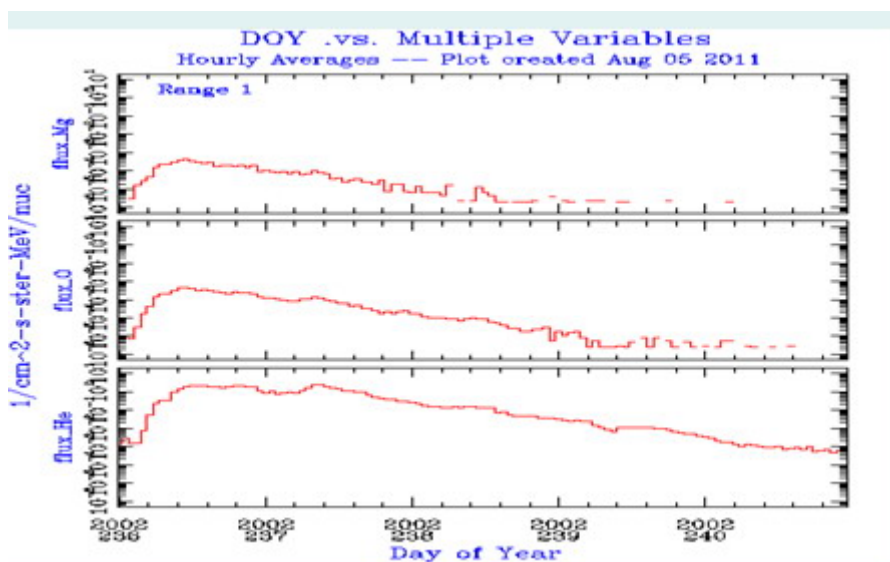


ภาพที่ 4.18 แสดงความเร็วลมสุริยะของวันที่ 24 สิงหาคม 2545

และตัวอย่างการกระจายตัวของอนุภาคของทั้ง 2 เหตุการณ์ดังแสดงในภาพที่ 4.19 และ 4.20

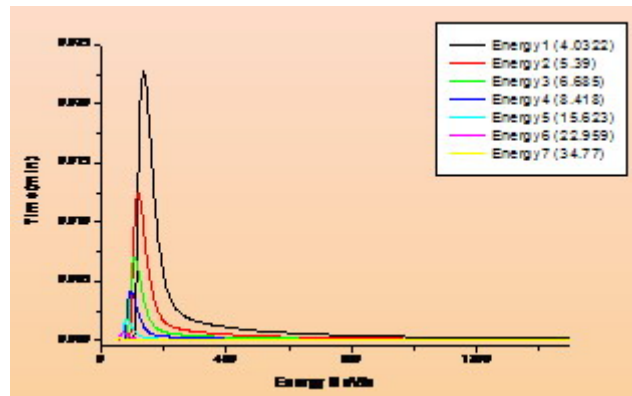


ภาพที่ 4.19 แสดงการกระจายตัวของอนุภาค He, O และ Mg ของการปะทุ  
วันที่ 18 กรกฎาคม 2545



ภาพที่ 4.20 แสดงการกระจายตัวของอนุภาค He, O และ Mg ของการปะทุ  
วันที่ 24 สิงหาคม 2545

และเมื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคในระดับพลังงานต่างๆ พบว่าอนุภาคที่มีพลังงานสูงจะเคลื่อนที่มาถึงโลกก่อนอนุภาคที่มีพลังงานต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคที่ระดับพลังงานต่างๆ

โดยข้อมูลอนุภาคจากยานอวกาศ ACE ตามระดับพลังงานต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลพลังงานของอนุภาคที่ระดับพลังงานต่างๆ

element	Range	E <sub>min</sub> (MeV/n)	E <sub>max</sub> (MeV/n)	E <sub>average</sub> (MeV/n)
Helium-4	0	3.43	4.74	4.03215
	1	4.74	6.13	5.39038
	2	6.13	7.29	6.68489
	3	7.29	9.72	8.41777
	4	9.72	13.59	11.4932
	5	13.59	17.96	15.6229
	6	17.96	29.35	22.9592
	7	29.35	41.19	34.7696
Oxygen	0	7.29675	9.99	8.53783
	1	9.99	13.07	11.4267
	2	13.07	15.63	14.2928
	3	15.63	20.97	18.1042
	4	20.97	29.42	24.8382
	5	29.42	38.94	33.8469
	6	38.94	63.77	49.8318
	7	63.77	89.78	75.6655
Magnesium	0	8.68175	12.16	10.2747
	1	12.16	16.03	13.9615
	2	16.03	19.26	17.5709
	3	19.26	25.99	22.3734
	4	25.99	36.64	30.8589
	5	36.64	48.63	42.2114
	6	48.63	79.97	62.3614
	7	79.97	112.9	95.019

และเมื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคตามระดับพลังงานที่สามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กได้ไกลสุดก่อนที่จะสะท้อนกลับเนื่องจากความไม่เรียบของเส้นสนามแม่เหล็ก ของทั้ง 2 เหตุการณ์ เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์หาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลก ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4

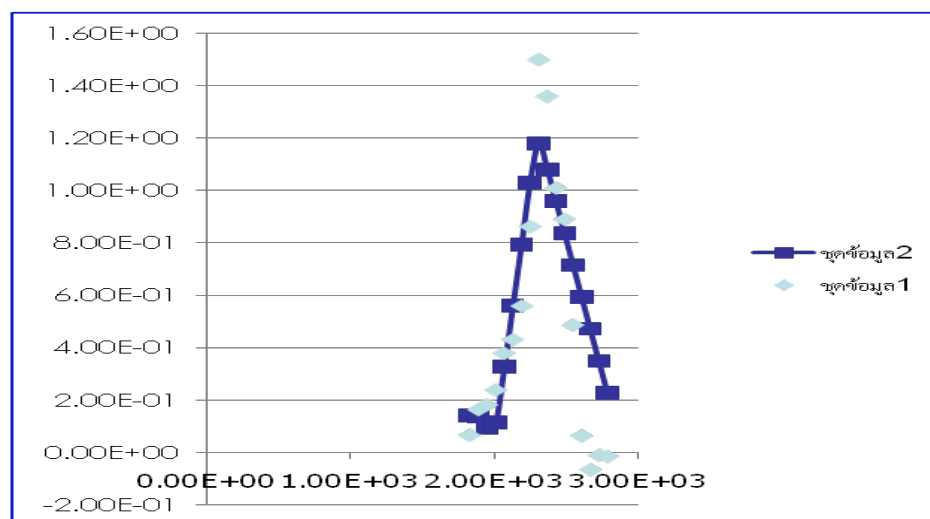
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป

ธาตุ	พลังงาน (MeV/n)	ระยะทางอิสระเฉลี่ย (AU)	ระยะเวลาปลดปล่อยอนุภาค (นาที)
He	4.0322	4.35	1584
	5.39	1.187	792
	6.685	0.866	722
	11.493	1.39	571
	15.623	0.436	470
Mg	10.276	0.766	575
	13.962	1.434	514
	17.571	0.832	745
O	8.538	0.144	116
	11.427	0.439	334
	14.293	0.392	553
	18.104	0.743	657

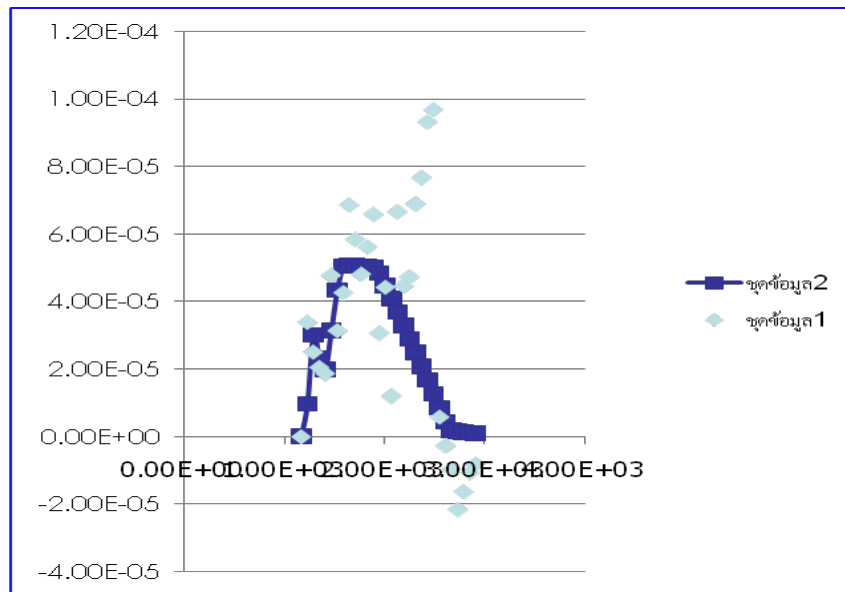
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการปะทุแบบทันทีทันใด

ธาตุ	พลังงาน (MeV/n)	ระยะทางอิสระเฉลี่ย (AU)	ระยะเวลาปลดปล่อยอนุภาค (นาที)
He	4.0322	18.53	247
	5.39	2.465	460
	6.685	2.772	457
	8.418	1.324	265
Mg	10.276	0.102	598
	13.962	0.225	998
	22.373	0.115	409
O	8.538	1.251	732
	14.293	2.452	378
	18.104	1.505	51

ผลการฟิตข้อมูลที่ใกล้เคียงข้อมูลจริงมากที่สุดแสดงด้วยกราฟในภาพที่ 4.2 เป็นต้นไปคือ



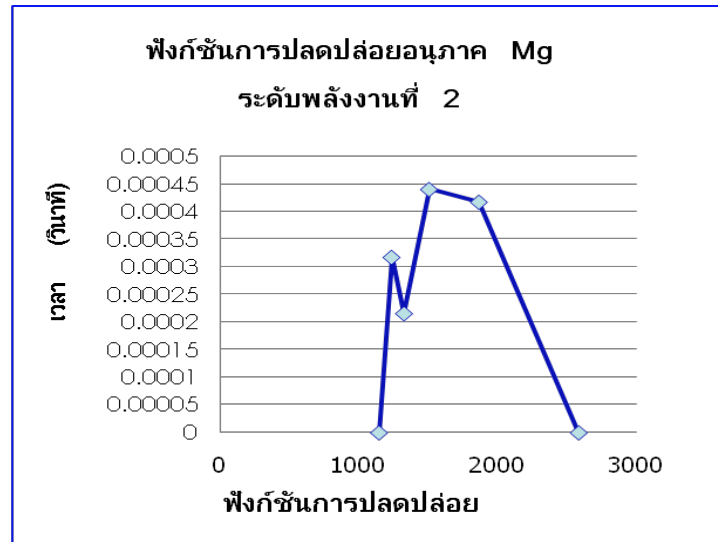
ภาพที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบการฟิตข้อมูลของธาตุซิลิคัม ระดับพลังงานที่ 6.685 MeV/n เมื่อแกน X คือเวลา และแกน Y คือความหนาแน่นอนุภาค



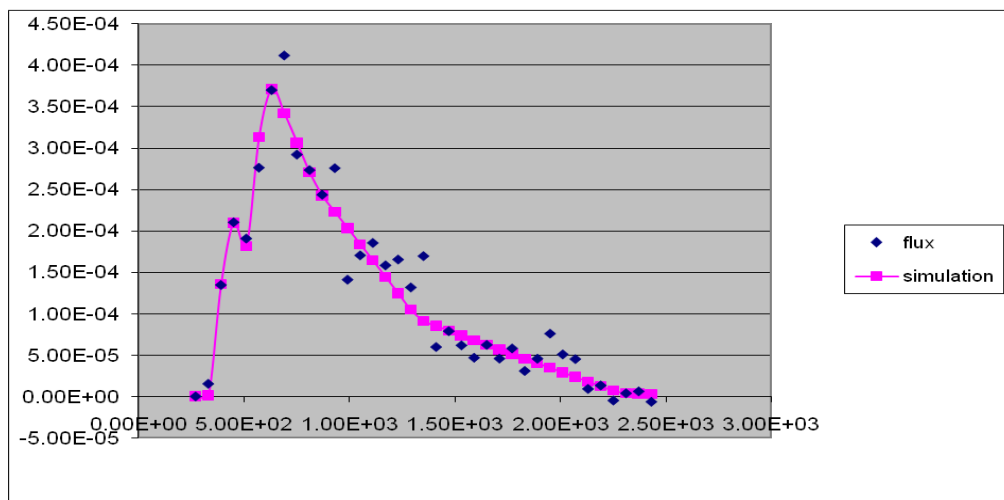
ภาพที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบการฟิตข้อมูลของ ธาตุแมกนีเซียม ระดับพลังงานที่ 13.962 MeV/n เมื่อแกน X คือเวลา และแกน Y คือความหนาแน่นอนุภาค



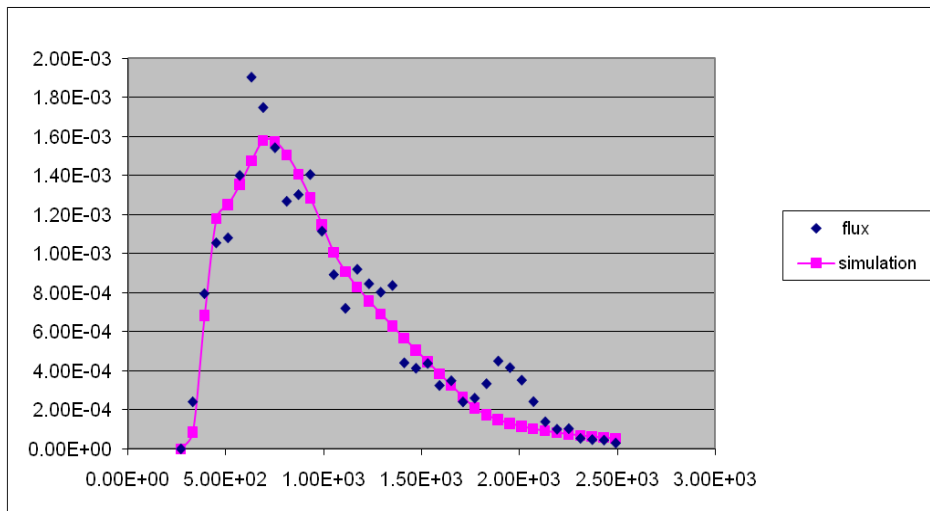
ภาพที่ 4.25 กราฟฟังก์ชันการปลดปล่อยของธาตุฮีเลียม ระดับพลังงานที่ 6.685 MeV/n เมื่อแกน X คือเวลา และแกน Y คือ ฟังก์ชันการปลดปล่อย



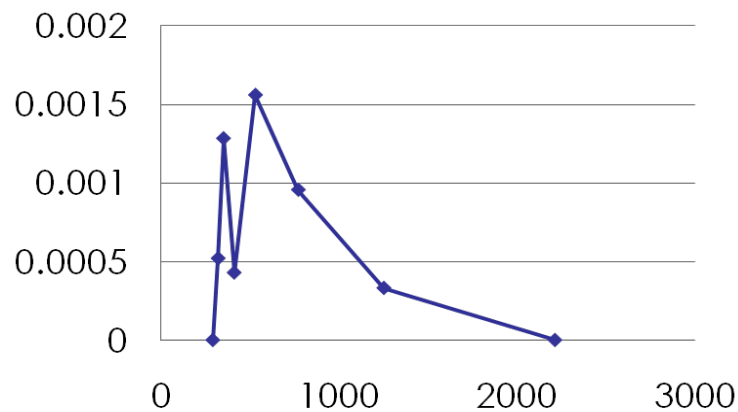
ภาพที่ 4.26 กราฟฟังก์ชันการปลดปล่อยของธาตุแมกนีเซียมระดับพลังงานที่ 13.962 MeV/n  
เมื่อแกน X คือเวลา และแกน Y คือ ฟังก์ชันการปลดปล่อย



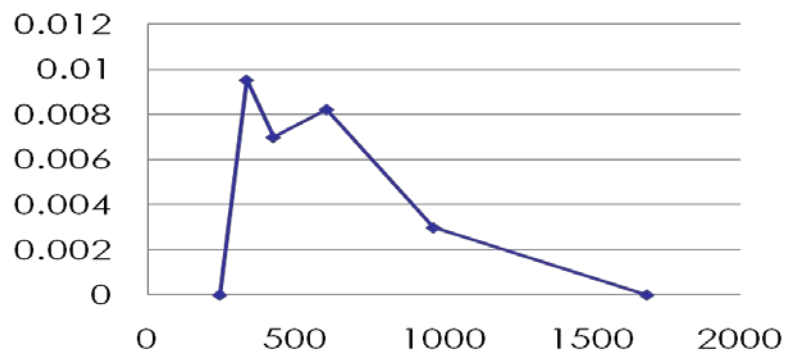
ภาพที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบของการฟิตข้อมูลของธาตุแมกนีเซียม ระดับพลังงานที่  
13.962 MeV/n เมื่อแกน X คือเวลา และแกน Y คือความหนาแน่นอนุภาค



ภาพที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบของการฟิตข้อมูลของธาตุออกซิเจน ระดับพลังงานที่ 14.293 MeV/n เมื่อแกน X คือเวลา และแกน Y คือความหนาแน่นอนุภาค



ภาพที่ 4.29 กราฟการปลดปล่อยอนุภาคธาตุแมกนีเซียมระดับพลังงานที่ 13.962 MeV/n เมื่อแกน X คือเวลา และแกน Y คือ ฟังก์ชันการปลดปล่อย



ภาพที่ 4.30 กราฟการปลดปล่อยอนุภาคธาตุออกซิเจน ระดับพลังงานที่ 14.293 MeV/n

เมื่อแกน X คือเวลา และแกน Y คือ ฟังก์ชันการปลดปล่อย

## บทที่ 5

### สรุปและวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาข้อมูลการเปลี่ยนของสเปกตรัมของอนุภาคที่ถูกปลดปล่อยออกจากดวงอาทิตย์ตามรอบวัฏจักรที่ 23 ของดวงอาทิตย์โดยเริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ.1997 - ค.ศ. 2009 พบว่าในช่วงต้นและช่วงท้ายของวัฏจักร การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมของอนุภาคพลังงานสูงจะมีค่าน้อย แสดงว่าความรุนแรงในการปลดปล่อยอนุภาคน้อย มีการฟุ้งของอนุภาคมาก แต่ในช่วงปี 2002 ซึ่งเป็นช่วงสูงสุดของรอบวัฏจักรค่าสเปกตรัมของอนุภาคโดยรวมจะมีค่าสูงแสดงว่าการปะทุบนดวงอาทิตย์มีความรุนแรงมากและการระเบิดบนดวงอาทิตย์ในช่วงสูงสุดของวัฏจักรมีระดับความรุนแรงของรังสีเอ็กซ์ค่าสูงสุดในระดับ X17 การตรวจพบการระเบิดบนดวงอาทิตย์พบว่าการระเบิดแบบค่อยเป็นค่อยไปจะพบในมากในช่วงสูงสุดของวัฏจักร จากข้อมูลในปัจจุบันพบว่าขณะนี้ดวงอาทิตย์กำลังเริ่มต้นวัฏจักรใหม่วัฏจักรที่ 24 แล้ว จะกำลังค่อยๆ เพิ่มความรุนแรงขึ้นโดยสังเกตจากจำนวนจุดดำที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้น และการปะทุที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์สอดคล้องกับจำนวนจุดดำที่ปรากฏบนดวงอาทิตย์ด้วย และเมื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการปะทุบนดวงอาทิตย์ โดยเลือกเหตุการณ์การปะทุที่มีความรุนแรงสูงโดยวิเคราะห์จากข้อมูลการวัดความเข้มรังสีเอ็กซ์บนดวงอาทิตย์ พบว่าการปะทุทั้งประเภททันทีทันใดและประเภทค่อยเป็นค่อยไปจะมีระดับความรุนแรงสอดคล้องกับรอบวัฏจักรของดวงอาทิตย์ โดยการปะทุที่มีความรุนแรงสูงจะพบในช่วงประมาณปี ค.ศ. 2002 และค่าสเปกตรัมการสลายตัวของอนุภาคจะมีค่าสูงกว่าภาวการณ์สลายตัวของอนุภาคพลังงานสูงในอวกาศมาก แสดงว่าอนุภาคมีการปลดปล่อยอย่างรุนแรงพร้อมทั้งสลายตัวลงอย่างรวดเร็ว เกิดการฟุ้งกระจายในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์น้อย

งานวิจัยนี้เลือกการปะทุแบบทันทีทันใดในวันที่ 18 กรกฎาคม 2545 ซึ่งมีข้อมูลความเร็วลมสุริยะเท่ากับ 409.65 km/s ใช้ระยะเวลาในการปลดปล่อย 25 นาที ความแรงของรังสีเอ็กซ์ X1.8 จากการวิเคราะห์ผลการจำลองของอนุภาคฮีเลียม, แมกนีเซียมและออกซิเจนที่ระดับพลังงานต่างๆพบว่า โนม์ค่าระยะทางเฉลี่ยของอนุภาคฮีเลียม, แมกนีเซียมและออกซิเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามพลังงานที่เพิ่มขึ้น และในส่วนระยะเวลาการของปลดปล่อยของอนุภาคพบว่าอนุภาคของออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงในขณะที่อนุภาคของแมกนีเซียมกับฮีเลียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพราะการกระจายของตัวของอนุภาคไม่สม่ำเสมอที่ได้จากยานอวกาศแสดงว่าขณะเดินทางจากดวงอาทิตย์มายังโลกของธาตุฮีเลียมซึ่งมีพลังงานต่ำถูกรบกวนเนื่องจากตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ได้ง่ายในขณะที่การกระจายตัวของอนุภาคออกซิเจนที่ได้จากยานอวกาศมีความไม่สม่ำเสมอของข้อมูลสูงจึงทำให้ผลการฟิตที่เกิดขึ้นมีความคลาดเคลื่อนจากอนุภาคอื่นๆ

เหตุการณ์การปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป ในวันที่ 24 สิงหาคม พ.ศ. 2545 ซึ่งมีระยะเวลาการปลดปล่อย 82 นาที โดยวัดค่าระดับรังสีเอกซ์ใต้ X3.1 จากการวิเคราะห์ผลการจำลองของอนุภาคในธาตุฮีเลียม แมกนีเซียม และออกซิเจน ที่ระดับพลังงานต่างๆพบว่าแนวโน้มของธาตุแมกนีเซียม และออกซิเจนมีค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยสูงขึ้น แต่ธาตุฮีเลียมมีแนวโน้มค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยต่ำลง จึงไม่เป็นไปตามแนวโน้มค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยของธาตุแมกนีเซียมกับออกซิเจน เพราะธาตุฮีเลียมมีค่าระดับพลังงานต่ำจึงถูกรบกวนระหว่างทางจากดวงอาทิตย์มาถึงโลกทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น และระยะเวลาการปลดปล่อยของอนุภาคในธาตุฮีเลียมและธาตุแมกนีเซียมมีแนวโน้มลดลง แต่ธาตุออกซิเจนที่มีระยะเวลาการปลดปล่อยเพิ่มขึ้น เพราะถูกรบกวนระหว่างทางดาวเคราะห์และการกระจายตัวของอนุภาคไม่สม่ำเสมอจึงทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนขึ้นได้

จากการศึกษาการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลกที่สามารถตรวจวัดได้ด้วยยานอวกาศ ACE แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ โดยวิธีการฟิตแบบกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุด (linear least squares fitting) ในการฟิตวิเคราะห์ข้อมูลการปลดปล่อยอนุภาค โดยการนำฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาคตามเวลา มาเขียนกราฟเพื่อหาระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคที่ดวงอาทิตย์ ซึ่งสอดคล้องกับระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุด จากนั้นเราจะหาฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาคตามฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Piecewise linear injection function) โดยใช้วิธีการ Inversion Problem ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับจากคำตอบไปสู่ปัญหาเริ่มต้น โดยเมื่อเราสามารถหาฟังก์ชันตอบสนองที่โลกได้ เราก็สามารถใช้วิธีการ Inversion Problem ย้อนผลกลับเพื่อหาฟังก์ชันการปลดปล่อยที่แท้จริงจากดวงอาทิตย์ได้ และวิเคราะห์หาระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคด้วยวิธี FWHM (Full Width at Half Maximum) โดยการปะทุ ณ วันที่ 24 สิงหาคม 2545 ซึ่งเป็นการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปมีระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาค 82 นาที และการปะทุ ณ วันที่ 18 กรกฎาคม 2545 ซึ่งเป็นการปะทุแบบทันทีทันใด มีระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค 25 นาที ซึ่งน้อยกว่าระยะเวลาการปลดปล่อยด้วยวิธี FWHM แสดงว่าอนุภาคเกิดการพุ่งเมื่อเคลื่อนที่ออกจากดวงอาทิตย์และมีการรบกวนโดยตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ และอนุภาคจะมีการเร่งของอนุภาคสูงที่บริเวณใกล้ดวงอาทิตย์

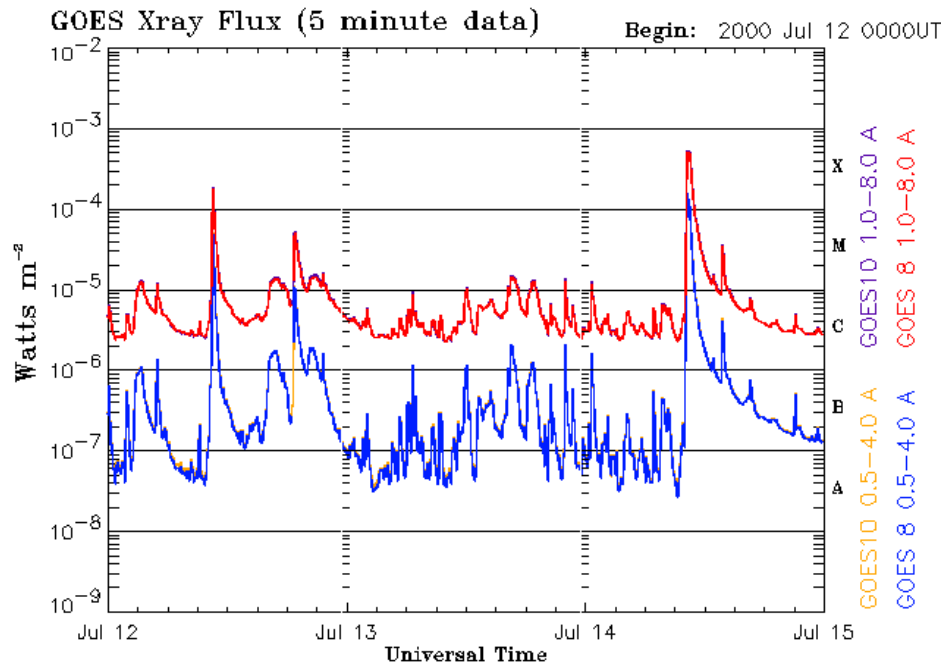
## เอกสารอ้างอิง

- [1] Bieber et al. 2008, Neutron Monitors in the 21<sup>st</sup> Century
- [2] Cliver, E. W. et al. 1989, *Astrophys. J.*, **343**, 953
- [3] Jokipii, J. R. 1966, *Astrophys. J.*, **146**: 480
- [4] Jokipii, J. R. 1971, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **9**: 27
- [5] Bieber, J. W. et al. 2002, *Astrophys. J.*, **567**, 622
- [6] Earl, J. A. 1973, *Astrophys. J.*, **180**: 227
- [7] Earl, J. A. 1976a, *Astrophys. J.*, **205**: 900
- [8] Earl, J. A. 1987, *Proc. 20<sup>th</sup> Internat. Cosmic Ray Conf.*, **3**, 198
- [9] Khumlumlert and Kasanuk, 2008, *Proc. 4<sup>th</sup> Mahasarakham University Research Conf.*, 13
- [10] Reames, D. V. 1990, *Astrophys. J.*, **358**, L63
- [11] Roelof, E. C. 1969, *Lectures in High Energy Astrophysics* ed. H. Ogelman & J.R. Wayland (NASA SP-199) (Washington: NASA), 111-135
- [12] Ruffolo, D. 1991, *Astrophys. J.*, **382**, 688
- [13] Ruffolo, D. 1995, *Astrophys. J.*, **442**, 861
- [14] Ruffolo, D. and Khumlumlert, T. 1995, *Geophysical Research Letters*, **22**, 2073
- [15] Ruffolo, D., Khumlumlert T., and Youngdee W. 1998, *J. Geophys. Res.*, **103** : 20591
- [16] Ruffolo, D., 1999, *Proc. 3rd Ann. Natl. Symp. Computational Sci. and Eng. (Thailand)*, p. 135
- [17] Ruffolo et al., 2006, *Astrophys. J.*, Relativistic Solar Protons on 1989 October 22: Injection And Transport Along Both Legs of a Closed Interplanetary Magnetic Loop, 639: 1186-1205
- [18] Mason, G. M., Gloeckler, G., & Hovestadt, D. 1984, *Astrophys. J.*, **280**, 902
- [19] Mason, G. M. et al. 1999a, *Geophys. Res. Lett.* **26**, 141
- [20] Möbius E. et al. 1999, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 145
- [21] Ng, C. K., & Wong, K.-Y 1979, *Proc. 16<sup>th</sup> Internat. Cosmic Ray Conf.*, **5**, 252
- [22] Ruffolo, D. and Riyawong, S. 1997, *Proc. 25<sup>th</sup> Internat. Cosmic Ray Conf.*, **1**, 249
- [23] Pauls, H. L., & Burger, R. A. 1994, *Astrophys. J.*, **427**, 927
- [24] Pallavicini, R., Serio, S., & Vaiana, G. S. 1977, *Astrophys. J.*, **216**, 108

- [25] Nutaro, T., Riyawong, S. and Ruffolo, D. 2001, *Computer Physics Communications*, **134**, 209
- [26] Sheeley, N. R., Jr., Howard, R. A., Koomen, M. J., & Michels, D. J. 1983, *Astrophys. J.*, **272**, 349
- [27] Leerunnavarat, K., Ruffolo, D., and Bieber, J. W. ,(submitted to *Astrophys. J.*)

ภาคผนวก

## ข้อมูลการตรวจพบรังสีเอ็กซ์จากการปะทุบนดวงอาทิตย์ในช่วงปี 1997-2009

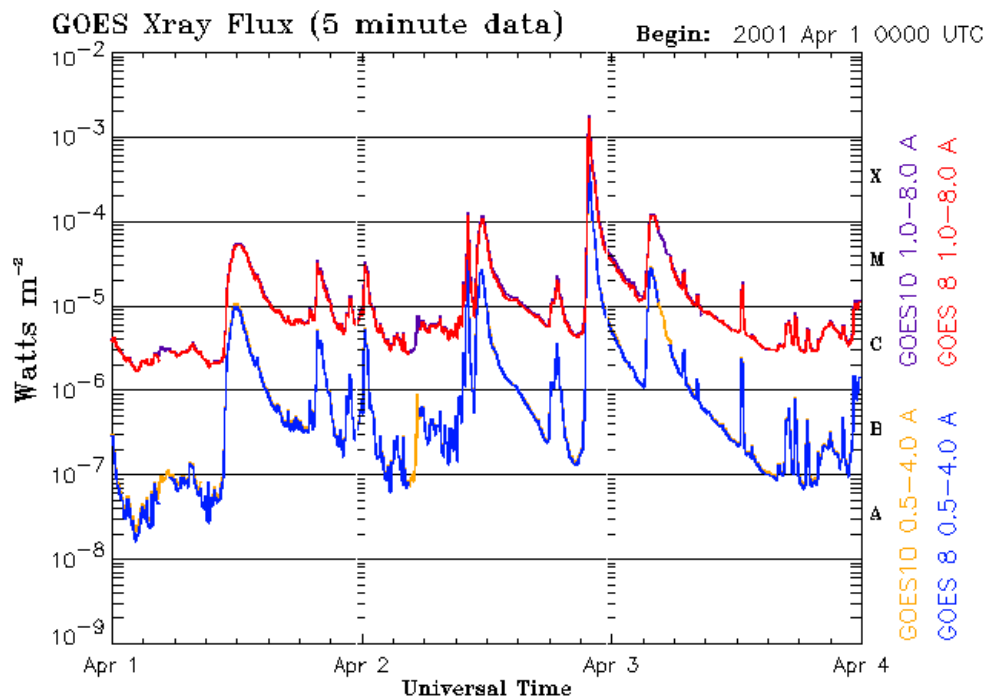


Updated 2000 Jul 14 23:59:03

NOAA/SEC Boulder, CO USA

ระดับความรุนแรงของการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ประเภทการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยดาวเทียม

NOAA (National Oceanic &amp; Atmospheric Administration) ช่วงวันที่ 12 – 15 กรกฎาคม พ.ศ.

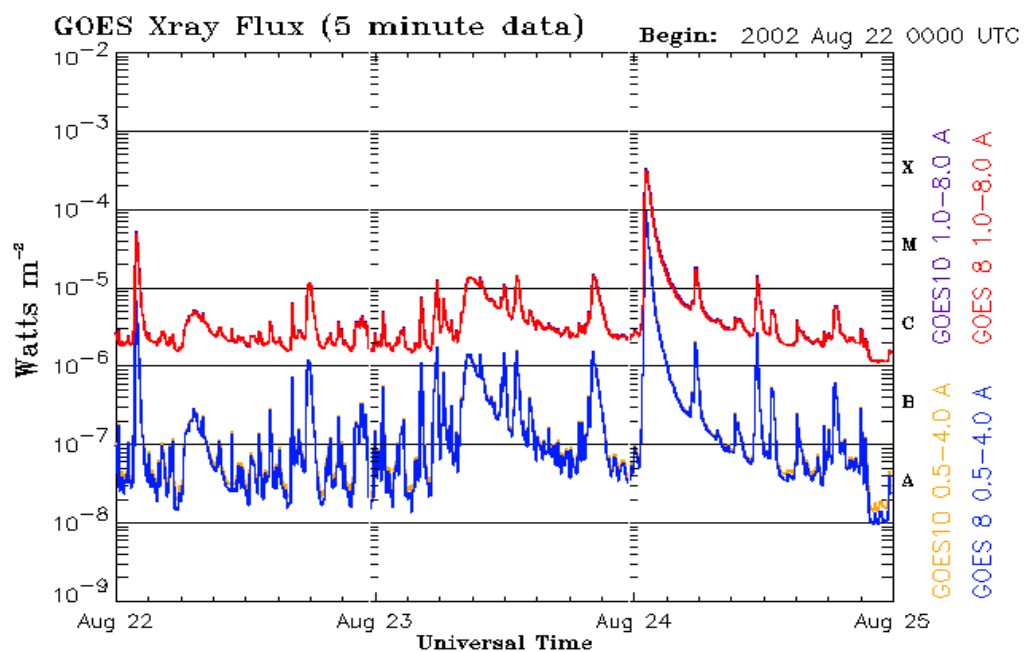


Updated 2001 Apr 3 23:56:05 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

ระดับความรุนแรงของการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ประเภทการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยดาวเทียม

NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) ช่วงวันที่ 1 - 4 เมษายน พ.ศ. 2544

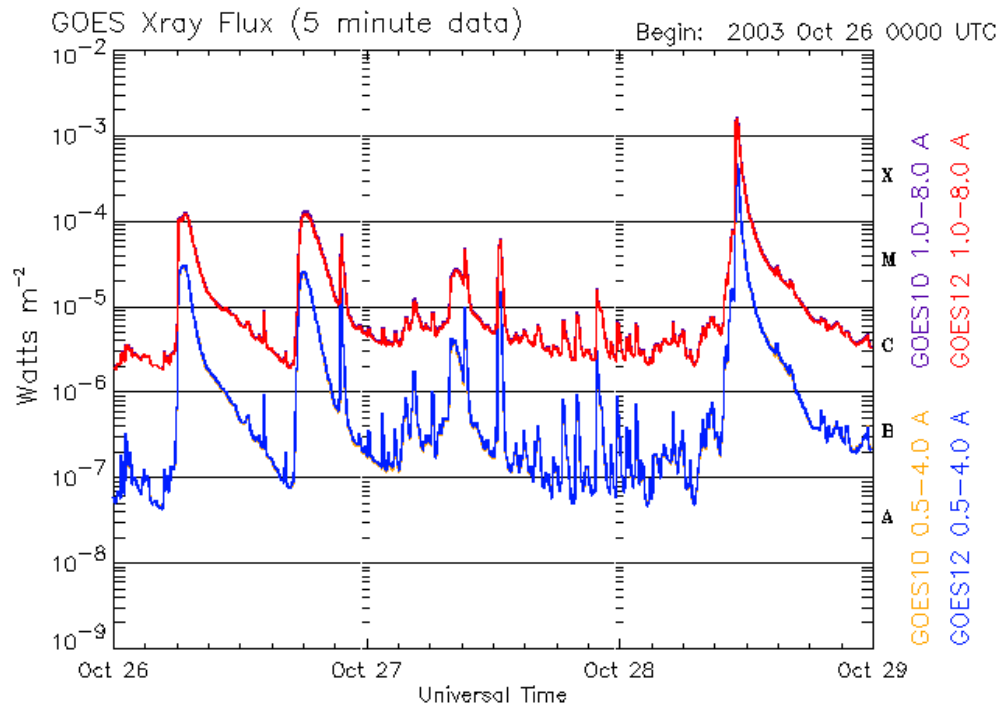


Updated 2002 Aug 24 23:56:06 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

ระดับความรุนแรงของการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ประเภทการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยดาวเทียม

NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) ช่วงวันที่ 22 - 25 สิงหาคม พ.ศ. 2545

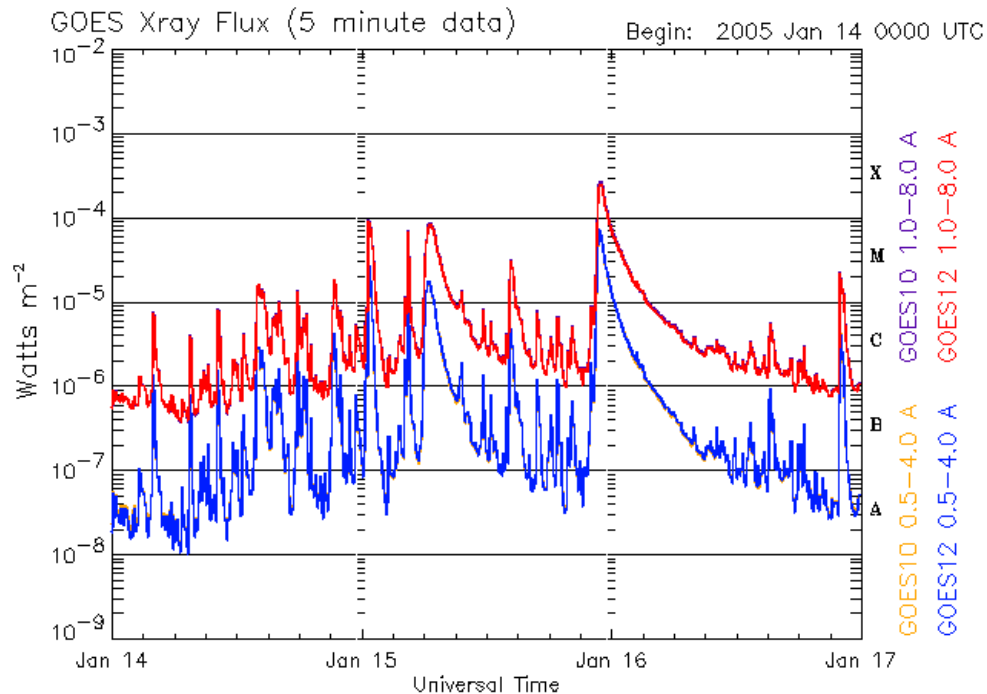


Updated 2003 Oct 28 23:56:06 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

ระดับความรุนแรงของการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ประเภทการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยดาวเทียม

NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) ช่วงวันที่ 26 – 29 ตุลาคม พ.ศ. 2546

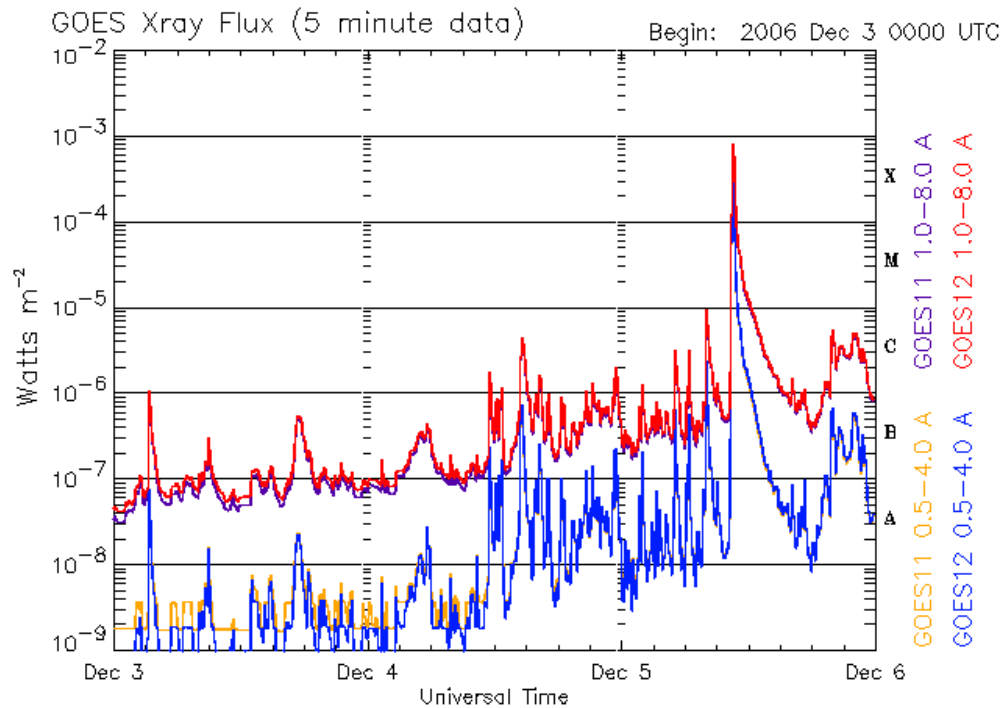


Updated 2005 Jan 16 23:56:04 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

ระดับความรุนแรงของการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ประเภทการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยดาวเทียม

NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) ช่วงวันที่ 14 – 17 มกราคม พ.ศ. 2548

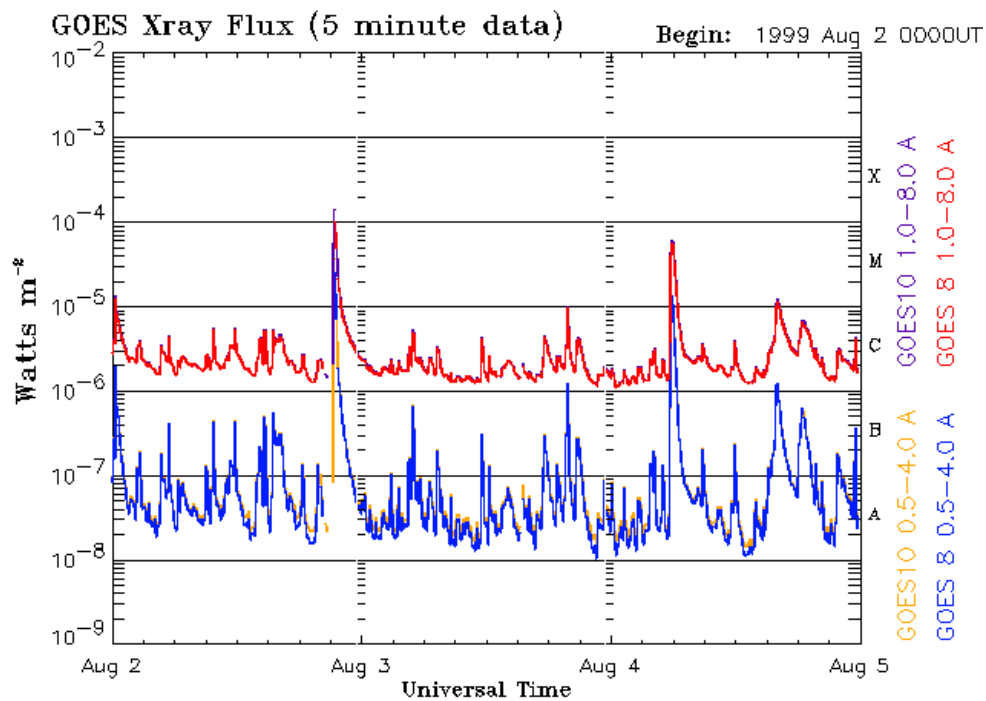


Updated 2006 Dec 5 23:56:07 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

ระดับความรุนแรงของการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ประเภทการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยดาวเทียม

NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) ช่วงวันที่ 3 - 6 ธันวาคม พ.ศ. 2549

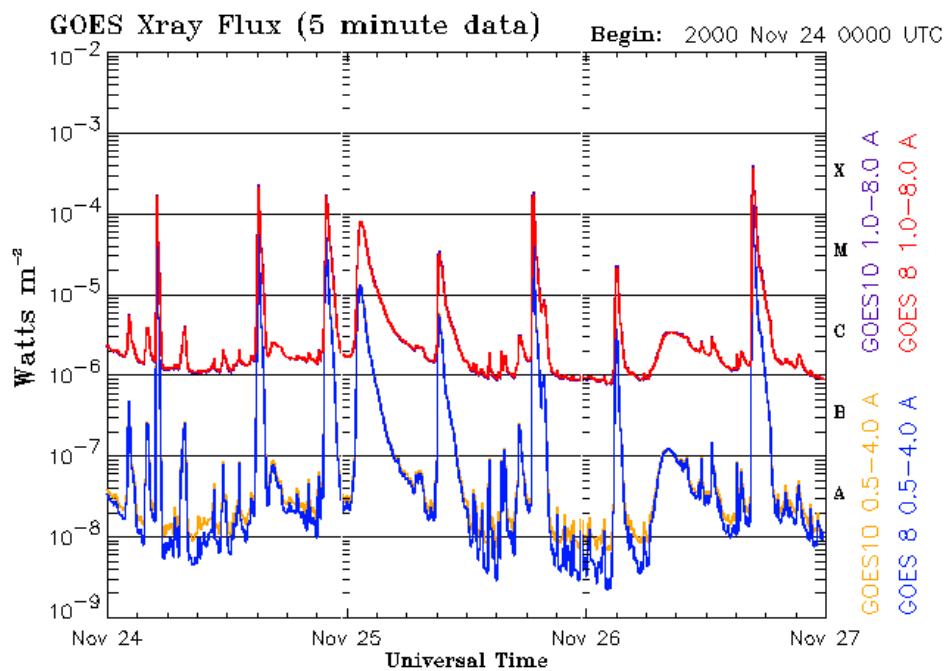


Updated 1999 Aug 4 23:59:10

NOAA/SEC Boulder, CO USA

ระดับความรุนแรงของการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ประเภทการปะทุแบบทันทีทันใด โดยดาวเทียม NOAA

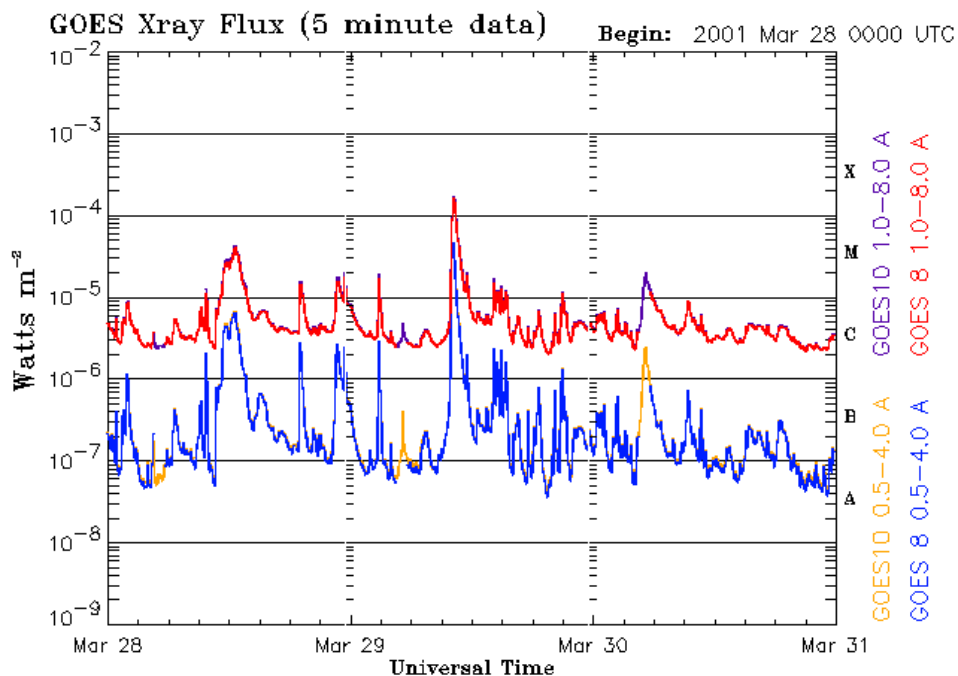
(National Oceanic & Atmospheric Administration) ช่วงวันที่ 2 - 5 สิงหาคม พ.ศ. 2542



Updated 2000 Nov 26 23:59:04 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

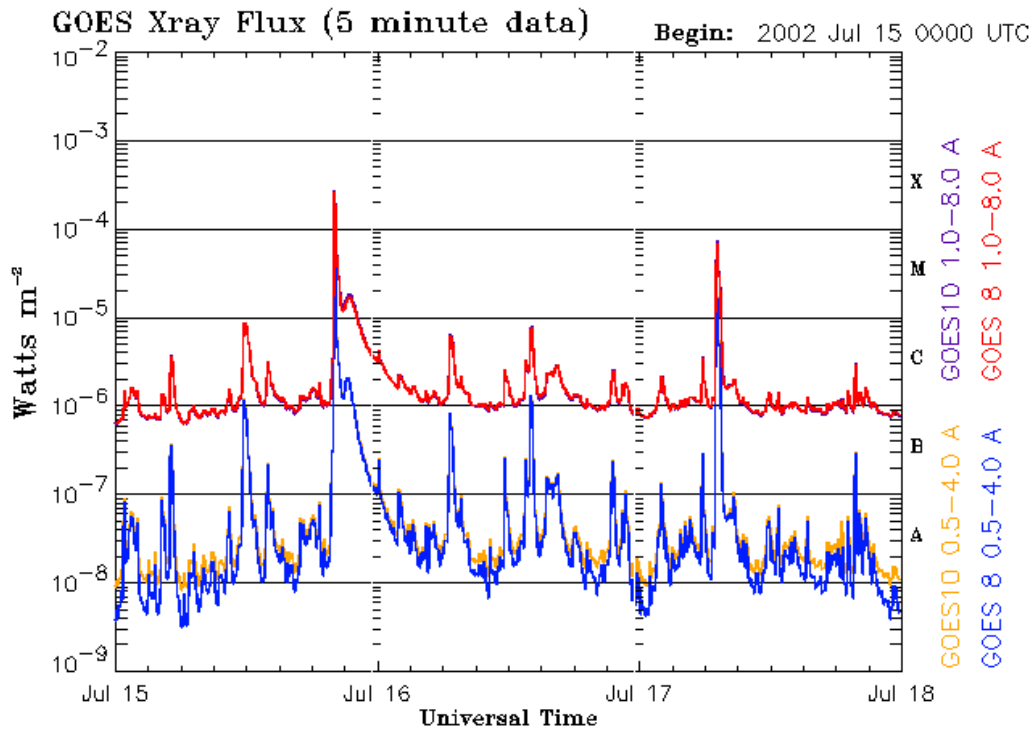
ระดับความรุนแรงของการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ประเภทการปะทุแบบทันทีทันใด โดยดาวเทียม NOAA  
(National Oceanic & Atmospheric Administration) ช่วงวันที่ 24 – 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2543



Updated 2001 Mar 30 23:56:04 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

ระดับความรุนแรงของการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ประเภทการปะทุแบบทันทีทันใด โดยดาวเทียม NOAA  
(National Oceanic & Atmospheric Administration) ช่วงวันที่ 28 – 31 มีนาคม พ.ศ. 2544

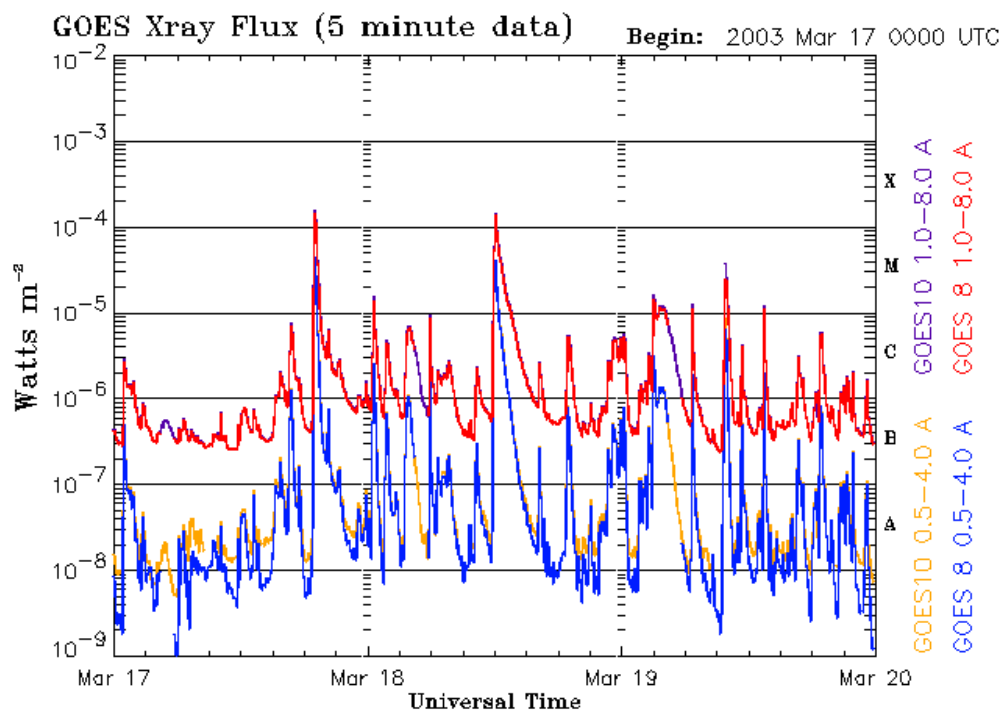


Updated 2002 Jul 17 23:56:06 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

ระดับความรุนแรงของการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ประเภทการปะทุแบบทันทีทันใด โดยดาวเทียม NOAA

(National Oceanic & Atmospheric Administration) ช่วงวันที่ 15 - 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2545

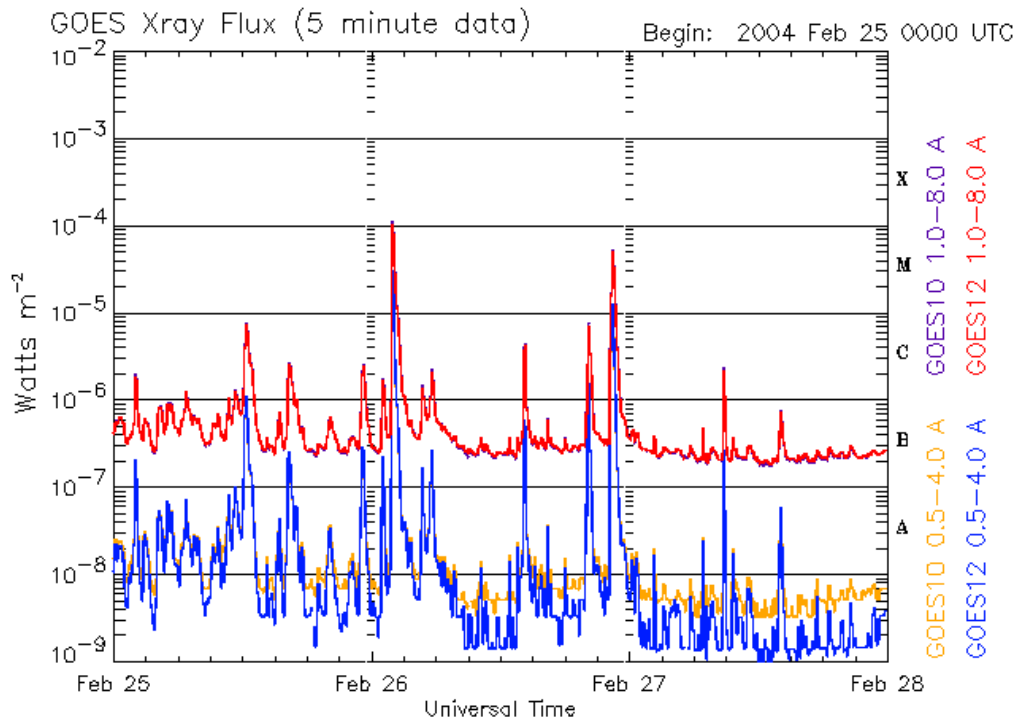


Updated 2003 Mar 19 23:56:05 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

ระดับความรุนแรงของการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ประเภทการปะทุแบบทันทีทันใด โดยดาวเทียม NOAA

(National Oceanic & Atmospheric Administration) ช่วงวันที่ 17 - 20 มีนาคม พ.ศ. 2546

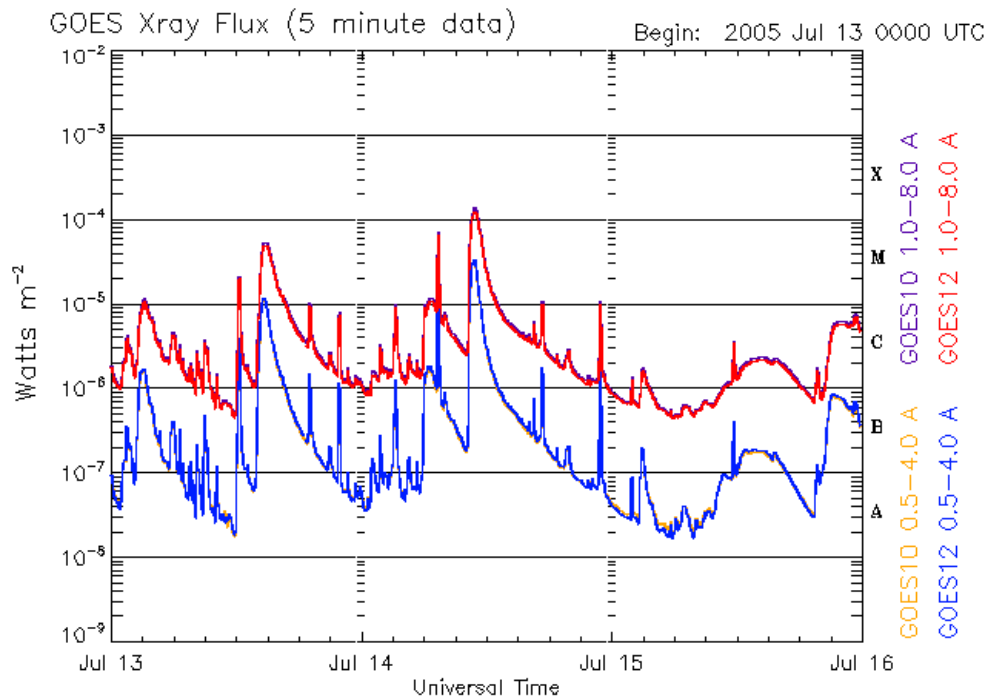


Updated 2004 Feb 27 23:56:04 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

ระดับความรุนแรงของการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ประเภทการปะทุแบบทันทีทันใด โดยดาวเทียม NOAA

(National Oceanic & Atmospheric Administration) ช่วงวันที่ 25 - 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2547

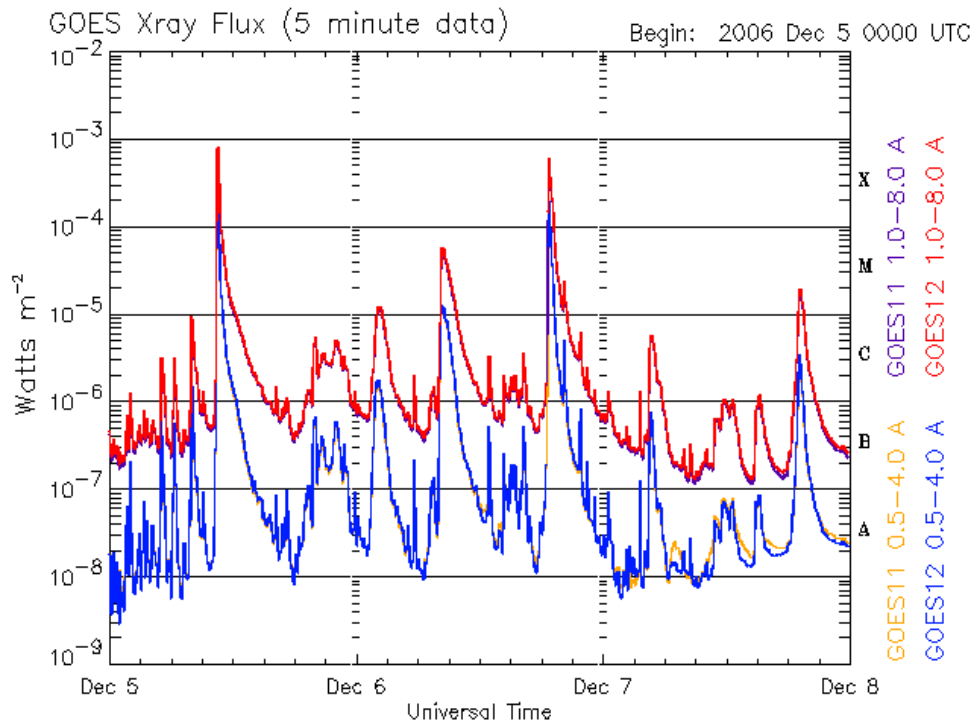


Updated 2005 Jul 15 23:56:09 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

ระดับความรุนแรงของการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ประเภทการปะทุแบบทันทีทันใด โดยดาวเทียม NOAA

(National Oceanic & Atmospheric Administration) ช่วงวันที่ 13 - 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2548



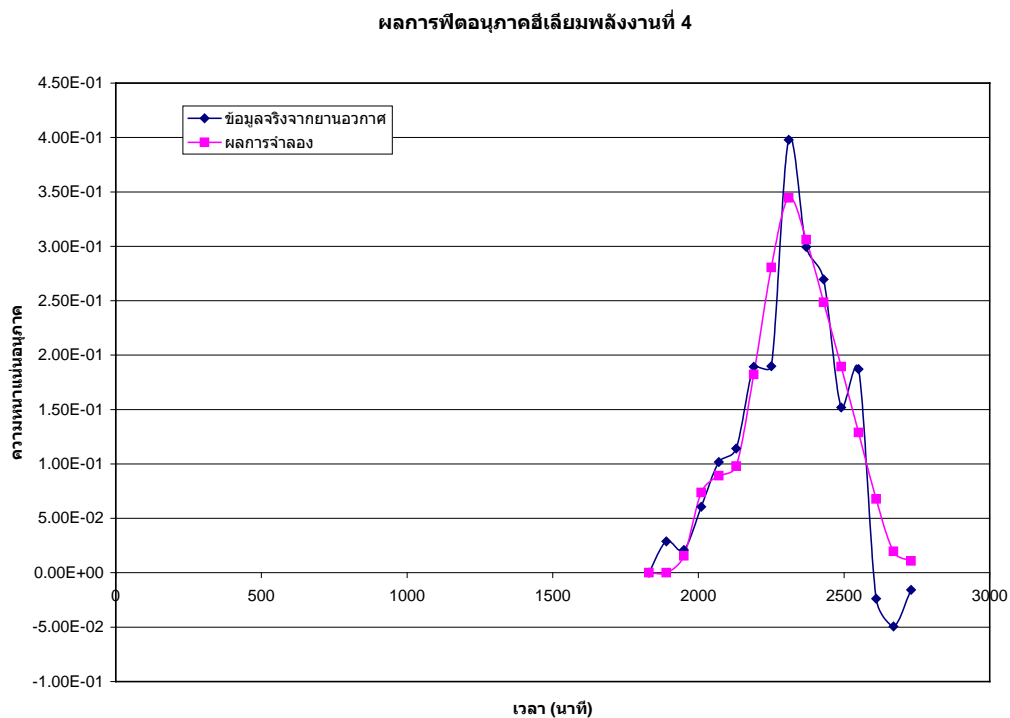
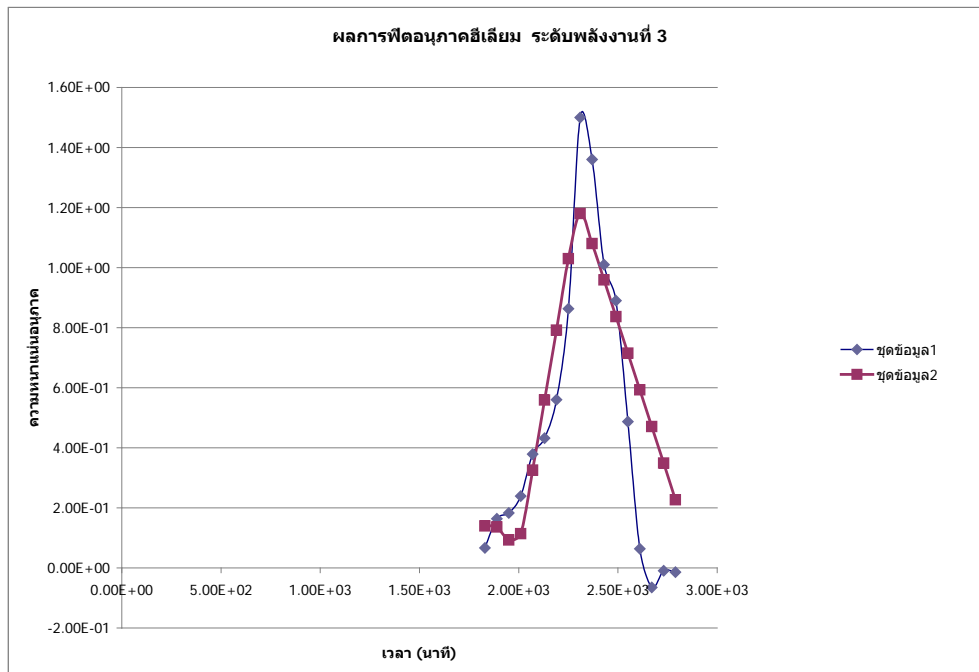
Updated 2006 Dec 7 23:56:08 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

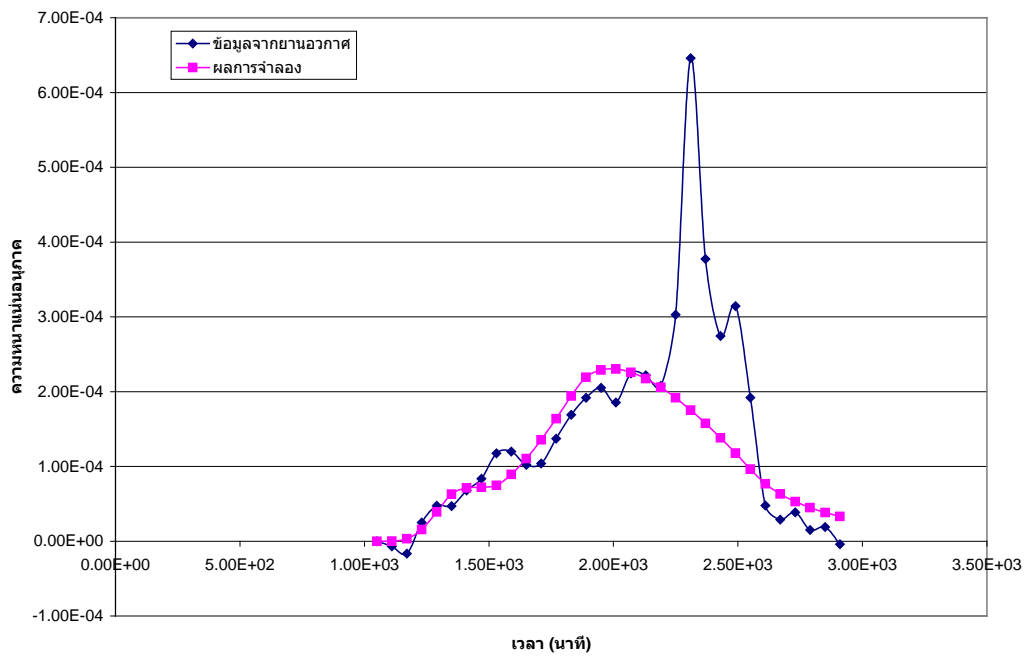
ระดับความรุนแรงของการปล่อยรังสีเอ็กซ์ ประเภทการปะทุแบบทันทีทันใด โดยดาวเทียม NOAA

(National Oceanic & Atmospheric Administration) ช่วงวันที่ 5-8 ธันวาคม พ.ศ. 2549

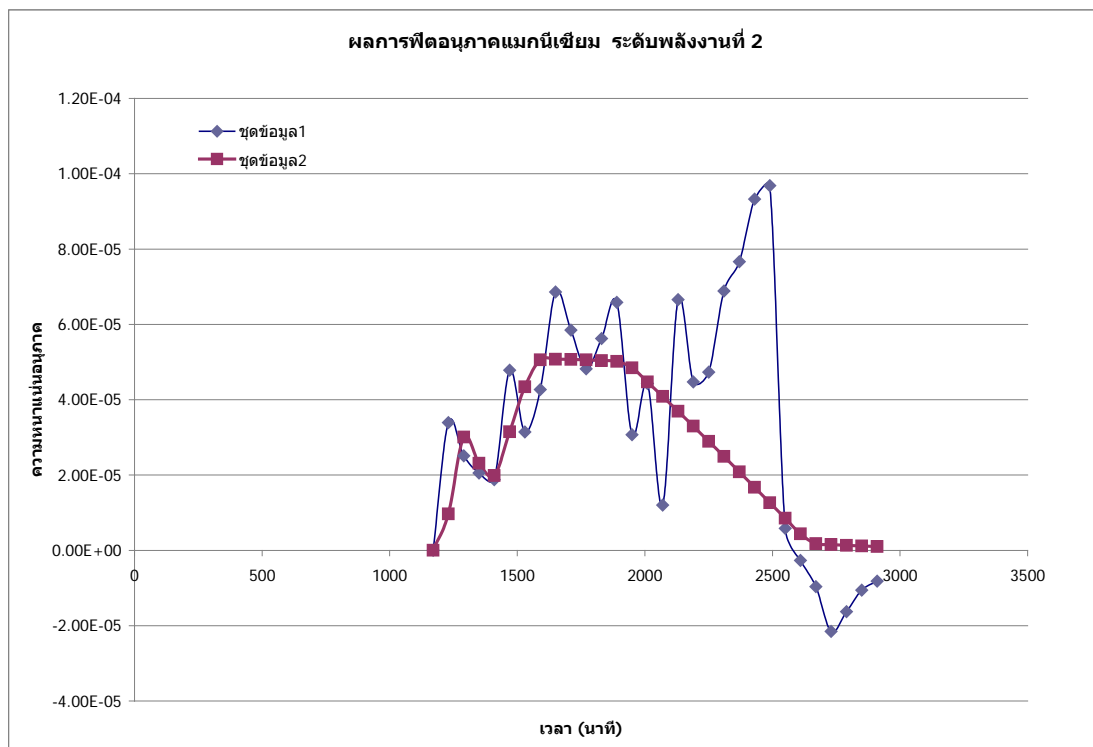
ผลการฟิตข้อมูลด้วยระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุดสำหรับการปะทุวันที่ 18 กรกฎาคม 2545



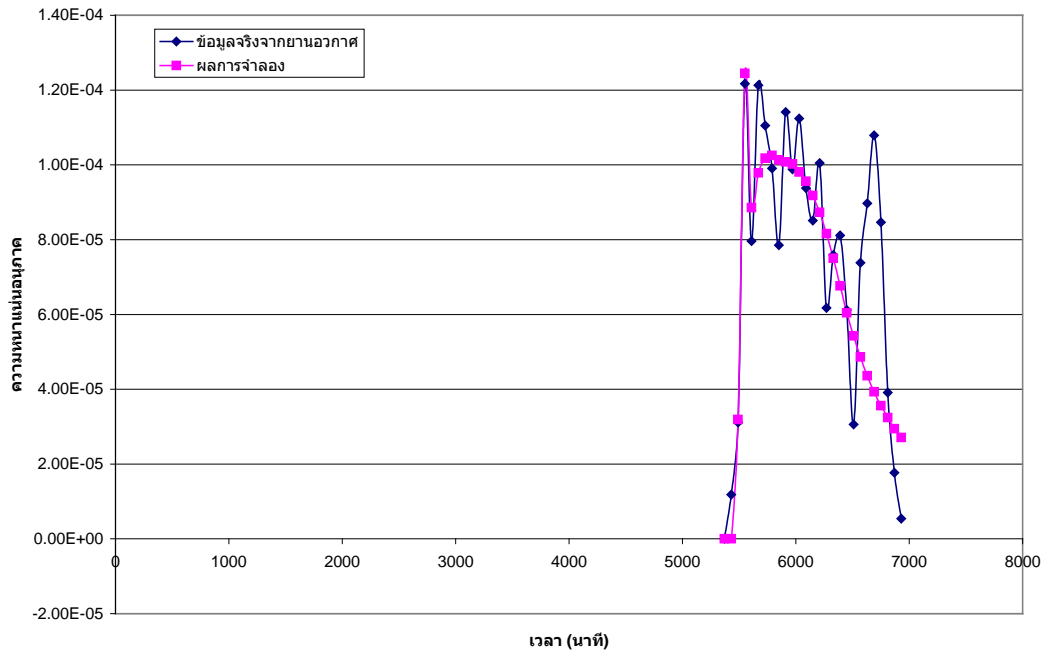
ผลการฟีดแบ็กแมกนีเซียม พลังงานที่ 1



ผลการฟีดแบ็กแมกนีเซียม ระดับพลังงานที่ 2

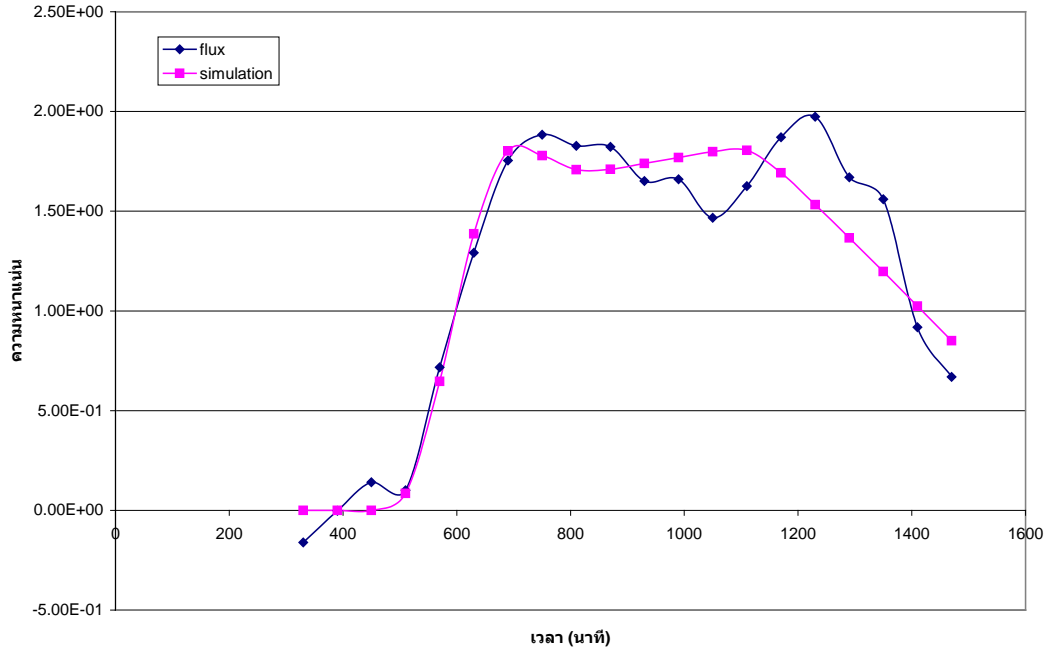


ผลการพัฒนาภาคออกซิเจนที่ระดับพลังงานที่ 4

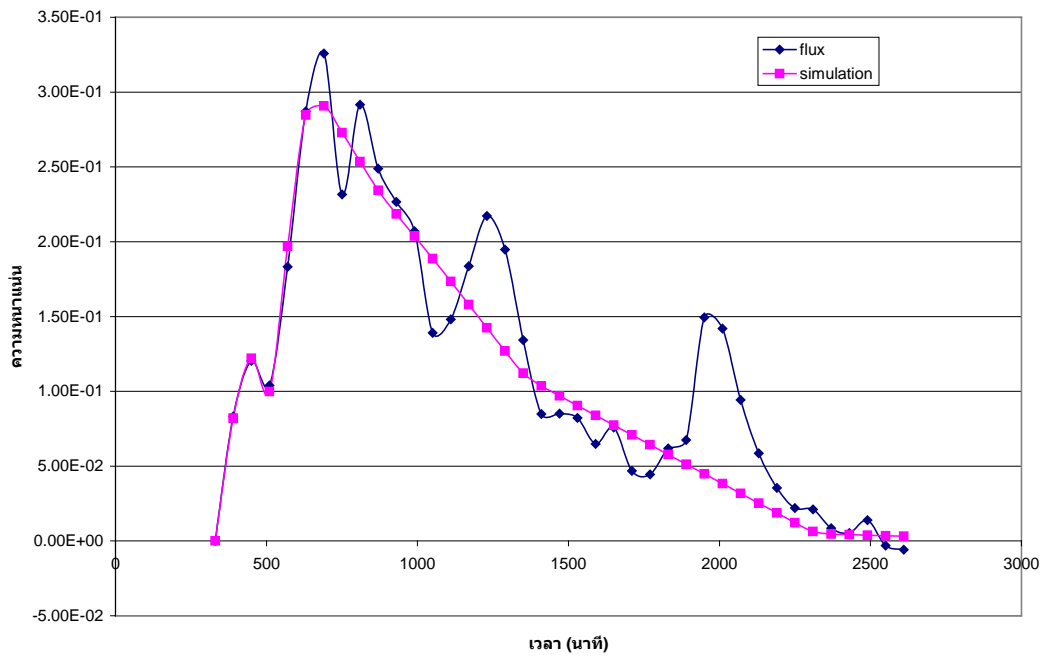


ผลการฟิตข้อมูลด้วยระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุดสำหรับการปะทุวันที่ 24 สิงหาคม 2545

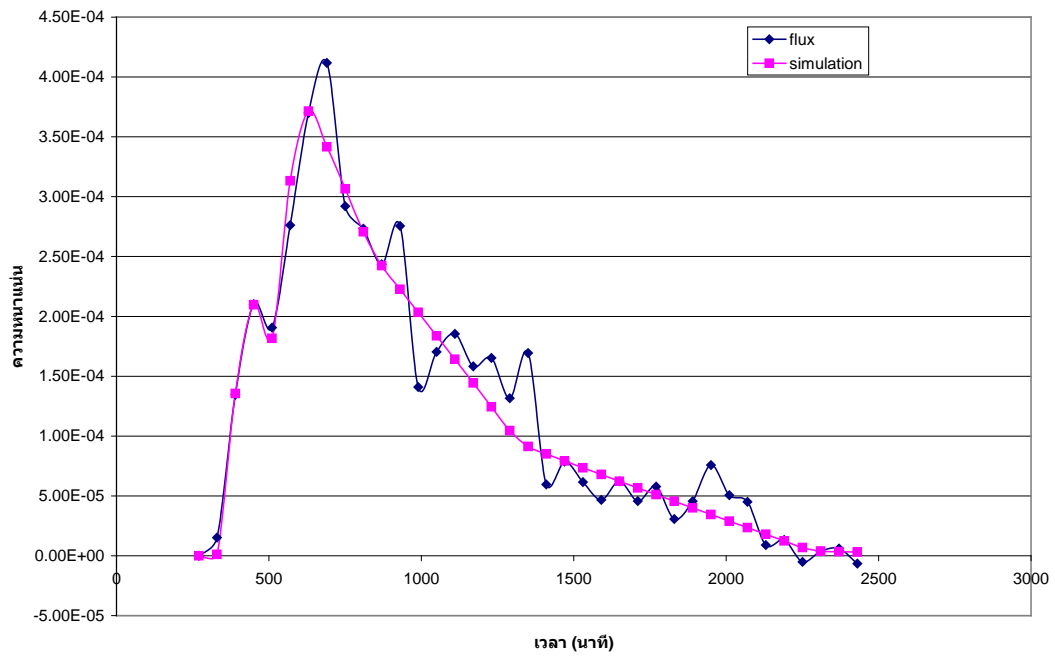
ผลการฟิตอนุภาคซีเลียมระดับพลังงานที่ 2



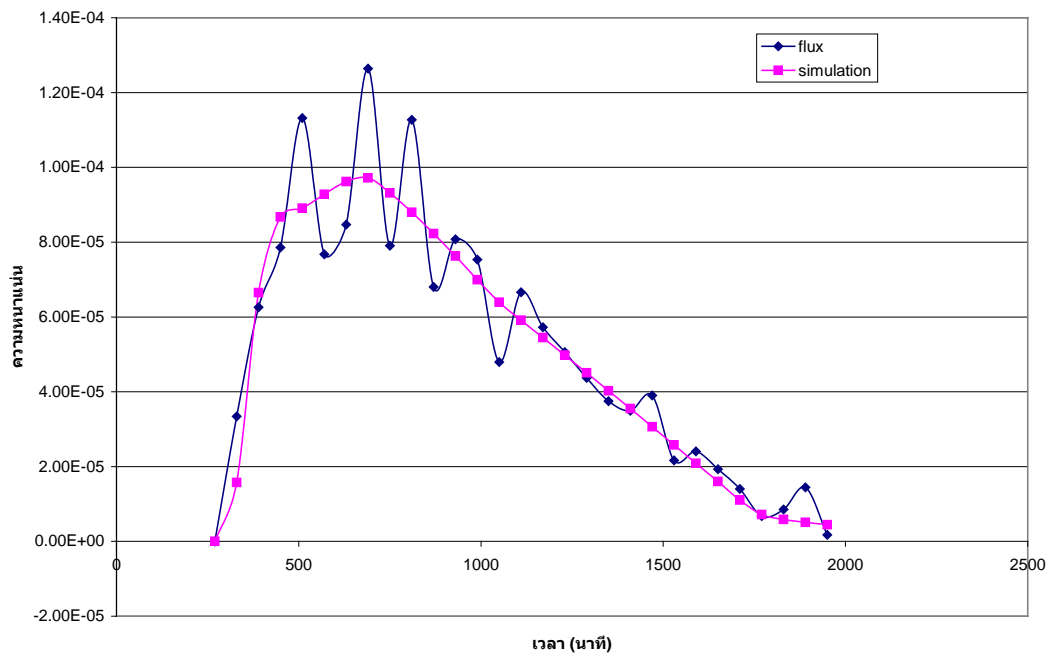
ผลการฟิตอนุภาคซีเลียมระดับพลังงานที่ 5



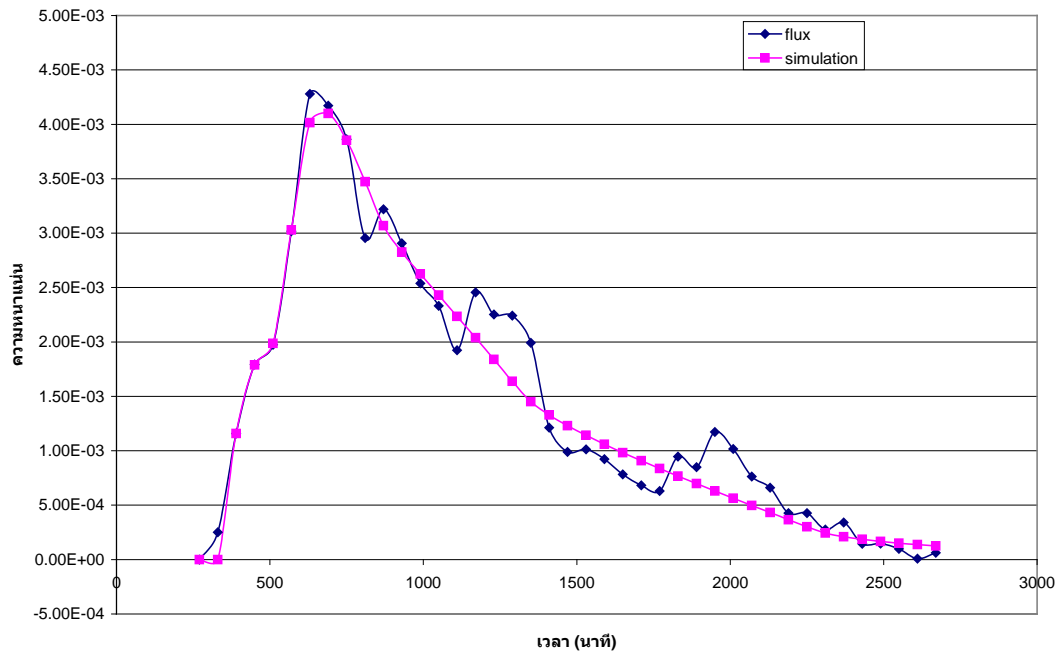
ผลการที่ตอนภาคแมกนีเซียมระดับพลังงานที่ 2



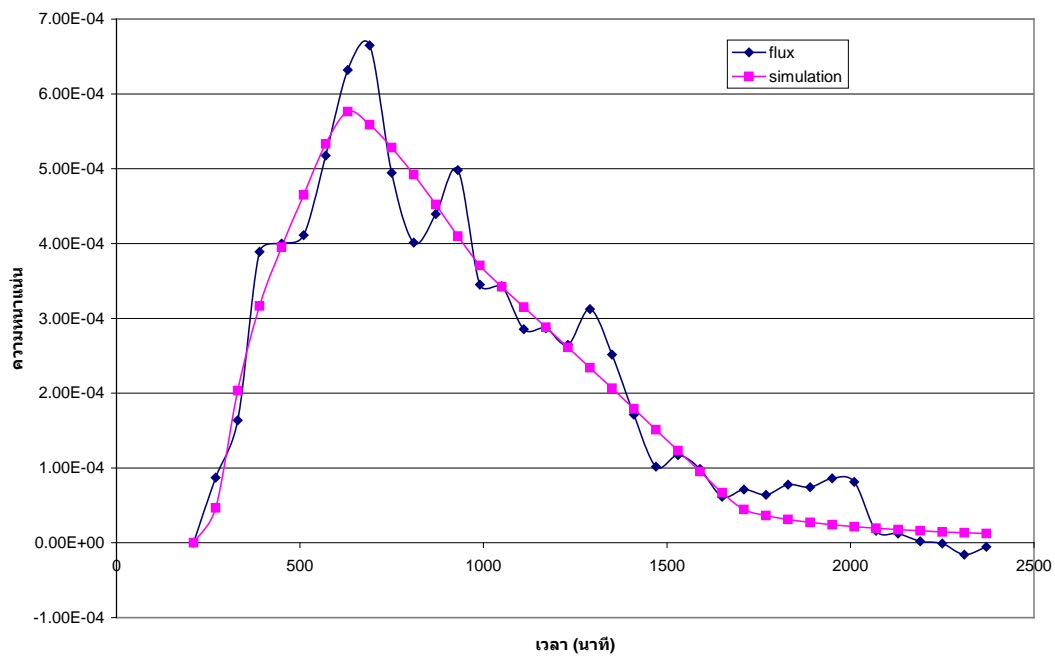
ผลการที่ตอนภาคแมกนีเซียมระดับพลังงานที่ 3



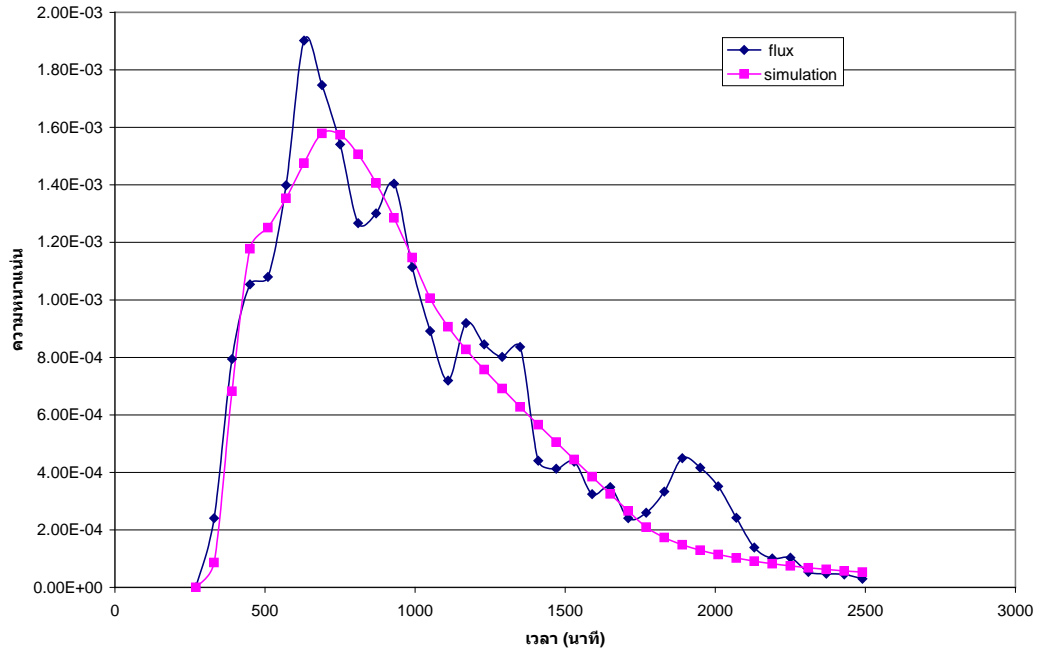
ผลการฟีดแบคออกซิเจนระดับพลังงานที่ 2



ผลการฟีดแบคออกซิเจนระดับพลังงานที่ 4



ผลการฟีดแบคออกซิเจนระดับพลังงานที่ 3



ผลงานที่เผยแพร่