

การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มายังโลกสำหรับการปะทุบนดวงอาทิตย์ในช่วงเริ่มต้นวัฏจักรที่ 24 ของดวงอาทิตย์

The propagation analysis of the solar energetic particle to the earth for the solar flare at the starting of the 24th solar cycle

วัชระ อินทจักร¹ นลินี เอี่ยมสะอาด² และ ทิราณี ขำลำเลิศ¹
Watchara Inthajak¹, Nalinee Aiemsad² and Thiranee Khumlumert¹

บทคัดย่อ

ปรากฏการณ์ต่างๆ เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ส่งผลต่อโลกเป็นอย่างมากอาทิเช่น การรบกวนระบบสื่อสารทางวิทยุ การเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรบริเวณขั้วโลก และการเกิดปรากฏการณ์แสงเหนือแสงใต้ โดยการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ที่สำคัญได้แก่การเกิดจำนวนจุดดำ การระเบิดอย่างรุนแรงบนดวงอาทิตย์และการปลดปล่อยมวลสารจากชั้นบรรยากาศโคโรนาบนดวงอาทิตย์ พบว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักรในทุกๆ 11 ปี ปัจจุบันนี้ดวงอาทิตย์กำลังเข้าสู่วัฏจักรที่ 24 งานวิจัยนี้เลือกวิเคราะห์การปะทุจริงที่เกิดบนดวงอาทิตย์วันที่ 19 มกราคม พ.ศ. 2553 เวลา 13.40 UT ระดับความรุนแรงที่ระดับ M2 ระดับความรุนแรงเพิ่มเป็น C3 ใน 2 วันต่อมา ความเร็วลมสุริยะเปลี่ยนจาก 326.7 km/s เป็น 452.3 km/s เกิดปรากฏการณ์แสงเหนือแสงใต้ขึ้นครั้งแรก และการปะทุในวันที่ 5 เมษายน 2553 เวลา 08.45 UT ความเร็วลมสุริยะ 631.9 km/s เกิดพายุแม่เหล็กที่โลกด้วยขนาด K-index 7 ซึ่งนับว่ารุนแรงมากที่สุดในรอบปี โดยใช้สมการการพุ่งในการอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลกด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (Finite Different Method) เพื่อหาระยะเวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่หลังจากเกิดการปะทุ

คำสำคัญ: วัฏจักรดวงอาทิตย์ การปะทุบนดวงอาทิตย์ ลมสุริยะ คลื่นกระแทก อนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์

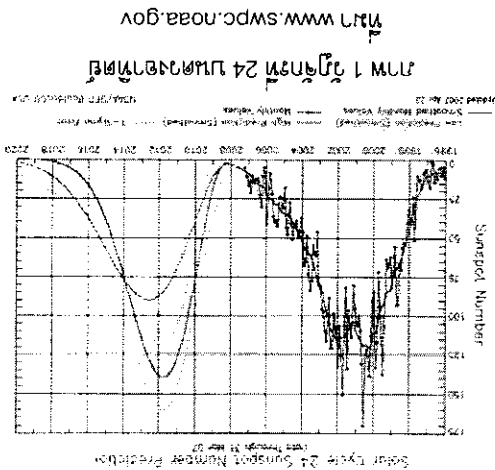
Key words: solar cycle, solar flare, solar wind, shock wave, solar energetic particle

¹ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จังหวัดพิษณุโลก

² สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ จังหวัดฉะเชิงเทรา

และ SERS ถูกปรับให้เข้ากันได้กับระบบการวัดแบบพกพาในสนาม การวัด SERS ที่ปรับให้เข้ากันได้กับระบบการวัดแบบพกพาในสนามสามารถใช้ในการตรวจสอบและวินิจฉัยโรคติดเชื้อในผู้ป่วยที่มีอาการทางเดินหายใจเฉียบพลัน (SARS-CoV-2) ได้ การวัด SERS ที่ปรับให้เข้ากันได้กับระบบการวัดแบบพกพาในสนามสามารถใช้ในการตรวจสอบและวินิจฉัยโรคติดเชื้อในผู้ป่วยที่มีอาการทางเดินหายใจเฉียบพลัน (SARS-CoV-2) ได้

อุปกรณ์การวัด



การประเมินผลกระทบ

ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อมมีผลต่อสุขภาพของประชาชน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มขึ้นของโรคทางเดินหายใจเฉียบพลัน (SARS-CoV-2) และการเพิ่มขึ้นของโรคติดเชื้อในผู้ป่วยที่มีอาการทางเดินหายใจเฉียบพลัน (SARS-CoV-2) ได้ การวัด SERS ที่ปรับให้เข้ากันได้กับระบบการวัดแบบพกพาในสนามสามารถใช้ในการตรวจสอบและวินิจฉัยโรคติดเชื้อในผู้ป่วยที่มีอาการทางเดินหายใจเฉียบพลัน (SARS-CoV-2) ได้

การวัด SERS ที่ปรับให้เข้ากันได้กับระบบการวัดแบบพกพาในสนาม

การวัด SERS ที่ปรับให้เข้ากันได้กับระบบการวัดแบบพกพาในสนามสามารถใช้ในการตรวจสอบและวินิจฉัยโรคติดเชื้อในผู้ป่วยที่มีอาการทางเดินหายใจเฉียบพลัน (SARS-CoV-2) ได้ การวัด SERS ที่ปรับให้เข้ากันได้กับระบบการวัดแบบพกพาในสนามสามารถใช้ในการตรวจสอบและวินิจฉัยโรคติดเชื้อในผู้ป่วยที่มีอาการทางเดินหายใจเฉียบพลัน (SARS-CoV-2) ได้

บทสรุป

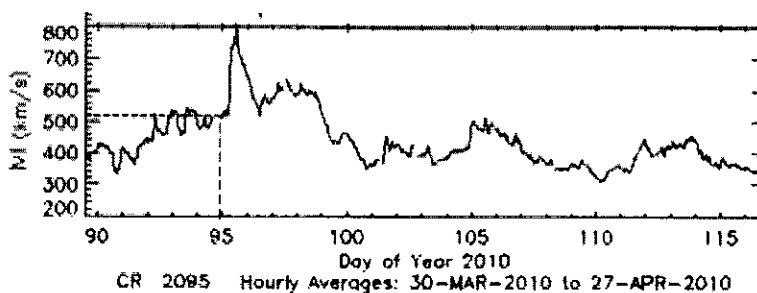
ตรวจวัดไอโซโทปของรังสีคอสมิกพลังงานต่ำที่มาจากแหล่งต่างๆ แต่ในขณะที่เกิดการปะทุบนดวงอาทิตย์ ความหนาแน่นของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอุปกรณ์ SIS จะตรวจวัดไอโซโทปของอนุภาคจากชั้นคอโรนา

หัววัดของทั้ง 2 อุปกรณ์ถูกสร้างขึ้นเพื่อบันทึกจำนวนอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านเข้ามายังหัววัด เมื่อเกิดเหตุการณ์การปะทุ หัววัดของอุปกรณ์จะบันทึกข้อมูลอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านเข้ามายังหัววัดและบันทึกข้อมูลอยู่ในรูปของความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาที่ผ่านหัววัดโดยแยกออกเป็นแต่ละช่วงพลังงานพร้อมทั้งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดอนุภาค

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เราเน้นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มายังโลกในช่วงเริ่มต้นวัฏจักรที่ 24 ของดวงอาทิตย์ ปัจจุบันดวงอาทิตย์อยู่ในช่วงเริ่มต้นของวัฏจักรที่ 24 (โดยวัฏจักรที่ 1 เริ่มในปี 2300) เราจึงเลือกวิเคราะห์เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงบนดวงอาทิตย์ในช่วงเริ่มต้นวัฏจักรที่ 24 โดยจะเลือกตัวอย่างการปะทุจริงที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ในวันที่ 19 มกราคม 2553 และวันที่ 5 เมษายน 2553 โดยการเลือกเหตุการณ์ทั้ง 2 เหตุการณ์นี้ ผู้วิจัยวิเคราะห์จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยเหตุการณ์การปะทุในวันที่ 19 มกราคม 2553 พบว่ามีการปะทุบนดวงอาทิตย์ในระดับความเข้มรังสีเอกซ์ที่ M Class และต่อมาหลังจากนั้น 24 ชั่วโมงก็พบการปะทุที่ระดับ M class อีก 4 ครั้งที่ทำแห้งเดิม (ความเข้มรังสีเอกซ์ระดับ M เป็นระดับความรุนแรงปานกลาง โดยทั่วไปจะปลดปล่อยคลื่นวิทยุขนาดสั้น โดยมีความรุนแรงอยู่ในช่วง $10^5 - 10^4 \text{ W/m}^2$)

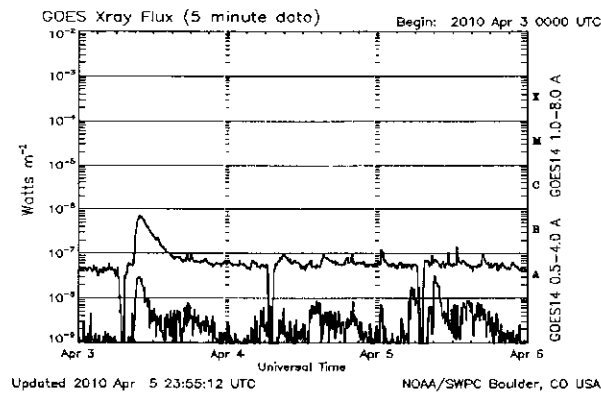
สำหรับเหตุการณ์การปะทุในวันที่ 5 เมษายน 2553 พบว่าหลังจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์ทำให้เกิดความรุนแรงของสนามแม่เหล็กสูงในระดับ K7 ซึ่งเป็นระดับที่สามารถส่งผลกระทบต่อมายังโลกได้ และความเร็วลมสุริยะหลังเกิดการปะทุสูงถึง 800 กิโลเมตรต่อวินาทีดังแสดงในภาพ 2 (ความเร็วลมสุริยะภาวะปกติมีค่าประมาณ 400 กิโลเมตรต่อวินาที) และระดับความรุนแรงของการปะทุอยู่ที่ระดับ B1-2 ดังแสดงข้อมูลในภาพ 3



ภาพ 2 กราฟแสดงค่าความเร็วลมสุริยะของเหตุการณ์การปะทุที่ผิวของดวงอาทิตย์ วันที่ 5 เมษายน 2553 มีความเร็วลมสุริยะสูงสุดประมาณ 800 km/s

ที่มา http://web.mit.edu/afs/athena/org/s/space/www/wind/wind_figures/wind_2010mar30.gif

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาของการปะทุทั้ง 2 เหตุการณ์พบว่าลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในการปะทุวันที่ 19 มกราคม 2553 มีการกระจายตัวของอนุภาคไม่สมมาตร ความคลาดเคลื่อนสูง จนไม่สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคในวันที่ 5 เมษายน 2553 โดยจัดเตรียมข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาในแต่ละระดับพลังงาน



ภาพ 3 แสดงการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ในวันที่ 5 เมษายน 2553 ที่ตรวจวัดได้จากยานอวกาศ GOES ที่มา http://www.swpc.noaa.gov/ftplib/warehouse/2010/2010_plots/xray/20100405_xray.gif

ผู้วิจัยใช้สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาค Ruffolo 1995 อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยพิจารณาอิทธิพลต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค อาทิเช่น ความเร็วลมสุริยะ การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการพาอนุภาคเคลื่อนไปตามเส้นสนามแม่เหล็ก ค่าการลดลงของจำนวนอนุภาคระดับพลังงานต่างๆ ตามเวลา โดยสมการที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคดังสมการ

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

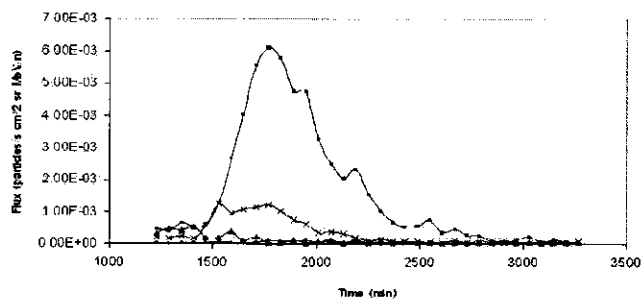
เมื่อ F คือ ฟังก์ชันการแพร่กระจายอนุภาค, t คือ เวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลก (min), Z คือ ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์มายังโลก (AU), $\mu = \cos \theta$ คือ ค่าแสดงทิศทางของการเคลื่อนที่ของอนุภาค, θ คือ มุมระหว่างทิศของความเร็วกับทิศทางการเคลื่อนที่, P คือ โมเมนตัมของอนุภาค (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 ความยาวของเส้นสนามแม่เหล็กที่บานออกตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น;

$$\frac{1}{L} = \frac{dB}{Bdz}, \quad \frac{E'}{E} \text{ คือ อัตราส่วนของพลังงานรวมของอนุภาคในกรอบลมสุริยะกับกรอบหยุดนิ่ง}$$

เราวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเวลาของแต่ละพลังงานด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (Finite Different Method) ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่จะได้ความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาที่ระยะทางอิสระเฉลี่ยค่าต่างๆ (ระยะทางอิสระเฉลี่ยคือระยะทางที่อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กได้มากที่สุดก่อนที่จะสะท้อนกลับเนื่องจากความไม่เรียบของเส้นสนามแม่เหล็ก) และทำการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากข้อมูลจริงจากยานอวกาศ โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบข้อมูลแบบกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุด (Linear Least Squares Fitting) เพื่อหาระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลก (Ruffolo et. al., 1998)

ผลการวิจัยและอธิบายผลการวิจัย

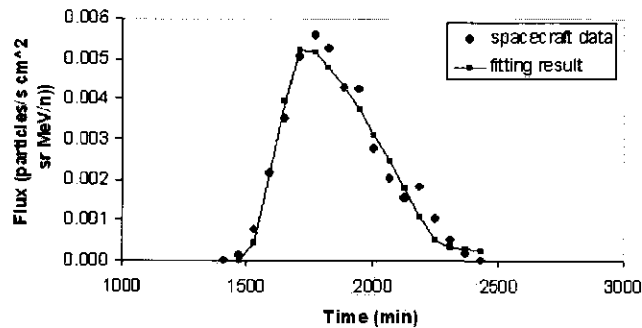
งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกพิจารณาเหตุการณ์การปะทุในช่วงเริ่มต้นวัฏจักรที่ 24 จำนวน 2 เหตุการณ์คือ เหตุการณ์การปะทุวันที่ 19 มกราคม 2553 เริ่มปะทุเวลา 13.40 UT (UT; Universal Time) ระดับความรุนแรงรังสีเอ็กซ์ที่ M2 และเพิ่มเป็น C3 ใน 2 วันต่อมา ความเร็วลมสุริยะในขณะที่เกิดการปะทุมีค่า 326.7- 452.3 กิโลเมตรต่อวินาที เป็นการปะทุที่ทำให้เกิดแสงเหนือแสงใต้ขึ้นครั้งแรกในรอบวัฏจักรนี้ และเมื่อศึกษาข้อมูลของอนุภาคจากอุปกรณ์ ULEIS เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค He3, He4, C, Fe, H, Ne-S และ O พบว่าจำนวนข้อมูลของแต่ละอนุภาคในทุกระดับพลังงานมีข้อมูลเพียงข้อมูลเดียวซึ่งแสดงว่าข้อมูลฟลักซ์ของอนุภาคมาจากจำนวนอนุภาคเพียง 1 ตัว ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงมากจึงไม่สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลในการจำลองการเคลื่อนที่และวิเคราะห์หาระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคได้ ในขณะที่เดียวกันไม่พบข้อมูลอนุภาคจากอุปกรณ์ SIS ซึ่งรายงานการกระจายตัวของอนุภาคที่มีพลังงานสูงกว่า ULEIS จากการวิเคราะห์ข้อมูลอนุภาคที่เกิดจากการปะทุในวันที่ 19 มกราคม 2553 พบว่าอนุภาคที่ปลดปล่อยออกมามีค่าพลังงานที่ต่ำเนื่องจากสามารถพบข้อมูลได้จากอุปกรณ์ ULEIS เท่านั้น



ภาพ 4 แสดงการกระจายตัวของอนุภาค He ที่ระดับพลังงาน 4.085, 5.435, 6.71 และ 8.505 MeV/n สำหรับเหตุการณ์การปะทุวันที่ 5 เมษายน 2553

สำหรับการปะทุในวันที่ 5 เมษายน 2553 เริ่มปะทุเวลา 08.00 UT ความเร็วลมสุริยะขณะเกิดการปะทุ 631.9 กิโลเมตรต่อวินาทีและเพิ่มขึ้นถึง 800 กิโลเมตรต่อวินาที ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาค He ที่ระดับพลังงานต่างๆ จากอุปกรณ์ SIS ดังแสดงในภาพ 4 เกิดสนามแม่เหล็กที่มีความรุนแรงในระดับที่สามารถรับรู้ได้ที่ระดับ Kp-7 (Kp เป็นเกณฑ์แสดงความรุนแรงของพายุแม่เหล็ก แบ่งเป็น Kp5 = Minor, Kp6 = Moderate, Kp7 = Strong, Kp8 = Severe และ Kp9 = Extreme) และเกิดแสงเหนือแสงใต้ในวันที่ 6 เมษายน 2010 ที่เวลา 01:35 UT จากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคและทำการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างผลการจำลองด้วยสมการขนส่งและข้อมูลจริงจากยานอวกาศพบว่า ระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุดของอนุภาค He ที่ระดับพลังงาน 4.085, 5.435 และ 6.71 MeV/n มีค่า 0.936, 1.111 และ 1.147 AU ตามลำดับ และมีระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาค 385.36, 368.38 และ 172.48 นาที ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าระยะเวลาที่อนุภาคถูก

ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์ที่ (ระยะเวลา 8 นาที) ตัวอย่างแสดงผลการฟิตข้อมูลดังภาพ 5 แสดงว่าอนุภาคเมื่อมีพลังงานสูงขึ้นจะสามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กได้มากกว่าอนุภาคพลังงานต่ำ และระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคที่พลังงานสูงมีค่าน้อยกว่าอนุภาคที่มีพลังงานต่ำ แสดงว่าอนุภาคที่มีพลังงานต่ำจะเกิดการฟุ้งในดักกลางระหว่างดาวเคราะห์ได้มากกว่าอนุภาคพลังงานสูง และจากการวิเคราะห์การปะทุในช่วงเริ่มต้นของวัฏจักรที่ 24 บนดวงอาทิตย์ พบว่าเหตุการณ์ยังไม่รุนแรงเพราะเราพบเฉพาะอนุภาคจากอุปกรณ์ที่วัดอนุภาคที่มีระดับพลังงานน้อยกว่า 10 MeV/n



ภาพ 5 แสดงผลการฟิตข้อมูลอนุภาค He ระดับพลังงาน 4.085 MeV/n ระยะทางอิสระเฉลี่ย 0.936 AU

การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการปะทุบนดวงอาทิตย์ที่มีการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงเข้ามา ยังโลกว่ามีความรุนแรงมากน้อยเพียงใด ดังนั้นเมื่อเราทราบว่าการระเบิดในแต่ละครั้งอนุภาคมีความรุนแรงหรือไม่ อนุภาคใช้ระยะเวลาในการเดินทางจากดวงอาทิตย์มายังโลกเป็นเท่าใด เราจะได้มีเวลาในการแจ้งเตือนภัยที่อาจเกิดขึ้นต่อทั้งระบบสัญญาณการสื่อสารเคเบิล UBC ระบบไฟฟ้า การส่งสัญญาณระหว่างภาคพื้นดินและบนเครื่องบิน การปฏิบัติงานของดาวเทียมและยานอวกาศนอกโลก เพื่อเป็นการป้องกันอุบัติเหตุและความเสียหายที่เกิดขึ้นได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ งบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ประจำปี 2553 ที่สนับสนุนงบประมาณในการวิจัย, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สำหรับสถานที่และคอมพิวเตอร์ในการประมวลผล และ ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด รูฟโฟโล มหาวิทยาลัยมิชิแกน สำหรับสมการการเคลื่อนที่และโปรแกรมการจำลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Saiz, D. Ruffolo, J. W. Bieber, P. Evenson, and R. Pyle, (2007) Anisotropy signatures of solar energetic particle transport in a closed interplanetary magnetic loop. *Astrophysical Journal*, (672), 650-658
- [2] D. Ruffolo., (1995). Effect of Adiabatic Deceleration on the Focused Transport of Solar Cosmic Rays. *Astrophysical Journal*. 2 (442), 861-874.
- [3] D. Ruffolo, T. Khumlumert & W. Youngdee, W. (1998). Deconvolution of interplanetary transport of solar energetic particles. *Journal of Geophysical Research*, 9 (103), 20, 591-20, 602.