

การวิเคราะห์ความแปรปรวนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ที่มีผลต่อค่าความ
คลาดเคลื่อนของข้อมูลอนุภาคพลังงานสูงจากยานอวกาศ

ทิราณี ขำล้ำเลิศ และ เอกชัย จันทะยอด

The Interplanetary Variable Analysis Affects to the Spacecraft Data Uncertainty

Thiraneek Khumlumlert* and Ekkachai Jantayod

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จังหวัดพิจิตร โลก65000

*Corresponding author. E-mail: thiraneek@nu.ac.th

บทคัดย่อ

การปะทุที่ผิวดวงอาทิตย์จะเกิดการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงออกมาซึ่งส่งผลกระทบต่อที่สำคัญต่อโลกหลายอย่าง อาทิเช่น รบกวนระบบการสื่อสาร การเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร งานวิจัยนี้วิเคราะห์การหาค่าความไม่แน่นอนของแต่ละชุดข้อมูล 2 ประเภทคือ ความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแปรปรวนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์และความไม่แน่นอนของข้อมูลทางสถิติจากยานอวกาศ ACE (Advanced Composition Explorer) เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ โดยงานวิจัยนี้วิเคราะห์ข้อมูลจากเหตุการณ์การปะทุจริงบนดวงอาทิตย์ ณ วันที่ 24 สิงหาคม 2543 กับผลการจำลองการเคลื่อนที่อนุภาคจากดวงอาทิตย์ พบว่าผลการเปรียบเทียบข้อมูลด้วยค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความแปรปรวนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ให้ค่าระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคใกล้เคียงกับผลการพิตด้วยค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติของข้อมูลสำหรับอนุภาคจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าพลังงานในช่วง 12-31 MeV/n

คำสำคัญ: การปะทุบนดวงอาทิตย์ สนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ สมสุริยะ อนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ โคโรนา

Abstract

The solar flare releases the solar energetic particles, which have important effects to the Earth such as disturbing radio communication, causing electric power failures. In this work, we analyze 2 data uncertainties are interplanetary fluctuation uncertainty and statistical uncertainty from the Advanced Composition Explorer (ACE) for analyzing the propagation of the solar particle.

We study the solar event on August 24, 2002 compares with the transport simulation result. The fitting results with the both of uncertainties show the injection duration are same for the solar energetic particles at 12-31 MeV/n.

Keywords: solar flare, interplanetary magnetic field, solar wind, solar energetic particle, corona

บทนำ

ชั้นบรรยากาศนอกสุดของดวงอาทิตย์คือชั้น โครนา ซึ่งเป็นชั้นบรรยากาศที่ประกอบด้วยอนุภาคพลังงานสูงที่แตกตัวเป็น ไอออนที่มีประจุเรียกว่าพลาสมา พลาสมาเหล่านี้จะไหลออกสู่อวกาศระหว่างดาวเคราะห์เรียกว่าลมสุริยะ (Solar Wind) เมื่อเกิดการปะทุของอนุภาคที่มีประจุจะเคลื่อนที่ออกจากดวงอาทิตย์พร้อมทั้งดึงเส้นสนามแม่เหล็กตามออกมาด้วย และเนื่องจากดวงอาทิตย์มีการหมุนรอบตัวเองเส้นสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากดวงอาทิตย์จึงมีลักษณะคล้ายกังหันที่ไม่เรียบเนื่องจากความแปรปรวนของลมสุริยะ ดวงอาทิตย์สามารถปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงเข้าสู่ตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์จากการเกิดการปะทุที่ผิวของดวงอาทิตย์หรือที่เรียกว่า Solar Flare เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ (Jokipii, 1971) และปรากฏการณ์นี้จะเพิ่มความรุนแรงขึ้นถ้ามีการปลดปล่อยมวลสารจาก โครนา (CMEs) ตามมาเมื่ออนุภาค พลังงานสูงจากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์มายัง โลก อนุภาคเหล่านี้บางส่วนจะถูกกักโดยเส้นสนามแม่เหล็กโลก และมีอนุภาคบางส่วนสามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้ามายังชั้นบรรยากาศโลกทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อโลกอาทิเช่น การเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร การเกิดปรากฏการณ์แสงเหนือแสงใต้ (Aurora) ความเสียหายที่เกิดกับระบบดาวเทียม ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงพยายามศึกษา พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลก ระยะเวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่ (Ford *et al.*, 1977) โดยนักวิทยาศาสตร์สามารถศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคเหล่านี้ได้จากข้อมูลจริงที่วัดโดยยานอวกาศที่ส่งออกไปนอกโลก ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เปิดกว้างให้นักวิจัยสามารถศึกษาได้อย่างอิสระ ดังนั้นถ้าเราสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์มายังโลกได้อย่างถูกต้องและสมบูรณ์แล้ว เราก็จะสามารถหาค่าเวลาที่อนุภาคเหล่านี้จะเคลื่อนที่มาถึง โลก เพื่อเตรียมการป้องกันอันตรายและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อไป

ข้อมูลและวิธีดำเนินการ

งานวิจัยนี้ศึกษาการขนส่งอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มายัง โลก โดยอาศัยสมการพื้นฐานที่อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาค Fokker-Plank คือ $\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{a}_i F)}{\partial a_i} = Q$ เมื่อ F คือค่าความ

หนาแน่นของอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา, a_i คือค่าตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่, Q คือเทอมของค่าตั้งต้นของสมการ เมื่อรวมอิทธิพลต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์แล้ว จะได้เป็นสมการการเคลื่อนที่ของRuffolo (1998) คือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(t, \mu, z, p)}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial z} v\mu F(t, \mu, z, p) - \frac{\partial}{\partial z} \left(1 - \mu^2 \frac{v^2}{c^2}\right) v_{sw} \sec \psi F(t, \mu, z, p) \\ & - \frac{\partial}{\partial \mu} \frac{v}{2L(z)} \left[1 + \mu \frac{v_{sw}}{v} \sec \psi - \mu \frac{v_{sw}v}{c^2} \sec \psi\right] (1 - \mu^2) F(t, \mu, z, p) \\ & + \frac{\partial}{\partial \mu} v_{sw} \left(\cos \psi \frac{\partial}{\partial r} \sec \psi\right) \mu (1 - \mu^2) F(t, \mu, z, p) \\ & + \frac{\partial}{\partial \mu} \frac{\varphi(\mu)}{2} \frac{\partial}{\partial \mu} \left(1 - \mu \frac{v_{sw}v}{c^2} \sec \psi\right) F(t, \mu, z, p) \\ & + \frac{\partial}{\partial p} p v_{sw} \left[\frac{\sec \psi}{2L(z)} (1 - \mu^2) + \cos \psi \frac{d}{dr} \sec \psi \mu^2\right] F(t, \mu, z, p) \end{aligned} \quad (1)$$

เมื่อ F คือความหนาแน่นของอนุภาคพลังงานสูงในฟลักซ์แม่เหล็ก, t คือเวลาที่อนุภาคพลังงานสูงเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็ก (นาทื), z คือระยะทางที่อนุภาคพลังงานสูงเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์มายัง โลก (AU), μ คือค่าโคไซน์ของมุม θ เมื่อ θ คือมุมระหว่างทิศของความเร็วของอนุภาคพลังงานสูงกับ z , ρ คือโมเมนตัมของอนุภาคพลังงานสูง (MeV/c), $\varphi(\mu)$ คือค่าสัมประสิทธิ์ การกระเจิงของอนุภาคพลังงานสูงที่กระทำกับเส้นสนามแม่เหล็ก v คือความเร็วของอนุภาคพลังงานสูง, v_{sw} คือความเร็วของลมสุริยะ, ψ คือมุมระหว่างเวกเตอร์ที่แสดงทิศทางของอนุภาคตามแนวรัศมีกับเวกเตอร์ที่แสดงทิศทางของเส้นสนามแม่เหล็ก และ c คือความเร็วของแสง

เราแก้สมการการเคลื่อนที่ของอนุภาคนี้ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขคือวิธี Finite Difference ซึ่งผลที่ได้คือการกระจายตัวของอนุภาคตามเวลาสำหรับการเคลื่อนที่ด้วยระยะทางอิสระเฉลี่ยค่าต่างๆ โดยงานวิจัยนี้เลือกเหตุการณ์การปะทุที่ดวงอาทิตย์ ณ วันที่ 24 สิงหาคม 2543 เวลาที่เริ่มปะทุคือ 0049 UT (UT คือ Universal Time โดยค่าเวลาสองค่าแรกคือชั่วโมง และเวลาสองค่าหลังคือนาทื) ระยะเวลาที่ปะทุทั้งสิ้น 42 นาทื (ข้อมูลจากยานอวกาศ GOES; Geostationary Operational Environmental Satellite Spacecraft) ข้อมูลอนุภาคที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นข้อมูลจากยานอวกาศ ACE (Advanced Composition Explorer) อนุภาคที่ทำการศึกษาคือธาตุ C, N, O, Ne, Si และ Fe ที่ระดับพลังงาน 6.12-76.34, 6.61-83.26, 7.05-89.78, 7.82-101.83, 9.03-12.32 และ 10.47-16.76 MeV/n โดยระยะทางที่จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเส้นสนามแม่เหล็กคือ 83 AU (Astronomical Unit) ความเร็วลมสุริยะของเหตุการณ์นี้คือ 400 km/s เมื่อ ได้ผลการจำลองการเคลื่อนที่แล้ว นำผลที่ได้มา

ฟิตเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงที่ได้จากยานอวกาศเพื่อหาค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยที่น้อยที่สุด (λ) ของอนุภาคที่สามารถเคลื่อนที่ได้ตามเส้นสนามแม่เหล็กก่อนที่จะกระเจิงเนื่องจากความไม่เรียบของเส้นสนามแม่เหล็ก โดยวิธีการ Piecewise Linear Least Squares Fitting

ในการฟิตเปรียบเทียบข้อมูลเราสามารถหาผลการฟิตข้อมูลที่ดีที่สุดได้จากความสัมพันธ์คือ

$$\chi_{\min}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - y(x_i))^2}{\sigma_i^2} \quad (2)$$

เมื่อ χ_{\min}^2 คือค่าผลต่างที่น้อยที่สุดระหว่างข้อมูลจากยานอวกาศและจากผลการจำลองการเคลื่อนที่ y_i คือค่าข้อมูลจากยานอวกาศ, $y(x_i)$ คือข้อมูลที่ได้จากผลการจำลองการเคลื่อนที่ และ σ_i คือค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละข้อมูล จากสมการที่แสดงผลการฟิตข้อมูลพบว่าตัวแปร σ_i เป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อรายงานผลการฟิต ดังนั้นถ้าเราสามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนของชุดข้อมูลที่เหมาะสมผลที่ได้จะมีความแม่นยำและถูกต้องมากขึ้น ข้อมูลที่ได้จากยานอวกาศจะประกอบด้วยความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลา และค่าความคลาดเคลื่อนของอนุภาคที่เกิดจากการวัดทางสถิติของเครื่องมือวัดบนยานอวกาศ งานวิจัยนี้ได้เพิ่มการศึกษาความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเนื่องจากความแปรปรวนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ โดยกำหนดให้

$$\sigma_{tot}^2 = \sigma_{ipf}^2 + \sigma_{stat}^2 \quad (3)$$

เมื่อ σ_{tot} คือค่าความคลาดเคลื่อนใหม่ที่รวมอิทธิพลเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากยานอวกาศและค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ, σ_{ipf} คือค่าความคลาดเคลื่อนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ และ σ_{stat} คือค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติของหัววัด

ในการพิจารณาความคลาดเคลื่อนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์กำหนดให้ลักษณะการสลายตัวของอนุภาคถ้าไม่มีความแปรปรวนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์เป็นเส้นตรง ดังนั้นจำนวนจุดข้อมูลที่คลาดเคลื่อนจากแนวเส้นตรงที่สลายตัวจะเป็นช่วงความคลาดเคลื่อนที่พิจารณา เมื่อ

$$\sigma_{ipf}^2 = \frac{1}{N-2} \sum_i (t_i - \hat{t}(t_i))^2 - \frac{1}{N} \sum_i \sigma_{stat,i}^2 \quad (4)$$

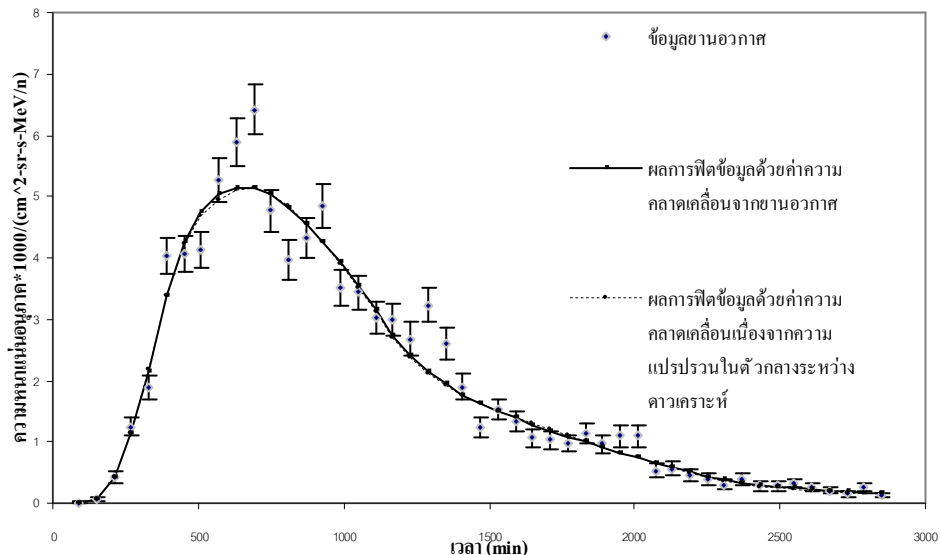
โดยเทอมแรกเป็นเทอมที่พิจารณาความแปรปรวนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ และเทอมที่สอง คือความคลาดเคลื่อนจากยานอวกาศ เมื่อ N คือจำนวนข้อมูลอ้างอิงที่พิจารณาในเส้นแนวโน้ม, I_i คือค่าความหนาแน่นของอนุภาคในช่วงที่พิจารณา, \hat{I}_i คือความหนาแน่นของอนุภาคหลังจากพิจารณาเส้นแนวโน้มแล้ว และ t_i คือเวลาของการกระจายตัวของอนุภาคในแต่ละจุดข้อมูล โดยงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบผลการฟิตที่ได้ทั้งโดยการฟิตด้วยค่าความคลาดเคลื่อนรวม และโดยค่าความคลาดเคลื่อนจากยานอวกาศโดยตรง

ผลการวิจัย

จากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์สำหรับธาตุ C, N, O, Ne, Si และ Fe ที่ระดับพลังงาน 6.12-76.34, 6.61-83.26, 7.05-89.78, 7.82-101.83, 9.03-12.32 และ 10.47-16.76 MeV/n สำหรับการปะทุบนดวงอาทิตย์ในวันที่ 24 สิงหาคม 2543 พบว่าระยะทางอิสระเฉลี่ยของอนุภาคมีแนวโน้มสูงขึ้นตามพลังงานที่เพิ่มขึ้นซึ่งที่พิดด้วยค่าความคลาดเคลื่อนจากยานอวกาศและค่าความคลาดเคลื่อนใหม่ที่รวมอิทธิพลของความแปรปรวนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์แล้ว และจากตารางค่า $\frac{\chi^2}{df}$ (เมื่อ df คือจำนวนตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อการพิดข้อมูล) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความแม่นยำของการพิดข้อมูล โดยผลการพิดที่ดีที่สุดจะให้ $\frac{\chi^2}{df}$ มีค่าใกล้ 1 ซึ่งผลการพิดค่าความคลาดเคลื่อนทั้ง 2 ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในตาราง และในรูป 1 เป็นกราฟแสดงผลการพิดที่ได้จากค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสอง

ตาราง 1 ผลการพิดข้อมูลของธาตุ He, C, N, O, Ne, Si และ Fe ในวันที่ 24 สิงหาคม 2543

Element	Kinetic Energy	Spacecraft Uncertainty			Interplanetary Fluctuation		
		$\lambda \pm \Delta\lambda$	Injection Time	χ^2/df	$\lambda \pm \Delta\lambda$	Injection Time	χ^2/df
C	12.315	0.591±1.121	808	3.03	0.622 ± 0.125	810	2.81
	29.165	0.293±0.130	583	0.98	0.250 ± 0.120	542	0.99
N	13.370	0.077±0.043	225	1.76	0.153 ± 0.015	506	1.42
	17.000	0.107±0.123	386	1.35	0.134 ± 0.107	431	1.10
O	18.300	0.230±0.108	590	2.34	0.270 ± 0.090	622	0.87
	25.195	0.400±0.040	543	1.86	0.330 ± 0.106	527	0.90
Ne	12.895	0.050±0.031	262	1.61	0.060 ± 0.023	287	1.74
	16.100	0.280±0.135	665	1.15	0.310 ± 0.042	171	2.94
Si	15.150	0.530±0.080	675	1.82	0.530 ± 0.096	116	0.83
	19.025	0.517±0.069	667	1.48	0.597±0.103	138	1.93
Fe	13.150	0.480±0.065	380	1.89	0.490±0.070	386	1.54
	31.305	0.417±0.101	159	1.45	0.370±0.123	135	1.25



รูป 1 ผลการฟิตเปรียบเทียบข้อมูลของธาตุ O ที่ระดับพลังงาน 18.3 MeV/n เมื่อแกนนอนเป็นค่าของเวลาหน่วยนาทีก และแกนตั้งเป็นค่าของความหนาแน่นของอนุภาคจากดวงอาทิตย์ หน่วย จำนวนอนุภาค/($\text{cm}^2\text{-sr-s-MeV/n}$) รูปสี่เหลี่ยมเปียกปูนแทนข้อมูลจริงจากยานอวกาศ เส้นทึบแทนผลการฟิตด้วยค่าความคลาดเคลื่อนจากยานอวกาศ และเส้นประแทนผลการฟิตด้วยค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อรวมความแปรปรวนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์

จากรูป 1 พบว่า เมื่อเขียนกราฟผลการฟิตข้อมูลด้วยค่าความคลาดเคลื่อนทั้งจากความคลาดเคลื่อนของยานอวกาศ และค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความแปรปรวนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ พบว่ากราฟทั้งสองให้ผลการฟิตที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงจากยานอวกาศ และในด้านการแสดงผลการฟิตข้อมูลด้วยค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสองตามตาราง 1 พบว่าค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้น และค่าระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลกมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับการฟิตด้วยค่าความคลาดเคลื่อนทั้งสอง

สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์โดยการเปรียบเทียบผลการฟิตระหว่างการฟิตด้วยค่าความคลาดเคลื่อนจากยานอวกาศเพียงลำพัง และการฟิตด้วยความคลาดเคลื่อนเมื่อพิจารณาความแปรปรวนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ โดยเลือกเหตุการณ์ การปะทุจริง ณ วันที่ 24 สิงหาคม 2543 ด้วยข้อมูลจากยานอวกาศ ACE สำหรับอนุภาค He, C, N, O, Ne, Si และ Fe ที่ระดับพลังงาน 6.12-76.34, 6.61-83.26, 7.05-89.78, 7.82-101.83, 9.03-12.32 และ 10.47-

16.76 MeV/n ตามลำดับ พบว่าผลการฟิตด้วยค่าความแปรปรวนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ให้ค่าระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคใกล้เคียงกับข้อมูลระยะเวลาการปลดปล่อยที่วัดได้โดยยานอวกาศ และจากผลการฟิตข้อมูลพบว่าระยะทางอิสระเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าระดับพลังงาน แสดงในตาราง 1 แสดงว่าเมื่ออนุภาคมีพลังงานเพิ่มขึ้นอนุภาคจะสามารถเดินทางตามเส้นสนามแม่เหล็กได้ระยะทางมากกว่าอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่า ส่วนค่าระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลกพบว่าอนุภาคที่มีพลังงานสูงจะมีระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคสั้นกว่าอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่า แสดงว่ามีการกระจายตัวหรือฟุ้งในอวกาศน้อยกว่าอนุภาคพลังงานต่ำ และการที่ตรวจพบว่ามี การปล่อยมวลสารจากชั้นโคโรนาตามมาในเวลา 0109 UT (Evenson *et al.*, 1982) ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่ออนุภาคพลังงานต่ำทำให้เกิดการฟุ้งในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์มากกว่าปกติ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และ รศ.ดร.เดวิด รูฟโฟโล อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่สนับสนุนทั้งด้านงบประมาณและวัสดุอุปกรณ์ ตลอดจนทั้งคำแนะนำต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Evenson P., Meyer P. and Yanagita S. (1982). Solar Flare Shocks in Interplanetary Space and Solar Flare Particle Events, *J. Geophys. Res.*, 87, 625-631
- Ford T., Palmer I.D. and Sanders R. (1977). Separation of Solar and Interplanetary Diffusion in Solar Cosmic Ray Events. *J. Geophys. Res.*, 82, 4704-4710
- Jokipii J.R., (1971). Propagation of Cosmic Rays in the Solar Wind. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 9, 27.
- Ruffolo D., Khumlumlert T. and Youngdee W. (1998). Deconvolution of Interplanetary Transport of Solar Energetic Particles, *J. Geophys. Res.*, 103, 591-602.

