

การวิเคราะห์ความไม่สม่ำเสมอในทุกทิศทางของอนุภาคจากดวงอาทิตย์  
ทิราณี ขำลำเลิศ<sup>1\*</sup> และ นลินี เอี่ยมสะอาด<sup>2</sup>

**An Anisotropy Analysis of Particles from the Sun**

Thiraneek Khumlumlert<sup>1\*</sup> and Nalinee Aiemsad<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก 65000

<sup>2</sup>โปรแกรมวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์

อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

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

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาการปะทุบนดวงอาทิตย์ ณ วันที่ 20 มกราคม 2548 โดยเหตุการณ์นี้มีระดับการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Class) ระดับ X7.1 เหตุการณ์นี้ได้ปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ ณ เวลา 06.36 UT ถึง 07.26 UT รวมระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาค 50 นาทีและตรวจพบการปล่อยก่อนมวลสารจากโคโรนา ณ เวลา 06.43 UT ในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลอนุภาคพลังงานต่ำซึ่งมีพลังงานในช่วง 0.02 – 10 MeV/n จากเครื่องมือ Ultra Low Energy Isotope Spectrometer, (ULEIS) บนยานอวกาศ Advanced Composition Explorer, (ACE) รวมถึงการวิเคราะห์ความไม่สม่ำเสมอในทุกทิศทางของอนุภาค (Anisotropy) ที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์มายังโลก โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า The Suprathermal Energetic Particle Telescope System, (STEP) จากยานอวกาศ The Wind Spacecraft, (WIND) ผลการวิจัยพบว่า อนุภาคที่วัดได้จากเครื่องมือ ULEIS แนวโน้มของระยะทางอิสระเฉลี่ยของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับพลังงาน โดยระยะทางอิสระเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.729 – 1.863 AU ระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคมีค่า 23.345 – 106.946 นาที ส่วนอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องมือ STEP มีค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.077 – 1.614 AU ระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคมีค่า 6.043 – 1,074.389 นาที พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคในเครื่องมือ STEP มีความแปรปรวนสูงกว่าการวิเคราะห์อนุภาคในทิศทางเดียวจากเครื่องมือ ULEIS

**คำสำคัญ:** การปะทุบนดวงอาทิตย์ อนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ ลมสุริยะ ความไม่สม่ำเสมอของอนุภาคในทุกทิศทาง

### Abstract

This research studied the gradual solar flare event on January 20, 2005. The X-ray class of this flare was X7.1. The released time of the energy particles was at 06.36 UT and the stop time of them was at 07.26 UT, so the total injection time of this event was about 50 min. The time of the coronal mass ejections (CMEs) of this event was at 06.43 UT. In this work, we studied and analyzed the low energy particles from an Ultra – Low Energy Isotopic Spectrometer, (ULEIS) instrument on the Advanced Composition Explorer spacecraft. We included an anisotropy analysis of particles from the Suprathermal Energetic Particle Telescope System, (STEP) instrument on the Wind spacecraft. Finally, we found trend of the mean free path increased in energy from particles analysis from the ULEIS instrument. The range of motion distance of particles along the magnetic field line was 0.729–1.863 AU. The injection time was 23.345–106.946 min. Mean free path of particles from the STEP instrument were uncertainty, which were 0.077–1.614 AU and the injection time was 6.043 – 1,074.389 min. We found, the distribution of particles from the STEP instrument were more turbulent more than particles from ULEIS.

*Keywords:* solar flare, solar energetic particle, solar wind, anisotropy

### บทนำ

ปรากฏการณ์การปะทุที่ผิวของดวงอาทิตย์ เป็นการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงออกมาสู่ตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ เมื่ออนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่ผ่านเข้ามาในชั้นบรรยากาศของโลกโดยเฉพาะที่ขั้วโลก ทำให้เกิดปรากฏการณ์แสงเหนือ - แสงใต้ (Aurora) นอกจากเกิดแสงเหนือ แสงใต้แล้ว ยังมีปรากฏการณ์การปล่อยก้อนมวลสารจากดวงอาทิตย์ (Coronal mass ejections, CMEs) ซึ่งเป็นการปลดปล่อยมวลหรืออนุภาคพลังงานสูงออกมาด้วยความเร็วสูงโดยปรากฏการณ์นี้มักเกิดขึ้นร่วมกับการปะทุบนดวงอาทิตย์ ซึ่งอนุภาคที่พุ่งมายังไปรบกวนระบบการสื่อสารของโลกด้วย ทำให้เกิดปัญหากับดาวเทียมสื่อสารต่างๆ และสนามแม่เหล็กยังก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ผิวโลกซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องบางประเทศ ดังนั้นในการศึกษาการปะทุบนดวงอาทิตย์จากการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงออกมานั้นทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของอนุภาคและสามารถพยากรณ์ความเข้มของอนุภาคพลังงานสูงที่จะเคลื่อนที่มาถึงโลก เวลาที่อนุภาคพลังงานสูงใช้

ในการเคลื่อนที่มาถึงโลกหลังจากเกิดการปะทุบนดวงอาทิตย์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศ และ ความเสี่ยงต่อดาวเทียมและอุปกรณ์ไฟฟ้าบนผิวโลกได้เพื่อช่วยให้สามารถเตรียมตัวได้อย่างทันทั่วถึง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในทุกทิศทางจากดวงอาทิตย์ ด้วยสมการการเคลื่อนที่ของ Ruffolo (1995, 1998) เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคและแก้สมการ โดยวิธีการเชิงตัวเลข (Finite different method) เพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามเส้น สนามแม่เหล็กก่อนที่จะกระเจิงเนื่องจากความไม่เรียบของสนามแม่เหล็ก หรือเรียกว่า ระยะทางอิสระ เฉลี่ย (Mean free path) โดยการฟิตข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจริงจากยานอวกาศและผลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยวิธี Piecewise linear least squares fitting เพื่อหาค่าระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาค (Injection time) จากดวงอาทิตย์มายังโลก

### วิธีดำเนินการ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ปะทุจากดวงอาทิตย์ สำหรับเหตุการณ์วันที่ 20 มกราคม 2548 ซึ่งในเหตุการณ์นี้มีระดับความรุนแรงของเหตุการณ์ที่ระดับ X7.1 (ระดับความรุนแรงที่ระดับ X คือการวัดค่า ฟลักซ์ของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ โดยระดับ X หมายถึง  $10^{-4} - 10^{-3}$  Watt/m<sup>2</sup> ค่าตัวเลขเป็นการแบ่งความรุนแรงตามสเกลลอการิทึม) ซึ่งจัดเป็นเหตุการณ์ที่มีความรุนแรงสูง และเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาค พบว่ามีจำนวนข้อมูลเพียงพอและไม่ถูกรบกวนจากอิทธิพลของตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ตำแหน่งที่เกิดการปะทุอยู่ที่ N12W58 สามารถตรวจพบการปล่อยมวลสารจากชั้นคอโรนาตามมา ที่เวลา 06.43 UT ความเร็วลมสุริยะมีค่า 822 km/s และเป็นเหตุการณ์ที่ตรวจพบข้อมูลทั้งในเครื่องมือ Ultra - Low Energy Isotopic Spectrometer, ULEIS และเครื่องมือ Suprathermal Energetic Particle Telescope System, STEP งานวิจัยนี้วิเคราะห์ ข้อมูลของอนุภาค H, He, CNO, NeS และ Fe ซึ่งอนุภาคเหล่านี้เป็นอนุภาคที่ตรวจวัดจากยานอวกาศ จากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยสมการขนส่งของ Ruffolo (1995, 1998) ดังแสดงในสมการ (1) เป็นสมการที่อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลกซึ่งรวมอิทธิพลต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อ ได้แก่ การพาอนุภาคโดยความเร็วลมสุริยะ การลดลงของจำนวนอนุภาคตามเวลา การบานออกของเส้นสนามแม่เหล็ก และการกระเจิงของอนุภาคตามเส้นสนามแม่เหล็ก

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

- เมื่อ  $F$  คือ ฟังก์ชันการแพร่กระจาย
- $t$  คือ เวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลก (min)
- $z$  คือ ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์มายังโลก (AU)
- $\mu = \cos \theta$  แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเคลื่อนที่เข้าหรือออกจากดวงอาทิตย์
- $\theta$  คือ มุมระหว่างทิศของความเร็วของอนุภาคกับทิศของสนามแม่เหล็ก
- $p$  คือ โมเมนตัมของอนุภาค (MeV/c)
- $\varphi(\mu)$  คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงของอนุภาคที่กระทำกับเส้นสนามแม่เหล็ก
- $v$  คือ ความเร็วของอนุภาค (AU/min)
- $v_{sw}$  คือ ความเร็วของลมสุริยะ (AU/min)
- $\psi$  คือ มุมระหว่างเวกเตอร์ที่แสดงทิศทางของอนุภาคตามแนวรัศมีกับเวกเตอร์ที่แสดงทิศทางของเส้นสนามแม่เหล็ก (degree)
- $c$  คือ ความเร็วแสง (AU/min)
- $L(z)$  คือ ความยาวของเส้นสนามแม่เหล็กที่มีลักษณะบานออกตามระยะทางสนาม

$$\text{แม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น เมื่อ } \frac{1}{L} = -\frac{1}{B} \frac{\partial B}{\partial z}$$

$\frac{E'}{E}$  คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานรวมในกรอบอ้างอิงของลมสุริยะกับกรอบอ้างอิง  
หยุดนิ่ง

ผลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ คือ การกระจายตัวของอนุภาคตามเวลา โดยงานวิจัยนี้  
เราจะวิเคราะห์ผลการเคลื่อนที่ของอนุภาคออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกที่จำลองให้อนุภาคเคลื่อนที่  
สม่ำเสมอในทุกทิศทาง (Isotropy) โดยพิดเปรียบเทียบกับข้อมูลจากเครื่องมือ ULEIS และกรณีที่ 2 คือ  
พิจารณาความไม่สม่ำเสมอของอนุภาคในทุกทิศทาง (Anisotropy) โดยพิดเปรียบเทียบกับข้อมูลจาก  
เครื่องมือ STEP ผลการพิดข้อมูลจะแสดงถึงค่าระยะทางอิสระเฉลี่ย ( $\lambda$ ) ที่เหมาะสมที่สุดของการ  
เคลื่อนที่ โดยผลการพิดข้อมูลสามารถหาได้จากวิธี Piecewise linear least squares fitting ซึ่งจะรายงาน  
ผลการพิดในรูปของค่าผลต่างกำลังสองน้อยที่สุด ( $\chi^2$ )

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

- เมื่อ  $\chi^2$  คือ ผลรวมของค่าความแตกต่างกำลังสองของข้อมูลจำนวน n ตัว
- $y_n$  คือ ข้อมูลจริงจากยานอวกาศ
- $y(x_n)$  คือ ข้อมูลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค
- $\sigma_n$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลแต่ละจุด

เมื่อได้ค่า  $\lambda$  ที่ให้ค่า  $\chi^2$  น้อยที่สุดแล้ว เราสามารถหาระยะการปลดปล่อยอนุภาคจากดวง  
อาทิตย์มายังโลกได้ โดยเทคนิค deconvolution หรือการแทนค่าฟังก์ชันการปลดปล่อยย้อนกลับ และ  
หาระยะเวลาการปลดปล่อยด้วยวิธี FWHM (Full Width at Half Maximum)

**ผลการวิจัย**

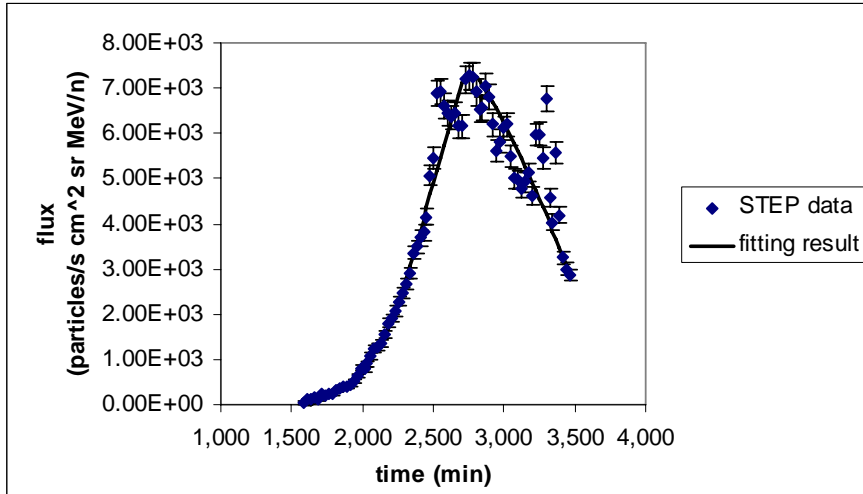
จากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยใช้สมการขนส่ง Ruffolo (1995) โดยทำการ  
จำลองและวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลจากเครื่องมือ ULEIS และเครื่องมือ STEP ของธาตุ H, He,  
CNO, NeS และ Fe ผลการพิดข้อมูลเพื่อหาระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ดีที่สุดสำหรับการเคลื่อนที่ของ  
อนุภาค และระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคแสดงในตาราง 1 และ 2

**ตาราง 1** แสดงค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยและระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์  
ของเครื่องมือ ULEIS และเครื่องมือ STEP ณ เหตุการณ์วันที่ 20 มกราคม 2548

ธาตุ	พลังงาน (MeV/n)		ULEIS		STEP	
	ต่ำสุด	สูงสุด	$\lambda \pm \Delta\lambda$ (AU)	ระยะเวลา ปลดปล่อย (min)	$\lambda \pm \Delta\lambda$ (AU)	ระยะเวลา ปลดปล่อย (min)
H	0.163	0.233	$0.987 \pm 0.176$	63.741	$0.548 \pm 0.011$	756.482
	0.233	0.325	$1.382 \pm 0.158$	77.816	$0.542 \pm 0.025$	881.350
	0.325	0.457	$0.759 \pm 0.161$	57.960	$0.625 \pm 0.010$	1074.389
	0.457	0.653	$1.177 \pm 0.263$	85.277	$0.702 \pm 0.075$	210.282
	0.653	0.884	$1.620 \pm 0.555$	94.909	$0.642 \pm 0.214$	228.229
He	0.0630	0.0790	$1.143 \pm 0.288$	79.005	-	-
	0.0790	0.1550	$1.059 \pm 0.109$	65.072	-	-
	0.1550	0.3150	$1.508 \pm 0.142$	70.267	-	-
	0.3150	0.6200	$1.341 \pm 0.023$	86.731	$0.077 \pm 0.003$	364.049
	0.6200	1.2800	$1.863 \pm 0.146$	62.603	$0.078 \pm 0.006$	449.754
CNO	0.0404	0.7930	$1.116 \pm 0.075$	39.499	-	-
	0.0793	0.1590	$0.900 \pm 0.097$	77.848	$1.295 \pm 0.167$	18.355
	0.1590	0.3270	$1.133 \pm 0.074$	54.551	$1.614 \pm 0.017$	9.089
	0.3270	0.5080	$0.729 \pm 0.026$	73.204	$0.299 \pm 0.082$	405.487
	0.5080	1.2300	$1.622 \pm 0.076$	75.675	$0.552 \pm 0.038$	510.147
NeS	0.0389	0.0789	-	-	$1.548 \pm 0.107$	19.504
	0.0789	0.1520	$0.847 \pm 0.079$	55.610	$0.893 \pm 0.081$	6.043
	0.1520	0.3250	$1.049 \pm 0.102$	74.523	-	-
	0.3250	0.6500	$1.530 \pm 0.075$	65.462	$0.536 \pm 0.123$	543.130
	0.6500	1.2900	$1.420 \pm 0.353$	23.345	$0.254 \pm 0.042$	584.538
Fe	0.0389	0.0769	$1.490 \pm 0.092$	79.285	$1.494 \pm 0.087$	72.072
	0.145	0.326	$1.160 \pm 0.133$	106.946	$0.587 \pm 0.038$	473.690
	0.326	0.664	$1.233 \pm 0.134$	106.322	$1.133 \pm 0.051$	589.257

**ตาราง 2** แสดงค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยและระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์ โดยการฟิตข้อมูลอนุภาคที่เท่ากันในทุกทิศทาง (Isotropy) และข้อมูลอนุภาคที่ไม่เท่ากันในทุกทิศทาง (Anisotropy) จากเครื่องมือ STEP บนยานอวกาศ WIND ณ เหตุการณ์วันที่ 20 มกราคม 2548

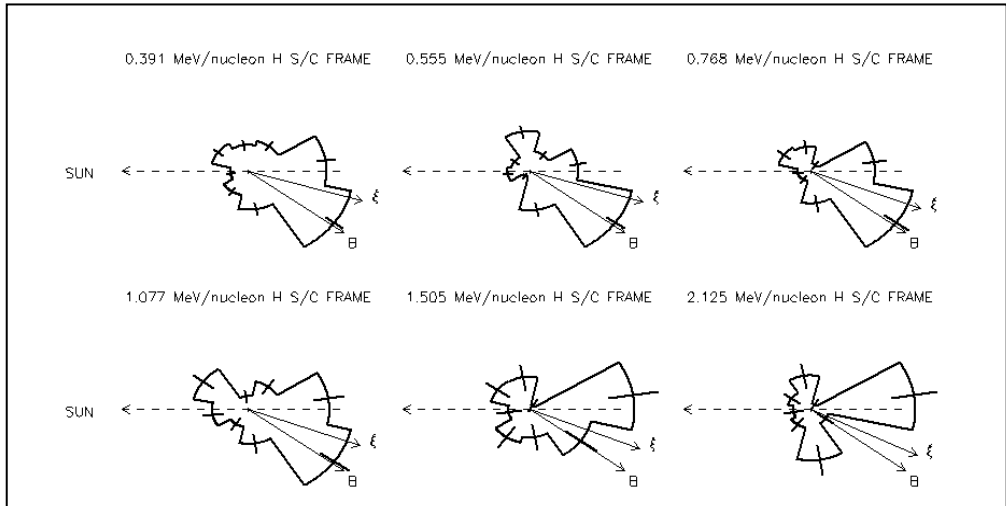
ธาตุ	พลังงาน (MeV/n)		isotropy		anisotropy	
	ต่ำสุด	สูงสุด	$\lambda \pm \Delta\lambda$ (AU)	ระยะเวลา ปลดปล่อย (min)	$\lambda \pm \Delta\lambda$ (AU)	ระยะเวลา ปลดปล่อย (min)
H	0.163	0.233	$0.548 \pm 0.011$	756.482	$0.053 \pm 0.006$	871.689
	0.233	0.325	$0.542 \pm 0.025$	881.350	$0.577 \pm 0.043$	940.067
	0.325	0.457	$0.625 \pm 0.010$	1074.389	$0.145 \pm 0.014$	1075.612
	0.457	0.653	$0.702 \pm 0.075$	210.282	-	-
	0.653	0.884	$0.642 \pm 0.214$	228.229	-	-
He	0.3150	0.6200	$0.077 \pm 0.003$	364.049	$0.038 \pm 0.008$	404.252
	0.6200	1.2800	$0.078 \pm 0.006$	449.754	-	-
CNO	0.0793	0.1590	$1.295 \pm 0.167$	18.355	$0.846 \pm 0.207$	6.842
	0.3270	0.5080	$0.299 \pm 0.082$	405.487	-	-
	0.5080	1.2300	$0.552 \pm 0.038$	510.147	$0.137 \pm 0.006$	512.907
NeS	0.0389	0.0789	$1.548 \pm 0.107$	19.504	$1.081 \pm 0.157$	18.782
	0.3250	0.6500	$0.536 \pm 0.123$	543.130	-	-
	0.6500	1.2900	$0.254 \pm 0.042$	584.538	-	-
Fe	0.0195	0.0389	$1.660 \pm 0.153$	74.846	$0.486 \pm 0.018$	47.402
	0.0389	0.0769	$1.494 \pm 0.087$	72.072	$0.695 \pm 0.263$	74.297
	0.145	0.326	$0.587 \pm 0.038$	473.690	$0.041 \pm 0.005$	446.881
	0.326	0.664	$1.133 \pm 0.051$	589.257	$0.400 \pm 0.035$	612.176
	0.664	1.14	$0.193 \pm 0.011$	631.792	$0.062 \pm 0.004$	623.928



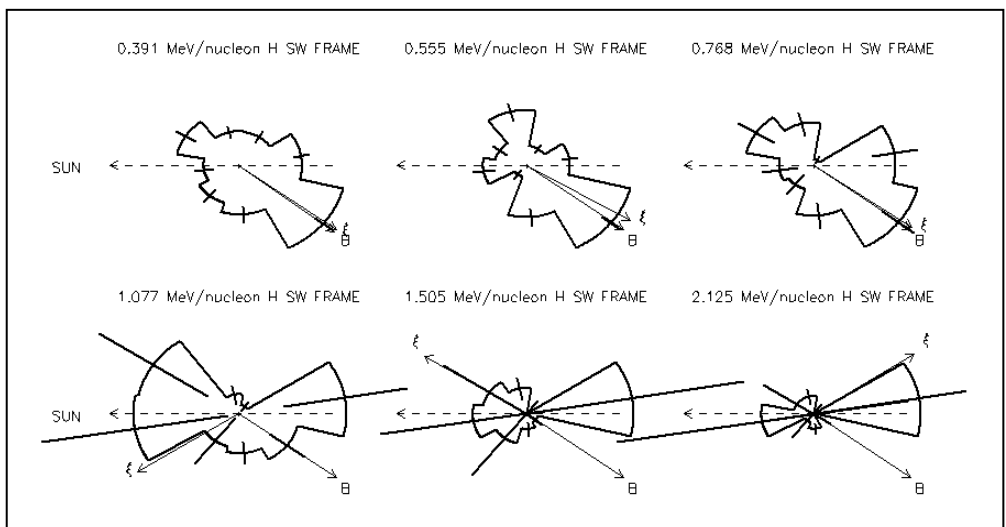
รูป 1 แสดงการฟิตข้อมูลของธาตุ H ที่ระดับพลังงาน 0.233 – 0.325 MeV/n จากเครื่องมือ STEP

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยทำการฟิตข้อมูลของธาตุต่างๆ ดังแสดงในรูป 1 ซึ่งเป็นผลการฟิตข้อมูลของธาตุ H จากเครื่องมือ STEP และมีแถบแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล โดยกราฟจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ของอนุภาคตามเวลา ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งแบบเกาส์เซียน และในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ความไม่สม่ำเสมอในทุกทิศทางโดยการนำข้อมูลจากเครื่องมือ STEP ซึ่งเป็นเครื่องมือที่แบ่งการวัดอนุภาคออกเป็น 8 ช่องแยกตามระดับพลังงาน จากนั้นนำข้อมูลฟลักซ์ของอนุภาคในแต่ละช่วงพลังงานมาทำการประมวลผลในโปรแกรม IDL (Interactive Data Language) โดยแยกพิจารณาในกรอบอ้างอิงหุคหนึ่งและกรอบของลมสุริยะ ในที่นี้ได้เลือกแสดงผลการฟิตข้อมูลและจากการประมวลผลของโปรแกรม IDL ของธาตุ H เนื่องจากธาตุ H เป็นธาตุที่มีระดับพลังงานต่ำที่สุดมีความแปรปรวนสูง และเป็นธาตุที่แสดงให้เห็นความแตกต่างของฟลักซ์ของอนุภาคในทุกทิศทางระหว่างกรอบอ้างอิงหุคหนึ่งและกรอบของลมสุริยะได้ชัดเจนกว่าธาตุอื่นๆ เพื่อพิจารณาขนาดฟลักซ์ของอนุภาคของธาตุ H ที่วัดได้จากยานอวกาศในทิศทางต่างๆ และการวิเคราะห์เวกเตอร์ลัพธ์ของสนามแม่เหล็ก ( $\vec{B}$ ) และทิศทางที่แสดงความไม่สม่ำเสมอของอนุภาค (Anisotropy,  $\xi$ ) ดังแสดงในรูป 2 - 3





**รูป 2** แสดงขนาดพลาสมาของอนุภาคในทุกทิศทางและเวกเตอร์ลิพธ์ของสนามแม่เหล็กของธาตุ H ในแต่ละระดับพลังงานสำหรับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง



**รูป 3** แสดงขนาดพลาสมาของอนุภาคในทุกทิศทางและเวกเตอร์ลิพธ์ของสนามแม่เหล็กของธาตุ H ในแต่ละระดับพลังงานสำหรับกรอบของลมสุริยะ

จากรูป 2 และ 3 จะเห็นว่าขนาดของพลาสมาจะมีมากในทิศทางเดียวกับทิศของเวกเตอร์ลิพธ์ของสนามแม่เหล็กและทิศที่แสดงความไม่สม่ำเสมอของอนุภาค ทั้งในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งและกรอบอ้างอิงของลมสุริยะ และเมื่อพิจารณาพลาสมาในกรอบของลมสุริยะจะเห็นว่าขนาดของพลาสมาในทิศเข้า

หาดวงอาทิตย์จะมีขนาดมากกว่ารอบข้างอึ่งหุคหนึ่ง เนื่องจากการพิจารณาในรอบข้างอึ่งหุคหนึ่ง จะเปรียบเสมือนผู้สังเกตอยู่ที่ตำแหน่งโลกและมองอนุภาคเคลื่อนที่มาจากดวงอาทิตย์เราจึงเห็นอนุภาคในทิศเข้าหาดวงอาทิตย์มีขนาดเล็กและเห็นอนุภาคในทิศเข้าหาโลกมีขนาดใหญ่ แต่ในการพิจารณาในรอบของลมสุริยะจะเปรียบเสมือนผู้สังเกตเคลื่อนที่มากับลมสุริยะดังนั้นเมื่อผู้สังเกตมองอนุภาคในทิศเข้าหาดวงอาทิตย์จึงเห็นอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าในรอบข้างอึ่งหุคหนึ่ง

### สรุปและวิเคราะห์ผลการวิจัย

จากผลการพืดข้อมูลพบว่า ค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยสำหรับอนุภาคต่างๆ ที่วิเคราะห์จากเครื่องมือ ULEIS มีค่าระหว่าง 0.729 – 1.863 AU และพบว่าเมื่อระดับพลังงานสูงขึ้นระยะทางอิสระเฉลี่ยของอนุภาคจะมีค่าเพิ่มขึ้น และจากการวิเคราะห์ระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาค พบว่ามีค่าระหว่าง 23.345 – 106.946 นาที โดยค่าระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคของธาตุ He และ NeS จะมีค่าลดลงเมื่อระดับพลังงานสูงขึ้น ส่วนธาตุ H, Fe และ CNO ค่าระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับพลังงานสูงขึ้น และจากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากดวงอาทิตย์วัดได้โดยเครื่องมือ STEP พบว่าผลการพืดข้อมูลให้ค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยระหว่าง 0.077 – 1.614 AU โดยค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยมีค่าไม่คงที่ และระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับพลังงานสูงขึ้น และมีค่าอยู่ในช่วง 6.043 – 1,074.389 นาที ซึ่งสาเหตุที่บางธาตุมีระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคสูงขึ้นเมื่อระดับพลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเป็นกรวดอนุภาคที่พลังงานต่ำ จึงได้รับผลกระทบจาก CMEs ทำให้เกิดการเร่งอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ดังนั้นอนุภาคจึงมีการแพร่อยู่ในอวกาศนานขึ้น จากการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องมือ ULEIS และเครื่องมือ STEP พบว่าค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยโดยรวมที่วัดได้จากเครื่องมือ ULEIS จะมีค่ามากกว่าเครื่องมือ STEP และระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องมือ STEP จะมีค่ามากกว่าเครื่องมือ ULEIS และจากการพิจารณาฟลักซ์ของอนุภาคในทิศทางในกรอบข้างอึ่งหุคหนึ่งและกรอบของลมสุริยะจากผลการวิจัยพบว่า เมื่อพิจารณาในรอบข้างอึ่งหุคหนึ่งโดยไม่พิจารณาผลกระทบจากลมสุริยะ ขนาดฟลักซ์ของอนุภาคในทิศทางออกจากดวงอาทิตย์มีฟลักซ์มาก และขนาดฟลักซ์ของอนุภาคในทิศทางเข้าหาดวงอาทิตย์มีขนาดน้อยกว่าเมื่อพิจารณาในรอบของลมสุริยะ นั่นคือเมื่อเราทำการพิจารณาในรอบของลมสุริยะเราจะเห็นขนาดฟลักซ์ของอนุภาคในทิศทางเข้าหาดวงอาทิตย์มีขนาดมากกว่าในรอบข้างอึ่งหุคหนึ่ง ดังนั้นในการศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากดวงอาทิตย์ จึงต้องพิจารณาทั้งกรอบข้างอึ่งหุคหนึ่งและกรอบของลมสุริยะ เนื่องจากอิทธิพลของลมสุริยะมีผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของอนุภาคจากดวงอาทิตย์

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และ ศ.ดร.เดวิด รูฟโฟโล ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่กรุณาให้คำปรึกษาและเอื้อเฟื้อโปรแกรมเบื้องต้นเพื่อใช้ศึกษา ขอขอบพระคุณ Prof. Dr. Joseph R. Dwyer และ นักศึกษาปริญญาเอก Mr. Maher Al – Dayeh Geospace Physics Laboratory, Department of Physics and Space Sciences, Florida Institute of Technology, Melbourne, USA ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลจากยานอวกาศ ให้คำปรึกษาและเอื้อเฟื้อโปรแกรม IDL เพื่อใช้ในการศึกษางานวิจัยครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- Earl, J.A. (1973). Diffusion on Charged Particles in a Random Magnetic Field. *Astrophysical Journal*, 180, 227-238.
- Forman, M.A. (1970). The Compton – Getting Effect for Cosmic Ray Particles and Photons and the Lorentz Invariance of Distribution Functions, *Planet. Space Science*, 18, 25–31.
- Hasselmann, K. and Wibberenz, G. (1968). Scattering of Particles by Random Electromagnetic Field. *Z. Geophysics*, 34, 353.
- Jokipii, J.R. (1968). Addendum and Erratum to Cosmic-ray Propagation. I. *Astrophysical Journal*, 152, 671
- Jokipii, J.R. (1971). Propagation of Cosmic Rays in the Solar Wind. *Geophysical Space Physics*, 19, 27.
- Khumlumlert, T. (2001). *Injection Function of Energetic Heavy ions from the Sun*. Ph.D. Thesis, Bangkok: Chulalongkorn University.
- Mason, G.M., Mazur, J.E. and Dwyer, J.R. (2002). A New Heavy Ion Abundance Enrichment Pattern in 3He–Rich Solar Particle Events, *Astrophysical Journal*, 565, L51-L54.
- Ruffolo, D. (1995). Effect of Adiabatic Deceleration on the Focused Transport of Solar Cosmic Rays. *Astrophysics Journal*, 422, 861-874.
- Ruffolo, D. Khumlumlert, T. and Youngde, W. (1998). Deconvolution of Interplanetary Transport of Solar Energetic Particles. *Journal of Geophysical Research*, 103, 591-602.

