

## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ผลของระยะอิสระเฉลี่ยต่อการเร่งอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์

Effect of mean free path to acceleration of solar energetic particles



ผู้วิจัย

ดร.ชาญเรืองฤทธิ์ จันทน์นอก  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงบประมาณ  
ประจำปีงบประมาณ 2551

### บทคัดย่อ

เราใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขในการจำลองการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกที่ขึ้นกับเวลา เพื่อศึกษาผลของระยะอิสระเฉลี่ย ( $\lambda$ ) ต่อการเร่งอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ ที่เกิดขึ้นในเหตุการณ์พายุสุริยะที่มีคลื่นกระแทกในตัวยานระหว่างดาวเคราะห์ พบว่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวยานระหว่างดาวเคราะห์มีผลต่อการทำให้อนุภาคถูกเร่งอย่างชัดเจน ซึ่งค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวยานระหว่างดาวเคราะห์ที่มีค่าน้อยนั้น จะมีผลทำให้เกิดการเร่งอนุภาคที่มีทำให้อนุภาคนั้นมีพลังงานสูงเพิ่มขึ้น เมื่อวิเคราะห์ค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวยานระหว่างดาวเคราะห์ ในเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะในช่วงวันที่ 20 -23 กันยายน ค.ศ. 1999 พบว่าค่า  $\lambda = 0.02$  AU นั้นสามารถใช้ฟิตได้ตรงกับข้อมูลการวัดจากยานอวกาศหลังการเกิดคลื่นกระแทก

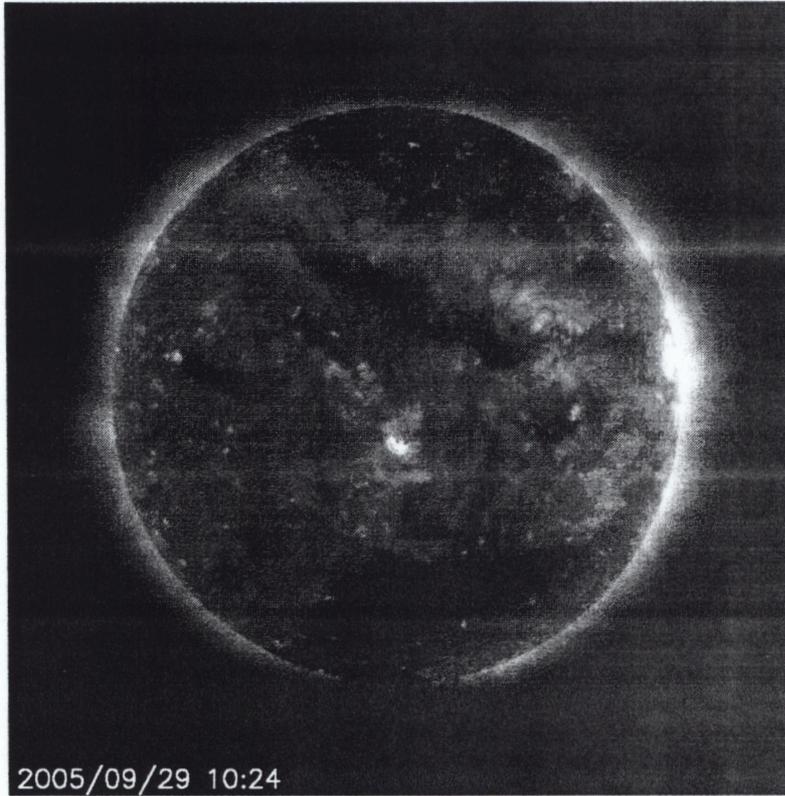
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	2
บทที่ 1 บทนำ	4
บทที่ 2 การเร่งอนุภาคจากดวงอาทิตย์	8
บทที่ 3 การจำลองการเร่งอนุภาคและขั้นตอนวิธีการคำนวณ	15
บทที่ 4 ผลการจำลองระยะอิสระเฉลี่ยต่อการเร่งอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์	18
บทที่ 5 สรุปผล	22
เอกสารอ้างอิง	23

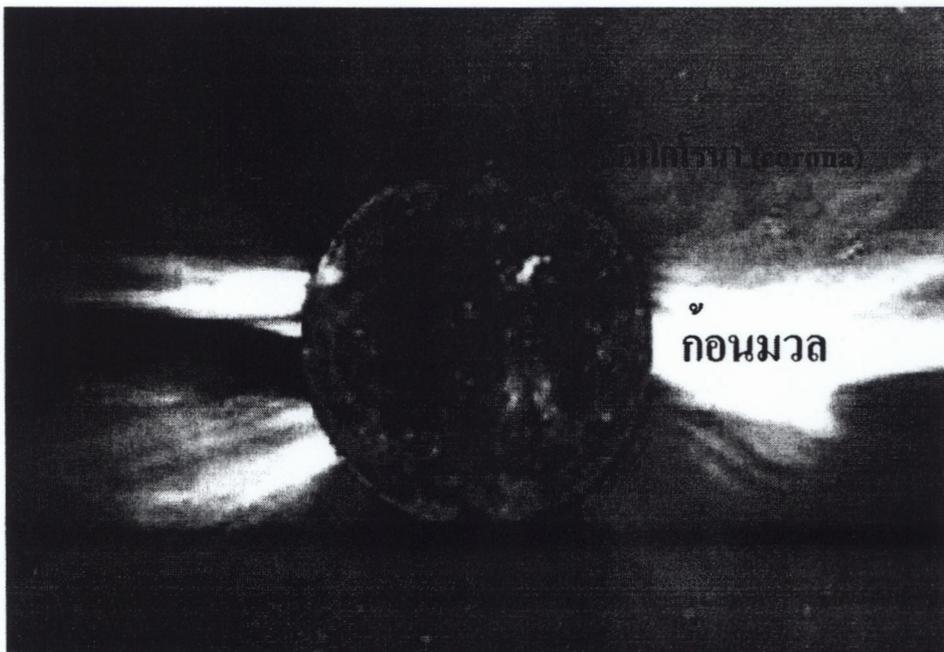
## บทที่ 1

### บทนำ

ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ที่อยู่ใกล้โลกที่สุดในระยะทาง 150,000,000 กิโลเมตร (หรือ 1 หน่วยดาราศาสตร์) ซึ่งดวงอาทิตย์นี้เป็นที่แหล่งกำเนิดพลังงานที่สำคัญต่อโลก โดยทุกๆวินาที ดวงอาทิตย์จะมีการแผ่รังสีเนื่องจากความร้อน(thermal radiation)ให้พลังงานออกมาในระดับ  $3.854 \times 10^{26}$  จูล (Lang 2001) และดวงอาทิตย์ยังมีการปลดปล่อยอนุภาคที่มีพลังงานสูงออกมา โดยการปะทุ(flare) ที่ผิวดวงอาทิตย์ ดังรูปที่ 1 ซึ่งแต่ละอนุภาคมีค่าพลังงาน 0.1 MeV – 100 MeV (Kallenrode 2001) โดยอนุภาคที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์เหล่านี้ประกอบไปด้วย อิเล็กตรอน โปรตอน ไอออนของธาตุหนัก เช่น ฮีเลียม ออกซิเจน คาร์บอน และเหล็ก เป็นต้น แต่ในเหตุการณ์การปะทุอย่างรุนแรงที่ดวงอาทิตย์นั้นจะมีอนุภาคที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์มีระดับพลังงานสูงถึง 30000 MeV (Tylka 2001) โดยในช่วงที่ดวงอาทิตย์มีช่วงสูงสุด (solar maximum) จะเกิดเหตุการณ์การปะทุรุนแรงที่ดวงอาทิตย์ได้หลายครั้ง จากสังเกตเหตุการณ์การปะทุรุนแรงที่ดวงอาทิตย์ โดยเครื่องวัด LASCO บนยานอวกาศ SOHO พบว่าในเหตุการณ์เกิดพายุสุริยะ(solar storm event) จะมีการปล่อยก้อนมวลในชั้นโคโรนา (coronal mass ejection, CME) ดังรูปที่ 2 การปลดปล่อยก้อนมวลจากโคโรนาครั้งหนึ่งๆ จะมีการพาก้อนสสารที่มีมวลมากกว่าพื้นล้านตัน ออกมาด้วยอัตราเร็ว 100 ถึง 2,000 กิโลเมตรต่อวินาที (Manchester et al. 2005) ในขณะที่ลมสุริยะ (solar wind) ซึ่งไหลออกมาจากดวงอาทิตย์มีความเร็ว 400 ถึง 800 กิโลเมตรต่อวินาที ดังนั้นเมื่อก้อนมวลจากโคโรนาเคลื่อนที่เร็วกว่าลมสุริยะจึงทำให้เกิดคลื่นกระแทก (shock) ในตัวกลางของอวกาศขึ้นภายในอวกาศตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์(interstellar medium) โดยคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นในอวกาศตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์นี้เป็นสาเหตุสำคัญของการเร่งอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มายังโลก เพราะในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์จะมีสนามแม่เหล็กที่เกิดจากดวงอาทิตย์ ทำให้อนุภาคที่มีประจุที่ถูกปล่อยออกจากดวงอาทิตย์นั้นมีการเคลื่อนที่ไปตามสนามแม่เหล็ก โดยในสถานการณ์ที่เกิดคลื่นกระแทกนั้นจะทำให้เส้นสนามแม่เหล็กในตัวกลางนั้นเกิดความปั่นป่วนอย่างมาก ทำให้อนุภาคที่เคลื่อนที่ไปตามสนามแม่เหล็กนั้นมีการพุ่งกระเจิงไปมาในขอบเขตคลื่นกระแทกเป็นผลให้อนุภาคเหล่านี้มีพลังงานที่สูงขึ้น

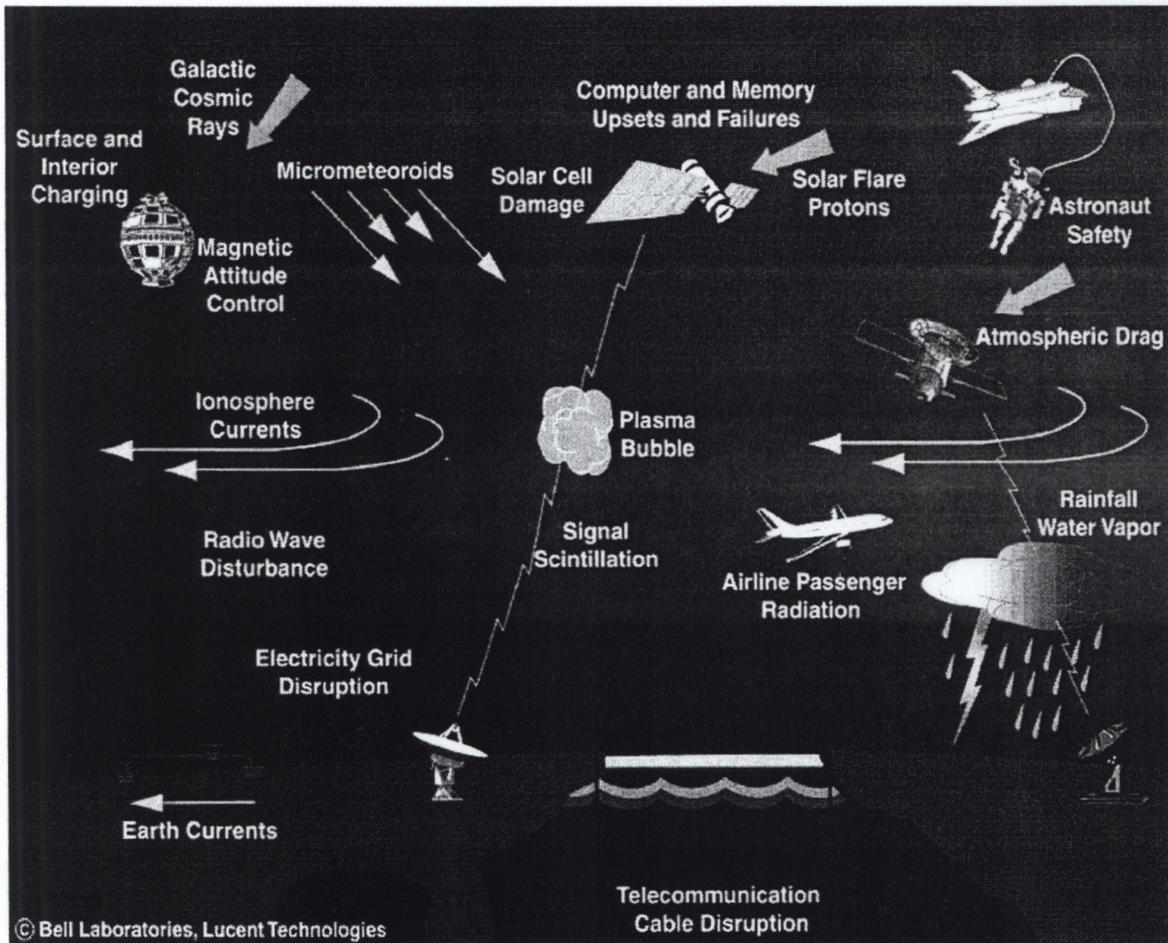


รูปที่ 1 แสดงการประทุ(mare) ที่ผิวดวงอาทิตย์



รูปที่ 2 เหตุการณ์พายุสุริยะ ที่มีการปล่อยก้อนมวลในชั้นโคโรนา(coronal mass ejection) ของดวงอาทิตย์

ในสถานการณ์ที่เกิดคลื่นกระแทกจากเหตุการณ์พายุสุริยะนั้น เป็นผลให้อนุภาคเหล่านั้นถูกเร่งให้มีพลังงานที่สูงขึ้น ซึ่งเมื่ออนุภาคที่มีพลังงานสูงเหล่านั้นเคลื่อนที่มาถึงโลกอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อการสื่อสารผ่านดาวเทียม และสถานีอวกาศที่โคจรอยู่รอบโลกได้ (Campbell 2001) หรืออาจทำความเสียหายต่อโรงงานไฟฟ้า การสื่อสารและการโดยสารทางเครื่องบินพาณิชย์ การติดต่อสื่อสารทางไกลใต้น้ำ ดังรูปที่ 3 หรือการเกิดปรากฏการณ์ออโรรา (aurora effect) เป็นต้น



รูปที่ 3 แสดงผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนโลก จากอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่มายังโลก (รูปจาก Bell Laboratories, Lucent Technonogies)

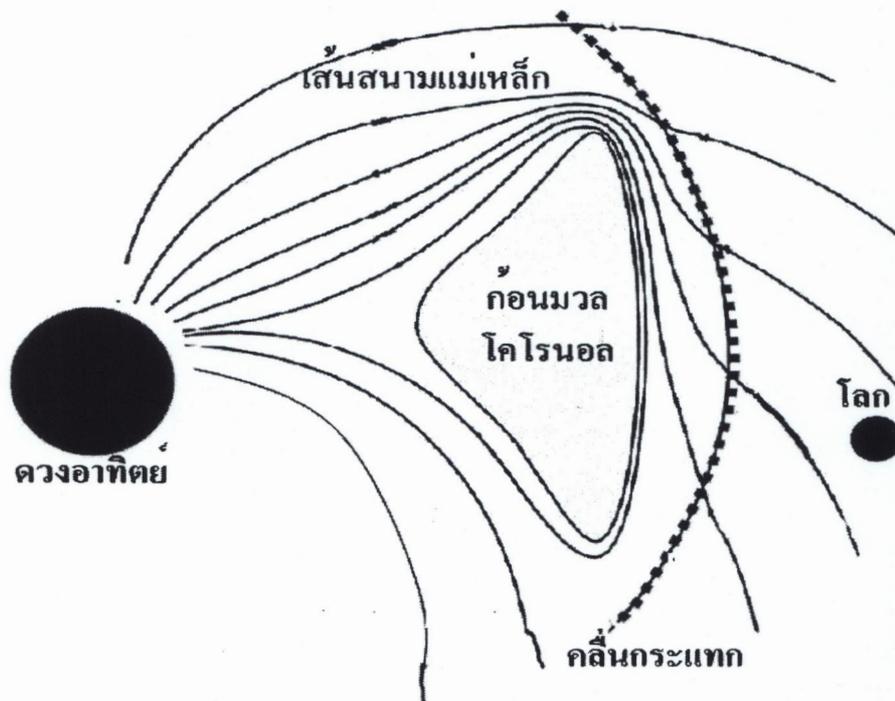
ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการทำการศึกษาดังผลของระยะอิสระเฉลี่ย(mean free path) ของอนุภาคที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ต่อการเร่งอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ในเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะ(solar storm event) อิสระเฉลี่ยนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับเหตุการณ์ของการเร่งอนุภาคในตัวกลางของคลื่นกระแทกในตัวกลางระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก โดยในเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะที่มีความรุนแรงจะทำให้ในสนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์มีความปั่นป่วนเป็นอย่างมาก ทำให้การฟุ้งกระจายของอนุภาคนั้นมีค่าระยะอิสระเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมากเมื่อเทียบกับในกรณีที่ไม่มีพายุสุริยะ โดยในการคำนวณค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในสนามแม่เหล็กของตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ผู้วิจัยได้ใช้ระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขและการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยแนวคิดของทฤษฎีการเร่งอนุภาคจากดวงอาทิตย์ที่คลื่นกระแทก เพื่อเข้าใจลักษณะการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอนุภาคนั้น

## บทที่ 2

### การเร่งอนุภาคจากดวงอาทิตย์

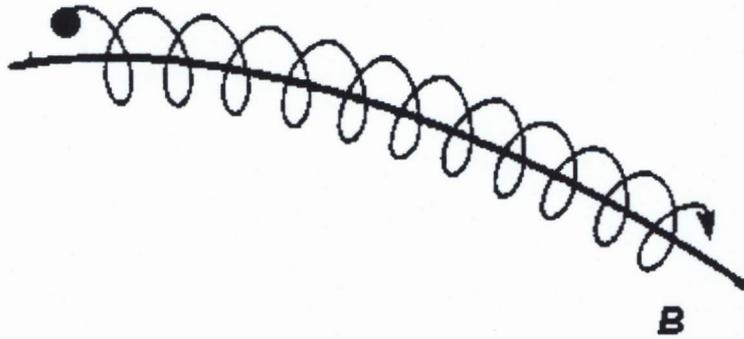
#### 2.1 ทฤษฎีการเร่งอนุภาคจากดวงอาทิตย์

การเร่งอนุภาคจากดวงอาทิตย์เกิดขึ้นการคลื่นกระแทก ได้ถูกพัฒนามาจากแนวคิดของ Fermi (1954) Kymyskii (1977) Bell (1978) Drury (1983) ในกลไกการเร่งอนุภาคแบบฟุ้ง (diffusive shock acceleration) ซึ่งใช้อธิบายการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกของรังสีคอสมิกในอวกาศ โดยการการเร่งอนุภาคจากดวงอาทิตย์ที่คลื่นกระแทกนั้นส่วนใหญ่เกิดจากเหตุการณ์ปล่อยก้อนมวลจากดวงอาทิตย์ (ดูรูปที่ 2) ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของตัวกลางของสนามแม่เหล็กในอวกาศชั้น ซึ่งความไม่ต่อเนื่องของสนามแม่เหล็กนี้คือคลื่นกระแทก (shock) ดังรูปที่ 4 โดยคลื่นกระแทกนี้จะเคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณชั้นโคโรนาของดวงอาทิตย์ มาขังโลกในเวลา 2 - 5 วัน ขึ้นกับระดับความรุนแรงในเหตุการณ์พายุสุริยะ

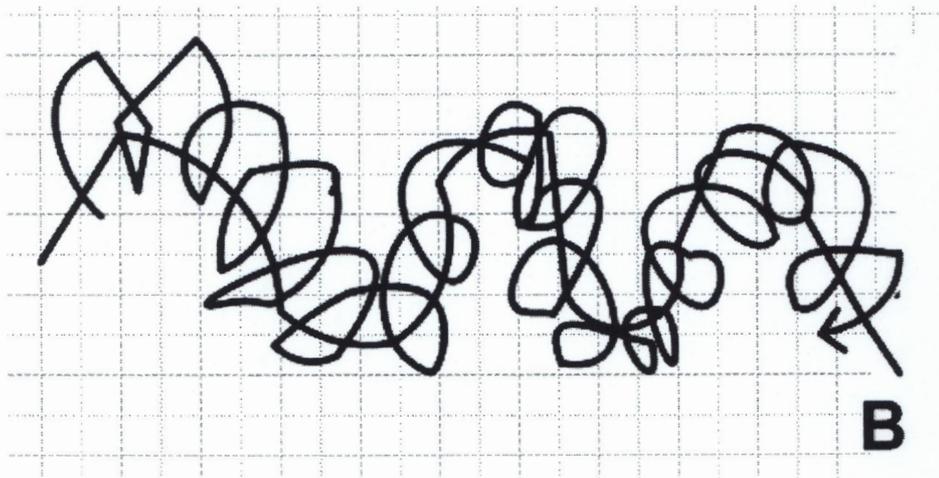


รูปที่ 4 แสดงการเกิดขึ้นกระแทกเนื่องจากเหตุการณ์ปล่อยก้อนมวลจากดวงอาทิตย์

เมื่อพิจารณาอนุภาคที่มีประจุที่กระจายอยู่ในตัวกลางระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่ไปกับสนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์ในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ (interplanetary magnetic field) ดังรูปที่ 5 แต่เมื่อสนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์มีลักษณะที่แปรปรวนมากๆ ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาครอบสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 6

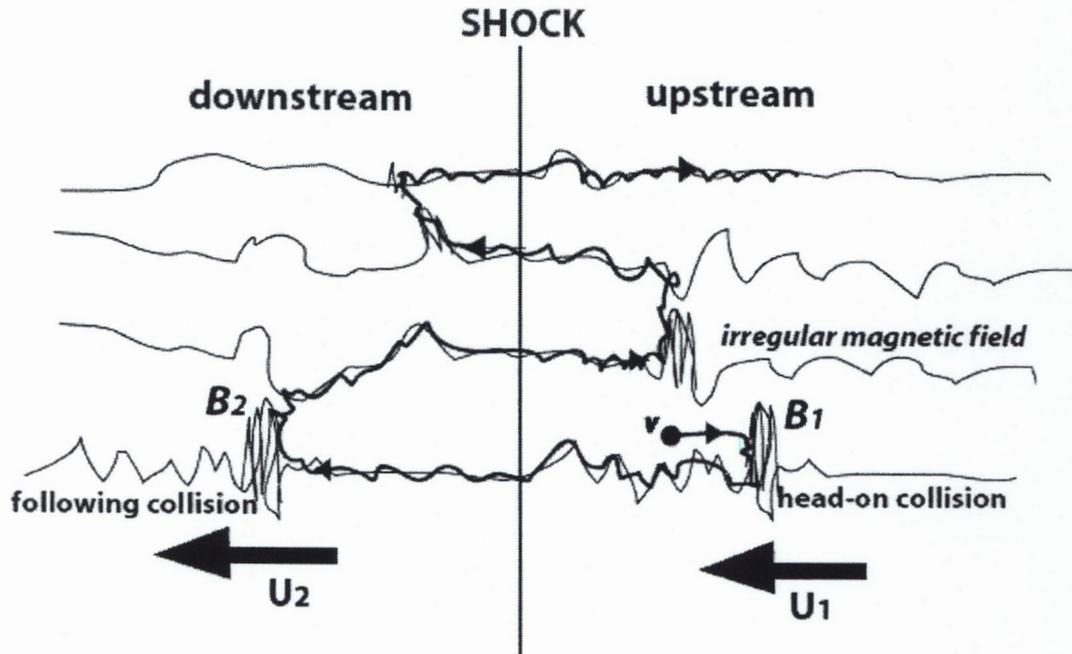


รูปที่ 4 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุตามเส้นสนามแม่เหล็ก (B)



รูปที่ 5 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุตามเส้นสนามแม่เหล็ก (B) ที่มีความปั่นป่วน

ในกรณีที่เกิดคลื่นกระแทก(shock)ขึ้นนั้น จะทำให้ความเร็วของพลาสมาในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์มีค่าแตกต่างกันที่บริเวณคลื่นกระแทก (ความเร็ว  $U_1$  ที่บริเวณด้านหน้าคลื่นกระแทก และ  $U_2$  ที่บริเวณหน้าด้านคลื่นกระแทก) และมีผลให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์มีค่าแตกต่างกันที่บริเวณคลื่นกระแทก (มีความเข้มของสนามแม่เหล็ก  $B_1$  ที่บริเวณด้านหน้าคลื่นกระแทก และ  $B_2$  ที่บริเวณหน้าด้านคลื่นกระแทก) ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามแม่เหล็กที่มีความปั่นป่วนผ่านคลื่นกระแทก (shock) ใน 1 รอบ

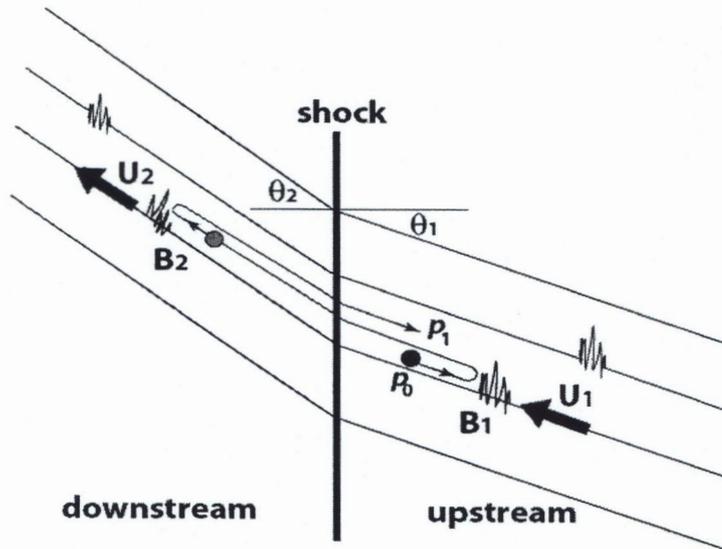
จากรูปที่ 6 นี้ เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามแม่เหล็กที่มีความปั่นป่วนผ่าน โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีการผ่านคลื่นกระแทกจะทำให้ โมเมนตัมของอนุภาคนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเร็วของพลาสมาในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ( $U_1$  และ  $U_2$ ) เพราะอนุภาคนั้นจะมีโมเมนตัม( $p$ )เพิ่มขึ้นเนื่องจากการพุ่งชนกับสนามแม่เหล็ก  $B_1$  ด้วยความเร็ว  $U_1$  และมีโมเมนตัมลดลงเนื่องจากการพุ่งชนกับสนามแม่เหล็ก  $B_2$  ด้วยความเร็ว  $U_2$  ดังนั้นโดยสุทธิแล้วอนุภาคเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ผ่านคลื่นกระแทก 1 ครั้ง จะมีค่าโมเมนตัมเพิ่มขึ้น( $\Delta p$ ) เท่ากับ

$$\Delta p \approx 2m(U_1 - U_2) \quad (1)$$

เมื่อพิจารณาลักษณะของการเร่งที่เกิดขึ้นในรูปที่ 6 นั้นพบว่าในเหตุการณ์ที่เกิดคลื่นกระแทกนั้น นั้นจะทำให้เกิดมุมของสนามแม่เหล็กกับหน้าคลื่นกระแทกมีค่าเป็นมุม  $\theta_1$  ที่ตำแหน่งด้านหน้าคลื่นกระแทก และ เกิดมุม  $\theta_2$  ที่ตำแหน่งด้านหลังคลื่นกระแทก ดังรูปที่ 7 ตามแนวคิดของ Drury (1983) ค่าโมเมนตัมของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจากการเคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทก คือ

$$p = \left( 1 + \frac{4}{3} \frac{u_1 \cos \theta_1 - u_2 \cos \theta_2}{v_0 \cos \theta_1} \right) p_0 \quad (2)$$

โดยที่  $p_0$  คือโมเมนตัมของอนุภาคก่อนเคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทก  $p$  คือโมเมนตัมของอนุภาคหลังจากการเคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทก 1 รอบ  $u_1$  ความเร็วของลมสุริยะหน้าคลื่นกระแทก  $u_2$  คือความเร็วของลมสุริยะหลังคลื่นกระแทก  $\theta_1$  มุมของทิศทางสนามแม่เหล็กหน้าคลื่นกระแทก  $\theta_2$  คือ มุมของทิศทางสนามแม่เหล็กด้านหลังคลื่นกระแทก  $v_0$  คือความเร็วของอนุภาคก่อนเคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทก



รูปที่ 7 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านคลื่นกระแทก(shock)ใน 1 รอบ ในกรอบอ้างอิงของคลื่นกระแทก ซึ่งหน้าคลื่นกระแทกทำมุมกับสนามแม่เหล็กเป็น มุม  $\theta_1$  และ มุม  $\theta_2$  โดยเริ่มต้นอนุภาคที่มีโมเมนตัม  $p_0$  ที่อยู่หน้าคลื่นกระแทก (upstream)

เมื่อพิจารณาอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกจำนวน  $n$  ครั้ง โมเมนตัมของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เป็น

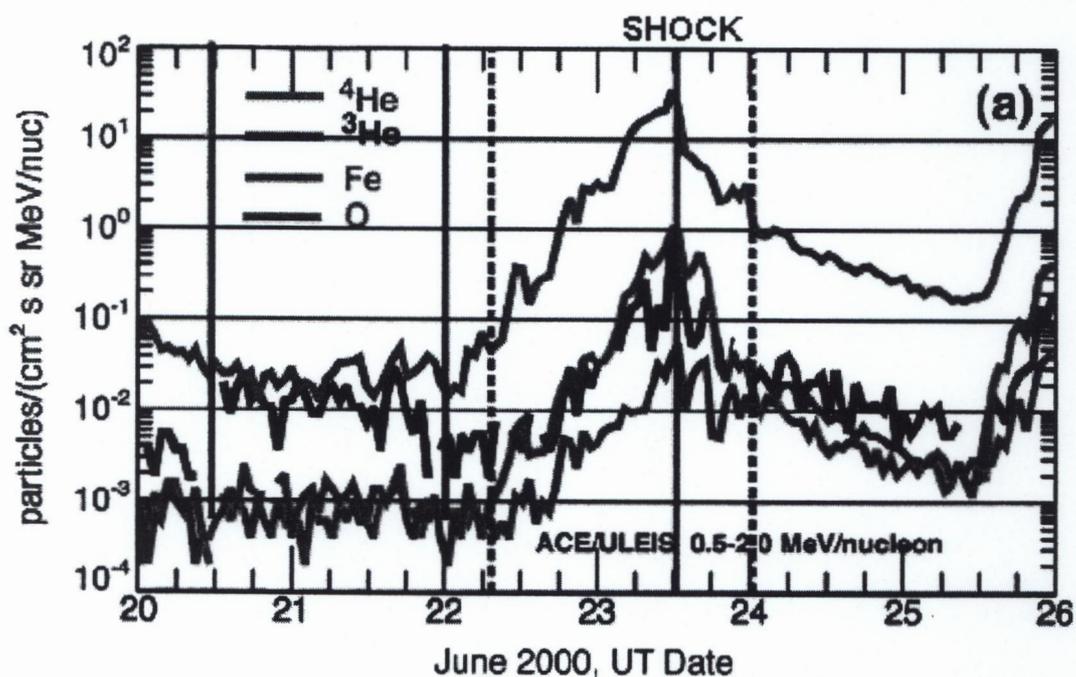
$$p_n \approx \prod_{i=0}^{n-1} \left( 1 + \frac{4}{3} \frac{u_1 \cos \theta_1 - u_2 \cos \theta_2}{v_i \cos \theta_1} \right) p_0 \quad (3)$$

โดยที่  $p_n$  คือโมเมนตัมของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกเป็นจำนวน  $n$  ครั้ง และ  $v_i$  คือความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกครั้งที่  $i$

จะเห็นได้ว่าพลังงาน(คำนวณได้จาก โมเมนตัม)ของอนุภาคจากดวงอาทิตย์สามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อมันเคลื่อนที่พุ่งไปมาในสนามแม่เหล็กผ่านคลื่นกระแทก โดยเฉพาะเมื่ออนุภาคมีการเคลื่อนที่พุ่งไปมาและผ่านข้ามคลื่นกระแทกเป็นจำนวนหลายๆครั้ง จะยิ่งทำให้พลังงานของอนุภาคนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นได้มาก

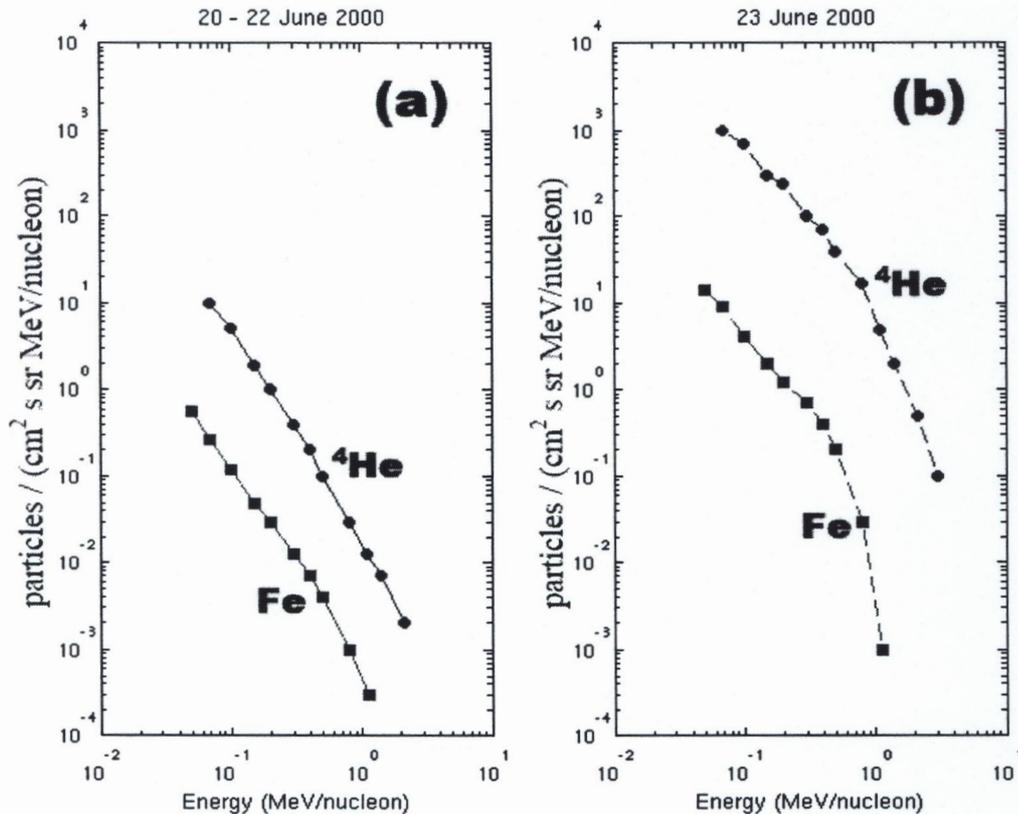
## 2.2 การตรวจวัดพลังงานของอนุภาคจากดวงอาทิตย์

จากการวัดอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ในช่วงพลังงาน 0.5 -2.0 MeV/nucleon โดยเครื่องตรวจวัดอนุภาค ULEIS (Mason et al. 1997) บนยานอวกาศ ACE (ยานอวกาศนี้อยู่ห่างจากดวงอาทิตย์  $1.485 \times 10^8$  กิโลเมตร หรือ 0.95 หน่วยดาราศาสตร์) ในเหตุการณ์เกิดพายุสุริยะรุนแรงในวันที่ 20 -26 มิถุนายน 2000 (Desai et al. 2003) ซึ่งในเหตุการณ์เหตุดังกล่าวมีการปล่อยก้อนมวลขนาดใหญ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ทำให้เกิดคลื่นกระแทกขึ้นในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ แล้วก้อนมวลขนาดใหญ่ได้ผลักให้คลื่นกระแทกนั้นเคลื่อนที่ออกมาจากดวงอาทิตย์ จนมันเคลื่อนที่ถึงยานอวกาศ ACE ในเวลาต่อมา ในการตรวจวัดพบว่าเมื่อคลื่นกระแทกเคลื่อนที่มาถึงยานอวกาศที่ทำให้อนุภาคจากดวงอาทิตย์มีจำนวนเพิ่มขึ้นในวันที่ 22 มิถุนายน 2000 (เวลา 00.00) และมีจำนวนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าสูงสุด ในวันที่ 23 มิถุนายน 2000 เวลา 12.00 น. ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลการตรวจวัดจำนวนอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ (ในช่วงพลังงาน 0.5 -2.0 MeV/nucleon) ในเหตุการณ์พายุสุริยะ ระหว่างวันที่ 20-26 มิถุนายน 2000 จากเครื่องวัด ULEIS จะเห็นได้ว่าเมื่อคลื่นกระแทกเคลื่อนที่มาถึงยานอวกาศที่ตรวจวัดในวันที่ 23 มิถุนายน เวลา 12:00 อนุภาค He, O และ Fe ที่วัดได้มีจำนวนเพิ่มขึ้นประมาณ 200 – 1000 เท่า (Desai et al. 2003)

จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าจำนวนอนุภาคต่างๆ คือ He, O และ Fe ที่วัดได้มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในระดับ 200 - 1000 เท่า โดยเมื่อคลื่นกระแทกเคลื่อนที่มาถึงเครื่องวัดบนยานอวกาศก็จะวัดจำนวนของอนุภาคได้มากที่สุด และหลังจากคลื่นกระแทกเคลื่อนที่ผ่านไปแล้วจำนวนอนุภาคที่วัดได้นั้นจะมีค่าค่อยๆ ลดลง เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของจำนวนอนุภาคในแต่ละพลังงาน เพื่อศึกษาว่าในแต่ละค่าพลังงานต่างๆ นั้น มีจำนวนอนุภาคเพิ่มขึ้นอย่างไร แสดงได้ในรูปที่ 9



**รูปที่ 9** สเปกตรัมพลังงานของอนุภาค ฮีเลียม ( $^4\text{He}$ ) และ เหล็ก (Fe) ที่ได้จากการวัดในแต่ละช่วงพลังงาน ในวันที่ 20-22 มิถุนายน 2000 (a) ก่อนการเกิดคลื่นกระแทก และในวันที่ 23 มิถุนายน 2000 (b) เมื่อมีการเกิดคลื่นกระแทกแล้ว (ข้อมูลจาก Desai et al. 2003)

ในรูปที่ 9 แสดงจำนวนของอนุภาคในแต่ละค่าพลังงานต่างๆ ในช่วง 0.05 ถึง 3.0 MeV/nucleon จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคก่อนถูกเร่งโดยคลื่นกระแทกเป็นลักษณะตามกฎยกกำลัง (power law) (รูปที่ 9(a)) ตามความสัมพันธ์  $E^{-\gamma}$  โดย  $E$  คือพลังงานจลน์ของอนุภาค และ  $\gamma$  คือค่าคงที่ (spectral index) ซึ่งเห็นได้ว่าอนุภาคพลังงานต่ำมีจำนวนมาก และอนุภาคพลังงานสูงๆ มีจำนวนน้อย และเมื่ออนุภาคถูกเร่งโดยคลื่นกระแทกในเวลาต่อมา (ในเวลาอีก 54 ชั่วโมง) แสดงได้ดังรูปที่ 9(b) ซึ่งพบว่าจำนวนอนุภาคในแต่ละพลังงานจะเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าจำนวนอนุภาคใน

แต่ค่าพลังงานมีค่าสูงขึ้นมากกว่า 50 เท่า เมื่อเทียบกับรูปที่ 9(a) ซึ่งเป็นผลจากอนุภาคหลายๆตัวเคลื่อนที่ข้ามคลื่นกระแทกจำนวนหลายๆครั้ง ตามแนวคิดในสมการที่ (3) แต่ลักษณะของสเปกตรัมของพลังงานในรูปที่ 9(b) ไม่เป็นเส้นตรงตามกฎยกกำลัง (แต่มีการโค้งลงที่พลังงาน 0.5 - 0.9 MeV /nucleon)

ในการเร่งอนุภาคในตัวกลางระหว่างดวงอาทิตย์มายังโลกนั้น เกิดขึ้นในช่วงเวลา 2 - 5 วัน (ซึ่งถือว่าใช้เวลาสั้นมากเมื่อเทียบกับการเร่งอนุภาคของรังสีคอสมิกนอกระบบสุริยะ เนื่องจากแหล่งกำเนิดรังสีคอสมิกนั้นอยู่ห่างไกลจากโลกมาก) ดังนั้นสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคที่ถูกเร่งโดยคลื่นกระแทกในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์จึงเห็นการโค้งลง(cut-off) ที่ช่วงพลังงาน 0.5 - 0.9 MeV/nucleon เนื่องจาก ช่วงเวลา 2 - 5 วัน นั้นยังไม่ช่วงเวลาที่จะทำให้สเปกตรัมพลังงานของอนุภาคอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) โดย Channok และ คณะ (2005) ได้เสนอว่าค่าพลังงาน cut-off ( $E_c$ ) ที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับเวลาที่ถูกรัง (t) มีความสัมพันธ์ คือ

$$\frac{E_c}{A} \propto \left(\frac{Q}{A}\right)^{2\alpha/(\alpha+1)} t^{2/(\alpha+1)} \quad (4)$$

- โดยที่  $E_c / A$  คือ พลังงานพลังงานที่ cut-off ต่อ นิวคลีออน  
 $Q$  คือ สถานะประจุของอนุภาค  
 $A$  คือ จำนวนนิวคลีออนของอนุภาค  
 $t$  คือ เวลาที่อนุภาคถูกเร่งที่คลื่นกระแทก  
 $\alpha$  คือ ค่าคงที่ใดๆ

## บทที่ 3

## การจำลองการเร่งอนุภาคและขั้นตอนวิธีการคำนวณ



## 3.1 แบบจำลองการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกที่ขึ้นกับเวลา

เราใช้แบบจำลองการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกที่ขึ้นกับเวลา (Channok et al. 2005) โดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงจำนวนอนุภาค ( $N$ ) ต่อเวลา ( $t$ ) สำหรับการเร่งอนุภาคในแต่ละครั้ง ( $n$ ) รอบคลื่นกระแทก ตามสมการ (5)

$$\frac{dN(E_n, t)}{dt} = I_n - (r_n - \varepsilon_n)N(E_n, t) + r_{n-1}N(E_{n-1}, t) \quad (5)$$

โดยที่  $N(E_n, t)$  คือ จำนวนอนุภาคที่มีค่าพลังงาน  $E_n$  ที่เวลา  $t$  ใดๆ

$E_n$  คือ พลังงานของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกจำนวน  $n$  ครั้ง (ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3) เมื่อทราบพลังงานเริ่มต้น  $E_0$ )

$I_n$  คือ การอัตราการไหลของอนุภาคเข้ามาหาคลื่นกระแทก (พิจารณาในกรอบอ้างอิงของคลื่นกระแทก)

$r_n$  คือ อัตราการการเร่งของอนุภาคที่คลื่นกระแทกที่พลังงาน  $E_n$

$\varepsilon_n$  คือ อัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคออกไปจากบริเวณคลื่นกระแทก ที่พลังงาน  $E_n$

โดยตัวแปร  $r_n$  และ  $\varepsilon_n$  ในสมการที่ (5) คือ

$$r_n = \left[ \frac{4}{v_n} \left( \frac{\kappa_1 \sec \theta_1}{u_1} \right) + (1 - \sqrt{1 - (B_1/B_2)}) \frac{\kappa_2 \sec \theta_2}{u_2} \right]^{-1} \quad (6)$$

$$\varepsilon_n = \left[ \frac{v_n \cos \theta_1}{4u_2} \left( 1 + \frac{u_1}{v_n \cos \theta_1} \right)^2 - 1 \right]^{-1} r_n \quad (7)$$

โดยที่  $v_n$  คือ ความเร็วของอนุภาคที่เมื่อผ่านคลื่นกระแทก  $n$  ครั้ง,  $u_1$  คือ ความเร็วของลมสุริยะหน้าคลื่นกระแทก  $u_2$  คือ ความเร็วของลมสุริยะหลังคลื่นกระแทก,  $\theta_1$  มุมของทิศทางสนามแม่เหล็กหน้าคลื่นกระแทก,  $\theta_2$  คือ มุมของทิศทางสนามแม่เหล็กด้านหลังคลื่นกระแทก,  $B_1/B_2$  คือ อัตราส่วนความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านหน้าคลื่นกระแทกกับด้านหลังคลื่นกระแทก (ซึ่งตัวแปรดังกล่าวนี้ได้จากการวัดโดยตรงจากเครื่องมือวัดบนยานอวกาศ ACE)

สำหรับตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเร่ง ( $r_n$ ) ของอนุภาคที่คลื่นกระแทกในสมการที่ (6) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพุ่ง ( $\kappa$ ) ในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ซึ่งต้องพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การพุ่งทั้งด้านหน้าคลื่นกระแทก และ ด้านหลังหน้าคลื่นกระแทก คือ

$$\kappa_{1n} = \frac{v_n \lambda}{3} \cos^2 \theta_1 \quad (8)$$

$$\kappa_{2n} = \frac{v_n \lambda}{3} \frac{\cos^3 \theta_2}{\cos \theta_1} \quad (9)$$

(จาก Decker and Vlahos (1986) และ Jokipii (1987))

โดยที่  $\kappa_{1n}$  คือ สัมประสิทธิ์การฟุ้งด้านหน้าคลื่นกระแทกของอนุภาคที่มีความเร็ว  $v_n$ ,  $\kappa_{2n}$  คือ สัมประสิทธิ์การฟุ้งด้านหลังคลื่นกระแทกของอนุภาคที่มีความเร็ว  $v_n$ ,  $\theta_1$  คือ มุมของทิศทางสนามแม่เหล็กหน้าคลื่นกระแทก,  $\theta_2$  คือ มุมของทิศทางสนามแม่เหล็กด้านหลังคลื่นกระแทก และ  $\lambda$  คือ ระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์

จากสมการ (8) และ (9) จะเห็นได้ว่า  $\kappa_{1n}$  และ  $\kappa_{2n}$  จะขึ้นกับตัวแปร  $v_n$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  และ  $\lambda$  โดยที่ตัวแปร  $v_n$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  เป็นตัวแปรที่วัดได้จากยานอวกาศ แต่สำหรับตัวแปร  $\lambda$  (ระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์) นั้นไม่สามารถวัดค่าได้จากยานอวกาศ ดังนั้นจึงต้องทำการประมวลผลค่า  $\lambda$  ต่างๆกัน เพื่อคำนวณค่า  $\kappa_{1n}$  และ  $\kappa_{2n}$  ที่ใช้ได้กับระดับเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะ ซึ่งในเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะจะมีความรุนแรงที่ต่างกันออกไป ซึ่งค่าระยะอิสระเฉลี่ยนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับเหตุการณ์ของการเร่งอนุภาคในตัวกลางของคลื่นกระแทกในตัวกลางระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก โดยในเหตุการณ์ปกติที่ไม่เกิดการเกิดพายุสุริยะค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ จะมีค่าประมาณ 0.05 – 0.3 AU (Parmer (1982) และ Karenrode, Wibberenz and Hucke (1992)) (โดย 1 AU คือระยะทาง 1 หน่วยดาราศาสตร์)

### 3.2 ขั้นตอนการคำนวณ

ในการคำนวณเพื่อหาคำตอบในสมการที่ (5) นั้นไม่สามารถคำนวณได้ด้วยวิธีการเชิงวิเคราะห์ เราจึงประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้ คือ

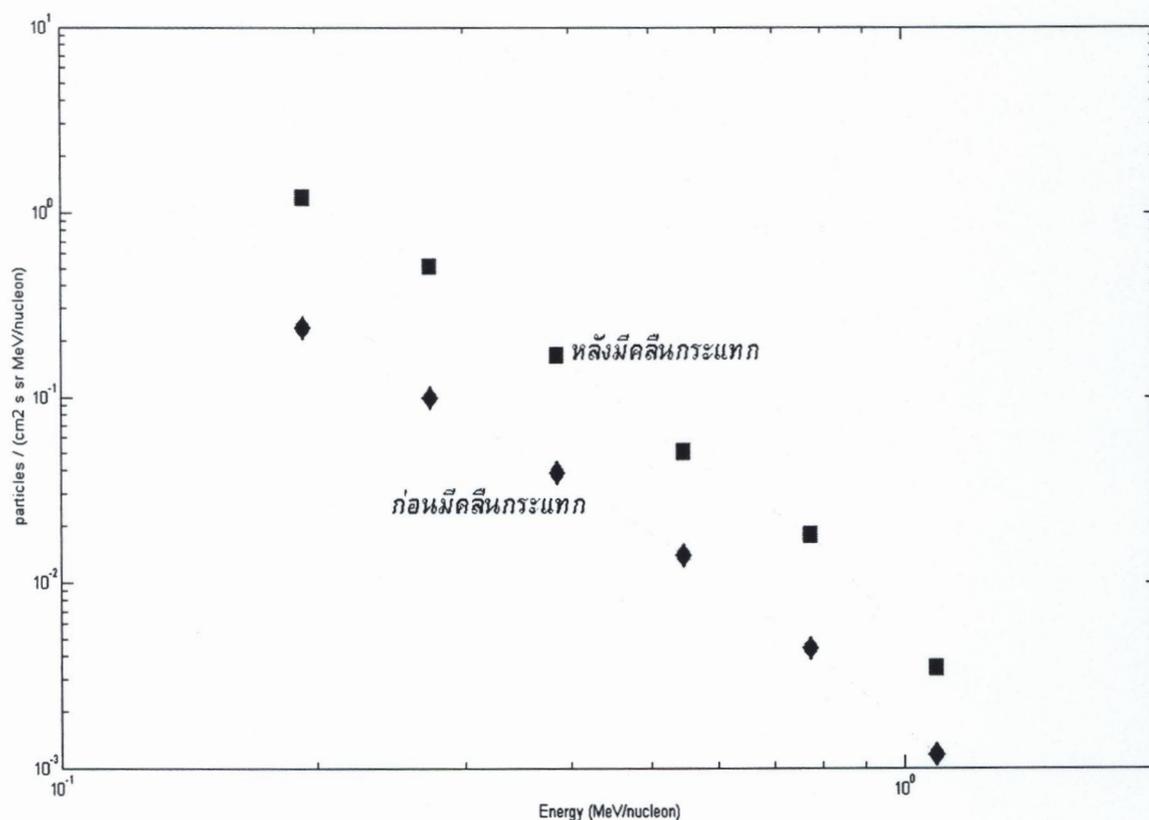
1. วิเคราะห์ข้อควรระวังจากเครื่องมือวัด ULEIS บนยานอวกาศ ACE ในช่วงที่เกิดเหตุการณ์พายุสุริยะ โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะของข้อมูลที่วัดได้จากสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคที่วัดได้ก่อนที่มีคลื่นกระแทก (ในทำนองกับรูปที่ 9(a)) และหลังจากมีคลื่นกระแทก (ในทำนองกับรูปที่ 9(b))
2. พิจารณาค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) ของ  $N(E_n, t)$  ซึ่งได้จากสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคที่วัดได้ก่อนที่มีคลื่นกระแทก ซึ่งจะได้ข้อมูลเริ่มต้นที่เวลา  $t = t_0$  เพื่อใช้ในการคำนวณเป็นค่าเริ่มต้นในสมการที่ (5)

3. วิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องจากข้อมูลจากเครื่องมือวัด ULEIS บนยานอวกาศ ACE ในช่วงที่เกิดเหตุการณ์พายุสุริยะ เพื่อใช้คำนวณค่า  $r_n$  และ  $\varepsilon_n$  ในสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ คือ  $u_1$  (ความเร็วของลมสุริยะหน้าคลื่นกระแทก),  $u_2$  (ความเร็วของลมสุริยะหลังคลื่นกระแทก),  $\theta_1$  (มุมของทิศทางสนามแม่เหล็กหน้าคลื่นกระแทก)  $\theta_2$  (มุมของทิศทางสนามแม่เหล็กด้านหลังคลื่นกระแทก) และ  $B_1/B_2$  (อัตราส่วนความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านหน้าคลื่นกระแทกกับด้านหลังคลื่นกระแทก) โดยใช้ค่าความเร็วของอนุภาคเริ่มต้น  $v_0 = 250$  km/s
4. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพุ่งด้านหน้าคลื่นกระแทก ( $\kappa_{1n}$ ) ในสมการที่ (8) และสัมประสิทธิ์การพุ่งด้านหลังคลื่นกระแทก ( $\kappa_{2n}$ ) ในสมการที่ (9) เพื่อใช้ในการหาค่า  $r_n$  และ  $\varepsilon_n$  ในสมการที่ (6) และ (7) โดยค่า  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  มาจากการวัดมุมของทิศทางสนามแม่เหล็กกับหน้าคลื่นกระแทก และใช้ โดยใช้ค่าความเร็วของอนุภาคเริ่มต้น  $v_0 = 250$  km/s โดยพิจารณาการเปลี่ยนค่า  $\lambda$  (ระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์) ที่ต่างๆ กัน
5. คำนวณทอมการอัตราการไหลของอนุภาคเข้ามาหาคลื่นกระแทก ( $I_n$ ) ที่ใช้ในสมการที่ (5) โดยกำหนดให้  $I_n = \varepsilon_n N(E, t_0)$
6. ทำการคำนวณผลเชิงตัวเลขในสมการที่ (5) จากตัวแปร  $I_n$ ,  $r_n$ ,  $\varepsilon_n$  และ  $N(E_n, t = t_0)$  เพื่อหาค่า  $N(E, t)$  ที่ขึ้นกับเวลา  $t$  โดยใช้วิธีการรุงเง-กุตตา ลำดับที่ 4 (4<sup>th</sup> order Runge-Kutta) ในการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ (วิธีการรุงเง-กุตตา ลำดับที่ 4 เป็นวิธีการเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ที่รู้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ซึ่งมีค่าความผิดพลาดน้อยเมื่อเทียบกับวิธีการเชิงตัวเลขอื่นๆ โดยค่าความผิดพลาดของวิธีรุงเง-กุตตา ลำดับที่ 4 นี้ขึ้นกับ  $(\Delta t)^4$  โดยที่  $\Delta t$  คือช่วงของขั้นเวลา (time step) ที่ใช้ในการจำลอง) โดยใช้ค่า  $\Delta t = 0.5$  วินาที ในการคำนวณ

#### บทที่ 4

#### ผลการจำลองระยะอิสระเฉลี่ยต่อการเร่งอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์

เราใช้ขั้นตอนการคำนวณจากหัวข้อ 3.2 สำหรับจำลองผลของระยะอิสระเฉลี่ยที่มีต่อการเร่งอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ โดยพิจารณาจากเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะในช่วงวันที่ 20 -23 กันยายน ค.ศ. 1999 (ข้อมูลจาก Desai et al. 2004) ซึ่งมีสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคคาร์บอนที่วัดได้ก่อนที่มีคลื่นกระแทก และ หลังจากมีคลื่นกระแทก เป็นดังรูปที่ 10



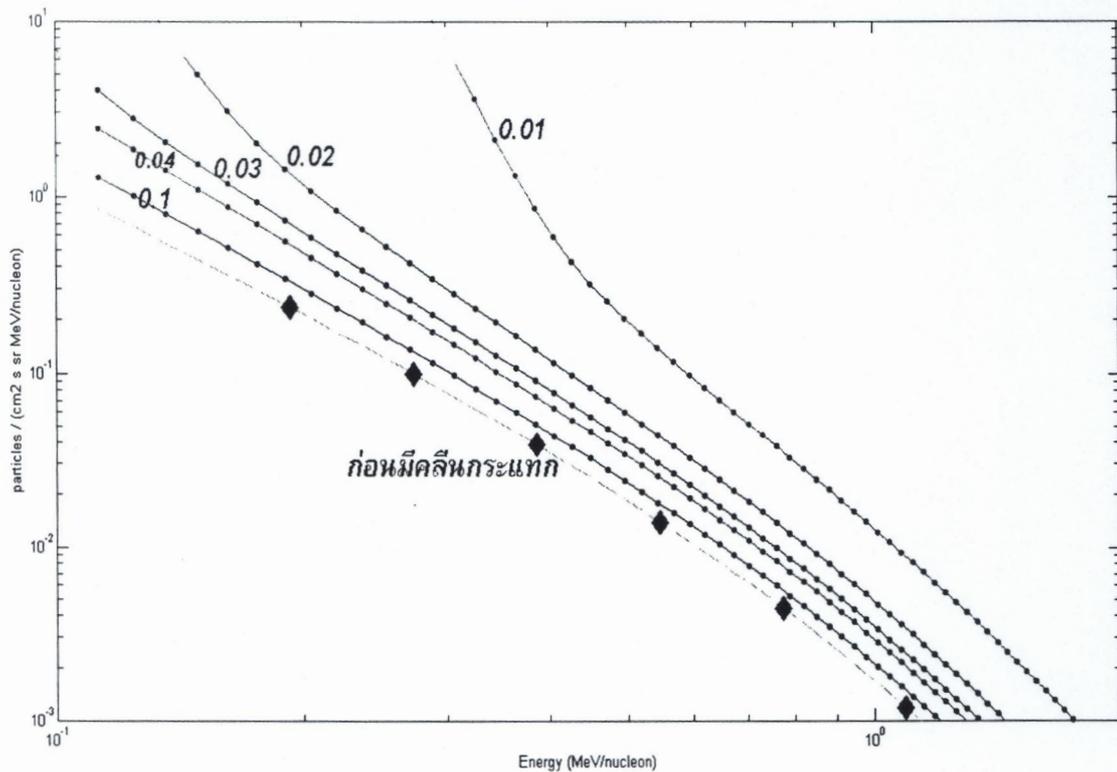
**รูปที่ 10** สเปกตรัมพลังงานของอนุภาคคาร์บอน(Carbon) ที่ได้จากการตรวจวัดจากเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะในช่วงวันที่ 20 -23 กันยายน ค.ศ. 1999 โดยข้อมูล  $\blacklozenge$  แสดงผลการวัดก่อนมีการเกิดคลื่นกระแทก และข้อมูล  $\blacksquare$  แสดงผลการวัดหลังจากมีคลื่นกระแทกเกิดขึ้น (ข้อมูลจาก Desai et al. 2004)

วิเคราะห์ตัวแปรในเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะในช่วงวันที่ 20 -23 กันยายน ค.ศ. 1999 จากการวัดตรวจโดยเครื่องมือวัด ULEIS (Desai et al. 2003; Desai et al. 2004) เพื่อใช้ในการจำลองการเร่งอนุภาคในแบบจำลองการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกที่ขึ้นกับเวลา โดยตัวแปรต่างๆ ที่ใช้แสดงในตารางที่ 1

ตัวแปร	ค่า
$u_1$	131 km/s
$u_2$	54 km/s
$\theta_1$	64 degree
$\theta_2$	79 degree
$B_1/B_2$	2.3
$t$	54.4 hours
$\lambda$	0.01 – 0.10 AU

ตารางที่ 1 ตัวแปรในเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะในช่วงวันที่ 20 -23 กันยายน ค.ศ. 1999 ที่ใช้ในการจำลองการเร่งอนุภาคในแบบจำลองการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกที่ขึ้นกับเวลา

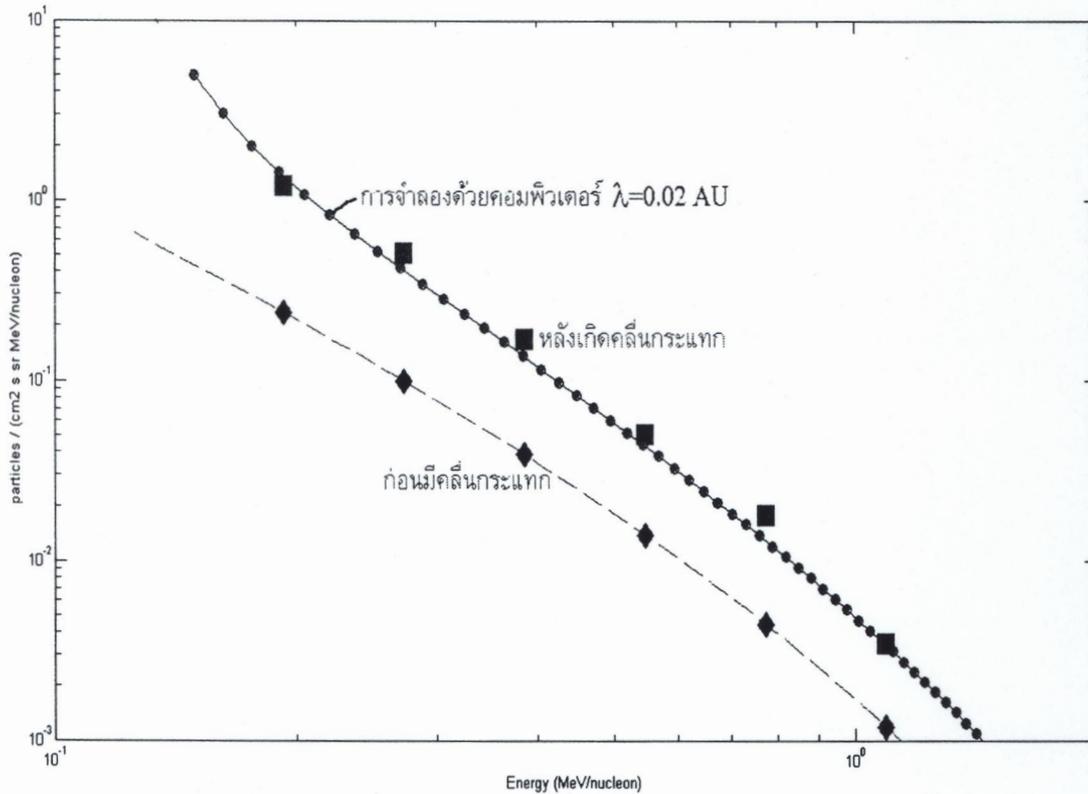
เราได้ทำการจำลองผลการเร่งอนุภาคคาร์บอนในแบบจำลองการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกที่ขึ้นกับเวลา โดยใช้ข้อมูลการวัดสเปกตรัมพลังงานก่อนการเกิดคลื่นกระแทกเป็นค่าเงื่อนไขเริ่มต้น แล้วคำนวณผลที่เกิดขึ้นจากการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกในเวลา 54.4 ชั่วโมงต่อมา โดยในการจำลองนี้ได้พิจารณาเปลี่ยนค่าของระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ( $\lambda$ ) ตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.10 AU ซึ่งได้ผลการจำลองดังรูปที่ 11



**รูปที่ 11** สเปกตรัมพลังงานของอนุภาคคาร์บอน(Carbon) ที่ได้จากการจำลองปรับระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ( $\lambda$ ) ตั้งแต่ 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.10 AU และข้อมูลการวัดสเปกตรัมพลังงานก่อนการเกิดคลื่นกระแทก (เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณ)

จากผลการจำลองในรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ( $\lambda$ ) มีผลต่อการเร่งอนุภาคอย่างชัดเจน โดยค่า  $\lambda = 0.01$  AU จะให้ประสิทธิภาพในการเร่งมากที่สุด ซึ่งค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ที่มีค่าน้อยนั้นจะยังทำให้เกิดจำนวนอนุภาคที่พลังงานสูงเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคที่น้อยนั้นทำให้อนุภาคพุ่งไปพุ่งมาในตัวกลางสนามแม่เหล็กได้มาก เพราะระยะทางจากโลกถึงดวงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 1 AU ดังนั้นอนุภาคที่มีระยะอิสระเฉลี่ยที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง  $\lambda = 0.01$  AU นั้นจะต้องมีการเคลื่อนที่พุ่งไปพุ่งมา 100 รอบจึงจะเคลื่อนที่มาถึงบริเวณโลกได้ ซึ่งการเคลื่อนที่พุ่งไปพุ่งมาหลายรอบนี้เป็นสาเหตุให้เกิดการอนุภาคนั้นมีพลังงานสูงขึ้น ดังสมการที่ (3)

เมื่อวิเคราะห์ถึงค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ( $\lambda$ ) ในเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะในช่วงวันที่ 20 -23 กันยายน ค.ศ. 1999 เพื่อหาค่าของ  $\lambda$  ที่เหมาะสมกับข้อมูลการวัดสเปกตรัมพลังงานภายหลังคลื่นกระแทก พบว่าค่า  $\lambda = 0.02$  AU นั้นสามารถใช้ฟิตได้ตรงกับข้อมูลการวัดจากยานอวกาศ (Desai et al. 2004) ภายหลังการเกิดคลื่นกระแทก ดังรูปที่ 12



**รูปที่ 12** สเปกตรัมพลังงานของอนุภาคคาร์บอน(Carbon) ที่ได้จากการตรวจวัดจากเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะในช่วงวันที่ 20 -23 กันยายน ค.ศ. 1999 โดยข้อมูล  $\blacklozenge$  แสดงผลการวัดก่อนมีการเกิดคลื่นกระแทก และ ข้อมูล  $\blacksquare$  แสดงผลการวัดหลังจากมีคลื่นกระแทกเกิดขึ้น และผลของการจำลองจากคอมพิวเตอร์ ที่ใช้ค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์  $\lambda = 0.02$  AU

## บทที่ 5

### สรุปผล

จากผลการจำลองระยะอิสระเฉลี่ยต่อการเร่งอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ โดยใช้แบบจำลองการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกที่ขึ้นกับเวลา (Channok et al. 2005) พบว่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในด्वากลางระหว่างดาวเคราะห์ ( $\lambda$ ) มีผลต่อการทำให้อนุภาคถูกเร่งอย่างชัดเจน ซึ่งค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในด्वากลางระหว่างดาวเคราะห์ที่มีค่าน้อยนั้นจะมีผลทำให้เกิดการเร่งอนุภาคที่มีทำให้อนุภาคนั้นมีพลังงานสูงเพิ่มขึ้น ยิ่งค่า  $\lambda$  มีค่าจะยิ่งทำให้การเร่งอนุภาคพลังงานสูงมีประสิทธิภาพมาก เพราะค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคที่น้อยนั้นทำให้อนุภาคพุ่งไปพุ่งมาในด्वากลางสนามแม่เหล็กได้มากทำให้มีอัตราการถูกเร่งที่สูงในระหว่างที่อนุภาคพุ่งไปพุ่งมาในด्वากลางสนามแม่เหล็กนั้น

เมื่อวิเคราะห์ค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในด्वากลางระหว่างดาวเคราะห์ ในเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะในช่วงวันที่ 20 -23 กันยายน ค.ศ. 1999 พบว่าค่า  $\lambda = 0.02$  AU นั้นสามารถใช้ฟิตได้ตรงกับข้อมูลการวัดจากยานอวกาศหลังการเกิดคลื่นกระแทก (Desai et al. 2004) โดยค่า  $\lambda = 0.02$  AU เป็นค่าที่ใกล้เคียงคล้อยกับการสังเกตของด्वากลางสนามแม่เหล็กภายในระบบสุริยะในเหตุการณ์ที่เกิดพายุสุริยะซึ่งมีค่า  $\lambda = 0.003 - 0.02$  AU (Forman 1981)

## เอกสารอ้างอิง

Bell, A.R. 1978. The acceleration of cosmic rays in shock fronts I. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* 182: 147-156.

Campbell, W.H. 2001. *Earth Magnetism*. Massachusetts: Harcourt/Academic Press. 52-90.

Channok, C., Ruffolo, D., Desai, M.I. and Mason, G.M. 2005. Finite time shock acceleration of energetic storm particles *Astrophysical Journal* 633, L53-L56.

Decker, R.B., and Vlahos, L. 1986. Numerical studies of particle acceleration at turbulent, oblique shocks with an application to prompt ion acceleration during solar flares. *Astrophysical Journal* 306: 710-729.

Desai, M.I., Mason, G.M., Dwyer, J.R., Mazur, J.E., Gold, R.E., Krimigis, S.M., Smith, C.W. and Skoug, R.M. 2003. Evidence for a suprathermal seed population of heavy ions accelerated by interplanetary shocks near 1 AU. *Astrophysical Journal* 588: 1149-1162.

Desai, M.I. Mason, G.M. Wiedenbeck, M.E., Cohen, C.M., Mazur, J.E., Dwyer, J.R., Gold, R.E., Krimigis, S.M., Hu, Q., Smith, C.W. and Skoug, R.M. 2004. Spectral properties of heavy ions associated with the passage of interplanetary shocks at 1 AU. *Astrophysical Journal* 611: 1156-1174.

Drury, L. 1983. An introduction to the theory of diffusive shock acceleration of energetic particles in tenuous plasmas. *Reports on Progress in Physics* 46: 973-1027.

Fermi, E. 1954. Galactic magnetic fields and the origin of cosmic ray radiation. *Astrophysical Journal* 119: 1-6.

Forman, M.A. 1981. Acceleration theory for 5-40 keV ions at interplanetary shock. *Advances in Space Research* 1: 97-100.

Jokipii, J.R. 1987. Rate of energy gain and maximum energy in diffusive shock acceleration. *Astrophysical Journal* 313: 842-846.

Kallenrode, M. 2001. *Space Physics*. Heidelberg: Springer-Verlag

Kallenrode, M.B., Wibberenz, G., and Hücke, S. 1992. Propagation conditions of relativistic electrons in the inner heliosphere. *Astrophysical Journal* 394: 351-356.

Krymskii, G.F. 1977. A regular mechanism for the acceleration of charged particles on the front of a shock wave. *Soviet Physics Doklady* 22: 327-328.

Lang, K.M. 2001. *The Cambridge encyclopedia of the Sun*. Cambridge: Cambridge Press.

Manchester, W.B., Gombosi, T.I., De Zeeuw, D.L., Sokolov, I.V., Roussev, I.I., Powell, K.G., Kóta, J., Tóth, G. and Zurbuchen, T.H. 2005. Coronal mass ejection shock and sheath structures relevant to particle acceleration. *Astrophysical Journal* 622: 1225-1239.

Mason, G.M., Gold, R.E., Krimigis, S.M., Mazur, J.E., Andrews, G.B., Daley, K.A., Dwyer, J.R., Heuerman, K.F., James, T.L., Kennedy, M.J., Lefevre, T., Malcolm, H., Tossman, B. and Walpole, P.H. 1998, The Ultra Low Energy Isotope Spectrometer (ULEIS) for the ACE spacecraft. *Space Science Review* 86: 409-448.

Palmer, I.D. 1982. Transport coefficient of low-energy cosmic rays in interplanetary space. *Reviews of Geophysics and Space Physics* 20: 335-351.

Tylka, A.J. 2001. New insights on solar energetic particles from Wind and ACE. *Journal of Geophysical Research* 106: 25333-25352.

