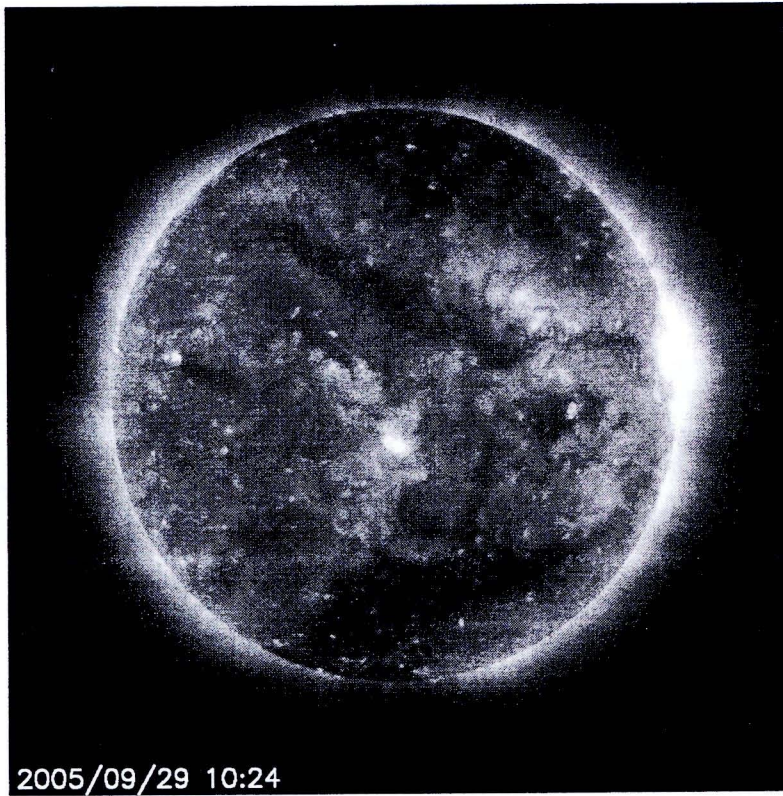


วัตถุประสงค์

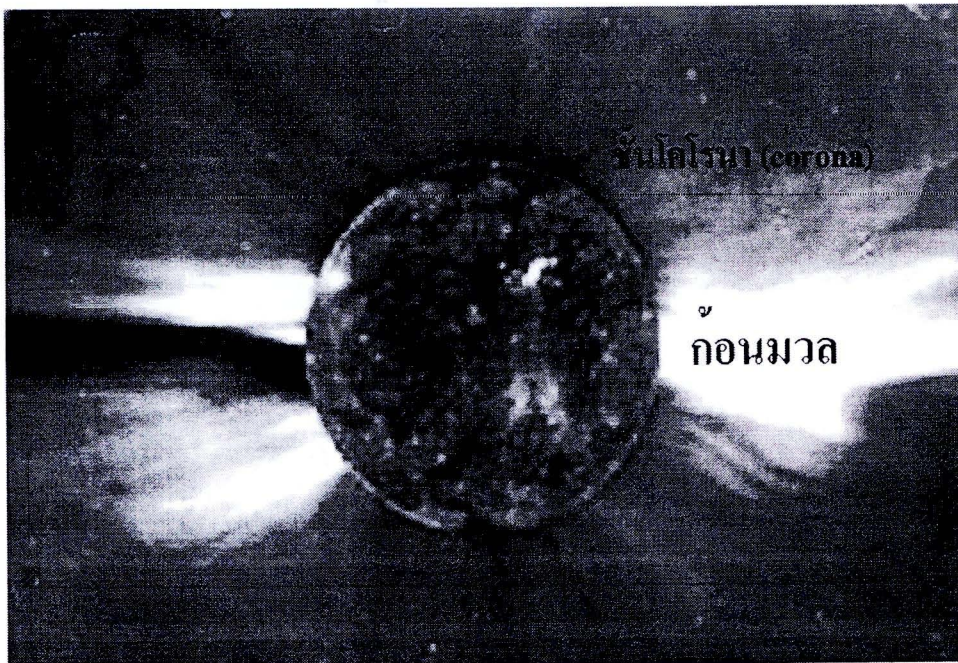
สร้างแบบจำลองการเร่งอนุภาคในเหตุการณ์พายุสุริยะแบบเดี่ยว เปรียบเทียบกับคลื่นกระแทกแบบคู่ ในการปลดปล่อยก้อนมวลจากดวงอาทิตย์

บทนำ

ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ที่อยู่ใกล้โลกที่สุดซึ่งอยู่ห่างออกไปประมาณ 150,000,000 กิโลเมตร (หรือ 1 หน่วยดาราศาสตร์) ซึ่งดวงอาทิตย์นี้เป็นที่แหล่งกำเนิดพลังงานที่มีความสำคัญต่อโลก โดยทุกๆวินาที ดวงอาทิตย์จะมีการแผ่รังสีเนื่องจากความร้อน(thermal radiation)ให้พลังงานออกมาในระดับ 3.854×10^{26} จูล (Lang 2001) และดวงอาทิตย์ยังมีการปลดปล่อยอนุภาคที่มีพลังงานสูงออกมา โดยการปะทุ(flare) ที่ผิวดวงอาทิตย์ ซึ่งเกิดขึ้นได้เป็นปกติ 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 จากสังเกตเหตุการณ์การปะทุรุนแรงที่ดวงอาทิตย์โดยเครื่องวัด LASCO บนยานอวกาศ SOHO พบว่าในเหตุการณ์เกิดพายุสุริยะ(solar storm event) จะมีการปล่อยก้อนมวลในชั้นโคโรนา (coronal mass ejection, CME) ดังรูปที่ 2 การปลดปล่อยก้อนมวลจากโคโรนาครั้งหนึ่งๆ จะมีการพาก้อนสสารที่มีมวลมากกว่าพันล้านตัน ออกมาด้วยอัตราเร็ว 100 ถึง 2,000 กิโลเมตรต่อวินาที (Manchester et al. 2005) ในขณะที่ลมสุริยะ (solar wind) ซึ่งไหลออกมาจากดวงอาทิตย์มีความเร็ว 400 ถึง 800 กิโลเมตรต่อวินาที ดังนั้นเมื่อก้อนมวลจากโคโรนาเคลื่อนที่เร็วกว่าลมสุริยะจึงทำให้เกิดคลื่นกระแทก (shock) ในตัวกลางของอวกาศชั้นภายในอวกาศตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์(interstellar medium) โดยคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นในอวกาศตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์นี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเร่งอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์มายังโลก โดยในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์จะมีเส้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากดวงอาทิตย์ ทำให้อนุภาคที่มีประจุที่ถูกปล่อยออกจากดวงอาทิตย์นั้นมีการเคลื่อนที่ไปตามสนามแม่เหล็ก โดยในสถานการณ์ที่มีคลื่นกระแทกเกิดขึ้นนั้นจะทำให้เส้นสนามแม่เหล็กในตัวกลางนั้นเกิดความปั่นป่วนอย่างมาก ทำให้อนุภาคที่เคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กนั้นมีการพุ่งกระเจิงไปมาในขอบเขตคลื่นกระแทกเป็นผลให้อนุภาคเหล่านั้นมีพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นได้

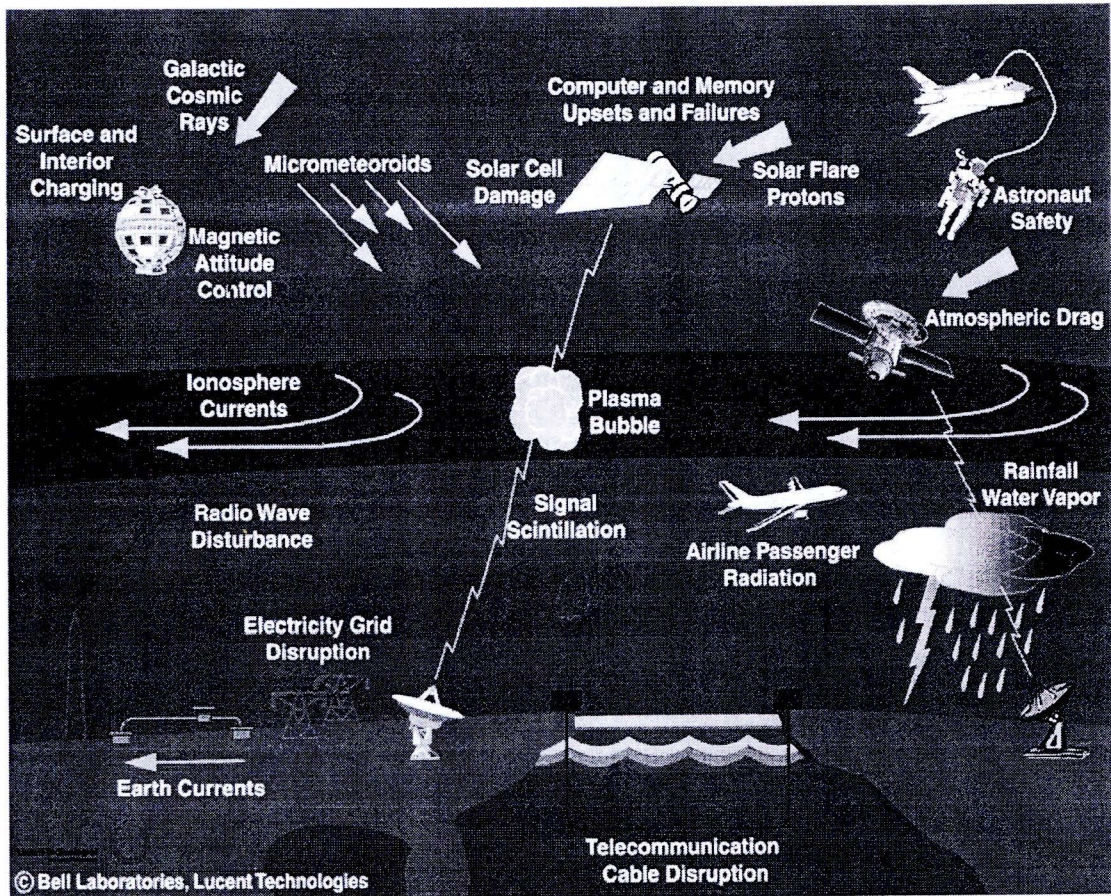


รูปที่ 1 แสดงการประทุ(flare) ที่ผิวดวงอาทิตย์ ซึ่งเกิดขึ้นได้เป็นประจำ



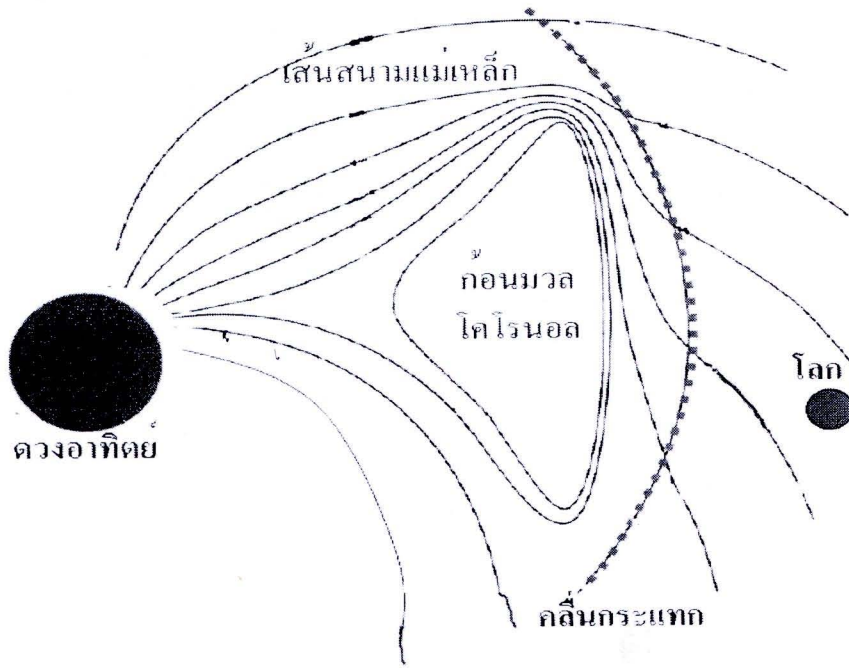
รูปที่ 2 เหตุการณ์พายุสุริยะ ที่มีการปล่อยก้อนมวลในชั้นโคโรนา(coronal mass ejection) ของดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดคลื่นกระแทกขึ้น

ในสถานการณ์ที่เกิดคลื่นกระแทกจากเหตุการณ์พายุสุริยะนั้น ทำให้อนุภาคเหล่านั้นถูกเร่งให้มีพลังงานที่สูงขึ้นอย่างมาก ซึ่งเมื่ออนุภาคที่มีพลังงานสูงเหล่านั้นเคลื่อนที่มาถึงโลกอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อการสื่อสารผ่านดาวเทียม และสถานีอวกาศที่โคจรอยู่รอบโลกได้ (Campbell 2001) หรืออาจทำความเสียหายต่อโรงงานไฟฟ้า การสื่อสารและการโดยสารทางเครื่องบินพาณิชย์ การติดต่อสื่อสารทางไกลได้นำ ดังรูปที่ 3 หรือการเกิดปรากฏการณ์ออโรรา (aurora effect) เป็นต้น



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

ในโครงการวิจัยนี้ เราต้องการพัฒนาแบบจำลองเชิงทฤษฎีของการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ในเหตุการณ์พายุสุริยะที่รุนแรงของดวงอาทิตย์ ซึ่งคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นจากดวงอาทิตย์ที่มีการปลดปล่อยก้อนมวลโคโรนาขนาดใหญ่ออกมา ทำให้สนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์มีความไม่ต่อเนื่องแบบกะทันหันเกิดเป็นคลื่นกระแทก (shock) ดังรูปที่ 4



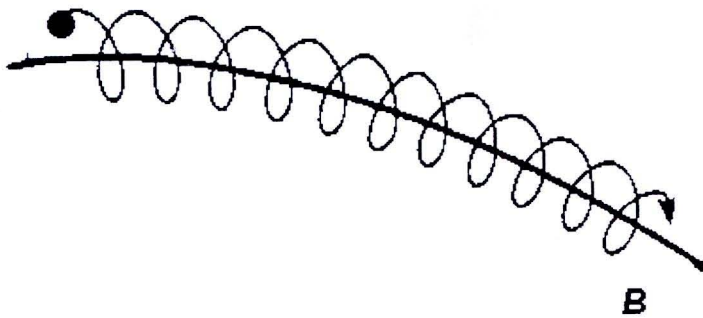
รูปที่ 4 แสดงการเกิดขึ้นกระแทกเนื่องจากเหตุการณ์ปล่อยก้อนมวลโคโรนาจากดวงอาทิตย์

โดยเราทำการสร้างแบบจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ในการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกจากการปลดปล่อยกลุ่มก้อนมวลขนาดใหญ่จากดวงอาทิตย์ในเหตุการณ์พายุสุริยะ โดยพิจารณาถึงการปล่อย 1 กลุ่มก้อนมวลใหญ่ และ การปล่อย 2 กลุ่มก้อนใหญ่ เพื่ออธิบายผลเปรียบเทียบกับข้อมูลการวัดอนุภาคพลังงานสูงที่สังเกตจากยานอวกาศ

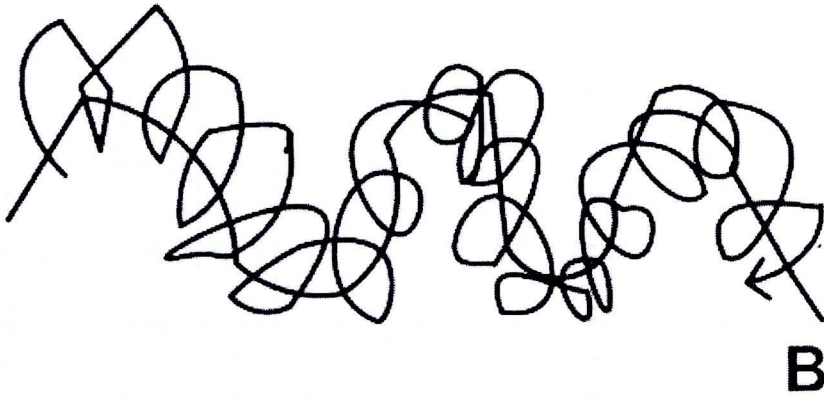
การเร่งอนุภาคจากดวงอาทิตย์

ทฤษฎีการเร่งอนุภาคจากดวงอาทิตย์เกิดขึ้นการคลื่นกระแทก ได้ถูกพัฒนามาจากแนวคิดของ Fermi (1954) Kymaskii (1977) Bell (1978) Drury (1983) ในกลไกการเร่งอนุภาคแบบพุ่ง (diffusive shock acceleration) ซึ่งใช้อธิบายการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกของรังสีคอสมิกในอวกาศ โดยการเร่งอนุภาคจากดวงอาทิตย์ที่คลื่นกระแทกนั้นส่วนใหญ่เกิดจากเหตุการณ์ปล่อยก้อนมวลจากดวงอาทิตย์ ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของตัวกลางของสนามแม่เหล็กในอวกาศขึ้น ซึ่งความไม่ต่อเนื่องของสนามแม่เหล็กนี้คือคลื่นกระแทก (shock) โดยคลื่นกระแทกนี้จะเคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณชั้นโคโรนาของดวงอาทิตย์ มายังโลก จะใช้เวลาประมาณ 2 - 5 วัน ขึ้นกับระดับความรุนแรงในเหตุการณ์พายุสุริยะ

เมื่อพิจารณาอนุภาคที่มีประจุที่กระจายอยู่ในตัวกลางระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่ไปกับสนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์ในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ (interplanetary magnetic field) ดังรูปที่ 5 แต่เมื่อสนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์มีลักษณะที่แปรปรวนมาก ๆ ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาครอบสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 6

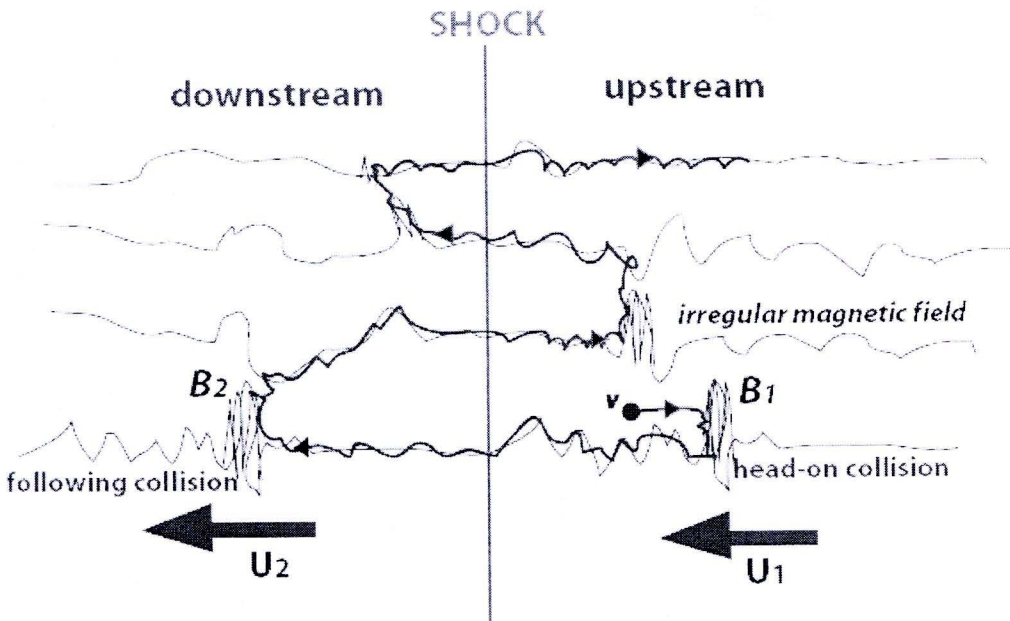


รูปที่ 5 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุตามเส้นสนามแม่เหล็ก (B)



รูปที่ 6 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุตามเส้นสนามแม่เหล็ก (B) ที่มีความปั่นป่วน

ในกรณีที่เกิดคลื่นกระแทก(shock)ขึ้นนั้น จะทำให้ความเร็วของพลาสมาในดักกลางระหว่างดาวเคราะห์มีค่าแตกต่างกันที่บริเวณคลื่นกระแทก (ความเร็ว U_1 ที่บริเวณด้านหน้าคลื่นกระแทก และ U_2 ที่บริเวณหน้าด้านคลื่นกระแทก) และมีผลให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กในดักกลางระหว่างดาวเคราะห์มีค่าแตกต่างกันที่บริเวณคลื่นกระแทก (มีความเข้มของสนามแม่เหล็ก B_1 ที่บริเวณด้านหน้าคลื่นกระแทก และ B_2 ที่บริเวณหน้าด้านคลื่นกระแทก) ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามแม่เหล็กที่มีความปั่นป่วนผ่านคลื่นกระแทก (shock) ใน 1 รอบ

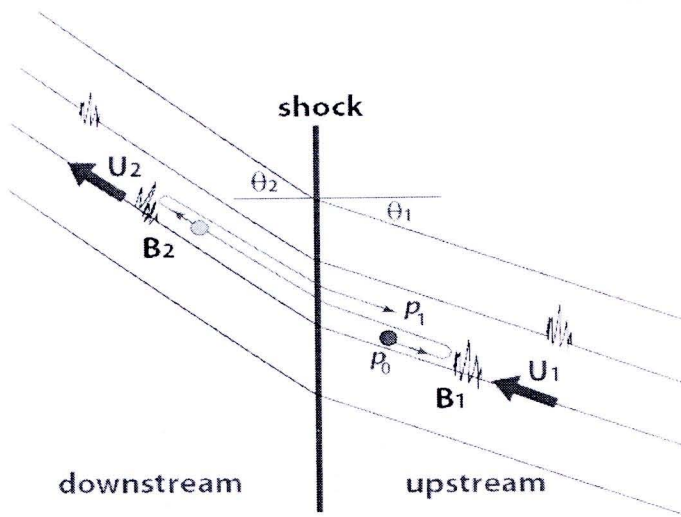
จากรูปที่ 7 นี้ เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามแม่เหล็กที่มีความปั่นป่วนผ่าน โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีการผ่านคลื่นกระแทกจะทำให้ โมเมนตัมของอนุภาคนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเร็วของพลาสมาในต้วกลางระหว่างดาวเคราะห์ (U_1 และ U_2) เพราะอนุภาคนั้นจะมีโมเมนตัม(p) เพิ่มขึ้นเนื่องจากการการพุ่งชนกับสนามแม่เหล็ก B_1 ด้วยความเร็ว U_1 และมีโมเมนตัมลดลงเนื่องจากการการพุ่งชนกับสนามแม่เหล็ก B_2 ด้วยความเร็ว U_2 ดังนั้นโดยสุทธิแล้วอนุภาคเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ผ่านคลื่นกระแทก 1 ครั้ง จะมีค่าโมเมนตัมเพิ่มขึ้น(Δp) เท่ากับ

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

เมื่อพิจารณาลักษณะของการเร่งที่เกิดขึ้นในเหตุการณ์ที่เกิดคลื่นกระแทก ในกรณีที่ทำให้เกิดมุมของสนามแม่เหล็กกับหน้าคลื่นกระแทกมีค่าเป็นมุม θ_1 ที่ตำแหน่งด้านหน้าคลื่นกระแทก และเกิดมุม θ_2 ที่ตำแหน่งด้านหลังคลื่นกระแทก ดังรูปที่ 8 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 θ_1 มุมของทิศทางสนามแม่เหล็กหน้าคลื่นกระแทก θ_2 คือมุมของทิศทางสนามแม่เหล็กด้านหลังคลื่นกระแทก v_0 คือความเร็วของอนุภาคก่อนเคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทก



รูปที่ 8 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านคลื่นกระแทก(shock)ใน 1 รอบ ในกรอบอ้างอิงของคลื่นกระแทก ซึ่งหน้าคลื่นกระแทกทำมุมกับสนามแม่เหล็กเป็น มุม θ_1 และ มุม θ_2 โดยเริ่มต้นอนุภาคที่มีโมเมนตัม p_0 ที่อยู่หน้าคลื่นกระแทก (upstream)

เมื่อพิจารณาอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกจำนวน n ครั้ง โมเมนตัมของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เป็น

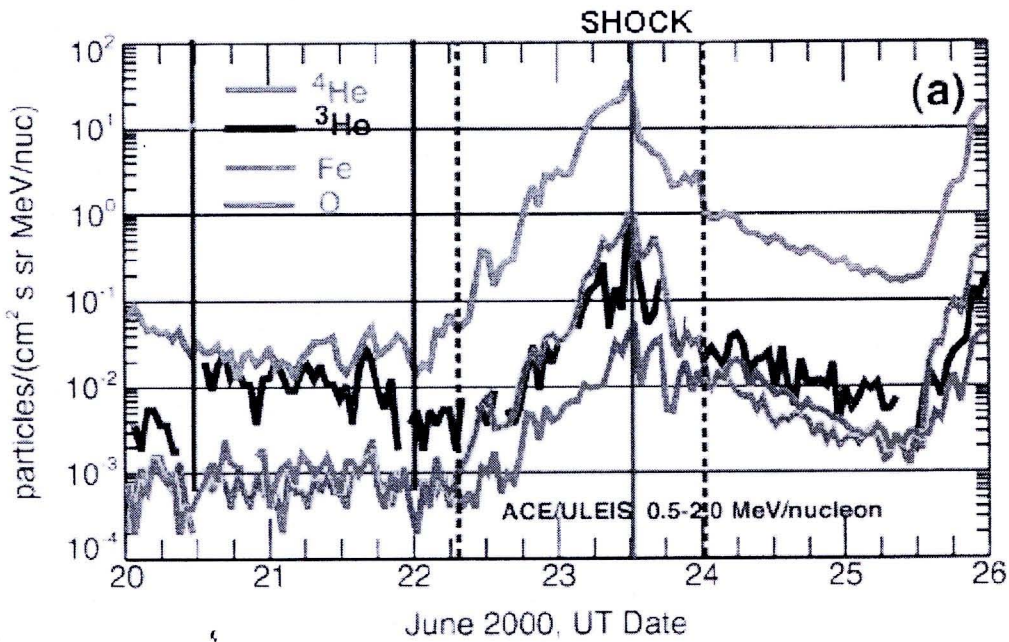
$$p_n \approx \prod_{i=0}^{n-1} \left(1 + \frac{4}{3} \frac{u_1 \cos \theta_1 - u_2 \cos \theta_2}{v_i \cos \theta_1} \right) p_0 \quad (3)$$

โดยที่ p_n คือโมเมนตัมของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกเป็นจำนวน n ครั้ง และ v_i คือความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกครั้งที่ i

จะเห็นได้ว่าพลังงาน(คำนวณได้จากโมเมนตัม)ของอนุภาคจากดวงอาทิตย์สามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อมันเคลื่อนที่พุ่งไปมาในสนามแม่เหล็กผ่านคลื่นกระแทก โดยเฉพาะเมื่ออนุภาคมีการเคลื่อนที่พุ่งไปมาและผ่านข้ามคลื่นกระแทกเป็นจำนวนหลายๆครั้ง จะยังมีผลทำให้พลังงานของอนุภาคนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นได้มาก

การตรวจวัดความหนาแน่นของอนุภาคจากดวงอาทิตย์ที่เวลาต่าง ๆ

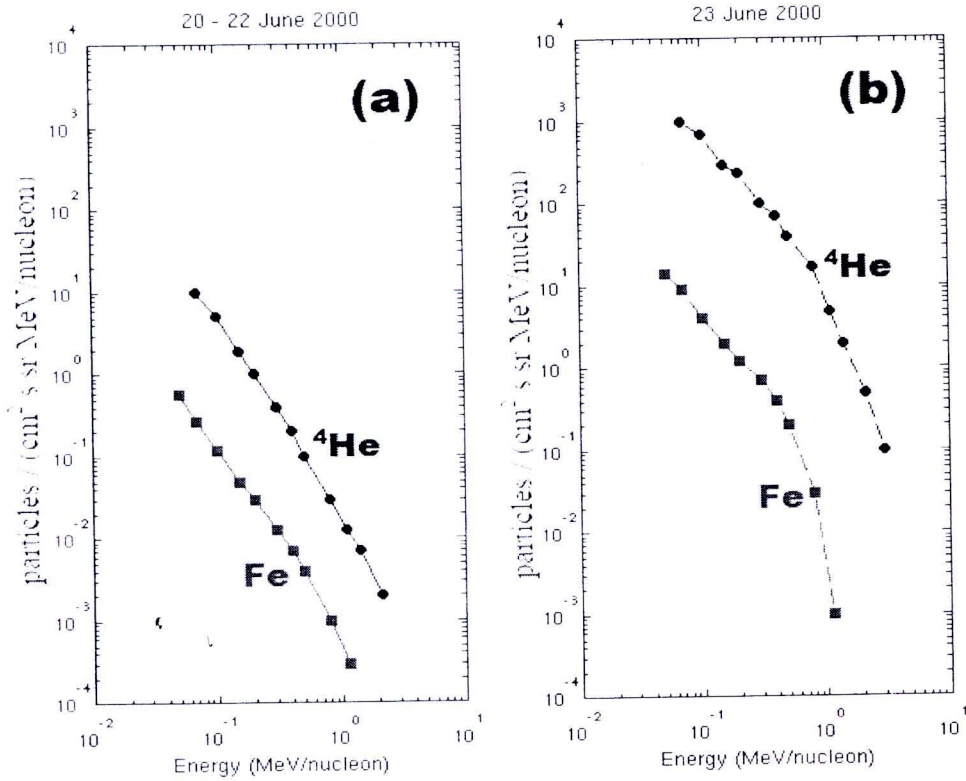
จากการวัดอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ในช่วงพลังงาน 0.5 -2.0 MeV/nucleon โดยเครื่องตรวจวัดอนุภาค ULEIS (Mason et al. 1997) บนยานอวกาศ ACE (ยานอวกาศนี้อยู่ห่างจากดวงอาทิตย์ 1.485×10^8 กิโลเมตร หรือ 0.95 หน่วยดาราศาสตร์) ในเหตุการณ์เกิดพายุสุริยะรุนแรงในวันที่ 20 - 26 มิถุนายน 2000 (Desai et al. 2003) ซึ่งในเหตุการณ์เหตุดังกล่าวมีการปล่อยก้อนมวลขนาดใหญ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ทำให้เกิดคลื่นกระแทกขึ้นในดักกลางระหว่างดาวเคราะห์ แล้วก้อนมวลขนาดใหญ่ได้ผลักดันให้คลื่นกระแทกนั้นเคลื่อนที่ออกมาจากดวงอาทิตย์ จนมันเคลื่อนที่ถึงยานอวกาศ ACE ในเวลาต่อมา ในการตรวจวัดพบว่าเมื่อคลื่นกระแทกเคลื่อนที่มาถึงยานอวกาศที่ทำให้อนุภาคจากดวงอาทิตย์มีจำนวนเพิ่มขึ้นในวันที่ 22 มิถุนายน 2000 (เวลาประมาณ 00.00) และมีจำนวนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนมีจำนวนที่วัดได้สูงสุด ในวันที่ 23 มิถุนายน 2000 เวลา 12.00 น. ดังรูปที่ 9 โดยอนุภาคที่เครื่องวัดสังเกตได้คือ อนุภาค ^4He , ^3He , O และ Fe ซึ่งพบว่าในเหตุการณ์ที่มีคลื่นกระแทกนั้นจะตรวจวัดจำนวนอนุภาคได้สูงขึ้นประมาณ 200 - 1000 เท่า (โดยความหนาแน่นของอนุภาค ^4He จะเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 1000 เท่า ส่วนความหนาแน่นของอนุภาค Fe จะเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 200 เท่า) ซึ่งจะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนอนุภาคจะมีลักษณะเป็นแบบภูเขาแบบค่อยๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งตำแหน่งสูงสุดเกิดขึ้นที่คลื่นกระแทก แล้วหลังจากนั้นจากจำนวนอนุภาคจะมีการลดลงไปในลักษณะที่เร็วขึ้น



รูปที่ 9 ผลการตรวจวัดจำนวนความหนาแน่นของอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ (ในช่วงพลังงาน 0.5 -2.0 MeV/nucleon) ในเหตุการณ์พายุสุริยะ ระหว่างวันที่ 20-26 มิถุนายน 2000 จากเครื่องวัด ULEIS จะเห็นได้ว่าเมื่อคลื่นกระแทกเคลื่อนที่มายังยานอวกาศที่ตรวจวัดในวันที่ 23 มิถุนายน เวลา 12:00 อนุภาค He, O และ Fe ที่วัดได้มีจำนวนเพิ่มขึ้นประมาณ 200 – 1000 เท่า (Desai et al. 2003)

การตรวจวัดสเปกตรัมของจำนวนอนุภาคในแต่ละในเหตุการณ์ที่ช่วงเวลาต่างกัน (ก่อนและหลังมีคลื่นกระแทก)

เมื่อพิจารณาการตรวจวัดสเปกตรัมของจำนวนอนุภาคในแต่ละค่าพลังงาน ตั้งแต่ 0.05 ถึง 3.0 MeV/nucleon จากเครื่องวัด ULEIS ในรูปที่ 10 เพื่อศึกษาว่าในแต่ละค่าพลังงานต่างๆ นั้น มีจำนวนอนุภาคเพิ่มขึ้นในแต่ละระดับพลังงานเป็นอย่างไร ซึ่งจากรูปที่ 10(a) จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมพลังงานของอนุภาค He และ Fe ก่อนถูกเร่งโดยคลื่นกระแทกนั้น จะมีลักษณะการกระจายตัวของแต่ละค่าพลังงานเป็นไปตามกฎยกกำลัง (power law) ตามความสัมพันธ์ $E^{-\gamma}$ โดย E คือพลังงานจลน์ของอนุภาค และ γ คือค่าคงที่ (spectral index) และจากการตรวจวัดเมื่ออนุภาคถูกเร่งโดยคลื่นกระแทกในเวลาต่อมา (ในเวลาอีก 54 ชั่วโมง) ในรูปที่ 10(b) จะซึ่งพบว่าจำนวนอนุภาคในแต่ละพลังงานจะเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าจำนวนอนุภาคในแต่ละค่าพลังงานมีค่าสูงขึ้นมากกว่า 50 เท่า เมื่อเทียบกับรูปที่ 10(a) ซึ่งเป็นผลจากอนุภาคหลายๆตัว เคลื่อนที่ข้ามคลื่นกระแทกจำนวนหลายๆครั้ง แต่อย่างไรก็ตามนั้นลักษณะการกระจายตัวของแต่ละค่าพลังงานจะไม่เป็นไปตามกฎยกกำลังแบบต่อเนื่องทุกค่าพลังงาน ซึ่งที่ค่าพลังงานสูง (0.05 ถึง 3.0 MeV/nucleon) จะมีการเพิ่มขึ้นน้อยกว่า 10 เท่า



รูปที่ 10 สเปกตรัมพลังงานของอนุภาค ฮีเลียม (^4He) และ เหล็ก (Fe) ที่ได้จากการวัดในแต่ละช่วงพลังงาน ในวันที่ 20 -22 มิถุนายน 2000 ก่อนการเกิดคลื่นกระแทก (a) และในวันที่ 23 มิถุนายน 2000 เมื่อมีการเกิดคลื่นกระแทกแล้ว (b) (ข้อมูลจาก Desai et al. 2003)

ขั้นตอนการคำนวณ และผลการคำนวณเชิงตัวเลข

ในกรณีที่ 1 เราทำการจำลองสถานการณ์เบื้องต้น เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่ถูกปลดปล่อยออกจากดวงอาทิตย์ที่ถูกรังที่บริเวณคลื่นกระแทก โดยกรณีที่ 1 นี้ เราได้พิจารณาการเกิดคลื่นกระแทกแบบเดี่ยว (single shock) โดยประยุกต์ใช้วิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นของอนุภาค ที่ระยะทาง และเวลาต่างๆ โดยพิจารณาจากรูปแบบของสมการ diffusion-convection ดังนี้ คือ

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} - U \frac{\partial F}{\partial z} \quad (4)$$

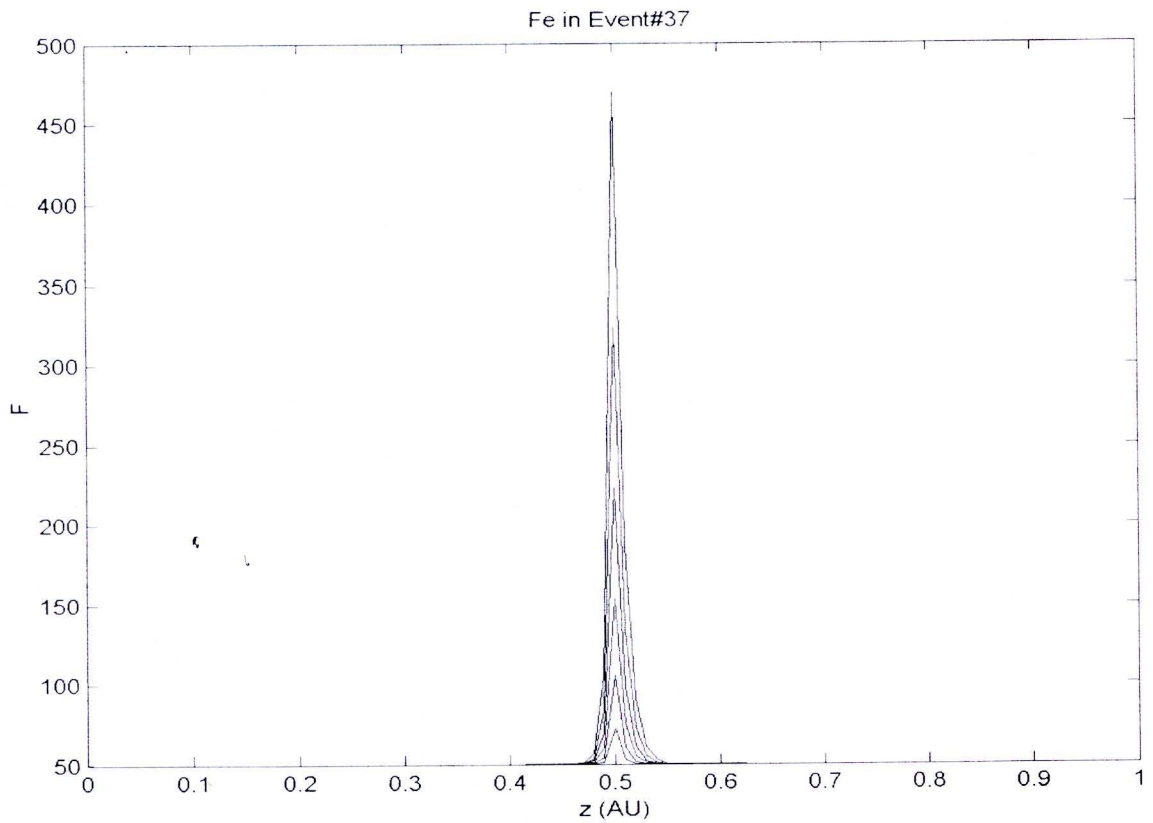
โดยที่ $F(t, z)$ เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของอนุภาคที่ขึ้นกับเวลา (t) และตำแหน่ง (z)

κ คือ สัมประสิทธิ์การฟุ้งของอนุภาค

U คือ ความเร็วของไหลเนื่องจากลมสุริยะ

เราคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอนุภาคจากสมการ (4) โดยวิธีการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Differrent) โดยใช้วิธีการแบบแควงส์-นิโคลสัน (Crank-Nicolson Method) โดยกำหนดให้เงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณ คือ $F(t = 0, z) = F_0$ โดยที่ F_0 เป็นค่าที่ได้มาจากข้อมูลการสังเกตการณ์ก่อนที่จะมีคลื่นกระแทกออกจากดวงอาทิตย์

จากการจำลองเพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของอนุภาค (F) ที่ถูกปลดปล่อยมาจากดวงอาทิตย์ที่ถูกรังที่คลื่นกระแทก โดยจำลองที่เวลาต่างๆกัน คือ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ชั่วโมง พบว่าบริเวณตำแหน่งคลื่นกระแทกนั้น (เราพิจารณาที่ตำแหน่ง $z = 0.5$ AU ในรูปที่ 11) จะมีความหนาแน่นของอนุภาคเพิ่มขึ้นตามเวลาอย่างชัดเจน โดยผลจากการจำลองความหนาแน่นของอนุภาค (F) ที่บริเวณตำแหน่งของคลื่นกระแทกจากเหตุการณ์พายุสุริยะ ได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลจากจำลองความหนาแน่นของอนุภาค Fe ที่ขึ้นกับเวลา ที่บริเวณตำแหน่งของคลื่นกระแทก ($z=0.5$ AU) และบริเวณใกล้คลื่นกระแทก จากเหตุการณ์พายุสุริยะ โดยจำลองที่เวลาต่าง ๆ กัน คือ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ชั่วโมง



ในกรณีที่ 2 เราทำการจำลองสถานการณ์จริงเพื่อเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่ตรวจวัดถูกปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ที่ยังไม่เกิดคลื่นกระแทก และในกรณีที่เกิดคลื่นกระแทกแล้ว โดยกรณีนี้ เราได้พิจารณาการเกิดคลื่นกระแทกแบบต่อเนื่อง (continuous shock) ในลักษณะการเร่งอนุภาคในรูปที่ 8 โดยประยุกต์ใช้วิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ในการจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบกับลักษณะสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคในช่วงเวลาก่อนและหลังการเกิดคลื่นกระแทกในรูปที่ 10

ขั้นตอนการจำลอง

เราใช้แบบจำลองการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกที่ขึ้นกับเวลา (Channok et al. 2005) โดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงจำนวนอนุภาคต่อเวลา (t) สำหรับการเร่งอนุภาคในแต่ละครั้ง (n) รอบคลื่นกระแทก ตามสมการ

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

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

E_n คือ พลังงานของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกจำนวน n ครั้ง (คำนวณจากสมการ 3)

I_n คือ การอัตราการไหลของอนุภาคเข้ามาหาคลื่นกระแทก (พิจารณาในกรอบอ้างอิงของคลื่นกระแทก)

r_n คือ อัตราการการเร่งของอนุภาคที่คลื่นกระแทกที่พลังงาน E_n

ε_n คือ อัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคออกไปจากบริเวณคลื่นกระแทก ที่พลังงาน E_n

โดยตัวแปร r_n และ ε_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 ในสมการที่ (6) และ (7) คือความเร็วของอนุภาคที่เมื่อผ่านคลื่นกระแทก n ครั้ง (คำนวณได้จากสมการ 3), u_1 คือความเร็วของลมสุริยะหน้าคลื่นกระแทก u_2 คือ ความเร็วของลมสุริยะหลังคลื่นกระแทก, θ_1 มุมของทิศทางสนามแม่เหล็กหน้าคลื่นกระแทก, θ_2 คือ มุมของทิศทางสนามแม่เหล็กด้านหลังคลื่นกระแทก, B_1 / B_2 คือ อัตราส่วนความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านหน้าคลื่นกระแทกกับด้านหลังคลื่นกระแทก (ซึ่งตัวแปรดังกล่าวนี้ได้จากการวัดโดยเครื่องมือวัดบนยานอวกาศ ACE)

สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกในสมการที่ (6) และ (7) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพุ่งในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ซึ่งเราพิจารณาทั้งด้านหน้าคลื่นกระแทก และ ด้านหลังหน้าคลื่นกระแทก คือ



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

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

โดยที่ κ_{1n} คือสัมประสิทธิ์การฟุ้งด้านหลังคลื่นกระแทกของอนุภาคความเร็ว v_n , κ_{2n} คือสัมประสิทธิ์การฟุ้งด้านหลังคลื่นกระแทกของอนุภาคความเร็ว v_n และ λ คือ ระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ โดยค่า λ เป็นค่าที่เราจะคำนวณหาจากการจำลองเพื่อฟิตข้อมูลจากการวัดสเปกตรัมของพลังงาน

เรามีขั้นตอนการจำลองดังนี้ คือ

1. ใช้ข้อมูลการวัดโดยเครื่องมือวัด ULEIS ในวันที่ 20-22 มิถุนายน 2000 (ก่อนเกิดคลื่นกระแทก) ตามรูปที่ 10(a) เพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลอง โดยเราใช้ข้อมูลจำนวนอนุภาคแต่ละค่าพลังงาน E ที่เวลาเริ่มต้น t_0 ในฟังก์ชัน $N(E, t_0)$ สำหรับอนุภาคไอออน ^4He และ Fe
2. วิเคราะห์ช่วงเวลาที่เกิดคลื่นกระแทกจากเวลา t_0 เคลื่อนที่ถึงเครื่องวัด ULEIS ตามรูปที่ 1 (Desai et al. 2003) ซึ่งใช้เวลา 54 ชั่วโมง
3. พิจารณาตัวแปรที่ได้จากการวัดตรวจโดยเครื่องมือวัด ULEIS ในวันที่ 20 -24 มิถุนายน 2000 (Desai et al. 2003; Desai et al. 2004) เพื่อใช้คำนวณในขั้นตอนที่ 4 คือ

u_1	217 km/s
u_2	87 km/s
θ_1	66 degree
θ_2	78 degree
B_1/B_2	2.4

4. คำนวณค่า อัตราการการเร่งที่คลื่นกระแทก r_n และ อัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคออกไปจากคลื่นกระแทก ε_n สมการที่ (6) และ (7) โดย r_n และ ε_n โดยเราใช้การคำนวณเราพิจารณาถึงระดับพลังงานของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกจำนวน $n = 250$ ครั้ง ใช้ความเร็วเริ่มต้นของอนุภาค 250 km/s
5. คำนวณทอม I_n ที่ใช้ในสมการที่ (5) โดยให้ $I_n = \varepsilon_n N(E, t_0)$
6. ทำการคำนวณผลเชิงตัวเลขในสมการที่ (5) เพื่อหาค่า $N(E, t)$ ที่เวลา $t = 54$ ชั่วโมง โดยใช้วิธีการรุงเง-กุตตา ลำดับที่ 4 (4th order Runge-Kutta) ในการคำนวณเชิงตัวเลข
7. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลอง และจากผลการวัดจากเครื่องวัด ULEIS โดยทำการปรับค่าระยะอิสระเฉลี่ย (λ) ของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ที่ให้ผลการจำลองที่ดีที่สุด

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
 ห้องสมุดงานวิจัย
 วันที่..... 4 มิถุนายน 255
 เลขทะเบียน..... 246852
 เลขเรียกหนังสือ.....