



การจำลองสเปกตรัมพลังงานของโปรตอนจากเหตุการณ์พายุสุริยะ
วันที่ 27 มกราคม ค.ศ. 2012

Simulation of Energy Spectra of Protons from Solar Storm
Event on January 27, 2012

ชาญเรืองฤทธิ์ จันทร์นอก¹

บทคัดย่อ

ได้ทำการจำลองผลการเร่งอนุภาคโปรตอนที่คลื่นกระแทกในเหตุการณ์พายุสุริยะด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข โดยใช้แบบจำลองการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกที่ขึ้นกับเวลา (finite time shock acceleration) ในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ โดยพิจารณาเหตุการณ์พายุสุริยะ (solar storm event) ในวันที่ 27 มกราคม ค.ศ. 2012 ซึ่งเป็นเหตุการณ์พายุสุริยะที่รุนแรงในวัฏจักรสุริยะที่ 24 ผลการจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกับการวัดสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคโปรตอน โดยเครื่องตรวจจับอนุภาค PAMELA บนดาวเทียม Resurs-DK1

ABSTRACT

We simulated numerically effects of shock acceleration of protons in the solar storm event of January 27, 2012, which was a strong level solar storm in the 24th solar cycle. A model of finite time shock acceleration at the interplanetary medium was used in this study. We found that the simulation results agree well with the measurement of the energy spectra of protons from the PAMELA instrument onboard the Resurs-DK1 satellite.

คำสำคัญ: การเร่งที่คลื่นกระแทก เหตุการณ์พายุสุริยะ ตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์

Keywords: Shock acceleration, Solar storm event, Interplanetary medium

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา จ.นครราชสีมา

E-mail: physics007@gmail.com

บทนำ

ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ที่มีความสำคัญในระบบสุริยะ ซึ่งมีดาวเคราะห์ทั้ง 8 ดวง เป็นดาวเคราะห์บริวารของดวงอาทิตย์ โดยโลกที่มนุษย์อาศัยอยู่เป็นดาวเคราะห์ที่ห่างจากดวงอาทิตย์เป็นลำดับที่ 3 ซึ่งอยู่ห่างจากดวงอาทิตย์เป็นระยะทางประมาณ 150,000,000 กิโลเมตร (หรือ 1 หน่วยดาราศาสตร์ (astronomical unit): AU) ซึ่งดวงอาทิตย์นี้เป็นดาวฤกษ์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่สำคัญต่อโลก และดาวเคราะห์ในระบบสุริยะ โดยทุก ๆ วินาที ดวงอาทิตย์จะมีการแผ่รังสีเนื่องจากความร้อน (thermal radiation) ให้พลังงานออกมาในระดับสูงถึง 3.85×10^{26} จูล (Lang, 2001) และดวงอาทิตย์ยังมีการปลดปล่อยอนุภาคที่มีพลังงานสูงออกมา โดยการประทุ (flare) ที่ผิวดวงอาทิตย์ ซึ่งเกิดขึ้นเป็นปกติ โดยอนุภาคที่ปลดปล่อยออกมา เมื่อพิจารณาในแต่ละตัว จะมีค่าพลังงานของอนุภาคประมาณ 0.1 MeV ถึง 100 MeV (Kallenrode, 2001) ซึ่งอนุภาคต่าง ๆ ที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์เหล่านี้ประกอบไปด้วย อิเล็กตรอน โปรตอน ไอออนของธาตุหนัก เช่น ฮีเลียม ออกซิเจน คาร์บอน และเหล็ก เป็นต้น แต่ในเหตุการณ์การประทุอย่างรุนแรงที่ดวงอาทิตย์นั้น จะมีอนุภาคที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์มีระดับพลังงานสูงถึง 30000 MeV (Tykka, 2001) โดยในช่วงที่ดวงอาทิตย์มีช่วงสูงสุด (solar maximum) จะเกิดเหตุการณ์การประทุรุนแรงที่ดวงอาทิตย์ได้หลายครั้งกว่าเวลาปกติ โดยในช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์จะเกิดการประทุรุนแรงอย่างมากรุนแรงนั้น จะเกิดในรอบวัฏจักรของดวงอาทิตย์ (solar cycle) ห่างกันรอบละประมาณ 11 ปี ซึ่งในเหตุการณ์ประทุอย่างรุนแรงนี้ จะมีการปลดปล่อยก้อนมวลของอนุภาคดวงอาทิตย์ขนาดใหญ่ออกมาถึงระดับชั้นโคโรนา (ซึ่งเป็นชั้นบรรยากาศนอกสุดของดวงอาทิตย์) ดังรูปที่ 1 การปลดปล่อยก้อนมวลในระดับชั้นโคโรนาในแต่ละครั้ง จะ

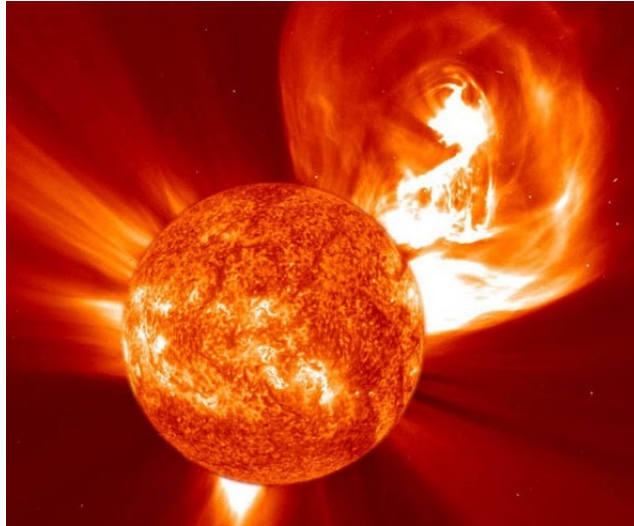
มีกลุ่มก้อนของอนุภาคจากดวงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่มีมวลมากกว่า 10,000,000,000 กิโลกรัม เคลื่อนที่ออกมาด้วยอัตราเร็วตั้งแต่ 100 ถึง 2000 กิโลเมตรต่อวินาที (Manchester et al., 2005) ใน ขณะที่ลมสุริยะ (solar wind) ปกติ ซึ่งมีอนุภาคออกมาจากดวงอาทิตย์ จะมีระดับความเร็ว 400 ถึง 800 กิโลเมตรต่อวินาที (Lang, 2001) ในเหตุการณ์ปลดปล่อยก้อนมวลของอนุภาคดวงอาทิตย์ขนาดใหญ่ในบางเหตุการณ์ที่มีความเร็วในการเคลื่อนที่ของก้อนมวลขนาดใหญ่สูงกว่าความเร็วลมสุริยะ มีผลทำให้เกิดคลื่นกระแทก (shock) ขึ้นได้เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องในความเร็วของวัตถุบนตัวกลางในการเคลื่อนที่ ซึ่งก้อนมวลของอนุภาคดวงอาทิตย์ขนาดใหญ่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากกว่าความเร็วของลมสุริยะในตัวกลางของดาวเคราะห์ (interplanetary medium) ในระบบสุริยะ

ในสถานการณ์ที่เกิดคลื่นกระแทกจากเหตุการณ์พายุสุริยะนั้น เป็นผลให้อนุภาคในตัวกลางของดาวเคราะห์ถูกเร่งให้มีพลังงานที่สูงขึ้น เมื่ออนุภาคที่มีพลังงานสูงเหล่านั้นเคลื่อนที่มาถึงโลกอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบสื่อสารของดาวเทียม และสถานีอวกาศที่โคจรอยู่รอบโลกได้ หรืออาจทำความเสียหายต่อโรงงานไฟฟ้า การแจ้งเตือนระดับปริมาณรังสีที่มีผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้โดยสารบนเครื่องบินพาณิชย์ที่อยู่ในระดับสูง รบกวนการติดต่อสื่อสารทางไกลผ่านสายเคเบิลใต้น้ำ หรือทำให้เกิดปรากฏการณ์ออโรรา (aurora effect)

จากการสังเกตการวัดปริมาณอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ พบว่าอนุภาคโปรตอนเป็นอนุภาคที่มีปริมาณมากที่สุดที่วัดได้ เนื่องจากโปรตอนเป็นสสารซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างดวงอาทิตย์ โดยในรูปที่ 2 ได้แสดงผลของสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคโปรตอนในเหตุการณ์พายุสุริยะ จากข้อมูลการวัดของ Bazilevskaya et al. (2013) โดยเครื่อง

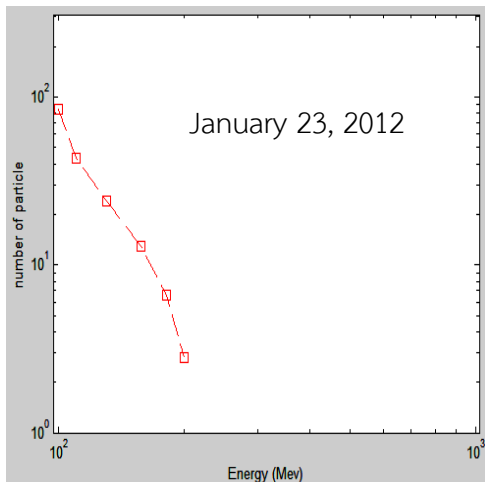
ตรวจวัดอนุภาค PAMELA (payload for antimatter matter exploration and light-nuclei astrophysics) บนดาวเทียม Resurs-DK1 ซึ่งเป็นการวัดจำนวนอนุภาคของโปรตอนที่มีพลังงานต่าง ๆ ในเหตุการณ์ก่อนเกิดพายุสุริยะ ในวันที่ 23 มกราคม 2012 (รูป 2(a)) และตอนที่เกิดพายุสุริยะ ในวันที่ 27

มกราคม 2012 (รูป 2(b)) พบว่าจำนวนอนุภาคในแต่ละระดับพลังงานในช่วง 100-200 MeV ในเหตุการณ์เกิดพายุสุริยะ ผลการวัดสเปกตรัมพลังงานของโปรตอน ในรูปที่ 2(b) จะมีจำนวนที่เพิ่มขึ้นในทุกระดับพลังงาน เนื่องจากผลการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกในเหตุการณ์พายุสุริยะในเวลาต่อมาประมาณ 103 ชั่วโมง

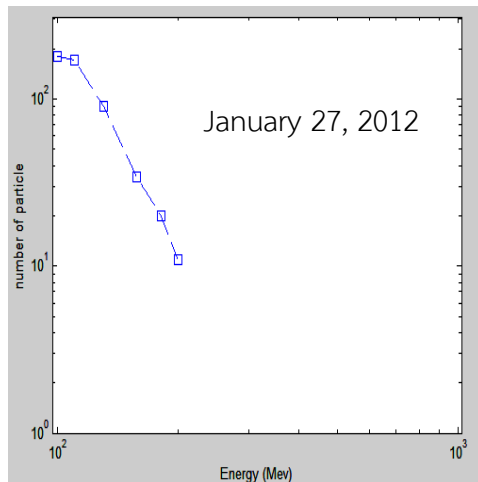


รูปที่ 1 ลักษณะของเหตุการณ์ปล่อยก้อนมวลโคโรนาจากดวงอาทิตย์ในเหตุการณ์พายุสุริยะ

(รูปจาก: http://www.geekation.com/wp-content/uploads/2011/11/CME_EIT_C2_2002_prev.jpg)

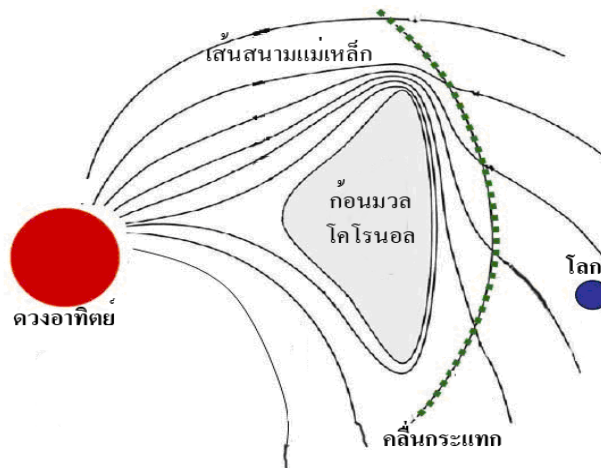


(a)



(b)

รูปที่ 2 สเปกตรัมพลังงานของอนุภาคโปรตอน (proton) ในช่วงพลังงาน 100-200 MeV ของวันที่ 23 มกราคม 2012 เวลา 01:12 UT (ก่อนการเกิดคลื่นกระแทก) (a) และวันที่ 27 มกราคม 2012 เวลา 08:39 UT (เมื่อมีการเกิดคลื่นกระแทก) (b) (ข้อมูลจาก: Bazilevskaya et al., 2013)



รูปที่ 3 แสดงการเกิดคลื่นกระแทกที่ทำให้เส้นสนามแม่เหล็กไม่ต่อเนื่องจากเหตุการณ์ปล่อยก้อนมวลโคโรนาล (CME) จากดวงอาทิตย์

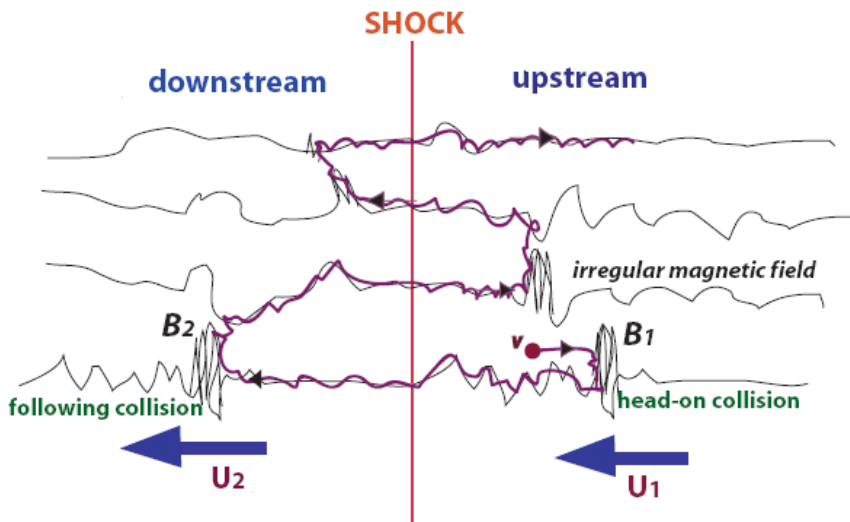
ทฤษฎี

หลักการการเร่งอนุภาคจากดวงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดคลื่นกระแทก ได้ถูกพัฒนาจากแนวคิดของ Fermi (1954), Krymskii (1977), Bell (1978) และ Drury (1983) เกี่ยวกับกลไกการเร่งอนุภาคแบบฟุ้ง (diffusive shock acceleration) ซึ่งใช้อธิบายการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกของรังสีคอสมิกในอวกาศทั่วไป สำหรับการเร่งอนุภาคจากดวงอาทิตย์ที่คลื่นกระแทกนั้น ส่วนใหญ่เกิดจากเหตุการณ์ปล่อยก้อนมวลโคโรนาล (coronal mass ejection, CME) จากดวงอาทิตย์ ในเหตุการณ์พายุสุริยะ (รูปที่ 1) เป็นผลทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของตัวกลางของเส้นสนามแม่เหล็กในอวกาศขึ้น ซึ่งความไม่ต่อเนื่องของเส้นสนามแม่เหล็กนี้คือคลื่นกระแทก (shock) ดังรูปที่ 3 โดยคลื่นกระแทกนี้จะเคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณชั้นโคโรนอลของดวงอาทิตย์ มายังบริเวณโลกในระยะเวลา 2-5 วัน ขึ้นกับระดับความรุนแรงและความเร็วในการเคลื่อนที่ของก้อนมวลโคโรนาลในแต่ละเหตุการณ์พายุสุริยะ

ในกรณีที่มีคลื่นกระแทก (shock) เกิดขึ้นนั้น จะมีผลทำให้ความเร็วของพลาสมาในตัวกลางระหว่าง

ดาวเคราะห์มีค่าแตกต่างกันที่บริเวณคลื่นกระแทก (ความเร็ว U_1 ที่บริเวณด้านหน้าคลื่นกระแทก และ U_2 ที่บริเวณด้านหลังคลื่นกระแทก) และมีผลให้ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์มีค่าแตกต่างกันที่บริเวณคลื่นกระแทก (มีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก B_1 ที่บริเวณด้านหน้าคลื่นกระแทก และ B_2 ที่บริเวณด้านหลังคลื่นกระแทก) ดังรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามแม่เหล็กที่มีความปั่นป่วนผ่าน โดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีการผ่านคลื่นกระแทกจะทำให้ โมเมนตัมของอนุภาคนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเร็วของพลาสมาในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ (U_1 และ U_2) เพราะอนุภาคนั้นจะมีโมเมนตัม (p) เพิ่มขึ้นเนื่องจากการฟุ้ง (diffusion) ชนกับสนามแม่เหล็ก B_1 ด้วยความเร็ว U_1 และมีโมเมนตัมลดลงเนื่องจากการฟุ้งชนกับสนามแม่เหล็ก B_2 ด้วยความเร็ว U_2 ดังนั้นโดยสุทธิแล้วการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ผ่านคลื่นกระแทก 1 ครั้ง จะมีค่าโมเมนตัมเพิ่มขึ้นดังสมการ

$$p = \left(1 + \frac{4}{3} \frac{U_1 - U_2}{v_0} \right) p_0 \quad (1)$$



รูปที่ 4 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านคลื่นกระแทก (shock) ในสนามแม่เหล็กที่มีความปั่นป่วน ซึ่งพิจารณาในกรอบอ้างอิงของคลื่นกระแทก โดยบริเวณ 1 (upstream) เป็นบริเวณที่คลื่นกระแทกยังไม่ถึง และบริเวณ 2 (downstream) เป็นบริเวณที่คลื่นกระแทกเคลื่อนผ่านไปแล้ว

โดยที่ p คือโมเมนตัมของอนุภาคหลังจากการเคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทก 1 รอบ p_0 คือ โมเมนตัมของอนุภาคก่อนเคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทก U_1 ความเร็วของลมสุริยะหน้าคลื่นกระแทก U_2 คือ ความเร็วของลมสุริยะหลังคลื่นกระแทก v_0 คือความเร็วของอนุภาคเริ่มต้นก่อนเคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทก

เมื่อพิจารณาอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกเป็นจำนวนหลาย ๆ ครั้ง เช่นจำนวน n ครั้ง ค่าโมเมนตัมของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ ดังสมการ

$$p_n \approx \prod_{i=0}^{n-1} \left(1 + \frac{4}{3} \frac{U_1 - U_2}{v_i} \right) p_0 \quad (2)$$

โดยที่ p_n คือโมเมนตัมของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกเป็นจำนวน n ครั้ง และ v_i คือความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกครั้งที่ i

จากค่าโมเมนตัมของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นในสมการ (2) จะพบว่าพลังงานของอนุภาคจากดวงอาทิตย์ในแต่ละตัวสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อมีการเคลื่อนที่ไปมาในสนามแม่เหล็กผ่านคลื่นกระแทก โดยเฉพาะ

เมื่ออนุภาคมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาและผ่านข้ามคลื่นกระแทกเป็นจำนวนหลาย ๆ ครั้ง (n) ซึ่งทำให้พลังงานของอนุภาคนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นได้มาก

วิธีการจำลอง

เราคำนวณผลของการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอนุภาคที่คลื่นกระแทก จากแบบจำลองการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกที่ขึ้นกับเวลา (finite time shock acceleration) ของ Channok et al. (2005) โดยพิจารณาจากสมการเชิงอนุพันธ์ เพื่อคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงจำนวนอนุภาค (N) ที่ขึ้นต่อเวลา (t) ซึ่งค่าพลังงาน (E) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้ง (n) ที่อนุภาคถูกเร่งผ่านคลื่นกระแทก โดยที่ E จะอยู่ในรูป E_n และตัวแปรต่าง ๆ จะขึ้นกับจำนวนครั้ง (n) ที่อนุภาคถูกเร่งผ่านคลื่นกระแทก (I_n, ε_n, r_n) ซึ่งมีรูปแบบ ดังสมการที่ (3)

$$\frac{dN(E_n, t)}{dt} = I_n - (r_n - \varepsilon_n)N(E_n, t) + r_{n-1}N(E_{n-1}, t) \quad (3)$$

โดยที่ $N(E_n, t)$ คือ จำนวนอนุภาคที่มีค่าพลังงาน E_n และที่เวลา t ใด ๆ

E_n คือ พลังงานของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านคลื่นกระแทกจำนวน n ครั้ง

I_n คือ การอัตราการไหลของอนุภาคเข้าหาคลื่นกระแทก (พิจารณาในกรอบอ้างอิงของคลื่นกระแทก)

r_n คือ อัตราการเร่งของอนุภาคที่คลื่นกระแทกที่พลังงาน E_n

ε_n คือ อัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคออกไปจากบริเวณคลื่นกระแทกที่พลังงาน E_n

โดยตัวแปรอัตราการเร่งของอนุภาคที่คลื่นกระแทก (r_n) และ อัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคออกไปจากคลื่นกระแทก (ε_n) ในสมการที่ (3) นั้น r_n และ ε_n จะมีค่าขึ้นกับจำนวนครั้งที่อนุภาคผ่านคลื่นกระแทกจำนวน n ครั้งซึ่งหาค่าได้ ดังสมการ

$$r_n = \left[\frac{4}{v_n} \left(\frac{\kappa}{U_1} \right) + (1 - \sqrt{1 - (B_1/B_2)}) \frac{\kappa}{U_2} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$\varepsilon_n = \left[\frac{v_n}{4U_2} \left(1 + \frac{U_1}{v_n} \right)^2 - 1 \right]^{-1} r_n \quad (5)$$

โดยที่ v_n คือ ความเร็วของอนุภาคที่เมื่อผ่านคลื่นกระแทก n ครั้ง, U_1 คือ ความเร็วของลมสุริยะหน้าคลื่นกระแทก, U_2 คือ ความเร็วของลมสุริยะหลังคลื่นกระแทก และ B_1/B_2 คือ อัตราส่วนความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านหน้าคลื่นกระแทกกับด้านหลังคลื่นกระแทก

สำหรับตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเร่ง (r_n) ของอนุภาคที่คลื่นกระแทกในสมการที่ (4) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การฟุ้ง (κ) ในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ โดยค่าสัมประสิทธิ์การฟุ้งด้านหน้าคลื่นกระแทก คือ

$$\kappa_n = \frac{v_n \lambda}{3} \quad (6)$$

โดยที่ κ_n คือ สัมประสิทธิ์การฟุ้งด้านหน้าคลื่นกระแทกของอนุภาคที่มีความเร็ว v_n และ λ คือ ระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) ของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ (Kallenrode, 2001)

สำหรับค่าของตัวแปร λ นั้นไม่สามารถวัดค่าได้จากเครื่องมือวัดในเหตุการณ์พายุสุริยะ ดังนั้นจึงต้องทำการประมวลผลค่าของ λ ที่ต่าง ๆ กัน เพื่อคำนวณค่า κ_n ที่ใช้ได้กับระดับเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะ ซึ่งในเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะจะมีความรุนแรงที่ต่างกันออกไป ซึ่งค่าระยะอิสระเฉลี่ยนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับเหตุการณ์ของการเร่งอนุภาคเนื่องจากคลื่นกระแทกในตัวกลางระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก โดยในเหตุการณ์ปกติ (ที่ไม่มีเกิดการเกิดพายุสุริยะ) ค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ จะมีค่าประมาณ 0.05–0.3 AU (Palmer, 1982; Kallenrode et al., 1992)) (1 AU คือ ระยะทาง 1 หน่วยดาราศาสตร์) ส่วนในเหตุการณ์การเกิดพายุสุริยะที่มีความรุนแรง ค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาค λ ที่วิเคราะห์ได้จะมีค่าที่น้อยลงกว่าเหตุการณ์ปกติ (น้อยกว่า 0.01 AU)

ในการคำนวณเพื่อหาผลเฉลยของจำนวนอนุภาค $N(E_n, t)$ จากการเร่งผ่านคลื่นกระแทกในสมการที่ (3) นั้น เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคในแต่ละค่าพลังงานมีจำนวนมาก เราจึงประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อคำนวณจำนวนอนุภาคในแต่ละค่าพลังงานเริ่มต้นก่อน $N(E_n, t = 0)$ แล้วจึงคำนวณผลการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับเวลาของจำนวนอนุภาคในแต่ละค่าพลังงาน ซึ่งมีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้ คือ

1. วิเคราะห์ข้อมูลการวัดอนุภาคโปรตอนในเหตุการณ์พายุสุริยะของ Bazilevska et al. (2013)

จากเครื่องมือวัด PAMELA บนดาวเทียม Resurs-DK1 โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะของข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคที่วัดได้ก่อนเกิดคลื่นกระแทก ในวันที่ 23 มกราคม 2012 จากรูปที่ 2(a)

2. พิจารณาค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) ของ $N(E_n, t)$ ซึ่งได้จากสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคที่วัดได้ก่อนเกิดคลื่นกระแทก (จากรูปที่ 2(a)) ซึ่งจะได้ข้อมูลเริ่มต้นที่เวลา $t = t_0$ เพื่อใช้ในการคำนวณเป็นค่าเริ่มต้น $N(E_n, t = 0)$ ในสมการที่ (3)

3. วิเคราะห์ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องจากข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัด PAMELA บนดาวเทียม Resurs-DK1 ที่โคจรรอบโลก ในช่วงที่เกิดเหตุการณ์พายุสุริยะในรอบวัฏจักรที่ 24 เพื่อใช้คำนวณค่า r_n และ ε_n ในสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ คือ U_1 (ความเร็วของลมสุริยะหน้าคลื่นกระแทก), U_2 (ความเร็วของลมสุริยะหลังคลื่นกระแทก), และ B_1/B_2 (อัตราส่วนความเข้มของสนามแม่เหล็กด้านหน้าคลื่นกระแทกกับด้านหลังคลื่นกระแทก)

4. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพุ่งด้านหน้าคลื่นกระแทก (κ_n) ในสมการที่ (6) เพื่อใช้ในการหาค่า r_n และ ε_n ในสมการที่ (4) และ (5) โดยกำหนดค่าความเร็วของอนุภาคเริ่มต้น $v_0 = 500$ km/s และพิจารณาจำนวนครั้งของการเคลื่อนที่ข้ามคลื่นกระแทก (n) ของอนุภาคโปรตอน โดยใช้ $n = 480$

5. พิจารณาประมวลค่าการปรับเปลี่ยนค่า λ (ระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์) เพื่อใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพุ่งในสมการที่ (6) ที่ระยะ λ ต่างๆ กัน โดยพิจารณาในช่วง $\lambda = 0.001-0.020$ AU

6. คำนวณอัตราการไหลของอนุภาคเข้ามาหาคลื่นกระแทก (I_n) ที่ใช้ในสมการที่ (3) โดยกำหนดให้ $I_n = \varepsilon_n N(E, t_0)$

7. คำนวณผลเชิงตัวเลขในสมการที่ (3) จากตัวแปร I_n, r_n, ε_n และ $N(E_n, t = t_0)$ เพื่อหาค่า $N(E_n, t)$ ที่ขึ้นกับเวลา t โดยใช้วิธีการรุงเง-กูดตา ลำดับที่ 4 (4th order Runge-Kutta) ในการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ โดยเราใช้ค่า $\Delta t = 0.01$ ชั่วโมง ในการแบ่งช่วงย่อยของเวลา

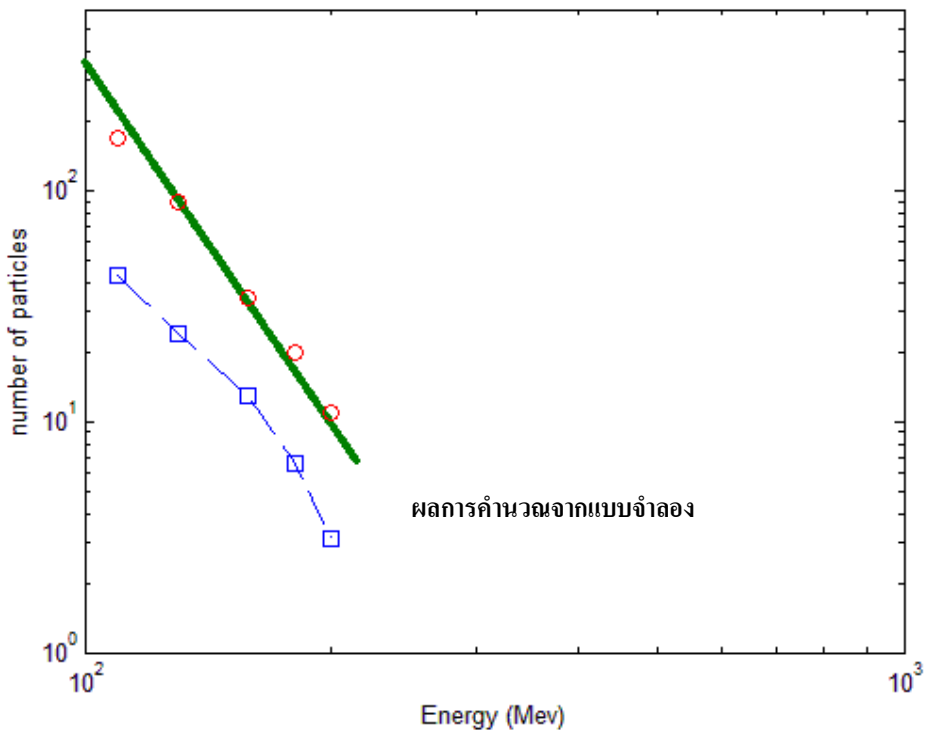
8. วิเคราะห์ผลของค่า $N(E_n, t)$ ที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 7 จากผลการเร่งที่คลื่นกระแทกเมื่อเวลาผ่านไป $t = 103.2$ ชั่วโมง เปรียบเทียบกับสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคโปรตอนที่วัดได้หลังมีคลื่นกระแทก (ในรูปที่ 2(b)) เพื่อหาค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคโปรตอนในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ที่มีผลสอดคล้องกับเหตุการณ์พายุสุริยะ วันที่ 27 มกราคม 2012

ผลการจำลอง

จากการจำลองผลการเร่งอนุภาคโปรตอนที่คลื่นกระแทกในเหตุการณ์พายุสุริยะ โดยใช้แบบจำลองการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกที่ขึ้นกับเวลา (finite time shock acceleration) โดยนำข้อมูลการวัดสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคโปรตอนก่อนการเกิดคลื่นกระแทก (ในวันที่ 23 มกราคม ค.ศ. 2012) เป็นค่าเงื่อนไขเริ่มต้น $N(E_n, t = 0)$ ในการคำนวณแล้วคำนวณผลของค่า $N(E_n, t)$ ที่เกิดขึ้นจากการเร่งอนุภาคโปรตอนที่คลื่นกระแทกในเวลา 103.2 ชั่วโมงต่อมา โดยกำหนดช่วงเวลาย่อย (Δt) ในการคำนวณ คือ $\Delta t = 0.01$ ชั่วโมง ในการจำลองนี้ เราได้พิจารณาการเปลี่ยนค่าของระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ (λ) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการศึกษาการพุ่งของอนุภาคในคลื่นกระแทก

โดยเริ่มจากใช้ค่าอิสระเฉลี่ยของอนุภาคเริ่มต้น $\lambda = 0.001$ AU แล้วปรับเพิ่มค่า λ เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.001 AU จนถึงค่า $\lambda = 0.020$ AU แล้ววิเคราะห์ผลของสเปกตรัมพลังงานของโปรตอนที่สอดคล้องกับการวัดที่ได้จากเครื่องมือ PAMELA ในเหตุการณ์พายุสุริยะวันที่ 27 มกราคม ค.ศ. 2012 (Bazilevskaia et al., 2013) จากการจำลองพบว่าที่ระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคมีค่าน้อย ๆ ($\lambda = 0.001$ ถึง 0.005 AU) จะทำให้มีผลต่อการเร่งอนุภาคเป็นอย่างมาก โดยค่าของระยะอิสระ

เฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ที่วิเคราะห์จากการจำลองเหตุการณ์พายุสุริยะนี้ ค่าที่สอดคล้องกับการวัดได้ดีที่สุด มีค่า 0.001 AU แสดงผลในรูปที่ 5 โดยมีความสอดคล้องกับค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ในเหตุการณ์พายุสุริยะที่มีความรุนแรงซึ่งมีค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคในช่วง 0.001 ถึง 0.01 AU (Forman, 1981; Ng et al., 1999)



รูปที่ 5 สเปกตรัมพลังงานของอนุภาคโปรตอนที่ได้จากการจำลองผลการเร่งอนุภาคในเหตุการณ์พายุสุริยะ วันที่ 27 มกราคม 2012 (โดยสัญลักษณ์ □ แสดงผลการวัดอนุภาคก่อนเกิดคลื่นกระแทก สัญลักษณ์ ○ แสดงผลการวัดอนุภาคหลังมีคลื่นกระแทกจากเหตุการณ์พายุสุริยะ และเส้นทึบ แสดงผลการคำนวณจากแบบจำลองการเร่งอนุภาค)

สรุปผล

เราสามารถประยุกต์ใช้การจำลองการเร่งอนุภาคที่คลื่นกระแทกขึ้นกับเวลา (finite time shock acceleration) ในการคำนวณผลของการเร่งอนุภาคที่

คลื่นกระแทกในเหตุการณ์พายุสุริยะ ในเหตุการณ์ วันที่ 27 มกราคม 2012 ซึ่งเป็นเหตุการณ์พายุสุริยะระดับรุนแรงในรอบวัฏจักรสุริยะที่ 24 ซึ่งเป็นรอบวัฏจักรสุริยะที่เกิดขึ้นล่าสุด ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงปี ค.ศ. 2011-

2012 ผลการจำลองที่ได้สอดคล้องกับการวัดสเปกตรัมของอนุภาคโปรตอน จากเครื่องวัด PAMELA บนดาวเทียม Resurs-DK1 (Bazilevskaya et al., 2013) โดยวิเคราะห์ค่าระยะอิสระเฉลี่ยของอนุภาคโปรตอนจากการจำลองในเหตุการณ์พายุสุริยะในวันที่ 27 มกราคม 2012 มีค่า 0.001 AU ซึ่งมีระดับความรุนแรงมากในรอบวัฏจักรสุริยะที่ 24

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

Bazilevskaya, G. (2013). Solar energetic particle event in 2006-2012 in the PAMELA experiment data. *Journal of Physics: Conference series* 401: 2188-2191.

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

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.

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.

Kallenrode, M. (2001). *Space Physics*. Heidelberg: Springer-Verlag. pp. 185-205.

Kallenrode, M.B., Wibberenz, G., and Hucke, 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. pp. 11-35.

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.

Ng, C.K., Reames, D.V., and Tylka, A.J. (1999). Effect of proton-amplified waves on the evolution of solar energetic particle composition in gradual events. *Geophysical Research Letters* 26: 2145-2148.

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.

