ผลกระทบของสภาพอวกาศและอิเล็กตรอนพลังงานสูงต่อความผิดปกติของดาวเทียมไทยคม-5 ในปี พ.ศ. 2554

Effects of Space Weather Environment and Energetic Electrons on Thaicom-5 Satellite Anomaly in 2011

ธนา ยีรัมย์,[1*] ธาดา สุขศิลา,[2] จันทร์ฉาย กรรภิรมย์,[1] พรรณทิพย์ ไวนิยมพงศ์ [3]

Thana Yeeram,[1*] Thada Suksila,[2] Janchai Kanpirom,[1] Panthip Wainiyompong[3]

บทคัดย่อ

เหตุการณ์ความผิดปกติบนดาวเทียมไทยคม-5 ที่เกิดขึ้นในวันที่ 21 เมษายน พ.ศ. 2554 พบว่ามีความเกี่ยวข้องกับดัชนีทางแม่เหล็กและตัวแปรพลาสมาในอวกาศใกล้โลกที่มีสหสัมพันธ์ต่อกันในรูปแบบของพายุแม่เหล็กโลกที่เวียนซ้ำแบบรอบ 27 วัน และเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ถูกพ่นอย่างต่อเนื่องจากส่วนหางแมกนีโตพอสเข้าสู่วงโคจรของดาวเทียมในระหว่างการพัดผ่านของลมสุริยะความเร็วสูงก่อนเกิดความขัดข้องอย่างน้อย 20 วัน โดยไม่พบแฟลร์สุริยะและการปลดปล่อยก้อนมวลโคโรนาที่มีนัยสำคัญต่อการเพิ่มของฟลักซ์นี้ ดังนั้นกระบวนการสะสม/อัดอิเล็กตรอนพลังงานสูงสู่ตัวยานร่วมกับการบดบังของโลกในช่วงอีควินอกซ์อาจเป็นกลไกหลักที่ทำให้เกิดการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์อย่างทันทีบนดาวเทียมไทยคม-5

คำสำคัญ: อิเล็กตรอนพลังงานสูง พายุแม่เหล็กโลก การคายประจุไฟฟ้าสถิตย์ ลมสุริยะความเร็วสูง

Abstract

An anomaly on Thaicom-5 satellite that occurred on 21 April 2011 is found to be associated with correlated geomagnetic indices and plasma parameters in near-Earth space in a typical profile of 27-day recurrent geomagnetic storms. The anomaly also relates to the enhanced energetic electron flux which is continuously injected from the magnetotail into the geostationary-orbit during the passage of a recurrent high speed solar wind stream (HSS) prior to the anomaly at least 20 days. Solar flares and coronal mass ejections are not significant for the enhanced energetic electron flux. The results suggest that the internal charging of the energetic electrons on Thaicom-5 and the eclipse during the equinox might be the main mechanisms for a sudden electrostatic discharge on Thaicom-5 satellite.

Keywords: High energy electrons**,** Geomagnetic storm**,** Electrostatic Discharge (ESD), High speed solar wind

---

[1] อาจารย์, [3] นิสิตปริญญาตรี, สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150,
[2] อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

[1] Lecturer, [3] Undergraduate student, Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand., [2] Lecturer, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Thechnology North Bangkok, Bangsue District, Bangkok 10800, Thailand.

[*] Corresponding author: Thana Yeeram, Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

บทนำ

"ผลกระทบด้านสภาพอวกาศ" (space weather effects) คือการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขด้านสิ่งแวดล้อมใกล้โลกหรืออวกาศระหว่างดวงอาทิตย์และโลก และมีจุดกำเนิดมาจากการเปลี่ยนแปลงกัมมันตภาพของดวงอาทิตย์ตลอดวัฏจักรสุริยะ (solar cycle) หรือมีที่มาจากรังสีคอสมิก (cosmic rays) และอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ (Hastings and Garrett, 1996) สภาพอวกาศทำให้เกิดพายุแม่เหล็กโลก (geomagnetic storm) ซึ่งเป็นการรบกวนแมกนีโตสเฟียร์ของโลก (อาณาบริเวณที่มีผลของสนามแม่เหล็กโลก) แล้วเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานในลมสุริยะเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในอวกาศใกล้โลก พายุแม่เหล็กโลกแบ่งออกได้สองแบบตามแหล่งกำเนิดคือ 1) ที่มาจากกระแสลมสุริยะความเร็วสูงจากหลุมคอโรนา (coronal hole) ของดวงอาทิตย์ที่มีลักษณะค่อนข้างเสถียร[1,2] โดยกดอัดลมสุริยะความเร็วต่ำให้เกิดบริเวณที่มีความดันและความเข้มสนามแม่เหล็กสูงเรียกว่า บริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วม (corotating interaction region) ที่หมุนไปพร้อมกับดวงอาทิตย์ทุก 27 วัน[3] พบมากในช่วงต่ำสุดของกัมมันตภาพสุริยะ (solar minimum) และ 2) ที่มาจากผลของการปลดปล่อยก้อนมวลโคโรนาอันเป็นการปลดปล่อยก้อนมวลและสนามแม่เหล็กขนาดใหญ่จากบรรยากาศดวงอาทิตย์ พบมากในช่วงสูงสุดของกัมมันตภาพสุริยะ (solar maximum) แม้พายุแม่เหล็กโลกจากกระแสลมสุริยะความเร็วสูง จะมีความรุนแรงน้อยกว่าพายุแม่เหล็กที่มาจากการปลดปล่อยก้อนมวลคอโรนา แต่พลังงานโดยรวมที่ป้อนเข้าสู่ระบบแมกนีโตสเฟียร์ในระยะยาวกลับมีค่าสูงกว่า[4,5] ในปัจจุบันพบว่า ผลกระทบด้านสภาพอวกาศมีผลกระทบอย่างยิ่งยวดต่อเทคโนโลยีการสื่อสารที่ต้องพึ่งพาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมาก

สภาพอวกาศมีผลกระทบอย่างมากต่อดาวเทียมและกระสวยอวกาศนับพันดวงที่โคจรอยู่รอบโลก โดยความผิดปกติหรือขัดข้อง (anomaly) ที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งเกิดจากถูกระดมชนโดยการแผ่รังสีที่มีประจุเข้าทำลายระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า deep-dielectric charging และการอัดประจุ (อิเล็กตรอน) บนพื้นผิวกระสวยอวกาศจากการคายประจุไฟฟ้าที่ถูกสะสมบนฉนวน ที่เรียกว่า surface charging โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ณ วงโคจรระดับสูงนั้น อาจพบ single event effects[6] โดยเกิดการแตกตัวในชั้นฉนวนแล้วนำไปสู่การรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าที่รบกวนหน่วยความจำหรืออาจเผาไหม้ชิ้นส่วนอุปกรณ์ได้ในระยะเวลาสั้นๆ จึงนำไปสู่ความเสียหายต่อระบบโทรคมนาคม โทรทัศน์ และวิทยุ อุตุนิยมวิทยา เศรษฐกิจ ความมั่นคงของชาติ สิ่งเหล่านี้เป็นความท้าทายอย่างมากในชุมชนกระสวยอวกาศในวงโคจรค้างฟ้า (geosynchronous orbit) ณ ความสูง 36,000 km และสำหรับดาวเทียมระบบนำทางทั้งหลาย รวมไปถึงการรบกวนสัญญาณ GPS (Global Positioning System) และคลื่นวิทยุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีประจุไฟฟ้าอยู่อย่างมาก จึงส่งผลต่อไปยังกิจกรรมอื่นๆ เช่น โทรศัพท์มือถือ ระบบไร้สาย การเดินเรือ รถไฟ การสำรวจ การขุดเจาะน้ำมัน เป็นต้น แม้สภาพอวกาศที่รุนแรงมีความน่าจะเป็นของการเกิดต่ำ แต่เมื่อเกิดขึ้นแล้วผลกระทบกลับมีมากอย่างคาดไม่ถึง

ประเทศไทยเคยได้รับผลกระทบจากสภาพอวกาศ/พายุแม่เหล็กโลก เช่น ดาวเทียมไทยคม-5 ซึ่งเป็นดาวเทียมค้างฟ้า ที่วงโคจร 78.5° ตะวันออก ได้เกิดขัดข้องขึ้นในวันที่ 21 เมษายน พ.ศ. 2554 ทั้งนี้สัญญาณดาวเทียมได้ขาดหายไปตั้งแต่เวลา 16:07 LT และใช้งานได้สมบูรณ์เวลา 20:20 LT ได้เกิดปัญหาเครื่องส่งสัญญาณที่สถานีดาวเทียมไทยคมขัดข้อง ทำให้เกิดผลกระทบในวงกว้าง (ในย่านความถี่ C-Band จำนวน 25 ทรานสพอนเดอร์ และย่านความถี่ Ku-Band จำนวน 14 ทรานสพอนเดอร์ โดยย่านความถี่ C-Band Global Beam ของไทยคม-5 ครอบคลุมพื้นที่

4 ทวีป คือเอเชีย ยุโรป ออสเตรเลีย และแอฟริกา ส่วนพื้นที่การให้บริการของ Spot Beam ในย่านความถี่ Ku-Band นั้นครอบคลุมประเทศไทย และประเทศในภูมิภาคอินโดจีน ส่วน Steerable Beam ในย่านความถี่ Ku-Band ของดาวเทียมไทยคม-5 ครอบคลุมประเทศเวียดนาม และประเทศในภูมิภาคอินโดจีน) จนเกิดความแตกตื่น และเกิดผลเสียหายทางเศรษฐกิจมาก คาดว่าเกิดมาจากปรากฏการณ์คายประจุไฟฟ้า (Electro static discharge) จากประจุไฟฟ้าในอวกาศ เพื่อความปลอดภัยของดาวเทียม เมื่อเกิดเหตุผิดปกติในลักษณะนี้ขึ้น ดาวเทียมจะปรับตัวเข้าไปอยู่ใน " ระบบปลอดภัย " (safe mode) อัตโนมัติ ดาวเทียมได้หันตัวเองไปยังดวงอาทิตย์ ทำให้สัญญาณดาวเทียมขาดหายไป แต่สาเหตุและรายละเอียดของการเกิดยังไม่เป็นที่เข้าใจ จึงเป็นเรื่องสำคัญในการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเหตุการณ์นี้ เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษาสำหรับผลกระทบจากพายุแม่เหล็กโลกที่มีต่อระบบดาวเทียม

หนึ่งในปรากฏการณ์แห่งสภาพอวกาศที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ การเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูง อย่างไรก็ตาม กลไกที่แท้จริงเพื่ออธิบายเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงในลมสุริยะความเร็วสูงยังมีความไม่ชัดเจนอยู่มาก ดังได้รับการทบทวนวิจัยในงานวิจัย[7] อิเล็กตรอนพลังงานสูงเหล่านี้มีพลังงานมากกว่า 1 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ตรวจวัดได้ในแมกนีโตสเฟียร์/แมกนีโตเทล โดยผลกระทบของอิเล็กตรอนพลังงานสูงต่อระบบอวกาศได้เป็นที่ทราบกันดีจากหลักฐานจากการสังเกตตลอดเวลากว่า 40 ปี การศึกษาชี้ว่าฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงในบริเวณเข็มขัดการแผ่รังสี (radiation belt) ด้านนอกที่เพิ่มขึ้นอนุภาคเหล่านี้สามารถทะลุเข้าสู่กระสวยอวกาศ/ดาวเทียม แล้วทำลายระบบภายใน เช่น ความล้มเหลวในการปฏิบัติการของดาวเทียมสื่อสาร Anik E1 ของประเทศแคนาดา ในปลายเดือนมีนาคม ค.ศ. 1996 อาจเกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงจำนวนมากที่ทะลุผ่านและอัดประจุไดอิเล็กตริก[8] โดยกำเนิดสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูงกว่าศักดาการพังทลายของวัสดุ ทำให้เกิดการคายประจุไฟฟ้าได้ หรือจากความล้มเหลวของกระสวยอวกาศ Galaxy-15 ของ Intelsat ในเดือนเมษายน ค.ศ. 2010

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยและผลกระทบของสภาพแวดล้อมของสภาพอวกาศใกล้โลกและอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่มีต่อความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับดาวเทียมไทยคม-5 โดยการบูรณาการข้อมูลการสังเกตของยานอวกาศใกล้โลกและในวงโคจรค้างฟ้า รวมไปถึงดัชนีทางพายุแม่เหล็กโลก ซึ่งพบว่าข้อมูลที่สังเกตได้มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับความผิดปกติของดาวเทียมไทยคม-5

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ข้อมูลพลาสมาระหว่างดาวเคราะห์

ใช้ข้อมูลรายชั่วโมงของค่าเฉลี่ยพลาสมาในอวกาศระหว่างดาวเคราะห์จากเครื่องมือ MAG และ SWEPAM ของยานอวกาศ Advanced Composition Explorer (ACE) และ OMNIWeb ในพิกัด Geocentric Solar Ecliptic (GSE) ที่ซึ่งแกน *x* ชี้จากโลกไปยังดวงอาทิตย์ แกน *z* ชี้ไปยังขั้วเหนือของระนาบสุริยะวิถี และแกน *y* ชี้ไปยังทิศที่ทำให้ระบบมือขวาสมบูรณ์

ข้อมูลฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูง

ข้อมูลจากยานอวกาศ GOES-13 โดยเครื่องมือตรวจจับพลังงานโปรตอน อิเล็กตรอนและอัลฟาพลังงานสูง (EPEAD): http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/ ของ National Geophysical Data Center (NGDC) และส่วนข้อมูลจากยานอวกาศ ACE ได้จาก เครื่องมือ Electron Proton Alpha Monitor (EPAM) http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2DATA_EPAM.html

ผลการศึกษา

รายละเอียดของความผิดปกติ

จากรายงานของ นายอารักษ์ ชลธาร์นนท์ ผู้จัดการบริษัท Thaicom Public Company Limited ถึงความผิดปกติของดาวเทียมไทยคม-5 สรุปได้ว่า ในวันที่ 21 เมษายน พ.ศ.2554ดาวเทียมไทยคม-5 ประสบกับความผิดปกติเชิงเทคนิคเป็นเวลาชั่วคราว ณ เวลา 16:07 LT (09:07 UT) เมื่อดาวเทียมหยุดการตอบสนองใดๆ กับคำสั่งภาคพื้นดิน ความผิดปกติดังกล่าวไม่ได้ส่งผลต่อระบบต่อดาวเทียมดวงอื่นๆ หน่วยงานได้กู้การทำงานได้ในเวลาประมาณ 18:50 LT และสามารถกลับมาทำงานได้อย่างสมบูรณ์ในเวลา 20:20 LT ดาวเทียมไม่ได้รับความเสียหายแต่อย่างใด อีกทั้งไม่ได้โคจรออกนอกแนวโคจร และทางบริษัทได้สำรองข้อมูลโดยการเชื่อมต่อสัญญาณโทรทัศน์หลักผ่านดาวเทียมไทยคม- 4 (IPSTAR)

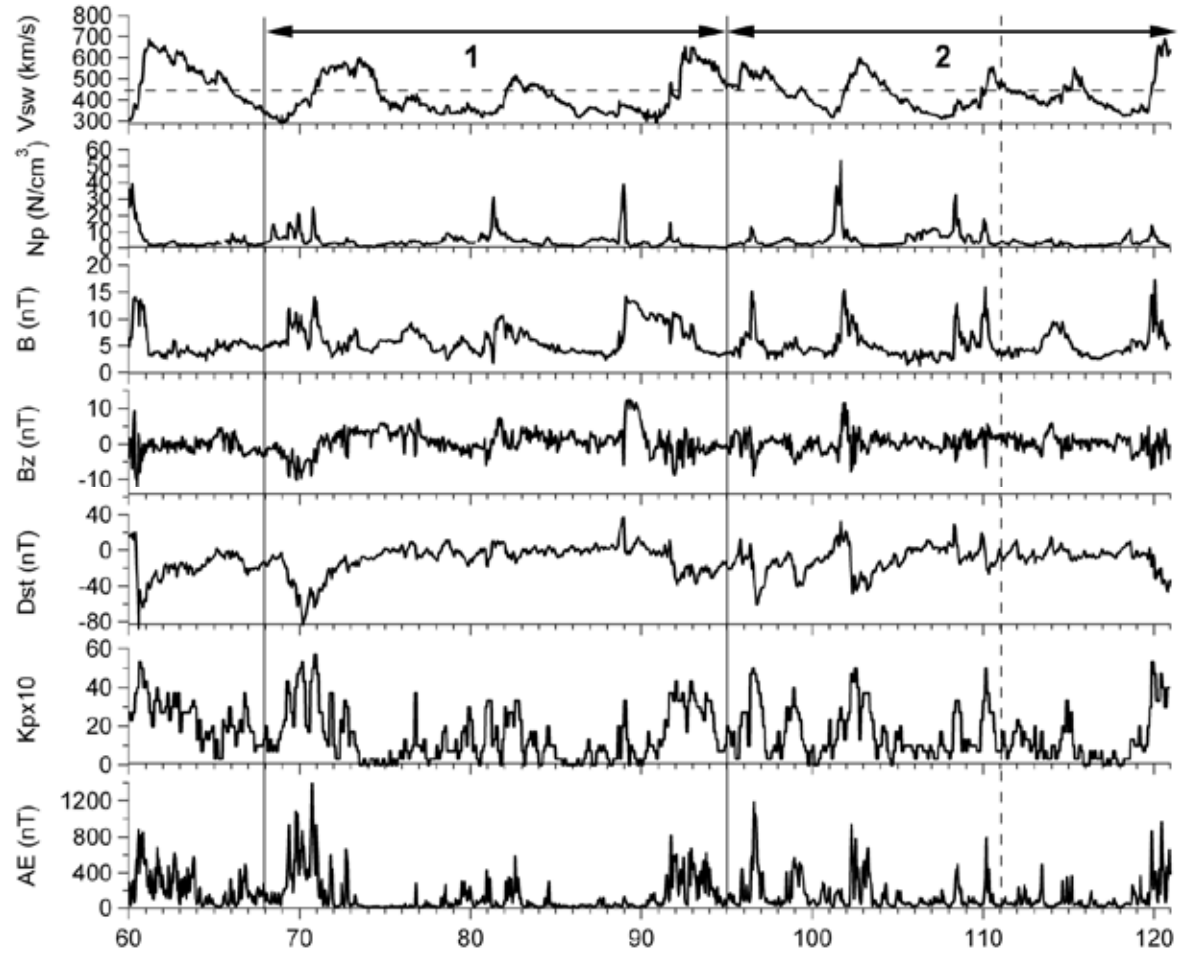

Figure 1 Plasma environments and geomagnetic storm indices during the anomaly of Thaicom-5. Dashed line indicates time of the anomaly. From top to bottom: the solar wind speed (Vsw), solar wind density (N_p), total magnetic field (B), z-component of the magnetic field (Bz), disturbed storm-time (Dst) index, planetary-K (Kp) index, and auroral electrojet (AE).

การแปรผันของตัวแปรพลาสมาของลมสุริยะและดัชนีทางแม่เหล็กโลก

พิจารณาการแปรผันของตัวแปรพลาสมาของลมสุริยะและดัชนีทางแม่เหล็กโลกเพื่อบ่งชี้ถึงสิ่งแวดล้อมสภาพอวกาศโดยแบ่งออกได้เป็นสองช่วงๆ คือช่วงที่ 1 ก่อนเกิดความผิดปกติ ระหว่างวันที่ 68 – 95 ของปี พ.ศ. 2554 แสดงดัง Figure 1 และช่วงที่ 2 ในระหว่างการเกิดความผิดปกติ ระหว่างวันที่ 96 - 121 แสดงดัง Figure 1 พบว่าการแปรผันของตัวแปรดังกล่าวในทั้งสองช่วงเวลา มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน เนื่องจากมีลมสุริยะความเร็วสูง (ความเร็วลมสุริยะมากกว่า 450 km/s) และบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วม (ความหนาแน่นโปรตอนและสนามแม่เหล็กมีค่าสูง) ที่พัดผ่านโลกในลักษณะเวียนซ้ำทุกประมาณ 27 วัน ในบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมพบว่า Bz มีการเปลี่ยนแปลงไปทางลบมากซึ่งแสดงถึงการส่งถ่ายพลังงานเข้าสู่แมกนีโตสเฟียร์ด้วยกระบวนการเชื่อมต่อใหม่ทางแม่เหล็กระหว่างสนามแม่เหล็กโลกกับสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ มีการลดลงของดัชนี Dst index ซึ่งบ่งชี้ถึงการพ่นพลาสมาเข้าหาโลกและการสร้างกระแสวงแหวน (ring current) และการเพิ่มขึ้นของดัชนี Kp บ่งชี้ถึงการรบกวนที่ขยายตัวในสนามแม่เหล็กโลก

ในวันที่มีความผิดปกติตรงกับวันที่ 111 ของปี ค.ศ. 2011 สอดคล้องกับการพัดผ่านของลมสุริยะความเร็วที่ไม่สูงนัก ประมาณ 430 km/s แต่ไม่สอดคล้องกับบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมและการลดลงเพียงเล็กน้อยของดัชนี Dst ซึ่งตรงกับวันที่ 110 โดยเงื่อนไขดังกล่าวอาจไม่มีนัยสำคัญสำหรับอนุภาคพลังงานสูงที่จะถูกผลิตขึ้นได้มากพอเพื่อเข้าสู่แมกนีโตสเฟียร์แล้วทำให้เกิดการอัดประจุในช่วงวันที่ 111ได้

Table 1 Comparison of correlation coefficients before and during the Thaicom-5 anomaly.

Interval no.	Duration (DOY)	Correlation coefficients					
		AE, Kp	AE, Dst	AE, B_z	AE, V_{sw}	Dst, V_{sw}	Kp, V_{sw}
1	71-98	0.77	-0.55	-0.55	0.39	-0.64	0.44
2	99-125	0.77	-0.64	-0.46	0.59	-0.73	0.66

สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรลมสุริยะและดัชนีแม่เหล็กโลกในช่วงเวลาก่อนและระหว่างการเกิดความผิดปกติบนไทยคม-5 แสดงดัง Table 1 เห็นได้ว่า ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ก่อนและหลังเหตุการณ์ความผิดปกติ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่มีแนวโน้มที่สูงกว่าในระหว่างการเกิดความผิดปกติ โดยสหสัมพันธ์ระหว่างดัชนี AE กับ Kp มีค่าสูงที่สุด และหว่างดัชนี Dst กับ V_{sw} มีค่ารองลงมา ทั้งนี้เพราะดัชนี AE บ่งชี้ถึงกระแสอนุภาคบริเวณขั้วโลกซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับดัชนี Kp ที่บ่งชี้ถึงการรบกวนสนามแม่เหล็กหรือแมกนีโตสเฟียร์ของโลกที่กำเนิดกระแสไฟฟ้าบริเวณขั้วโลก ส่วนดัชนี Dst บ่งชี้ถึงระดับการลดลงของสนามแม่เหล็กโลกและปริมาณกระแสวงแหวนที่ไหลวนอยู่รอบโลกซึ่งขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าแบบพาที่แปรผันตรงกับความเร็วลมสุริยะ V_{sw} และสนามแม่เหล็กในแนวแกน z

ดัชนี AE กับ Dst และดัชนี AE กับ Bz มีปฏิสหสัมพันธ์ต่อกันระดับปานกลางเนื่องจากกลไกการเพิ่มขึ้นของกระแสออโรราสอดคล้องกับการลดลงของดัชนี Dst (การเพิ่มขึ้นของกระแสวงแหวน) และ Bz ที่มีทิศไปทางใต้ (ค่าติดลบ) สอดคล้องกับการเชื่อมต่อใหม่ทางแม่เหล็กระหว่างสนามแม่เหล็กโลกกับสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ในทิศ Bz ในด้าน

กลางวันเพื่อส่งถ่ายพลังงานจากลมสุริยะเข้าสู่แมกนีโตสเฟียร์ แล้วทำให้สนามแม่เหล็กโลกถูกรบกวนหลังการปะทะกันนั้น จากนั้นจะเกิดการเชื่อมต่อใหม่ของสนามแม่เหล็กในด้านกลางคืนแล้วผลิตอิเล็กตรอนพลังงานสูงให้เคลื่อนที่ตามเส้นแรงแม่เหล็กโลกเข้าสู่แมกนีโตสเฟียร์ชั้นในด้วยกลการลอยเลื่อนแบบโค้งและเกรเดียนต์ในสนามแม่เหล็ก ส่วนดัชนี AE กับ V_{sw} และ Kp กับ V_{sw} มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำถึงปานกลางเนื่องจากความเร็วลมสุริยะเป็นส่วนหนึ่งของสนามไฟฟ้าแบบพา ($E_y = -VB_z$) ที่ถูกนำเข้าสู่แมกนีโตสเฟียร์และบริเวณขั้วโลกเมื่อบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมและลมสุริยะความเร็วสูงปะทะแมกนีโตสเฟียร์ (magnetosphere) ของโลก ทำให้เกิดพายุแม่เหล็กที่มีกำลังอ่อนถึงปานกลาง[5] ที่บ่งชี้ได้จากค่าดัชนี Dst ที่ลดต่ำลงเล็กน้อย ส่วนบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมถูกก่อตัวอยู่ใกล้แผ่นกระแสเฮลิโอสเฟียร์ (Heliosphere) เสมอ โดยพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูงในบริเวณดังกล่าวทำให้ความดันแรมที่กระทำบนแมกนีโตสเฟียร์มีค่าเพิ่มขึ้น

ฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูง

จากข้อมูลของยาน GOES-13 ตาม Figure 2 หมายเหตุว่า ฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในช่วงวันที่ 61-67 และ 92-96 ในช่วงที่มีลมสุริยะความเร็วสูงพัดผ่านโลกในลักษณะเวียนซ้ำประมาณ 27 วัน (ลมสุริยะความเร็วสูงทั้งสองกลุ่มมีลักษณะคล้ายกันซึ่งกำเนิดจากหลุมคอโรนากลุ่มเดียวกัน) ซึ่งในช่วงนี้ทั้งด้านทิศตะวันตกและทิศตะวันออกของยาน GOES-13 วัดค่าฟลักซ์สูงสุดของอิเล็กตรอนได้มากกว่า 150 x 10^3 e/(cm^2s sr) สำหรับพลังงานมากกว่า 0.8 MeV ซึ่งสอดคล้องกับบริเวณของลมสุริยะความเร็วสูงที่พัดผ่านยาน GOES-13 และพบว่า ดัชนี AE มีค่าสูงต่อเนื่องยาวนานกว่าสองกลุ่มข้างเคียง (พิจารณา Figure 1) จากนั้นได้พบการลดลงของฟลักซ์อิเล็กตรอนประมาณ 3 เท่าในระหว่างวันที่ 99-108 ซึ่งสอดคล้องกับลมสุริยะความเร็วสูงกลุ่มย่อยสองกลุ่ม แล้วฟลักซ์ได้ลดต่ำลงที่สุดในวันที่ 109 และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในวันที่เกิดความผิดปกติ ลักษณะเช่นนี้บ่งชี้ถึงการผลิตอนุภาคพลังงานสูงในลมสุริยะความเร็วสูงภายหลังการผ่านไปของบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วม สังเกตว่า มีการแปรผันประจำวันของฟลักซ์อิเล็กตรอนในทั้งสองกลุ่มพลังงานและมีเฟสที่ตรงกัน

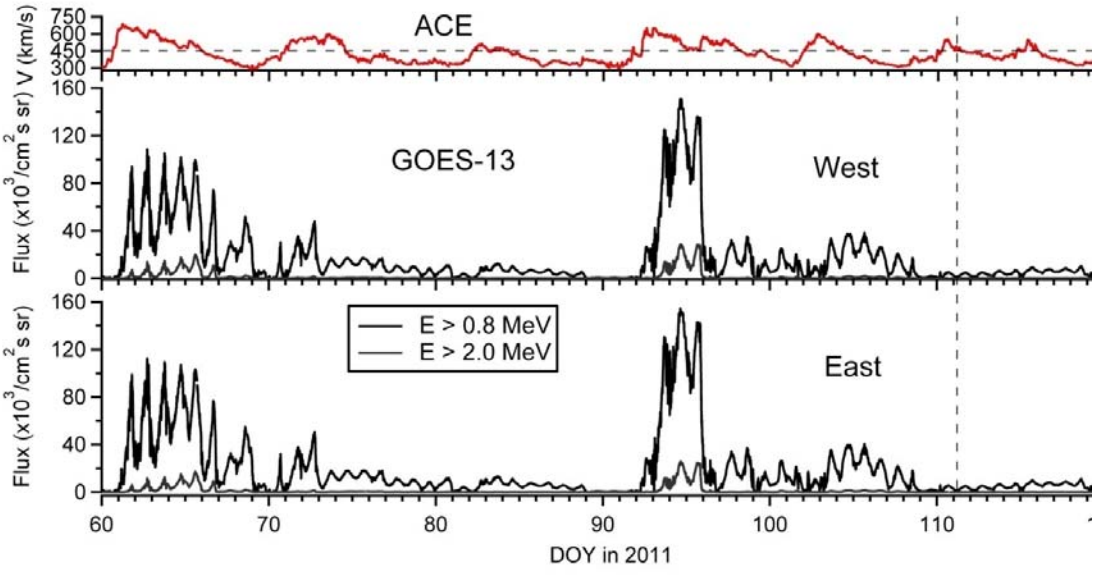

Figure 2 The solar wind speed and energetic electron flux on day of year 60-120 as measured by GOES-13. The horizontal dashed line indicates high speed stream regions where $V \geq$450 km/s.

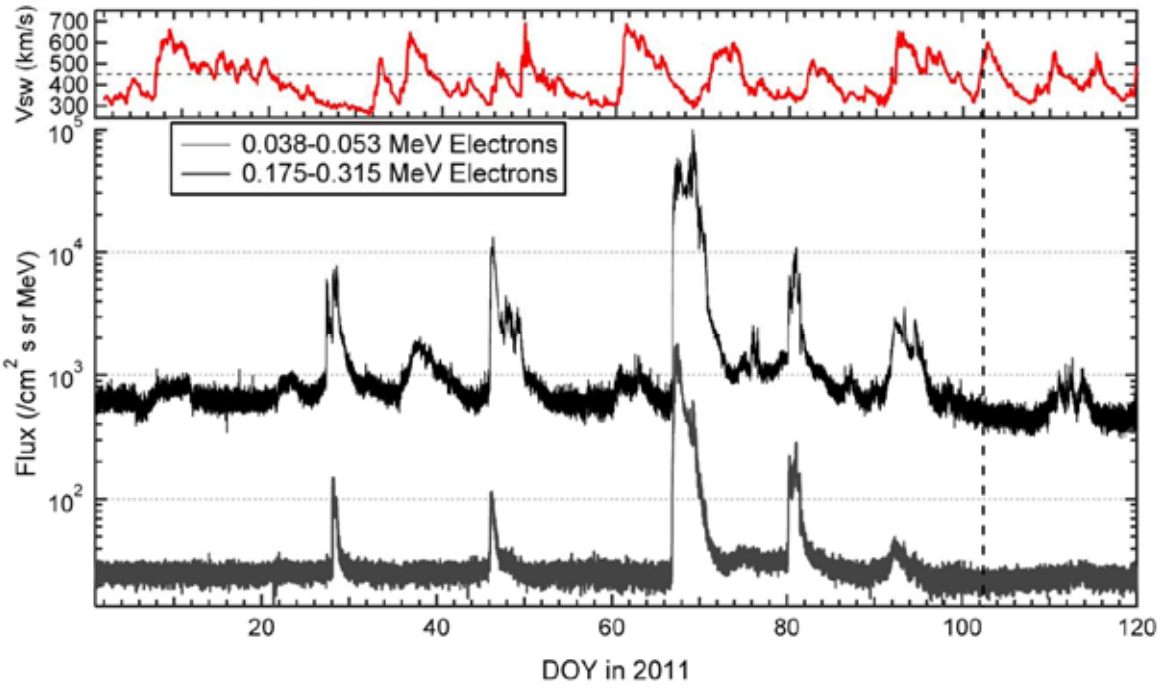

Figure 3 Top panel: the solar wind speed (Vsw). Dashed line indicates high speed solar wind stream region. Bottom panel: energetic electron flux measured by ACE spacecraft in day of year (DOY) 1-120. The vertical line represents the time of the anomaly.

จากกราฟข้อมูลของลมสุริยะความเร็วสูงและฟลักซ์อิเล็กตรอนที่วัดโดยยานอวกาศ ACE ดัง Figure 3 สำหรับอิเล็กตรอนพลังงานต่ำและพลังงานสูง คือ 0.038-0.053 MeV และ 0.175-0.315 MeV ของช่อง E1P และ E4P ตามลำดับ พบว่า อิเล็กตรอนพลังงานต่ำและพลังงานสูงมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือมีการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์หลายช่วงเป็นระยะเวลาประมาณ 1-3 วัน ยกเว้นในช่วงวันที่ 39-41 ที่ไม่พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานต่ำ นอกจากนี้พบว่า ฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงเริ่มเพิ่มขึ้นชัดเจนในวันที่ 23 ของปีแล้วแปรผันหลายรอบไปจนถึงวันที่ 111 ซึ่งเป็นวันที่ดาวเทียมไทยคม-5 ผิดปกติ อย่างไรก็ตามพบว่าตลอดช่วงดังกล่าวนั้นฟลักซ์สูงสุดของทั้งสองช่วงพลังงานมีตำแหน่งใกล้กับช่วงท้ายของลมสุริยะความเร็วสูง และอยู่ที่ช่วงเวลาเดียวกันคือในช่วงวันที่ 68 - 70 และมีระดับ 1.1×10^5 และ 1.2×10^4 /cm^2 s sr ตามลำดับ ส่วนในช่วงวันที่ 92-96 พบการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์เล็กน้อยซึ่งอาจมีความสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงาน 0.8 MeV ที่วัดโดยยาน GOES-13 ณ วงโคจรค้างฟ้า ส่วนในระหว่างวันที่ 111 ที่แสดงความผิดปกติของดาวเทียม จากการวัดโดยยาน ACE กลับไม่พบการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของฟลักซ์ในช่วงพลังงาน 0.175-0.315 MeV เช่นเดียวกันกับที่วัดได้โดย GOES-13 จึงสะท้อนให้เห็นว่า อิเล็กตรอนพลังงานสูงไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในวันที่เกิดความผิดปกติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบเหตุการณ์แฟลร์สุริยะและการปลดปล่อยก้อนมวลคอโรนาในช่วงที่เกิดความผิดปกติ จากฐานข้อมูลยานอวกาศ Hinode และ SOHO ที่ไม่พบแฟลร์สุริยะและการปลดปล่อยก้อนมวลคอโรนาที่รุนแรงดังแสดงใน Figure 4 ในการผลิตฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงในช่วงเวลาระดับชั่วโมงหรือวัน

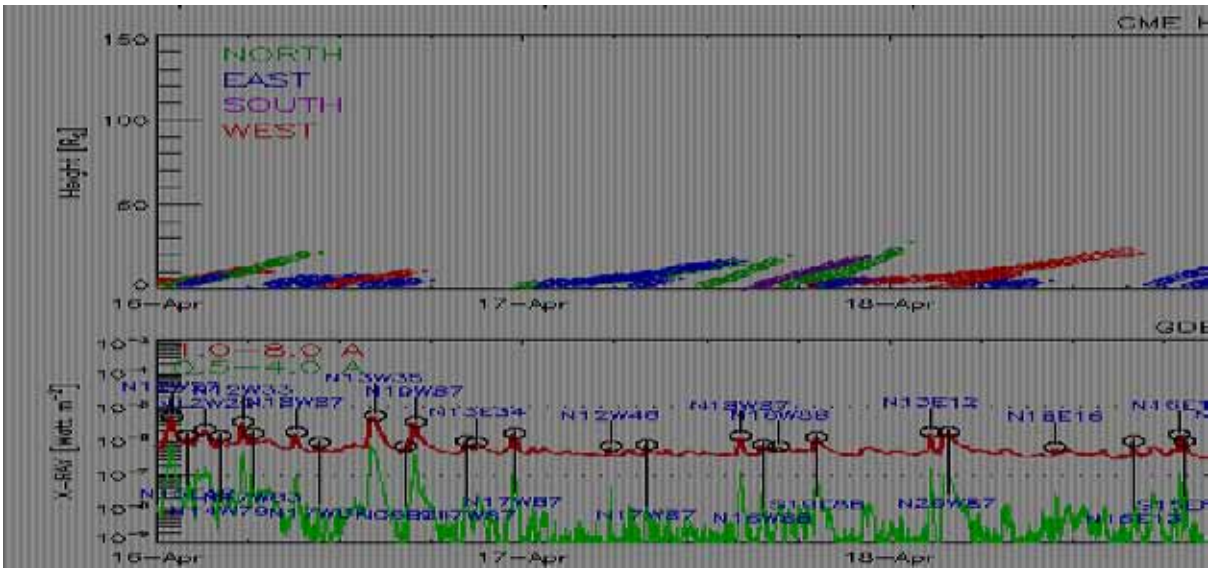

Figure 4 Coronal mass ejection and solar flare events during before the anomaly on 21 April 2011.

Table 2 Total electron flux during 2-21 April 2011 as measured by GOES-13.

Instrument	Energy (MeV)	Total electron flux during 2-21 April 2011 (e/cm^2 s sr)
E1E_COR_FLUX	> 0.8	1.46 x 10^8
E1W_COR_FLUX	> 0.8	1.37 x 10^8
E2E_COR_FLUX	> 2.0	1.07 x 10^7
E2W_COR_FLUX	> 2.0	1.23 x 10^7
E3E_COR_FLUX	> 4.0	8.31 x 10^4
E3W_COR_FLUX	> 4.0	8.27 x 10^4

ความเป็นไปได้ของการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์

จากข้อมูลของฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานที่วัดโดยยาน GOES-13 ณ วงโคจรค้างฟ้า พบว่าตั้งแต่วันที่ 2 - 21 เมษายน พ.ศ. 2554 เป็นช่วงที่พบการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงอย่างชัดเจน โดยมีฟลักซ์อิเล็กตรอนสะสมจำแนกตามพลังงานแสดงดัง Table 2 ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าฟลักซ์อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงจะมีจำนวนฟลักซ์อิเล็กตรอนน้อยกว่าฟลักซ์อิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ โดยเครื่องมือวัดด้านตะวันออกและตกของยานวัดฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงได้ใกล้เคียงกัน โดยฟลักซ์อิเล็กตรอนที่สูงขึ้นอาจเป็นสาเหตุของการอัดประจุบนดาวเทียมในระยะเวลากว่า 20 วัน จนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าของดาวเทียมมีค่าสูงขึ้นมากแล้วเกิดการคายประจุไฟฟ้าอย่างทันที

จากการศึกษาชี้ว่าฟลักซ์ของอนุภาคที่มีพลังงานสูงตั้งแต่ 200 keV (0.2 MeV) ขึ้นไป สามารถสะสมหรือชาร์จประจุที่ตัวยานดาวเทียมแล้วทะลุผ่านเข้าไป (internal charging) ในวัสดุหรืออิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเป็นฉนวน จนเกิดความล้มเหลวในตัวยานได้เมื่อมีปริมาณมากพอ[9] โดยกลไกการทะลุเข้าสู่ภายในขึ้นอยู่กับความสามารถในการสกัดกั้นอนุภาคพลังงานสูง

สภาพการนำทางไฟฟ้าซึ่งถ้าต่ำมาก ประจุอาจค้างอยู่เป็นเวลาหลายเดือนได้[10] ค่าขีดเริ่มของศักดาพังทลายของวัสดุ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซึ่งเมื่อมีค่ามากย่อมสามารถจุประจุไฟฟ้าได้มากขึ้นก่อนเกิดการพังทลาย และขึ้นอยู่กับการมีหรือไม่มีพื้นผิวตัวนำเพราะตัวนำพร้อมที่จะเหนี่ยวนำการคายประจุอย่างมาก

สำหรับระยะเวลาในการอัดประจุนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณฟลักซ์อิเล็กตรอนที่ถูกสะสมในอุปกรณ์หรือพื้นผิวของดาวเทียม ที่จะทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าถึงระดับประมาณ -10 kV ซึ่งจากการสังเกตพบว่า การอัดประจุบนดาวเทียมไทยคม-5 น่าจะใช้เวลาประมาณ 20 วัน และจากการสังเกตการณ์ความขัดข้องของดาวเทียมพบว่า อิเล็กตรอนพลังงานสูงตั้งแต่ 0.2 MeV ควรมีบทบาทต่อการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดจากการทะลุของประจุไฟฟ้าเข้าสู่ตัวดาวเทียม

ความล้มเหลวที่เกิดขึ้นกับยานอวกาศจำนวนมากมีความเป็นไปได้ว่า เกิดจากการทะลุของประจุเข้าสู่ภายในยานที่มีไดอิเล็กตริกอยู่ภายใน อาทิเช่น ยานอวกาศ Anik E-1 ดาวเทียม II และยานอวกาศ NOZOMI Mars ซึ่งตัวอย่างหลังเกิดจากการระดมชนของอนุภาคที่มีประจุในระหว่างเหตุการณ์ปะทุบนดวงอาทิตย์ จากเกณฑ์เชิงการทดลองสำหรับการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์จากการทะลุสู่ภายในก็คือ การสะสมของประจุอิเล็กตรอนจำนวน 10^{10}-10^{11} e/ cm^2 เป็นเวลากว่า 10 ชั่วโมง[11]

อิเล็กตรอนพลังงาน ≥ 0.2 MeV สามารถทะลุสู่ตัวยานและเกิดปรากฏการณ์คายประจุไฟฟ้าซึ่งก่อให้เกิดความขัดข้องของดาวเทียมไทยคม-5 ได้ พบว่า ตลอดเวลา 20 วันมีจำนวนฟลักซ์อิเล็กตรอนในพลังงาน ≥ 0.8 MeV สะสมทั้งหมด 7.30 x 10^8 e/cm^2 s sr ซึ่งสามารถเทียบเป็นจำนวนฟลักซ์อิเล็กตรอนในช่วงพลังงาน ≥ 0.2 MeV (200 keV) ได้โดยการเทียบอัตราส่วนพลังงาน 0.8 MeV ต่อ 2 MeV ซึ่งเท่ากับ 0.4 เท่า เมื่ออ่านข้อมูลจากกราฟพบว่า มีอัตราส่วนฟลักซ์ประมาณ 7 เท่า ดังนั้นเมื่อเทียบอัตราส่วนพลังงาน 0.8 MeV ต่อ 0.2 MeV ได้ 4 เท่า จึงได้จำนวนฟลักซ์ของอิเล็กตรอนพลังงาน 0.2 MeV มีค่าประมาณ 70 เท่าของพลังงาน ≥ 0.8 MeV คือ 70 x 7.30 x 10^8 หรือ 4.9 x 10^{10} e/ cm^2 ซึ่งเป็นปริมาณที่สอดคล้องกับขีดเริ่มการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์ สอดคล้องกับการสังเกตการณ์ที่ใช้เวลาในการอัดประจุประมาณ 20 วัน จึงเป็นไปได้ว่า กระบวนการสะสมประจุสู่ตัวยานจะเป็นกลไกหลักที่ทำให้เกิดความขัดข้องของดาวเทียมไทยคม-5 ในปี พ.ศ. 2554

สำหรับช่วงเวลาที่เกิดความขัดข้องบนดาวเทียมไทยคม-5 นั้นได้เกิดขึ้นในตอนเย็นตามเวลาท้องถิ่นของประเทศไทย สะท้อนให้เห็นว่า ความผิดปกตินี้เป็นผลมาจากการอัดสะสมประจุไฟฟ้ามาเป็นระยะเวลาหนึ่งที่อาจยาวนาน เพราะช่วงเวลาที่ขัดข้องนั้นไม่สอดคล้องกับการอัดประจุหรือการทะลุผ่านของอิเล็กตรอนพลังงานสูงขณะดาวเทียมโคจรอยู่ในเขตเงาหรือเพิ่งออกจากเขตเงาของโลก กล่าวคือโดยทั่วไป ความผิดปกติของดาวเทียมส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการอัดประจุพื้นผิว ณ วงโคจรค้างฟ้า ณ เวลากลางคืนและช่วงเช้าตรู่[12,13,14] ซึ่งตรงกันกับบริเวณที่น่าจะเป็นสูงสุดสำหรับการพ่นอนุภาคในระยะพายุย่อยและการลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนเข้าสู่ด้านเช้าภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าแมกนีโตสเฟียร์

มีกลไกที่เกี่ยวข้องกับการเร่งและเพิ่มอิเล็กตรอนพลังงานสูงเหล่านี้คือ การเร่งในบริเวณคลื่นอัลเวงของลมสุริยะความเร็วสูง และการปั๊มป์ทางแม่เหล็กที่ส่วนหางแมกนีโตพอสในการผลิตอิเล็กตรอนพลังงานสูงในเวลาที่ยาวนาน ดังนั้นจึงต้องมีการสะสมอิเล็กตรอนสัมพันธภาพ (พลังงานสูง) ในแมกนีโตสเฟียร์ด้านนอกซึ่งสอดคล้องกับการสังเกตการณ์ในช่วงเดือนเมษายน 2011 ที่มีการสะสมของฟลักซ์เป็นเวลากว่า 20 วัน

การก่อตัวของกระแสวงแหวน (สังเกตจากค่าดัชนี Dst) นำไปสู่การลดลงของฟลักซ์อิเล็กตรอนที่ถูกดักจับอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เบตาตรอน แต่

สนามไฟฟ้าการพาที่เป็นสาเหตุของการเพิ่มกระแสวงแหวนกลับเพิ่มอัตราการให้พลังงานกับอิเล็กตรอนโดยกระบวนการเรโซแนนซ์ดริฟต์ ดังนั้นกลไกทั้งสองจึงควรหักล้างกัน การเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนพลังงานสูงเกิดขึ้นในช่วงฟื้นตัวของพายุย่อยที่ยาวนาน (บ่งชี้โดยดัชนี Kp) ซึ่งในช่วงที่พบฟลักซ์อิเล็กตรอนมากนั้นเกิดในช่วงที่ดัชนี Kp เพิ่มขึ้นเป็นเวลานาน โดยดัชนี Kp มีความสัมพันธ์กับขนาดของแมกนีโตสเฟียร์ (ภายในไม่กี่เท่าของรัศมีโลก)

ลมสุริยะความเร็วสูงมีความเกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิดกับการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูง [15-18] ซึ่งอาจมีที่มาจากผลของการไหลของลมสุริยะความเร็วสูงไปตามขอบเขตภายนอกของแมกนีโตพอสซึ่งกระตุ้นคลื่น ULF ผ่านอันตรกิริยาแบบ Kelvin-Helmholz–type เมื่อคลื่น ULF เดินทางเข้าสู่แมกนีโตสเฟียร์และขับให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการฟุ้งในแนวรัศมีเข้าสู่โลก จึงเกิดการเร่งอิเล็กตรอนขึ้น หรือมีที่มาจากการแกว่งของคลื่นอัลเวงในลมสุริยะความเร็วสูงที่ขับดันพายุย่อยขึ้น

เป็นเรื่องสำคัญที่กล่าวว่า แม้บางครั้งการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์จะไม่เกิดขึ้นในระหว่างพายุหลัก แต่ค่าคงที่เวลาสำหรับประจุในการสลายตัวอาจยาวนานระดับปี ขึ้นอยู่กับวัสดุไดอิเล็กตริกนั้นๆ [19,20] และดังนั้นกระสวยอวกาศจึงอาจตอบรับกับการเปลี่ยนแปลงย่อยของสภาพอวกาศในระยะที่เวลานาน

วิจารณ์และสรุปผล

จากการศึกษาผลกระทบของอิเล็กตรอนพลังงานสูงและสิ่งแวดล้อมทางสภาพอวกาศ ที่มีผลต่อความผิดปกติของดาวเทียมไทยคม-5 ในวันที่ 21 เมษายน พ.ศ. 2554 เวลา 15.00 LT สิ้นสุดที่เวลา 18.50 LT และใช้งานได้ตามปรกติเวลา 20.20 LT โดยวิเคราะห์ข้อมูลของตัวแปรพลาสมาและดัชนีทางแม่เหล็กโลก ข้อมูลฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงจากดาวเทียม GOES-13 และยาน ACE ข้อมูลการเกิดปรากฏการณ์แฟลร์สุริยะและการปลดปล่อยก้อนมวลโคโรนา และการวิเคราะห์ข้อมูลตำแหน่งของดาวเทียม GOES-13 และดาวเทียมไทยคม-5 พบว่า ความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับดาวเทียมไทยคม-5 มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับสภาพอวกาศของพายุแม่เหล็กโลกที่เวียนซ้ำทุก 27 วัน (ตามคาบการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์) ที่เกี่ยวข้องกับการปะทะของบริเวณอันตรกิริยาหมุนร่วมและลมสุริยะความเร็วสูงกับแมกนีโตสเฟียร์ของโลก โดยพบว่า ค่าสหสัมพันธ์ของข้อมูลพลาสมาและดัชนีแม่เหล็กโลกในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในช่วงก่อนและในระหว่างความขัดข้องของไทยคม-5 มีสหสัมพันธ์ต่อกันในระดับสูงระหว่าง 1) ดัชนี AE กับ Kp และ 2) ดัชนี Dst กับ V_{sw} และสหสัมพันธ์ในระดับปานกลางระหว่าง 1) ดัชนี AE กับ Dst 2) ดัชนี AE กับ Bz 3) ดัชนี AE กับ V_{sw} และ 4) Kp กับ V_{sw} ซึ่งบ่งชี้ว่าตัวแปรพลาสมาและดัชนีทางแม่เหล็กดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกันกับการส่งถ่ายพลังงานจากลมสุริยะเข้าสู่แมกนีโตสเฟียร์โดยกระบวนการเชื่อมต่อใหม่ทางแม่เหล็ก และกระแสวงแหวนที่เกิดจากการพ่นอนุภาคพลังงานสูง (> 0.2 MeV) อย่างต่อเนื่องจากส่วนหางแมกนีโตพอสเข้าสู่โลกในระหว่างการพัดผ่านของลมสุริยะความเร็วสูงจากหลุมคอโรนา

จากวิเคราะห์ข้อมูลของฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงที่วัดจากดาวเทียม GOES-13 และยาน ACE โดยทั่วไปพบว่า ฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงที่วัดโดยยาน ACE ซึ่งอยู่ด้านหน้าของโลก (เทียบกับดวงอาทิตย์) มีปริมาณน้อยกว่าฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงที่วัดโดยดาวเทียม GOES-13 ที่อยู่ภายในแมกนีโตสเฟียร์ของโลก และพบว่าฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงเวลาเดียวกันกับที่ลมสุริยะความเร็วสูงพัดผ่านโลกในช่วงวันที่ 2 – 7 เมษายน พ.ศ. 2554 (DOY ที่ 92-97) จึงสะท้อนให้เห็นว่า ดาวเทียม GOES-13 ได้ตรวจวัดฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงที่เพิ่มขึ้นอันเกิดจากการเร่งอิเล็กตรอน

ภายในแมกนีโตสเฟียร์โดยลมสุริยะความเร็วสูง และในช่วงเวลาเดียวกัน จากข้อมูลของยานอวกาศ ACE ไม่พบการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานมากกว่า 0.2 MeV อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการไม่พบเหตุการณ์แฟร์สุริยะและการปลดปล่อยก้อนมวลคอโรนาขนาดใหญ่ที่ผลิตอนุภาคพลังงานสูงจำนวนมากในช่วงเวลาที่ผิดปกติของดาวเทียม

การพ่นพลาสมาด้านกลางคืนเข้าสู่แมกนีโตสเฟียร์ด้านในและวงโคจรของดาวเทียมค้างฟ้า (บริเวณเข็มขัดแวนอัลเลนด้านนอก) ด้วยกระบวนการเชื่อมต่อใหม่ทางแม่เหล็กที่ส่วนหางแมกนีโตพอส ส่งผลให้มีอิเล็กตรอนพลังงานสูงเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อดาวเทียมไทยคม-5 โคจรเข้าสู่ด้านกลางคืนของเวลาท้องถิ่นย่อมถูกระดมชนจากอิเล็กตรอนในลมสุริยะความเร็วสูง ทำให้เกิดการอัดหรือสะสมอิเล็กตรอนพลังงานสูงบนดาวเทียม และจากการสังเกตปริมาณฟลักซ์อิเล็กตรอนพลังงานสูงในช่วงพลังงานมากกว่า 0.8 MeV โดย GOES-13 ในระยะเวลาประมาณ 20 วันนั้น มีปริมาณมากพอที่จะทำให้เกิดการคายประจุไฟฟ้าสถิตในดาวเทียมไทยคม-5 ขึ้น

อิเล็กตรอนพลังงานสูงในเรือน MeV ในเข็มขัดแวนอัลเลน ส่งผลต่อความเสี่ยงจากการอัดประจุภายในดาวเทียม[21,22,13] เมื่ออิเล็กตรอนเหล่านี้ทะลุผ่านผิวนอกของตัวยานจะเกิดการสะสมในวัสดุชั้นฉนวนอาทิเช่น สายไฟและตัวนำที่ไม่กราวนด์ และทำให้เกิดการอัดประจุด้านในซึ่งศักดาไฟฟ้าสูงเกินกว่าสนามการพังทลายของฉนวน เกิดเป็นการคายประจุไฟฟ้าสถิตย์ เป็นความเสียหายถาวร ความล้มเหลว คำสั่งปลอม ไม่สามารถควบคุมยานหรือดาวเทียมได้[23] จากการวิจัยแสดงให้เห็นถึงสหสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญเชิงสถิติระหว่างความผิดปกติของดาวเทียมกับผลของอิเล็กตรอนรายวันที่เพิ่มขึ้นในเรือน MeV ณ วงโคจรค้างฟ้า[24]

จากการวิเคราะห์เชิงสถิติพบว่า ความผิดปกตินั้นเกิดจากการสะสมของประจุภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่อิเล็กตรอนพลังงานสูง >2 MeV และเมื่อผลของอิเล็กตรอน (electron fluence) เกินกว่า 10^9 cm^{-2} sr^{-1} ในระหว่างช่วงเวลา 2 วัน[25,23] ส่วนการอัดประจุภายในต้องใช้เวลาระยะหนึ่งเพื่ออัดประจุให้ถึงระดับที่อันตราย และเป็นที่น่าสังเกตว่า ความไม่ปกติที่เกิดขึ้นกับดาวเทียมไทยคม-5 และกาแล็กซี-15 ได้เกิดขึ้นในเดือนเมษายนซึ่งเป็นช่วงเวลาเวอร์นัลอีควินอกซ์ (vernal equinox) ที่ดาวเทียมค้างฟ้าถูกโลกบดบังอยู่ทุกวัน และความผิดปกติของดาวเทียมจำนวนมากมักเกิดขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าวเช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ ที่สนับสนุนทุนวิจัย ข้อมูลลมสุริยะจาก Omniweb ขององค์การนาซา ข้อมูลฟลักซ์อิเล็กตรอนจากยานอวกาศ ACE และ GOES-13 แคตาลอก CME catalog จาก SOHO

เอกสารอ้างอิง

1. Krieger AS, Timothy AF, & Roelof EC. A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream. Solar Phys 1973;29: 505-525.
2. Yeeram T, Ruffolo D, Sáiz A, Kamyan N, Nutaro T. Corotating Solar Wind Structures and Recurrent Trains of Enhanced Diurnal Variation in Galactic Cosmic Rays. ApJ 2014; 184:136Y.
3. Balogh A, Gosling JT, Jokipii JR, Kallenbach R, Kunow H. (Eds.) Corotating interaction regions. Space Sci Rev 1999;89:141-411.
4. Sheeley NR Jr, Harvey JW, Feldman WC. Coronal holes, solar wind streams, and recurrent geomagnetic disturbances - 1973-1976. Solar Phys 1976;49:271.

5. Tsurutani BT, Gonzalez WD. The efficiency of 'viscous interaction' between the solar wind and the magnetosphere during intense northward IMF events, GeoRL 1995;22:663.
6. Koons, HC, and Fennell JF. Space weather effects on communications satellites. URSI 2006;316.
7. Tsurutani BT, Gonzalez WD, Gonzalez ALC, Guarnieri FL. et al. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review. JGR 2006*;* 111.
8. Baker DN, Li X, Turner N, Allen JH, Bargatze LF, Blake JB, Sheldon R B, Spence HE, Belian R D, Reeves GD, and 8 coauthors. Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTP coordinated measurements. JGR 1997;102:14141-14148.
9. Ferguson DC, Denig WF, Rodriguez JV. Plasma conditions during the Galaxy 15 anomaly and the possibility of ESD from subsurface charging, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting 2011.
10. Ferguson DC, Schneider TA, and Vaughn JA. Effects of cryogenic temperatures on spacecraft internal dielectric discharges. in Proceedings of the 1st International Conference on Space Technology, August 24-26. 2009.
11. NASA-HDBK-4002, Avoiding Problems Caused By Spacecraft On-Orbit Internal Charging Effects Garrett, HB and Whittlesey A. (2000), Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference 1999:AFRL-VS-TR-20001578.
12. Fennell JF, Koons HC, Roeder JL, and Blake JB. Spacecraft Charging: Observations and Relationship to Satellite Anomalies, in Proceedings of 7th Spacecraft Charging Technology Conference 2001;476:279–285.
13. Gubby R, and Evans J. Space Environment effects and satellite design J Atmos Solar Terr Phys 2002;64:1723–1733.
14. O'Brien TP. SEAES-GEO: A spacecraft environmental anomalies expert system for geosynchronous orbit. Space Weather 2009; 7:S09003.
15. Paulikas G, and Blake JB. Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: Energetic electrons at the synchronous orbit, in Quantitative Modeling of Magnetospheric Processes. Geophys Monogr Ser, 1979;21:21.
16. Baker D N., Blake JB, Klebesadel RW, & Higbie PR. Highly relativistic electrons in the Earth's outer magnetosphere: 1. Life-times and temporal history 1979-1984. JGR 1986; 91: 4265.
17. Iles RHA, Fazakerley AN, Johnstone AD, Meredith NP, and Bühler P. The relativistic electron response in the outer radiation belt during magnetic storms. Ann Geophys 2002; 20:957–965.
18. Miyoshi YS, Jordanova VK, Morioka A, and Evans DS. Solar cycle variations of the electron radiation belts: Observations and radial diffusion simulation. Space Weather 2004;2:S10S02.
19. Bodeau M. High energy electron climatology that supports deep charging risk assessment in GEO, in 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting 2010.

20. Fennell JF, et al. Charge deposition behind known shielding in a highly inclined orbit. 11th Spacecraft Charging Technology Conference, Albuquerque, NM, Sept 2010.
21. Frederickson AR. Upsets related to spacecraft charging. IEEE Trans. Nucl Sci 1996;43(2): 426–441.
22. Wrenn GL. Conclusive Evidence for Internal Dielectric Charging Anomalies on Geosynchronous Communications Spacecraft, J. Spacecraft and Rockets 1995;32:514–520.
23. Wrenn GL, Rodgers DJ, and Ryden KA. A solar cycle of spacecraft anomalies due to internal charging, Ann Geophys 2002;20:953–956.
24. Iucci N. et al. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits, Space Weather 2005;3:S01001.
25. Wrenn GL, and Smith RJK. The ESD threat to GEO satellites: Empirical models for observed effects due to both surface and internal charging, ESA symposium proceedings on 'Environment Modelling for space-based Application 1996;SP-392:121.