



เอกสารประกอบการบรรยาย
วิชา
สภาพอากาศในอวกาศ
(Space Weather)

หลักสูตรเจ้าหน้าที่ข่าวอากาศขั้นพื้นฐาน รุ่นที่ ๔
กองข่าวอากาศ
กองบัญชาการควบคุมการปฏิบัติทางอากาศ

สภาพอากาศในอวกาศ (Space Weather)

1. บทนำ

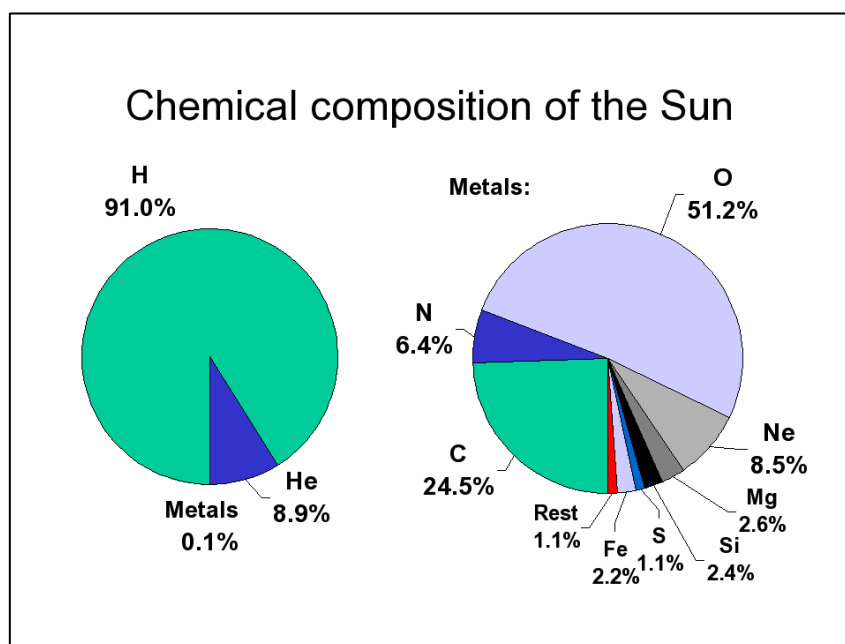
ถึงแม้นิยามหรือความหมายของสภาพอากาศในอวกาศจะมีความหลากหลาย คำว่า อวกาศ (Space) อาจนิยามได้อย่างกว้าง ๆ คือขอบเขตที่อยู่เหนือบรรยากาศระดับต่ำของโลกซึ่งเป็นบริเวณที่วัตถุ (เช่นดาวเทียม) สามารถคงอยู่และโคจรรอบโลกได้ (ถึงแม้ว่าจะช่วงระยะเวลาหนึ่งก็ตาม) โดยเริ่มต้นที่ความสูงประมาณ 100 กิโลเมตร สภาพอากาศในอวกาศอธิบายถึงปรากฏการณ์ในอวกาศที่ส่งผลกระทบต่อโลก เช่น บรรยากาศของโลก และระบบเทคโนโลยีในปัจจุบันที่ปฏิบัติการอยู่บนพื้นโลกหรือรอบ ๆ โลกของเรา

สภาพอากาศในอวกาศเป็นผลจากกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์และสิ่งเหล่านั้นมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กโลกและบรรยากาศของโลก สภาพอากาศในอวกาศส่งผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ อย่างมากมาย อาทิเช่น การติดต่อสื่อสาร เรดาร์ ระบบนำทาง (Navigation) ระบบอิเล็กทรอนิกส์ ระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Power grids) ยานอวกาศ อากาศยาน แม้กระทั่งร่างกายของมนุษย์ ผลกระทบต่อระบบเหล่านี้เกิดขึ้นได้ทั้งในวงโคจร ในบรรยากาศ พื้นผิวโลกหรือแม้กระทั่งใต้พื้นผิวโลก

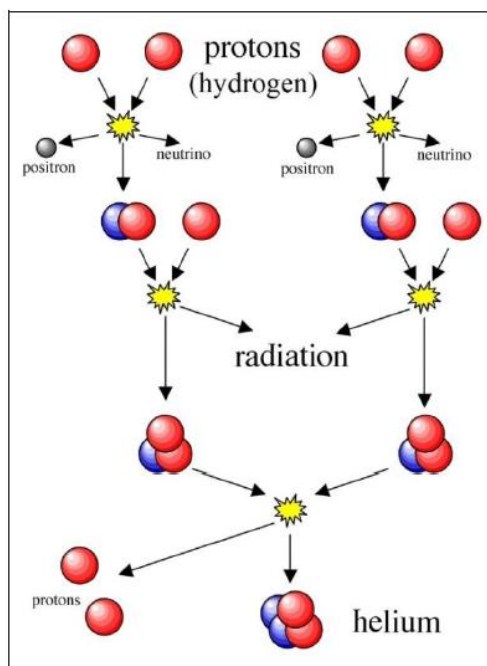
2. ขอบเขตของสภาพอากาศในอวกาศ (Region of Space Weather)

ขอบเขตของสภาพอากาศในอวกาศแบ่งออกเป็นพื้นที่เฉพาะได้หลายพื้นที่ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของแรงต่าง ๆ ในบริเวณนั้น เช่นพื้นที่บริเวณดวงอาทิตย์ บริเวณสื่อ(medium) ในการส่งผ่านระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ พื้นที่ในปริมาตรของสนามแม่เหล็กโลก บริเวณบรรยากาศระดับบนของโลก (เหนือระดับความสูง 50 กิโลเมตร) และบรรยากาศระดับต่ำของโลก (ในย่านปฏิบัติการด้านการบินของอากาศยาน)

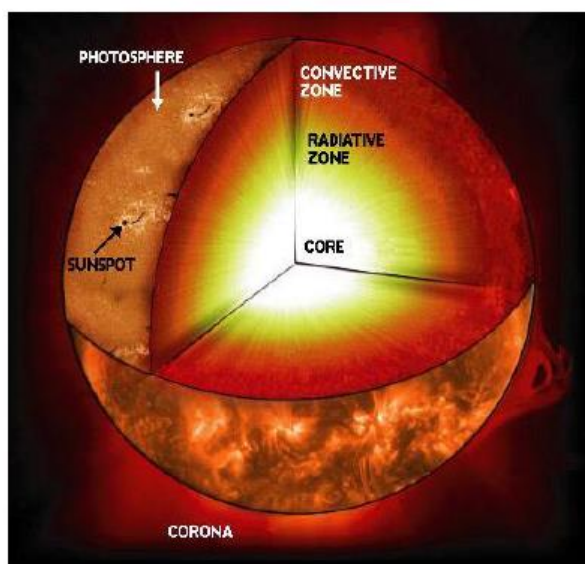
2.1 ดวงอาทิตย์ (The Sun) ต้นกำเนิดของปรากฏการณ์สภาพอากาศในอวกาศที่เกิดขึ้นในสภาวะแวดล้อมของโลกส่วนใหญ่มาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นดาวฤกษ์ที่อยู่ใกล้โลกมากที่สุด ดวงอาทิตย์มีขนาดใหญ่เป็นล้านเท่าของขนาดของโลกและมีมวลมากกว่าสามแสนเท่า สามในสี่ส่วนของดวงอาทิตย์ประกอบไปด้วยแก๊สไฮโดรเจน ส่วนที่เหลือจะเป็นฮีเลียมและธาตุหนักอื่น ๆ อีกเล็กน้อย เช่น ออกซิเจน คาร์บอน ธาตุเหล็ก นีออน ไนโตรเจน ซิลิคอน แมกนีเซียม ซัลเฟอร์ และแคลเซียม



บริเวณแกนกลาง (Core) ของดวงอาทิตย์ ความดันและอุณหภูมิที่สูงมากเนื่องจากแรงดึงดูดทำให้ไฮโดรเจนแตกตัวและรวมตัวกันใหม่เป็นฮีเลียม เรียกว่าปฏิกิริยานิวเคลียร์ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงของดวงอาทิตย์ จัดได้ว่าเป็นการเปลี่ยนมวลมากกว่าสี่ล้านล้านตันเป็นพลังงานรังสีทุกวินาที (รูปที่ 1) จากการกระทำซ้ำของการดูดซับและการแผ่รังสี ทำยที่สุดพลังงานรังสีก็จะส่งออกไปโดยผ่านเขตการแผ่รังสี (radiative zone) ต่อจากนั้นความร้อนจะเป็นตัวขับเคลื่อนให้เกิดการคลุกเคล้ากันในเขตของการพา (Convective Zone) พลังงานจะถูกส่งออกมาที่พื้นผิวของดวงอาทิตย์ (solar surface) ซึ่งเป็นบริเวณที่พลังงานความร้อนและแสงถูกปล่อยออกสู่อวกาศเราสังเกตเห็นได้ที่ชั้นโฟโตสเฟียร์ (รูปที่ 2)

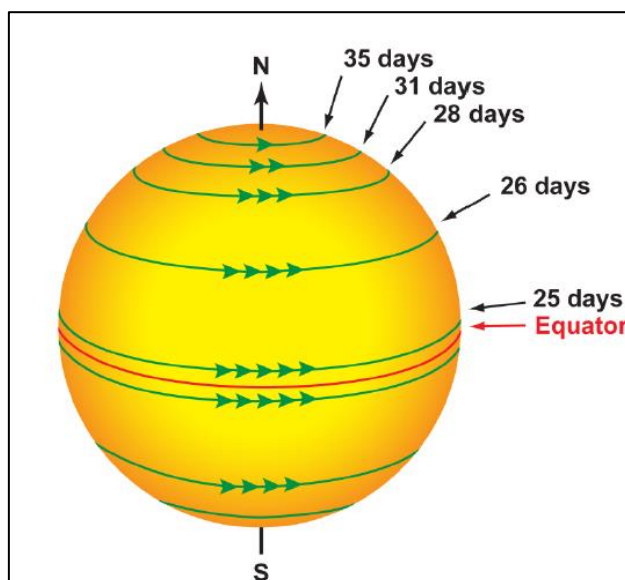


รูปที่ 1 ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันบริเวณแกนของดวงอาทิตย์



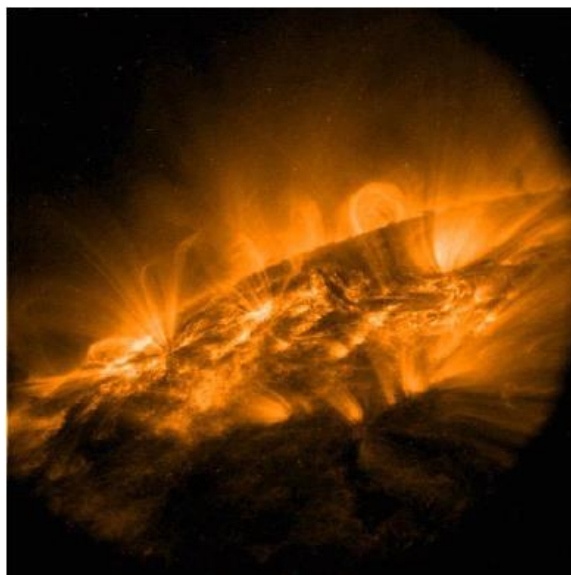
รูปที่ 2 โครงสร้างของดวงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์มีการหมุนรอบแกนเช่นเดียวกับโลก ขณะที่โลกหมุนรอบแกนหนึ่งรอบใช้เวลา 24 ชั่วโมง ดวงอาทิตย์ใช้เวลาประมาณหนึ่งเดือนต่อการหมุนรอบแกนหนึ่งรอบ ทั้งนี้เนื่องจากดวงอาทิตย์ไม่มีสถานะเป็นของแข็งเช่นเดียวกับโลก แต่ประกอบด้วยกลุ่มแก๊ส ดังนั้นอัตราการหมุนจึงแตกต่างกัน บริเวณเส้นศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์จะหมุนรอบแกนด้วยอัตราเร็ว 25 วันต่อรอบ ส่วนบริเวณขั้วของดวงอาทิตย์ (Solar Pole) จะใช้เวลาประมาณ 35 วันต่อรอบ (รูปที่ 3)

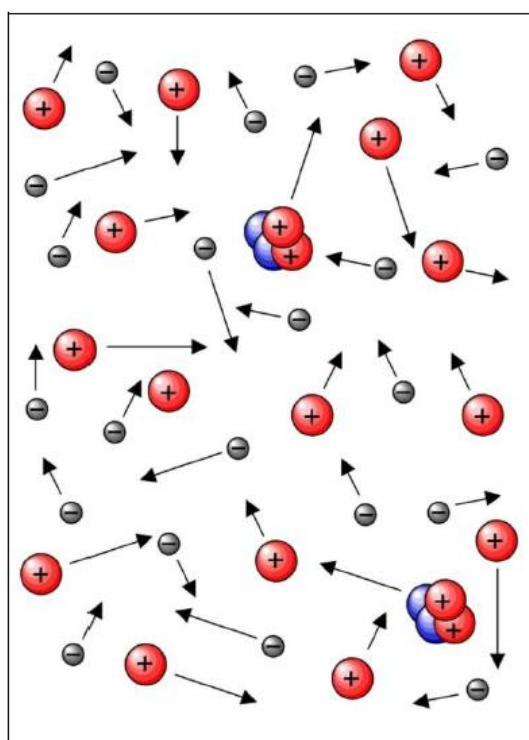


รูปที่ 3 การหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์

ข้อแตกต่างกับโลกคือ สนามแม่เหล็กโลกมีรูปแบบค่อนข้างแน่นอน แต่สนามแม่เหล็กของดวงอาทิตย์จะถูกสร้างขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีการจัดเรียงสนามแม่เหล็กขึ้นใหม่ที่มีโครงสร้างซับซ้อน การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างต่าง ๆ เหล่านี้จะดักจับสสารของดวงอาทิตย์ (Solar material) ที่อยู่เหนือชั้นโฟโตสเฟียร์ในบริเวณที่เรียกว่า โคโรนาของดวงอาทิตย์ (Solar corona) ในรูปภาพที่ 4 แสดงการหมุนวน (Looping) ของสนามแม่เหล็กเหนือชั้นโฟโตสเฟียร์ ซึ่งจะปรากฏเป็นริ้วๆ ในชั้นโคโรนา ในภาพแสดงบริเวณรังสีอัลตราไวโอเล็ตพลังงานสูงที่ปรากฏในชั้นโฟโตสเฟียร์ ส่วนบริเวณพื้นที่สีดำที่อยู่บริเวณตอนล่างของโคโรนาคือบริเวณที่ไม่มีการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ตพลังงานสูงหรือเอ็กซ์เรย์ ในโคโรนาอะตอมที่กระจายตัวกันอย่างเบาบางจะถูกทำให้ร้อนขึ้นและมีการแตกตัวออก (Ionized) กล่าวคือ อิเล็กตรอนตั้งแต่หนึ่งตัวหรือมากกว่าที่แยกตัวออกมาจากอะตอมเหลือไว้เฉพาะไอออนที่เป็นบวก เนื่องจากอะตอมของไฮโดรเจนประกอบด้วยอนุภาคโปรตอนที่เป็นประจุบวก ล้อมรอบด้วยอิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบ ดังนั้นไอออนของไฮโดรเจนคือโปรตอน (นิวเคลียสของอะตอมไฮโดรเจน) ส่วนอะตอมของฮีเลียมประกอบโปรตรอนสองตัว นิวตรอนสองตัวและล้อมรอบด้วยอิเล็กตรอนสองตัว ไอออนฮีเลียมแบ่งออกได้สองชนิด โดยที่ชนิดแรกเป็นอิเล็กตรอนเพียงตัวเดียวที่หลุดออกมาและชนิดที่สองอิเล็กตรอนทั้งสองหลุดออกมาเหลือไว้เฉพาะนิวเคลียสของฮีเลียม ซึ่งนิวเคลียสของฮีเลียมบางครั้งเรียกว่าอนุภาคอัลฟา (Alpha particle) บริเวณที่มีการรวมตัวกันอย่างหนาแน่นของไอออนประจุบวกและอิเล็กตรอนประจุลบเรียกว่า พลาสมา (Plasma) ซึ่งจัดเป็นสถานะที่สี่ของสสาร (ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส จัดเป็นสามสถานะแรกของสสาร) ต่างจากสถานะของแก๊สตรงที่พลาสมาสามารถกลายสภาพเป็นแม่เหล็กและเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ดี



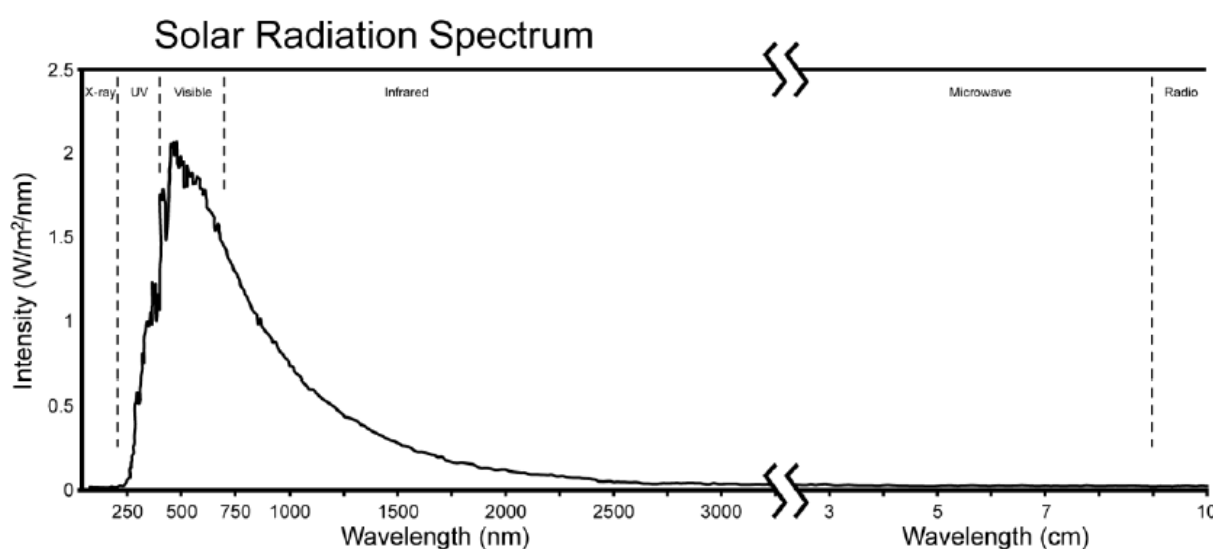
รูปที่ 4 สunamiแม่เหล็กสุริยะดักจับสารของดวงอาทิตย์ในชั้นโคโรนา



รูปที่ 5 พลาสมาสุริยะ (นิวเคลียสไฮโดรเจน(โปรตรอน), นิวเคลียสฮีเลียม(อนุภาคอัลฟา) และอิเล็กตรอนอิสระ

รูปที่ 5 แสดงไอออนของไฮโดรเจน (โปรตรอน) และอนุภาคของฮีเลียม ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของพลาสมาในโคโรนา ส่วนลูกศรแสดงการเคลื่อนที่อย่างอิสระของอิเล็กตรอน (ประจุลบ) และไอออน (ประจุบวก)

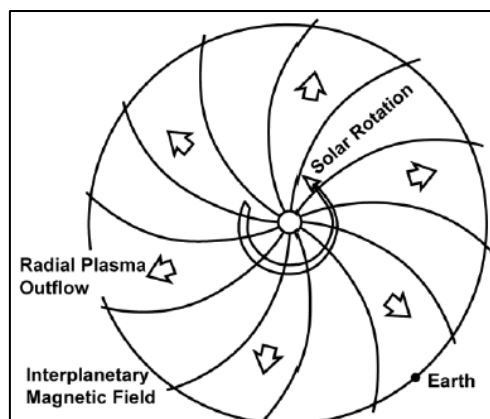
เนื่องจากความร้อนของพลาสมาในโคโรนาจึงแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ต เอ็กซ์เรย์ และเนื่องจากความหนาแน่นต่ำจึงแผ่รังสีในช่วงคลื่นไมโครเวฟและช่วงคลื่นวิทยุได้อีกด้วย การแผ่รังสีของโคโรนาเป็นผลทำให้เกิดแสงและความร้อนออกไปจากชั้นโฟโตสเฟียร์ ในรูปที่ 6 พบว่า 99% ของพลังงานของดวงอาทิตย์คือพลังงานแสงและความร้อน (รังสีอินฟราเรด) และรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากชั้นโฟโตสเฟียร์ ส่วนที่เหลือ 1% มาเป็นคลื่นวิทยุ คลื่นไมโครเวฟและรังสีอัลตราไวโอเล็ตพลังงานสูง (Extreme Ultraviolet Radiation) และเอ็กซ์เรย์ ซึ่งได้จากโคโรนา อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการแผ่รังสีที่มาจากโคโรนาจะเป็นสัดส่วนเพียงเล็กน้อยของพลังงานรวมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์ก็ตาม แต่ผลปรากฏว่ารังสีเอ็กซ์เรย์และคลื่นวิทยุมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบเทคโนโลยีที่บนพื้นโลกหรือตามแนวโคจรรอบโลก นอกจากนั้นการแผ่รังสีในช่วงคลื่นเหล่านี้แปรเปลี่ยนอย่างมากในขณะที่มีกิจกรรมต่าง ๆ เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ โดยที่แสงและความร้อนของดวงอาทิตย์จะคงที่อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 6 แสดงแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของดวงอาทิตย์

2.2 สื่อกลางระหว่างดวงดาว (The interplanetary medium)

พลาสมาที่มีอุณหภูมิสูงในโคโรนาหลุดออกจากดวงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องก่อให้เกิดแนวแคบๆของการไหลของอนุภาคประจุ (อิเล็กตรอน โปรตรอน และอนุภาคอัลฟา) เราเรียกว่า ลมสุริยะ (Solar wind) ซึ่งจะเคลื่อนที่ไปในสนามแม่เหล็กสุริยะ (Solar magnetic field) ลมสุริยะไหลออกเป็นวงรัศมีจากดวงอาทิตย์ด้วยความเร็วประมาณ 400 กิโลเมตรต่อวินาที และเนื่องจากดวงอาทิตย์มีการหมุนสนามแม่เหล็กที่ฝังตัวอยู่ในลมสุริยะจะยืดออกเป็นวงคล้ายกับรูปก้นหอย สนามแม่เหล็กดังกล่าวเรียกว่าสนามแม่เหล็กระหว่างดวงดาว (Interplanetary Magnetic Field: IMF) แสดงดังรูปที่ 7 โดยมีดวงอาทิตย์อยู่บริเวณศูนย์กลาง



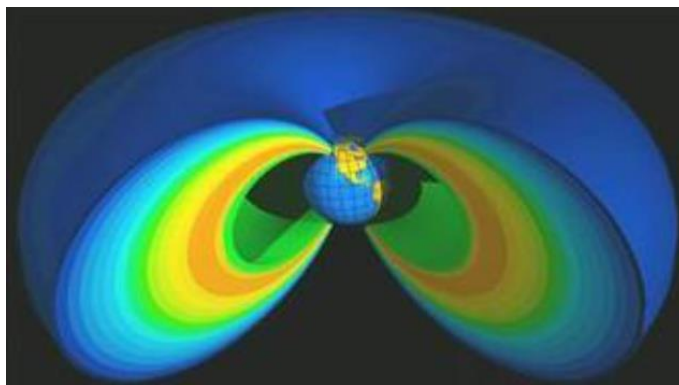
รูปที่ 7 สนามแม่เหล็กระหว่างดวงดาว (The Interplanetary Magnetic Field : IMF)

ลมสุริยะพัดกวาดผ่านโลกและปกคลุมไปทั่วอวกาศในระบบสุริยะจักรวาลไกลออกไปจนถึงด้านหลังแนวโคจรของดาวพลูโต อย่างไรก็ตามพีระลึกละมสุริยะเป็นชั้นบาง ๆ คล้ายกับผืนธงที่สะบัดในพายุ ความหนาแน่นของลมสุริยะเริ่มตั้งแต่สองถึงสามร้อยอนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในขณะที่อากาศที่เราหายใจมีความหนาแน่นมากกว่าประมาณแสนล้านล้านเท่า อันที่จริงห้องสุญญากาศในห้องทดลองวิทยาศาสตร์การที่จะบีบอัดเพื่อก่อให้เกิดความกดที่ต่ำและมีความหนาแน่นดังเช่นลมสุริยะเป็นไปได้ยากมาก

นอกจากนี้ยังมีการแทรกเข้ามาของ รังสีคอสมิก (Galactic Cosmic Ray) ในสื่อกลางระหว่างดวงดาวด้วยเช่นกัน ซึ่งไม่ได้เป็นผลของกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์ แต่เกิดจากปรากฏการณ์ระยะไกล เช่น การระเบิดของกลุ่มดาว และปรากฏการณ์ของหลุมดำที่กลืนกินบรรดาดวงดาว รังสีคอสมิกมีองค์ประกอบหลักของอิเล็กตรอนและไอออน (ส่วนมากเป็นโปรตอน) เคลื่อนตัวด้วยความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วแสงผ่านระบบสุริยะไปอย่างรวดเร็วในทุกทิศทางโดยมีอัตราเร็วของการเคลื่อนที่คงที่ อนึ่งปรากฏการณ์ที่น่าสนใจอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในสื่อกลางระหว่างดวงดาวซึ่งมีผลต่อสภาพอากาศในอวกาศน้อยมาก เนื่องจากผลกระทบค่อนข้างจำกัด เช่นฝนดาวตก ดาวเคราะห์น้อย และดาวหาง สิ่งเหล่านี้จัดเป็นปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสภาพอากาศในอวกาศเป็นช่วงระยะเวลาอันจำกัด

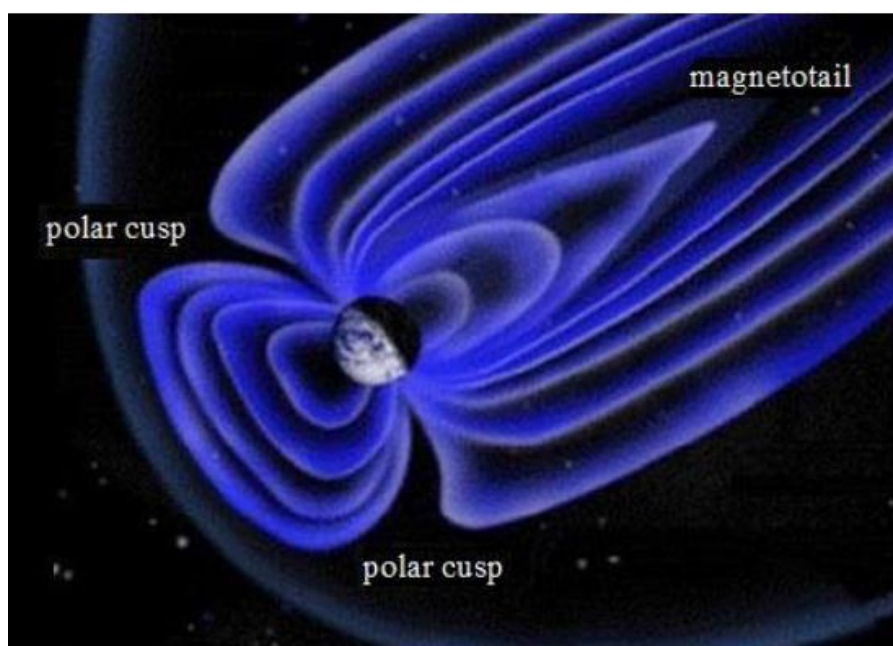
2.3 สนามแม่เหล็กโลก (The Earth's Magnetosphere)

สนามแม่เหล็กโลกมีรูปแบบค่อนข้างจะคงที่ซึ่งมีลักษณะเป็นสองขั้วมีเส้นแรงแม่เหล็กออกจากบริเวณขั้วโลกใต้สู่อวกาศและวนไปบรรจบกันที่บริเวณขั้วโลกเหนือ ถ้าพิจารณาเป็นภาพสามมิติสนามแม่เหล็กโลกคล้ายกับโดนัทที่มีขนาด 5 แสนกิโลเมตร (รูปที่ 8) หลังจากระยะนี้สนามแม่เหล็กโลกจะมีกำลังอ่อนลงจนถูกกวาดออกไปด้านข้างโดยลมสุริยะ ซึ่งมาตามสนามแม่เหล็กระหว่างดวงดาว อันเป็นสนามแม่เหล็กกำลังอ่อนที่ถูกดึงจากขอบนอกของโคโรนา



รูปที่ 8 แมกนีโตสเฟียร์ของโลกชั้นใน (Inner Magnetosphere of the Earth)

การกระทำของลมสุริยะทางด้านรับแสงดวงอาทิตย์ของโลกสนามแม่เหล็กโลกจะถูกบีบอัด ขณะที่ด้านตรงข้ามจะดึงสนามแม่เหล็กโลกให้ยืดเป็นโพรงออกไปนับล้านกิโลเมตร ก่อให้เกิดรูปร่างคล้ายกับกระสุนปืนหรือดาวหางขึ้นในสนามแม่เหล็กโลก บริเวณที่มีลักษณะเป็นโพรง (รูปที่ 9) เรียกว่า แมกนีโตสเฟียร์ (Magnetosphere) ขอบทางหน้าของแมกนีโตสเฟียร์(ด้านรับแสงดวงอาทิตย์) เรียกว่า ส่วนหัว (Nose) ของแมกนีโตสเฟียร์ ในส่วนที่ทอดยาวออกไปทางด้านหลังของโลกเรียกว่าส่วนหาง (Tail) ของแมกนีโตสเฟียร์ หรือแมกนีโตเทล (Magnetotail)



รูปที่ 9 ปฏิสัมพันธ์ระหว่างลมสุริยะและแมกนีโตสเฟียร์ของโลก

แมกนีโตสเฟียร์จะเบี่ยงเบนลมสุริยะ และสนามแม่เหล็กระหว่างดวงดาวที่แผ่ตัวอยู่ไปรอบๆ โลก โดยทั่วไปจะดันให้อนุภาคต่างจากดวงอาทิตย์อยู่นอกเขตของแมกนีโตสเฟียร์ อย่างไรก็ตามบริเวณที่สนามแม่เหล็กโลกมีกำลังอ่อน อนุภาคของลมสุริยะสามารถทะลุเข้ามาในแมกนีโตสเฟียร์ได้โดยเฉพาะตรงบริเวณแมกนีโตเทล ที่ซึ่งพลาสมาในลมสุริยะเกิดการปั่นป่วนและคลุกเคล้าเข้าไปในแมกนีโตสเฟียร์ อนุภาคที่เป็นประจุสามารถเข้าไปในแมกนีโตสเฟียร์โดยผ่านบริเวณแคบๆที่เรียกว่า คัสป์ (Cusps) แถบขั้วโลกทั้งสอง (หรือรอยแยกบริเวณขั้วโลก) บริเวณตอนเหนือของขั้วแม่เหล็กโลกทั้งสองไปยังขอบด้านหน้าของแมกนีโตสเฟียร์

อนุภาคประจุจะยังคงถูกกักกันในแมกนีโตสเฟียร์ของโลก เว้นแต่จะชนกันในบรรยากาศของโลกหรือหลุดลอดลงมาจากแมกนีโตเทลได้สำเร็จระหว่างที่เกิดการปั่นป่วนและคลุกเคล้ากันของลมสุริยะซึ่งเกิดขึ้นในบริเวณนี้เป็นประจำ

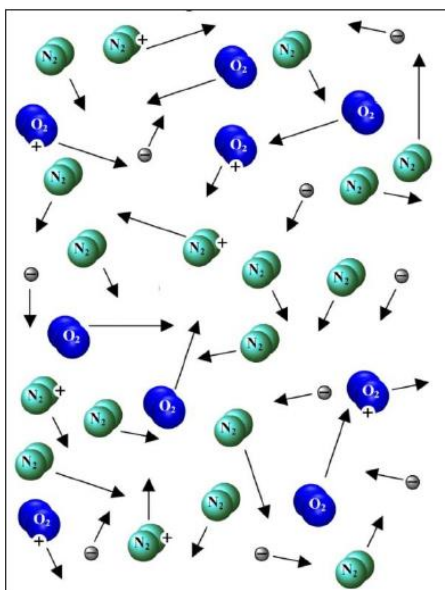
2.4 บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ (The Ionosphere)

โครงสร้างบรรยากาศของโลกแบ่งตามอุณหภูมิ บรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์เป็นชั้นต่ำสุดและมีคุณสมบัติอุณหภูมิลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น ความสูงเริ่มจากพื้นดินขึ้นไปประมาณ 12 กิโลเมตร (40,000 ฟุต) พลังงานแสงและการแผ่รังสีความร้อนจำนวนมากของดวงอาทิตย์ถูกดูดซับโดยพื้นผิวโลกและเปลี่ยนเป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้กับอากาศในชั้นโทรโพสเฟียร์ โดยทั่วไปกระบวนการต่าง ๆ ทางอุตุนิยมวิทยาทั้งหมดเกิดขึ้นในบรรยากาศชั้นนี้

เหนือระดับนี้ขึ้นมาคือบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ มีคุณสมบัติของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้าตามความสูง เริ่มจากความสูงประมาณ 12 กิโลเมตรถึง 50 กิโลเมตร (40,000 - 165,000 ฟุต) อากาศยานบินได้สูงสุดในบริเวณตอนล่างของบรรยากาศชั้นนี้ ตอนบนของบรรยากาศร้อนขึ้นเนื่องจากการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ กระบวนการดูดซับเกี่ยวข้องกับการสร้างและการทำลายไอออน

บรรยากาศชั้นเมโซสเฟียร์เป็นบรรยากาศชั้นอยู่เหนือขึ้นมา ความเข้าใจในบรรยากาศชั้นนี้มีค่อนข้างน้อย ทั้งนี้เนื่องจากสูงเกินกว่าเพดานบินของอากาศยานและต่ำเกินไปสำหรับการโคจรของดาวเทียม คุณลักษณะทั่วไปของอากาศในชั้นนี้คืออุณหภูมิลดลงตามความสูง และมีความสูงตั้งแต่ 50 กิโลเมตรถึง 85 กิโลเมตร (165,000 - 280,000 ฟุต)

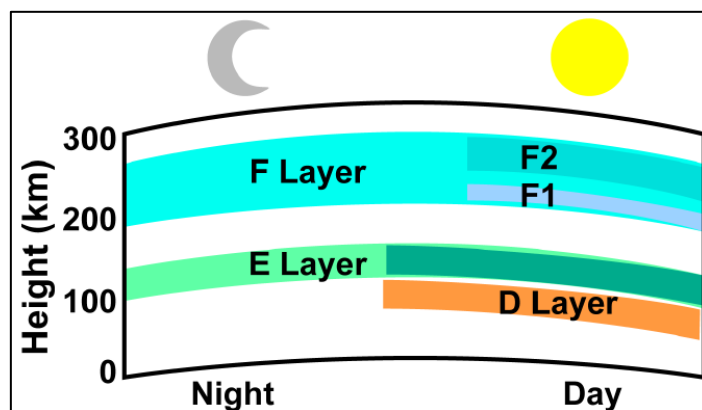
บรรยากาศชั้นเทอร์โมสเฟียร์เป็นชั้นสูงขึ้นมา คุณสมบัติโดยทั่วไปคืออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามความสูง อยู่เหนือที่ระดับ 85 กิโลเมตร (280,000 ฟุต) อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพราะมีการดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีเอ็กซ์เรย์จากดวงอาทิตย์ ซึ่งกระบวนการดูดซับรังสีเหล่านี้โมเลกุลของไนโตรเจนและออกซิเจนบางส่วนมีการแตกตัว (รูปที่ 10) เป็นไอออนและอิเล็กตรอนอิสระเหล่านั้นก่อให้เกิดเป็นชั้นขึ้นในบรรยากาศเรียกว่า ไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) บางส่วนของชั้นไอโอโนสเฟียร์อยู่เหนือพื้นผิวโลก 70 กิโลเมตร (ทางตอนบนของบรรยากาศชั้นเมโซสเฟียร์) ขยายขึ้นไปจนถึงความสูงในชั้นเทอร์โมสเฟียร์และบางลงเมื่อเข้าสู่ในอวกาศ



รูปที่ 10 สภาวะแวดล้อมของพลาสมาในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ (O₂ N₂ ไอออนและอิเล็กตรอน)

คุณลักษณะเด่นที่สำคัญของชั้นไอโอโนสเฟียร์คือสามารถสะท้อนหรือเบี่ยงเบนคลื่นวิทยุได้ เนื่องจากเราใช้ประโยชน์จากคลื่นวิทยุโดยนำมาประยุกต์ใช้อย่างหลากหลาย ดังนั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญและในขณะเดียวกันอาจจะขัดขวางการสะท้อนคลื่นวิทยุได้เช่นกัน

ในรูปที่ 11 บรรยากาศชั้นไอโอสเฟียร์แบ่งออกได้หลายชั้น แต่ละชั้นจะมีคุณลักษณะเฉพาะทางเคมีและฟิสิกส์ ทั้งนี้เพราะความหนาแน่นของบรรยากาศ พลังงานรังสีดวงอาทิตย์และชนิดของโมเลกุลในบรรยากาศหรืออะตอมที่อยู่ในแต่ละชั้นเป็นสำคัญ



รูปที่ 11 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ชั้นต่ำสุดของไอโอโนสเฟียร์ เรียกว่า ชั้น D (D layer or D region) ความสูงประมาณ 70-90 กิโลเมตร ในชั้นนี้รังสีเอ็กซ์เรย์จากดวงอาทิตย์จะทำให้โมเลกุลของออกซิเจนและไนโตรเจนแตกตัวออกเป็นไอออน รวมทั้งไนตริกออกไซด์ อย่างไรก็ตามในเวลากลางคืนอิเล็กตรอนและไอออนในชั้นนี้จะรวมตัวกับโมเลกุลที่เป็นกลาง (Neutral molecules) อย่างรวดเร็ว ดังนั้นชั้น D มีอยู่เฉพาะในเวลากลางวัน

ชั้นถัดไปของไอโอโนสเฟียร์ เรียกว่า ชั้น E (E layer or E region) อยู่ที่ความสูง 90-140 กิโลเมตร ในชั้นนี้รังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ทำให้ออกซิเจน ไนโตรเจนและไนตริกออกไซด์แตกตัวเป็นไอออน แต่เนื่องจากบรรยากาศที่สูงกว่าจะบางกว่า อิเล็กตรอนและไอออนจึงรวมตัวกันในอัตราที่ช้ากว่าในเวลากลางคืน ด้วยเหตุนี้ชั้น E จึงคงอยู่ได้ตลอดทั้งคืนถึงแม้ว่าจะอ่อนกำลังก็ตาม เฉพาะในบริเวณละติจูดสูง ๆ (เช่น อลาสกา แคนาดา และมหาสมุทรแถบขั้วโลกเหนือ) ระหว่างสัปดาห์หรือเดือนที่อยู่ในช่วงมีดสนิทของฤดูหนาวชั้น E จะหายไปอย่างถาวร

ชั้นต่อมาเรียกว่า ชั้น F (F layer or F region) ความสูงประมาณ 140-300 กิโลเมตร ในชั้นนี้รังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ทำให้อะตอมของออกซิเจนแตกตัวกลายเป็นไอออน แต่เนื่องจากเป็นชั้นที่บางมากในความสูงนี้จึงยัง不足以ให้เกิดกระบวนการการรวมตัวของอิเล็กตรอนและไอออน เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างกับชั้นอื่นๆในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ พบว่าในชั้นนี้คงสภาพของไอออนตลอดทั้งกลางวันและกลางคืน คุณลักษณะเฉพาะอีกอย่างหนึ่งของชั้น F คือในช่วงเวลากลางวันมีการแยกออกเป็นสองระดับ โดยชั้นล่างเป็นชั้น F1 ส่วนชั้นบนเป็นชั้น F2

2.5 การสะท้อนคลื่นวิทยุในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Radio Refraction in the Ionosphere)

คลื่นวิทยุจะมีการหักเหเมื่อเคลื่อนตัวผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ เช่นเดียวกับการหักเหคลื่นแสง (โค้งงอ) เมื่อคลื่นแสงผ่านสื่อที่มีความโปร่งใสเช่นน้ำหรือแก้ว คลื่นวิทยุเกิดการหักเหเมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งอาจก่อให้เกิดประโยชน์หรืออาจรบกวนสัญญาณคลื่นวิทยุได้ สิ่งสำคัญคือการชดเชยผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ ตัวอย่างเช่นในระหว่างดวงอาทิตย์ขึ้นหรือตก

ความหลากหลายของคลื่นวิทยุและแถบคลื่นสัญญาณเรดาร์ (Radar band) มีปฏิสัมพันธ์ที่แตกต่างกันระหว่างพื้นผิวโลก บรรยากาศและบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์

คลื่นวิทยุช่วงความถี่ต่ำ (Low Frequency: LF) ความถี่ในย่าน 30-300 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ดูดซับคลื่นวิทยุในช่วงความถี่ต่ำไว้อย่างมาก อย่างไรก็ตามคลื่นวิทยุความถี่ต่ำเดินทางไปตามพื้นผิวโลกก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านเครื่องช่วยนำทาง (Navigation aid) (ตัวอย่างเช่น Long Range Navigation: LORAN) จนกระทั่งเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการนำเอาระบบ GPS (Global Positioning System) Navigation มาใช้ทำหน้าที่แทนระบบเดิม

คลื่นวิทยุช่วงความถี่ปานกลาง (MF) มีความถี่ตั้งแต่ 300 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 3 เมกะเฮิร์ตซ์ มีลักษณะเช่นเดียวกับคลื่นวิทยุความถี่ต่ำ กล่าวคือจะเดินทางไปตามพื้นโลก และได้นำมาใช้ในระบบนำทาง (Navigation) พิสัยไกลใกล้กับพื้นผิวโลกเหมาะสำหรับการเดินเรือและการบินระดับต่ำ (ตัวอย่างเช่น NDB-Non Directional Beacon; GMDSS- Global Maritime Distress Safety System) ขณะเดียวกันคลื่นวิทยุเอเอ็ม (Amplitude Modulation: AM) อยู่ในช่วงคลื่นนี้เช่นเดียวกันในช่วงเวลากลางวันการติดต่อสื่อสารด้วยช่วงคลื่นนี้จะถูกดูดซับโดยชั้น D ในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดเกี่ยวกับขอบเขตหรือระยะทาง ส่วนในเวลากลางคืนคลื่นวิทยุเอเอ็มสามารถส่งคลื่นวิทยุออกไปได้ไกลหลายร้อยกิโลเมตร ทั้งนี้เพราะว่าคลื่นวิทยุช่วงความถี่ปานกลางหักเหในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่สูงกว่าและมีการดูดซับน้อยกว่า ในช่วงเวลาใกล้ ๆ กับดวงอาทิตย์ขึ้น ดวงอาทิตย์ตก แสดงให้เห็นถึงปัญหาได้อย่างชัดเจนในการติดต่อสื่อสารของสัญญาณคลื่นวิทยุช่วงความถี่ปานกลาง ทั้งนี้เนื่องจากบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาดังกล่าว

คลื่นวิทยุช่วงความถี่สูง (High Frequency: HF) หรือเรียกว่าช่วงคลื่นสั้น (Shortwave) มีช่วงความถี่ระหว่าง 3-30 เมกะเฮิร์ตซ์ บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์หักเหช่วงคลื่นสั้นกลับยังพื้นโลกได้โดยง่าย คลื่นวิทยุความถี่สูงนี้มีความสำคัญและมีประโยชน์อย่างมากในการส่งผ่านสัญญาณได้ไกลออกไปนับเป็นพัน ๆ กิโลเมตรตามส่วนโค้งของโลก ก่อให้เกิดประโยชน์ในการติดต่อสื่อสารข้ามทวีป ข้ามมหาสมุทรและในพื้นที่ละติจูดสูง (บริเวณขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้) ซึ่งเป็นบริเวณที่การติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียมมีข้อจำกัดหรือแทบจะเป็นไปไม่ได้เลย คลื่นวิทยุช่วงความถี่สูงขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งมีความอ่อนไหวต่อการรบกวนของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์

คลื่นวิทยุช่วงความถี่สูงมาก (Very High Frequency: VHF) มีช่วงความถี่ระหว่าง 30-300 เมกะเฮิร์ตซ์ บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์จะค่อนข้างจะหักเหคลื่นวิทยุช่วงความถี่สูงมาก แต่อาจจะไม่เพียงพอที่จะเชื่อได้ว่าการส่งผ่านสัญญาณไปเหนือเส้นขอบฟ้าแล้วจะสะท้อนกลับมายังพื้นผิวโลก ดังนั้นคลื่นวิทยุความถี่สูงมากจึงมีขอบเขตจำกัดในด้านระยะทางที่สั้นกว่าระหว่างจุดสองจุดบนพื้นโลก นอกจากช่วงคลื่นดังกล่าวยังใช้สำหรับการติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียม ด้านการบินได้ใช้คลื่นวิทยุในช่วงความถี่ดังกล่าวด้วย เช่น VOR (VHF Omni-directional Radio Range) DME (Distance Measuring Equipment), TACAN (Tactical Air Navigation System), ILS (Instrument Landing System) และ การติดต่อสื่อสารของ ATC (Air Traffic Control) นอกจากนี้คลื่นวิทยุเอฟเอ็ม (Frequency Modulation) และการส่งสัญญาณโทรทัศน์บางส่วนก็จัดอยู่ในช่วงความถี่สูงมากเช่นกัน ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นอาจกล่าวได้อย่างกว้าง ๆ ว่าเป็นช่วงคลื่นวิทยุแถบไมโครเวฟ

คลื่นวิทยุช่วงความถี่ช่วงอุลตราไวโอเลต (UHF) มีช่วงความถี่ระหว่าง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 3 กิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์มีผลกระทบต่อคลื่นวิทยุความถี่ช่วงอุลตราไวโอเลตน้อยกว่าคลื่นวิทยุความถี่สูงมาก ดังนั้นแถบคลื่นวิทยุดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการส่งผ่านสัญญาณหรือการติดต่อสื่อสาร

ที่เรียกว่า Line - of sight (LOS) ตัวอย่างเช่น การติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียมและระบบ GPS นอกจากนี้การปฏิบัติการด้วยเรดาร์ต่าง ๆ จำนวนมากก็ใช้ย่านความถี่นี้ (ตัวอย่างเช่น L band และ S band) การส่งสัญญาณโทรทัศน์บางส่วนก็ใช้ย่านความถี่นี้เช่นเดียวกัน

คลื่นวิทยุช่วงความถี่ Super High Frequency (SHF) ความถี่ระหว่าง 3-30 GHz ย่านความถี่นี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในการติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียม ทั้งนี้เพราะบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อคลื่นวิทยุย่านความถี่นี้ ในทางกลับกันหากผ่านบริเวณที่มีน้ำฟ้าตกหนัก (ฝน หิมะและลูกเห็บ) จะทำให้สูญเสียพลังงาน ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดของการส่งผ่านสัญญาณแบบ LOS ระหว่างจุดสองจุดบนพื้นผิวโลก เรดาร์จำนวนมากได้ใช้คลื่นย่านความถี่นี้ในการปฏิบัติการด้วยเช่นกัน (ตัวอย่างเช่น IEEE C-band, X-band, และ K- bands) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการติดตามวัตถุในวงโคจร

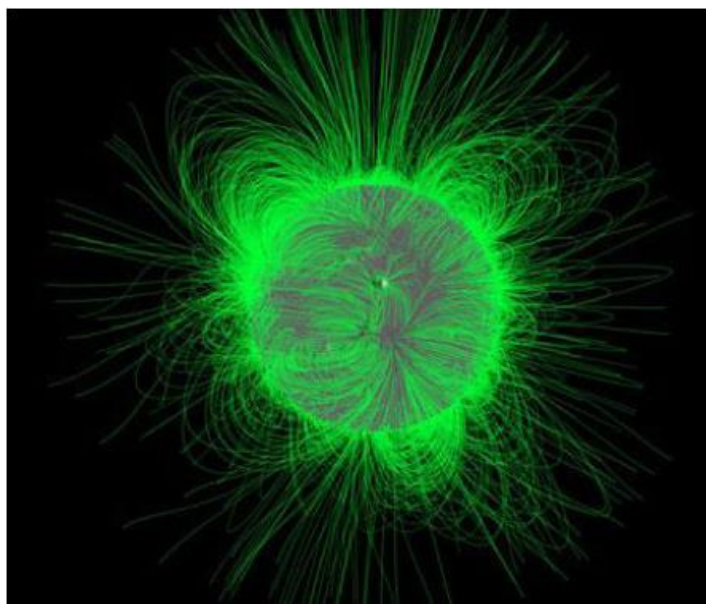
คลื่นวิทยุช่วงความถี่ Extremely High Frequency (EHF) ความถี่ตั้งแต่ 30 GHz ถึง 300 GHz คลื่นความถี่ย่านดังกล่าวเหมาะสำหรับการติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียม เนื่องจากบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ไม่มีผลกระทบต่อคลื่นย่านความถี่นี้ อย่างไรก็ตาม น้ำฟ้า เมฆ และไอน้ำในบรรยากาศอาจเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานคลื่นย่านความถี่นี้ลดลง

3. กิจกรรมของดวงอาทิตย์ (Solar Activity)

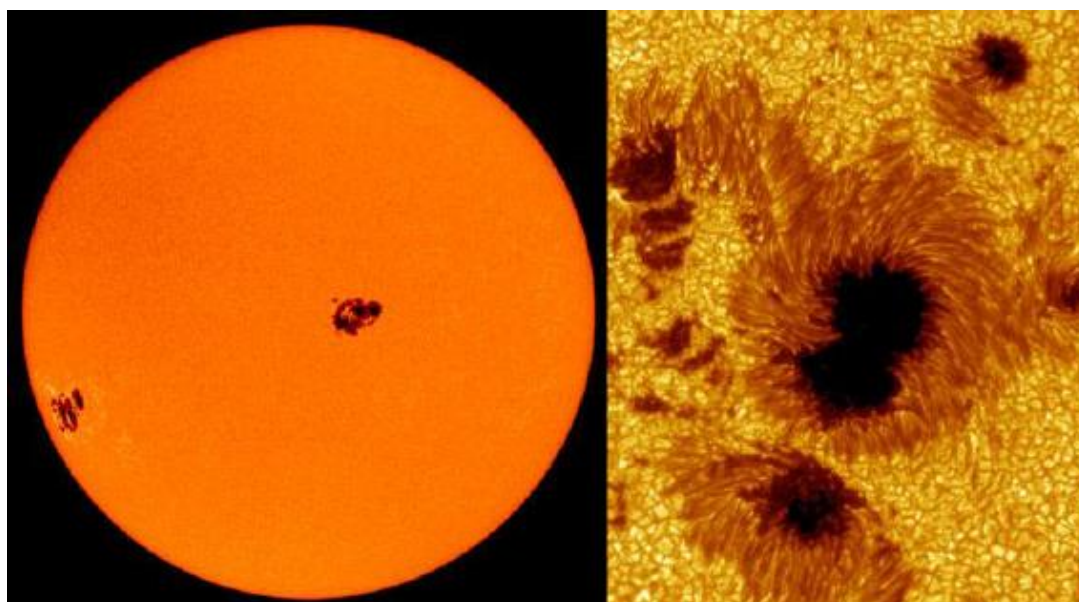
รูปทรงกลมของดวงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยพลาสมาไม่คงรูปตลอดเวลา แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามกิจกรรมที่เกิดขึ้นตามห้วงเวลาต่างๆ บนดวงอาทิตย์ การหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์มีความแตกต่างกันกล่าวคือ อัตราเร็วการหมุนไม่เท่ากันเช่นเดียวกับการไหลของของเหลวในอ่างน้ำวน

3.1 บริเวณที่เกิดกิจกรรมของดวงอาทิตย์

บริเวณศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์จะหมุนรอบตัวเองในหนึ่งรอบประมาณ 25 วัน และบริเวณขั้วโลกของดวงอาทิตย์จะใช้เวลาหมุนรอบตัวเองหนึ่งรอบประมาณ 35 วัน การที่มีอัตราการหมุนรอบตัวเองที่แตกต่างกันทำให้สนามแม่เหล็กที่ระเบิดขึ้นมาจากพื้นผิวของดวงอาทิตย์เกิดการบิดตัว และความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นในบางพื้นที่ตามมาดังรูปที่ 12 แสดงความซับซ้อนของรูปแบบสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มมากกว่าในชั้นโฟโตสเฟียร์ผลักดันวัตถุที่ร้อนกว่าของดวงอาทิตย์ออกจากชั้นโฟโตสเฟียร์ ในขณะที่บริเวณเดียวกันที่พื้นผิวของโฟโตสเฟียร์จะเป็นบริเวณที่เย็นกว่า ปรากฏเป็นแถบดำเป็นหย่อมๆ ซึ่งเรียกว่า จุดมืด (Sun spots) ซึ่งเป็นบริเวณที่บ่งชี้ว่าเป็นบริเวณที่มีการคงอยู่ของความเข้มของสนามแม่เหล็กมาก อันเกิดจากการระเบิดจากภายในของดวงอาทิตย์(รูปที่ 13) จุดที่ดำที่สุดบริเวณศูนย์กลางของจุดมืดบนดวงอาทิตย์เรียกว่า Umbra เป็นบริเวณที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากและมีทิศทางในทางตั้งขึ้นไปจากพื้นผิวของดวงอาทิตย์ ส่วนบริเวณโดยรอบที่มีสีดำน้อยกว่าจุดมืดบนดวงอาทิตย์ เรียกว่า Penumbra เป็นบริเวณที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กมากเช่นเดียวกันแต่จะมีทิศทางในแนวขนานกับพื้นผิวของดวงอาทิตย์



รูปที่ 12 สนามแม่เหล็กสุริยะ

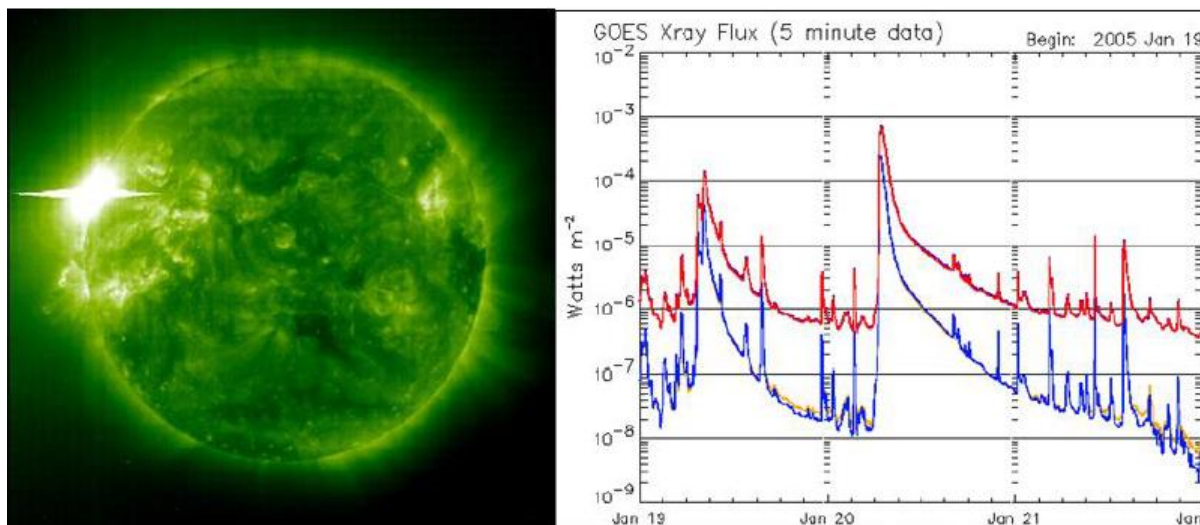


รูปที่ 13 จุดมืดของดวงอาทิตย์บนชั้นโฟโตสเฟียร์ (แสดงภาพดวงอาทิตย์ทั้งดวงและภาพขยายบริเวณจุดมืด)

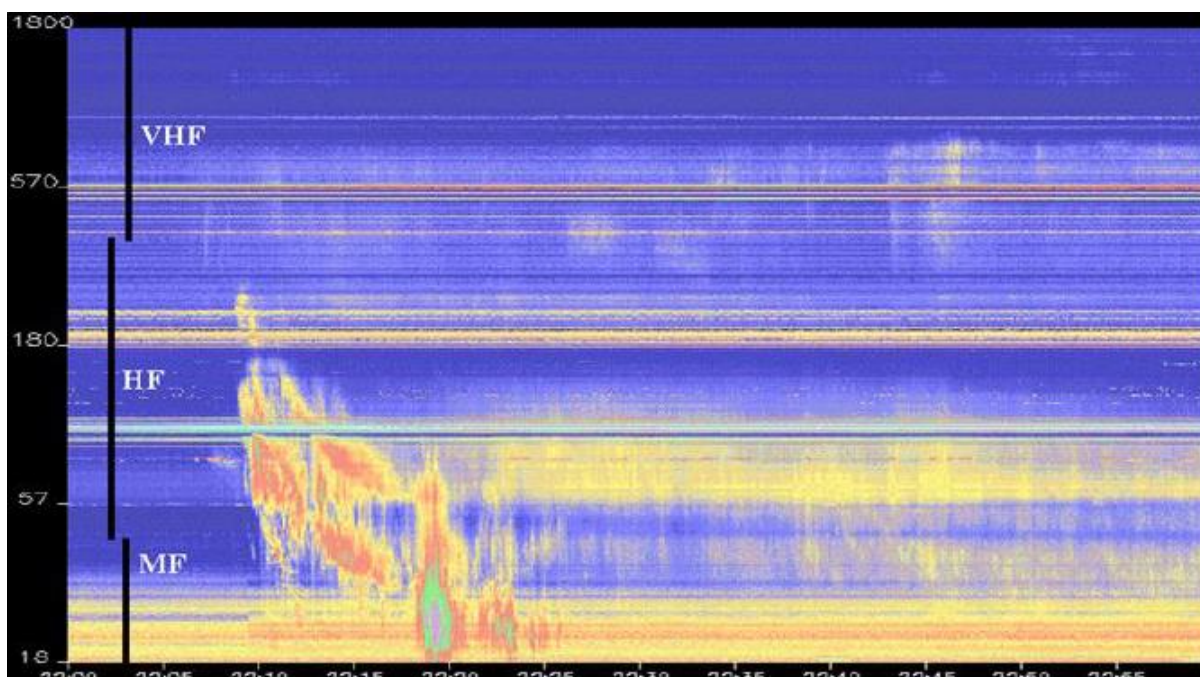
3.2 การลุกจ้าของดวงอาทิตย์ (Solar Flares) (X-ray Flares, Radio Bursts, Energetic Proton Events)

เมื่อสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงที่เกิดบริเวณที่มีกิจกรรมบนดวงอาทิตย์เริ่มเปลี่ยนโครงสร้างที่สลับซับซ้อนและเป็นเงื่อนปมที่ยู่เหยิง สนามแม่เหล็กอาจแตก (Snap) ออกอย่างรวดเร็วเพื่อจัดรูปแบบโครงสร้างสนามแม่เหล็กใหม่ที่มีความซับซ้อนลดลง ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า "การลุกจ้าของดวงอาทิตย์" (Solar Flare) ซึ่งปรากฏเป็นแสงจ้าของรังสีเอ็กซ์เรย์ การปะทุของคลื่นวิทยุและอนุภาคพลังงานสูง (Energetic Charged Particles) โดยเฉพาะอนุภาคของโปรตรอนแสดงดังรูปที่ 14-16 และถ้าปรากฏการณ์ที่สำคัญของสภาพอากาศในอวกาศเหล่านี้มีทิศทางมายังโลก จะมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบเทคโนโลยีที่ปฏิบัติการอยู่บนโลกและในวงโคจรเหนือโลก แสงจ้าของรังสีเอ็กซ์เรย์คงอยู่ได้นานนับเป็นสิบๆ นาที

เช่นเดียวกับการปะทุของคลื่นวิทยุ แต่อนุภาคพลังงานสูงโปรตรอนอาจถูกกักไว้ในสนามแม่เหล็กโลกและคงอยู่ได้หลายวันภายหลังที่เกิดการลุกจ้าของดวงอาทิตย์

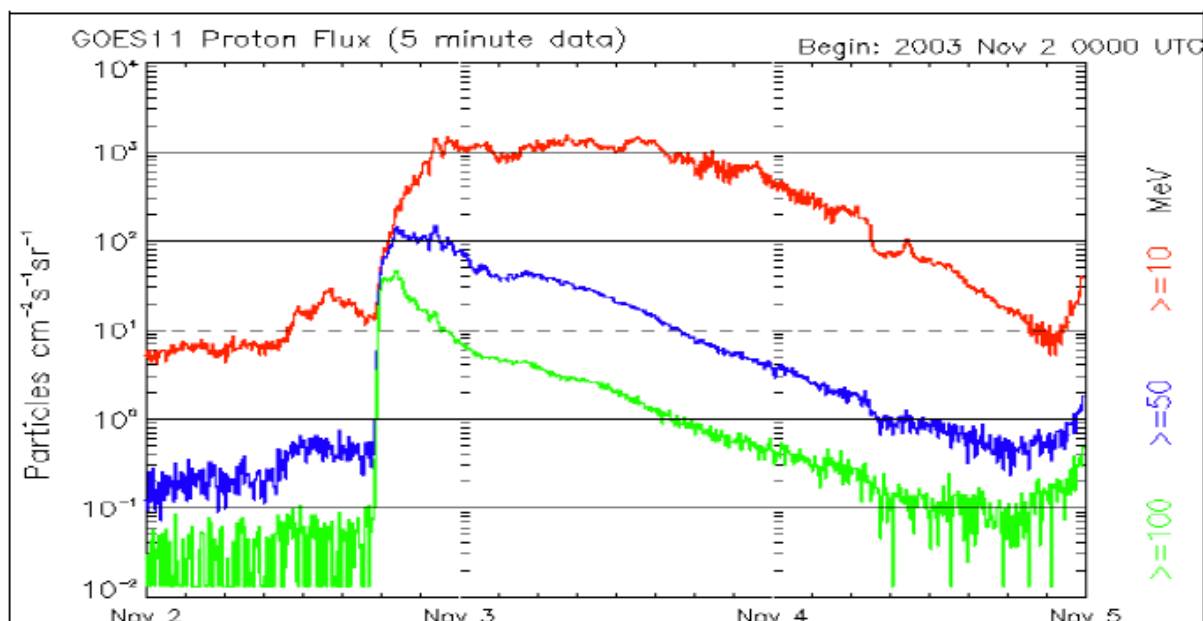


รูปที่ 14 การลุกจ้าของดวงอาทิตย์ (ภาพรังสีเอ็กซ์เรย์และแสดงการเปลี่ยนแปลงของรังสีเอ็กซ์เรย์ในสองความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน)



รูปที่ 15 การปะทุของคลื่นวิทยุ

หมายเหตุ การรบกวนสัญญาณอย่างมากในคลื่นวิทยุความถี่สูง (HF) และความถี่ในย่านปานกลาง (MF) และรบกวนเพียงเล็กน้อยบริเวณด้านล่างของคลื่นความถี่ VHF สำหรับเส้นในแนวนอนแสดงถึงสัญญาณคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นมา เช่นสถานีวิทยุกระจายเสียง (Radio Broadcast Stations)

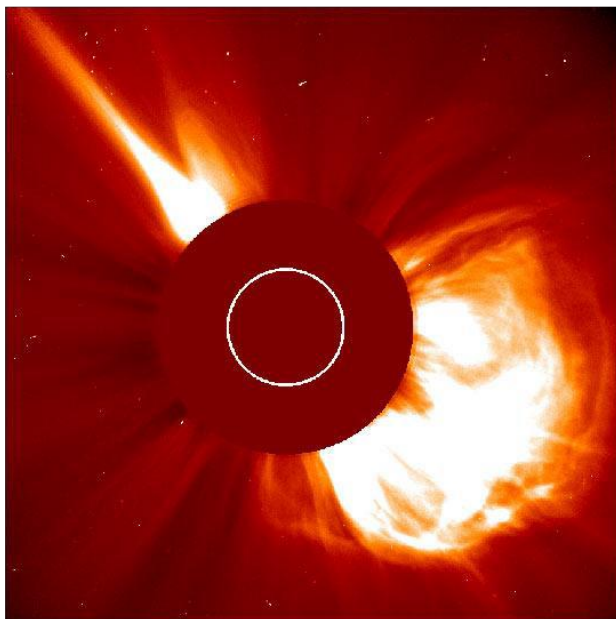


รูปที่ 16 อนุภาคพลังงานสูงโปรตรอน (แสดงระดับความแตกต่างของอนุภาคพลังงานสูง 3 ระดับ)

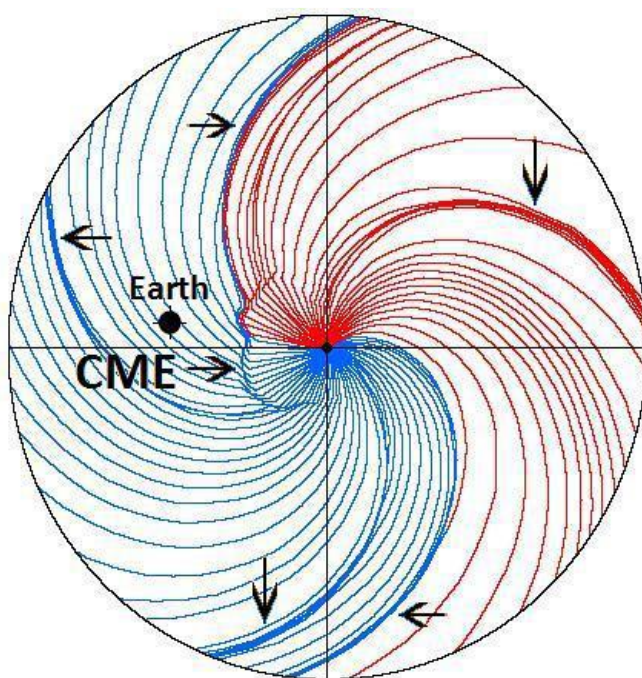
3.3 การปลดปล่อยก้อนมวลจากโคโรนา (Coronal mass ejection : CME)

สนามแม่เหล็กที่ซับซ้อนในชั้นโคโรนาของดวงอาทิตย์เหล่านั้นบางครั้งอาจจัดเรียงตัวใหม่ และอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยกลุ่มของพลาสมาสู่อวกาศ เรียกว่า การปลดปล่อยก้อนมวลจากโคโรนา (Coronal mass ejection : CME) รูปที่ 17 แสดงการปลดปล่อยก้อนมวลจากโคโรนาเหนือแผ่นทรงกลมที่ปิดบังแสงสว่างจ้าของดวงอาทิตย์ (ตำแหน่งของดวงอาทิตย์แสดงโดยวงกลมสีขาว) ส่วนการปลดปล่อยก้อนมวลจากโคโรนาที่มีแสงสีอ่อนกว่าปรากฏในบริเวณด้านล่างทางด้านซ้ายของระบบ การปลดปล่อยก้อนมวลเกิดจากการกระตุ้นจากการลุกจ้าของดวงอาทิตย์ แต่บางครั้งไม่จำเป็น ซึ่งถูกปลดปล่อยเข้าสู่ลมสุริยะ (Solar Wind) โดยมีคุณลักษณะของแนวความไม่ต่อเนื่องกันของหนาแน่น ความเร็ว อุณหภูมิและสนามแม่เหล็ก เช่นเดียวกับแนวความไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นในสนามแม่เหล็กระหว่างดวงดาวดังแสดงในรูปที่ 18 (พร้อมกับแนวที่ไม่ต่อเนื่องอื่น ๆ) แนวที่ไม่ต่อเนื่องดังกล่าวมีทิศทางการแพร่กระจายออกไปจากดวงอาทิตย์ และถ้าแนวที่แพร่กระจายออกมามีแนวเคลื่อนตัวเข้าหาโลกก็จะปะทะกับสนามแม่เหล็กโลกและสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งที่จะเกิดตามมาคือผลกระทบต่อระบบเทคโนโลยี

การปลดปล่อยก้อนมวลจากโคโรนาสามารถปะทุจากดวงอาทิตย์นับเป็นเวลาหลายสิบนาทีถึงหลายชั่วโมง อย่างไรก็ตามจะใช้เวลาสองวันหรือมากกว่าที่ผลกระทบจากลมสุริยะนี้จะปรากฏที่โลกเราอย่างเต็มที่



รูปที่ 17 การปลดปล่อยก้อนมวลจากโคโรนา



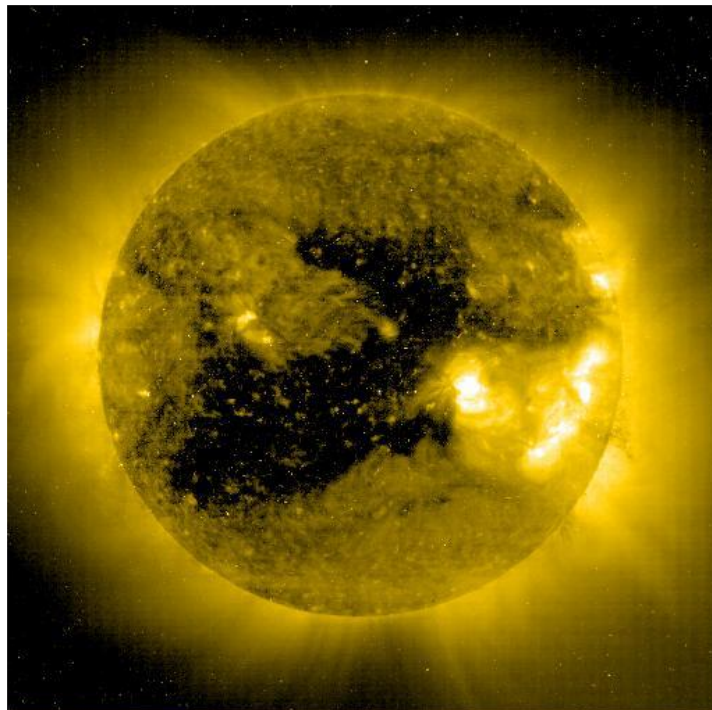
รูปที่ 18 สนามแม่เหล็กกระหว่างดวงดาวอันเนื่องจากการปลดปล่อยก้อนมวลจากโคโรนา

3.4 โคโรนาโฮลส์ (Coronal Holes)

การผสมผสานกันของความซับซ้อนของสนามแม่เหล็กภายในดวงอาทิตย์และเหนือพื้นผิวดวงอาทิตย์ก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กขนาดใหญ่และพวยพุ่งขึ้นไปในอวกาศ (ดังแสดงในรูปที่ 12 บริเวณเหนือทรงกลมของดวงอาทิตย์) บริเวณดังกล่าวอนุภาคโดยเฉพาะอย่างยิ่งอิเล็กตรอนมีอัตราเร่งที่จะออกห่างจากดวงอาทิตย์เพิ่มขึ้น ถ้าพิจารณาจากภาพเอ็กซ์เรย์หรือภาพอัลตราไวโอเลตพลังงานสูง (Extreme Ultraviolet) บริเวณนี้จะค่อนข้างมืดเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณที่มีแสงของพลาสมาที่ถูกกักอยู่บริเวณพื้นที่อื่น ๆ ในโคโรนา ด้วยเหตุนี้จึงเรียกว่า coronal hole ซึ่งมองเห็นได้อย่างชัดเจนในภาพอัลตราไวโอเลต

ดังแสดงในรูปที่ 19 กลุ่มของอนุภาคที่เคลื่อนที่เร็วนี้เกิดจาก coronal holes เป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดแนวที่ไม่ต่อเนื่องกันของลมสุริยะ ดังเช่นรูปแบบที่แสดงเป็นลูกศรสีดำในรูปที่ 18 ลมสุริยะเหล่านี้หากมีทิศทางมายังโลกจะปะทะกับสนามแม่เหล็กโลก ผลลัพธ์ที่สำคัญที่จะมีผลกระทบต่อระบบเทคโนโลยีอย่างกว้างขวาง

โคโรนาโฮลส์ เกิดขึ้นได้นานนับสัปดาห์ถึงหลายเดือน แต่เนื่องจากดวงอาทิตย์มีการหมุนรอบตัวเอง แนวของอนุภาคความเร็วสูงเหล่านี้ที่เกิดจาก coronal hole แต่ละแนวจะมีแนวโน้กวาดผ่านโลกทุกสัปดาห์โดยประมาณ



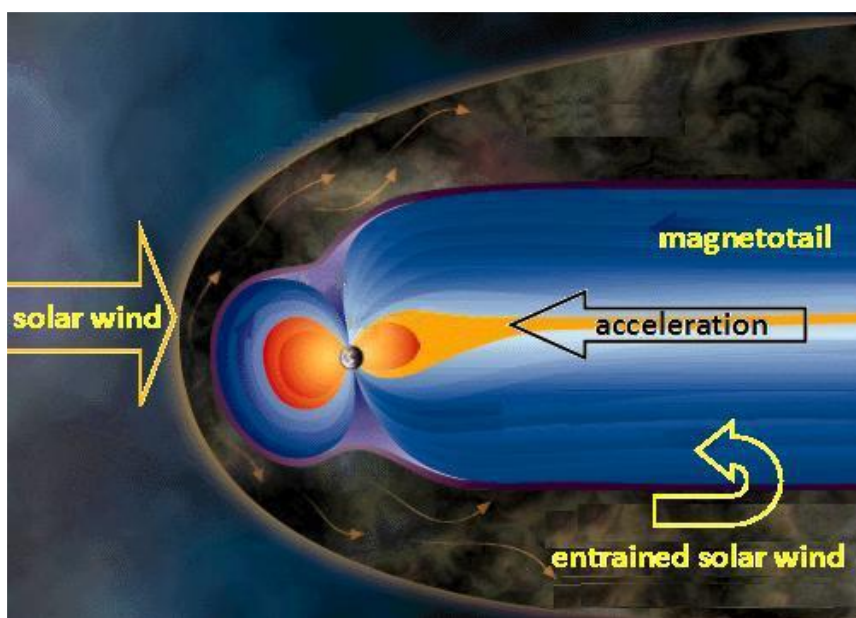
รูปที่ 19 โคโรนาโฮลส์ในภาพอุลตราไวโอเลต (บริเวณพื้นที่มืดบริเวณศูนย์กลางของดวงอาทิตย์)

3.5 พายุแม่เหล็กโลก (Geomagnetic Storm)

ลมสุริยะจะเปียงเบนไปรอบโลกโดยจะเบียดอัดกันมากบริเวณสนามแม่เหล็กโลกในด้านที่หันเข้าหาดวงอาทิตย์และไหลออกไปทางด้านข้างทั้งสองด้านก่อนที่จะลากยาวออกไปทางด้านหลังทำให้เกิดเป็นส่วนหางของสนามแม่เหล็ก (Magnetotail) ความต่อเนื่องของความหนาแน่น ความเร็ว อุณหภูมิและสนามแม่เหล็กที่ฝังตัวอยู่ในลมสุริยะจะรบกวนสนามแม่เหล็กโลก ทำให้เกิดความผันผวนของความเข้มของสนามแม่เหล็กและการเปลี่ยนแปลงทิศทาง ซึ่งเรียกว่า พายุแม่เหล็กโลก (Geomagnetic storm) แนวที่ไม่ต่อเนื่องของลมสุริยะนี้เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์การปลดปล่อยก้อนมวลจากโคโรนา โคโรนาโฮลส์และสนามแม่เหล็กกระหว่างดวงดาว (Interplanetary Magnetic Field : IMF)

เมื่อสนามแม่เหล็กโลกถูกรบกวนด้วยเหตุนี้ ลมสุริยะที่ประกอบด้วยพลาสมา(ส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอนและโปรตรอน) จะเกิดความปั่นป่วนและคลุกเคล้าเข้าไปในส่วนหางของสนามแม่เหล็ก (Magnetotail) การไหลทะลักของอนุภาคความเร็วสูงจะเคลื่อนตัวตามเส้นแรงสนามแม่เหล็กมุ่งสู่โลก ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการคลุกเคล้ากันของอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอนที่กักเก็บอยู่ภายในสนามแม่เหล็กโลก (รูปที่ 20) การผันผวนของสนามแม่เหล็กโลกในขณะเกิดพายุแม่เหล็กโลกจะเพิ่มอัตราเร่งให้กับอนุภาคที่ถูกกักไว้ส่วนใหญ่คืออิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูง ซึ่งอนุภาคลังงานสูงเหล่านี้บางส่วนจะไหลลงสู่บริเวณขั้วโลก (ตามเส้นแรงสนามแม่เหล็กที่รวมกันหนาแน่นบริเวณนั้น) และต่อจากนั้นก็เคลื่อนตัวไปชนกับโมเลกุลของแก๊สในบรรยากาศชั้นเทอร์โมส

เพียร์ ผลกระทบจากการชนกันนี้ทำให้เราเห็นปรากฏการณ์ออโรรา (Aurora) (รูปที่ 21) มีลักษณะคล้ายกับผ่าน่านเรืองแสงบริเวณขั้วโลกเหนือ เรียกว่า แสงเหนือ (aurora borealis หรือ northern lights) สำหรับขั้วโลกใต้พบเห็นได้น้อยกว่าแต่มีความรุนแรงและความถี่ในการเกิดเท่ากัน เรียกว่า aurora australis หรือแสงใต้ (southern lights)



รูปที่ 20 รูปแบบของพายุแม่เหล็กโลก



รูปที่ 21 แสงออโรราที่ถ่ายจากกระสวยอวกาศ

แกนของสนามแม่เหล็กโลกเอียงประมาณ 11 องศาจากแกนการหมุนของโลก ขั้วแม่เหล็กในซีกโลกเหนือ (Magnetic north pole) จะอยู่บริเวณด้านตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศแคนาดาในมหาสมุทรแปซิฟิก และขั้วแม่เหล็กในซีกโลกใต้ (Magnetic south pole) อยู่เหนือประเทศออสเตรเลียที่ติดกับแปซิฟิกใต้ เชื่อกันว่าการหมุนเวียนอย่างช้า ๆ ของเหล็กหลอมละลายบริเวณแก่นโลกชั้นนอก (Outer

core) เป็นสาเหตุทำให้ขั้วแม่เหล็กโลกมีการเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ และไม่มีที่สิ้นสุดเป็นเวลานานนับปี ระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกออโรราเกิดขึ้นเป็นวงรอบบริเวณขั้วโลกคล้ายกับมงกุฎเรียกว่า Auroral Oval ซึ่งมีขั้วแม่เหล็กเป็นศูนย์กลาง (รูปที่ 22) ซึ่งไม่ใช่ขั้วโลกในพิกัดทางภูมิศาสตร์ ด้วยเหตุนี้เองแสงเหนือจึงถูกตรวจพบในอวกาศและแคนาดาามากกว่าที่จะพบในแถบสแกนดิเนเวียและไซบีเรียซึ่งจัดอยู่ในแนวละติจูดพิกัดภูมิศาสตร์เดียวกัน หากพายุแม่เหล็กโลกมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นวงของออโรราจะมีความกว้างเพิ่มมากขึ้น แสงเหนือที่เกิดขึ้นจะแผ่ลึกลงมาทางใต้ ระหว่างที่มีความรุนแรงมากเป็นพิเศษออโรราถูกตรวจพบว่าไกลลงมาทางใต้ได้มากที่สุดถึงประเทศเม็กซิโกและคิวบา

โดยปกติการปั่นป่วนของลมสุริยะที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งสามารถคงอยู่ได้นานนับหลายชั่วโมง อย่างไรก็ตามผลกระทบที่ตกค้างในสนามแม่เหล็กโลกยังคงอยู่อย่างยาวนานได้นับหลายชั่วโมงถึงหลายวัน



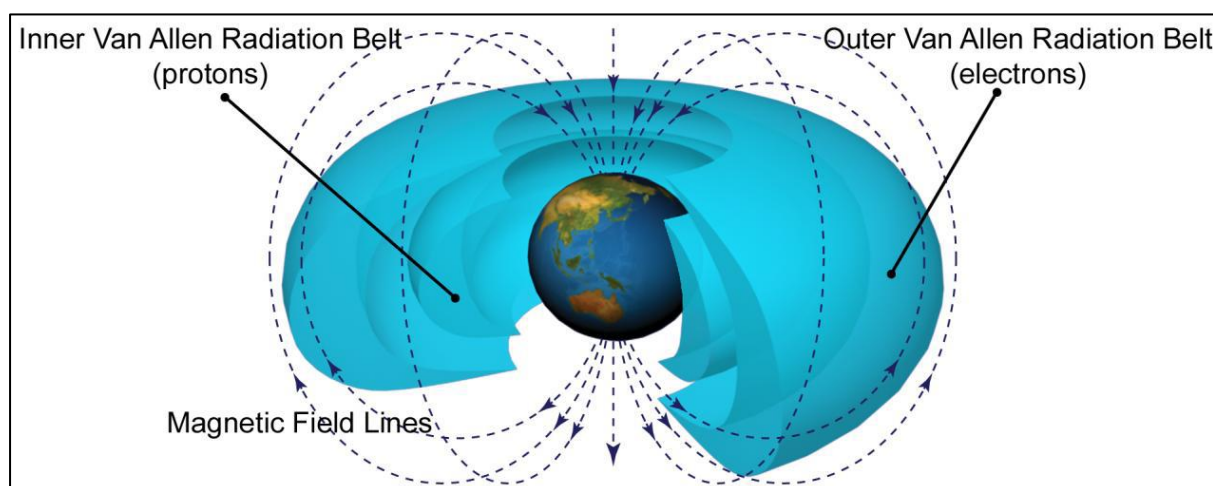
รูปที่ 22 แสงออโรรา (Auroral Ovals) หรือแสงเหนือ แสงใต้

3.6 แถบรังสีแวนแอลเลน (Van Allen Radiation Belts)

อนุภาคพลังงานสูงที่ถูกสนามแม่เหล็กโลกกักไว้จนกระทั่งเคลื่อนตัวลงไปที่ปะทะกับบรรยากาศของโลกและจบลงที่ปรากฏการณ์ออรา นั่นนับว่าเป็นสัดส่วนเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่หลุดเข้าสู่บรรยากาศในแถบละติจูดสูง ส่วนที่เหลือจะถูกกักไว้เป็นเวลานานนับเดือนจนถึงปีก็อาจเป็นไปได้ อันที่จริงอนุภาคที่ถูกกักในสนามแม่เหล็กโลกเคลื่อนที่วนไปมาระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กที่รวบเข้าหากัน (Converging Magnetic Field Lines) ในบริเวณแถบขั้วโลกก่อให้เกิดรูปทรงคล้ายโดนัทรอบโลกเรียกว่าแถบรังสีแวนแอลเลน (Van Allen Radiation Belts) เรียกตามชื่อของผู้ค้นพบเป็นคนแรกและนำเสนอให้เห็นว่ามีการเกิดขึ้นจริง อนุภาคที่ถูกกักเหล่านี้เป็นอนุภาคพลังงานสูงมากจึงจัดเป็นอนุภาคที่แผ่รังสีได้ (Particle Radiation) ทั้งนี้เพราะว่าสามารถทะลุทะลวงและมีปฏิกิริยากับวัสดุที่ใช้สร้างยานอวกาศหรือแม้แต่วัสดุของมนุษย์ เช่นเดียวกับการกระทำของรังสีเอ็กซ์เรย์และรังสีแกมมา

แถบรังสี (Radiation belts) จำแนกออกได้สองแถบ (รูปที่ 23) คือ แถบรังสีแวนแอลเลนชั้นนอก (Outer Van Allen Radiation Belt) ประกอบไปด้วยสสารของลมสุริยะที่สนามแม่เหล็กโลกกักไว้บริเวณส่วนหางของสนามแม่เหล็ก (Magnetotail) ความเข้มข้นและรูปทรงของสนามแม่เหล็กในแถบรังสีชั้นนอกช่วยเสริม

อัตราเร่งให้กับอิเล็กตรอนกลายเป็นอิเล็กตรอนพลังงานสูง สำหรับแถบที่สองเรียกว่าแถบรังสีแวนแอลเลนชั้นใน (Inner Belt) (บริเวณด้านล่างจะมีปฏิสัมพันธ์กับส่วนบนของบรรยากาศของโลก) ประกอบไปด้วยอนุภาคพลังงานสูงเช่นเดียวกัน แต่แหล่งที่มาเป็นที่น่าสนใจอย่างมาก โดยขณะที่รังสีคอสมิกตกลงสู่โลกในลักษณะคล้ายกับฝนชู (Shower of cosmic rays) ซึ่งมาทุกทิศทางและชนกับโมเลกุลของบรรยากาศเกิดการแตกตัวของนิวเคลียสอะตอม อนุภาคของโปรตรอนที่เกิดจากชนกันถูกปลดปล่อยให้เป็นอิสระและเคลื่อนที่ไปตามแนวของเส้นแรงแม่เหล็กไปสู่อวกาศและเป็นอนุภาคที่อาศัยอยู่ในแถบรังสีแวนแอลเลนชั้นใน



รูปที่ 23 แถบรังสีแวนแอลเลน (Van Allen Radiation Belts)

3.7 วงรอบการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ในรอบ 27 วัน (The 27 days Solar Rotation Cycle)

หากมองจากโลกที่กำลังโคจรรอบดวงอาทิตย์ในทิศทางเดียวกับการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ จะพบว่าบริเวณศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์ใช้เวลาหมุนรอบตัวเองเท่ากับ 27 วันเวลาในโลก ในขณะที่ละติจูดที่สูงกว่าจะใช้เวลานานกว่า ดังนั้นลักษณะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์มีแนวโน้มที่จะปรากฏในช่วงระยะเวลา 27 วัน

ตัวอย่างเช่น บริเวณที่มีกิจกรรมที่เกิดขึ้นใกล้กับขอบด้านข้างของดวงอาทิตย์จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ออกไปประมาณสองสัปดาห์จนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ และหากปรากฏการณ์ดังกล่าวยังคงอยู่จะปรากฏให้เห็นอีกครั้งในสองสัปดาห์ถัดมา

อนุภาคความเร็วสูงในกระแสลมสุริยะที่เกิดจากโคโรนาโฮลส์เป็นปรากฏการณ์อีกอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นในลักษณะที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

3.8 วัฏจักรกิจกรรมดวงอาทิตย์ในรอบ 11 ปี (The 11-year Solar Activity Cycle)

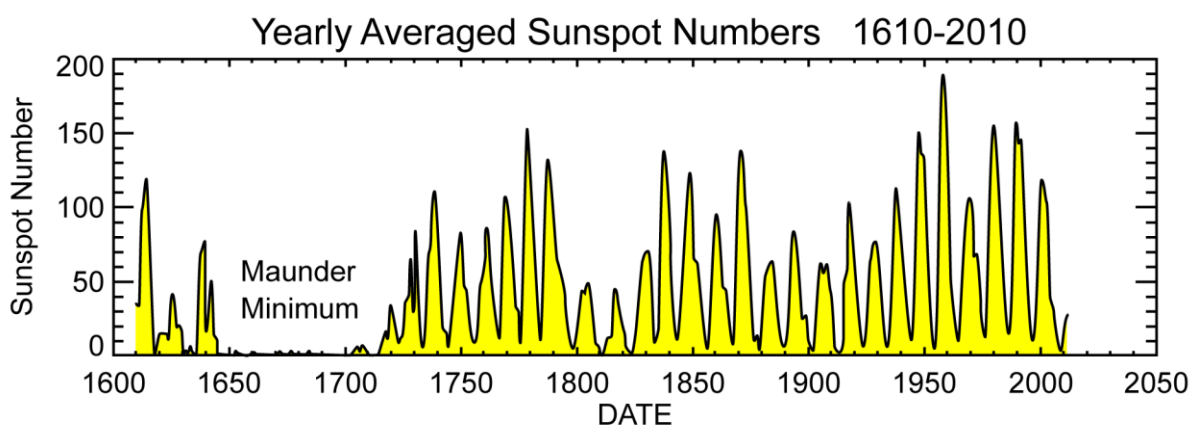
บริเวณที่เกิดกิจกรรมบนดวงอาทิตย์ เช่น จุดมืด (Sunspots) การลุกจ้า (Flares) และการปลดปล่อยก้อนมวลจากโคโรนา ปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้จะเกิดเป็นวัฏจักรในรอบประมาณ 11 ปี ซึ่งเราสังเกตเห็นวัฏจักรดังกล่าวมาเป็นเวลานานนับทศวรรษ (รูปที่ 24) ในระหว่างช่วงครึ่งหลังของศตวรรษที่ 17 กิจกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นขาดหายไปหรือแตกต่างไปจากค่าปกติมาก เช่นการเกิดจุดมืด ซึ่งเรียกว่าช่วงต่ำสุดมอนเดอร์ (Maunder Minimum)

ในช่วงที่เกิดกิจกรรมบนดวงอาทิตย์ต่ำสุด (Solar minimum) ปรากฏให้เห็นในช่วงเริ่มต้นของวัฏจักรกิจกรรมโดยจะเกิดจุดมืดขึ้นเพียงเล็กน้อย (ถ้ามี) การลุกจ้าของดวงอาทิตย์ (Solar flares) เกิดขึ้นค่อนข้าง

น้อยและควมถี่ของการเกิดการปลดปล่อยก้อนมวลจากโคโรนาก็มีค่อนข้างน้อย อย่างไรก็ตามโคโรนาโฮลส์จะเป็นบริเวณกว้างและคงอยู่ได้นานกว่า

สองสามปีถัดจากช่วงที่เกิดกิจกรรมบนดวงอาทิตย์ต่ำสุดแล้ว การเกิดจุดมืดและการลุกจ้าของดวงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นทั้งความถี่ในการเกิดและความรุนแรง ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของอัตราการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ทำให้สนามแม่เหล็กที่อยู่ใต้พื้นผิวของดวงอาทิตย์ม้วนบิดตัว จนในที่สุดจะทะลุผ่านชั้นโฟโตสเฟียร์ในบริเวณที่มีกิจกรรม (Active region) ขึ้นซึ่งเกี่ยวข้องกับจุดมืดบนดวงอาทิตย์ กิจกรรมเหล่านี้จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนสูงที่สุด (กล่าวโดยทั่วไปคือจำนวนของการสังเกตเห็นจุดมืดบนดวงอาทิตย์มีมากที่สุด) เรียกว่าช่วงที่เกิดกิจกรรมบนดวงอาทิตย์มากที่สุด (Solar maximum) อาจยาวนานหลายเดือน หรือสองถึงสามปี ดังนั้นตลอดช่วงเวลาหลาย ๆ ปีของการเกิดกิจกรรมบนดวงอาทิตย์มากที่สุดจะเปลี่ยนกลับลงสู่ช่วงที่เกิดกิจกรรมบนดวงอาทิตย์ต่ำสุดอีกครั้งก่อนที่จะวนรอบใหม่จะเกิดต่อเนื่องกันไป

วัฏจักรกิจกรรมดวงอาทิตย์ในวงรอบ 11 ปี แสดงดังรูปที่ 24 ช่วงที่เกิดกิจกรรมบนดวงอาทิตย์ต่ำสุดเกิดในระหว่างปี ค.ศ.2008-2009 คาดได้ว่าช่วงที่เกิดกิจกรรมบนดวงอาทิตย์มากที่สุดจะเกิดขึ้นราว ๆ ปี ค.ศ.2012 หรือ 2013 นั่นคือมีโอกาสเกิดการลุกจ้า การปลดปล่อยก้อนมวลจากโคโรนาและโปรตรอนพลังงานสูงจะมีความถี่เพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 24 วัฏจักรกิจกรรมดวงอาทิตย์ในวงรอบ 11 ปี (ณ เดือนธันวาคม 2010)

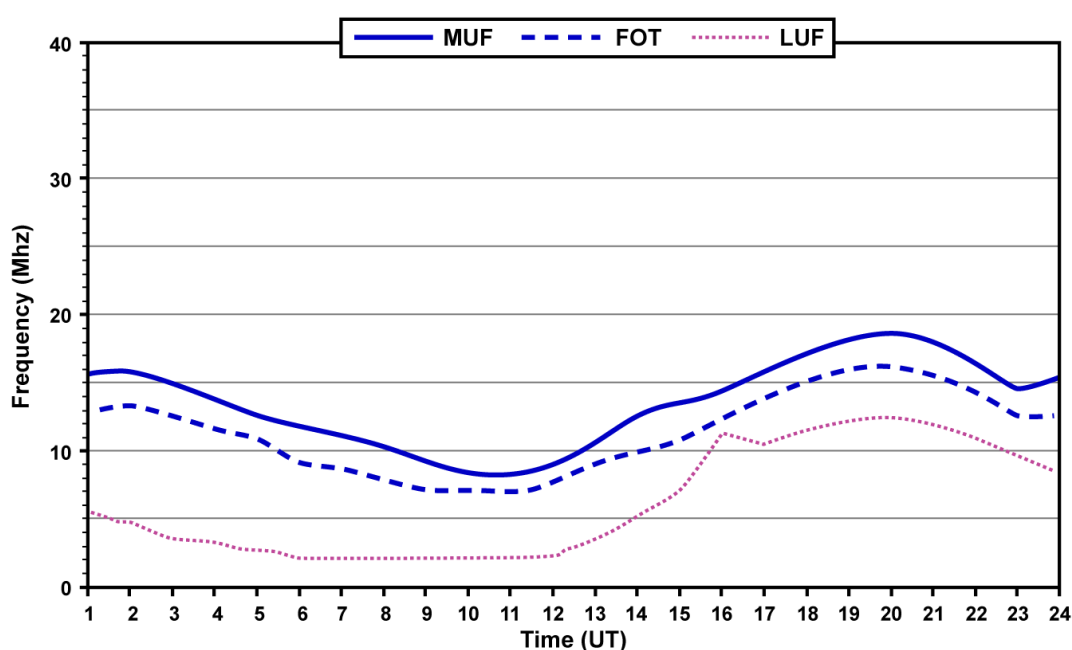
4. ผลกระทบของสภาพอากาศในอวกาศ (Space Weather Impacts) ผลกระทบโดยตรงจากสภาพอากาศในอวกาศต่อการบินประกอบด้วยการลดทอนสัญญาณคลื่นวิทยุหลายย่านความถี่และอันตรายจากรังสี สำหรับสัญญาณคลื่นวิทยุรวมทั้งที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร เรดาร์และการทำงานของระบบนำทาง (Navigation functions)

4.1 ผลกระทบต่อคลื่นสัญญาณความถี่สูง (HF Signal impacts)

การติดต่อสื่อสารและการทำงานของเรดาร์ในช่วงคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงค่อนข้างจะอ่อนไหวต่อการรบกวนที่เกิดขึ้นในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ ทั้งนี้คลื่นวิทยุย่านความถี่สูงโดยปกตินำมาประยุกต์ใช้ในการติดต่อสื่อสารระยะไกล (Long Range Application) ซึ่งนับว่ามีความสำคัญอย่างมากและไม่สามารถเพิกเฉยต่อผลกระทบที่เกิดขึ้นได้เลยเพราะผลกระทบต่อคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงอาจเกิดขึ้นได้ทุกแห่งตามแนวที่ส่งสัญญาณไม่เพียงแต่จะกระทบต่อสถานีส่งสัญญาณหรือสถานีรับสัญญาณเท่านั้น

ช่วงรุ่งอรุณและพลบค่ำ ซึ่งเป็นช่วงเวลาใกล้กับดวงอาทิตย์ขึ้นและดวงอาทิตย์ตก นับว่าเป็นช่วงที่มีความทำหายอย่างมากต่อการทำงานของคลื่นวิทยุย่านความถี่สูง เพราะว่าเป็นช่วงเวลาที่ความหนาแน่นของไอโอโนสเฟียร์จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ บ่อยครั้งที่สถานี

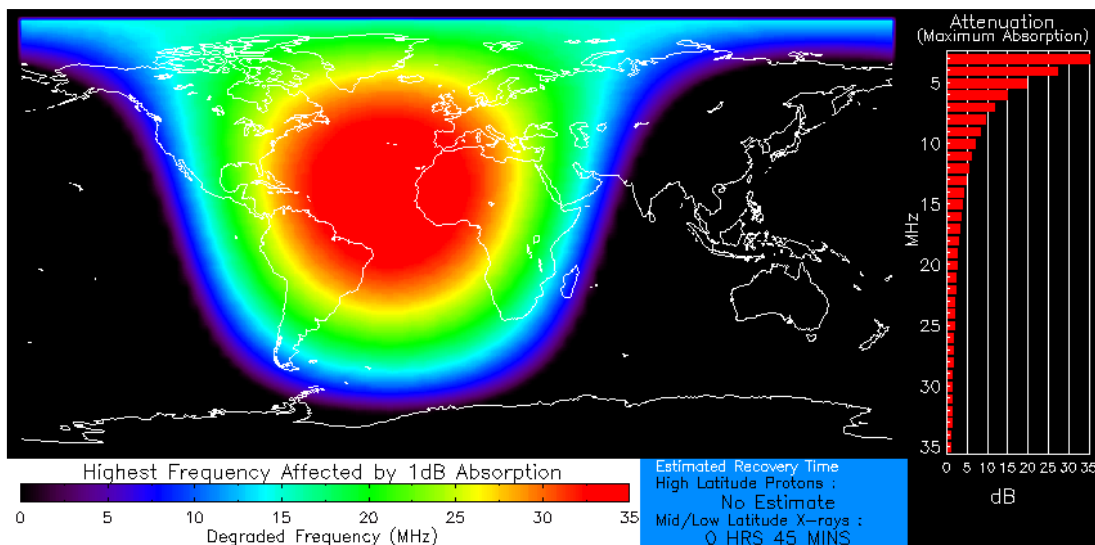
ส่งสัญญาณคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงจะใช้ความถี่ที่แตกต่างกันระหว่างกลางวันและกลางคืนเพื่อให้เหมาะกับเงื่อนไขของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยปกติการส่งสัญญาณในช่วงเวลากลางวันจะใช้ย่านความถี่สูงกว่าในเวลากลางคืนเพื่อประสิทธิภาพในการรับสัญญาณที่ดี ระหว่างช่วงรุ่งอรุณและพลบค่ำมักจะก่อปัญหาให้กับผู้ใช้ว่าจะเลือกใช้อย่านความถี่ใดระหว่างย่านความถี่ที่ใช้ในเวลากลางวันหรือย่านความถี่ที่ใช้ระหว่างเวลากลางคืน เพื่อที่จะได้รับประสิทธิภาพสูงสุดในการรับจนกว่าจะเข้าสู่ช่วงกลางวันหรือกลางคืน แต่ในช่วงเวลาดังกล่าวจะต้องเลือกเพียงสัญญาณคลื่นวิทยุย่านความถี่ใดความถี่หนึ่งเท่านั้น กราฟในรูปที่ 25 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงที่ใช้งานได้ตลอดทั้งวันของงานรับสัญญาณเฉพาะแบบ โดยแสดงให้เห็นอยู่ในช่วงความถี่สูงสุดที่สามารถใช้งานได้ (Maximum useable frequency : MUF) ช่วงความถี่ต่ำสุดที่สามารถมาใช้งานได้ (Lowest useable frequency : LUF) และแสดงย่านความถี่ที่เหมาะสมในการส่งคลื่นสัญญาณวิทยุ (Frequency of optimum transmission : FOT)



รูปที่ 25 กรอบของคลื่นย่านความถี่สูงในรอบวัน

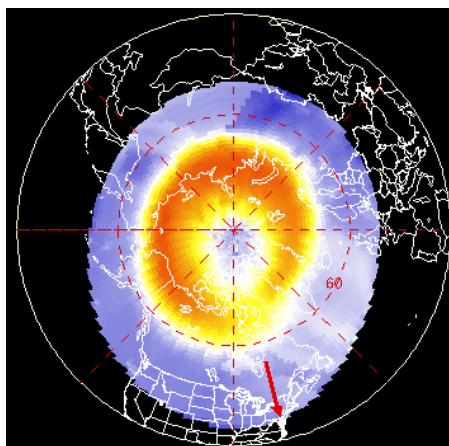
การลุกจ้าของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Flares) เมื่อดวงอาทิตย์ก่อให้เกิดการลุกจ้าของรังสีเอ็กซ์จะส่งผลทำให้ชั้นไอโอโนสเฟียร์ในซีกโลกที่เป็นเวลากลางวันถูกรบกวน ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อยู่ในระดับต่ำ (ชั้น D) ความสามารถในการดูดซับสัญญาณคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงเพิ่มมากขึ้น หากการลุกจ้าของรังสีเอ็กซ์มีกำลังอ่อนอาจทำให้ชั้น D ดูดซับคลื่นสัญญาณคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงได้เพียงบางส่วนโดยเฉพาะบริเวณแถบด้านล่างของคลื่นวิทยุความถี่สูง และถ้าหากการลุกจ้าของรังสีเอ็กซ์มีกำลังปานกลางก็จะเพิ่มการดูดซับบริเวณแถบตอนกลางของคลื่นวิทยุความถี่สูงและถ้ารังสีเอ็กซ์มีกำลังแรงก็จะดูดซับสัญญาณคลื่นวิทยุความถี่สูงได้ทั้งหมดและสามารถดูดซับแถบตอนล่างของคลื่นวิทยุ VHF ได้อีกด้วย ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า การขาดหายของคลื่นสัญญาณวิทยุความถี่สูง (HF Blackout or Shortwave fade) ซึ่งขึ้นอยู่กับความรุนแรงของรังสีเอ็กซ์และความยาวนานของรังสีเอ็กซ์ คลื่นวิทยุความถี่สูงอาจถูกดูดซับเป็นเวลานานนับสิบนาทีถึงหลายชั่วโมง แต่ข้อพึงระวังผลกระทบที่มีต่อการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุความถี่สูงเกิดขึ้นเฉพาะเวลากลางวันเท่านั้น โดยที่บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ รูปภาพที่ 26 แสดงให้เห็นการขยายพื้นที่ของผลกระทบของการลุกจ้าของรังสีเอ็กซ์

ต่อคลื่นวิทยุความถี่สูงรอบโลกการลดทอนสัญญาณคลื่นวิทยุแสดงด้วยค่าการสูญเสียพลังงาน (attenuation) มีหน่วยเป็นเดซิเบล (Decibels)



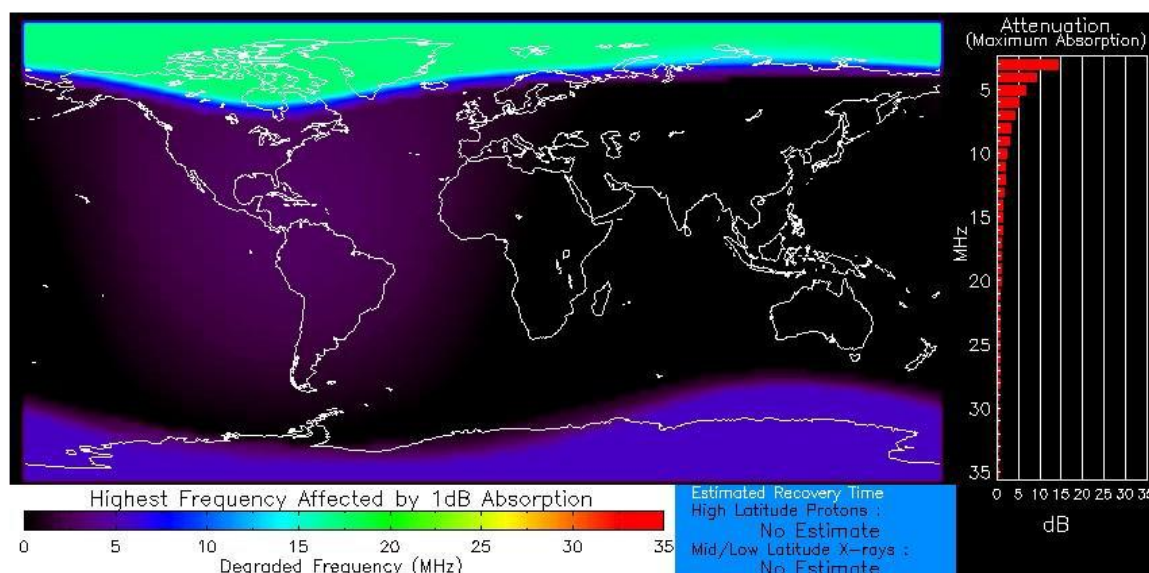
รูปที่ 26 แผนที่การดูดซับสัญญาณคลื่นวิทยุในชั้น D ระหว่างการเกิดการลุกจ้าของรังสีเอ็กซ์

พายุแม่เหล็กโลก (Geomagnetic storms) ทำให้เกิดออโรราที่สวยงาม แต่ก็ก่อให้เกิดปัญหาหลักต่อผู้ติดต่อสื่อสารคลื่นวิทยุในย่านความถี่สูงเช่นกัน อนุภาคพลังงานสูง (energetic particles) ที่เข้ามาในชั้นบรรยากาศก่อให้เกิดการปั่นป่วนและรบกวนโครงสร้างในทางตั้งของบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นสาเหตุที่ทำให้คลื่นวิทยุยานความถี่สูงแยกออกและหักเหไปในทุกทิศทาง มีการดูดซับสัญญาณและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของคลื่น (Scintillation คือ การเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มอย่างรวดเร็วของความแรงของสัญญาณทิศทาง เฟส และความถี่) ซึ่งเป็นผลกระทบที่ไม่พึงประสงค์ การรบกวนบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ในระหว่างการเกิดพายุแม่เหล็กโลกอาจนานนับหลายชั่วโมงถึงสองหรือสามวัน จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องรู้กล่าวคือชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อยู่ในพื้นที่ที่เกิดออโรรามีแนวโน้มที่ได้รับผลกระทบความผิดปกติเหล่านั้นอย่างน้อยก็ในชั้นความรุนแรงเล็กน้อยเสมอ แสดงดังรูปที่ 27 ดังนั้น ถึงแม้ว่าจะอยู่ในช่วงที่ปราศจากพายุแม่เหล็กโลกก็ตามการแพร่กระจายสัญญาณบริเวณแถบขั้วโลกก็มีแนวโน้มที่สัญญาณจะถูกลดทอนเสมอ

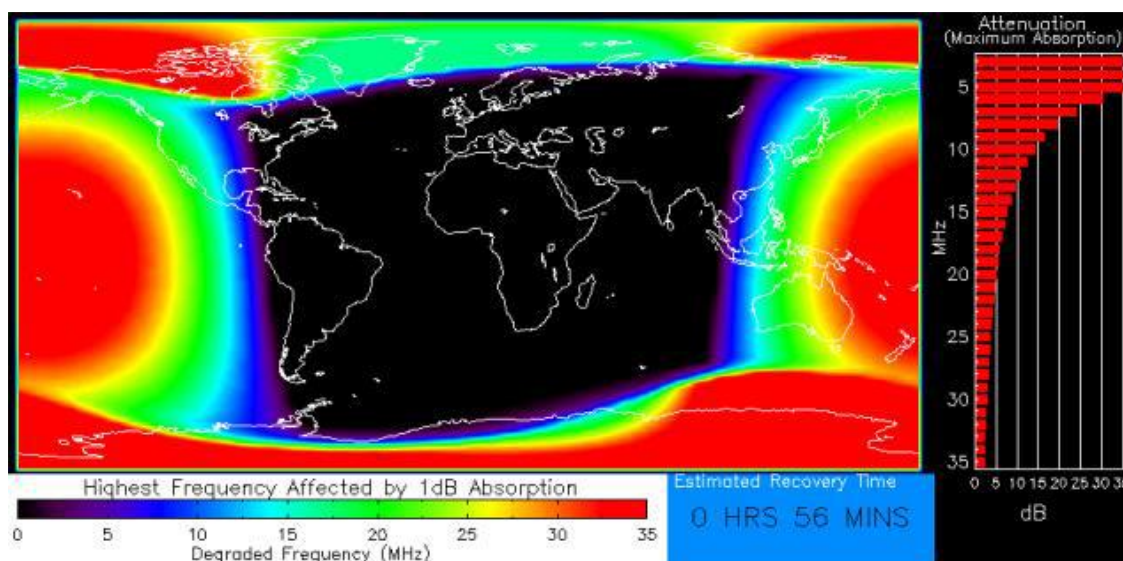


รูปที่ 27 พื้นที่วงออโรราที่มีผลกระทบต่อบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์
ระหว่างการเกิดกิจกรรมพายุแม่เหล็กโลก โดยประมาณ (ลูกศรสีแดงแสดงทิศทางของดวงอาทิตย์)

ปรากฏการณ์โปรตรอน (Proton Events) นอกจากการก่อให้เกิดการลุกจ้าของรังสีเอ็กซ์และการปะทุของคลื่นวิทยุแล้ว การลุกจ้าของดวงอาทิตย์ (Solar flare) ยังทำให้มีการปลดปล่อยโปรตรอนพลังงานสูงเข้าสู่ลมสุริยะด้วยเช่นกัน โปรตรอนพลังงานสูงเหล่านี้มีความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วแสงและเดินทางมายังโลกประมาณหนึ่งชั่วโมงเป็นอย่างน้อยหลังจากที่เกิดการลุกจ้าของดวงอาทิตย์ ดังนั้นโปรตรอนพลังงานสูงเข้าสู่สนามแม่เหล็กโลกบริเวณใกล้กับขั้วแม่เหล็ก (Polar cusps) (แสดงดังรูปที่ 9) และปะทะกับบรรยากาศบริเวณขั้วโลก ปรากฏการณ์ดังกล่าวไม่ได้เป็นสาเหตุของการเกิดออโรรา แต่จะให้ความหนาแน่นของไอโอโนสเฟียร์ระดับต่ำ (ชั้น D) เพิ่มขึ้นขึ้นเช่นกับการเกิดการลุกจ้าของรังสีเอ็กซ์เรย์ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นสาเหตุของการดูดซับคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงในบริเวณละติจูดสูงเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Polar cap absorption (PCA) รูปที่ 28 แสดงผลกระทบของพื้นที่ระหว่างที่เกิดปรากฏการณ์ Polar cap absorption (บริเวณพื้นที่สีม่วงอ่อนเหนือประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นช่วงเวลากลางวันที่ชั้น D มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น) ส่วนรูปที่ 29 แสดงผลของการลุกจ้าของดวงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่ก่อให้เกิดการลุกจ้าอย่างรุนแรงของรังสีเอ็กซ์ (บริเวณรูปดาวเหนือมหาสมุทรแปซิฟิก) และปรากฏให้เห็นปรากฏการณ์ PCA (เหนือบริเวณแอนตาร์กติกาและแอนตาร์กติกา)

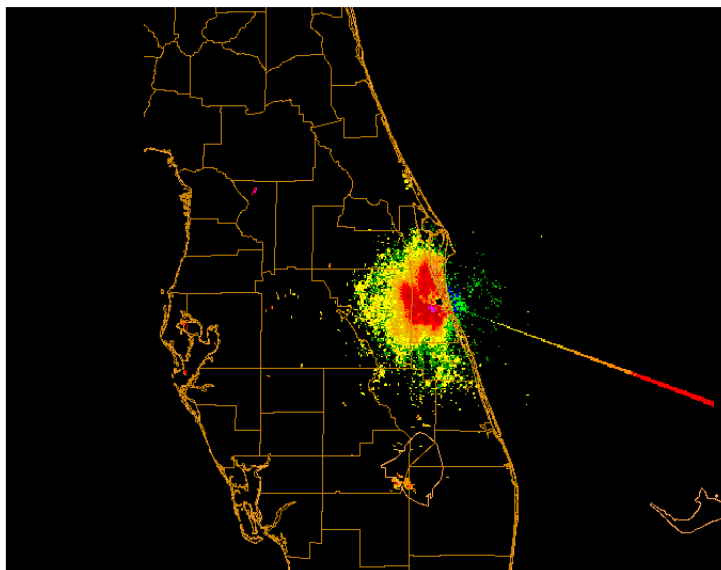


รูปที่ 28 แผนที่แสดงการดูดซับในชั้น D ระหว่างการเกิด Polar cap absorption กำลังปานกลาง



รูปที่ 29 แผนที่แสดงการดูดซับในชั้น D ระหว่างการเกิดการลุกจ้าของรังสีเอ็กซ์อย่างรุนแรงมาก และปรากฏการณ์ Polar cap absorption อย่างรุนแรง (เปรียบเทียบกับรูปที่ 26 และ 28)

4.2 การรบกวนจากคลื่นวิทยุของดวงอาทิตย์ (Solar Radio Interference) ในชั้นโคโรนาของดวงอาทิตย์ และบริเวณที่มีกิจกรรมบนดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของคลื่นวิทยุของดวงอาทิตย์ ทิศทางหรือมุม (Geometry) มีบทบาทอย่างสำคัญอย่างมากต่อการเกิดสัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุอันเป็นผลมาจากดวงอาทิตย์ การวางตำแหน่งของอุปกรณ์ส่งสัญญาณและอุปกรณ์ภาครับสัญญาณที่ทำมุมกับดวงอาทิตย์อาจก่อให้เกิดความล้มเหลวอย่างสิ้นเชิง (washout) ในการส่ง-รับสัญญาณวิทยุได้ ตัวอย่างเช่น การพยายามที่จะดักจับสัญญาณดาวเทียมในขณะที่ดวงอาทิตย์วางแนวอยู่ตรงด้านหลังของดาวเทียมจะกระทำไม่ได้เลย อย่างไรก็ตามเนื่องจากโลกมีการหมุนรอบตัวเอง ด้วยเหตุนี้โอกาสที่จะเหตุการณ์ดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นมากนักหรือหากเกิดก็จะเป็นช่วงไม่กี่นาทีเท่านั้น ในทางตรงกันข้ามเรดาร์ค่อนข้างจะอ่อนไหวต่อการรบกวนสัญญาณคลื่นวิทยุจากดวงอาทิตย์เป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะการส่งสัญญาณและรับสัญญาณมีทิศทางที่กว้างมากและตำแหน่งของดวงอาทิตย์ก็อยู่ในทิศทางนั้นได้บ่อยครั้ง รูปที่ 30 แสดงการรบกวนสัญญาณของเรดาร์ตรวจอากาศจากดวงอาทิตย์ซึ่งเกิดขึ้นที่ความถี่ของเรดาร์ โดยปรากฏเป็นแนวยาว ๆ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ผิดพลาด ในกรณีนี้อยู่ในย่านความถี่ 2800 MHz ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Sun spike บริเวณดังกล่าวไม่ได้เป็นสาระประกอบกบอบทางอุตุนิยมวิทยา (น้ำฟ้า) ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ โดยทั่วไปแล้วระบบเรดาร์ที่ได้รับผลกระทบจากการแทรกแซงของคลื่นวิทยุจากดวงอาทิตย์เกิดขึ้นอยู่เสมอ อาจกล่าวได้ว่าไม่ได้เป็นผลกระทบที่แท้จริง



รูปที่ 30 การรบกวนสัญญาณเรดาร์ในภาพเรดาร์ตรวจอากาศจากคลื่นวิทยุของดวงอาทิตย์
(แนวยาวไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้)

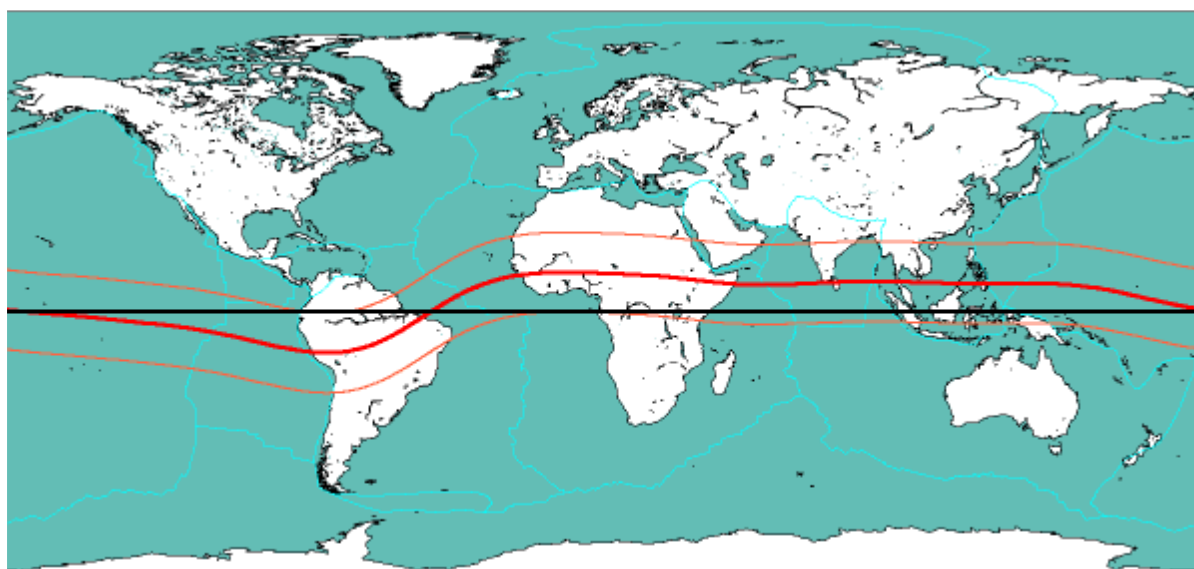
ในทางตรงกันข้ามการรบกวนของดวงอาทิตย์ การปลดปล่อยก้อนมวลในชั้นโคโรนาและกิจกรรมอื่น ๆ ในชั้นโคโรนาของดวงอาทิตย์ก่อให้เกิดการรบกวนคลื่นวิทยุเพิ่มมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อระบบการติดต่อสื่อสาร ระบบนำทางและสัญญาณเรดาร์ในย่านความถี่สูงถึงย่าน SHF การรบกวนสัญญาณวิทยุอาจรุนแรงมากยิ่งขึ้น โดยปรากฏเป็น Side lobe ในภาครับของจานรับสัญญาณเรดาร์ ถึงแม้ว่าการออกแบบจานรับสัญญาณและมี วงจรอิเล็กทรอนิกส์กรองสัญญาณ (Electronic filters) ช่วยลดทอนการรบกวนสัญญาณได้ แต่ไม่สามารถลดทอนการ รบกวนสัญญาณได้ทั้งหมดเพราะการรบกวนของคลื่นวิทยุเกิดขึ้นในหลาย ๆ ย่านความถี่ (Radio frequency interference : RFI) ระหว่างเกิดการปะทุคลื่นวิทยุของดวงอาทิตย์จานรับสัญญาณที่อยู่ทางด้านซีกโลกที่เป็นเวลา กลางวันจะประสบกับปัญหาการรบกวนจากความเข้มของสัญญาณคลื่นวิทยุที่เพิ่มมากขึ้น (Radio whiteout) ผลกระทบที่ตามมาจะทำให้ไม่สามารถตรวจจับเป้าหมายได้เป็นเวลานานนับสิบนาทีกหรือหลายชั่วโมงต่อการ รบกวนในแต่ละครั้ง

4.3 ผลกระทบต่อสัญญาณวิทยุย่าน VHF/UHF

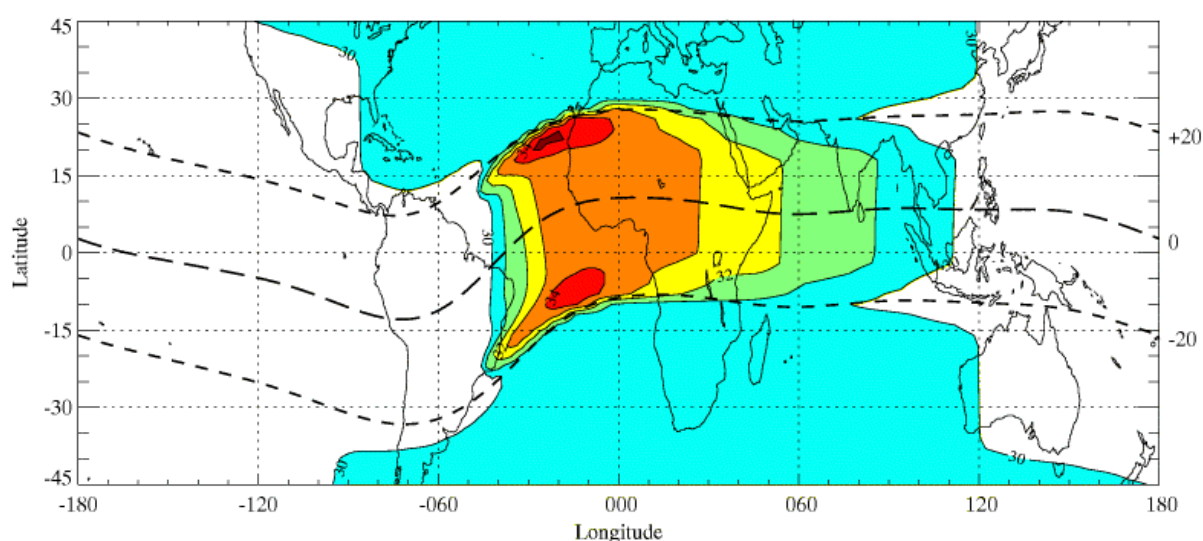
การติดต่อสื่อสารและการปฏิบัติการของเรดาร์ที่อยู่ในคลื่นวิทยุย่าน VHF และ UHF ได้รับผลกระทบ จากการที่บรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ถูกรบกวนน้อยกว่าที่ปฏิบัติการในคลื่นวิทยุย่านความถี่สูง (HF) อย่างไร ก็ตาม ย่านความถี่นี้จะพบกับปัญหาเฉพาะอย่างในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์เช่นเดียวกัน

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของคลื่นแถบศูนย์สูตร (Equatorial Scintillation) นอกจากการรบกวน ของคลื่นวิทยุในหลาย ๆ ย่านความถี่อันเป็นผลมาจากการปะทุของคลื่นวิทยุของดวงอาทิตย์แล้ว สัญญาณคลื่นวิทยุ ย่านความถี่ VHF และ UHF ที่ส่งผ่านบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ไปยังดาวเทียมก็ได้รับผลกระทบเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะบริเวณละติจูดต่ำ ๆ ในช่วงเวลากลางวัน บริเวณเหนือสนามแม่เหล็กแถบศูนย์สูตร (Magnetic equator หมายถึง บริเวณที่สนามแม่เหล็กโลกวางตัวอยู่ในแนวระนาบขนานไปกับพื้นผิวโลก แสดงดังรูปที่ 31) บรรยากาศชั้นไอโอโนส เฟียร์จะมีความเข้มเพิ่มขึ้นและเลื่อนสูงขึ้นไปในช่วงที่เกิดปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนนี้ ซึ่งเรียกว่า Equatorial anomaly แต่เมื่อดวงอาทิตย์ตก ชุดของพลาสมาพยายามที่จะลดมาอยู่ในระดับความสูงที่ต่ำกว่า แต่เนื่องจาก บังคับโดยเส้นแรงแม่เหล็กในแนวระนาบ แทนที่จะถ่ายเทในแนวเหนือใต้ซึ่งมีเส้นแรงแม่เหล็กลาดเอียงผ่านชั้น ไอโอโนสเฟียร์ที่ประกอบด้วยพลาสมาที่อยู่ในบริเวณนี้ ความปั่นป่วนของการเคลื่อนที่ในชั้นไอโอโนสเฟียร์

ก่อให้เกิดช่องว่างของพลาสมา (Bubble plasma) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิด Scintillation ของคลื่นวิทยุย่านความถี่ VHF และ UHF (Scintillation หมายถึง การเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มอย่างรวดเร็วของสัญญาณ ความถี่ ความเข้ม ทิศทางและเฟส ผลกระทบดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างมากระหว่างละติจูดที่ 15-20 องศาเหนือ/ใต้ของสนามแม่เหล็ก แลบนขั้วสูตร ตามแนวของ Equatorial Scintillation นี้ผู้ใช้จะประสบกับปัญหาการติดต่อสื่อสารกับ ดาวเทียมย่านความถี่ UHF เริ่มตั้งแต่ประมาณหนึ่งชั่วโมงหลังดวงอาทิตย์ตกถึงเที่ยงคืนหรือนานกว่านั้น สิ่งสำคัญที่ควรทราบอย่างหนึ่งคือ Equatorial Scintillation นี้ไม่ได้เกิดขึ้นทุกคืน แต่อาจเกิดขึ้นแบบกะทันหัน และรุนแรงพอที่จะทำให้เกิดการสูญเสียการดักจับสัญญาณจากดาวเทียมได้ รูปที่ 32 แสดงตำแหน่งที่ตั้ง แนวที่เกิดและความรุนแรงของ Scintillation ซึ่งเป็นช่วงที่ดวงอาทิตย์ตกที่ประเทศบราซิล (2300 GMT) สังเกตพบว่าแถบอเมริกาเหนือไม่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ดังกล่าว)

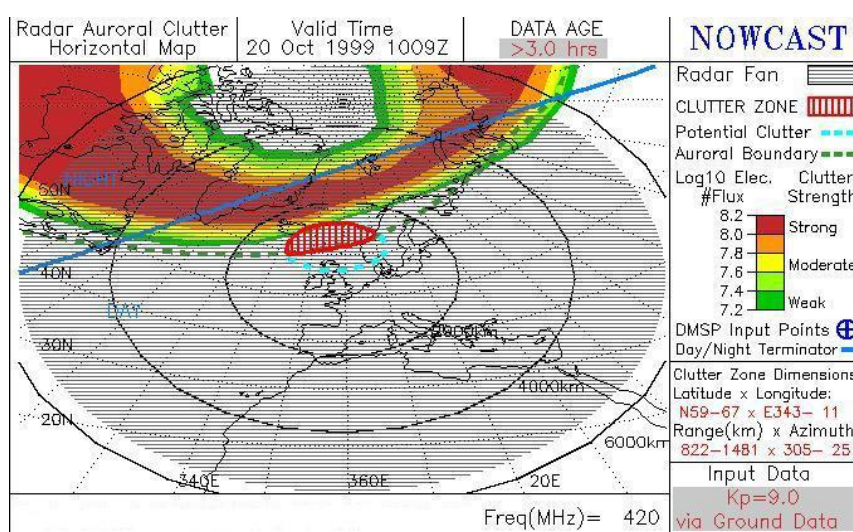


รูปที่ 31 สนามแม่เหล็กโลกแลบนขั้วสูตรและแถบที่จะเกิด Scintillation (แสดงพื้นที่ที่เบี่ยงเบนไปจากเส้นศูนย์สูตรตามพิกัดภูมิศาสตร์ซึ่งเป็นเส้นสีดำ)



รูปที่ 32 รูปแบบของ Scintillation เวลา 2300 UTC

พายุแม่เหล็กโลก (ออโรรา) ออโรราก่อให้เกิดปัญหาอย่างมากต่อการกระจายสัญญาณคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงและยังก่อให้เกิดปัญหาในคลื่นวิทยุในช่วงคลื่น VHF และ UHF เช่นเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเรดาร์ อนุภาคพลังงานสูงเหล่านั้นที่เข้ามาในบรรยากาศก่อให้เกิดการปั่นป่วนและรบกวนโครงสร้างทางตั้งของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งทำให้เกิดภาพอันไม่พึงประสงค์ (radar clutter) บนจอเรดาร์ ระบบเรดาร์ส่วนใหญ่มีซอฟต์แวร์ที่จะลดทอนหรือแม้แต่ลบภาพอันไม่พึงประสงค์ออกได้จึงไม่มีความกังวลในปัญหาดังกล่าวมากนัก อย่างไรก็ตามมีบางระบบที่ได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์นี้ หากมีความรุนแรงมากจะส่งผลทำให้เรดาร์ไม่สามารถรับสัญญาณได้ (Blind spot) การรบกวนบรรยากาศในชั้นไอโอโนสเฟียร์และออโรราเกี่ยวข้องกับการเกิดภาพอันไม่พึงประสงค์บนจอเรดาร์ (radar clutter) ในขณะเกิดพายุแม่เหล็กโลกอาจเป็นเวลายาวนานนับชั่วโมงถึงหลายวัน รูปที่ 33 แสดงช่วงเวลาเกิดพายุแม่เหล็กโลกที่ส่งผลกระทบต่อเรดาร์ที่ทำงานในย่านความถี่ 420 MHz ซึ่งแสดงเป็นแถบที่เกิดขึ้นบนจอเรดาร์ที่กำหนดโดยชนิดของงานรับสัญญาณและมุมในการส่งผ่านพลังงานออกไป



รูปที่ 33 Auroral clutter บนภาพเรดาร์

4.4 ผลกระทบต่อระบบนำทางด้วย GPS (Global Position system)

ประสิทธิภาพของระบบนำทางด้วย GPS ขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของระยะเวลาสัญญาณดาวเทียม ขณะที่บรรยากาศและชั้นไอโอโนสเฟียร์ทำให้เกิดความล่าช้าของสัญญาณ GPS ในย่านความถี่ UHF (L band) เพียงเล็กน้อย แต่ก็เพียงพอที่จะให้การระบุตำแหน่งเกิดความคลาดเคลื่อนได้อย่างมาก อันที่จริงความล่าช้าเพียงหนึ่งในล้านของวินาทีก็ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งถึง 300 เมตร เพื่อเป็นการลดค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าว ระบบ GPS ติดตั้งอุปกรณ์เกี่ยวกับวิเคราะห์ข้อมูลบรรยากาศและชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ดาวเทียมด้วย ถึงแม้ว่าผลกระทบจะสัมพันธ์กับปัจจัยดังกล่าวแล้ว ยังต้องพิจารณาถึงความเร็วของดาวเทียม GPS แรงดึงดูดของโลกด้วยเช่นกัน

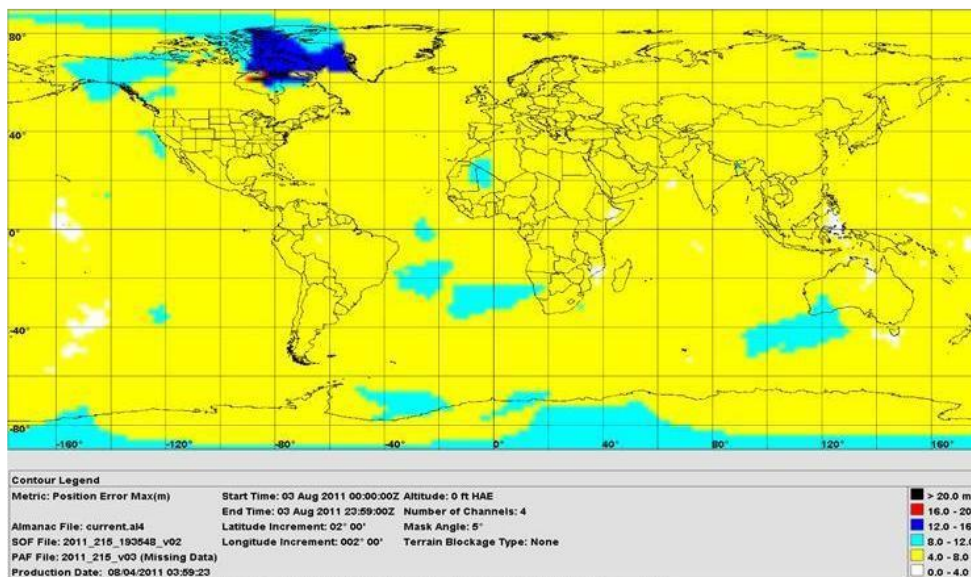
ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากบรรยากาศอาจปรับแก้ให้ลดลงได้โดยให้ระบบ GPS นำเอาค่าความกดอากาศที่ผิวพื้นมาคำนวณร่วมด้วย การขจัดความคลาดเคลื่อนของชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นสิ่งที่ยากต่อการแก้ปัญหา เพราะการคำนวณต้องรวมตัวแปรต่างๆ หลากหลาย ซึ่งค่าตัวแปรที่ได้นั้นเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลอง (เวลา วันที่ ละติจูด ลองจิจูด กิจกรรมของสนามแม่เหล็ก วงรอบของดวงอาทิตย์ รวมทั้งกิจกรรมต่างๆ บนดวงอาทิตย์) ถึงกระนั้นก็ตามความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่น้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง

เล็กน้อยและการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ได้คาดหมายไว้เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด หากไม่ได้นำไปคำนวณร่วมด้วยก็เป็นจุดเริ่มต้นของความผิดพลาดในกระบวนการลดความคลาดเคลื่อนของระบบ

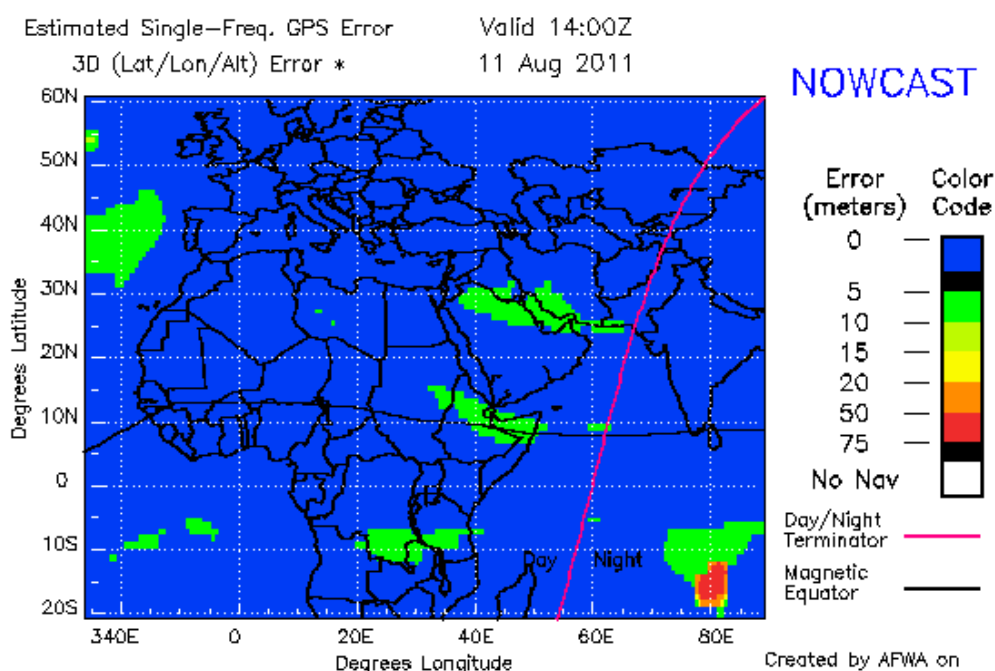
ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาเครื่องรับสัญญาณ GPS ได้ปรับปรุงการบริการระบบนำทางให้ดีขึ้น โดยผสมผสานที่หลากหลายระหว่างวิธีการทางสถิติและอัลกอริทึมขั้นสูง ซึ่งแบ่งประเภทการให้บริการเป็น 2 ระบบ คือ Standard Positioning Service (SPS) และ Precise Positioning Service (PPS) ระบบ SPS ให้บริการระบบนำทางแบบย่านความถี่เดียว (Single frequency) เพื่อใช้ในการกิจการรักษาความสงบ การพาณิชย์และทางวิทยาศาสตร์ ส่วนระบบ PPS ให้บริการระบบนำทางที่เกี่ยวข้องกับความแม่นยำ ซึ่งมีทั้งระบบย่านความถี่เดียวและหรือย่านความถี่คู่ (dual frequency) เครื่องรับระบบนำทางที่ใช้ย่านความถี่เดียว (ไม่ว่าจะเป็นแบบ SPS หรือ PPS) มีการชดเชยความล่าช้าในชั้นไอโอโนสเฟียร์จากแบบจำลอง ขณะที่เครื่องรับย่านความถี่คู่ (เฉพาะระบบ PPS เท่านั้น) ใช้หลักการเปรียบเทียบความถี่ในการคำนวณความล่าช้าในชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างต่อเนื่องเป็นปัจจุบัน

ด้านกิจการการบินและระบบอาวุธใช้ประโยชน์จากระบบ PPS เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามต้องเข้าใจด้วยเช่นกันว่าสถานีภาคพื้นยังคงใช้เครื่องรับระบบ PPS แบบย่านความถี่เดียว เช่น Precision Lightweight GPS Receiver (PLUGGER) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวจะเริ่มถูกแทนที่ด้วย Defense Advanced GPS Receiver (DAGGER) ซึ่งเป็นเครื่องรับแบบย่านความถี่คู่

รูปที่ 34 แสดงตัวอย่างของแผนที่ความคลาดเคลื่อนของเครื่องรับ GPS ที่ใช้ย่านความถี่คู่ซึ่งใช้ดาวเทียม 4 ดวงที่เหมาะสมที่สุด (เหมาะสมที่สุด หมายถึงตำแหน่งในท้องฟ้าและความสัมพันธ์กันระหว่างตำแหน่งของดาวเทียม โดยที่ดาวเทียม GPS ที่มีตำแหน่งอยู่เหนือพื้นที่นั้นจะมีความถูกต้องของสัญญาณมากกว่าเพราะทำมุมค่อนข้างชันและมีช่วงเวลาสั้นที่สุดในการผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ และหากมีดาวเทียมกระจายออกไปมากผลการนำทางก็จะมีค่าความถูกต้องเพิ่มขึ้นเช่นกัน) ระบบ GPS คลาดเคลื่อน 16-20 เมตรในเขตอาร์กติกเนื่องจากพายุแม่เหล็กโลกและเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ออโรรา รูปที่ 35 แสดงแผนที่ความคลาดเคลื่อนของเครื่องรับระบบ GPS แบบ PPS ย่านความถี่เดียว พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อน 5-10 เมตรบริเวณพื้นที่ตรงกลางของสนามแม่เหล็กเขตศูนย์สูตร (เส้นลายคลื่นสีดำ) บริเวณเหนืออาฟริกาตะวันออกและด้านตะวันตกเฉียงใต้ของเอเชีย ทั้งนี้เนื่องจากความผิดปกติเขตศูนย์สูตร ความคลาดเคลื่อน 75 เมตรในมหาสมุทรอินเดีย (ประมาณหนึ่งชั่วโมงหลังจากดวงอาทิตย์ตก) ทั้งนี้เนื่องจาก Equatorial scintillation ของสัญญาณคลื่นวิทยุย่าน UHF



รูปที่ 34 ค่าความคลาดเคลื่อนของ Dual Frequency



รูปที่ 35 ค่าความคลาดเคลื่อนของ Single Frequency

4.5. อันตรายจากรังสี (Radiation Hazards- High Latitude and High Altitude)

รังสีคอสมิกและโดยเฉพาะอย่างยิ่งการกระจายของอนุภาคพลังงานสูง ซึ่งเกิดจากการที่รังสีคอสมิกชนกับโมเลกุลของอากาศในบรรยากาศระดับบน ก่อให้เกิดการแผ่รังสีที่อันตรายต่อการบิน อนุภาคโปรตรอนพลังงานสูงจากการลุกจ้าของดวงอาทิตย์ก็เพิ่มการแผ่รังสีที่เป็นอันตรายมากขึ้น อันตรายดังกล่าวเพิ่มขึ้นตามความสูงและละติจูด

ทั้งนี้เพราะอนุภาคแผ่รังสีสามารถที่จะทะลุทะลวงเข้าไปในอากาศยานและมีผลกระทบต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่น โปรตรอนพลังงานสูงอาจแทรกเข้าไปในเมนบอร์ดคอมพิวเตอร์และแยกอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่โดยรอบออกจากอะตอม ทำให้อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กมากเกิดการกรอบและแตกหักได้ ซึ่งอาจเกิดการรบกวนข้อมูล การเปลี่ยนแปลงคำสั่ง หรือแม้กระทั่งทำลายองค์ประกอบของคอมพิวเตอร์ ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า SEE (Single Event Effect) ความซับซ้อนของระบบและซอฟต์แวร์ที่ติดตั้งบนอากาศยานมีการขจัดปรากฏการณ์ SEE แม้กระนั้นก็ตามก็มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน

ภัยคุกคามที่เห็นได้ชัดเจนของอนุภาคที่แผ่รังสีเหล่านี้คือภัยที่มีต่อร่างกายมนุษย์ (เช่นลูกเรือและผู้โดยสาร) อนุภาคที่แผ่รังสีมีผลกระทบต่อการบินเชิงพาณิชย์เช่นเดียวกับการปฏิบัติทางอากาศของทหาร โดยเฉพาะหากทำการบินในระดับสูง ๆ ตัวอย่างเช่นเมื่อปรากฏอนุภาคโปรตรอนพลังงานสูง Federal Aviation Administration (FAA) จะกำหนดระยะเวลาในการบิน และความสูงของเพดานบินตามเส้นทางบินเชิงพาณิชย์ (commercial air routes) โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณเหนือหรือใกล้กับแถบขั้วโลก การปฏิบัติทางอากาศของทหารจะได้รับการประกาศแจ้งเตือนรังสีต่างๆ จากหน่วยงานที่รับผิดชอบในพื้นที่เช่นเดียวกัน

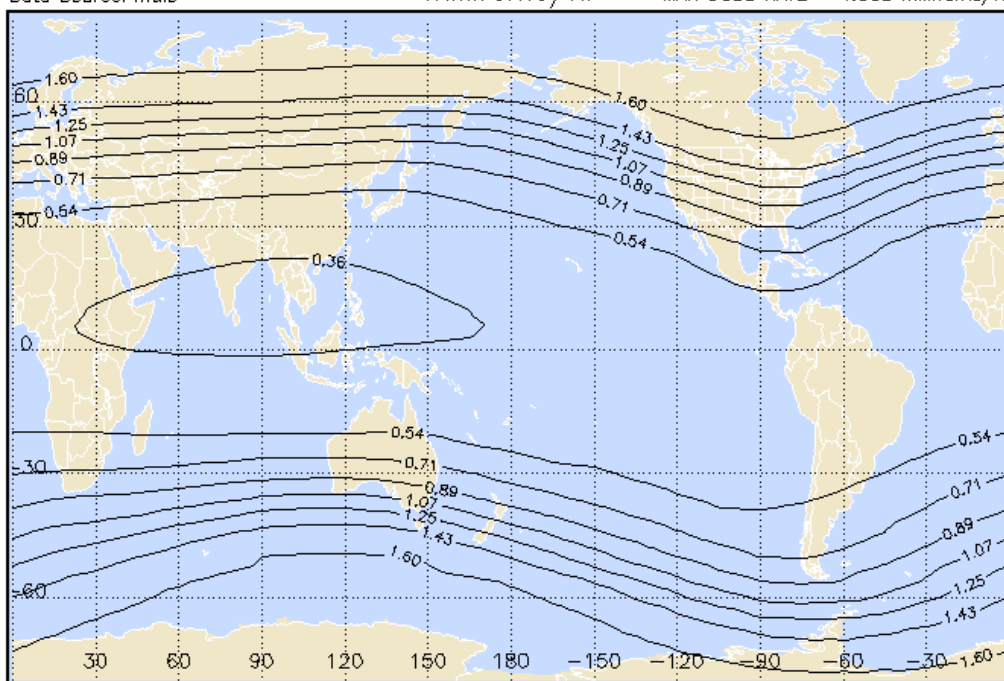
การพิจารณาอันตรายที่ผลต่อสุขภาพจากการที่ได้รับพลังงานรังสี ตามปกติจะบ่งบอกเป็น โดส (dose) ซึ่งเป็นค่าแสดงผลกระทบจากปริมาณรังสีทั้งหมดที่ร่างกายดูดซับไว้ ตารางเปรียบเทียบค่าโดสซึ่งอธิบายถึงความแตกต่างในการตอบสนองของส่วนต่าง ๆ ของร่างกายและเนื้อเยื่อที่มีต่อพลังงานรังสี โดยมีหน่วยเป็น rem (Roentgen Equivalent in Man) และ millirem (mrem, 1ใน1000 ส่วนของ rem) เพื่อแสดงอันตรายที่เกิดจากรังสี รูปที่ 36 แสดงแผนที่ของค่าการแผ่รังสีสำหรับลูกเรือที่ทำการบินที่ระดับความสูง 67,000 ฟุต รอบโลก ค่าโดสเริ่มตั้งแต่ 0.35 ถึง 1.608 mrem ต่อชั่วโมง โดยทั่วไปเพิ่มขึ้นตามละติจูดซึ่งจะมีค่าสูงสุดแถบขั้วโลก โดยมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าประมาณ 5 เท่าตามแนวแม่เหล็กแถบศูนย์สูตร

High-Flyer Background Cosmic Radiation Dosage

VALID: 11 Aug/1207Z
Data Source: Thule

millirems/hr

Altitude (ft): 67000
MAX DOSE RATE = 1.608 millirems/hr



รูปที่ 36 แสดงโดสของรังสีบริเวณเส้นทางบินในระดับสูง

สำหรับการเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสีอันเนื่องมาจากสิ่งต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์ (แสดงค่าเฉลี่ยรายปี) ข้อสังเกตการบินในระดับสูง ๆ ปริมาณรังสีอยู่ในอันดับที่สูงกว่าผลรวมปริมาณรังสีทั้งหมดจากแหล่งต่างๆ ของสิ่งมีชีวิตบนพื้นโลก ปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและจากการกระทำของมนุษย์มีดังนี้

อากาศ (ส่วนมากเป็นแก๊สเรดอนที่ปลดปล่อยจากเปลือกโลก)	0.0020-0.1000 mrem/ชั่วโมง
อาหาร (ส่วนมากจากคาร์บอน 14 และ โพตัสเซียม-40 ไอโซโทป)	0.0020-0.0100 mrem/ชั่วโมง
พื้นผิวโลก (พื้นดินและวัสดุสิ่งปลูกสร้าง)	0.0030-0.0100 mrem/ชั่วโมง
รังสีคอสมิก (ผิวพื้น - 10,000 ฟุต)	0.0030-0.0100 mrem/ชั่วโมง
การแพทย์ (x-ray)	0.0003-0.0200 mrem/ชั่วโมง

4.6 ผลกระทบต่อสนามแม่เหล็ก

พายุแม่เหล็กโลก (Geomagnetic Storm) เป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดความผันผวนของความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็กที่พื้นผิวโลก ก่อให้เกิดวิกฤตต่ออุตสาหกรรมระบบนำทางหรือการสำรวจซึ่งเกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กโลก ถึงแม้ว่าหลายๆ ระบบได้มีการปรับปรุง GPS ให้ทันสมัยและมีเทคนิคต่าง ๆ ที่ดีขึ้น แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าระบบการบินดั้งเดิมยังใช้ระบบนำทางที่ต้องพึ่งพาทิศทางของสนามแม่เหล็กจึงมีความเสี่ยงที่จะเกิดข้อผิดพลาดร้ายแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ระบบดังกล่าวในละติจูดที่สูงซึ่งบริเวณดังกล่าวสนามแม่เหล็กเกือบจะเป็นแนวตั้ง การเคลื่อนไปอย่างไร้จุดหมายอย่างช้าๆ ของขั้วแม่เหล็กโลกต่อหนึ่งหน่วยระยะเวลาอันเนื่องมาจากความผันผวนของสนามแม่เหล็กระหว่างการเกิดพายุแม่เหล็ก ส่งผลต่อความผิดปกติอย่างมากของทิศทางในแนวระนาบบริเวณใกล้เคียงกับขั้วแม่เหล็ก อันที่จริงบริเวณดังกล่าวนี้จะมีการแจ้งเตือนเกี่ยวกับปัญหานี้ใน Air chart

4.7 ผลกระทบทางอ้อม

ถึงแม้ว่าสภาพอากาศในอวกาศมีผลกระทบต่อระบบต่าง ๆ หลายระบบที่อาจจะไม่เกี่ยวข้องโดยตรงต่อการบินก็ตาม แต่อาจส่งผลกระทบทางอ้อมต่อการบินได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น สภาพแวดล้อมที่ไม่ดีในอวกาศย่อมหมายถึงยานอวกาศจะได้รับความเสียหายหรือได้รับผลกระทบนั้น หากการปฏิบัติทางอากาศต้องใช้ยานอวกาศนั้นเพื่อการนำทางหรือการติดต่อสื่อสารก็จะได้รับผลกระทบนั้นไปด้วย หรืออีกตัวอย่างหนึ่ง พายุแม่เหล็กโลกที่รุนแรงทำให้กระแสไฟฟ้าในระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าเกินขนาด เป็นผลทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้และเกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง ซึ่งจะไม่มีไฟฟ้าไปใช้ในการบิน
