

โครงการพัฒนาศักยภาพนักวิทยุสมัครเล่น ความรู้ความเข้าใจในการใช้งานความถี่ย่าน HF
17 ธันวาคม พ.ศ. 2565

การแพร่กระจายคลื่นวิทยุในบรรยากาศ

Propagation of Radio Wave in Atmosphere

อำนาจ สาธานนท์ (E25GGT)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรรมการฝ่ายวิชาการ สมาคมวิทยุสมัครเล่นแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์

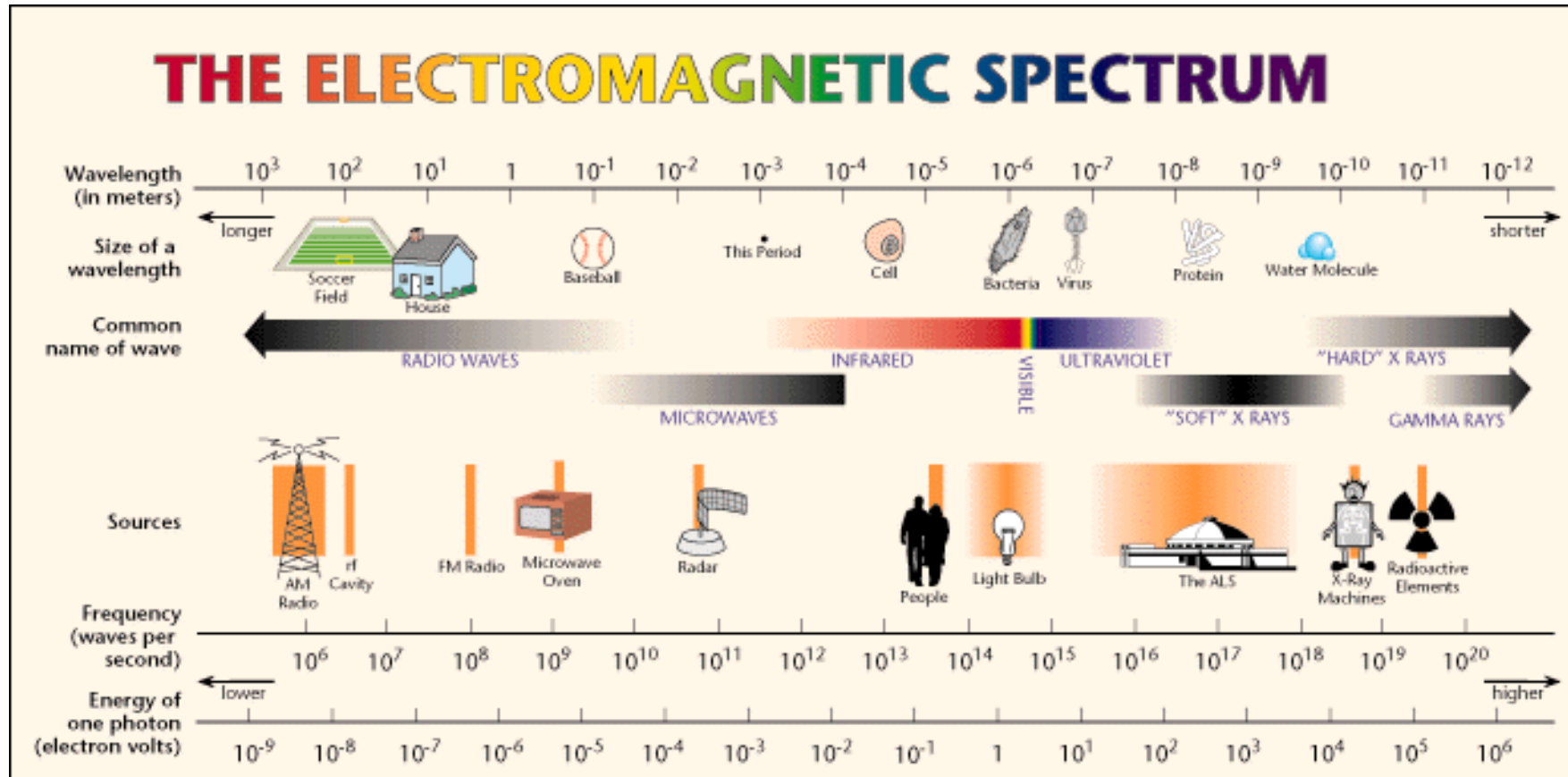
อภิวัฒน์ จิรวัฒนผล (HS4SCI)

กรรมการฝ่ายอวกาศและดาวเทียม สมาคมวิทยุสมัครเล่นแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์

ธรรมชาติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

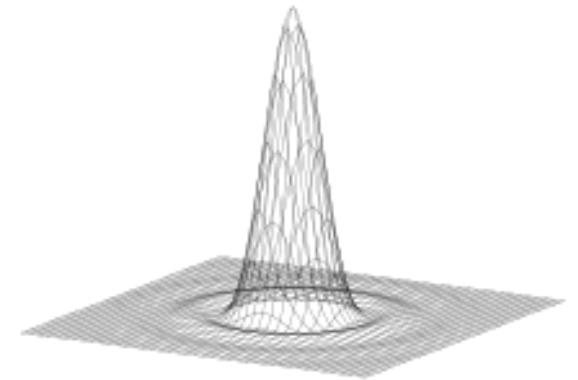
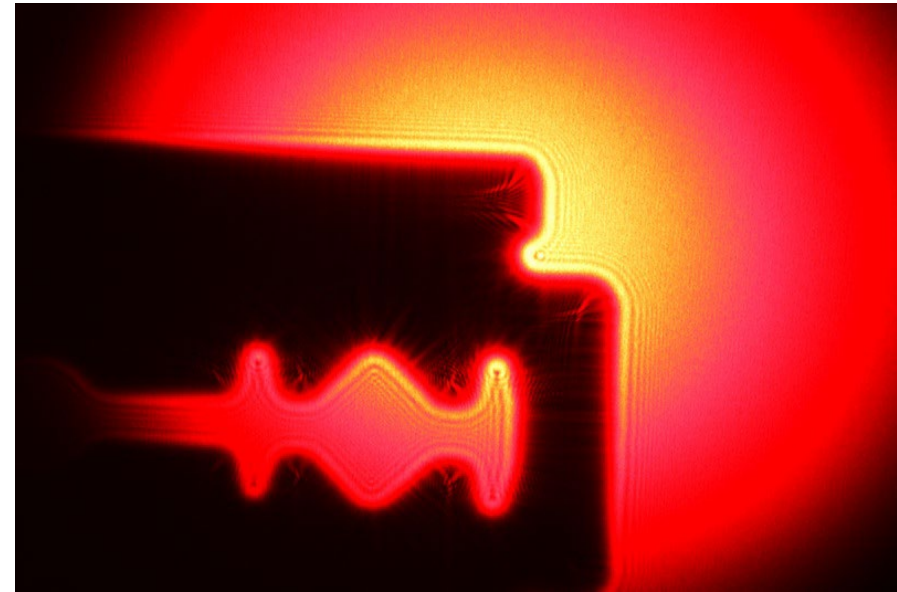
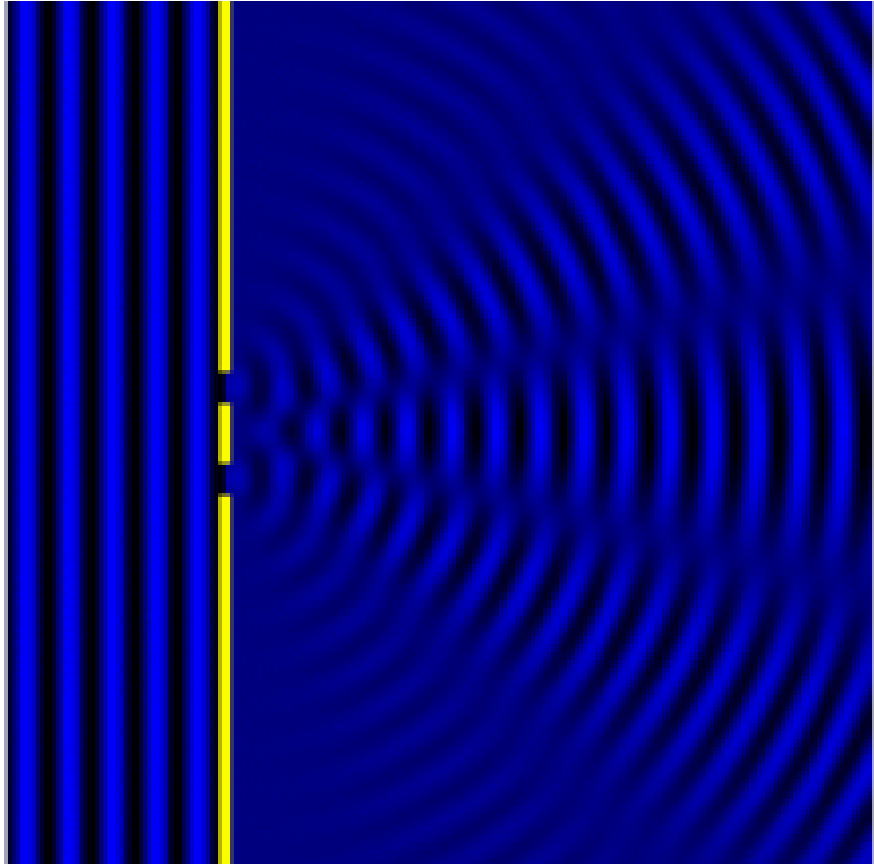
- การแทรกสอดและการเลี้ยวเบน
- การสะท้อนและการหักเห
- การกระเจิง (Scattering)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



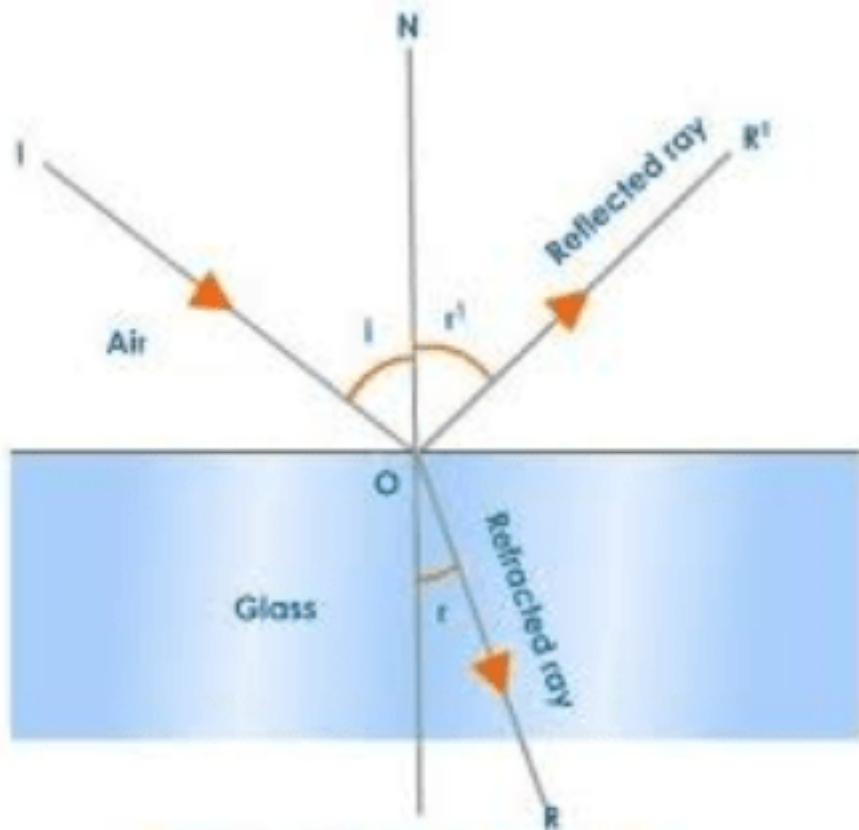
<http://www2.lbl.gov/MicroWorlds/ALSTool/EMSpec/EMSpec2.html>

การแทรกสอดและการเลี้ยวเบน

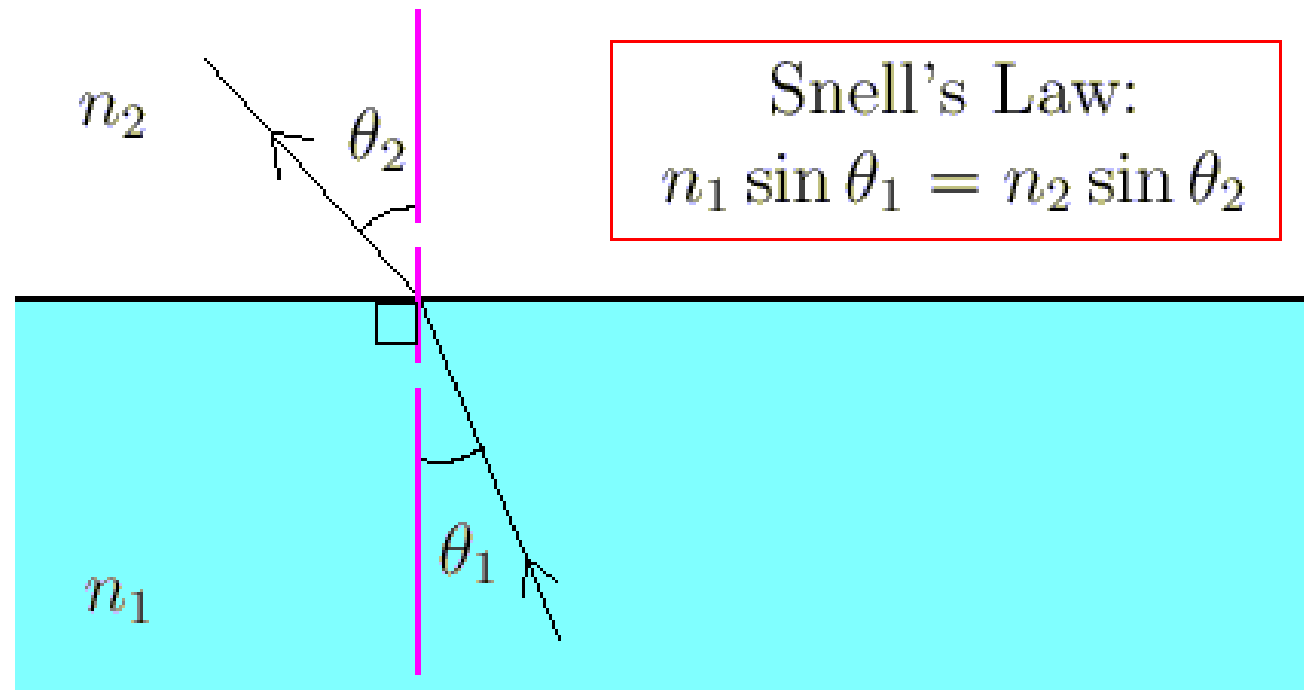


<http://becuo.com/diffraction-of-light-animation>

การสะท้อนและการหักเห

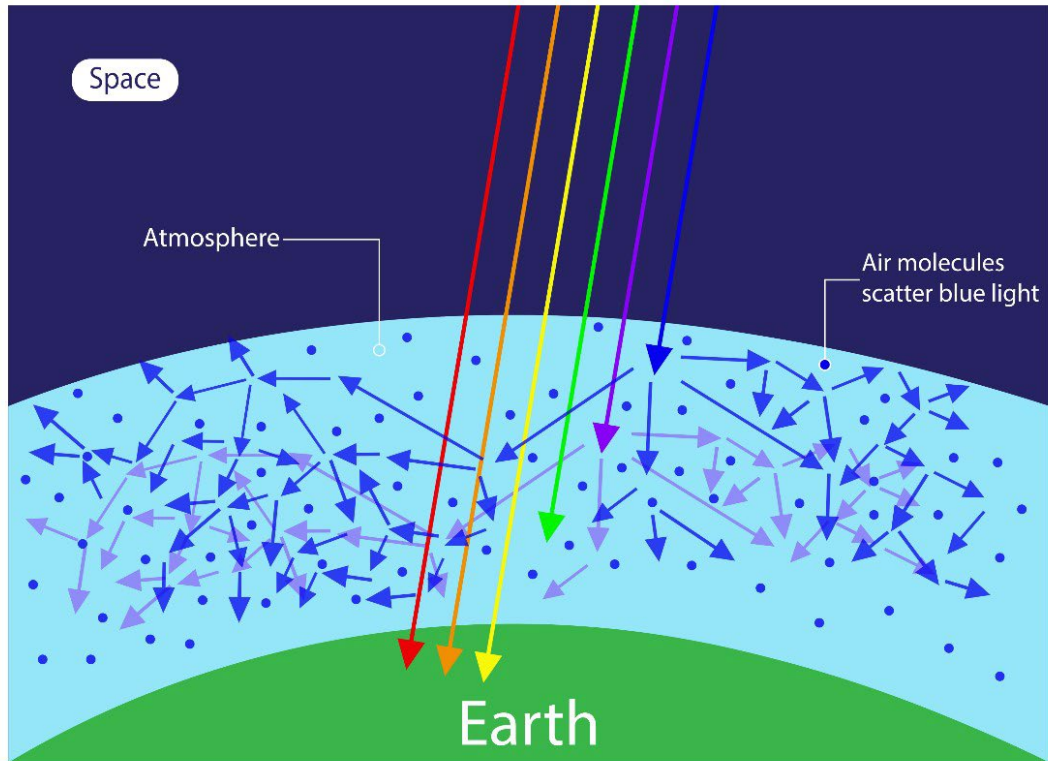


Refraction and Reflection of Light



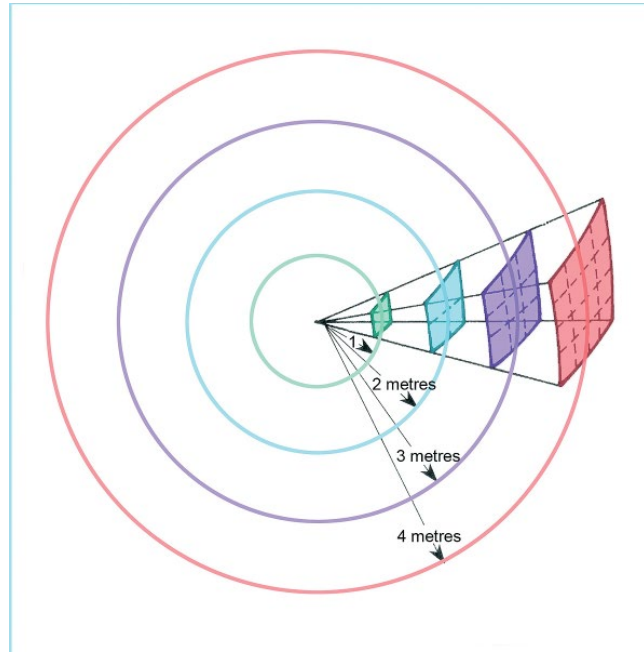
Snell's Law:
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

การกระเจิง (scattering)



<https://www.embibe.com/exams/scattering-of-light/>

การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

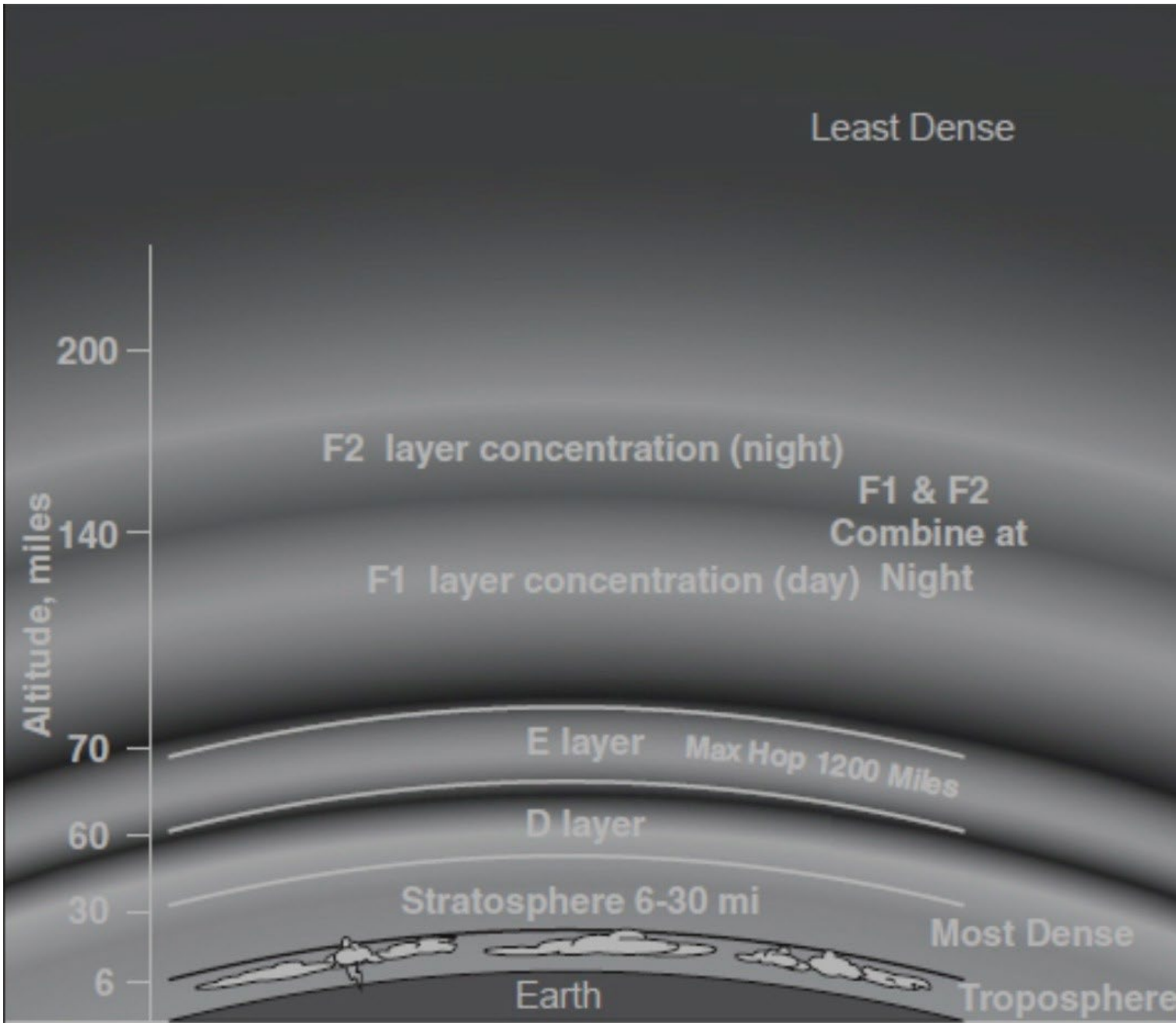


- ตามแนวเส้นสายตา (line-of-sight, LOS)
- คลื่นคลื่นดิน (ground wave)
- การสะท้อนจากไอโอโนสเฟียร์ (sky wave)
- การสะท้อนอื่น ๆ เช่น ดาวตก, ดวงจันทร์

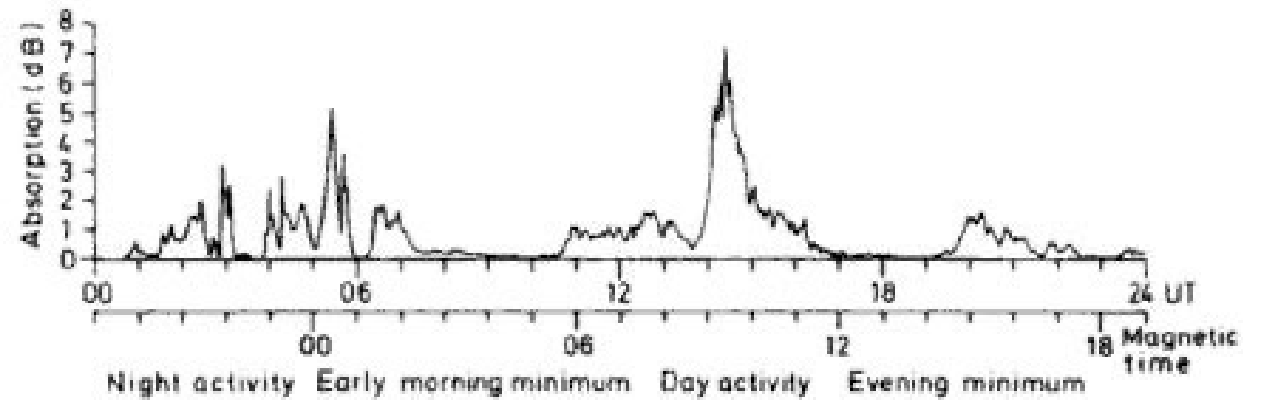
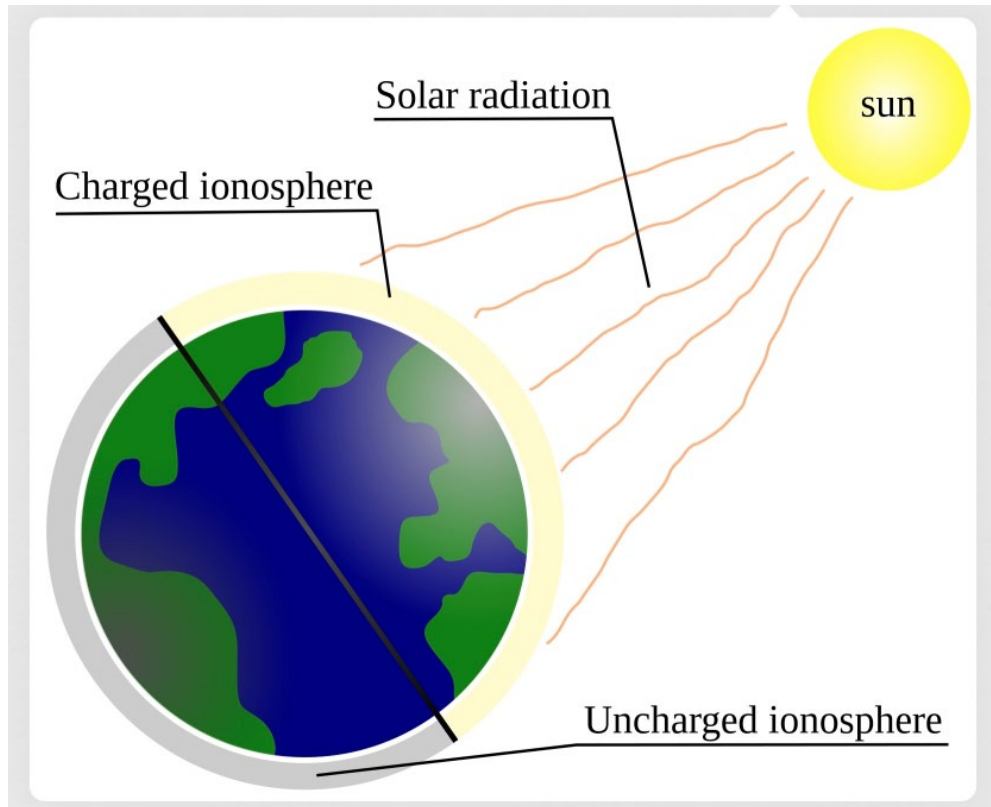
Band		Frequency	Wavelength	Propagation via
ELF	Extremely Low Frequency	3–30 Hz	100,000–10,000 km	Guided between the Earth and the D layer of the ionosphere.
SLF	Super Low Frequency	30–300 Hz	10,000–1,000 km	Guided between the Earth and the ionosphere .
ULF	Ultra Low Frequency	0.3–3 kHz (300–3,000 Hz)	1,000–100 km	Guided between the Earth and the ionosphere .
VLF	Very Low Frequency	3–30 kHz (3,000–30,000 Hz)	100–10 km	Guided between the Earth and the ionosphere . Ground waves .
LF	Low Frequency	30–300 kHz (30,000–300,000 Hz)	10–1 km	Guided between the Earth and the ionosphere. Ground waves .
MF	Medium Frequency	300–3000 kHz (300,000–3,000,000 Hz)	1000–100 m	Ground waves . E, F layer ionospheric refraction at night, when D layer absorption weakens.
HF	High Frequency (Short Wave)	3–30 MHz (3,000,000–30,000,000 Hz)	100–10 m	E layer ionospheric refraction. F1, F2 layer ionospheric refraction.
VHF	Very High Frequency	30–300 MHz (30,000,000–300,000,000 Hz)	10–1 m	Line-of-sight propagation . Infrequent E ionospheric (E_s) refraction . Uncommonly F2 layer ionospheric refraction during high sunspot activity up to 50 MHz and rarely to 80 MHz. Sometimes tropospheric ducting or meteor scatter

บรรยากาศโลก

- โครงสร้างของชั้นบรรยากาศ
- โทรโพสเฟียร์ (troposphere)
- ไอโอโนสเฟียร์



การดูดกลืนและการสะท้อนคลื่นวิทยุที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์



Space Weather

Sunspots

Sunspots are comparatively cool areas at up to 7,700° F and show the location of strong magnetic fields protruding through what we would see as the Sun's surface. Large, complex sunspot groups are generally the source of significant space weather.

Coronal Mass Ejections (CMEs)

Large portions of the corona, or outer atmosphere of the Sun, can be explosively blown into space, sending billions of tons of plasma, or superheated gas, Earth's direction. These CMEs have their own magnetic field and can slam into and interact with Earth's magnetic field, resulting in geomagnetic storms. The fastest of these CMEs can reach Earth in under a day, with the slowest taking 4 or 5 days to reach Earth.

Solar Wind

The solar wind is a constant outflow of electrons and protons from the Sun, always present and buffeting Earth's magnetic field. The background solar wind flows at approximately one million miles per hour!

Solar Flares

Reconnection of the magnetic fields on the surface of the Sun drive the biggest explosions in our solar system. These solar flares release immense amounts of energy and result in electromagnetic emissions spanning the spectrum from gamma rays to radio waves. Traveling at the speed of light, these emissions make the 93 million mile trip to Earth in just 8 minutes.

Earth's Magnetic Field

Earth's magnetic field, largely like that of a bar magnet, gives the Earth some protection from the effects of the Sun. Earth's magnetic field is constantly compressed on the day side and stretched on the night side by the ever-present solar wind. During geomagnetic storms, the disturbances to Earth's magnetic field can become extreme. In addition to some buffering by the atmosphere, this field also offers some shielding from the charged particles of a radiation storm.

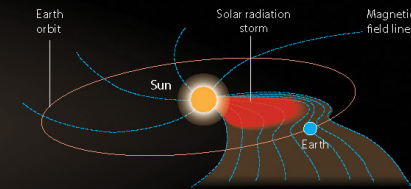
Space weather refers to the variable conditions on the Sun and in the space environment that can influence the performance and reliability of space-based and ground-based technological systems, as well as endanger life or health. Just like weather on Earth, space weather has its seasons, with solar activity rising and falling over an approximate 11 year cycle.

Sun's Magnetic Field

Strong and ever-changing magnetic fields drive the life of the Sun and underlie sunspots. These strong magnetic fields are the energy source for space weather and their twisting, shearing, and reconnection lead to solar flares.

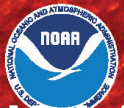
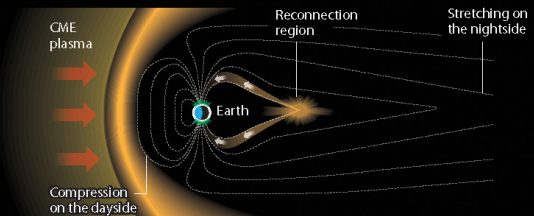
Solar Radiation Storms

Charged particles, including electrons and protons, can be accelerated by coronal mass ejections and solar flares. These particles bounce and gyrate their way through space, roughly following the magnetic field lines and ultimately bombarding Earth from every direction. The fastest of these particles can affect Earth tens of minutes after a solar flare.



Geomagnetic Storms

A geomagnetic storm is a temporary disturbance of Earth's magnetic field typically associated with enhancements in the solar wind. These storms are created when the solar wind and its magnetic field interacts with Earth's magnetic field. The primary source of geomagnetic storms is CMEs which stretch the magnetosphere on the nightside causing it to release energy through magnetic reconnection. Disturbances in the ionosphere (a region of Earth's upper atmosphere) are usually associated with geomagnetic storms.

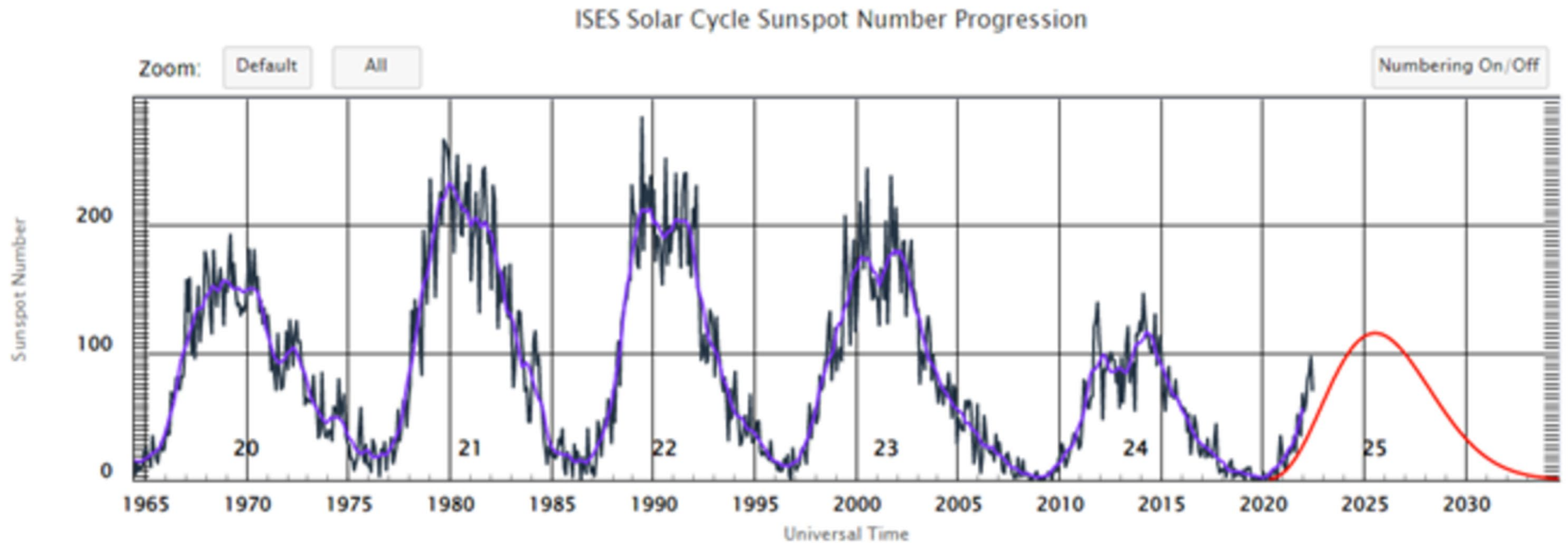


NOAA

Prediction Center - www.spaceweather.gov

Source images: NASA, NOAA.

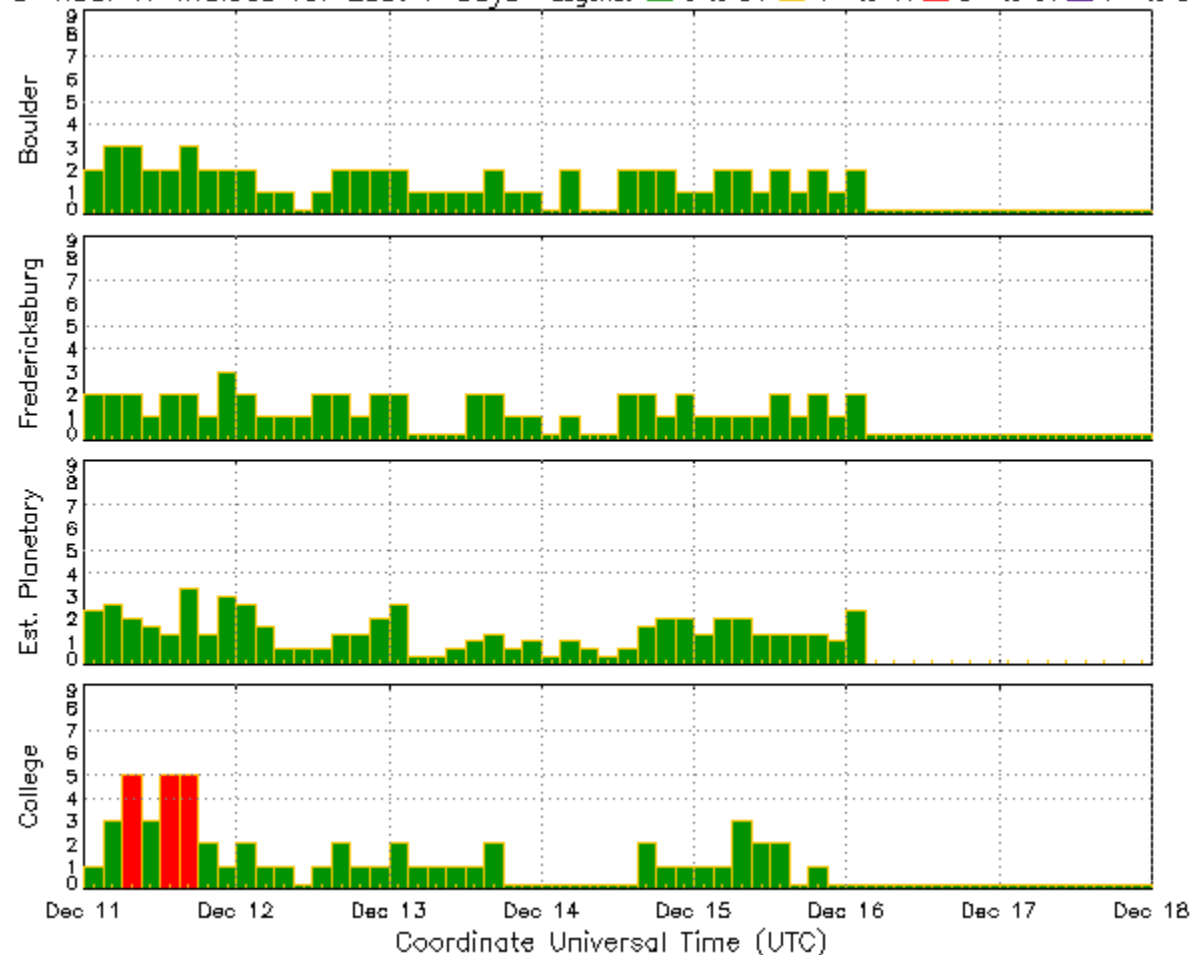
วัฏจักรดวงอาทิตย์ (solar cycle)



https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2022/07/Solar_cycle_25_prediction_NOAA_July_2022

Station K and Station A indices

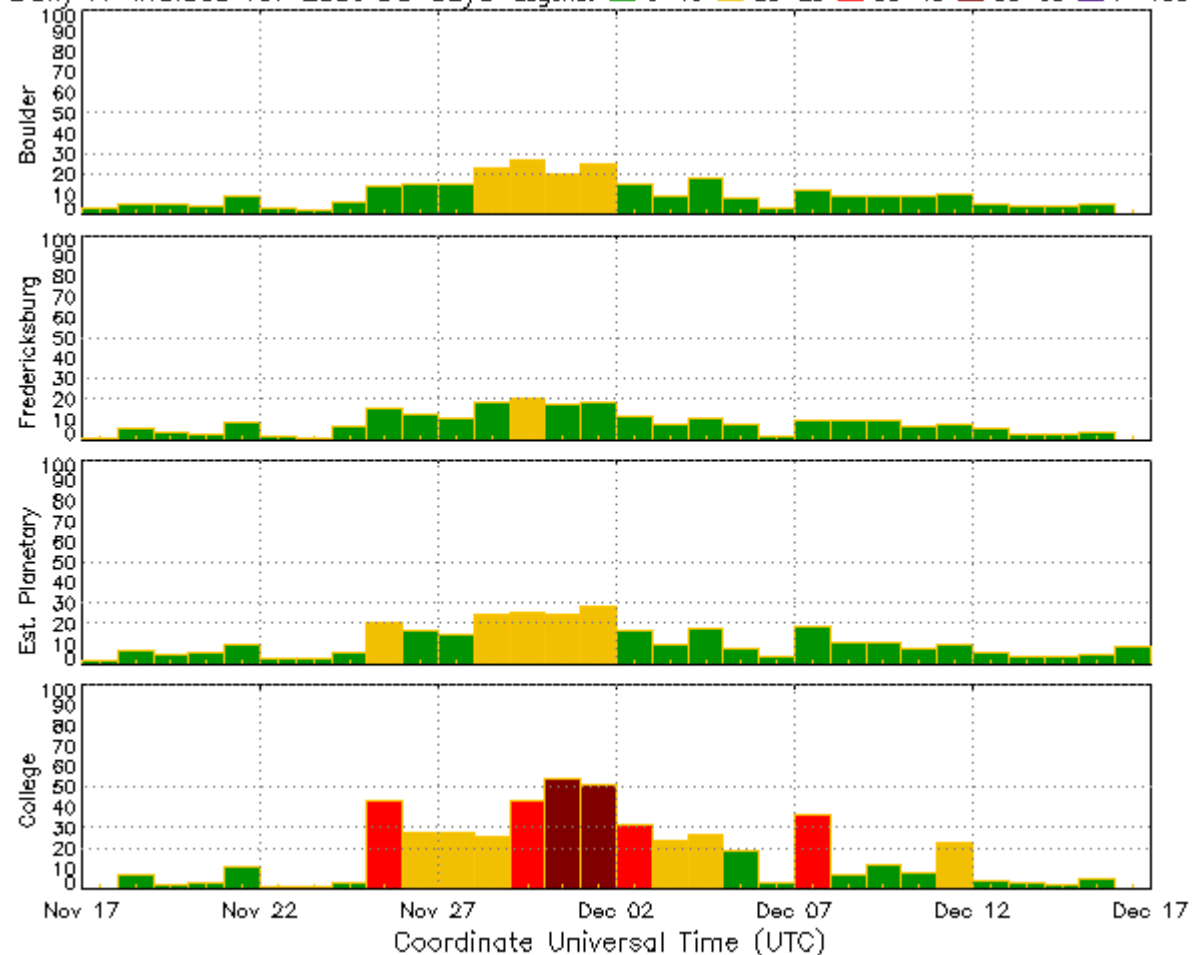
3-hour K-indices for Last 7 days Legend: 0 to 3+ 4- to 4+ 5- to 6+ 7- to 9



Updated 2022 Dec 17 0020

NOAA/SWPC Boulder, CO USA

Daily A-indices for Last 30 days Legend: 0-19 20-29 30-49 50-99 >=100



Updated 2022 Dec 17 0020

NOAA/SWPC Boulder, CO USA

<https://www.swpc.noaa.gov/products/station-k-and-indices>

MUF และ LUF

- ชั้นบรรยากาศสามารถ ดูดซึม (Absorption) หักเห (Refraction) สัญญาณความถี่วิทยุ
- General rule for skywave: use the highest possible frequency for a given destination
 - This is the maximum usable frequency (MUF)
 - Signals $>$ MUF are not refracted (ทะลุ)
 - As ionization increases, MUF usually increase
- ความถี่ต่ำกว่า LUF จะสื่อสารได้ยากหรือแทบเป็นไปไม่ได้
- LUF is (mostly) a function of noise (poor SNR)
- MUF is a function of the ionosphere

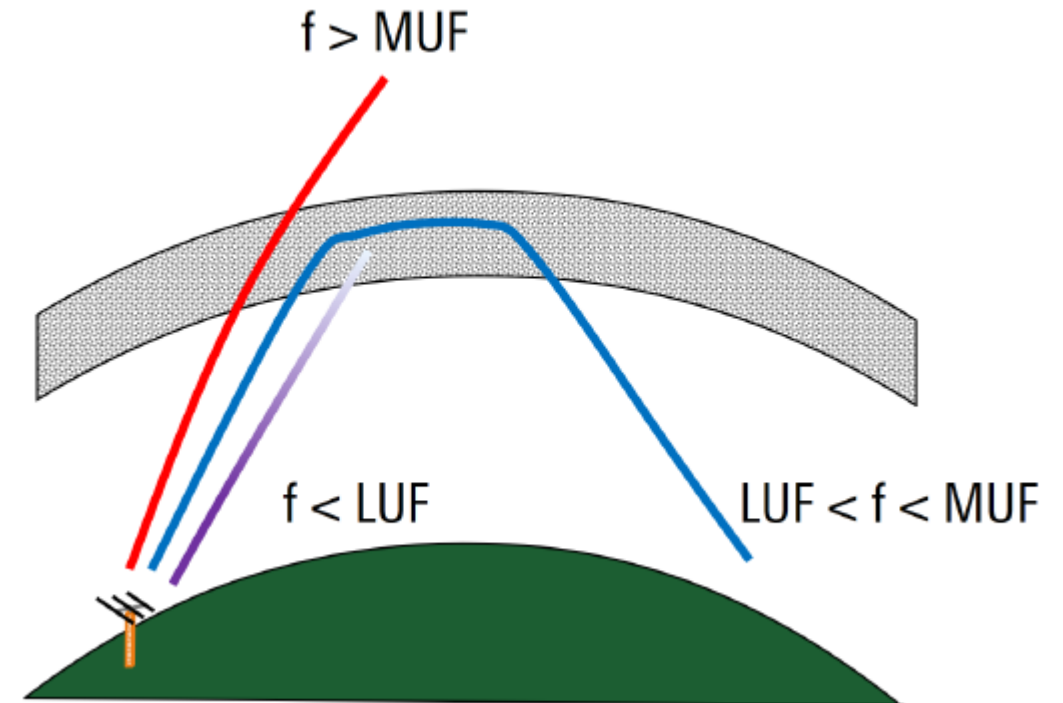


Image: Rohde & Schwarz

Critical Frequency

- MUF ปกติแล้วสามารถประมาณได้จาก Critical Frequency
- การวัด Critical Frequency:
 - ส่งสัญญาณ Pulses ที่ความถี่ต่างๆกัน
 - ใช้เวลาที่สัญญาณสะท้อนกลับมาเพื่อคำนวณความสูง
 - ณ Critical Frequency สัญญาณ Pulse จะไม่สะท้อนชั้นบรรยากาศ (ทะลุไปอวกาศ)
- Critical frequency (f_c) เป็นความสัมพันธ์ของระดับของ ionization และจุดที่ทำกรวัดค่า
- ในทางปฏิบัติ MUF จะมีค่ามากกว่า Critical Frequency 3-5 เท่า
- $$MUF = \frac{f_c}{\cos\theta}$$

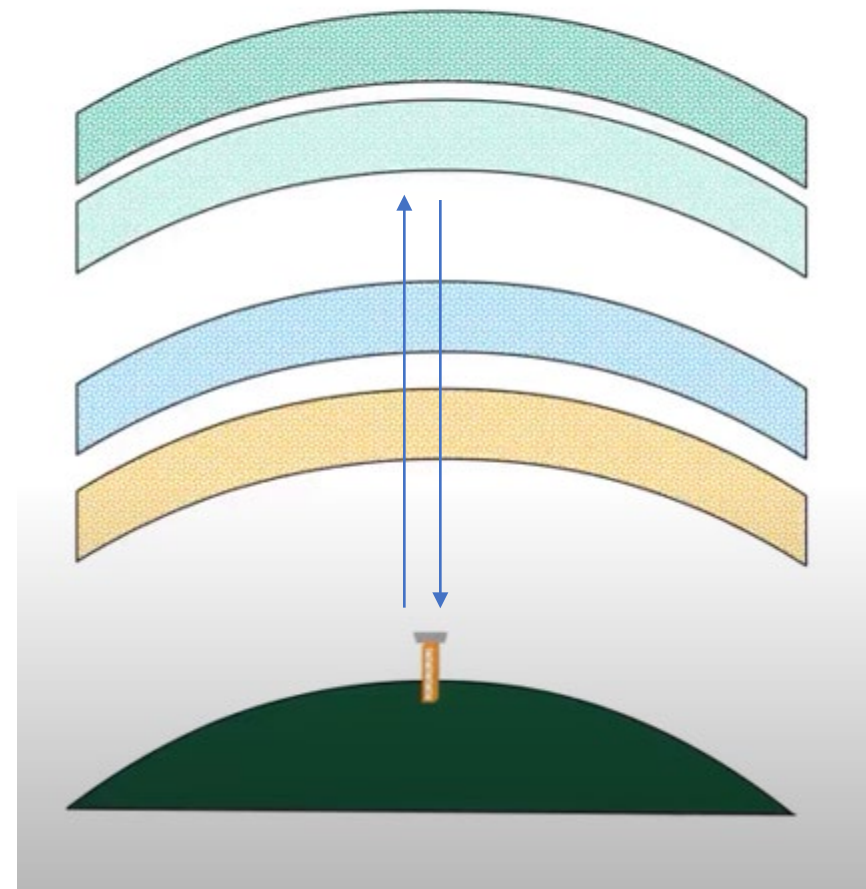


Image: Rohde & Schwarz

Ionospheric Observatory station at Chumphon, Thailand

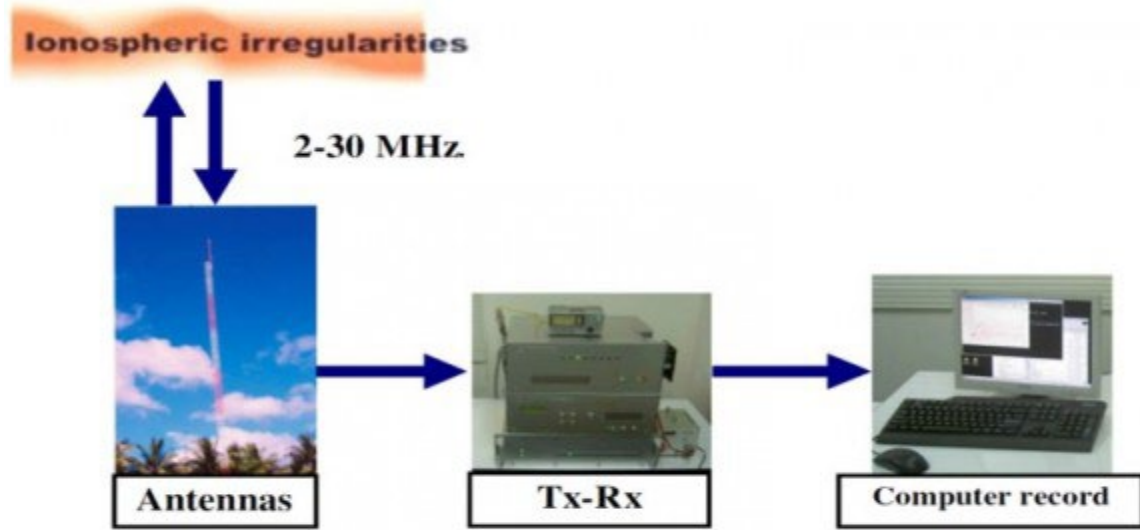


Fig. 2 Component of FMCW ionosonde: 3 main parts.

An ionosonde used at Chumphon station transmits FM-modulated signals to reflect from the ionosphere layer using the frequency of **2 to 30 MHz** (high frequency or HF) and receives the echoes continuously, so called "continuous wave-frequency modulation (FMCW) ionosonde".

The HF signals are increased with a sweep rate of 100 kHz/s and a sweep repetition period of 5 minutes.

Source: http://iono-gnss.kmitl.ac.th/?page_id=668

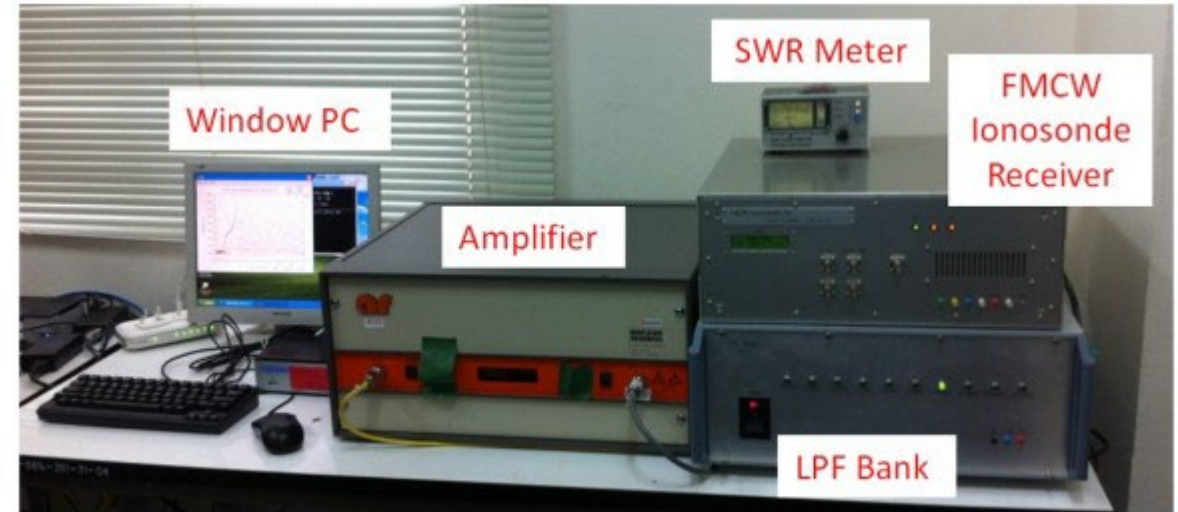


Fig. 3 The equipment in an ionospheric observatory room at Chumphon.



Fig. 4 The antenna region of FMCW ionosonde at Chumphon.

Southeast Asia low latitude ionospheric network (SEALION)

Low latitude ionosphere-thermosphere dynamics studies with inosonde chain in Southeast Asia

T. Maruyama¹, M. Kawamura¹, S. Saito¹, K. Nozaki¹, H. Kato¹, N. Hemmakorn², T. Boonchuk², T. Komolmis³, and C. Ha Duyen⁴

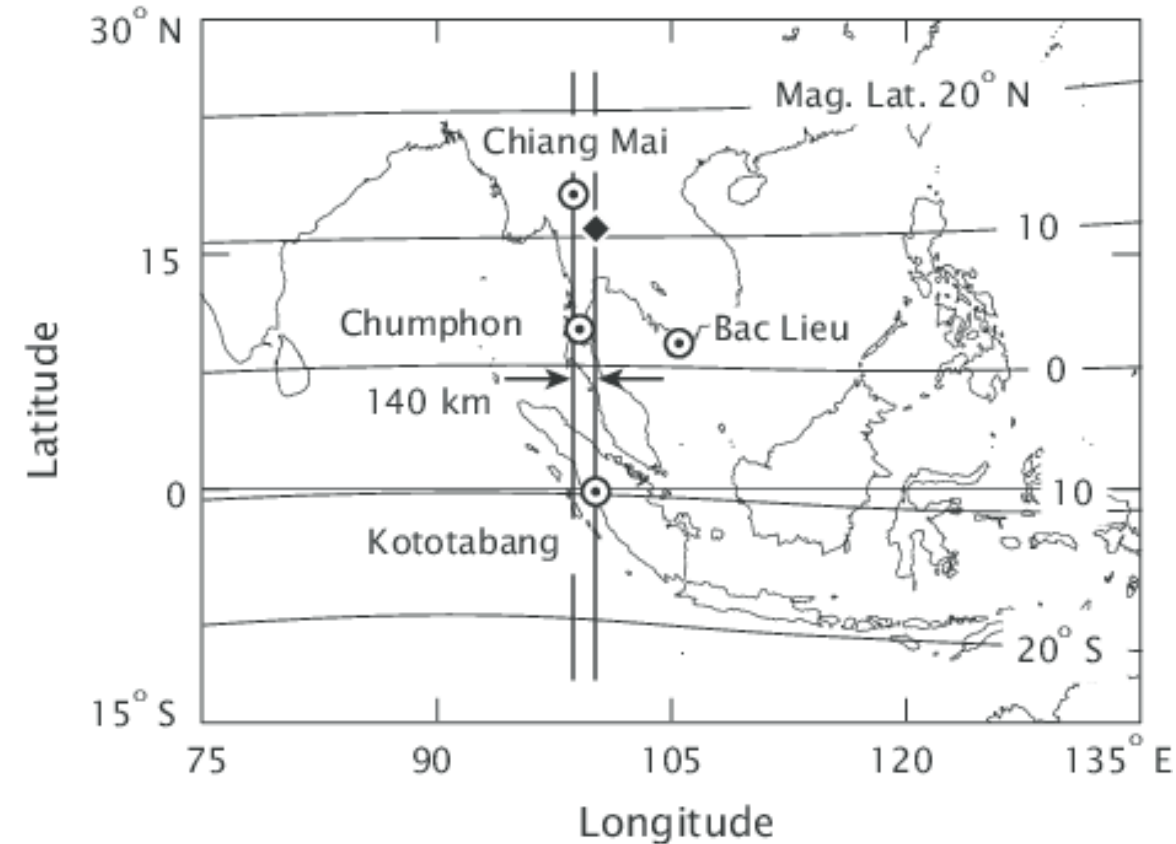
¹National Institute of Information and Communications Technology, 2-1 Nukui-kita 4-chome, Koganei, Tokyo, 184-8795 Japan

²Department of Telecommunications, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 3-2, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiangmai 50200, Thailand

⁴Institute of Geophysics, Vietnamese Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Str., Cau Giay, Hanoi, Vietnam

Received: 1 March 2007 – Revised: 6 June 2007 – Accepted: 27 June 2007 – Published: 30 July 2007



ดาวเทียมศึกษา Ionosphere

ICON
Ionospheric Connection Explorer

INSTRUMENTS

IVM
(ION VELOCITY METER)
Developed by UT Dallas, TX
The IVM measure the motion, temperature, and total ion number density of ionized gases at the location of the spacecraft. There are two on the ICON spacecraft.

MIGHTI
(MICHELSON INTERFEROMETER FOR GLOBAL HIGH-RESOLUTION THERMOSPHERIC IMAGING)
Developed by Naval Research Lab, DC
The MIGHTI interferometer determines the altitude profiles of atmospheric wind and temperature in Earth's upper atmosphere. There are two on the ICON spacecraft.

FUV
(FAIR ULTRA VIOLET IMAGING SPECTROGRAPH)
Developed by UC Berkeley, CA
During the daytime, the FUV imager determines the upper atmospheric composition. At nighttime, it measures altitude profiles of ion density.

EUUV
(EXTREME ULTRAVIOLET SPECTROGRAPH)
Developed by UC Berkeley, CA
The EUUV spectrophotograph measures the density of ionized gases during the daytime.

Credit: Mark Balan (www.artscistudios.com)

ICON

In the summer of 2017, the Ionospheric Connection Explorer (ICON) is scheduled to launch into orbit around the Earth's equator. The satellite is designed to study the region of space called the ionosphere, where terrestrial and space weather meet. The interaction of solar wind with Earth's conditions creates a dynamic zone full of winds and charged particles. Disturbances in this region can disrupt radio communications and GPS signals.

• ICON will orbit at 350 mile altitude
• International Space Station orbits at 250 miles

ICON carries three cameras:
 • Infrared to measure temperature
 • Visible light for wind measurement
 • Ultraviolet for composition and ion abundance
 And a charged particle detector

ICON's instruments take advantage of a phenomenon called airglow — the light emitted by gas interacting with solar radiation.

Deep red — atomic oxygen
 Magenta — high altitude atomic nitrogen
 Green — low altitude atomic nitrogen

Far UV Spectrometer
 Ion velocity meter

Charged particles in the ionosphere should be evenly distributed around the Earth's magnetic equator after sunset, but measurements show higher levels over the continents. Part of ICON's mission is to dig into the reasons that this patchiness develops.

@garj_schroeder

Quantifying the ionosphere

- Critical frequency → active measuring
- Three common passive methods
 - Sunspot numbers: **predict** the level of ionosphere
 - Solar flux index: **measure** the level of ionization
 - Geomagnetic indices: indicate the impact of solar particles on the Earth's magnetic field
- Together these quantities provide a good indication of the current state of the ionosphere and can be used to predict HF propagation

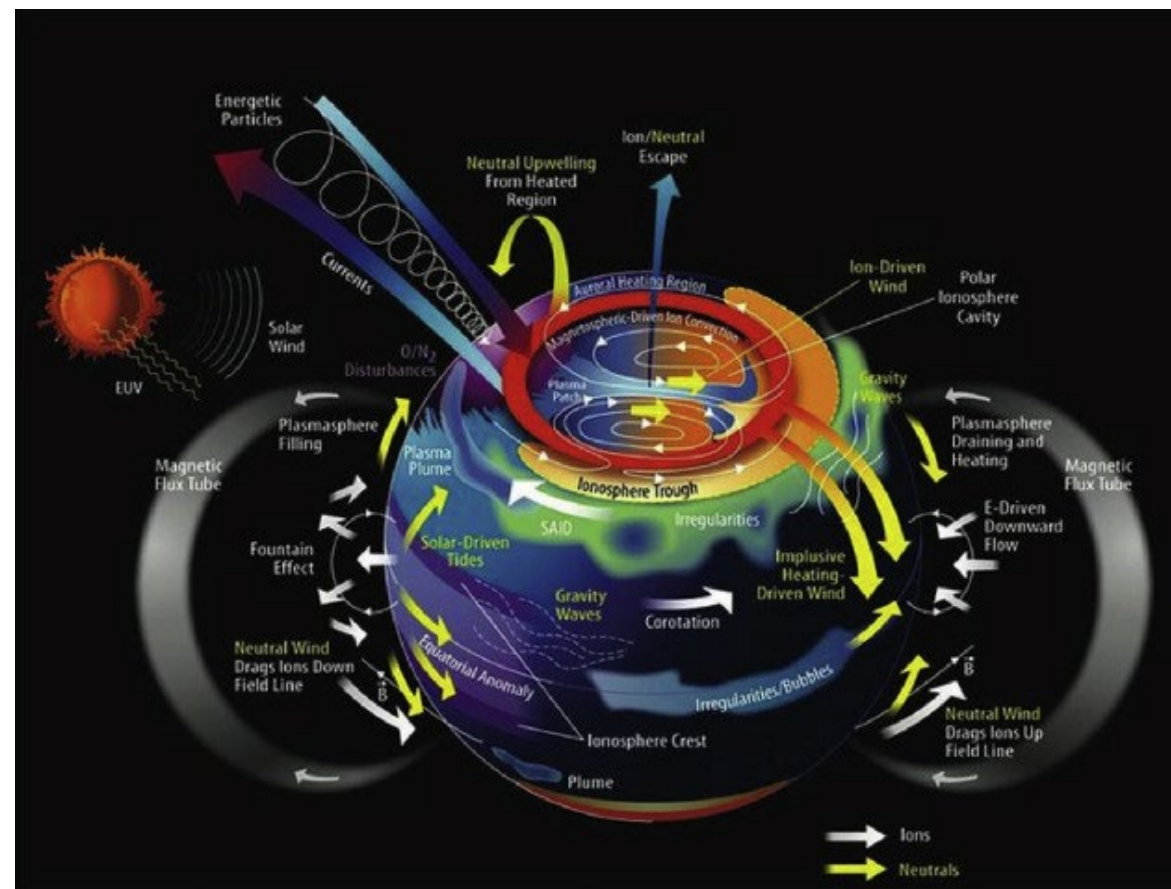


Image: Joe Grebowsky, NASA Goddard Space Flight Center

Sunspot

- จุดเย็นบนดวงอาทิตย์ cooler spot surface region of the sun (3000-6000 k)
- เกี่ยวข้องกับสนามแม่เหล็กพลังงานสูง
- จำนวนของ sunspot มีความสัมพันธ์กับ Solar activities / Radiation
 - **Sunspots เยอะ = atmospheric ionization เยอะ = HF propagation ดี**
- Sunspot number = 0 - maximum record 250
- Daily measurement
- Record at solar observatories around the world

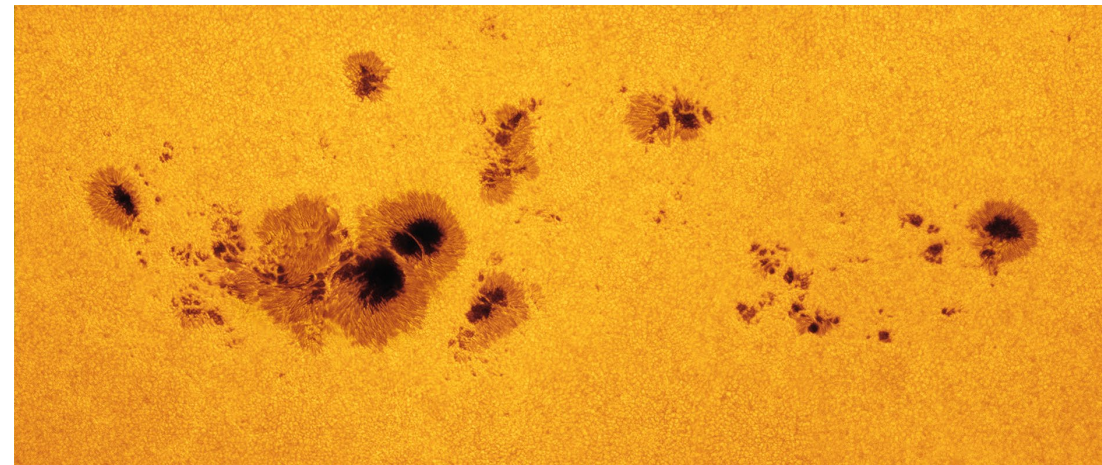
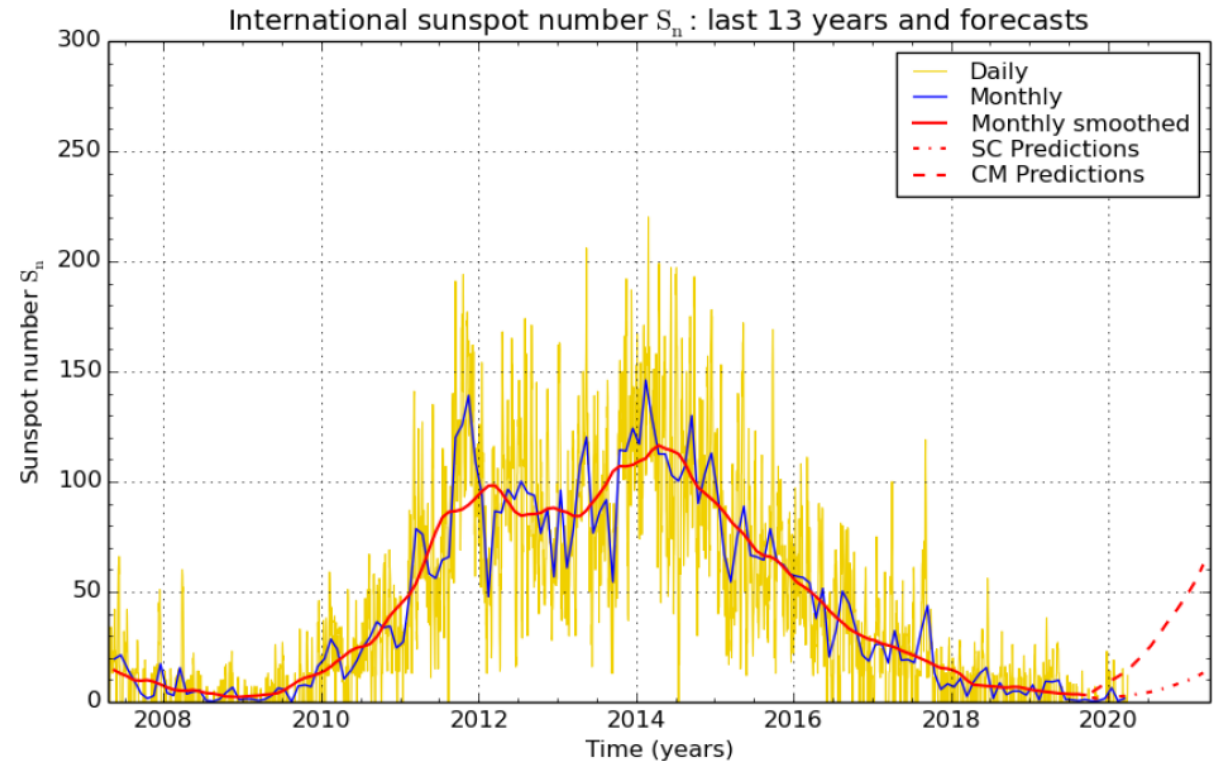


Image: NASA

Solar cycle

- 1 cycle ประมาณ 11 ปี
- At the peak, SSN is about 150,
HF propagation is very good, even at higher frequencies
- At the bottom, SSN is about 0
HF propagation is poor, especially at higher frequencies
- **Solar cycle is good for long term prediction of HF propagation → long term = years**



Solar flux index (SFI)

- Solar activity วัดด้วย solar noise หรือ flux ที่ 2800 MHz
- เราเรียกมันว่า SFI: Solar flux Index
 - วัดในหน่วย Solar flux units (SFU)
 - ค่าอยู่ในช่วง 50-300
- Solar flux เป็นค่าที่เกิดจากการวัด ไม่ใช่จากการสังเกต ซึ่งจะมีความแม่นยำมากกว่า
- สัมพันธ์กับ SSN
 - $SFI = 73.4 + 0.62 * SSN$
- SFI สูง \rightarrow MUF สูง \rightarrow Better HF propagation



Image: <https://3fs.net.au/making-sense-of-solar-indices/>

Sudden Ionospheric Disturbances (SIDs)

- การแผ่รังสี X-Ray ขนาดใหญ่จากดวงอาทิตย์ส่งผลเกิดการ Ionization บน D-Layer ทำให้เกิดการดูดซับคลื่นมากขึ้น
- ความถี่ต่ำได้รับผลกระทบเยอะ
ความถี่สูงได้รับผลกระทบน้อยลง
- Solar flare เล็กๆ ช่วยทำให้การสื่อสารที่ HF high frequency ดีขึ้น

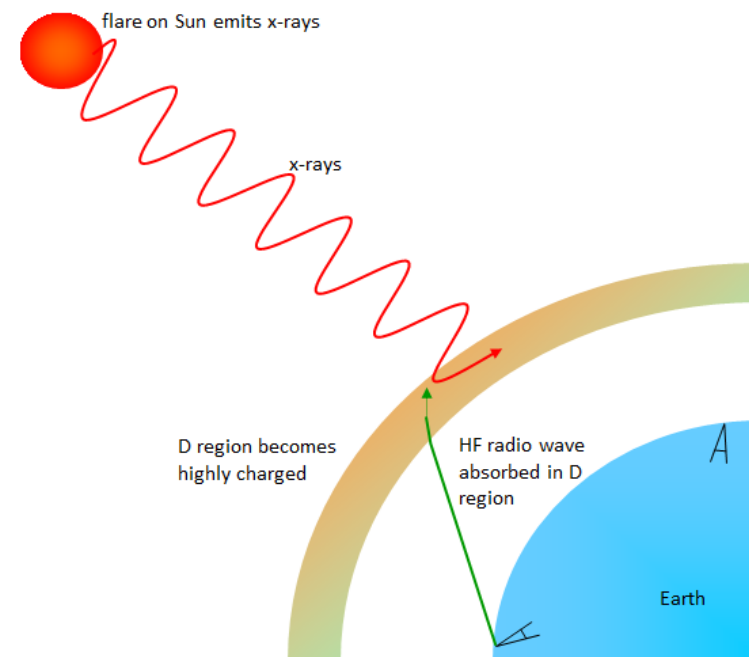
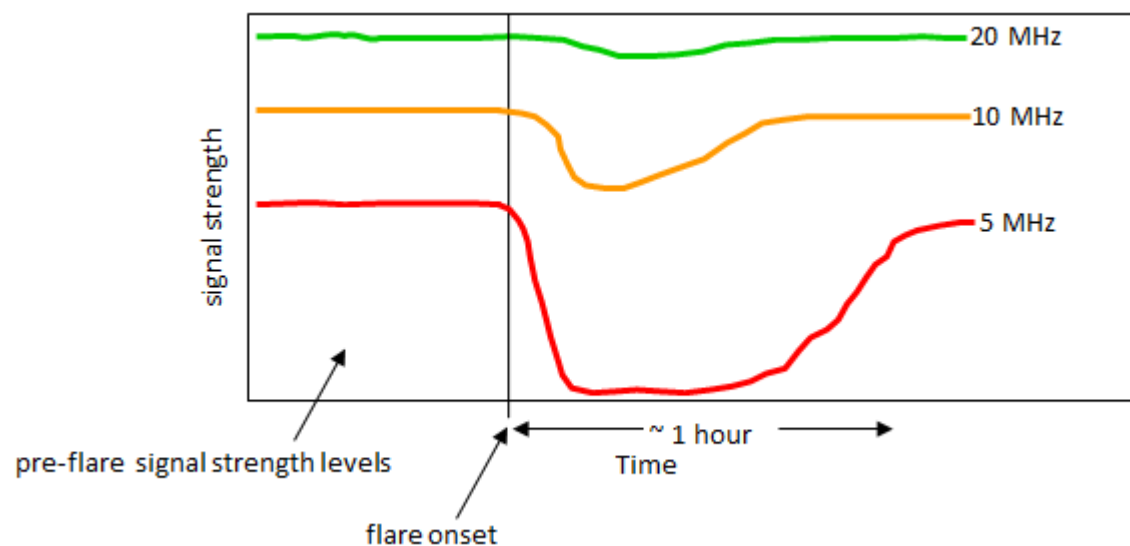
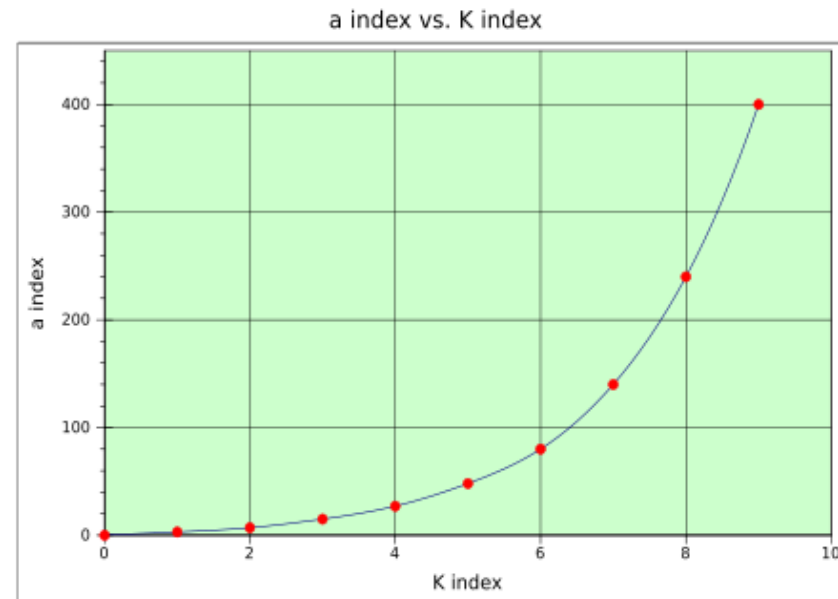


Image: Australian Space Weather Alert System

A and K indices

- A and K values measure magnetic fluctuations caused by ionosphere disturbances such as solar flares
 - Lower values → more stable ionosphere
- Measured at observatories around the planet
 - Local values of A and K can be averaged to product planetary value (Ap and Kp)
- A calculated daily, K measured every 3 hours
 - K indicates a current disturbance
 - A indicated how lone the disturbance has been occurring



A	K	Conditions
0	0	Quiet
2-3	1	Quiet
4	1	Quiet / unsettled
7	2	Unsettled
15-27	3-4	Active
48	5	Minor storm
60	6	Major storm
132	7	Severe storm
208+	8+	Very severe storm

การใช้งานที่ลดลงของย่าน HF

- การสื่อสารดาวเทียมเริ่มมีการใช้งานในช่วงท้ายของทศวรรษ 1960

- Data rate สูงกว่า
- ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องฝึกฝนเท่า HF

- อินเทอร์เน็ต

- Data rate สูงกว่า
- ใช้งานได้ทันที
- ครอบคลุมทั่วโลก

- การใช้งาน ทูบ/งบ สนับสนุน HF ลดลง ทำให้ส่งผลให้การพัฒนาบุคลากรและความรู้ลดลง

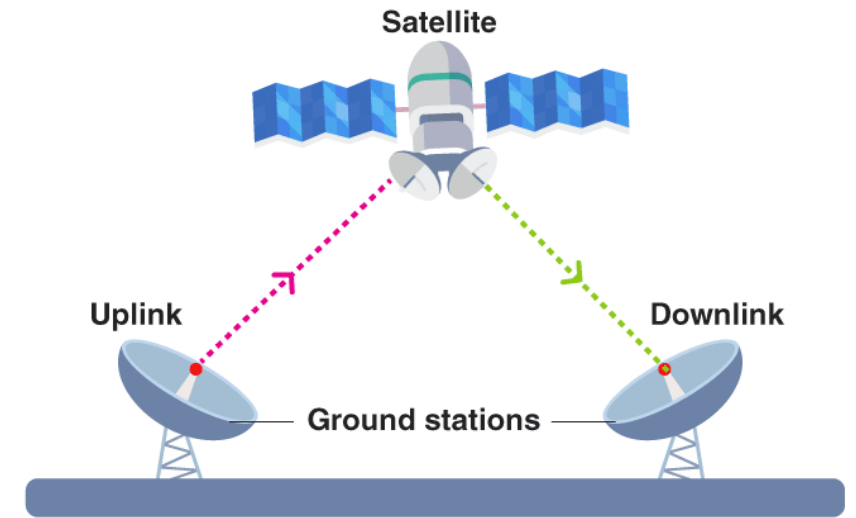
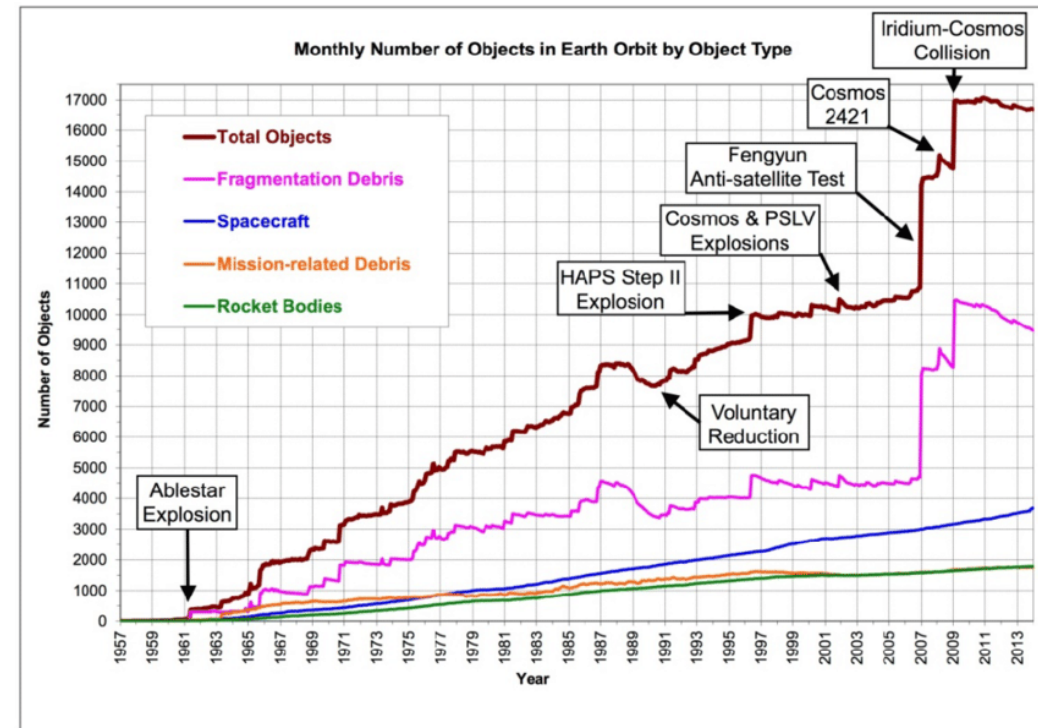




Image: US Air Force

จุดอ่อนของดาวเทียม

- Anti-satellite System
 - Ground-base
 - Air-or space-based “kill vehicles”
- Susceptible to jamming
 - Satellite not frequency-agile
- Solar storms or space weather
 - Disrupt and Damage Satellites
- Lack of polar cover
 - Not all constellation cover the poles
- Terrain can block signals
 - Mountain, Jungle, etc.



ทำไมยังใช้ HF

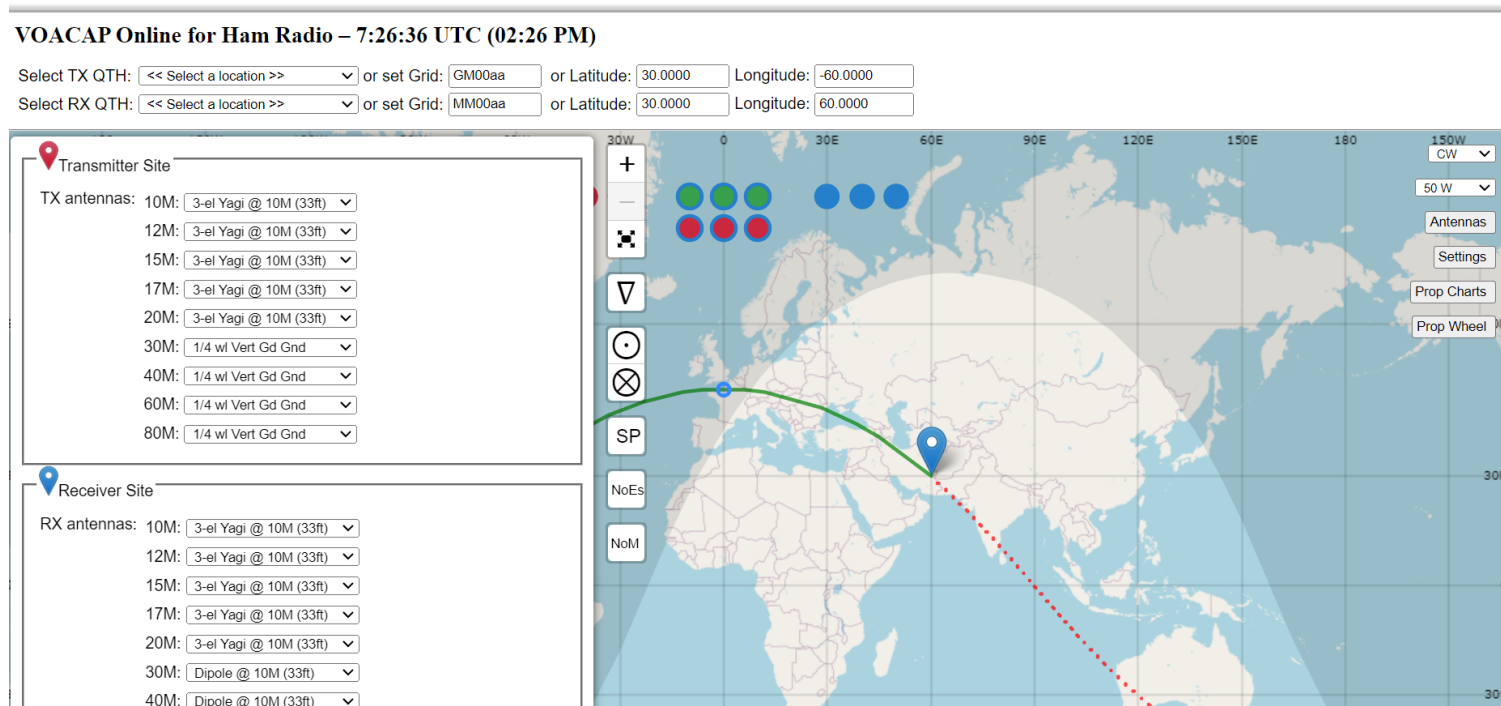
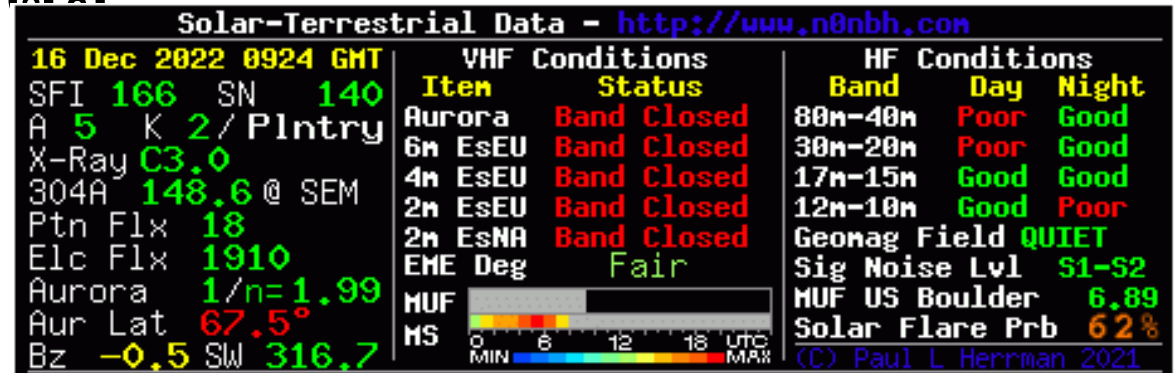
- ยังมีความต้องการการสื่อสารแบบทั่วโลกอยู่
 - ต้องระบบสื่อสารสำรอง
- จุดเด่นของ HF
 - ครอบคลุมทั่วโลก
 - ไม่ต้องมี Infrastructure
 - ถูกกว่าดาวเทียม
 - ทนทานต่อการโจมตี (Robust against attacks)
 - ทนทานต่อการรบกวน ก่อกวน (Robust against jamming)



Image: HSOAC

การพัฒนาความพร้อมในการติดต่อ

- ความรู้ในการเลือกใช้ความถี่ในแต่ละช่วงเวลา
- การฝึกฝนและประสบการณ์ของผู้ใช้งาน
 - เครื่องมือช่วยพยากรณ์ Propagation VOACAP



สรุป

- การติดต่อกับทั่วโลกใช้คลื่นฟ้า Skywave
- ไอออไนเซชันจะเพิ่มขึ้น
 - ในช่วงกลางวัน
 - เมื่อ Sunspot เพิ่มขึ้น
- Solar event ซึ่งคาดเดาไม่ได้ มีผลกับชั้นบรรยากาศ
 - Solar flare
 - Coronal mass ejections
- SSN, SFI, and A/K index ใช้ในการบอกสถานะของชั้นบรรยากาศ Ionosphere

Resource

- Australian Space Weather Alert System
- ARRL
- RAST
- Rohde & schwarz educational note