

# Meteorologické družice:

Základy družicové (pasivní) hyperspektrální sondáže atmosféry,  
přístroje aktivní sondáže (radary, lidary) z oběžné dráhy

RNDr. Martin Setvák, CSc.

družicové oddělení ČHMÚ

E-mail: [martin.setvak@chmi.cz](mailto:martin.setvak@chmi.cz)

osobní stránky: [www.setvak.cz](http://www.setvak.cz)

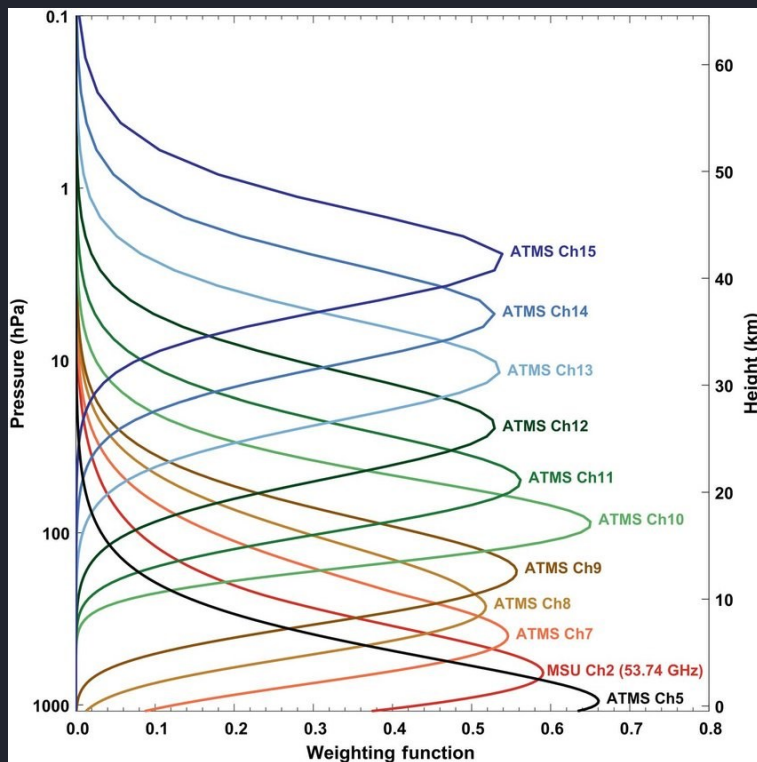
## Družicová sondáž atmosféry

- přehled metod družicové sondáže atmosféry
- podstata metod pasivní vertikální IR hyperspektrální a mikrovlnné sondáže atmosféry
- družice a jejich přístroje pro pasivní IR hyperspektrální a MW sondáž atmosféry (Aqua/AIRS, Metop/IASI, JPSS/CrIS, FY-4/GIIRS, MTG-S/IRS, AWS/MWR a EPS-Sterna/MWS)
- družice a jejich přístroje pro aktivní sondáž oblačnosti, aerosolů a proudění (CloudSat, CALIPSO, EarthCARE, Aeolus a EPS-Aeolus)

# Družicová sondáž atmosféry

- pasivní vertikální sondáž atmosféry
  - mikrovlnná (MW)
  - infračervená (IR)
- limbová (tečná) sondáž atmosféry
  - infračervená (IR) a mikrovlnná (MW) pasivní sondáž
  - radio-okultační metody (ROM) – zákryty signálu z GNSS (Global Navigation Satellite Systems) družic (GPS, GLOSNASS, Galileo, ...)
- aktivní vertikální sondáž atmosféry (oblačnost, aerosoly, proudění)
  - radarová
  - lidarová

# Podstata pasivní vertikální MW a IR hyperspektrální sondáže atmosféry



Příklad váhových funkcí přístroje **ATMS** (Advanced Technology Microwave Sounder, SNPP, NOAA-20 a NOAA-21), resp. jeho předchůdce **AMSU-A** (Advanced Microwave Sounding Unit-A, Aqua, NOAA-15 až NOAA-19, Metop-A, B, C)

zdroj: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aau0049>

Různé spektrální kanály mají maximum příspěvku naměřené intenzity záření v různých hladinách nad zemským povrchem, což je vyjádřeno pomocí tzv. váhových funkcí.

Pro družicovou sondáž se používají přístroje pracující buď v IR nebo MW oblasti elmg. záření.

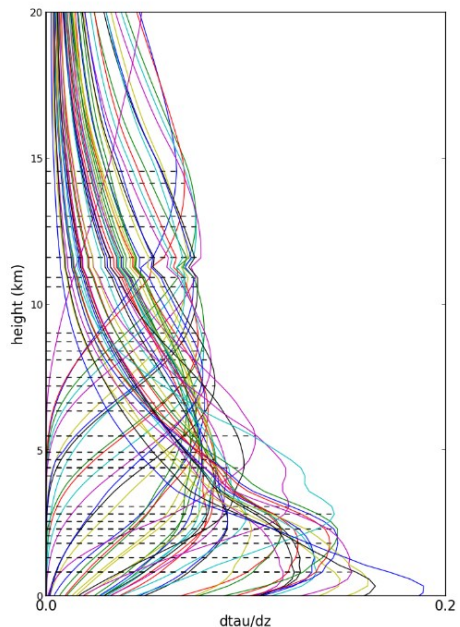
Konkrétní hladina maxima váhových funkcí jednotlivých kanálů ale závisí na reálném stavu atmosféry (tj. profilu teploty a množství absorbujících plynů –  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$  aj.). Zpracování naměřených hodnot IR a MW radiancí (intenzit záření) tedy není elementární záležitostí – zpracování dat ze sondážních přístrojů vyžaduje využití RTM (Radiative Transfer Model) a výstupů z NWP.

Hlavní využití dat z MW a IR hyperspektrální sondáže atmosféry – asimilace dat do modelů NWP, doplnění klasických aerologických sondáží v oblastech, kde tyto chybí, nowcasting, globální monitorování atmosféry, klimatologie.

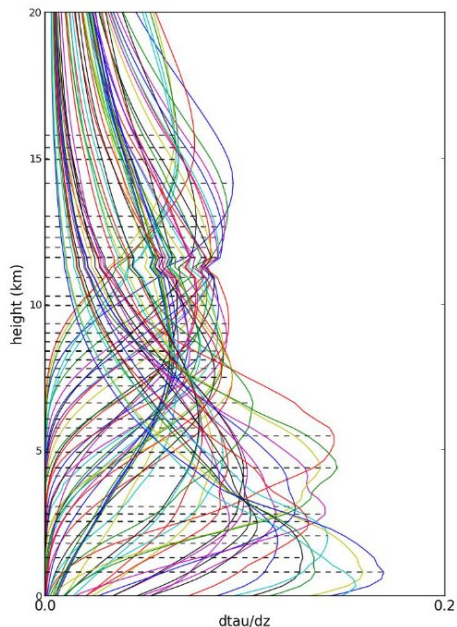
Hlavní rozdíl mezi MW a IR přístroji – pro IR záření je oblačnost překážkou a IR sondážní přístroje skrz ni nemohou měřit, zatímco MW záření oblačností proniká a tedy MW sondážní přístroje jsou použitelné i v oblastech pokrytých oblačností. Hyperspektrální IR sondáže – lepší horizontální i vertikální rozlišení než MW sondáže.

# Podstata vertikální IR hyperspektrální sondáže atmosféry – CrIS, IASI a AIRS

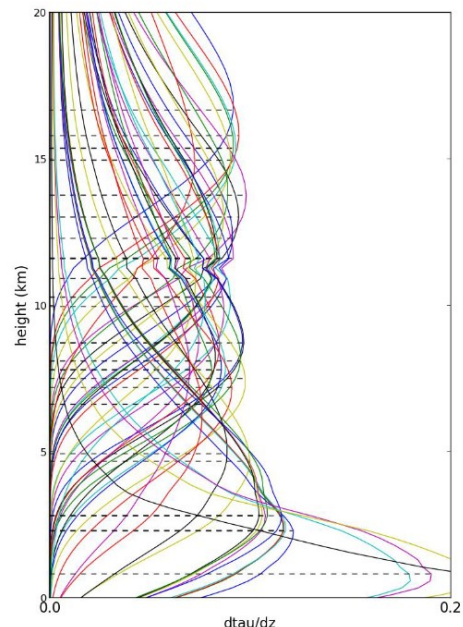
CrIS Weighting Functions: Assimilated Low-peaking T-channels



IASI Weighting Functions: Assimilated Low-peaking T-channels



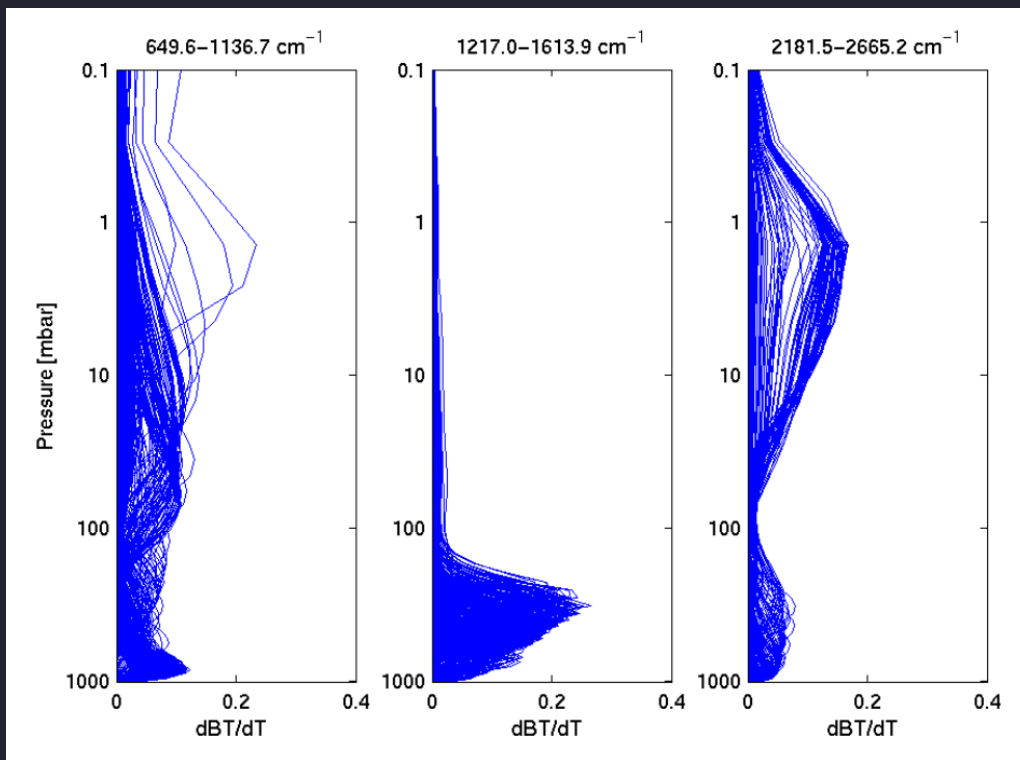
AIRS Weighting Functions: Assimilated Low-peaking T-channels



Zatímco u MW přístrojů se počty spektrálních kanálů pohybují řádově v jednotkách až desítkách, moderní IR sondážní přístroje pracují s počty kanálů ve stovkách až několika tisících – proto termín hyperspektrální sondáž atmosféry. Zde příklady váhových funkcí CrIS, IASI a AIRS pro kanály mající maximum své váhové funkce do hladiny 20 km.

zdroj: [https://www.star.nesdis.noaa.gov/jps/documents/AMM\\_All/CrIS\\_SDR/Validated/Bell\\_Met\[1\].pdf](https://www.star.nesdis.noaa.gov/jps/documents/AMM_All/CrIS_SDR/Validated/Bell_Met[1].pdf)

# Podstata vertikální IR hyperspektrální sondáže atmosféry – AIRS



Ukázka váhových funkcí přístroje AIRS (Aqua) až do hladiny 0.1 hPa.

AIRS – tři skupiny spektrálních kanálů, pracujících v různém rozsahu vlnových délek.

U přístrojů sondáže atmosféry je častější označení jednotlivých kanálů jejich středním vlnovým číslem (wavenumber) nebo frekvencí kanálu, nikoliv vlnovou délkou. Totéž pro rozsahy jednotlivých spektrálních pásem.

vlnové číslo = 1 / vlnová délka, nejčastěji [cm<sup>-1</sup>]

převodník jednotek záření např. zde:  
[Energy Unit Conversions](#)

zdroj: <https://cimss.ssec.wisc.edu/dbs/China2011/Day4/Lectures/AIRS/AIRS-Instrument.pdf>

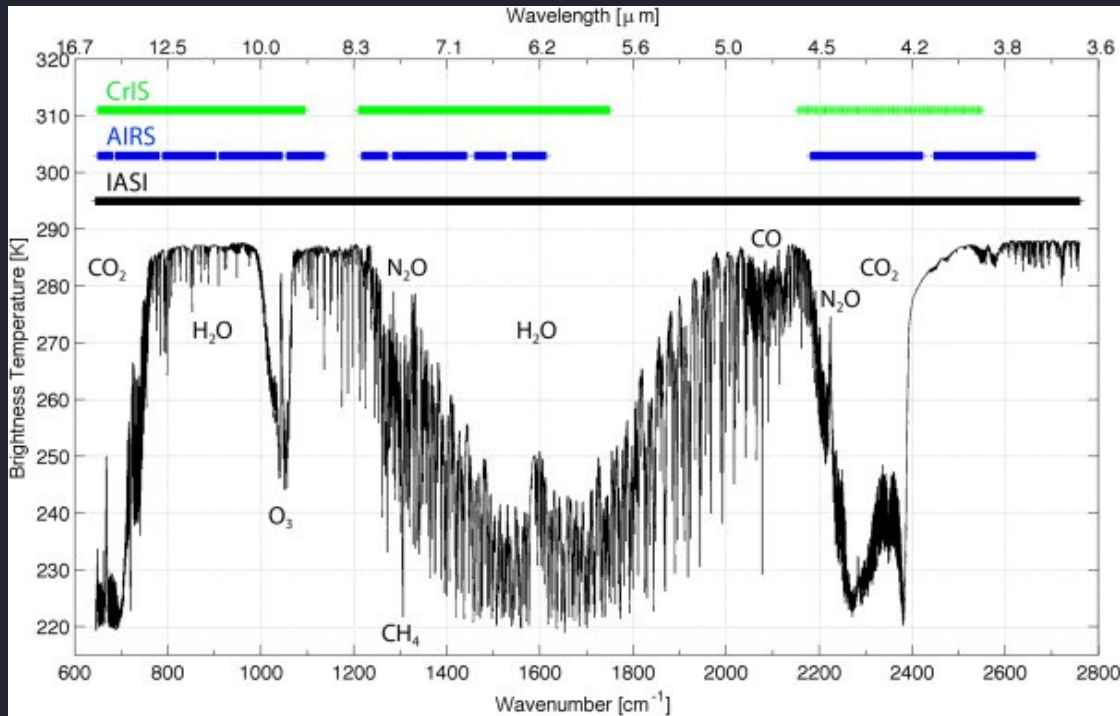
# Historie, současnost a budoucnost pasivní vertikální sondáže atmosféry

- první teoretická práce, která položila základy pro budoucí vertikální družicovou sondáž atmosféry: Lewis Kaplan, 1959 – [Inference of Atmospheric Structure from Remote Radiation Measurements](#)
- první pokusy o sondáž z družic: [NIMBUS-3](#) (start 1969) přístroje Satellite Infrared Spectrometer (SIRS) a Infrared Interferometer spectrometer (IRIS)
- další obdobné přístroje na družicích NIMBUS-4 až 7 (do r. 1994)
- výrazné zdokonalení a určitá standardizace sondážních přístrojů počínaje družicí TIROS-N (1978), na následných družicích NOAA-6 až NOAA-19, družicí Aqua (2002, NASA) a evropských družicích METOP-1 až 3 (od r. 2006 do současnosti)

# Historie, současnost a budoucnost pasivní vertikální sondáže atmosféry

- první teoretická práce, která položila základy pro budoucí vertikální družicovou sondáž atmosféry: Lewis Kaplan, 1959 – Inference of Atmospheric Structure from Remote Radiation Measurements
- první pokusy o sondáž z družic: NIMBUS-3 (start 1969) přístroje Satellite Infrared Spectrometer (SIRS) a Infrared Interferometer spectrometer (IRIS)
- další obdobné přístroje na družicích NIMBUS-4 až 7 (do r. 1994)
- výrazné zdokonalení a určitá standardizace sondážních přístrojů počínaje družicí TIROS-N (1978), na následných družicích NOAA-6 až NOAA-19, družicí Aqua (2002, NASA) a evropských družicích METOP-1 až 3 (od r. 2006 do současnosti)
- v současnosti tři nejvýznamnější IR hyperspektrální sondážní přístroje:  
AIRS, [Atmospheric Infra-Red Sounder](#) – družice Aqua (2002)  
IASI, [Infrared Atmospheric Sounding Interferometer](#) – družice Metop-1 až 3 (od 2006)  
CrIS, [Cross-track Infrared Sounder](#) – družice SNPP (2011), NOAA-20 (2017), NOAA-21 (2022) a budoucích NOAA-22 (JPSS-3) a NOAA-23 (JPSS-4)
- nejbližší budoucnost: IRS, [InfraRed Sounder](#) – družice MTG-S1 (2025/07) a MTG-S2 (~ 2035)

# Porovnání spektrálních rozsahů a využívaných pásem přístroji CrIS, AIRS a IASI



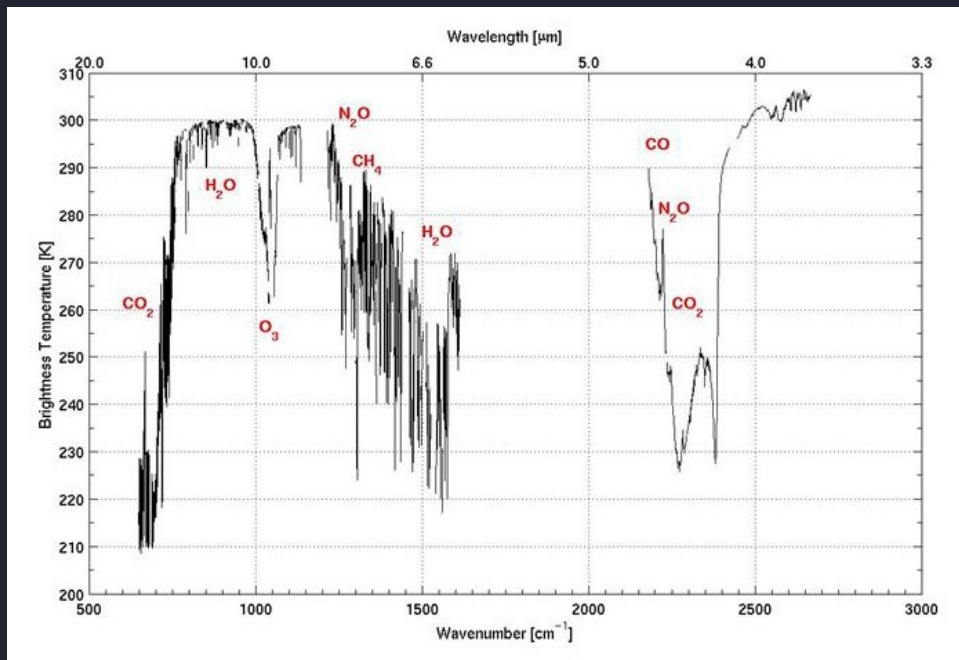
zdroj: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/aqua-satellite>

Pouze IASI kontinuální pokrytí celého pásma od  $\sim 3.6 \mu\text{m}$  do  $15.5 \mu\text{m}$  ( $600$  až  $2800 \text{ cm}^{-1}$ ). Přístroje AIRS a CrIS tři oddělená pásma.

Podrobnosti k jednotlivým přístrojům dále.



## AIRS – Atmospheric Infrared Sounder, Aqua



Spektrální rozsah kanálů AIRS, zdroj: [AIRS Instrument Characteristics](#) (PDF)

Další podrobnější informace k přístroji AIRS: [AIRS Project Instrument Suite](#).

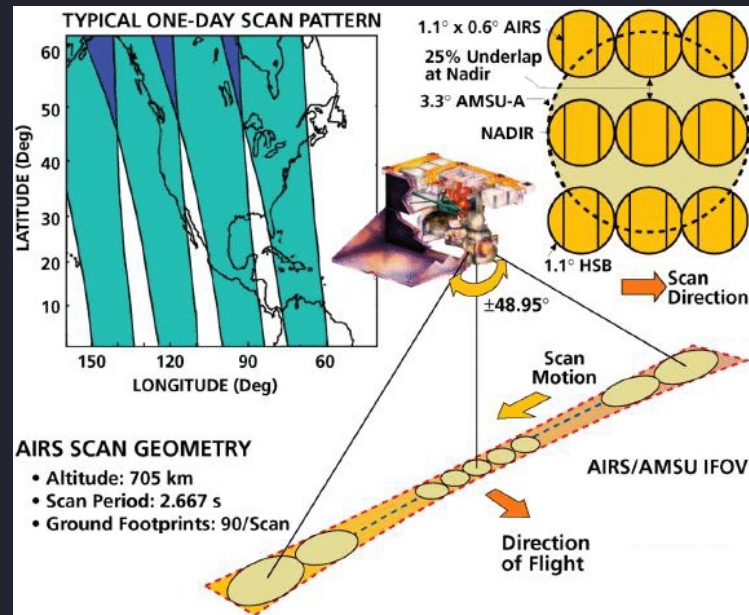
schéma skenování přístrojem AIRS >>>

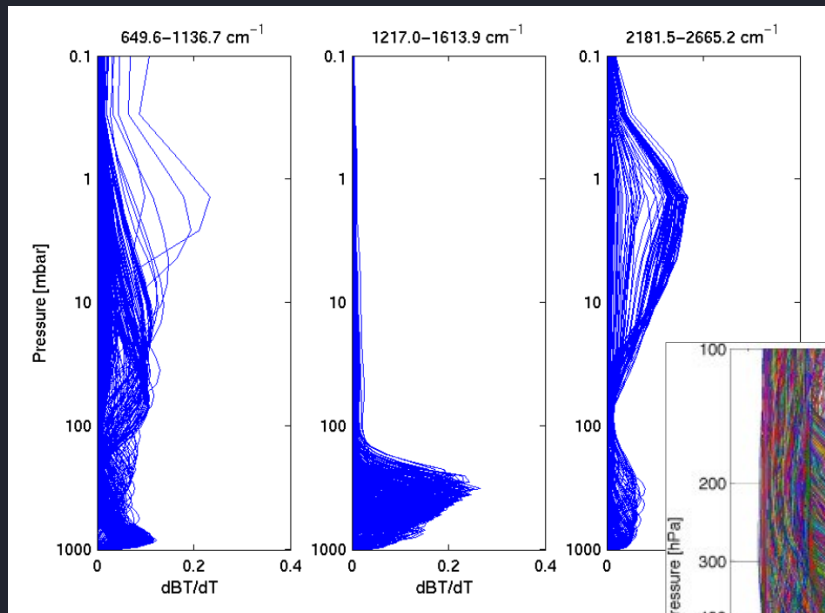
Mřížkový spektrometr (na rozdíl od všech následujících přístrojů, využívajících Michelsonův interferometr), detaily konstrukce a principu přístroje AIRS [zde](#)

celkem 2378 individuálních kanálů  
(3.74 – 4.61 μm, 6.20 – 8.22 μm, 8.80 – 15.4 μm)

šířka snímaného pásu území přístrojem AIRS: 1650 km

konstantní velikost snímacího úhlu přístroje 1.1°, což odpovídá rozlišení 13.5 km v nadiru (nejlepší rozlišení)

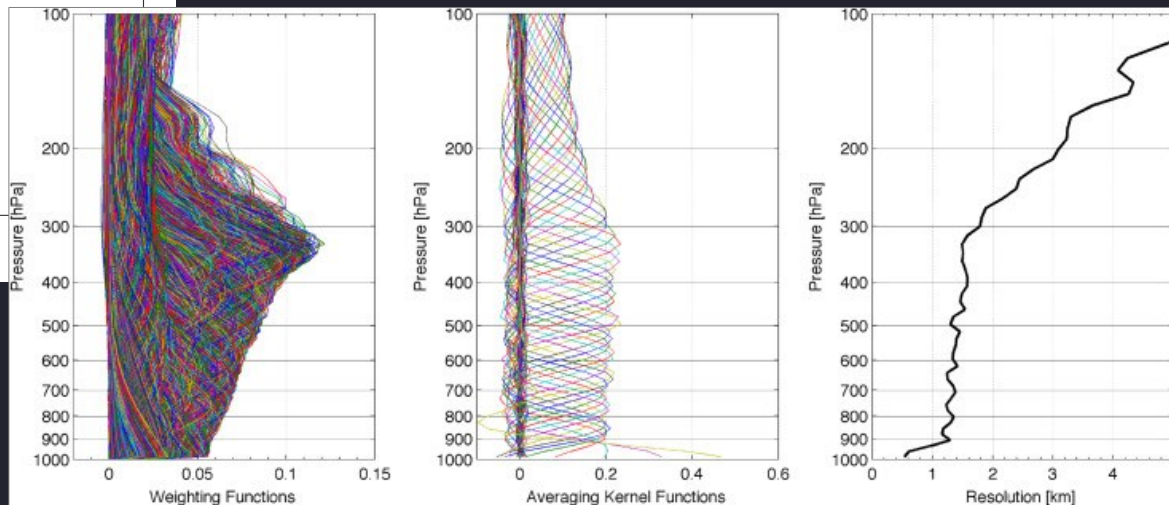




Váňové funkce přístroje AIRS do hladiny 0.1 hPa. Tři skupiny spektrálních kanálů, pracujících v různém rozsahu vlnových délek.

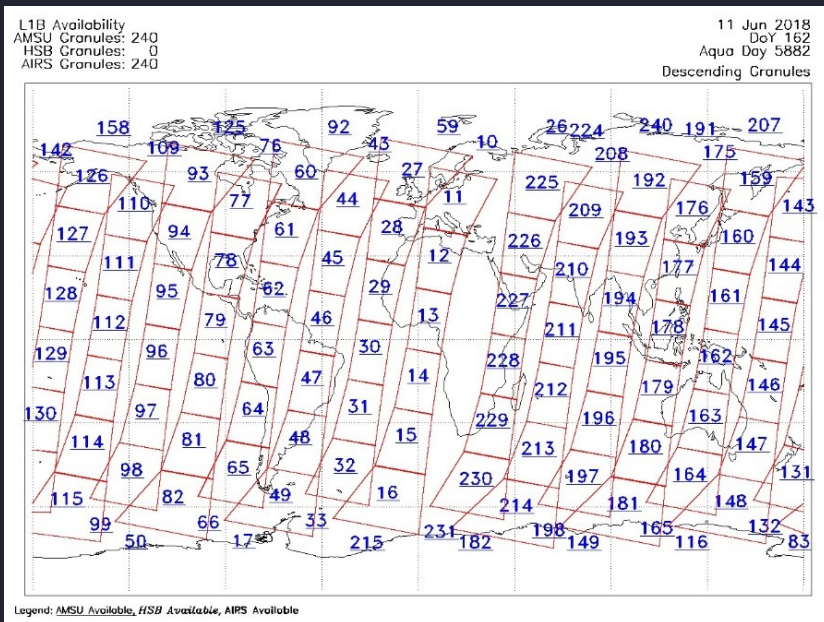
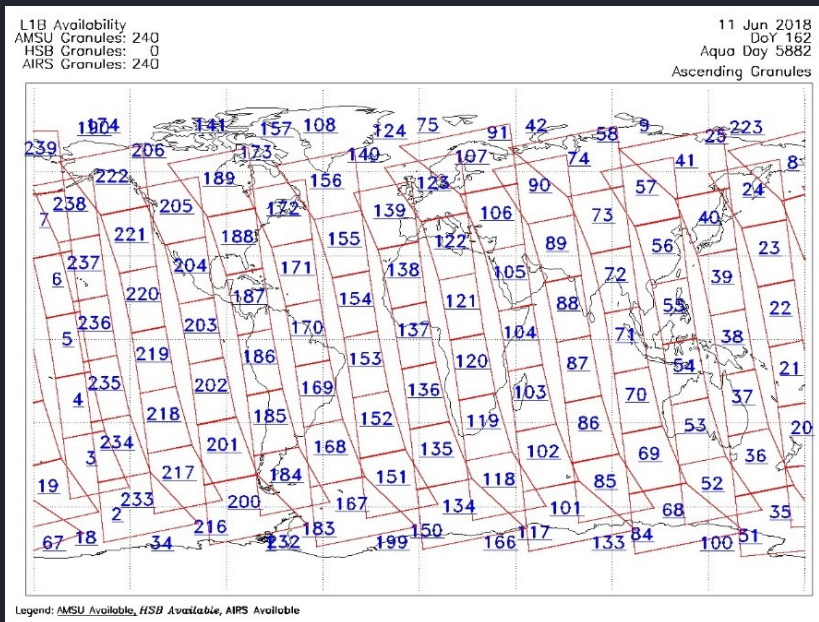
zdroj: <https://cimss.ssec.wisc.edu/dbs/China2011/Day4/Lectures/AIRS/AIRS-Instrument.pdf>

Váňové funkce přístroje AIRS do hladiny 100 hPa, zpracované „Kernel Functions“, a vertikální rozlišení v různých hladinách.



zdroj: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/aqua-satellite>

# AIRS – formáty a dostupnost dat



Data a produkty dostupné uživatelům:

- Level 1B (L1B) – naměřené kalibrované a geolokované radiance
- Level 1C (L1C) – L1B zhlazené a opravené o různé chyby měření, plus syntetické kanály (doplnění chybějících dat z jiných přístrojů)
- Level 2 a 3 (L2, L3) – různé odvozené produkty

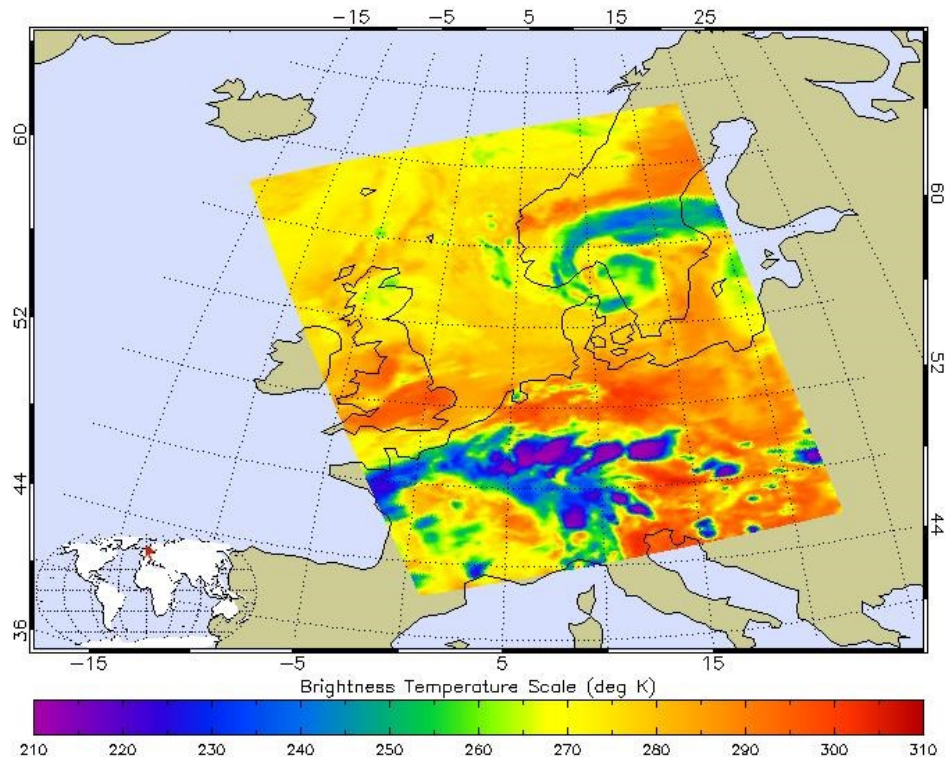
Data (L1B, L1C a L2) organizována do 6-minutových „granulí“, výběr požadovaných granulí zde:

[https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/AIRXAMAP\\_005/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/AIRXAMAP_005/summary)

## AIRS – formáty a dostupnost dat – granule

### AIRS Level-1B Quick Browse Image

11.08  $\mu\text{m}$  Brightness Temperature Jun 11, 2018 12:17:21 UTC Granule 123



Granule Id = AIRS.2018.06.11.123.L1B.AIRS\_Rad.v5.0.23.0.G18163110422.hdf

Data L1B a L1C (kalibrované a geolokované radiance,  $\text{mW}/\text{m}^2/\text{cm}^{-1}/\text{sr}$ )

Každá obrazová granule sestává z celkem 135 nasnímaných řádků dat (*lines*), každý nasnímaný řádek sestává z 90 pixelů (*footprints*).

Typická velikost granule:  $\sim 125$  MB

Každých 24 hodin je standardně nasnímano celkem 240 granulí, z čehož je 120 ve vzestupné (denní) a 120 v sestupné (noční) části dráhy družice.

Objednání dat – archiv, nutná bezplatná registrace:

L1B (AIRIBRAD)

[https://airs1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/Aqua\\_AIRS\\_Level1/AIRIBRAD.005/](https://airs1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/Aqua_AIRS_Level1/AIRIBRAD.005/)

L1C (AIRICRAD)

[https://airs1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/Aqua\\_AIRS\\_Level1/AIRICRAD.6.7/](https://airs1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/Aqua_AIRS_Level1/AIRICRAD.6.7/)

**Poznámka:** L1C stejný formát jako L1B, ale navíc různé „syntetické“ kanály > číslování L1C kanálů neodpovídá číslování L1B kanálů

## Ukázka využití AIRS L1B dat pro detekci gravitačních vln v horní stratosféře (variace teploty)



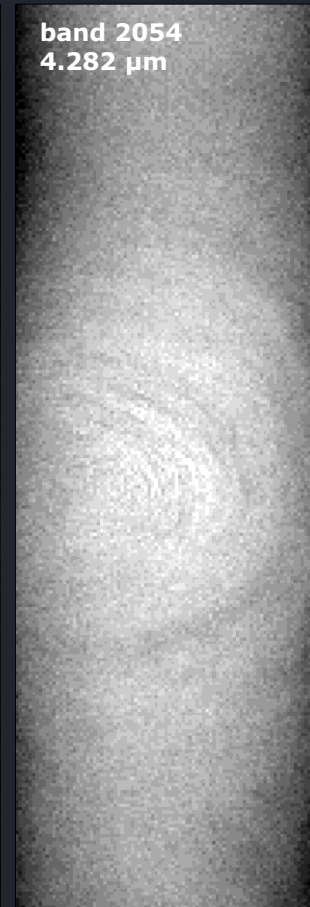
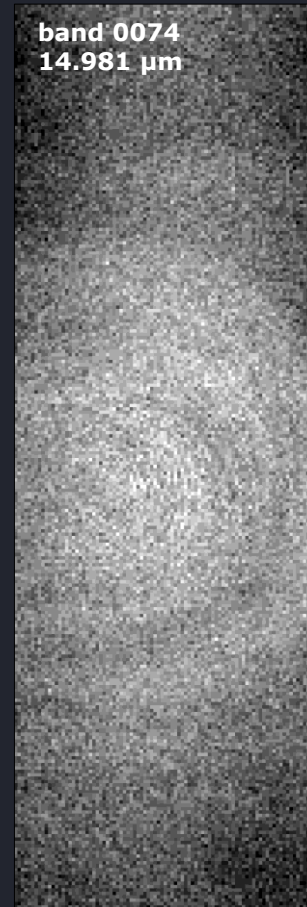
Koncentrické gravitační vlny (CGW) vygenerované silnými konvektivními bouřkami nad Bangladéšem, zviditelněné díky airglow v hladinách 85–100 km.

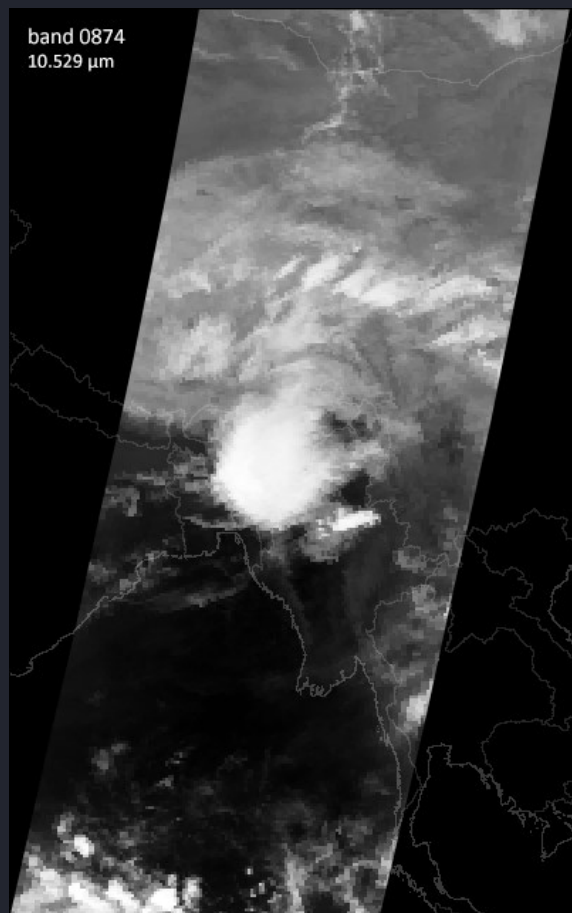
Foto: Jeff Dai, 2014-04-27 15:57 UTC, Tibetská náhorní plošina, Čína

zdroj: <https://www.flickr.com/photos/jeffdai/14845763849/>

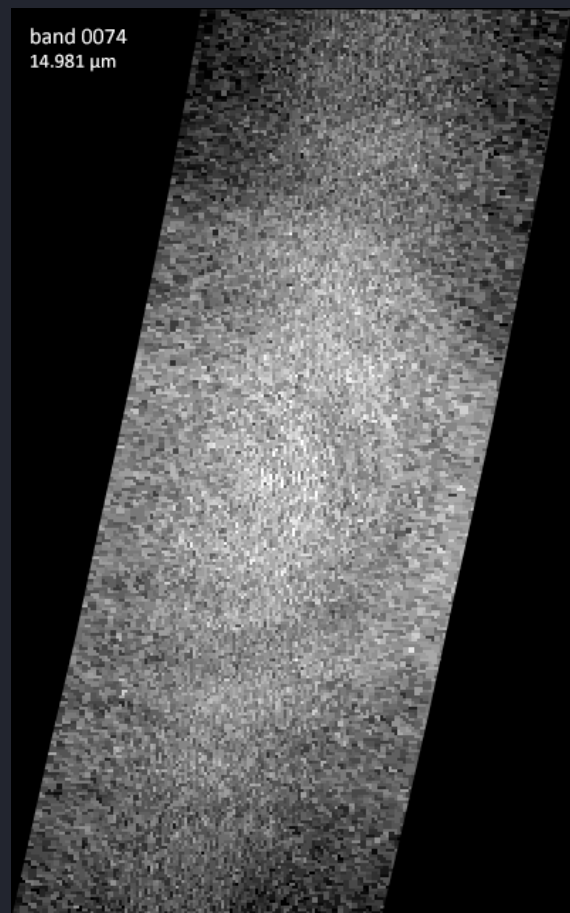
nebo: <https://apod.nasa.gov/apod/ap221120.html>

Tytéž gravitační vlny, zaznamenané v absorpčních kanálech CO<sub>2</sub> přístroje AIRS družice Aqua, 19:29 – 19:41 UTC, v horní stratosféře (cca 40 – 45 km). Vlevo pro porovnání snímek v atmosférickém okně.

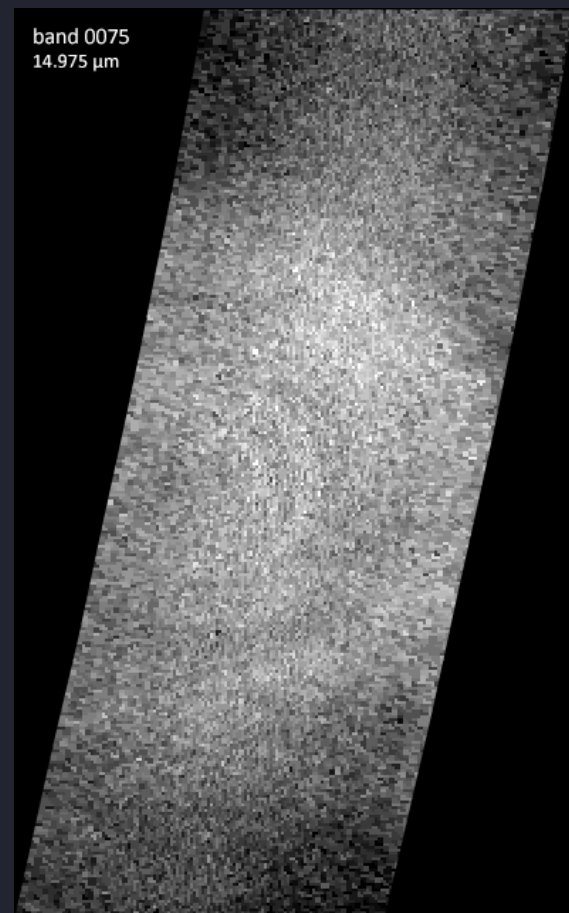


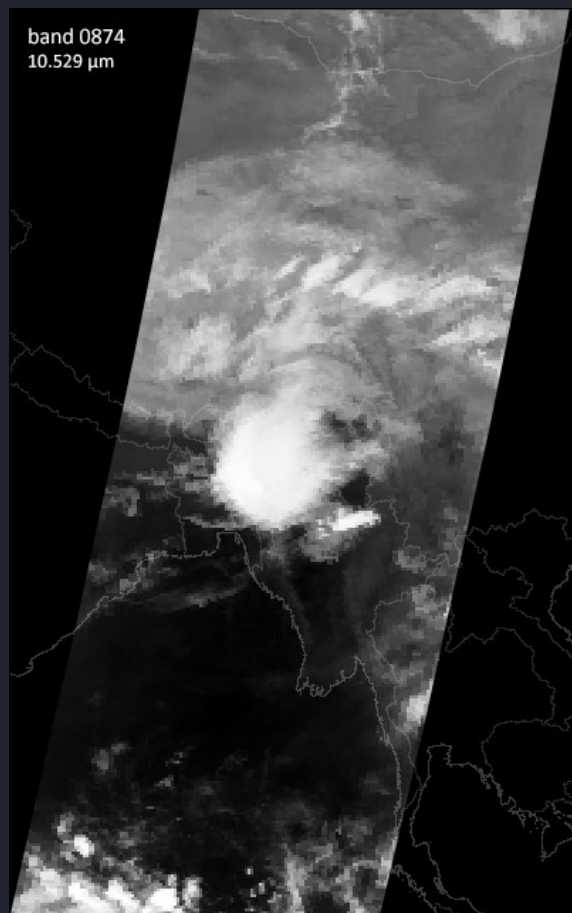


Atmosférické okno 10.5  $\mu\text{m}$

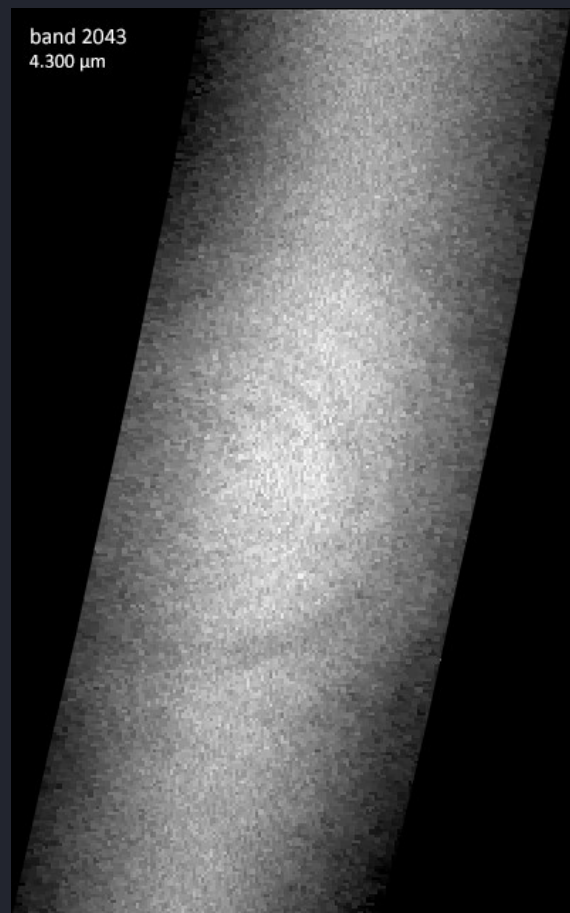


Absorpční kanály  $\text{CO}_2$ . Viditelnost gravitačních vln v konkrétních kanálech se pro různé případy může lišit.

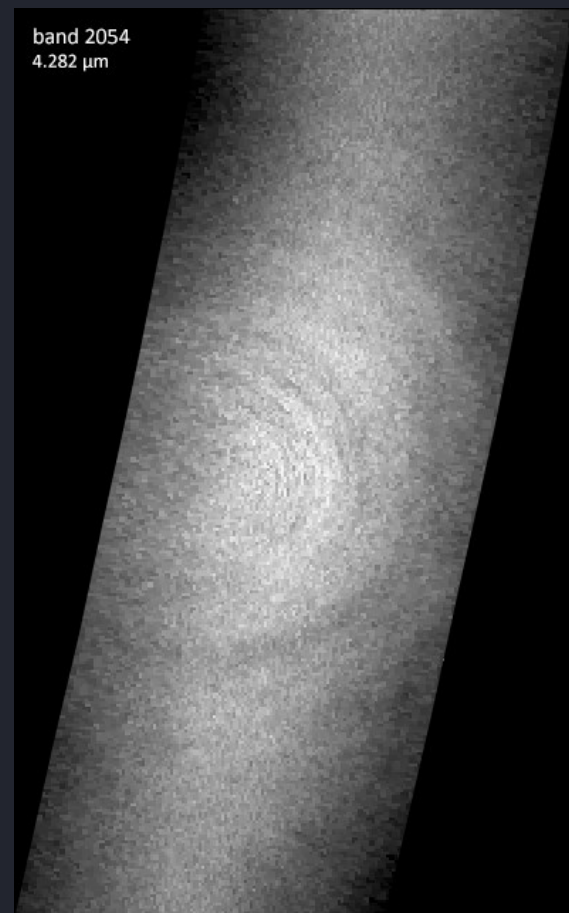


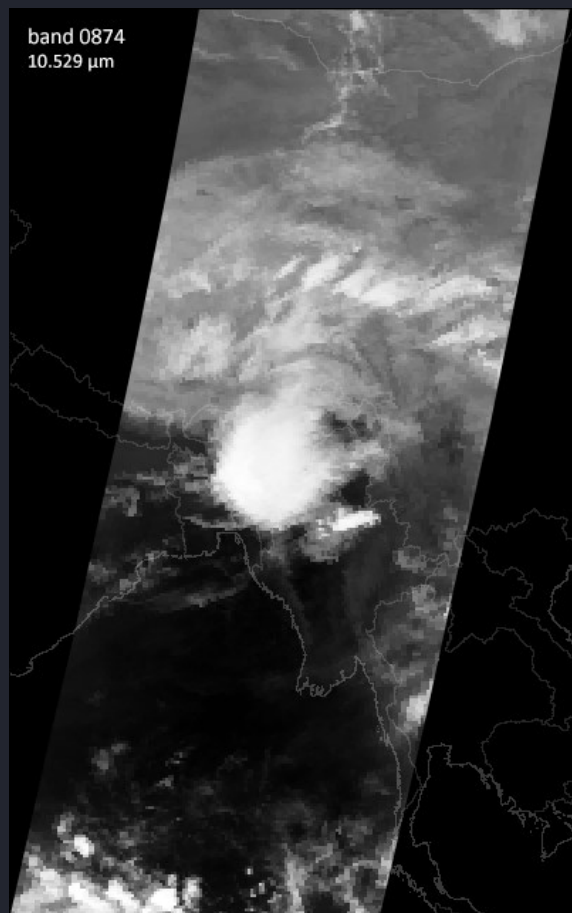


Atmosférické okno 10.5  $\mu\text{m}$

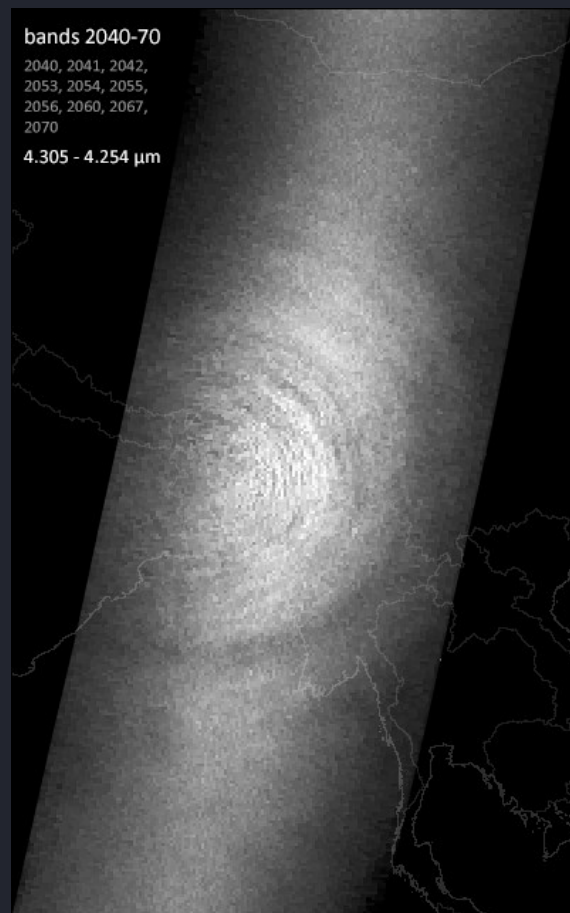


Absorpční kanály CO<sub>2</sub>. Viditelnost gravitačních vln v konkrétních kanálech se pro různé případy může lišit.

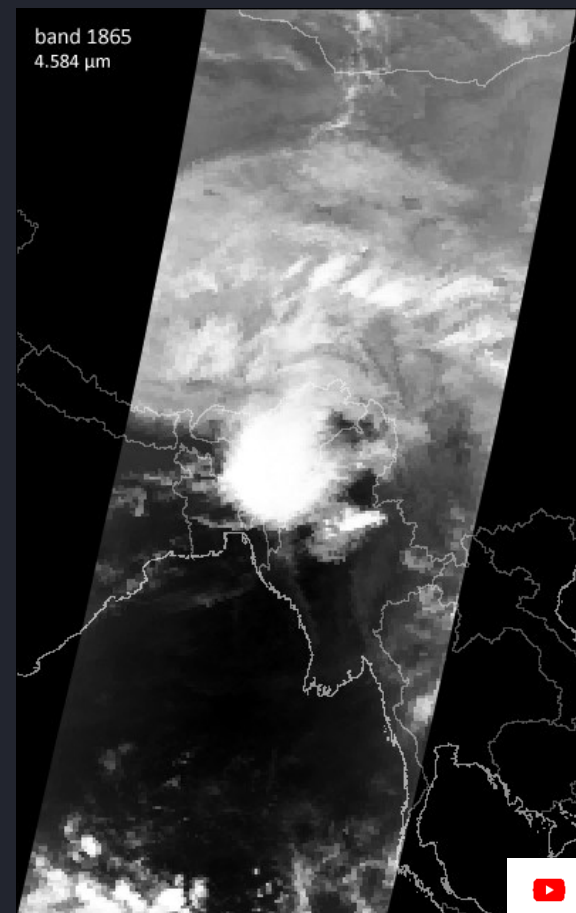




Atmosférické okno 10.5  $\mu\text{m}$

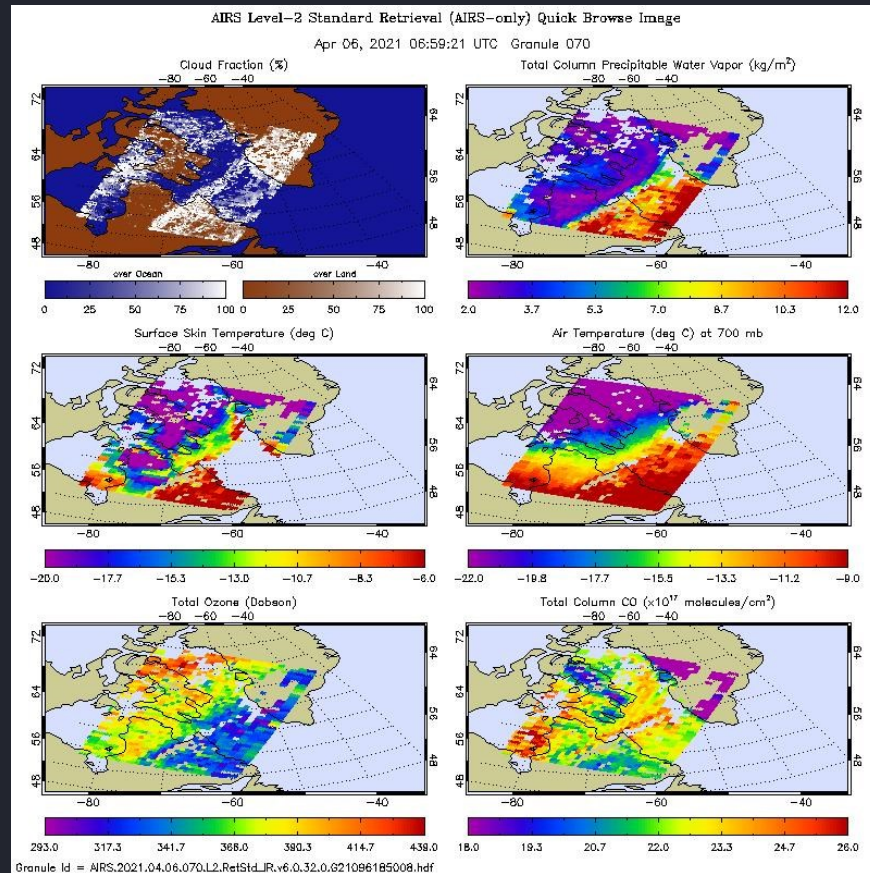
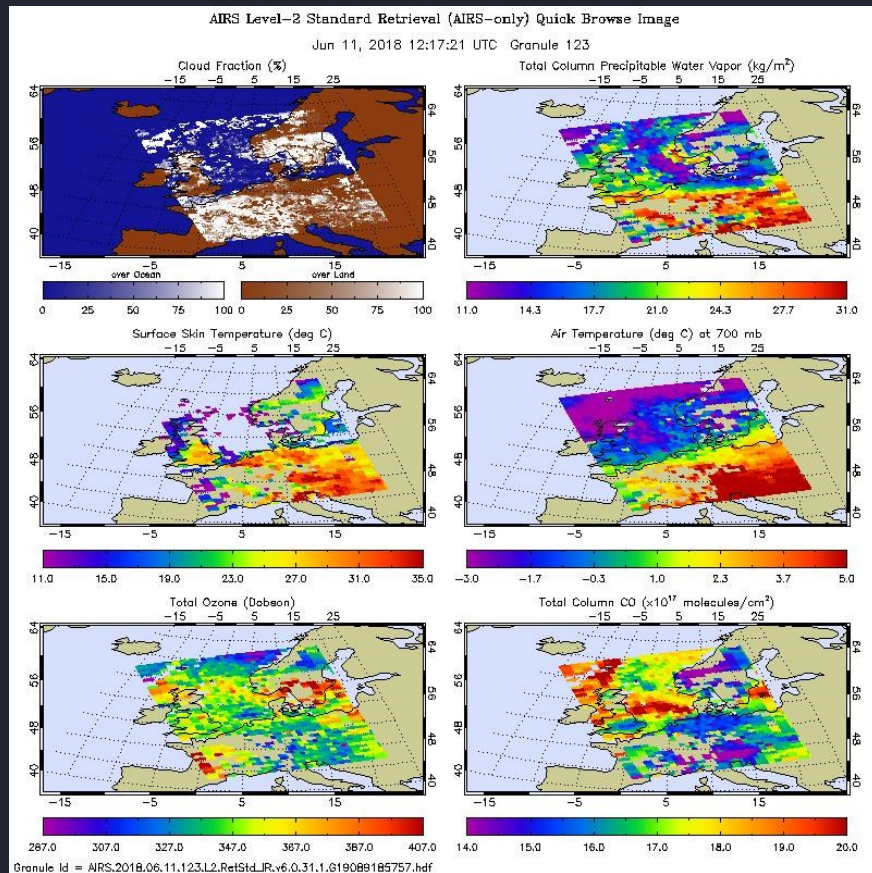


Průměrná radiance z deseti vybraných kanálů  
(potlačení šumu)



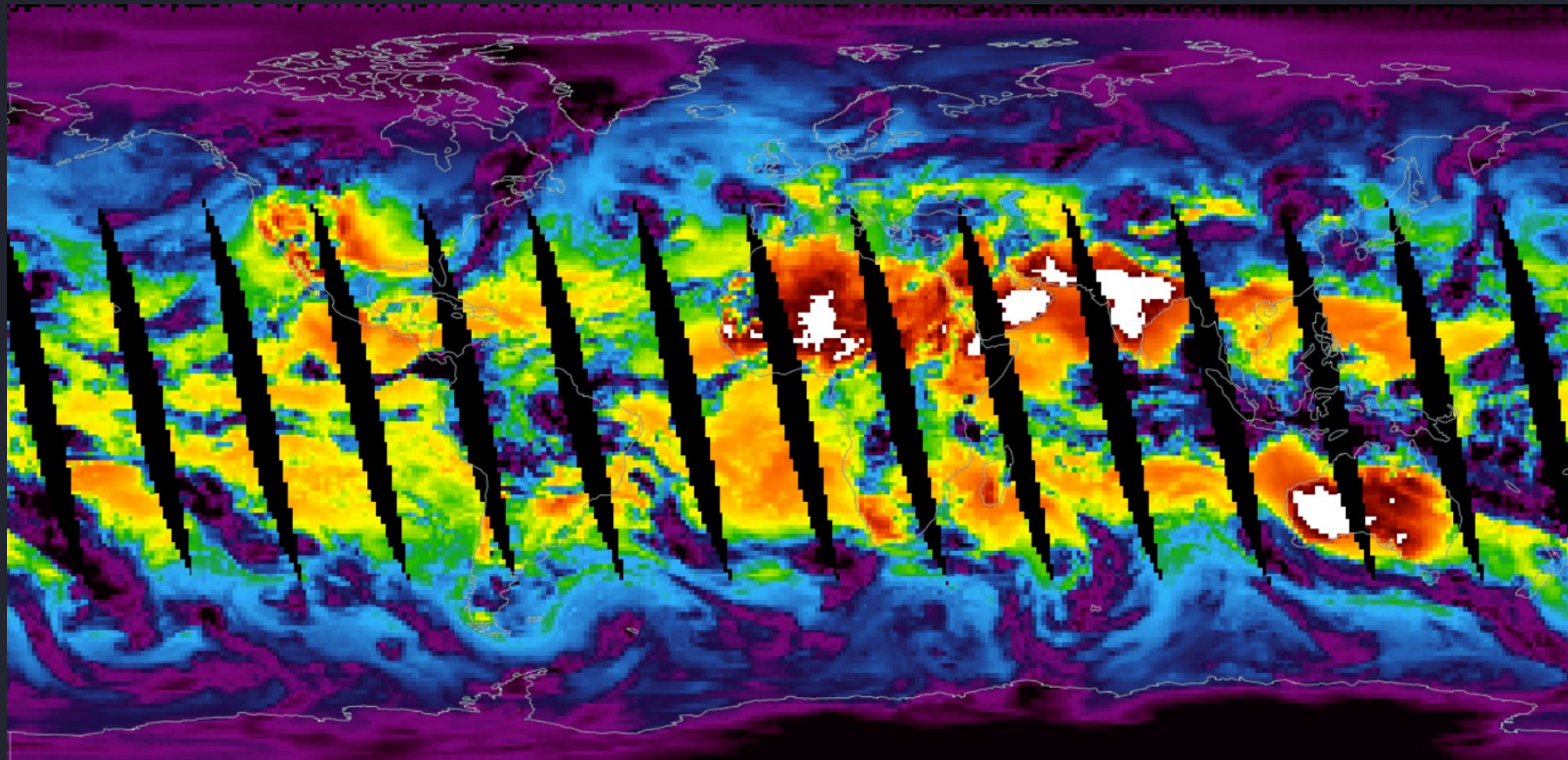
Ukázka proměnlivosti viditelnosti a vzhledu CGW  
v jednotlivých kanálech AIRS (pouze kanály 1865  
až 2144)

# Ukázky produktů AIRS L2



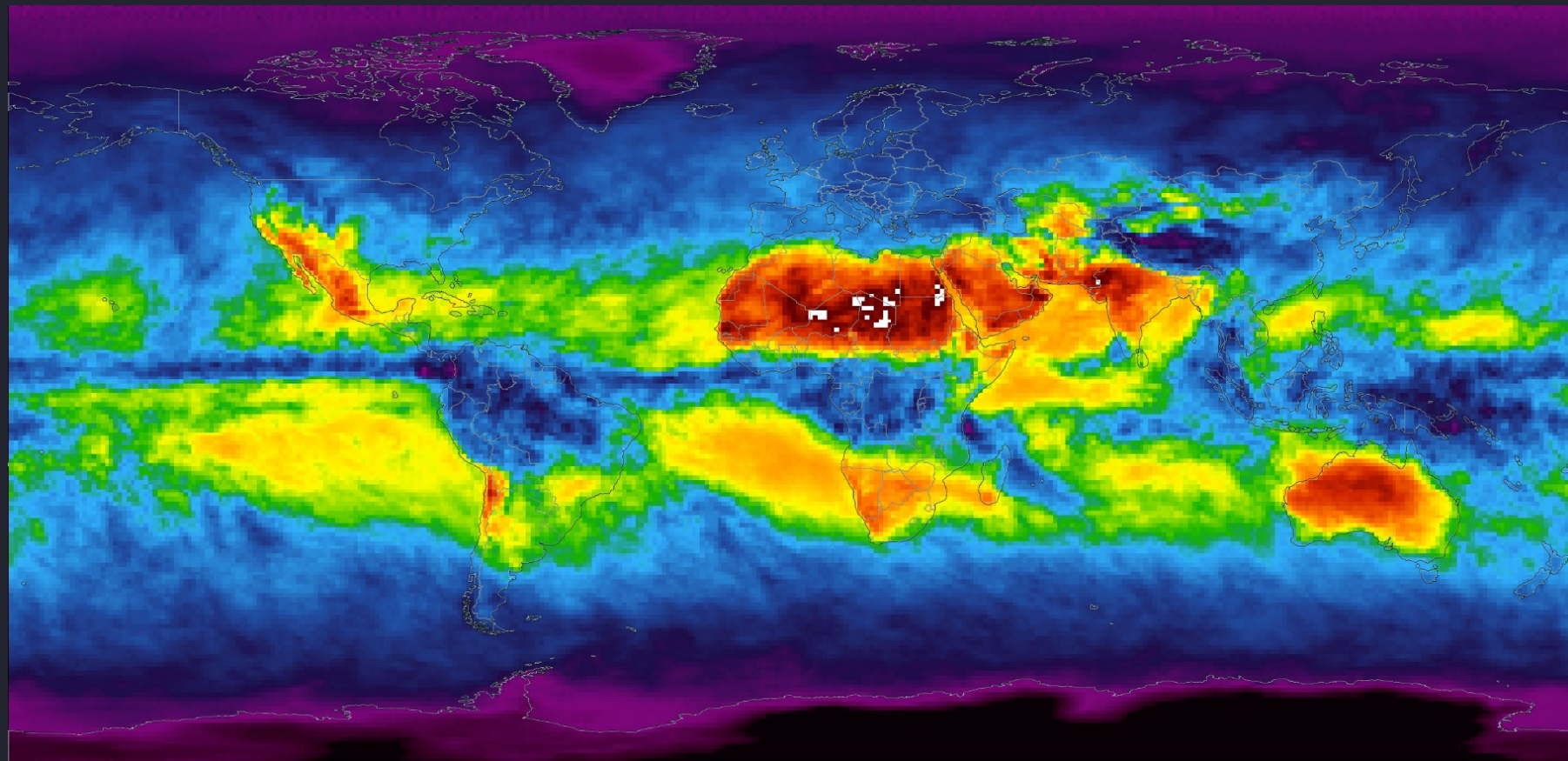
AIRS/Aqua [L2 Standard Physical Retrieval \(AIRS-only\) V006 \(AIRS2RET\)](#)

Ukázky produktů AIRS L3 (různé denní, několikadenní, měsíční, roční produkty)



Outgoing Longwave Radiation (L3, Day, Daily), [NASA EOS Worldview](#)

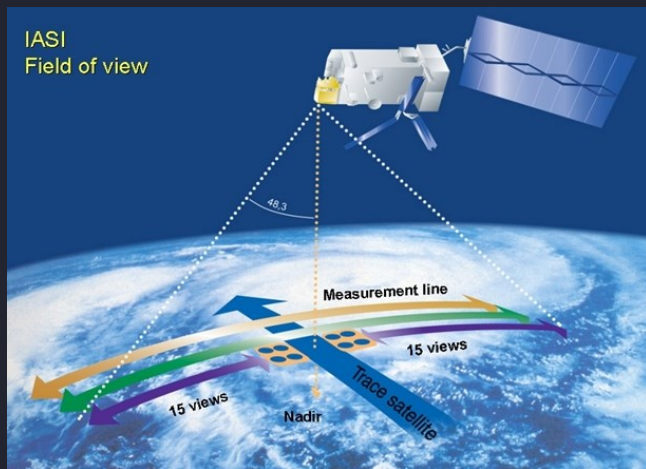
Ukázky produktů AIRS L3 (různé denní, několikadenní, měsíční, roční produkty)



Outgoing Longwave Radiation (L3, Day, Monthly), [NASA EOS Worldview](#)

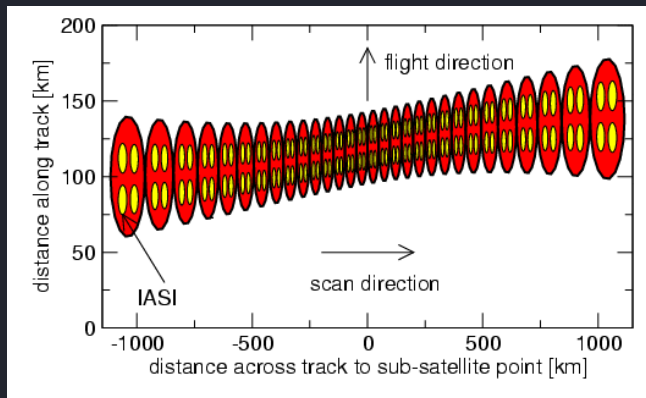


# IASI – Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, Metop 1 – 3



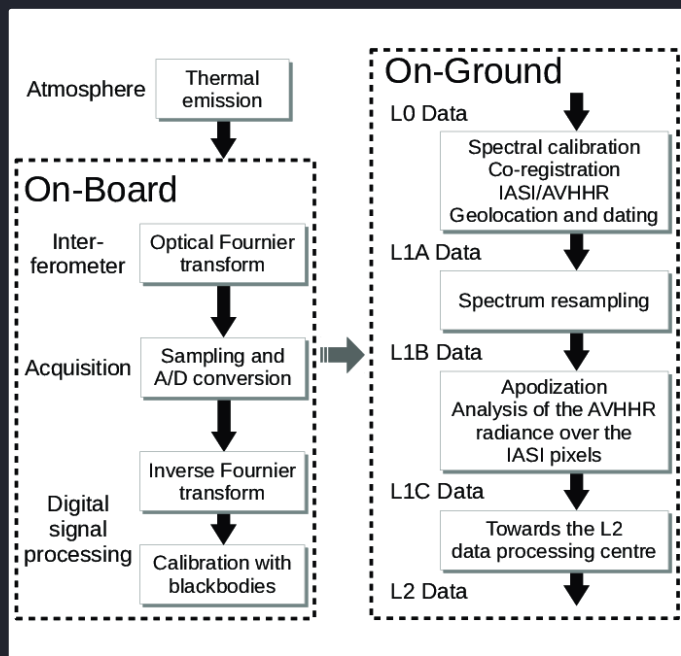
- Krokový Michelsonův interferometr (metoda „stop and stare“), v průběhu jednoho skenu 30 EFOV (elementary fields of view), v každém z nich měření ve 4 IFOV (instantaneous fields of view), v každém IFOV změřen tzv. interferogram. Velikost IFOV v nadiru 12 km, na kraji snímaného pásu 39x20 km. Celková šířka pásu dat cca 2200 km.
- Měření interferogramů v celkem 8461 kanálech, pokrývajících kontinuálně celé pásmo 3.63 až 15.5  $\mu\text{m}$  ( $645\text{--}2760\text{ cm}^{-1}$ ), rozdělené na tři navazující dílčí pásma:

Band 1    645 - 1210  $\text{cm}^{-1}$ ,    8.26 - 15.50  $\mu\text{m}$   
 Band 2    1210 - 2000  $\text{cm}^{-1}$ ,    5.00 - 8.26  $\mu\text{m}$   
 Band 3    2000 - 2760  $\text{cm}^{-1}$ ,    3.62 - 5.00  $\mu\text{m}$



| Band | Name of region | Spectral region ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Absorption band                        | Usage                                                                   |
|------|----------------|--------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| B1   | R1             | 650 - 770                            | $\text{CO}_2$                          | Temperature profile                                                     |
| B1   | R2             | 790 - 980                            | Atmospheric window                     | Surface and Cloud properties                                            |
| B1   | R3             | 1000 - 1070                          | $\text{O}_3$                           | $\text{O}_3$ sounding                                                   |
| B1   | R4             | 1080 - 1150                          | Atmospheric window                     | Surface and Cloud properties                                            |
| B2   | R5             | 1210 - 1650                          | $\text{H}_2\text{O}$                   | Humidity profiles;<br>$\text{CH}_4$ and $\text{N}_2\text{O}$ properties |
| B3   | R6             | 2100 - 2150                          | $\text{CO}$                            | $\text{CO}$ column amount                                               |
| B3   | R7             | 2150 - 2250                          | $\text{N}_2\text{O}$ and $\text{CO}_2$ | Temperature profile;<br>$\text{N}_2\text{O}$ column amount              |
| B3   | R8             | 2350 - 2420                          | $\text{CO}_2$                          | Temperature profile                                                     |
| B3   | R9             | 2420 - 2700                          | Atmospheric window                     | Surface and cloud properties                                            |
| B3   | R10            | 2700 - 2760                          | $\text{CH}_4$                          | $\text{CH}_4$ column amount                                             |

## IASI – zpracování dat, jejich úrovně a dostupnost



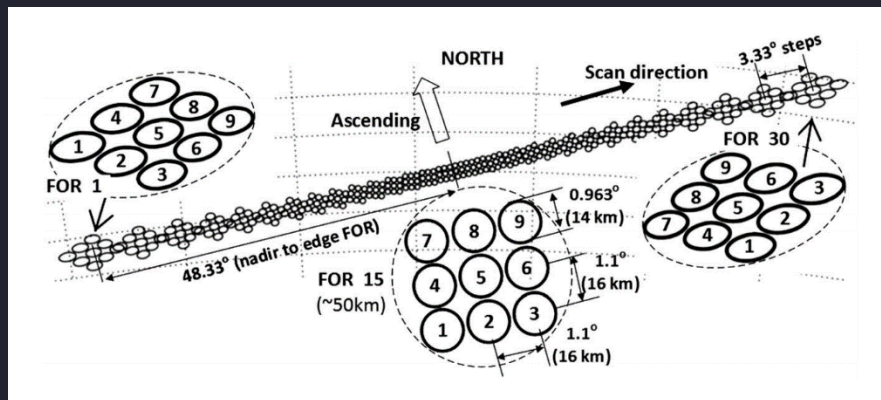
- Vzhledem k přidělené přenosové kapacitě 1.5 Mbps pro IASI (přenos dat z družic Metop do přijímacích, resp. zpracovatelských center) a objemu dat generovaného samotným přístrojem IASI (cca 45 Mbps) je nutná redukce naměřených dat již na družici, před jejich přenosem.
- Jednotlivé kroky poměrně složitého zpracování naměřených dat a jejich komprese podrobně popsány např. zde: Hyperspectral IASI L1C Data Compression, DOI: [10.3390/s17061404](https://doi.org/10.3390/s17061404) (2017), nebo stručně [zde \(Wikipedia\)](#).
- Přístup k datům (L1C a L2) např.:  
[EUMETSAT Data Centre](#)  
[NOAA CLASS Archive](#)  
[IASI Portal](#)
- Data L1C jsou rovněž distribuována v téměř reálném čase (NRT, Near-Real Time) prostřednictvím služby EUMETCast.
- Popis L1 dat zde: [IASI Level 1 Product Guide](#)
- Popis L2 produktů: [IASI Level 2 Product Guide](#)

Na budoucích polárních družicích EUMETSATu systému EPS-SG bude jedním z přístrojů **IASI-NG**, zde podrobněji nerozebírán, detailní popis např. zde: <https://www-cdn.eumetsat.int/files/2023-10/4.%20Giordano%20Bruni%2016.45.pdf>

## **CrIS – Cross-track Infrared Sounder**

**S-NPP (2012), NOAA-20 (2017), NOAA-21 (2022)  
a budoucích NOAA-22 a NOAA-23**

## CrIS – Cross-track Infrared Sounder, S-NPP, NOAA-20, NOAA-21 a budoucí navazující



Michelsonův interferometr (stejně jako IASI), v průběhu jednoho skenu 30 tzv. FOR (fields of regard), v každém z nich měření v 9 FOV (fields of view), v každém FOV změřen interferogram. Velikost FOV v nadiru 14 km. Celková šířka pásu dat cca 2200 km.

Měření interferogramů v celkem 1305 kanálech na S-NPP do 2.11.2015 (Normal Spectral Resolution, NSR), resp. ve 2223 kanálech na S-NPP od 2.11.2015, na NOAA-20 a novějších budoucích družicích (Full Spectral Resolution, FSR), pokrývajících pásmo 3.9 až 15.4  $\mu\text{m}$  ( $650\text{--}2550\text{ cm}^{-1}$ ), které je rozdělené na tři nesouvislá, oddělená dílčí pásma:

|      |                                |                            |
|------|--------------------------------|----------------------------|
| LWIR | 650 - 1095 $\text{cm}^{-1}$ ,  | 9.13 - 15.40 $\mu\text{m}$ |
| MWIR | 1210 - 1750 $\text{cm}^{-1}$ , | 5.71 - 8.26 $\mu\text{m}$  |
| SWIR | 2155 - 2550 $\text{cm}^{-1}$ , | 3.92 - 4.64 $\mu\text{m}$  |

Zpracování dat obdobné IASI, částečně na družici (redukce objemu dat), ostatní po přenosu do pozemního zpracovatelského centra. Podrobnosti ke zpracování dat CrIS viz např.

[Cross Track Infrared Sounder \(CrIS\) Sensor Data Record \(SDR\) User's Guide](#)

nebo

[Suomi NPP CrIS measurements, sensor data record algorithm, calibration and validation activities, and record data quality](#)

## CrIS – úrovně dat a jejich dostupnost

| Level                            | Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Level 0<br>(RDR's)               | Raw Data Records (RDR)s from CrIS sensor formatted to CCSDS transmission standards. Unprocessed raw data packages of instrument data at original resolution, are time ordered (no overlap), with duplicate packets removed.<br>Contents of data record include sensor raw science data, housekeeping and calibration data merged with spacecraft orbit information (ephemeris, attitude, and time data).<br>The data granule is assumed to be 1.25 orbits maximum.<br>→ RDR sensor output |
| Level 1A<br>(intermediate level) | Level 0 data (including reconstructed interferograms) which may have been reformatted or transformed reversibly, located to a coordinate system, and packaged with needed calibration characterization data needed to begin calibration procedure.                                                                                                                                                                                                                                        |
| Level 1B<br>(SDR's)              | Radiometrically, spectrally (frequency), and geolocated calibrated spectra mapped onto EDR channel sets with specific ILS and apodization, with annotated quality indicators.                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Level 2<br>(EDR's)               | Environmental variables retrieved from Level 1 data.<br>Geolocated profiles of pressure, temperature, and humidity of the atmosphere.<br>Land and ocean skin temperature, and total column ozone.                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

Podrobnější popis všech jednotlivých dostupných produktů L1B a L2 a jejich dostupnost např. zde: [NASA EarthData GES DISC](#)

Produkty úrovní L0 (RDR) a L1A (obojí nedostupné výše), L1B (SDR) a L2 (EDR) dostupné prostřednictvím [NOAA CLASS Archive](#) (tam zařazené mezi produkty JPSS).



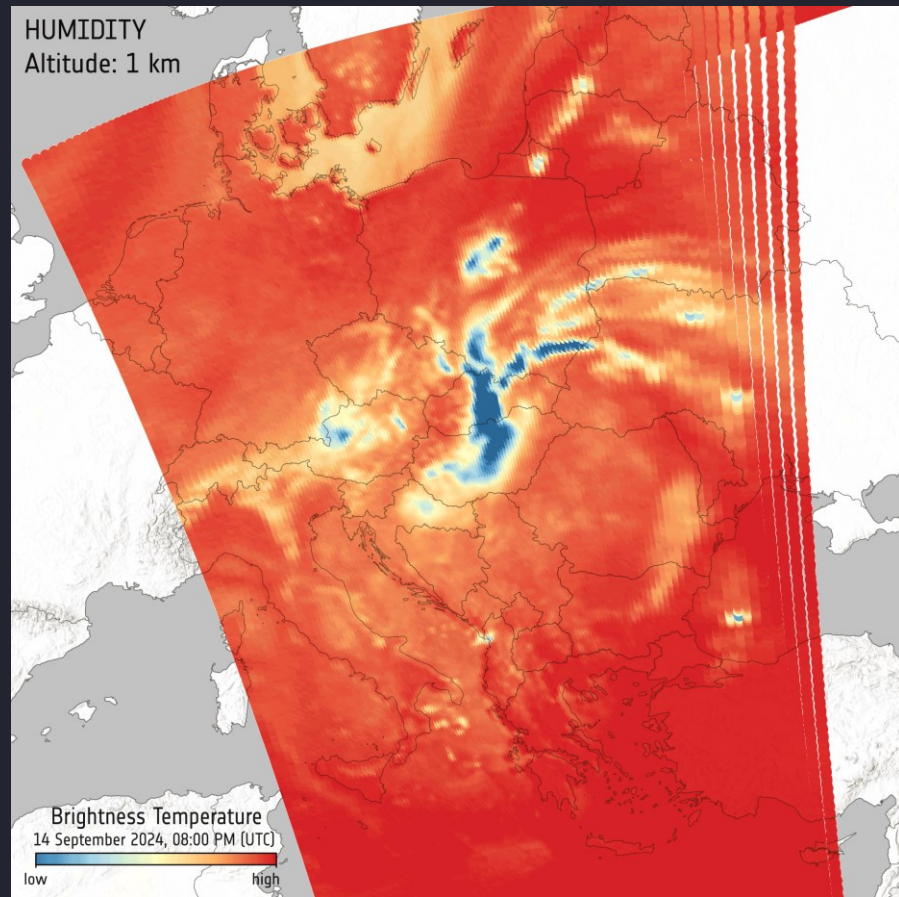
# AWS – Arctic Weather Satellite (ESA)

start: 11. srpna 2024

AWS Microwave Radiometer (MWR):

- celkem 19 kanálů (50 - 325 GHz)
- zdroj dat pro NWP
- zpřesnění předpovědí především v polárních oblastech

prototyp budoucích operativních družic programu EPS-Sterna



zdroj: [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Missions/Arctic\\_Weather\\_Satellite/](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Missions/Arctic_Weather_Satellite/)

## EPS–Sterna (ESA a EUMETSAT)

Návazný operativní program EUMETSATu na AWS (v současnosti ve fázi schvalování členskými státy EUMETSATu)

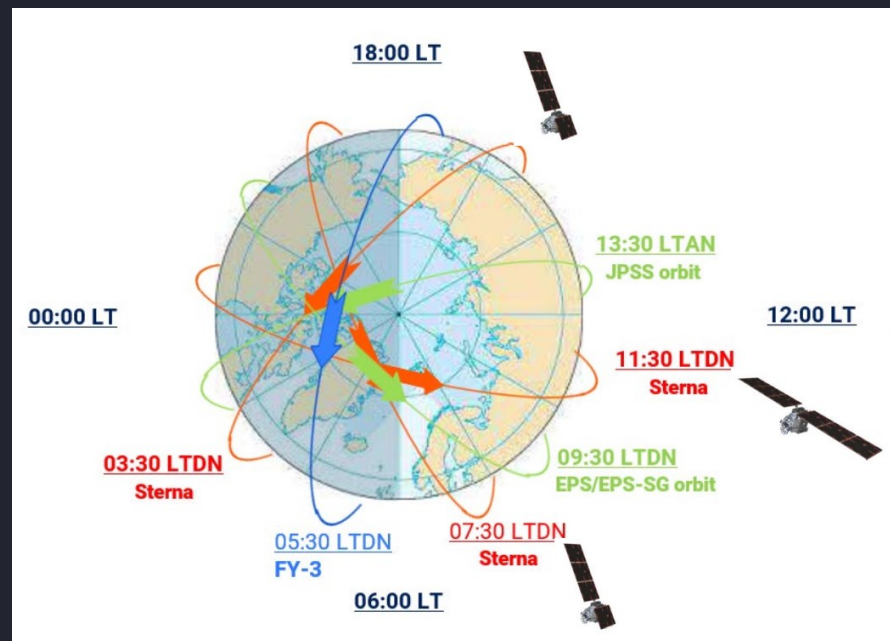
### Microwave Sounder (MWS):

- celkem 19 kanálů (50 - 325 GHz)
- zdroj dat pro NWP, vertikální profily teploty a vlhkosti
- zpřesnění předpovědí v globálním měřítku (zahuštění oběžných rovin ostatních družic (JPSS, EPS/EPS-SG a FY3), poskytujících obdobná data

### Oběžná dráha:

- výška dráhy 595 km, sklon dráhy 98° (polární heliosynchronní dráha)
- celkem tři oběžné roviny
- v jedné oběžné rovině vždy dvě aktivní družice

V případě schválení programu start prvních šesti družic v roce 2029, druhá šestice kolem roku 2034, dvě družice jako záložní.







# GIIRS – Geostationary Interferometric Infrared Sounder, FY-4A a FY-4B

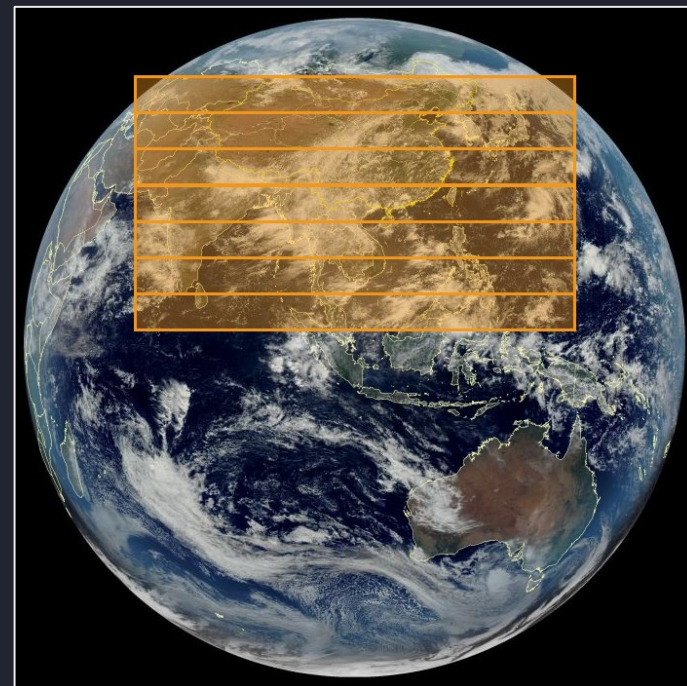
|                                                      | FY-4A (R&D)    |                          |                             |          | FY-4B (Operational) |                          |                             |          |
|------------------------------------------------------|----------------|--------------------------|-----------------------------|----------|---------------------|--------------------------|-----------------------------|----------|
| Spectral Parameters(Normal mode)                     |                | Range(cm <sup>-1</sup> ) | Resolution                  | Channels |                     | Range(cm <sup>-1</sup> ) | Resolution                  | Channels |
|                                                      | LWIR           | 700 ~ 1130               | 0.8                         | 538      | LWIR                | 700 ~ 1130               | 0.625                       | 688      |
|                                                      | S/MIR          | 1650 ~ 2250              | 1.6                         | 375      | S/MIR               | 1650 ~ 2250              | 1.2                         | 500      |
|                                                      | VIS            | 0.55-0.75μm              |                             | 1        | VIS                 | 0.55-0.75μm              |                             | 1        |
| Spatial Resolution                                   | LWIR/S/MIR     |                          | 16km SSP                    |          | LWIR/S/MIR          |                          | 8km SSP                     |          |
|                                                      | VIS            |                          | 2km SSP                     |          |                     |                          |                             |          |
| Operational Mode                                     | China area     |                          | 5000 × 5000 km <sup>2</sup> |          | China area          |                          | 5000 × 5000 km <sup>2</sup> |          |
|                                                      | Mesoscale area |                          | 1000 × 1000 km <sup>2</sup> |          | Mesoscale area      |                          | 1000 × 1000 km <sup>2</sup> |          |
| Temporal Resolution                                  | China area     |                          | < 1 hr                      |          | China area          |                          | < 1 hr                      |          |
|                                                      | Mesoscale area |                          | < ½ hr                      |          | Mesoscale area      |                          | < ½ hr                      |          |
| Sensitivity (mW/m <sup>2</sup> sr cm <sup>-1</sup> ) | LWIR           |                          | 0.5 ~ 1.1                   |          | LWIR                |                          | 0.3                         |          |
|                                                      | S/MIR          |                          | 0.1 ~ 0.14                  |          | S/MIR               |                          | 0.06                        |          |
|                                                      | VIS            |                          | S/N > 200(p=100%)           |          | VIS                 |                          | S/N > 200(p=100%)           |          |
| Calibration accuracy (radiation)                     | 1.5k (3σ)      |                          |                             |          | 1.0k (3σ)           |                          |                             |          |
| Calibration accuracy (spectrum)                      | 10 ppm (3σ)    |                          |                             |          | 5 ppm (3σ)          |                          |                             |          |
| Quantization Bits                                    | 13             |                          |                             |          | 13                  |                          |                             |          |

První hyperspektrální sounder na geostacionární dráze, na FY-4A testovací prototyp, na FY-4B již plná operativní verze. Podobný princip jako IASI a CrIS, dvě pásma: LWIR 700-1130cm<sup>-1</sup> (8.85-14.29μm) a S/MIR 1650-2250cm<sup>-1</sup> (4.44-6.06μm), detaily viz tabulka výše.

Na rozdíl od plánovaného IS na MSG-S pokrytí pouze oblasti Číny, nikoli celé zemské polokoule.

Podrobnosti ke GIIRS např. zde: [Brief introduction of the hyper-spectral infrared sounder from FY-4A and FY-3D \(2017\)](#) nebo zde: [Review of Geostationary Interferometric Infrared Sounder \(2018\)](#)

Poznámka: data z GIIRS využívána v rámci příprav na budoucí IRS MTG-S (plánovaný start 2025/07)





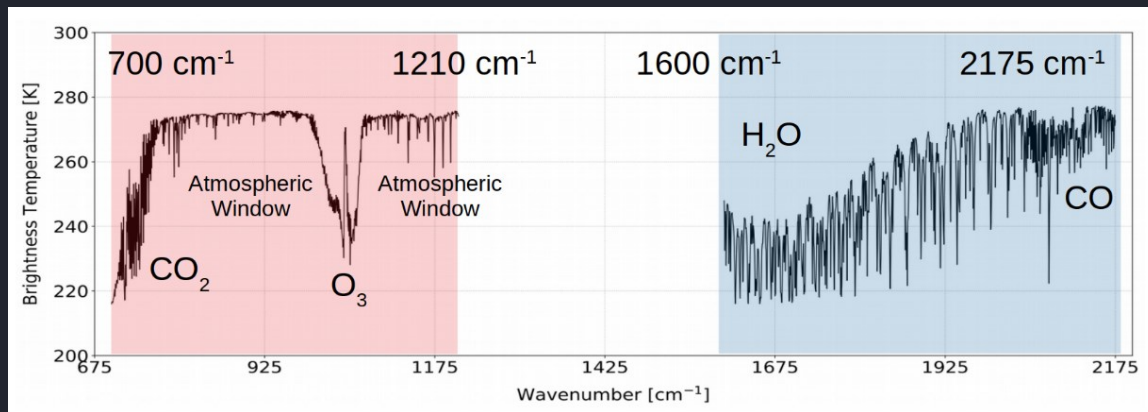
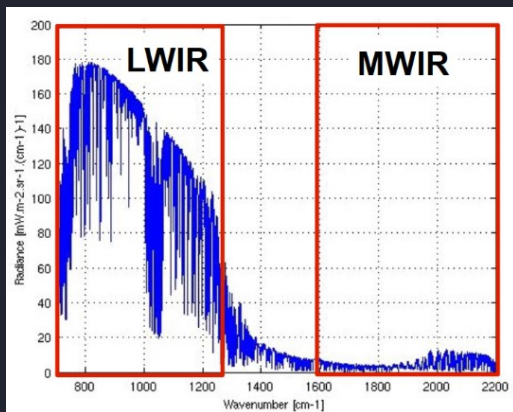
# MTG-S InfraRed Sounder (IRS)

## Hyperspektrální interferometrická sondáž atmosféry

- Podobně jako IASI, CrIS a GIIRS, Michelsonův krokující interferometr (metoda „*stop and stare*“), trochu odlišná terminologie, viz dále.
- Měření „interferogramů“ v pásmu 4.44 až 14.70  $\mu\text{m}$  ( $680\text{--}2250\text{ cm}^{-1}$ ), rozděleném na dvě dílčí oddělená pásma:

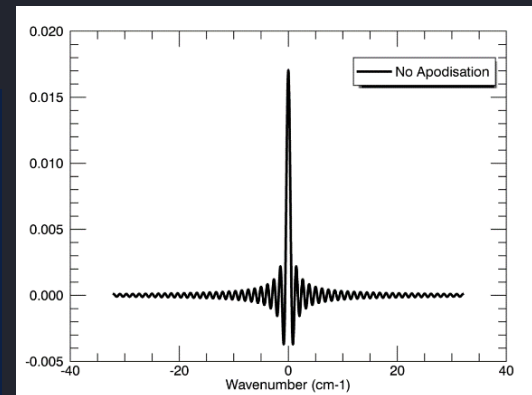
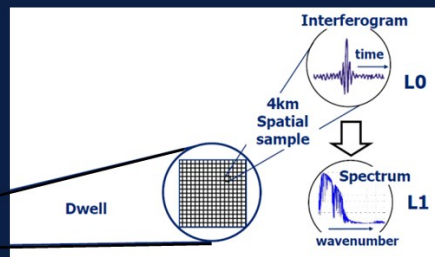
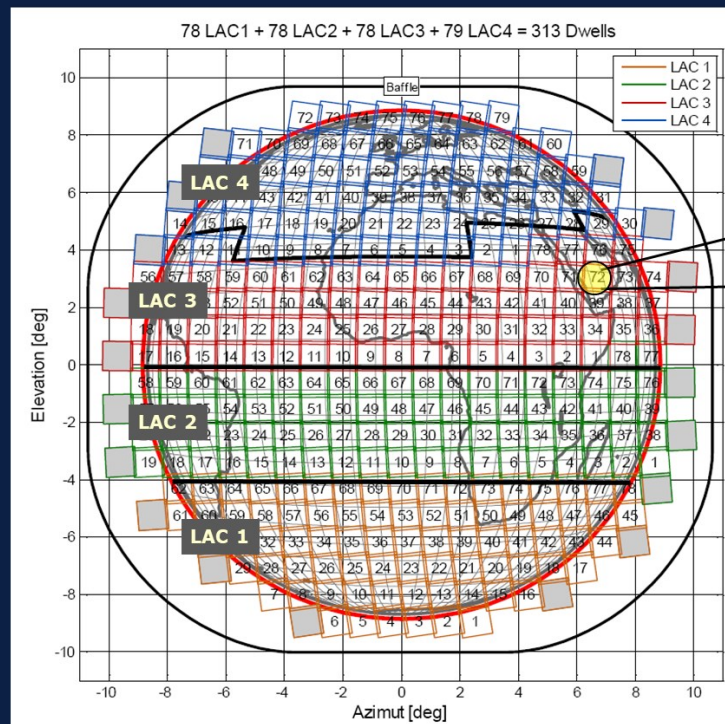
LWIR 680 - 1210  $\text{cm}^{-1}$ , 8.26 - 14.70  $\mu\text{m}$  (cca 800 kanálů)

MWIR 1600 - 2250  $\text{cm}^{-1}$ , 4.44 - 6.25  $\mu\text{m}$  (cca 900 kanálů)



# MTG-S InfraRed Sounder (IRS)

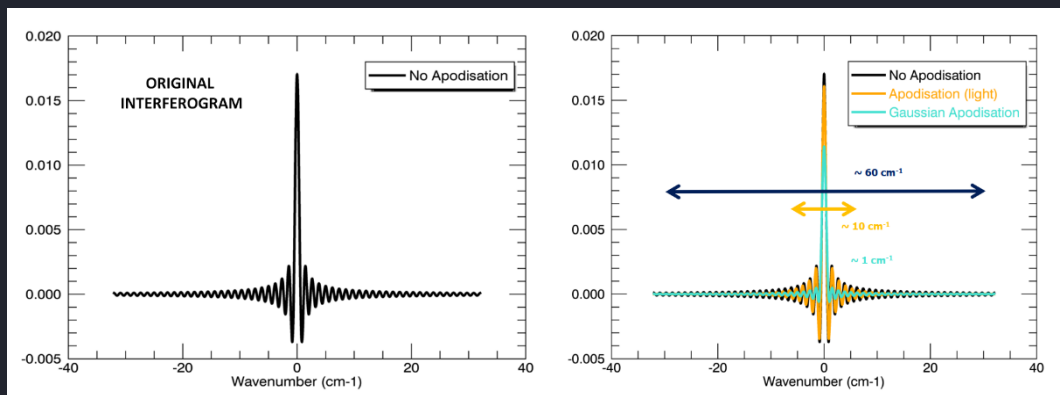
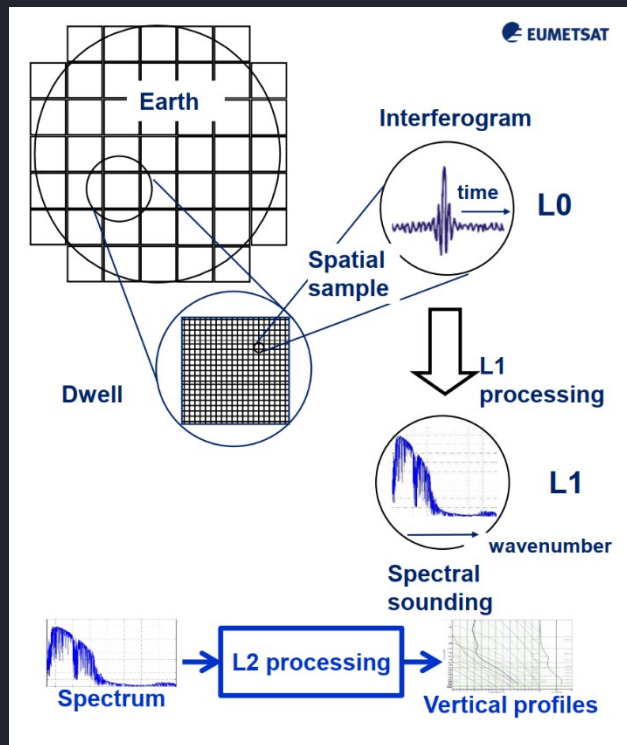
## Princip snímání



- Zemský disk rozdělen na 4 oblasti (Local Area Coverage, LAC),
- každá LAC obsahuje 78 – 79 „dwells“, zastávky krokujícího mechanismu IRS
- doba měření v každém „dwellu“ přibližně 10s
- snímač (odpovídající rozsahu „dwellu“) obsahuje 160 × 160 dílčích pixelů, v nichž je při každé zastávce naměřen **interferogram** (L0 data), který je primárně zpracován na družici a následně odeslán k dalšímu zpracování na zemi, kde jsou z něj pak postupně odvozena L1 a další data.
- rozlišení jednotlivých dílčích pixelů „dwellu“ je 4 × 4 km v nadiru, cca 5 × 8 km v oblasti střední Evropy
- oblast Evropy (LAC 4) bude snímána každých 30 minut
- celý zemský disk snímán každou hodinu až několik hodin (max. 6 h) – bude teprve upřesněno, informace se zatím poněkud liší.

# MTG-S InfraRed Sounder (IRS)

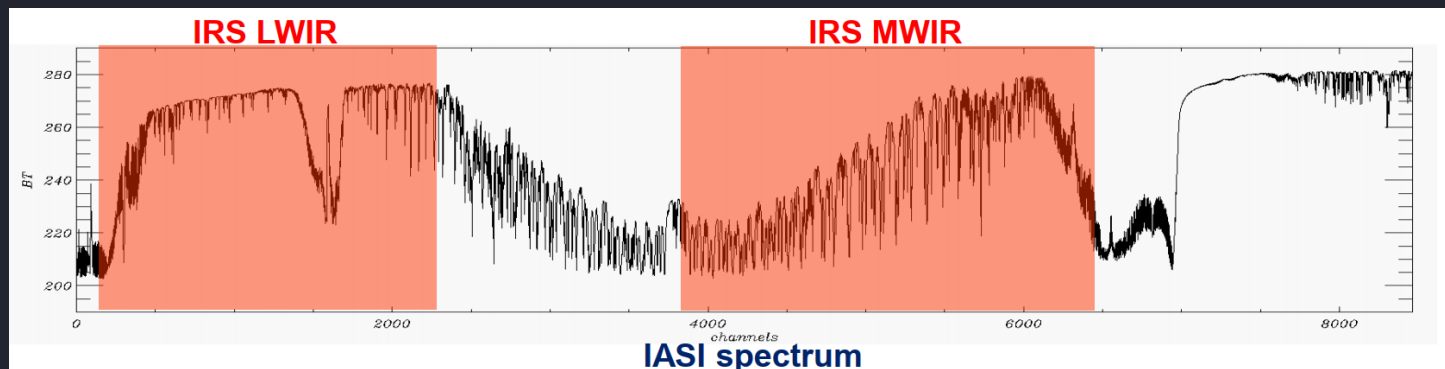
## Princip zpracování



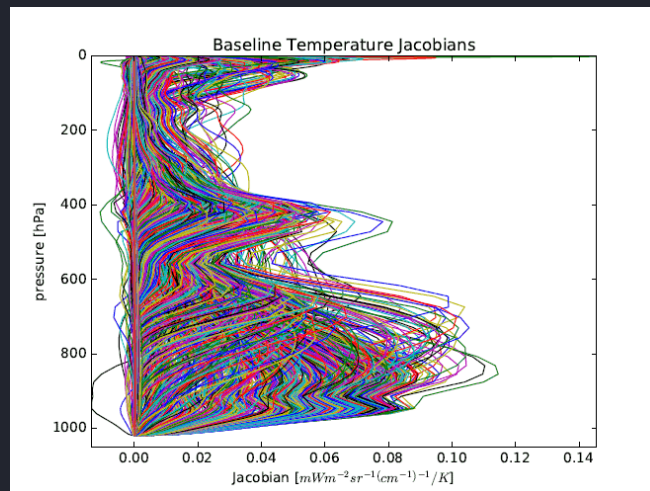
- Po naměření interferogramu v každém pixlu „dwellu“ je nejdříve, ještě na družici, za účelem snížení objemu dat určených k přenosu, provedena jejich apodizace (zjednodušení).
- Následně je takto upravený interferogram (L0) přenesen do pozemního centra k dalšímu zpracování – převodu Fourierovou transformací do „spektra“ (pro každý pixel), L1 data.
- IRS L1 data distribuována uživatelům systémem EUMETCast (Satellite) ve formátu Principal Components (PC) komprese, zvažuje se rovněž jejich distribuce ve formátu Spectral Response Functions (SRF) prostřednictvím EUMETCast Terrestrial, určena především pro potřeby NWP.
- IRS L2 data – profily teploty, H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, teplota zemského povrchu, jeho emisivita, oblačnost, konvektivní parametry (nowcasting), pro LAC4 (Evropa) L2 data každých 30 minut. Další produkty budou teprve upřesněny.

Podrobněji o zpracování dat IRS viz např. [https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf\\_eum\\_users\\_science\\_pres\\_coopmann\\_20.pdf](https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_eum_users_science_pres_coopmann_20.pdf)

## MTG-S InfraRed Sounder (IRS)



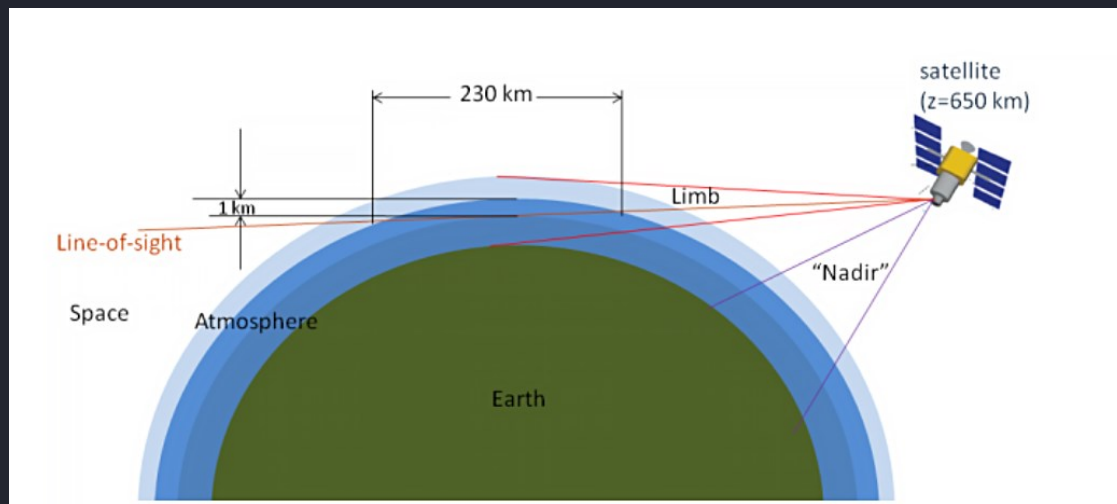
Porovnání rozsahu IASI (plná černá čára) a IRS (LWIR a MWIR)



Ukázka (simulace) tzv. Jacobiánů IRS vertikálních profilů teploty (viz např. <https://cab.inta-csic.es/users/jrpardo/paper20.pdf>)



# Limbová sondáž atmosféry – princip



zdroj: [https://www.researchgate.net/publication/282886083\\_The\\_atmospheric\\_limb\\_sounding\\_satellite\\_ALISS](https://www.researchgate.net/publication/282886083_The_atmospheric_limb_sounding_satellite_ALISS)

Další informace – viz např.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002240731930086X>

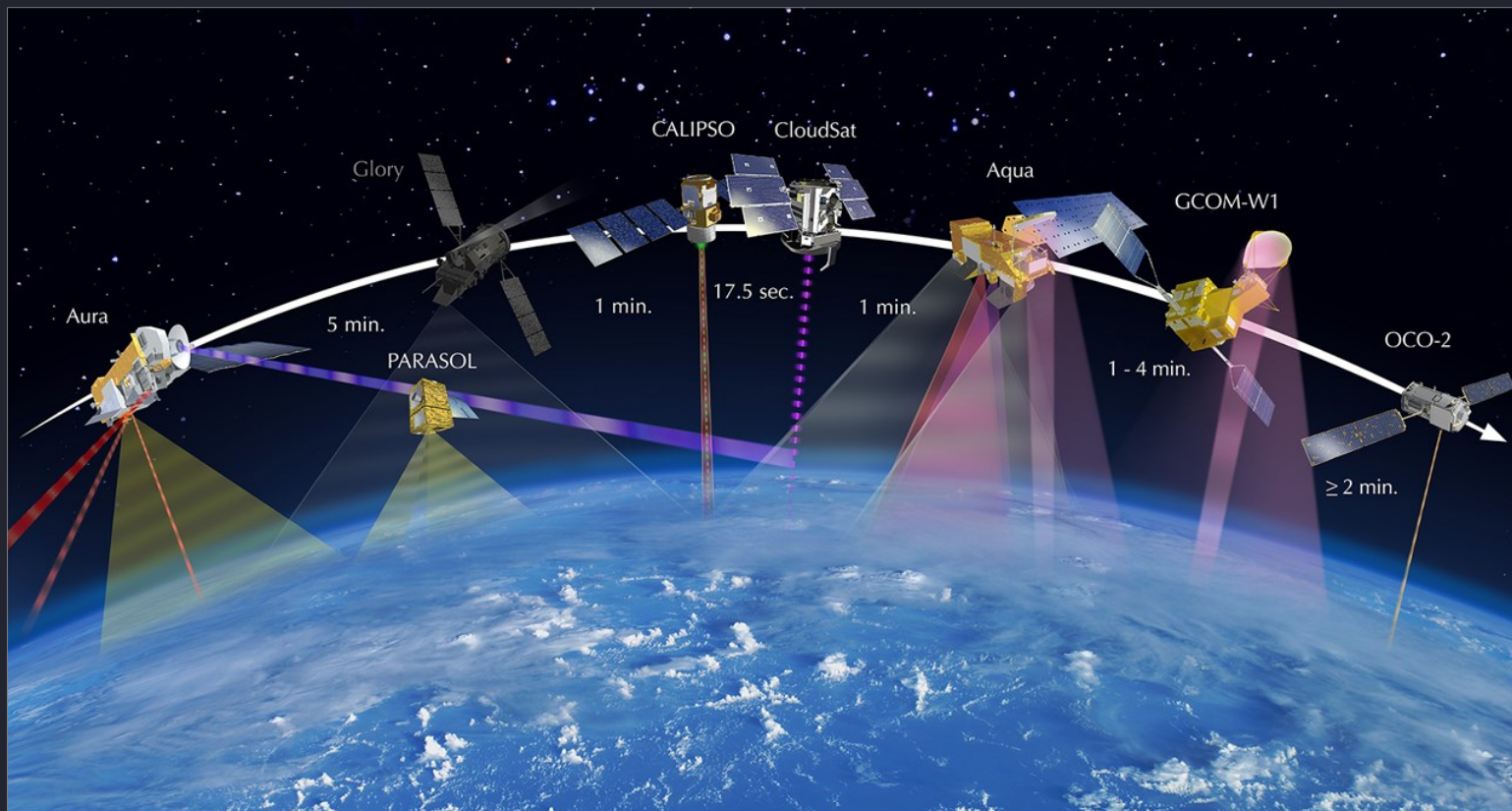
<https://amt.copernicus.org/articles/13/13/2020/>

- UV, VIS, NIR, IR a MW pásma
- vertikální profily horní troposféry až horní mezosféry (teplota, vlhkost, chemické složení),
- rovněž např. detekce atmosférických gravitačních vln
- vertikální rozlišení řádově půl až spodní jednotky km, horizontální rozlišení horní desítky až spodní stovky km



# **Družice CloudSat a CALIPSO**

Družice **CloudSat** a **CALIPSO** – původně (do února 2018) součást seskupení družic „A-Train“, od září 2018 do srpna 2020 samostatná formace obou družic na společné nižší dráze



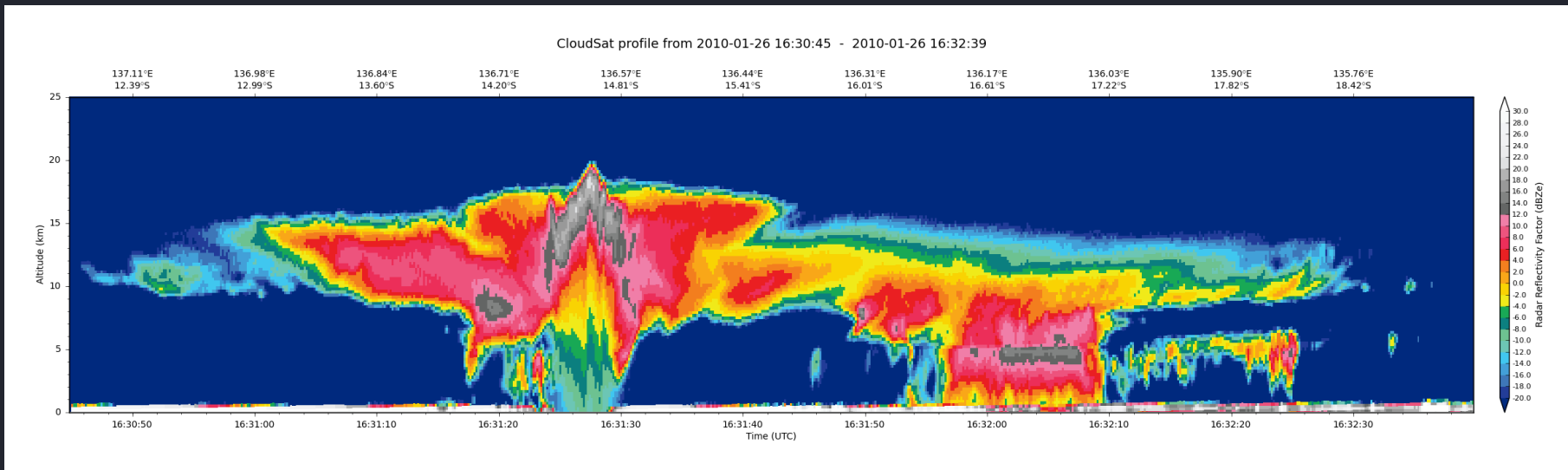
**A-Train** = „The Afternoon Train“ (1:30 p.m.) nebo též „Aqua Train“, <http://atrain.nasa.gov/>  
**Aqua**: 2002/05/04, **CloudSat** a **CALIPSO**: 2006/04/28 (společný start)

## CloudSat – přístroj Cloud Profiling Radar (CPR)

<https://cloudsat.atmos.colostate.edu> (???)

<https://eosps.nasa.gov/missions/cloudsat>

ukončení měření: 27. srpna 2020



94 GHz ( $\sim 3$  mm), vertikální profil oblačnosti a srážek v rovině oběžné dráhy družice („řez“ kolmo na zem)

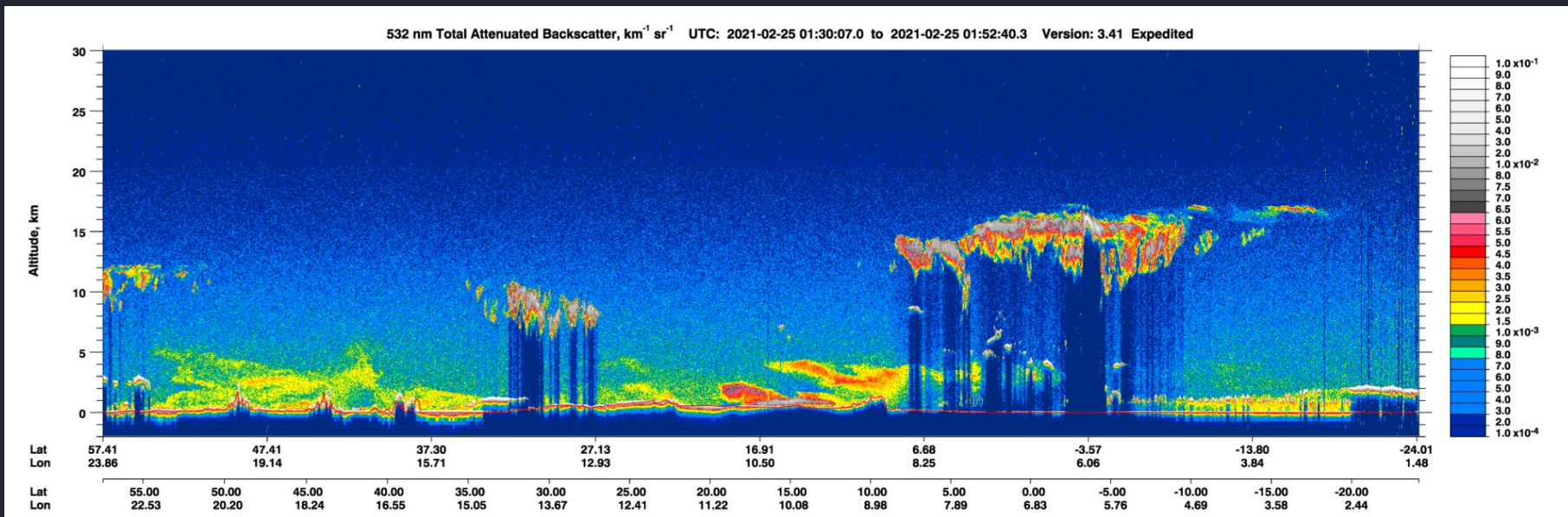
- horizontální rozlišení přibližně 1.4 km
- vertikální rozlišení 500 m
- měření od zemského povrchu do 30 km

# CALIPSO – přístroj Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP)

<https://calipso.cnes.fr/en/CALIPSO/index.htm>

<https://www-calipso.larc.nasa.gov/>

ukončení měření: 1. srpna 2023



1064 nm (zpětný rozptyl, 1 kanál), 532 nm (zpětný rozptyl, 2 kanály s kolmou polarizací)  
vertikální profil oblačnosti a aerosolů v rovině oběžné dráhy družice („řez“ kolmo na zem)

- vertikální rozlišení 30 - 60 m
- horizontální rozlišení (podél dráhy) 333 m

## **CALIPSO** – další podpůrné přístroje družice:

### **CALIPSO Wide Field Camera (WFC)**

rozlišení 125 m / 1 km

šířka pásu dat: 61 km

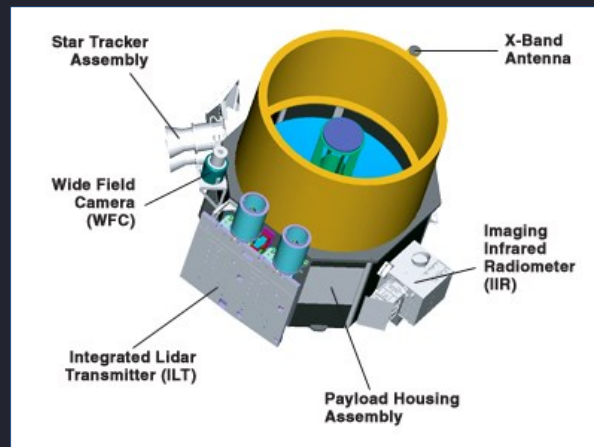
### **CALIPSO Infrared Imaging Radiometer (IIR)**

rozlišení 1 km

šířka pásu dat: 64 km

IR kanály 8.7, 10.6 and 12  $\mu\text{m}$

Oba přístroje vycentrovány na trajektorii CALIOP



# CloudSat a CALIPSO

Hlavní oblasti využití dat CPR a CALIOP:

- studie vlastností oblačnosti (mikrofyzika, výška, optická mohutnost, ...) a aerosolů (typ, složení, původ, vlastnosti, ...), včetně různého prachu v atmosféře (z pouštních oblastí, spraš, pyl, ...), kouř z požárů, vulkanický prach, ...
- využití pro různé studie (včetně vlivu na radiační bilanci, klimatologické dopady, ...), operativní monitorování (lokální, globální), řízení leteckého provozu (při sopečných výbuších výška vleček sopečného prachu), aj.

Zdroje dat (pro přístup ke stažení dat nutná registrace, náhledy volně dostupné):

CloudSat – <https://www.cloudsat.cira.colostate.edu/>

CALIPSO – [https://www-calipso.larc.nasa.gov/products/lidar/browse\\_images/exp\\_index.php](https://www-calipso.larc.nasa.gov/products/lidar/browse_images/exp_index.php)

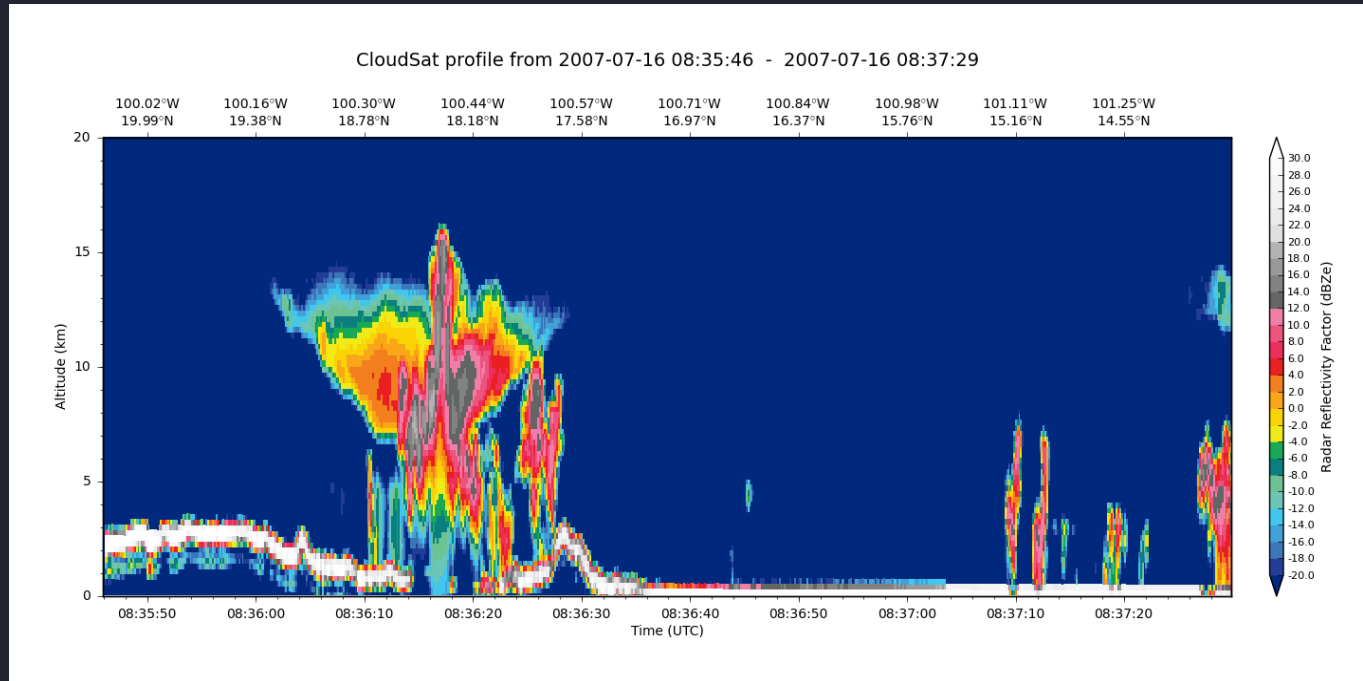
Zpracování a vizualizace dat:

**ccplot** – CloudSat and CALIPSO Plotting Tool, freeware, <https://ccplot.org/> (Peter Kuma)

**McIDAS-V** – freeware, <https://www.ssec.wisc.edu/mcidas/software/v/>

## CloudSat a CALIPSO – porovnání dat (stejná konvektivní bouře):

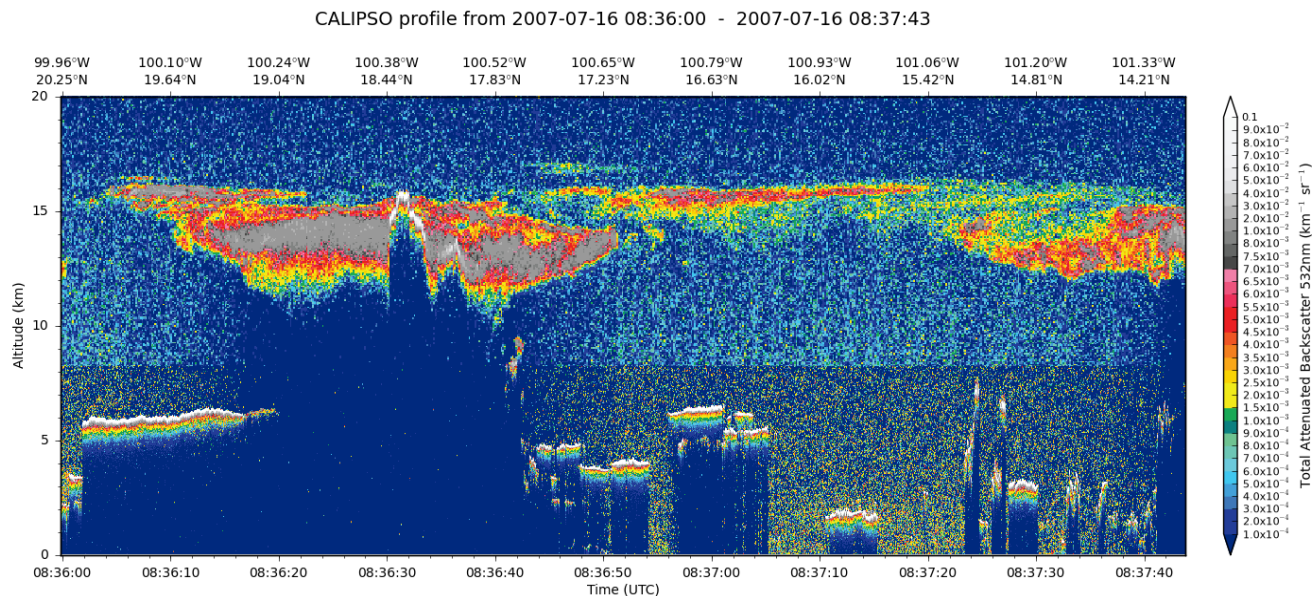
2007-07-16 08:36 UTC Mexico



Příklad, kdy CloudSat/CPR detekuje podstatně méně řídké oblačnosti v hladinách kovadliny bouře než CALIPSO/CALIOP (viz následující snímek). V důsledku toho se horní hranice oblačnosti bouře jeví výrazně níže než na měření CALIOP, a naopak přestřelující vrchol se jeví výrazně vyšší oproti okolní oblačnosti.

## CloudSat a CALIPSO – porovnání dat (stejná konvektivní bouře):

2007-07-16 08:36 UTC Mexico



Na tomto profilu z CALIPSO/CALIOIP je vidět výrazně více vysoké řídké oblačnosti než na profilu CloudSat/CPR, a to jak nad kovanálinou bouře, tak v oblasti vpravo od bouře. V důsledku toho se zde přestřelující vrchol jeví znatelně méně výrazným než na CloudSat/CPR. Naopak, CALIOIP „nevidí“ pod bouří v důsledku útlumu signálu horními partiemi bouře.

# **Družice EarthCARE**

**Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer, ESA & JAXA/NICT**

start: 29. 5. 2024

# EarthCARE – Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer



- Společný program ESA (European Space Agency), JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) a NICT (National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo)
- přímá návaznost na družice CloudSat a CALIPSO
- start 29. května 2024 (Vandenberg, Falcon 9)
- heliosynchronní téměř kruhová nízká dráha ( $\sim 393$  km), oběžná doba 92.5 minut, sklon dráhy  $97^\circ$ , periodičita 25 dní
- LTDN (Local equator crossing Time on Descending Node): 14:00 místního času (brzké odpoledne – tedy o něco příznivější načasování než polední CloudSat a CALIPSO)
- předpokládaná doba života družice: přibližně pouze 3 roky – důsledek velmi nízké oběžné dráhy (potřebné pro požadované rozlišení přístrojů), při které se ale výrazněji uplatňuje odpor vzduchu zbytkové atmosféry
- spotřeba paliva (a tedy i životnost družice) bude záviset na aktuální sluneční aktivitě – zvýšení odporu zbytkové atmosféry při vyšší sluneční aktivitě; při vyšším odporu vzduchu větší spotřeba paliva pro udržení požadované dráhy

# EarthCARE – přístrojové vybavení a měřené charakteristiky/jevy

Radiative flux profile in cloudy condition within  $10\text{W/m}^2$  accuracy

## Needs

Observation  
Needs/Target

Vertical profiles of  
extinction and  
characteristics of  
aerosols

Vertical profiles of liquid,  
supercooled and ice water,  
cloud overlap, particle size  
and extinction

Convective  
updraft and ice  
fall speed

Horizontal  
structure of  
clouds and  
aerosols

Shortwave and  
longwave fluxes at Top  
of Atmosphere

## Techniques

Remote Sensing  
Techniques

Active

**High Spectral  
Resolution LIDAR  
(HSRL)**

Active

**Millimeter-  
wave  
RADAR**

Active

**Doppler  
RADAR**

Passive

**Multispectral  
Imager**

Passive

**Broadband  
Radiometer**

## EarthCARE Instruments

**ATLID**

Atmospheric Lidar

**CPR**

Cloud Profiling Radar

**MSI**

Multispectral Imager

**BBR**

Broadband Radiometer

# EarthCARE – přístrojové vybavení a geometrie snímání

## EarthCARE Satellite

Sun-Synchronous Orbit (SSO)  
Orbit Height approx. 393km  
Orbit Inclination 97 deg.  
Recurrent Period 25 days

**CPR** NICT JAXA

### Cloud Profiling Radar

94GHz (W-band) Doppler Radar

**BBR** esa

### Broadband Radiometer

Radiometer for Wide Band Shortwave (SW)  
and Longwave (LW)

**MSI** esa

### Multi-Spectral Imager

7ch Visible-Infrared Push Broom Scanner (PBS)

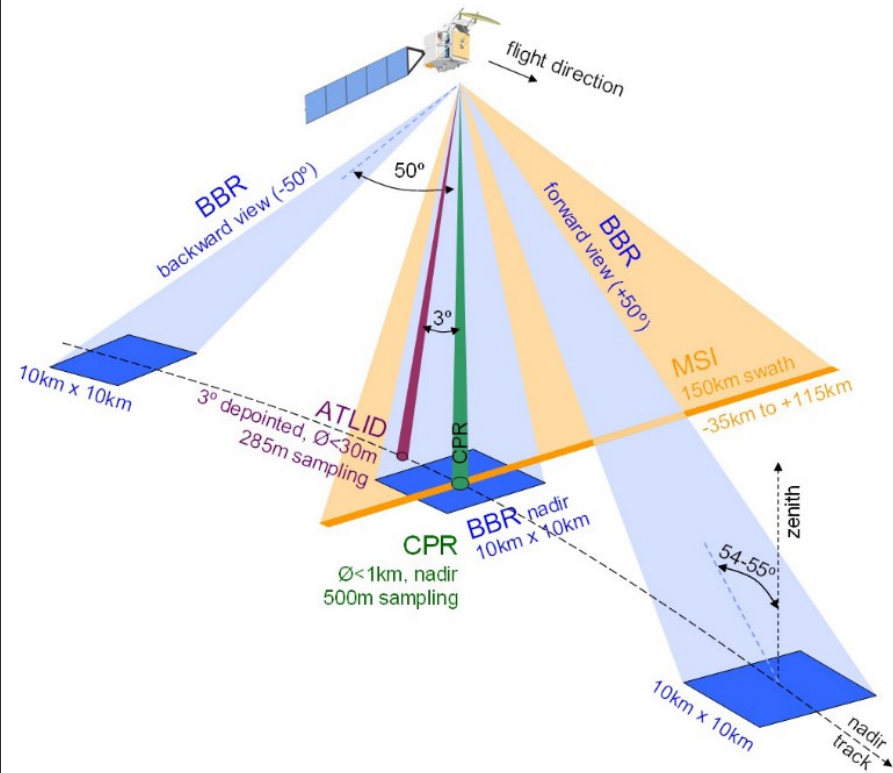
**ATLID** esa

### Atmospheric Lidar

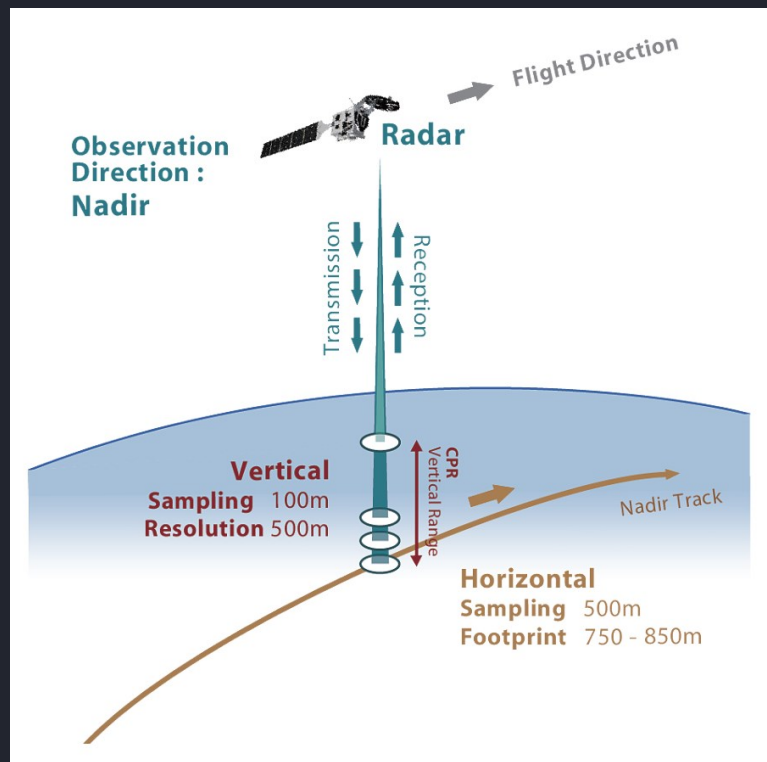
355nm High Spectral  
Resolution Lidar (HSRL)

- CPR – Cloud Profiling Radar (JAXA)
- ATLID – Atmospheric Lidar (ESA)
- MSI – Multi-Spectral Imager (ESA)
- BBR – Broadband Radiometer (ESA)

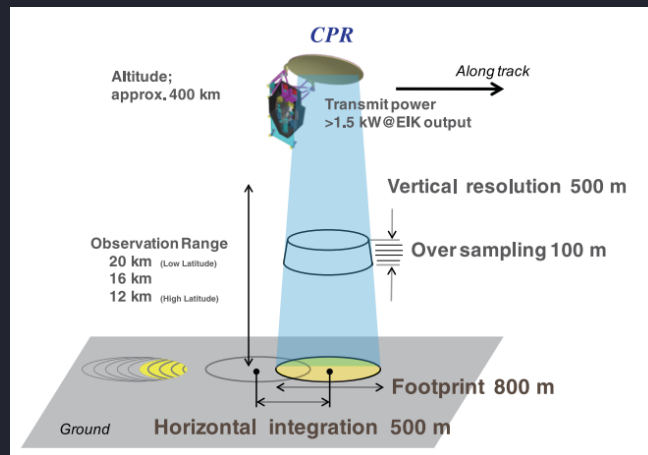
(details k jednotlivým přístrojům viz dále)



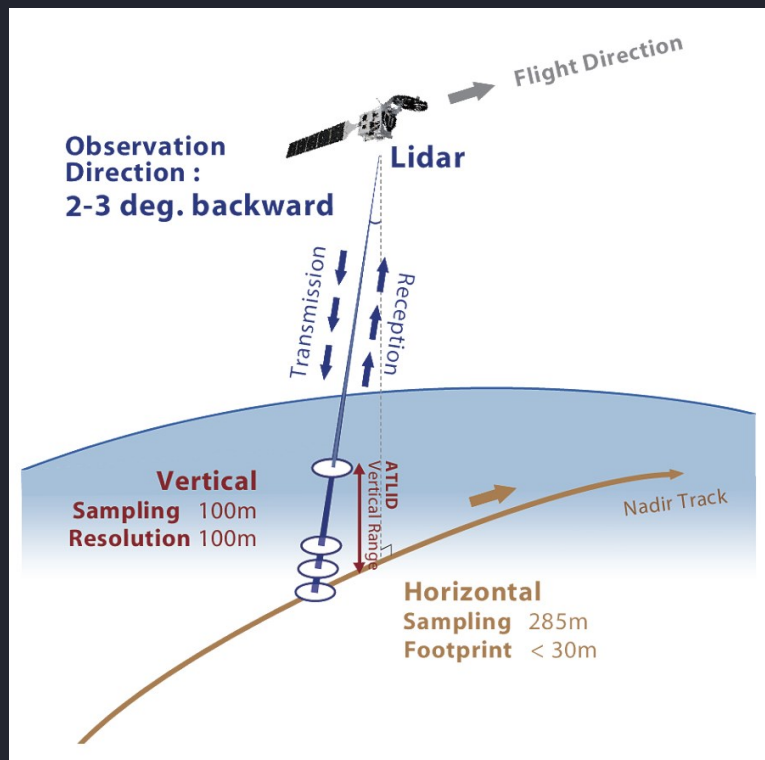
# EarthCARE – CPR, Cloud Profiling Radar



- 94.05 GHz (W-pásmo) oblačný a srážkový Dopplerův radar, průměr antény radaru 2.5 m, citlivost -35 dBz, měření přesně v nadiru (kolmo na zemský povrch)
- vertikální rozsah měření – do 20 km, vertikální rozlišení 500 m, horizontální rozlišení zpracovaných dat 1 km
- rozsah dopplerovských rychlostí -10 až + 10 m/s (tedy nedostatečné pro silnější updrafty), přesnost měření 1 m/s

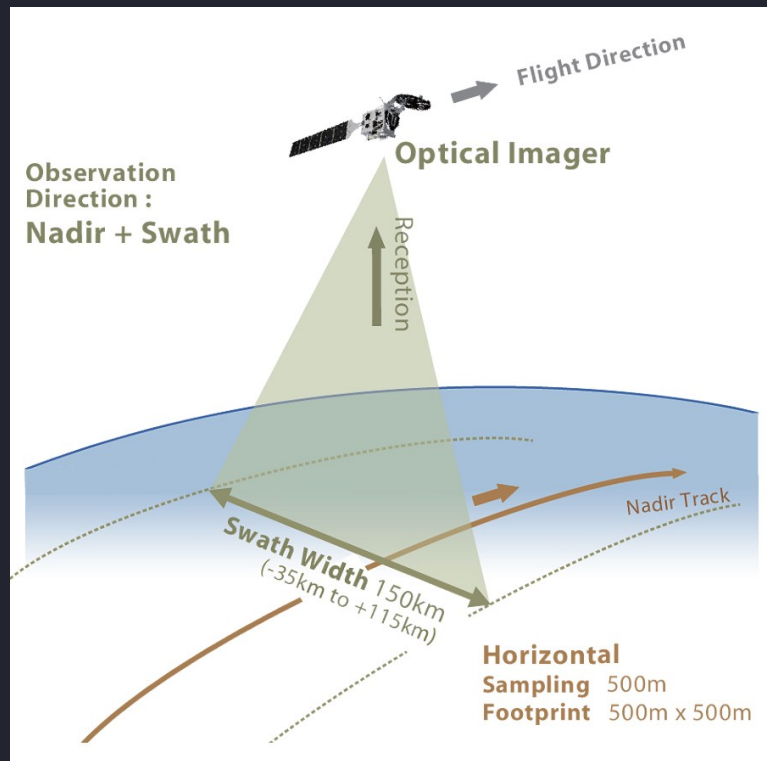


## EarthCARE – ATLID, Atmospheric Lidar



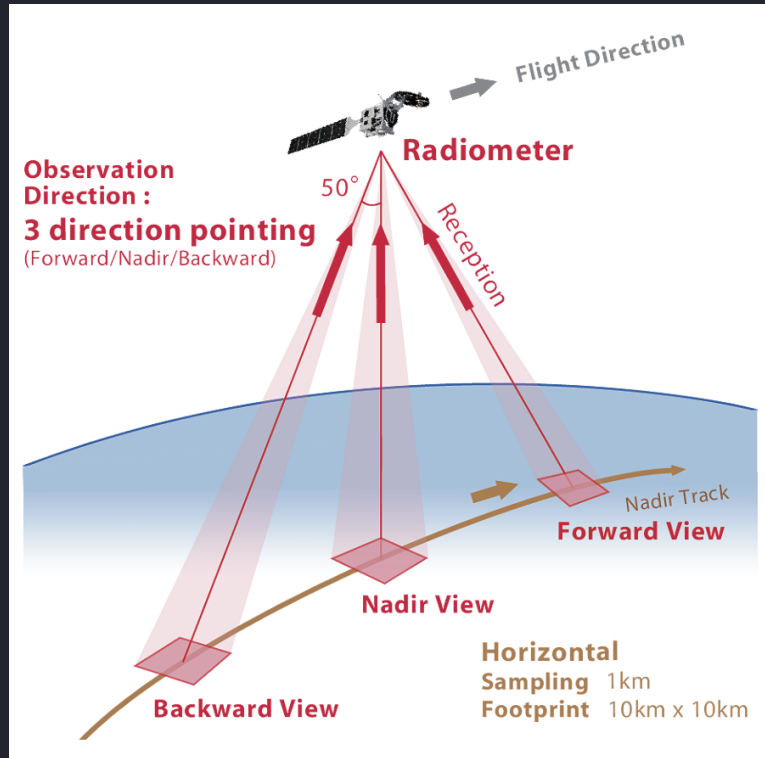
- 355 nm (UV) lidar s vysokým horizontálním rozlišením, vzorkování s horizontálním krokem 285 m a rozlišením 30 m, vertikální rozlišení 100 m
- měření odkloněno o  $3^\circ$  pro zamezení přímého zrcadlení na krystalech ledu (???)
- nezávislé měření molekulární extinkce a zpětného rozptylu ve dvou kolmých polarizovaných rovinách

## EarthCARE – MSI, Multi-Spectral Imager



- Multispektrální radiometr, celkem 7 spektrálních kanálů:  
0.67  $\mu\text{m}$ , 0.865  $\mu\text{m}$ , 1.65  $\mu\text{m}$ , 2.21  $\mu\text{m}$ , 8.8  $\mu\text{m}$ , 10.8  $\mu\text{m}$  a 12.0  $\mu\text{m}$
- šířka stopy (pásu měření) 150 km, odkloněná na stranu od slunce  
(35 km vpravo a 115 km vlevo od směru letu) pro potlačení odrazů  
na vodních plochách
- horizontální rozlišení (velikost pixlu) 500 x 500 m

## EarthCARE – BBR, Broadband Radiometer



- Dvě spektrální pásma: 0.25 až 4.0  $\mu\text{m}$  (SW) a 0.25 až 50  $\mu\text{m}$  (LW)
- velikost jediného integrovaného „pixlu“ měření 10x10 km
- měření třemi teleskopy: nadir, -50° a +50° od nadiru
- určeno pro měření celkové radiační bilance systému země-atmosféra

## EarthCARE – další informace, dostupnost dat a jejich vizualizace

### Obecné informace:

<https://earth.esa.int/eogateway/missions/earthcare>

<https://www.eorc.jaxa.jp/EARTHCARE/en/index.html>

<https://space.oscar.wmo.int/satellites/view/earthcare>

<https://en.wikipedia.org/wiki/EarthCARE>

[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2011/11/EarthCARE\\_viewing\\_geometry](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2011/11/EarthCARE_viewing_geometry)

### Data a jejich vizualizace:

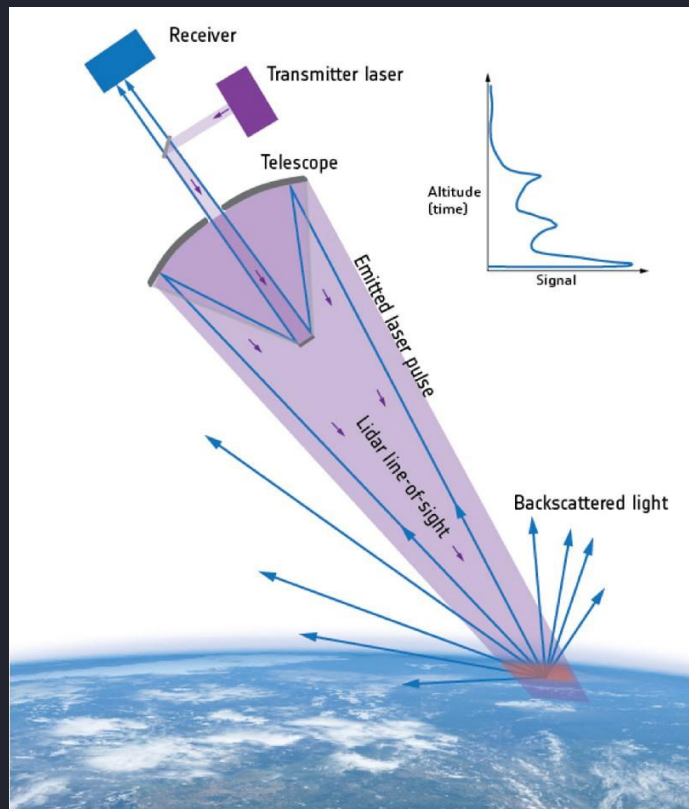
<https://earth.esa.int/eogateway/catalog/earthcare-l1-products>

<https://repo.gportal.jaxa.jp/standard/EarthCARE/>

<https://web.meteo.mcgill.ca/EarthCARE/>

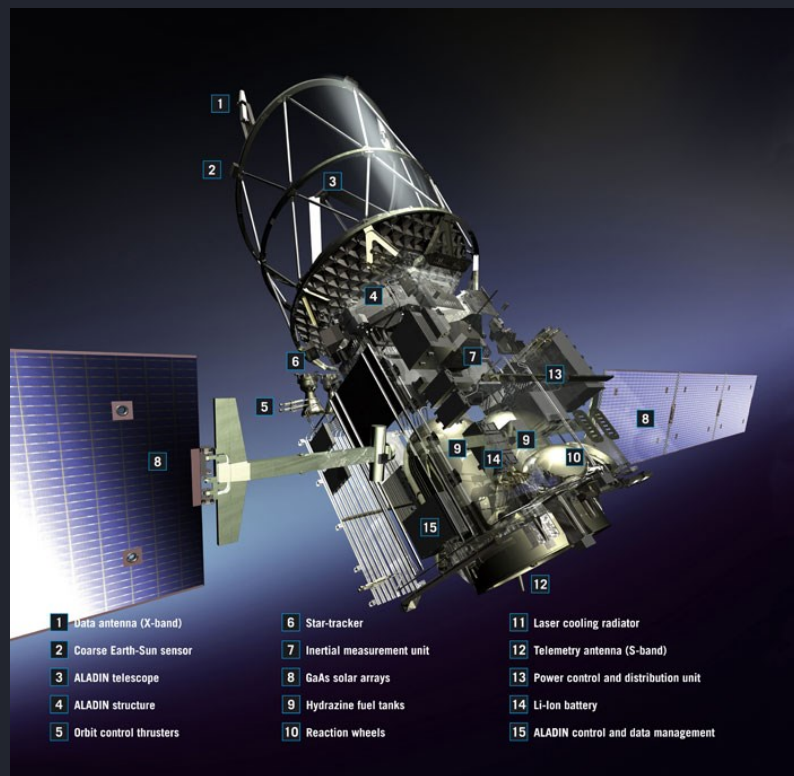


## Aeolus (ESA Earth Explorer research mission, 2018 - 2023)



- Dopplerová lidarová měření vertikálních profilů větru (proudění)
- první družice Aeolus – prototyp ESA pro vyzkoušení technologie
- především pro potřeby NWP – zejména ECMWF

# Aeolus – návazný program ESA a EUMETSATu



<https://earth.esa.int/eogateway/missions/aeolus/description>

<https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/aeolus>

[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Missions/Aeolus/\(result\\_type\)/videos](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Missions/Aeolus/(result_type)/videos)

[https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/FutureEO/Aeolus](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Aeolus)

Nyní (2023 - 2025) jednání o návazném operativním programu ESA (pod označením Aeolus-2) a EUMETSAT (pod označením EPS-Aeolus), přístroj DWL ([Doppler Wind Lidar](#)), který by byl rozšířením povinného programu polárních družic EUMETSATu. Schvalovací proces v rámci EUMETSATu 2026 - 2027, v případě schválení první start kolem 2030.

