

Legge di Planck

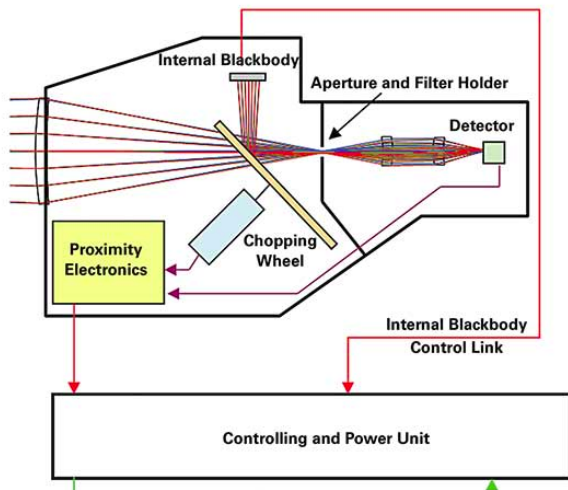
Radianza di un corpo nero alla temperatura T

$$B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2(\exp(\frac{h\nu}{kT}) - 1)}$$

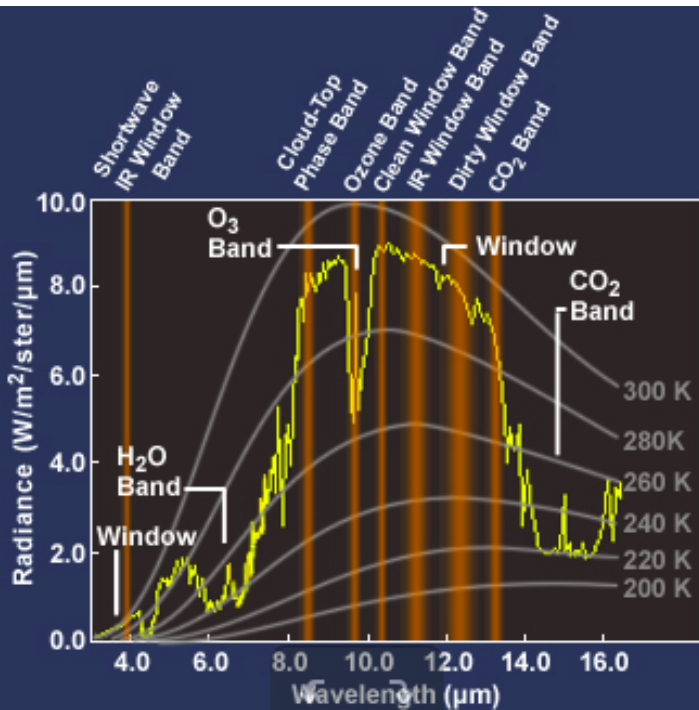
la radianza della radiazione termica di un corpo generico si esprime spesso come la temperatura di brillantezza , T_b

$$L_{\nu}(T) = \epsilon_{\nu} B_{\nu}(T) = B_{\nu}(T_b)$$

La calibrazione dei radiometri IR



Si possono artificialmente creare dei corpi neri a una temperatura controllata. I radiometri IR su satellite imbarcano un corpo nero di riferimento.



Assorbimenti CO_2 e canali per la misura della temperatura

- ▶ Gli intervalli spettrali su cui c'è un assorbimento non sono sensibili alla radiazione dalla superficie.
- ▶ Queste lunghezze d'onda sono usate per la stima del profilo di temperatura (assorbimento da CO_2)
- ▶ Noto il profilo di temperatura si può invece cercare il profilo di un gas in corrispondenza dei suoi assorbimenti.

Radiazione dalla superficie

- ▶ Nelle finestre IR l'assorbimento é piccolo e la radiazione emessa puó raggiungere il top dell'atmosfera.
- ▶ La radianza é data dall'equazione del trasporto radiativo.

Equazione del trasporto radiativo in assenza di scattering:

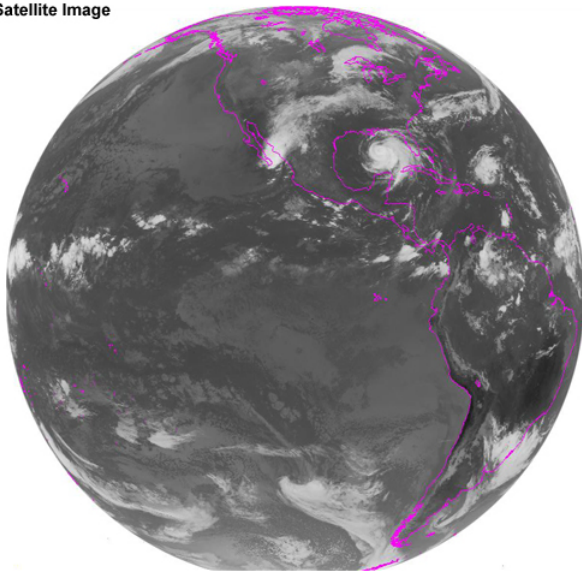
$$L_{\nu} = \epsilon(\nu)B_{\nu}(T)e^{-\frac{\tau^*}{\mu}} + \frac{1}{\mu} \int_0^{\tau^*} B_{\nu}(T(\tau'))e^{-\frac{\tau'}{\mu}} d\tau'$$

Un radiometro che guarda la radianza in una finestra IR vede una temperatura di brillantezza paragonabile a quella della superficie.

Un immagine IR é quindi poco contrastata (buia)

Un immagine IR da satelliti geostazionari

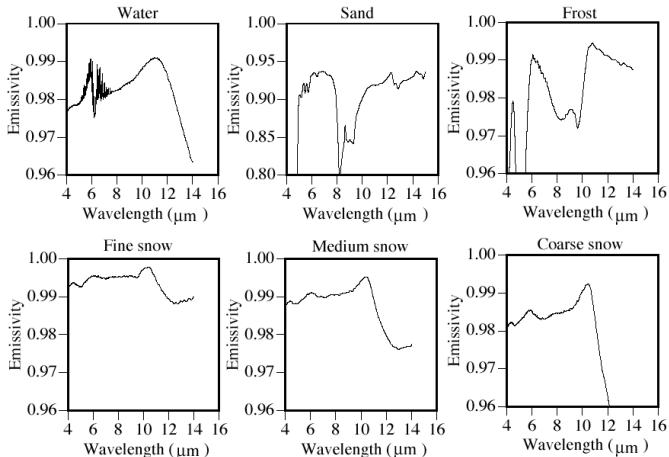
Infrared Satellite Image



CIMSS

Emissività di diversi terreni

Le emissività nella finestra IR (10–12 μm) sono tutte vicine a 1



Radianza delle nubi

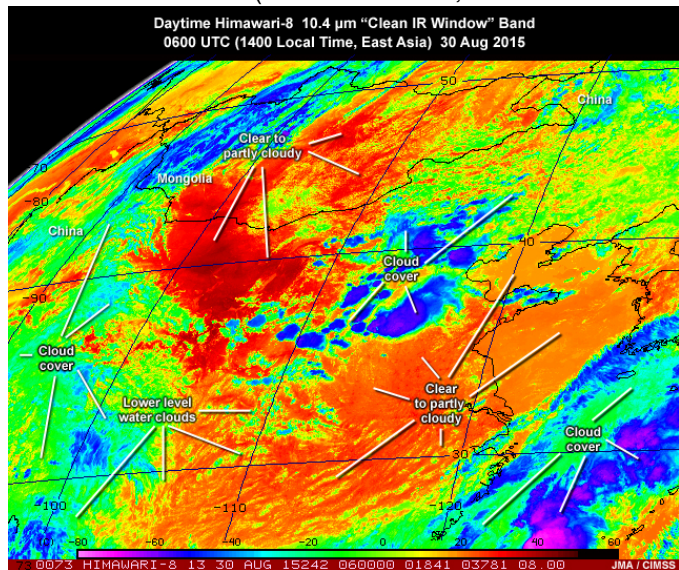
Le nubi assorbono e diffondono la radiazione IR efficacemente, quindi le nubi sono sostanzialmente opache alla radiazione IR.

$$L_{\nu} = \epsilon(\nu) B_{\nu}(T_{clouds}) e^{-\frac{(\tau_{cloud}^*)}{\mu}} + \frac{1}{\mu} \int_0^{\tau_{cloud}^*} B_{\nu}(T(\tau')) e^{-\frac{\tau'}{\mu}} d\tau'$$

Un radiometro IR guarda la radianza emessa dalla sommità delle nubi: le nuvole appaiono fredde rispetto al terreno e al mare.

Identificazione delle nubi

La misura della radianza dalle nubi fornisce la temperatura della loro sommità (indirettamente, una misura dell'altezza)



Misura della temperatura della superficie del mare

Occorre tenere conto del fatto che l'atmosfera non é completamente trasparente.

Riscriviamo l'equazione del trasporto radiativo in assenza di scattering (radianza al top dell'atmosfera):

$$L_{\nu} = B_{\nu}(T)e^{-\frac{\tau^*}{\mu}} + \frac{1}{\mu} \int_0^{\tau^*} B_{\nu}(T(\tau'))e^{-\frac{\tau'}{\mu}} d\tau'$$

Se si vuole trovare la temperatura alla superficie senza ricorrere a un profilo di temperatura, ma conoscendo la trasmissione $Tr(\nu) = e^{-\frac{\tau^*}{\mu}}$, si possono confrontare due frequenze vicine in modo da eliminare il contributo del profilo di temperatura.

Temperatura atmosferica efficace

$$B_{\nu}(T_{atm})(1 - Tr(\nu)) = \frac{1}{\mu} \int_0^{\tau^*} B_{\nu}(T(\tau')) e^{-\frac{\tau'}{\mu}} d\tau'$$

L'equazione diventa:

$$L_{\nu} = B_{\nu}(T) e^{-\frac{\tau^*}{\mu}} + B(T_{atm})(1 - Tr(\nu))$$

Supponiamo di avere 2 misure a frequenze vicine ν_1 e ν_2 :

$$L_{\nu_1} = B_{\nu_1}(T) Tr(\nu_1) + B_{\nu_1}(T_{atm})(1 - Tr(\nu_1))$$

$$L_{\nu_2} = B_{\nu_2}(T) Tr(\nu_2) + B_{\nu_2}(T_{atm})(1 - Tr(\nu_2))$$

Linearizzando B attorno a T_{atm} si può scrivere un'espressione che lega B_1 e B_2 che si può usare per eliminare T_{atm} .
Il risultato finale per la radianza é

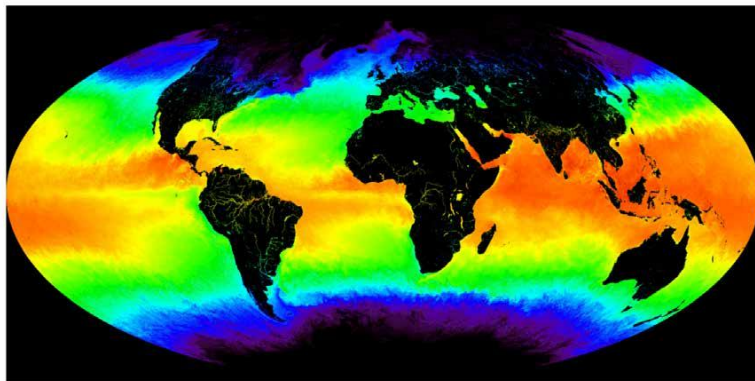
$$B_1(T) = L_1 + \gamma(L_1 - B_1(T_{b2}))$$

con $\gamma = \frac{1 - Tr(1)}{Tr(1) - Tr(2)}$

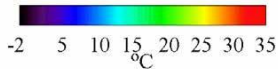
L'algoritmo funziona bene se non ci sono nuvole. Occorre quindi eliminare tutti i punti per cui possono esserci nuvole.

Attualmente esistono serie trentennali di misura della SST usando i canali corrispondenti agli intervalli spettrali $10.3 - 11.3\mu$ e $11.5 - 12.5\mu$

Esempio misura SST



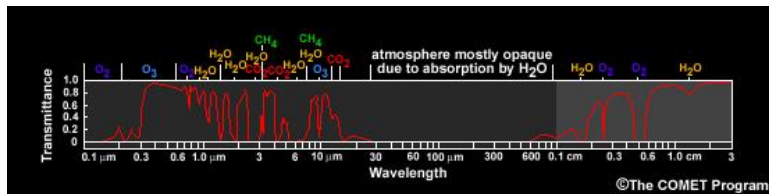
MODIS/OCEAN GROUP
GSFC, RSMAS

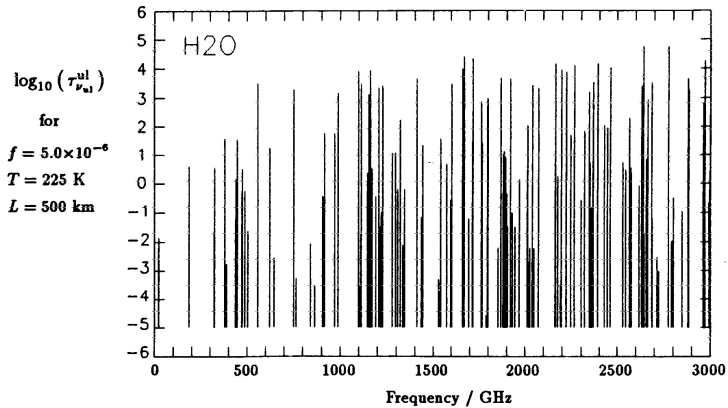


MAY 2001
V 3.3.1

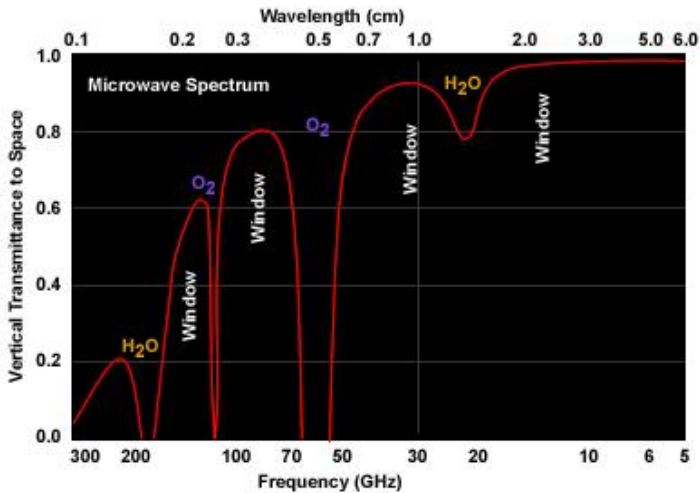


Remote sensing da satellite nella zona spettrale delle microonde.



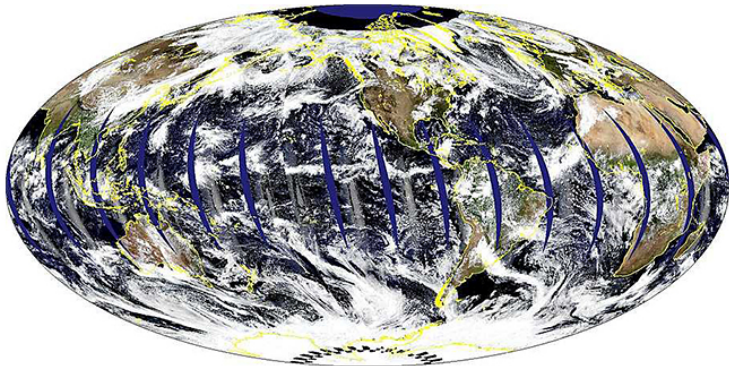


Electromagnetic Spectrum



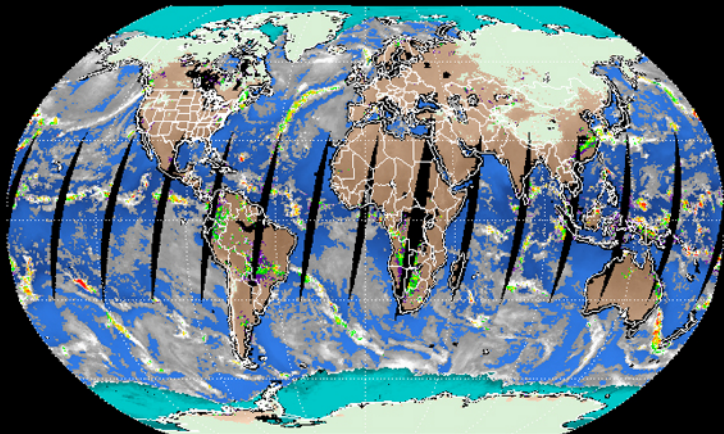
©The COMET Program

Aqua MODIS 24-Hour True Color Composite Image 23 Oct 2011



NASA / GSFC

AMSU Product Composite 10 Nov 2005



Missing Tsfc Sea Ice Snow TPW CLW IWP Rain

Tsfc: Land Surface Temperature
TPW: Total Precipitable Water

CLW: Cloud Liquid Water
IPW: Cloud Ice Water Path

NOAA

Caratteristiche particolari del telerilevamento a microonde:

- ▶ Le nuvole sono semitrasparenti
- ▶ Diversi tipi di superfici hanno emissività diverse
- ▶ La qualità delle misure non dipende da giorno-notte o dal tempo meteorologico
- ▶ diversi parametri meteorologici sono accessibili

Comparing Active and Passive Microwave Instruments

Passive Microwave Remote Sensing	Active Microwave Remote Sensing
Instrument Examples	
AMSU, MHS, AMSR-E, SSM/I/T1/T2, SSMIS, FY-3, TRMM-TMI, WindSat, DOD, ATMS, SMOS, Aquarius, GCOM-W1,2,3 AMSR2/3, Megha-Tropiques MADRAS, and GPM GMI	TRMM-PR, RADARSAT, ASCAT, CloudSat, GCOM-W2 and W3 (DFS), Jason-1,2,3, Envisat (ASAR and RA-2), HY-2, Oceansat-2, CryoSat-2, Sentinel-1 SAR, FY-3E WindRAD, METEOR-M N3 (SCAT and SAR), and GPM DPR
Measurement Capabilities	
Sense emitted microwave energy from terrestrial sources	Send and receive electromagnetic pulses of energy
Cloud and precipitation information from layers	Cloud and precipitation information from discrete levels
Sea surface wind vectors (WindSat, DOD), salinity	Sea surface wind vectors, salinity
Precipitation (rain rate and snowfall)	Precipitation (rain rate and snowfall)
Cloud properties (microphysics, cloud top and base)	Cloud properties (microphysics, cloud top, and base)
Atmospheric temperature and moisture profiling	
Snow and sea ice coverage and extent, sea ice age	Snow and sea ice coverage and extent, river ice movement
Snow cover characteristics	Snow cover characteristics
Soil moisture / surface wetness	Soil moisture / surface wetness
	Vegetation, biomass, land use, surface roughness, topography, and geology (SAR, SCAT, ASCAT, RADARSAT)
Sea surface temperature	Ocean surface topography, sea surface state, heat storage and transfer (from radar altimeters)

*DOD microwave imager/sounder capabilities TBD

*AMSR-E stopped working in October 2011

*Megha-Tropiques launched in October 2011

*GCOM-W1 launch expected in 2012

*GCOM-W2/W3 launch planned for 2016/2010

*Sentinel-1 launch expected in 2013

*Jason-3 launch tentatively planned for 2014

*GPM core satellite launch expected in 2014

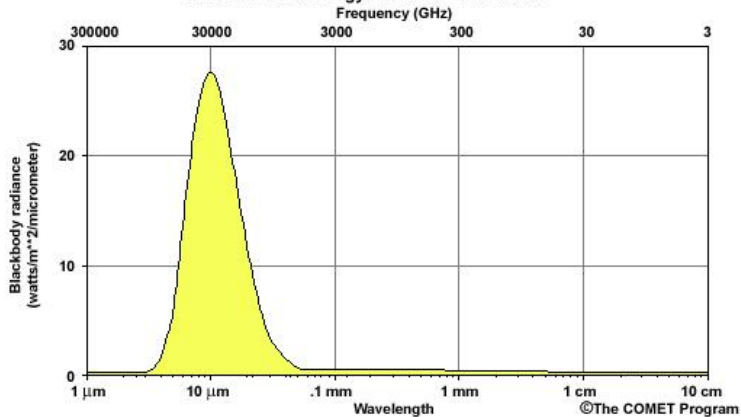
*METEOR-M N3 launch expected in 2015

*FY-3E (WindRAD) launch planned for 2017

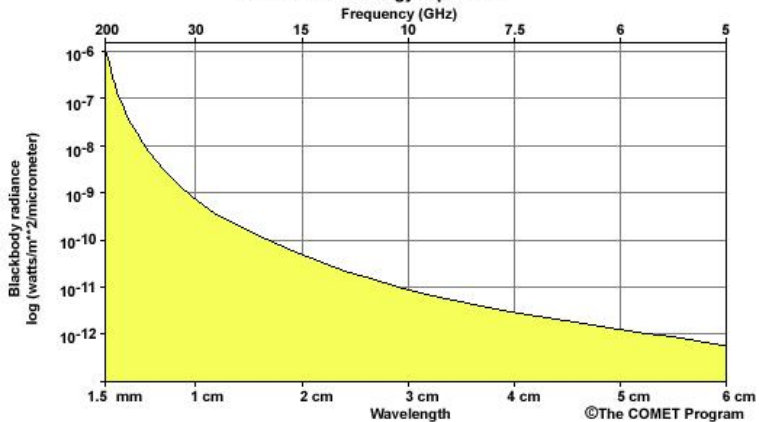
*GCOM-W2/W3 launch planned for 2016/2020

©The COMET Program

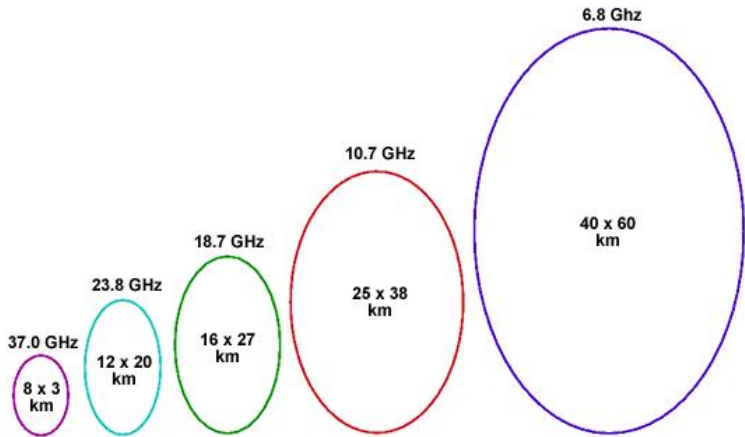
Earth Emitted Energy: Infrared - Microwave



Earth Emitted Energy: Spectrum

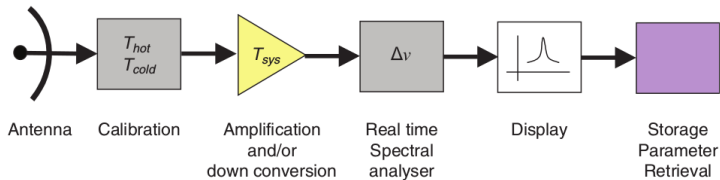


WindSat Channel Footprints



U.S. Navy / NRL

Principio rivelazione MW



Legge di Planck a frequenze MW

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2(\exp(\frac{h\nu}{kT}) - 1)}$$

Alle frequenze delle MW $h\nu \ll kT$ per cui

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2 \frac{h\nu}{kT}} = 2 \frac{\nu^2}{c^2} kT = 2 \frac{kT}{\lambda^2}$$

La radianza é proporzionale alla temperatura.

Per un corpo non nero,

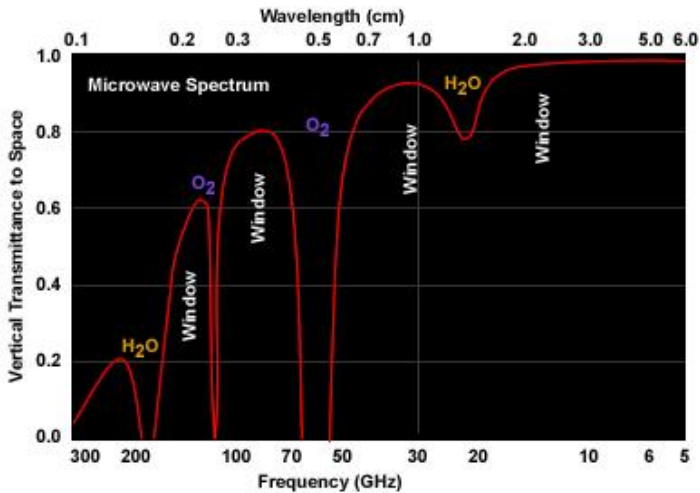
$$B_\nu(T) = \epsilon(\nu) 2 \frac{\nu^2}{c^2} kT = 2 \frac{\nu^2}{c^2} kT_B$$

Temperatura di brillantezza

$$T_B = \epsilon(\nu) T$$

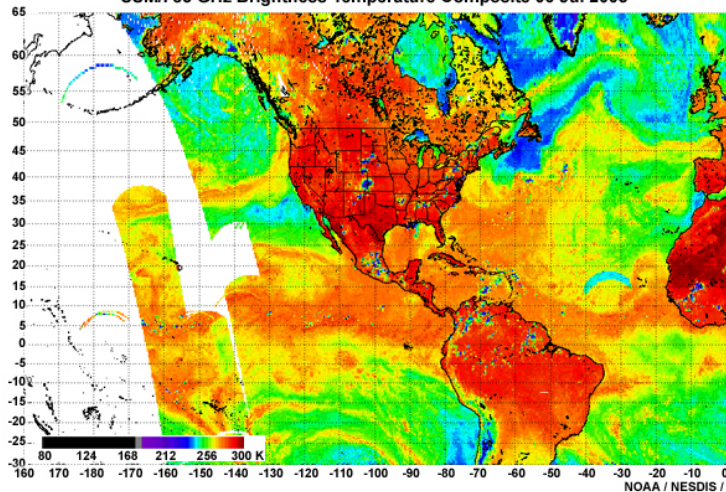
L'emissività è sempre più piccola di 1, e può essere $\ll 1$.
Le misure di radianza MW sono sostanzialmente misure di temperatura (di brillantezza): la differenza della temperatura apparente mostra diverse caratteristiche delle superfici

Electromagnetic Spectrum



©The COMET Program

SSM/I 85 GHz Brightness Temperature Composite 06 Jul 2005

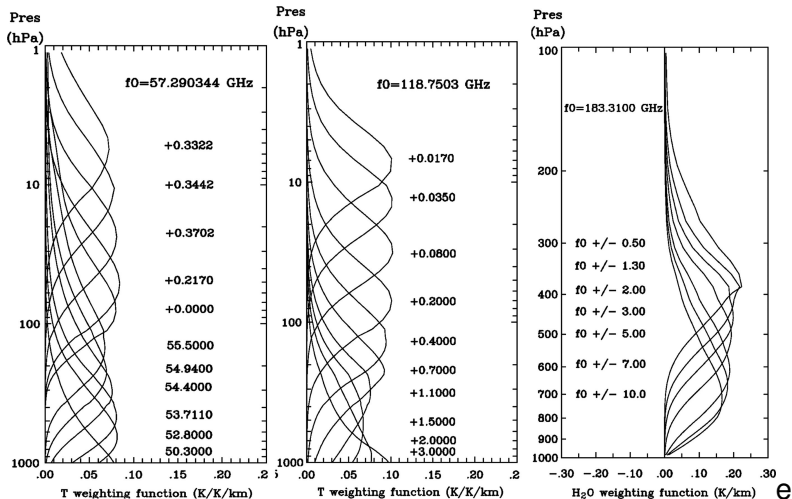


La terra appare in generale più calda del mare. Le precipitazioni appaiono fredde, le nubi delle zone tropicali appaiono più calde.

Profili di temperatura

Assorbimento O_2 : misure a diverse frequenze permettono di ricostruire il profilo di temperatura.

Weighting functions



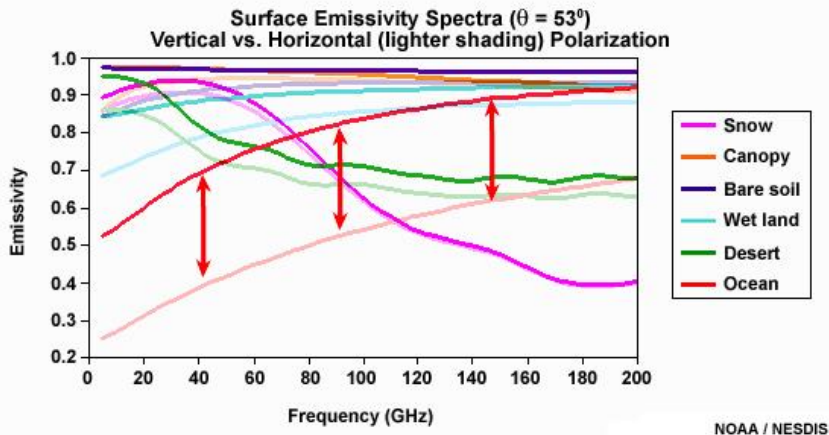
Emissività a microonde delle superfici reali

Fuori dalle zone di assorbimento, la temperatura misurata riflette le condizioni della superficie.

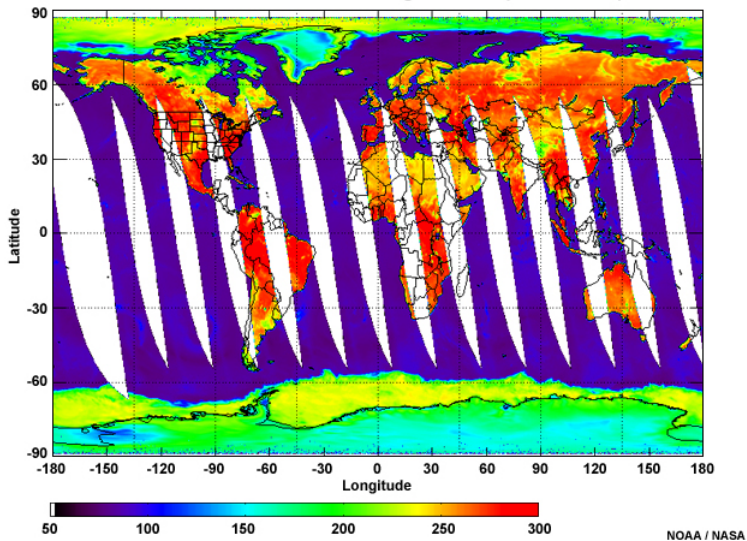
Per una superficie reale l'emissività dipende da:

- ▶ direzione
- ▶ polarizzazione
- ▶ costante dielettrica (presenza di acqua)
- ▶ rugosità

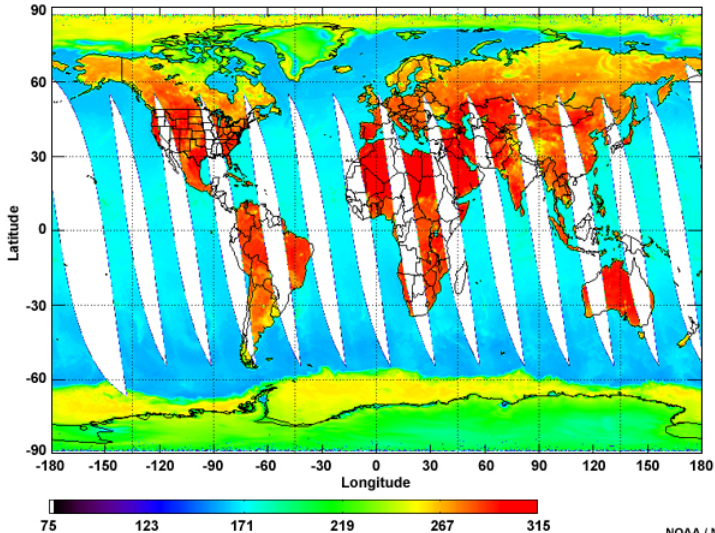
emissività di diversi materiali



AMSR-E 7 GHz Horizontal Polarization Brightness Temperature 2 Sep 2006

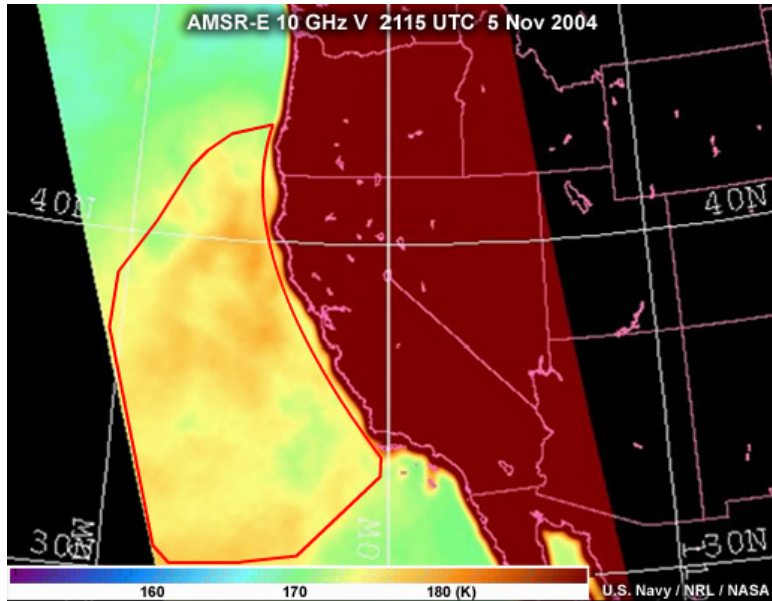


AMSR-E 7 GHz Vertical Polarization Brightness Temperature 2 Sep 2006



NOAA / NASA

AMSR-E 10 GHz V 2115 UTC 5 Nov 2004



Determinazione del contenuto colonnare di vapore acqueo e acqua liquida

- ▶ La maggior parte del vapore acqueo é contenuta alle quote piú basse.
- ▶ Scegliendo frequenze per cui l'assorbimento non é grande (attorno a 20 Ghz) la radianza misurata dipenderá dal contenuto di vapore e di acqua liquida (nubi)
- ▶ Se si puó caratterizzare l'emissione della superficie si possono misurare insieme vapore e acqua liquida. In pratica funziona sul mare
- ▶ La radianza alla superficie é quella emessa piú quella riflessa dall'atmosfera

Eq. del trasporto radiativo in presenza di riflessione

$$L_\nu = \epsilon(\nu) B_\nu(T) Tr(\nu, \mu, \tau^*) + \frac{1}{\mu} \int_0^{\tau^*} B_\nu(T(\tau')) Tr(\nu, \mu, \tau') d\tau' \\ + \left(R(\nu) \frac{1}{\mu} \int_0^{\tau^*} B_\nu(T(\tau')) e^{-\frac{\tau^* - \tau'}{\mu}} d\tau' \right) Tr(\nu, \mu)$$

Questa equazione va scritta per le due polarizzazioni. Si tenga presente che $R^p(\nu) = (1 - \epsilon(\nu))$

Si può riscrivere l'equazione in termini della temperatura di brillanza T_B e della temperatura atmosferica T_{atm}

Supponiamo che l'assorbimento avvenga principalmente all'interno del PBL in modo che possiamo considerare costante la temperatura $T = T_{atm} = T_{sur}$

$$T_B = \epsilon(\nu) T_{sur} Tr(\nu) + T_{sur} \int_0^{\tau^*} Tr(\tau') + (R(\nu) Tr(\nu))^2 \int_0^{\tau^*} Tr(\tau')$$

con un po' di algebra si arriva a

$$T_b = T_{sur}[1 - Tr_{\nu}^2(\tau^*, \mu)(1 - \epsilon(\nu))]$$

Supponendo di eseguire la misura per entrambe le polarizzazioni, si può scrivere la differenza tra la temperatura di brillantezza orizzontale e verticale

$$\Delta T_B = T_{sur}(R^V - R^H) Tr^2(\nu)$$

$$Tr^2 = Tr_{O_2}^2 Tr_{LW}^2 Tr_{WV}^2$$

La trasmissione dovuta all'ossigeno si può calcolare, la trasmissione dovuta al vapore acqueo e all'acqua liquida si potrà parametrizzare come:

$$Tr_{LW}^2 = e^{-k_{aLW} \frac{LW}{\mu}} \quad Tr_{WV}^2 = e^{-k_{aWV} \frac{WV}{\mu}}$$

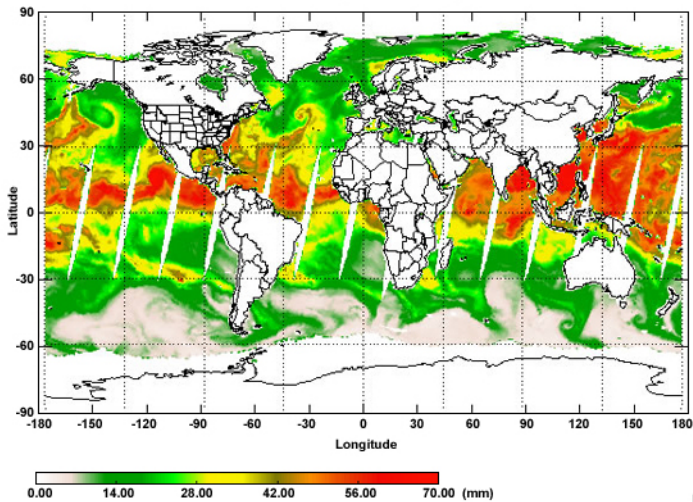
Si può quindi scrivere

$$k_{aLW}LW + k_{aWV}WV = \frac{\mu}{2} \ln\left(\frac{\Delta T_B}{T_{sur}(R^V - R^H) Tr_{O_2}^2}\right)$$

Utilizzando due frequenze (19.35 e 37 GHz) Problemi:

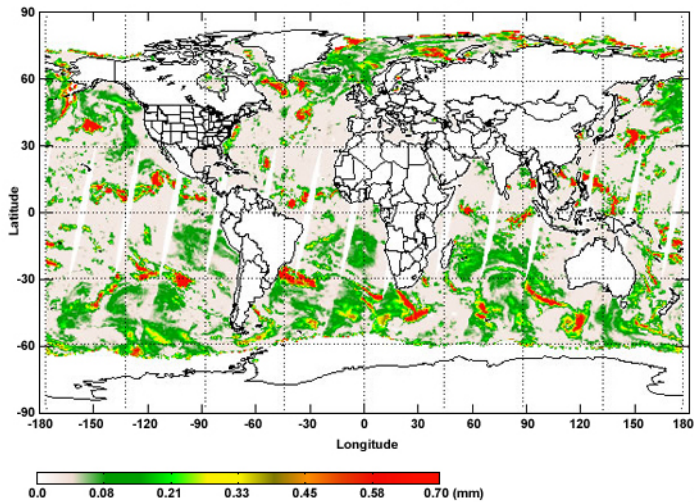
- ▶ Le riflettività dipendono dalla velocità del vento
- ▶ Devono essere noti i coefficienti di assorbimento

AMSU TPW Composite 10 Aug 2005



NOAA

AMSU CLW Composite 10 Aug 2005



Altre applicazioni

- ▶ Precipitazioni
- ▶ Ghiaccio marino - neve
- ▶ Umidità nel suolo

Cenni alla determinazione del tasso di precipitazione

Le nuvole che danno luogo a precipitazioni contengono in generale acqua e ghiaccio. Le gocce assorbono e sono abbastanza grandi da dare luogo a scattering. I cristalli di ghiaccio non assorbono.

Sull'acqua, le precipitazioni risaltano come un aumento della temperatura (alle frequenze piú basse).

Alle frequenze piú alte, i cristalli di ghiaccio creano scattering e quindi le precipitazioni risultano fredde (rispetto all'acqua e al terreno)

Un semplice modello per la dimensione delle gocce nelle precipitazioni:

$$N(r) = N_0 \exp(-2\Lambda r) \mid N_0 = 8 * 10^3 m^{-3} mm^{-1} \mid \Lambda = 4.1 (Rr)^{-0.21}$$

Rr rainfall rate (mm/ora)

Si può calcolare l'estinzione:

$$\alpha_{rain} = N_0 \int_{r_{min}}^{r_{max}} dr \pi r^2 Q(r) \exp(-2\Lambda r)$$

Absorption Coefficient

k_a (km^{-1})

Volume
Absorption

— Water
--- Ice

3

2

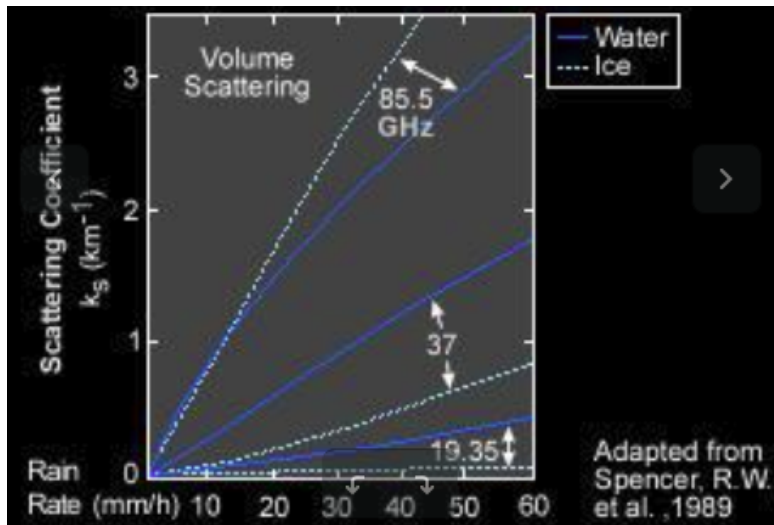
1

0

85.5 GHz

37

19.35



Semplice modello

Usando le ipotesi:

- ▶ La temperatura é costante nella nuvola
- ▶ Lo spessore ottico é dovuta solo alla nuvola

Si scrive l'equazione del trasporto radiativo

$$T_B = \epsilon(\nu) T_{sur} Tr(\nu) + T_{atm} \int_0^{\tau^*} Tr(\tau') d\tau' + \\ R(\nu) Tr(\nu) T_{atm} \int_0^{\tau^*} \exp(-(\tau^* - \tau')) d\tau'$$

Si può scrivere:

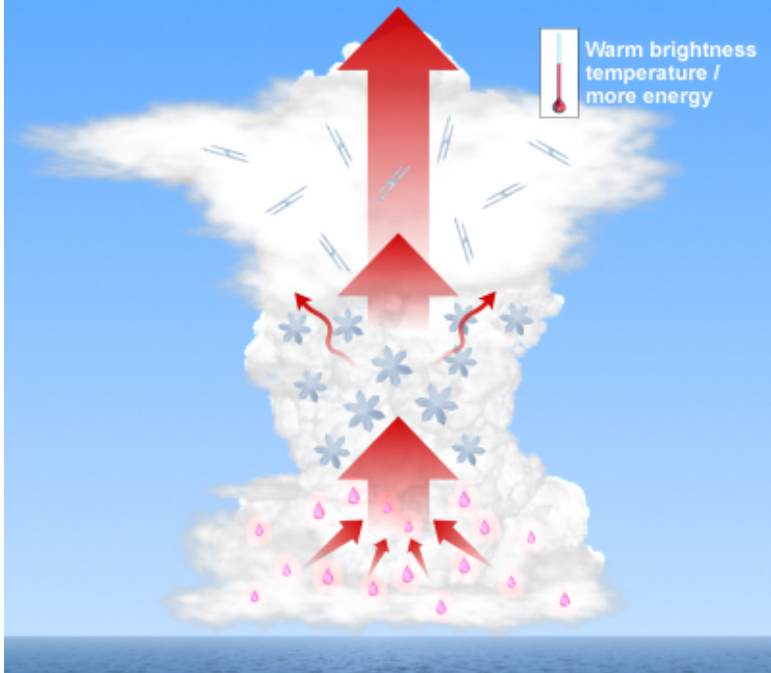
$$T_{B,\nu} = T_{atm} \left[1 + \epsilon_{\nu} \left(\frac{T_{sur}}{T_{atm}} - 1 \right) \exp(-\tau^{\star}) - (1 - \epsilon_{\nu}) \exp(-2\tau^{\star}) \right]$$

- ▶ per $\tau^* = 0$, $T_B = \epsilon(\nu) T_{sur}$
- ▶ τ^* cresce , $T_B \rightarrow T_{atm}$
- ▶ Sul mare la precipitazione appare piú calda della superficie circostante (a frequenze per cui lo scattering é piccolo.)
- ▶ Sulla terra la precipitazione non ha T_B molto diverso dal terreno circostante

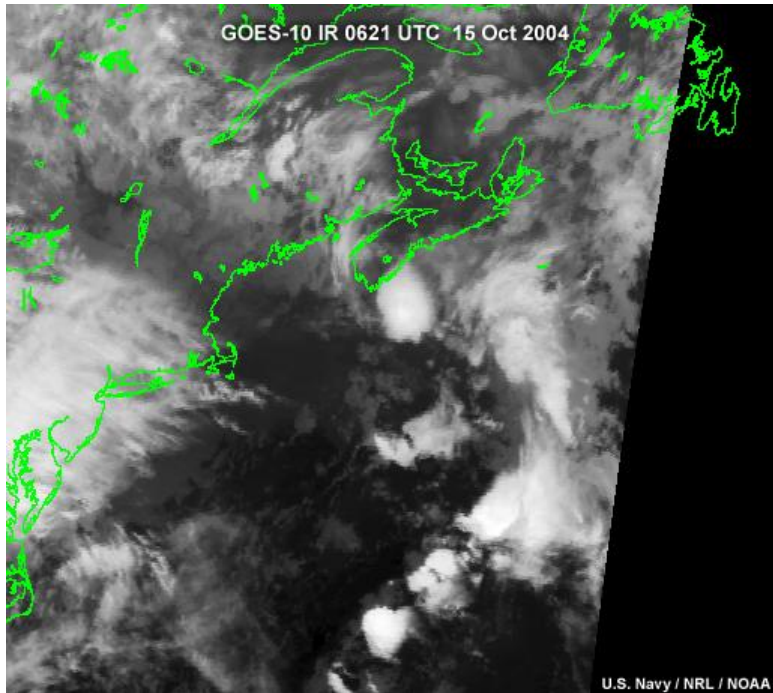
Radiative Processes at 37 GHz in a Convective Atmosphere



Warm brightness
temperature /
more energy

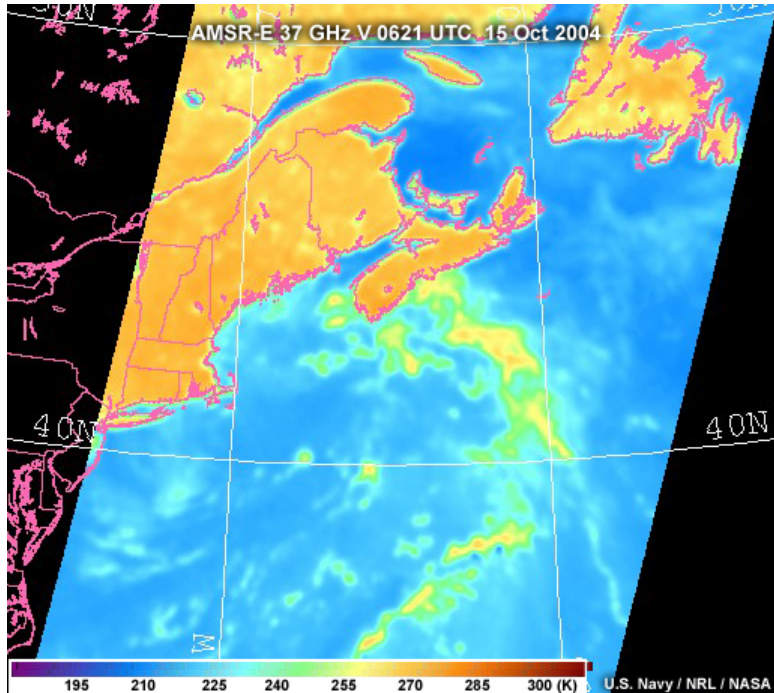


GOES-10 IR 0621 UTC 15 Oct 2004



U.S. Navy / NRL / NOAA

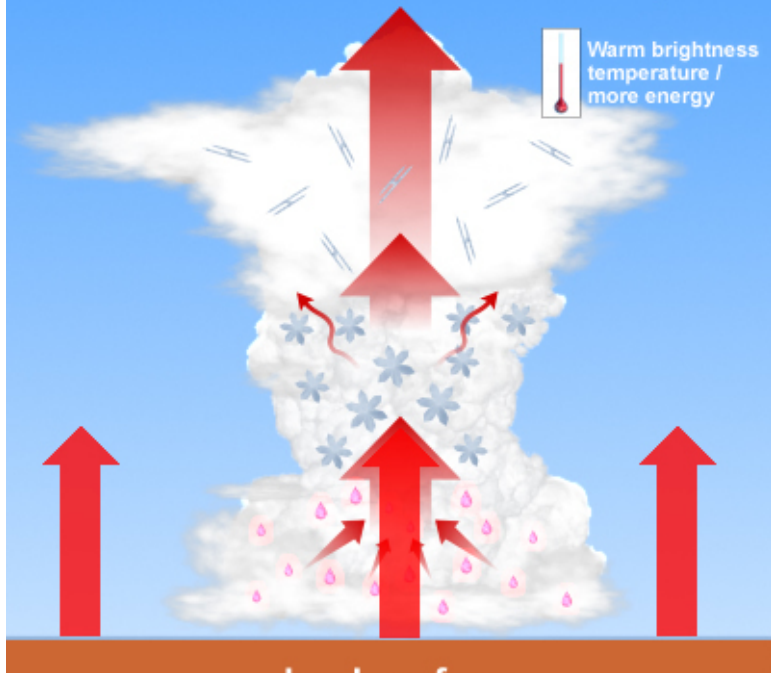
AMSR-E 37 GHz V 0621 UTC 15 Oct 2004



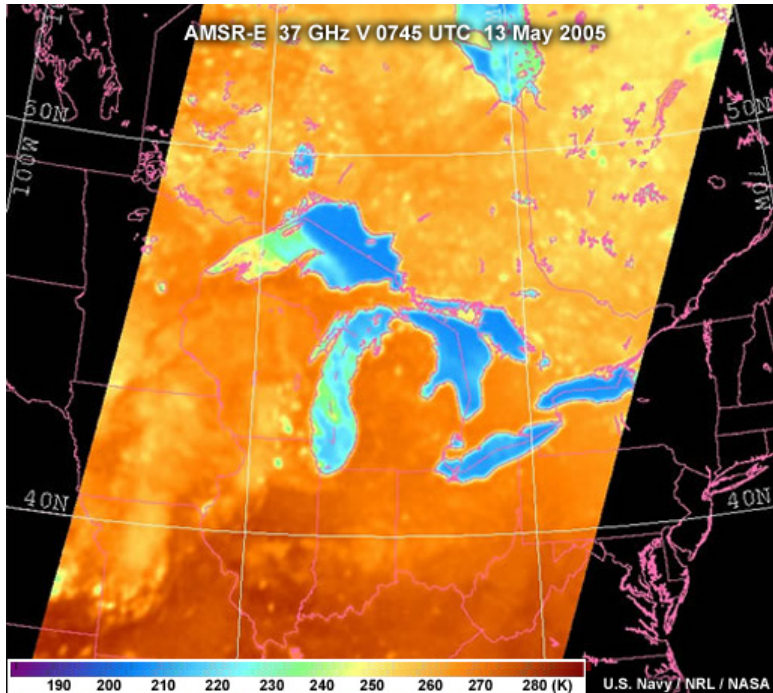
Radiative Processes at 37 GHz in a Convective Atmosphere



Warm brightness
temperature /
more energy

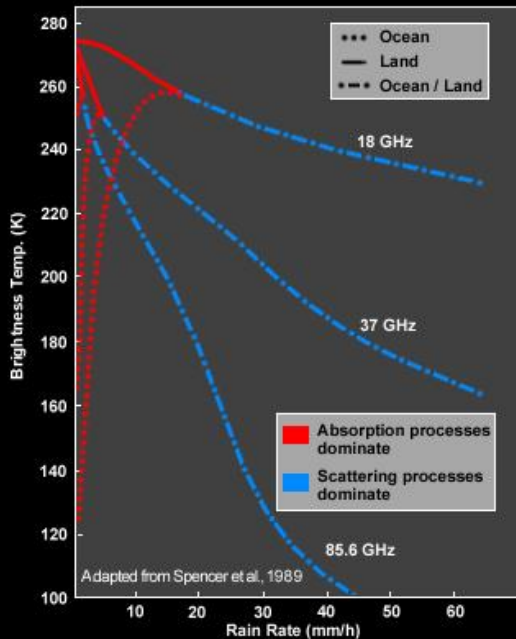


AMSR-E 37 GHz V 0745 UTC 13 May 2005

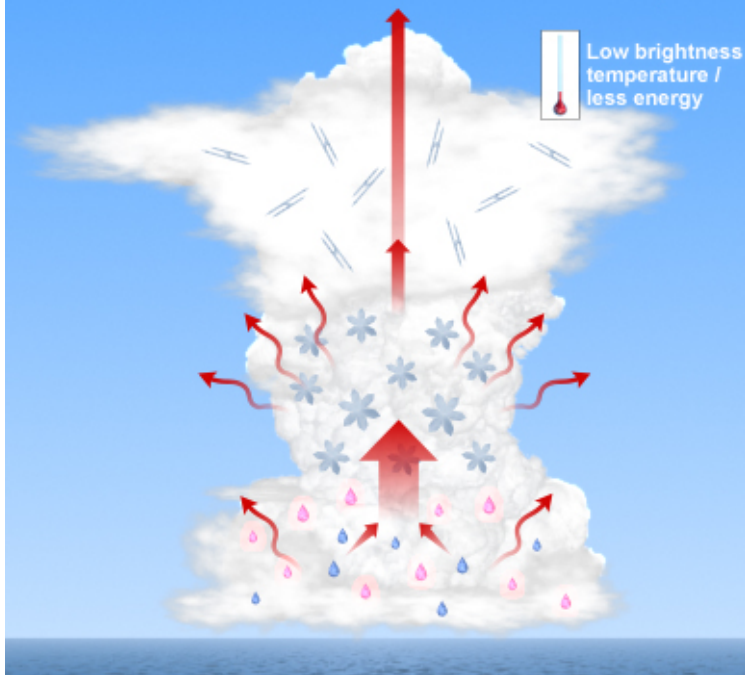


190 200 210 220 230 240 250 260 270 280 (K)

U.S. Navy / NRL / NASA



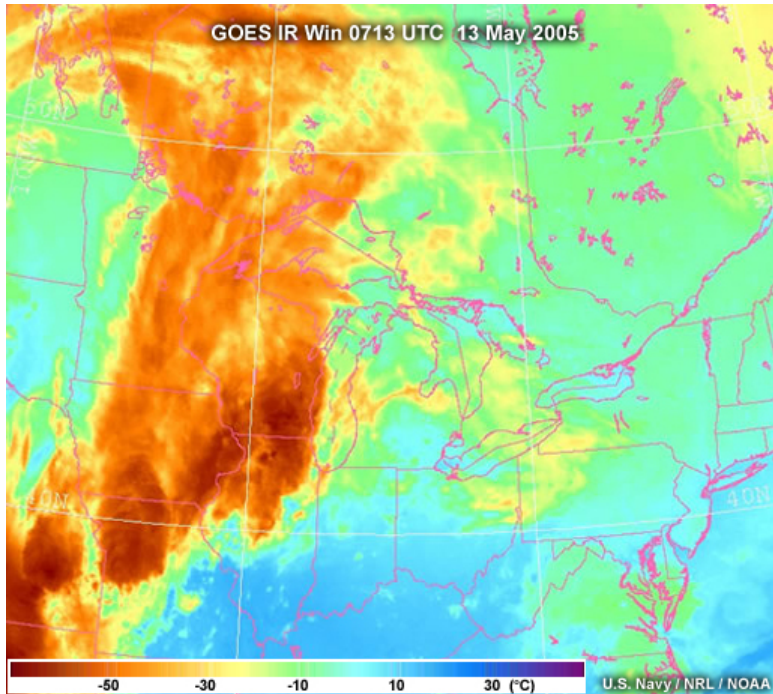
Radiative Processes at 85 GHz in a Convective Atmosphere



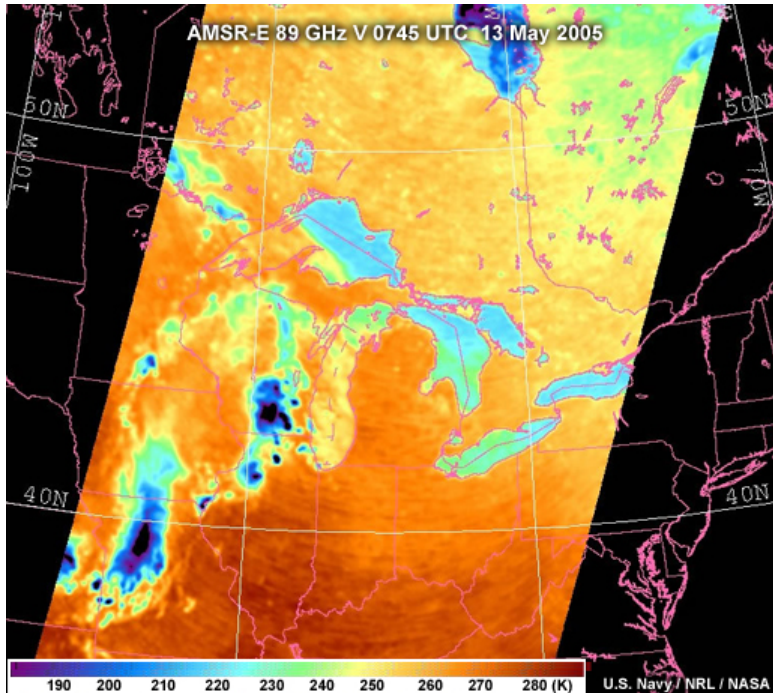
In questo caso l'equazione va modificata tenendo conto del pezzo di spessore ottico dovuto allo scattering

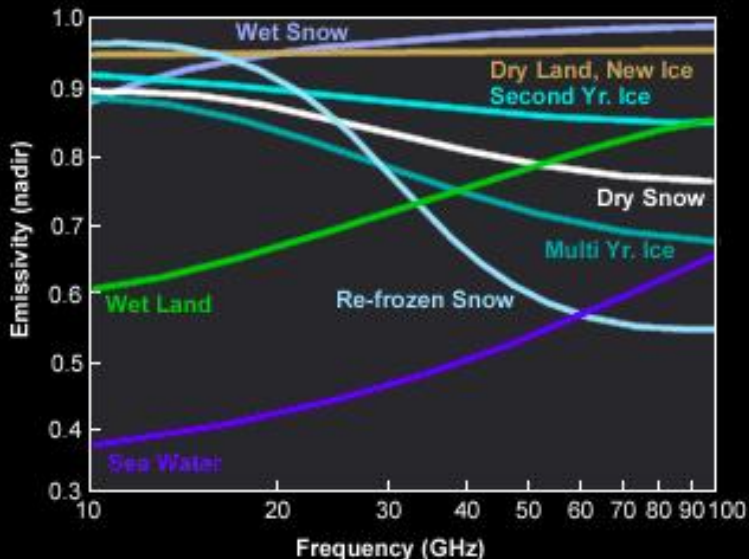
$$T_{B,\nu} = T_{atm} e^{-\tau_{ice}} \left[1 + \epsilon_{\nu} \left(\frac{T_{sur}}{T_{atm}} - 1 \right) \exp(-\tau^{\star}) - (1 - \epsilon_{\nu}) \exp(-2\tau^{\star}) \right]$$

GOES IR Win 0713 UTC 13 May 2005



AMSR-E 89 GHz V 0745 UTC 13 May 2005

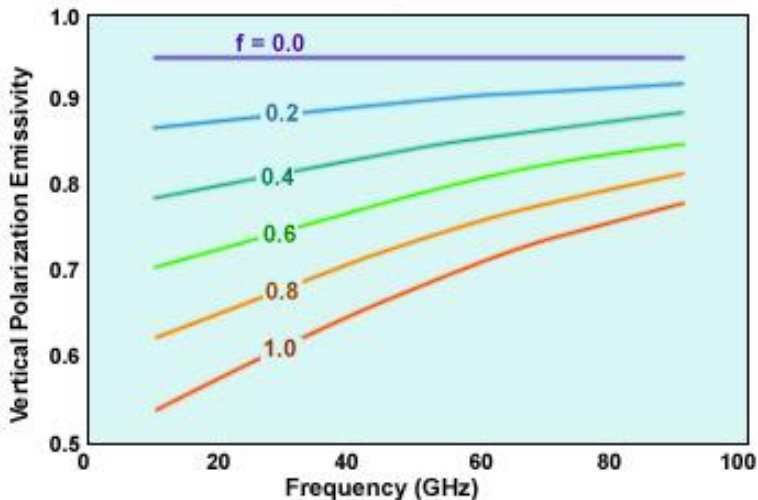




Surface emissivity at nadir as a function of frequency for scattering materials (aged sea ice and snow cover) and absorption materials (water, wet and dry soil and new sea ice).

Adapted from Dr. Norman C. Grody

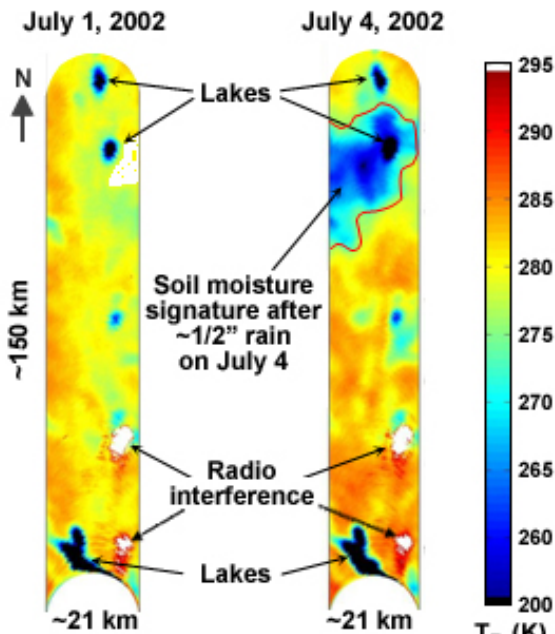
Theoretical Microwave Land Emissivities as a Function of Surface Wetness



f is fraction of surface covered by water

AMS, J. Hydrometeor., 2001

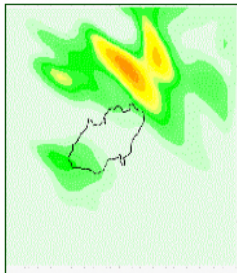
Microwave Soil Moisture Signatures



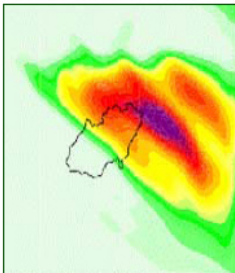
Importanza dell'umidità del suolo per la previsione del tempo

Buffalo Creek, Colorado Flash Flood Event

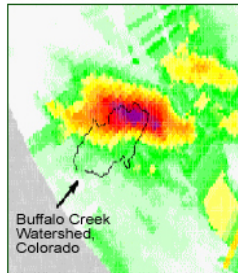
24-Hr Model Forecast Rainfall
Initialized Without Soil Moisture



24-Hr Model Forecast Rainfall
Initialized With Soil Moisture



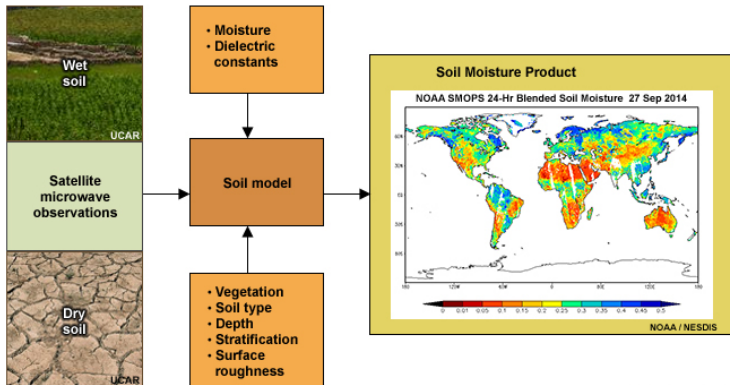
Observed Rainfall
00 to 04 UTC 13 Jul 1996



Courtesy of Fei Chen, NCAR

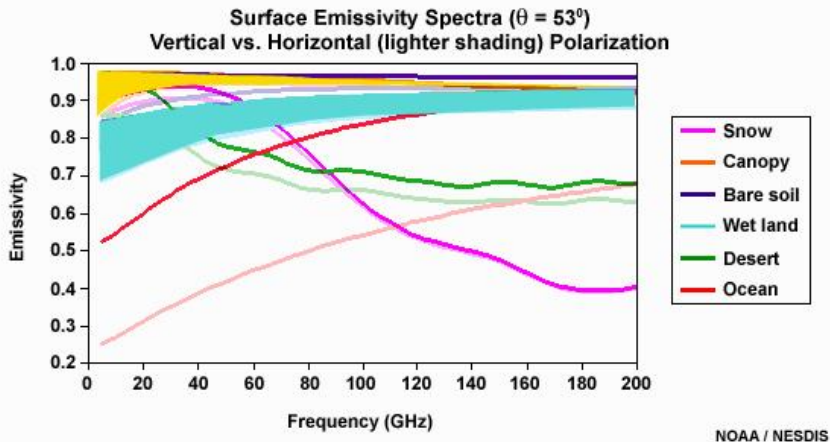
Difficoltà di una stima quantitativa

Generalized Microwave Soil Moisture Retrieval Process



©The COMET Program

polarizzazione



Soil Moisture



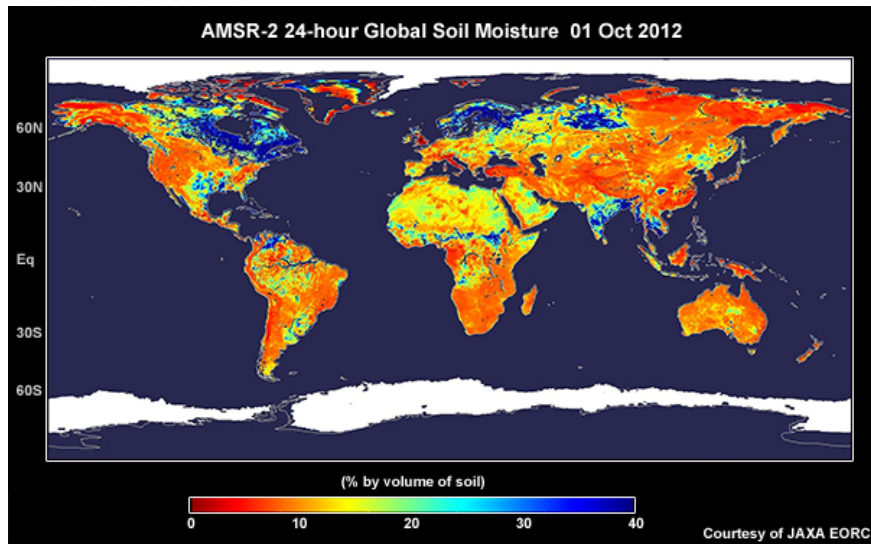
Normalized Polarization
Difference at 10.7 GHz

$$= \frac{\uparrow (T_{bv} - T_{bh})}{\frac{1}{2} (T_{bv} + T_{bh})}$$

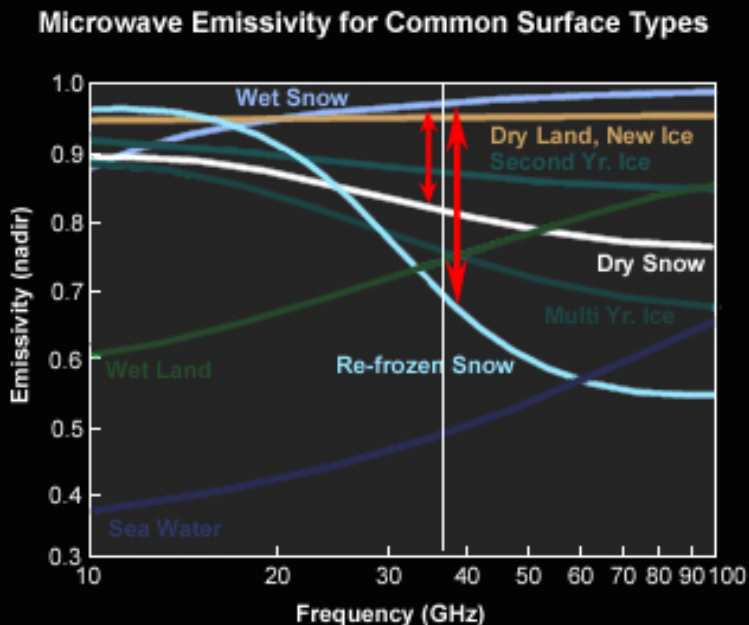
Normalized Frequency
Difference: 37 – 10.7 GHz

$$= \frac{\uparrow (T_{bh,37} - T_{bh,10.7})}{\frac{1}{2} (T_{bh,37} + T_{bh,10.7})}$$

Prodotto finale

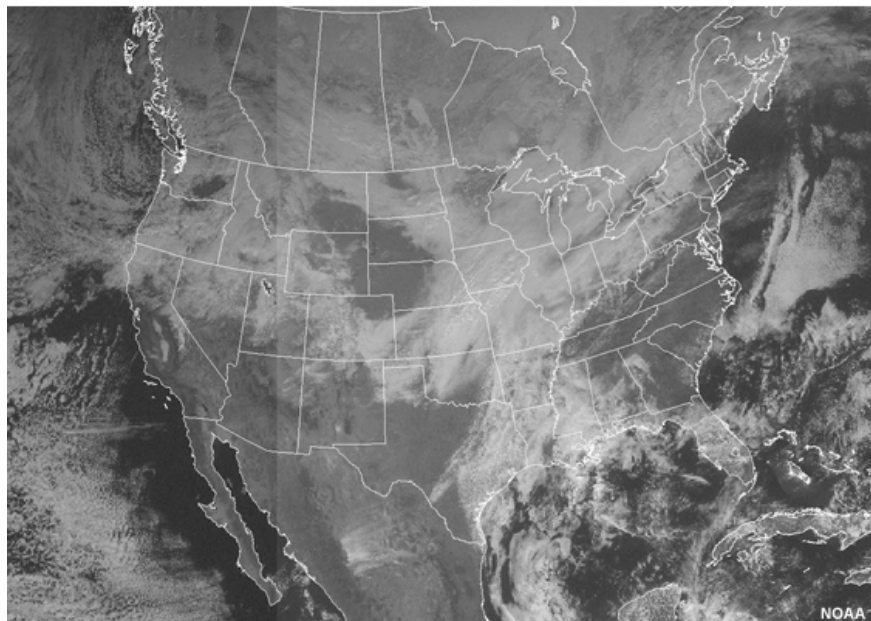


Rivelazione di neve



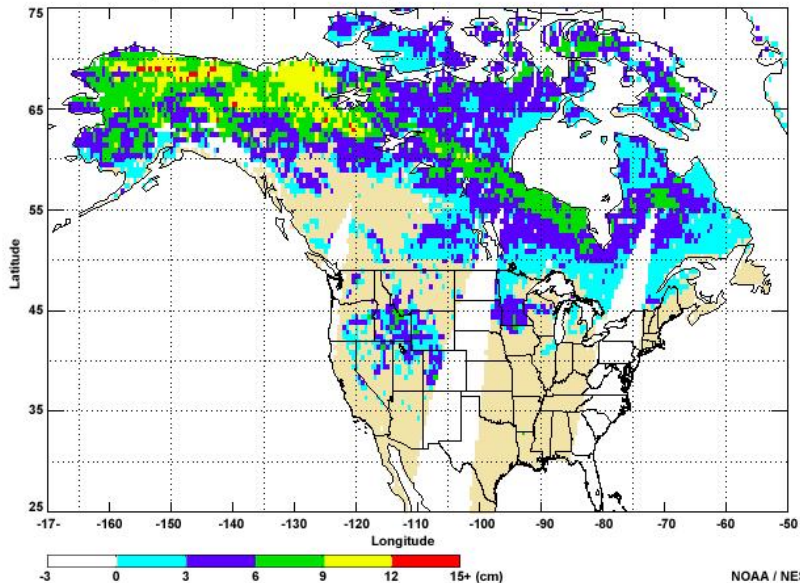
Rivelazione di neve

GOES East and West Visible Channel Composite 1830 UTC 20 Jan 2006



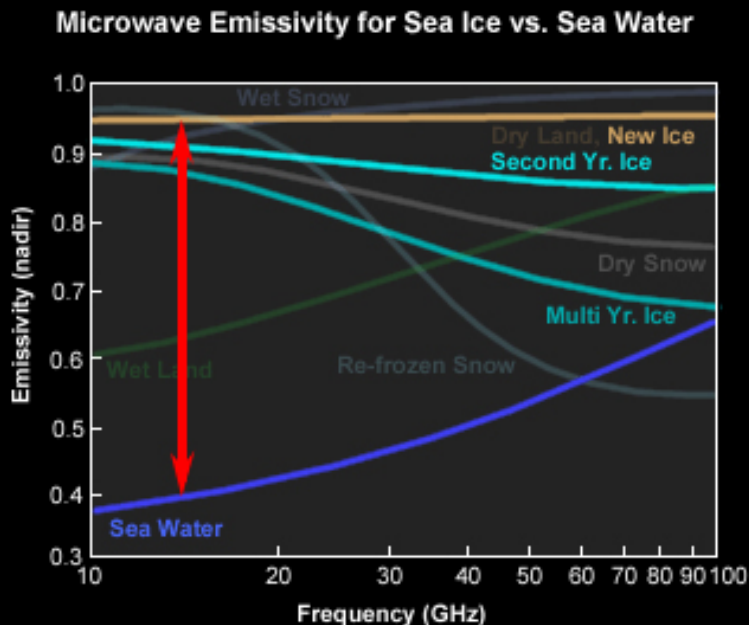
Rivelazione di neve

Aqua AMSR-E Snow Water Equivalent 0130 LST 22 Jan 2006

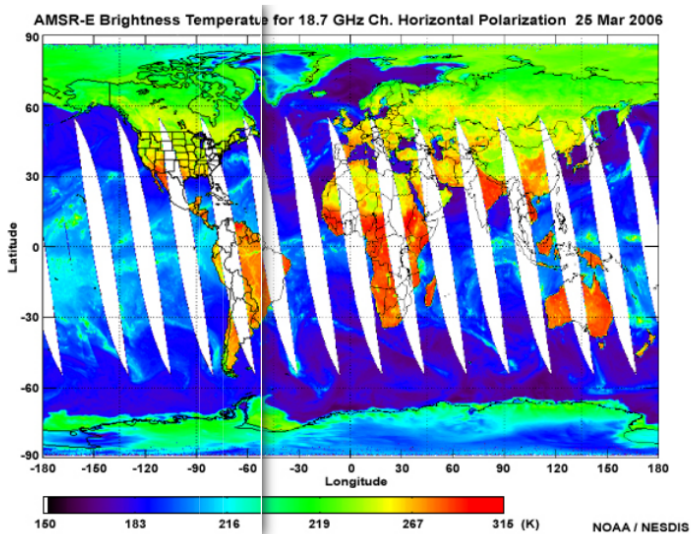


NOAA / NESDIS

Rivelazione di ghiaccio marino

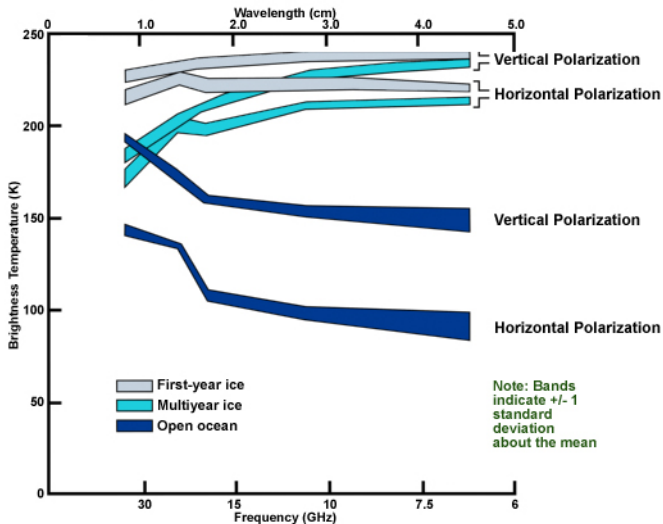


Rivelazione di ghiaccio marino



Rivelazione di ghiaccio marino

Microwave Brightness Temperatures (at Vertical and Horizontal Polarizations)
for Sea Ice and Open Ocean as Observed by the Nimbus-7 SMMR



Cavalieri et al., 1984. Reproduced by permission of American Geophysical Union

Rivelazione di ghiaccio marino