

# **Fizyka Procesów Klimatycznych**

## **Wykład 5**

**prof. dr hab. Szymon Malinowski**  
**Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki**  
**Uniwersytet Warszawski**  
**malina@igf.fuw.edu.pl**

**dr hab. Krzysztof Markowicz**  
**Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki**  
**Uniwersytet Warszawski**  
**kmark@igf.fuw.edu.pl**

## **ENERGIA W SYSTEMIE KLIMATYCZNYM**

1. Strumień energii słonecznej =  $\frac{1}{4}$  stałej słonecznej

$$\frac{1}{4} * 1362 \text{W/m}^2 \approx 341 \text{W/m}^2$$

2. Albedo Ziemi  $\approx 0.3$ , zmienne, od 0.9 (śnieg) do 0.07 (ocean)

3. Strumień energii geotermalnej  $\approx 0.092 \text{W/m}^2$

4. Strumień energii ze spalania paliw kopalnych  $\approx 0.028 \text{W/m}^2$

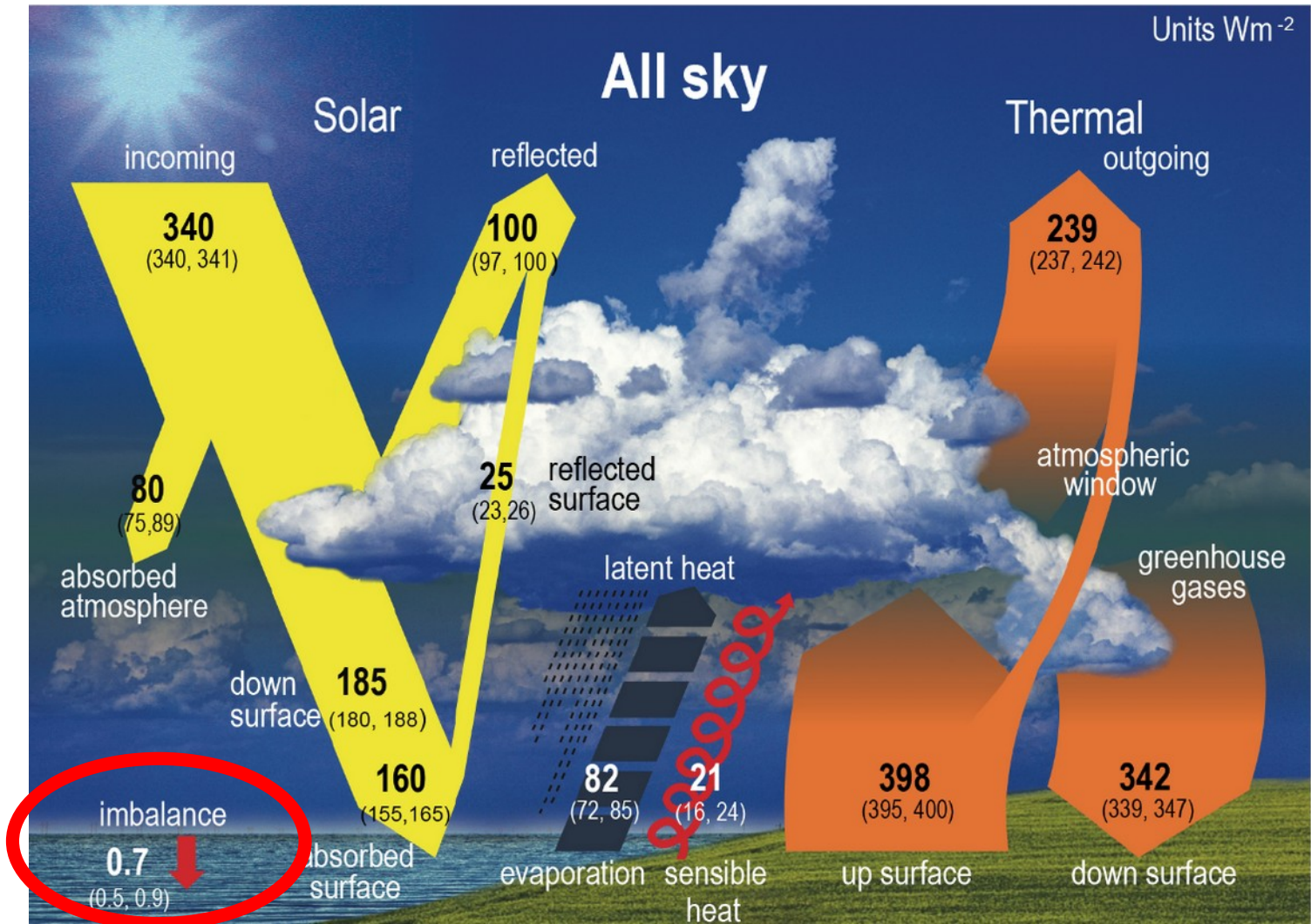
## **PODSTAWOWE WŁASNOŚCI SYSTEMU KLIMATYCZNEGO**

1. Ciśnienie powietrza  $\approx 1000 \text{hPa}$  (10m wody),  $c_p = 1004 \text{J/kg} \cdot \text{K}$

2. Średnia głębokość oceanów  $\approx 4000 \text{m}$ ,  $c_w = 4192 \text{J/kg} \cdot \text{K}$

3. Ląd – tylko cienka warstwa odpowiada na strumienie radiacji

4. Gazy cieplarniane:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_x$  i wiele innych



Uśredniony bilans energii systemu klimatycznego. Wartości w  $W/m^2$ .

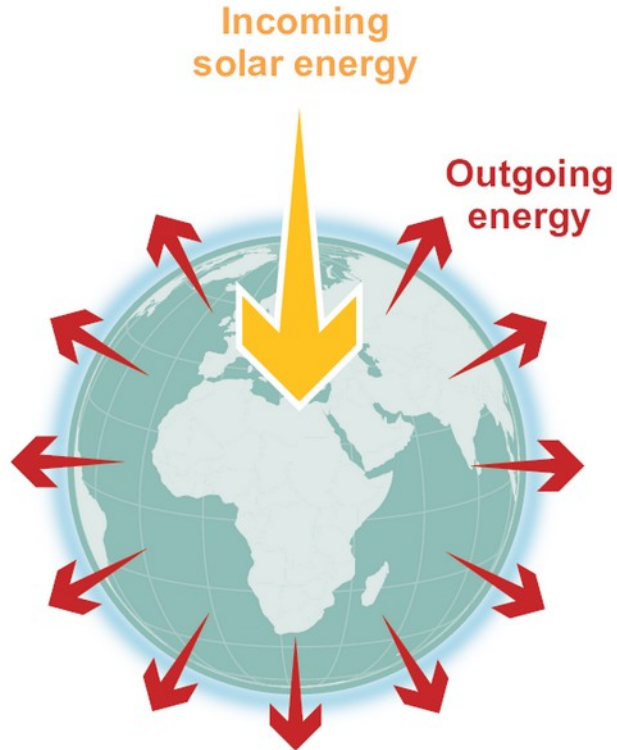
W nawiasach zakres niepewności i zmienności.

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/figures/chapter-7/figure-7-2/>

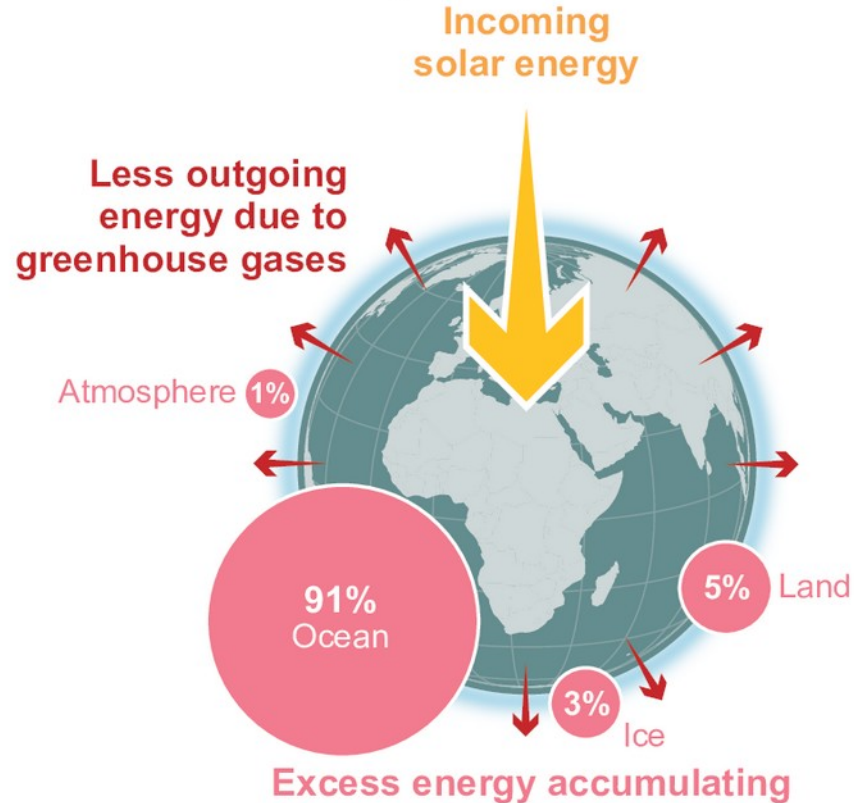
## FAQ 7.1: The Earth's energy budget and climate change

Since at least 1970, there has been a persistent imbalance in the energy flows that has led to **excess energy being absorbed by different components of the climate system.**

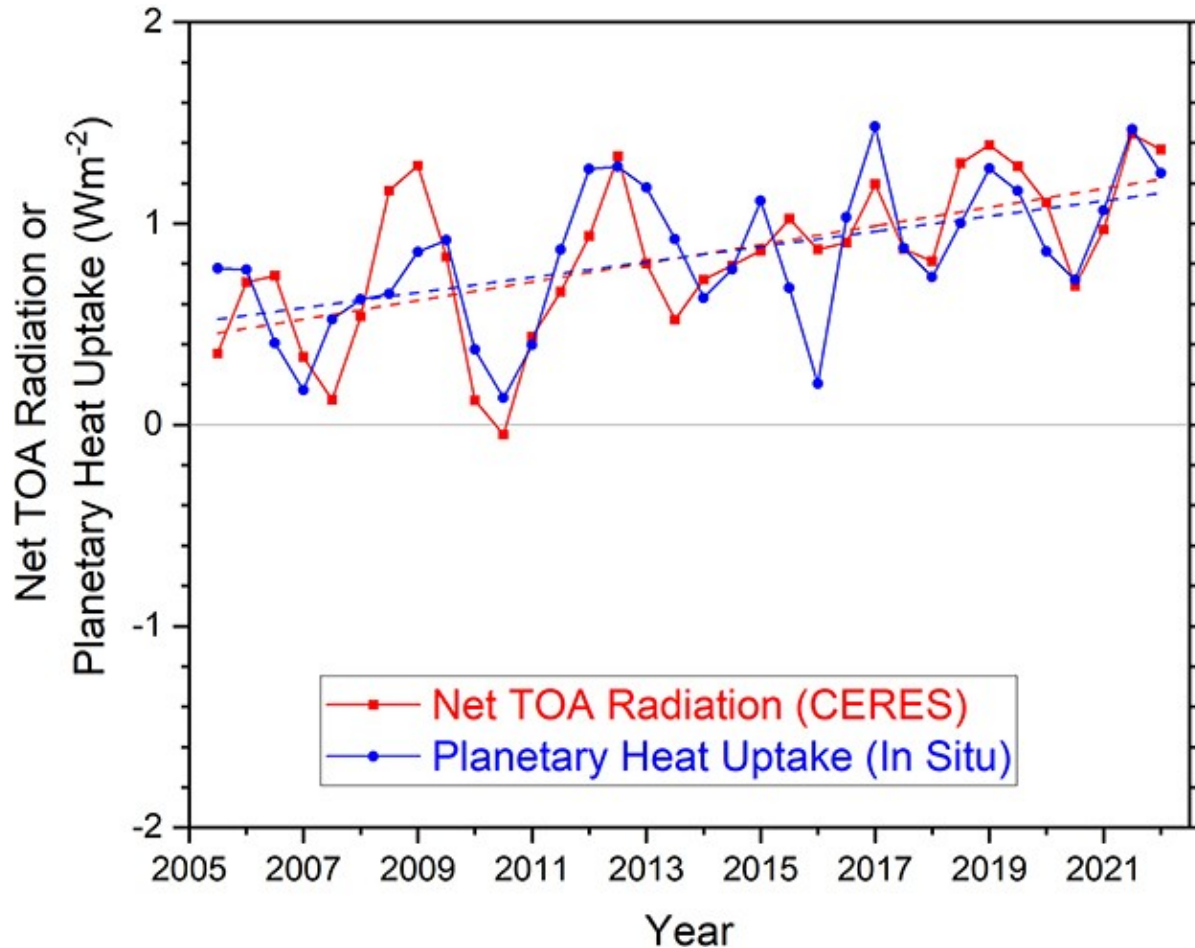
### Stable climate: in balance



### Today: imbalanced

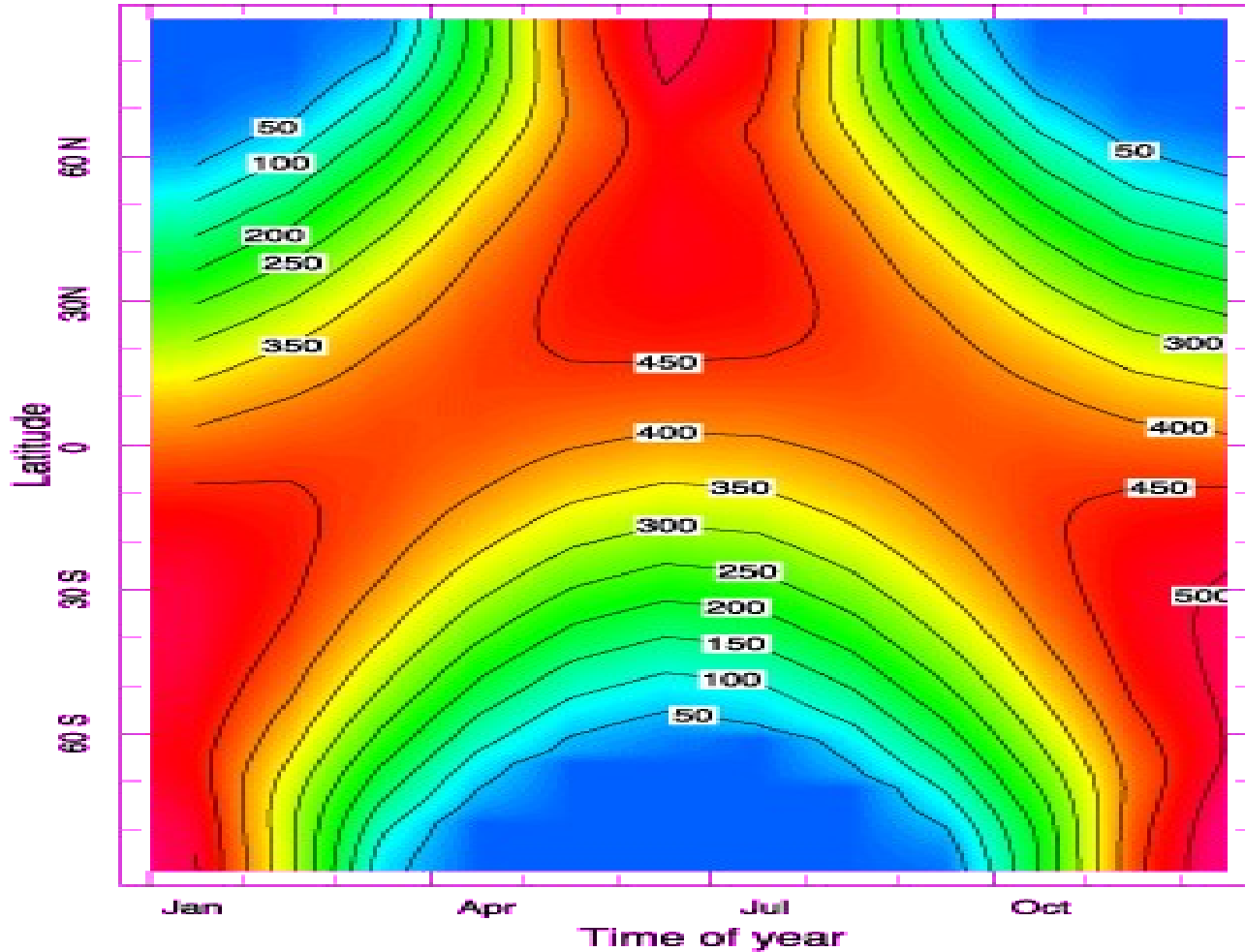


# Nierównowaga energetyczna narasta



Schmidt GA, et al., 2023, CERESMIP: a climate modeling protocol to investigate recent trends in the Earth's Energy Imbalance. *Front. Clim.* 5:1202161. <https://doi.org/10.3389/fclim.2023.1202161>

# Latitude-Time Distribution of Incoming Solar Radiation at the Top of the Atmosphere



Based on ERBE data. Units are  $W/m^2$

Zmienność w dopływie energii słonecznej w cyklu rocznym w funkcji szerokości geograficznej.

## Problem nachylenia osi:

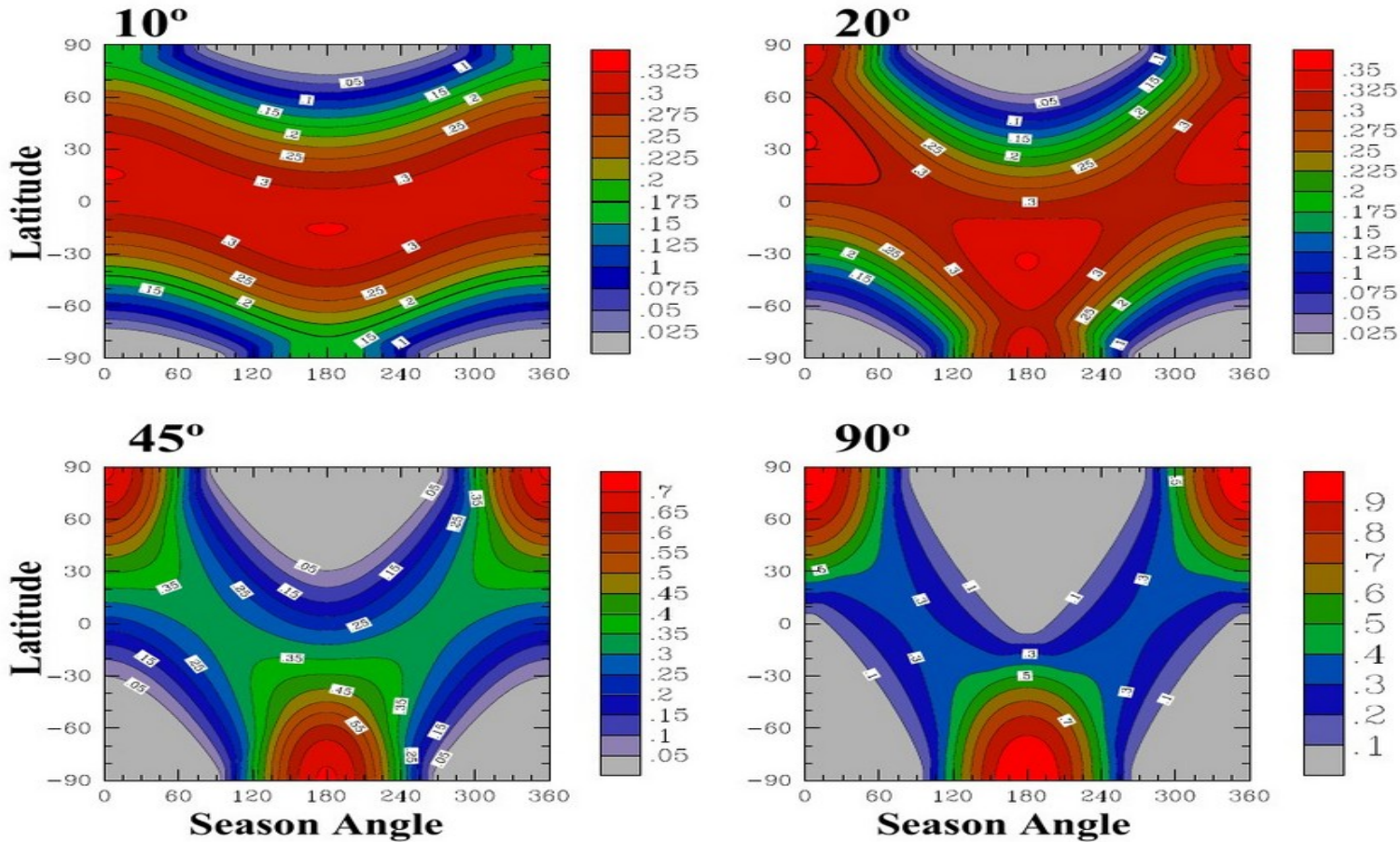


Fig. 7.5: The seasonal and latitudinal distribution of daily-mean flux factor for four different values of the obliquity. In these plots, a circular orbit has been assumed. To obtain the daily mean energy flux incident on each square meter of the planet's surface, one multiplies the flux factor by the solar constant. For example, if the solar constant is  $1000\text{W/m}^2$ , the incident solar flux at the pole during the Summer solstice is about  $700\text{W/m}^2$  if the obliquity is  $45^\circ$  (Dierckhambert, Principles of planetary climate!)

# MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere

[About this model](#) [Other Models](#)

## Model Input

CO<sub>2</sub> (ppm)

CH<sub>4</sub> (ppm)

Trop. Ozone (ppb)

Strat. Ozone scale

Water Vapor Scale

Freon Scale

Temperature Offset, C

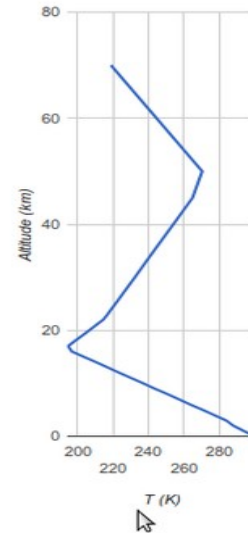
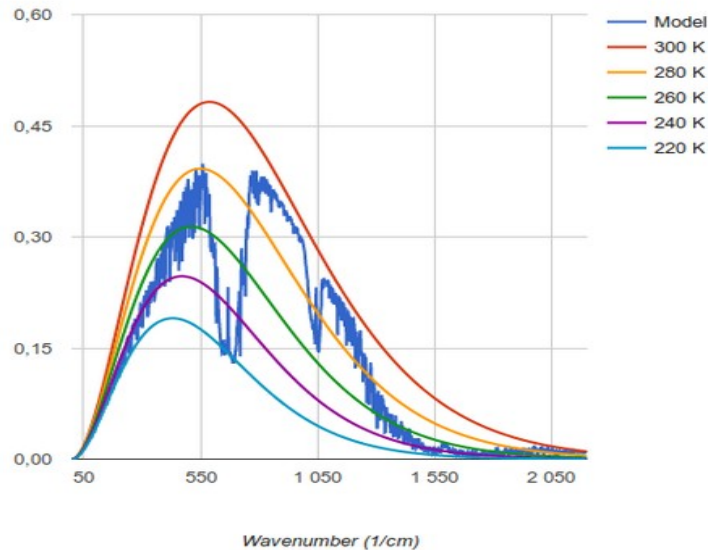
Locality

Altitude (km)

## Model Output

Upward IR Heat Flux **298.52 W/m<sup>2</sup>**

Ground Temperature **299.7 K**





# MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere

[About this model](#) [Other Models](#)

## Model Input

CO<sub>2</sub> (ppm)

CH<sub>4</sub> (ppm)

Trop. Ozone (ppb)

Strat. Ozone scale

Water Vapor Scale

Freon Scale

Temperature Offset, C

Locality

Altitude (km)

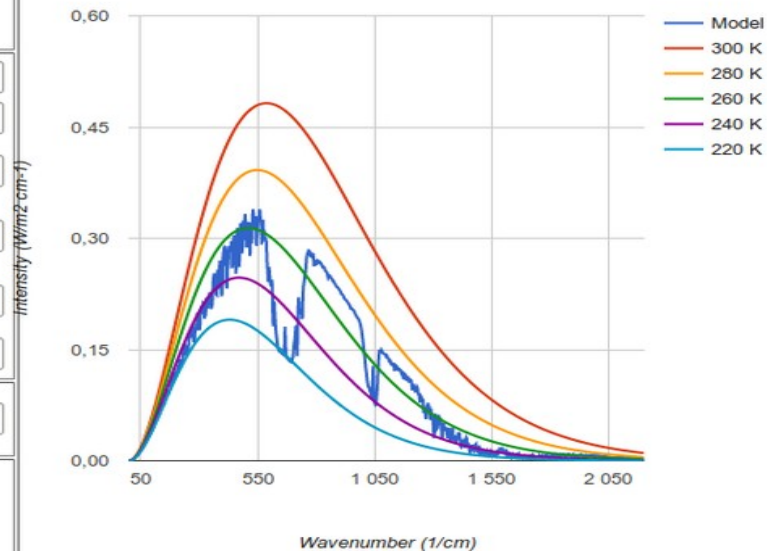
Save This Run to Background

Show Raw Model Output

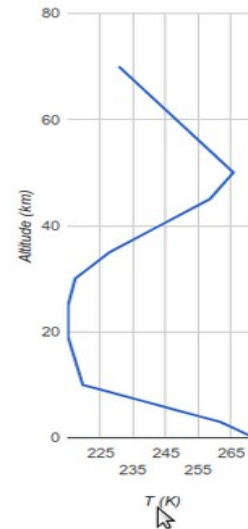
## Model Output

Upward IR Heat Flux **235.217** W/m<sup>2</sup>

Ground Temperature **272.2** K



Wavenumber



T (K)

# MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere

[About this model](#) [Other Models](#)

## Model Input

CO<sub>2</sub> (ppm)

CH<sub>4</sub> (ppm)

Trop. Ozone (ppb)

Strat. Ozone scale

Water Vapor Scale

Freon Scale

Temperature Offset, C

Locality

Altitude (km)

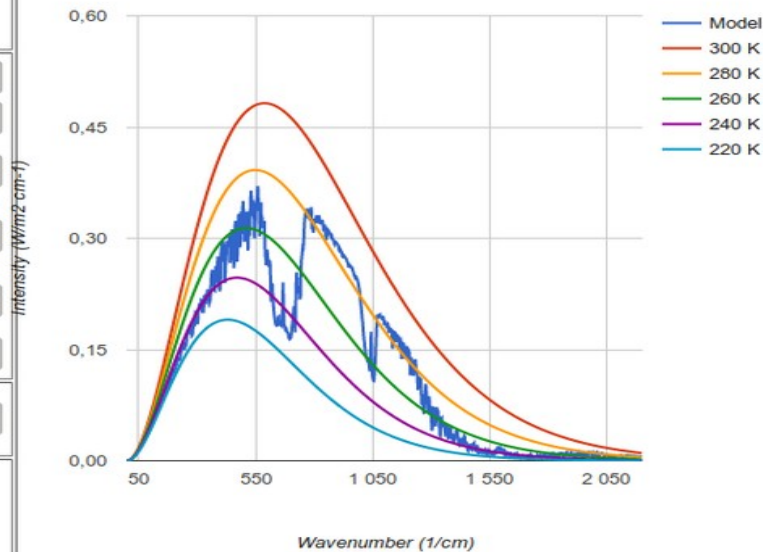
Save This Run to Background

Show Raw Model Output

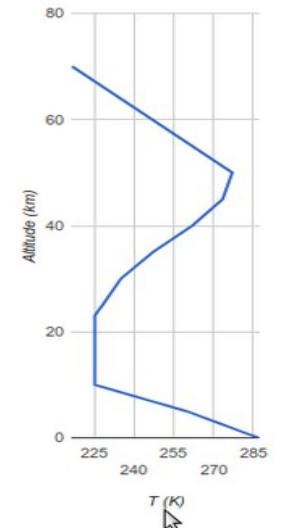
## Model Output

Upward IR Heat Flux **270.731** W/m<sup>2</sup>

Ground Temperature **287.2** K



Wavenumber



T (K)

# MODTRAN Infrared Light in the Atmosphere

[About this model](#) [Other Models](#)

## Model Input

CO<sub>2</sub> (ppm)

CH<sub>4</sub> (ppm)

Trop. Ozone (ppb)

Strat. Ozone scale

Water Vapor Scale

Freon Scale

Temperature Offset, C

Locality

Altitude (km)

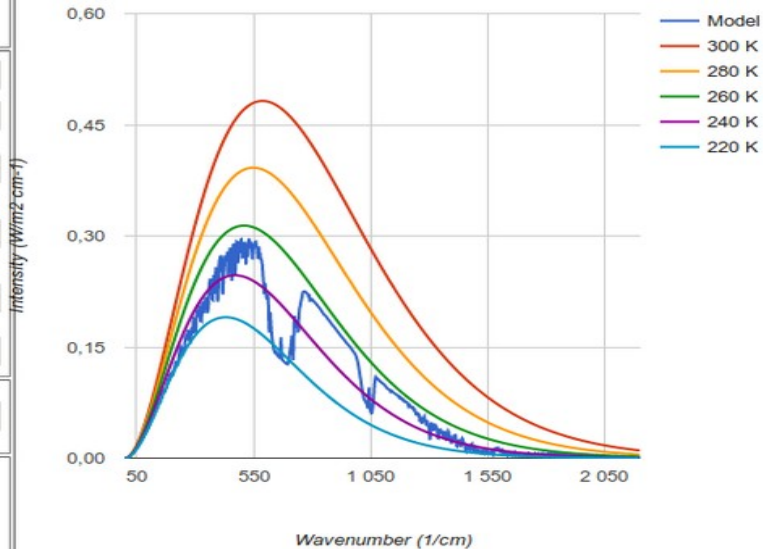
Save This Run to Background

Show Raw Model Output

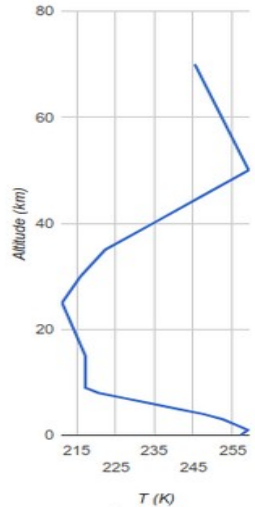
## Model Output

Upward IR Heat Flux **202.059** W/m<sup>2</sup>

Ground Temperature **257.2** K



Wavenumber



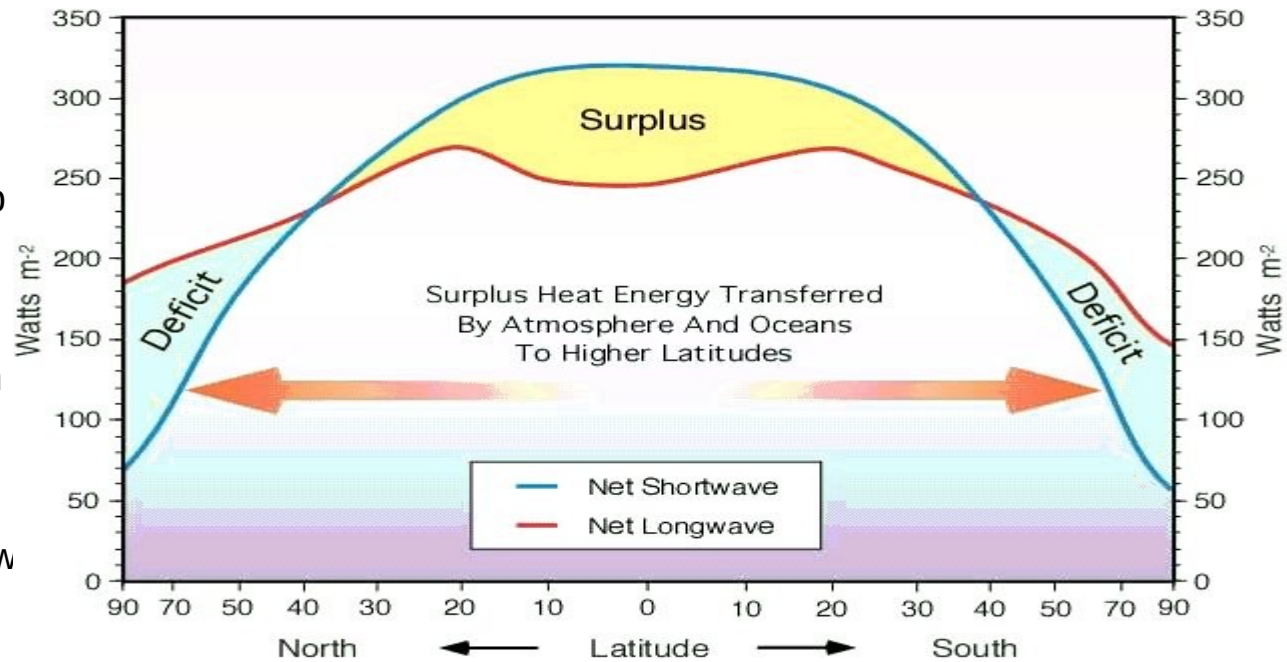
T (K)

Bilans promieniowania - dopływu i odpływu ciepła – w skali całej planety w stanie stacjonarnym jest bliski równowagi.

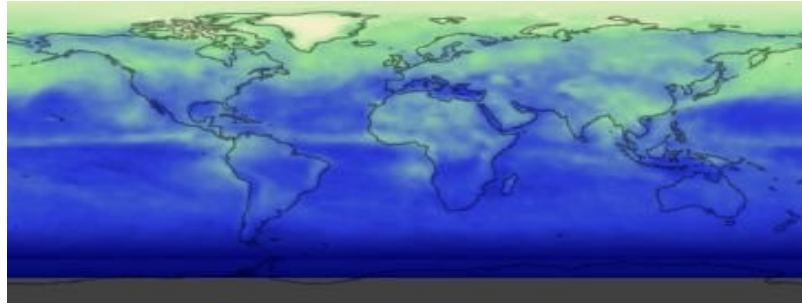
Gdy nie ma równowagi Ziemia ogrzewa się lub stygnie.

Lokalne zmiany w bilansie (wewnątrz układu Ziemia-Atmosfera) mogą zachodzić bez zmian w dopływie energii z zewnątrz, wyłącznie wskutek zmienności własności atmosfery – zawartości gazów cieplarnianych, aerozoli, chmur oraz tzw. mechanizmów redystrybucji (w pionie - konwekcja, cykl hydrologiczny – i po powierzchni globu - cyrkulacje atmosferyczne, prądy morskie, przewodnictwo cieplne w głąb gruntu).

Mechanizmy transferu energii za pośrednictwem promieniowania wraz procesami redystrybucji energii kształtują pogodę i klimat (wieloletnie statystyki pogody).



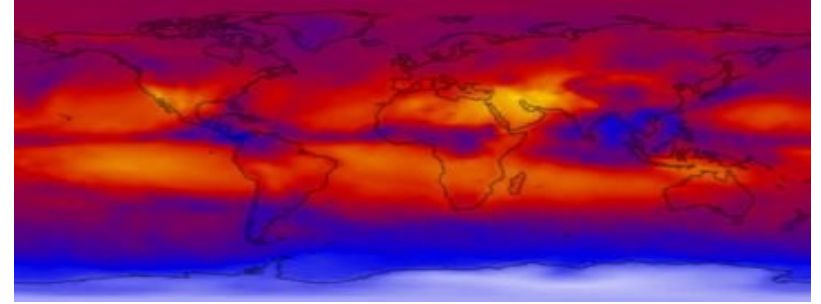
Bilans promieniowania słonecznego i podczerwonego w zależności od szerokości geograficznej. Tam gdzie występuje nadwyżka (Surplus) promieniowania słonecznego planeta ogrzewa się (średnio) wskutek pochłaniania promieniowania. Tam gdzie przeważa emisja promieniowania podczerwonego (Deficit), przeważa chłodzenie. *Cyrkulacje atmosferyczne i prądy morskie przenoszą ciepło od obszarów z nadwyżką bilansu promieniowania do obszarów z deficytem.* (rysunek: [Encyclopedia of The Earth](#))



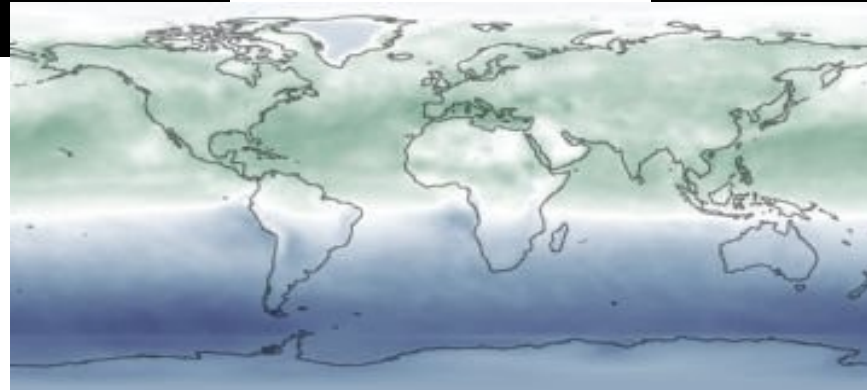
Reflected Solar Radiation ( $W/m^2$ )



Przykład:  
LIPIEC 2005  
- zima na półkuli  
południowej.



Emitted Heat Radiation ( $W/m^2$ )



Net Radiation ( $W/m^2$ )



# Problem rozkładu łądów:

## Zonal Mean Surface Temperature, 1970-2000

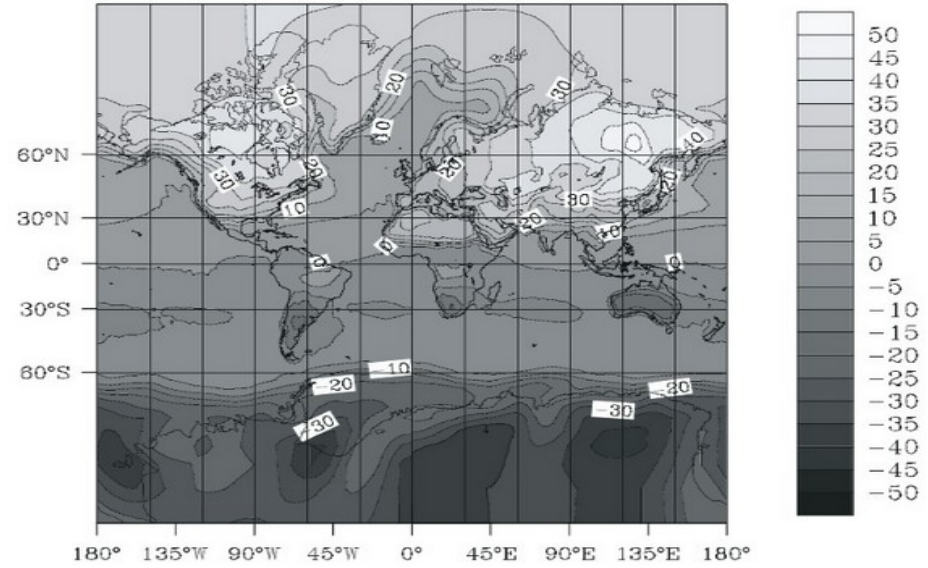
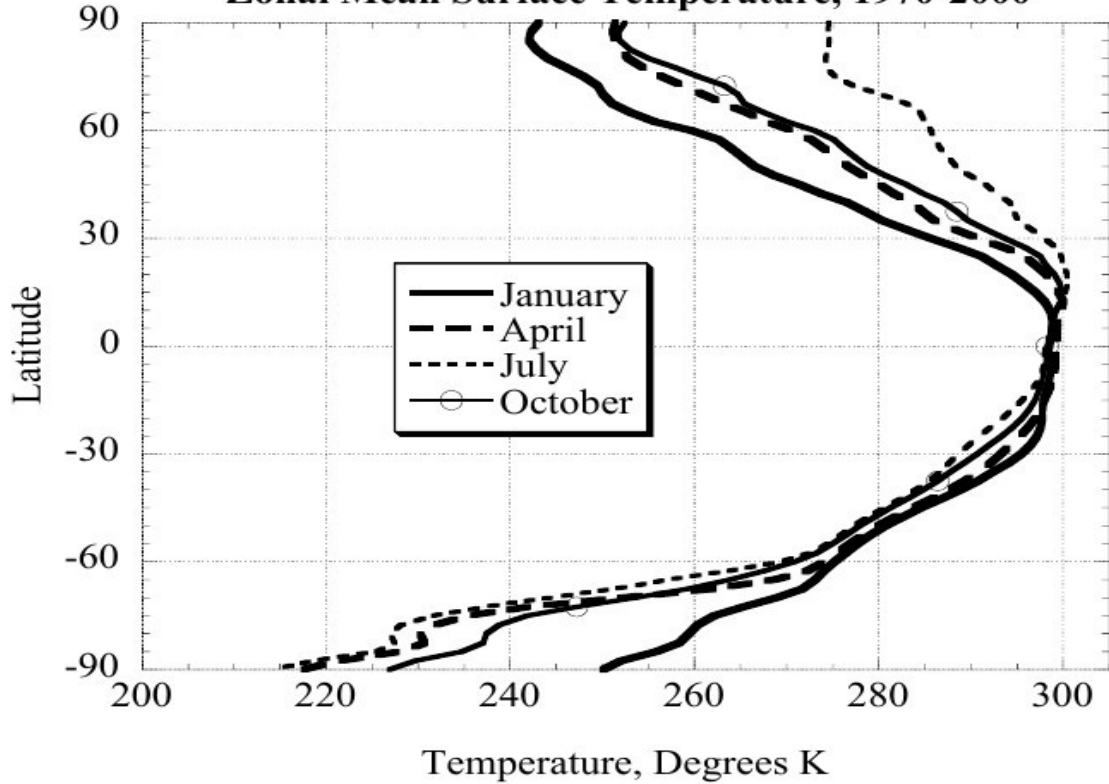


Figure 7.2: Map of July-January surface air temperature difference.

Observed zonal mean surface air temperatures for January, April, July and October. Computed from NCEP data for 1970-2000. (Pierrehumbert, „Principles of planetary climate”)

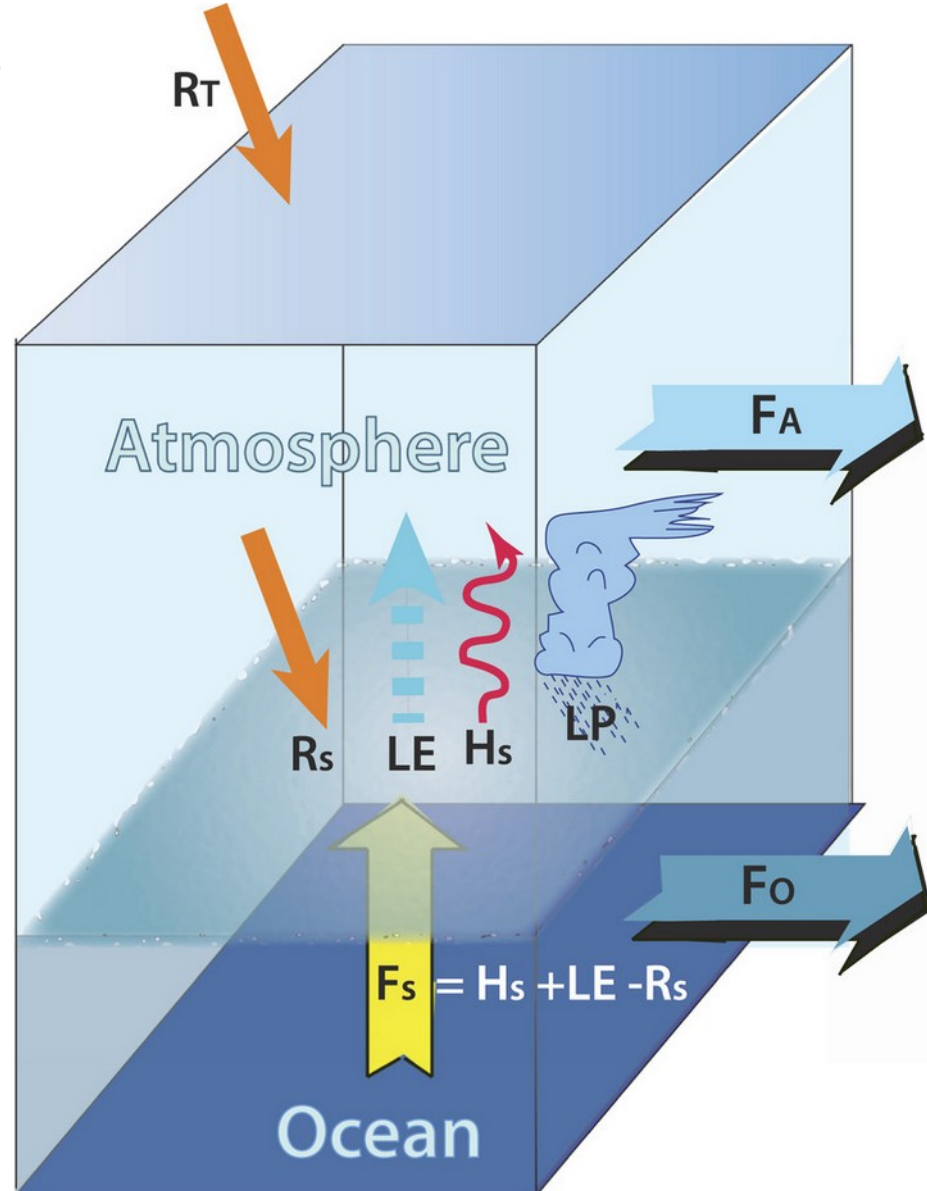
Ciepło jest przenoszone w atmosferze w postaci jawnej i utajonej. To ostatnie związane jest z przemianami fazowymi – parowaniem i skraplaniem wody.

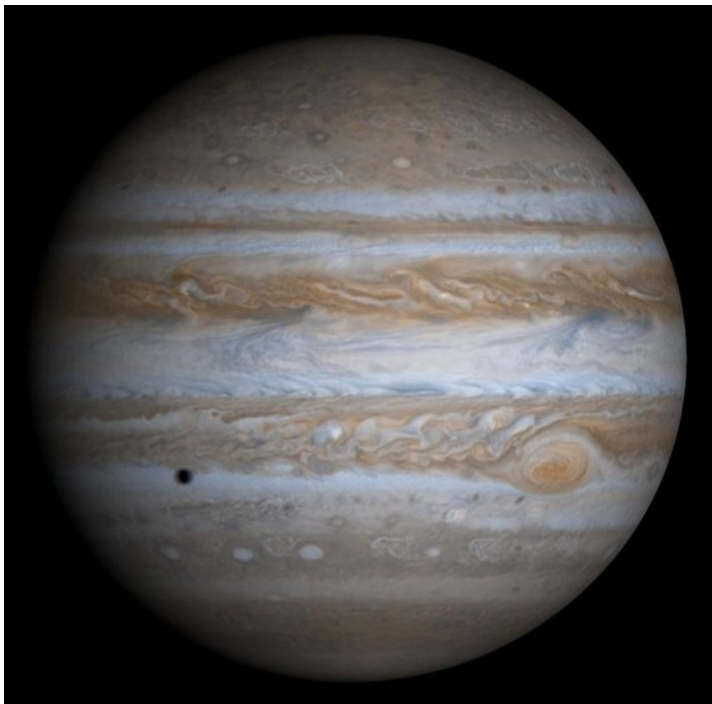
Wyparowanie 1 litra wody zabiera z powierzchni morza, roślin czy gruntu ~2500 KJ energii. Para wodna jest gazem, jednym ze składników powietrza, i jako taka jest unoszona przez cyrkulacje atmosferyczne.

Energia pobrana w procesie parowania podgrzewa powietrze w procesie kondensacji pary wodnej. Utajone ciepło parowania przenosi 20-25% całkowitego strumienia energii od szerokości podzwrotnikowych do podbiegunowych.

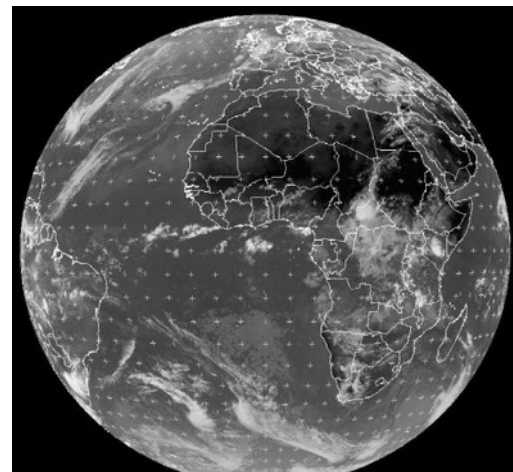
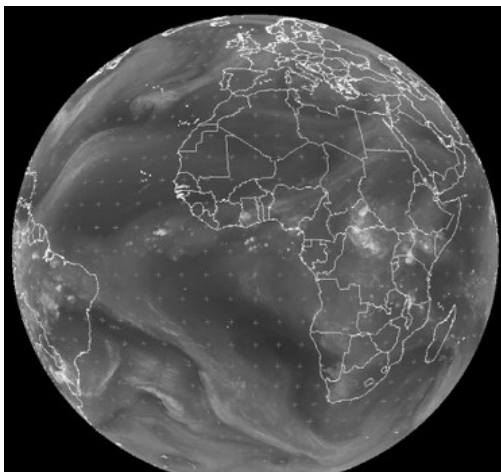
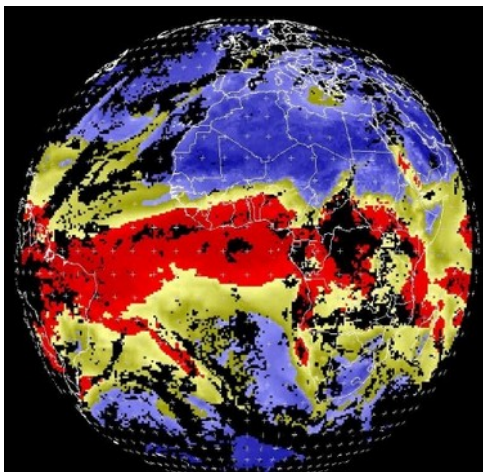
Nieco mniejsze są ilości ciepła przenoszone adwekcyjnie: przez prądy morskie (rzędu 15-20%) oraz przez ruch ciepłych mas powietrza w kierunku biegunów i chłodnych w kierunku równika. Procesy związane z absorpcją i emisją promieniowania (ochładzanie i ogrzewanie) oraz przenoszeniem ciepła w postaci jawnej i utajonej zachodzą w różnych skalach przestrzennych i czasowych:

- przy powierzchni Ziemi w przeciągu kilku minut (gdy chmura zasłania słońce przestaje doływać energia słoneczna),
- w cyklu dobowym (proszę obejrzeć sobie fluktuacje temperatury i strumienie energii słonecznej i promieniowania podczerwonego mierzone w naszym punkcie pomiarowym: <http://metobs.igf.fuw.edu.pl/> zakładka Radiometers),
- zmiany pogody w skali dni i tygodni,
- zmienność warunków atmosferycznych z roku na rok.



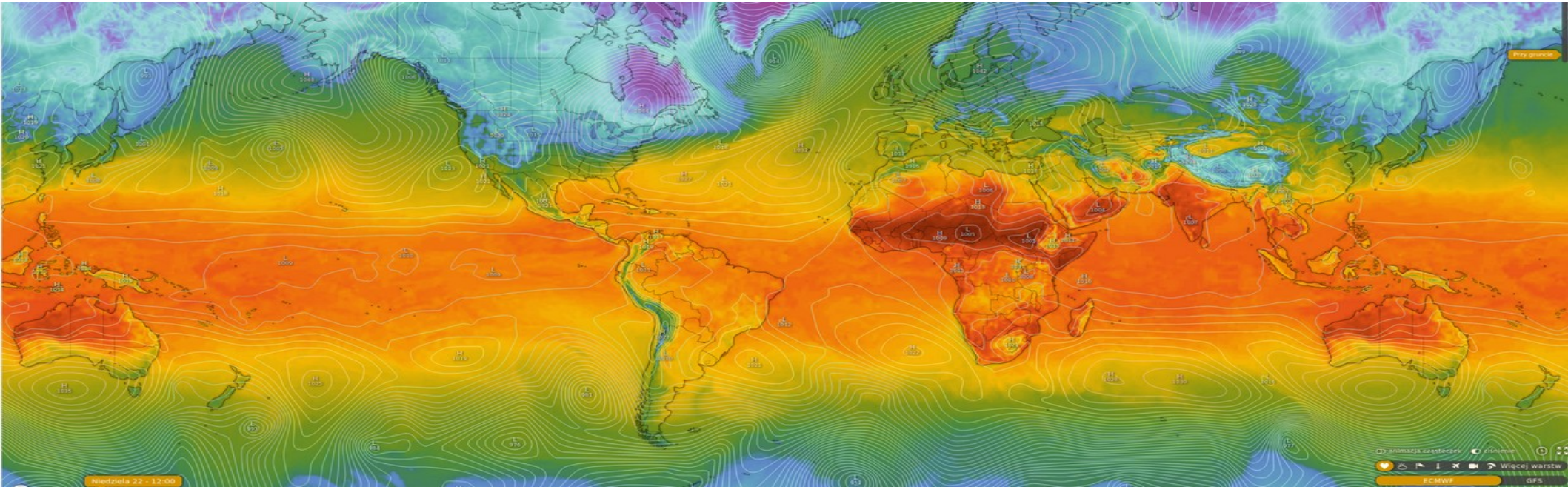


Atmosfery innych planet też mają komórki cyrkulacyjne, czasem lepiej widoczne niż w przypadku Ziemi.

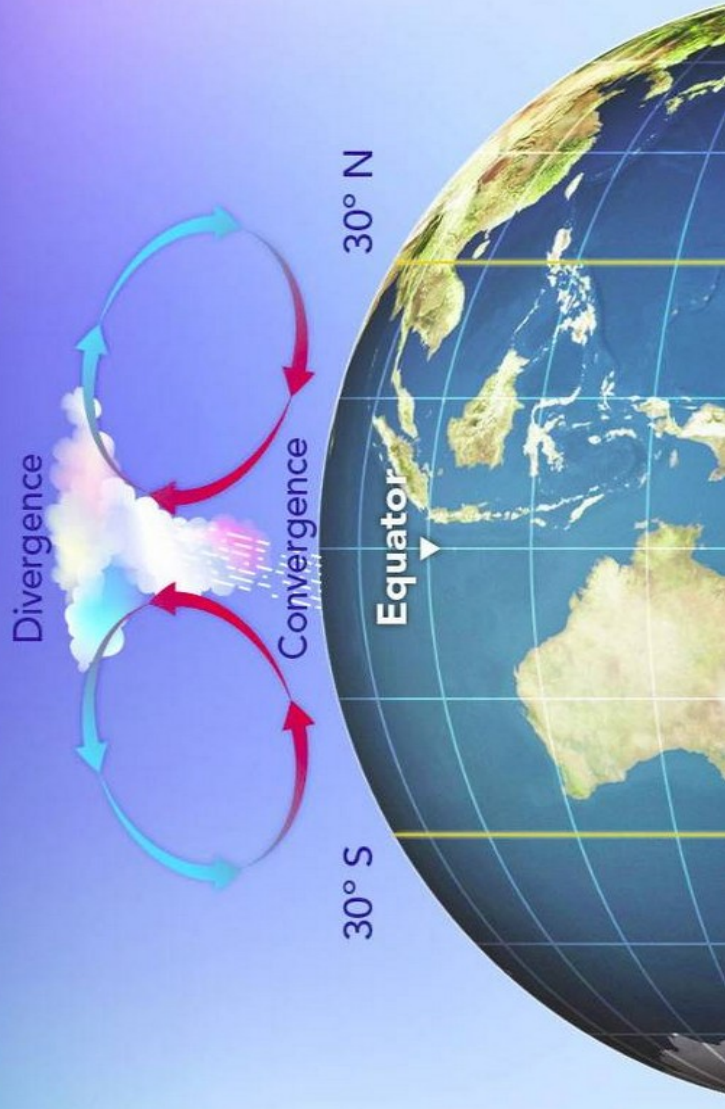




Z kolei w atmosferze na równiku nie ma wyżów i niżów!



<https://www.windy.com/>



Komórka Hadleya i strefa zbieżności równikowej.



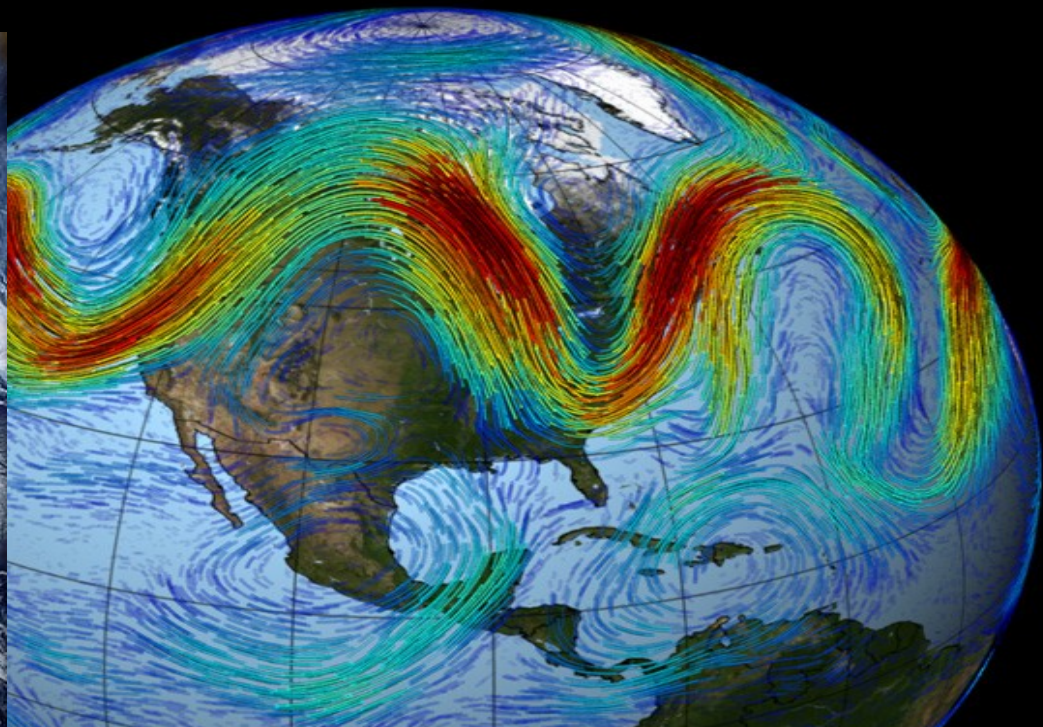
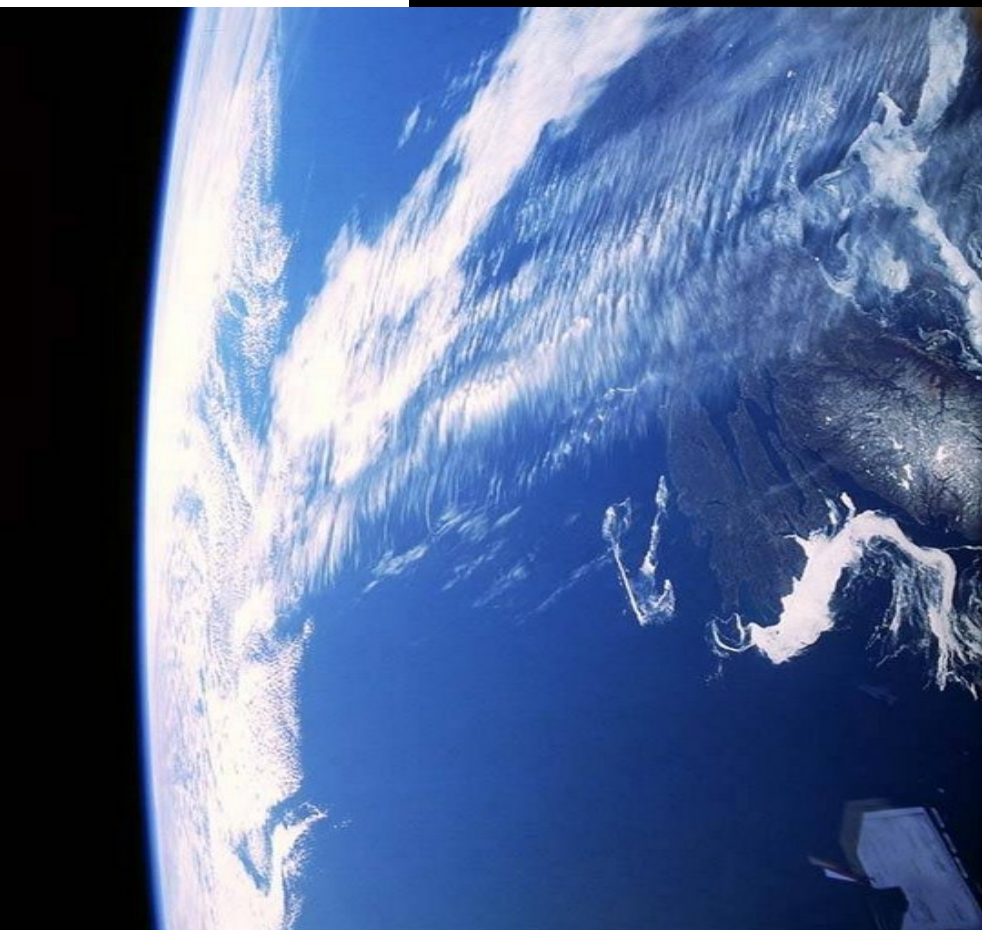
The Hadley circulation is driven mostly from the subtropics through cooling by transient baroclinic waves in storm tracks at mid-lats.

This is reason Hadley circulation varies with annual cycle.

The cooling drives the downward branch of the Hadley circulation, clears the skies to allow OLR to contribute, and allows solar radiation through to surface where it provides moisture through evaporation.

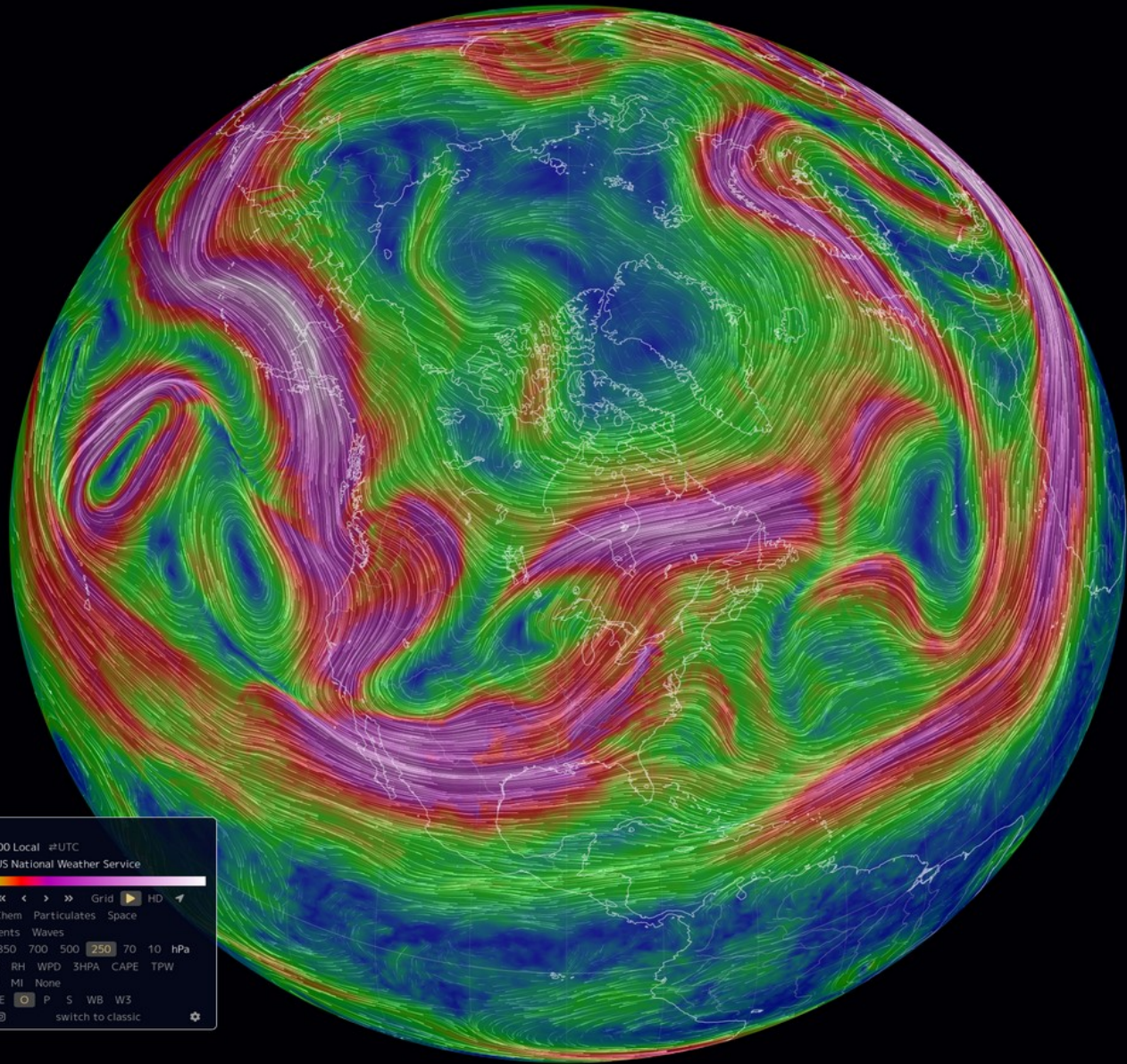
Tropical SSTs determine where the upward motion is favored, and the upward motion is driven by latent heating. But the moisture comes mostly from the subtropics, transported by the Hadley circulation itself.

The subtropical OLR and the tropical latent heating are secondary consequences of the more fundamental drivers.



Prądy strumieniowe (jet-streams).

W obszarze objętym zmienia się charakter transportu ciepła....



Data | Wind @ 250hPa  
Date | 2021-03-24 10:00 Local #UTC  
Source | GFS / NCEP / US National Weather Service  
Scale |

Control | Now Grid HD

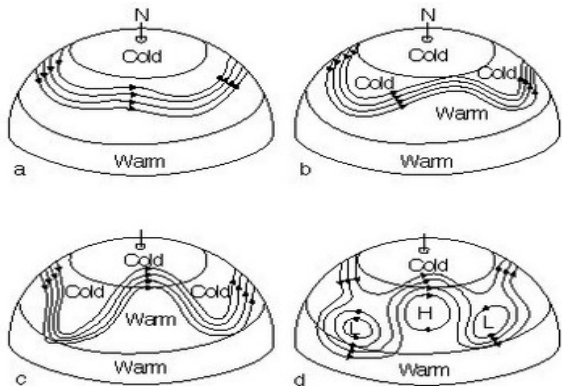
Mode | **Air** Ocean Chem Particulates Space

Animate | **Wind** Currents Waves

Height | Sfc 1000 850 700 500 **250** 70 10 hPa

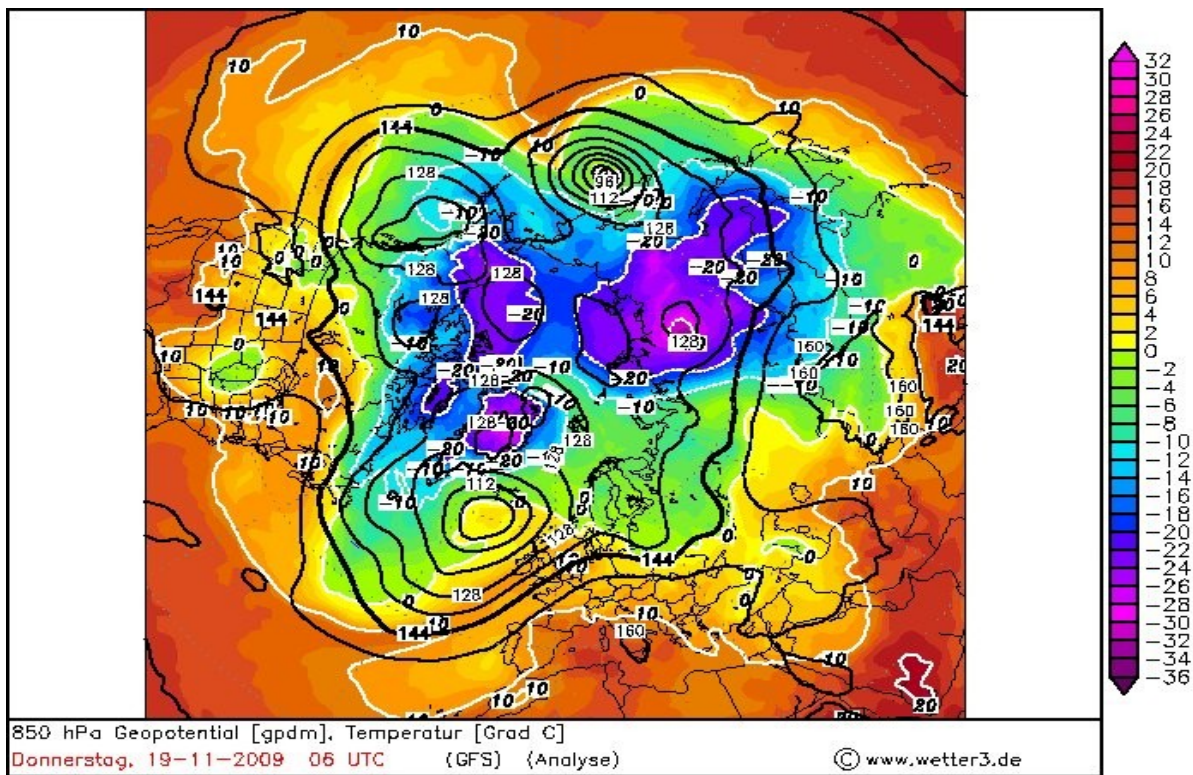
Overlay | **Wind** Temp RH WPD 3HPA CAPE TPW  
TCW MSLP MI None

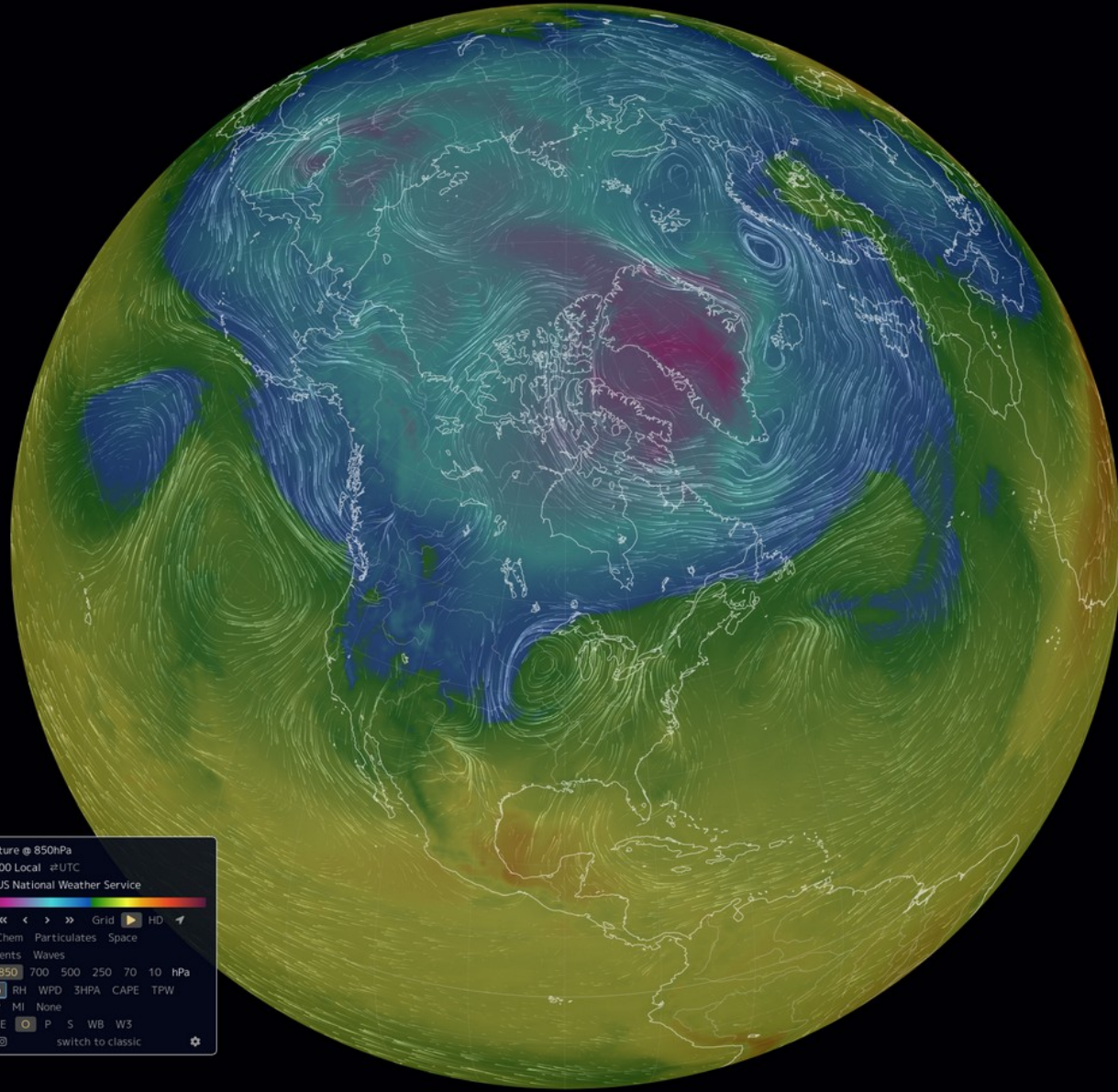
Projection | A CE E  P S WB W3  
about [switch to classic](#)













Tworzenie się układów wysokiego i niskiego ciśnienia: transport ciepła ku biegunom przez wiry o osi pionowej w umiarkowanych szerokościach geograficznych.

Przykład:  
rozkład temperatur na poziomie 850 hPa.  
Projekcja mapy od strony bieguna północnego.  
Należy zauważyć „języki” zimnego powietrza rozpełzające się wokół bieguna.





Data | Wind + Temperature @ 850hPa  
Date | 2021-03-24 09:00 Local @UTC  
Source | GFS / NCEP / US National Weather Service  
Scale |   
Control | Now    Grid  HD   
Mode | **Air** Ocean Chem Particulates Space  
Animate | **Wind** Currents Waves  
Height | Sfc 1000 **850** 700 500 250 70 10 hPa  
Overlay | Wind **Temp** RH WPD 3HPA CAPE TPW  
TCW MSLP MI None  
Projection | A CE E **O** P S WB W3  
about     switch to classic 

### 1. In tropics:

Global monsoon TE transport is small residual of DSE and LE.

Solar radiation in clear skies heats ocean, cooled by evaporation:  
moisture transported into upward branch, feeds DSE.

Circulation that provides transport, supplies LE.

### 2. In extratropics:

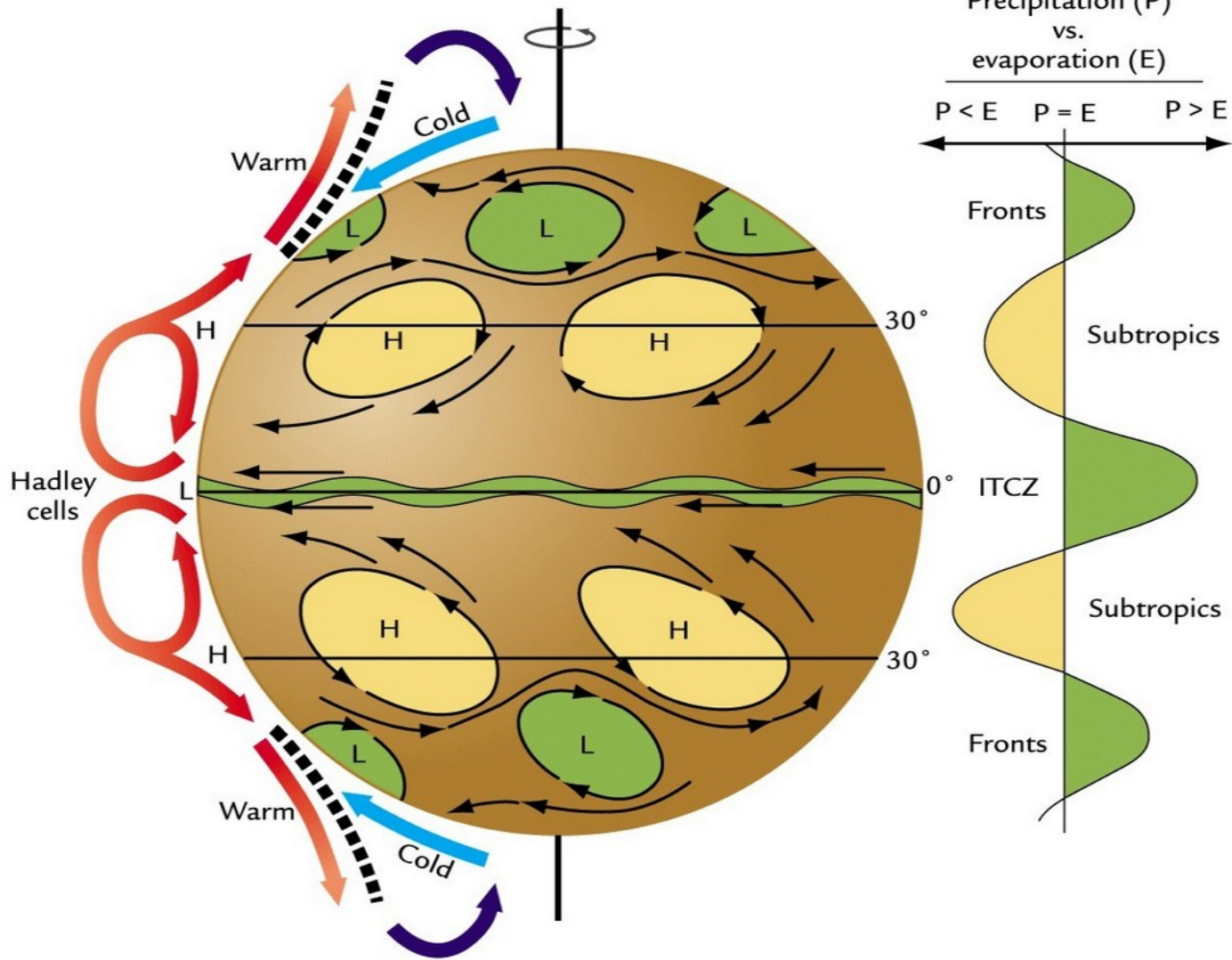
transient baroclinic waves LE and DSE additive, moisture more prominent in low-  
mid- latitudes.

### 3. Subtropics:

substantial cooling by baroclinic waves coordinated with Hadley circulation  
adiabatic warming; and upward motion near equator.

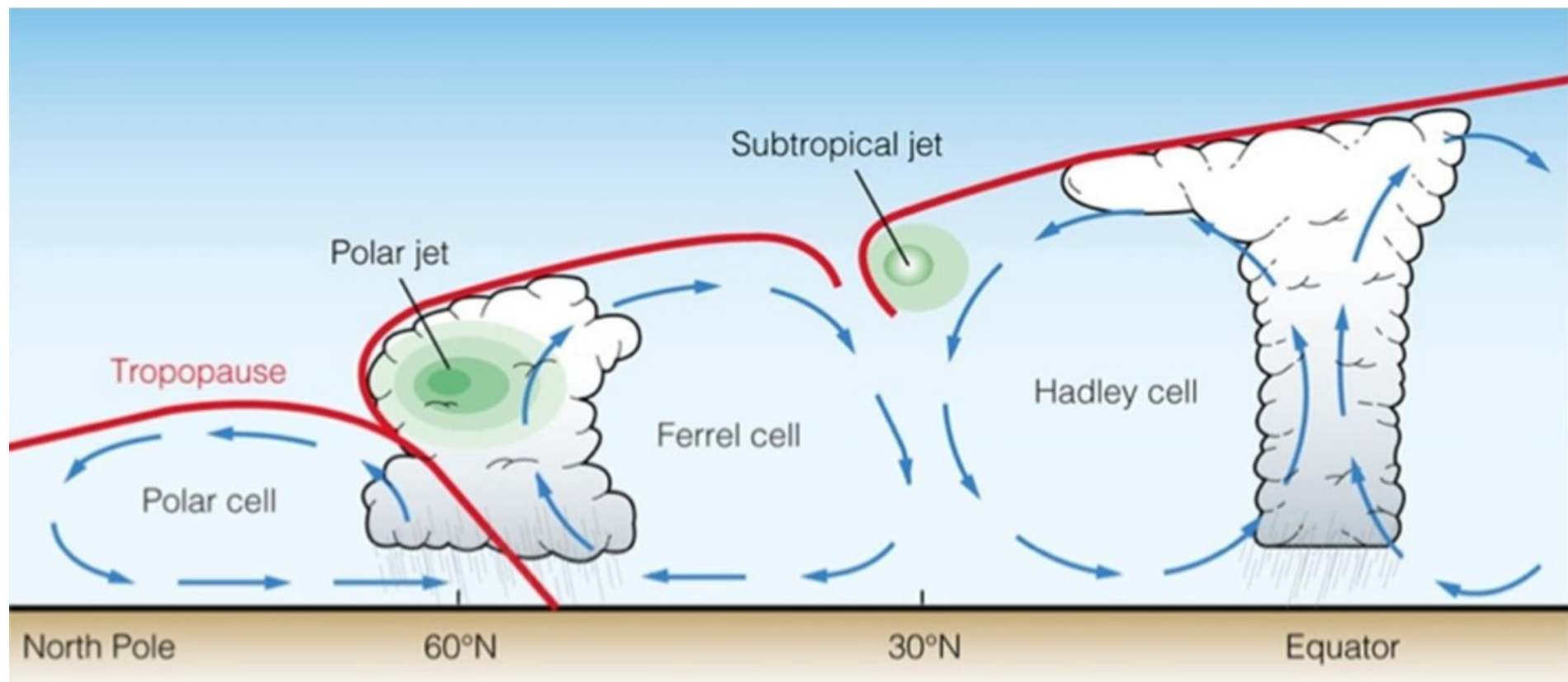
I.e. Hadley circulation and mid-latitude storm tracks directly linked, seamless total  
energy transport on seasonal time scales





Ogólna cyrkulacja atmosfery: efektywny transport ciepła od równika ku biegunom.

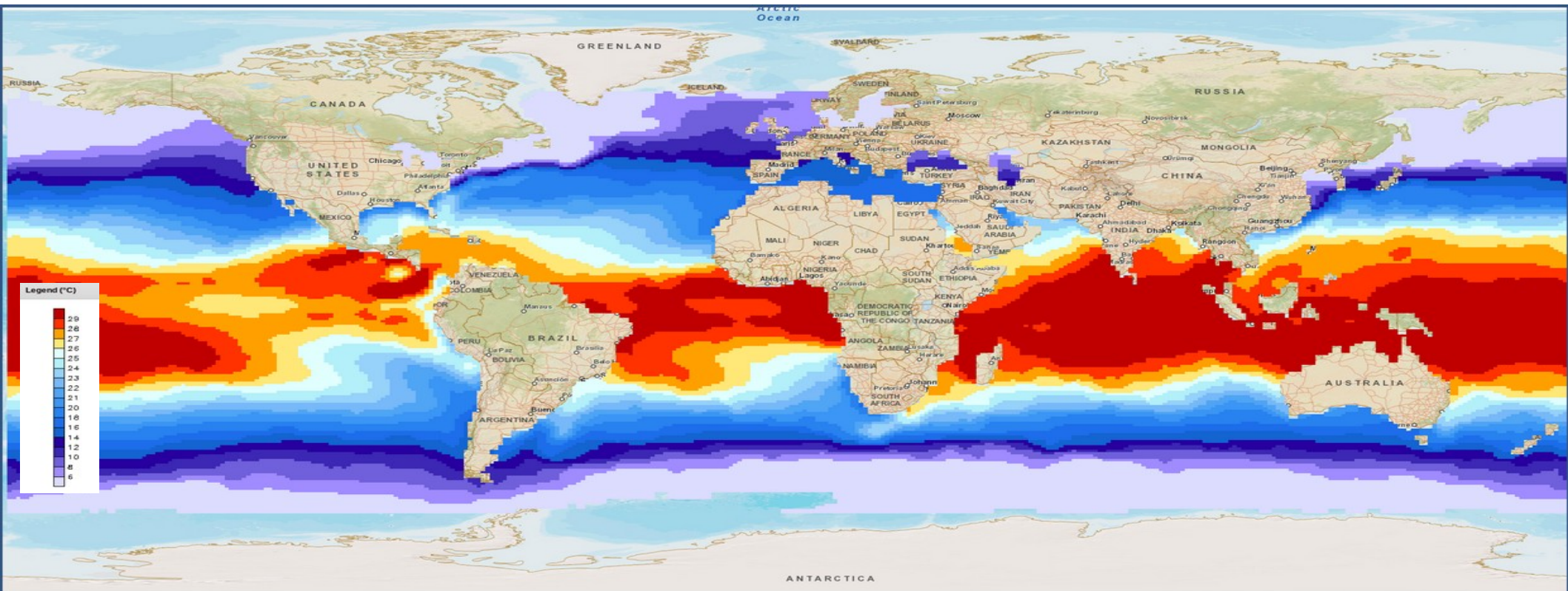
Diagram po prawej stronie pokazuje schematycznie efekty ciepła utajonego.



**Fig. 1 Global atmospheric circulation.** *Credit: Geophile pages.*

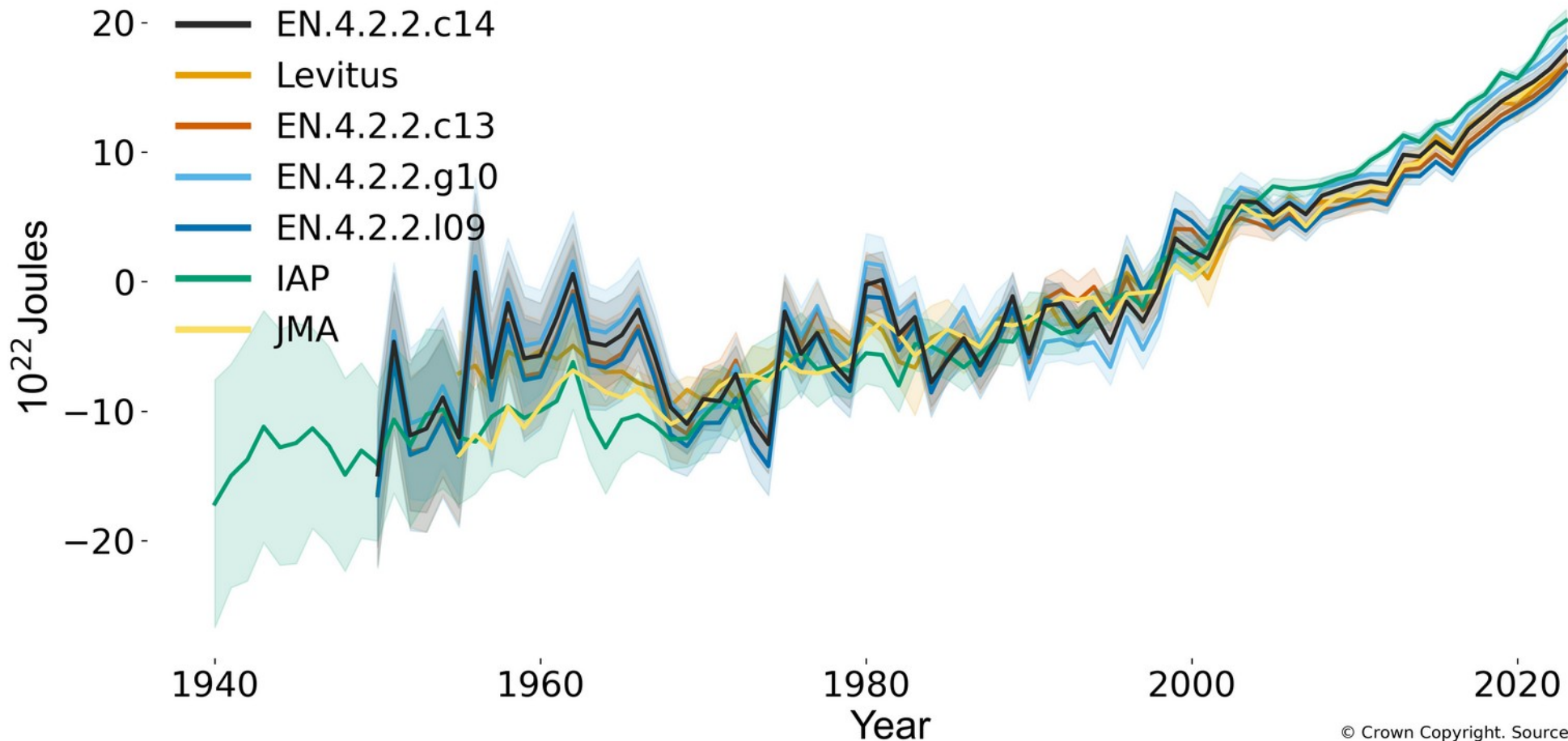
Temperatura powierzchni morza -SST (Sea Surface Temperature) – średnia tygodniowa, 04-11/03/2020.

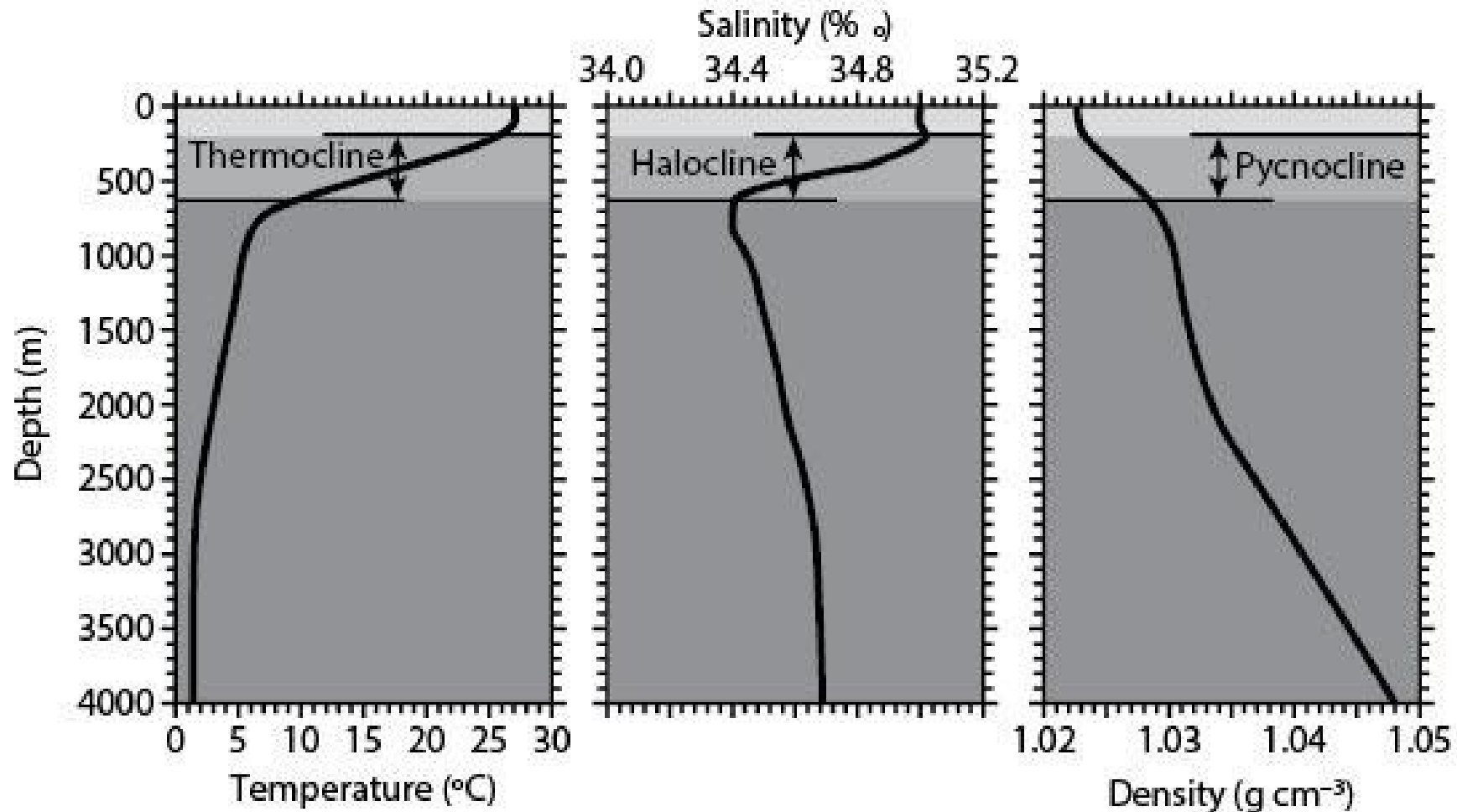
Widać znaczne odchylenia od strefowości.

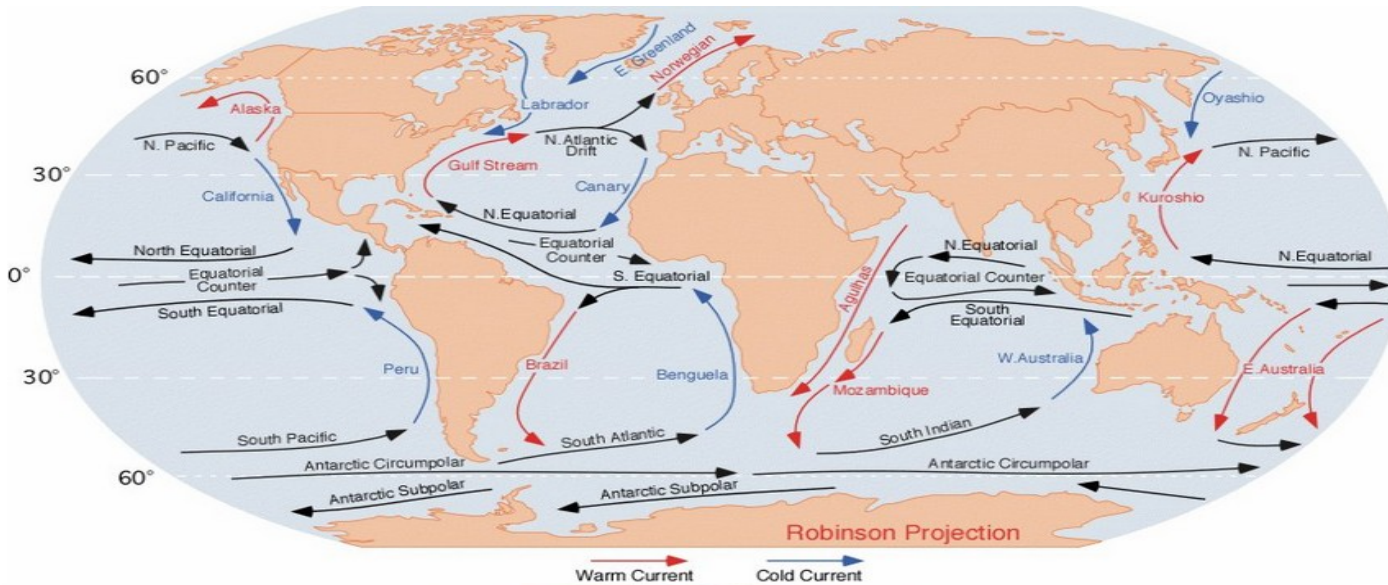


[https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GIS/map\\_viewer/cpcgis.swf](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GIS/map_viewer/cpcgis.swf)

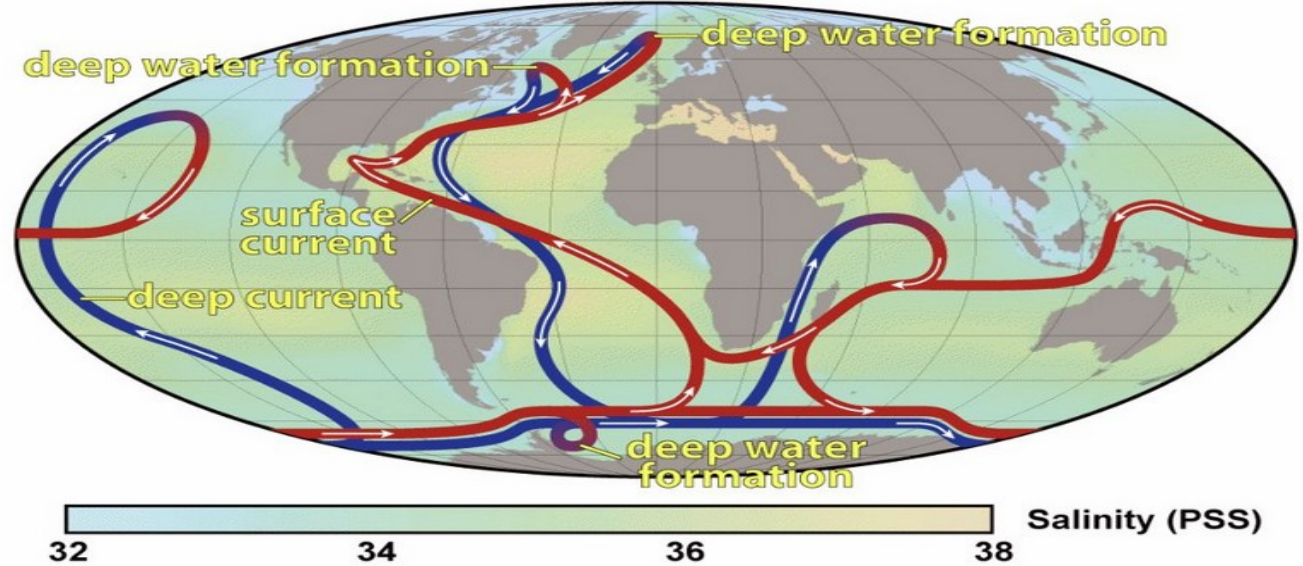
### Global ocean heat content difference from 1981-2010 ( $10^{22}$ Joules)



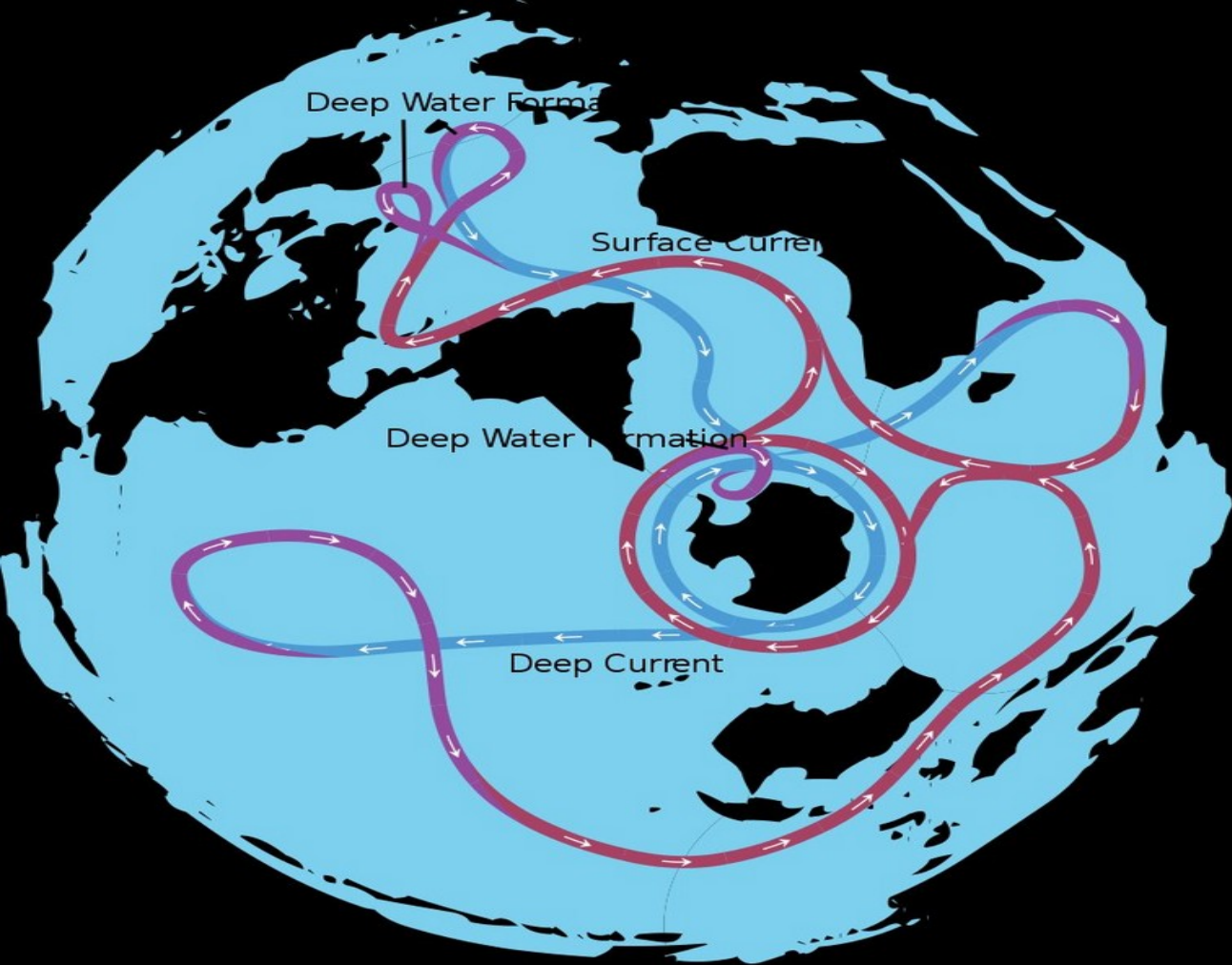




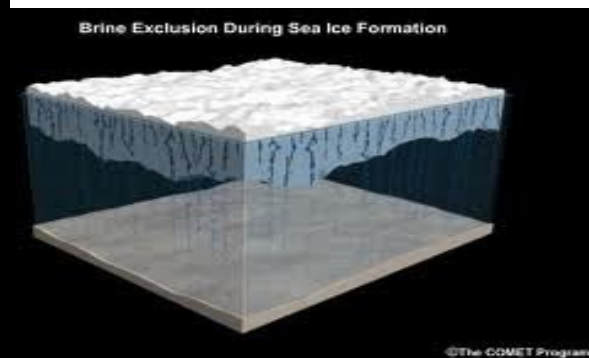
Powierzchniowe prądy morskie. Kolorami oznaczono względną temperaturę wody: czerwień - prąd ciepły, błękit - prąd chłodny.



Cyrkulacja termohalinowa w oceanach, wpływająca na temperaturę i zasolenie wody w poszczególnych rejonach. Czerwonymi liniami oznaczono powierzchniowe prądy morskie (surface current), kształtowane przez wiatry. W miarę zbliżania się do biegunów, woda niesiona prądami powierzchniowymi stygnie i zaczyna opadać na dno (deep water formation). Różnicowanie w temperaturach i zasoleniu napędza głębokie prądy oceaniczne (niebieskie linie, deep currents).



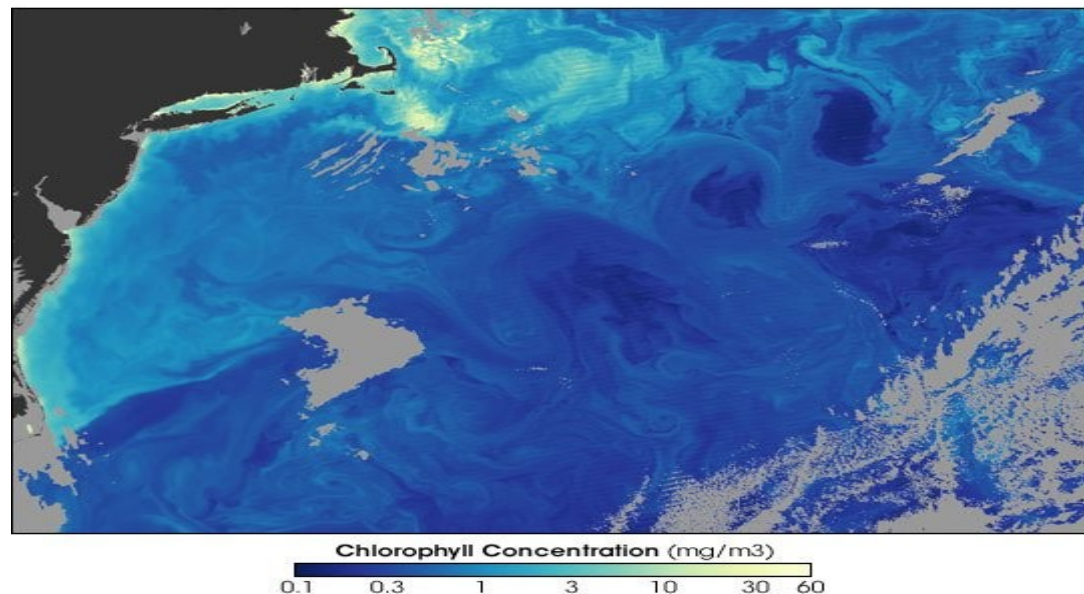
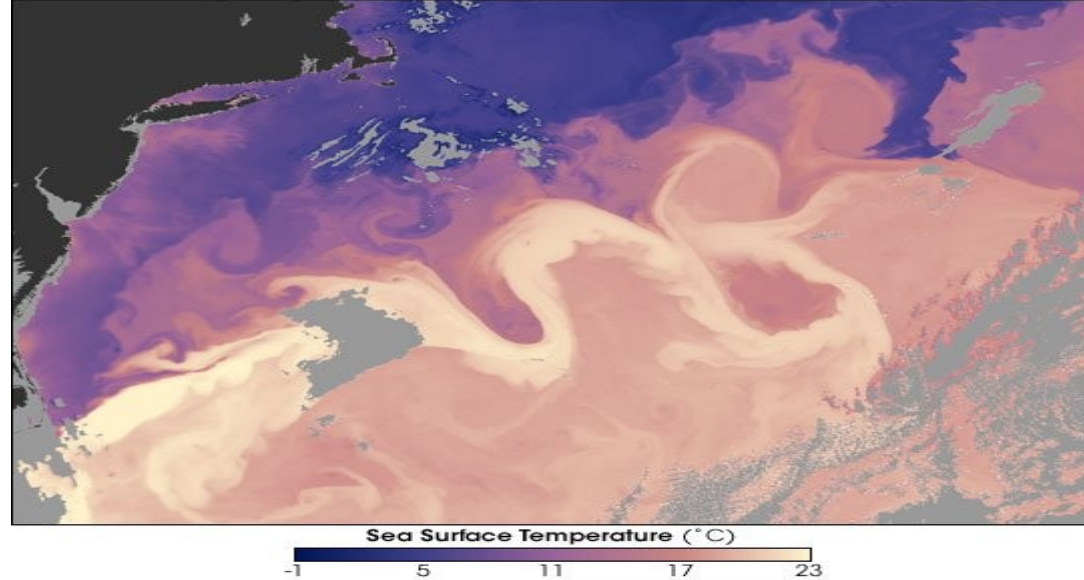
Cyrkulacja termohalinowa: „wielka pętla”



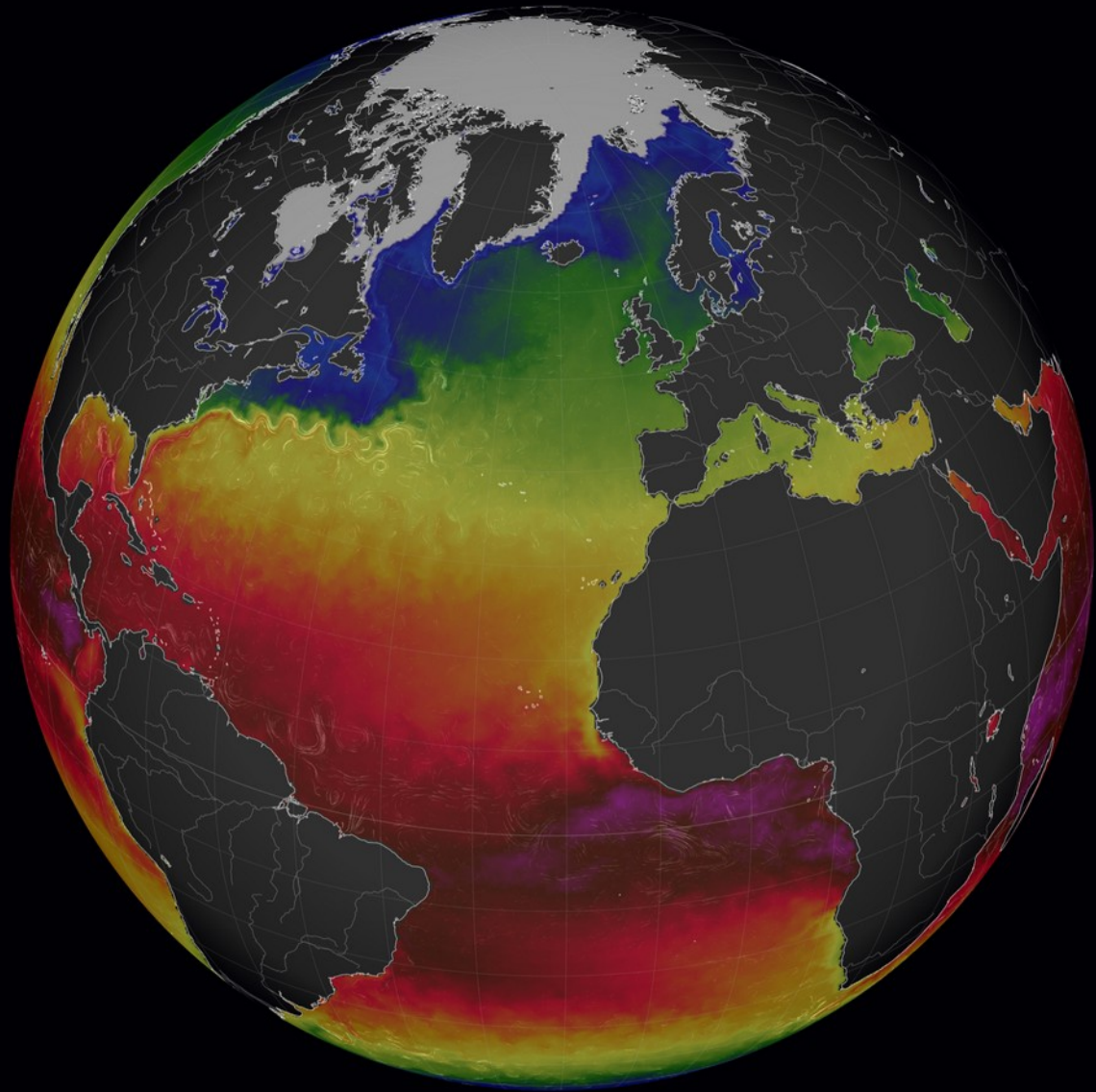
Powstawanie solanki podczas zamarzania wody morskiej

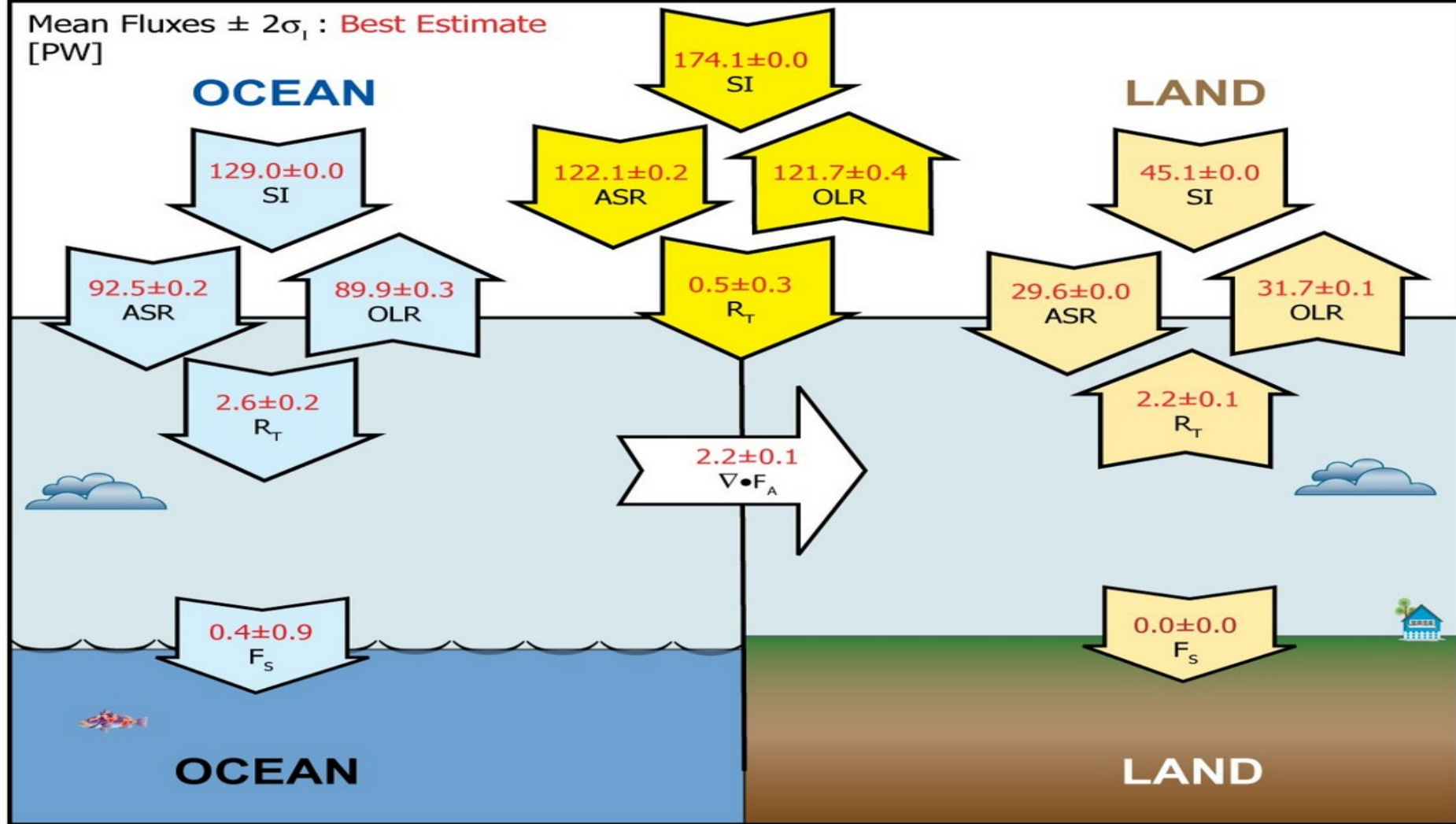
## Prąd zatokowy - Golsztröm

- widać  
cyrkulacje  
inercyjne  
(mniejsze  
pętle)









CERES- ocena strumieni energii na szczycie atmosfery (PW) globalnie oraz nad oceanem (lewy panel) i nad lądem (prawy panel).

Fasullo and Trenberth, 2008a.

GFS Precipitable Water (kg m<sup>-2</sup>), 2m T 0°C (white)

1-day Avg | Tue, Apr 02, 2024

ClimateReanalyzer.org

Climate Change Institute | University of Maine

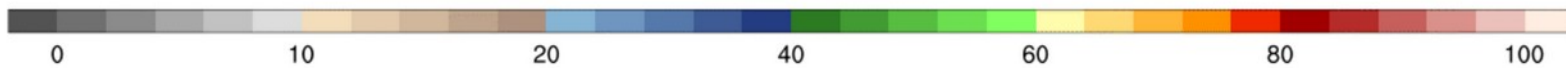
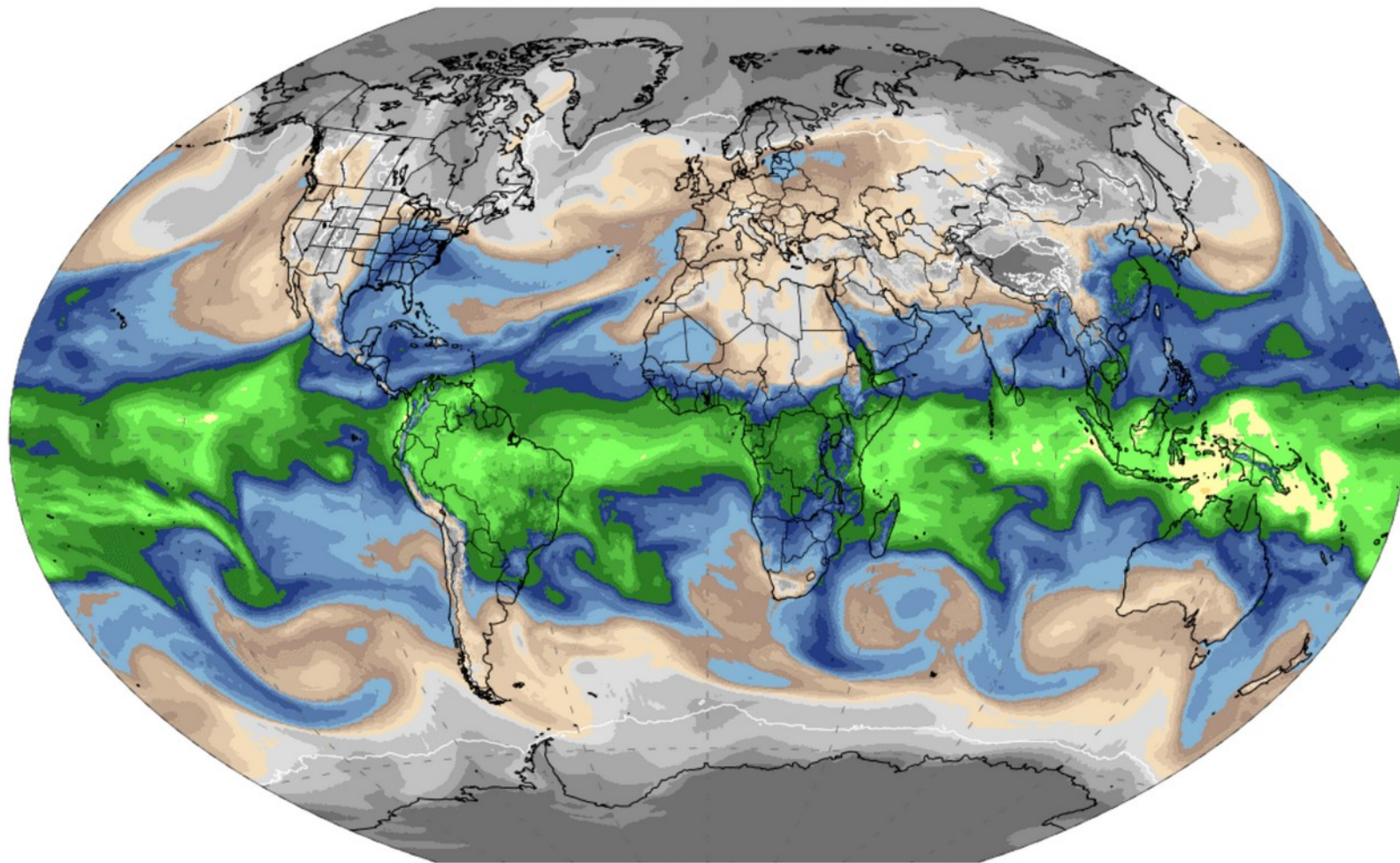
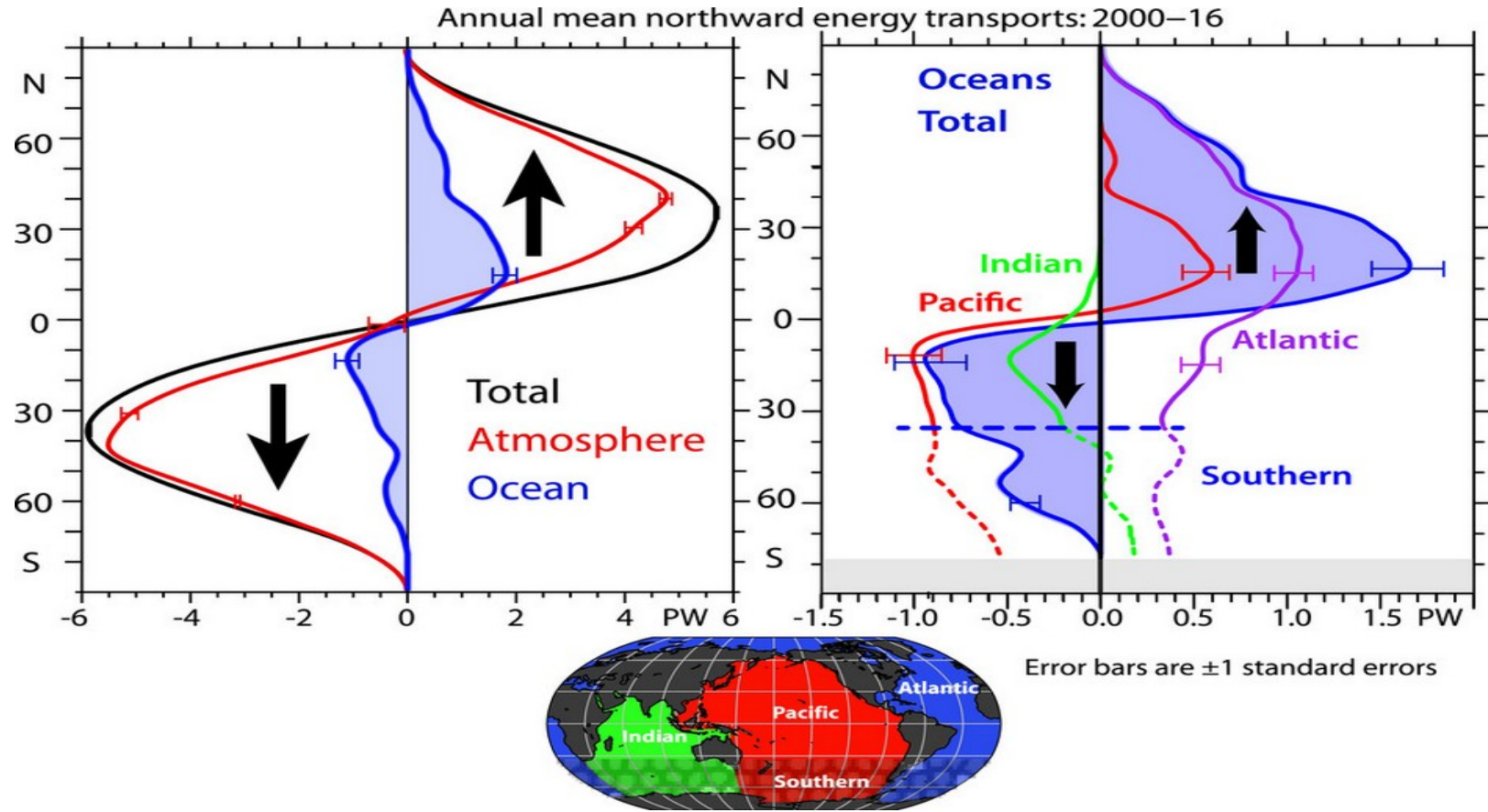


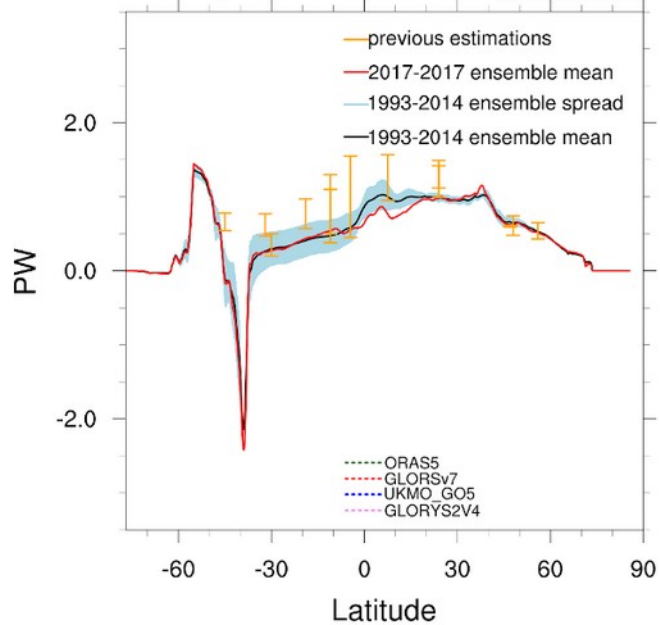
Fig. 3.



Zonal-mean annual long-term average meridional transports in PW for 2000–16. (left) Those inferred from TOA radiation (black), within the atmosphere from ERA-I (red), and the residual for the oceans (blue). (right) The breakdown for the oceans for the Atlantic (purple), Pacific (red), and Indian (green) and combined for the Southern Ocean south of 35°S (blue) in PW. (bottom) The domains used and the standard errors are  $1\sigma$ . The ITF transport is not included here.  
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0872.1>

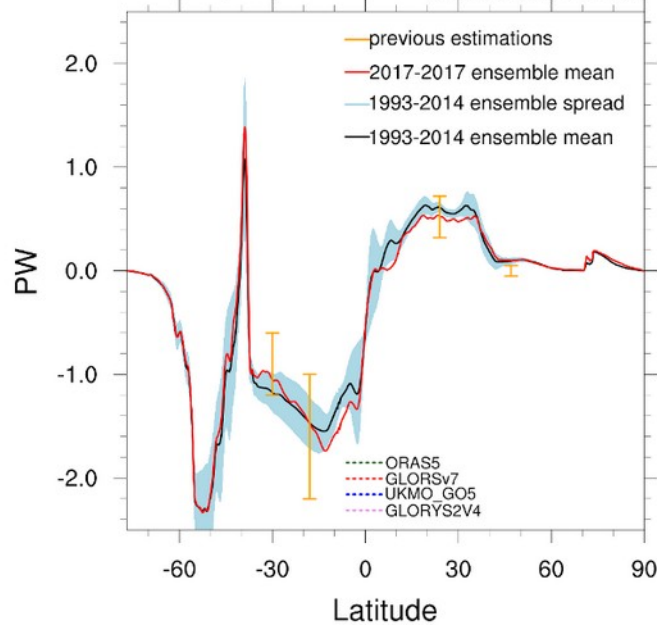
### GREP Meridional Heat Transport

reference period: 1993-2014 Ocean: Atlantic



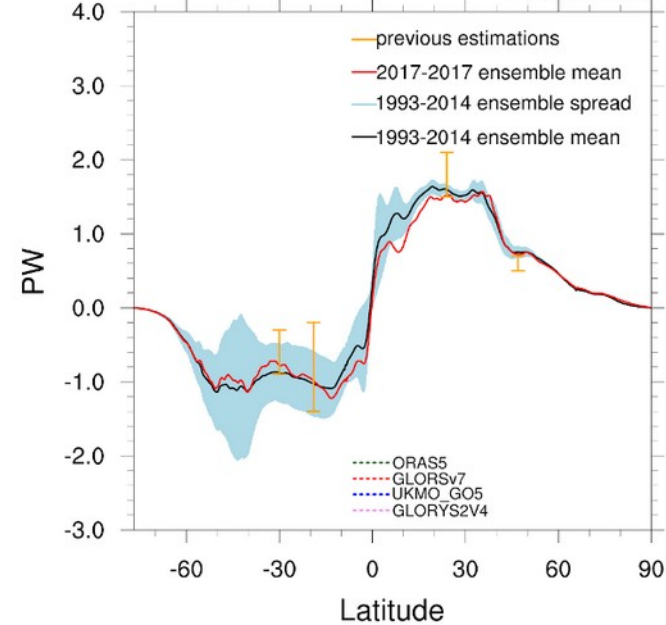
### GREP Meridional Heat Transport

reference period: 1993-2014 Ocean: Pacific+Indian



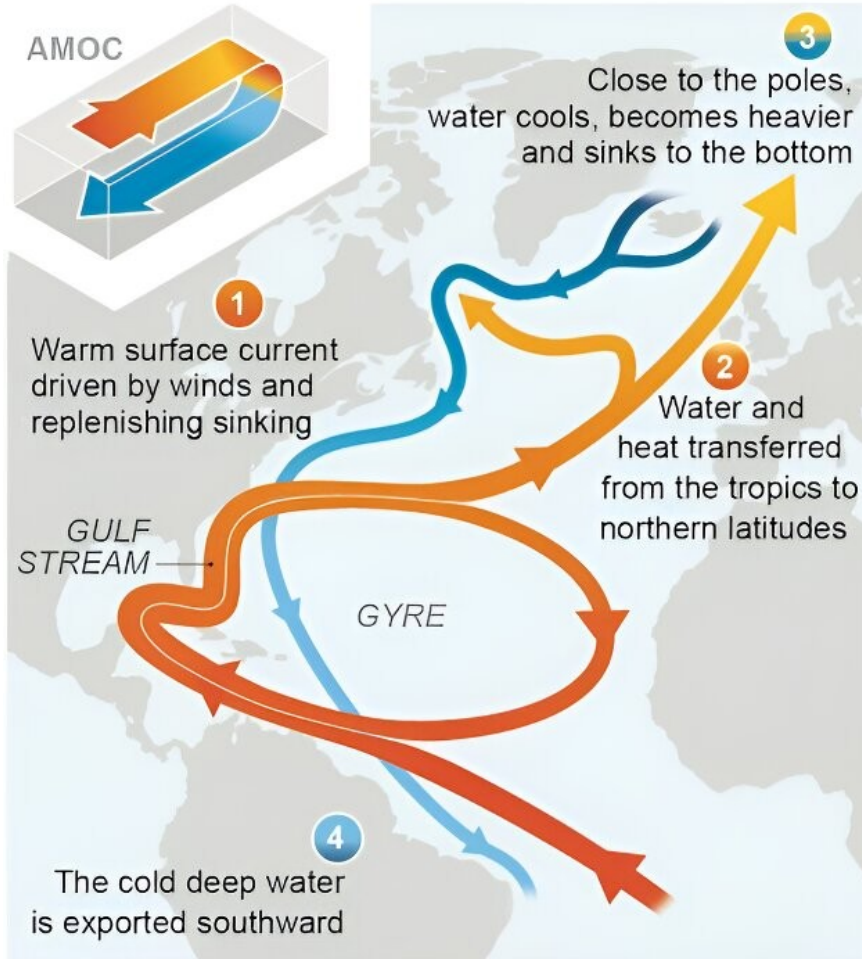
### GREP Meridional Heat Transport

reference period: 1993-2014 Ocean: Global



## Today

The Gulf Stream is part of both the horizontal, subtropical gyre and the vertical, Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)



## In a warmer world

Climate change weakens the AMOC, which slows the Gulf Stream down

