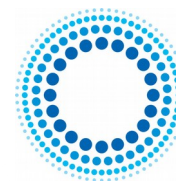


# Mechanizmy klimatyczne: globalne ocieplenie okiem fizyka

Szymon P. Malinowski

Wydział Fizyki UW



**NAUKA O KLIMACIE**  
DLA SCEPTYCZNYCH

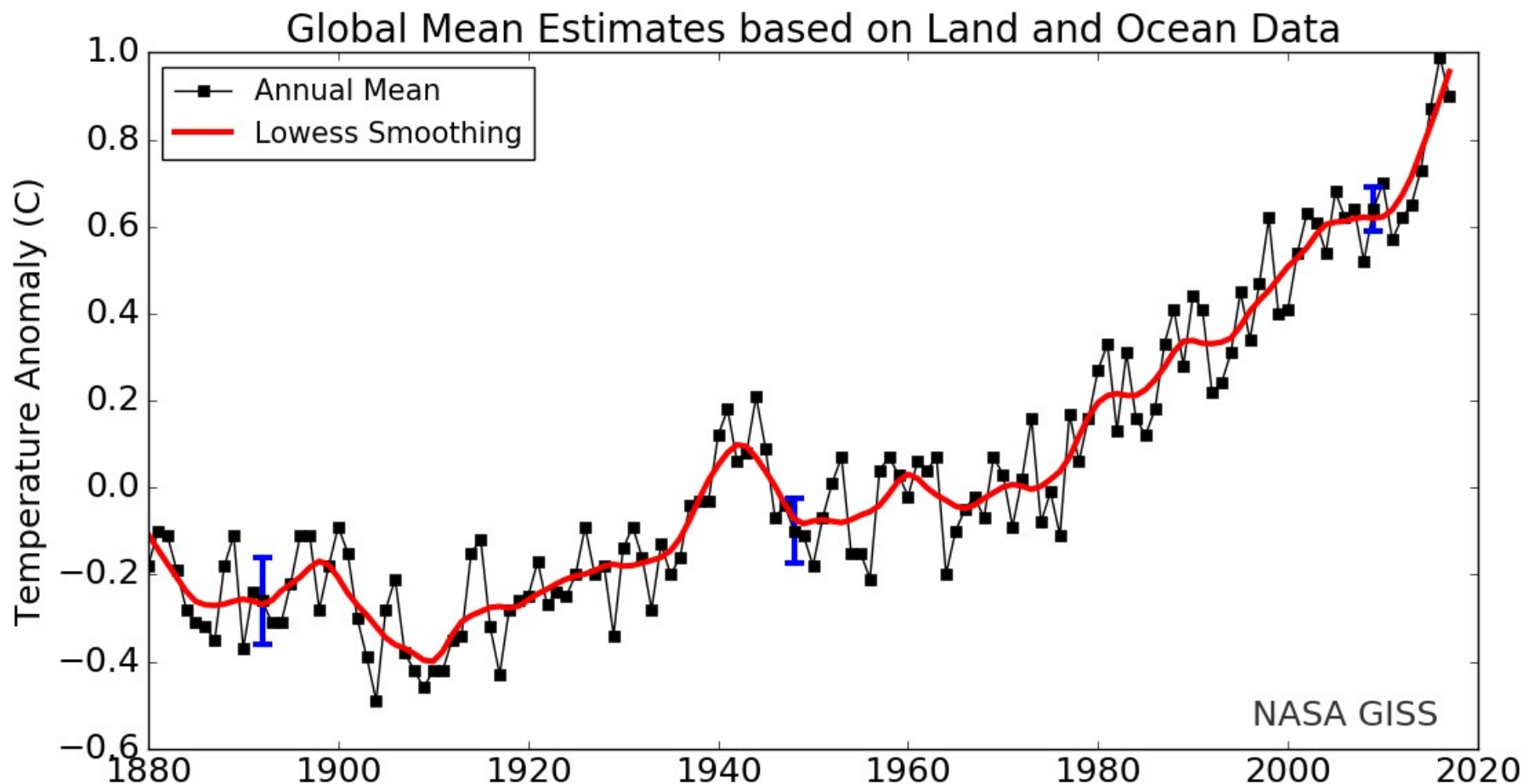


UNIwersytet  
Warszawski

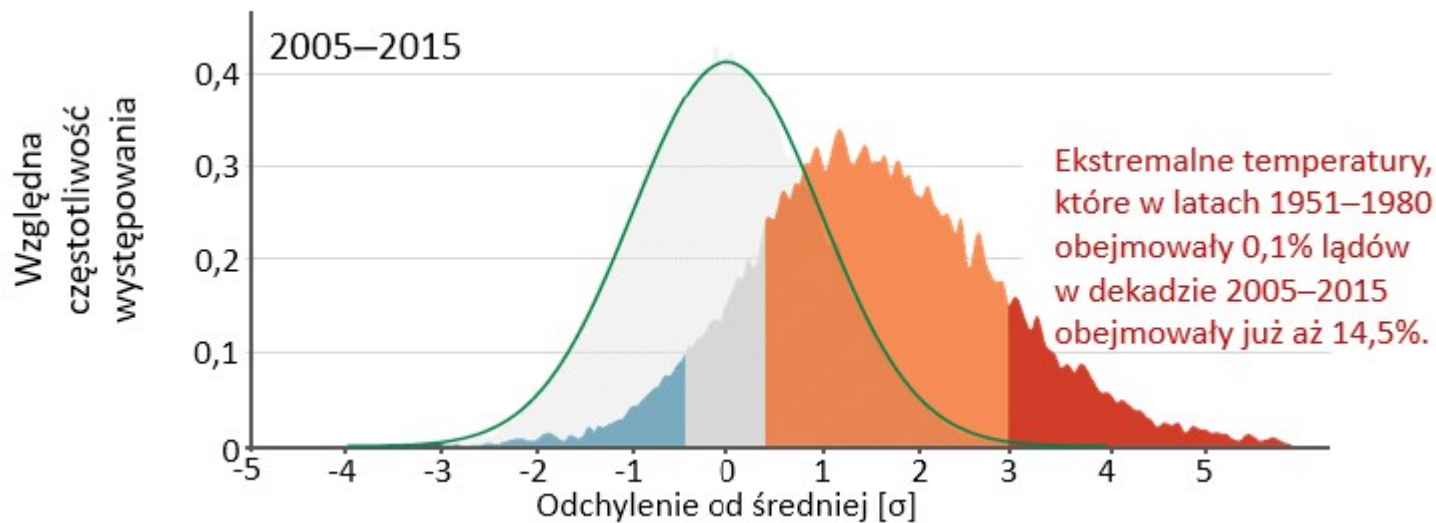
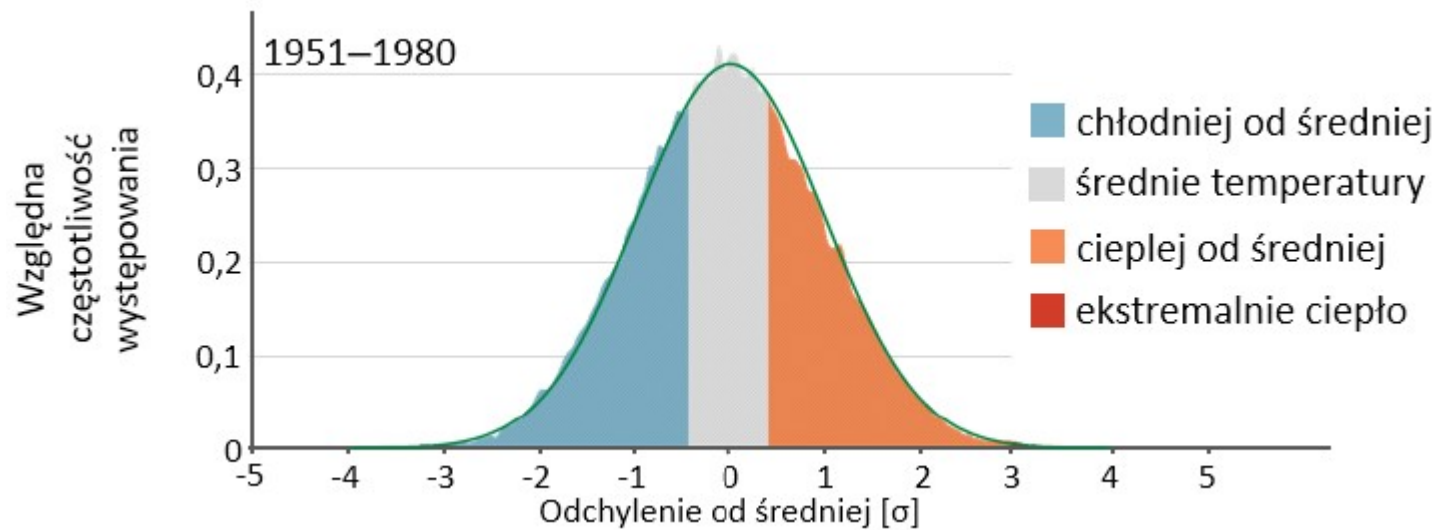
2018-11-15

[http://pl.wikipedia.org/wiki/Globalne\\_ocieplenie](http://pl.wikipedia.org/wiki/Globalne_ocieplenie)

Globalne ocieplenie – obserwowane od połowy XX wieku podwyższenie średniej temperatury atmosfery przy powierzchni ziemi i oceanów oraz przewidywane ocieplenie w przyszłości.



Istotą problemu związanego z wyjaśnieniem globalnego ocieplenia było ustalenie w jakim stopniu na to zjawisko wpływa działalność człowieka, a w jakim czynniki naturalne.



Częstotliwość występowania (oś y) lokalnych odchyłeń temperatury latem na lądach półkuli północnej względem okresu bazowego 1951–1980 i w latach 2005-2015. Na osi x odchylenia standardowe dla rozkładu Gaussa odpowiadającego rozkładowi temperatur z okresu bazowego. Obszar pod każdą krzywą wynosi 100%. Temperatury są podzielone na trzy kategorie: odpowiadające 1/3 najchłodniejszych przypadków w okresie bazowym (kolor niebieski), 1/3 przeciętnych (kolor szary) i 1/3 najcieplejszych (kolor pomarańczowy i czerwony).

# Pierwsza zasada termodynamiki

Istnieje funkcja stanu, zwana energią wewnętrzną, taka, że

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$$

gdzie  $\Delta Q$  jest ciepłem dostarczonym do układu a  $\Delta W$  jest pracą wykonaną przez układ.

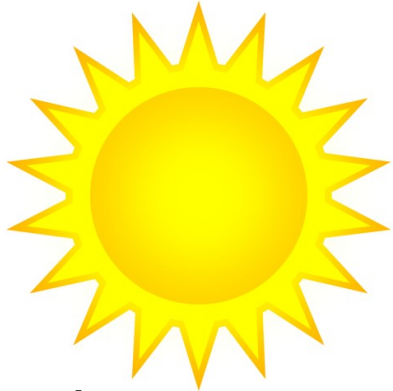
Dla sytuacji gdy  $\Delta W=0$  zachodzi:

$$\Delta U = \Delta Q = C \cdot \Delta T$$

gdzie  $C$  to pojemność cieplna układu

Przykład:

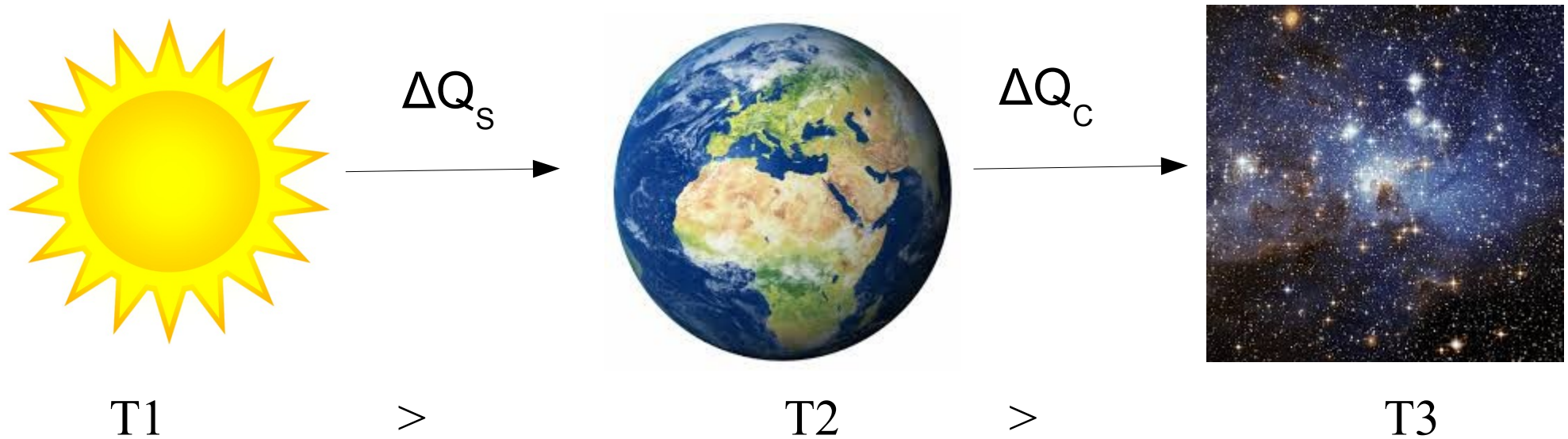
Słońce dostarcza ciepło Ziemi tak że rośnie jej energia.



Ziemia ma pewną pojemność cieplną, w efekcie rośnie jej temperatura.

Bez końca?





Aby temperatura Ziemi była stała  
strumień ciepła otrzymywanego przez Ziemię od Słońca  $\Delta Q_s$  ( $/\Delta t$ )  
musi być równoważony  
strumieniem ciepła oddawanym przez Ziemię w kosmos  $\Delta Q_c$  ( $/\Delta t$ ).

Temperatura Ziemi rośnie, gdy  $\Delta Q_s > \Delta Q_c$

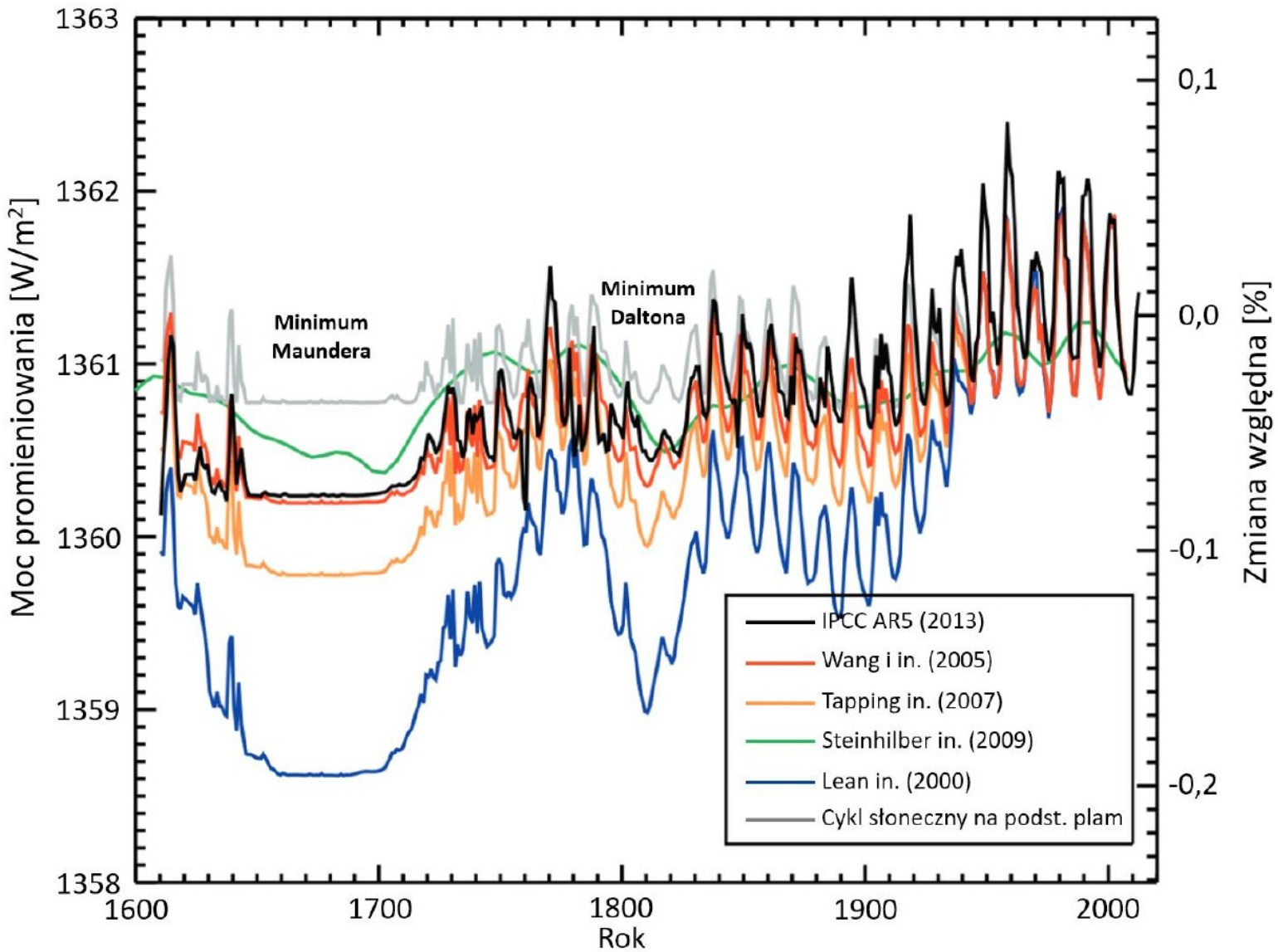
Temperatura Ziemi spada, gdy  $\Delta Q_s < \Delta Q_c$

## **Wymuszanie radiacyjne** (ang. *Radiative Forcing*, RF).

Różnica między strumieniem energii słonecznej zabsorbowanej przez planetę a strumieniem energii promieniowania termicznego planety emitowanego w kosmos po dostosowaniu się temperatur w atmosferze, wilgotności i chmur, czyli bardzo szybko (dni i tygodnie) działających elementów systemu klimatycznego, ale zanim nastąpi reakcja wolnozmiennych (dziesiątki lat i więcej) elementów systemu klimatycznego (np. wzrośnie temperatura oceanu) .

Wymuszanie dodatnie związane jest ze wzrostem, a ujemne – ze spadkiem średniej temperatury powierzchni Ziemi.

# Jak zmieniał się strumień energii słonecznej?



Porównanie najnowszych rekonstrukcji zmienności stałej słonecznej od 1600 roku (Kopp 2014).

# Stan równowagi: Temperatura Efektywna Ziemi

R- promień,

S- stała słoneczna,

A- albedo,

$E_S$  - energia absorbowana:

$$E_S = (1-A)S\pi R^2.$$

Założenie: ciało doskonale czarne.

$T_E$  - temperatura emisyjna

$E_P$  - emisja energii w podczerwieni:

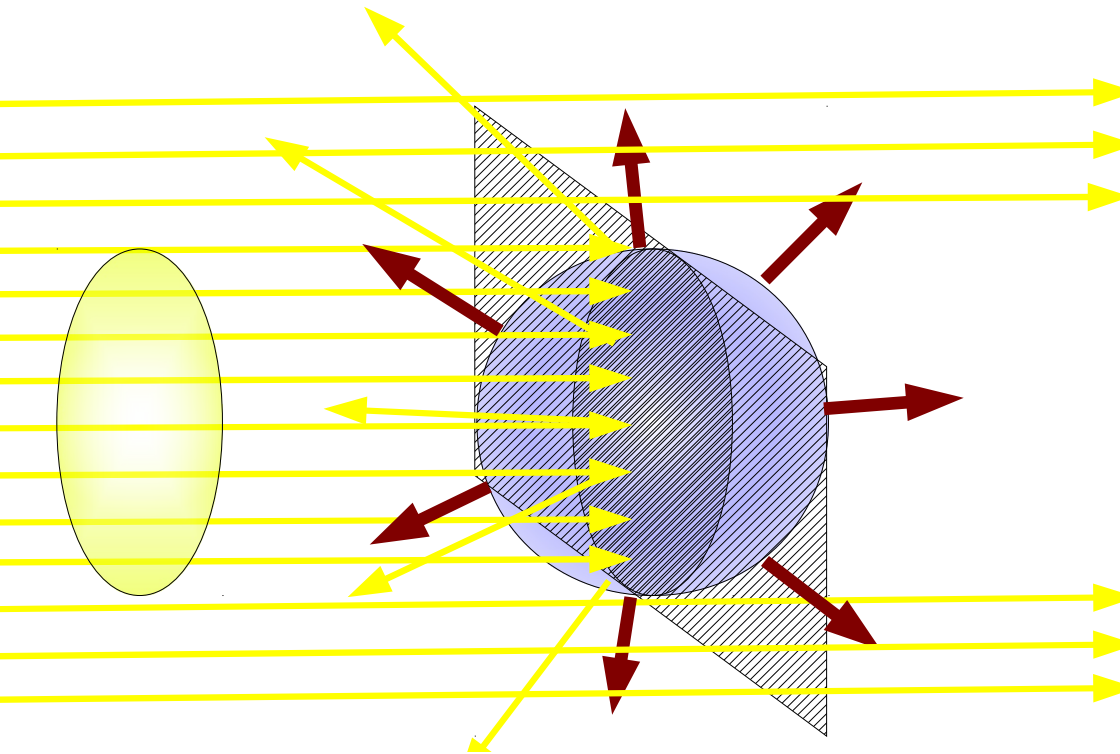
$$E_P = 4\pi R^2\sigma T_E^4.$$

Założenie równowagi  $E_S = E_P$

$$(1-A)S/4 = \sigma T_E^4.$$

$$T_E = \sqrt[4]{\frac{(1-A)S}{4\sigma}}$$

To, dla zmiennego  $S=1362\pm 1 \text{ W/m}^2$  i  $A=0.3$  daje  $T_E=254.81\pm 0.05\text{K}$





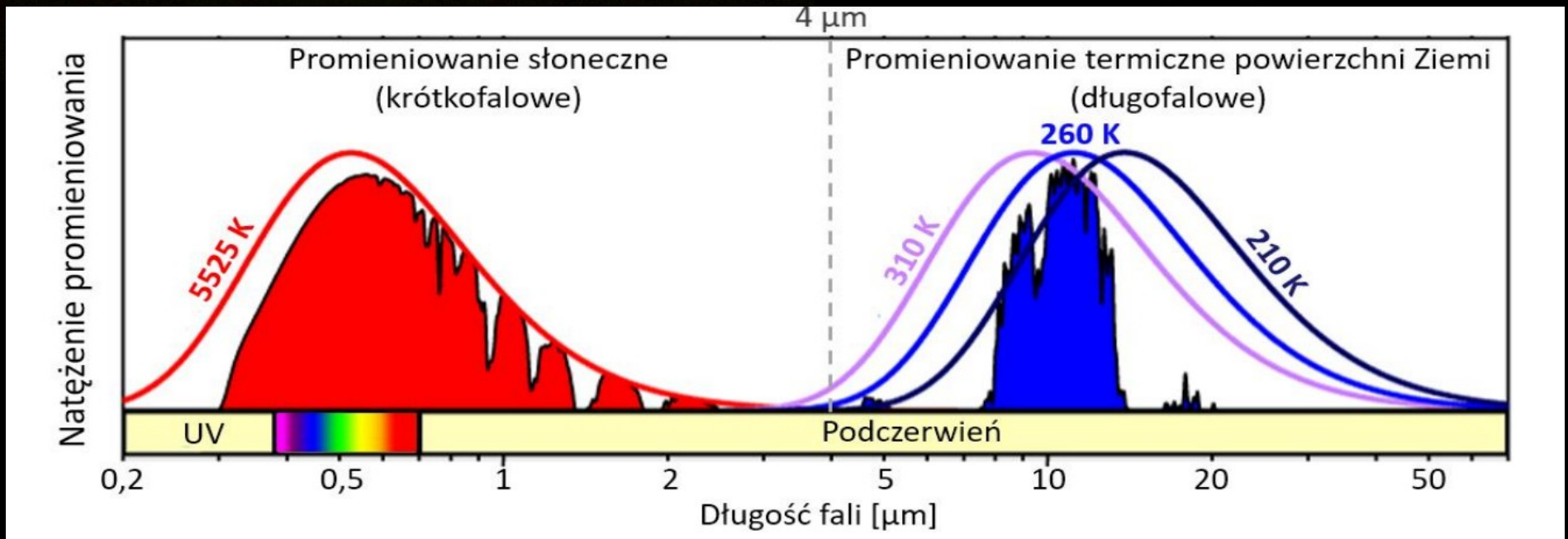
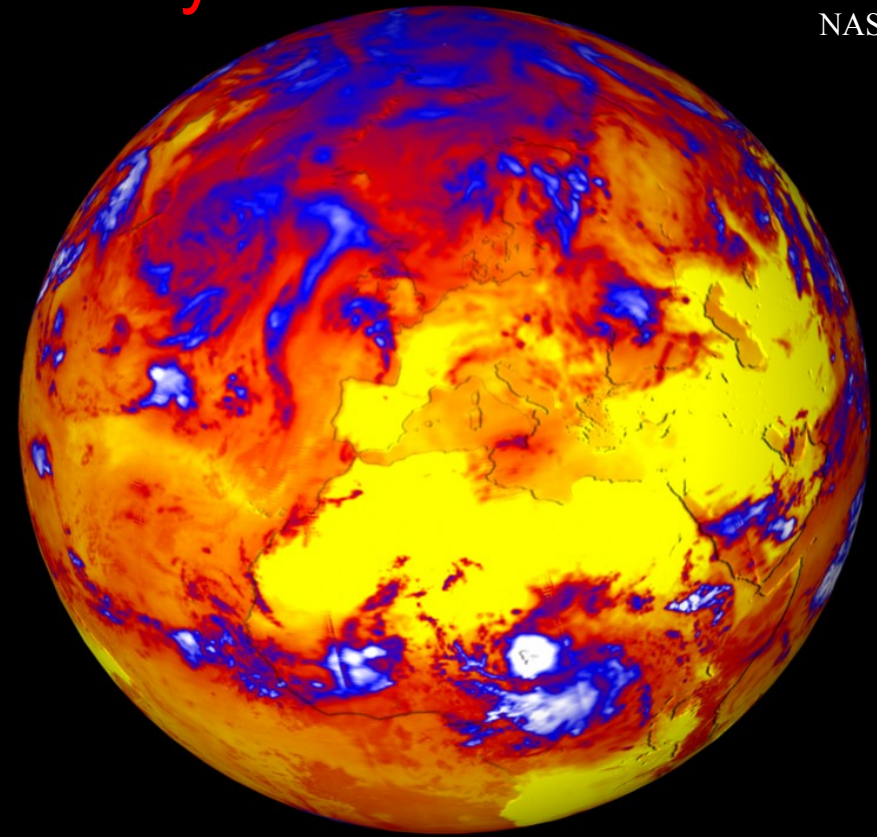


Ziemia posiada cieką warstwę atmosfery, która oddziałuje z promieniowaniem słonecznym i emitowanym z powierzchni, i która sama promieniuje w obszarze podczerwieni..



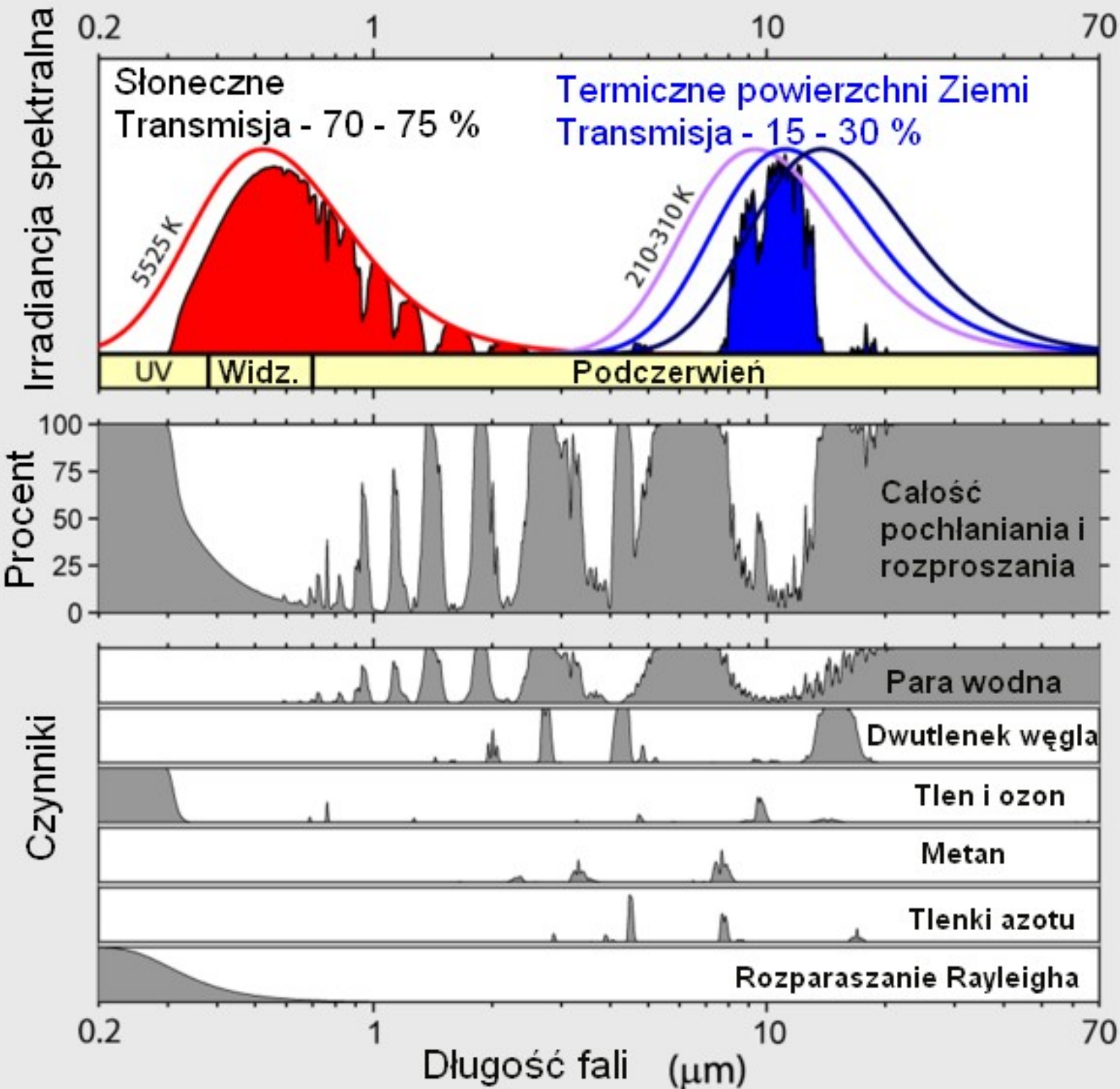
# Transmisja atmosfery

NASA





# Promieniowanie przechodzące przez atmosferę



John Tyndall (~1850) doświadczalnie pokazał:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$  i wiele innych par i gazów to gazy cieplarniane.

Uwaga: gazami cieplarnianymi są gazy o cząsteczkach trój- i więcej atomowych raz dwuatomowych o różnych atomach.

## Efekt cieplarniany – model jednej szyby

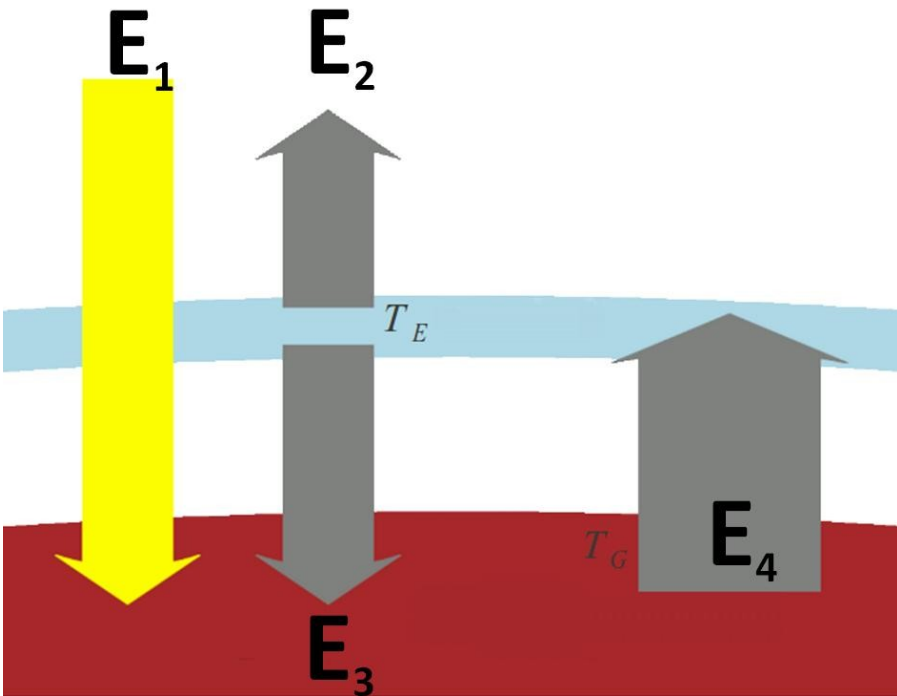
Obserwator w kosmosie mierzy strumień energii promieniowania słonecznego pochłanianego przez planetę  $E_1$  i promieniowania w podczerwieni emitowanego przez nią  $E_2$ .

W stanie równowagi  $E_1 = E_2$ .

„Szyba” emituje w górę i w dół  $E_2 = E_3$ .

Brak zmian temperatury powierzchni oznacza  $E_4 = E_1 + E_3 = 2E_1$ .

Powierzchnia Ziemi wypromieniowuje dwukrotnie więcej energii, niż wynosi dopływ energii słonecznej!

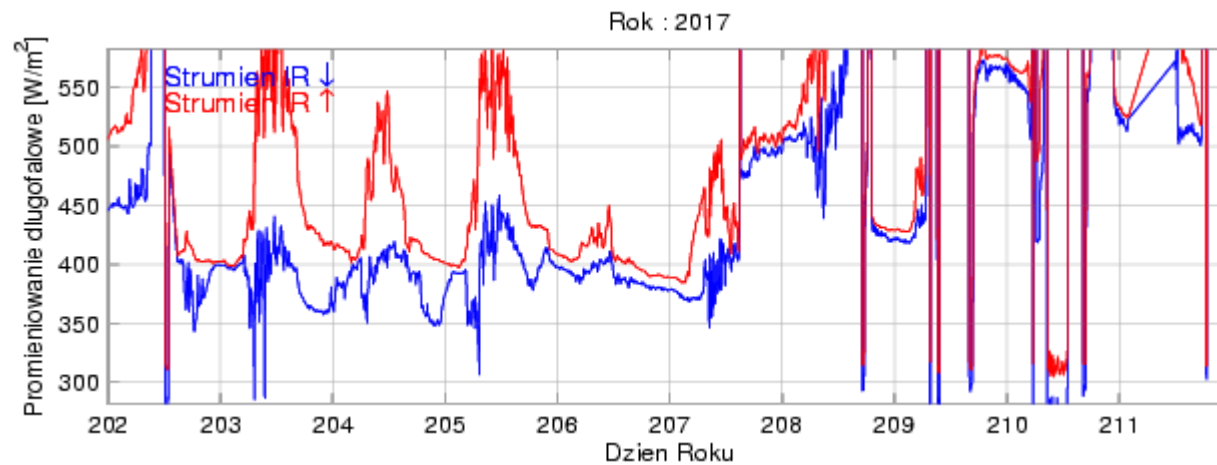
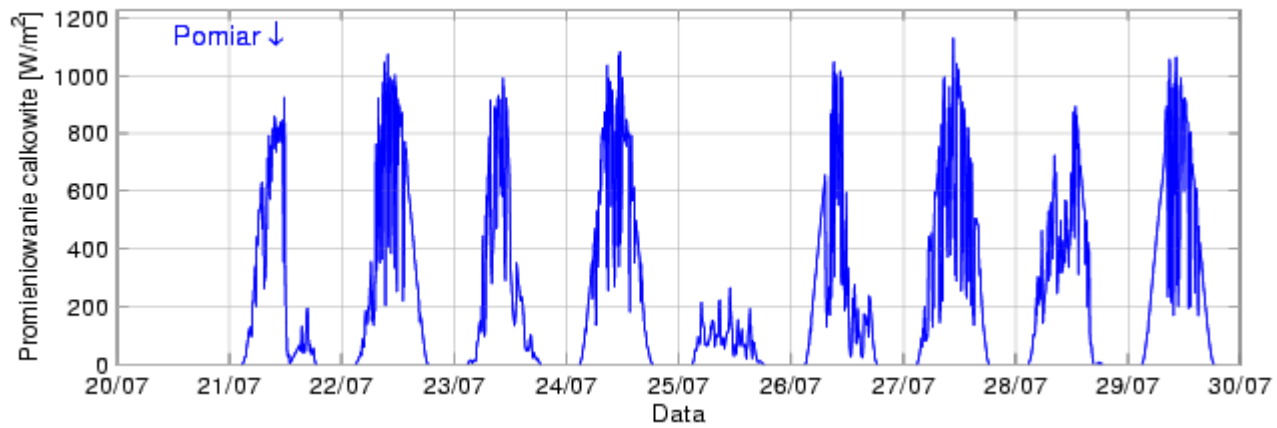


Obserwator zewnętrzny w kosmosie widzi planetę wypromieniowującą energię z szyby o temperaturze  $T_E$ ,  $E_2 = \sigma T_E^4$ . Z kolei obserwator nad powierzchnią gruntu widzi grunt o temperaturze  $T_G$  wypromieniowujący  $E_4 = \sigma T_G^4$ .

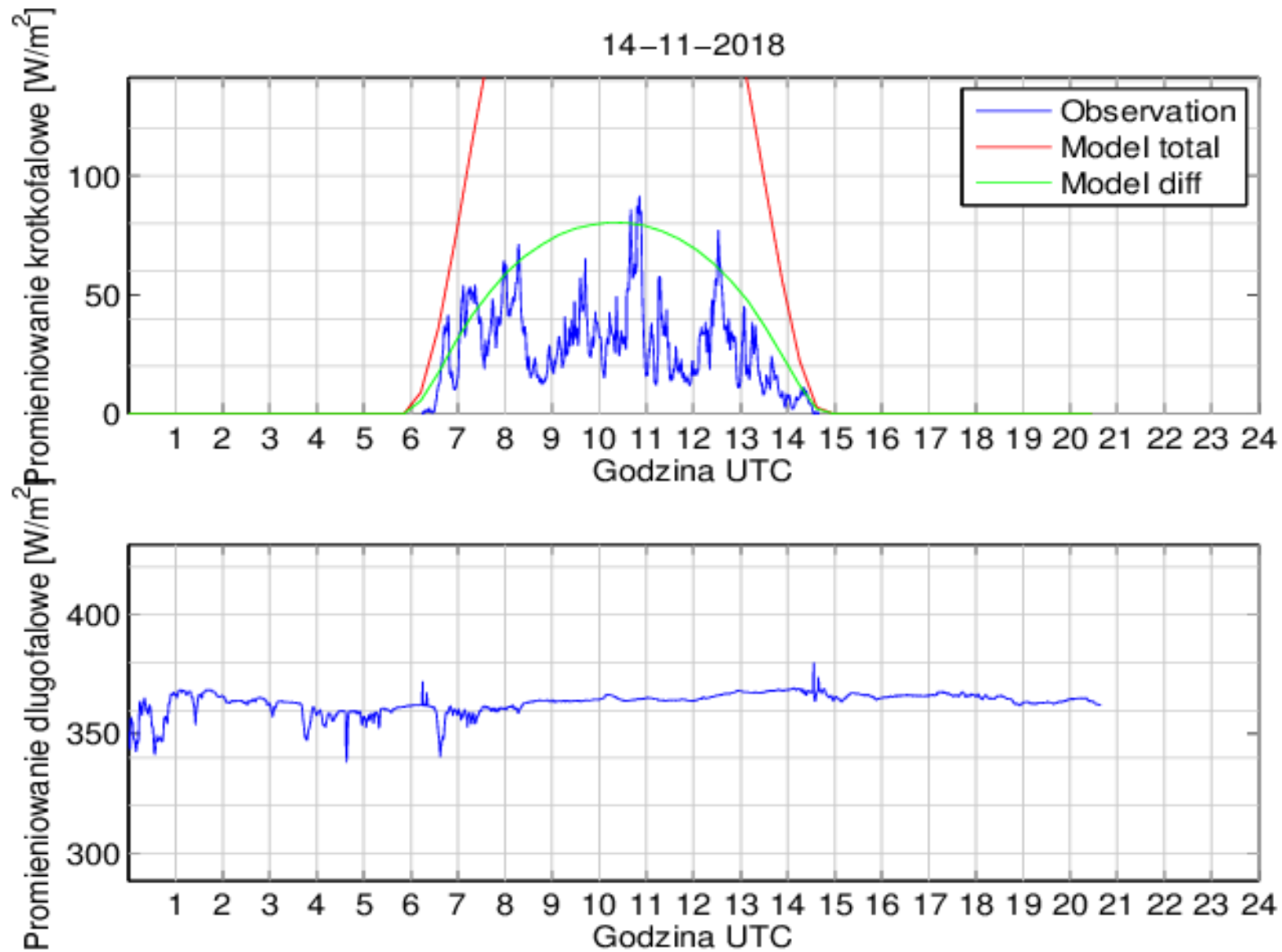
Ponieważ  $E_4 = 2E_2$ , więc:

$$T_G = \sqrt[4]{2} T_E$$

# Strumienie promieniowania mierzone w Warszawie

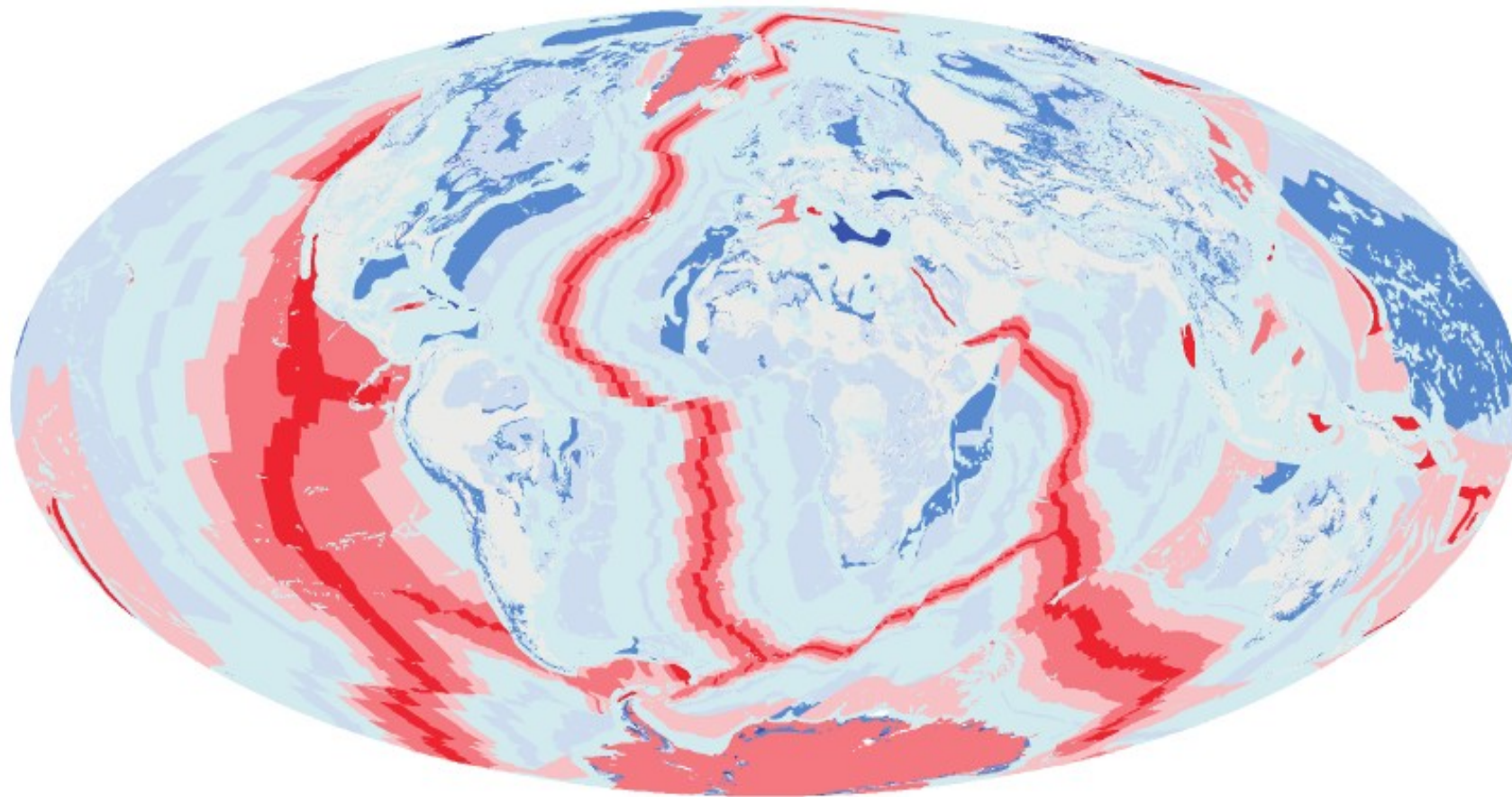


# Strumienie promieniowania mierzone w Warszawie



# Energia geotermalna

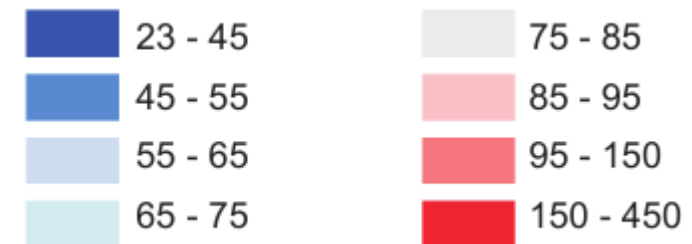
Davies, J. H., D. R. Davies. 2010. Earth's surface heat flux. *Solid Earth* 1, no. 1: 5-24.



średnia globalna:  
 $0.092 \text{ W/m}^2$

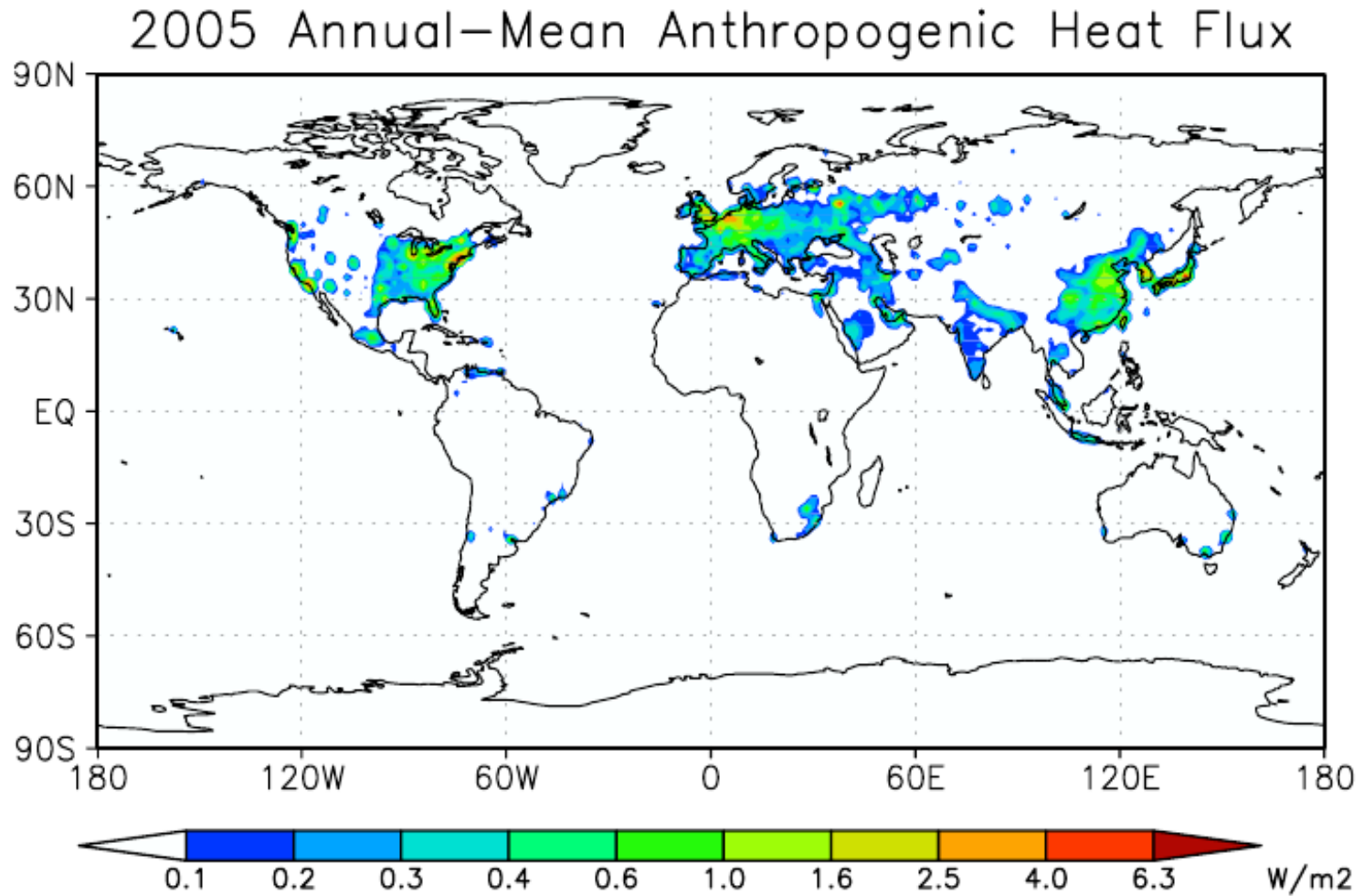
**Table 7.** Summary of continental and oceanic heat flow from our preferred estimates.

	Area ( $\text{m}^2$ )	Heat Flow (TW)	Mean Heat Flow ( $\text{mW m}^{-2}$ )
Continent	$2.073 \times 10^{14}$	14.7	70.9
Ocean	$3.028 \times 10^{14}$	31.9	105.4
Global Total	$5.101 \times 10^{14}$	46.7	91.6





# Antropogeniczny strumień ciepła – jak bezpośrednio podgrzewamy atmosferę.



średnia globalna:  
**0.028 W/m<sup>2</sup>**

Flanner, M. G. (2009) Integrating anthropogenic heat flux with global climate models, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L02801

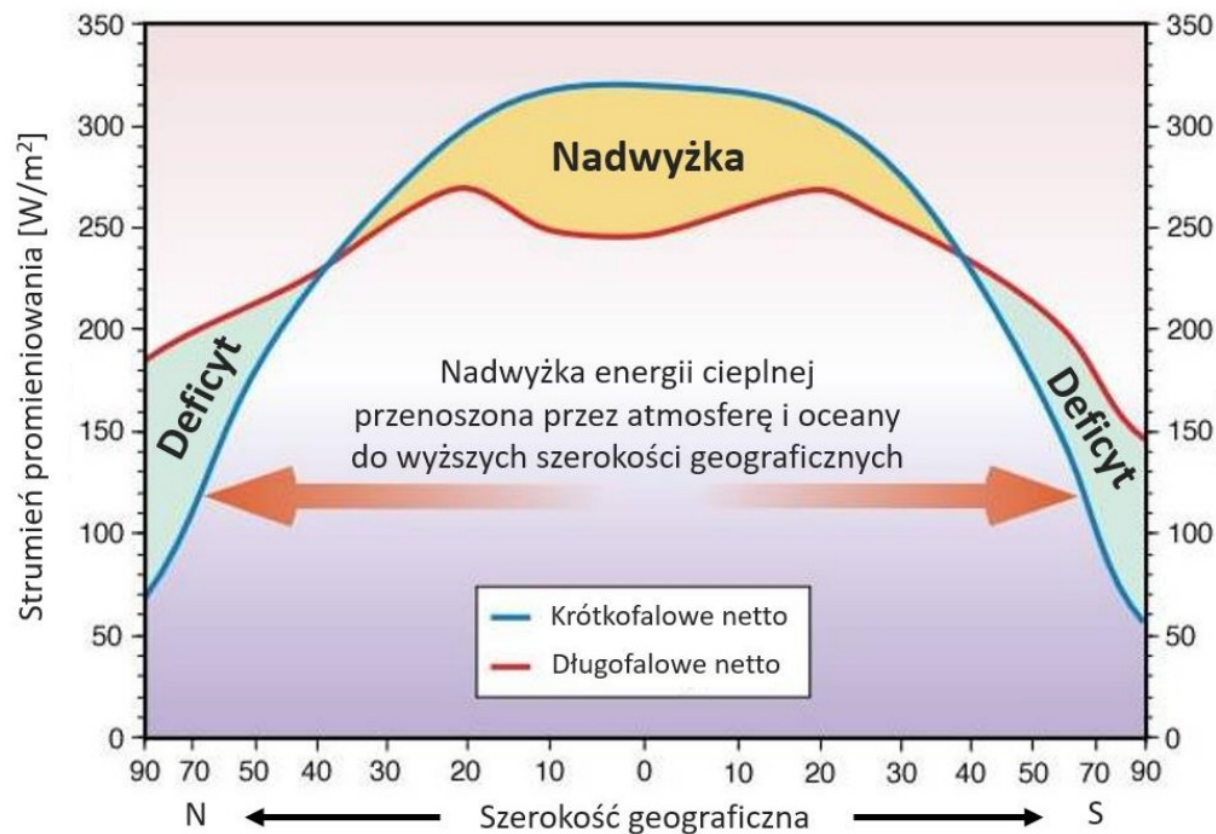


Bilans promieniowania - dopływu i odpływu ciepła – w skali całej planety w stanie stacjonarnym jest bliski równowagi.

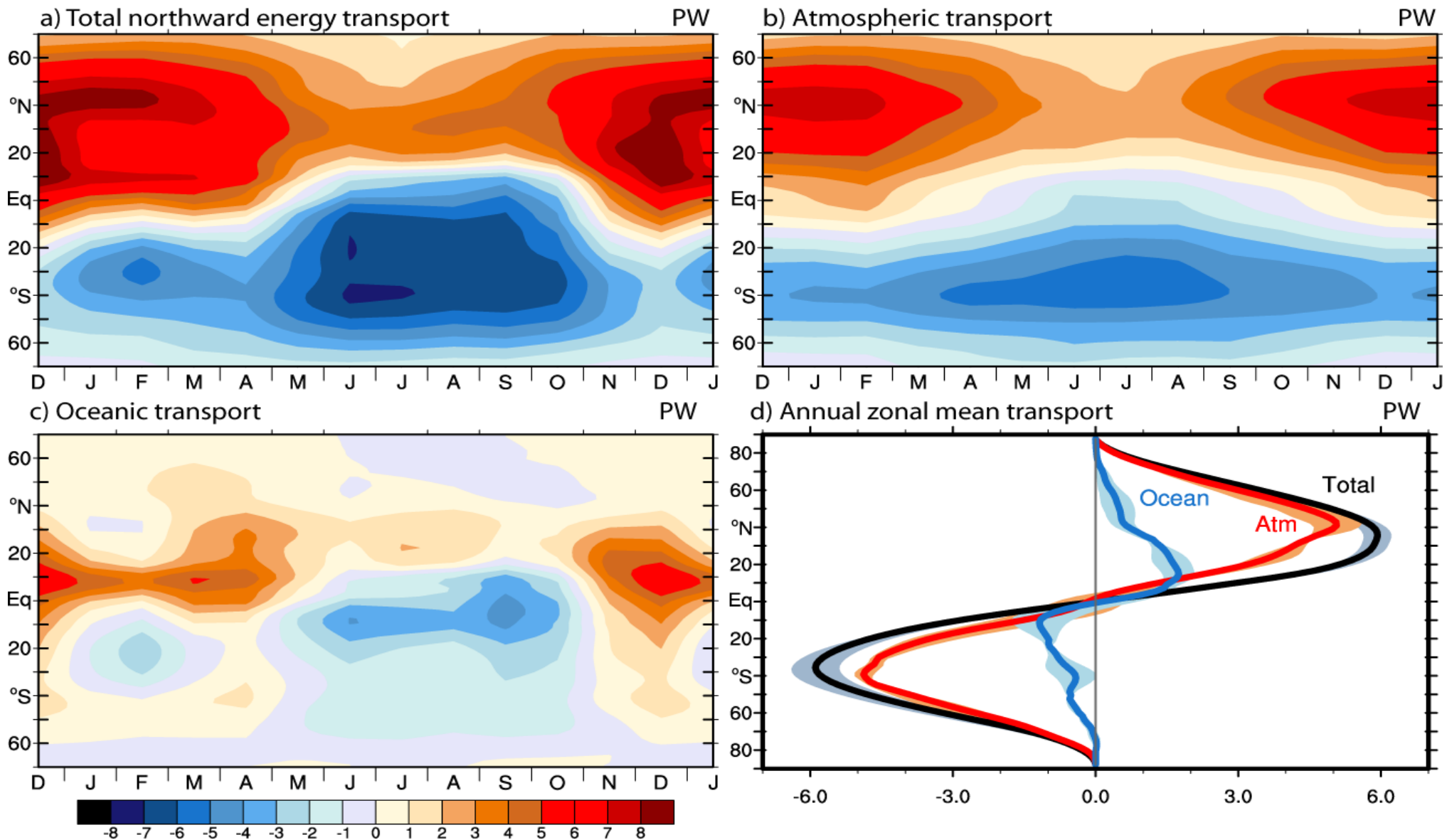
Gdy nie ma równowagi Ziemia ogrzewa się lub stygnie.

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 ciepłe 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 promieniowania słonecznego planeta ogrzewa się (średnio) wskutek pochłaniania promieniowania. Tam gdzie przeważa emisja promieniowania podczerwonego (Deficyt), przeważa chłodzenie. Cyrkulacje atmosferyczne i prądy morskie przenoszą ciepło od obszarów z nadwyżką bilansu promieniowania do obszarów z deficytem. (rysunek: [Encyclopedia of The Earth](#))**



**Roczne rozkłady strumieni energii transportowanej na północ: a – całkowitej, b – transportowanej przez atmosferę, c – transportowanej przez ocean, oraz średnia roczna – d, obliczone na podstawie obserwacji satelitarnych i symulacji globalnych (szare obszary na panelu d – niepewność w zakresie  $\pm 2\sigma$ ).**

**Jednostki – petawaty ( $10^{15}$  W).**

## **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  $\approx 0.028 \text{W/m}^2$
5. Średnio energia transportowana jest przez przepływy atmosferyczne i oceaniczne od równika do obszarów polarnych.

## **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

## **Wymuszenia i sprzężenia w systemie klimatycznym.**

**Wymuszenia są zewnętrznymi przyczynami** zmian klimatu.  
Przykłady: irradiancja Słońca, zmiany orbitalne, antropogeniczne czy wulkaniczne emisje gazów cieplarnianych .

**Sprzężenia** to procesy **wewnętrzne** systemu klimatycznego, które są skutkiem wymuszeń i prowadzą do dalszych zmian klimatu.

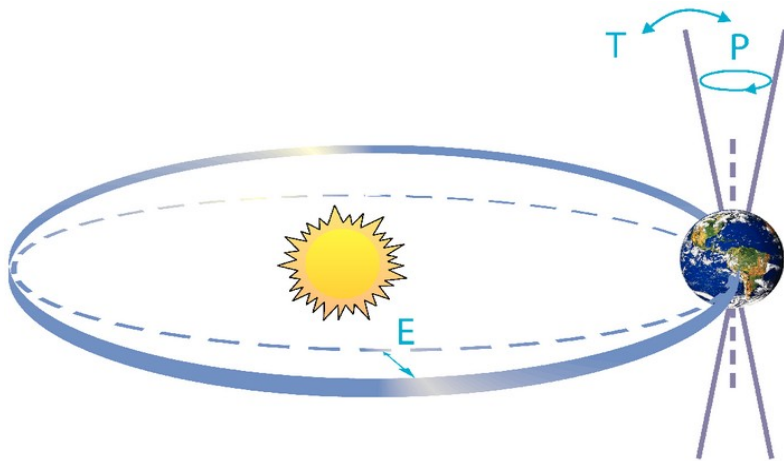
Przykłady: zmiany albedo wskutek pokrycia lodem, rozpuszczanie CO<sub>2</sub> w oceanie wskutek zmian temperatury.

## **Sprzężenia mogą być dodatnie lub ujemne.**

Sprzężenia dodatnie, gdy przekroczą pewne granice, mogą prowadzić do gwałtownych zmian klimatu.

Paleoklimatologia dostarcza dowodów na to że gwałtowne zmiany występowały w przeszłości geologicznej planety.

# Zmiany w dopływie energii słonecznej wskutek zmian orbitalnych



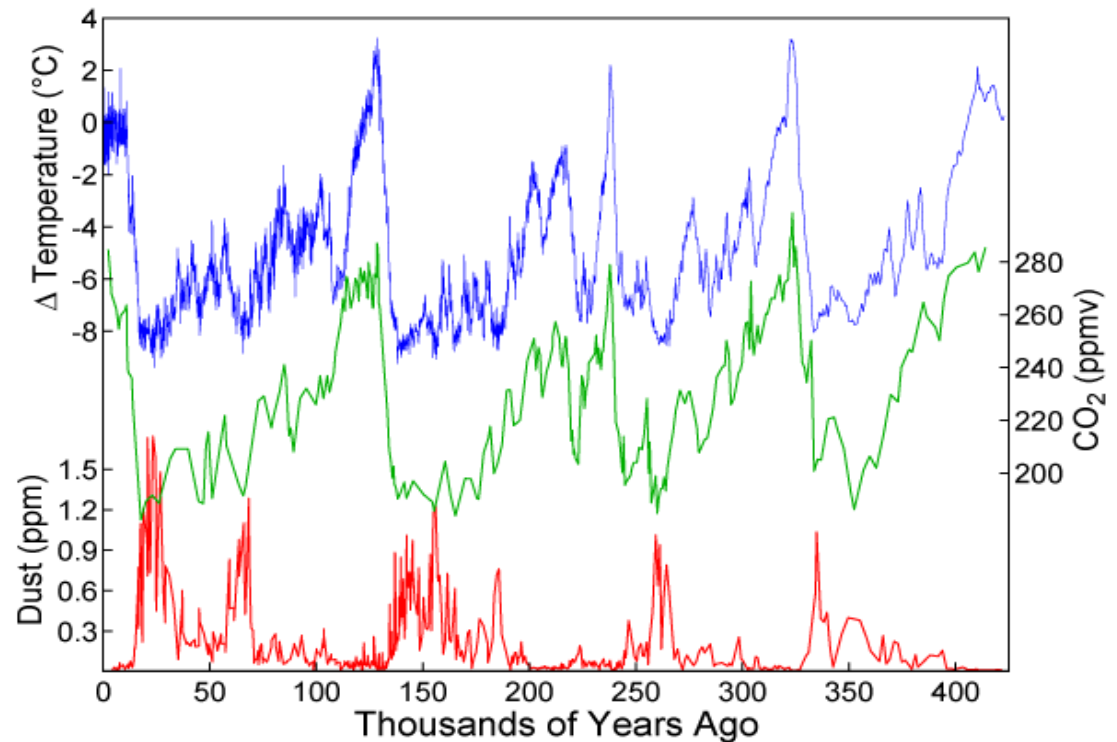
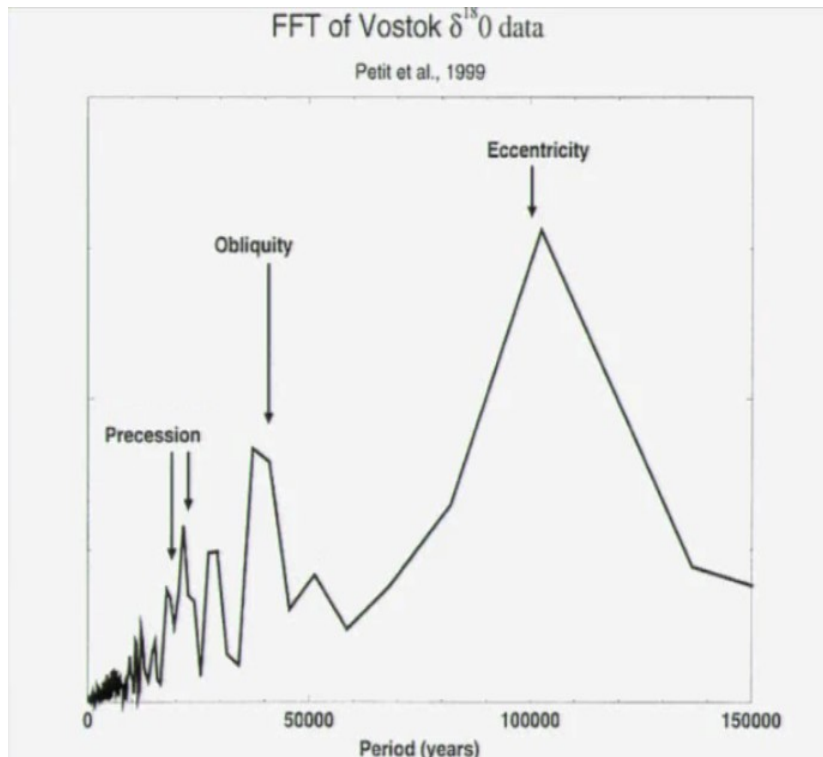
Cykle Milankowicza:

'T' zmiany nachylenia osi Ziemi (obliquity)

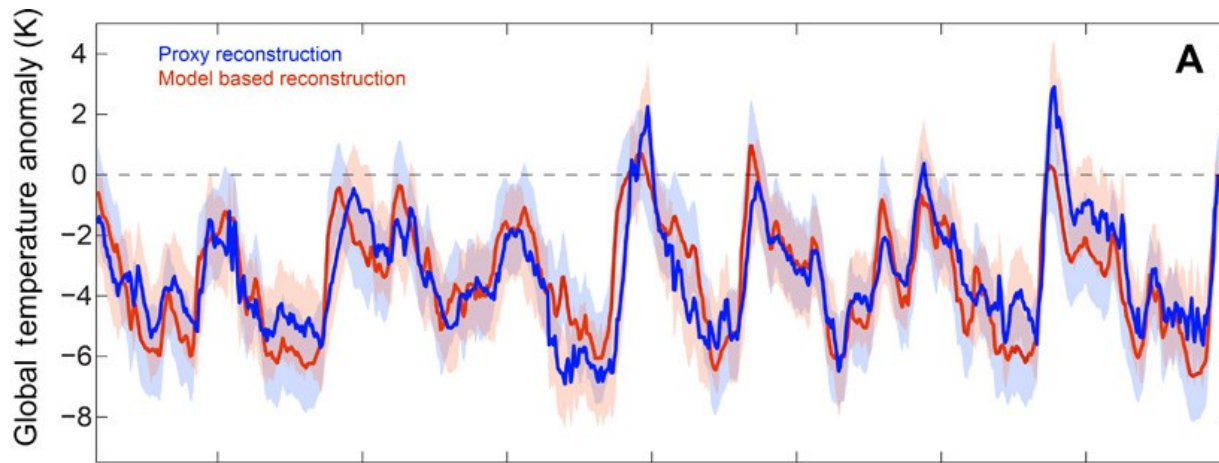
'E' zmiany ekscentryczności orbity

'P' precesja Rahmstorf and Schellnhuber (2006)

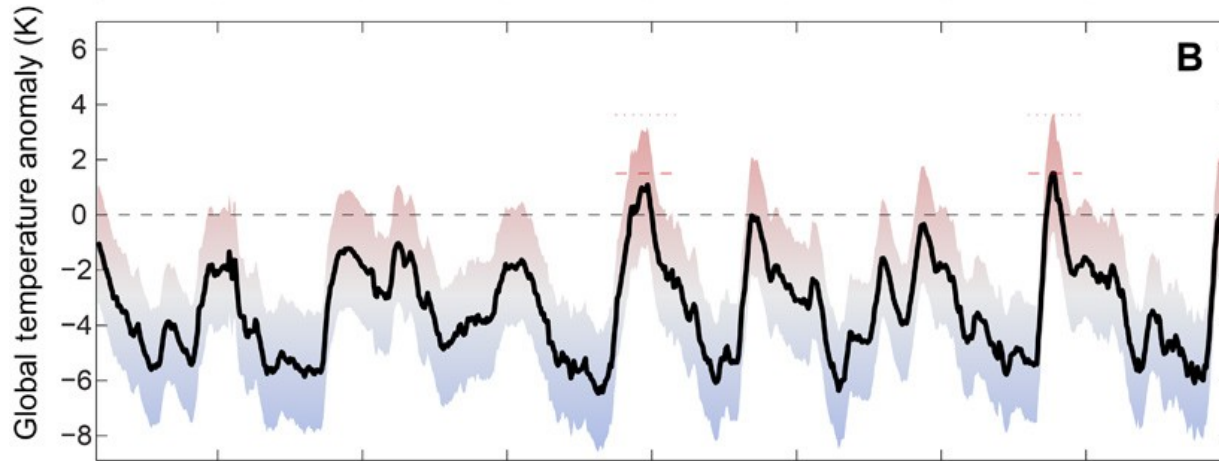
i zapisy z rdzeni lodowych na Antarktydzie (Vostok)



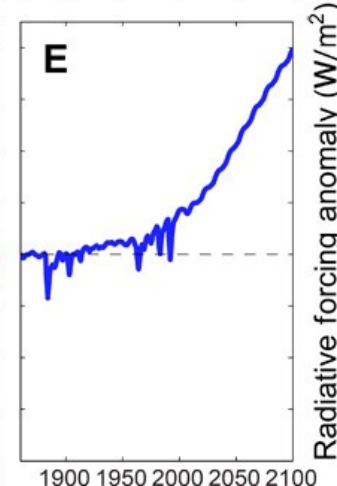
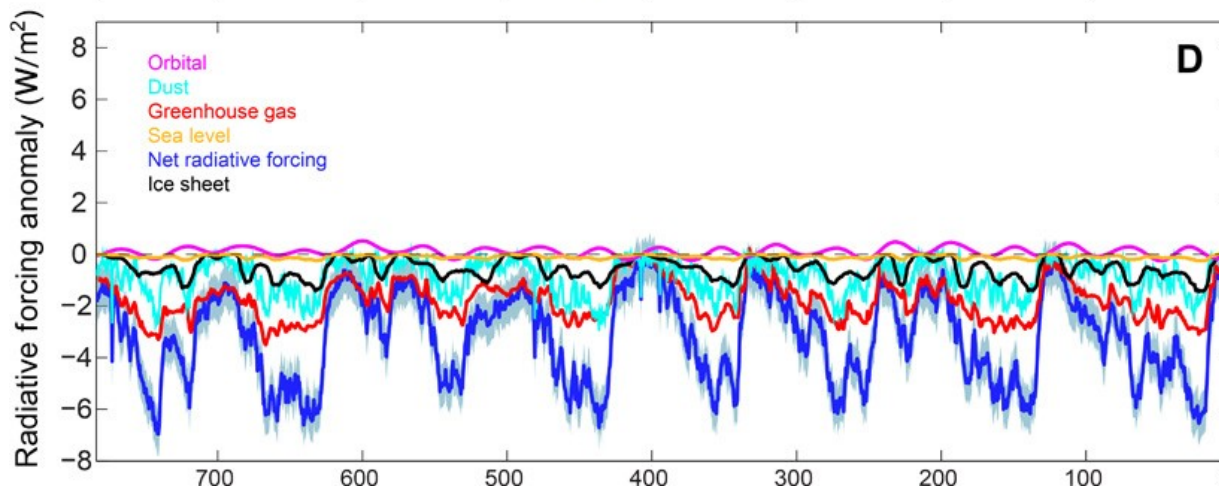
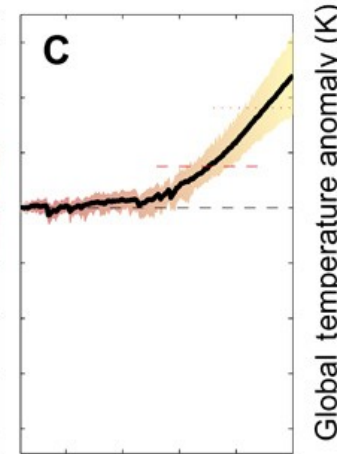




A: Globalne anomalie temperatur, niebieskie – proxy, czerwone – model



B,C: Globalne anomalie temperatur, najlepsze dopasowanie i zakres niepewności



D,E: Wymuszeniaa radiacyjne, których suma jest odpowiedzialna za zmiany temperatury glob. Suma wymuszeń radiacyjnych: linia niebieska



# Jak działa mechanizm epok lodowcowych (w uproszczeniu!)?

## Glacjał:

- 1) Przy minimalnych fluktuacjach stałej słonecznej zmiana ekscentryczności orbity powoduje wychłodzenie lądów Arktyki i akumulację lodu → wzrost albedo (także zmiany szaty roślinnej i.t.d.).
- 2) Rosnąca powłoka lodowa, zmiana stratyfikacji stabilnej oceanu, zmiany biologiczne powodują zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery wskutek czego spada zawartość CO<sub>2</sub> w atmosferze i zmniejsza się efekt cieplarniany.

(np. wykład Richarda Alleya [http://www.agu.org/meetings/fm09/lectures/lecture\\_videos/A23A.shtml](http://www.agu.org/meetings/fm09/lectures/lecture_videos/A23A.shtml))

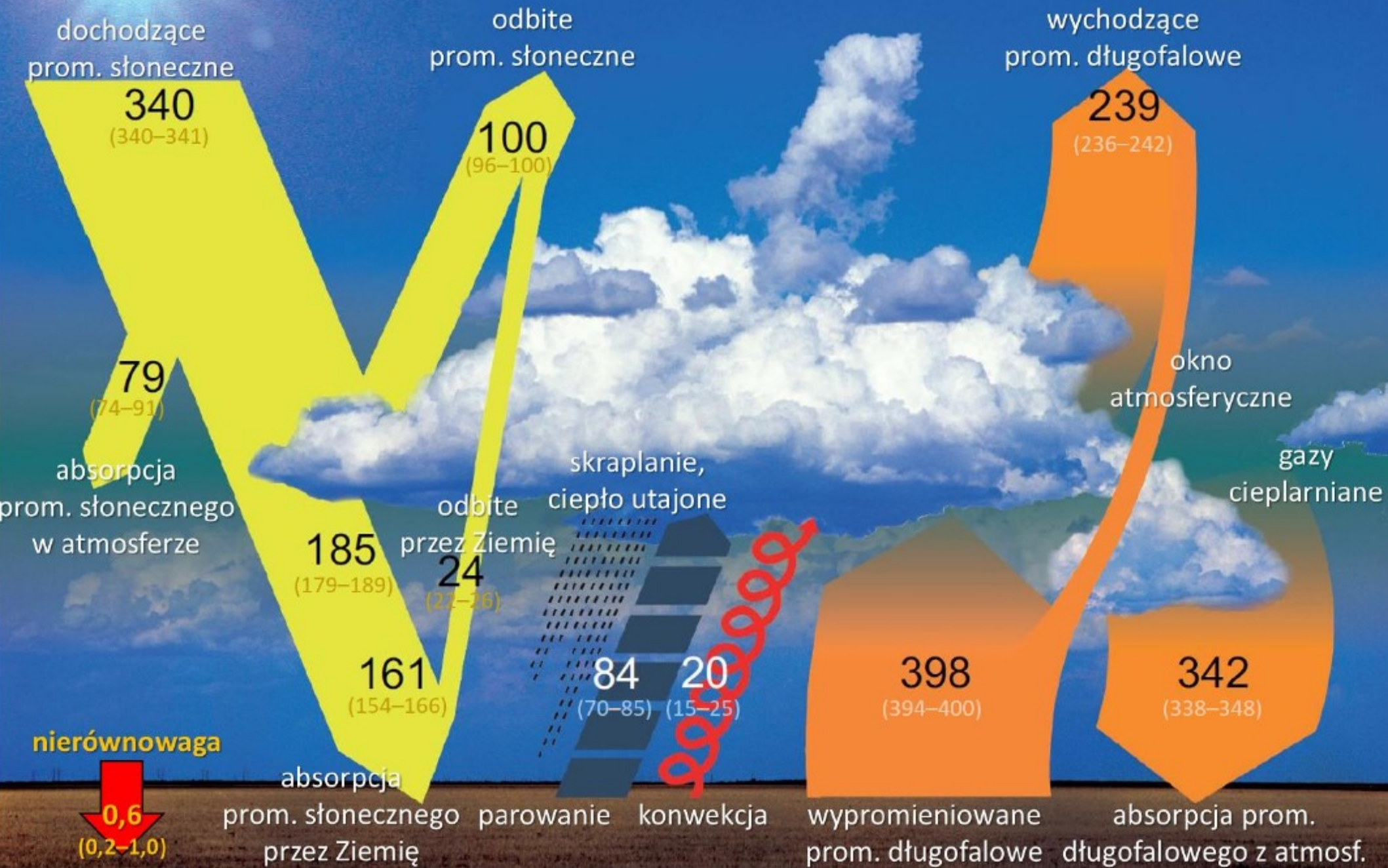
## Interglacjał:

- 3) Za koniec epok lodowych odpowiada zmiana nachylenia osi / precesji przy odpowiednim stanie ekscentryczności → topnienie lodu na biegunach.
- 4) Zmiany w cyrkulacji oceanicznej i monsunowej powodują zwiększoną emisję CO<sub>2</sub> z oceanów, rośnie efekt cieplarniany.

(np. Huybers i Wunsch, 2005, Cheng i inni, 2009)

W tych wypadkach CO<sub>2</sub> nie jest przyczyną zmian, natomiast wymiana CO<sub>2</sub> z oceanem jest dodatnim sprzężeniem zwrotnym, wpływającym na amplitudę zmian. Skala czasowa tych zmian jest stosunkowo wolna, wymuszenia orbitalne mają skalę dziesiątek tysięcy lat a skala czasowa naturalnych fluktuacji CO<sub>2</sub> związana z cyklami oceanicznymi i biogeochemicznymi jest rzędu 1000 lat.

Jednostki [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]



Uśredniony bilans energii systemu klimatycznego. Wartości w  $\text{W}/\text{m}^2$ .

W nawiasach zakres niepewności i zmienności.

<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>



## Gdzie Ziemia lokuje nadwyżkę energii

1%

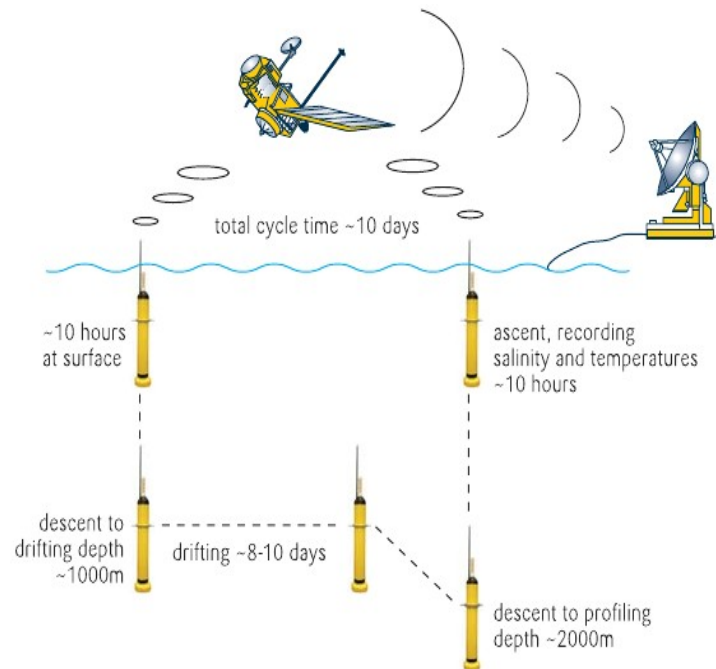
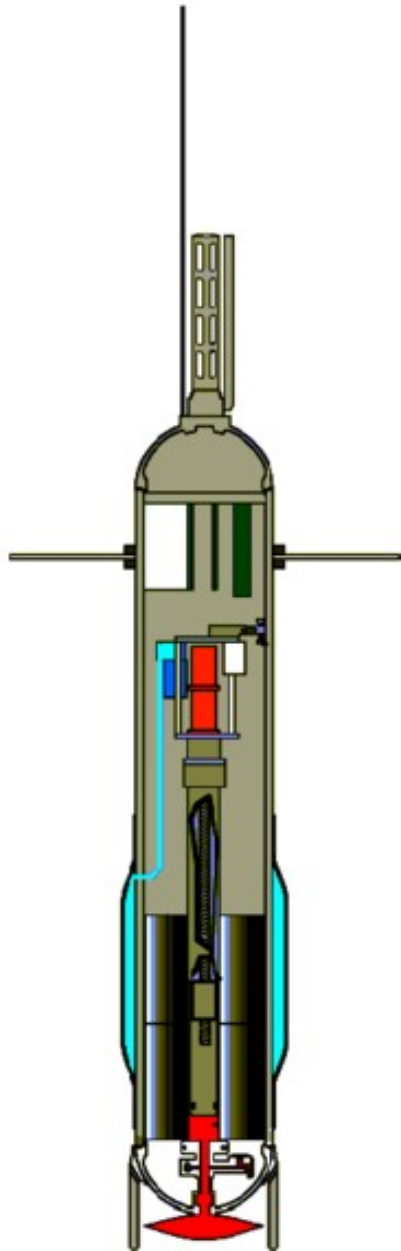
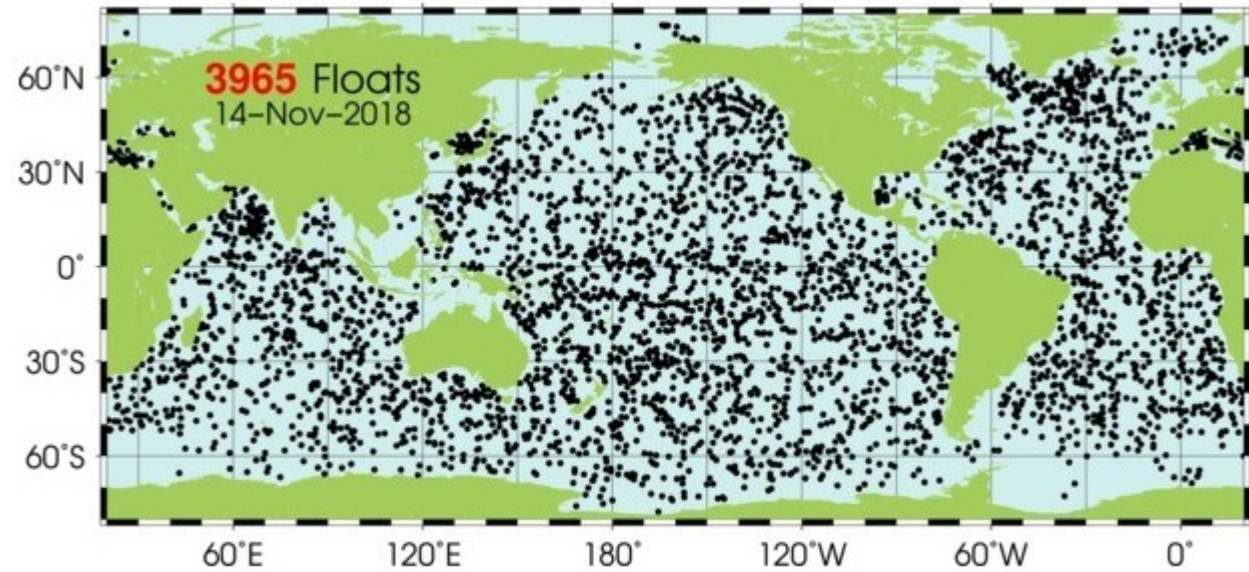
3%

3%

93%

Dokąd trafia nadwyżka energii z nierównowagi radiacyjnej: nagrzewanie oceanów 93%, topnienie lodu (pływający lód morski, lodowce, lądolody) 3%, ogrzewanie lądów 3%, nagrzewanie się atmosfery 1%.

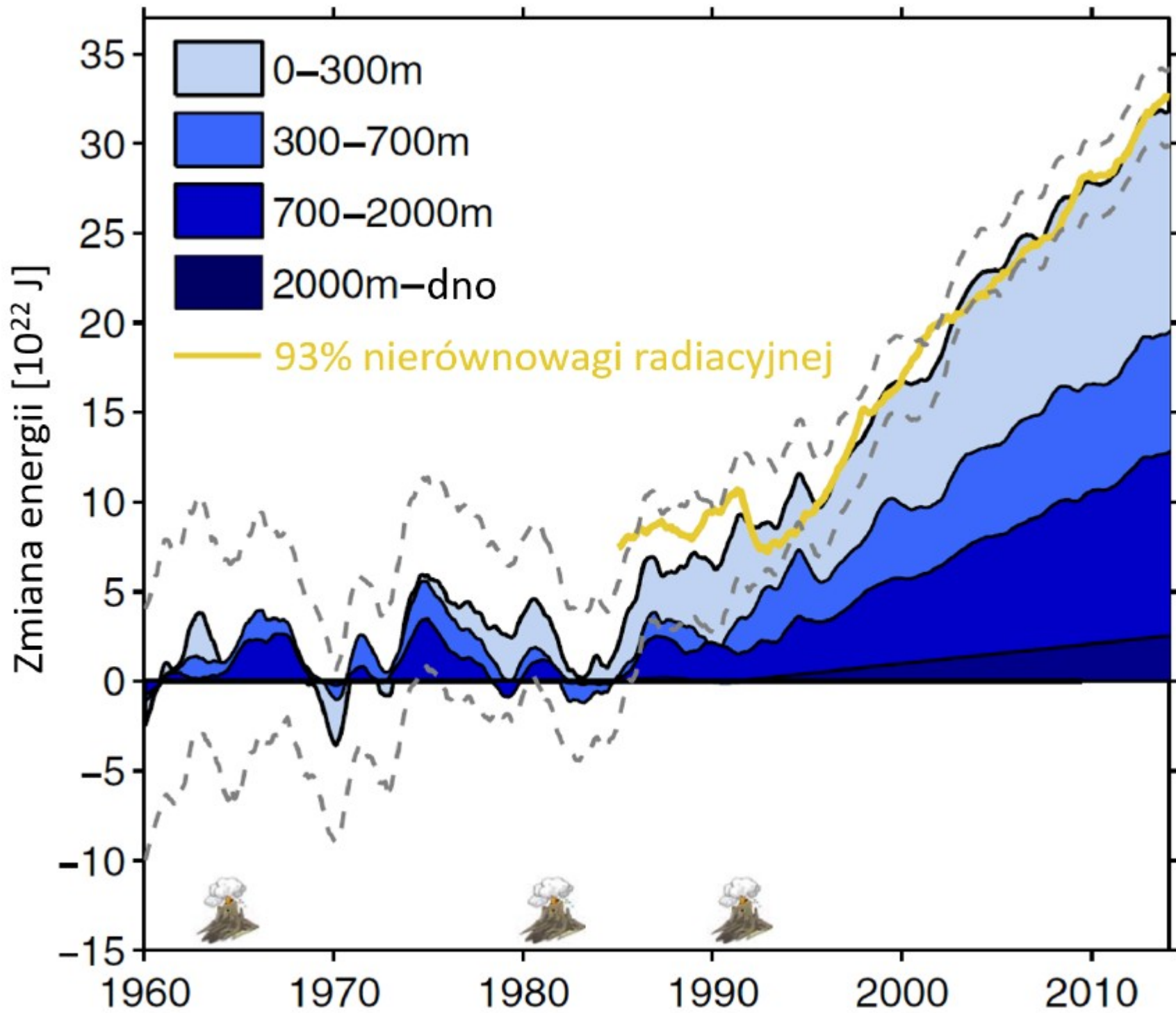
# Projekt ARGO: profilowanie oceanów (temperatura, zasolenie, prądy).

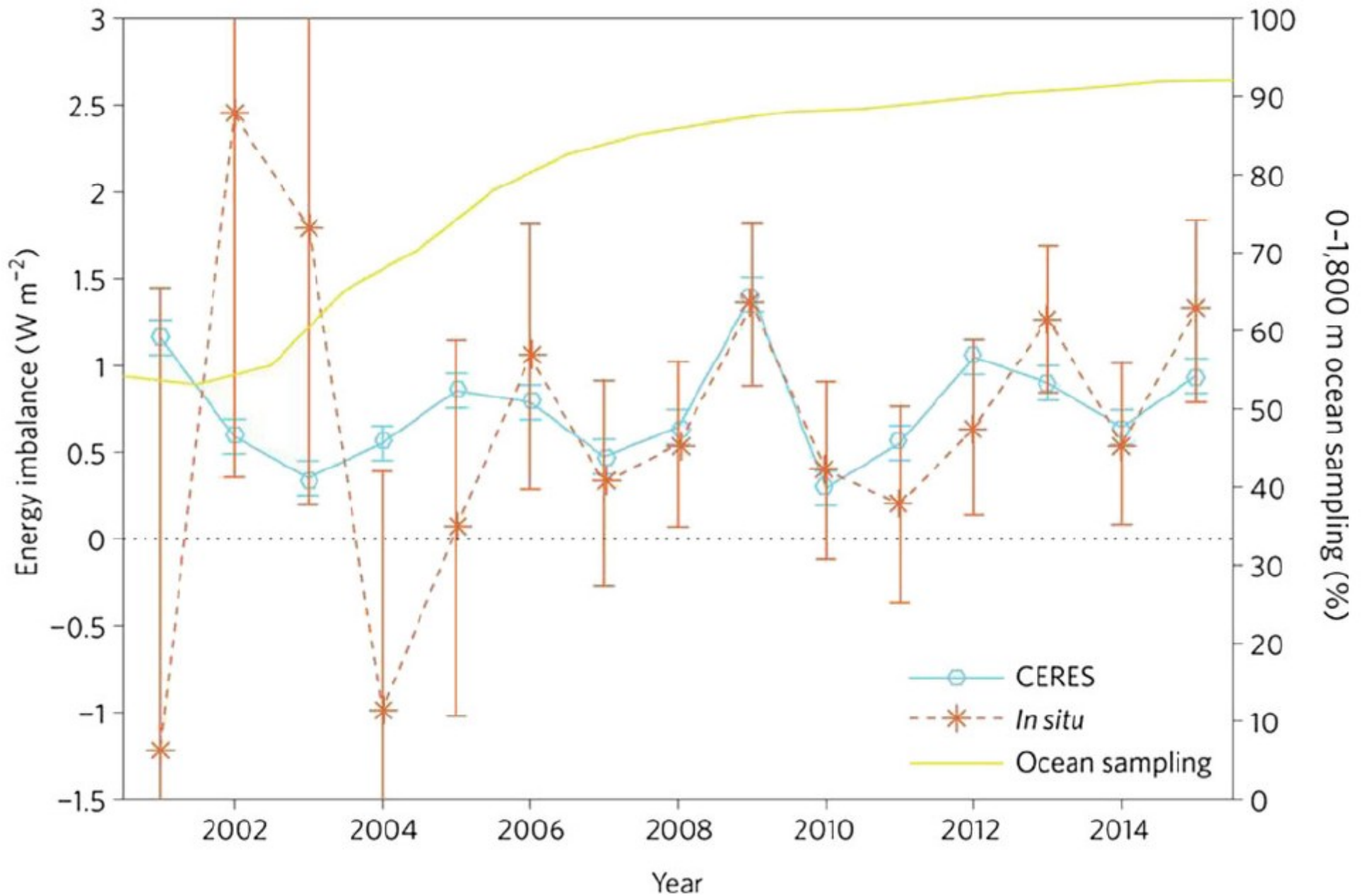


dane dostępne on-line

<http://www.argo.ucsd.edu/>












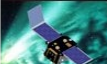

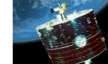
- MISSIONS**
- Space Transportation Systems
  - Human Space Activities
  - Satellites & Spacecraft**
    - Earth Observation**
      - « Operation »
        - SHIZUKU (GCOM-W1)
        - IBUKI (GOSAT)
        - Aqua
        - TRMM
        - REIMEI (INDEX)
        - Akebono (EXOS-D)
        - GEOTAIL
        - « Development »
          - DAICHI-2 (ALOS-2)
          - GPM/ DPR
          - GCOM-C
          - EarthCARE
          - « Completed »
            - DAICHI (ALOS)
      - Communication, Positioning & Engineering Test**
        - « Operation »

## Satellites and Spacecraft

Satellites offer a wide variety of valuable services. These include communications and weather observation, which are essential to modern life, as well as astronomical observation and space development. Japanese satellites now in orbit are performing missions in a wide range of areas. For example, they have been playing an important role in assessing and analyzing abnormal weather patterns. For the purpose of planetary exploration, plans are under way for sending probes to the Moon and Mars.

### Earth Observation Satellites

**In Operation**

 Global Change Observation Mission 1st - Water "SHIZUKU" (GCOM-W1)	 Greenhouse gases Observing SATellite "IBUKI" (GOSAT)	 "Aqua" Earth Observation Satellite	 Tropical Rainfall Measuring Mission "TRMM"
			

+ ABOUT NASA + NEWS & EVENTS + MULTIMEDIA + MISSIONS + POPULAR TOPICS + MyNASA

**The Earth Observing System Project Science Office**

- For Kids  
- For Scientists  
- For Educators  
- For Media & Press

+ MISSION PROFILES + DATA SERVICES + EOS LINKS + WHO'S WHO + SEARCH EOS

### About NASA's Earth Observing System

The **Earth Observing System** (EOS) is a coordinated series of polar-orbiting and low inclination satellites for long-term global observations of the land surface, biosphere, solid Earth, atmosphere, and oceans. EOS is a major component of the **Earth Science Division of NASA's Science Mission Directorate**. EOS enables an improved understanding of the Earth as an integrated system. The EOS Project Science Office (EOSPSO) is committed to bringing program information and resources to program scientists and the general public alike.

Download 2012 NASA Science Mission Directorate Calendar Screen Saver **NEW!**

### EOS Announcements

The Earth Observer Newsletter online is now available in color!  
February 17, 2011

### Earth Observatory's Image of the Day



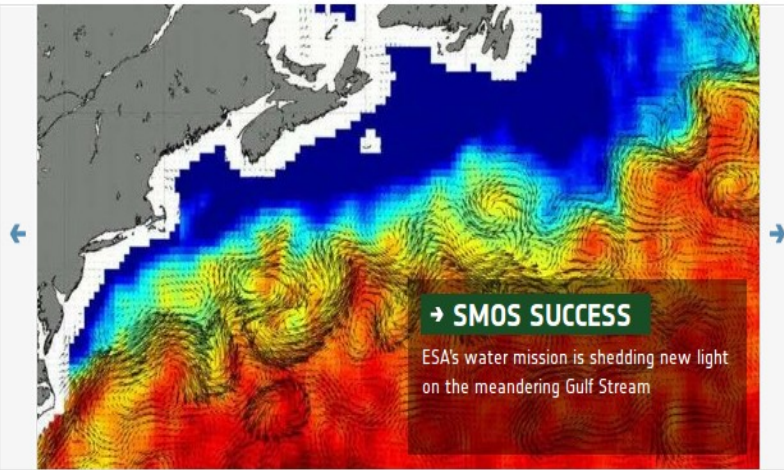
**observing the earth** 

ESA **OBSERVING THE EARTH** UNDERSTANDING OUR PLANET SECURING OUR ENVIRONMENT BENEFITING OUR ECONOMY

- + About Observing the Earth
- EO programmes
  - The Living Planet
  - GMES
- ESA's Earth Observing missions
  - Envisat overview
  - ERS overview
  - Earth Explorers overview
  - Sentinels overview
  - MSG overview
  - MetOp overview
  - Proba-1 overview
  - Third Party Missions overview

ESA > Our Activities > Observing the Earth

Search here



**→ SMOS SUCCESS**  
ESA's water mission is shedding new light on the meandering Gulf Stream

Image of the week archive

Earth from Space on ESA Web-TV

Living Planet Symposium 2013

Archive

Systemy satelitarne NASA, ESA, JAXA i innych.





### Quick Links

[Land-Based Station](#)

[Satellite](#)

[Radar](#)

[Model](#)

[Weather Balloon](#)

[Marine / Ocean](#)

[Paleoclimatology](#)

### Datasets

[Borehole](#)

[Climate Forcing](#)

[Climate Reconstruction](#)

[Coral and Sclerosponge](#)

[Fauna](#)

[Fire History](#)

[Historical](#)

[Ice Core](#)

[Insect](#)

[Lake Level  
Reconstruction](#)

[Loess and Eolian Dust](#)

[Paleoclimate Modeling](#)

[Lake](#)

[Paleogeography](#)

## Paleoclimatology Datasets



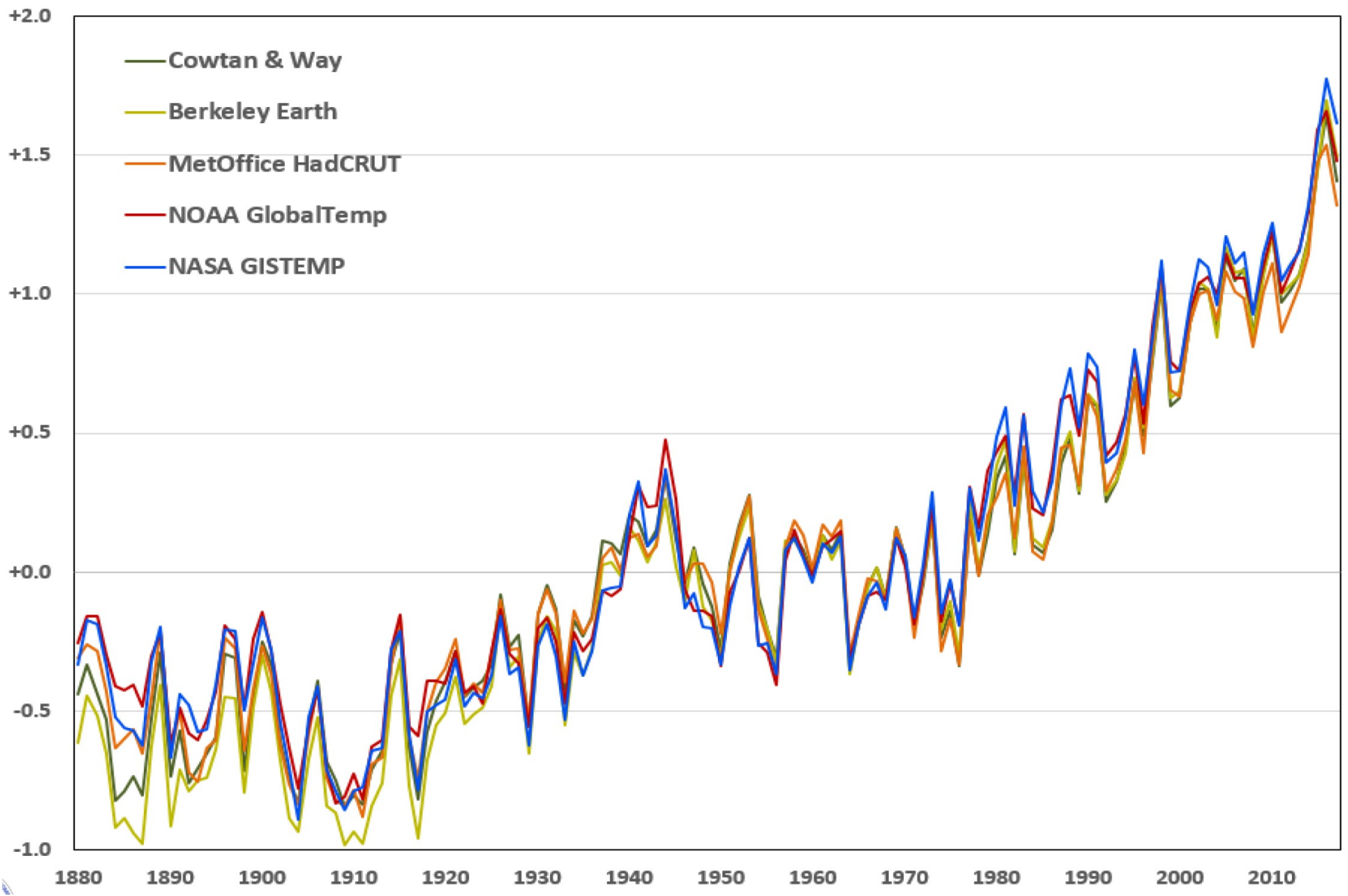
These links provide access to descriptive information and explanatory notes, maps, searches, visualizations, and more. The data cover the globe, and while most span the last few millennia, some datasets extend back in time 100 million years. Most of the data are time series of geophysical or biological measurements and some include reconstructed climate variables such as temperature and precipitation.

- **All Proxies:** [Data Search](#), [Contributing Data](#), [Most Recent Contributions](#), [Paleoclimatology Data Download Area](#), [Map Search](#), [Google Earth File](#), [Free Software](#).
- **Borehole**  
Borehole data are direct measurements of temperature from boreholes drilled into the Earth's crust.
- **Climate Forcing**  
A variety of data about factors potentially affecting climate such as volcanic eruptions, solar variability,

Wiele danych paleo jest dostępnych on-line

Tak samo jak znaczna większość danych klimatycznych i narzędzi ich obróbki i przetwarzania.

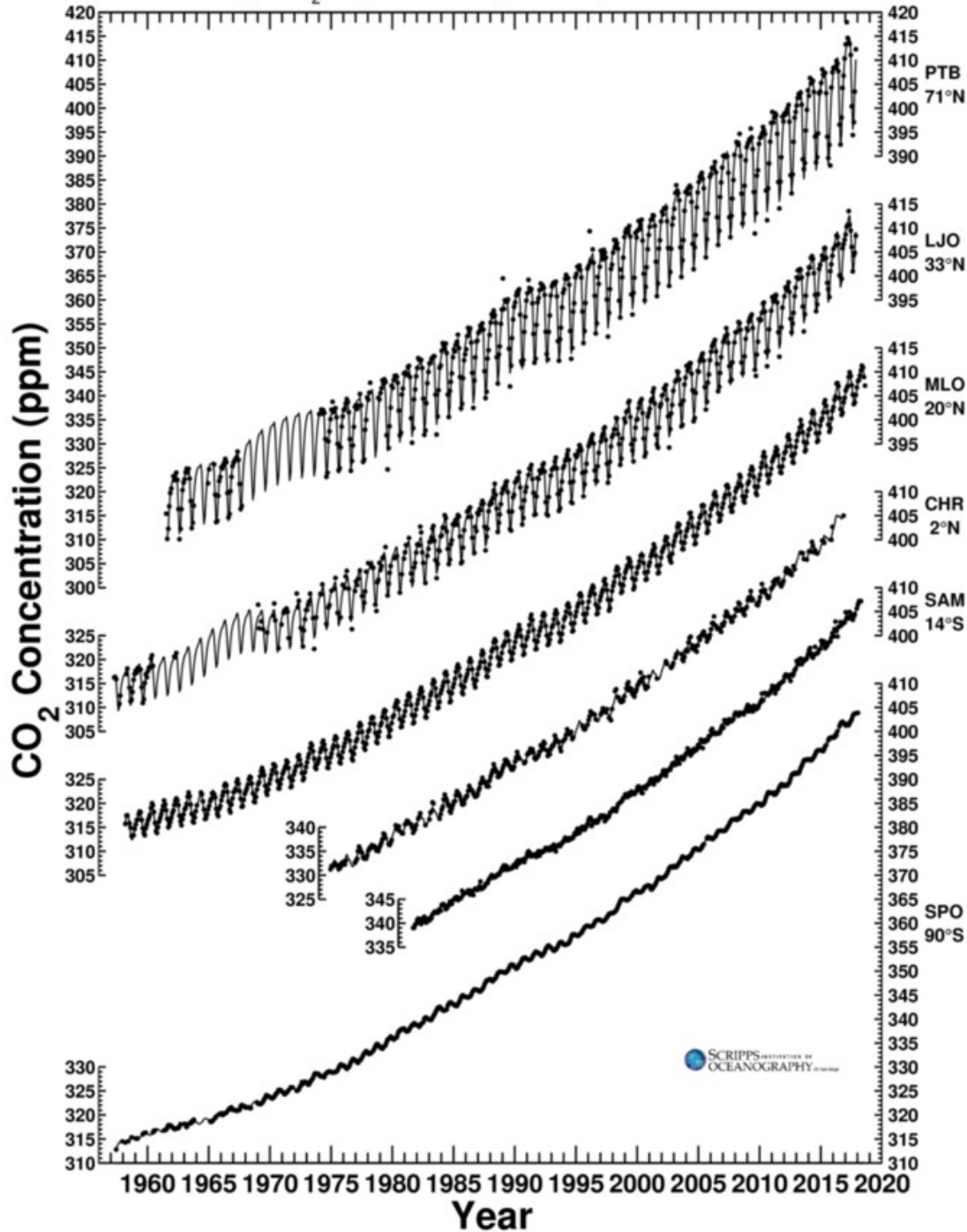
# Różne serie globalnych anomalii temperatury przypowierzchniowej:





# Global Stations Carbon Dioxide Concentration Trends

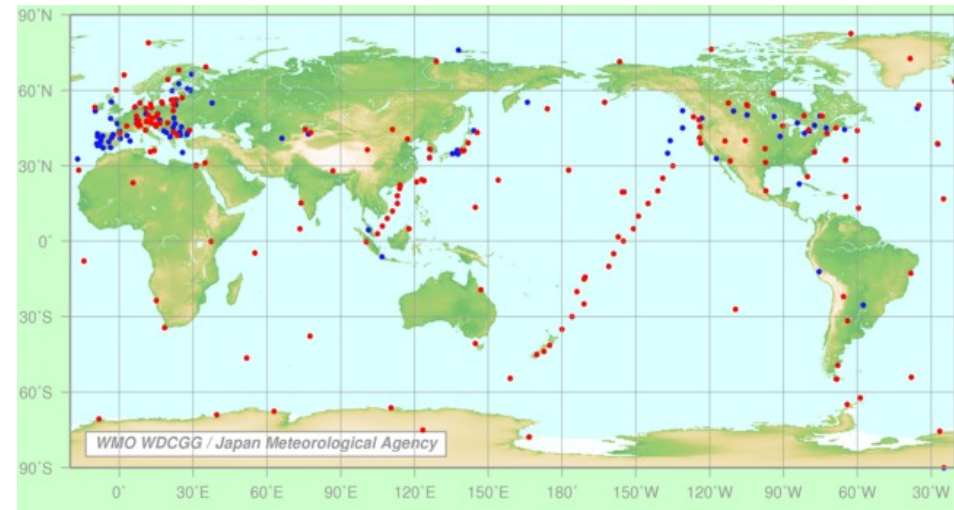
Data from Scripps CO<sub>2</sub> Program Last updated September 2018



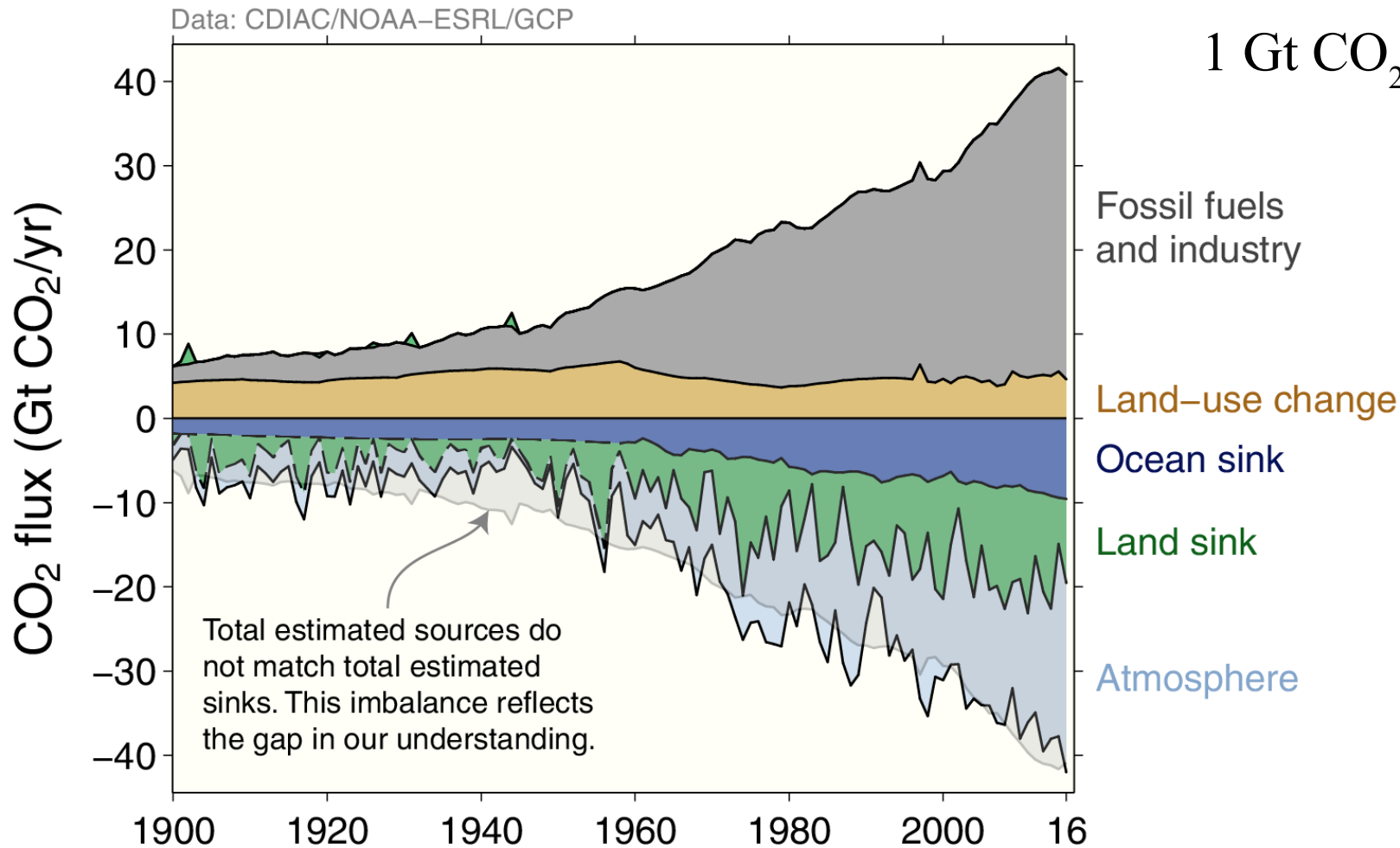
Regularne pomiary CO<sub>2</sub> i innych gazów atmosferycznych są zbierane przez WMO World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG)

<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg/>

<http://scrippsco2.ucsd.edu/>



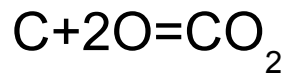
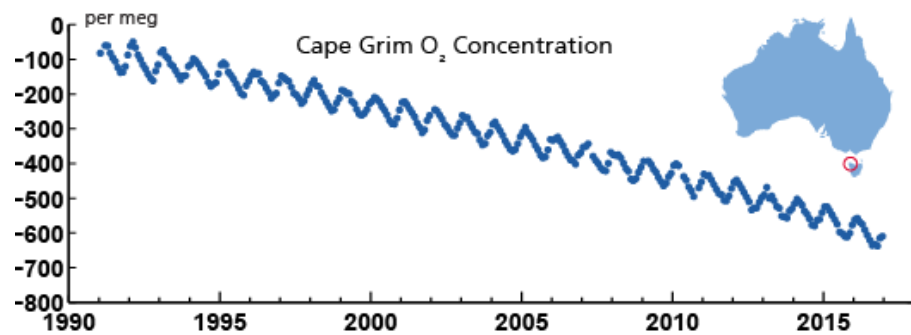
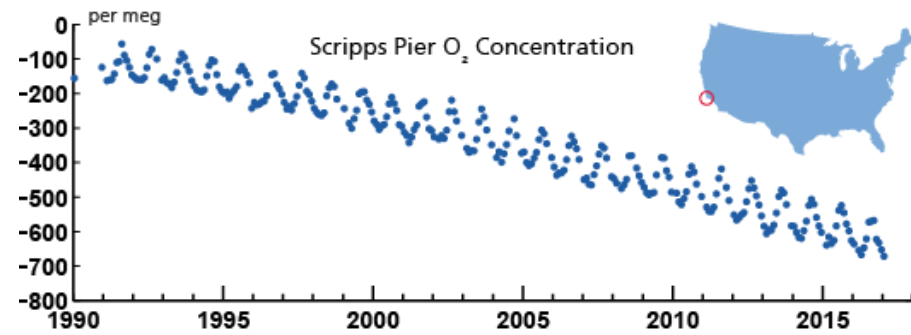
## CO<sub>2</sub> z paliw kopalnych, przemysłu, użytkowania gruntu oraz bilans w postaci zmian zawartości w oceanie, atmosferze i glebie





# Inne dowody na antropogeniczność nadwyżki CO<sub>2</sub> w systemie klimatycznym.

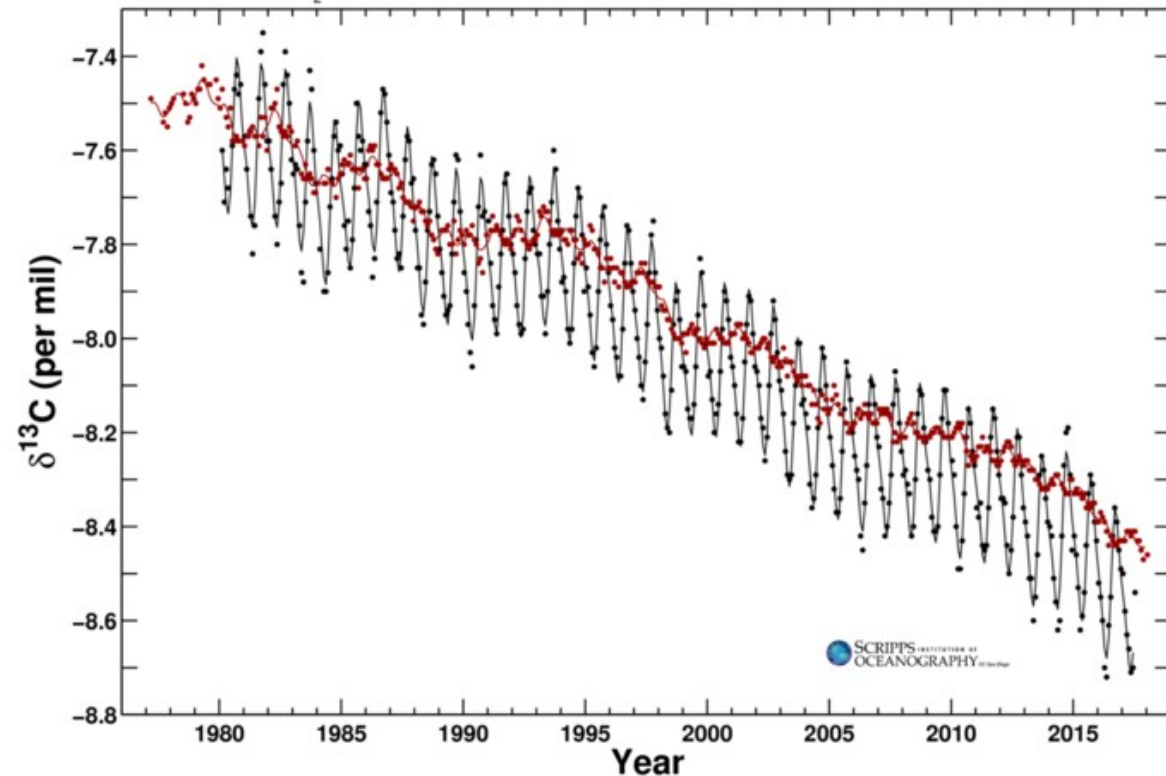
Spada stosunek <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C .



Spada stosunek O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> w powietrzu.

## Mauna Loa Observatory, Hawaii and South Pole, Antarctica Monthly Average $\delta^{13}C$ Trends

Data from Scripps CO<sub>2</sub> Program Last updated September 2018



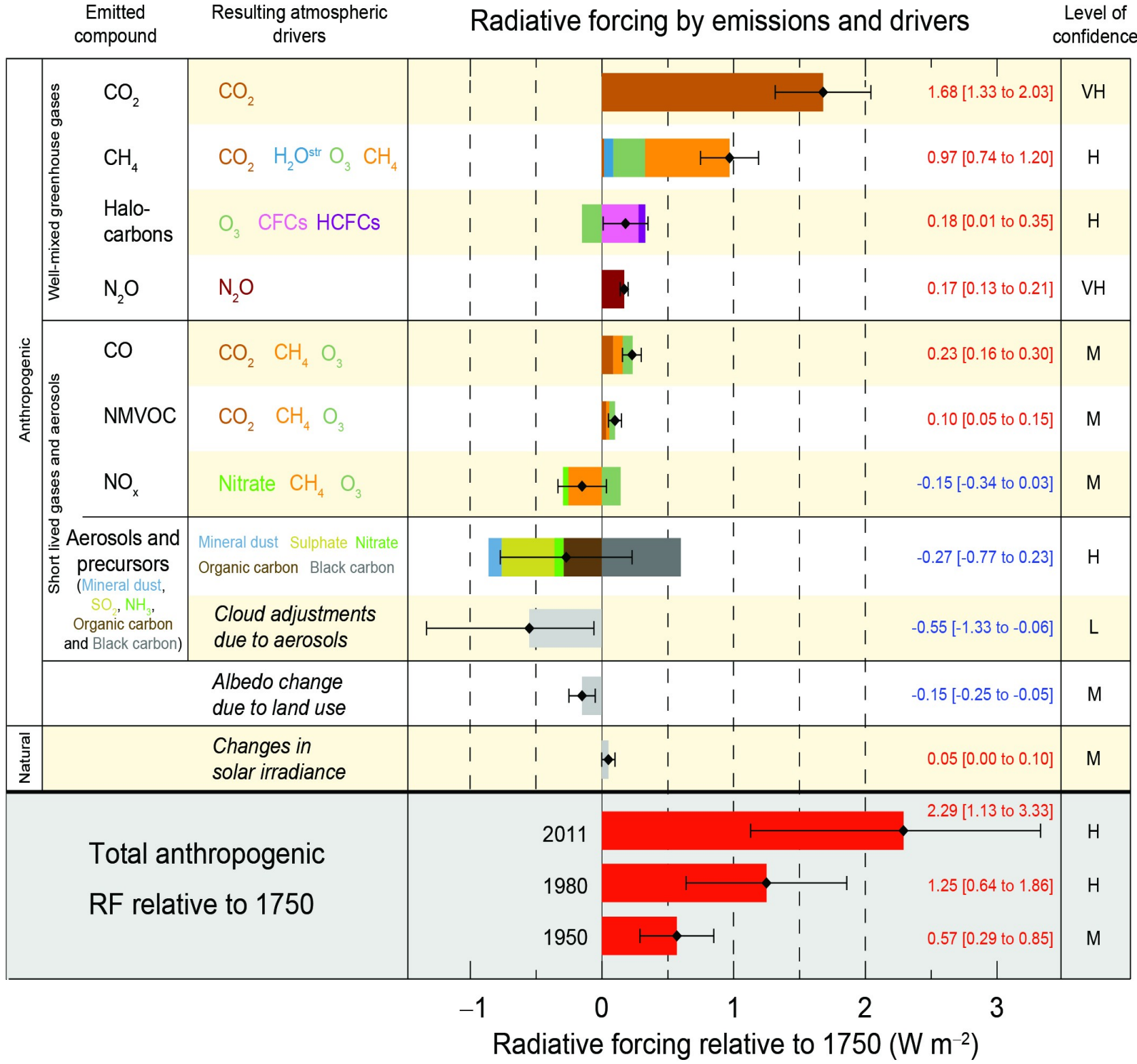
## **Wymuszanie radiacyjne** (ang. *Radiative Forcing*, RF).

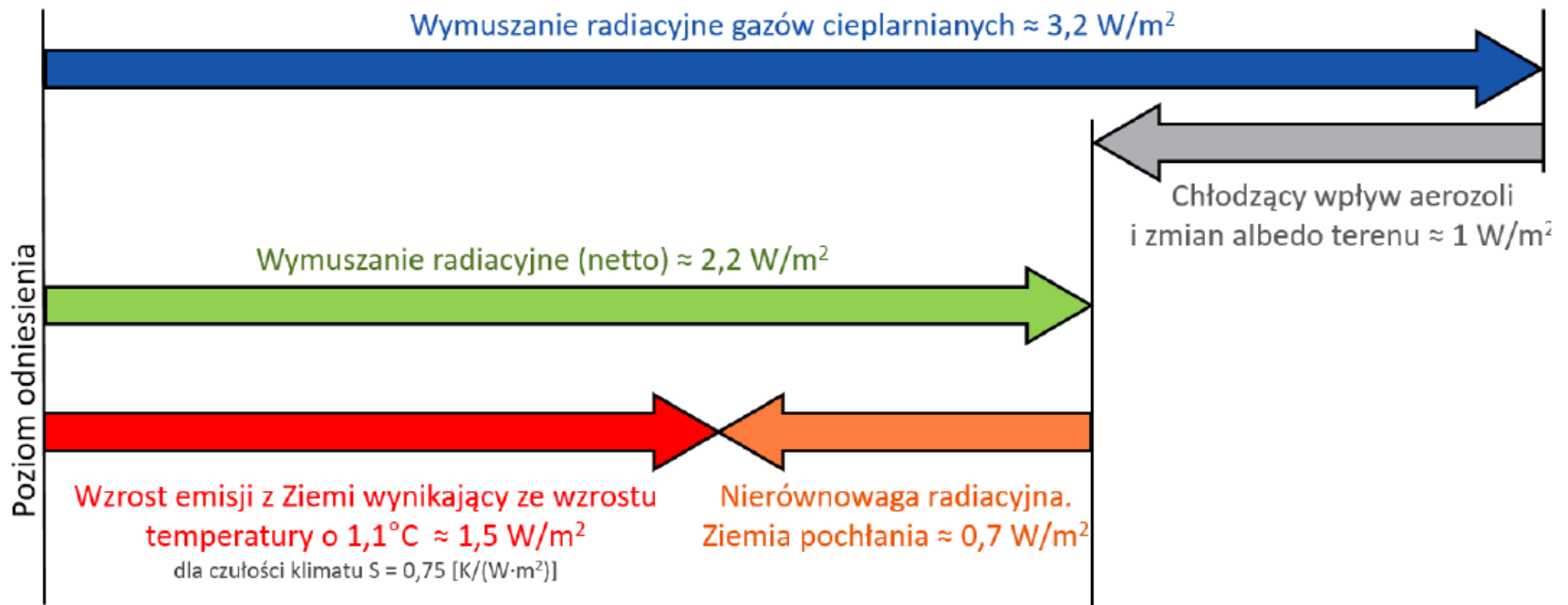
Różnica między strumieniem energii słonecznej zabsorbowanej przez planetę a strumieniem energii promieniowania termicznego planety emitowanego w kosmos **po dostosowaniu się temperatur w atmosferze, wilgotności i chmur, czyli bardzo szybko (dni i tygodnie) działających elementów systemu klimatycznego, ale zanim nastąpi reakcja wolnozmiennych (dziesiątki lat i więcej) elementów systemu klimatycznego (np. wzrośnie temperatura oceanu).**

Wymuszanie dodatnie związane jest ze wzrostem, a ujemne – ze spadkiem średniej temperatury powierzchni Ziemi.

Wymuszanie radiacyjne:

jak zmieniły się strumienie promieniowania w systemie klimatycznym od 1750r. wskutek zmian składu atmosfery, zmian albedo, zmian w dopływie promieniowania słonecznego.



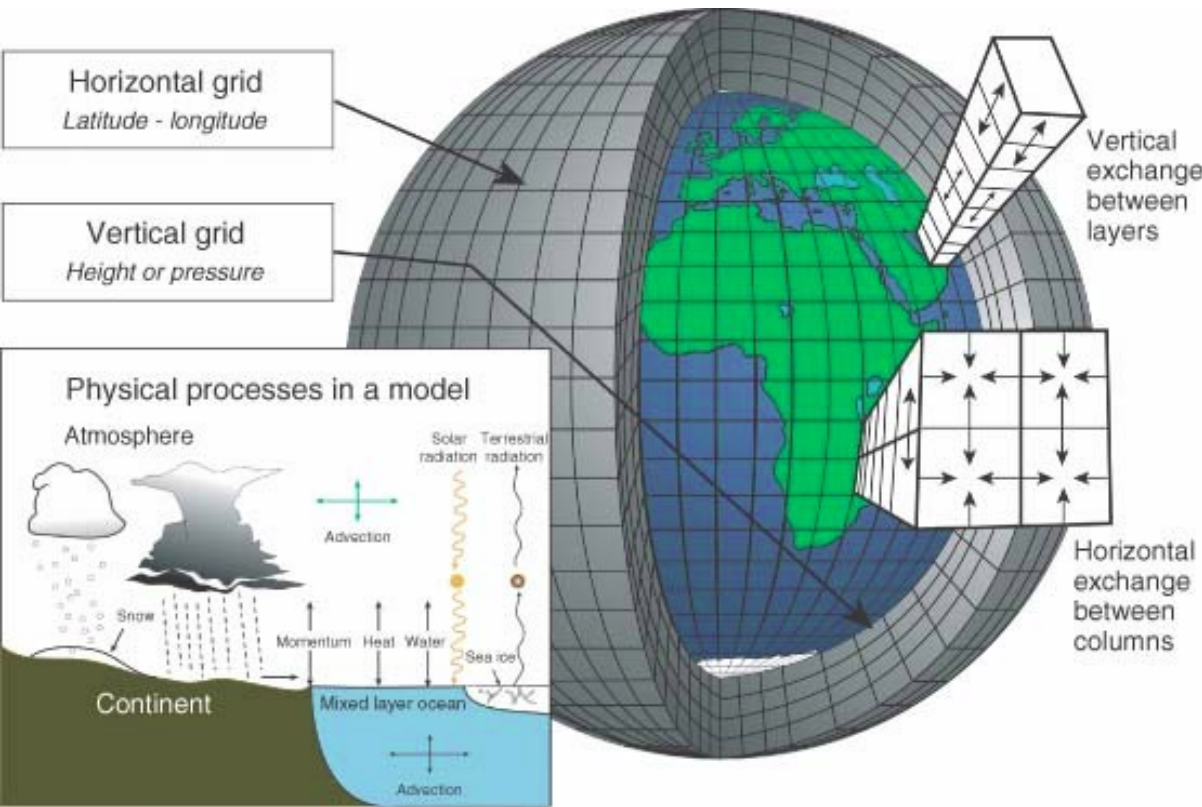


Wymuszenie radiacyjne  $2,2 \text{ W/m}^2$  doprowadziło do wzrostu temperatury powierzchni Ziemi, w wyniku którego wypromieniowuje ona  $1,5 \text{ W/m}^2$  więcej energii.

Pozostała nierównowaga energetyczna równa  $0,7 \text{ W/m}^2$  prowadzi do dalszego wzrostu energii (nagrzewania się) ziemskiego systemu klimatycznego.

Wartości są przybliżone, zaokrąglone i zbilansowane, jednak każda z nich jest obarczona pewnym stopniem niepewności – największym dla aerozoli atmosferycznych oraz czułości klimatu, najmniejszym dla mierzonej sumarycznej nierównowagi radiacyjnej.

# Modelowanie klimatu to budowa wirtualnej planety dzięki znajomości praw fizyki:



równania hydrodynamiki  
równania termodynamiki  
prawa transferu radiacyjnego  
własności składników atmosfery  
promieniowanie słoneczne  
oddziaływanie z podłożem  
przemiany chemiczne

---

układ równań modelu

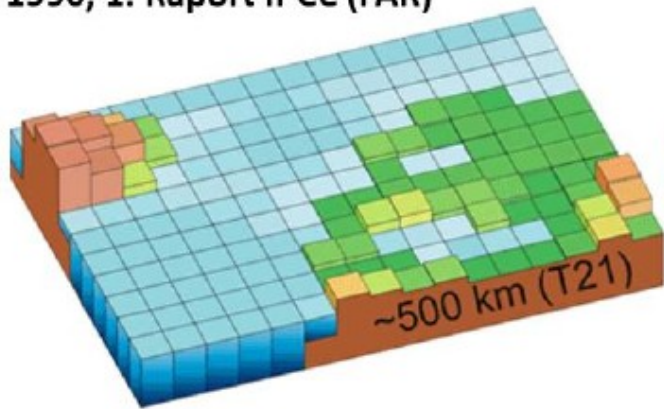
„zakłęcie” w kod numeryczny  
uwzględnienie danych  
wielki superkomputer

---

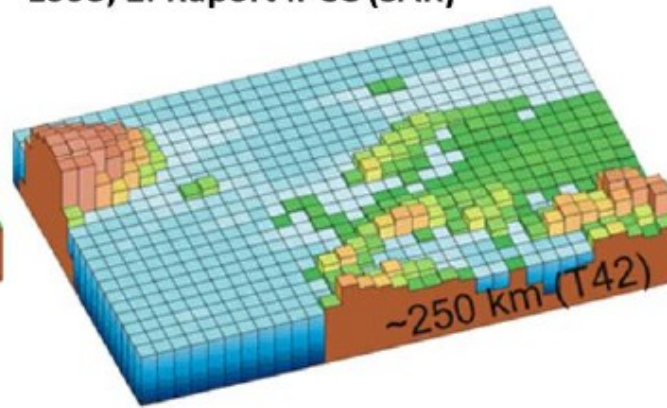
**wirtualna rzeczywistość, w której możemy symulować mechanizmy klimatyczne i związki przyczynowo-skutkowe.**



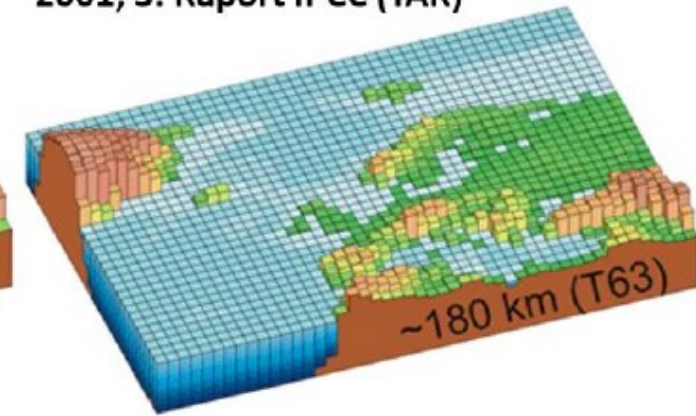
1990, 1. Raport IPCC (FAR)



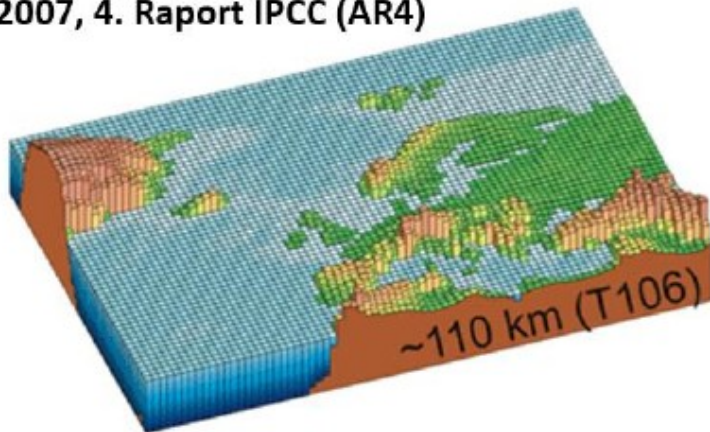
1995, 2. Raport IPCC (SAR)



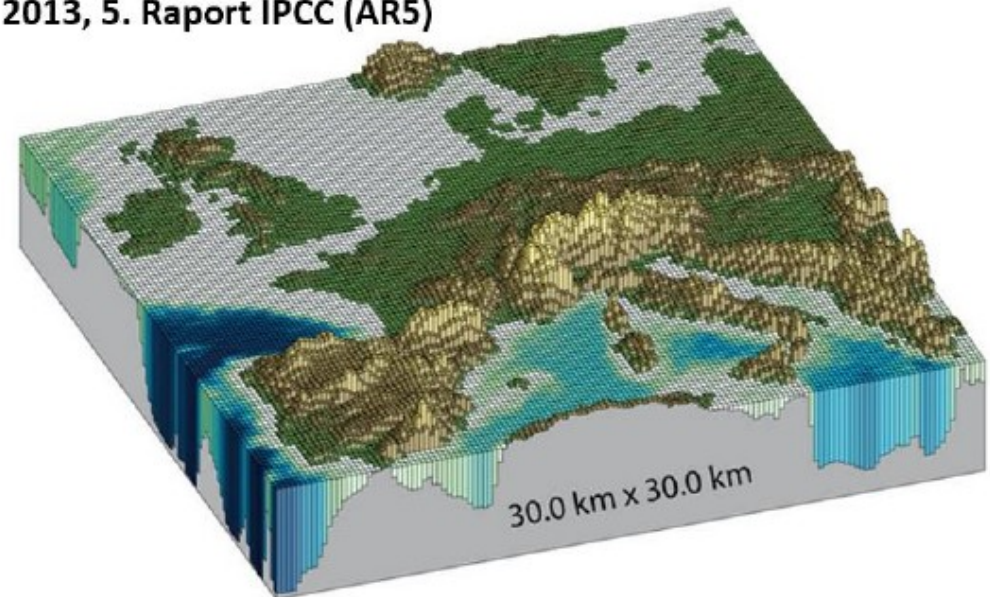
2001, 3. Raport IPCC (TAR)



2007, 4. Raport IPCC (AR4)



2013, 5. Raport IPCC (AR5)

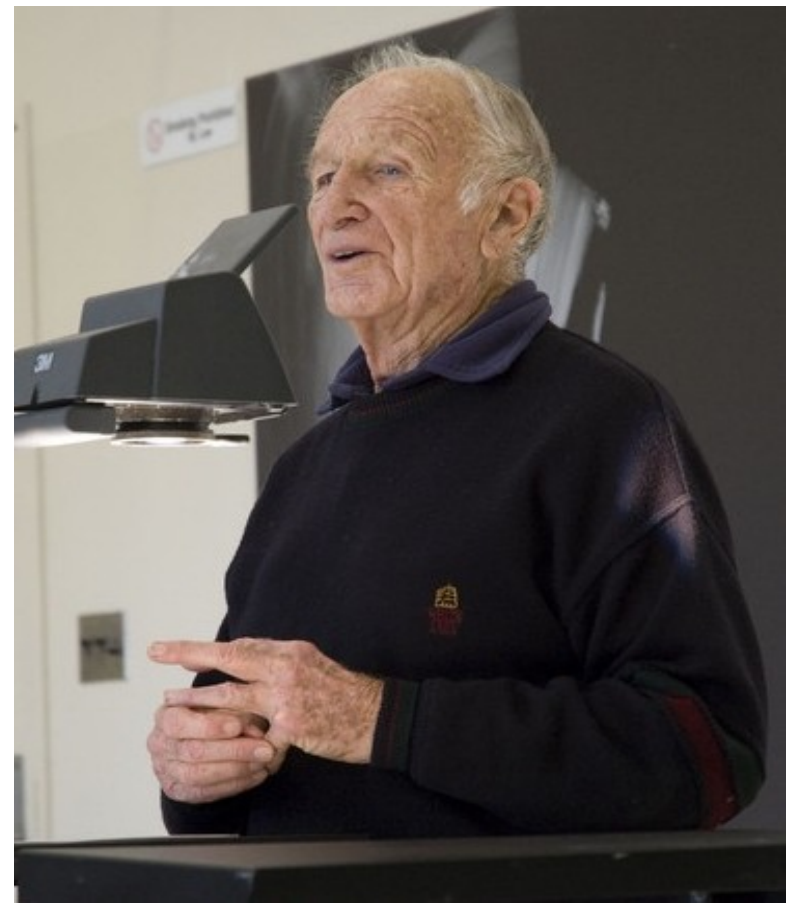


Rozwój siatek modeli klimatu.

Edward N. Lorenz (1917-2008):

pokazał co to znaczy przewidywalność  
(ang. predictability) układu fizycznego.

Pokazał, czym różni się przewidywalność  
pogody i klimatu.



Wybrane prace:

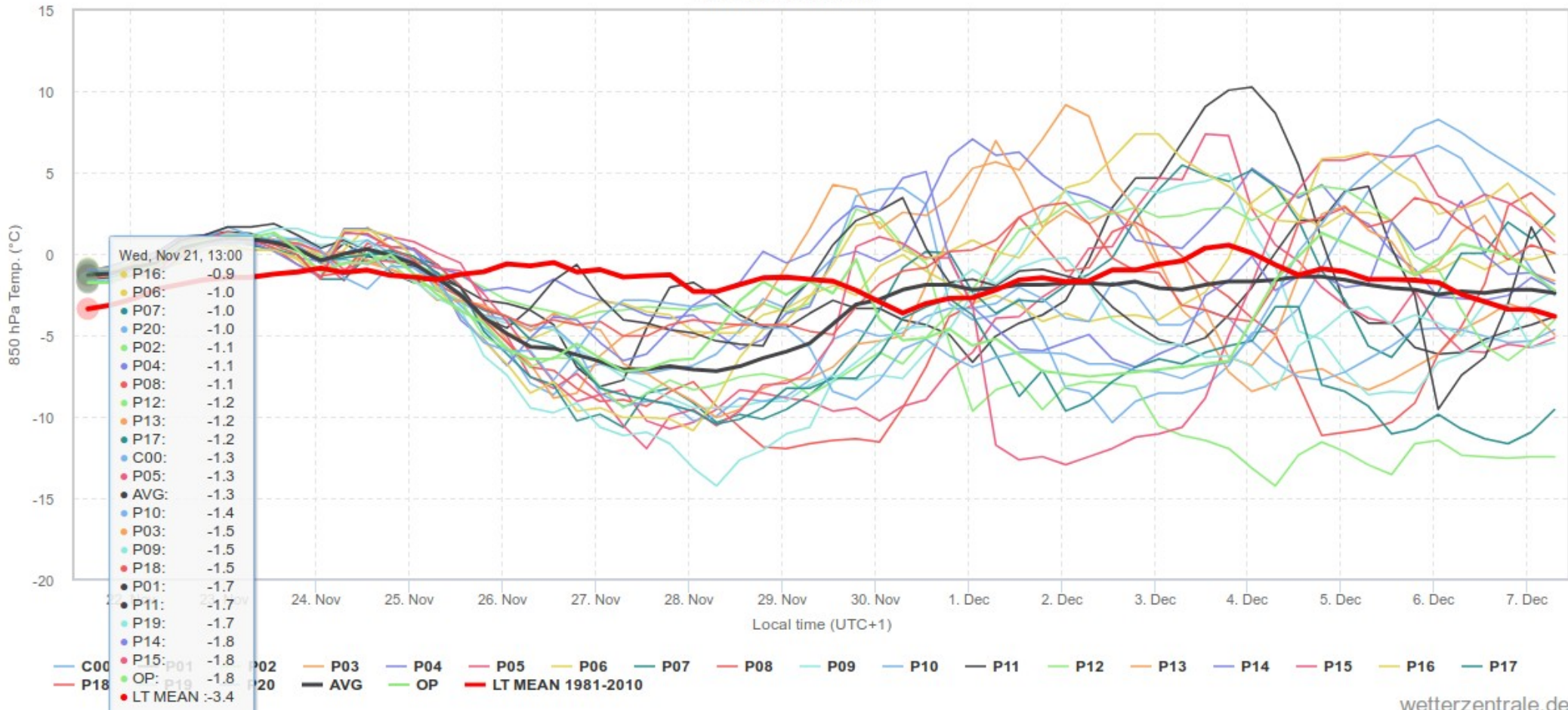
„Deterministic nonperiodic flow”, 1963 (atraktor Lorenza, efekt motyla, nieprzewidywalność pogody)

„The problem of deducing the climate from the governing equations”, 1964 (rozdzielenie między brakiem przewidywalności układu nieliniowego ze względu na nieznajomość stanu początkowego układu i ze względu na niepełną znajomość fizyki – równań – układu)

„Climatic change as a mathematical problem”, 1970 (nieprzewidywalność pogody -chaos- nie znaczy że klimat jest nieprzewidywalny)

„Predictability – a problem partly solved”, 2006





## Przewidywalność pogody:

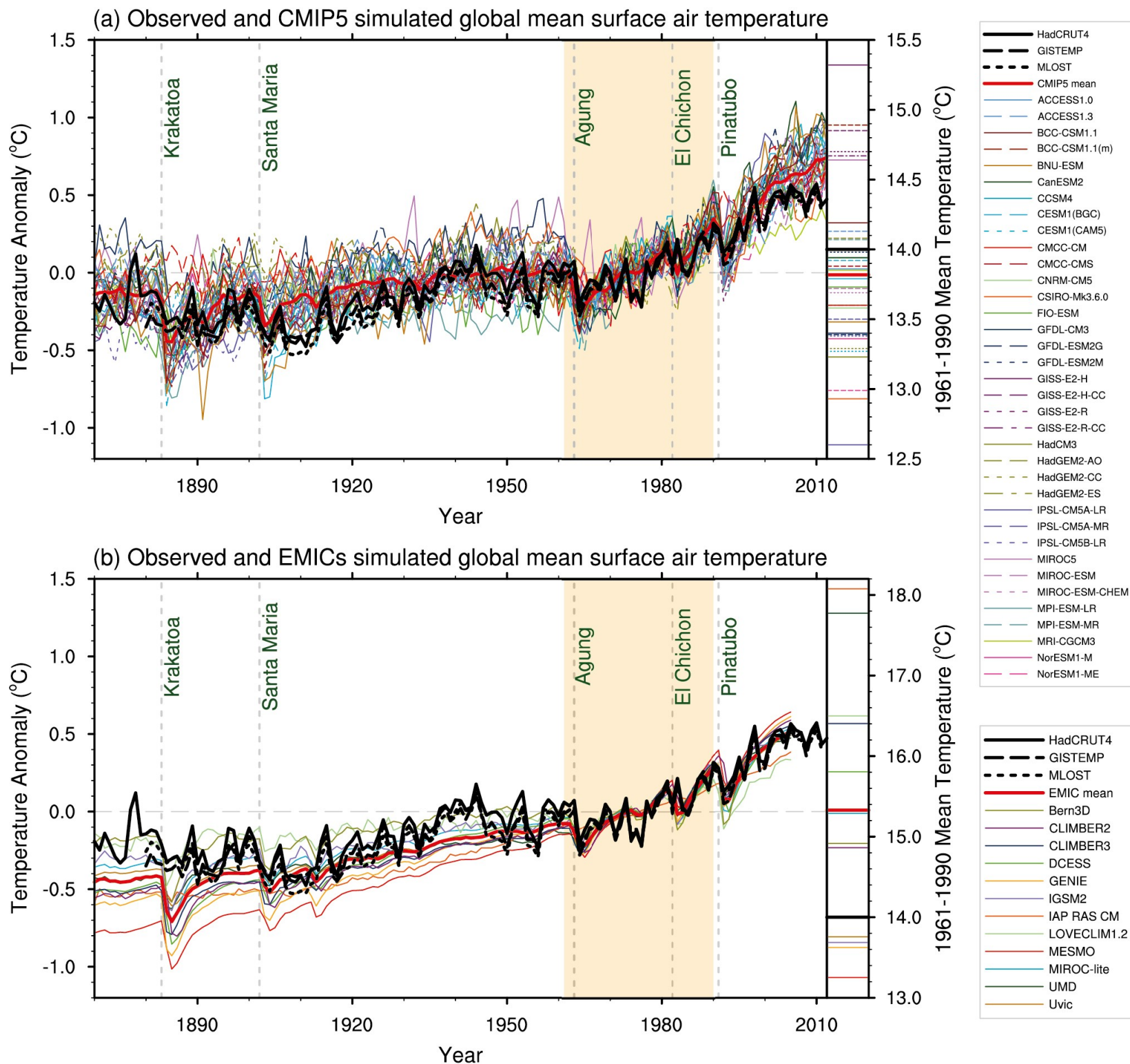
- poszczególne realizacje procesu dynamiczno-stochastycznego (prognozy pogody dla różnych warunków początkowych w zakresie błęd pomiarowego - cienkie kolorowe linie),
- średnia po zespole realizacji (czarna linia),
- średnia klimatyczna (czerwona linia).

Ewaluacja modeli klimatu – przewidywalność klimatu.

Wiązka symulacji przebiegu anomalii temperatury globalnej w XX wieku.

Górny panel: symulacje modelami o dużym stopniu komplikacji.

Dolny panel: symulacje z modelami o umiarkowanym stopniu komplikacji.





# Kody modeli klimatycznych są w większości otwarte:

www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/cam/

NCAR | UCAR | CESM COMMUNITY EARTH SYSTEM MODEL

## CESM Models

### CESM1.0: CAM DOCUMENTATION

INTRODUCTION

Version 5.0 of the Community Atmosphere Model (CAM) is the latest in a series of global atmosphere models developed primarily at the National Center for Atmospheric Research (NCAR). CAM5.0 includes significant enhancements to the representation of atmospheric processes resulting in a number of notable improvements. CAM4.0 is also available in the CESM1.0 release. Development of the model was led by the Atmosphere Model Working Group (AMWG).

DOCUMENTATION

- CAM-5.1.1 (CESM-1.0.5)**
  - Users Guide [html (single page)] [html (multipage)] [pdf]
  - Search Namelist Variables
  - CAM stand alone build scripts have a bug. Untar `cam_build_fix.tar` in `models/atm/cam/bld` to fix.
- CAM-5.1.1 (CESM-1.0.4)**
  - Users Guide [html (single page)] [html (multipage)] [pdf]
  - Search Namelist Variables
- CAM-5.1 (CESM-1.0.3)**
  - Users Guide [html (single page)] [html (multipage)] [pdf]
  - Search Namelist Variables

www.giss.nasa.gov/tools/modelE/

National Aeronautics and Space Administration  
Goddard Institute for Space Studies

## GISS ModelE

The current incarnation of the GISS series of coupled atmosphere-ocean models is now available. Called ModelE, it provides the ability to simulate many different configurations of Earth System Models - including interactive atmospheric chemistry, aerosols, carbon cycle and other tracers, as well as the standard atmosphere, ocean, sea ice and land surface components.

The model version being used for the CMIP5 simulations will soon be available in a complete package, though there are nightly snapshots of the current code repository available (including the frozen 'ARS\_a\_branch'), but users should be aware that these snapshots are presented 'as is' and are not necessarily suitable for publication-quality experiments.

Please let us know if you intend to use this code by subscribing to our mailing list. We will then keep you (very occasionally) informed about code patches and possible improvements to the configuration.

Documentation is included in the distribution (under directory `doc`), and is included below for reference. System requirements and configuration of the distribution for any new system is discussed in detail.

### GISS GCM Documentation Index

Model documentation in the literature is usually by component, with only occasional general papers on the whole system. The most recent general paper (including the ModelE AR4 specification and results from three standard configurations), is given in the following journal article:

- Schmidt, G.A., R. Ruedy, J.E. Hansen, I. Aleinov, N. Bell, M. Bauer, S. Bauer, B. Cairns, V. Canuto, Y. Cheng, A. Del Genio, G. Faluvegi, A.D. Friend, T.M. Hall, Y. Hu, M. Kelley, N.Y. Kiang, D. Koch, A.A. Lacis, J. Lerner, K.K. Lo, R.L. Miller, L. Nazarenko, V. Oinas, Ja. Perlwitz, Ju. Perlwitz, D. Rind, A. Romanou, G.L. Russell, Mki. Sato, D.T. Shindell, P.H. Stone, S. Sun, N. Tausnev, D. Thresher, and M.-S. Yao 2006. Present day atmospheric simulations using GISS ModelE: Comparison to in-situ, satellite and reanalysis data. *J. Climate* **19**, 153-192.

Other articles on ModelE development include:

- Aleinov, I., and G.A. Schmidt 2006. Water isotopes in the GISS ModelE land surface scheme. *Global Planet. Change* **51**, 108-120, doi:10.1016/j.gloplacha.2005.12.010.
- Kim, D., A. Del Genio, and M.-S. Yao, 2011. Moist Convection scheme in Model E2, Technical note. (pdf)
- Koch, D., G.A. Schmidt, and C.V. Field 2006. Sulfur, sea salt and radionuclide aerosols in GISS ModelE. *J. Geophys. Res.* **111**, D06206, doi:10.1029/2004JD005550.

www.mpimet.mpg.de/en/wissenschaft/modelle/echam/echam5.html

Max-Planck-Institut für Meteorologie

## ECHAM5

ECHAM5 is the 5th generation of the ECHAM general circulation model. Depending on the configuration the model resolves the atmosphere up to 10 hPa for tropospheric studies, or up to 0.01 hPa for middle atmosphere studies (often referred to as MAECHAM5).

Contact Person: [Marco Giorgetta](#)

Status

- ECHAM5 is available to the scientific community -> [Model distribution](#)
- Current version: **echam-5.4.02**

Documentation

- ECHAM5/MAECHAM5
  - MPI Report No. 349: The atmospheric general circulation model ECHAM5, Part I: Model description ([PDF](#))

https://verc.enes.org/models/earthsystem-models/ncc/noresm

ENES EUROPEAN NETWORK FOR EARTH SYSTEM MODELLING

## NorESM

Norwegian Earth System Model

Name: NorESM  
Contact: [NCC Help Desk](#)  
Homepage: [www.uib.no](#)  
Assembling Guide: [www.geosci-model-dev.net](#)

Component models used

- CAM-OSLO**: representing the atmosphere
- CLM**: representing the land
- CICE**: representing the sea ice
- MICOM-HAMOC**: representing the ocean

Model versions (CIM views)

- NorESM1-M: Norwegian Earth System Model 1 - medium resolution
- NorESM1-ME: Norwegian Earth System Model 1 - medium resolution with capability to be fully emission driven

# Otwarty jest też dostęp do wyników symulacji:

cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data\_getting\_started.html

PCMDI - Program For Climate Model Diagnosis and Intercomparison

Denmark Norway Japan United Kingdom Italy  
Russia S. Korea Germany France  
The Netherlands China Canada  
Australia USA

## CMIP5 Coupled Model Intercomparison Project

WCRP World Climate Research Programme

Home News CMIP3 CMIP5 Accomplishments Links Contact

RSS

CMIP5

Home

- CMIP5 Overview
- CMIP Home

News

Guide to CMIP5

Experiment Design

Data Access

- Getting Started
- Terms of use
- Citation
- Availability
- Data Portal
- FAQs

For Data Providers

More Info

- CMIP5 Status
- CMIP5 Errata
- CMIP5 Publications
- Obs4MIPs Wiki
- Contact

CMIP Home \ CMIP5 Home \ Data Access \ Getting Started \

## CMIP5 - Data Access - Getting Started

### CMIP5 Data - Getting Started

### Getting Started Tutorial for Users Seeking CMIP5 Model Output

#### NOTES:

- Please use Firefox 7+, Safari 5+ or Chrome 1
- The old ESGF gateways ( PCMDI: <http://pcmdi3.llnl.gov> gateway was shut down perm below in 2a. Refer to 2b for the registration at

#### 1. Access to data.

Anyone can browse the CMIP5 model output arc below). Your account will be valid for browsing al restrictions are placed on different datasets serv CMIP5 (see step 3 below).

#### 2. Obtaining an ESGF account.

- All CMIP5 Model output can be accessed via any to CMIP3 data and also the ESG "gateways" orig a dozen ESGF portals currently exist, the followi
  - PCMDI: <http://pcmdi9.llnl.gov/>
  - BADC: <http://esgf-index1.ceda.ac.uk>
  - DKRZ: <http://esgf-data.dkrz.de>
  - NCI: <http://esg2.nci.org.au>

The other nodes are listed on the home page of  
b. Who should register?

https://pmp3.lscce.ipsl.fr

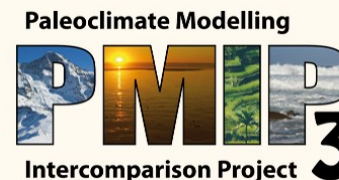


- Overview
- What's New?
- Events
- Working Groups
- PMIP3-CMIP5 Experiments
- Model Output Database
- Paleo-data Syntheses
- Publications
- PMIP3 wiki
- Contacts

PMIP 1 - PMIP 2

## Paleoclimate Modelling Intercomparison Project Phase III

**NEW!** The third PMIP3 meeting will take place in Namur, Belgium, Sunday, May 25<sup>th</sup> to Friday, May 30<sup>th</sup> 2014



The Palaeoclimate Modelling Intercomparison Project (PMIP) began in the early 1990s to provide an efficient mechanism for coordinating palaeoclimate modelling activities. The key aims of the project are to:

- Understand the mechanisms of climate change
- Identify the different climatic factors that shape our environment
- Evaluate the capability of state-of-the-art models to reproduce different climates

This is achieved through:

- Coordinated model experiments
- Paleo-data syntheses
- Model-data comparisons

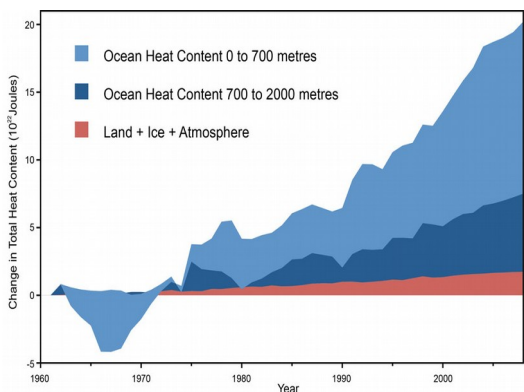
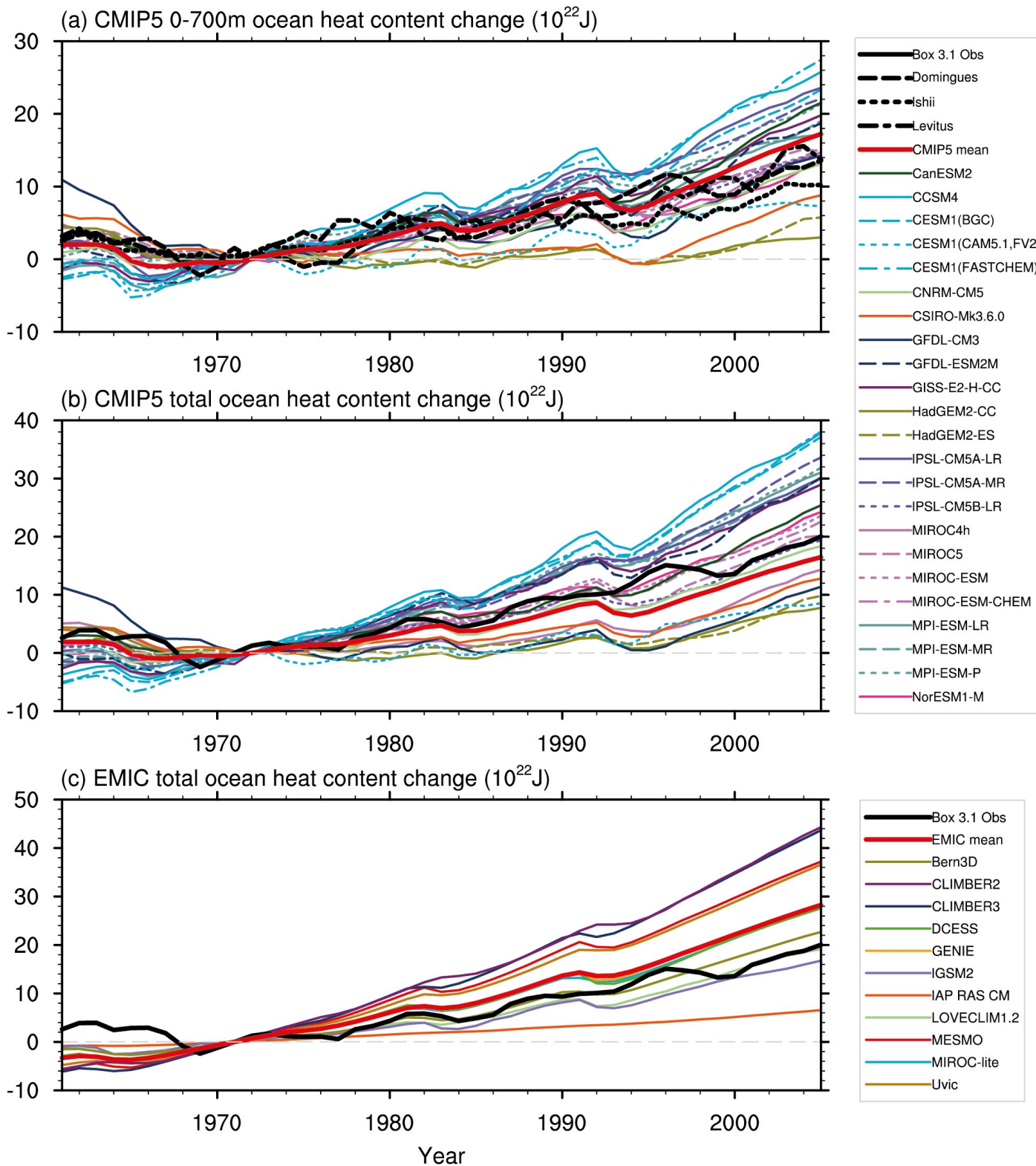


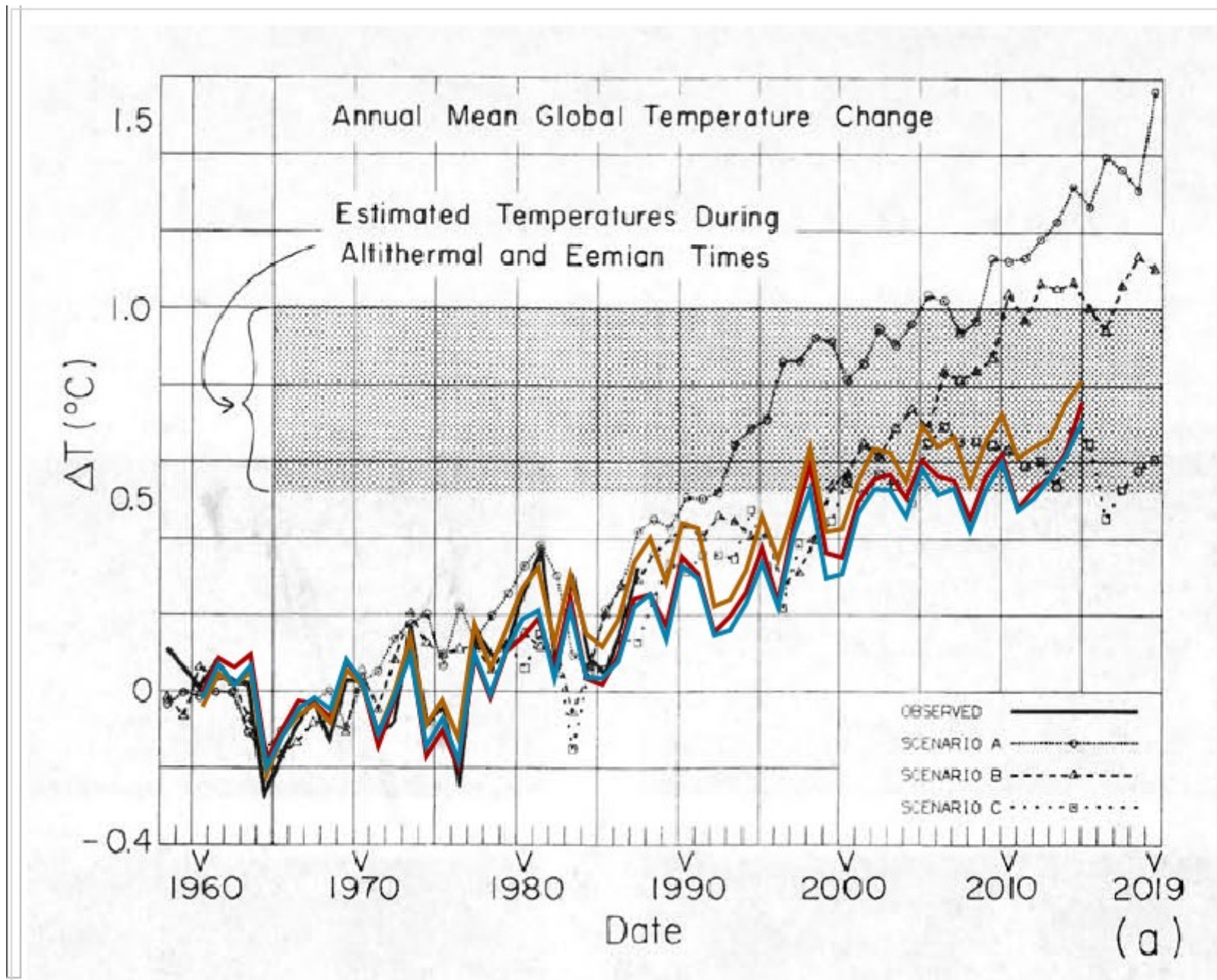
# Ewaluacja modeli klimatu.

Wiązka symulacji przebiegu energii termicznej oceanów w II poł. w XX wieku.

Górny i środkowy panel: symulacje modelami o dużym stopniu komplikacji.

Dolny panel: symulacje z modelami o umiarkowanym stopniu komplikacji.



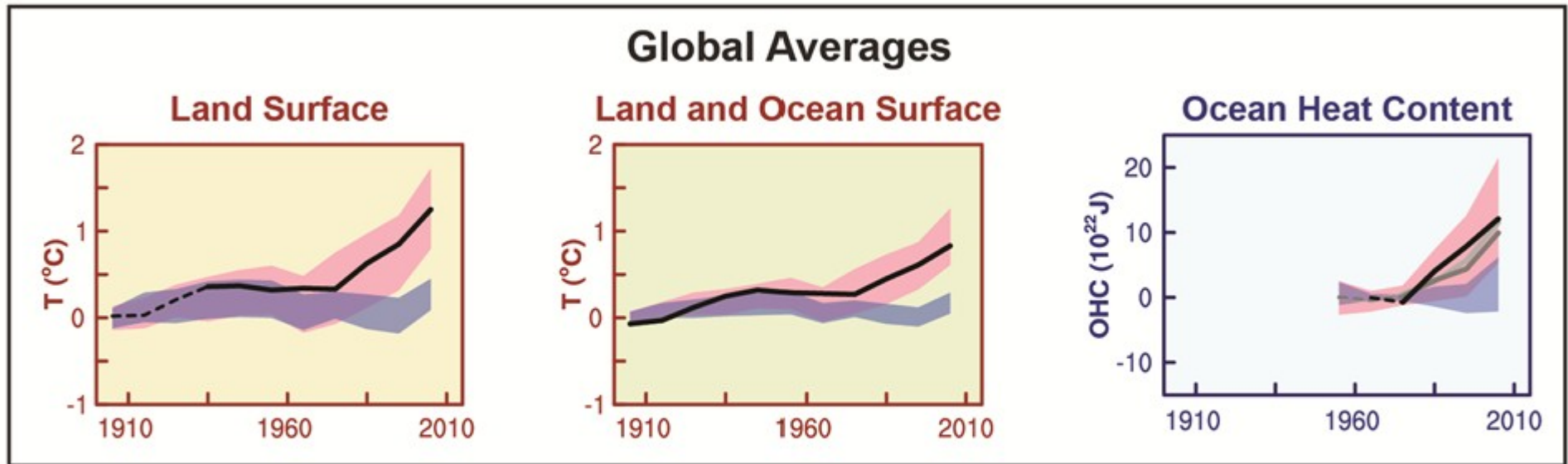


Porównanie prognoz Hansena (1988) z obserwacjami

<https://moyhu.blogspot.com/2015/10/hansens-1988-predictions-revisited.html>



Jest niezwykle prawdopodobne że działalność ludzka jest dominującą przyczyną ocieplenia obserwowanego od lat 50-tych XX wieku.



— Observations

■ Models using only natural forcings

■ Models using both natural and anthropogenic forcings

Technika prognozowania klimatu : multimodel ensemble – pozwala a priori na ocenę prawdopodobieństwa sprawdzenia prognozy – podejście bayesowkie.

**Dlaczego możemy (w ograniczonym stopniu) ufać prognozom klimatu:**

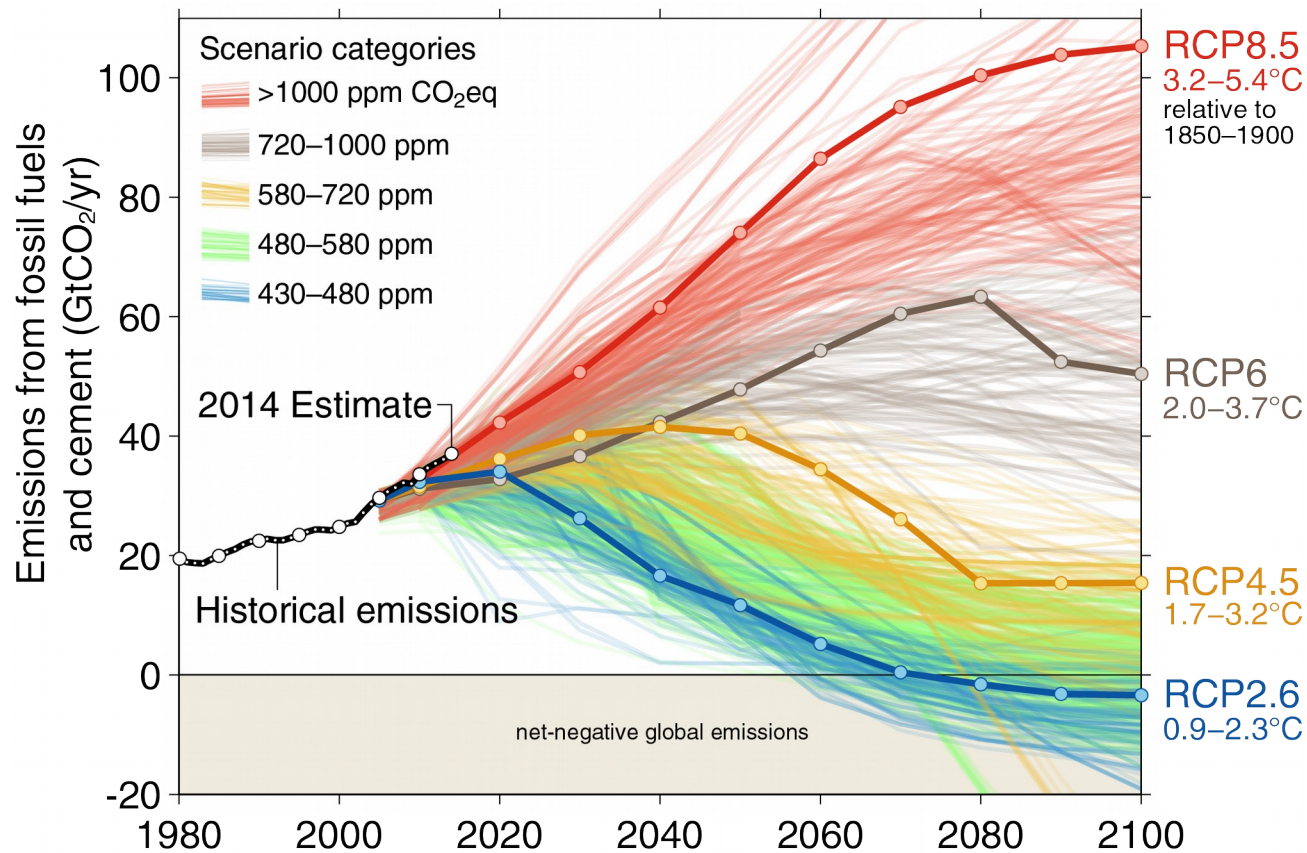
- 1) modele bazują na podstawowych powszechnych prawach fizyki: zasadach zachowania energii, pędu, momentu pędu, masy....
- 2) w „wirtualnej rzeczywistości” modeli wielkości fizyczne i ich statystki zachowują się w sposób rozsądny, a kolejne ulepszenia prowadzą do poprawy zachowań modeli zgodnie z naszym doświadczeniem i oczekiwaniami;
- 3) modele odtwarzają trendy i obserwowany rozkład przestrzenny wielu zmiennych;
- 4) testy modeli na przeszłych stanach atmosfery ( w tym tych sytuacjach paleo, dla których mamy odpowiednie dane) stanowią dodatkowe, niezależne źródło weryfikacji;
- 5) różnorodne modele dają zgodne (w spodziewanych granicach) wyniki symulacji na tych samych danych;
- 6) prognozy nowej generacji modeli są zgodne ze starszymi;
- 7) potrafimy zinterpretować wyniki symulacji w sensie zrozumienia procesów fizycznych i sprzężeń.

R Knutti, 2008: Should we believe model predictions of future climate change? *Phil. Trans. R. Soc. A* 366, 4647–4664  
doi:10.1098/rsta.2008.0169

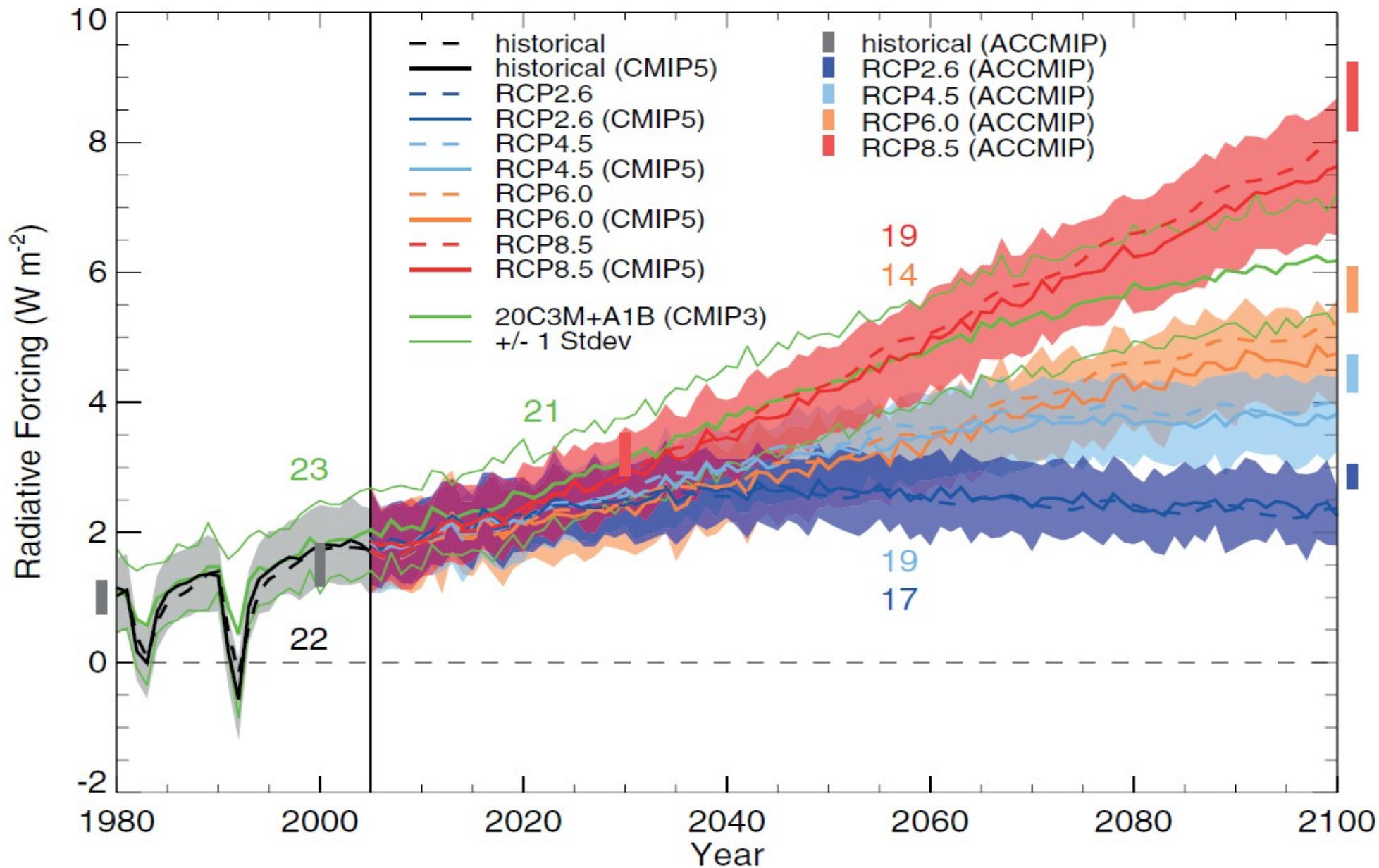
# Obserwowane emisje i scenariusze przyszłych emisji

Aktualna ścieżka emisji prowadzi do wzrostu temperatury w roku 2100 o 3.2–5.4°C ponad wartość sprzed ery przemysłowej. Aby utrzymać wzrost temperatury nie większy niż 2°C konieczne są znaczne redukcje emisji.

Data: CDIAC/GCP/IPCC/Fuss et al 2014



Pokazano ponad 1000 scenariuszy z Piątego Raportu IPCC  
 Fuss et al 2014; [CDIAC](#); [Global Carbon Budget 2014](#)

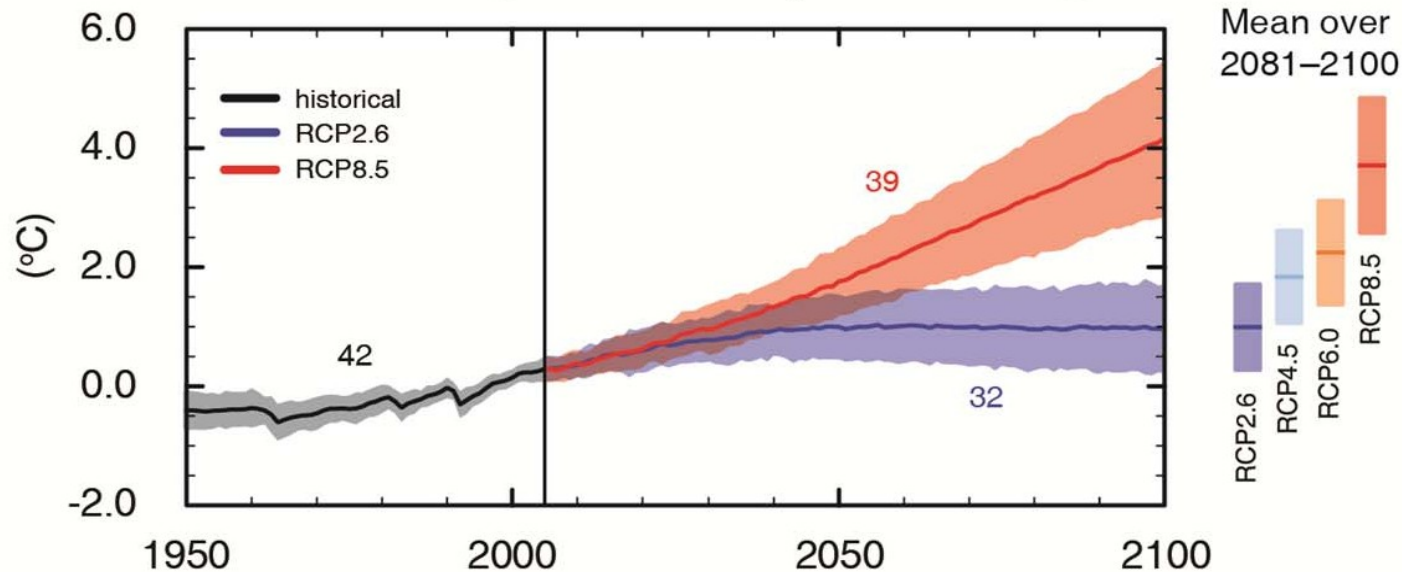


Zmiany wymuszania radiacyjnego (zmian w bilansie energetycznym) w symulacjach numerycznych wieloma modelami dla różnych scenariuszy emisji. Niepewność związana jest głównie z tym jak reprezentujemy w modelach klimatu chmury.

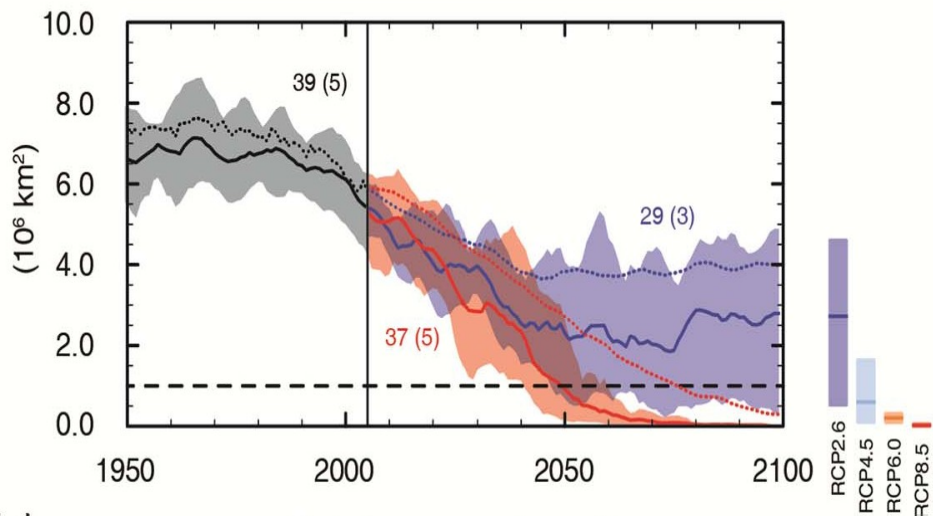


Kontynuacja emisji gazów cieplarnianych przyniesie dalszy wzrost temperatur i zmiany we wszystkich elementach systemu klimatycznego. Ograniczenie tych zmian będzie wymagać znaczących i długotrwałych redukcji emisji gazów cieplarnianych.

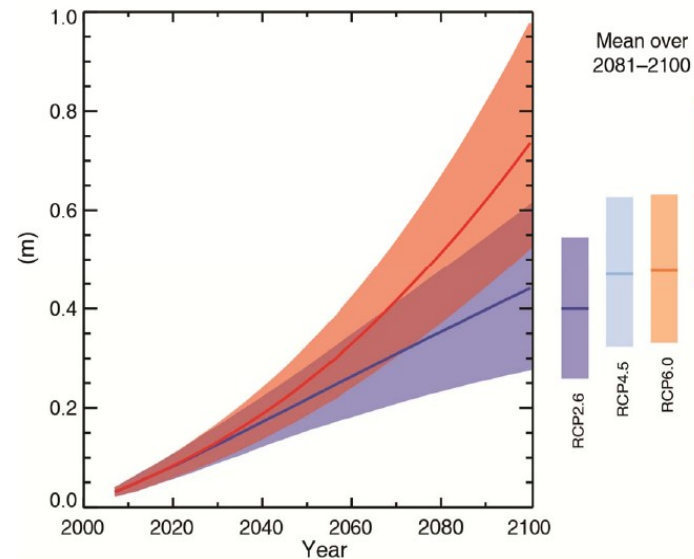
(a) Global average surface temperature change



(b) Northern Hemisphere September sea ice extent

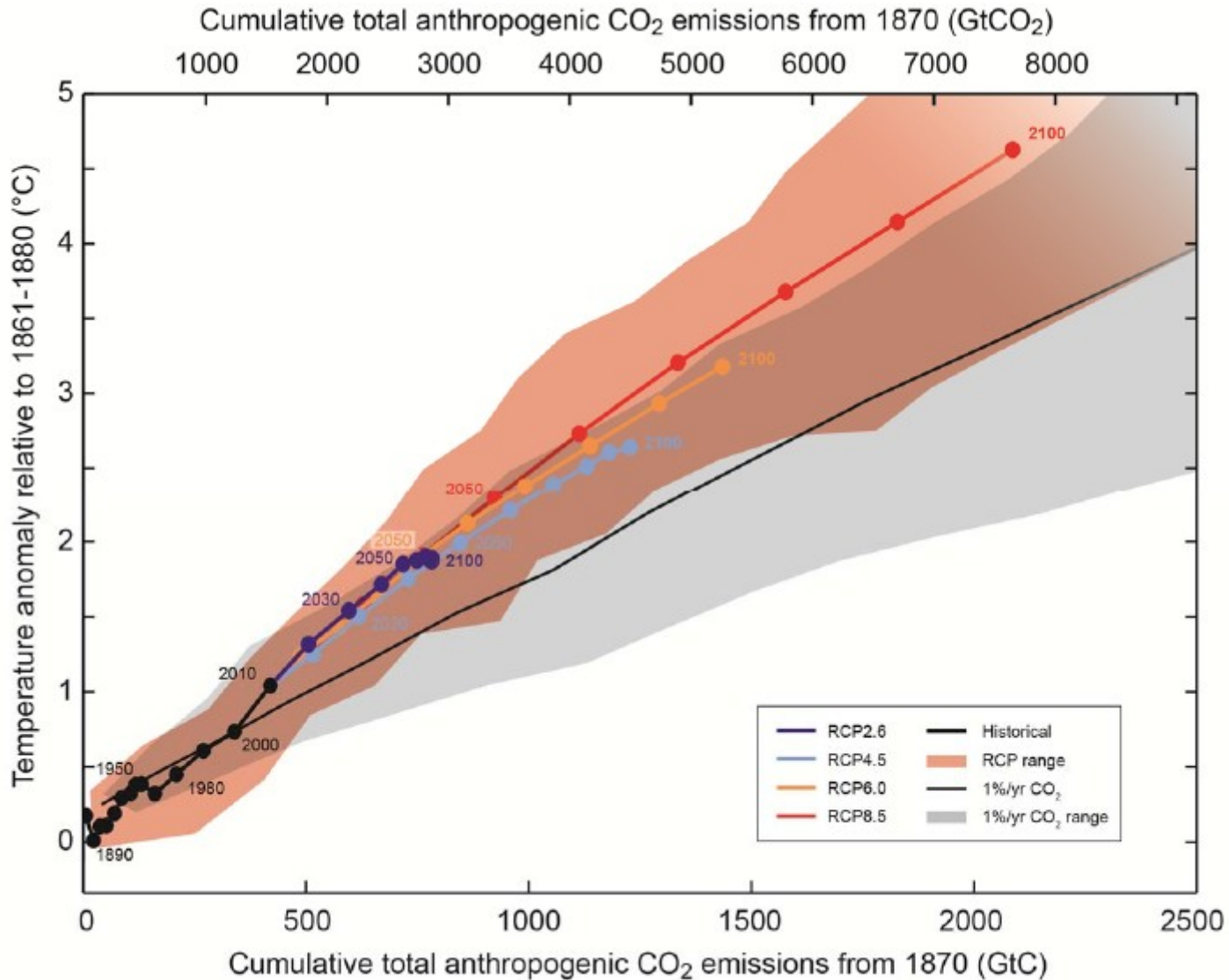


Global mean sea level rise



### E.8 Climate Stabilization, Climate Change Commitment and Irreversibility

Cumulative emissions of CO<sub>2</sub> largely determine global mean surface warming by the late 21st century and beyond (see Figure SPM.10). Most aspects of climate change will persist for many centuries even if emissions of CO<sub>2</sub> are stopped. This represents a substantial multi-century climate change commitment created by past, present and future emissions of CO<sub>2</sub>. {12.5}

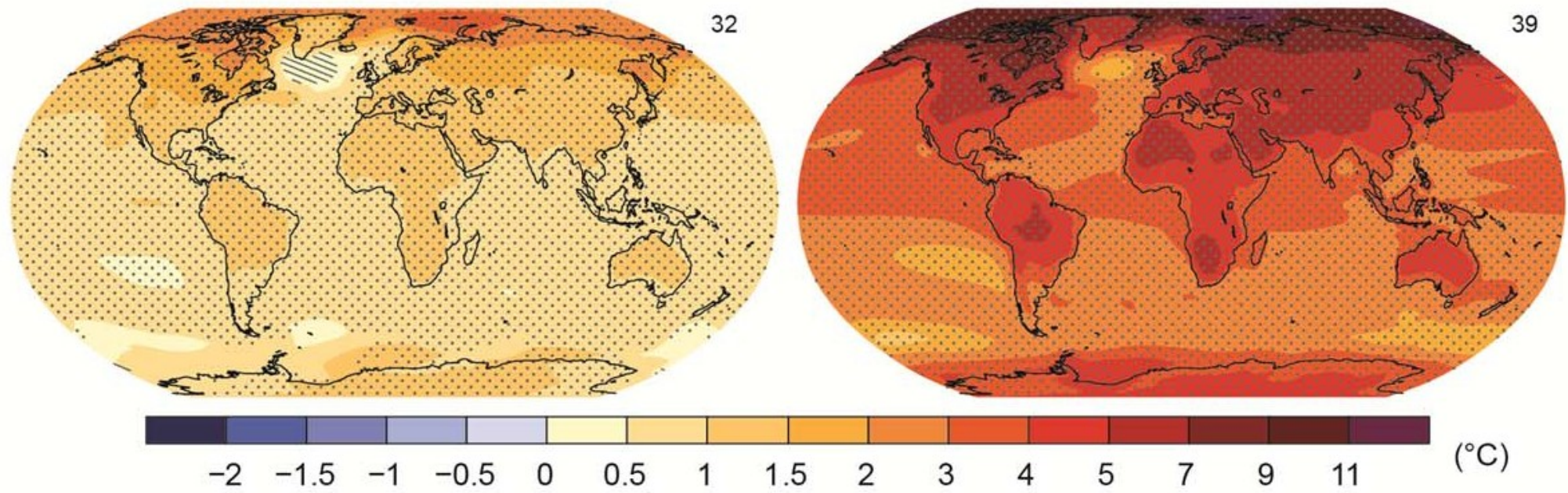




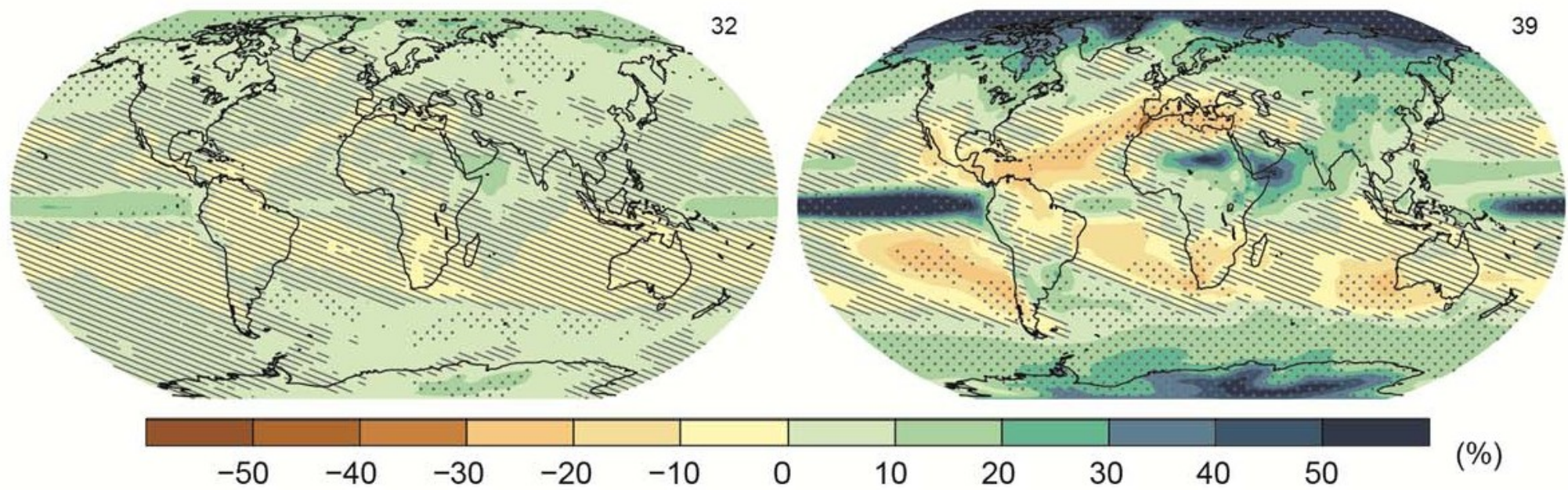
RCP 2.6

RCP 8.5

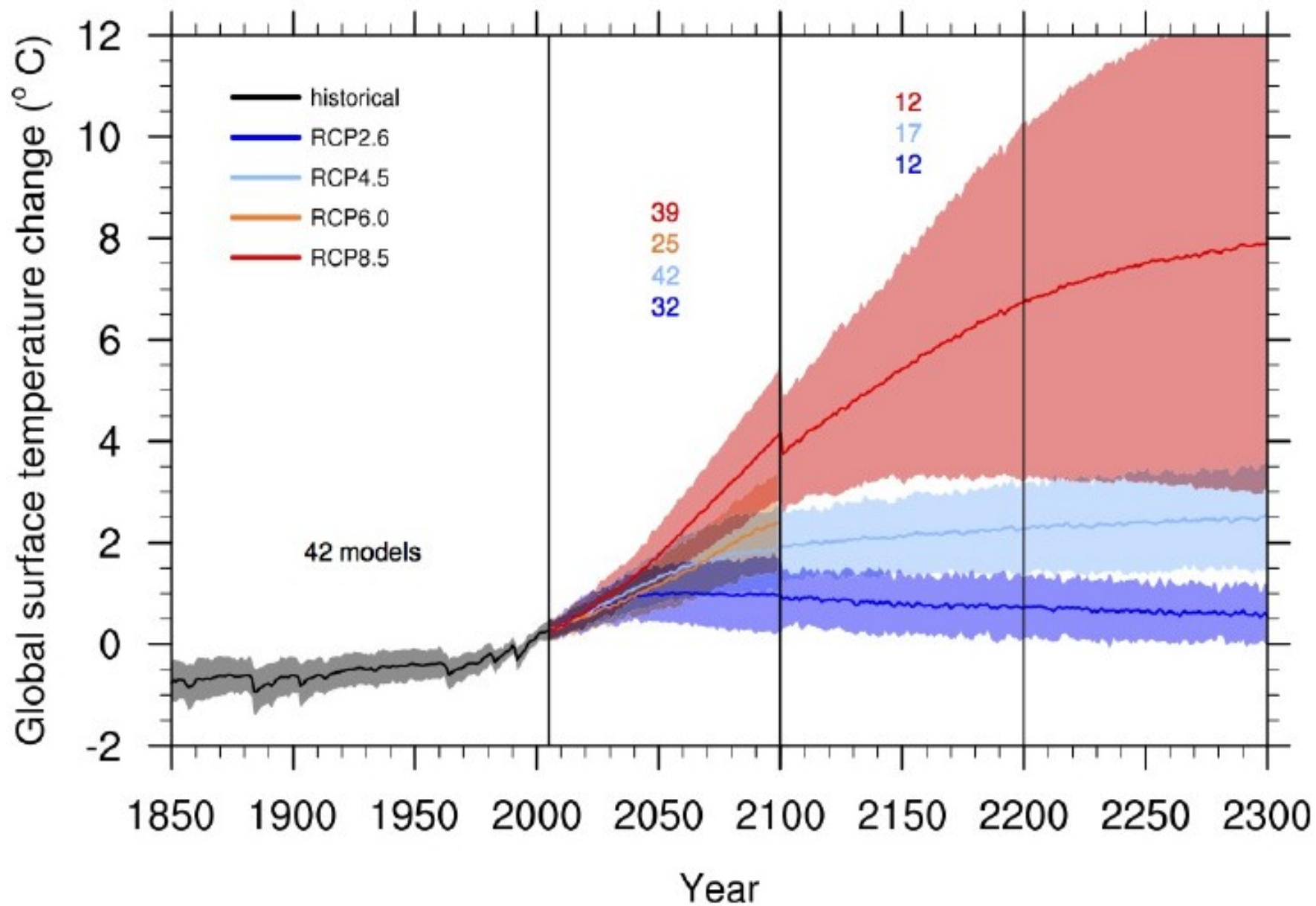
(a) Change in average surface temperature (1986–2005 to 2081–2100)



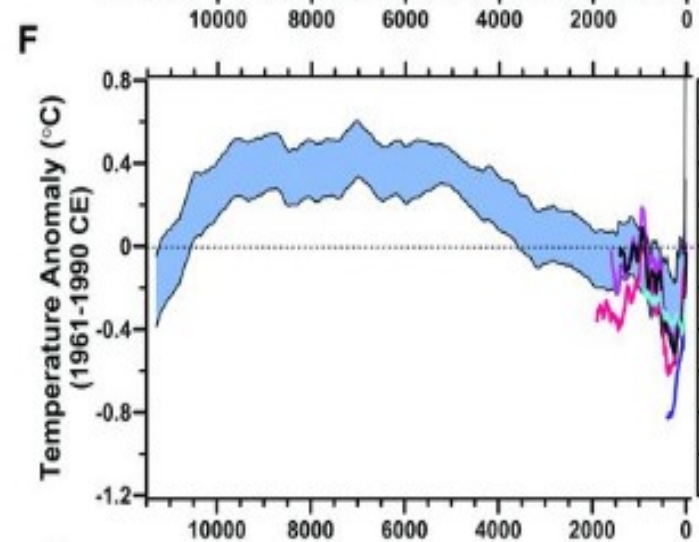
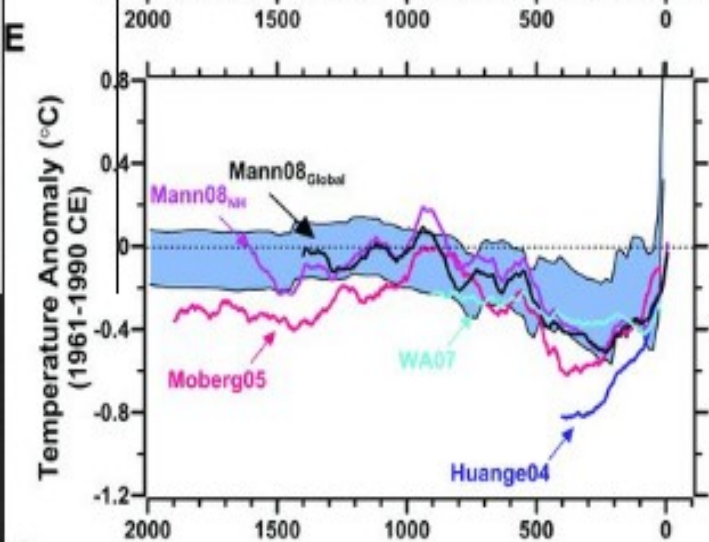
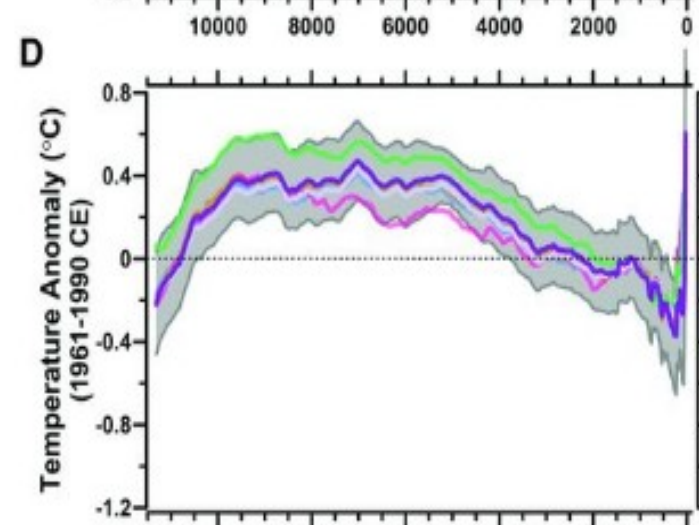
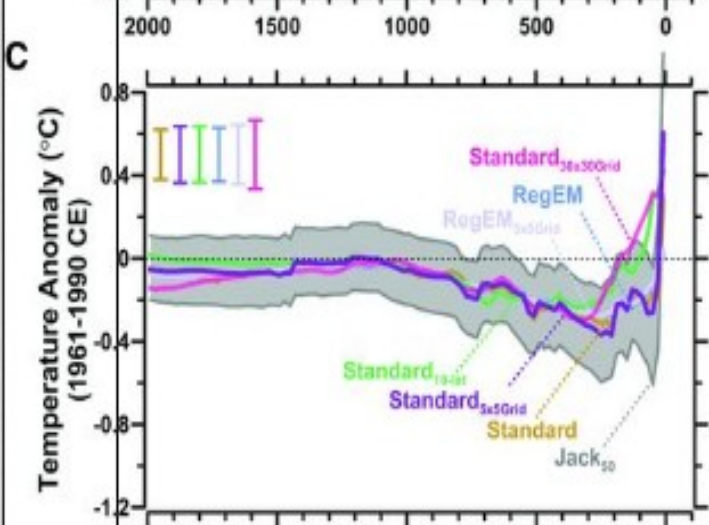
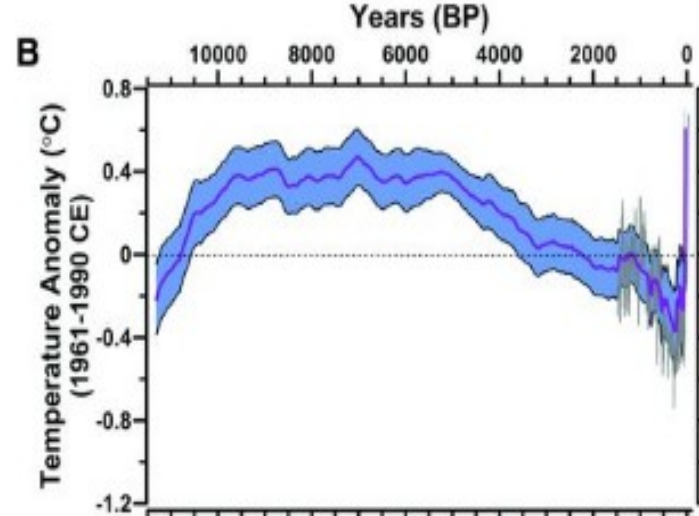
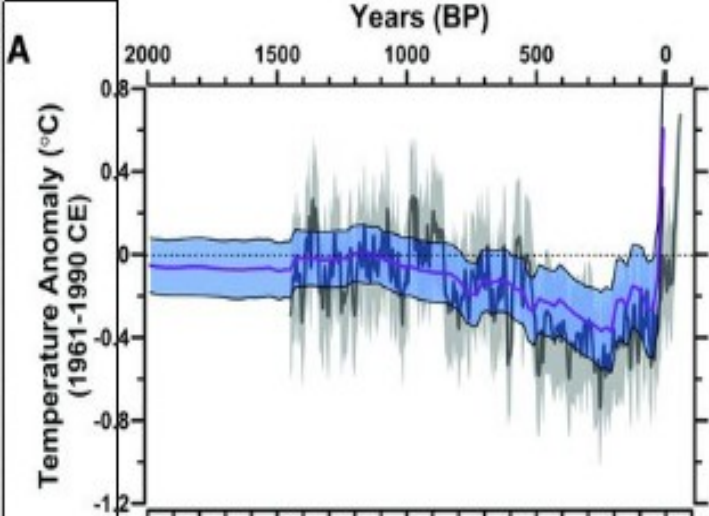
(b) Change in average precipitation (1986–2005 to 2081–2100)







Anomalia średniej temperatury globu do roku 2300 przy różnych scenariuszach emisji



Jak to się ma w stosunku do historii naturalnej klimatu?

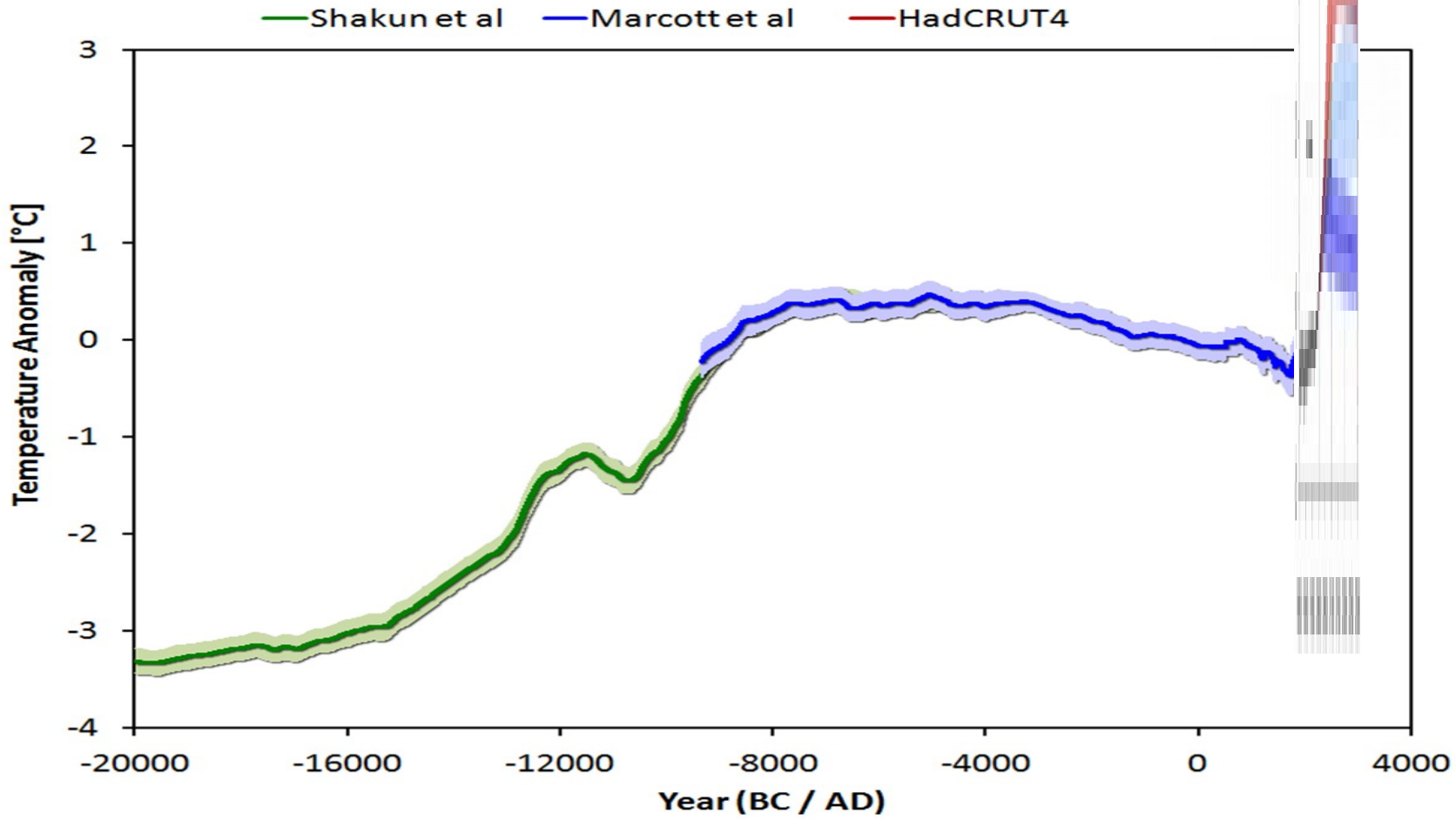
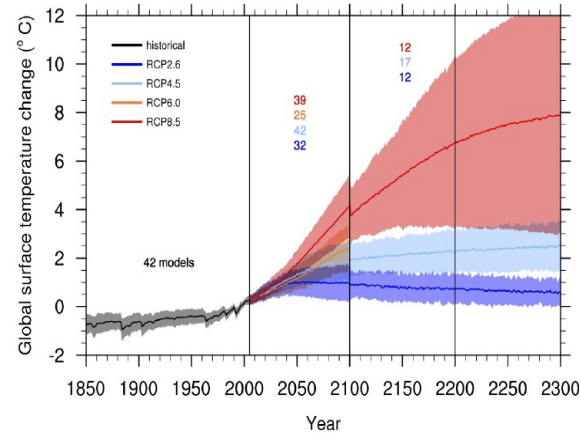
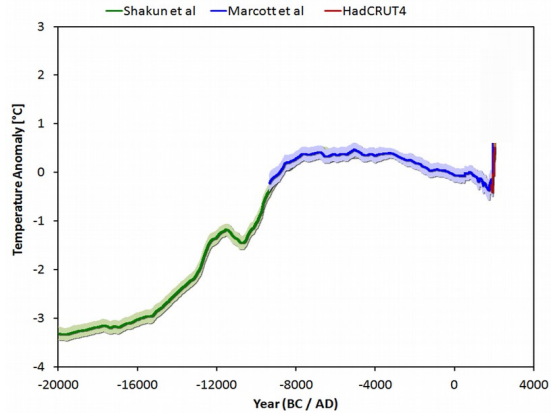
Porównanie rekonstrukcji globalnych zmian temperatury w holocenie (ostatni interglacjał) oraz obserwowanego ostatnio wzrostu temperatury

S A Marcott et al.  
Science 2013;339:1198-1201



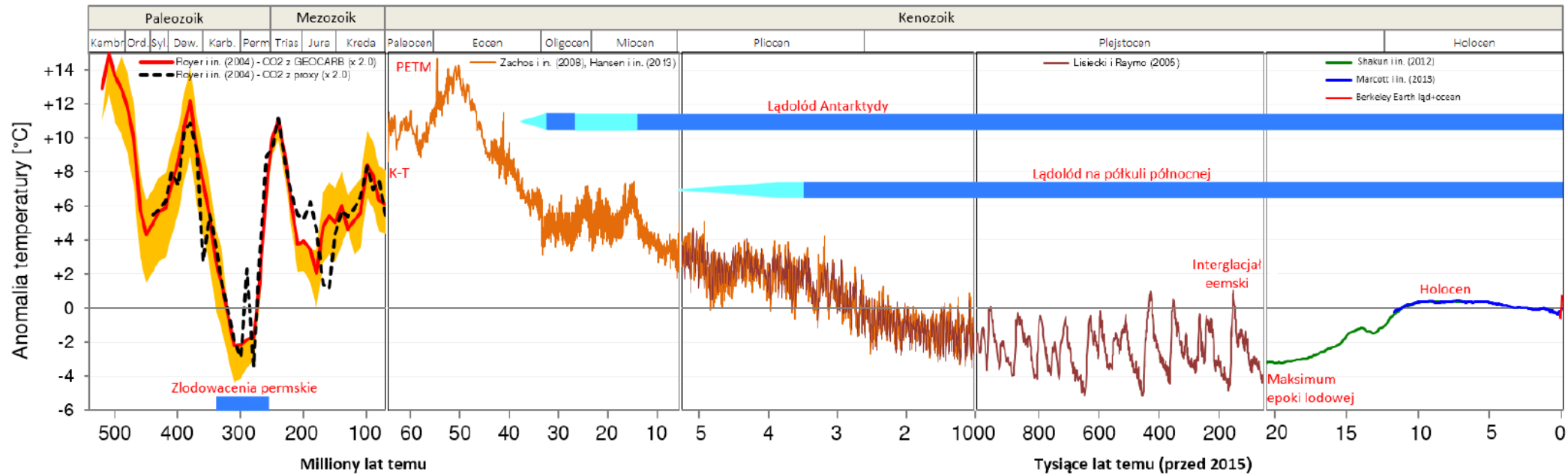
Published by AAAS

# Holocen i Antropocen

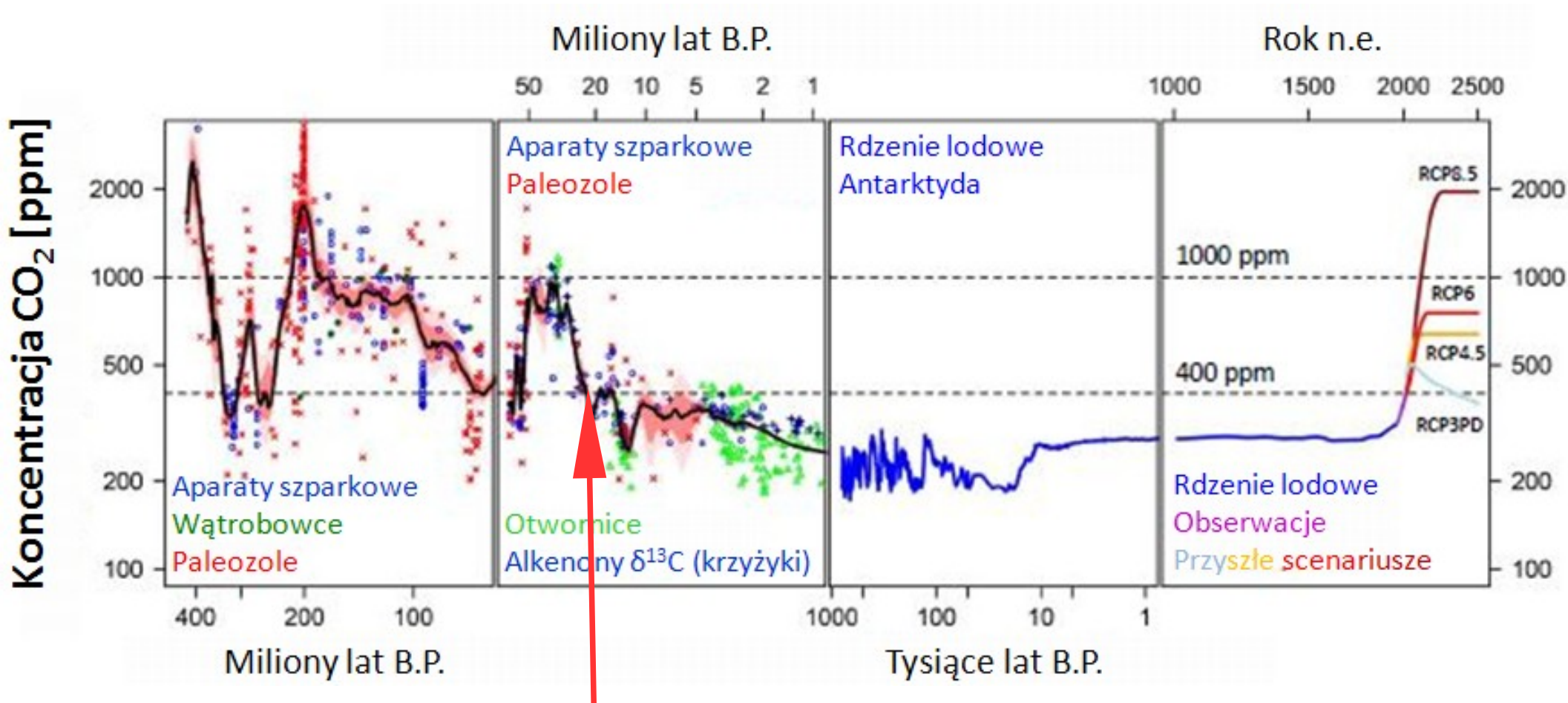




# Zmiany koncentracji temperatury planety w historii geologicznej

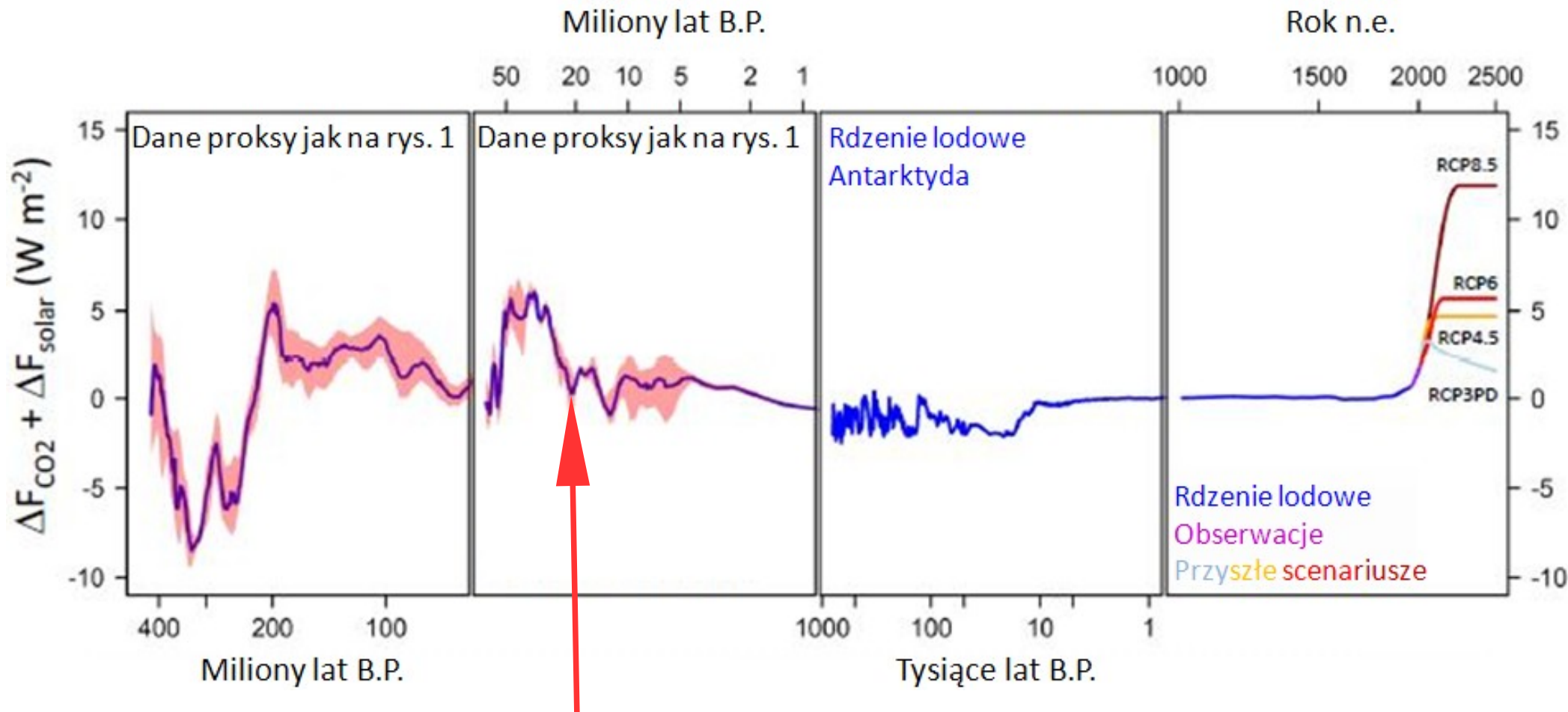


# Zmiany koncentracji atmosferycznego CO<sub>2</sub> w historii geologicznej



glacjacja Antarktydy

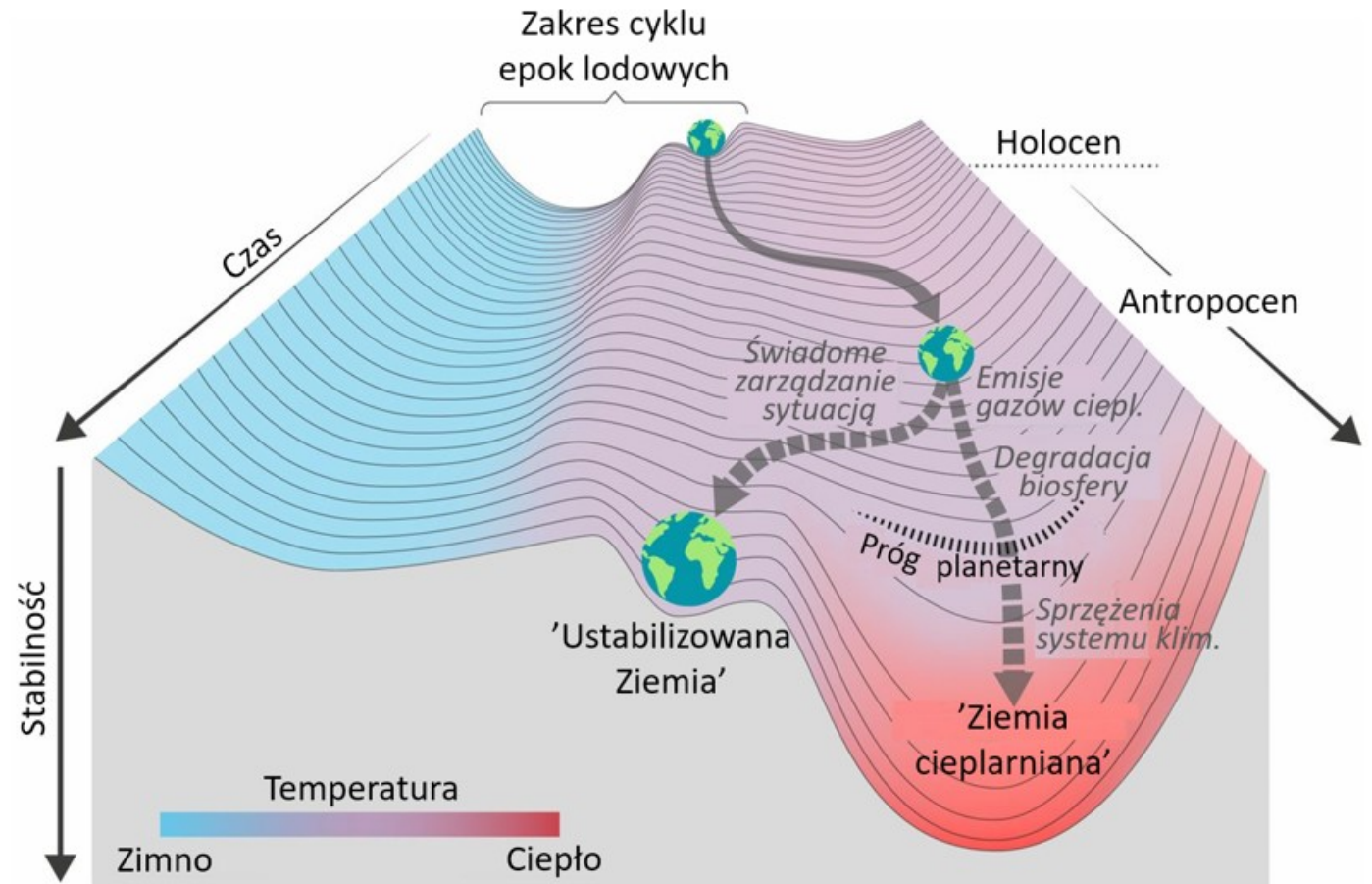
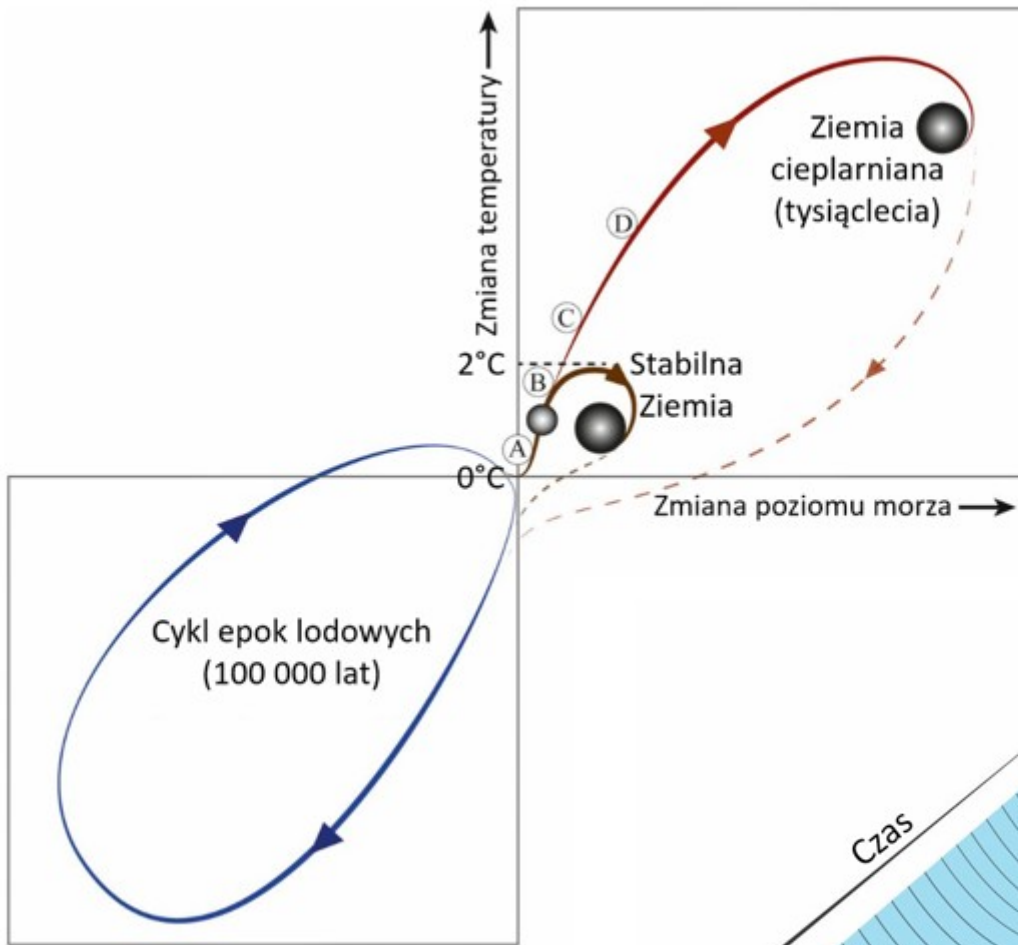
# Zmiany wymuszania radiacyjnego (Słońce+CO<sub>2</sub>) w historii geologicznej



glacjacja Antarktydy

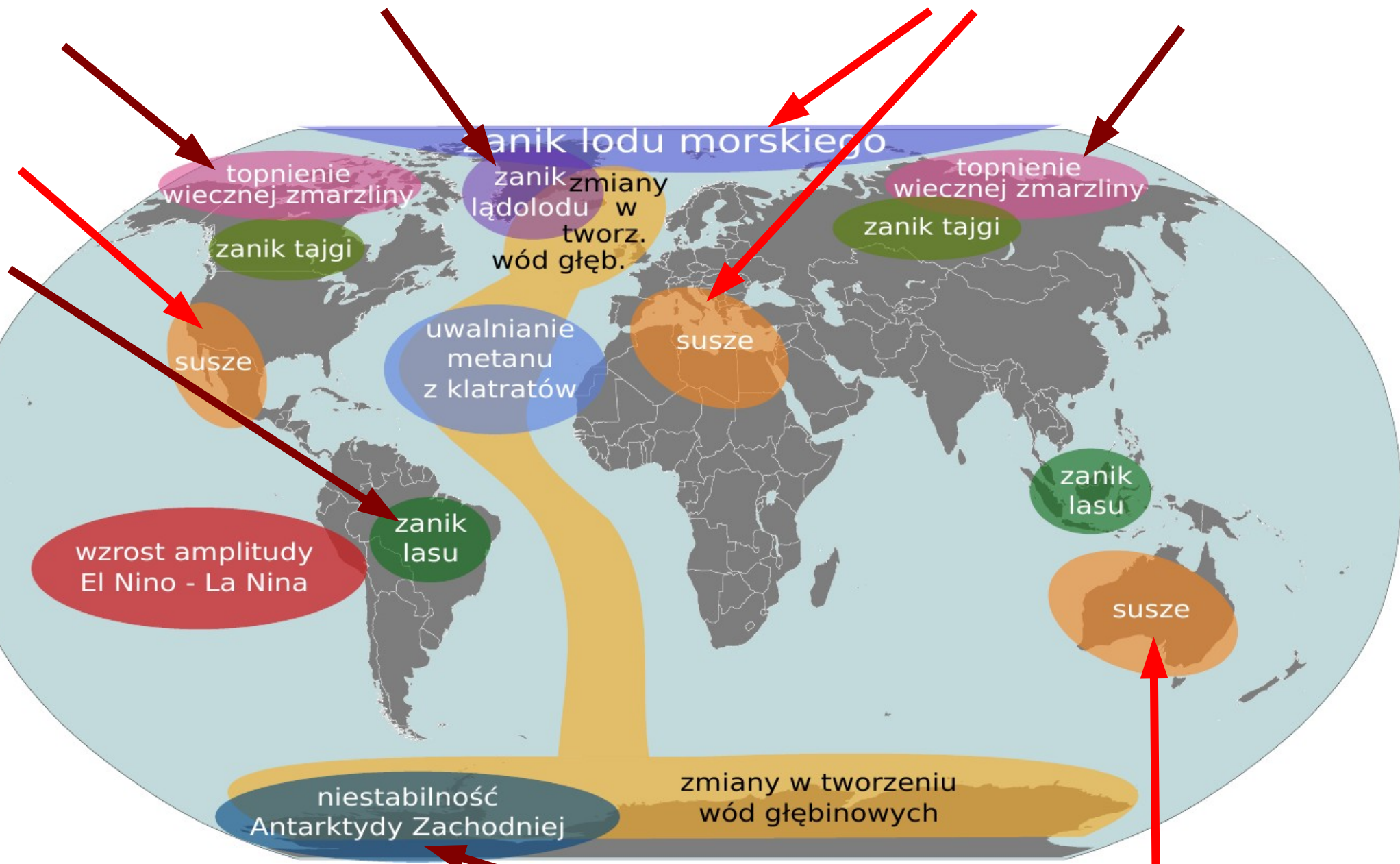


# Alternatywy na przyszłość



Steffen et al., PNAS Aug 2018,  
115 (33) 8252-8259;  
DOI: 10.1073/pnas.1810141115

# Punkty krytyczne – tipping points – już blisko?



od jakiegoś czasu  
prawdopodobnie od teraz

## Podsumowanie:

Rosnąca w ostatnich ~150 latach w układzie Ziemia-Atmosfera zawartość energii wewnętrznej jest bezpośrednim skutkiem wzrostu strumienia promieniowania termicznego atmosfery do powierzchni Ziemi (wzmocnienia efektu cieplarnianego).

Pierwotną przyczyną tego wzmocnionego efektu cieplarnianego jest wzrost koncentracji gazów cieplarnianych, głównie  $\text{CO}_2$ , spowodowana działalnością człowieka, w pierwszej mierze spalaniem paliw kopalnych. Badania składu izotopowego węgla w atmosferycznym  $\text{CO}_2$  i bilans węgla jednoznacznie dokumentują pochodzenie tego gazu.

Inne **BEZPOŚREDNIE** antropogeniczne oddziaływania na klimat to zmiany własności optycznych atmosfery wskutek emisji aerozolu, zmiany własności optycznych chmur, zmiany w albedo powierzchni ziemi, zmiany w tempie cyklu węglowego wskutek wycinania lasów i działalności rolniczej i zanieczyszczenia oceanów.



Pogoda to nie klimat. Wiemy dlaczego nie potrafimy zrobić wiarygodnej prognozy pogody na okres dłuższy niż kilkanaście dni.

Wiemy też że możemy zrobić wiarygodną (w pewnym sensie) prognozę klimatu.

W szczególności:

analiza wyników symulacji wieloma modelami klimatu pozwala określić niektóre związki między wymuszeniami i odpowiedzią systemu klimatycznego na te wymuszenia.

Wyniki tych analiz pokazują, że system klimatyczny jest w skali czasu ~100 lat wrażliwy na zmiany koncentracji gazów cieplarnianych.

Szacowana na podstawie danych paleoklimatycznych i obliczana modelami czułość systemu klimatycznego (w sensie zmiany średniej temperatury globalnej) na wymuszenia długożyjącymi gazami cieplarnianymi wynosi ok. 3K przy podwojeniu koncentracji CO<sub>2</sub>.

**Oszacowania historyczne:** S.Arrhenius (1896, transfer radiacyjny) 5-6K,  
E.O.Hulburt (1931, transfer radiacyjny) 4K,  
G.Callendar (1939, dane za ~60 lat) 2K.

## Podsumowanie 2 : 200 lat fizyki klimatu i globalnego ocieplenia

- niemal 200 lat od momentu wprowadzenia terminu „efekt cieplarniany” (Fourier)
- około 150 lat od wykazania że  $H_2O$ ,  $CO_2$  e.t.c. to gazy cieplarniane (Tyndall)
- ponad 100 lat od pierwszych obliczeń jaki wzrost temperatury przyniesie podwojenie zawartości atmosferycznego  $CO_2$  (Arrhenius)
- ponad 70 lat od pierwszych analiz wzrostu temperatury globu wskutek wzrostu zawartosci gazów cieplarnianych w atmosferze (Callendar)
- ponad 50 lat od pierwszego w pełni fizycznego dowodu na antropogeniczne pochodzenie przyrostu  $CO_2$  w atmosferze (Revelle i Suess)
- 50 lat od pierwszego naukowego raportu dla polityków na temat zagrożeń związanych ze wzrostem koncentracji  $CO_2$  w atmosferze wskutek spalania paliw kopalnych (Restoring the quality of our environment: Report by United States. President's Science Advisory Committee, 1964)
- 40 lat od formalnego wprowadzenia terminu “globalne ocieplenie” (Broecker)
- ponad 550 GT całkowitych emisji węgla do atmosfery od początku rewolucji przemysłowej

*(dla porównania – cała żyjąca biosfera zwiiera mniej więcej tyle samo węgla)*

## Wybrane odnośniki:

<http://www.igf.fuw.edu.pl/zfa/>

<http://www.climatechange2013.org/>

<http://www.aip.org/history/climate/>

<http://www-pcmdi.llnl.gov/>

<http://hadobs.metoffice.com/>

<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/paleo.html>

<http://www.noaa.gov/climate.html>

<http://www.mpimet.mpg.de/en/science/the-atmosphere-in-the-earth-system.html>

<http://www2.cgd.ucar.edu/>

<http://cdiac.esd.ornl.gov/>

<http://www.argo.ucsd.edu/>