

# **Fizyka Procesów Klimatycznych**

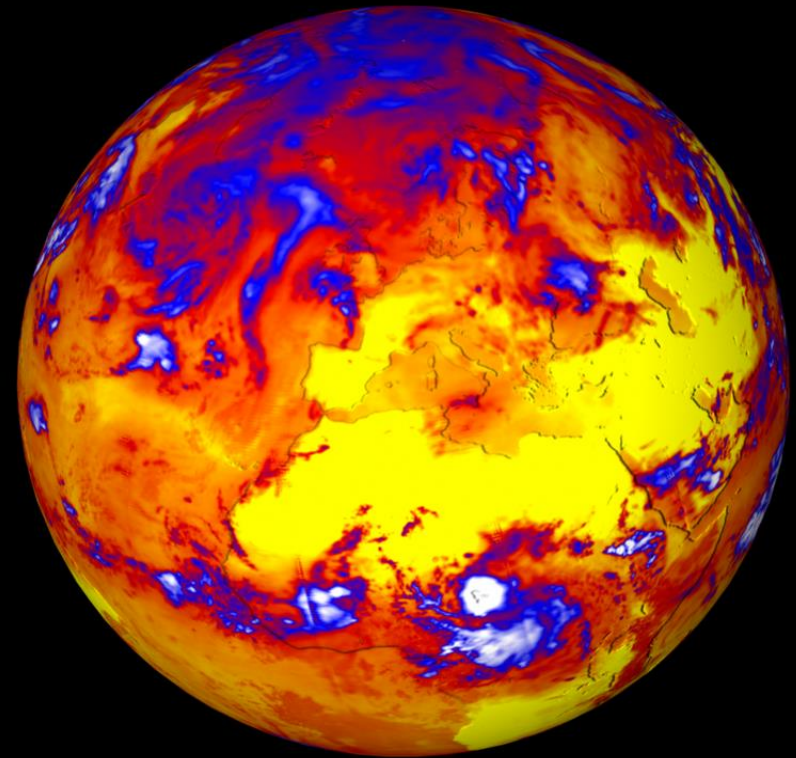
## **Wykład 3 (Budżet energetyczny i wymuszenia radiacyjne)**

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

# Bilans energii

NASA



Emitted Heat Radiation ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

85

350

# Pierwsza zasada termodynamiki

Istnieje funkcja stanu, zwana energią wewnętrzną, taka, że

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

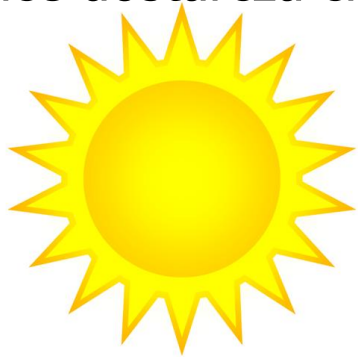
gdzie  $\Delta Q$  jest ciepłem dostarczonym do układu a  $\Delta W$  jest pracą wykonaną przez układ. Dla sytuacji gdy  $\Delta W=0$  zachodzi:

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

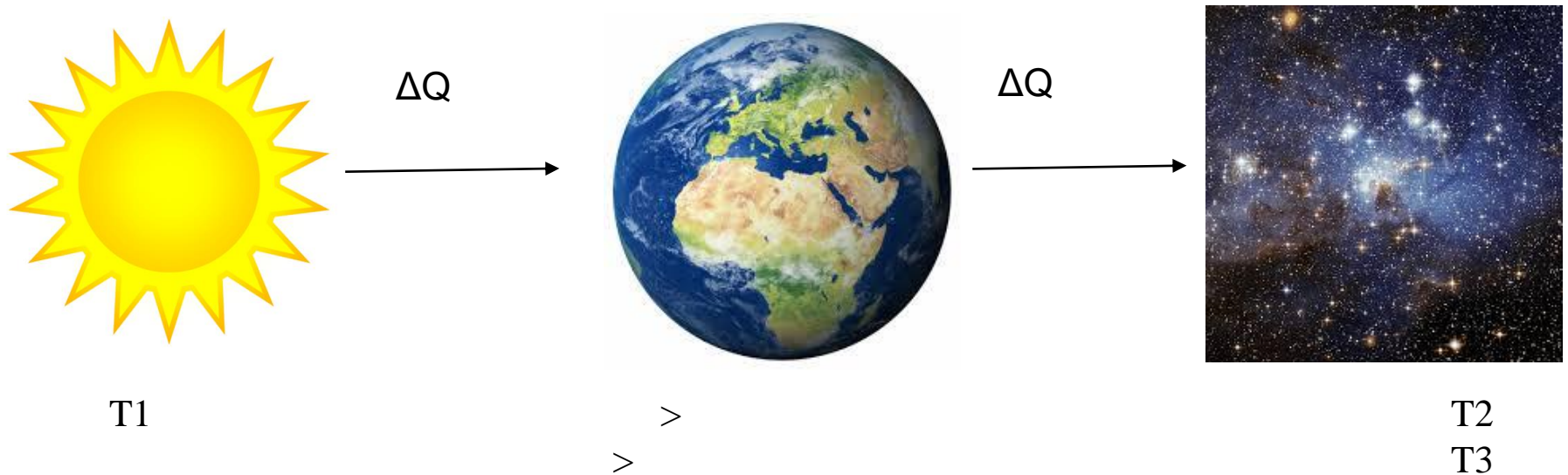
gdzie  $C$  to pojemność cieplna układu,

Przykład:

Słońce dostarcza ciepło Ziemi tak że rośnie jej energia.



Ziemia ma pewną pojemność cieplną, w efekcie rośnie jej temperatura. Ale Ziemia oddaje też energię w kosmos...



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

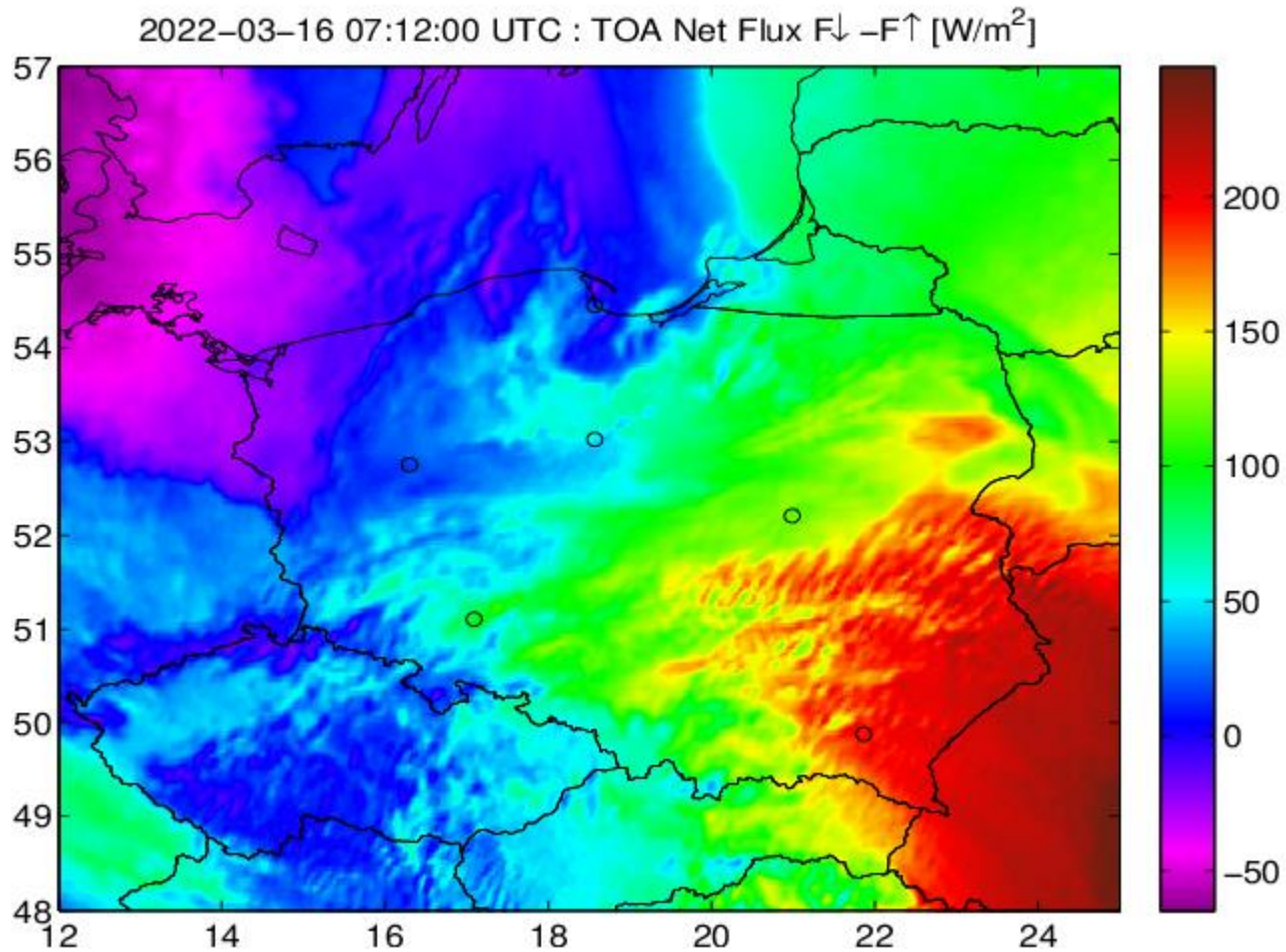
Temperatura Ziemi rośnie, gdy  $\Delta Q > \Delta Q$

Temperatura Ziemi spada, gdy  $\Delta Q < \Delta Q$

Tak jest z bardzo dobrym przybliżeniem, gdyż strumienie radiacyjne ( $\sim 340 \text{ W/m}^2$ ) są wielokrotnie większe niż strumień energii z wnętrza Ziemi ( $\sim 0.1 \text{ W/m}^2$ ) czy strumień antropogeniczny ( $\sim 0.03 \text{ W/m}^2$ ).



# Chwilowy budżet energetyczny



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

Różnica między bilansami radiacyjnymi (strumieniem energii słonecznej zabsorbowanej przez planetę a strumieniem energii promieniowania termicznego planety emitowanego w kosmos) określonymi dla warunków zaburzonych i niezaburzonych po dostosowaniu się w pierwszym przypadku temperatury 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.

UWAGA: istnieje wiele definicji, ta jest uproszczona. Można mówić o wymuszaniu na górnej granicy atmosfery, na powierzchni Ziemi e.t.c.

# Chwilowe wymuszanie Radiacyjne (instantaneous radiative forcing)

Zmiana bilansu radiacyjnego w systemie klimatycznym.

Dodatnie wymuszanie radiacyjne oznacza, że dane zaburzenie prowadzi do wzrostu energii absorbowanej przez system.

Wymuszanie radiacyjne oblicza się ze wzoru:

$$RF = (F_{\downarrow} - F_{\uparrow})_{\text{zab}} - (F_{\downarrow} - F_{\uparrow})_{\text{pod}} \quad [\text{W/m}^2],$$

gdzie  $F_{\downarrow}$  oraz  $F_{\uparrow}$  oznaczają strumienie radiacyjne promieniowania odgórnego (promieniowanie idące w dół) i oddolnego (promieniowanie idące w górę).

Pierwszy nawias opisuje strumień netto w przypadku sytuacji z zaburzeniem, zaś drugi strumień netto przypadku niezaburzonego (podstawowym).

Wymuszanie radiacyjne może być zdefiniowane na dowolnej wysokości w atmosferze wówczas opisuje zmianę bilansu radiacyjnego w atmosferze po niżej tej wysokości.

Najczęściej definiuje się je na górnej granicy atmosfery (wówczas odnosi się do całej kolumny pionowej powietrza), na wysokości tropopauzy lub na powierzchni Ziemi.

Przykładowy model online do wyznaczania wymuszeń radiacyjnych:

<https://cloudsgate2.larc.nasa.gov/cgi-bin/fuliou/runfl.cgi>

# Stała słoneczna

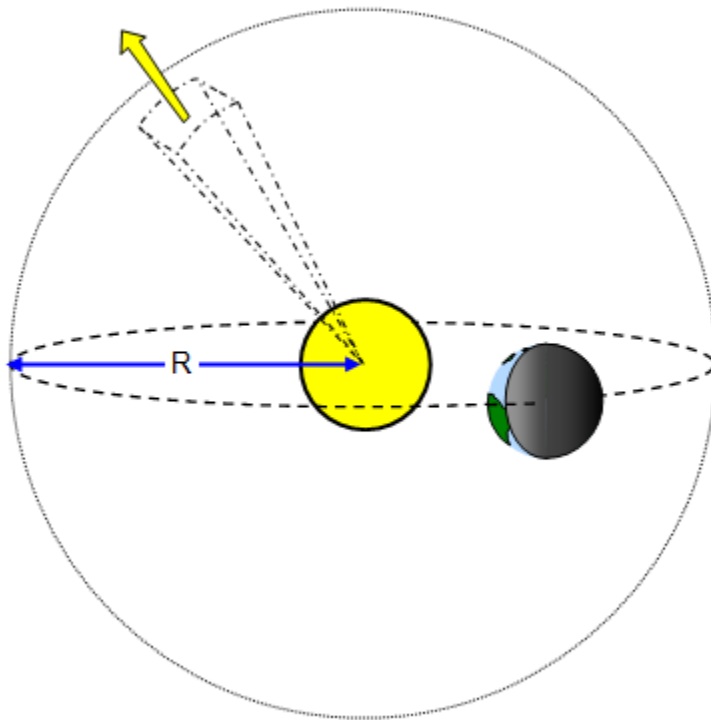


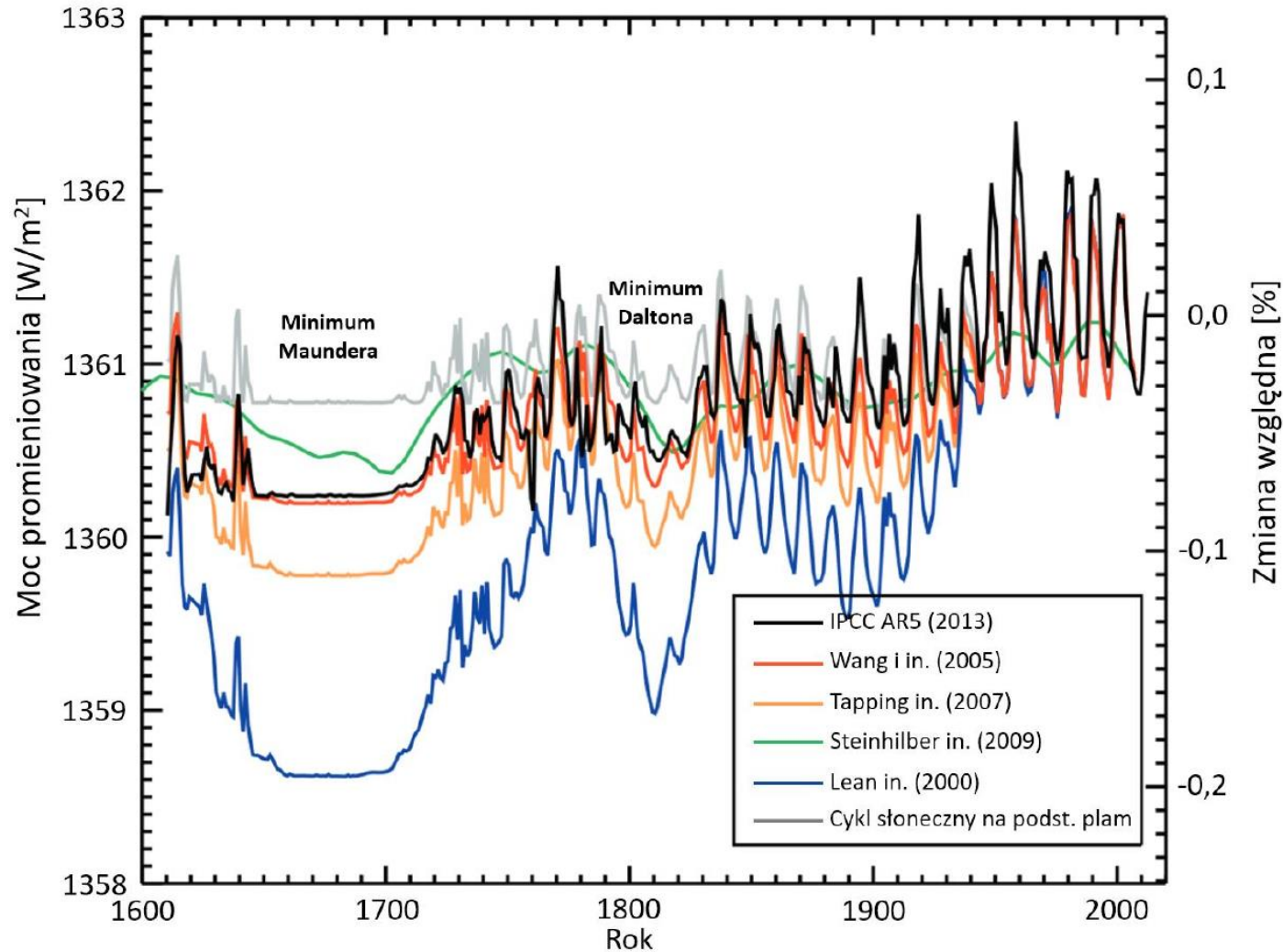
Diagram not to scale

**$1362 \pm 1 \text{ W/m}^2$**

całkowita irradancja  
słoneczna  
= total solar irradiance



# 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.

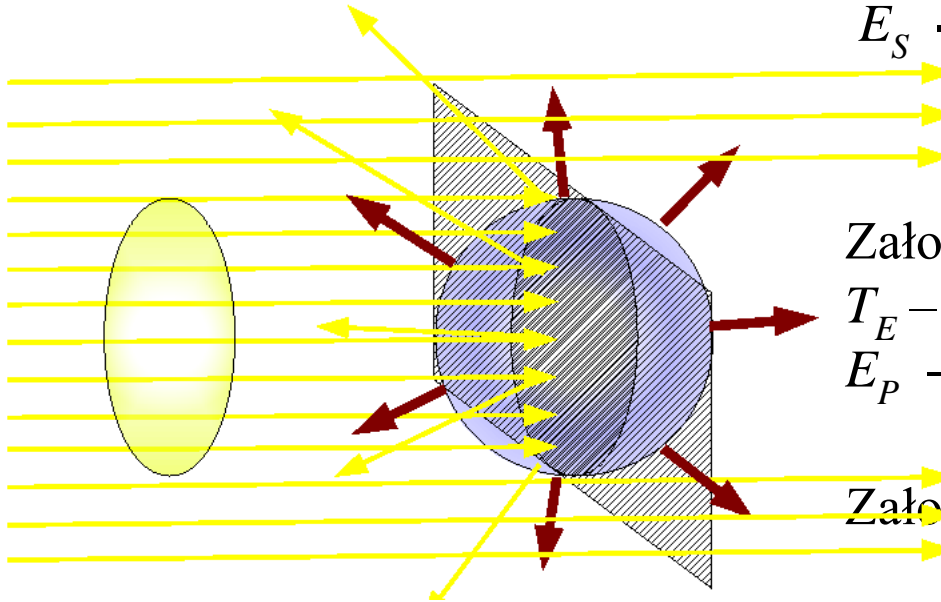
$T_E$  - temperatura efektywna

$E_P$  - 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

$T = 254.81\pm 0.05 \text{ K}$

# Albedo powierzchni Ziemi



0,5-0,8

0,05 - 0,07

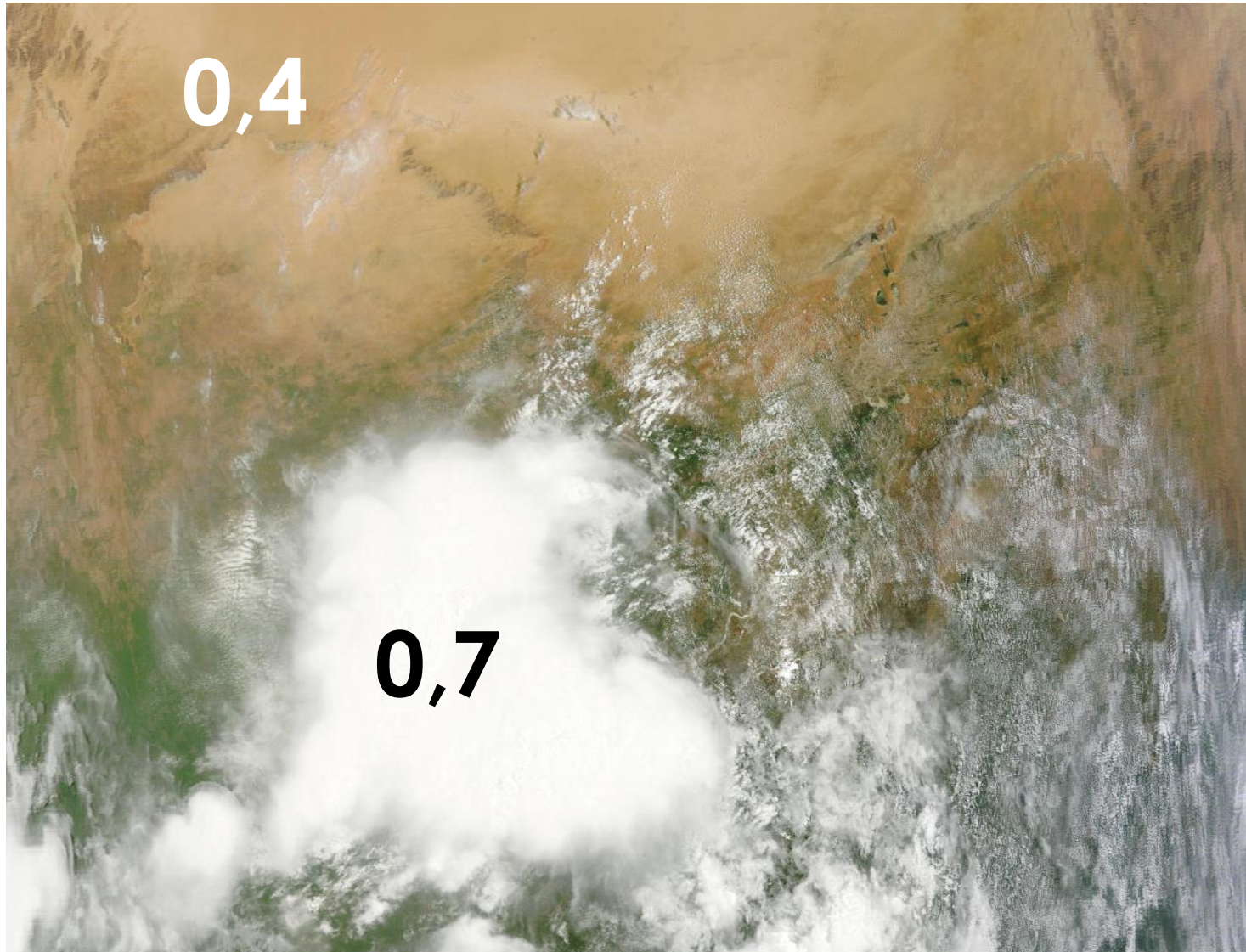


# Albedo powierzchni Ziemi





# Albedo powierzchni Ziemi



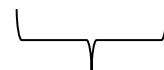
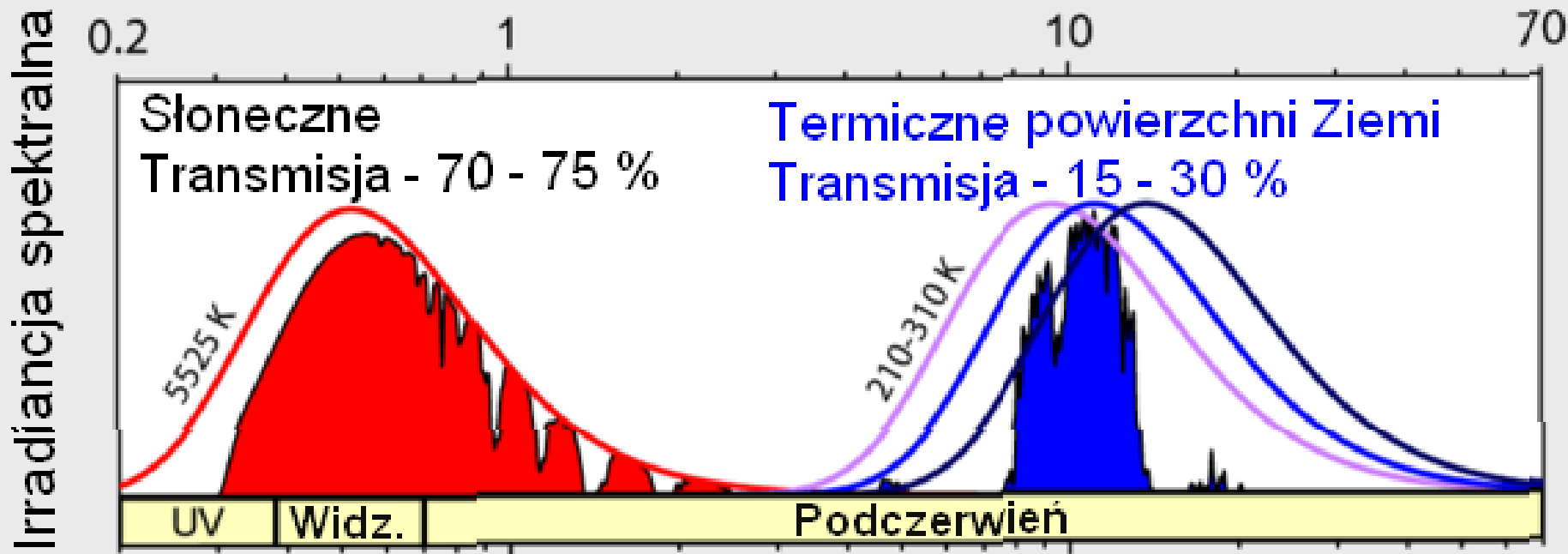
# Ziemia ma atmosferę!





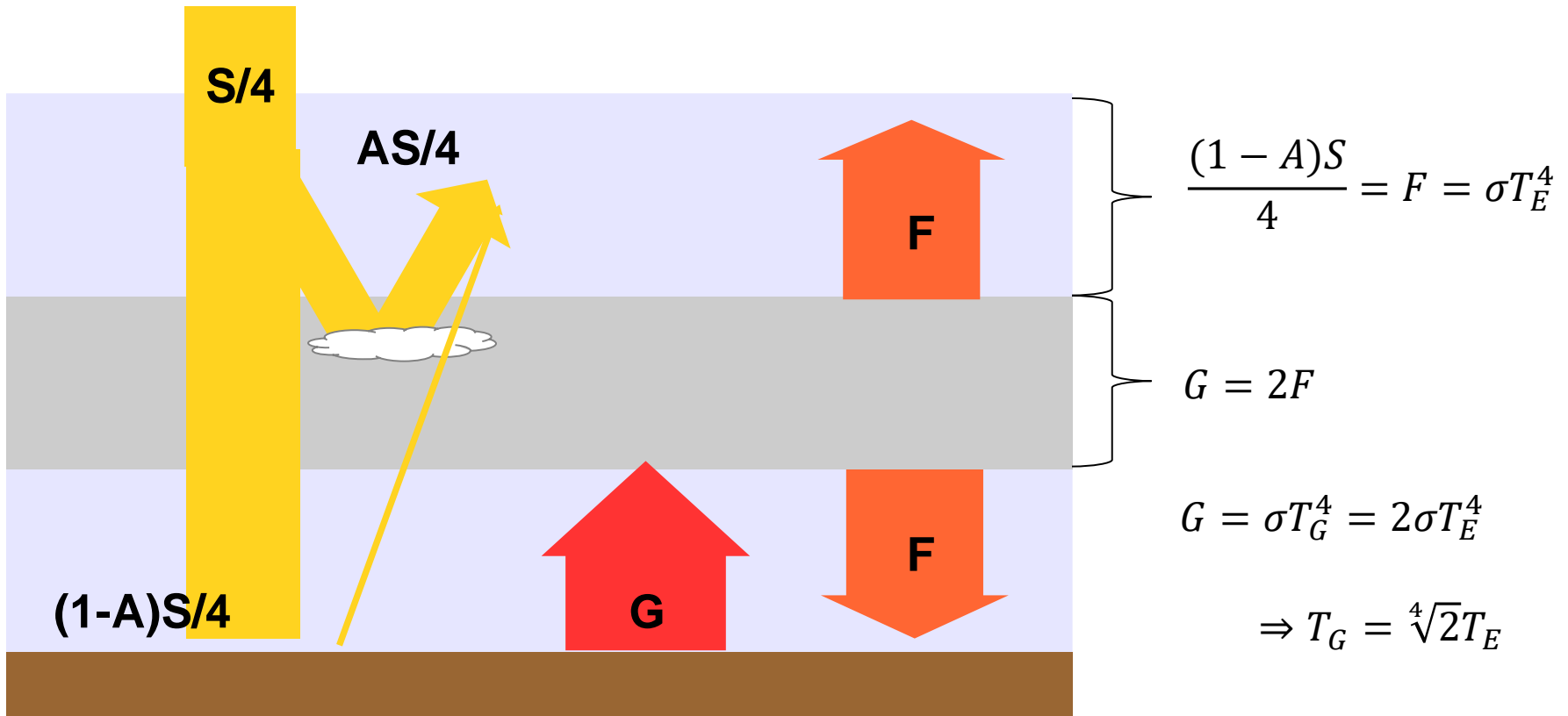
# Efekt cieplarniany – model jednej szyby

Promieniowanie przechodzące przez atmosferę



okno atmosferyczne: 8-14 $\mu$ m

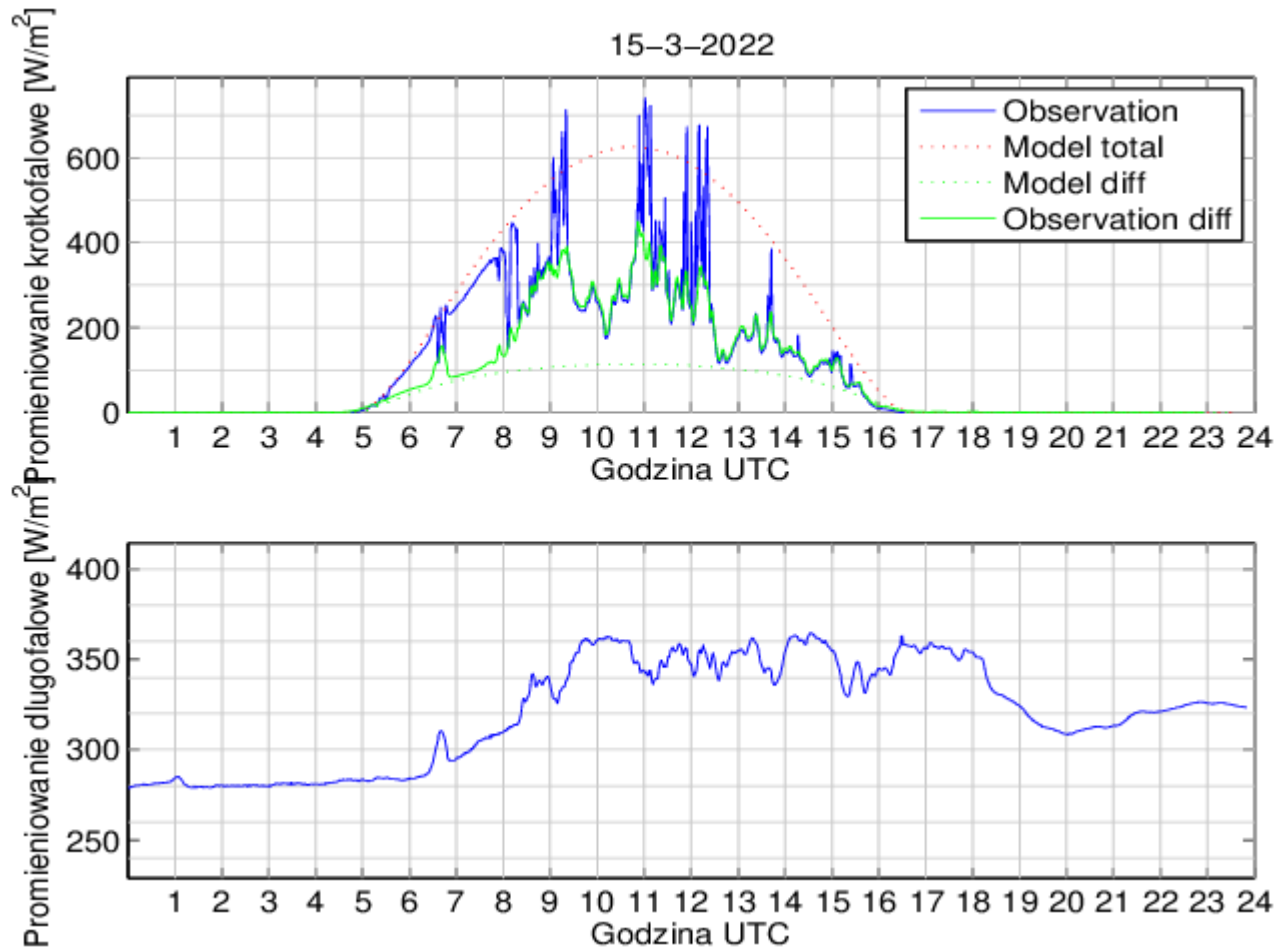
# Efekt cieplarniany – model jednej szyby



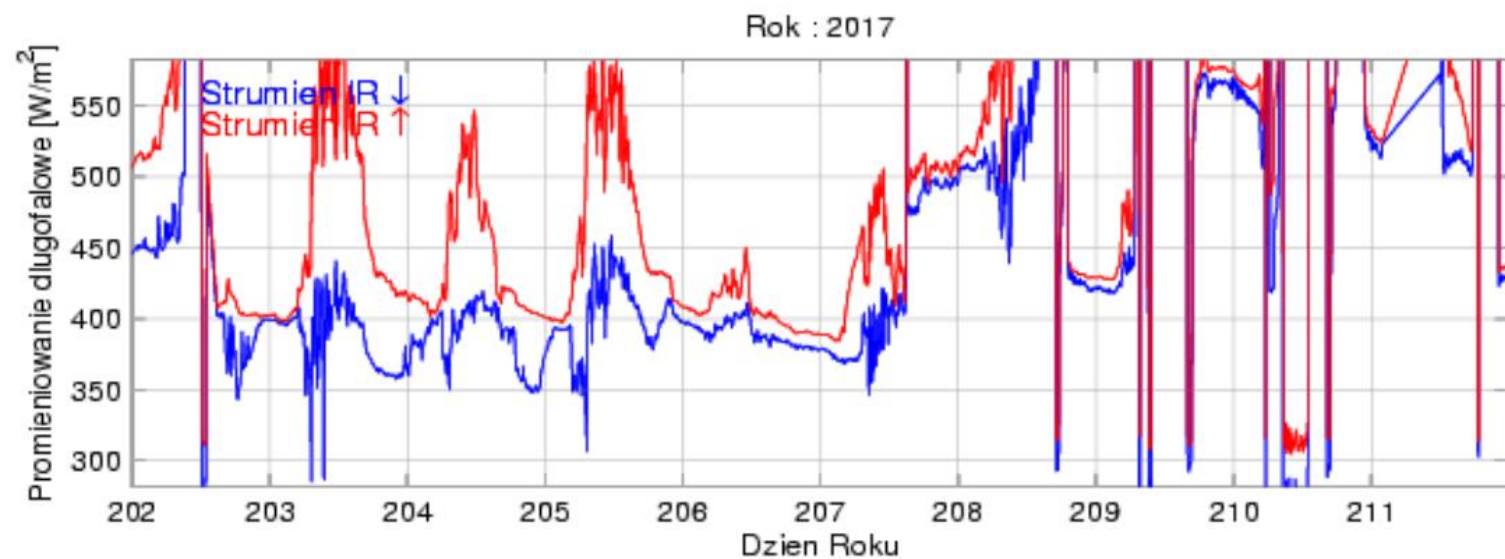
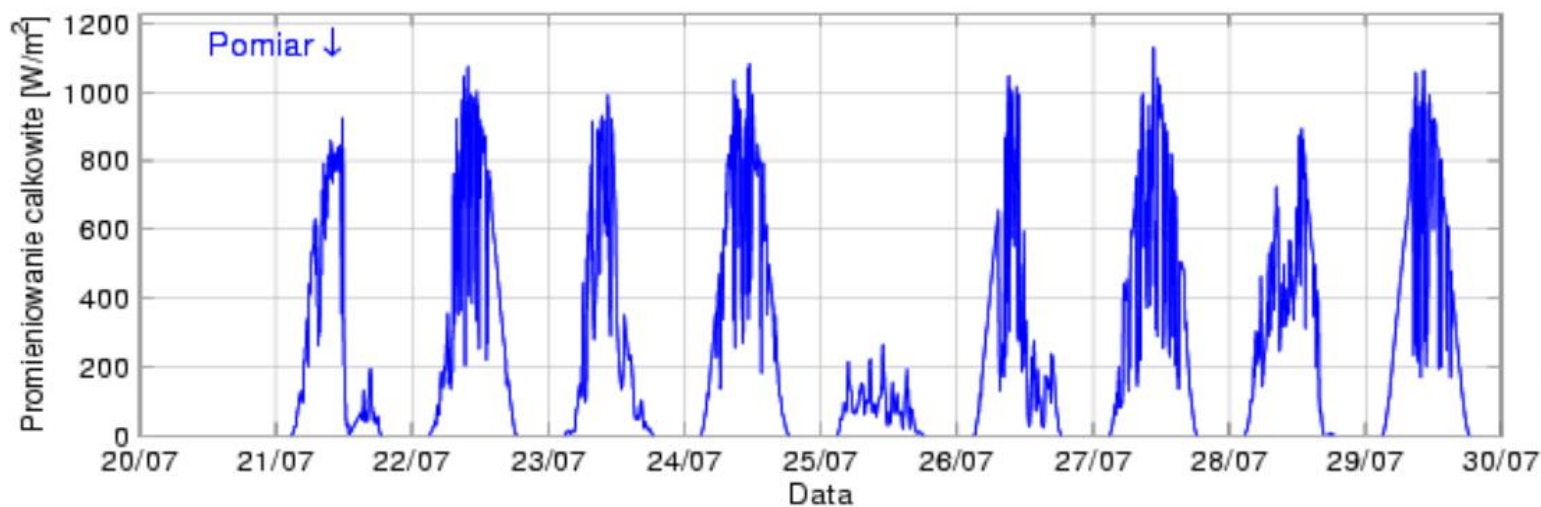
$$T_E \approx 255K$$

$$T_G \approx 303K$$

# Strumienie radiacyjne w Warszawie (IGF)



# Strumienie promieniowania mierzone w Warszawie



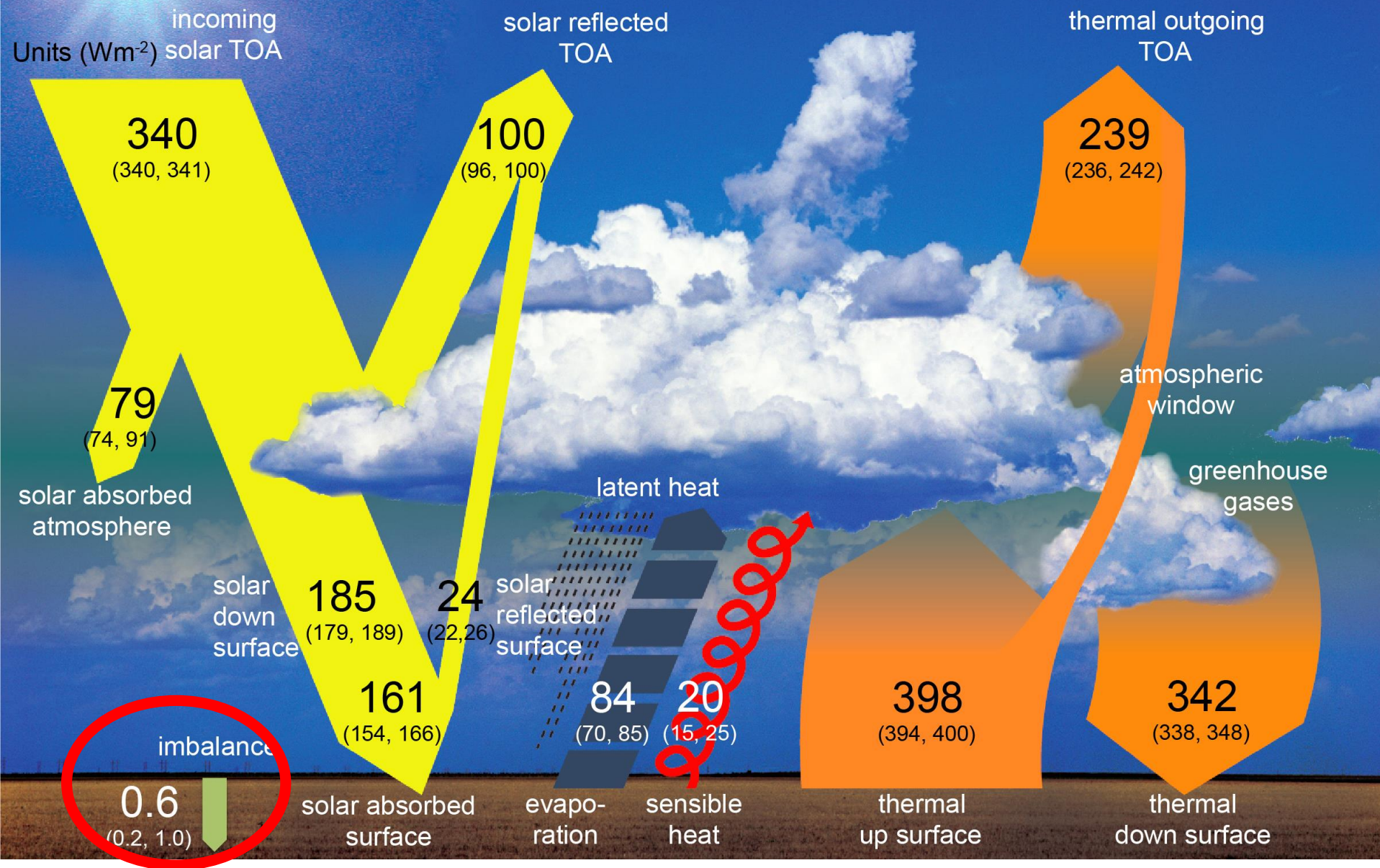
## **ENERGIA W SYSTEMIE KLIMATYCZNYM**

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),  $c = 1004 \text{J/kg} \cdot \text{K}$
2. Średnia głębokość oceanów  $\approx 4000 \text{m}$ ,  $c = 4192 \text{J/kg} \cdot \text{K}$
3. Ląd – tylko cienka warstwa odpowiada na strumienie radiacji
4. Gazy cieplarniane:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  i wiele innych





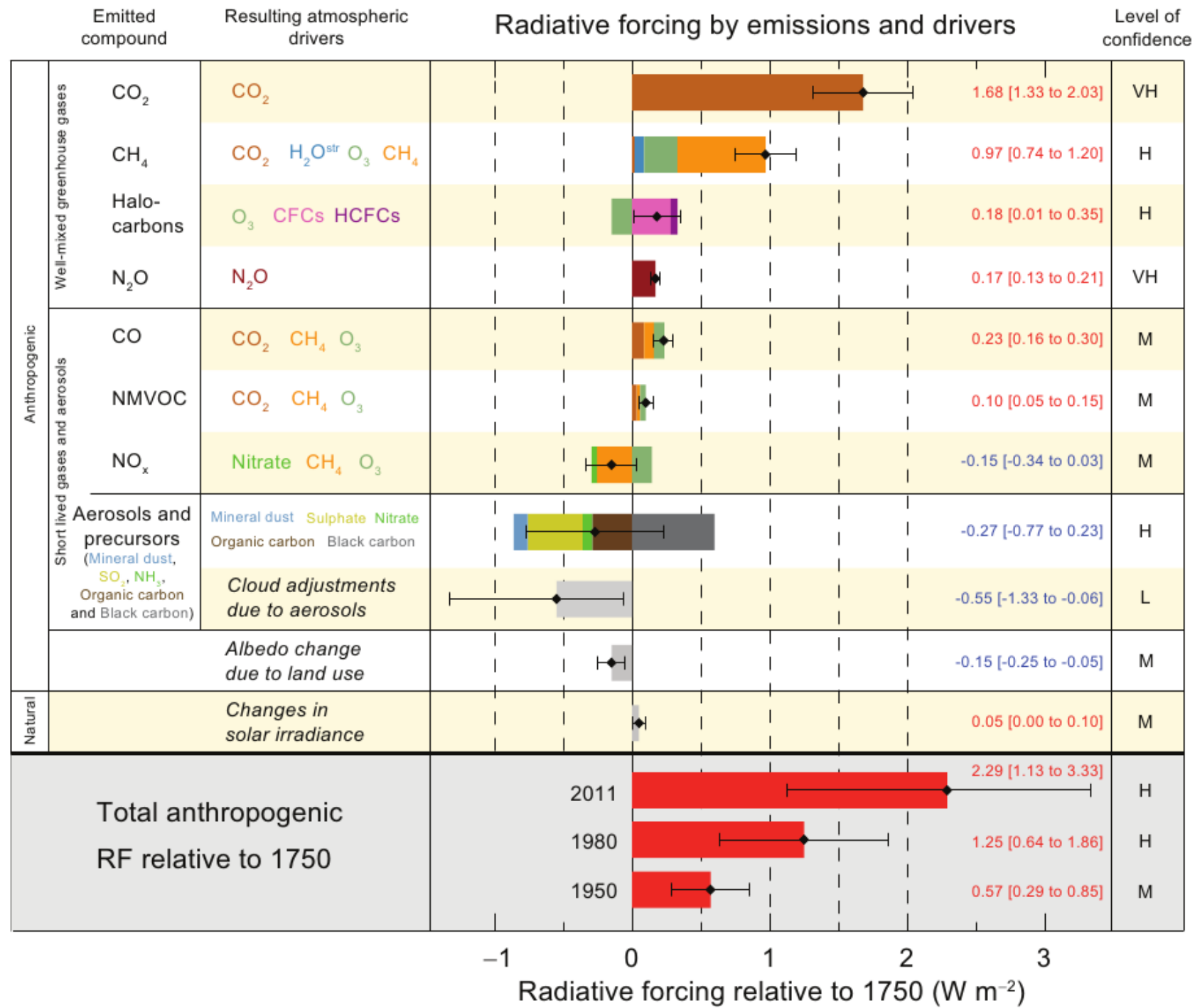
Uśredniony bilans energii systemu klimatycznego. Wartości w  $W/m^2$ .

W nawiasach zakres niepewności i zmienności.

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



# Radiative forcing by emissions and drivers



-1      0      1      2      3  
Radiative forcing relative to 1750 (W m<sup>-2</sup>)

## Gdzie Ziemia lokuje nadwyżkę energii

1%

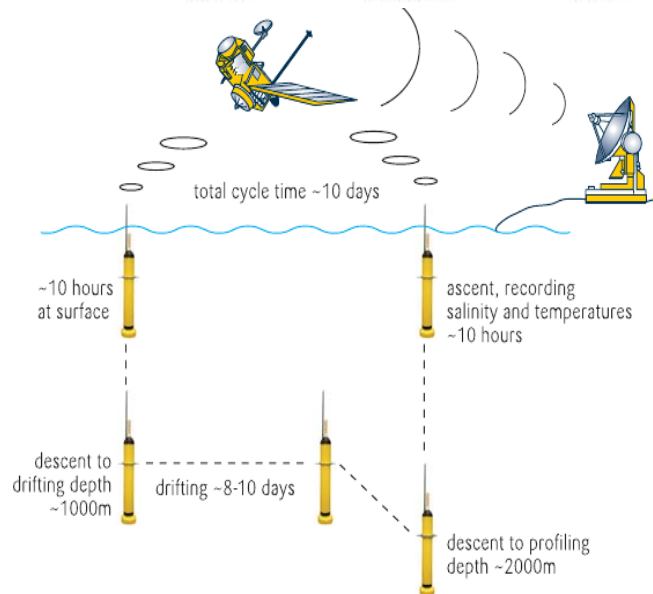
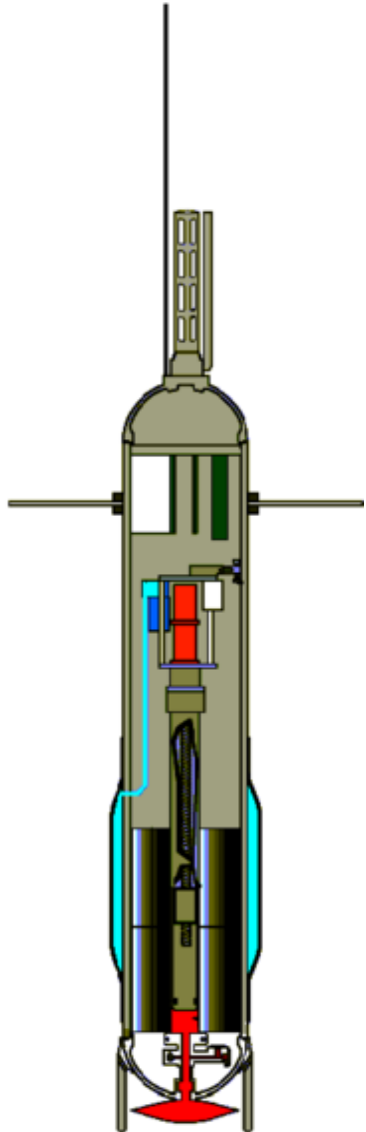
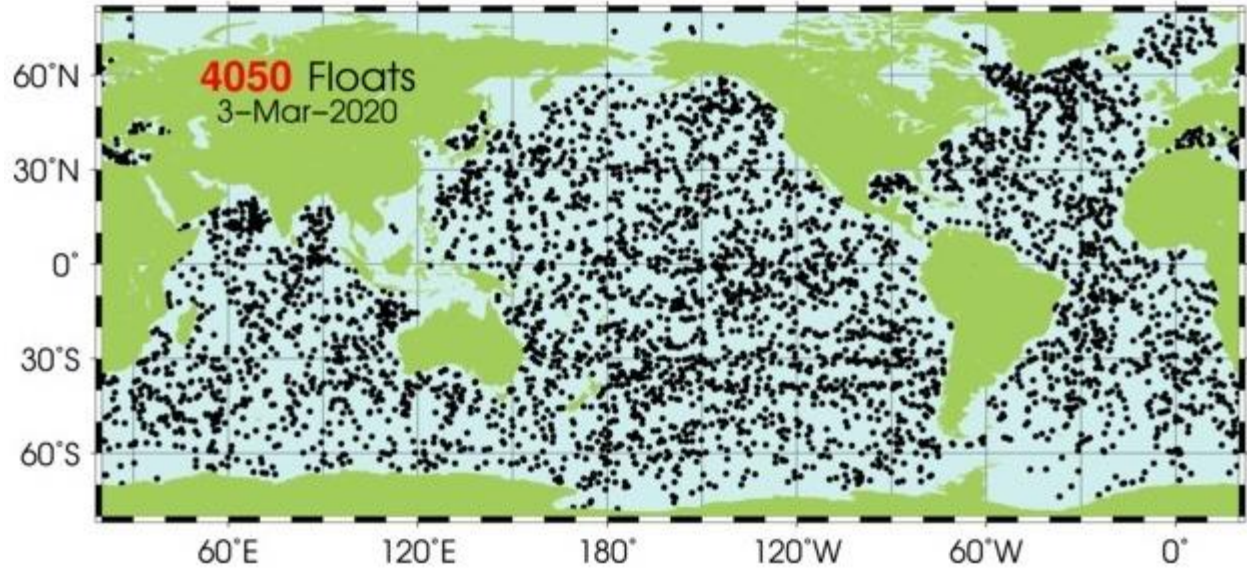
3%

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%.

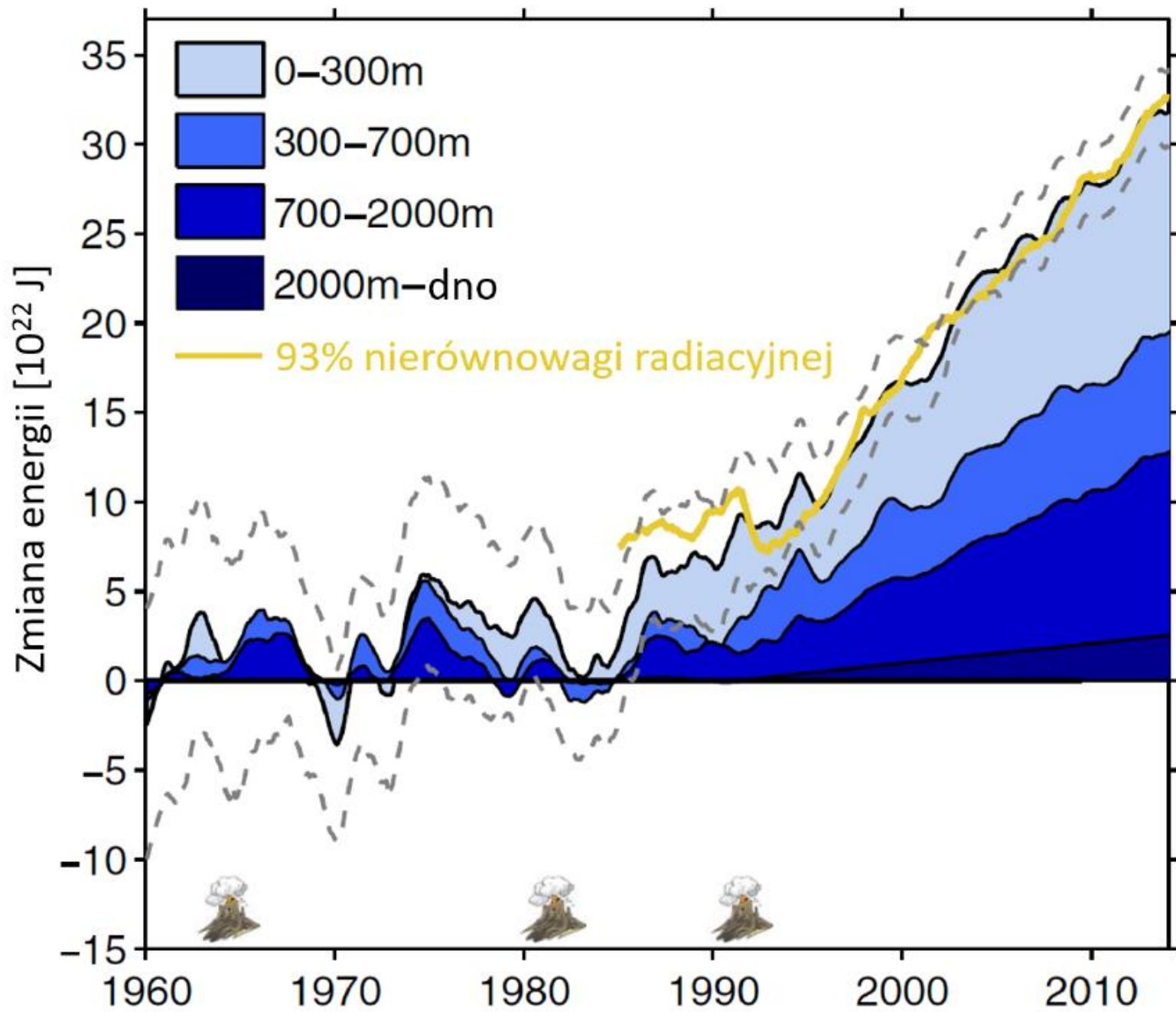
# Projekt ARGO: profilowanie oceanów (temperatura, zasolenie, prądy).

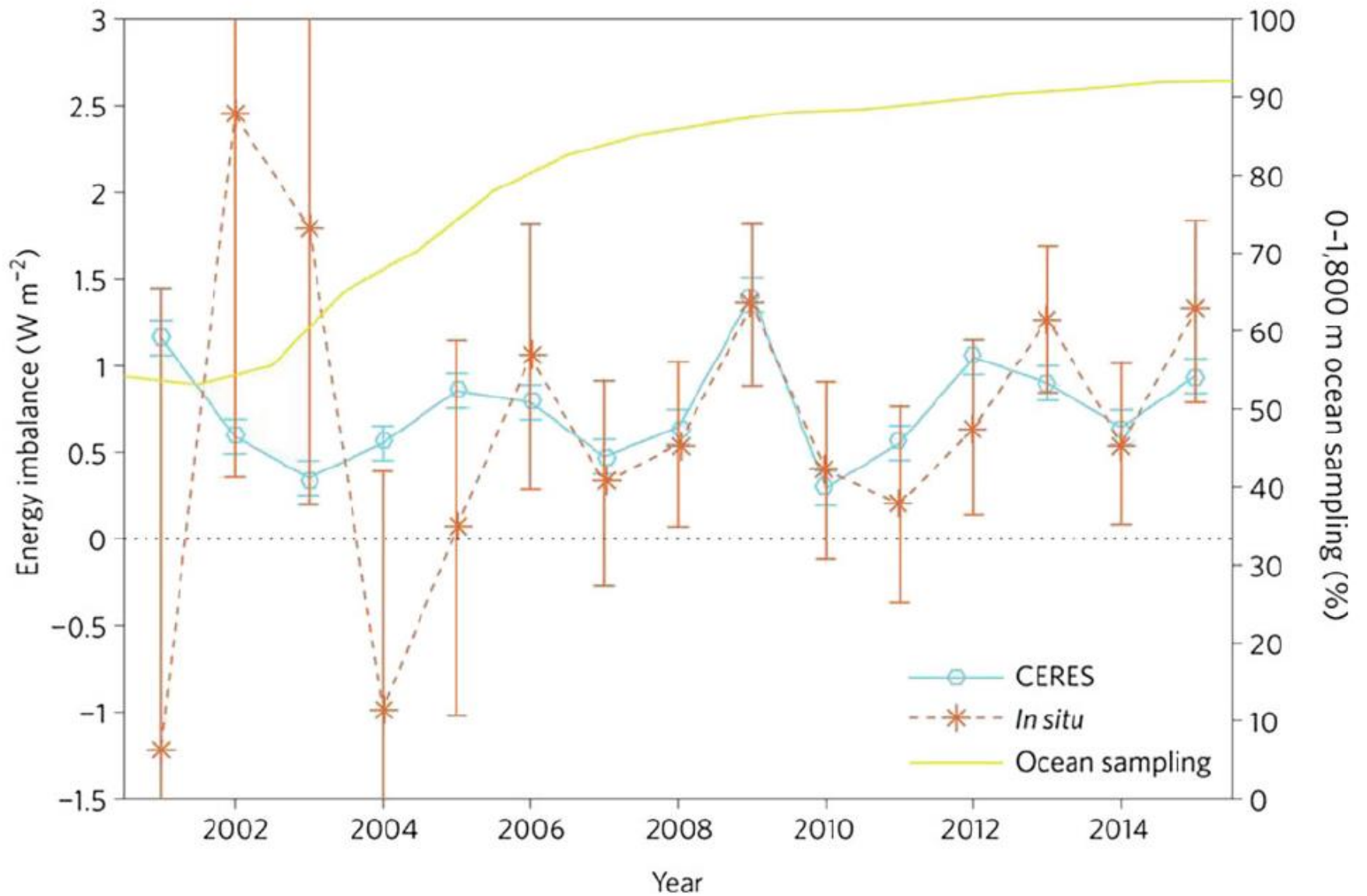


dane dostępne on-line

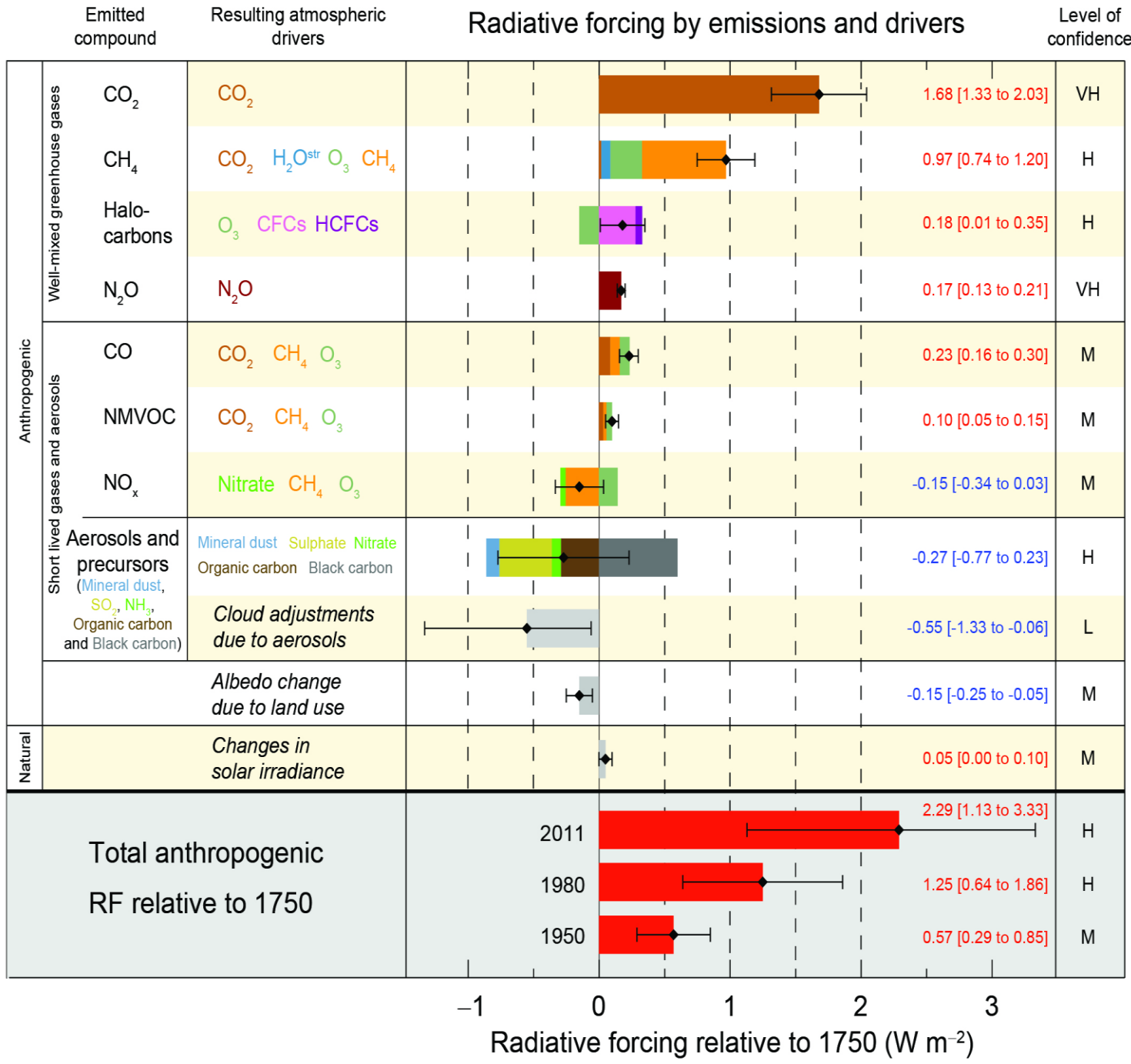
<http://www.argo.ucsd.edu/>



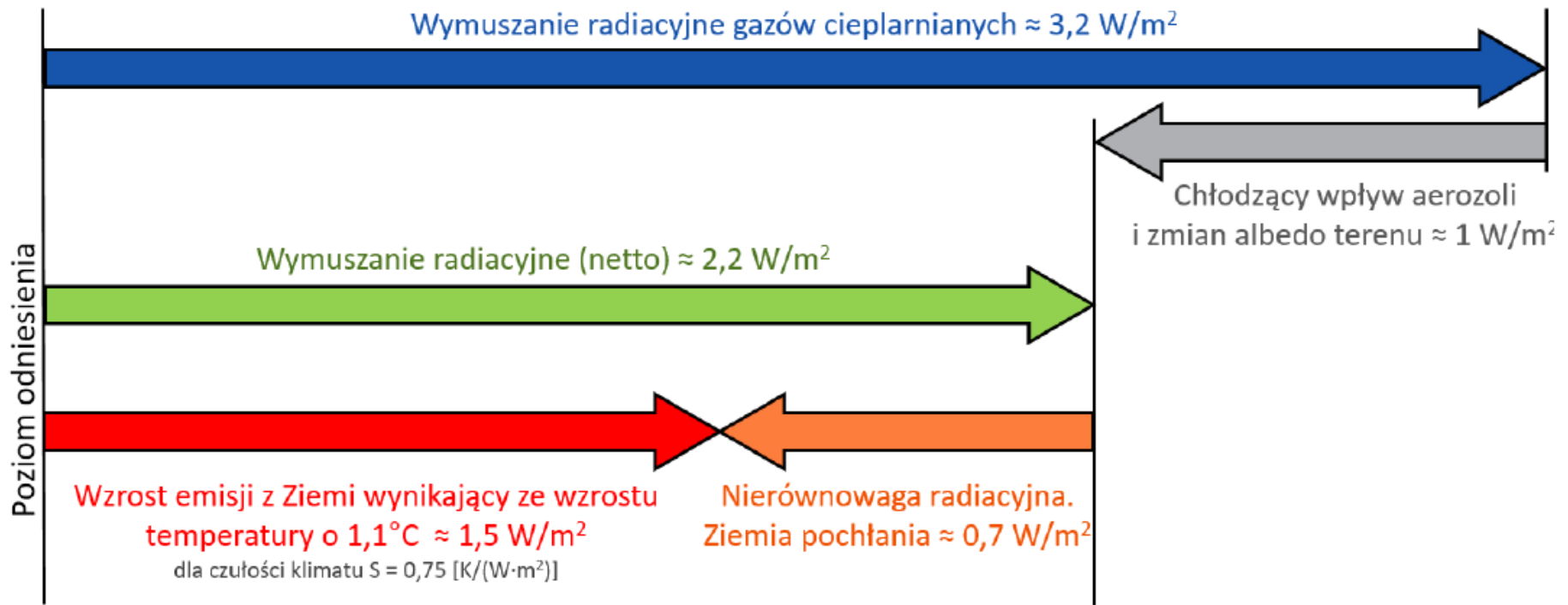




Wymuszanie radiacyjne: jak zmieniły się strumienie promieniowania w systemie klimatycznym od 1750r. wskutek zmian składu atmosfery, zmian albedo, zmian w dopływie promieniowania słonecznego.







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.

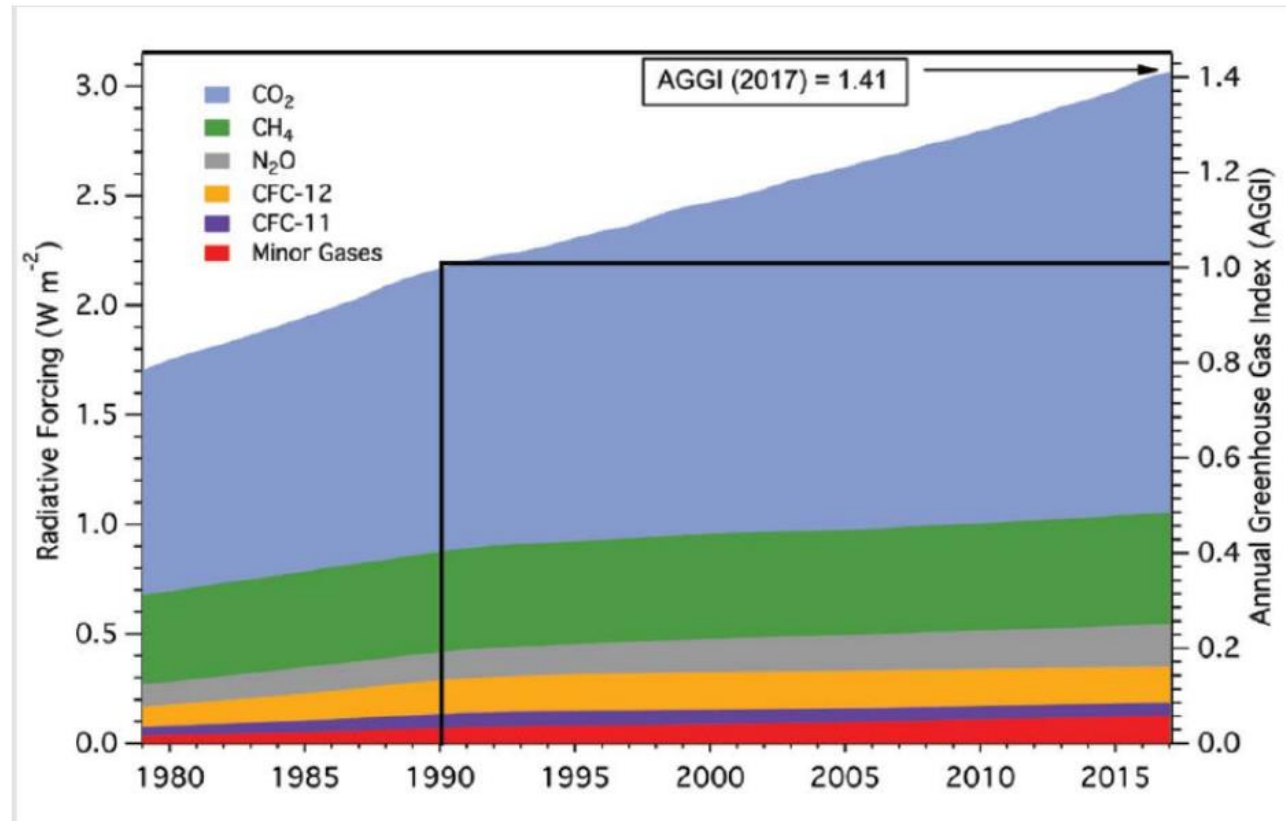
Pozostała nierównowaga energetyczna równa  $0,7 \text{ W/m}^2$  prowadzi do dalszego wzrostu energii (nagrzewania się) ziemskiego systemu klimatycznego.

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.

Średni globalny indeks  
długożyjących gazów  
cieplarnianych (GHGs) oraz  
wymuszenie radiacyjne  
przez te gazy w roku 2017

- CO<sub>2</sub>: 405.0 ppm, wzrost o 2.2 ppm
- CH<sub>4</sub>: 1849.7 ppb, Wzrost o 6.9 ppb od 2016
- N<sub>2</sub>O: 329.8 ppb, wzrost 0.9 ppb od 2016

Wymuszenie przez GHG  
wzrosło o 41% od 1990.



Odpowiedz systemu klimatycznego na wymuszanie radiacyjne.  
System klimatyczny poddany zaburzeniu będzie ewoluował w kierunku nowego stanu równowagi. Dla niewielkich zaburzeń nowy stan może być wyznaczony ze wzoru:

$$DT = \alpha * RF$$

gdzie DT opisuje zmianę temperatury pomiędzy nowym stanem równowagi a stanem podstawowym, RF jest wymuszeniem radiacyjnym, zaś  $\alpha$  jest współczynnikiem wrażliwości na zmiany klimatyczne [ $KW^{-1}m^{-2}$ ].

Parametr ten opisuje odpowiedź systemu na zaburzenia radiacyjne uwzględniając wszystkie sprzężenia zwrotne występujące w układzie. Zakładając pewien typ zaburzenia w modelu klimatu wyznacza się równowagową wartość temperatury. Znając wartość odpowiadającą mu wymuszania radiacyjnego wyznacza się parametr  $\alpha$ .

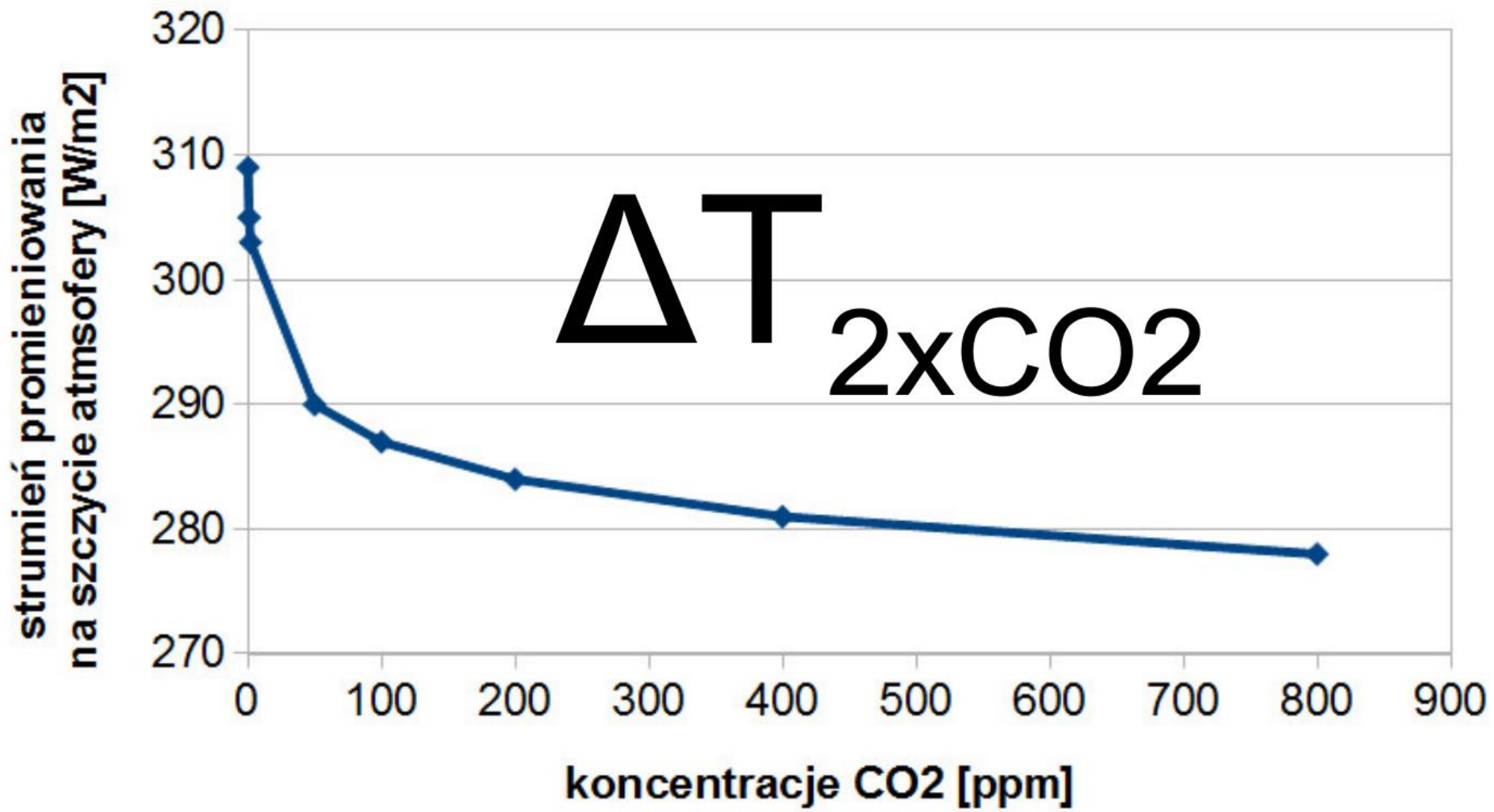
Często przyjmuje się że współczynnik wrażliwości na zmiany klimatyczne to około 0.6-0.7 [ $KW^{-1}m^{-2}$ ].

Rozważając przypadek podwojenia koncentracji  $CO_2$  w atmosferze możemy oszacować wymuszenia radiacyjne związane z tym zaburzeniem na około 4 co przy współczynniku  $\alpha=0.6$  prowadzi do zmian temperatury na poziomie około 2.4 K.

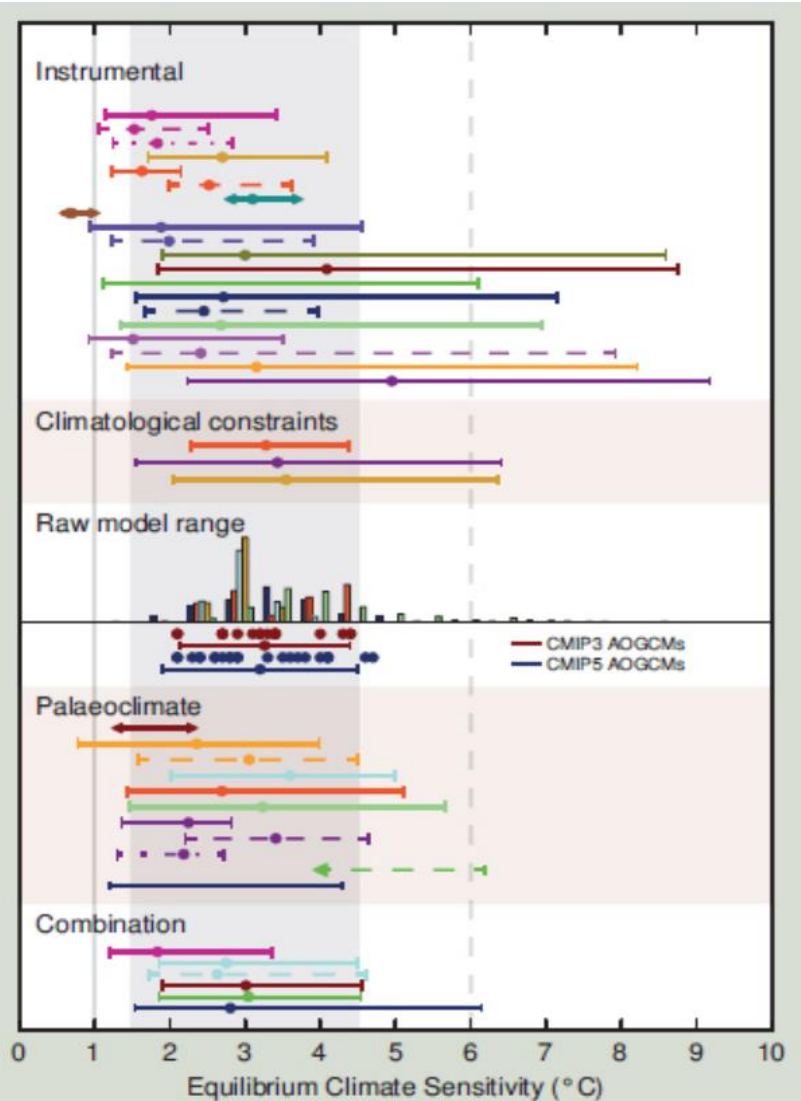
# Czułość klimatu (równowagowa) Equilibrium Climate Sensitivity (ECS)

$$\Delta T_{2xCO_2}$$

zmiana globalnej średniej temperatury powierzchni Ziemi,  
gdy po podwojeniu koncentracji CO<sub>2</sub> ukształtował się nowy stan równowagi



**Każde podwojenie koncentracji CO<sub>2</sub> wprowadza taką samą zmianę!**



**TFE.6, Figure 1** | Probability density functions, distributions and ranges for equilibrium climate sensitivity, based on Figure 10.20b plus climatological constraints shown in IPCC AR4 (Box AR4 10.2 Figure 1), and results from CMIP5 (Table 9.5). The grey shaded range marks the *likely* 1.5°C to 4.5°C range, grey solid line the *extremely unlikely* less than 1°C, the grey dashed line the *very unlikely* greater than 6°C. See Figure 10.20b and Chapter 10 Supplementary Material for full caption and details. |

według V raportu IPCC  
równowagowa czułość klimatu to

**1,5 – 4,5 °C**

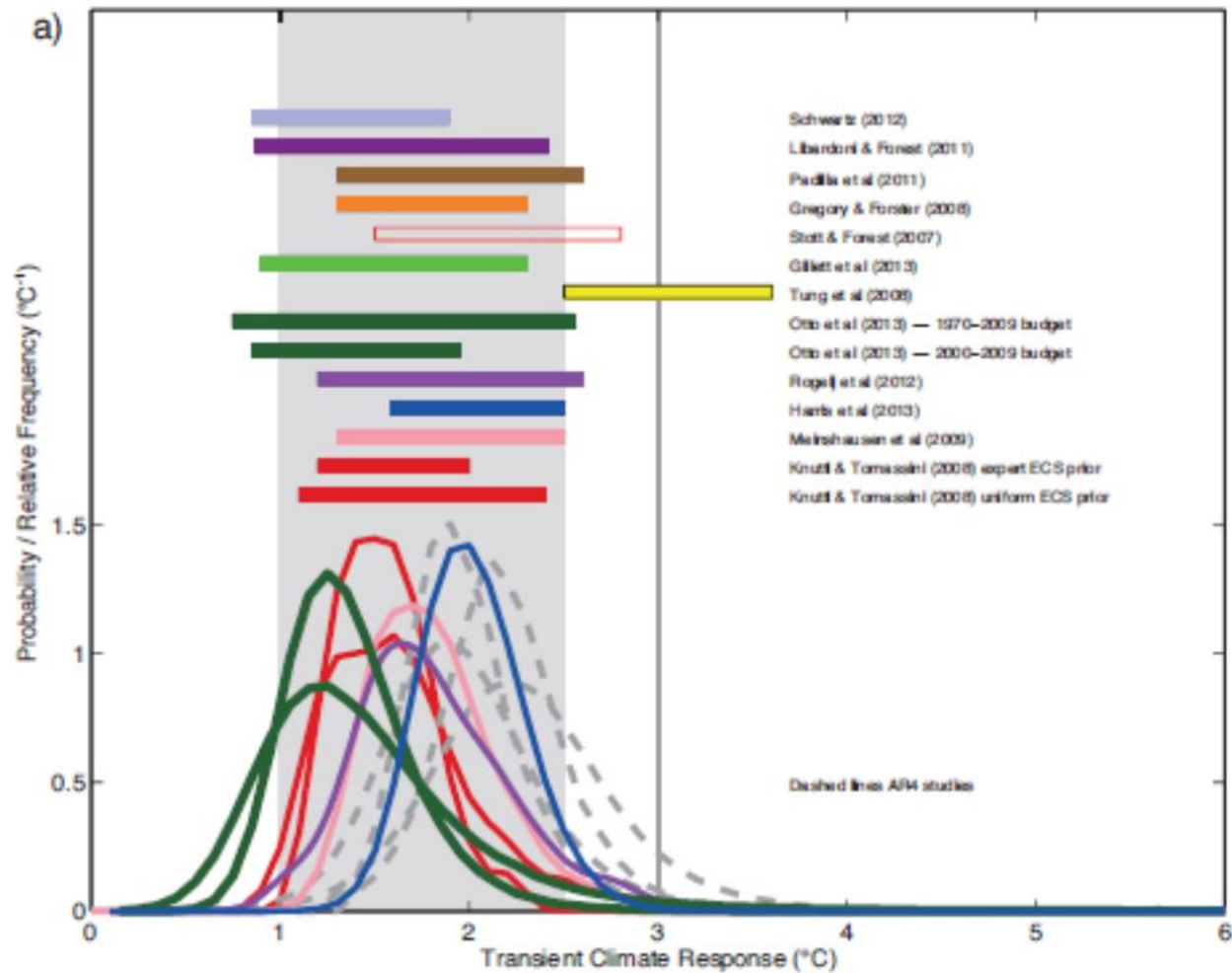
Najprawdopodobniej: **3°C**



# Przejściowa odpowiedź klimatu (Transient Climate Response – TCR)

$$\Delta T_{2xCO_2} \left( \text{Hourglass} \quad 2xCO_2 \right)$$

zmiana globalnej średniej temperatury powierzchni **w czasie**,  
**w którym koncentracje CO<sub>2</sub> podwoiły się**, rosnąc w tempie 1% rocznie



według V raportu IPCC przejściowa odpowiedź klimatu wynosi: **1-2,5 °C**