

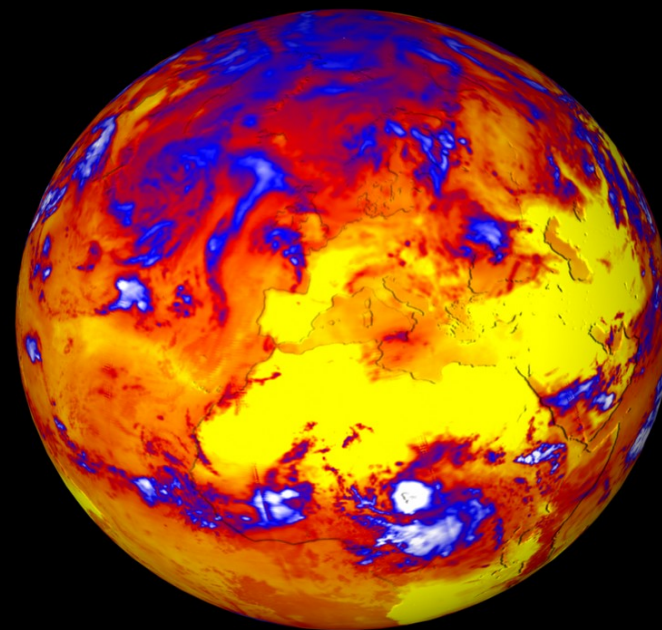
Fizyka Procesów Klimatycznych

2026 Wykład 2

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 (W/m^2)

85

350

Pierwsza zasada termodynamiki

Istnieje funkcja stanu, zwana energią wewnętrzną, taka, że

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

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

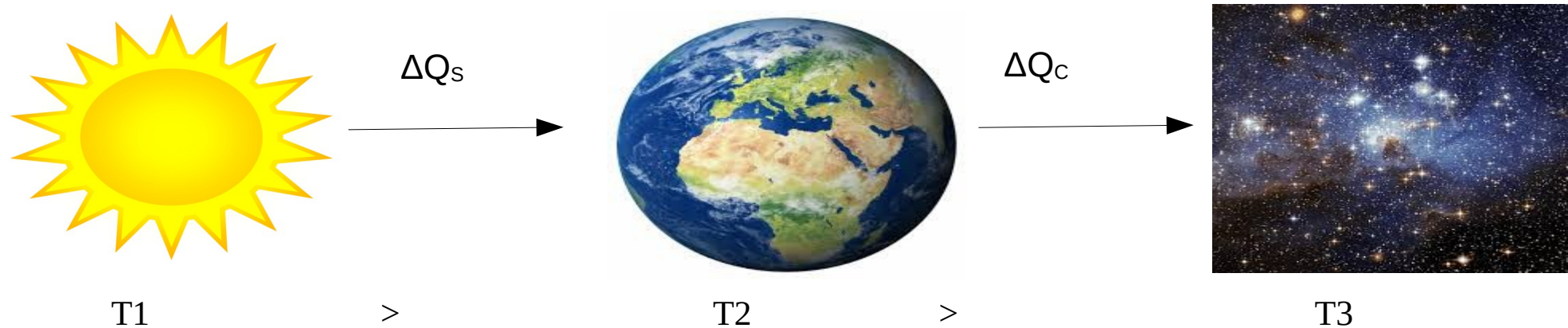
$$\Delta U = \Delta Q = C \cdot \Delta T$$

gdzie C to pojemność cieplna układu,

Przykład:

Słońce dostarcza ciepło Ziemi tak że rośnie jej energia.



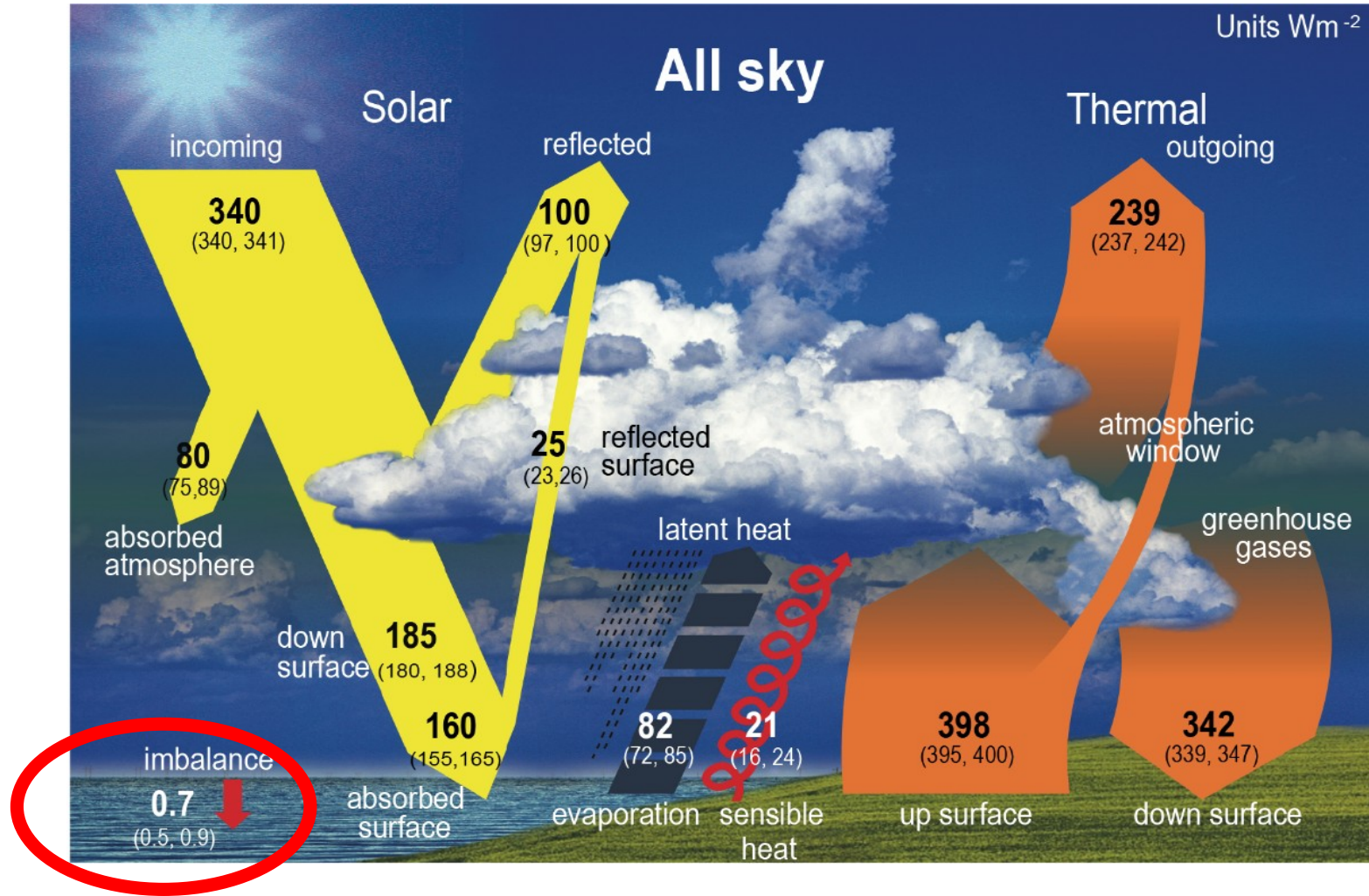


Aby temperatura Ziemi była stała strumień ciepła otrzymywanego przez Ziemię od Słońca ΔQ_s ($/\Delta t$) musi być równoważony strumieniem ciepła oddawanym przez Ziemię w kosmos ΔQ_c ($/\Delta t$).

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

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

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 ($\sim 0.04 \text{ W/m}^2$).



Uśredniony bilans energii systemu klimatycznego. Wartości w W/m^2 .
W nawiasach zakres niepewności i zmienności.

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.

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

Stała słoneczna

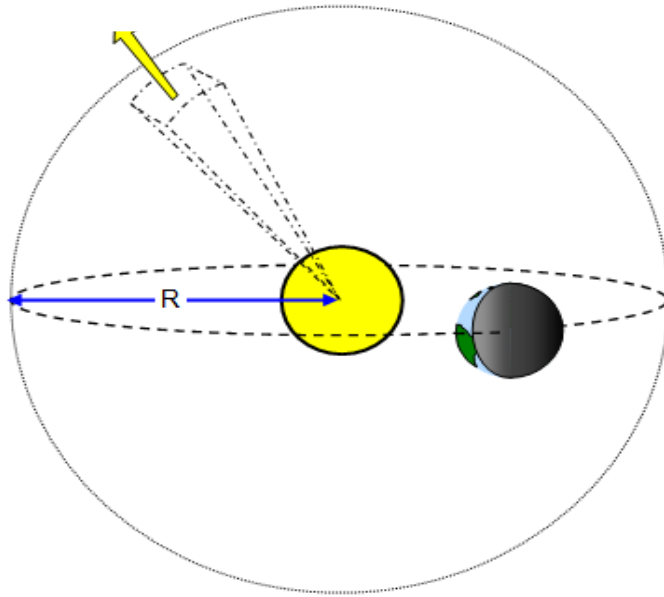
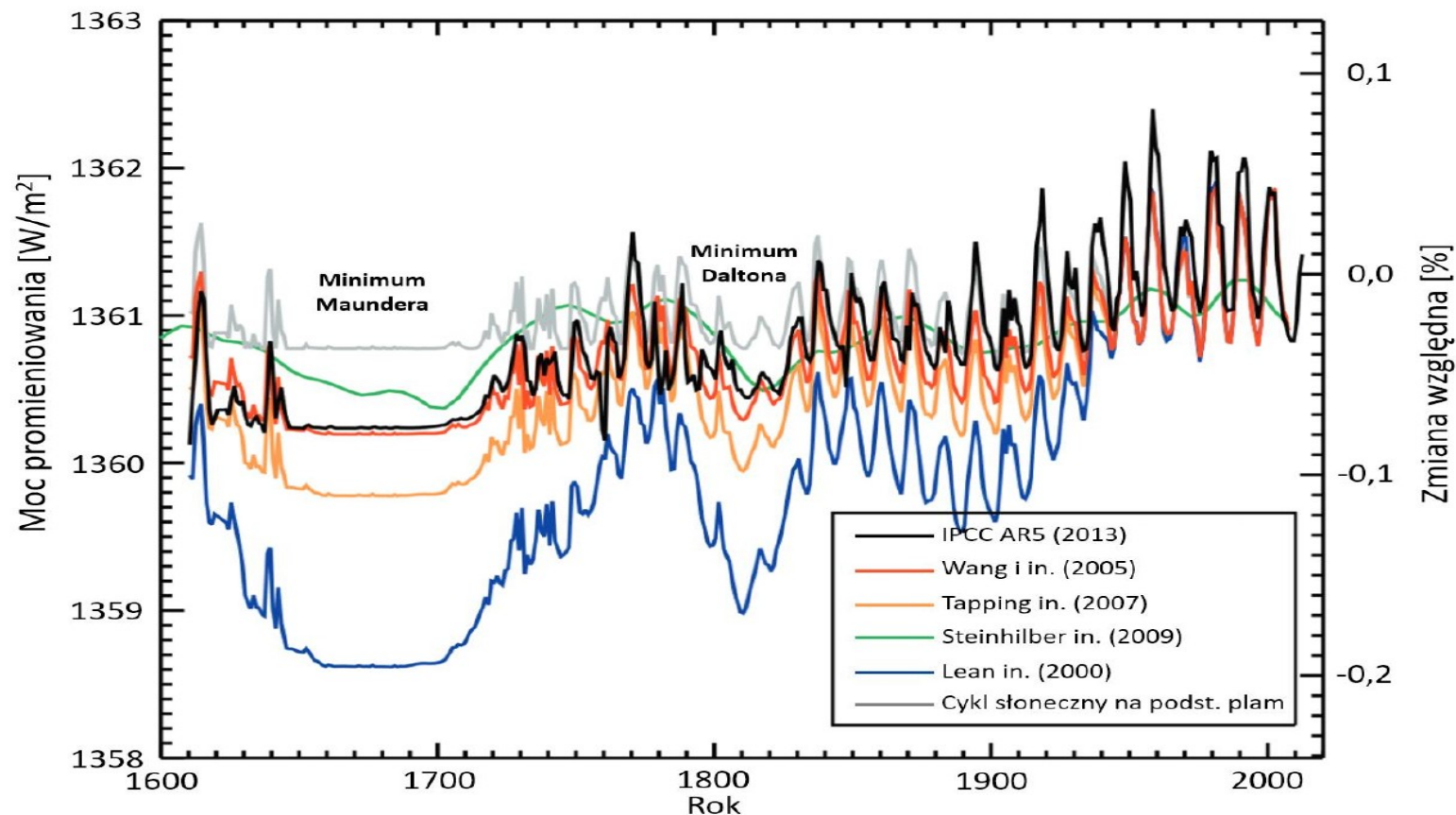


Diagram not to scale

$1361 \pm 1 \text{ W/m}^2$

całkowita irradancja
słoneczna
= total solar irradiance

Jak zmieniał się strumień energii słonecznej?



Porównanie 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

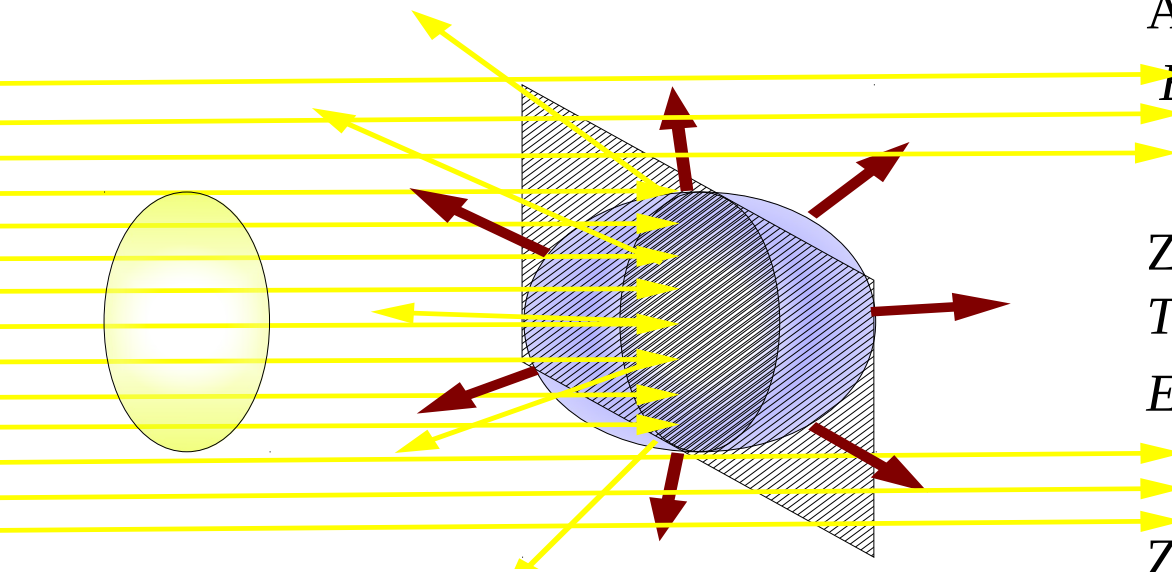
E_P - emisja energii w podczerwieni:

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

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 $S=1362\pm1 \text{ W/m}^2$ i $A=0.3$ daje $T_E=254.81\pm0.05\text{K}$

Albedo powierzchni Ziemi



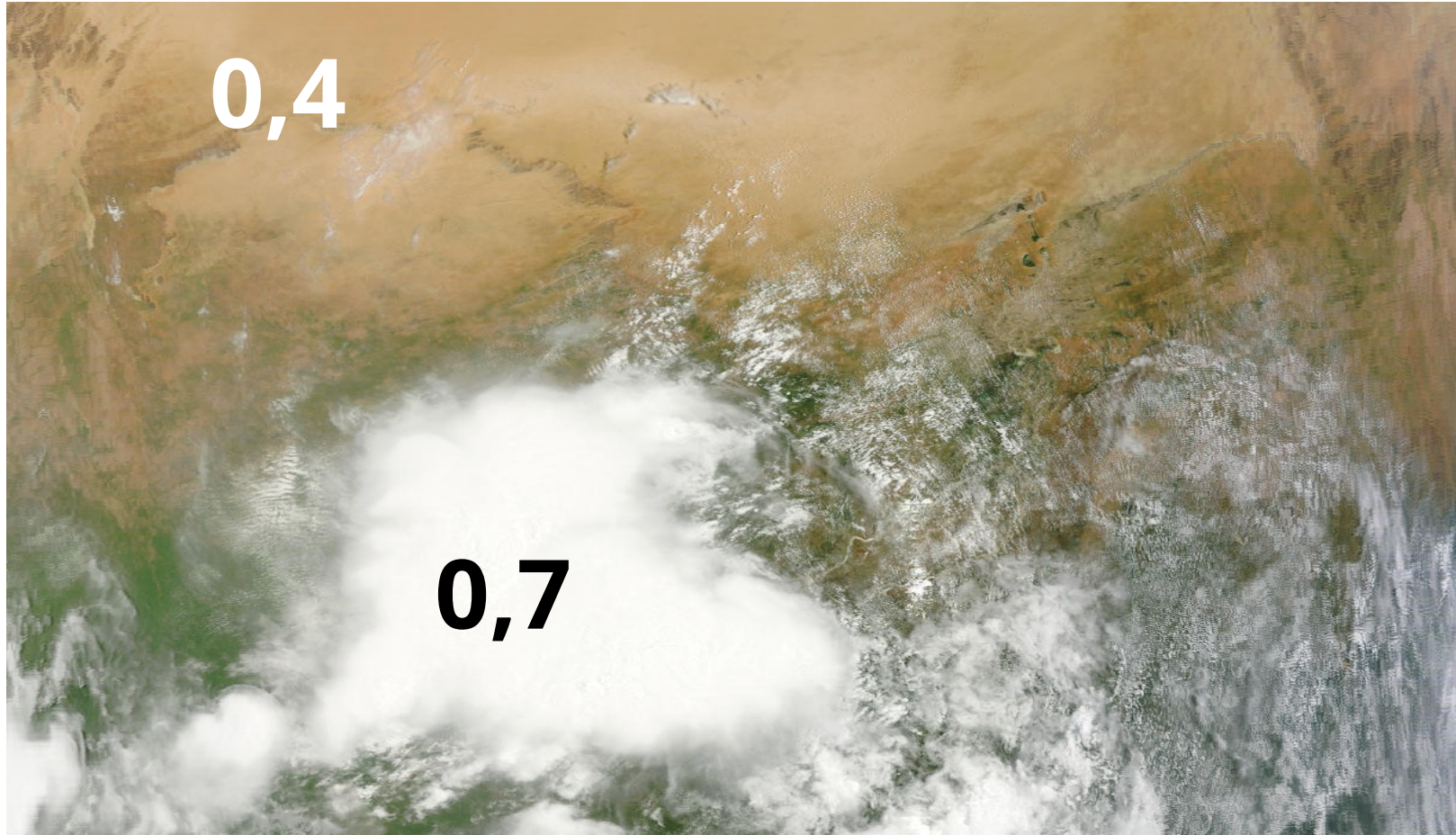
0,05 - 0,07

0,5-0,8

Albedo powierzchni Ziemi



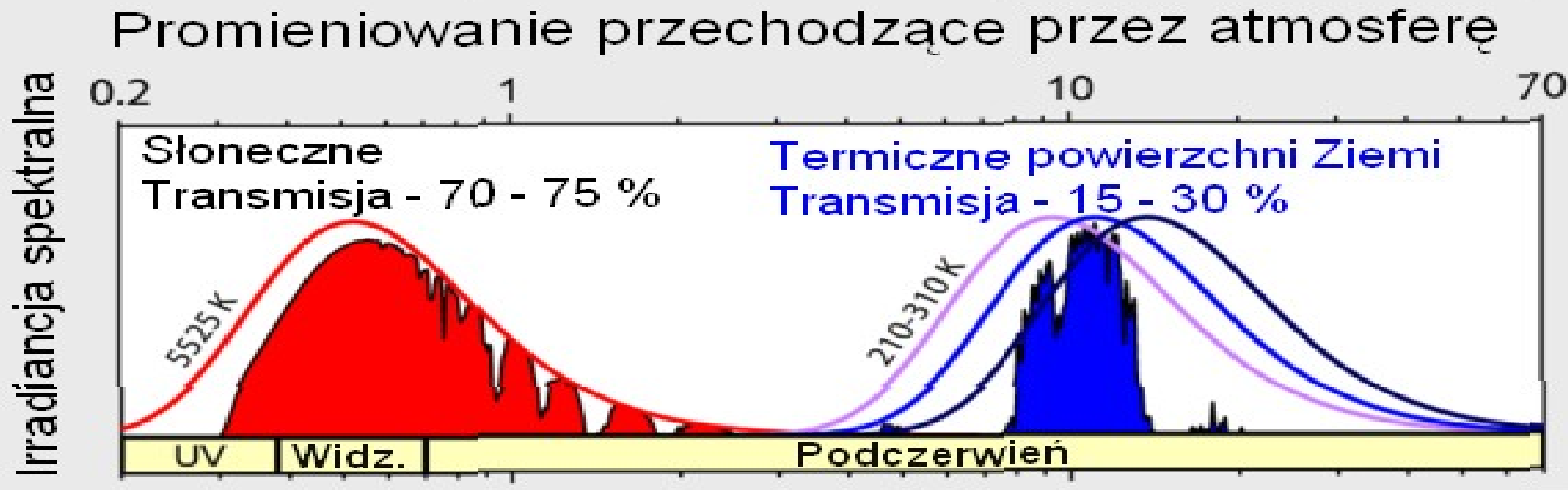
Albedo powierzchni Ziemi



Ziemia ma atmosferę!

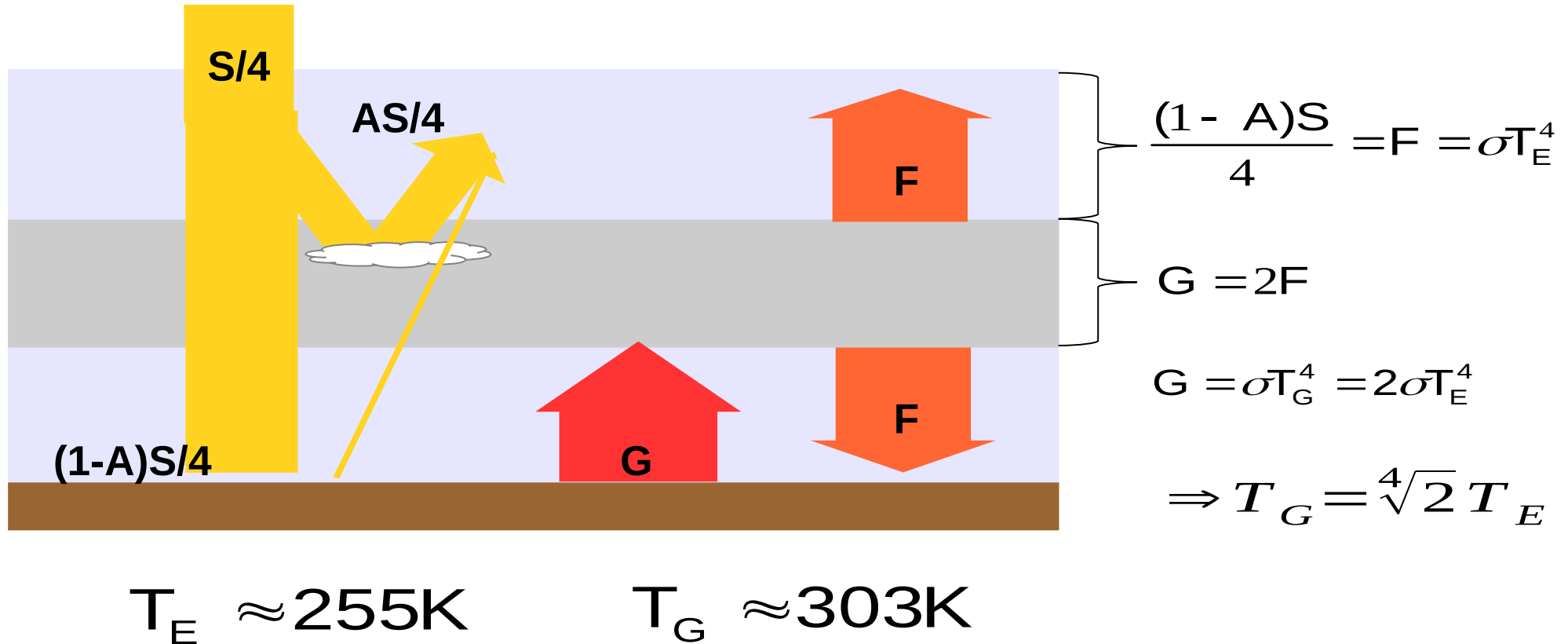


Efekt cieplarniany – model jednej szyby

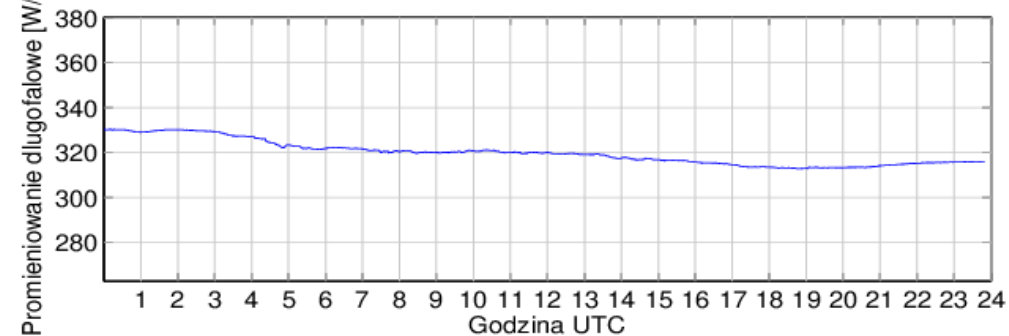
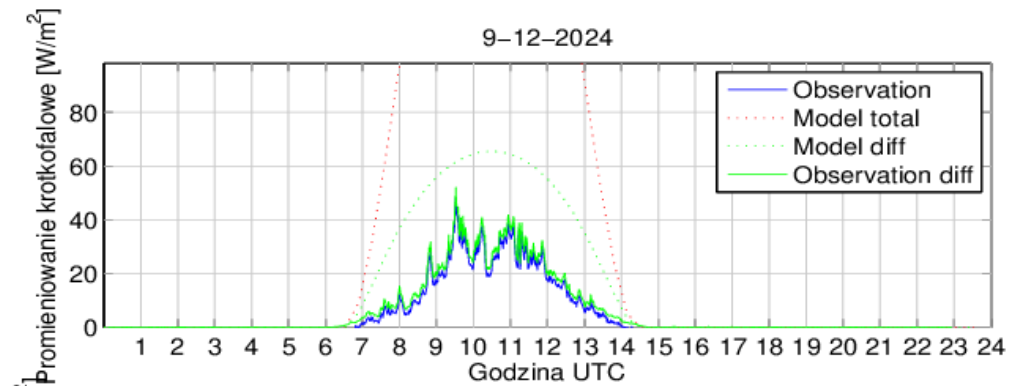
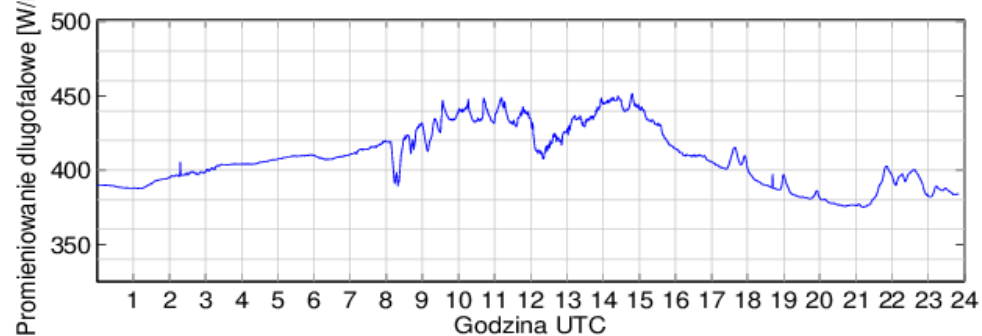
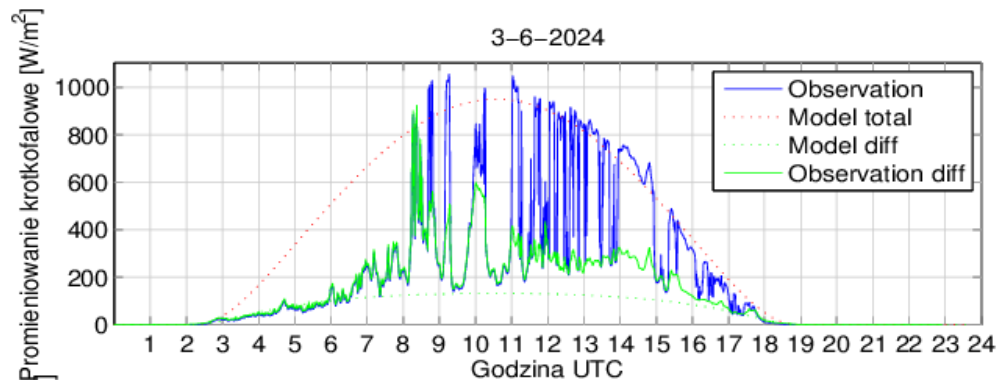


okno atmosferyczne: 8-14 μ m

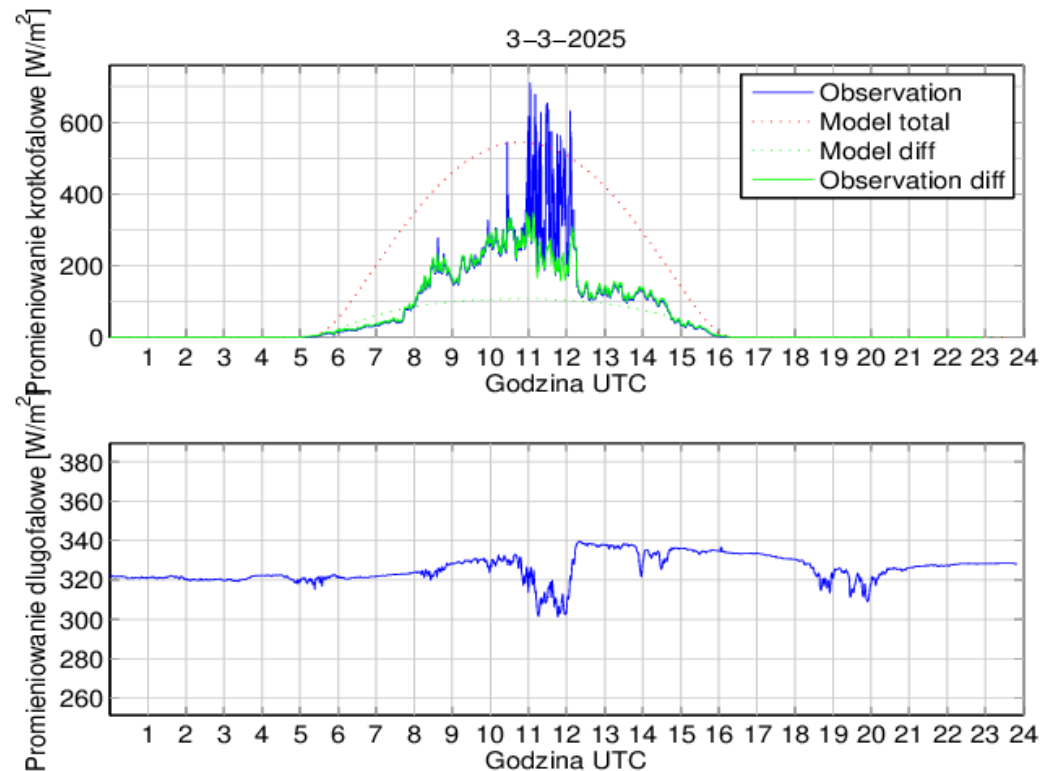
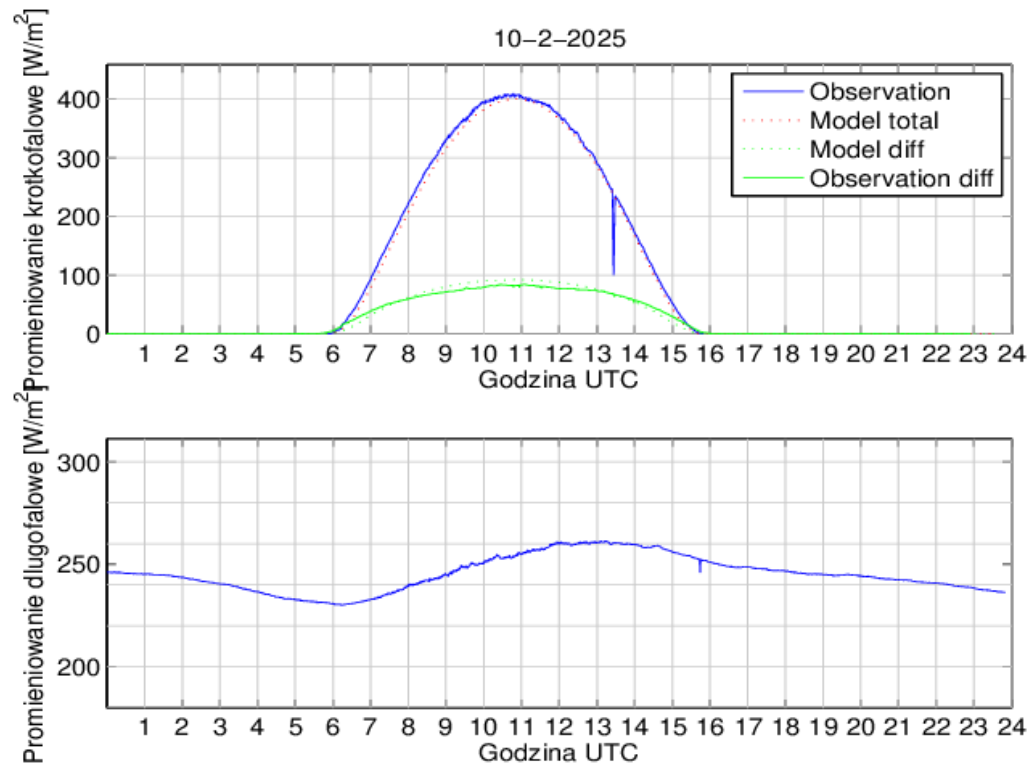
Efekt cieplarniany – model jednej szyby



Strumienie promieniowania Warszawa - przykłady



Strumienie promieniowania Warszawa - przykłady



ENERGIA W SYSTEMIE KLIMATYCZNYM

1. Strumień energii słonecznej = $\frac{1}{4}$ stałej słonecznej
 $\frac{1}{4} \cdot 1362 \text{ W/m}^2 \approx 341 \text{ W/m}^2$
2. Albedo Ziemi ≈ 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 $\approx 0.04 \text{ W/m}^2$

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: H_2O , CO_2 , CH_4 , O_3 , NO_x i wiele innych

Wymuszanie Radiacyjne (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:

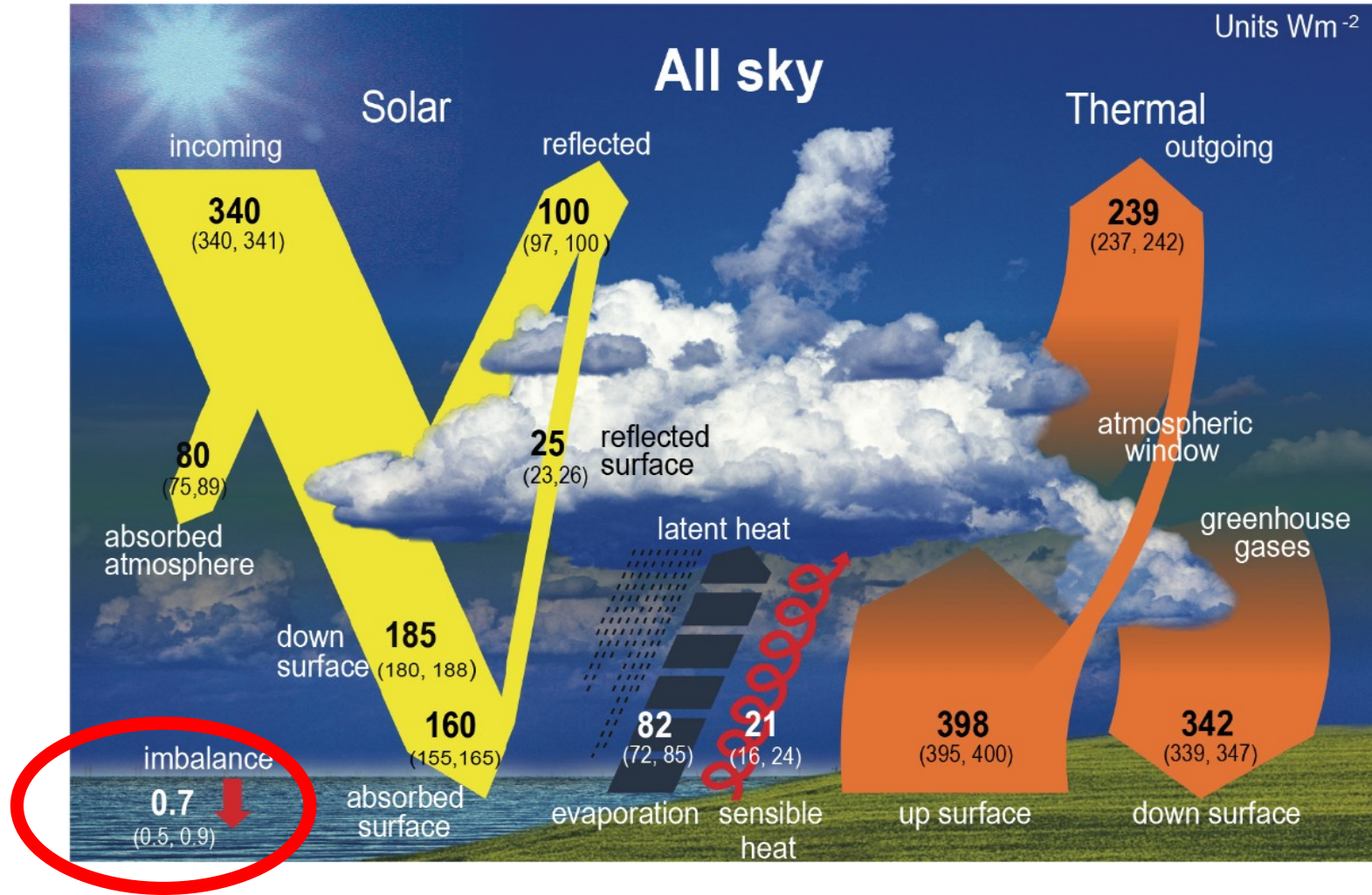
$$RF = (F_{\downarrow} - F_{\uparrow})_{\text{zab}} - (F_{\downarrow} - F_{\uparrow})_{\text{pod}} \quad [\text{W/m}^2],$$

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

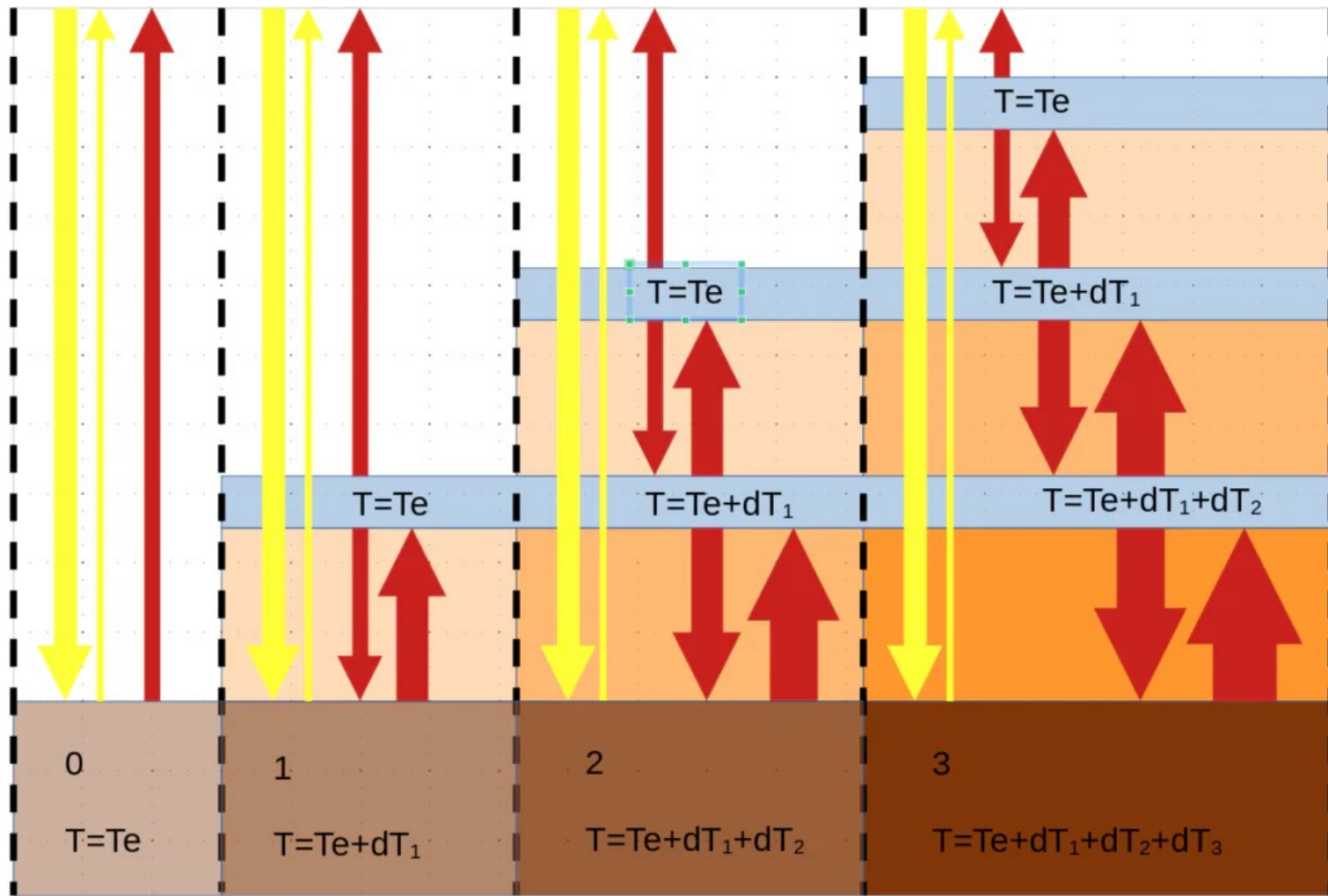
Pierwszy nawias opisuje strumień netto w przypadku sytuacji z zaburzeniem, zaś drugi strumień netto przypadku niezaburzonego (podstawowego).

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.



Bilans energii systemu klimatycznego – rezultatem nie jest wymuszanie radiacyjne, ale chwilowa wartość. Wartości w W/m^2 .



$$T_G = \sqrt[4]{n+1} T_E$$

Gdzie Ziemia lokuje nadwyżkę energii

1%

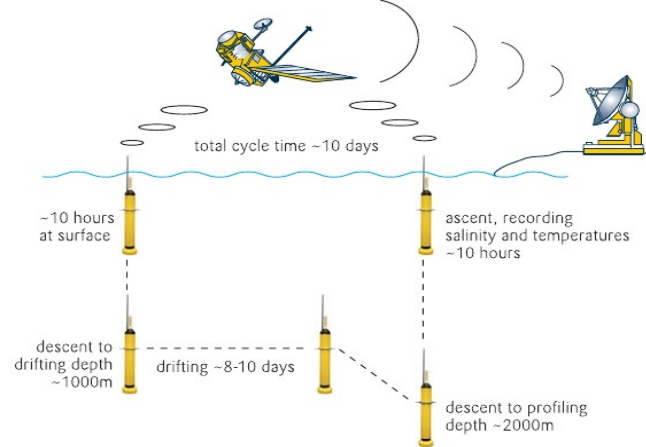
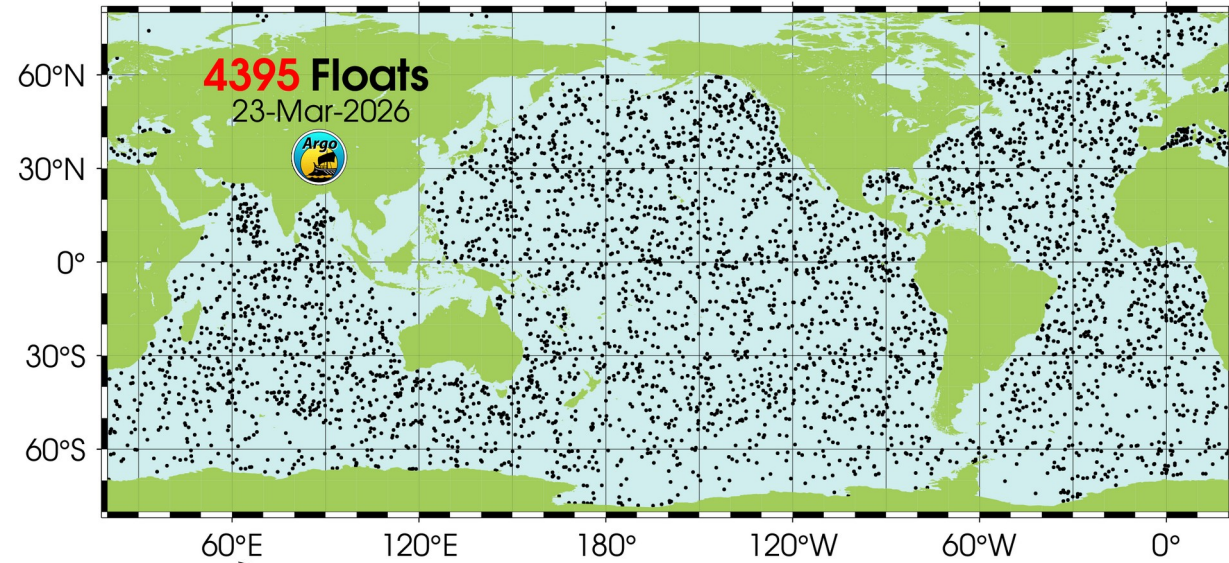
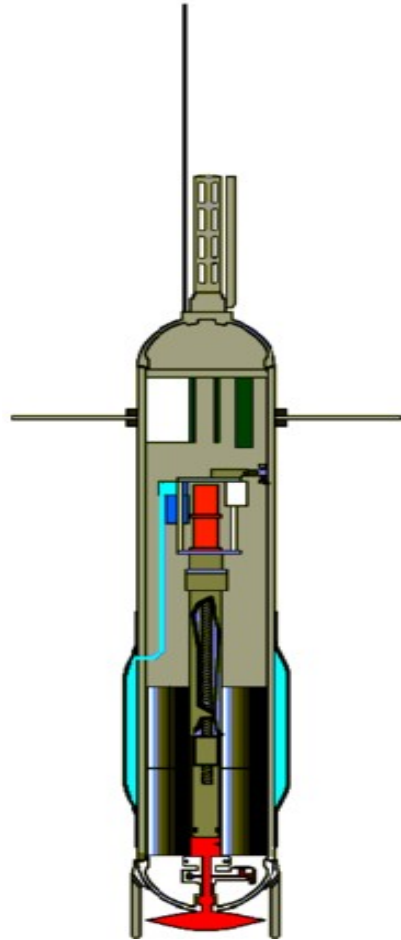
3%

3%

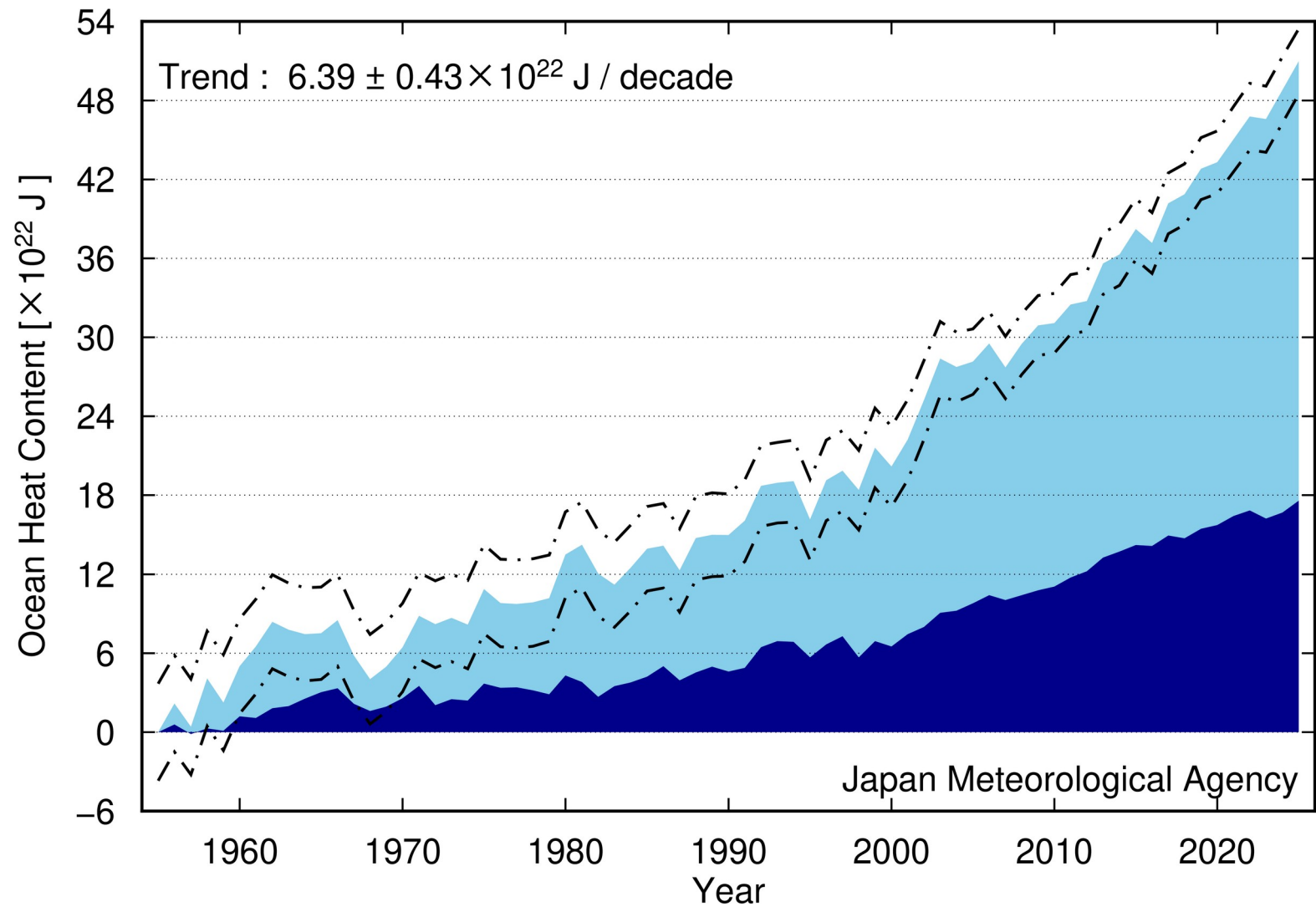
93%

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%.

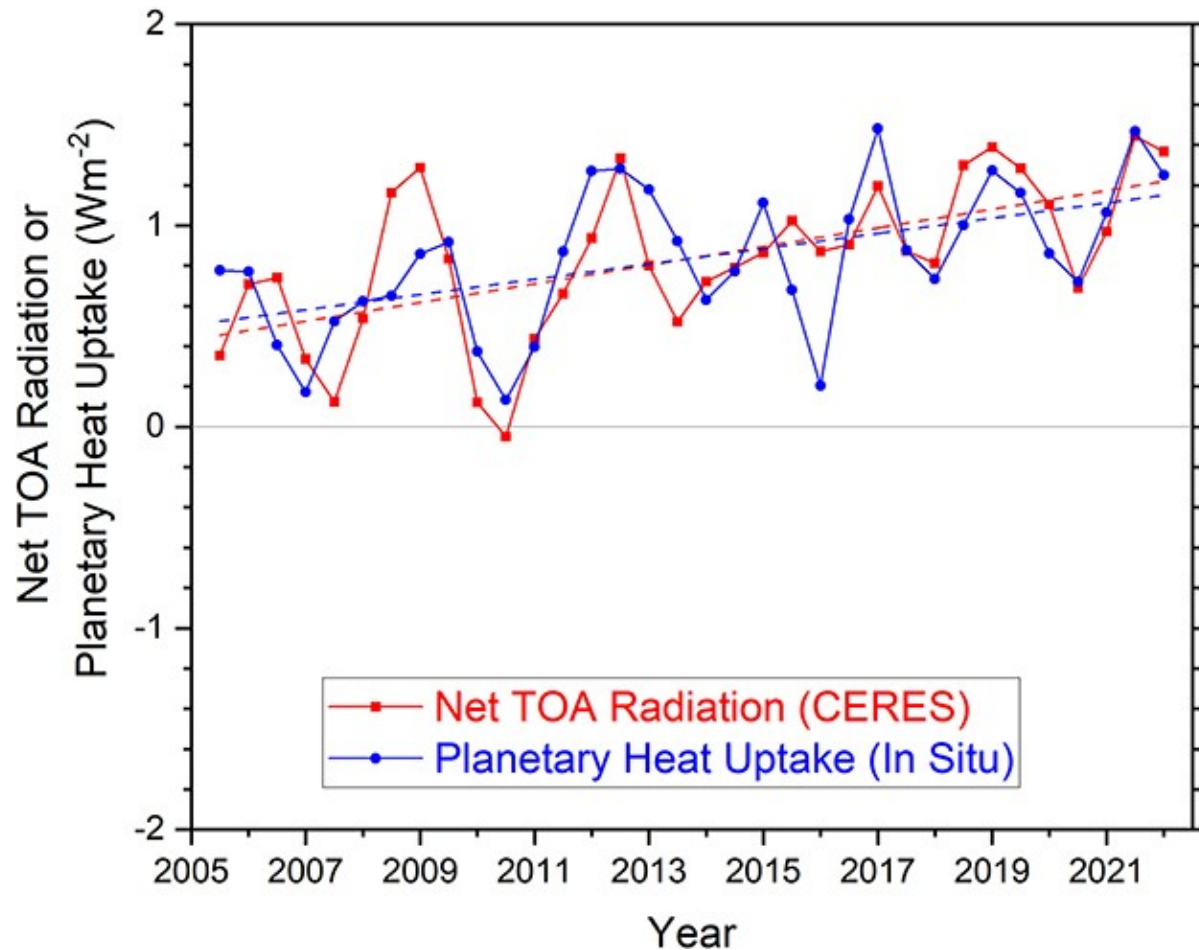
Projekt ARGO: profilowanie oceanów (temperatura, zasolenie, prądy).



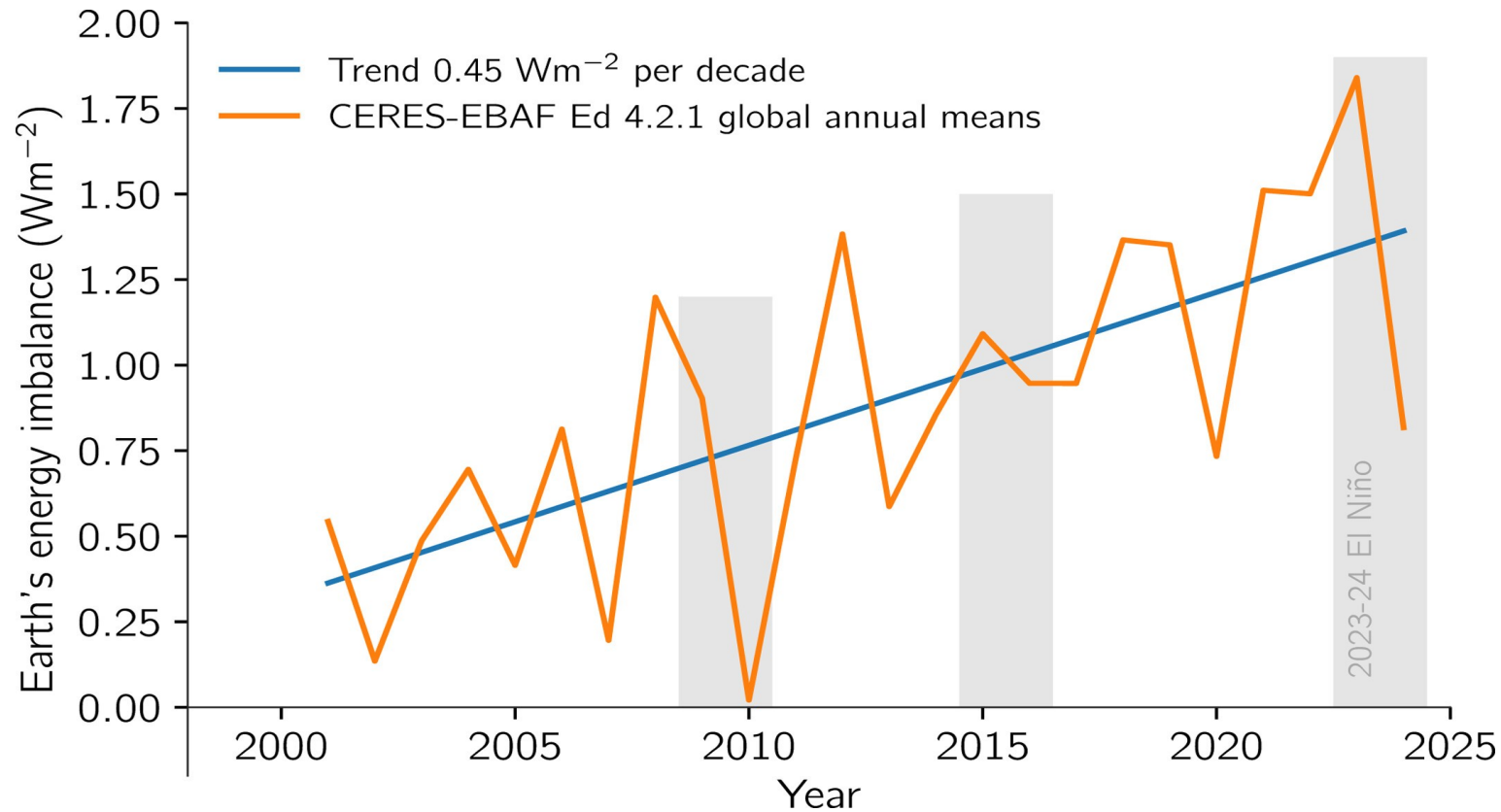
<http://www.argo.ucsd.edu/>



Nierównowaga energetyczna narasta – dane satelitarne i z systemu ARGO



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>



AGU Advances

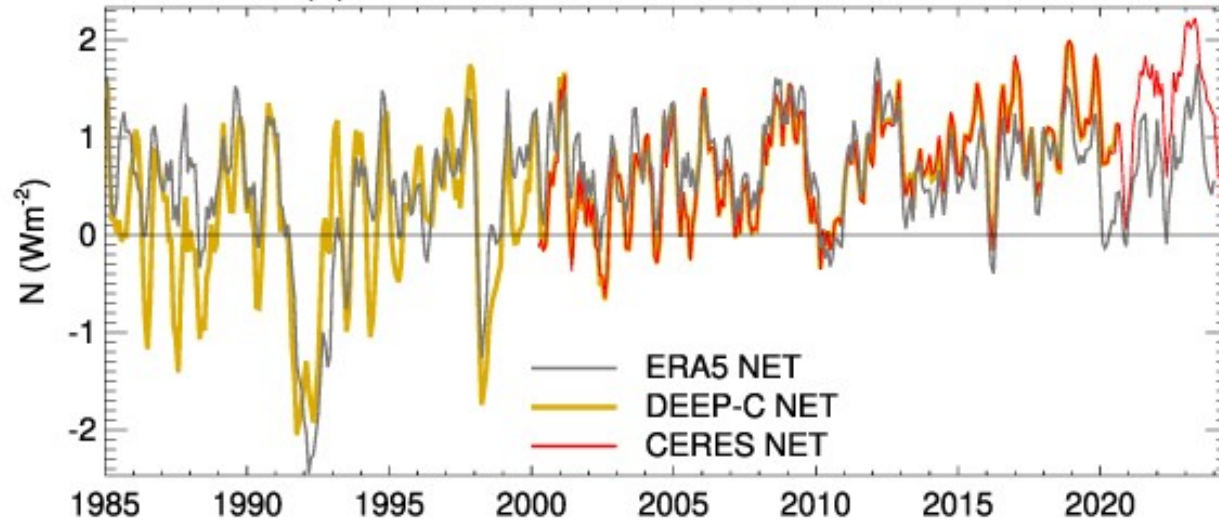
Commentary | [Open Access](#) | [CC BY](#)

Earth's Energy Imbalance More Than Doubled in Recent Decades

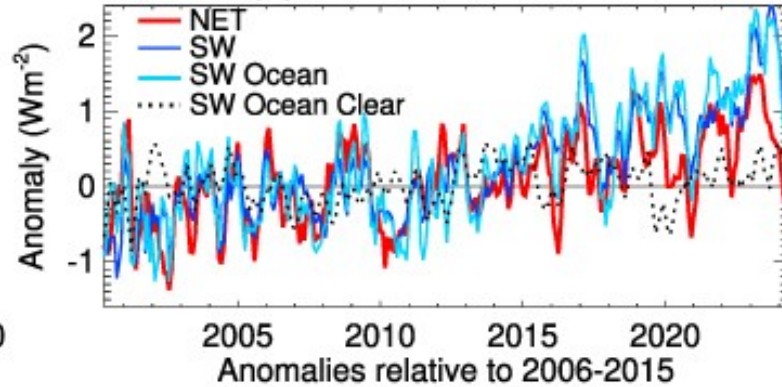
Thorsten Mauritsen  Yoko Tsushima, Benoit Meyssignac, Norman G. Loeb, Maria Hakuba, Peter Pilewskie, Jason Cole, Kentaroh Suzuki, Thomas P. Ackerman, Richard P. Allan ... [See all authors](#)

First published: 10 May 2025 | <https://doi.org/10.1029/2024AV001636> | Citations: 3

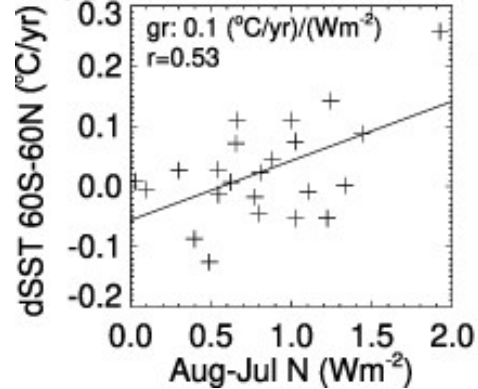
(a) GLOBAL NET ENERGY IMBALANCE



(b) CERES Anomalies



(c) ERA5/CERES 2000-23



Richard P Allan and Christopher J Merchant 2025,
Reconciling Earth's growing energy imbalance with
ocean warming, Environ. Res. Lett. 20 044002

DOI 10.1088/1748-9326/adb448

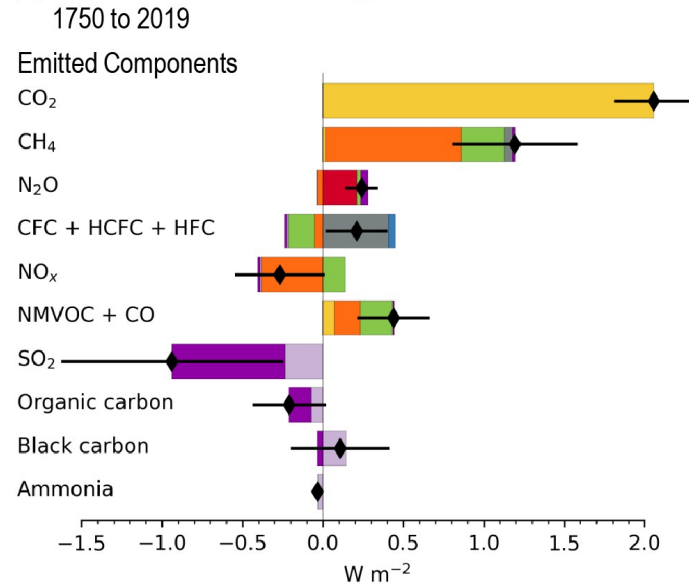
Wymuszanie radiacyjne (ang. *Radiative Forcing*, RF).

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).**

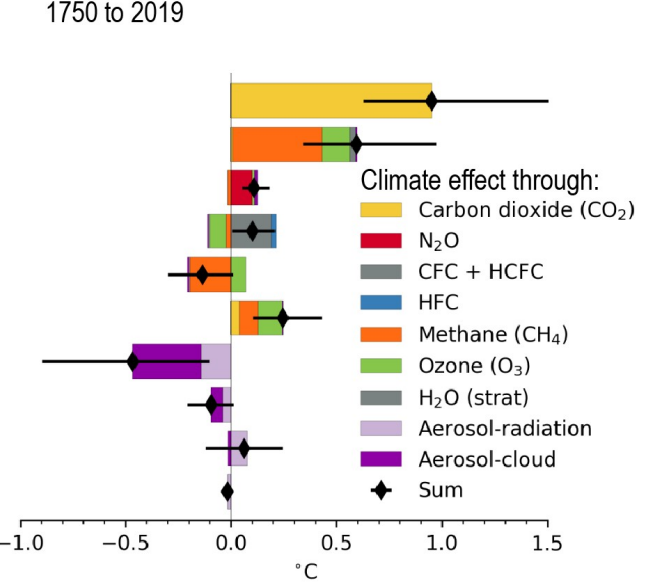
UWAGA: istnieje wiele definicji, ta jest uproszczona. Można mówić o wymuszaniu na szczycie atmosfery, na powierzchni Ziemi e.t.c.

Wymuszanie radiacyjne:
jak zmieniły się strumienie promieniowania w systemie klimatycznym od 1750r do 2019r wskutek zmian składu atmosfery, zmian albedo, zmian w dopływie promieniowania słonecznego.

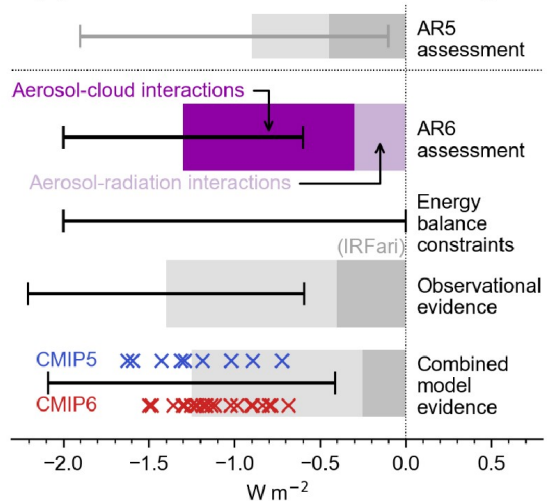
(a) Effective radiative forcing 1750 to 2019



(b) Change in global surface temperature 1750 to 2019



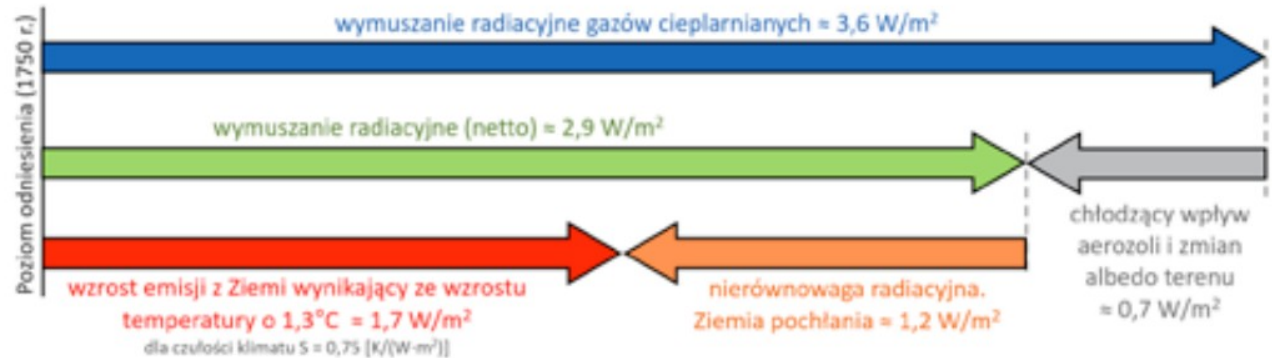
(c) Aerosol effective radiative forcing



W wydaniu książki z 2018 r.

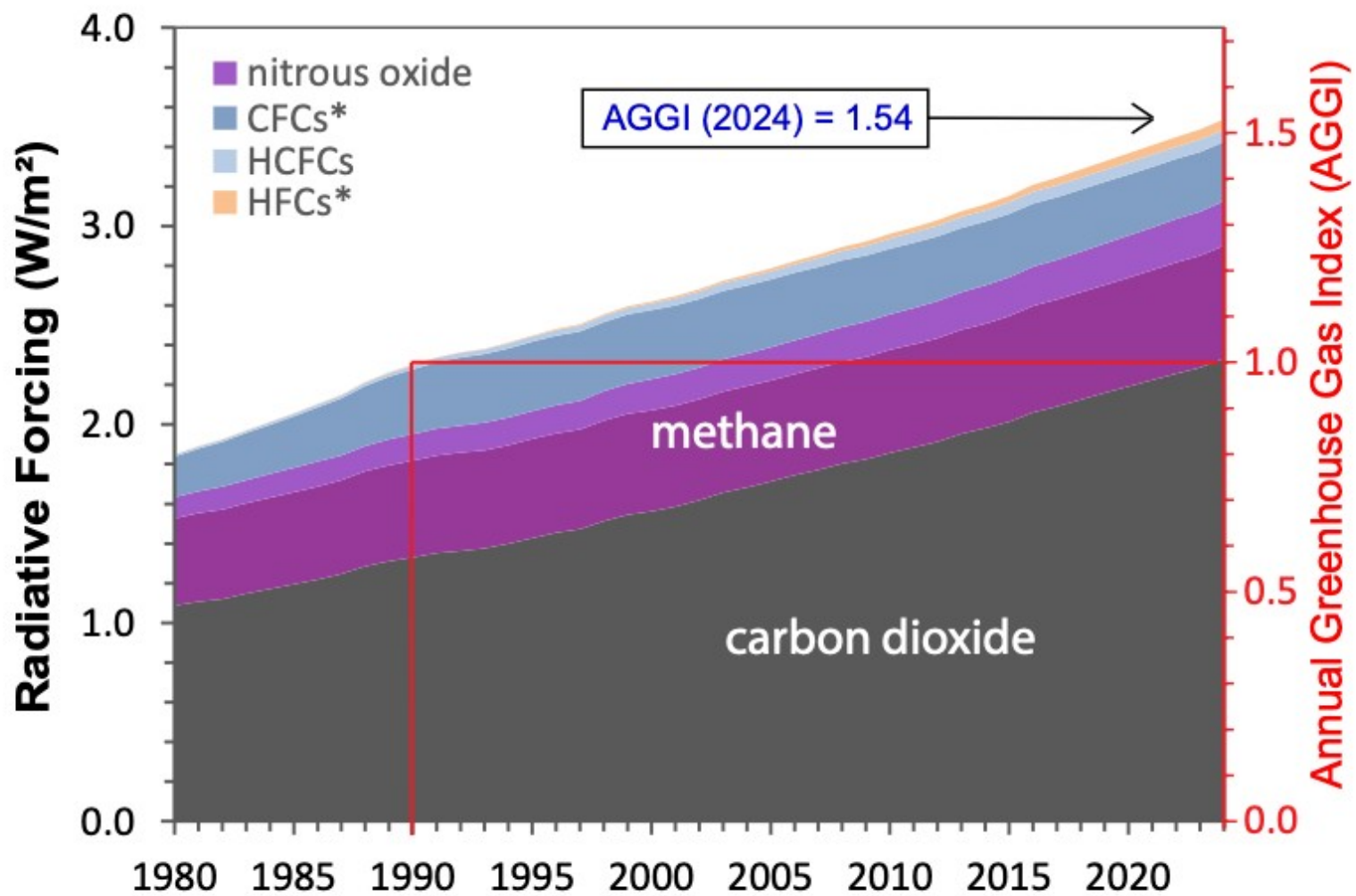


z 2025 r.



Wymuszenie radiacyjne $3,6 \text{ W/m}^2$ doprowadziło do wzrostu temperatury powierzchni Ziemi, w wyniku którego wypromieniowuje ona $1,7 \text{ W/m}^2$ więcej energii.

Pozostała nierównowaga energetyczna równa $1,2 \text{ W/m}^2$ prowadzi do dalszego wzrostu energii (nagrzewania się) ziemskiego systemu klimatycznego. Wartości są przybliżone, zaokrąglone i zbilansowane, jednak każda z nich jest obciążona pewnym stopniem niepewności – największym dla aerozoli atmosferycznych oraz czułości klimatu, najmniejszym dla mierzonej sumarycznej nierównowagi radiacyjnej.



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:

$$\Delta T = \alpha \cdot \Delta F$$

gdzie ΔT opisuje zmianę temperatury pomiędzy nowym stanem równowagi a stanem podstawowym, ΔF jest wymuszaniem radiacyjnym, zaś α jest współczynnikiem wrażliwości na zmiany klimatyczne [$\text{K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$].

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 α .

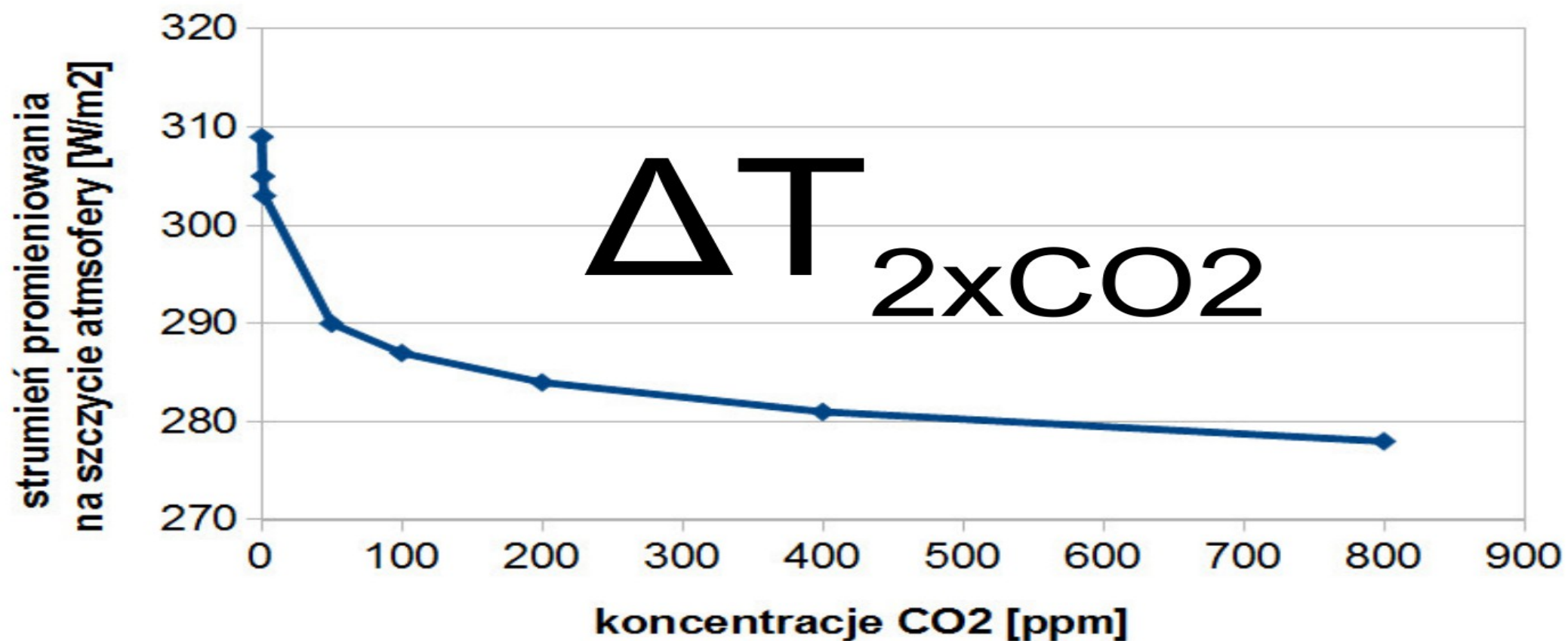
Często przyjmuje się że współczynnik wrażliwości na zmiany klimatyczne to około $0.6-0.7 [\text{K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$.

Rozważając przypadek podwojenia koncentracji CO_2 w atmosferze możemy oszacować wymuszenia radiacyjne związane z tym zaburzeniem na około $4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ co przy współczynniku $\alpha=0.6$ prowadzi do zmian temperatury na poziomie około 2.4 K .

Czułość klimatu (równowagowa) Equilibrium Climate Sensitivity (ECS)

$$\Delta T_{2\times\text{CO}_2}$$

zmiana globalnej średniej temperatury powierzchni Ziemi,
gdy po podwojeniu koncentracji CO_2 ukształtował się nowy stan równowagi



Każde podwojenie koncentracji CO₂ wprowadza taką samą zmianę!

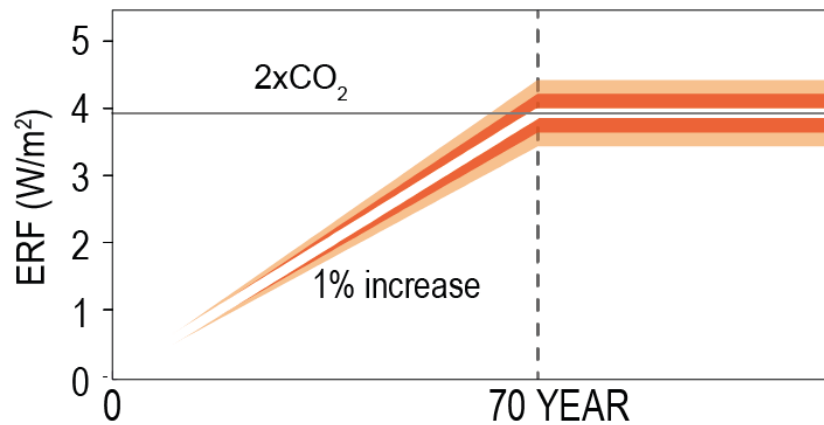
Przejściowa odpowiedź klimatu (Transient Climate Response – TCR)

$$\Delta T_{2\times\text{CO}_2}(\text{hourglass } 2\times\text{CO}_2)$$

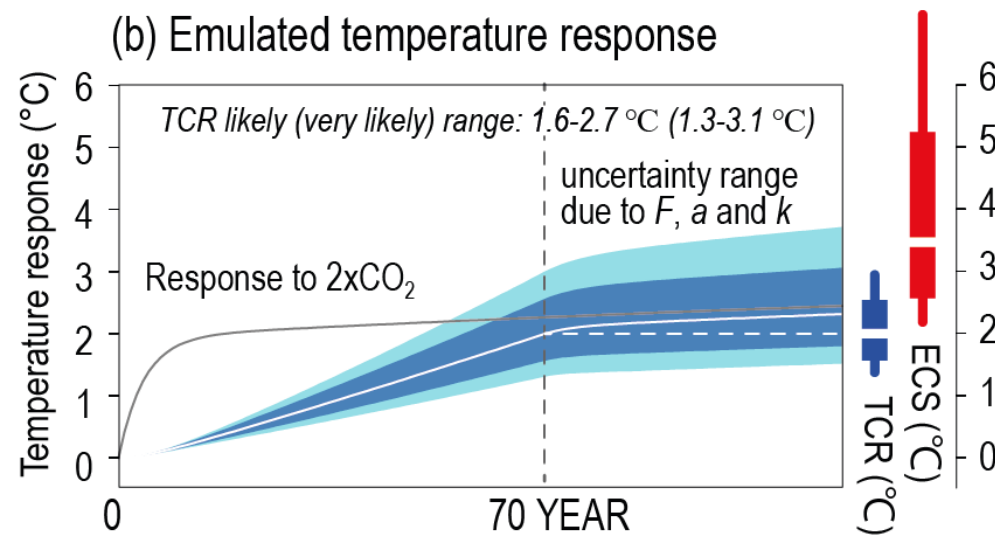
zmiana globalnej średniej temperatury powierzchni **w czasie**,
w którym koncentracje CO₂ podwoiły się, rosnąc w tempie 1% rocznie

Process assessment of Transient Climate Response

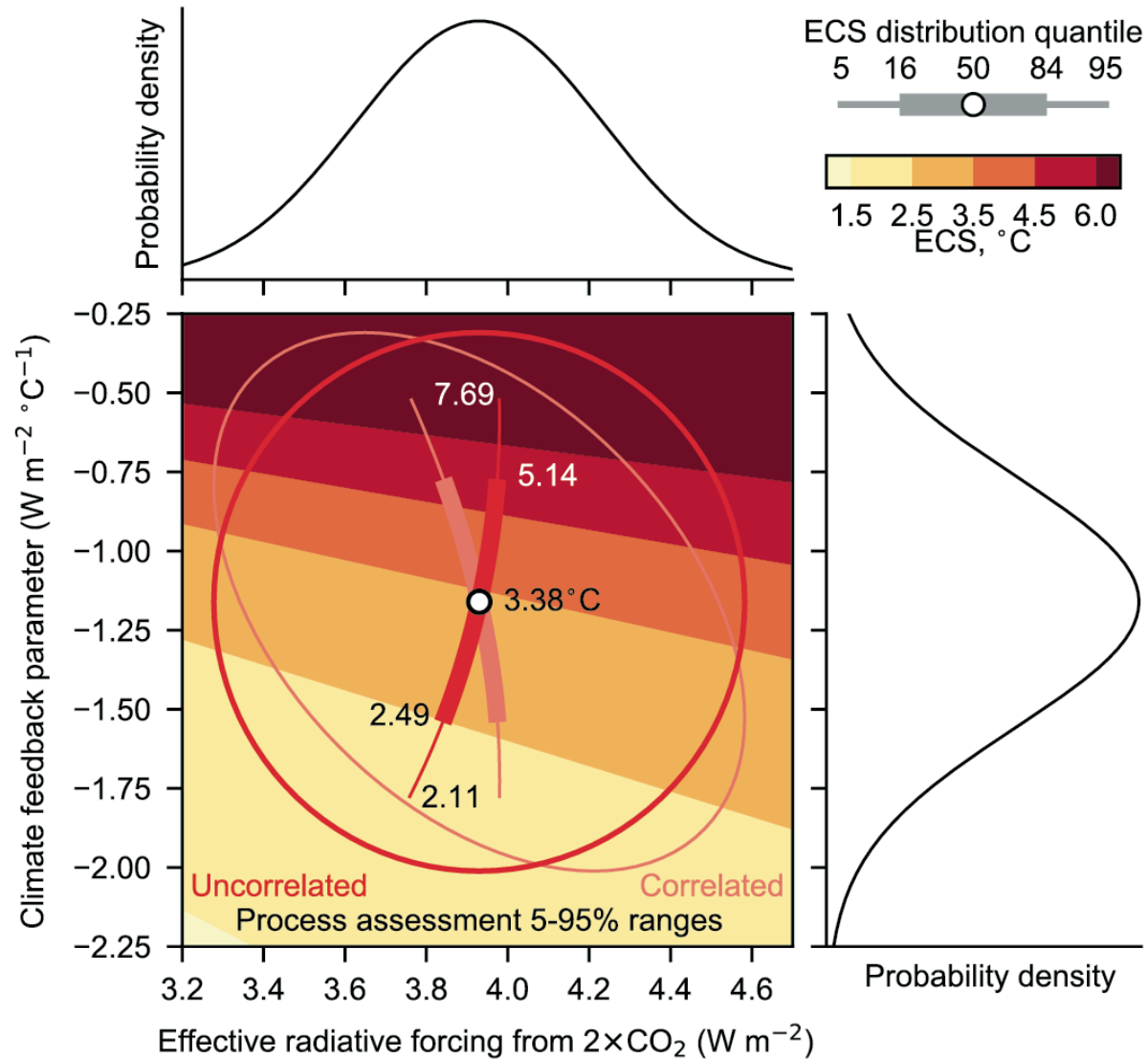
(a) Idealized radiative forcing



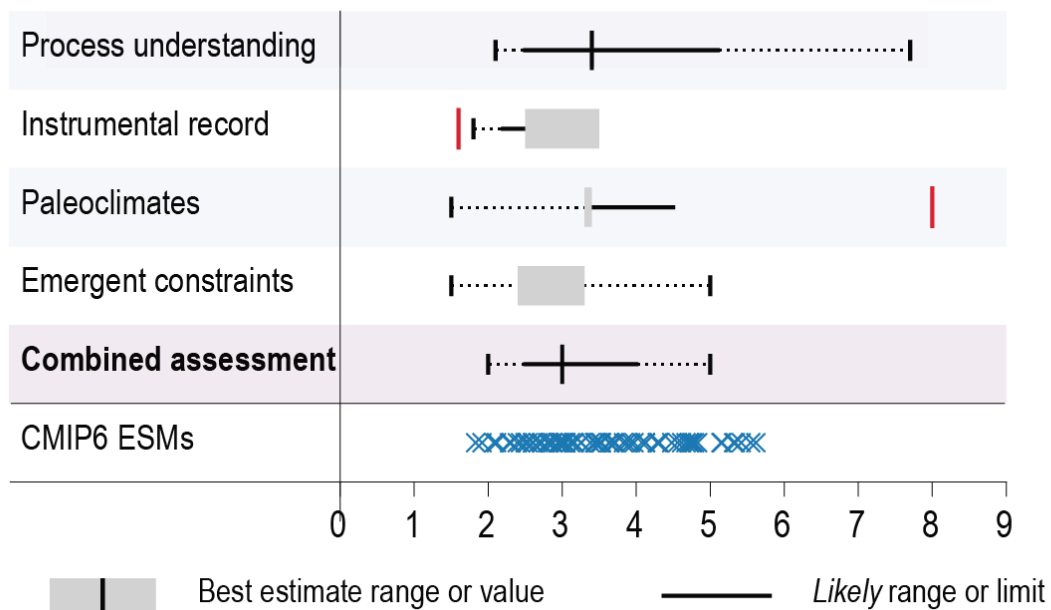
(b) Emulated temperature response



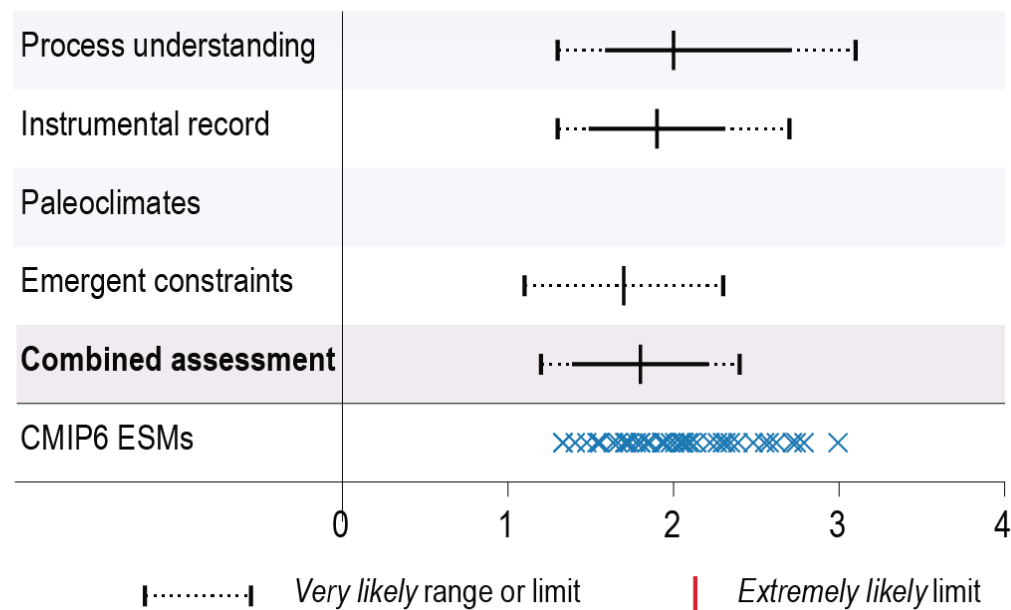
Process assessment of Equilibrium Climate Sensitivity (ECS)



(a) Equilibrium climate sensitivity estimates (°C)



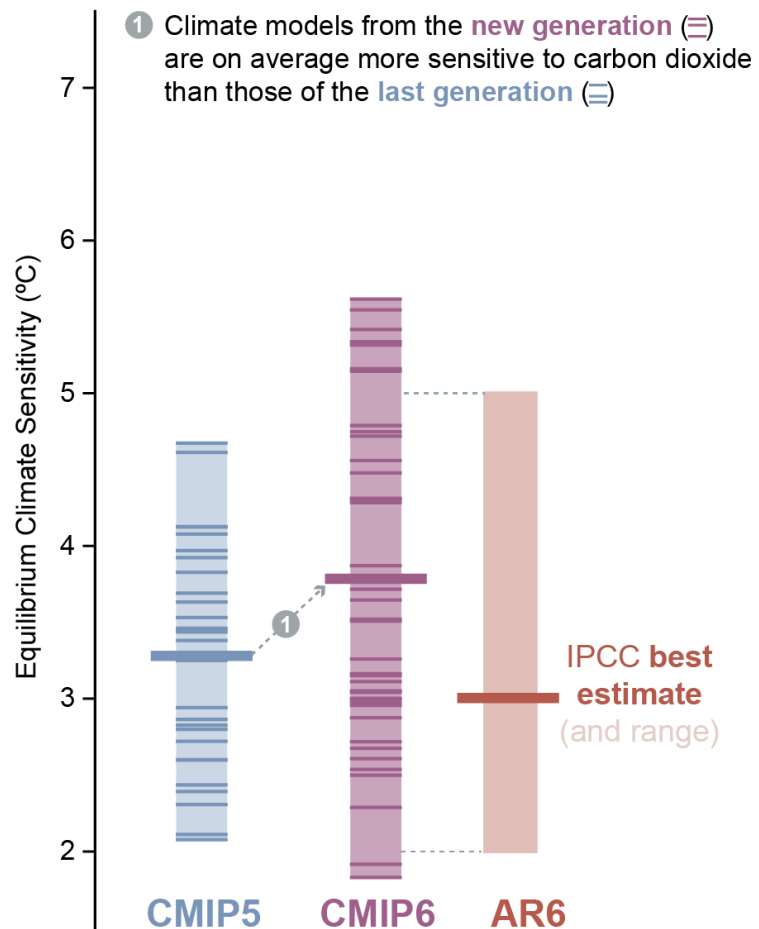
(b) Transient climate response estimates (°C)



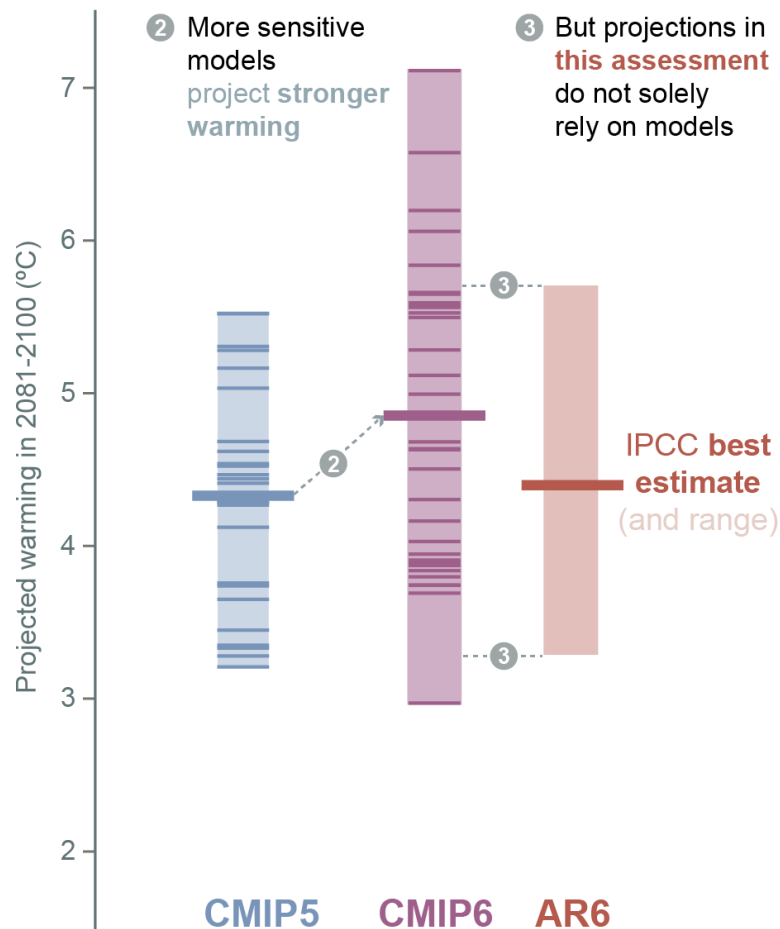
FAQ 7.3: Equilibrium climate sensitivity and future warming

Equilibrium climate sensitivity measures how climate models respond to a doubling of carbon dioxide in the atmosphere.

Climate sensitivity of models



Future projections



<https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate/state-of-global-climate-2025>

State of the Global Climate 2025

● PUBLICATION

23 March 2026

Share:    

Key messages

- WMO State of Climate report confirms 2015-2025 hottest 11 years on record
- Earth's energy imbalance is highest in sixty five-year record
- The ocean has been absorbing about eighteen times the annual human energy use each year for the past two decades
- Extreme weather impacts millions and costs billions
- World Meteorological Day: observing today to protect tomorrow