

Fizyka procesów klimatycznych

Współczesne modelowanie klimatu

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

Pierwotnym źródłem energii w układzie klimatycznym jest Słońce a w układzie dominują strumienie energii promieniowania.

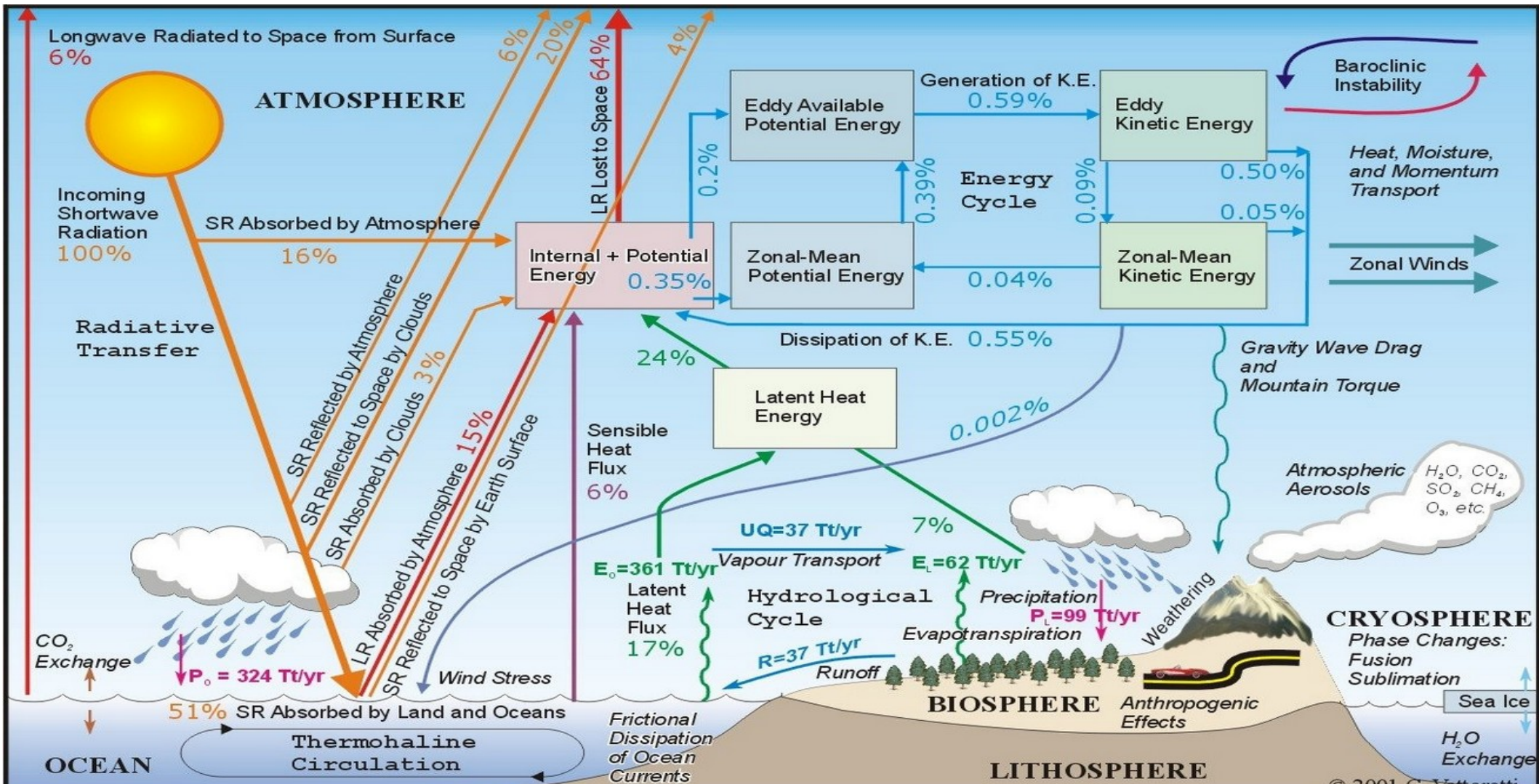
ZMIANY KLIMATU mogą mieć kilka przyczyn:

- zmiany w dopływie energii pierwotnej wskutek zmian w aktywności słonecznej i w orbicie naszej planety;
- zmiany albedo (powierzchnia Ziemi, lód, aerozole, chmury, zakwit oceanów, pył wulkaniczny);
- zmiany w składnikach gazowych atmosfery.

Zmiany te mają wpływ NIE TYLKO na strumienie energii promieniowania, ale także na redystrybucje energii przez cyrkulacje atmosferyczne i oceaniczne, cykl hydrologiczny, biosferę.

Między poszczególnymi elementami systemu klimatycznego występują związki i sprzężenia zwrotne....

System klimatyczny – jedno z wielu możliwych przedstawień



Skutkiem tych zmian jest zmiana temperatury powietrza przy powierzchni Ziemi, zmiany w cyklu hydrologicznym, zmiany w cyrkulacjach atmosferycznych i oceanicznych.

Sprzężenia występujące w systemie klimatycznym mogą prowadzić do dalszych zmian albedo, cyklu hydrologicznego, strumieni energii promieniowania.

Nie dysponujemy pełną teorią działania systemu klimatycznego, jednak pewne elementy działania tego systemu w określonych, stosunkowo krótkich skalach czasu jesteśmy w stanie dobrze udokumentować.

Jak badać tak skomplikowany system?

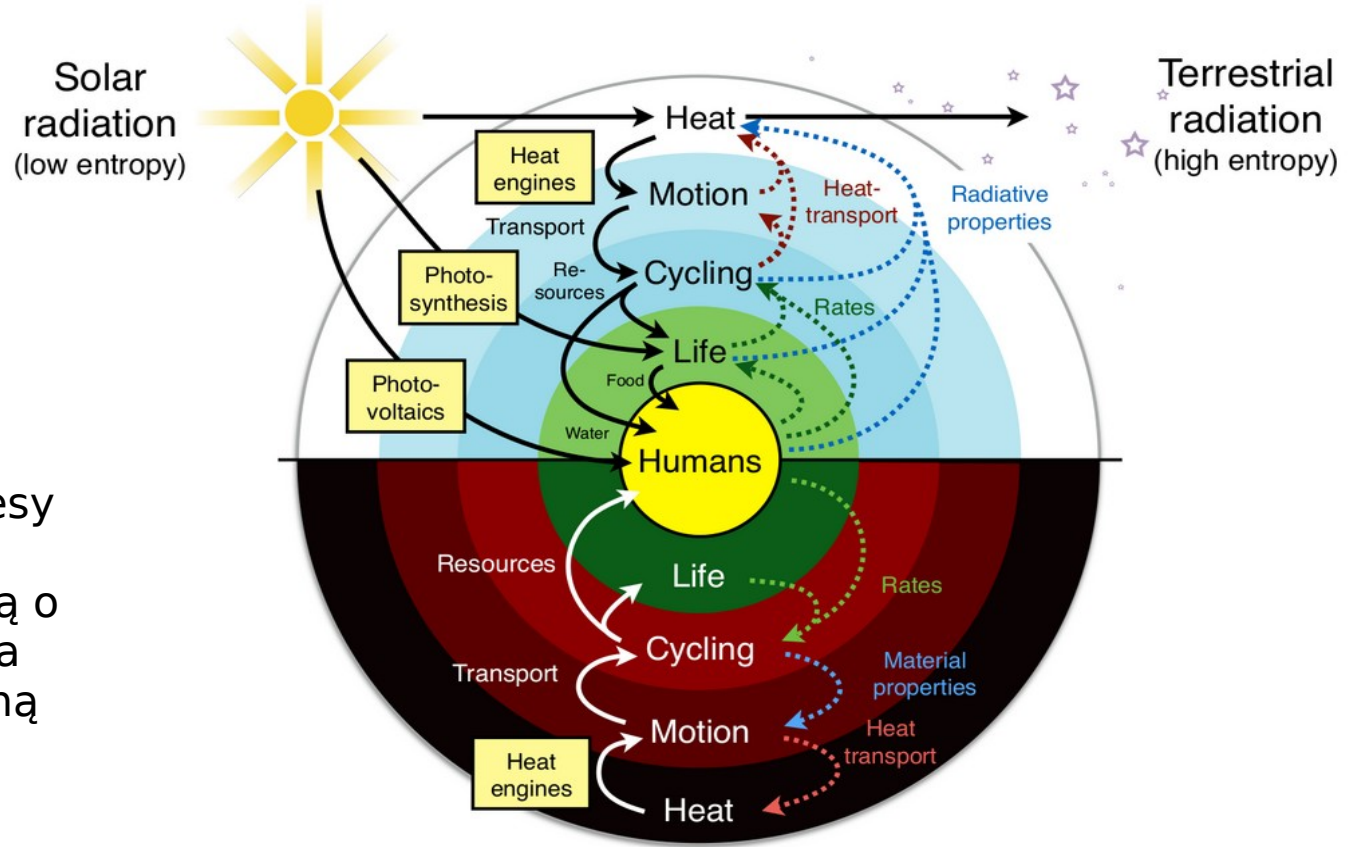
Jak dokumentować związki przyczynowo – skutkowe?

Prócz obserwacji i badań doświadczalnych możemy wykorzystywać prawa fizyki i tworzyć prostsze lub bardziej skomplikowane systemy

– MODELE –

opisujące określone elementy lub cechy systemu klimatycznego.

Hierarchiczne przedstawienie systemu ziemskiego, w którym termodynamika ogranicza procesy generujące energię swobodną wykorzystując energię słoneczną o niskiej entropii (pola żółte), która następnie napędza dyssypatywną dynamikę procesów systemu ziemskiego. Efekty (linie przerywane) tych procesów poprzez transport ciepła i zmianę właściwości promieniowania lub materiałów zasilają termodynamicznie procesy w systemie klimatycznym.



Kleidon, A.: Working at the limit: A review of thermodynamics and optimality of the Earth system, *Earth Syst. Dynam. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/esd-2022-38>, in review, 2022.



Inne możliwe
przedstawienie
systemu
klimatycznego

W modelach klimatu wykorzystujemy **matematyczne sformułowania praw fizyki** co pozwala w sposób ilościowy symulować oddziaływania między elementami systemu klimatycznego.

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} + f\mathbf{k} \times \mathbf{V} = -\nabla\Phi$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial p} = -\alpha = -RT/p$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\partial\omega}{\partial p} = 0$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla\right) T - S_p\omega = J/c_p$$

W ten sposób możemy np. badać odpowiedzi systemu klimatycznego na wymuszenia czy badać sprzężenia w systemie klimatycznym.

Modele klimatu mogą być proste lub skomplikowane.

Np. modele zerowymiarowe (temperatura efektywna, model szyby, model wielu szyb).

Modele zerowymiarowe z czasem (jeden z powyższych + nierównowaga radiacyjna, np. bezwładność termiczna oceanu).

Modele jednowymiarowe (np. model równowagi radiacyjno-konwekcyjnej).

Modele dwuwymiarowe (np.. uśrednione równoleżnikowo).

Modele ogólnej cyrkulacji atmosfery (GCM).

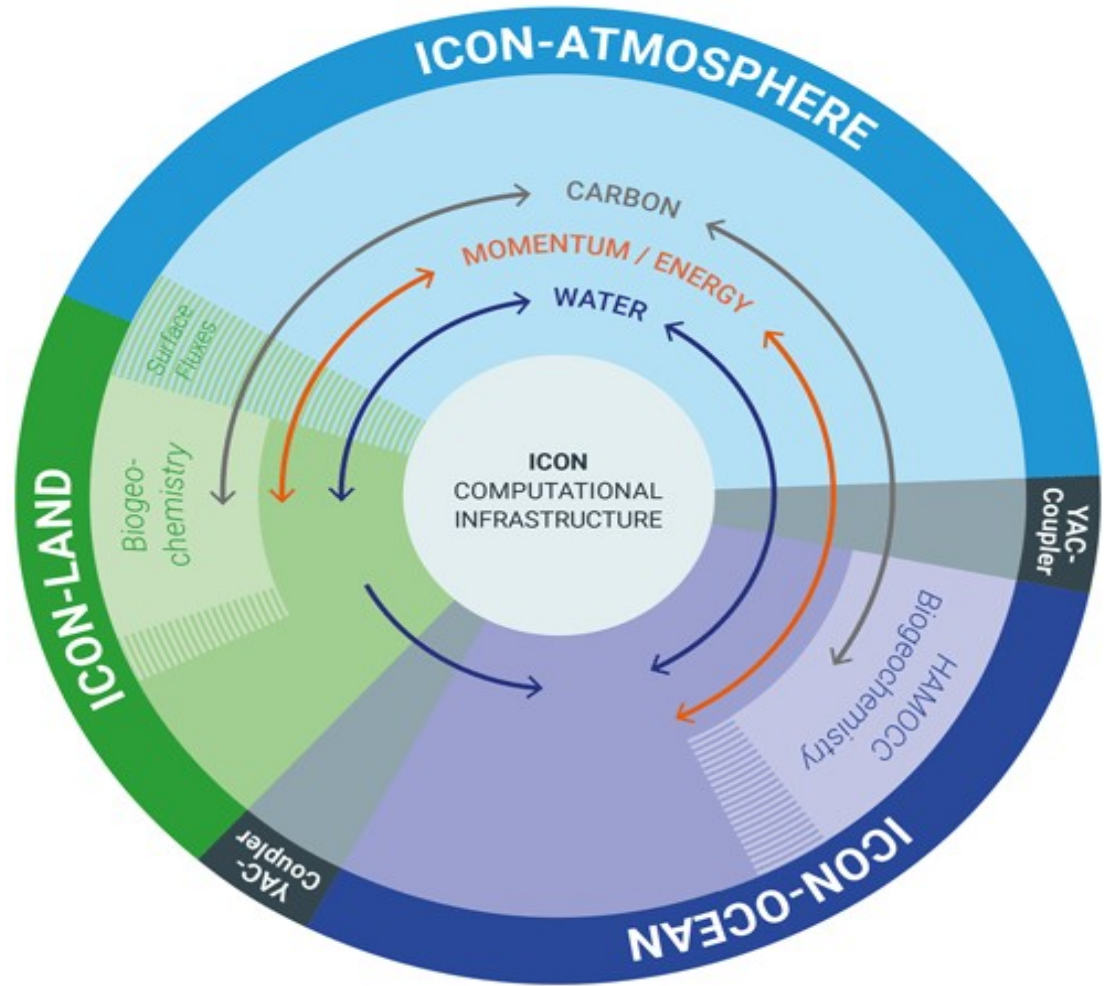
Modele o umiarkowanym stopniu komplikacji (rzadka siatka, dużo uproszczeń).

Modele systemu ziemskiego (Earth System Models ESM).

Model numeryczny, za pomocą którego otrzymuje się numeryczną prognozę pogody czy klimatu nazywany **numerycznym modelem prognostycznym**.

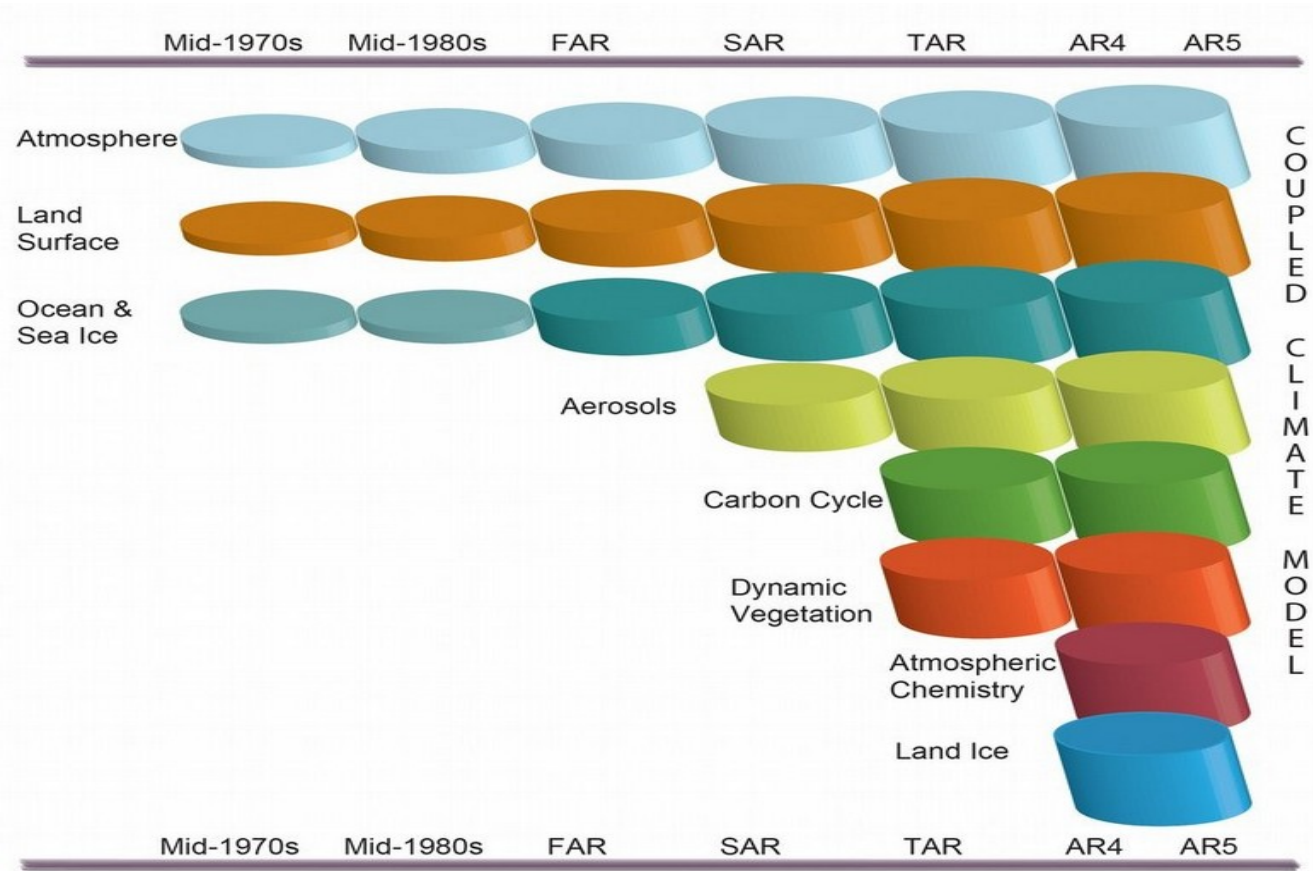
Składa się z trzech części (poziomów):

- zamkniętego układu równań opisujących zjawiska fizyczne w systemie ziemskim,
- algorytmów numerycznego rozwiązywania równań modelu matematycznego,
- kodu (programu komputerowego), który pozwala na uzyskanie rozwiązania na konkretnym superkomputerze czy maszynie obliczeniowej.

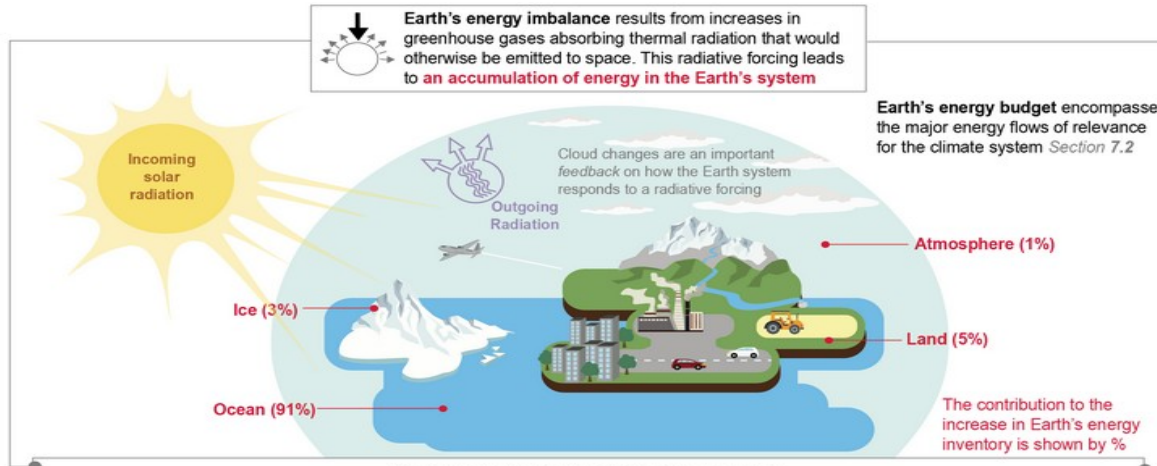


Model systemu ziemskiego to złożony system modeli opisujących różne środowiska wykorzystywany do zrozumienia naszej planety. Modele systemu ziemskiego symulują wzajemne oddziaływania chemii, biologii fizyki.

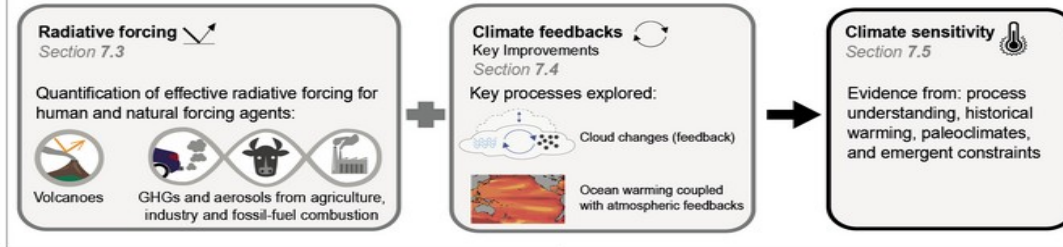




Od prostych do coraz bardziej skomplikowanych modeli: procesy uwzględniane w modelach klimatu od lat 70-tych do AR5



Earth's energy budget is influenced by:



New elements in this Chapter relative to AR5

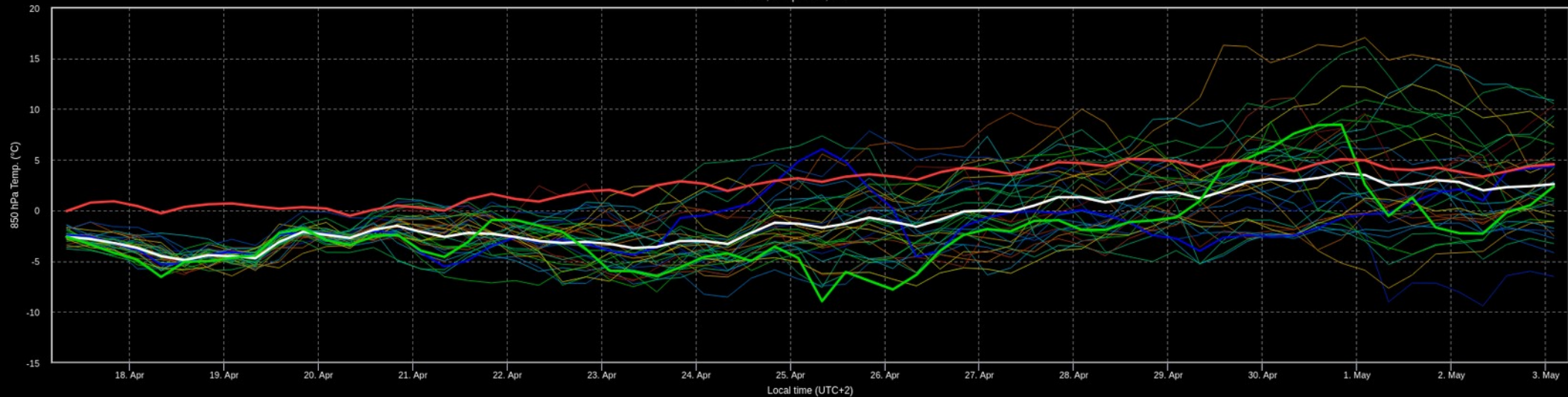
- Advances in observing the **energy budget** show that Earth is warming everywhere, from multiple lines of evidence
- An improved **radiative forcing** concept from better understanding of adjustments
- Improved understanding of cloud processes leads to a better constrained **cloud feedback**
- New science shows that as the pattern of sea-surface temperature change evolves in time, **feedbacks** change, potentially affecting projections
- A tighter constraint on **equilibrium climate sensitivity** is possible, leading to improved surface temperature projections
- New emission metric approaches account for the different warming implications of short-lived and long-lived **climate forcings**

Assessment involves **multiple lines of evidence** from various sources:

- Paleo records
- Satellites
- Observations
- Argo floats
- Simulations and theory

GFS Warsaw (PL) 52N, 21E

Init: Wed, 17 Apr 2024, 00Z



Prognoza pogody:

prognoza pojedynczej realizacji procesu dynamiczno-stochastycznego, lub prognoza empirycznego rozkładu prawdopodobieństwa różnych realizacji.

Prognoza klimatu:

prognoza pewnych quasi-równowagowych statystyk realizacji procesów dynamiczno-stochastycznych przy ustalonych wymuszeniach zewnętrznych w stosunku do systemu klimatycznego.

Prognoza pogody:

badanie konkretnego stanu, zależność od warunku początkowego, krytycznie ważna możliwość śledzenia rozwoju pojedynczych niestabilności w systemie, krytycznie ważne szczegóły dynamiki.

Prognoza klimatu:

badanie statystyki zachowań układu, krytycznie ważne strumienie energii i spełnienie zasad zachowania w długim czasie oraz prawidłowe modelowanie strumieni radiacyjnych.

Boundary
value problem

Initial value problem



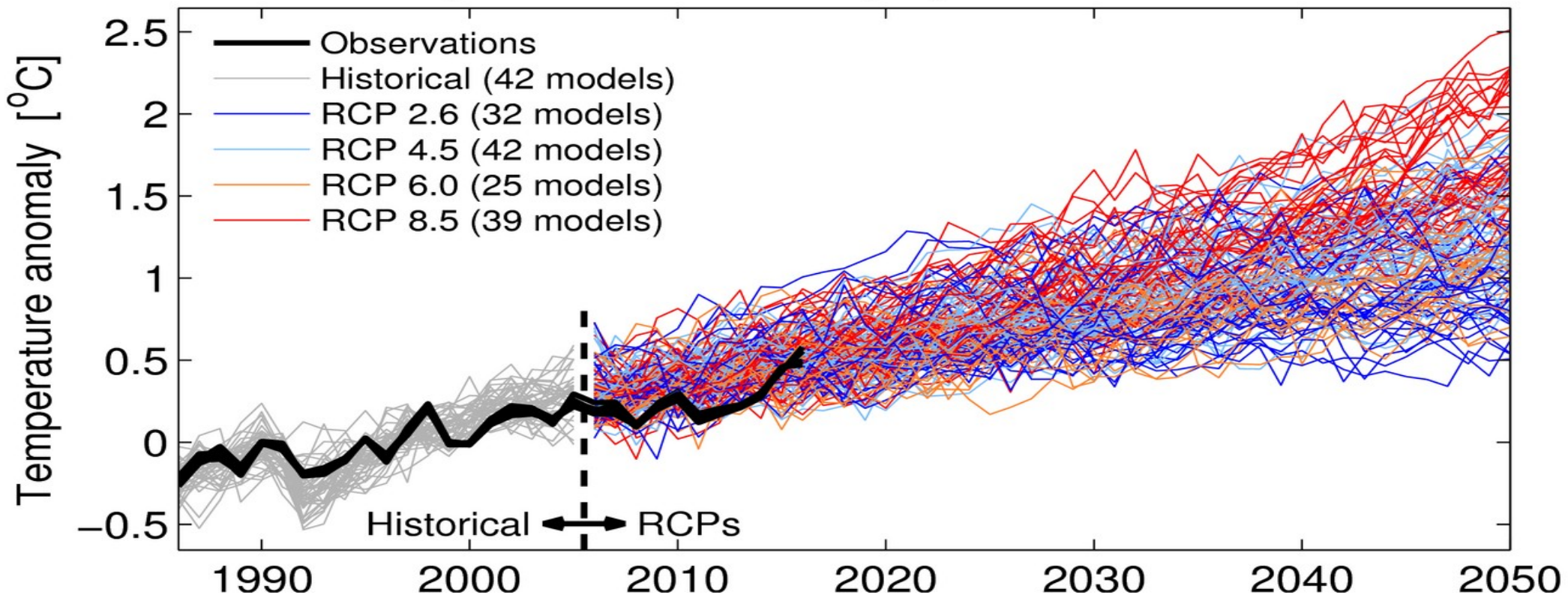
szczegóły przepływów
procesy „szybkie”

- bilans energii
- procesy „wolne”

oddziaływania między procesami lokalnymi i szybkimi
a globalnymi i wolnymi

Przewidywalność
klimatu: symulacje różnymi modelami

Global mean temperature near-term projections relative to 1986–2005



Dostęp do wyników symulacji modelami klimatu jest otwarty

Instytut Geofizyki - Akt... CESM Models | CCSM4. MIT Integrated Framev MITgcm Wetter : Wetterzentra CMIP - Overview

cmip-pcmdi.llnl.gov zgodność

PCMDI - Program For Climate Model Diagnosis and Intercomparison PCMDI Home CAPT AMIP SMIP PMIP APE Contact

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

CMIP Coupled Model Intercomparison Project
WCRP World Climate Research Programme

Home News CMIP3 CMIP5 Accomplishments Links Contact RSS

Home Overview

CMIP - Coupled Model Intercomparison Project - Overview

Under the [World Climate Research Programme \(WCRP\)](#) the [Working Group on Coupled Modelling \(WGCM\)](#) established the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) as a standard experimental protocol for studying the output of coupled atmosphere-ocean general circulation models (AOGCMs). CMIP provides a community-based infrastructure in support of climate model diagnosis, validation, intercomparison, documentation and data access. This framework enables a diverse community of scientists to analyze GCMs in a systematic fashion, a process which serves to facilitate model improvement. Virtually the entire international climate modeling community has participated in this project since its inception in 1995. The [Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison \(PCMDI\)](#) archives much of the CMIP data and provides other support for CMIP. PCMDI's CMIP effort is funded by the [Regional and Global Climate Modeling \(RGCM\)](#) Program of the [Climate and Environmental Sciences Division](#) of the U.S. Department of Energy's Office of Science, [Biological and Environmental Research \(BER\)](#) program.

Coupled atmosphere-ocean general circulation models allow the simulated climate to adjust to changes in climate forcing, such as increasing atmospheric carbon dioxide. CMIP began in 1995 by collecting output from model "control runs" in which climate forcing is held constant. Later versions of CMIP have collected output from an idealized scenario of global warming, with atmospheric CO₂ increasing at the rate of 1% per year until it doubles at about Year 70. CMIP output is available for study by approved diagnostic sub-projects.

Phase three of CMIP ([CMIP3](#)) included "realistic" scenarios for both past and present climate forcing. The research based on this dataset provided much of the new material underlying the [Intergovernmental Panel on Climate Change \(IPCC\)](#) Fourth Assessment Report (AR4).

Current Intercomparison - CMIP5

We are now beginning the process towards the IPCC Fifth Assessment Report and with it the [CMIP5](#) intercomparison activity. The CMIP5 (CMIP Phase 5) experiment design has been finalized with the following suites of experiments:

- I Decadal Hindcasts and Predictions simulations,
- II "long-term" simulations,
- III "atmosphere-only" (prescribed SST) simulations for especially computationally-demanding models.

Click on [CMIP5](#) tab to enter CMIP5 designated web-page

Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)

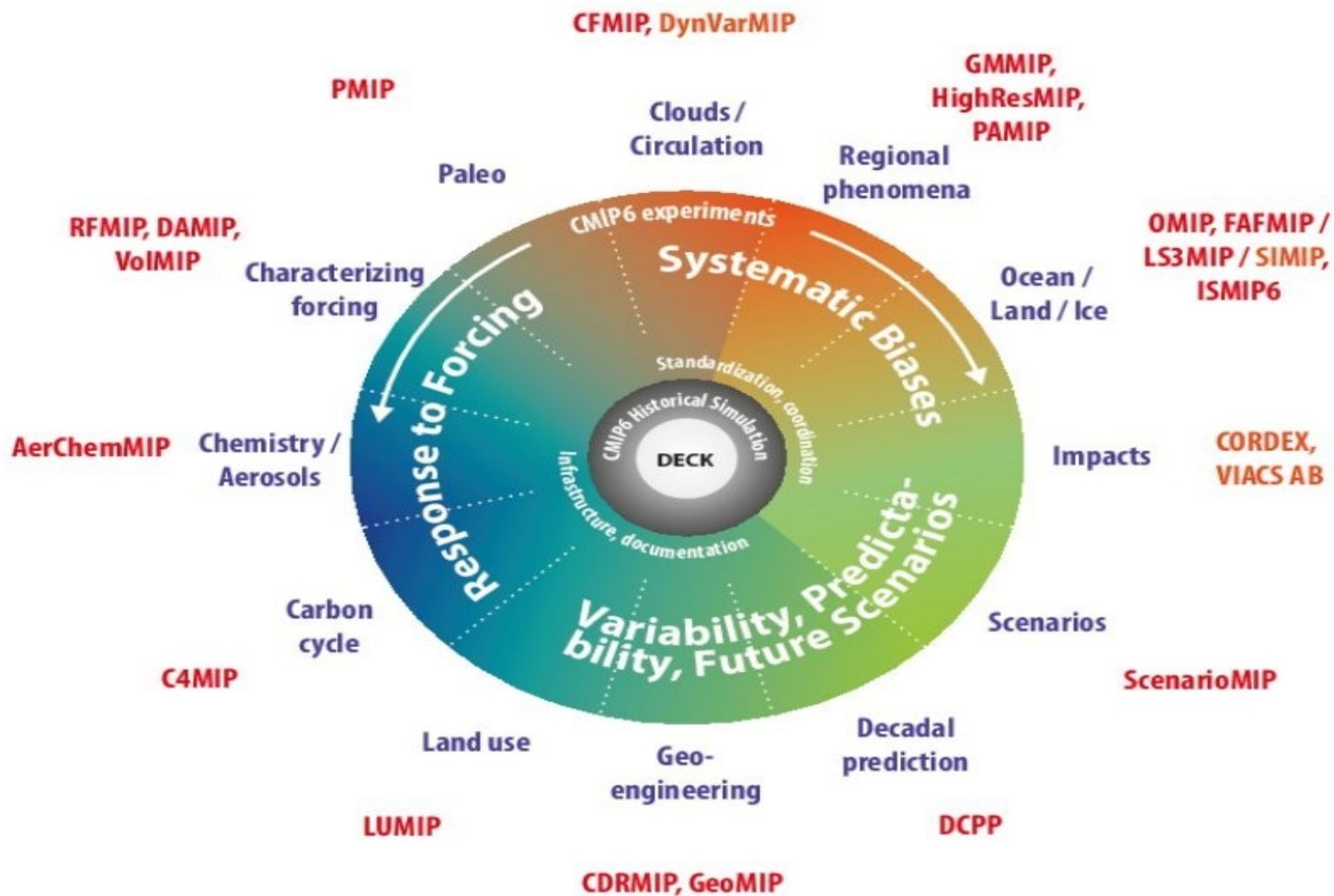
- Understanding past, present and future climate -

- CMIP is a project of the World Climate Research Programme (**WCRP**)'s Working Group of Coupled Modelling (**WGCM**).
- Since 1995, **CMIP** has coordinated climate model experiments involving multiple international modeling teams worldwide.
- CMIP has led to a better understanding of past, present and future climate change and variability in a **multi-model framework**.
- CMIP defines **common experiment protocols, forcings and output**.
- CMIP has developed in phases, with the simulations of the fifth phase, CMIP5, now completed, and the planning of the sixth phase, i.e. CMIP6, well underway.
- CMIP's central goal is to advance scientific understanding of the Earth system.
- CMIP model simulations have also been regularly assessed as part of the IPCC Climate Assessments Reports and various national assessments.

CMIP6 Design: Scientific Focus

- The **scientific backdrop** for CMIP6 is the **WCRP Grand Science Challenges**:
 1. Clouds, Circulation and Climate Sensitivity
 2. Changes in Cryosphere
 3. Climate Extremes
 4. Regional Sea-level Rise
 5. Water Availability
 6. Near-Term Climate Prediction
 7. Biogeochemical Cycles and Climate Change
- The specific experimental design is focused on **three broad scientific questions**:
 1. How does the Earth System respond to forcing?
 2. What are the origins and consequences of systematic model biases?
 3. How can we assess future climate changes given climate variability, predictability and uncertainties in scenarios?

23 CMIP6-Endorsed MIPs



CMIP6: Participating Model Groups

	Institution	Country		Institution	Country		Institution	Country
1	AWI	Germany	12	DOE	USA	23	MRI	Japan
2	BCC	China	13	EC-Earth-Cons	Europe	24	NASA-GISS	USA
3	BNU	China	14	FGOALS	China	25	NCAR	USA
4	CAMS	China	15	FIO-RONM	China	26	NCC	Norway
5	CasESM	China	16	INM	Russia	27	NERC	UK
6	CCCma	Canada	17	INPE	Brazil	28	NIMS-KMA	Republic of Korea
7	CCCR-IITM	India	18	IPSL	France	29	NOAA-GFDL	USA
8	CMCC	Italy	19	MESSY-Cons	Germany	30	NUIST	China
9	CNRM	France	20	MIROC	Japan	31	TaiESM	Taiwan, China
10	CSIR-CSIRO	South Africa	21	MOHC	UK	32	THU	China
11	CSIRO-BOM	Australia	22	MPI-M	Germany	33	Seoul Nat.Uni	Republic of Korea

New in CMIP:

- 2 new model groups from Germany (AWI, MESSY-Consortium)
- 4 new model groups from China (CAMS, CasESM, NUIST, THU)
- 1 new model group from Brazil (INPE)
- 1 new model group from India (CCCR-IITM)
- 1 new model group from Taiwan, China (TaiESM)
- 1 new model group from USA (DOE)
- 2 new model group from Republic of Korea (NIMS-KMA, SAM0-UNICON)
- 1 new model group from South Africa / Australia (CSIR-CSIRO)

=====

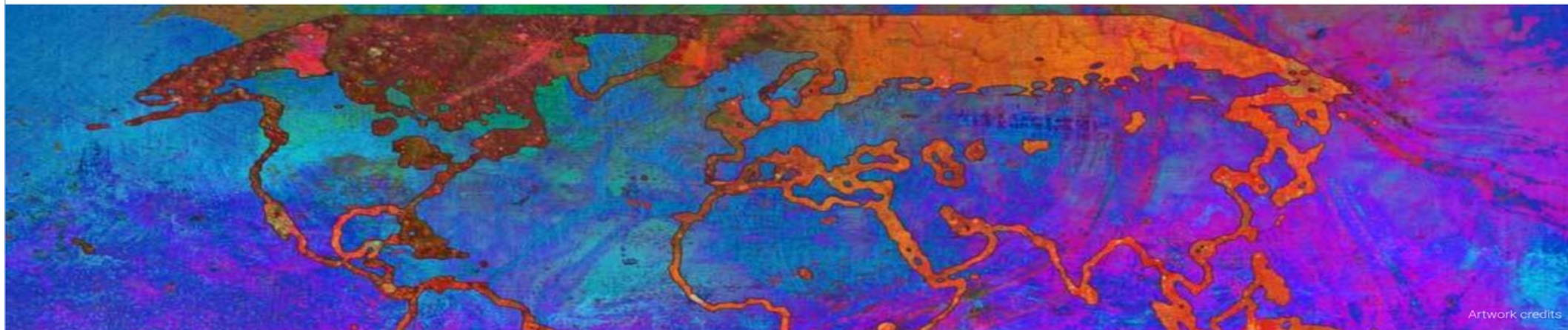
⇒ **13 new model groups so far**

* Other models can join providing DECK and historical simulations are submitted

More models (>70)
 New models
 More complex models
 Higher resolution models

CMIP6 Modeling Groups (click on flags to reveal identity)





Artwork credits

Climate Change 2021: The Physical Science Basis

The Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report addresses the most up-to-date physical understanding of the climate system and climate change, bringing together the latest advances in climate science.

Summary for Policymakers

The Summary for Policymakers provides a high-level summary of the current state of the climate, how it is changing, the role of human influence, and possible climate futures.

[EXPLORE](#)

[DOWNLOADS](#) ▾

[FIGURES](#)

Technical Summary

The Technical Summary provides a synthesis of the key findings of the Report and serves as a bridge between the Summary for Policymakers and the chapters of the full report.

[EXPLORE](#)

[DOWNLOADS](#) ▾

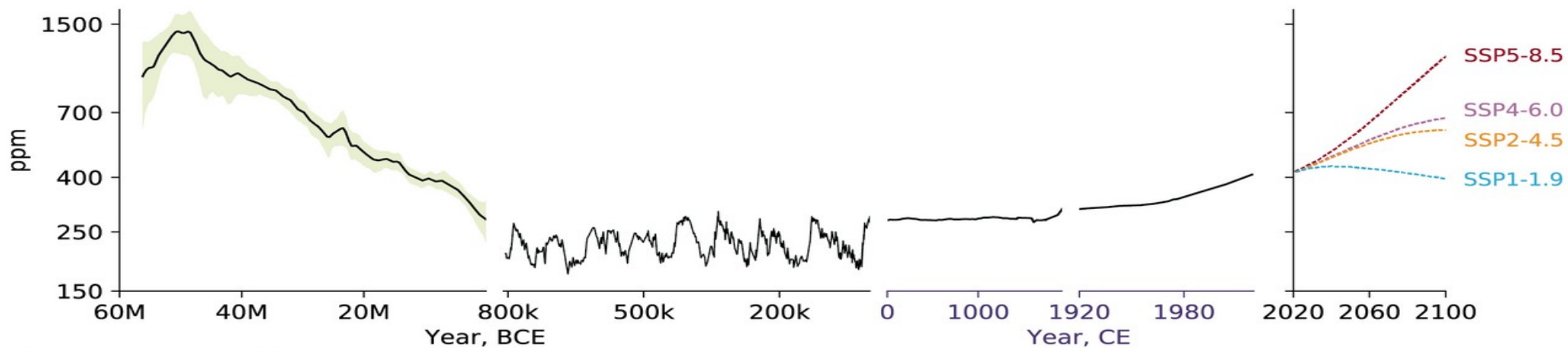
[FIGURES](#)

Full Report

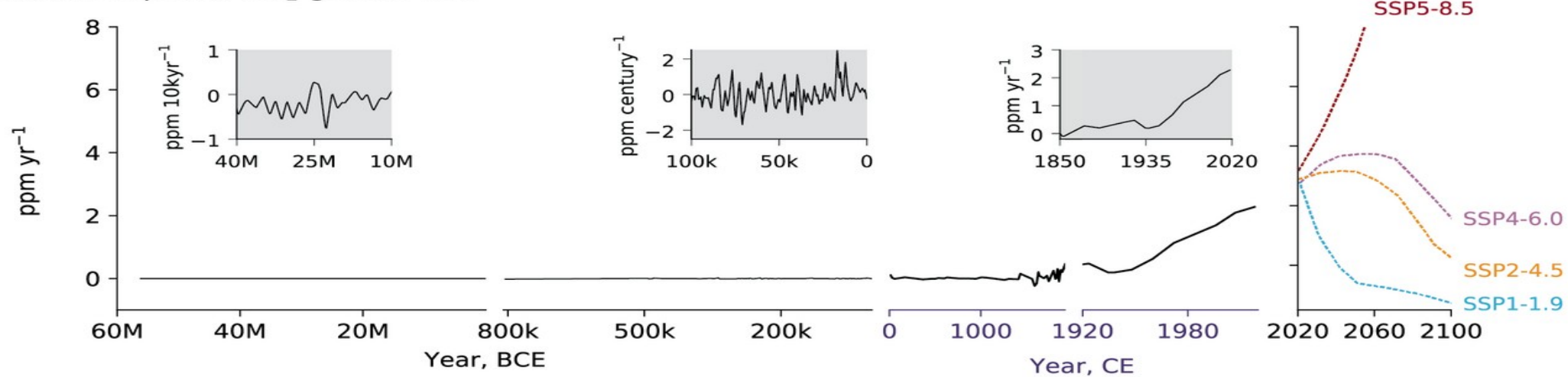
The 13 chapters of the Working Group I report provide a comprehensive assessment of the current evidence on the physical science of climate change.

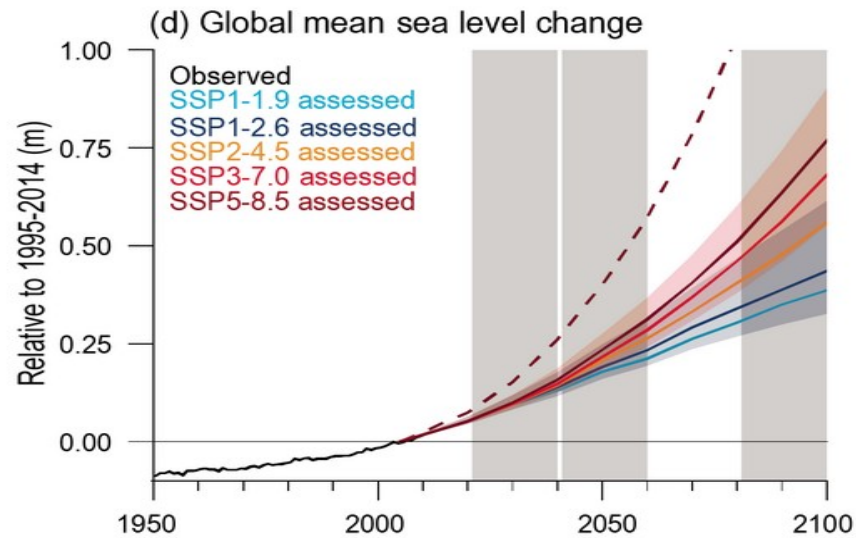
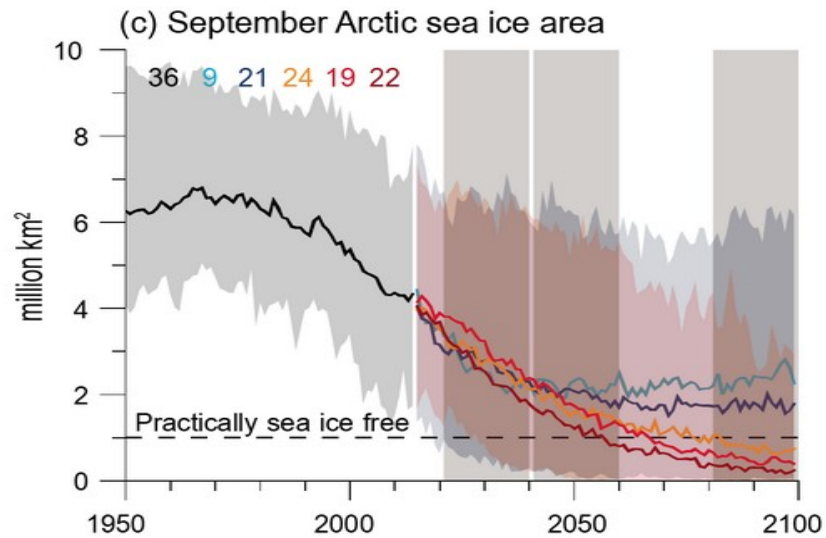
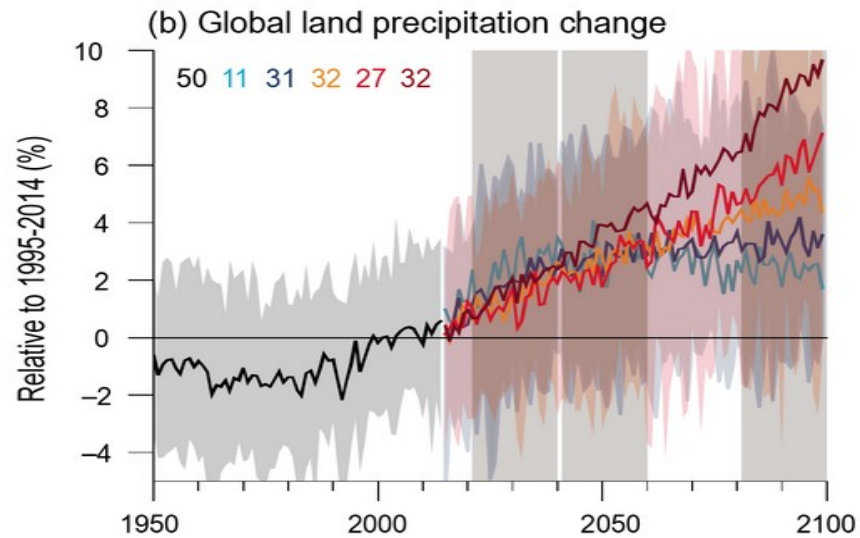
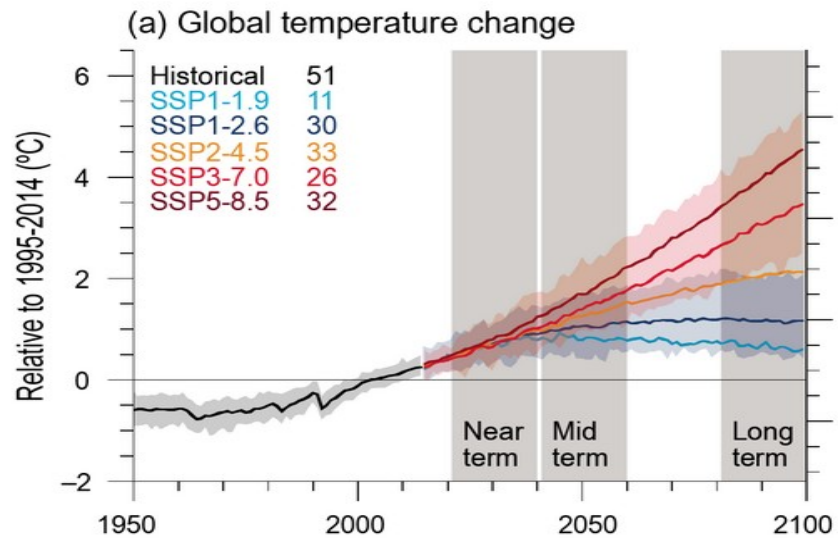
[DOWNLOADS](#) ▾

(a) Atmospheric CO₂ concentrations

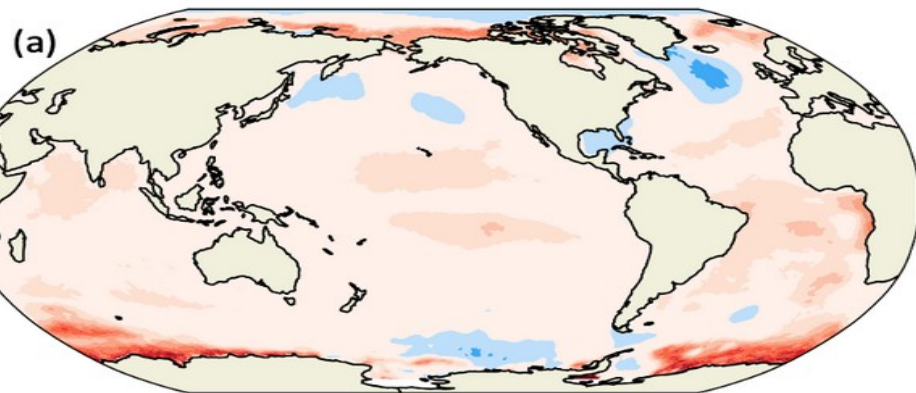


(b) Atmospheric CO₂ growth rate

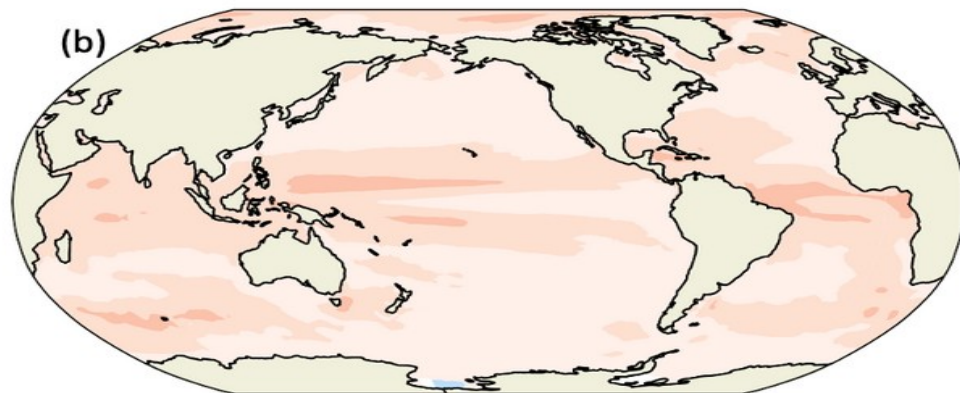




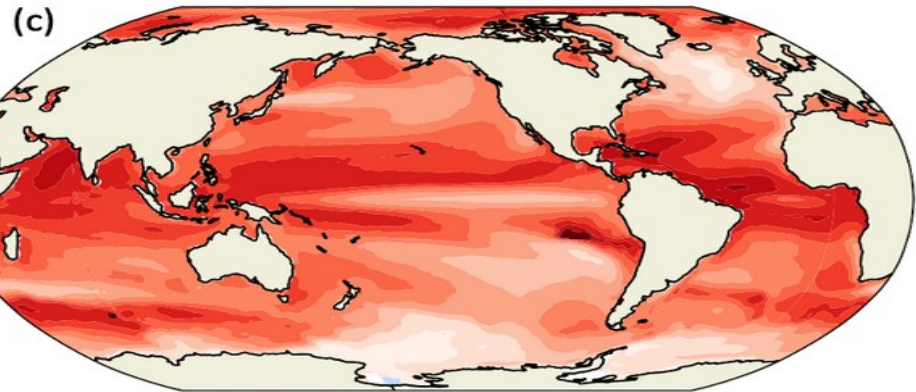
Observations (ERSSTv5 and Satellite): 1985-2014



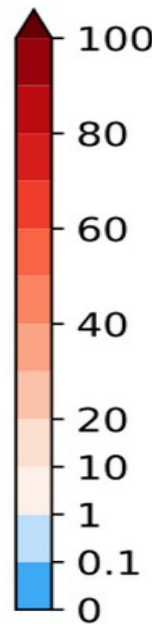
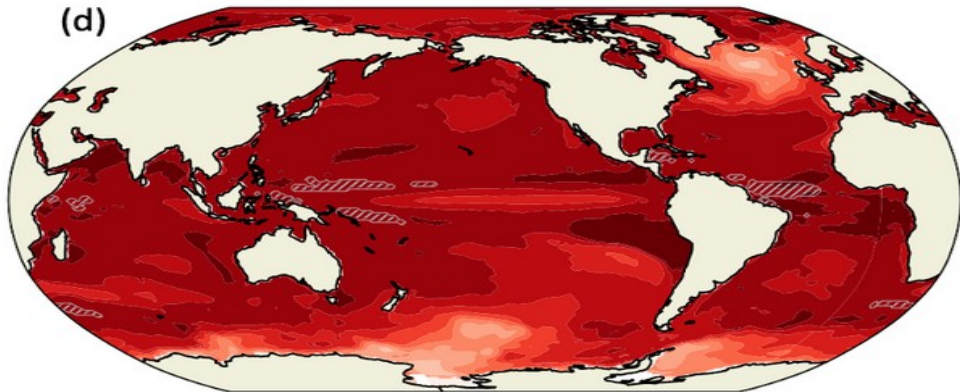
CMIP6: 1985-2014



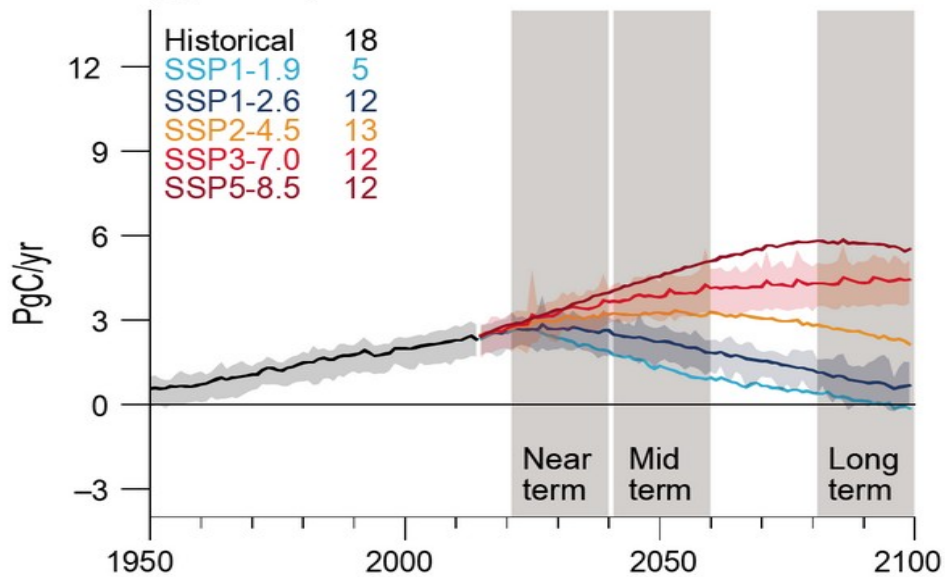
CMIP6 SSP1-2.6: 2081-2100



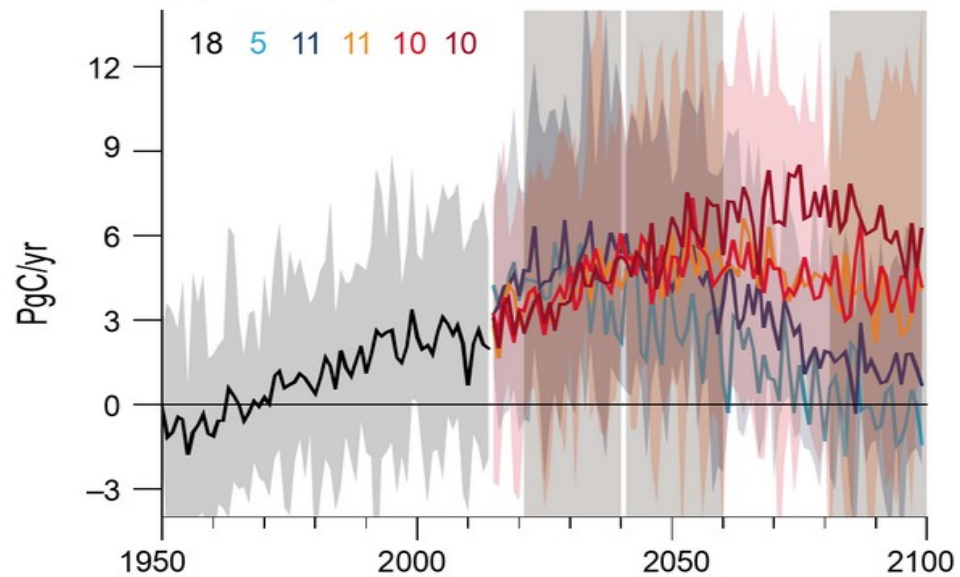
CMIP6 SSP5-8.5: 2081-2100



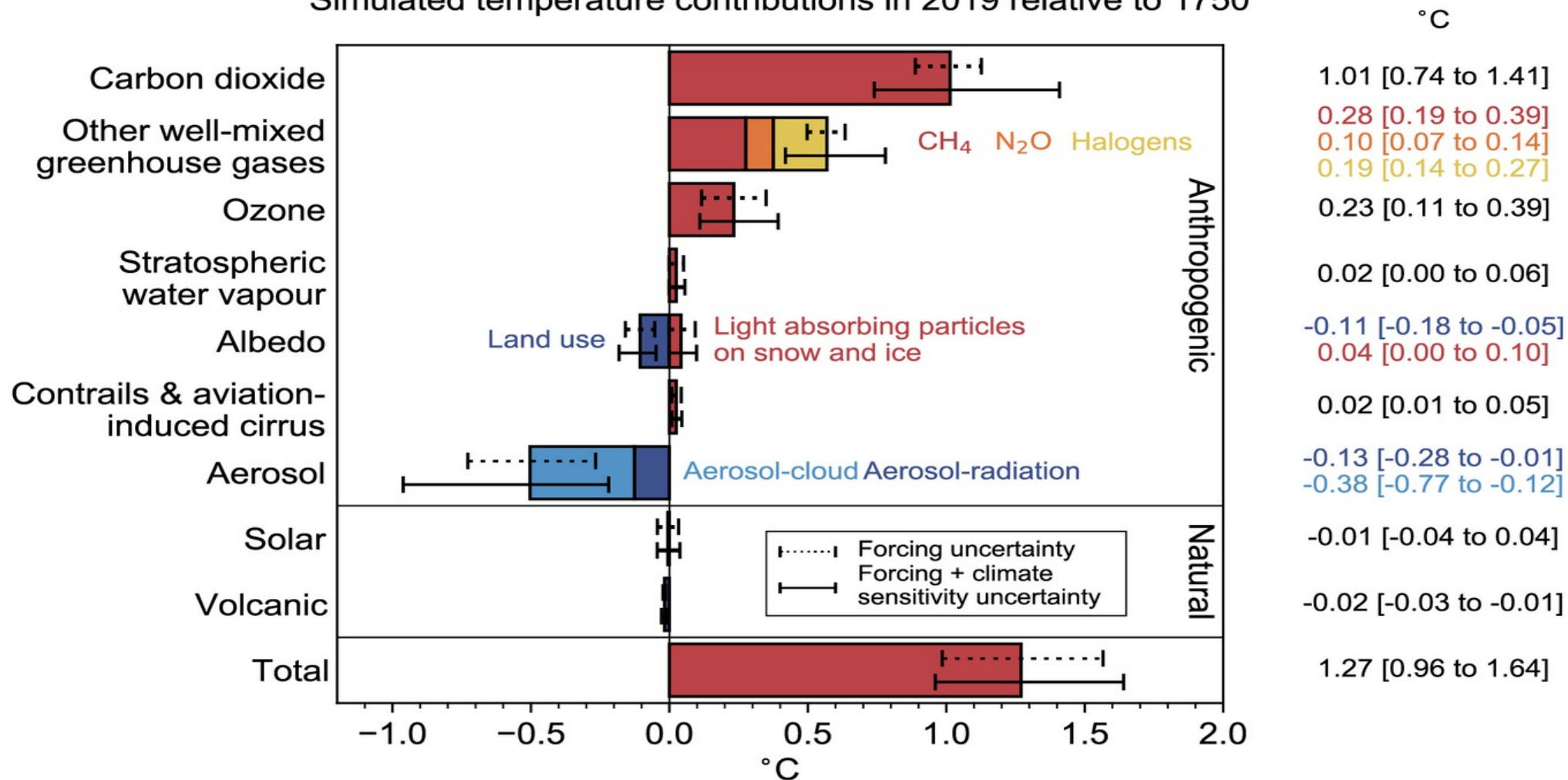
(a) Atmosphere to ocean carbon flux



(b) Atmosphere to land carbon flux



Simulated temperature contributions in 2019 relative to 1750



Attributed temperature change relative to 1750

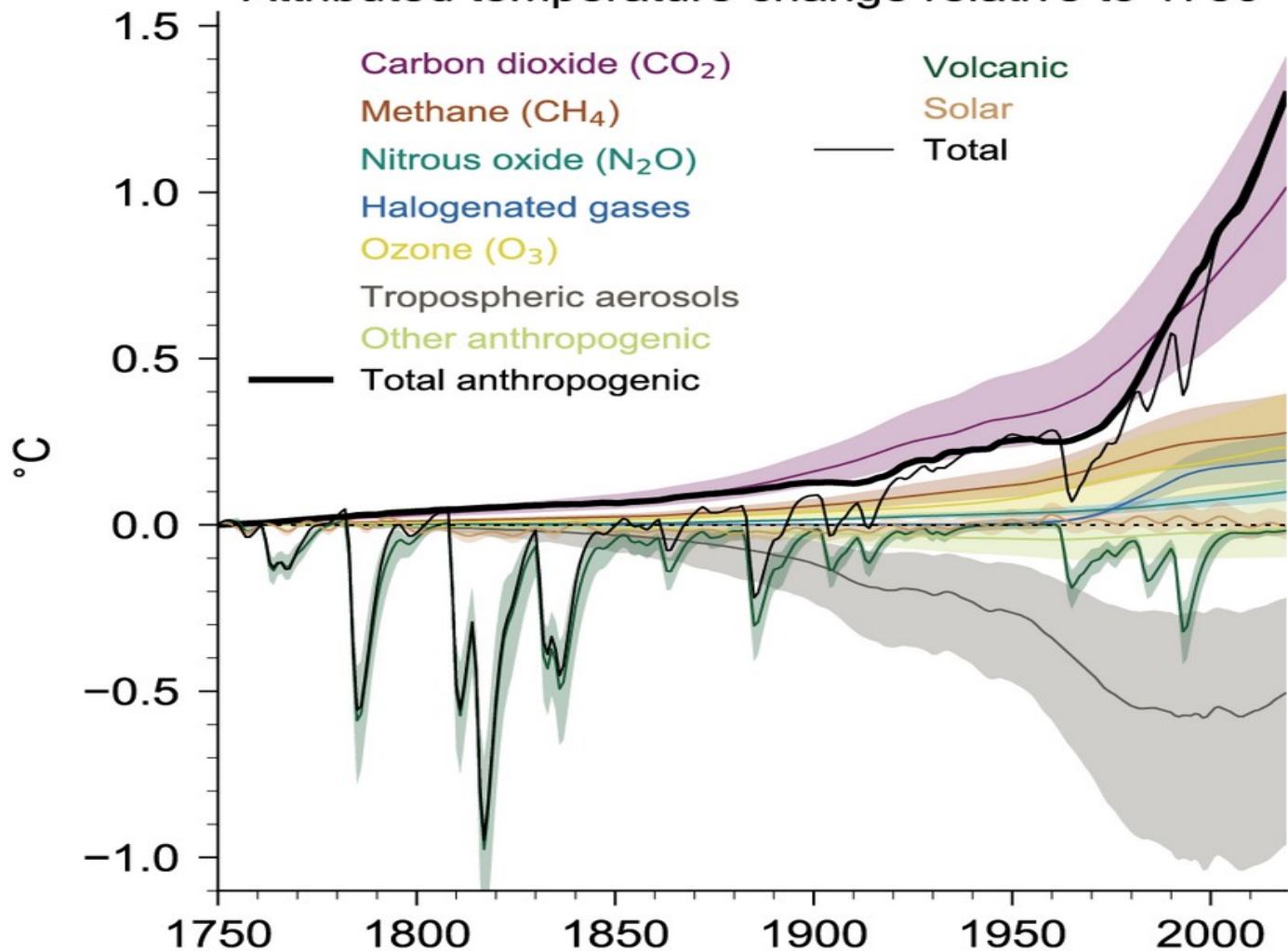
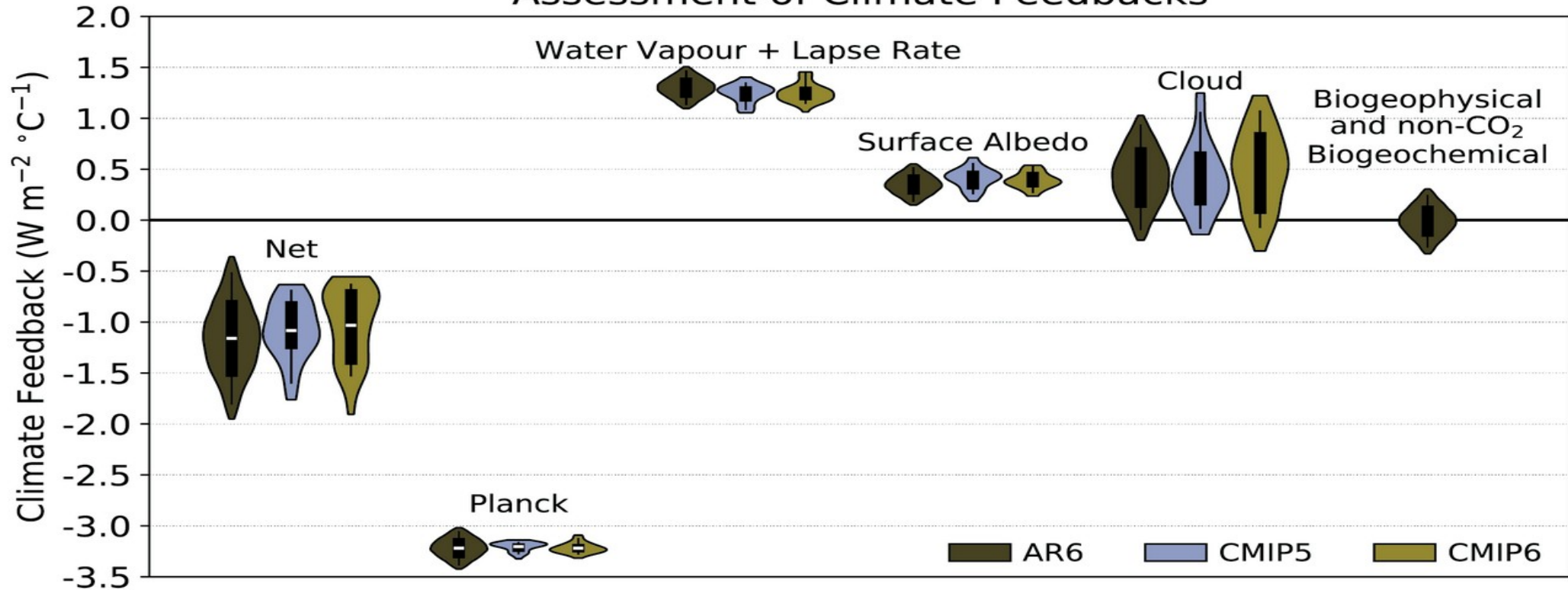


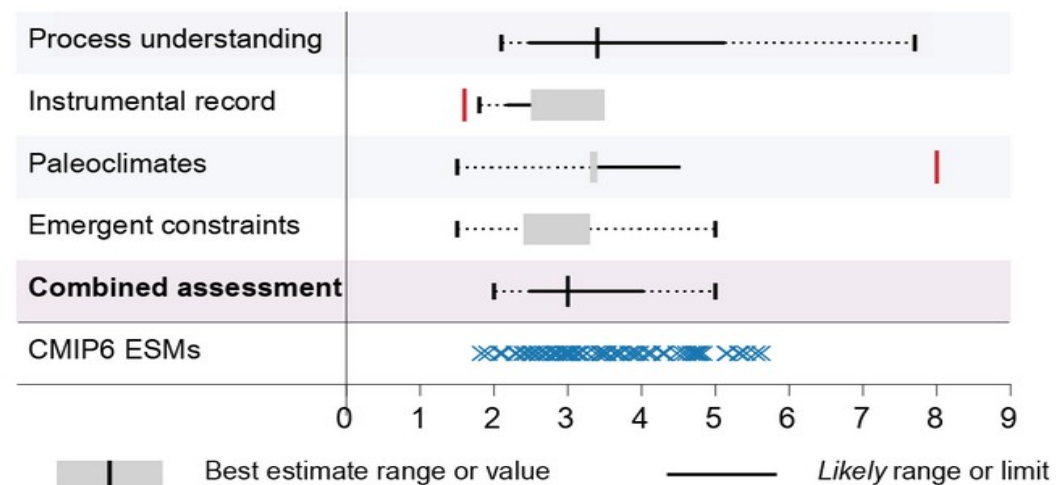
Table 7.10 | Synthesis assessment of climate feedbacks (central estimate shown in bold). The mean values and their 90% ranges in CMIP5/6 models, derived using multiple radiative kernels (Zelinka et al., 2020) are also presented for comparison.

Feedback Parameter $\alpha \times (W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1})$	CMIP5 GCMs	CMIP6 ESMs	AR6 Assessed Ranges			
	Mean and 5–95% Interval	Mean and 5–95% Interval	Central Estimate	<i>Very likely</i> Interval	<i>Likely</i> Interval	Level of Confidence
Planck	-3.20 [-3.3 to -3.1]	-3.22 [-3.3 to -3.1]	-3.22	-3.4 to -3.0	-3.3 to -3.1	<i>high</i>
WV+LR	1.24 [1.08 to 1.35]	1.25 [1.14 to 1.45]	1.30	1.1 to 1.5	1.2 to 1.4	<i>high</i>
Surface albedo	0.41 [0.25 to 0.56]	0.39 [0.26 to 0.53]	0.35	0.10 to 0.60	0.25 to 0.45	<i>medium</i>
Clouds	0.41 [-0.09 to 1.1]	0.49 [-0.08 to 1.1]	0.42	-0.10 to 0.94	0.12 to 0.72	<i>high</i>
Biogeophysical and non-CO ₂ biogeochemical	Not evaluated	Not evaluated	-0.01	-0.27 to 0.25	-0.16 to 0.14	<i>low</i>
Residual of kernel estimates	0.06 [-0.17 to 0.29]	0.05 [-0.18 to 0.28]				
Net (i.e., relevant for ECS)	-1.08 [-1.61 to -0.68]	-1.03 [-1.54 to -0.62]	-1.16	-1.81 to -0.51	-1.54 to -0.78	<i>medium</i>
Long-term ice-sheet feedbacks (millennial scale)				>0.0		<i>high</i>

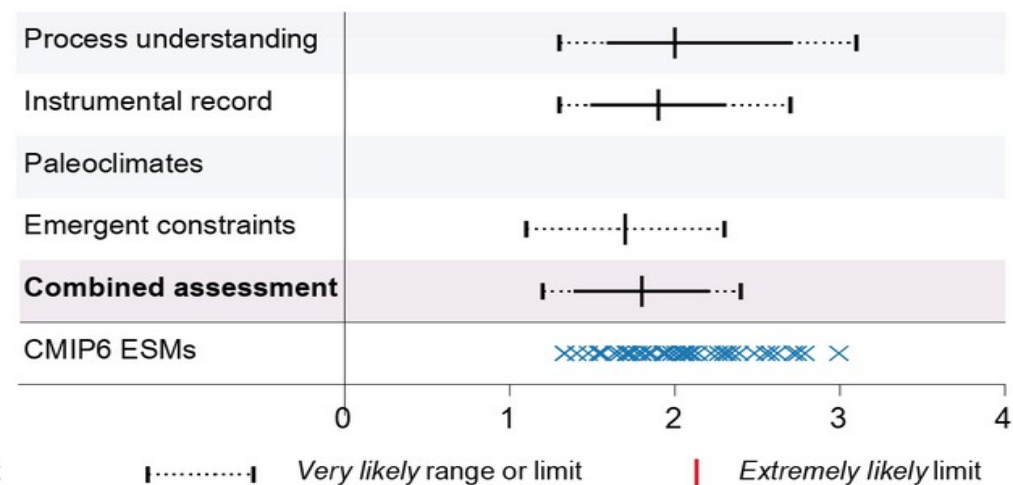
Assessment of Climate Feedbacks



(a) Equilibrium climate sensitivity estimates (°C)



(b) Transient climate response estimates (°C)



CMIP

Coupled Model Intercomparison Project

CMIP is a project of the World Climate Research Programme (WCRP) providing climate projections to understand past, present and future climate changes. CMIP and its associated data infrastructure have become essential to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and other international and national climate assessments.



[Watch introduction video](#)



[Use CMIP data](#)



[Find CMIP data](#)



[Node status](#)

News

May 9, 2023

Two new drop in sessions announced

[Read more](#)

May 2, 2023

Fresh Eyes on CMIP Launch

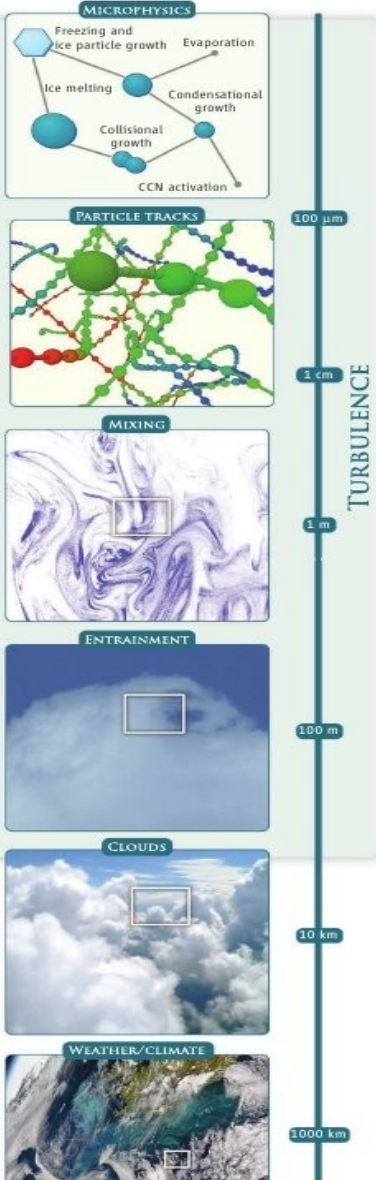
[Read more](#)

Apr 28, 2023

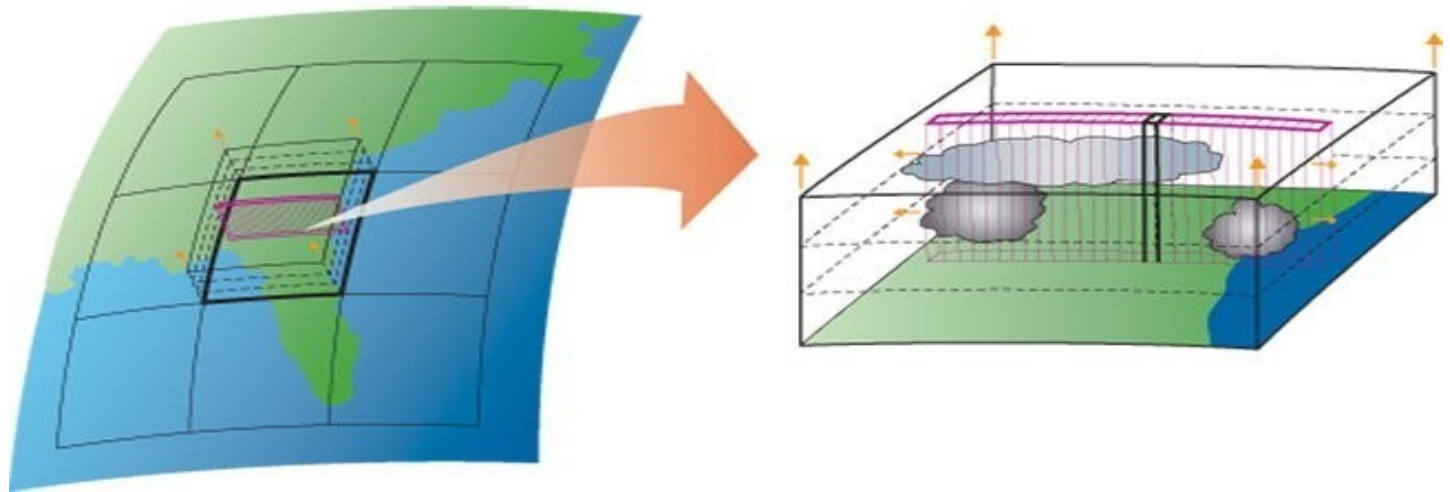
CMIP at EGU General Assembly 2023

[Read more](#)

[All news»](#)



Jak sobie radzimy z problemami?
 „Multiscale modeling” - modelowanie wieloskalowe,
 superparametryzacje, GIGA-LES, ILES,
 explicit cloud-resolving....



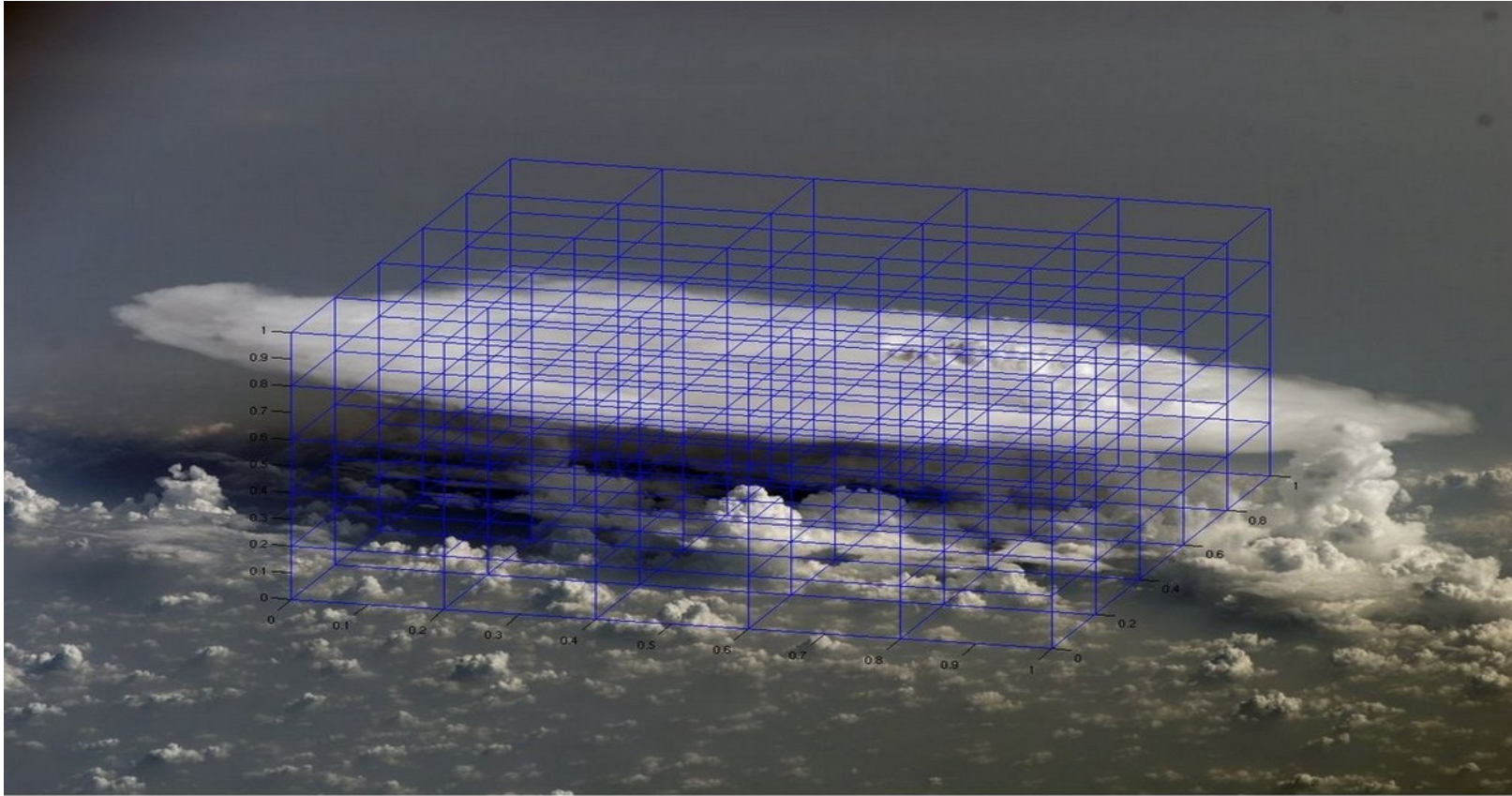
Bodenschatz, E., S.P. Malinowski, R.A. Shaw, F. Stratmann, 2010: Can We Understand Clouds without Turbulence? *Science*, **327**, 970 – 971.

Randall D.A, Khairoutdinov M, Arakawa A, Grabowski W.W., 2003: Breaking the cloud parameterization deadlock . *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **84**, 1547-1564.

I wiele wiele innych.....

Jakie problemy napotyka modelowanie prognozy pogody i klimatu?

Najważniejszy to wielkoskalowość przepływów w atmosferze i oceanie i konieczność parametryzacji procesów podskalowych (o rozmiarach mniejszych niż oczko siatki i zachodzących szybciej niż krok czasowy obliczeń)



About the Project

nextGEMS is a collaborative European project. Funded by the EU's Horizon 2020 programme, it will tap expertise from fourteen European Nations to develop two next generation (storm-resolving) Earth-system Models. Through breakthroughs in simulation realism, these models will allow us to understand and reliably quantify how the climate will change on a global and regional scale, and how the weather, including its extreme events, will look like in the future.



nextGEMS is a Horizon 2020 project funded by the European Commission. It is coordinated by Bjorn Stevens at the Max Planck Institute for Meteorology and Irina Sandu at the ECMWF. The nextGEMS consortium is made up of 26 institutes:

Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Germany

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

Alfred-Wegener-Institut (AWI), Germany

University of Bergen (UIB), Norway

University of Copenhagen (UCPH), Denmark

French National Centre for Scientific Research (CNRS), France

Stockholm University (SU), Sweden

University of Warsaw (UW), Poland

University of Oxford (UOXF), UK

Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (GEOMAR), Germany

Barcelona Supercomputing Center (BSC), Spain

University of Reading (UREAD), UK

Wageningen University (WU), The Netherlands

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), Switzerland

Universität Bern (UBERN), Switzerland

Instituto Português do Mar e da Atmosfera IP (IPMA), Portugal

University of Helsinki (UH), Finland

University of Trento (UNITN), Italy

Deutsches Klimarechenzentrum GmbH (DKRZ), Germany

Universidad Complutense de Madrid (UCM), Spain

French National Institute for Sustainable Development (IRD), France

Iberdrola Renovables Energía S.A.U. (IBE), Spain

Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), Senegal

Latest Thinking GmbH (LT), Germany

Karlsruhe Institut of Technology (KIT), Germany

University of Hamburg (UHH), Germany

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

Odnośniki do kilku wybranych modeli klimatu:

<http://www.cesm.ucar.edu/models/ccsm4.0/>

<https://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/icon-esm/>

https://geos5.org/wiki/index.php?title=GEOS_GCM_Documentation_and_Access

<http://web.mit.edu/globalchange/www/climate.html>

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/toolbox>