

Federico Porcù, Dip. di Fisica ed Astronomia,
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna
federico.porcu@unibo.it



**FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI**

24.05 Energia I

problema energetico, struttura atomica,
fissione nucleare

06.06 Energia II

fusione nucleare, centrali nucleari, energie
rinnovabili

07.06 Clima

sistema climatico, osservazione, modellazione
e tendenze



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Introduzione al sistema climatico terrestre

Studio e previsioni dello stato del sistema

*Federico Porcù (federico.porcu@unibo.it)
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Università di Bologna*

**definizione del problema;
evidenze della tendenza climatica;
aspetti critici;**

**sistemi dinamici;
il sistema climatico terrestre;
un approccio osservativo.**

CLIMA E TEMPO METEOROLOGICO

diversa scala temporale

diversità di metodo, dati e formulazioni teoriche

tempo meteorologico *stato di un sottosistema (in particolare dell'atmosfera) ad un istante.*

clima *stato medio del sistema e sue variazioni nel tempo.*

Il sistema climatico

The climate system is a forced, dissipative, nonlinear, complex and heterogeneous system that is out of thermodynamic equilibrium. (Ghil & Lucarini)

INDICATORI

temperatura dell'aria

altezza del mare

**precipitazione, vegetazione, insolazione,
estensione dei ghiacci,**

temperatura dell'aria ($h=2\text{ m}$)

termometri (tempi recenti < 200 anni):

- termometri a mercurio

- termometri a stato solido (termistori)

proxy data (paleoclima):

- anelli di accrescimento degli alberi

- forma delle foglie

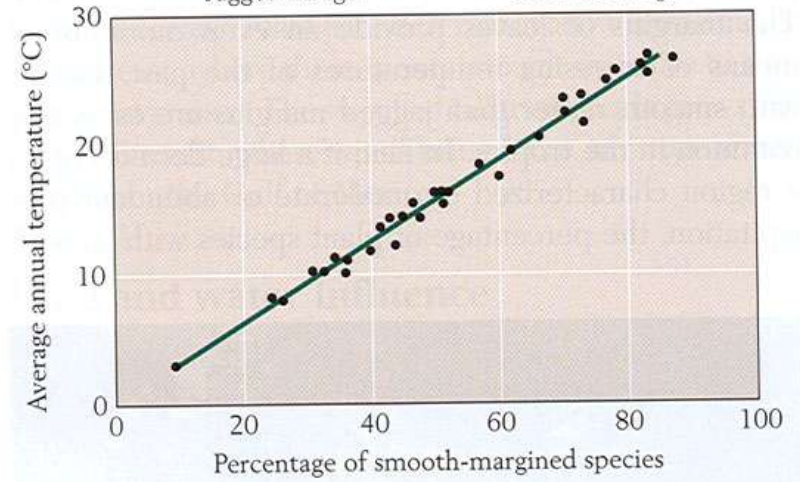
- O^{16}/O^{18}

- cronache storiche



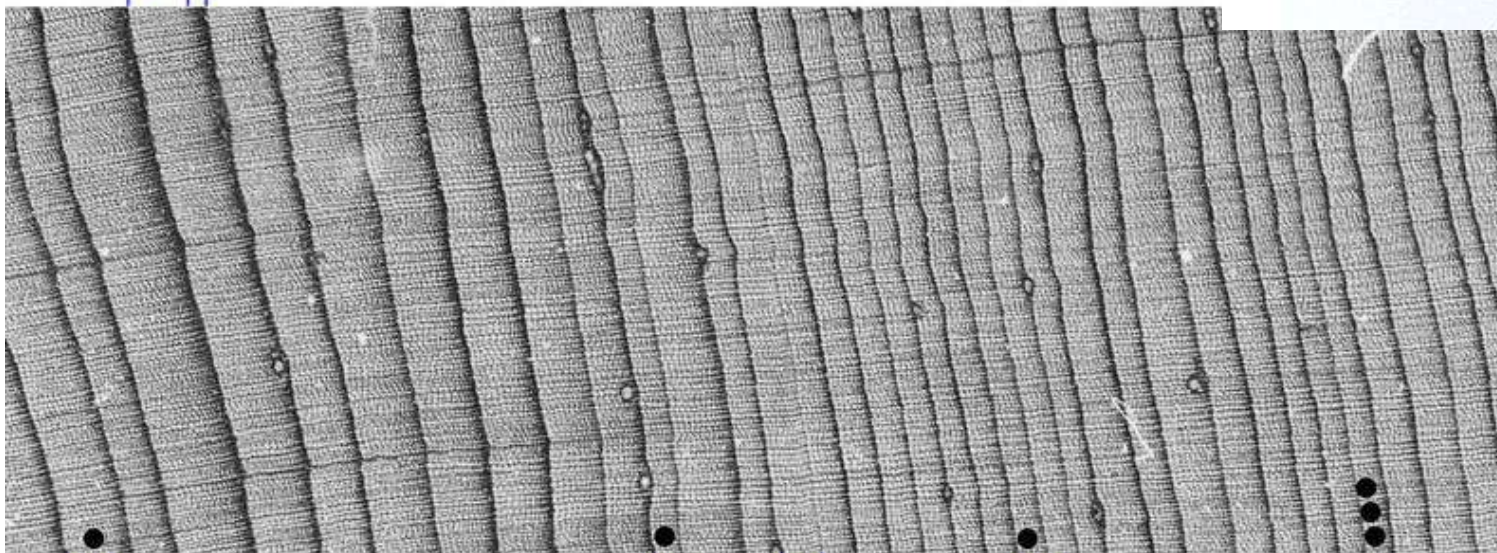
Jagged margin

Smooth margin



earlywood + latewood = annual ring

2 millimeters



1770

1780

1783

1790

1800

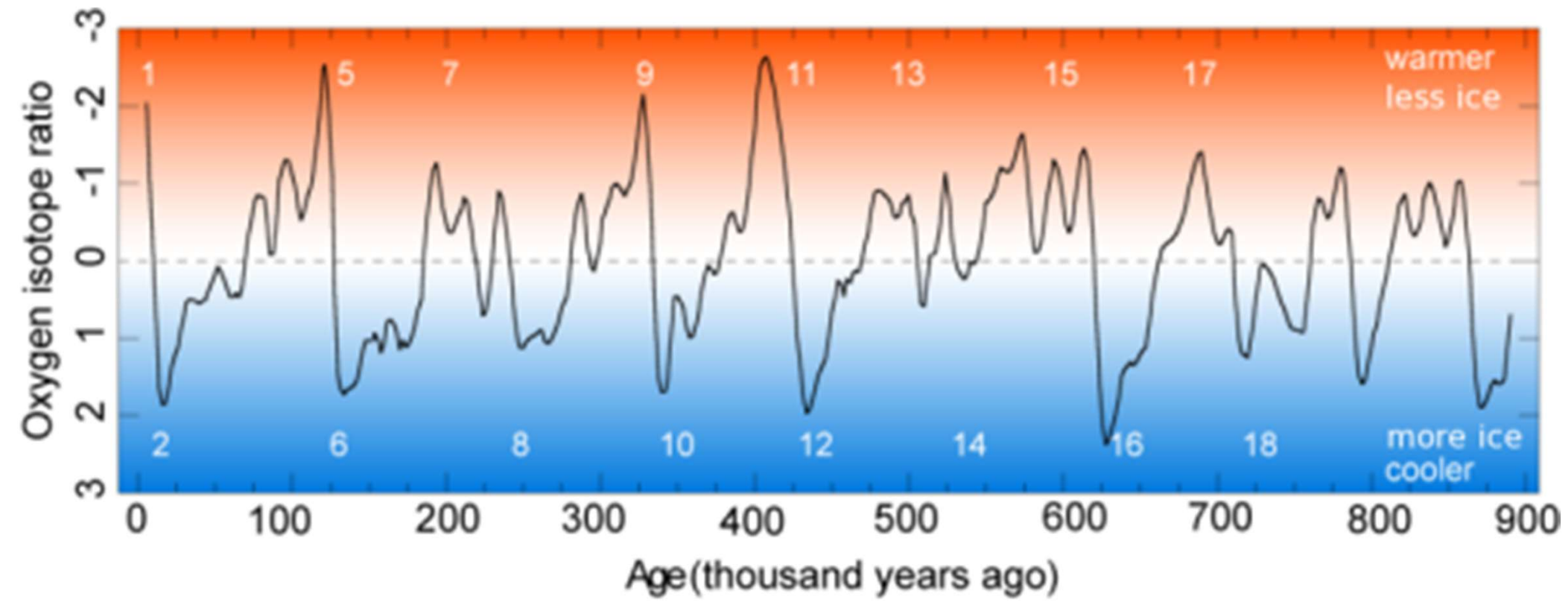
Le molecole di acqua formate da atomi di ^{18}O sono più pesanti delle altre ed evaporano meno facilmente e la concentrazione relativa dei due isotopi nell'acqua degli oceani è un indicatore della temperatura.

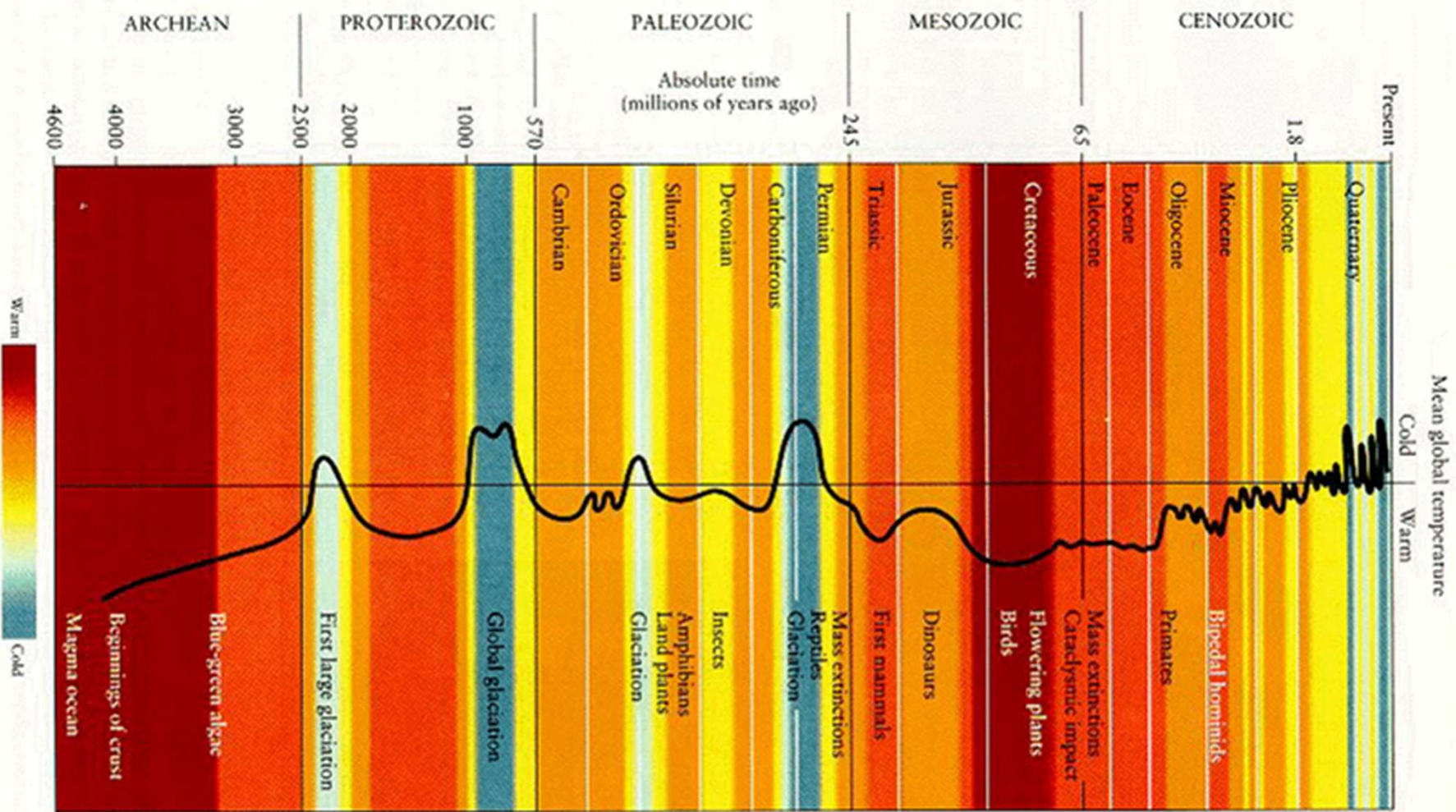
Il rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ fornisce una stima della temperatura dell'acqua degli oceani in tempi remoti.

L'acqua da 10 a 15 °C più fredda del presente rappresenta un periodo glaciale. Man mano che le temperature più fredde si diffondono verso l'equatore, l'acqua ricca di ^{18}O precipita preferenzialmente alle latitudini più basse. Il restante vapore acqueo che condensa a latitudini più elevate è più ricco di ^{16}O . Le precipitazioni e quindi il ghiaccio contengono acqua con un basso contenuto di ^{18}O . Poiché grandi quantità di acqua ^{16}O vengono immagazzinate come ghiaccio, il contenuto di ^{18}O nell'acqua oceanica è elevato.

L'acqua fino a 5 °C più calda di oggi rappresenta un interglaciale, quando il contenuto di ^{18}O dell'acqua oceanica è inferiore.

$$\delta^{18}O = \left(\frac{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{mis}}{\left(\frac{^{18}O}{^{16}O}\right)_{ref}} - 1 \right) \times 1000$$

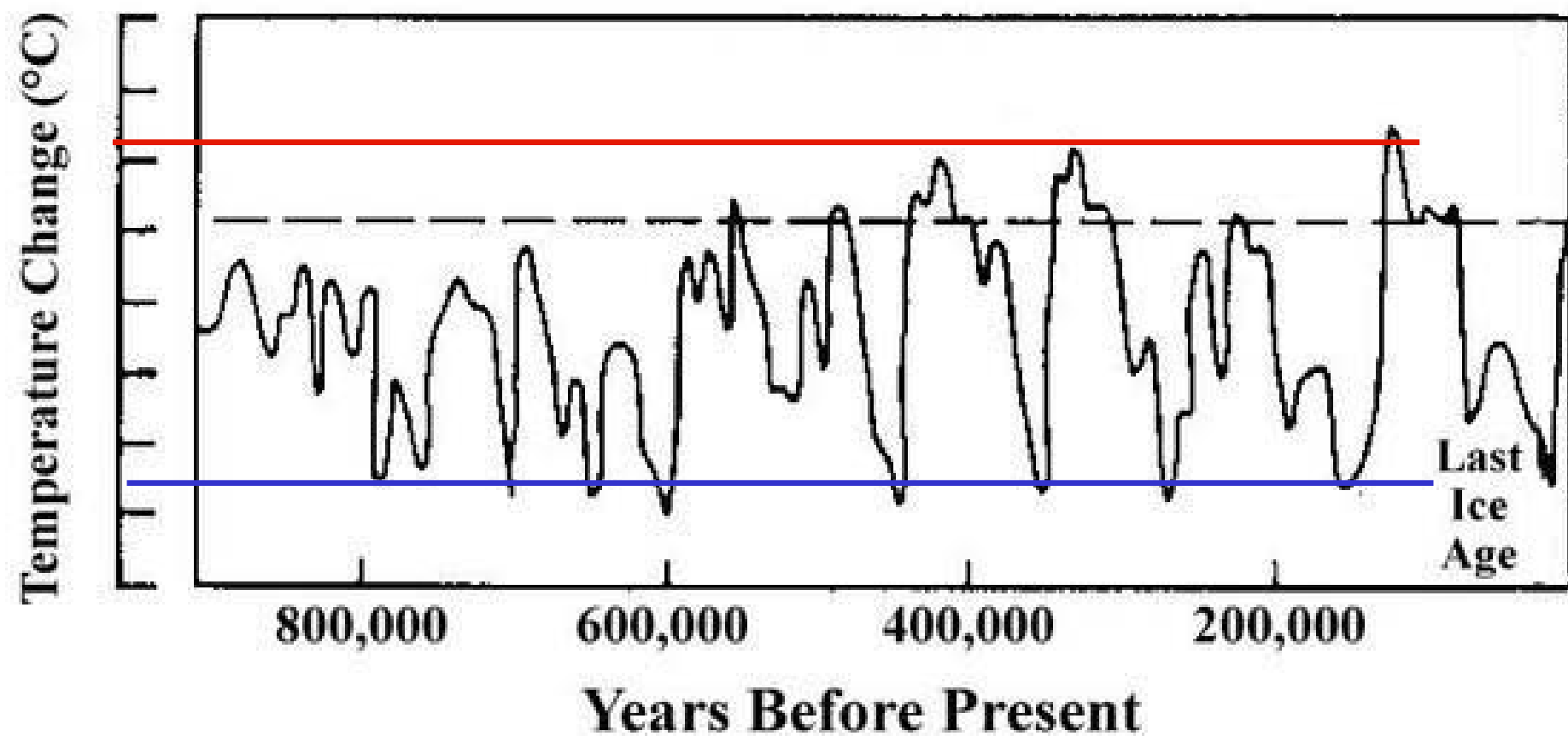




4.5 MILIARDI



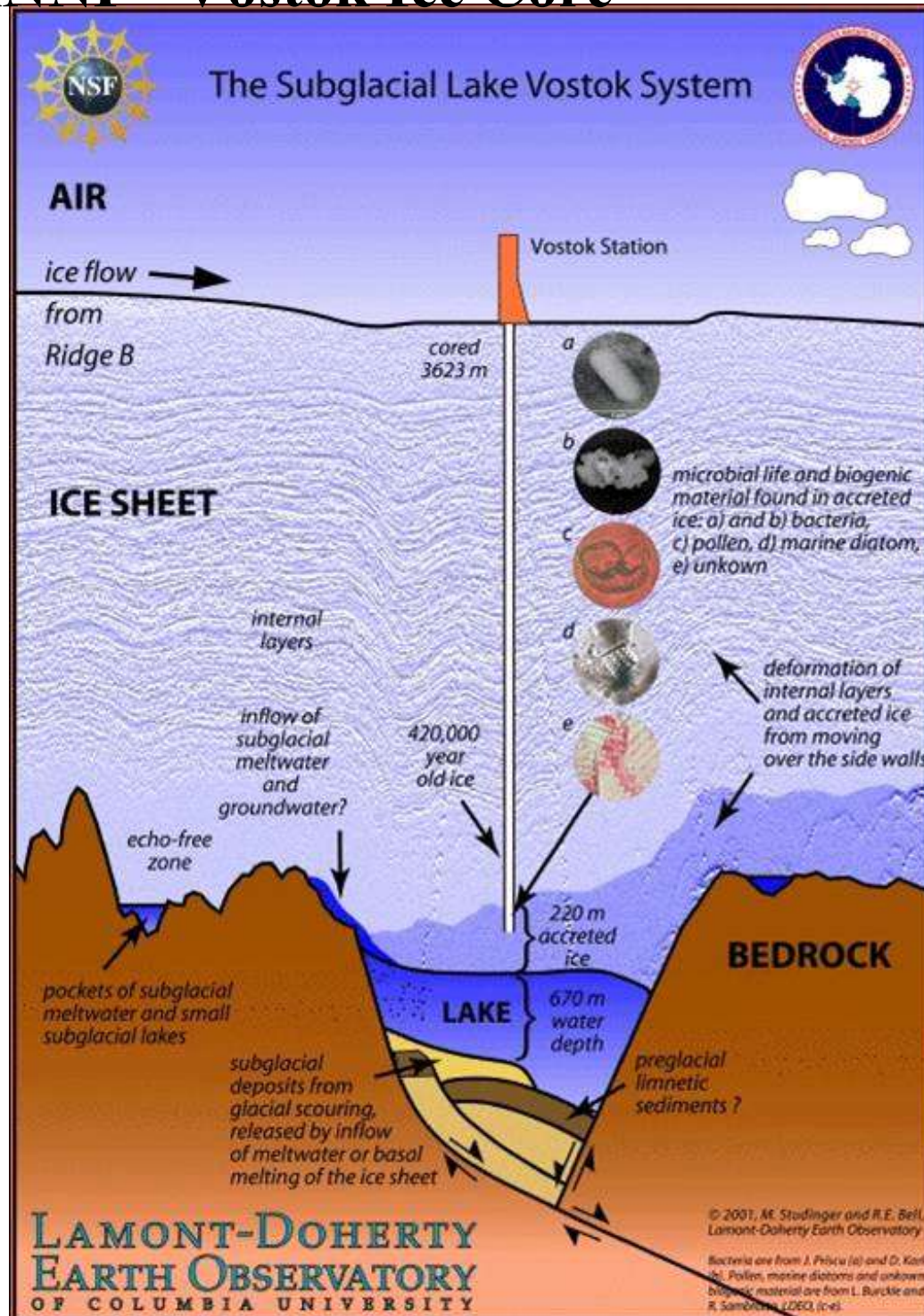
1 MILIONE DI ANNI



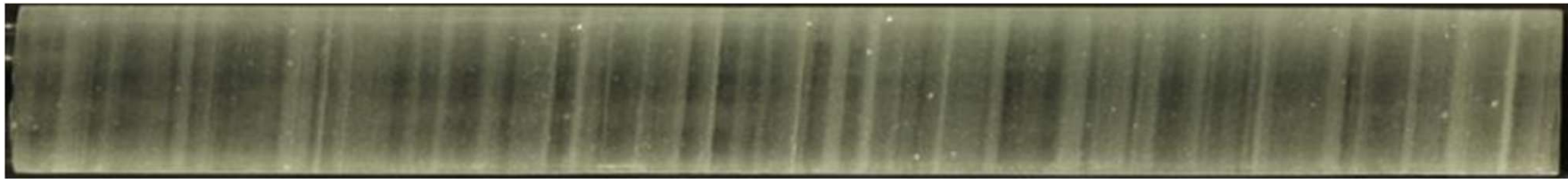
420.000 ANNI – Vostok Ice Core



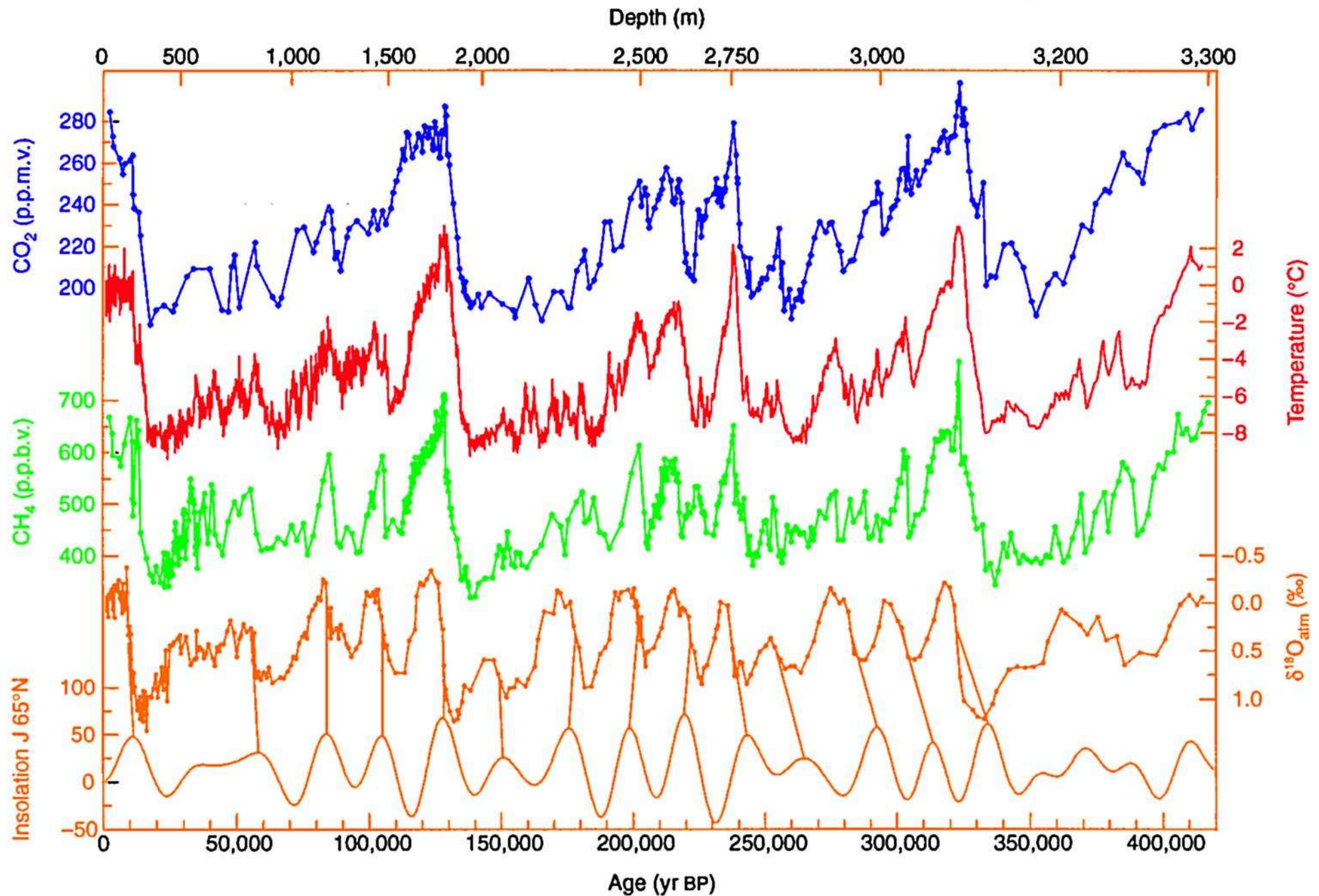
420.000 ANNI – Vostok Ice Core



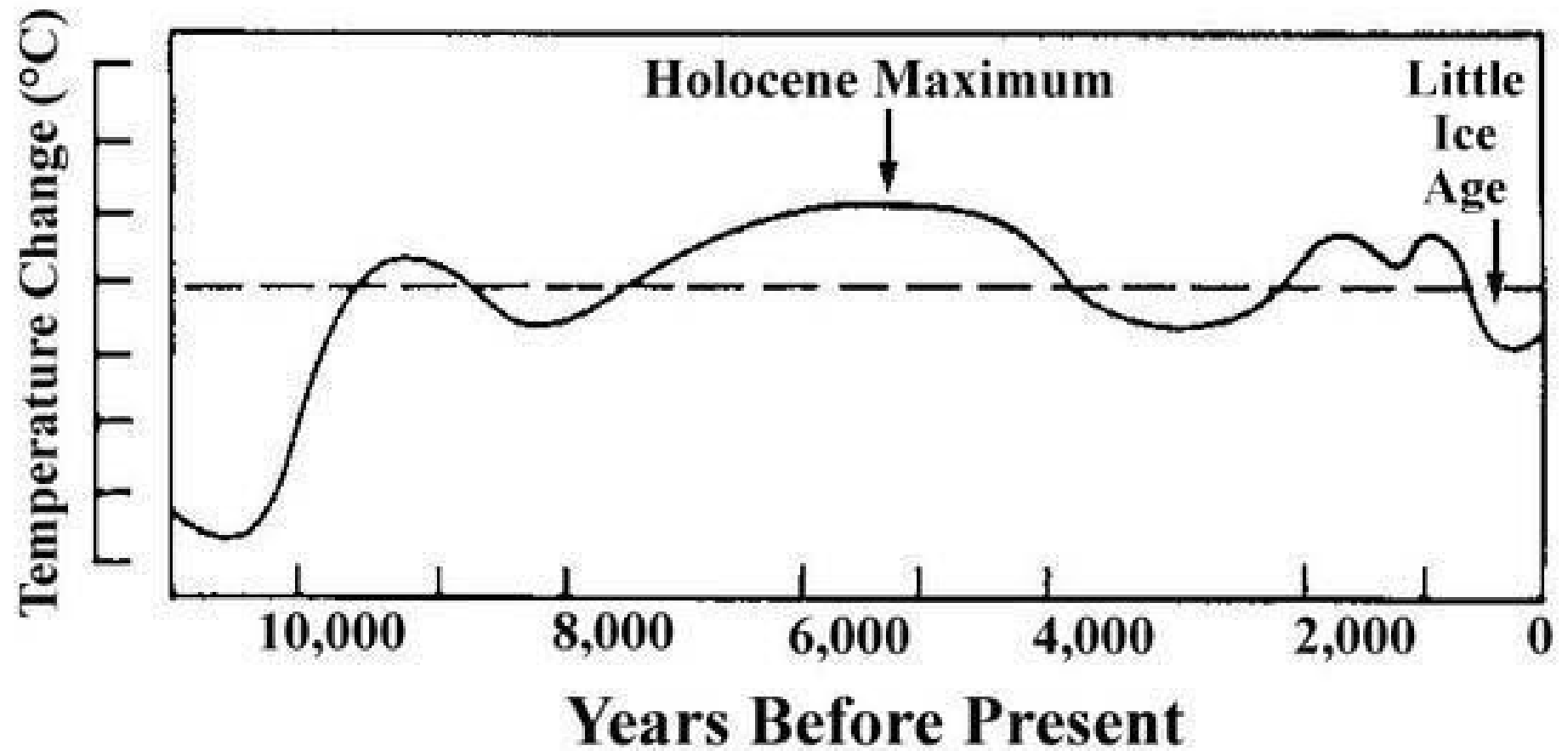
420.000 ANNI – Vostok Ice Core



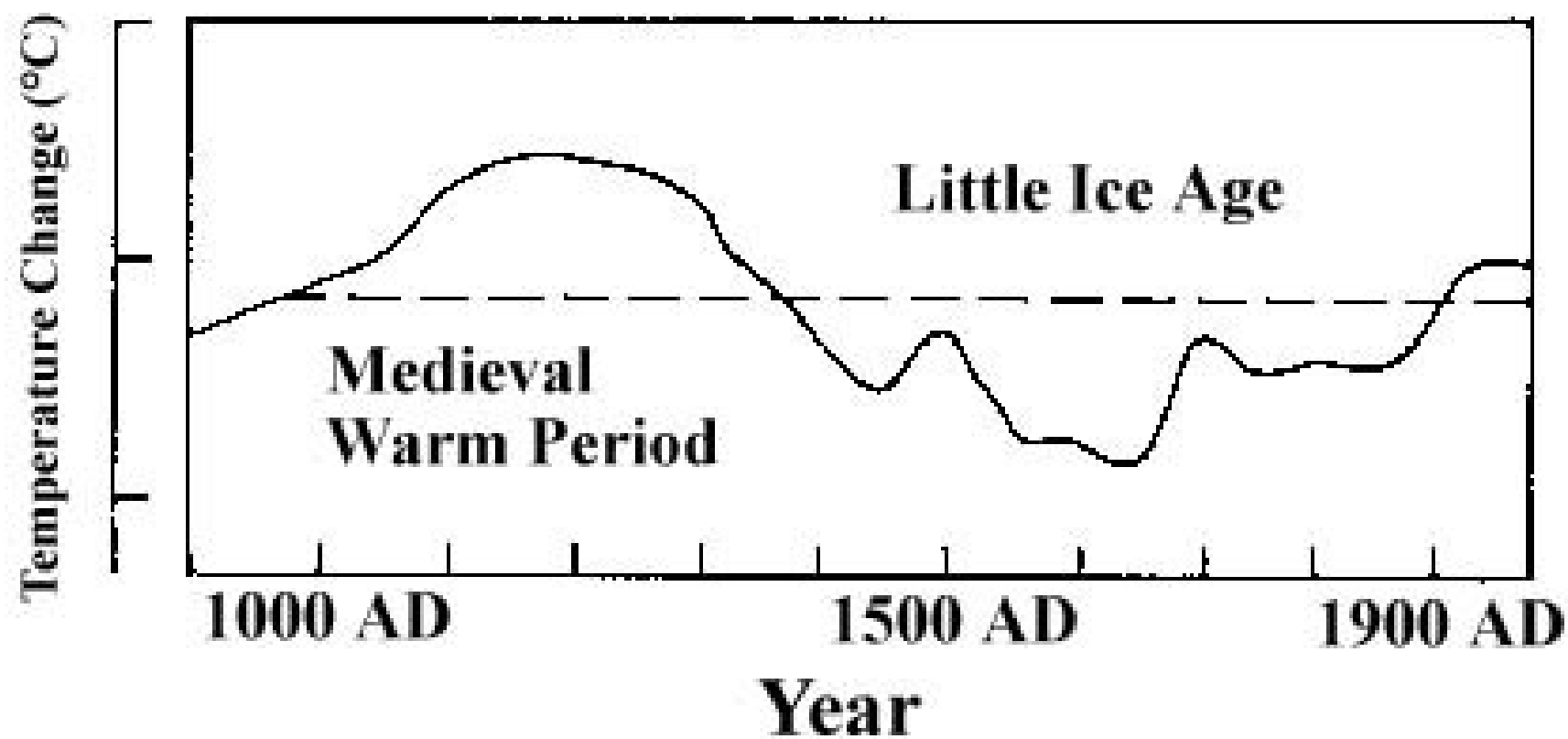
420.000 ANNI – Vostok Ice Core



10.000 ANNI

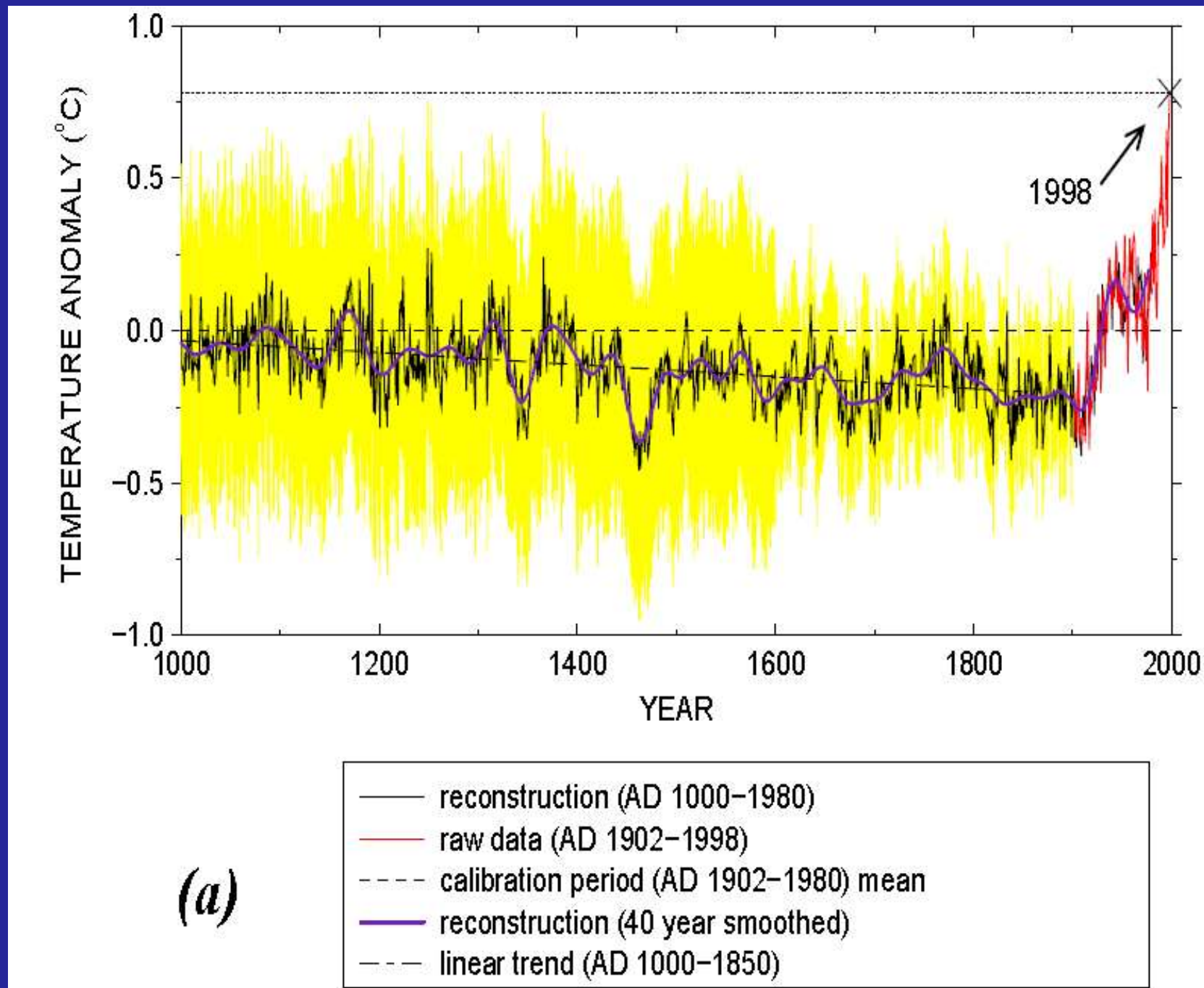


1.000 ANNI



osservazione delle tendenze I

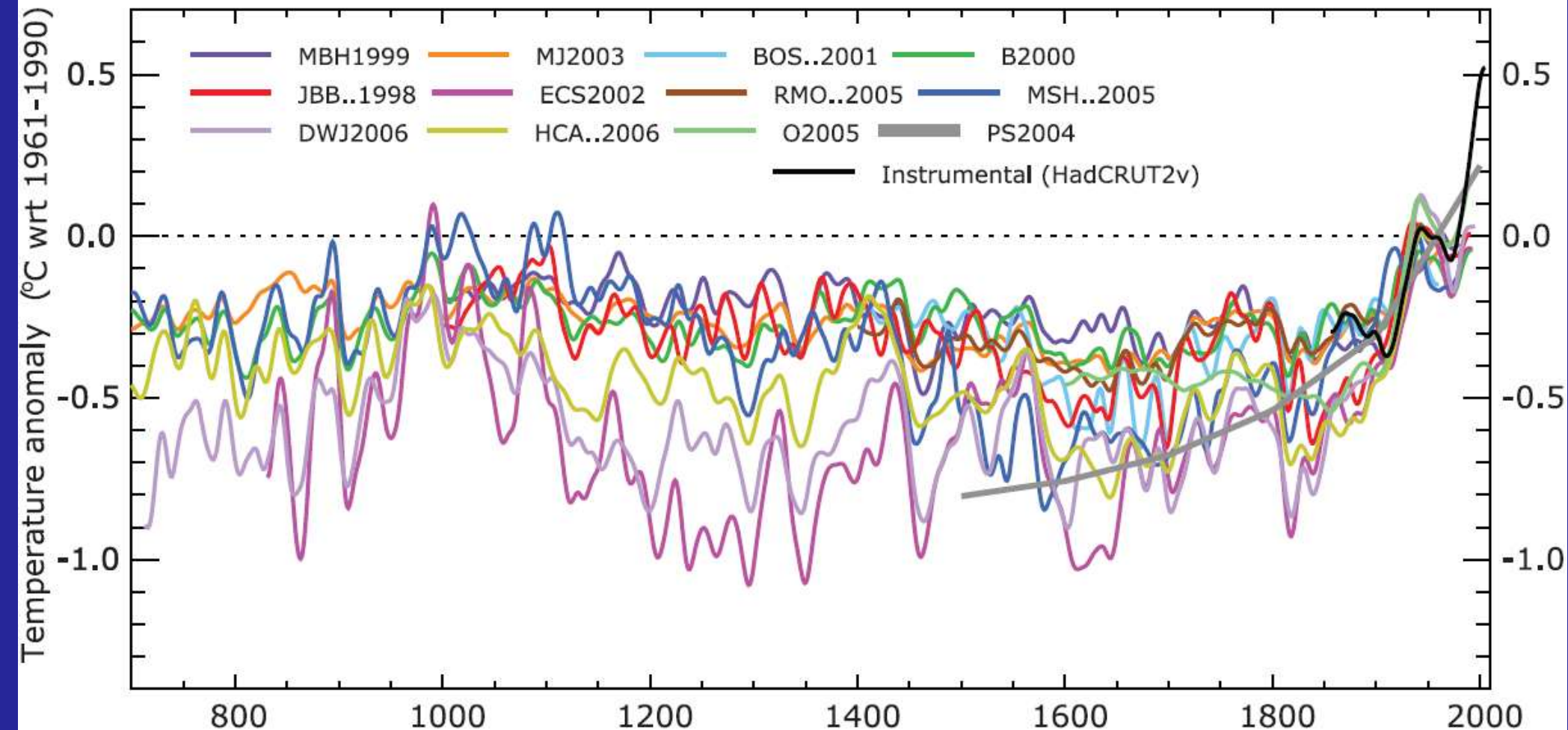
hockey stick (Mann, Bradley, Hughes, JGR, 1999)



osservazione delle tendenze II

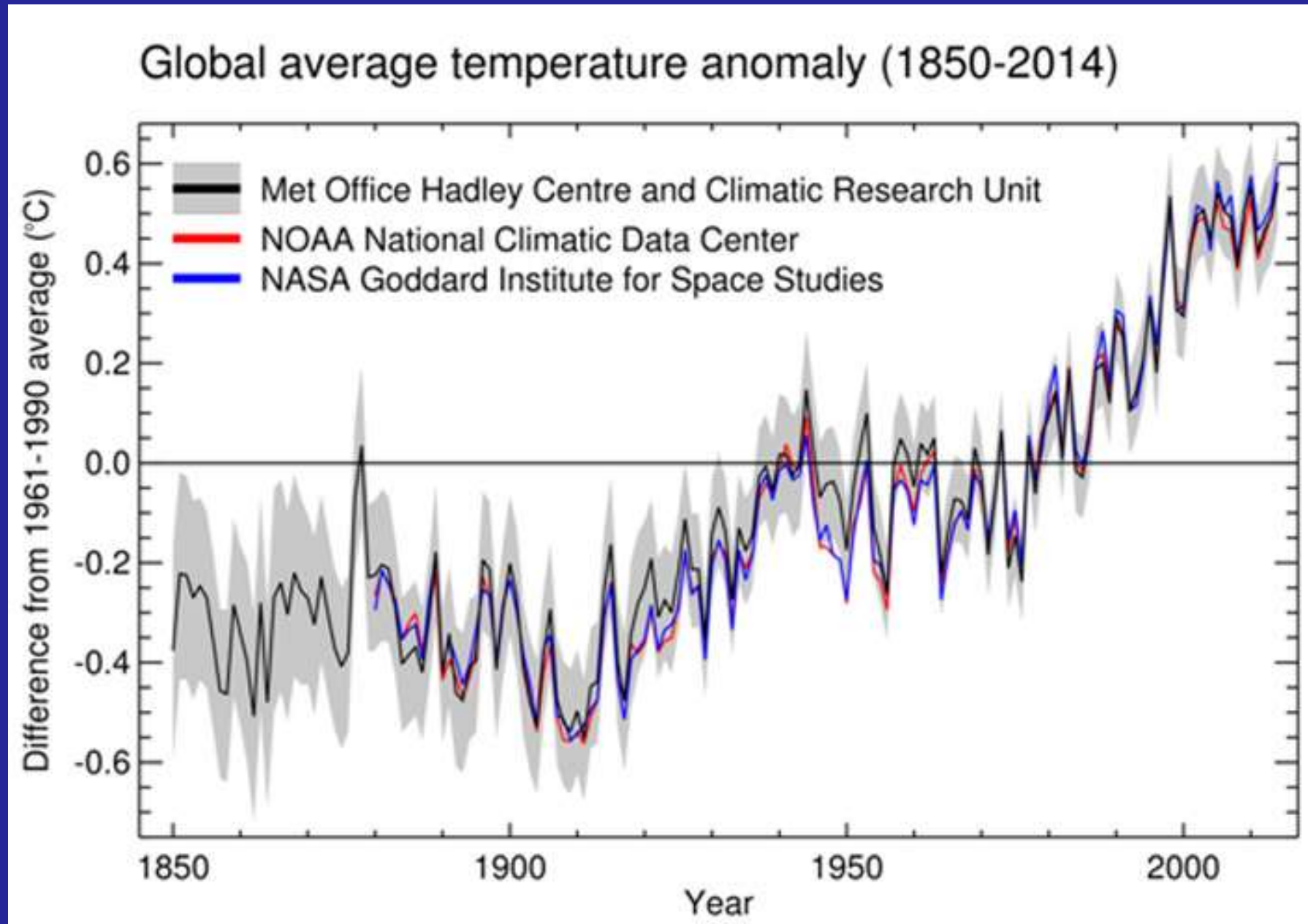
stime della temperatura media dell'emisfero nord

NORTHERN HEMISPHERE TEMPERATURE RECONSTRUCTIONS



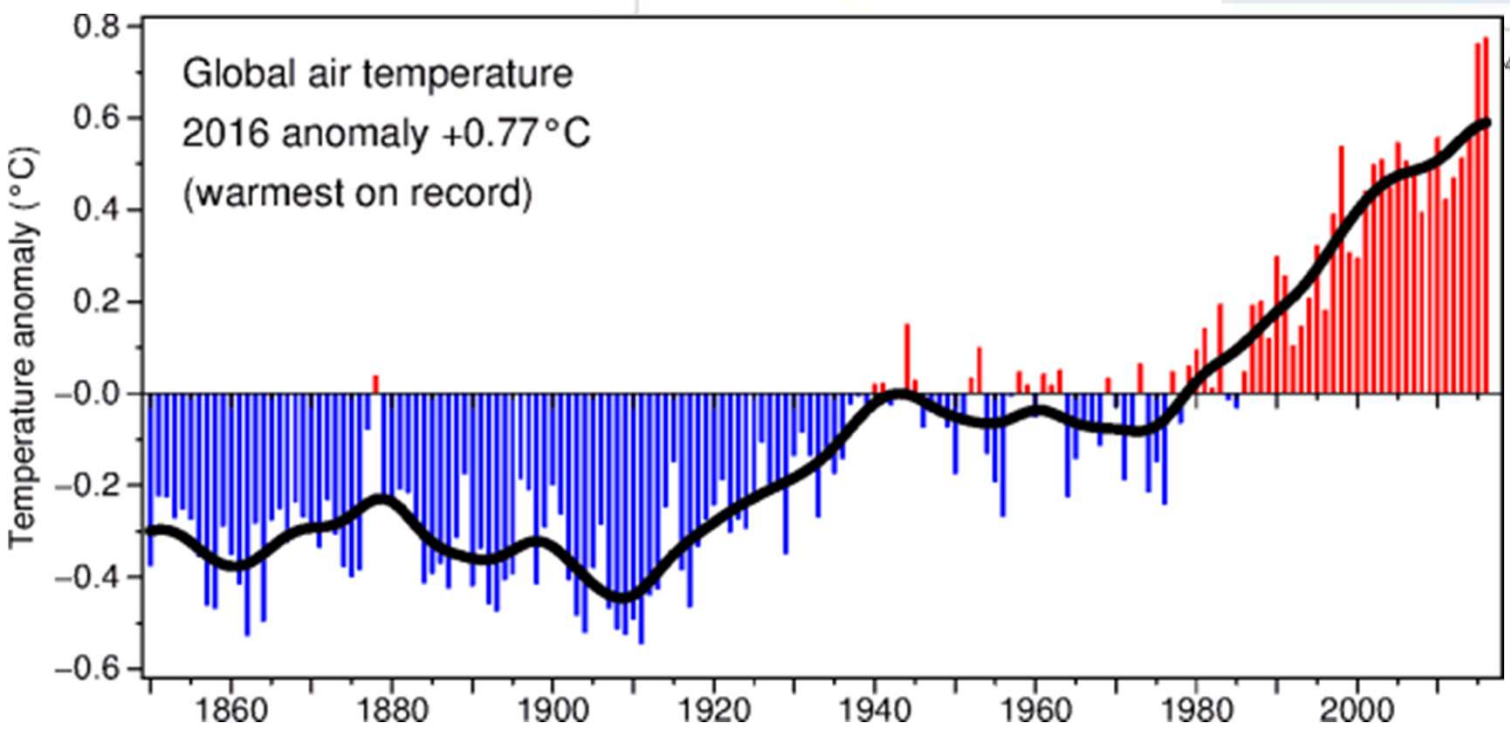
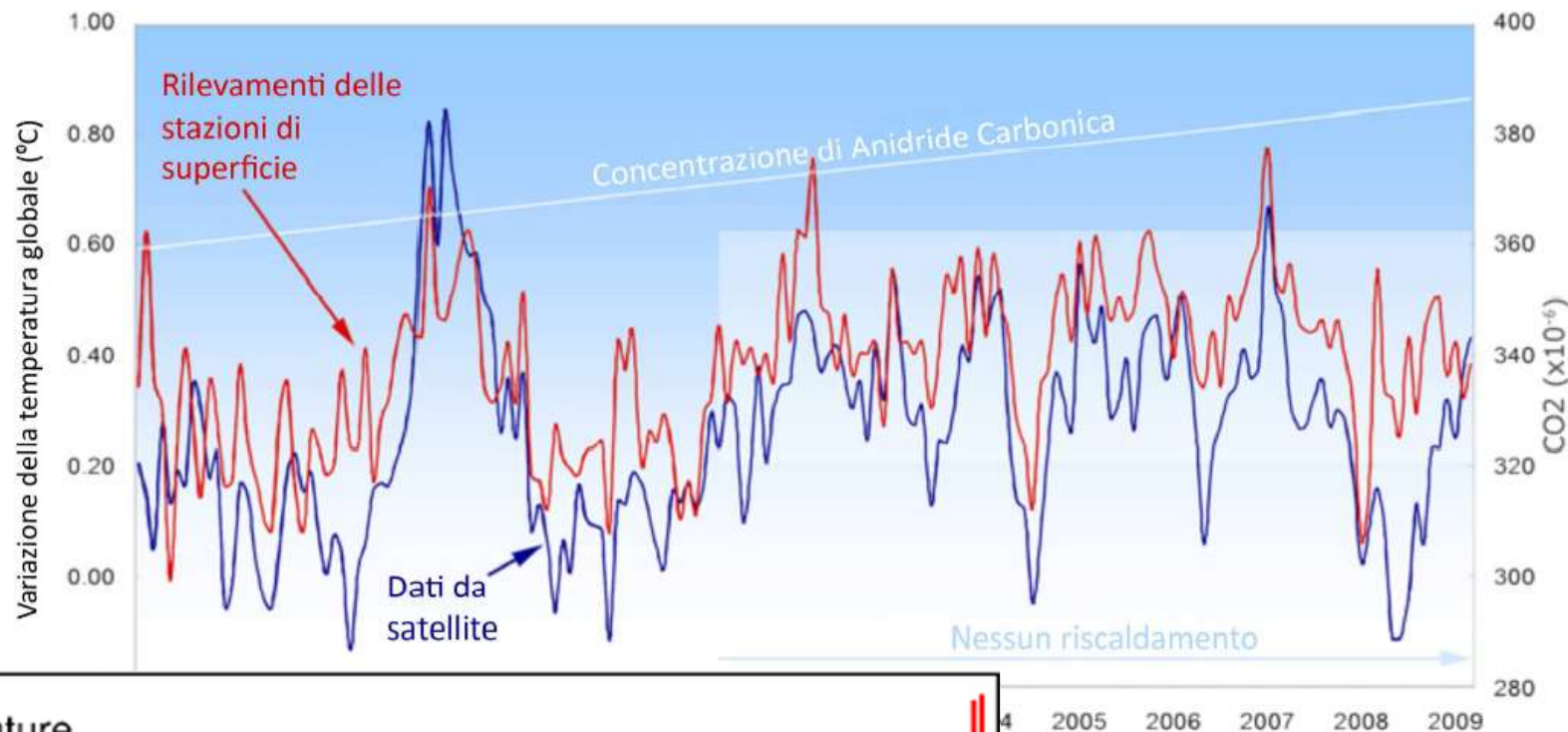
osservazione delle tendenze III

ultimi anni



osservazione delle tendenze III

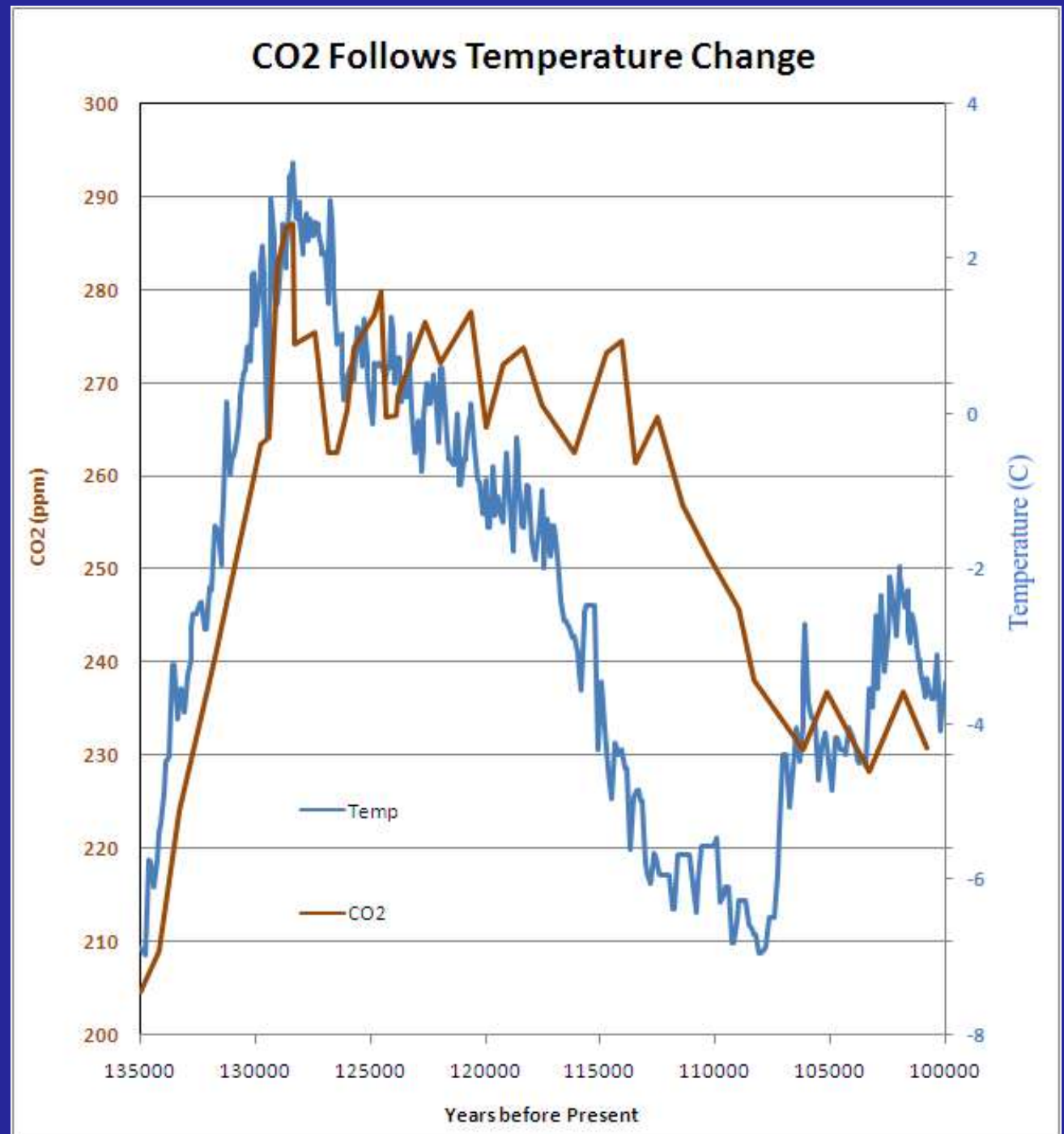
GW hiatus



osservazione delle tendenze IV

relazione $GHG/\Delta T$

le variazioni di contenuto di CO_2 seguono di circa 800 anni le variazioni della temperatura

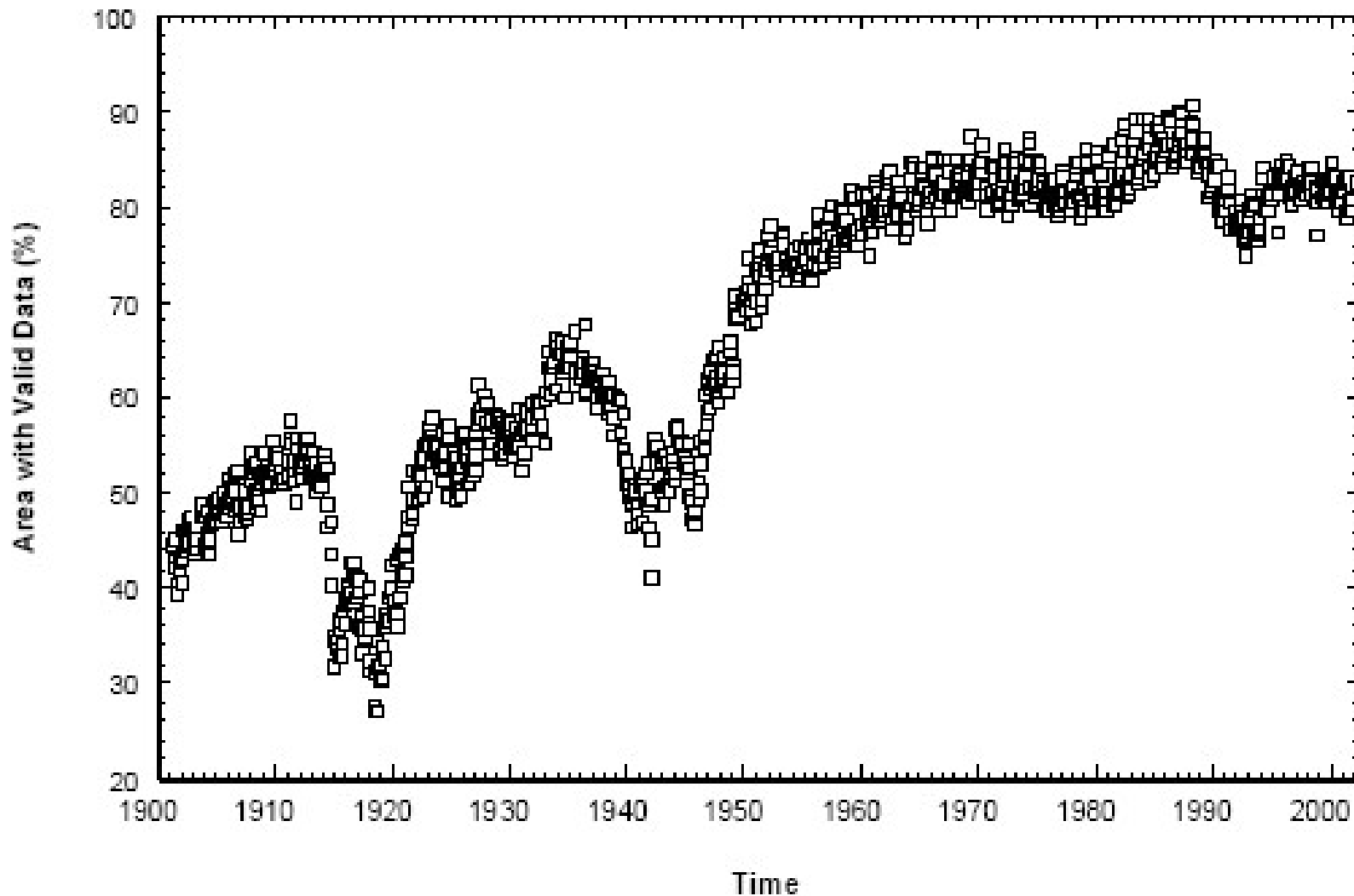


Mudelsee, 2001

osservazione delle tendenze V

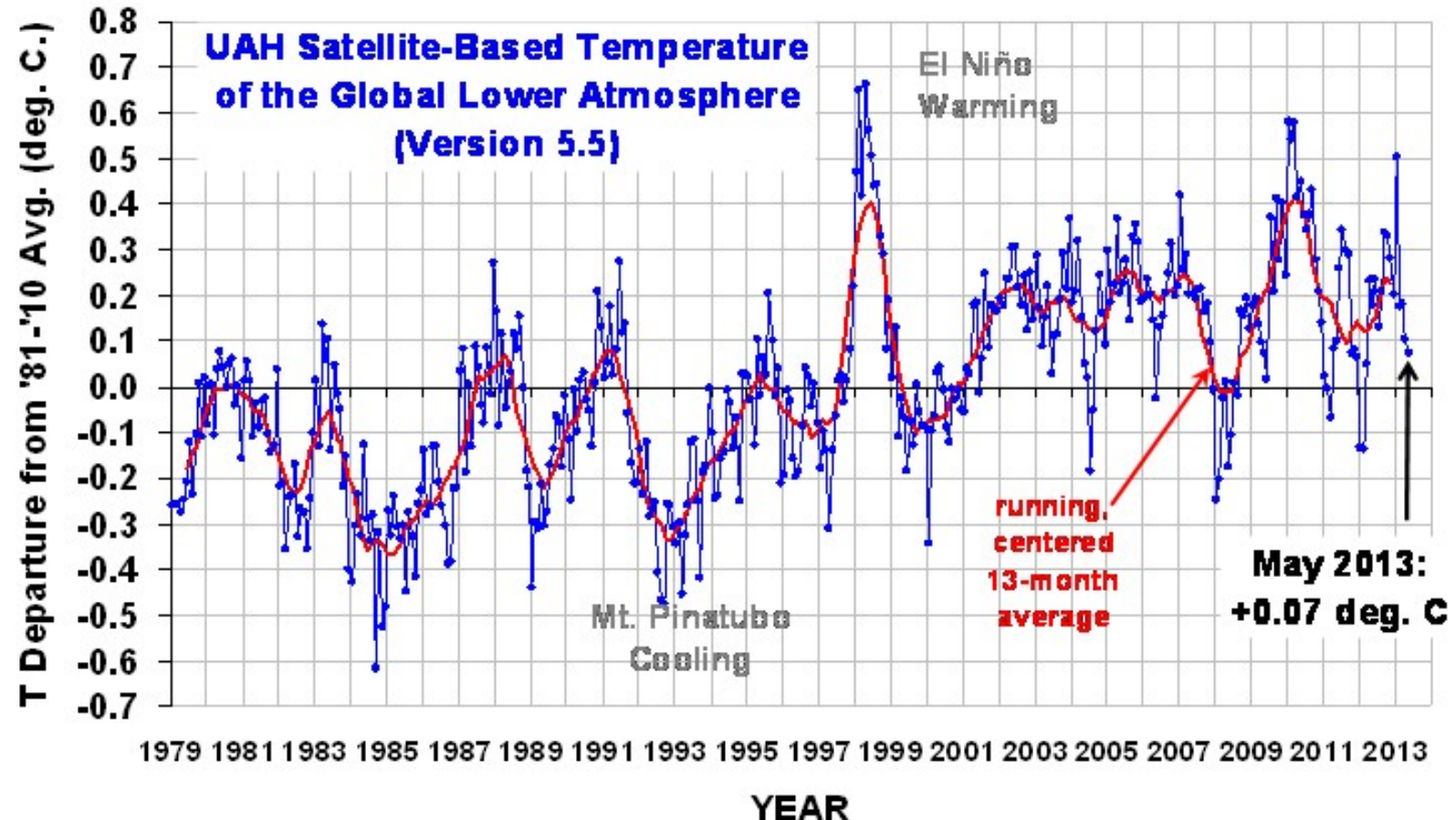
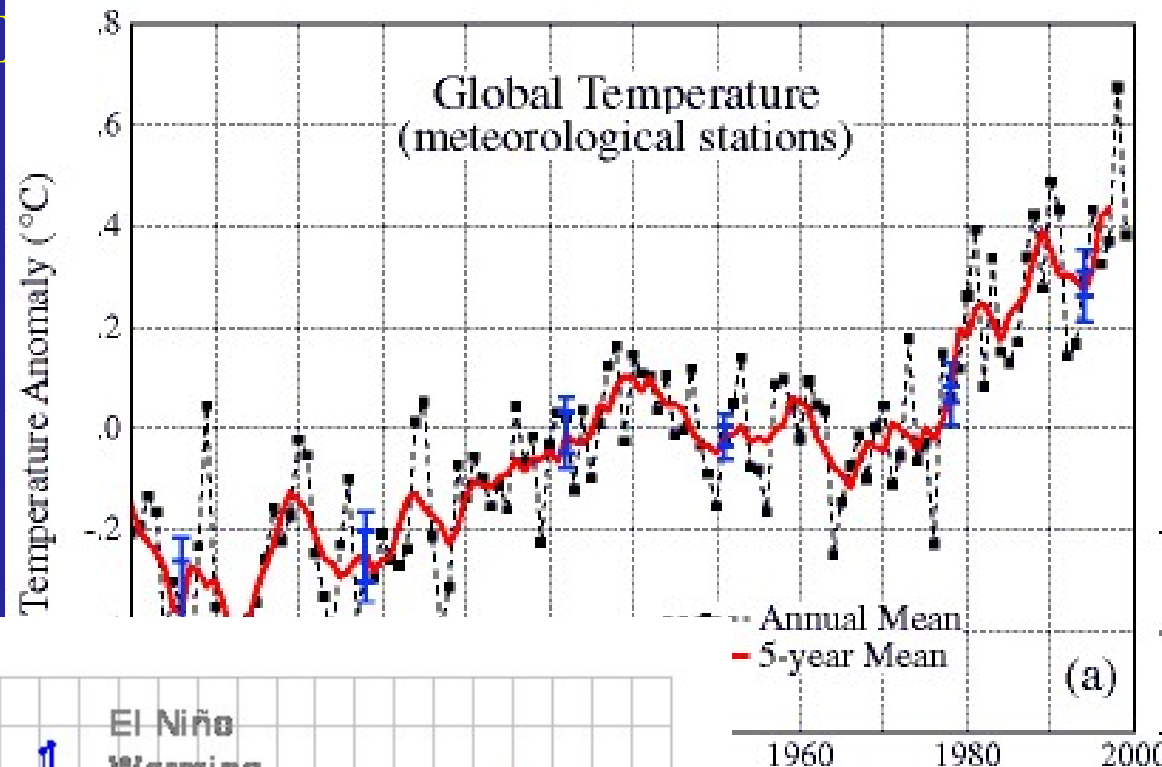
copertura globale dei sensori

la frazione di superficie globale monitorata varia
 $5^\circ \times 5^\circ \sim 550 \times 400 \text{ km}^2$



osservazione delle tendenze VI
osservazioni dallo spazio

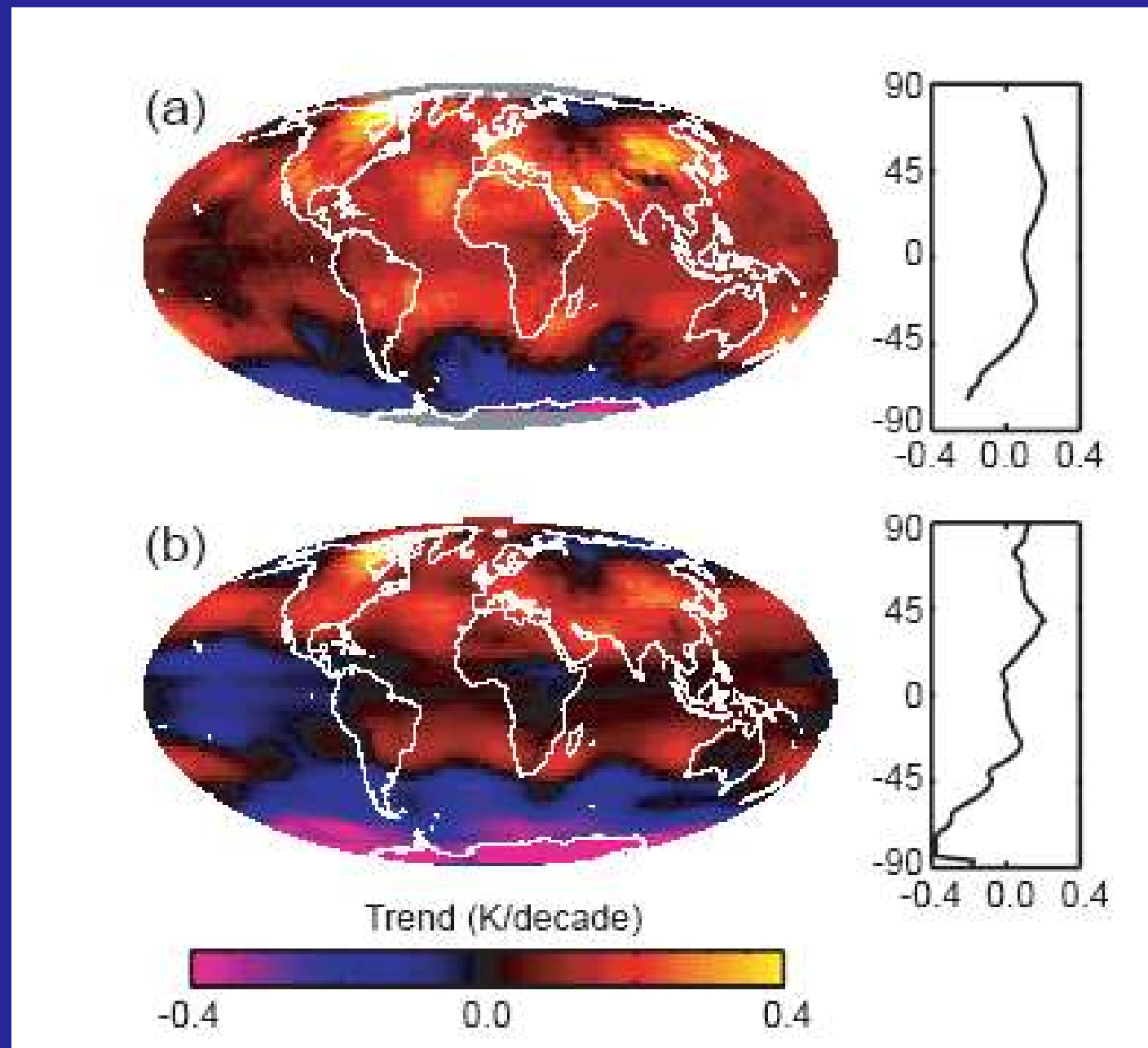
0,2 K/decade ←



0,09 K/decade ←

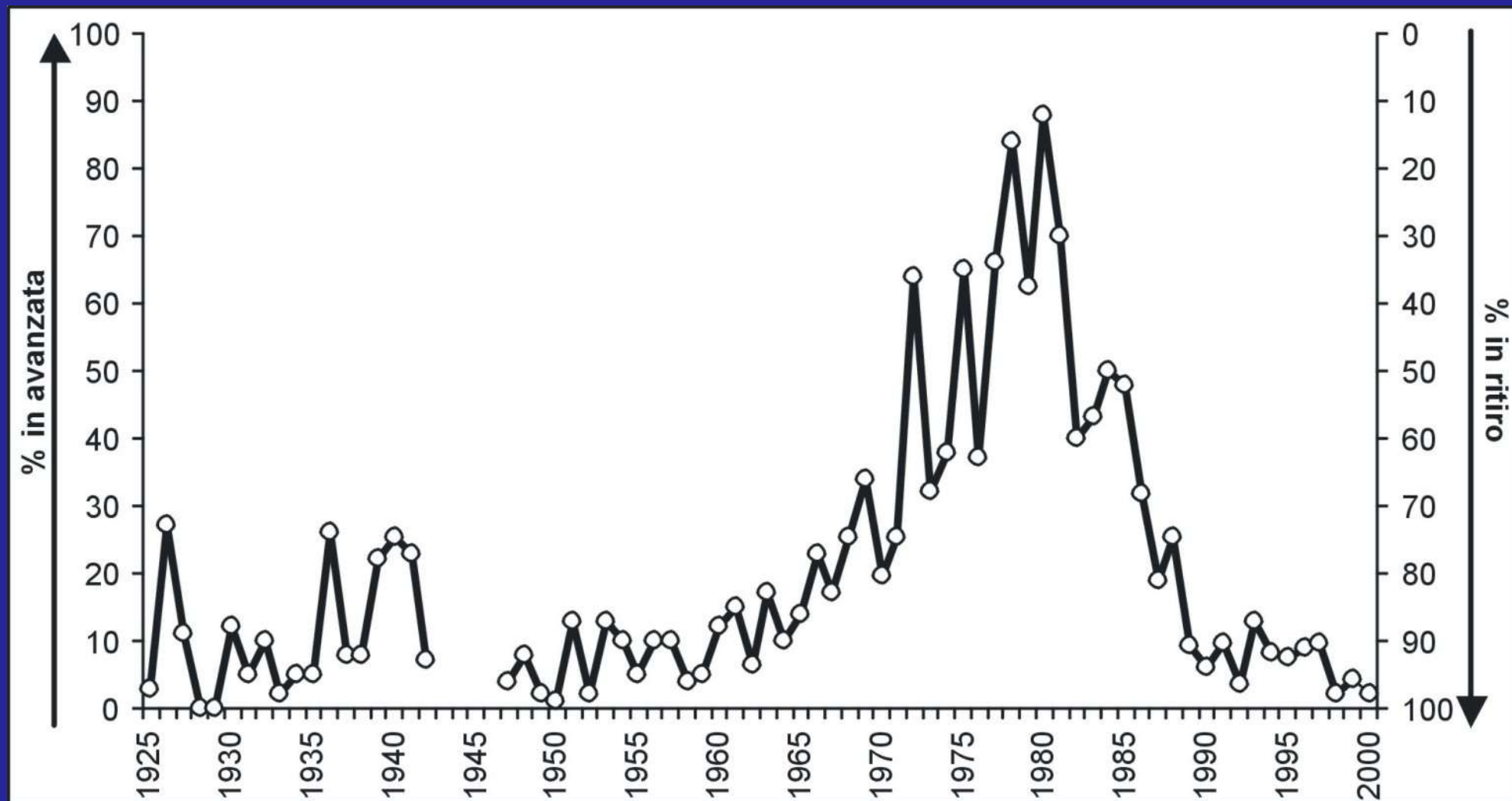
osservazione delle tendenze VIII

Microwave Sounding Unit (MSU)



osservazione delle tendenze IX

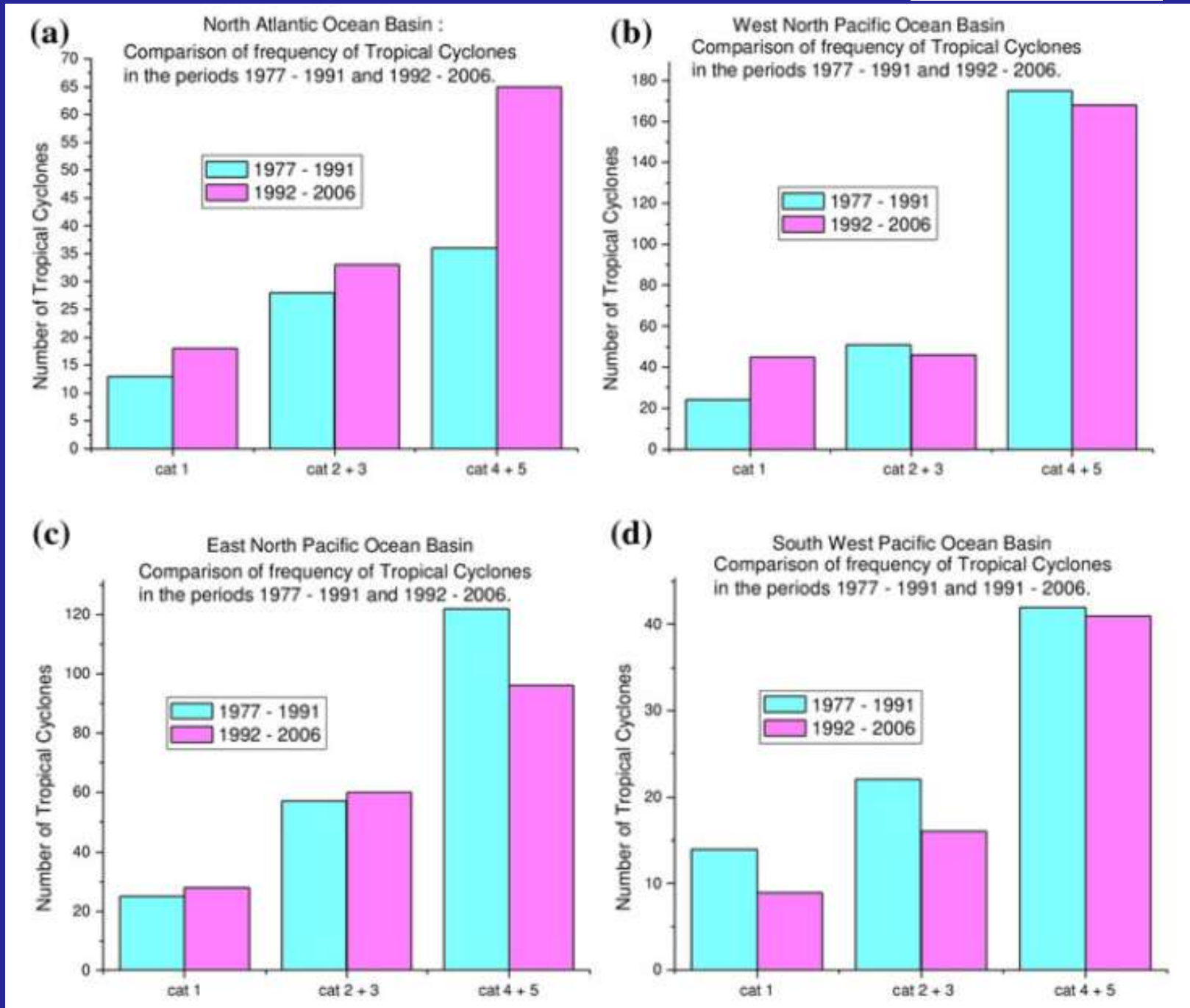
ritiro dei ghiacciai



osservazione delle tendenze X

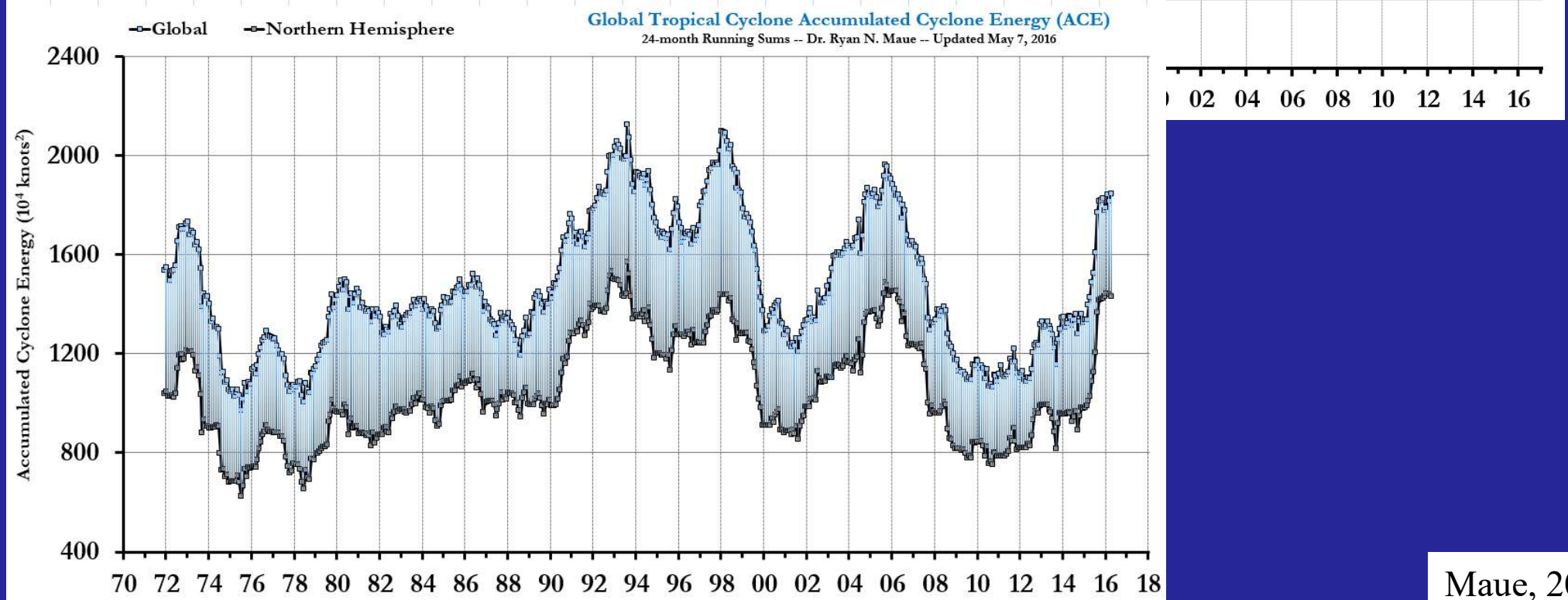
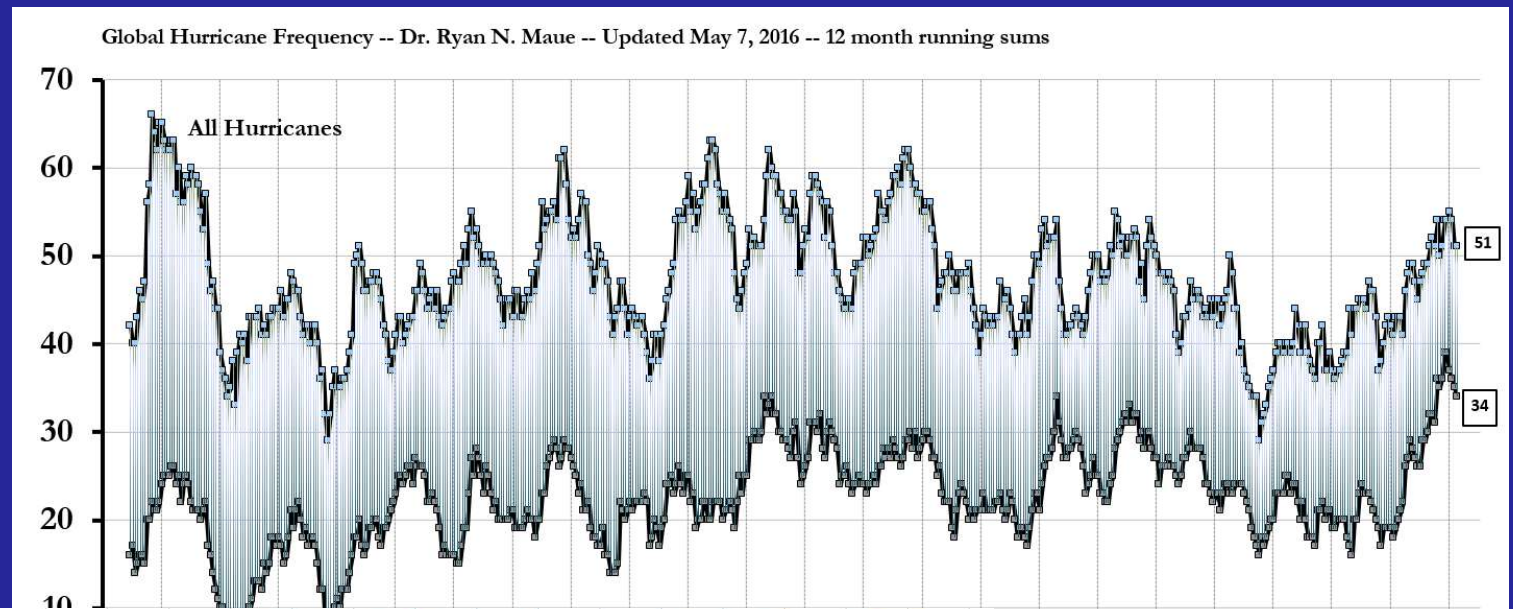
eventi estremi: cicloni tropicali

Deo et al., 2011



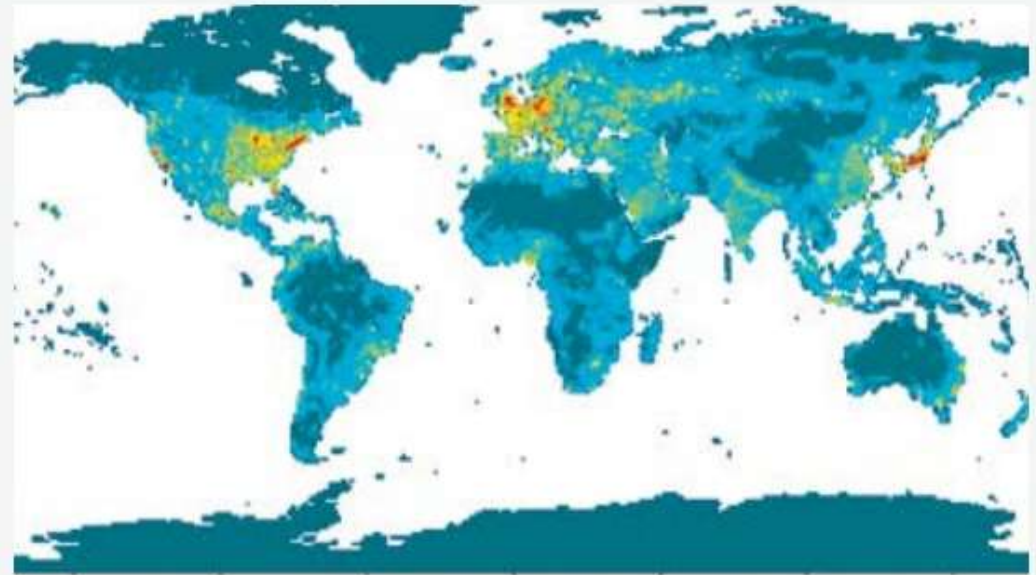
osservazione delle tendenze X

eventi estremi: cicloni tropicali



osservazione delle tendenze *eventi estremi: PIL*

1980



2015

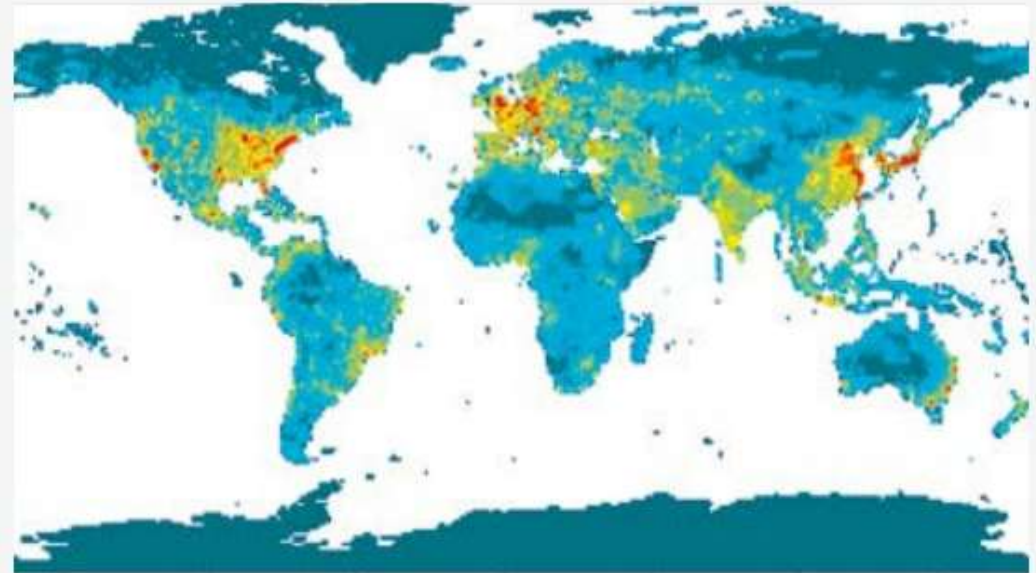
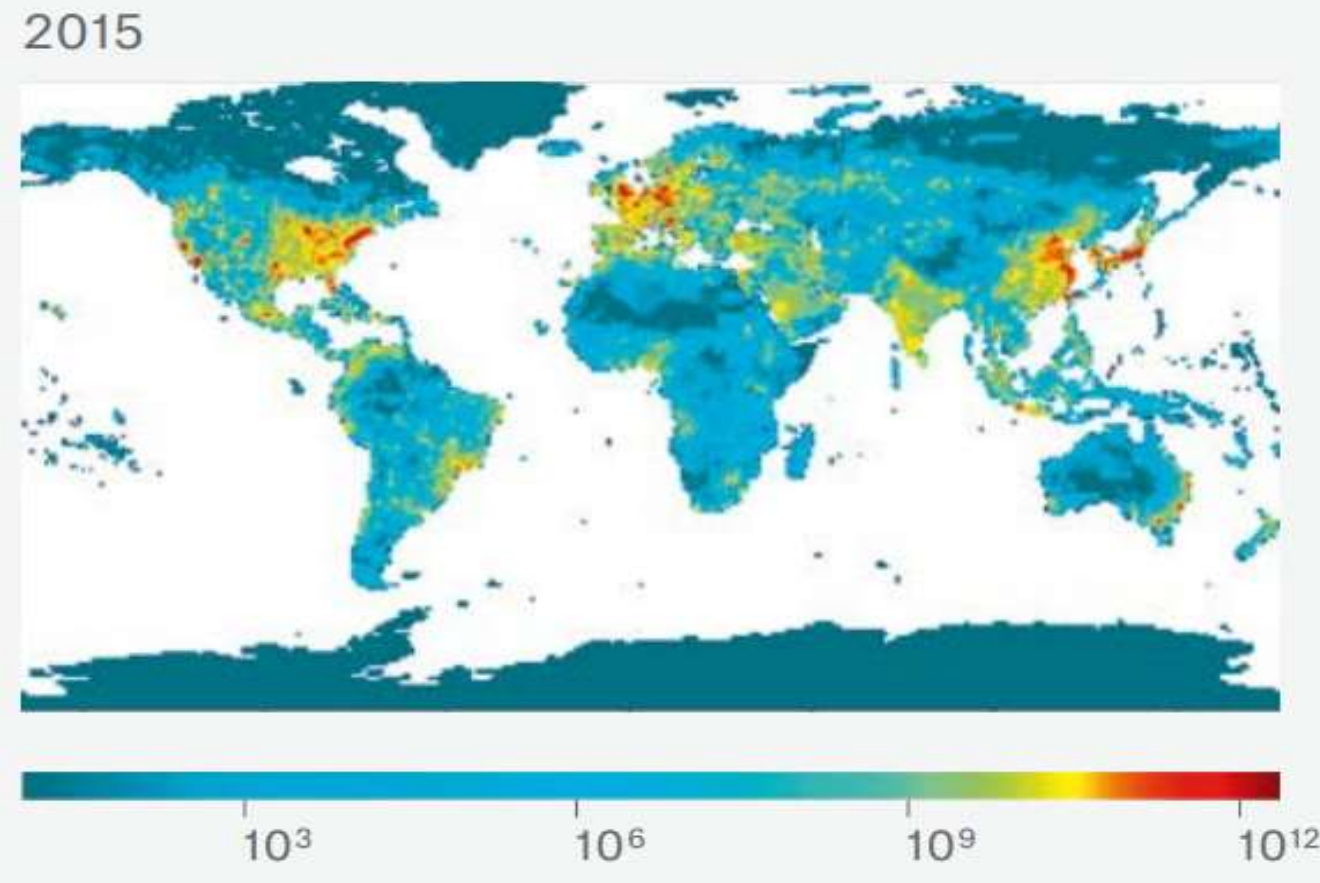
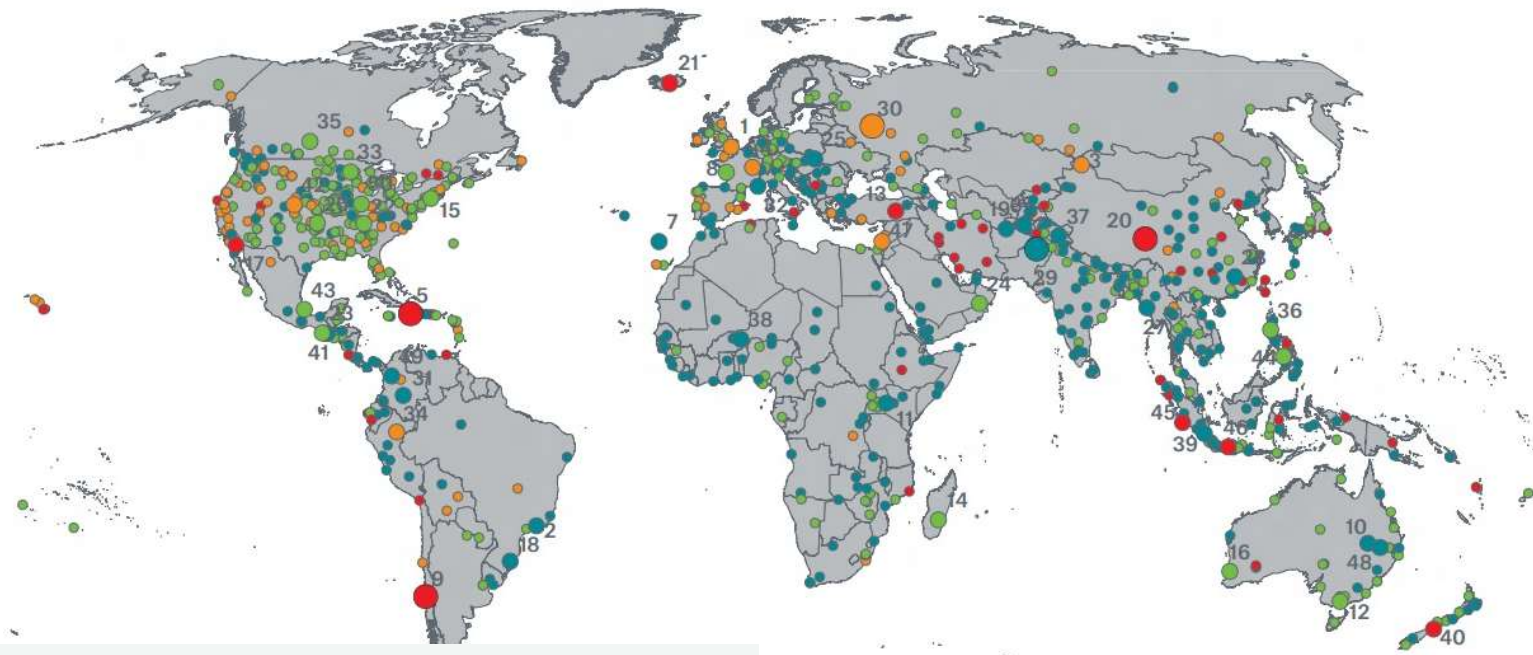


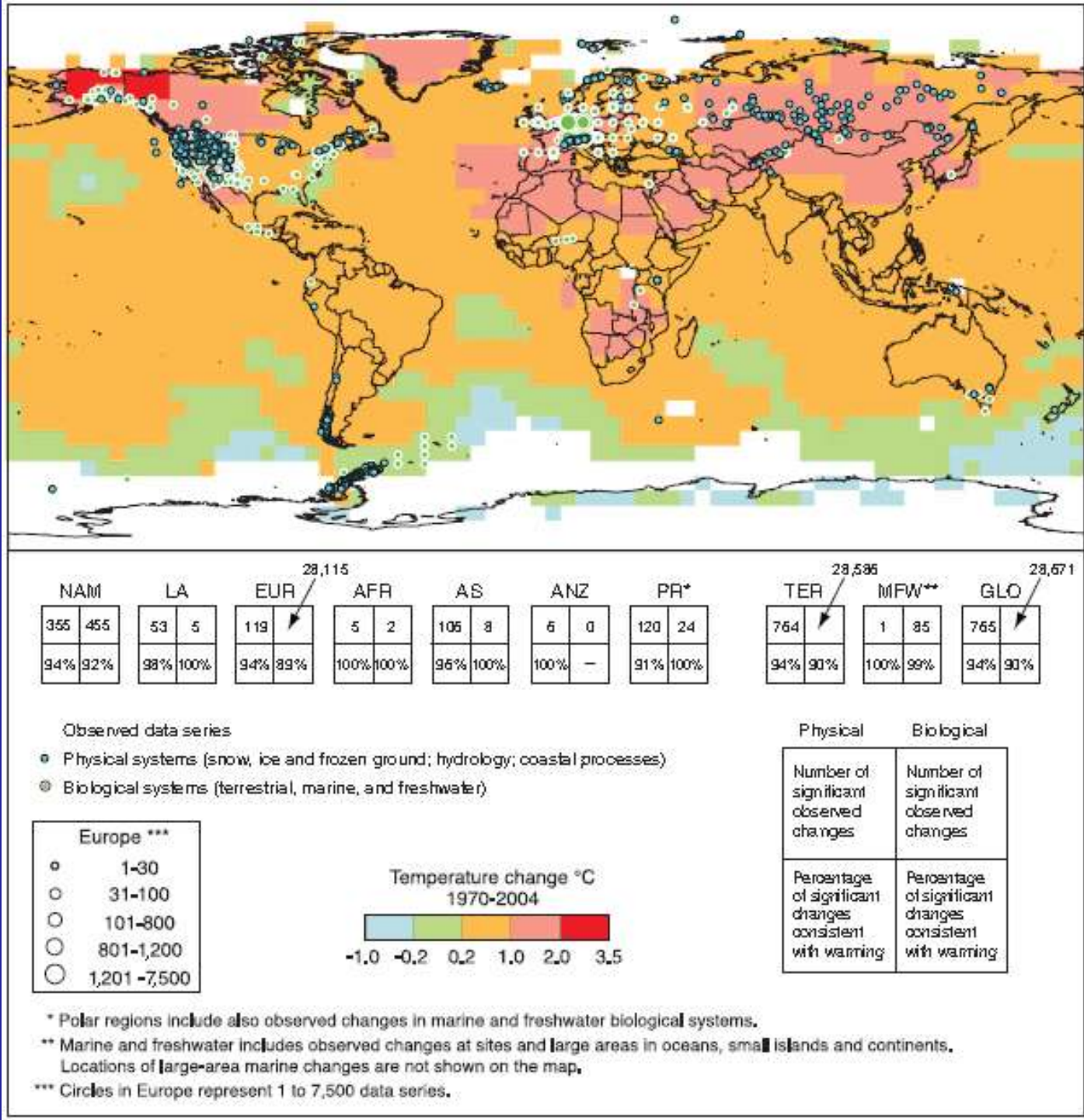
Figure 2011

osservazione delle
eventi estremi: danni



osservazione delle tendenze XI

*impatto sui
sistemi fisici e
biologici*



sistemi dinamici, non linearità, caos;

**componenti e caratteristiche del sistema
climatico terrestre;**

un approccio osservativo.

Il sistema climatico è un sistema complesso;

non esiste una definizione univoca e generale di sistema complesso;

definiamo allora un sistema non complesso:
sistema semplice o lineare o riducibile.

sistema: insieme di elementi che interagiscono tra loro con un obiettivo seguendo proprie regole

linearità: l'effetto è proporzionale alla causa

riduzionismo: il sistema può essere compreso studiando separatamente le parti di cui è composto

caratteristiche di un sistema lineare:

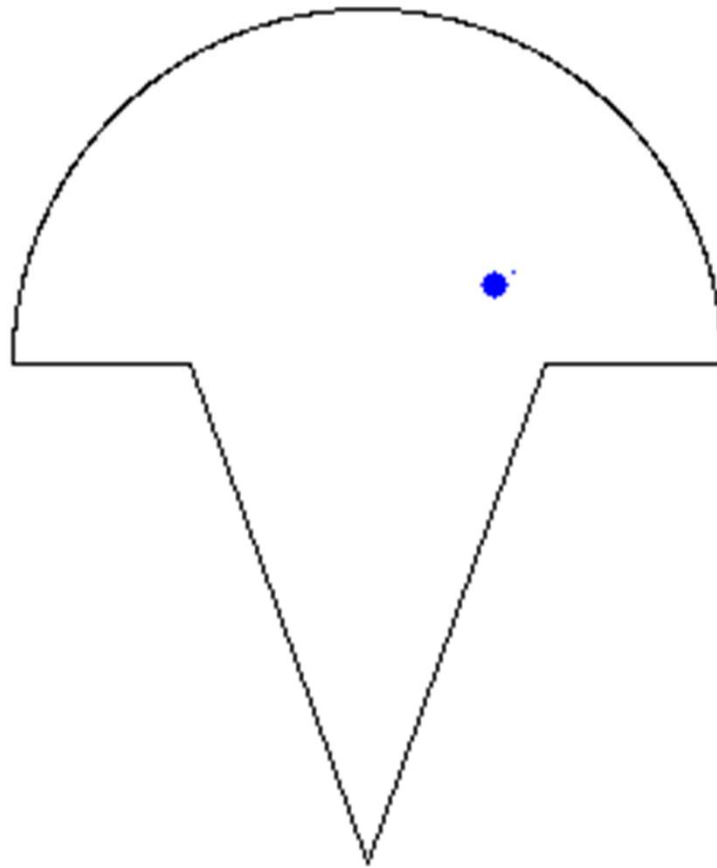
- i componenti interagiscono tra loro in modo lineare;
- è riducibile;
- è predicibile;
- è descritto da un numero finito di parametri.

caratteristiche di un sistema non lineare:

- non è possibile riconoscere il ruolo di ogni singolo elemento in un processo (meccanismi di retroazione);
- è non predicibile (caos, sensibilità alle condizioni iniziali);
- piccole perturbazioni possono dare grandi risposte e viceversa;
- fenomeni di auto-organizzazione (vortici, convezione).

Biliardo

sensibilità alle condizioni iniziali ($\Delta\phi = 0.5\%$)



Sistema di Lorenz

$$\dot{x} = \sigma(y - x)$$

$$\dot{y} = rx - y - xz$$

$$\dot{z} = xy - bz$$

$$x_{(t=0)} = 8$$

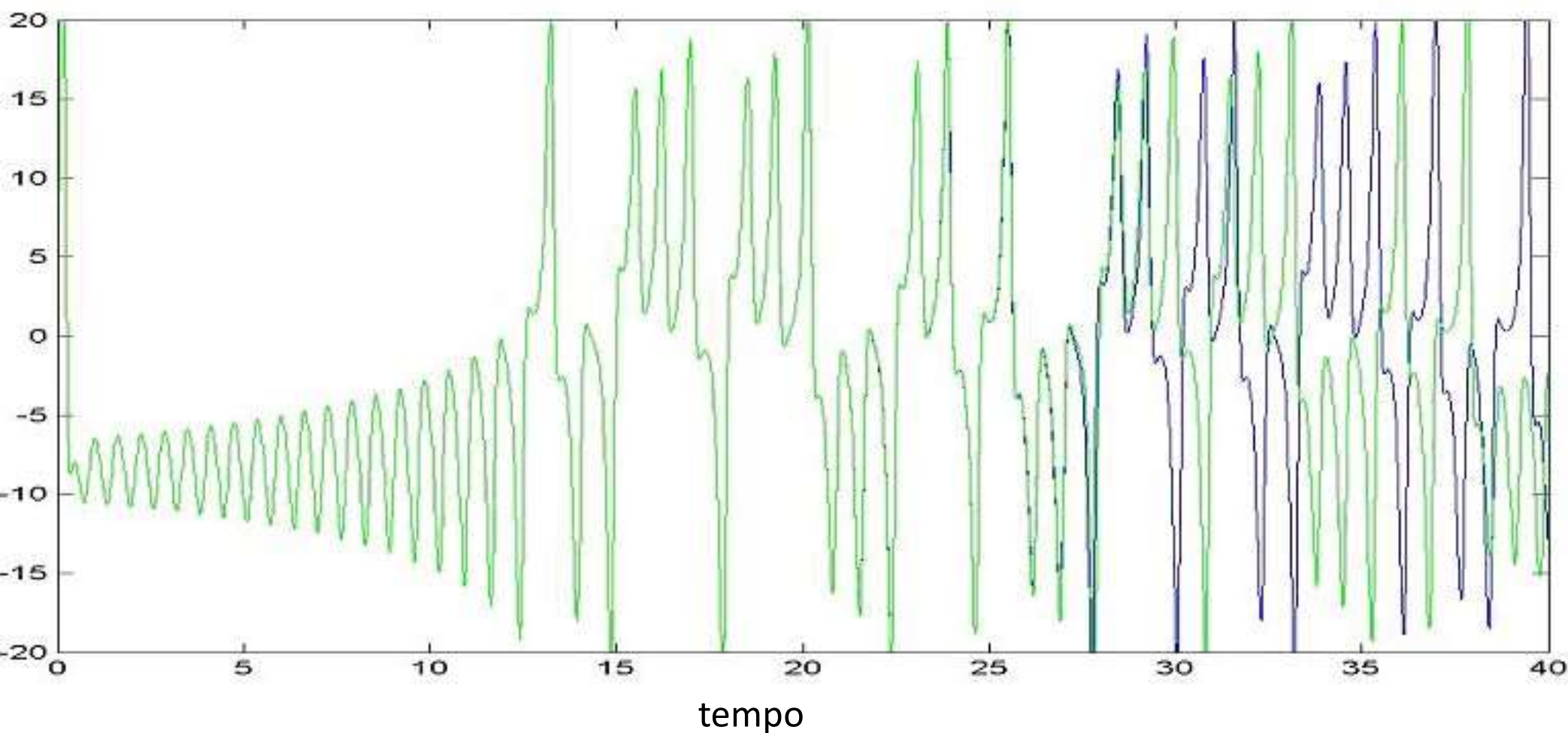
$$y_{(t=0)} = 1$$

$$z_{(t=0)} = 1$$

$$x_{(t=0)} = 8$$

$$y_{(t=0)} = 1.0000001$$

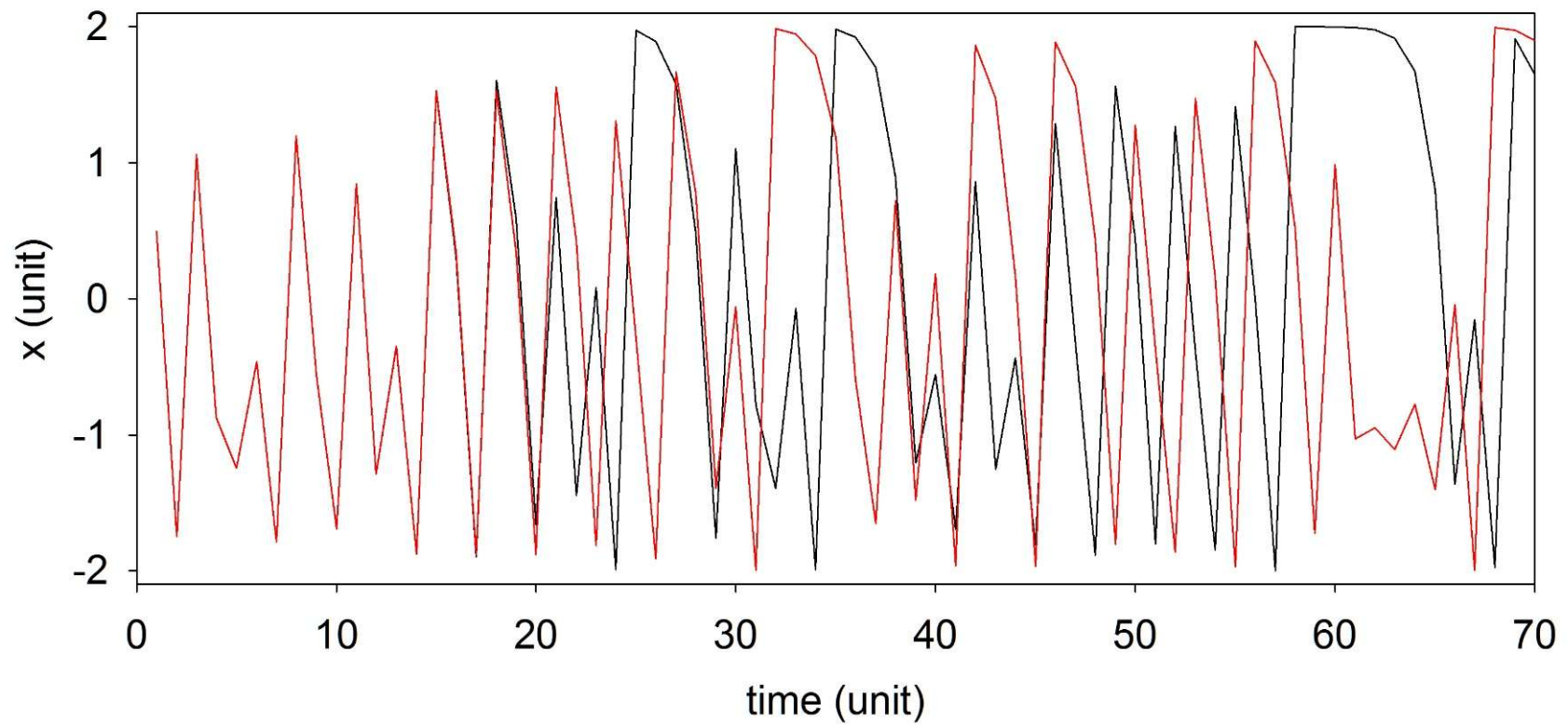
$$z_{(t=0)} = 1$$



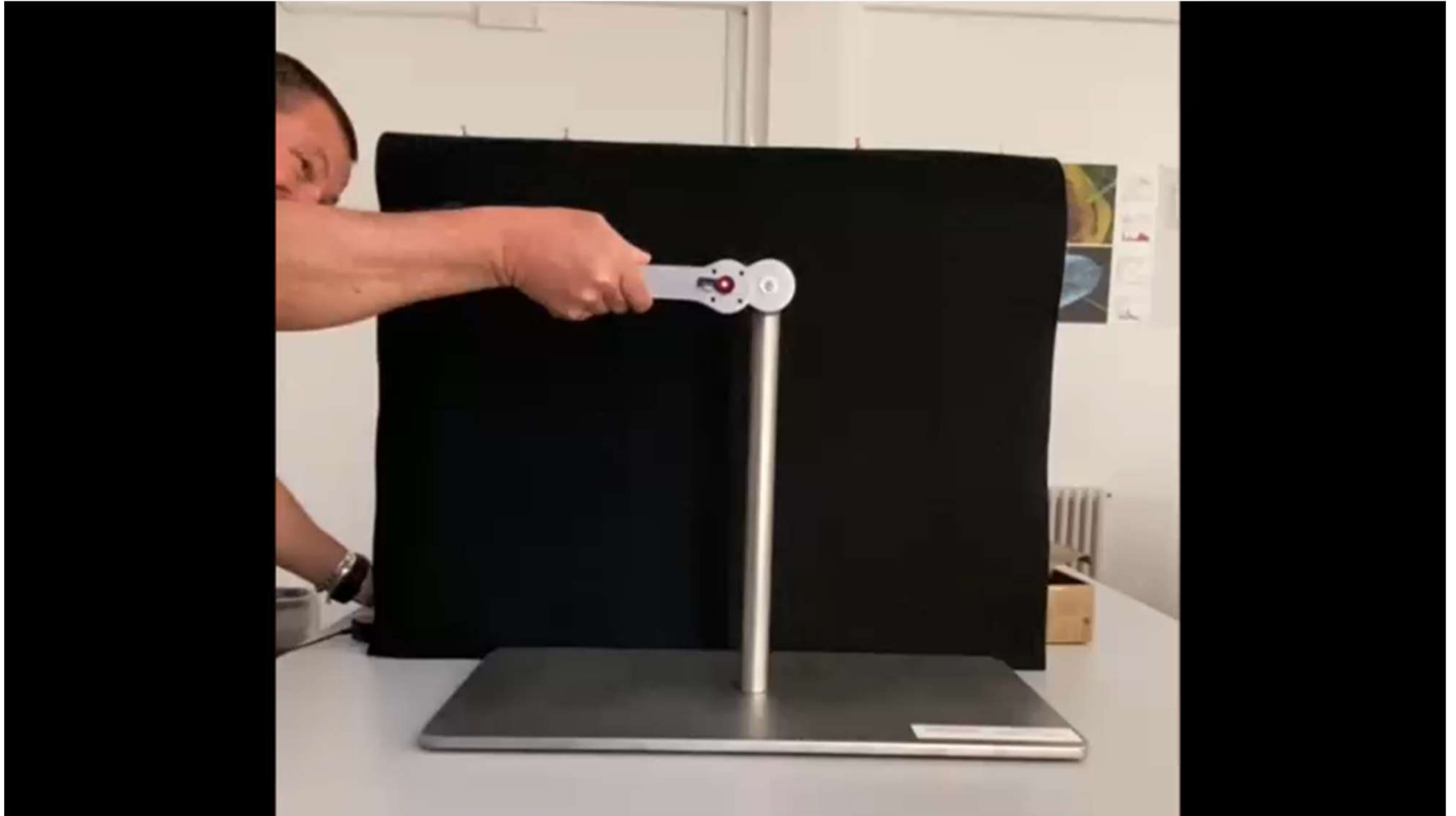
$$\mathbf{x}_t = \mathbf{x}_{t-1}^2 - 2$$

$$\mathbf{x}_o = 0.500000$$

$$\mathbf{x}'_o = 0.500001$$

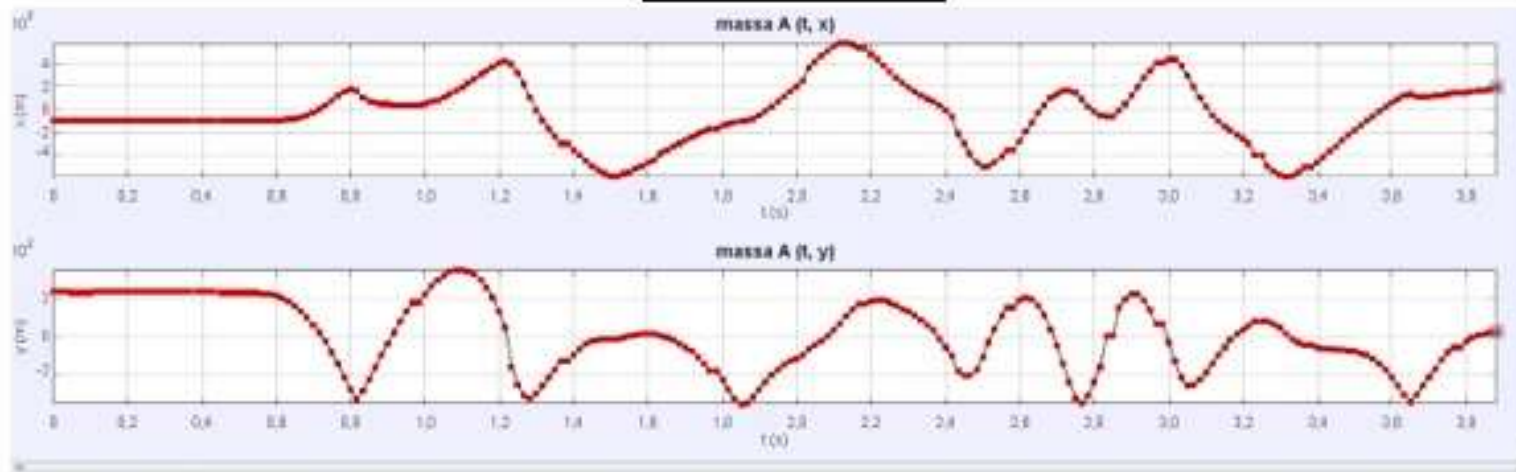


Il pendolo doppio

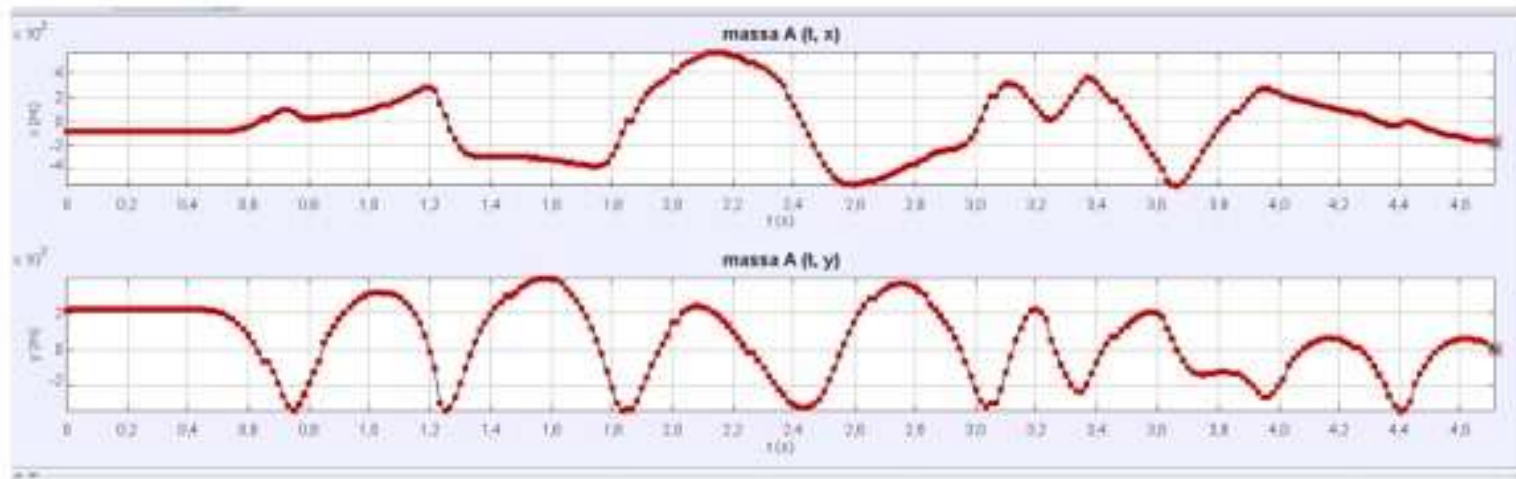


Il pendolo doppio

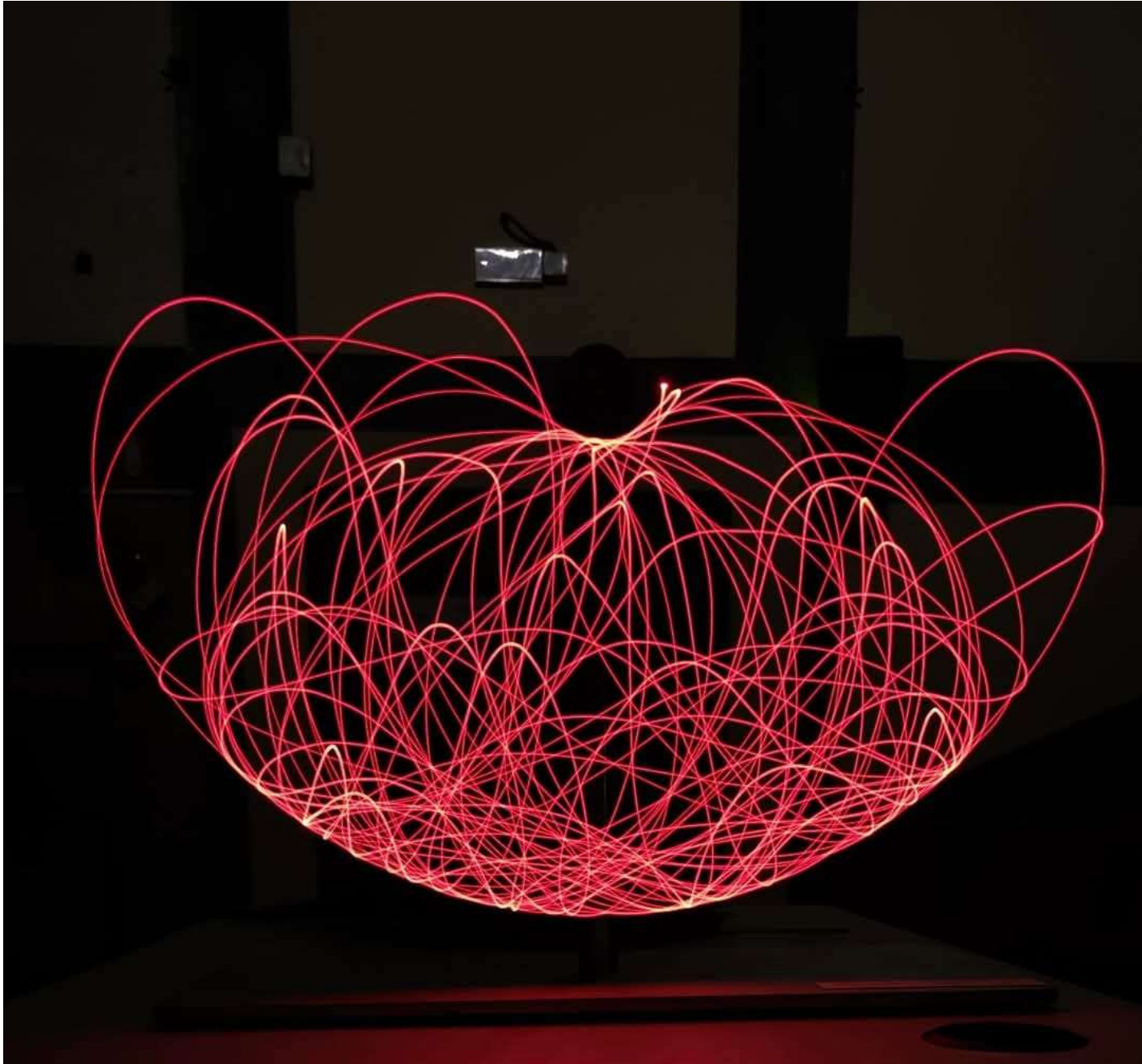
Video 1479552



Video 8d8be009

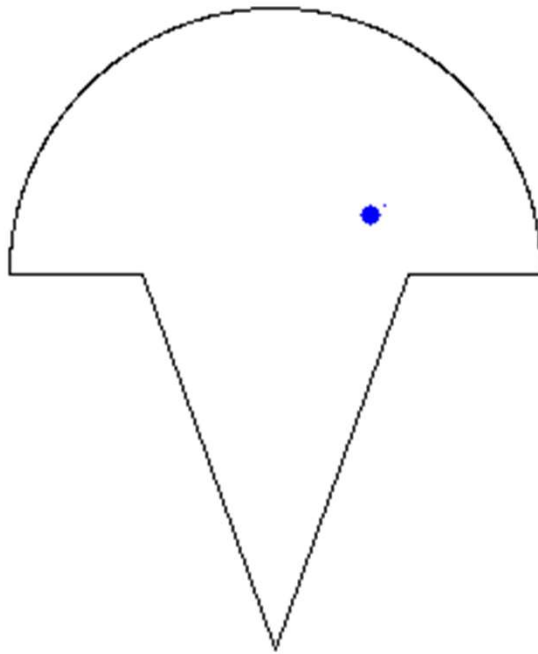


Il pendolo doppio



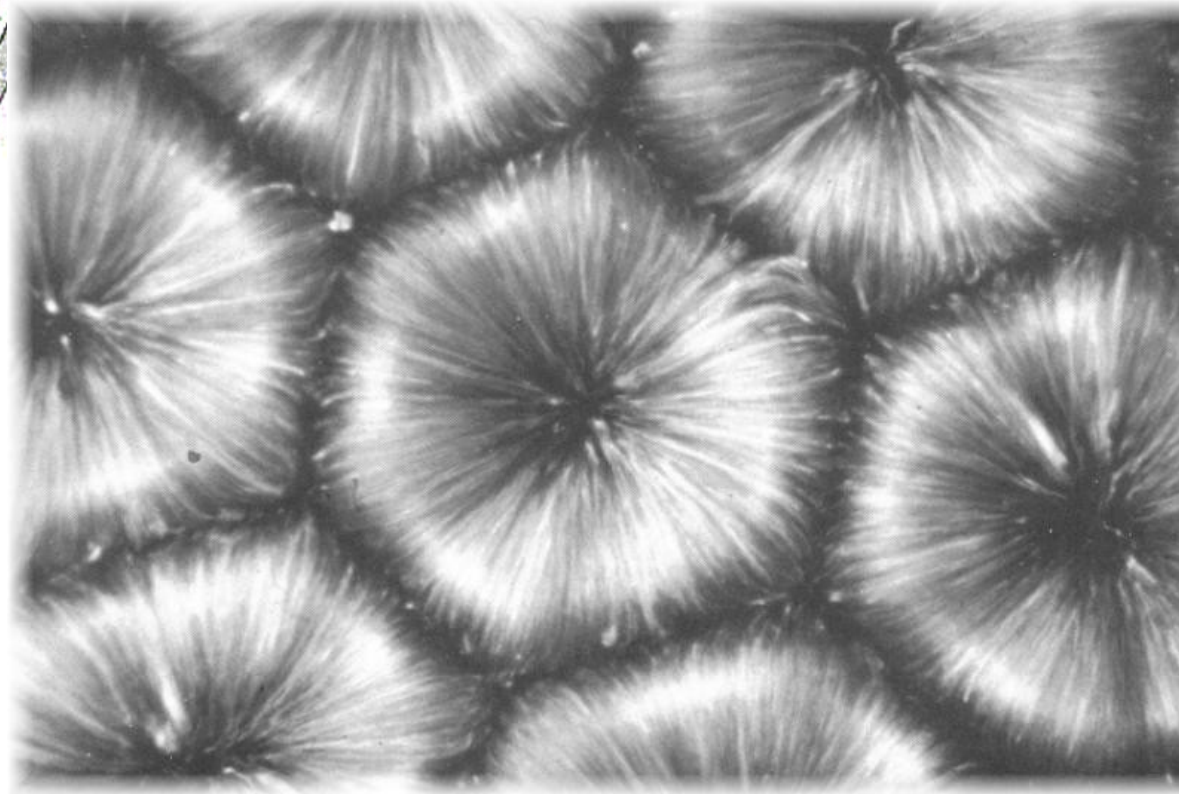
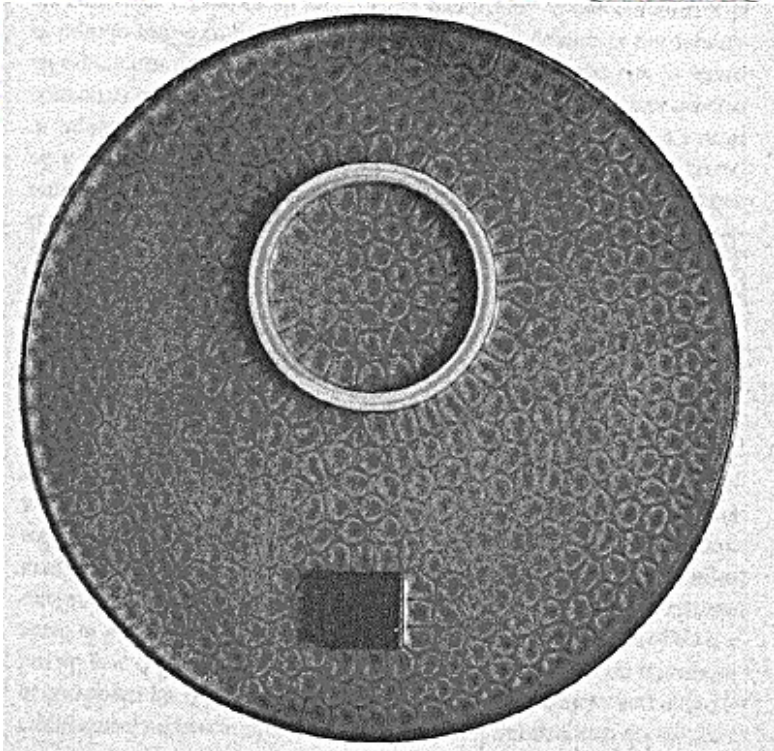
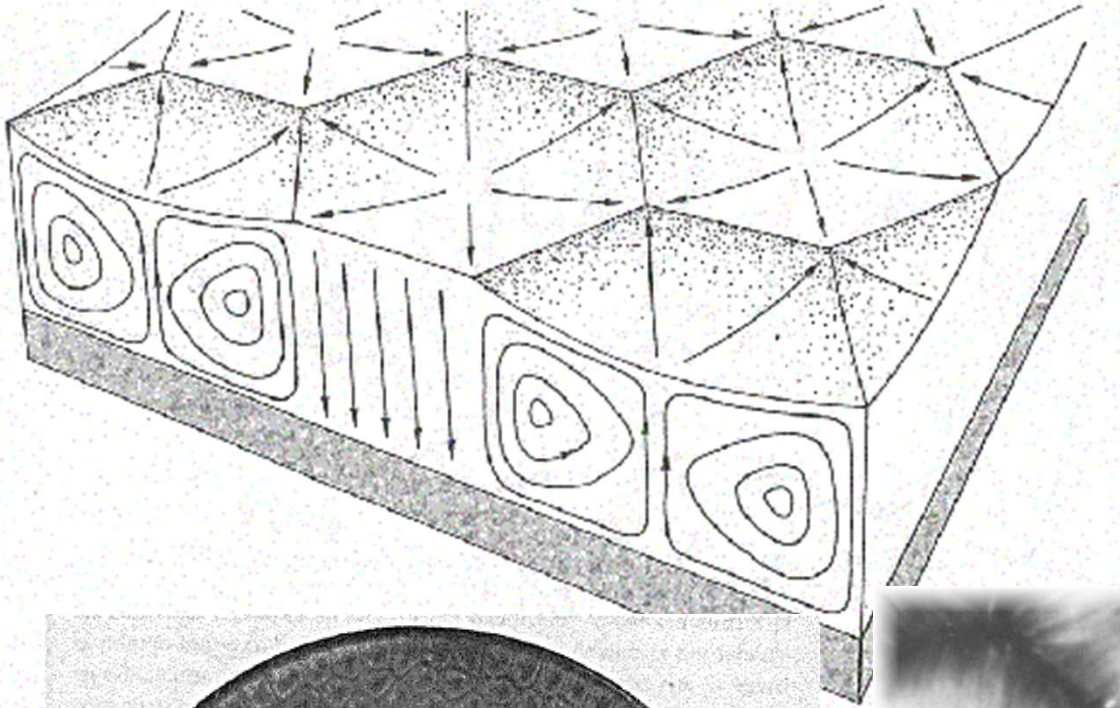
Biliardo

sensibilità alle condizioni iniziali ($\Delta\phi = 0.5\%$)

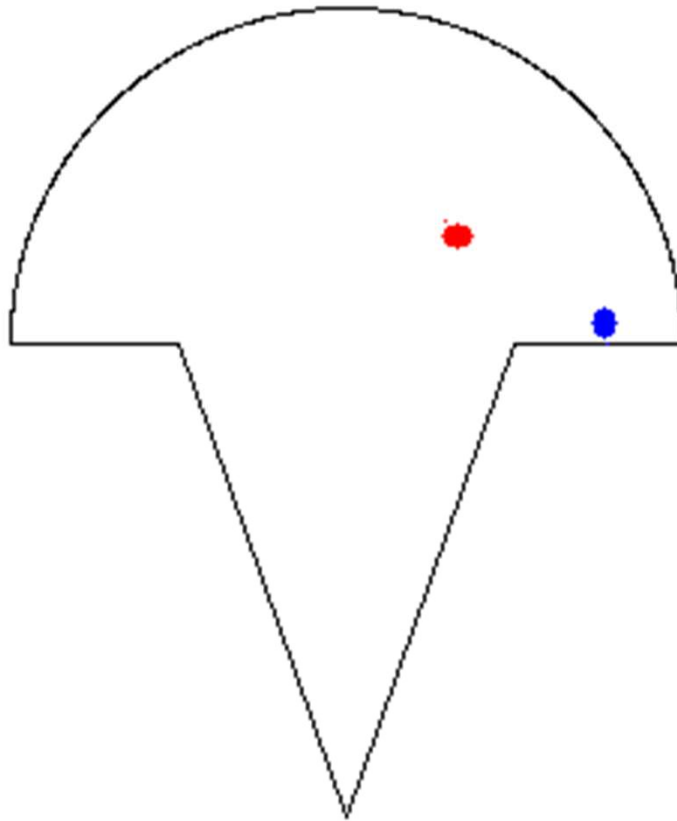


<http://www.mpipks-dresden.mpg.de/mpi-doc/kantzgruppe/wiki/Visual.html>

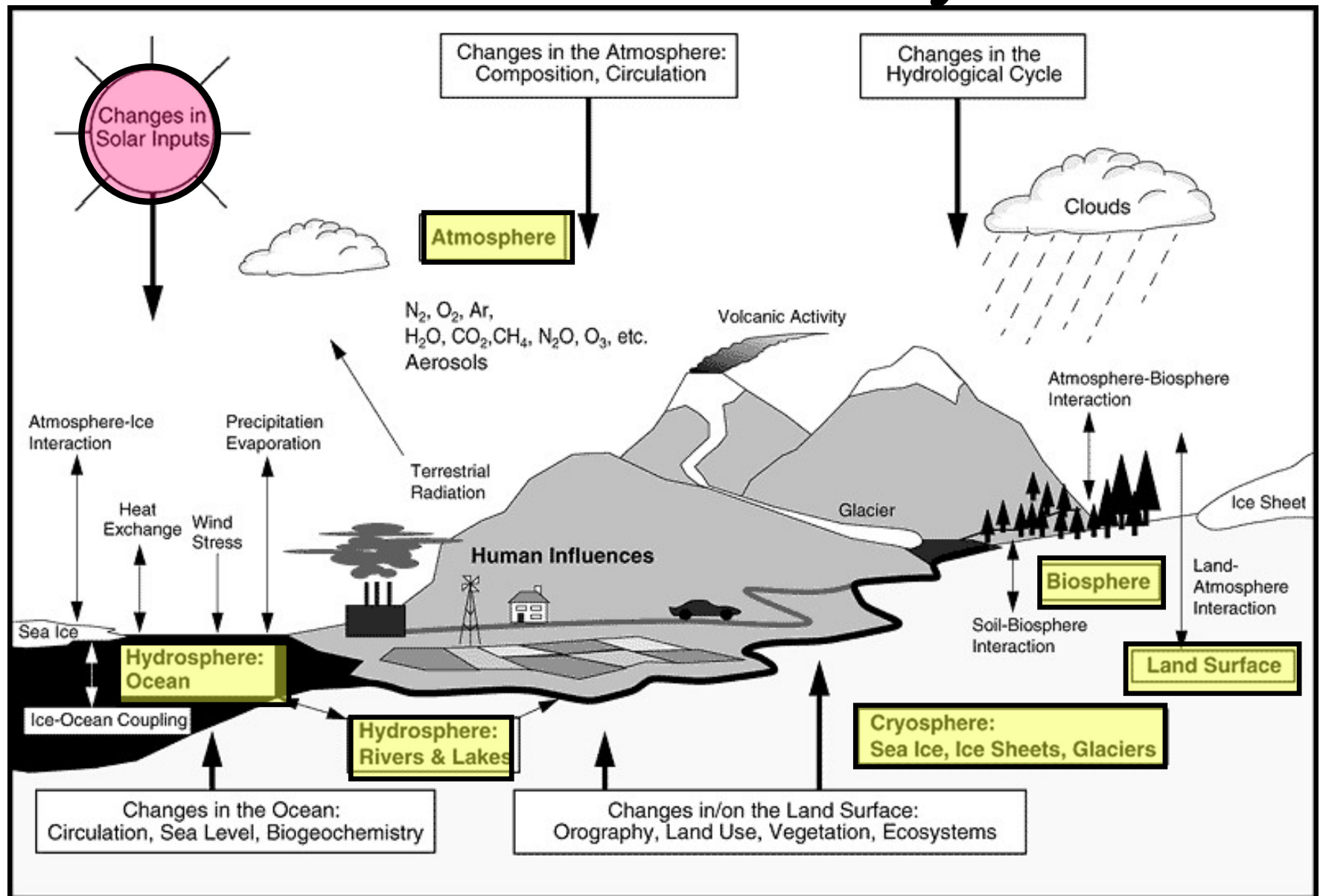
Convezione (Benard)



Biliardo ordine



The Global Climate System



caratteristiche del sistema climatico:

- 1) diversi sottosistemi con:
diversi scale spazio-temporali,
diverse metodologie di studio,
diversi livelli di conoscenza;
- 2) interazioni tra sottosistemi:
difficilmente osservabili,
poco studiate,
- 3) necessità di tempi “sperimentali” lunghi;
- 4) sistema caotico.

Pubblicità



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SECOND CYCLE DEGREE/TWO YEAR MASTER IN
SCIENCE OF CLIMATE



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

LAUREA MAGISTRALE IN
FISICA DEL SISTEMA TERRA



PHD PROGRAMME

FUTURE EARTH, CLIMATE CHANGE AND SOCIETAL CHALLENGES

IT

EN

*The key to gaining a better understanding of the **global environment** is exploring how the Earth's systems of air, land, water, and life interact with each other, **blending together** fields like meteorology, oceanography, biology, and atmospheric sciences*

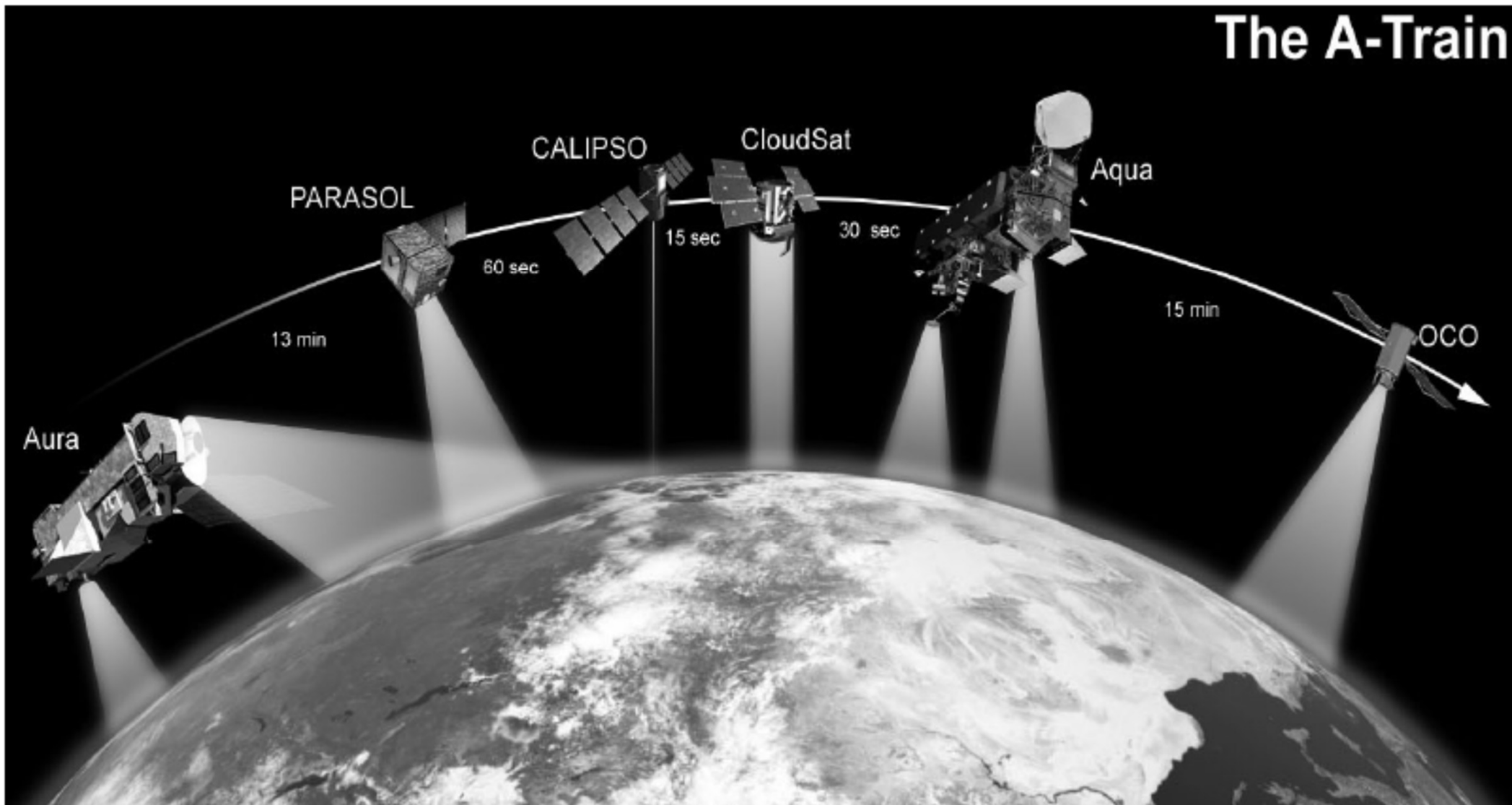
1991: Earth Science Enterprise

1999: Earth Observing System



*EOS will observe the key physical variables needed to advance understanding of the entire Earth system and develop a **deeper comprehension** of the **components** of that system and the **interactions** among the components*

The A-Train



24 EOS Measurements



ATMOSPHERE

Cloud Properties
(amount, optical properties, height)

MODIS, GLAS, AMSR-E, MISR, AIRS, ASTER, SAGE III

Radiative Energy Fluxes
(top of atmosphere, surface)

CERES, ACRIM III, MODIS, AMSR-E, GLAS, MISR, AIRS, ASTER, SAGE III

Precipitation

AMSR-E

Tropospheric Chemistry
(ozone, precursor gases)

TES, MOPITT, SAGE III, MLS, HIRDLS, LIS

Stratospheric Chemistry
(ozone, ClO, BrO, OH, trace gases)

MLS, HIRDLS, SAGE III, OMI, TES

Aerosol Properties
(stratospheric, tropospheric)

SAGE III, HIRDLS
MODIS, MISR, OMI, GLAS

Atmospheric Temperature

AIRS/AMSU-A, MLS, HIRDLS, TES, MODIS

Atmospheric Humidity

AIRS/AMSU-A/HSB, MLS, SAGE III, HIRDLS, Poseidon 2/JMR/DORIS, MODIS, TES

Lightning
(events, area, flash structure)

LIS

SOLAR RADIATION

Total Solar Irradiance

ACRIM III, TIM

Solar Spectral Irradiance

SIM, SOLSTICE

24 EOS Measurements



LAND	Land Cover & Land Use Change	ETM+, MODIS, ASTER, MISR
	Vegetation Dynamics	MODIS, MISR, ETM+, ASTER
	Surface Temperature	ASTER, MODIS, AIRS, AMSR-E, ETM+
	Fire Occurrence (extent, thermal anomalies)	MODIS, ASTER, ETM+
	Volcanic Effects (frequency of occurrence, thermal anomalies, impact)	MODIS, ASTER, ETM+, MISR
	Surface Wetness	AMSR-E
OCEAN	Surface Temperature	MODIS, AIRS, AMSR-E
	Phytoplankton & Dissolved Organic Matter	MODIS
	Surface Wind Fields	SeaWinds, AMSR-E, Poseidon 2/JMR/DORIS
	Ocean Surface Topography (height, waves, sea level)	Poseidon 2/JMR/DORIS

24 EOS Measurements



CRYOSPHERE

Land Ice

(ice sheet topography, ice sheet volume change, glacier change)

GLAS, ASTER, ETM+

Sea Ice

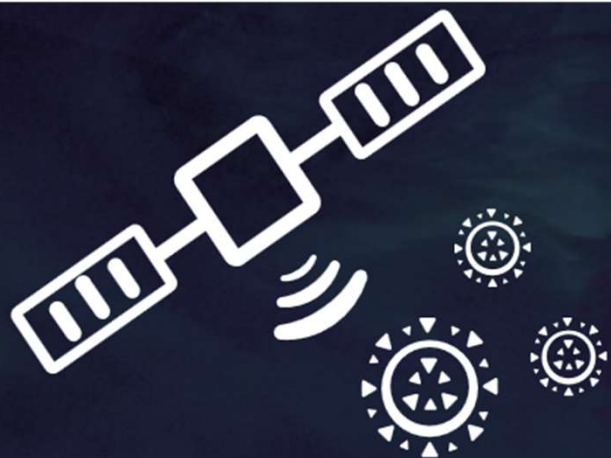
(extent, concentration, motion, temperature)

AMSR-E, Poseidon 2/JMR/DORIS, MODIS, ETM+, ASTER

Snow Cover

(extent, water equivalent)

MODIS, AMSR-E, ASTER, ETM+



EU Space response to Coronavirus ...>

Copernicus Services



Atmosphere



Marine



Land



Climate Change



Security



Emergency



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



Studio e previsioni dello stato del sistema

*Federico Porcù (federico.porcu@unibo.it)
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Università di Bologna*

un esempio di interazione tra sottosistemi: El nino

forzanti sul sistema climatico (GHG)

proiezioni climatiche

meccanismi di retroazione

una forzatura su una componente del sistema produce un effetto che modifica l'impatto della forzatura

feed back positivo: l'impatto aumenta
instabilità

feed back negativo: l'impatto diminuisce
stabilità

feed back negativo

aumento di T $\Rightarrow$ aumento di wv $\Rightarrow$ aumento di copertura
nubi $\Rightarrow$ aumento albedo planetaria $\Rightarrow$ diminuzione di T

feed back positivo

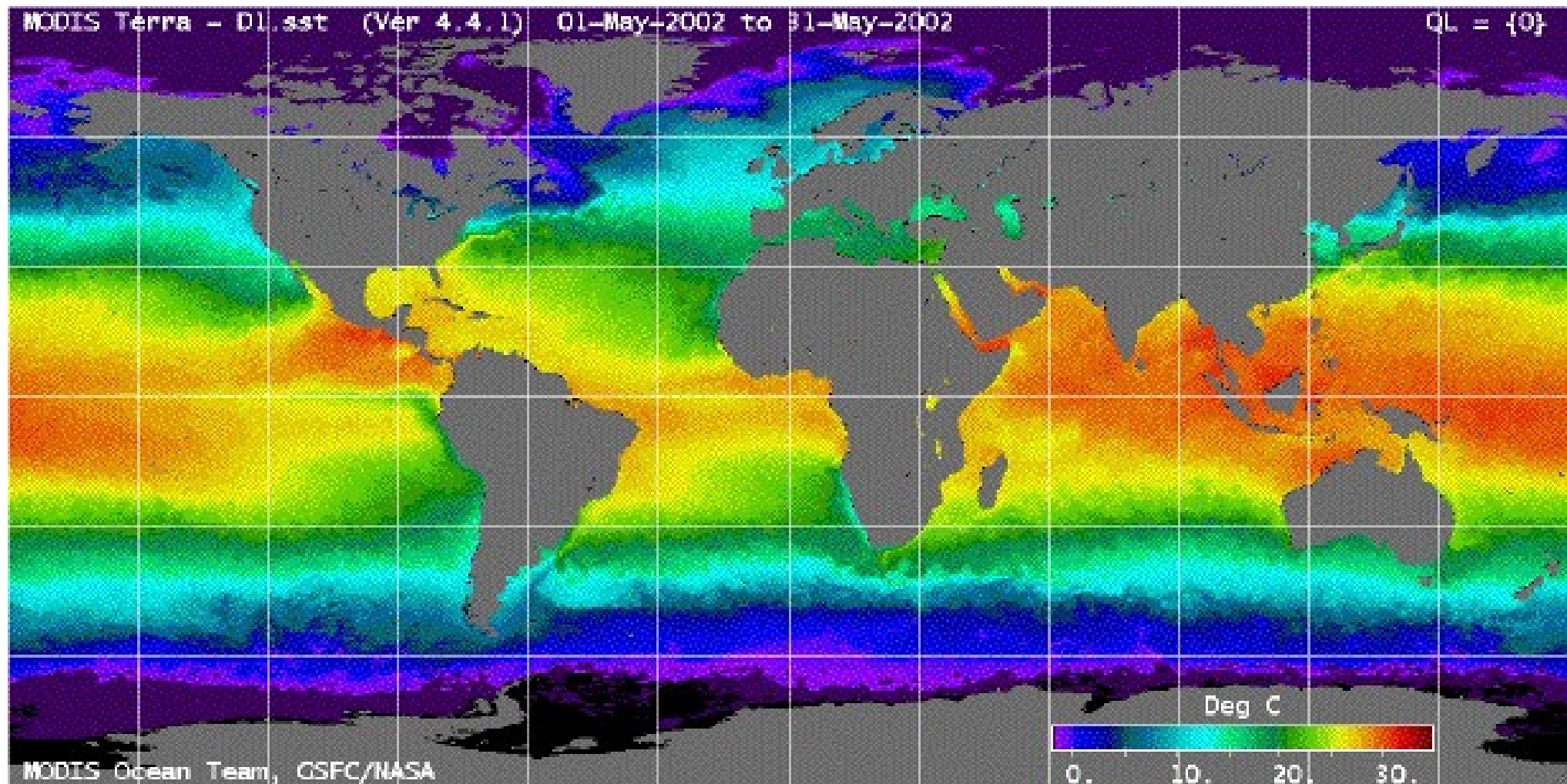
aumento di T $\Rightarrow$ aumento di wv $\Rightarrow$
aumento effetto serra $\Rightarrow$ aumento di T

diminuzione di T $\Rightarrow$ aumento ghiaccio superficiale $\Rightarrow$
aumento di albedo planetaria $\Rightarrow$ diminuzione di T

Interazione Atmosfera/Oceano

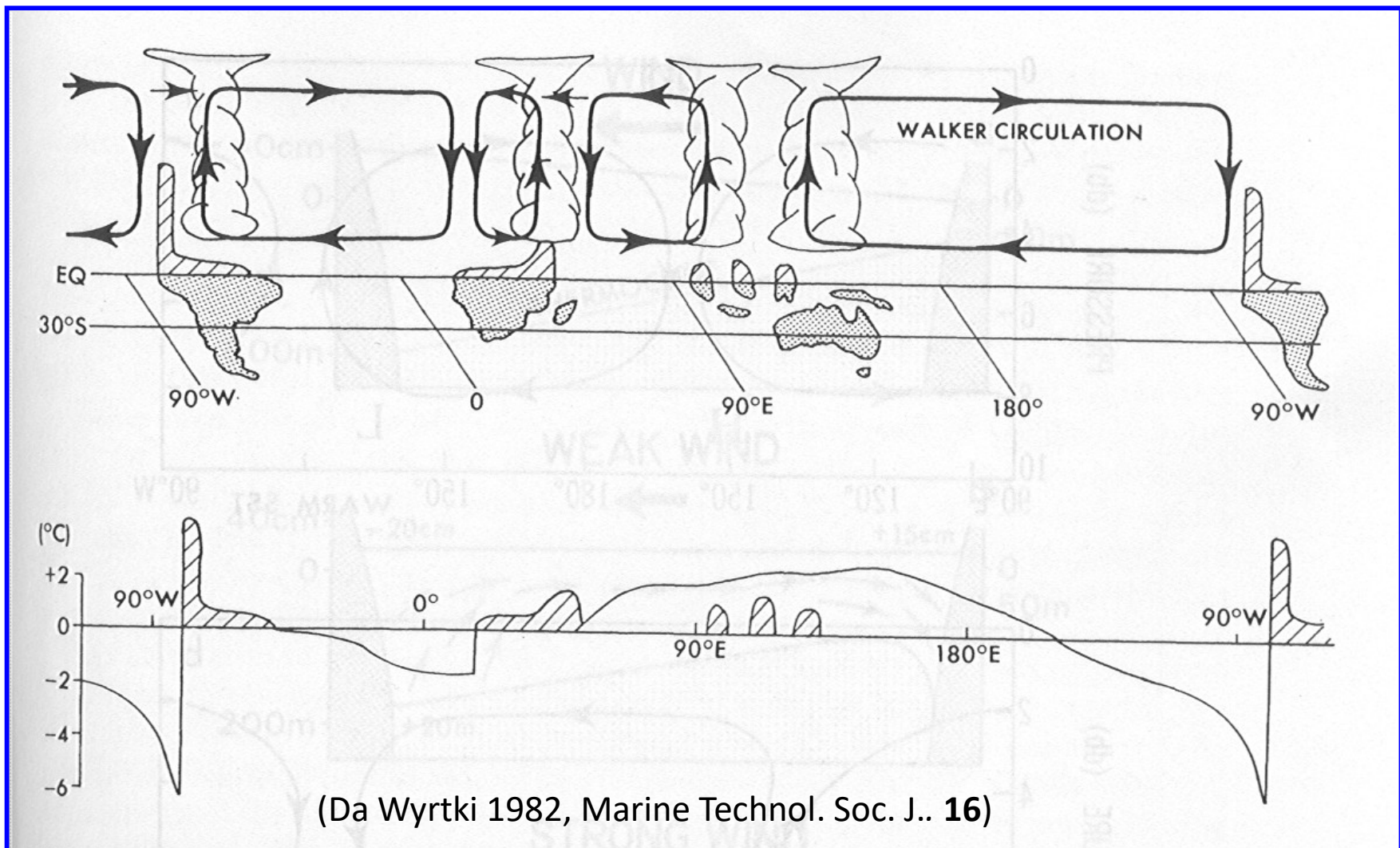
- ❑ l'atmosfera influenza l'oceano principalmente a causa dello stress del vento superficiale;**
- ❑ l'oceano influenza l'atmosfera principalmente a causa di anomalie nella temperatura della sua superficie (*Sea Surface Temperature SST*) e del conseguente flusso verticale di calore sensibile e latente.**

temperatura media oceanica



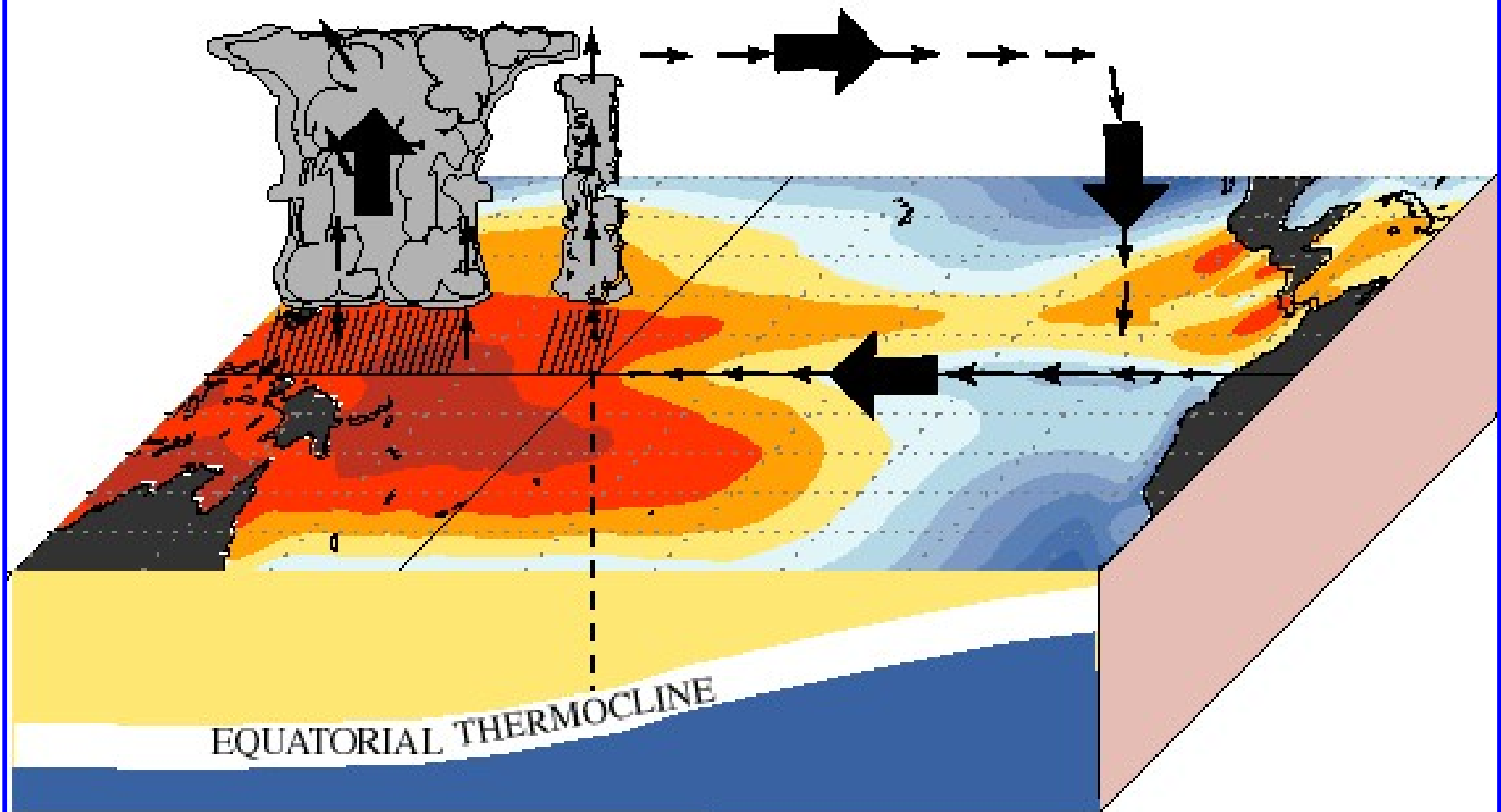
Circolazione Atmosferica Equatoriale

Schema della normale circolazione di Walker lungo l'equatore. Risalita di aria e pioggia insistente sul Indonesia, Pacifico occidentale, Africa sud orientale e Amazzonia, mentre condizioni di scarsa precipitazione nel Pacifico orientale e nell'Africa sud-occidentale. Il grafico in basso mostra inoltre il profilo dell'anomalia di temperatura lungo l'equatore.



Circolazione Atmosferica Equatoriale

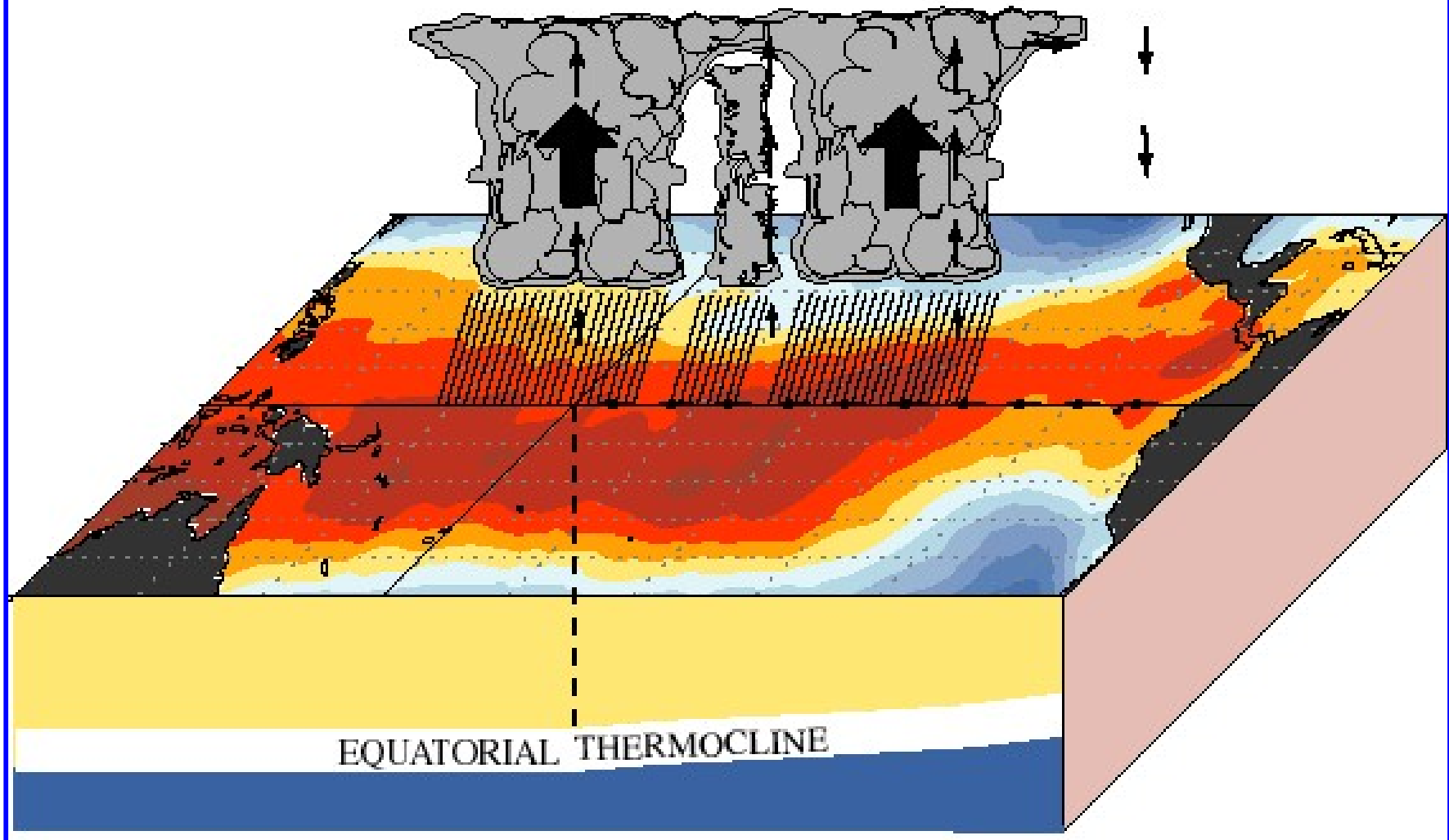
December - February Normal Conditions



Circolazione Atmosferica Equatoriale

Condizione ENSO – El Nino

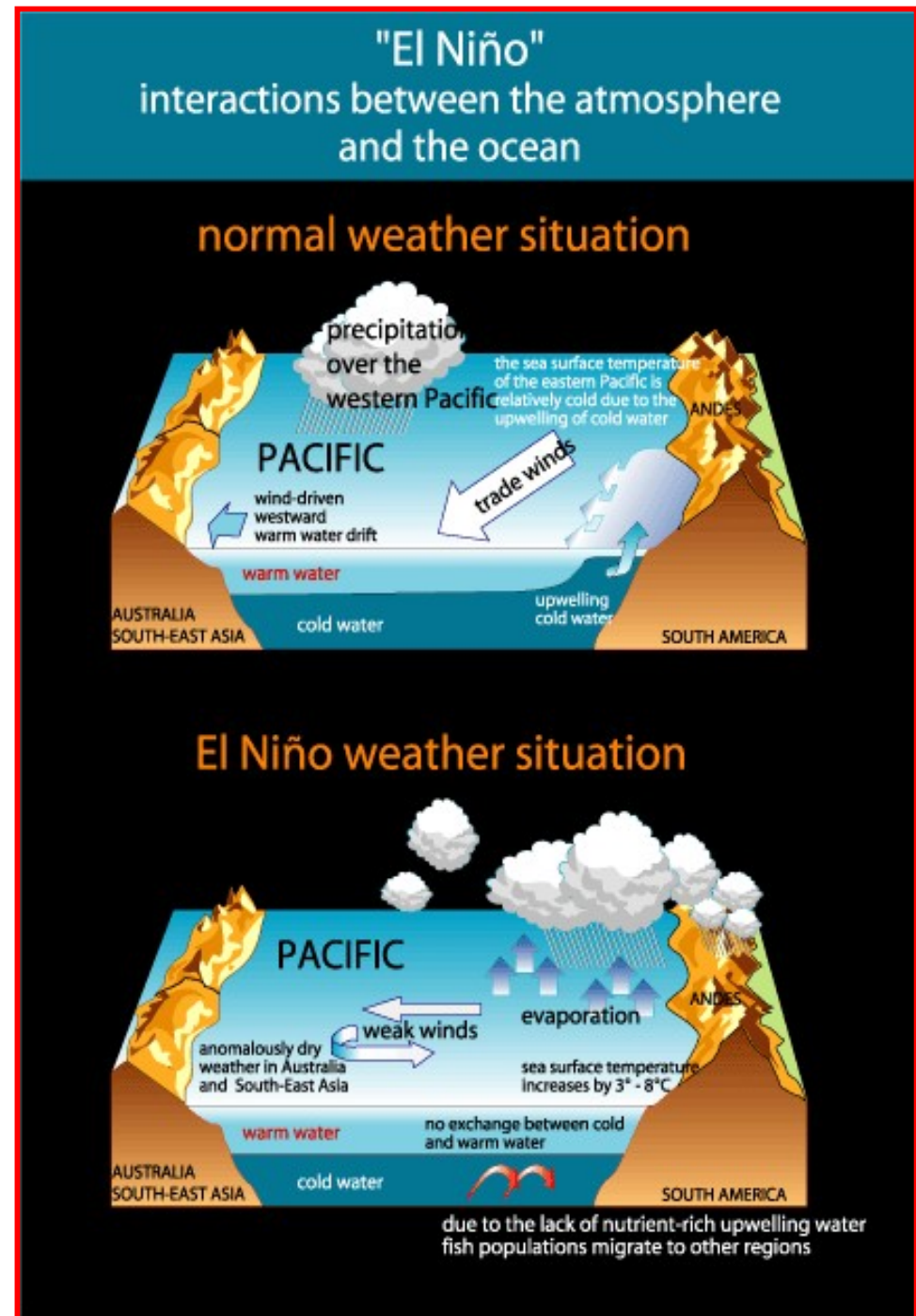
December - February El Niño Conditions



Circolazione Atmosferica Equatoriale - Condizione ENSO

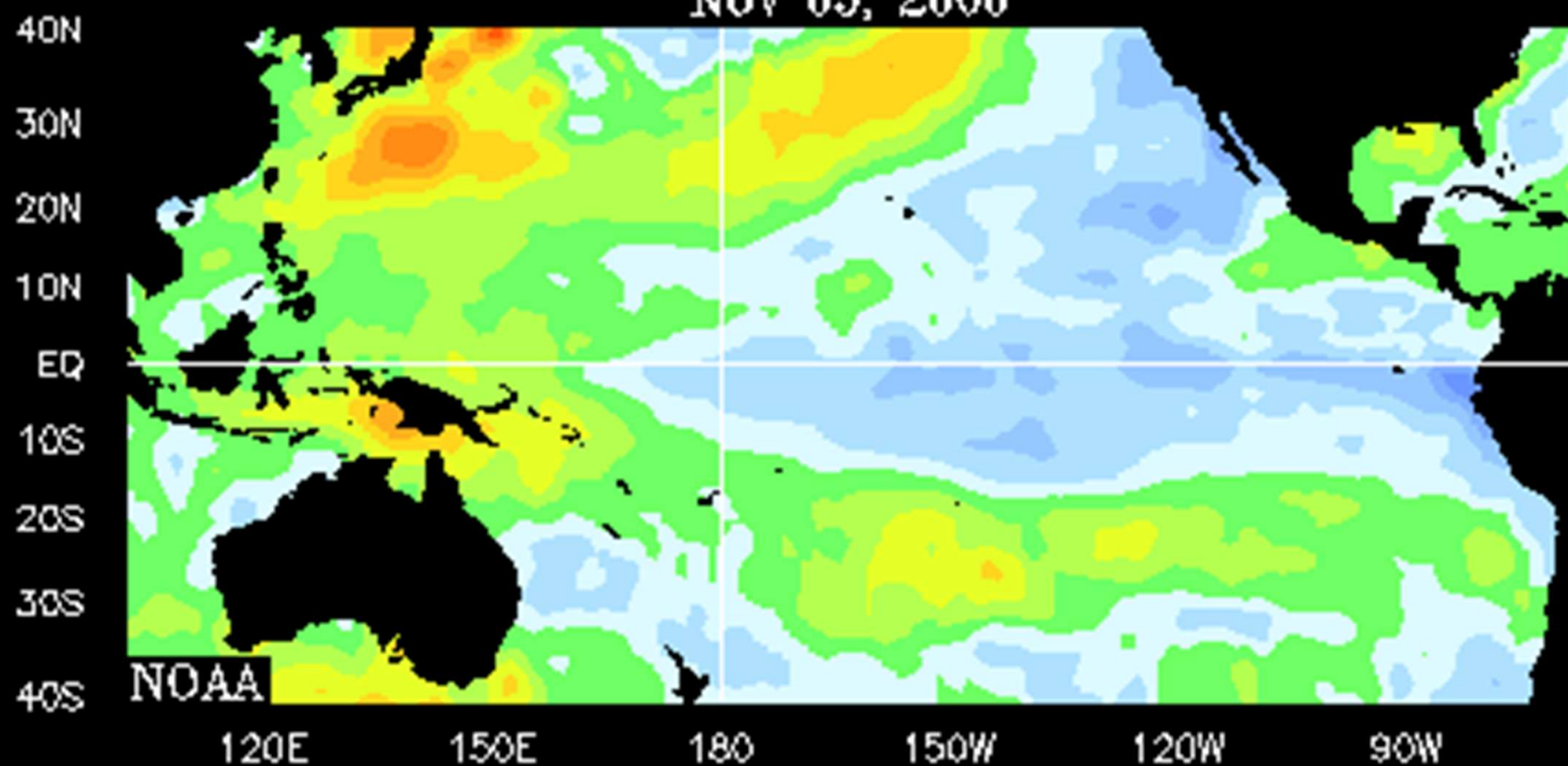
Negli anni “normali” il forte gradiente di temperatura superficiale (freddo a est caldo a ovest) nel Pacifico equatoriale è accompagnato da **forti venti alisei** che spingono le acque superficiali verso ovest permettendo a quelle più fredde e profonde di risalire in superficie. La **risalita delle acque** rafforza a sua volta il gradiente di temperatura superficiale mantenendo gli alisei.

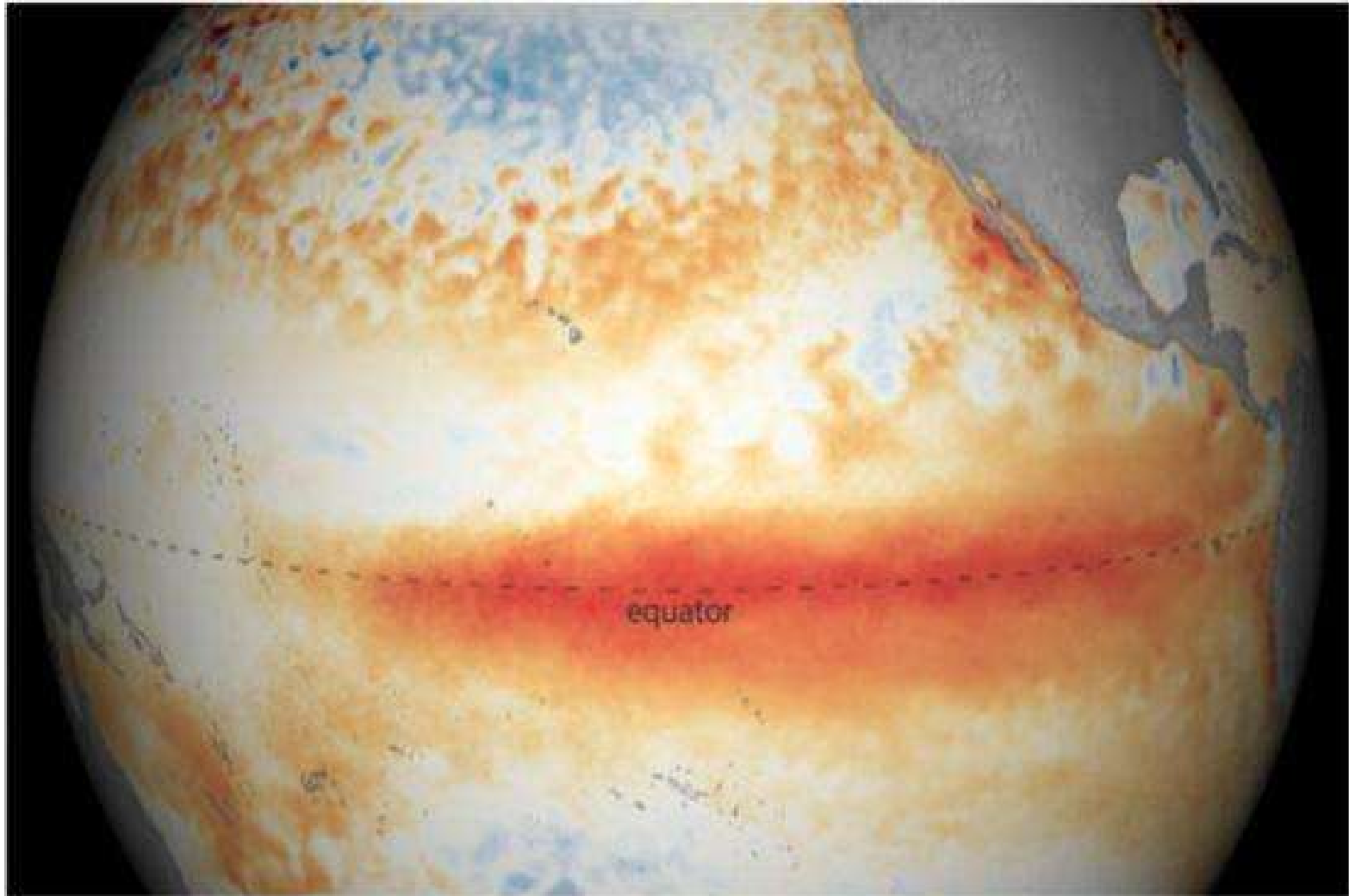
Un **indebolimento degli alisei** nel Pacifico centrale **indebolisce l'upwelling** e fa aumentare la temperatura del Pacifico orientale. Questo fenomeno contribuisce a indebolire ulteriormente gli alisei. Il rafforzarsi vicendevole di questi effetti contribuisce all'instaurarsi di un El Niño.



SST ANOMALIES °C

NOV 05, 2000





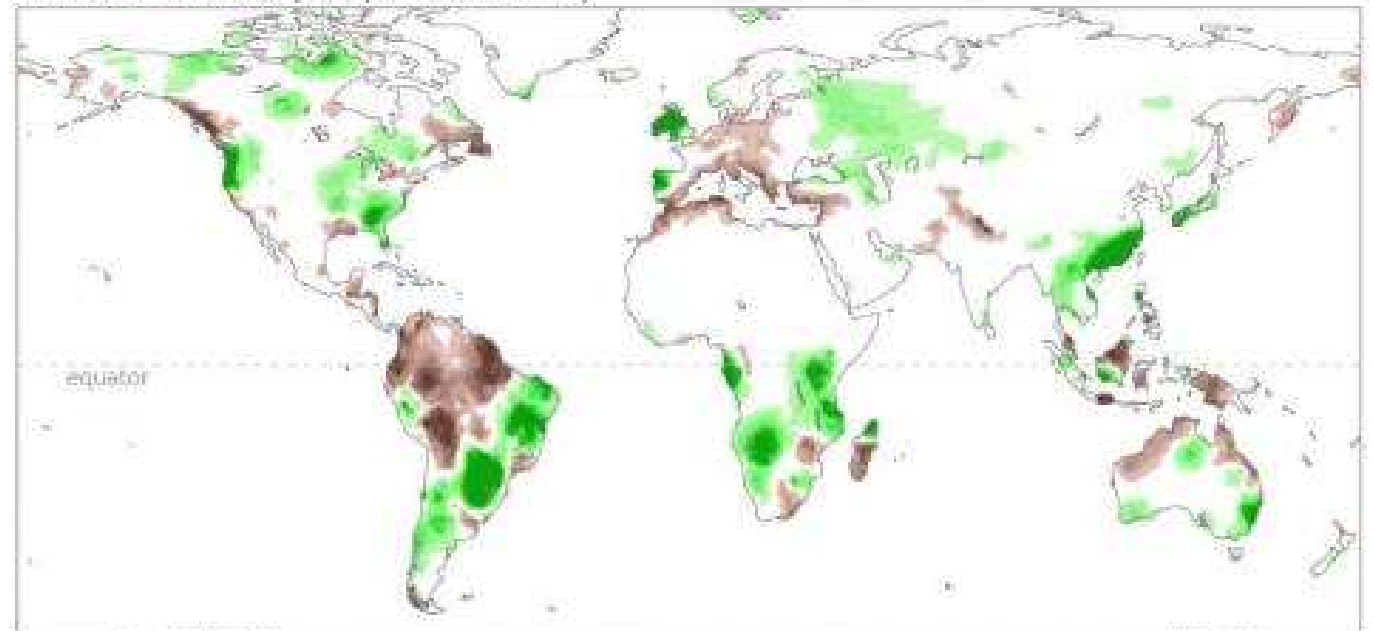
February 2016
compared to 1981-2010

Difference from average temperature (°F)

-9 0 9

Climate.gov/NNVL
Data: Geo-Polar SST

Dec 2015–Feb 2016 precipitation anomaly



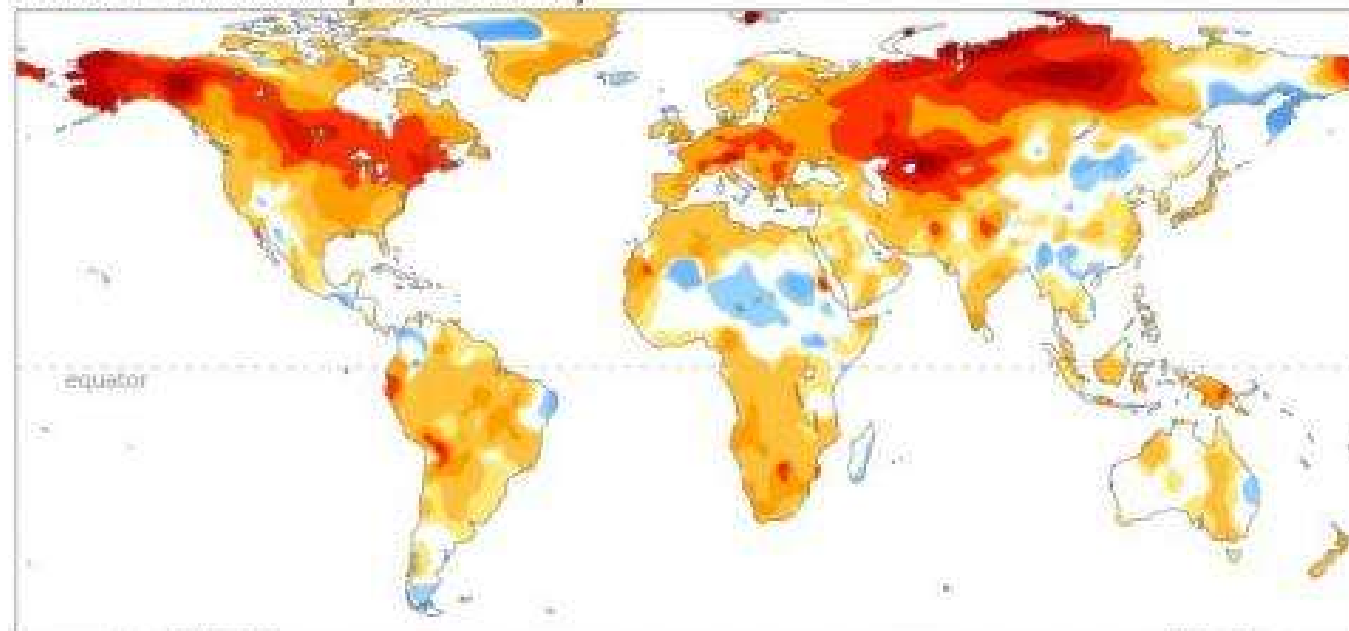
Compared to 1981–2010

Difference from average (mm)

NOAA Climate.gov
Data: CPC



Dec 2015–Feb 2016 temperature anomaly



Compared to 1981–2010

Difference from average temperature ($^{\circ}\text{C}$)

NOAA Climate.gov
Data: CPC



FORZANTI NATURALI

VARIAZIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE

Diretta



Attività Solare

Indiretta



Milankovitch

INTERAZIONI TRA DIVERSE COMPONENTI

El Niño

ERUZIONI VULCANICHE

DERIVA DEI CONTINENTI

FORZANTI ANTROPICHE

IMMISSIONE DI GAS IN ATMOSFERA

IMMISSIONE DI AEROSOL IN ATMOSFERA

SFRUTTAMENTO DEL TERRENO

forzanti - GHG I

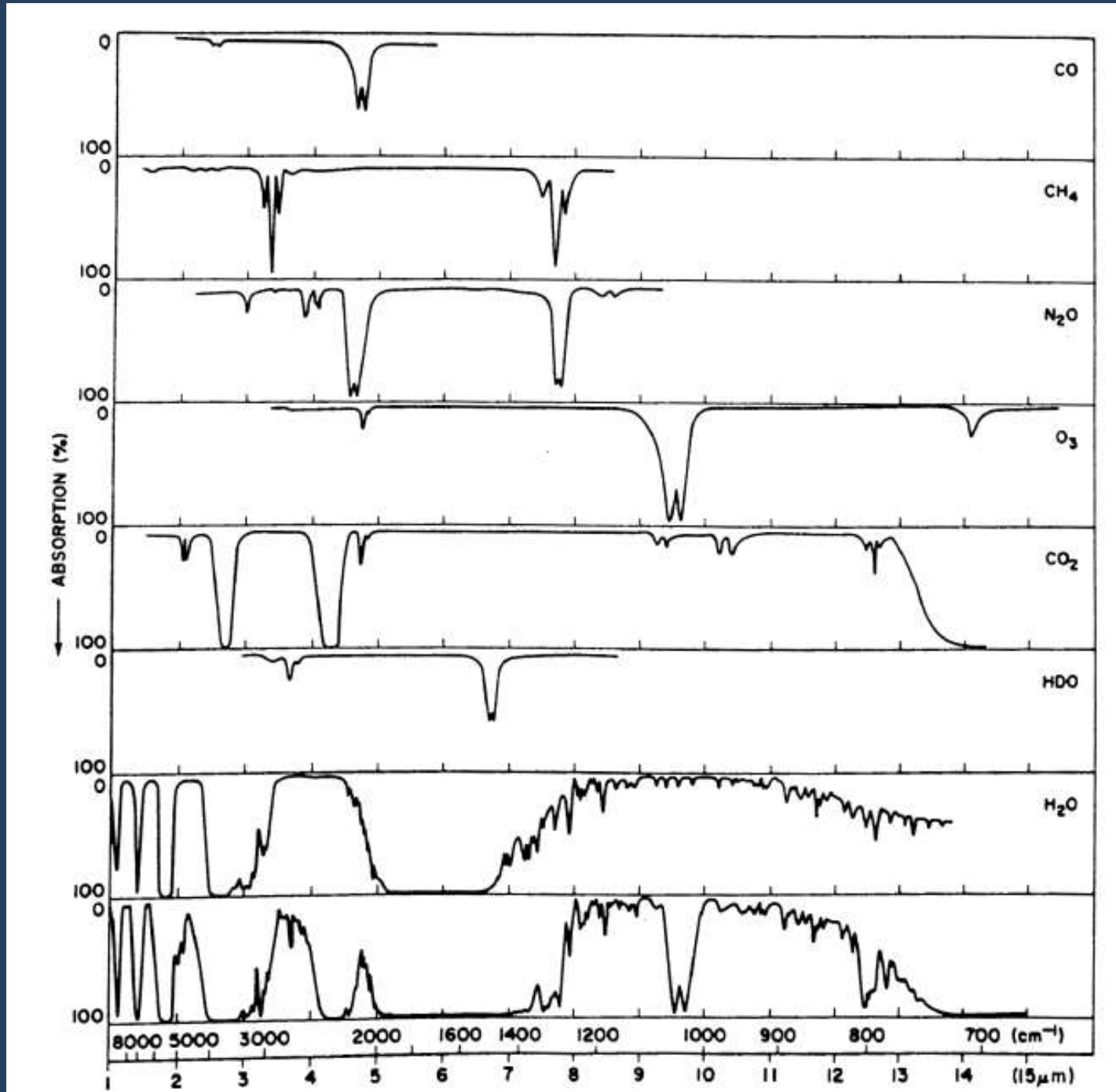
interazione tra radiazione e costituenti atmosferici

Molecule	Structure	Permanent dipole moment	May acquire dipole moment
N ₂	N  —  N	No	No
O ₂	O  —  O	No	No
CO	C  —  O	Yes	Yes
CO ₂	O  —  C —  O	No	Yes (in two vibrational modes)
N ₂ O	N  —  N —  O	Yes	Yes
H ₂ O	 H —  O —  H	Yes	Yes
O ₃	 O —  O —  O	Yes	Yes
CH ₄	 H —  C —  H  H —  H  H —  H	No	Yes (in two vibrational modes)

Peixoto and Oort (1998)

forzanti - GHG II

spettri di assorbimento dei gas atmosferici

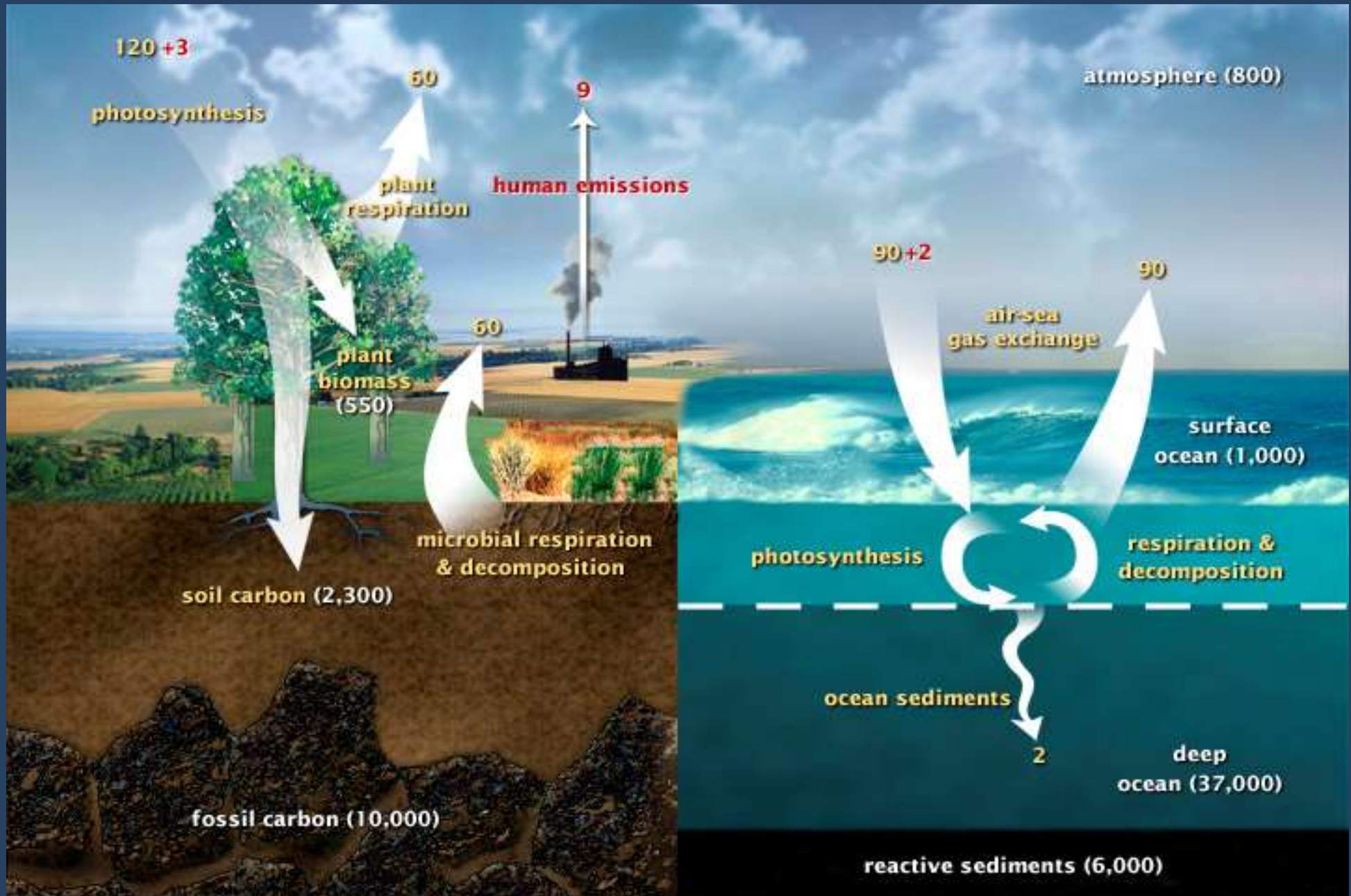


(Valley, 1965)

forzanti - GHG III

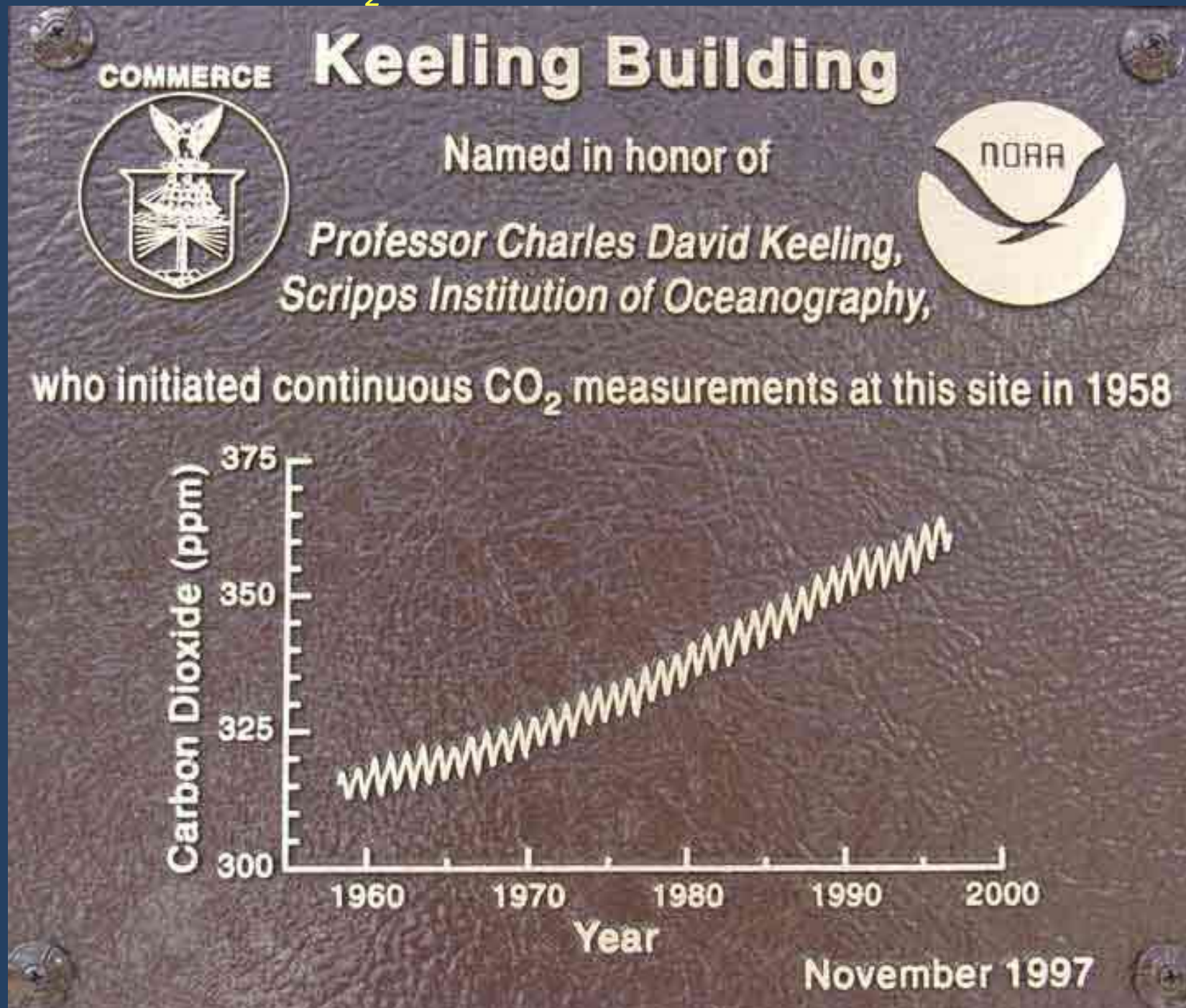
ciclo veloce del carbonio

flussi naturali (GtC/anno) flussi antropici (GtC/anno) riserve (GtC)



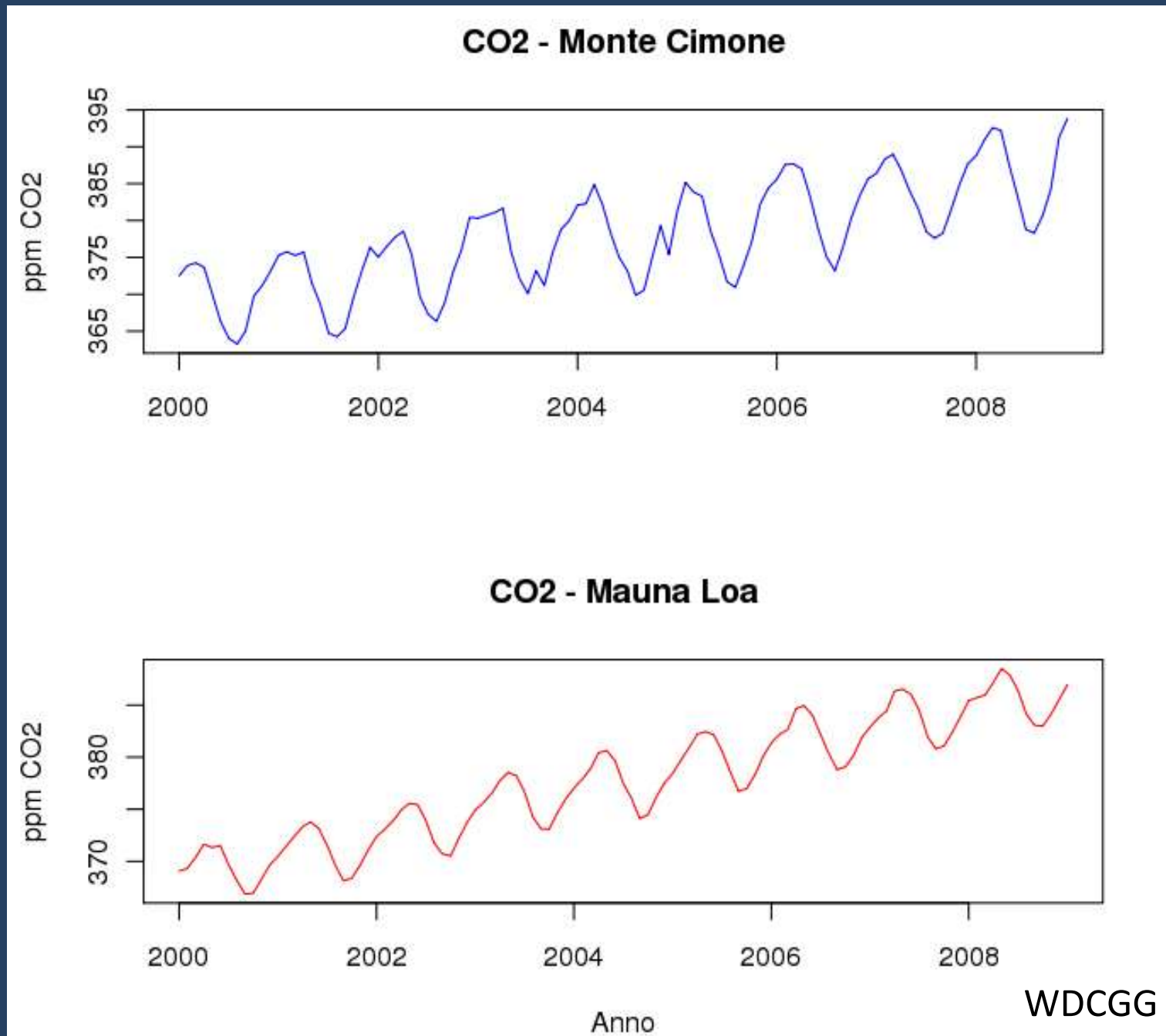
forzanti - GHG IV

misure di contenuto di CO₂



forzanti - GHG V

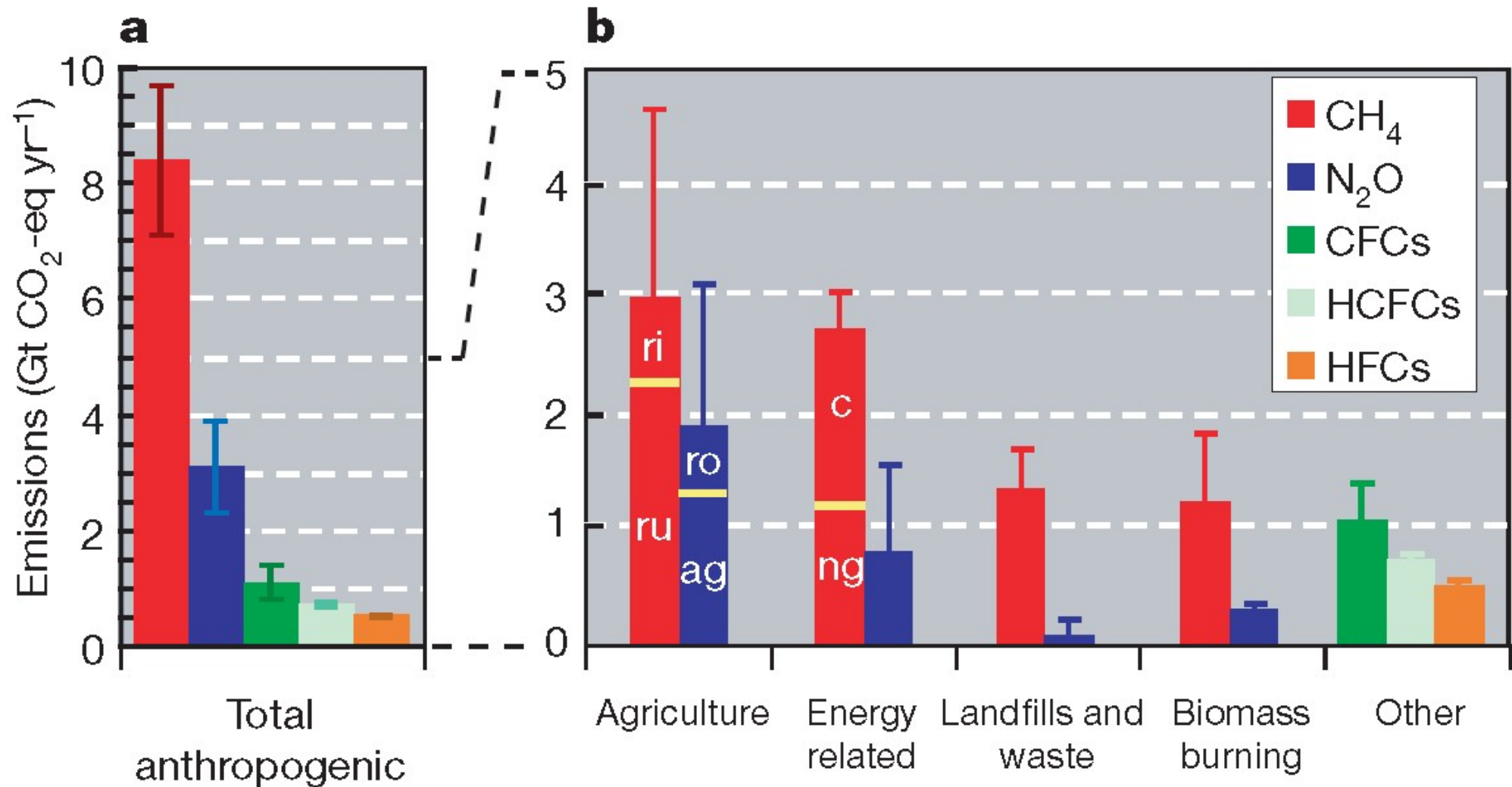
misure di contenuto di CO₂



forzanti - GHG VI

meccanismi di produzione e distruzione di altri GHG

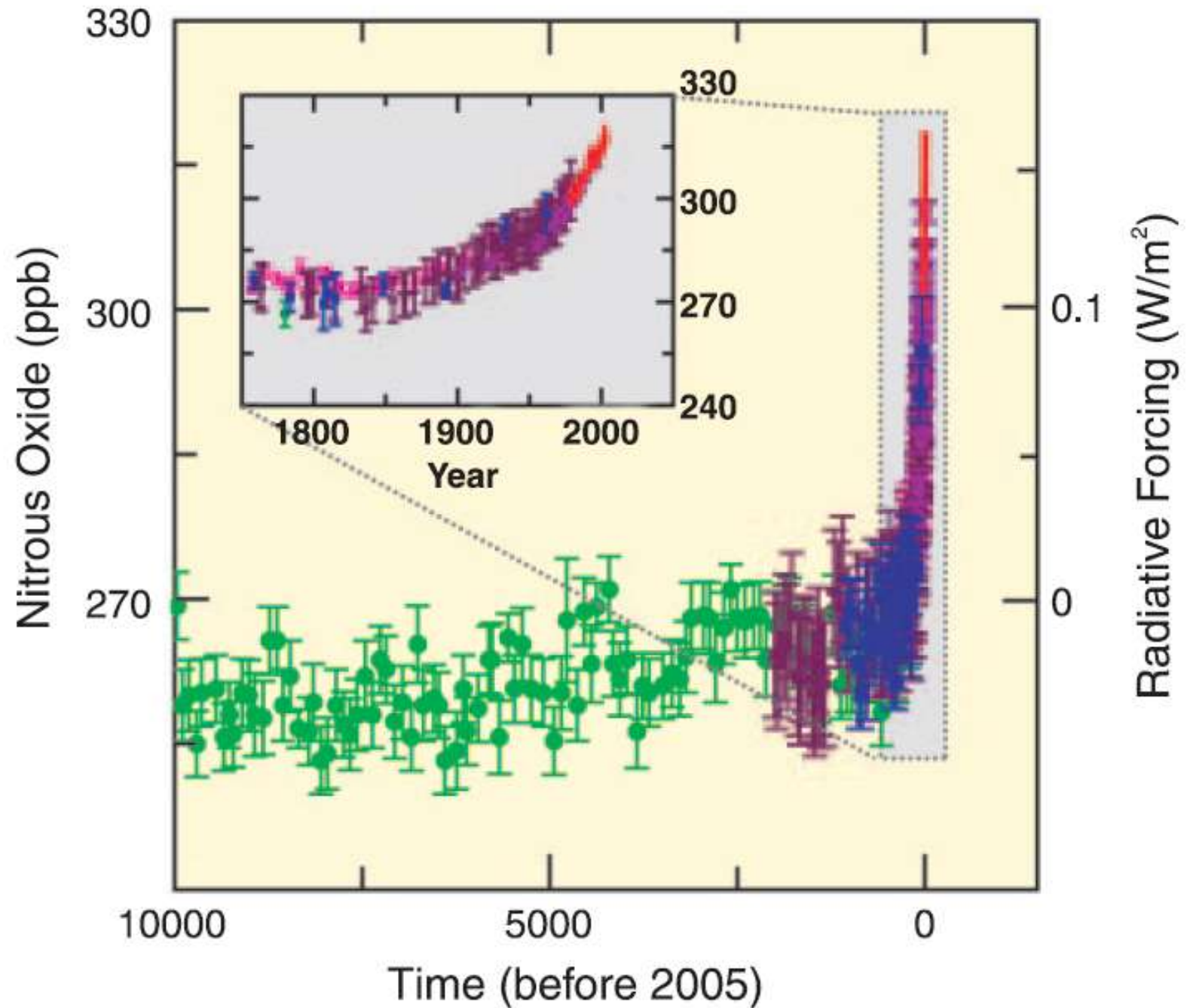
ri: coltivazione del riso; ru: ruminanti; ng: gas naturali; c: miniere
ro: run-off; ag: agricoltura



(Montzka et al, 2011)

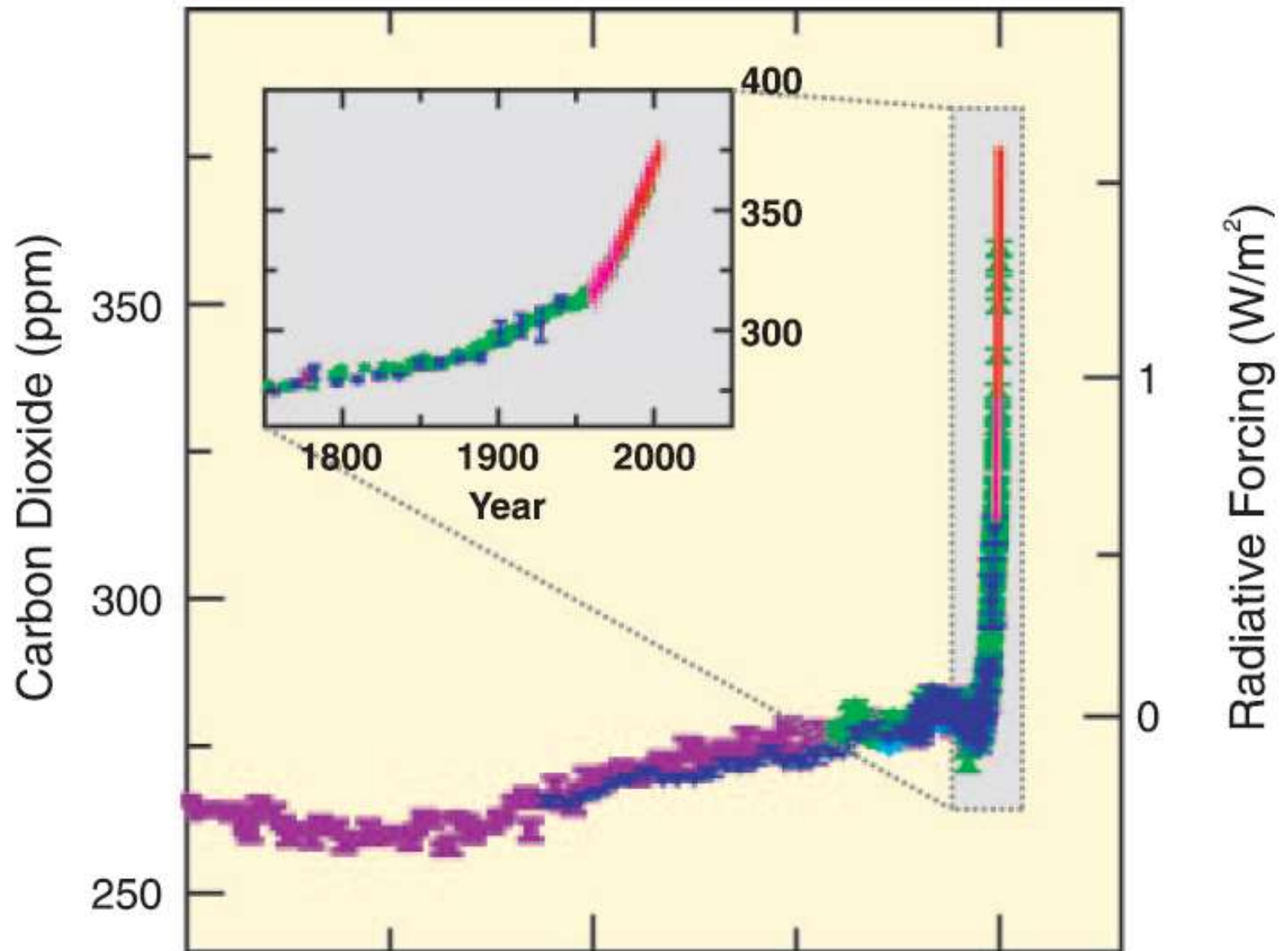
forzanti - GHG VII

record storici (ice cores)



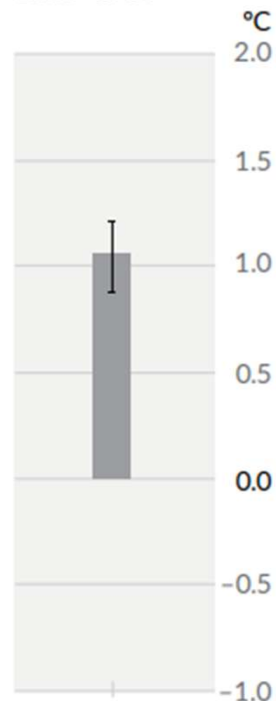
forzanti - GHG VII

record storici (ice cores)



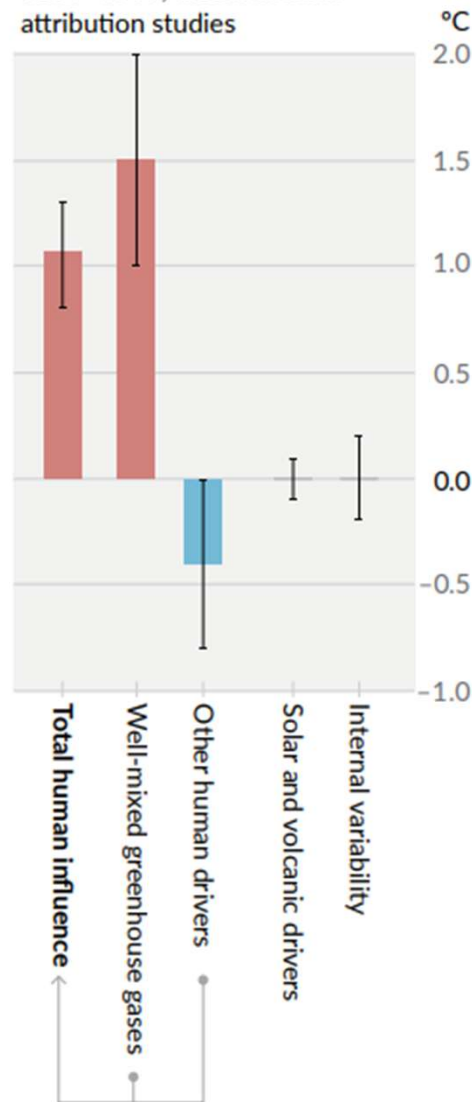
Observed warming

(a) Observed warming 2010–2019 relative to 1850–1900

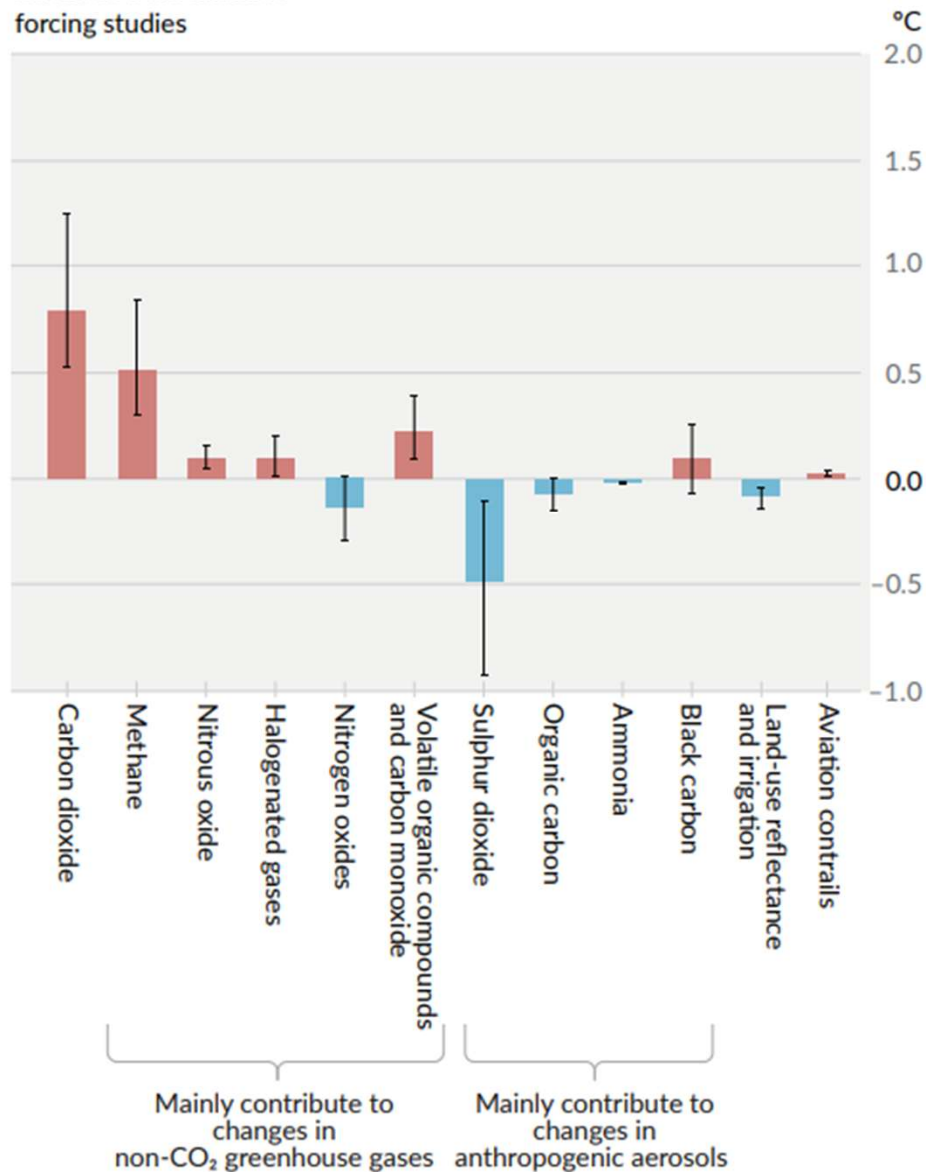


Contributions to warming based on two complementary approaches

(b) Aggregated contributions to 2010–2019 warming relative to 1850–1900, assessed from attribution studies



(c) Contributions to 2010–2019 warming relative to 1850–1900, assessed from radiative forcing studies

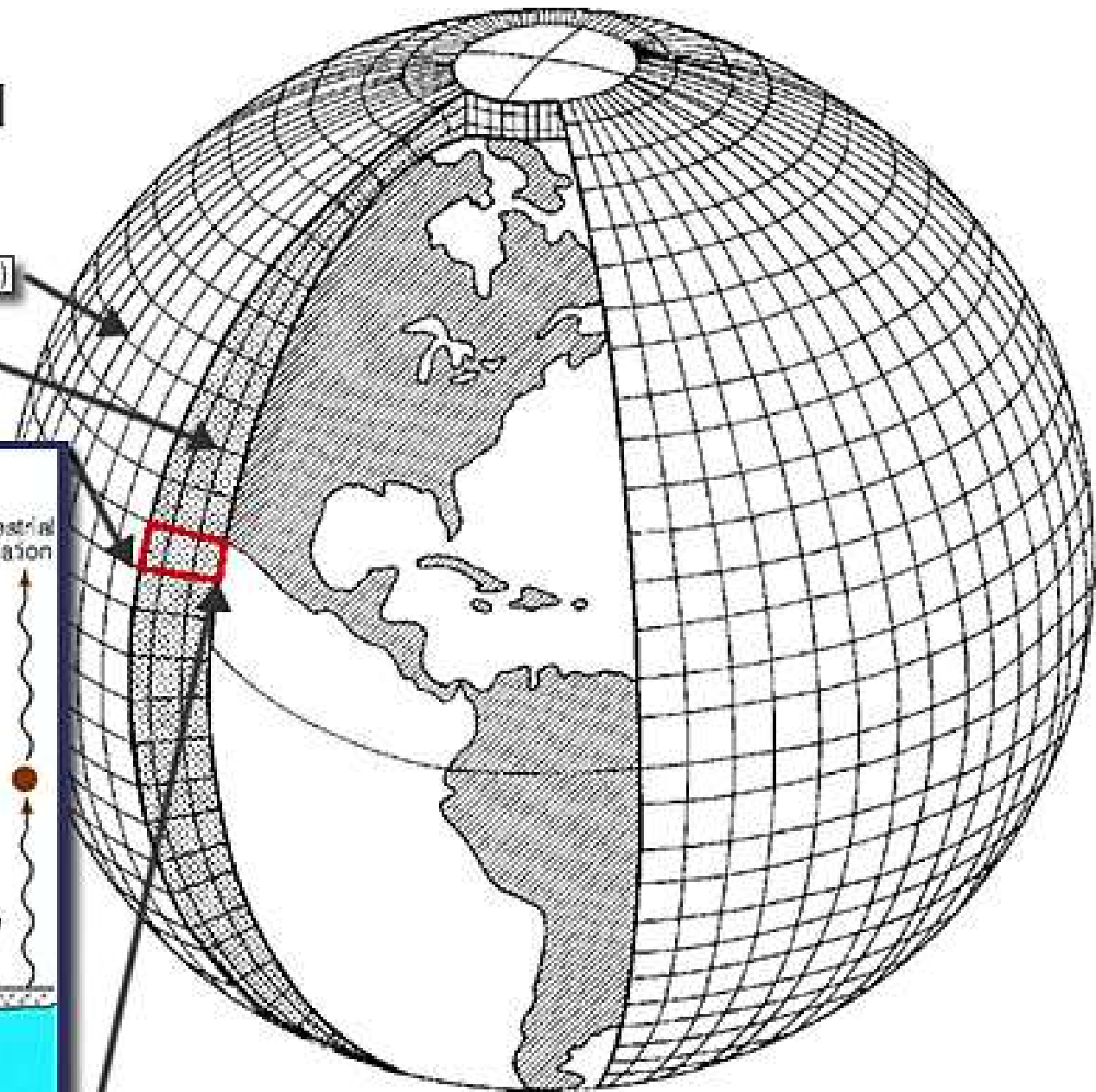
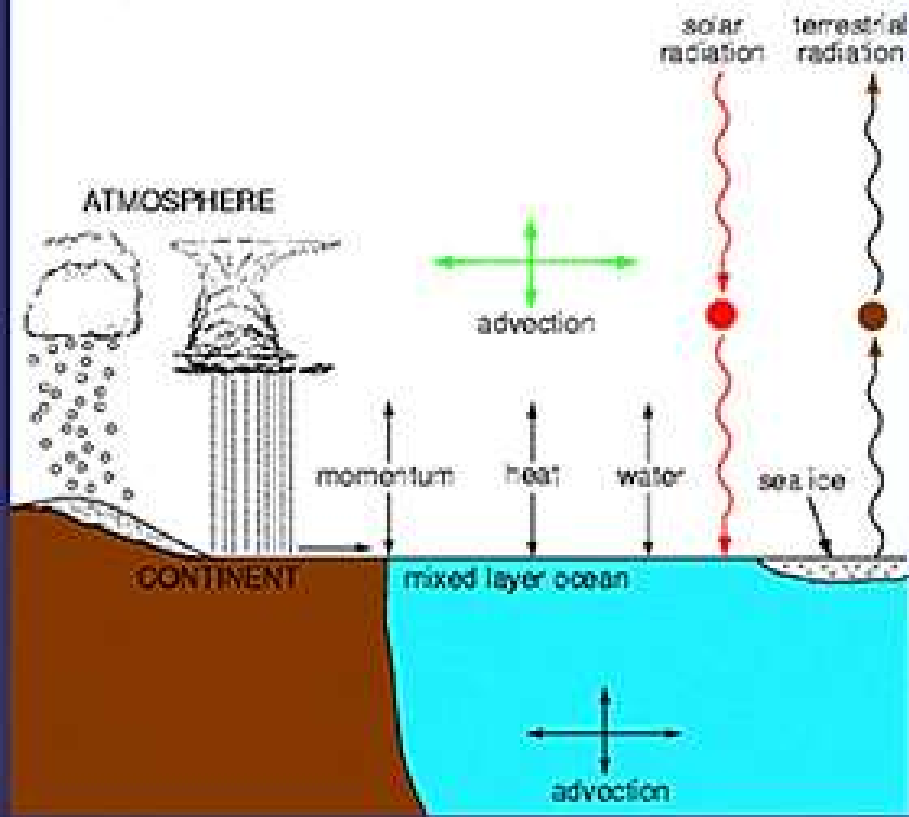


Schematic for Global Atmospheric Model

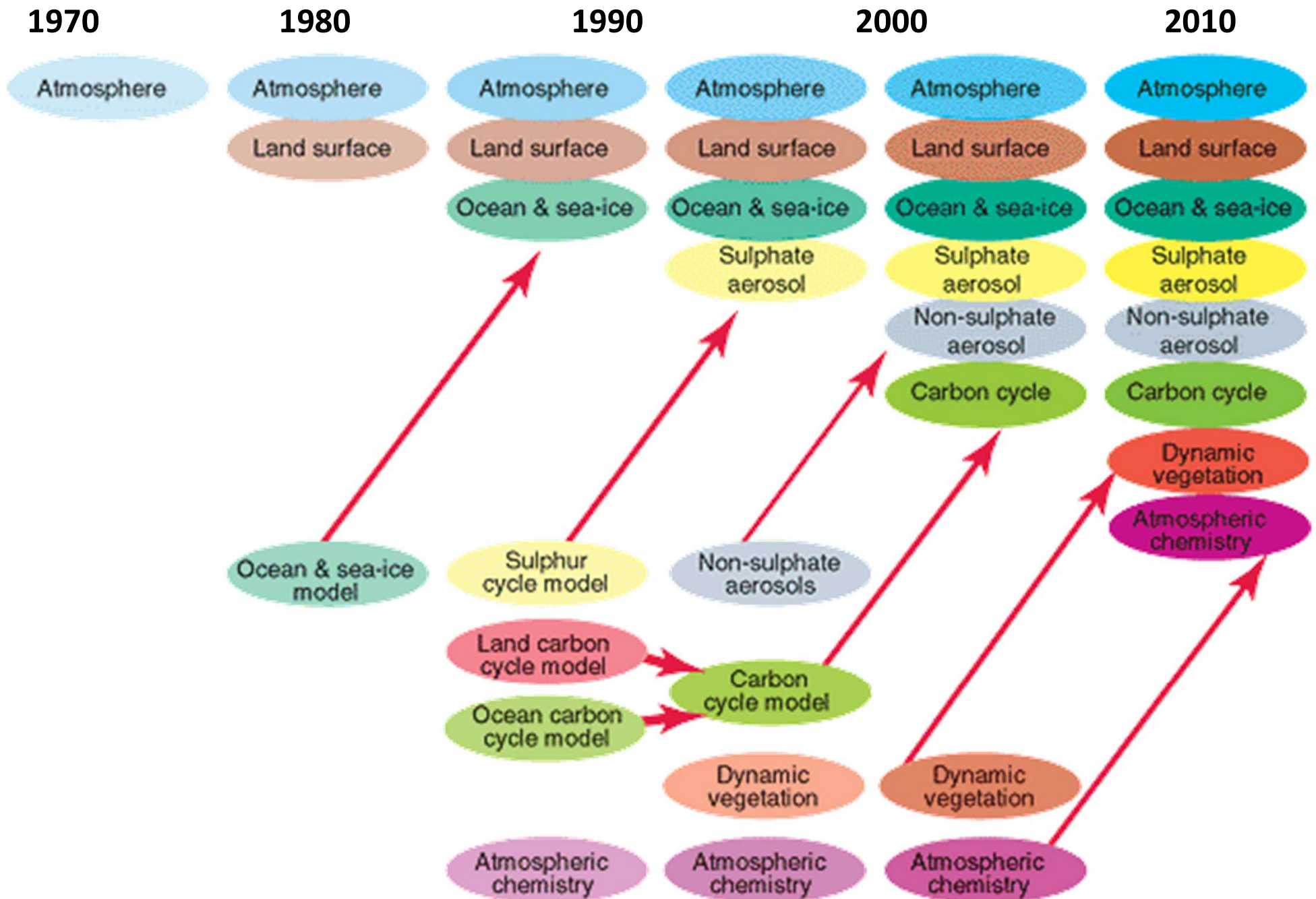
Horizontal Grid (latitude - longitude)

Vertical Grid (height or pressure)

Physical Processes in a Model



evoluzione dei modelli climatici



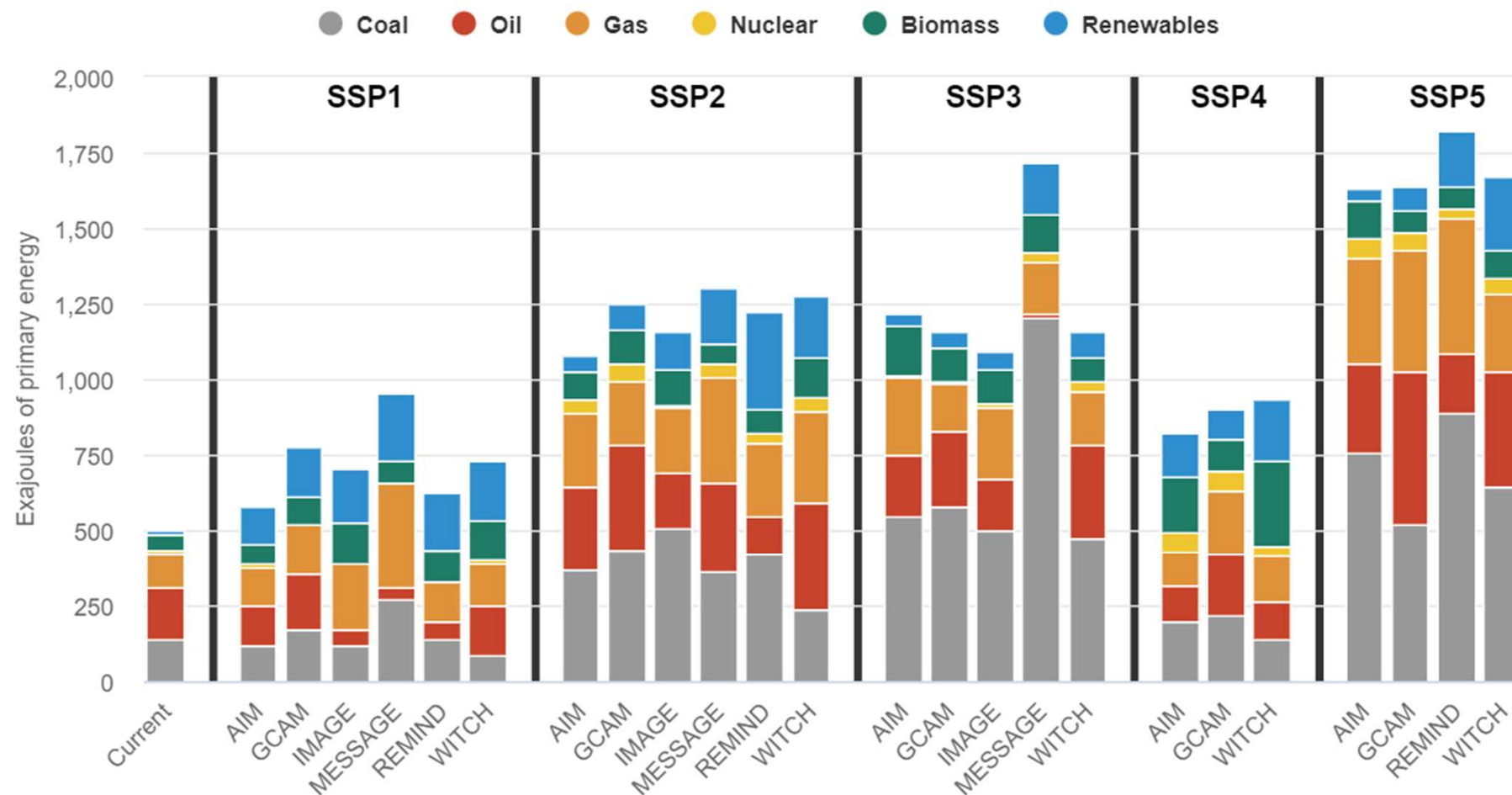
Future Climate Change

Shared Socioeconomic Pathways



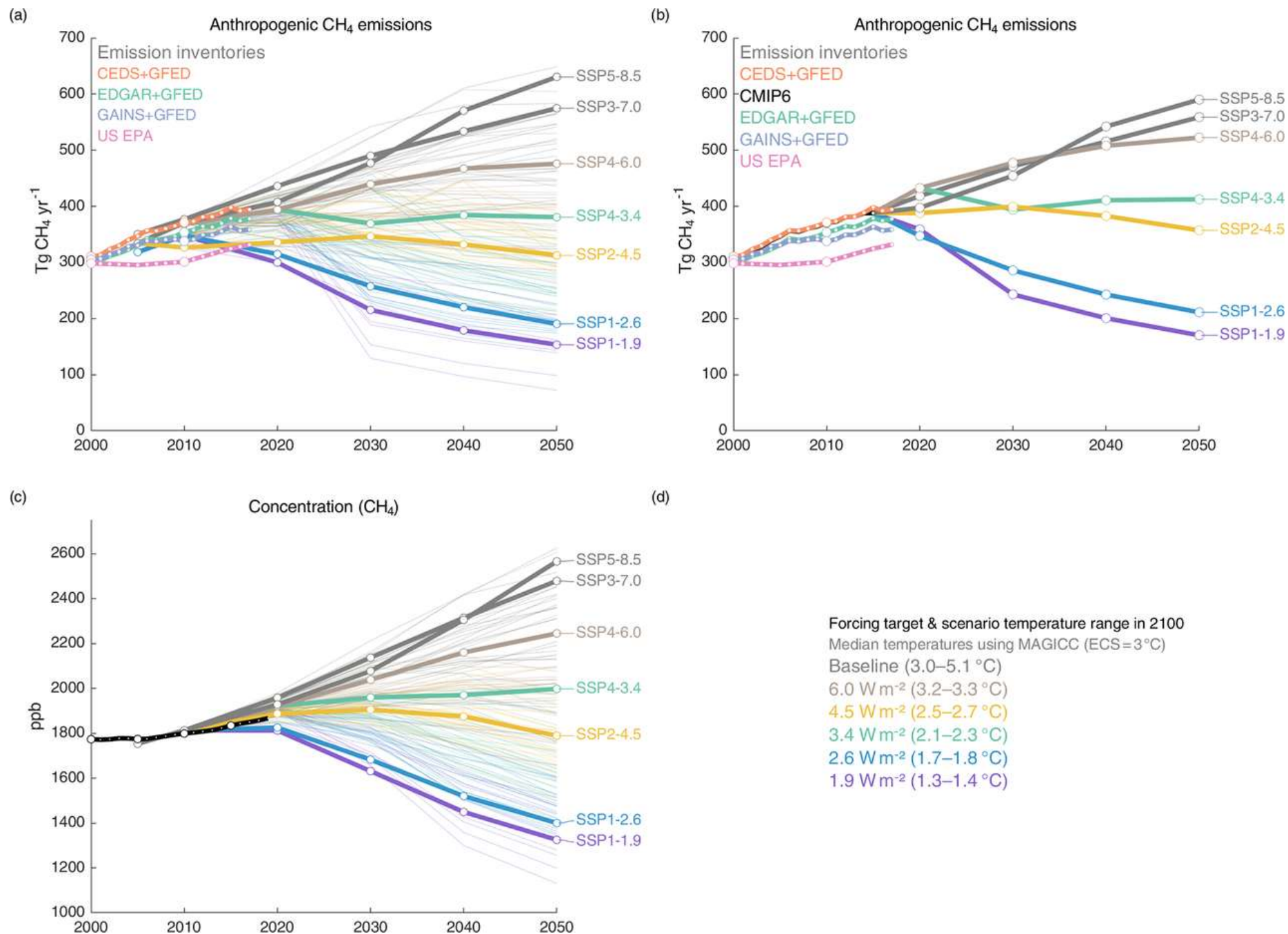
ogni SSP ha una propria tendenza nello sviluppo energetico

Primary energy in 2100 by model for SSP baseline scenarios

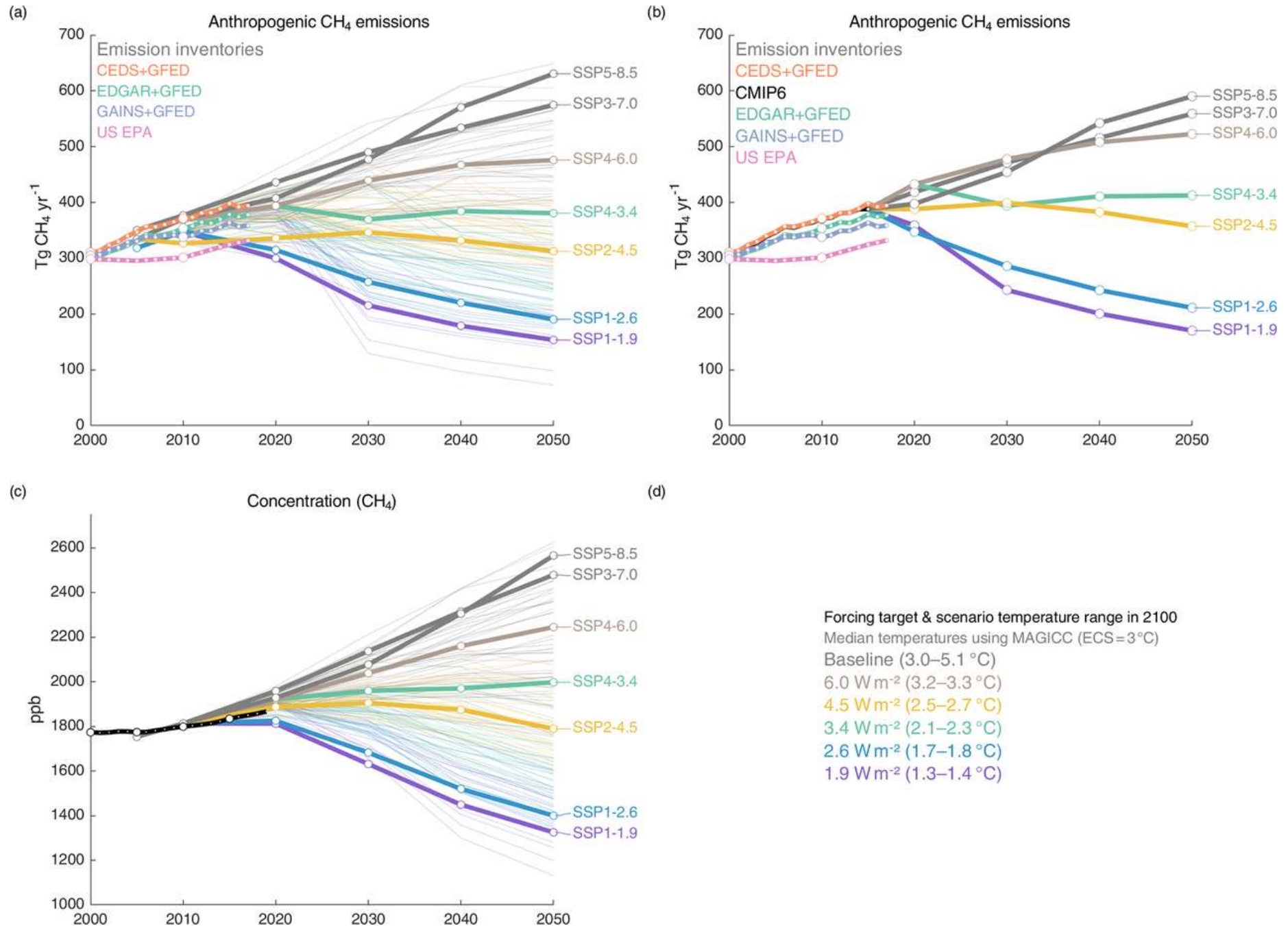


Integrated Assessment Models

ogni SSP ha una propria tendenza nelle emissioni

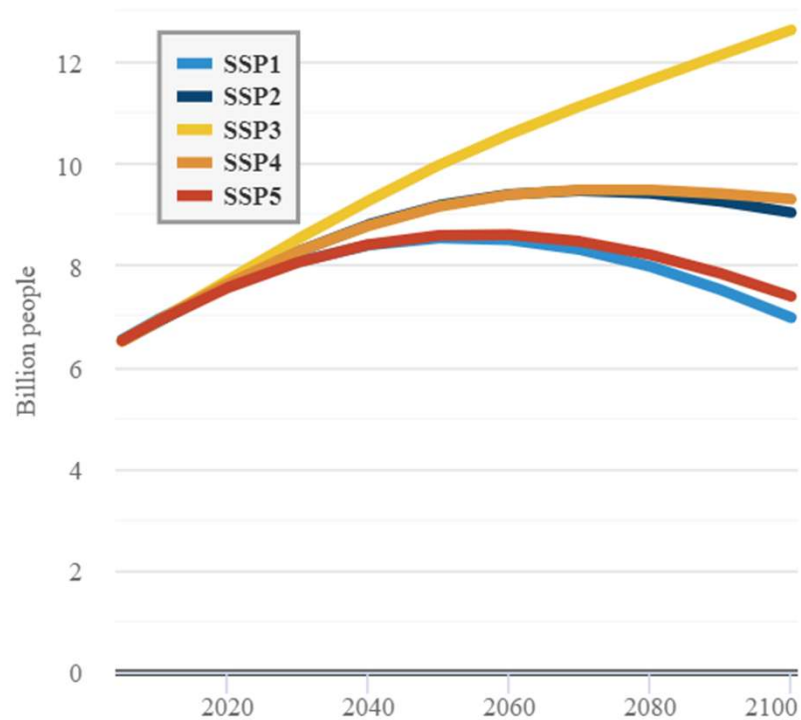


ogni SSP ha una propria tendenza nelle emissioni

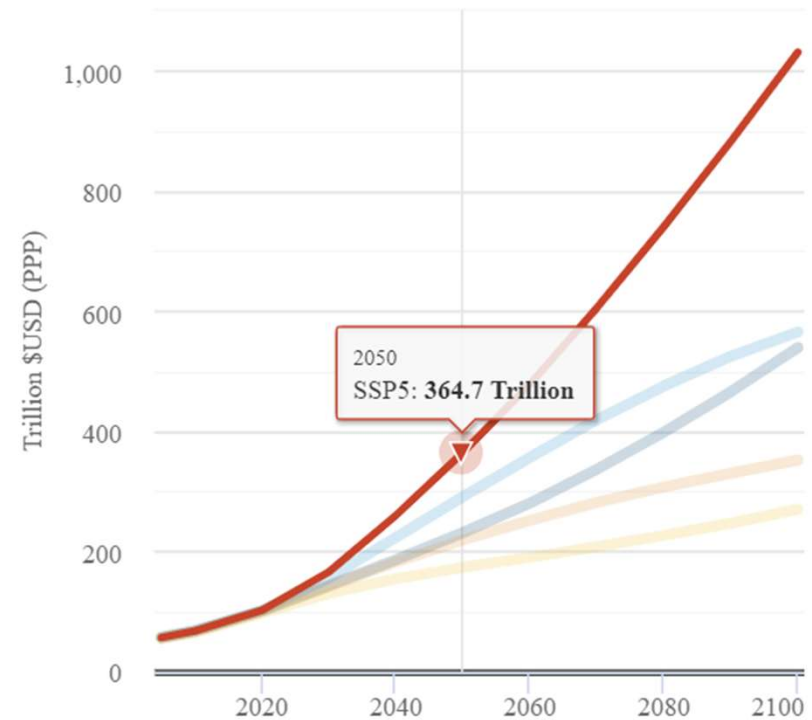


ogni SSP ha una propria tendenza delle condizioni socioeconomiche

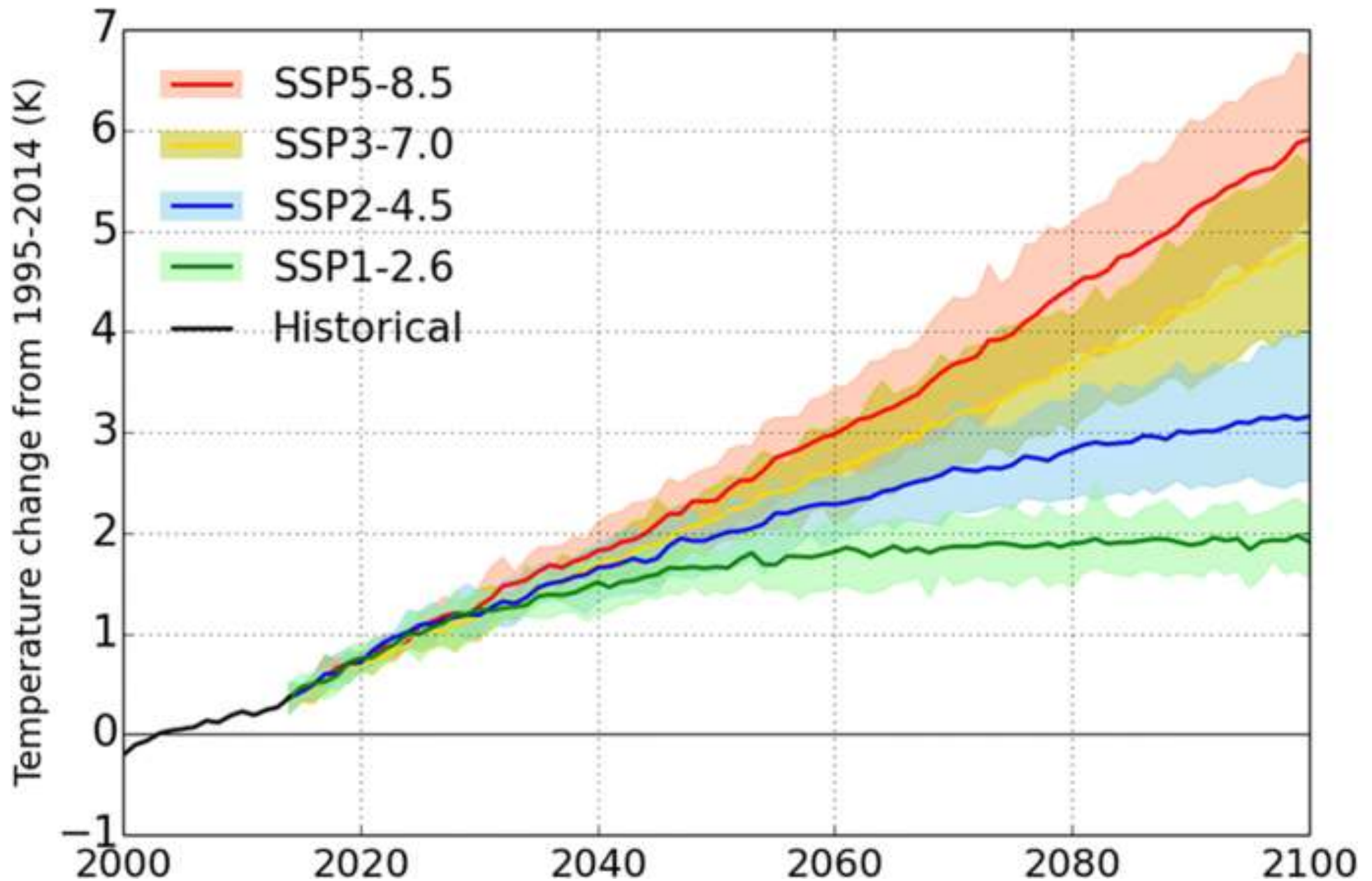
Global population



Global GDP



I modelli climatici vengono inizializzati con i diversi scenari ipotizzati



GEOENGINEERING TECHNIQUES

Geoengineering is the large-scale intervention in the Earth system to counteract human-induced climate change. There are two basic approaches to intervention:



CARBON DIOXIDE REMOVAL

Removes carbon dioxide (CO₂) from the atmosphere and storing it for a long time. Techniques include:



Ocean fertilisation

Sprinkle iron to stimulate growth of CO₂-eating phytoplankton

Safety ●●●●●
Ready ●●●●●
Cost ●●●●●



Afforestation

Plant trees on a large-scale to remove CO₂

Safety ●●●●●
Ready ●●●●●
Cost ●●●●●



Air capture

Convert CO₂ into a solid using sodium hydroxide

Safety ●●●●●
Ready ●●●●●
Cost ●●●●●

SOLAR RADIATION MANAGEMENT

Counteracts global warming by reflecting some sunlight back to space. Techniques include:



Desert surface albedo

Cover desert surface with reflective sheets to reflect sunlight

Safety ●●●●●
Ready ●●●●●
Cost ●●●●●



Stratospheric aerosol

Inject sulfur to reflect sunlight, increase cloud condensation

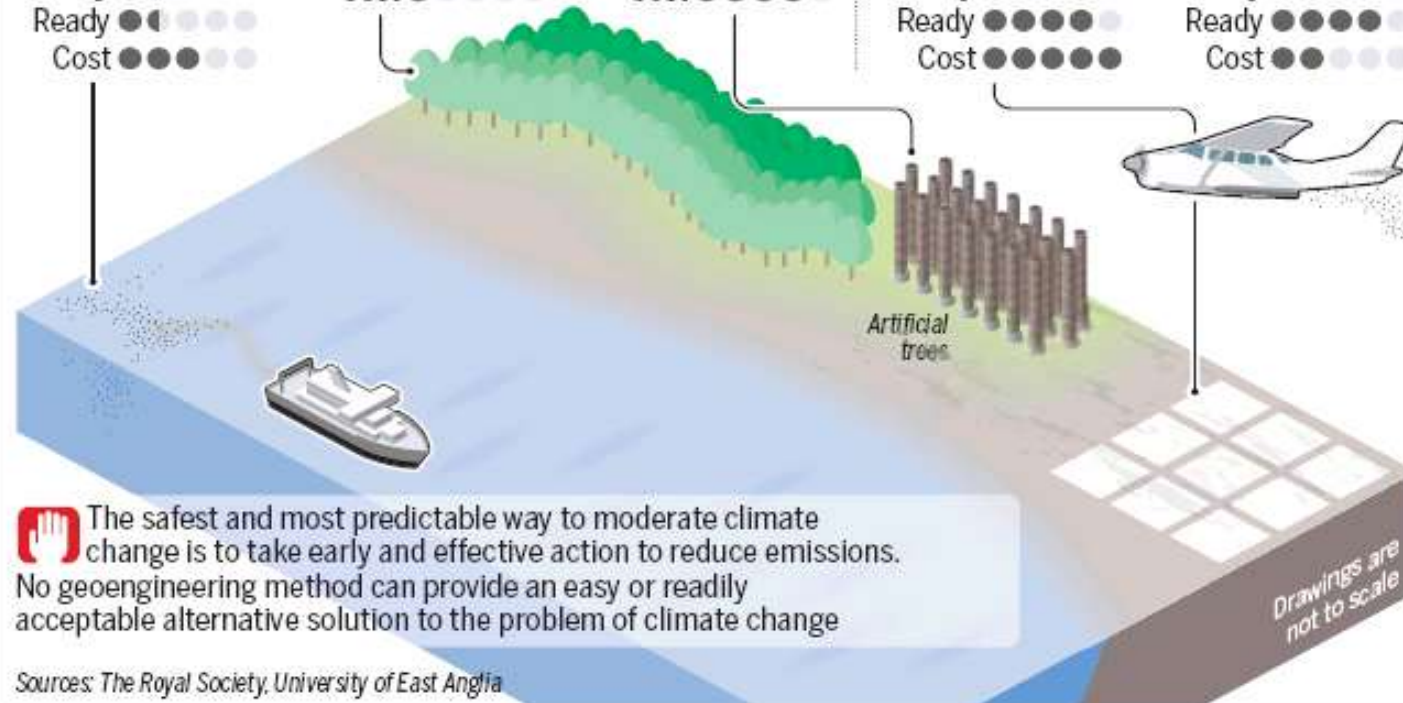
Safety ●●●●●
Ready ●●●●●
Cost ●●●●●



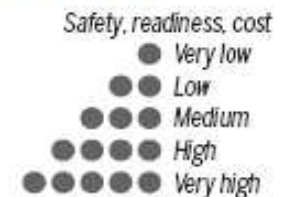
Space reflector

Launch mirrors into space to reflect sunlight

Safety ●●●●●
Ready ●●●●●
Cost ●●●●●



The safest and most predictable way to moderate climate change is to take early and effective action to reduce emissions. No geoengineering method can provide an easy or readily acceptable alternative solution to the problem of climate change



Drawings are not to scale

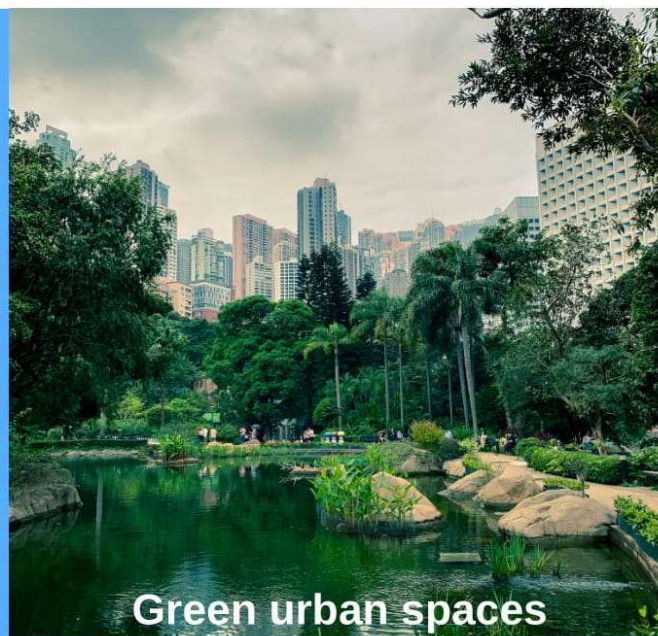
Sources: The Royal Society, University of East Anglia

REUTERS

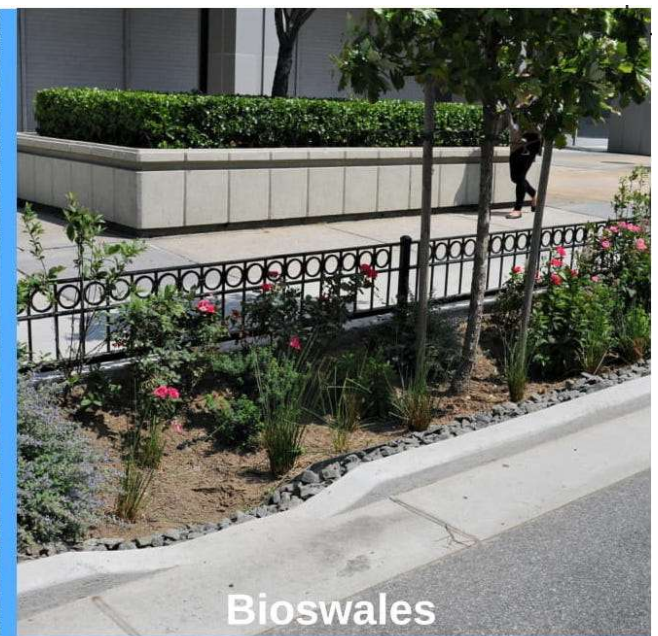




Constructed wetlands



Green urban spaces

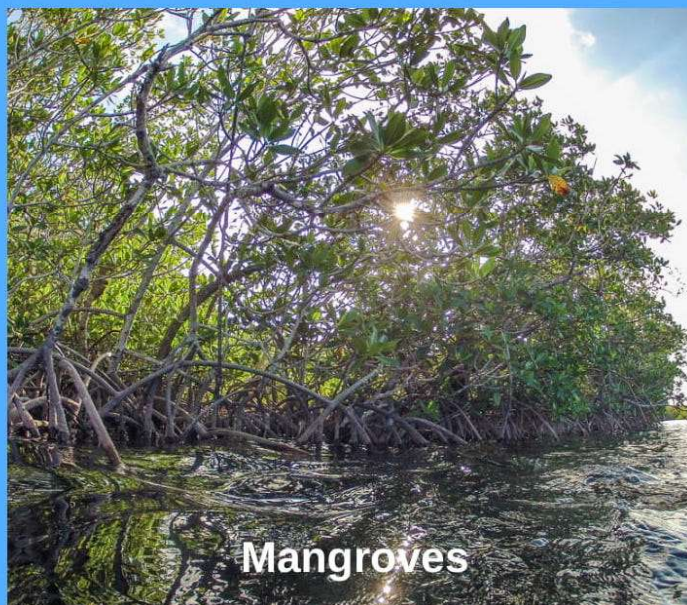


Bioswales

Types of Nature-based Solutions



Natural wetlands



Mangroves



Reforestation