

# **Climi del passato, climi del futuro: la Paleontologia e i cambiamenti climatici**



**Prof. Cesare A. Papazzoni**

Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche

Università di Modena e Reggio Emilia

Via Campi 103 - 41125 Modena

*[papazzoni@unimore.it](mailto:papazzoni@unimore.it)*

# Argomenti del corso:

1. Cos'è la paleoclimatologia e a cosa serve
2. Cosa sono i proxy
3. Misure attuali e tendenze climatiche
4. Acidificazione degli oceani
5. Registro del passato e variabili climatiche
6. Velocità di cambiamento
7. Modelli climatici



# 1. Cos'è la paleoclimatologia (e a cosa serve)

## Paleoclimatology

🌐 51 languages ▾

Article [Talk](#)

Read [Edit](#) [View history](#) [Tools](#) ▾

From Wikipedia, the free encyclopedia

**Paleoclimatology** ([British spelling](#), **palaeoclimatology**) is the scientific study of [climates](#) predating the invention of [meteorological instruments](#), when no direct measurement data were available.<sup>[1]</sup> As instrumental records only span a tiny part of [Earth's history](#), the reconstruction of ancient climate is important to understand natural variation and the evolution of the current climate.

Paleoclimatology uses a variety of [proxy](#) methods from [Earth](#) and [life sciences](#) to obtain data previously preserved within [rocks](#), [sediments](#), [boreholes](#), [ice sheets](#), [tree rings](#), [corals](#), [shells](#), and [microfossils](#). Combined with techniques to date the proxies, the paleoclimate records are used to determine the past states of [Earth's atmosphere](#).

The scientific field of paleoclimatology came to maturity in the 20th century. Notable periods studied by paleoclimatologists include the frequent [glaciations](#) that Earth has undergone, rapid cooling events like the [Younger Dryas](#), and the rapid warming during the [Paleocene–Eocene Thermal Maximum](#). Studies of past changes in the environment and biodiversity often reflect on the current situation, specifically the impact of climate on [mass extinctions](#) and biotic recovery and current [global warming](#).<sup>[2][3]</sup>

Part of a series on  
**Paleontology**



**Fossils** [\[show\]](#)

**Natural history** [\[show\]](#)

**Organs and processes** [\[show\]](#)

**Evolution of various taxa** [\[show\]](#)

**Evolution** [\[show\]](#)

**History of paleontology** [\[show\]](#)

**Branches of paleontology** [\[show\]](#)

**Paleontology Portal**  
**Category**

In sintesi, la paleoclimatologia è lo studio scientifico del clima **prima dell'invenzione degli strumenti meteorologici.**

Ciò significa che la paleoclimatologia ha un ambito di applicazione vastissimo, coprendo praticamente **tutta la storia della Terra** fino circa al XVIII secolo. I dati strumentali infatti non saranno disponibili in generale fino a prima del 1800 circa (e comunque sono molto incompleti fino all'inizio del XX secolo).



# A cosa serve la paleoclimatologia?



# A cosa serve la paleoclimatologia?

L'attuale preoccupazione per i **cambiamenti climatici** è accentuata dall'incertezza rispetto al futuro: come possiamo sapere cosa accadrà se le condizioni climatiche che conoscevamo fino a pochi anni fa sono destinate a modificarsi?

Uno dei problemi sta nel fatto che noi abbiamo un'idea di **sistema climatico** come qualcosa di sostanzialmente **immutabile**, dovuta al fatto che **le condizioni climatiche in epoche storiche** appaiono in larga misura **immutate**.

# A cosa serve la paleoclimatologia?

In realtà il sistema climatico è, **sui tempi lunghi (geologici), decisamente instabile** e soggetto a variazioni di grande impatto. Oggi, grazie agli studi paleoclimatici, possiamo ricostruire **la storia del clima globale** con un dettaglio inimmaginabile anche soltanto pochi decenni fa.

Ma quindi ritorniamo alla domanda iniziale:  
**a che serve, infine, la paleoclimatologia?**



# A cosa serve la paleoclimatologia?

Nella scienza, per prevedere il comportamento di un sistema naturale, di norma si procede **formulando ipotesi** e poi svolgendo **esperimenti pratici** in condizioni controllate (in laboratorio).

Purtroppo il **Sistema Terra** è talmente complesso da **non potere essere ridotto in laboratorio** in misura tale da poter rappresentare convenientemente il nostro pianeta. La dimensione stessa del pianeta fa sembrare che l'unica possibilità per fare esperimenti di questo tipo sia con un altro pianeta. Però **non abbiamo un Pianeta B**, sul quale fare esperimenti. O no?

# A cosa serve la paleoclimatologia?

In realtà, poiché sappiamo che nel passato geologico le **condizioni climatiche** sulla Terra sono **cambiate drasticamente** più volte, possiamo studiare il comportamento del pianeta in condizioni simili a quelle che ci possiamo aspettare per il futuro prossimo. Ecco che **il nostro Pianeta B esiste**, o meglio è esistito diverse volte in passato!

La paleoclimatologia quindi, **studiando il passato, ci permette di fare previsioni sul futuro.**

## 2. Cosa sono i proxy

Come detto precedentemente, la paleoclimatologia è lo studio scientifico del clima **prima dell'invenzione degli strumenti meteorologici.**

Ma quindi come si fa a studiare il clima senza poter usare strumenti meteorologici?

La risposta sta nello **studio dei proxy.**

# proxy :

<*pròksi*> s. ingl., usato in it. al masch. – **Denominazione di dati relativi a epoche remote, dedotti indirettamente.** La raccolta regolare di dati meteorologici su scala mondiale ha avuto luogo solo a partire dalla seconda metà dell'Ottocento; le

condizioni climatiche antecedenti non possono, dunque, essere identificate con dati diretti, ma possono essere valutate a partire da misurazioni ambientali di quantità che sono più o meno direttamente collegate alla situazione climatica locale. Nella paleoclimatologia questi dati, chiamati *proxy data*, hanno origini molteplici e sono ottenuti in base a vari elementi: le composizioni isotopiche (dell'ossigeno, del deuterio e del carbonio) misurate nei sedimenti oceanici e lacustri, nelle calotte polari, nelle stalattiti e nelle stalagmiti, negli anelli degli alberi e negli strati geologici; le testimonianze delle faune e delle flore del passato, quali i pollini, le microfaune marine, gli insetti, i mammiferi, i molluschi, le piante fossili; le prove geologiche e geomorfologiche fornite dallo studio di morene, evaporiti, paleosuoli, varve, dune, scogliere coralline, e così via. Questi dati, analizzati simultaneamente e in modo coerente, consentono di creare un'immagine razionale delle variazioni climatiche avvenute lungo particolari momenti della storia della Terra. Un tipo di p. molto conosciuto è quello che proviene dall'analisi degli anelli arborei (dendrologia). In generale, un anno caldo e piovoso risulterà in un anello di maggiore spessore, ma l'analisi può scendere più in dettaglio e trarre utili informazioni dalla struttura degli anelli, dalla densità del legno e dalle abbondanze relative di isotopi di ossigeno e idrogeno presenti. La ricostruzione climatica si può spingere verso ere molto più remote analizzando campioni di ghiaccio estratti tramite carotaggi a grandi profondità. Infatti, i ghiacci perenni presenti sulle montagne più elevate e soprattutto nelle calotte polari sono il risultato dell'accumulazione di precipitazioni nevose durante decine di migliaia di anni. Questi ghiacci sono ovviamente composti di ossigeno e idrogeno. Piccole percentuali di idrogeno sono presenti sotto forma di deuterio, un suo isotopo. Analizzando campioni di ghiaccio risalenti a periodi storici in cui l'andamento climatico è noto, si è derivata per es. una relazione tra temperatura media e concentrazione di deuterio nel ghiaccio. Supponendo la validità di questa relazione anche in epoche preistoriche, si è potuto ricostruire l'andamento della temperatura in quei lontani periodi. Oltre a questo dato, i carotaggi di ghiaccio polare consentono di determinare la concentrazione di pulviscolo atmosferico e anidride carbonica in ere remote. Anche le paleotemperature oceaniche, ricavate dall'esame dei sedimenti, forniscono un metodo estremamente interessante quando sia applicato a lunghe sequenze di osservazioni. Le faune e le flore forniscono elementi di datazione e indicazioni sui paleoambienti e i paleoclimi; le morene danno informazioni sulle fasi di massima estensione glaciale; i terrazzi marini forniscono dati soprattutto sui livelli estremi di elevazione raggiunti dal mare in corrispondenza delle massime temperature realizzatesi durante le fasi interglaciali; dai depositi di Löss e dai suoli fossili si ricavano informazioni più complete sulla cronologia climatica, ma le correlazioni con i depositi glaciali e marini rimangono generalmente difficili. Le registrazioni naturali sono tuttavia influenzate dal clima stesso e possono subire alterazioni dovute ad azioni di bioturbazione insieme con altre trasformazioni fisiche e chimiche. La loro interpretazione in termini di variazioni climatiche richiede dunque l'applicazione di specifiche tecniche di elaborazione: per es., le funzioni di trasferimento basate sull'analisi multivariata, utilizzate per i sedimenti marini, gli anelli degli alberi e i pollini. I valori p. sono datati conteggiando gli strati annuali (come nel caso degli anelli degli alberi, delle varve lacustri e delle torbiere, e per gli strati delle carote di ghiaccio) con metodi radiometrici (come nei casi dell'isotopo  $^{14}\text{C}$  del carbonio, e del rapporto di masse tra il potassio e l'argo, K/Ar) o con riferimento ad avvenimenti ben definiti avvenuti a scala planetaria, come i depositi di ceneri vulcaniche, i terrazzamenti marini e le inversioni del campo magnetico terrestre.

[da: [https://www.treccani.it/enciclopedia/proxy\\_\(Lessico-del-XXI-Secolo\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/proxy_(Lessico-del-XXI-Secolo)/) ]



I proxy sono una grande varietà di oggetti e misure diverse, tra i quali ricordiamo:

A - Proxy fotografici

B - Anelli degli alberi (dendrocronologia)

C - Proxy pollinici

D - Forma delle foglie

E - Anelli di accrescimento dei coralli

F - Carote di ghiaccio

G - Depositi glaciali antichi

H - Carote di sedimento dai fondali oceanici

I - Composizione isotopica dei gusci di foraminiferi

# A - Proxy fotografici



Ghiacciaio Stein, Svizzera. Questo ghiacciaio si è ritirato di 550 m tra il 2006 (a sinistra) e il 2015 (a destra)

Da: <https://newatlas.com/before-after-photos-glaciers-climate-change/49143/>



# A - Proxy fotografici



Sopra, Ghiacciaio Ameghino, Argentina. Alberto Maria De Agostini 1945. © Museo Borgatello. Sotto, l'evidente ritiro del ghiacciaio Ameghino di oltre 6 km. Fabiano Ventura, 2016. © Archivio F. Ventura

Da: <https://inviaggio.touringclub.it/news/i-ghiacciai-scompaiono-straordinarie-immagini-in-mostra-a-genova>



# B - Anelli degli alberi (dendrocronologia)

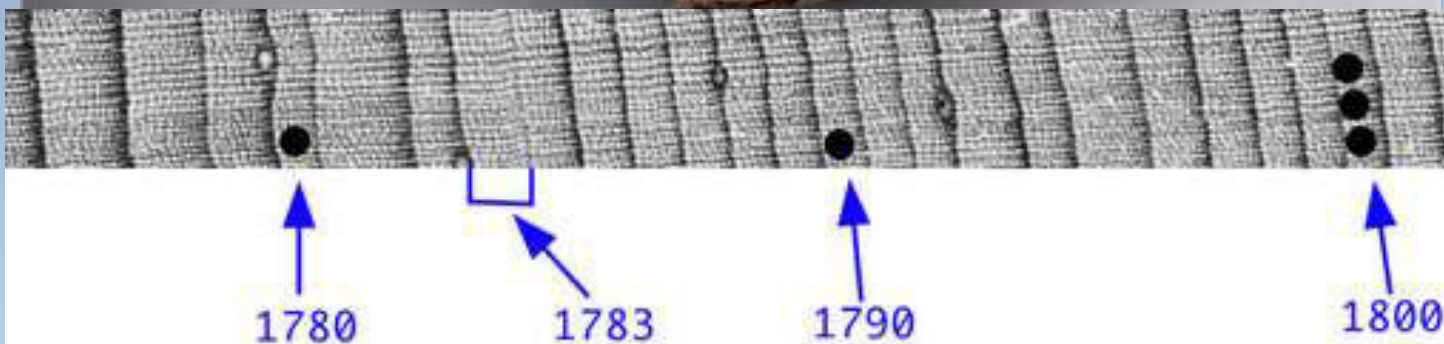


Lo studio della crescita degli anelli degli alberi permette di ottenere informazioni sui climi del passato relativamente recente.

Gli alberi possono vivere per centinaia (in casi straordinari anche migliaia) di anni. Ogni anno l'albero aggiunge uno strato di crescita, o "anello", che varia in spessore. Un **anello largo registra una buona stagione di crescita**, solitamente **più umida e/o più calda**, mentre un **anello stretto registra una stagione di crescita scarsa**, solitamente **più secca e/o più fresca**.

La **dendrocronologia** mette in correlazione gli anelli degli alberi morti con gli anelli di un albero vivo di cui è nota l'età, cercando pattern sovrapposti e procedendo così si può ottenere una registrazione del clima nel tempo **con risoluzione annuale**.

Dalla registrazione degli anelli degli alberi è stato ricostruito il clima negli USA occidentali negli **ultimi 9.000 anni**.





# C - Proxy pollinici

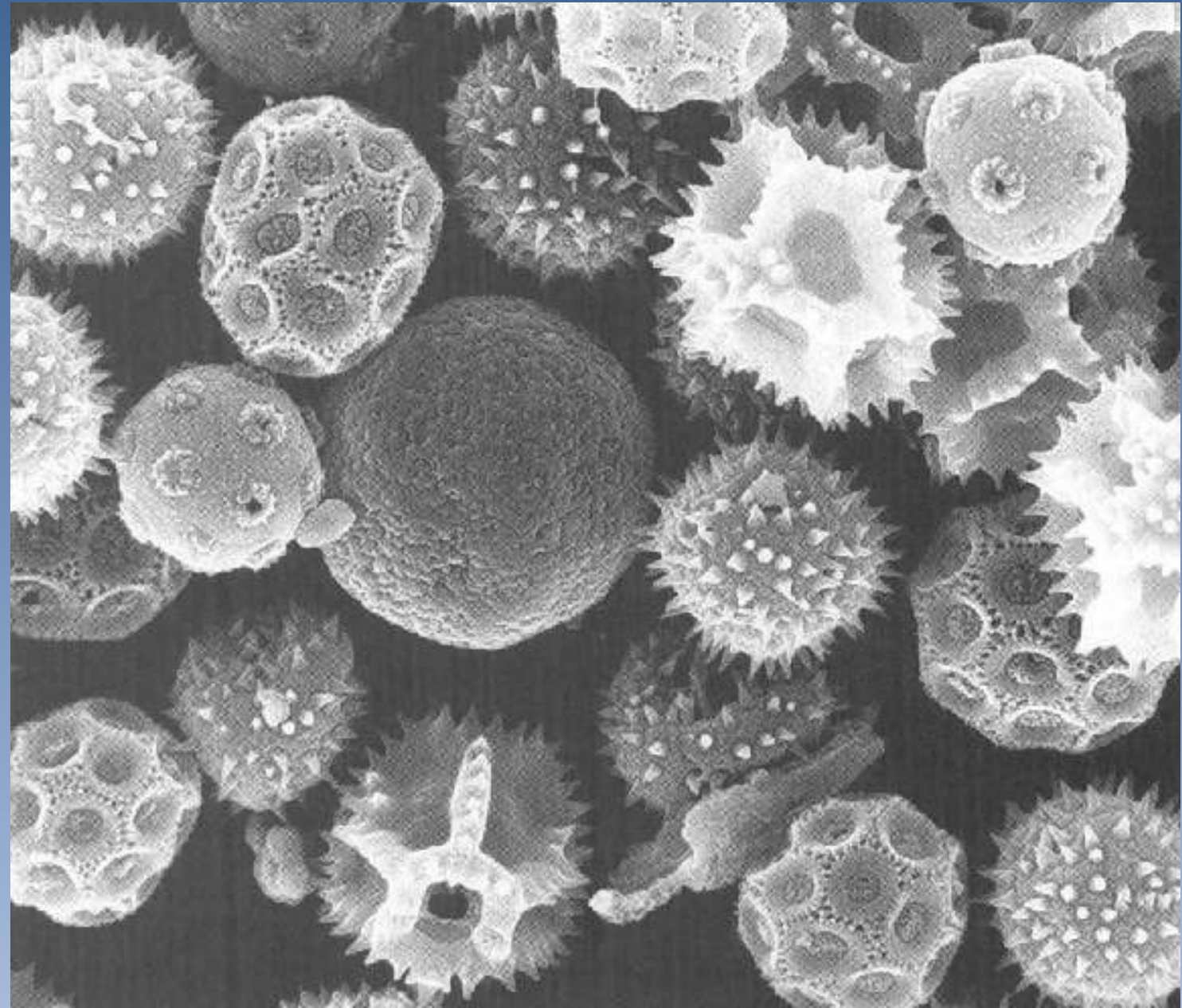
Anche il polline e le spore di piante antiche (prodotti da piante come felci, licheni e muschi) possono aiutarci a conoscere i climi antichi.

La **palinologia** (lo studio del polline e delle spore) sfrutta il fatto che questi oggetti sono **piccoli, abbondanti e facilmente conservabili**.

Grazie al loro rivestimento organico resistente, vengono comunemente conservati nella sabbia e nei sedimenti di luoghi come laghi e fiumi, anche quando alberi e foglie non sono conservati.

Dallo studio dei **requisiti ambientali** della pianta che ha prodotto il polline è possibile dedurre la **storia del clima nell'area**.

Ad esempio, pollini e spore sono stati utilizzati per tracciare gli **spostamenti** delle comunità vegetali **verso nord e verso sud** durante le fluttuazioni tra **periodi glaciali e interglaciali**.



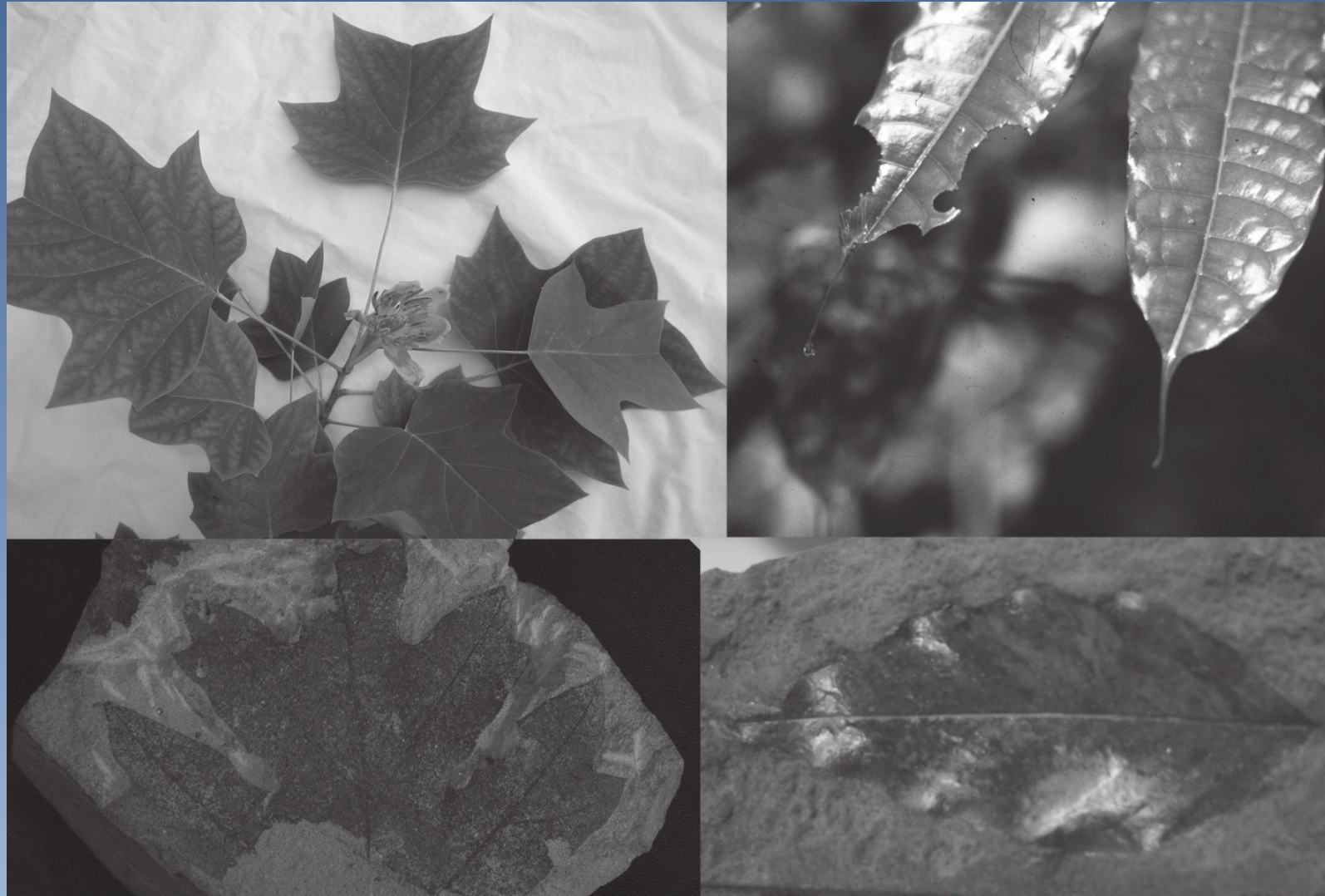


# D - Forma delle foglie

La forma delle foglie fossili viene analizzata con un processo chiamato **analisi del margine fogliare**, che può aiutare a ricostruire ambienti e climi antichi.

I bordi delle foglie moderne sono infatti indicativi del loro clima e ambiente: foglie dai **bordi lisci con punte strette e appuntite**, fatte per liberare le foglie dall'acqua in eccesso, sono comuni nelle **foreste pluviali** mentre i **bordi dentellati** sono più comuni negli **ambienti temperati**.

Dalla forma delle foglie, pertanto, si possono ricostruire la **temperatura e l'umidità** della regione.

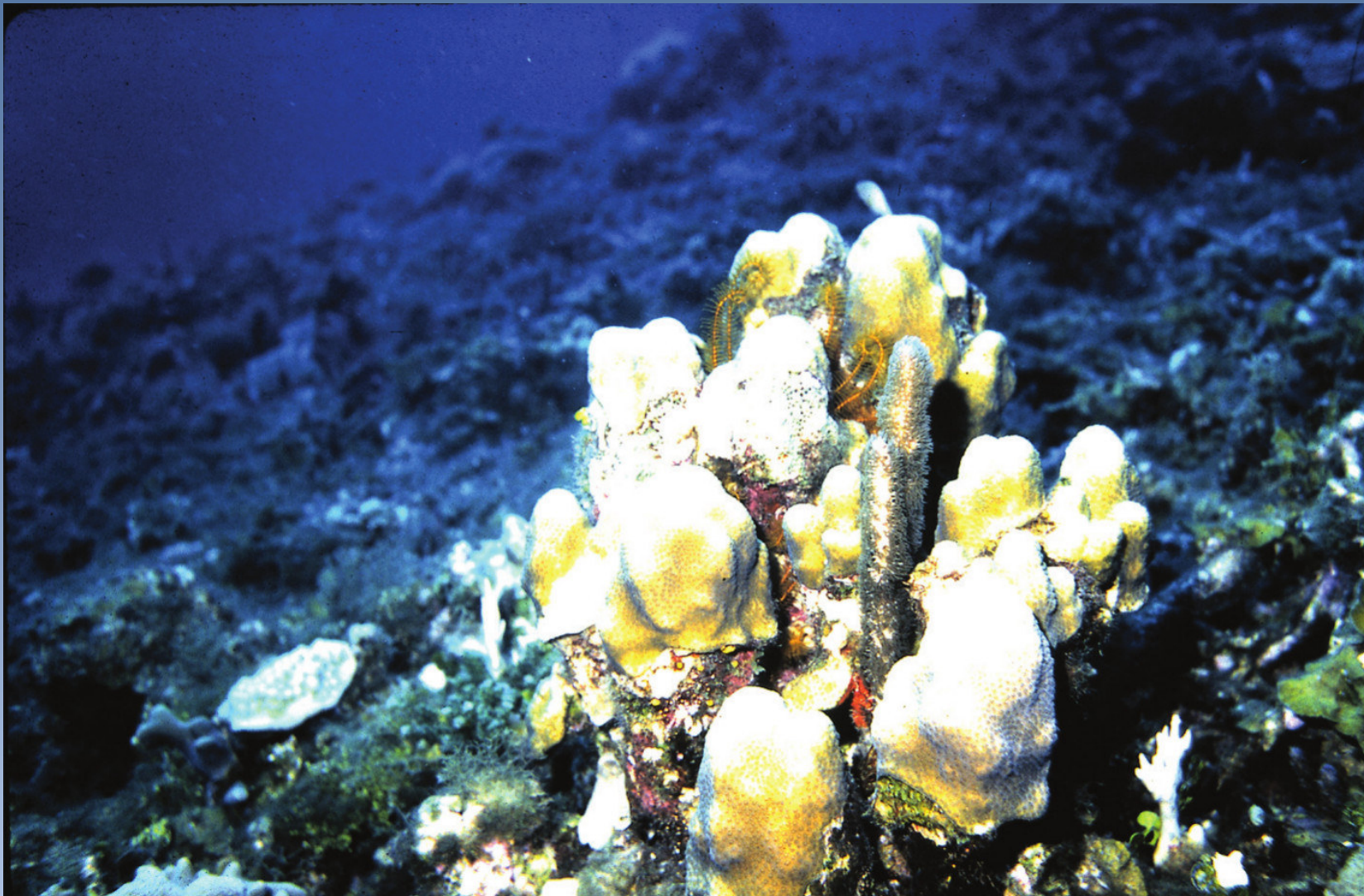




# E - Anelli di accrescimento dei coralli

Poiché costruiscono i propri scheletri di carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), i coralli tengono traccia del clima in un modo molto simile agli alberi, tramite **anelli periodici di crescita dello scheletro**.

Anelli **più spessi** rappresentano **condizioni migliori** per il corallo, anelli **più sottili** rappresentano **condizioni scadenti**.



La colonia di coralli cresce sia in inverno che in estate, ma la **densità dello scheletro** è diversa a causa dei **cambiamenti stagionali della temperatura** dell'oceano, della **disponibilità di nutrienti** e delle  **differenze di luce**.

*Figure B: A living colony of pillar coral at Discovery Bay, Jamaica. Such colonies can be hundreds of years old and the characteristics of older layers can provide proxy evidence of past environmental conditions.*



# F - Carote di ghiaccio





# F - Carote di ghiaccio

In alcuni casi, gli scienziati possono campionare direttamente **atmosfere antiche**.

Le **bolle di aria** nel ghiaccio delle calotte glaciali possono contenere aria che è rimasta intrappolata quando si è formato il ghiaccio. La composizione chimica dell'aria in queste bolle, come quella dell'acqua ghiacciata che le circonda, può rivelare la **quantità di CO<sub>2</sub>** nell'atmosfera antica.

Gli scienziati possono condurre **studi chimici e isotopici** sul ghiaccio stesso, ma possono anche osservare fisicamente le **inclusioni nel ghiaccio**, come **polvere** trasportata dal vento, **cenere** o **sostanze radioattive** che possono fornirci informazioni sull'estensione di **deserti**, **eruzioni vulcaniche**, **incendi boschivi** e persino **impatti di meteoriti**.

La lunghezza della registrazione è estremamente variabile. Alcuni carotaggi registrano solo gli ultimi cento anni, mentre il carotaggio più lungo mai prelevato (dalla stazione di ricerca di Vostok, Antartide) consente di studiare il cambiamento climatico per oltre 400.000 anni.

Raccogliendo informazioni da più carotaggi, gli scienziati hanno ora ricostruito la **storia climatica degli ultimi 800.000 anni**.





# G - Depositi glaciali antichi

## Depositi morenici e tilliti

Morena di ghiacciaio in arretramento,  
Alpefjord, Northeast Greenland National Park

Da: <https://www.grida.no/resources/3584>



Tillite del Precambriano Superiore (650 milioni di anni fa) a Ella Ø, Groenlandia orientale. Foto M. Hambrey

Da: <https://www.swisseduc.ch/glaciers/glossary/tillite-en.html>



# G - Depositi glaciali antichi

## Rocce montonate

Rocce montonate, Plateau del Lys (Val d'Aosta).

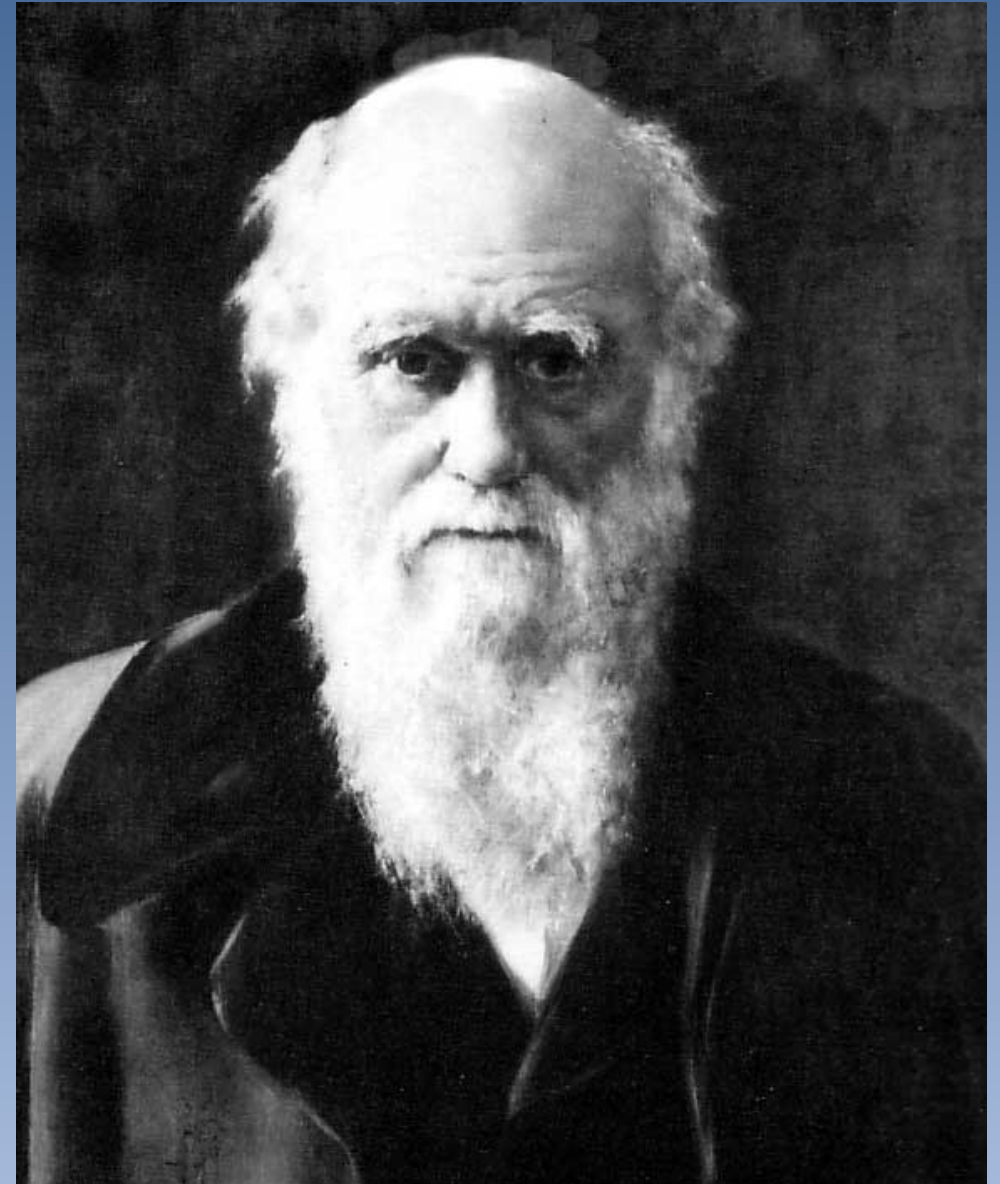
Da: [http://www.montegeologo.com/Montagna/Escursioni/Sorgenti del Lys/FotoLys.htm](http://www.montegeologo.com/Montagna/Escursioni/Sorgenti%20del%20Lys/FotoLys.htm)





# G - Depositi glaciali antichi

**Charles Darwin**, nel 1839, osservò le tracce di antiche linee di costa attorno ai rilievi scozzesi, interpretandole come **tracce dell'antica estensione del mare.**



# G - Depositi glaciali antichi

Louis Agassiz



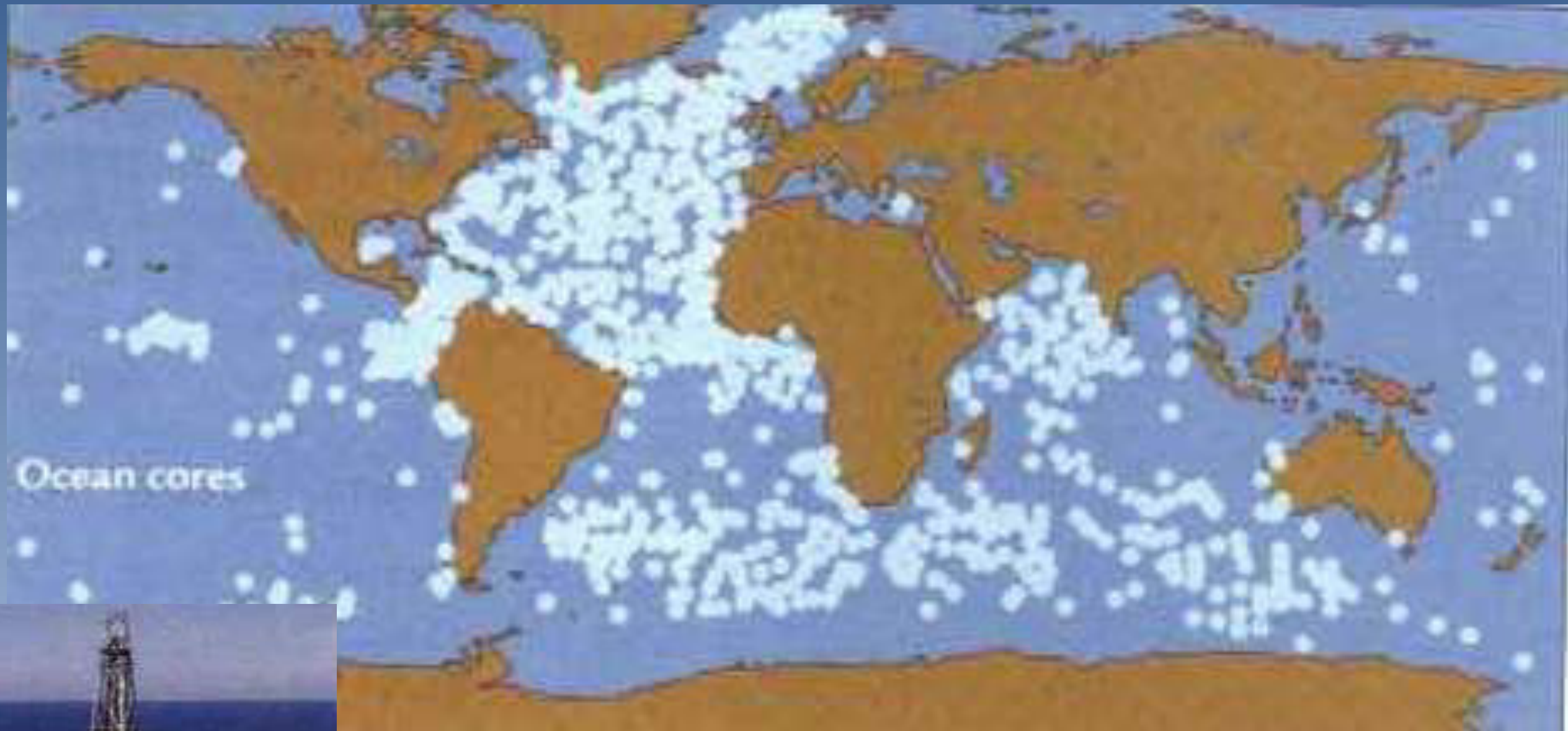
Louis Agassiz

|                   |                                                         |
|-------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Born</b>       | May 28, 1807<br>Haut-Vully, Switzerland                 |
| <b>Died</b>       | December 14, 1873 (aged 66)<br>Cambridge, Massachusetts |
| <b>Fields</b>     | Paleontology, Glaciology, Geology, Natural History      |
| <b>Alma mater</b> | University of Erlangen-Nuremberg                        |

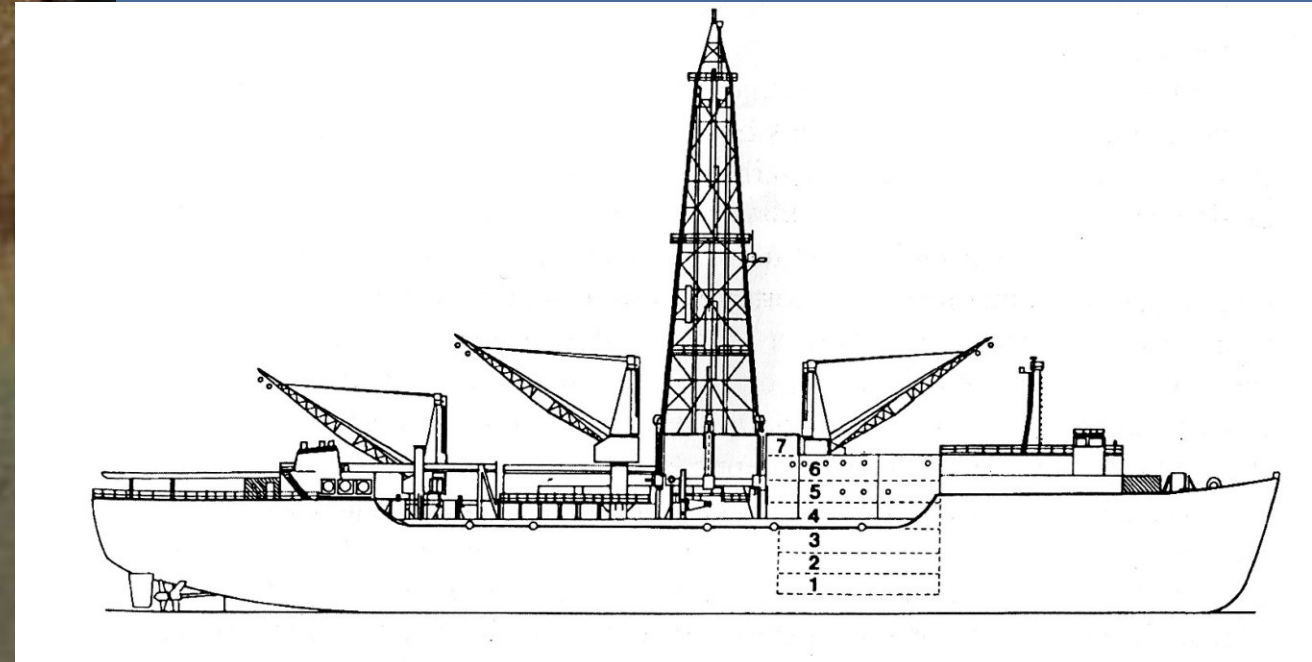
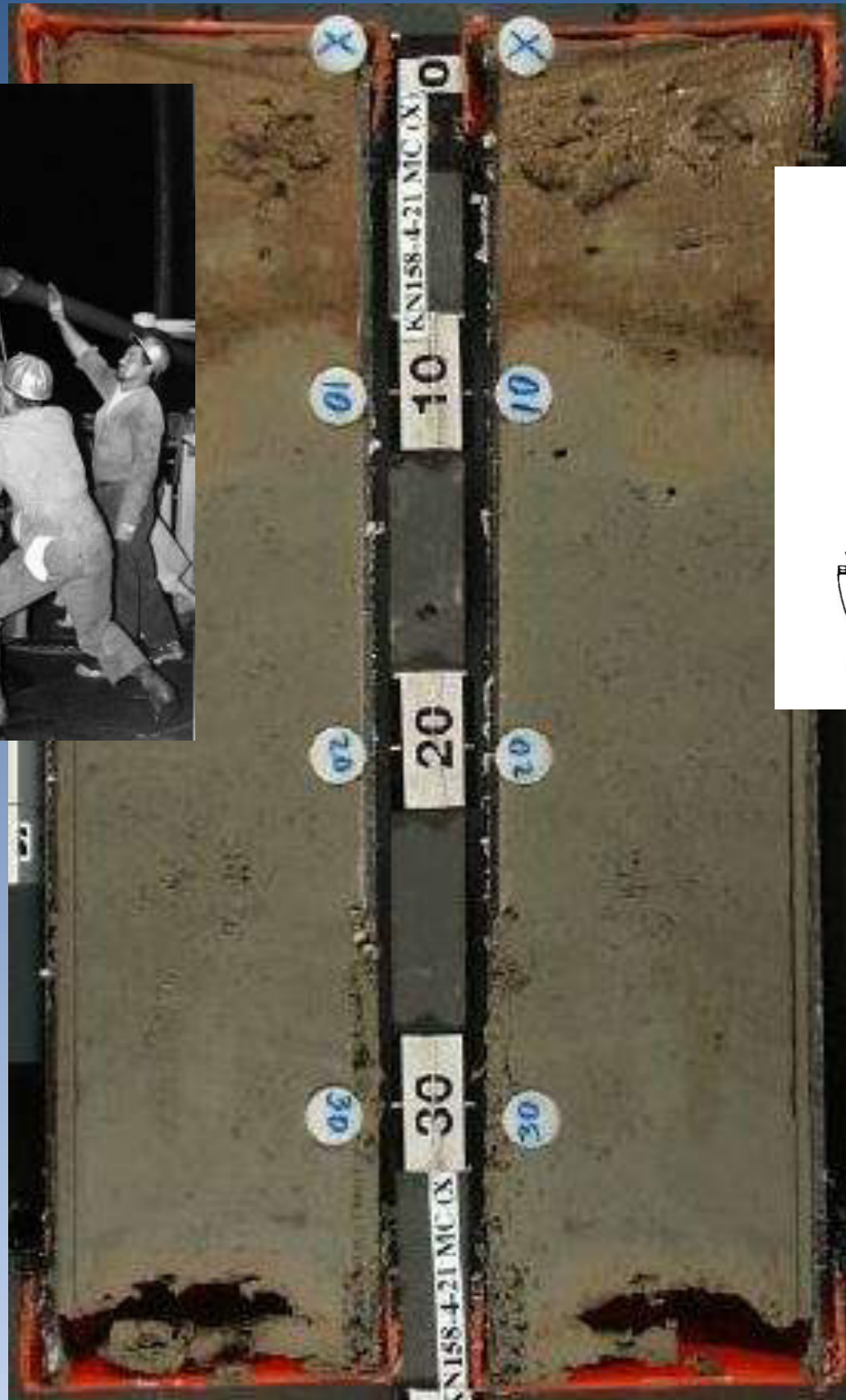
**Louis Agassiz**, poco più tardi, interpretò correttamente tali linee costiere come i margini di laghi generati dallo **sbarramento glaciale**. Agassiz, geologo e paleontologo, è considerato il padre della glaciologia moderna.



# H - Carote di sedimento dai fondali oceanici



# H - Carote di sedimento dai fondali oceanici



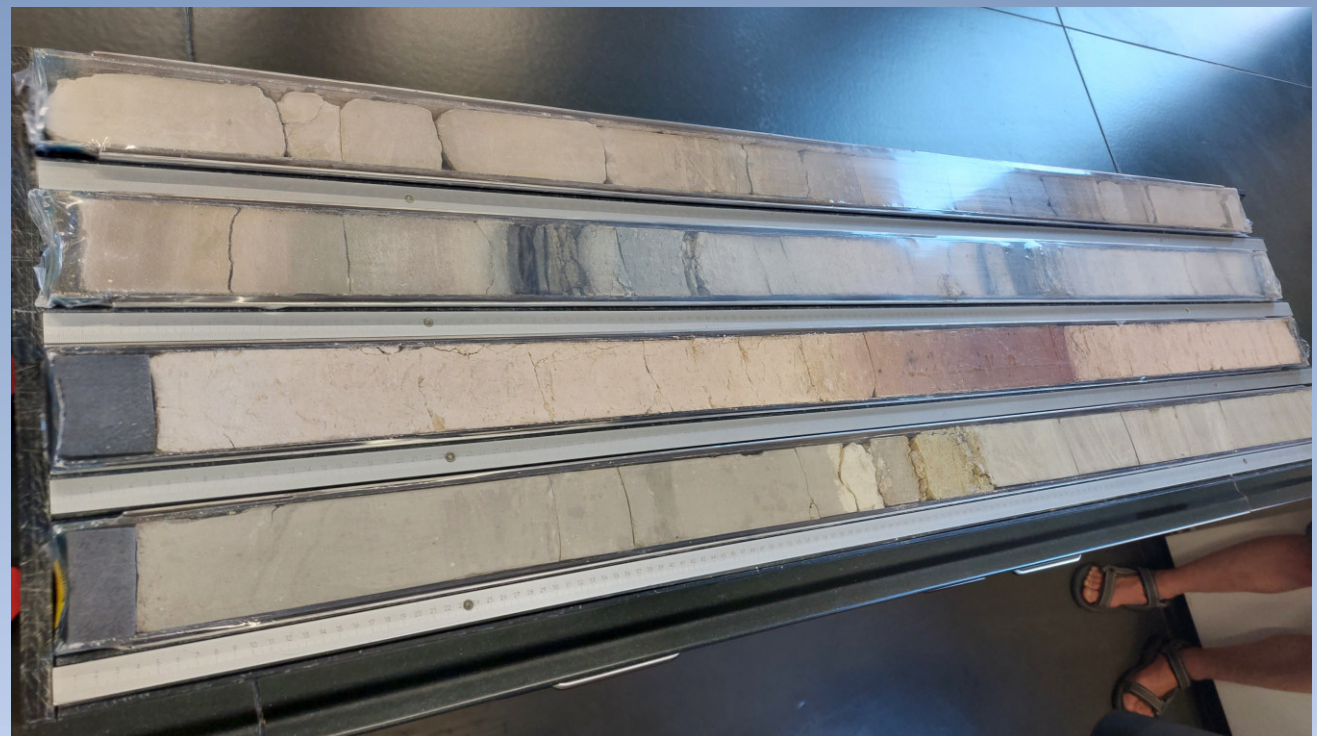
Schizzo della nave Joides Resolution con la sua torre di perforazione ben visibile. I numeri rappresentano i laboratori scientifici.



# H - Carote di sedimento dai fondali oceanici



Deposito delle carote IODP a Brema (Germania)



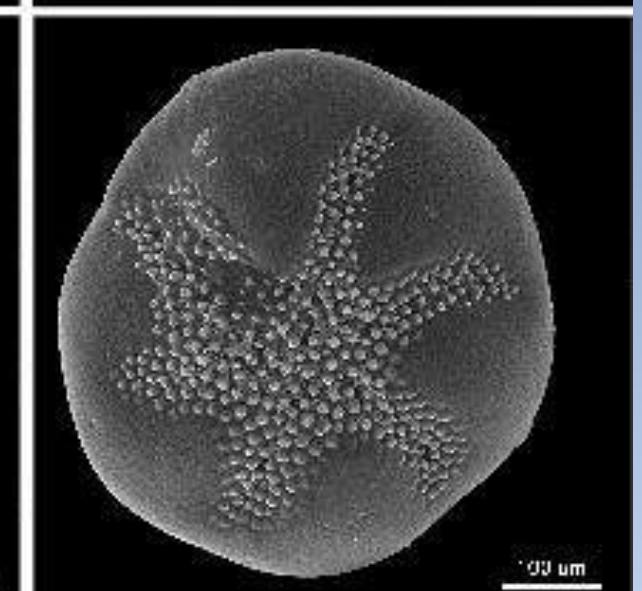
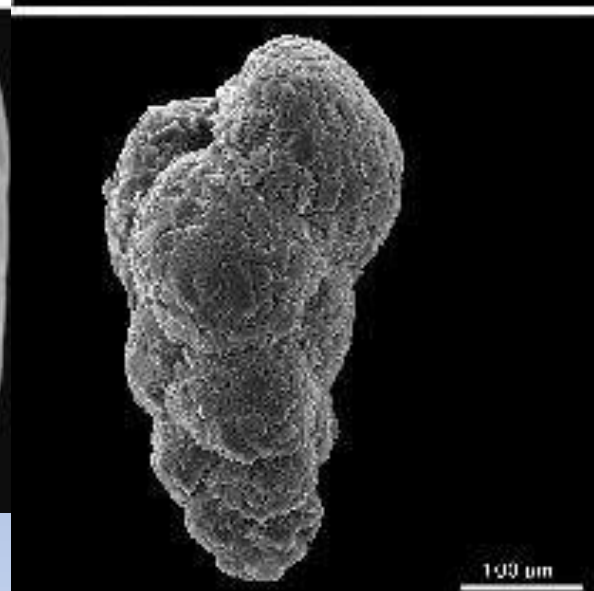
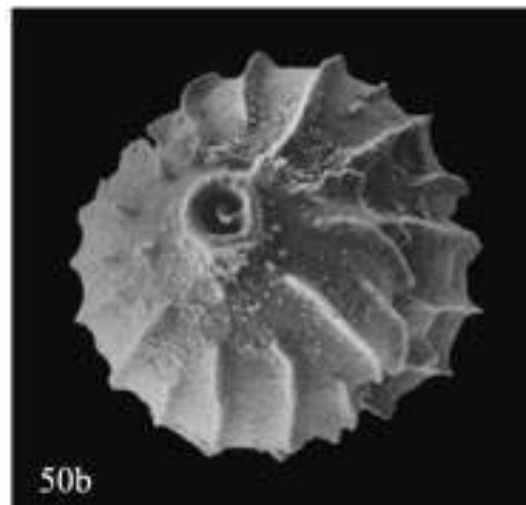
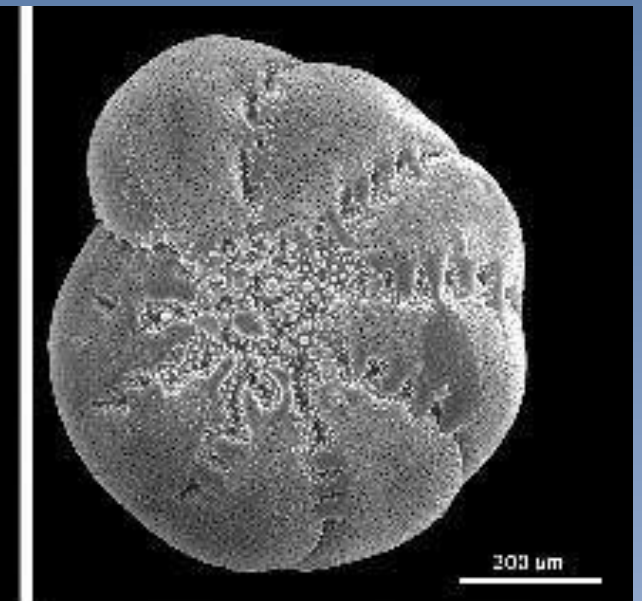
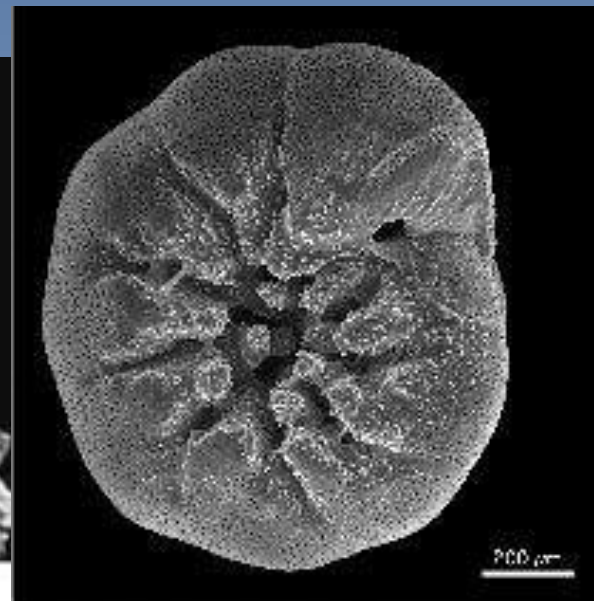
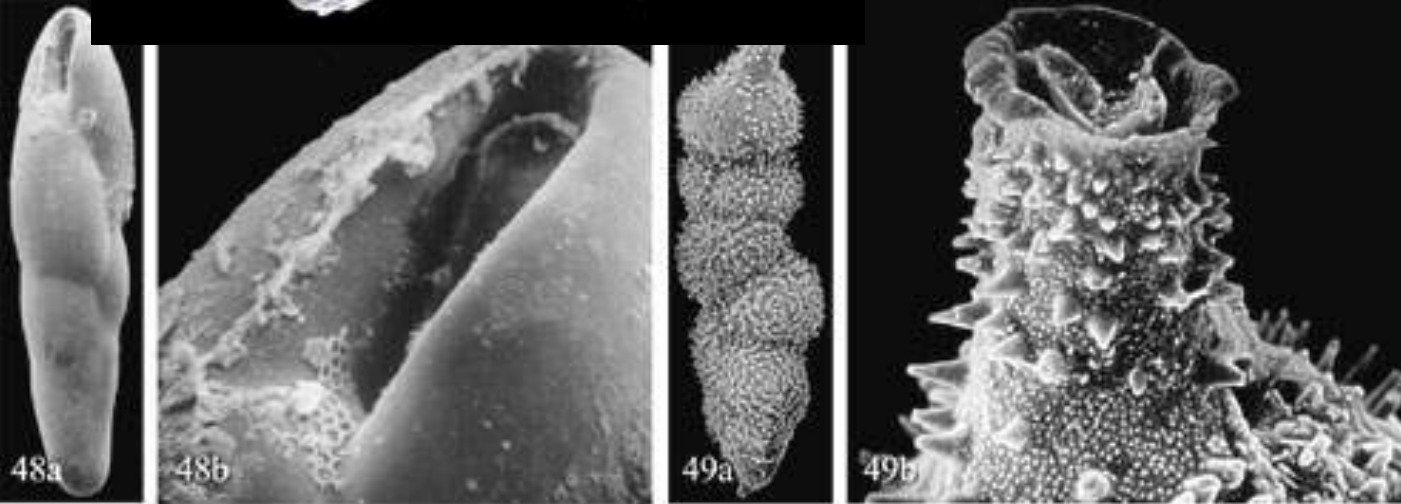


# I - Composizione isotopica dei gusci di foraminiferi



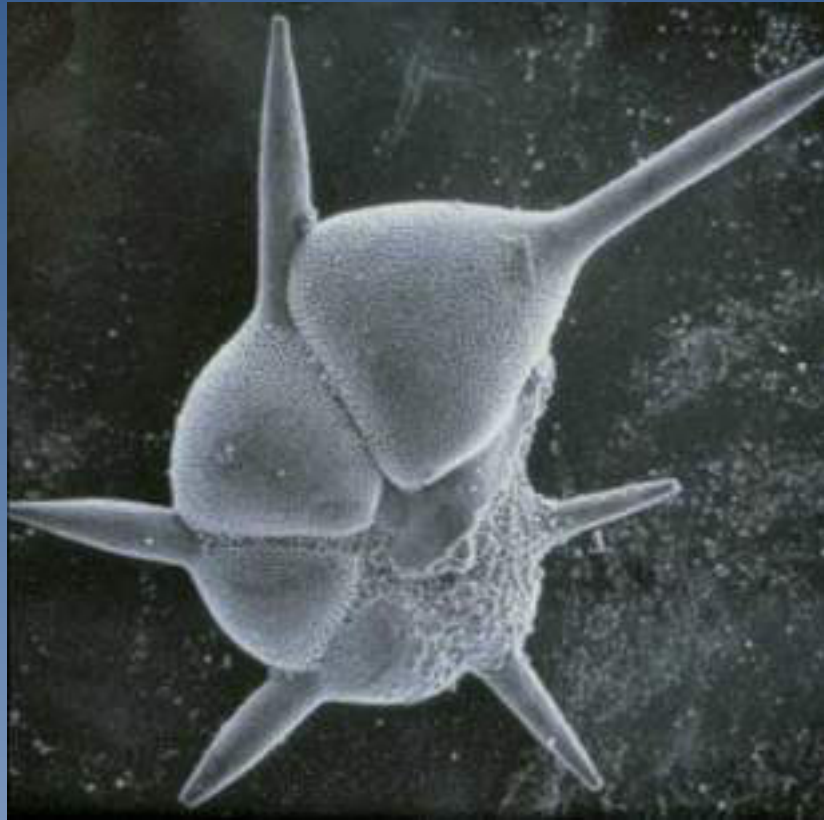
**Foraminiferi bentonici:**

$\delta^{18}\text{O}$  temperatura delle acque sul **fondo marino**.

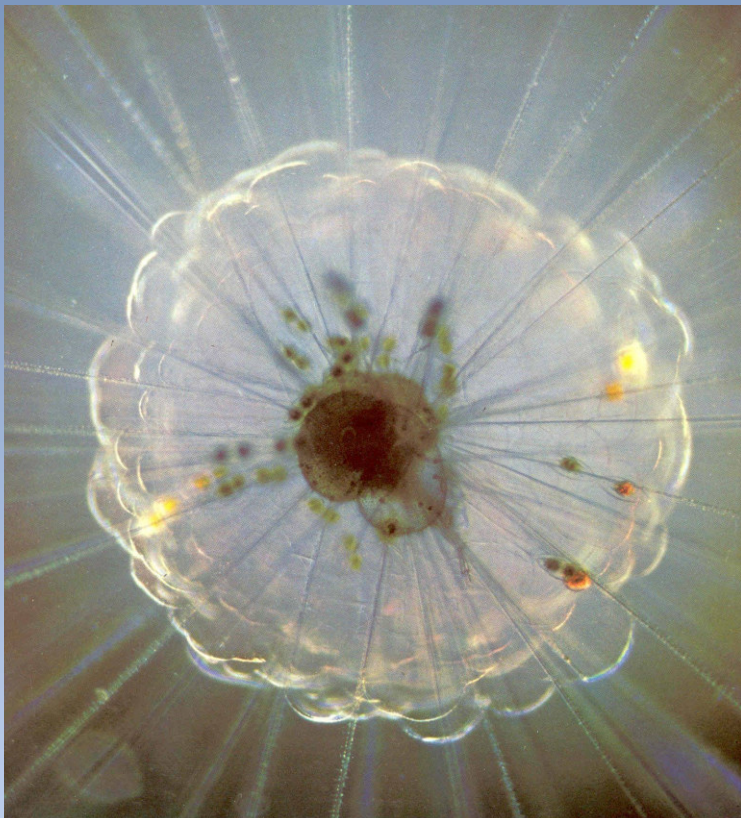
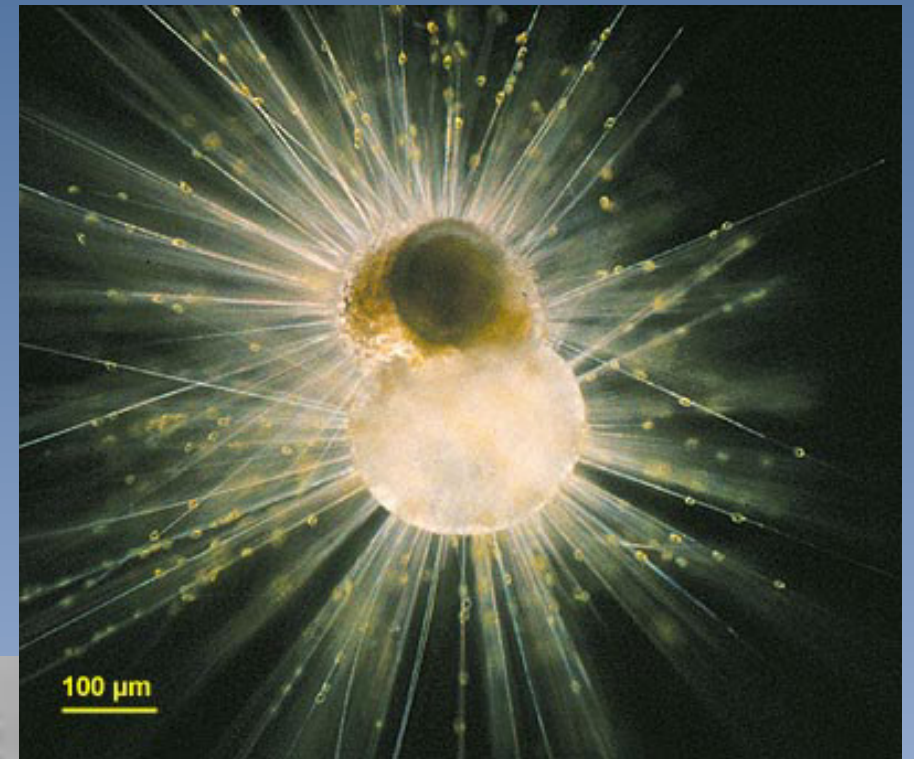




# I - Composizione isotopica dei gusci di foraminiferi

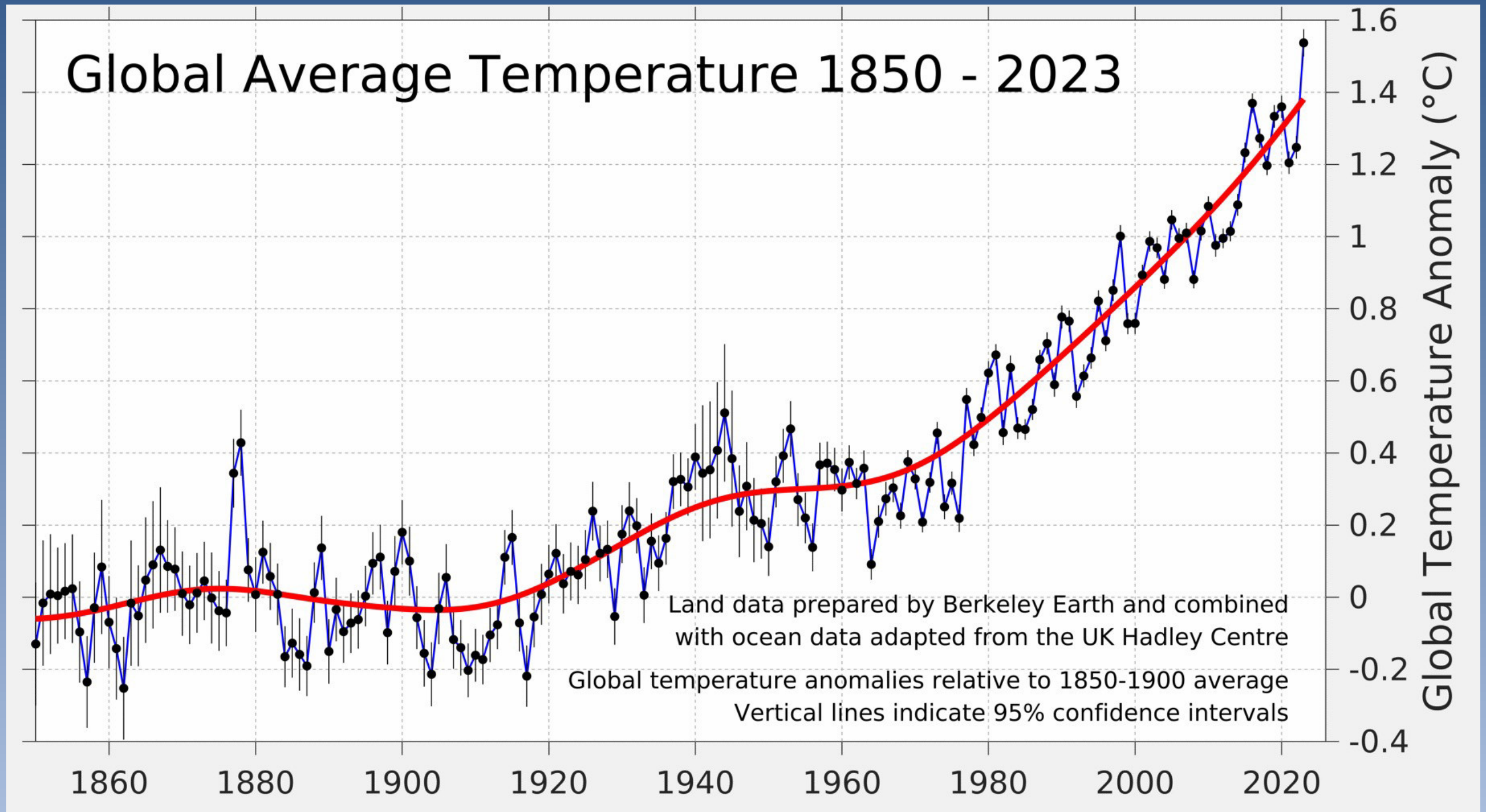


**Foraminiferi planctonici:**  
 $\delta^{18}\text{O}$  temperatura delle **acque superficiali**.





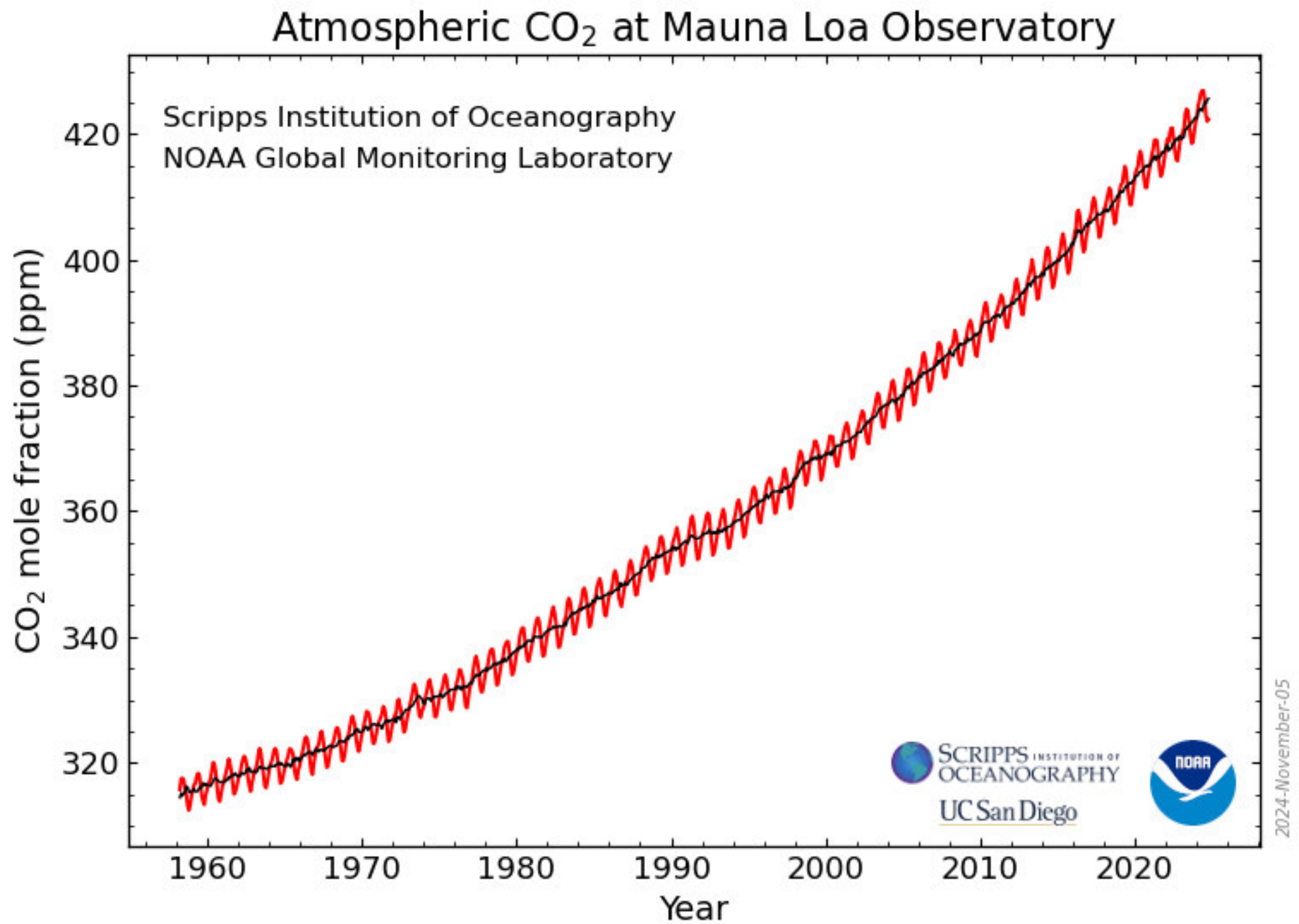
### 3. Misure attuali e tendenze climatiche



<https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2023/>

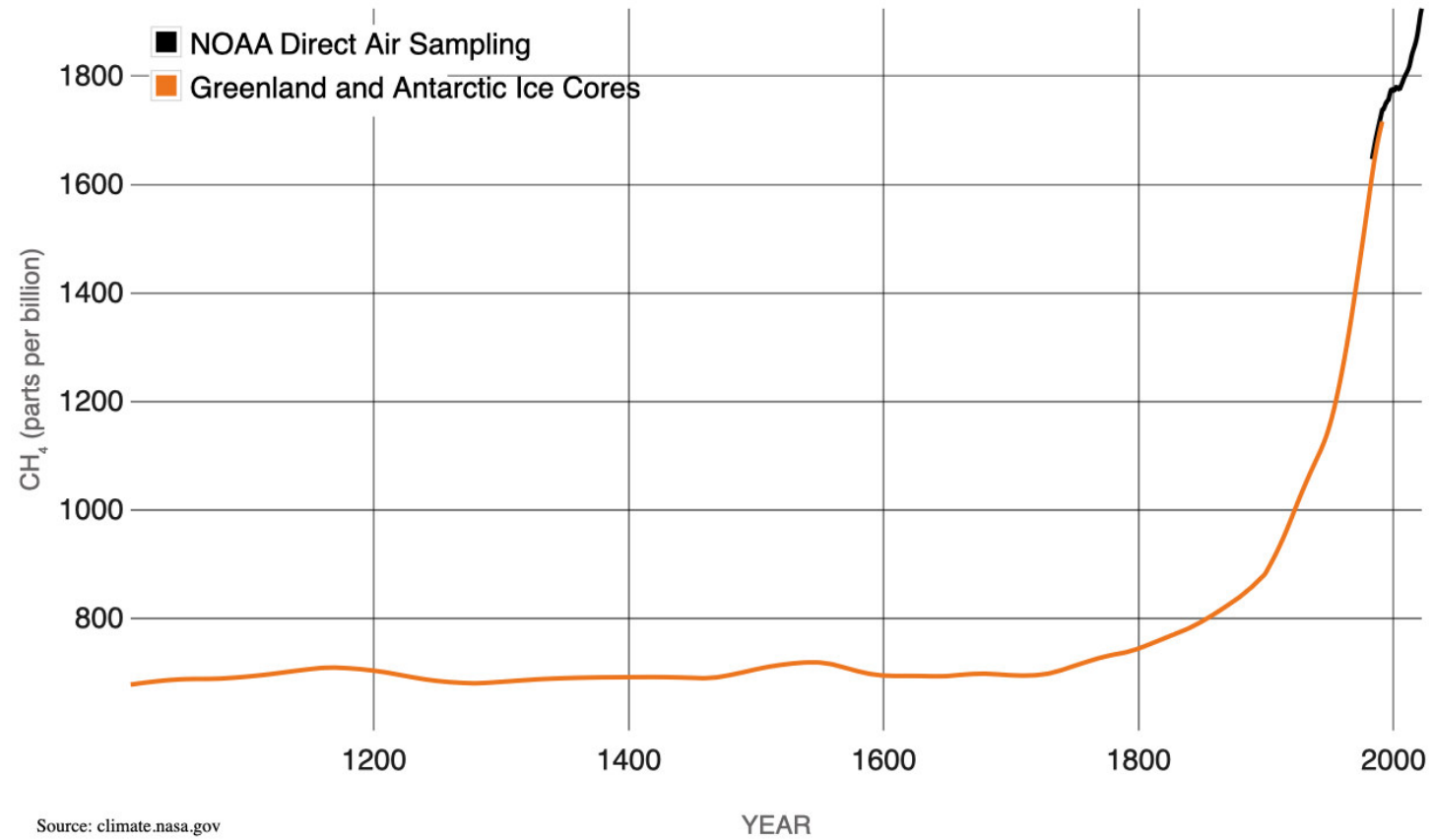


# CO<sub>2</sub>

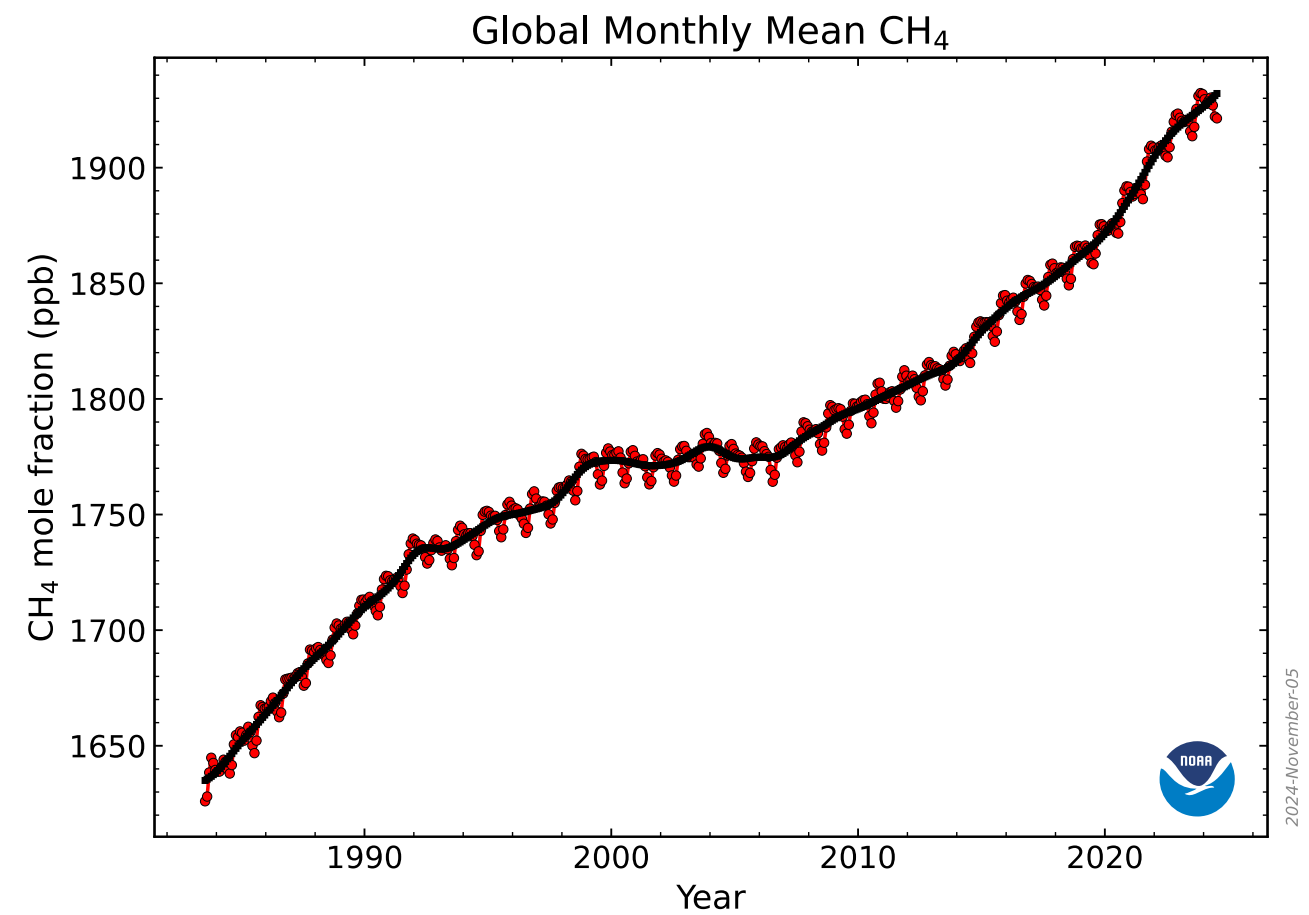


[https://www.esrl.noaa.gov/gmd/webdata/ccgg/trends/co2\\_data\\_mlo.png](https://www.esrl.noaa.gov/gmd/webdata/ccgg/trends/co2_data_mlo.png)

# Metano



<https://climate.nasa.gov/vital-signs/methane/?intent=121>

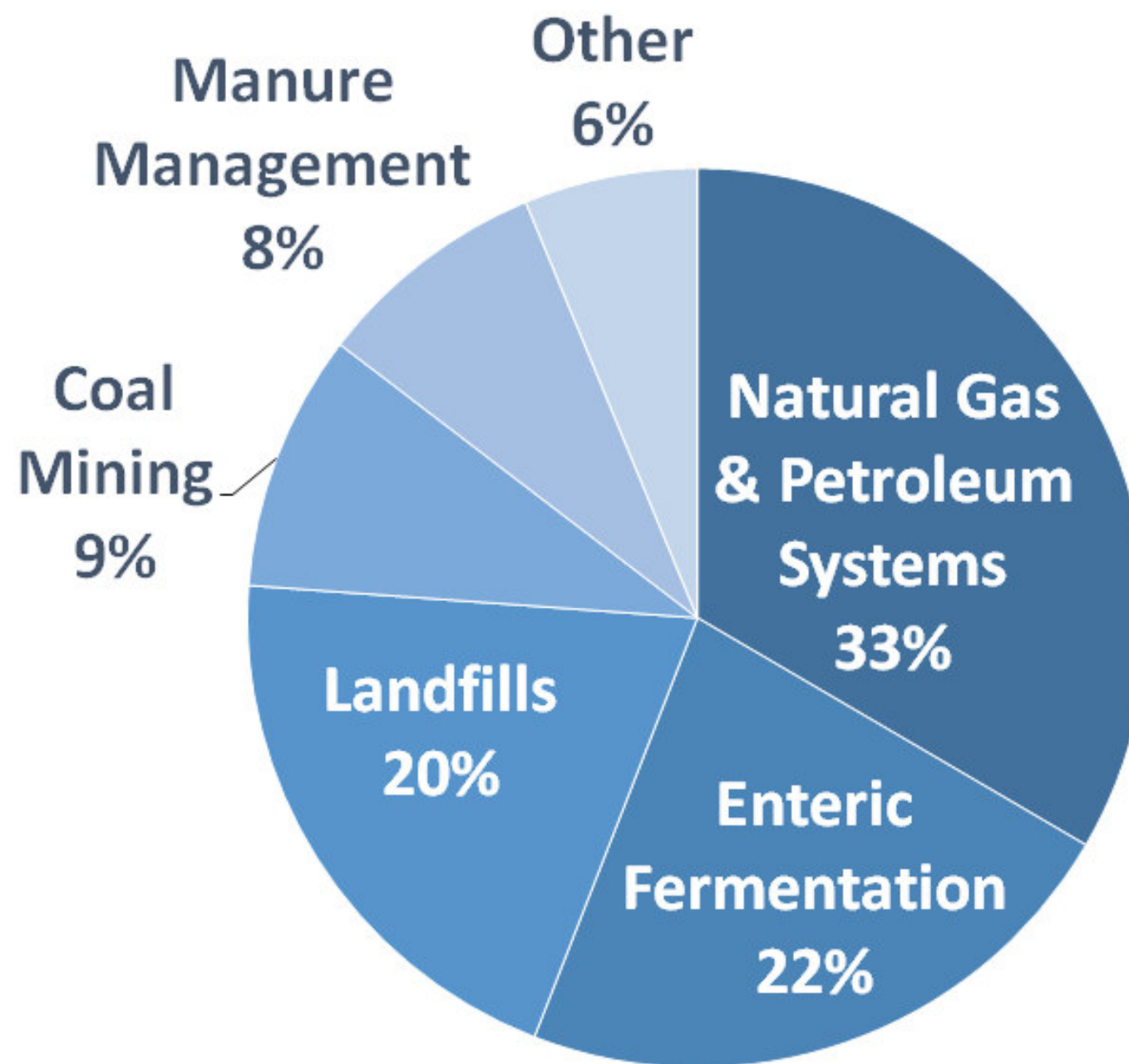


[https://www.esrl.noaa.gov/gmd/webdata/ccgg/trends/ch4\\_trend\\_all\\_gl.pdf](https://www.esrl.noaa.gov/gmd/webdata/ccgg/trends/ch4_trend_all_gl.pdf)



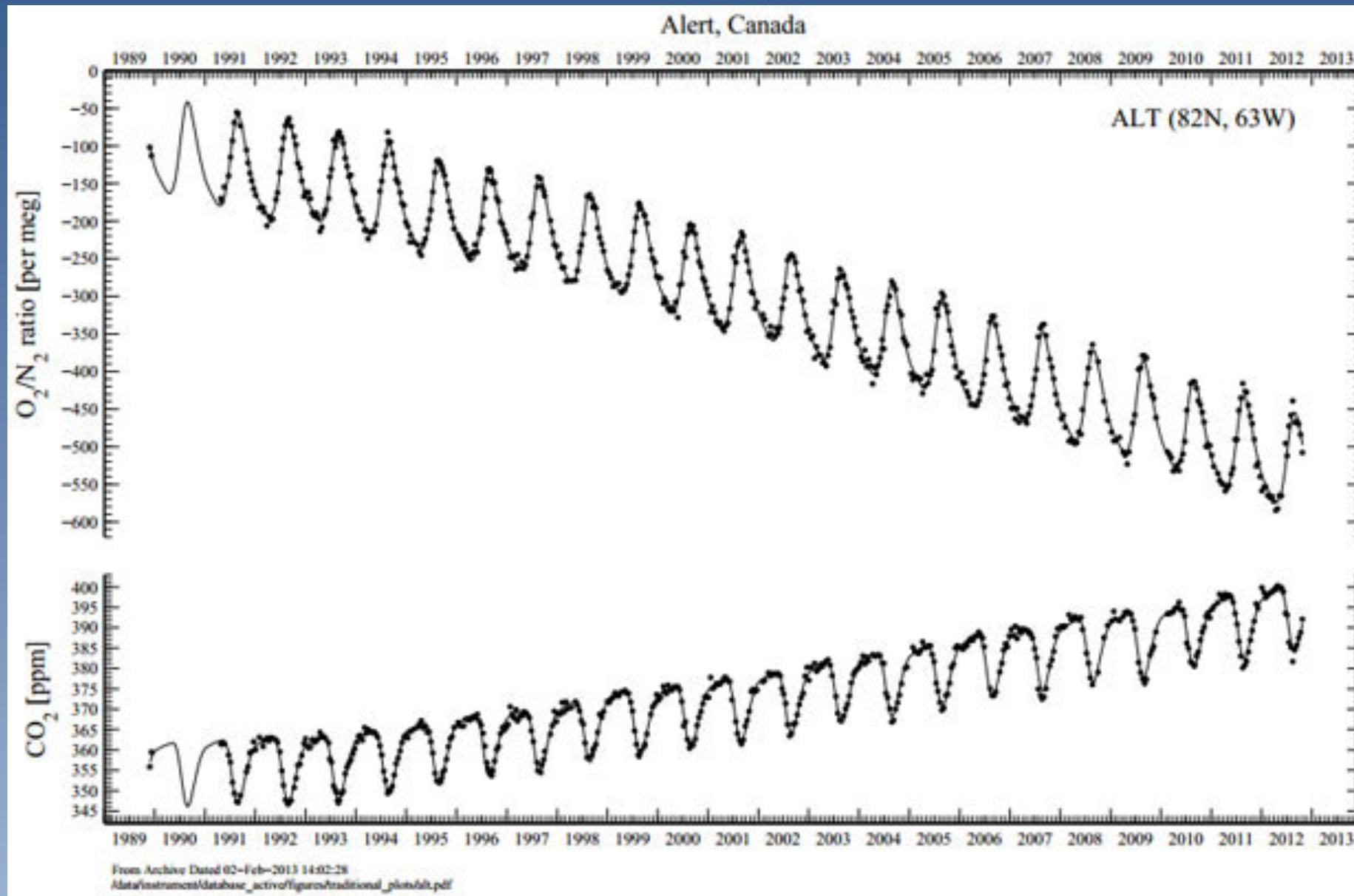
# Sorgenti di metano

## U.S. Methane Emissions, By Source



U.S. Environmental Protection Agency (2014).  
*U.S. Greenhouse Gas Inventory Report: 1990-2014.*

# Ossigeno consumato dalle combustioni



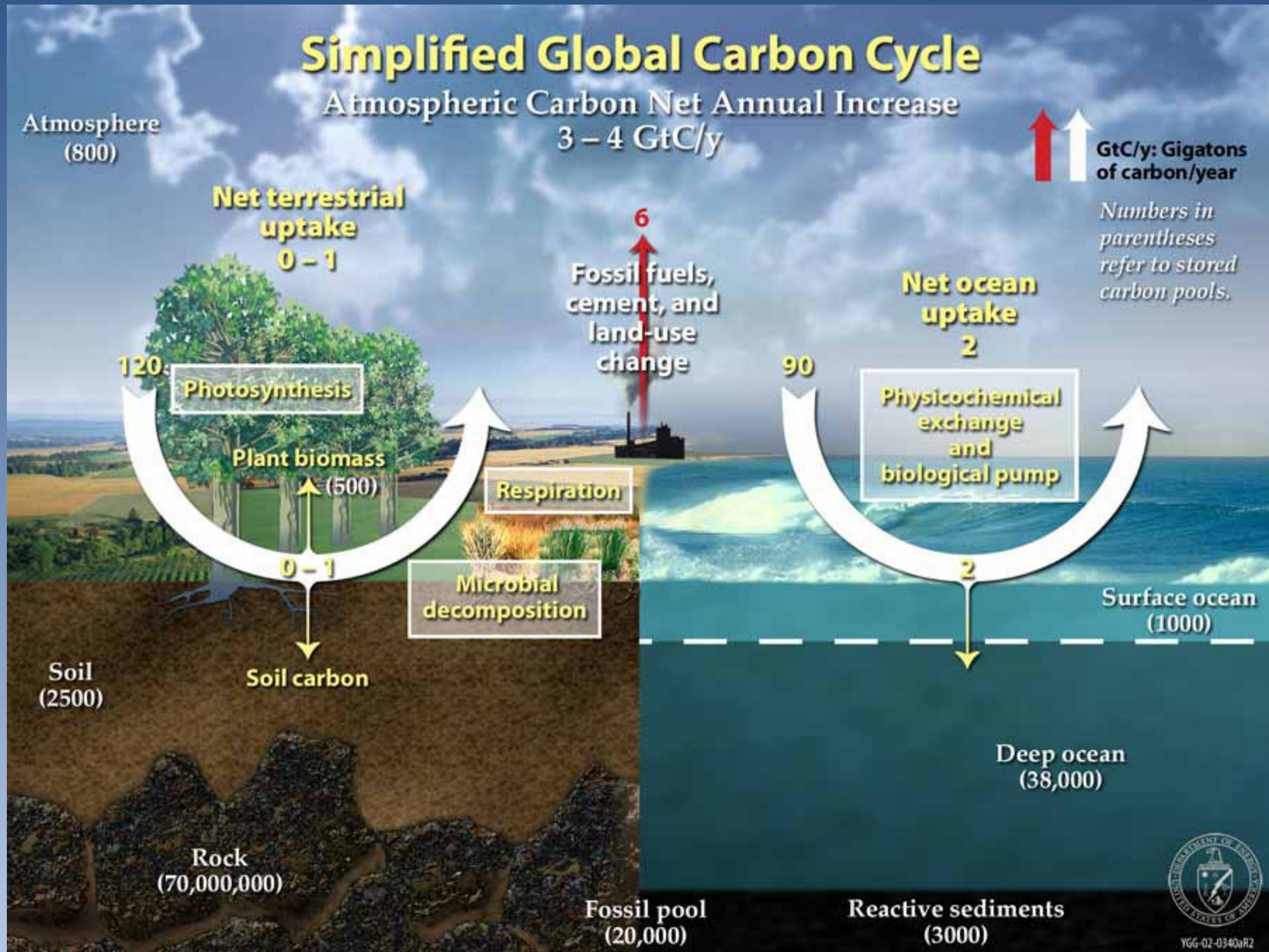
Il trend osservato è di -19 'per meg' (=ppm) per anno.

<http://scrippso2.ucsd.edu>



***PAUSA 1***

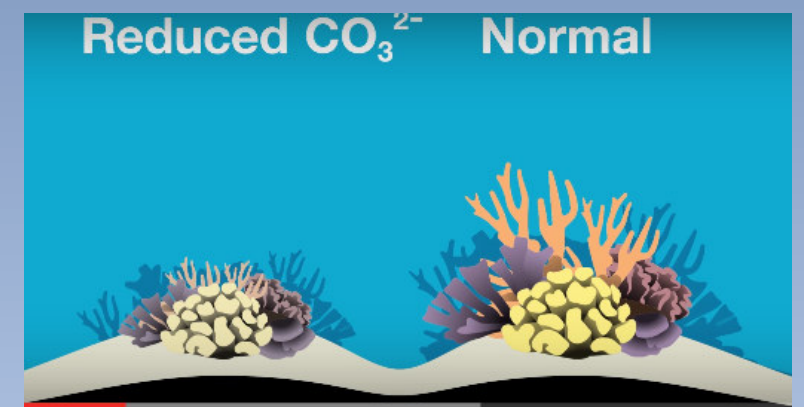
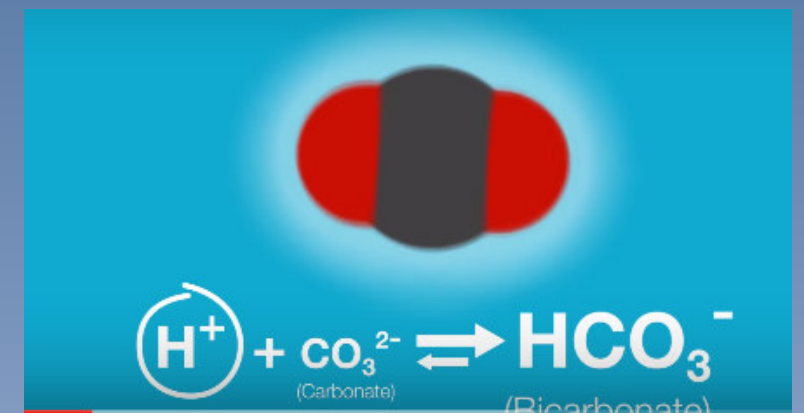
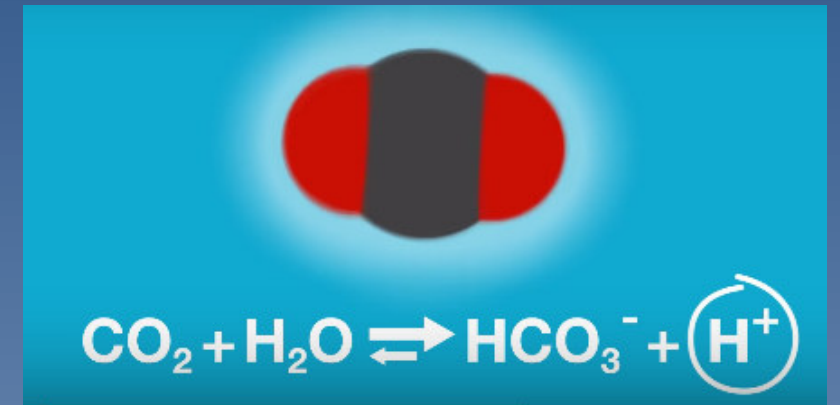
# 4. Acidificazione degli oceani





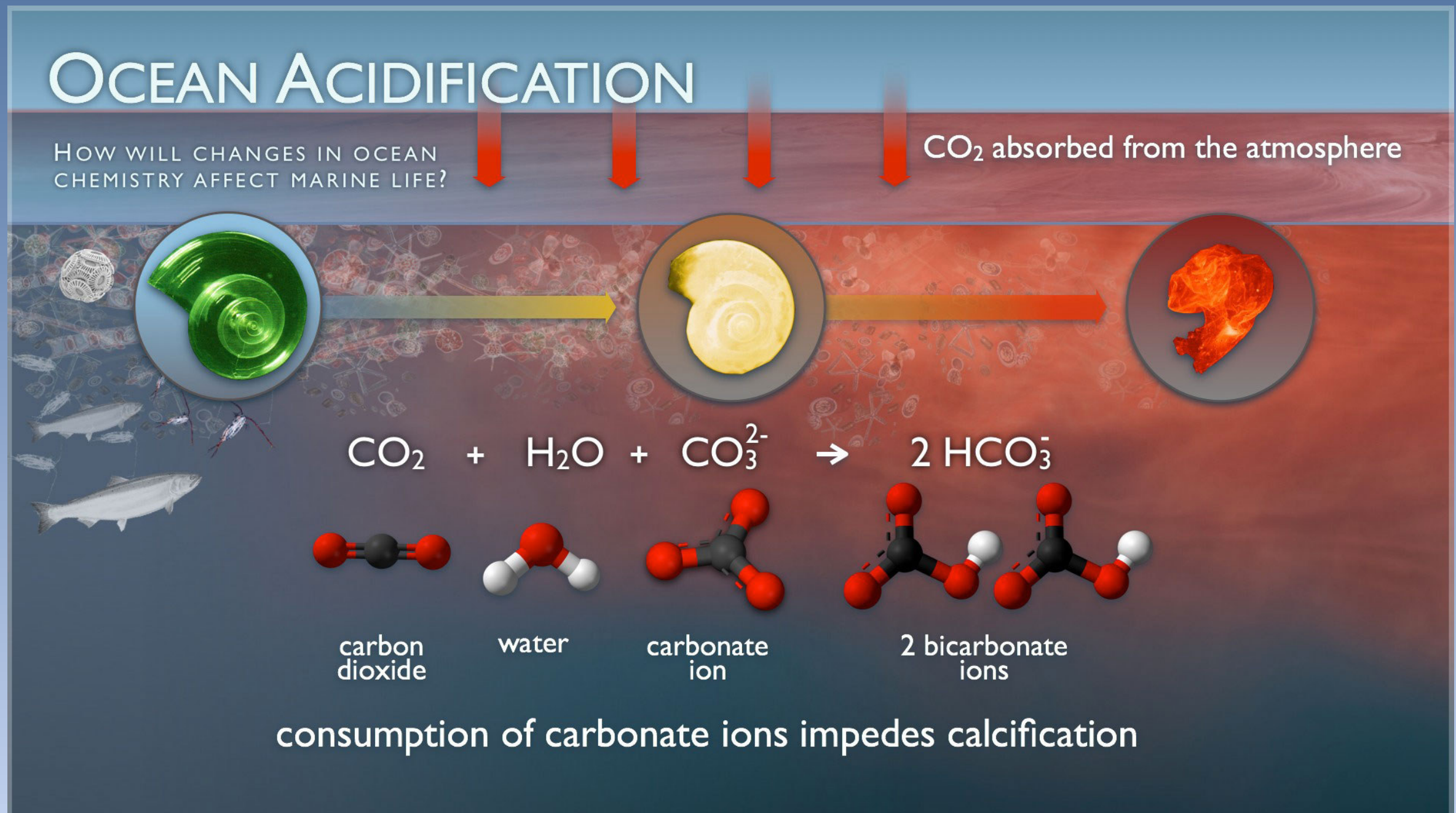
# Come funziona l'acidificazione degli oceani:

- Aggiungendo  $\text{CO}_2$  si producono ioni  $\text{H}^+$  che rendono l'acqua più acida (riduzione del pH)
- Ciò a sua volta riduce gli ioni  $\text{CO}_3^{2-}$
- La riduzione degli ioni  $\text{CO}_3^{2-}$  rende più difficile per gli organismi costruire le conchiglie, soprattutto se aragonitiche



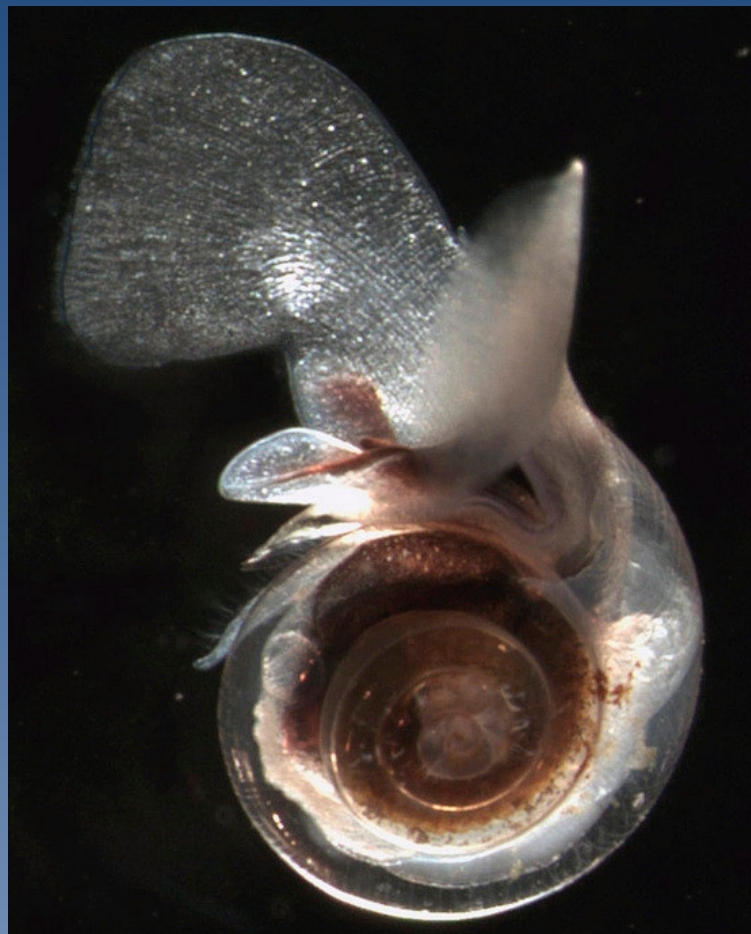
## Come funziona l'acidificazione degli oceani:

- Ci vogliono centinaia di anni per equilibrare l'alterazione dei silicati, o per riequilibrare i carbonati di profondità
- Riduzione di 0,1 nel pH = -26% di ioni  $\text{CO}_3^{2-}$





## PTEROPODI piccoli molluschi pelagici



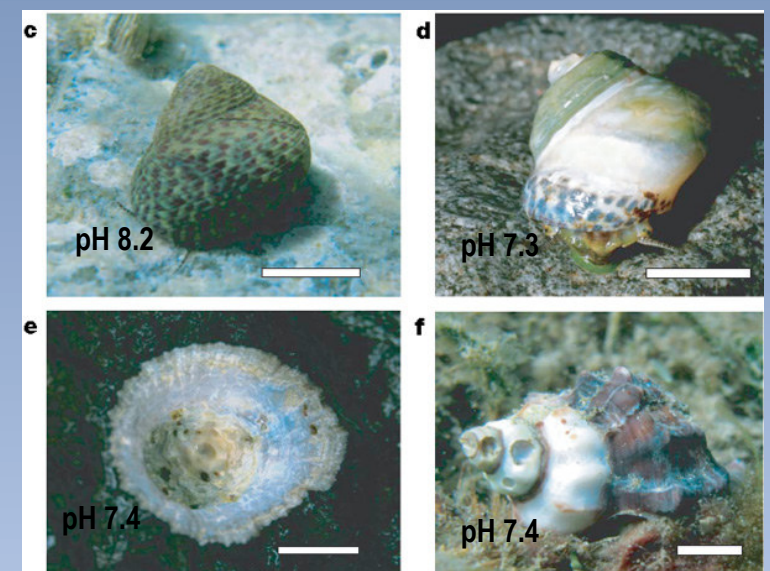
Dissoluzione di un guscio di pteropode dopo 45 giorni di immersione in acqua di mare con pH e concentrazione ione carbonato ai livelli proiettati per il 2100.

NOAA PMEL Carbon Program

<https://www.pmel.noaa.gov/co2/story/>

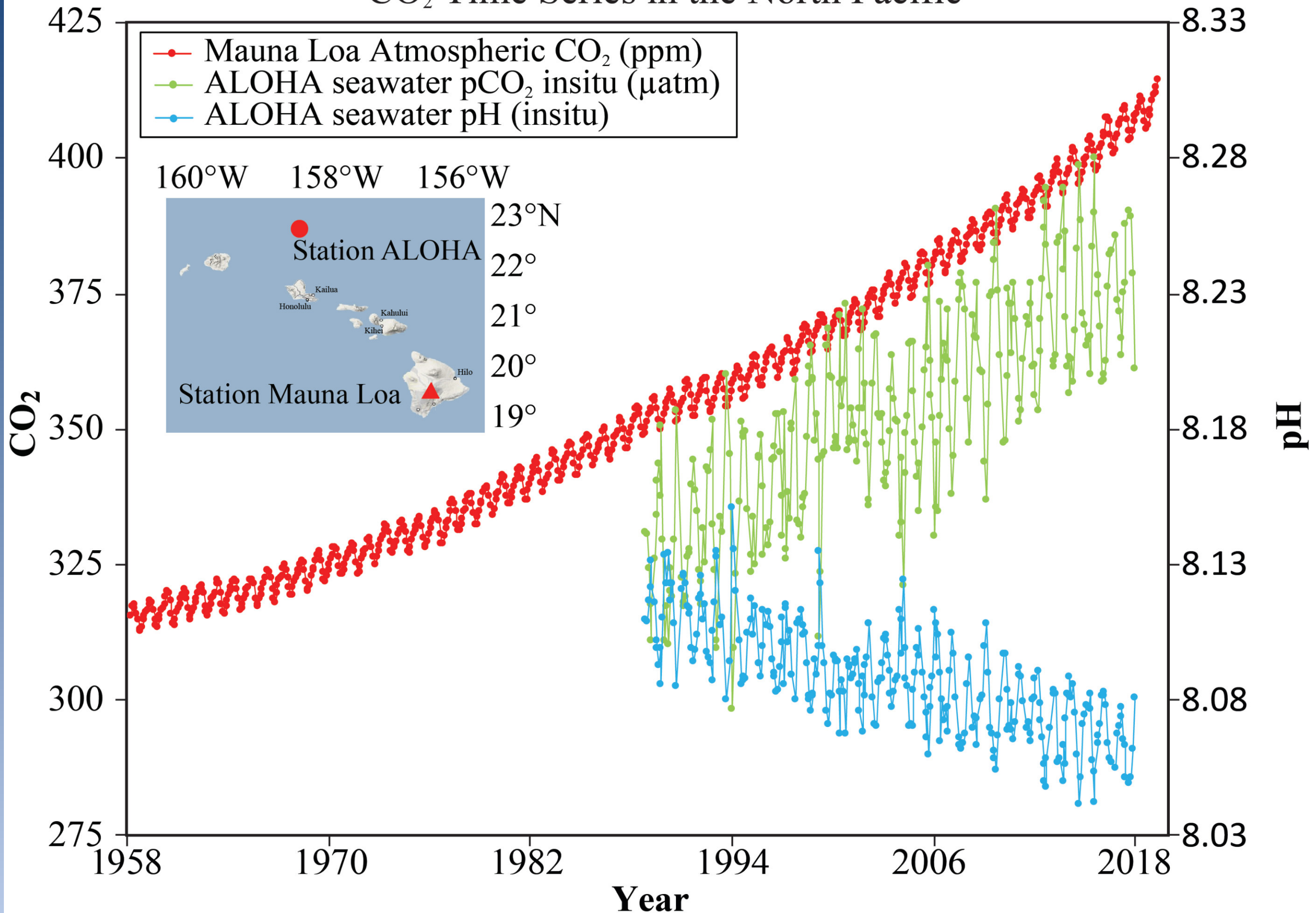
effetti della acidificazione  
sugli organismi

gasteropodi con periostraco  
danneggiato



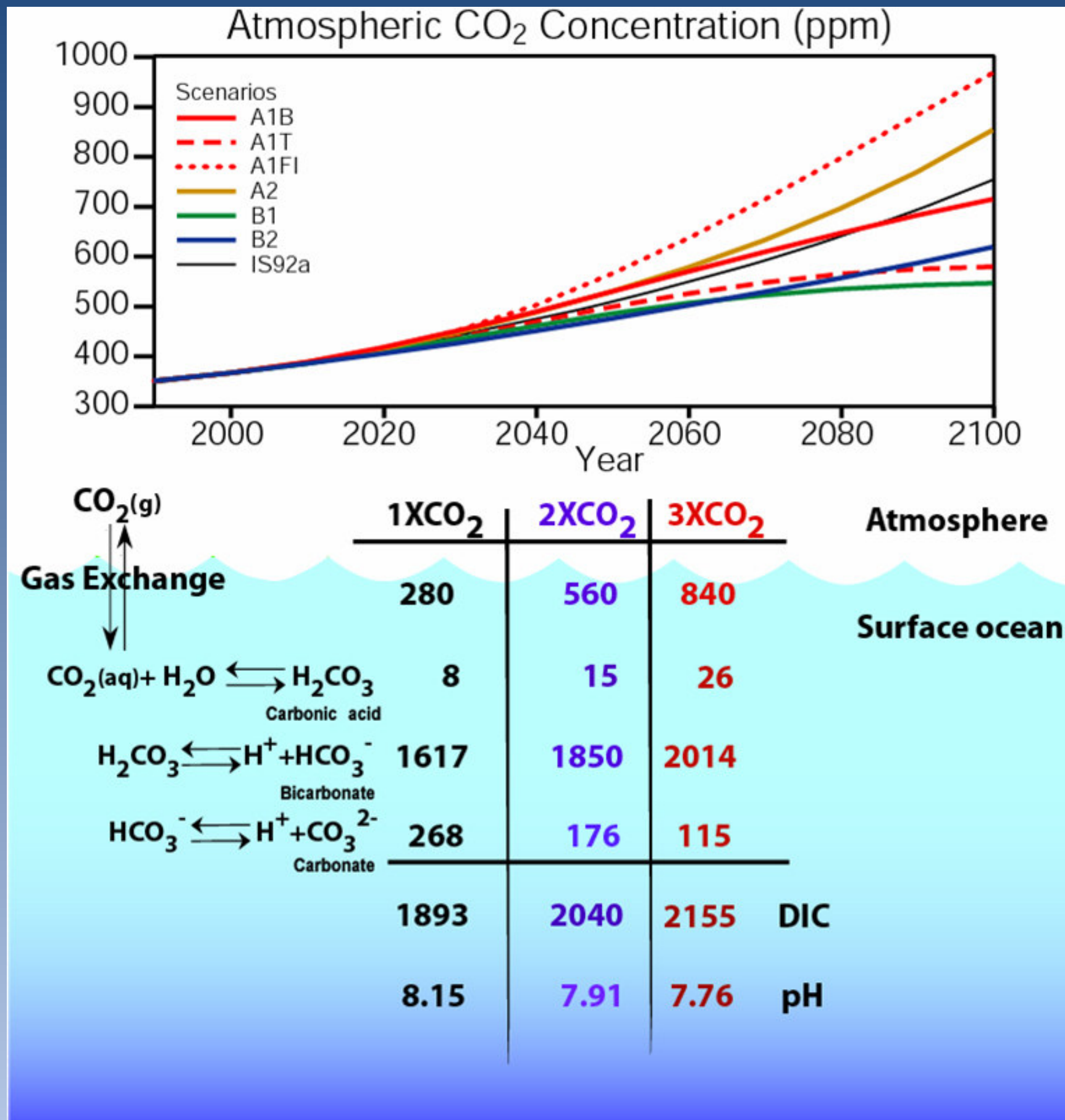
<https://coralreefs.blogs.rice.edu/2017/02/21/>

# CO<sub>2</sub> Time Series in the North Pacific

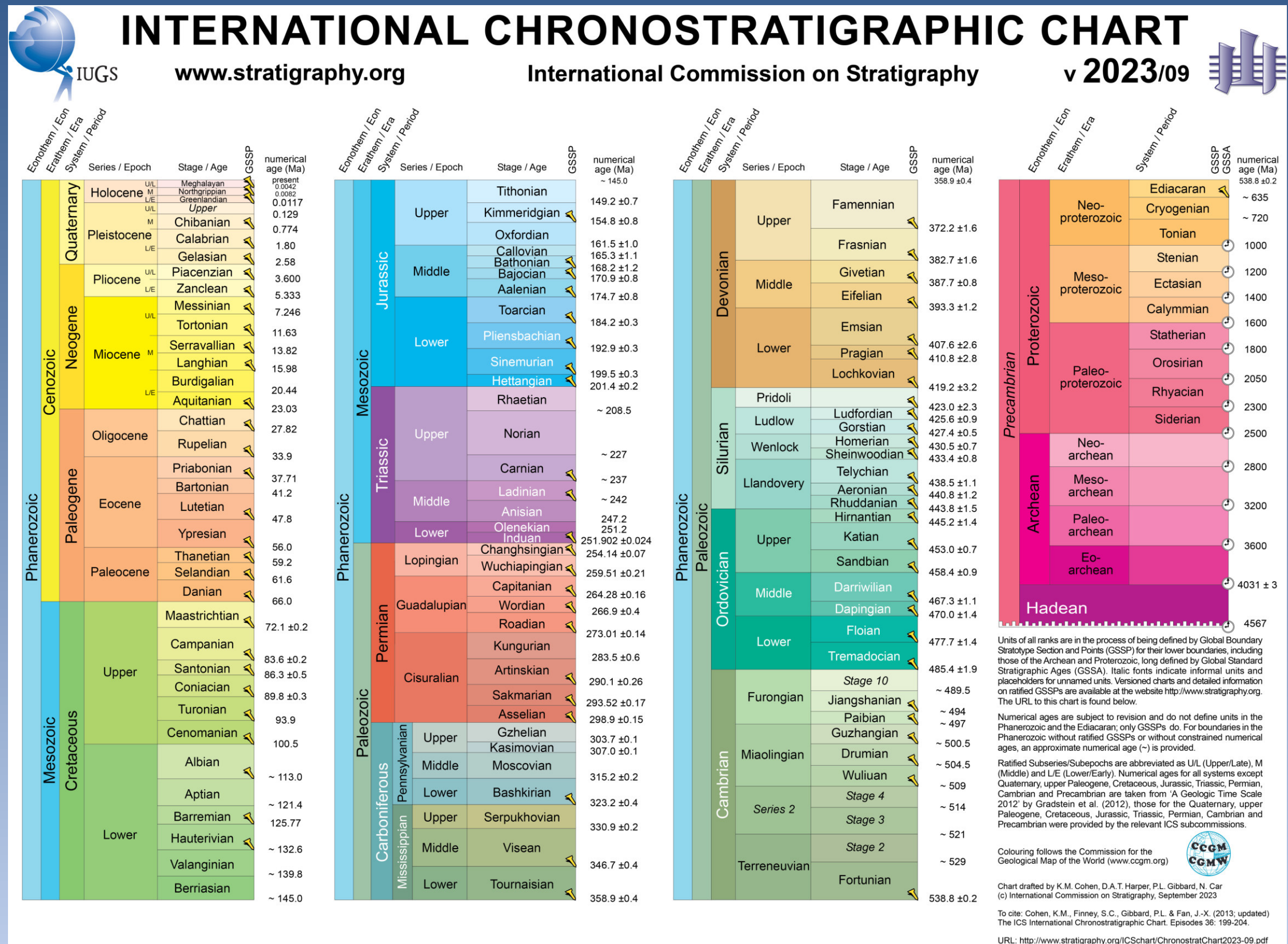


Data: Mauna Loa ([ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2\\_mm\\_mlo.txt](ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_mm_mlo.txt)) ALOHA ([http://hahana.soest.hawaii.edu/hot/products/HOT\\_surface\\_CO2.txt](http://hahana.soest.hawaii.edu/hot/products/HOT_surface_CO2.txt))  
Ref: J.E. Dore et al, 2009. Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific. *Proc Natl Acad Sci USA* **106**:12235-12240.



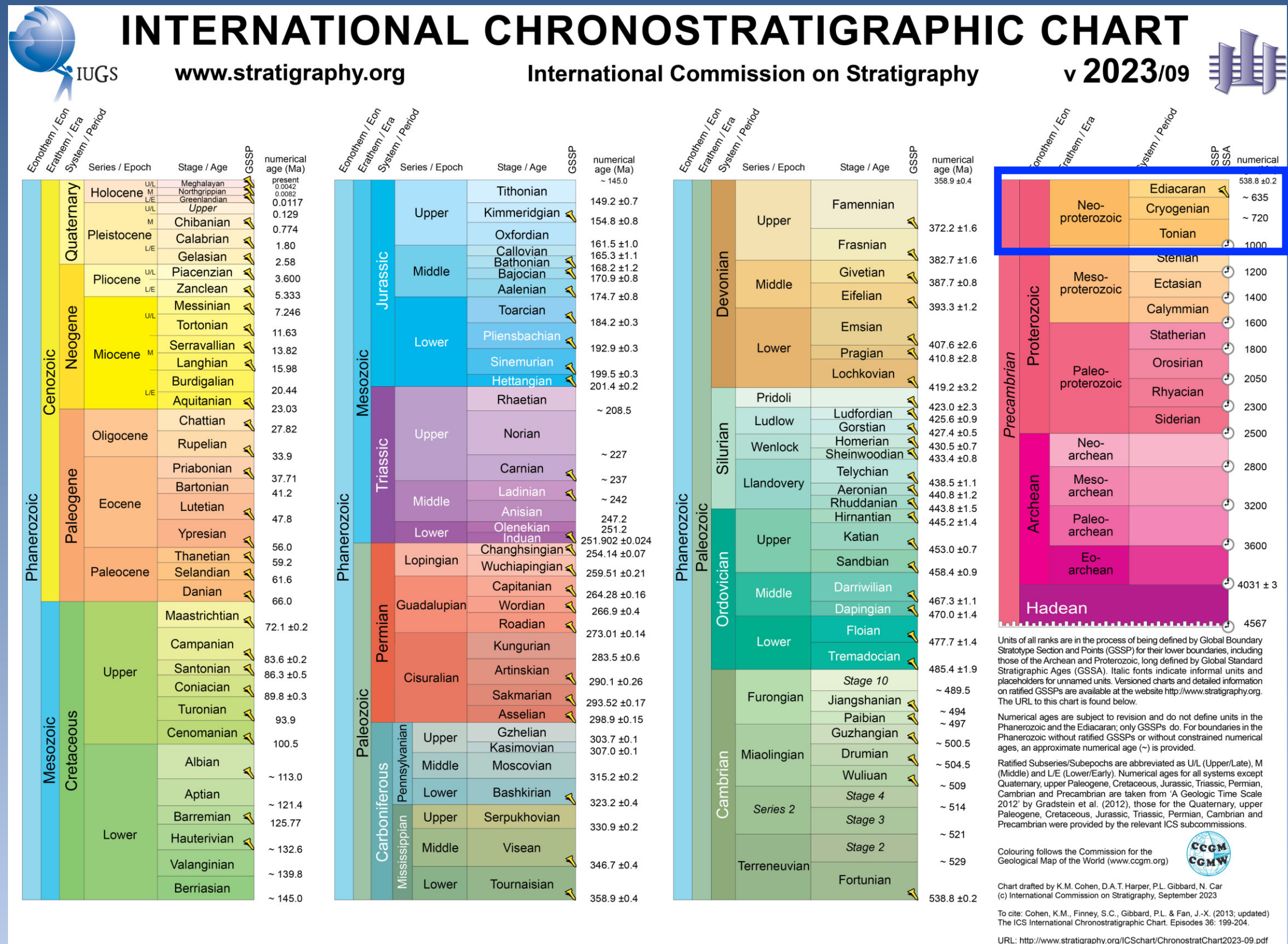


# 5. Registro del passato e variabili climatiche

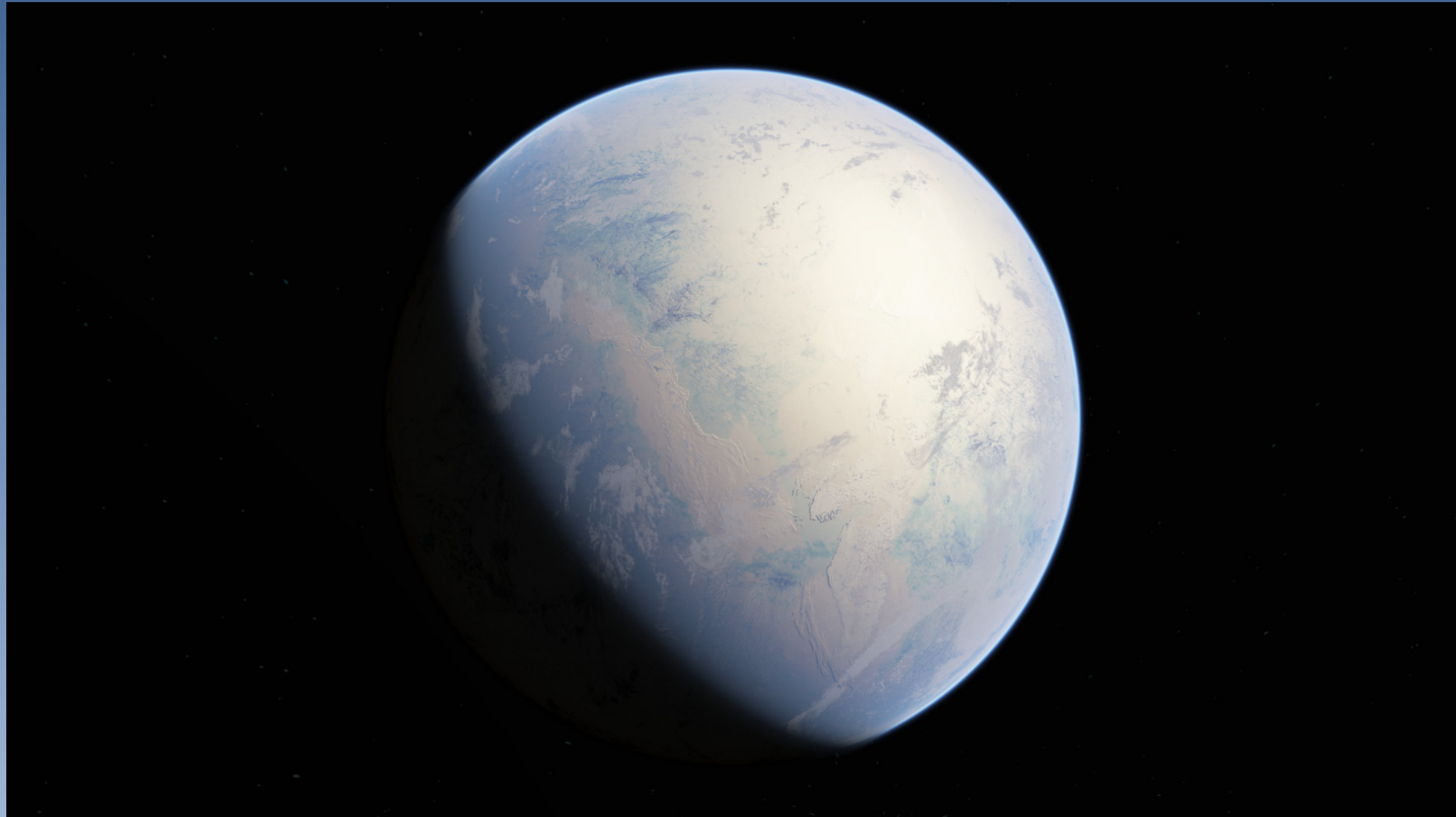




# 5. Registro del passato e variabili climatiche



# La “Terra a palla di neve” (*Snowball Earth*)



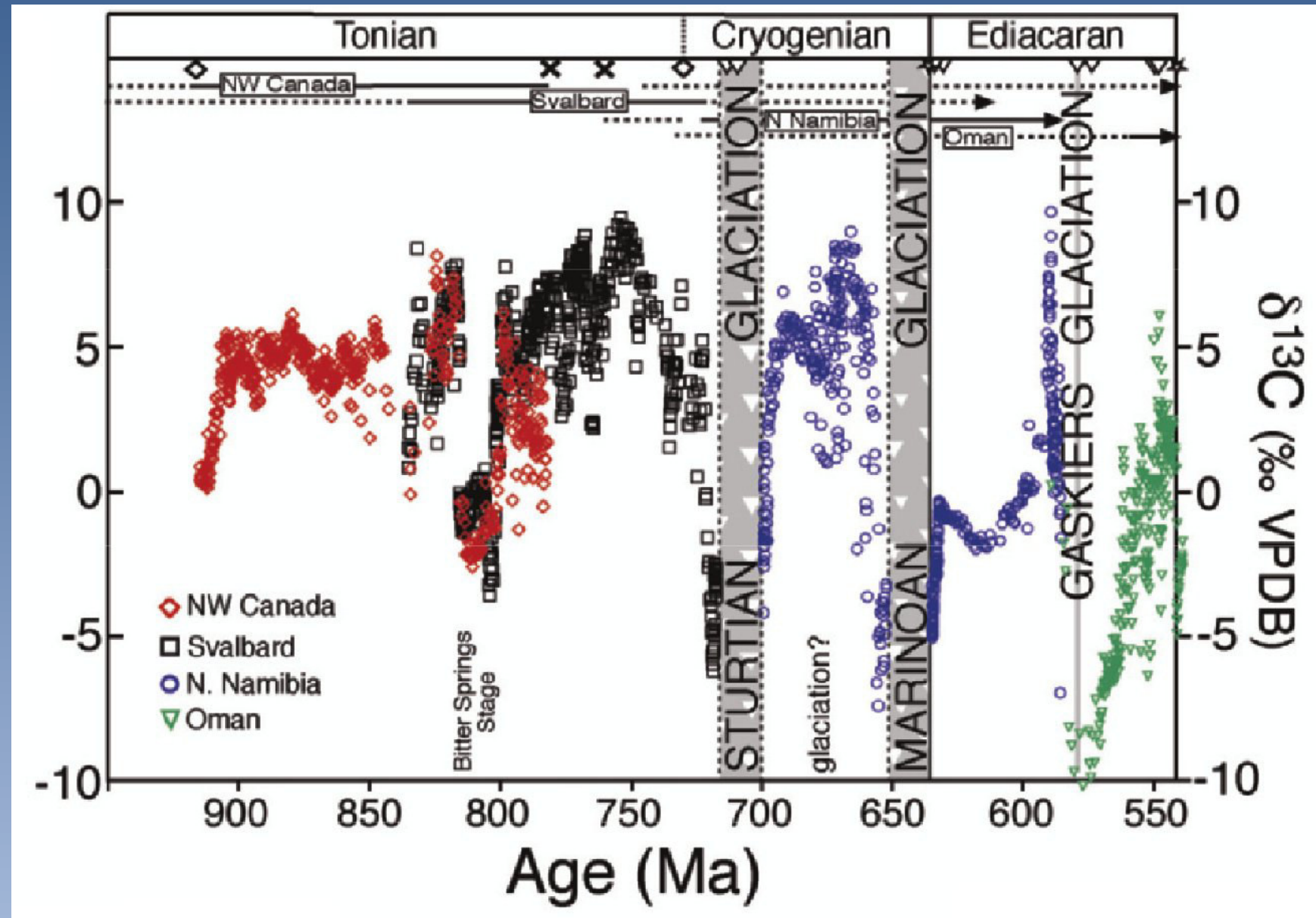
By Oleg Kuznetsov - 3depix - <http://3depix.com/> - Own work, CC BY-SA 4.0,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=89577421>



# Datazioni delle rocce nel Neoproterozoico

Il registro fossile del Neoproterozoico è ampiamente incompleto. Di conseguenza, non esiste una scala biostratigrafica sufficientemente dettagliata, ed anche i depositi vulcanici databili con il metodo U-Pb sono abbastanza scarsi.

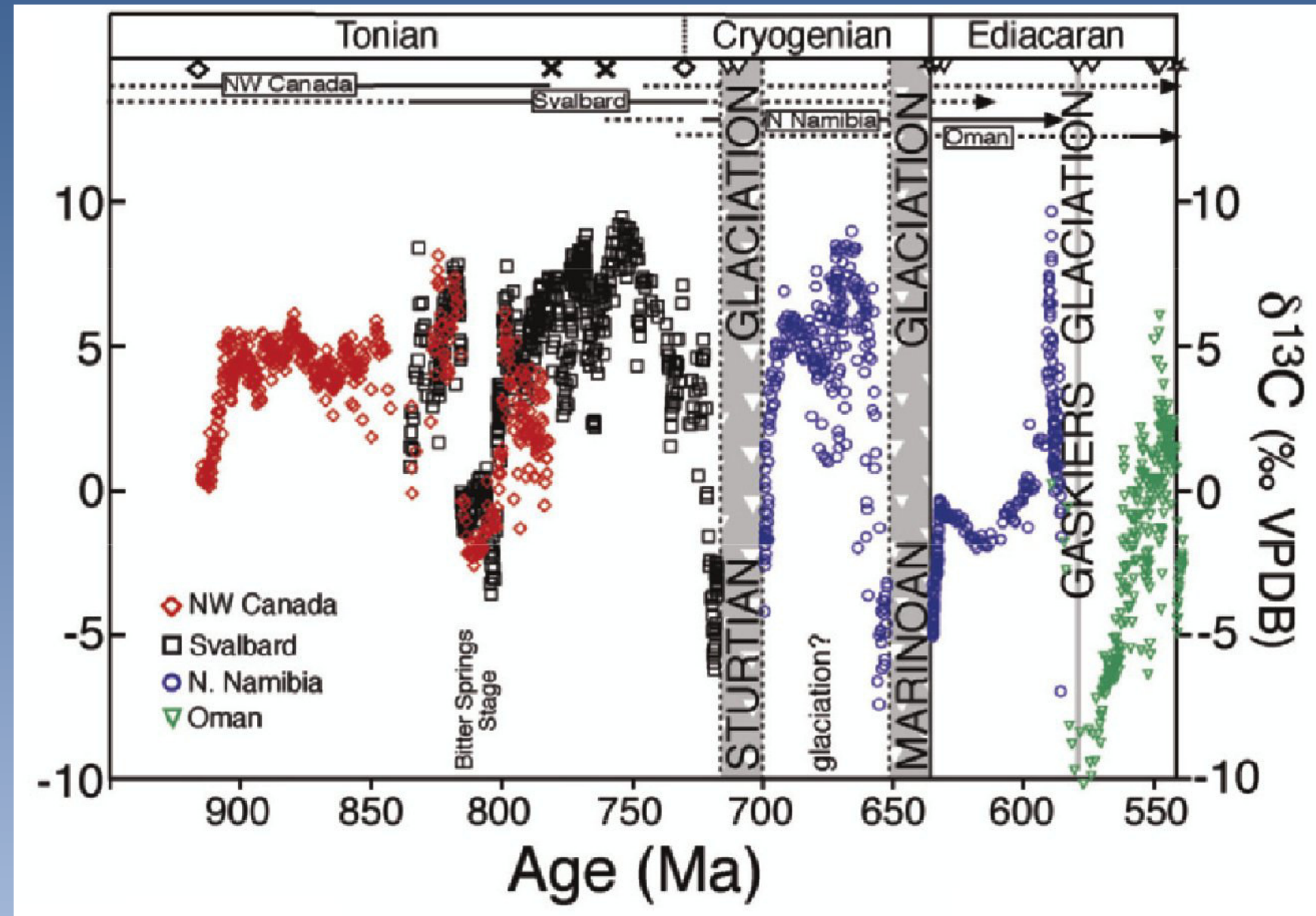
Gli ostacoli allo sviluppo di una scala stratigrafica nel Neoproterozoico sono stati in parte superati grazie all'uso degli isotopi del C ( $\delta^{13}\text{C}$ ).



# Glaciazioni nel Neoproterozoico

Almeno tre periodi glaciali sono riconoscibili nella parte alta del Neoproterozoico:

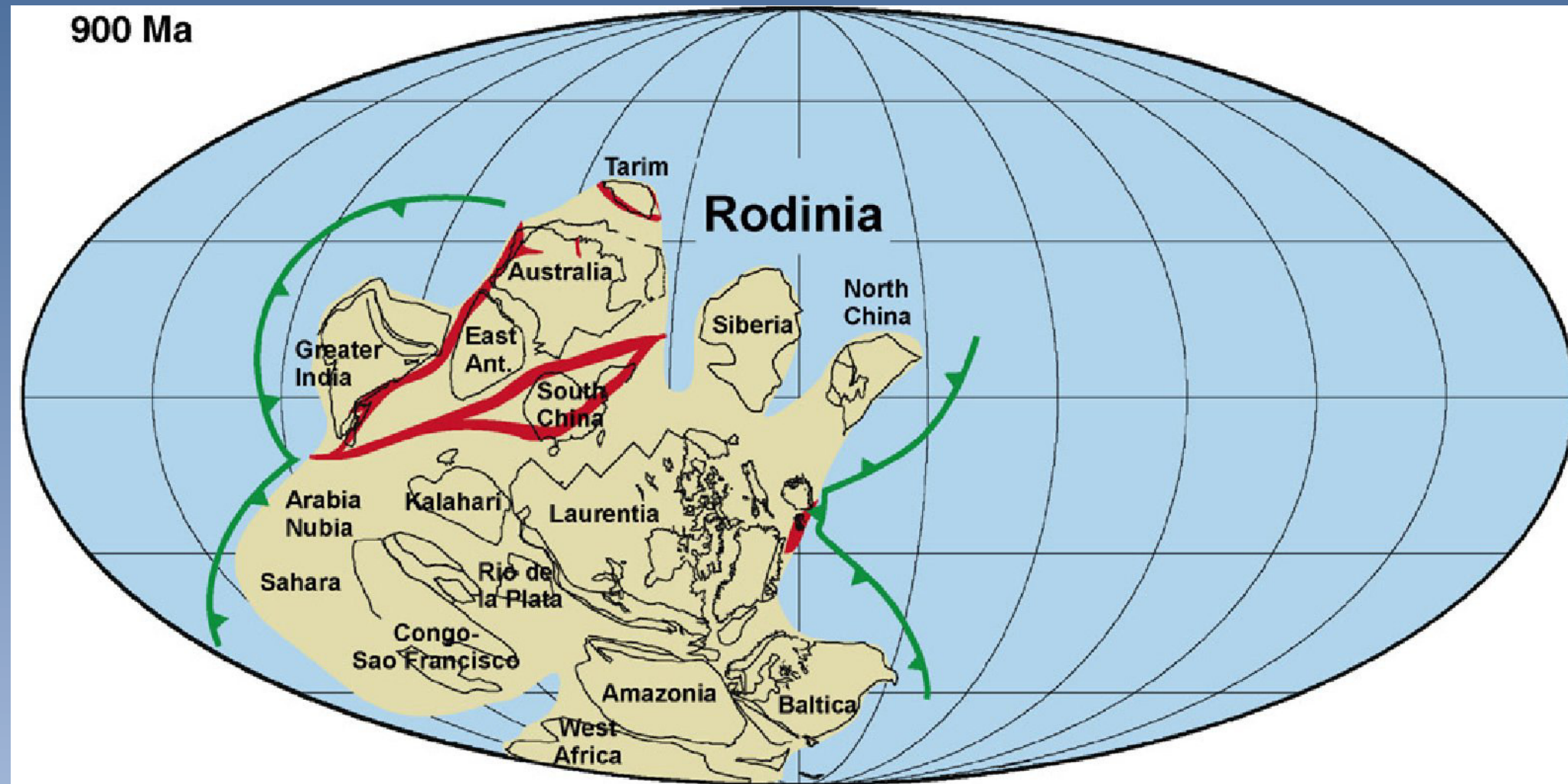
- a) **Glaciazione Sturtiana** (circa 715-700 Ma fa).
- b) **Glaciazione Marinoana** (circa 650-635 Ma fa).
- c) **Glaciazione di Gaskiers** (circa 580 Ma fa).





# Il Toniano (1000-720 Ma)

Durante questo periodo inizia ad assemblarsi il **supercontinente Rodinia**.



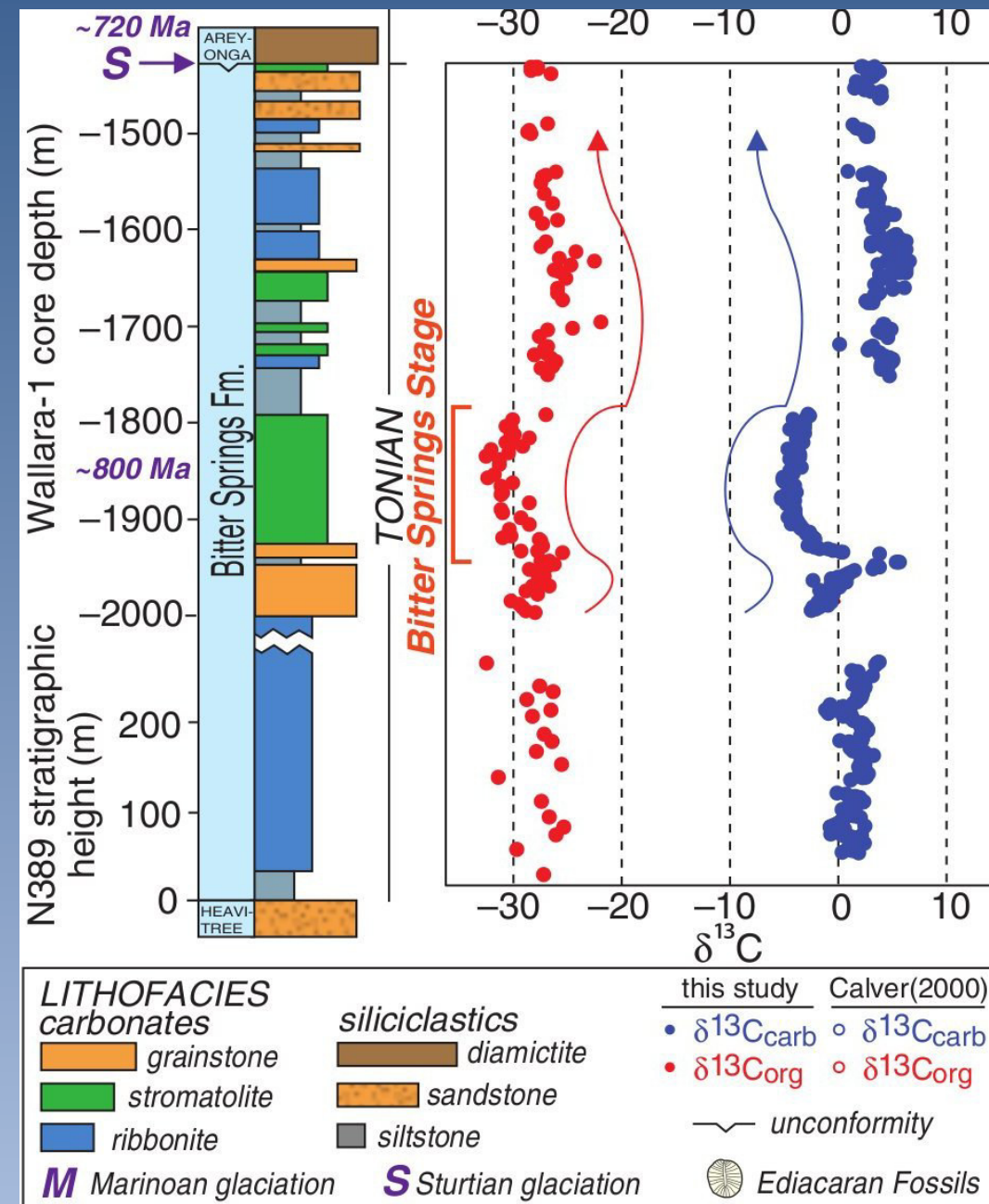
Da: Li et al (2008).

# Il Toniano (1000-720 Ma)

Il  $\delta^{13}\text{C}$  in questo periodo subisce un'importante oscillazione (*Bitter Springs Stage*).

Il significato di questo improvviso calo è ancora incerto, ma sembra che non sia legato a glaciazioni come avverrà in seguito.

Piuttosto è stato ipotizzato un evento di reale deriva dei poli (*True Polar Wander*) datato a circa 800 Ma fa. Come questo evento abbia potuto influire sul ciclo del C e quindi sul  $\delta^{13}\text{C}$  resta altamente speculativo.

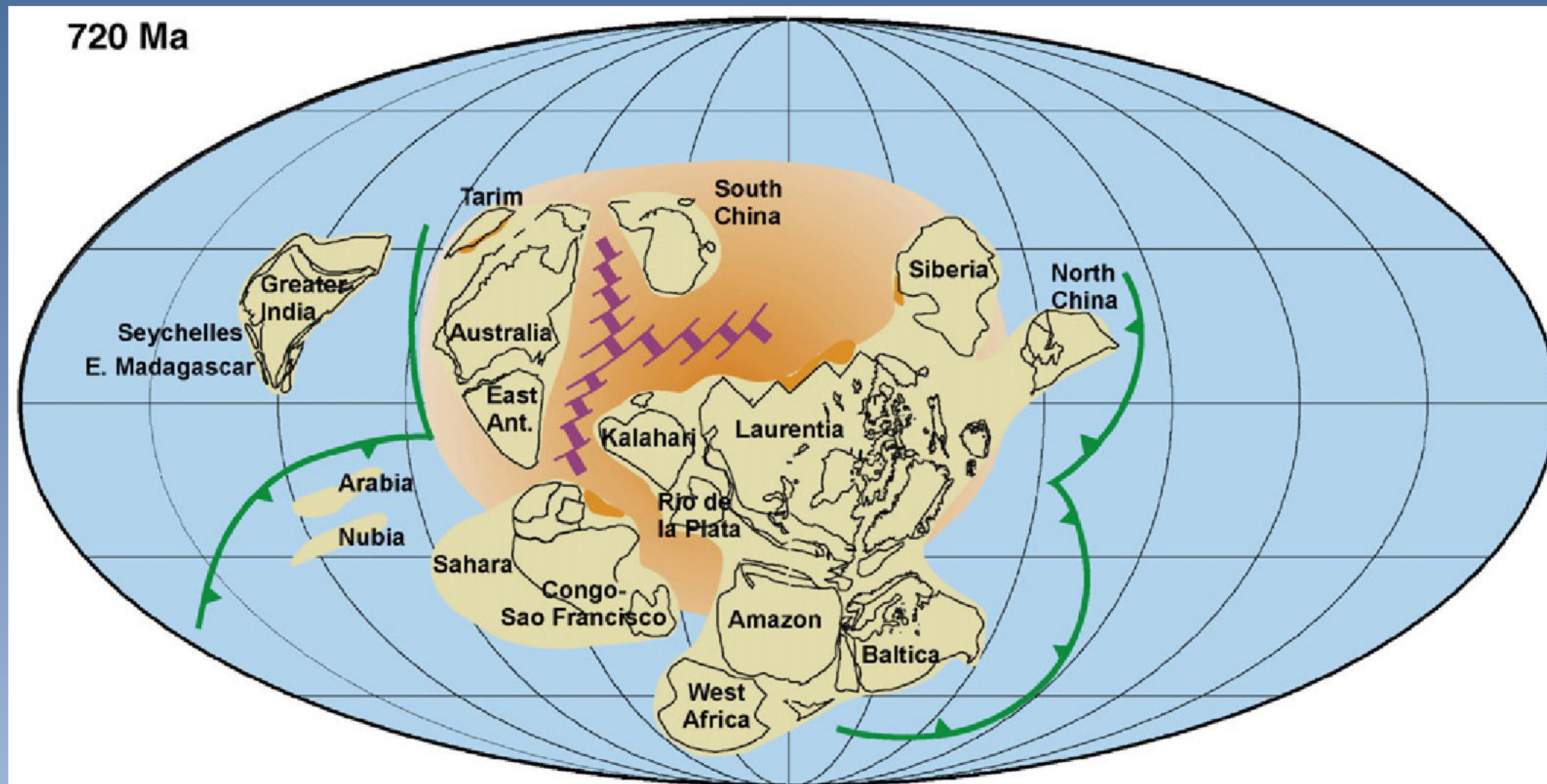


Da: Swanson-Hysell et al (2010).



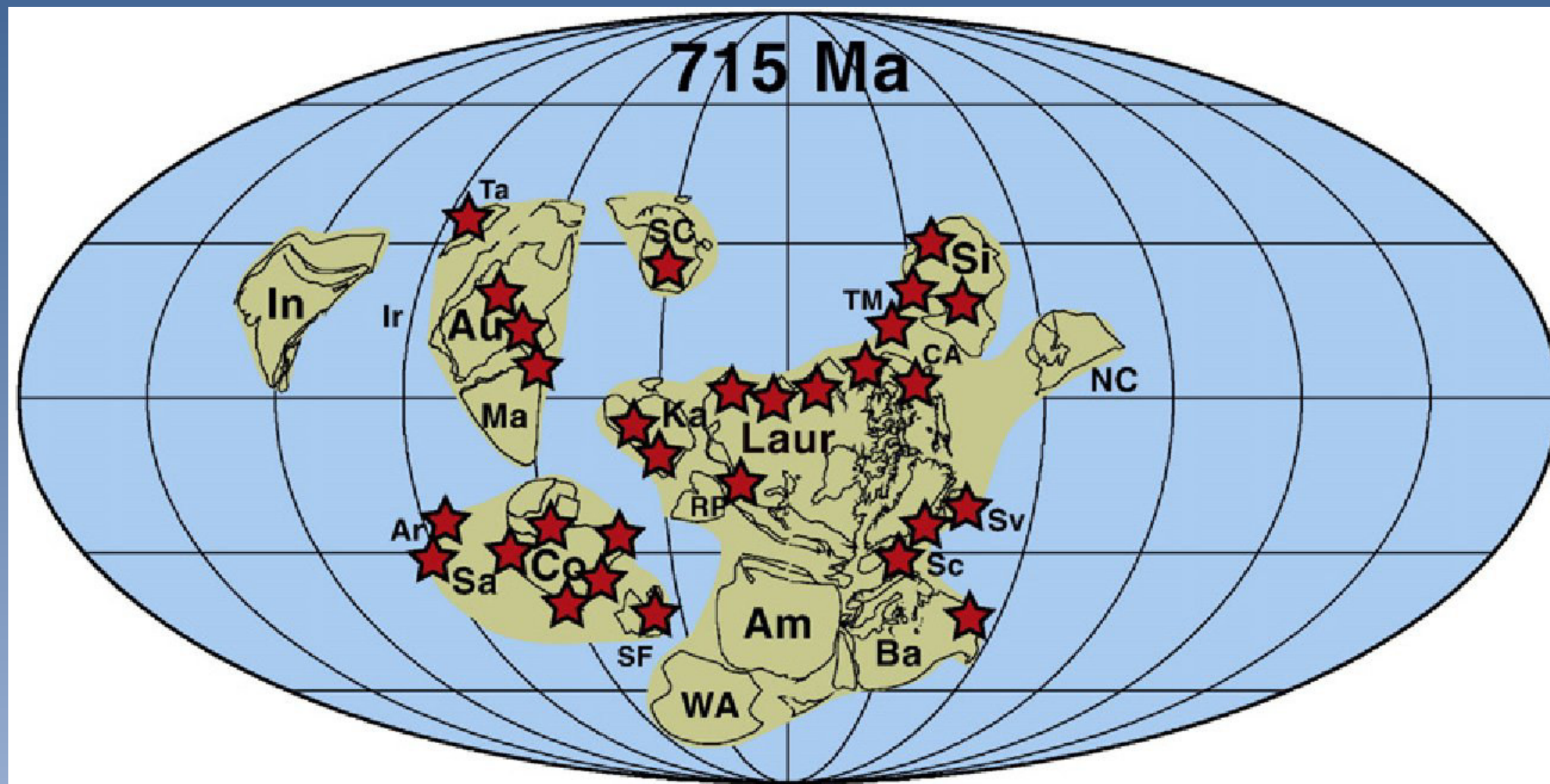
# Il Criogeniano (720-635 Ma)

Il **supercontinente Rodinia** inizia a smembrarsi. Le glaciazioni più intense mai registrate sono attribuite a questo periodo.



Da: Li et al (2008).

# La glaciazione Sturtiana (715-700 Ma)



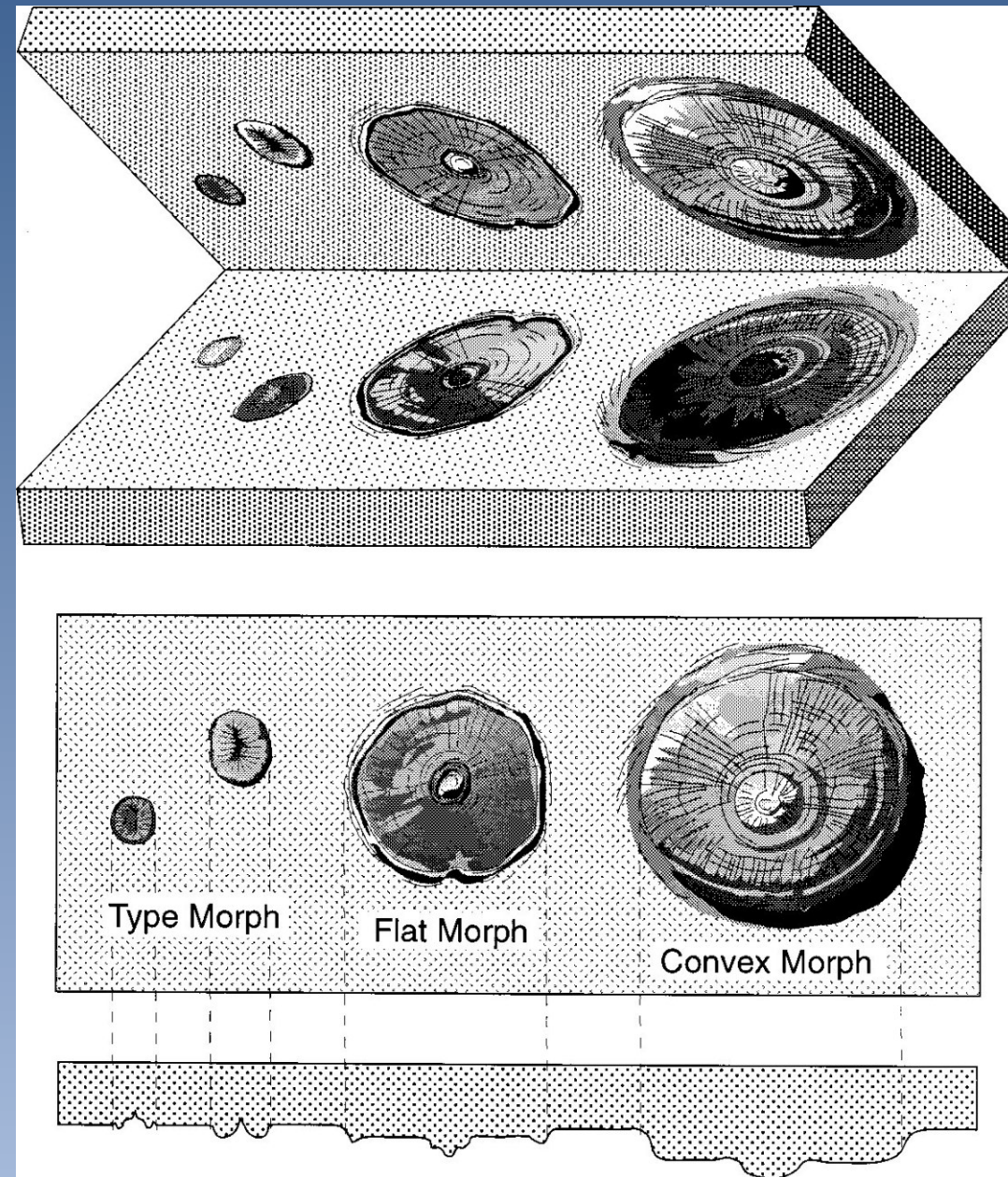
Distribuzione dei depositi glaciali attribuiti alla glaciazione Sturtiana.  
Da: Hoffman & Li (2009).



# L'interglaciale Sturtiano/Marinoano (700-650 Ma)

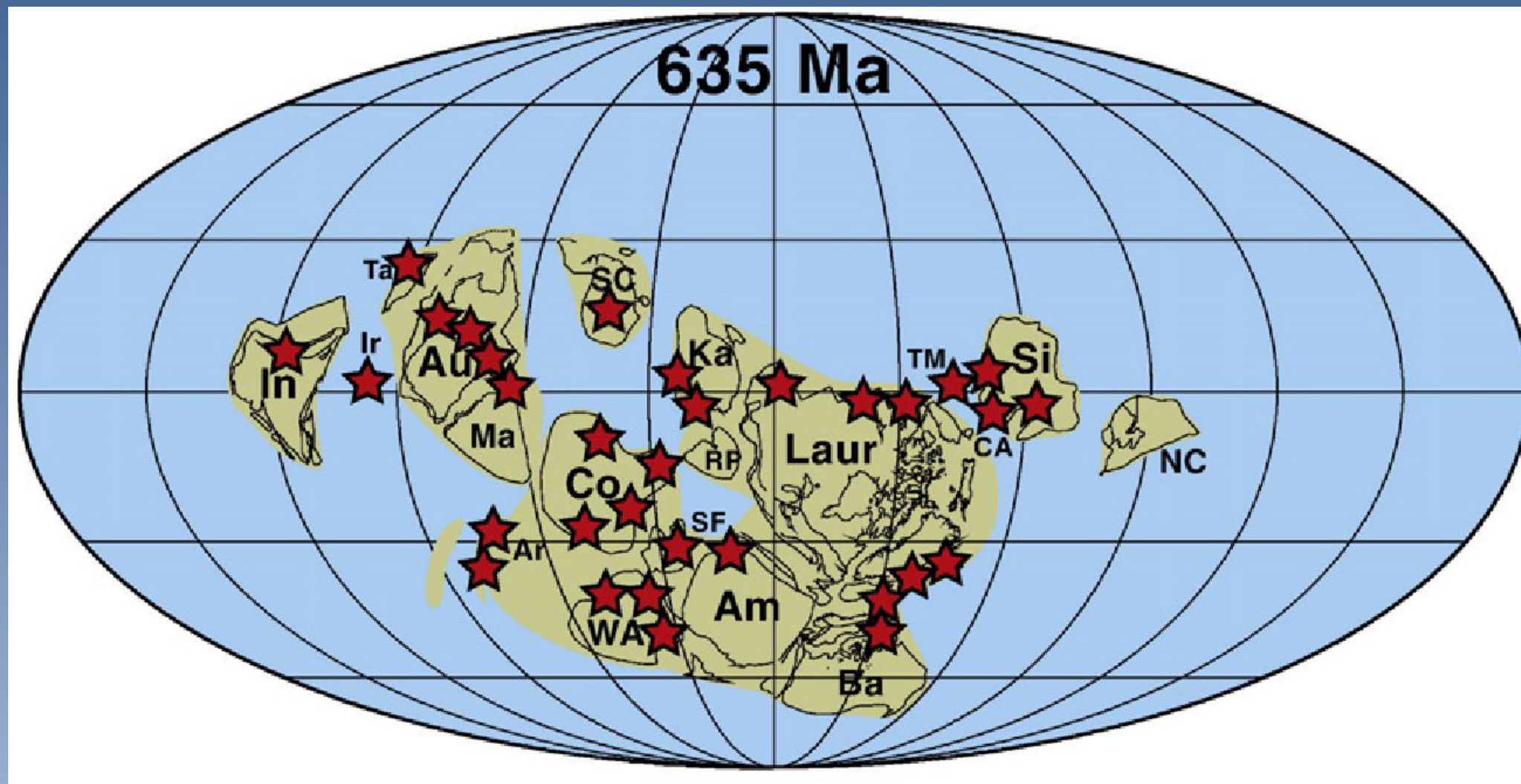
Alla glaciazione Sturtiana segue un **periodo interglaciale**.

In questo periodo compare il primo possibile rappresentante della **Fauna di Ediacara**, *Aspidella terranova*.



*Aspidella terranova* (da: Gehring et al 2000).

# La glaciazione Marinoana (650-635 Ma)



Distribuzione dei depositi glaciali attribuiti alla glaciazione Marinoana.  
Da: Hoffman & Li (2009).



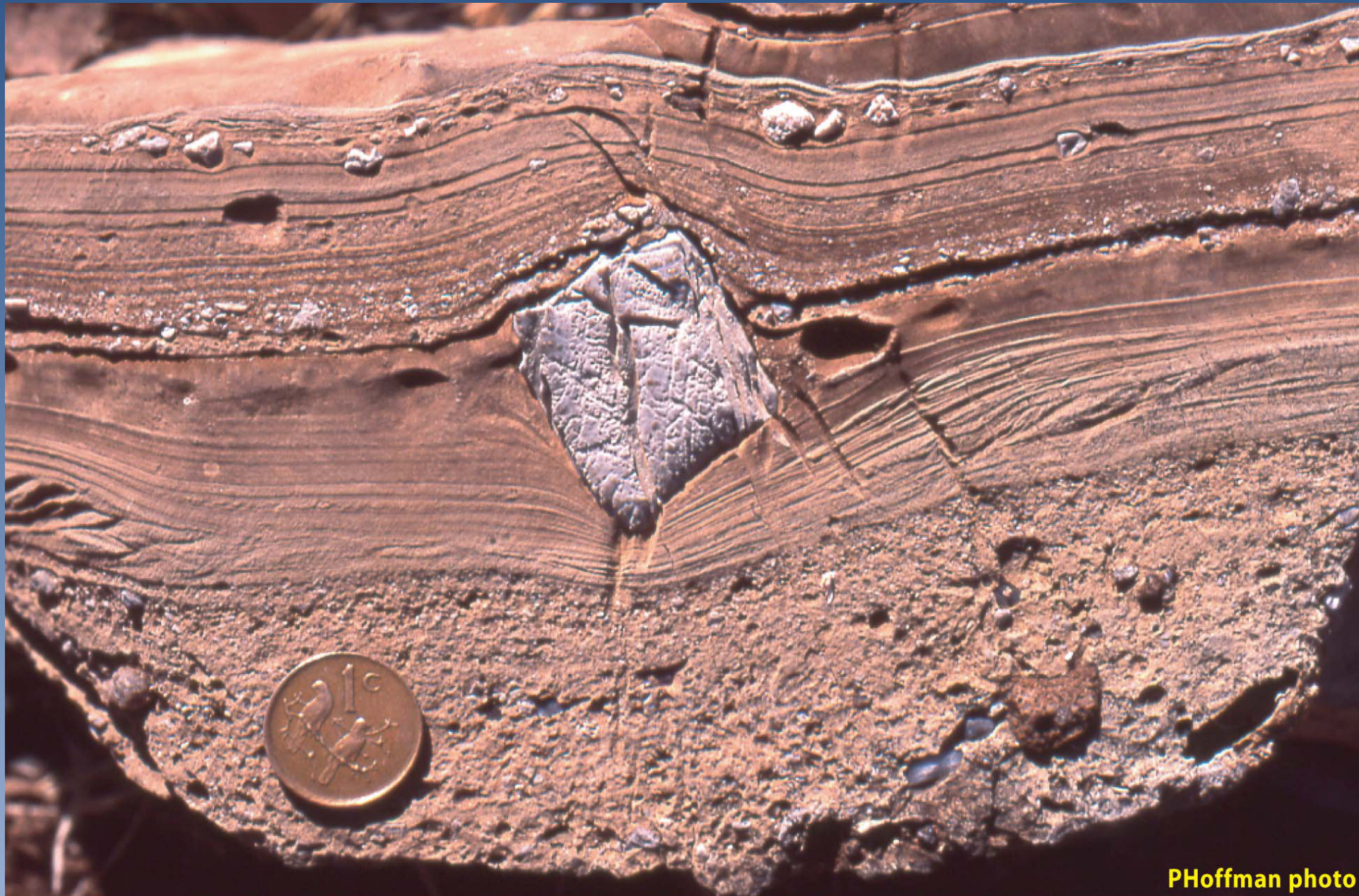
# La glaciazione Marinoana (650-635 Ma)



Tillite e roccia montonata attribuite alla glaciazione Marinoana.  
Norvegia settentrionale.



# La glaciazione Marinoana (650-635 Ma)



PHoffman photo

***Ice-rafted dropstone, Ghaub Fm, Namibia***

*Dropstone attribuita alla glaciazione Marinoana. Namibia*

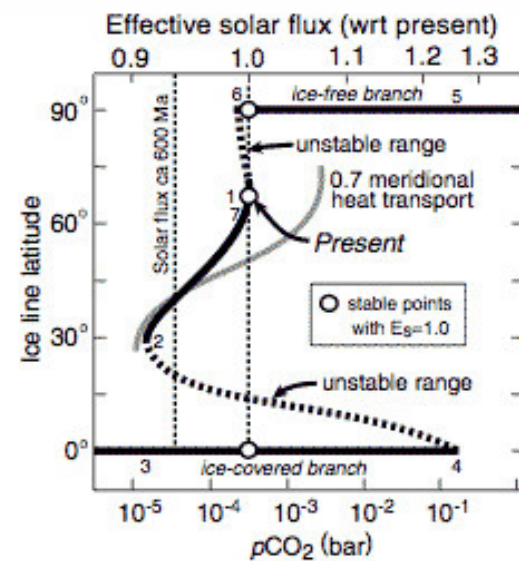


# La Terra “a palla di neve” (*Snowball Earth*)

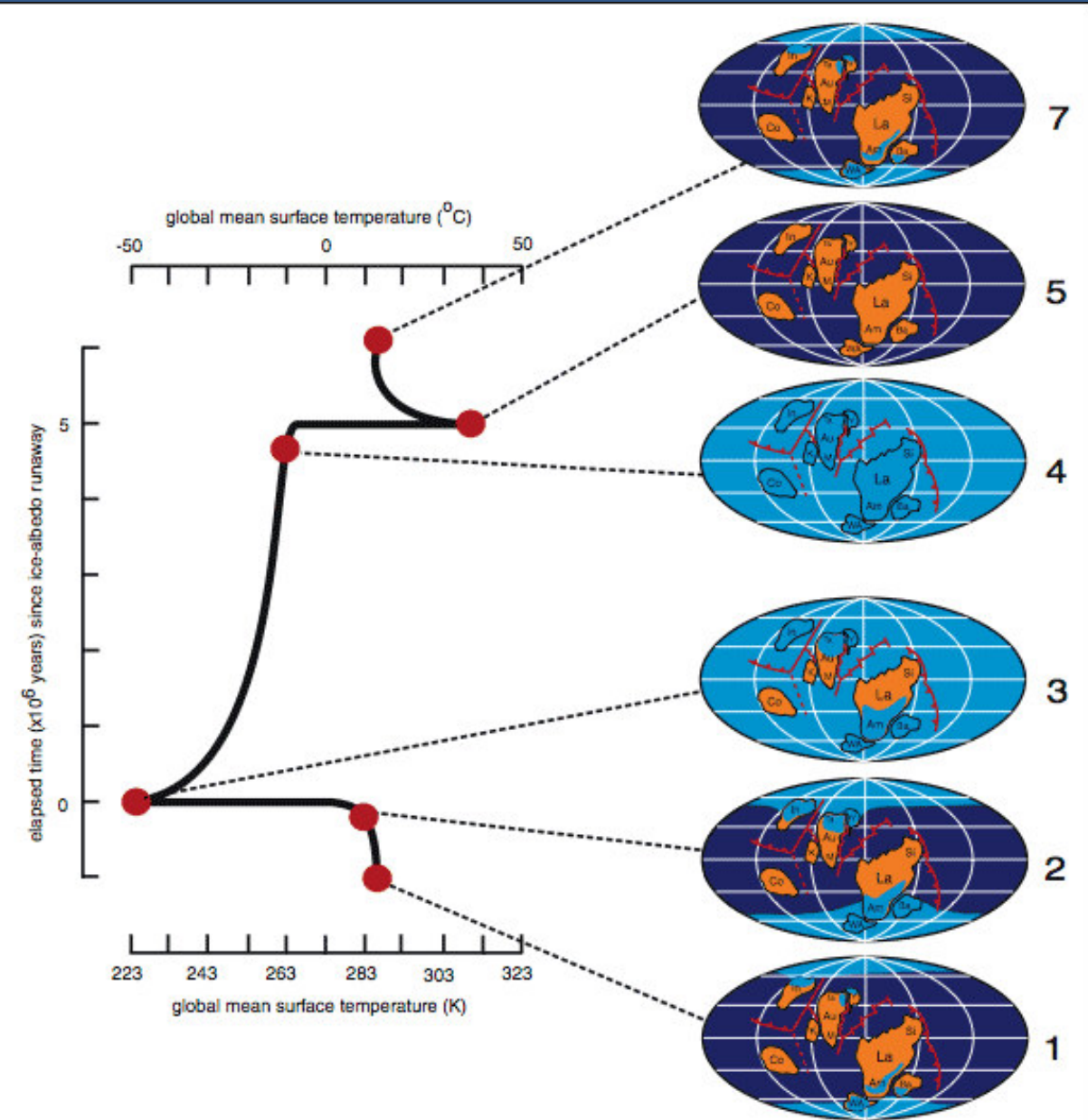
Le principali ragioni per la formazione di una Terra a palla di neve sono tuttora dibattute, ma tra le principali possiamo elencare:

- **Elevata albedo delle aree continentali** concentrate vicino all'equatore (v. paleogeografia del tempo).
- **Crescente erosione continentale** dovuta agli agenti atmosferici (*weathering*), che assorbe CO<sub>2</sub>.
- **Seppellimento rapido della materia organica** e scarsa concentrazione di CO<sub>2</sub> in atmosfera, dovuta alla ridotta attività delle dorsali oceaniche.

# La Terra “a palla di neve” (*Snowball Earth*)



**Fig. 6** Ice-line latitudes (at sea level) as a function of the effective solar flux ( $E_s$ ), or equivalent  $p\text{CO}_2$  (for  $E_s = 1.0$ ), based on a simple energy-balance model of the Budyko-Sellers type (after Caldeira and Kasting, 1992; Ikeda and Tajika, 1999). Effect of a 30% reduction in meridional heat transport is shown, as is the estimated solar flux at  $\sim 600$  Ma. Of three possible stable points for  $E_s = 1.0$ , the Earth actually lies on the partially ice-covered branch at point 1. An instability due to ice-albedo feedback drives any ice-line latitude  $< 30^\circ$  onto the ice-covered branch. A  $p\text{CO}_2 \approx 0.12$  bar is required for deglaciation of an ice-covered Earth, assuming the planetary albedo is 0.6 and  $E_s = 1.0$  (Caldeira and Kasting, 1992). The snowball Earth hypothesis is qualitatively predicated on these findings and infers a hysteresis in  $p\text{CO}_2$  (and consequently surface temperature) following the circuit labelled 1–7. Starting from point 1, lowering of  $p\text{CO}_2$  causes ice lines to migrate stably to point 2, whereupon runaway ice-albedo feedback drives ice lines to the ice-covered branch at point 3. Normal volcanic outgassing over millions of years increases  $p\text{CO}_2$  to point 4, initiating deglaciation. Reverse ice-albedo feedback then drives ice lines rapidly to the ice-free branch at point 5, where high  $p\text{CO}_2$  combined with low planetary albedo creates a transient ultra-greenhouse. Enhanced silicate weathering causes lowering of  $p\text{CO}_2$  to point 6, whereupon polar ice caps reform and ice lines return to the partially ice-covered branch at point 7. In the 1960s, Budyko was concerned with the small ice-cap instability, which predicts a possible switch to the ice-free branch (e.g. disappearance of Arctic sea ice) due to anthropogenic global warming.



**Fig. 7** Estimated changes in global mean surface temperature, based on energy-balance calculations, and ice extent through one complete snowball event. The suggested time scale of the event of  $\sim 5$  Myr is conservative for an albedo = 0.6, based on the estimated outgassing flux of  $\text{CO}_2$  and subsidence analysis (Hoffman *et al.*, 1998b). The global palaeogeographical model (Powell *et al.*, 2001) pertains to 750 Ma,  $\sim 30$  Myr before the ‘Sturtian’ glaciation (Table 1). Palaeocontinents: Am, Amazonia; Au, Australia; Ba, Baltica; Co, Congo; In, India; K, Kalahari; M, Mawson; Si, Siberia; Ta, Tarim; WA, West Africa; Y, South China (Yangtze). The global ice-line depictions correspond approximately to points 1–7 in Fig. 2. Note the growth of terrestrial ice sheets with rising surface temperature during the snowball event. Note also the abrupt onset and termination of glacial conditions in the low and middle latitudes, consistent with geological observations, and the saw-tooth form of the temperature curve reversed to that associated with late Quaternary glacial cycles. Note finally that the estimated surface temperatures are global mean values and give no sense of the real zonal, seasonal and diurnal ranges in temperature (Walker, 2001).

Glaciazioni globali dovute ad un incremento “galoppante” dell’albedo.



# La Terra “a palla di neve” (*Snowball Earth*)

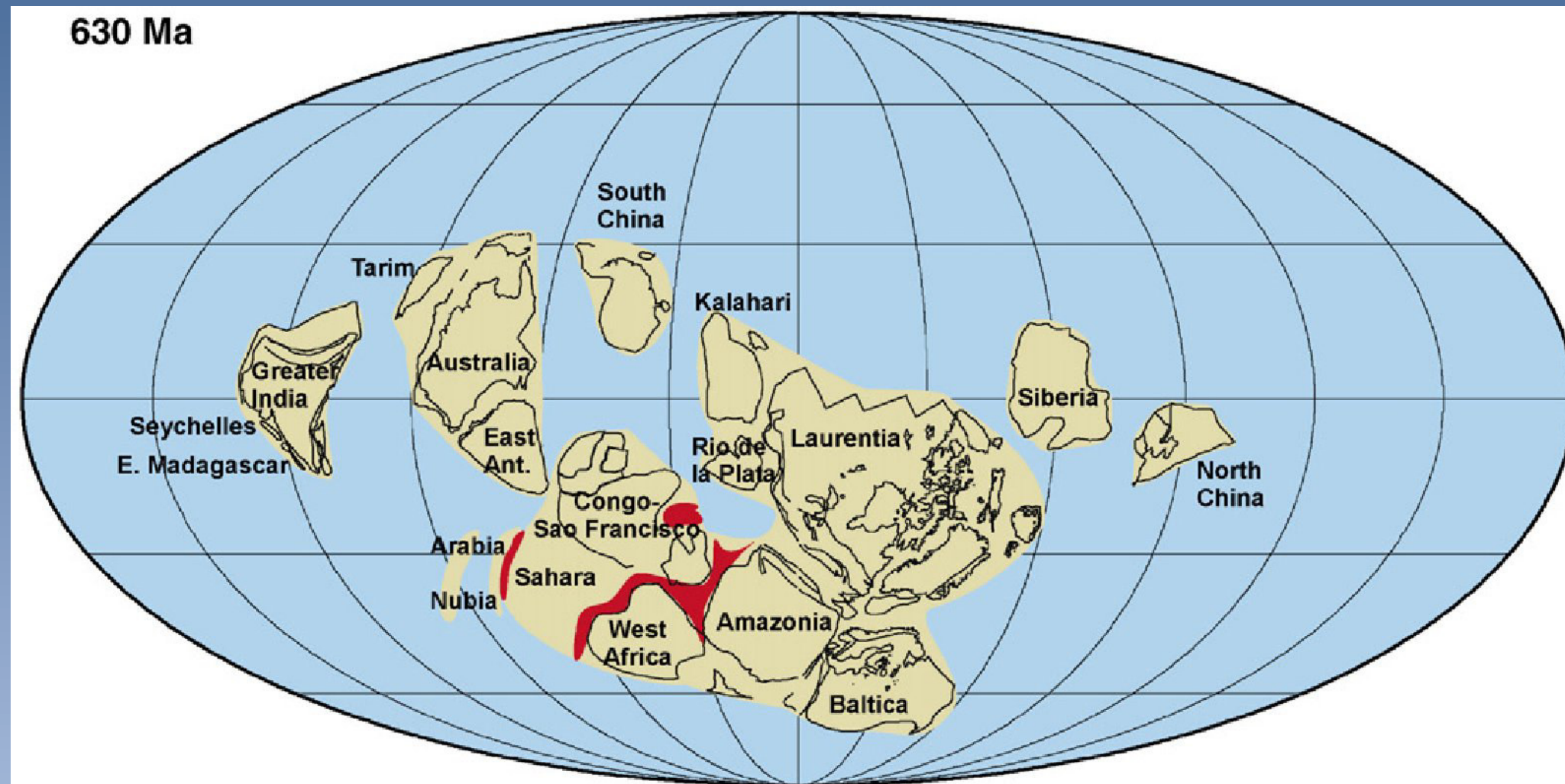
Un problema nell'interpretazione di quanto avvenuto durante i periodi di Terra a palla di neve riguarda la sopravvivenza degli organismi, soprattutto di quelli fotosintetici come gli acritarchi. Si pensa che le spaccature nel ghiaccio possano aver mantenuto “isole” fotiche che avrebbero consentito la sopravvivenza degli autotrofi fotosintetici.

**Cracks in  
dynamic  
sea-ice, a  
potential  
refugium  
for photo-  
trophs on  
snowball  
Earths.**



# L'Ediacarano (635-539 Ma)

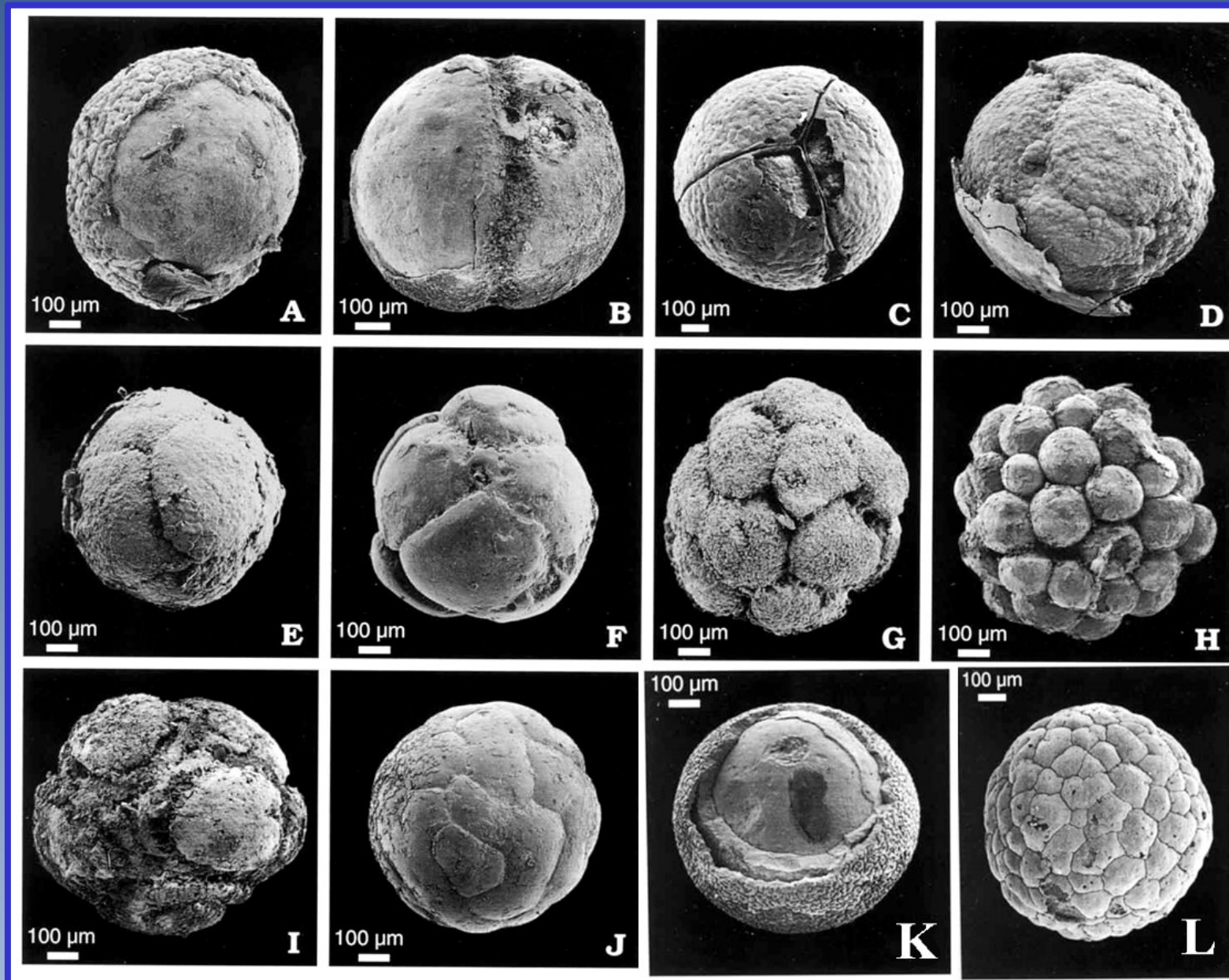
Alla fine della glaciazione Marinoana si ripristinarono condizioni “normali”.



Da: Li et al (2008).



# Embrioni di eucarioti dell'Ediacarano



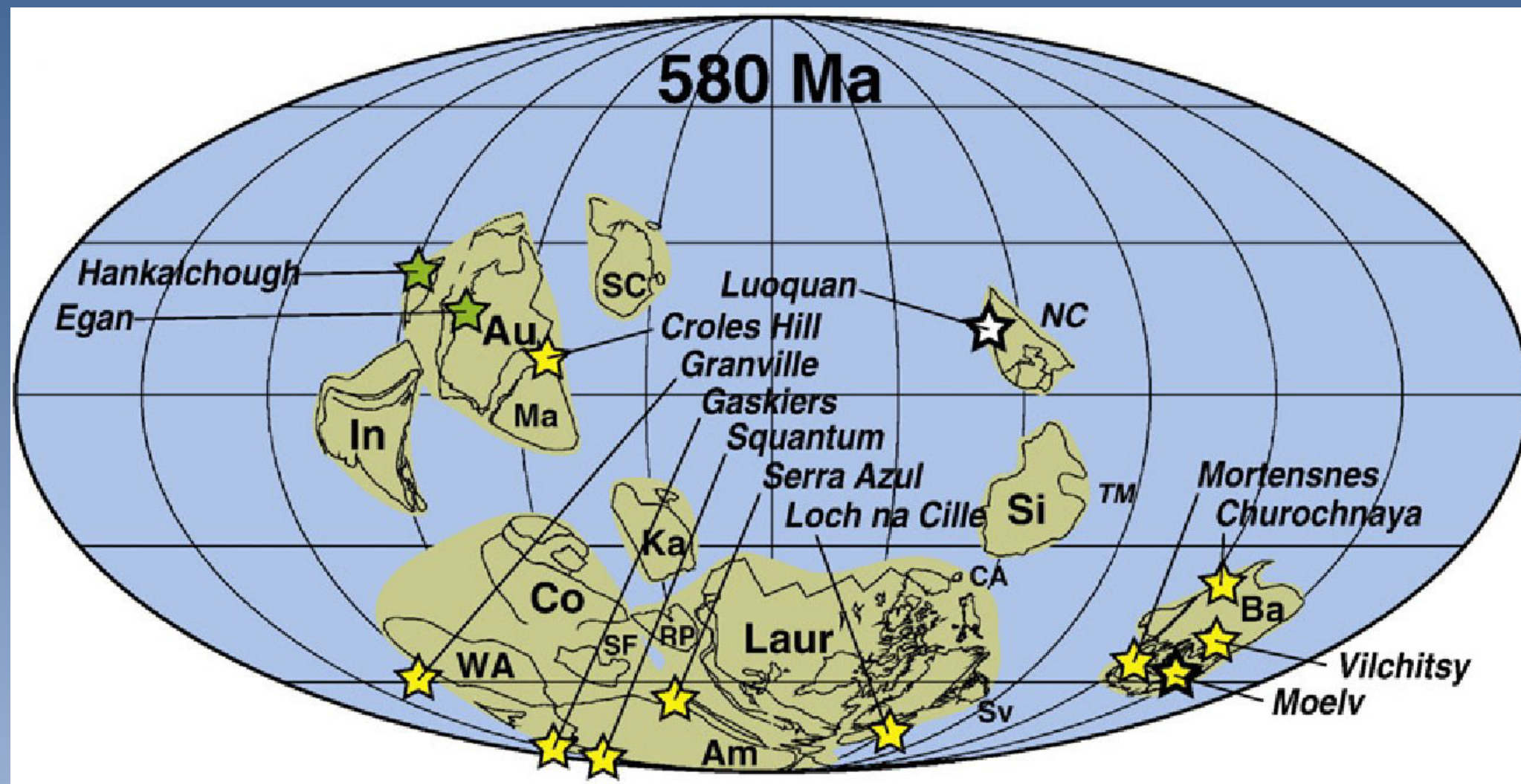
Embrioni in vari stadi di  
scissione (B-J)  
(*Parapandorina  
raphospissa*)

e uova (A, K, L)  
(*Tianzhushania ornata*)

rinvenute nelle fosforiti  
della Doushantuo Fm.  
(Cina meridionale,  
635-551 Ma).

Xiao & Knoll, 2000; Yin, Bengtson & Yue, 2004.

# La glaciazione di Gaskiers (580 Ma)



Distribuzione dei depositi glaciali attribuiti alla glaciazione di Gaskiers.

Da: Hoffman & Li (2009).



# La fauna di Ediacara

**EDIACARAN SOFT-BODIED FOSSILS, 575-542 Ma**



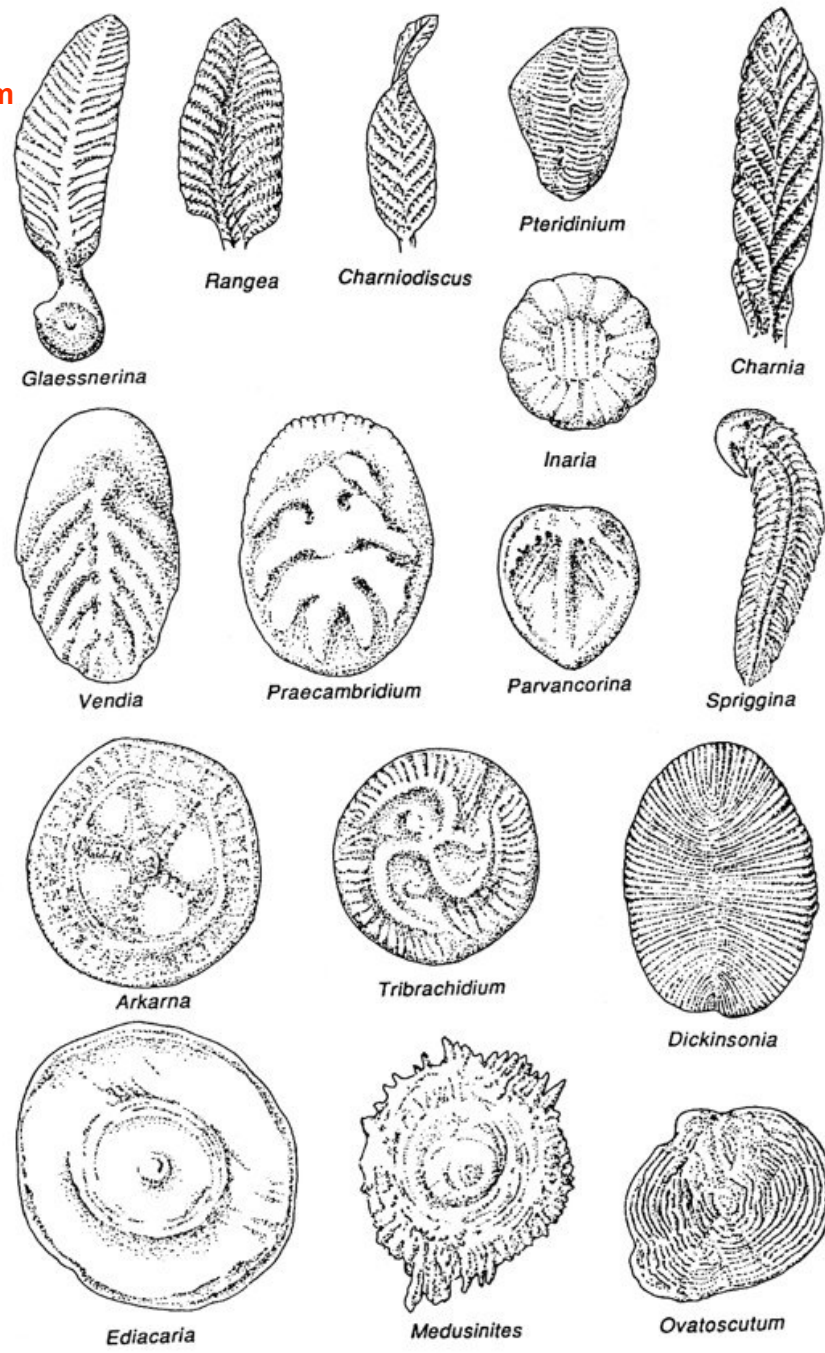
I più antichi (e abbondanti) rappresentanti della Fauna di Ediacara vengono da Terranova, (Canada). Comparvero **circa 5 milioni di anni dopo la glaciazione Gaskiers**.

Essi proliferarono fino al limite Ediacarano-Cambriano (539 Ma), quando improvvisamente scomparvero nella più antica estinzione di massa conosciuta.



# La fauna di Ediacara

Dimensioni da 2 a 8 cm



Le principali forme della Fauna di Ediacara contano oltre 100 specie note, appartenenti a una trentina di generi.



# La fauna di Ediacara

*Medusinites*

*Albumares*

*Parvancorina*

*Spriggina*

*Tribrachidium*

Southwestern Australia  
630-550 Ma

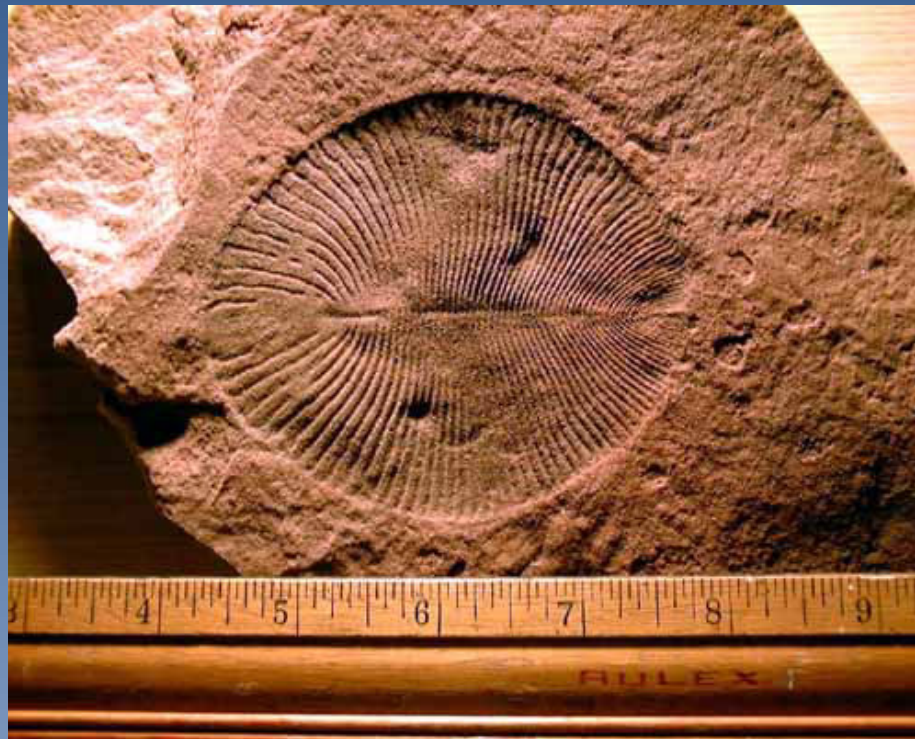
Dimensioni = 2-8 cm



# La fauna di Ediacara



*Pteridinium*



*Dickinsonia*

Southwestern Australia  
630-550 Ma

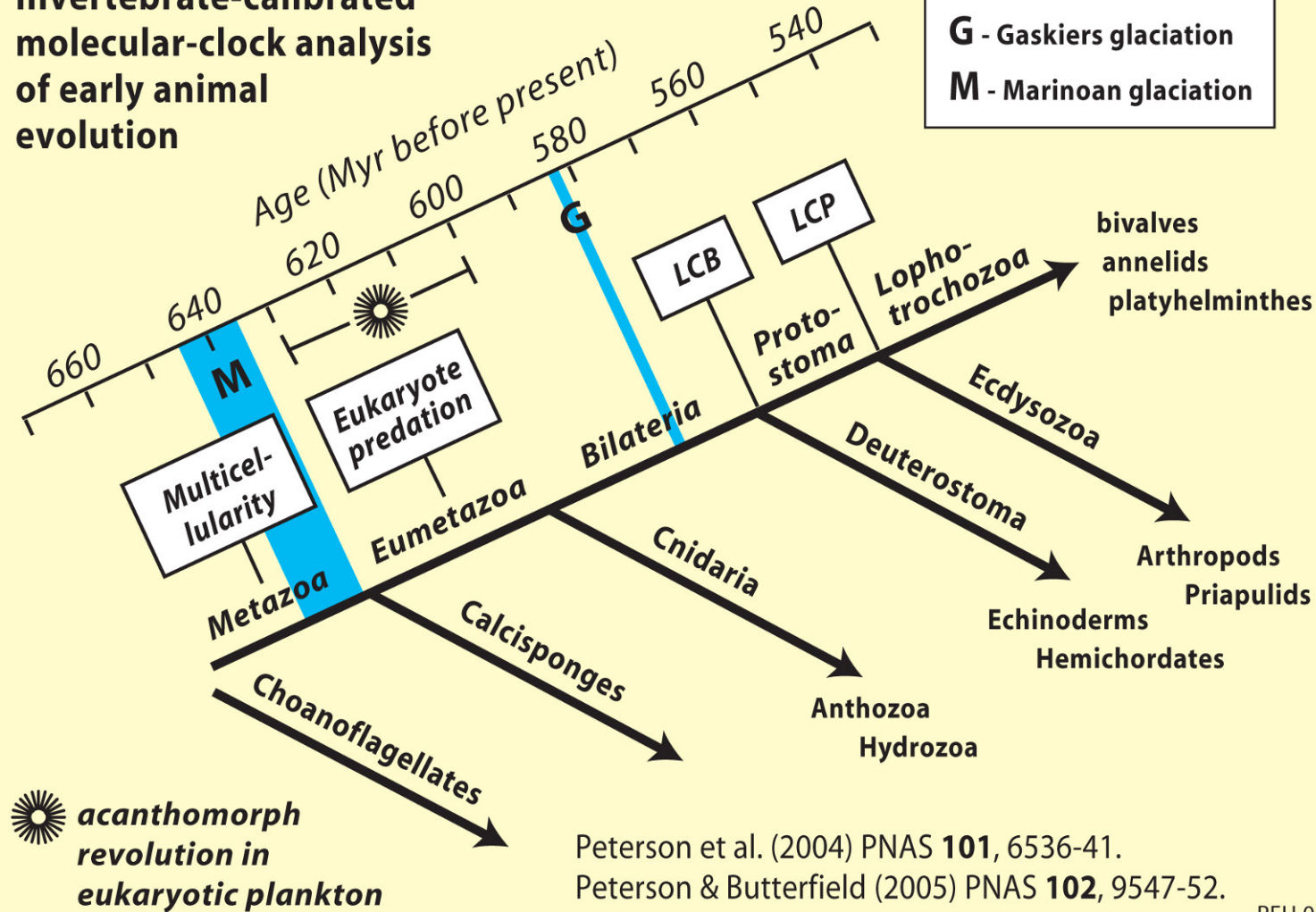


*Charnia*



# Origine ed evoluzione dei metazoi

Invertebrate-calibrated  
molecular-clock analysis  
of early animal  
evolution



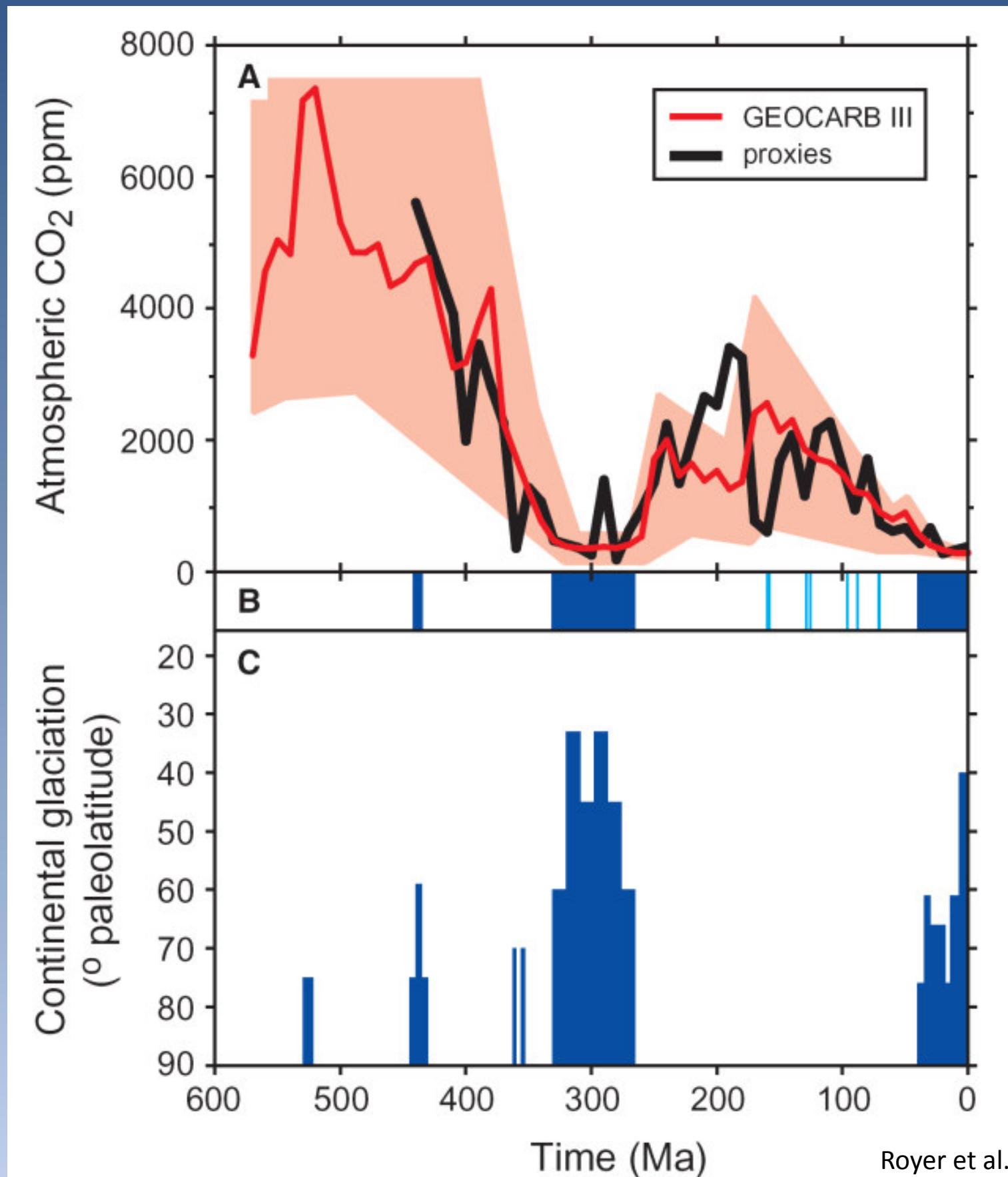
PFH 05

Tempi di divergenza dei principali gruppi di animali (Peterson & Butterfield, 2005). Gli Eumetazoi sono stati i primi predatori degli eucarioti come gli acritarchi (plancton acantomorfo) che presentano un forte incremento di dimensioni, diversità, ornamentazione e turnover tra ~630 e 600 Ma. Si noti che la comparsa degli Eumetazoi è stimata subito dopo l'ultima glaciazione (Marinoana) con Terra a palla di neve.

Anche in questo caso le variazioni climatiche hanno effetti profondi sull'evoluzione della vita.

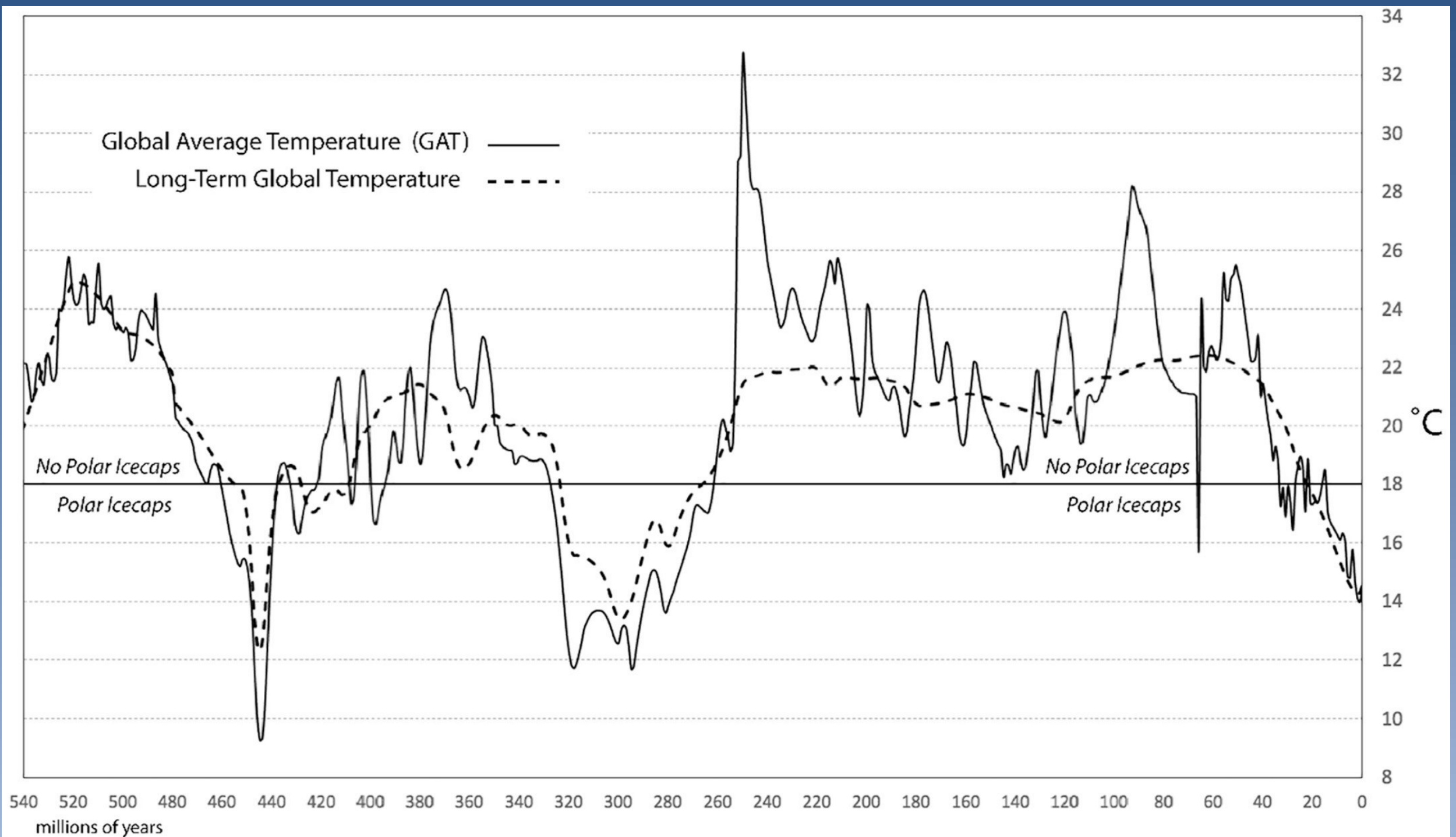
# Alternanza di periodi *Greenhouse* e *Icehouse*

Cicli geologici:  
il clima durante il  
Fanerozoico è  
determinato dal  
ciclo del carbonio.





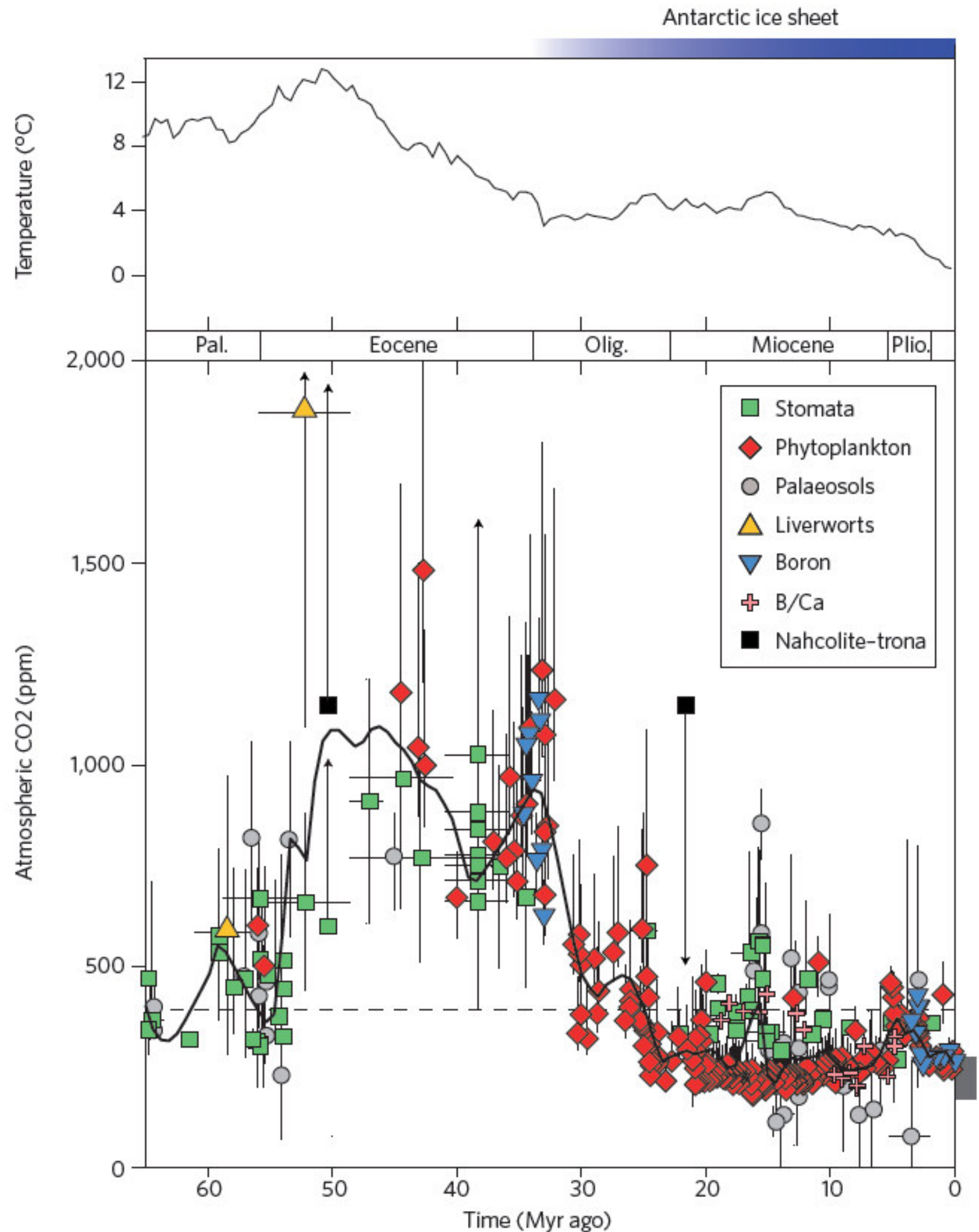
# Alternanza di periodi *Greenhouse* e *Icehouse*



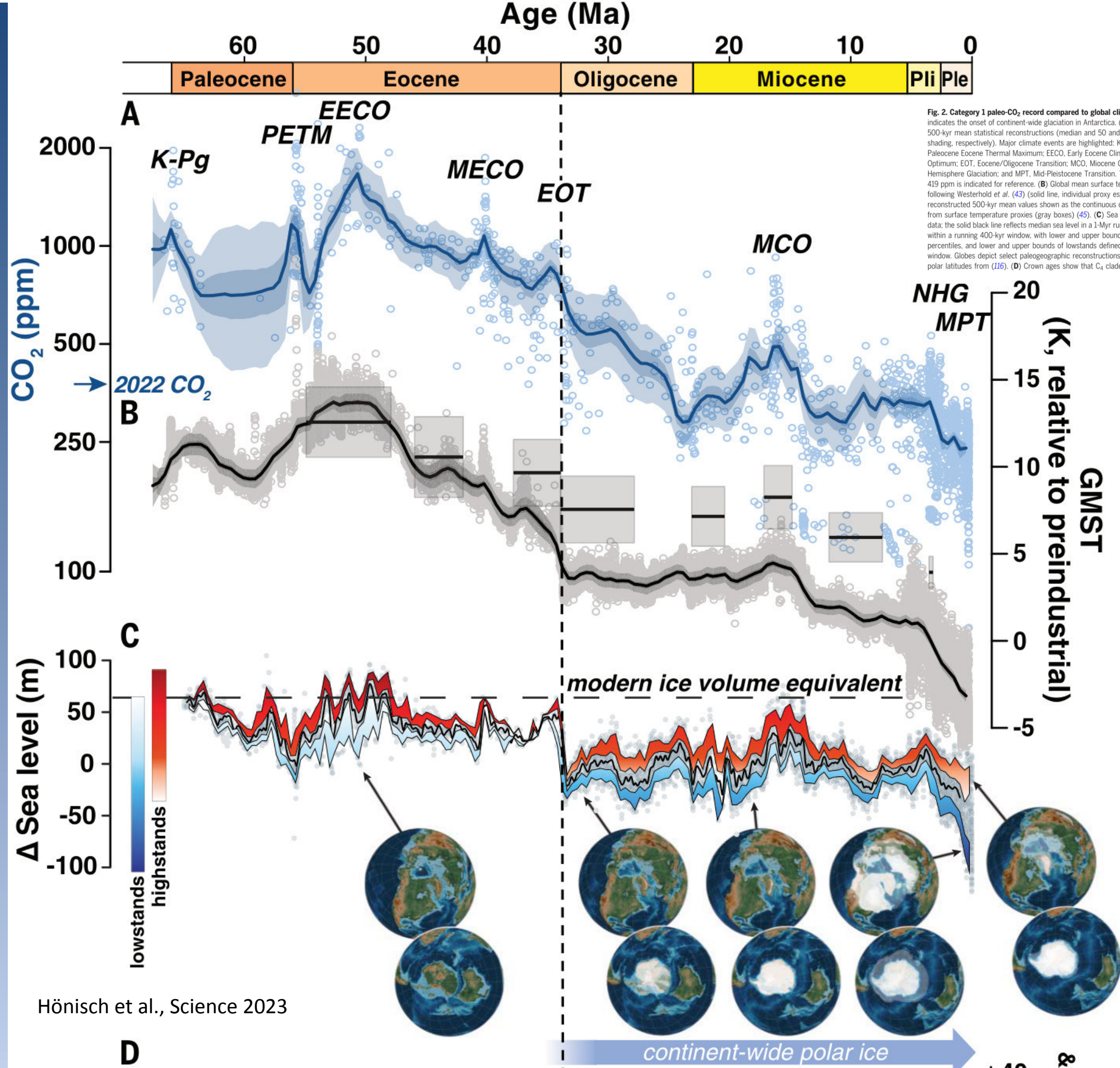
**Fig. 13.** Phanerozoic Global Average Temperature (GAT), blackline = Global Average Temperature, dashed line = Long-term temperature change derived from changes in the pole-to-Equator temperature gradient calculated from the changing area of Köppen Climatic Belts (see Figure 6). When the Global Average Temperature is below 18°C large polar icecaps can form. When the Global Average Temperature is above 18°C large polar icecaps are unlikely to form.

Correlazioni tra  
CO<sub>2</sub> e temperature  
negli ultimi 66  
milioni di anni

Beerling and Royer, Nature 2011

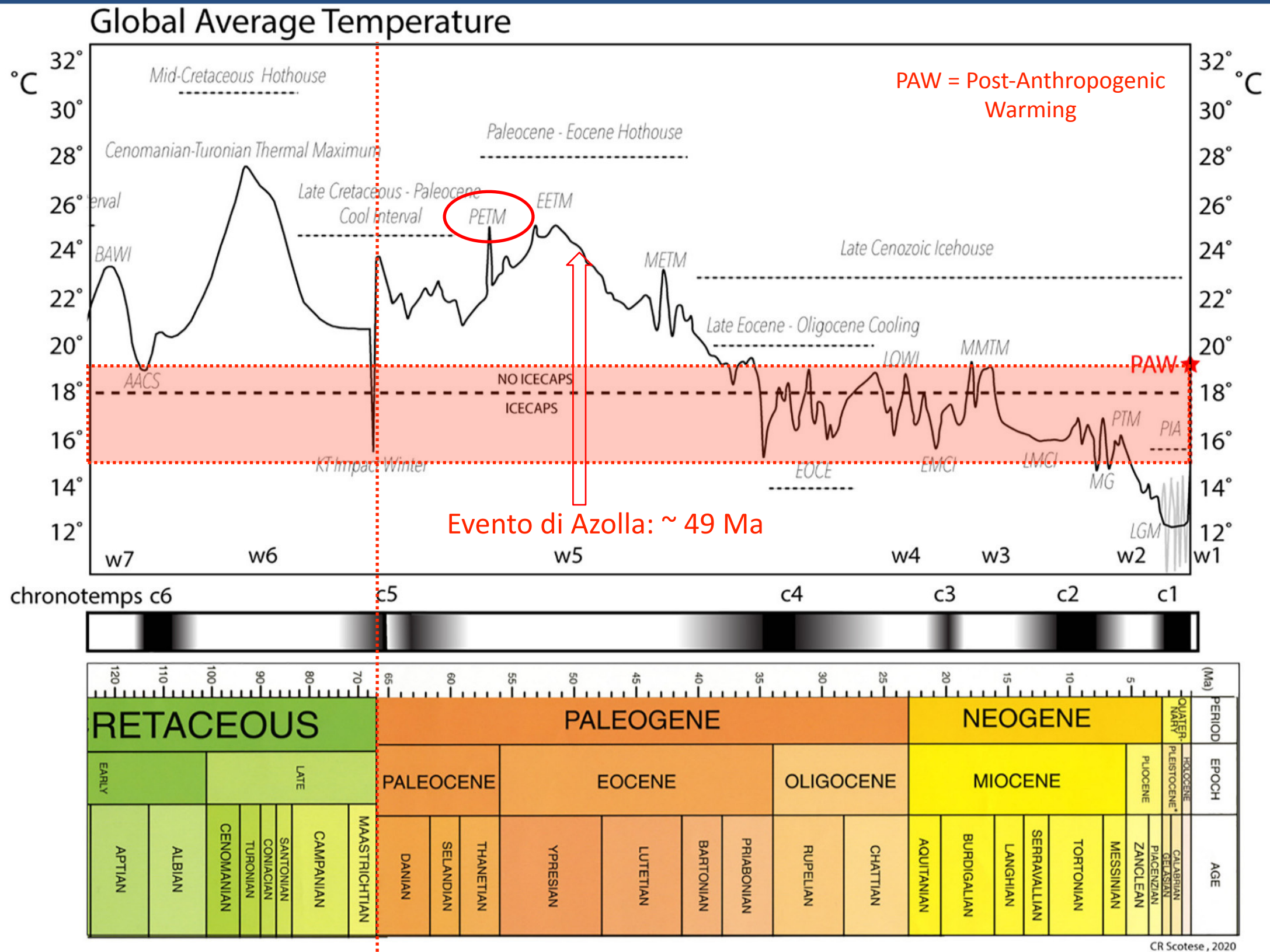






**Fig. 2. Category 1 paleo-CO<sub>2</sub> record compared to global climate signals.** The vertical dashed line indicates the onset of continent-wide glaciation in Antarctica. **(A)** Atmospheric CO<sub>2</sub> estimates (symbols) and 500-kyr mean statistical reconstructions (median and 50 and 95% credible intervals; dark and light-blue shading, respectively). Major climate events are highlighted: K-Pg, Cretaceous/Paleogene boundary; PETM, Paleocene Eocene Thermal Maximum; EECO, Early Eocene Climatic Optimum; MECO, Middle Eocene Climatic Optimum; EOT, Eocene/Oligocene Transition; MCO, Miocene Climatic Optimum; NHG, onset of Northern Hemisphere Glaciation; and MPT, Mid-Pleistocene Transition. The 2022 annual average atmospheric CO<sub>2</sub> of 419 ppm is indicated for reference. **(B)** Global mean surface temperatures estimated from benthic δ<sup>18</sup>O data following Westerhold et al. (43) (solid line, individual proxy estimates as symbols, and statistically reconstructed 500-kyr mean values shown as the continuous curve, with 50 and 95% credible intervals) and from surface temperature proxies (gray boxes) (45). **(C)** Sea level after (66) with gray dots displaying raw data; the solid black line reflects median sea level in a 1-Myr running window. High- and lowstands are defined within a running 400-kyr window, with lower and upper bounds of highstands defined by the 75th and 95th percentiles, and lower and upper bounds of lowstands defined by the 5th and 25th percentiles in each window. Globes depict select paleogeographic reconstructions and the growing presence of ice sheets in polar latitudes from (116). **(D)** Crown ages show that C<sub>4</sub> clades, with CCMs adapted to low CO<sub>2</sub>, initially





**Fig. 21.** A Cenozoic Paleotemperature Timescale. white = warm time intervals, black = cool time intervals; Light gray jagged lines = a schematic representation of >50 glacial/interglacial cycles during the Plio-Pleistocene. Solid black line = Global Average Temperatures (GAT), < 18°C = large, permanent icecaps, > 18°C = no large, permanent icecaps. Timescale = International Chronostratigraphic Chart v2020/01. Refer to Table 3 for more information about each chronotemp and abbreviations.

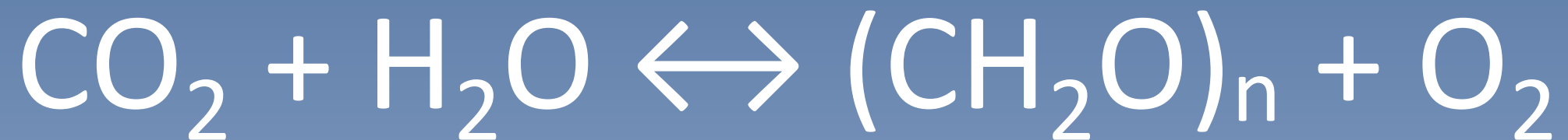


***PAUSA 2***

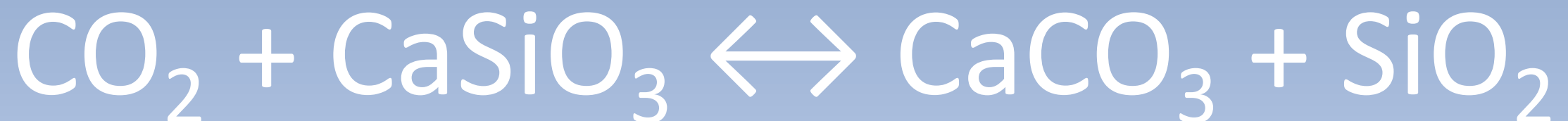
# Il ciclo del carbonio a lungo termine: le rocce

Due reazioni generali...

## Fotosintesi/Respirazione

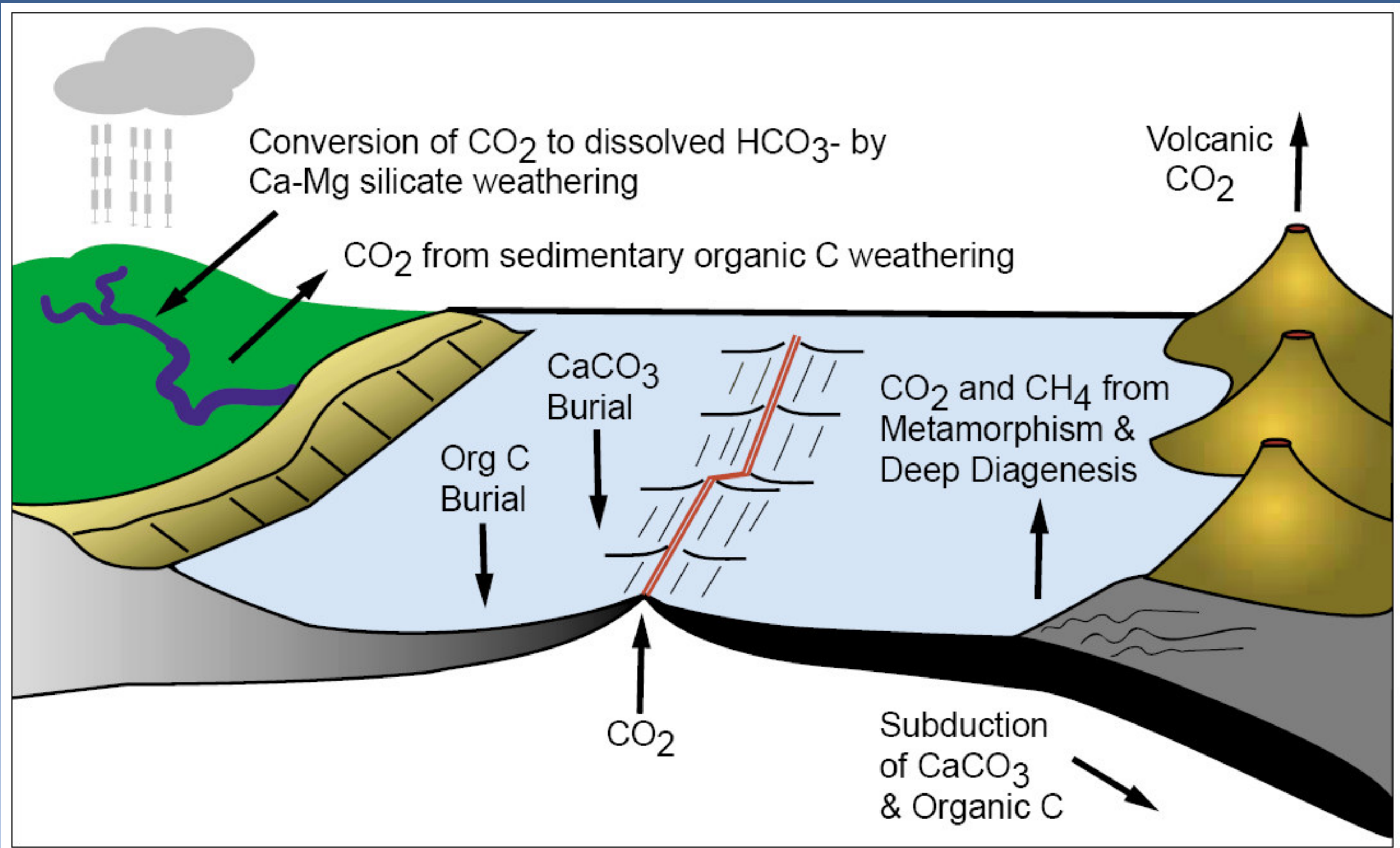


## Alterazione/Precipitazione





# Il ciclo del carbonio a lungo termine: le rocce



# Quindi, cosa è cambiato?





# Alterazione (pozzo del C):



Con il **movimento dei continenti verso le alte latitudini**, nonché con l'**aumento della altitudine media (orogenesi)**, che porta a sempre più estese **superfici ghiacciate** si ottengono:

## 1. INCREMENTO DELL'ALTERAZIONE MECCANICA DEI SILICATI:

- aumento del **sequestro di CO<sub>2</sub> nei sedimenti**
- **diminuzione della stessa in atmosfera**

IN PIÙ nel Cenozoico:

## 2. LA VELOCITÀ DI ESPANSIONE DELLE DORSALI MEDIO-OCEANICHE RALLENTA

- **Meno CO<sub>2</sub>** introdotta in atmosfera **dai vulcani**

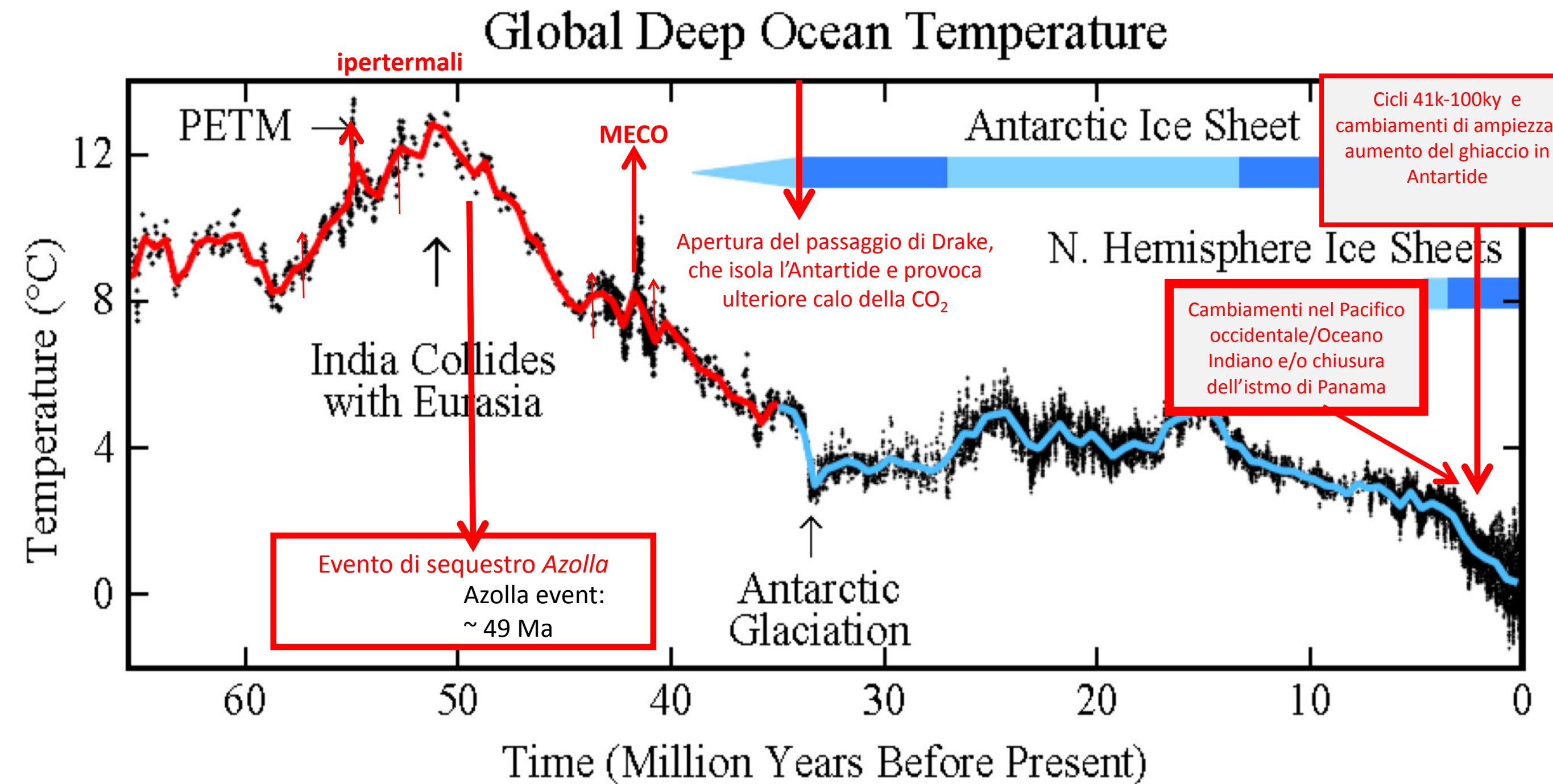
=

***DIMINUIZIONE DELLA CO<sub>2</sub> NEL TEMPO!***

50 milioni di anni fa la Terra era priva di calotte glaciali.

La CO<sub>2</sub> atmosferica era nell'ordine di grandezza di 1000 ppm.

Lo squilibrio di CO<sub>2</sub> atmosferica dovuto alla tettonica delle placche valeva circa 10<sup>-4</sup> ppm per anno.

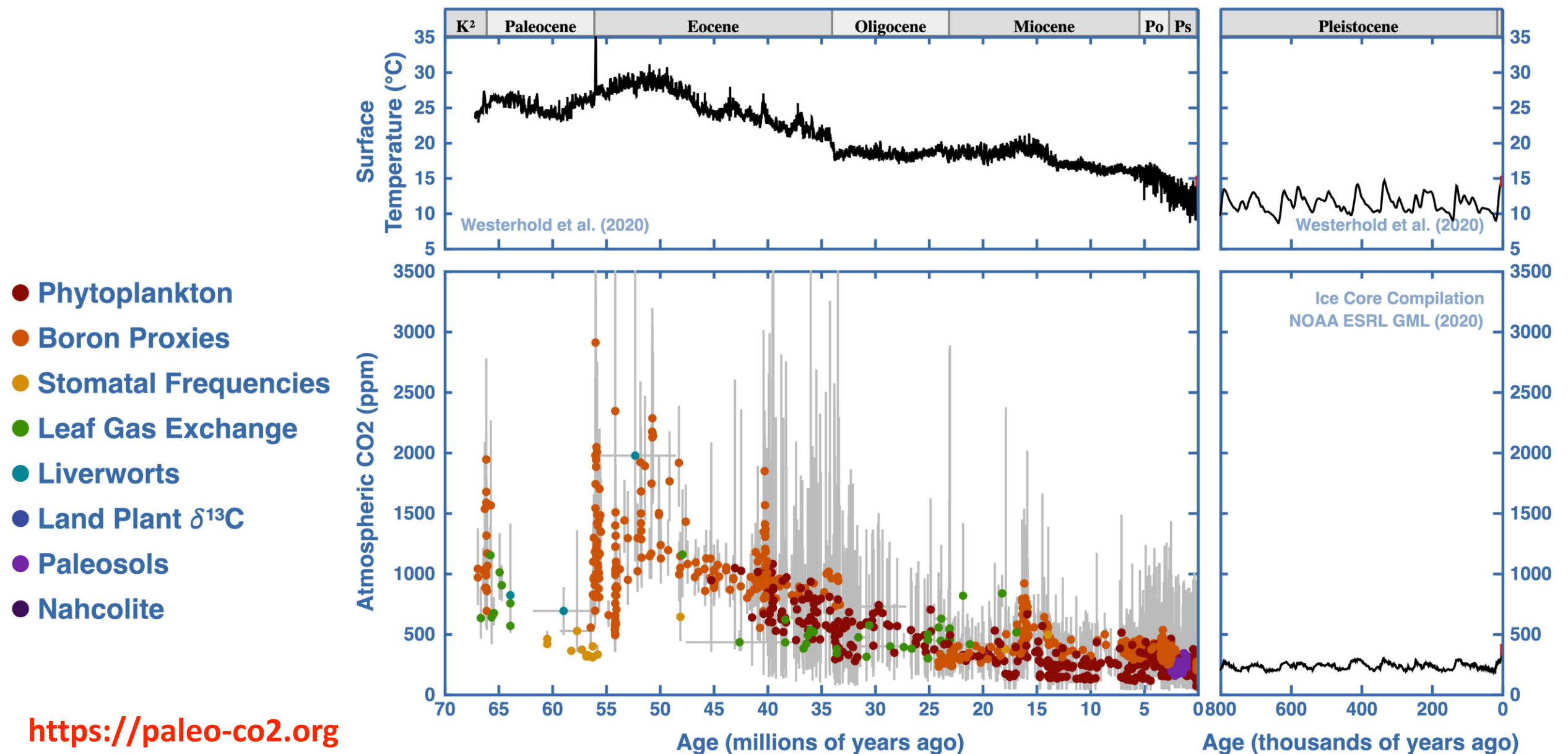




50 milioni di anni fa la Terra era priva di calotte glaciali.

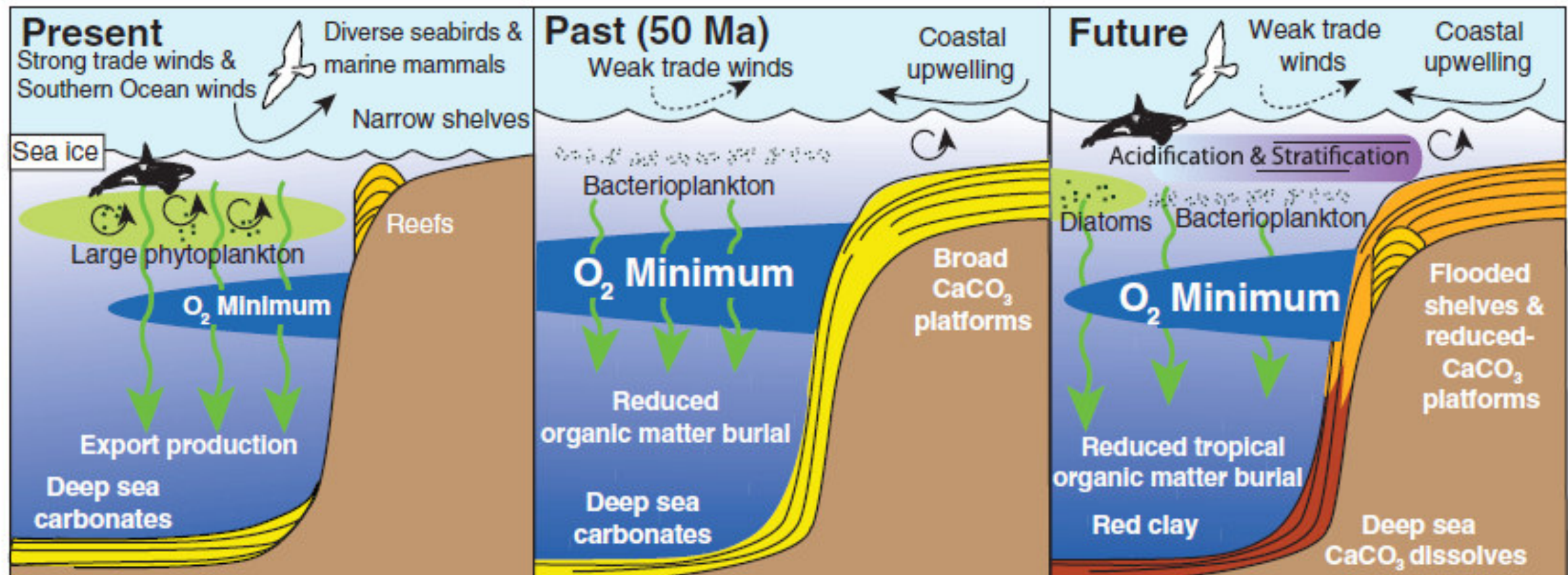
La CO<sub>2</sub> atmosferica era nell'ordine di grandezza di 1000 ppm.

Lo squilibrio di CO<sub>2</sub> atmosferica dovuto alla tettonica delle placche valeva circa 10<sup>-4</sup> ppm per anno.





# Passato e presente; stime future



**Fig. 1. Comparison of present, past, and future ocean ecosystem states.** In the geologic past (middle panel), a warmer, less oxygenated ocean supported longer food chains based in phytoplankton smaller than present-day phytoplankton (left panel). The relatively low energy transfer between trophic levels in the past made it hard to support diverse and abundant top predators dominated by marine mammals and seabirds, and also reduced deep-sea organic matter burial. Equilibration of weathering with high atmospheric  $p\text{CO}_2$  allowed carbonates to accumulate in parts of the deep sea. Reef construction was limited by high temperatures and coastal runoff even as high

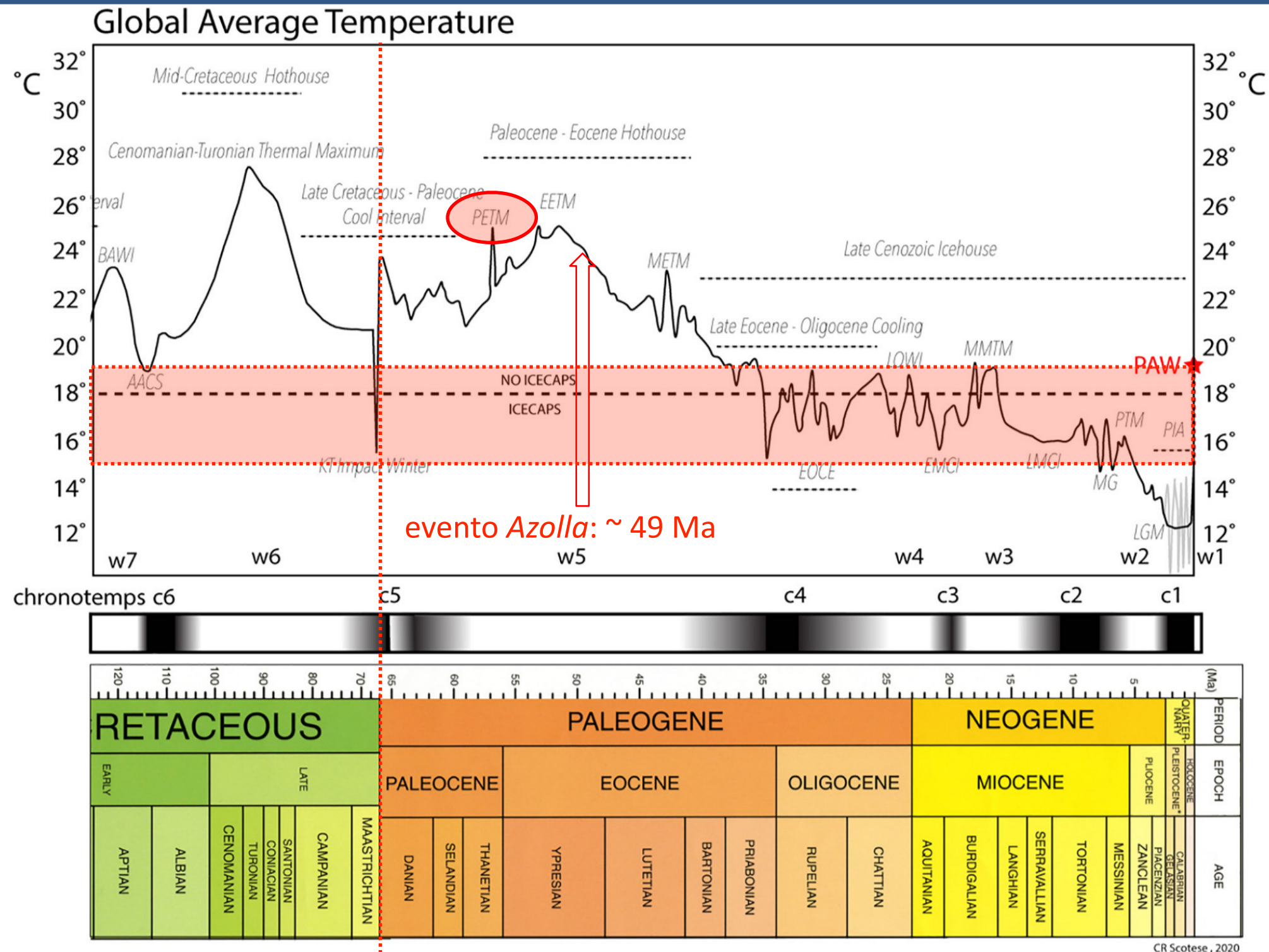
sea level created wide, shallow coastal oceans. In the future (right panel), warming will eventually reproduce many features of the past warm world but will also add transient impacts such as acidification and stratification of the surface ocean. Acidification will eventually be buffered by dissolving carbonates in the deep ocean, which create carbonate-poor "red clay." Stratification and the disappearance of multiyear sea ice will gradually eliminate parts of the polar ecosystems that have evolved in the past 34 million years and will restrict the abundance of short-food chain food webs that support marine vertebrates in the polar seas.



## 6. Velocità di cambiamento

Il Paleocene/Eocene Thermal Maximum (**PETM**):  
un evento di **riscaldamento** e  
**acidificazione degli oceani**

# Paleocene-Eocene Thermal Maximum - PETM



**Fig. 21.** A Cenozoic Paleotemperature Timescale. white = warm time intervals, black = cool time intervals; Light gray jagged lines = a schematic representation of >50 glacial/interglacial cycles during the Plio-Pleistocene. Solid black line = Global Average Temperatures (GAT), < 18°C = large, permanent icecaps, > 18°C = no large, permanent icecaps. Timescale = International Chronostratigraphic Chart v2020/01. Refer to [Table 3](#) for more information about each chronotemp and abbreviations.





PETM



PMAG

da 2 a 4 cm / 1000 anni

da 0,2 a 0,4 cm / 1000 anni

1000 anni

1000 anni

?

PETM

PMAG

ETHOM  
10cc



# Quanto durò?

**Table 1.** PETM carbon input scenarios.

| experiment name | C source used (‰) | total C input (Pg C) | onset duration (kyr) |
|-----------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| Bowen 2015      | —55               | 3284                 | ~3                   |
| Gutjahr 2017    | avg. —11          | 10 200               | ~21                  |
| Frieling 2016   | —50 and —45       | 4500                 | 5                    |
| Zeebe 2009      | —50               | 4500                 | 5                    |
| this study      | —35 and —6        | 9660                 | 3                    |

Turner (2018)

Comunque sia, ci volle **molto più tempo** per il recupero





# L'evento *Azolla*

Un evento di sequestro del carbonio nell'oceano

[https://en.wikipedia.org/wiki/Azolla\\_event](https://en.wikipedia.org/wiki/Azolla_event)

# L'evento *Azolla*



La felce moderna *Azolla filiculoides*. La fioritura incontrollata di una specie collegata a questa potrebbe aver innescato il processo che ha portato all'attuale mondo *icehouse*.

L'evento *Azolla* è uno scenario che si ipotizza abbia avuto luogo durante l'Eocene medio, **circa 49 milioni di anni fa**, quando la fioritura incontrollata della **felce di acqua dolce *Azolla*** sarebbe avvenuta nell'**Oceano Artico**. Affondando in un bacino stagnante, i resti vegetali sarebbero stati incorporati nel sedimento; la risultante rimozione della CO<sub>2</sub> si suppone abbia aiutato a trasformare il pianeta dallo stato **greenhouse**, caldo a sufficienza per avere tartarughe e palme viventi ai poli, allo stato attuale di **icehouse** che ha portato alle **epoche glaciali** del tardo Cenozoico.



# Ricostruzione dell'Oceano Artico 50 milioni di anni fa





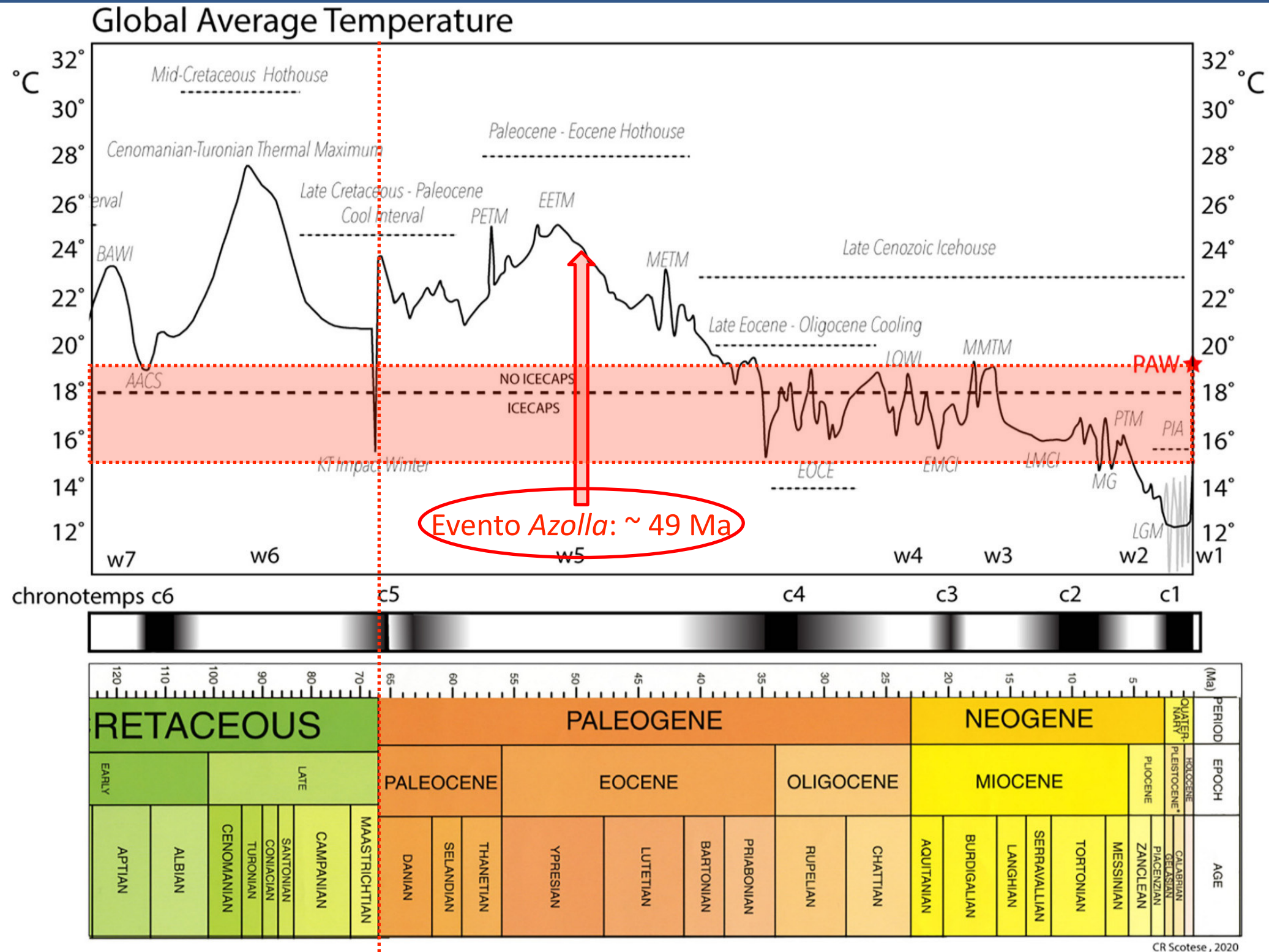
# Arctic Core EXpedition (ACEX) - carota *Azolla*

- carota ACEX >8 m con 90% *Azolla*
- *Azolla* si trova come livelli finemente laminati
- ciò indica che *Azolla* si depositò *in situ*
- e che c'era anossia al fondo nel sito di ACEX





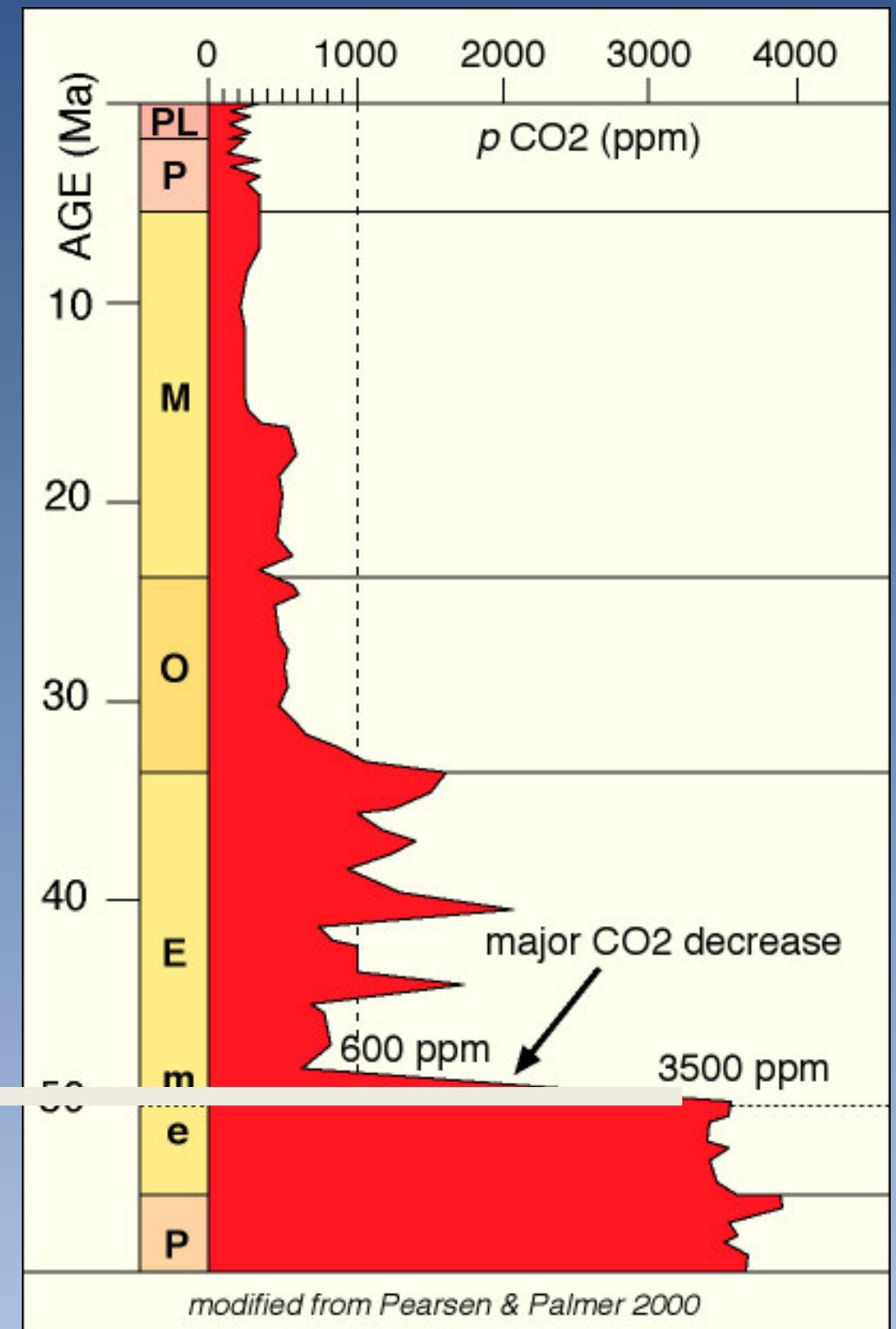
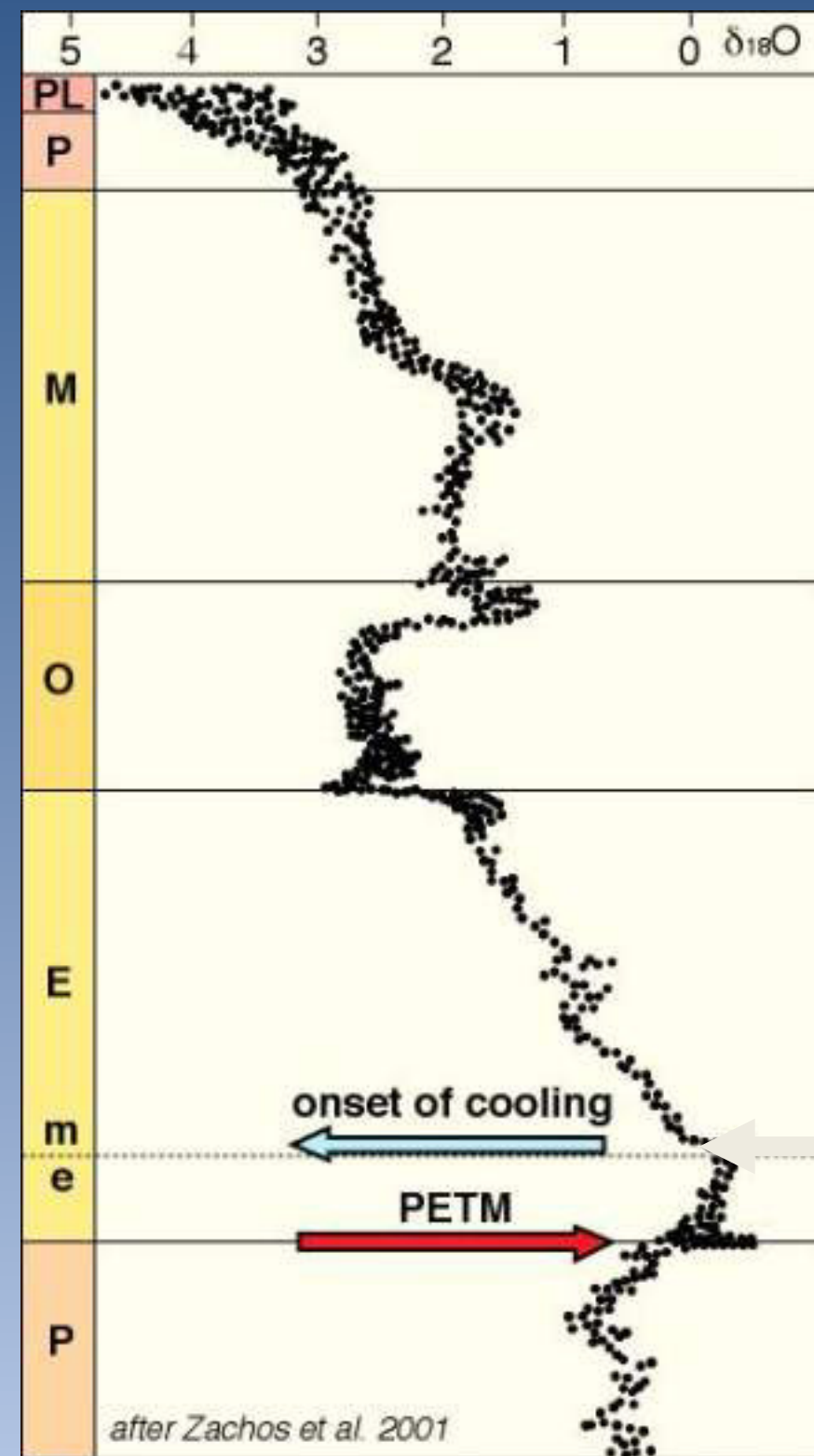
# L'evento Azolla



**Fig. 21.** A Cenozoic Paleotemperature Timescale. white = warm time intervals, black = cool time intervals; Light gray jagged lines = a schematic representation of >50 glacial/interglacial cycles during the Plio-Pleistocene. Solid black line = Global Average Temperatures (GAT), > 18°C = no large, permanent icecaps, < 18°C = large, permanent icecaps. Timescale = International Chronostratigraphic Chart v2020/01. Refer to [Table 3](#) for more information about each chronotemp and abbreviations.

# Un calo senza precedenti della CO<sub>2</sub>

All'inizio dell'Eocene medio ci fu una massiccia diminuzione della CO<sub>2</sub> atmosferica.





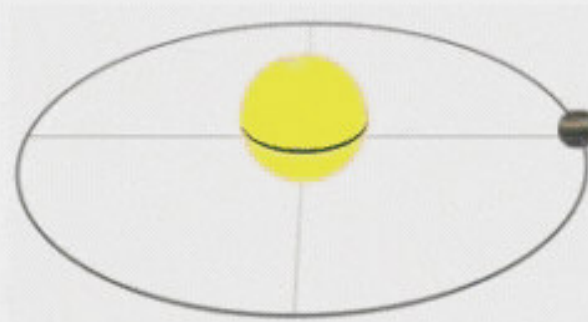
# I cicli di Milankovitch

## THE THREE MILANKOVITCH CYCLES

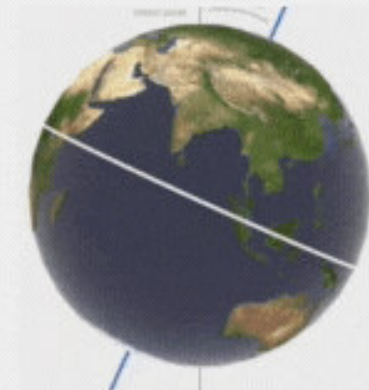
**CHANGES IN AXIAL  
PROCESSION (WOBBLE) IN  
A 26,000-YEAR CYCLE**



**CHANGES IN ECCENTRICITY  
(ORBIT SHAPE) IN A  
100,000-YEAR CYCLE**

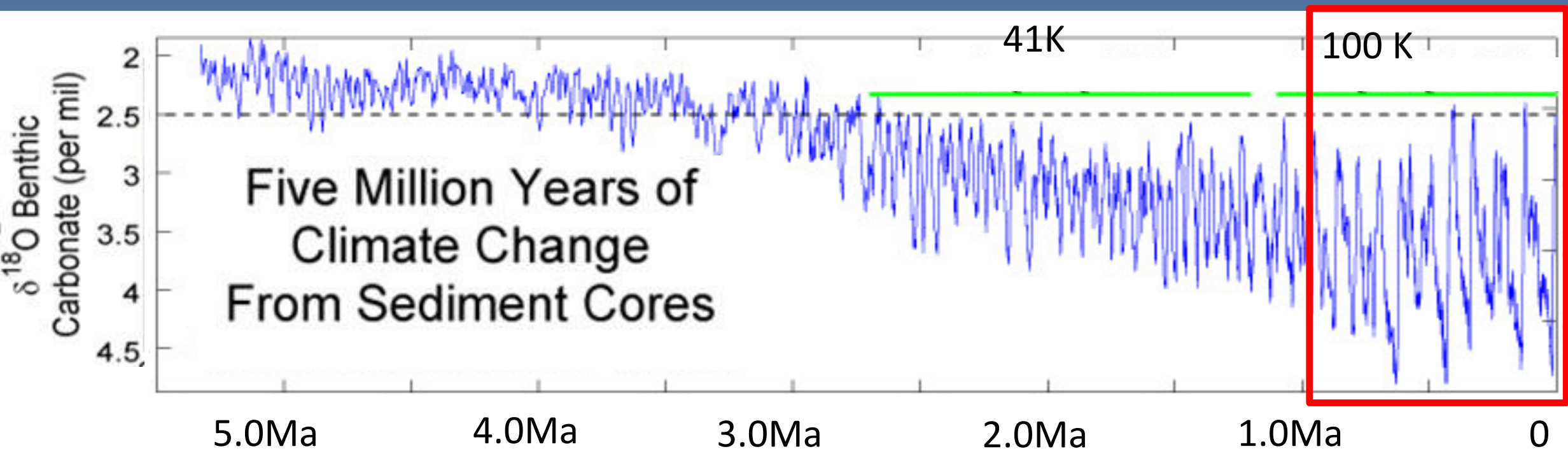


**CHANGES IN OBLIQUITY  
(TILT) IN A 41,000-YEAR  
CYCLE**



<https://news.medill.northwestern.edu/chicago/milankovitch-theory-flaw-climate-change-new-study/>

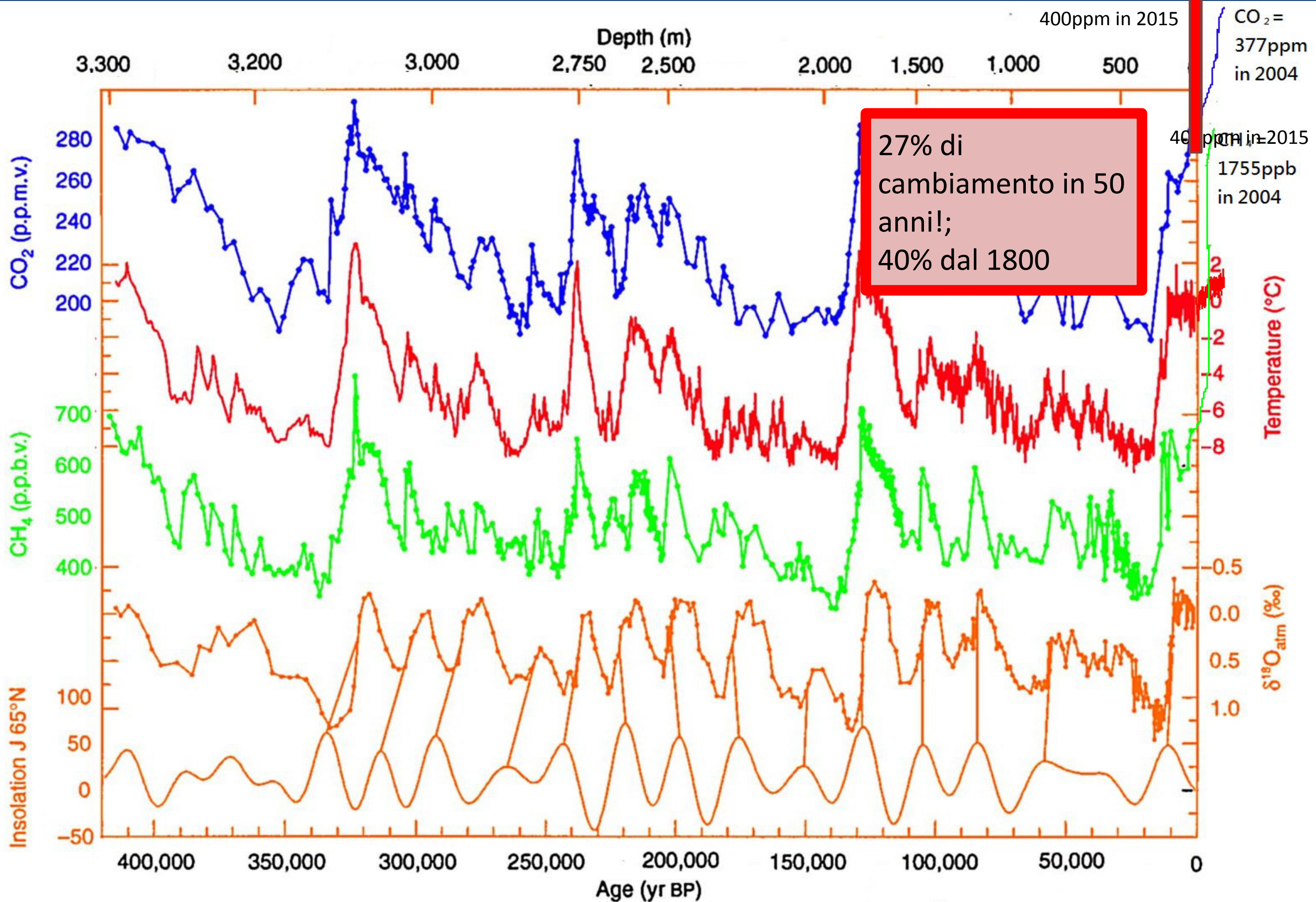
# Cambiamenti climatici dalle carote oceaniche, ultimi 5 Ma. Cicli di Milankovitch

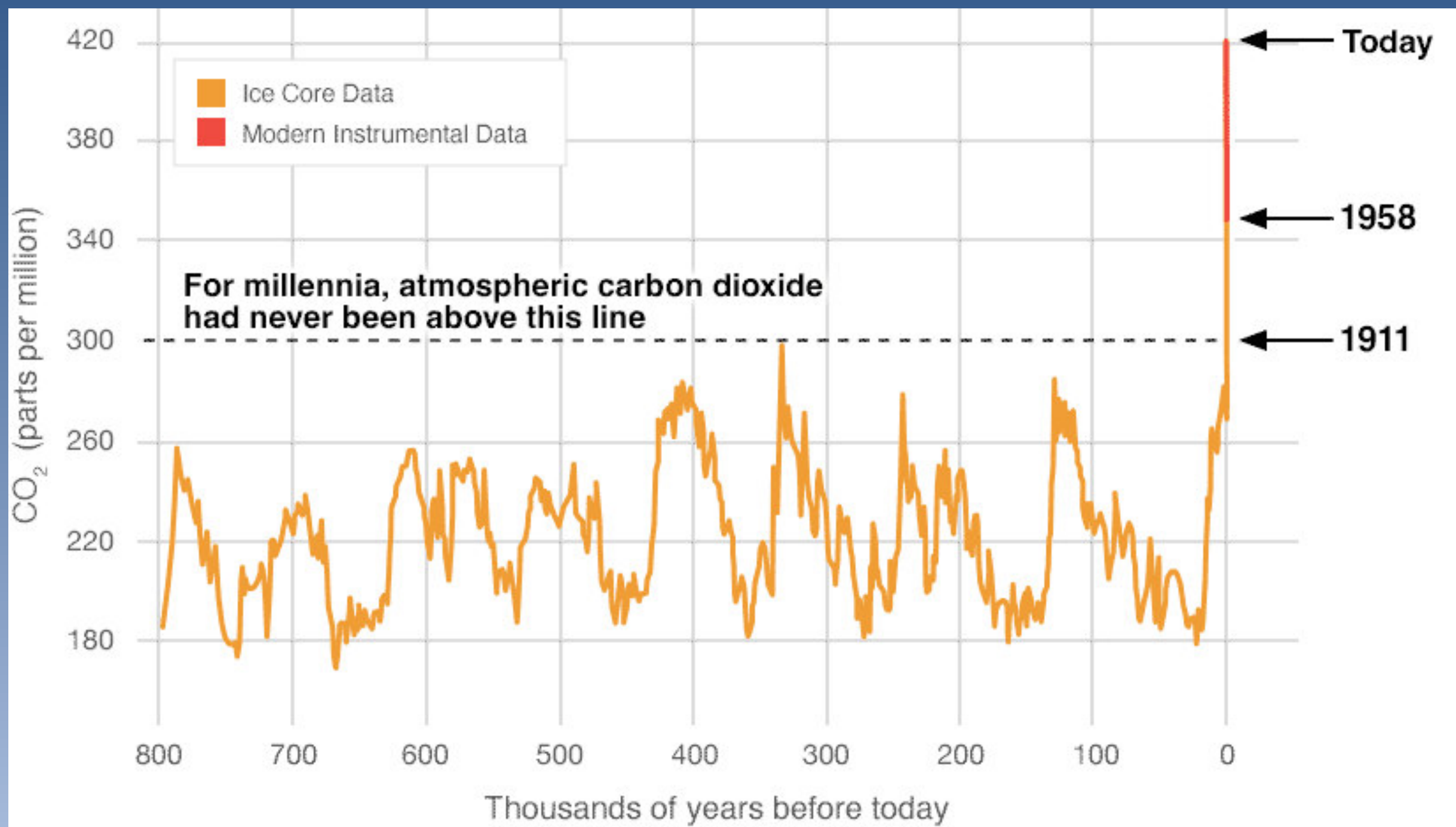


<https://www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/climate-change/>

Quando i livelli di CO<sub>2</sub> scendono sotto i ~400-600 ppm, i parametri orbitali diventano più importanti rispetto alla CO<sub>2</sub>







<https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>  
(aggiornato al 2023)





# Carbon Dioxide

**LATEST MEASUREMENT: October 2023**

419 ppm

DOWNLOAD DATA

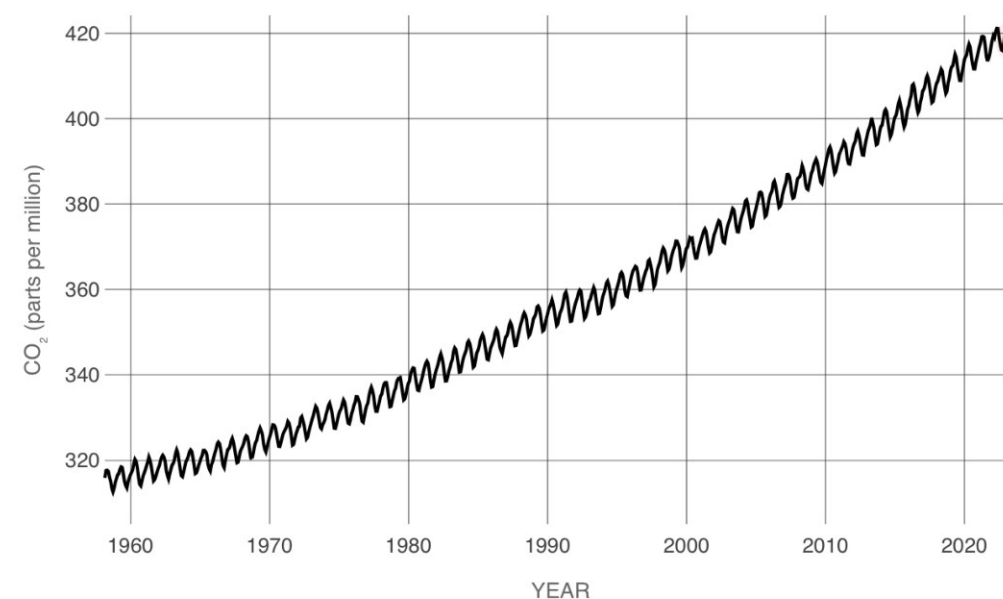
## Key Takeaway:

Carbon dioxide in the atmosphere warms the planet, causing climate change. Human activities have raised the atmosphere's carbon dioxide content by 50% in less than 200 years.

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is an important heat-trapping gas, also known as a greenhouse gas, that comes from the extraction and burning of fossil fuels (such as coal, oil, and natural gas), from wildfires, and

## DIRECT MEASUREMENTS: 1958-PRESENT

Data source: Monthly measurements.



# Carbon Dioxide

**LATEST MEASUREMENT: September 2024**

422 ppm

Download Data

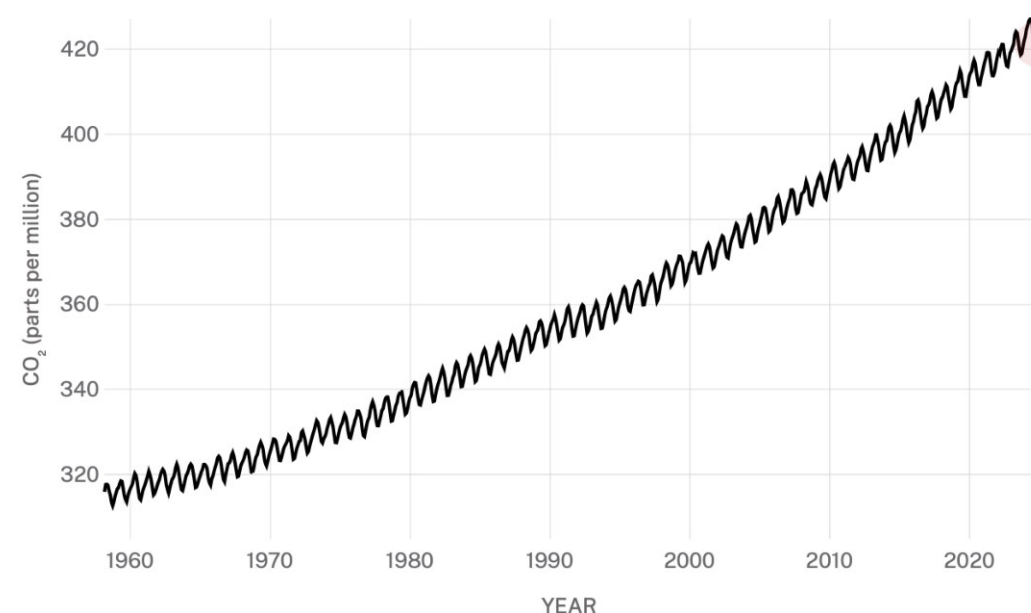
## Key Takeaway:

Carbon dioxide in the atmosphere warms the planet, causing climate change. Human activities have raised the atmosphere's carbon dioxide content by 50% in less than 200 years.

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is an important heat-trapping gas, also known as a greenhouse gas, that comes from the extraction and burning of

## DIRECT MEASUREMENTS: 1958-PRESENT

Data source: NOAA, measured at the Mauna Loa Observatory



# Velocità di cambiamento senza precedenti

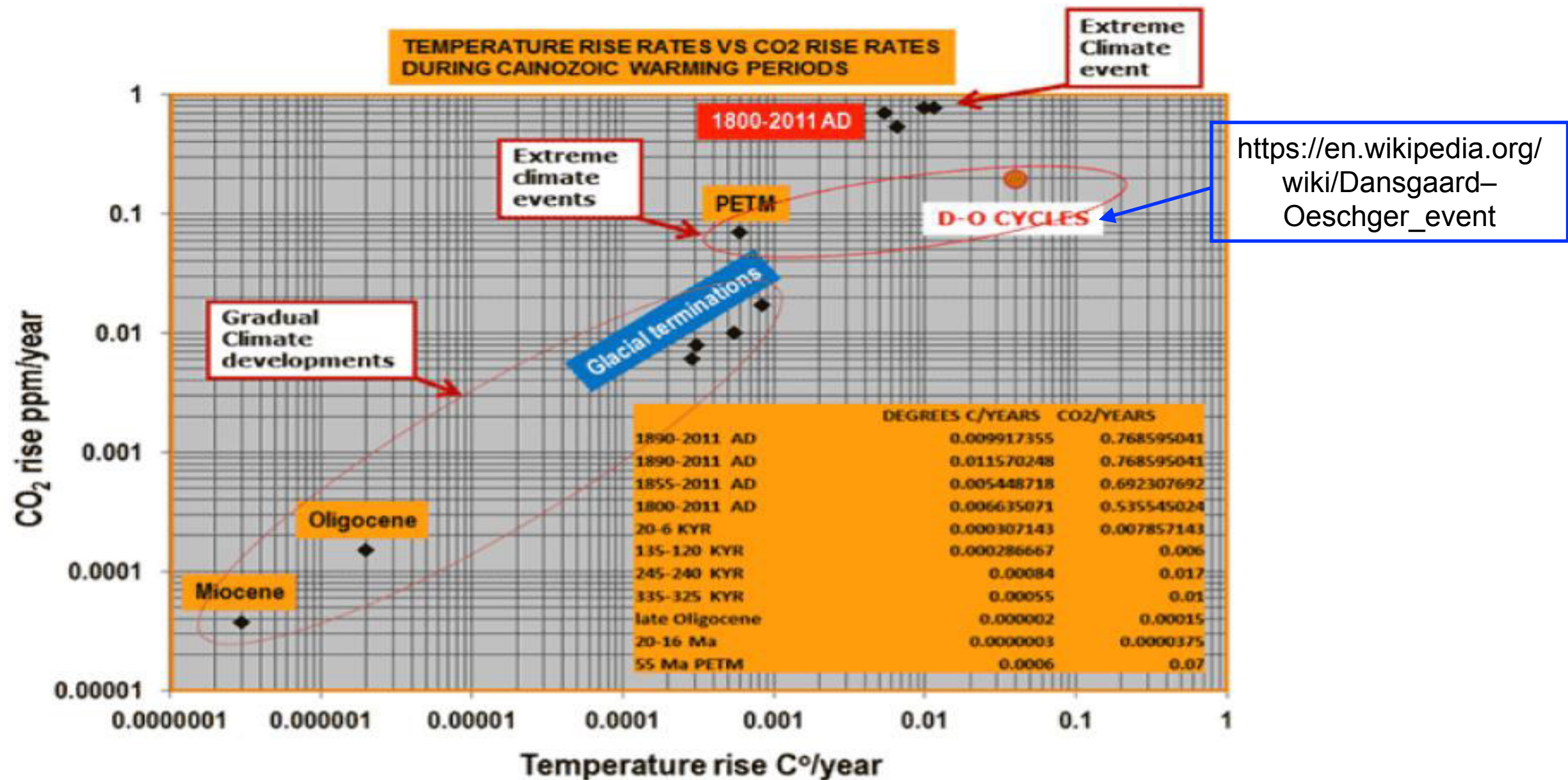
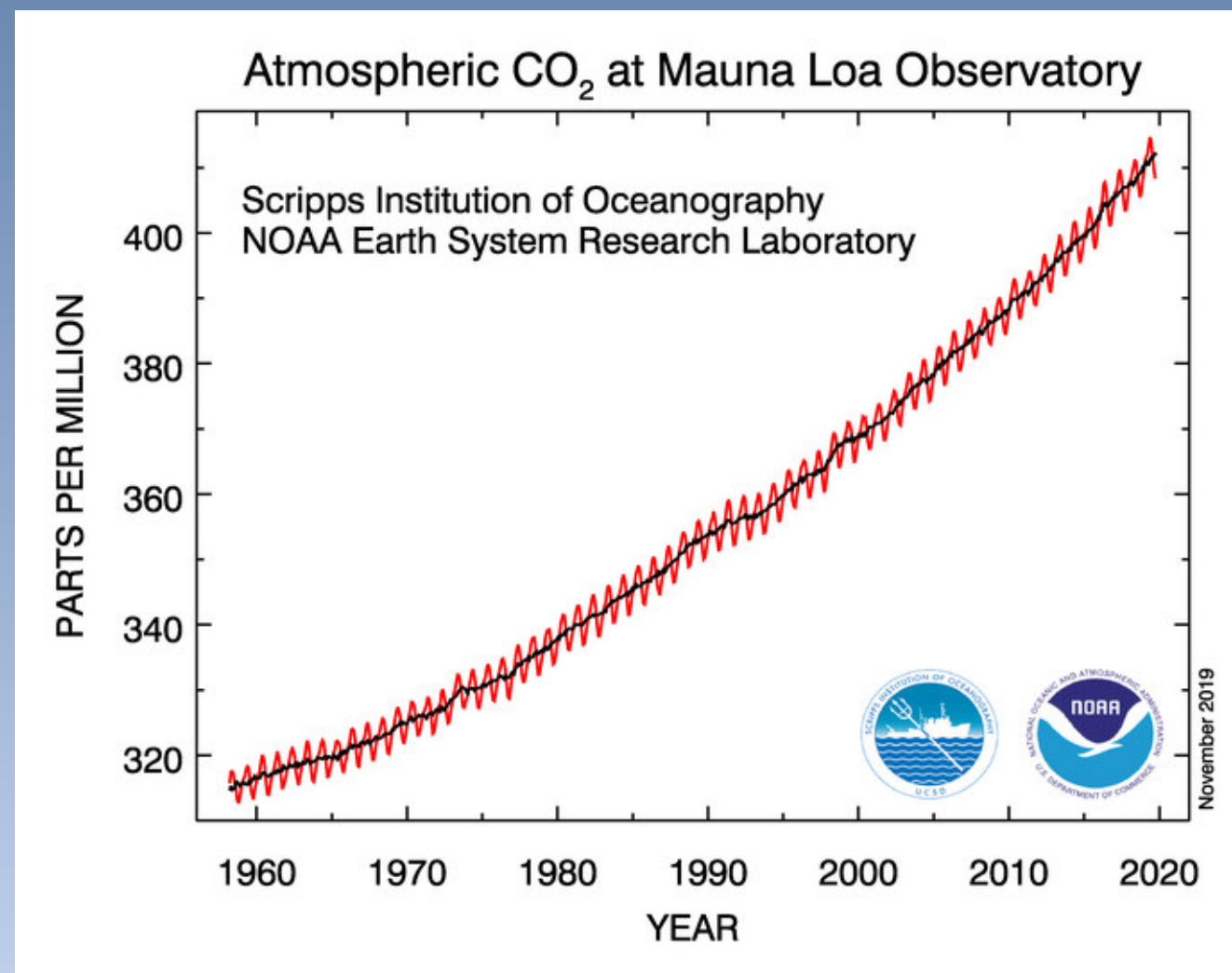


Figure 2: Relations between CO<sub>2</sub> rise rates and mean global temperature rise rates during warming periods, including the Paleocene-Eocene Thermal Maximum, Oligocene, Miocene, glacial terminations, Dansgaard-Oeschger cycles and the post-1750 period.

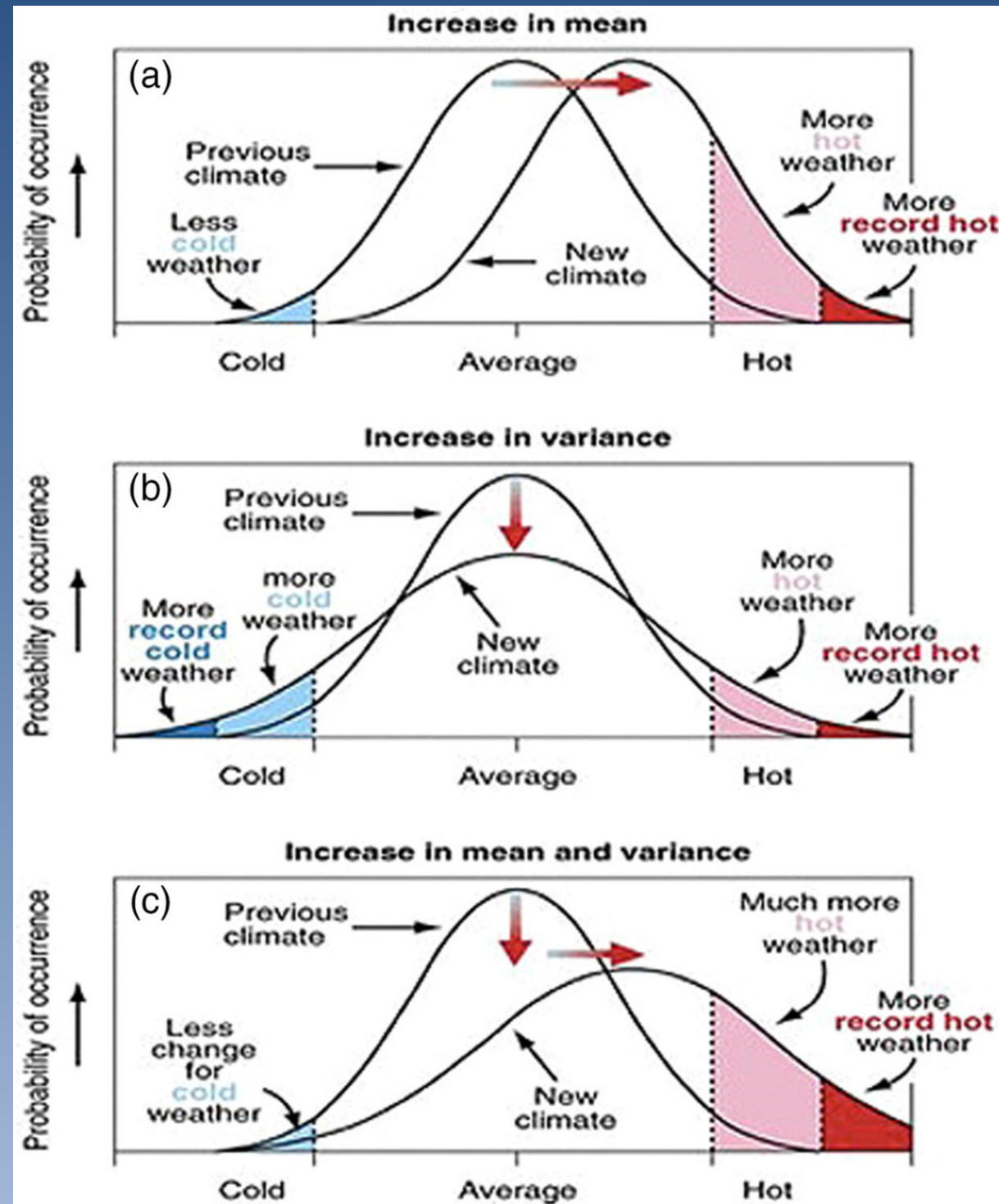


# Le emissioni antropiche sono largamente responsabili della situazione attuale

- 40% di aumento della CO<sub>2</sub>
- Carbonio “morto” altera il <sup>14</sup>C atmosferico
- Questo carbonio è più negativo/arricchito in <sup>12</sup>C



# EVENTI ESTREMI

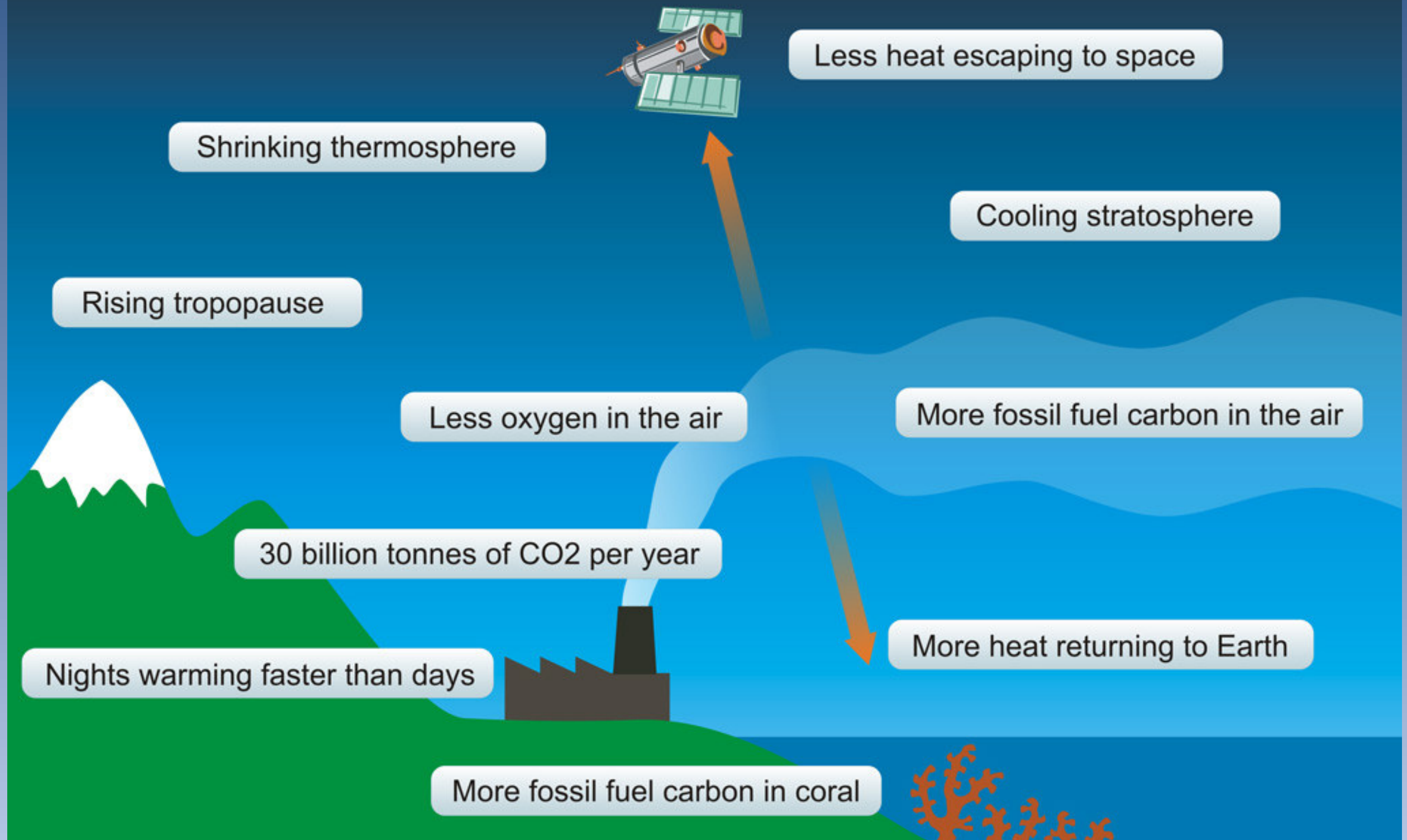


Al Ghussain  
(2018)

**Figure 8.** The effect of the average global temperature on the occurrence probability of extreme weather. Reproduced from: Houghton, JT., Ding, Y., Griggs, DJ., Noguer, M., Linden, PJ van der, Dai, X., et al. (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

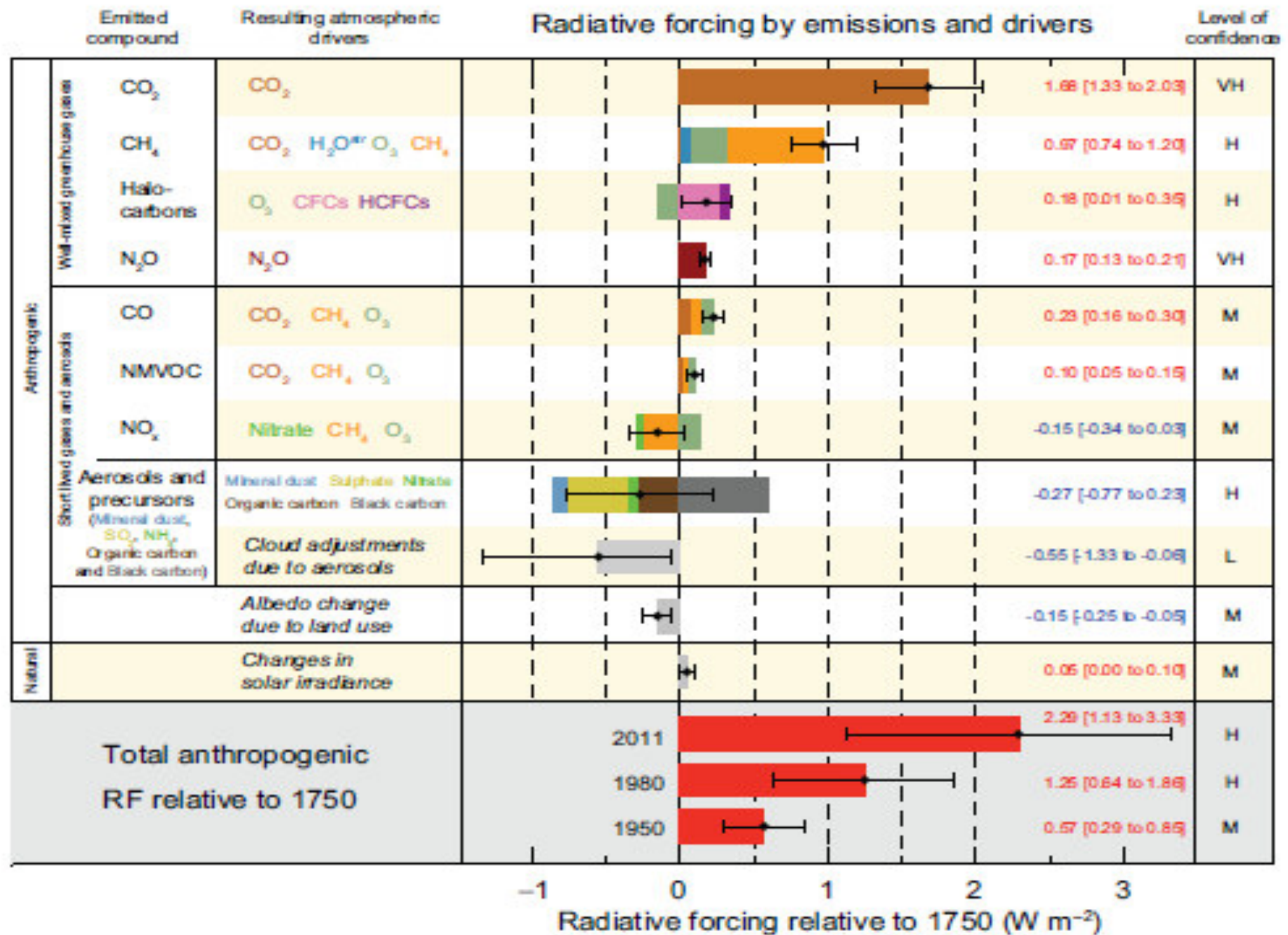


# 10 Indicators of a Human Fingerprint on Climate Change



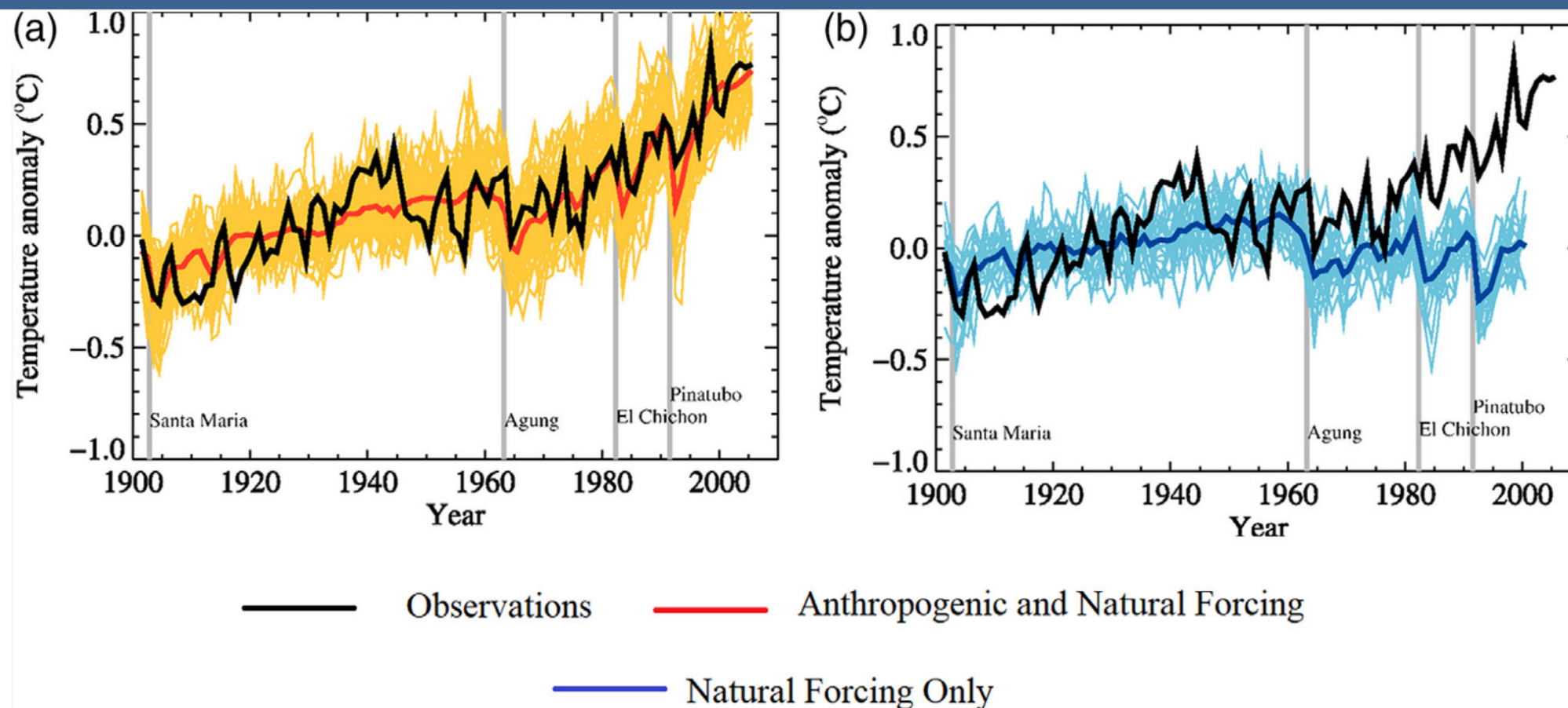
# 7. Modelli climatici

- Principali fattori responsabili, o forzanti (cause)





# IL CLIMA SI STA RISCALDANDO



**Figure 3.** The ensembles between the global observed temperature anomalies and the simulated ones by considering only the natural causes and by considering both natural and anthropogenic causes. Reproduced from: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor MMB., et al (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Color figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

# IL CLIMA SI STA RISCALDANDO

Vedi anche:

<https://www.reteclima.it/cause-ed-origini-del-cambiamento-climatico-una-serie-di-grafici-interattivi-aiutano-a-capirle-meglio/>



# Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC



MENU

ABOUT

DATA

DOCUMENTATION

FOCAL POINTS PORTAL  
LINKS HELP

BUREAU PORTAL

LIBRARY

LANGUAGES



SEARCH

ipcc

REPORTS

SYNTHESIS REPORT

WORKING GROUPS

ACTIVITIES

NEWS

CALENDAR



FOLLOW



SHARE

## The Intergovernmental Panel on Climate Change

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is the United Nations body for assessing the science related to climate change.

<https://www.ipcc.ch>

# Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC

[Mappa del sito](#)[Accessibilità](#)[Contatti](#)[Italiano](#)[English](#)

Istituto Superiore per la Protezione  
e la Ricerca Ambientale

[Cerca](#)[Home](#)[Istituto](#)[Attività](#)[Servizi](#)[Dati e Indicatori](#)[News](#)[Eventi ISPRA](#)[Sala stampa](#)[URP](#)

[Home](#) / [Attività](#) / [Biodiversità](#) / [Documenti](#) / Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC)- Report

Documenti

**Intergovernmental Panel On Climate  
Change (IPCC)- Report**

## Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC)- Report

L'IPCC (Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico) è il principale organismo internazionale per la valutazione dei cambiamenti climatici.

È stato istituito nel 1988 dalla World Meteorological Organization (WMO) e dall'United Nations Environment Program (UNEP) come uno sforzo da parte delle Nazioni Unite per fornire ai governi di tutto il mondo una chiara visione scientifica dello stato attuale delle conoscenze sul cambiamento climatico e sui suoi potenziali impatti ambientali e socio-economici.

L'IPCC è un organismo scientifico che passa in rassegna e valuta le più recenti informazioni scientifiche, tecniche e socio-economiche prodotte a livello mondiale per la comprensione dei cambiamenti climatici. Non effettua attività di ricerca né di controllo dei dati o dei parametri climatici.

Migliaia di scienziati di tutto il mondo contribuiscono al lavoro dell'IPCC, su base volontaria. La review è una parte essenziale dell'azione dell'IPCC, per garantire una valutazione oggettiva e completa di informazioni aggiornate.

[https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/biodiversita/documenti/  
intergovernmental-panel-on-climate-change-ipcc-report](https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/biodiversita/documenti/intergovernmental-panel-on-climate-change-ipcc-report)