

# Ocean a klimat:

## wczoraj, dziś i jutro

Wykład 3:

Gwałtowne zmiany klimatu

(*deglacjacja, zmienność “suborbitalna”*)

Jacek Piskozub

<http://www.iopan.gda.pl/~piskozub/klimat>

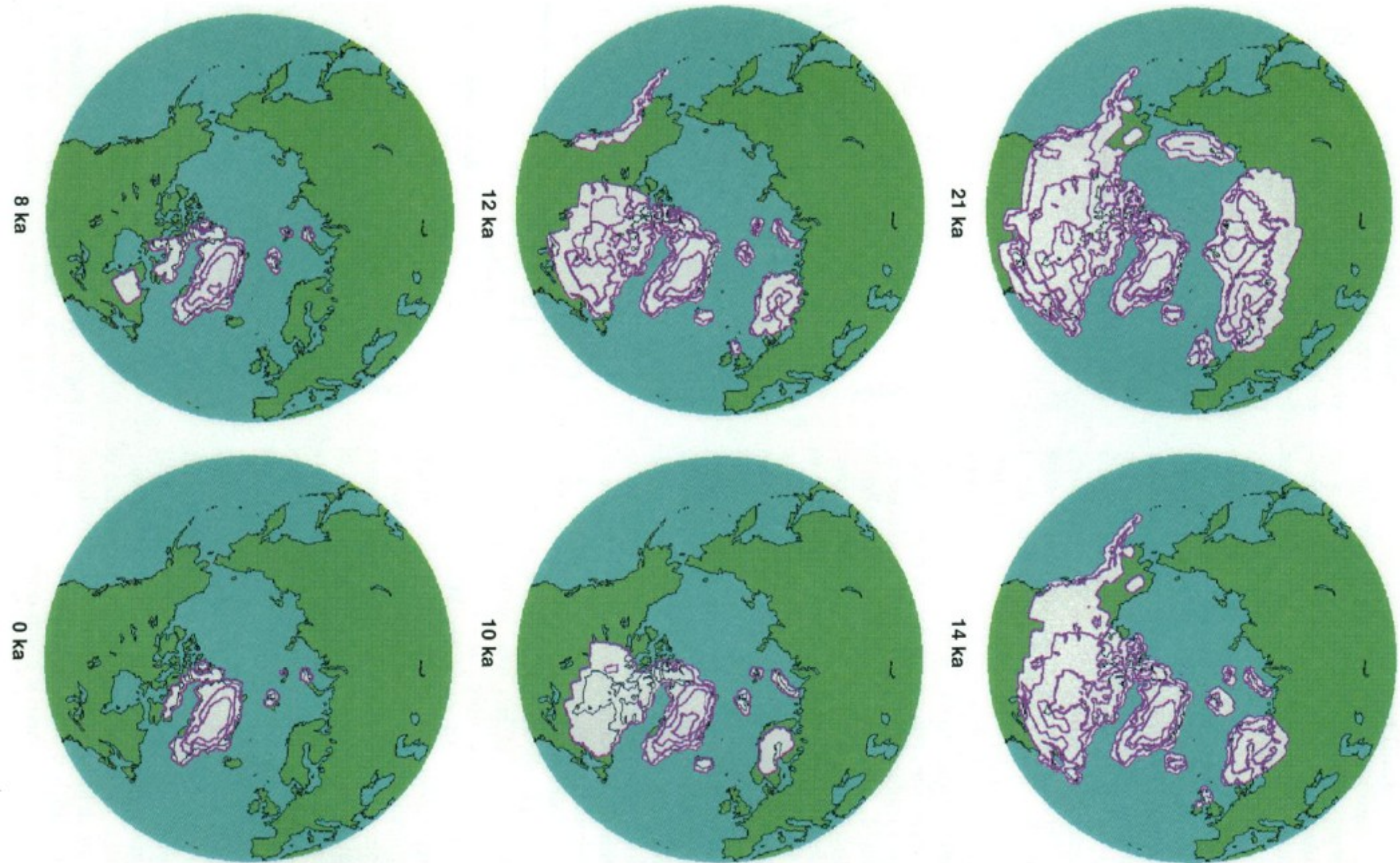
Studium Doktoranckie IOPAN, semestr zimowy 2016 /17 r.

# Jacek Piskozub “Klimat a ocean: wczoraj, dziś i jutro”, kurs wykładów dla doktorantów październik '16 – styczeń '17

- ✓ Maszyna klimatyczna Ziemia (zmienność w skali geologicznej)
- ✓ Epoka lodowa w której żyjemy (zmienność w skali astronomicznej)
- ✓ **Gwałtowne zmiany klimatu (deglacja, zmienność “suborbitalna”)**
- ✓ Holocen: klimat, ocean a cywilizacja, (stała słoneczna i wulkanizm)
- ✓ Północny Atlantyk – kuźnia klimatu (cyrkulacja termohalinowa)
- ✓ Zmienność klimatu w skali dekadnej (AMO, NAO, PDO)
- ✓ Tropiki a zmienność klimatu (*ENSO, huragany, monsuny*)
- ✓ Aerosol: wielka niewiadoma klimatyczna
- ✓ Gazy o znaczeniu klimatycznym (*cykl węgla, CO<sub>2</sub>, metan, DMS*)
- ✓ Globalne ocieplenie a ocean (*zmienność antropogeniczna*)
- ✓ Zmiany klimatyczne w rejonach polarnych



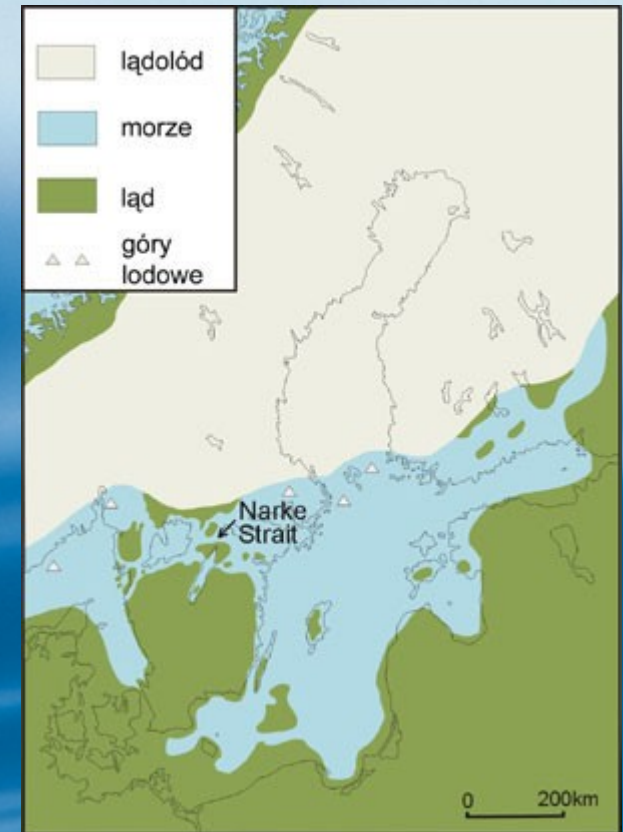
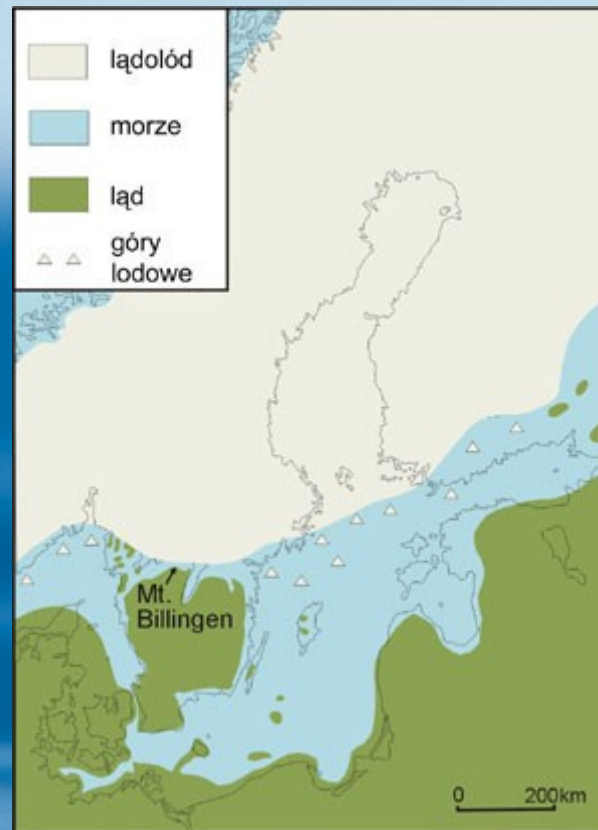
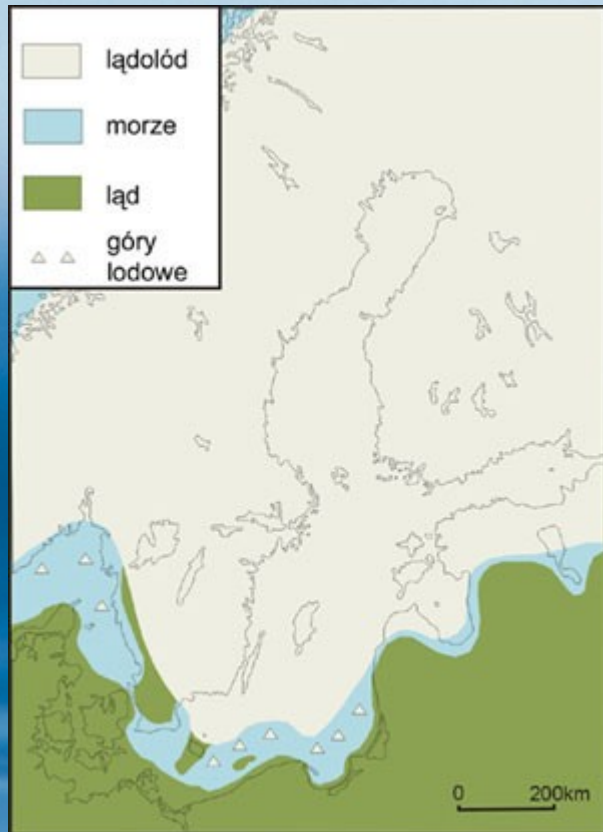
# Proces topienia lodowców na półkuli północnej





# Ewolucja Morza Bałtyckiego 1/2

(ta część jego historii, której nie zatarł lodowiec)



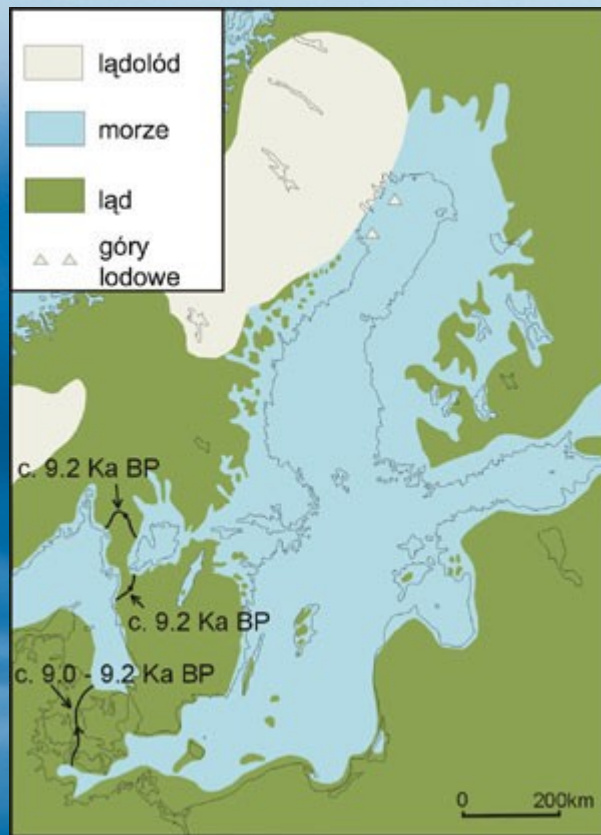
Wczesne Jezioro Lodowe,  
13.0 ka

Późne Jezioro Lodowe,  
10.3 ka

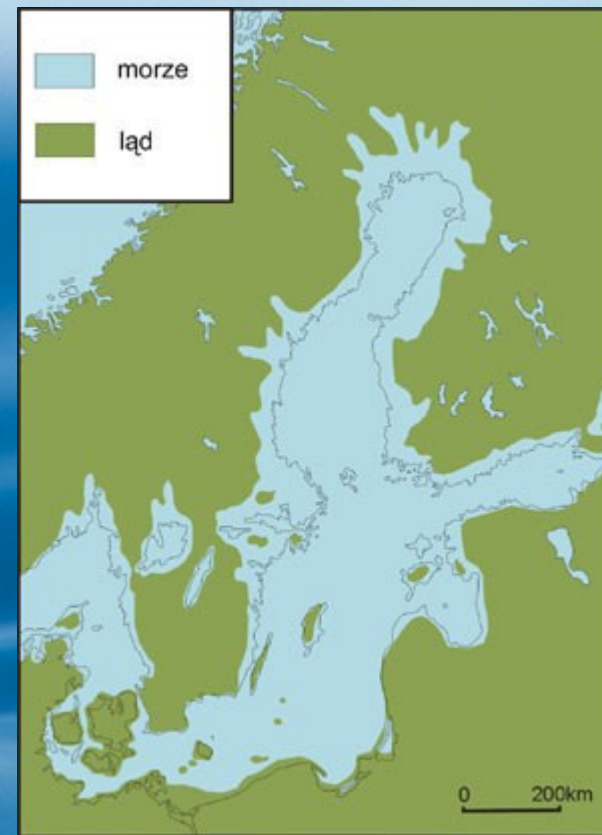
Morze Yoldiowe,  
10.0 ka

# Ewolucja Morza Bałtyckiego 2/2

(ta część jego historii, której nie zatarł lodowiec)



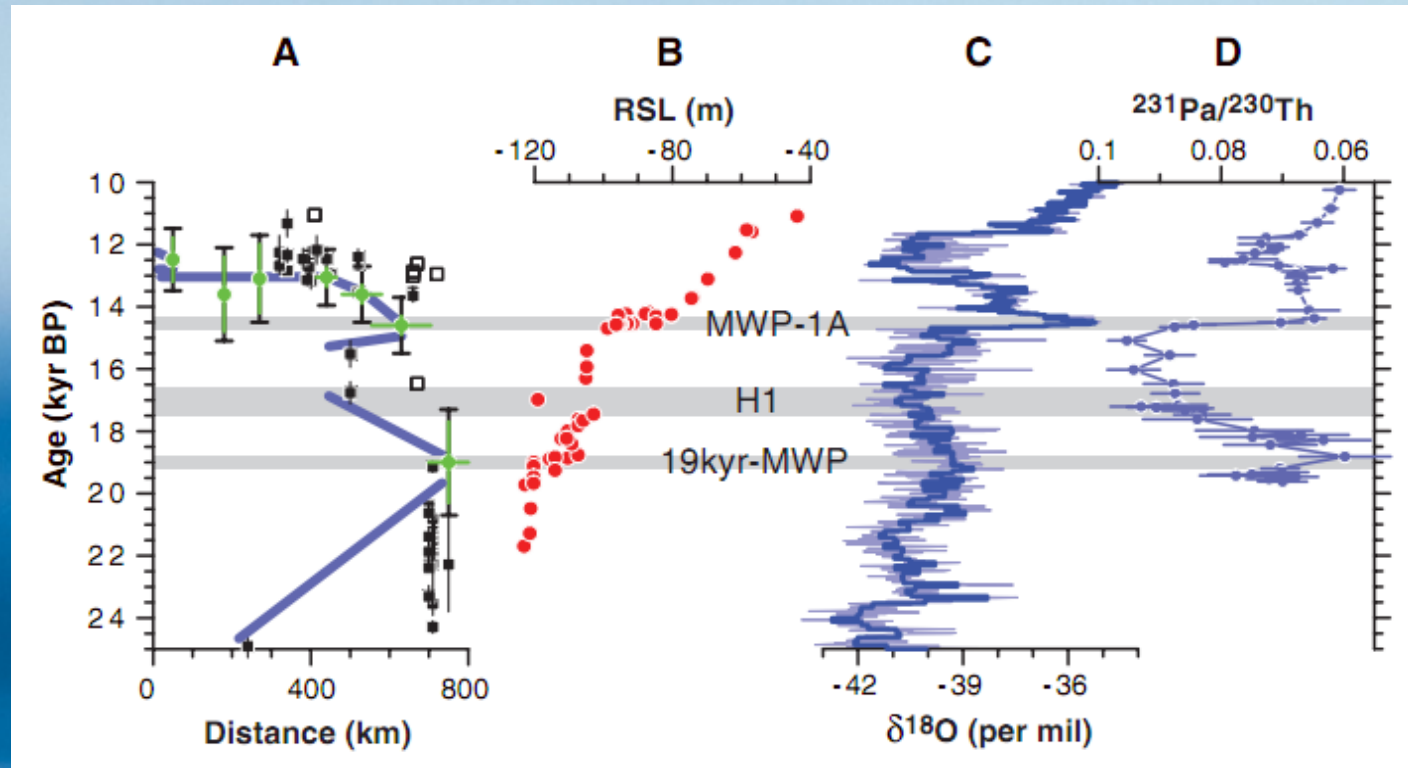
Jezioro Ancylusowe,  
9.2 ka



Morze Lytorynowe,  
7.5 ka



# Zmiany zasięgu zlodowacenia skandynawskiego

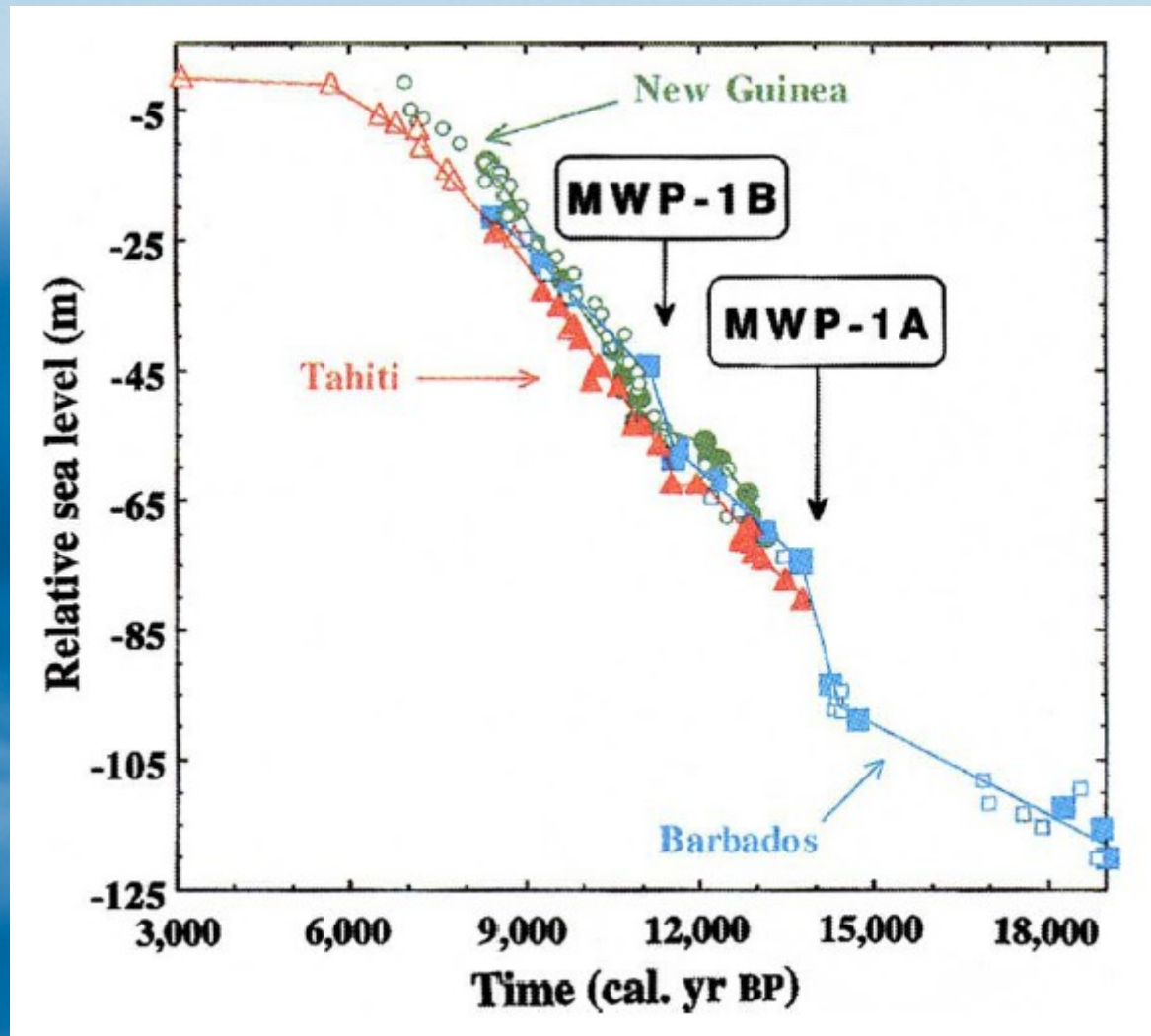


(A) zasięg zlodowacenia na podstawie pomiarów  $^{14}\text{C}$  (czarne) oraz  $^{10}\text{Be}$  (zielone); (B) zmiany poziomu morza; (C) względna obfitość izotopu  $^{18}\text{O}$  w rdzeniu lodowym z Grenlandii; (D) stosunek izotopów  $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$  (proaktynu i toru) w osadach atlantyckich (proxy intensywności cyrkulacji – *Kumar et al. 1993*). Oba izotopy pochodzą z rozpadu promieniotwórczego uranu, lecz tor ma większą afiniczność do cząstek osadów (nie jest dobrze wymieszany).

Uwaga: zdarzenie Heinricha 1 (H1) oznaczone jest na wykresie zbyt wcześnie (za nisko). Powinno być 18-15 ka ze szczytem intensywności ok. 16 ka.

*Rinterknecht et al. 2006 (Science)*

# Zmiany poziomu morza w czasie ostatniego roztopiania lądolodu (“deglacjacji”)

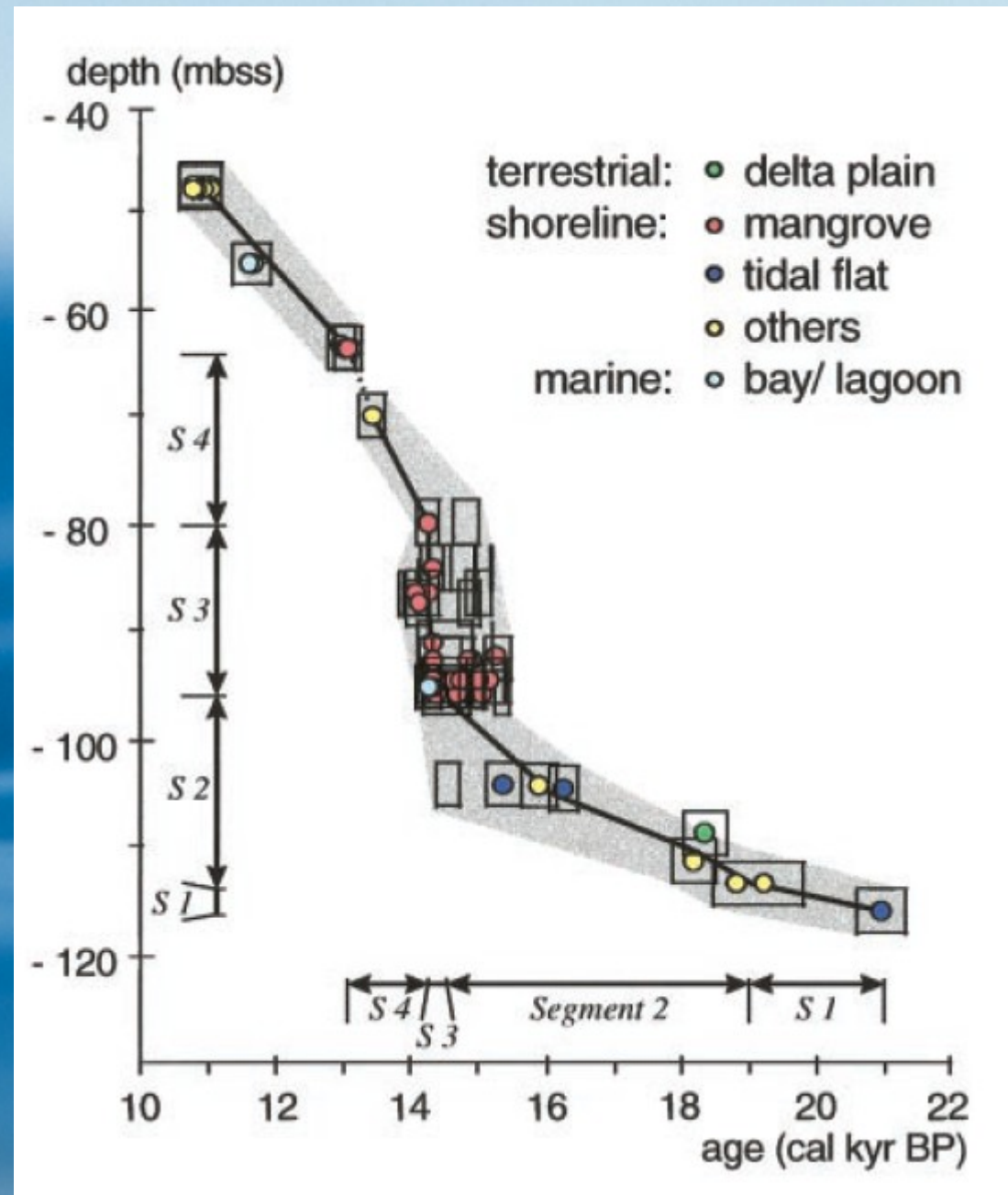


Kopalne linie brzegowe wskazują na największą szybkość zmian poziomu morza ok. 14 ka (“MWP-1A”) oraz 11.3 ka (“MWP-1B”)



# Zmiany poziomu morza na Szelfie Sunda

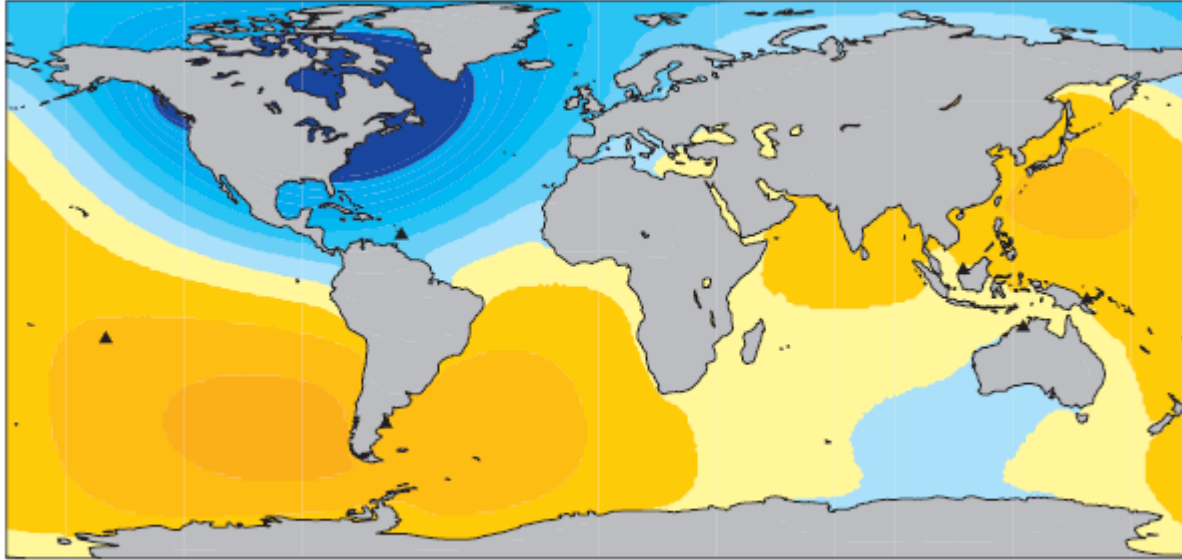
Badania tektonicznie stabilnego Szelfu Sunda (Indonezja), odsłanianego podczas zlodowaceń wskazują, że podczas MWP-1A (14.6 – 14.3 ka) poziom morza podniósł się o 16 m w przeciągu 300 lat, czyli średnio o ponad 5 cm rocznie.



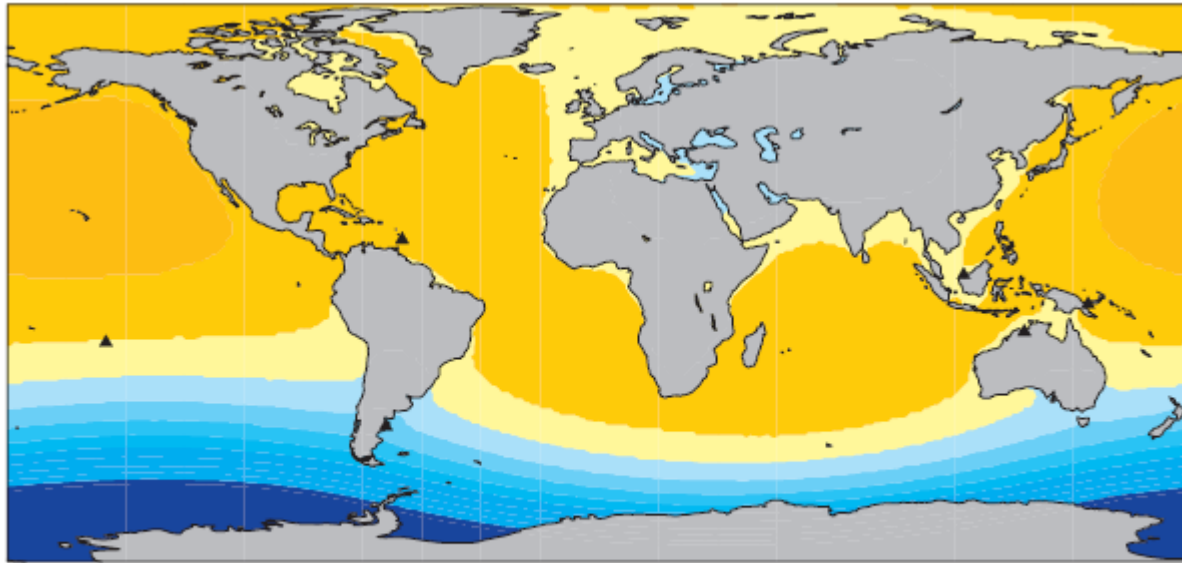


# Źródło wypływu WMP-1A da się odnaleźć?

A



B



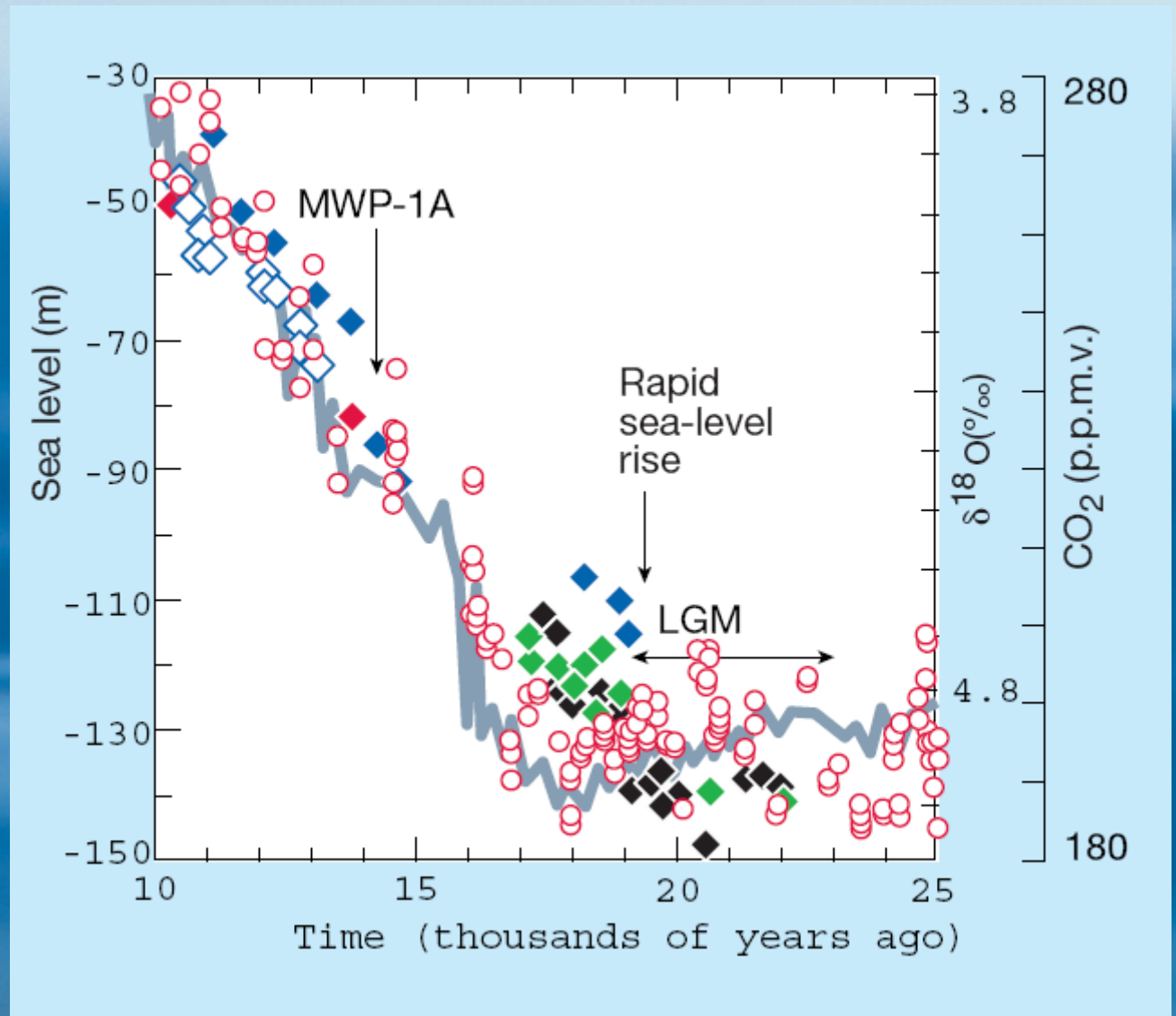
Na zmiany poziomu morza po roztopieniu dużej masy lądolodu ma wpływ zmienione przyciąganie grawitacyjne lądolodu (!)

W wyniku tego rozkład zmian wysokość poziomu morza na oceanach będzie różny jeśli 100% WMP-1A pochodziłoby z Pn. Ameryki (A) lub Zachodniej Antarktydy (B). Obecnie dostępne (dość niekompletne) dane sugerują jednoczesne topienie lodowców na obu półkulach. *Jednostki na rysunkach dobrane są arbitralnie.*

# Przyczyny deglacjacji?

Podejrzaniymi są ci sami co zazwyczaj:

- Pierwotną przyczyną końca zlodowacenia jest duże nasłonecznienie letnie Arktyki (wzrost poziomu morza 19 ka)
- Impuls ten jest znacznie wzmocniony przez stopniowo wzrastającą koncentrację  $\text{CO}_2$  (na rysunku niebieska linia) od 200 do 280 ppm.
- Mechanizm? Nie do końca poznany ale związany z oceanem.





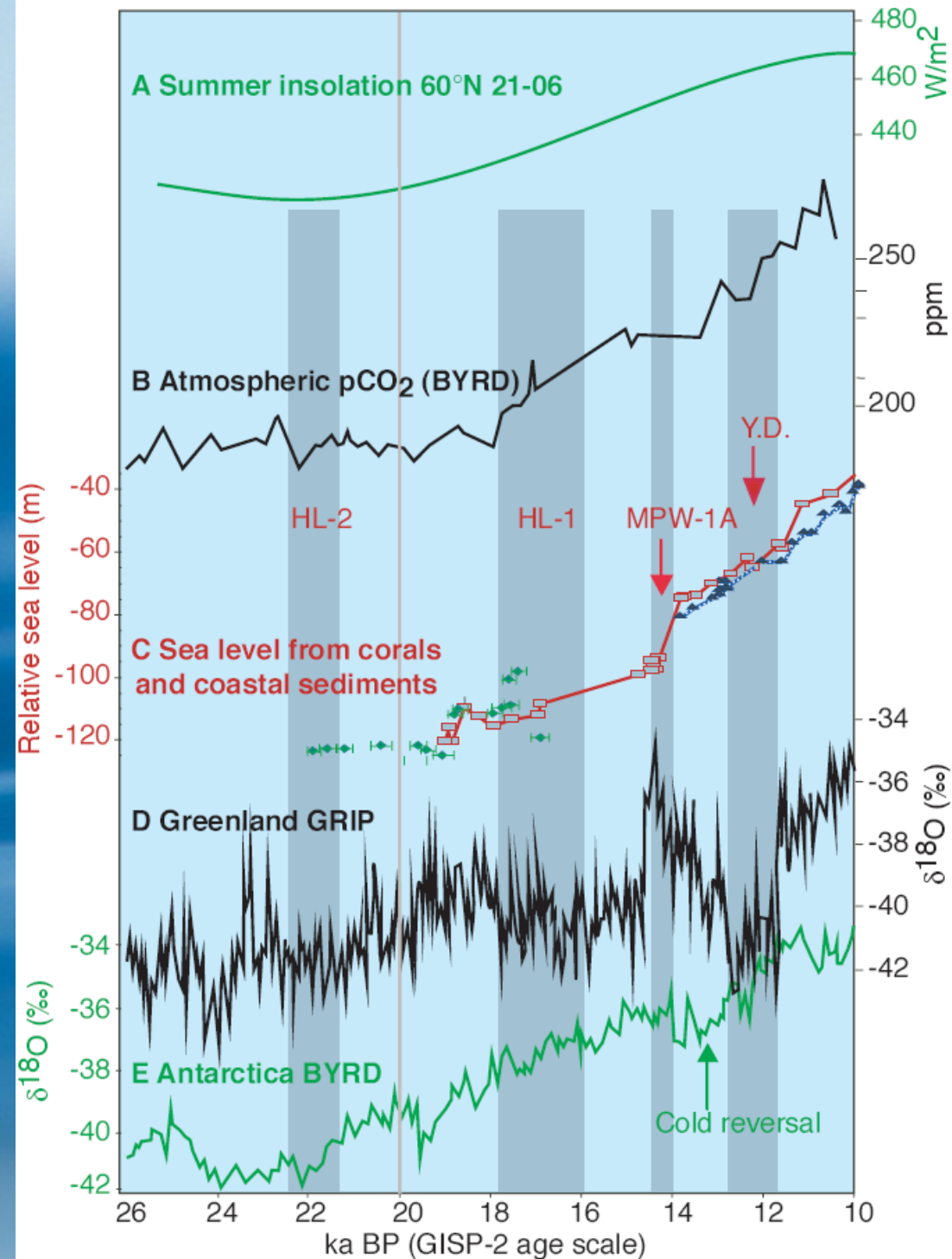
# Czy wszystko przebiegało gładko i bez przeszkód?

*(stan wiedzy z ok. 2005 roku)*

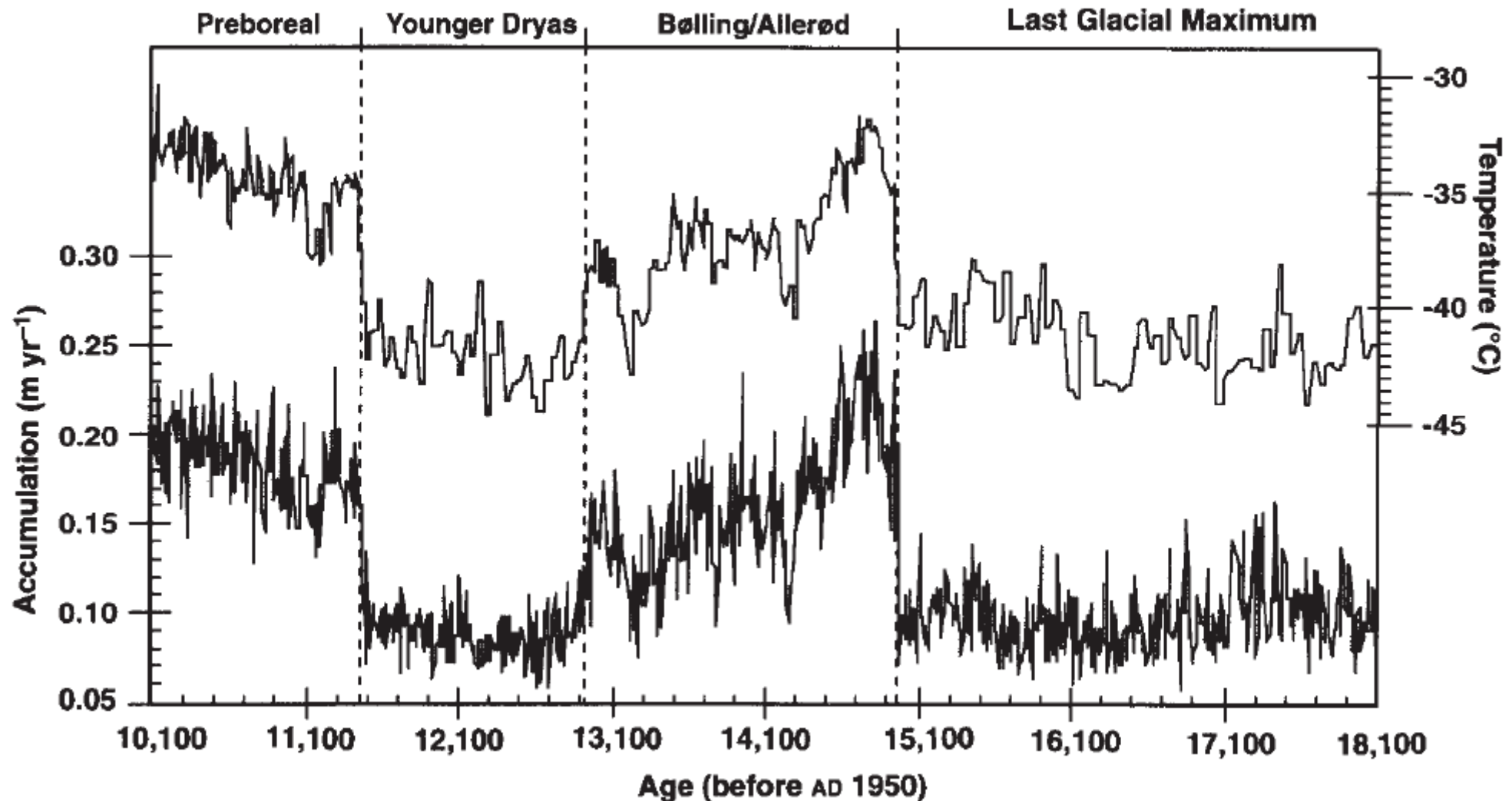
Z danych paleoklimatycznych  
widać, że:

- Wzrost temperatury nie przebiegał ani gładko ani jednostronnie (monotonicznie)
- Większe i bardziej gwałtowne zmiany temperatury widoczne były na północnej półkuli (Grenlandia) niż południowej (Antarktyda)
- Zmiany temperatur na obu półkulach nie były synchroniczne

## Last Deglaciation (25-10 ka BP) Through Various Proxies



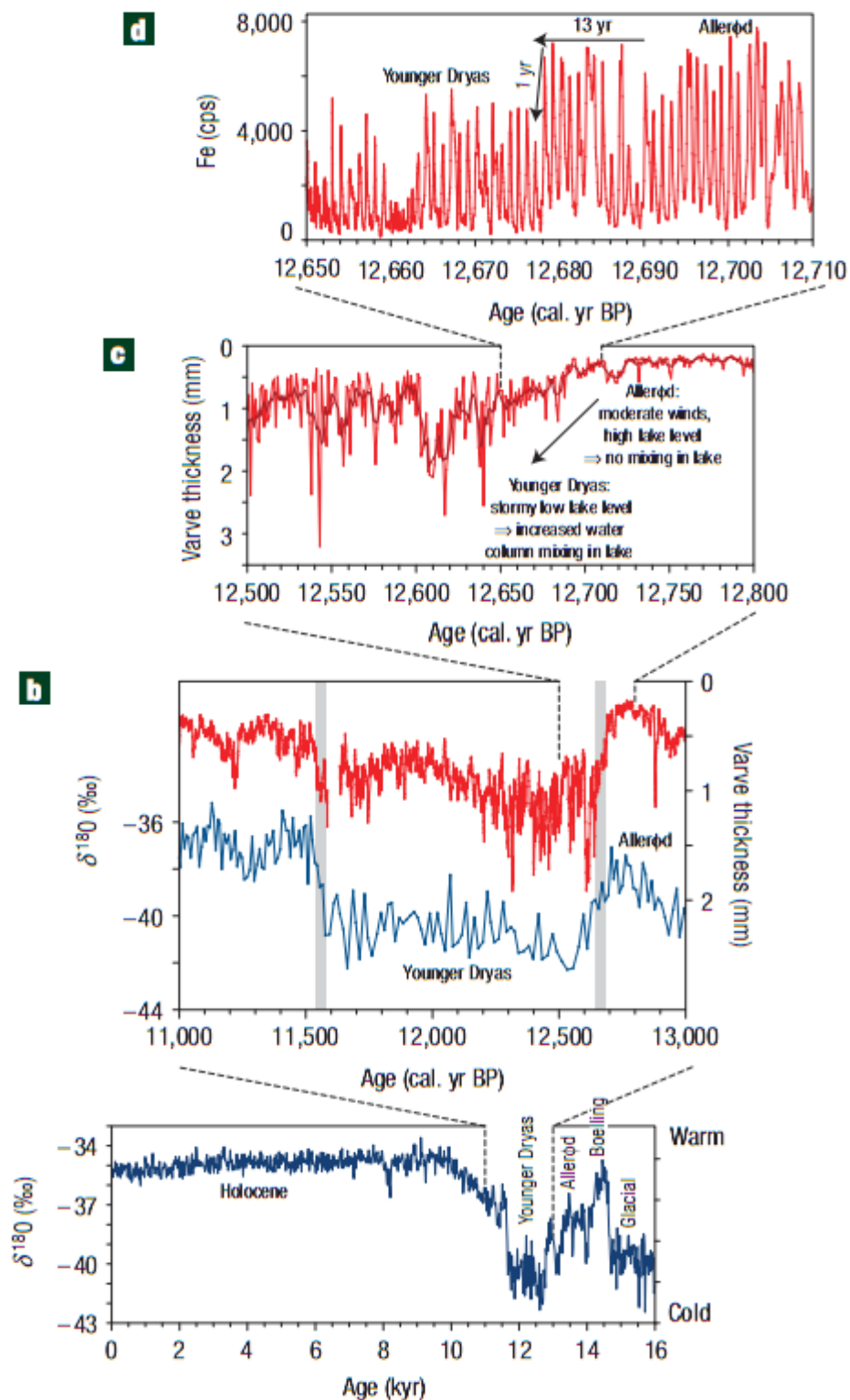
# Ciepły Bølling/Allerød i zimny Młodszy Dryas



Temperatura powietrza i akumulacja śniegu z rdzenia lodowego GISP2 na Grenlandii: gwałtowne zmiany klimatu w czasie rzędu dekady (10 lat)



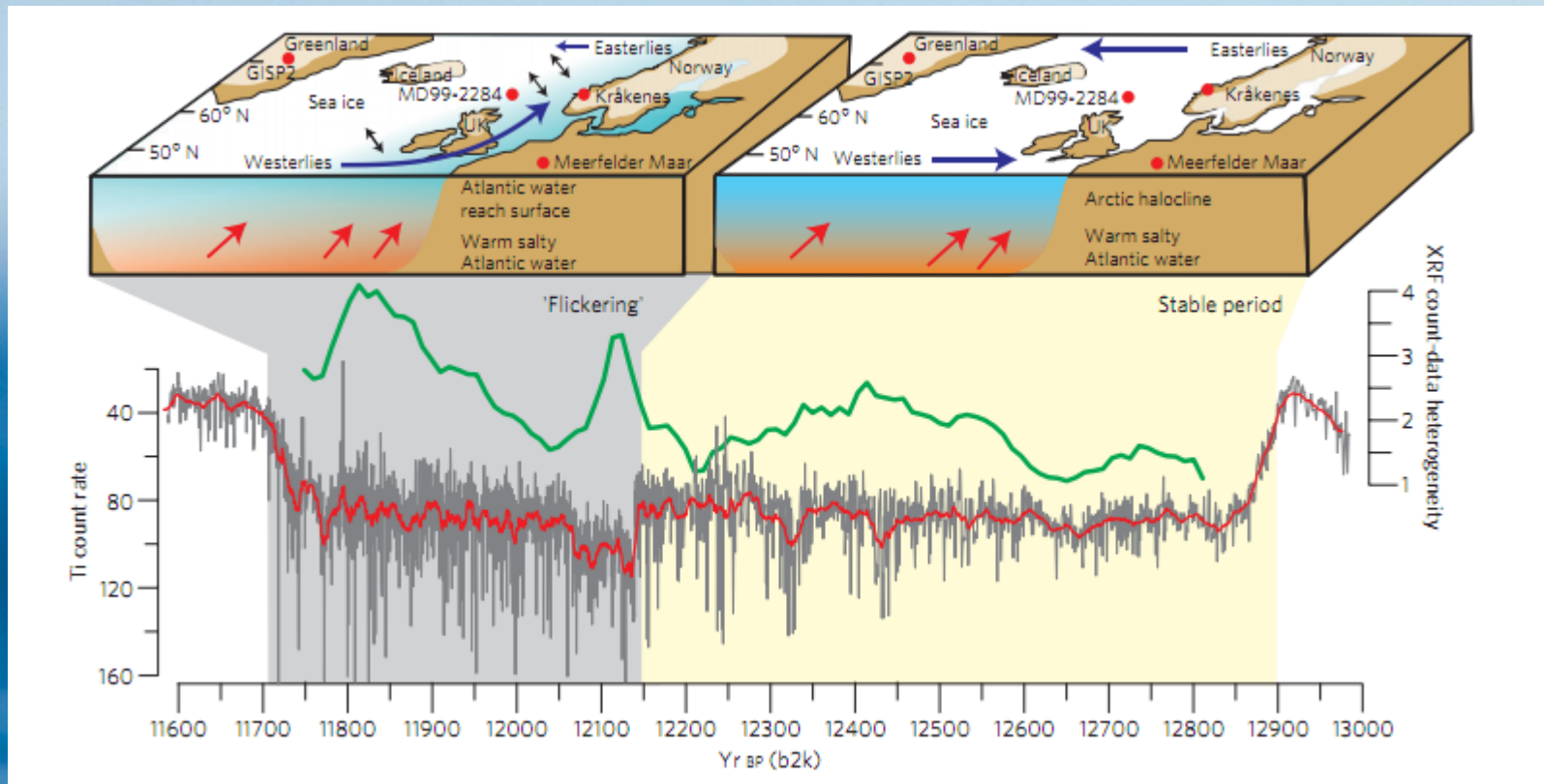
# YD rozpoczął się w ciągu jednego roku



Warwy (warstwy roczne) z jeziora Meerfelder Maar z Niemiec pozwalają stwierdzić że intensywność wiatrów zwiększyła się gwałtownie 12679 lat „temu” (przed 1950 n.e.) rozpoczynając okres Młodsze Dryasu. Taka gwałtowna zmiana oznaczać musi, że zmieniła się nie tylko cyrkulacja oceaniczna, ale także atmosferyczna.

*Brauer et al. 2008 (Nature Geoscience)*

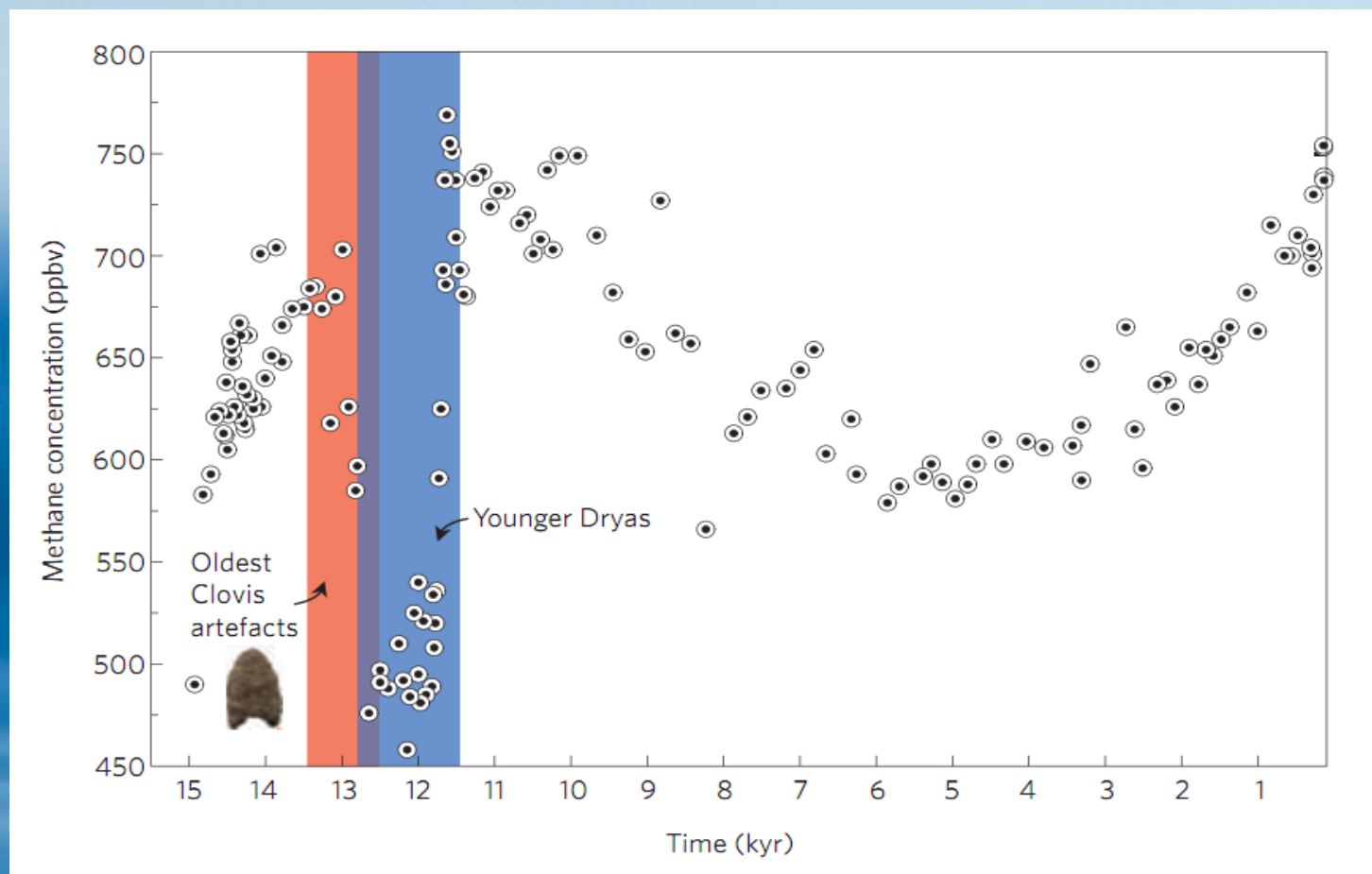
# Znamy klimat YD wręcz z rozdzielczością roczną



Dane paleoklimatyczne z jeziora Krakenes w zachodniej Norwegii (w połączeniu z innymi miejscami zaznaczonymi na mapie) wskazują na stabilny klimat pierwszej części YD i szybkozmienny (“migający”) w drugiej. Tytan w osadach jest proxy intensywności erozji gór przez lodowiec a linia zielona to szybkość zmian wartości XRF (fluorescencji rentgenowska) osadów jeziornych.



# Czy spadek koncentracji metanu w YD spowodowało “wielkie zabijanie” w Północnej Ameryce?



Spadek atmosferycznej koncentracji metanu w czasie YD nakłada się czasowo ze zniknięciem megafauny Pn. Ameryki o które podejrzewa się kulturę Clovis, bardzo sprawnych myśliwych wytrenowanych na mamutach Syberii. Autorzy tego rysunku oceniają, że może to tłumaczyć od 12.5% do 100% spadku metanu. Tak, ale w zimnym klimacie mokradła zamarzają redukując produkcję metanu. Więc?

*Smith & Elliot 2010 (Nature Geoscience)*

# Z cyklu dziwne hipotezy: asteroid / kometa zabijająca mamuty i rozpoczynająca YD

Firestone et al 2007 (PNAS), zaproponowali taki scenariusz dla wyjaśnienia zniknięcia amerykańskiej megafauny, archeologicznej kultury Clovis i rozpoczęcia Młodsze Dryasu. Argumentacje kontynuowano w kolejnych artykułach: Kenneth et al 2009 (PNAS & Science). Niestety (?) każde z ich rzekomych odkryć zostało już zakwestionowane (argument i kto go kwestionował):

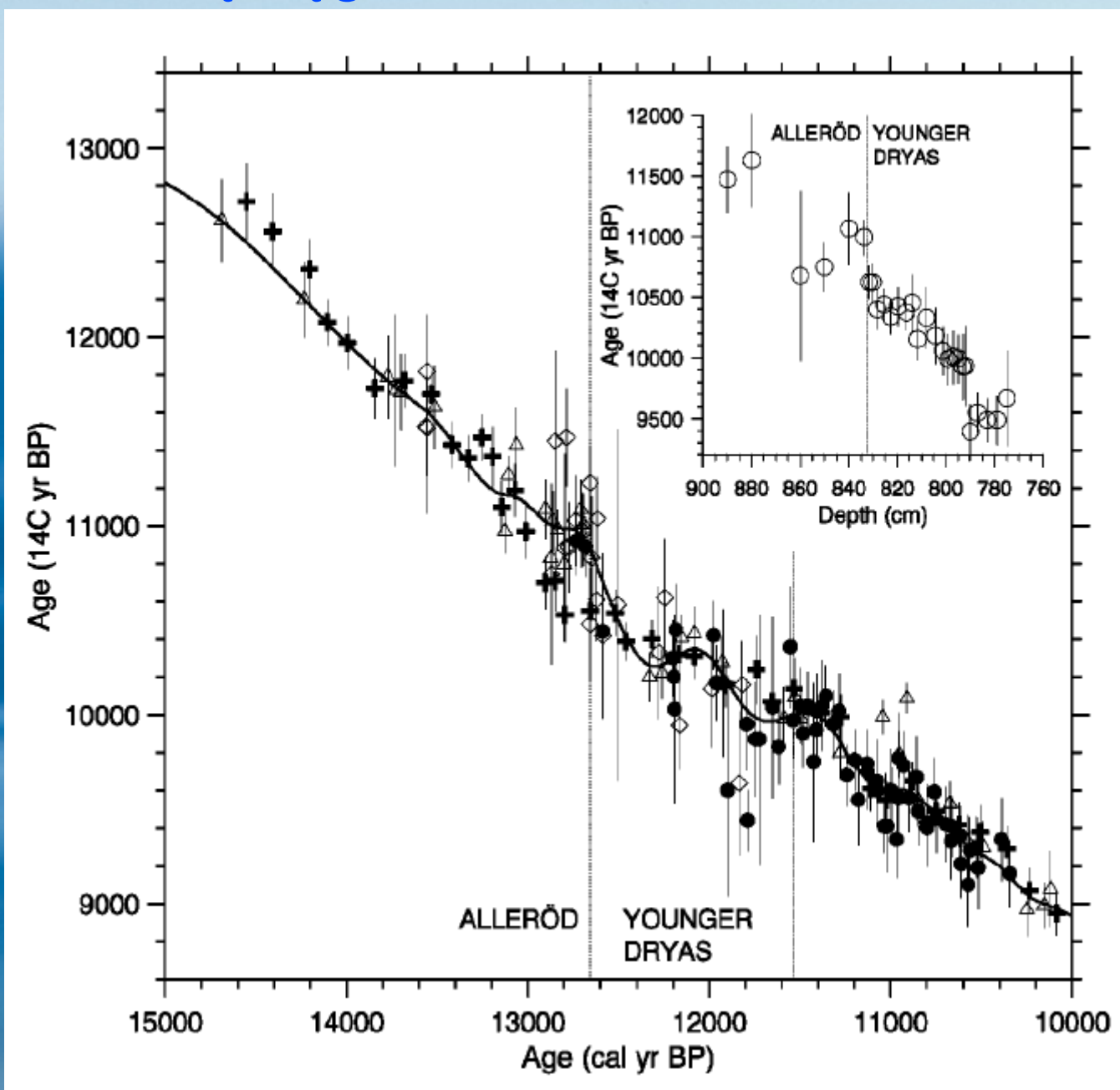
- megafauna Północnej Ameryki zginęła nagle na początku YD (Gill et al 2009 Science)
- kultura Clovis nagle zniknęła w tym samym czasie (Buchanan Collard Edinborough 2008 PNAS)
- wiąże się to z warstwą węgla świadczącą o rozległych pożarach (Marlon et al 2008 PNAS)
- warstwa zawiera typowe dla impaktu cząstki namagnesowane i mikrosferule (Surovell et al 2009 PNAS, Scott et al 2010 GRL)
- warstwa zawiera duże ilości irydu (Paquay et al 2009 PNAS)
- w warstwie tej występują nanodiamenty (Daulton, Pinter & Scott 2010 PNAS)
- wszystkie te dowody są synchroniczne i pochodzą z początku YD (Meltzer et al 2014 PNAS)

Artykuł przeglądowy Holliday et al 2014 kwestionuje wszystkie te argumenty bez wyjątku jako “*contradictory, inconsistent and incoherent*”.



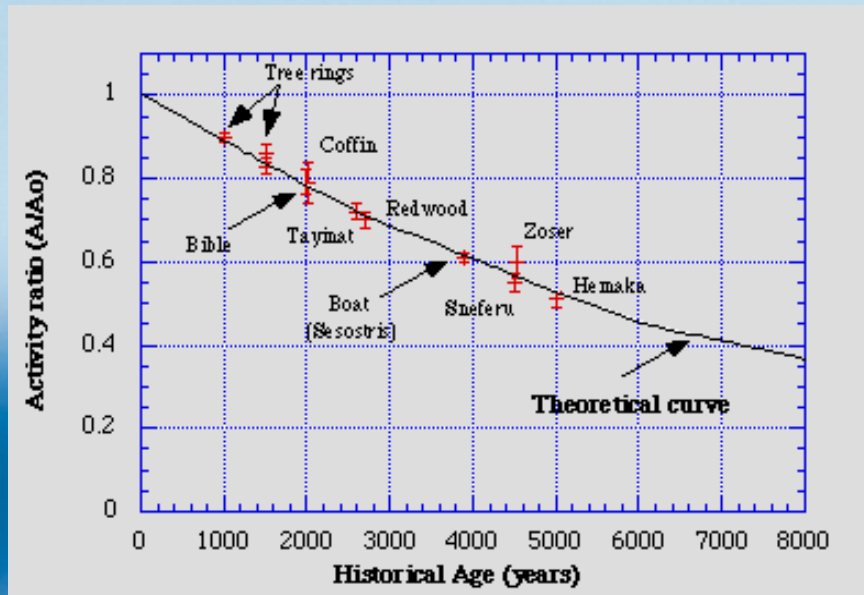
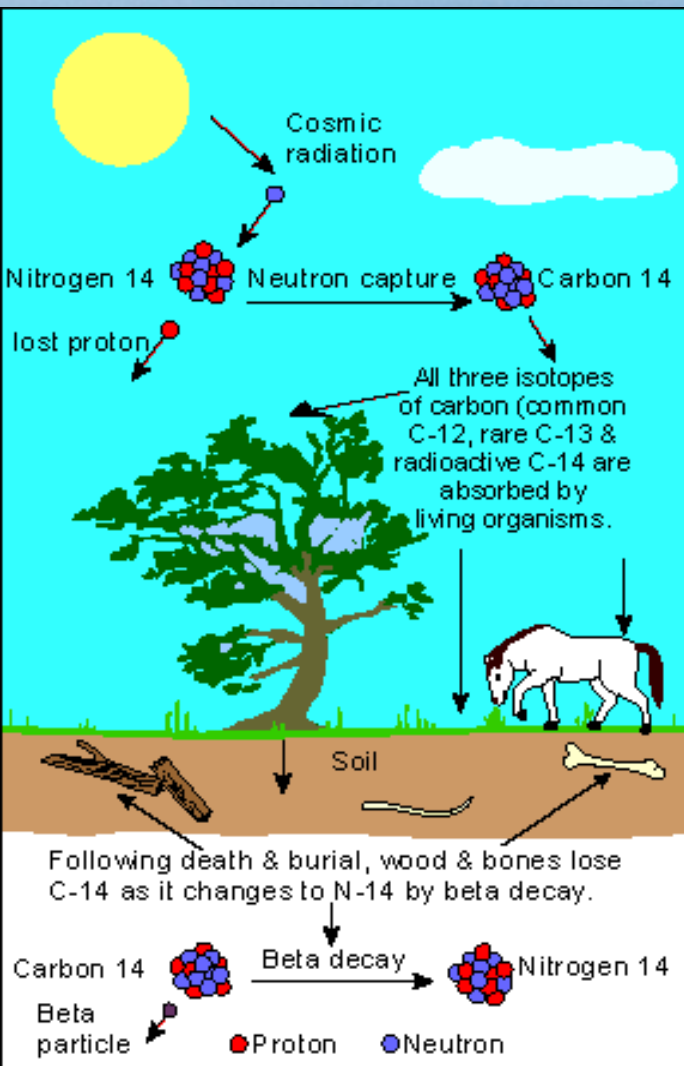
# Dlaczego Młodszy Dryas tak się broni przed datowaniem metodą węgla $^{14}\text{C}$ ?

Porównanie datowań metodą  $^{14}\text{C}$  oraz bezwzględnie datowanych warw (warstw corocznych) z Jeziora Gosiąż (Polska) wskazuje na zaburzenia atmosferycznej koncentracji  $^{14}\text{C}$  w okresie Młodszego Dryasu.



# Datowanie radiowęglowe (metoda $^{14}\text{C}$ )

Willard F. Libby – Nagroda  
Nobla w dziedzinie chemii 1960

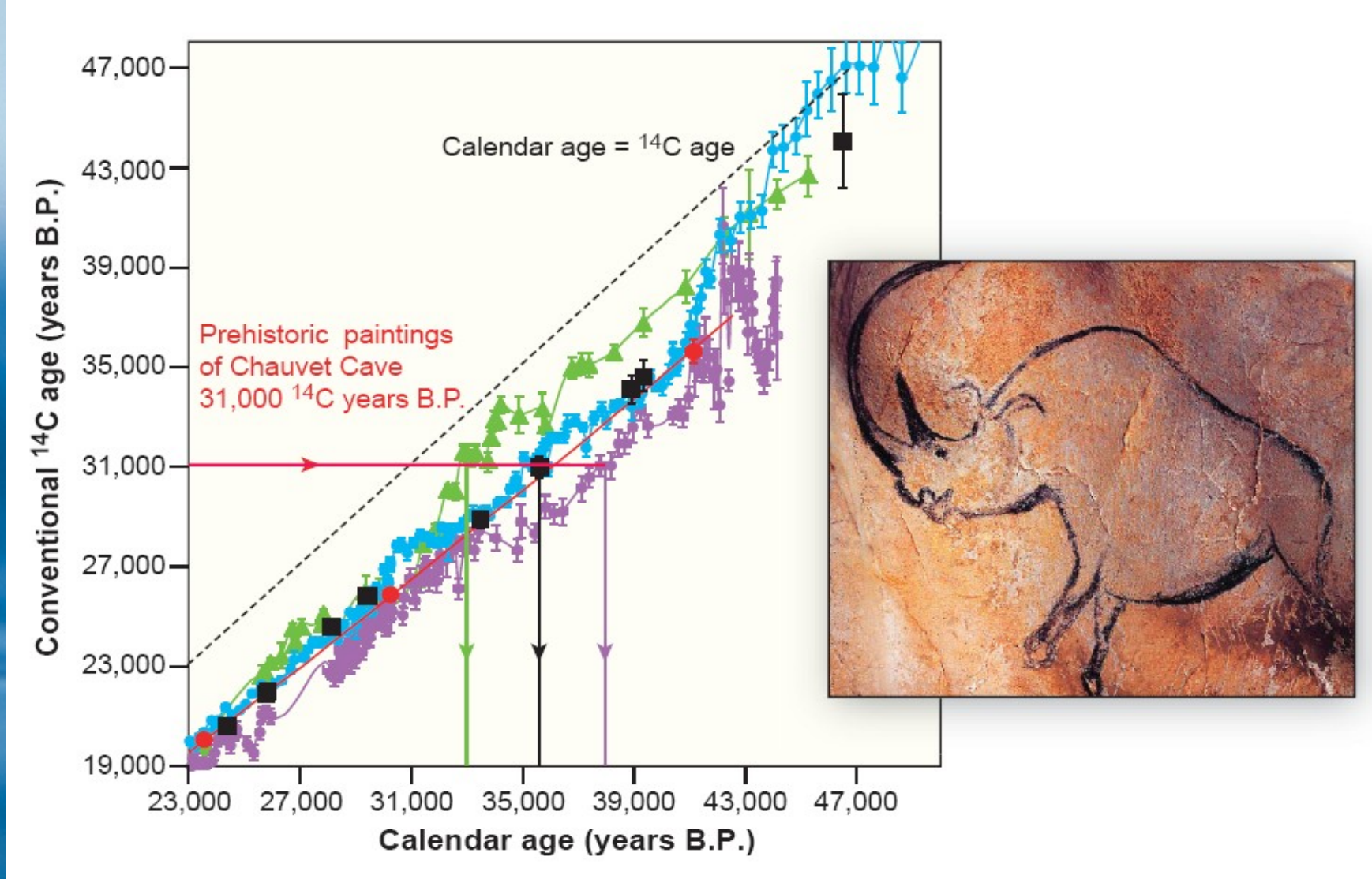


*Arnold & Libby 1949 (Science)*

- Izotop węgla  $^{14}\text{C}$  pochodzi z azotu  $^{14}\text{N}$  w górnych warstwach atmosfery pod wpływem promieniowania kosmicznego.
- Pod postacią  $\text{CO}_2$  wchodzi do obiegu węgla w przyrodzie (przed wybuchami bomb atomowych w miarę stałym stosunku 1 ppt (1 na  $10^{12}$  atomów węgla)).
- Po śmierci organizmu (i odizolowaniu od obiegu węgla!) względna zawartość  $^{14}\text{C}$  w jego szczątkach maleje wykładniczo z czasem z okresem połowicznego rozpadu wynoszącym 5740 lat.



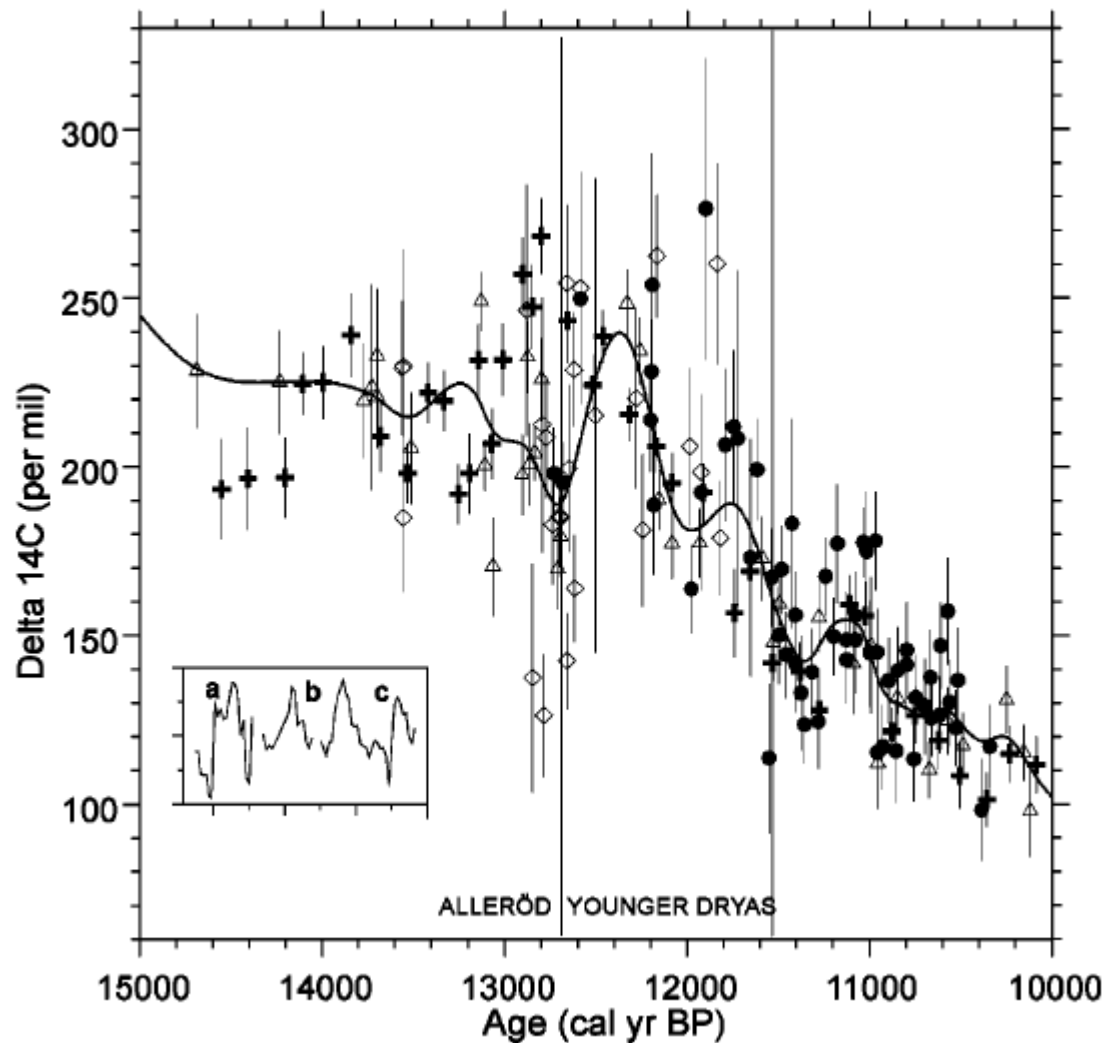
# Zbliżamy się do bezwzględnego wykalibrowania metody $^{14}\text{C}$ w całym jej zakresie stosowności (prawie 50 ka)



Za pomocą słoików drzew, koralu, stalagmitów, warw itp. wykalibrowano metodę  $^{14}\text{C}$  do 23 ka. Nadal błędy metody np. datowaniu rysunku nosorożca z jaskini Chauvet sięgają ciągle do 20%.

*Bard, Rostek & Ménot-Combes 2004 (Science)*

# Skąd się wzięła nadwyżka atmosferycznego $^{14}\text{C}$ ?



Niezgodność datowania  $^{14}\text{C}$  z datami bezwzględnymi oznaczać musi zmiany proporcji tego izotopu w  $\text{CO}_2$  w datowanym okresie.

Przyczyny mogą być dwie:

- Zmiany w produkcji izotopu spowodowane zmianami strumienia promieniowania kosmicznego (z powodu zmian pola geomagnetycznego Ziemi lub Słońca – *patrz Wykład 4*)
- Zmiany globalnego cyklu węgla.

Nadwyżka  $^{14}\text{C}$  konieczna dla wytłumaczenia niezgodności datowania w funkcji czasu

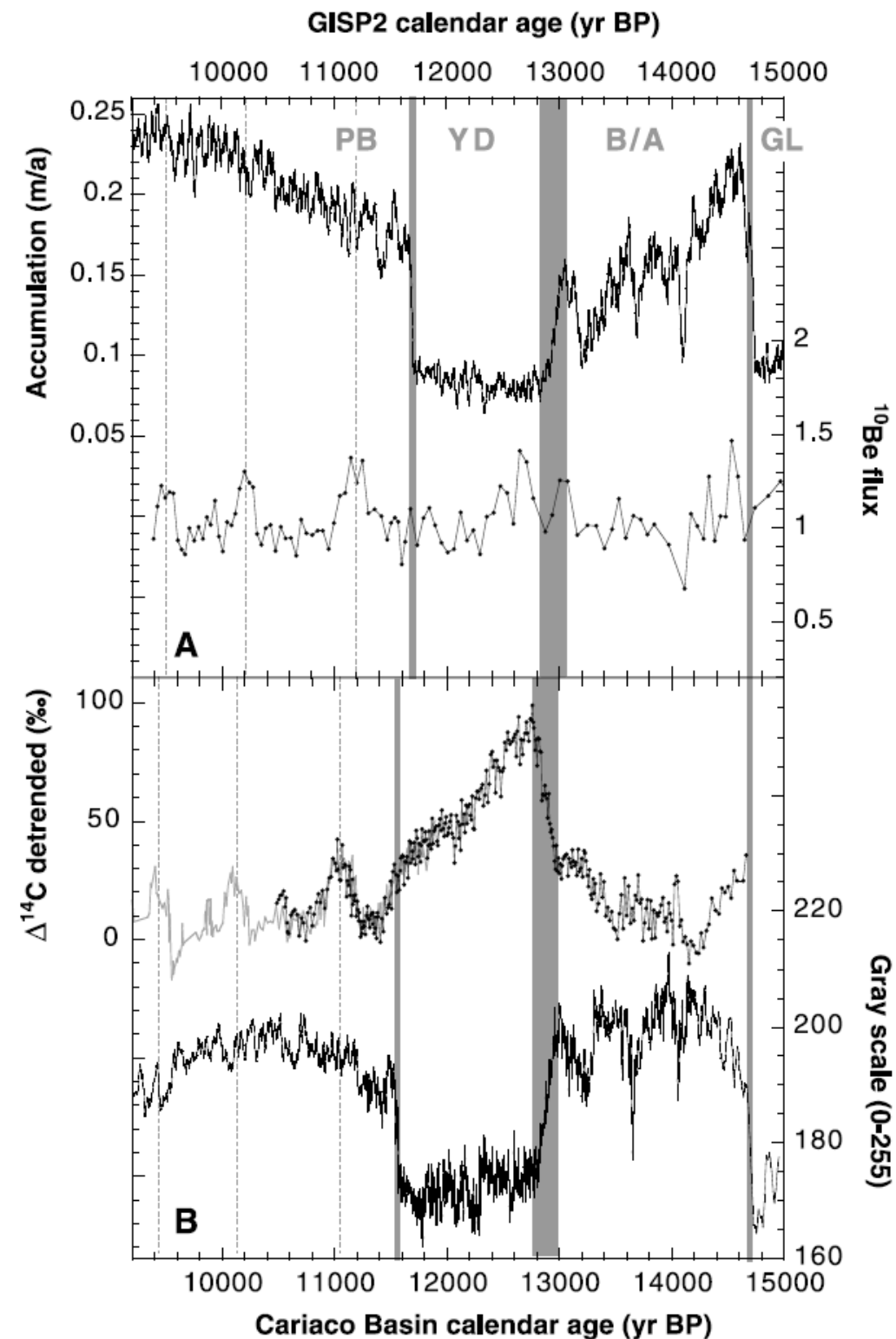


## Koncentracja berylu $^{10}\text{Be}$ jako zastępczy pomiar (*proxy*) produkcji $^{14}\text{C}$

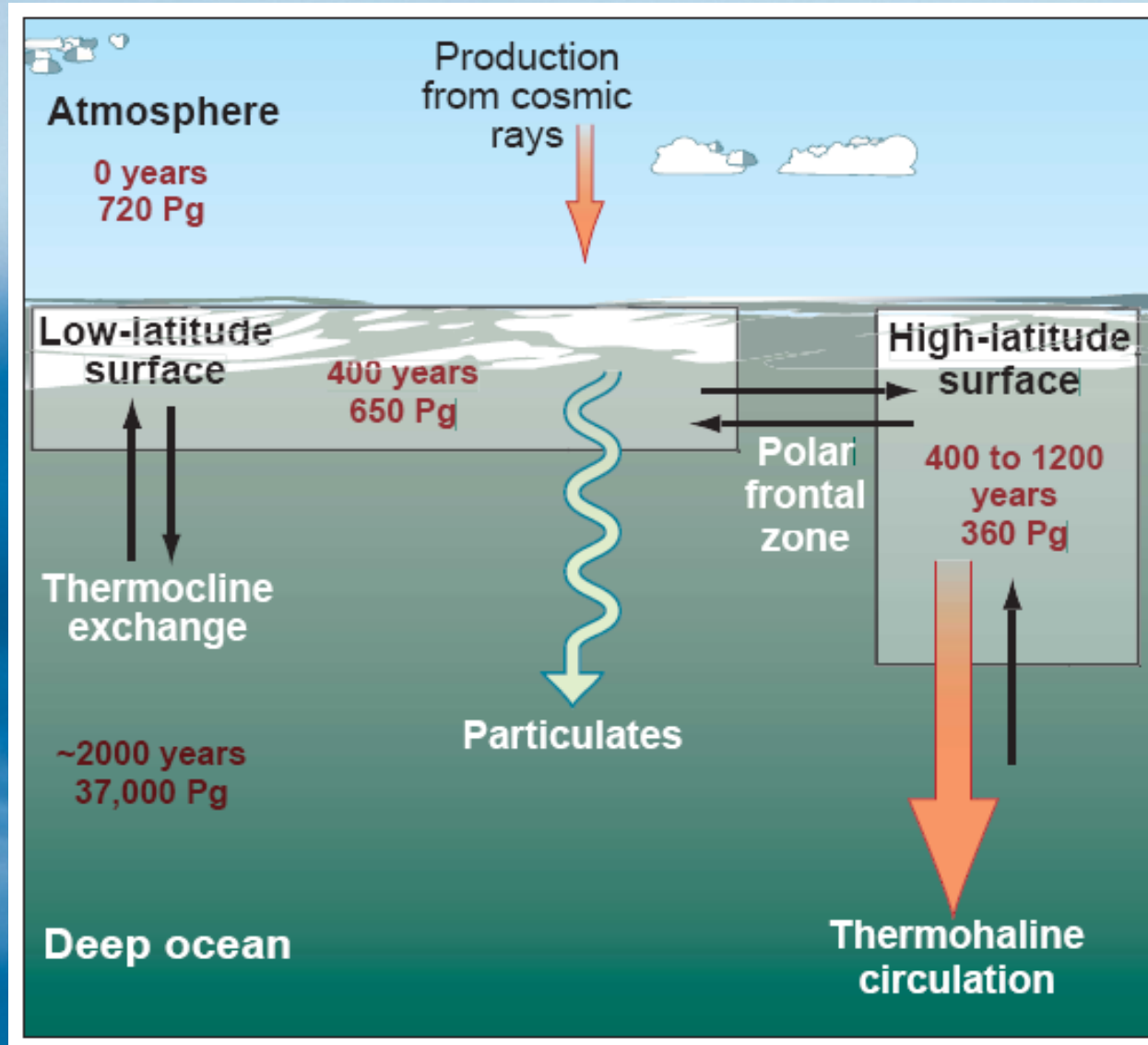
Produkcja izotopów węgla  $^{14}\text{C}$  oraz berylu  $^{10}\text{Be}$  (czas połowicznego rozpadu 1.5 mln lat) w atmosferze przez promieniowanie kosmiczne jest silnie skorelowane. Zmiany koncentracji  $^{10}\text{Be}$  z rdzenia lodowego GISP2 (Grenlandia) świadczą, że główna przyczyna zaburzeń koncentracji  $^{14}\text{C}$  podczas Młodszego Dryasu (YD) nie była astronomiczna.

Co zatem mogło zakłócić obieg węgla na kilkaset lat?

*Hughen et al. 2000 (Science)*



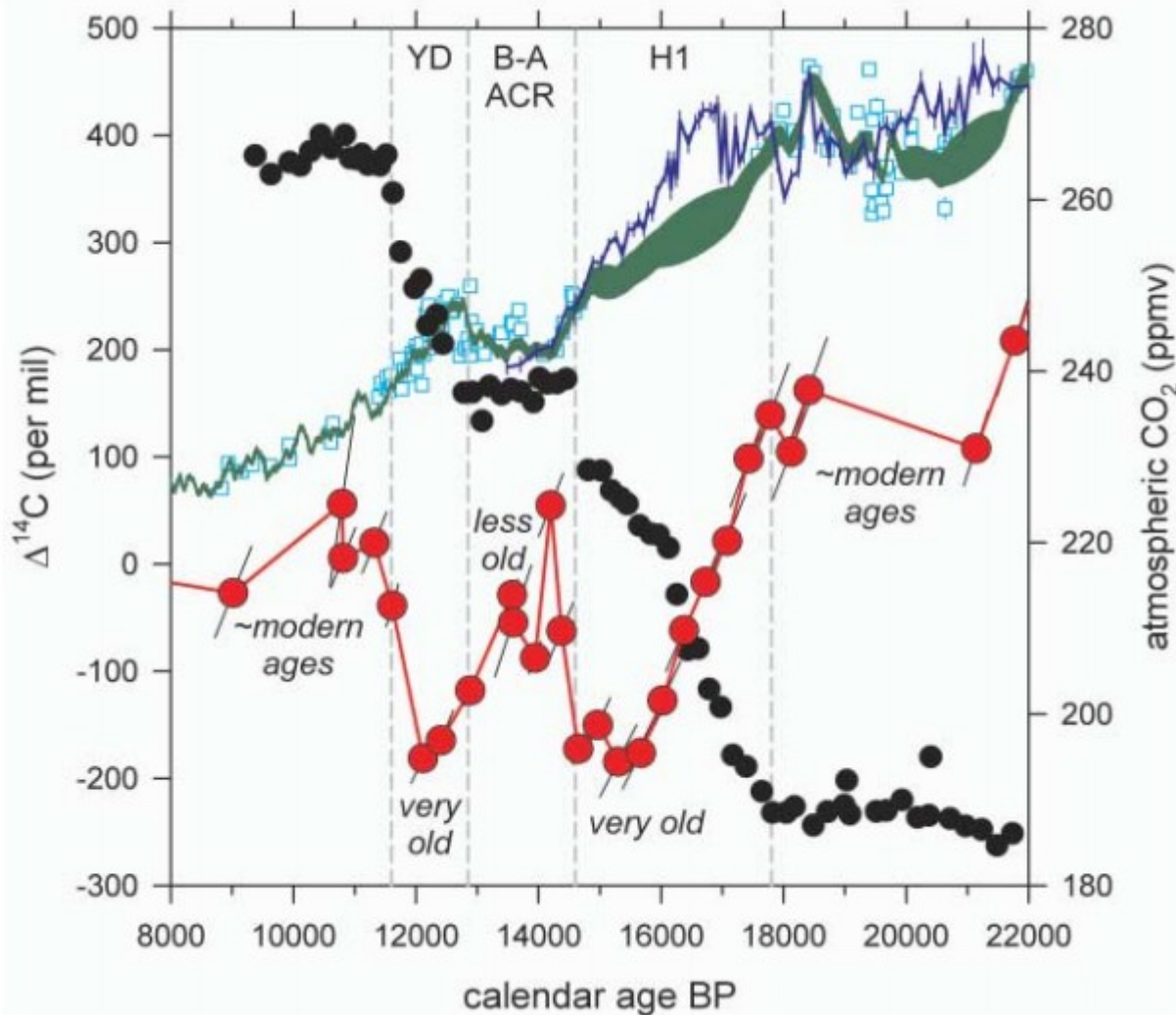
# Wiek zbiornika (*reservoir age*)



Ograniczona wymiana CO<sub>2</sub> między morzem a atmosferą oznacza, że woda oceaniczna jest “postarzona” w stosunku do powietrza (zawiera mniej <sup>14</sup>C).



## Niektórzy widzą w oceanie dowody na „zbiornik” wody głębinowej zubożonej w $^{14}\text{C}$



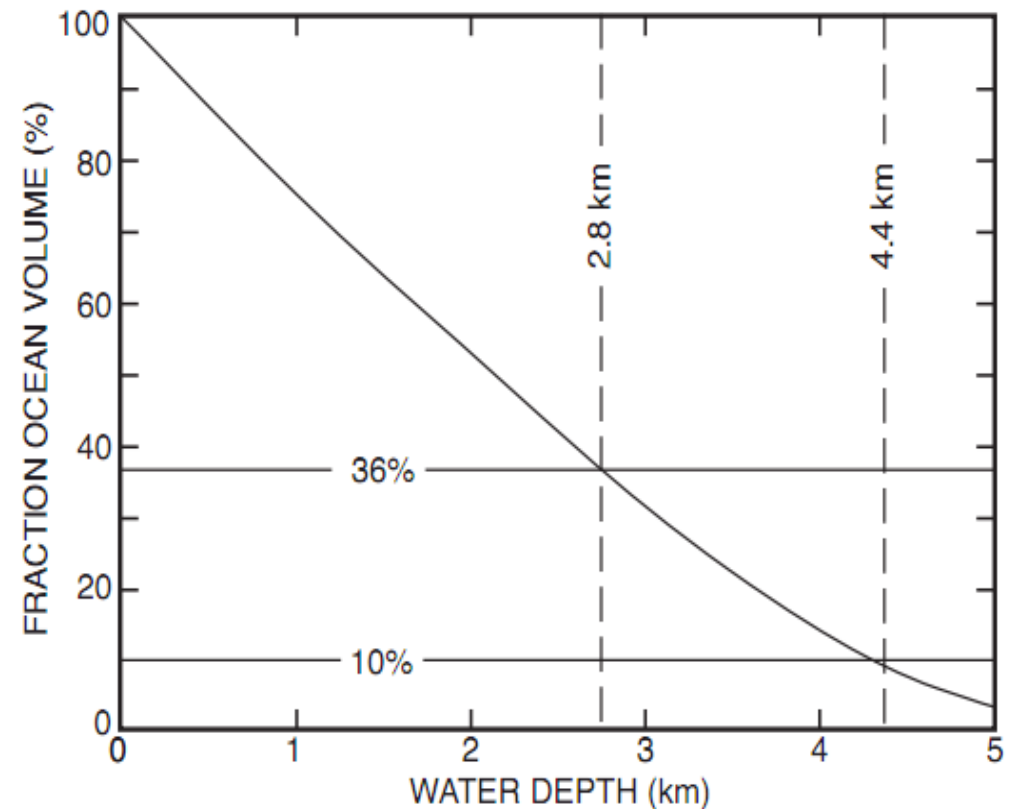
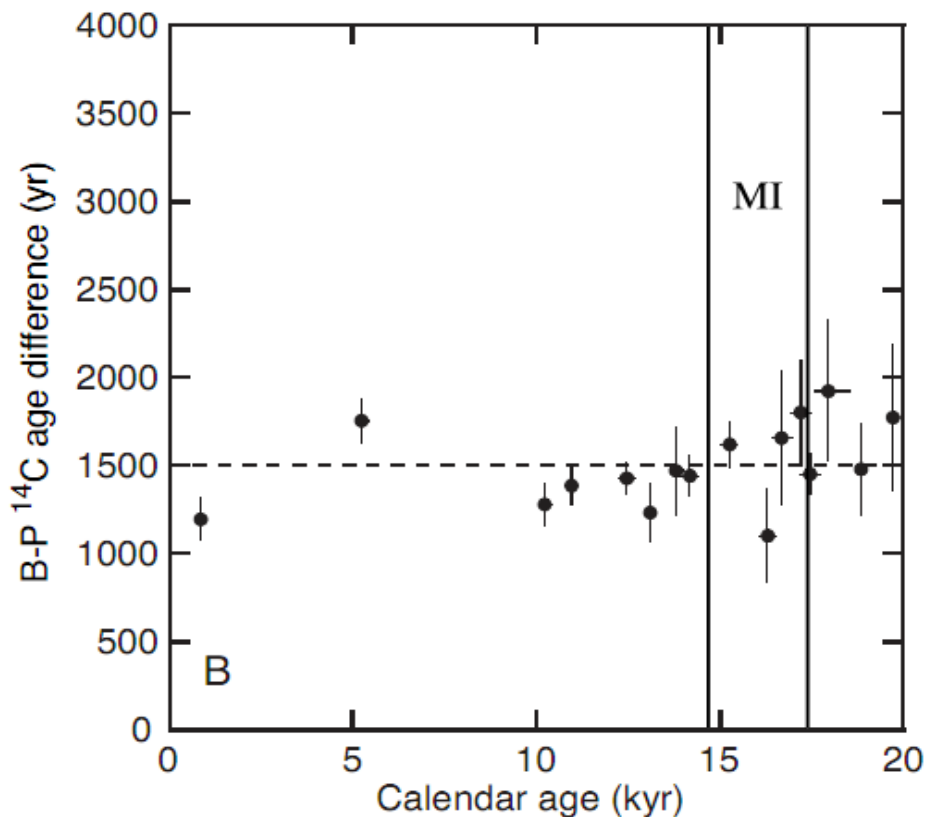
Ilość  $^{14}\text{C}$  w pośrednich wodach na zachód od Baja California (**czzerwone**) oraz w atmosferze (**zielone**) i koncentracja atmosferycznego  $\text{CO}_2$  (czarne).

Widać dwukrotny epizod zubożenia w  $^{14}\text{C}$  (“bardzo” stare” wody) w okresach gdy koncentracja atmosferycznego węgla rosła.

Zatem kwestia zamknięta?

*Marchitto et al. 2007 (Science)*

# Niektórzy nie widzą w oceanie dowodów na „zbiornik” wody głębinowej zubożonej w $^{14}\text{C}$



Sam twórca koncepcji cyrkulacji termohalinowej jako przyczyny gwałtownych zmian klimatu w okresie glacialnym, Wally Broecker, w serii artykułów (Broecker & Barker 2007, Broecker 2009, 2010) wskazuje, że osady co najmniej do głębokości 2,8 km nie wykazują zubożonego  $^{14}\text{C}$  a poniżej tej głębokości jest tylko 36% objętości oceanu. Aby wpłynąć na globalny bilans  $^{14}\text{C}$  te wody musiałyby być odcięte od powietrza przez wiele tysięcy lat...

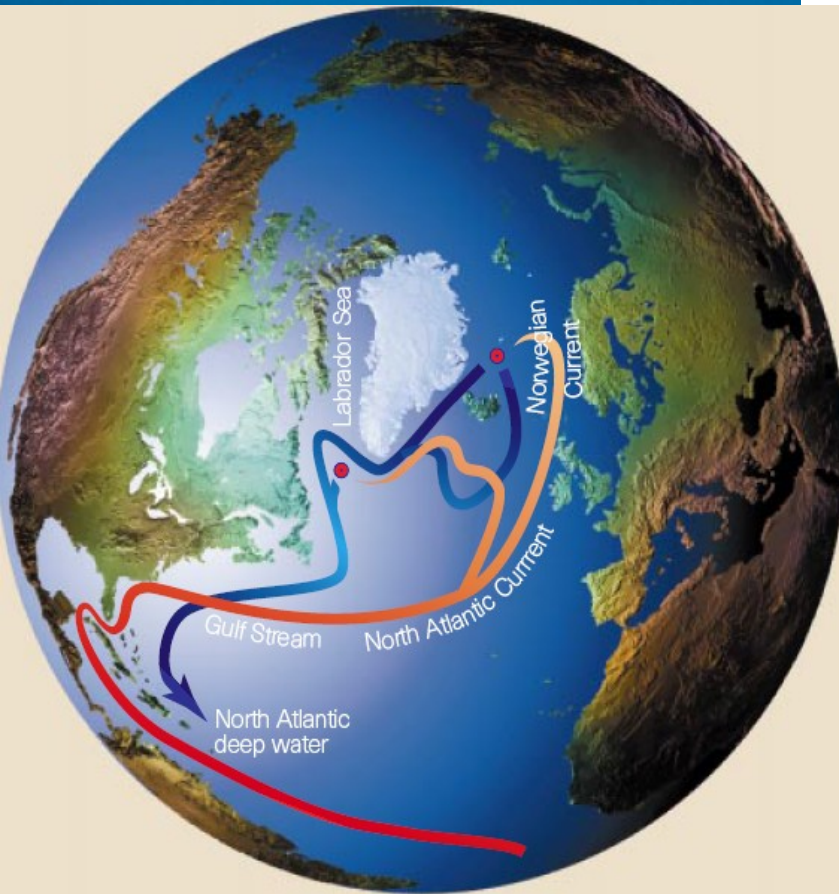
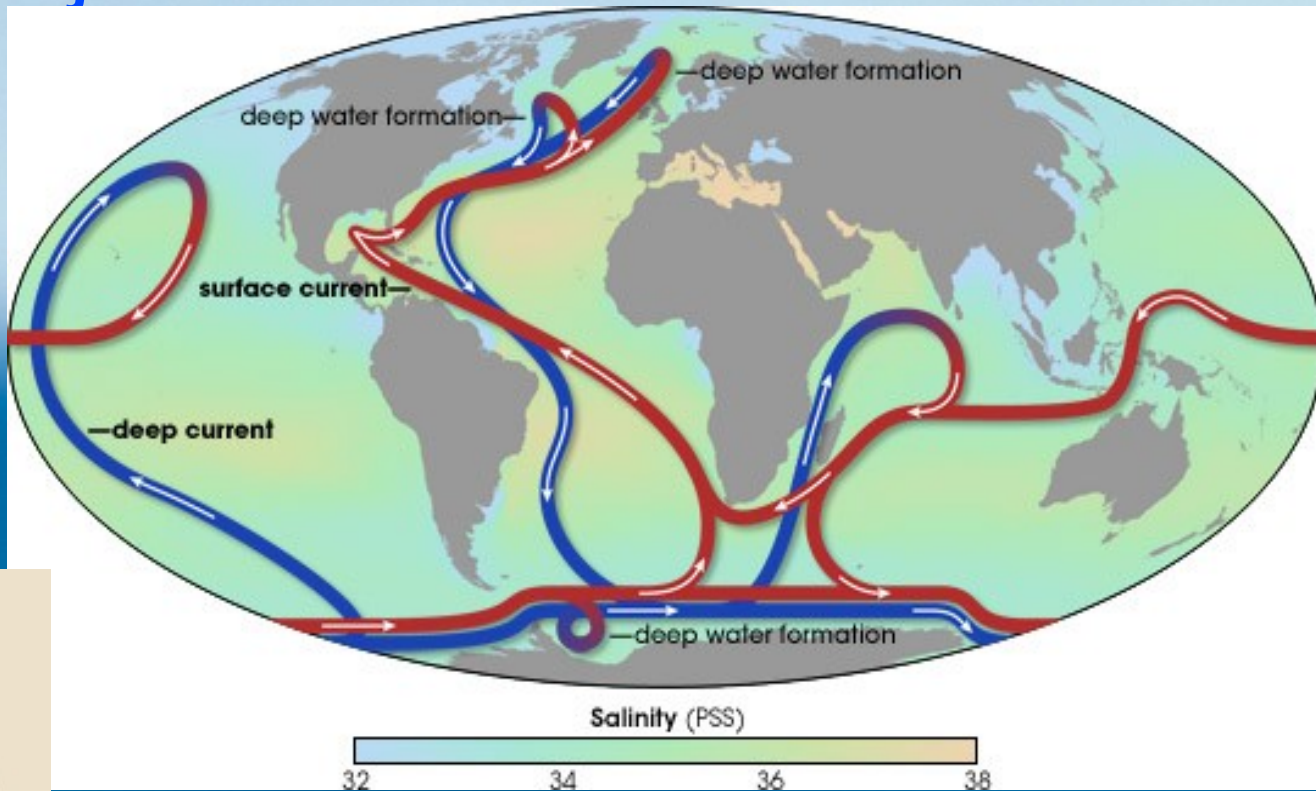
*Broecker 2009 (Radiocarbon)*



# Cyrkulacja termohalinowa

*The thermohaline circulation is that part of the ocean circulation which is driven by fluxes of heat and freshwater across the sea surface and subsequent interior mixing of heat and salt.*

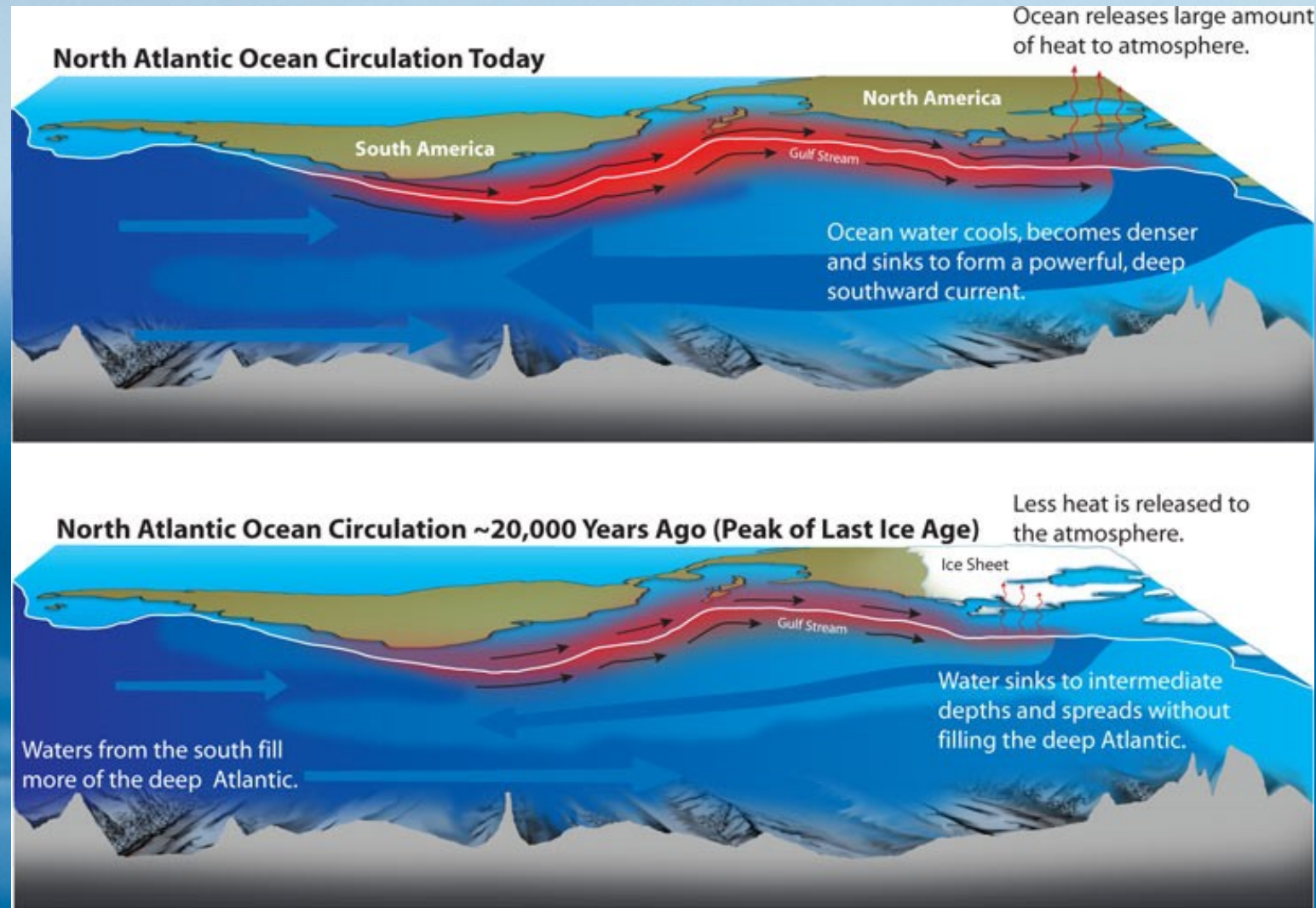
*Stefan Rahmstorf, 2006*



Cyrkulacja termohalinowa skutecznym mechanizmem transportu ciepła z tropików na Północy Atlantyk. Równocześnie jest źródłem oceanicznych wód głębinowych, zapewniając wentylację oceanu. Dzięki temu umożliwia skuteczną wymianę gazów (także  $\text{CO}_2$ ) pomiędzy atmosferą a głębią oceaniczną.



# Cyrkulacja termohalinowa na Atlantyku teraz i w epoce lodowej

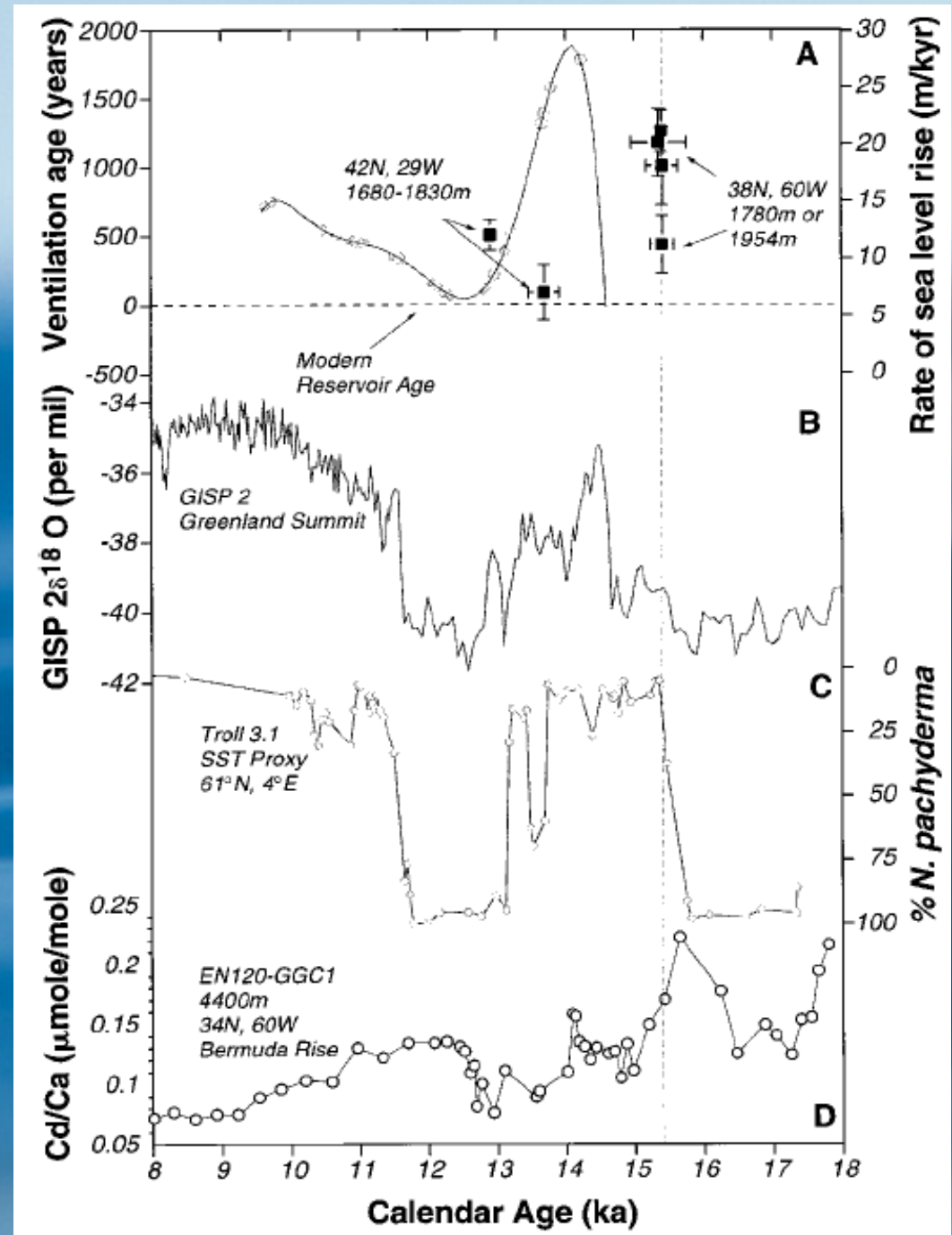


Obecność lodu oraz względnie słodkiej wody w rejonach subarktycznych sprawił, że ciepłe wody powierzchniowe tonęły bardziej na południe. Jeśli globalna produkcja wód głębinowych malała, izolowało to „zbiorniki”  $\text{CO}_2$  w atmosferze i oceanie zwiększając względną koncentrację  $^{14}\text{C}$  w atmosferze. Zwiększenie produkcji wód głębinowych wywoływało efekt odwrotny.



# Pierwszy (prawie) bezpośredni dowód na zmiany THC

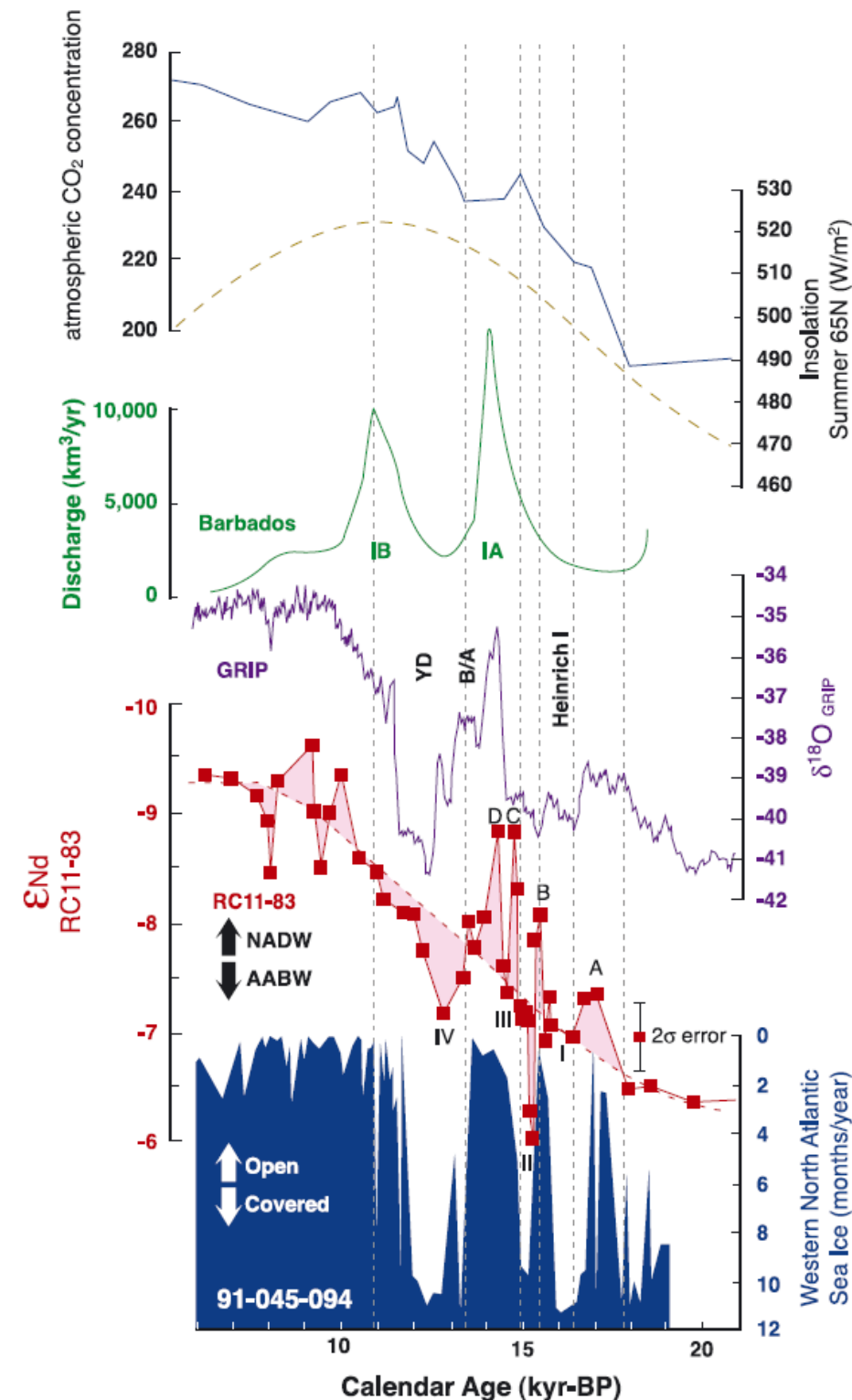
“Wiek zbiornika” (czas wentylacji) Północnego Atlantyku wyznaczony z różnicy wieku koralów głębokowodnych w pobliżu Bermudów zmierzanej metodą  $^{14}\text{C}$  oraz uranową (górny panel) wskazuje na cyrkulację termohalinową wolniejszą niż dzisiejsza z wyjątkiem ciepłego okresu Bølling/Allerød 14 ka.



*Adkins et al. 1998 (Science)*

# Lepszy dowód na zmiany THC

Zawartość neodymu w wodzie morskiej wskazuje na jej pochodzenie (najmniej na Morzu Labradorским, najwięcej na Pacyfiku). Parametr ten (***czzerwona linia***), z rdzeni z Południowego Atlantyku wskazuje na systematyczny wzrost wpływu Głębokiej Wody Północnoatlantyckiej kosztem Głębokiej Wody Antarktycznej, czyli na systematyczne wzmocnienie THC. Młodszy Dryas jest lokalnym minimum na wykresie.



*Piotrowski et al. 2004  
(Earth and Planetary Science Letters)*



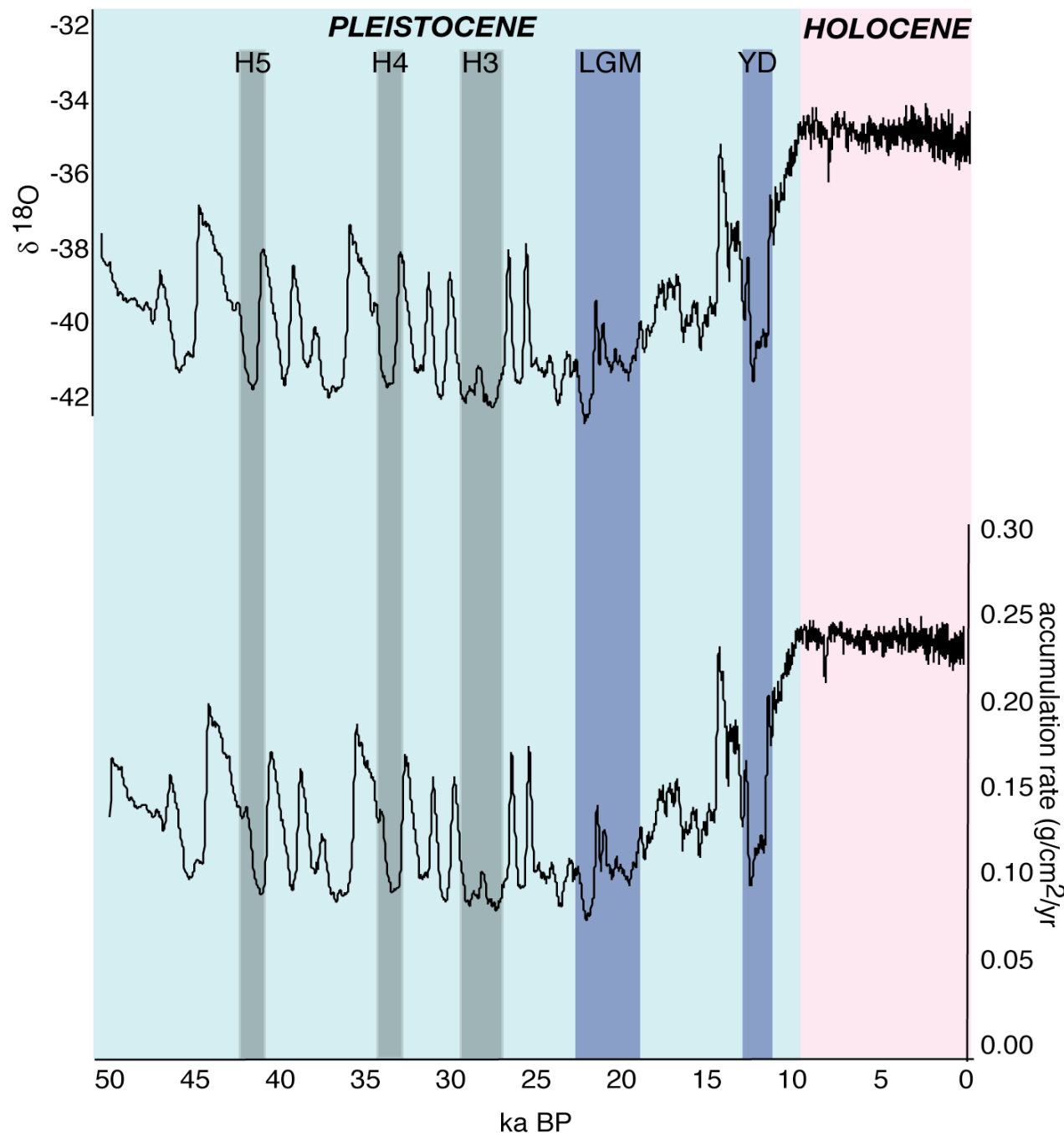
# Podsumowanie 1/3



***Dębik ośmiopłatkowy** (*Dryas octopetala*) – roślina alpejska ostatnio rosnąca na równinach Europy w Młodszym Dryasie*

- Zlodowacenia nie wycofywały się równomiernie, występowały okresy oziębienia.
- Największym oziębieniem półkuli północnej w czasie deglacjacji był Młodszy Dryas (od 12.9 ka do 11.4 ka)
- W czasie młodszego Dryasu koncentracja izotopu  $^{14}\text{C}$  w atmosferze znacznie wzrosła.
- Przyczyna tego wzrostu nie jest zwiększona jego produkcja gdyż ilość analogicznie produkowanego  $^{10}\text{Be}$  wzrosła minimalnie.
- Najbardziej prawdopodobną przyczyną zaburzenia cyklu węgla w przyrodzie są zmiany produkcji wód głębinowych (cyrkulacji termohalinowej).

# Greenland Ice Cores: Accumulation and Isotopically Inferred Temperature



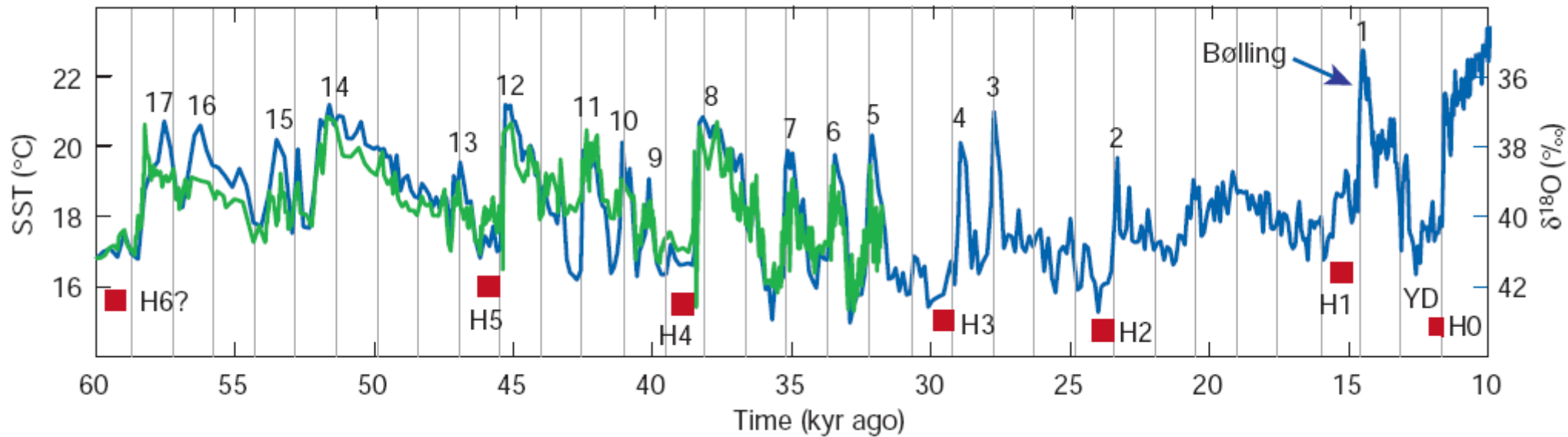
Skąd się brała  
zmienność  
„suborbitalna”?

Zmienność klimatu epoki  
lodowej w skali krótszej  
od skali czasowej  
związanej z orbity Ziemi  
(tzw. „suborbitalna”)  
związana jest  
najprawdopodobniej z  
raptownymi zmianami  
cyrkulacji termohalinowej.

Pozostaje pytanie: co je  
powodowało?

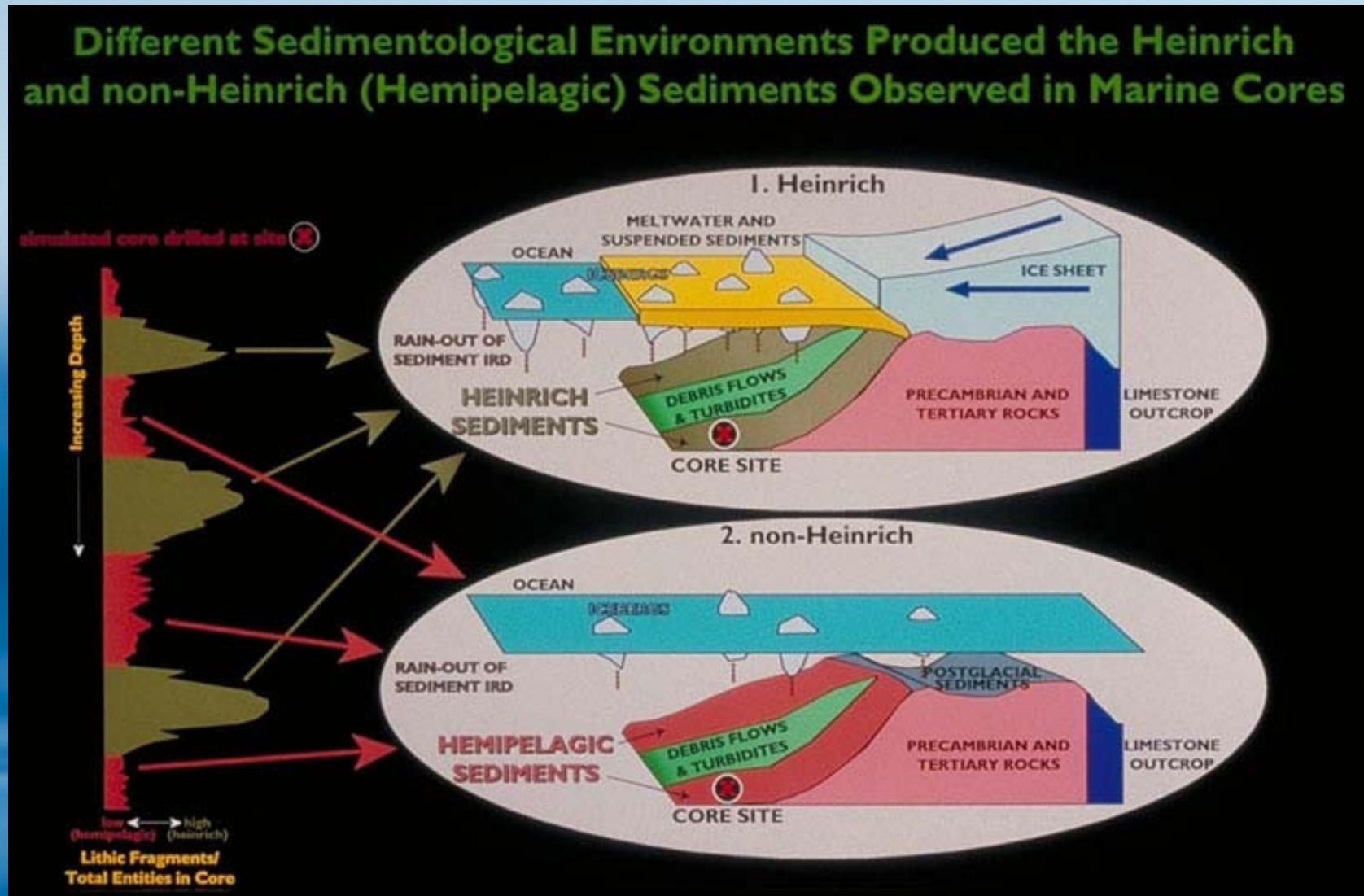


# Zdarzenia Heinricha, Dansgaard–Oeschgera (D/O) oraz cykle Bonda



W czasie ostatniego zlodowacenia klimat (szczególnie wokół Północnego Atlantyku) cechował się nagłymi zmianami temperatur w cyklu rzędu tysiąca lat (cykl D/O) z charakterystycznym szybkim ociepleniem klimatu w czasie kilku lat. Kilka coraz zimniejszych takich cykli (sumarycznie zwanych “cyklem Bonda”) kończyło się tzw. „zdarzeniem Heinricha” podczas którego lód pokrywał Atlantyk aż po Portugalię a lodowce zrzucały na dno duże ilości osadów pochodzenia kontynentalnego.

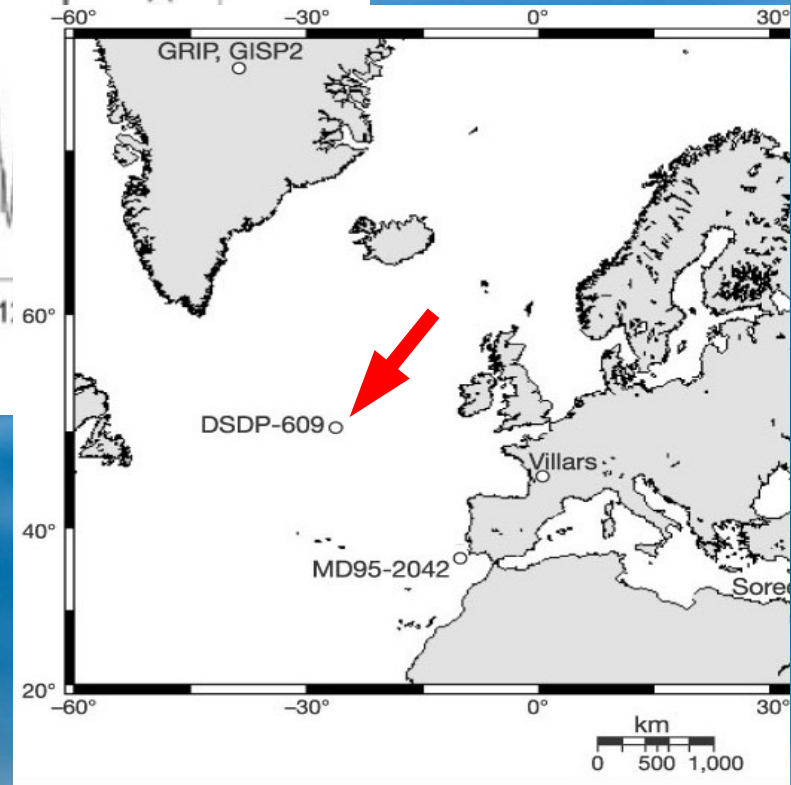
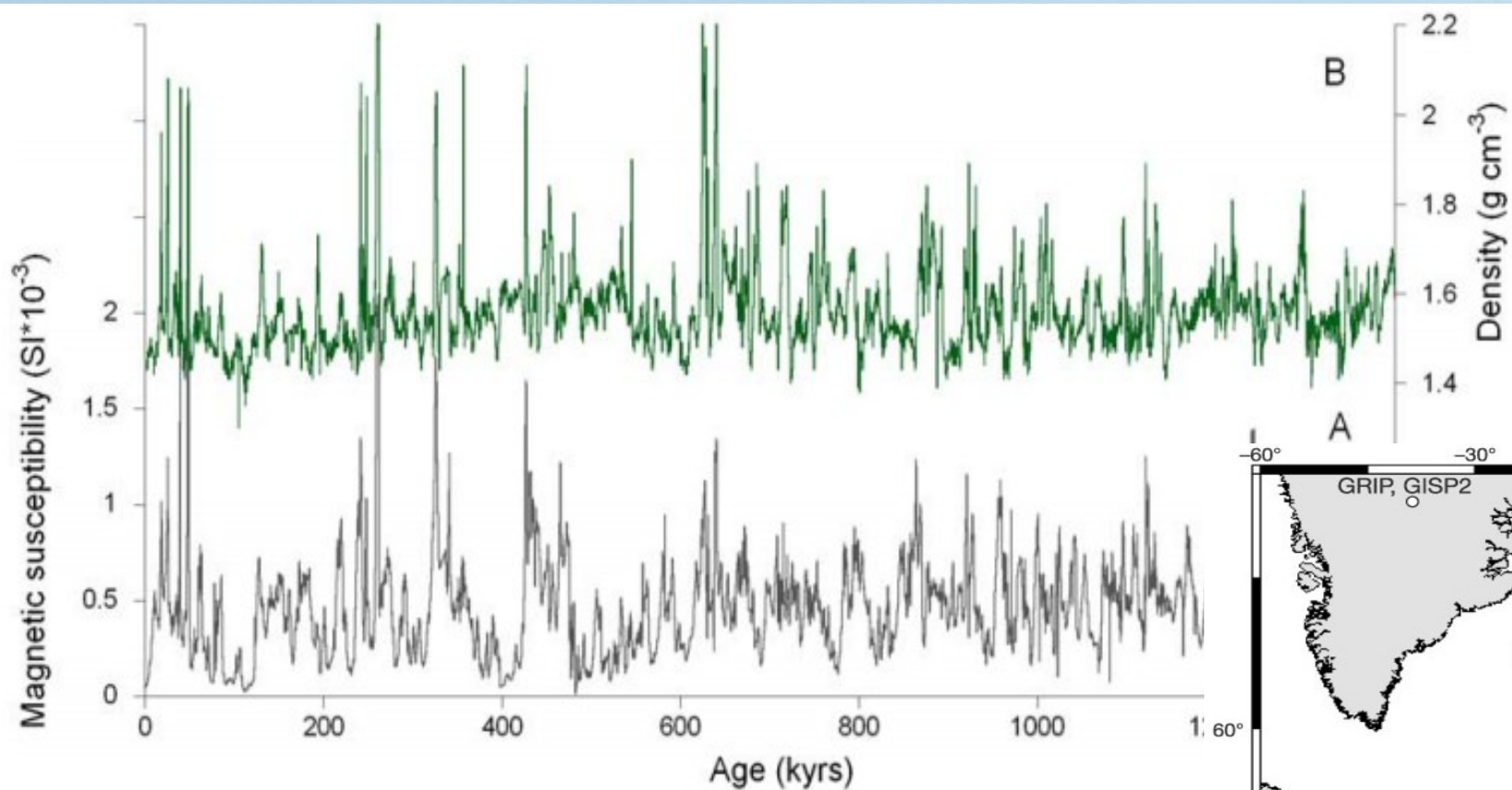
# Zdarzenia Heinricha



W czasie zdarzeń Heinricha (góra) Północny Atlantyk był silnie stratyfikowany z wysłodzoną wodą jako warstwą powierzchniową. Występowały one gdy lądolód Pn. Ameryki sięgał skraju szelfu Atlantyckiego. Po zakończeniu zdarzenia następowało silne ocieplenie. [czy nie przypomina to końca zlodowacenia 100k w mniejszej skali?- JP]



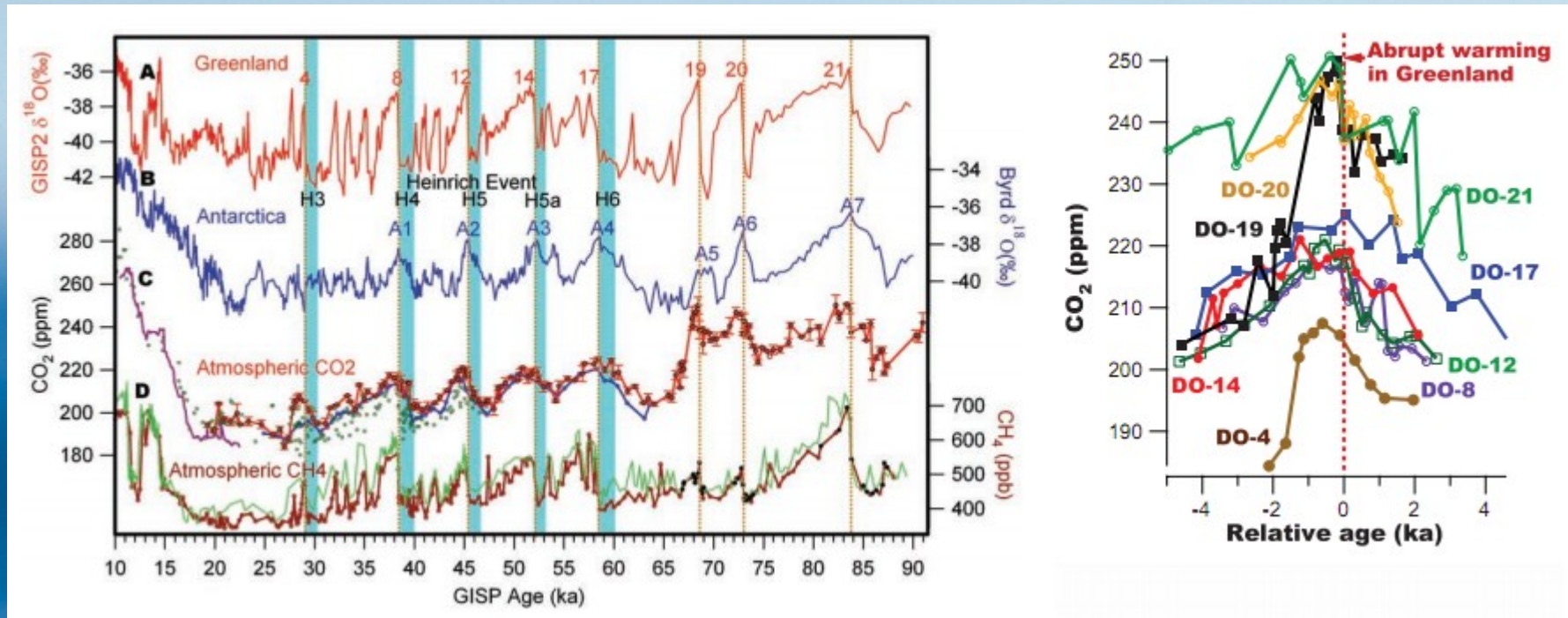
# Zdarzenia Heinricha zaczęły się 640 ka (razem ze zlodowaczeniami „100 ky”)



Wartości podatności magnetycznej i gęstości osadów z rdzenia zawierającego osady z 1,4 mln lat pokazują, że zdarzenia Heinricha zaczęły się 640 tysięcy lat temu.

*Hodell et al 2008 (Paleoceanography)*

# Każde zakończenie zdarzenia Heinricha poprzedzone było wzrostem koncentracji CO<sub>2</sub>



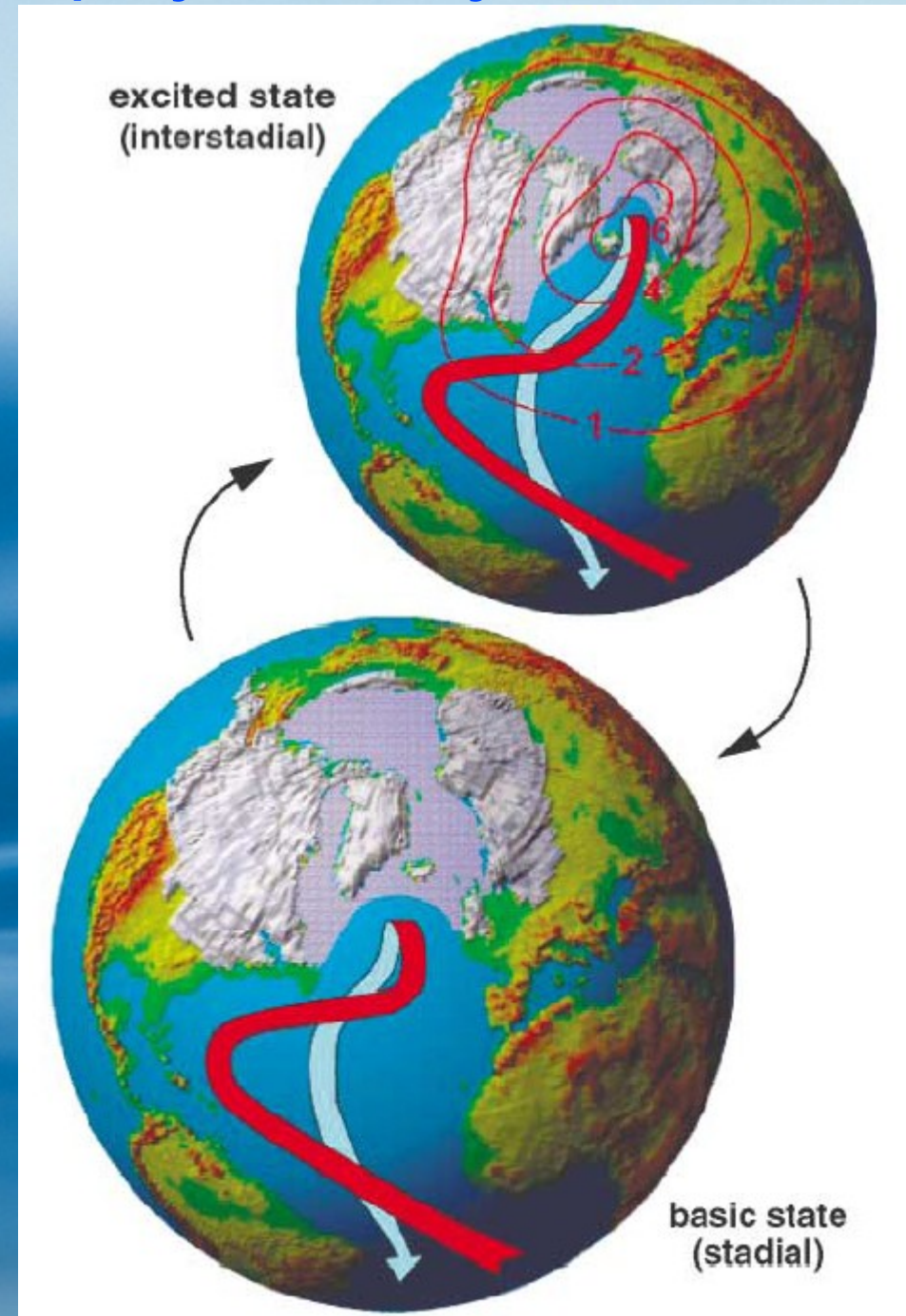
Przed każdym końcem zdarzenia Heinricha (ich numery podane są na lewym panelu) i związanym z tym ociepleniem następowało wcześniejsze ocieplenie w rejonie Antarktydy i związany z tym wzrost koncentracji CO<sub>2</sub> (po prawej pokazano powiększenie fragmentów wykresu). Natomiast koncentracja metanu wzrasta gwałtownie wraz z temperaturą północnej półkuli (użyto tego faktu jako znacznika ocieplenia na prawym panelu – przypominam, że koncentracje gazów są synchroniczne w rdzeniach lodowych)



# Cyrkulacja termohalinowa ciepłej i zimnej fazy D/O

W czasie ciepłej fazy cyklu D/O Atlantyckie wody głębinowe (NADW) tworzyły się w rejonie podobnym do dzisiejszego (z wyjątkiem pokrytego lądolodem morza Labradorskiego) powodując ocieplenie klimatu Pn. Atlantyku.

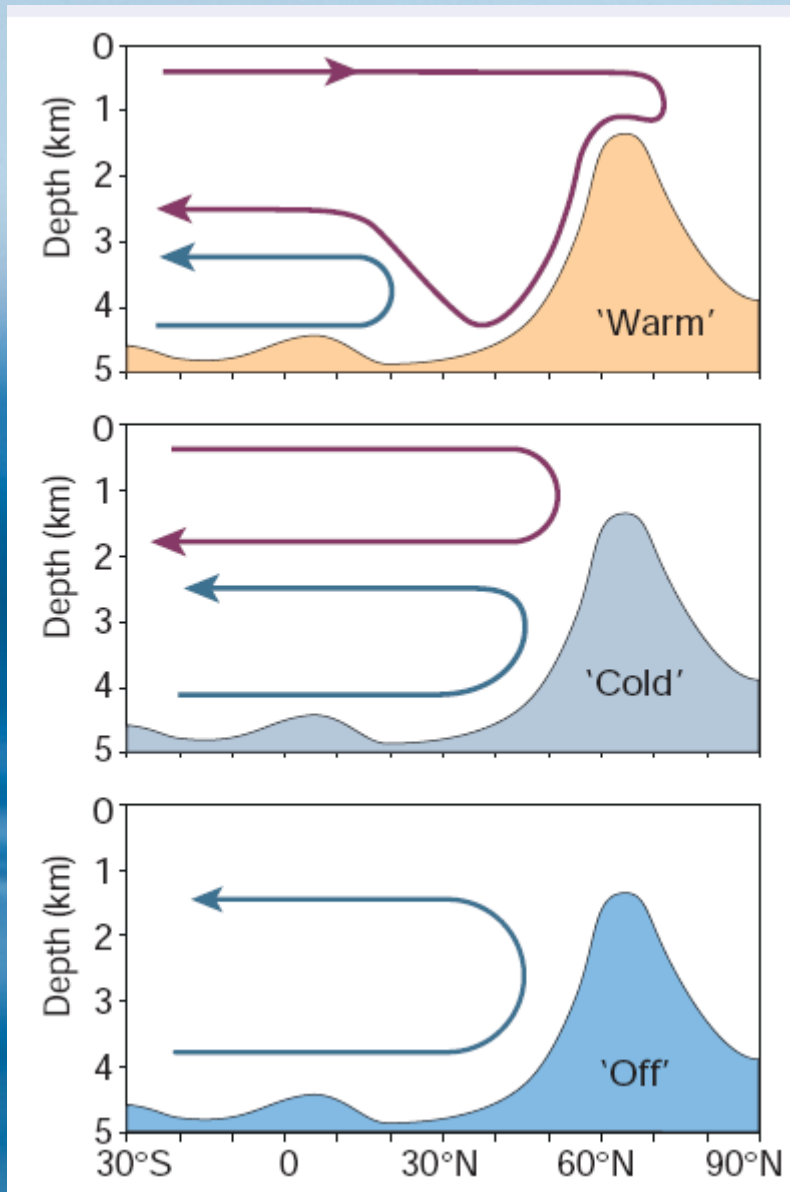
W fazie zimnej front polarny (i lód) przesuwał się na południe od Islandii gdzie tworzyły się w tym czasie Pośrednie Wody Atlantycka



# Cyrkulacja termohalinowa epoki lodowej

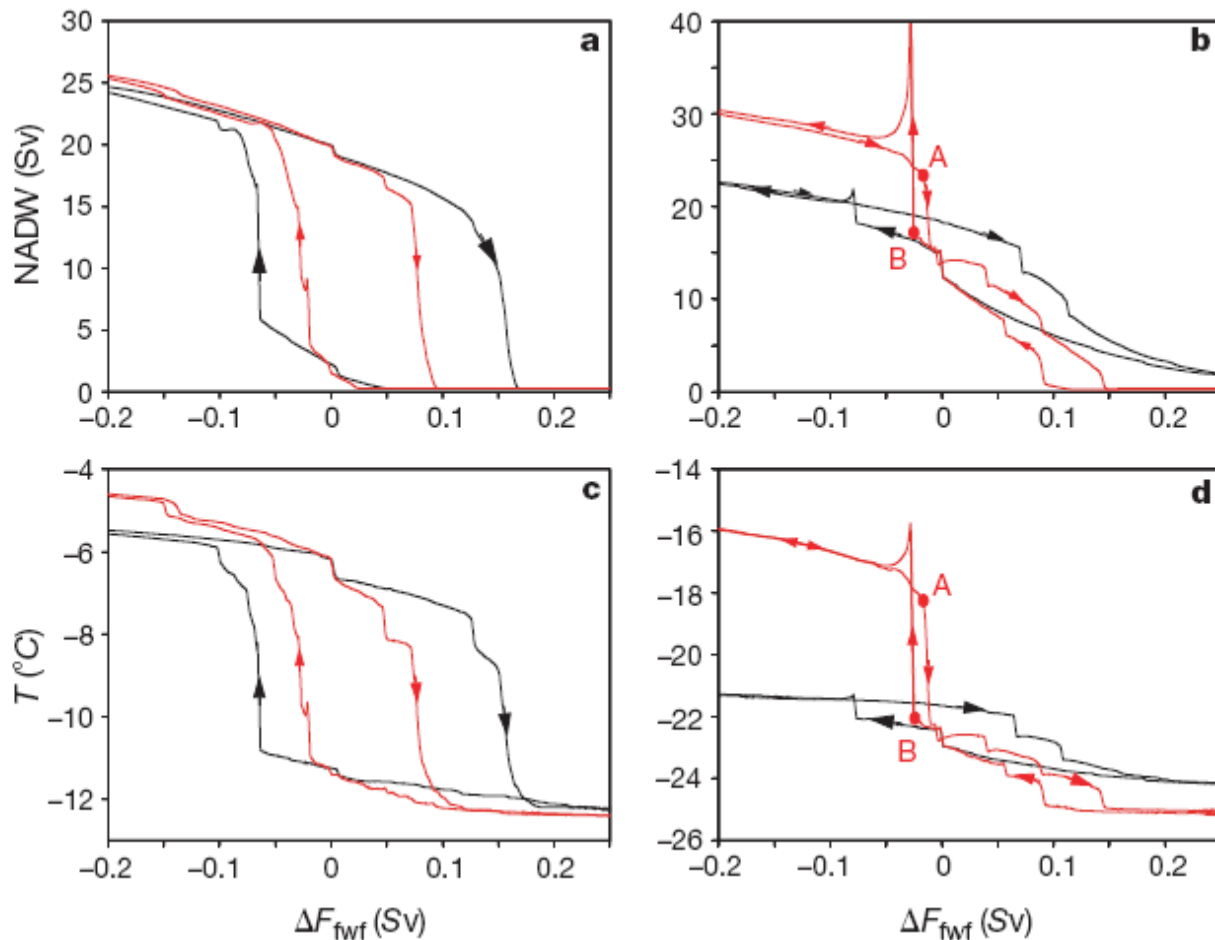
## Trzy fazy THC

- Faza ciepła D/O: THC podobna jak obecne, NADW tworzy się na Morzach Nordyckich, Antarktyczne Wody Głębiny odepchnięte daleko na południe.
- Faza zimna D/O: Atlantyczne Wody Pośrednie tworzą się na południe od Islandii; Antarktyczne Wody Głębiny wypełniają głębie Atlantyku.
- Zdarzenie Heinricha: cyrkulacja termohalinowa ustaje całkowicie.





# Cyrkulacja termohalinowa zależy od dopływu słodkiej wody do Północnego Atlantyku

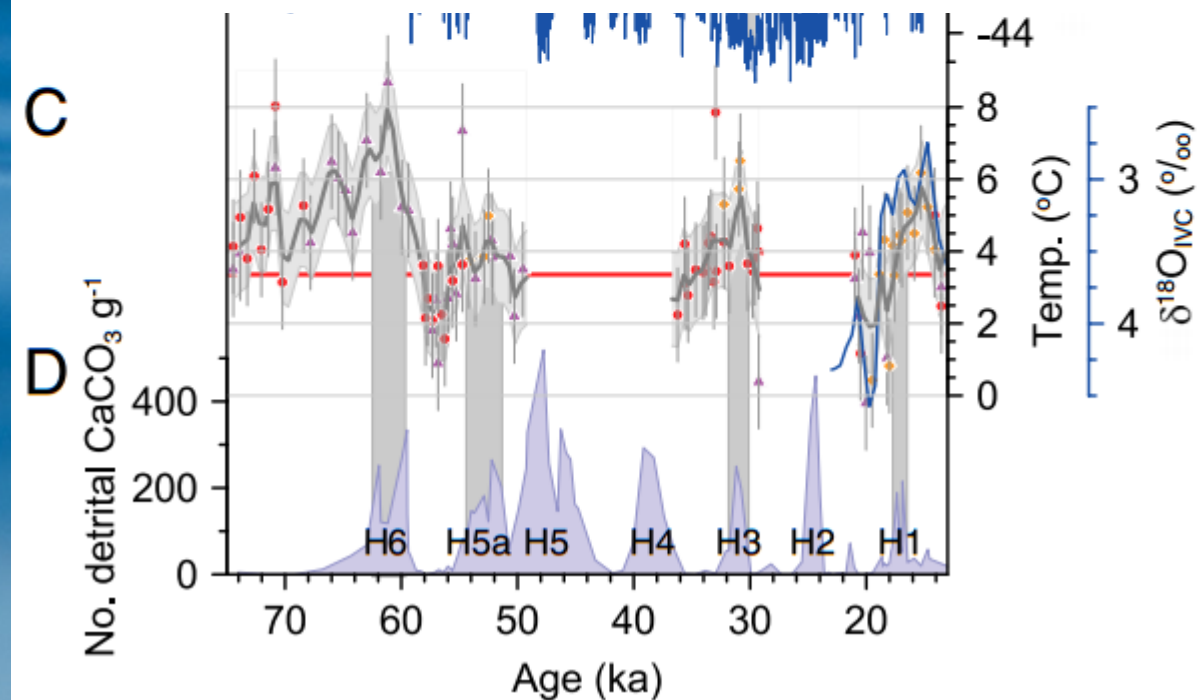
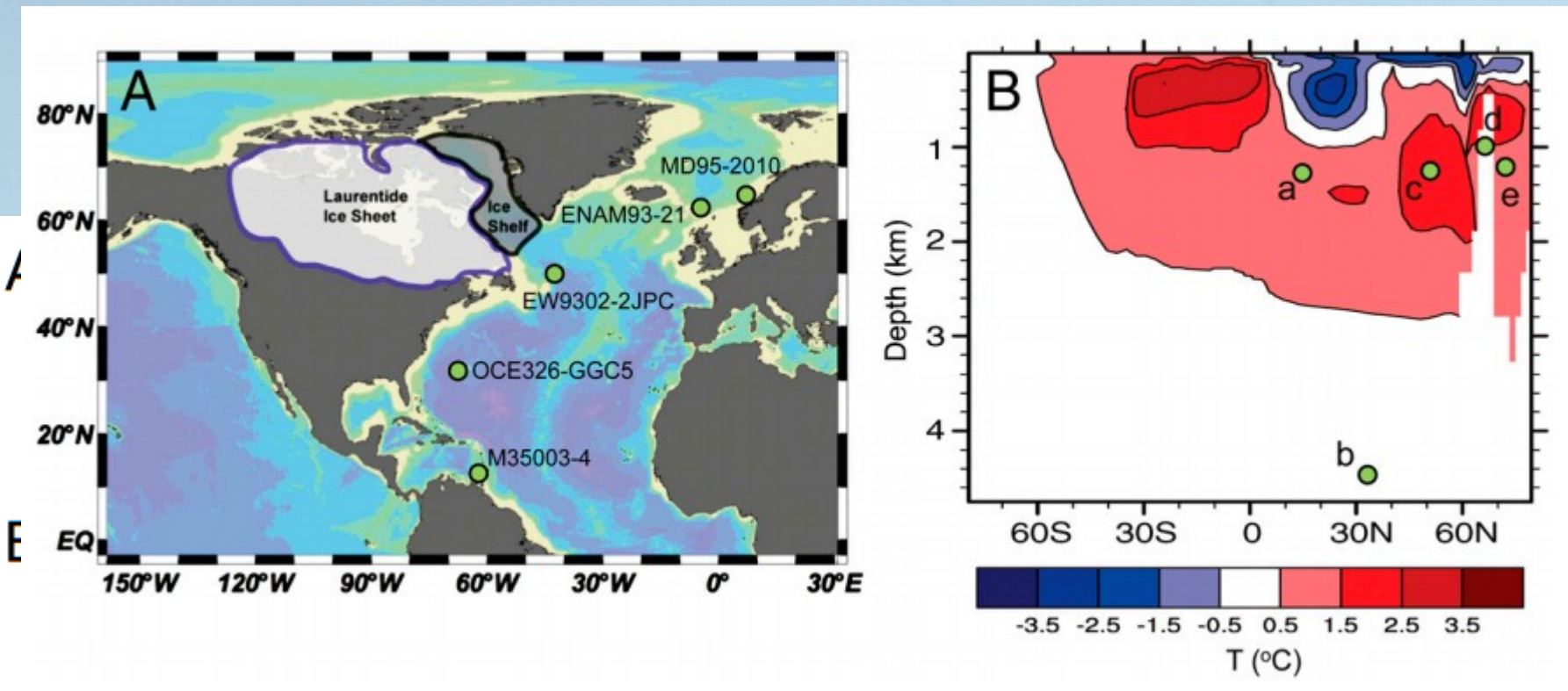


Modelowanie klimatyczne wielkości produkcji NADW (górną) i temperaturę powierzchniową (dół) Północnego Atlantyku obecnie (po lewej) i w epoce lodowej (po prawej) w funkcji strumienia dopływu słodkiej wody do subarktycznego (50-70° N) (czerwone) i subtropikalnego (20-50° N) (czarne) Atlantyku.

Modele klimatyczne pokazują, że woda słodka wpływa nieliniowo (pętla histerezy) na NADW. Dla zatrzymania THC potrzeba więcej wody słodkiej wlanej daleko lub mniej blisko Arktyki. W czasie zlodowaceń pętla histerezy była węższa co powodowało niestabilność klimatu.

*Ganopolski & Rahmstorf 2001 (Nature)*

# Zjawisko Heinricha: zimna powierzchnia i ciepłe głębiny



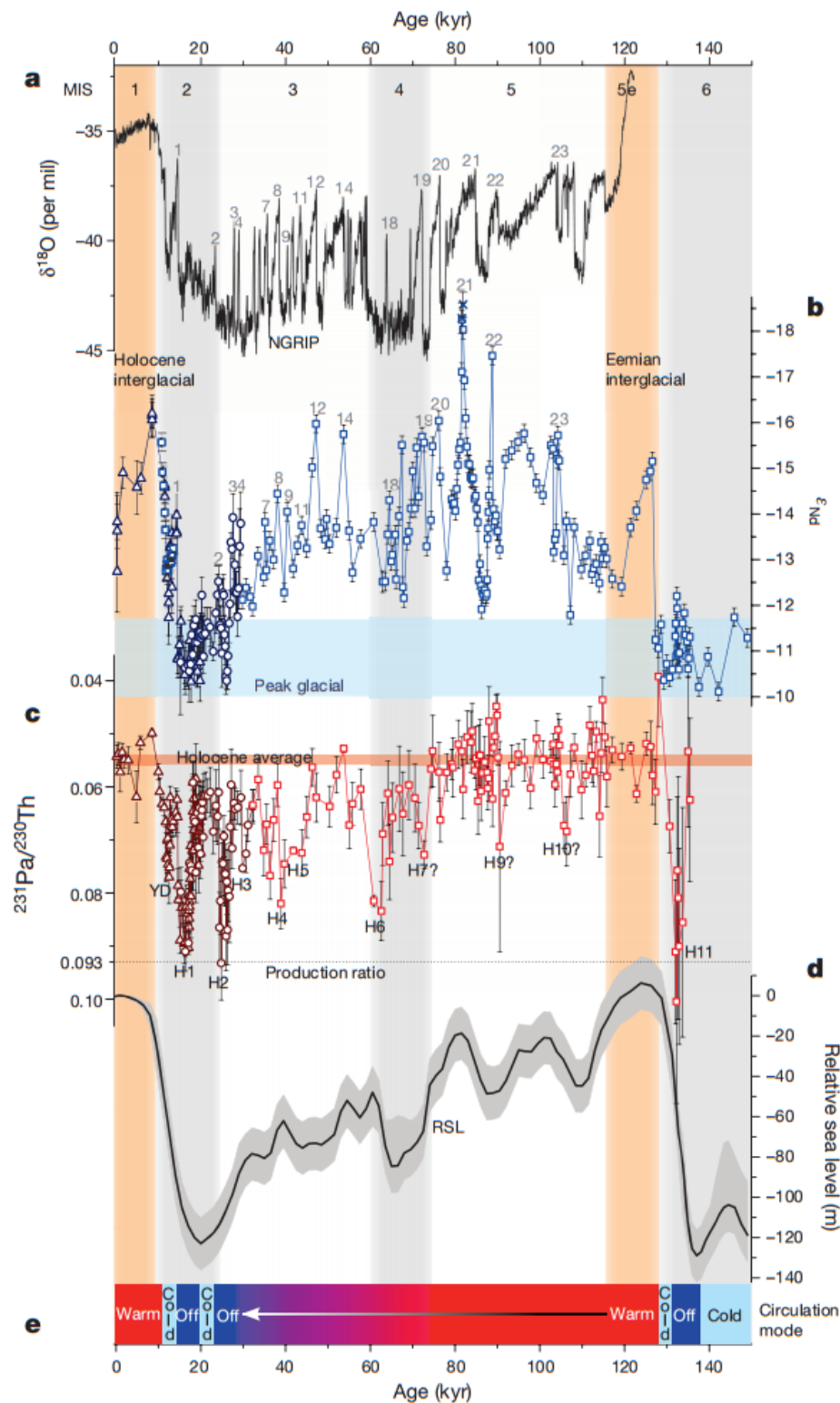
Zatrzymanie cyrkulacji termohalinowej skutkuje zimną powierzchnią wód Północnego Atlantyku i ciepłymi głębunami. Na rysunkach przekrój równoleżnikowy temperatur wody z modelu oraz paleodane o temperaturze wód głębinowych z rdzenia EW9302-2JPC.

*Marcott et al. 2011 (PNAS)*



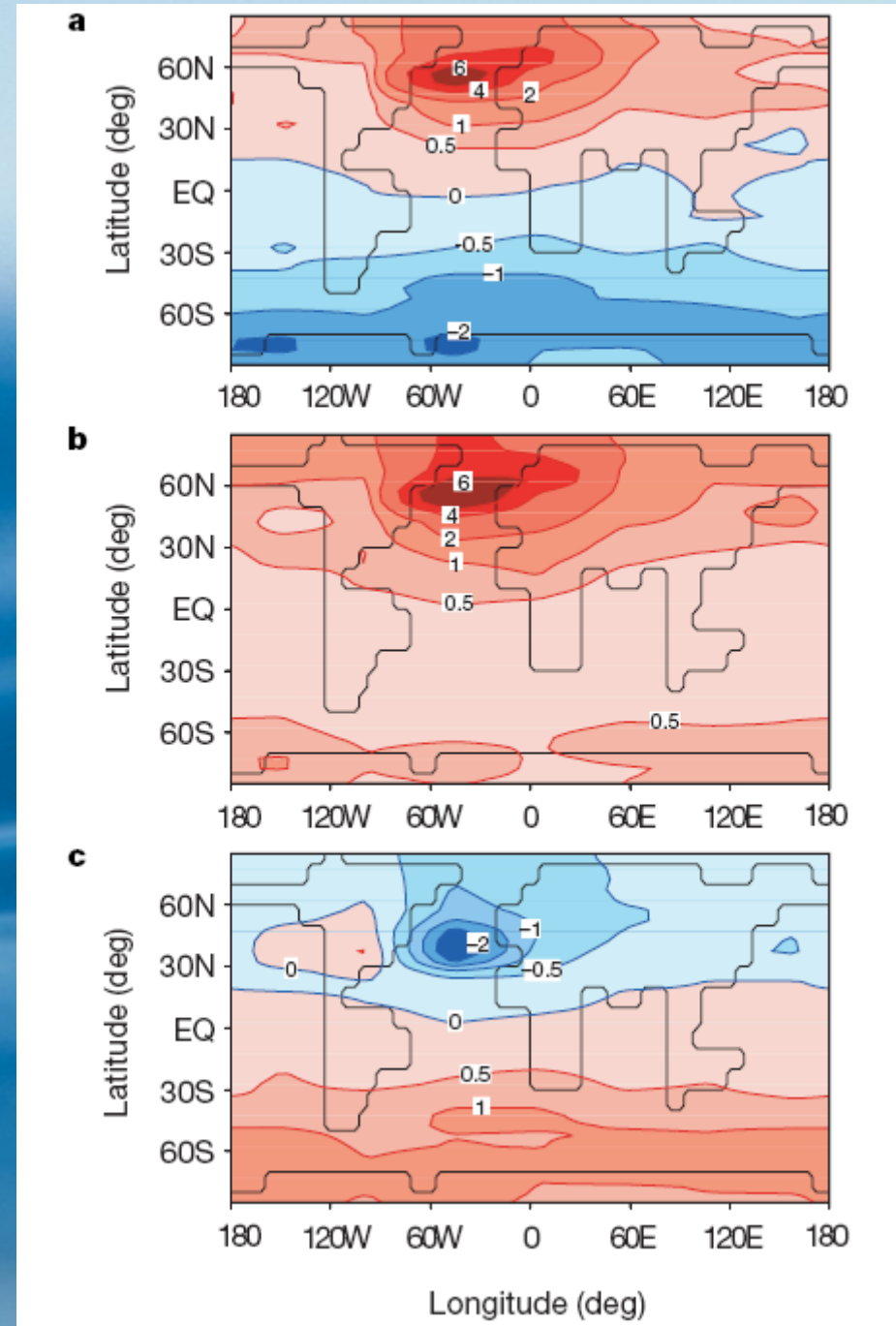
# THC podczas epoki lodowej

Zawartość neodymu oraz stosunek izotopów  $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$  świadczą o tym, że słabszy mod cyrkulacji termohalinowej “włączył się” dopiero w maksimum zlodowacenia, a mod bez cyrkulacji termohalinowej na Atlantyku jedynie podczas ostatnich dwóch zjawiska Heinricha (H1 i H2) oraz jednego z poprzedniej epoki lodowej (H11).



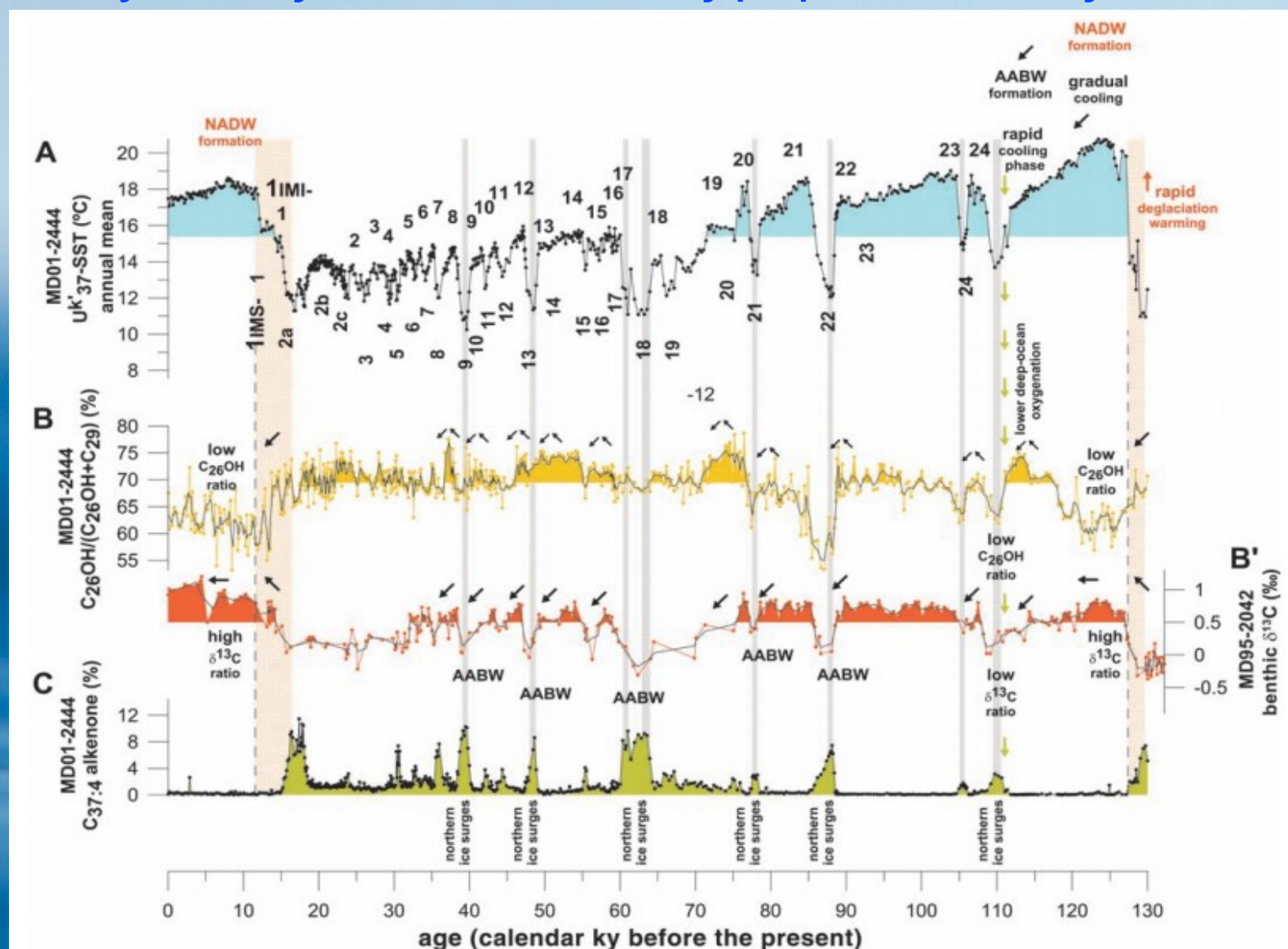
# Zmiany temperatury w czasie cyklu D/O

Zmiany temperatury (w stosunku do fazy zimnej) w cyklu D/O wskazują na naprzemienne ogrzewanie i oziębianie półkuli północnej i południowej w zależności od tego gdzie aktualnie wytwarzane są wody głębinowe





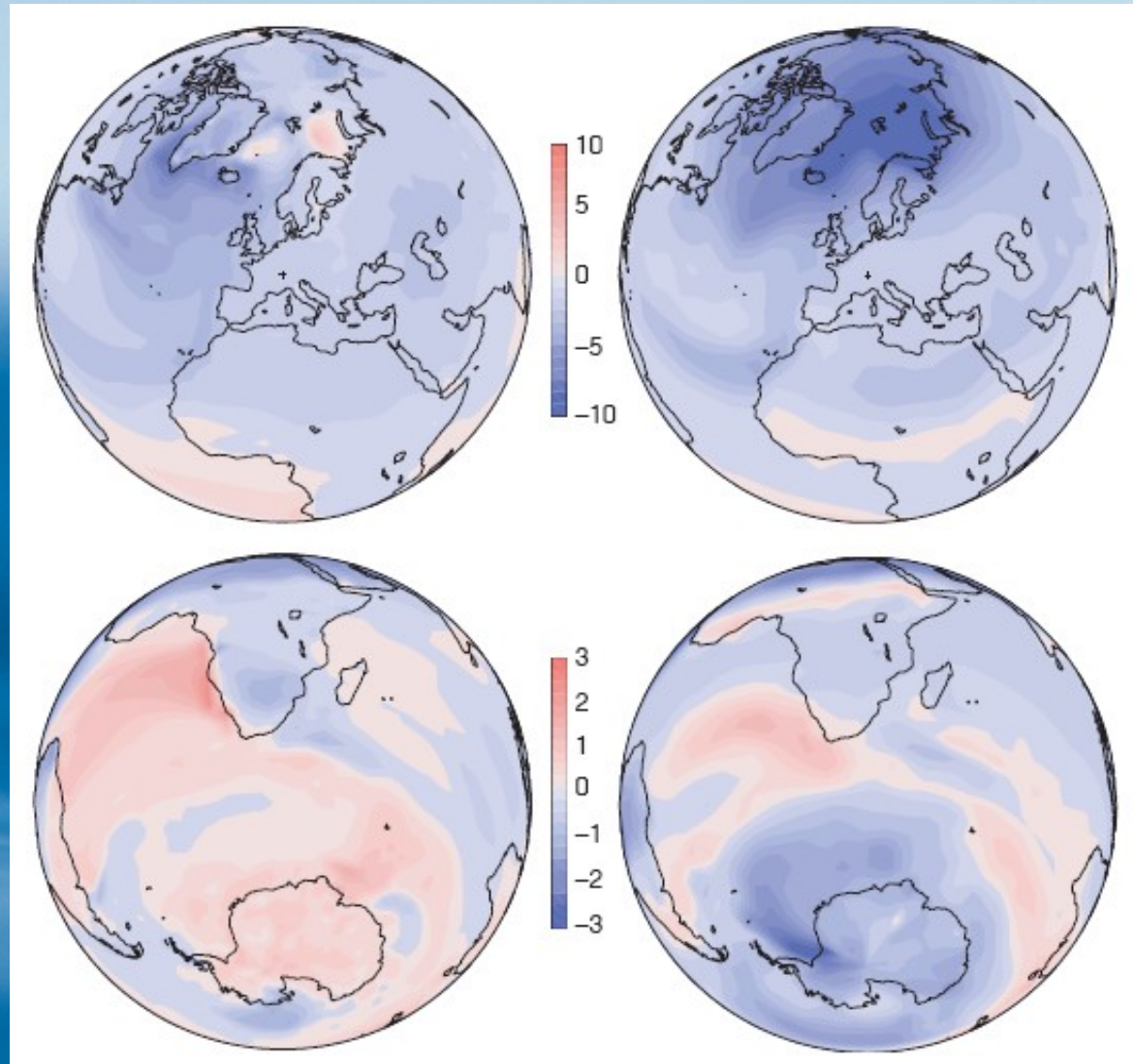
# Osłabienie cyrkulacji termohalinowej poprzedzało zjawiska Heinricha



Dane z osadów oceanicznych w pobliżu Hiszpanii pokazują, że zjawiska Heinricha (ich proxy C to ilość poczwórnie nasyconych alkenonów C37) poprzedzone są kilkuset latami napływu głębinowych wód antarktycznych wód (B jest miarą natlenienia a B' ilości węgla nieorganicznego)

*Martrat et al 2007 (Science)*

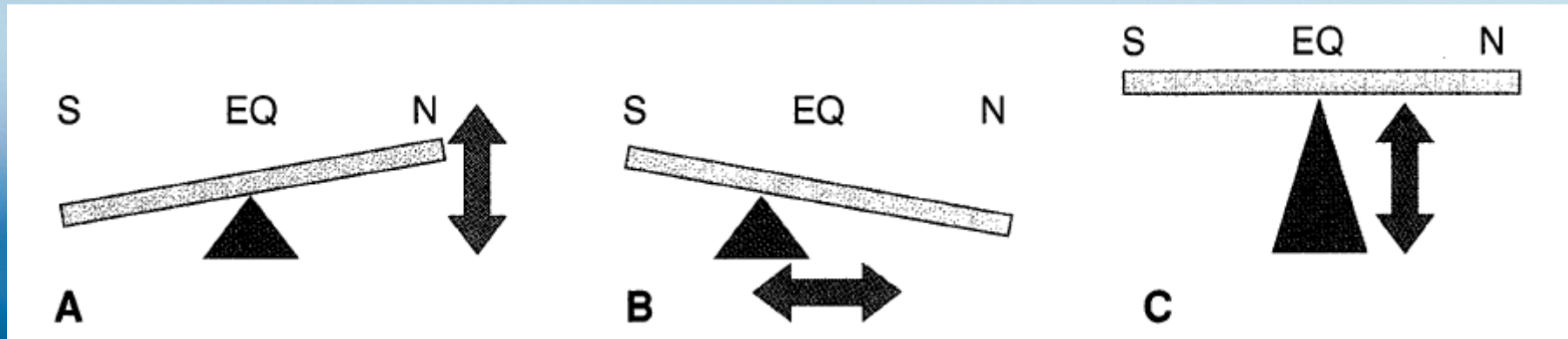
# Zmiany temperatur po wyłączeniu cyrkulacji termohalinowej



Zmiany średniej temperatury po „wyłączeniu” THC wyliczone dwoma modelami klimatycznymi. Widać duże niezgodności, szczególnie na półkuli południowej.



# Huśtawka klimatyczna (see-saw)



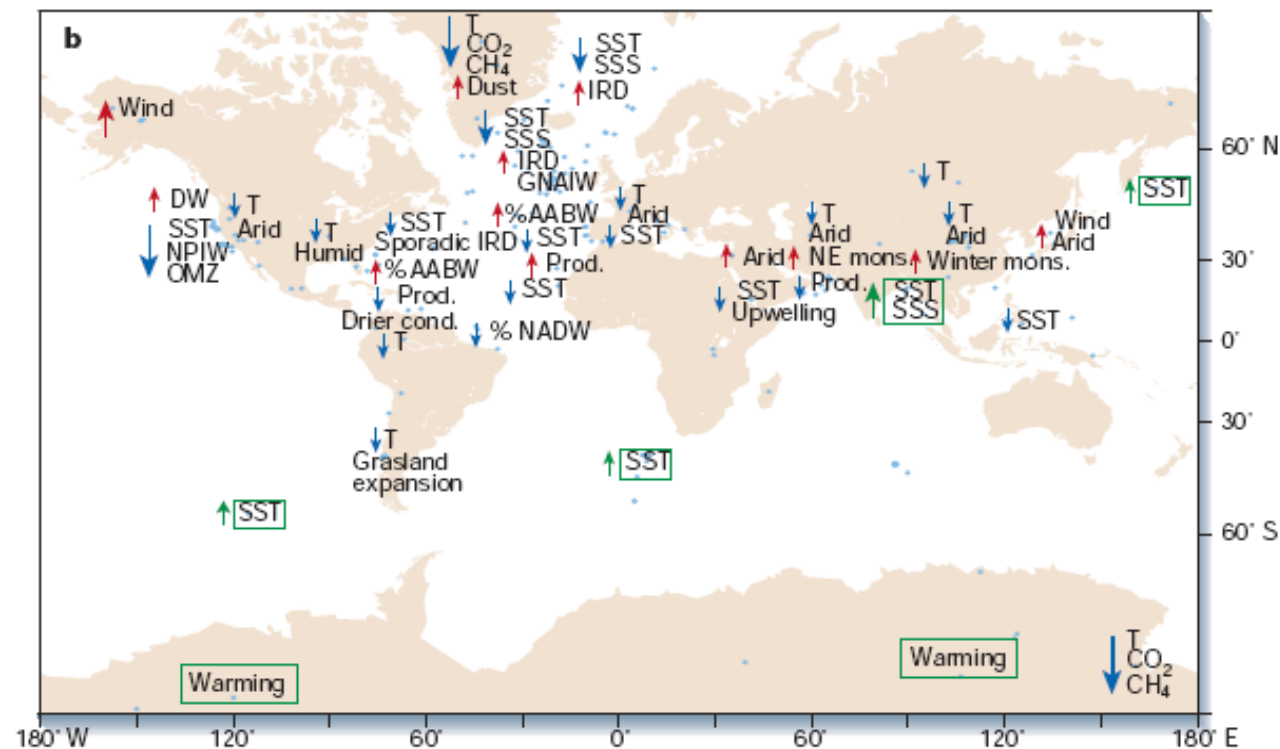
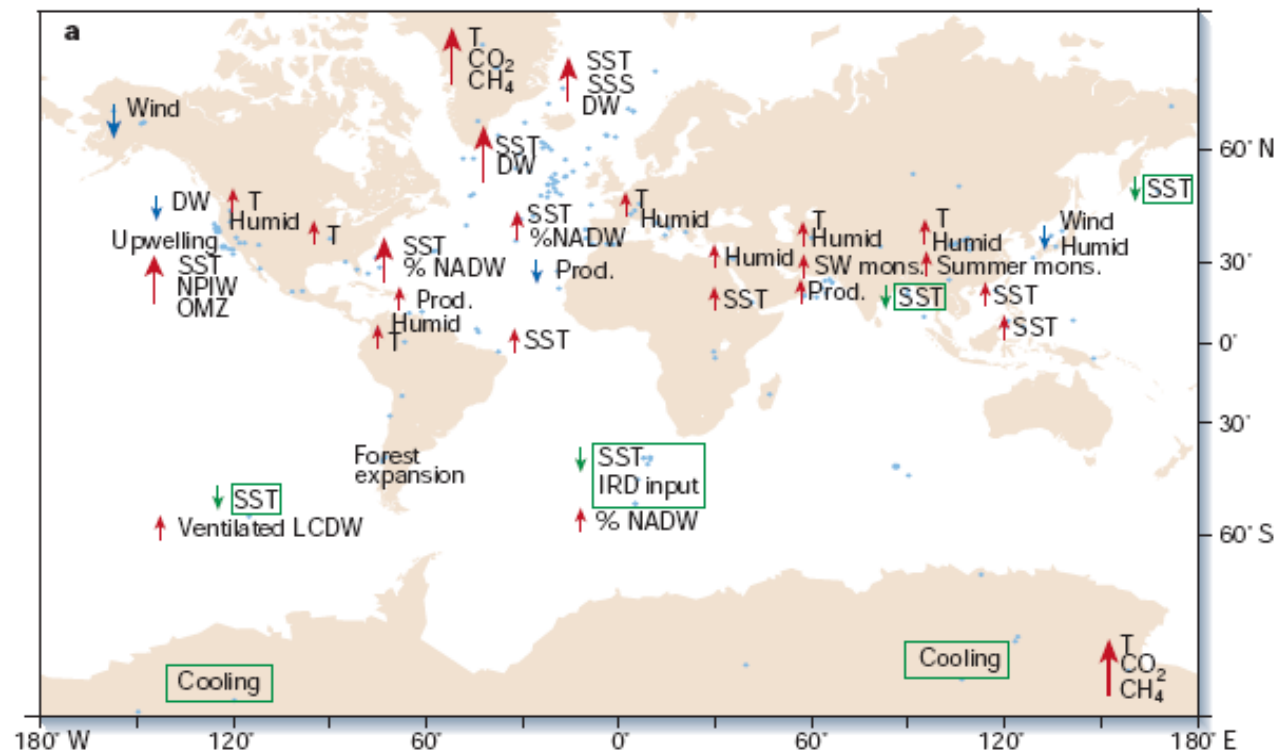
Czy gwałtowne zmiany klimatyczne (np. cykle D/O) są spowodowane:

- Zaburzeniami klimatycznymi na północy (dopływy słodkiej wody)?
- Zaburzeniami w tropikach (wymiana wody poprzez deszcze między Atlantykiem a Pacyfikiem) wpływającymi na THC Północnego Atlantyku?
- Przyczynami leżącymi w tropikach działającymi synchronicznie na obie półkule?
- A może jeszcze co innego: przyczyna na oceanach wokół Antarktydy? (*wariant nie pokazany na rysunku*)

# Cykle D/O

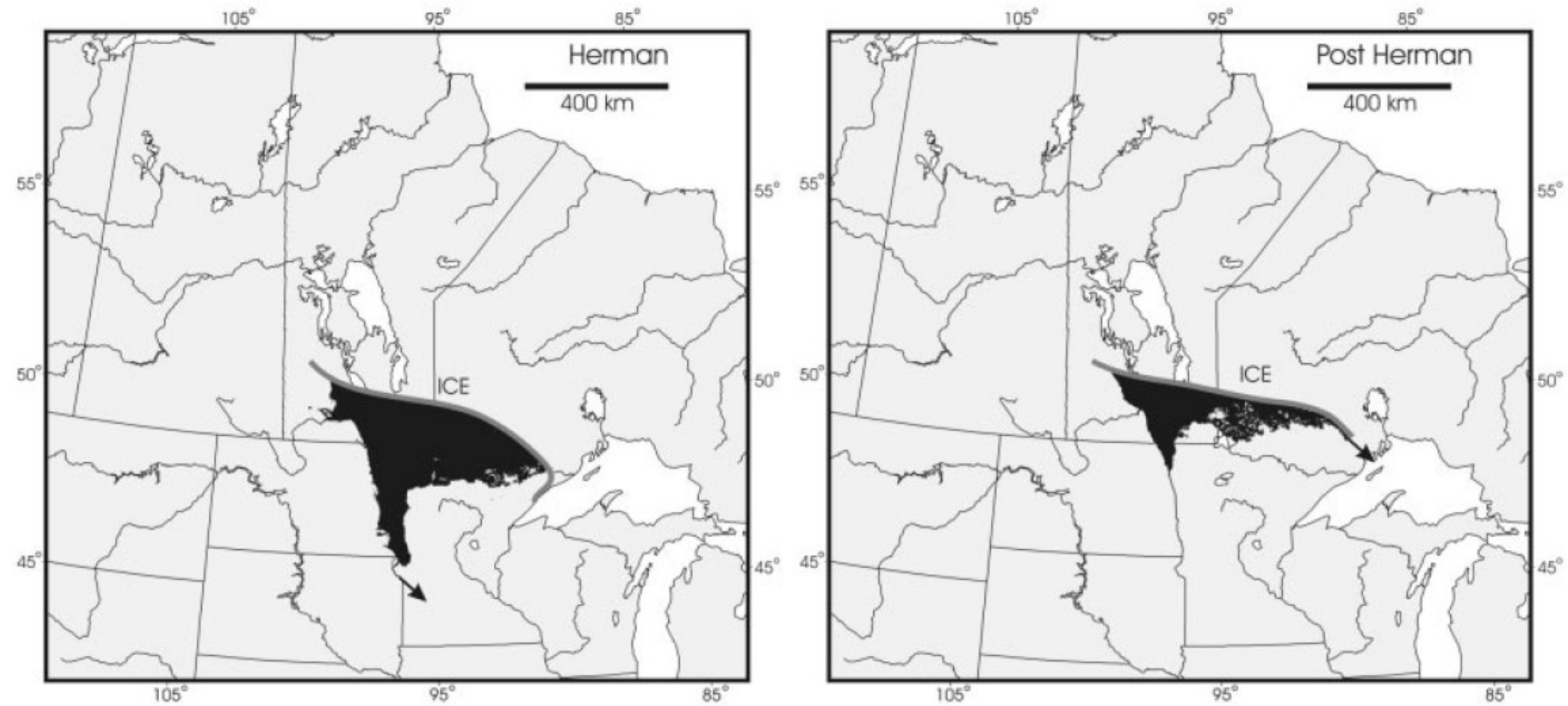
Zmiany klimatyczne zanotowane z zapisach paleoklimatycznych w czasie cieplej (góra) i zimne (dół) fazy cyklu D/O. Charakterystyczne odwrócenie temperatur na Pn. i Pd. Atlantyku świadczy, że cykl ten związany jest ze zmianami cyrkulacji termohalinowej.

*Rahmstorf 2002 (Nature)*





# Możliwe źródło słodkiej wody na początku YD

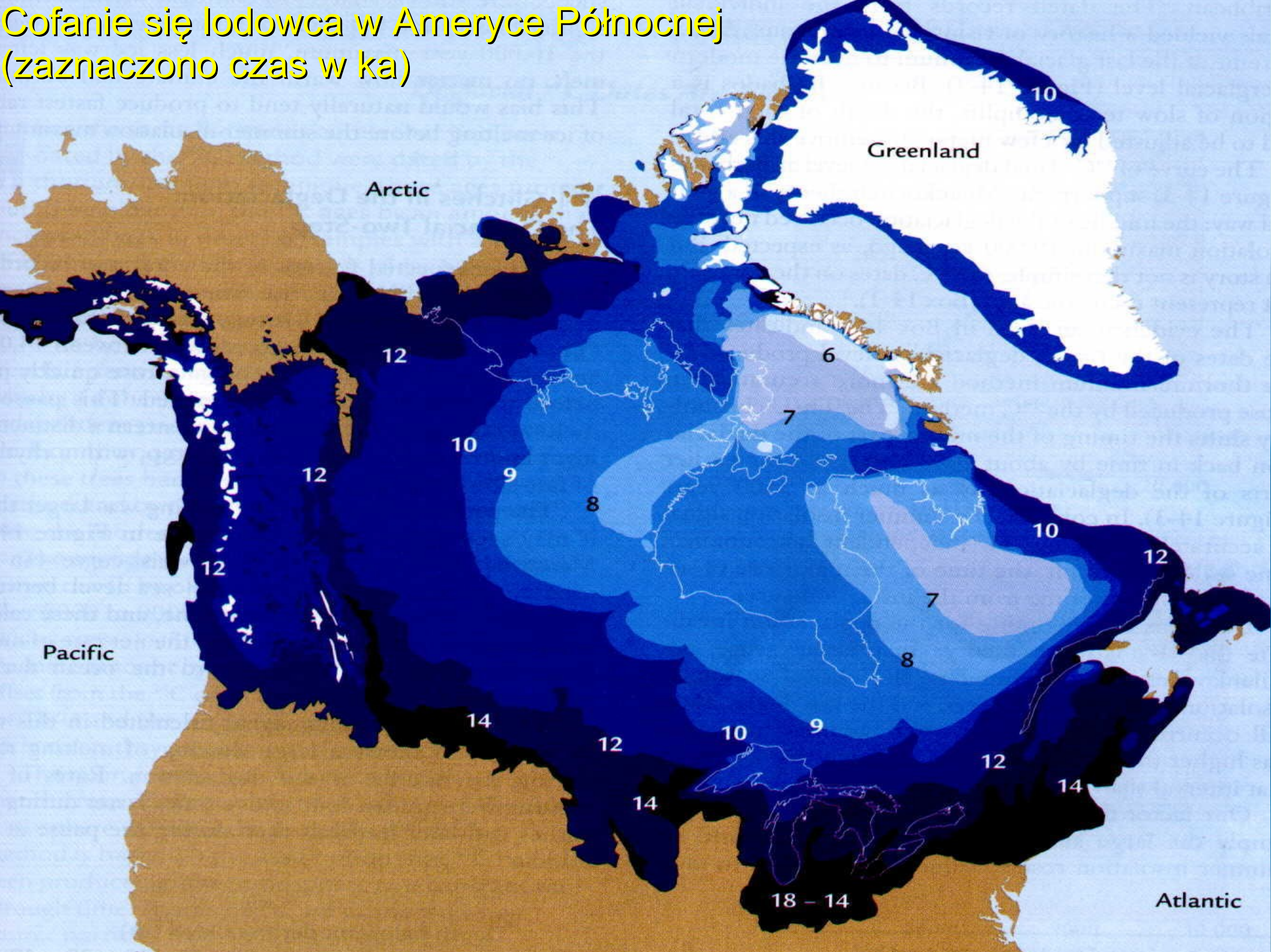


Opróżnienie do Północnego Atlantyku zablokowanego lodem Jeziora Agassiz ( $9500 \text{ km}^3$ ), wcześniej mającego ujście w stronę Zatoki Meksykańskiej, mogło być bezpośrednią przyczyną Młodszego Dryasu. Związku przyczynowo-skutkowego nie udowodniono jednak do dziś (wyływ nie został dokładnie wydatowany).

*Broecker 2003 (Science)*

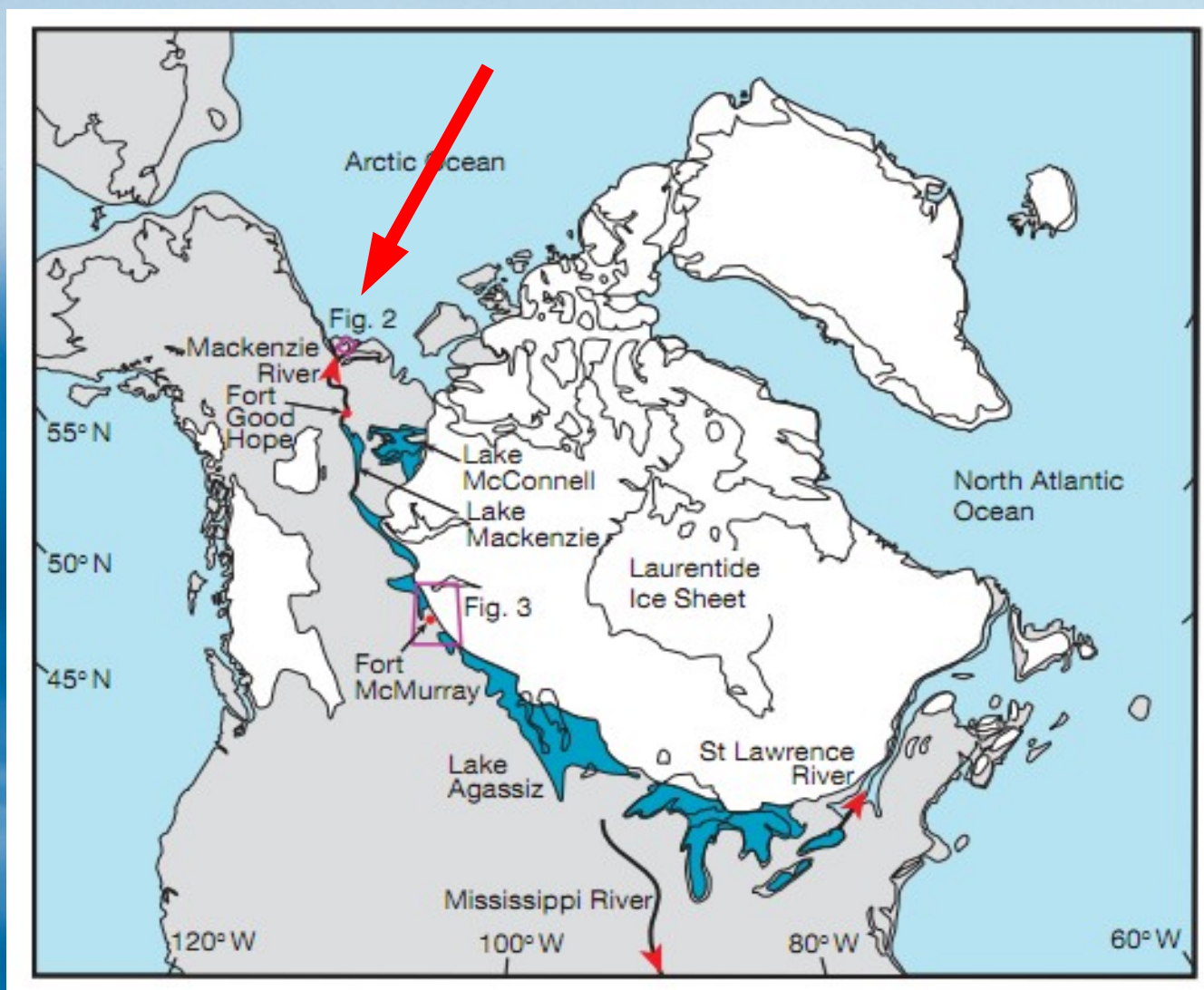


# Cofanie się lodowca w Ameryce Północnej (zaznaczono czas w ka)





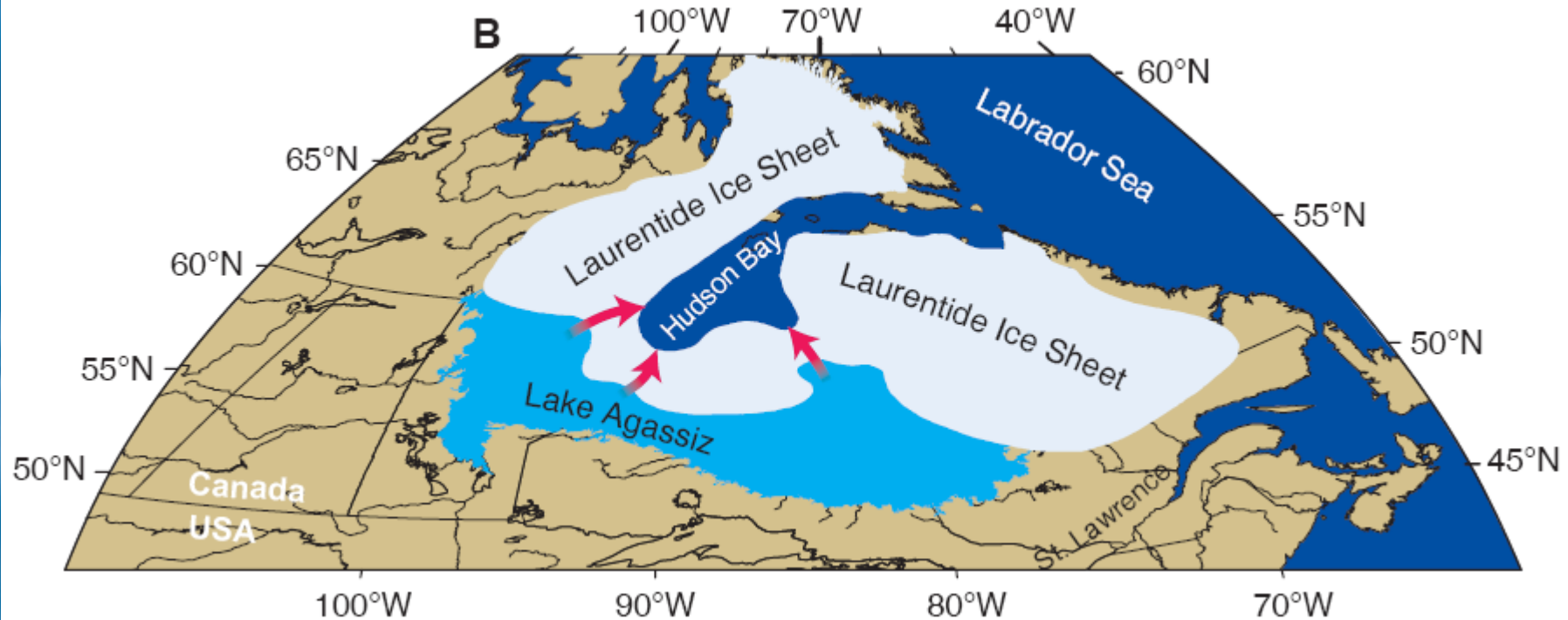
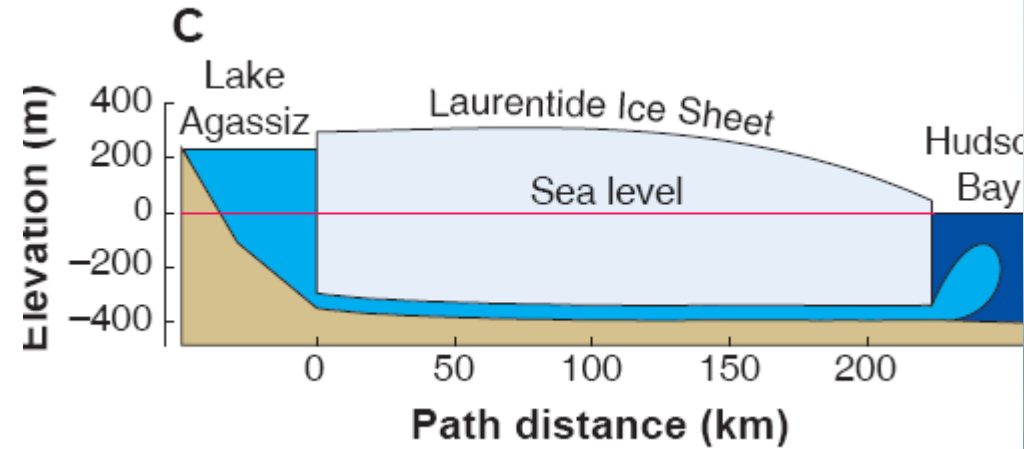
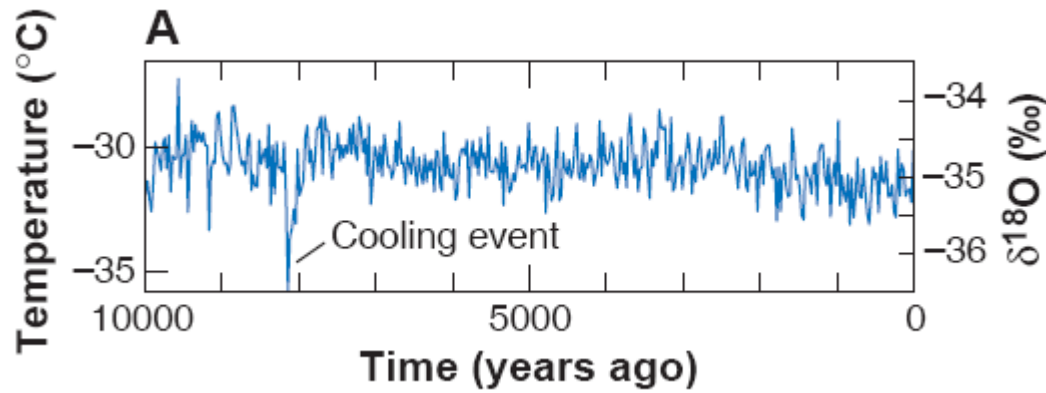
# Znaleziono drogę wylewu, który rozpoczął YD?



Formy terenu i datowanie osadów u ujścia Rzeki Mackenzie wskazuje na katastrofalny wylew do Oceanu Arktycznego około 13 ka. Czy jest to “dymiący rewolwer”?

*Murton et al. 2003 (Nature)*

# Jeszcze jedno oziębienie: 8200 lat temu



Ostatni wylew wody z Jeziora Agassiz prawdopodobną przyczyną oziębienia klimatu w Arktyce oraz NW Europie 8200 lat temu.

*Clarke et al. 2003 (Science)*



# Skutki wylewów jezior lodowcowych

Washington

Idaho

Montana

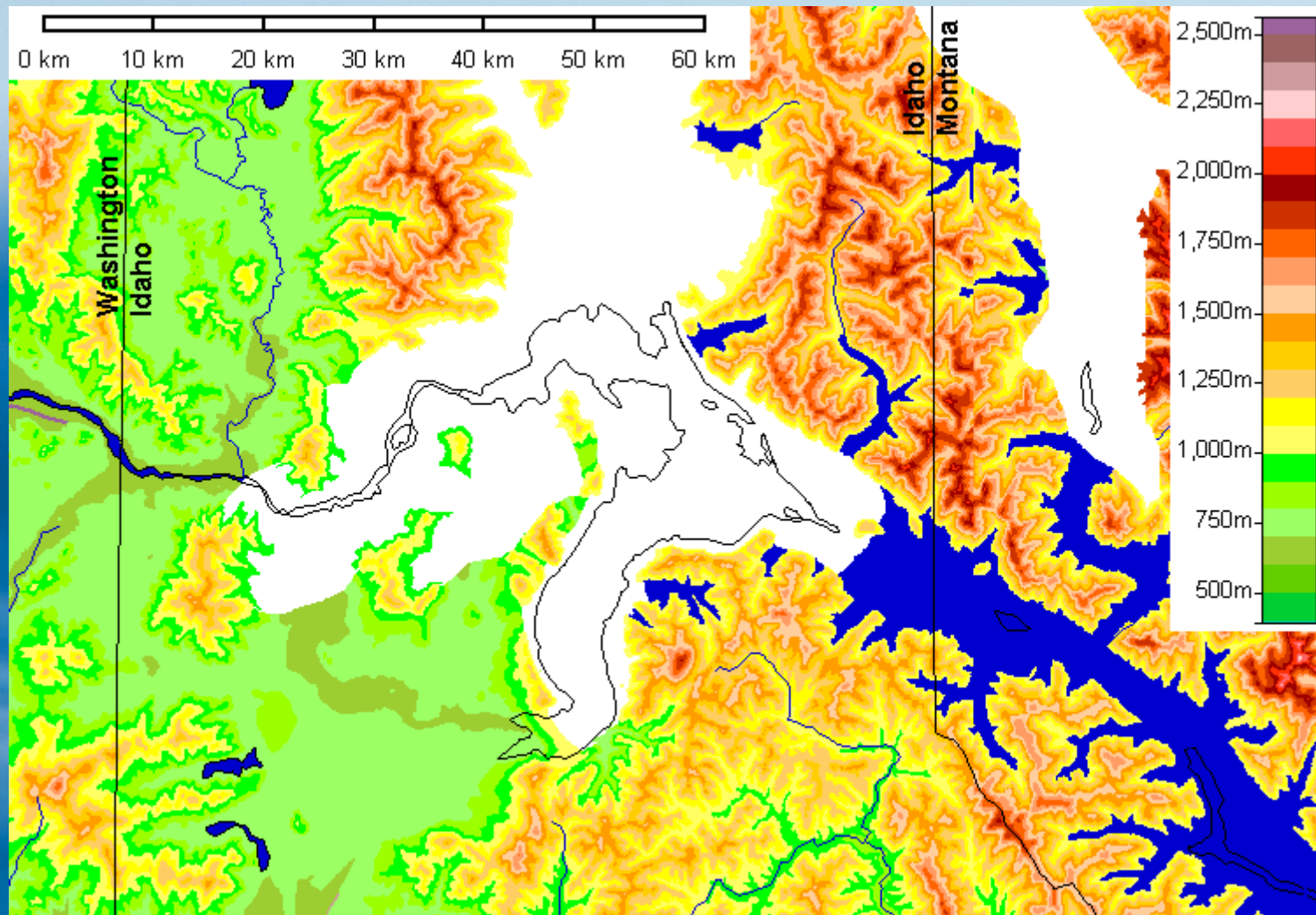
1



Kilkaset kilometrów kwadratowych stanu Washington i Idaho zostało oszpecone olbrzymią powodzią (w szczycie do 20 Sv!) po przełamaniu bariery lodowej Jeziora Missoula. Strumień wody pozostawił gigantyczne kanały, wielkie otoczaki oraz zmarszczki (*ripplemarks*) o długości ok. 150 m.

*Baker 1978 (Science)*

# Przełamanie bariery Jeziora Missoula



Wylew lodowcowego Jeziora Missoula 15 tysięcy lat temu.



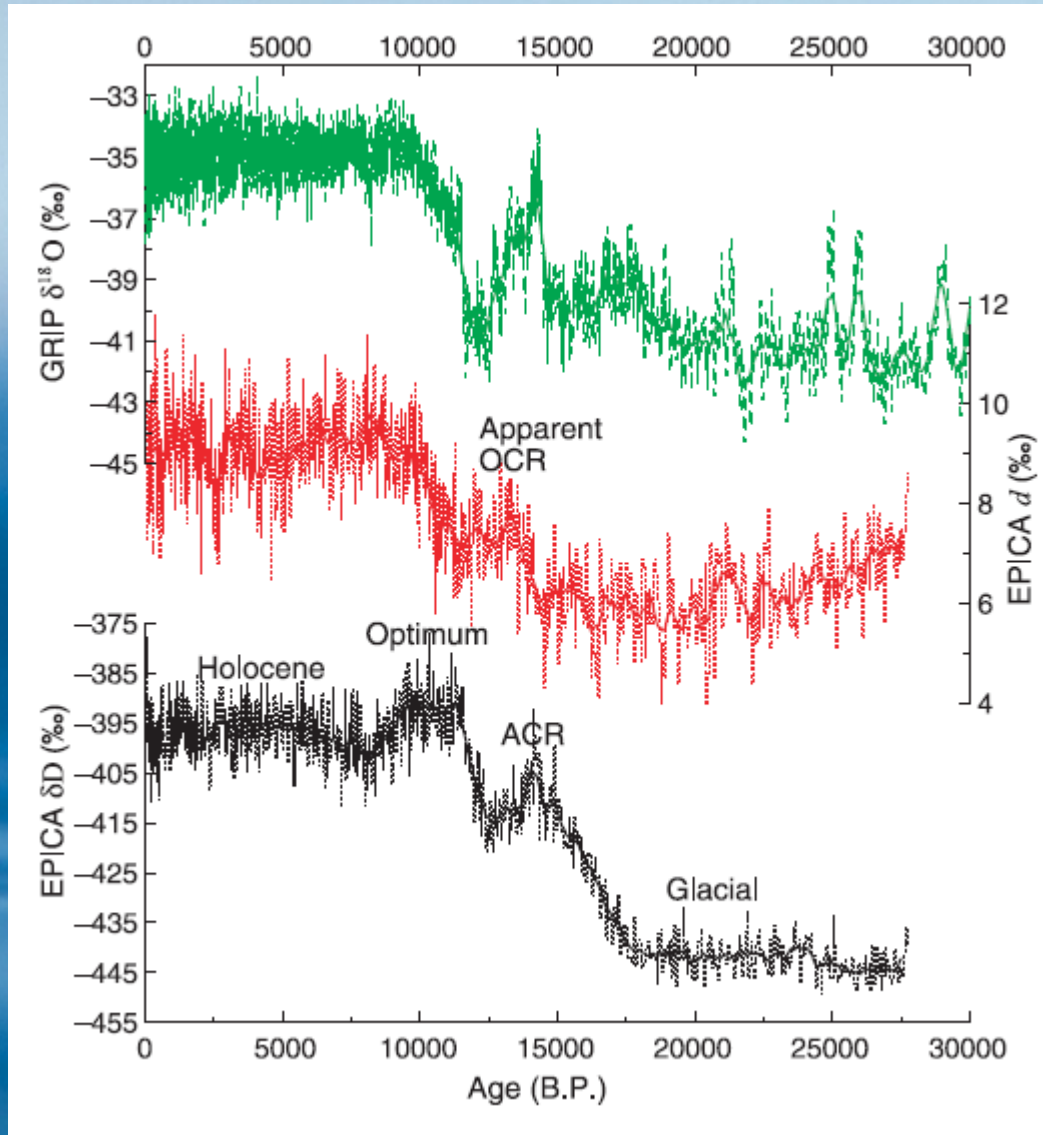
# Megawylewy naprawdę drażą skałę...



Trwający trzy dni wylew jeziora w Teksasie spowodował powstanie kanionu o głębokości 7 metrów, o wszystkich cechach megawylewu w zmniejszonej skali.

*Lamb & Fongstad 2010 (Nature Geoscience)*

# Jednak huśtawka: niesynchroniczne zmiany na obu półkulach



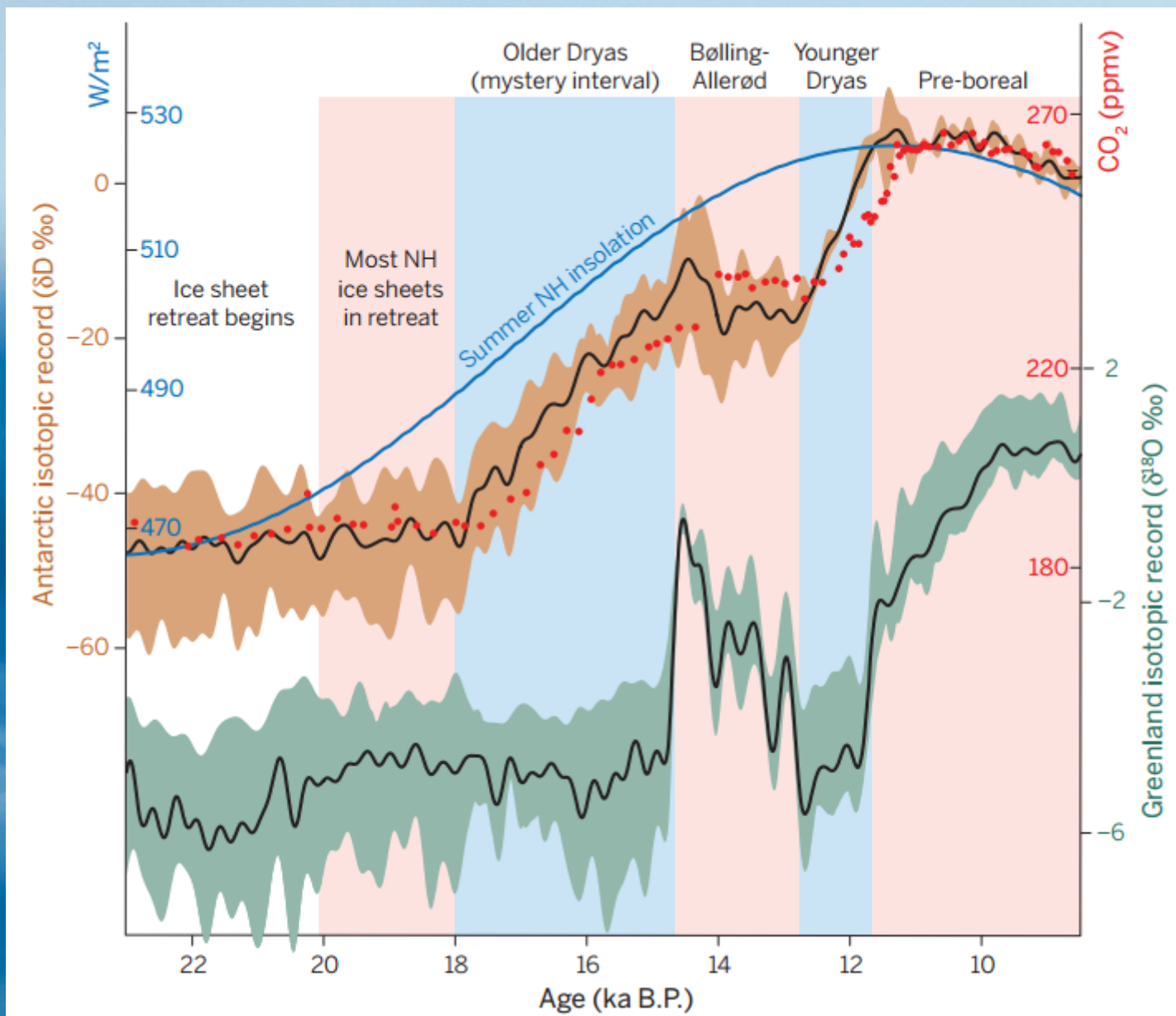
## Zapis paleoklimatyczny:

- Izotop tlenu  $^{18}\text{O}$  z rdzenia lodowego GRIP z Grenlandii **zielone** – miara lokalnej temperatury (w tej skali czasowej)
- Koncentracja deuteru w rdzeniu lodowym EPICA z Antarktydy **czarne** – miara lokalnej temperatury (w przybliżeniu)
- Nadmiar deuteru nie dający się wytłumaczyć lokalną temperaturą **czerwone** – miara temperatury oceanu z którego pochodzi  $\text{H}_2\text{O}$

Antarktyczny Nawrót Zimna (ACR) poprzedził o około 800 lat oziębienie oceanu (OCR). Oba poprzedzają Młodszy Dryas, oziębienie półkuli północnej (ACR – YD = 1.5 ky)



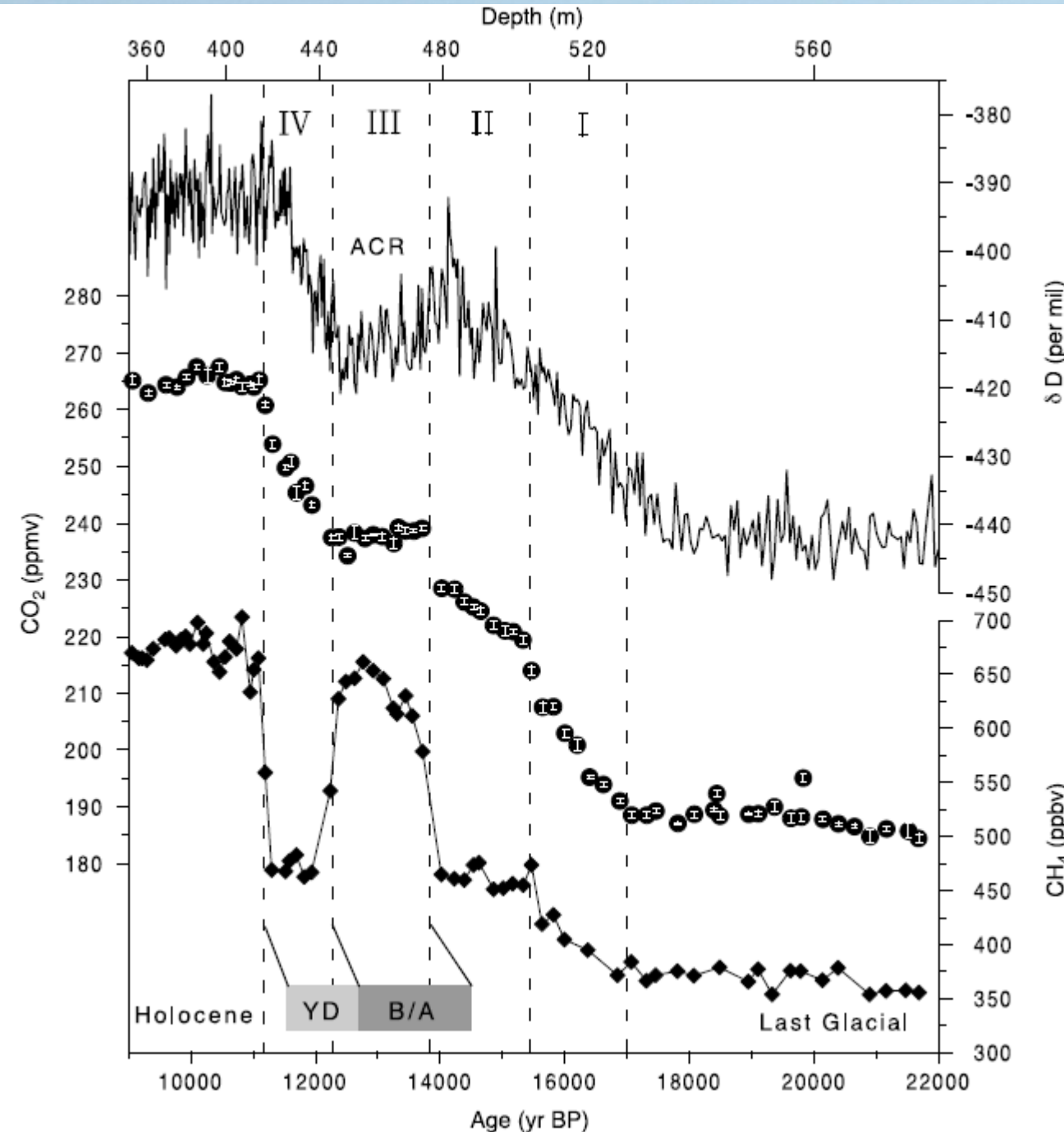
# Huśtawka klimatyczna: najnowszy obraz



Nowa seria temperatur Grenlandii przygotowana metodą  $\delta^{15}N$  pokazuje, że YD nie był zimniejszy niż OD (co jest logiczne zważywszy na większe nasłonecznienie Arktyki latem podczas YD).

*Sime 2014 (Science)*

# Nagłe zmiany klimatu: rola gazów cieplarnianych

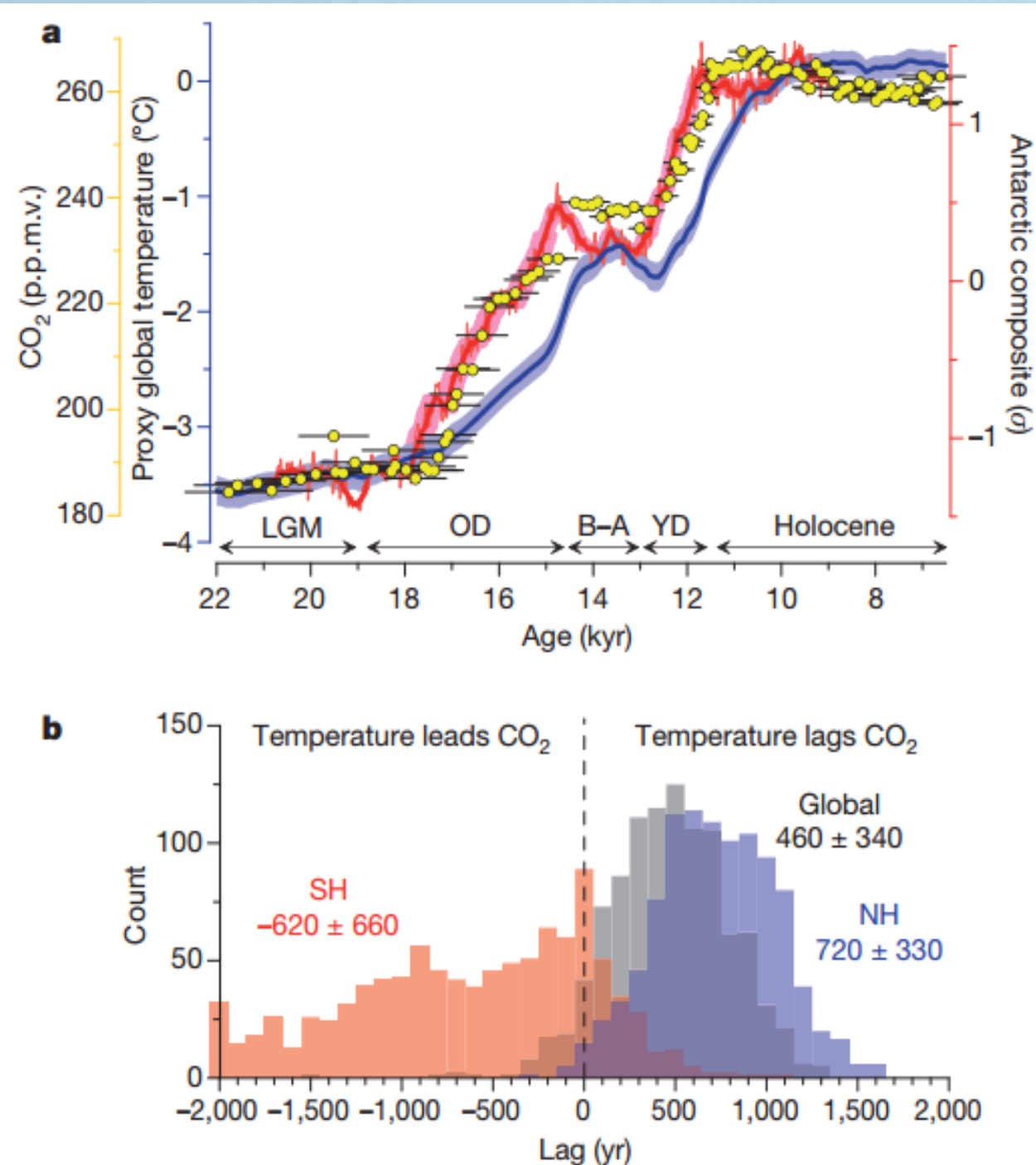


Zmiany koncentracji atmosferycznej CO<sub>2</sub> (środek) są silnie skorelowane z temperaturą Antarktydy (góra) z wyjątkiem silnych skoków w momentach gwałtownych ociepleń półkuli północnej (skutek zmian w THC).

Koncentracja metanu (dół) koreluje ze zmianami temperatury półkuli północnej (nie pokazane).



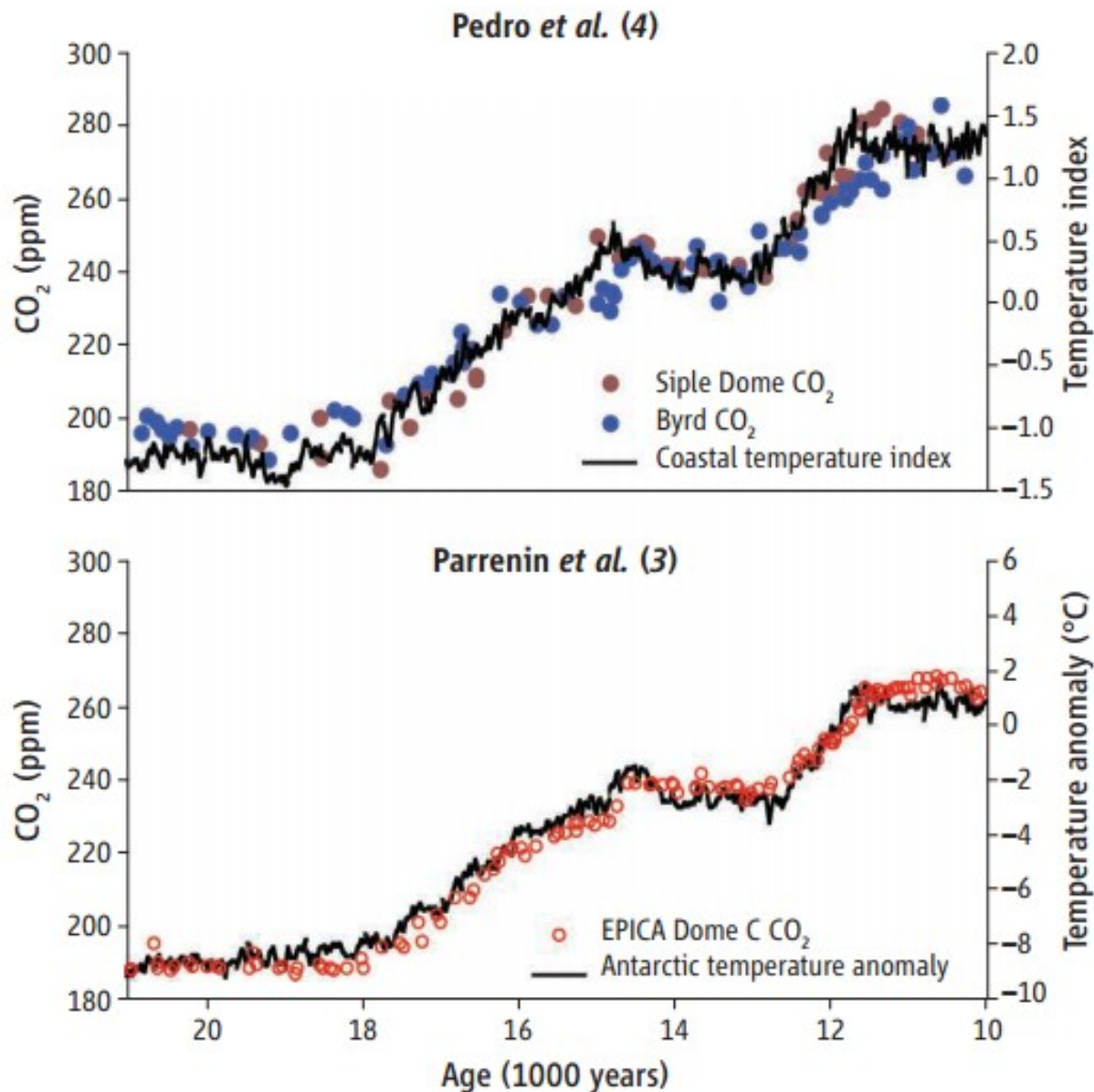
# Huśtawka klimatyczna: rola gazów cieplarnianych



Zmiany koncentracji atmosferycznej CO<sub>2</sub> (żółte), rekonstrukcji temperatury globalnej (niebieskie) i temperatury Antarktydy (czerwone)

Na dole różnice w fazie koncentracji CO<sub>2</sub>, oraz temperatur globalnych (szare), północnej niebieskie) i południowej (czerwone) półkuli.

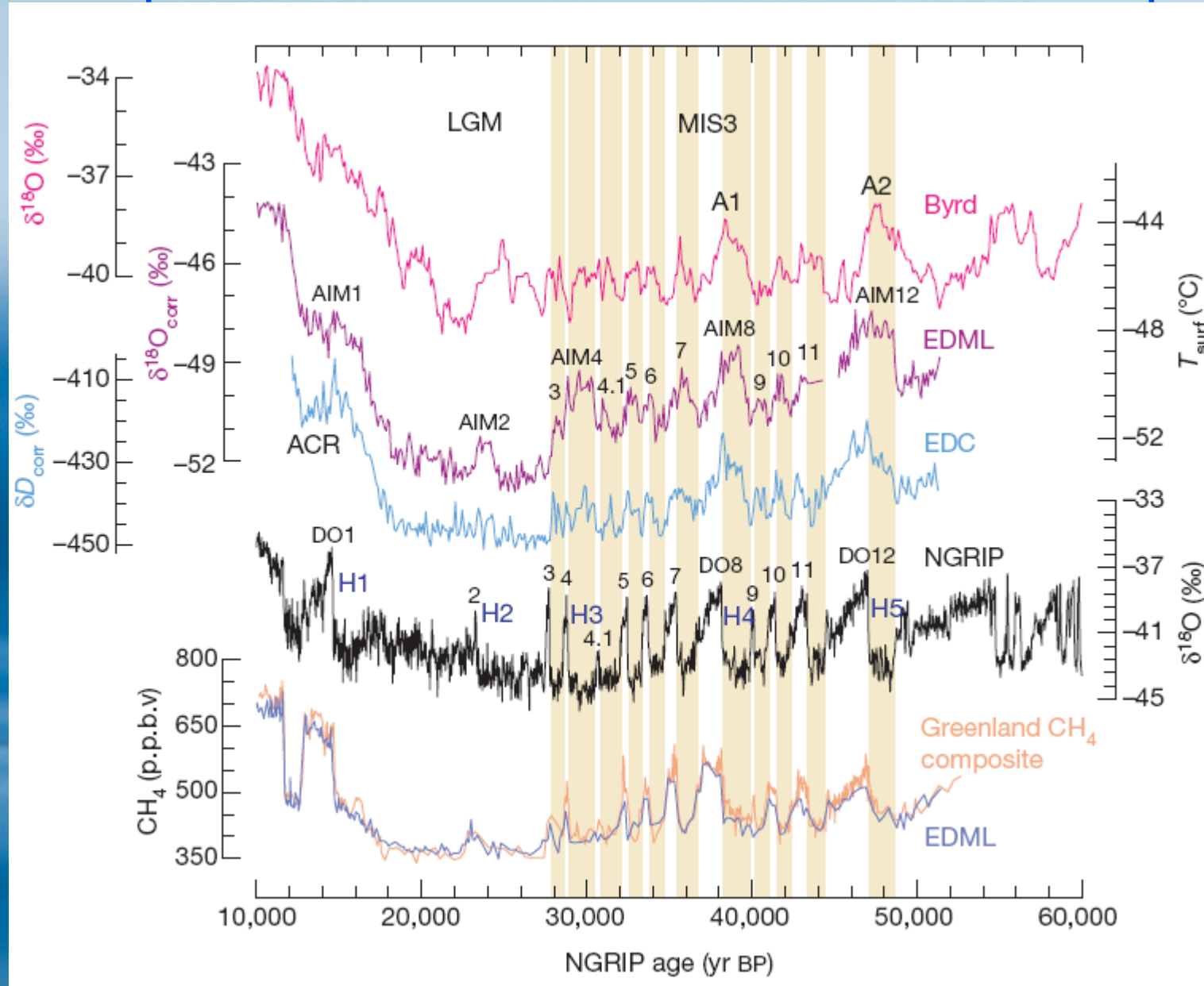
# Huśtawka klimatyczna: rola gazów cieplarnianych



Dwa niedawne artykuły Pedro et al 2012 (Clim. Past) i Parrenin et al 2013 (Science) kwestionują istnienie opóźnienia czasowego między temperaturą Antarktydy a koncentracją CO<sub>2</sub>.



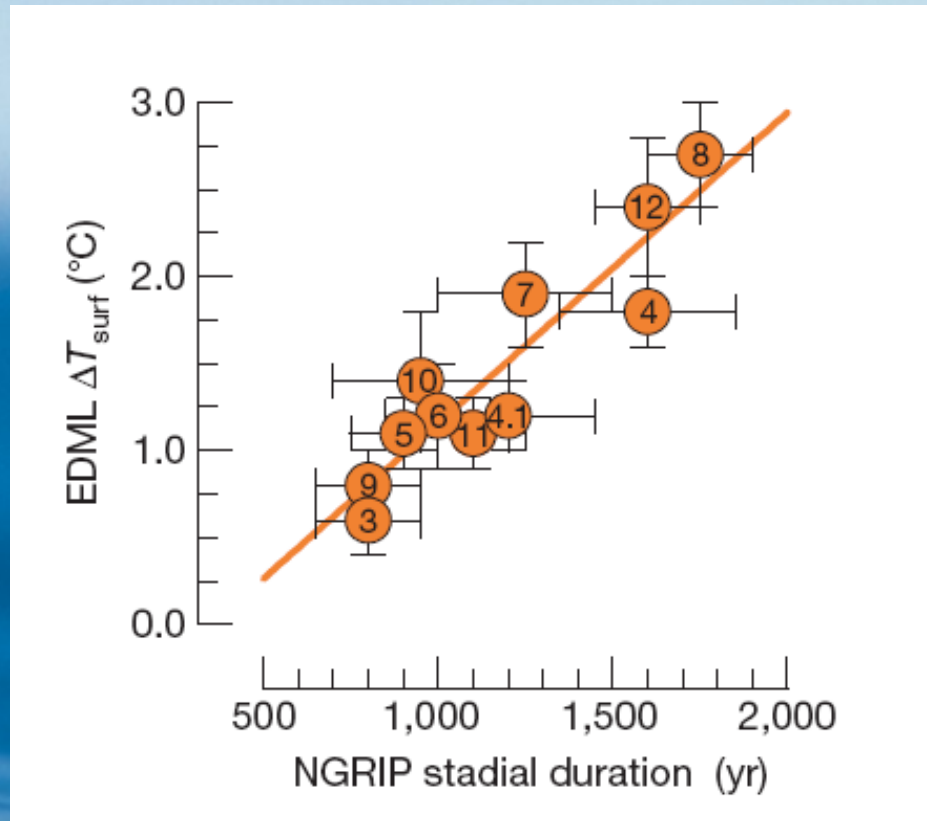
# Huśtawka potwierdzona: ale czemu silnik ma na południu?



Nowy rdzeń antarktyczny o dużej rozdzielczości czasowej EDML potwierdza dopasowanie *one-to-one* zmian na obu półkulach – południe jest jednak zawsze pierwsze!

*EPICA memebers 2006 (Nature)*

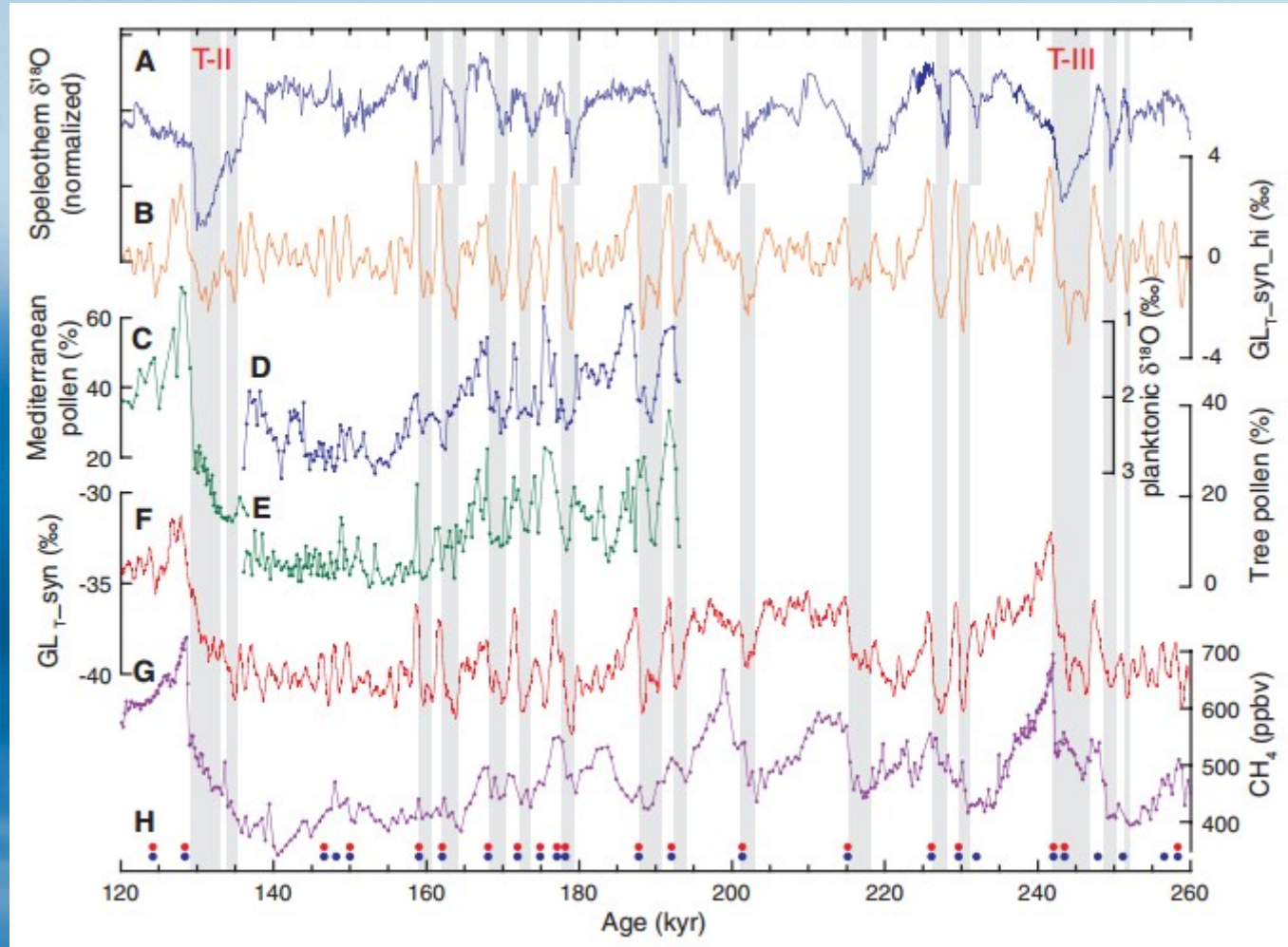
# Huštawka THC: dowód liczbowy



Amplituda zmiany temperatury (ogrzewania) Antarktydy jest liniowo skorelowana z długością trwania synchronicznej (jednoczesnej) zimnej fazy cyklu D/O na Grenlandii ( $r^2 = 0,85$ ). Mechanizmem wiążącym musi być ilość ciepła zakumulowana na półkuli południowej w wyniku zmniejszenia intensywności cyrkulacji termohalinowej.



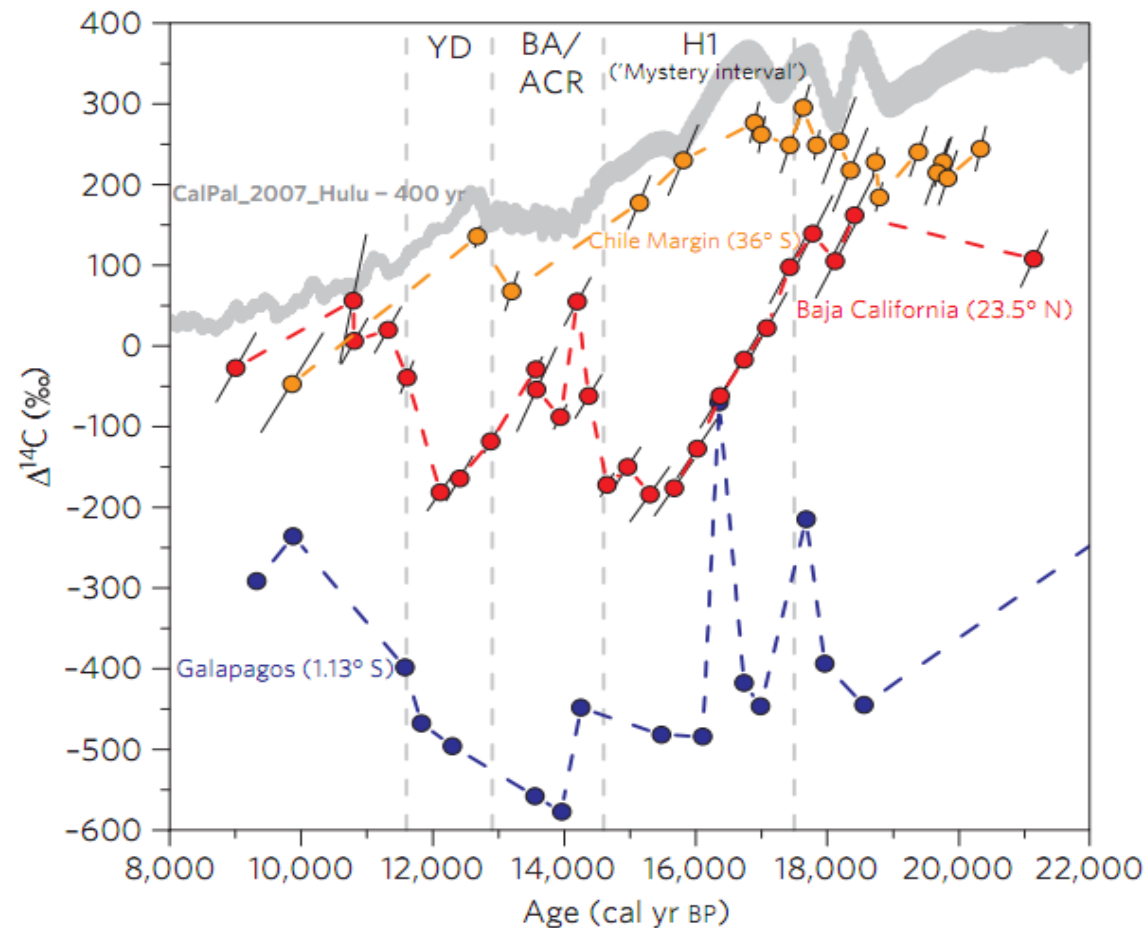
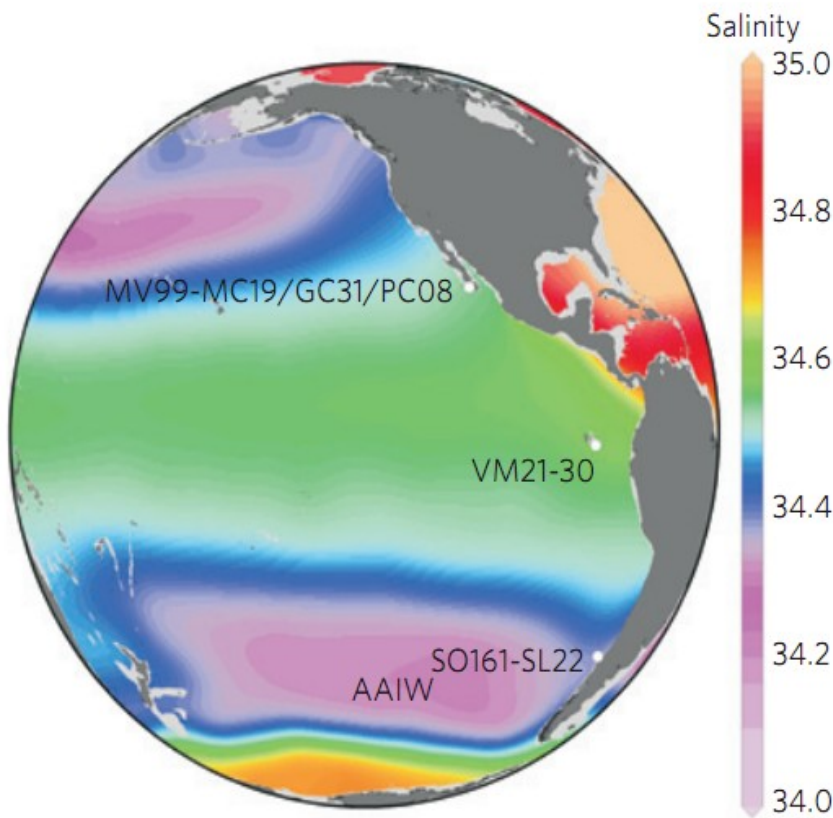
# Rekonstrukcja temperatur Grenlandii



Porównanie rekonstrukcji temperatury Grenlandii (B i F odpowiednio przeskalowaną pochodną temperatur Antarktydy i jej sumą z tą samą temperaturą przesuniętą o 2000 lat) z zmiennością monsunów w Azji (A), danymi z rdzeni osadów przy Hiszpanii (C do E) oraz metanem (G). Kropki (H) oznaczają przewidziane zdarzenia D-O przy stałym (czerwone) i zmiennym (niebieskie) progu.

*Barker et al 2011 (Science)*

# Ale, ale! A co słyszeć z $^{14}\text{C}$ ?

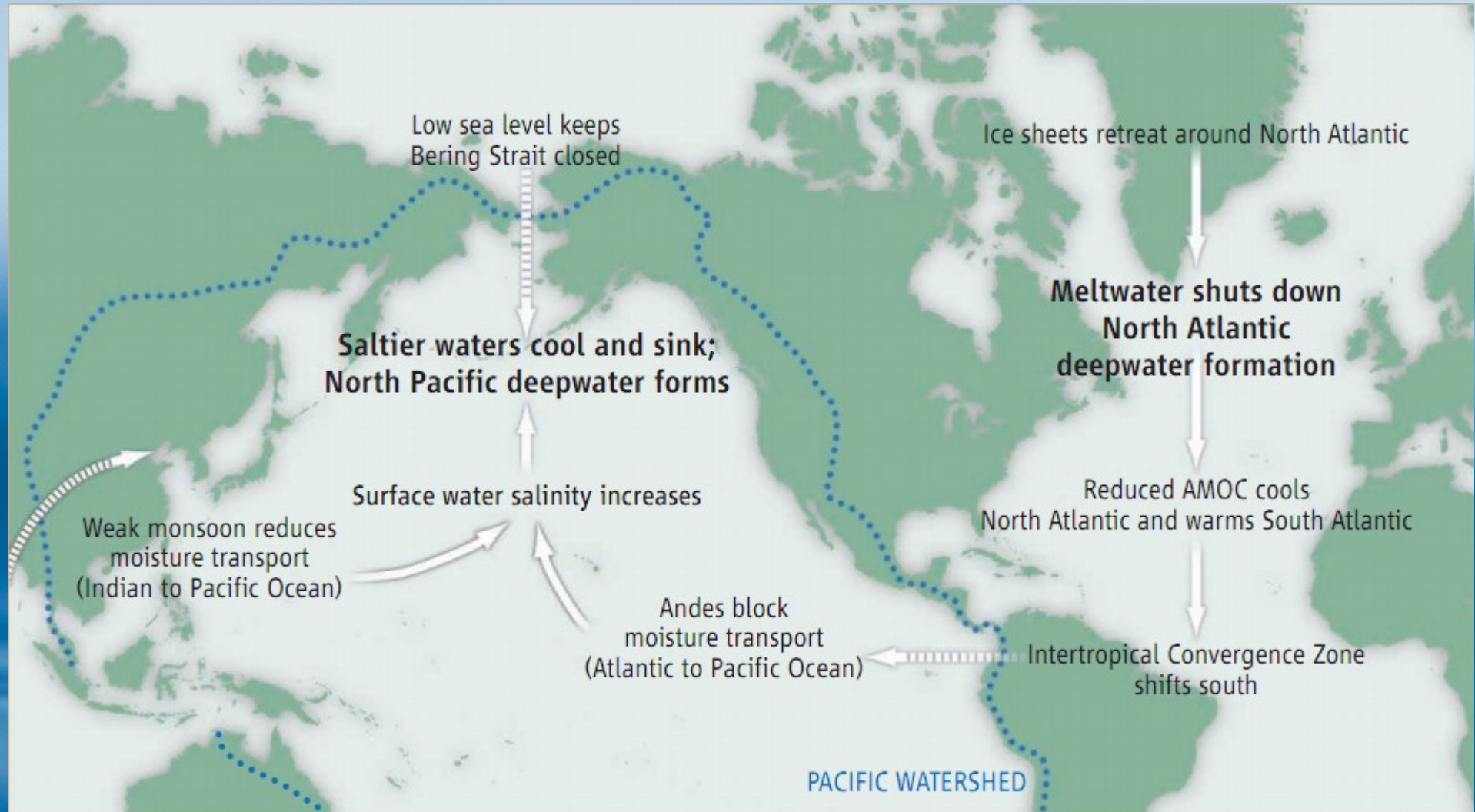


Wyniki z ostatnich lat wydają się sprzeczne, ale widać już chyba prawidłowość. Tam gdzie spodziewano się wpływu wód zubożonych w  $^{14}\text{C}$ , na Oceanie Wokółantarktycznym  $^{14}\text{C}$  nie wykazuje (De Pol-Holz et al 2010) ujemnej anomalii w stosunku do atmosfery (szare). Natomiast koło Baja California (Marchitto et al 2007), a szczególnie przy Galapagos (Stott et al 2009) wody pośrednie były naprawdę stare. Ale dlaczego akurat tam?

*De Pol-Holz et al 2010 (Nature Geoscience)*



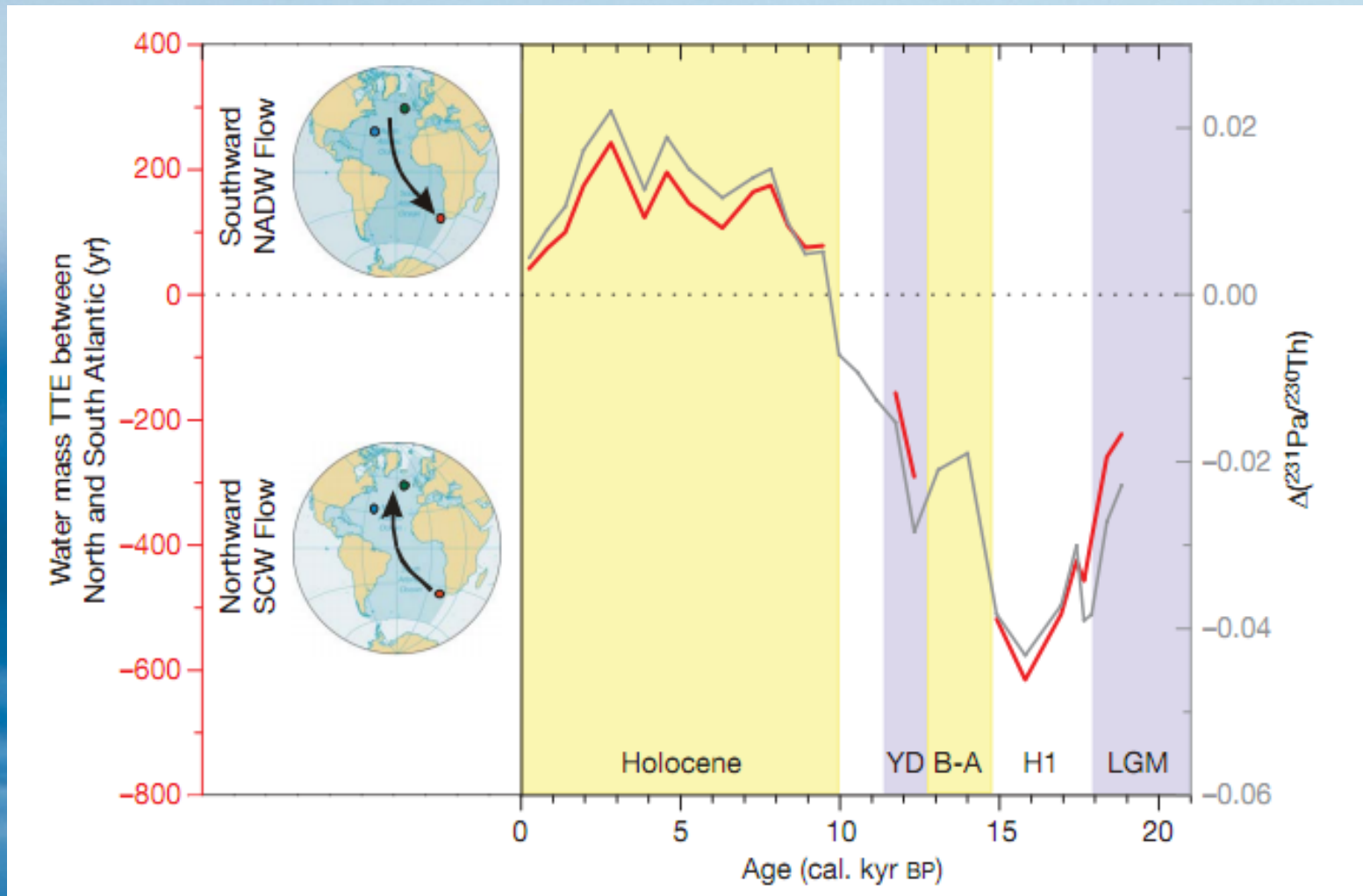
# Nowy mod cyrkulacji termohalinowej podczas H1?



W czasie zjawiska Heinricha 1 podczas wstrzymania cyrkulacji termohalinowej na Atlantyku wody głębinowe tworzyły się na Północnym Pacyfiku (Okazaki et al 2010 – *Science*). Zaczyna to pasować do koncepcji „starych” wód zubożonych w 14C pojawiających się na powierzchni właśnie na Pacyfiku.

*Kiefer 2010 (Science)*

# Odwrócona cyrkulacja termohalinowa podczas LGM?



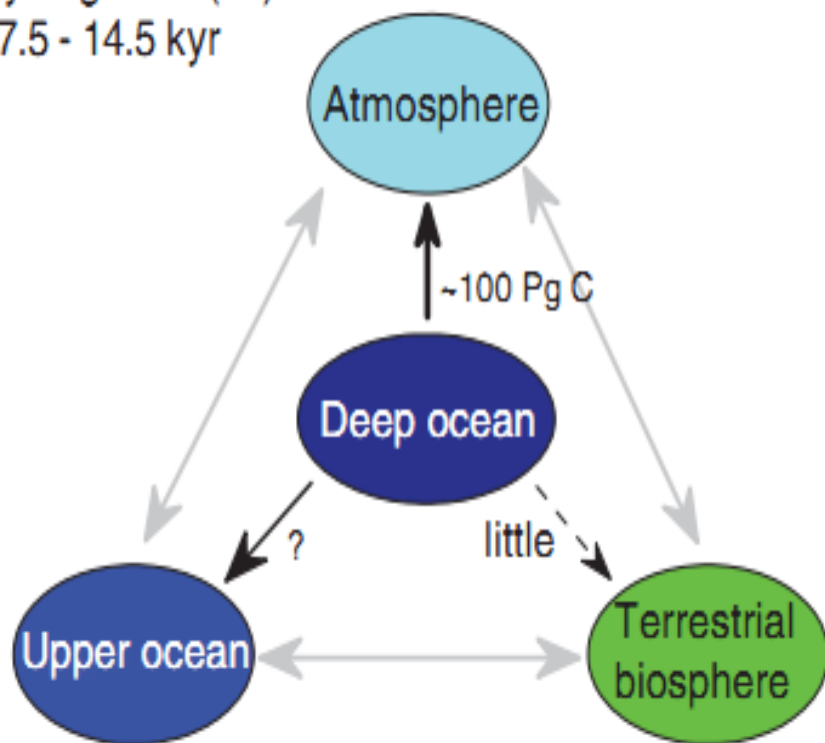
Na podstawie odwróconych gradientów izotopów toru i proaktynu  $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ , Nere i inni sugerują odwrócenie cyrkulacji termohalinowej w czasie całej epoki lodowej Ale czy to nie odzwierciedla jedynie dlaszego zasięgu Antarktycznych Wód Dennyh (AABW), a nie kierunku cyrkulacji termohalinowej?

*Negre et al 2010 (Nature)*

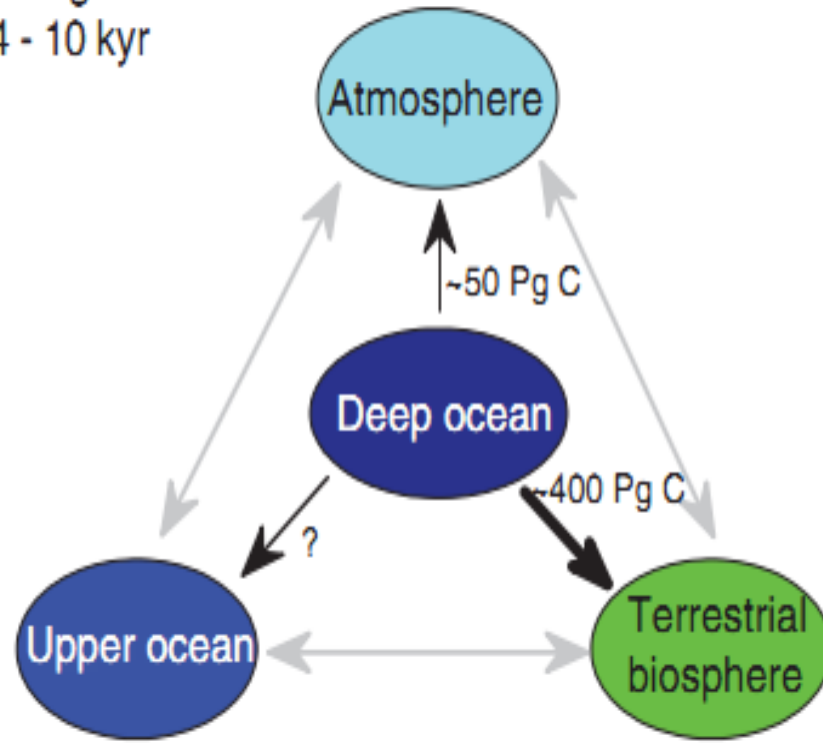


# Ile węgla oddał głęboki ocean podczas deglacjacji?

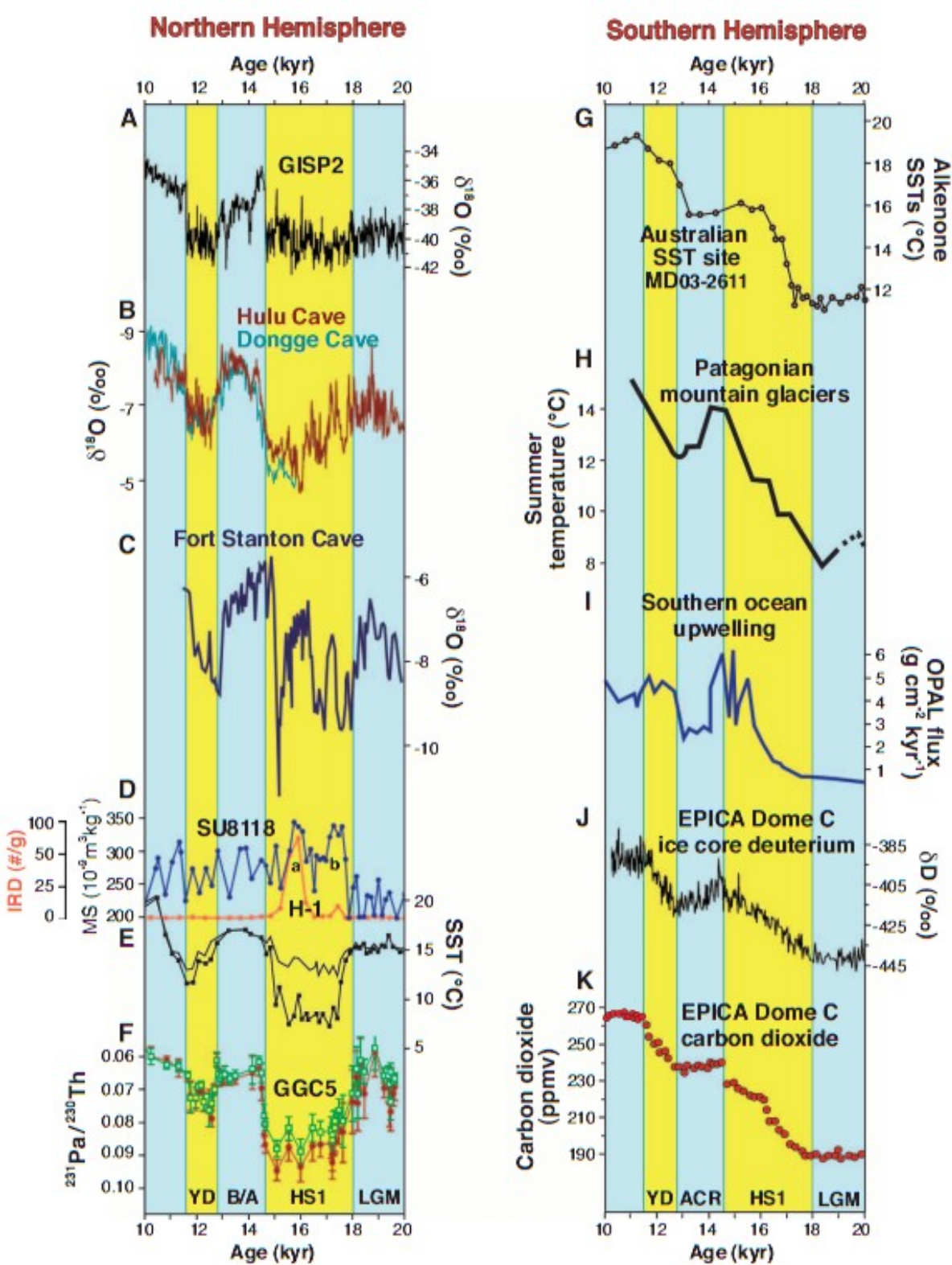
**A** Early deglacial (MI)  
17.5 - 14.5 kyr



**B** Late deglacial  
14 - 10 kyr



Podczas “tajemniczego okresu” (17.5 – 14.5 ka) głęboki ocean oddał około 100 Gt węgla, który zwiększył o około 50 ppm koncentrację atmosferyczną CO<sub>2</sub>. Natomiast w późnej fazie deglacjacji strumień węgla do atmosfery musiał być znacznie większy, jednak z 450 Gt węgla 400 Gt trafiło do odrastających na kontynentach lasów, a jedynie 50 Gt pozostało w atmosferze.

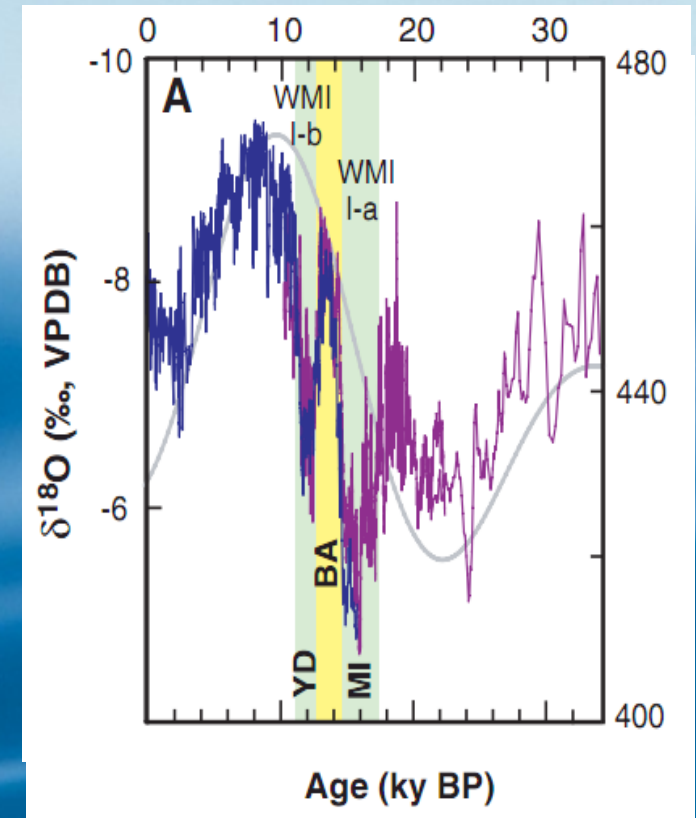
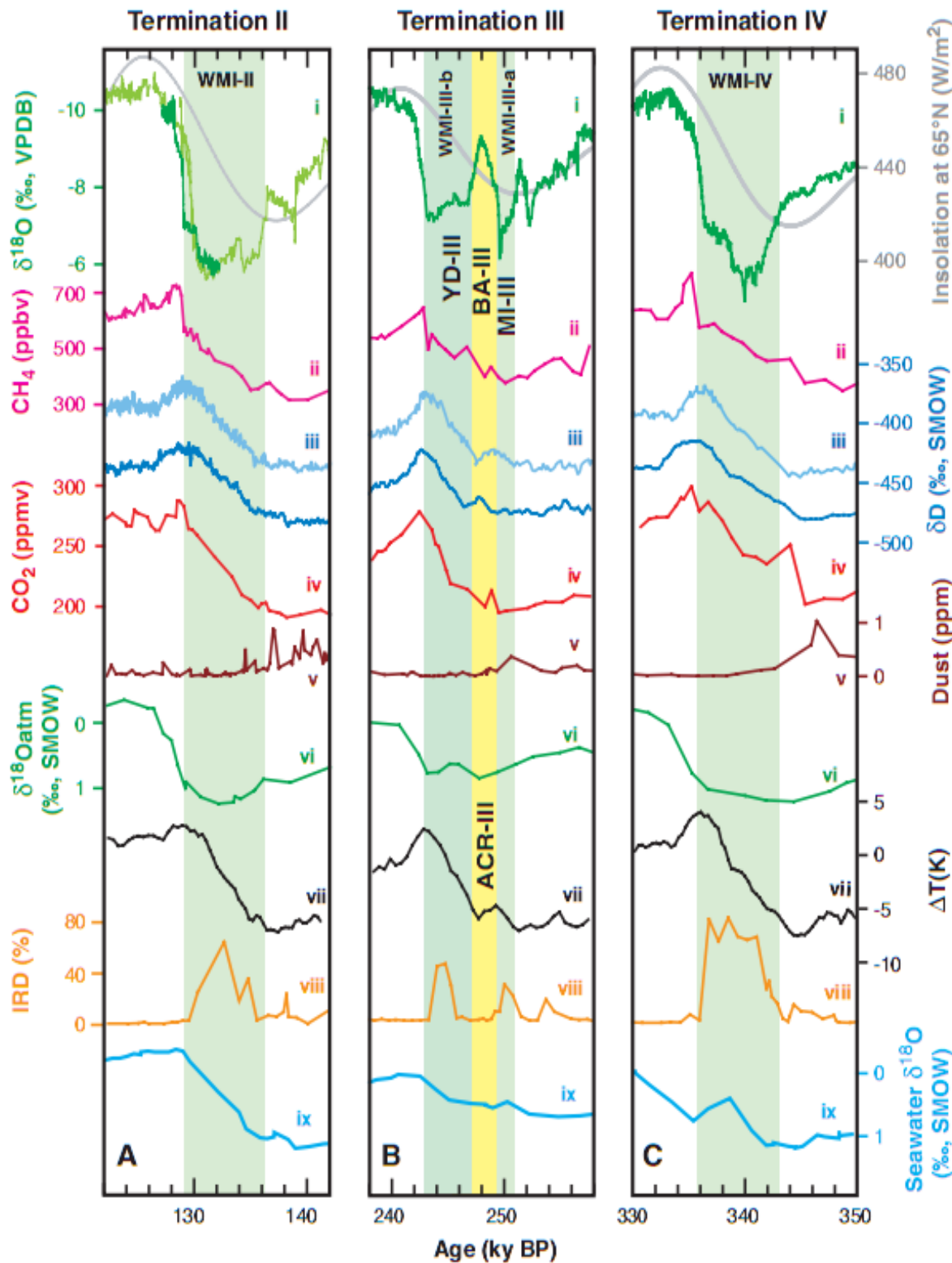


## Deglacjacja: dane z obu półkul

Porównanie danych z obu półkul pokazuje niesynchronizację zmian. Wszystkie podane wielkości to nasi znajomi. Wyjaśnić należy może jedynie, że MS to podatność magnetyczna osadów a IRD to Ice Rafted Debris (składowa osadów pochodząca z topienia lodu morskiego). Ilość izotopu  $^{18}\text{O}$  tlenu w stalagnitach jaskiń w południowo-wschodniej Azji uważana jest za miarę intensywności monsunu.



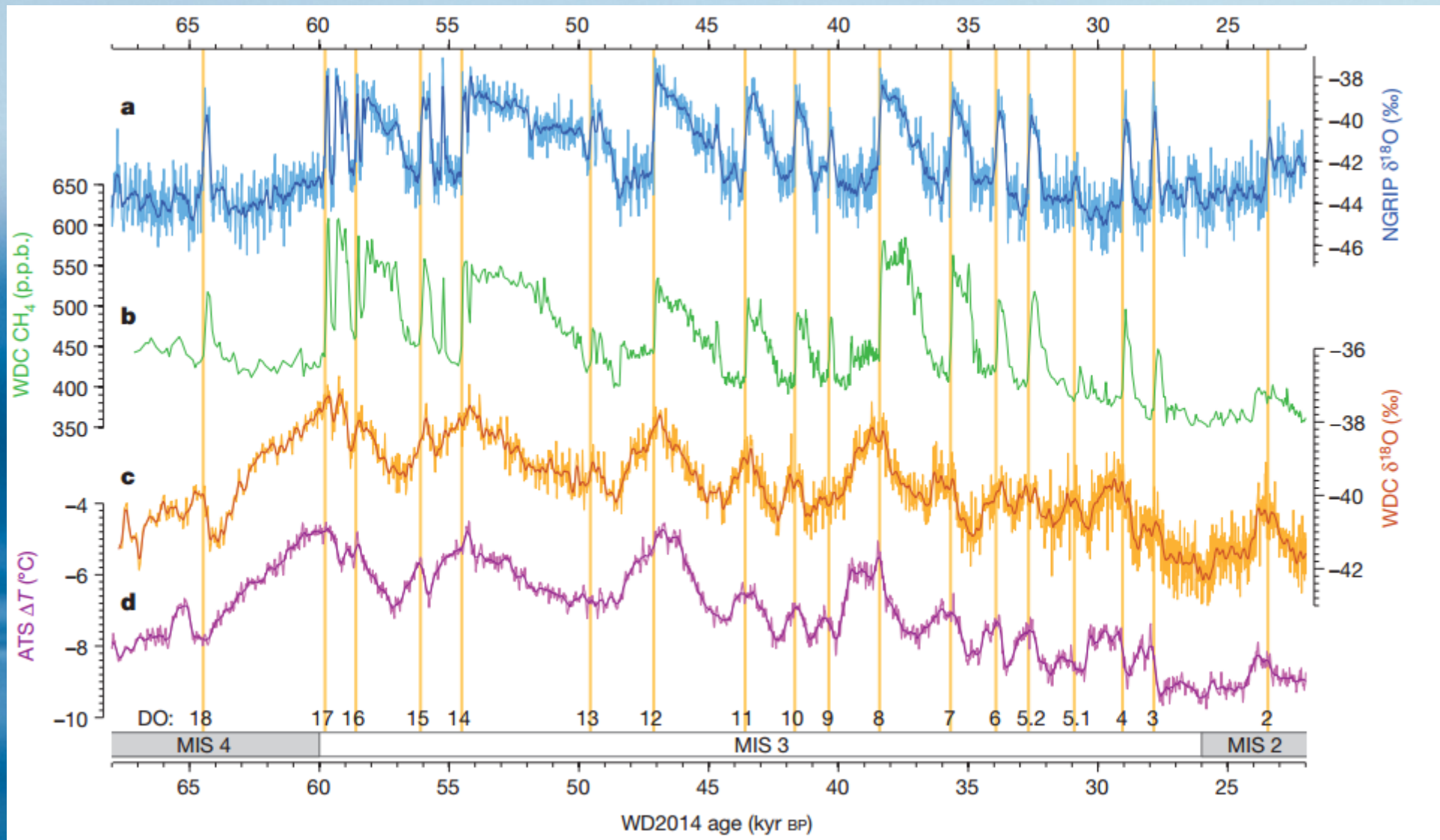
# Poprzednie deglacjacje wyglądały podobnie



Dane izotopowe (zielone) ze stalagmitów z chińskich jaskiń dały już w miarę kompletny i dobrze wydатовany obraz ostatnich czterech deglacjacji uzupełniając zapis z osadów morskich i rdzeni lodowych.

*Cheng et al 2009 (Science)*

# Dokładnie datowanie zdarzeń wokół obu biegunów

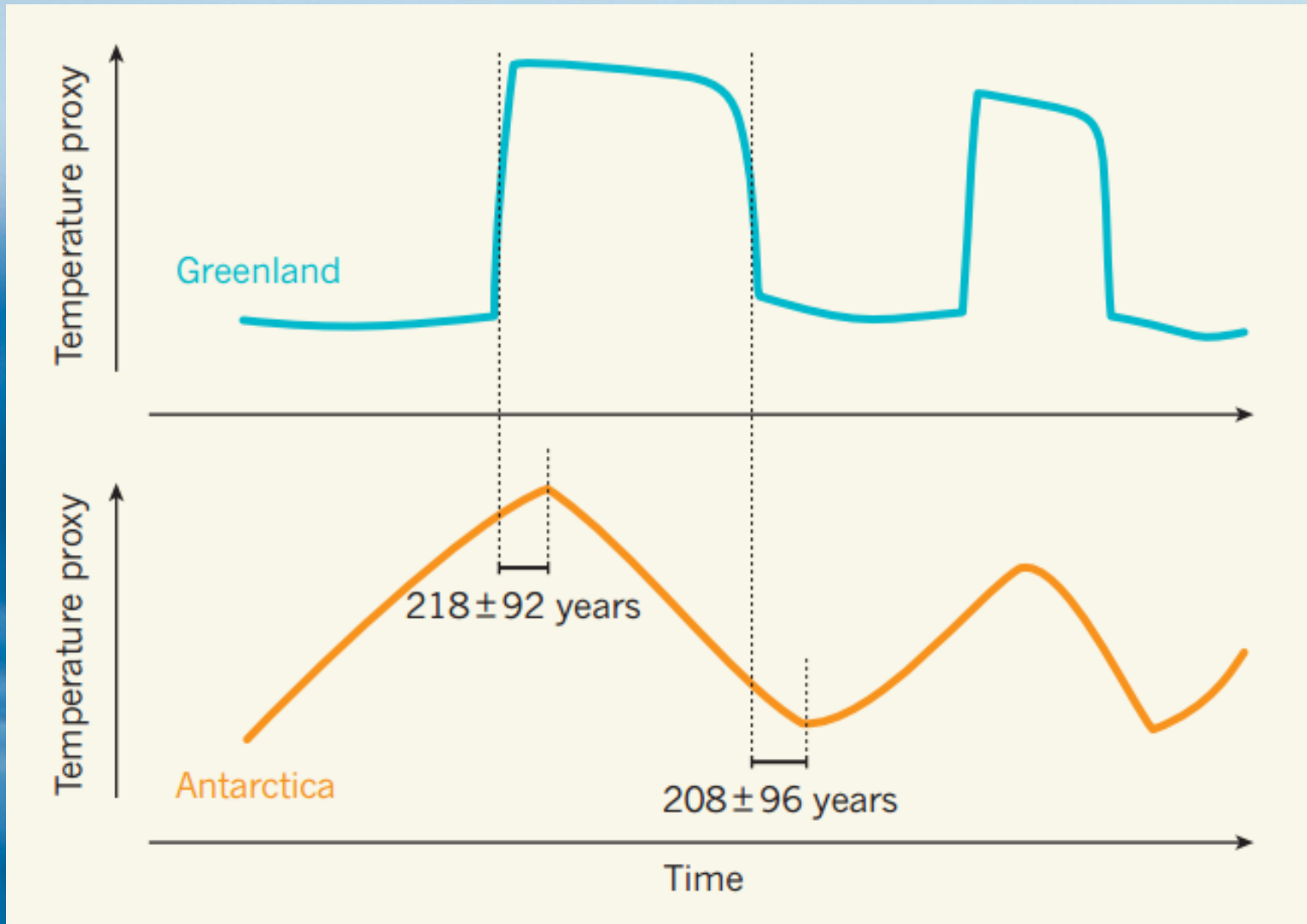


Gwałtowne ocieplenia Grenlandii wyprzedzały początek oziębienia Antarktydy o  $218 \pm 92$  ( $2\sigma$ ) lata, a oziębienia Grenlandii wyprzedzały początek ocieplenia Antarktydy o  $208 \pm 96$  lat.

*WAIS Divide Project Members 2015 (Nature)*

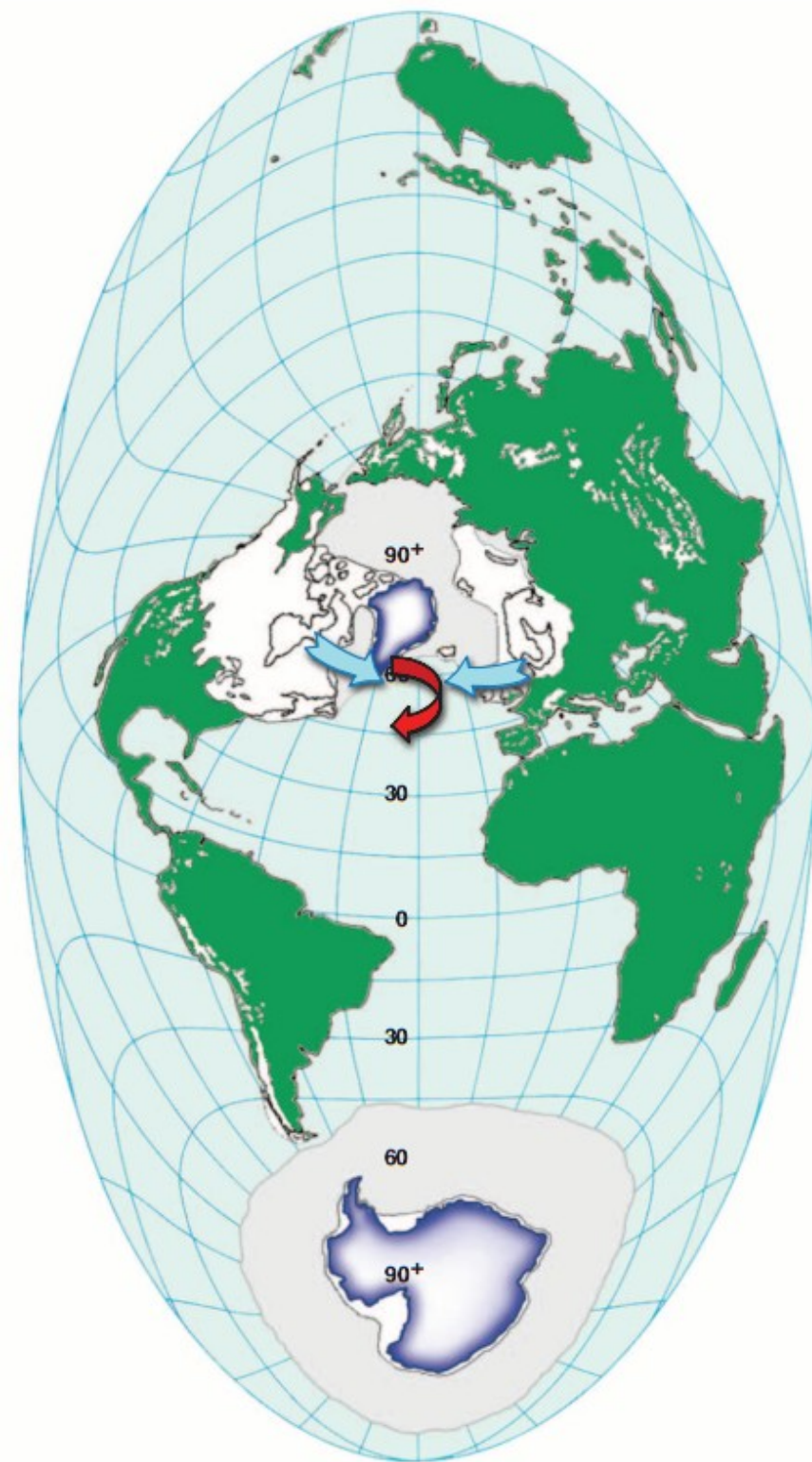


# Prostszy obraz tego samego



Gwałtowne ocieplenia Grenlandii wyprzedzały początek oziębienia Antarktydy o  $218 \pm 92$  ( $2\sigma$ ) lata, a oziębienia Grenlandii wyprzedzały początek ocieplenia Antarktydy o  $208 \pm 96$  lat.

# Przebieg deglacjacji wg. najnowszej wiedzy



Very large and isostatically depressed NH ice sheets with marine-based components

Rising NH summer insolation leads to ice-sheet melting and instabilities that deliver water and ice to the North Atlantic

Reduced AMOC and spread of winter sea ice produce particularly long NH stadials with severe winters

Asian monsoon weakens, ITCZ and westerlies of both hemispheres shift southwards

Southward shift of SH westerlies and oceanic bipolar seesaw warm Antarctica and raise atmospheric  $\text{CO}_2$

Prolonged effects of NH stadials raise atmospheric  $\text{CO}_2$  above threshold necessary to sustain interglacial conditions

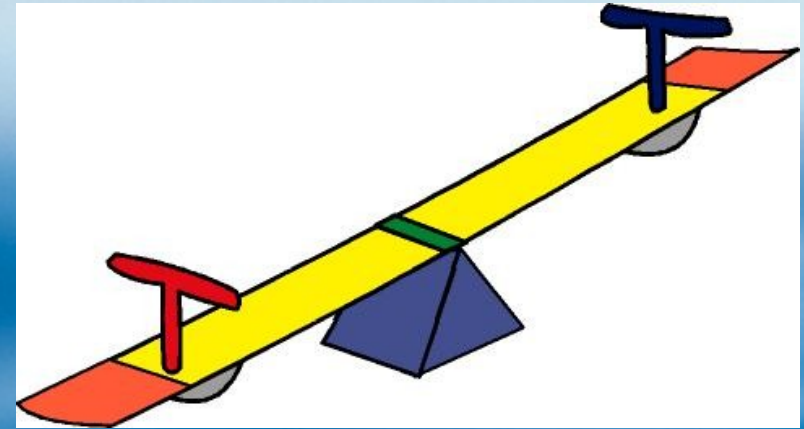
Wszystkie powyższe etapy wydają się niezbędne dla udanej deglacjacji.

*Denton et al 2010 (Science)*



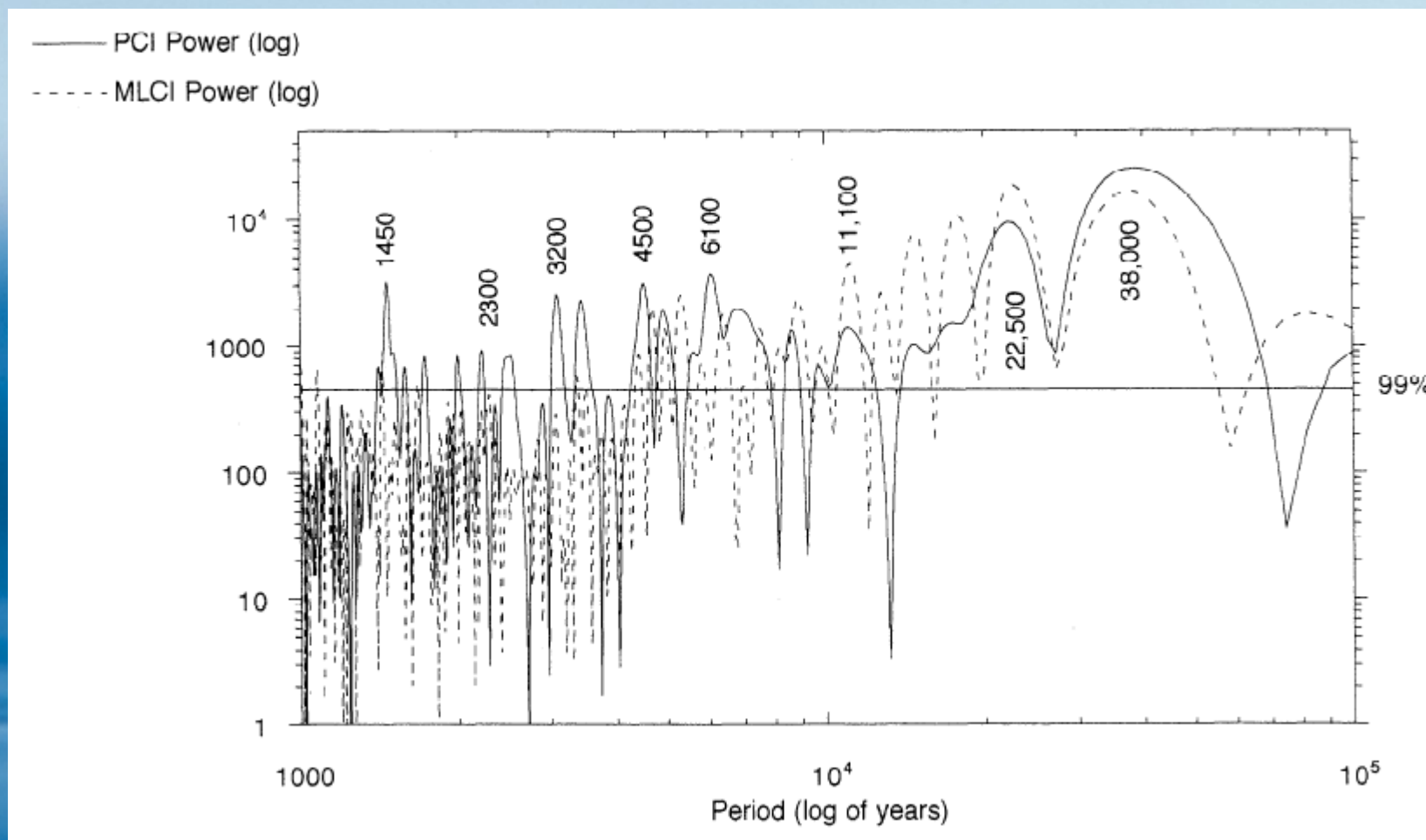
## Podsumowanie 2/3

- Młodszy Dryas był jedynie ostatnim (i przez to najlepiej poznanym) z wielu cykli Dansgaard–Oeschgera (D/O) gwałtownych zmian klimatu w okresie lodowcowym.
- Szereg coraz zimniejszych cykli D/O (cykl Bonda) kończyło się wyjątkowo zimnym okresem pokrycia Północnego Atlantyku lodem morskim i górami lodowymi (zdarzeniem Heinricha).
- Cykle zimno-ciepło spowodowane były zmianami THC (cyrkulacji termohalinowej) – znacznie mniej stabilnej w okresie lodowcowym, występując naprzemiennie na obu półkulach.
- Zmiany cyrkulacji termohalinowej powodowały zaburzenia cyklu węgla, w oceanie zmieniając atmosferyczne koncentracje  $\text{CO}_2$  i  $^{14}\text{C}$ .
- Przyczyną deglacjacji wydaje się skomplikowany splot wydarzeń (poprzedni slajd) na obu półkulach. Zarówno zmiany THC jak i wywołane nimi zmiany atmosferycznego  $\text{CO}_2$  są jednak kluczowe.



*Huśtawka: model cyrkulacji termohalinowej.*

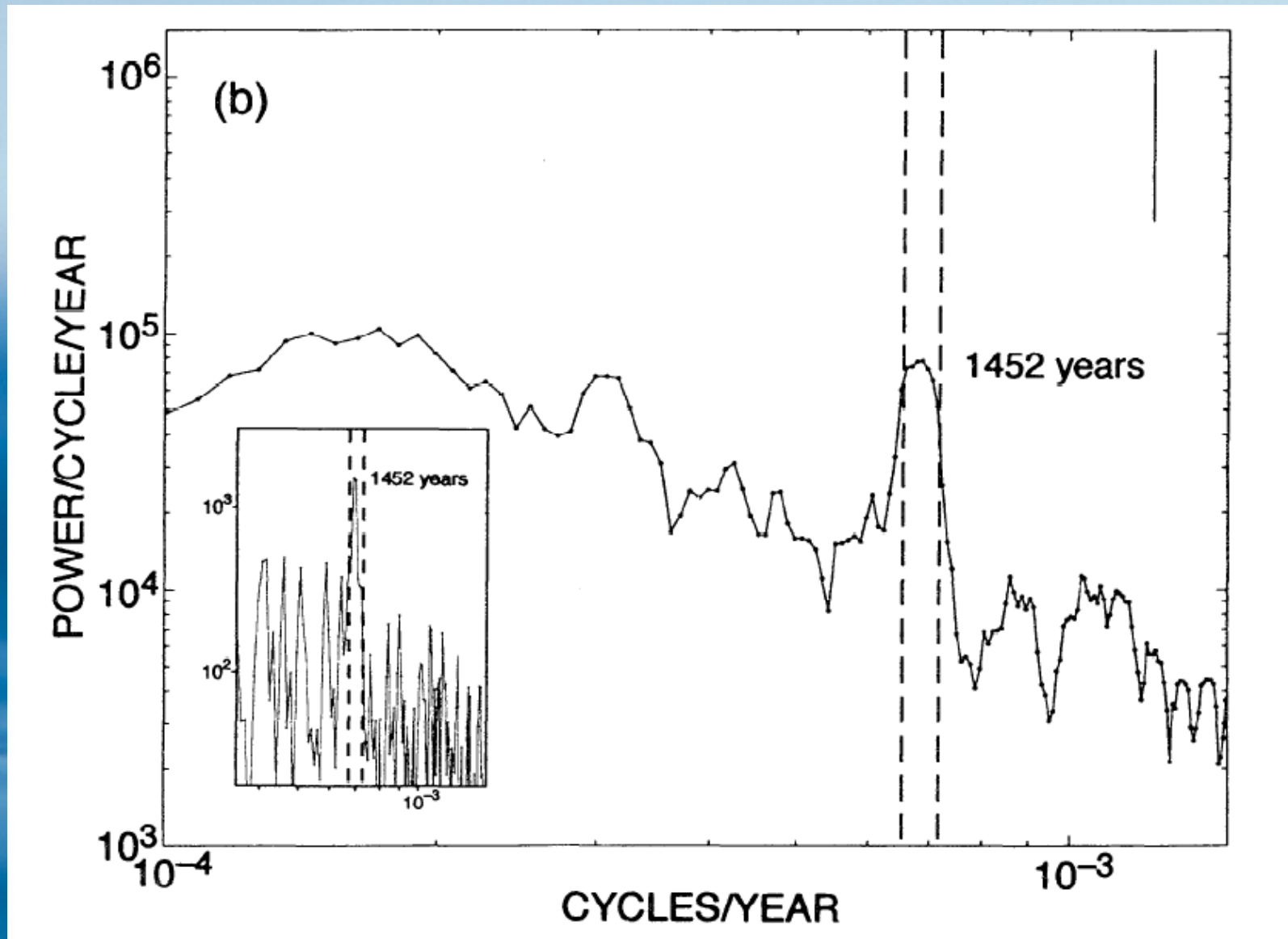
# Cykl 1470 lat z rdzeni lodowych



Rysunek przedstawia moc spektralną rdzenia lodowego GISP2 z przeciągu 110ka. Cykl 1470 lat (zaokrąglone na rysunku do 1450) dominuje szczególnie w okresie 80ka-20ka.



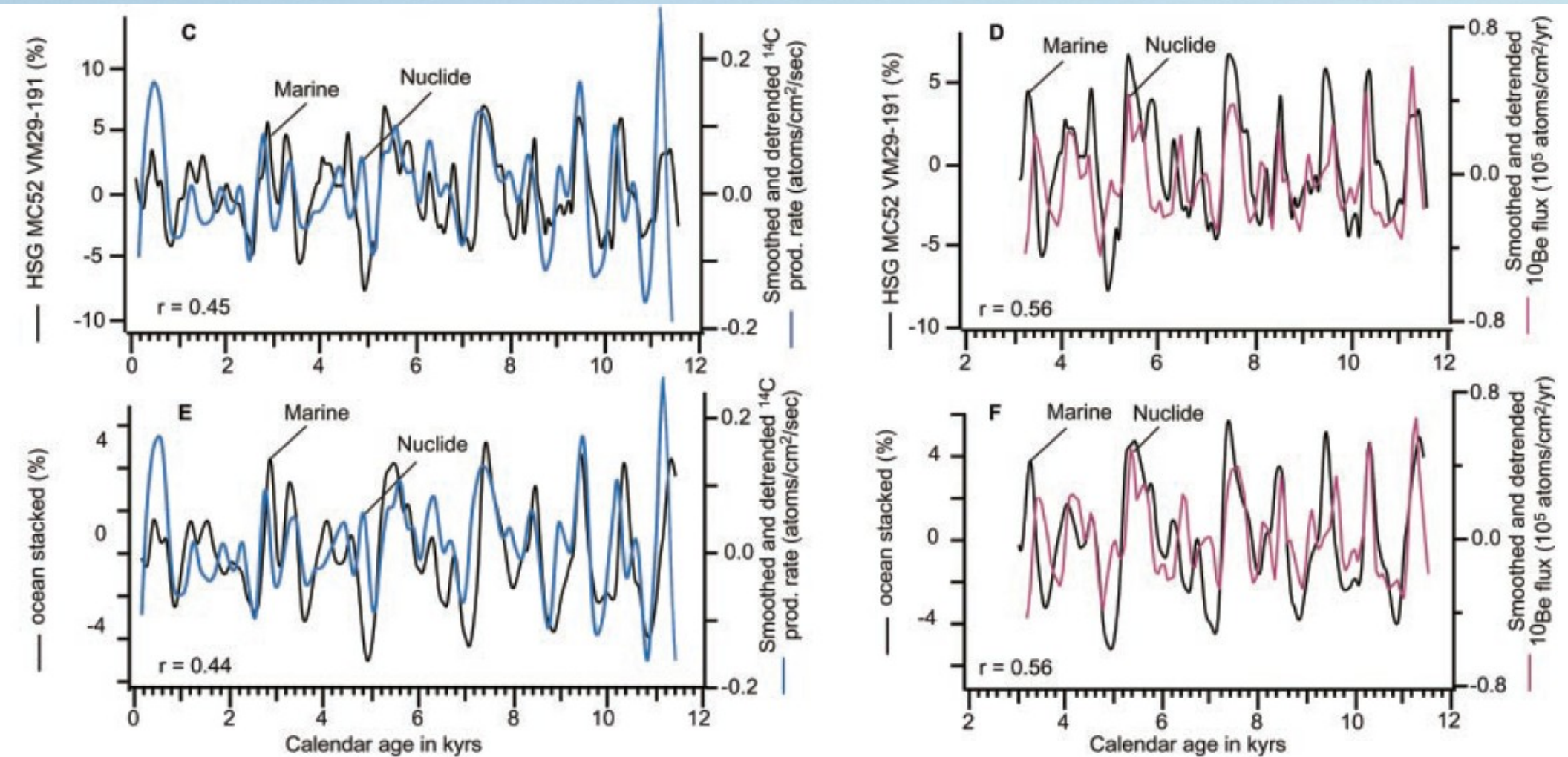
# Głos sceptyka: czy okres 1452 lat nie jest artefaktem?



Okres 1452 lata to czas „dudnienia” pomiędzy prawdziwą długością roku a „rokiem” 365 dniowym. Czy paleoklimatolodzy błędnie używają niewłaściwej długości roku w obliczeniach? Na szczęście wydaje się, że to tylko przypadek.

*Wunsch 2000 (Paleoceanography)*

# Korelacja wskaźników paleo-zalodzenia Północnego Atlantyku oraz produkcji radioizotopów $^{14}\text{C}$ i $^{10}\text{Be}$

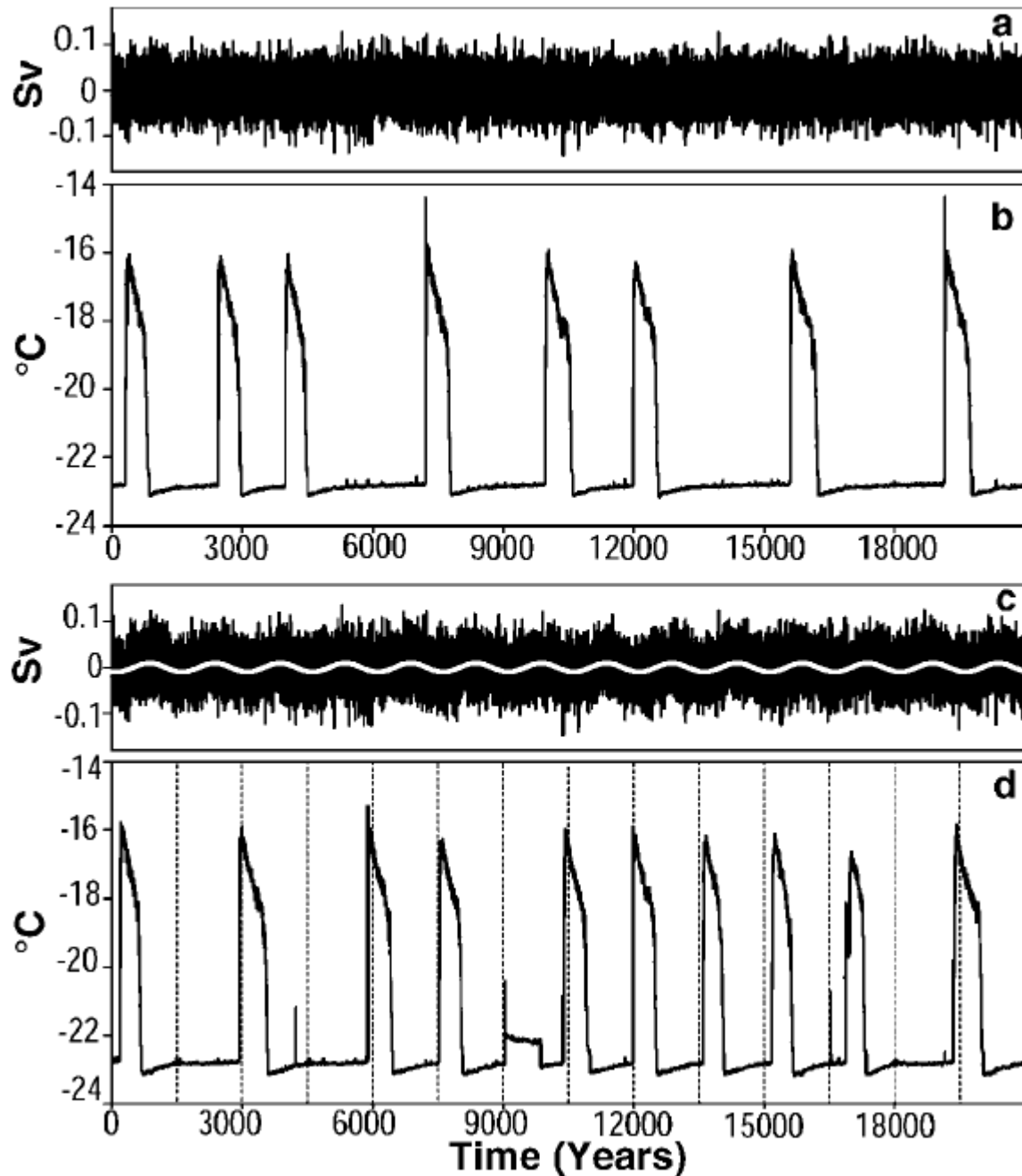


Okolo 25% zmienności zalodzenia Pn. Atlantyku w holocen (w skali dziesięcioleci i więcej) da się wytłumaczyć zmiennością słoneczną. Produkcja izotopów  $^{14}\text{C}$  (dane ze słojów drzew) i  $^{10}\text{Be}$  (dane z rdzeni lodowych) w stratosferze związana jest z aktywnością słoneczną.

*Bond et al. 2001 (Science)*

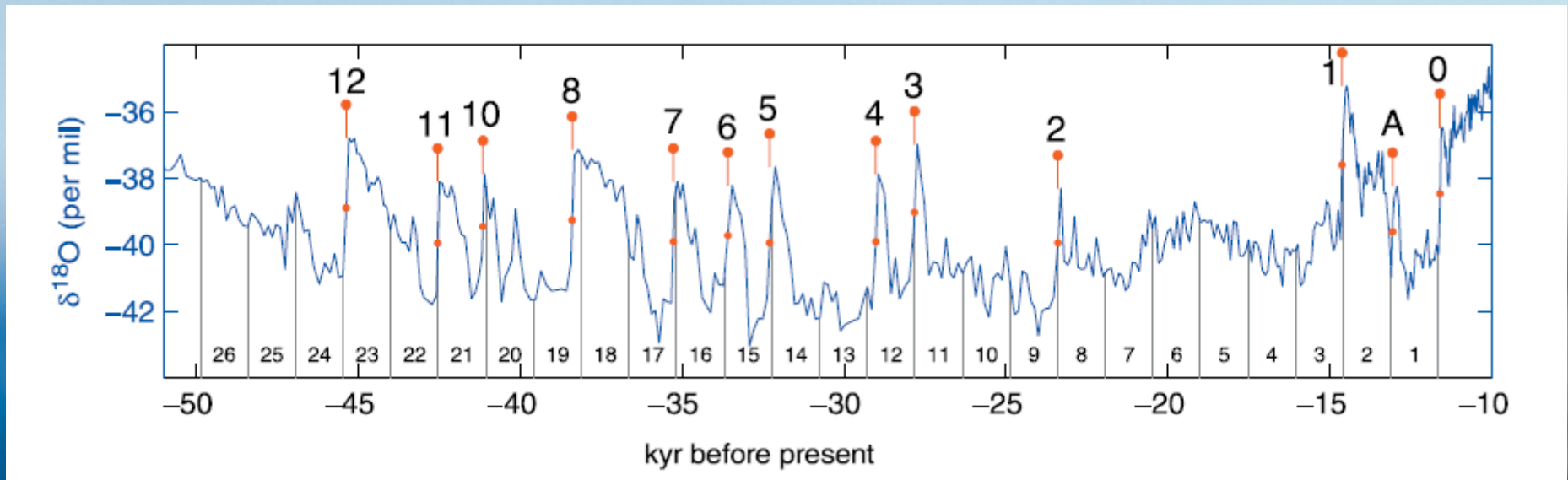


# Czy ocean ma naturalny cykl o długości 1-2 tysięcy lat?

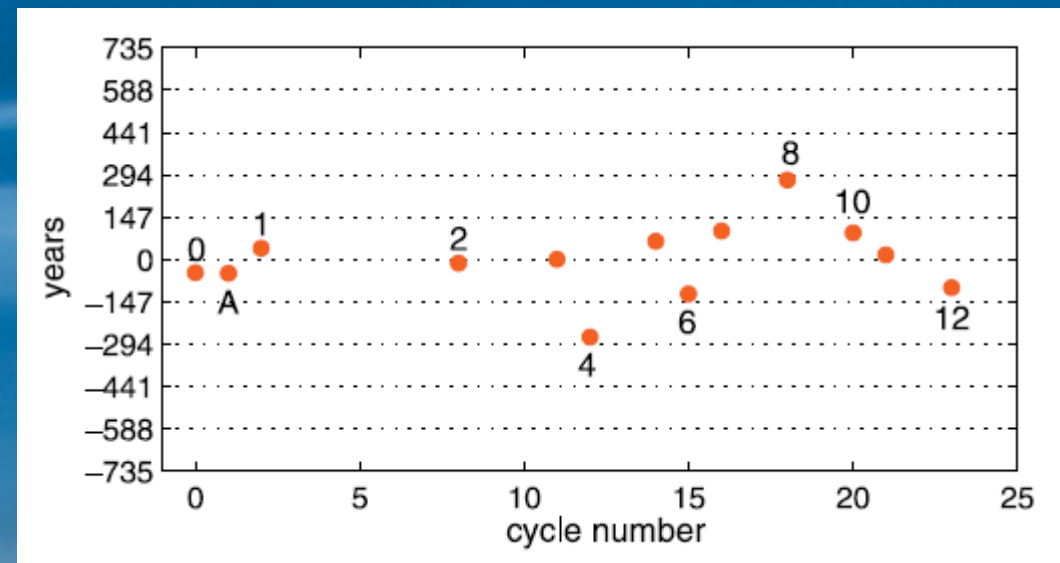


Jeśli cyrkulacja termohalinowa jest systemem o naturalnym cyklu o długości rzędu 1000 lat (panel górny) to nawet niewielki impuls słodkiej wody w Pn. Atlantyku o stałym okresie podobnej długości może doprowadzić THC do rezonansu stochastycznego (panel dolny).

# Dowód na faktyczne istnienie cyklu 1470 lat



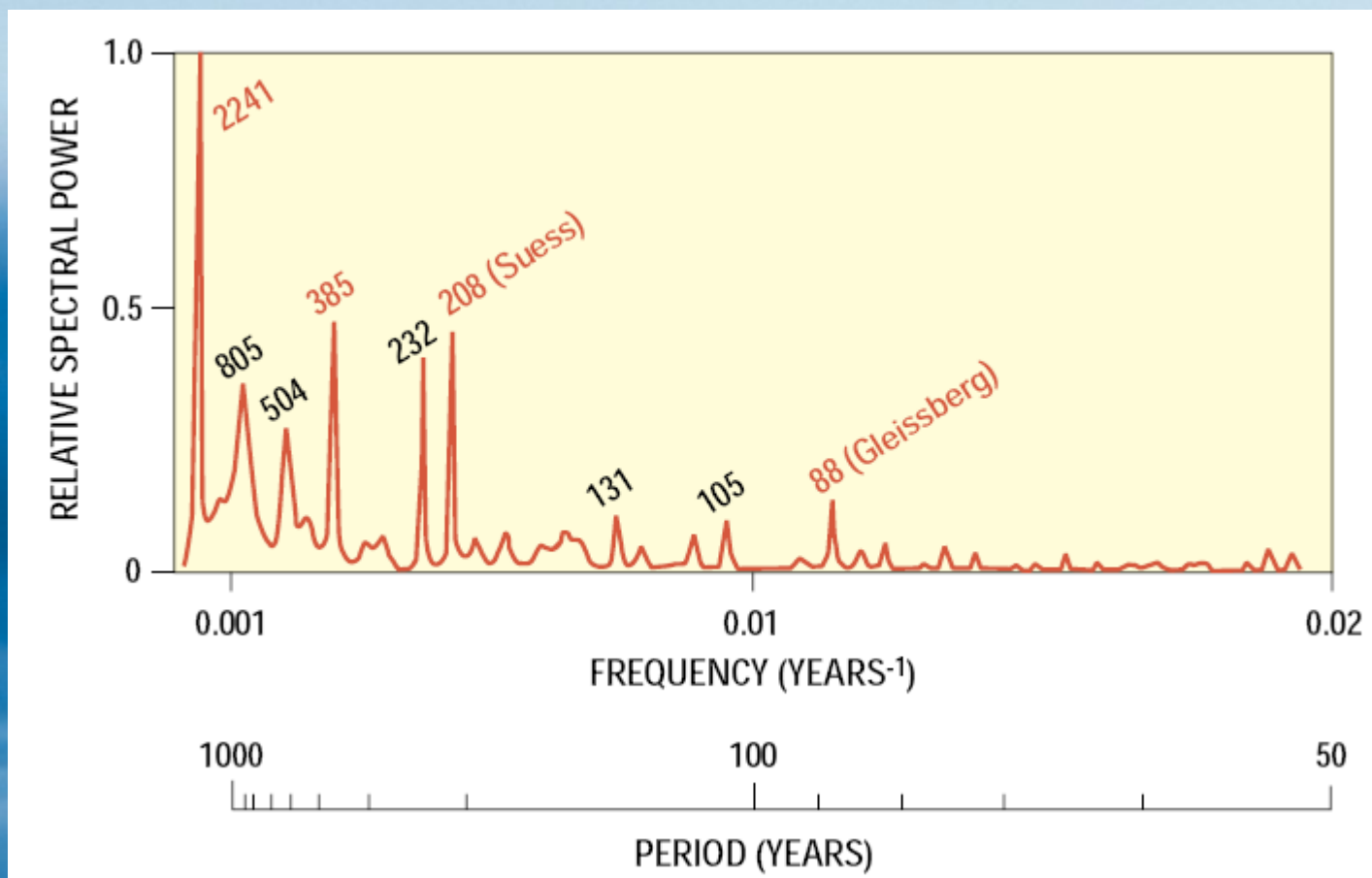
Zdarzenia Dansgaarda-Oeschgera („D/O”) zdefiniowane jako środki okresów gwałtownego ocieplenia występują co wielokrotność 1470 lat z niezwykłą precyzją. Odchylenia od cyklu dla poszczególnych zdarzeń wynosi 12% jego długości cyklu (przy ufności oceny 95% .



*Rahmstorf 2003 (Geophysical Research Letters)*

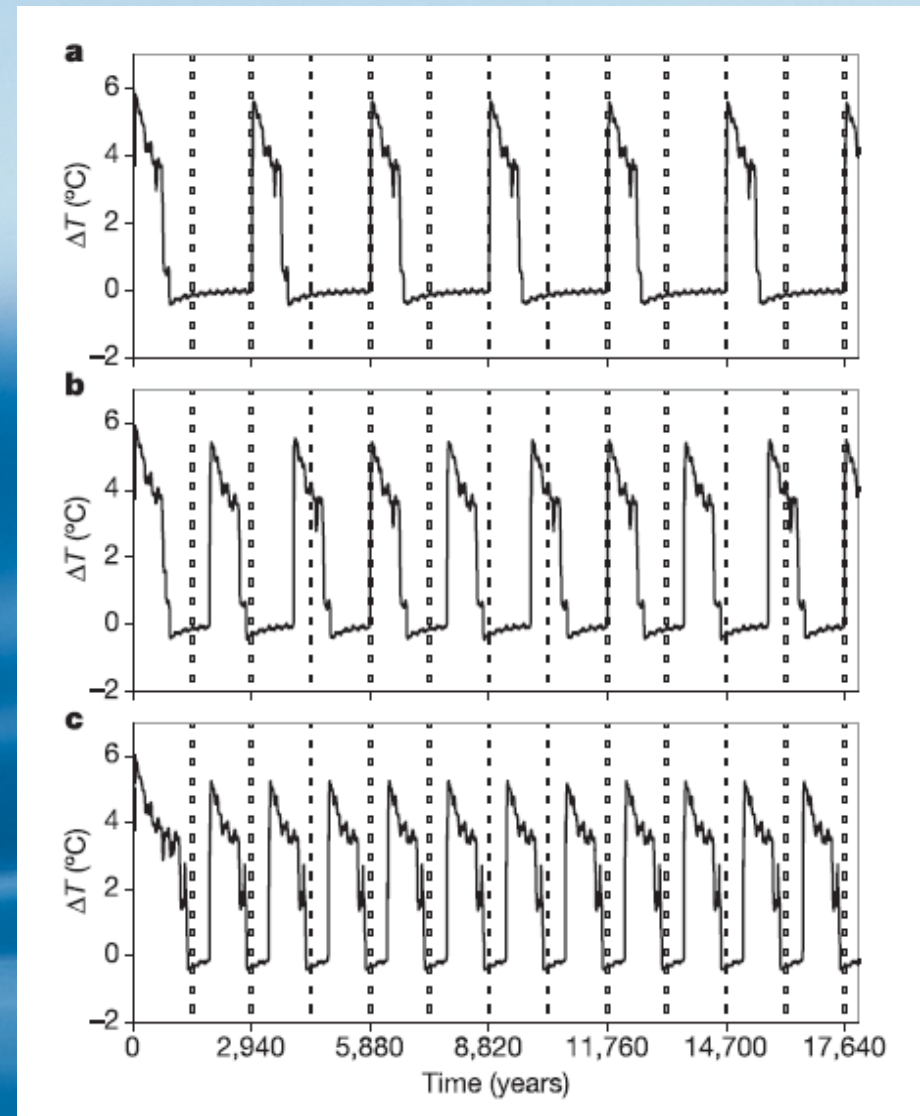
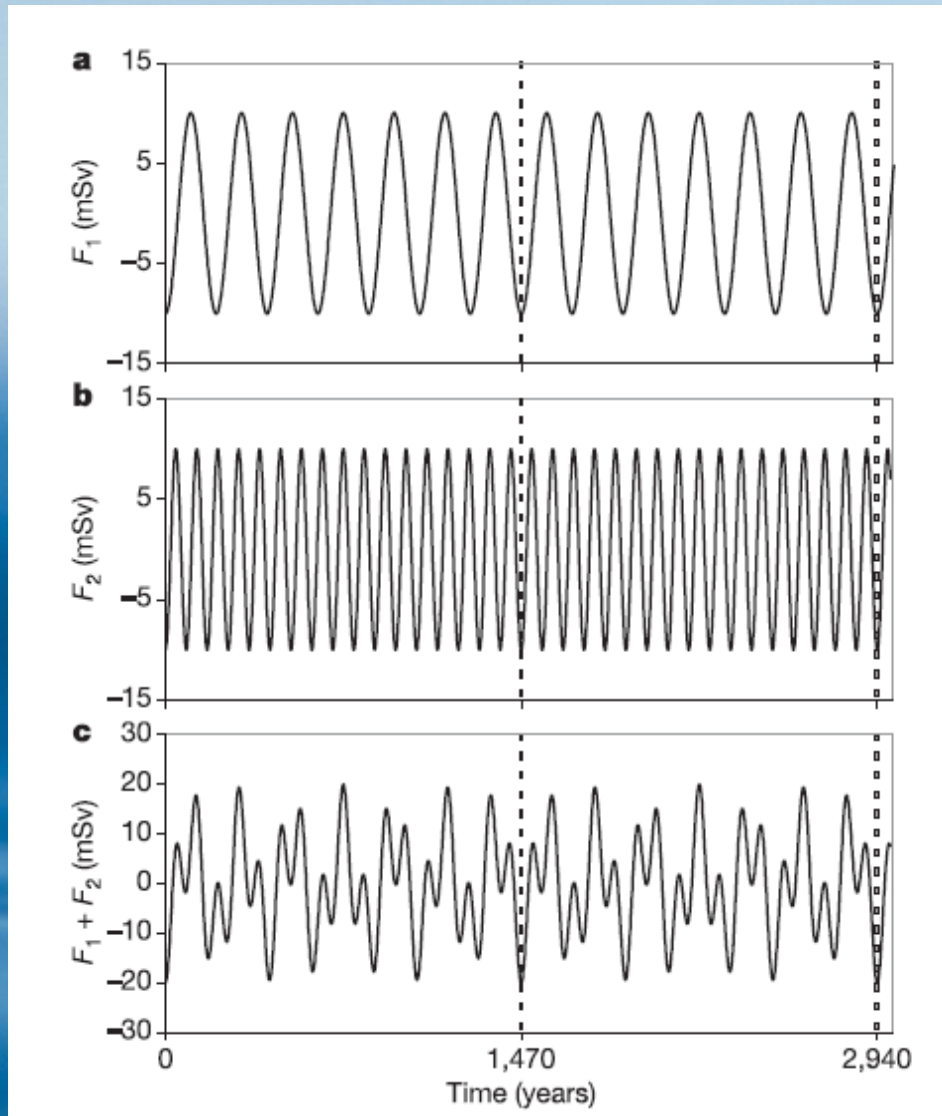


Jest problem: aktywność Słońca nie ma cyklu o okresie około 1500 lat.



Aktywność Słońca mierzona koncentracją  $^{14}\text{C}$  w słojach drzew wykazuje wiele cykli ale żadnego o właściwej długości. Szczególnie cykle o długości 88 i 208 lat są na tyle widoczne w wielu zapisach paleoklimatycznych, że zyskały własne nazwy.

# A jednak jest: 1470 lat to “dudnienie” cykli 88 i 208 lat

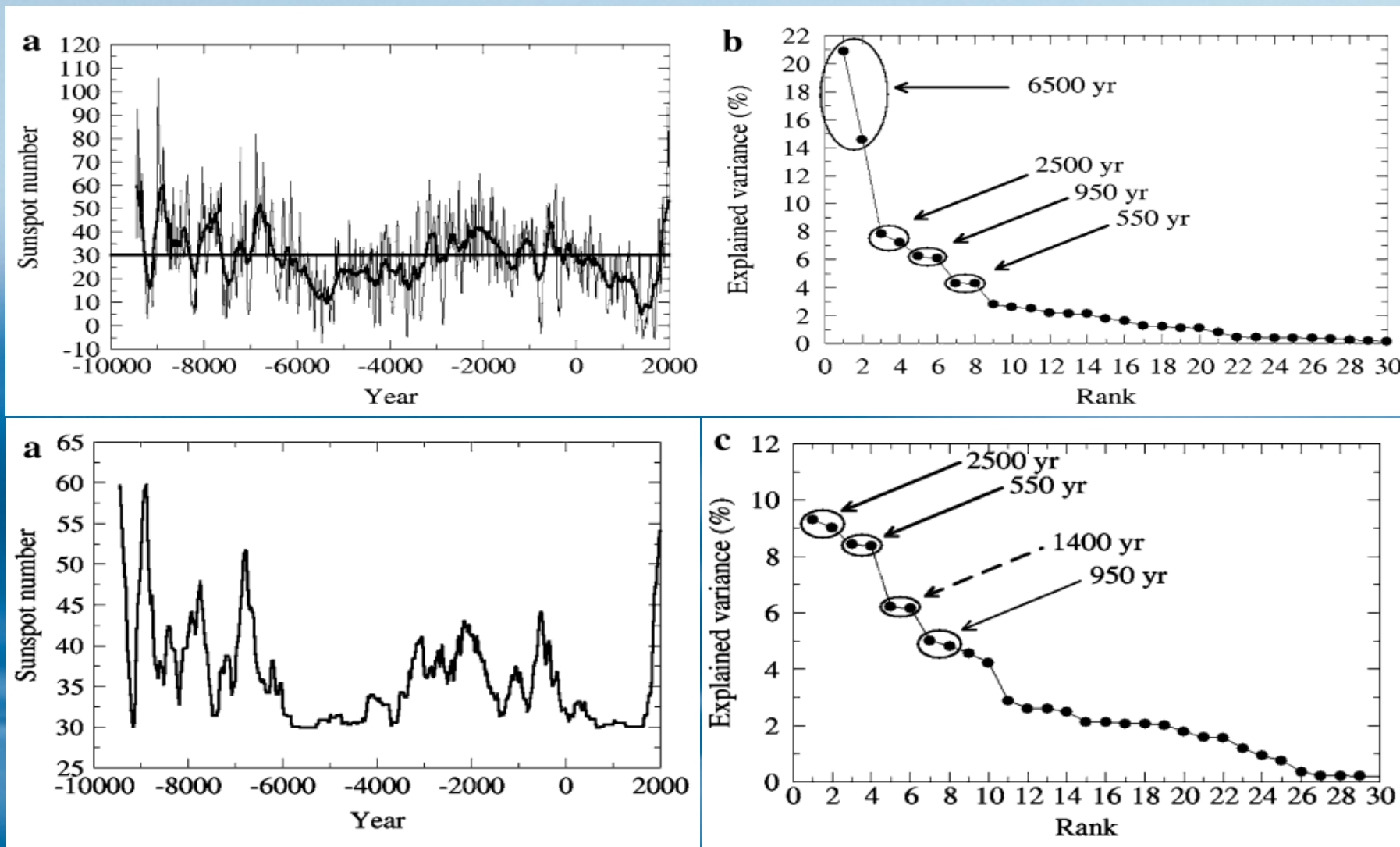


Nakładanie się cykli 88 i 208 lat wywołuje szczególnie duże maksima co 1470 lat (po lewej). Wyniki modelowania (po prawej) wskazują, że przy jednakowej i stałej amplitudzie obu cykli (10 mSv) od wartości stałej (*offsetu*) dopływu słodkiej wody (9, 14 i 19 mSv) zależy długość wywołanego „cyklu D/O”.

*Braun et al. 2005 (Nature)*



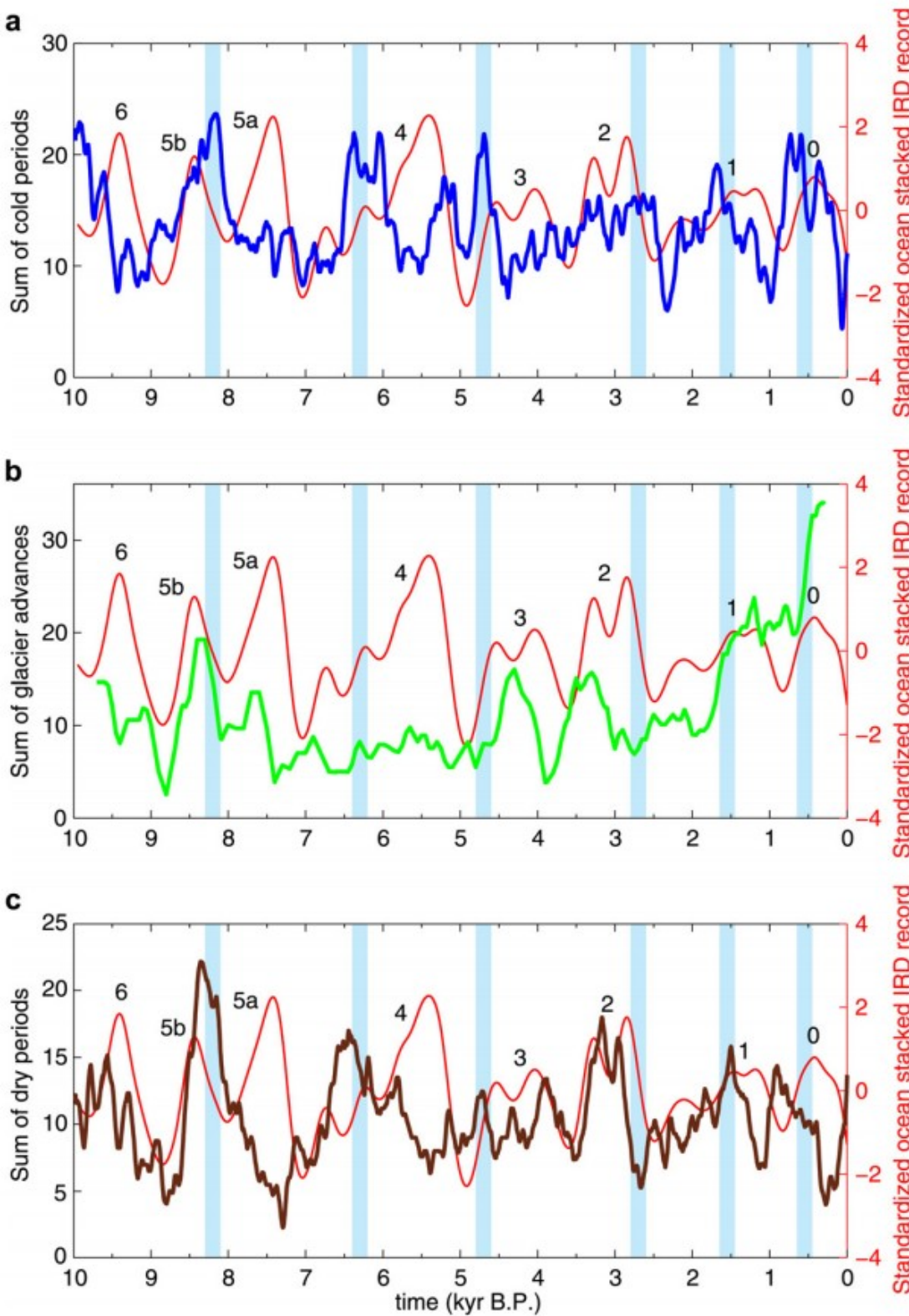
## A gdyby tak pomajstrować liczbami...



W widmie zrekonstruowanej aktywności słońca (na górze) nie ma cyklu ok. 1500 lat. Gdyby tak jednak założyć (na dole), że słońce poniżej 30 plam słonecznych nie zmienia jasności (lub efekt klimatyczny jest identyczny), cykl ok. 1400 lat wyskakuje jak z kapelusza. Problem jedynie w tym, że jest to kompletnie нефизyczne.

*Dima & Lohmann 2009 (Climate Dynamics)*

A jednak jest: 1470 lat to  
“dudnienie” cykli 88 i 208 lat



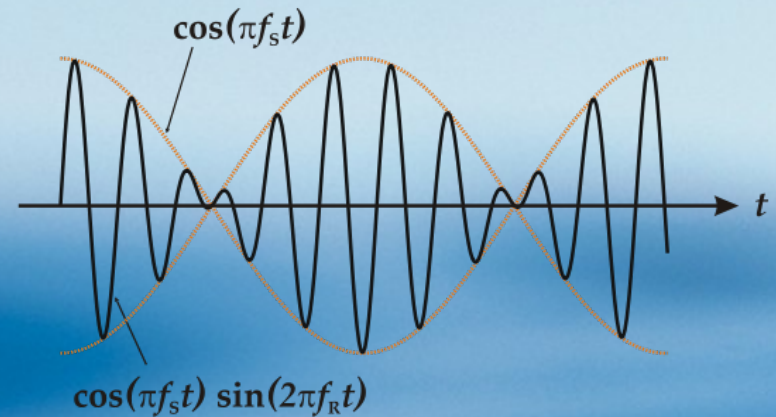
Dokładne przebadanie historii klimatycznych zdarzeń holocenu pokazuje, że istnieje zmienność przypominająca cykle Bonda ale nie na tyle regularna aby przypisywać ją regularnemu cyklowi. Od góry: a) częstotliwość zdarzeń chłodnych, b) postępów lodowców i c) zdarzeń suchych.

*Wanner et al. 2011 (Quaternary Sci. Rev.)*



# Podsumowanie 3/3

- Zdarzenia D/O występują z dużą regularnością w cyklu o długości ok. 1470 lat.
- Zmiany izotopów  $^{14}\text{C}$  i  $^{10}\text{Be}$ , których produkcja w atmosferze związana jest z aktywnością słoneczną występujące w identycznym cyklu świadczą, że przyczyną cyklu jest intensywność promieniowania słonecznego.
- Wśród znanych cykli związanych ze słońcem nie ma okresu ok. 1470 lat. Dwa inne cykle (88 i 208 lat) mogą jednak “zdudniać” się w takim okresie.
- Pozostaje jednak pytanie jak niewielkie zmiany oświetlenia, synchroniczne na obu półkulach, mogą powodować naprzemienne zmiany temperatury na północy i południu.
- Najbardziej prawdopodobnym wyjaśnieniem jest nadal niestabilność THC na północnym Atlantyku jako “wzmacniacz” cyklu 1470 lat.



*Dudnienie dwóch drgań o zbliżonych częstotliwościach*



Za tydzień (21.11.2015 r.):

Holocen: klimat, ocean a cywilizacja, (*stała słoneczna i wulkanizm*)

Dziękuję za uwagę



Hendrick Avercamp, "Zimowy krajobraz z łyżwiarzami", 1608