

# Ocean a klimat:

## wczoraj, dziś i jutro

Wykład 2:

Epoka lodowa w której żyjemy (*zmienność w skali astronomicznej*)

Jacek Piskozub

Studium Doktoranckie IOPAN, semestr letni 2010/11 r.



# Jacek Piskozub “Klimat a ocean: wczoraj, dziś i jutro”, kurs wykładów dla doktorantów 11.10.2010-???.02.2011

- ✓ Maszyna klimatyczna Ziemia (*zmienność w skali geologicznej*)
- ✓ **Epoka lodowa w której żyjemy (*zmienność w skali astronomicznej*)**
- ✓ Gwałtowne zmiany klimatu (*deglacjacja, zmienność “suborbitalna”*)
- ✓ Holocen: klimat, ocean a cywilizacja, (*stała słoneczna i wulkanizm*)
- ✓ Północny Atlantyk – kuźnia klimatu (*cyrkulacja termohalinowa, NAO*)
- ✓ 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



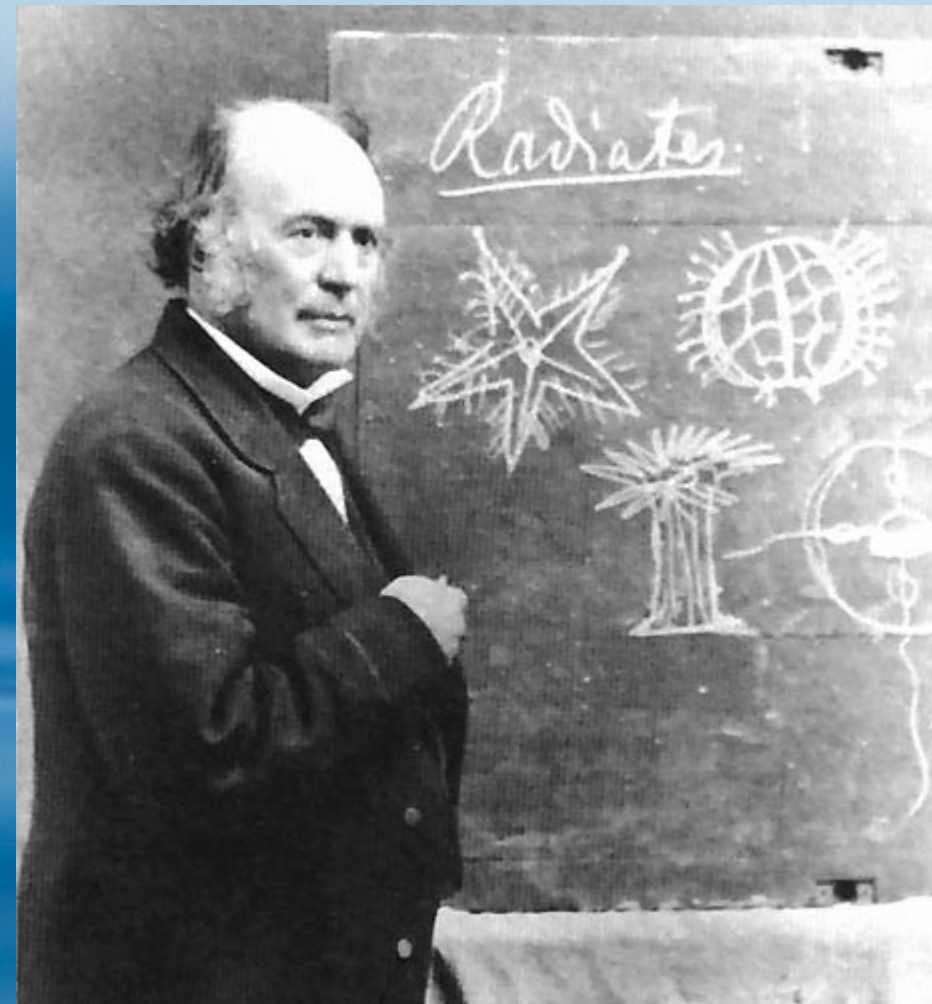
# Skąd się wzięły głazy narzutowe, moreny, jeziora rynnowe?



Yosemites (Kalifornia),  
Sutton (Pn. Anglia),  
Kaszuby (Polska)



# Teoria Epoki Lodowej (1840)



Louis Agassiz, 1807-1873

- W początkach XIX wieku wierzono, że krajobraz Europy (i nie tylko) utworzony został podczas Potopu
- Jean de Charpentier i Ignatz Venetz na podstawie obserwacji dolin lodowcowych w Alpach dochodzą do wniosku, że lodowce alpejskie były bardziej rozległe w przeszłości.
- Louis Agassiz “nawraca się” w 1836 r. Po wizycie w Alpach i w 1840 roku ogłasza teorię Epoki Lodowej, podczas której większość kontynentów była pokryta lodem.
- Przyjęcie tej teorii przez świat naukowy trwało około 30 lat.

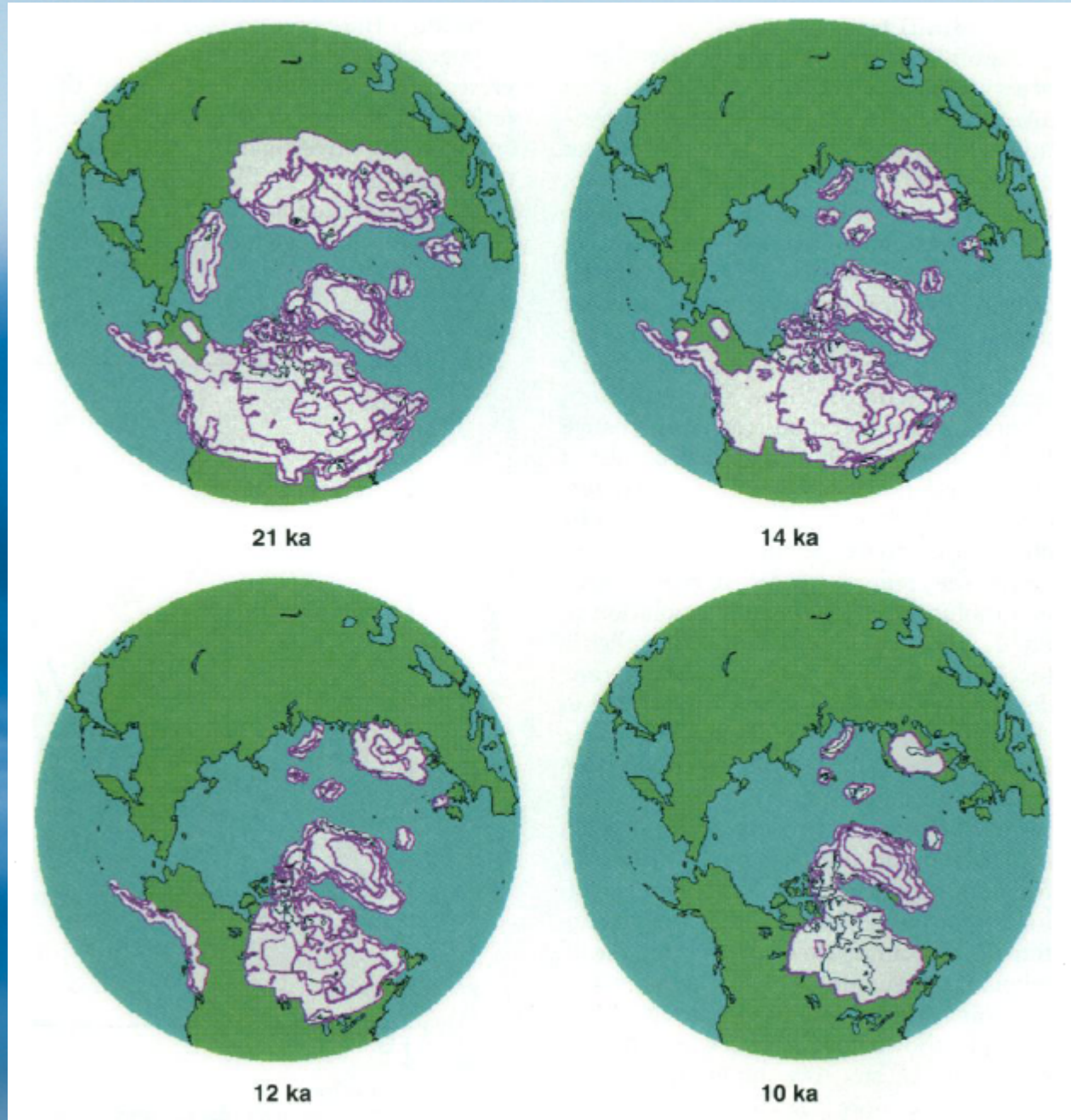


# Krajobraz Islandii i...Kaszub





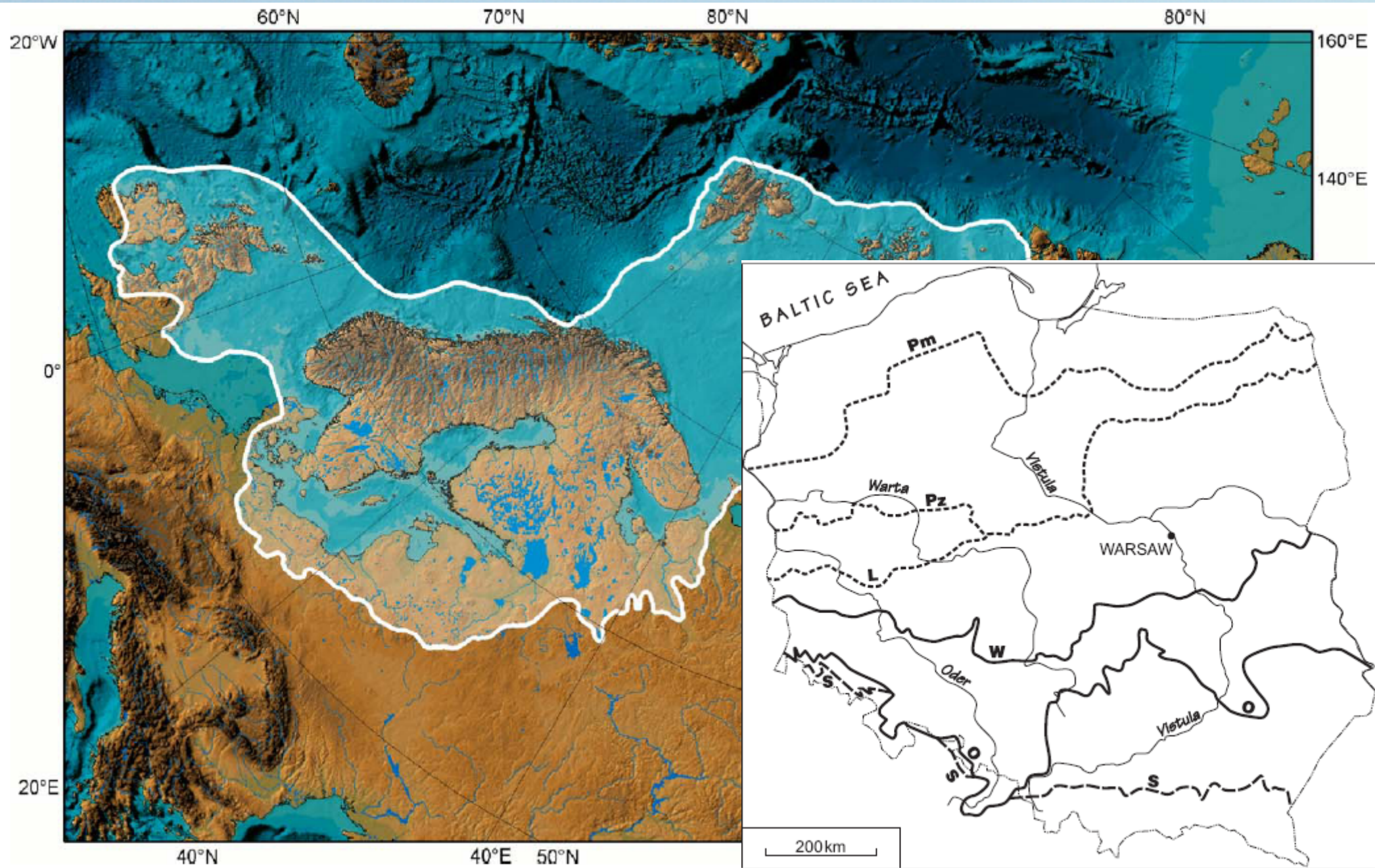
# Ostatnie zlodowacenie na półkuli północnej



*Peltier 1994 (Science)*

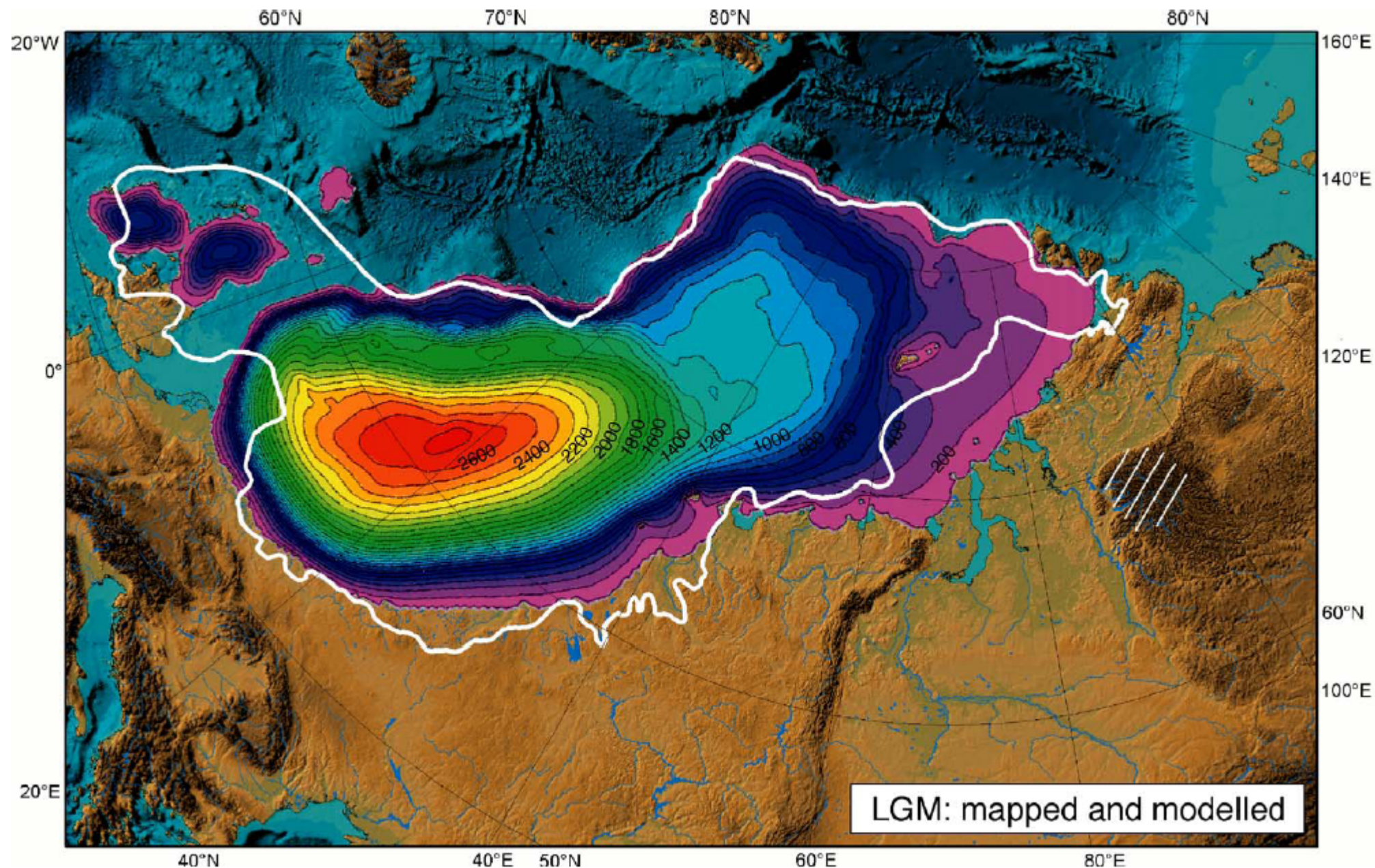


# Północna Europa 20 tys. lat temu





# Grubość pokrywy lodowej



Modelowana grubość pokrywy lodowej podczas ostatniego maksimum zlodowacenia  
*Svendsen et al. 2004 za Siegert et al. 1999*



# Ostatnie zlodowacenie w Polsce

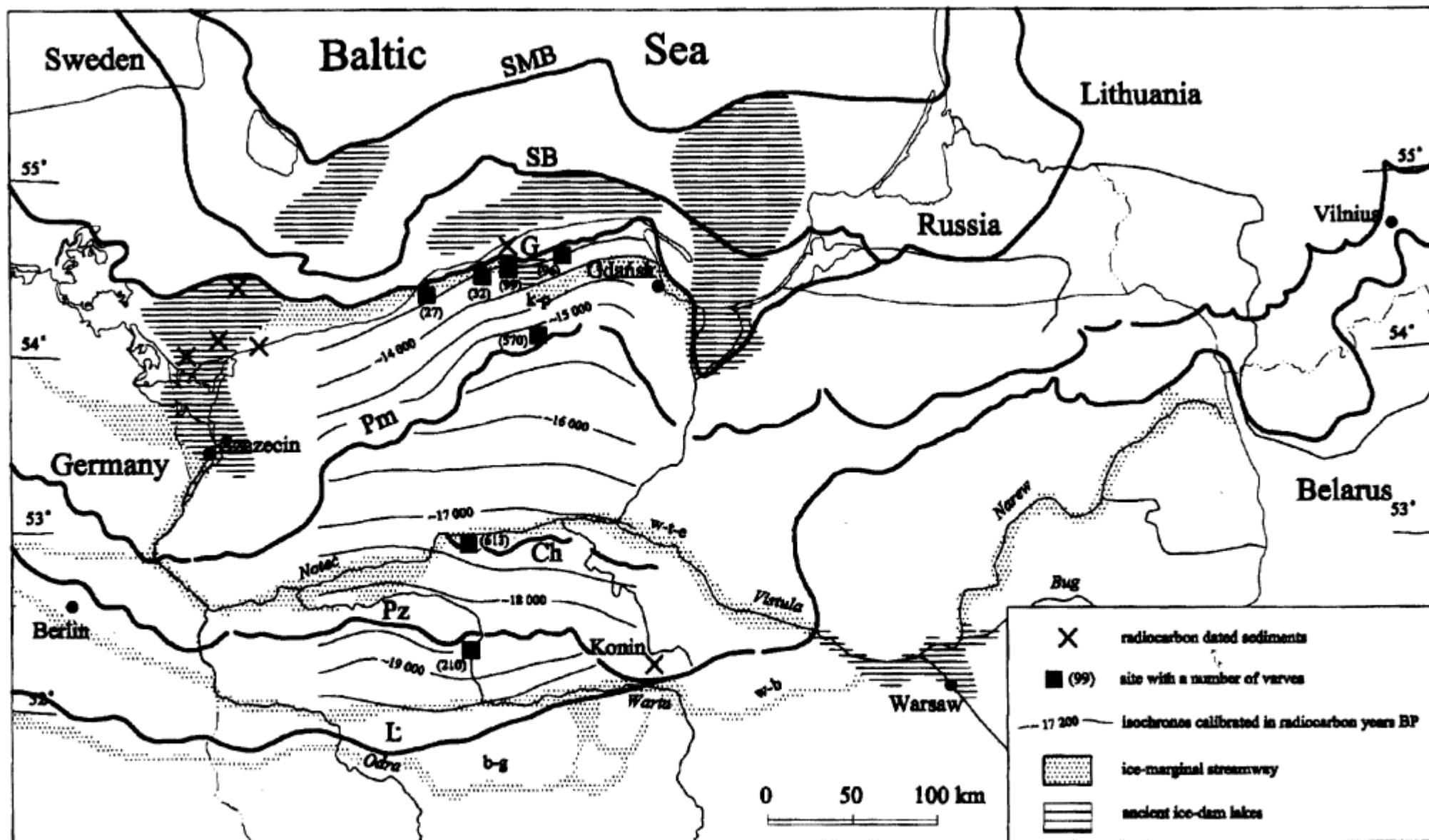
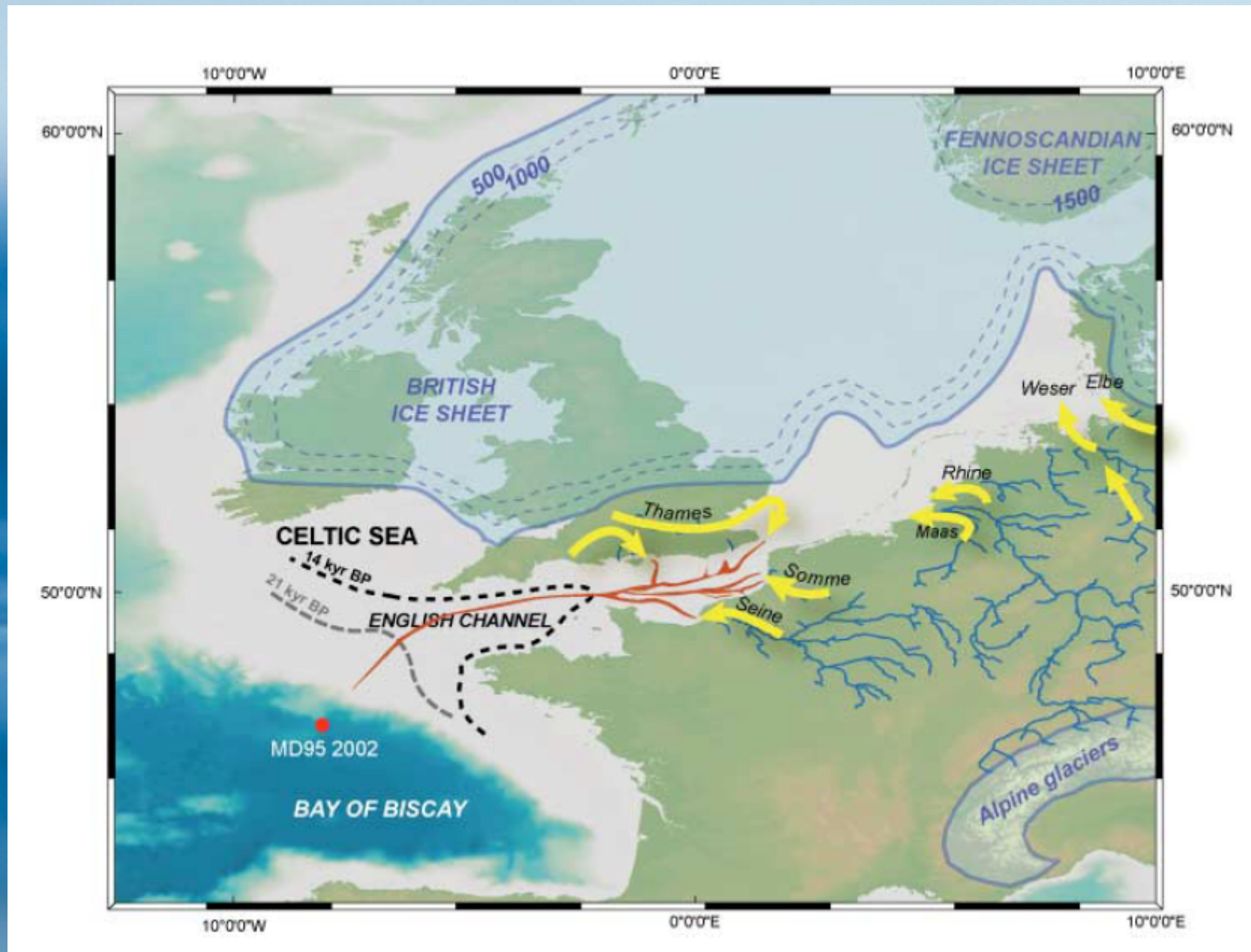


Fig. 1. Late Vistulian major glacial phases, ice-marginal spillways and proglacial lakes in Poland and neighbouring areas; compiled from different authors, deglaciation isochrones and sites with varve counting after Kozarski (1986). Ice sheet limits: L—Leszno Phase, Pz—Poznań Phase, Ch—Chojna Phase, Pm—Pomeranian Phase, G—Gardno Phase, SB—Ślupsk Bank Phase and SMB—Southern Middle Bank Phase; spillways: b-g—Baruth-Głogów, w-b—Warsaw-Berlin, w-t-e—Warsaw-Toruń-Eberswalde and k-p—Kashubian-Pomeranian.



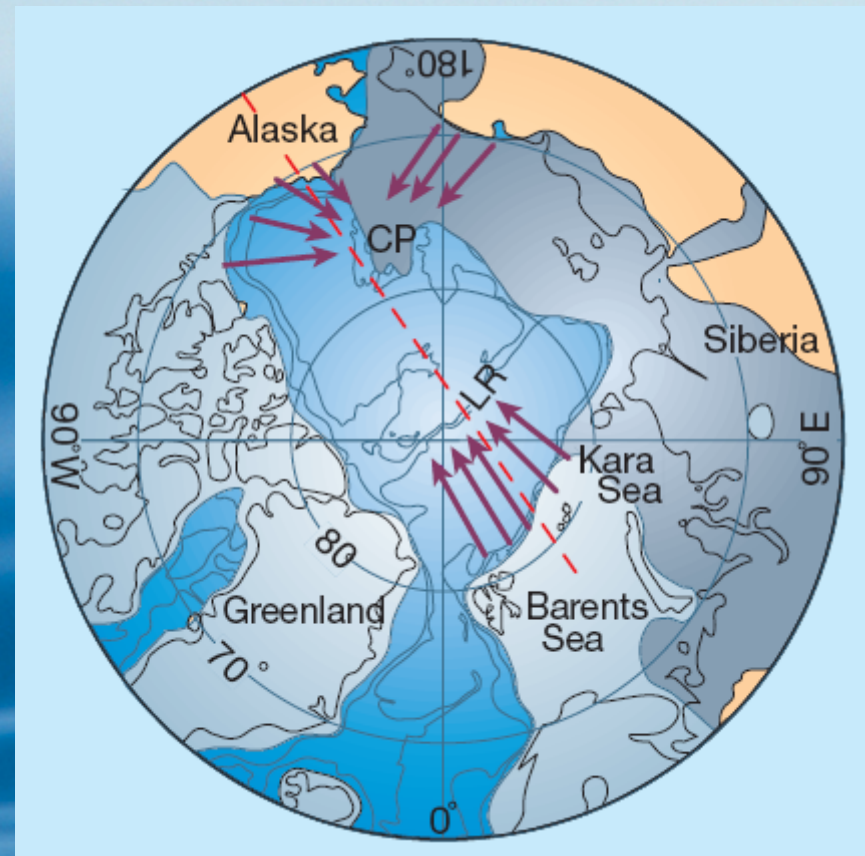
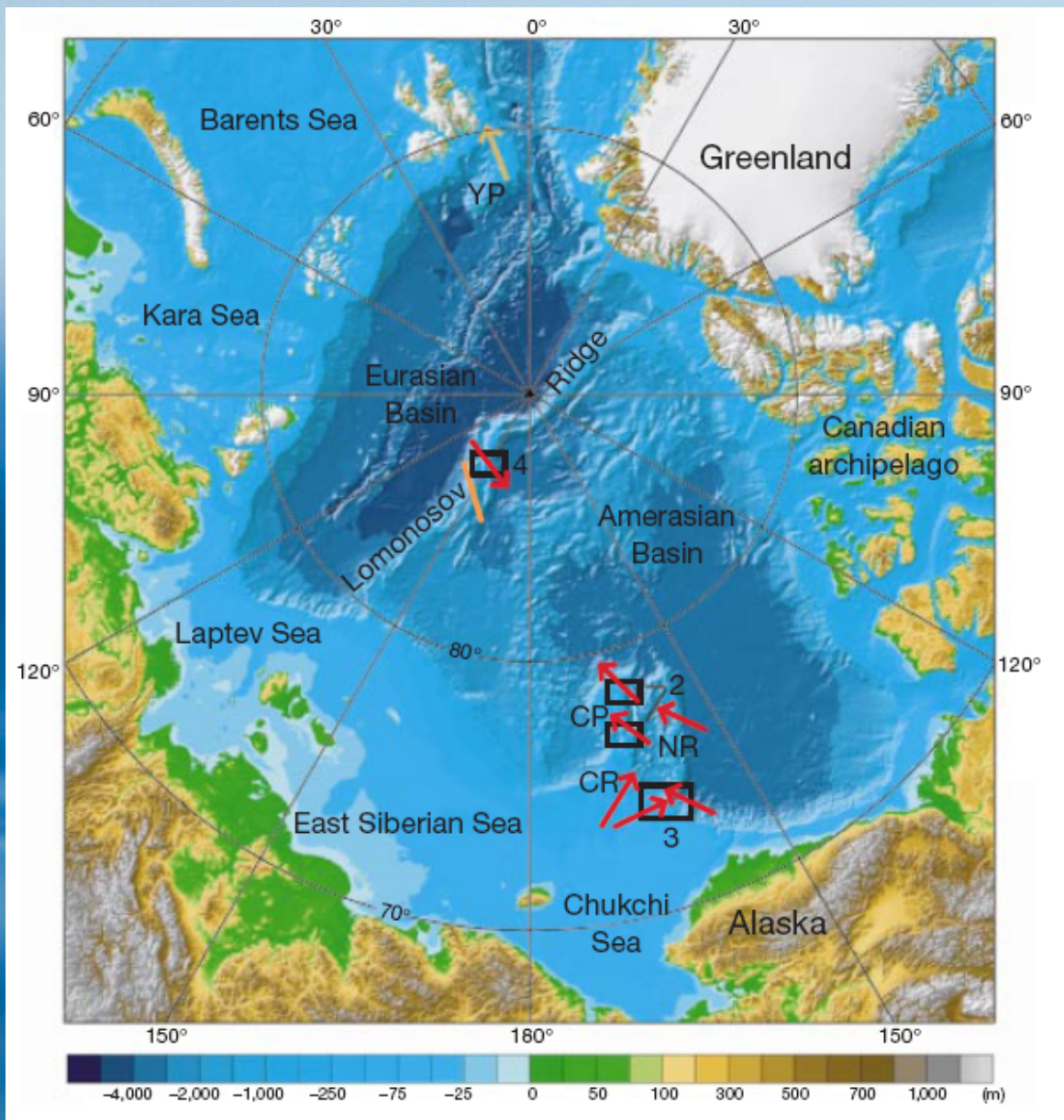
# Ostatnie zlodowacenie w Europie: Kanał La Manche pradoliną mega-rzeki



*Menot et al. 2006 (Nature)*



# Czy lodowce szelfowe pokrywały Ocean Arktyczny?

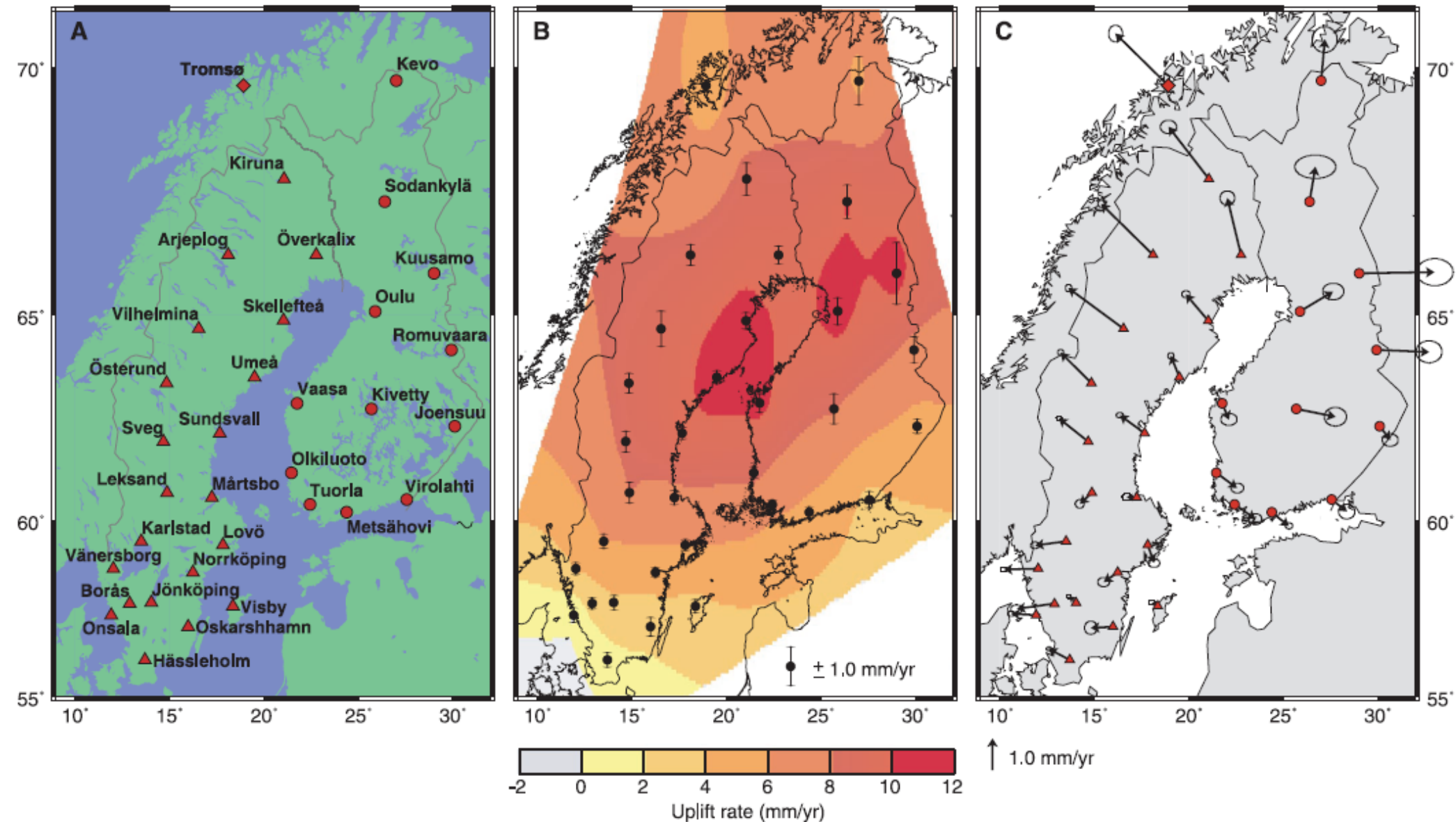


Ślady zarysowań grzbietów podmorskich przez lodowce szelfowe oraz rekonstrukcja ich rozprzestrzeniania się

*Polyak et al. 2001; Spielhagen 2001 (Nature)*



# Skutki trwające do dziś: izostatyczne podnoszenie się lądu Skandynawii

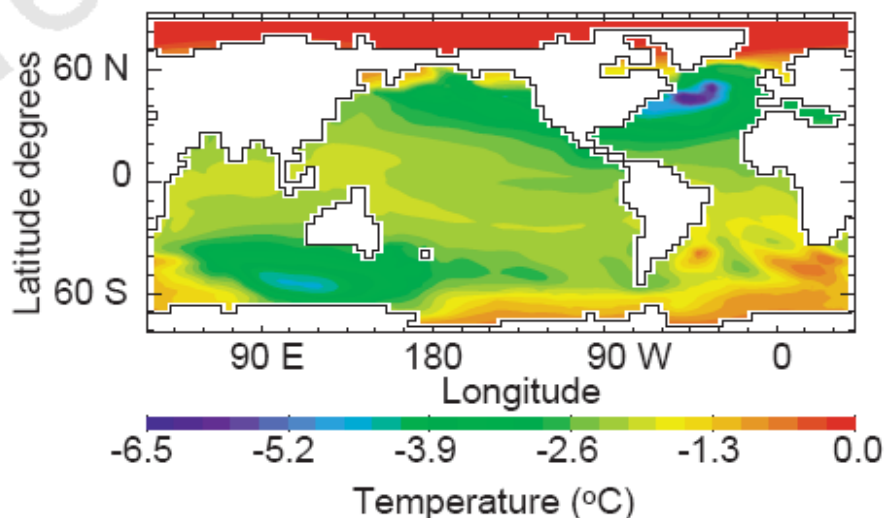


Miejsca pomiarów, prędkość ruchu w pionie i poziomie Skandynawii  
*Milne et al. 2005 (Science)*

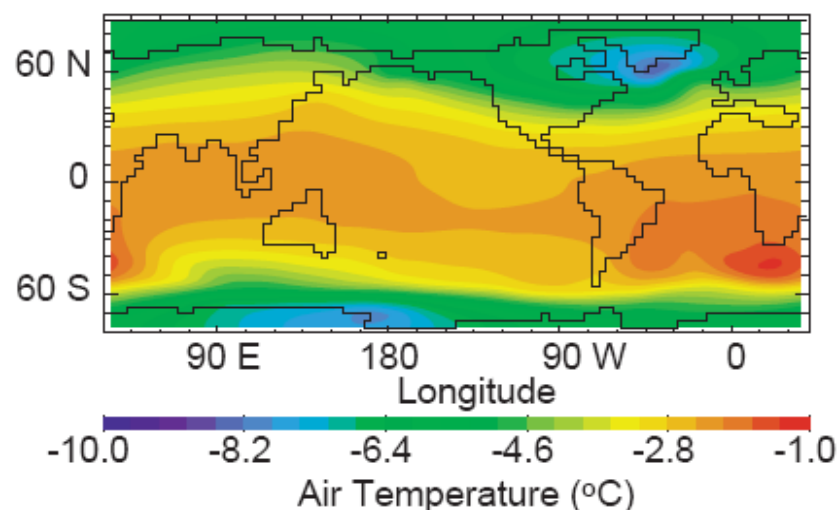


# Modelowanie klimatu LGM (c.d.)

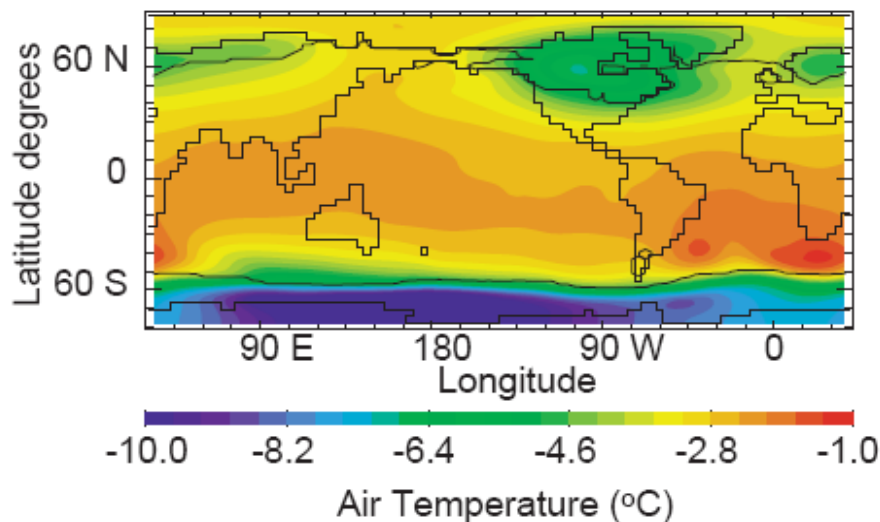
**a** Annual Mean SST Difference (LGM - Present Day)



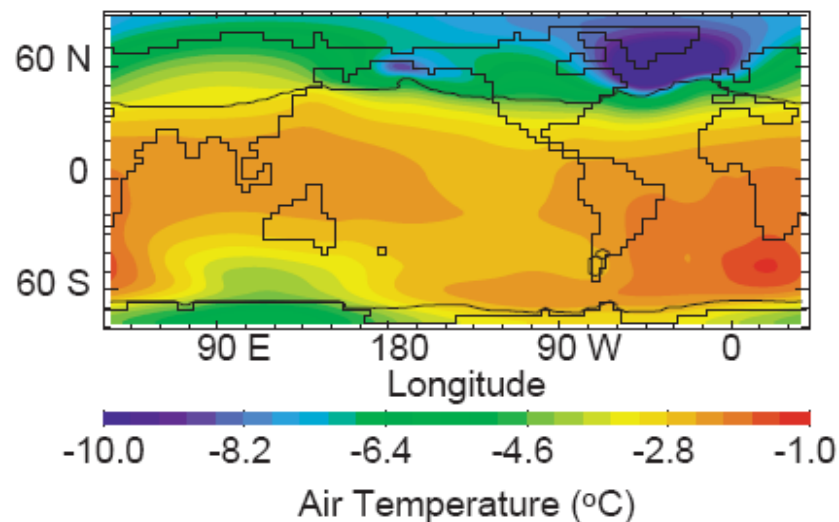
**b** Annual Mean SAT Difference (LGM - Present Day)



**c** Summer Mean SAT Difference (LGM - Present Day)



**d** Winter Mean SAT Difference (LGM - Present Day)

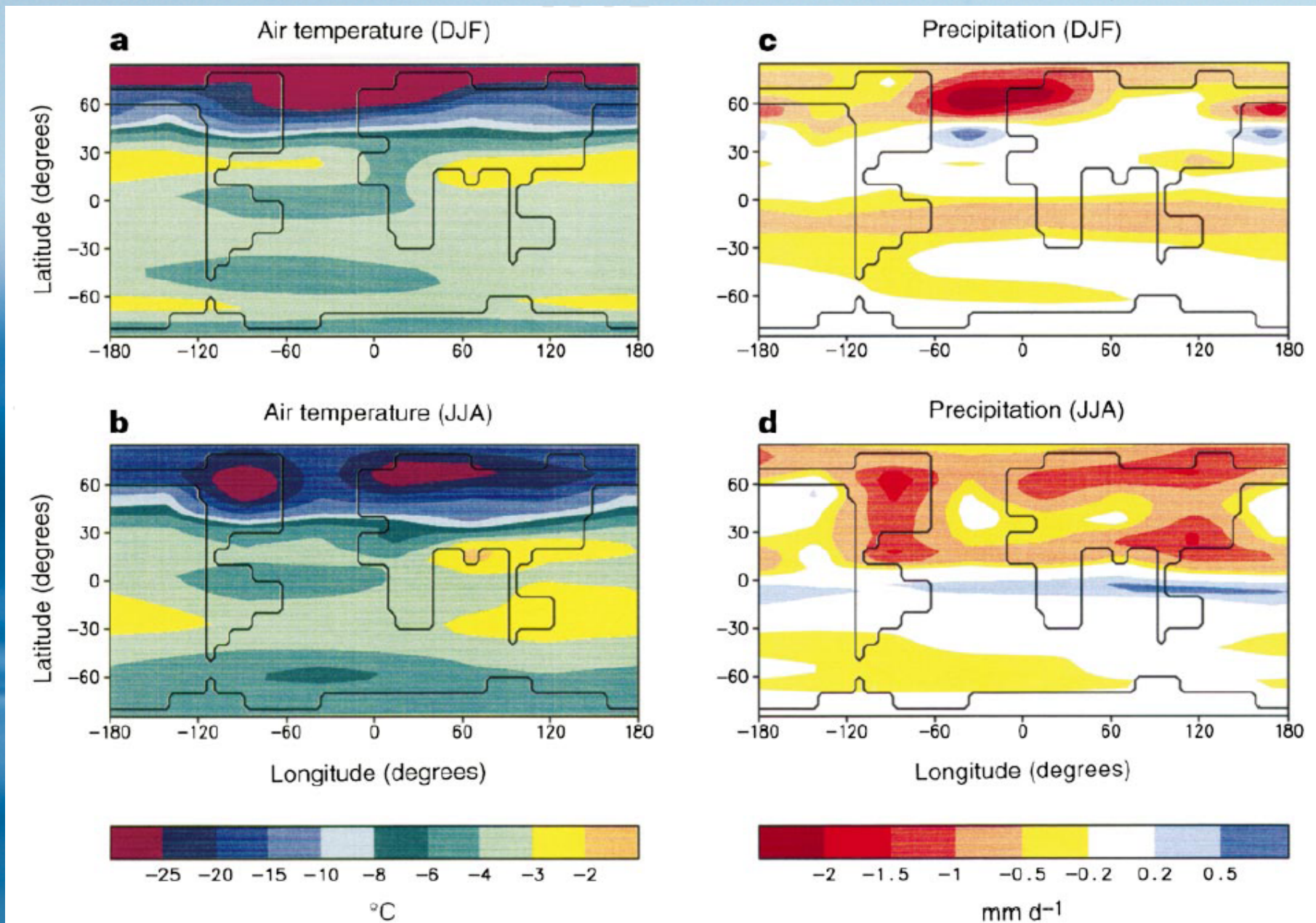


Średnioroczne i sezonowe wartości temperatury powierzchni morza (SST) i powietrza (SAT) w ostatnim maksimum lodowcowym w porównaniu z współczesnymi.

*Weaver et al. 1998 (Nature)*



# Modelowanie klimatu LGM

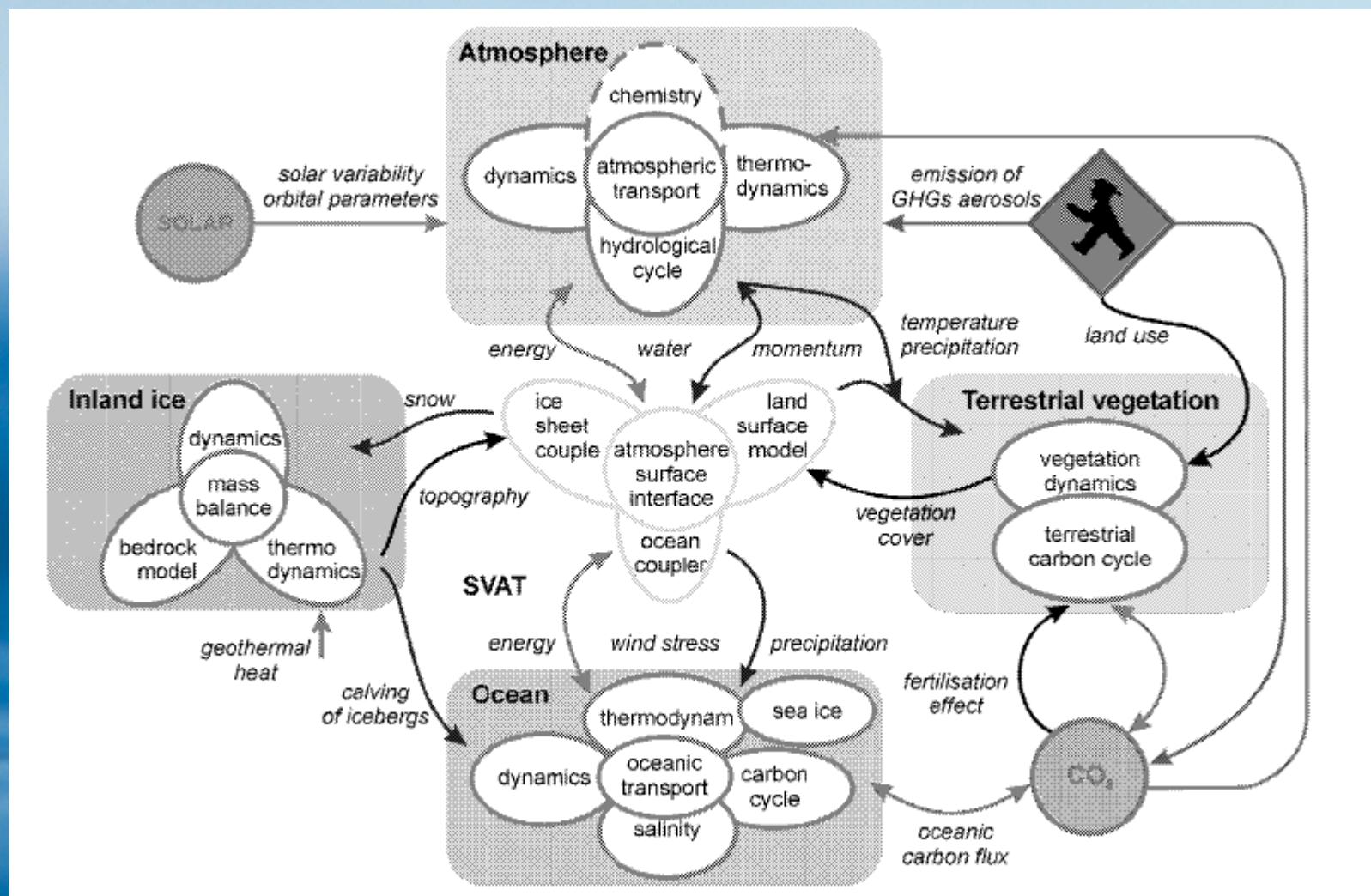


Zimowe (DJF) i letnie (JJA) wartości temperatury powietrza i opadów w ostatnim maksimum lodowcowym w porównaniu z współczesnymi.

*Ganopolski et al. 1998 (Nature)*



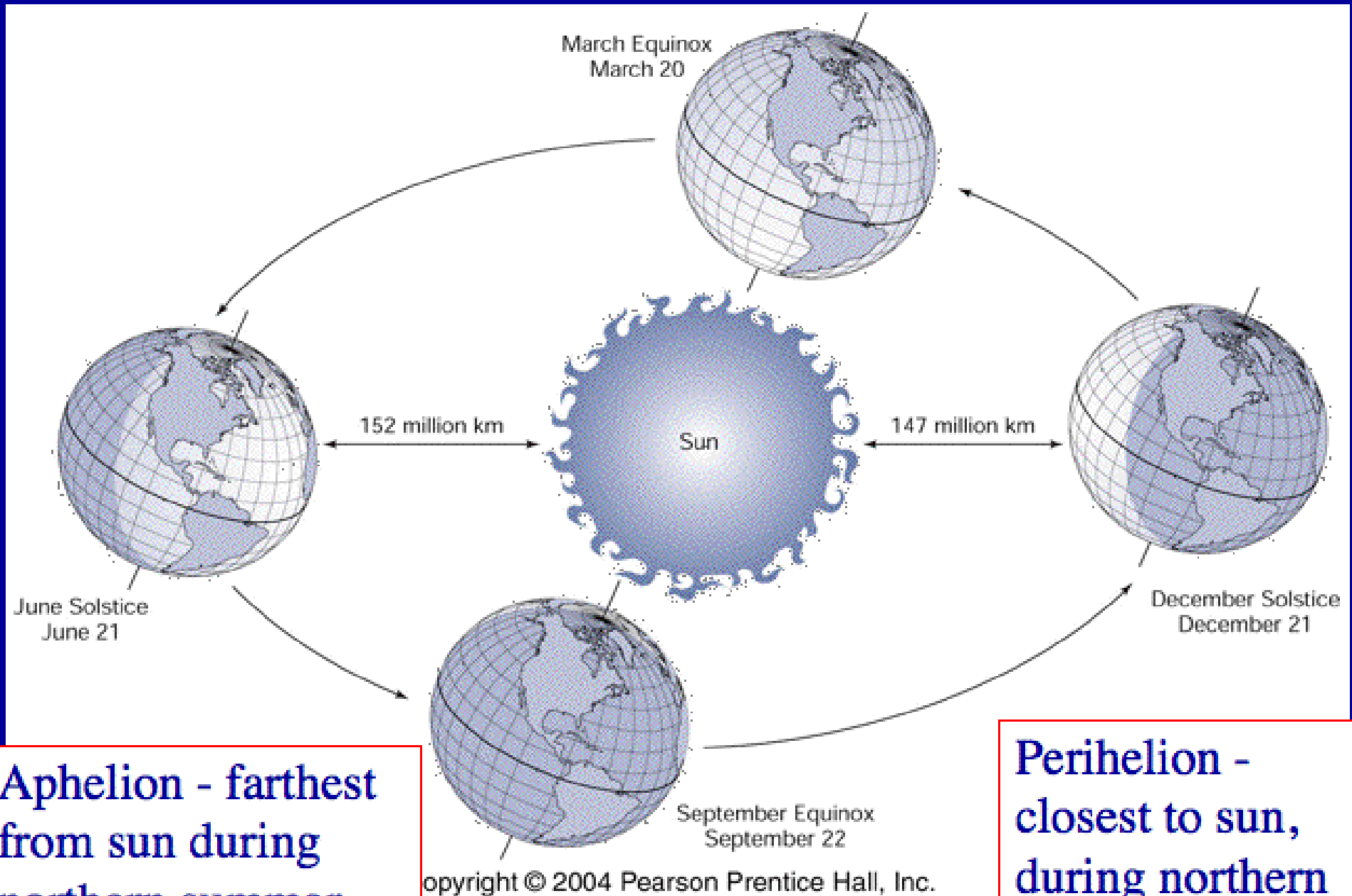
# Modele klimatyczne



Struktura współczesnego zintegrowanego modelu klimatycznego (*coupled model*) na przykładzie programu CLIMBER2



# Solar insolation: Elliptical orbit results in asymmetry in northern and southern seasons

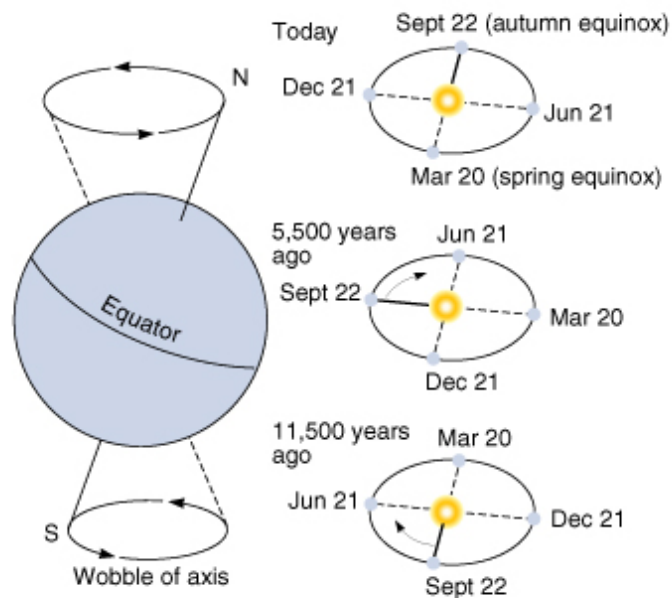


**Aphelion - farthest from sun during northern summer**

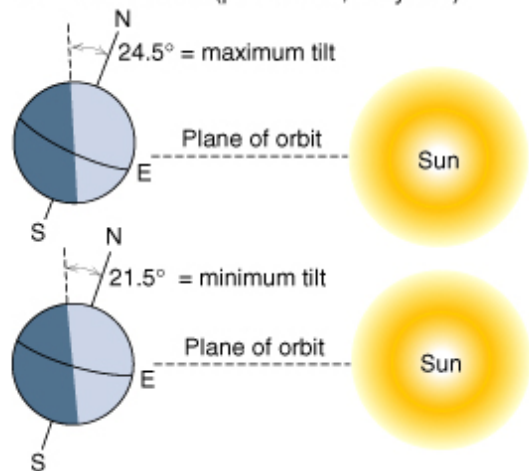
**Perihelion - closest to sun, during northern winter**



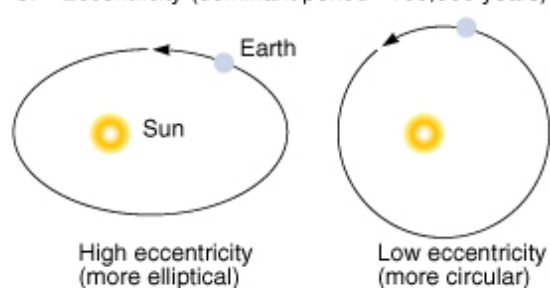
A. Precession of the equinoxes (period = 23,000 years)



B. Tilt of the axis (period = 41,000 years)



C. Eccentricity (dominant period = 100,000 years)



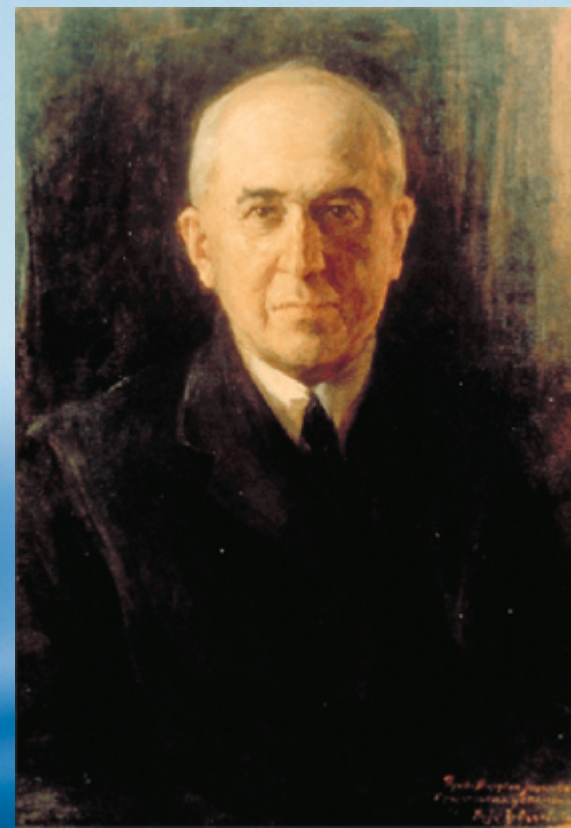
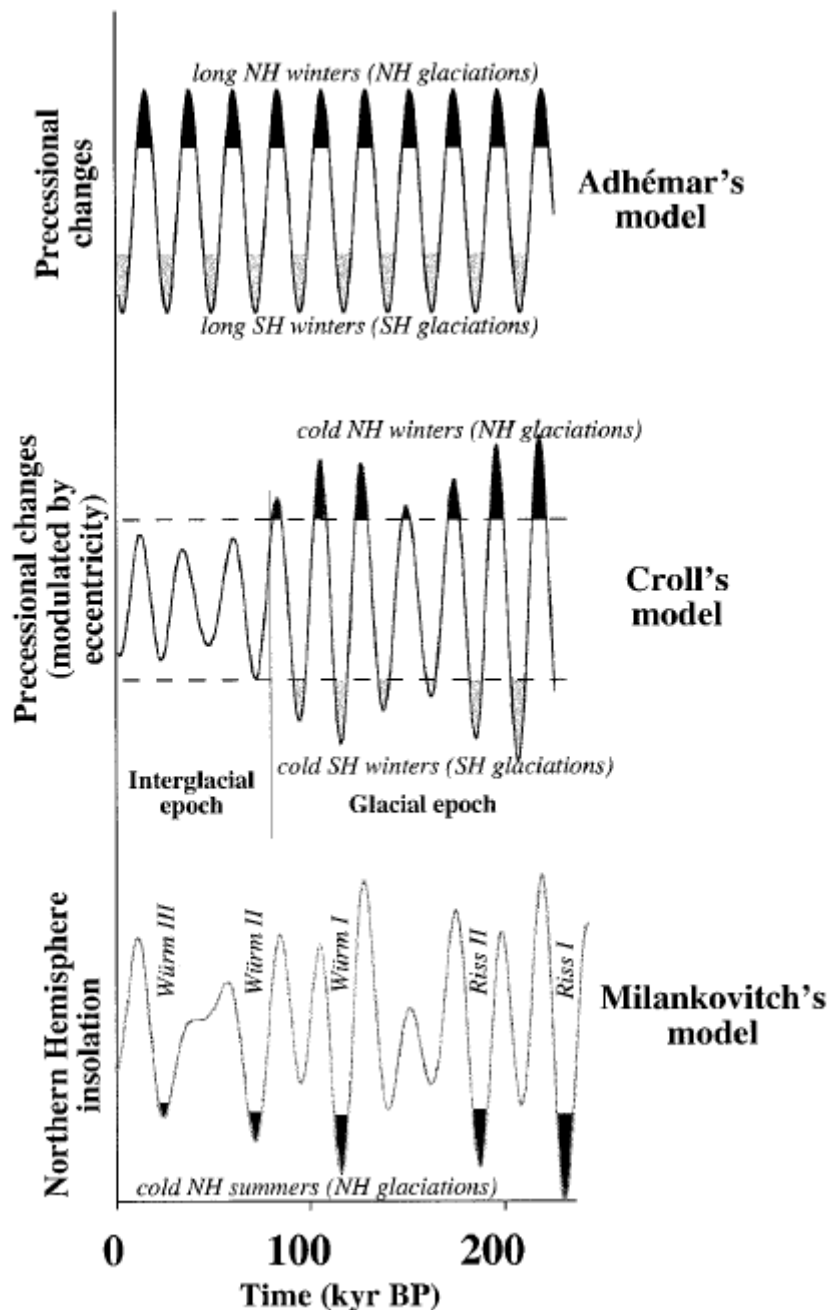
Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.

# Zmienność orbity Ziemi (wersja uproszczona)

- Precesja orbity Ziemi (znana już starożytnym Grekom) powoduje przesuwanie się punktu równonocy (a zatem i miesiąca gdy Ziemia jest w peryhelium. Okres: ok. 22 tys. lat.
- Zmiany nachylenia osi ziemi ("*obliquity*") od  $22,1^\circ$  do  $24,5^\circ$  (obecnie  $23,5^\circ$ ) lat powodują zmiany nasłonecznienia rejonów odległych od równika, zależne od pory roku. Okres: 41 tys. lat.
- Zmiany ekscentryczności (wydłużenia) orbity Ziemi na wielkość efektu precesji na nasłonecznienie oraz minimalnie na globalne nasłonecznienie. Okres: ok. 100 tys. lat.



# Rozwój teorii astronomicznej zlodowaceń

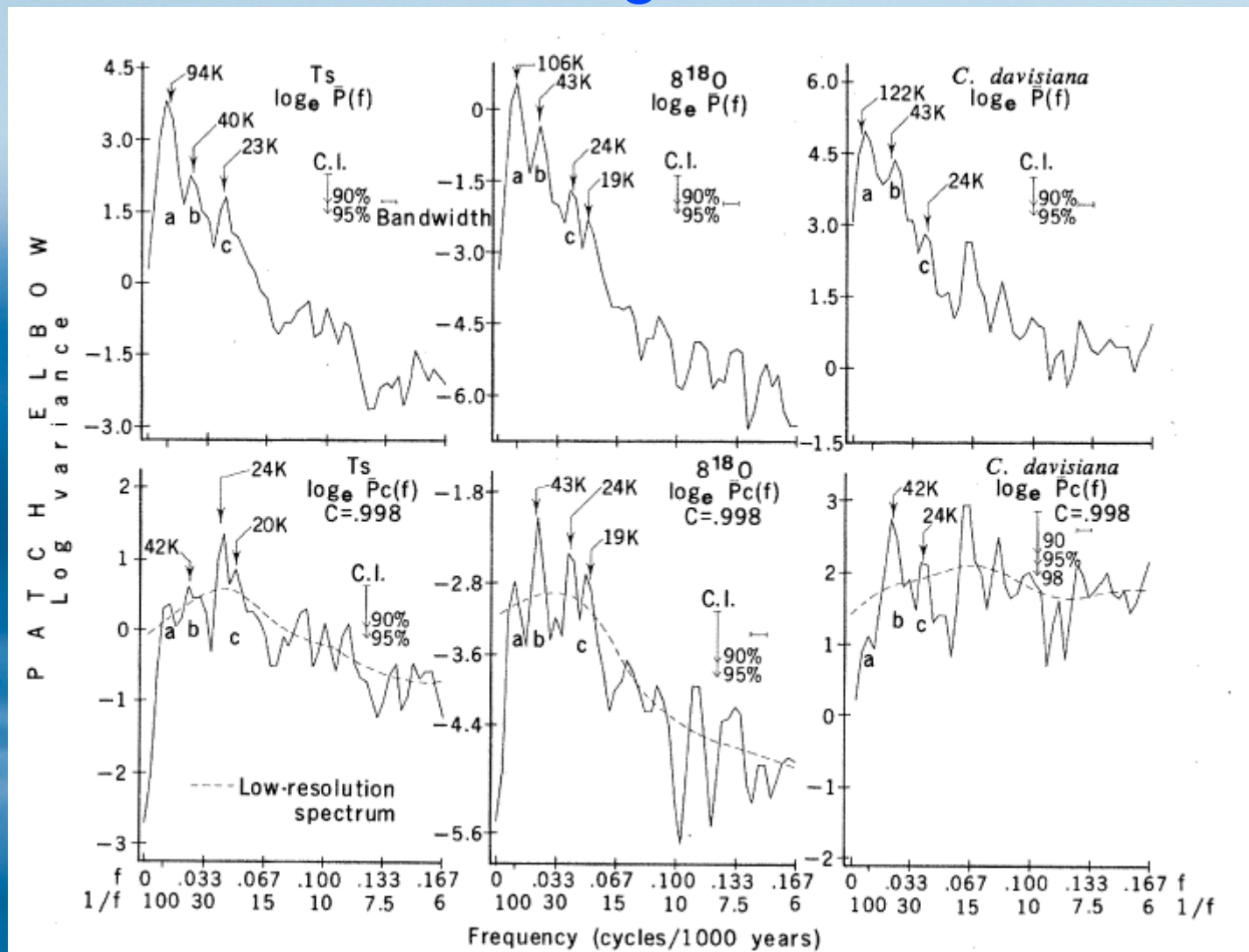


Milutin Milankovitch  
1889-1958

- Adhémar (1842) – precesja wpływa na srogość zim
- Croll (1875) – precesja ale modulowana ekscentrycznością
- Milankovitch (1941) – wszystkie parametry orbitalne, nie zima a lato!



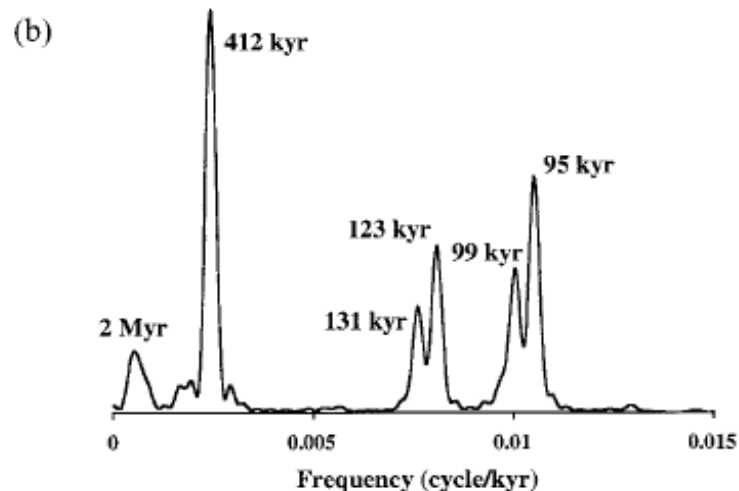
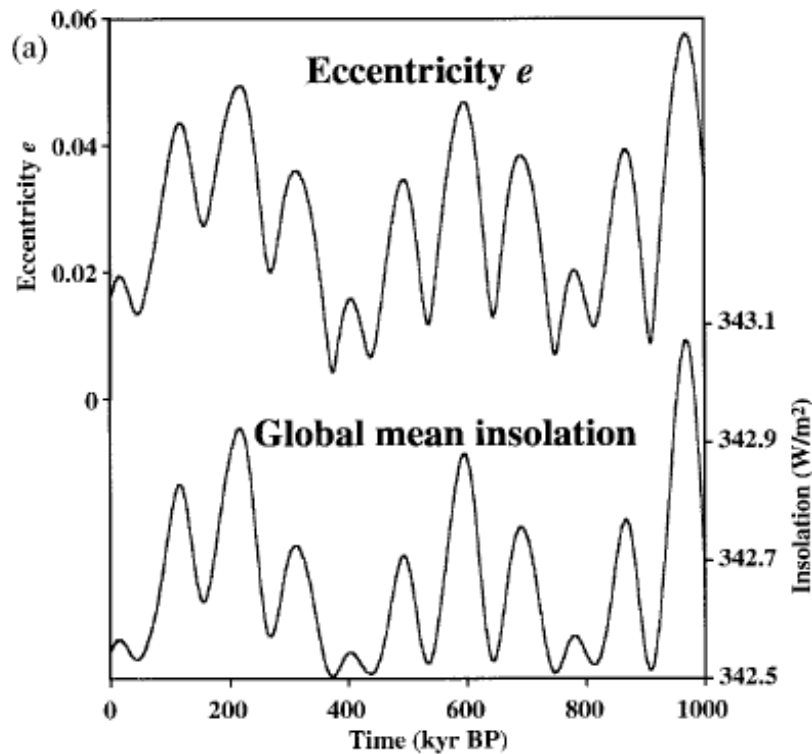
# Teoria astronomiczna złodowceń udowodniona przez... oceanografów



Analiza spektralna wartości temperatury wyznaczonej ze statystyk występowania promienic (*radiolaria*), składu izotopów tlenu w skorupkach otwornic *Globigerina bulloides* oraz ilości promienic *Cycladofora davisiana* w dwóch rdzeniach subantarktycznych. *Hays, Imbrie, Shackleton 1976 (Science)*



# Ekscentryczność: to nie takie proste

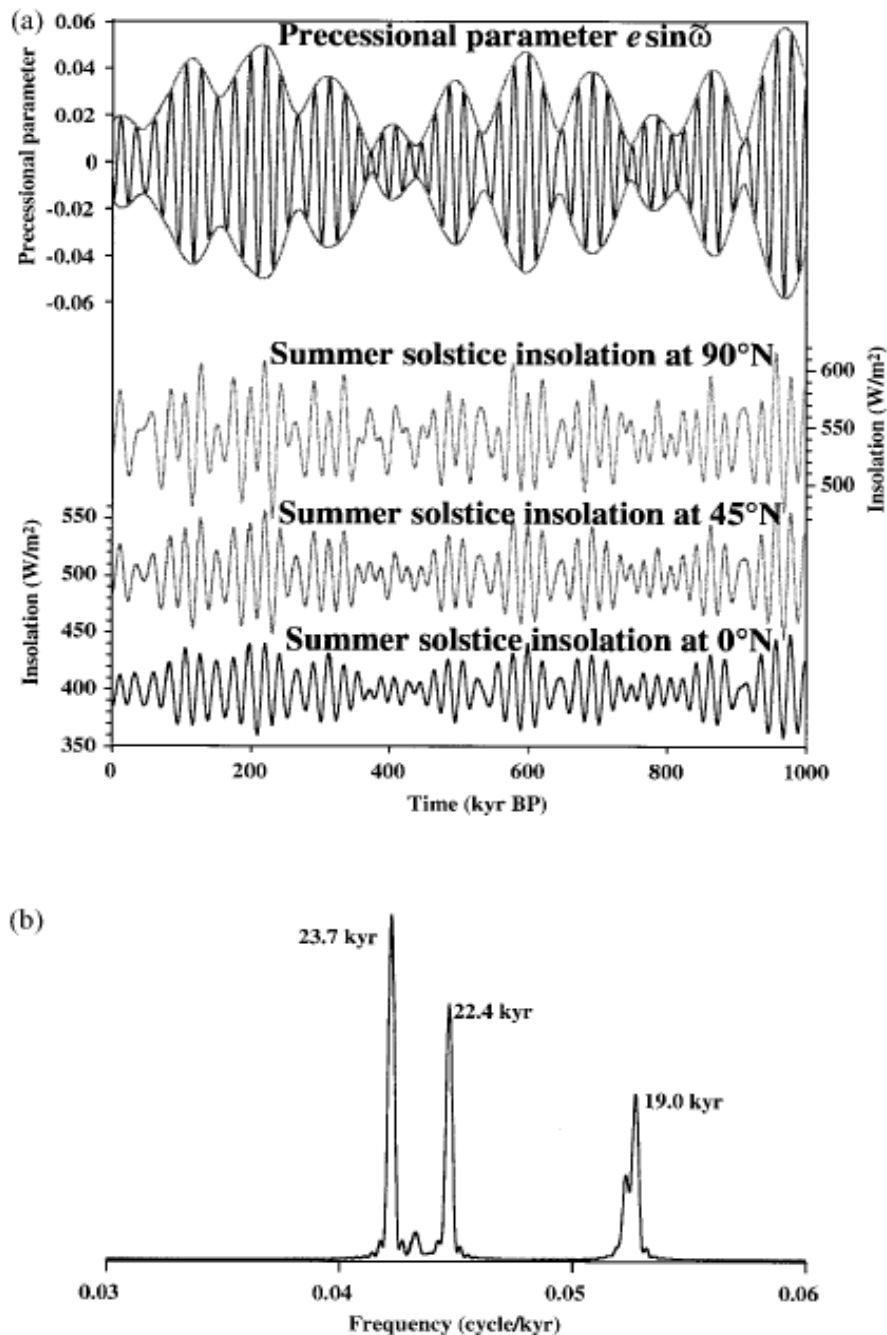


Ekscentryczność wpływa na globalne nasłonecznienie ale w dość niewielkim stopniu.

**Uwaga:** nie istnieje okres ekscentryczności 100k lat. Istnieją okresy nieco mniejsze i nieco większe, a ekscentryczność ma jeszcze wyraźniejszy okres ok. 400k. lat.



# Precesja: to też nie jest proste

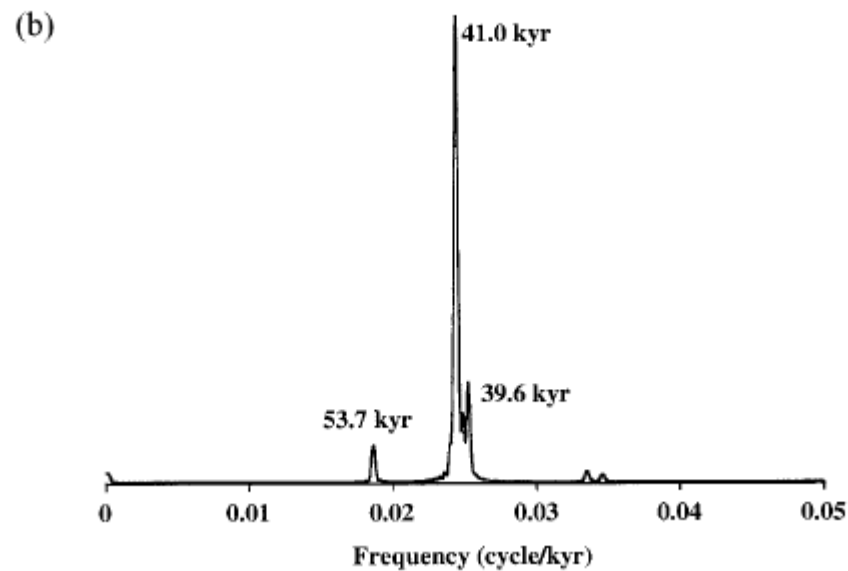
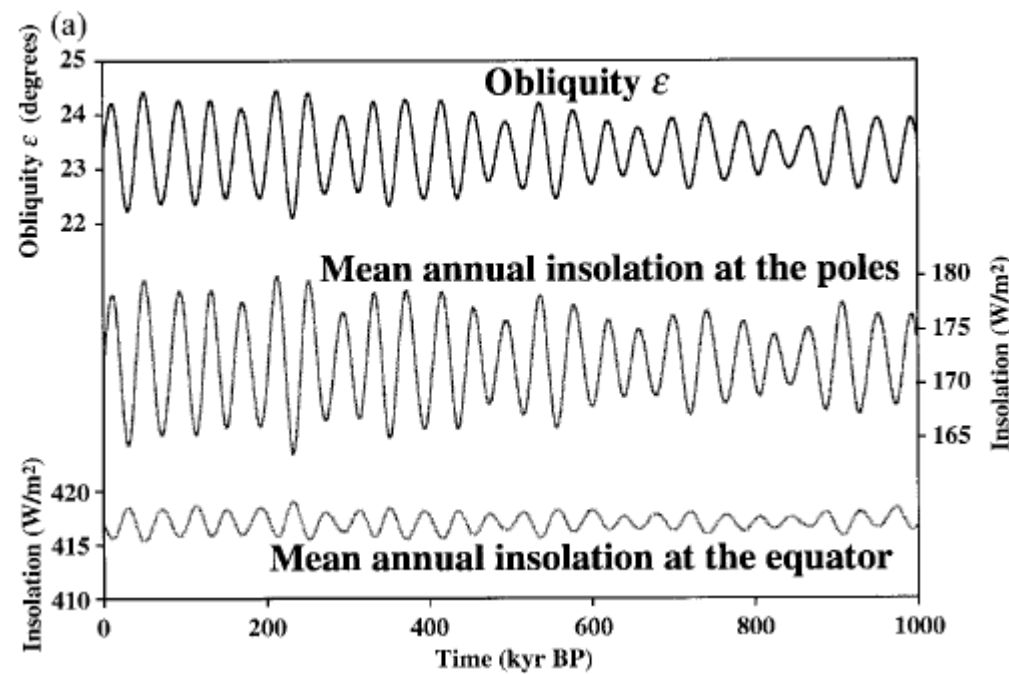


Precesja wpływa na letnie oświetlenie na całej Ziemi (jednak w skali rocznej efekt ten jest coraz mniejszy w kierunku równika).

**Uwaga:** jeśli brać pod uwagę precesję modulowaną ekscentrycznością w rzeczywistości istnieją trzy okresowości: 19.0k, 22.4k i 23.7k lat.

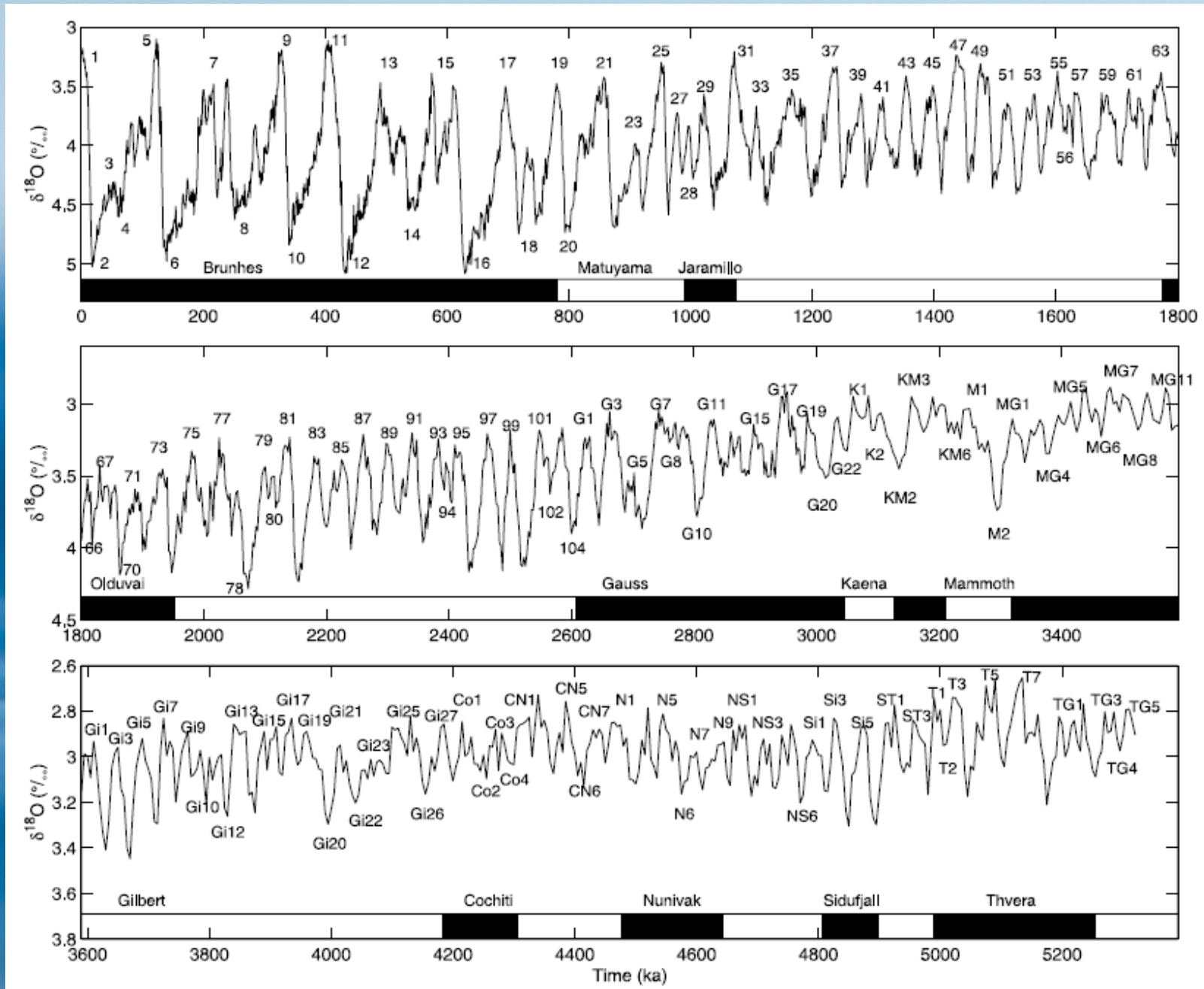


# Nachylenie orbity: to jest proste





# Co mówią osady morskie: zlodowacenia ostatnich 5 mln lat

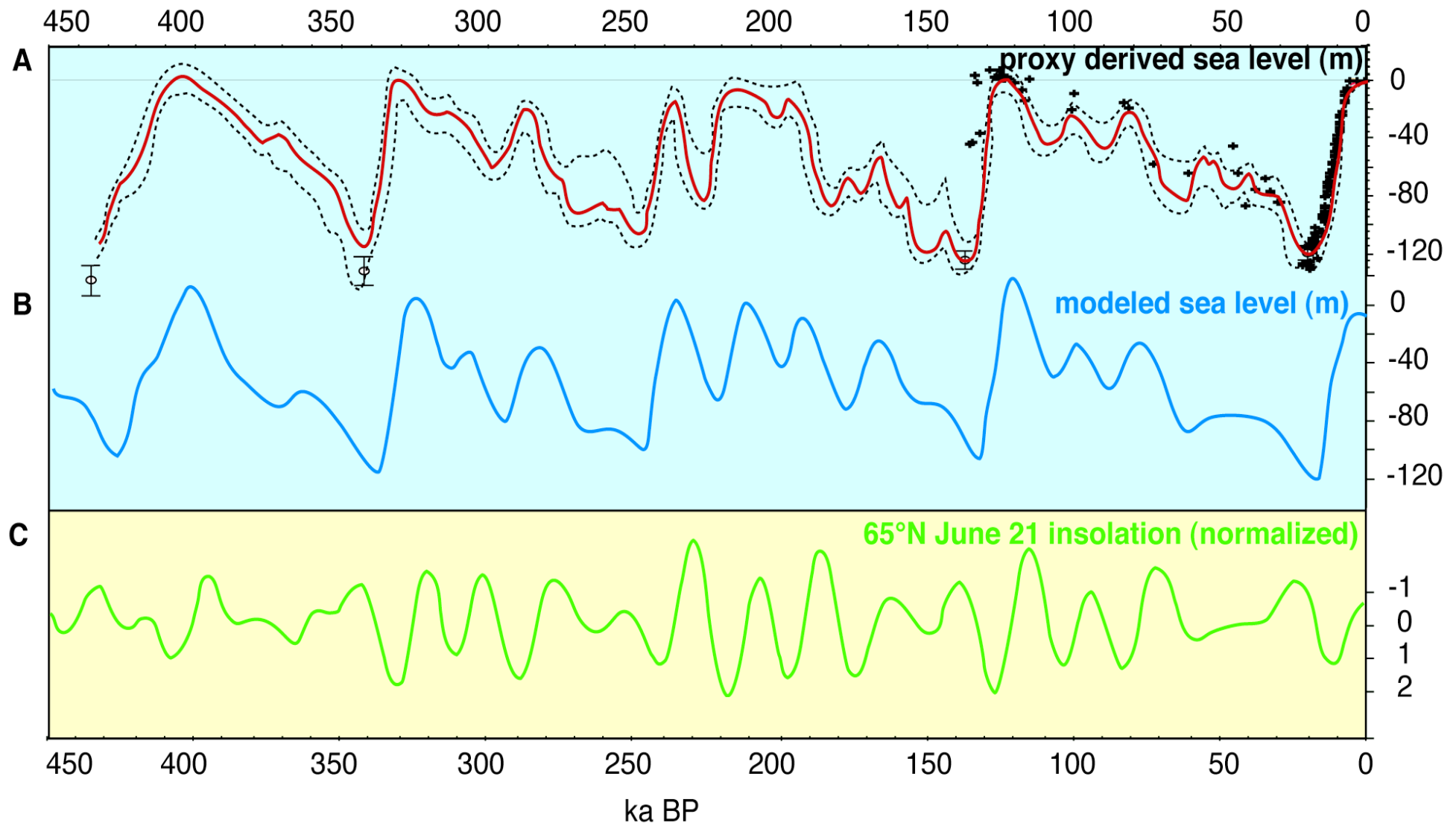


$\delta^{18}\text{O}$  z 57 „globalnie rozmieszczonych” rdzeni

*Lisiecki & Raymo 2005 (Paleocenography)*



# Sea Level Change Over Four Glacial Cycles



**Paleoclimate, Global Change and the Future**  
Alverson, Bradley and Pederson eds., 2002

Chapter 3: L. Labeyrie et al., fig. 3.1, p. 37



# Podsumowanie 1/3

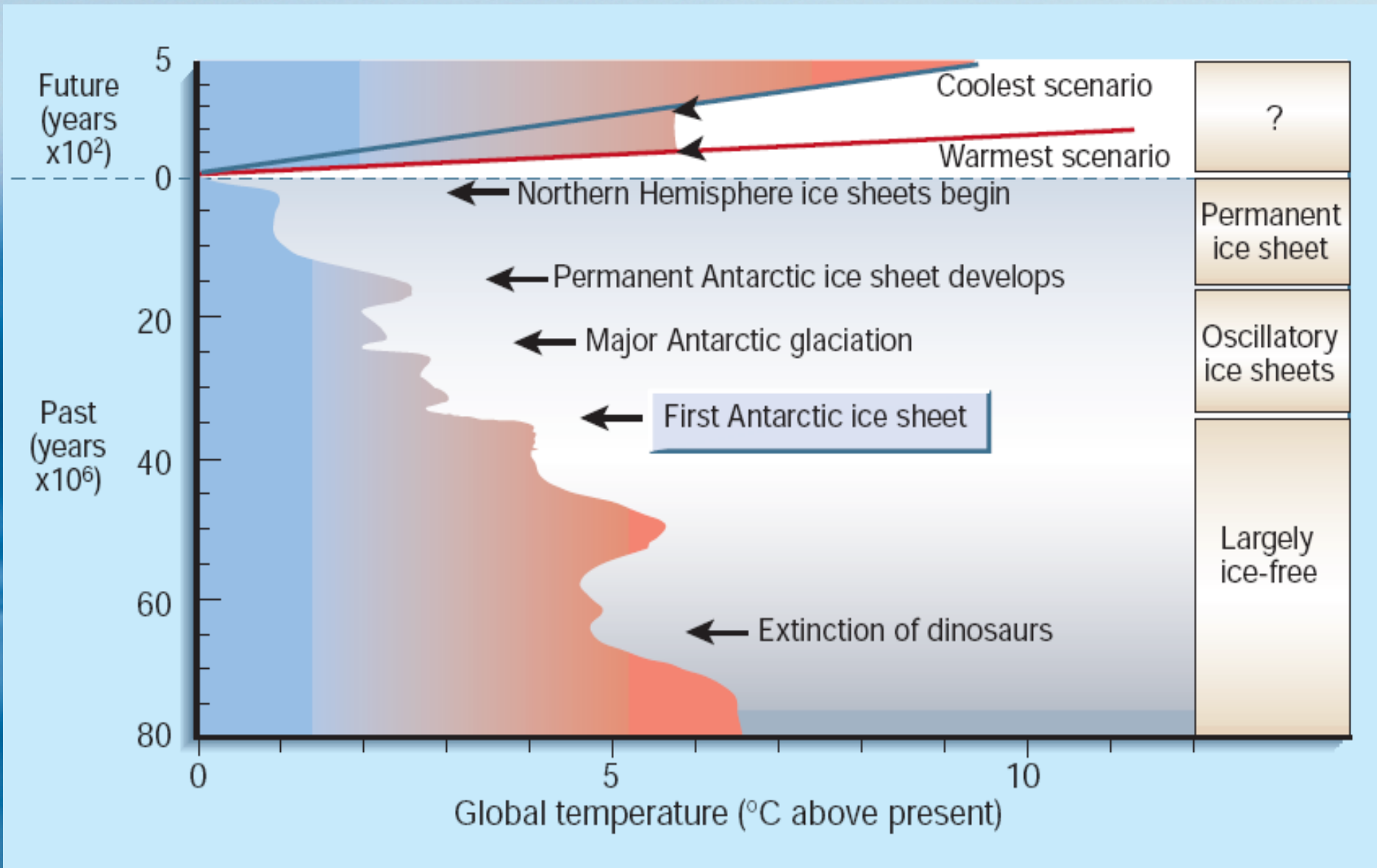
- W ciągu ostatnich ok. 2.7 mln lat Ziemia znajduje się w pogłębiającym się cyklu zlodowaceń (ostatnich kilka było najrozleglejsze i najdłuższe)
- Ostatnie kilka zlodowaceń (w cyklu ok 100 k lat) spowodowało obniżenie poziomu morza o ok. 120-140 m w stosunku do stanu dzisiejszego.
- Początki i końce zlodowaceń związane są z poziomem oświetlenia rejonów subarktycznych ( $65^{\circ}$  N) latem: zlodowacenie zaczyna się gdy śnieg z poprzedniej zimy nie zdąży stopić się latem.



*Nie da się obalić teorii zlodowaceń (pomnik Agassiego w San Francisco po trzęsieniu ziemi w 1906 r)*

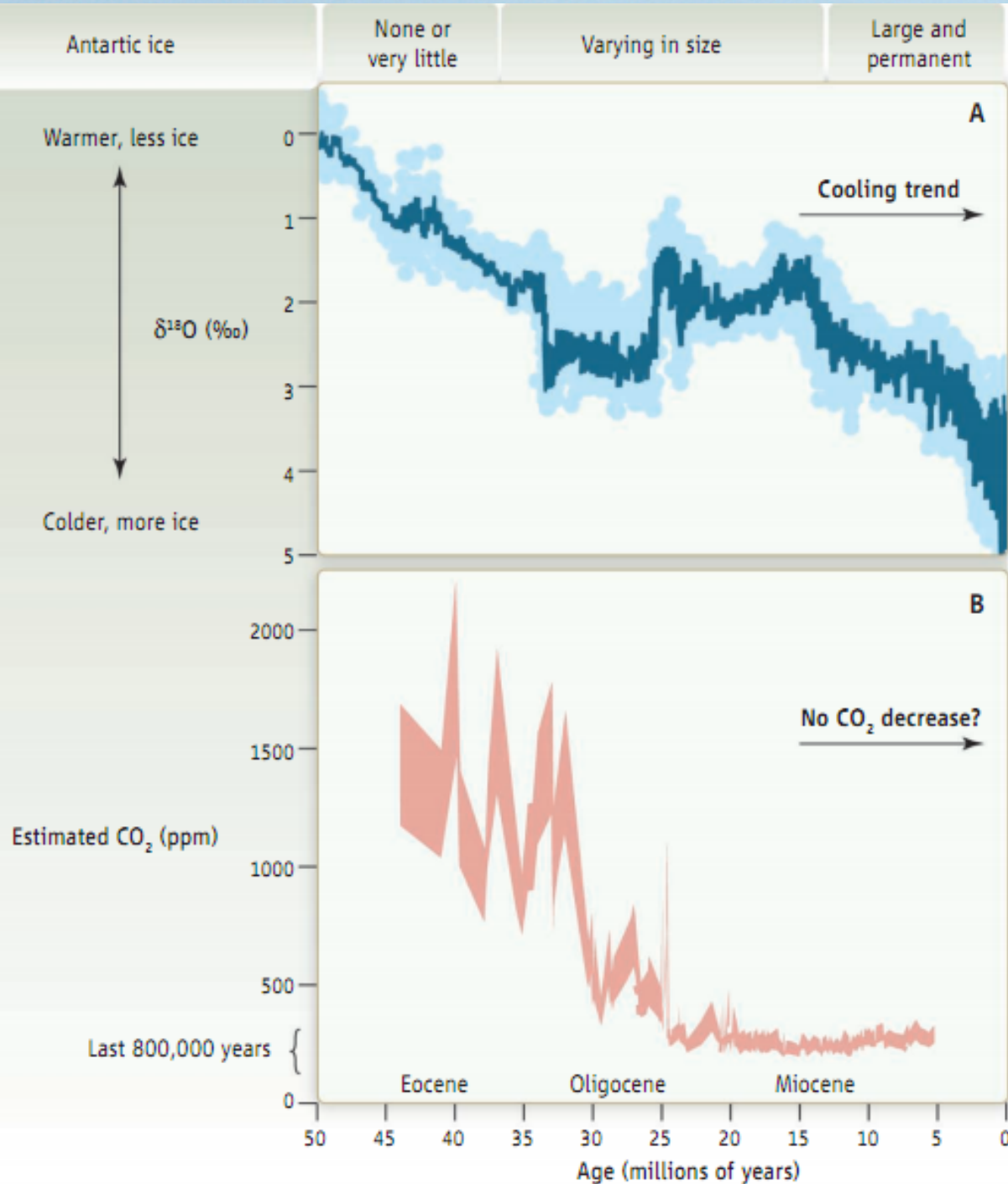


# W drodze do epoki lodowej (przypomnienie)





# Czy CO<sub>2</sub> do końca tłumaczy drogę do zlodowacenia

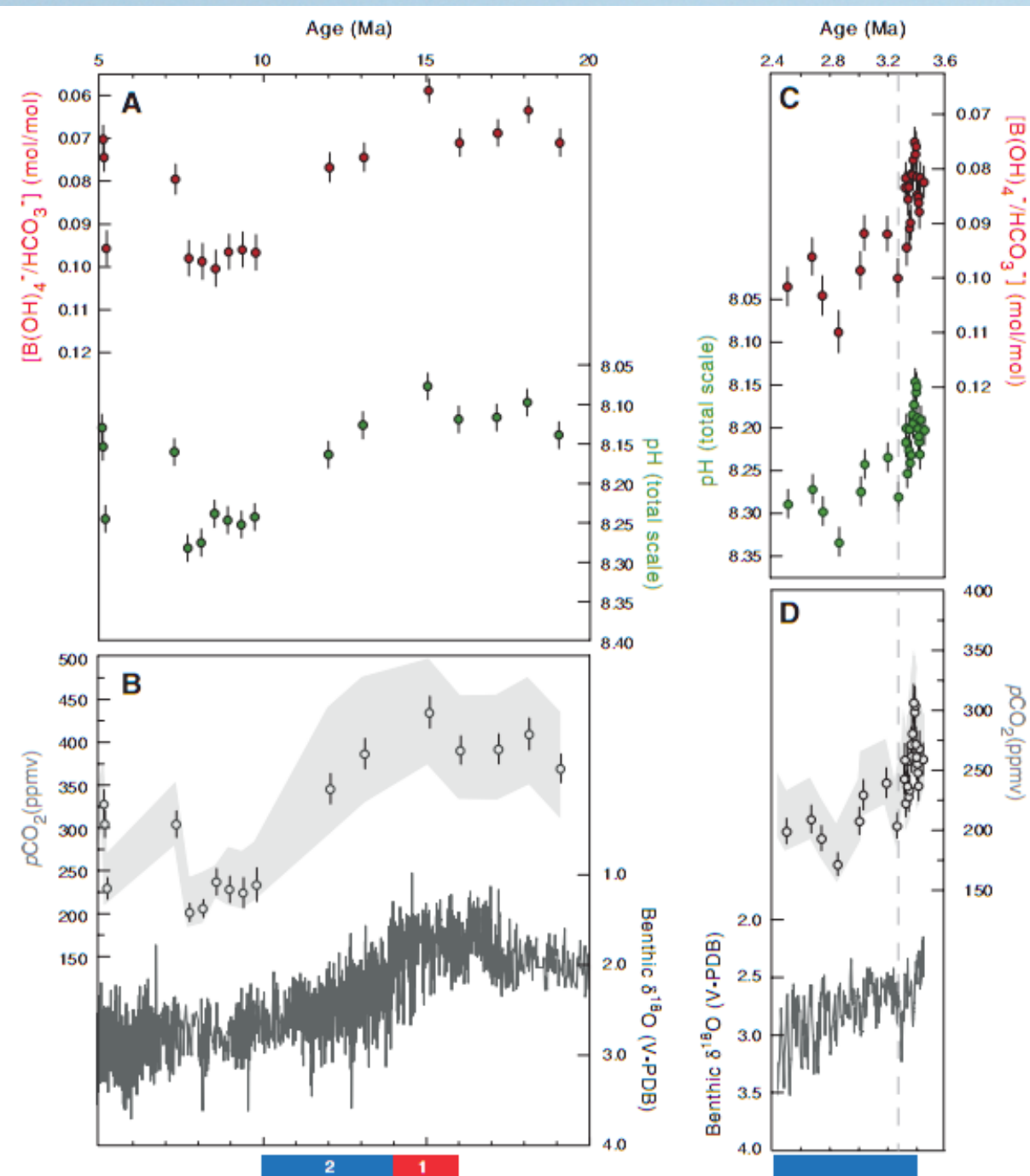


Tak zwany “problem miocenu” jest już chyba ostatnim problemem z wyjaśnieniem zmian klimatycznych z paleozapisów koncentracja atmosferycznego dwutlenku węgla. Czy rzeczywiście temperatura globalna obniżyła się w miocenie przy niezmienniej koncentracji CO<sub>2</sub>?

*Ruddiman 2010 (Science)*



# Chyba jednak tłumaczy...

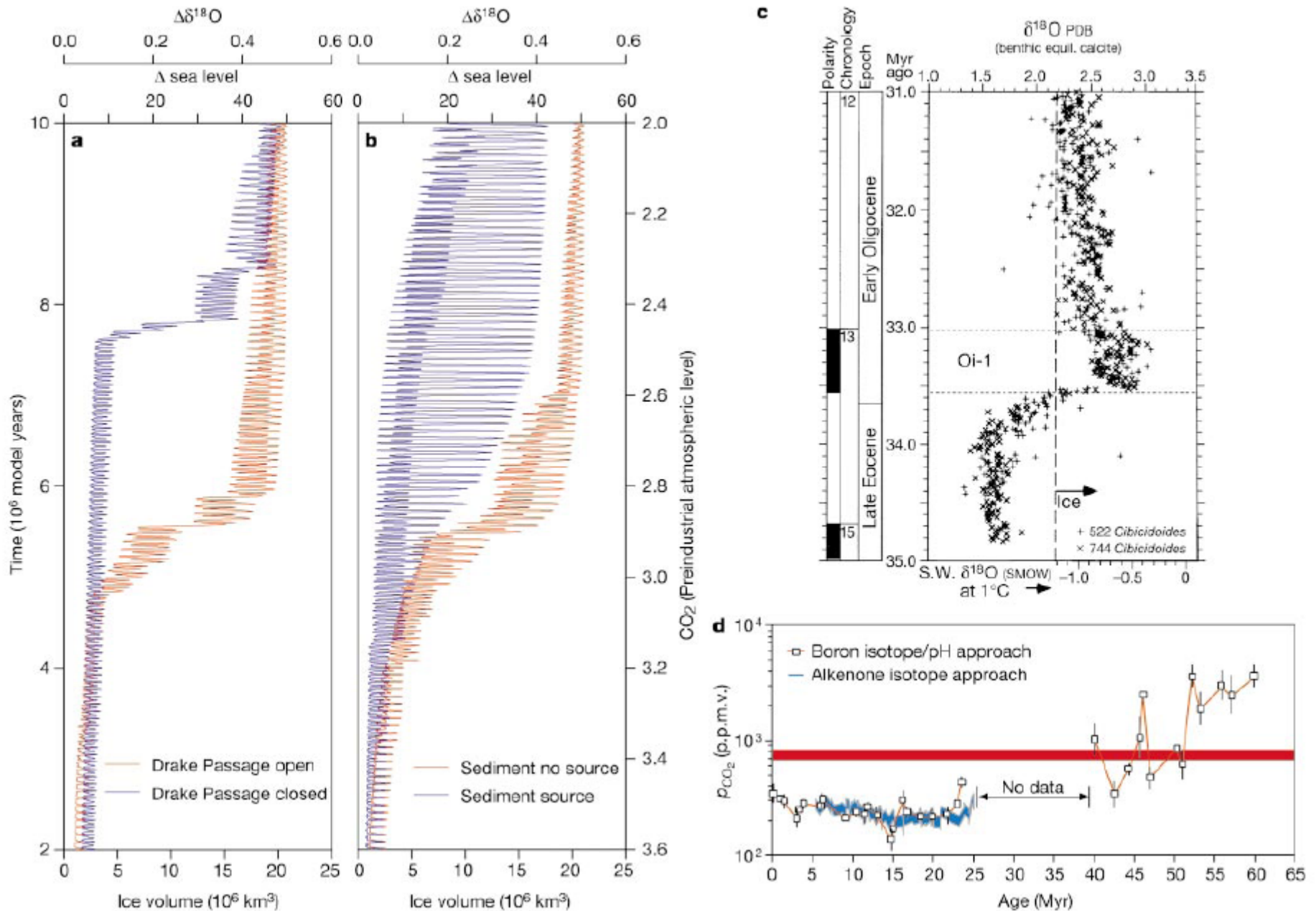


Najnowsze rekonstrukcje paleokoncentracji  $CO_2$  przy pomocy badania stosunku bor/wapń (B/Ca) w pancerzykach otwornic wydają się tłumaczyć ochłodzenia klimatu zarówno w miocenie (14 -10 mln lat temu) jak i późniejszego w pliocenie (3,5 – 2,5 mln lat temu)

*Tripati, Roberts & Eagle 2009  
(Science)*

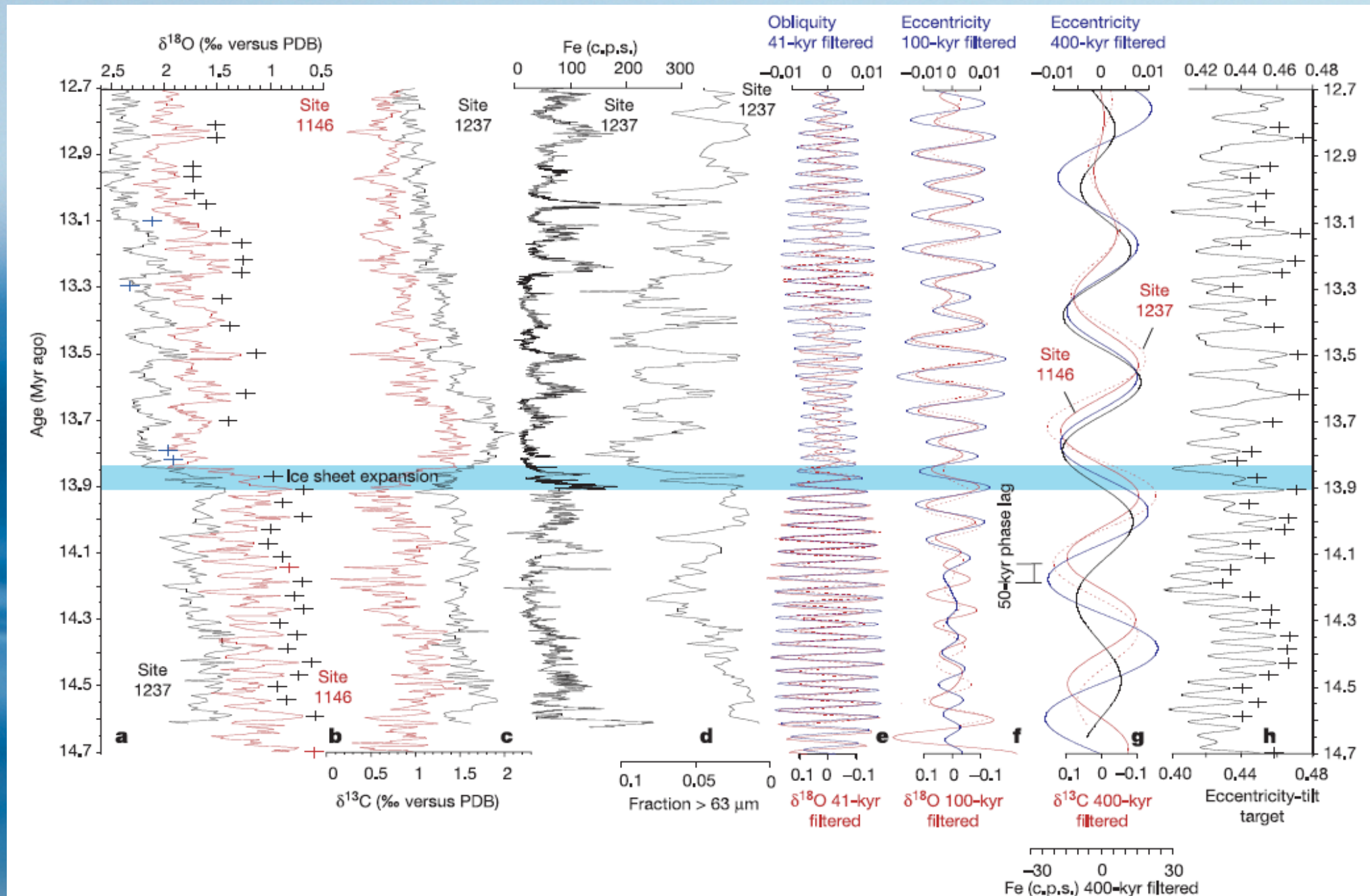


# Jak się to zaczęło: początek zlodowacenia Antarktydy





# Dalszy wzrost lodolodu Antarktydy 13 Ma

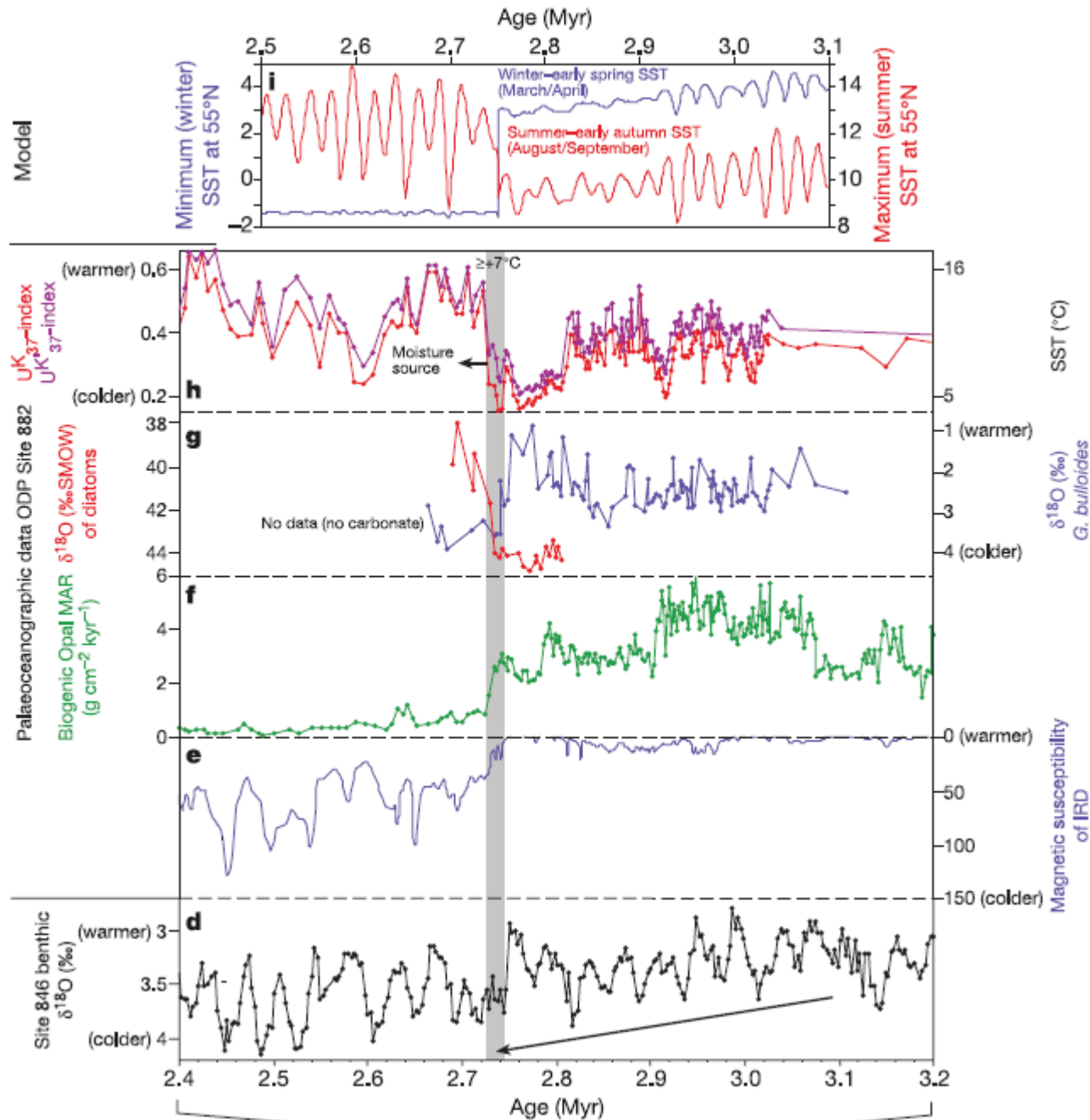


Parametry astronomiczne rządzą zmianami w „orbitalnej” skali czasu

*Holbourn et al. 2005 (Nature)*



# Przyczyna wpadnięcia Ziemi w epokę lodową 2.7 Ma: stratyfikacja wód Północnego Pacyfiku?



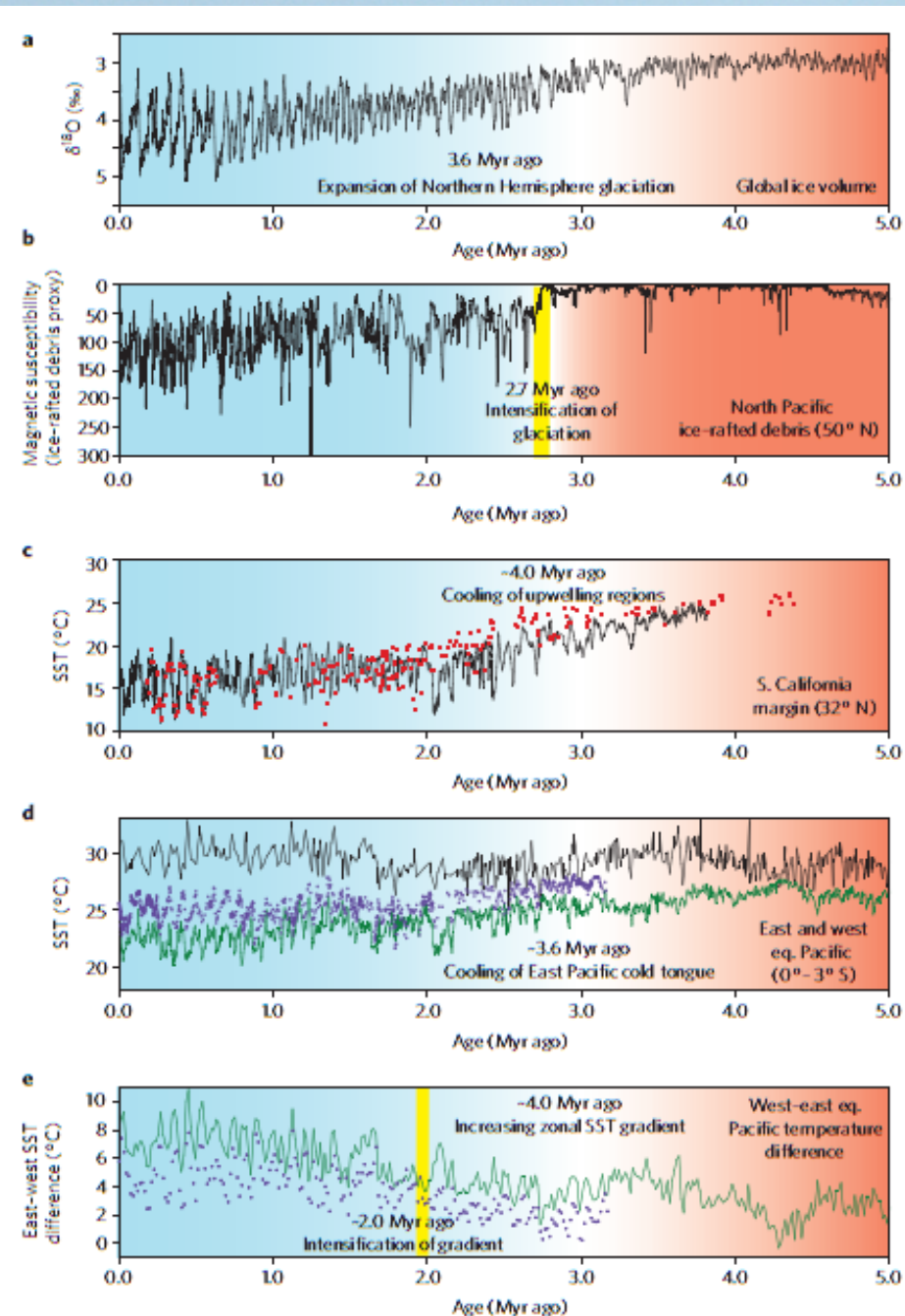
Powstanie stratyfikacja (halokliny) na Północnym Pacyfiku, powodujące ocieplenie wód powierzchniowych latem i zamarzanie zimą (brak pionowego mieszania) zbiega się w czasie z początkiem Epoki Lodowej.

Przypadek?

*Haug et al. 2005 (Nature)*



# Przyczyna wpadnięcia Ziemi w epokę lodową 2.7 Ma: wzmocnienie cyrkulacji atmosferycznej?



Niektórzy przyczynę początku zlodowaceń na półkuli północnej upatrywali we wzmocnieniu cyrkulacji atmosferycznej. Jednak dane wskazują że to zdarzenie 2,7 mln lat temu (b) poprzedza powstanie gradientu temperatury zachodniego i wschodniego tropikalnego Pacyfiku (e), spowodowanego wzmocnionymi pasatami i wynikającymi z tego upwellingami zimnej wody na wschodnim Pacyfiku (La Niña).

*Ravelo. 2010; Eourneau et al 2010  
(Nature Geoscience)*



# Po co wierci się lód Antaktydy?

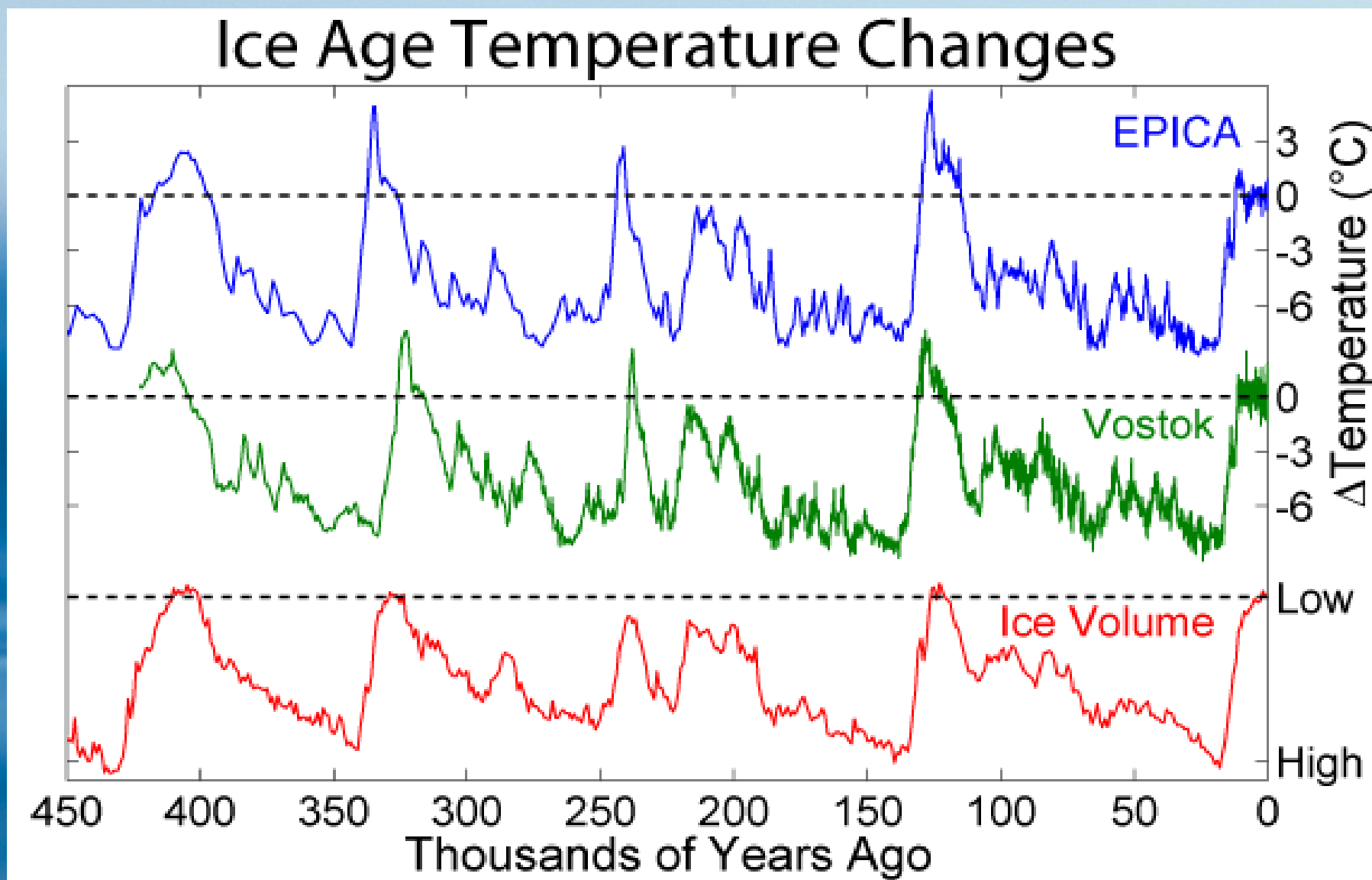
Stacja odwiertu rdzenia lodowego Dome C, Concordia, 1996-2004



*Nature 2004*



# Co da się odczytać z lodu?

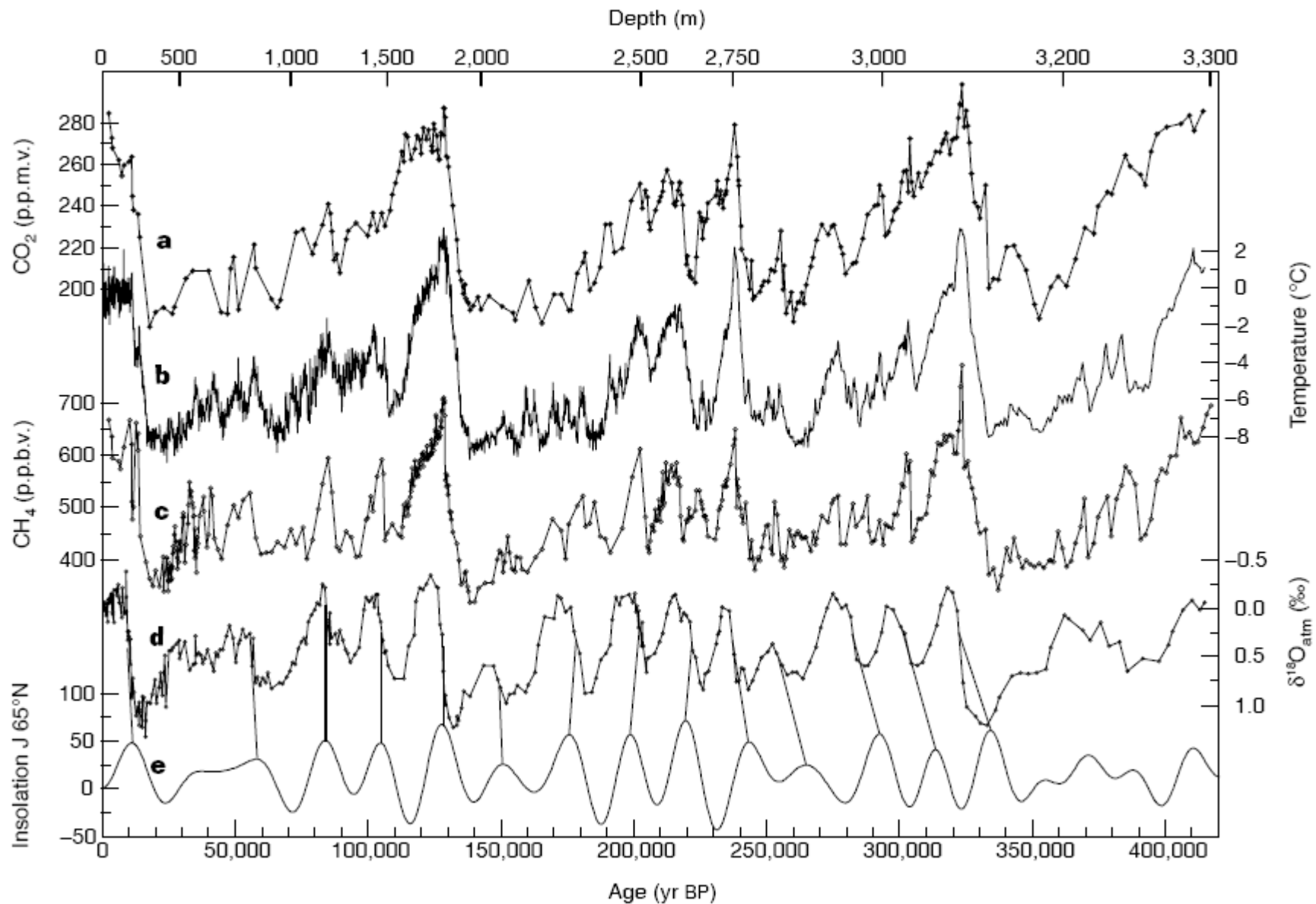


Parametry klimatyczne odczytane z trzykilometrowego rdzeni lodowych na Antarktydzie

*Petit i inni, 1999, EPICA 2004*



# Ocean, lodowce i atmosfera

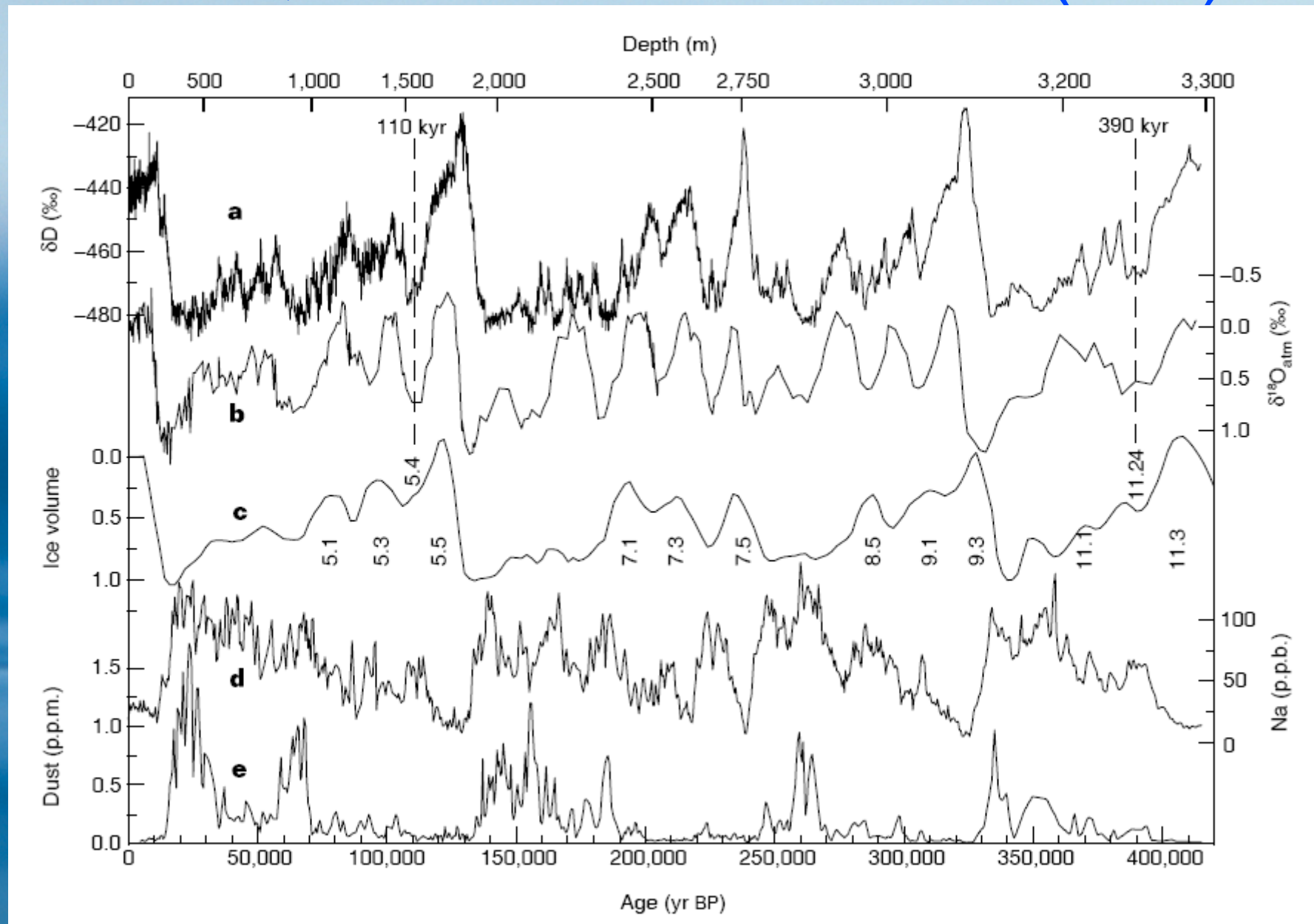


Parametry klimatyczne odczytane z trzykilometrowego rdzenia lodowego ponad podlodowym jeziorem Wostok na Antarktydzie

*Petit et al. 1999 (Nature)*



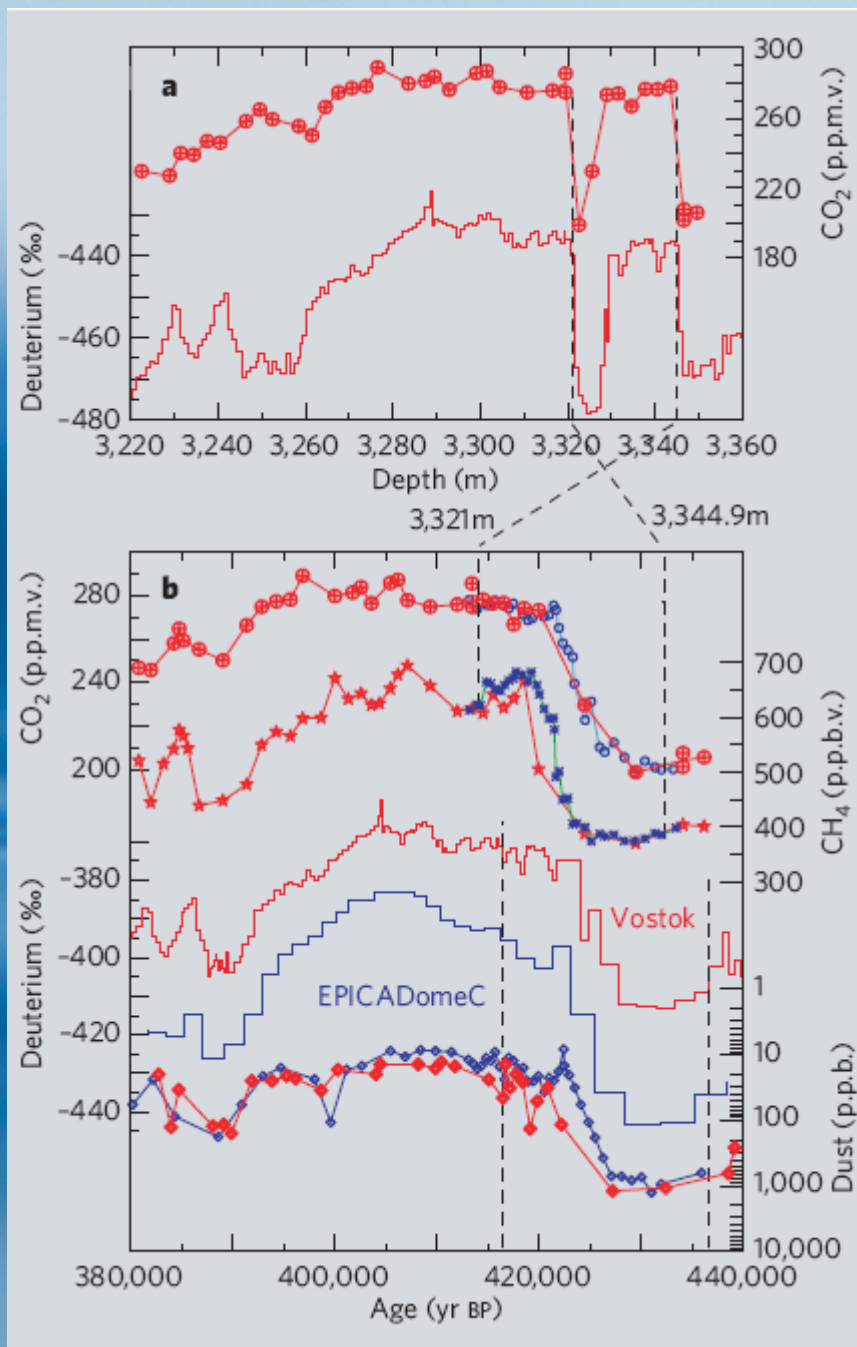
# Ocean, lodowce i atmosfera (c.d.)



Więcej parametrów klimatycznych odczytanych z trzykilometrowego rdzenia lodowego ponad podlodowym jeziorem Vostok na Antarktydzie

*Petit et al. 1999 (Nature)*

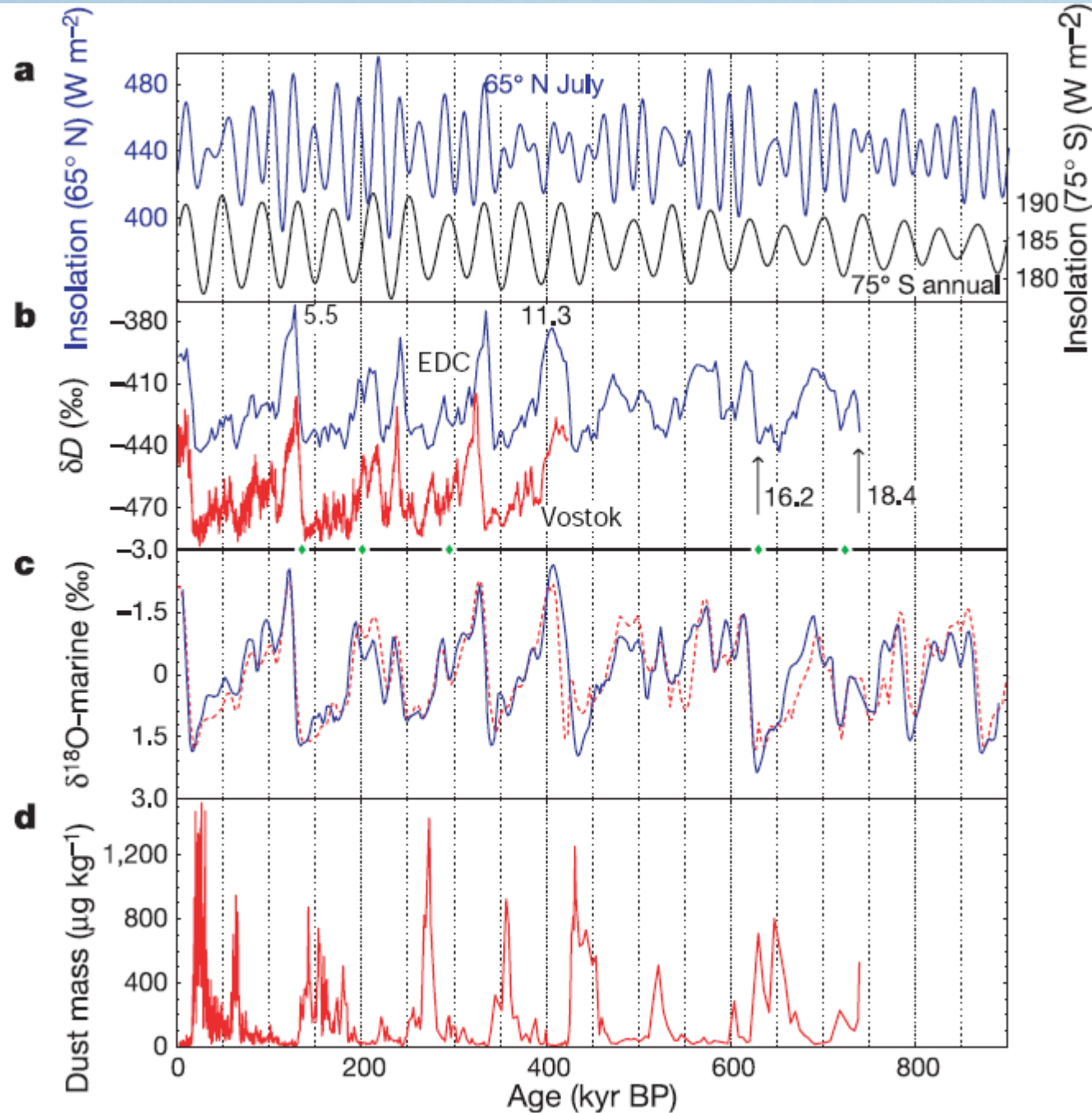
## Problemy z rdzeniami lodowymi: odwrócony fragment rdzenia Vostok.



Porównanie najstarszej części, uznanej za zaburzoną, pozwoliło na „uratowanie” 20 k lat zapisu. Ten fragment rdzenia okazał się odwrócony przez sfałdowanie warstw lodu w najniższej jego części.

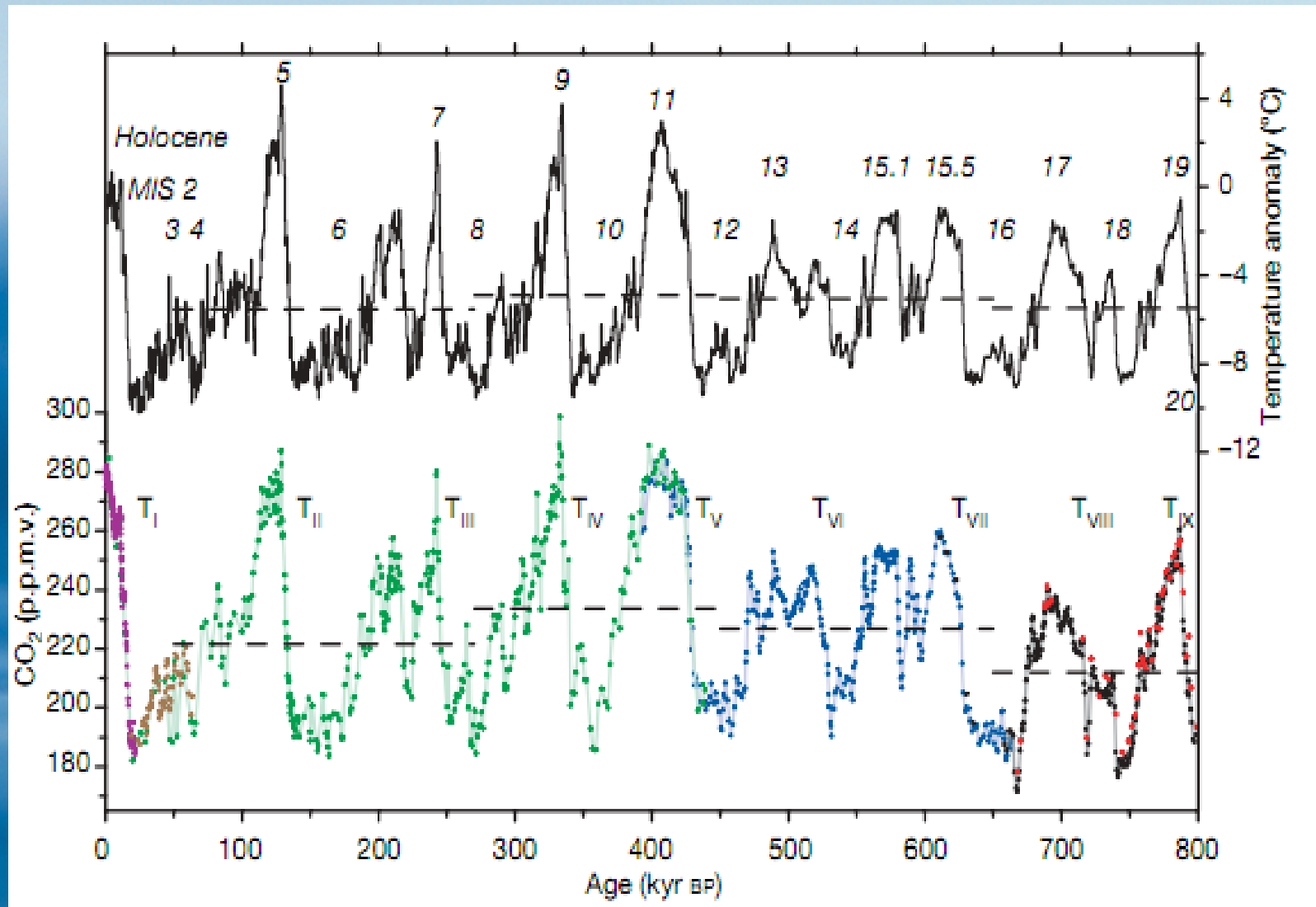


# Najdłuższy zapis klimatu z rdzeni lodowych



Rdzeń z Dome C (Antarktyda) będący zapisem klimatu ostatnich 8 epok lodowych porównany z rdzeniem Vostok oraz rdzeniami z osadów oceanicznych.

# Połączenie danych o temperaturze i CO<sub>2</sub> z różnych rdzeni lodowych

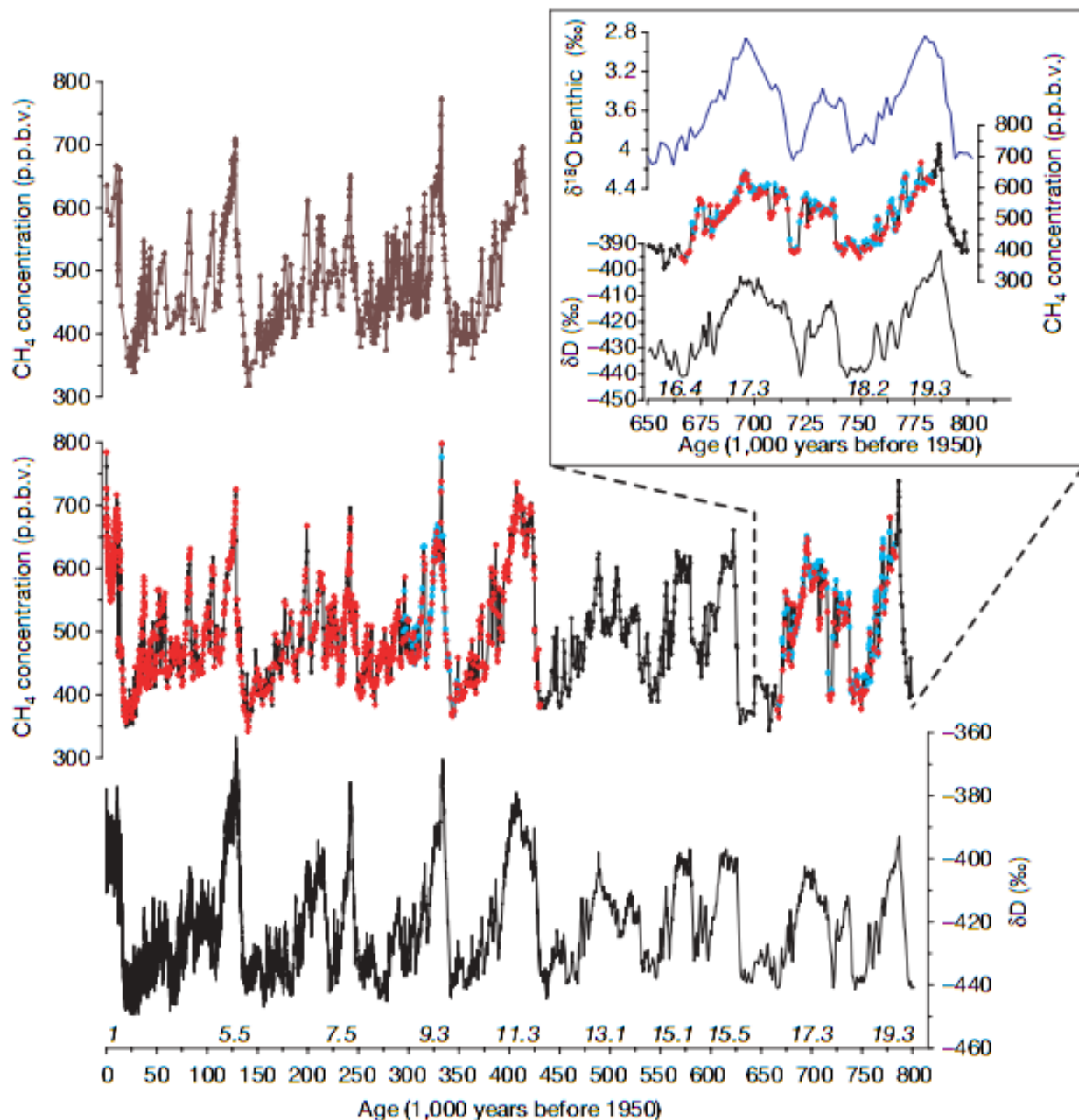


Dane o CO<sub>2</sub> z antarktydzkich rdzeni Taylor Dome (brązowe), Vostok (zielone) i Dome C (pozostałe kolory oznaczające różne prace i laboratoria) i temperatura z Dome C.

*Luthi et al. 2008 (Nature)*

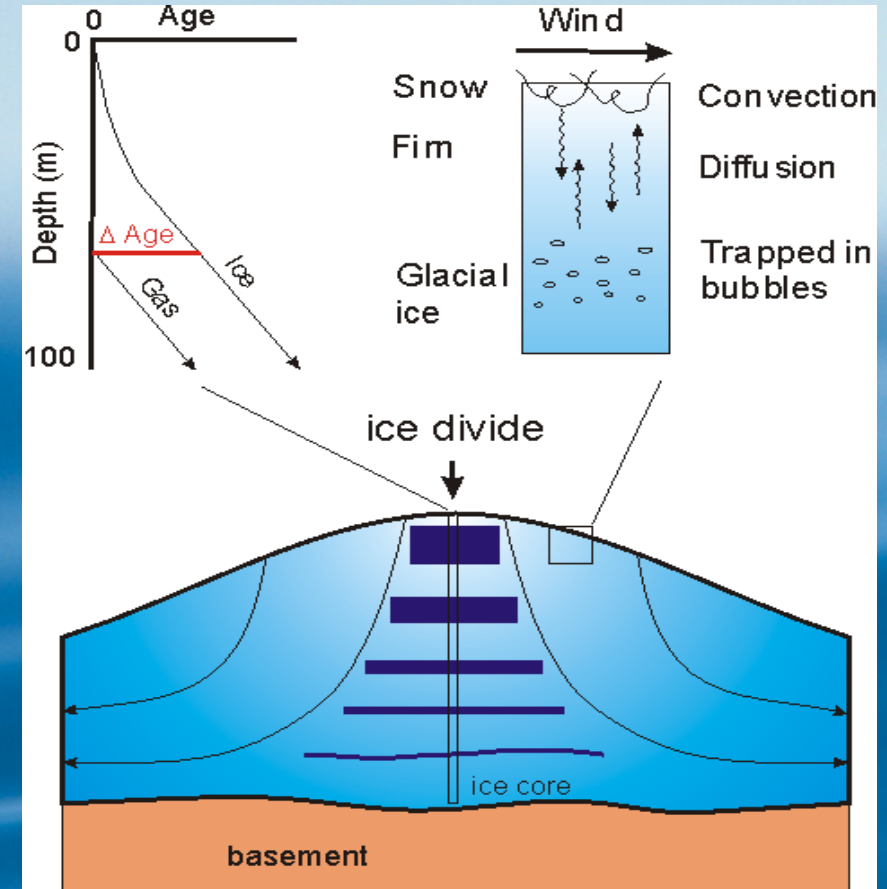
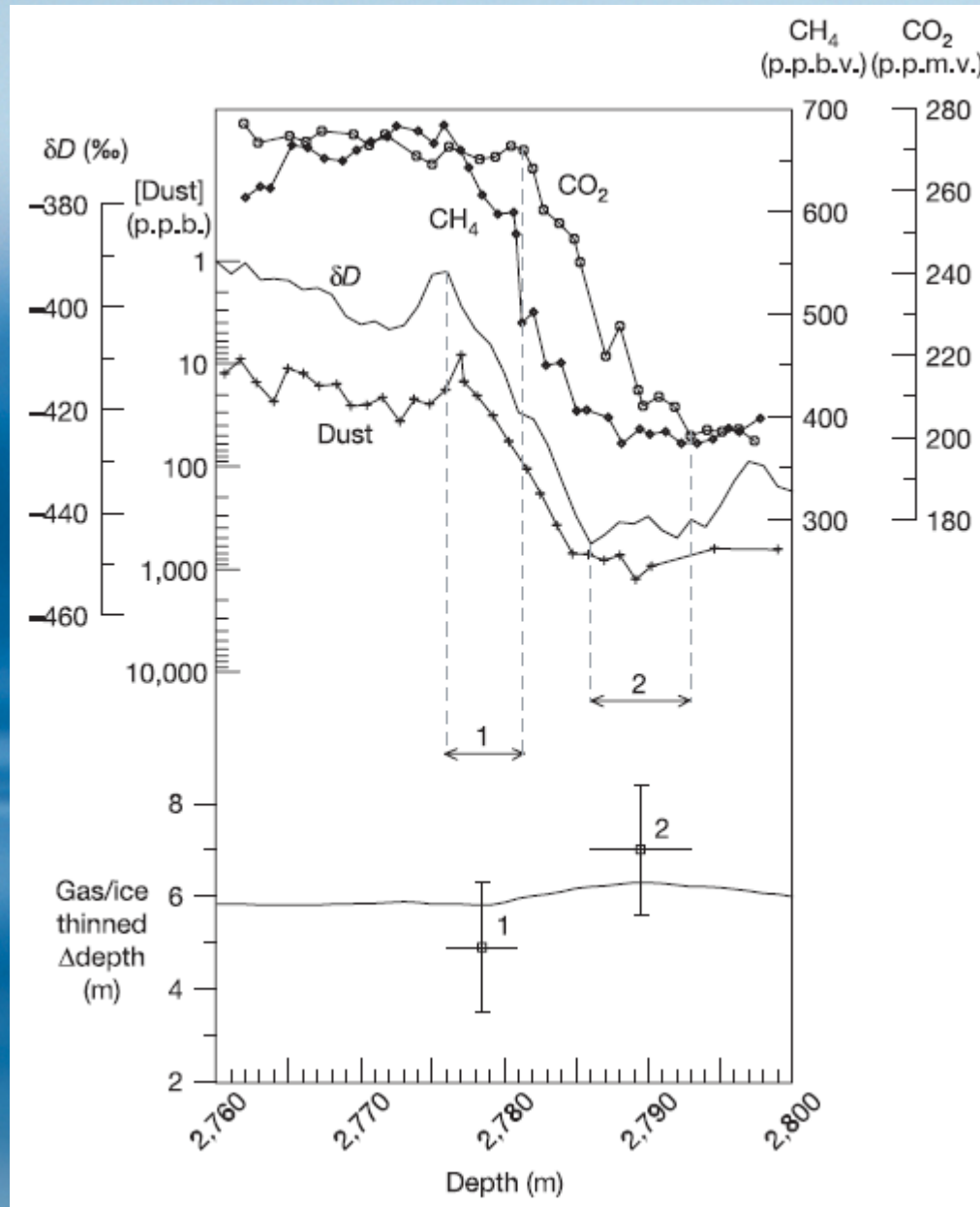


# Połączenie danych o temperaturze i metanie z dwóch rdzeni lodowych



Od dołu  $\delta D$  (proxy temperatury) z Dome C, metan z Dome C (kolory oznaczają różne prace) i metan z rdzenia Vostok.

# Problemy z rdzeniami lodowymi: pęcherzyki powietrza są młodsze niż otaczający lód

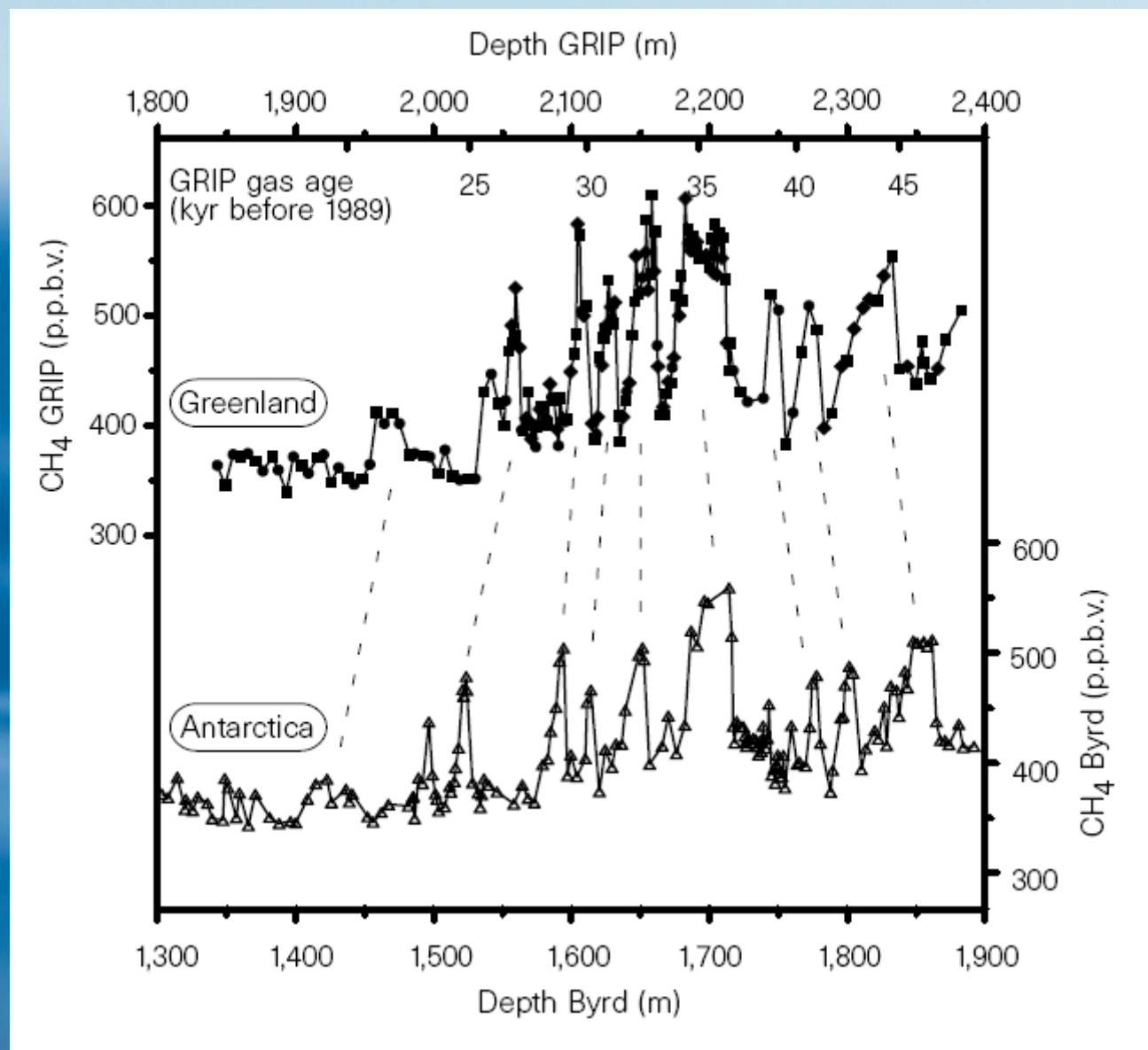


Fragment rdzenia z Dome C (Antarktyda) pokazujący różnicę w głębokości tych samych zmian klimatycznych odczytanych z gazów w pęcherzykach ( $CO_2$  i metan) oraz lodu (deuter i pył).



...jednak przynajmniej gazy w pęcherzykach mają ten sam wiek

Metan z rdzeni z Grenlandii i Antarktydy pozwala na ich synchronizację (dokładną w przypadku  $\text{CO}_2$ ) i przybliżoną w przypadku danych pochodzących z lodu (z dokładnością do błędu stosowanej funkcji różnicy głębokości gaz/lód.



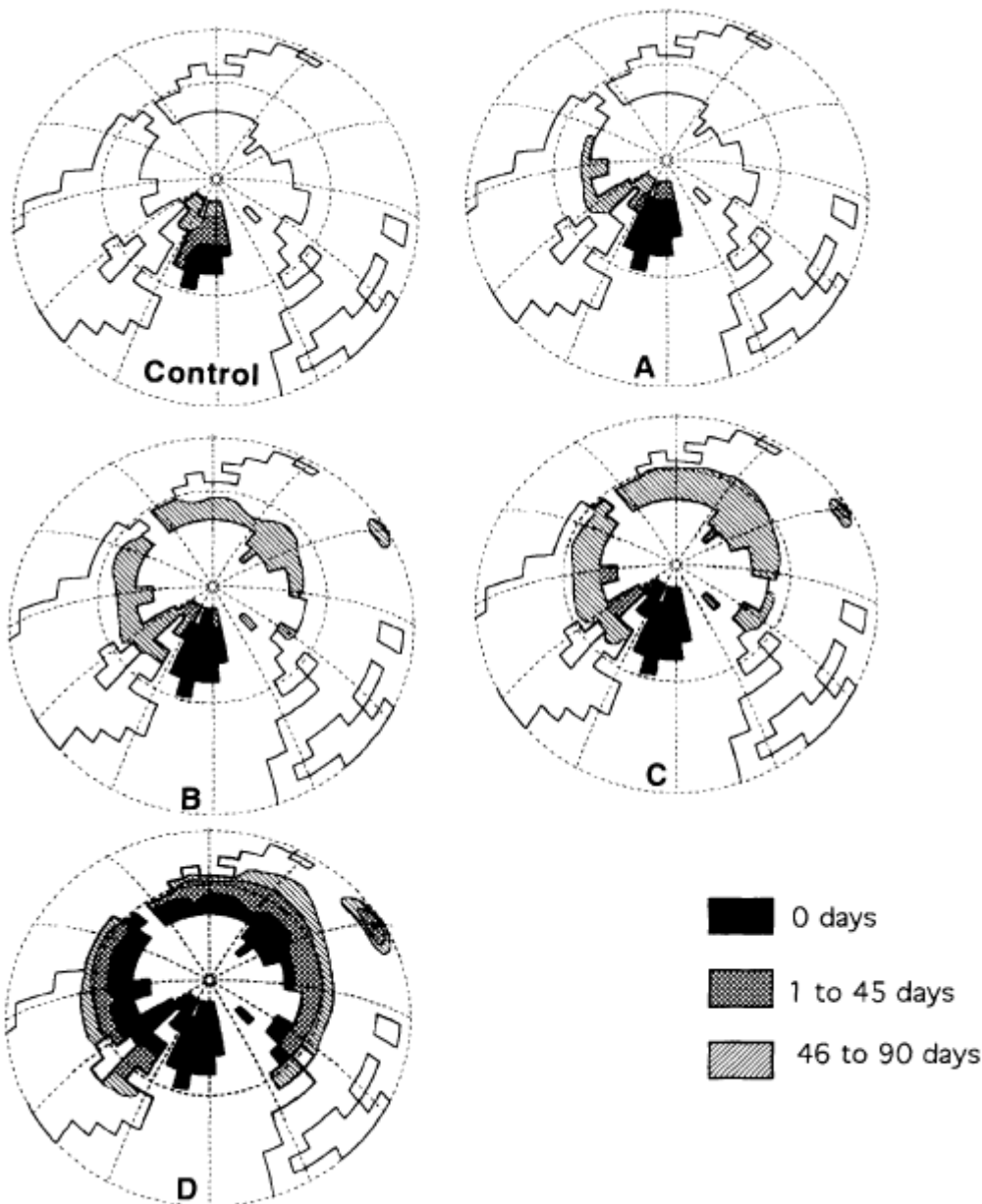


## Podsumowanie 2/3

- Wejście Ziemi w epokę lodową związane jest ze stopniowym zmniejszaniem się koncentracji gazów cieplarnianych.
- Ruch kontynentów (otwarcie cieśnin wokół Antarktydy, zamknięcie Cieśniny Panamskiej) nie były bezpośrednią przyczyną zlodowaceń.
- Natomiast cyrkulacja oceaniczna (powstanie stratyfikacji Północnego Pacyfiku) wydaje się być impulsem do powstania zlodowaceń Półkuli Północnej.
- Globalna objętość lodu oraz temperatura na Antarktydzie są silnie skorelowane z koncentracją gazów cieplarnianych co wskazuje że wzmacniają one efekty „orbitalne” (zmiany nasłonecznienia) .
- Za zmiany koncentracji metanu odpowiadają zmiany powierzchni mokradeł tropikalnych i subarktycznych.
- Jednak za zmiany koncentracji CO<sub>2</sub> muszą być pochodzenia oceanicznego – duża korelacja z temperaturą Antarktydy sugeruje wpływ oceanu z rejonu Prądu Wokółantarktycznego.



# Jak rozpocząć epokę lodową?



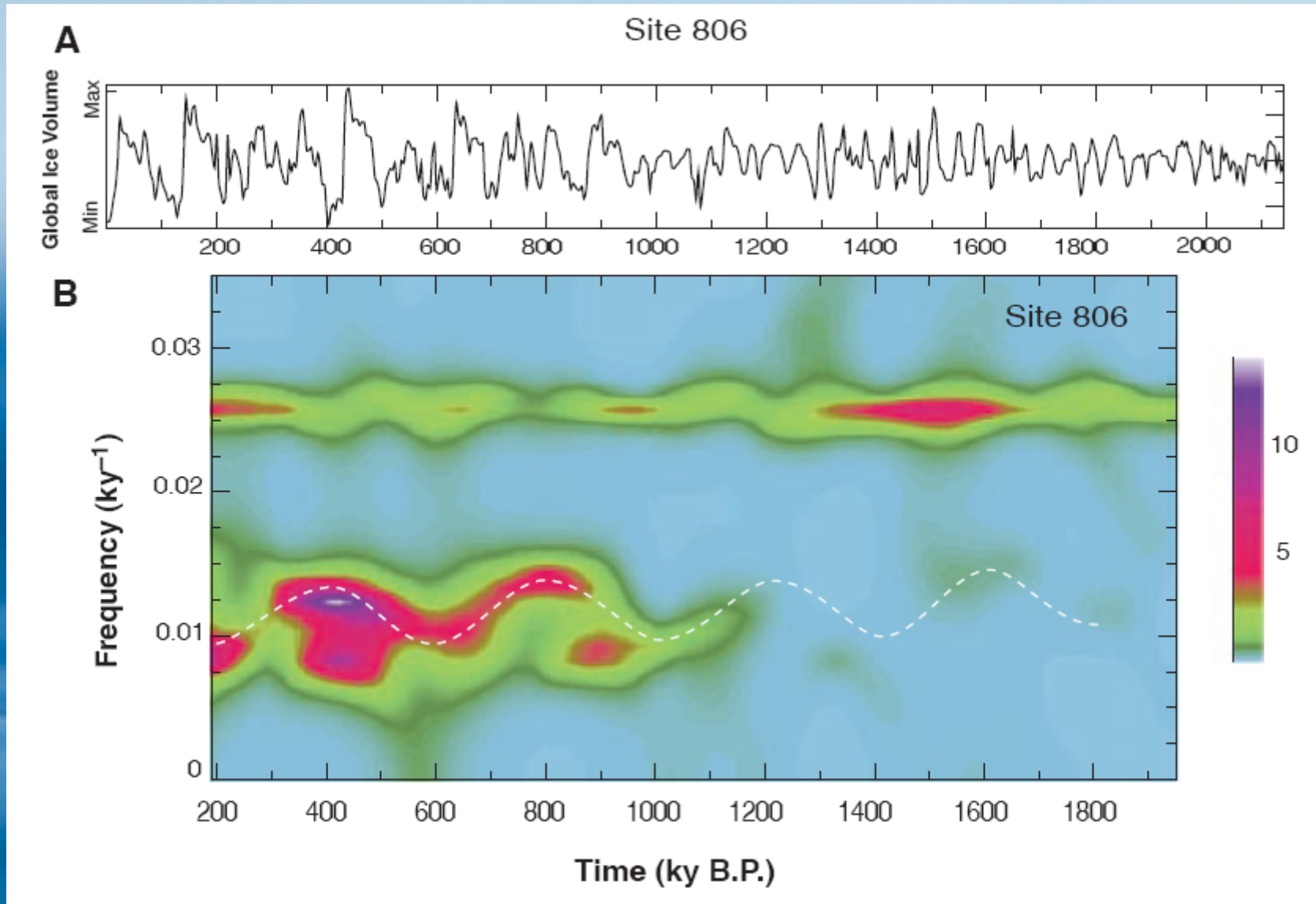
Ilość dni bez lodu w różnych wariantach modelu (D oznacza "wszystko jak 116ka")

Wyniki modeli klimatycznych wskazują że aby rozpoczęła się epoka lodowa konieczne jest spełnienie wszystkich z poniższych warunków:

- Parametry orbitalne z początku zlodowacenia (116ka)
- Obniżona koncentracja  $\text{CO}_2$  o wartości sprzed 116ka
- Zmniejszone albedo (współczynnik odbicia światła) w wyniku zastąpienia tajgi tundrą.

*Gallimore & Kuzbach 1996 (Nature)*

Od 800 k lat cykl zlodowaceń ma długość ok. 100 k lat

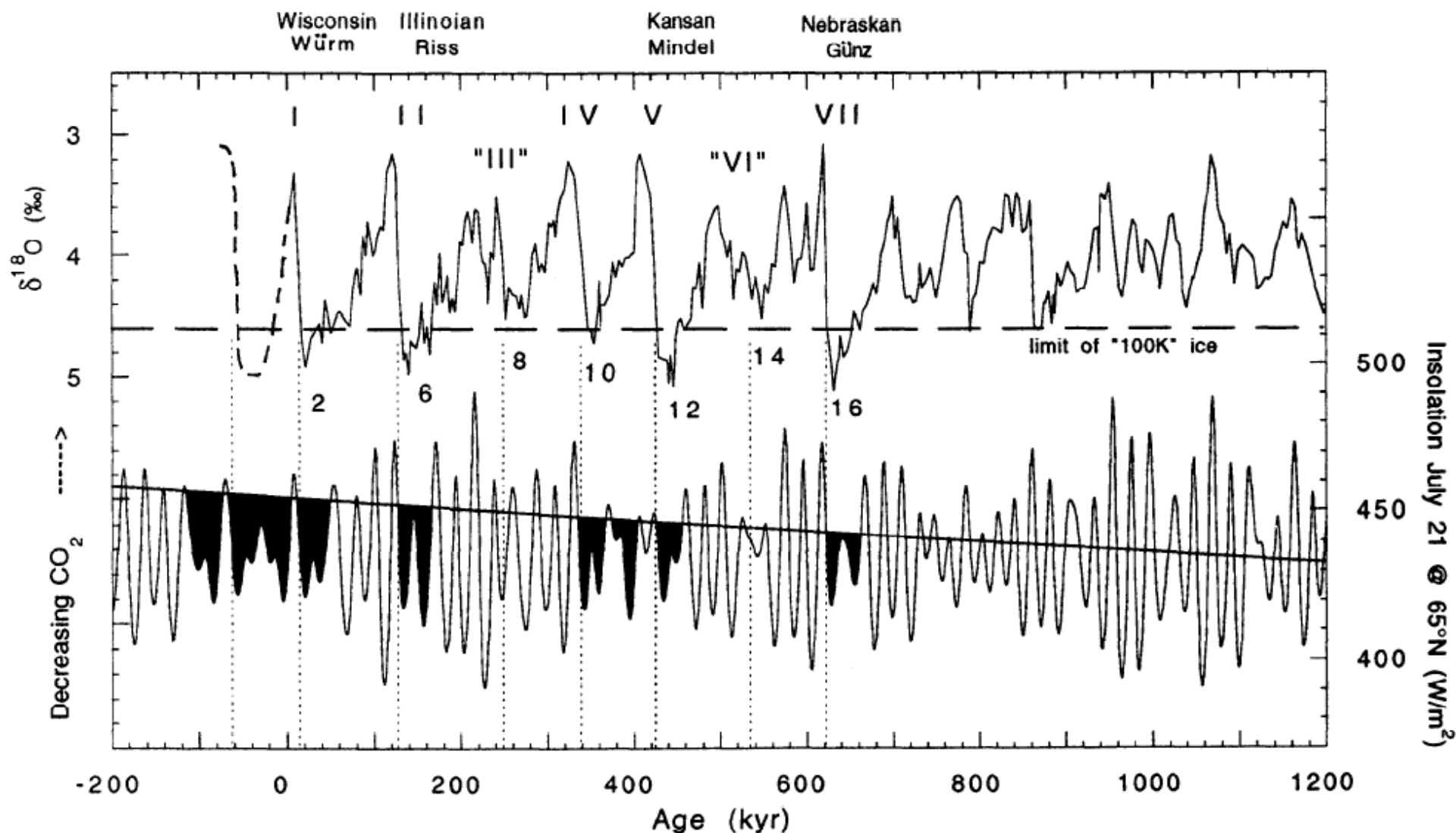


Moc spektralna funkcji objętości lądolodu. Od ok 800 k lat dominuje okres ok. 100 k lat (niższe pasmo na rysunku B). Widoczna jest jego oscylacja między 80 a 120 k lat.

*Rial 1999 (Science)*



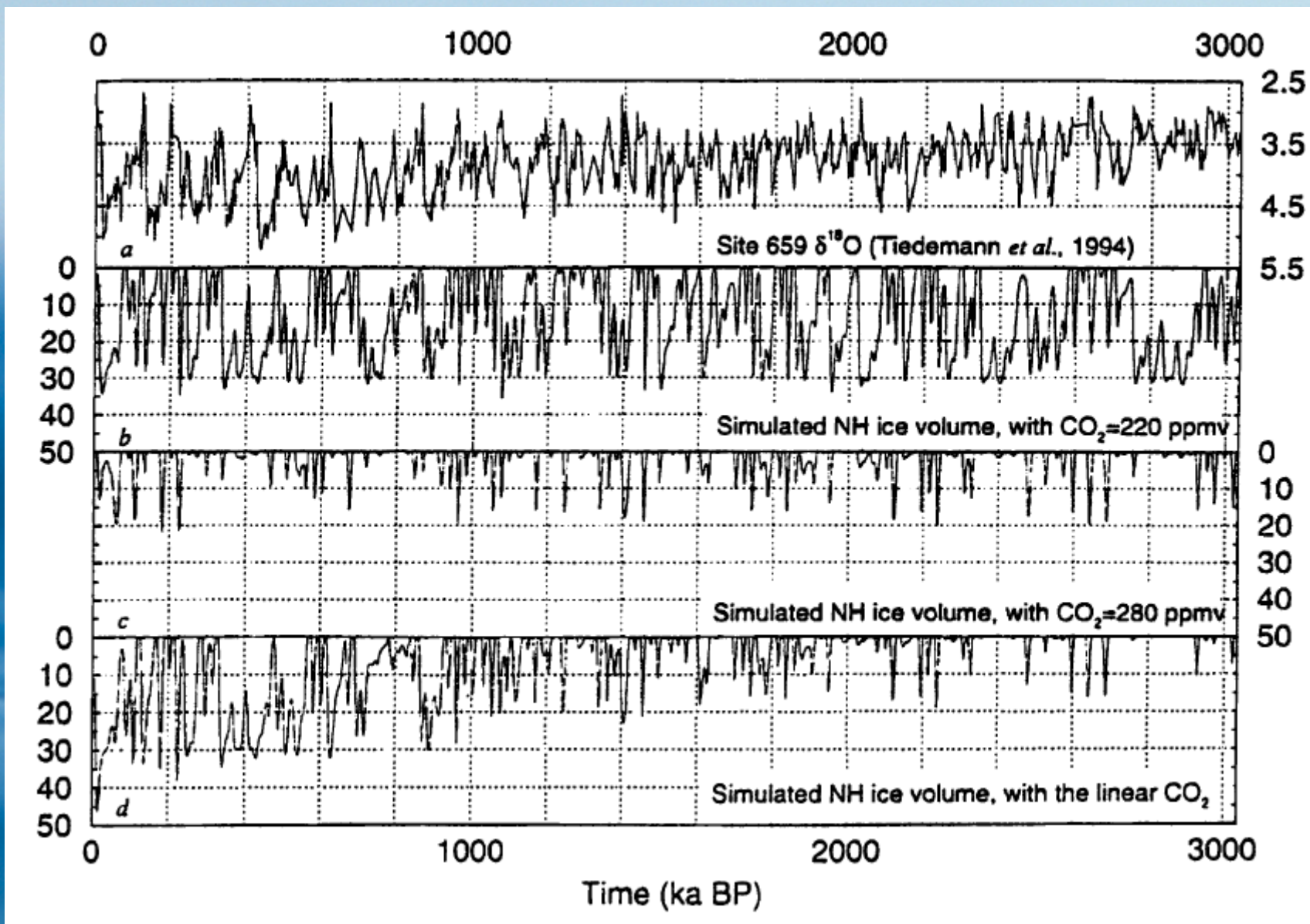
# Przejdźcie 41 k -> 100 k da się wydedukować



Objętość lodu typową dla zlodowaceń "100 k" Ziemia osiąga z coraz większą łatwością (tzn. przy coraz większych poziomach oświetlenia letniego rejonów subpolarnych). Dlaczego?

*Raymo 1997 (Paleoceanography)*

# Przejdźcie 41 k -> 100 k da się wymodelować

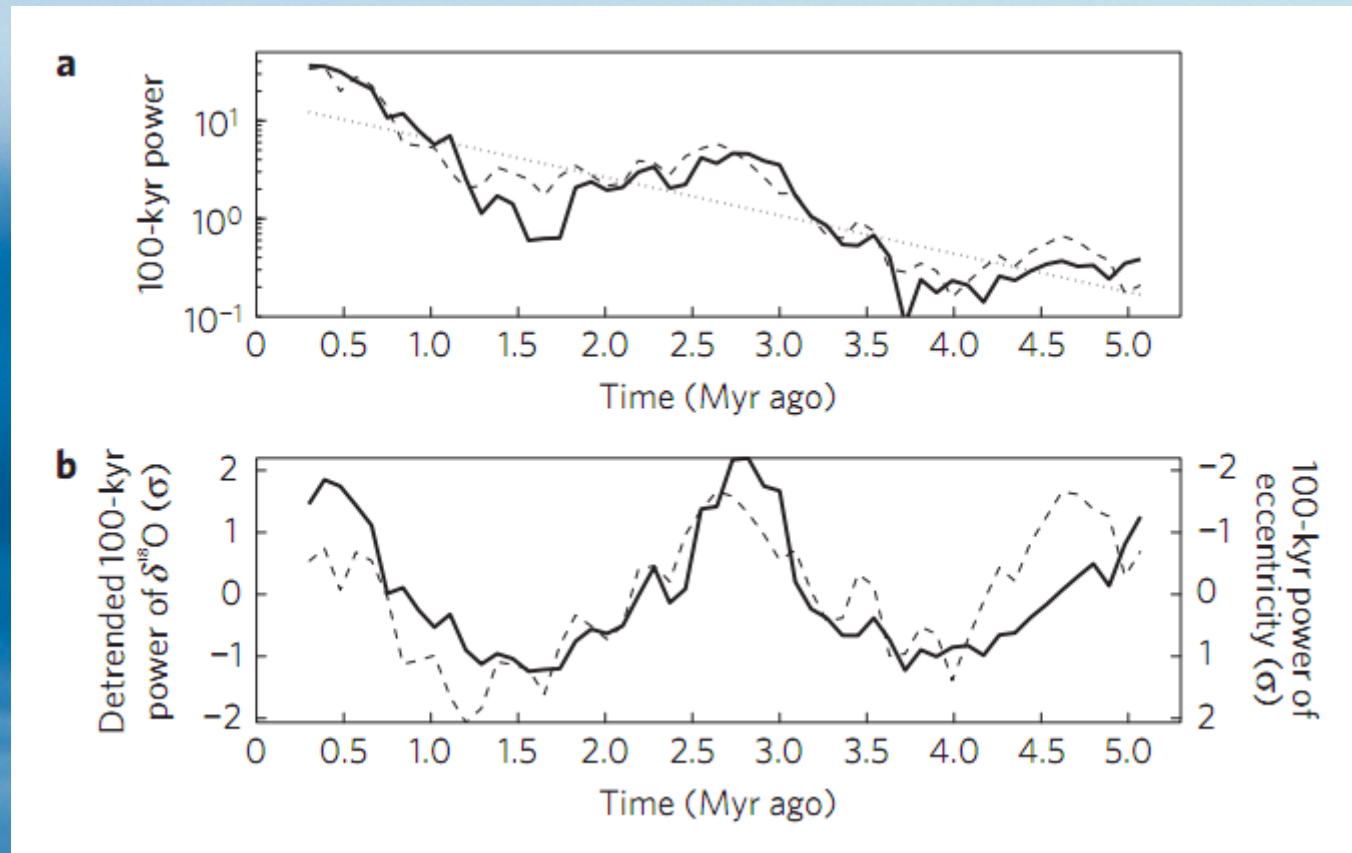


Model rekonstruuje wartości  $\delta^{18}\text{O}$  z osadów morskich (a) tylko gdy wejściowe wartości  $\text{CO}_2$  zmniejszają się z czasem (d).

*Berger, Li, Loutre 1999 (Quaternary Science Reviews)*

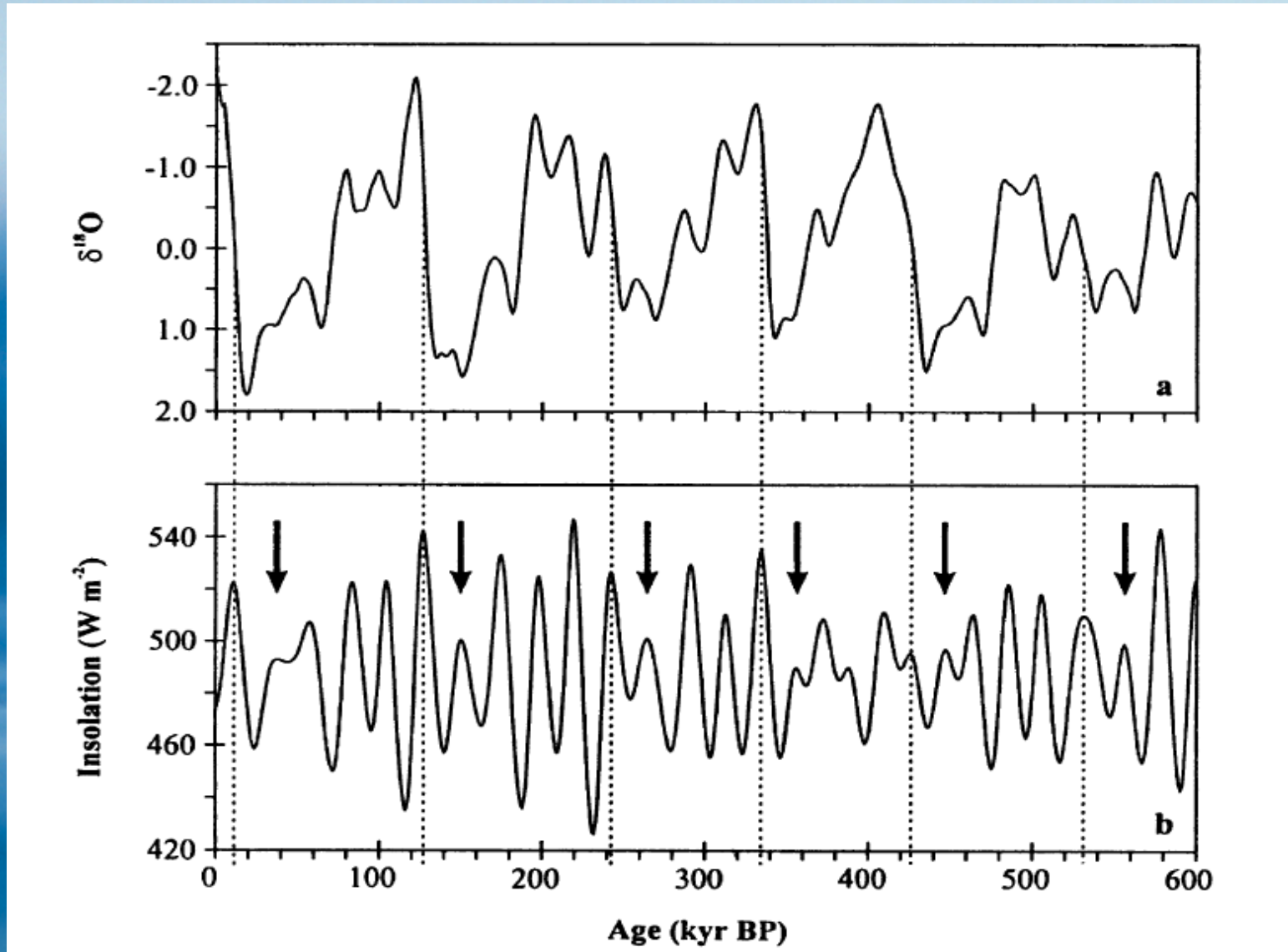


# Czy jednak zlodowacenia o okresie 100k ma coś wspólnego z ekscentrycznością?



Problem w tym, że analiza falkowa (wavelets) pokazuje, że w okresie (ostatni milion lat) gdy moc pasma 100ky była największa (na górze, moc tego samego pasma ekscentryczności była najmniejsza. Dolny panel przedstawia moc obu po usunięciu trendu. Skale pionowe są odwrócone względem siebie!

Czemu przed końcem zlodowacenia “100k” musi nastąpić jedno niskie maksimum letniego nasłonecznienia 65° N?

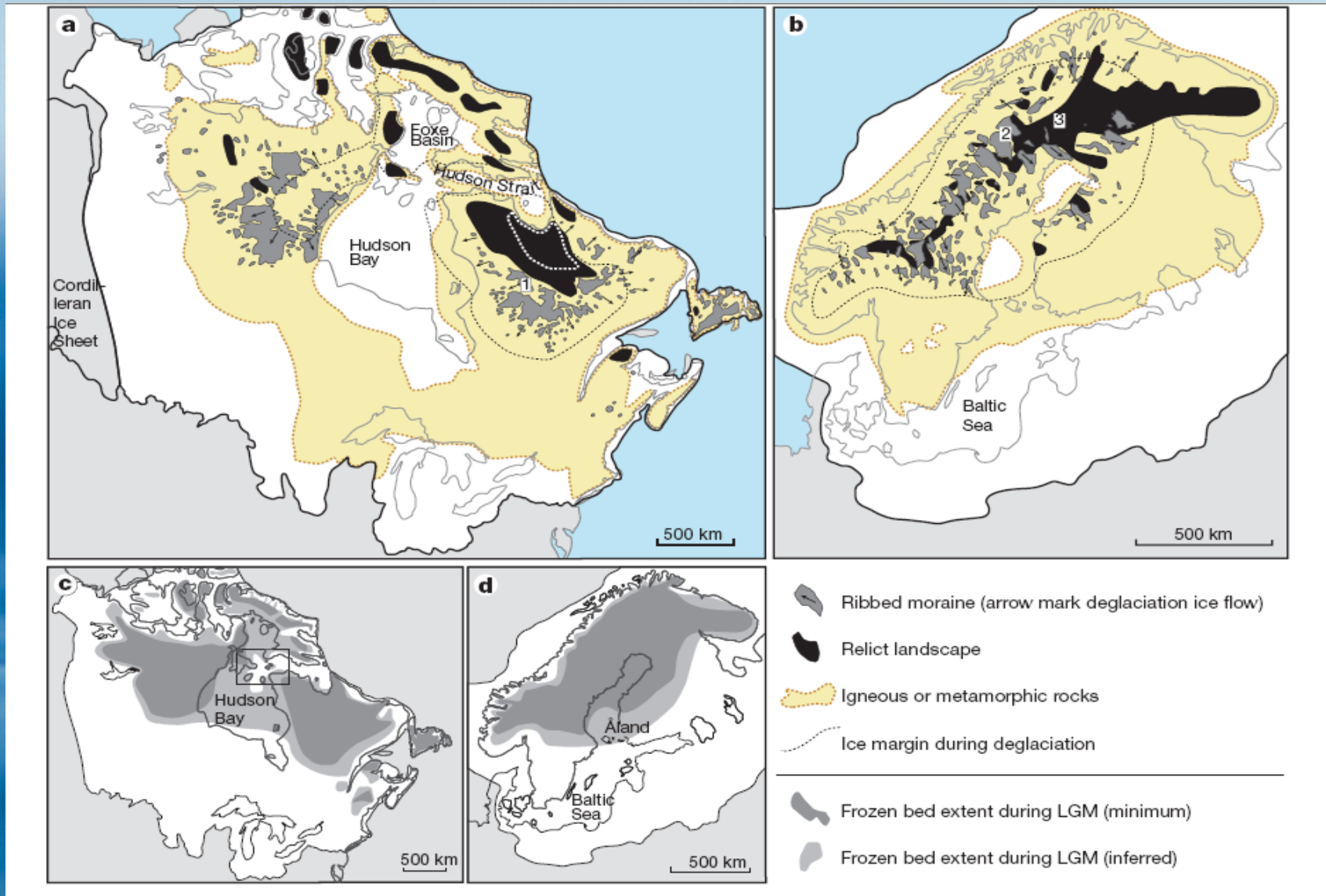


Czy jest to warunek konieczny osiągnięcia przez zlodowacenie objętości „krytycznej”, ponad którą staje się niestabilne?

*Ridgwell Watson Raymo 1999 (Paleoceanography)*



# Czy na objętość krytyczną złodowaceń wpływa miękkość podłoża w marginalnych obszarach złodowacenia?



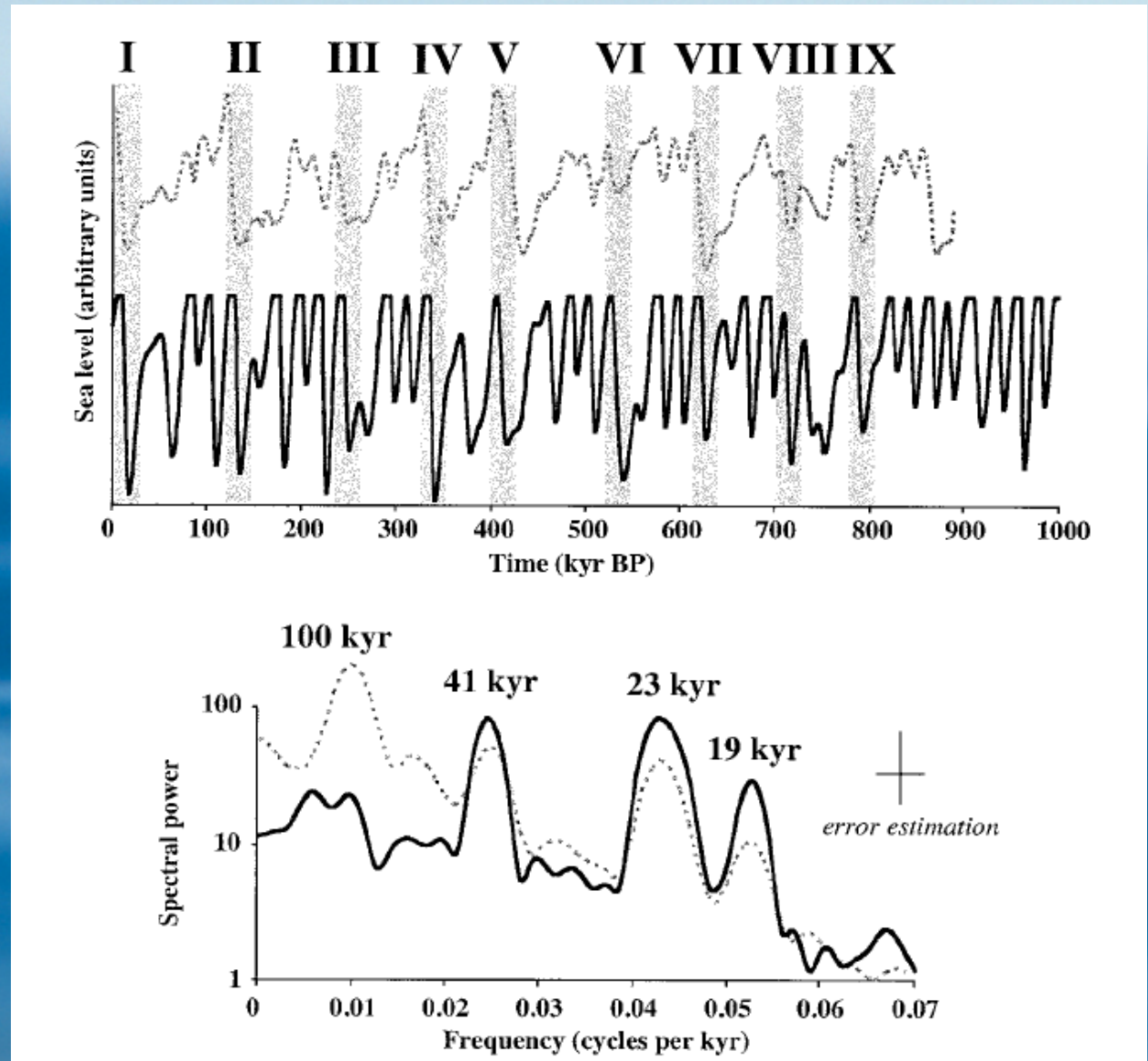
Kolejne złodowacenia rozprzestrzeniają się po „miękkich” osadach pochodzenia lodowcowego co wpływa na geometrię i stabilność lądolodu.

*Kleman & Hattestrand 1999 (Nature)*

# Model zlodowaceń liniowo uzależnionych od nasłonecznienia nie tłumaczy przebiegu zlodowaceń

Jeśli przyrost i ubytek lodu są liniowo zależne od letniego oświetlenia 65 N:

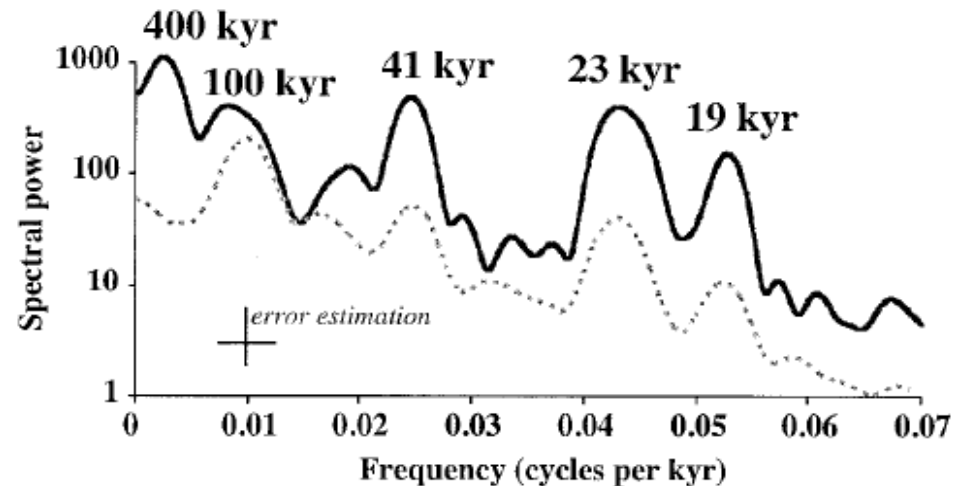
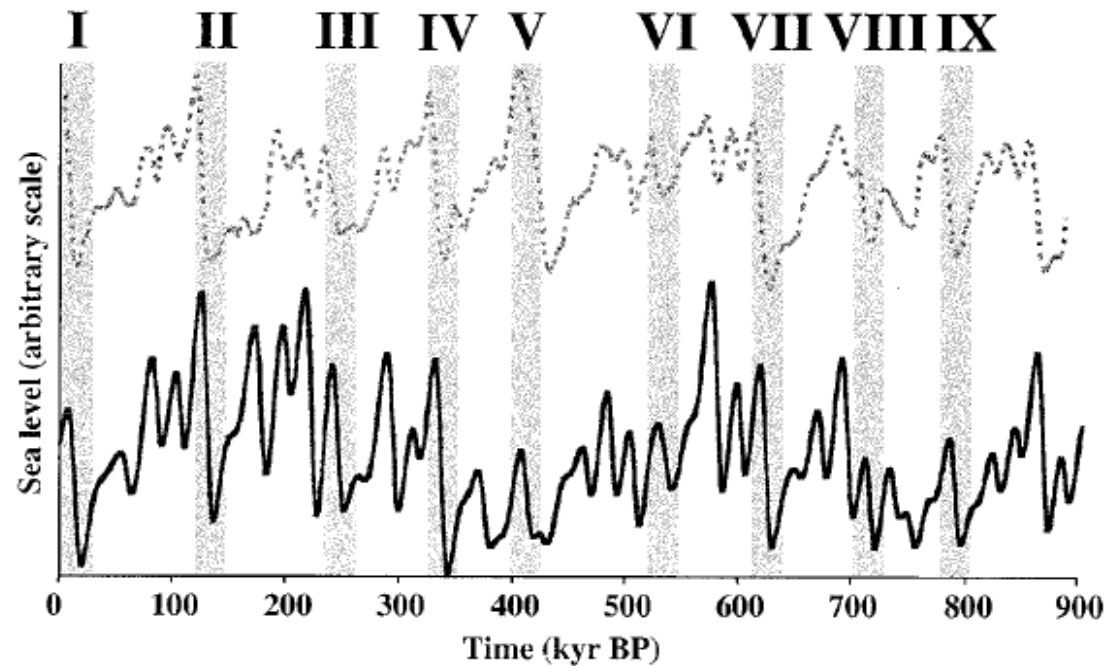
- W rozkładzie spektralnym nie występuje cykl 100 k – jest on zatem efektem nieliniowym
- przebieg czasowy zlodowaceń nie daje się odtworzyć (szczególnie brakuje zlodowaceń “100 k”)



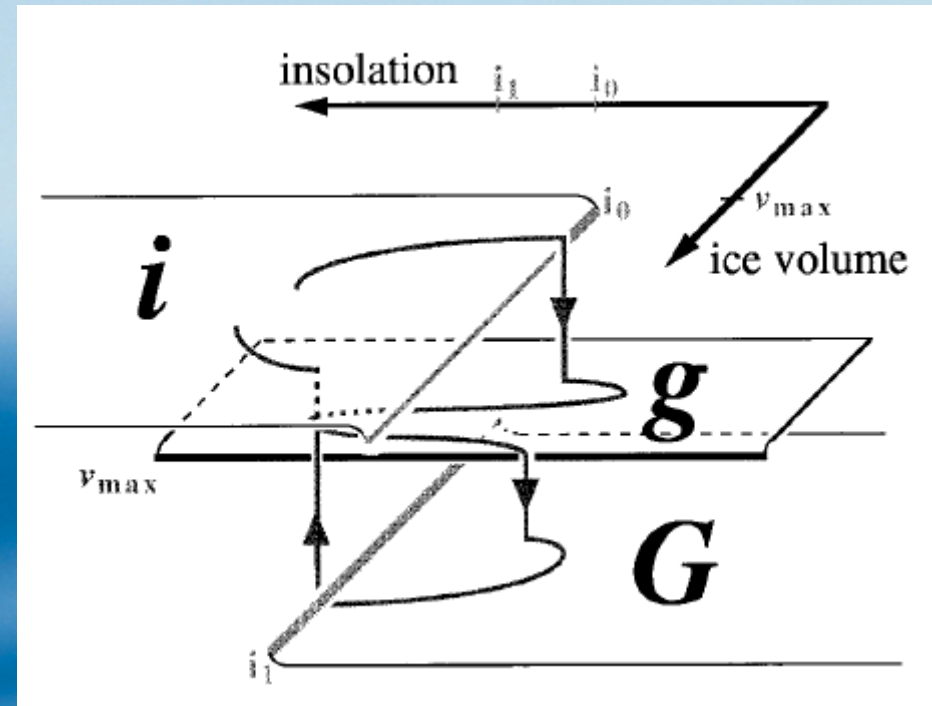
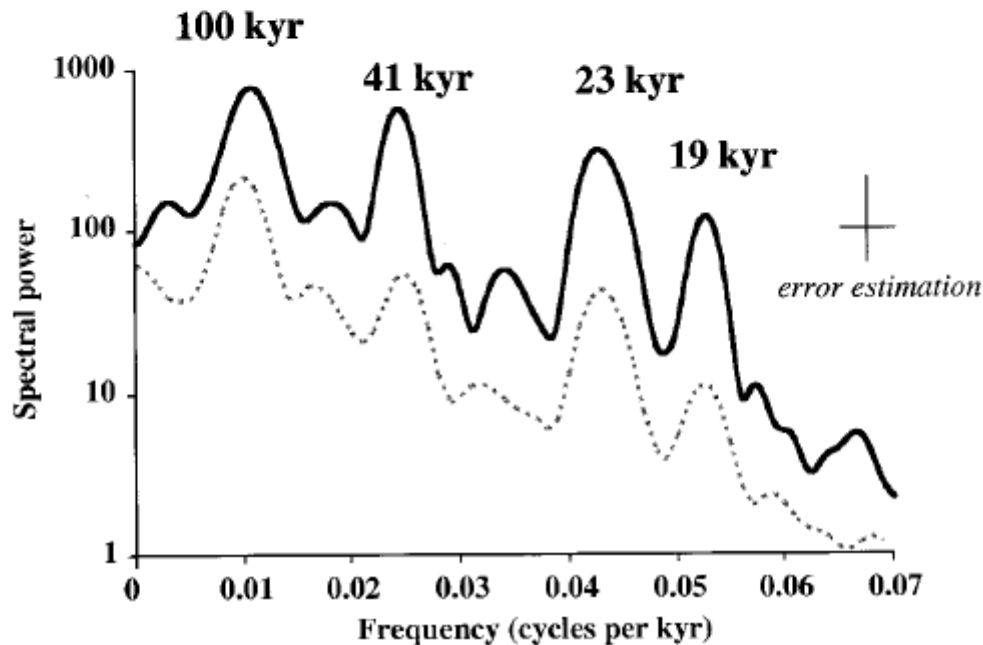
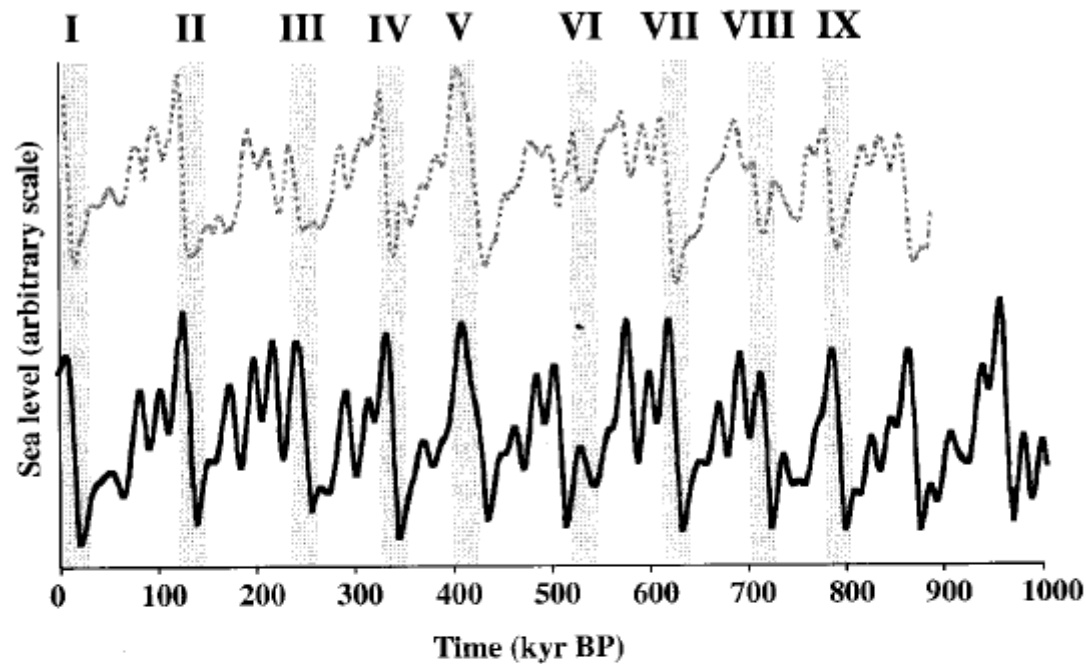


# Model nieliniowy z niesymetrycznym wpływem oświetlenia na akumulację i topienie lodolodu odnosi częściowy sukces

Model niesymetrycznego wpływu oświetlenia na prędkość akumulacji i topienia lodu tłumaczy przynajmniej częściowo przebieg czasowy (zlodowacenia “100 k”). Nie tłumaczy jednak braku sygnału 400 k (ekscentryczność) w paleoklimatycznych danych.



# Model nieliniowy z progiem tłumaczy przebieg zlodowaceń



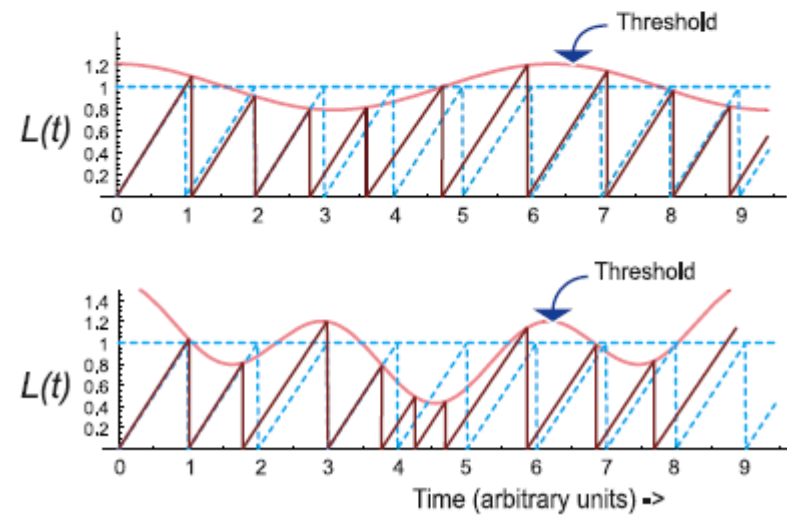
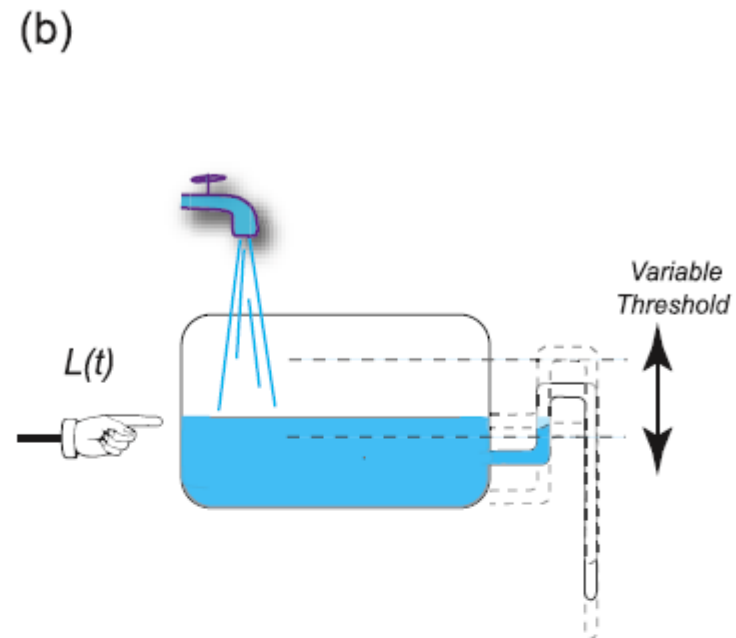
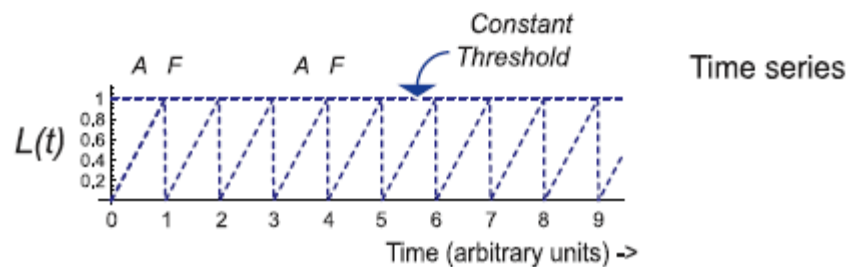
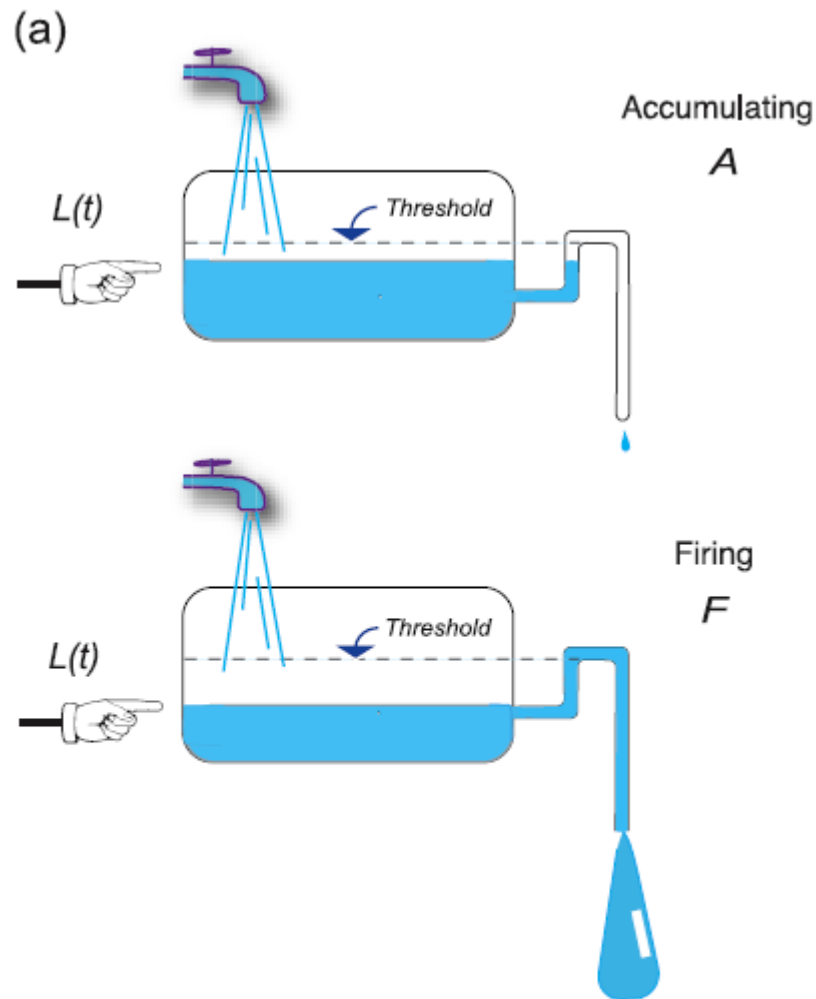
Modele nieliniowe z progiem objętości zlodowacenia powyżej którego lód szybciej topnieje (np. model Paillarda) tłumaczą zarówno istnienie zlodowaceń “100 k” jak i przebiegi spektralne.

Nadal jednak nie znamy fizyki tego “progu”.

*Paillard 2001 (Reviews of Geophysics)*



# Zlew z syfonem: prosty model z progiem



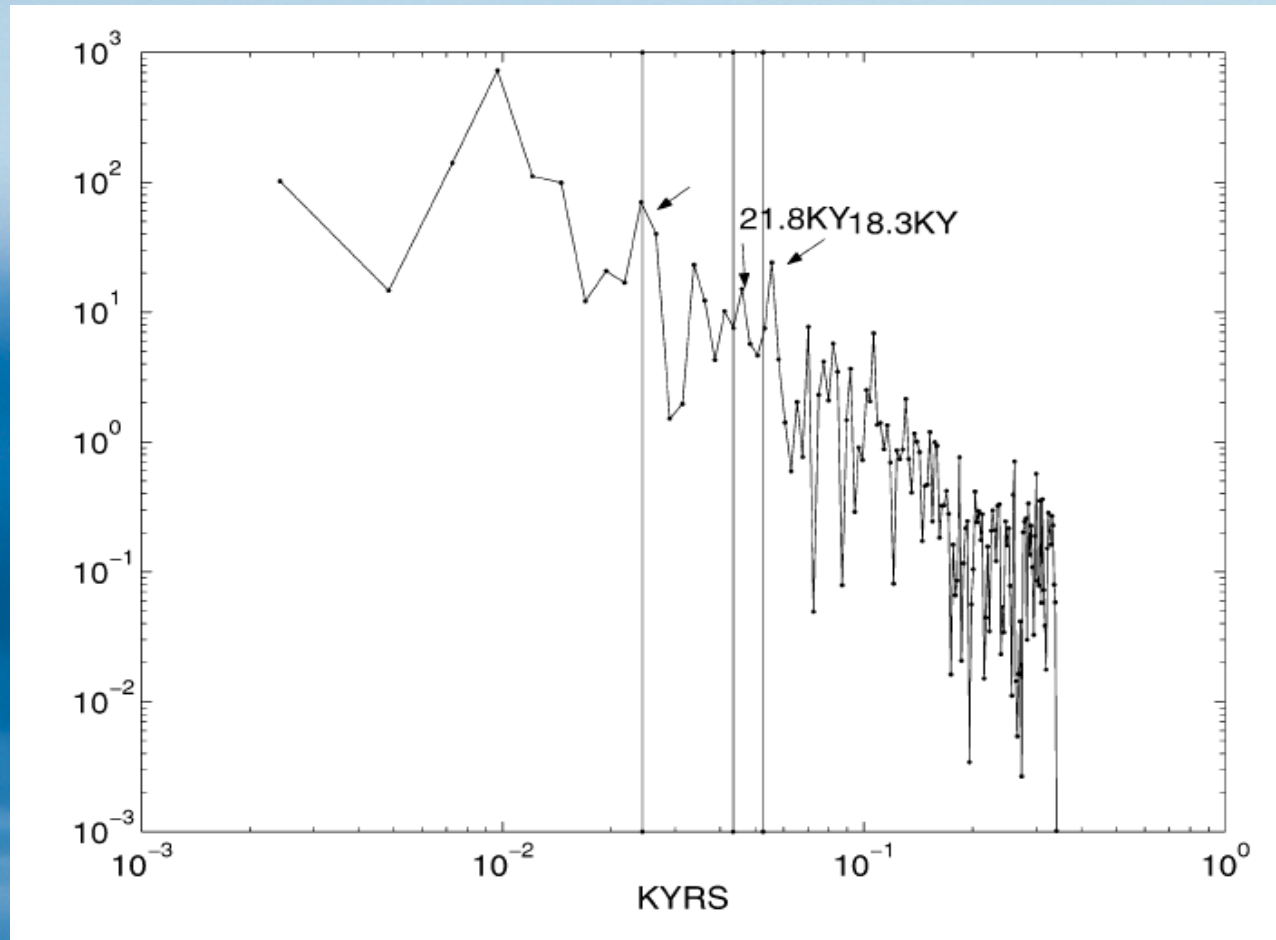
# Możliwe mechanizmy progu krytycznego zlodowaceń

## Zaproponowano szereg możliwych mechanizmów:

- Naturalna oscylacja lądolodów; wymuszanie orbitalne jedynie steruje fazą (momentem deglacjacji)
- Niestabilność kontynentalnych pokryw lodowych o marginesach z miękkich osadów umożliwiających szybki ruch lądolodu
- Wpływ zwiększenia się pokrycia oceanu lodem morskim przy maksimum zlodowacenia poprzez zmiany cyrkulacji atmosferycznej i/albo cyklu węgla ( $\text{CO}_2$ !)
- Osiąganie przez lądolód Antarktydy brzegu szelfu kontynentalnego i wzmożone cilenie się lodu powodujące zwiększoną stratyfikację mórz wokółantarktycznych i wpływając na cykl węgla (zwiększenie atmosferycznej koncentracji  $\text{CO}_2$ ) [*Paillard Parrenin 2004*]



# Głos sceptyka: czy rzeczywiście “wymuszanie orbitalne” steruje zlodowaceniami?

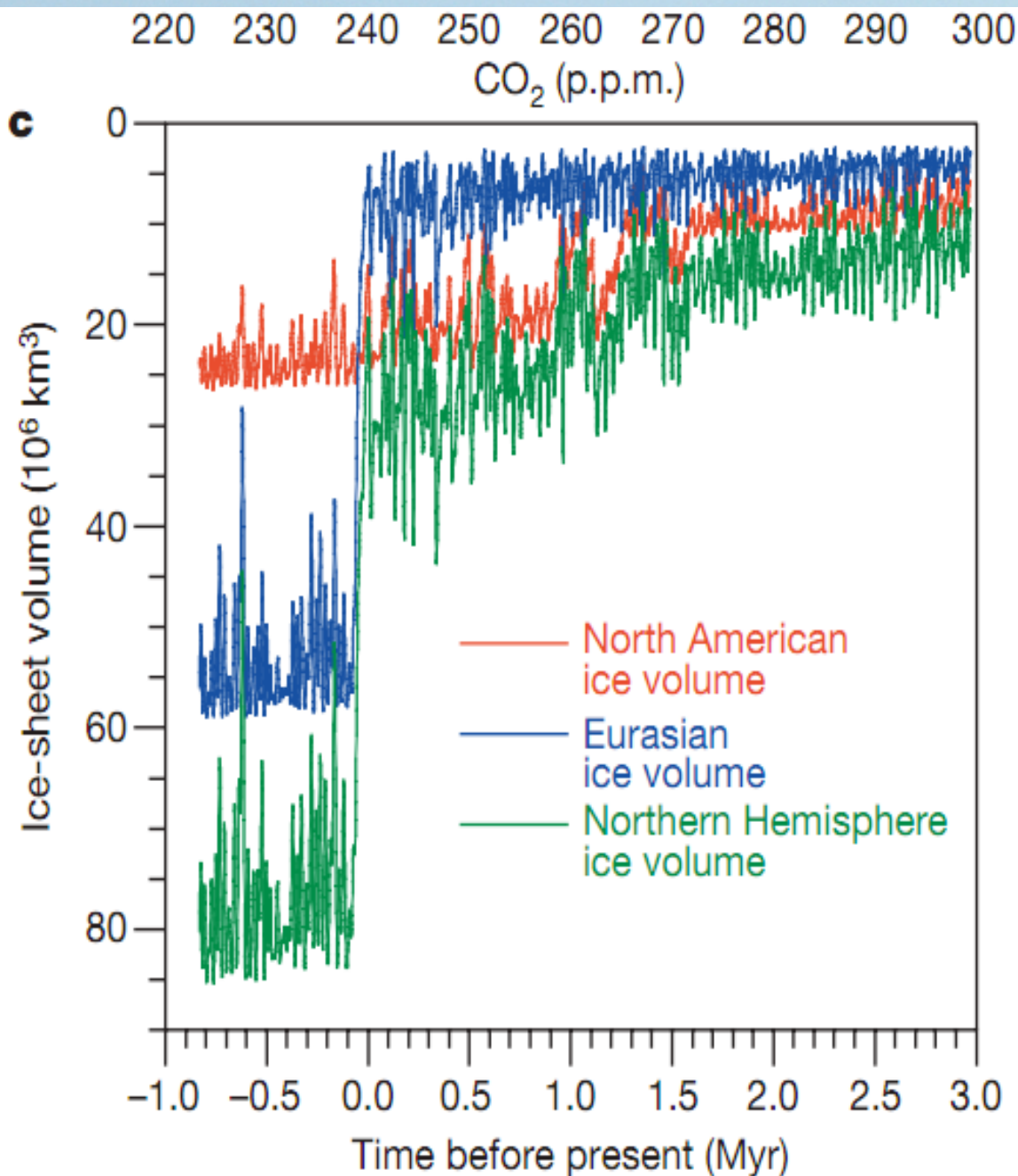


Cykle „orbitalne” (zaznaczone pionowymi kreskami) stanowią małą część (5%) spektrum energetycznego zmian rdzenia lodowego Vostok. Czy zatem są w ogóle istotne? [Wunsch 2003]

Chyba jednak są, gdyż dominują fragment spektrum o właściwej dla zlodowaceń skali czasowej (dziesiątek tysięcy lat).

*Wunsch 2003 (Climate Dynamics)*

# Czy zlodowacenia 100k nie byłyby tylko formą pośrednią do stałego zlodowacenia (gdyby nie my)?



Wyniki modelowania zlodowaceń przy założonym liniowym spadku koncentracji atmosferycznego CO<sub>2</sub> zdają się wskazywać, że niedługo Ziemia wpadłaby w stan nieustannego i znacznie większego niż poprzednie) zlodowacenia na półkuli północnej.

To jednak teoria bo Homo Sapiens zadbał o to aby CO<sub>2</sub> nie ubywało...

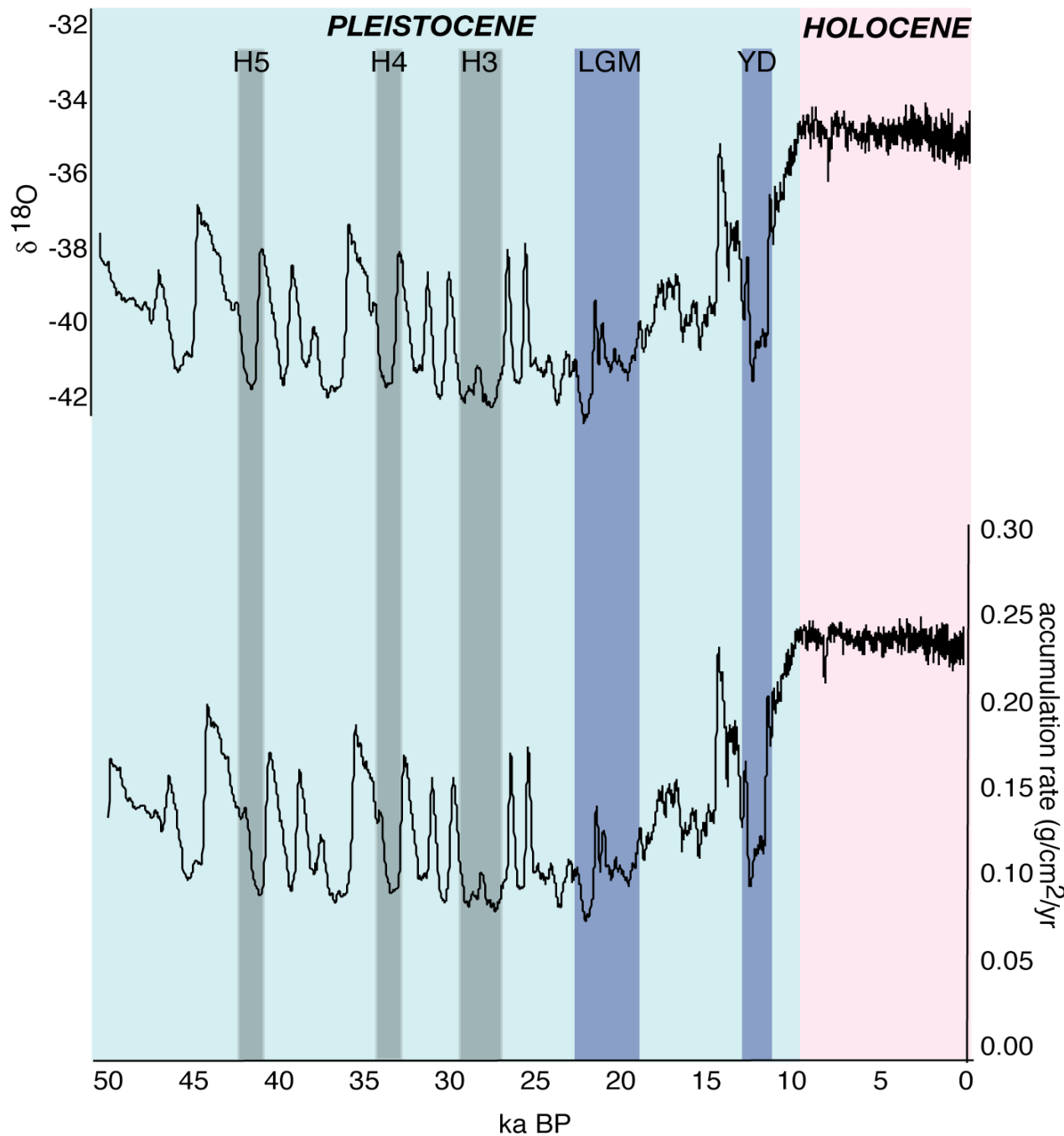
*Crowley & Hyde 2008 (Nature)*



## Podsumowanie 3/3

- Zmiana długości cyklu zlodowaceń z 41 k na 100 k lat 800 k lat temu spowodowana została najprawdopodobniej zmniejszającą się koncentracją CO<sub>2</sub> w atmosferze (ale nie ma na to bezpośrednich dowodów)
- W „świecie 41 k” zlodowacenie rozpoczynało się przy małym oświetleniu północnych rejonów polarnych latem a kończyła się przy wysokim.
- W „świecie 100k” nie każde maksimum oświetlenia wystarczy dla zakończenia zlodowacenia. Udaje się to dopiero 2-mu lub 3-mu (skąd długość cyklu 80 do 120k lat). Wydaje się, że niezbędny jest uprzedni wzrost pokrywy lodowej do określonej wielkości (jednak przyczyny tego nie są w pełni zrozumiałe).

# Greenland Ice Cores: Accumulation and Isotopically Inferred Temperature

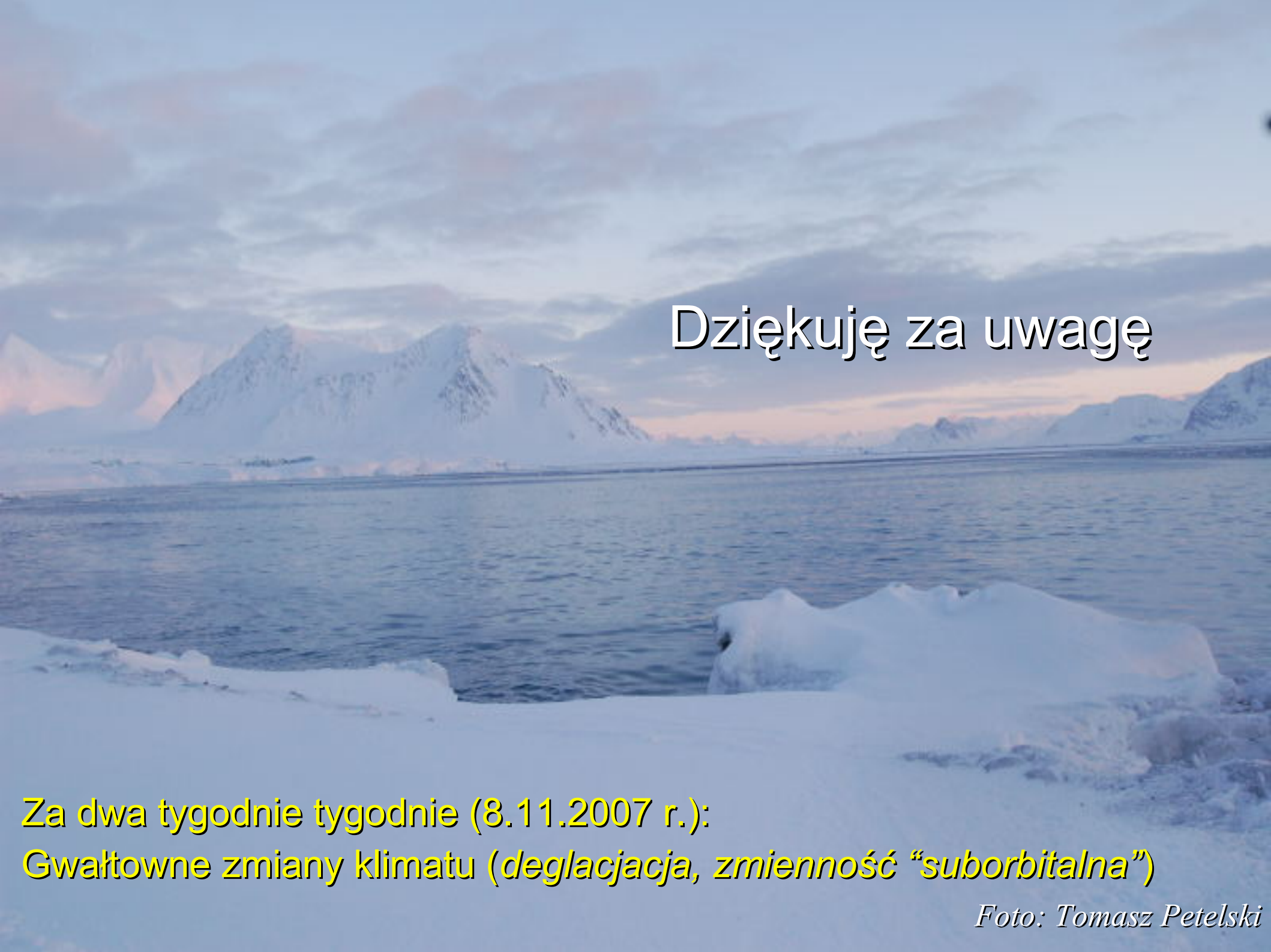


Wszystko już wiemy

A zatem dlaczego klimat Grenlandii zmieniał się tak gwałtownie w epoce lodowej w skali czasowej „suborbitalnej”?

O tym w następnym odcinku...





Dziękuję za uwagę

Za dwa tygodnie tygodnie (8.11.2007 r.):

Gwałtowne zmiany klimatu (*deglacjacja, zmienność “suborbitalna”*)

*Foto: Tomasz Petelski*