

# Geologija mora

## Paleoceanografija (12)

Mladen Juračić, Geološki odsjek PMFa,  
Sveučilište u Zagrebu, 2013/14

# Paleoceanografija

- Klimatske promjene i promjene načina cirkulacije vode u oceanima zapisane su u oceanskim sedimentima.
- Paleoceanografija se bavi rekonstrukcijom fiziografije oceana i promjenama u vremenu.
- Za dobivanje podataka za te rekonstrukcije posebno su važni međunarodni veliki projekti (i skupi) kao što su DSDP s *RV Glomar Challenger* i CLIMAP (posebno za pleistocensku rekonstrukciju). Danas IODP (Integrated Ocean Drilling Project) s brodom *JOIDES Resolution*.

# Paleoceanografija

- Polazeći od današnje situacije (koju manje više poznajemo), ukoliko idemo u rekonstrukciju oceana u sve starijim razdobljima smanjuje nam se broj dostupnih podataka pa će i rekonstrukcija biti sve slabija (netočnija).
- Relativno je uspješna rekonstrukcija pleistocenskih oceana.

# Pleistocenska oceanografija

- Shvaćanje da su u prošlosti postojala ledena doba s debelim pokrovom leda i u Europi i Americi, uhvatilo je korijena tek prije nešto više od 120 godina!
- Nakon toga otkriveno je da ih je bilo *više*, ali koliko, u kakvim ciklusima, te o čemu ti ciklusi ovise, pokazalo se teško odgonetnuti samo istraživanjem kopna.
- Svaka slijedeća glacijacija brisala je prethodni zapis!

# Pleistocenska oceanografija

- Za rekonstrukciju ledenih doba pokazao se idealnim istraživati zapis u dubokomorskim sedimentima.
- Za to su potrebni uzorci iz dugačkih jezgri iz i klipnih korera (*Piston corer*).
- Takva uzorkovanja započela su ekspedicijom *Albatross* (Švedska 1947-48) kad je Kullenberg vadio i do 7 m dugačke jezgre koje su pokrivale vremensko razdoblje do 0,5-1 Ma.
- Geokemijska i mikropaleontološka istraživanja tih uzoraka doprinijela su rekonstrukciji ponašanja oceana u pleistocenu.

# Pleistocenska oceanografija

- Time se odgovorilo na to:
  1. Kako su izgledali oceani u maksimumu glacijacije?
  2. Koja je priroda ciklusa ledenih doba, koja im je frekvencija i amplituda, te vrijeme trajanja?
  3. Kakva je uloga oceana u dinamici promjene iz glacijala u interglacijal i obrnuto?

# Oceani u maksimumu glacijacije

1. Koliko su se ledeni oceani razlikovali od sadašnjih?
  - **Površinske su struje bile jače.** Struje ovise o vjetrovima a ovi o horizontalnim temperaturnim gradijentima (razlike na maloj udaljenosti).
  - Rub leda i polarni front bili su bliži ekvatoru.
  - **Ekvatorijalni upwelling** bio je intenzivniji, a i obalni upwelling.
  - **Fertilitet** je pao na sjeveru (zbog pokrivenosti ledom), a porastao u srednjim širinama i tropima.
  - Naravno **površina oceana bila je hladnija** no danas.

# Oceani u maksimumu glacijacije

- Led je povećao **albedo**, što znači da je smanjena adsorpcija energije sunca, te je zrak hladniji, pa je manje vlage u zraku. Manje vlage znači aridniju klimu, a to dalje dovodi do povećanja pustinja i savana, što opet uzrokuje manju adsorpciju (nego što adsorbiraju šume). Sve to dovodi do povećane refleksije sunčeve energije u svemir, što u povratnom mehanizmu pospješuje hlađenje.
- **Primjer pozitivne povratne sprege**



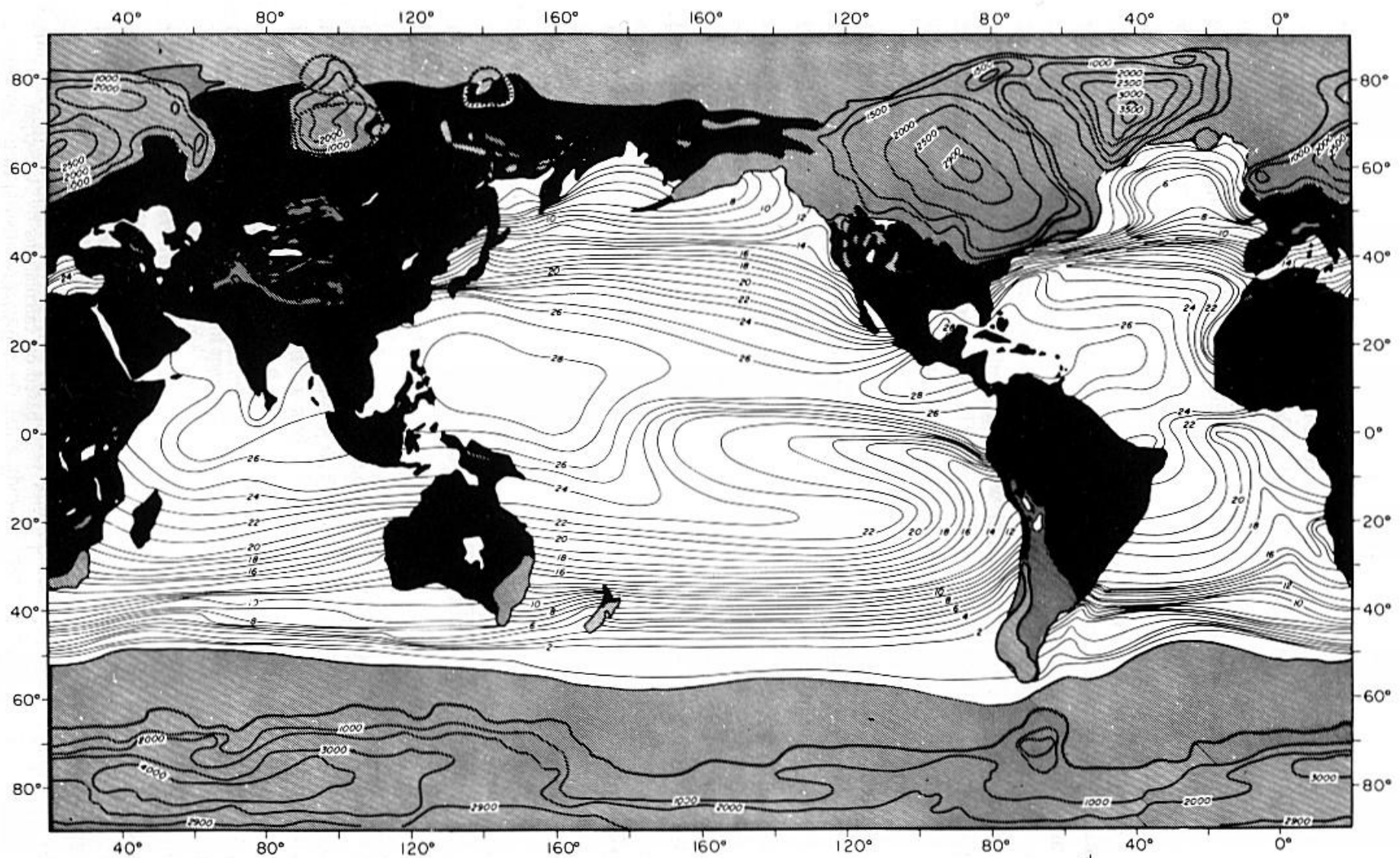
# Oceani u maksimumu glacijacije

- Regionalni stupanj promjene bio je različit. Neke su se regije više hladile od drugih.
- Klimatske razlike posebno su bile značajne u blizini granica klimatskih zona (područje je mijenjalo klimatske zone), dok su relativno male klimatske promjene bile u sredini pojedinih zona, čak i zanemarive primjerice u centralnim dijelovima tropske ili subtropske klimatske zone!
- Posljednje, ali ne i manje važno **morska je razina** bila znatno **niže** no danas, 120 do 130 m. Time su i šelfovi bili dijelom izloženi (na zraku), a površina oceana malo manja. To je također povećavalo albedo Zemlje pridonoseći dodatnom hlađenju.

# Oceani u maksimumu glacijacije

- **18 K karta** napravljena je na temelju "transfer metode" (J. Imbrie) usporedbom foraminiferske zajednice u površini sedimenta sa zajednicom u jezgri starom 18.000 g.
- Starost donjeg uzorka je određivana pretežno na temelju prvog vrlo povećanog udjela kisika-18 u vapnenačkim ljušturicama (što odgovara glacijalu jer je  $^{16}\text{O}$  "spremljen" u ledu na kopnu!
- Debljina uzorka za određivanje 18K karte u jezgri je konačne debljine i obuhvaća vremenski raspon sedimentacije između 400 i 4000 godina (ovisno o brzini sedimentacije!).

# 18 K karta



# Oceani u maksimumu glacijacije

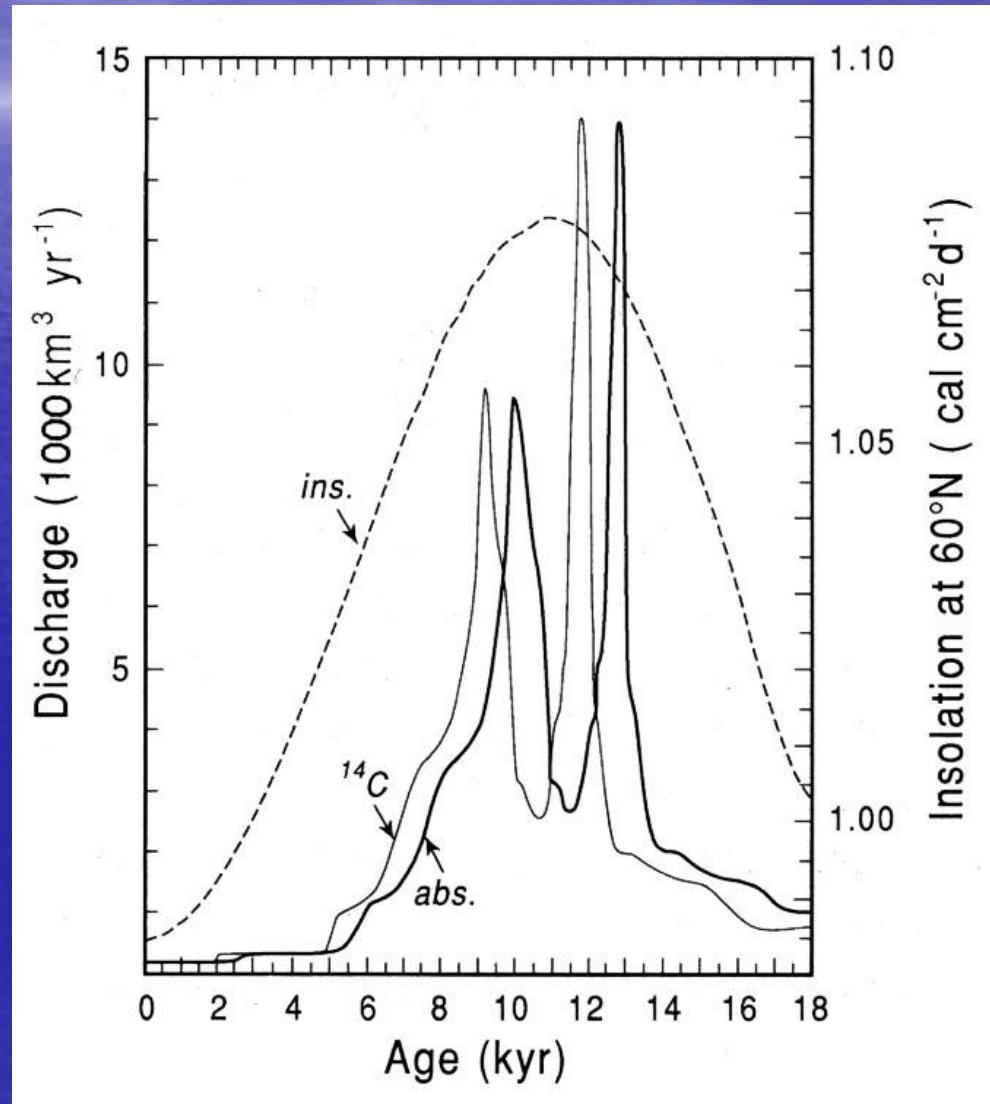
- Na temelju 18K karte može se zaključiti da je ocean ledenog doba prije 18 000 godina bio sljedećih karakteristika:
  1. Imao je povećani termalni gradijent duž polarnog fronta, posebno u sjevernom Atlantiku i oko Antarktike.
  2. Polarni front bio je pomaknut prema ekvatoru.
  3. Površinska temperatura vode bila je prosječno niža za 2,3°C.
  4. Upwelling je bio povećan duž ekvatora u Atlantiku i Pacifiku.
  5. Obalni upwelling je također bio povećan, kao i istočne rubne struje.
  6. Gotovo stabilne pozicije centara kruženja i nepromijenjene temperature u vrtložnim sustavima u osnovnim oceanskim bazenima.

# Deglacijacija u pulsovima

1. Zašto i kako je glacijal prešao u današnji interglacijal ?
2. Koliko je tomu trebalo?
  - Uzrok prijelaza iz glacijala u interglacijal vjerojatno je vezan sa sezonskom distribucijom Sunčeva zračenja koji je pak vezan uz Milankovićeve mehanizam (cikluse).
  - Za prijelaz je trebalo između 7 i 8.000 godina. Kroz to vrijeme su se ledenjačke mase posljednjeg glacijala smanjile na nešto slično današnjoj situaciji.
  - Tijekom deglacijacije je morska razina porasla za oko 120 m. Novija istraživanja potvrđuju da je otapanje leda nastupalo u pulsevima ili stepenicama, i to prvi od 13,5 do 12,5 ka (Termination Ia) i drugi od 11 do 9,5 ka (ili Ib).

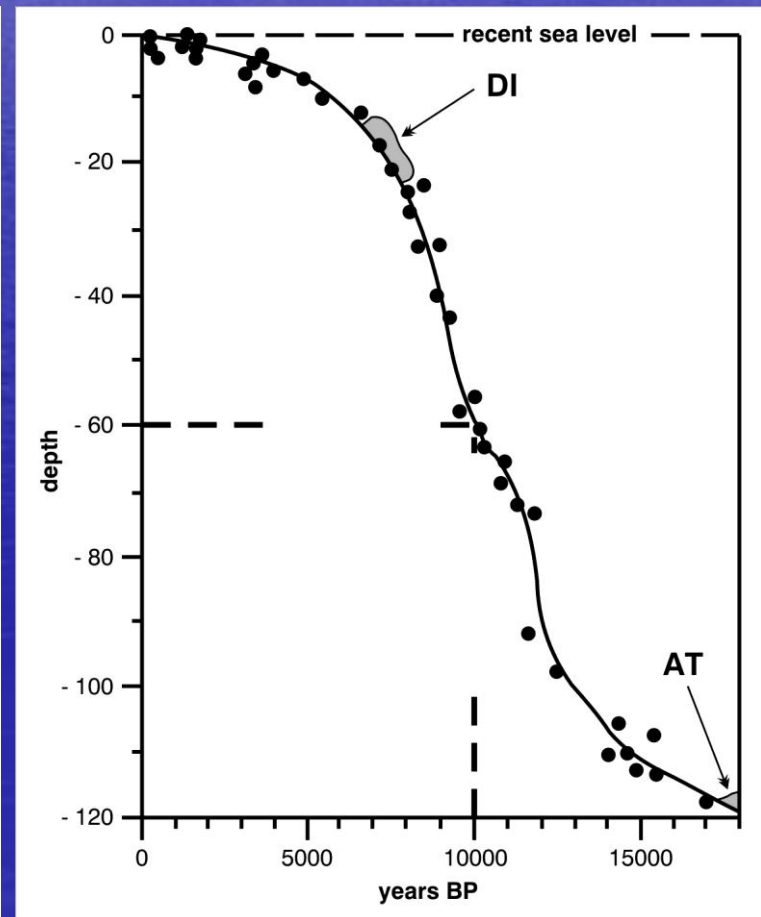
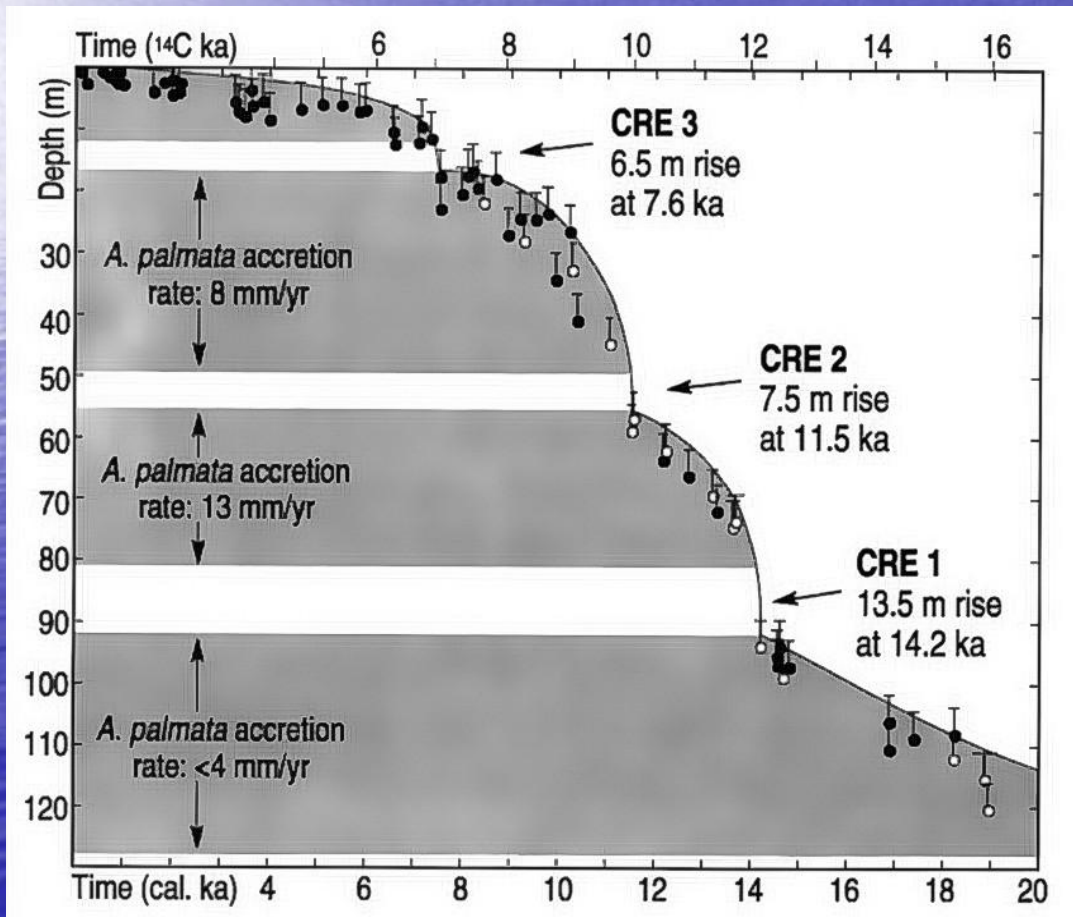
# Deglacijacija u pulsovima

- Usporedba vremena i količine vode nastale otapanjem leda i intenziteta subarktičke ljetne insolacije. Deblja linija dobivena U/Th metodom



# Deglacijacija u pulsovima

- To je uzrokovalo i skokovit porast morske razine



# Deglacijacija u pulsovima

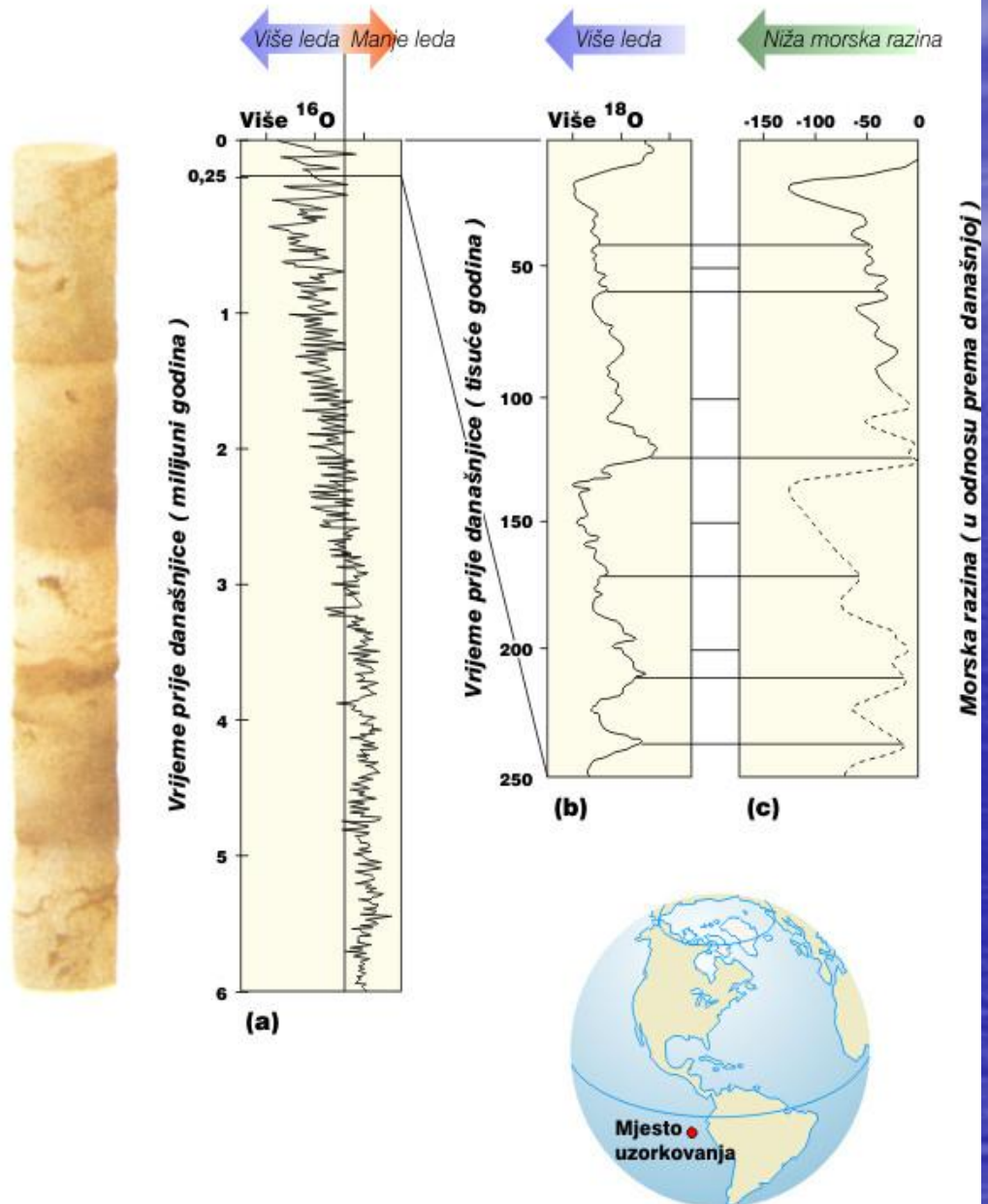
- Povlačenje polarnog fronta u sjevernom Atlantiku također je bilo diskontinuirano.
- Znatno **napredovanje** fronta dogodilo se tijekom **mlađeg drijasa** (*Younger Dryas*) između 11 i 10.000 godina  $^{14}\text{C}$  (U jezgri leda prije 12.800 do 11.700 kalendarskih godina).
- Nastanak ovog hladnog razdoblja koji je vratio Europu u *coldhouse* (**ledenica?**) uvjete jedan je od važnih i zanimljivih paleoklimatskih ali i paleoceanografskih problema.
- Vjerojatno su promjene u oceanskoj cirkulaciji bile značajne te se i prijenos topline znatno razlikovao. Na neki je način donos topline strujama u sjeverni Atlantik bio znatno smanjen. Niz povratnih procesa, koje smo opisali, doveo je do mini ledenog doba koje je trajalo oko 1. milenija, a završilo iznenada vjerojatno u nekoliko desetaka godina.

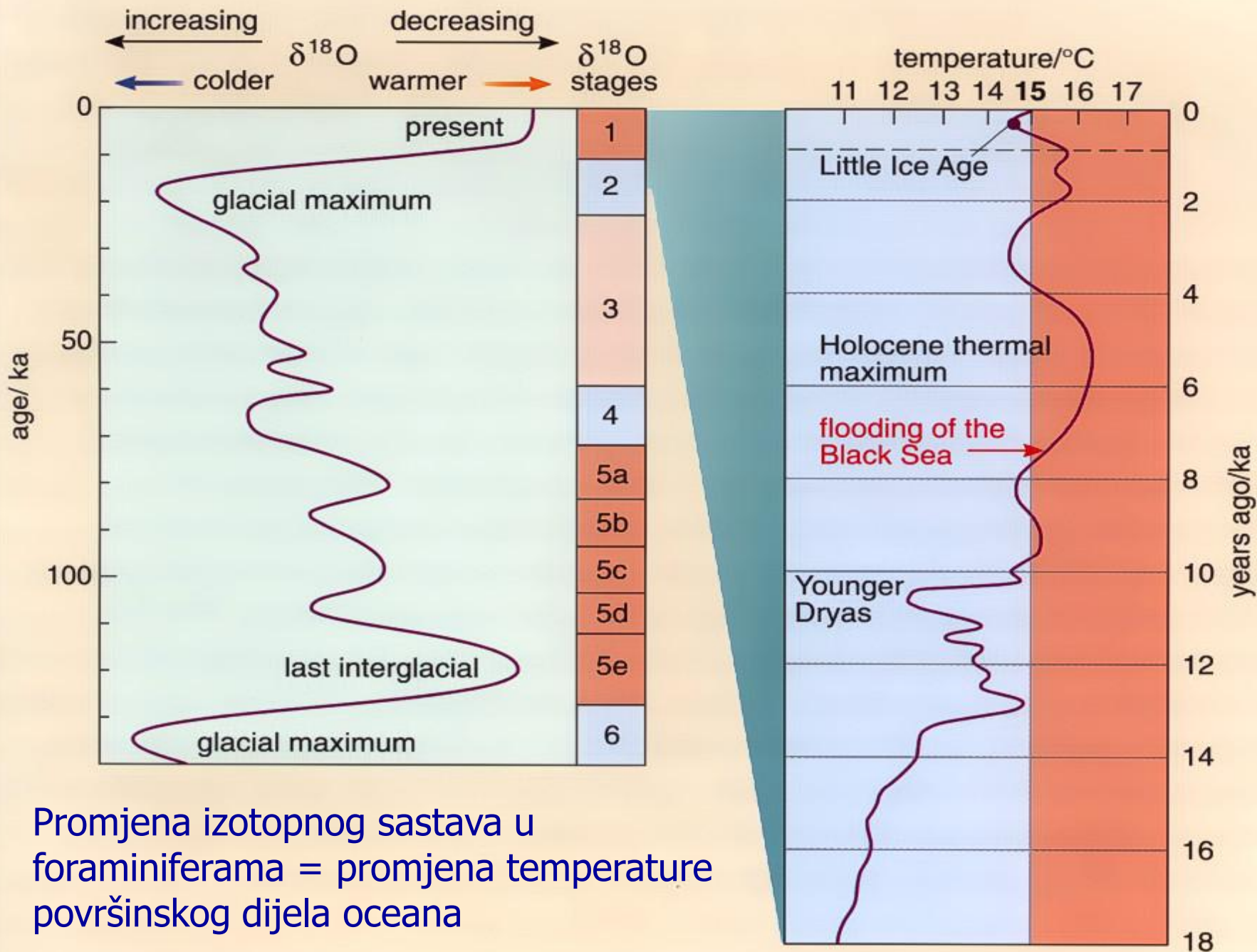


# Pleistocenski klimatski ciklusi

2. Pitanjem o prirodi **klimatskih ciklusa**, frekvencijama i amplitudama ulazimo malo dalje u prošlost ali i u problem uzroka cikličnosti klime u pleistocenu.
- Istraživanja dugih jezgri dubokomorskih sedimenata pokazala su da postoji duga serija zapisa **izmjene klime**.
  - To se pokazalo vrlo važnim u znanosti o Zemlji, posebno u proučavanju klimatske dinamike.
  - Cikličnost se u sedimentu pokazuje u promjeni sastava flore i faune, u promjeni udjela karbonata, i u promjeni udjela  $^{18}\text{O}$  u foraminiferskim ljušturicama.

- Promjena izotopnog sastava kisika u jezgri sedimenta iz Pacifika (pliocen, pleistocen i holocen)





Promjena izotopnog sastava u foraminiferama = promjena temperature površinskog dijela oceana

# Pleistocenski klimatski ciklusi

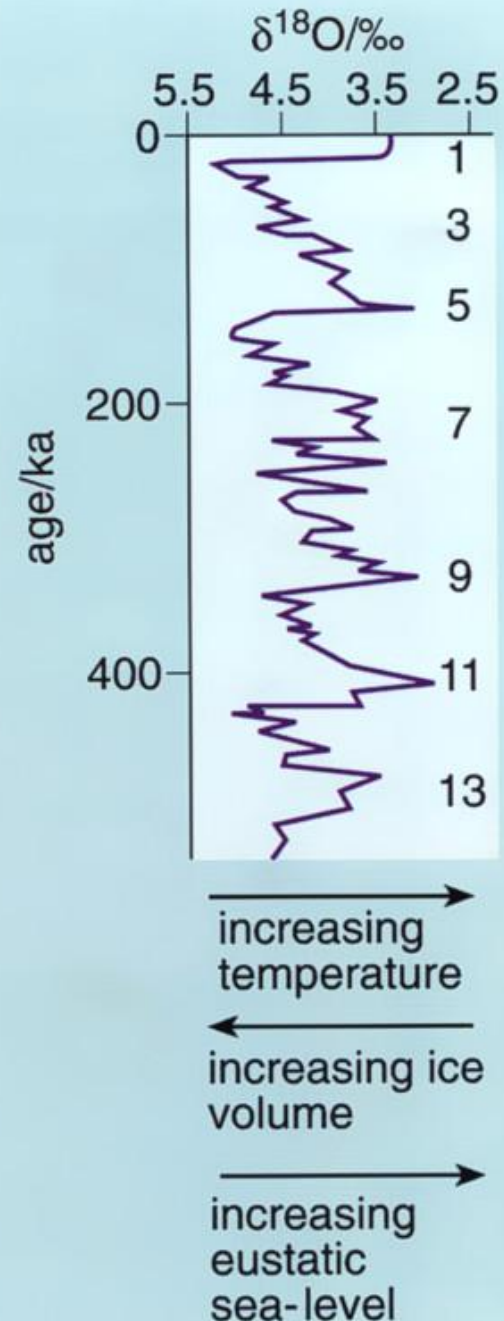
- Promjene u sastavu flore i faune mogu se prvenstveno očitati kao toplo-hladni ciklusi. Kvantificirano se može prikazati zastupljenost toplovodnih i hladnovodnih planktonskih foraminifera s promjenom dubine u jezgri. Kalibracijom i faktor-regresijskom analizom dolazi se do vjerojatne temperature površinske vode, isto kao i za konstrukciju 18K karte.
- Međutim najviše istraživanja vezano je uz mjerenja promjena udjela  $^{18}\text{O}$  u biogenim i hidrogenim uzorcima

# Pleistocenski klimatski ciklusi

- Fluktuacije u udjelu  $^{18}\text{O}$  u foraminiferskim ljušturicama prvi je opisao Emiliani u radu *Pleistocene temperatures*, objavljenom 1955.
- Danas je stratigrafija kisikovim izotopima s “izotopskim razdobljima” temelj pleistocenske stratigrafije.
- Radio je posebno na vrstama *Globigerinoides* jer te imaju najniži udjel  $^{18}\text{O}$ , pa je logično pretpostaviti da je to vrsta iz plitke vode.
- Temperatura u kojoj raste organizam utječe na odnos izotopa  $^{18}\text{O}$  i  $^{16}\text{O}$ . U Toplome se ugrađuje više  $^{16}\text{O}$  tj. manje  $^{18}\text{O}$ . No i izotopski sastav morske vode se mijenja ovisno o tome da li je doba ledeno (ima puno leda na Zemlji) ili nije. U ledu se akumulira lakši izotop  $^{16}\text{O}$ , pa raste koncentracija težega  $^{18}\text{O}$  u moru.
- U hladnom (ledenom) dobu u moru ima više  $^{18}\text{O}$ , a također, jer je hladno više ga se ugrađuje u ljuštire. Obje promjene djeluju u istome smjeru.

# Pleistocenski klimatski ciklusi

- Tako se u posljednjih 500 Ka može se zamijetiti 7 hladno / toplih ciklusa.
- Postupno hlađenje i naglo zagrijavanje.
- Sad je neobično toplo. U zadnjih 500 Ka uglavnom je bilo puno hladnije.

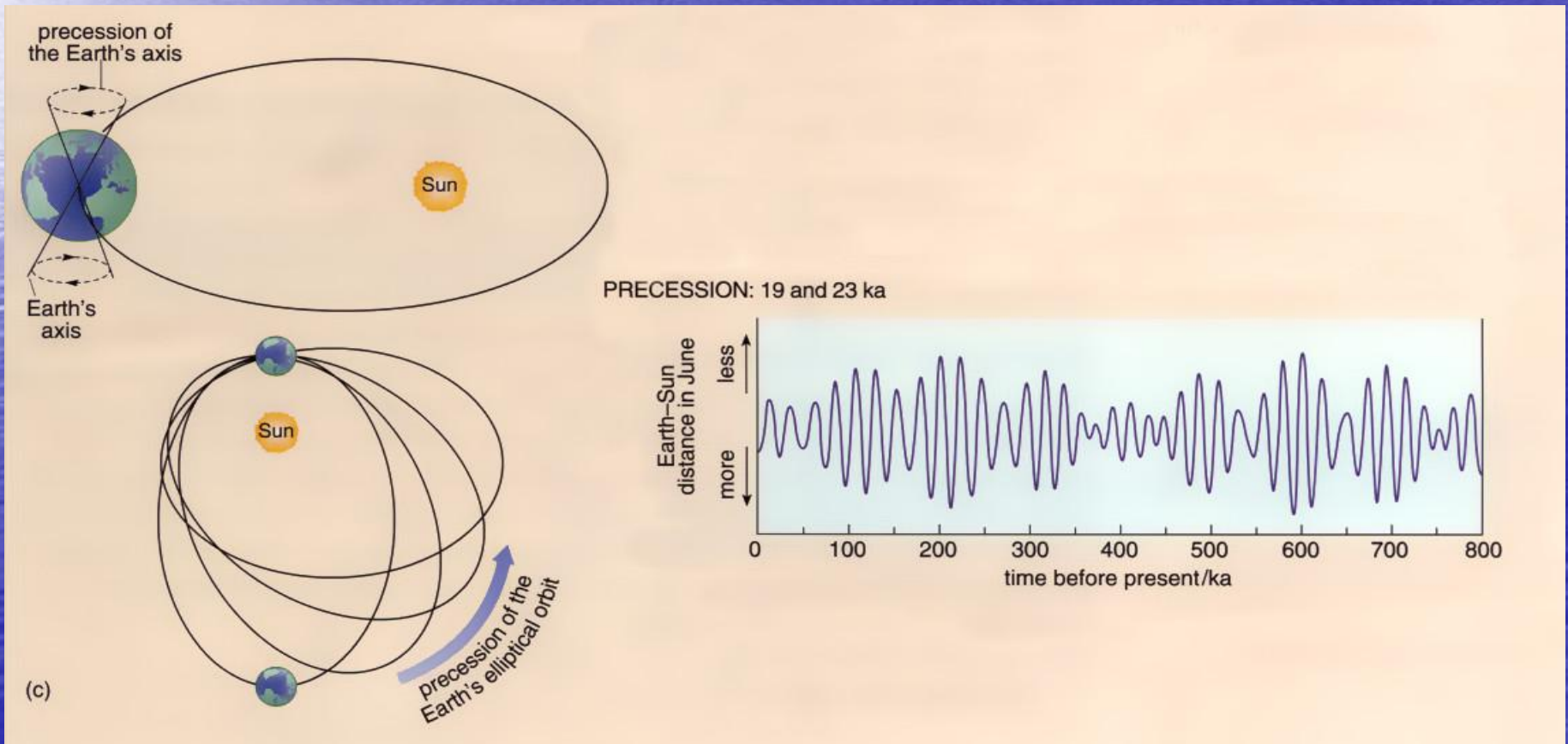


# Uzroci klimatskih ciklusa

- Već je Emiliani istaknuo da varijacije izotopnog sastava ukazuju na nekakve pravilne cikluse koji bi eventualno mogli nastati putem **Milankovićeve mehanizma** koji pretpostavlja da pravilne varijacije orbitalnih parametara Zemlje uzrokuju niz glacijala i interglacijala.
- Hipoteza Milutina Milankovića (1879-1958) pretpostavlja da su dugoročne fluktuacije primljene sunčeve radijacije tokom ljeta u visokim širinama sjeverne polutke, kontrolirale pojavu ledenih doba u posljednjih 600 000 godina.
- U literaturi se navodi kao Croll-Milankovićeve teorija.

# Uzroci klimatskih ciklusa

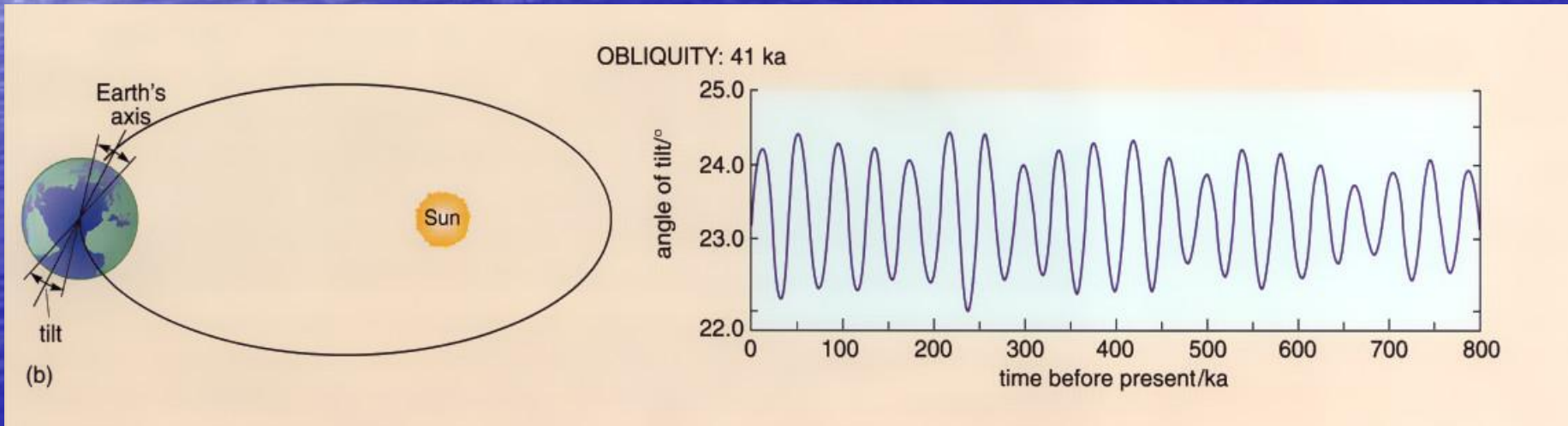
- Sunce i Mjesec svojim gravitacijskim djelovanjem dovode do **precesije**, tj. do periodičke promjene položaja osi rotacije Zemlje (sada je os usmjerena prema zvijezdi Sjevernjači). Taj smjer opisuje krug koji se zatvara u oko 21.000 godina.





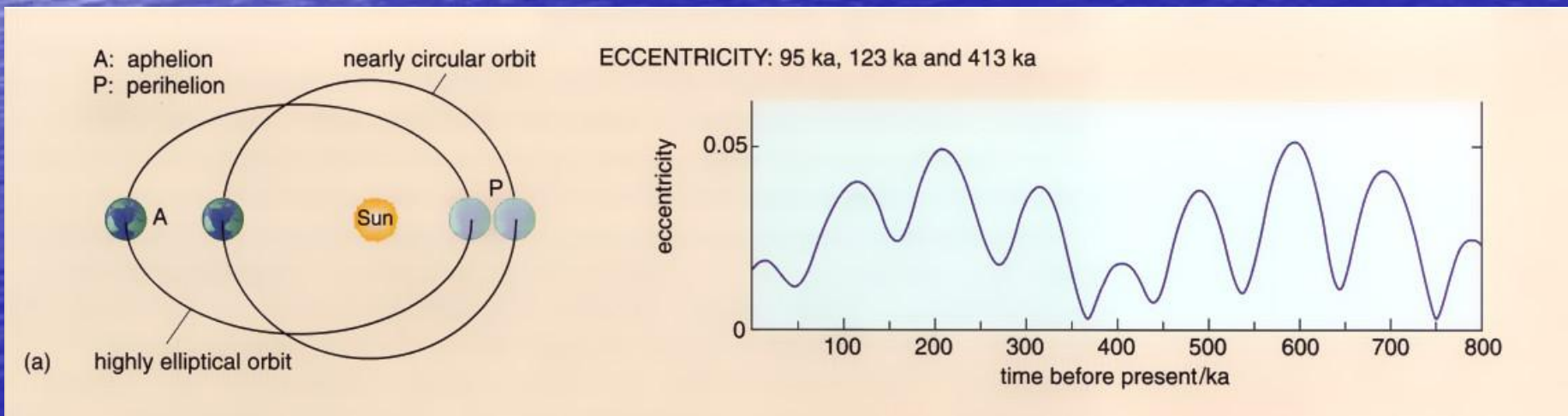
# Uzroci klimatskih ciklusa

- Zbog gravitacijskog utjecaja velikih planeta Jupitera i Saturna dolazi do (kvazi)periodičkog utjecaja na varijacije druga dva orbitalna parametra a to su:
- nagib osi rotacije u odnosu na plohu u kojoj se nalazi orbita varira u vremenu odnosno **kut prema orbiti** (nakrivljenost *obliquity*) umjesto sadašnjih  $90^\circ - 23\frac{1}{2}^\circ = 66\frac{1}{2}^\circ$  varira između  $65^\circ$  i  $68^\circ$  s periodicitetom od oko 41.000 godina. Taj kut je važan jer ako je veća nakrivljenost to znači izrazitiju sezonalnost (toplija ljeta i hladnije zime).



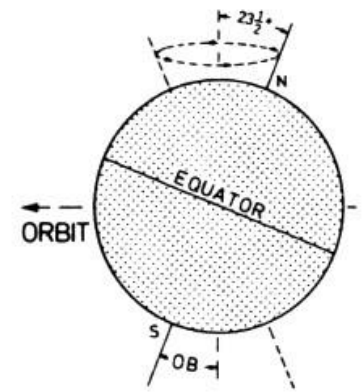
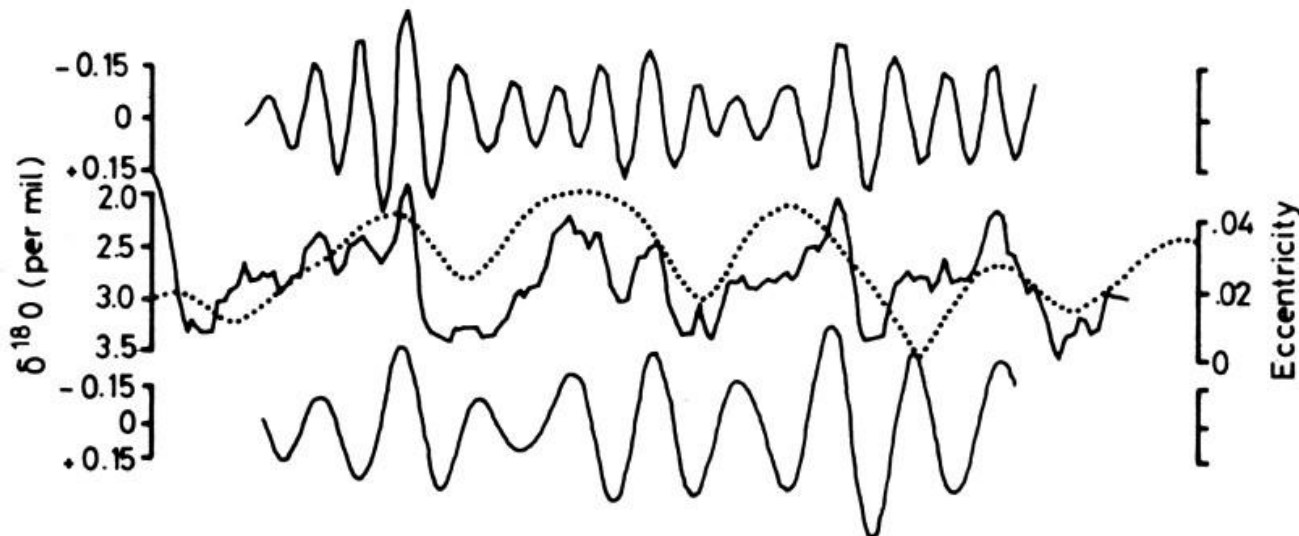
# Uzroci klimatskih ciklusa

- Sama orbita nije kružnica već elipsa, a odnos kraće i dulje osi varira u vremenu. to je varijacija **ekscentriciteta**. Npr. ljeti sunce može biti daleko, bude hladno ljeto i stiže manje energije → ledena doba. Jedan ciklus se zatvara u cca. 100.000 i 400.000 godina.
- Na temelju ova tri parametra može se izračunati krivulja promjene primljene energije u nekom području kao osnovnog faktora koji uzrokuje klimatske promjene.



# Uzroci klimatskih ciklusa

- Spektralnom analizom promjene odnosa izotopa kisika  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  mogu se dobiti **frekvencije** promjena (upotreba u fizici - filtriranje podataka, zanimljiva metoda). Tom spektralnom analizom dobivene su frekvencijski periodi od 20, 40 i 100 000 godina, što je vrlo blisko Milankovićevoj krivulji iradijacije i navedenim periodicitetima!



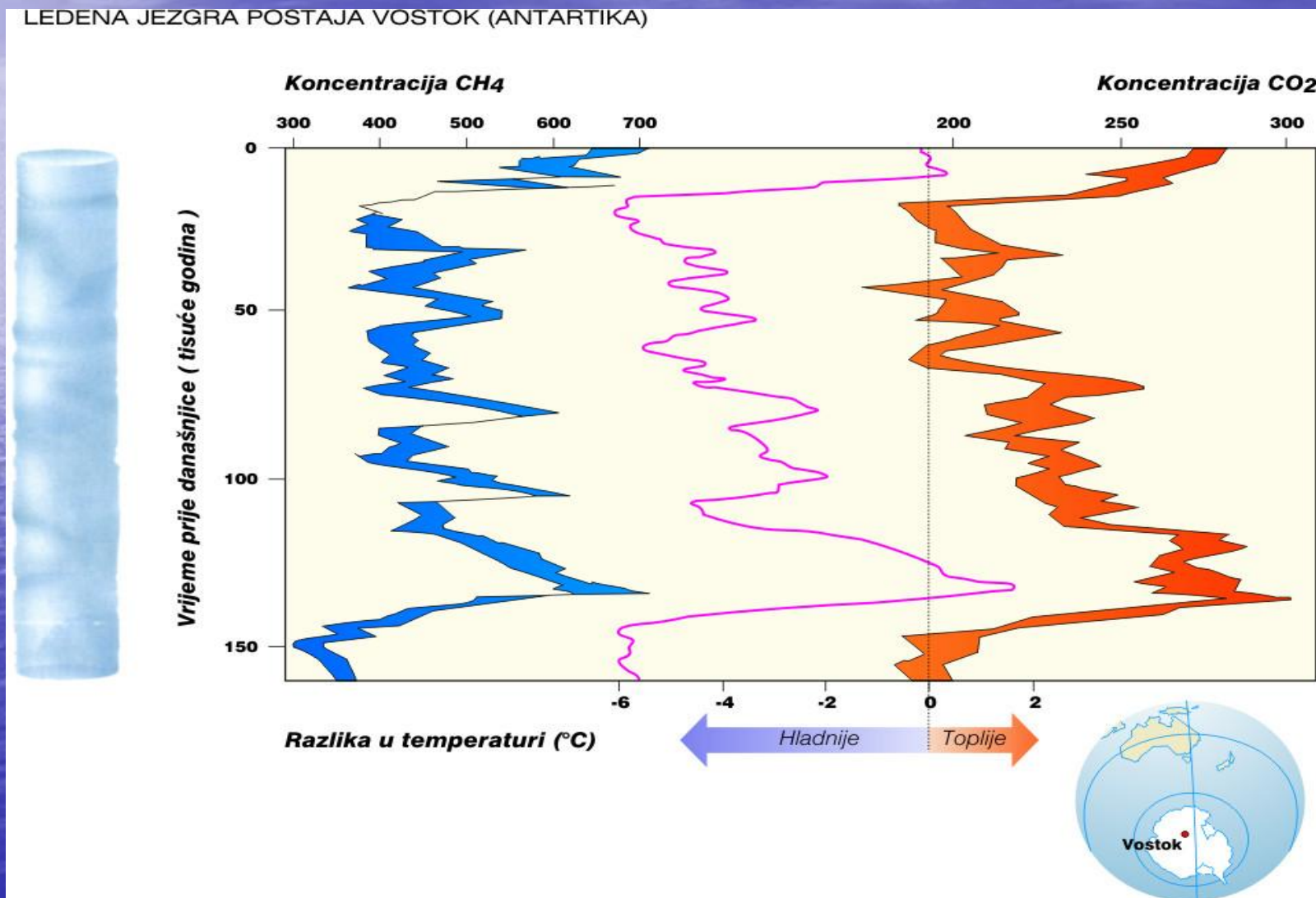
# Uzroci klimatskih ciklusa

- Može se zaključiti da postoji posebno osjetljivi pojas u sjevernoj hemisferi gdje se ove male promjene primljene energije pretvaraju u različiti snježni pokrivač koji potom povratnom spregom putem albedo mehanizma mijenja klimu.

# Uzroci klimatskih ciklusa

- No, klima se može mijenjati i zbog promjene intenziteta izvora energije, tj. Sunca.
- Poznati su promjene solarne radijacije s periodima od 11, 130 i 200 godina.
- Također su moguće i promjene **albeda** neovisne o Milankovićevu ciklusu a uslijed promjena na Zemlji i u atmosferi! Npr. promjene položaja kontinenata te koncentracija vulkanske prašine, sulfatnih aerosola ili stakleničkih plinova ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  i drugih).

# Promjene koncentracije stakleničkih plinova u jezgri leda s Antarktike (uzrok/posljedica?)

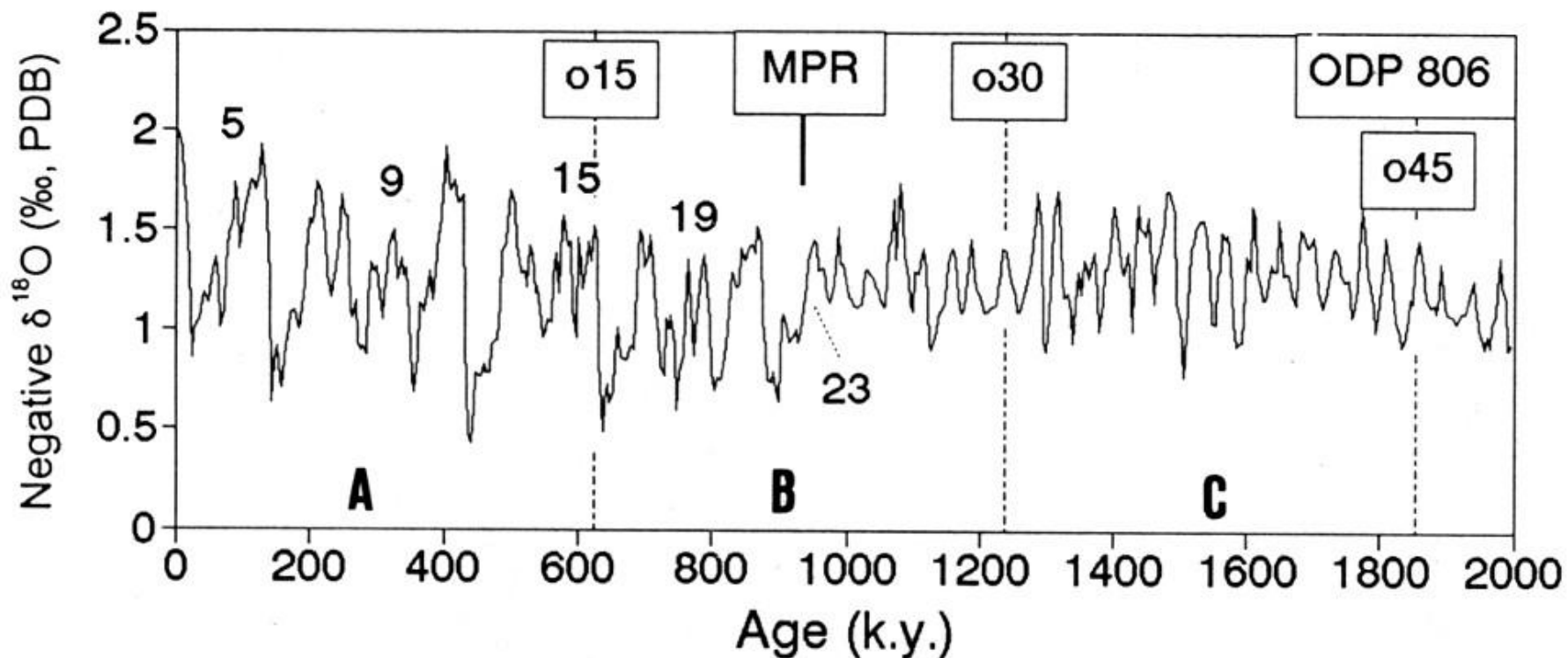


# Uzroci klimatskih ciklusa

- Danas je Milankovićev mehanizam prihvaćen kao logičan način objašnjenja izotopskog zapisa. Dodatna su dva elementa zapisa zanimljiva. To je stabilizacija amplitude te izgled nazubljene pile (**brzo zagrijavanje a sporo hlađenje**).
  - Brzo zagrijavanje ukazuje na jaku pozitivnu povratnu spregu u sustavu atmosfera-ocean.
  - Mogući uzroci tome su nepotpuno miješanje voda u oceanu za vrijeme deglacijacije (stagnantni ocean), te promjene u koncentraciji CO<sub>2</sub> u atmosferi.
  - To je primjer "*run-away*" efekta tj. kolapsa sustava, koji dovodi do vrlo naglih promjena (npr. nagli dotok voda u Meksički zaljev s puno <sup>16</sup>O prije 12 000 g.)

# Uzroci klimatskih ciklusa

- Promjene izotopskog sastava foraminifera u zapadnom Pacifiku. Vidi se dominacija promjene ekscentriciteta u zadnjih 900.000 godina i nedostatak ciklusa od 100.000 g prije toga. MPR je *mid Pleistocene revolution*.

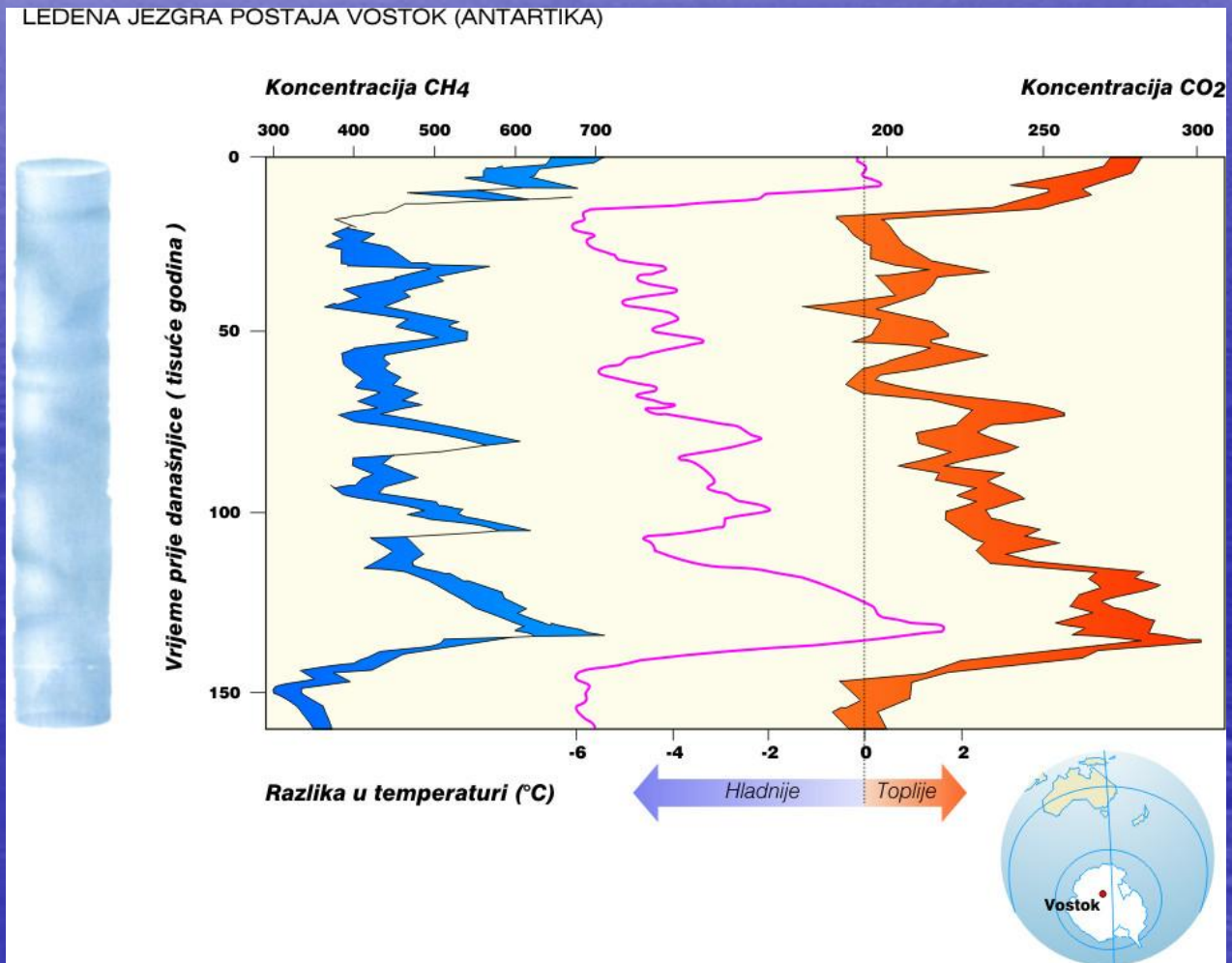




# Budućnost?

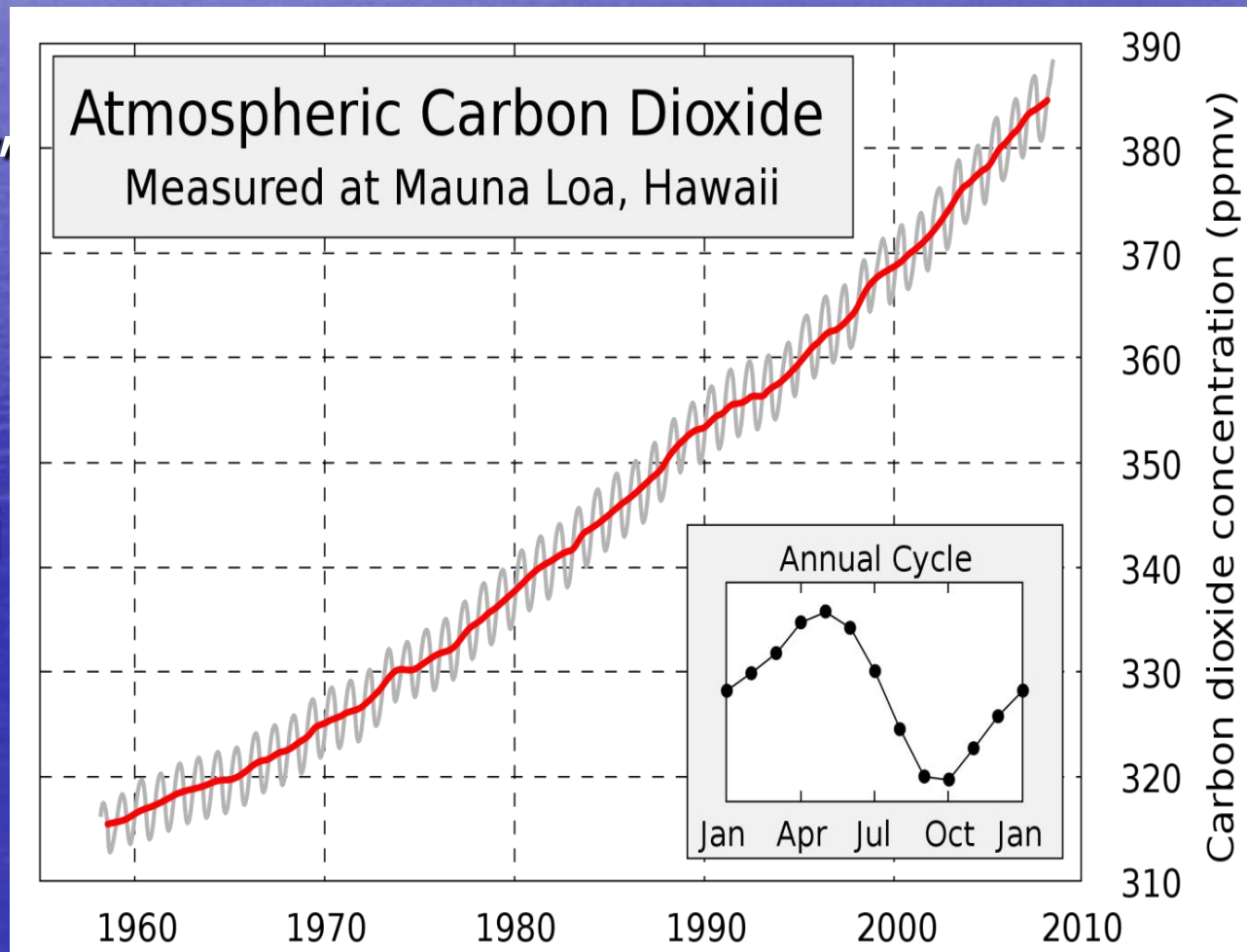
- Mjerenja koncentracije CO<sub>2</sub> u jezgrama leda pokazuju da je koncentracija CO<sub>2</sub> u glacijalima bila niža 1,5 puta.

- Uz to se vežu danas vrlo moderni izrazi **greenhouse** (*staklenik*) i **coldhouse** (*ledenica*).



# Budućnost?

- Što se danas događa s koncentracijom CO<sub>2</sub>?
- Da li je moguć tzv. "*run-away*" efekt tj. kolaps sustava, ili je jači autoregulacijski mehanizam Zemlje?

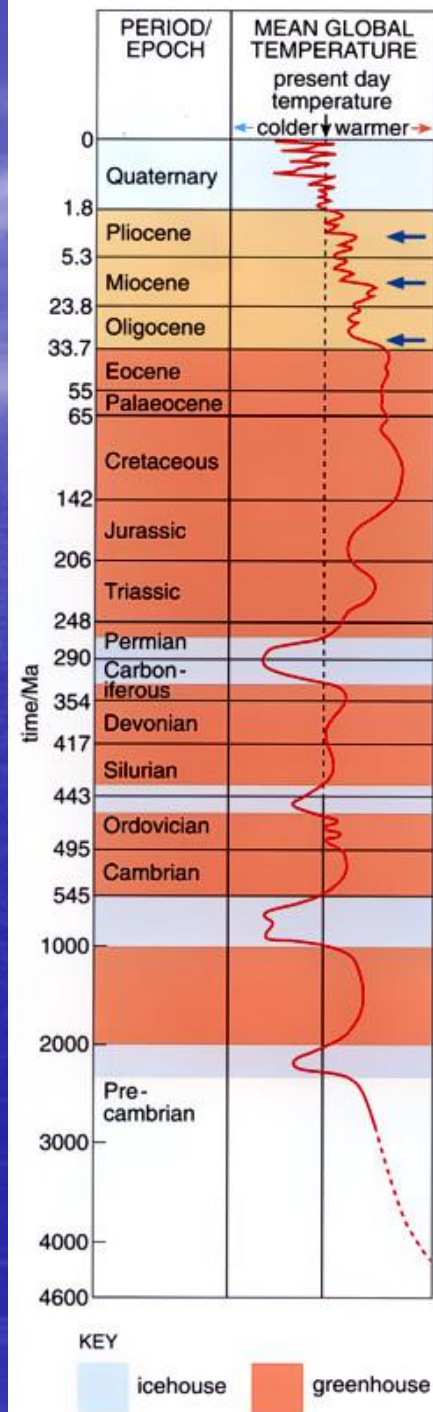


# Oceani u starijim razdobljima

- Od 1968. godine (DSDP) početni podaci za rekonstrukciju oceanskih uvjeta (razmještaj, salinitet, stratifikacija, struje, temperatura) u starijim geološkim razdobljima.
- I danas su intenzivna istraživanja u tom području i još nema gotovih odgovora, a ovdje samo o tri važnija aspekta povijesti starih oceana:
  1. Kako se mijenjao izotopski sastav kisika (temperature) od krede?
  2. Kako je fluktuirala CCD?
  3. Dali se i kako mijenjala koncentracija otopljenog kisika (stupanj zasićenosti) u dubokome moru?

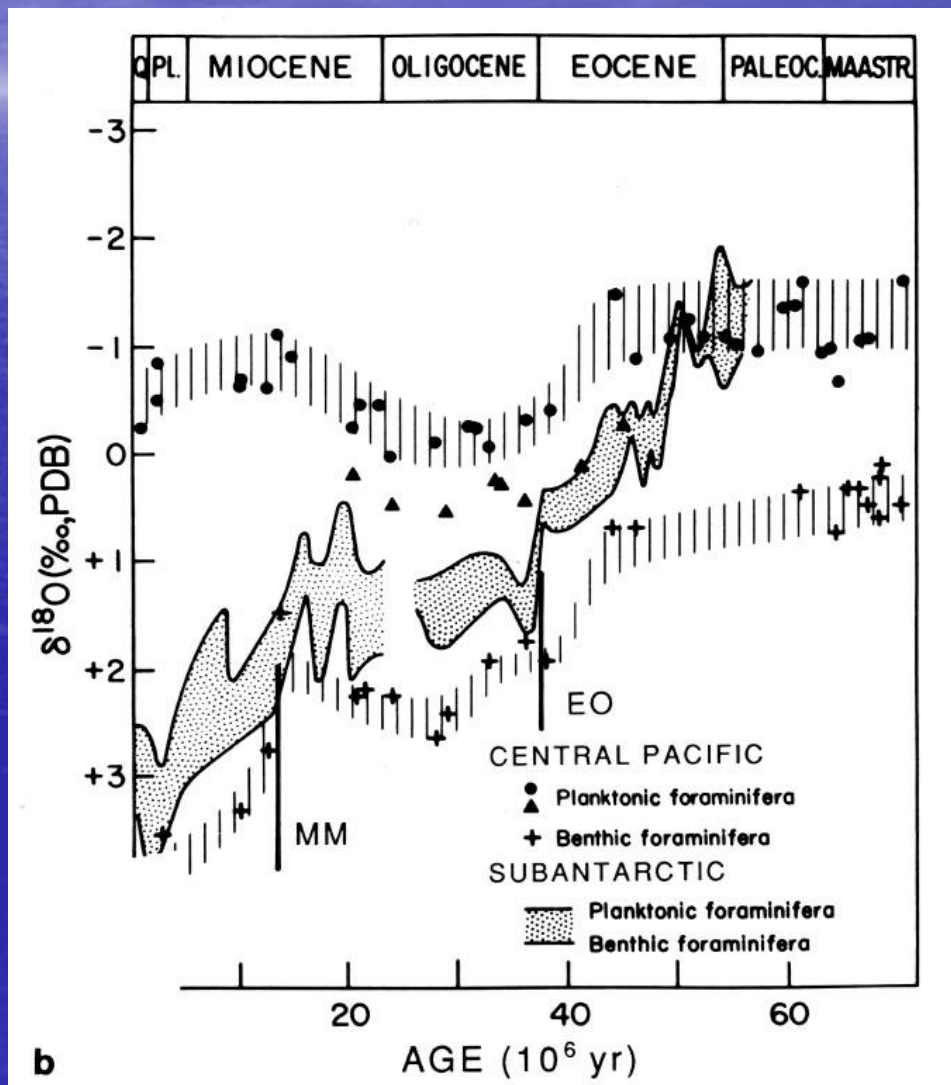
# Oceani u starijim razdobljima

- **Generalni trend** sniženja temperature svjetskog mora od krede prema sadašnjici otkrio je još C. Emiliani, temeljem promjene omjera  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  u ljušturicama **bentičkih** foraminifera.



# Oceani u starijim razdobljima

Kisikov izotopski sastav pokazuje slične promjene u sastavu bentičkih i planktonskih foraminifera u visokim širinama (polarni i subpolarni krajevi), dok u niskim širinama (tropi, umjereni) promjene u kisikovom izotopskom sastavu razlikuju se za bentičke i planktonske ostatke.

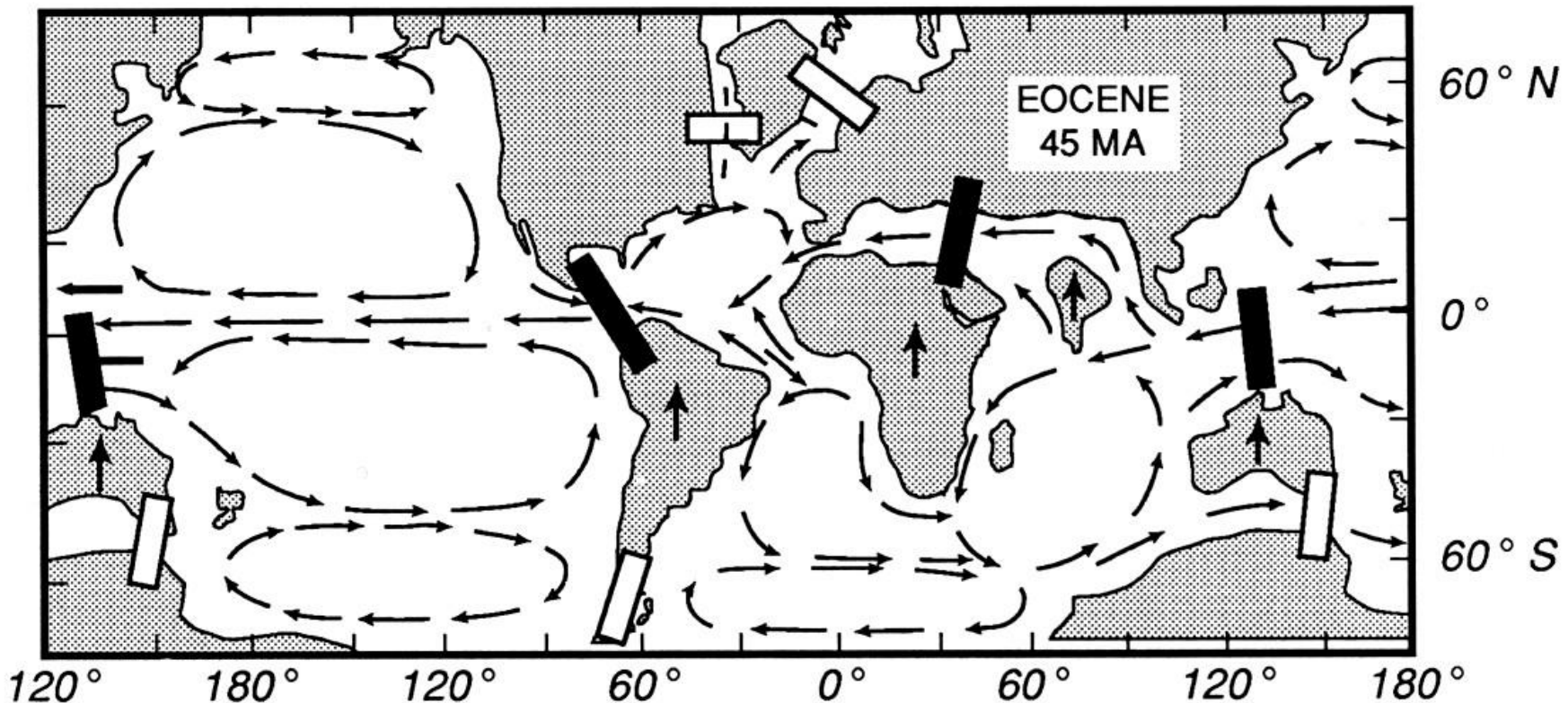


# Promjena $\delta^{18}\text{O}$ u tercijaru, *Zemlja se hladi*

- Analiza prethodne slike pokazuje značajno zahlađenje posebno od kraja eocena (34 Ma) u visokim širinama u površinskom sloju oceana (naravno i u dubokom moru, jer je ohlađena subpolarna voda počela ispunjavati oceanske bazene).
- Posljedica toga je stvaranje većih gradijenata a to uvjetuje jače vjetrove (kako je već rečeno). Oni uzrokuju jače **površinske struje**, a s njima se pojačava i upwelling.
- Dokaz tome je povećano taloženje diatomeja u sjevernom Pacifiku i oko Antarktike u gornjem tercijaru. Povećani fertilitet odražava se i u krhkim radiolarijskim ljušturicama jer nedostaje otopljenog silicija koji se intenzivno ugrađuje u diatomeje u zonama upwellinga.

# Eocensko-oligocenska stepenica

- Polarni krajevi su se ohladili krajem starijeg tercijara, vjerojatno zbog termalne izolacije Arktika i Antarktike, te povratnog utjecaja povećanja albeda. To se dogodilo zbog dinamike litosfernih ploča koja je dovela do zatvaranja veza među oceanima u ekvatorskom području i otvaranja u visokim širinama.



# Eocensko-oligocenska stepenica

- Polarni front se pomaknuo prema ekvatoru, pa se i kišni pojas (umjerena zona) udaljila od Antarktike. To dovodi do promjeni izotopskog sastava morske vode (više je  $^{18}\text{O}$ ) u visokim širinama u gornjem eocenu i posebno na granici eocen/oligocen.
- Time je površinska voda u visokim širinama postala dovoljno hladna i slana da je mogla potonuti u dublje dijelove i hladiti pridnenu vodu. Koje su posljedice tog eocensko/oligocenskog graničnog događaja?



# Eocensko-oligocenska stepenica

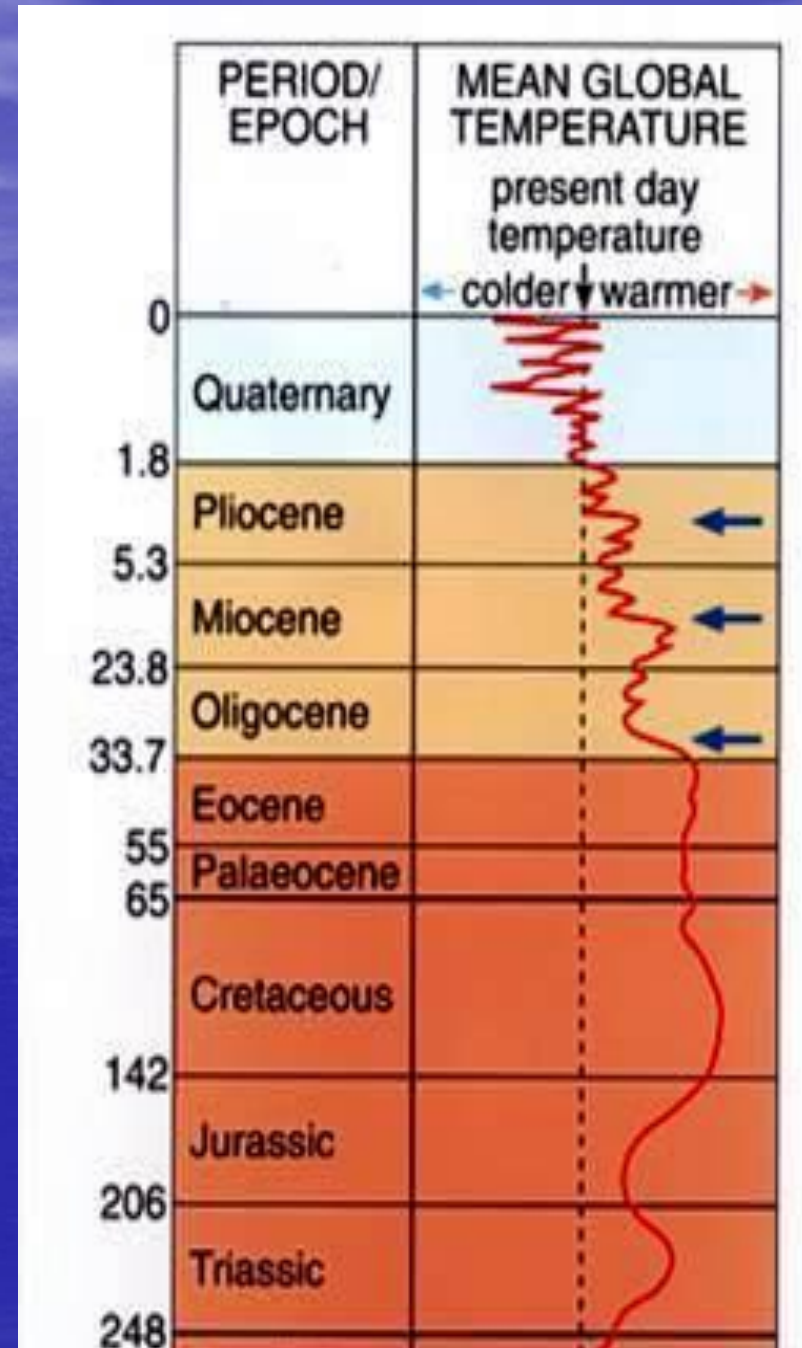
- Očito se dubokomorska fauna mora prilagoditi hladnoj vodi. Paleontološki dokazi su izraziti (promjene vrsta ostrakoda i drugih bentičkih organizama).
- Kemija oceana se također morala promijeniti. Npr. CO<sub>2</sub> naglo biva topljiviji u moru, te se izvlači iz atmosfere. To dalje dovodi do povratne sprege (*positive feedback*) dovodeći do većeg hlađenja cijelog planeta. To se odražava i na naglom padu površinske temperature u tropima (vidi se na temelju kisikova izotopskog sastava ostataka planktonskih tropskih foraminifera).

# Promjene temperature u gornjem tercijaru

- Tijekom oligocena ostaje hladno.
- U miocenu rast temperature u tropima, a nakon toga sniženje temperature u visokim širinama.
- Povišenje uzrokovano porastom razine svjetskog mora (transgresija i pokrivanje šelfa, smanjenje albeda. Više sunčeve energije se akumulira (pogotovo u tropima), pa se povećava **kontrast** prema visokim širinama gdje se zadržava ledeni pokrov.
- Smanjenje temperature u visokim širinama je dio generalnog trenda ali i posljedica nakupljanja leda u visokim širinama.

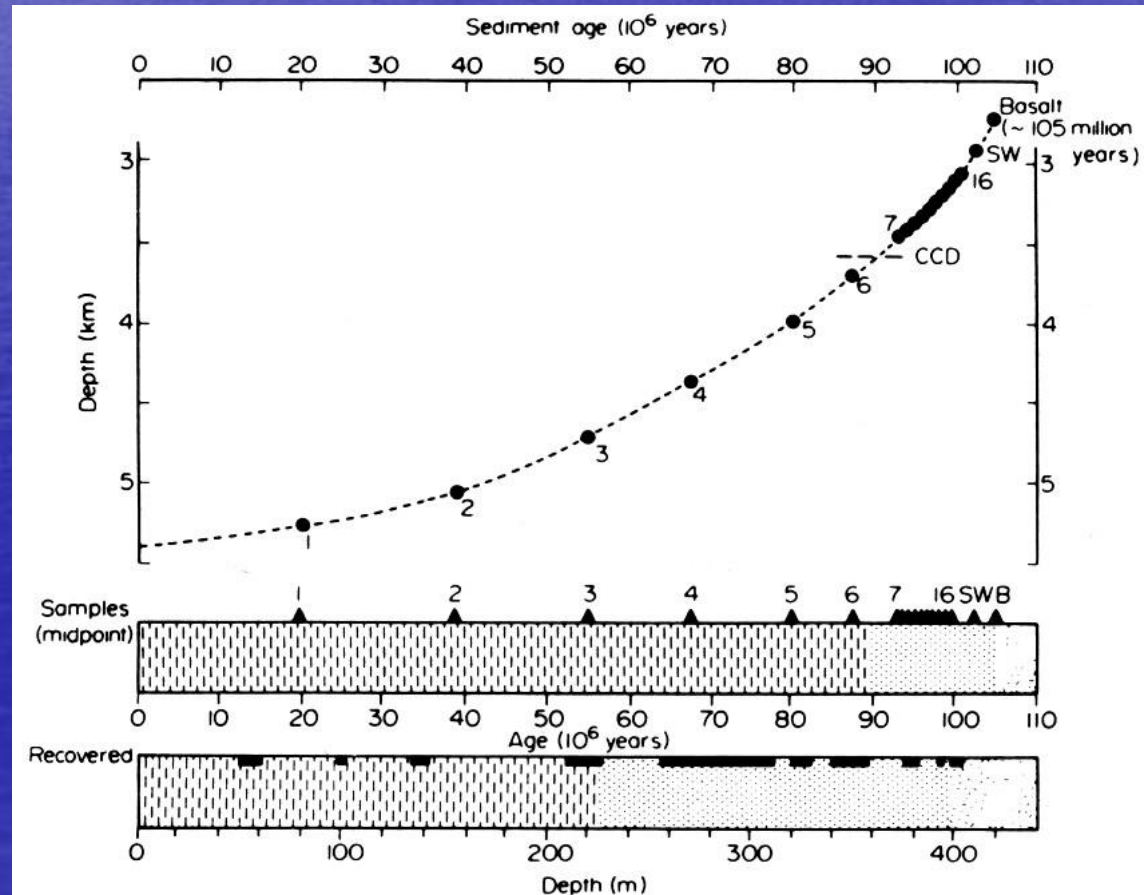
# Promjene temperature u gornjem tercijaru

- U pliocenu se nastavlja hlađenje i akumulacija leda na Antarktici, a u gornjem pliocenu (prije oko 3 Ma) počinje glacijacija sjevernih krajeva i započinju cikličke promjene klime karakteristične za pleistocen.
- To hlađenje uzrokuje regresiju, a dodatno i izdizanje gorja, te pomak kopnenih masa prema sjevernim polarnim područjima pomažu povećanju vjerojatnosti zadržavanja snijega na tlu - neophodnom uvjetu za glacijaciju!



# Fluktuacije CCD

- Već je spomenuto da je karbonatna kritična dubina varirala u vremenu. Kako je zaista varirala i što iz toga možemo saznati o promjenama kemizma i fertiliteta oceana?
- Istraživanjem sedimentne jezgre sa neke lokacije može se utvrditi promjena od karbonatne u glinovitu sedimentaciju te dubina morskoga dna u doba sedimentacije (morsko dno se s vremenom spušta - s udaljenošću od centralnog grebena).

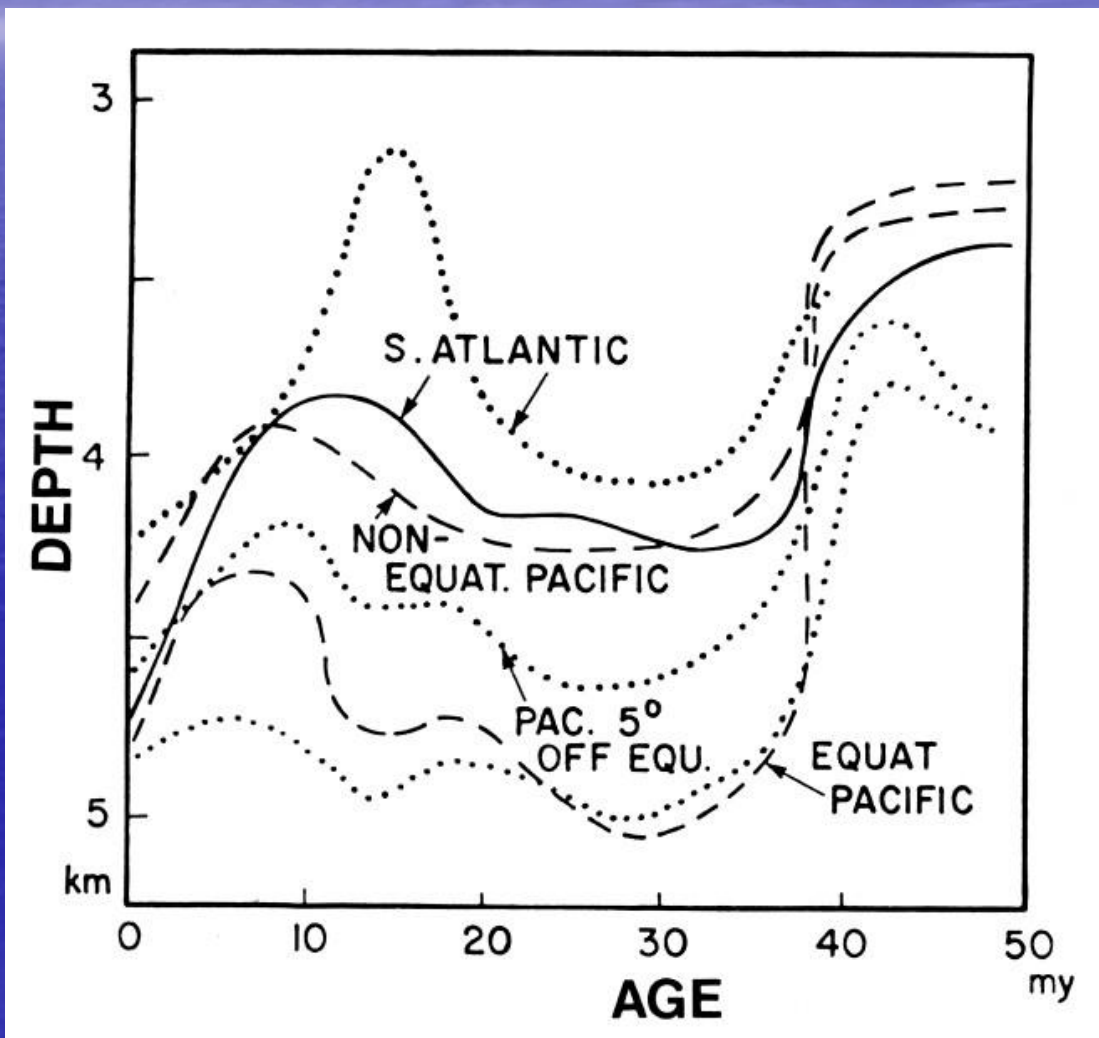


# Fluktuacije CCD

- Rekonstrukcija ukazuje da je CCD bila visoko (plitko) u gornjem eocenu, spustila se (bila duboko) u donjem oligocenu, rasla u miocenu (najviše bila prije oko 10-15 Ma seravalijen) i otad pala na oko 4,3 km gdje je danas. Dubina CCD se mijenjala slično u oba oceana Pacifiku i Atlantiku, što indicira globalne promjene kemijskih uvjeta u oceanima.

- U eocenu i miocenu je CCD bila pliće (oko 3-4 km) no u oligocenu i plio/pleistocenu (4-5 km). Postoji izvjesni paralelizam s promjenama kisikovog izotopnog sastava i kolebanjima morske razine. Periodi visoke razine svjetskog mora karakterizirani su plitkom CCD i toplim visokim širinama; Periodi pak niske razine mora imaju duboku CCD i hladnoću u visokim širinama (i u dubokoj vodi).

## Fluktuacije CCD



# Fluktuacije zasićenosti kisikom u dubokim oceanima

- Problem stagnantnog oceana.
- Kad su nabušeni kredni sedimenti u Atlantiku (DSDP), pokazalo se da su neki bogati s organskom tvari
- Veliki input organske tvari (veliku produkcija), ili slaba razgradnju organske tvari (snižene koncentracije otopljenog kisika u pridненоj vodi), ili oboje.
- Očito da je regionalno bilo malo kisika u dubokom moru, što je dovelo do eliminacije organizama koji buše sediment (bioturbiraju), te su česti laminirani sedimenti na granici donja/gornja kreda.

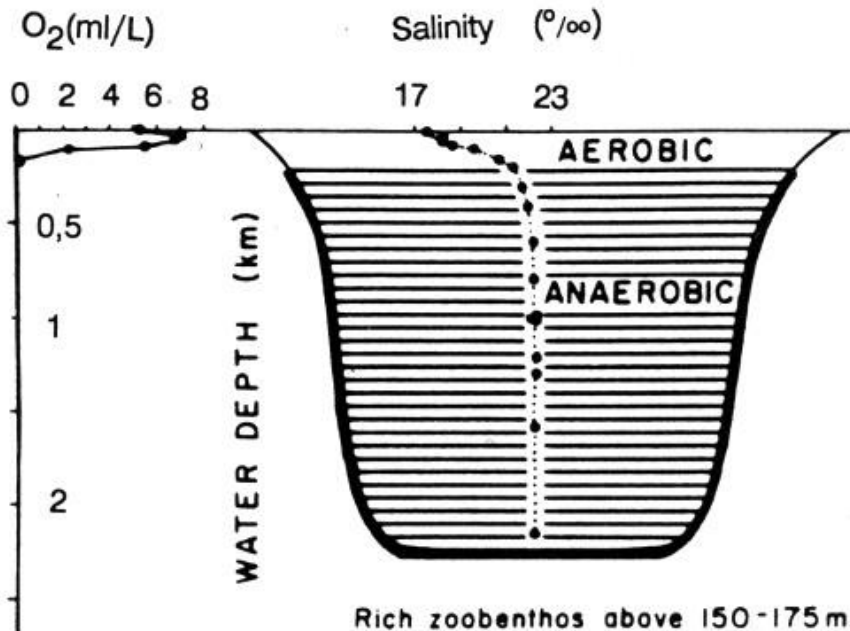
# Fluktuacije zasićenosti kisikom u dubokim oceanima

- Različiti indikatori niske koncentracije kisika koncentrirani su u pojedinačne definirane periode (relativno kratke) tzv. **anoksičke događaje**.
- Češći su u Atlantiku, iako ih ima zabilježenih i u Pacifiku.
- Koje je značenje tih anaerobnih ili suboksičnih sedimenata, što oni mogu reći o kemizmu i fertilitetu oceana u to doba?



# Fluktuacije zasićenosti kisikom u dubokim oceanima

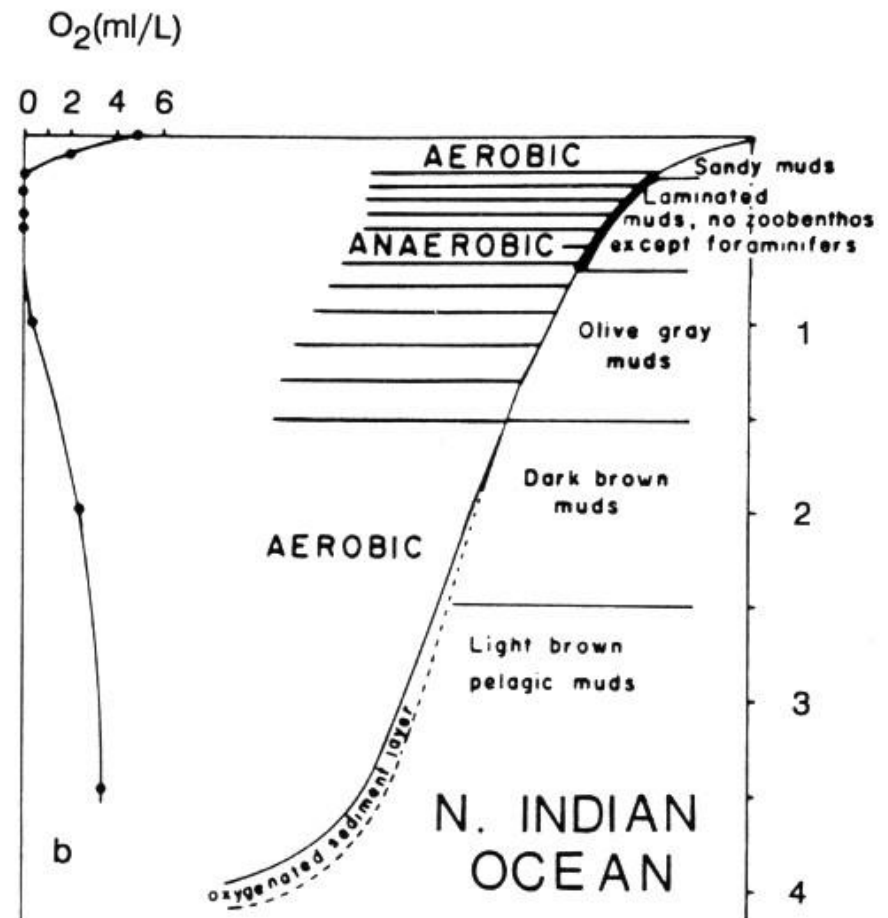
- Uzroke nastanka takvih sedimenata najlakše je objasniti pomoću modernih analoga.



Rich zoobenthos above 150-175 m. Laminated clayey and marly muds in the anoxic depth; no benthic life.

BLACK SEA

a



N. INDIAN OCEAN

b

# Fluktuacije zasićenosti kisikom u dubokim oceanima

- Na kontinentskom slazu u dubinama kisikovog minimuma u oceanu (zona mora ispod fotičke zone do dubine 1-1,5 km).
- Zona intenzivne razgradnje organske tvari koja kiši iz fotičke zone. Posebno izrazita u zonama povećane primarne produkcije.
- Primjeri su Kalifornijski zaljev i Indijska kontinentska padina u Arapskom moru.

# Fluktuacije zasićenosti kisikom u dubokim oceanima

- Zajednička je karakteristika takvih okoliša veliki input organske tvari u odnosu prema donosu kisika u duboku vodu (kamo ta organska tvar pada).
- Povećana je vjerojatnost stvaranja "crnih sedimenata" ukoliko je donos kisika stalan a povećava se donos organske tvari, ili se smanjuje donos kisika a donos organske tvari ostaje konstantan (brza promjena a spora prilagodba!).

# Fluktuacije zasićenosti kisikom u dubokim oceanima

- Kredni sedimenti?
- Nema dokaza povećane produkcije organske tvari te se može pretpostaviti da je došlo do smanjenja donosa kisika u dubokomorsko područje.
- Zašto je došlo do smanjenja koncentracije kisika u dubokom moru?
- Temperatura oceana bila je relativno visoka (oko 15°C za razliku od sadašnjih između 0 - 5°C). Saturacija kisikom je kod tih temperatura je 5,5 i 7,5 ml/l.

# Fluktuacije zasićenosti kisikom u dubokim oceanima

- U današnjem oceanu je u duboku moru koncentracija otopljenog  $O_2$  između 3 i 5 ml/l kao posljedica razgradnje organske tvari, dakle 3,5 ml/l je niža od saturacije.
- Ako od početnih svega 5,5 oduzmemo ovih 3,5 ml/l ostaje svega 2 ml/l. To indicira suboksične uvjete.
- Ako se na to superponiraju estuarijski cirkulacijski uvjeti (stratifikacija voda u cijelom oceanu) ili pak dodatni terigeni donos organskog materijala, mogućnosti stvaranja anoksičnih uvjeta u pojedinim područjima / regijama oceana se znatno povećavaju.

# Anoksični ocean?

- Može li i cijeli ocean postati anaeroban/ anoksičan?
- Zbog djelovanja negativne povratne sprege (**negative feedback**) vjerojatno ne može ili samo kraće vrijeme.
- Naime, sedimenti bogati organskom tvari ne otpuštaju nutrijente (ne dolazi do remineralizacije) te se time smanjuje donos nutrijenata u fotičku zonu, a time i produkcija nove organske tvari tj. input!
- **Primjer negativne povratne sprege**  
(Autoregulacijski mehanizam).

# Fluktuacije zasićenosti kisikom u dubokim oceanima

- U Atlantiku ima više krednih sedimenata bogatih organskom tvari nego u Pacifiku.
- Zašto? Jer je u kredi Atlantik imao estuarijski tip cirkulacije voda u odnosu na Pacifik (upravo suprotno od današnje situacije).
- To upućuje na to da su vode Atlantika bile stratificirane!
- Duboki Atlantik je sakupio tešku slanu vodu koja se mogla formirati na šelfovima, te se u njoj brzo potrošio kisik razlaganjem organske tvari.
- Osim akademske važnosti, ovakva istraživanja mogu imati i veliku ekonomsku važnost, jer mnoga važna nalazišta nafte su nastala iz matičnih stijena kredne starosti! Na temelju paleoceanografskih pretpostavki može se također krenuti u istraživanja nafte.

