

# Látogatás a BGU-n: jégkorszakokról a sivatagban

Márfy János

ELTE Elméleti Fizikai  
Tanszék

## Probléma felvetése:

Amit eddig a jégkorszakokról megtudtunk.  
Mire keressük választ?



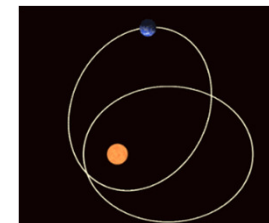
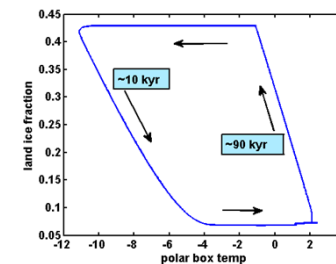
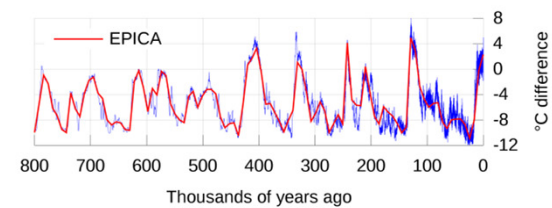
## A SIS mechanizmus:

A külső hajtás problematikája  
Milankovitch- ciklusok  
Belső oszcilláció?



## Modellek:

Boxmodell  
0D modell



# Az elmúlt 800 ezer év a lineáris válasz csődje

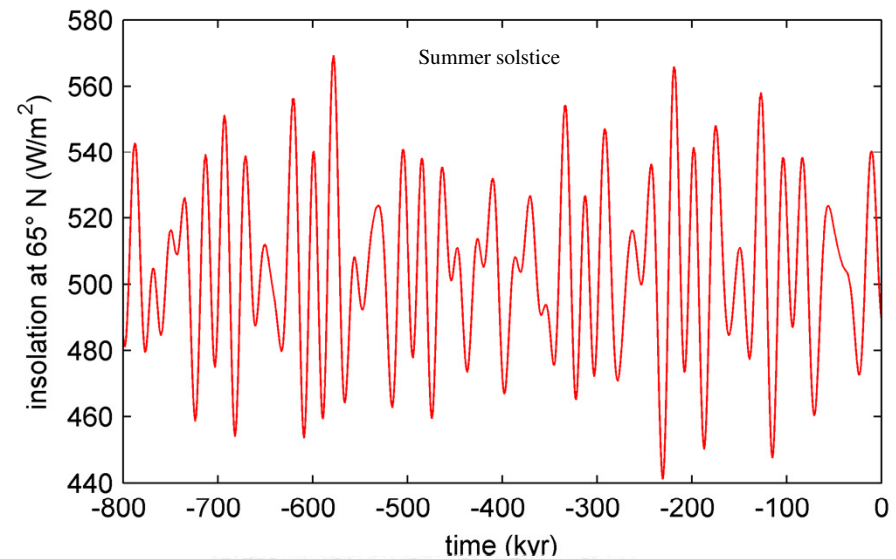
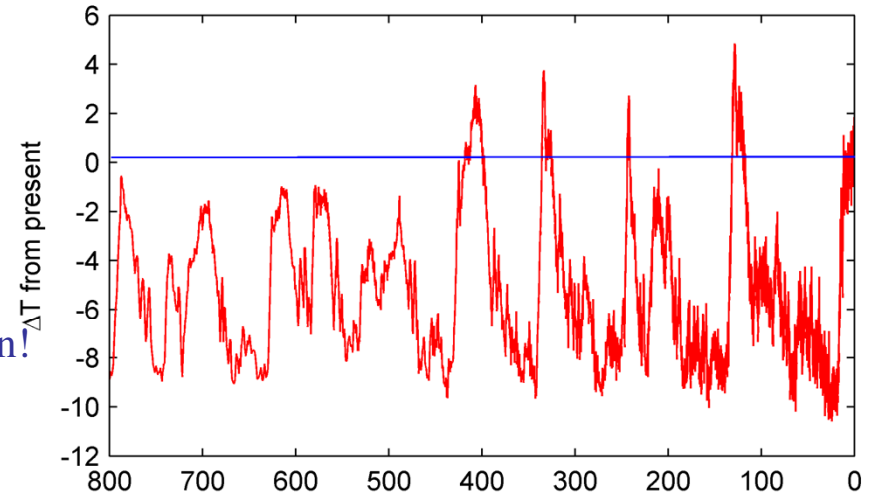
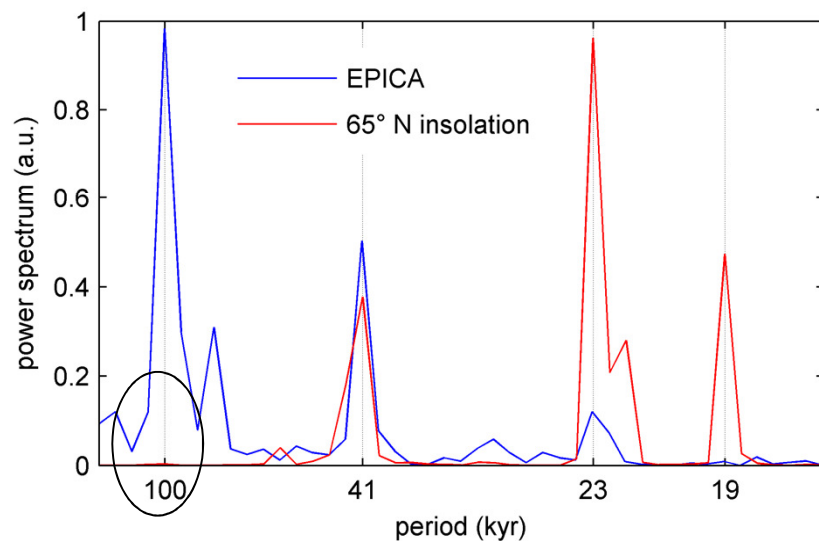
$\Delta T$  nagyságrendje:  $\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{4} \frac{\Delta J}{J} \rightarrow \Delta T \approx 8^\circ\text{C}$  OK!

Hiányzó 100 ezer éves csúcs a besugárzás spektrumában!  
Honnan származik?

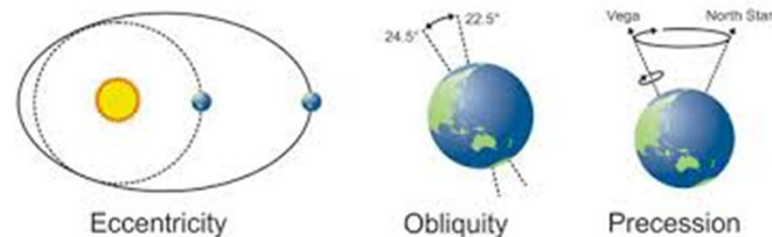
„nemlineáris energiaátvitel a magasabb frekvenciák felől az alacsonyabbak irányában”

Nagy frekvenciájú hatások összegződnek?

- threshold modell
- átlagolás



## Milankovitch Cycles



# Problémák a Milankovitch elmélettel

Nemlineáris válasz a hajtásra:

threshold + 3 állapot (evidenciák?)

átmentek:  $i \rightarrow g \ I < I_0$ ;  $g \rightarrow G \ V > V_{max}$ ;  $G \rightarrow i \ I > I_1$

tiltott átmenetek

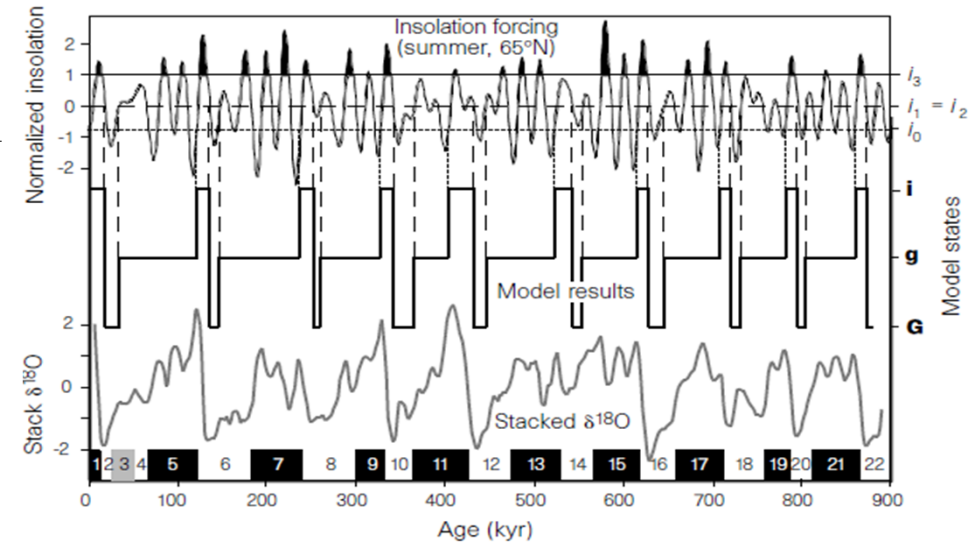
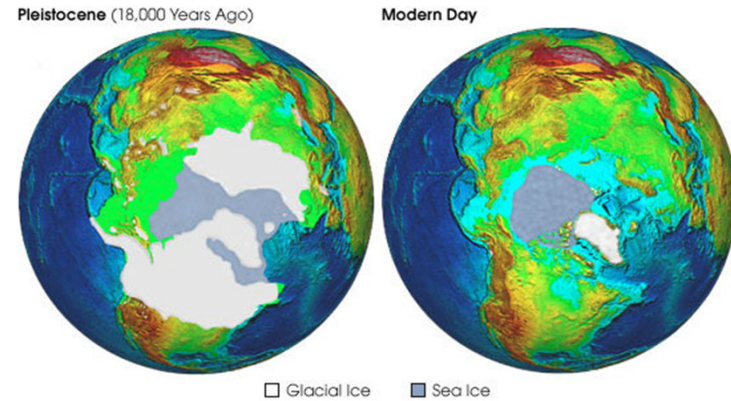
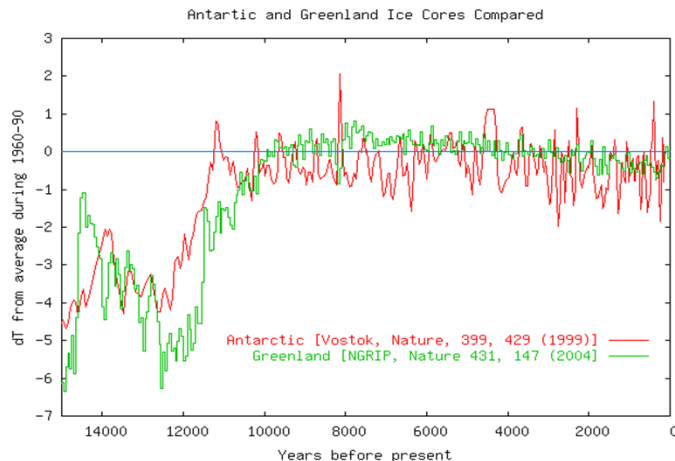
Folytonos változat, egyszerű relaxáció:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\tau_R} (V_R - V) - \frac{1}{\tau_F} I(t) \quad I(t) = \frac{J - \langle J \rangle}{J^{\max} - \langle J \rangle}$$

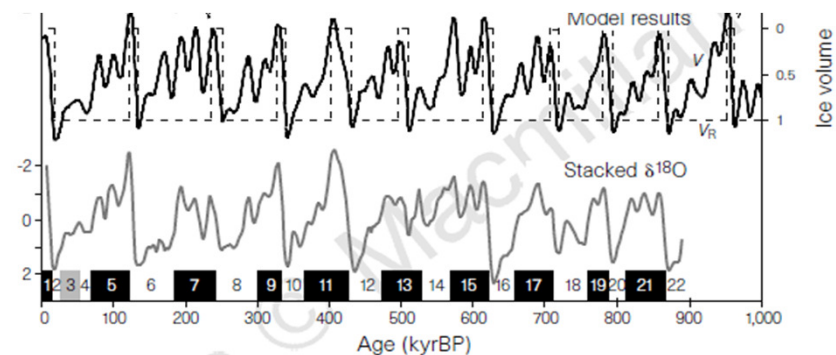
$V_i = 0$  (inicializáció);  $V_{g,G} = V_{max}$ ;

$\tau_{i,g,G,F} = 10, 50, 25$  kyr !

További probléma: észak-dél szinkronizáltsága



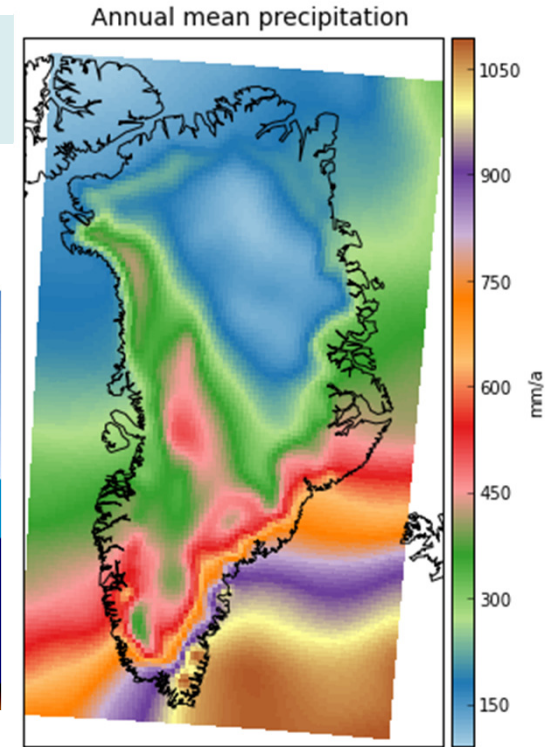
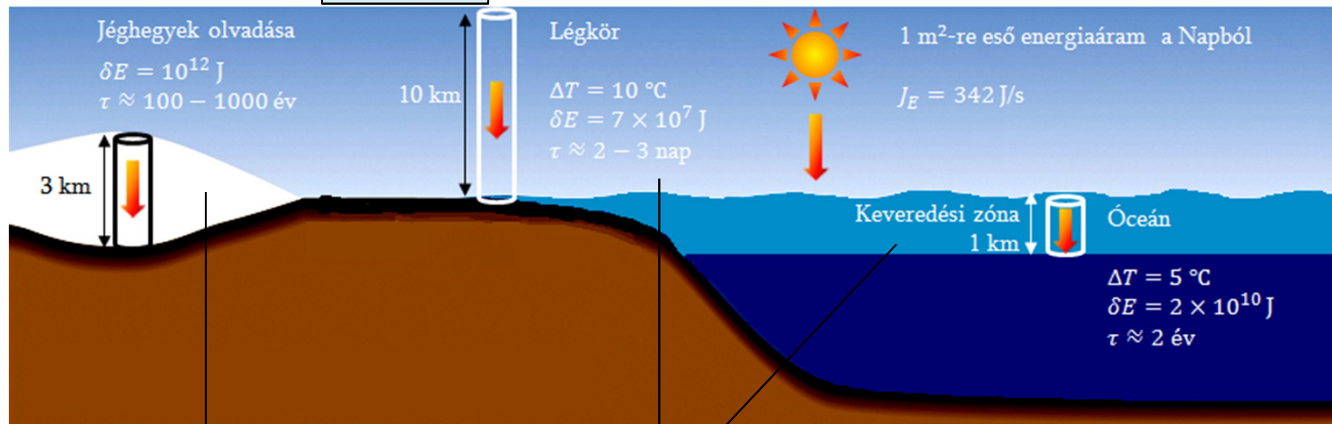
D. Paillard, Nature 391, 378 (1998)



# Belső dinamika: karakterisztikus időskálák

relaxációs idő:

$$\tau \approx \frac{\delta E}{J_E}$$



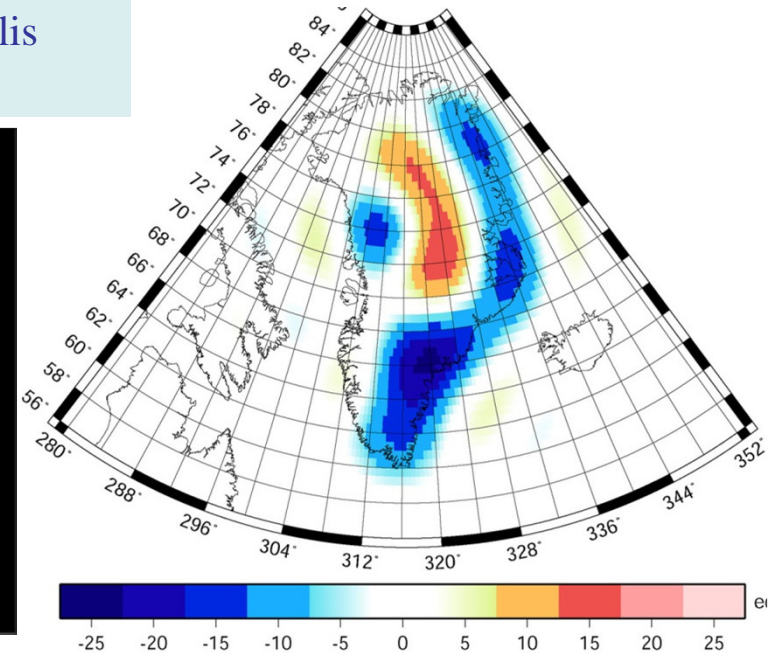
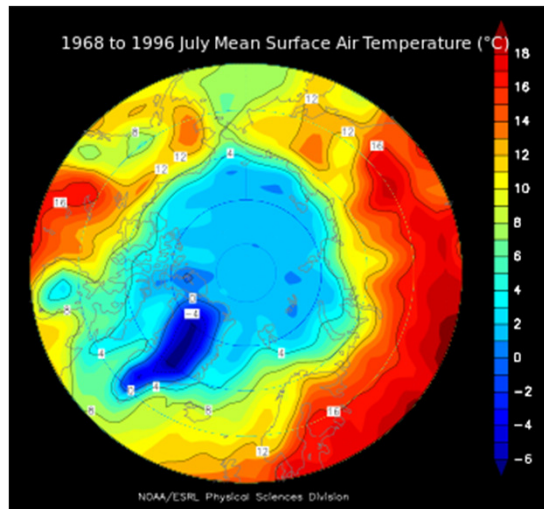
Látens hő (olvadás)  
 $\delta E = L\delta m$

$$\delta E = c\delta T$$

csak vertikális áramok!

Egyéb tényezők:

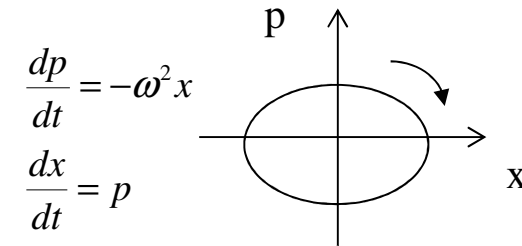
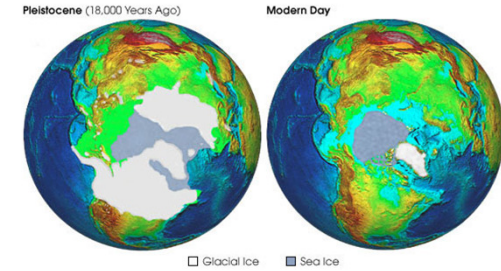
- meridionális hő- és nedvességtranszport (csapadék)
- 0D modellekben ez az átlagolás miatt kiesik (kézzel kell betenni)
- hőmérséklet
- nyomás
- gleccserek dinamikája



# Belső hajtás: a SIS mechanizmus

Mi hozza létre az oszcillációt? → Visszacsatolási mechanizmus:  
Hőmérséklet → csapadék → jég → albedo

Hogy lesz ebből határciklus (oszcilláció, nem fixpont)?  
→ „kapcsoló”



$$\tau = \tau_g + \tau_d = \frac{\Delta V}{P_g} + \frac{\Delta V}{|P_d|}$$

$$\tau_g \gg \tau_d$$

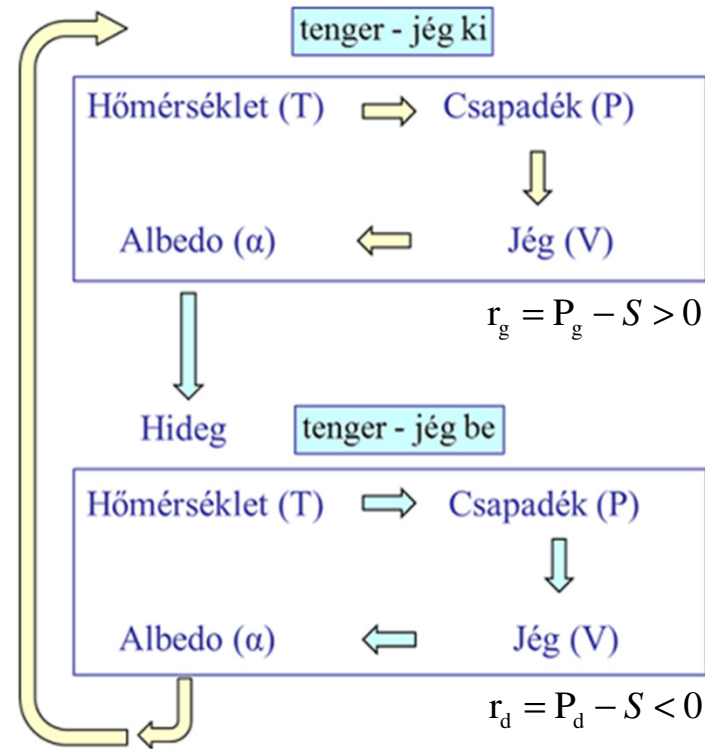
$$\Delta V = V_{\max} - V_{\min}$$

Minimál modell:

Csatolt légkör-óceán-krioszféra



meridionális  
hő-és nedvességtranszport



lassú



$V_{\min}$

gyors



$V_{\max}$

# SIS mechanizmus: boxmodell

H. Gildor, E. Tziperman,  
J. Geophys. Res. **106**, 9117 (2001)

## Óceán modell

Zonáisan átlagolt hidrodinamikai egyenletek  
( →zonális áramlás hatása: örvényes diffúzió)

→Boussinesq- közelítés, hidrosztatika, momentum átvitel:

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{g}{\rho_0} \rho \\ 0 &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - rv \\ 0 &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \end{aligned}$$

felszíni áramok:

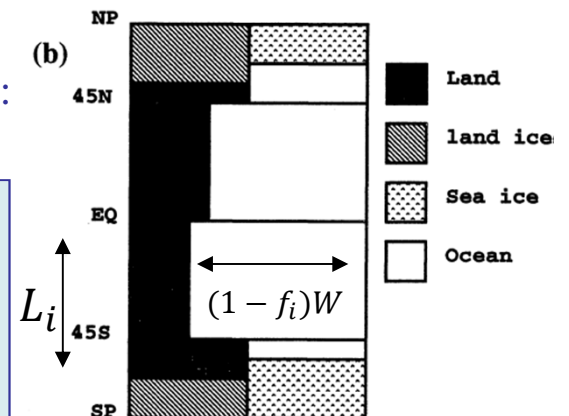
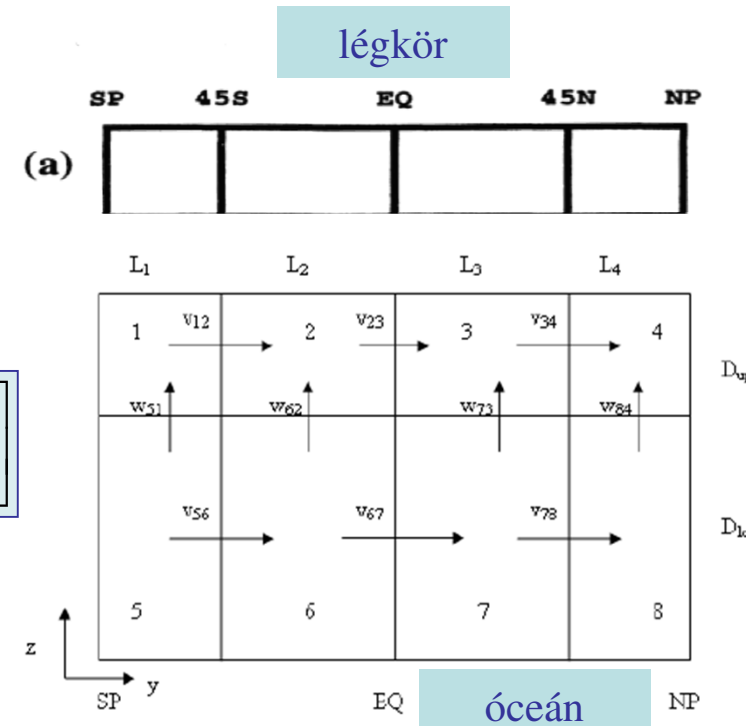
$$v_u = \frac{gD_l}{2\rho_0 rH} \left[ \frac{\partial \rho_l}{\partial y} D_l + \frac{\partial \rho_u}{\partial y} D_u \right]$$

A többi sebesség az anyag-  
megmaradás következménye!

+ állapotegyenlet:  $\rho = \rho(S, T)$

Prognosztikai egyenletek T,S-re (termodin. I főtétele és anyagmegmaradás):  
advekción és diffúzió + források!

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} (vT) + \frac{\partial}{\partial z} (wT) &= K_h \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q_T^{atm} + Q_T^{sea-ice}}{\rho_0 C_{pw} V_u} \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} (vS) + \frac{\partial}{\partial z} (wS) &= K_h \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + K_v \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + Q_S^{atm} + Q_S^{sea-ice} + Q_S^{land-ice} \end{aligned}$$



# SIS mechanizmus: boxmodell

## Óceán modell

Forrásokra egyszerű lineáris parametrizáció (relaxáció):

$\tau_{si} \sim 100$  nap;  $\tau \sim 10$  nap;  $D_{si} = 2$  m;  $T_{si} = 0$  °C ←

$T^{atm}, P - E$ : a légkör modellből

## Sea ice modell

$$\frac{dV_{si}}{dt} = \frac{Q_T^{si}}{\rho_{si} L_f} + P_{on-ice}$$

$$Q_T^{atm} = \frac{\rho_0 C_{pw} V_u}{\tau} (T^{atm} - T) \left\{ f_{ow} + f_{si} \frac{\gamma}{D_{si}} \right\}$$

$$Q_T^{sea-ice} = \frac{\rho_0 C_{pw} V_u}{\tau_{si}} (T^{sea-ice} - T)$$

$$Q_S^{sea-ice} = \frac{Q_T^{sea-ice}}{\rho_{sea-ice} L_f V_u} S_0$$

$$Q_S^{atm} = -(P - E) S_0 / V_u$$

$$Q_S^{land-ice} = -L I_{sink} S_0 / V_u$$

## Légkör modell

Egyszerű energy-balance modell:

$$C \frac{\partial T^{atm}}{\partial t} = (1 - \alpha)(1 - \alpha_{cloud}) J + K_T \frac{\partial^2 T^{atm}}{\partial y^2} - \epsilon \sigma T_{atm}^4 - Q_T^{atm}$$

$$\alpha = f_L (f_{li} \alpha_{li} + (1 - f_{li}) \alpha_l) + (1 - f_L) (f_{si} \alpha_{si} + (1 - f_{si}) \alpha_o)$$

# SIS mechanizmus: boxmodell

R. Sayag, E. Tziperman, M. Ghil  
Paleoceanography, **19** (2004)

## Légkör modell, nedvesség-transzport

Anyagmegmaradás:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\rho_w g}{P_0} (-(P - E) - \nabla F_{mq})$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = 0 \Rightarrow P - E = -\nabla F_{mq}$$

$$q = 0.7 q_s(T^{atm})$$

$$q_s(T) = A \exp(-B/T)$$

„Erősen” nemlineáris!

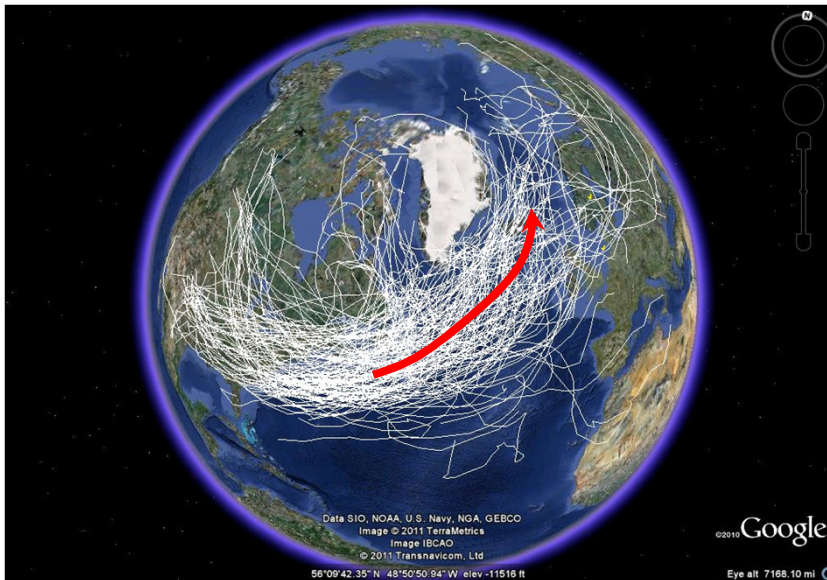
$$(P - E)_g \ll (P - E)_i$$

$$F_{mq} = -K_{mq} |\nabla T^{atm}| \nabla q$$

Az átvitelt a légkör  
nagyskálájú folyamatai  
végzik

Figyelembe lehet venni a zonális  
nedvességátvitelt is a poláris boxban:

$$F_{mq} = -K_{mq} |\nabla T^{atm}| \nabla q + K_q f_{ow} q$$





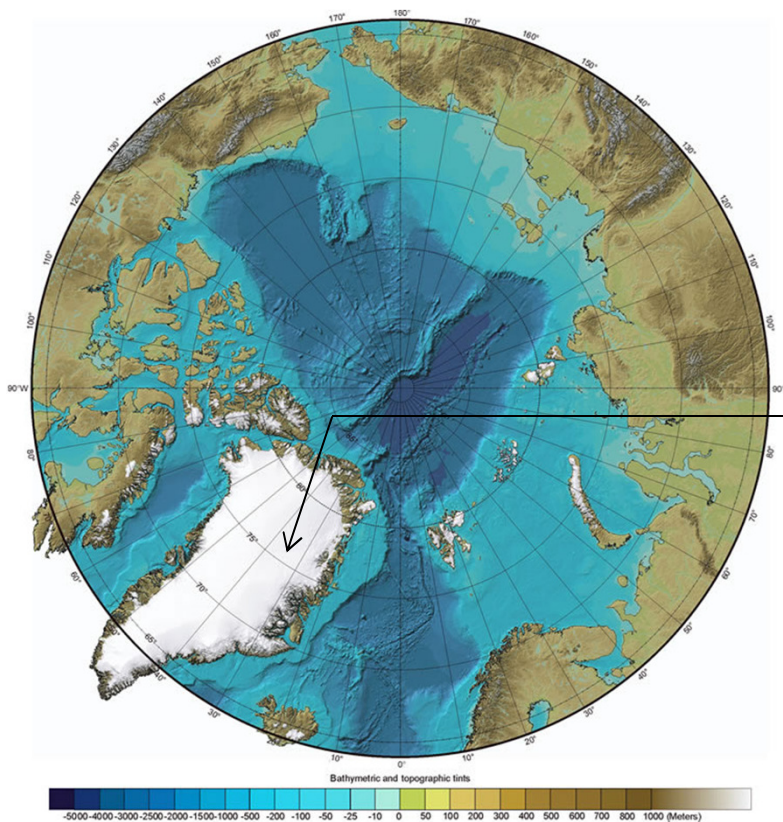
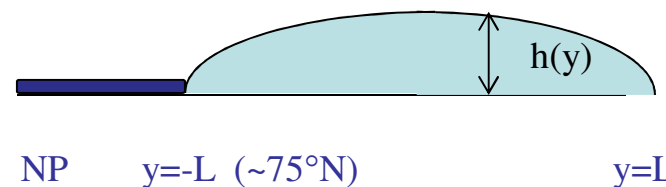
# SIS mechanizmus: boxmodell

R. Sayag, E. Tziperman, M. Ghil  
Paleoceanography, **19** (2004)

## Land-ice model

$$\frac{dV_{li}}{dt} = LI_{source} - LI_{Sink}$$

Parabolikus profil:  $h(y) = \sqrt{\frac{2\tau_0}{g\rho_{LI}}(L - |y|)}$   $\rightarrow V_{li} \sim L^{3/2}$



Szárazföldi jég forrása: csapadék (hó) a gleccserekre

$$LI_{source} = \max(0, 25f_L, f_{li})(P - E)$$

Olvadás: hőmérséklet, nyomás, megnövekedett instabilitás (calving), ice runoff...



$$LI_{Sink} = \text{const} \quad (?)$$

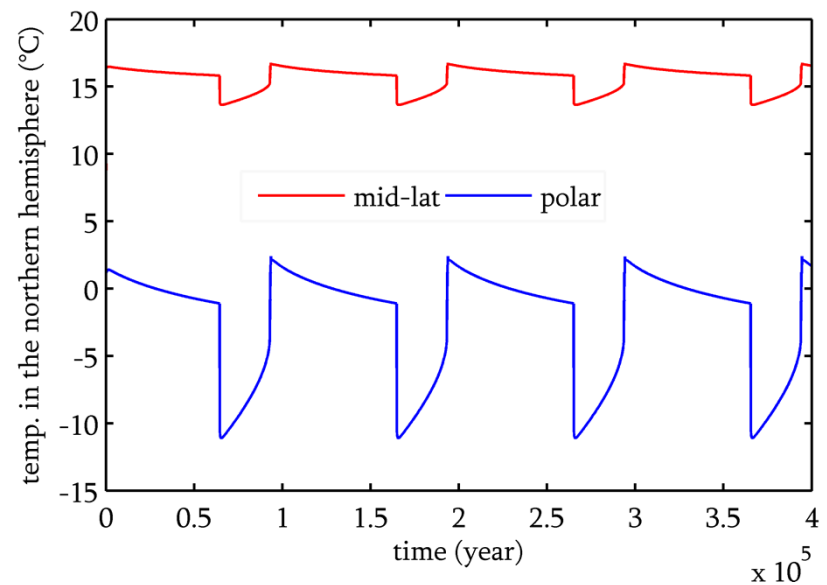
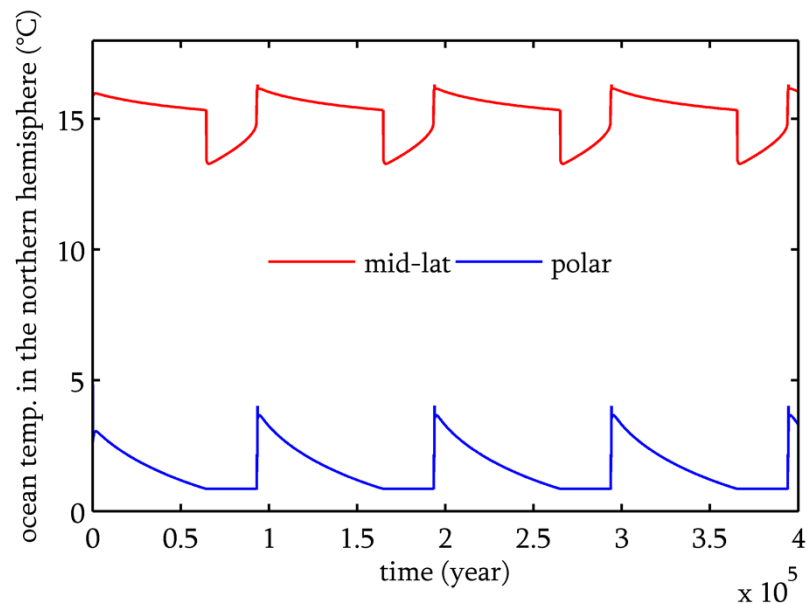
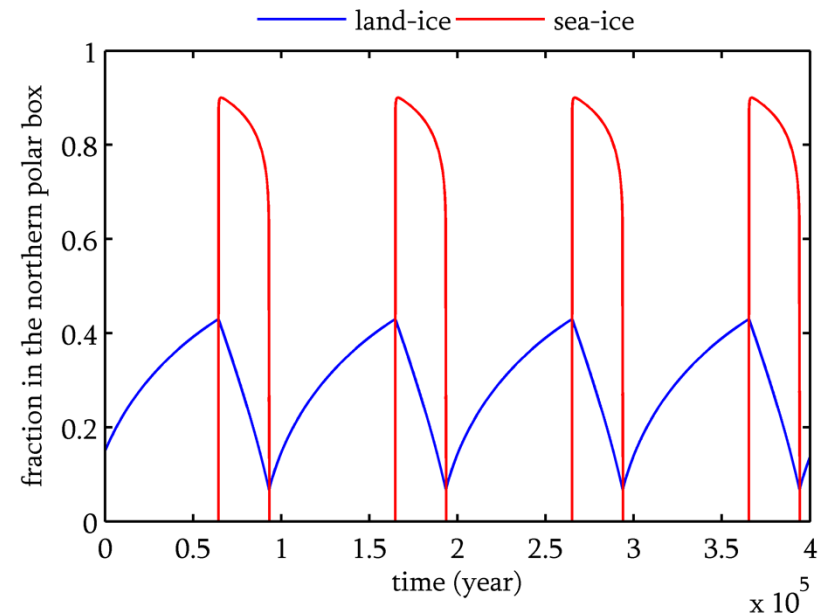
# Eredmények

Modell eredmények:

Konstans hajtás:  $J = (245,382,382,245) \text{ W/m}^2$

Antarktison a jég kiterjedése az elmúlt 10-20 millió évben nem változott jelentősen  $\rightarrow$

Déli poláris boxban  $V_{li} = \text{const}$  ( $f_{li} = 0.37$ )



# Eredmények

## Honnan jön az oszcilláció?

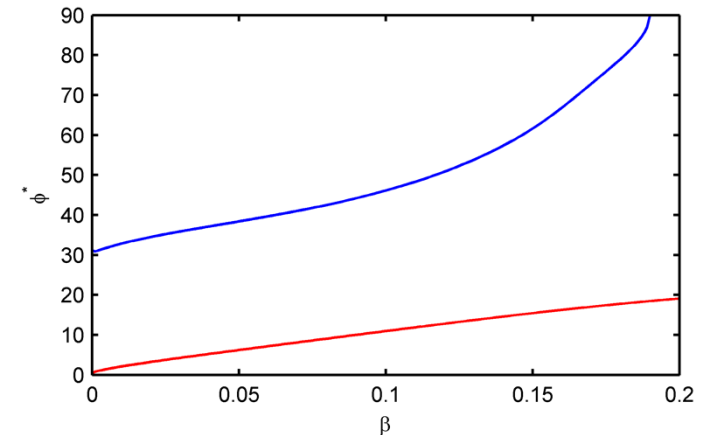
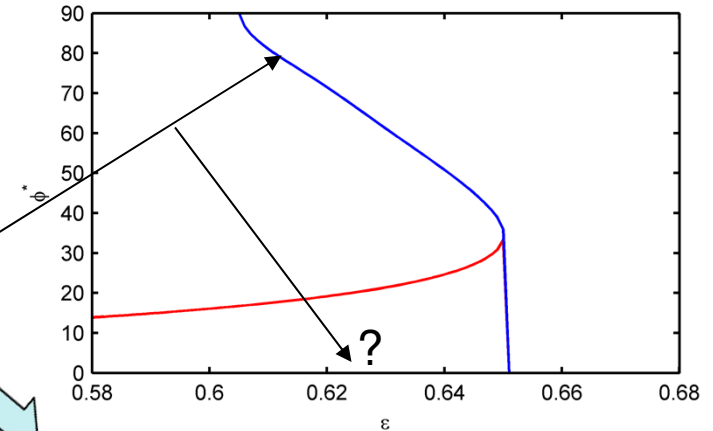
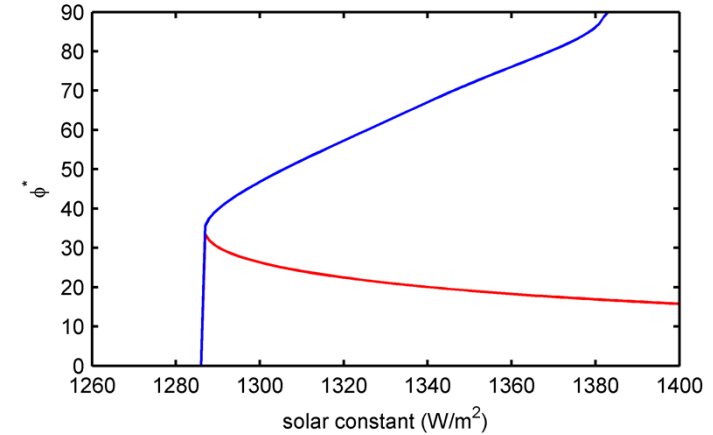
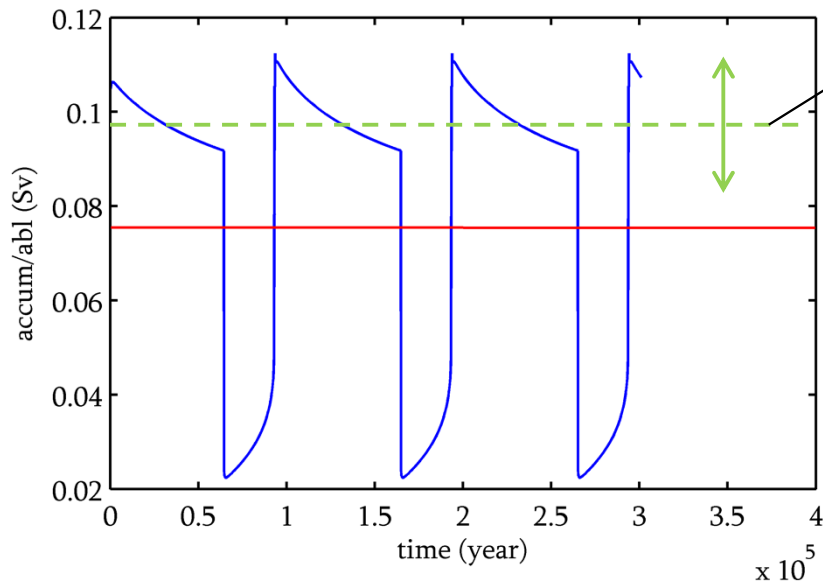
„Stacionárius” állapot:  $LI_{sink} = LI_{source}$

A rendszer relaxál, de a kapcsoló megváltoztatja stacionárius állapotokat → van memória!

Hóglyó föld? ( $LI_{sink} > 0$ )

Energy balance modell gömbön, jéghatár:  $T=0^\circ\text{C}$

$$\frac{(1 - \alpha)S_0}{\pi} \sqrt{1 - x^2} - \sigma \epsilon T^4 + \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial x} \left( D(1 - x^2) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0$$



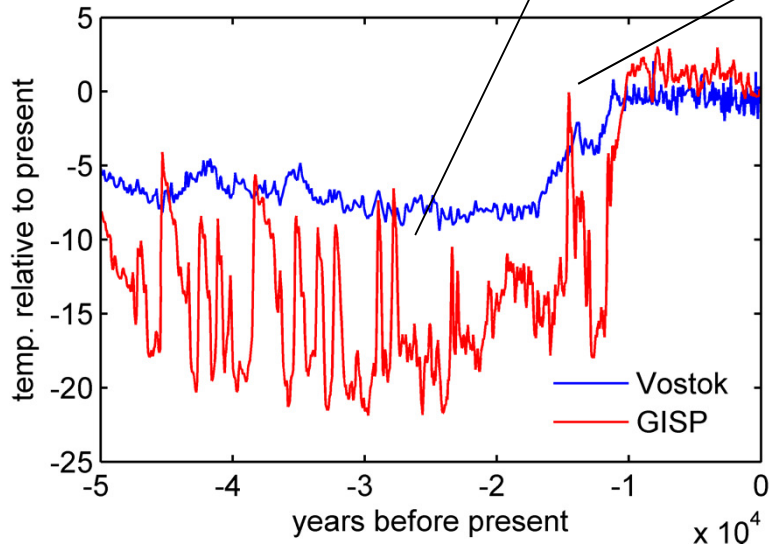
# THC, DO-események

Melyik hatás a dominálja a THC-t?

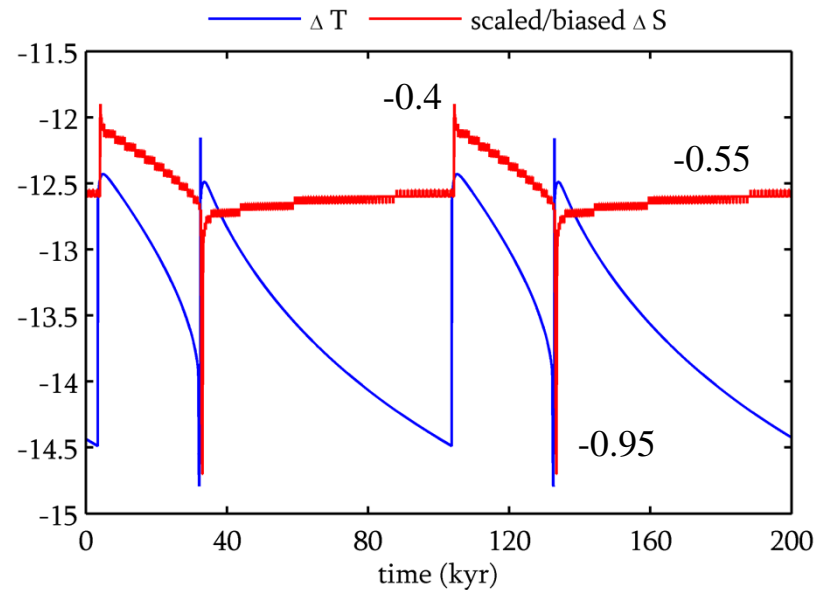
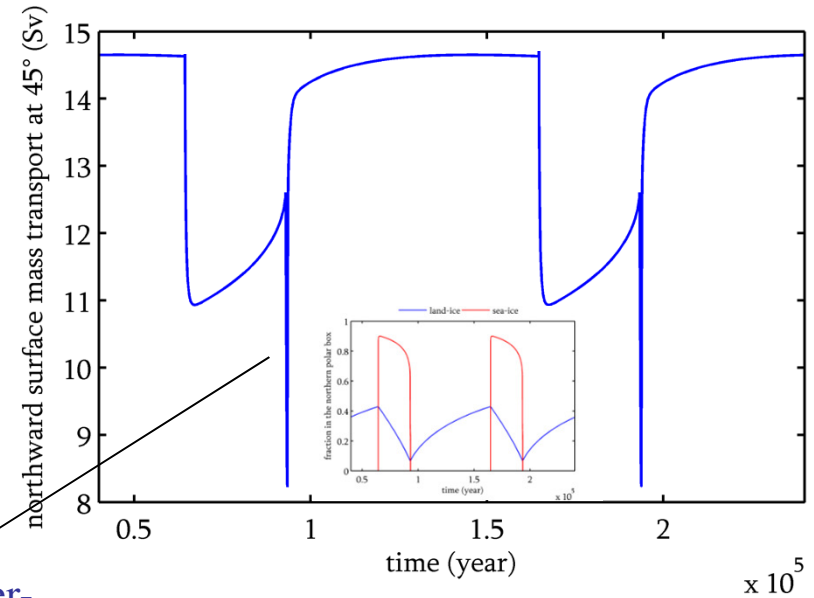
- hőmérséklet-, sótartalom-különbség
- gleccserek olvadéka, párolgás csökkenése
- tenger-jég olvadéka



DO-események  
Rezonancia?



Younger-Dryas

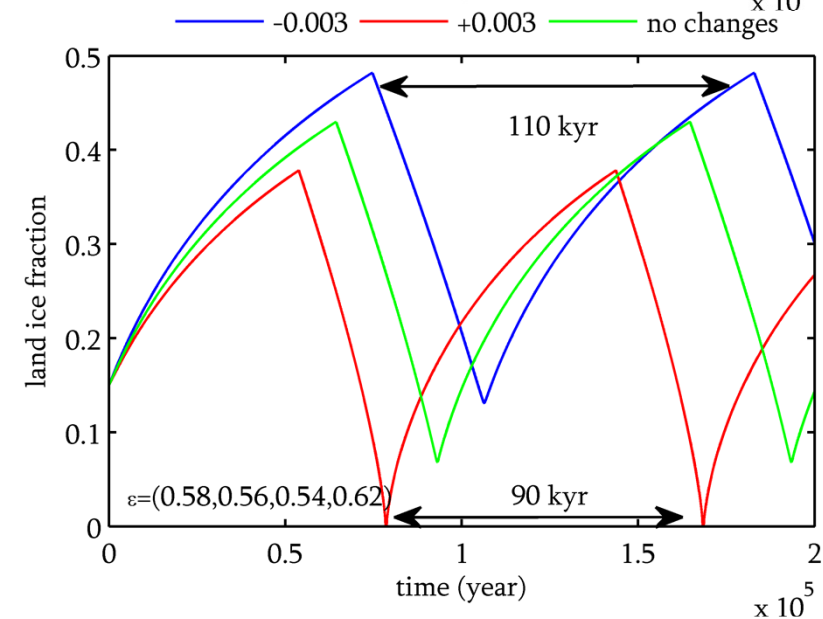
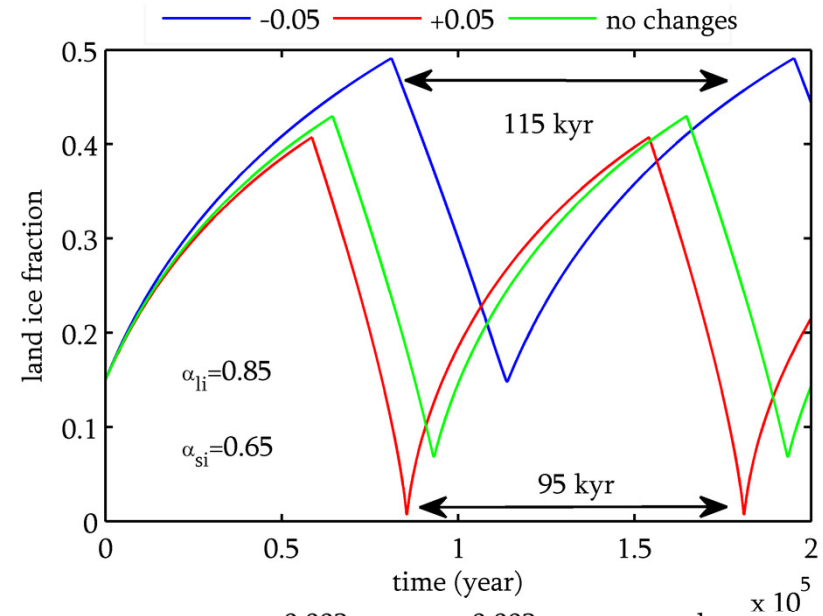
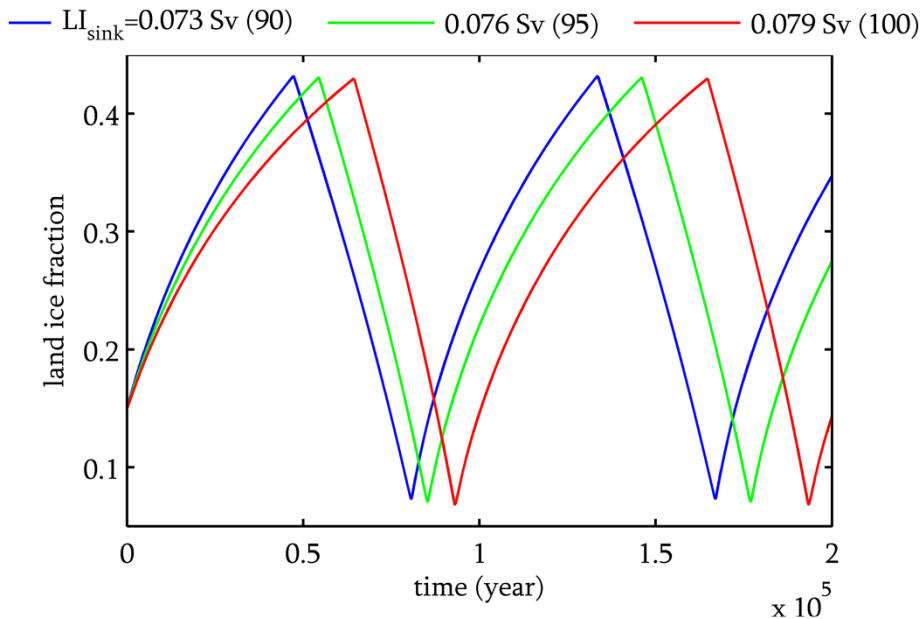


# Érzékenységi vizsgálatok

$\alpha$ -t csökkentve  $V_{min,max}$  nő ( $T_{krit}$  nem változik)  $\rightarrow$  ( $T - \alpha$ ) visszacsatolás

$LI_{sink}$ : amplitúdó nem, csak a periódus hossza változik ( $V_{min,max}$  nem)  $\rightarrow \tau_g/\tau_d$  arányt (aszimmetriát) befolyásolja

$\varepsilon \sim CO_2$ :  $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon'$ ,  $\varepsilon' \approx 0.015 \ln(CO_2/CO_{2,ref})$   
 $CO_{2,ref} = 280$  ppm  $\rightarrow \pm 30\%$  változás az interglaciális-glaciális oszcillációk során:  $\varepsilon' \approx \pm 0.003$



# Felbontás hatása, folytonos modell

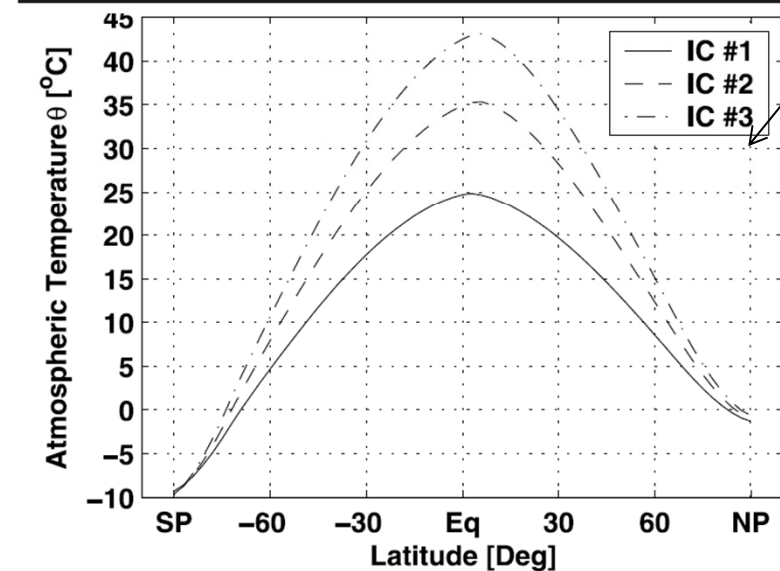
R. Sayag, E. Tziperman, M. Ghil  
Paleoceanography, 19 (2004)

Kérdés: A hirtelen átmenetek, a nagy fáziskülönbség (land-ice – sea-ice) nem a felbontás (45°) következménye? → „folytonos” modell (1.5°-os felbontás)

Változtatások: prognosztikai egyenlet q-ra,  $LI_{sink} = 0$ ,  $LI_{source} = \text{const}$ , parabolikus profil az emisszivitásra,  $V_{si}$ -ra vonatkozó egyenletben diffúzió is szerepel

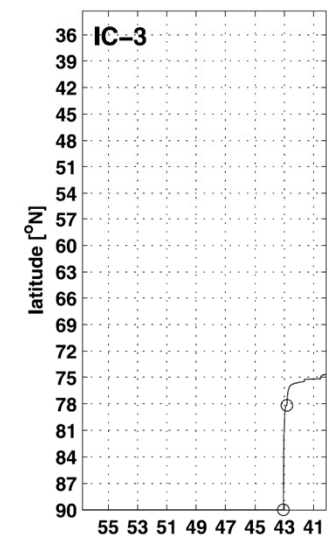
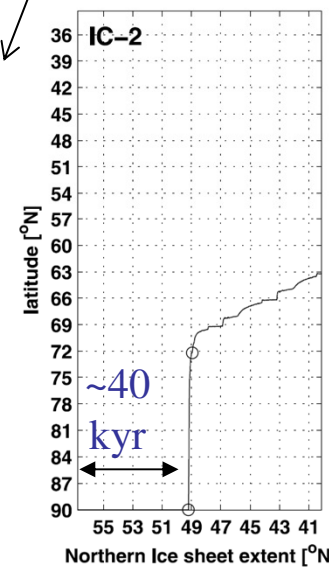
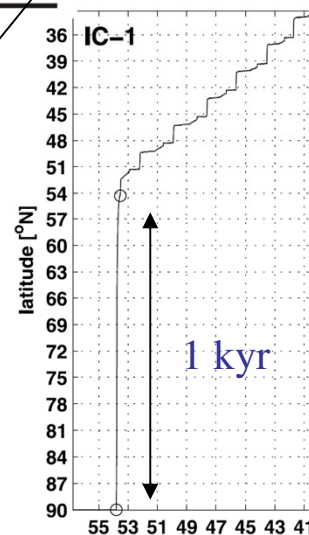
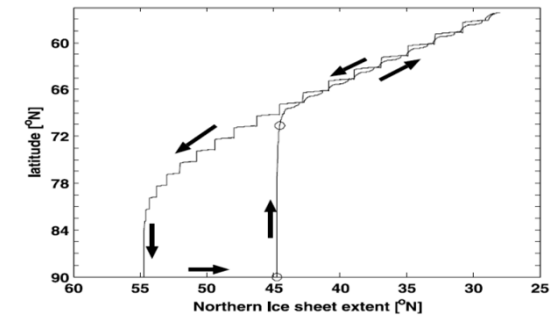
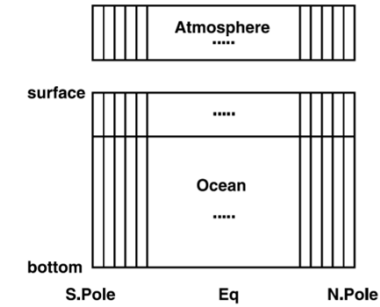
emisszivitás, atm. merid. hőátvitel, THC

| IC <sup>a</sup> | $\epsilon_S, \epsilon_o, \epsilon_N$ | $C$ | $r_o, s^{-1}$ | $\Delta\theta_{\text{equil.}} \text{ } ^\circ\text{C}$ |
|-----------------|--------------------------------------|-----|---------------|--|
| 1               | 0.55, 0.55, 0.55                     | 3.5 | 15            | 30.1   |
| 2               | 0.60, 0.46, 0.64                     | 2.5 | 23            | 40.6   |
| 3               | 0.64, 0.40, 0.70                     | 2   | 27            | 48.3   |

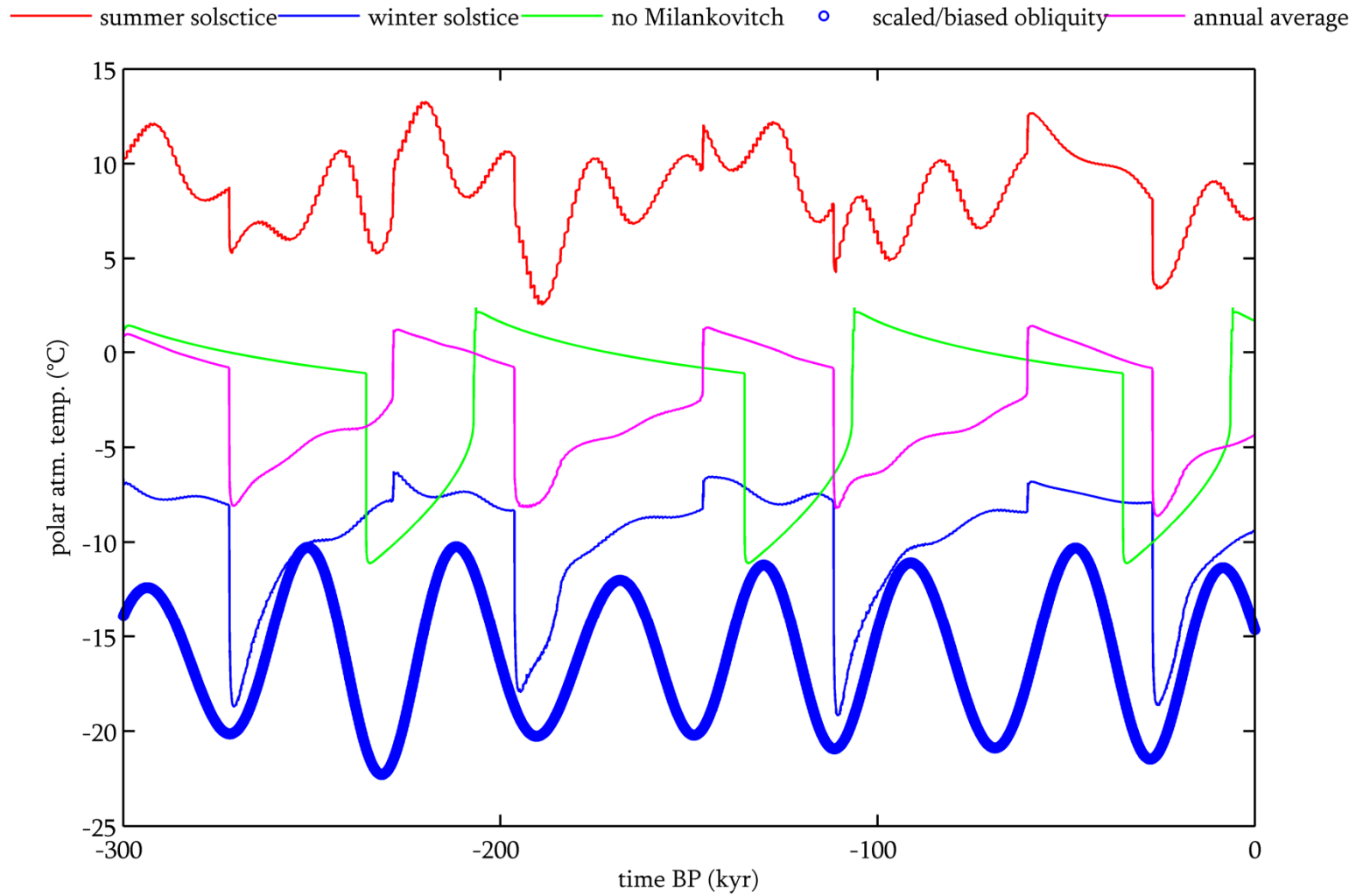


Steady state:  
gleccserek határa = 66°  
 $LI_{source} = 0$

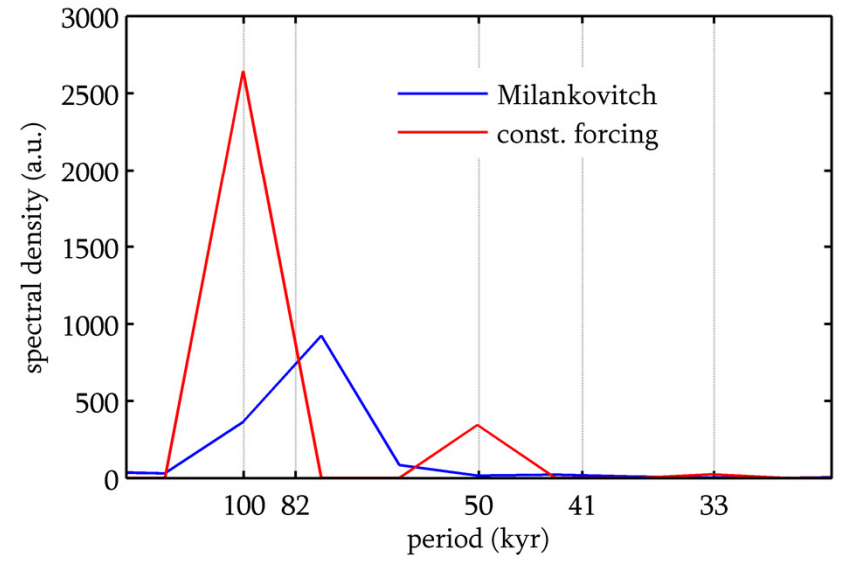
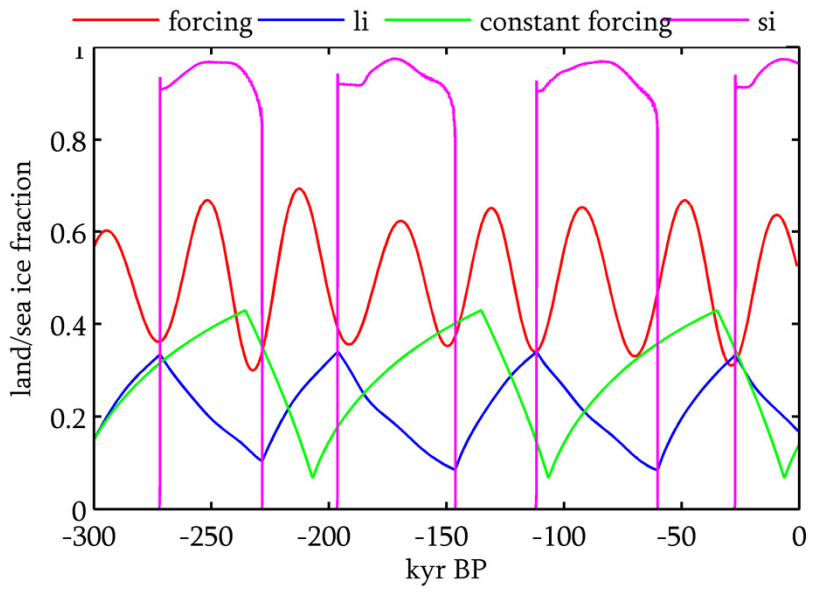
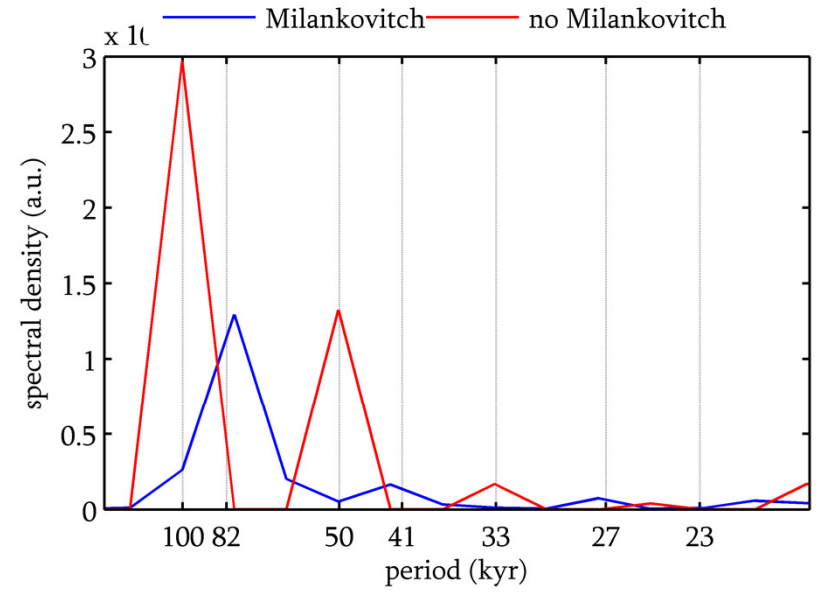
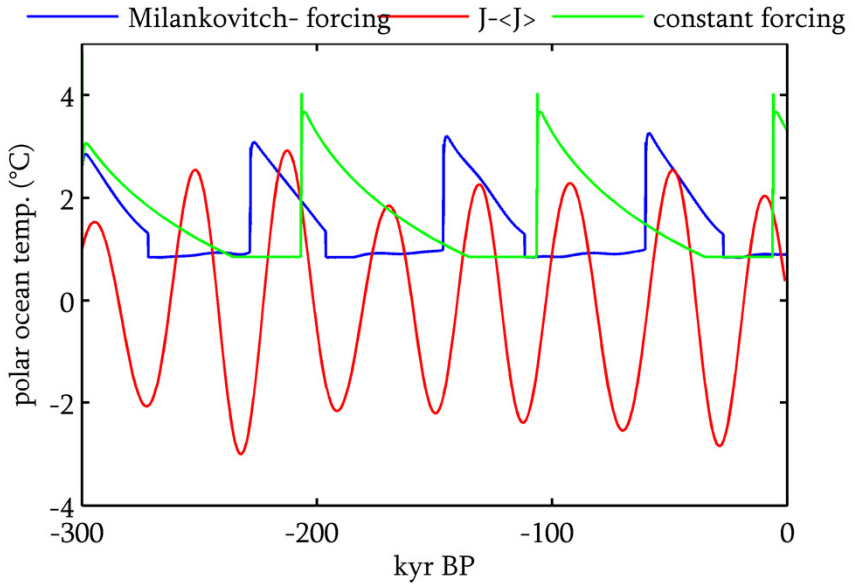
$LI_{source} = 0.04 \text{ Sv}$  (40m/10 kyr tsz.-változás)



# A puding próbája: éves menet és a Milankovitch-ciklusok hatása



# Milankovitch-ciklusok, phase locking





# Phase locking, nemlineáris rezonancia

E. Tziperman, M. Raymo,  
P.Huybers, C. Wunsch  
Paleoceanography, **21** (2006)

Szakaszonként lineáris (0D) modell SIS modell:

$$\frac{dV}{dt} = (p_0 - kV)(1 - a_{si}) - S_0 [1 + \eta(t) + S_M I(t)]$$

Nemlineáris rezonancia (phase locking):

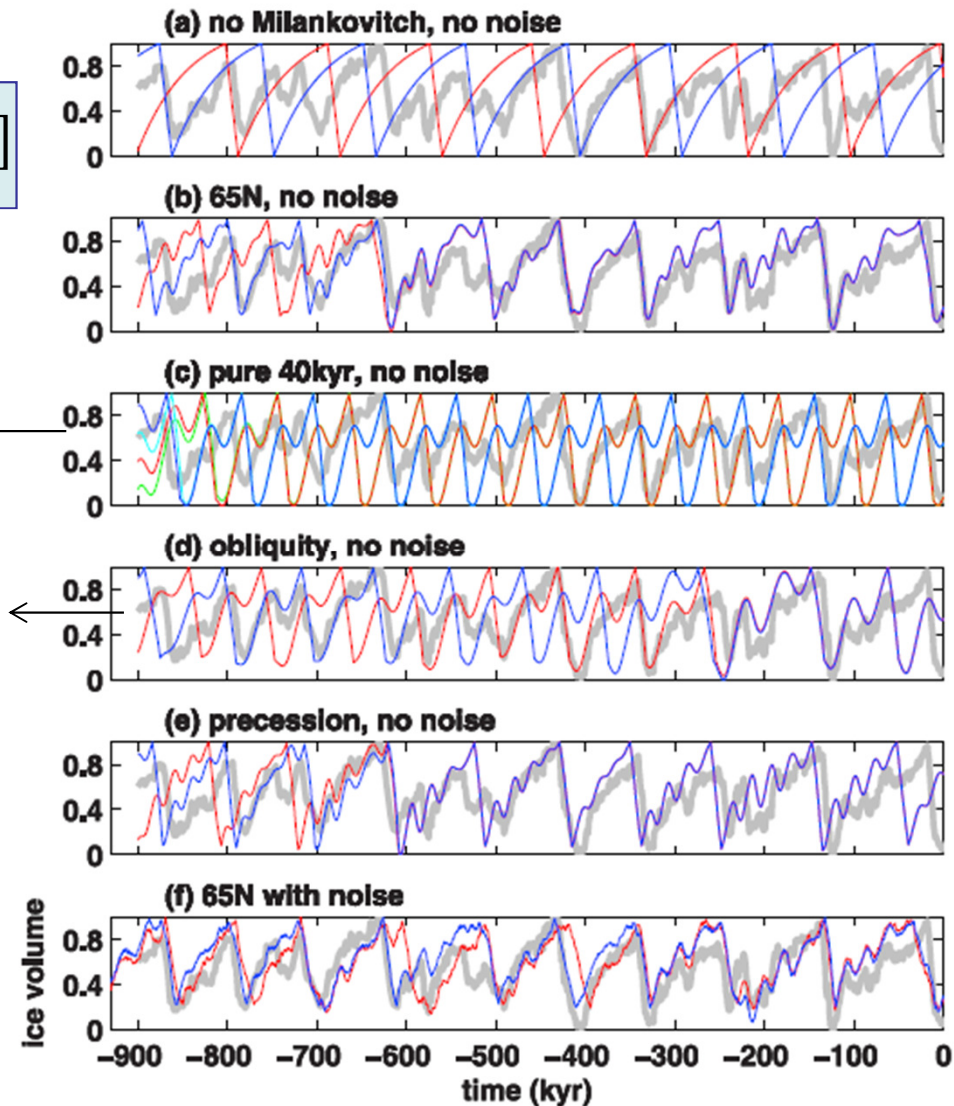


$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{p}{q}$$

Mi szükséges hozzá?

Nemlinearitás ( $\omega = \omega(A)$ ), disszipáció (memória „törlése”)

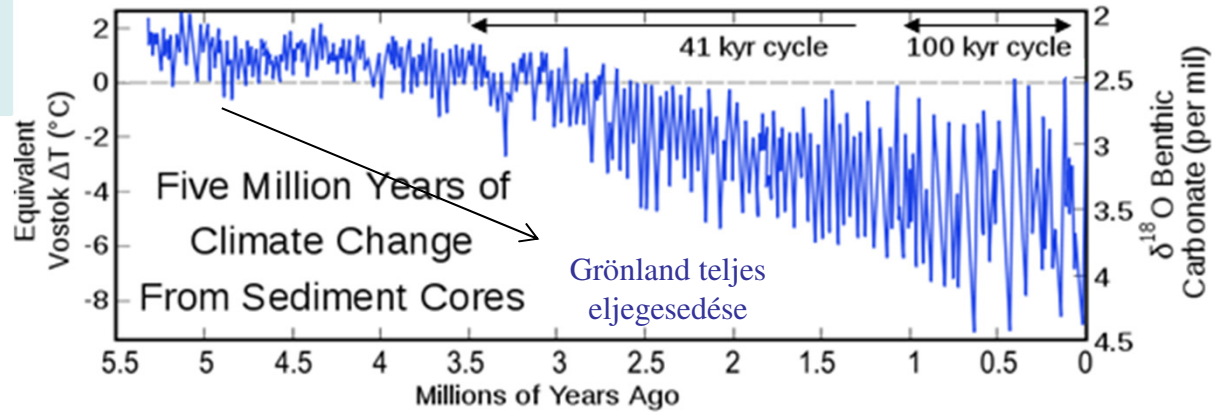
1. Precesszió dominált klíma:  $\omega_1 \approx 20$  kyr  $\rightarrow$   
 $p/q=1/5$ :  $\omega_1 \approx 100$  kyr
2. Tengelydőlés által dominált klíma:  
 $\omega_1 \approx 20$  kyr  $\rightarrow$   
 $p/q=2/5$  (102kyr)



# Amire még választ várunk...

## Újabb kérdések:

- (1) Fluktuációk nagyságrendje
- (2) Frekvencia-rezsim váltás
- (3) Aszimmetria
- (4) 2-3 millió éves trend
- (5) Észak-Dél szinkronizáltság



## Aszimmetria mértéke

