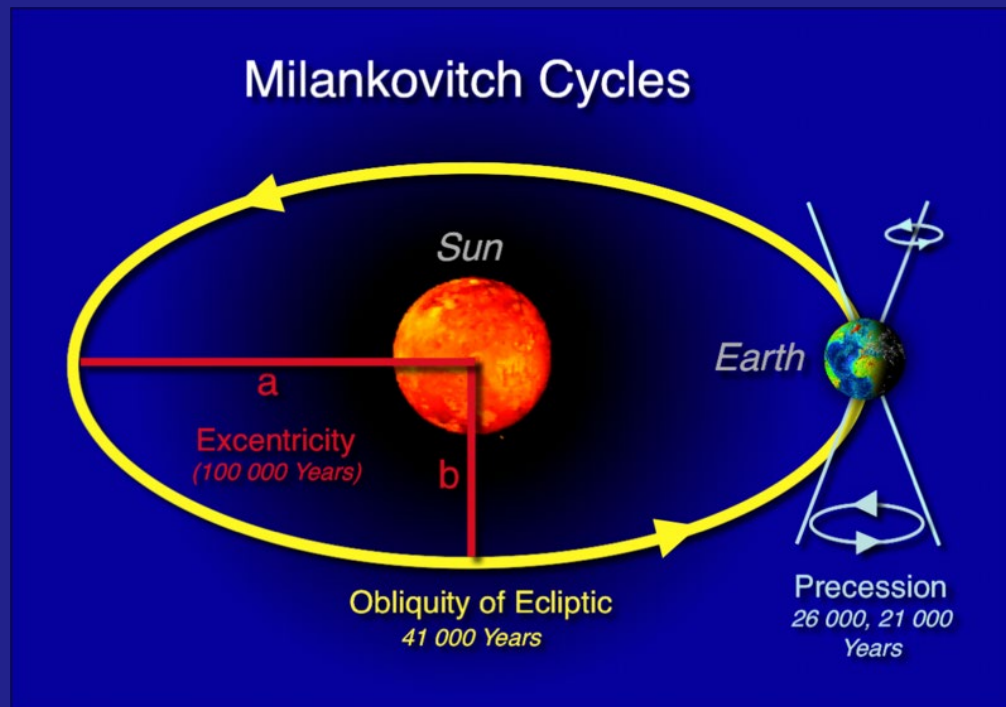
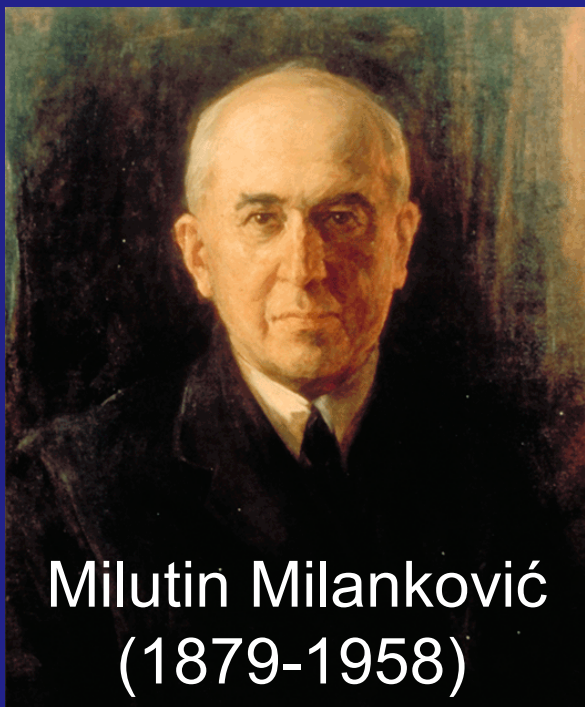


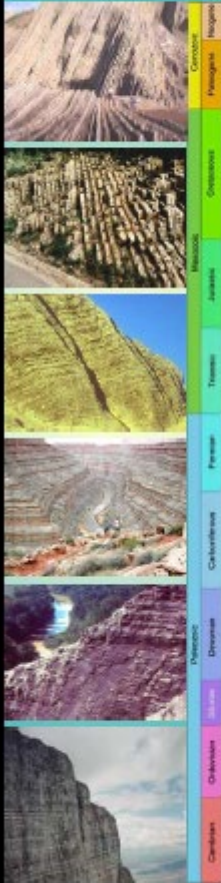
# Τροχιακές παράμετροι



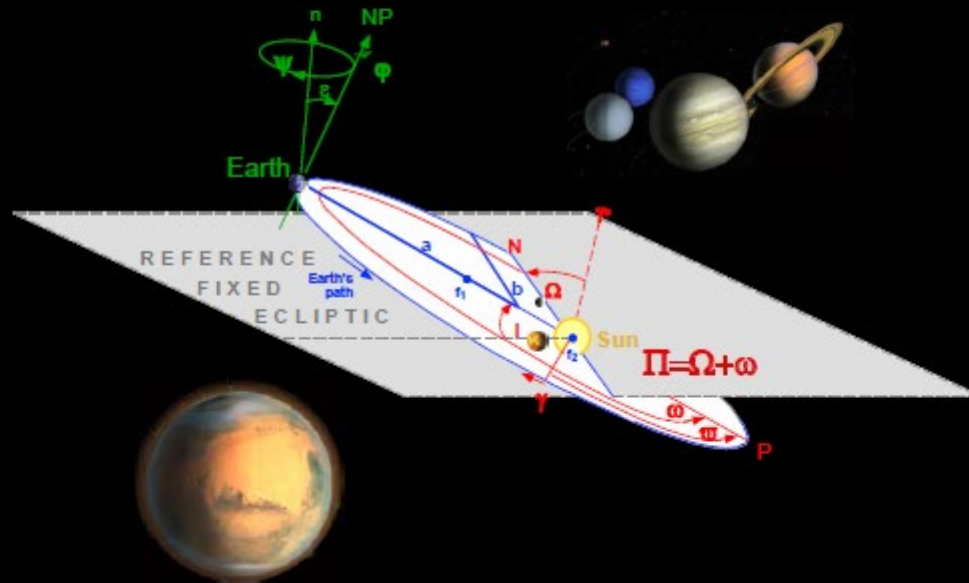
Στην δεκαετία του '40, ο Milanković αναρωτήθηκε εάν οι **παλμικές κινήσεις** στην τροχιά της Γης μπορούσαν να εξηγήσουν τις πολλαπλές παγετώδεις περιόδους, με βάση τη μεταβολή της ποσότητας της θερμότητας που φτάνει στη Γη από τον Ηλιο



# CYCLOSTRATIGRAPHY AND THE ASTRONOMICAL TIME SCALE



## Earth's Orbital Parameters

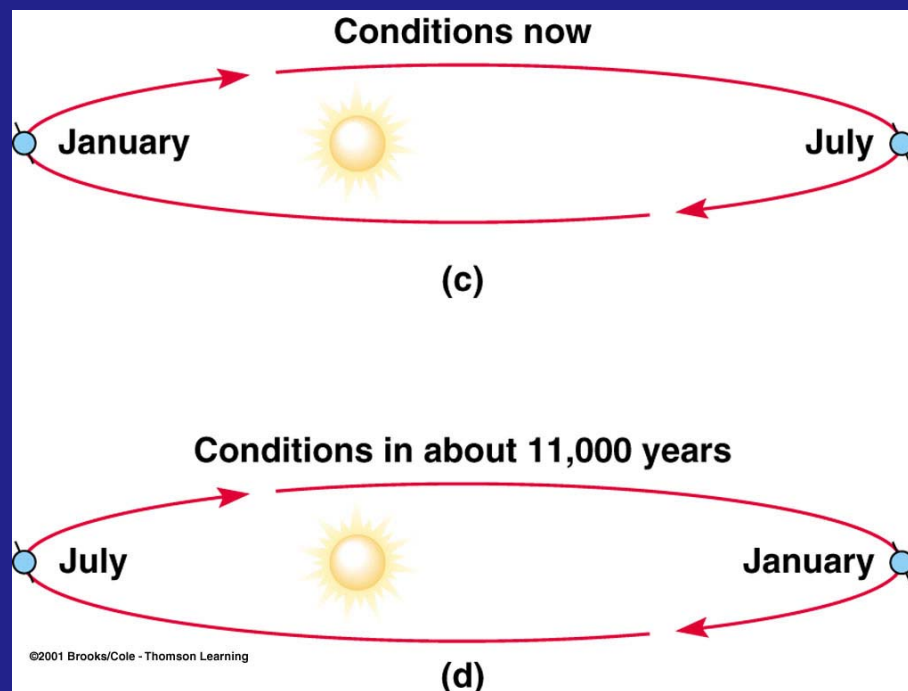
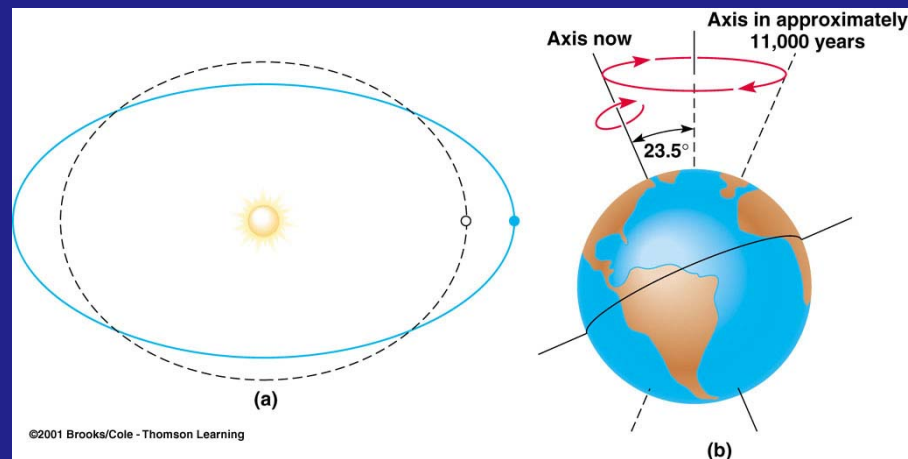


# Κύκλοι Milankovitch

Τροχιακή εκκεντρότητα  
100,000 yr κύκλος

Λόξωση  
22° — 25°      41,000 yr κύκλος

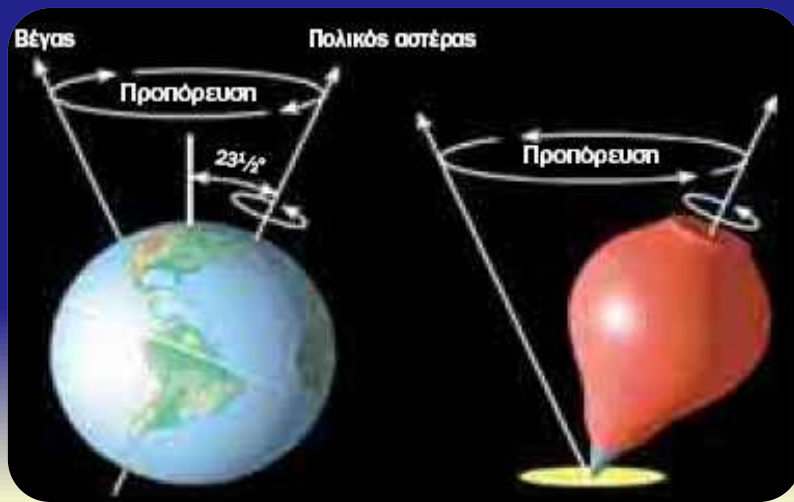
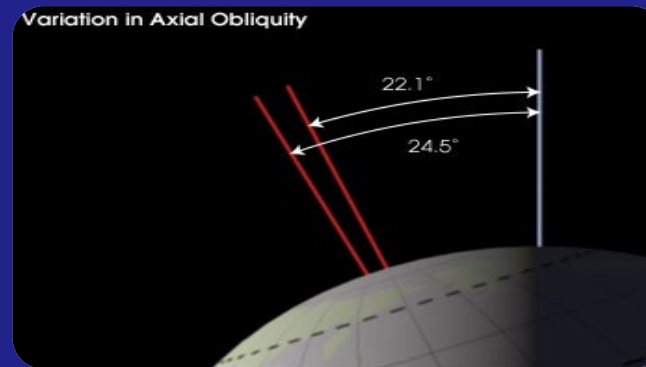
Μετάπτωση των ισημεριών  
20,000-25,000 yr κύκλος





Εκκεντρότητα (Eccentricity) :  
 Περιοδικότητα μεταξύ  
 ελλειπτικής και κυκλικής  
 γήινης τροχιάς (100.000 y)

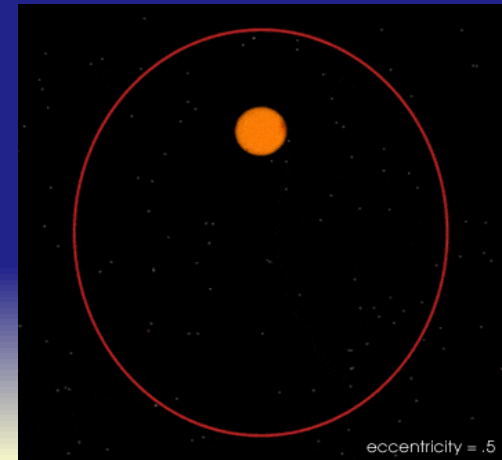
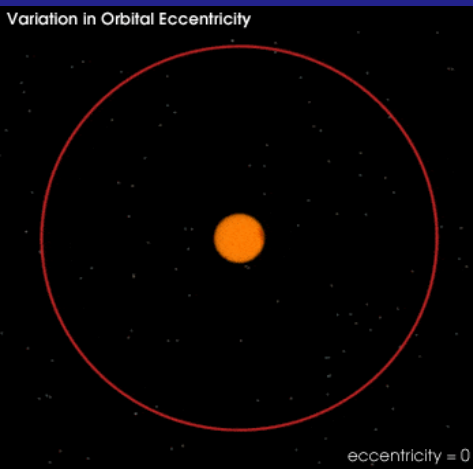
Λόξωση (Obliquity): Μετατόπιση  
 κλίσης γήινου άξονα (41.000 y)



Μετάπτωση (Precession):  
 Ταλάντωση γήινου  
 άξονα περιστροφής (21.700 y)

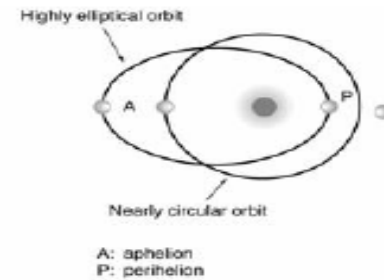
# Εκκεντρότητα

- Εποχική αλλαγή στη μορφή της Γήινης τροχιάς (↑ ελλειπτική – ↓ κυκλική)
- Μεταβολή της μέσης απόστασης Γης-Ήλιου
- Περίοδος: ~ 100000 χρόνια
- Κυκλική τροχιά → μικρή διαφορά στην εισερχόμενη ακτινοβολία ανά εποχή

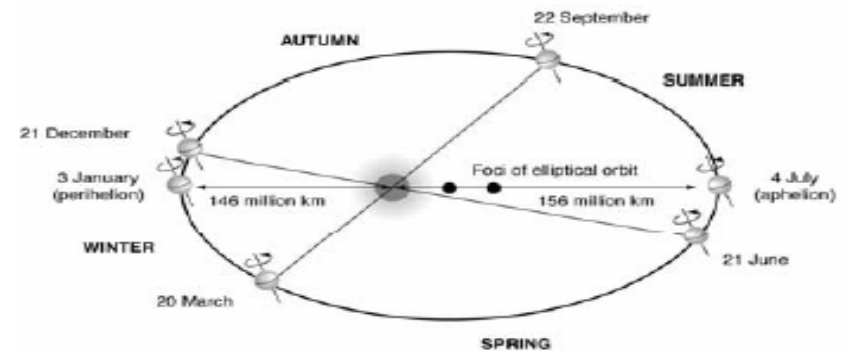


# Εκκεντρότητα

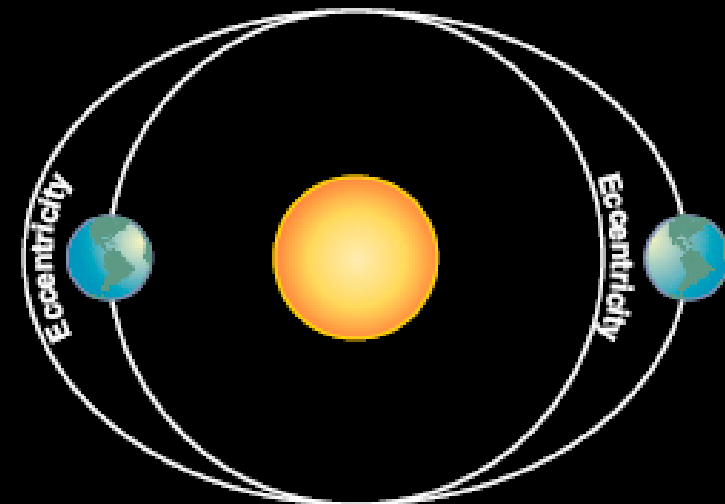
- Η εκκεντρότητα δίνει τον ρυθμό, αλλά δεν αποτελεί την αιτία των κλιματικών μεταβολών.
- Το σχήμα της γήινης τροχιάς μεταβάλλεται από κυκλικό σε ελλειψοειδές ανά 100 kyr και 400 kyr



(a)



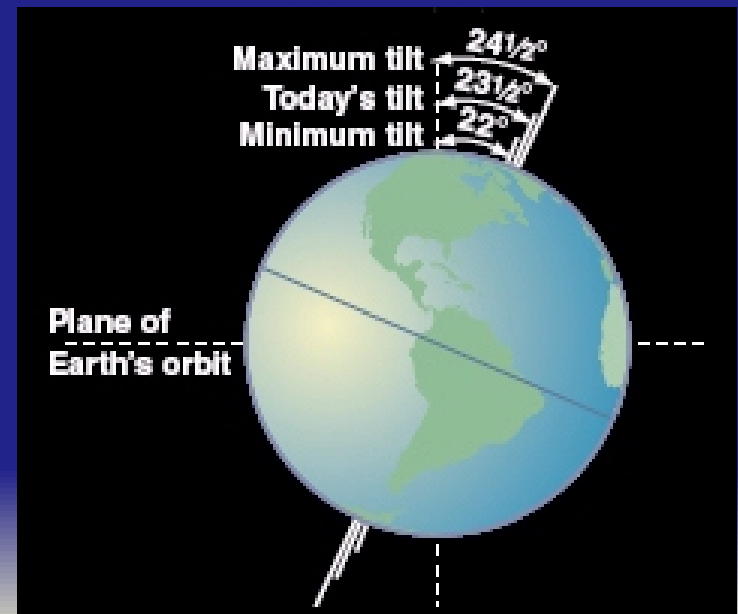
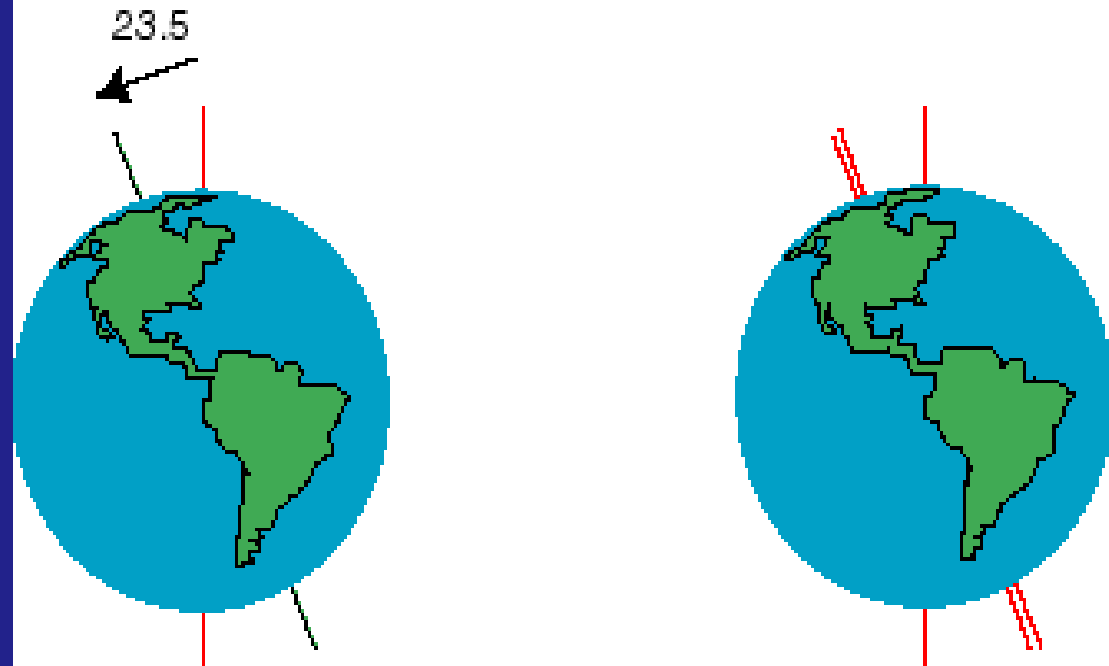
(b)



# Λόξωση

- Απόκλιση του άξονα περιστροφής της Γης σε σχέση με το τροχιακό επίπεδο
- $21.8^{\circ} - 24.4^{\circ}$
- Κύκλος 41,000 yrs

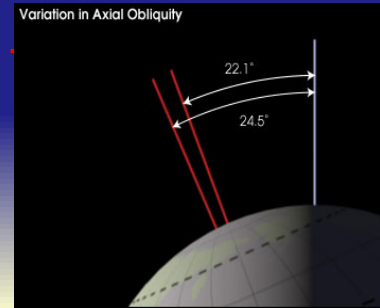
Obliquity Cycle (41 k.y.)





# Λόξωση

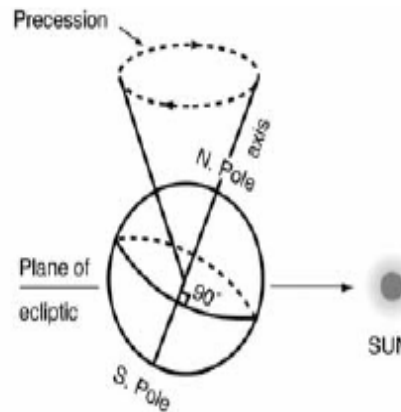
- Μεταβολές της γωνίας που σχηματίζει ο άξονας της Γης με το επίπεδο της ελλειπτικής τροχιάς της (αλλαγές στην κλίση του άξονα, αλλά όχι και στην διεύθυνσή του)
- Περιοδικότητα: ~ 42000 χρόνια
- Μεγαλύτερη κλίση → πιο έντονες εποχές
- Μικρή κλίση → δροσερά καλοκαίρια  
διατήρηση πάγων





# Μετάπτωση των Ισημεριών

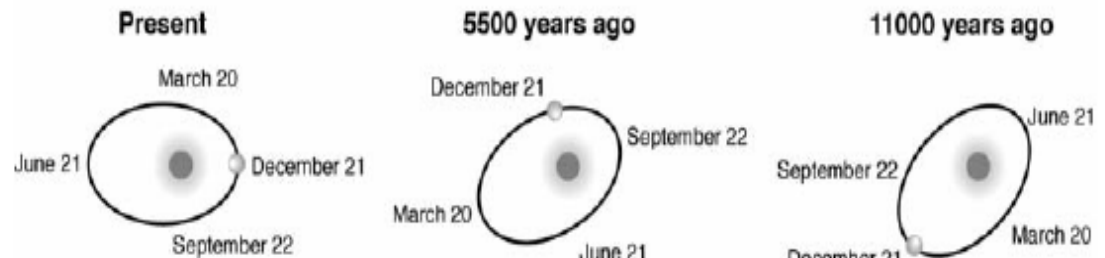
- Σχετίζεται με την ελλειπτική τροχιά της Γης και τον άξονα περιστροφής
- Κύκλοι 23 και 19 kyr.



(a)



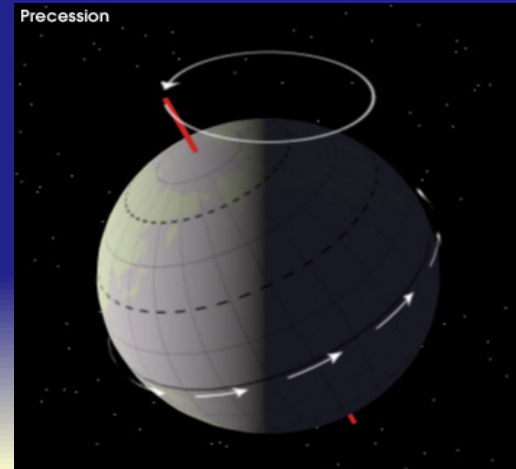
(b)



(c)

# Μετάπτωση

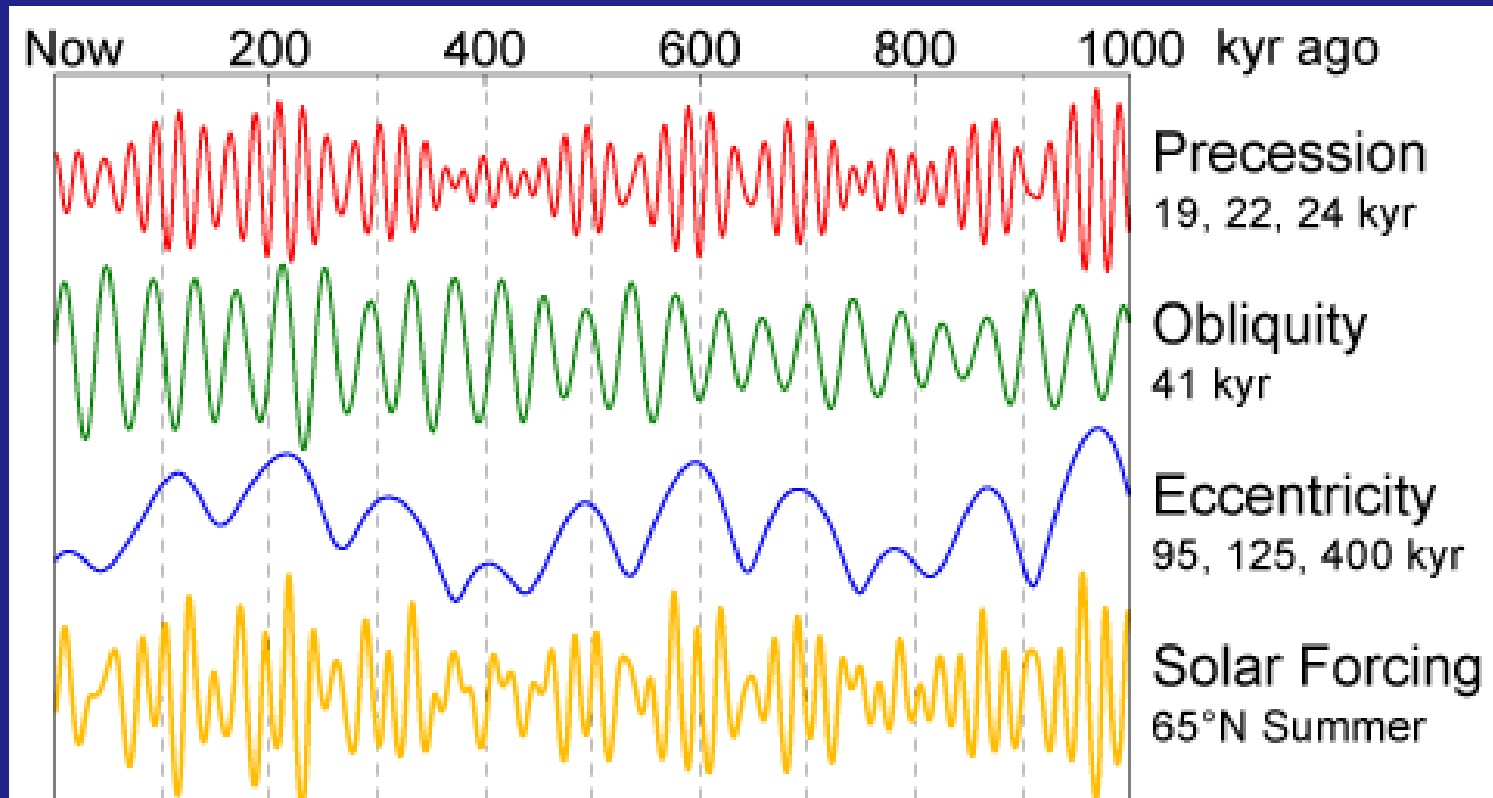
- Μεταβολές του χρονικού σημείου των ισημεριών, δηλ, μεταβολές του ακριβούς χρονικού διαστήματος κατά τη διάρκεια του έτους, στο οποίο η Γη βρίσκεται στην πλησιέστερη απόσταση από τον Ήλιο
- Κυκλική κίνηση του άξονα της Γης
- Οφείλεται σε δύο παράγοντες, μια ταλάντωση του άξονα της Γης και μια περιστροφική κίνηση της ελλειπτικής τροχιάς της Γης
- προκαλείται από τις βαρυτικές ροπές που ασκούνται από το φεγγάρι και τον ήλιο στην περιστροφή της ελαφρώς πεπλατυσμένης Γης.
- αυξάνουν την εποχική αντίθεση στο ένα ημισφαίριο και μειώνουν την εποχική αντίθεση στο άλλο ημισφαίριο
- Περιοδικότητα: 21000



# Some points..

- ❁ Η εκκεντρότητα επηρεάζει όλη τη Γη, όλες τις εποχές
- ❁ Η λόξωση και η μετάπτωση έχουν εποχική και τοπική επίδραση
- ❁ **Μέγιστο ηλιακής ακτινοβολίας** κατά τον συνδυασμό υψηλής εκκεντρότητας, υψηλής λόξωσης & ελάχιστης μετάπτωσης
- ❁ **Επηρεάζονται περισσότερο τα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη & ιδίως το καλοκαίρι**

# Κυκλικότητα



**Ο Milanković πρόσθεσε όλες τις τροχιακές παραμέτρους καταλήγοντας ότι οι παγετώδεις εποχές θα έπρεπε να συμβαίνουν με κανονική κυκλικότητα, πιθανά κάθε 100 χιλιάδες χρόνια.**



# CYCLOSTRATIGRAPHY AND THE ASTRONOMICAL TIME SCALE



## INTRODUCTION

La2004

cyclostratigraphy

NEOGENE

Pleistocene

Pliocene

Miocene

PALEOGENE

Oligocene

Eocene

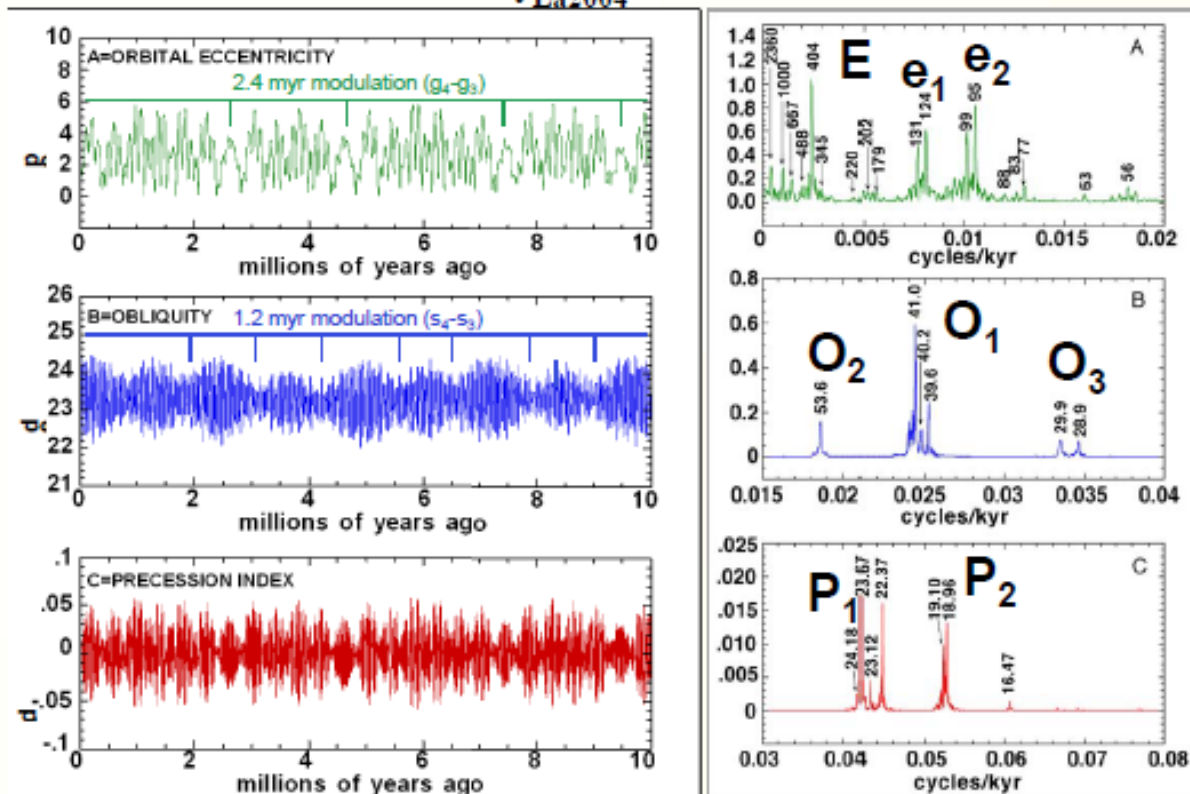
Paleocene

CONCLUSIONS

[2 of 18]

## INTRODUCTION

• La2004



Solar constant    Earth-Sun Distance  $\rho$     Geographic latitude  $\theta$     Solar declination  $\delta$     Hour angle  $H$

$$INSOLATION: W = S_0 \rho^2 (\sin\theta \sin\delta + \cos\theta \cos\delta \cos H)$$

## INTRODUCTION

La2004

cyclostratigraphy

NEOGENE

Pleistocene

Pliocene

Miocene

PALEOGENE

Oligocene

Eocene

Paleocene

CONCLUSIONS

## NEOGENE

### • Pleistocene

Age model based on sapropel tuning to summer insolation with **3-kyr lag** between maximum summer insolation and sapropel midpoint—based on radiocarbon age of Sapropel S1. *-Lourens et al. 2004*

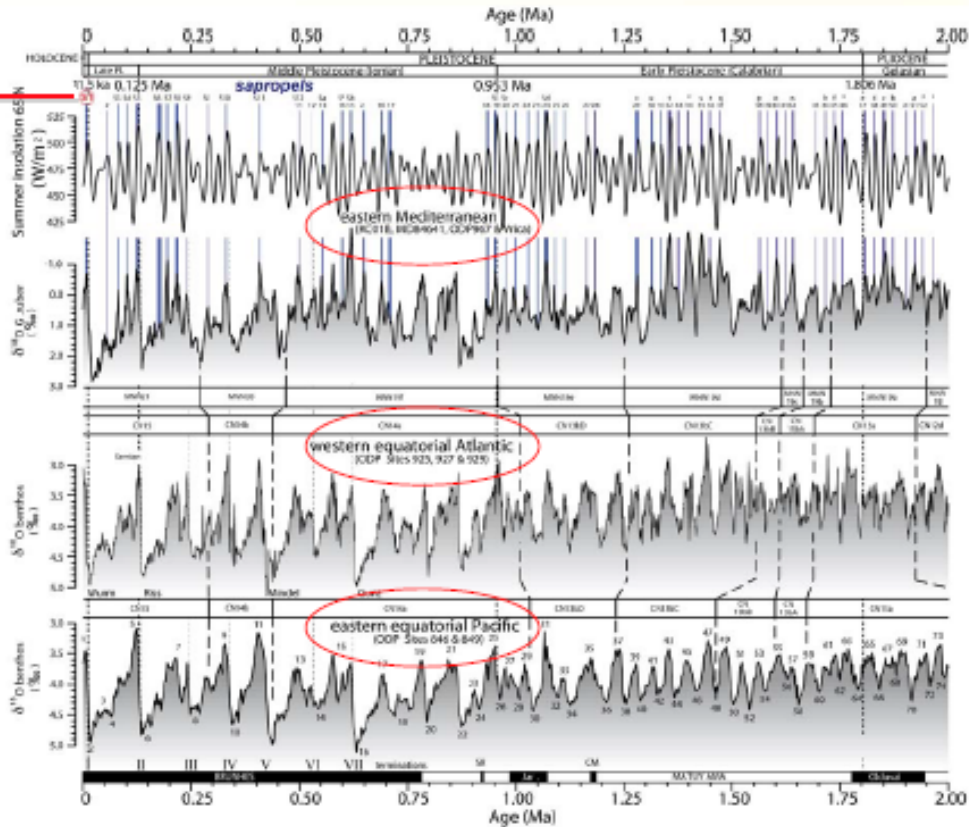
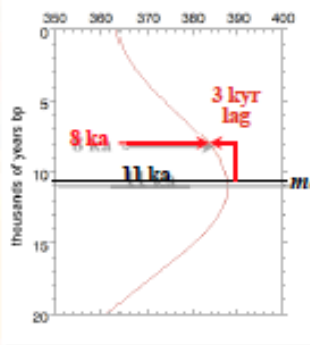
### CALIBRATION:

Holocene  
SAPROPEL S1



Radiocarbon date: 8 ka

La2004 Summer Insolation  
65°N





# CYCLOSTRATIGRAPHY AND THE ASTRONOMICAL TIME SCALE



## INTRODUCTION

La2004

cyclostratigraphy

NEOGENE

Pleistocene

Pliocene

Miocene

PALEOGENE

Oligocene

Eocene

Paleocene

CONCLUSIONS

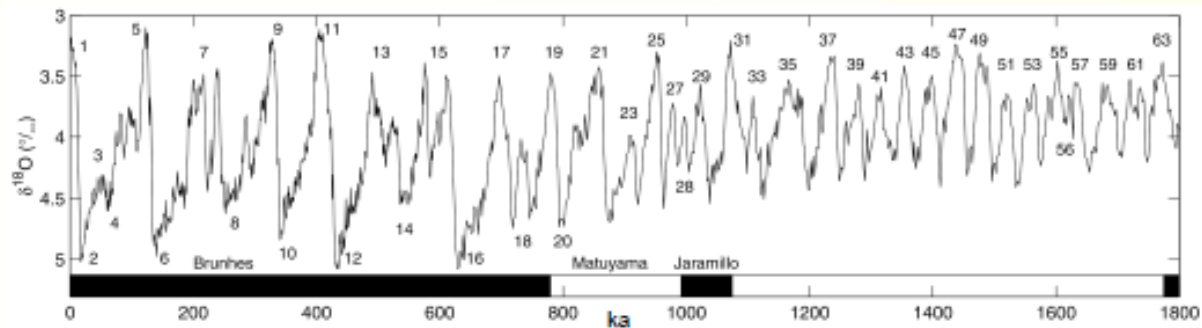
[5 of 18]

## NEOGENE

### • Pleistocene

Age model from a stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}O$  records tuned to a nonlinear (5 to 15 kyr lagged) ice model driven by 21 June insolation at 65°N, based on La93(1,1), except 0-135 Ka which is calibrated to GRIP and U/Th dating of Termination II.

*Lisiecki & Raymo, 2005*



### Model comparison

REVERSAL	MIS	LOURENS ET AL.	LISIECKI & RAYMO	Difference (myr)
Brunhes (b)	19	0.781	0.78	0.001
Jaramillo (t)	28	0.988	0.991	-0.003
Jaramillo (b)	31	1.072	1.075	-0.003
Olduvai (t)	63	1.778	1.781	-0.003

Agree to within 3 kyrs  
(Lisiecki older)





# CYCLOSTRATIGRAPHY AND THE ASTRONOMICAL TIME SCALE



## INTRODUCTION

La2004

cyclostratigraphy

NEOGENE

Pleistocene

Pliocene

Miocene

PALEOGENE

Oligocene

Eocene

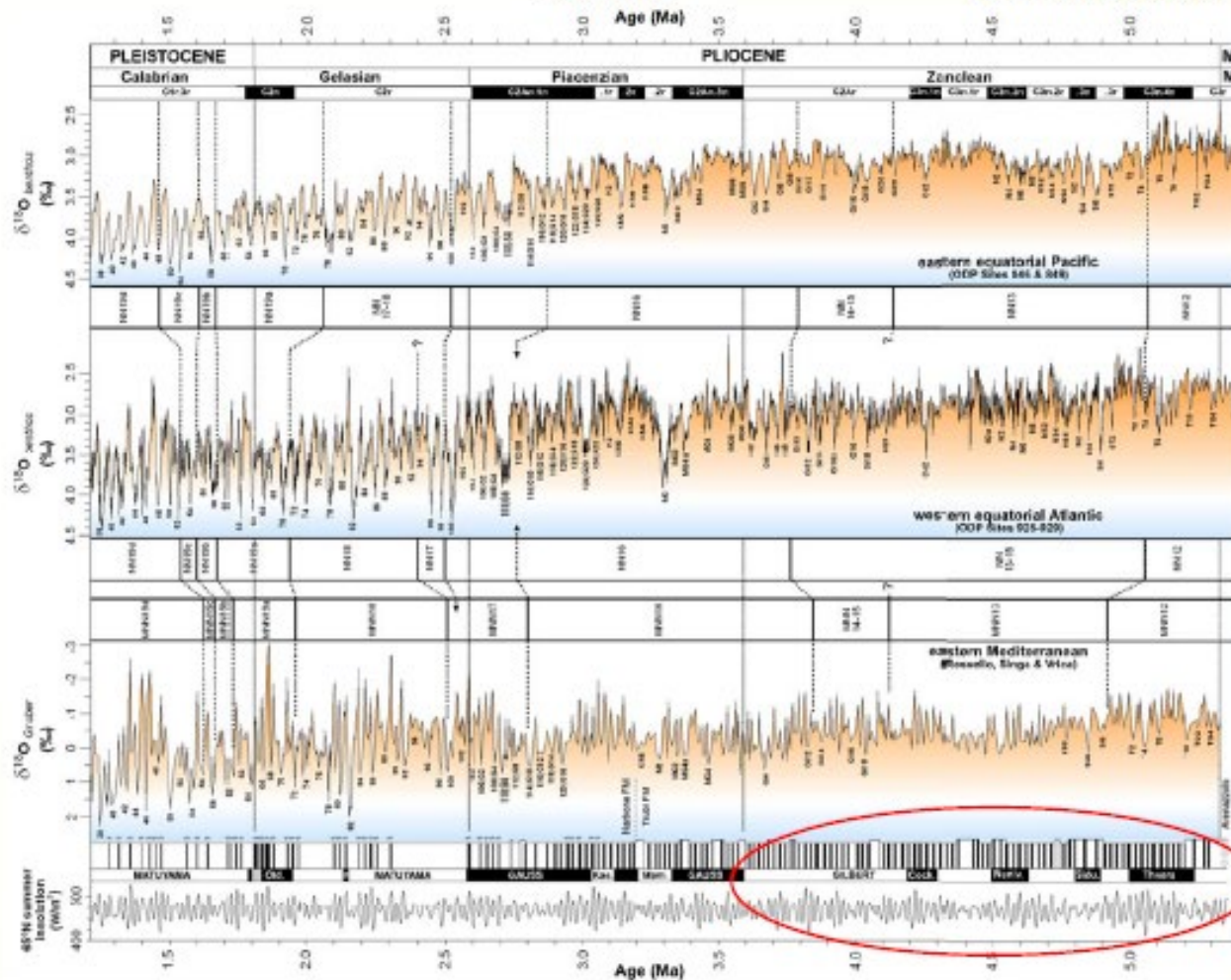
Paleocene

CONCLUSIONS

[6 of 18]

• Pliocene

Lourens et al. 2004



INTRODUCTION

La2004

cyclostratigraphy

NEOGENE

Pleistocene

Pliocene

Miocene

PALEOGENE

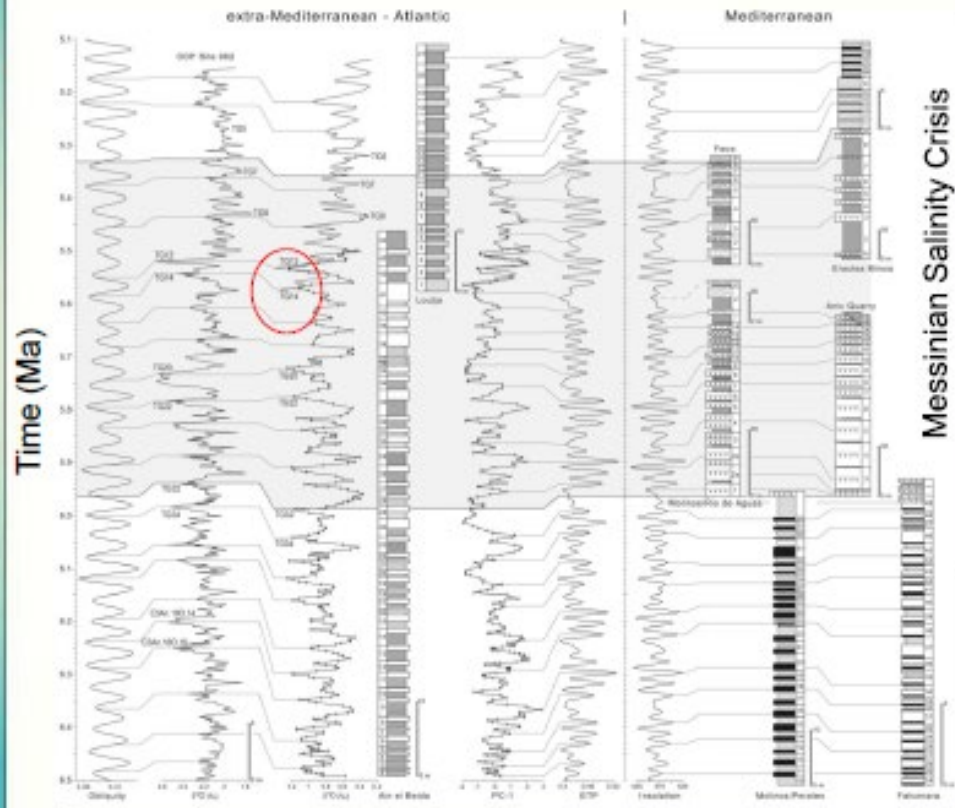
Oligocene

Eocene

Paleocene

CONCLUSIONS

• Miocene



Stronger obliquity forcing

Stronger precession forcing

Messinian Salinity Crisis

Messinian: 7.25-5.33 Ma

*Hilgen et al. 2007*

- onset of MSC 5.96 Ma (not related to glacio-eustatic sealevel lowering)
- main desiccation phase coincides with twin peak glacials TG12-14
- evaporite cycles controlled by precession-forced climate.



# CYCLOSTRATIGRAPHY AND THE ASTRONOMICAL TIME SCALE



## INTRODUCTION

La2004

cyclostratigraphy

NEOGENE

Pleistocene

Pliocene

Miocene

PALEOGENE

Oligocene

Eocene

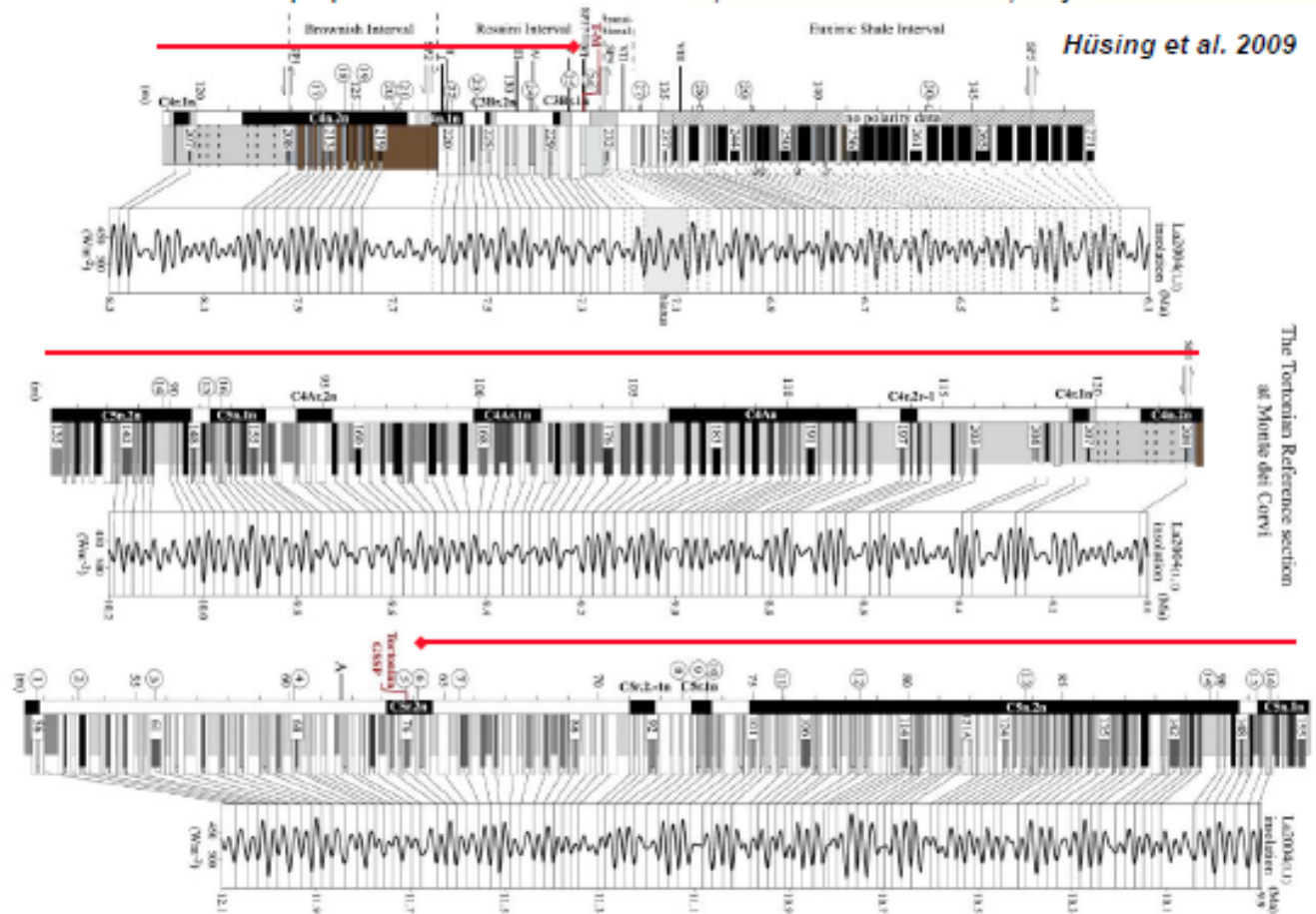
Paleocene

CONCLUSIONS

### • Miocene

Tortonian: 11.61-7.25 Ma

Calibration of sapropels to 65°N summer insolation, Monte dei Corvi Beach, Italy.







# CYCLOSTRATIGRAPHY AND THE ASTRONOMICAL TIME SCALE



## INTRODUCTION

La2004

cyclostratigraphy

NEOGENE

Pleistocene

Pliocene

Miocene

PALEOGENE

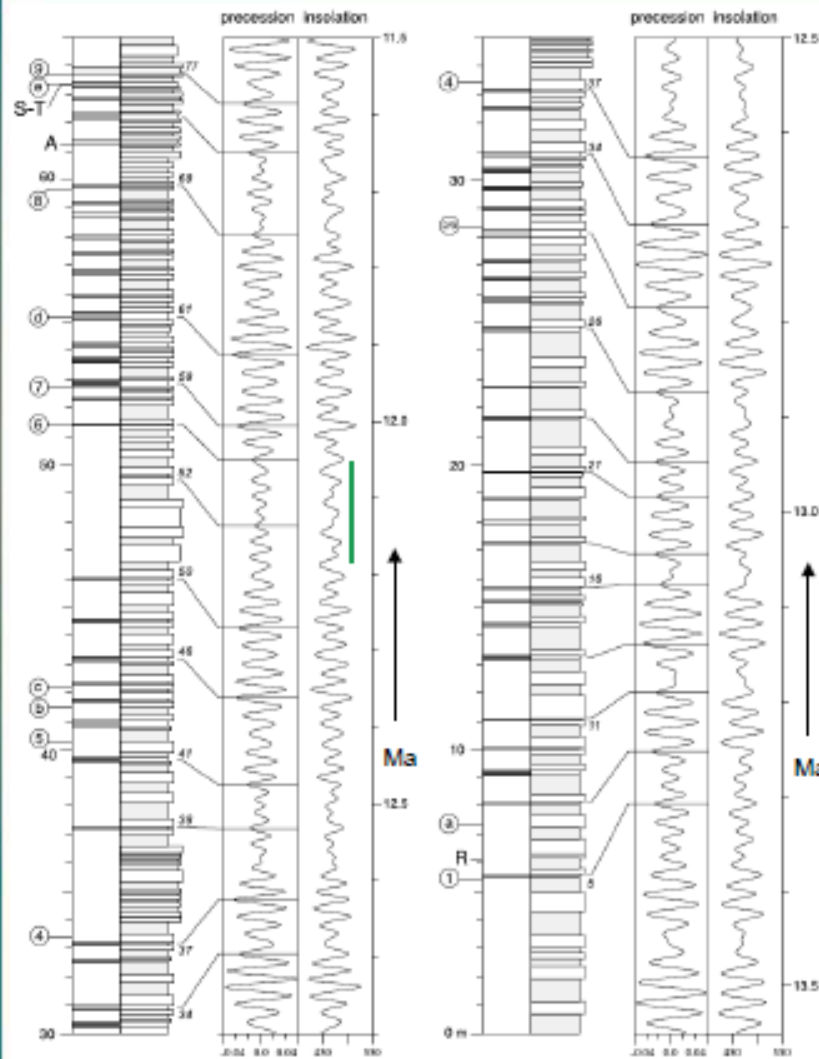
Oligocene

Eocene

Paleocene

CONCLUSIONS

[11 of 18]



## • Miocene

Serravaillian: 13.65-11.61 Ma

*Hilgen et al. 2003*

- Individual sapropels are correlated to precession and 65°N insolation.
- Clusters correspond to short and long eccentricity.
- Interval with near-absence of sapropels corresponds to a 2.4-myrr minimum in eccentricity (see green line).
- Tuned ages are 250-400 kyr older than argon-dated (in 1997) ash beds.

### NOTES:

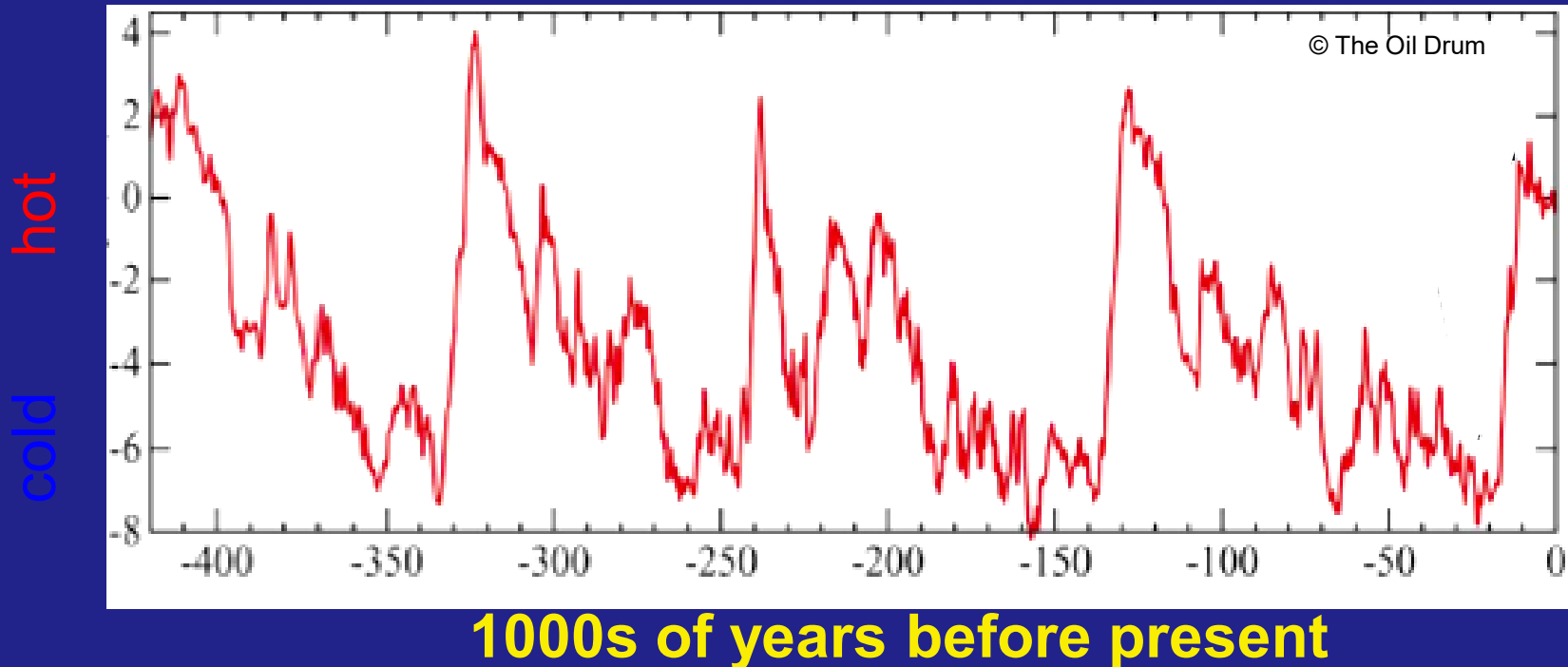
R=Respighi ash bed (Ar-dated: 12.85±0.15 Ma)

A=Ancona ash bed (Ar-dated: 11.4 ±0.25 Ma)

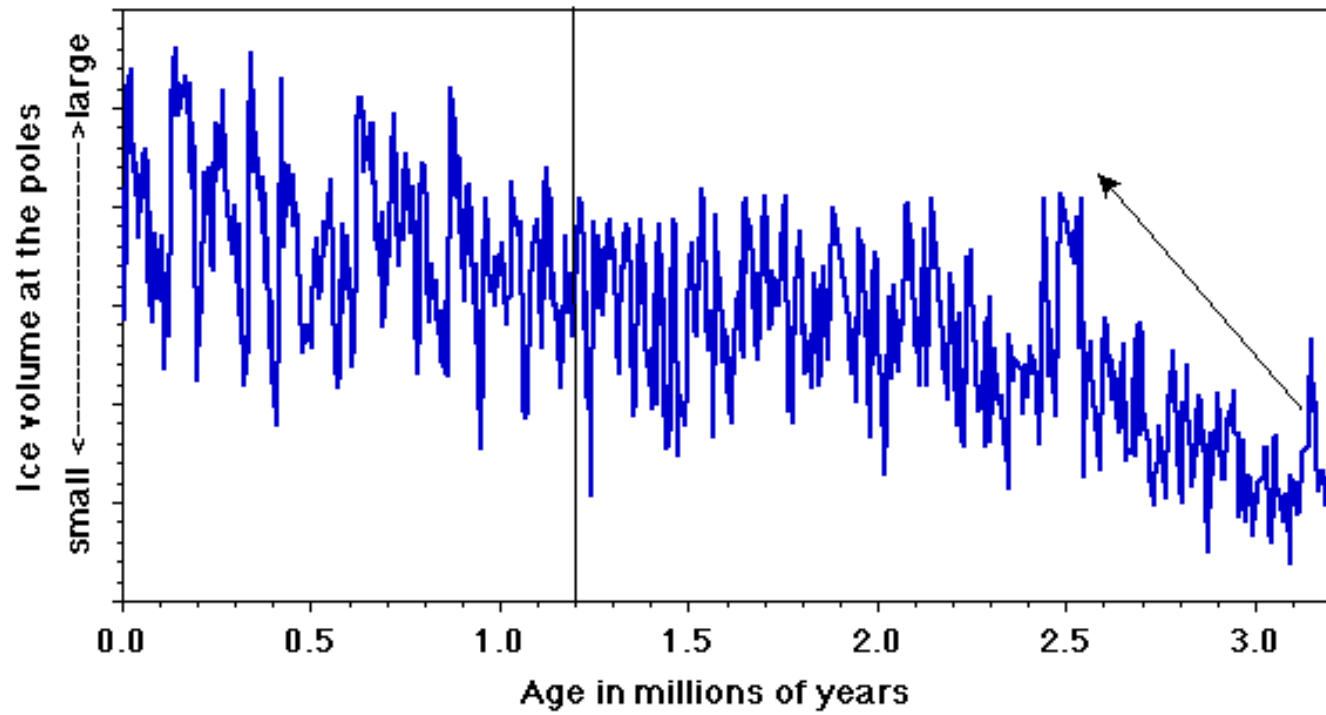
Circled numbers, letters = bioevents

Monte di Corvi Beach, Italy  
(lower half of section)

# Ο Βηματοδότης του Ηλιου



- Στη δεκαετία του '60, τα ιζήματα των βαθιών θαλασσών (Shackleton) έδειξαν ότι ο Milanković είχε δίκιο!
- Το κλίμα της Γης είχε επαναλαμβανόμενες μεταβολές από ζεστό σε ψυχρό με τους παγετώδεις κύκλους να συμβαίνουν κάθε 100000 χρόνια όπως είχε προβλέψει ο Milanković.



## Ισοτοπική κλασματοποίηση

•Ο διαχωρισμός των ισοτόπων καλείται **ισοτοπική κλασματοποίηση** (isotope fractionation), και συμβαίνει επειδή διαφορετικά ισότοπα του ίδιου στοιχείου έχουν διαφορετική μάζα. Οφείλεται στις μικρές διαφοροποιήσεις στις φυσικο-χημικές ιδιότητες των μορίων που περιέχουν διαφορετικά ισότοπα. Η ισοτοπική κλασματοποίηση πραγματοποιείται κατά την διάρκεια φυσικών (πχ εξάτμιση) ή χημικών διεργασιών (πχ ασβεστοποίηση).

•Υπάρχουν δύο διαφορετικές διεργασίες κατά την ισοτοπική κλασματοποίηση:

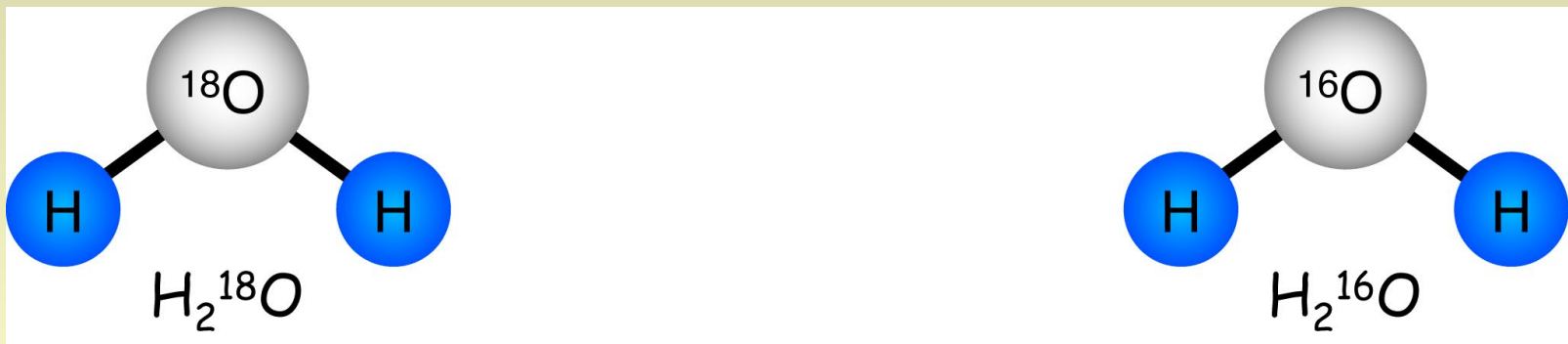
•**Κινητική ισοτοπική κλασματοποίηση**: τα μόρια των ελαφρύτερων ισοτόπων κινούνται ταχύτερα (καθώς οι χημικοί δεσμοί είναι ασθενέστεροι). Π.χ. κατά την διαδικασία της συμπύκνωσης τα βαρύτερα ισότοπα συγκεντρώνονται στην υγρή φάση, σε σχέση με την αέρια.

•**Ισοδύναμη ισοτοπική κλασματοποίηση**: Διαφορές στις θερμοδυναμικές ιδιότητες των μορίων με διαφορετικά ισότοπα (η διαφοροποίηση είναι ισχυρότερη στις χαμηλότερες θερμοκρασίες).



Ο βαθμός της κλασματοποίησης σχετίζεται με τις διαφορές στην μάζα. Ισχυρότερη κλασματοποίηση συμβαίνει μεταξύ υδρογόνου και του 2 φορές βαρύτερου δευτέρου, από ότι στο οξυγόνο, καθώς  $(18-16)/16 = 1/8$ .

Είναι φανερό ότι τα μόρια  $H_2^{18}O$  θα είναι ελαφρώς βαρύτερα από τα μόρια  $H_2^{16}O$ .



- Τα ισότοπα του οξυγόνου κλασματοποιούνται κατά την εξάτμιση και την συμπύκνωση του  $H_2O$ 
  - Το  $H_2^{16}O$  εξατμίζεται ευκολότερα από το  $H_2^{18}O$
  - Το  $H_2^{18}O$  συμπυκνώνεται ευκολότερα από το  $H_2^{16}O$

Μετράμε τις συγκεντρώσεις των ισοτόπων στον **φασματογράφο μάζας**, που διαχωρίζει τα μόρια σε μορφή αερίων ανάλογα με την μάζα τους.

Τα βαρύτερα ισότοπα είναι συνήθως σπάνια επομένως η συγκέντρωσή τους είναι δύσκολο να μετρηθεί με ακρίβεια. Επομένως δεν μετριέται άμεσα η συγκέντρωση των ισοτόπων αλλά **συσχετίζεται με την συγκέντρωση ενός προτύπου**.

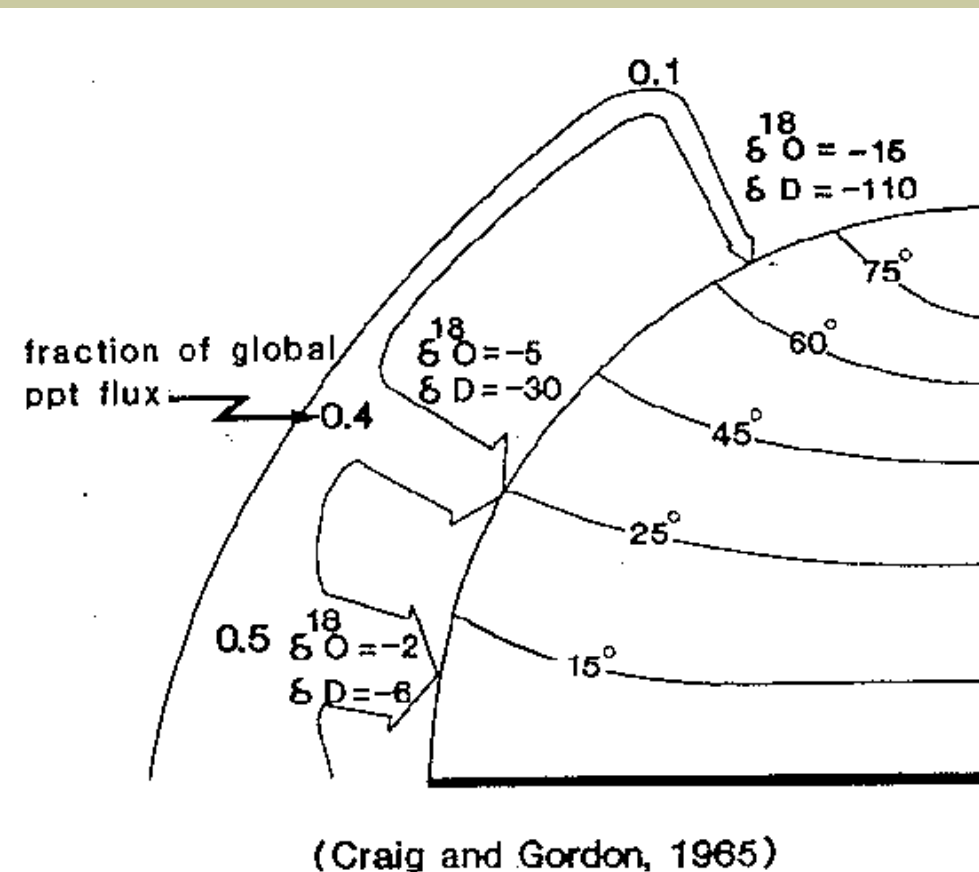
Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας εκφράζονται με τον όρο **δέλτα (delta, δ, d)** όπου δ η διαφορά στην μέτρηση μεταξύ του δείγματος και του προτύπου. Εάν οι τιμές δ είναι **θετικές** τότε το δείγμα έχει **περισσότερο βαρύ ισότοπο** από ότι το πρότυπο. Η μονάδα δ συνήθως εκφράζεται επί τοις χιλίοις (**per mille, ‰**). Για την μέτρηση ισοτόπων υδρογόνου και οξυγόνου στο νερό χρησιμοποιείται σαν πρότυπο η **μέση ισοτοπική σύσταση του ωκεάνιου νερού** (standard mean ocean water, **VSMOW**), ενώ για την μέτρηση ισοτόπων στα ανθρακικά χρησιμοποιείται το πρότυπο **Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)**.

Όπου  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 1.03092\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}} + 30.92$

$$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰} = \frac{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O} \text{ δείγματος} - {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O} \text{ προτύπου}}{{}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O} \text{ δείγματος}} \times 1000$$

## Γιατί μας ενδιαφέρει η ισοτοπική κλασματοποίηση?

- Η σχέση οξυγόνου-18 προς οξυγόνο-16 στη γήινη ατμόσφαιρα εξαρτάται από τη δυναμική της εξάτμισης και συμπύκνωσης του νερού.
- Επειδή το  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  έχει μικρότερη τάση ατμών από το  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ , κατά την εξάτμιση φυσικού νερού, τα μόρια  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  θα τείνουν να εξατμίζονται ευκολότερα από τα μόρια  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ , ενώ κατά τη συμπύκνωση, ευκολότερα θα συμπυκνώνονται τα μόρια  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ .
- Δηλαδή έχουμε:  
 $\text{H}_2\text{O}$ (υγρό) (εξάτμιση): εμπλουτισμός σε  $\text{H}_2^{16}\text{O}$   
 $\text{H}_2\text{O}$ (αέριο) (συμπύκνωση): εμπλουτισμός σε  $\text{H}_2^{18}\text{O}$
- Έτσι, η εξάτμιση του νερού των θαλασσών σε μικρά γεωγραφικά πλάτη τείνει να αυξάνει το ποσοστό του  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  στην ατμόσφαιρα. Καθώς αέριες μάζες από τέτοιες περιοχές μετακινούνται προς τους πόλους, όπου επικρατούν ψυχρότερες θερμοκρασίες, οι περιεχόμενοι υδρατμοί αρχίζουν να συμπυκνώνονται σε βροχή ή χιόνι.



## Η κλασματοποίηση Rayleigh

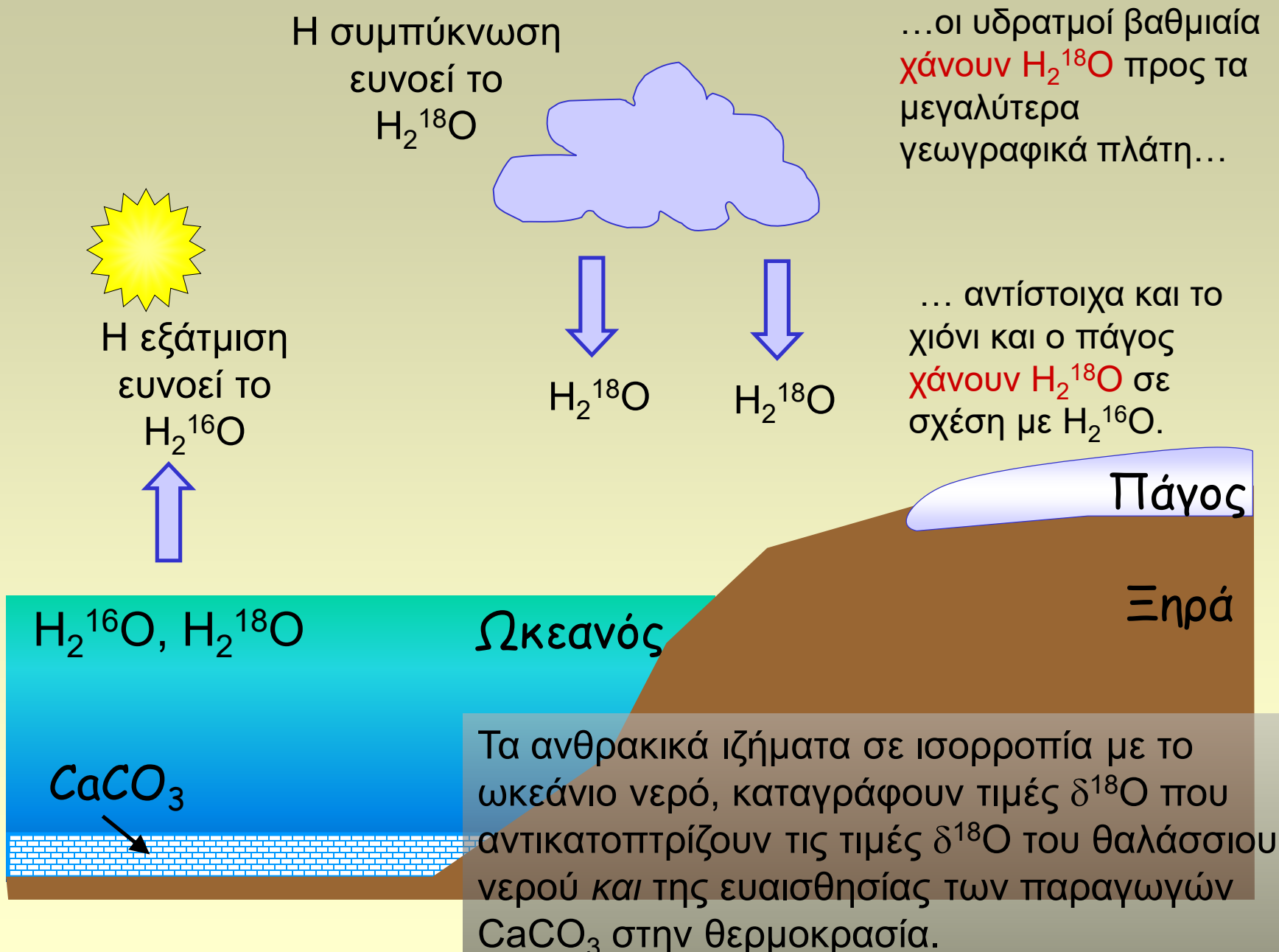
'Fraction of global ppt flux' σημαίνει κλάσμα της εισροής των παγκόσμιων βροχοπτώσεων.

Μείωση του οξυγόνου-18, καθώς αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος

- Το νερό εξατμίζεται στον ισημερινό και οι υδρατμοί είναι πλέον ισοτοπικά ελαφρύτεροι σε υδρογόνο και οξυγόνο από ότι το ωκεάνιο νερό.

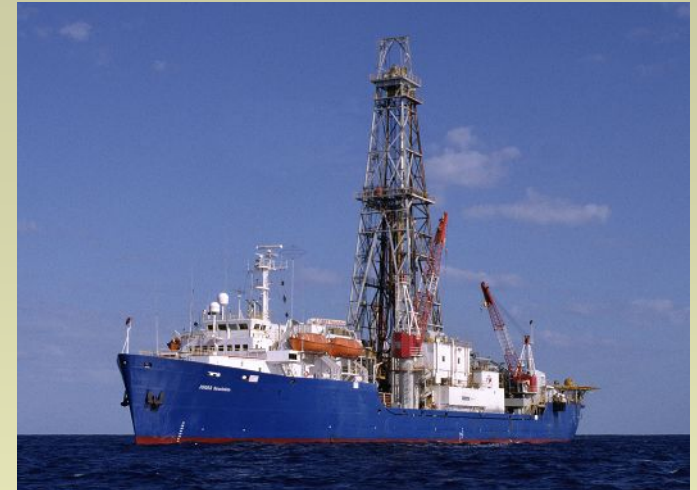
- Τα πρώτα μόρια νερού που συμπυκνώνονται είναι τα μόρια  $H_2^{18}O$ . Δηλαδή, η βροχή ή το χιόνι που πέφτουν στην αρχή είναι εμπλουτισμένα σε  $H_2^{18}O$ , βαθμιαία όμως γίνονται «ελαφρύτερα».

- Αυτό σημαίνει ότι, πηγαίνοντας από τον ισημερινό προς τους πόλους (αυξάνοντας το γεωγραφικό πλάτος), η ατμόσφαιρα γενικά «χάνει»  $^{18}O$ , και όταν φθάνουμε στους πόλους το χιόνι που πέφτει εκεί περιέχει 5% λιγότερο  $^{18}O$  σε σχέση με τη βροχή που πέφτει στον ισημερινό. Πράγματι, οι **πολικό πάγοι** περιέχουν σημαντικά **μειωμένα ποσοστά  $^{18}O$** , σε σχέση με τα **τροπικά ύδατα**, όπου λόγω της μεγαλύτερης εξάτμισης η **συγκέντρωση του  $^{18}O$  είναι σχετικά υψηλή**

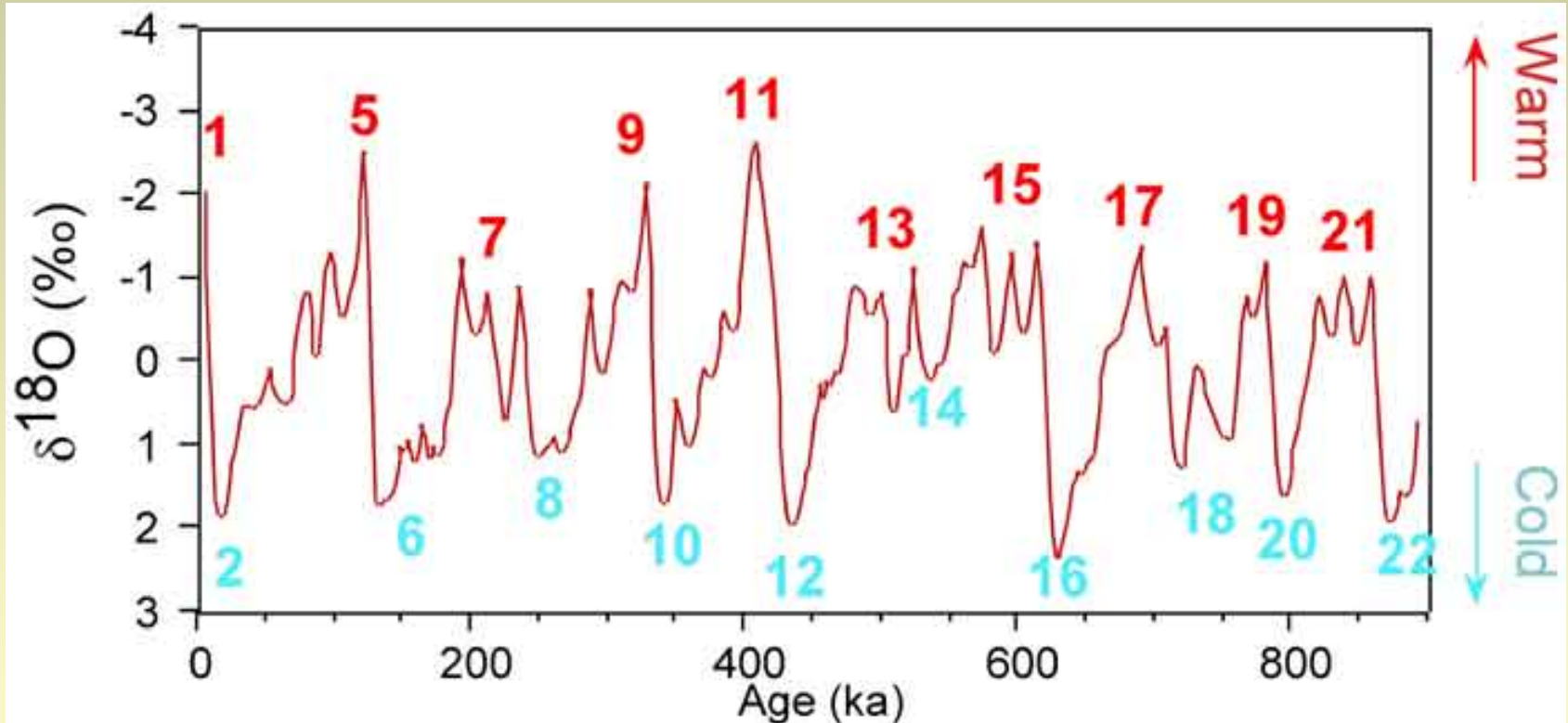


# Ισότοπα οξυγόνου και παλαιοκλίμα

- **ψυχρότερο** κλίμα: τα θαλάσσια ανθρακικά καταγράφουν **αύξηση** του  $\delta^{18}\text{O}$ .
- **θέρμανση**: **μείωση** του  $\delta^{18}\text{O}$  των θαλάσσιων ανθρακικών.

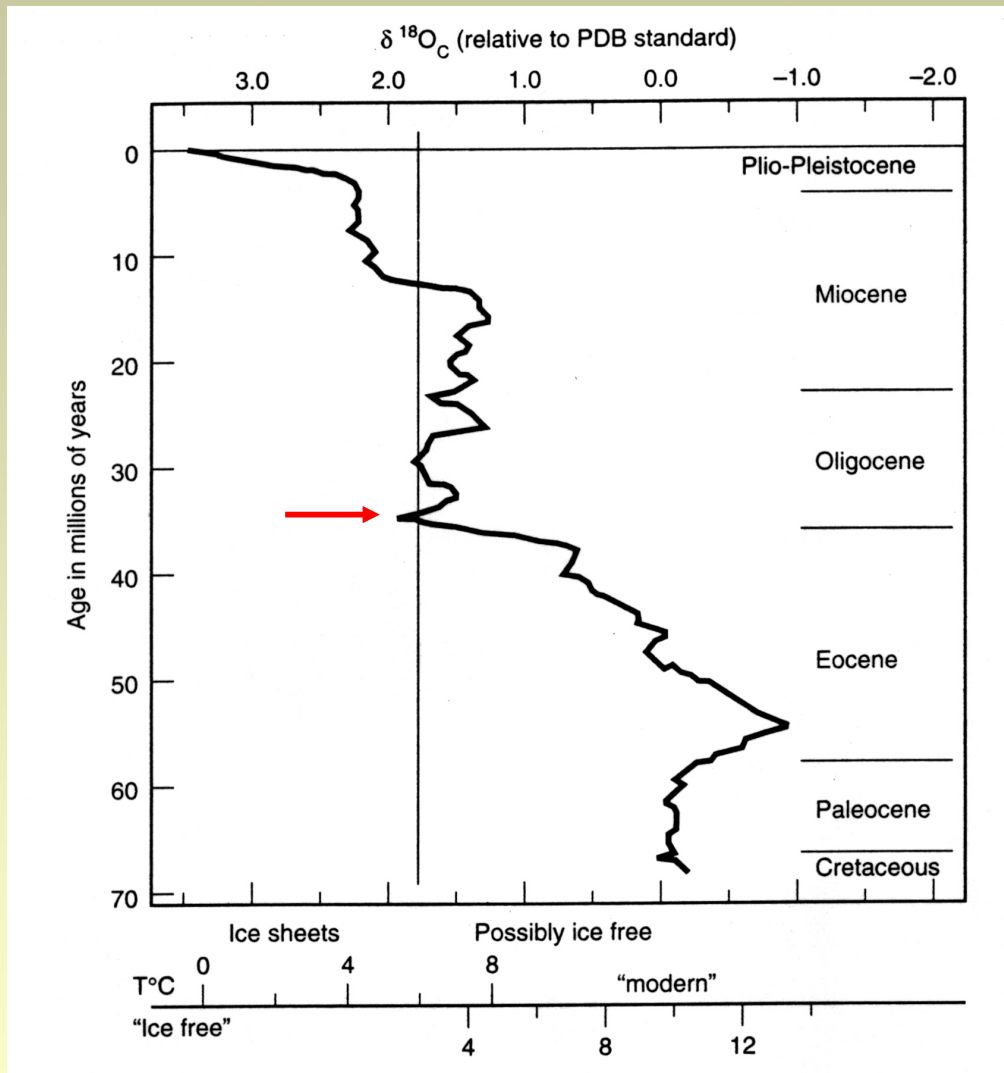


# Ισότοπα Ο—τα τελευταία 900 κ.γ.



- ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΙΣΟΤΟΠΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ-
- MARINE ISOTOPE STAGES (MIS)
- κυριαρχούσα κυκλικότητα ~100,000 yrs



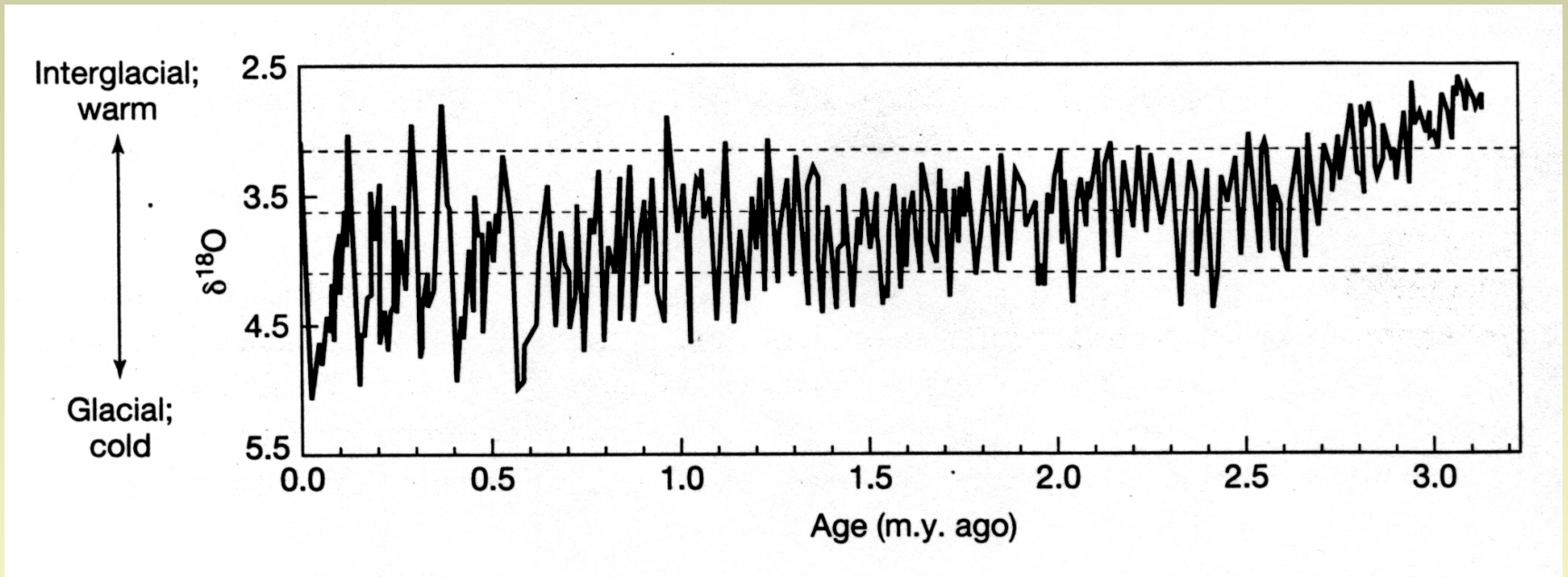


## Μακροχρόνιο Αρχείο Ισοτόπων οξυγόνου

Έναρξη σχηματισμού  
παγετωδών καλυμμάτων  
στην Ανταρκτική πριν από  
35 Ma, σχετιζόμενη με την  
διάνοιξη μεταξύ Ανταρκτικής  
και Ν. Αμερικής

From K. K. Turekian, *Global Environmental Change*, 1996

# Τα ισότοπα Ο κατά τα τελευταία 3 m.y.



Kump et al., *The Earth System*, Fig. 14-4

- Η κλιματική ψύχρανση **επιταχύνθηκε** κατά τα τελευταία 3 m.y.
- Η κυκλικότητα άλλαξε πριν από 0.8-0.9 Ma
  - 41,000 yrs πριν
  - 100,000 yrs μετά

Το δ<sup>18</sup>O αυξάνεται με την αλατότητα (εξάτμιση)

Το δ<sup>18</sup>O είναι μειωμένο στη βροχή, χιόνι, πάγο (Raleigh Distillation), αυτή η μείωση αυξάνεται καθώς ελαττώνεται η θερμοκρασία

Το δ<sup>18</sup>O είναι αυξημένο στο θαλάσσιο νερό κατά τις παγετώδεις περιόδους, εξαιτίας του ότι μεγάλες συγκεντρώσεις <sup>16</sup>O είναι δεσμευμένες στα παγετώδη καλύμματα.

Τα ασβεστολιθικά κελύφη (τρηματοφόρα, μαλάκια, κοράλλια) αλλά και το ασβεστολιθικό ναννοπλαγκτόν/κοκκολιθοφόρα καταγράφουν αυτές τις τάσεις.

**-Παγετώδης ωκεανός:** ωκεανός εμπλουτισμένος σε <sup>18</sup>O + τρηματοφόρα εμπλουτισμένα σε <sup>18</sup>O = “βαρύ” <sup>18</sup>O στα κελύφη των τρηματοφόρων

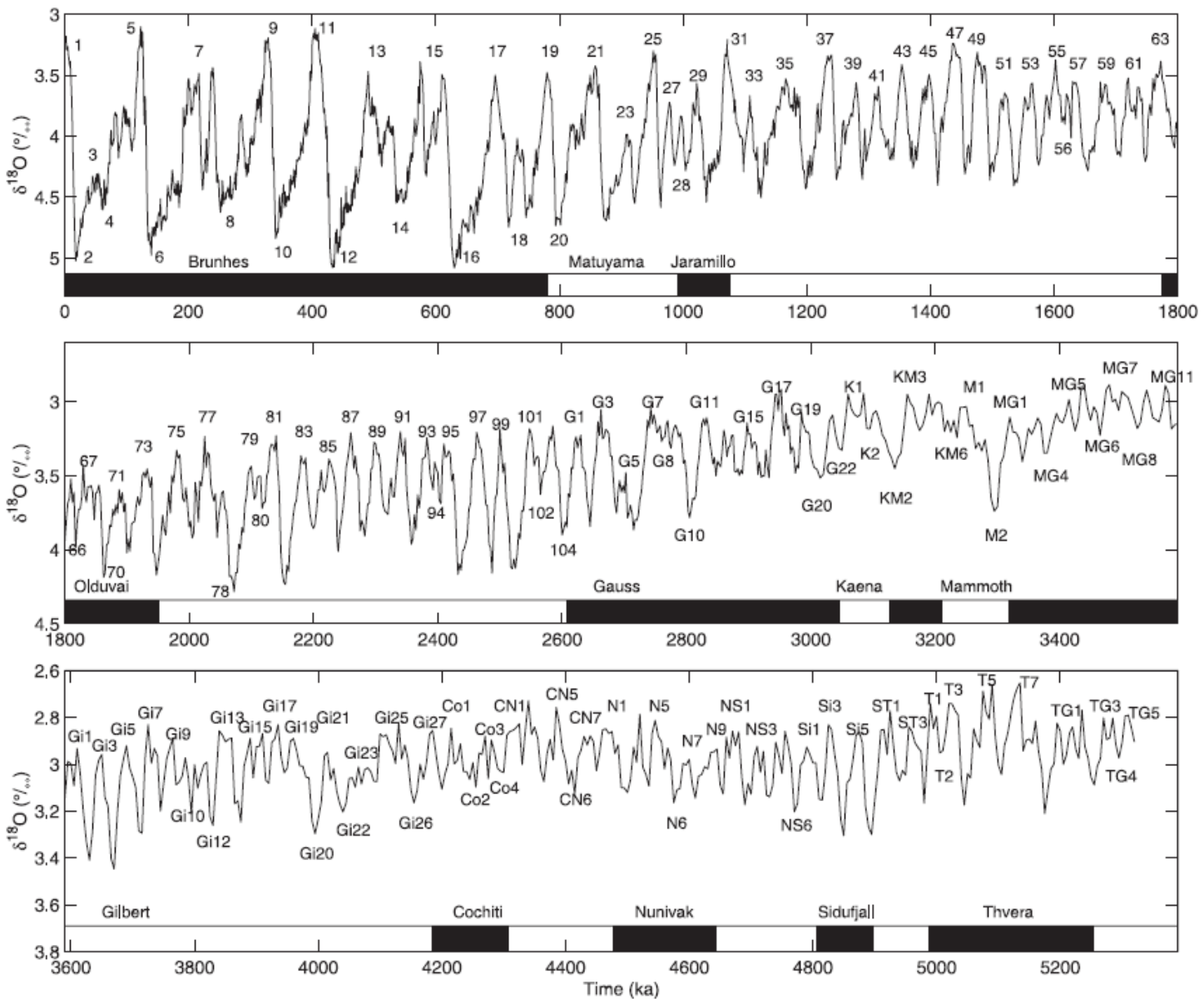


Fig. 5. The LH04 stack benthic  $\delta^{18}\text{O}$  stack constructed by graphic correlation of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. Scale of the vertical axis is changing across panels; geomagnetic chrons are labelled (from LISIECKI & RAYMO 2005).

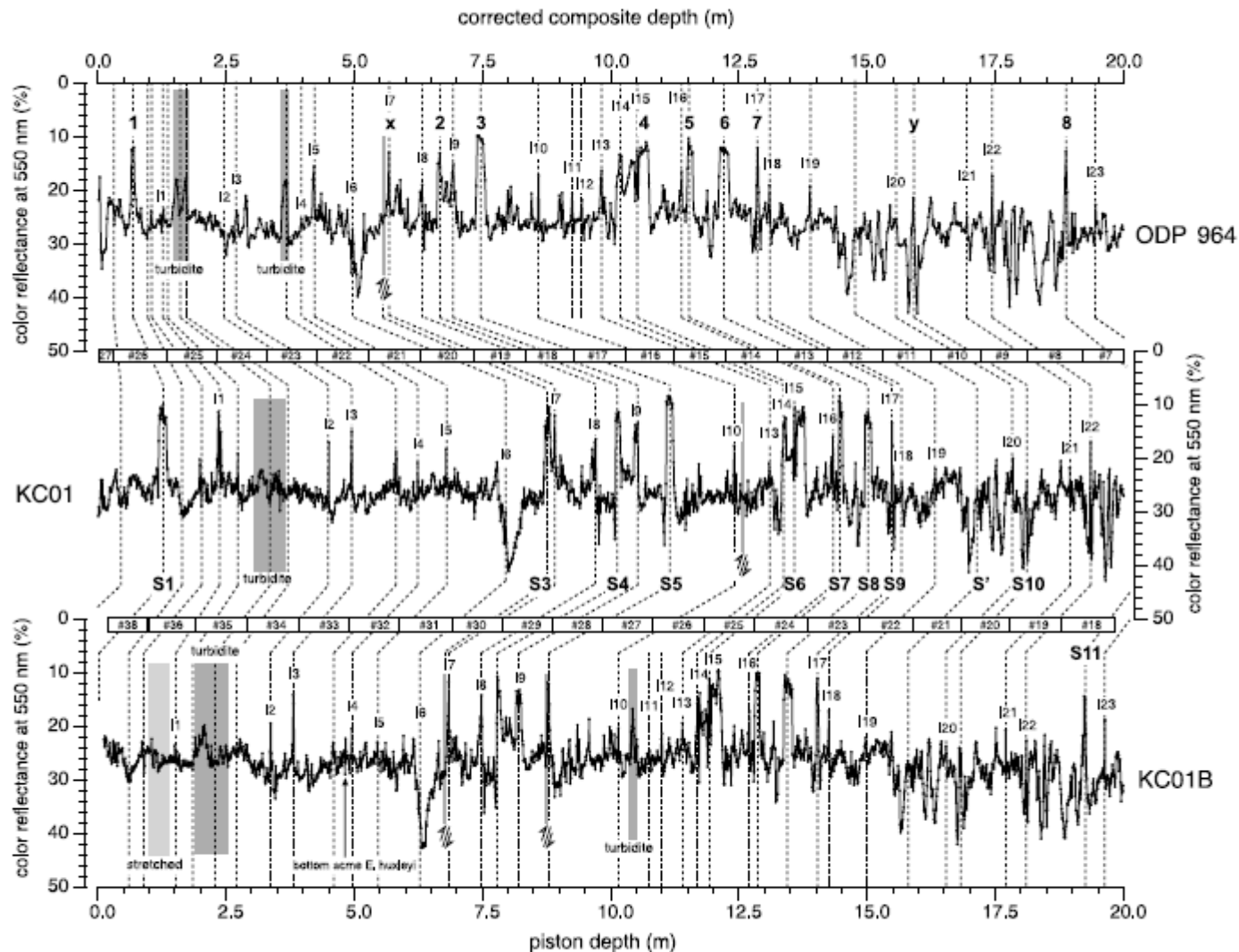


Figure 1a. Color reflectance at 550 nm (%) for cores KC01B, KC01, and ODP Site 964 against depth in meters. Sapropels for KC01 and KC01B are coded after amongst others *Langereis et al.* [1997], whereas the nomenclature for ODP Site 964 is after *Emeis et al.* [1996]. The numbers I1–I23 indicate Tephra layers.



## CYCLOSTRATIGRAPHY AND THE ASTRONOMICAL TIME SCALE



### • Miocene

Langhian: 15.97-13.65 Ma

*Raffi et al. 2006*

#### INTRODUCTION

La2004

cyclostratigraphy

NEOGENE

Pleistocene

Pliocene

Miocene

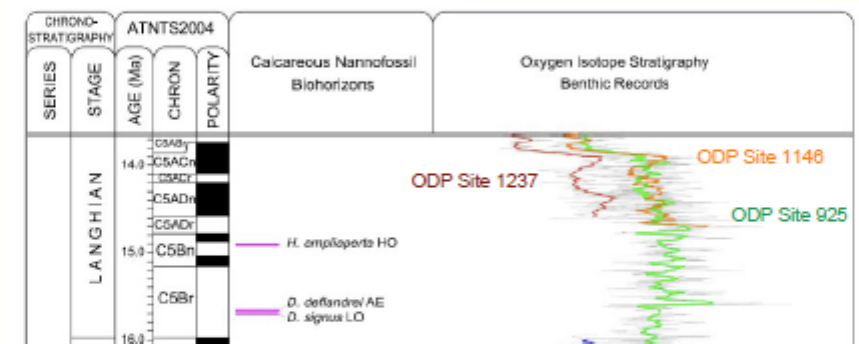
PALEOGENE

Oligocene

Eocene

Paleocene

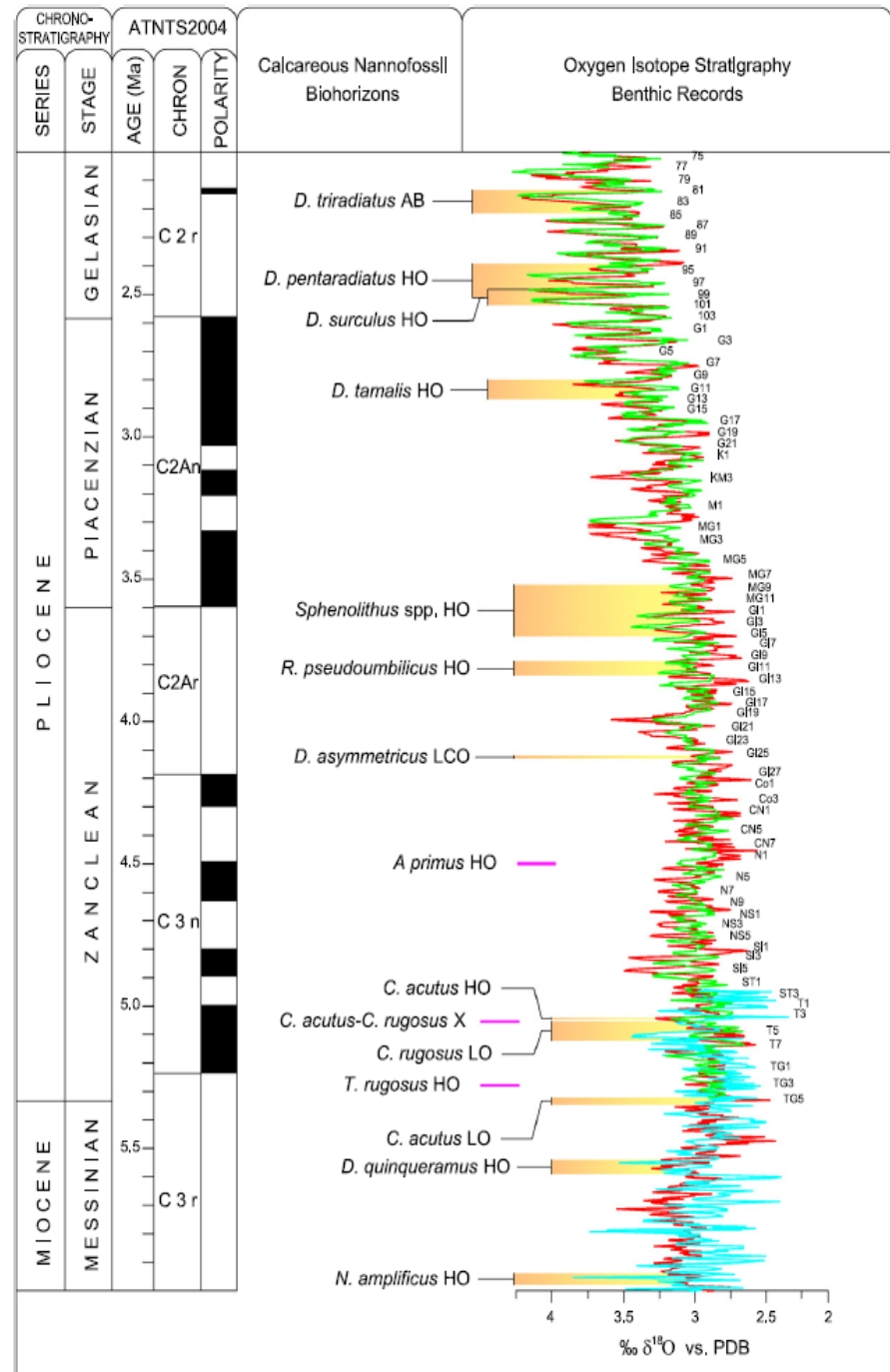
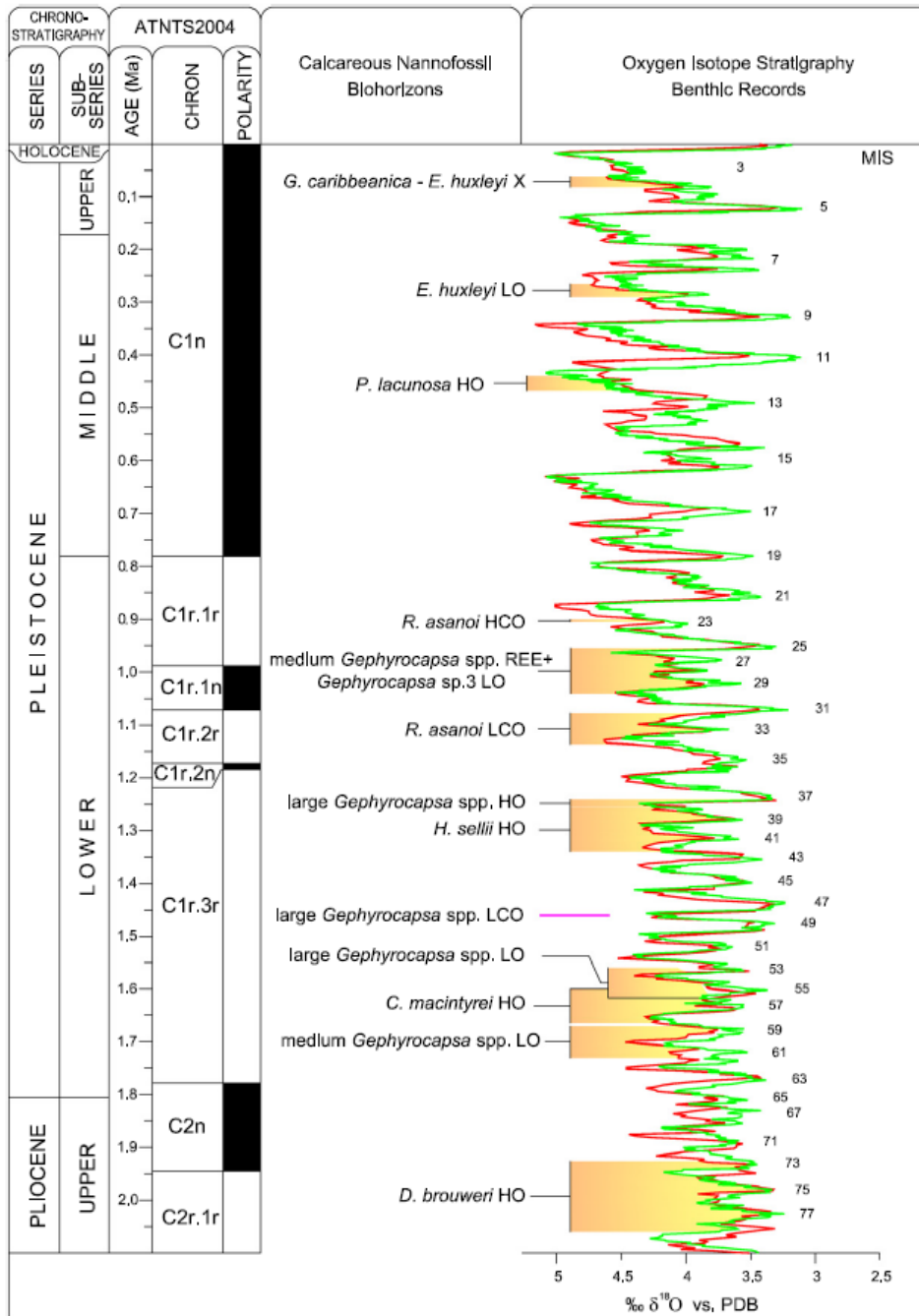
CONCLUSIONS



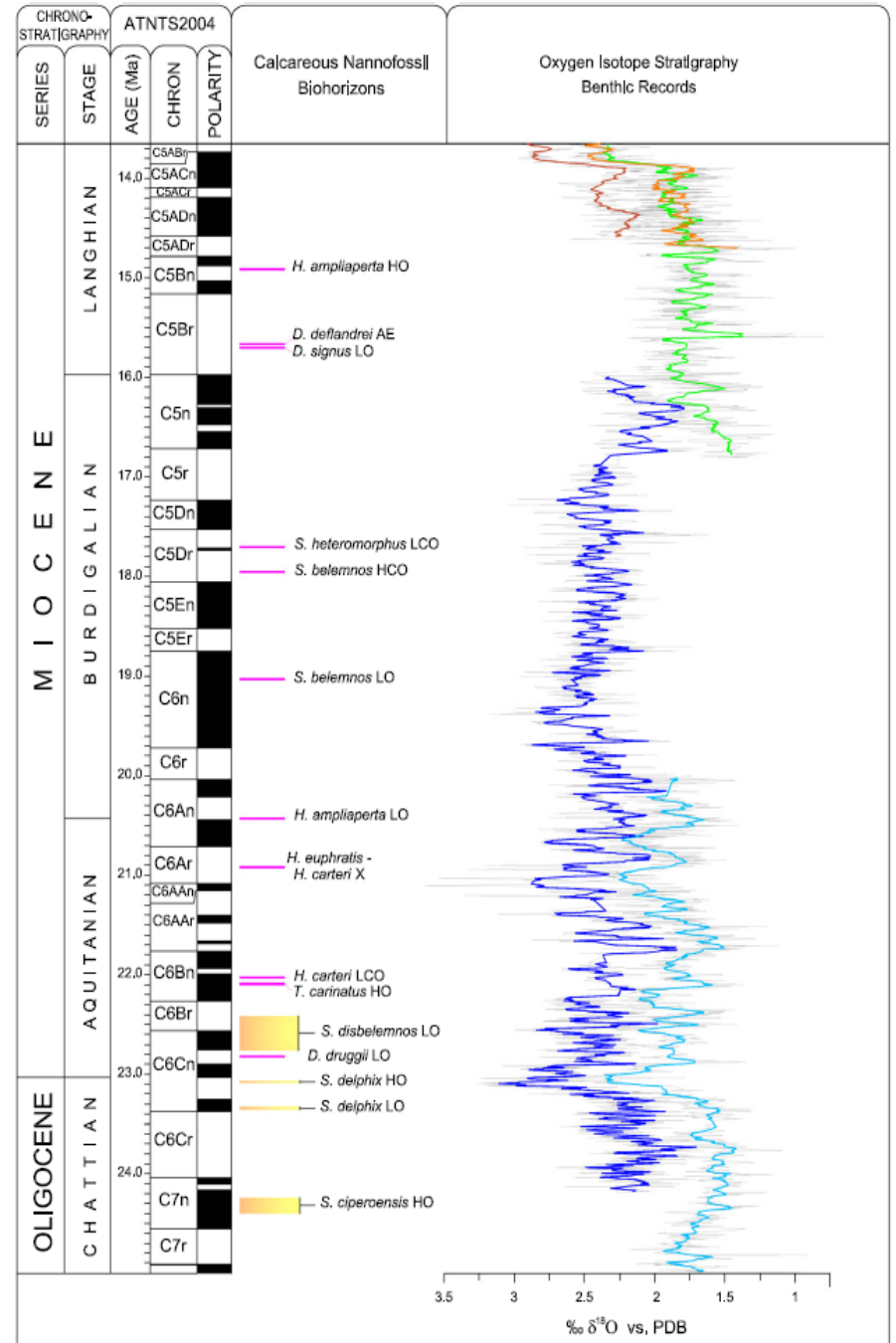
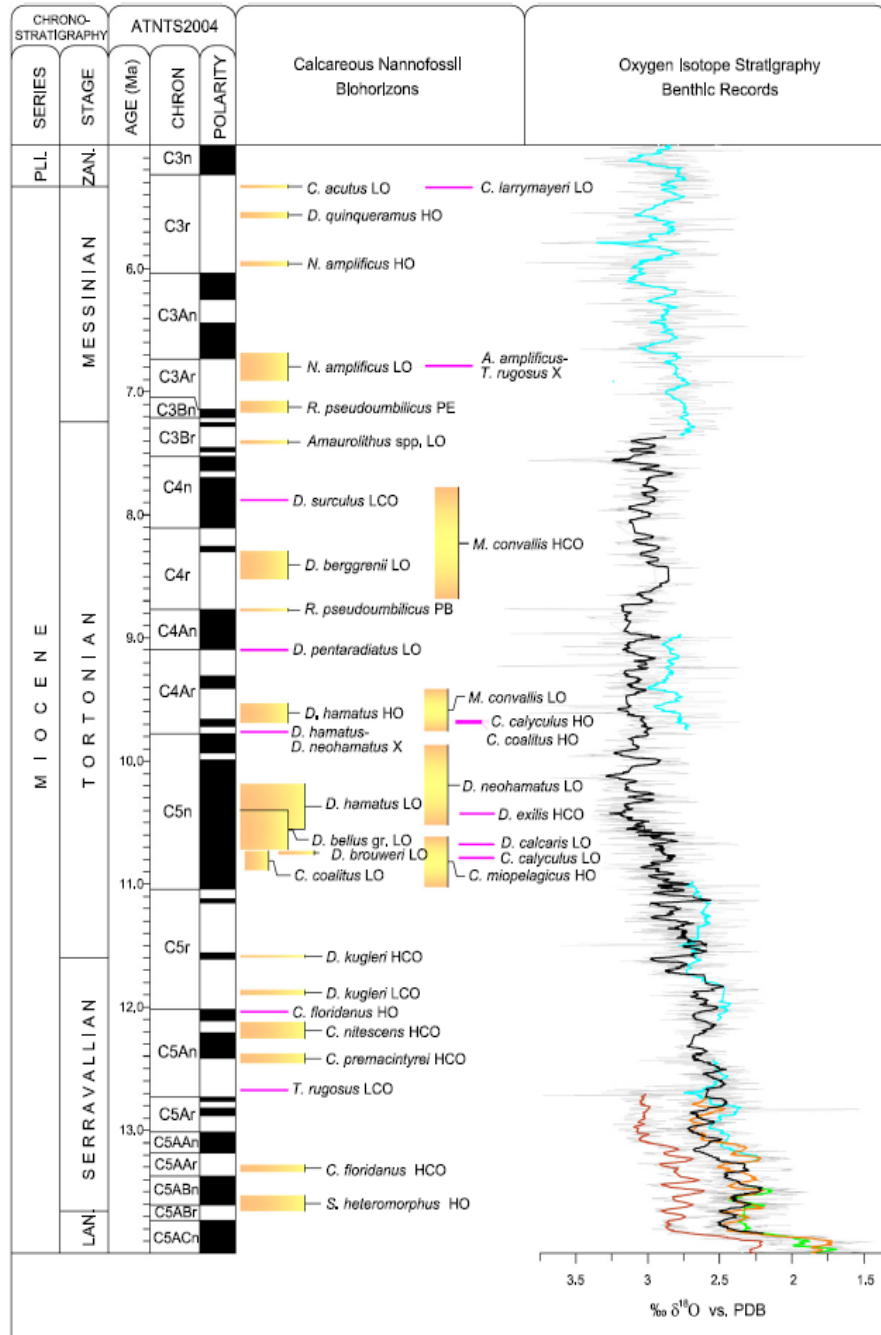
Green curve from Shackleton, 2001 (abstract), reported in Raffi et al. 2006.

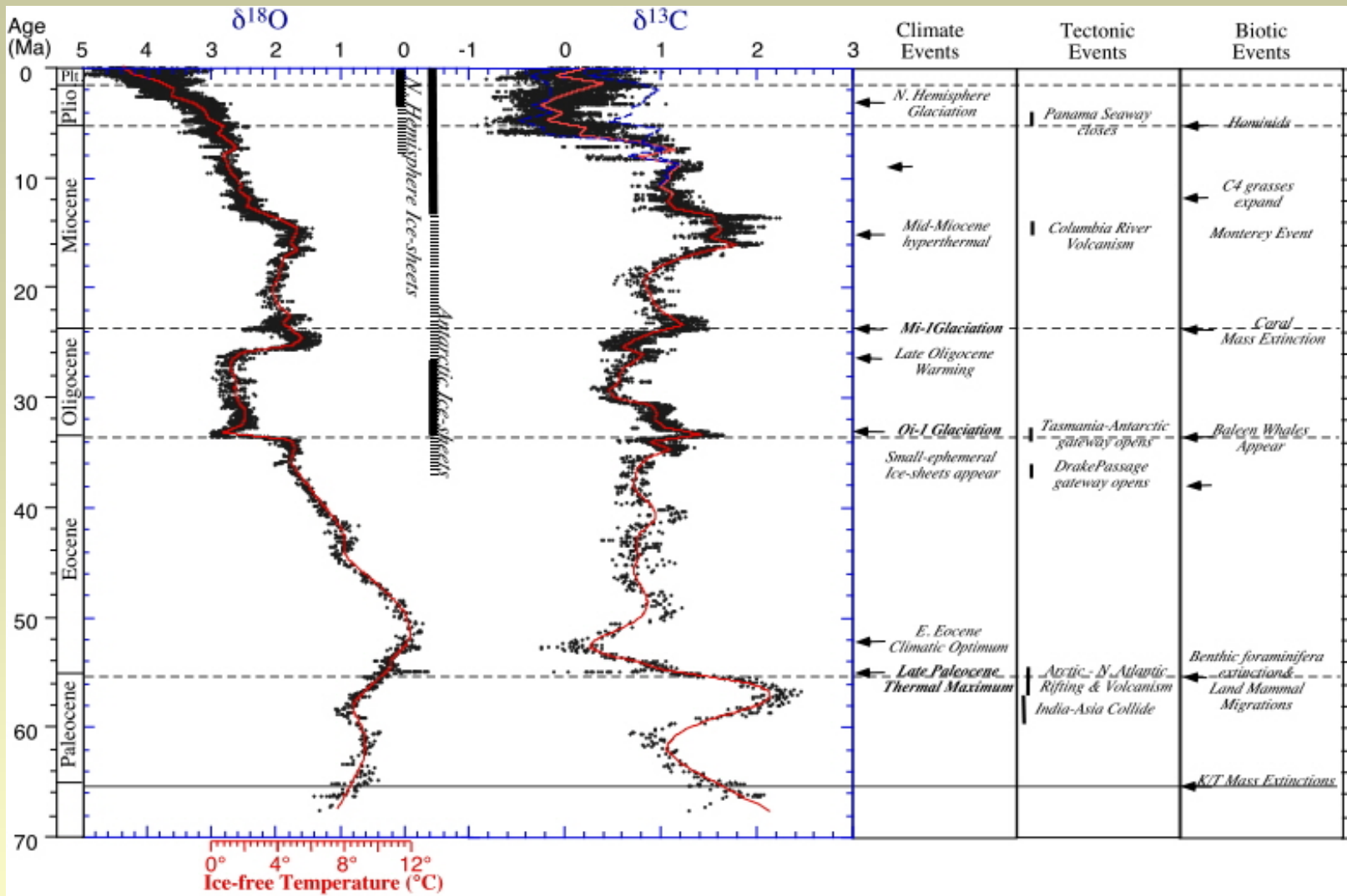
Burgundy and orange curves from Holbourn et al., 2007











carbon isotopes show overall storage of organic carbon in organic matter (if globally more carbon is stored in organic carbon, the record of carbonates moves to heavier values). Note the very short-term changes to extremely low values at about 55.5 million years ago (in the latest Paleocene), the time of the LPTM (PETM).