



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών
— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —



ΚΥΚΛΟΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ

Δρ. Χαρά Ντρίνια

Καθηγήτρια Παλαιοοικολογίας - Ιζηματολογίας

Στρωματογραφικές μέθοδοι

Κλασικές μέθοδοι

- Λιθοστρωματογραφία
- Χρονοστρωματογραφία
- Βιοστρωματογραφία

Μοντέρνες μέθοδοι

- Σεισμική στρωματογραφία
- **Κυκλοστρωματογραφία**
- Μαγνητοστρωματογραφία
- Χημειοστρωματογραφία

Ορισμός Κυκλοστρωματογραφίας

Κυκλοστρωματογραφία είναι ο κλάδος της στρωματογραφίας που:

- Μελετά **ρυθμικές επαναλήψεις** σε ιζηματογενείς ή ηφαιστειακές ακολουθίες.
- Αναγνωρίζει **περιοδικότητες** που σχετίζονται με **αστρονομικούς** (Milankovitch) ή **μη αστρονομικούς** παράγοντες.
- Εξετάζει πώς οι **τροχιακές μεταβολές**, οι κλιματικές αλλαγές και η θαλάσσια στάθμη μεταφράζονται σε **καταγραφές στα ιζήματα**.
- Χρησιμοποιείται για **αστροχρονολόγηση**, δηλαδή τη δημιουργία χρονολογικών μοντέλων υψηλής ακρίβειας.

Γιατί η κυκλοστρωματογραφία είναι σημαντική;

Αποκαλύπτει τον ρυθμό λειτουργίας του κλίματος μέσα στον γεωλογικό χρόνο.

Επιτρέπει την αναγνώριση αστρονομικών κύκλων (eccentricity, obliquity, precession) στα ιζήματα.

Παρέχει χρονολόγηση υψηλής ακρίβειας (astrochronology) — σε επίπεδο λίγων ka.

Συνδέει κλίμα – ιζηματογένεση – θαλάσσια στάθμη σε ένα ενιαίο πλαίσιο.

Χρησιμοποιείται για παγκόσμια συσχέτιση στρωμάτων και βελτίωση της Γεωλογικής Χρονολογικής Κλίμακας.

Βοηθά στην κατανόηση ακραίων κλιματικών γεγονότων (π.χ. sapropels, PETM, Messinian events).

ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ ΚΑΙ ΟΙ ΑΙΤΙΕΣ ΤΟΥΣ

Vail et al. (1977)

Τύπος	Διάρκεια (m.y.)	Πιθανές αιτίες
1 ^{ης} τάξεως	200 - 400 (10^8)	Μεγάλης κλίμακας ευστατικοί κύκλοι που προκλήθηκαν από τον σχηματισμό και τη διάρρηξη των υπερ-ηπείρων.
2 ^{ης} τάξεως	10 – 100 (10^7)	Ευστατικοί κύκλοι που προκλήθηκαν από μεταβολές όγκου, σε παγκόσμια μεσο-ωκεάνια κέντρα εξάπλωσης.
3 ^{ης} τάξεως	1 – 10 (10^6)	Περιφερειακοί κύκλοι που προκλήθηκαν από συμπίεσεις εντός των πλακών. Οι περισσότεροι δεν είναι παγκόσμιας έκτασης.
4 ^{ης} τάξεως	0,2 – 0,5 (10^5)	1) Milankovitch παγετο-ευστατικοί κύκλοι 2) Περιφερειακοί κύκλοι από κάμψη λόγω φόρτωσης
5 ^{ης} τάξεως	0,01 – 0,2 (10^4)	1) Milankovitch παγετο-ευστατικοί κύκλοι 2) Περιφερειακοί κύκλοι από κάμψη λόγω φόρτωσης

Πηγές Κυκλικότητας στη Φύση

Μη-Αστρονομικοί Κύκλοι (Earth system–driven cycles)

- **Ευστατισμός (Eustasy)**

Παγκόσμιες μεταβολές της στάθμης της θάλασσας που οφείλονται σε αλλαγές στον όγκο των ωκεανών
(λιώσιμο/σχηματισμός πάγου, θερμική διαστολή).

- **Σχετική Θαλάσσια Στάθμη (RSL)**

Τοπική μεταβολή της στάθμης θάλασσας λόγω συνδυασμού ευστατισμού + τεκτονικών κινήσεων + ισοστατικών φαινομένων.
Επηρεάζει το βάθος, την ενέργεια και τον ρυθμό ιζηματογένεσης.

- **Παγετώδεις – Μεσοπαγετώδεις κύκλοι**

Εναλλαγή παγετωδών/μεσοπαγετωδών περιόδων που μεταβάλλουν:

- τον όγκο των πάγων → ευστατισμός
- την παραγωγικότητα, τον άνεμο, τα ιζηματολογικά φορτία
- την ωκεάνια κυκλοφορία

- **Τεκτονικό–Κλιματικό Feedback**

Ανύψωση ή βύθιση λεκανών, αλλαγές υδρογραφικού δικτύου, παγίδευση ιζημάτων, βουνά που επηρεάζουν το κλίμα → ρυθμικές ακολουθίες που δεν σχετίζονται με Milankovitch.

Πηγές Κυκλικότητας στη Φύση

Αστρονομικοί Κύκλοι (Milankovitch cycles)

- **Eccentricity (100–405 ka)**

Μεταβολή στο σχήμα της τροχιάς της Γης (κυκλική $\leftrightarrow$ ελλειπτική).
Τροποποιεί την ένταση της επίδρασης της μετάπτωσης.

- **Obliquity (41 ka)**

Αλλαγές στην κλίση του άξονα της Γης.
Ελέγχει την ένταση των εποχών.

- **Precession (19–23 ka)**

Αλλαγή στον προσανατολισμό του άξονα.
Καθορίζει ποιο ημισφαίριο δέχεται ισχυρότερη καλοκαιρινή ακτινοβολία.

Επίδραση Μιλάνκοβιτς $\rightarrow$ Ηλιακή ακτινοβολία το καλοκαίρι

Οι τρεις κύκλοι μεταβάλλουν την **καλοκαιρινή ηλιακή ακτινοβολία στο 65°B**, καθορίζοντας την τήξη ή διατήρηση του χιονιού και άρα τον ρυθμό των παγετωδών–μεσοπαγετωδών μεταβάσεων.

Astronomical vs. Non-astronomical Cycles

Astronomical Cycles (Αστρονομικοί κύκλοι): Προέρχονται από μεταβολές στην τροχιά και στον άξονα της Γης 🖐️ προκαλούν περιοδικές αλλαγές στην ηλιακή ακτινοβολία (insolation)

- Εκκεντρότητα (100–405 ka)
- Λόξωση (41 ka)
- Μετάπτωση (19–23 ka)
- Προκαλούν κυκλικές κλιματικές διακυμάνσεις
- Χρησιμοποιούνται για **αστροχρονολόγηση** (astrochronology)

Non-astronomical Cycles (Μη αστρονομικοί κύκλοι): Προέρχονται από διεργασίες μέσα στο γήινο σύστημα 🖐️ δεν σχετίζονται με την τροχιά της Γης

- Ευστατικές μεταβολές (παγετώδεις–μεσοπαγετώδεις κύκλοι)
- Τεκτονική δραστηριότητα (ρυθμικές καταβυθίσεις – uplifts)
- Αλλαγές στην παραγωγικότητα ή τον κύκλο του άνθρακα
- Περιοδική κυκλοφορία ωκεανών / κλιματικές ταλαντώσεις (ENSO, AMOC, monsoon cycles)

Κύρια διαφορά

- **Αστρονομικοί κύκλοι** έχουν **σταθερές, γνωστές περιόδους** → επιτρέπουν ακριβή χρονολόγηση.
- **Μη αστρονομικοί κύκλοι** έχουν **μεταβλητές περιόδους** → συχνά δύσκολο να προβλεφθούν.

Παγετώδεις-Μεσοπαγετώδεις κύκλοι

Τι είναι οι παγετώδεις περίοδοι;

- Μακρές περίοδοι ψυχρού κλίματος, με εκτεταμένα παγοκαλύμματα.
- Η στάθμη της θάλασσας πέφτει → *glacio-eustasy*.

Τι είναι οι μεσοπαγετώδεις;

- Θερμότερες φάσεις, με περιορισμένα παγοκαλύμματα.
- Η στάθμη της θάλασσας ανεβαίνει.

Ρυθμικότητα των παγετώνων

- Κυριαρχούν οι κύκλοι των:
 - **41 ka** (λοξότητα) → πρώιμο Πλειστόκαινο
 - **100 ka** (εκκεντρότητα) → όψιμο Πλειστόκαινο
- Saw-tooth pattern: **αργή ψύξη – γρήγορη θέρμανση**.

Σύνδεση με την κυκλοστρωματογραφία

- Οι κύκλοι αυτοί δημιουργούν **ρυθμικές ιζηματογενείς ακολουθίες**.
- Αποτελούν «φυσικό μετρονόμο» για την *astrochronology*.

Τελευταίο Μέγιστο Παγετώνα (LGM, ~21 ka)

Τι ήταν το LGM;

- Η πιο ψυχρή φάση του τελευταίου παγετωνικού κύκλου.
- Τεράστια παγοκαλύμματα κάλυπταν Β. Αμερική, Ευρώπη, Β. Ασία.
- Οι ωκεανοί ήταν ~120 m χαμηλότερα λόγω δέσμευσης νερού σε πάγο.

Κλιματικές & περιβαλλοντικές επιπτώσεις

- Ξηρότερο κλίμα σε πολλές περιοχές.
- Έντονη μετατόπιση ζωνών ανέμων και ρευμάτων.
- Μεγάλης κλίμακας αλλαγές στα οικοσυστήματα.

Γιατί μας αφορά;

- Το LGM επιβεβαιώνει την καθαρή **κλιματική απόκριση** σε αστρονομικό forcing.
- Χρησιμοποιείται ως **σημείο αναφοράς** για κλιματικά μοντέλα και για calibrations σε paleo-proxies.
- Αποτελεί κλασικό παράδειγμα **glacio-eustatic** πτώσης στάθμης θάλασσας.

Τροχιακές Παράμετροι της Γης

1. Εκκεντρότητα (Eccentricity)

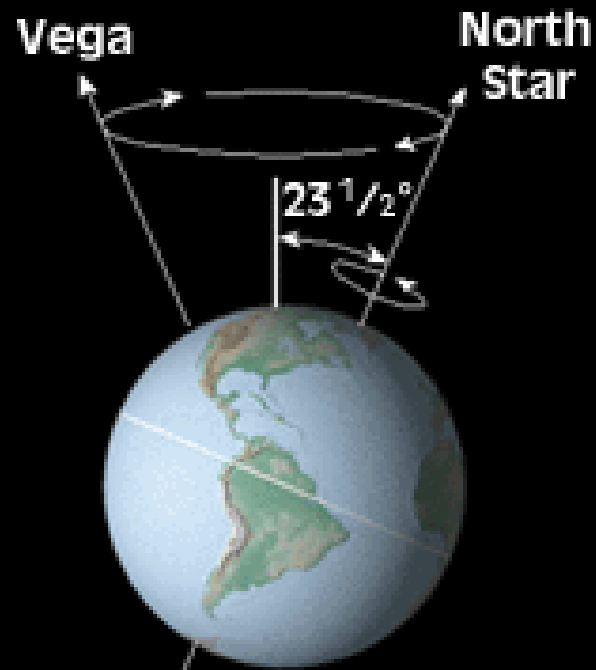
- Μεταβολές στο σχήμα της τροχιάς της Γης: από πιο κυκλική → πιο ελλειπτική.
- Κύκλοι: **100 ka** και **405 ka**.
- Ελέγχει **πόσο έντονα** λειτουργεί η μετάπτωση (precession modulation).

2. Λόξωση ή κλίση άξονα (Obliquity)

- Γωνία μεταξύ άξονα περιστροφής και επιπέδου τροχιάς.
- Κύκλος: **41 ka**.
- Ρυθμίζει την **άνιση θέρμανση** των πόλων → σημαντική επίδραση σε θερμοκρασία.

3. Μετάπτωση (Precession)

- “Κούνημα” του άξονα περιστροφής σαν σβούρα.
- Κύκλοι: **19–23 ka**.
- Αλλάζει την κατανομή **θερινής ακτινοβολίας** (summer insolation), κυρίως στο Βόρειο Ημισφαίριο.



Μετάπτωση
ισημεριών

Maximum tilt $24\frac{1}{2}^{\circ}$
 Today's tilt $23\frac{1}{2}^{\circ}$
 Minimum tilt $22\frac{1}{2}^{\circ}$

Plane of
Earth's orbit



Λοξότητα ή Λόξωση



Εκκεντρότητα

Εκκεντρότητα = πόσο κυκλική ή ελλειπτική είναι η τροχιά της Γης

Κύρια σημεία:

- Η τροχιά ταλαντώνεται από **σχεδόν κυκλική** σε πιο **ελλειπτική**.
- Τυπικό εύρος: **0.005 – 0.06** (σήμερα ~ 0.0167).
- Δύο βασικές περίοδοι:
 - **100.000** έτη
 - **405.000** έτη (ο σταθερός “μεγάλος κύκλος”)

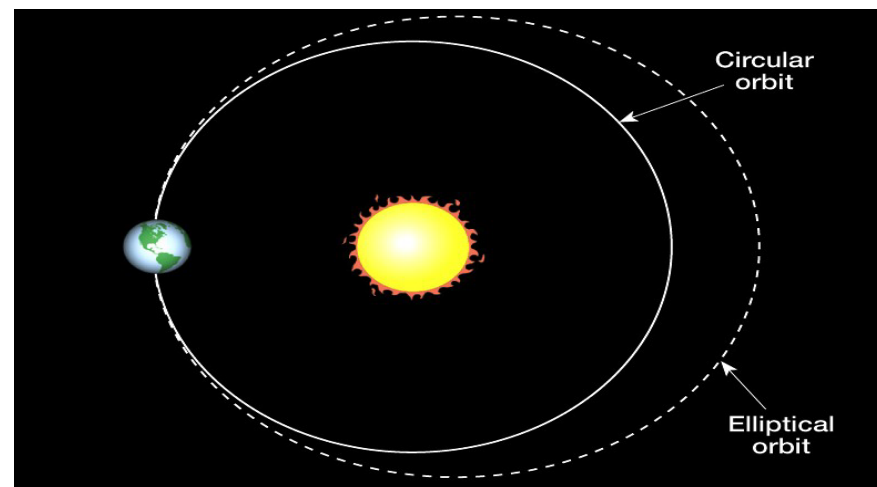
Κλιματική επίδραση:

- Η εκκεντρότητα **δεν αλλάζει δραματικά** τη συνολική ενέργεια που φτάνει στη Γη.
- **Ρυθμίζει την ισχύ της μετάπτωσης** $\rightarrow$ καθορίζει πόσο “ισχυρά” γίνονται τα ζεστά και κρύα καλοκαίρια.
- Παίζει ρόλο στη **διαμόρφωση παγετωδών κύκλων**.

Σημασία στην Κυκλοστρωματογραφία:

- Οι κύκλοι 100 ka και 405 ka **αποτυπώνονται καθαρά στα ιζήματα**.
- Ο 405 ka κύκλος λειτουργεί ως **μετρονόμος** για χρονολόγηση σε γεωλογικά χρονικά >200 Myr.

Εκκεντρότητα



Ο 405 ka Κύκλος (Μεγάλος Κύκλος Εκκεντρότητας)

Ο “μετρονόμος” της γεωλογικής κλίμακας

- Η πιο σταθερή αστρονομική περίοδος.
- Προέρχεται από την αλληλεπίδραση των πλανητικών τροχιών (κυρίως Αφροδίτη–Δίας).
- Η περίοδος του 405 ka δεν αλλάζει σημαντικά για εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια.

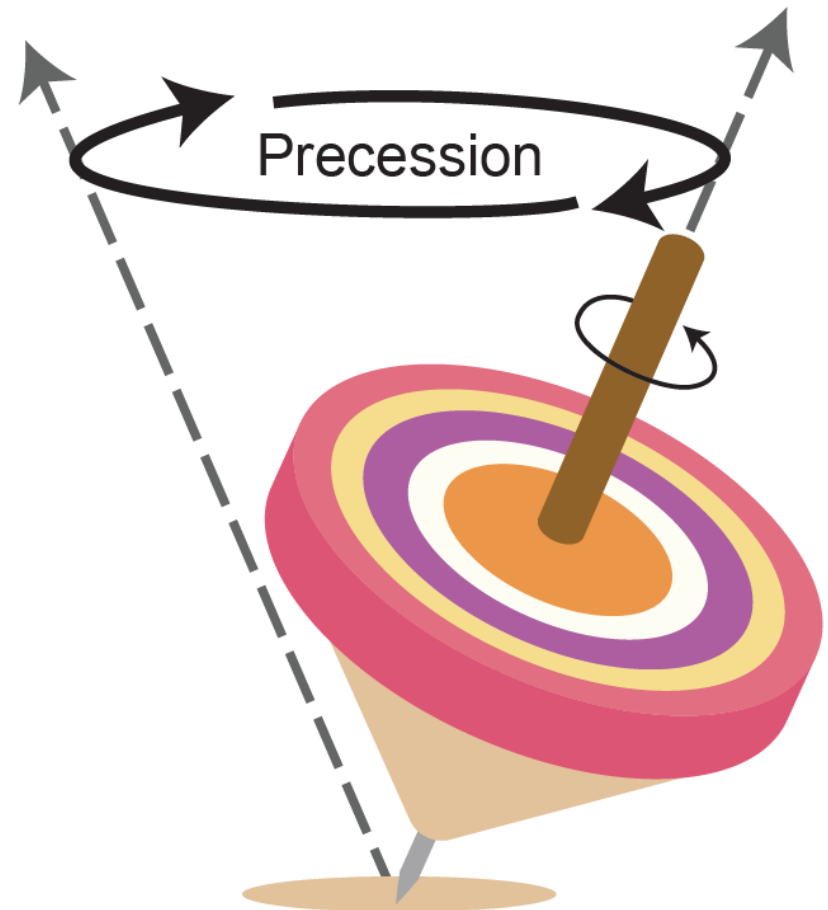
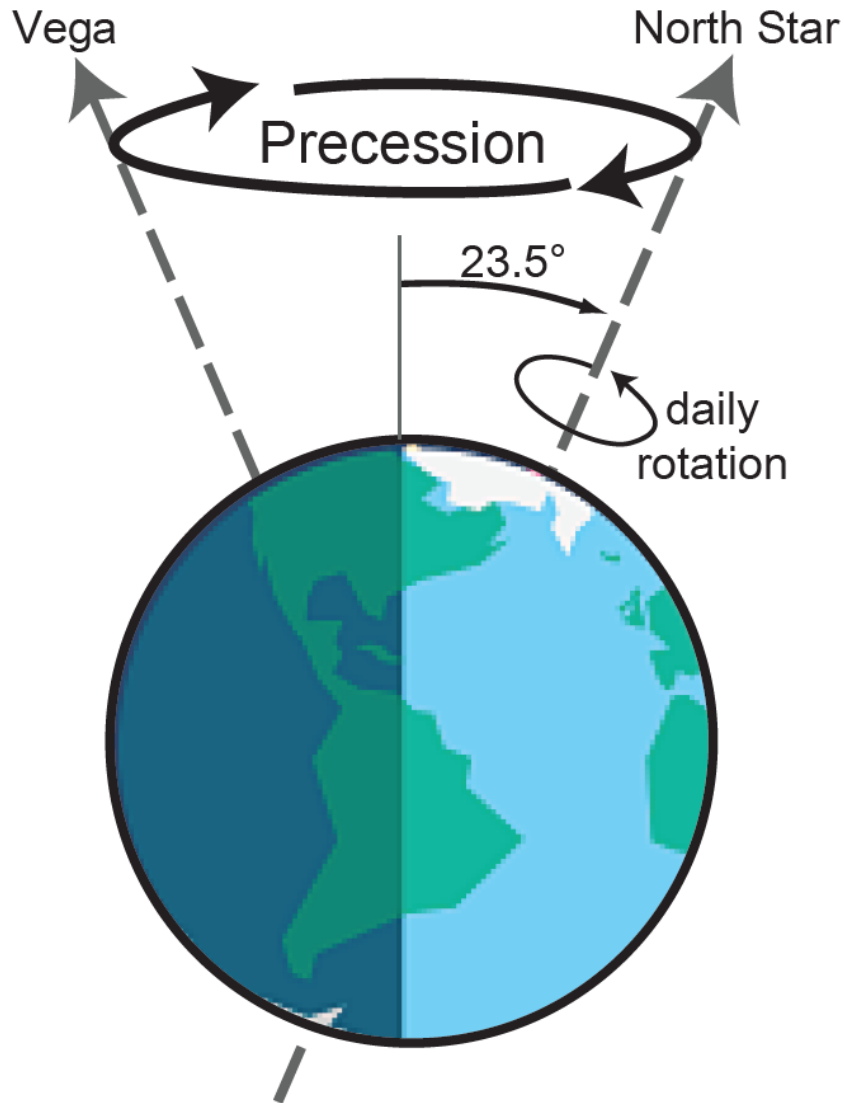
Χρήση σε >200 Myr χρονοκλίμακες

- Διατηρείται με εξαιρετική σταθερότητα στο Φανεροζωικό.
- Εντοπίζεται σε ανθρακικά, πυριτικά, εβαπορίτες.
- Χρησιμοποιείται για χρονολόγηση του Μεσοζωικού & Παλαιοζωικού.

Σημασία για τη χρονολόγηση στο Phanerozoic

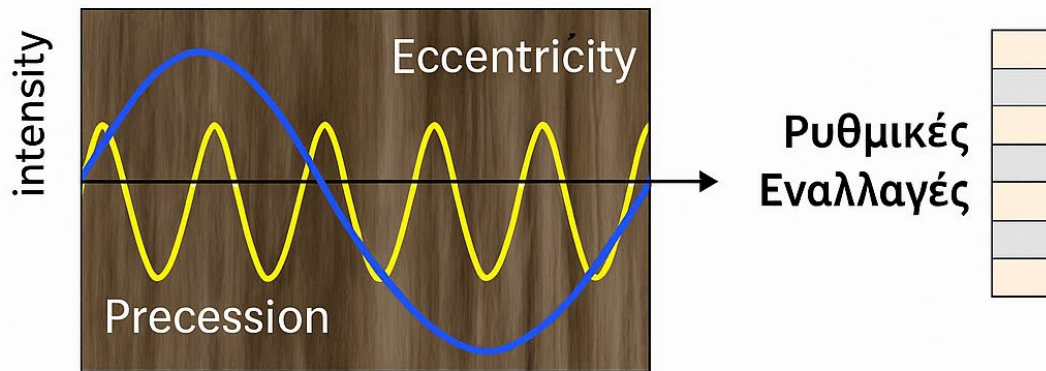
- Παρέχει απόλυτη χρονοστρωματογραφική αγκύρωση (astronomical anchor).
- Επιτρέπει ενοποίηση αρχείων από διαφορετικές λεκάνες.
- Κεντρικό στοιχείο στη νέα “Αστρονομικά Ρυθμισμένη χρονοστρωματογραφική κλίμακα”.

Κύκλος Μετάπτωσης



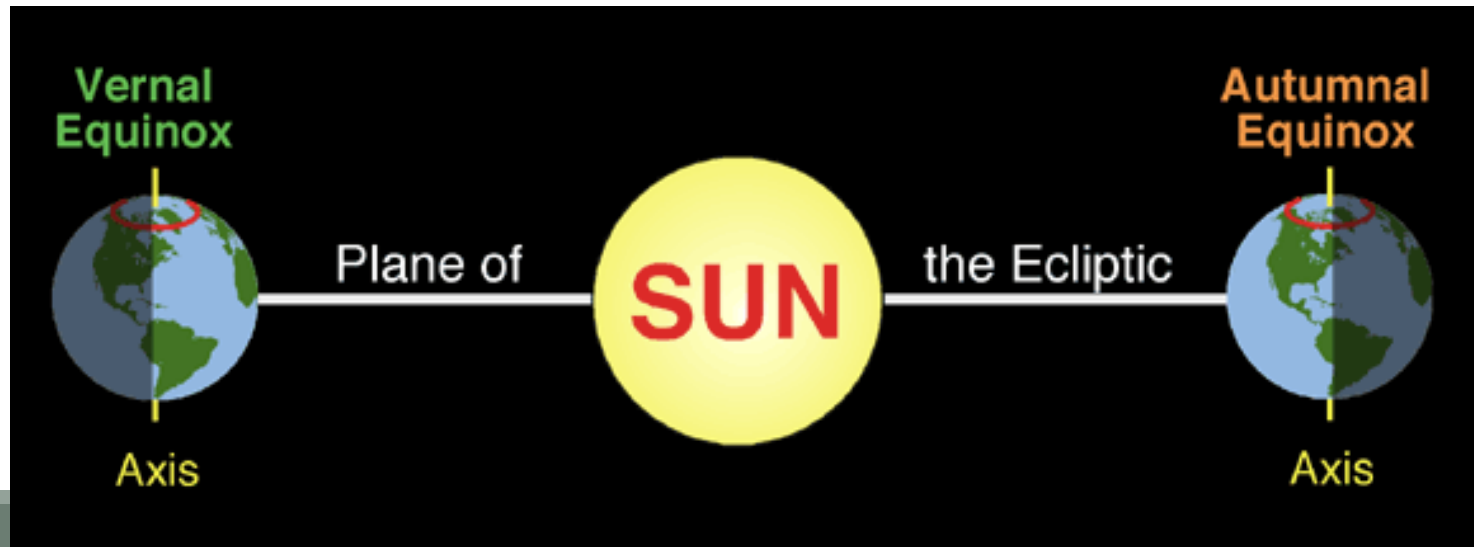
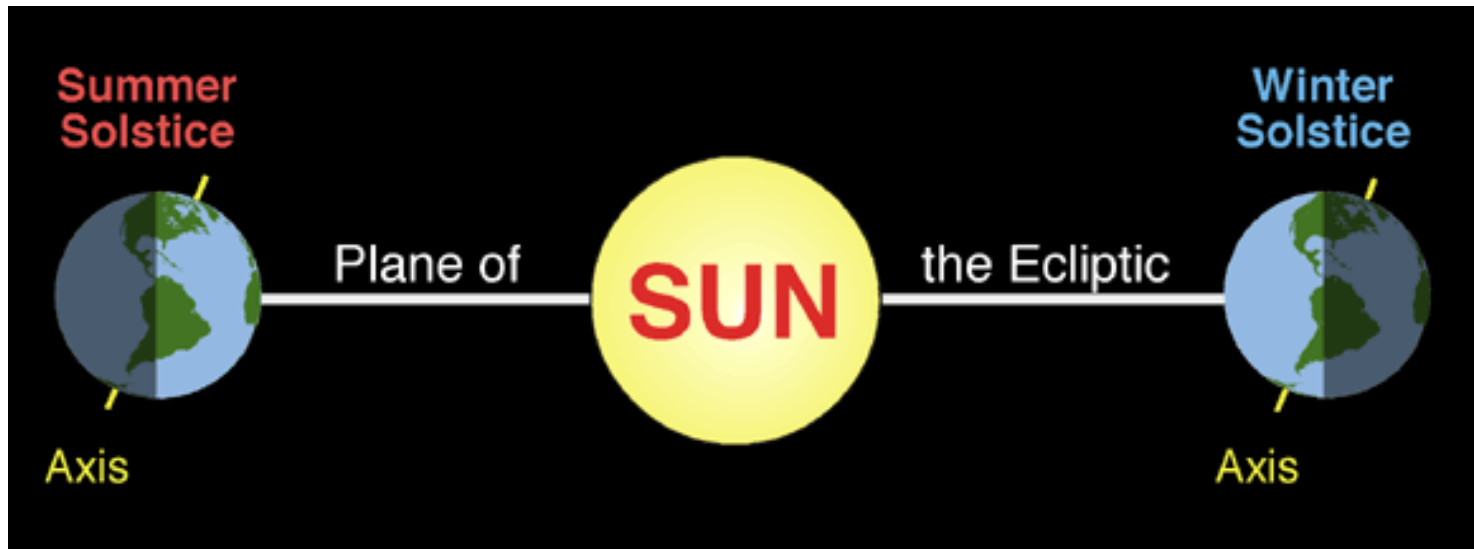
Διαμόρφωση (modulation)

Περιοδική ενίσχυση ή εξασθένηση ενός μικρότερου αστρονομικού κύκλου (π.χ. precession) από έναν μεγαλύτερο (eccentricity). Στα ιζήματα εμφανίζεται ως “bundles” ρυθμικών εναλλαγών.

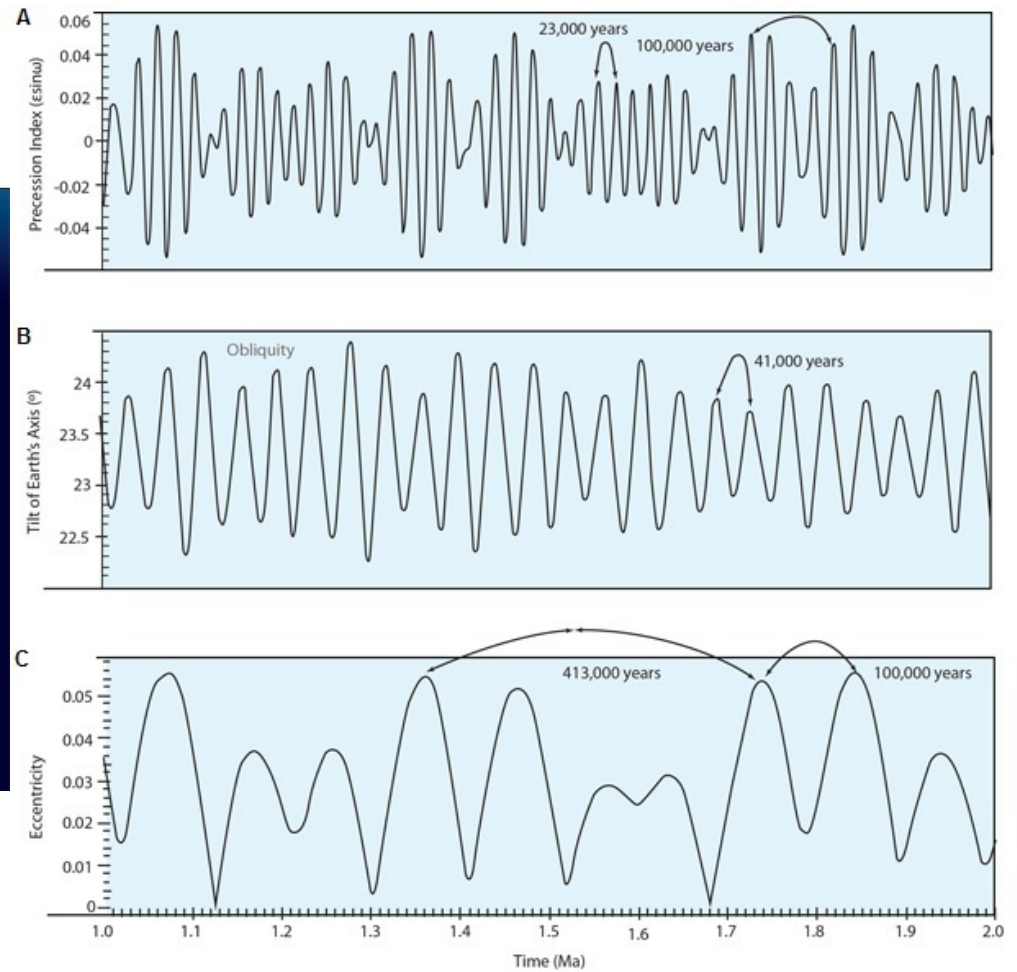
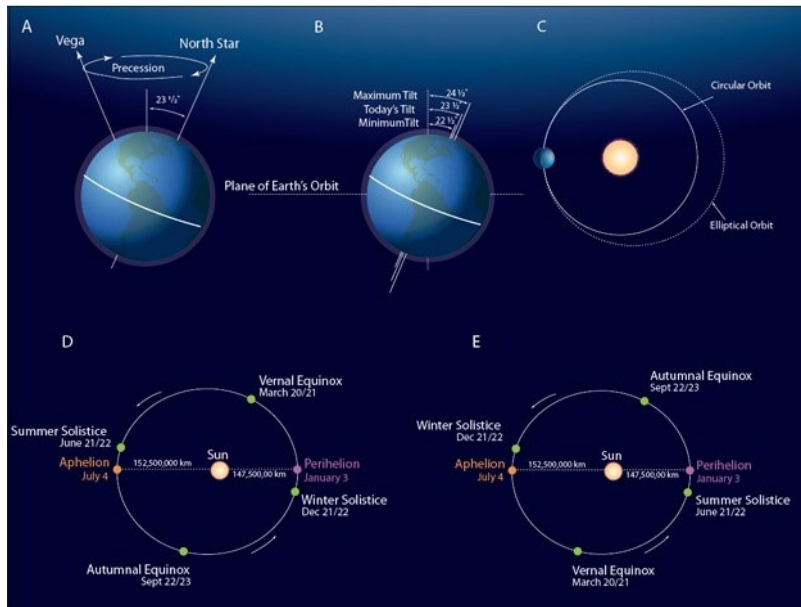


- ➔ Το κλίμα στα ιζήματα εκδηλώνεται ως “bundles” ρυθμικών εναλλαγών.

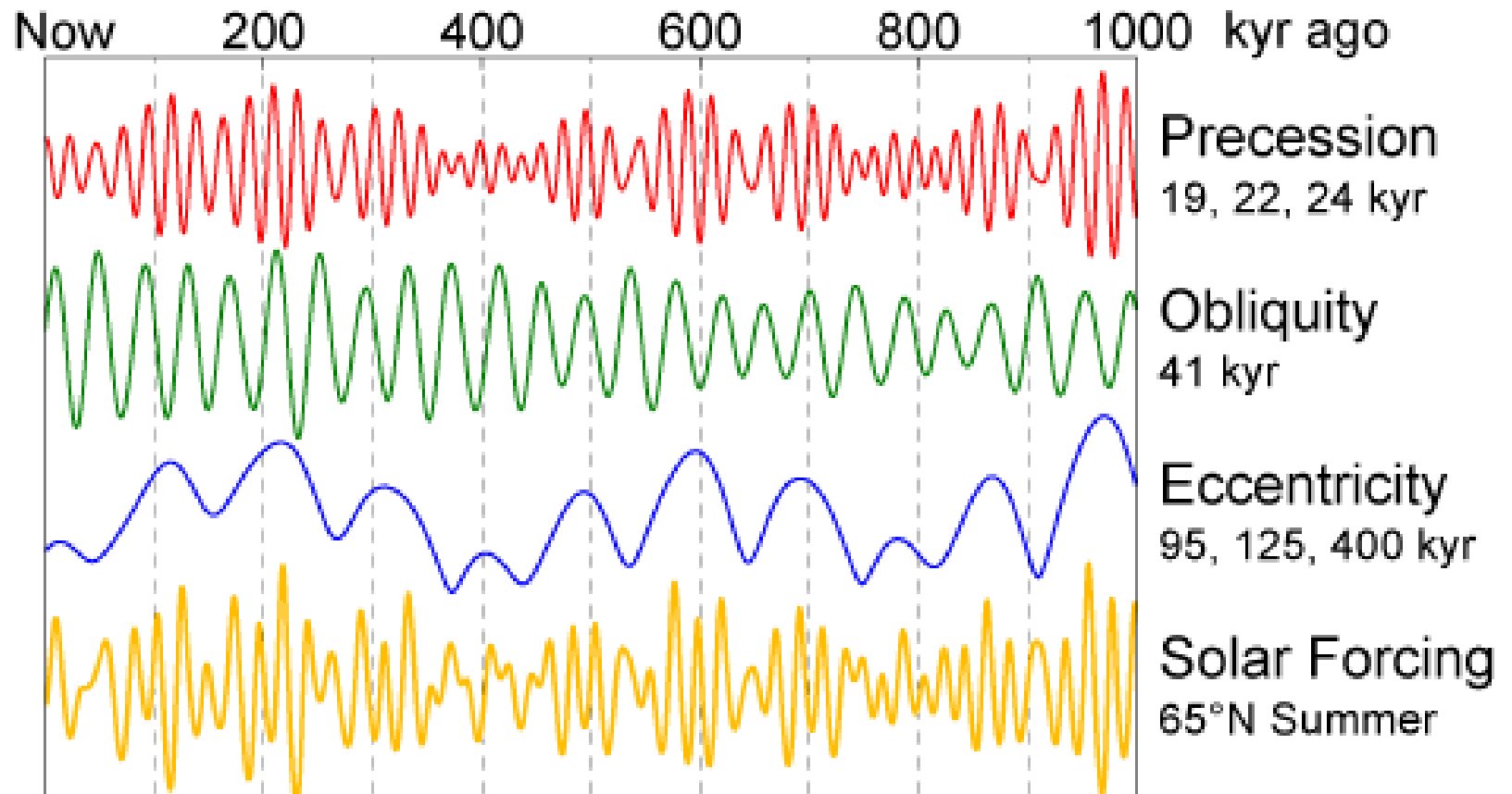
Η λόξωση ή λοξότητα είναι υπεύθυνη για τις εποχές



Τροχιακές παράμετροι:



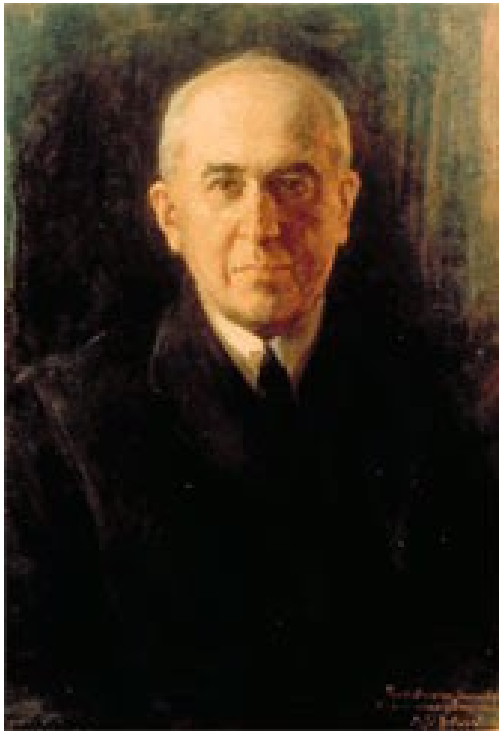
Καμπύλη ηλιακής ακτινοβολίας το καλοκαίρι (65°N)



Milutin Milankovitch,

Σέρβος μαθηματικός

(1879-1958)



- 1941, “Κανόνας ηλιακής ακτινοβολίας της Γης και η εφαρμογή του στο πρόβλημα των παγετώνων,” 626 σελ.

- υπογράμμισε τη σημασία της μείωσης της θερινής ακτινοβολίας η οποία ευνοεί τη συσσώρευση παγετώνων

Η θεωρία Milankovitch

1. Οι παγετώνες ελέγχονται από την καλοκαιρινή ακτινοβολία (summer insolation)

- Η θεωρία εστιάζει στη **θερινή ακτινοβολία στο 65° Β**.
- Αυτή καθορίζει αν ο χιονιάς/πάγος του χειμώνα θα λιώσει ή θα διατηρηθεί.

2. Η ακτινοβολία μεταβάλλεται λόγω τριών τροχιακών κύκλων

- **Εκκεντρότητα:** 100 ka & 405 ka
- **Λόξωση:** 41 ka
- **Μετάπτωση:** 19–23 ka
→ Οι κύκλοι αυτοί αλλάζουν την ποσότητα και την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας.

3. Η έναρξη και λήξη των παγετώνων προκύπτει από τον συνδυασμό των κύκλων

- Οι κύκλοι δεν λειτουργούν μεμονωμένα, αλλά **μαζί**.
- Το αποτέλεσμα είναι περιοδικότητες στο κλίμα.

4. Η θεωρία δεν περιλάμβανε μηχανισμούς feedback

- Milankovitch δεν εξήγησε CO₂, ωκεάνια κυκλοφορία, ice-sheet dynamics.
- Είπε μόνο ότι οι **τροχιακές μεταβολές ρυθμίζουν την εισερχόμενη ακτινοβολία**.

Προβλήματα της θεωρίας Milankovitch

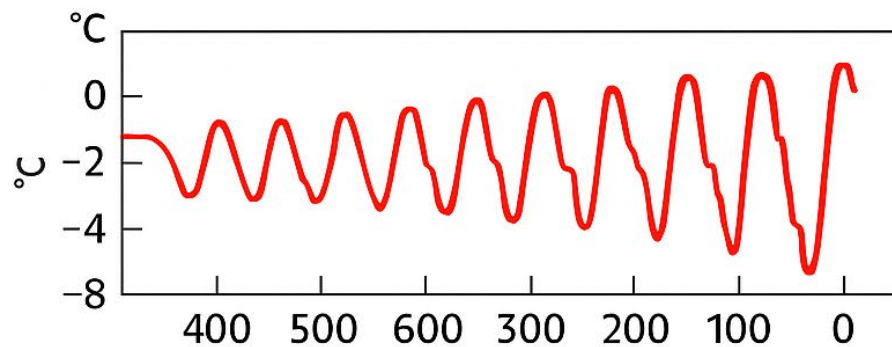
- **Ο ρόλος του CO₂ και της θετικής ανάδρασης**
Νεότερα δεδομένα δείχνουν ότι το CO₂ μπορεί να ενισχύει ή να επιταχύνει την τροχιακή επίδραση, γεγονός που περιπλέκει τη σχέση αιτίου–αποτελέσματος.
- **Η “100-ka problem” — γιατί κυριαρχεί ο κύκλος των 100.000 ετών;**
Η εκκεντρότητα έχει μικρή επίδραση στην ακτινοβολία, όμως ο παγετωνικός κύκλος των 100 ka είναι ο κυρίαρχος στο πρόσφατο παλαιοκλιματικό αρχείο.
- **Μηχανισμοί μεταφοράς και ενίσχυσης**
Οι ακριβείς διεργασίες που μετατρέπουν μικρές τροχιακές μεταβολές σε μεγάλες παγετωνικές αλλαγές δεν έχουν αποσαφηνιστεί πλήρως.
- **Σύγχυση μεταξύ διαφορετικών παραμέτρων**
Κύκλοι μετάπτωσης (21 ka) και λόξωσης (41 ka) εμφανίζονται ξεκάθαρα στο παλαιοκλιματικό αρχείο, αλλά η κυριαρχία του 100 ka δεν εξηγείται επαρκώς.
- **Πολλαπλές αιτίες και σύνθετη δυναμική**
Το παγκόσμιο κλίμα επηρεάζεται από τροχιακές, ατμοσφαιρικές, τεκτονικές και ωκεάνιες διεργασίες, κάνοντας δύσκολη την απομόνωση ενός μοναδικού μηχανισμού.

Πολλά
προβλήματα

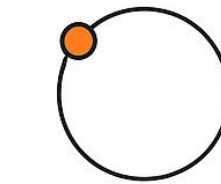


Ο 100-ka Παγετωνικός Κύκλος

Κυρίαρχος ρυθμός των παγετωδών και μεσοπαγετωδών περιόδων κατά το Πλειστόκαινο (~800 ka):



- «Μετρονόμος» του Πλειστοκαίνου
- Αλληλεπίδραση τροχιακών κύκλων & κλιματικών feedbacks
- Ισχυρό γεωλογικό αποτύπωμα σε ιζήματα



Εκκεντρότητα



Αστρονομική
αναγκαστική δράση



Μηχανισμοί
ενίσχυσης
(feedbacks)

Αναβίωση της Θεωρίας Milankovitch

Η αρχική δυσπιστία (1900–1960)

- Περιορισμένα δεδομένα παλαιοκλίματος
- Αδυναμία ακριβούς χρονολόγησης
- Μεγάλη αβεβαιότητα στους τροχιακούς υπολογισμούς

Η επιστημονική αναβίωση (δεκαετίες 1960–1980)

- Νέα θαλάσσια γεωτρητικά δεδομένα (DSDP/ODP)
- Οξυγονοϊσοτοπικές καμπύλες ($\delta^{18}\text{O}$) → παγκόσμια εικόνα κλιματικών κύκλων
- Το “Pacemaker of the Ice Ages” (Hays, Imbrie, Shackleton, 1976)
→ Απόδειξη ότι οι παγετώδεις κύκλοι ακολουθούν Milankovitch περιοδικότητες
- Βελτιωμένα αριθμητικά μοντέλα τροχιάς (Berger, Laskar)

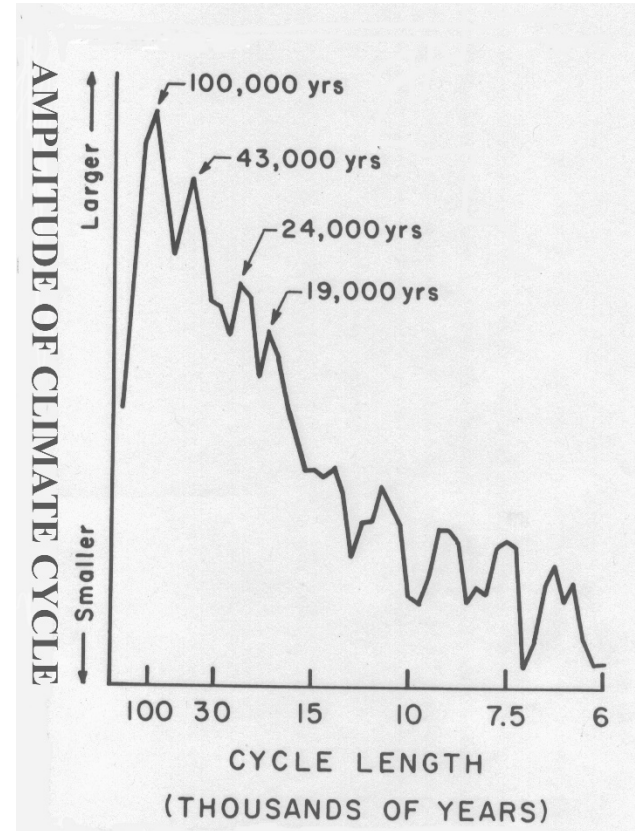
Τι σημαίνει για την κυκλοστρωματογραφία;

- Σύνδεση τροχιακής θεωρίας → κλιματικού σήματος → ιζημάτων
- Γέννηση της **astrochronology**
- Χρονολόγηση με ακρίβεια λίγων χιλιάδων ετών

Παραλλαγές στην τροχιά της Γης: Ο ρυθμιστής των εποχών των παγετώνων



Τα ισότοπα του θαλάσσιου οξυγόνου απεικονίζουν τις ίδιες περιόδους που προβλέπονται από τις τροχιακές παραβιάσεις.



Ο ρυθμιστής των εποχών των παγετώνων(Hays, Imbrie & Shackleton, 1976)

Τι έδειξε η μελέτη

- Ανάλυση οξυγανοϊσοτοπικών καμπυλών ($\delta^{18}\text{O}$) από πυρήνες του IN60 (Ινδικός Ωκεανός).
- Φασματική ανάλυση των παγετωδών–μεσοπαγετωδών κύκλων.
- Εντοπισμός των **ίδιων περιοδικοτήτων** που προβλέπει η θεωρία Milankovitch:
 - **23 ka** (μετάπτωση)
 - **41 ka** (λόξωση)
 - **~100 ka** (εκκεντρότητα)

Γιατί είναι “σταθμός”

- Πρώτη ισχυρή **ποσοτική απόδειξη** ότι οι παγετώδεις κύκλοι ρυθμίζονται από το αστρονομικό forcing.
- Έθεσε τα θεμέλια της **σύγχρονης κυκλοστρωματογραφίας**.
- Κατέστησε δυνατή την ανάπτυξη της **astrochronology**.

Κεντρικό συμπέρασμα

- Οι παγετώδεις κύκλοι “χτυπούν” στους ρυθμούς των Milankovitch κύκλων.

Η μοντέρνα αναθεώρηση της θεωρίας Milankovitch (Strasser et al.)

1. Το κλιματικό σύστημα είναι μη γραμμικό

- Οι παγετώνες δεν ανταποκρίνονται γραμμικά στις τροχιακές επιδράσεις.
- Κατώτατα όρια, απότομες μεταβάσεις, χρόνοι καθυστέρησης.

2. Ανατροφοδοτήσεις και εσωτερικές δυνάμεις

- CO₂, ωκεάνια κυκλοφορία, albedo, υδρατμοί.
- Τα feedbacks μπορούν να ενισχύσουν ή να αποδυναμώσουν το τροχιακό σήμα.

3. Διαμόρφωση των τροχιακών κύκλων

- Η εκκεντρότητα μετριάζει την μετάπτωση (μετριάσμός μετάπτωσης).
- Εμφανίζονται χαρακτηριστικές δεσμίδες (π.χ. 4–5 precession cycles).

4. Κυκλοστρωματογραφία δεν είναι “Milankovitch=κλίμα”

- Οι περίοδοι εμφανίζονται και σε κλιματικά ανεξάρτητα περιβάλλοντα (π.χ. ανθρακικά).
- Το ιζηματογενές σύστημα έχει δική του δυναμική.

5. Η τροχιακή επίδραση είναι πραγματική — αλλά όχι το μοναδική

- Το αποτύπωμα ιζήματος = συνδυασμός
Τροχιακή επίδραση + κλίμα + RSL + τεκτονική + δυναμική ιζηματογένεσης.

Emiliani (1955) – Το ισοτοπικό αρχείο της θερμοκρασίας

Τι έκανε ο Emiliani

- Ανέλυσε $\delta^{18}\text{O}$ σε tests foraminifera από θαλάσσιους πυρήνες.
- Έδειξε ότι οι διακυμάνσεις στο $\delta^{18}\text{O}$ αντικατοπτρίζουν:
 - Θερμοκρασία νερού
 - Όγκο παγετώνων (ice volume)

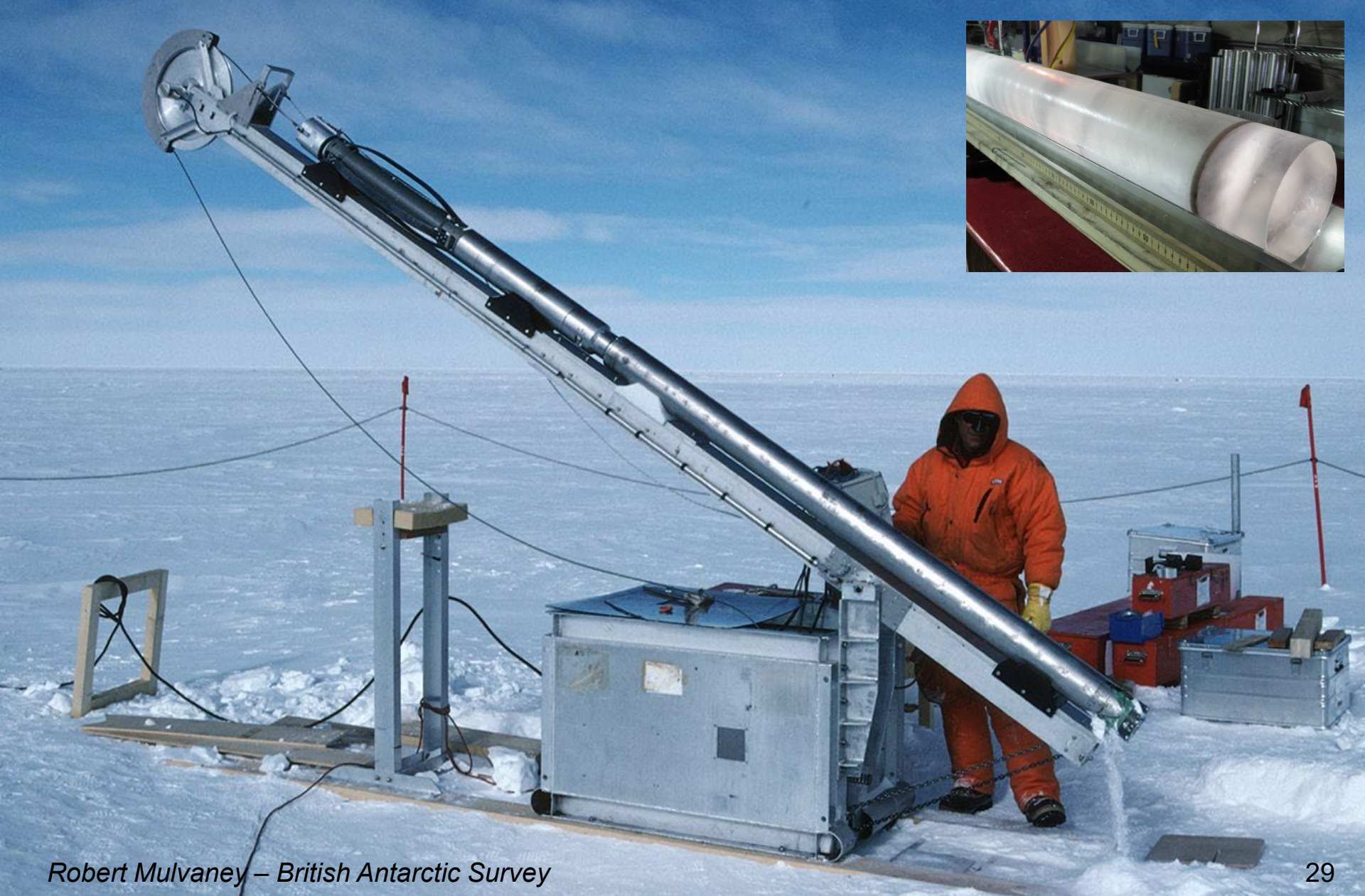
Κύρια ευρήματα

- Πρώτη **συνεχής χρονοσειρά** παγετωδών–μεσοπαγετωδών κύκλων.
- Αναγνώριση **κυκλικών μεταβολών** στο παλαιοκλίμα.
- Άνοιξε τον δρόμο για τον Shackleton (1970s) και το **Pacemaker** (1976).

Γιατί είναι σημαντικό

- Το $\delta^{18}\text{O}$ έγινε ο βασικός παλαιοκλιματικός δείκτης του 20ού αιώνα.
- Συνδέει άμεσα **τροχιακή θεωρία – κλίμα – ιζηματογενές αρχείο**.

Πυρήνες πάγου: ένα σημαντικό αρχείο



Πυρήνες Πάγου – Αρχείο κλιματικών δεδομένων εξαιρετικά υψηλής ευκρίνειας

Γιατί είναι τόσο σημαντικοί;

- Καταγράφουν **ετήσια** ή **πολυετή** στρώματα (snow → firn → ice).
- Διατηρούν **παγιδευμένες φυσαλίδες αέρα** → άμεσες μετρήσεις CO₂, CH₄.
- Αποτυπώνουν αλλαγές σε:
 - θερμοκρασία ($\delta^{18}\text{O}$, δD)
 - ηφαιστειακή τέφρα
 - σκόνη / αεροζόλ
 - χημεία ατμόσφαιρας
- Παρέχουν συνεχές αρχείο **εκατοντάδων χιλιάδων ετών**.

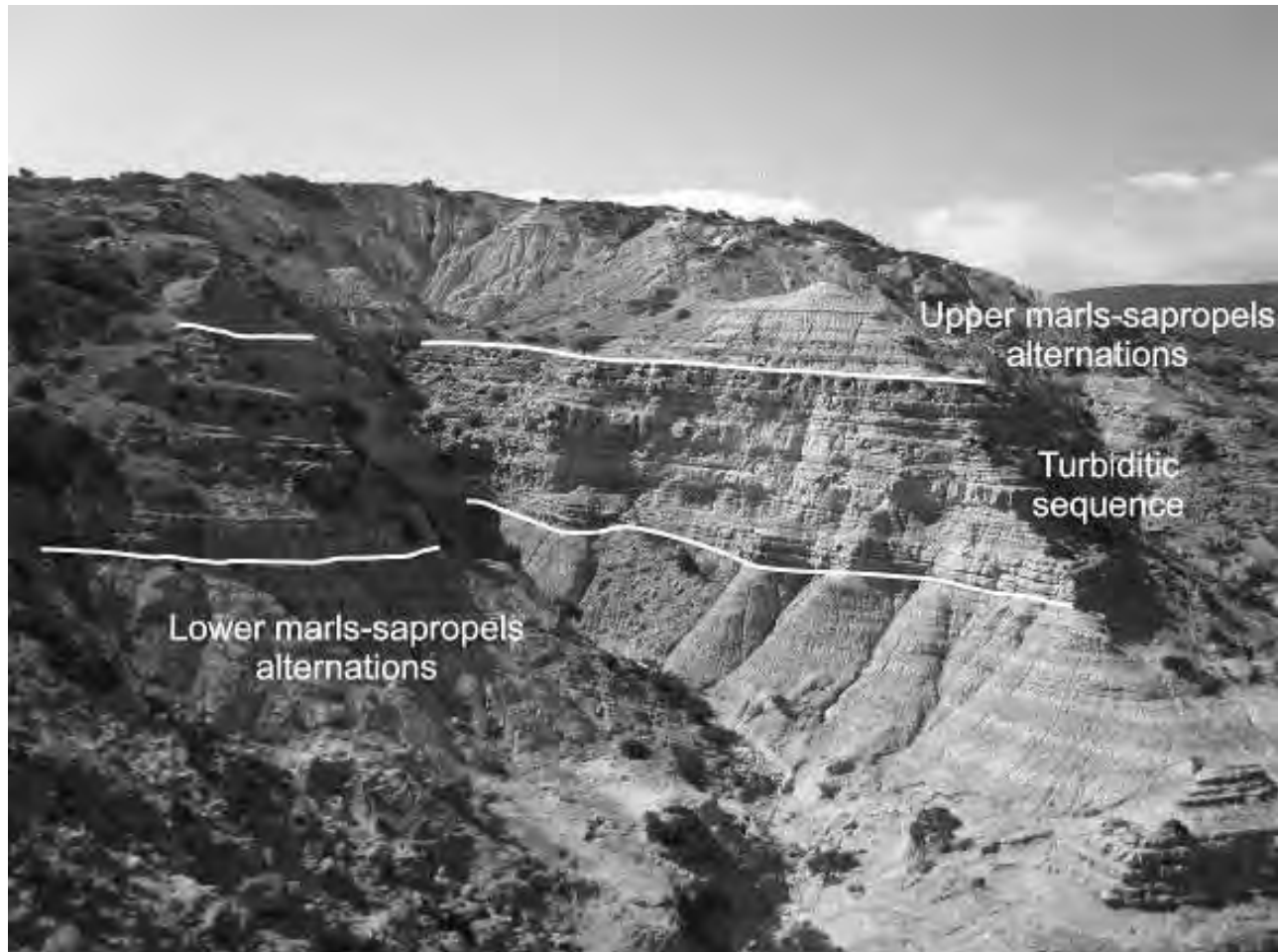
Τι ρόλο παίζουν στο πλαίσιο Milankovitch;

- Επαληθεύουν την περιοδικότητα των παγετωδών–μεσοπαγετωδών κύκλων.
- Δείχνουν καθαρά **τροχιακές περιοδικότητες** (23 ka, 41 ka, 100 ka).
- Συνδέουν **κλιματική επίδραση** → **όγκος πάγου** → **αέρια θερμοκηπίου**.

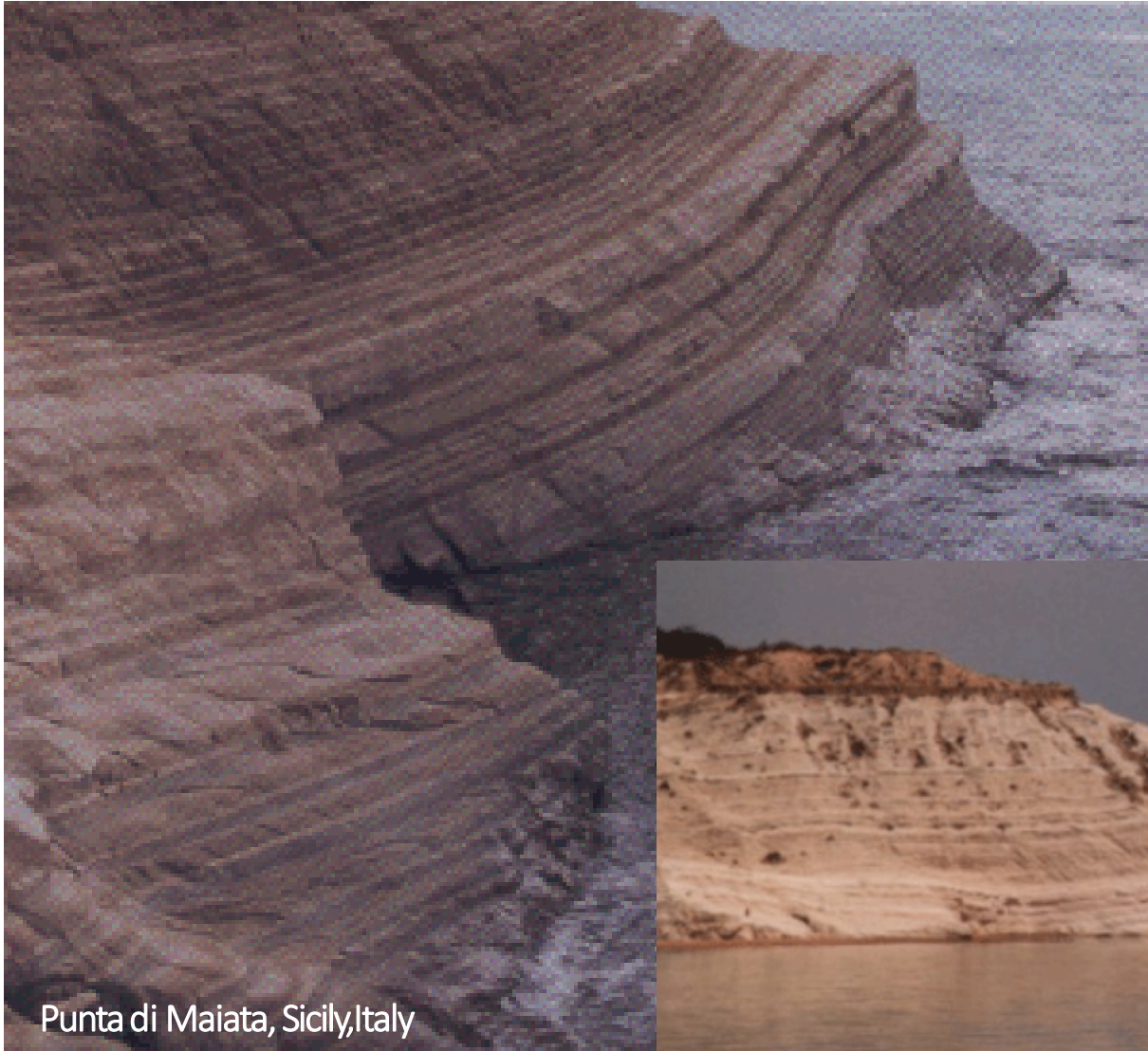
Γιατί είναι “υψηλής ανάλυσης”;

- Η ανάλυση μπορεί να φτάσει από **ετήσια** μέχρι **δεκαετή κλίμακα** (ανάλογα με τον πυρήνα).
- Επιτρέπουν την κατανόηση **ταχείας κλιματικής μεταβολής** (Dansgaard–Oeschger, Heinrich events).

Από τους αστρονομικούς κύκλους στο ιζηματογενές αρχείο



Κυκλοστρωματογραφία = ανάλυση ρυθμικών
ιζηματογενών εναλλαγών που αντανακλούν
κλιματικούς και αστρονομικούς κύκλους.



Punta di Maiata, Sicily, Italy



Αποτύπωση στα ιζήματα - Ορολογία

Τι είναι “ιζηματογενείς κύκλοι”;

- Ρυθμικές, επαναλαμβανόμενες εναλλαγές ιζημάτων (λιθολογία, χημεία, χρώμα).
- Οφείλονται σε **περιοδικές αλλαγές** στο κλίμα, RSL, υδρολογία ή παραγωγικότητα.

Βασικές έννοιες

- **Κύκλος**: Μία πλήρης επανάληψη (π.χ. limestone → marl → limestone).
- **Bundle - Δεσμίδα**: Ομάδα 4–6 μικρότερων κύκλων που σχετίζονται με διαμόρφωση της μετάπτωσης (**precession modulation**).
- **Couplet / triplet**: Δύο ή τρία επαναλαμβανόμενα στρώματα.
- **Rhythmites**: Ιζήματα που εμφανίζουν εμφανή ρυθμικότητα.
- **Varves**: Ετήσια στρώματα (lake records).
- **Σαπροπηλοί / σαπροπηλικά στρώματα** : Μεσογειακά οργανικά πλούσια στρώματα που συνδέονται με τροχιακές μεταβολές.

Γιατί μας ενδιαφέρουν;

- Είναι το **ίχνος** της κλιματικής απόκρισης μέσα στο ιζηματογενές αρχείο.
- Αποτελούν το σημείο εκκίνησης για την **κυκλοστρωματογραφία**.

Ιστορικό Παράδειγμα: Κυκλοθέματα (Cyclothemms)

Τι είναι τα Κυκλοθέματα (Cyclothemms)

- Ρυθμικές, επαναλαμβανόμενες ακολουθίες ιζημάτων του Λιθανθρακοφόρου – Περμίου
- Τυπικά: **άργιλος** → **σχιστόλιθοι** → **ψαμμίτες** → **ασβεστόλιθοι** σε επαναλαμβανόμενο μοτίβο.
- Συνδέονται με εναλλαγές χερσαίων–θαλάσσιων περιβαλλόντων.

Γιατί θεωρούνται παράδειγμα non-astronomical ρυθμικότητας

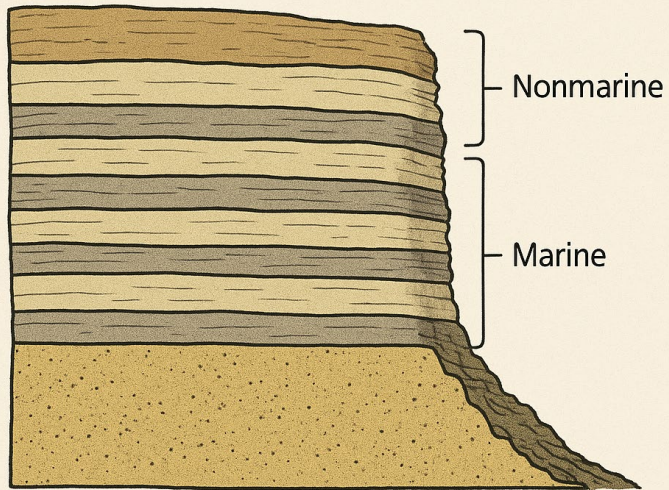
- Οι κύκλοι οφείλονται κυρίως σε **παγετώδεις/μεσοπαγετώδεις μεταβολές** του Ανθρακοφόρου.
- Οι μεταβολές αυτές δημιουργούσαν **ευστατικές αλλαγές** στη στάθμη της θάλασσας.
- Δεν τεκμηριώνεται κυκλικότητα καθαρά αστρονομικής προέλευσης.

Πού εφαρμόζονται

- Στα μεγάλα ανθρακοφόρα πεδία της Βόρειας Αμερικής και Ευρώπης.
- Χρησιμοποιούνται ως μοντέλα **παλαιοπεριβαλλοντικής ερμηνείας** και **αποκατάστασης RSL**.
- **Γιατί δεν είναι ο πυρήνας της σύγχρονης Κυκλοστρωματογραφίας**
 - Τα cyclothemms είναι **περιβαλλοντικοί** και **ευστατικοί** κύκλοι, όχι αστρονομικοί.
 - Δεν χρησιμοποιούνται για **αστροχρονολόγηση**.
 - Σήμερα η κυκλοστρωματογραφία βασίζεται σε **υψηλής ανάλυσης αστρονομική κυκλικότητα** (precession, obliquity, eccentricity).

Κυκλόθεμα – Βασική Εννοια

Cyclothems



Cyclothems are rhythmic sequences of sedimentary rock layers.

Τα κυκλοθέματα έδειξαν πρώτα ότι τα ιζήματα έχουν “ρυθμό” — η κυκλική στρωματογραφία εξηγεί αυτόν τον ρυθμό με βάση αστρονομικούς κύκλους.

Κυκλική Στρωματογραφία: Ο Πυρήνας

Ορισμός & Στόχοι

Ανάλυση περιοδικότητας

- Μελέτη επαναλαμβανόμενων ρυθμών στα ιζήματα.
- Αναγνώριση αστρονομικών συχνοτήτων (precession, obliquity, eccentricity).
- Διάκριση αστρονομικών από μη-αστρονομικούς κύκλους.

Astrochronology

- Αντιστοίχιση κυκλικών σημάτων με θεωρητικές τροχιακές λύσεις (Laskar).
- Ακριβής χρονικός συγχρονισμός ιζηματογενών ακολουθιών.
- Χτίσιμο συνεχών χρονοστρωματογραφικών μοντέλων.

High-resolution age models

- Χρονολόγηση με ακρίβεια **καλύμματος χιλιάδων ετών** (sub-ka resolution).
- Χρήση σε Μειοκαινικά, Παλαιοκαινικά και Μεσοζωικά αρχεία.
- Σύνδεση με παγκόσμια κλιματικά γεγονότα.

Μέθοδοι Κυκλικής Στρωματογραφίας (Οπτικές & Ποσοτικές)

Οπτικές μέθοδοι

- **Οπτική αναγνώριση κύκλου**
Αναγνώριση οπτικών ρυθμικών εναλλαγών (λιθολογικών, γεωχημικών).
- **Αναλογίες πάχους κύκλου**
Λόγοι παχών κύκλων που επιτρέπουν αντιστοίχιση με αστρονομικές περιόδους.

Προεπεξεργασία

- **Αφαίρεση τάσης**
Αφαίρεση μακροκλίμακων τάσεων (background trends) από τα δεδομένα.
- **Φιλτράρισμα**
Band-pass φίλτρα για απομόνωση συγκεκριμένων συχνοτήτων (π.χ. ζώνη μετάπτωσης).

• Ποσοτικές μέθοδοι

- **Φασματική ανάλυση**
 - **FFT (Γρήγορος μετασχηματισμός Fourier)**
 - **MTM (Μέθοδος πολλαπλών κωνικών διατομών)**
 - **Lomb–Scargle** (για άνισα κατανεμημένα δεδομένα)
Αναδεικνύουν στατιστικά σημαντικές περιοδικότητες και συχνότητες.
- **Ανάλυση κυματιδίων**
Ανάλυση κυκλικών σημάτων *στον χρόνο*, χρήσιμη για μη-στατικά σήματα και μεταβολές κυκλικότητας.

Astrochronology

Laskar solutions

- Θεωρητικές αριθμητικές λύσεις της τροχιάς της Γης (La2004, La2010, La2011).
- Παρέχουν τις αστρονομικές περιόδους (eccentricity, obliquity, precession) για τα τελευταία ~50–60 Ma.
- Χρησιμοποιούνται ως “πρότυπο” για αντιστοίχιση κυκλικών σημάτων στα ιζήματα.

Tuning techniques (Αστρονομική προσαρμογή)

- Ευθυγράμμιση των ιζηματογενών κυκλικών σημάτων με τα θεωρητικά αστρονομικά σήματα.
- Προσαρμογή της ακολουθίας ώστε οι κύκλοι precession/obliquity/eccentricity να “κουμπώνουν” στις Laskar λύσεις.
- Χρήση φασματικής ισχύος, phase alignment και modulation patterns.

Age models με ακρίβεια λίγων ka

- Δημιουργία χρονολογικών μοντέλων εξαιρετικά υψηλής ανάλυσης (± 2 –5 ka).
- Συνεχής χρονική κλίμακα χωρίς μεγάλα κενά.
- Κρίσιμη μέθοδος για παγκόσμια γεγονότα (συμβάντα άνθρακα, Ωκεάνια Ανάβρα, ηφαιστειακές παλμούς).

Τι είναι οι Laskar Orbital Solutions;

- **Αριθμητικά μοντέλα** της τροχιάς της Γης που υπολογίζουν πώς μεταβάλλονται:
 - η εκκεντρότητα
 - η λοξότητα
 - η μετάπτωση
 - η ηλιακή ακτινοβολία (insolation)
- **Προσομοιώνουν** την τροχιακή εξέλιξη των πλανητών και την αλληλεπίδρασή τους.
- Παρέχουν **χρονικές σειρές** τροχιακών παραμέτρων για **τα τελευταία 50–60 εκατ. χρόνια**.
- Χρησιμοποιούνται ως **αναφορά (καμπύλες τροχιακών στόχων)** στην αστροχρονολόγηση.
- Επιτρέπουν **χρονολόγηση υψηλής ακρίβειας ($\pm 2-4$ ka)** μέσω αντιστοίχισης των ιζηματογενών κύκλων σε τροχιακές περιόδους.

Ροή εργασίας Κυκλικής Στρωματογραφίας



Μελέτες Περίπτωσης (Case Studies)

Μεσοζωικά ανθρακικά

- Πολύ σταθερά, συνεχόμενα αρχεία.
- Ισχυρή precession–eccentricity κυκλικότητα.
- Χρήσιμα για astrochronology σε >100 Ma χρονοκλίμακες.

Sapropels Ανατολικής Μεσογείου

- Precession-driven παραγωγικότητα και υγρό κλίμα στη Β. Αφρική.
- Εξαιρετικά καθαρή 23 ka κυκλικότητα.
- Κλασικό παράδειγμα σύνδεσης Milankovitch → ιζήματα.

Messinian evaporites

- Ρυθμικές εβαπορίτες (κυρίως στο Μεσσήνιο Κρίση Αλμυρότητας).
- Bundled κύκλοι που αντιστοιχούν σε precession modulation.
- Κρίσιμο αρχείο για υψηλής ακρίβειας χρονολόγηση.

Paleogene–Neogene marl–limestone cycles

- Εναλλαγές μαργών–ασβεστόλιθων με ισχυρή ρυθμικότητα.
- Ιδανικά αρχεία για 405 ka eccentricity cycle tuning.
- Βάση για πολλές Astrochronology studies.

Παλαιοκλιματικοί δείκτες (Proxies)

- CaCO_3 , TOC, XRF, Fe/Ti, μαγνητική επιδεκτικότητα.
- Αναδεικνύουν modulation patterns και phase relationships.
- Επιτρέπουν multi-proxy validation.

Πλεονεκτήματα & Περιορισμοί της Κυκλικής Στρωματογραφίας

Πλεονεκτήματα

- **Υψηλή χρονολογική ακρίβεια**
Age models επιπέδου $\pm 2-5$ ka, συχνά ανώτερη από ραδιοχρονολόγηση.
- **Συνεχής χρονοστρωματογραφική κλίμακα**
Ιδανική για λεπτομερείς παλαιοκλιματικές μεταβάσεις και παγκόσμια γεγονότα.
- **Ενοποίηση αρχείων από διαφορετικές λεκάνες**
Κοινές αστρονομικές περιοδικότητες $\rightarrow$ άμεση συσχέτιση.
- **Δυνατότητα υψηλής ανάλυσης κλιματικών μοντέλων**
Δομή εποχικότητας, παραγωγικότητας, RSL, circulation.

Περιορισμοί

- **Hiatus & ασυνέχειες**
Διάβρωση ή μη-απόθεση μπορούν να σβήσουν ή να παραμορφώσουν κύκλους.
- **Διαγένεση**
Χημικές αλλοιώσεις (π.χ. ανακρυστάλλωση CaCO_3) μπορούν να καταστρέψουν το αρχικό σήμα.
- **Αλλαγές ρυθμού ιζηματογένεσης**
Μεταβλητός ρυθμός ιζηματογένεσης $\rightarrow$ «τέντωμα» ή «συμπίεση» των κύκλων.
- **Ψευδο-κυκλικότητες (non-astronomical signals)**
Ρυθμοί που προκύπτουν από τεκτονικά/περιβαλλοντικά feedbacks μπορεί να μπερδευτούν με Milankovitch forcing.

Η Σύνδεση Milankovitch ↔ Κυκλοστρωματογραφία

Οι τροχιακοί κύκλοι Milankovitch → δημιουργούν περιοδική κλιματική μεταβολή

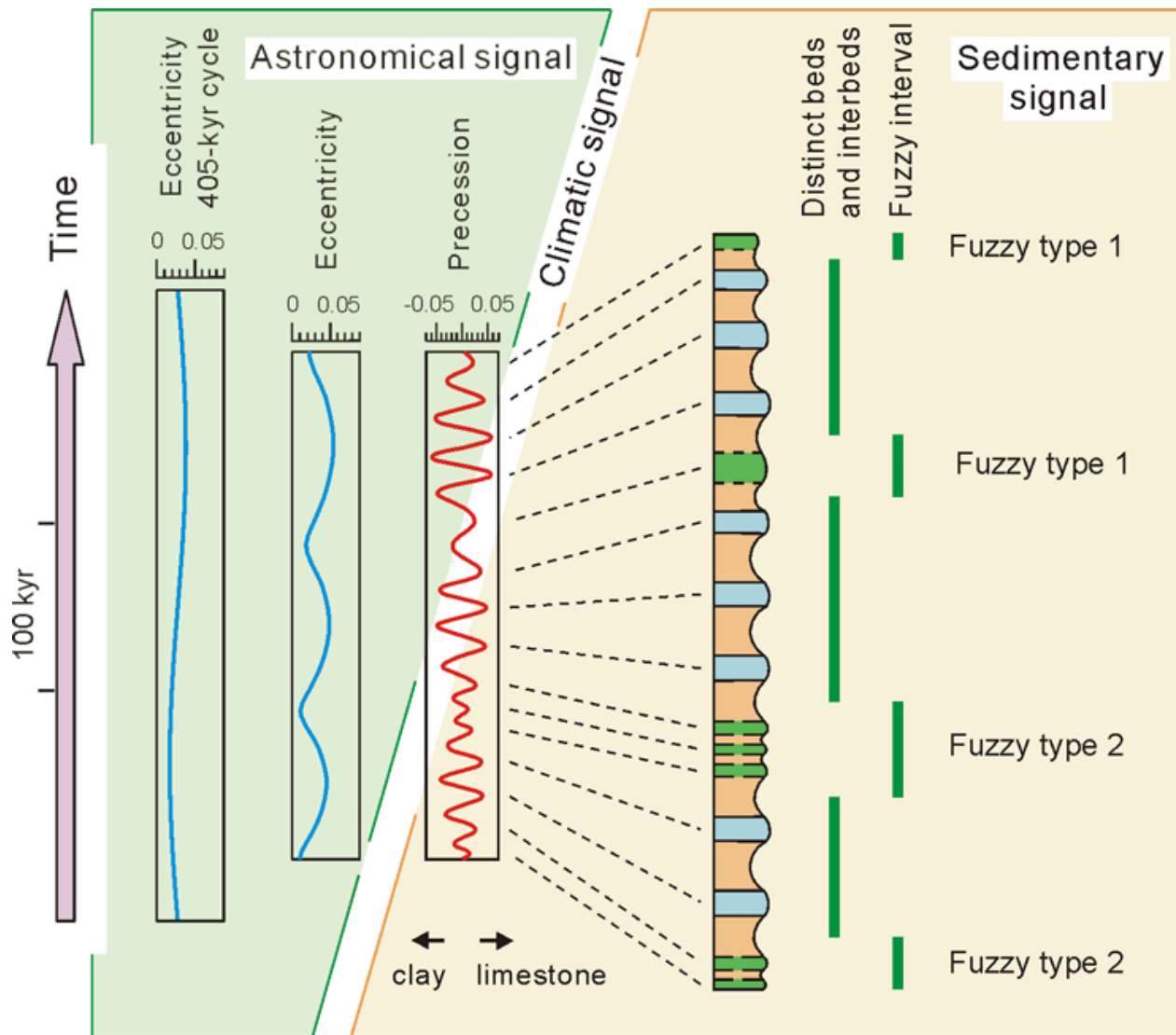
Η κυκλοστρωματογραφία βρίσκει αυτές τις περιοδικότητες στα ιζήματα

Έτσι: Τροχιά → Κλίμα → Ιζηματογένεση

- Οι τροχιακοί κύκλοι οδηγούν σε κλιματικούς ρυθμούς
- Το κλίμα οδηγεί σε ρυθμική ιζηματογένεση
- Άρα τα ιζήματα γίνονται φυσικό αρχείο των Milankovitch cycles

Astrochronology = η εφαρμογή της θεωρίας

- Η κυκλοστρωματογραφία “κουρδίζει” τα ιζηματογενή σήματα στις τροχιακές λύσεις (Laskar)
- Παράγει ηλικίες υψηλής ακρίβειας ($\pm 3\text{--}5$ ka)
- Χρησιμοποιείται στη χρονολόγηση Μεσοζωικού–Καινοζωικού και πέρα από 200 Myr



Η κυκλική στρωματογραφία μελετά περιοδικές μεταβολές στην ιζηματογένεση που προκαλούνται από αστρονομικούς κύκλους.

