

Μέθοδοι Χρονολόγησης (*Dating methods*)

Σχετική Χρονολόγηση

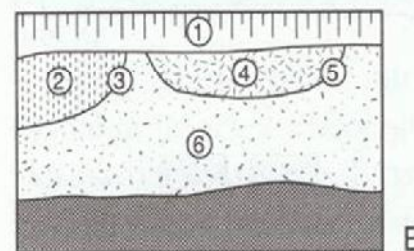
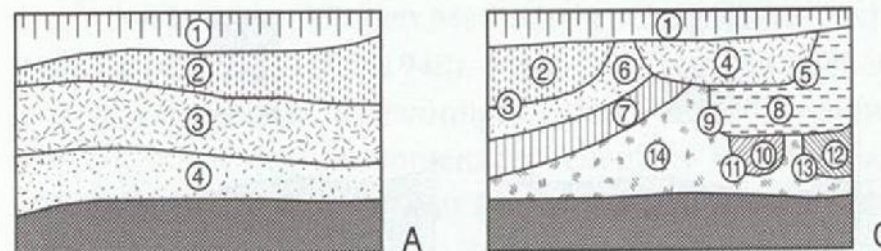
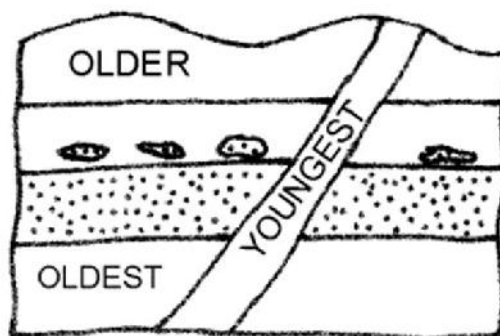
- Στρωματογραφία
- Τυπολογικές ακολουθίες
- Γλωσσολογική χρονολόγηση
- Κλιματική στρωματογραφία
- Παλυνολογία
- Ρακεμοποίηση

Απόλυτη Χρονολόγηση

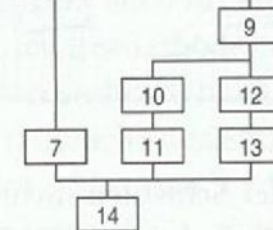
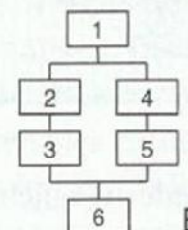
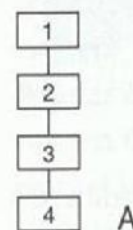
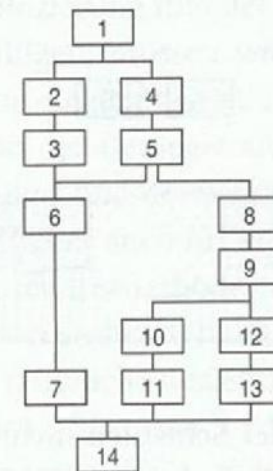
- Γραπτές πηγές
- Κάλιο/Αργό
- Δενδροχρονολόγηση
- Ραδιοχρονολόγηση
- Φωταύγεια
- Αρχαιομαγνητισμός
- Ενυδάτωση οψιανού
- Τροχιές σχάσης
- Αναλογία κατιόντων
- Σειρές ουρανίου-θορίου
- Συντονισμός στροφορμής ηλεκτρονίων

Στρωματογραφία (*Stratigraphy*)

- μελέτη και καταγραφή της διαστρωμάτωσης, δηλαδή της διαδικασίας εναπόθεσης των οριζόντων της ανασκαφής
- **αρχή της υπέρθεσης:** τα αρχαιότερα στρώματα είναι τα κατώτερα και τα νεότερα είναι τα ανώτερα
- **αρχή της συσχέτισης:** ένα εύρημα είναι σύγχρονο με άλλα ευρήματα που βρίσκονται στο ίδιο στρώμα

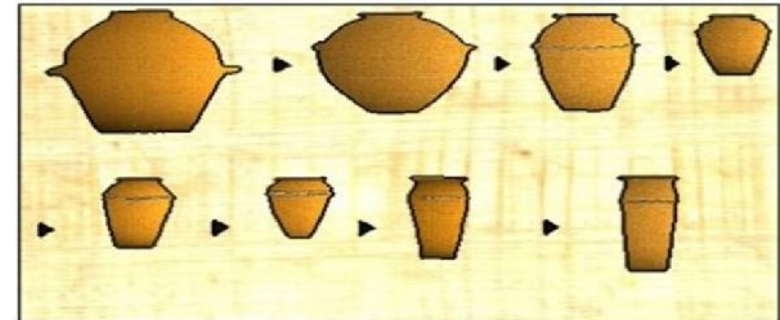


Harris matrix

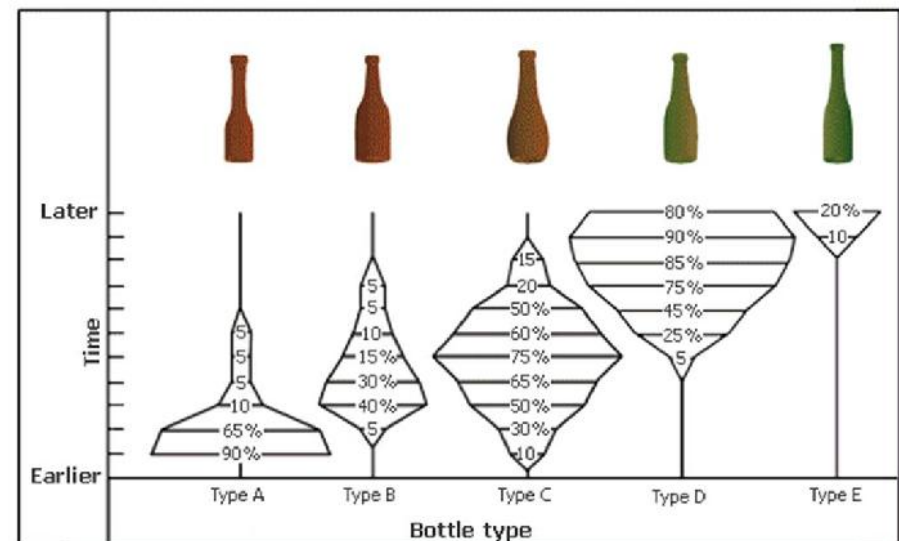


Τυπολογικές ακολουθίες (*Typology*)

- κατάταξη βάσει του περιβάλλοντος ταφής (***contextual seriation***), δηλαδή από το σχήμα και την διακόσμηση των διαφορετικών τύπων τεχνέργων



- κατάταξη βάσει της συχνότητας (***frequency seriation***) λόγω απουσίας εξωτερικής χρονολογικής πληροφορίας, στηριζόμενοι στη συχνότητα εμφάνισης αλλαγών ενός τύπου τεχνέργου



Γλωσσολογική χρονολόγηση (*Linguistic Dating*)

- στηρίζεται στη μεταβολή της γλώσσας βάσει της σύγκρισης λεξιλογίων συγγενικών γλωσσών
- η *λεξικοστατιστική* μελετά αλλαγές λεξιλογίου και απόκλισης γλωσσών
- ο **Morris Swadesh**, υπέρμαχος της μεθόδου υποστηρίζει ότι δυο συγγενικές γλώσσες διατηρούν ένα κοινό λεξιλόγιο κατά **86%** του πρωτότυπου μετά από μια περίοδο χωρισμού **1.000 ετών**
- λογική προσέγγιση αλλά επισφαλής

Κλιματική στρωματογραφία (*Climatostratigraphy*)

Πυρήνες μεγάλου θαλάσσιου βάθους (καρότα) που αντλούνται από τον βυθό του ωκεανού

- περιέχουν όστρεα τρηματοφόρων (***foraminifera***) που κατακάθονται στον πυθμένα μέσω της ιζηματογένεσης
- η αναλογία των δυο ισοτόπων ^{16}O , ^{18}O στο CaCO_3 των όστρεων δίνουν έναν δείκτη της θαλάσσιας θερμοκρασίας όταν οι μικροοργανισμοί ήταν ζωντανοί
- η καταγραφή παρέχει μια σχετική χρονολόγηση για το Πλειστόκαινο
- η ακολουθία των θερμοκρασιών εκτείνεται **2,3 Ma** πίσω δείχνοντας κλιματικές μεταβολές σε παγκόσμια κλίμακα

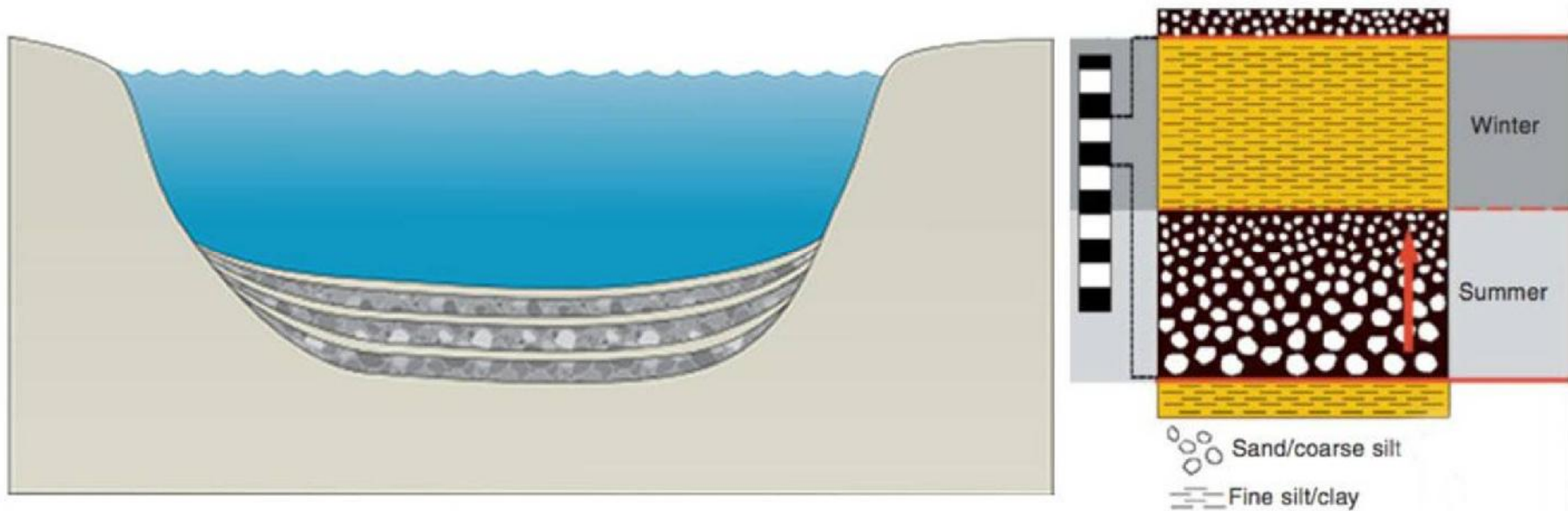
Πυρήνες πάγου

- συμβάλλουν στην ανασύσταση αρχαίων περιβαλλόντων και της χρονολόγησης
- ετήσιες εναποθέσεις στρωμάτων συμπαγούς πάγου στους παγετώνες της **Αρκτικής** και της **Ανταρκτικής** δίνουν πληροφορίες για τα τελευταία **2-3 ka**
- η λίμνη **Vostok** της Ανταρκτικής παρέχει πληροφορίες έως και **160 ka** πριν



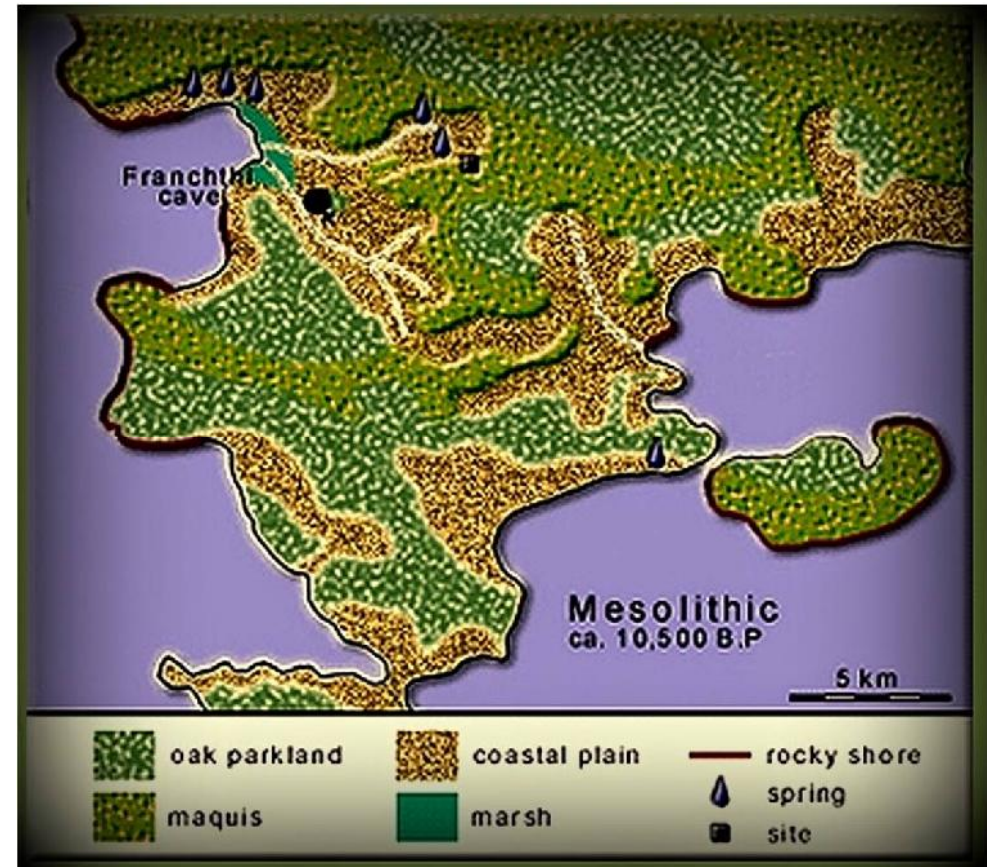
Ιζηματογενή στρώματα ταινιωτών αργίλων (*varves*)

- εναποτίθενται οριζόντια στον πυθμένα λιμνών μετά την τήξη των πάγων κάθε καλοκαίρι δημιουργώντας μια χρονική ακολουθία για κάθε περιοχή



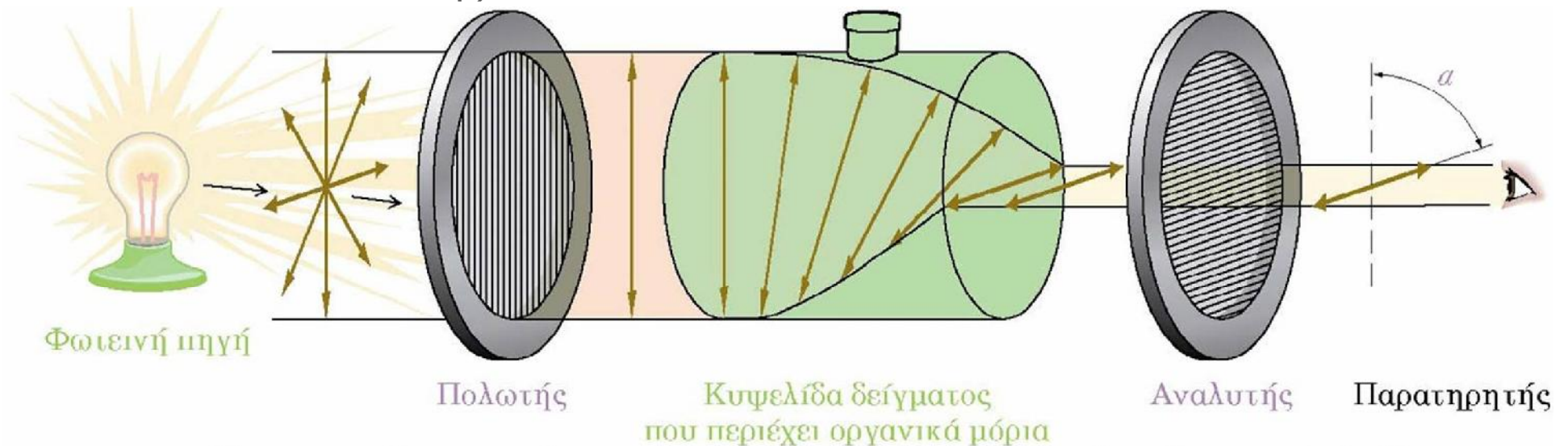
Παλυνολογία (*Palynology*)

- όλα τα ανθοφόρα φυτά παράγουν άφθαρτους κόκκους (γύρη)
- η ιζηματοποίησή τους σε λίμνες και έλη δημιουργεί χρονικές ακολουθίες παρέχοντας πληροφορίες για την ανασύσταση της βλάστησης κατά το παρελθόν και τις κλιματικές αλλαγές



Ρακεμοποίηση αμινοξέων (*Amino acid racemization*)

- όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί παράγουν πρωτεΐνες, δηλαδή μόρια σε μακρές αλυσίδες αποτελούμενες από αμινοξέα
- όταν δέσμη πολωμένου φωτός διέλθει από διάλυμα αμινοξέος στρέφεται το επίπεδο πόλωσης



Σχηματική αναπαράσταση ενός πολωσιμέτρου. Το πολωμένο στο επίπεδο φως διέρχεται από ένα διάλυμα οπτικώς ενεργών μορίων, το οποίο στρέφει το επίπεδο της πόλωσης.

- όταν το αμινοξύ του διαλύματος προέρχεται από οργανισμό χρόνια νεκρό παρατηρείται μείωση της οπτικής στροφικής ικανότητας (οπτική ενεργότητα)
- όσο αρχαιότερο είναι το αμινοξύ τόσο πιο αδύναμη η στροφή του επίπεδου της διερχόμενης δέσμης (**ρακεμοποίηση**)
- η ταχύτητα ρακεμοποίησης είναι διαφορετική ανά αμινοξύ
- υπολογισμός απόλυτης ηλικίας σπάνια εφικτός
- η τεχνική χρησιμεύει κυρίως στον υπολογισμό σχετικών χρονολογιών σε συγκεκριμένο αρχαιολογικό χώρο και σπάνια δίνει ακριβείς χρονολογίες
- χρησιμοποιείται ελάχιστο δείγμα από το αντικείμενο

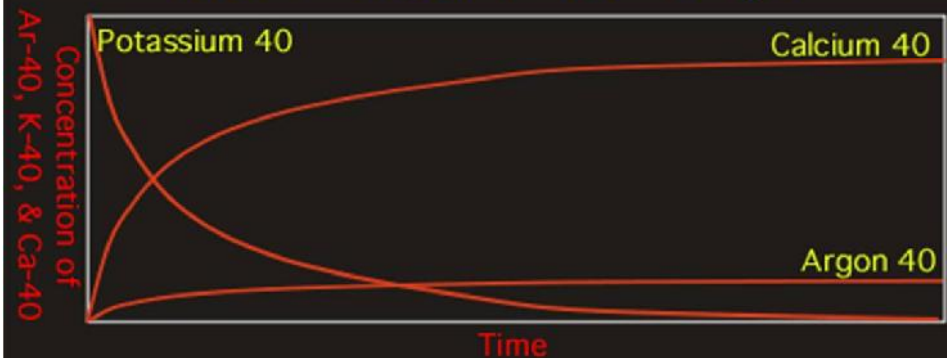
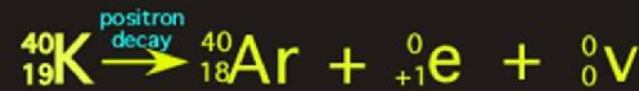
Γραπτές πηγές

- παρέχουν γραπτή ημερομηνία
- χρησιμοποιείται σε νομίσματα, παπύρους, βιβλία, μνημεία, αντικείμενα τέχνης, κ.α.
- η πιο πρόσφατη ημερομηνία χρονολόγησης δηλώνεται με τον όρο ***terminus post quem*** (ημερομηνία μετά της οποίας) δηλαδή ότι έπεται της αναγραφόμενης χρονολογίας
- ο όρος ***terminus ante quem***, (ημερομηνία προ της οποίας) δηλώνει την πρωιμότερη εξακριβωμένη ημερομηνία χρονολόγησης

Κάλιο/Αργό (K^{40} - Ar^{40})

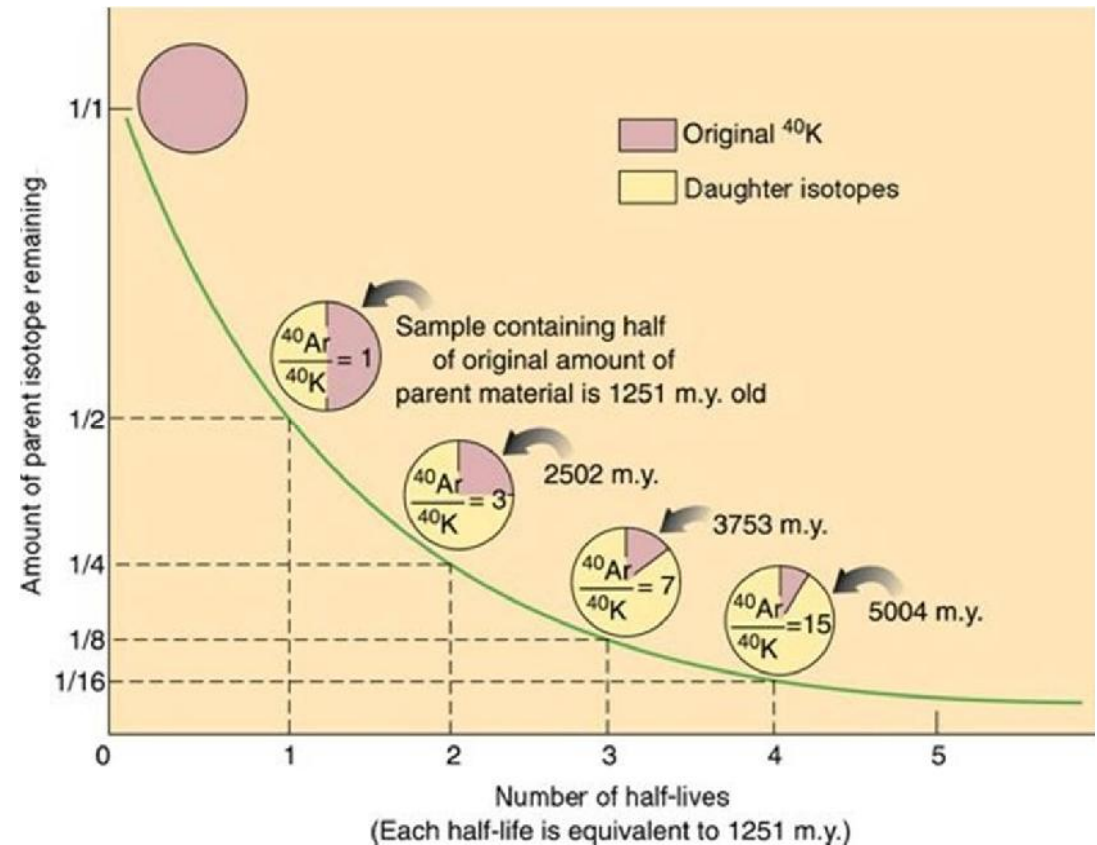
- το ^{40}K είναι ραδιενεργό ισότοπο του ^{39}K και υπάρχει σε ελάχιστη ποσότητα σε ορισμένες λάβες ηφαιστειών
- διασπάται αργά δίνοντας ^{40}Ar υπό μορφή αερίου και ^{40}C
- όταν η λάβα είναι σε υγρή κατάσταση, το αέριο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα
- όταν η λάβα στερεοποιείται, το K συνεχίζει να διασπάται αλλά το Ar δεν μπορεί πλέον να απελευθερωθεί και παγιδεύεται
- υπολογίζοντας την ποσότητα Ar στο πέτρωμα προκύπτει η ηλικία τήξης της λάβας και η έκρηξη του ηφαιστείου

Potassium, Argon, and Calcium Rate Changes



Argon 40 accumulates in the rock. Naturally occurring Ar 40 is assumed to have escaped when the rock was hot. Calcium 40 is produced in the rock but there is no way to make any measurements of the accumulating Ca 40. Naturally occurring Ca 40 would contaminate the measurements. Potassium 40 is used up in the rock. It breaks down into both Ar 40 & Ca 40.

- πολύ ακριβής μέτρηση, χρήσιμη για χρονολόγηση οστών και τεχνουργημάτων εγκλωβισμένων σε σκληρή ηφαιστειακή τέφρα (**Olduvai**: *Homo Habilis*, *Homo Erectus*)
- μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για θέσεις που θάφτηκαν από ηφαιστειακά πετρώματα
- σπάνια μπορεί να επιτύχει ακρίβεια μεγαλύτερη από **±10%**
- ρυθμός διάσπασης/χρόνος ημίσειας ζωής **1251 Ma**



Δενδροχρονολόγηση (*Dendrochronology*)

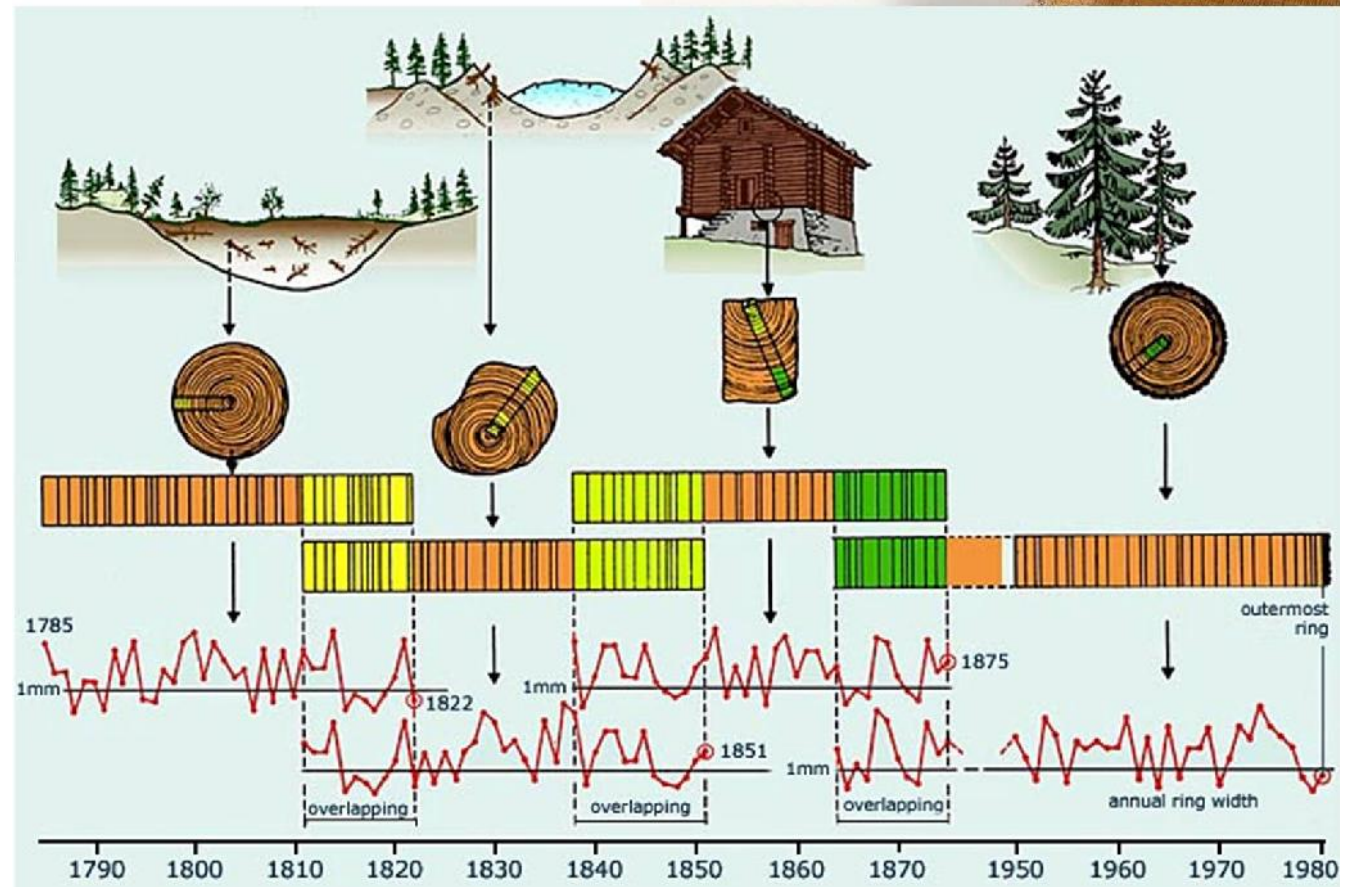
- κάθε έτος τα δέντρα παράγουν έναν δακτύλιο νέου ξύλου
- οι ετήσιοι κύκλοι ανάπτυξης εντοπίζονται με εγκάρσια τομή του κορμού
- ανομοιομορφία πάχους των δακτυλίων
- γίνονται στενότεροι με την αυξανόμενη ηλικία του δέντρου
- το μέγεθος ανάπτυξης του δέντρου επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις στο κλίμα
- σε ξηρές περιοχές, οι βροχοπτώσεις παράγουν παχύ δακτύλιο
- σε θερμές περιοχές, το ηλιακό φως και η θερμοκρασία ίσως το επηρεάζουν περισσότερο από τις βροχοπτώσεις, παράγοντας σε μια περίοδο ψυχρής άνοιξης έναν στενό δακτύλιο ανάπτυξης



- δέντρα ίδιου είδους της ίδιας περιοχής γενικά εμφανίζουν ίδιο σχέδιο δακτυλίων
- δεν είναι απαραίτητη η κοπή του δέντρου, γίνεται και με διάτρηση



- ο συνδυασμός αλληλουχίας δακτυλίων από ζώντα και παλαιά δέντρα δημιουργεί μια μακρά ακολουθία, ακόμη και χιλιάδες χρόνια πριν από σήμερα



Οι μακρές βασικές ακολουθίες και ο ραδιενεργός άνθρακας

- έλεγχος υπολογισμού των χρονολογιών του ^{14}C , συνδυάζοντας τις αλληλουχίες των ζώντων και παλαιών δέντρων
- διαφορετικές καμπύλες αναφοράς ανάλογα με την περιοχή και το είδος

Άμεση δενδροχρονολόγηση

- η αποκλειστική χρήση ξύλου ενός είδους σε μια περιοχή, διαμορφώνει δενδροχρονολογική ακολουθία, αποκτώντας απόλυτη χρονολόγηση σε συνδυασμό των διατηρημένων ξύλων και της κυρίαρχης ακολουθίας
- στην κεντρική και δυτική Ευρώπη μεγαλύτερες καμπύλες παρέχει η βελανιδιά (**6 ka** για Γερμανία και **3 ka** για Αγγλία)
- στην Αμερική η σεκόγια με χρόνο ζωής **3 ka** παρέχει συνεχής καμπύλη δενδροχρονολόγησης για **7 ka** από σήμερα
- στην Ευρώπη το μέγιστο όριο ζωής δέντρων είναι **0,3 ka** ενώ στην Αμερική είναι **3 ka** ή **4 ka**

Περιοριστικοί παράγοντες

- εφαρμόζεται μόνο σε δέντρα σε περιοχές εκτός των τροπικών (στον ισημερινό οι μικρές διακυμάνσεις των θερμοκρασιών και η συχνή βροχόπτωση δεν επιτρέπουν τη δημιουργία ακολουθίας)
- για άμεση δενδροχρονολόγηση, περιοριζόμαστε στο ξύλο από δέντρα που έχουν μια κυρίαρχη ακολουθία στο παρελθόν και οι άνθρωποι έκαναν χρήση

Η δενδροχρονολόγηση παράλληλα με τον ραδιενεργό άνθρακα αποτελεί την κυρίαρχη τεχνική χρονολόγησης για τα τελευταία 8 ka σε εύκρατες και ξηρές περιοχές



Ραδιοχρονολόγηση (*Radiocarbon Dating*)

- βασικό εργαλείο χρονολόγησης για τα τελευταία **50 ka**
- ο άνθρακας έχει τρία κύρια ισότοπα: ^{12}C , ^{13}C και ^{14}C
- ισότοπο: άτομο στοιχείου με ίδιο αριθμό πρωτονίων και διαφορετικό αριθμό νετρονίων στον πυρήνα του

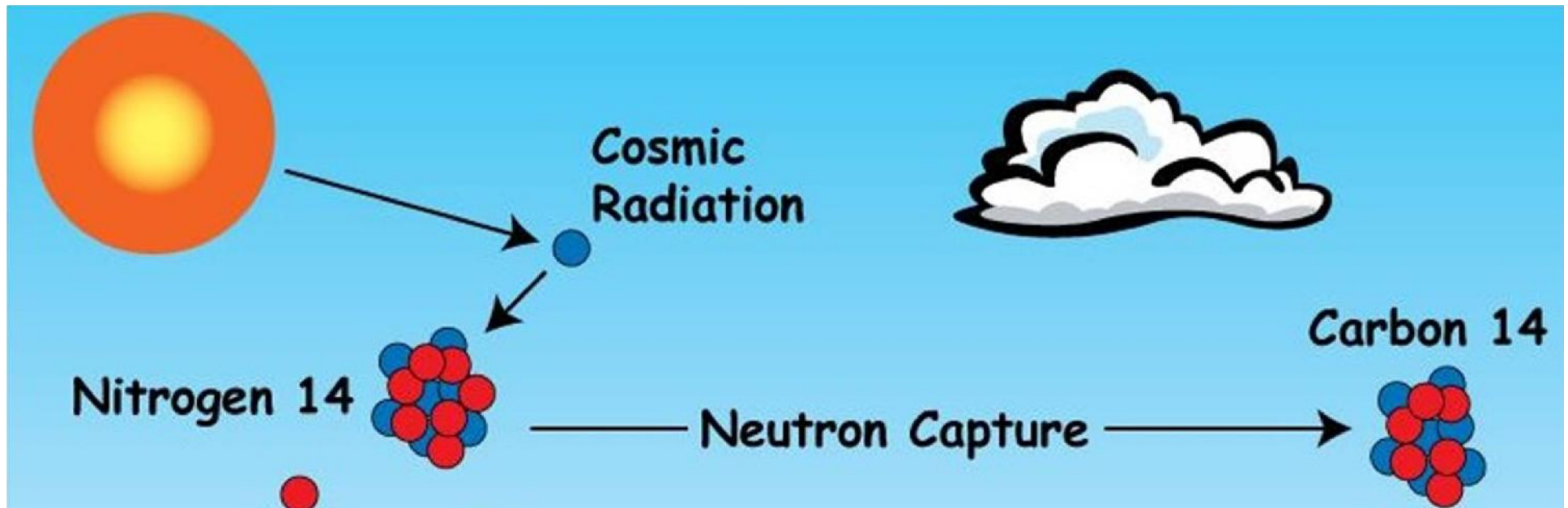
Ισότοπα

- Τα **ισότοπα** είναι άτομα του **ίδιου στοιχείου** που έχουν **διαφορετικό μαζικό αριθμό (A)**
- **Διαφορετικός αριθμός νετρονίων N**
- **Ίδιος ατομικός αριθμός Z** (αριθμός πρωτονίων/ηλεκτρονίων)
- Έχουν **ίδιες χημικές ιδιότητες**

Ισότοπα άνθρακα

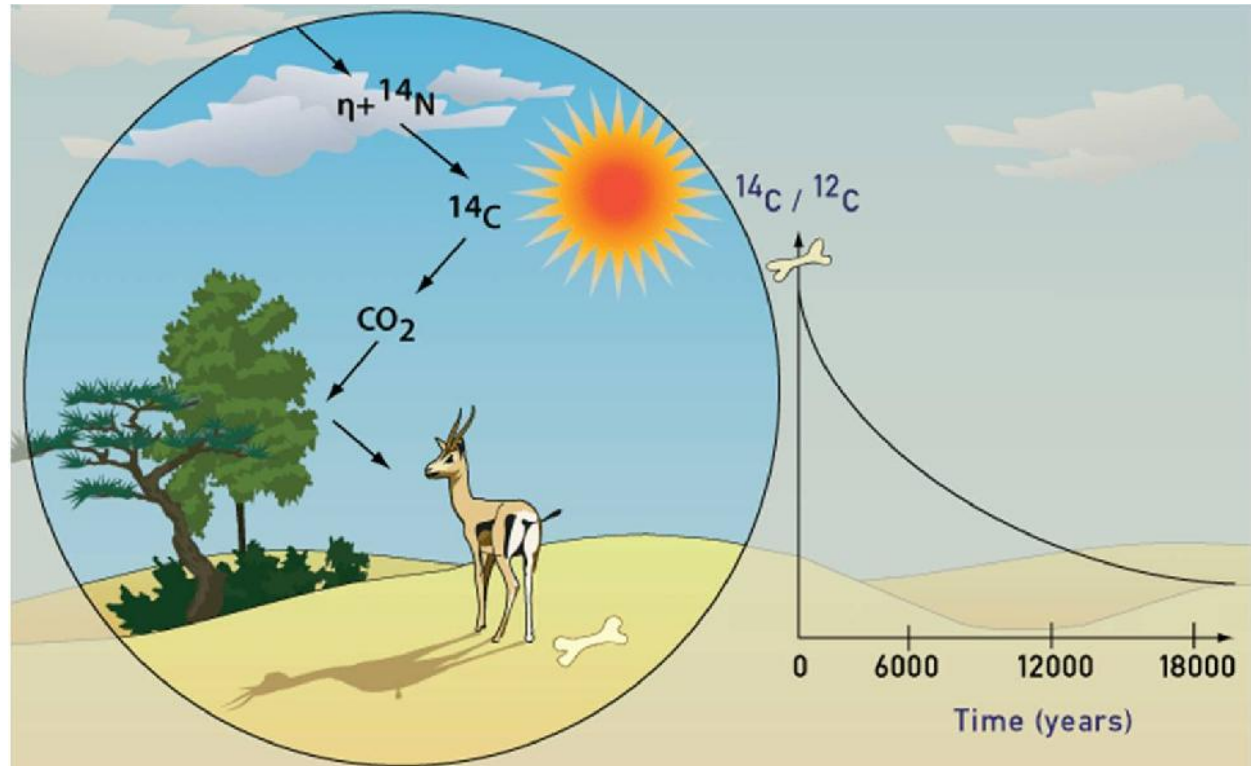
	6	Z	6	
	6	N	8	
	12	A	14	

$^{12}_6\text{C}$ $^{14}_6\text{C}$



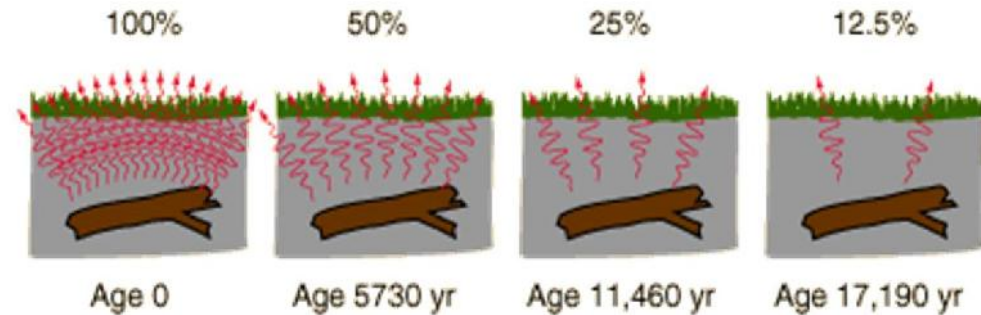
- ο ραδιενεργός ^{14}C παράγεται από την κοσμική ακτινοβολία στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας όταν νετρόνιο προσπίπτει σε άτομο ^{14}N και μετατρέπεται σε ^{14}C χάνοντας ταυτόχρονα ένα πρωτόνιο
- κοσμική ακτινοβολία (*cosmic rays*): υψηλής ενέργειας προσπίπτοντα σωματίδια από το διάστημα προερχόμενα από εκρήξεις μακρινών άστρων

- με τη μορφή CO_2 προσλαμβάνεται από τα φυτά και μέσω αυτών από τα ζώα και τον άνθρωπο
- μετά την απορρόφηση από τον έμβιο οργανισμό, τα ισότοπα ^{12}C , ^{13}C και ^{14}C εγκαθίστανται στον σκελετό ή στον οργανισμό
- μέρος του ^{14}C βρίσκεται στους ωκεανούς
- οι ^{12}C και ^{13}C είναι σταθεροί αλλά ο ^{14}C όχι
- ο ^{14}C δεν ανανεώνεται σε οργανισμό όταν παύσει να ζει
- η περιεκτικότητά του τείνει στο μηδέν διασπώμενα στον χρόνο
- σε **5730 χρόνια** τα μισά άτομα του ^{14}C θα έχουν απομείνει από την αρχική συγκέντρωση ενώ τα υπόλοιπα θα έχουν μεταστοιχειωθεί

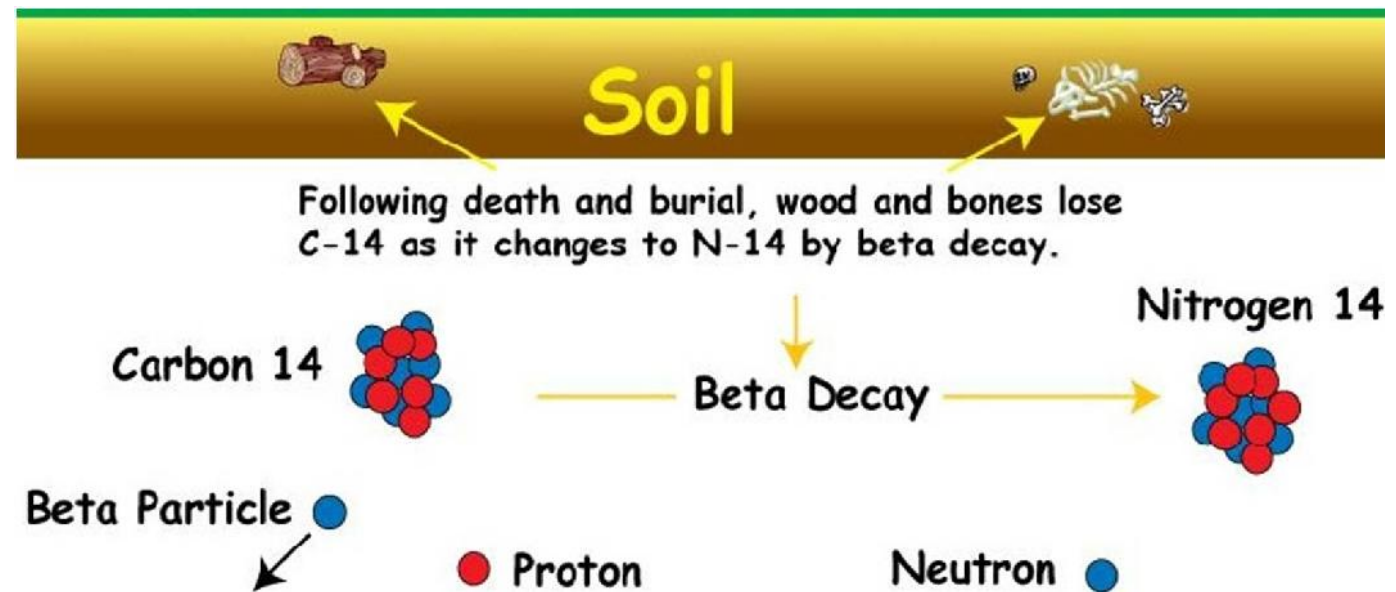


- ο χρόνος ημίσειας ζωής του ^{14}C είναι **5730 χρόνια**
- συγκρίνοντας την αρχική συγκέντρωση με την σημερινή υπολογίζουμε την ηλικία του δείγματος

Measurement of the beta decay activity of a buried piece of wood provides a measurement of the time elapsed since it was living and in equilibrium with the atmosphere.



- τα άτομα ^{14}C διασπώνται στο περιβάλλον και δίνουν ^{14}N εκπέμποντας παράλληλα ασθενή ακτινοβολία β



- αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο της Γης έχουν μεταβάλλει την συγκέντρωση του ^{14}C στην ατμόσφαιρα
- η δενδροχρονολόγηση παρέχει το μέσο για τη διόρθωση της χρονολόγησης με τον ραδιενεργό άνθρακα
- πριν το **1000 BCE** τα δέντρα (κατά συνέπεια όλοι οι οργανισμοί) ήταν εκτεθειμένα σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ^{14}C απ' ό,τι σήμερα
- γενικά, οι ηλικίες του ^{14}C αποκλίνουν περισσότερο πριν το **1000 BCE** ώστε από το **5000 BCE** η ηλικία του ^{14}C είναι **900 yr** νεότερη

Μόλυνση κατά τη δειγματοληψία

- νερό του εδάφους σε υγρές θέσεις αλλάζει την ισοτοπική σύνθεση
- σχηματισμός συμπαγών ορυκτών γύρω από οργανικές ουσίες μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία CaCO_3 όπου δεν περιέχει ^{14}C , αυξάνοντας εσφαλμένα την ηλικία του δείγματος

Μόλυνση κατά τη διάρκεια ή μετά τη δειγματοληψία

- αποκλεισμός παρουσίας οποιασδήποτε μορφής σύγχρονου C όπως είναι το χαρτί ή άλλου οργανικού υλικού
- απουσία φωτός και μούχλας για τον κίνδυνο φωτοσύνθεσης

Περιβάλλον εναπόθεσης

- ο ανασκαφέας δεν θα πρέπει να υποβάλλει ένα δείγμα για χρονολόγηση εκτός εάν είναι σίγουρος για το αρχαιολογικό του περιβάλλον

Χρονολόγηση περιβάλλοντος

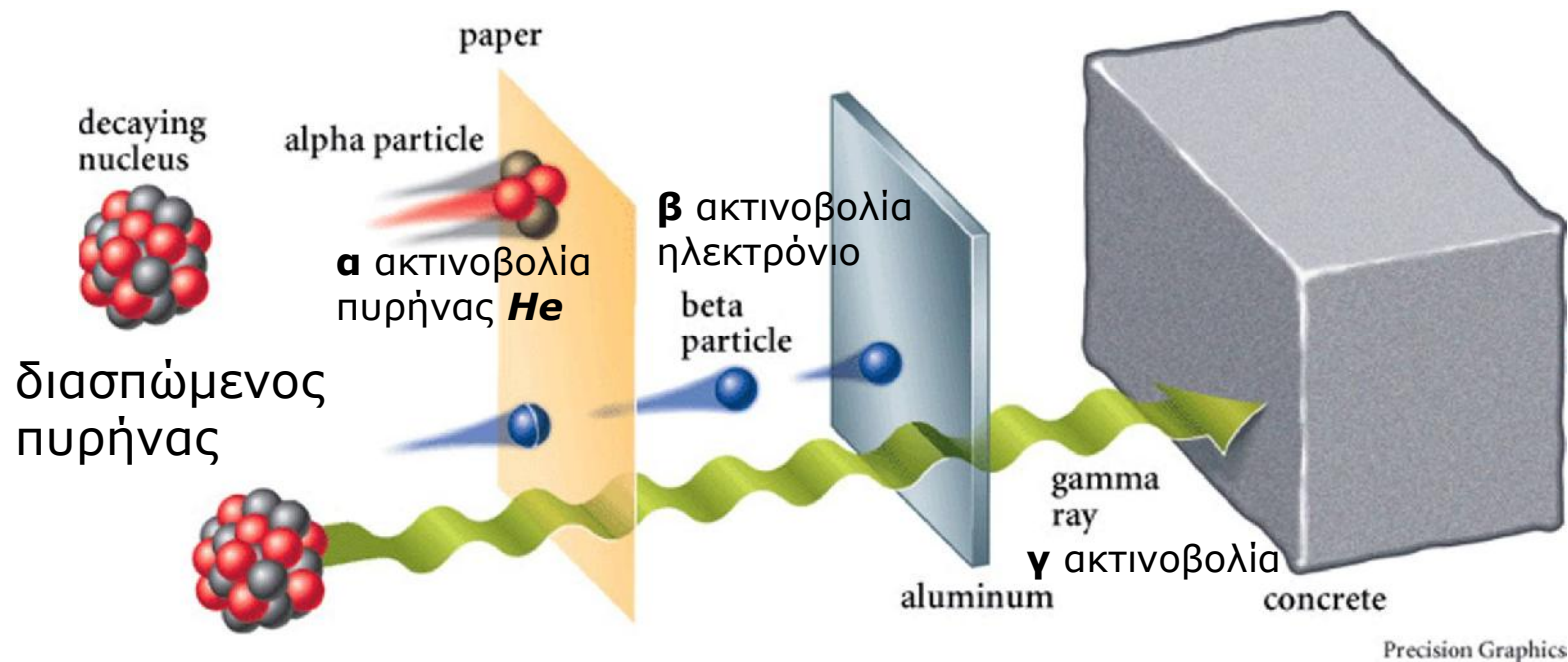
- συχνά γίνεται εσφαλμένη εκτίμηση δείγματος λόγω πολλαπλής χρήσης του κατά το παρελθόν, όπως ξύλινα δοκάρια οροφής
- προτιμώνται συχνά δείγματα με σύντομη διάρκεια ζωής, όπως οι απανθρακωμένοι κόκκοι δημητριακών ή κλαδιά θάμνων

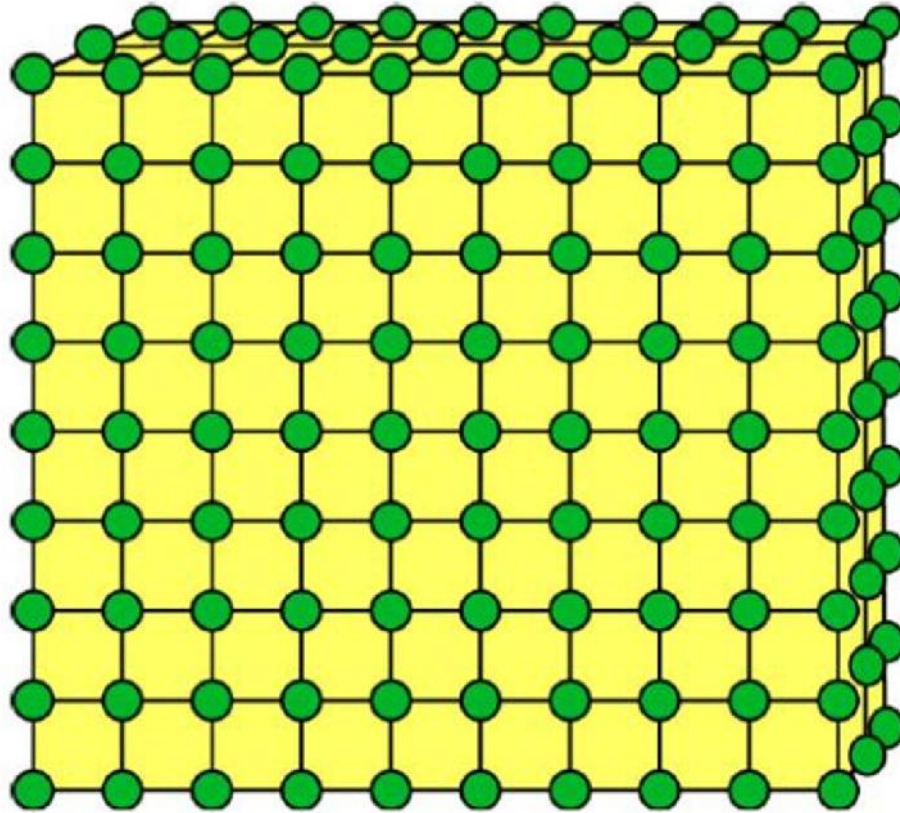
Στρατηγική δειγματοληψίας: *"μια χρονολόγηση ίσον καμία χρονολόγηση"*

- η μέθοδος του ραδιενεργού ^{14}C παραμένει σταθερά το κύριο εργαλείο χρονολόγησης οργανικών υλικών για **50-80 ka** πριν
- για ανόργανα υλικά η φωταύγεια αποδεικνύεται χρήσιμη

Φωταύγεια (*Luminescence*)

- υλικά με κρυσταλλική δομή, όπως η κεραμική (αγγεία και πηλός) ή το χώμα περιέχουν μικρή ποσότητα ραδιενεργών στοιχείων, κυρίως ουράνιο **U**, θόριο **Th** και ραδιενεργό κάλιο **K**
- διασπώνται με σταθερό ρυθμό εκπέμποντας ραδιενέργεια **α, β** και **γ**





Αγωγοί ρεύματος
Μέταλλα: κρυσταλλικό πλέγμα ιόντων
μετάλλου (●) και το νέφος ηλεκτρονίων
στα ενδιάμεσα κενά (■).

Μονωτές: Τα ηλεκτρόνια είναι
δεσμευμένα και δεν μπορούν να
κινηθούν εύκολα

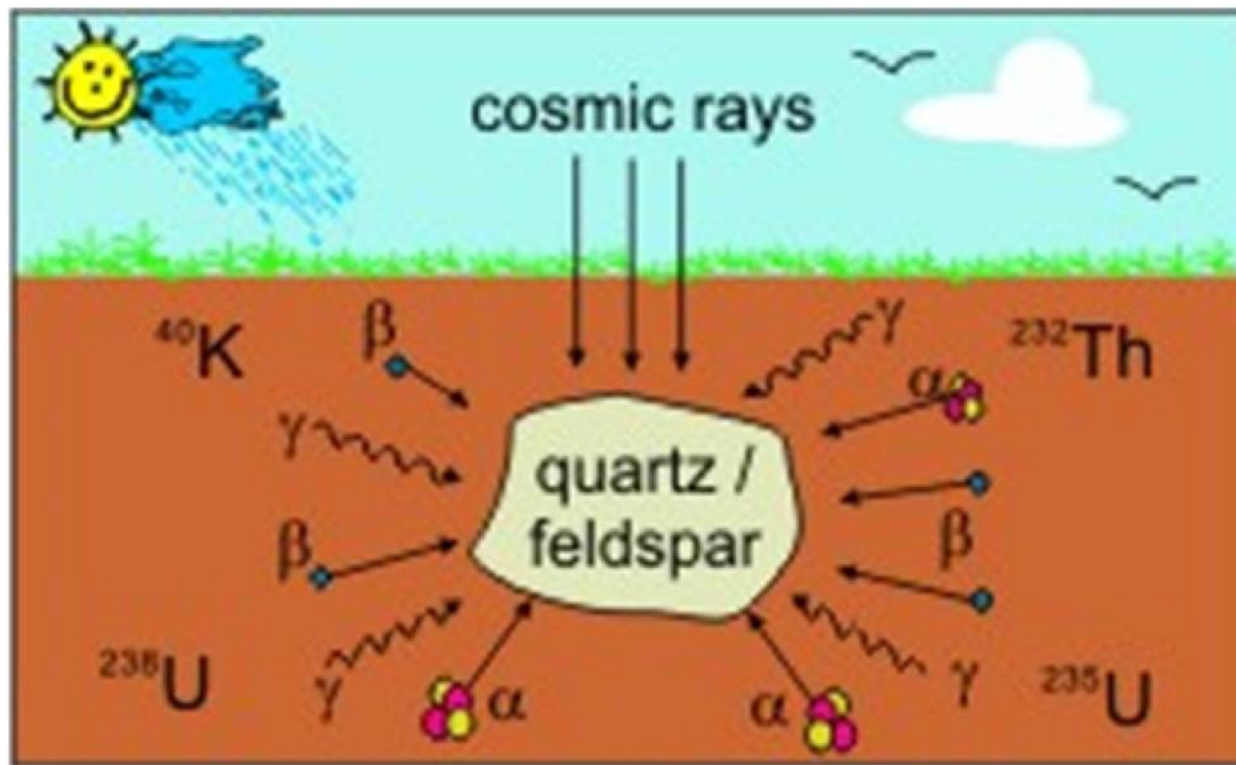
- οι ακτινοβολίες α , β , γ και η **κοσμική** βομβαρδίζουν τα άτομα χαλαζία (**quartz**) της κρυσταλλικής δομής του δείγματος μετατοπίζοντας τα ηλεκτρόνια από τις τροχιές τους γύρω από τους πυρήνες των ατόμων
- τα ηλεκτρόνια διαφεύγουν και στη συνέχεια παγιδεύονται σε σημεία ατέλειας του κρυσταλλικού πλέγματος

- με την πάροδο του χρόνου όλο και περισσότερα ηλεκτρόνια παγιδεύονται
- παραμένουν στις ενεργειακές παγίδες του πλέγματος για όσο διάστημα η θερμοκρασία δεν αυξάνεται
- στο εργαστηριακό περιβάλλον με τη μέθοδο της φωταύγειας τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια δέχονται ενέργεια
- η ενέργεια αποδεσμεύει τα ηλεκτρόνια από τις παγίδες και διαφεύγουν με ταυτόχρονη εκπομπή φωτός
- από την ανάλυση των δεδομένων προκύπτει η χρονολόγηση
- έχει προηγηθεί η μέτρηση της ραδιενέργειας που περιέχεται στο δείγμα (**συσσωρευμένη δόση -Dose**)
- το δείγμα υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους μετρήσεων όπου ακτινοβολείται βαθμηδόν με αυξανόμενες ακτινοβολήσεις
- με τις διαδοχικές μετρήσεις προκύπτει ο **ρυθμός δόσης-Dose Rate** (ανα χιλιετία), δηλαδή το πόσο γρήγορα απορρόφησε το δείγμα την ακτινοβολία μέχρι την ανασκαφή
- από τα δύο δεδομένα υπολογίζεται η ηλικία του δείγματος:

$$\text{Ηλικία(έτη)} = \frac{\text{Δόση(Gy)}}{\text{Ρυθμός Δόσης(Gy * ka}^{-1})} * 1000$$

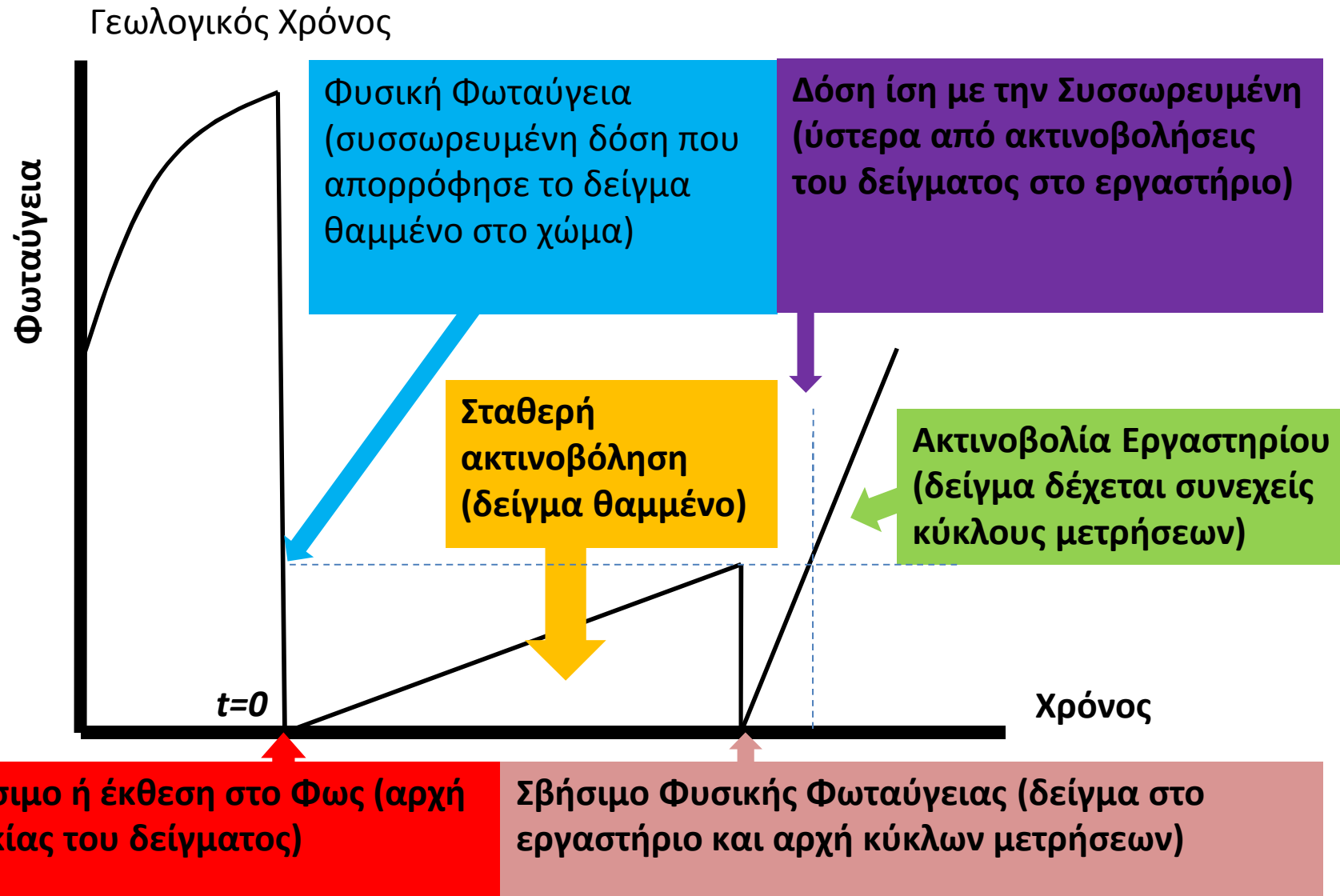
«Ρολόι Χρονολόγησης»

- η χρονική στιγμή που ξεκινά η χρονολόγηση του δείγματος
- π.χ. για τα κεραμικά **t=0** είναι η στιγμή του ψησίματος του πηλού από τον κεραμέα



- για ένα παλαιοέδαφος όταν δημιουργείται, οι κρύσταλλοι χαλαζία που βρίσκονται στην επιφάνεια εκτίθενται στην ηλιακή ακτινοβολία αποβάλλοντας την ενέργεια που έχουν αποθηκεύσει σε παλαιότερους γεωλογικούς χρόνους
- η επικάλυψη νέων στρωμάτων χώματος αυξάνει σταδιακά το φωταυγειακό σήμα με την απορρόφηση φυσικής ραδιενέργειας α, β, γ και κοσμικής ανάλογα με τον χρόνο ταφής.

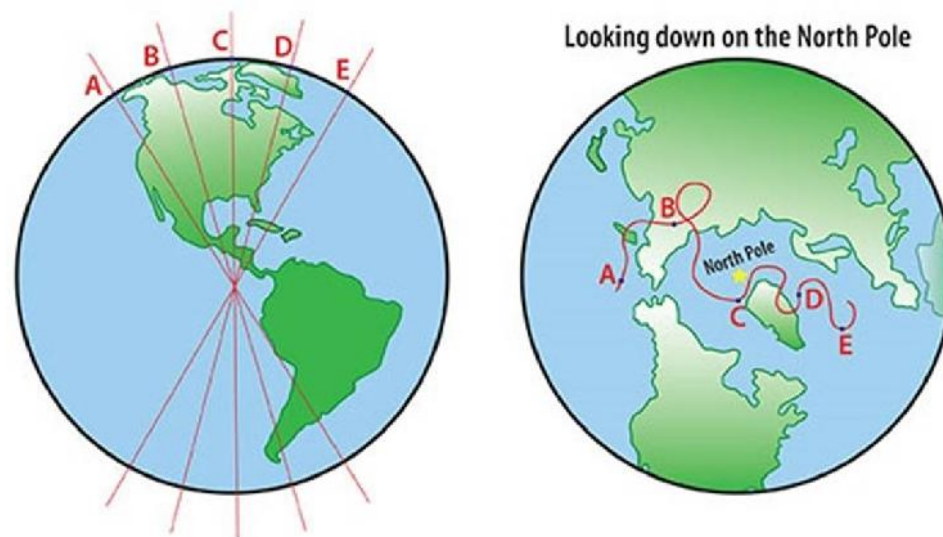
Διαγραμματική απεικόνιση του τρόπου συσσώρευσης της δόσης Φωταύγειας



- η μέθοδος της φωταύγειας είναι χρήσιμη όπου η ραδιοχρονολόγηση δεν είναι εφικτή, δηλαδή σε ανόργανα δείγματα όπως τα κεραμικά
- το εύρος χρονολόγησης φτάνει έως και **200 ka** πριν
- είναι ευαίσθητη μέθοδος γιατί απαιτείται το δείγμα να μην έχει υποστεί σημαντική ηλιακή εκθεση για τον κίνδυνο αποδέσμευσης των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στις παγίδες του κρυσταλλικού πλέγματος
- για τον ίδιο λόγο στο εργαστήριο οι μετρήσεις γίνονται υπό συνθήκες χαμηλού φωτισμού
- όπως και στη ραδιοχρονολόγηση το δείγμα υποβάλλεται σε χημική επεξεργασία
- πραγματοποιείται καθαρισμός του δείγματος από οργανικά υπολείμματα (επίδραση **H₂O₂**), ανθρακικών αλάτων (επίδραση **HCl**) και αστρίων (επίδραση **HF**)
- η ακρίβεια της χρονολόγησης κυμαίνεται στο **±10%**

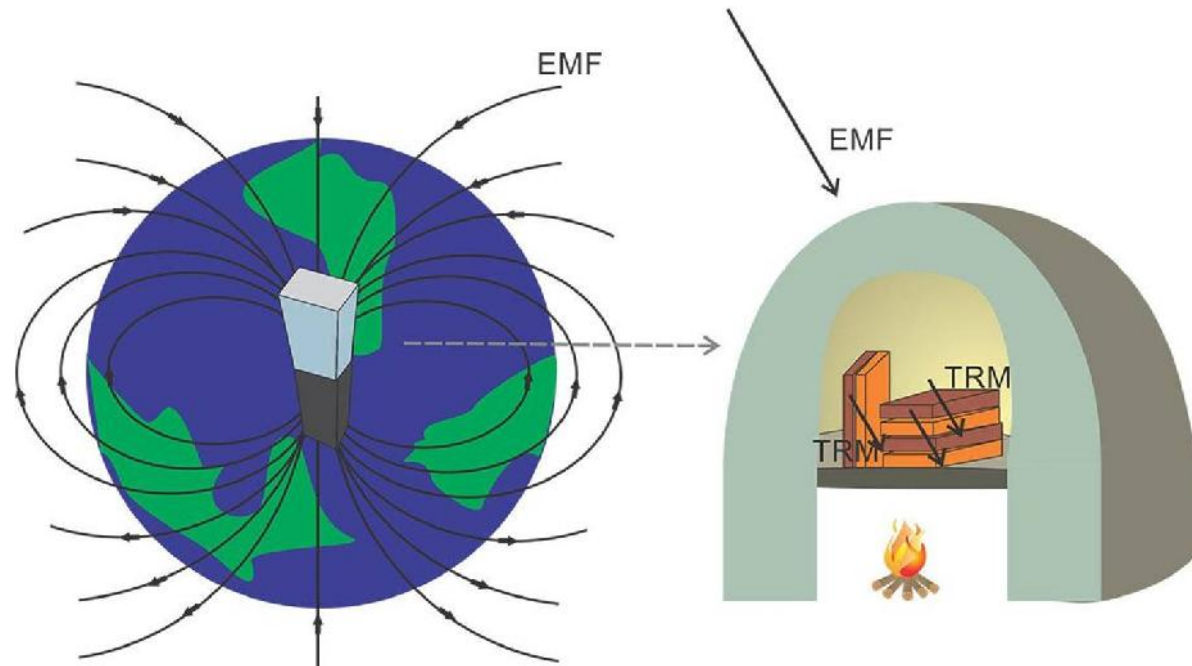
Αρχαιομαγνητισμός (*Archaeomagnetic dating*)

- το μαγνητικό πεδίο της Γης μεταβάλλεται συνεχώς σε ένταση και διεύθυνση
- ιστορικά αρχεία για τα τελευταία **400 χρόνια**
- μελέτη μαγνητικής ιδιότητας σε ψημένες πήλινες κατασκευές (φούρνοι, κλίβανοι, εστίες)

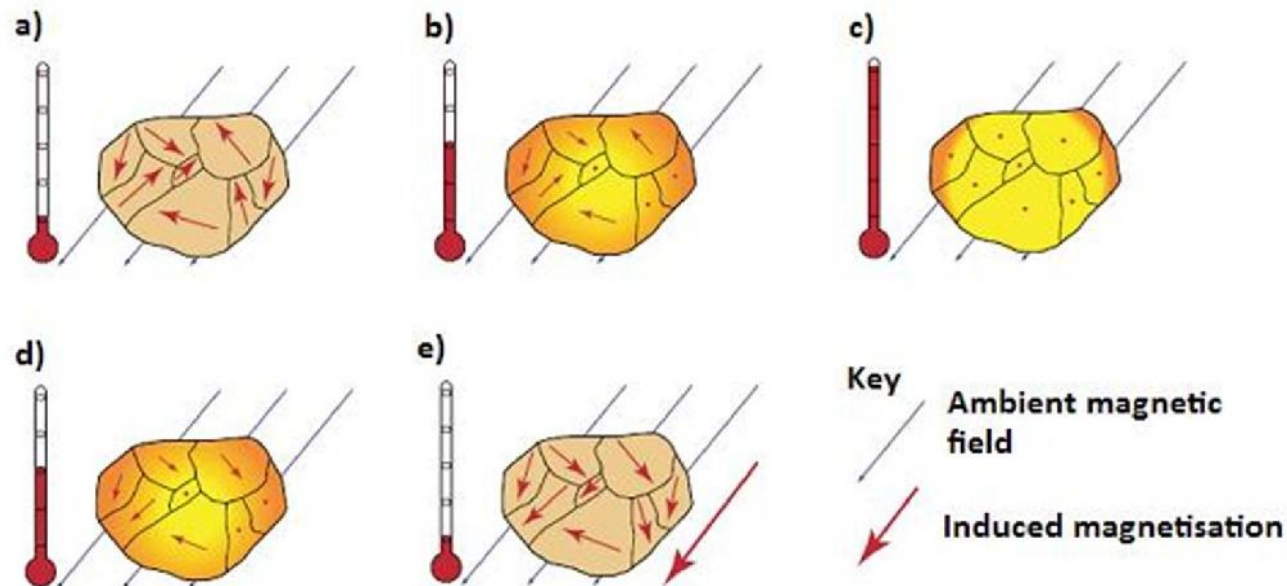


A–E represent different magnetic polar positions over time. The curved red line on the right represents a hypothetical portion of the archaeomagnetic reference curve.

- ο πηλός έχει ψηθεί στους **650°-700° C** και δεν έχει ξαναθερμανθεί, τότε τα μόρια του σιδήρου **Fe** αποκτούν την μαγνητική διεύθυνση και ένταση της Γης κατά τη στιγμή της όπτησης (**thermoremanent magnetism, TRM - θερμοπαραμένων μαγνητισμός**)



- συνδέεται με τις ιδιότητες του μαγνήτη και του αιματίτη που περιέχονται στο πηλό
- η άργιλος περιέχει περίπου **7%** οξείδια του σιδήρου (μαγνήτη και αιματίτη) με άτακτη διεύθυνση
- όταν ψηθεί το κεραμικό τα οξείδια χάνουν την μαγνήτισή τους
- όταν κρυώσουν αποκτούν την κατεύθυνση του μαγνητικού Βορρά και παραμένουν παγιδευμένα



- η σύγκριση της διεύθυνσης του μαγνητικού Βορρά σε διάφορες εποχές και των μορίων των οξειδίων στα υπολείμματα της αρχαίας αργίλου μας δίνει την χρονολόγηση του δείγματος
- ο **παλαιομαγνητισμός-paleomagnetism** ερευνά το μαγνητικό πεδίο της Γης και τις αναστροφές που έλαβαν χώρα από **100 ka** έως **5 Ma** πριν
- η μεθοδολογία και οι αρχές είναι ίδιες, μόνο που αντικείμενο μελέτης είναι τα ηφαιστειογενή πετρώματα
- αναστροφή μαγνητικού πεδίου της Γης πραγματοποιείται ανά **200 ka**

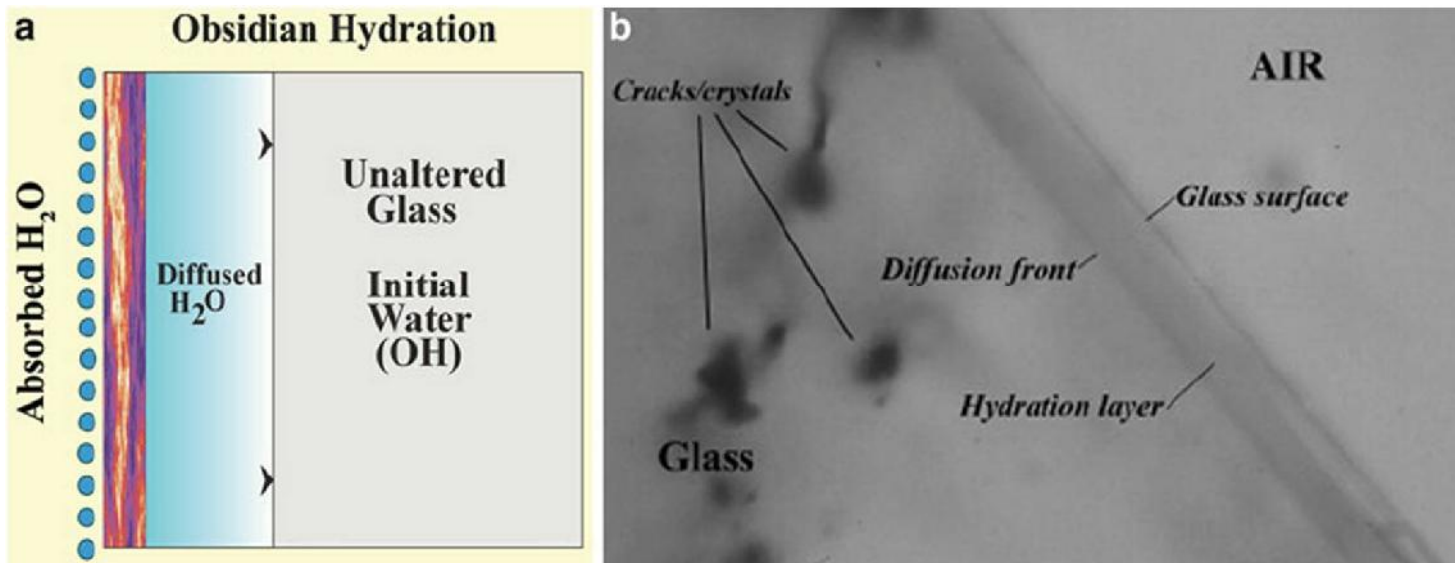
Περιοριστικοί παράγοντες

- τοπικές μεταβολές συνεπάγονται ξεχωριστή κύρια ακολουθία για κάθε περιοχή
- κλίβανος της χρονικής περιόδου που μετρήθηκαν **in situ** σε μια από αυτές τις περιοχές, χρονολογούνται με ακρίβεια
- όταν το κατασκεύασμα μετακινηθεί, η αρχαία μαγνητική διεύθυνση δεν μπορεί να συγκριθεί με τη σύγχρονη

Ενυδάτωση οψιανού (*Obsidian hydration*)

- αφορά υαλώδη αντικείμενα
- ορισμένα αρχαία γυαλιά εμφανίζουν διάβρωση και αφυδάτωση της επιφάνειας αποκτώντας ιριδισμούς
- ο αριθμός των στρώσεων στην κρούστα ενυδάτωσης είναι ανάλογος της ηλικίας του ευρήματος επειδή σχηματίζεται κάθε χρόνο ανάλογα με τις εποχιακές μεταβολές
- οψιανός: ηφαιστειογενές πέτρωμα με ιδιότητα να απορροφά πολύ αργά το νερό που το περιβάλλει
- όταν σπάσει, απορροφά νερό από το περιβάλλον και σχηματισμό ενός στρώματος ενυδάτωσης
- όσο περισσότερο είναι σε επαφή με την υγρασία, τον αέρα ή το χώμα, τόσο παχύτερη είναι γίνεται η κρούστα
- ο προϊστορικός άνθρωπος με κατεργασία αφαιρούσε το στρώμα ενυδάτωσης στην επιφάνεια του λίθου
- πάχος μερικών **mm**, οι επιστήμονες μετρούν μέσω μικροσκοπίου

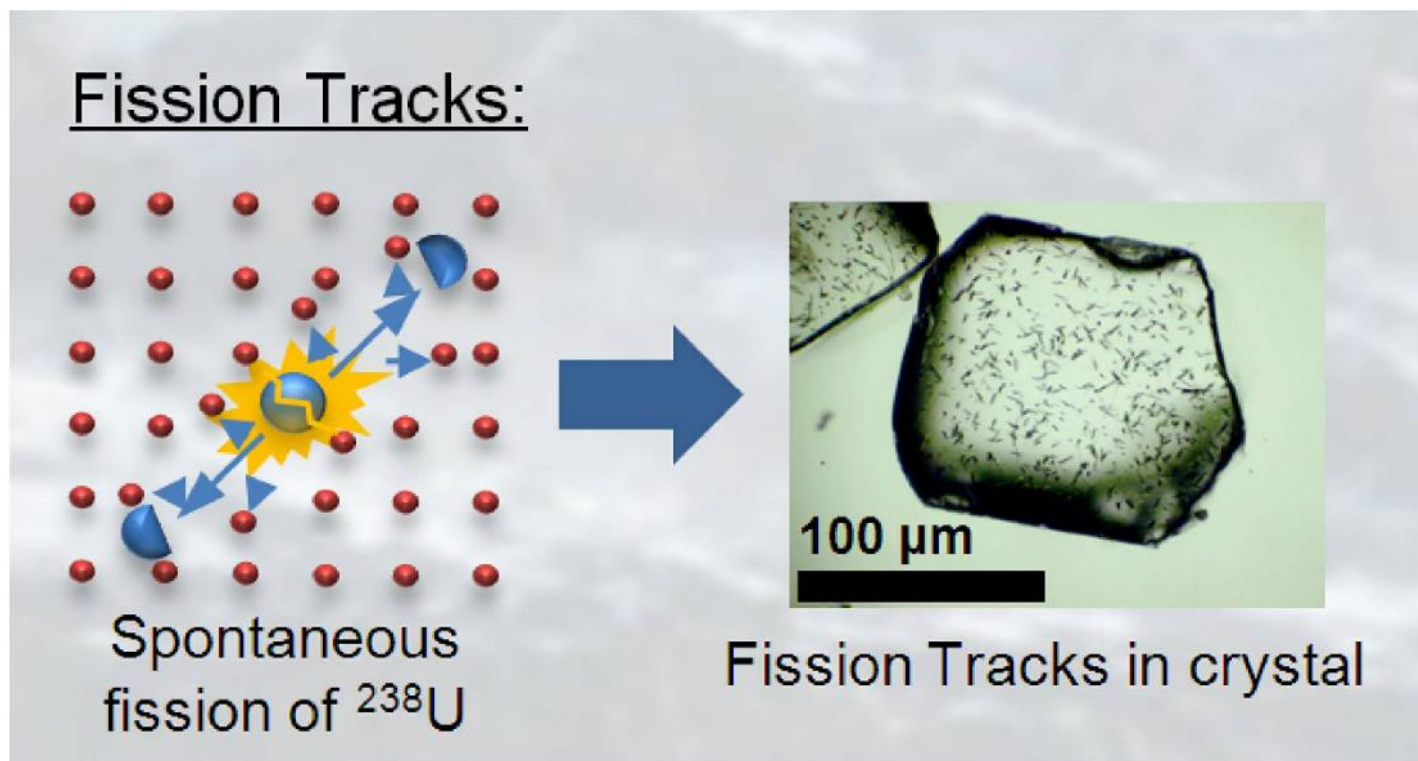
- χρονική στιγμή *μηδέν*, όταν η ζώνη ενυδάτωσης άρχισε να σχηματίζεται
- τότε το εργαλείο πρωτοδημιουργήθηκε με την αποκοπή του από το αρχικό κομμάτι οψιανού



- δεν υπάρχει παγκόσμιος αποδεκτός ρυθμός ανάπτυξης ή ενυδάτωσης
- εξαρτάται από τη θερμοκρασία
- η ηλιακή έκθεση αυξάνει την ενυδάτωση
- οψιανοί από διαφορετικά ορυχεία έχουν διαφορετικές χημικές συνθέσεις
- ένα μεμονωμένο τεχνούργημα δεν δίνει αξιόπιστη χρονολόγηση
- ασφαλέστερη η χρήση ενός συνόλου 10 περίπου κομματιών
- η μέθοδος είναι χρήσιμη στον προσδιορισμό σχετικών ηλικιών διαφόρων στρωμάτων σε μια περιοχή όπου ο οψιανός είναι άφθονος
- δίνει αποδεκτές χρονολογήσεις ακόμα και **120 ka** πριν

Τροχιές σχάσης (*Fission track dating*)

- το ^{238}U καθώς μειώνεται φυσικά σε ένα σταθερό ισότοπο του ουρανίου, χωρίζεται ενίοτε στη μέση (σχάση)
- η αυθόρμητη διαδικασία γίνεται αστραπιαία
- οι δυο νέους πυρήνες κινούνται εντός του πλέγματος του υλικού
- σταματούν προκαλώντας ρωγμές στις δομές



- σε φυσικά γυαλιά που περιέχουν ^{238}U , η καταστροφή καταγράφεται με τη μορφή γραμμών που ονομάζονται ρωγμές σχάσης
- οι τροχιές μετρώνται σε μικροσκόπιο αφού προηγηθεί χάραξη της γυαλισμένης επιφάνειας με οξύ για βελτίωση της παρατήρησης
- το ραδιενεργό ρολόι ρυθμίζεται στο μηδέν με το σχηματισμό του ορυκτού είτε φυσικά είτε τεχνητά
- η ποσότητα του ουρανίου καθορίζεται με τη μέτρηση μιας δεύτερης ομάδας τροχιών από τη τεχνητή διάσπαση του ^{235}U
- η αναλογία $^{238}\text{U} - ^{235}\text{U}$ είναι γνωστή, οπότε υπολογίζεται έμμεσα η ποσότητα του ^{238}U
- γνωρίζοντας τον ρυθμό σχάσης του ^{238}U , συγκρίνουμε τον αριθμό των τροχιών που προκλήθηκαν με την ποσότητα του ^{238}U στο δείγμα
- χρήσιμη μέθοδος για πρώιμες παλαιολιθικές θέσεις όταν η μέθοδος $^{40}\text{K}-^{40}\text{Ar}$ δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί
- εφαρμόσιμη εύκολα σε φυσικώς δημιουργημένα υλικά, όπως η ελαφρόπετρα και ο οψιανός ή ορυκτά με υψηλή περιεκτικότητα σε ουράνιο (ζιρκόνιο και απατίτης)
- χρονικό εύρος από **300 ka** έως **5 Ma**
- σε μικρότερες ηλικίες προτιμότερη η φωταύγεια
- σφάλμα της τάξης του **10%** σε πλήθος **100** τροχιών

Αναλογία κατιόντων (*Cation ratio dating*)

- άμεση χρονολόγηση των ανάγλυφων παραστάσεων και των εγχαράξεων σε βράχο
- στην έρημο δημιουργείται επίχρισμα στην επιφάνεια των βράχων που είναι εκτεθειμένοι στη σκόνη της ερήμου
- τα κατιόντα συγκεκριμένων στοιχείων είναι πιο διαλυτά από άλλα στοιχεία
- αφαιρούνται πιο εύκολα από το επίχρισμα του βράχου με την πάροδο του χρόνου
- μετράται η αναλογία των ευμετάβλητων στοιχείων, όπως του **K**, **Ca** ως προς τα πιο σταθερά κατιόντα του **Ti**
- η αναλογία μειώνεται εκθετικά
- δεν υπάρχει ένας απόλυτος ρυθμός μείωσης
- η μέθοδος πρέπει να βαθμονομηθεί για την εκάστοτε περιοχή με χρήση άλλων μεθόδων χρονολόγησης

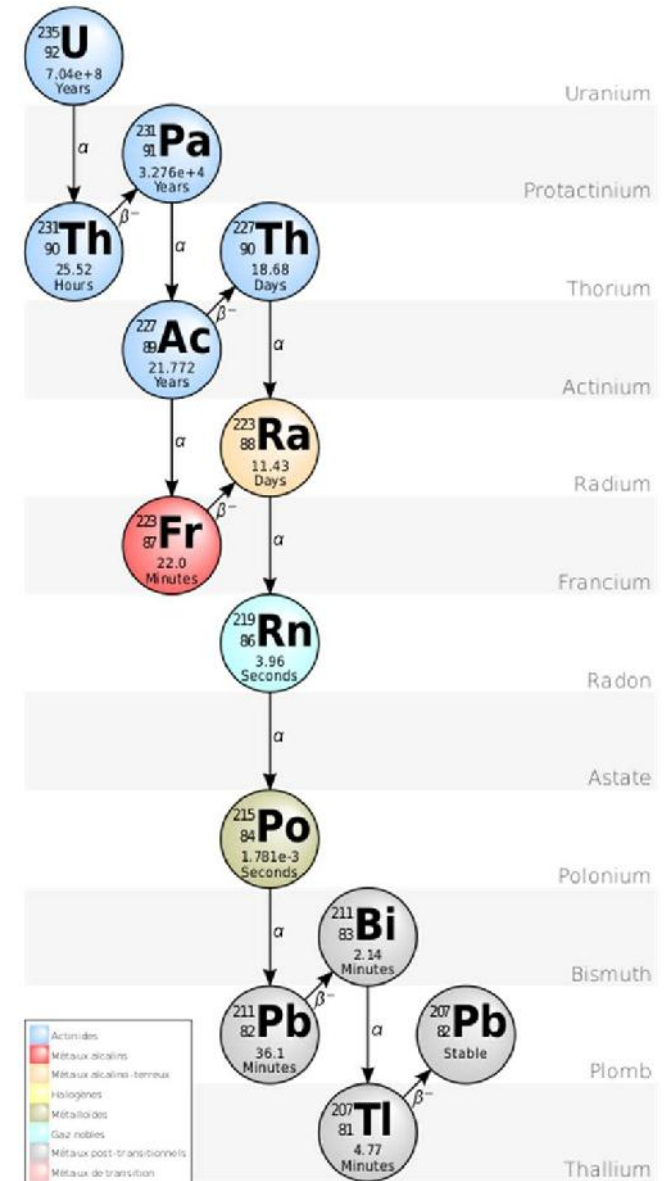
Περιοριστικοί παράγοντες

- δεν έχει ευρεία εφαρμογή
- δεν έχει διασαφηνιστεί σε ποιες κλιματικές συνθήκες το επίχρισμα μπορεί να υποστεί ζημιές ή να καταστραφεί

Εύρος χρονολόγησης: περίπου έως **10 ka** πριν

Σειρές U-Th (*Uranium-thorium dating*)

- δυο ραδιενεργά ισότοπα του ουρανίου, ^{238}U , ^{235}U διασπώνται βαθμιαία σε θυγατρικά στοιχεία
- τα θυγατρικά ^{230}Th και ^{231}Pa μειώνονται με ημιζωές χρήσιμες για χρονολόγηση
- το ουράνιο είναι διαλυτό σε νερό ενώ τα θυγατρικά όχι
- μόνο ισότοπα του ουρανίου υπάρχουν σε ύδατα ασβεστολιθικών σπηλαίων
- όταν τα ύδατα καθιζάνουν, σχηματίζοντας CaCO_3 τα θυγατρικά προϊόντα παγιδεύονται με τα γονικά ισότοπα
- όσο μεγαλύτερη ποσότητα θυγατρικών τόσο μεγαλύτερη η ηλικία του τραβερτίνη (CaCO_3)
- ποσότητα **100 g** αρκετή για δείγμα

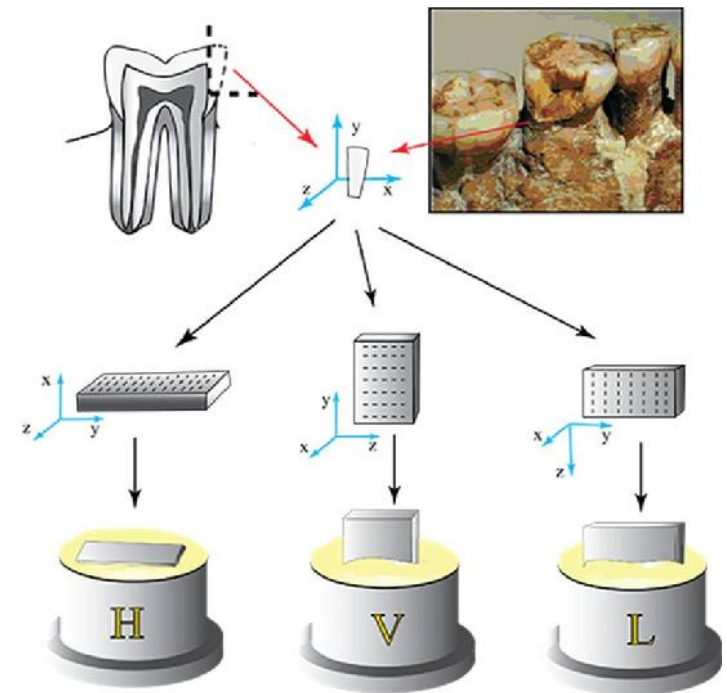


Περιοριστικοί παράγοντες

- δυσκολία καθορισμού σωστής σειράς αποθέσεων σε σπήλαιο πιθανώς να δώσει ασαφή αποτελέσματα
- εύρος χρονολόγησης δείγματος από **10 ka** έως **500 ka** πριν
- χρήση εναλλακτικών μεθόδων (φωταύγεια) για έλεγχο των αποτελεσμάτων

Συντονισμός στροφορμής ηλεκτρονίων (*Electron Spin Resonance dating-ESR*)

- μέθοδος που διευκολύνει τα παγιδευμένα ηλεκτρόνια μέσα σε όστρεα ή οστά να μετρηθούν χωρίς την τεχνική της φωταύγειας
- όπως και στη φωταύγεια, ο αριθμός των παγιδευμένων ηλεκτρονίων υποδηλώνει την ηλικία του δείγματος
- το δείγμα τοποθετείται σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο
- η απορροφούμενη ενέργεια εντός μεταβλητής έντασης αποδίδει φάσμα όπου μετράται το πλήθος των παγιδευμένων ηλεκτρονίων
- μη καταστροφική τεχνική σε αντίθεση με την φωταύγεια
- ελάχιστη ποσότητα δείγματος **< 1 g**
- λιγότερο ευαίσθητη από φωταύγεια
- χρήσιμη για μέτρηση δειγμάτων οστών και δοντιών
- εύρος χρονολόγησης δείγματος από **10 ka** έως **1 Ma**



Βιβλιογραφία

- Βέλκος Γεώργιος. 2014, *Μαγνητικός χαρακτηρισμός αρχαιομαγνητικών δειγμάτων*, πτυχιακή εργασία, Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο
- Dincauze Dena. 2000, *Environmental Archaeology, principles and practice*, New York: Cambridge University Press
- Greene Kevin, Moore Tom. 2010 (5th ed.), *Archaeology, an introduction*, New York: Routledge
- Ζαχαριάς Νίκος. 2008, *Φωταύγεια, απόλυτες χρονολογήσεις και δοσιμετρία υλικών*, Αθήνα: Time Heritage
- Καραλή Λίλιαν. 2005, *Περιβαλλοντική Αρχαιολογία*, Αθήνα: Καρδαμίτσα
- Παππάς Ιωάννης. 2017, *Χρονολόγηση δειγμάτων χώματος και κονιαμάτων από τον αρχαιολογικό χώρο στο Βαθύ Αστυπάλαιας με τη μέθοδο της Οπτικά Προτρεπόμενης Φωταύγειας (Optically Stimulated Luminescence--OSL)*, εργασία, Ιωάννινα: Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων
- Πολυμέρης Σ. Γεώργιος, 2006, *Ανίχνευση χρονικώς ολοκληρωμένων χαμηλών δόσεων με τη μέθοδο της θερμοφωταύγειας και της οπτικώς προτρεπόμενης φωταύγειας*, διδακτορική διατριβή, Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο

- Renfrew Colin, Bahn Paul. 2001, *Αρχαιολογία, θεωρίες, μεθοδολογία και πρακτικές εφαρμογές*, Αθήνα: Καρδαμίτσα
- Serway Raymond, Moses J.Clement, Moyer A.Curt. 2004, *Σύγχρονη Φυσική*, Ηράκλειο: ΠΕΚ
- Young D. Hugh. 1994, *Πανεπιστημιακή Φυσική, δεύτερος τόμος,, Οπτική, Σύγχρονη Φυσική*, Αθήνα: Παπαζήση

Με βάση τα όσα συζητήθηκαν στο μάθημα και αναφέρονται στην παρουσίαση αυτή να προσδιορίσετε και να σχολιάσετε τις μεθόδους χρονολόγησης που έχουν (ή θα μπορούσαν να έχουν) χρησιμοποιηθεί στην ανασκαφή του Ακρωτηρίου Θήρας.