

# ΧΡΟΝΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΟΦΩΤΑΥΓΕΙΑ-ΟΠΤΙΚΑ ΠΡΟΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΦΩΤΑΥΓΕΙΑ

Δρ Νέστωρ Τσιολιγκάνης



**ATHENA**

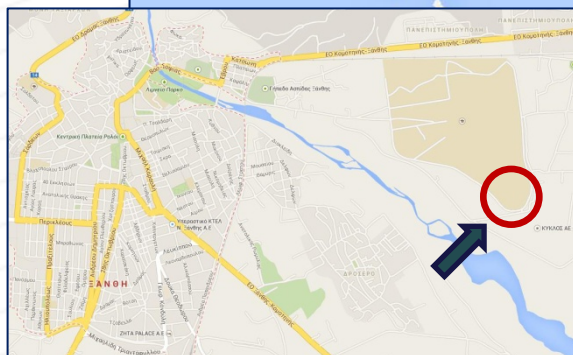
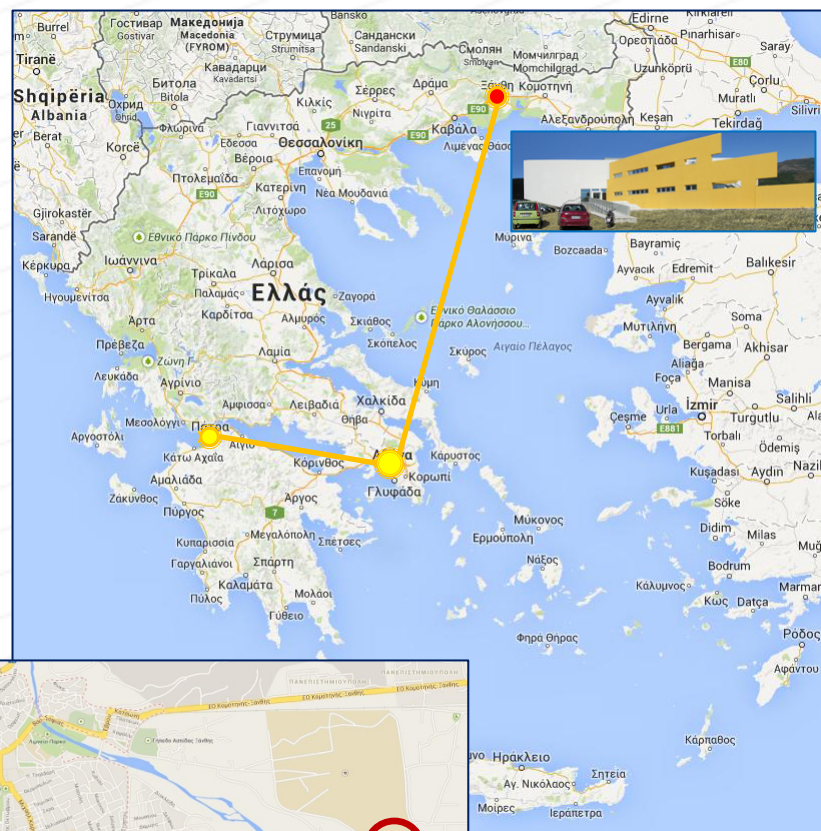
Research & Innovation  
Information Technologies



# ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ «Αθηνά»

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΞΑΝΘΗΣ

- Το 1998 ιδρύθηκε στην Ξάνθη το Ινστιτούτο Πολιτιστικής και Εκπαιδευτικής Τεχνολογίας (ΙΠΕΤ) ως ανεξάρτητο ινστιτούτο υπό την αιγίδα της ΓΓΕΤ
- Το Νοέμβριο του 2003 το ΙΠΕΤ εντάχθηκε στο Ερευνητικό Κέντρο «Αθηνά»
- Το Φεβρουάριο του 2012 συγχωνεύθηκε με το ΙΕΛ του Ερευνητικού Κέντρου «Αθηνά» και λειτουργεί ως Παράρτημα με έδρα την Ξάνθη
- Σκοπός: η ενίσχυση των ερευνητικών και τεχνολογικών δραστηριοτήτων και η εφαρμογή των νέων τεχνολογιών στους τομείς των ανθρωπιστικών επιστημών, του πολιτισμού και της εκπαίδευσης





# Εργαστήριο Αρχαιομετρίας και Φυσικοχημικών Μετρήσεων

- Το *Εργαστήριο Αρχαιομετρίας και Φυσικοχημικών Μετρήσεων* του Ε.Κ. «Αθηνά» ιδρύθηκε το 1999 (τότε ως Εργαστήριο Αρχαιομετρίας του Ι.Π.Ε.Τ.) με στόχο την προώθηση της επιστημονικής έρευνας στο πεδίο της αρχαιομετρίας και την κάλυψη των αναγκών των ενδιαφερομένων φορέων με εξειδικευμένο επιστημονικό προσωπικό, εγκαταστάσεις και εξοπλισμό.
- Στην παρούσα φάση λειτουργίας του Εργαστηρίου ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στη μελέτη κεραμικών αντικειμένων και πηλών (χρονολόγηση, σύσταση, οργανικά υπολείμματα κ.λπ.)



# Τεχνογνωσία – Έρευνα – Υπηρεσίες

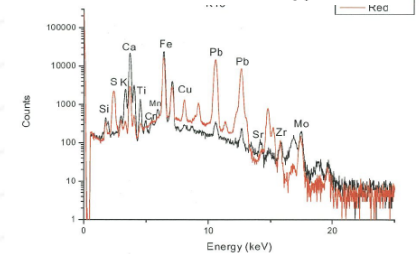
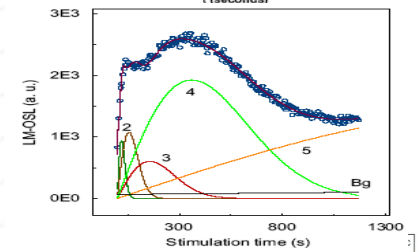
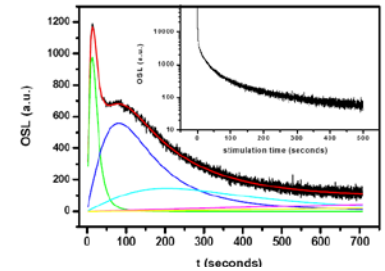
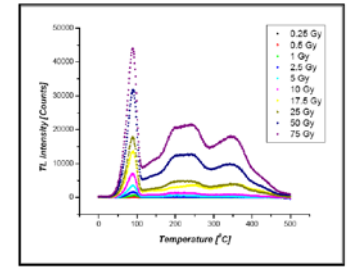
- Χρονολογήσεις και έλεγχος αυθεντικότητας κεραμικών και γεωλογικών υλικών με μεθόδους TL και OSL (διάφορες τεχνικές: λεπτών κόκκων, προσθετικής δόσης, μεγάλων κόκκων, IRSL, Blue OSL, απλού και πολλαπλού δείγματος).
- Στοιχειακές αναλύσεις κεραμικών και ανόργανων υλικών :
  - Χημικές αναλύσεις (AAS)
  - Μικρο-φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων-Χ (μ-XRF, δυνατότητα μη καταστροφικής σημειακής επιφανειακής ανάλυσης)
- Πετρογραφικές αναλύσεις κεραμικών (XRD)
- Ηλεκτρονική μικροσκοπία (variable pressure SEM)
- Ψηφιακή ραδιογραφία ακτίνων-Χ αντικειμένων και έργων τέχνης
- Αναλύσεις οργανικών υπολειμμάτων (LC-MS-MS)
- Στερεομικροσκοπική και πολυφασματική μελέτη αντικειμένων και έργων τέχνης
- Ψηφιοποιήσεις αντικειμένων και χώρων σε δύο και τρεις διαστάσεις (σε συνεργασία με την «ΚΛΕΨΥΔΡΑ», μονάδα υποστήριξης για την Ψηφιοποίηση του Πολιτιστικού Αποθέματος)





# Εργαστηριακές Υποδομές

- TL/OSL χρονολόγηση υλικών
- Στοιχειακές αναλύσεις υλικών
  - ✓ Ατομική απορρόφηση (AAS)
  - ✓ Μικρο-φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων-Χ (μ-XRF)
- Αναλύσεις οργανικών ουσιών
  - ✓ Γρήγη χρωματογραφία με φασματογραφία μαζών (LC-MS-MS)
- Ορυκτολογικές αναλύσεις
  - ✓ Φασματοσκοπία περίθλασης ακτίνων-Χ (XRD)
- Ηλεκτρονική μικροσκοπία (SEM) με μικροανάλυση
  - ✓ EDS
  - ✓ WDS
  - ✓ EBSD
- Ψηφιακή ραδιογραφία ακτίνων-Χ





# Περιεχόμενο μαθήματος...

- Γενικά περί χρονολόγησης
- Διάφοροι μέθοδοι χρονολόγησης
- Χρονολόγηση TL/OSL
  - Βασικές αρχές
  - Μεθοδολογία μέτρησης
  - Εφαρμογή
- Επιλεγμένες εφαρμογές
- Βιβλιογραφία



# Ορολογία...

- **Χρονολόγηση:** ο καθορισμός της χρονολογίας, η τοποθέτηση των γεγονότων μέσα στον χρόνο για την κατανόηση της ροής και της αλληλουχίας τους.
- **Χρονολογία:** 1. ο χρονικός προσδιορισμός γεγονότος σε σχέση με άλλο σημαντικό γεγονός, φυσικό ή ιστορικό, το οποίο λαμβάνεται ως αφετηρία, 2. η χρονική στιγμή κατά την οποία συνέβη κάτι, το έτος και η ημερομηνία συμβάντος, γεγονότος, φαινομένου κ.λπ.
- **Χρονολόγηση (αρχαιομετρικός ορισμός):** ο προσδιορισμός του χρόνου που παρήλθε από τη χρονική στιγμή τέλεσης ενός συμβάντος, γεγονότος, φαινομένου κ.λπ. (π.χ. κατασκευή, θάνατος, φυσικό φαινόμενο κ.λπ.)
- **Χρονική αφετηρία (χρόνος μηδέν):** η χρονική στιγμή τέλεσης του συμβάντος, γεγονότος, φαινομένου κ.λπ.
- **Ηλικία (αρχαιομετρικός ορισμός):** η χρονική διάρκεια από την χρονική αφετηρία έως την στιγμή της χρονολόγησης (μέτρησης). Η «αρχαιομετρική» ηλικία συμπίπτει με την «πραγματική» μόνον όταν η χρονική αφετηρία είναι το γεγονός της γένεσης και η στιγμή της χρονολόγησης είναι το παρόν.



# Κατηγοριοποίηση μεθόδων χρονολόγησης

- **Σχετική χρονολόγηση.**

Το αντικείμενο χρονολογείται σε σχέση και σύγκριση με άλλα αντικείμενα που έγιναν πριν ή μετά από αυτό ή το περιβάλλον (π.χ. στρωματογραφία, τυπολογία κ.λπ.). Δεν δίνουν ηλικία σε ημερολογιακά έτη.

- **Απόλυτη χρονολόγηση.**

Το αντικείμενο χρονολογείται με ακρίβεια με βάση αρχαιολογικές και ιστορικές πληροφορίες ή με επιστημονικές μεθόδους (π.χ. επιγραφές, νομίσματα, θερμοφωταύγεια, C-14 κ.λπ.). Δίνουν ηλικία σε ημερολογιακά έτη.

- **Μετρήσεις-χρονολογήσεις με επιστημονικές μεθόδους.**

Το αντικείμενο χρονολογείται με μετρήσεις χρονικά εξαρτώμενων-εξελισσομένων φυσικών ή χημικών διαδικασιών που συμβαίνουν στο υλικό.

- ο **Ανεξάρτητες μέθοδοι:** δεν στηρίζονται σε άλλες μεθόδους ή μετρήσεις για να δώσουν την ηλικία (π.χ. θερμοφωταύγεια κλπ)
    - ο **Εξαρτημένες μέθοδοι:** στηρίζονται σε άλλες μεθόδους ή μετρήσεις για να δώσουν την ηλικία (π.χ. αρχαιομαγνητισμός κλπ)





# Αρχές Επιστημονικών Μεθόδων Χρονολόγησης

- Χρονο-εξαρτώμενες φυσικές και χημικές διαδικασίες που οδηγούν σε ποσοτικά προσδιοριζόμενες αλλαγές είναι κατάλληλες για μετρήσεις χρόνου.
- Η χρονική εξάρτηση των διαδικασιών αυτών πρέπει να είναι γνωστή.
- Επιπλέον απαίτηση για τον προσδιορισμό της ηλικίας ενός γεωλογικού ή αρχαιολογικού γεγονότος είναι η ύπαρξη σύμπτωσης ανάμεσα στο γεγονός και την αρχή της χρονο-εξαρτώμενης διαδικασίας.
- Τυπικές χρονο-εξαρτώμενες διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για χρονολόγηση:
  - Ραδιενέργεια
  - Κινητική χημικών αντιδράσεων
  - Μεταβολή του γήινου μαγνητικού πεδίου
  - Διαδικασίες που προκαλούνται από κλιματικές αλλαγές



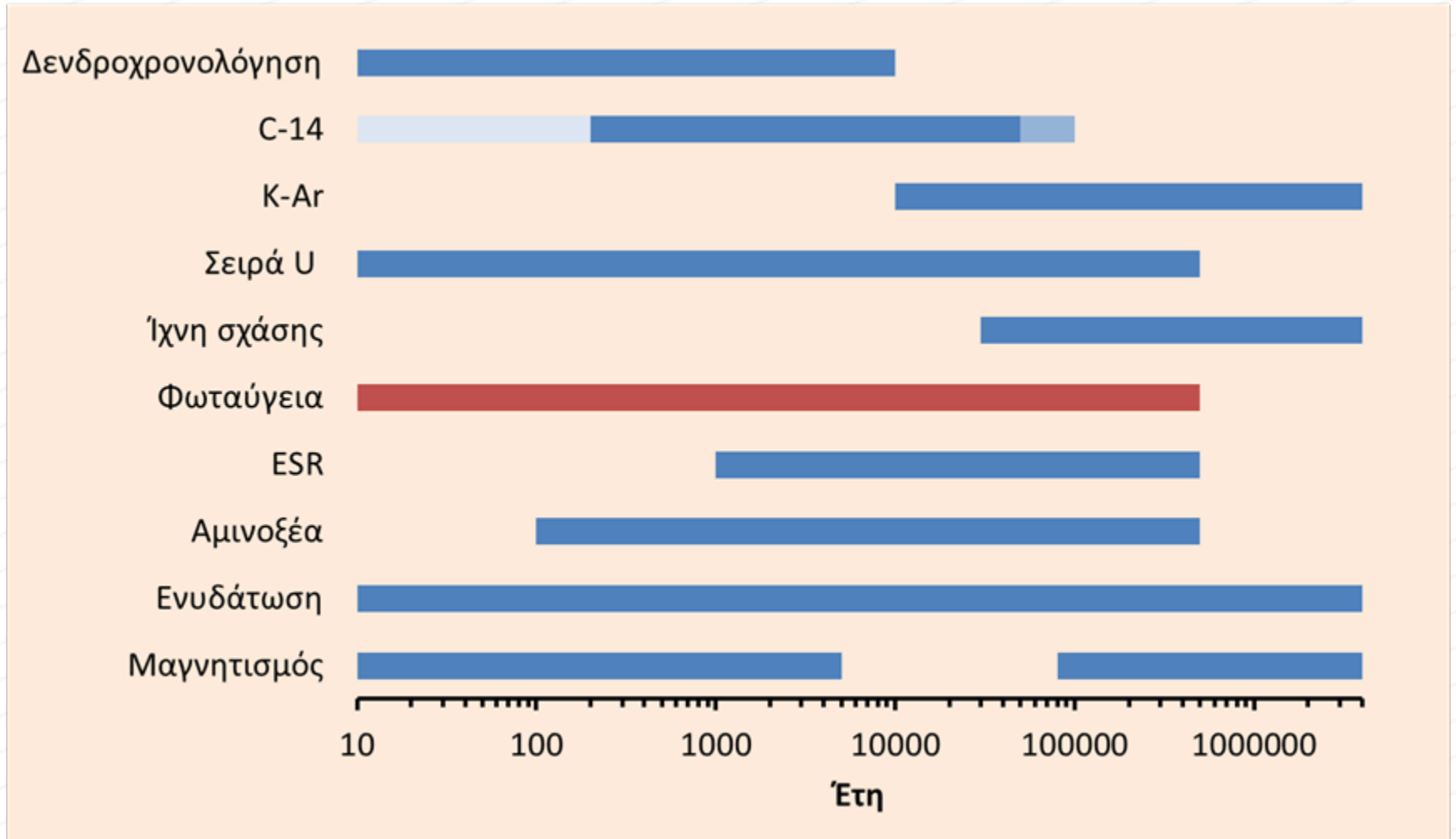
# Μέθοδοι χρονολόγησης

## Μέθοδοι που στηρίζονται:

- Σε ραδιογενή στοιχεία:
  - C-14
  - K-Ar
- Σε ραδιενεργές διασπάσεις:
  - Σειρά Ουρανίου
  - Ίχνη σχάσης
- Στη δοσιμετρία:
  - Φωταύγεια (TL / OSL)
  - ESR
- Φυσικοχημικές διεργασίες:
  - Ενυδάτωση οψιδιανού
  - Ρακεμοποίηση αμινοξέων
- Γεωλογικές διεργασίες:
  - Αρχαιομαγνητισμός / Παλεομαγνητισμός
- Βιολογικές διεργασίες:
  - Δενδροχρονολόγηση



# Ηλικίες χρονολόγησης





# Δενδροχρονολόγηση 1



Η χρονολόγηση γεγονότων στο παρελθόν μέσω της μελέτης της ανάπτυξης των δακτυλίων των δέντρων

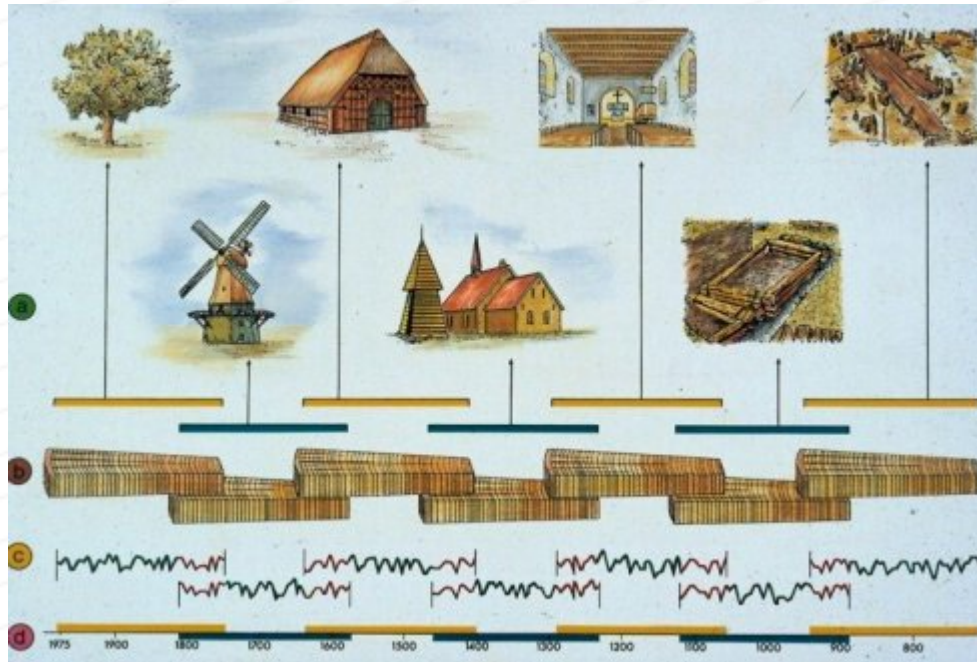
**Αρχή :** Κάθε χρόνο ένα δέντρο προσθέτει ένα στρώμα ξύλου στον κορμό του σχηματίζοντας έναν επιπλέον δακτύλιο. Τα δέντρα σε μια συγκεκριμένη κλιματική περιοχή επηρεάζονται όμοια από τις ετήσιες κλιματικές αλλαγές, οπότε τα πάχη των δακτυλίων τους αναμένεται να κυμαίνονται αντίστοιχα.







## Δενδροχρονολόγηση 2



Μπορούμε δηλαδή να ταιριάξουμε αυτές τις διαδοχές δακτυλίων ανάμεσα σε δύο δέντρα και να αντιστοιχίσουμε σε αυτές συγκεκριμένη ακολουθία ημερολογιακών ετών.

Με τον τρόπο αυτό, αν συγκρίνουμε ένα άγνωστης ηλικίας ξύλο με κάποιο γνωστής ηλικίας και ταιριάξουμε τους δακτυλίους τους, μπορούμε να υπολογίσουμε την χρονολογία κοπής, του άγνωστης ηλικίας δέντρου.



## Δενδροχρονολόγηση 3

Η διασταυρωμένη χρονολόγηση είναι θεμελιώδης αρχή της δενδροχρονολόγησης. Απαιτείται η επιβεβαίωση ότι οι δακτύλιοι από δύο ή περισσότερα δείγματα σχηματίστηκαν τον ίδιο χρόνο.

Ανάλογα με το σκοπό της χρονολόγησης το δείγμα θα πρέπει να φέρει δακτυλίους μέχρι τον φλοιό.

Η δενδροχρονολόγηση είναι η μόνη αρχαιομετρική τεχνική που μπορεί να δώσει αποτέλεσμα με ακρίβεια έτους.

Σήμερα φθάνει έως 13.900 έτη στο παρελθόν.



**Χρόνος «Μηδέν» :** Χρόνος κοπής του δένδρου.

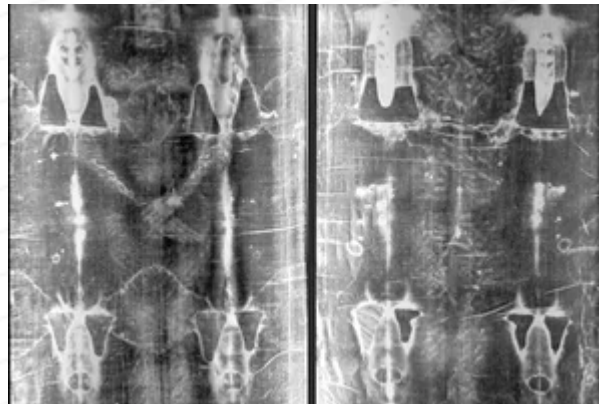
**Υλικά :** Ξύλο.

**Ακρίβεια :**  $\pm 1$  έτος (!)



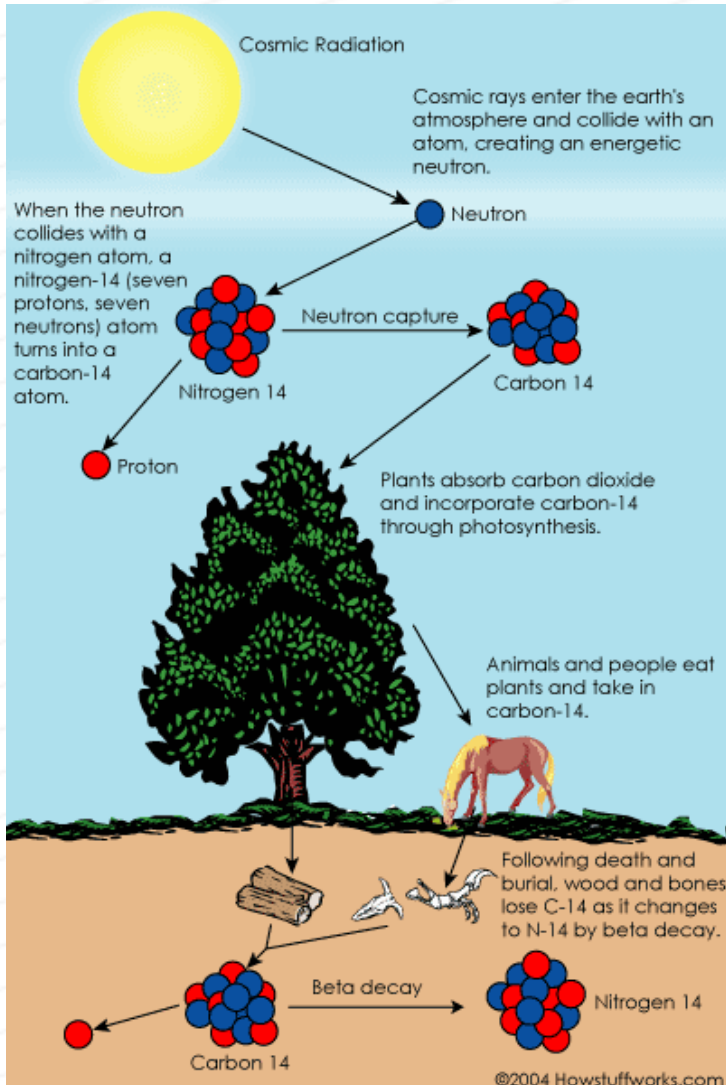
# Ραδιάνθρακας (C-14) <sup>1</sup>

Η χρονολόγηση Άνθρακα-14 (γνωστή και ως χρονολόγηση άνθρακα ή χρονολόγηση ραδιάνθρακα) είναι μια μέθοδος για τον προσδιορισμό της ηλικίας ενός αντικειμένου που περιέχει οργανικό υλικό χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες του ραδιενεργού άνθρακα, ενός ραδιενεργού ισότοπου άνθρακα.





# Ραδιάνθρακας (C-14) <sub>2</sub>



**Αρχή :** Ο άνθρακας 14 (C-14) δημιουργείται συνεχώς στην ατμόσφαιρα από την αλληλεπίδραση των κοσμικών ακτίνων με το ατμοσφαιρικό άζωτο. Το προϊόν, ο C-14 ενώνεται με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας και σχηματίζει ραδιενεργό διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο ενσωματώνεται στα φυτά με τη φωτοσύνθεση. Τα ζώα αποκτούν τον C-14 με την κατανάλωση των φυτών.



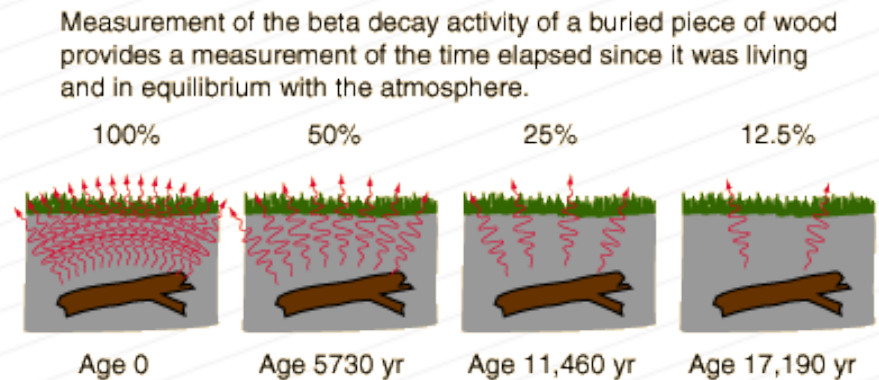


# Ραδιάνθρακας (C-14) <sub>3</sub>

Όταν το ζώο ή το φυτό πεθαίνει, σταματά να ανταλλάσσει άνθρακα με το περιβάλλον του, και από εκεί και πέρα το ποσό του C-14 που περιέχει αρχίζει να μειώνεται καθώς ο C-14 υφίσταται ραδιενεργή διάσπαση.

Μετρώντας το ποσό του C-14 σε ένα δείγμα από ένα νεκρό φυτό ή ζώο (κομμάτι ξύλου, τεμάχιο οστού κ.λπ.) μπορεί να υπολογιστεί πότε πέθανε το ζώο ή το φυτό. Όσο παλαιότερο είναι το δείγμα, τόσο λιγότερος C-14 θα ανιχνευθεί.

Ο χρόνος ημίσειας ζωής του C-14 είναι περίπου 5.730 έτη, συνεπώς μετά από 5.730 έτη θα μετρηθεί ο μισός C-14, μετά από 11.460 έτη θα μετρηθεί το  $\frac{1}{4}$  κ.ο.κ.





## Ραδιάνθρακας (C-14) 4

Ο C-14 είναι ένα ποσοστό του συνολικού άνθρακα στο περιβάλλον. Το κύριο σταθερό ισότοπο του άνθρακα είναι ο C-12, ενώ ένα ποσοστό 1% είναι και το επίσης σταθερό ισότοπο C-13.

Ο λόγος του C-14 προς τον C-12 είναι περίπου 1,25 άτομα C-14 για κάθε  $10^{12}$  άτομα C-12.

Από τη στιγμή που ένας οργανισμός-υλικό παύει να ανταλλάσσει άνθρακα με το περιβάλλον το ποσό του C-14 που βρίσκεται σε αυτό μειώνεται συνεχώς λόγω της ραδιενεργού διάσπασής του, ενώ το ποσό του C-12 παραμένει σταθερό, οπότε ο λόγος C-14/C-12 μεταβάλλεται συνεχώς (μειώνεται με τον χρόνο).



# Ραδιάνθρακας (C-14) 5

Συνεπώς ο προσδιορισμός του λόγου C-14/C-12 μία δεδομένη χρονική στιγμή μας δίνει και την ηλικία του δείγματος αυτή την χρονική στιγμή.

Η ηλικία του δείγματος δίνεται από την σχέση:

$$t = 8267 \cdot \ln(N_0/N)$$

Όπου  $t$  είναι η ηλικία σε έτη,  $N_0$  ο συνολικός αριθμός ατόμων άνθρακα στο δείγμα που υπολογίζεται από το μέγεθος του δείγματος και  $N$  ο αριθμός ατόμων του C-14 που μετράται.



# Ραδιάνθρακας (C-14) 6

Οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί που ακολουθούν δίνουν την ηλικία σε «έτη ραδιάνθρακα» δηλ. με την υπόθεση ότι ο λόγος:

$$C-14 / C-12$$

παρέμενε σταθερός όλα τα παρελθόντα έτη σε όλο τον πλανήτη.

Η υπόθεση αυτή δεν αληθεύει. Ο λόγος του C-14/C-12 μεταβάλλεται:

- Γεωγραφικά
- Χρονικά
- Λόγω της «ισοτοπικής κλασματοποίησης»
- Λόγω επιμόλυνσης (ορυκτά καύσιμα, πυρηνικές δοκιμές)

Οπότε για να βρεθεί η ορθή ηλικία χρειάζεται να γίνει μία καμπύλη βαθμονόμησης που να αντιστοιχεί την ηλικία σε «έτη ραδιάνθρακα» με την πραγματική ηλικία σε έτη.





# Ραδιάνθρακας (C-14) 7

Για να παραχθεί αυτή η καμπύλη χρειάζεται ένας αριθμός δειγμάτων γνωστής ηλικίας που να μπορούν να χρονολογηθούν και με την μέθοδο του C-14.

Την δυνατότητα αυτή την παρέχουν οι δακτύλιοι των δένδρων με την δενδροχρονολόγηση.

Υπάρχουν διάφορες καμπύλες βαθμονόμησης που προέκυψαν με τη χρήση διαφόρων μεθόδων και στατιστικών αναλύσεων.

Σήμερα έχουν αντικατασταθεί από τις σειρές καμπυλών INTCAL.

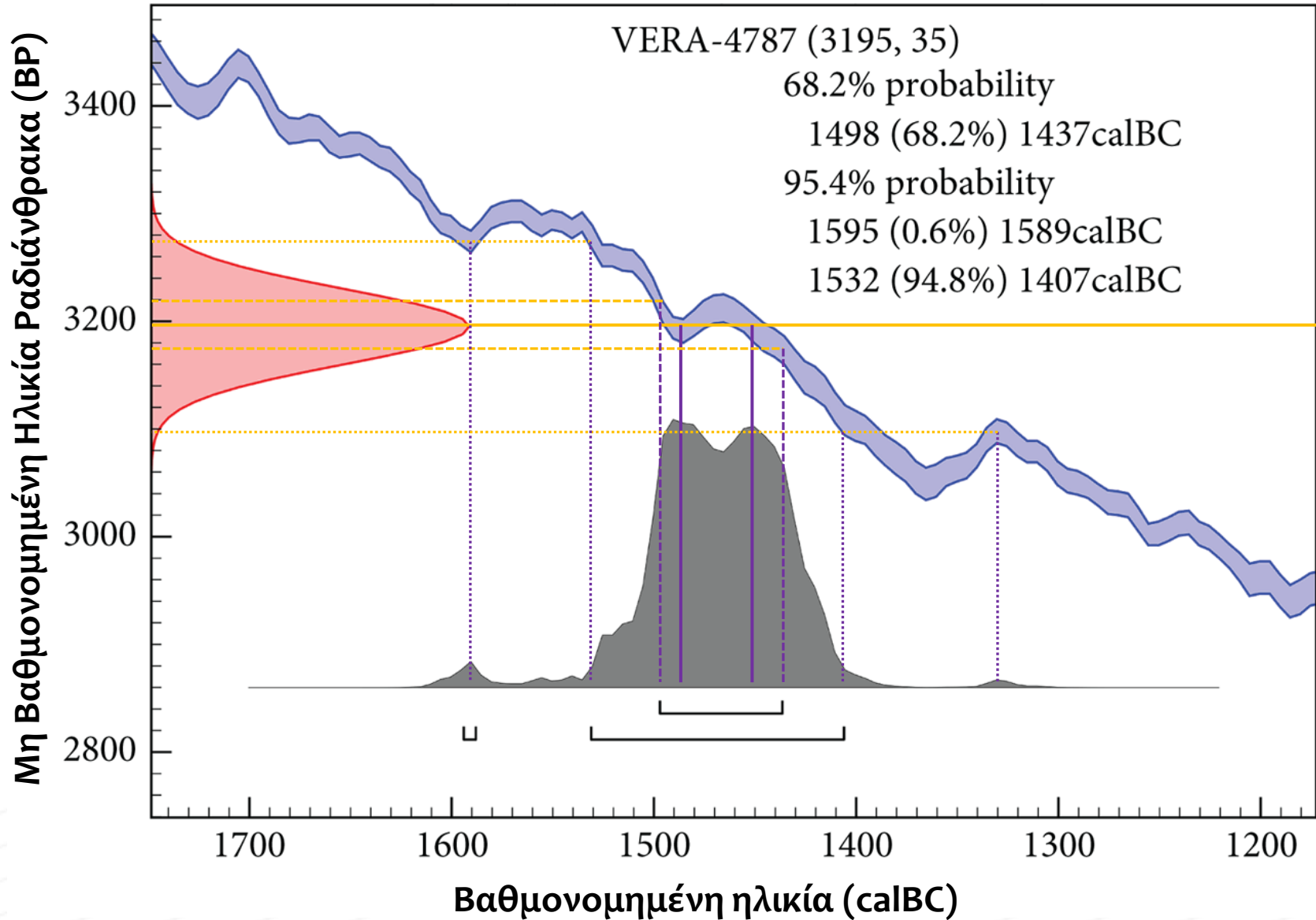
Η πιο πρόσφατη είναι η INTCAL13 του 2013.

Η INTCAL13 περιλαμβάνει διαφορετικές καμπύλες για το βόρειο και το νότιο ημισφαίριο (SHCAL13).

Για τα θαλάσσια δείγματα υπάρχει η καμπύλη βαθμονόμησης MARINE13.



# Ραδιάνθρακας (C-14) 8





# Ραδιάνθρακας (C-14) 9

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι αναγραφής των αποτελεσμάτων της χρονολόγησης C-14:

- Μη βαθμονομημένες ηλικίες αναγράφονται με την μορφή:
  - <εργαστήριο>: <έτη C-14> ± <σφάλμα> BP
    - <εργαστήριο> είναι ένας κωδικός που προσδιορίζει το εργαστήριο και την ταυτότητα ID κωδικό του δείγματος.
    - <έτη C-14> είναι η ηλικία του δείγματος σε έτη ραδιάνθρακα που προσδιορίστηκε από το εργαστήριο.
    - <σφάλμα> είναι το σφάλμα της μέτρησης με βαθμό εμπιστοσύνης  $1\sigma$
    - BP δηλώνει ότι η ηλικία του δείγματος που αναγράφεται είναι «πριν από σήμερα» (Before Present), όπου το σήμερα αναφέρεται στο έτος 1950 (συνεπώς 1000 BP αναφέρεται στο έτος 950 μ.Χ.)

Παράδειγμα: UtC-100: 2000 ± 40 BP σημαίνει ότι το δείγμα μετρήθηκε στο Εργαστήριο van der Graaff της Utrecht, ο κωδικός του δείγματος ήταν 100, η μη βαθμονομημένη ηλικία που μετρήθηκε ήταν 2000 έτη πριν από σήμερα ± 40 έτη.



# Ραδιάνθρακας (C-14) <sup>10</sup>

- Βαθμονομημένες ηλικίες αναφέρονται ως:
  - cal BP (έτη πριν από σήμερα όπου σήμερα είναι το έτος 1950)
  - cal BC (έτος προ Χριστού)
  - cal AD (έτος μετά Χριστόν)

και αναγράφονται με την μορφή:

- cal <διάστημα ηλικιών> <βαθμός εμπιστοσύνης>
  - <διάστημα ηλικιών> είναι το διάστημα ηλικιών που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο βαθμό εμπιστοσύνης.
  - <βαθμός εμπιστοσύνης> είναι ο βαθμός εμπιστοσύνης του συγκεκριμένου διαστήματος ηλικιών.

Παράδειγμα: cal 1100 – 1000 BC (95%) σημαίνει ότι το δείγμα χρονολογείται στα 1100 έως 1000 π.Χ. με βαθμό εμπιστοσύνης 95%.

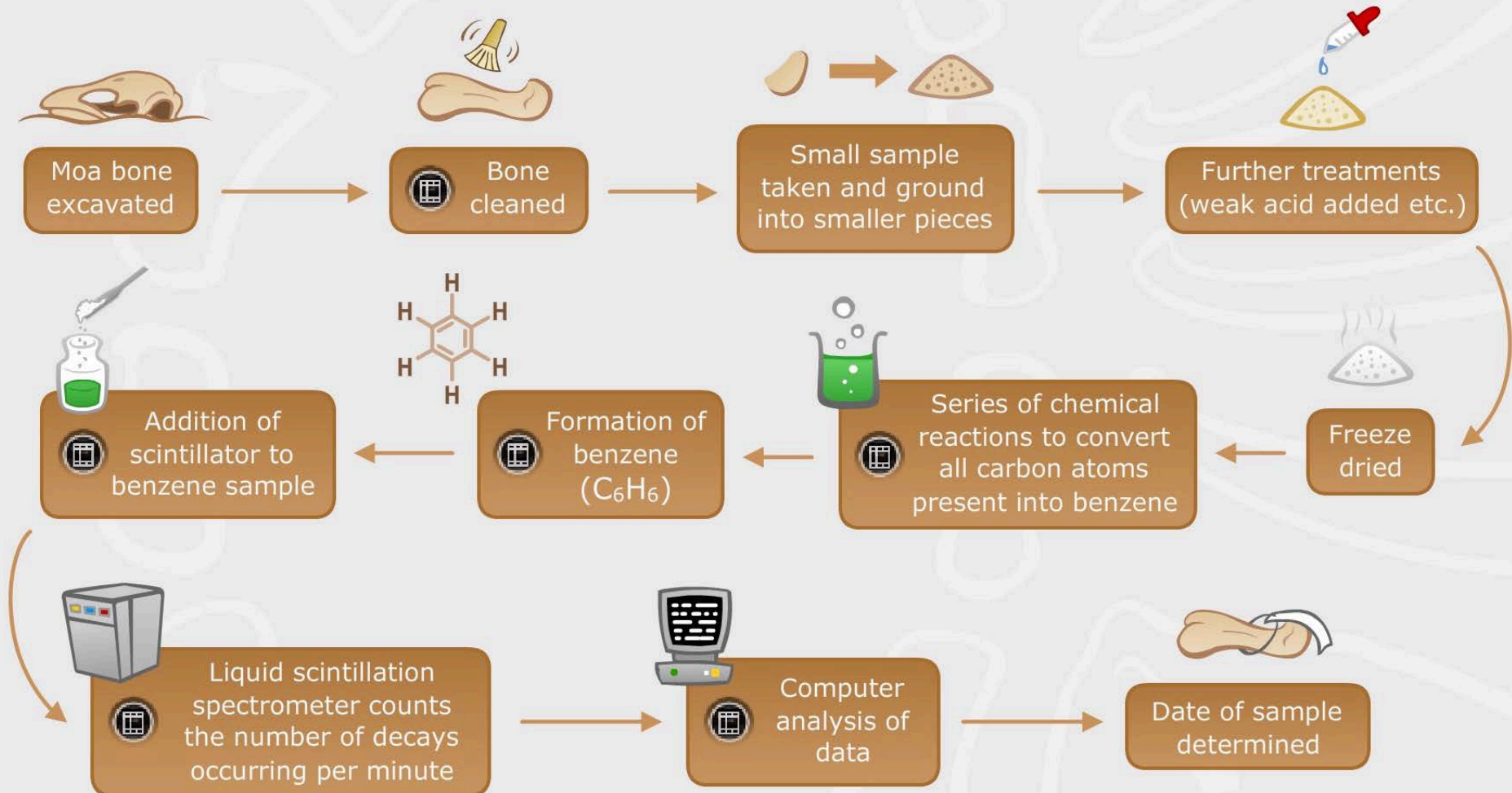
Στις βαθμονομημένες ηλικίες θα πρέπει να αναγράφεται και η καμπύλη (π.χ. INTCAL13) και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση (π.χ. OxCal).





# Ραδιάνθρακας (C-14) <sup>11</sup>

## C-14 CARBON DATING PROCESS





# Ραδιάνθρακας (C-14) <sup>12</sup>

## Μετρήσεις:

- Ο αριθμός ατόμων C-14 μπορεί να μετρηθεί μέσω της β-ραδιενεργούς διάσπασής του με κατάλληλους ανιχνευτές β-ακτινοβολίας (αναλογικοί απαριθμητές αερίου, υγροί σπινθηριστές)
- Εναλλακτικά μπορεί να προσδιοριστεί απευθείας ο λόγος C-14/C-12 έναν επιταχυντή με φασματογράφο μάζας (AMS)

## Ηλικίες που προσδιορίζονται:

- Έως 50.000 έτη πριν από σήμερα
- Έως 100.000 έτη πριν από σήμερα με ειδικές τεχνικές και επιταχυντές (AMS)



# Ραδιάνθρακας (C-14) <sup>13</sup>



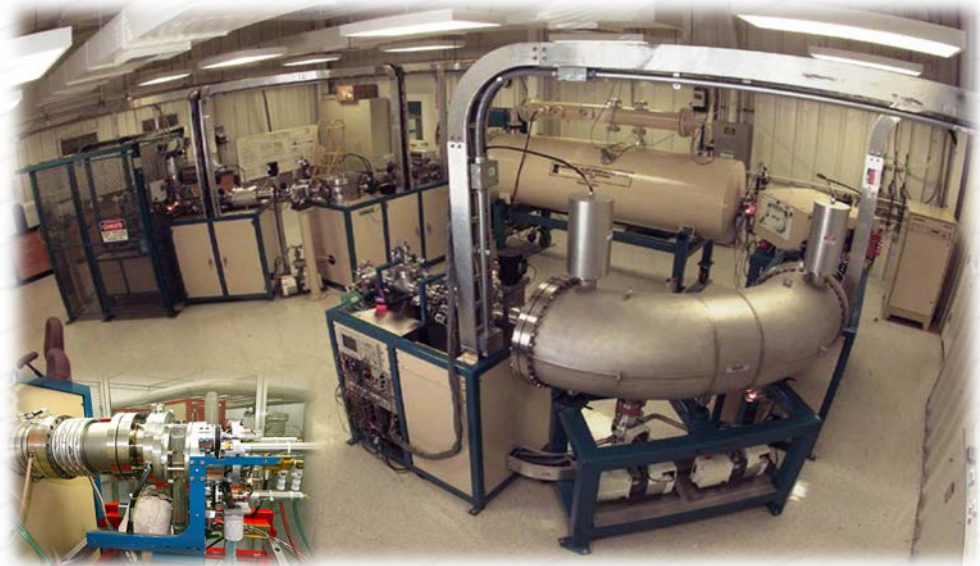
Χημική  
προκατεργασία  
δείγματος



Μέτρηση με υγρό  
σπινθηριστή



Συστοιχία αναλογικών  
απαριθμητών αερίου



Γραμμικός επιταχυντής με φασματογράφο μάζας



# Ραδιάνθρακας (C-14) <sup>14</sup>

**Χρόνος «Μηδέν» :** Χρόνος θανάτου του οργανισμού, χρόνος που το υλικό σταματά να ανταλλάσσει άνθρακα με το περιβάλλον.

**Υλικά :** Ξύλο, κάρβουνο, σπόροι, γύρη, οστά, δέρμα, τρίχες, γούνα, κέρατο, υπολείμματα αίματος, όστρακα, κοράλλια, κελύφη, χαρτί, πάπυρος, τοιχογραφίες (οργανικά χρώματα), τύρφη, λάσπη, χώμα, κεραμικά με οργανικά υπολείμματα.

**Ακρίβεια :**  $< \pm 0,1\%$





# K-Ar <sub>1</sub>

**Αρχή :** Το K είναι ένα από τα 8 πιο άφθονα στοιχεία στο γήινο φλοιό (αλκάλιο). Το Ar είναι ευγενές αέριο το τρίτο σε περιεκτικότητα στην γήινη ατμόσφαιρα.

Το K έχει τρία ισότοπα από τα οποία το K-40 (ισοτοπική αναλογία 0,01167%) είναι φυσικό ραδιενεργό. Διασπάται με χρόνο ημιζωής  $T_{1/2} = 1,25 \times 10^9$  έτη. Ένα ποσοστό του K-40 διασπάται σε Ar-40 (0,001% β+ διάσπαση, 10,48% σύλληψη ηλεκτρονίου).

Κατά τον σχηματισμό ενός ορυκτού (κρυστάλλωση μάγματος, μεταμόρφωση) η θερμοκρασία των κρυστάλλων είναι υψηλή (π.χ. 600-800 °C) και η κινητικότητα των ατόμων μεγάλη. Το Ar-40 που παράγεται από τη διάσπαση του K-40, ως ευγενές αέριο δεν αντιδρά, διαχέεται και διαφεύγει στην ατμόσφαιρα.



## K-Ar <sub>2</sub>

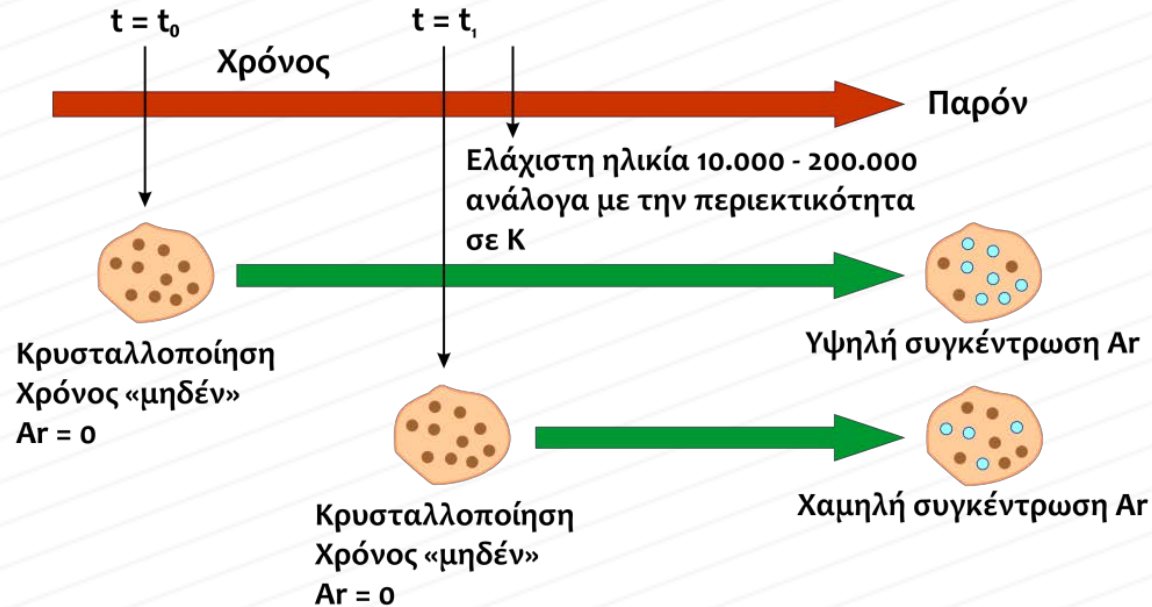
Κάτω από μία θερμοκρασία, χαρακτηριστική για κάθε ορυκτό, η διάχυση του Ar-40 σταματά (*θερμοκρασία κλεισίματος*). Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες όλο το Ar-40 παραμένει στον κρύσταλλο (κλειστό σύστημα). Συνεπώς από το χρονικό αυτό σημείο και μετέπειτα η ποσότητα K-40 στον κρύσταλλο μειώνεται συνεχώς λόγω των διασπάσεων ενώ η ποσότητα του Ar-40 αυξάνεται. Επομένως ο λόγος K-40/Ar-40 σε κάθε χρονική στιγμή είναι ανάλογος της ηλικίας του ορυκτού.

### *Τεχνικές :*

- K-40 / Ar-40 (*χημικός προσδιορισμός K*)
- Ar-39 / Ar-40 (*προσδιορισμός K με νετρονική ενεργοποίηση*)



# K-Ar<sub>3</sub>



**Χρόνος «Μηδέν» :** Ο χρόνος που το ορυκτό ψύχθηκε κάτω από τη θερμοκρασία κλεισίματος του Ar (ηλικίες ψύξης)

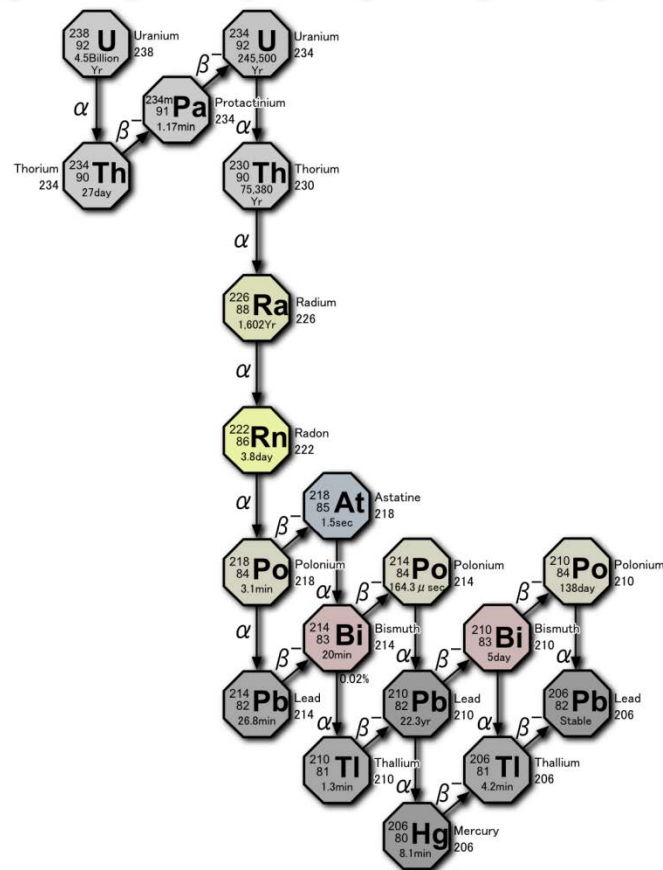
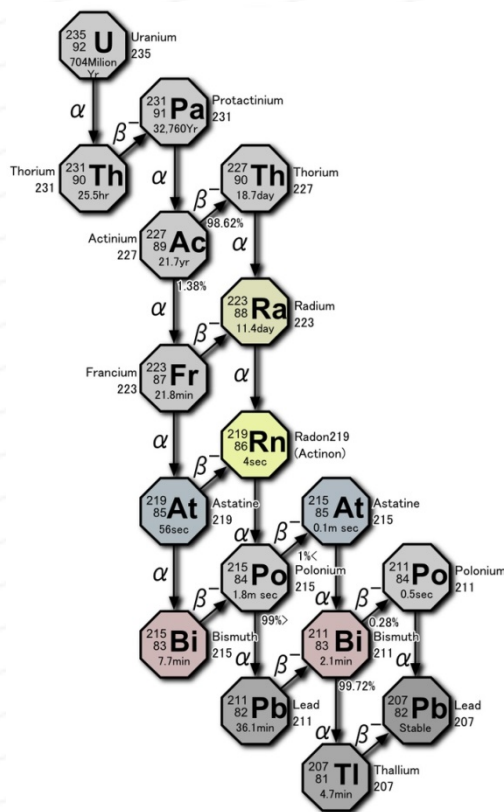
**Υλικά :** Πετρογενετικά υλικά (βιοτίτης, μοσχοβίτης, αμφίβολοι και καλιούχοι άστριοι, αργιλικά ορυκτά, ορισμένα ορυκτά των εβαποριτών)

**Ακρίβεια :**  $\pm 1\%$



# Σειρά ουρανίου 1

Γενικός όρος που περιλαμβάνει αρκετές παραπλήσιες μεθόδους που στηρίζονται στην έλλειψη ραδιενεργού ισορροπίας μέσα σε μία αλυσίδα (σειρά) διάσπασης (κυρίως στις αλυσίδες του U-238 και U-235).





## Σειρά ουρανίου 2

**Αρχή :** Και τα δύο ισότοπα του Ουρανίου (U-238 και U-235) είναι ραδιενεργά και διασπώνται μέσω μίας σειράς ενδιάμεσων θυγατρικών σε σταθερά ισότοπα του Μολύβδου. Σε ένα «κλειστό» σύστημα (όπου κανένα θυγατρικό δεν διαφεύγει) επιτυγχάνεται τελικά μία ραδιενεργός ισορροπία όπου όλα τα θυγατρικά έχουν την ίδια ενεργότητα (ρυθμό διάσπασης). Εάν ένα τέτοιο σύστημα διαταραχθεί επανέρχεται σταδιακά σε ραδιενεργό ισορροπία και απαιτείται κάποιος χρόνος για την πλήρη επίτευξή της. Η στιγμή τη διαταραχής μπορεί επομένως να προσδιοριστεί από τον βαθμό της ραδιενεργούς ισορροπίας που έχει επιτευχθεί μία δεδομένη χρονική στιγμή. Στη φύση η διαταραχή συμβαίνει κατά την κλασματοποίηση λόγω γεωχημικών διεργασιών όπως:





## Σειρά ουρανίου 3

Η αποσάθρωση των υλικών από ατμοσφαιρικούς παράγοντες, η μεταφορά υλικών (π.χ. από υπόγεια ύδατα), οι διαδικασίες σχηματισμού υλικών και καθίζησης.

Για να είναι δυνατή η χρονολόγηση απαιτείται:

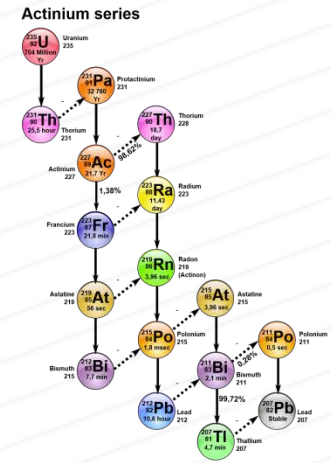
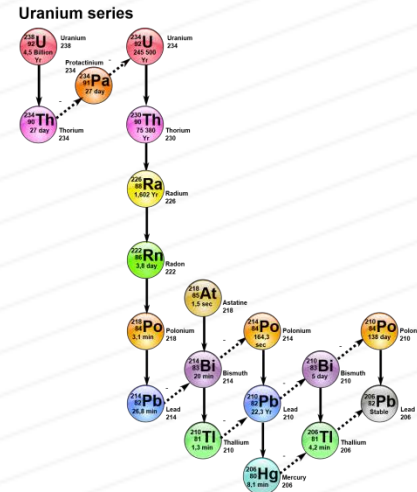
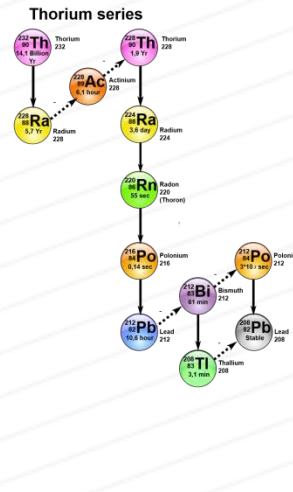
- Η χρονική διάρκεια της διαταραχής να είναι μικρή σε σχέση με το χρόνο ημιζωής των θυγατρικών ισοτόπων που ενδιαφέρουν.
- Η αρχική συγκέντρωση των θυγατρικών στο τέλος της διαταραχής να είναι μηδενική ή γνωστή.
- Μετά τη διαταραχή το σύστημα (υλικό) παραμένει «κλειστό» ώστε όλες οι μεταβολές στη συγκέντρωση του μητρικού και των θυγατρικών ισοτόπων οφείλονται αποκλειστικά στη ραδιενεργό διάσπαση.



# Σειρά ουρανίου 4

## Τεχνικές :

- Th-230 / U-234
- «Ανοιχτό σύστημα» U-238
- Pa-231 / U-235
- U-234 / U-238
- «Υπερβάλλον» Th-230 και Pa-231
- Pb-210
- Ra-226
- Th-228 / Th-232
- Μέθοδος U-Th-Pb





# Σειρά ουρανίου 5

**Χρόνος «Μηδέν» :** Γεωχημικό φαινόμενο που διαταράσσει την ραδιενεργό ισορροπία.

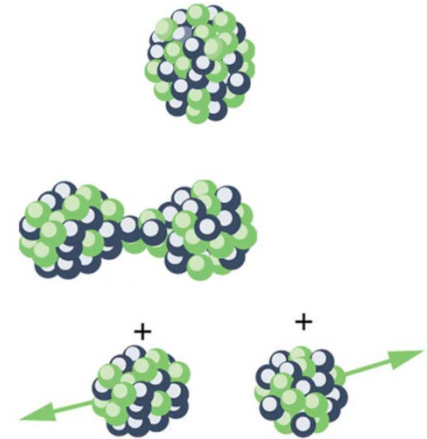
**Υλικά :** Θαλάσσια ιζήματα από μεγάλα βάθη, κοράλλια, φωσφορίτες, ανθρακικά άλατα, κελύφη μαλακίων, δόντια και οστά, τύρφη, αποθέσεις σε λίμνες και εκβολές ποταμών, ηφαιστειακά πετρώματα, πολυμεταλλικά σουλφίδια, χρωστικές ουσίες και κράματα μολύβδου.

**Ακρίβεια :**  $< \pm 1\% - \pm 10\%$  (ανάλογα με την τεχνική και τα χαρακτηριστικά του δείγματος)



# Ίχνη σχάσης 1

**Αρχή :** Η τυχαία σχάση (*spontaneous fission*) είναι μία σπάνια μορφή ραδιενεργού διάσπασης κατά την οποία ένας «βαρύς» πυρήνας διασπάται σε δύο «ελαφρύτερους» (θραύσματα). Κατά τη σχάση τα θραύσματα αποκτούν σημαντική κινητική ενέργεια και κινούνται μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα αλληλεπιδρώντας με τα υπόλοιπα άτομα του πλέγματος, σπάζοντας χημικούς δεσμούς και αφήνοντας ένα ίχνος «καταστροφής από ακτινοβολία» (ίχνος σχάσης) κατά μήκος της διαδρομής τους. Τα ίχνη αυτά παραμένουν ως έχουν για εκατοντάδες χιλιάδες έτη εφόσον η θερμοκρασία του ορυκτού δεν ξεπεράσει μία χαρακτηριστική για το ορυκτό θερμοκρασία πάνω από την οποία οι ζημιές αποκαθίστανται και το ορυκτό επιστρέφει στην πρότερη κατάστασή του.

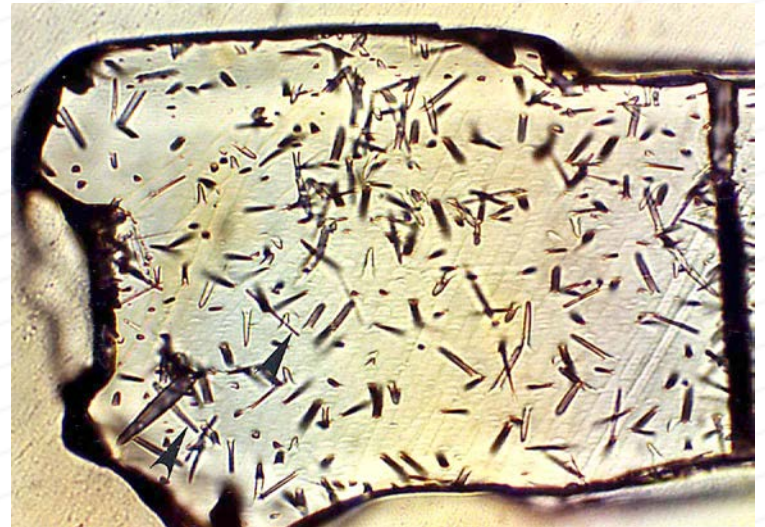




## Ίχνη σχάσης 2

Συνεπώς ο αριθμός των ιχνών αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο αριθμό σχάσεων. Ο ρυθμός σχάσεων μπορεί να υπολογιστεί από τη συγκέντρωση του ισότοπου οπότε από το συνολικό αριθμό των σχάσεων μπορεί να προσδιοριστεί η ηλικία του ορυκτού.

Στην πράξη το ισότοπο που χρησιμοποιείται είναι το U-238 (χρόνος ημιζωής για τυχαία σχάση  $8,2 \times 10^{15}$  a). Τα ίχνη σχάσης έχουν μήκος 10-20  $\mu\text{m}$  και οι διαστάσεις τους μπορούν να μεγεθυνθούν με κατάλληλη χημική επεξεργασία του δείγματος (*etching*) ώστε να γίνουν ορατά με οπτικό μικροσκόπιο. Καταμετρώνται ένα προς ένα.







## Ίχνη σχάσης 3

**Χρόνος «Μηδέν» :** Τελευταία θέρμανση του υλικού ή σχηματισμός γεωλογικού υλικού.

**Υλικά :** Βασάλτης, ηφαιστειακά γυαλιά, τέφρα, λίθοι και τέχνηρα (artifacts) από οψιδιανό που έχουν θερμανθεί, θαλάσσια ηφαιστειακά πετρώματα από μεγάλα βάθη, γυαλιά από πρόσκρουση (κρατήρες μετεωριτών), τεχνητά γυαλιά.

**Ακρίβεια :**  $\pm 2\%$  -  $\pm 4\%$



# ESR

**Αρχή :** Η χρονολόγηση Ηλεκτρονικού Παραμαγνητικού Συντονισμού (Electron Spin Resonance – ESR) στηρίζεται στη δημιουργία παραμαγνητικών κέντρων στο κρυσταλλικό πλέγμα ορυκτών μετά από ακτινοβόληση. Οι φυσικές διεργασίες είναι όμοιες με αυτές της TL/OSL. Στην περίπτωση του ESR ο σκανδαλισμός γίνεται με μικροκύματα παρουσία μαγνητικού πεδίου (φασματοσκοπία ESR).

**Χρόνος «Μηδέν» :** Τελευταία θέρμανση ή τελευταία έκθεση στο ηλιακό φως ή σχηματισμός υλικού.

**Υλικά :** Ασβεστολιθικές αποθέσεις σε σπήλαια, ασβεστόλιθοι, κελύφη μαλακίων, δόντια και οστά, πυριτόλιθοι, θαλάσσια ιζήματα από μεγάλα βάθη, κλαστικά ιζήματα.

**Ακρίβεια :**  $\pm 5\%$  -  $\pm 15\%$





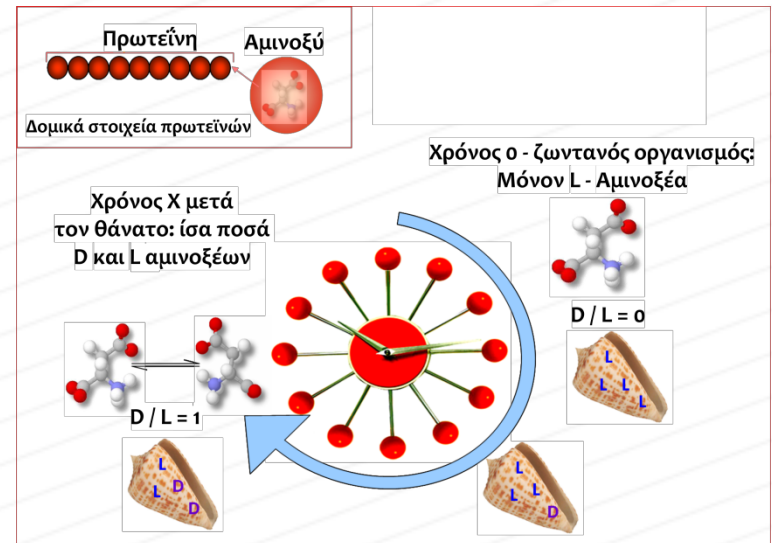
# Ρακεμοποίηση αμινοξέων

**Αρχή :** Δεξιόστροφη (D) και αριστερόστροφη (L) δομή αμινοξέων. Τα αμινοξέα ζωντανών οργανισμών είναι μόνον αριστερόστροφα. Μετά τον θάνατο του οργανισμού αρχίζουν να μετατρέπονται σε δεξιόστροφα μέχρι να επέλθει ισορροπία (ίδια ποσότητα αριστερόστροφων και δεξιόστροφων). Η διαδικασία επίτευξης ισορροπίας καλείται ρακεμοποίηση και λαμβάνει χώρα με συγκεκριμένο ρυθμό που εξαρτάται όμως από τη θερμοκρασία.

**Χρόνος «Μηδέν» :** Ο θάνατος του οργανισμού

**Υλικά :** Βιολογικά δείγματα

**Ακρίβεια :**  $\pm 3\%$





# Ενυδάτωση οψιδιανού

**Αρχή :** Διάχυση ύδατος στο εσωτερικό του οψιδιανού. Σχηματισμός ενυδατωμένου στρώματος. Το πάχος του εξαρτάται:

- Το χρόνο που διαρκεί η διείσδυση ύδατος
- Τη θερμοκρασία και την υγρασία του περιβάλλοντος ταφής
- Την ιδιαίτερη φυσικοχημική δομή του οψιδιανού

**Χρόνος «Μηδέν» :** Η έναρξη της διείσδυσης (χρόνος θραύσης – κατασκευής αντικειμένου [;])

**Υλικά :** Οψιδιανός

**Ακρίβεια :**  $\pm 1\%$  -  $\pm 7\%$  (σφάλμα μέτρησης)



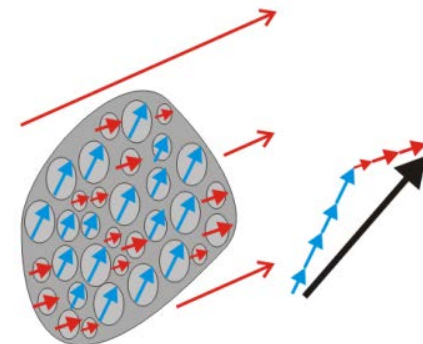
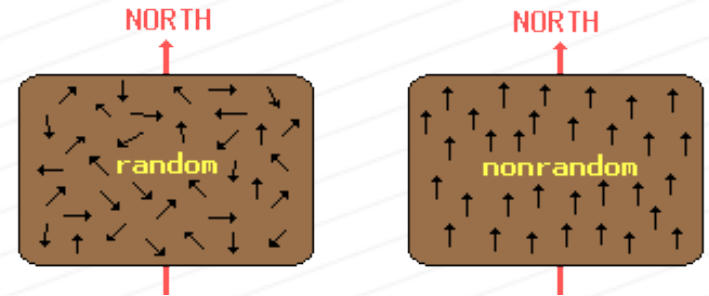
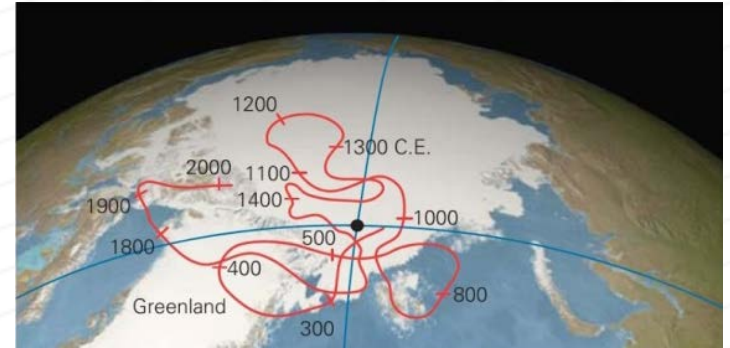
Οψιδιανός





# Αρχαιομαγνητισμός 1

**Αρχή :** Το γήινο μαγνητικό πεδίο υπόκειται σε περιοδικές μεταβολές ως προς τη διεύθυνση και την έντασή του. Ο αρχαιο- και ο παλαιομαγνητισμός στηρίζονται στην ιδιότητα των ορυκτών να καταγράφουν και να διατηρούν το γήινο μαγνητικό πεδίο όπως αυτό ήταν κατά την στιγμή του σχηματισμού τους ή μετέπειτα θέρμανσή τους, με την μορφή παραμένουσας μαγνήτισης.

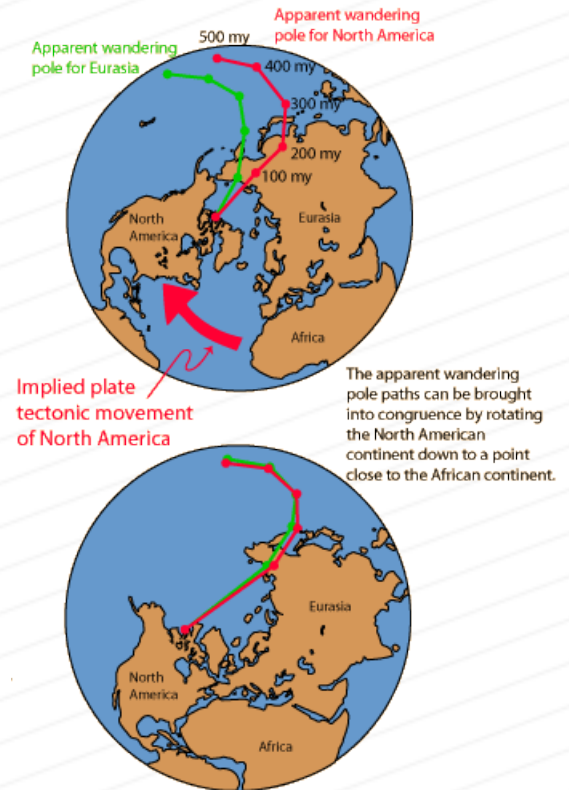






# Αρχαιομαγνητισμός 2

Από την παραμένουσα μαγνήτιση ενός δείγματος, συγκρίνοντας με τα χαρακτηριστικά (ένταση, διεύθυνση) του σημερινού γήινου μαγνητικού πεδίου και τις γνωστές μεταβολές του κατά το παρελθόν μπορούμε να προσδιορίσουμε την ηλικία του. Απαιτείται η γνώση της ιστορίας των μεταβολών του γήινου μαγνητικού πεδίου μίας περιοχής από άλλα χρονολογημένα δείγματα (εξαρτημένη μέθοδος χρονολόγησης)





# Αρχαιομαγνητισμός 3

**Προσοχή** : Η θέση του προς χρονολόγηση δείγματος δεν πρέπει να έχει διαταραχθεί καθόλου από τη στιγμή του σχηματισμού ή θέρμανσης του και πριν τη μέτρησή του!

**Χρόνος «Μηδέν»** : Τελευταία θέρμανση του υλικού ή σχηματισμός γεωλογικού υλικού

**Υλικά** : Σιδηρομαγνητικά υλικά (βασάλτης, ηφαιστειακά πετρώματα, κλίβανοι και καμένο έδαφος, κεραμικά και πήλινα τούβλα, θαλάσσια ιζήματα από μεγάλα βάθη, loess, ιζήματα και αποθέσεις σπηλαίων)

**Ακρίβεια** :  $\pm 25 - 50$  a (εξαρτάται από την ακρίβεια της γνώσης της ιστορίας μεταβολών του γήινου μαγνητικού πεδίου της περιοχής).



# Αρχαιομαγνητισμός 4

**Σημείωση :** Ο όρος *Αρχαιομαγνητισμός* χρησιμοποιείται συνήθως για τη χρονολόγηση τεχνέργων (artifacts) κατά τα τελευταία 100.000 έτη περίπου, ενώ ο όρος *Παλαιομαγνητισμός* χρησιμοποιείται για τη χρονολόγηση γεωλογικών υλικών με ηλικίες συνήθως μεγαλύτερες των 100.000 ετών

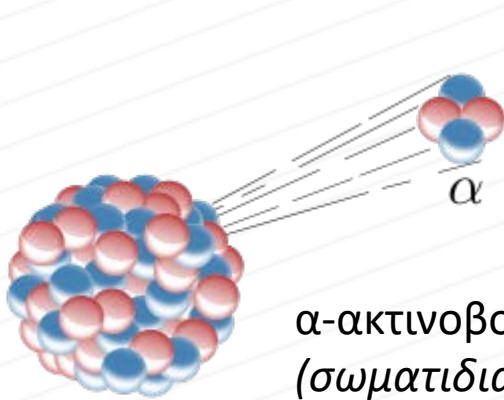


# Καταλληλότητα μεθόδων χρονολόγησης

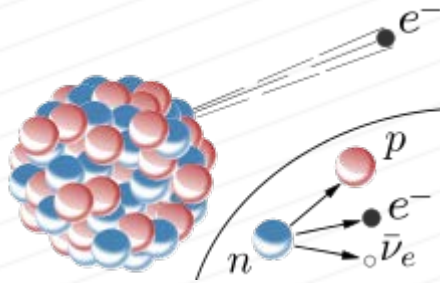
|                      |         |           |                    |             |         |                 |                          |         |                   |  |                             |                        |
|----------------------|---------|-----------|--------------------|-------------|---------|-----------------|--------------------------|---------|-------------------|--|-----------------------------|------------------------|
|                      |         |           |                    |             |         |                 |                          |         |                   |  |                             | Δενδροχρονο-<br>λόγηση |
|                      |         |           |                    |             |         |                 |                          |         |                   |  |                             | C-14                   |
|                      |         |           |                    |             |         |                 |                          |         |                   |  |                             | K-Ar                   |
|                      |         |           |                    |             |         |                 |                          |         |                   |  |                             | Σειρά U                |
|                      |         |           |                    |             |         |                 |                          |         |                   |  |                             | Ίχνη Σχάσης            |
|                      |         |           |                    |             |         |                 |                          |         |                   |  |                             | <b>Φωταύγεια</b>       |
|                      |         |           |                    |             |         |                 |                          |         |                   |  |                             | ESR                    |
|                      |         |           |                    |             |         |                 |                          |         |                   |  |                             | Αμινοξέα               |
|                      |         |           |                    |             |         |                 |                          |         |                   |  |                             | Ενυδάτωση              |
|                      |         |           |                    |             |         |                 |                          |         |                   |  |                             | Μαγνητισμός            |
| Ηφαιστειακά<br>Υλικά | Κοράλια | Οψιδιανός | Άκαυστα<br>Ιζήματα | Πυριτόλιθος | Σκωρίες | <b>Κεραμικά</b> | Σταλακτίτες<br>Ασβετίτης | Όστρακα | Σμάλτο<br>δοντιών | Κόκκαλο, Κέρατο<br>Ελεφαντόδοντο<br>Δόντια | Ξύλο, Φυτά<br>Σπόροι, κ.λπ. |                        |



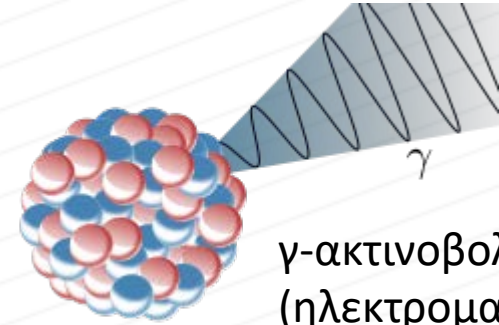
# Ραδιενέργεια (ιονίζουσες ακτινοβολίες)



α-ακτινοβολία  
(σωματιδιακή,  
πυρήνες He)

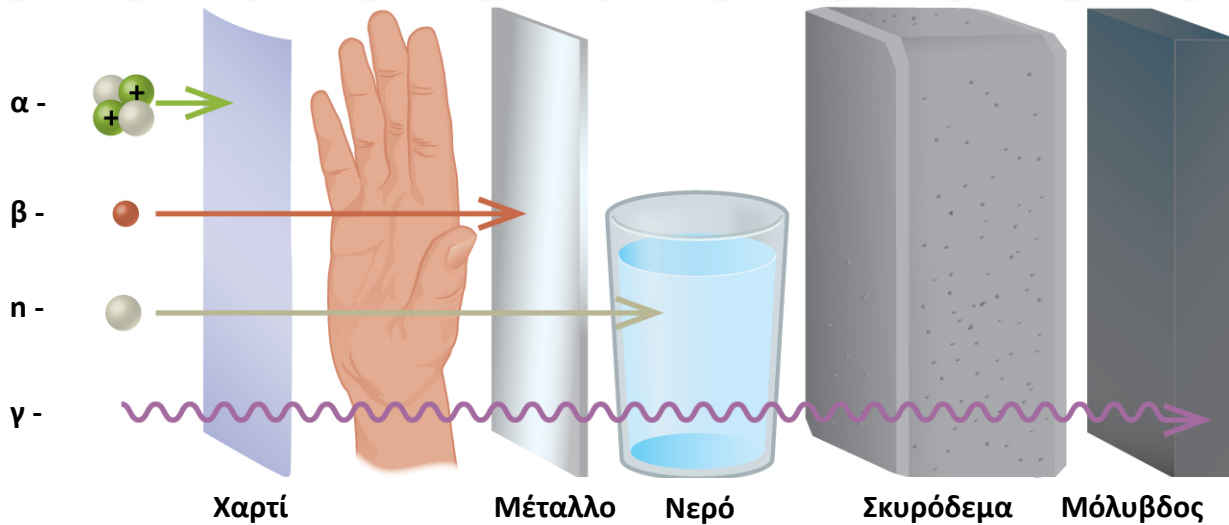


β-ακτινοβολία  
(σωματιδιακή,  
ηλεκτρόνια)



γ-ακτινοβολία  
(ηλεκτρομαγνητική)

Εμβέλεια ακτινοβολιών

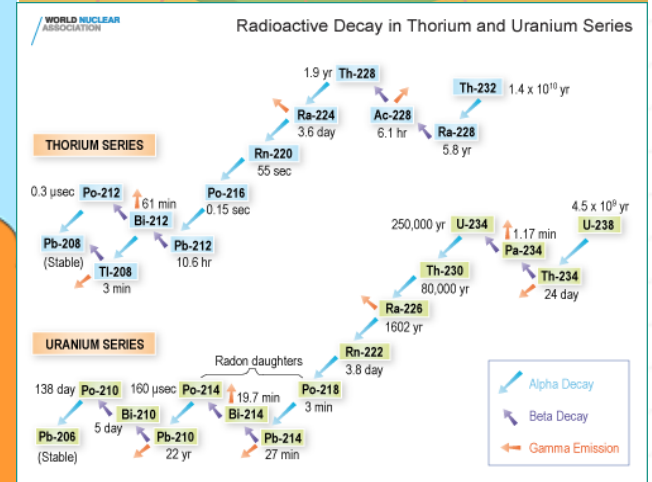
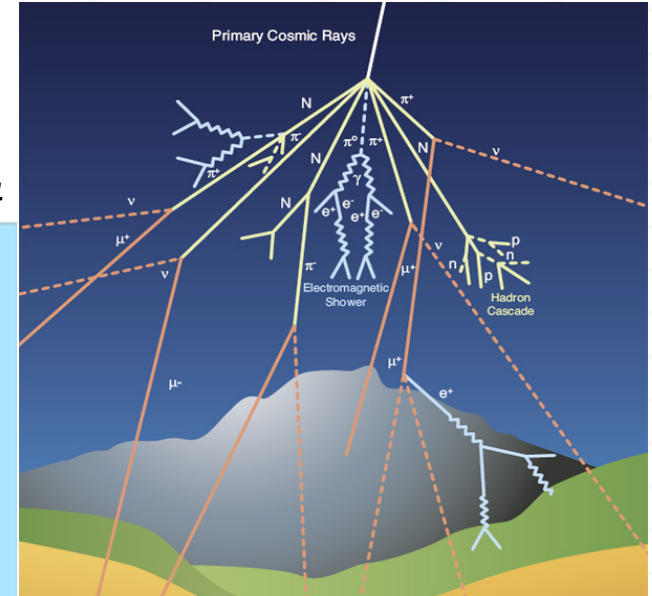
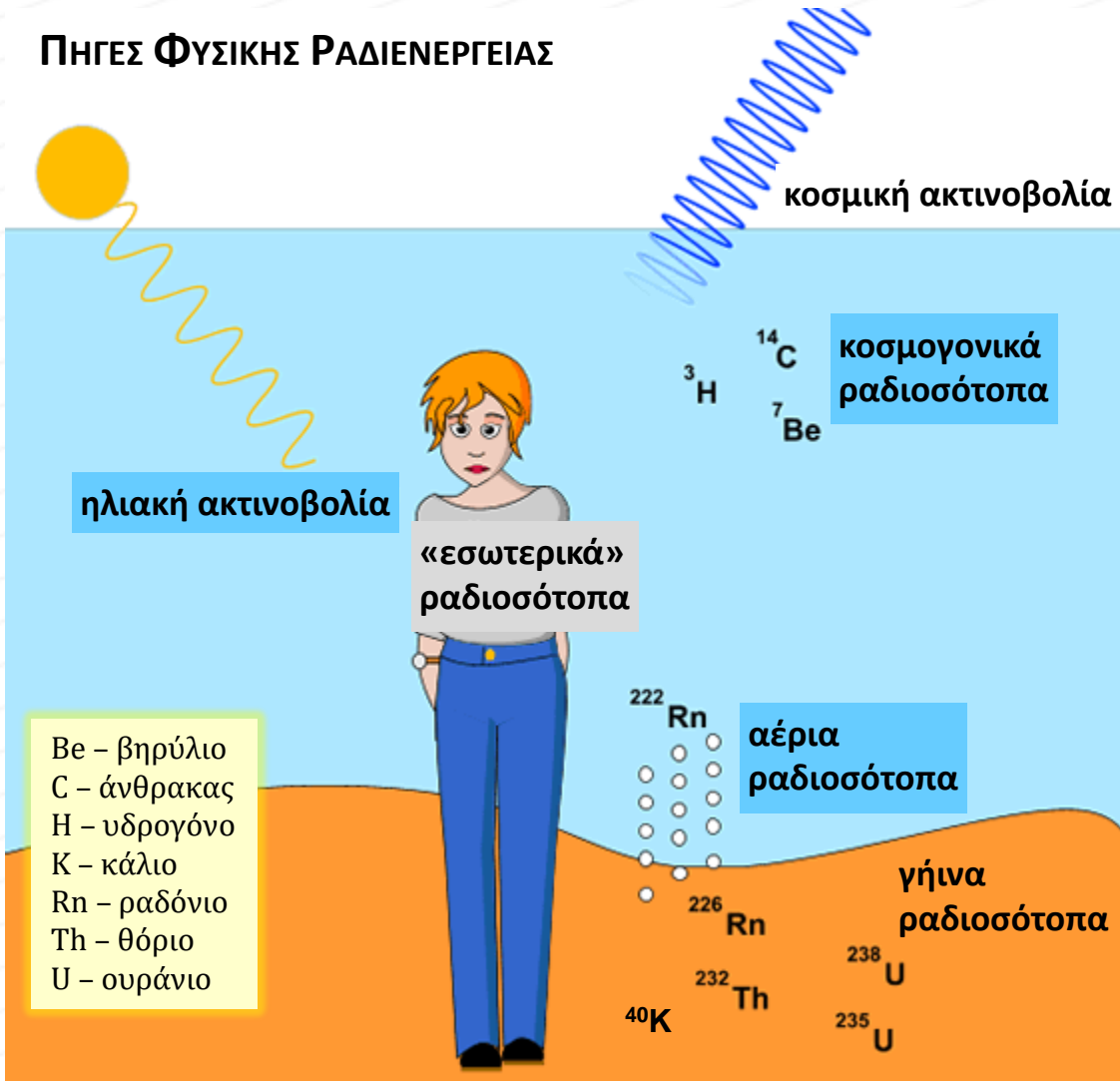






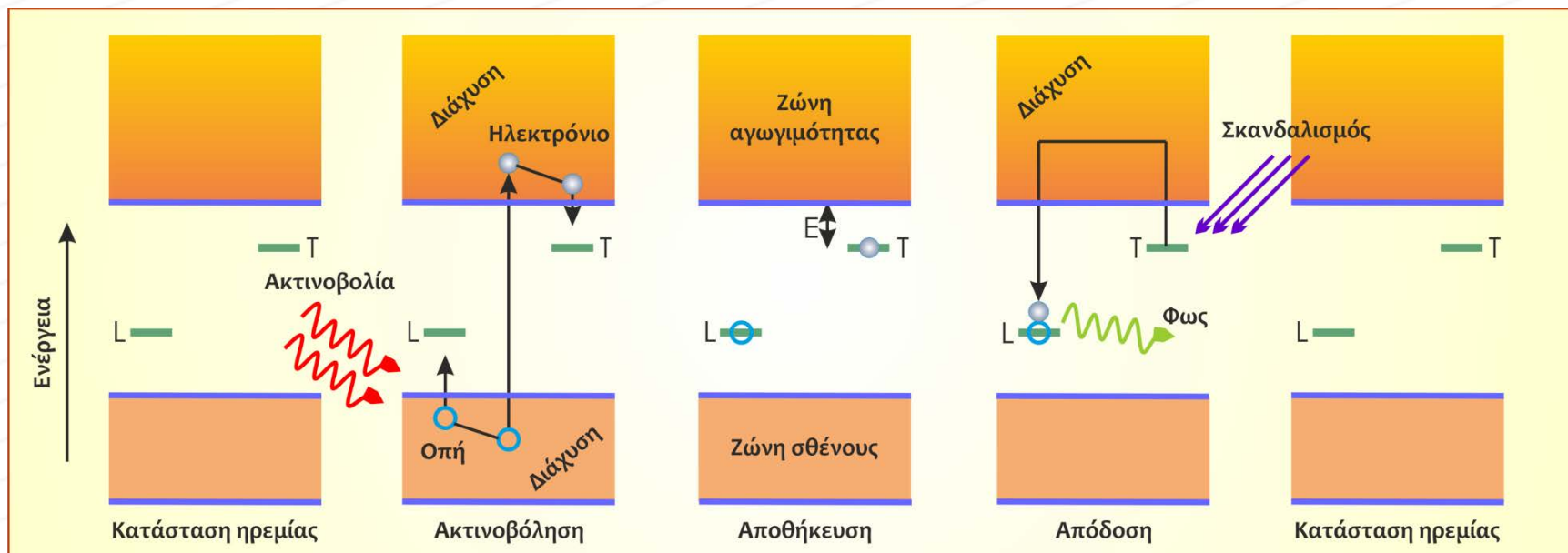
# Πηγές φυσικής ραδιενέργειας

## ΠΗΓΕΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ





# Βασική αρχή TL/OSL

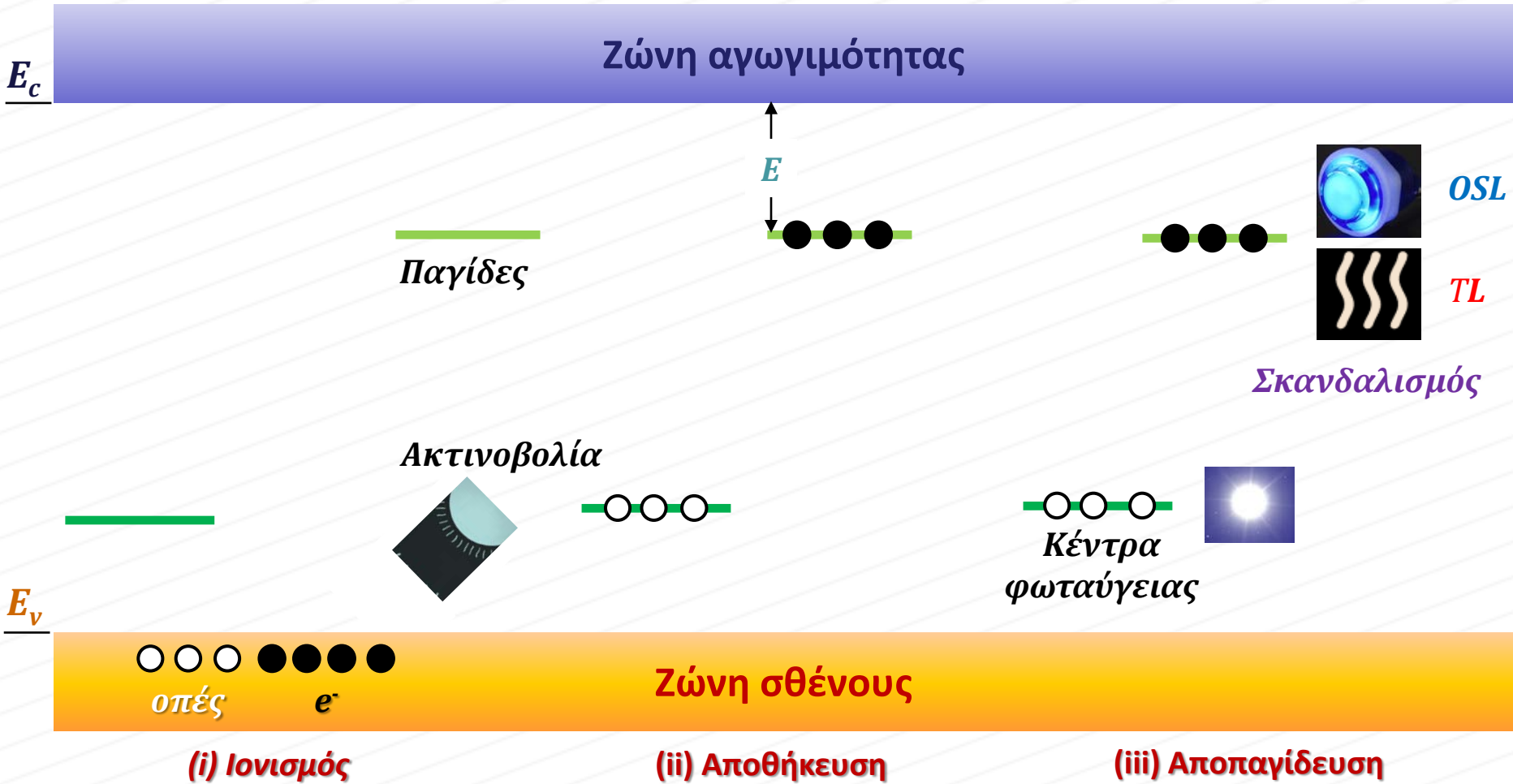


Κρυσταλλικά υλικά έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν την ενέργεια που απορροφούν από τη φυσική ραδιενεργό ακτινοβολία (φυσικά ραδιο-ισότοπα και κοσμική ακτινοβολία) και να την επανεκπέμπουν υπό μορφή φωτός μετά από κατάλληλο «σκανδαλισμό» (θέρμανση-θερμοφωταύγεια-thermoluminescence-TL, πρόσπτωση οπτικής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας-οπτικά προτρεπόμενη φωταύγεια-optically stimulated luminescence-OSL) κ.λπ.)



# Βασική αρχή TL/OSL

(εικονική αναπαράσταση)





# Χρονολόγηση TL/OSL

- Εάν υπολογισθεί ο ρυθμός απόκτησης της αποθηκευμένης ενέργειας και προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ απορροφώμενης ενέργειας και εκπεμπόμενου φωτός τότε με τη μέτρηση του συνολικού λαμβανόμενου φωτός από το υλικό μπορούμε να προσδιορίσουμε τη χρονική διάρκεια «απορρόφησης» της ακτινοβολίας από αυτό.
- Απαιτείται ωστόσο ο προσδιορισμός της «αρχής του χρόνου» (μηδενισμός του «χρονομέτρου»)
- Η «αρχή του χρόνου»/«χρόνος μηδέν» είναι η στιγμή που κατάλληλο γεγονός («γεγονός μηδενισμού») είχε ως αποτέλεσμα την πλήρη εκπομπή της μέχρι τότε αποθηκευμένης ενέργειας.
- «Γεγονότα μηδενισμού»:
  - TL τελευταία θέρμανση του αντικειμένου
  - OSL τελευταία έκθεση στο ηλιακό φως



# Χρονολόγηση TL/OSL (συν)

- Η μέθοδος συνίσταται:
  - στη μέτρηση της συνολικής ποσότητας (δόσης) της αποθηκευμένης ενέργειας με τη μορφή εκπεμπόμενου φωτός κατά τη θέρμανση ή φωτισμό του υλικού
  - την εύρεση-μέτρηση του ετήσιου ρυθμού απόκτησης της ενέργειας με ακτινοβολία από το υλικό (μέση ετήσια δόση).
- Η ηλικία προσδιορίζεται από τη διαίρεση:

$$\text{ηλικία} = \frac{\text{συνολική αποθηκευμένη δόση}}{\text{μέση ετησια δόση}}$$





# Χρονολόγηση TL Κεραμικών

- **Ο πηλός:**

- περιέχει πλήθος κρυσταλλικών γεωλογικών ουσιών (απατίτη, καολίνη, χαλαζία κ.λπ.)
- αποθηκεύει ενέργεια από την ακτινοβολία που δέχεται από:
  - την κοσμική ακτινοβολία
  - τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα του περιβάλλοντος
  - τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που περιέχονται στον πηλό
- αποθηκεύει ενέργεια από τη στιγμή του γεωλογικού σχηματισμού του

- Κατά το ψήσιμο του πηλού σε θερμοκρασία που υπερβαίνει τους 500 °C όλη η αποθηκευμένη ενέργεια στο υλικό του πηλού εκλύεται με μορφή φωτός και συνεπώς η αποθηκευμένη ενέργεια μηδενίζεται.



# Χρονολόγηση TL Κεραμικών (συν)

- **Το κεραμικό:**

- ξεκινά με μηδενική αποθηκευμένη ενέργεια
- αποθηκεύει ενέργεια από την ακτινοβολία που δέχεται από:
  - την κοσμική ακτινοβολία
  - τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα του περιβάλλοντος
  - τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που περιέχονται στον πηλό
- όσο περισσότερο χρόνο δέχεται αυτή την ακτινοβολία (όσο παλαιότερο είναι) τόσο περισσότερη ενέργεια θα αποθηκεύσει.



# Προβλήματα υπολογισμού...

- Ο προσδιορισμός της συνολικής αποθηκευμένης δόσης απαιτεί τη γνώση της **TL απόδοσης (efficiency)** του υλικού
- TL απόδοση (efficiency) είναι η ποσότητα του εκπεμπόμενου φωτός μετά από «σκανδαλισμό» (TL σήμα) ανά μονάδα απορροφώμενης δόσης
- Η TL απόδοση (efficiency):
  - Διαφέρει για την α-, β- και γ- ακτινοβολία
  - Πρέπει να υπολογιστεί για κάθε δείγμα
- Ο λόγος της TL απόδοσης ενός υλικού για την α-ακτινοβολία προς την TL απόδοση του υλικού για τη β- ή γ-ακτινοβολία χαρακτηρίζεται ως τιμή  $k$  (ή τιμή  $\alpha$ ) του υλικού



# Ισοδύναμη δόση...

- **Ισοδύναμη δόση (ED)** είναι η τεχνητή β-δόση η οποία παράγει το ίδιο TL/OSL σήμα με τη συνολική φυσική αποθηκευμένη δόση
- Λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές TL αποδόσεις ενός υλικού για τα διάφορα είδη ακτινοβολιών η ηλικία του δείγματος δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{ηλικία} = \frac{ED}{k \cdot NDR_{\alpha} + NDR_{\beta} + NDR_{\gamma}}$$

όπου:

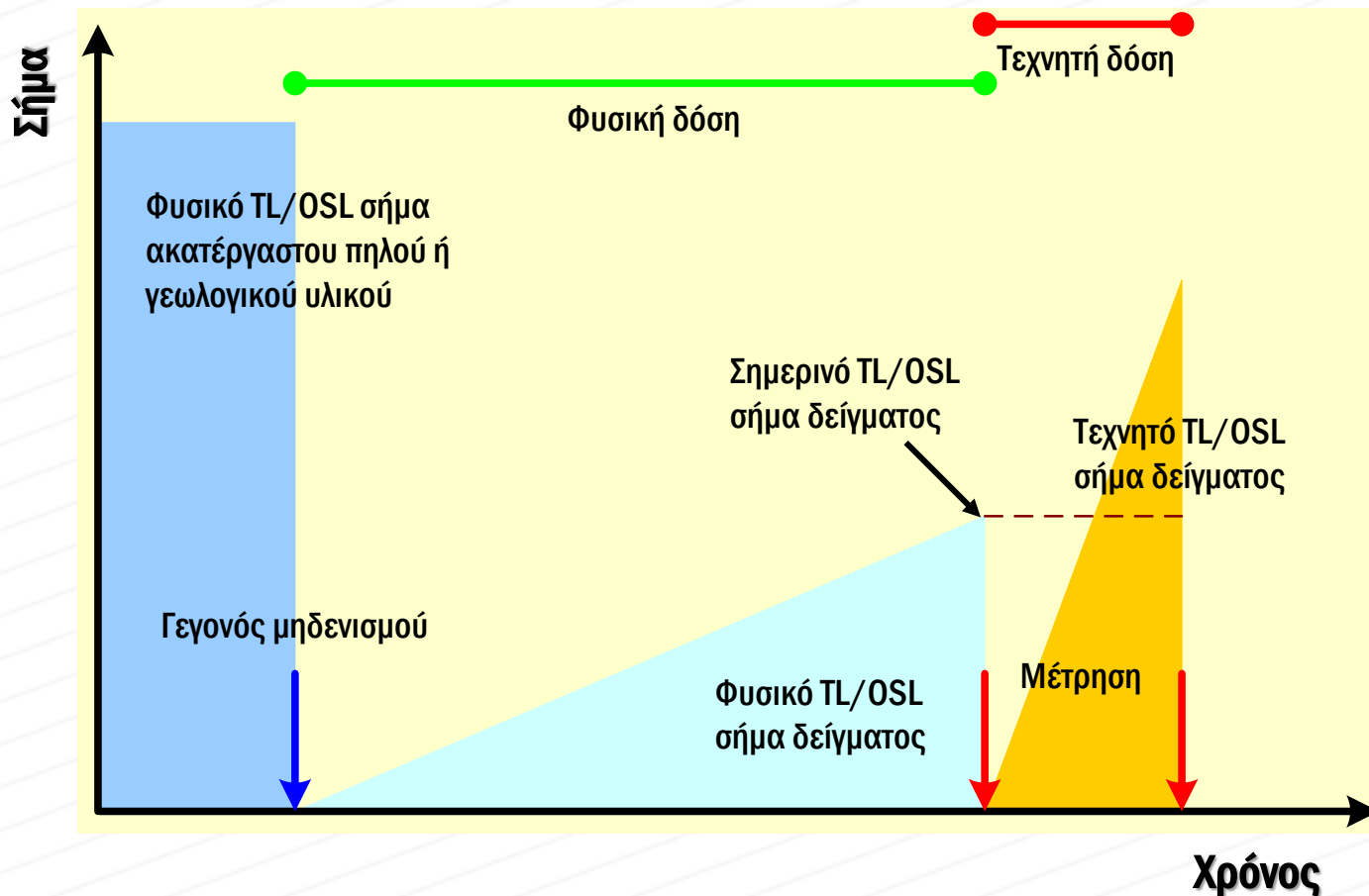
$NDR_{\alpha}$  = η μέση ετήσια δόση που δέχεται το υλικό από α-ακτινοβολία

$NDR_{\beta}$  = η μέση ετήσια δόση που δέχεται το υλικό από β-ακτινοβολία

$NDR_{\gamma}$  = η μέση ετήσια δόση που δέχεται το υλικό από γ-ακτινοβολία



# Βασική αρχή χρονολόγησης TL/OSL









# Υπολογισμός μέσης ετήσιας δόσης...

Η μέση ετήσια δόση προέρχεται από τη συνεισφορά:

- της εσωτερικής δόσης (φυσικά ραδιοϊσότοπα που υπάρχουν στο υλικό του δείγματος, κυρίως α- και β-ακτινοβολία)
- της εξωτερικής δόσης (φυσικά ραδιοϊσότοπα που υπάρχουν στο περιβάλλον του δείγματος, κυρίως γ-ακτινοβολία)
- της κοσμικής ακτινοβολίας

Σημ. Μονάδες δόσης: *rad* ή *Gray (Gy)* [ $1\text{Gy} = 100\text{ rad}$ ]



# Συνιστώσες φυσικής ραδιενεργού δόσης

|  | Συγκέντρωση | Αποτελεσματικός Ρυθμός Δόσης |              |              |
|--|-------------|------------------------------|--------------|--------------|
|  |             | άλφα                         | βήτα         | γάμμα        |
| Κάλιο (K)  | 1%          | -                            | 0,782        | 0,243        |
| Ρουβίδιο (Rb)  | 50 ppm      | -                            | 0,019        | -            |
| Θόριο (Th)   | 3 ppm       | 0,193                        | 0,082        | 0,143        |
| Ουράνιο (U)  | 1 ppm       | 0,231                        | 0,145        | 0,113        |
| Κοσμική  | -           | -                            | -            | 0,180        |
| ΣΥΝΟΛΟ   |             | 0,424                        | 1,028        | 0,679        |
| <i>Συντελεστές απορρόφησης για 10% περιεκτικότητα σε νερό</i>  |             |                              |              |              |
|  |             | 1,15                         | 1,125        | 1,114        |
| <i>Τελικές διορθωμένες τιμές αποτελεσματικών ρυθμών δόσεων</i> |             |                              |              |              |
|  |             | <b>0,369</b>                 | <b>0,914</b> | <b>0,609</b> |



# Τεχνικές TL χρονολόγησης

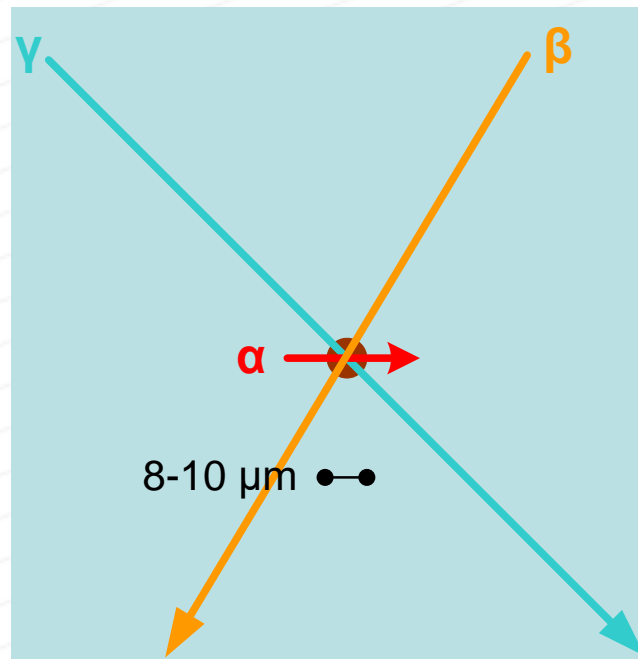
- *Τεχνική λεπτών κόκκων (χαλαζία ή αστρίων)*
- *Τεχνική μεγάλων κόκκων*
- *Τεχνική μεγάλων κόκκων ζιρκονίου*
- *Μέθοδος αφαίρεσης*
- *Μέθοδος προ-δόσης*



# Τεχνική Λεπτών Κόκκων (Άστριος - Χαλαζίας)

Στην εσωτερική δόση συνεισφέρουν όλες οι ακτινοβολίες ( $\alpha$ -,  
 $\beta$ - και  $\gamma$ -)

Σφάλμα μεθόδου  $\pm 5\%$  έως  $\pm 7\%$  (στατιστικό  $\pm 3\%$ )

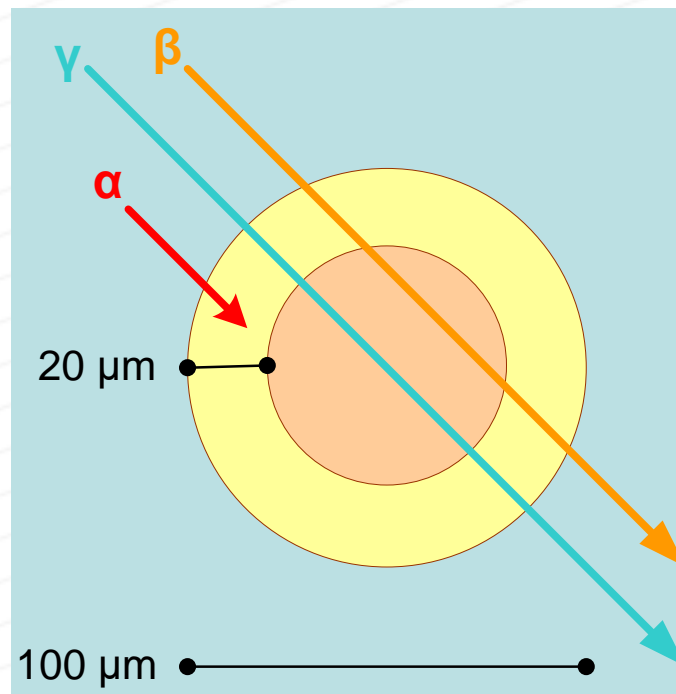






# Τεχνική Μεγάλων Κόκκων

Στην εσωτερική δόση δεν συνεισφέρει η α-ακτινοβολία  
Σφάλμα μεθόδου  $\pm 5\%$  (στατιστικό  $\pm 3\%$ )

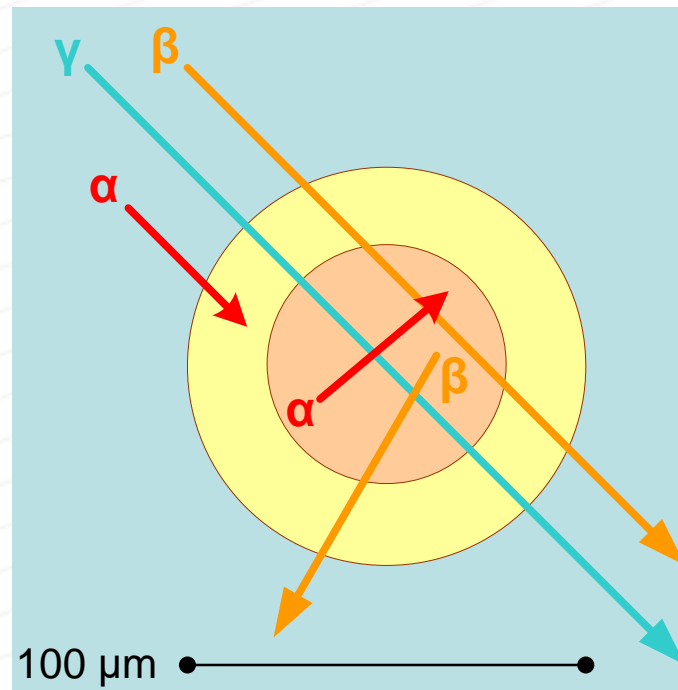




# Τεχνική Μεγάλων Κόκκων (Ζιρκόνιο)

Στην εσωτερική δόση συνεισφέρει κυρίως η α-ακτινοβολία του ίδιου του κόκκου, η εξωτερική δόση και η κοσμική ακτινοβολία παραλείπονται

Σφάλμα μεθόδου  $\pm 15\%$  έως  $\pm 20\%$





# Λοιπές τεχνικές TL χρονολόγησης

- **Μέθοδος αφαίρεσης**

Αφαιρούνται οι εξισώσεις ηλικιών λεπτών κόκκων και μεγάλων κόκκων οπότε δεν απαιτείται η γνώση του περιβάλλοντος (εξωτερική δόση και κοσμική ακτινοβολία). Ιδιαίτερα χρήσιμη τεχνική για αντικείμενα αγνώστου προέλευσης (μουσεία, συλλογές κ.λπ.)

*Σφάλμα μεθόδου  $\pm 12\%$  έως  $\pm 15\%$*

- **Μέθοδος προ-δόσης**

Δεν μετράται η αποθηκευμένη δόση αλλά η μεταβολή της ευαισθησίας της κορυφής των  $110\text{ }^\circ\text{C}$  του χαλαζία.

Προσδιορίζονται ηλικίες έως 1500 έτη. Κατάλληλη τεχνική για έλεγχο αυθεντικότητας.

*Σφάλμα μεθόδου  $\pm 7\%$*



# Παράγοντες που επηρεάζουν τη μέτρηση

- Παροδικό άδειασμα παγίδων (*fading*) (τεστ οροπεδίου-plateau test)
- Μη γραμμικότητα και μεταβολή ευαισθησίας
- Ανώμαλο παροδικό άδειασμα παγίδων (*anomalous fading*)
- Επαγωγή / εξασθένηση σήματος από έκθεση στο φως (δειγματοληψία)
- Επαγωγή / εξασθένηση σήματος από διάφορες φωταυγειακά φαινόμενα (προκατεργασία δείγματος: τριβο-φωταύγεια, πιεζο-φωταύγεια, χημειο-φωταύγεια κλπ)
- Υδατικό περιεχόμενο στο δείγμα και το περιβάλλον του (απορρόφηση ακτινοβολίας)
- Χημική δράση υπογείου ύδατος (μεταφορά ραδιοϊσοτόπων)
- Μη ύπαρξη ραδιενεργού ισορροπίας – έλλειμμα ραδονίου



# Μέτρηση μέσης ετήσιας δόσης

- **Εσωτερική δόση**

- δόση από β-ακτινοβολία K-40 (φασματοσκοπία ατομικής απορρόφησης, ανιχνευτές β-ακτινοβολίας)
- δόση από α-ακτινοβολία Th και U (ανιχνευτές α-ακτινοβολίας, γ-φασματοσκοπία, νετρονική ενεργοποίηση)
- δόση από β-ακτινοβολία K-40, Th και U (δοσίμετρα β-ακτινοβολίας, ανιχνευτές β-ακτινοβολίας)

- **Εξωτερική δόση**

- επιτόπια δοσιμετρία με TL δοσίμετρα
- επιτόπια γ-φασματοσκοπία
- εργαστηριακή μέτρηση φυσικής ραδιενέργειας χώματος (γ-φασματοσκοπία)

- **Κοσμική ακτινοβολία**

- γεωγραφική θέση (μέση τιμή 15 mrad/έτος)





# Σφάλματα μέτρησης - Αποτελέσματα

- Τυχαία και συστηματικά σφάλματα μέτρησης (> 5%)
- Στατιστική κατανομή (3%)
- Τα σφάλματα είναι σχετικά (ποσοστιαία)
- Συνήθως η ηλικία δίνεται ως: π.χ. 3000 έτη  $\pm 90$ ,  $\pm 150$  έτη
  - το πρώτο είναι το σφάλμα της μέσης ηλικίας (στατιστική κατανομή)
    - κατάλληλο για σύγκριση διαφόρων στρωμάτων στην ίδια περιοχή ή διαφόρων περιοχών με παρόμοιες συνθήκες
  - το δεύτερο είναι το σφάλμα της μέτρησης (τυχαίο και συστηματικό)
    - κατάλληλο για σύγκριση χρονολογήσεων με διάφορες μεθόδους (π.χ. C-14)



# Κατάλληλα υλικά για TL χρονολόγηση

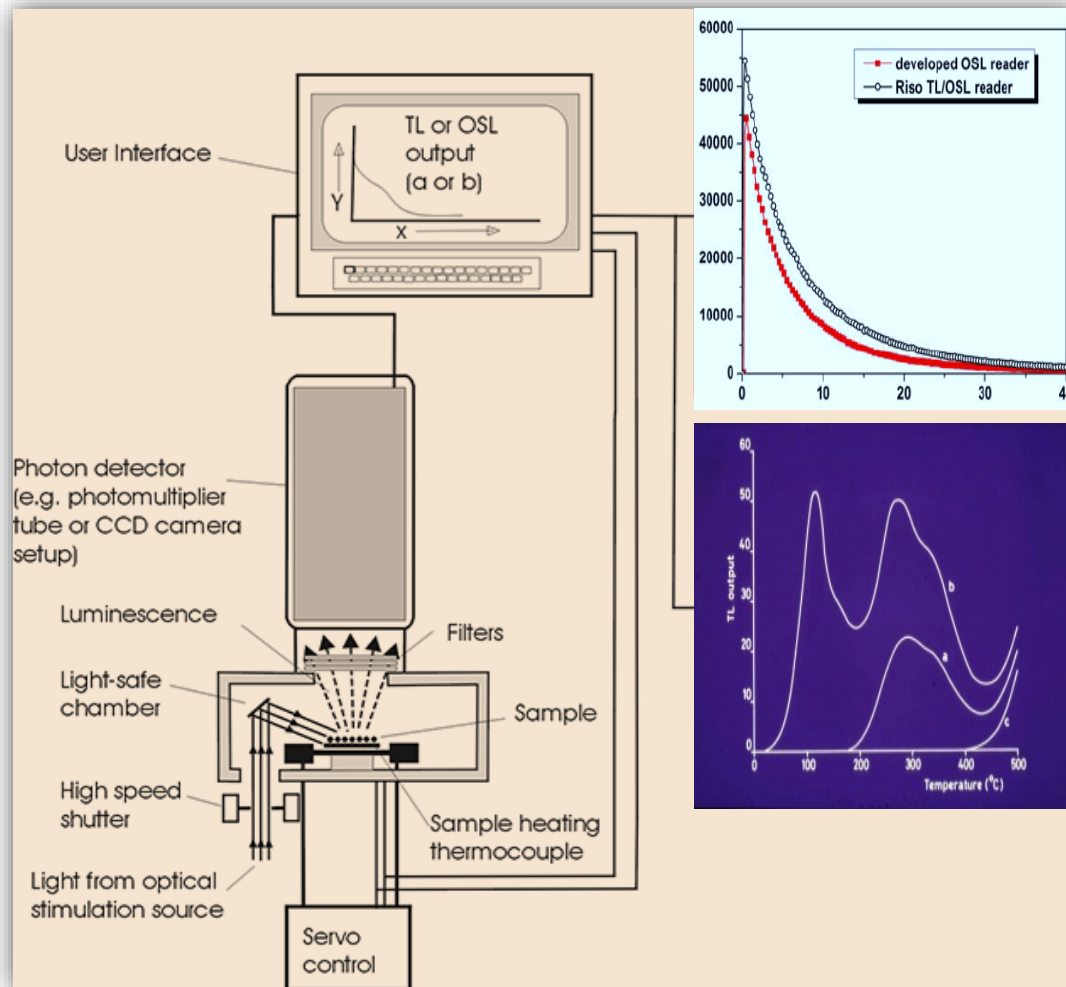
- Κεραμικά
- Γεωλογικά υλικά
  - ηφαιστειογενή πετρώματα
  - πυριτόλιθος
  - οψιδιανός
  - κερατόλιθος
  - γρανίτες
  - μετεωρίτες
  - σταλακτίτες και σταλαγμίτες
  - καμένες πέτρες
  - κλπ
- Ιζήματα

## Ενδεικτικά όρια προσδιοριζόμενων ηλικιών:

- Χαλαζίας: 50-100.000 έτη
- Άστριοι: 500-500.000 έτη
- Πυριτόλιθος: 5.000-500.000 έτη
- Ασβεστόλιθος: 10.000-500.000 έτη

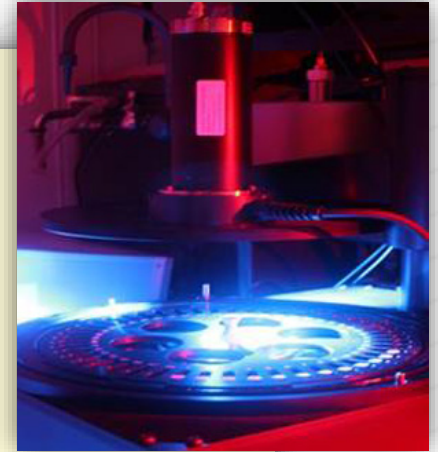
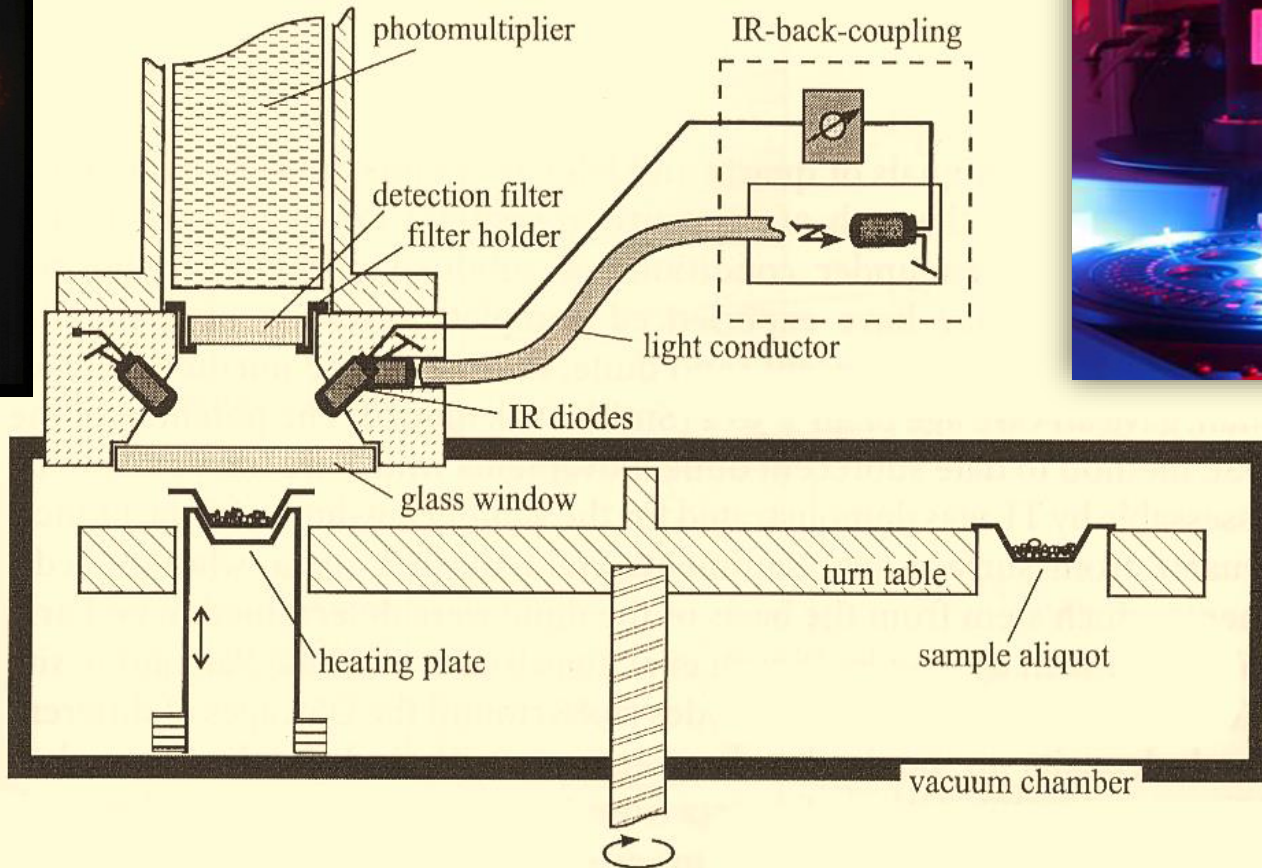
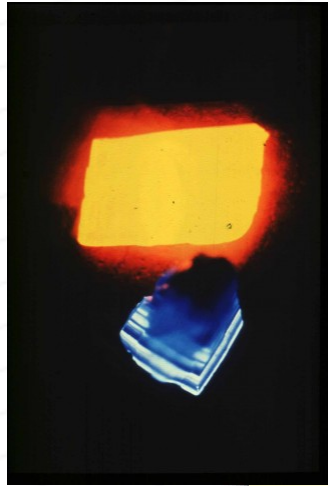


# Σχηματικό διάγραμμα συστήματος μέτρησης TL/OSL



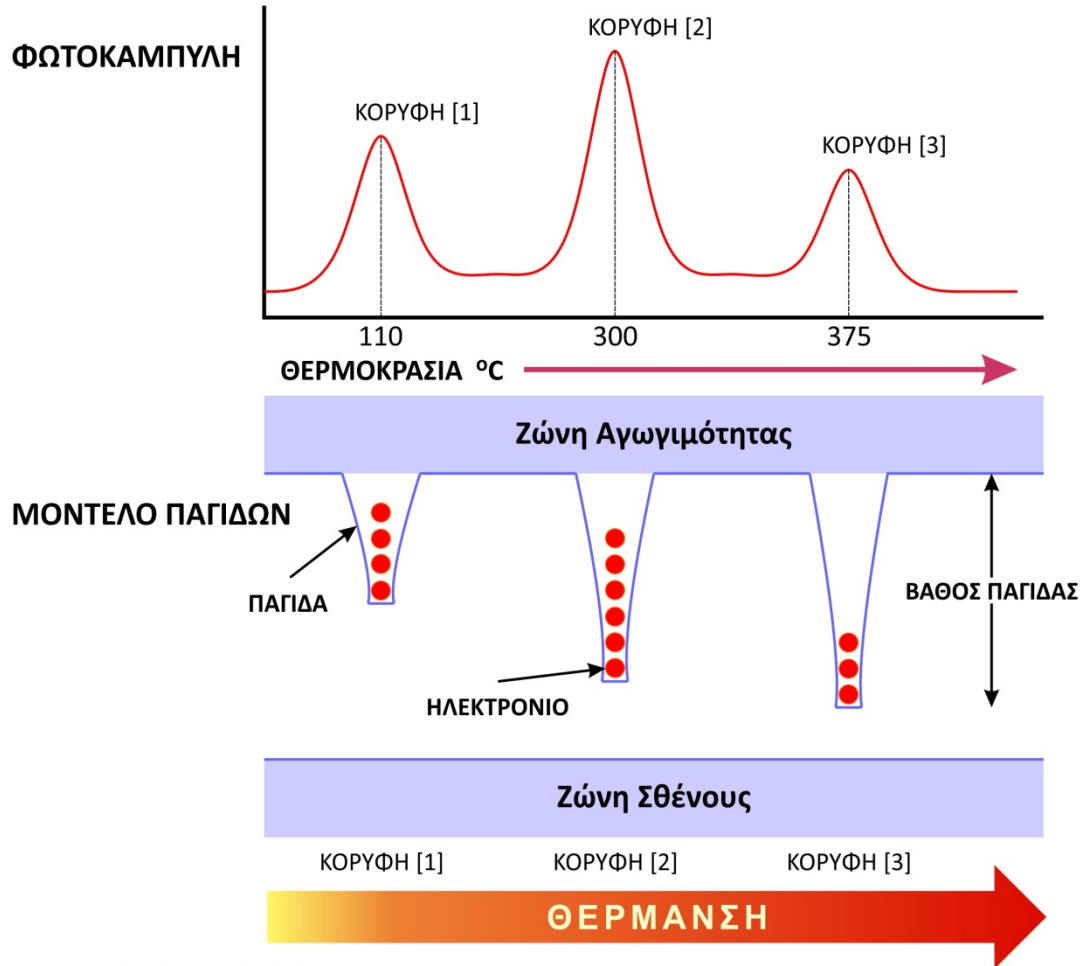


# Σχηματικό διάγραμμα συσκευής μέτρησης TL/OSL





# Μοντέλο παγίδων για TL φωτοκαμπύλες 1

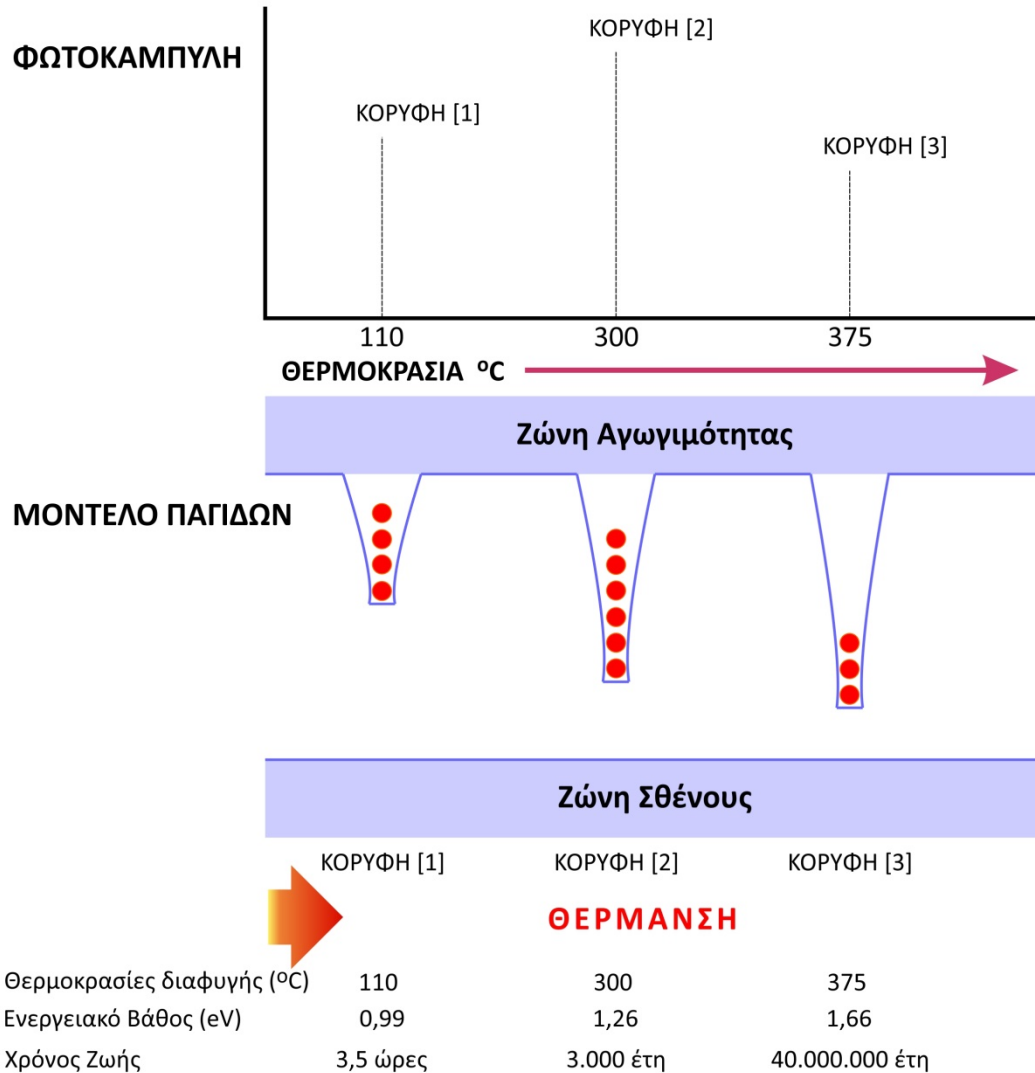


|                            |          |           |                |
|----------------------------|----------|-----------|----------------|
| Θερμοκρασίες διαφυγής (°C) | 110      | 300       | 375            |
| Ενεργειακό Βάθος (eV)      | 0,99     | 1,26      | 1,66           |
| Χρόνος Ζωής                | 3,5 ώρες | 3.000 έτη | 40.000.000 έτη |



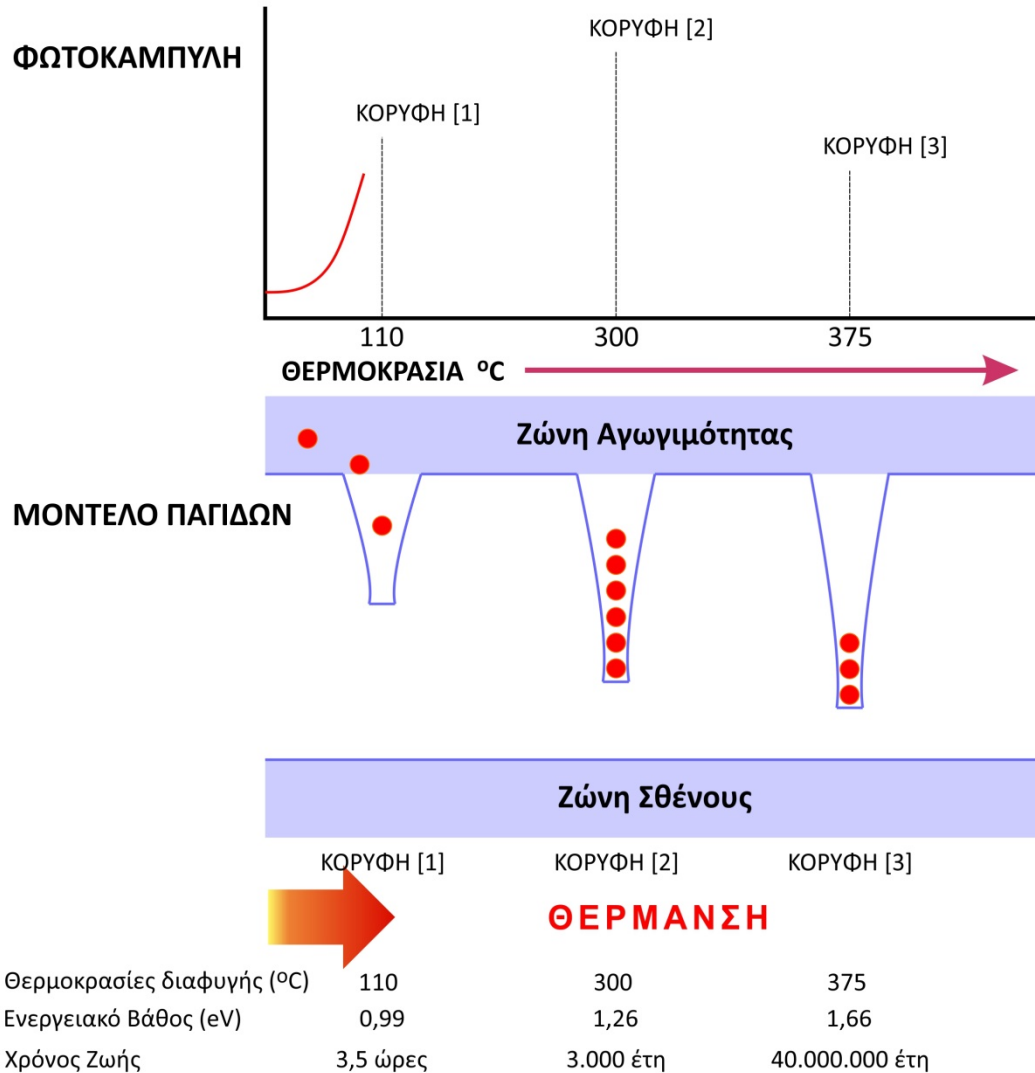


# Μοντέλο παγίδων για TL φωτοκαμπύλες 2



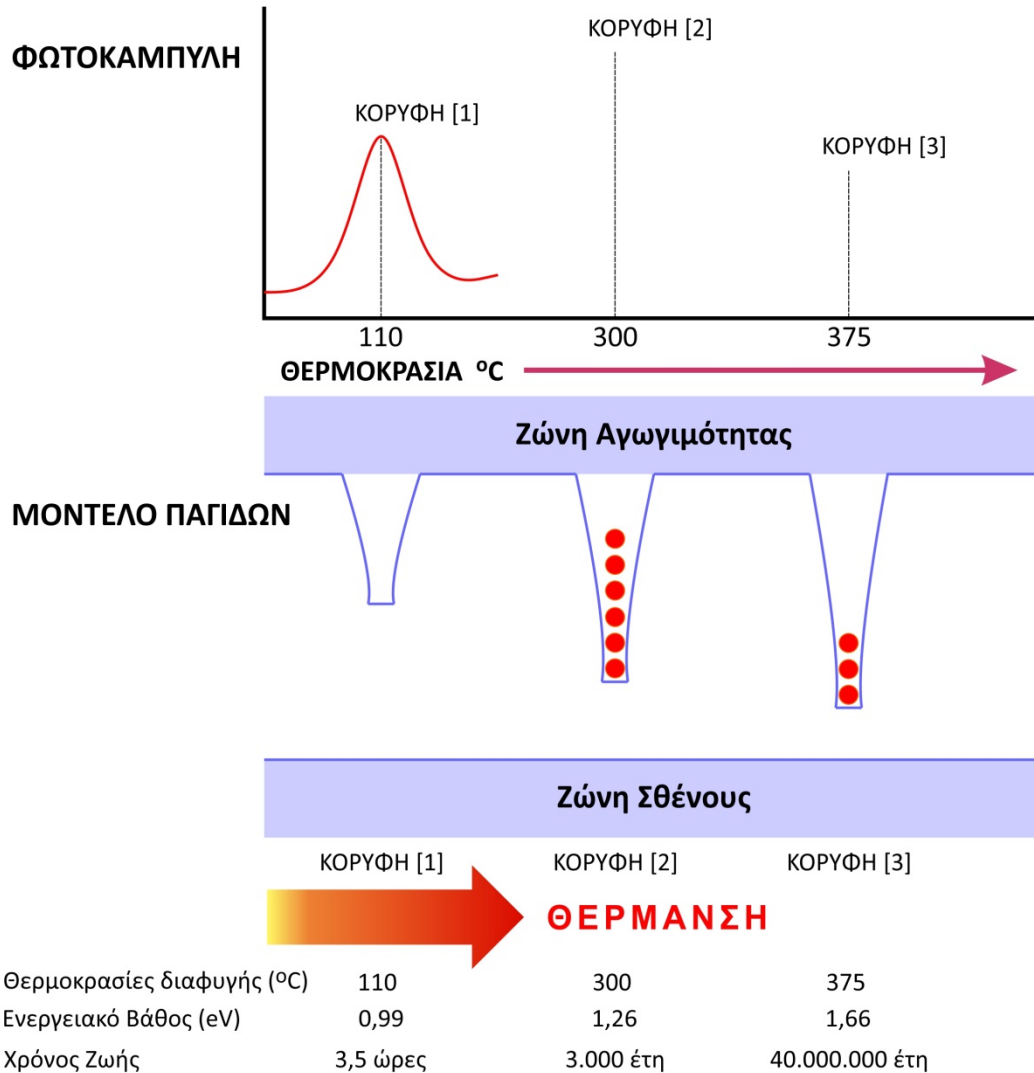


# Μοντέλο παγίδων για TL φωτοκαμπύλες 3



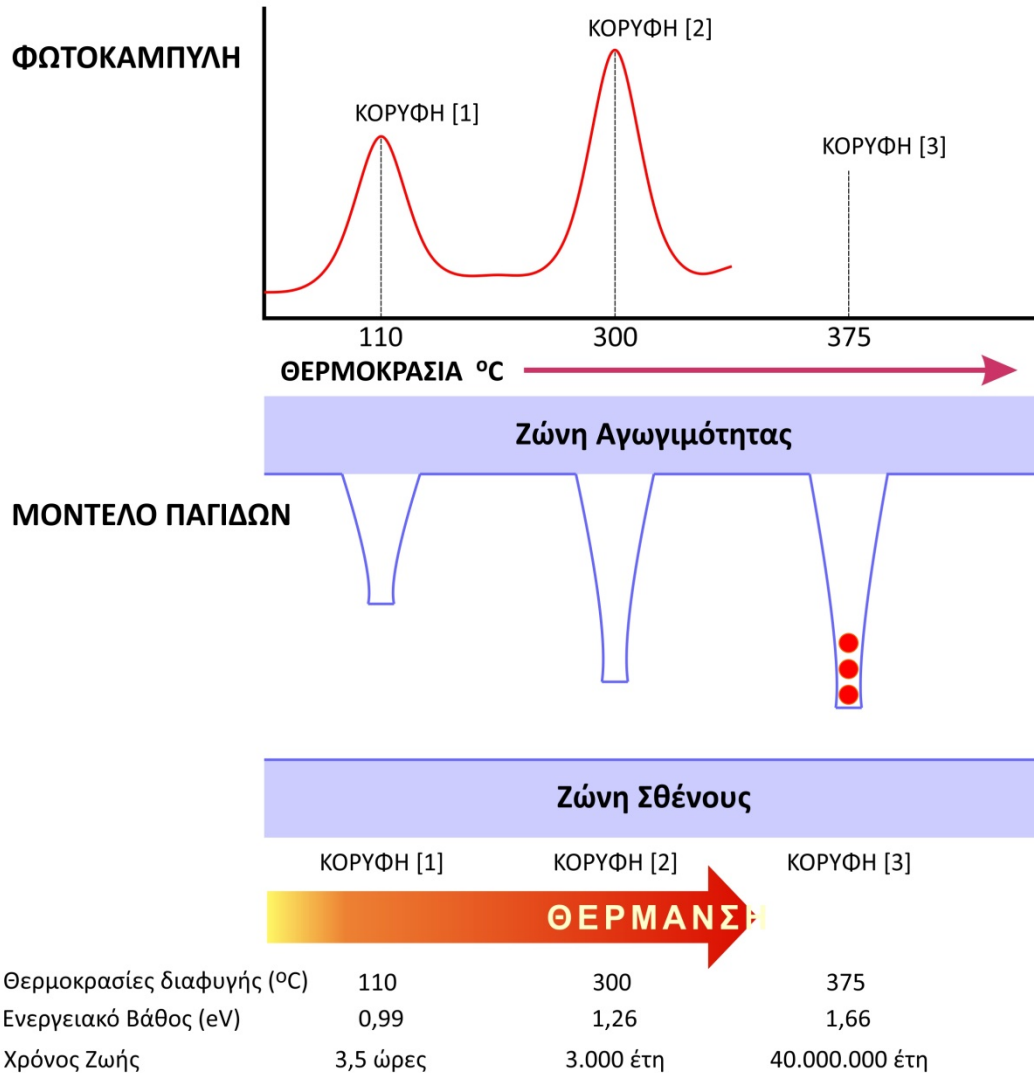


# Μοντέλο παγίδων για TL φωτοκαμπύλες 4



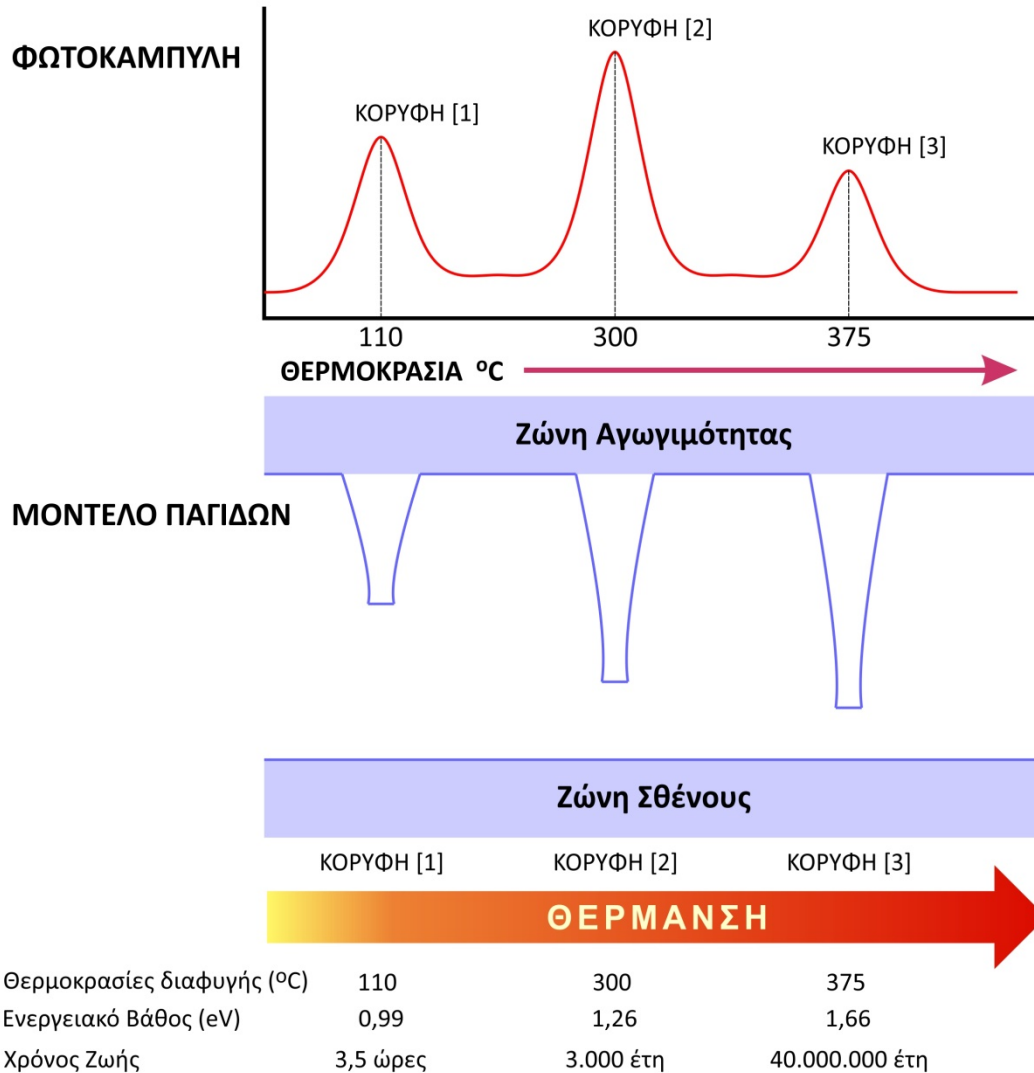


# Μοντέλο παγίδων για TL φωτοκαμπύλες 5





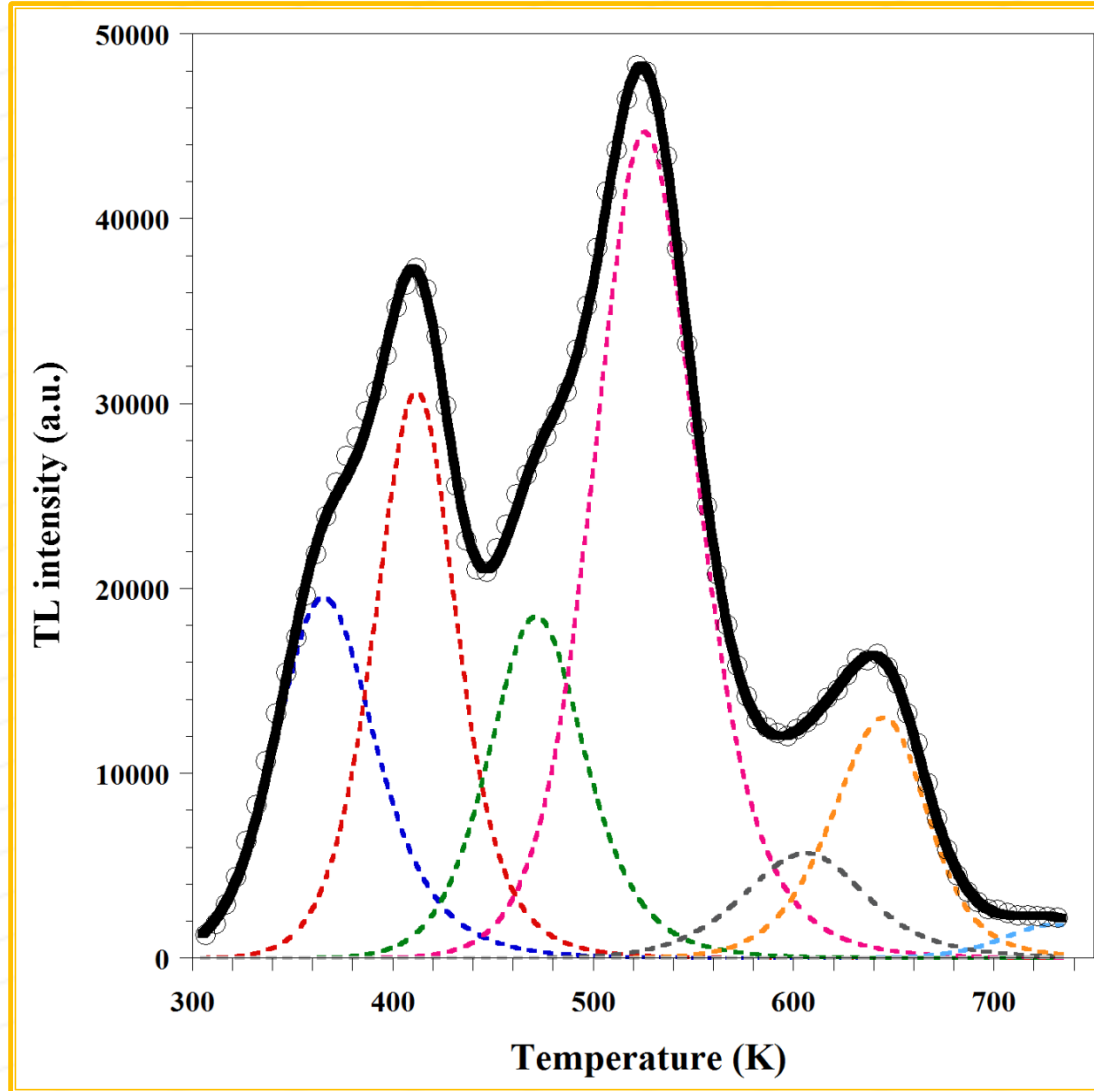
# Μοντέλο παγίδων για TL φωτοκαμπύλες 6





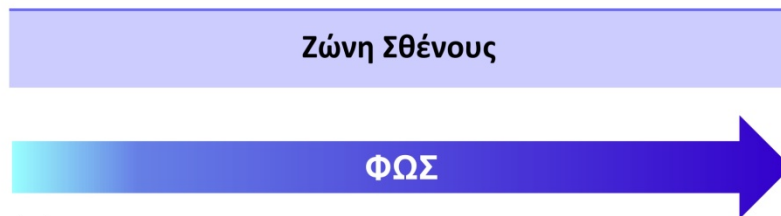
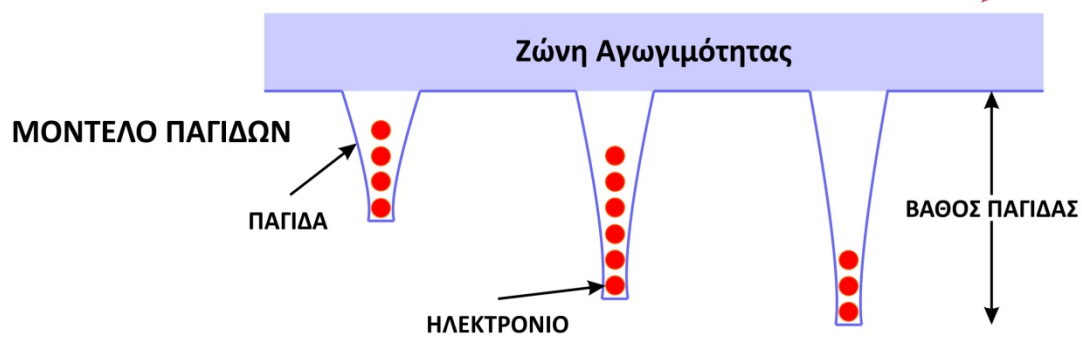
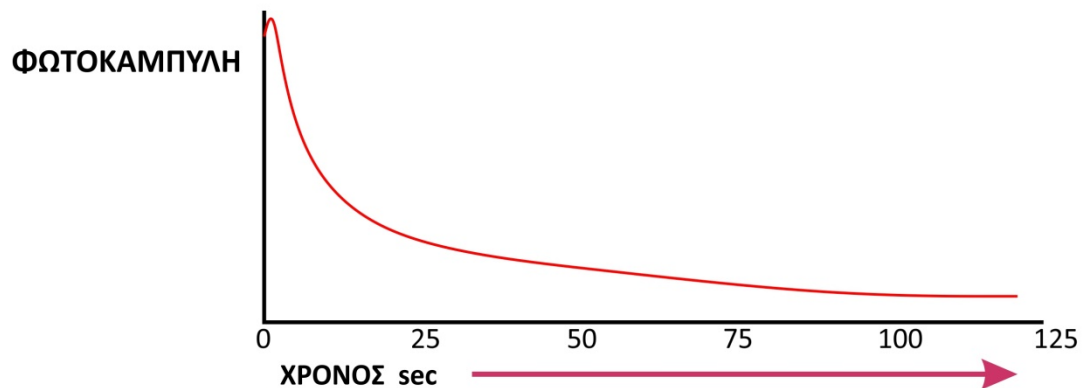


# Ανάλυση φωτοκαμπύλης





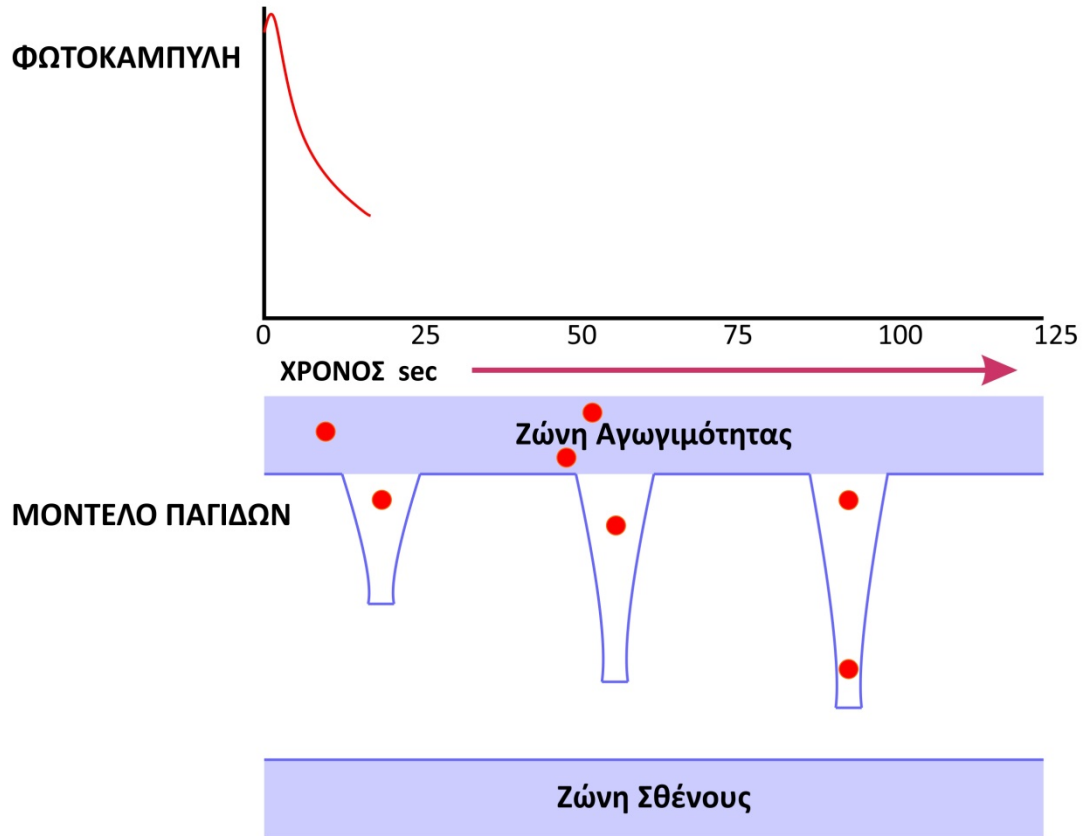
# Μοντέλο παγίδων για OSL φωτοκαμπύλες 1



|                            |          |           |                |
|----------------------------|----------|-----------|----------------|
| Θερμοκρασίες διαφυγής (°C) | 110      | 300       | 375            |
| Ενεργειακό Βάθος (eV)      | 0,99     | 1,26      | 1,66           |
| Χρόνος Ζωής                | 3,5 ώρες | 3.000 έτη | 40.000.000 έτη |



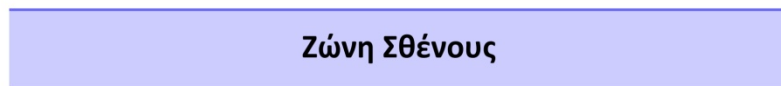
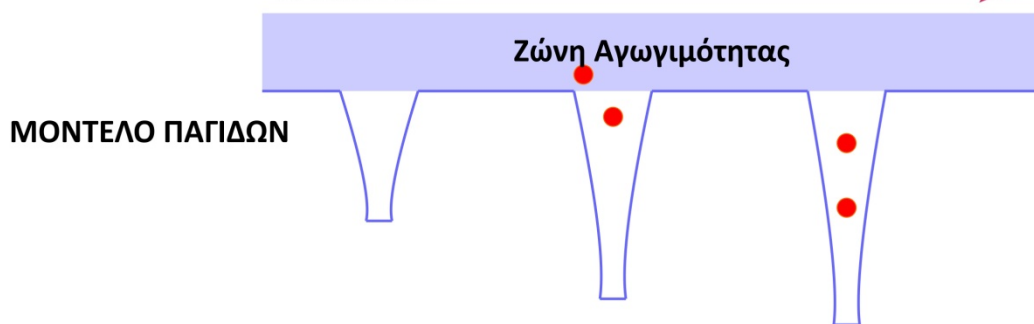
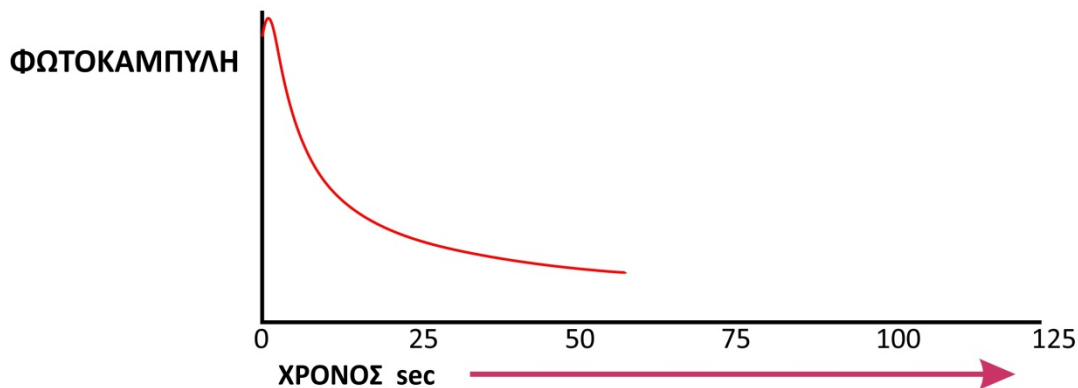
# Μοντέλο παγίδων για OSL φωτοκαμπύλες 2



|                            | 110      | 300       | 375            |
|----------------------------|----------|-----------|----------------|
| Θερμοκρασίες διαφυγής (°C) | 110      | 300       | 375            |
| Ενεργειακό Βάθος (eV)      | 0,99     | 1,26      | 1,66           |
| Χρόνος Ζωής                | 3,5 ώρες | 3.000 έτη | 40.000.000 έτη |



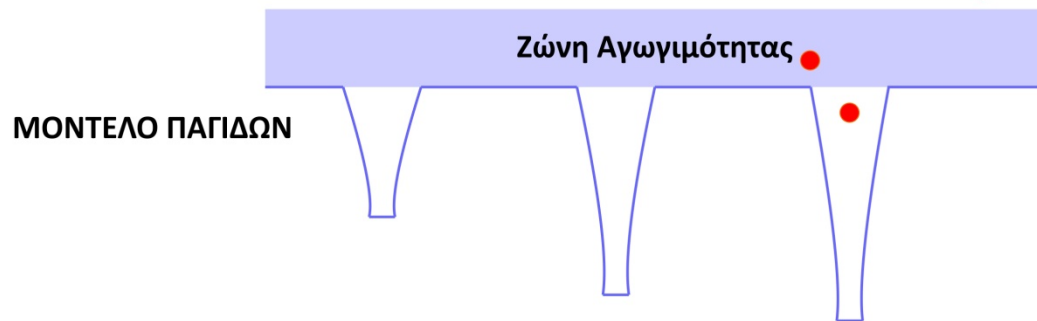
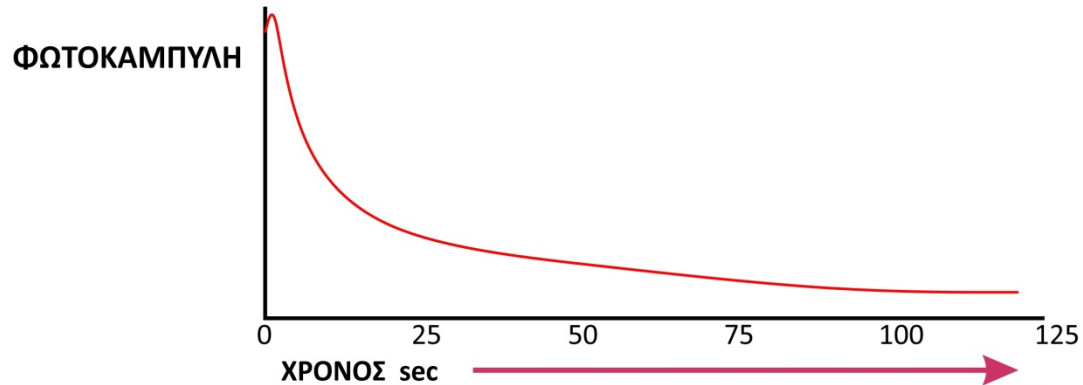
# Μοντέλο παγίδων για OSL φωτοκαμπίλες 3



|                            |          |           |                |
|----------------------------|----------|-----------|----------------|
| Θερμοκρασίες διαφυγής (°C) | 110      | 300       | 375            |
| Ενεργειακό Βάθος (eV)      | 0,99     | 1,26      | 1,66           |
| Χρόνος Ζωής                | 3,5 ώρες | 3.000 έτη | 40.000.000 έτη |



# Μοντέλο παγίδων για OSL φωτοκαμπύλες 4

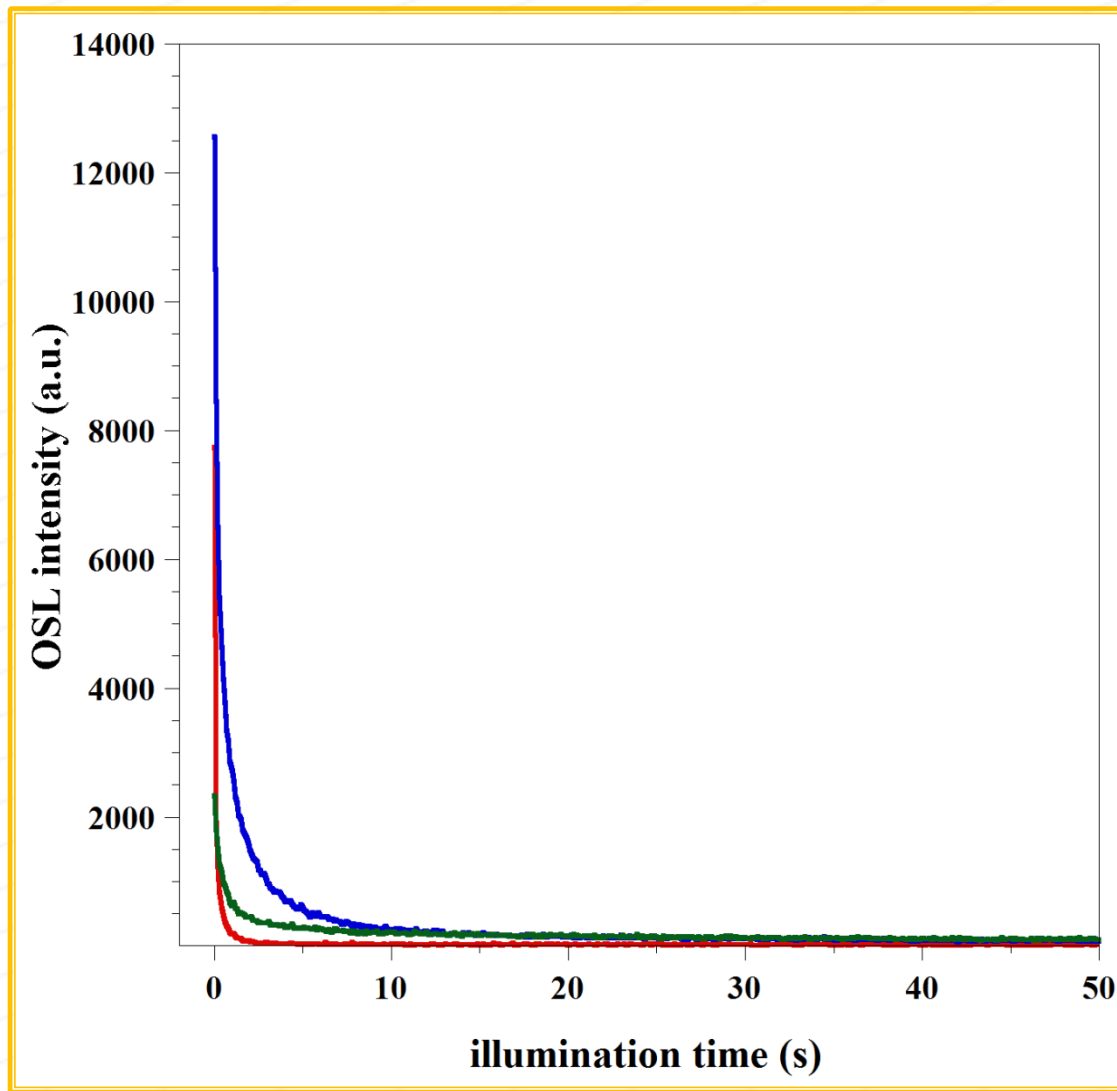


|                            |          |           |                |
|----------------------------|----------|-----------|----------------|
| Θερμοκρασίες διαφυγής (°C) | 110      | 300       | 375            |
| Ενεργειακό Βάθος (eV)      | 0,99     | 1,26      | 1,66           |
| Χρόνος Ζωής                | 3,5 ώρες | 3.000 έτη | 40.000.000 έτη |



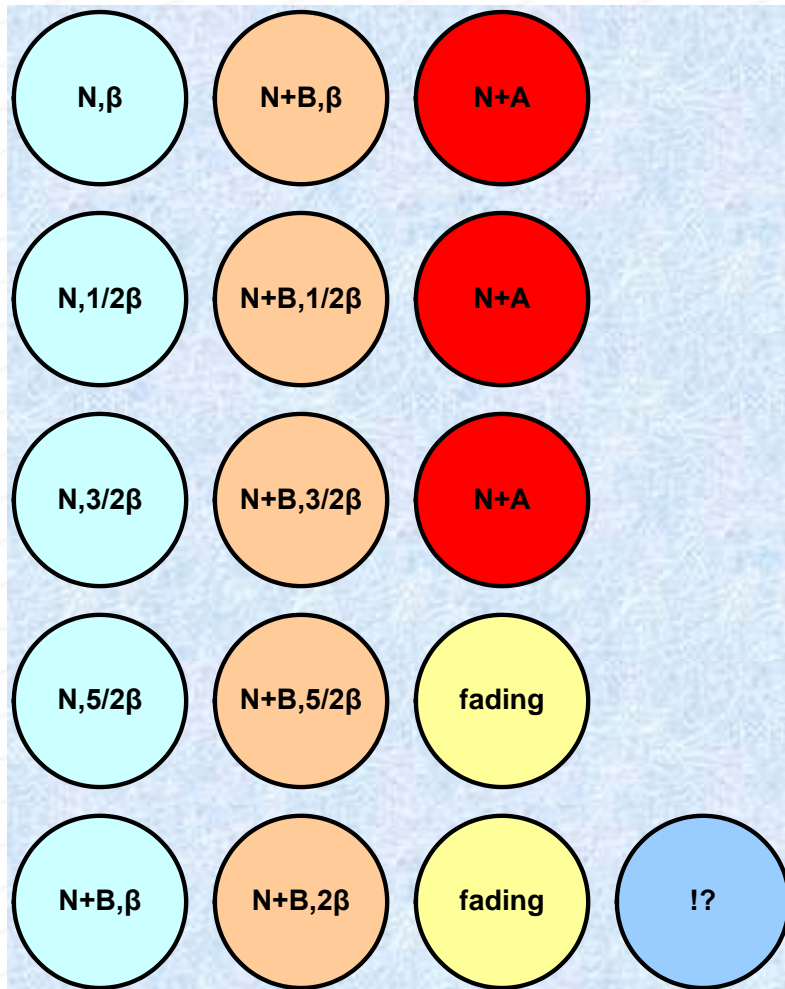


# Καμπύλη OSL (IRSL)





# «Πρωτόκολλο» μέτρησης Λεπτών Κόκκων



**N** – συνολική φυσική δόση

**$\beta$**  – τεχνητή δόση  $\beta$ -ακτινοβολίας περίπου 30% μεγαλύτερη από την αναμενόμενη φυσική

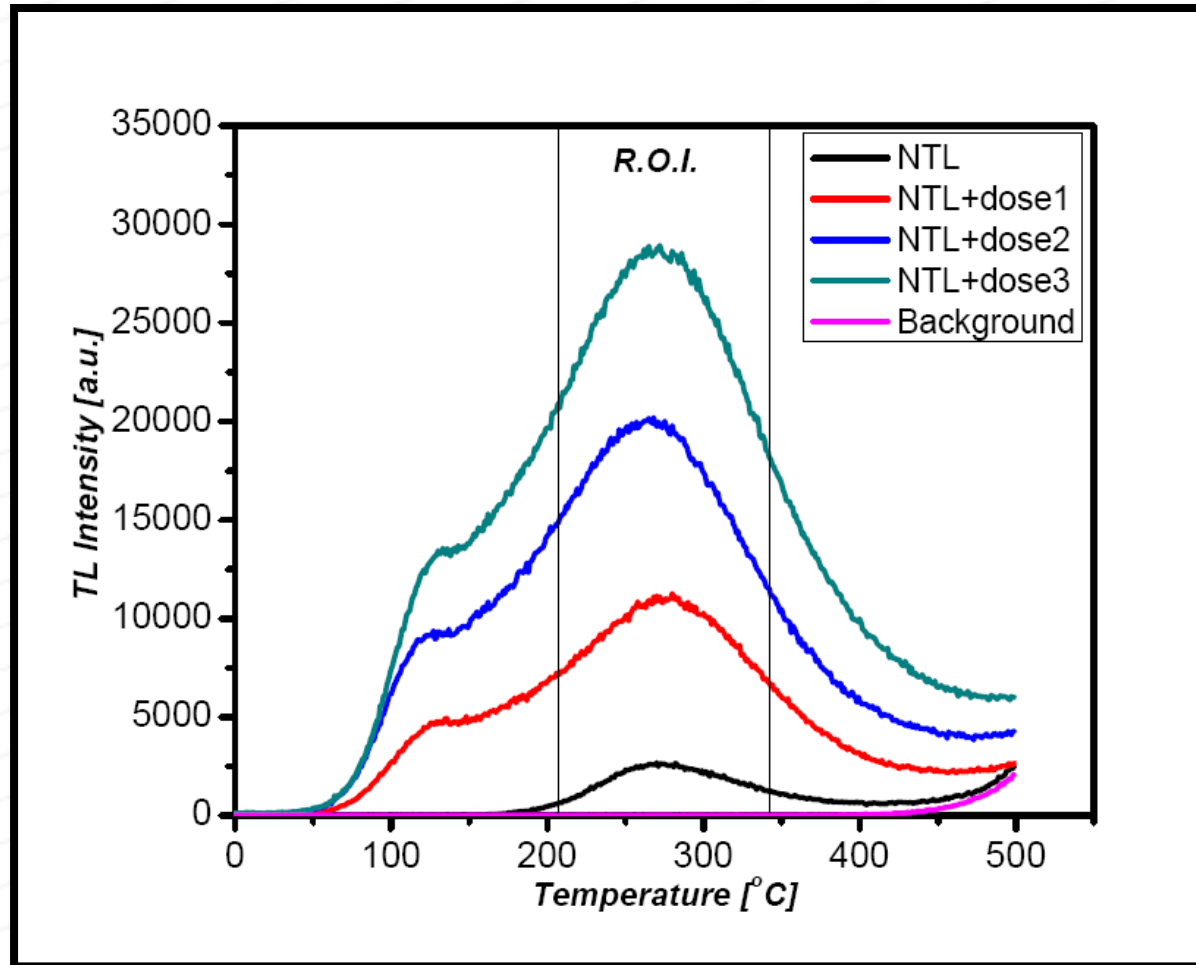
**B** – αυθαίρετη τεχνητή δόση  $\beta$ -ακτινοβολίας τέτοια ώστε  $N+B$  να βρίσκεται στην γραμμική περιοχή

**A** – τεχνητή δόση  $\alpha$ -ακτινοβολίας (για τον προσδιορισμό του  $k$ )

**fading** – δισκία για τον έλεγχο του anomalous fading

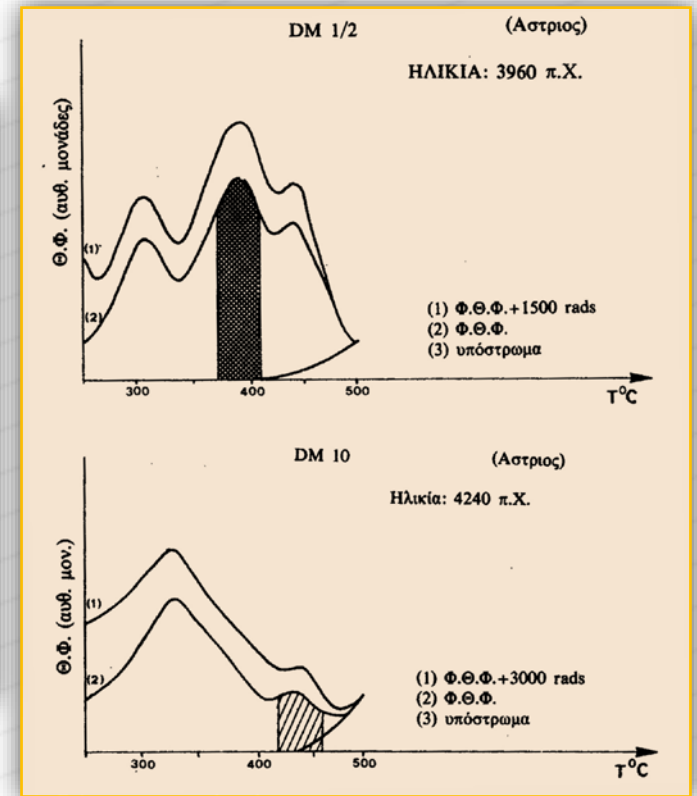
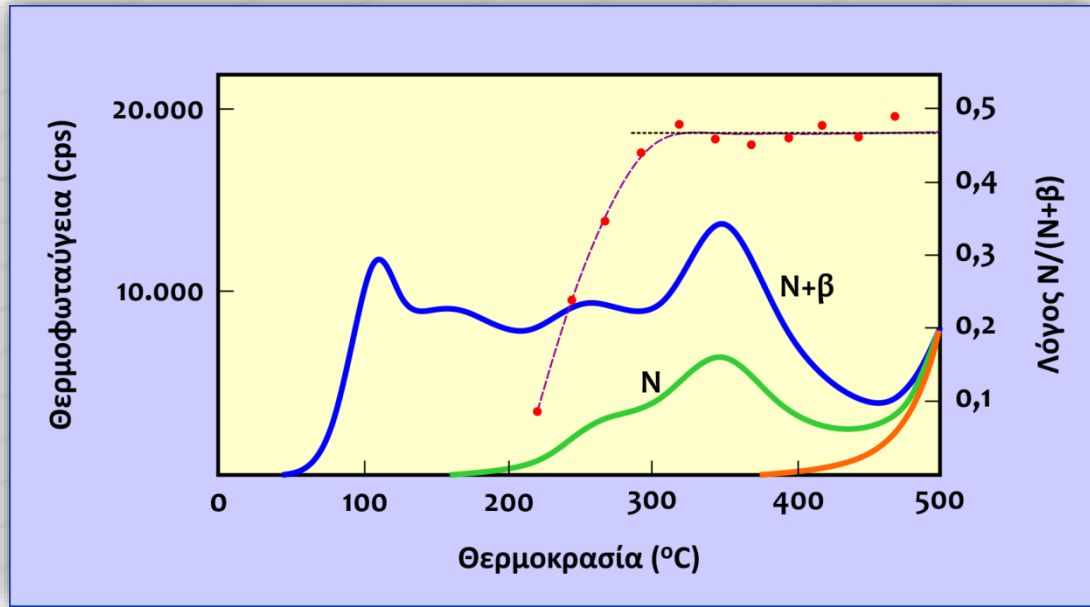


# Πειραματικές φωτοκαμπύλες



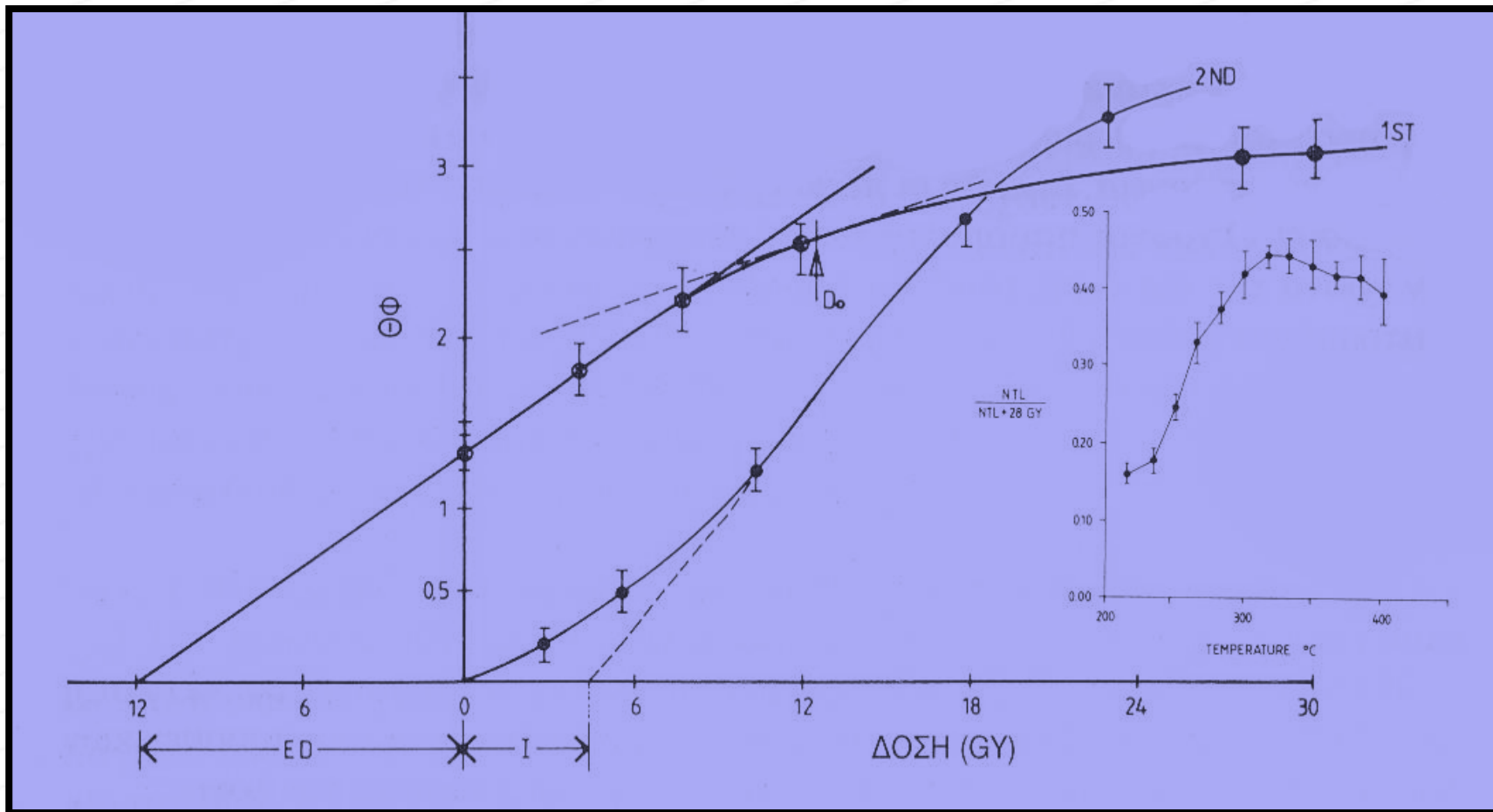


# TL plateau test





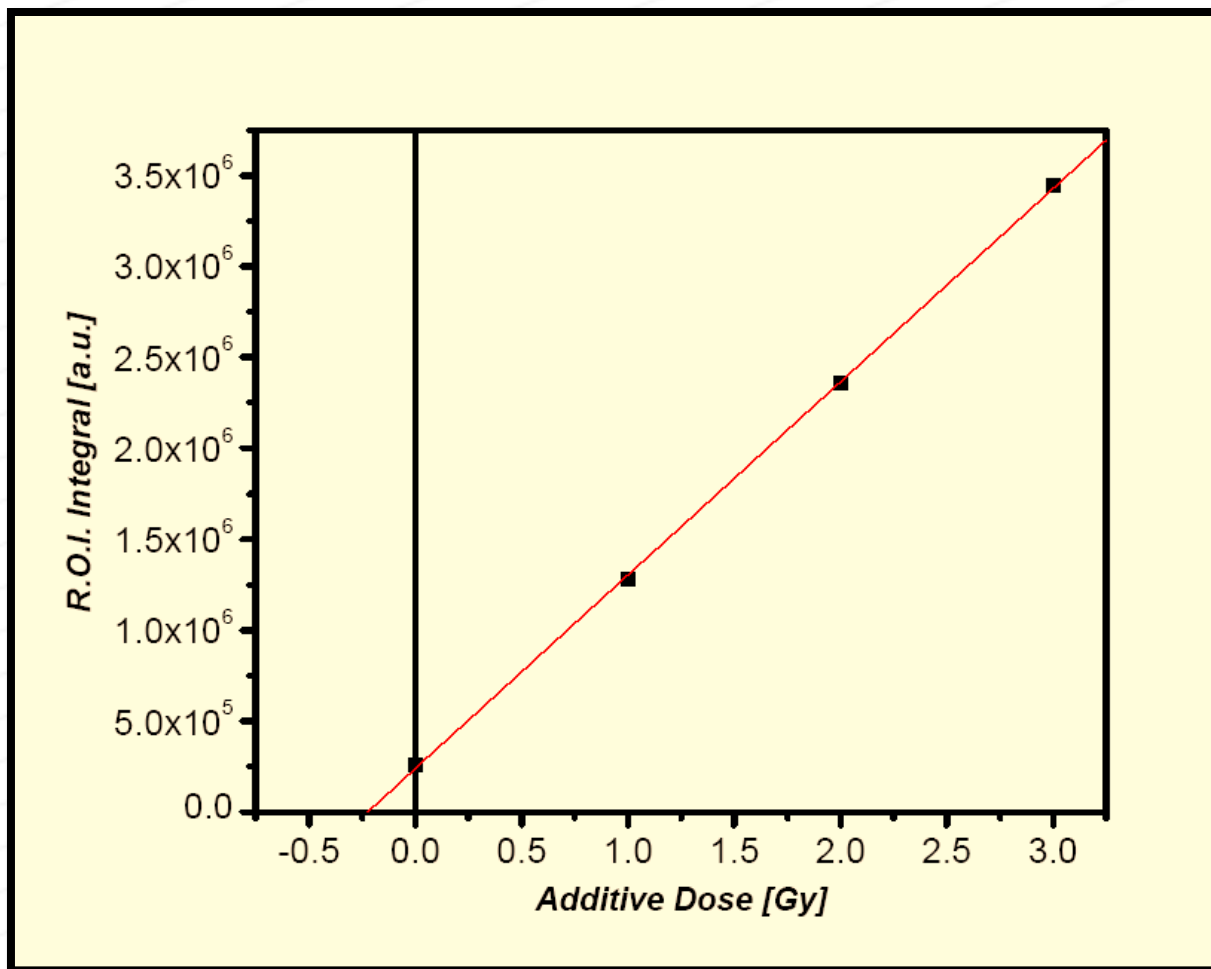
# Υπεργραμμικότητα – κορεσμός







# Προσδιορισμός Ισοδύναμης Δόσης



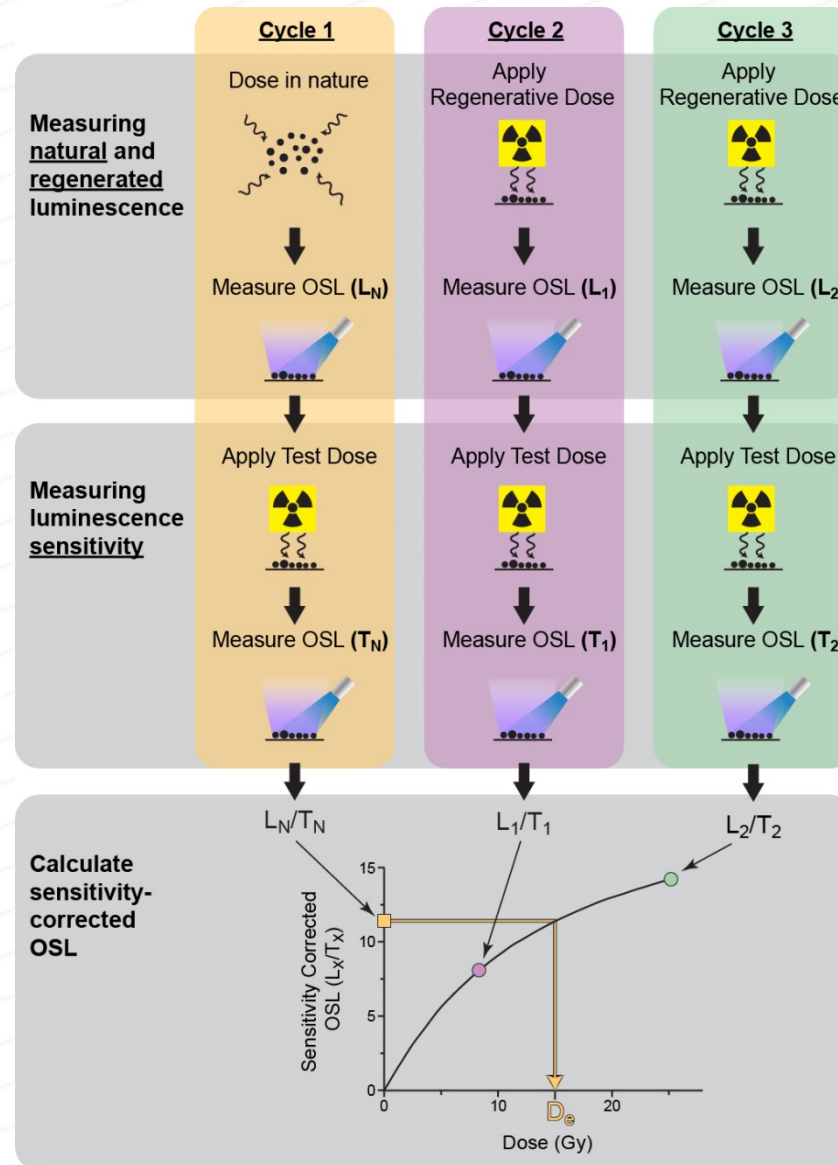


# Πρωτόκολλο **Single Aliquot Regeneration**

1. Ακτινοβολήση με μία δόση «αναγέννησης»  $D_i$
2. Προθέρμανση στους 160 - 300 °C για 10 sec
3. Οπτικός σκανδαλισμός στους 125 °C για 100 sec: μέτρηση φωταύγειας [ $L_i$ ]
4. Ακτινοβολήση με σταθερή «δοκιμαστική» δόση  $D_t$
5. Θέρμανση στους 160 °C
6. Οπτικός σκανδαλισμός στους 125 °C για 100 sec: μέτρηση φωταύγειας [ $T_i$ ]
7. Μετά τη μέτρηση της φυσικής δόσης LN, και της πρώτης «δοκιμαστικής» δόσης TN ( $i=0$ ), επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 6 για ένα εύρος συνεχώς αυξανόμενων δόσεων «αναγέννησης» ( $i=1, 2, 3$ ), μία μηδενική δόση ( $i=4$ ) και μία επανάληψη της πρώτης δόσης «αναγέννησης» ( $i=5$ )



# Πρωτόκολλο **Single Aliquot Regeneration** (συν)





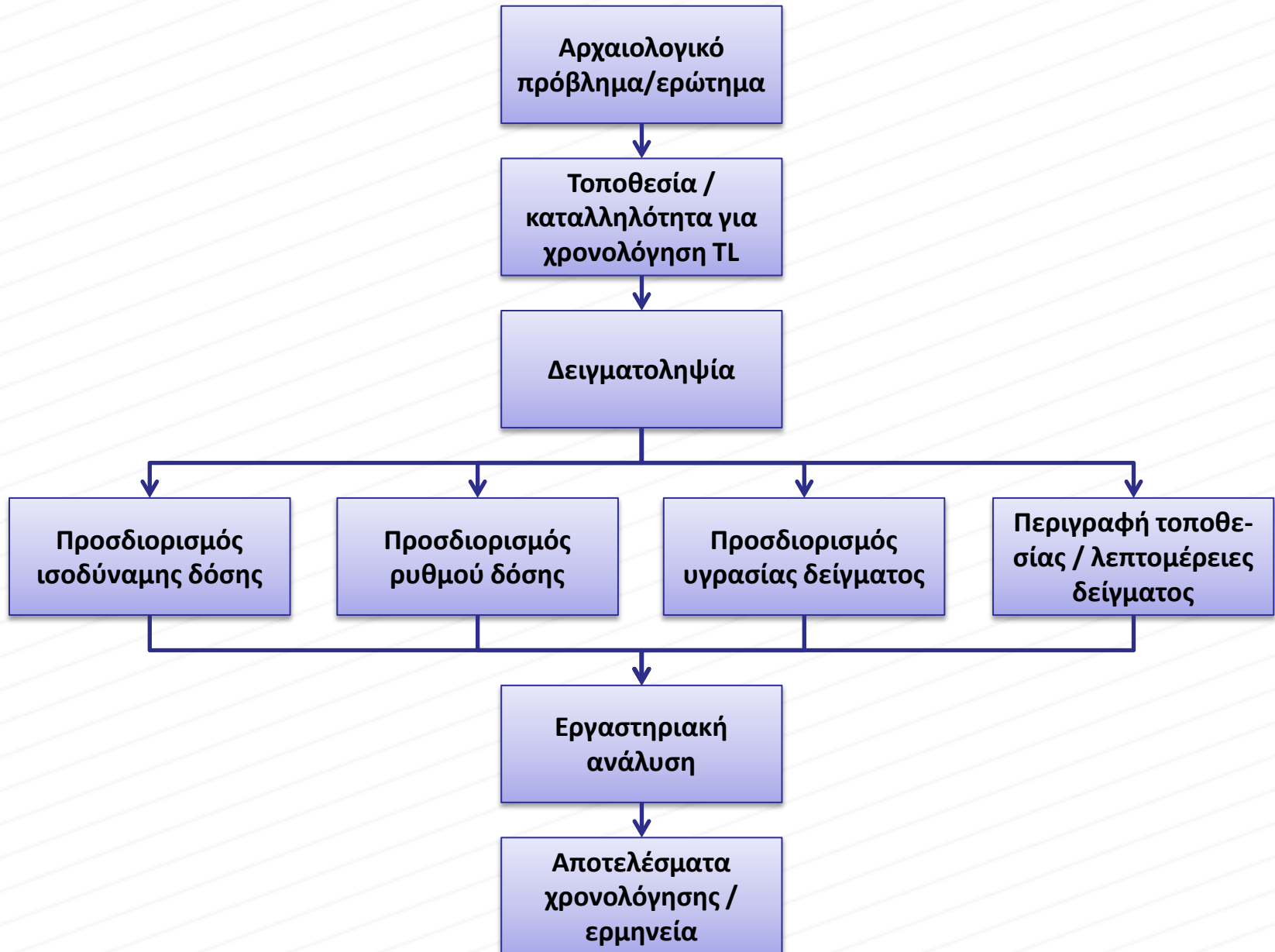
# Επιλογή υλικού και μεθόδου χρονολόγησης



1. Τι «χρονολογήσιμα» υλικά είναι παρόντα;
2. Είναι τα υλικά αυτά χρήσιμα για την αναμενόμενη χρονική περίοδο του στρώματος;
3. Τι χρονολογείται στην πράξη με τη χρήση του επιλεγμένου υλικού;
4. Είναι δυνατό η(οι) επιλεγμένη(ες) μέθοδος(οι) χρονολόγησης να παράσχει(ουν) ικανοποιητική ακρίβεια για να απαντηθούν τα ερωτήματα που ενδιαφέρουν;
5. Είναι τα «χρονολογήσιμα» υλικά νεώτερα, παλαιότερα ή σχεδόν σύγχρονα με τα υπόλοιπα αρχαιολογικά ευρήματα;



# Διαδικασία TL χρονολόγησης







# Εργασίες χρονολόγησης

## Ενέργειες πεδίου

Συλλογή δειγμάτων  
για TL χρονολόγηση



Δυνατότητα εκτέλεσης  
μετρήσεων πεδίου για τον  
ρυθμό δόσης κατά το χρόνο  
της δειγματοληψίας

Εργαστηριακή κατεργασία  
δειγμάτων για την εξαγωγή  
υλικού για φωταυγειακές  
μετρήσεις (συνήθως χαλαζίας)

Χρήση μέρους του προς  
χρονολόγηση δείγματος για  
εργαστηριακές μετρήσεις του  
ρυθμού δόσης

Εκτέλεση φωταυγειακών  
μετρήσεων για τον  
υπολογισμό της **ισοδύναμης  
δόσης ( $D_e$ )**



Υπολογισμός του **ρυθμού  
δόσης** για τη μέθοδο (και το  
υλικό) που χρησιμοποιείται για  
τις φωταυγειακές μετρήσεις  
λαμβάνοντας υπόψη και τις  
συνθήκες του χώρου  
ανασκαφής

$$\text{Ηλικία (έτη)} = \frac{\text{Ισοδύναμη δόση } (D_e)}{\text{Ρυθμός δόσης}}$$

Ενέργειες εργαστηρίου



# Δειγματοληψία

- Αριθμός δειγμάτων 6-12 (για καλή στατιστική)
- Μέγεθος δειγμάτων τουλάχιστον 6 mm πάχος, 10 gr βάρος (προτιμώνται μεγαλύτερα δείγματα)
- Δείγματα από διαφορετικούς πηλούς εφόσον είναι διαθέσιμα
- Δείγματα από κατάλληλη θέση και βάθος ταφής
- Να αποφεύγεται η παρατεταμένη έκθεση στο ηλιακό φως και η υπερβολική θέρμανση των δειγμάτων (άνω των 100 °C)
- Να αποφεύγεται η έκθεση των δειγμάτων δε διάφορες ακτινοβολίες (υπεριώδης ακτινοβολία, ακτίνες-Χ, γ-ακτινοβολία κλπ). Οι ακτίνες-Χ των αεροδρομίων δεν προκαλούν ιδιαίτερο πρόβλημα
- Τα δείγματα να μην πλένονται ή εφόσον έχουν πλυθεί αυτό να αναφέρεται κατά την παράδοσή τους στο εργαστήριο.



# Δειγματοληψία (συν.)

- Τα δείγματα αμέσως μετά την εκταφή τους να τοποθετούνται άμεσα μέσα σε μαύρες, αδιαφανείς πλαστικές σακούλες και να κλείνονται αεροστεγώς. Τυχόν κολλημένα χώματα να μην απομακρύνονται.
- Μικρή ποσότητα χώματος (1/2 -1 kg) από το μέρος που βρέθηκαν τα δείγματα να τοποθετείται επίσης σε αεροστεγώς κλειστές πλαστικές σακούλες και να συνοδεύει τα δείγματα. Έκθεση του χώματος στο φως ή άλλες ακτινοβολίες δεν επηρεάζει τις μετρήσεις
- Τα δείγματα να συνοδεύονται από πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες ταφής (υγρασία, ετήσιες διακυμάνσεις βροχόπτωσης, βάθος κλπ), φωτογραφίες και σχεδιαγράμματα του χώρου όπου να φαίνονται τα σημεία όπου βρέθηκαν καθώς και η γύρω περιοχή σε απόσταση τουλάχιστον 30 cm
- Εάν είναι δυνατόν η δειγματοληψία να γίνεται από ή παρουσία προσωπικού του εργαστηρίου όπου θα γίνει η χρονολόγηση





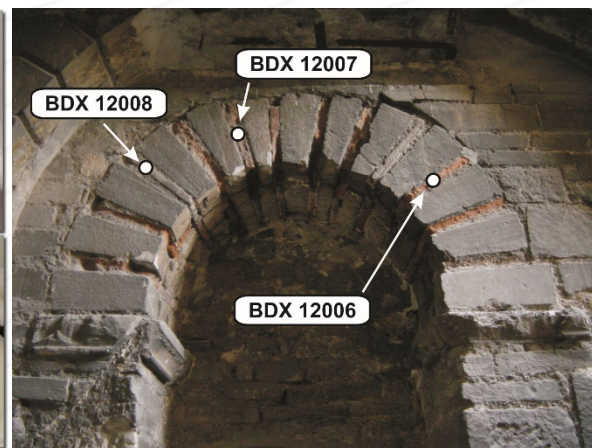
# Δειγματοληψία (συν.)



## Δειγματοληψία στο πεδίο

---

## Δειγματοληψία στο εργαστήριο ή επιτόπια







# Εξοπλισμός δειγματοληψίας πεδίου



- (1) Κολλητική ταινία και αλουμινόχαρτο
- (2) Αδιαφανείς σωλήνες μεταλλικοί ή PVC και καπάκια
- (3) Σημειωματάριο για την καταγραφή των πληροφοριών δειγματοληψίας
- (4) Σφυριά και μυστρί / μαχαίρι
- (5) Όργανα μέτρησης διαστάσεων (μέτρο, χάρακας κ.λπ.)
- (6) Πλαστικές σακούλες που σφραγίζουν και μαύρες.



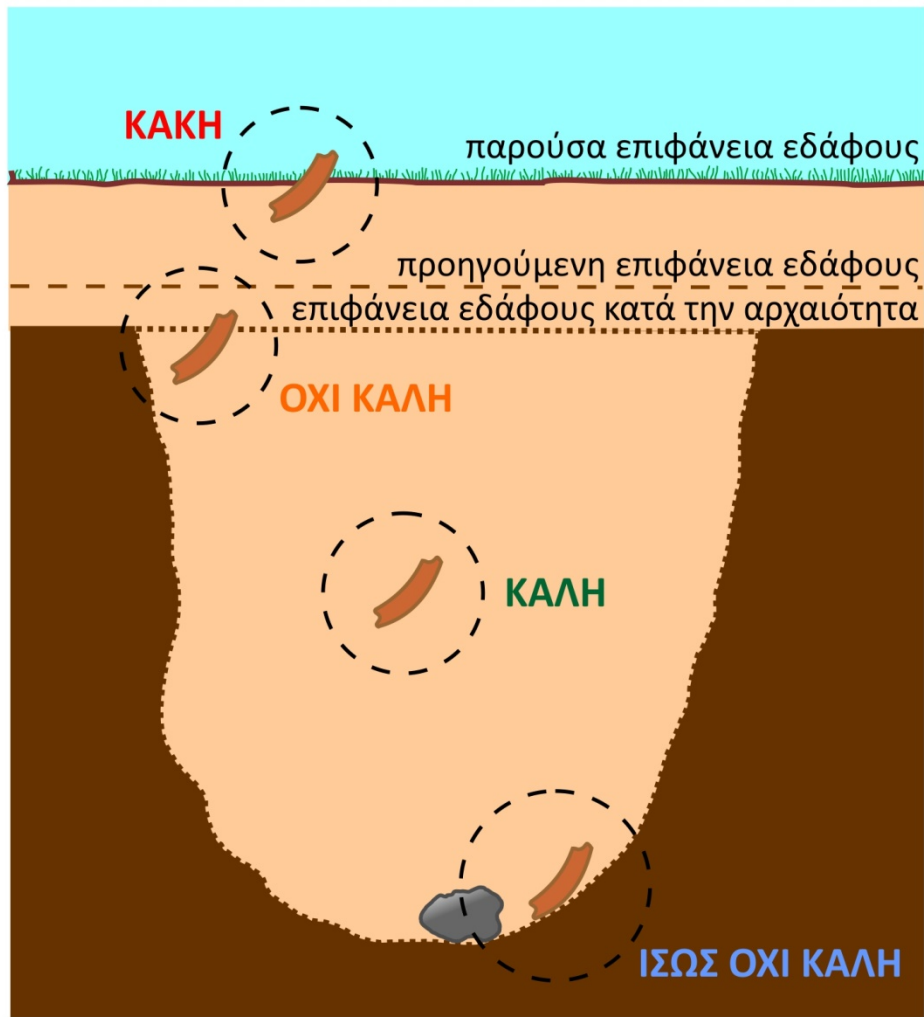
Συσκευασία δείγματος





# Καταλληλότητα θέσης δειγματοληψίας

## ΘΕΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ





# Φορητό σύστημα γ-φασματοσκοπίας





# α- και β- ακτινοβολητές







# Απαριθμητής α-σωματιδίων





# Ανιχνευτές α-σωματιδίων και δείγματα





# Συσκευή μέτρησης TL/OSL





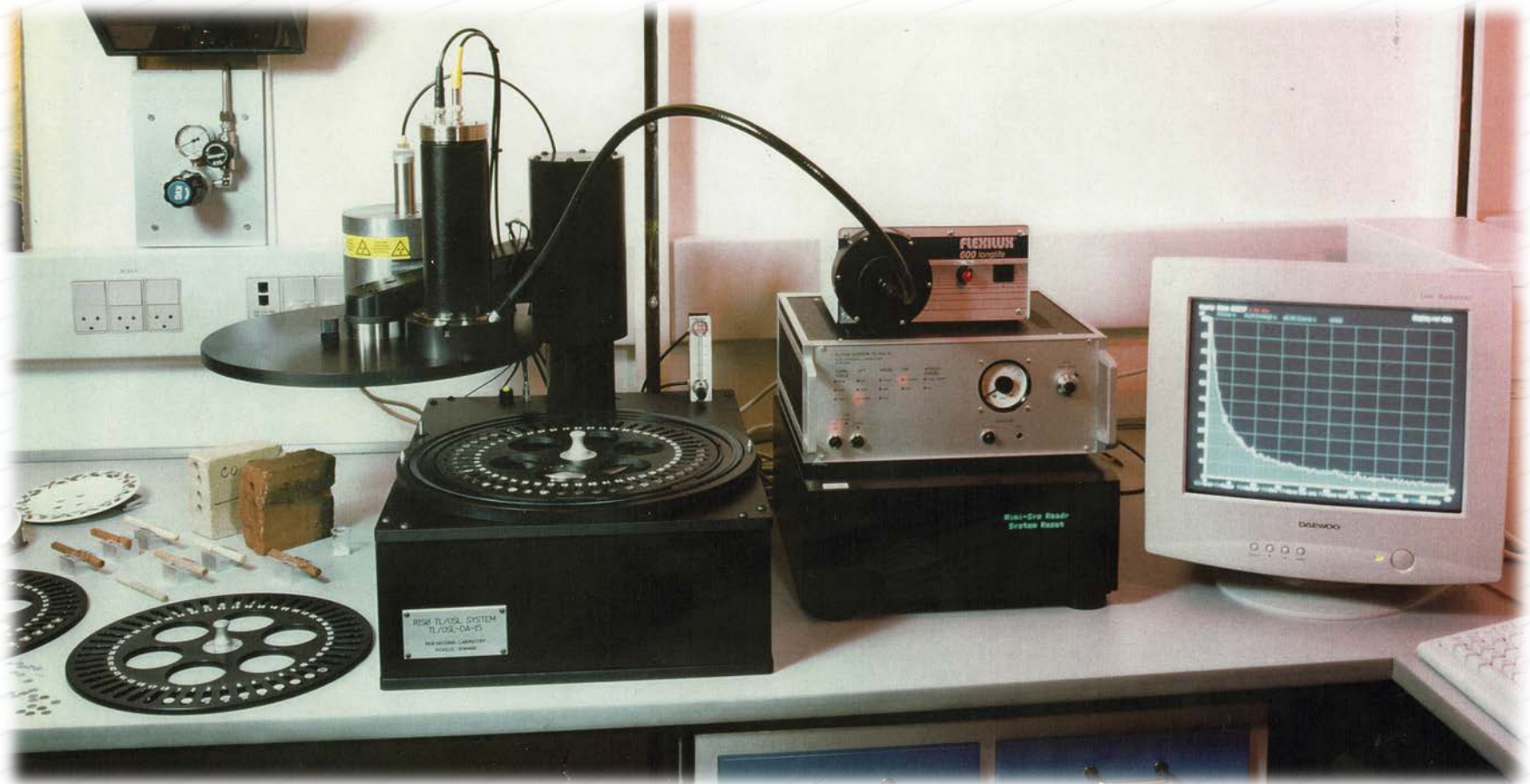


# Συσκευή μέτρησης TL/OSL (ανοιχτή...)





# Συσκευή μέτρησης TL/OSL και δείγματα





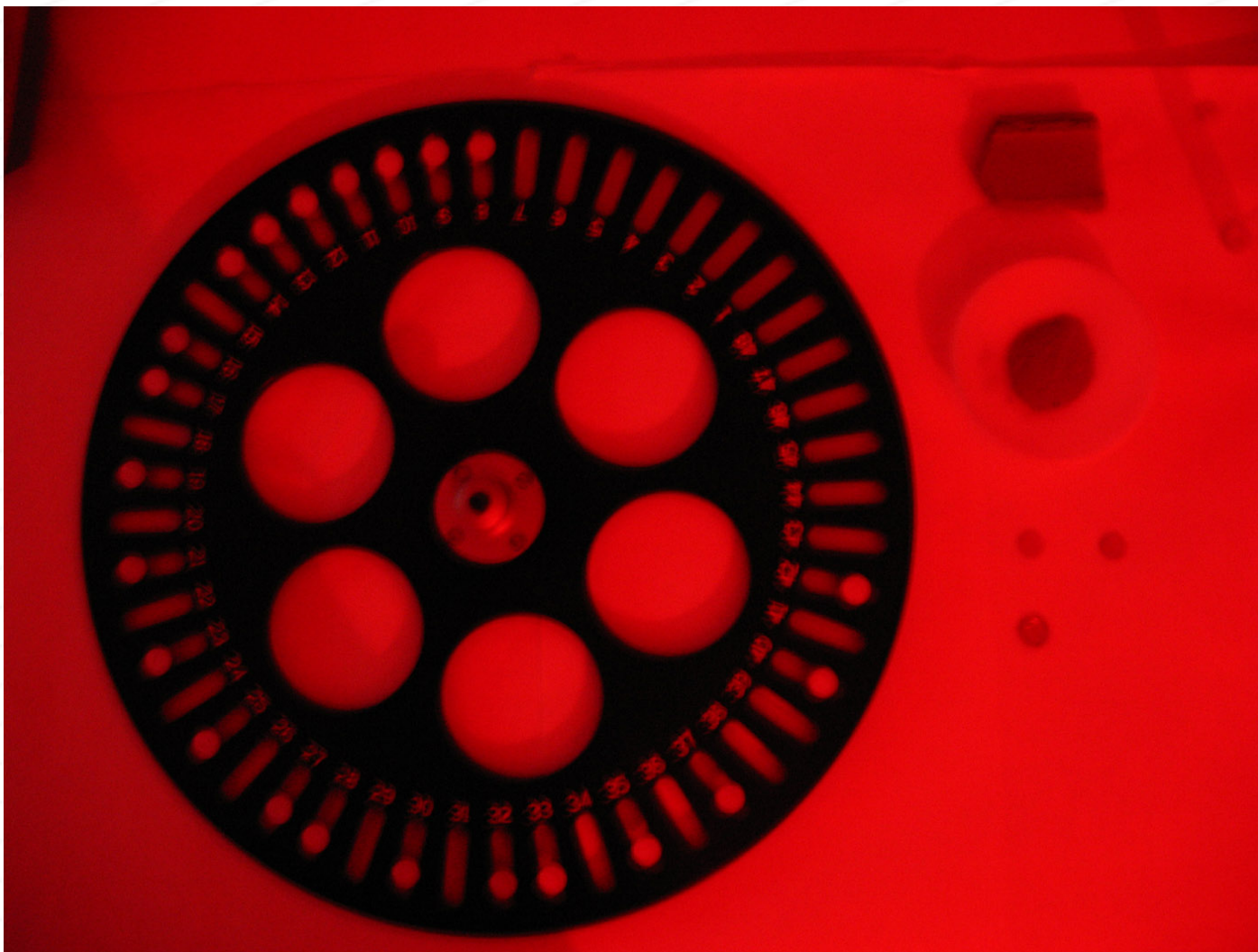
# Δειγματοφορέας και δείγματα





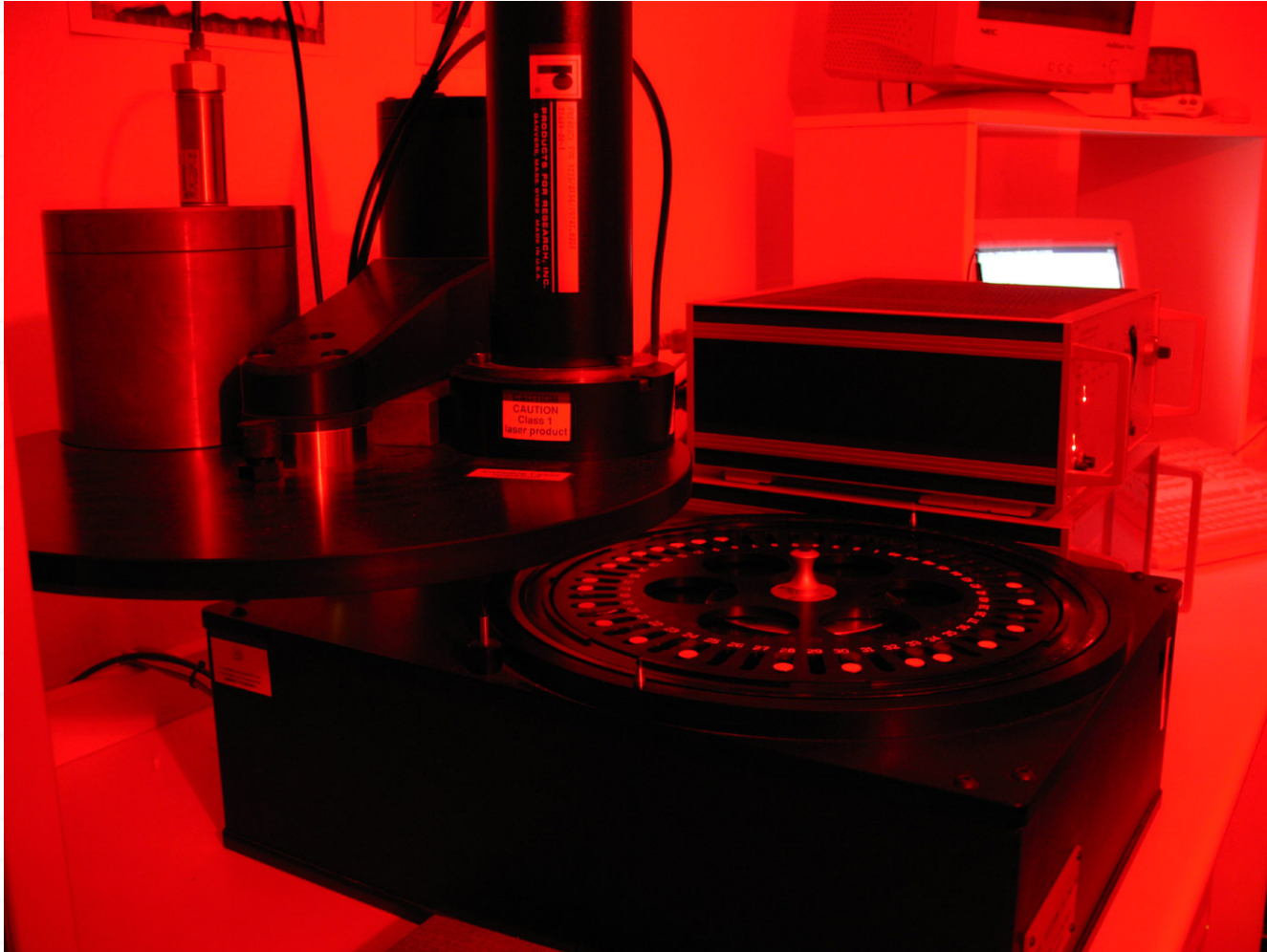


# Συνθήκες «φωτογραφικού θαλάμου»





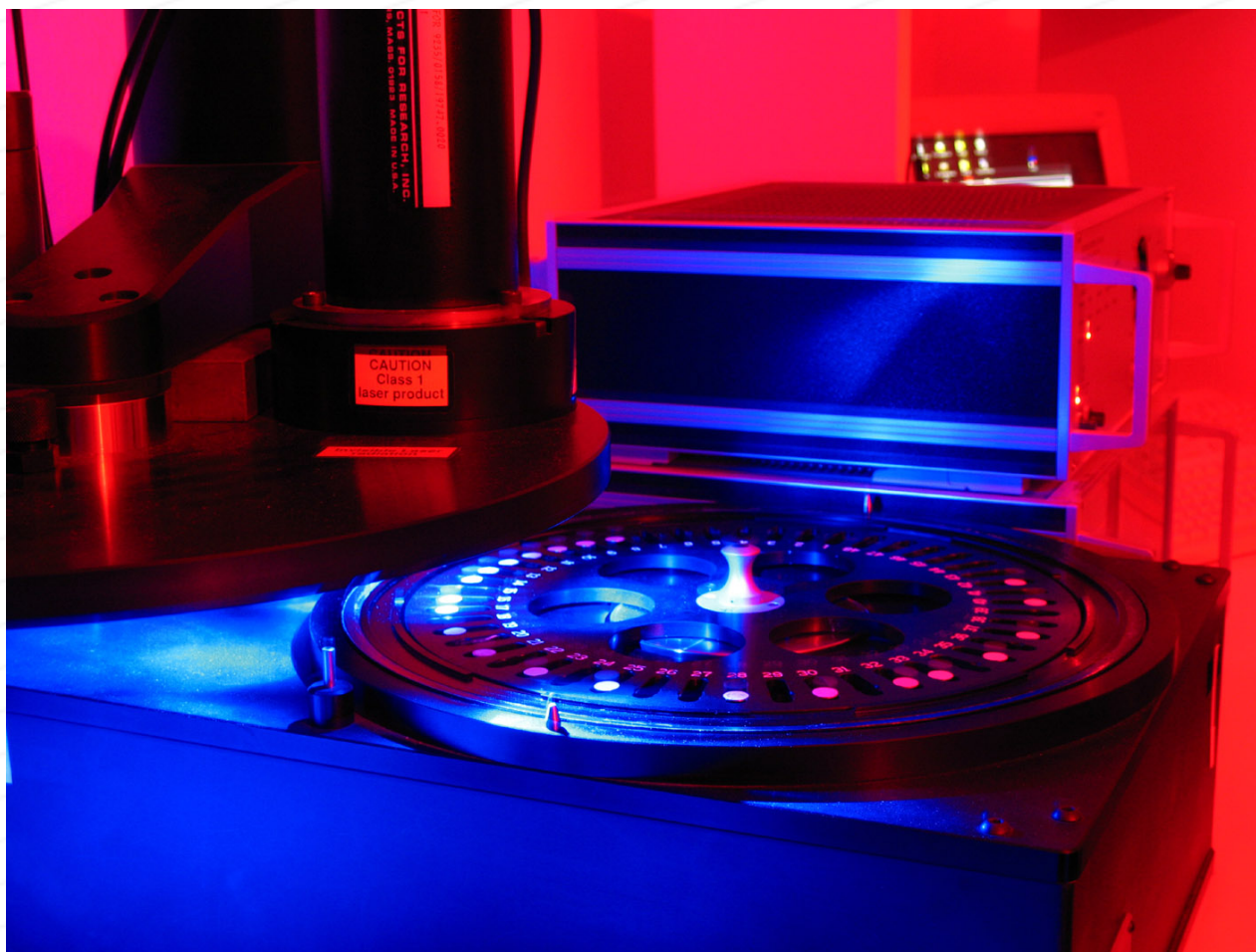
# Συνθήκες «φωτογραφικού θαλάμου»







# Blue-OSL (λεπτομέρεια)





# Blue-OSL (τοποθέτηση δειγματοφορέα)





# Ενδεικτικές εφαρμογές

- Νεολιθικά όστρακα αγγείων από διάφορα μέρη του κόσμου και την Ελλάδα (Δίμηνη, Σέσκλο)
- Ψημένοι πηλοί από τοιχώματα κλιβάνων και εστίες πύρωσης (Μινωικοί κλίβανοι στην Κρήτη)
- Πήλινα κεραμικά (terracotta) (χρονολογήσεις και έλεγχοι αυθεντικότητας)
- Λάβα
- Καμένοι πυριτόλιθοι (παλαιολιθική θέση Combe Grenal και επιφανειακή σπηλιά στην περιοχή Perigord της Γαλλίας)
- Μεταλλουργικές σκουριές από προϊστορικές και ρωμαϊκές θέσεις τήξης μολύβδου-αργύρου (Σίφνος, Θάσος)
- Καμένες πέτρες και κεραμικά από προϊστορικές θέσεις της Δανίας, Νορβηγίας και Σουηδίας
- Κεραμικά από Σαξωνικό μοναστήρι του τέλους του 17ου αιώνα στην Αγγλία
- Χρονολόγηση και έλεγχος αυθεντικότητας πορσελάνης κινεζικής προέλευσης από τον 3ο έως τον 20ο μ.Χ. αιώνα





# Χρονολόγηση έκρηξης ηφαιστείου Σαντορίνης

## Δείγμα:

- Υποθαλάσσιο, από το βαθύτερο σημείο της Μεσογείου (Πύλος-Πείραμα NESTOR)

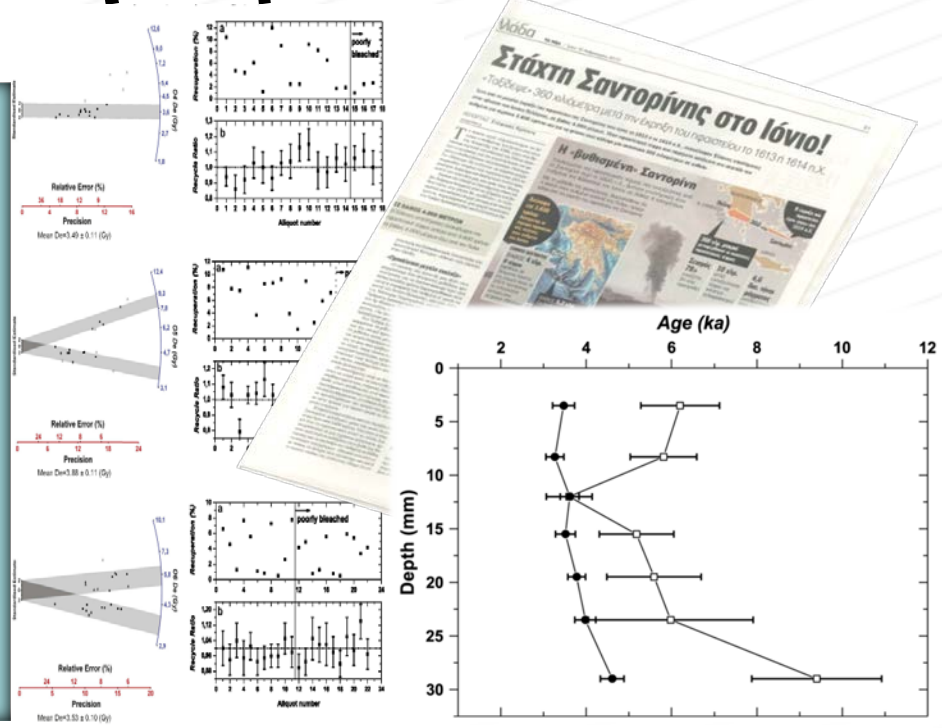
## Μετρήσεις:

- Σε στρώματα
- Χρονολόγηση TL
- Χρονολόγηση OSL

Προηγούμενες χρονολογήσεις  
 1624 δενδροχρονολόγηση  
 1645±20 ice core (?)  
 1400-1700 C-14

## Αποτελέσματα – συμπεράσματα:

- Δείγμα O5, βάθος 12 mm, ηλικία TL = ηλικία OSL = **3,61±0,22 ka π.Σ.** (**1.605 ± 220 π.Χ.**)



**Table 1**  
 Summary of physical characteristics and luminescence dating results

| Layer | Depth (mm) | K <sub>2</sub> O (%) | <sup>a</sup> Δ <sup>w</sup> (%) | <sup>b</sup> Δ <sup>o</sup> (%) | DR <sup>c</sup> (Gy/ka) | TL D <sub>e</sub> (Gy)   | σ <sub>TL</sub> (%) | ΔT <sub>plateau</sub> (°C) | OSL D <sub>e</sub> (Gy) | σ <sub>OSL</sub> (%) | n <sub>OSL</sub> <sup>d</sup> | TL age (ka) | σ <sub>TL</sub> age (%) | OSL age (ka) | σ <sub>OSL</sub> age (%) |
|-------|------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------|-------------------------|--------------|--------------------------|
| O1    | 29         | 1.61 ± 0.09          | 52.8                            | 51.9                            | 1.04 ± 0.03             | 9.78 ± 1.18              | 12.1                | 80                         | 4.80 ± 0.13             | 2.8                  | 11/11                         | 9.40 ± 1.52 | 16.2                    | 4.61 ± 0.28  | 6.0                      |
| O2    | 23.5       | 1.68 ± 0.03          | 54.5                            | 55.3                            | 0.998 ± 0.03            | 5.97 ± 1.81              | 30.5                | 75                         | 3.97 ± 0.11             | 2.8                  | 15/15                         | 5.98 ± 1.93 | 33.5                    | 3.98 ± 0.24  | 6.1                      |
| O3    | 19.5       | 1.70 ± 0.01          | 54.7                            | 56.3                            | 1.01 ± 0.03             | 5.65 ± 0.71              | 12.5                | 85                         | 3.82 ± 0.08             | 2.0                  | 15/15                         | 5.59 ± 1.01 | 17.9                    | 3.78 ± 0.21  | 5.5                      |
| O4    | 15.5       | 1.71 ± 0.02          | 56.1                            | 70.4                            | 0.99 ± 0.04             | 5.17 ± 0.76              | 15.1                | 75                         | 3.49 ± 0.11             | 3.2                  | 14/17                         | 5.18 ± 0.87 | 16.8                    | 3.51 ± 0.23  | 6.7                      |
| O5    | 12         | 1.71 ± 0.03          | 56.7                            | 66.7                            | 1.08 ± 0.03             | 3.12 ± 0.46 <sup>e</sup> | 11.8                | 95                         | 3.88 ± 0.11             | 3                    | 13/19                         | 3.62 ± 0.57 | 15.6                    | 3.61 ± 0.22  | 6.1                      |
| O6    | 8.3        | 1.77 ± 0.03          | 57.4                            | 69.6                            | 1.08 ± 0.04             | 6.27 ± 0.65              | 10.5                | 55                         | 3.53 ± 0.10             | 2.8                  | 11/22                         | 5.81 ± 0.78 | 13.6                    | 3.27 ± 0.21  | 6.4                      |
| O7    | 3.5        | 1.85 ± 0.02          | 57.0                            | 63.8                            | 1.09 ± 0.06             | 6.75 ± 0.68              | 10.1                | 65                         | 3.79 ± 0.09             | 2.3                  | 13/21                         | 6.20 ± 0.92 | 14.8                    | 3.47 ± 0.26  | 7.4                      |

<sup>a</sup> Water to mineral ratio.  
<sup>b</sup> Organic to mineral ratio.  
<sup>c</sup> Corrected dose rate.  
<sup>d</sup> Number of aliquots used in the D<sub>e</sub> estimation over the total number of aliquots measured.  
<sup>e</sup> For layer O5, due to supra linearity correction: P = D<sub>e</sub> + I = 3.12 + 0.79 = 3.91 (Gy).



# Βιβλιογραφία – Χρονολογήσεις TL/OSL

- Aitken M.J., *Thermoluminescence Dating*, Academic Press, Orlando 1985
- Aitken M.J., *An Introduction to Optical Dating-The Dating of Quaternary Sediments by the Use of Photon-stimulated Luminescence*, Oxford Science Publications, Oxford 1998
- Wagner G.A. , *Handbooks for Archaeologists No 1 – Thermoluminescence Dating*, European Science Foundation, Heidelberg 1983
- Fleming S., *Thermoluminescence Techniques in Archaeology*, Clarendon Press, Oxford 1979
- Ζαχαριάς Ν., *Φωταύγεια: Απόλυτες Χρονολογήσεις και Δοσιμετρία Υλικών*, Εκδόσεις TIME Heritage, Αθήνα 2008



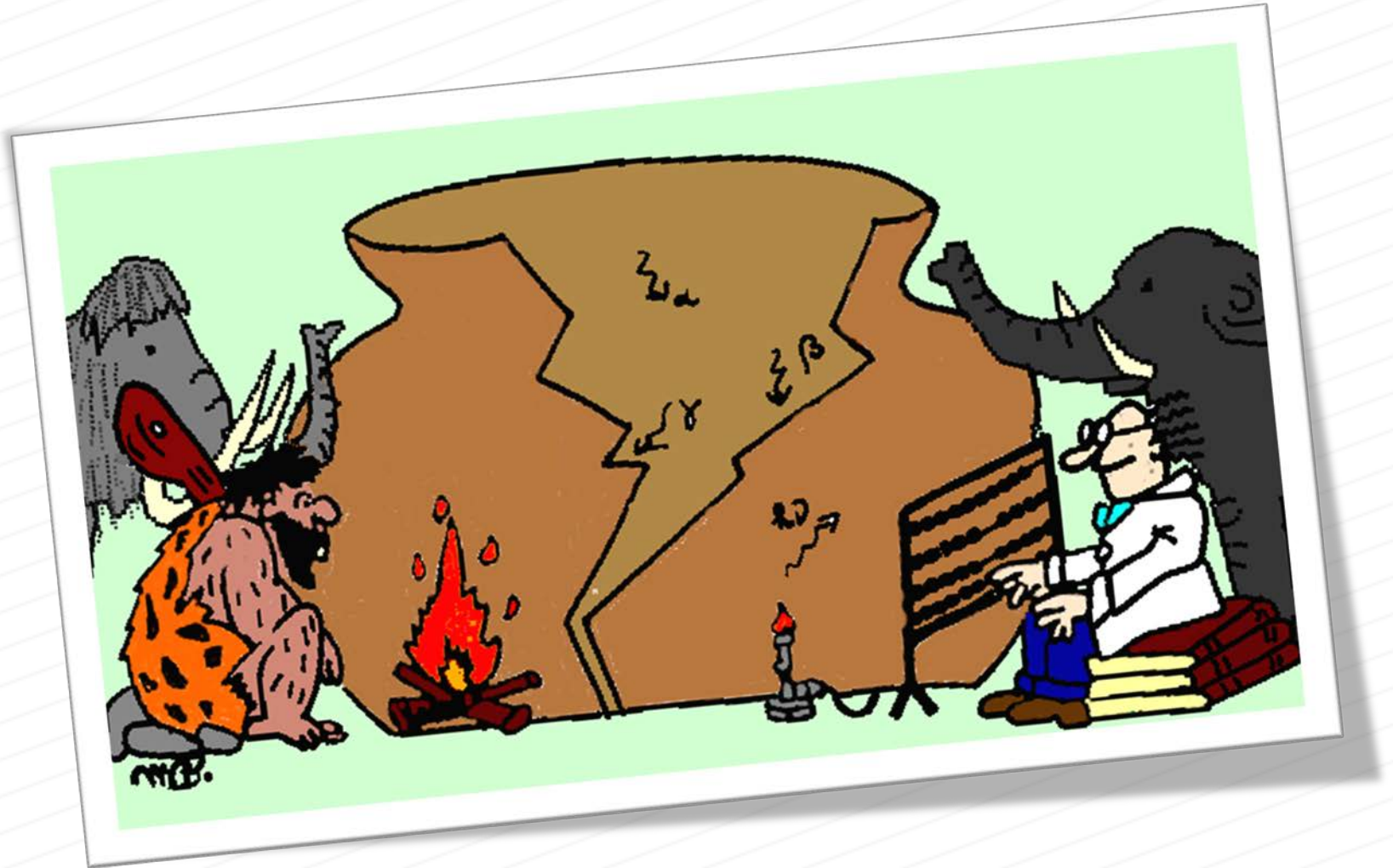


# Βιβλιογραφία – Χρονολογήσεις διάφορες μέθοδοι

- Λυριτζής Ι., **Αρχαιομετρία, Μέθοδοι Χρονολόγησης στην Αρχαιολογία**, Εκδ. Καρδαμίτσα, Αθήνα 1994
- Λυριτζής Ι., **Φυσικές Επιστήμες στην Αρχαιολογία**, τυπωθήτω-Γιώργος Δάρδανος, Αθήνα 2005
- Wagner G.A. , **Age Determination of Young Rocks and Artifacts – Physical and Chemical Clocks in Quarternary Geology and Archaeology**, Springer, Berlin Heidelberg 1998
- Biers W.R., **Art, Artefacts and Chronology in Classical Archaeology**, London and New York 1996
- Michels J.W., **Dating Methods in Archaeology**, New York 1973

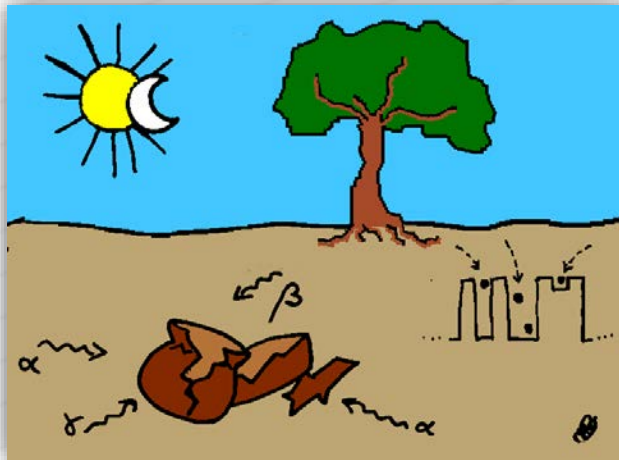


# Συνοψίζοντας... Χρονολόγηση TL/OSL



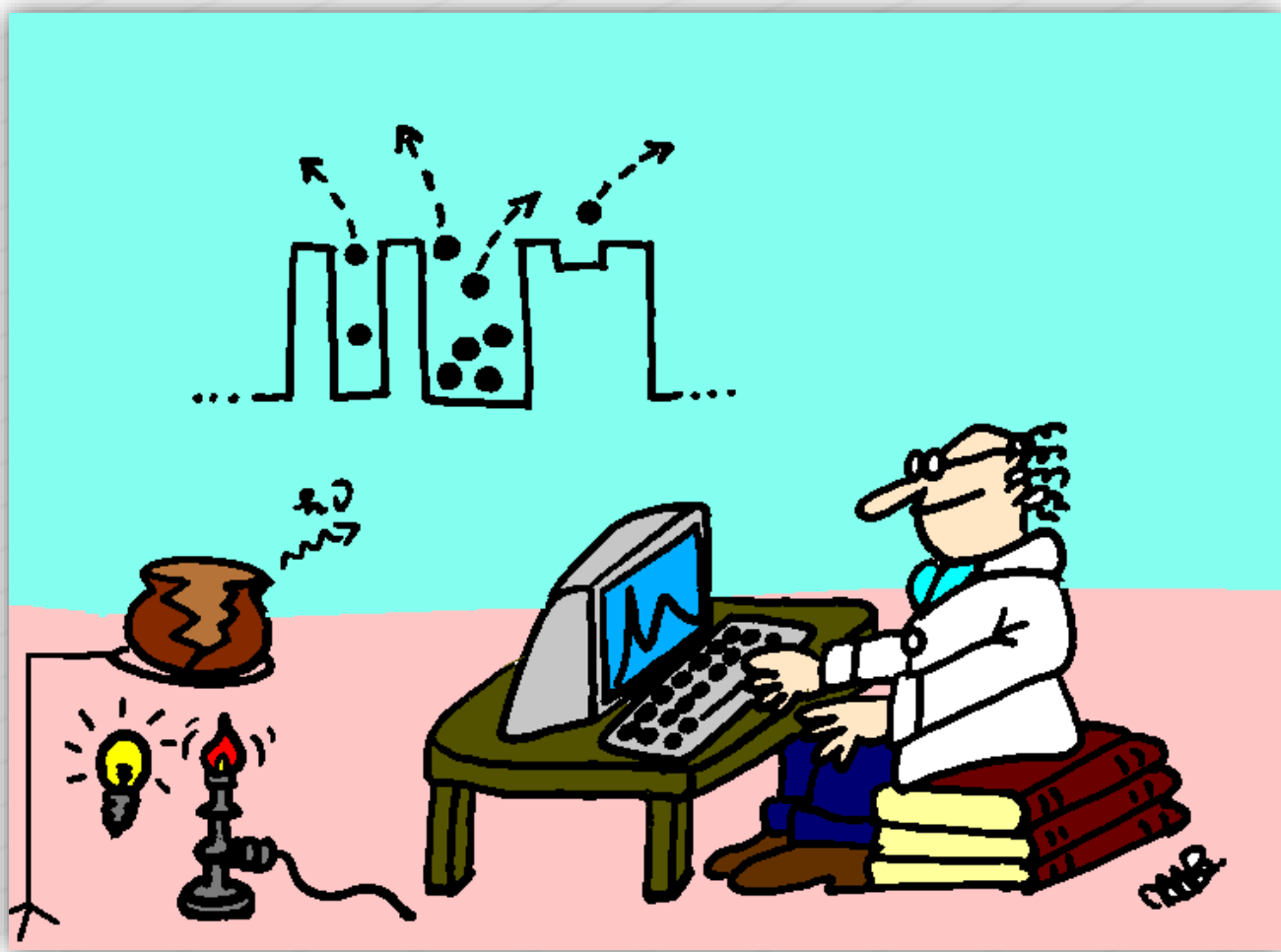


# Οι φυσικές διεργασίες...





# Η μέτρηση...





Το αποτέλεσμα...

4042 π.Σ.

δηλ.

2021 π.Χ.