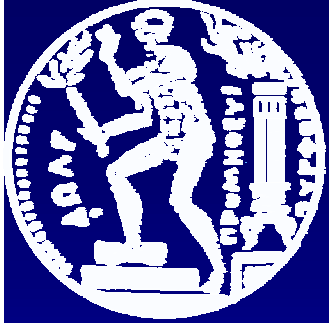


**Προσδιορισμός Απεμπλουτισμένου
Ουρανίου σε περιβαλλοντικά δείγματα με
την τεχνική της γ-φασματοσκοπίας**

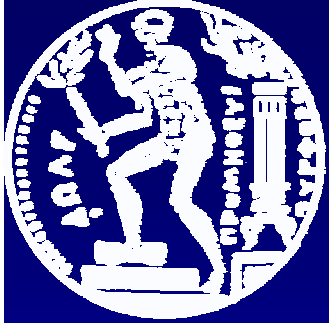
**Δ.Ι. Καράγγελος, Π.Κ. Ρούνη, Ν.Π. Πετρόπουλος,
Μ.Ι. Αναγνωστάκης, Ε.Π. Χίνης
και Σ.Ε. Σιμόπουλος**

*Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*



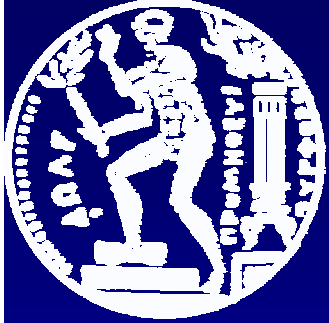
Περιεχόμενα

- ✓ γ-φασματοσκοπικός προσδιορισμός U και DU στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.
- ✓ Συνεργασία ΕΠΤ-ΕΜΠ και Vinča Institute προ του πολέμου.
- ✓ Συνεργασία ΕΠΤ-ΕΜΠ και Vinča Institute μετά τον πόλεμο.
- ✓ Συμπεράσματα.



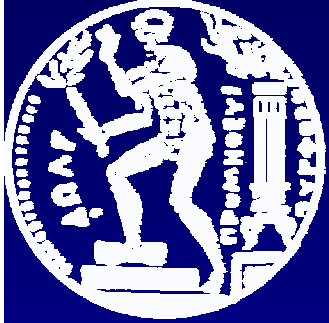
Μερικά στοιχεία για τα ^{238}U και ^{235}U

- ✓ Ισοτοπική αναλογία του φυσικού Ουρανίου:
 $^{238}\text{U} = \sim 99.2\%$ και $^{235}\text{U} = \sim 0.72\%$
- ✓ Κύριες φωτοκορυφές του ^{238}U (^{234}Th):
63.29 keV (3.8 %), 92.35 keV (2.72%) και
92.78 keV (2.69%)
- ✓ Κύριες φωτοκορυφές του ^{235}U :
143.76 (10.96%), 163.33 (5.08%), 185.72
keV (57.2%) και 205.31 keV (5.01%)
- ✓ Λόγος ραδιενεργειών στο φυσικό Ουράνιο :
 $^{238}\text{U}/^{235}\text{U} = 21.7$



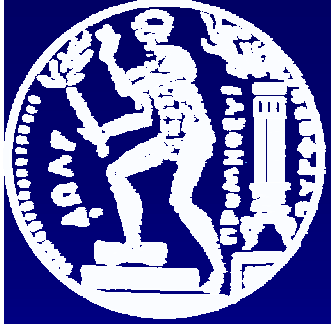
Ουράνιο σε περιβαλλοντικά δείγματα

- ✓ Σε περιβαλλοντικά δείγματα σχεδόν πάντα ανιχνεύονται ίχνη:
 - ✓ ^{238}U και θυγατρικών του.
 - ✓ ^{235}U και θυγατρικών του.
- ✓ Μεταξύ των θυγατρικών του ^{238}U συμπεριλαμβάνεται το ^{226}Ra , το οποίο εκπέμπει φωτόνια στα 186.25keV (3.51%).
- ✓ Σε δείγματα που δεν περιέχουν DU συνήθως παρατηρείται η φυσική ισοτοπική αναλογία.



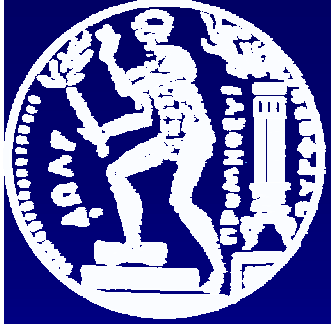
Προσδιορισμός του ^{238}U σε περιβαλλοντικά δείγματα

- ✓ Γίνεται συνήθως από τα φωτόνια στα 63.29keV (^{234}Th).
- ✓ Δείγματα όγκου αρκετών cm^3 , π.χ. 282cm^3 .
- ✓ Ανιχνευτές Ge υψηλής απόδοσης και διακριτικής ικανότητας στην περιοχή των χαμηλών ενεργειών (κάτω των 200keV)
 - ✓ LEGe (341eV resolution @ 5.9keV)
 - ✓ XtRa (1003eV @ 122keV)
- ✓ Τεχνικές διόρθωσης αυτοαπορρόφησης για την ανάλυση των φωτονίων χαμηλών ενεργειών (κάτω των 200keV).

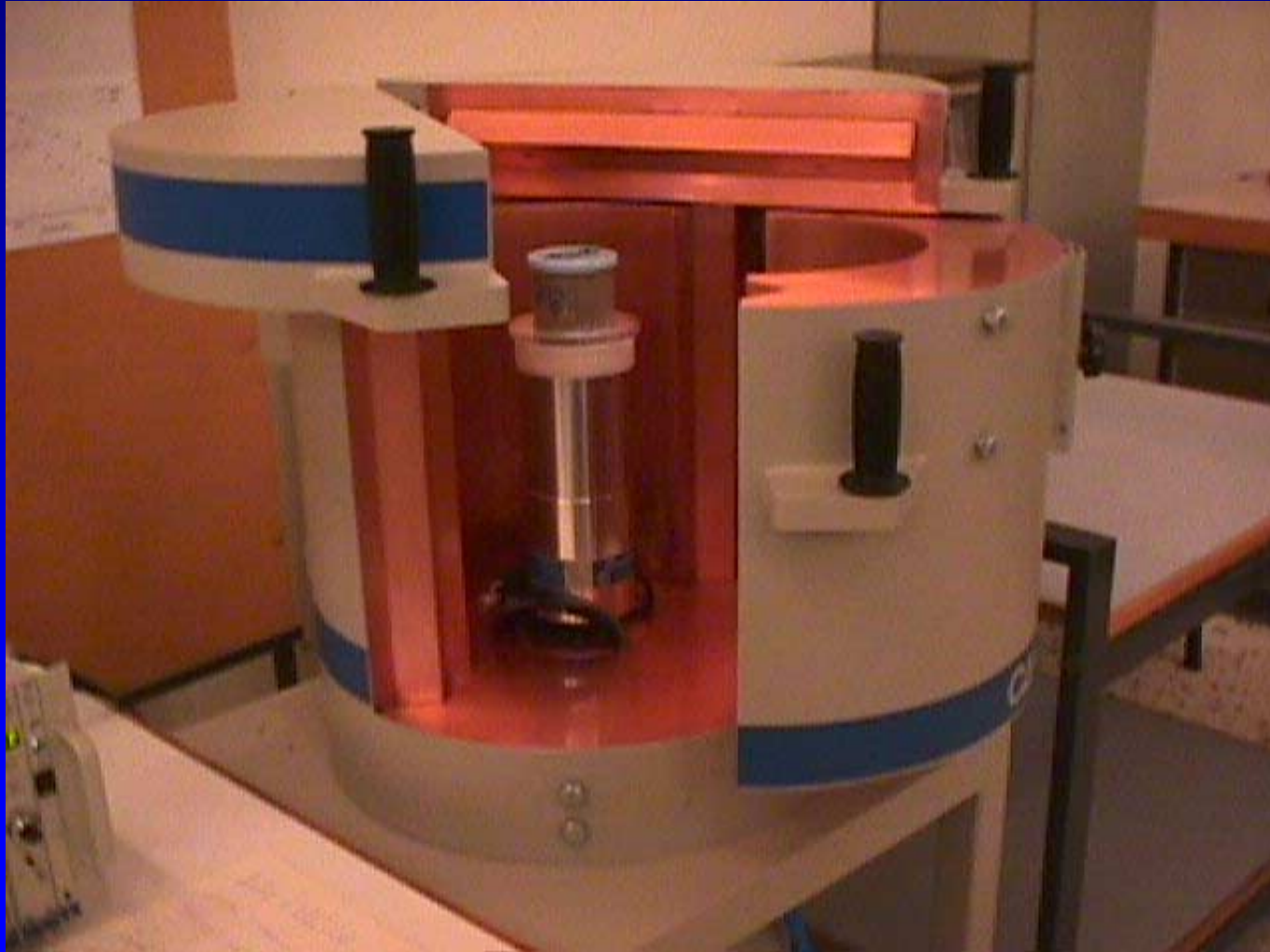


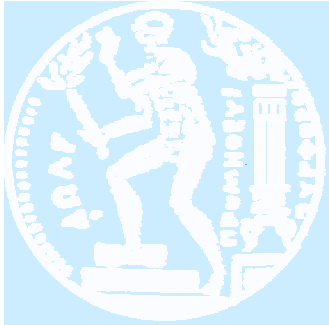
Το εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας του ΕΠΤ-ΕΜΠ



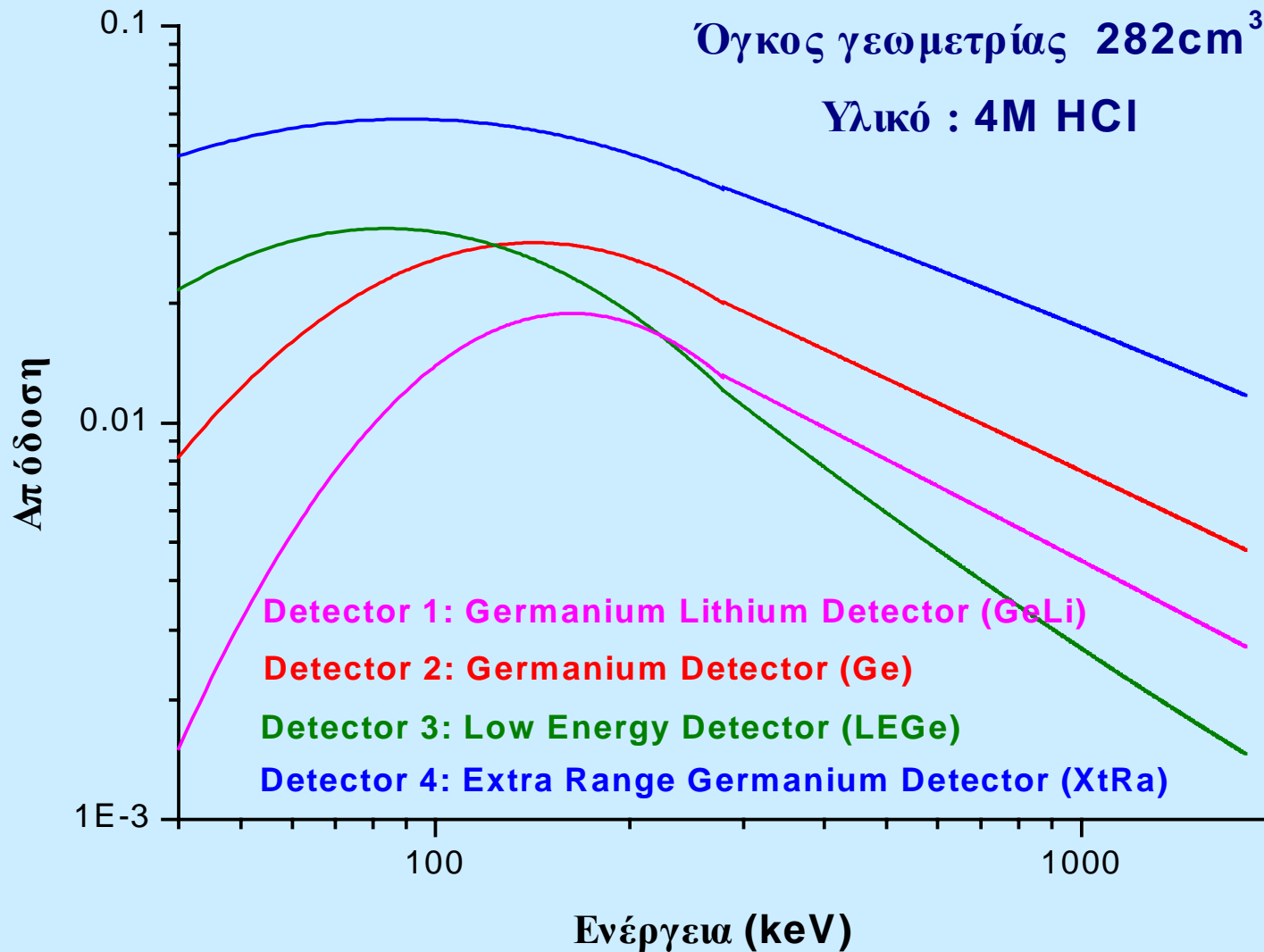


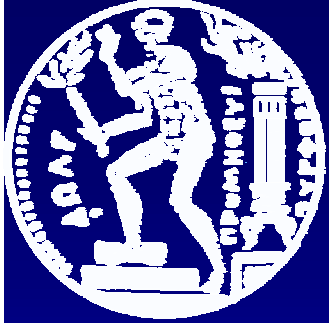
Ο ανιχνευτής XtRa του ΕΠΤ-ΕΜΠ





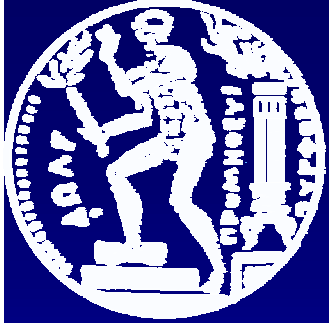
Καμπύλες απόδοσης των ανιχνευτών του ΕΠΤ-ΕΜΠ για γεωμετρία όγκου



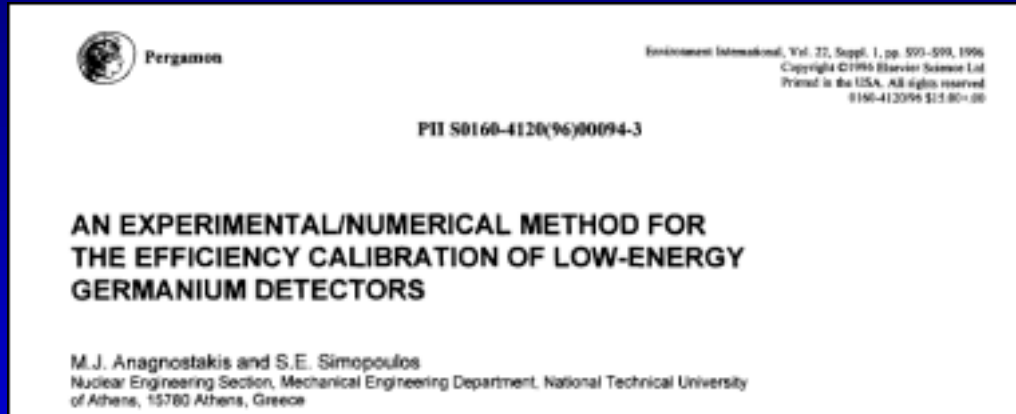


Διορθώσεις αυτοαπορρόφησης (1)

- ✓ Εξαρτώνται από :
 - ✓ τη γεωμετρία ανιχνευτή και δείγματος.
 - ✓ το υλικό του δείγματος.
 - ✓ την πυκνότητα του δείγματος.
 - ✓ την ενέργεια των φωτονίων.
- ✓ Μπορεί να είναι σημαντικές για την ανάλυση των φωτονίων στα
 - ✓ 63.29keV (^{238}U) και
 - ✓ 46.52keV (^{210}Pb)

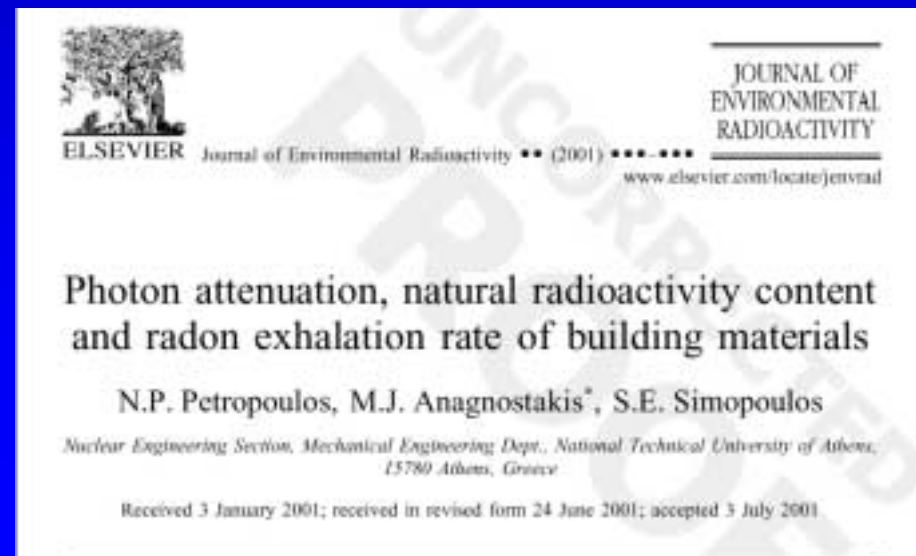


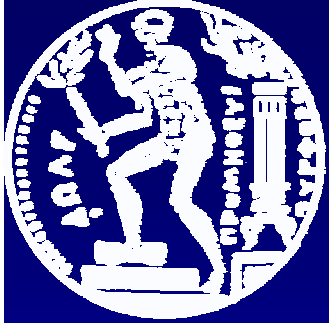
Διορθώσεις αυτοαπορρόφησης (2)



M.J. Anagnostakis & S.E. Simopoulos,
Environment International
22, 891 – 899 (1996)

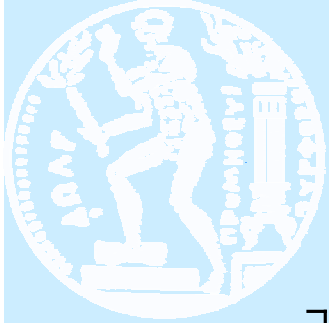
N.P. Petropoulos, M.J. Anagnostakis &
S.E. Simopoulos
Journal of Environmental Radioactivity
(υπό δημοσίευση)



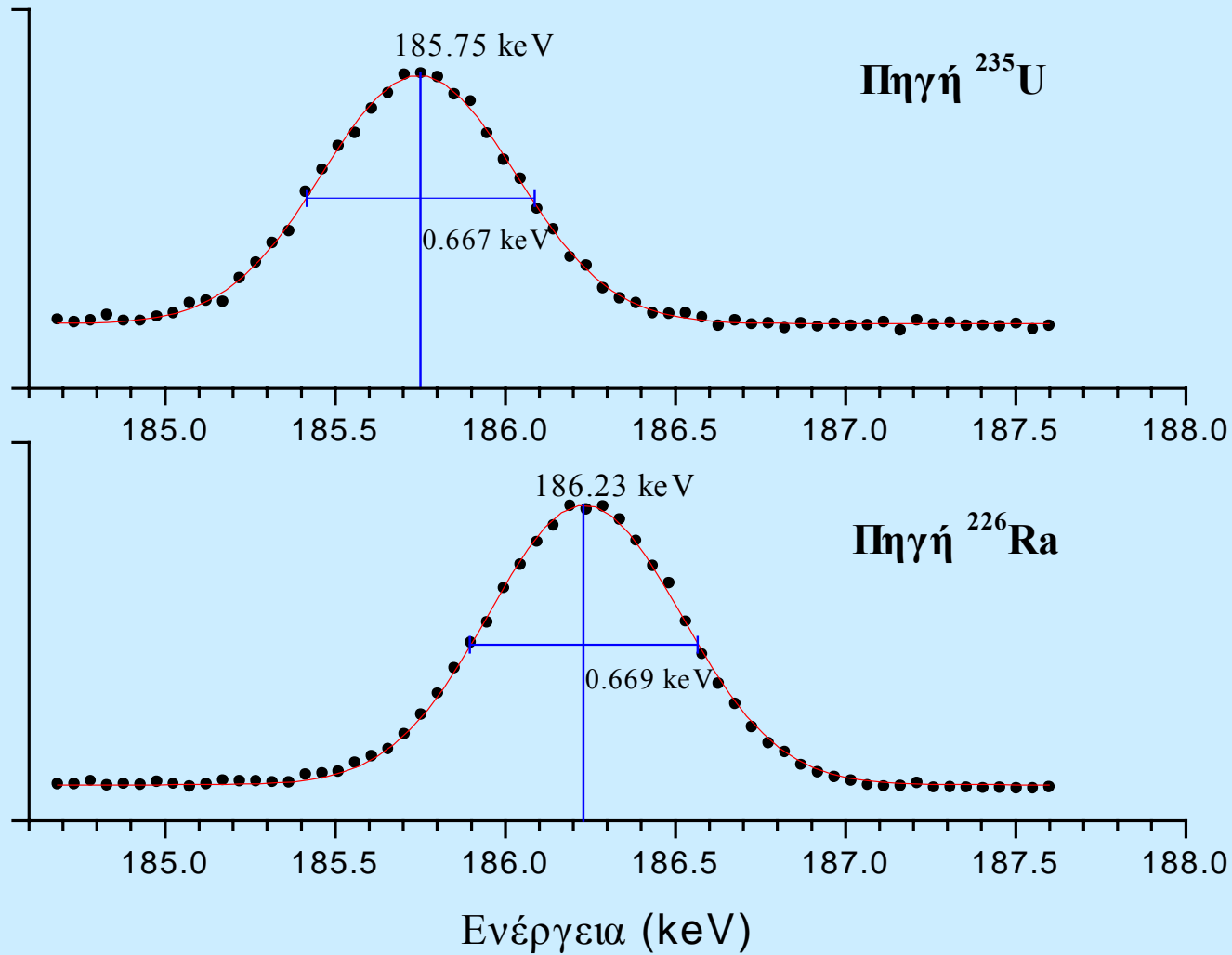


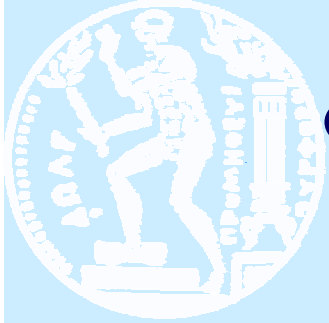
Προσδιορισμός του ^{235}U σε περιβαλλοντικά δείγματα

- ✓ Τα φωτόνια των 185.72keV δίνουν την πλέον αξιόλογη φωτοκορυφή.
- ✓ Σχηματίζεται όμως πολλαπλή φωτοκορυφή από τα φωτόνια των 185.72keV (^{235}U) και 186.25keV (^{226}Ra).
- ✓ Η ανάλυση της φωτοκορυφής είναι δυνατή εάν :
 - ✓ χρησιμοποιηθεί ανιχνευτής κατάλληλης διακριτικής ικανότητας (FWHM <1 keV)
 - ✓ γίνει κατάλληλη βαθμονόμηση (π.χ. 20ch/keV).
 - ✓ χρησιμοποιηθεί κατάλληλο λογισμικό (SPUNAL).
 - ✓ η φωτοκορυφή έχει ικανοποιητική στατιστική (μεγάλος χρόνος ανάλυσης).

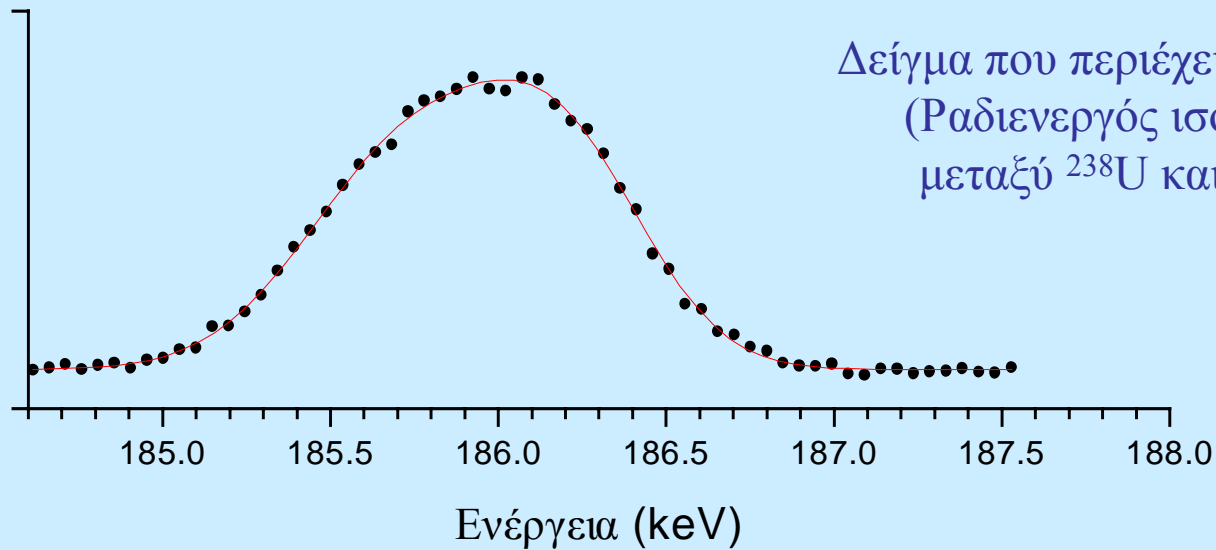
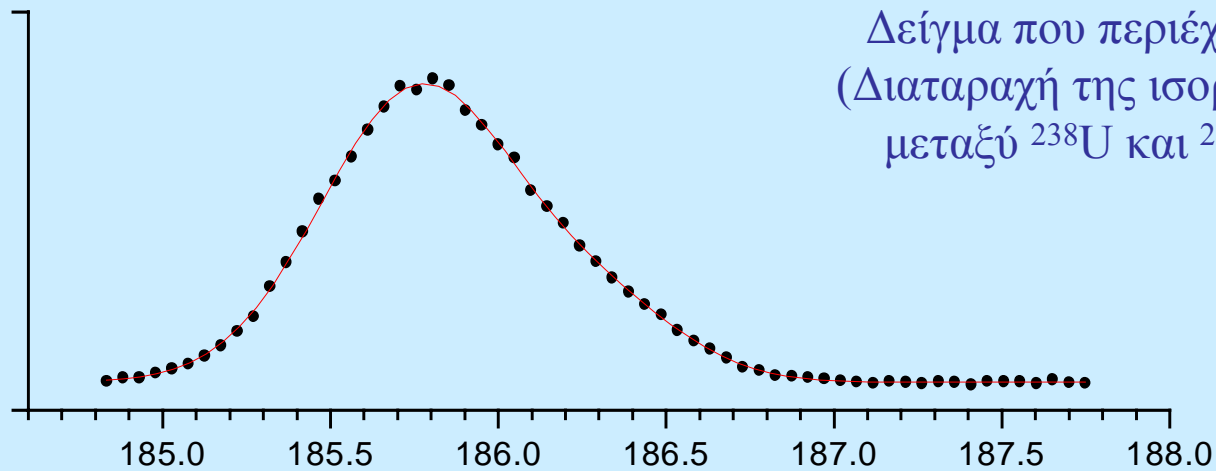


Φάσματα πηγών ^{235}U και ^{226}Ra

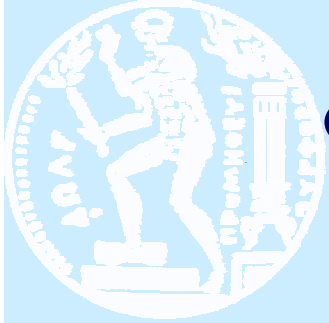




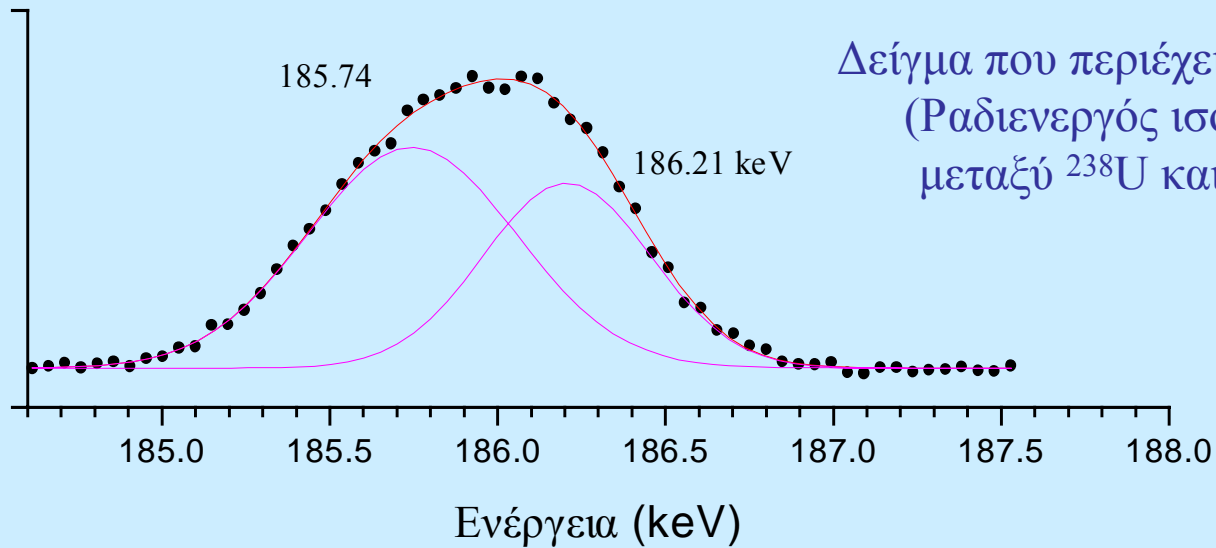
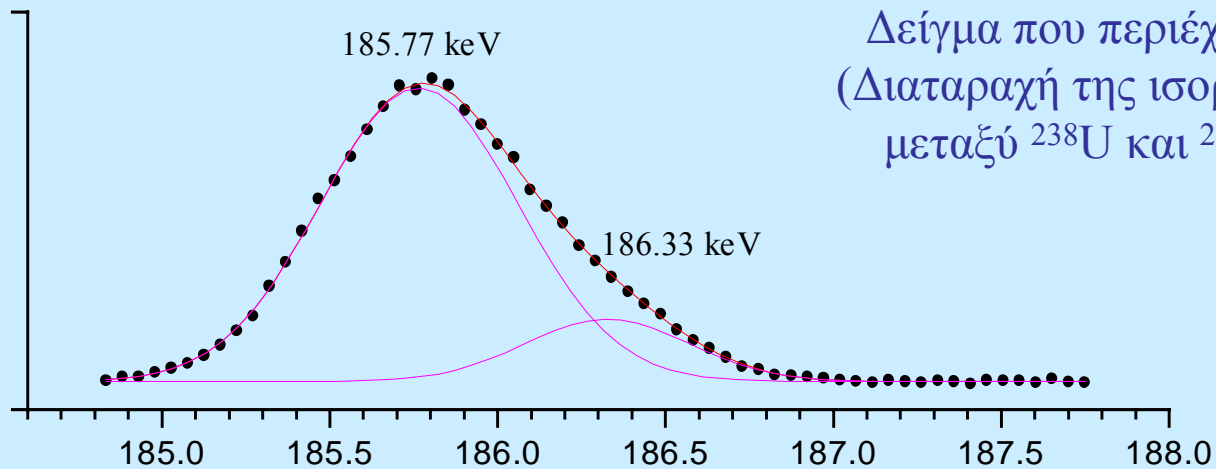
Φάσματα περιβαλλοντικών δειγμάτων

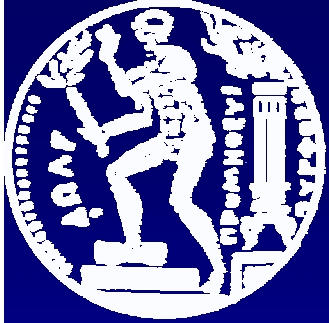


Ενέργεια (keV)



Φάσματα περιβαλλοντικών δειγμάτων





Συνεργασία μεταξύ ΕΠΤ-ΕΜΠ και Vinča προ του πολέμου

- Ξεκίνησε τον Ιανουάριο 1999.
- Σκόπευε στη μελέτη του φυσικού υποβάθρου στη Νότιο Γιουγκοσλαβία.
- Οι δειγματοληψίες εδάφους πραγματοποιήθηκαν από το Ινστιτούτο Vinča.
- Οι γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν από το ΕΠΤ-ΕΜΠ.



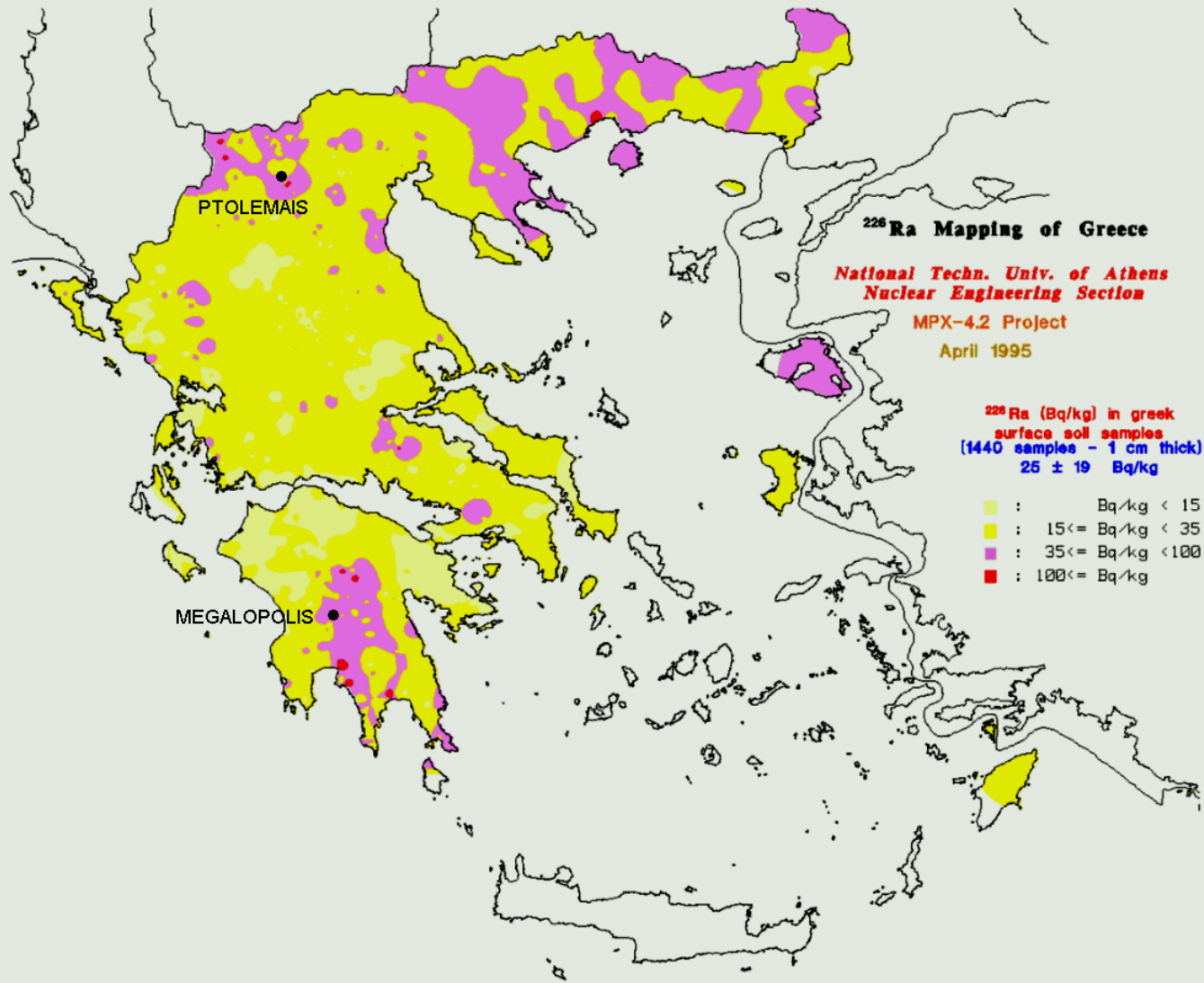
Αποτελέσματα αναλύσεων δειγμάτων προ του πολέμου

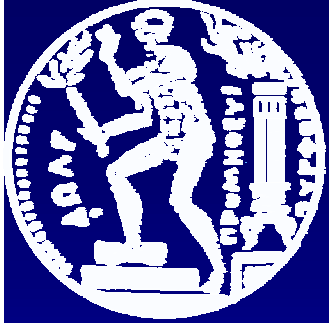
| Κωδικός Δείγματος | Θέση | Ραδιενέργεια σε Bqkg ⁻¹ | | | | | |
|----------------------|---------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------------------------|
| | | ²³⁸ U | ²²⁶ Ra | ²¹⁰ Pb | ²³² Th | ⁴⁰ K | ²³⁸ U/ ²²⁶ Ra |
| MS088 | Servia | 326 | 205 | 199 | 210 | 1694 | 1.6 |
| MS089 | Gornja Stubla | 191 | 190 | 142 | 245 | 1516 | 1.0 |
| MS090 | Kosovo | 27 | 32 | 52 | 32 | 354 | 0.84 |
| MS091 | Kosovo | 220 | 162 | 153 | 171 | 1319 | 1.4 |
| MS092 | Kosovo | 331 | 363 | 343 | 232 | 1552 | 0.91 |
| MS094 | Kosovo | 37 | 32 | 33 | 32 | 356 | 1.2 |
| MS095 | Kosovo | 297 | 248 | 285 | 234 | 1531 | 1.20 |
| MS096 | Kosovo | 57 | 55 | 49 | 87 | 65 | 1.0 |
| MS097 | Kosovo | 24 | 28 | 42 | 28 | 237 | 0.86 |
| MS098 | Kosovo | 30 | 25 | 51 | 61 | 222 | 1.2 |
| MS099 | Gornja Stubla | 325 | 235 | 256 | 235 | 1579 | 1.4 |
| MS100 | West Serbia | 33 | --- | 36 | 28 | 380 | --- |
| MS101 | West Serbia | 30 | --- | 53 | 28 | 311 | --- |
| MS102 | Gornja Stubla | 358 | 266 | 291 | 166 | 1630 | 1.4 |
| MS103 | Gornja Stubla | 330 | 207 | 228 | 164 | 1585 | 1.6 |
| MS104 | Gornja Stubla | 12 | --- | 10 | --- | 7 | --- |

Μέση Τιμή : 1.20
Τυπική Απόκλιση : 0.27



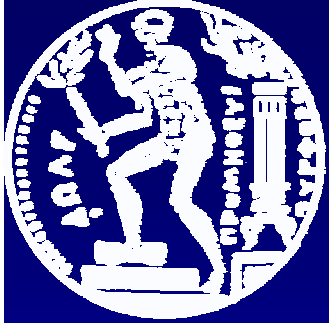
^{226}Ra στο ελληνικό επιφανειακό χώμα





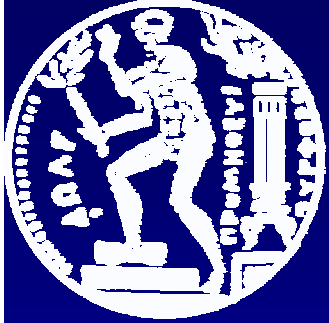
Συμπεράσματα (1)

- Η φυσική ραδιενέργεια σε ορισμένες από τις θέσεις που εξετάστηκαν είναι υψηλότερη από τις μέσες τιμές διεθνώς.
- Η ραδιενεργός ισορροπία είναι σε μερικές περιπτώσεις διαταραγμένη.
- Ο λόγος $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ κυμαίνεται μεταξύ 0.74 – 2.0
- Ο λόγος $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ κυμαίνεται μεταξύ 0.84 – 1.6
- Απαιτείται συστηματική μελέτη.



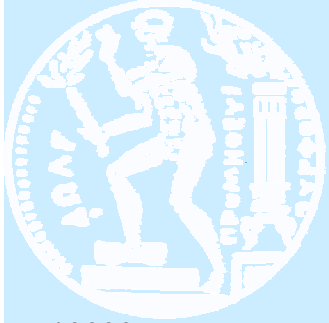
Συνεργασία μεταξύ ΕΠΙΤ-ΕΜΠ και Vinča μετά τον πόλεμο

- Σκόπευε στην ανίχνευση DU σε περιβαλλοντικά δείγματα (χώμα και βλάστηση).
- Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν από το Ινστιτούτο Vinča.
- Οι γ-φασματοσκοπικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν από το ΕΠΙΤ-ΕΜΠ.
- Αναλύθηκαν επίσης βλήματα DU στο ΕΠΙΤ-ΕΜΠ.

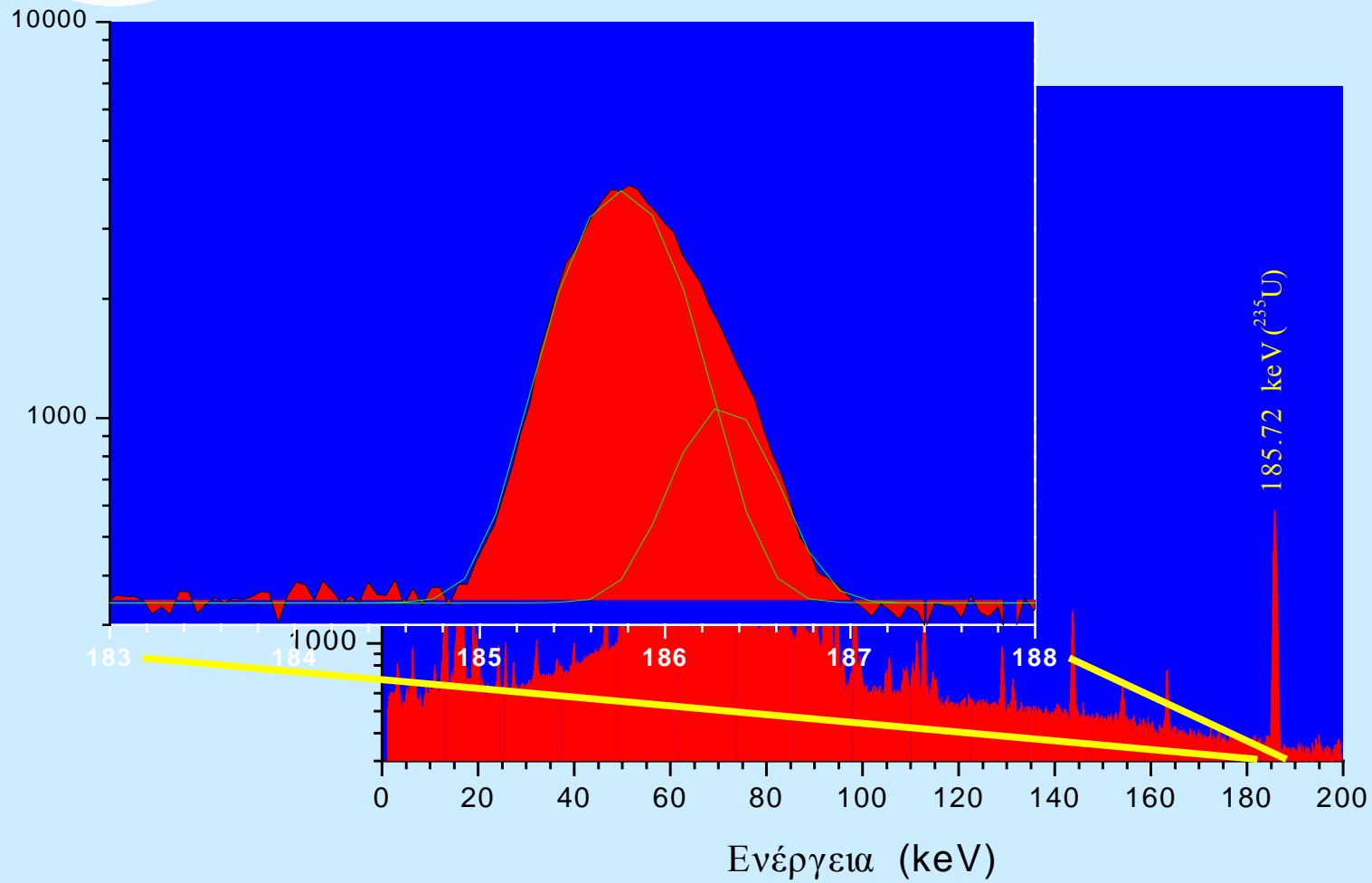


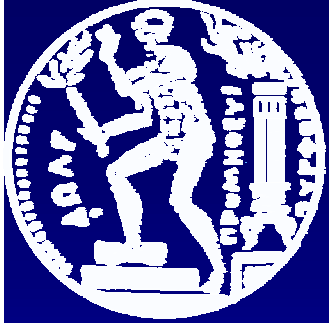
Αποτελέσματα αναλύσεων δειγμάτων μετά τον πόλεμο

| Κωδικός Δείγματος | Είδος Δείγματος | Θέση | Ραδιενέργεια σε Bqkg ⁻¹ | | | | | |
|----------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|------------------|-------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | | | ²³⁸ U | ²³⁵ U | DU | ²²⁶ Ra | ²¹⁰ Pb | ⁴⁰ K |
| MS115 | βλάστηση | Plackovica- Vranje | - | - | - | - | 34 | 551 |
| MS116 | έδαφος | Plackovica- Vranje | 23 | - | - | - | 34 | 376 |
| MS117 | βλάστηση | Plackovica- Vranje | 9 | - | - | - | 51 | 482 |
| MS118 | βλάστηση | Plackovica- Vranje | - | - | - | - | 76 | 203 |
| MS119 | βλάστηση | Plackovica- Vranje | - | - | - | - | 23 | 592 |
| MS120 | βλάστηση | Plackovica- Vranje | - | - | - | - | 58 | 250 |
| MS121 | έδαφος | Plackovica-Vranje | 53 | - | - | - | 67 | 735 |
| MS122 | έδαφος | Bratoselce | 1000 | 19 | 828 | 172 | 197 | - |
| MS123 | έδαφος | Bratoselce | 737 | 15 | 544 | 193 | 194 | 1132 |
| MS124 | βλάστηση | Bratoselce | - | - | - | - | 26 | 323 |
| MS125 | βλάστηση | Bratoselce | - | - | - | - | 42 | 305 |
| MS126 | έδαφος | -- | - | - | - | - | 39 | 357 |
| MS127 | βλάστηση | Bratoselce | - | - | - | - | 2 | 308 |
| MS128 | βλάστηση | Bratoselce | 4.9 | - | - | - | 49 | 1030 |
| MS129 | έδαφος | Bratoselce | 2417 | 37 | 2248 | 169 | 201 | - |
| MS130 | έδαφος | Plackovica | 66 | 3 | - | 30 | 81 | - |
| MS131 | έδαφος | --- | 1854 | 29 | 1714 | 140 | 168 | 1168 |
| MS143 | έδαφος | Plackovica | 50 | - | - | 41 | 46 | 657 |
| MS144 | έδαφος | Vrbovac | 47 | - | - | - | 63 | 644 |
| MS145 | έδαφος | Mesto B | 40 | - | - | 40 | 49 | 658 |



γ – φάσμα δείγματος που περιέχει DU

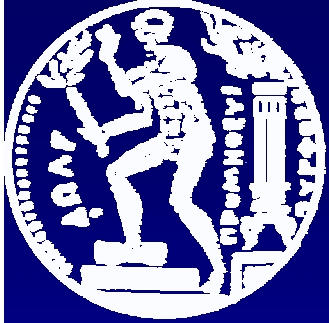




Κατώτερο Όριο Ανίχνευσης DU (1)

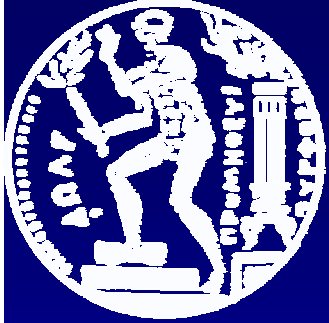
Για τον προσδιορισμό του κατώτερου ορίου ανίχνευσης πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν :

- το φυσικό U που υπάρχει σε όλα σχεδόν τα περιβαλλοντικά δείγματα προ της παρουσίας του DU,
- το χαμηλό ποσοστό εκπομπής των φωτόνιων στα 63.29keV (^{238}U) και 185.72keV (^{235}U),
- το υπόβαθρο του ανιχνευτή,
- η στατιστική της μέτρησης.



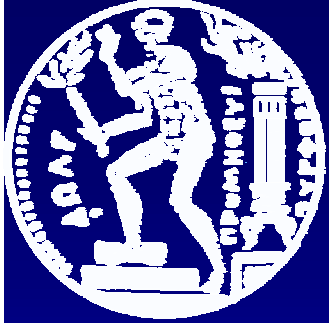
Κατώτερο Όριο Ανίχνευσης DU (2)

- Με τους ανιχνευτές του ΕΠΤ – ΕΜΠ, όταν αναλυθεί η φωτοκορυφή στα 186 keV, το ^{235}U μπορεί να προσδιοριστεί με σφάλμα καλύτερο του 2% . Το ^{238}U προσδιορίζεται με σφάλμα καλύτερο του 4%.
- Με την ακρίβεια αυτή, ο ισοτοπικός λόγος του U μπορεί να προσδιοριστεί με σφάλμα καλύτερο του 5%.
- Η ακρίβεια αυτή επιτρέπει τη διάκριση του ισοτοπικού λόγου από αυτόν του φυσικού U, όταν το *DU* (0.2%) είναι παρόν σε ποσότητα μεγαλύτερη από περίπου 20% του φυσικού περιεχομένου του δείγματος σε U



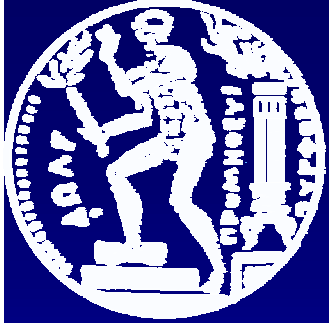
$^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ σε περιβαλλοντικά δείγματα

| Προέλευση δειγμάτων | Μέγεθος Δείγματος | Ραδιενέργεια $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ |
|--|-------------------|---|
| Ελληνικό επιφανειακό χώμα | 70 | 0.17 – 5.5 |
| Χώμα από Γιουγκοσλαβία (Φυσικό U) | 16 | 0.84 - 1.60 |
| Χώμα από Γιουγκοσλαβία (Απεμπλουτισμένο U) | 4 | 3.8 – 14.3 |



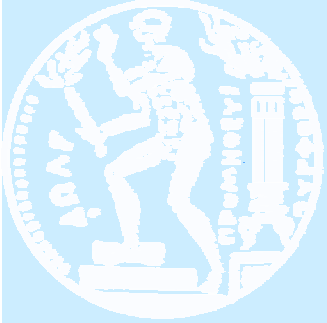
Προσδιορισμός της ισοτοπικής αναλογίας του ουρανίου σε βλήματα DU

- Σύγκριση των ραδιενεργειών των ^{238}U και ^{235}U υποδεικνύει την παρουσία DU στο δείγμα.
- Υποθέτοντας ραδιενεργό ισορροπία μεταξύ των ^{226}Ra και ^{238}U προ της ρύπανσης υπολογίζεται η περιεκτικότητα του δείγματος σε ^{238}U και ^{235}U προ της ρύπανσης.
- Υπολογίζεται το επιπλέον ^{238}U και ^{235}U λόγω ρύπανσης με DU.
- Υπολογίζεται η ισοτοπική σύσταση της πηγής της ρύπανσης (βλήμα DU), υποθέτοντας ότι η ρύπανση προέρχεται από μια και μοναδική πηγή .
- Η αναλογία του ^{235}U στα βλήματα DU εκτιμάται σε $\sim 0.2\%$.

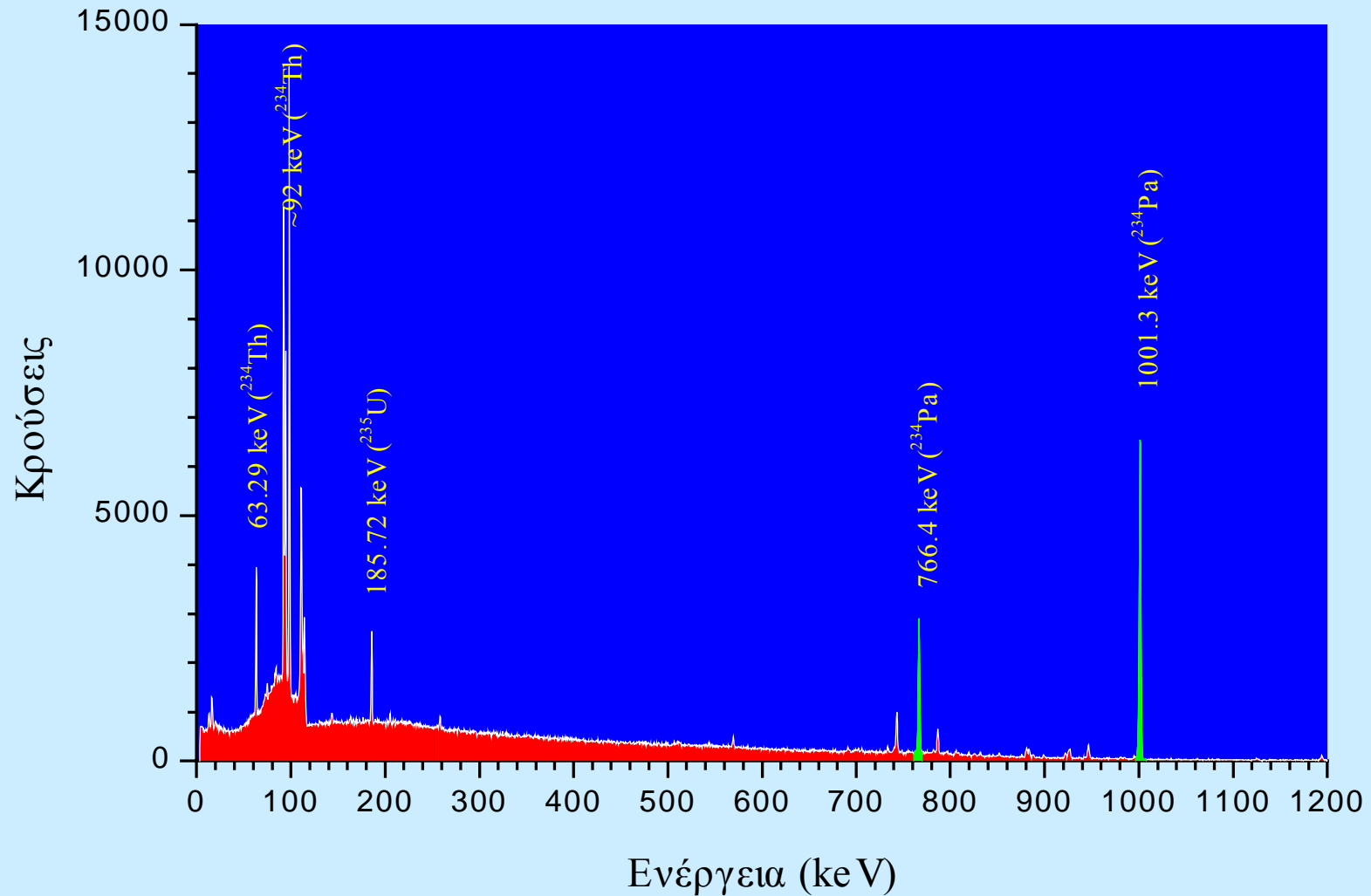


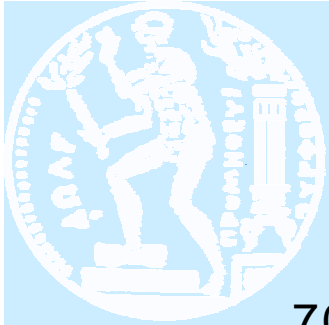
Εκτιμώμενη ισοτοπική αναλογία του ^{235}U σε βλήματα

| Δείγμα | ^{238}U (Bqkg ⁻¹) | ^{235}U Bqkg ⁻¹ | Ισ. αναλογία του ^{235}U στο χώμα | Ισ. αναλογία του ^{235}U στο βλήμα |
|--------|---|--|--|---|
| MS122 | 1000 | 19 | 0.304 % | 0.217 % |
| MS123 | 734 | 15 | 0.320 % | 0.178 % |
| MS129 | 2417 | 37 | 0.242 % | 0.206 % |
| MS131 | 1854 | 29 | 0.247 % | 0.210 % |
| | | | Μέση Τιμή | 0.203 % |

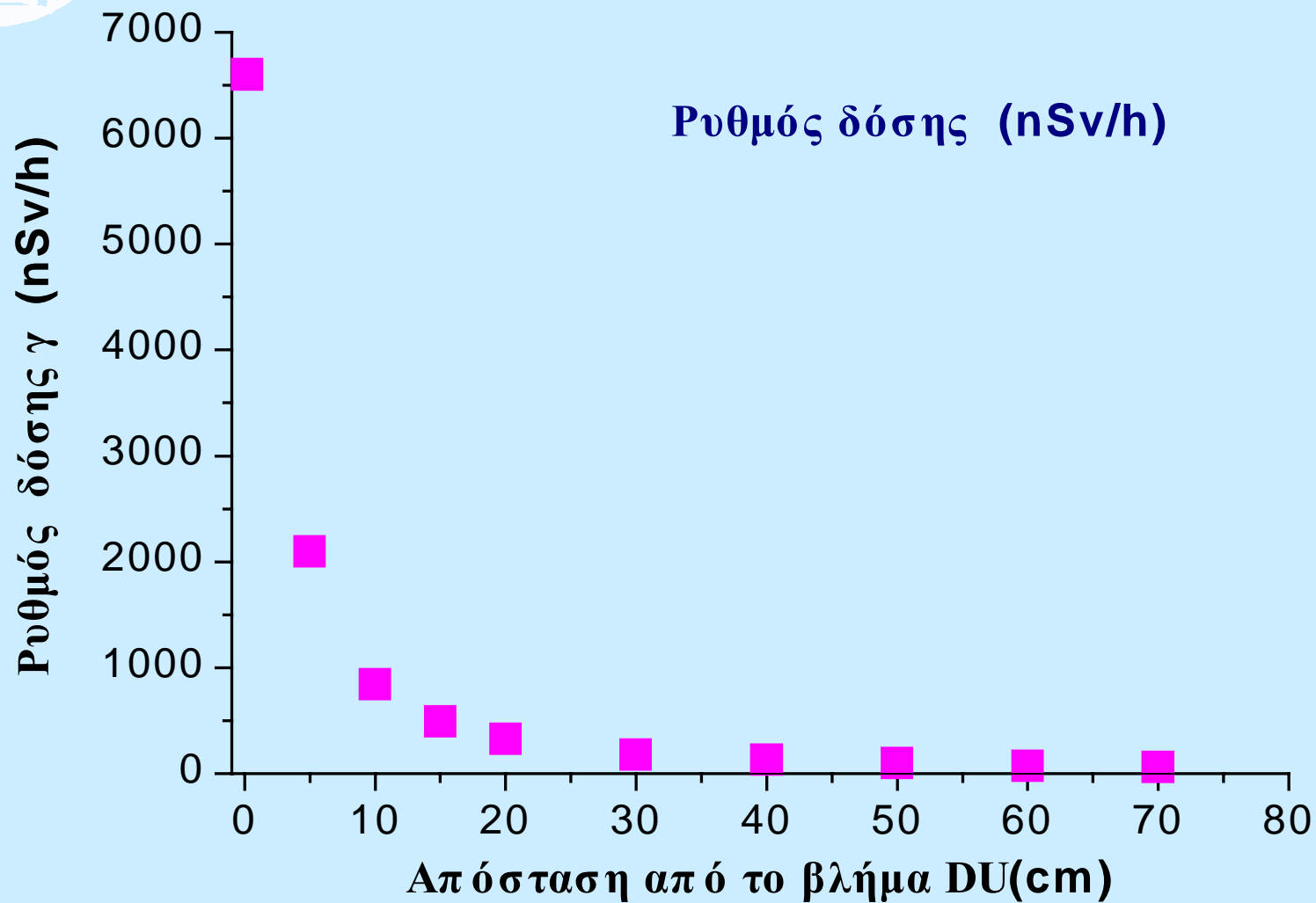


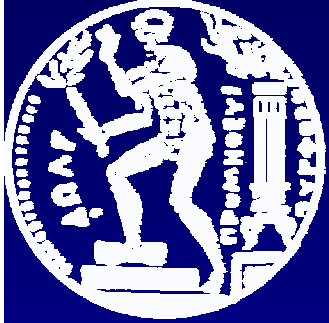
γ-φάσμα βλήματος DU





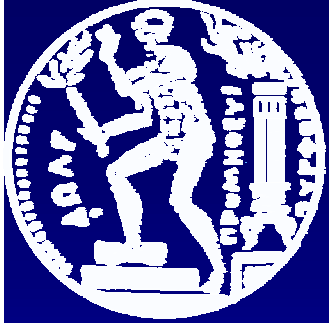
Δόση λόγω βλήματος DU





Συμπεράσματα (2)

- ✓ Το φυσικό υπόβαθρο στη Νότιο Γιουγκοσλαβία ήταν αυξημένο προ του πολέμου, με τη ραδιενέργεια του ^{238}U στο χώμα να ξεπερνά σε ορισμένες περιπτώσεις τα 300Bqkg^{-1} .
- ✓ Η γ-φασματοσκοπία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του DU σε περιβαλλοντικά δείγματα.
- ✓ Το κατώτερο όριο ανίχνευσης για το DU εξαρτάται από το φυσικό ουράνιο που περιέχεται στο υπό ανάλυση δείγμα.



Συμπεράσματα (3)

- ✓ Υψηλή περιεκτικότητα ^{238}U σε περιβαλλοντικά δείγματα δεν συνεπάγεται απαραίτητα ρύπανση με DU.
- ✓ Σημαντική διαταραχή της ραδιενεργού ισορροπίας μεταξύ ^{238}U και ^{226}Ra ($^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra} > 5$) μπορεί να είναι ένδειξη ρύπανσης με DU.
- ✓ Σε μερικά από τα δείγματα που αναλύθηκαν ανιχνεύθηκαν ψηλά επίπεδα ρύπανσης από DU.