

## 4. Η ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

### 4.1 Εισαγωγή

Από την ανακάλυψη της ραδιενέργειας (H. Becquerel, 1896), οι μετρήσεις της ραδιενέργειας των πετρωμάτων και ορυκτών έχουν βρει εφαρμογές σε πολλούς τομείς της γεωλογίας και της γεωφυσικής. Κατ' αρχήν, ο ρυθμός της ραδιενεργής διάσπασης ορισμένων στοιχείων που απαντούν στη φύση μέσα σε πετρώματα παρέχει ένα δυναμικό εργαλείο για την χρονολόγηση γεωλογικών γεγονότων, ιδιαίτερα των χρόνων δημιουργίας των σχηματισμών αυτών. Δεύτερον, η θερμότητα που παράγεται από ραδιενεργές μεταστοιχειώσεις σε διάφορους τύπους πετρωμάτων του φλοιού είναι ένας σπουδαίος παράγοντας στη μελέτη και τον καθορισμό της θερμικής κατάστασης του υπεδάφους. Τρίτον, οι μετρήσεις της ραδιενέργειας είναι χρήσιμες στη γεωλογική χαρτογράφηση εφόσον μπορούν να αναγνωρισθούν διαφορετικοί τύποι πετρωμάτων με βάση τη διαφορετική ραδιενεργή συμπεριφορά τους. Ίσως, η περισσότερο κοινή εφαρμογή των ραδιομετρικών τεχνικών είναι στις γεωφυσικές διαγραφίες για την εκτίμηση του πορώδους των πετρωμάτων, της ανίχνευσης ρωγμών καθώς και της υπόγειας κίνησης υγρών.

Η ραδιενέργεια είναι μέρος του φυσικού μας περιβάλλοντος. Η μεγαλύτερη συνεισφορά στη ραδιενέργεια του περιβάλλοντος προέρχεται από φυσικές πηγές και οφείλεται σε κοσμικές ακτίνες, τη φυσική ραδιενέργεια του εδάφους και τα ραδιενεργά προϊόντα διάσπασης του ραδονίου στον αέρα. Τεχνητή ραδιενέργεια εκπέμπεται από πυρηνικά εργοστάσια, βιομηχανικά εργοστάσια και από μερικά ερευνητικά κέντρα. Αυτές οι εκπομπές είναι πολύ μικρές σε κανονικές συνθήκες, αν και μεγάλα ποσά ραδιενέργειας μπορούν να αφηθούν στο περιβάλλον δια μέσου αστοχιών ή ατυχημάτων. Ένα από τα μεγαλύτερα πυρηνικά ατυχήματα που έχει δημοσιοποιηθεί τελευταία είναι του Chernobyl της Ουκρανίας (Απρίλιος 26, 1986), που προκάλεσε σοβαρή αναστάτωση, διότι έθεσε σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία σε περιοχές που επηρεάστηκαν από τα υψηλά επίπεδα της ραδιενέργειας.

Το κεφάλαιο αυτό σκοπό έχει να δώσει μια συνοπτική θεώρηση των αρχών και των εφαρμογών των ραδιομετρικών μεθόδων.

### 4.2 Αρχές της ραδιενεργής μεταστοιχειώσης

Το φαινόμενο της ραδιενέργειας συνίσταται στη μεταστοιχείωση ενός ατομικού πυρήνα με την εκπομπή ενέργειας και σωματιδίων μάζας. Η μεταστοιχείωση του πυρήνα  ${}^A_ZX$  σημαίνει μετασχηματισμό του σε ένα πυρήνα ενός άλλου στοιχείου με μια αλλαγή στο ατομικό του βάρος  $A$  και με ατομικό αριθμό  $Z$ , με παρα-προϊόντα μεταστοιχειώσης τα σωματίδια  $\alpha$  (πυρήνες ηλίου,  ${}^4_2\text{He}$ ), σωματίδια  $\beta$  (ηλεκτρόνια), και  $\gamma$ -ακτινοβολία, σε διάφορους συνδυασμούς.

Η ραδιενεργή μεταστοιχείωση ή διάσπαση είναι μια τυχαία διαδικασία και εκφράζεται με όρους πιθανότητας για το σωματίδιο που θα διαφύγει από τη δυναμική συγκράτηση του από τον πυρήνα. Η πιθανότητα διάσπασης δεν επηρεάζεται από τις φυσικές συνθήκες, όπως η πίεση και η θερμοκρασία και εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των ατόμων. Αυτό δείχνει ότι ο ρυθμός διάσπασης των  $N$  πυρήνων ενός είδους ραδιενεργού υλικού είναι άμεσα ανάλογος του αριθμού  $N$  των πυρήνων και εκφράζεται από τη σχέση:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

η λύση της οποίας είναι:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

όπου  $N_0$  είναι ο αριθμός των πυρήνων σε χρόνο  $t=0$ . Ο παράγοντας  $\lambda$ , ονομάζεται **σταθερά διάσπασης**, είναι μια μοναδική ιδιότητα του καθενός πυρήνα που μεταστοιχειώνεται. Ο ρυθμός διάσπασης συχνά αναφέρεται με μια άλλη σχετική ποσότητα, το **χρόνο ημι-ζωής**,  $T_{1/2}$ . Αυτός είναι ο χρόνος (σε δευτερόλεπτα) που απαιτείται να μειωθεί ο αριθμός των γονικών ατόμων στο ήμισυ. Έτσι, θέτοντας  $N=N_0/2$  και  $t=T_{1/2}$  στην σχέση 2 λαμβάνεται:

$$\ln 2 = \lambda T_{1/2} \quad (3)$$

Έτσι,

$$T_{1/2} = 0.693/\lambda \quad (4)$$

Ας υποθέσουμε ότι η διάσπαση ενός γονικού ραδιενεργού υλικού παράγει ένα σταθερό ραδιογενές θυγατρικό και ότι ο αριθμός των θυγατρικών ατόμων είναι  $\theta$  σε χρόνο  $t = 0$ . Ο αριθμός των θυγατρικών ατόμων,  $D$ , που παράγονται από τη διάσπαση  $N$  γονικών για κάθε χρονική στιγμή  $t$ , δίδεται από τη σχέση:

$$D = N_0 - N \quad (5)$$

Με αντικατάσταση της έκφρασης για  $N_0$ , της σχέσης 2 στην σχέση 5 λαμβάνεται:

$$D = N(e^{\lambda t} - 1) \quad (6)$$

Μηχανισμοί διάσπασης και πειραματικά υπολογισθείσες σταθερές διάσπασης ( $\lambda$ ) των πλέον γνωστών ραδιενεργών στοιχείων δίδονται από τους Steiger & Jaeger (1977). Εάν η σταθερά  $\lambda$  είναι γνωστή, οι μετρήσεις των σχετικών ποσοτήτων του γονικού ισοτόπου και του τελευταίου ή θυγατρικού προϊόντος θα επιτρέψουν τον προσδιορισμό του χρόνου  $t$  από τη σχέση 6. Αυτή είναι η βάση των ραδιομετρικών μεθόδων χρονολόγησης.

Η μεταστοιχείωση του πυρήνα του ατόμου ακολουθείται από την εκπομπή τριών πιθανών τύπων ενέργειας ή σωματιδίων. Α)  $\alpha$  σωματίδια από πυρήνες ηλίου ( ${}^4\text{He}_2$ ) με δύο πρωτόνια (θετικό φορτίο, +2) και δύο νετρόνια. Αυτά εύκολα απορροφούνται ή σταματούν την πορεία τους με τη μεσολάβηση ολίγων φύλλων χαρτιού. Β) Τα σωματίδια  $\beta$  είναι ηλεκτρόνια τα οποία εκπέμπονται όταν ένα νετρόνιο διαχωριστεί σε ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο κατά τη διάρκεια ορισμένων μεταστοιχειώσεων. Τα σωματίδια  $\beta$  σταματούν την πορεία τους με τη μεσολάβηση φύλλων αλουμινίου ολίγων χιλιοστών. Γ) Τα  $\gamma$ -φωτόνια (που συνήθως ονομάζονται  $\gamma$ -ακτίνες ή  $\gamma$ -ακτινοβολία) είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που απελευθερώνεται από διεγερμένους πυρήνες κατά τη διάρκεια των μεταστοιχειώσεων. Είναι όμοιες με τις ακτίνες  $X$ , με τη διαφορά ότι έχουν μικρότερο μήκος κύματος και ισχυρότερο ενεργειακό περιεχόμενο. Η διεισδυτική τους ικανότητα είναι πολύ μεγαλύτερη από τα  $\alpha$  και  $\beta$  σωματίδια. Εφόσον τα  $\alpha$  και  $\beta$  σωματίδια εύκολα σταματούν ή απορροφούνται, ακόμα και από λεπτά φύλλα, συνεπάγεται ότι κυρίως η ανίχνευση της  $\gamma$ -ακτινοβολίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χαρτογράφηση περιοχών με ανώμαλη ραδιενέργεια. Μόνο η  $\gamma$ -ακτινοβολία μπορεί να ανιχνευθεί με τη χρήση αεροπλάνου.

### 4.3 Μονάδες ραδιενέργειας

Μια ευρεία ποικιλία μονάδων έχει χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της ραδιενέργειας. Οι ορισμοί και οι συντελεστές μετατροπής τους δίδονται στον πίνακα 4-1. Η πρότυπη μονάδα για τη μέτρηση της  $\gamma$ -ακτινοβολίας είναι η **ραϊντγκεν** (R). Στις γεωφυσικές μετρήσεις χρησιμοποιείται μια παρόμοια αλλά μικρότερη μονάδα, το **μικρο-ραϊντγκεν** ( $1 \mu\text{R} = 10^{-6} \text{R}$ ).

#### Πίνακας 4-1

Μονάδες ραδιενέργειας και συντελεστές μετατροπής τους

<u>Μονάδα</u>	<u>Ορισμός</u>	<u>Μετατροπή</u>
<b>R</b> (ραίντγκεν)	Ακτινοβολία που απαιτείται να παραχθεί 1 ηλεκτροστατική μονάδα φορτίου (e.s.u.)	1 e.s.u. φορτίου = $2,083 \times 10^{15}$ ιόντα/m <sup>3</sup>
<b>Bq</b> (μπεκερέλ)	1 μεταστοιχείωση/s	1 Bq = 27 pCi
<b>Ci</b> (κιουρί)	Ακτινοβολία 1 g ραδονίου	1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq
<b>pCi/l</b>	Ακτινοβολία μετρηθείσα σε υγρά	1 pCi/l = 37 Bq/m <sup>3</sup>

Η ραδιενέργεια μπορεί επίσης να μετρηθεί από το ρυθμό των μεταστοιχειώσεων. Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι το **Μπεκερέλ** (Bq) και το **Κιουρί** (Ci). Στις μετρήσεις ραδονίου μια πολύ μικρότερη μονάδα χρησιμοποιείται, το **πικο-κιουρί** ανά λίτρο (pCi/l), κυρίως στην Αμερική και στο Καναδά.

#### 4.4 Ραδιενεργές σειρές μεταστοιχείωσης και ισορροπία θυγατρικών προϊόντων

Όταν ένα γονικό ισότοπο μεταστοιχειώνεται, πολύ συχνά το αρχικό θυγατρικό προϊόν είναι επίσης ραδιενεργό και διασπάται, ίσως δια μέσου μιας σειράς από ραδιενεργούς πυρήνες, μέχρι να επιτευχθεί το σταθερό τελικό προϊόν. Ο πίνακας 4-2 δείχνει τη σειρά διάσπασης του <sup>238</sup>U που περιλαμβάνει τις αρχικές εκπομπές και τους χρόνους ημι-ζωής των προϊόντων διάσπασης.

Βασικά, το θυγατρικό προϊόν είναι σε ισορροπία με το γονικό όταν ο αριθμός των θυγατρικών ατόμων,  $N_2$ , που μεταστοιχειώνονται ανά δευτερόλεπτο είναι ίδιος με τον αριθμό που δημιουργείται από τις μεταστοιχειώσεις των γονικών ατόμων,  $N_1$ . Όταν όλη η σειρά διάσπασης είναι σε ισορροπία, συνεπάγεται από τις σχέσεις 2 και 6 ότι:

$$N_1 \lambda_1 = N_2 \lambda_2 = N_3 \lambda_3 = \dots N_n \lambda_n \quad (7)$$

Για παράδειγμα, ας εξετάσουμε την κατάσταση της ραδιενεργούς ισορροπίας μεταξύ του γονικού <sup>226</sup>Ra και του θυγατρικού <sup>222</sup>Ra στη σειρά διάσπασης που φαίνεται στον πίνακα 4-2. Εδώ το θυγατρικό (χρόνος ημι-ζωής  $T_{1/2} = 3,825$  ημέρες) διασπάται περίπου 155.000 φορές γρηγορότερα από το γονικό του ισότοπο ( $T_{1/2} = 1622$  έτη).

Χρησιμοποιώντας τη σχέση ισορροπίας, δηλαδή  $\frac{N_1}{N_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ , ο χρόνος ισορροπίας,  $t_{eq}$ , μπορεί να σχετισθεί με τις σταθερές διάσπασης του γονικού ( $\lambda_1$ ) και του θυγατρικού προϊόντος ( $\lambda_2$ ). Η σχέση που δίνει την πλήρη ισορροπία είναι:

$$t_{eq} = \left( \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \right) \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (8)$$

Χρησιμοποιώντας τις τιμές των σταθερών διάσπασης για το <sup>226</sup>Ra ( $\lambda = 1,35 \times 10^{-11}$ /s) και για το <sup>222</sup>Ra ( $\lambda = 2,09 \times 10^{-6}$ /s), η τιμή του χρόνου  $t_{eq}$  είναι 66 ημέρες. Στην πραγματικότητα πλήρης ισορροπία (100%) επιτυγχάνεται μόνο ασυμπτωτικά. Οι χρόνοι που απαιτούνται για

το  $^{222}\text{Ra}$  για να αποκτήσει ισορροπία με το  $^{226}\text{Ra}$  σε επίπεδα 99% και 95% είναι περίπου 25 και 17 έτη, αντίστοιχα.

#### **Πίνακας 4-2**

Σειρά της ραδιενεργής μεταστοιχείωσης του Ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ).  
 Ισότοπα περιεκτικότητας μικρότερης από 0,25% προϊόντων διάσπασης παραλείπονται.

<b>Στοιχείο</b>	<b>Z</b>	<b>Εκπομπή</b>	<b>Ημι-ζωή</b>
Ουράνιο-238	92	α	$4,51 \times 10^9$ έτη
Θόριο-234	90	β,γ	24,1 ημέρες
Προτακτίνιο-234	91	β,γ ή β	1,18 λεπτά 6,7 ώρες
Ουράνιο-234	92	α	$2,48 \times 10^5$ έτη
Θόριο-230	90	α	$8 \times 10^4$ έτη
Ράδιον-226	88	α,γ	1622 έτη
Ραδόνιο-222	86	α	3,825 ημέρες
Πολώνιο-218	84	α,β	3,05 λεπτά
Μόλυβδος-214	82	β,γ	26,8 λεπτά
Αστατίνη-218	85	α	2 δευτερόλεπτα
Βισμούθιο-214	83	β,α,γ	19,7 λεπτά
Πολώνιο-214	84	α	$1,6 \times 10^{-4}$ δευτερόλεπτα
Θάλλιο-210	81	β,γ	1,3 λεπτά
Μόλυβδος-210	83	β,γ	20 έτη
Βισμούθιο-210	83	β,α	5,0 ημέρες
Πολώνιο-210	84	α	138,4 ημέρες
Θάλλιο-206	81	β	4,2 λεπτά
Μόλυβδος-206	82	Σταθερό	

Στην περίπτωση των ραδιενεργών σειρών με  $n$  προϊόντα, ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη ισορροπίας προσδιορίζεται από το χρόνο ημι-ζωής του ισότοπου με τη μακροβιότερη ζωή. Κάτω από συνθήκες ισορροπίας είναι πιθανό να υπολογισθεί το ποσόν του γονικού προϊόντος σε ένα δείγμα, με τη μέτρηση του ποσού ενός από τα επόμενα θυγατρικά μέλη. Εάν η σειρά δεν είναι σε ισορροπία, για παράδειγμα επειδή κάποιο μέλος ή κάποια μέλη μειώνονται ή χάνονται που οφείλεται σε μια εκλεκτική διήθηση ή διάβρωση ή διαφυγή αερίου ραδονίου, η μέτρηση θα είναι μειωμένη και θα προκαλέσει ένα αντίστοιχο σφάλμα στον υπολογισμό του γονικού στοιχείου.

#### **4.5 Ραδιενέργεια των πετρωμάτων**

Μετρήσεις επί των ραδιενεργών ιδιοτήτων υλικών που εμφανίζονται στη φύση δείχνουν ότι, ένα μόνο μικρό ποσοστό ραδιενέργειας είναι σχεδόν σε όλα τα ορυκτά και πετρώματα. Αρχικά αυτό το ποσοστό αποδόθηκε καθ' ολοκληρία σε ίχνη ουρανίου και θορίου καθώς και στα προϊόντα διάσπασης τους. Έρευνες που έγιναν αργότερα έδειξαν ότι ένα ισότοπο του καλίου ( $^{40}\text{K}$ ) είναι επίσης ραδιενεργό. Αν και το ισότοπο αυτό σχηματίζει μόνο το 0,012% του καλίου του φλοιού της Γης, συνεισφέρει πολύ σημαντικά στην ραδιενέργεια των

πετρωμάτων, διότι έχει ευρεία εξάπλωση το κάλιο αυτό καθ' αυτό στα πετρώματα του φλοιού.

Ο πίνακας 4-3 δίδει μια ιδέα τυπικών ποσοτήτων του ουρανίου, του θορίου και του καλίου σε συνήθεις τύπους πετρωμάτων. Να σημειωθεί ότι οι γρανίτες και οι σχιστόλιθοι έχουν ένα σχετικά μεγάλο περιεχόμενο σε ουράνιο και θόριο και κατά συνέπεια υψηλή ραδιενέργεια, που τους διακρίνει από άλλους τύπους πετρωμάτων. Το ουράνιο και το θόριο συχνά εμφανίζονται μαζί σε κάποια πετρώματα και τα ισότοπα τους ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  &  $^{232}\text{Th}$ ) διασπώνται σε σταθερά ισότοπα μολύβδου μέσω ενδιάμεσων θυγατρικών ισωτόπων. Τα ισότοπα του ουρανίου και θορίου έχουν χρόνους ημι-ζωής συγκρίσιμους με την ηλικία της Γης, άρα υπάρχουν ακόμα σε αρκετές ποσότητες. Από το ουράνιο που εμφανίζεται στη φύση, το ισότοπο  $^{238}\text{U}$  είναι το πλέον άφθονο (99,28%).

## 4.6 Όργανα μέτρησης της ραδιενέργειας

### 4.6.1 Μετρητής Geiger και σιντιλόμετρο

Από τους πολλούς τύπους των ανιχνευτών ακτινοβολίας που έχουν σχεδιασθεί για μετρήσεις υπαίθρου, ο μετρητής **Geiger** είναι ο πιο απλός και πιο φθηνός. Αποτελείται από ένα προστατευόμενο υάλινο σωλήνα με μια κυλινδρική κάθοδο γύρω από μια λεπτή κεντρική άνοδο.

**Πίνακας 4-3.**

Τυπικές περιεκτικότητες γνωστών ραδιενεργών στοιχείων σε διάφορους τύπους πετρωμάτων.

<u>Τύπος πετρώματος</u>	<u>U (ppm)</u>	<u>Th (ppm)</u>	<u>K (%)</u>
Γρανίτης	5	18	3,8
Βασάλτης	0,6	3	0,8
Σχιστόλιθοι	5	12	2,7
Ψαμμίτες	1	2	0,6
Ασβεστόλιθοι	1,8	1,6	0,3
Άμμοι	3	6	0,3

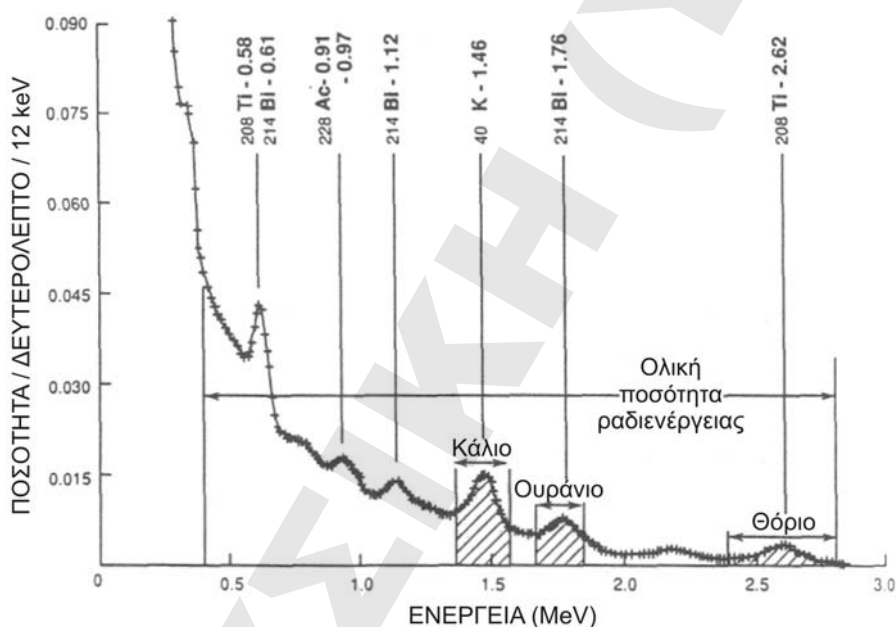
Ο σωλήνας πληρούται με ένα αδρανές αέριο (συνήθως αργόν με ίχνη αλκοόλης) και μια υψηλή τάση εφαρμόζεται μεταξύ των ηλεκτροδίων. Κανονικά, το αέριο δεν είναι αγωγίμο, αλλά όταν ακτινοβολία εισέρχεται στο σωλήνα, το αέριο ιονίζεται και τα ιόντα καθώς και τα ηλεκτρόνια που παράγονται, επιταχύνονται και οδεύουν προς τα ηλεκτρόδια. Το ρεύμα που προκύπτει μπορεί να μεγεθυνθεί και να καταγραφεί από το όργανο ή να δώσει ένα ακουστικό σήμα. Εφόσον οι ακτίνες  $\gamma$  ιονίζουν πολύ λίγο, και τα σωματίδια  $\alpha$  έχουν μικρά όρια διακύμανσης ώστε δεν λαμβάνονται γενικά υπόψη, το όργανο κύρια ανταποκρίνεται στα σωματίδια  $\beta$ .

Το **σιντιλόμετρο** είναι ένας περισσότερο αποδοτικός τύπος ανιχνευτή, ιδιαίτερα για την ανίχνευση της ακτινοβολίας  $\gamma$ . Χρησιμοποιεί το γεγονός ότι ορισμένοι κρύσταλλοι όπως το ιωδιούχο νάτριο, κατά την ενεργοποίηση τους από Θάλλιο, εκπέμπουν ένα στιγμιαίο ορατό φως όταν απορροφούν ακτίνες  $\gamma$ . Οι εκλάμψεις αυτές μπορούν να ανιχνευθούν με φωτοπολλαπλασιαστικούς σωλήνες και με κατάλληλη μεγέθυνση να αναγνωσθούν από το όργανο, υπό μορφή κτύπων ανά λεπτό. Επειδή το σιντιλόμετρο έχει πολύ μεγάλη απόδοση (σχεδόν 100% για ανίχνευση  $\gamma$  ακτινοβολίας), έχει αντικαταστήσει το μετρητή Geiger σε

σύγχρονες μετρήσεις πεδίου. Τα σιντιλόμετρα είναι προσιτά και μπορούν να αναρτηθούν τόσο σε όχημα ξηράς, όσο και σε αεροπλάνο και με κατάλληλους μετρητές της απόστασης να απεικονίσουν ταυτόχρονα τις μετρήσεις υπαίθρου. Είναι φανερό, ότι σιντιλόμετρα μεγίστης ευαισθησίας απαιτούνται για μετρήσεις από αεροπλάνο και οι πτήσεις πρέπει να γίνονται σε χαμηλά επίπεδα ( $\leq 50$  m).

#### 4.6.2 Φασματομετρία $\gamma$ ακτινοβολίας

Το **φασματόμετρο** ακτίνων  $\gamma$  είναι μια προέκταση των σιντιλομέτρων, το οποίο διαχωρίζει τα χαρακτηριστικά των ακτίνων  $\gamma$  των ισοτόπων του καλίου, του θορίου και ουρανίου για τον προσδιορισμό της ταυτότητας της πηγής. Το όργανο διαχωρίζει τους ηλεκτρικούς παλμούς από τον φωτοπολλαπλασιαστή, σύμφωνα με την ενέργεια εκπομπής τους σε τρεις ή περισσότερες φασματικές περιοχές πριν τη καταγραφή του ρυθμού άφιξης των παλμών σε κάθε μια προεπιλεγμένη φασματική περιοχή. Όταν το κάλιο, το ουράνιο και το θόριο είναι όλα παρόντα, το σύνθετο φάσμα της εικόνας 4-1 προκύπτει, στο οποίο οι χωριστές γραμμές έχουν διευρυνθεί λόγω της μικρής διακριτικής ικανότητας του Θαλλίου - ενεργοποιούμενου κρυστάλλου ιωδιούχου νατρίου του οργάνου.



**Εικόνα 4-1.** Ένα τυπικό φάσμα  $\gamma$ -ακτινοβολίας που έχει ληφθεί από αεροπλάνο. Το φάσμα δείχνει τέσσερις περιοχές. α) Ολική ενέργεια 0.4-2.81 MeV, β)  $^{40}\text{K}$ , 1.37-1.57 MeV γ)  $^{238}\text{U}$ , 1.66-1.86 MeV και δ)  $^{232}\text{Th}$ , 2.42-2.81 MeV (από Grasty, 1987).

Στην περίπτωση ισορροπίας, οι συγκεντρώσεις των γονικών πυρήνων μπορούν να προσδιορισθούν με τη μέτρηση της  $\gamma$  ακτινοβολίας που παράγεται από το θυγατρικό προϊόν. Στην πράξη, τέσσερις ποσότητες μετρούνται στη φασματομετρία των ακτίνων  $\gamma$ : (1) TC = συνολικοί κτύποι στο φάσμα 0,4 και 2,81 MeV: (2)  $^{40}\text{K}$  = Κάλιο με τη μέτρηση κτύπων στο φάσμα 1,37 και 1,57 MeV: (3)  $^{238}\text{U}$  = Ουράνιο με τη μέτρηση κτύπων στο φάσμα 1,66 και 1,86 MeV και (4)  $^{232}\text{Th}$  = Θόριο με τη μέτρηση κτύπων στο φάσμα 2,42 και 2,81 MeV.

#### 4.6.3 Μετρητές ραδονίου

Η μέτρηση της ακτινοβολίας ραδονίου πραγματοποιείται με την ανίχνευση του ραδονίου στο έδαφος και στο υπόγειο νερό. Επειδή το ραδόνιο είναι ένα ευγενές αέριο, δεν δημιουργεί μίγματα με άλλα στοιχεία και μπορεί να κινηθεί ελεύθερα μέσα από πόρους, ρωγμές, διακλάσεις και ρήγματα, για αποστάσεις αρκετών εκατοντάδων μέτρων. Το ραδόνιο επίσης

διαλύεται μέσα στο υπόγειο νερό. Το ραδόνιο πριν ανιχνευθεί, μπορεί να έχει ταξιδέψει μια σημαντική απόσταση από την πηγή των ουρανιούχων πετρωμάτων.

Στους ανιχνευτές ραδονίου **τύπου άντλησης**, ένας κενός σωλήνας εισέρχεται μέσα στο έδαφος και ένα δείγμα του εδαφικού αερίου αντλείται μέσα σε ένα υδατοστεγές δοχείο. Αυτό το αέριο στη συνέχεια αναλύεται και μετριέται η  $\alpha$  ακτινοβολία με ένα σιντιλόμετρο θειούχου ψευδαργύρου. Συσκευές αυτού του τύπου, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη δειγματοληψία υπόγειου ή επιφανειακού νερού. Τα δείγματα νερού απαεριοποιούνται και το μίγμα αερίου-αέρα αναλύεται για να μετρηθεί τελικά η συγκέντρωση ραδονίου.

Οι συσκευές μέτρησης της ραδιοακτινοβολίας **τύπου ενσωμάτωσης**, χρησιμοποιούν φιλμ νιτρικής σελλουλόζης ευαίσθητου σε εκπομπή  $\alpha$  ακτινοβολίας και τοποθετούνται στον πυθμένα ενός κυπέλλου δειγματοληψίας. Ένας αριθμός τέτοιων κυπέλλων θάβονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, συνήθως υπό μορφή καννάβου στην περιοχή που εκτελείται η έρευνα. Τα κύπελλα παραμένουν αδιατάρακτα για περίοδο αρκετών εβδομάδων, κατά τη διάρκεια των οποίων σωματίδια  $\alpha$  από το ραδόνιο του εδάφους χαράσσουν αποτυπώματα στο φιλμ. Οι τροχιές των σωματιδίων  $\alpha$  χαράσσουν το φιλμ ώστε να γίνεται ορατή και η πυκνότητα των τροχιών  $\alpha$ , πράγμα που δείχνει το σχετικό ποσό του ραδονίου σε κάθε σταθμό δειγματοληψίας. Οι κάρτες για την ανίχνευση  $\alpha$  σωματιδίων είναι βελτιωμένες συσκευές, οι οποίες είναι όμοιες με τη αρχή της «τροχιάς χάραξης», αλλά χρησιμοποιούν ημι-αγωγό πυριτίου αντί του φιλμ. Οι συσκευές αυτού του τύπου είναι περισσότερο αποδοτικές και έχουν μειώσει τη περίοδο ταφής μέσα στο έδαφος σε 1-3 ημέρες.

#### 4.7 Λήψη των μετρήσεων υπαίθρου

Ο μετρητής Geiger χρησιμοποιείται μόνο σε μετρήσεις υπαίθρου πεζή, κατά μήκος προφίλ ή σε διάταξη καννάβου, με τον παρατηρητή να κρατά τον ανιχνευτή 40-50 cm πάνω από το έδαφος. Το σιντιλόμετρο και το φασματομέτρο ακτίνων  $\gamma$  μπορούν να αναρτηθούν σε οχήματα. Αυτά τα όργανα συνήθως καταγράφουν την ένταση της ακτινοβολίας ως κτύπους ανά λεπτό, αλλά σήμερα βελτιωμένες εκδόσεις αυτών έχουν βαθμονομηθεί ώστε να προσδιορίζουν τα σχετικά ποσά του ουρανίου ή θορίου με βάση πρότυπες πηγές. Μέθοδοι βαθμονόμησης φασματομέτρων ακτίνων  $\gamma$ , για μετρήσεις επί του εδάφους ή από αεροπλάνο έχουν αναφερθεί μεταξύ των άλλων και από τους Lønborg et. Al. (1977) και Grasty (1979).

Η γεωμετρία των επιφανειακών σχηματισμών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, διότι η απόκριση του οργάνου επηρεάζεται από την απόσταση πηγής-ανιχνευτού καθώς επίσης και από τις διαστάσεις της πηγής. Οι τοπογραφικές ανωμαλίες, η διασπορά του ραδιενεργούς υλικού λόγω διάβρωσης και η ακτινοβολία περιβάλλοντος, είναι μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν τις μετρήσεις. Η «ακτινοβολία περιβάλλοντος» οφείλεται κυρίως στις κοσμικές ακτίνες και στην περιεκτικότητα σε κάλιο των τοπικών πετρωμάτων, που μπορεί να διαφέρει από μια περιοχή σε άλλη καθώς και στην ίδια την περιοχή. Γενικά, μια μέτρηση δεν θεωρείται αξιόπιστη εκτός και εάν είναι τρεις ή τέσσερις φορές μεγαλύτερη εκείνης του περιβάλλοντος.

Η ακτινοβολία προς το περιβάλλον που παράγεται από θυγατρικά προϊόντα της σειράς διάσπασης του ουρανίου, μπορεί να είναι έντονη και να μεταβάλλεται με το χρόνο. Ως προϊόν μεταστοιχείωσης του  $^{226}\text{Ra}$  (βλ. πίνακα 4-2), το ραδόνιο ( $^{222}\text{Rn}$ ) μπορεί να διαφύγει προς την επιφάνεια με ρεύματα νερού, με διάχυση μέσω υδροπερατών πετρωμάτων, ή να διαφύγει μέσω σχισμών ή ρωγμών και να μεταφερθεί σε σημαντικές αποστάσεις. Το  $^{222}\text{Rn}$  με τη σειρά του διασπάται σε  $^{214}\text{Bi}$  (εικ. 4-1), το οποίο είναι δείκτης ουρανίου στη φασματομετρία ακτίνων  $\gamma$ . Έτσι, το ραδόνιο που έχει μεταναστεύσει, μπορεί να δώσει ανώμαλες ενδείξεις ουρανίου, οι οποίες δεν έχουν καμία σχέση με την περιεκτικότητα σε ουράνιο των επιφανειακών πετρωμάτων ή του εδαφικού καλύμματος κάτω από τον ανιχνευτή. Εν τούτοις, η ανίχνευση του ραδονίου μπορεί να αποδειχθεί σημαντική για την ανίχνευση ρηγμάτων, ρωγμών ή άλλων χαρακτηριστικών περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος. Οι μετεωρολογικοί

παράγοντες (θερμοκρασία, βαρομετρική πίεση, άνεμος και βροχόπτωση) επίσης επηρεάζουν την μετανάστευση και συγκέντρωση του ραδονίου. Μια επαρκής θεώρηση αυτών των παραγόντων είναι σημαντική στην ερμηνεία των δεδομένων υπαίθρου.

Περισσότερες λεπτομέρειες για τις μεθόδους πεδίου που χρησιμοποιούνται στη φασματομετρία ακτίνων  $\gamma$  και την μέτρηση ραδονίου, μπορούν να βρεθούν στους Durrance (1986), Nielson et. al. (1990) και Gregg & Holmes (1990).

ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ (ΥΟ118)