

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ
ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΒΡΑΧΥΒΙΩΝ
ΘΥΓΑΤΡΙΚΩΝ ΤΟΥ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ της

ΑΝΤΩΝΙΑΣ ΟΡΦΑΝΟΥ

Σπουδάστριας της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Καθηγητής Μ.Ι. Αναγνωστάκης

Συνεργασία: Κωνσταντίνος Κανούτος

ΑΘΗΝΑ 2023

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον Οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας εργασίας είναι προϊόν δικής μου δουλειάς και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ορφανού Αντωνία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Διπλωματική Εργασία αποτελεί μέρος της έρευνας που γίνεται στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ και έχει σκοπό τη μελέτη της φυσικής ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα και ειδικότερα των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου. Για τη μελέτη αυτή προτείνεται η συγκρότηση ενός ανιχνευτικού συστήματος με αξιοποίηση των δυνατοτήτων που υπάρχουν στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Το ανιχνευτικό αυτό σύστημα θα οδηγήσει σε αύξηση της αποτελεσματικότητας της παρακολούθησης των θυγατρικών του ραδονίου σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα. Συνεπώς, ένα μεγάλο μέρος της εργασίας αποτελεί επίσης η δοκιμή, η αξιολόγηση και η εφαρμογή αυτής της διάταξης. Συγκεκριμένα, η προτεινόμενη διάταξη περιλαμβάνει τη χρήση μίας αντλίας αέρα σε συνδυασμό με ένα φίλτρο, το οποίο και θα αποτελεί το δείγμα της μέτρησης. Με συνεχή παροχή αέρα μέσω του φίλτρου και κατακράτηση του αερολύματος σε αυτό αυξάνεται η συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου στο φίλτρο και καθίσταται ευκολότερη η ανίχνευση και ο προσδιορισμός τους με καλύτερη ακρίβεια. Στα πλαίσια της ΔΕ προτάθηκαν και μελετήθηκαν 4 διαφορετικές εκδοχές αυτής της ιδέας, δηλαδή συνδυασμοί ανιχνευτών, δειγματοληπτών αέρα και φίλτρων. Η διερεύνηση και αξιολόγηση της συγκεκριμένης διάταξης καθώς και η μελέτη της μεταβολής της φυσικής ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα γίνεται μέσω του ^{214}Bi , βραχύβιου θυγατρικού του Ραδονίου (^{222}Rn). Αναπτύχθηκαν συγκεκριμένες μεθοδολογίες για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, από τις οποίες προέκυψε για κάθε διάταξη η απεικόνιση του ολικού φάσματος που καταγράφεται από τον ανιχνευτή και της φωτοκορυφής των 609,3 keV του ^{214}Bi . Η βέλτιστη των λύσεων που δοκιμάστηκαν χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της μεταβολής (αύξησης) του ^{214}Bi πάνω στο φίλτρο του αέρα κατά τη λειτουργία της αντλίας μέχρις οριακού σημείου, αλλά και της απομείωσης μετά την παύση της λειτουργίας της. Μάλιστα, όπως διαπιστώνεται το σήμα του ^{214}Bi μετά από δύο ώρες λειτουργίας της αντλίας έχει σταθεροποιηθεί σε τιμή περίπου διπλάσια από αυτήν κατά την έναρξη του πειράματος. Ακόμη, από τα αποτελέσματα των μετρήσεων εξήχθησαν διαγράμματα σχετικά με την χρονική εξέλιξη της φωτοκορυφής με την παράλληλη μεταβολή της θερμοκρασίας, φαινόμενο που παρατηρείται συχνά σε ανιχνευτές Ιωδιούχου Νατρίου και γίνεται πιο έντονο σε πολύωρες μετρήσεις με έντονη διακύμανση της θερμοκρασίας. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα όλων των πειραμάτων, και ιδιαίτερα του τελευταίου, συμπεραίνεται η χρησιμότητα της προτεινόμενης διάταξης για την παρακολούθηση των θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα, αναφέρονται τα σημεία στα οποία μπορεί να υπάρξει βελτίωση και καταληκτικά περιγράφεται η βέλτιστη δομή της υπό μελέτη διάταξης για περαιτέρω έλεγχο και μελλοντική χρήση.

ABSTRACT

The thesis is part of the ongoing research at the Nuclear Technology Laboratory and aims at the determination and study of the natural radioactivity in the atmosphere based on a proposed experimental setup, by exploiting the possibilities provided by the laboratory in order to increase the effectiveness compared to the classical methods used to this day. Thus, a large part of the work has also been the testing, evaluation and

implementation of this proposed setup. In particular, the proposed setup includes the use of an air pump in combination with a filter, which will constitute the measurement sample. By supplying air through the filter, the concentration of the radionuclides deposited on it - and therefore the gamma radiation from it - will increase, thereby amplifying the received signal. Four different configurations of the experimental setup were proposed and studied, i.e. combinations of the NaI detectors with the High Volume air samplers. The investigation and evaluation of the specific setup as well as the study of the variation of natural radioactivity in the atmosphere is done through the short-lived radon daughter ^{214}Bi . Specific methodologies were developed to carry out the measurements, from which the visualization of the whole spectrum recorded by the detector and specifically the photopeak of interest at 609,3 keV. In addition, graphs were produced from the results of the measurements, regarding the correlation of peak position with temperature, a phenomenon that is always present with NaI detectors which becomes a problem in long-term measurements with significant temperature variations. After investigating the correlation between the photopeak position and temperature and ensuring that any peak shift that may occur does not significantly affect the validity of the results, the final experiment was carried out to monitor the growth of ^{214}Bi on the filter when the air sampler is in operation and its decay after the air sampler operation is ceased. From the results of this experiment it was concluded that the use of a combination of air sampler and detector to simultaneously measure while sampling aerosol on the filter; significantly improves the signal from ^{214}Bi . Therefore, with the new experimental setup that is proposed the fluctuation of ^{214}Bi in the air may be monitored with better statistics.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	3
Κεφάλαιο 1.....	11
Εισαγωγή.....	11
Κεφάλαιο 2:.....	14
Ραδιενεργός διάσπαση, ακτινοβολίες και ανίχνευσή τους.....	14
2.1 Ραδιενέργεια και μηχανισμοί αποδιέγερσης.....	14
2.1.1 Νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων.....	16
2.2 Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας-γ με την ύλη.....	17
2.3 Πηγές και είδη ραδιενέργειας.....	19
2.3.1 Κοσμική ακτινοβολία.....	20
2.3.2 Τεχνητή ραδιενέργεια.....	21
2.3.3 Φυσική ραδιενέργεια.....	21
2.3.3.1 Ραδιενεργός ισορροπία και διαταραχή της ραδιενεργού ισορροπίας.....	25
2.4 Μελέτη της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα.....	29
2.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την συγκέντρωση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα.....	30
2.4.2 Το ραδόνιο και τα θυγατρικά του.....	31
2.4.3 Ανίχνευση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα.....	33
2.4.4 Φασματοσκοπία γ.....	34
2.5 Ανιχνευτικά συστήματα.....	36
2.5.1 Ανιχνευτές αερίων.....	36
2.5.2 Ανιχνευτές σπινθηρισμού.....	39
2.5.3 Ανιχνευτές στερεάς κατάστασης.....	42
2.6 Μετρήσεις ραδονίου με χρήση φασματοσκοπίας-γ.....	43
2.6.1 Δειγματοληψία κι επεξεργασία δειγμάτων ατμοσφαιρικού αεροζόλ.....	43
2.6.2 Συνεχείς μετρήσεις (Continuous Monitors).....	45
2.6.3 Το διεθνές δίκτυο παρακολούθησης της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα.....	46
2.6.4 Σταθμοί μέτρησης αερολύματος στην ατμόσφαιρα.....	47
2.6.4.1 Τύποι συστημάτων μέτρησης αερολύματος AMS-02 και AMS-02T.....	47
2.6.4.2 Τύποι συστημάτων ASU-Online.....	51
2.7 Ανίχνευση ραδιενεργών ισοτόπων και ακτινοβολίας γ.....	52
2.7.1 Διακριτική ικανότητα του ανιχνευτικού συστήματος.....	53

2.7.2 Απόδοση συστήματος	54
Κεφάλαιο 3:.....	55
Η ανιχνευτική διάταξη.....	55
3.1 Εισαγωγή.....	55
3.2 Συνιστώσες της διάταξης	56
3.2.1 Ανιχνευτές	56
3.2.1.1 Ανιχνευτής NaI.....	57
3.2.1.2 Ανιχνευτής BEGe.....	57
3.2.2 Η δειγματοληψία αέρα	58
3.2.2.1 Φορητή αντλία υψηλής παροχής.....	59
3.2.3 Οι ηλεκτρονικές συνιστώσες της ανιχνευτικής διάταξης	60
3.3 Περιγραφή των διατάξεων	62
3.3.1 Διάταξη με ανιχνευτή NaI 3"x3" και αντλία STAPLEX.....	62
3.3.2 Διάταξη NaI 2"x2" και αντλίας μικρής παροχής αέρα	64
3.3.3 Διάταξη ανιχνευτή NaI 2"x2" και δειγματολήπτη F&J υψηλού όγκου αέρα.....	66
3.3.4 Διάταξη με ανιχνευτή BEGe και δειγματολήπτη F&J υψηλού όγκου αέρα.....	67
3.3.5 Διάταξη με ανιχνευτή NaI 3"x3" και δειγματολήπτη F&J υψηλού όγκου αέρα	68
Κεφάλαιο 4.....	70
Μεθοδολογία μετρήσεων.....	70
4.1 Πρώτη σειρά μετρήσεων με τη διάταξη NaI 3"x3" και την αντλία STAPLEX.....	70
4.1.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση.....	70
4.1.2 Βαθμονόμηση διακριτικής ικανότητας (FWHM)	73
4.1.3 Προσδιορισμός ραδιενεργών ισοτόπων ενδιαφέροντος στο φίλτρο αέρα	75
4.1.3.1 Θόρυβος μετρήσεων και πηγές θορύβου	75
4.1.3.2 Μεθοδολογία ανάλυσης	76
4.1.4 Μελέτη της διακύμανσης των θυγατρικών του ραδονίου.....	79
4.1.4.1 Παρακολούθηση της αύξησης των θυγατρικών στο φίλτρο αέρα.....	79
4.1.4.2 Διερεύνηση της επίδρασης των πλήθους των καναλιών του ADC στα αποτελέσματα των μετρήσεων	83
4.1.4.3 Μελέτη της παρακολούθησης της διακύμανσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου για διαφορετικό πλήθος καναλιών του ADC.....	84
4.2 Μετρήσεις στο εξωτερικό περιβάλλον με τη διάταξη NaI 2"x2" και την αντλία TFIA STAPLEX (2 ^η σειρά μετρήσεων).....	88
4.2.2 Λήψη του φάσματος με χρήση του μονοκαναλικού ανιχνευτή SCA	89
4.2.3 Μελέτη της φωτοκορυφής ενδιαφέροντος στα 609,3 keV	92

4.3 Τρίτη σειρά μετρήσεων με τη διάταξη ανιχνευτή BEGe και τον δειγματολήπτη υψηλού όγκου αέρα F&J.....	94
4.3.1 Ποιοτικός προσδιορισμός φωτοκορυφών ενδιαφέροντος.....	94
4.3.2 Διακύμανση της επιφάνειας των φωτοκορυφών κατά τη διάρκεια δειγματοληψίας διάρκειας 6 ωρών.....	97
4.4 Τέταρτη σειρά μετρήσεων με τη διάταξη NaI 2”x2” και το δειγματολήπτη υψηλού όγκου αέρα F&J.....	102
4.4.1 Παραγωγή φάσματος με χρήση του SCA	103
4.4.2 Μελέτη υποστρώματος με χρήση του SCA	104
4.4.3 Προσδιορισμός της θέσεως της φωτοκορυφής ενδιαφέροντος.....	105
Κεφάλαιο 5:.....	107
Τελική συγκρότηση της μετρητικής διάταξης.....	107
5.1 Εισαγωγή.....	107
5.2 Το υπόστρωμα της διάταξης	107
5.3 Επαλήθευση της θέσης της φωτοκορυφής 609,3 keV	109
5.4 Μελέτη διακύμανσης της φωτοκορυφής του ²¹⁴ Bi	110
5.5 Παρακολούθηση της διακύμανσης της φωτοκορυφής 609,3 keV συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος	113
5.5.2 Προσδιορισμός του υποβάθρου της φωτοκορυφής	117
5.5.3 Προσδιορισμός της καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφής και του λόγου σήματος προς θόρυβο	118
5.6 Επίδραση της ολίσθησης της φωτοκορυφής στη μελέτη της διακύμανσης της φωτοκορυφής 609,3 keV.....	119
5.6.1 Σχόλια για την οργάνωση διεξαγωγής του πειράματος	123
5.7 Συμπέρασμα από τα αποτελέσματα των μετρήσεων με την τελική συγκρότηση της διάταξης	124
Κεφάλαιο 6:.....	125
Συμπεράσματα, συζήτηση, ιδέες για περαιτέρω έρευνα.....	125
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	132
Ανάλυση δείγματος φίλτρου αέρα 4” σε ανιχνευτή Υπερκαθαρού Γερμανίου HPGe.....	132
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	134
Αναλυτικοί πίνακες δεδομένων και επιπλέον διαγράμματα από τα πειράματα με την δοκιμαστική διάταξη, NaI 3”x3” και αντλία μικρής παροχής στο εργαστήριο.....	134
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	136
Χρήση παλμογράφου για έλεγχο παλμών.....	136
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	137

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4. 1: Ενεργειακή βαθμονόμηση ανιχνευτικής διάταξης	73
Διάγραμμα 4. 2: Συνάρτηση βαθμονόμησης FWHM.....	75
Διάγραμμα 4. 3: Εξέλιξη του ^{214}Pb βάσει της φωτοκορυφής 351,9keV.	82
Διάγραμμα 4. 4: Εξέλιξη του ^{214}Bi βάσει της φωτοκορυφής 609,3 keV.....	82
Διάγραμμα 4. 5: Εξέλιξη του ^{214}Bi βάσει της φωτοκορυφής 1120,3 keV.....	83
Διάγραμμα 4. 6: Εξέλιξη του ^{214}Bi βάσει της φωτοκορυφής 1764,5 keV.....	83
Διάγραμμα 4. 7: Εξέλιξη του ^{214}Pb βάσει της φωτοκορυφής 351,9 keV για τις διαφορετικές ρυθμίσεις του ADC.....	86
Διάγραμμα 4. 8: Εξέλιξη του ^{214}Bi βάσει της φωτοκορυφής 609 keV για τις διαφορετικές ρυθμίσεις του ADC.....	86
Διάγραμμα 4. 9: Εξέλιξη του ^{214}Bi βάσει της φωτοκορυφής 1120 keV για τις διαφορετικές ρυθμίσεις του ADC.....	87
Διάγραμμα 4. 10: Εξέλιξη του ^{214}Bi βάσει της φωτοκορυφής 1764 keV για τις διαφορετικές ρυθμίσεις του ADC.....	87
Διάγραμμα 4. 11: Φάσμα με SCA.	89
Διάγραμμα 4. 12: Φάσμα με έμφαση στις χαμηλές ενέργειες.	90
Διάγραμμα 4. 13: Παραγωγή φάσματος με μικρότερο βήμα.	91
Διάγραμμα 4. 14: Φωτοκορυφή 609 keV του ^{214}Bi	93
Διάγραμμα 4. 15: Επανελέγχος της θέσης της φωτοκορυφής ενέργειας 609,3 keV ...	94
Διάγραμμα 4. 16: Επιφάνεια των φωτοκορυφών ενδιαφέροντος για τον ανιχνευτή BEGe.....	97
Διάγραμμα 4. 17: Εξέλιξη του ^{214}Pb με βάση την φωτοκορυφή 295,2 keV.....	99
Διάγραμμα 4. 18: Εξέλιξη του ^{214}Pb με βάση την φωτοκορυφή 351,9 keV.....	100
Διάγραμμα 4. 19: Εξέλιξη του ^{214}Bi με βάση την φωτοκορυφή 609,3 keV.....	100
Διάγραμμα 4. 20: Εξέλιξη του ^{214}Bi με βάση την φωτοκορυφή 1120,3 keV.....	101
Διάγραμμα 4. 21: Εξέλιξη του ^{40}K με βάση την φωτοκορυφή 1460,7keV.....	101
Διάγραμμα 4. 22: Εξέλιξη του ^{214}Bi με βάση την φωτοκορυφή 1764,7 keV.....	102
Διάγραμμα 4. 23: Φάσμα του ανιχνευτή NaI 2"x2" με χρήση πηγής Ραδίου.....	104
Διάγραμμα 4. 24: Διάγραμμα υποστρώματος με τον ανιχνευτή NaI 2"x2" επί του δειγματολήπτη F&J και την αντλία εκτός λειτουργίας.....	105
Διάγραμμα 4. 25: Προσδιορισμός φωτοκορυφής 609 keV.	105
Διάγραμμα 5. 1: Φάσμα υποστρώματος	108
Διάγραμμα 5. 2: Φωτοκορυφή Βισμούθιου ενέργειας 609,3 keV.....	110
Διάγραμμα 5. 3: Η εξέλιξη του ^{214}Bi σε διάστημα έξι ωρών, μέσω παρακολούθησης της φωτοκορυφής 609,3 keV.	111
Διάγραμμα 5. 4: Η εξέλιξη του ^{214}Bi σε διάστημα έξι ωρών, μέσω παρακολούθησης της φωτοκορυφής 609 keV. Διακρίνεται η επίδραση των φαινομένων συσσώρευσης (Growth) και απομείωσης (Decay), με τις αντίστοιχες καμπύλες προσαρμογής.....	112
Διάγραμμα 5. 5: Αιχμές που αντιστοιχούν στην ενέργεια 609,3 keV για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.....	114

Διάγραμμα 5. 6: Φωτοκορυφή 609,3 keV από πειραματικά δεδομένα και η αντίστοιχη θεωρητική καμπύλη για μετρήσεις 8:40 και θερμοκρασίας 28,8 °C	116
Διάγραμμα 5. 7: Συσχέτιση της θέσης του κεντροειδούς της φωτοκορυφής 609,3 keV με την θερμοκρασία.	117
Διάγραμμα 5. 8: Εξέλιξη φωτοκορυφής ²¹⁴ Bi σε διάστημα έξι ωρών με μέτρηση NaI 3”x3” και αντλία F&J	121
Διάγραμμα 5. 9: Μετρήσεις γεγονότων Βισμούθιου με ενίσχυση από πηγή Ραδίου με την διάταξη NaI 3”x3” και της αντλίας μεγάλου όγκου αέρα σε διάστημα έξι ωρών	121
Διάγραμμα 5. 10: Εξέλιξη της επιφάνειας της φωτοκορυφής του ²¹⁴ Bi σε διάστημα έξι ωρών	122
Διάγραμμα 5. 11: Διακύμανση του πλήθους των γεγονότων κατά τη δεύτερη σειρά μετρήσεων.....	124
Διάγραμμα Β 1: Διακύμανση φωτοκορυφής 351,9 keV για 6 ώρες.....	134
Διάγραμμα Β 2: Διακύμανση φωτοκορυφής 609,3 keV για 6 ώρες.....	134
Διάγραμμα Β 3: Διακύμανση φωτοκορυφής 1120,3 keV για 6 ώρες.....	135
Διάγραμμα Β 4: Διακύμανση φωτοκορυφής 1764,5 keV για 6 ώρες.....	135

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 3. 1: Πλάγια όψη της διάταξης	63
Εικόνα 3. 3: Σχηματική αναπαράσταση δοκιμαστικής διάταξης	64
Εικόνα 3. 4: Διάταξη αντλίας μικρής παροχής και ανιχνευτή NaI 2”x2”	65
Εικόνα 3. 5: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης NaI 2”x2” και δειγματολήπτη μικρής παροχής.	65
Εικόνα 3. 6: (α) Πλάγια όψη διάταξης (β) Πρόσοψη διάταξης	66
Εικόνα 3. 7: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης NaI 2”x2” και μεγάλης αντλίας....	66
Εικόνα 3. 8: Πλάγια όψη της διάταξης BEGe και δειγματολήπτη μεγάλου όγκου αέρα.	67
Εικόνα 3. 9: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης BEGe και δειγματολήπτη υψηλού όγκου αέρα.....	67
Εικόνα 3. 10: Πλάγια όψη διάταξης	68
Εικόνα 3. 11: Κάτοψη διάταξης.....	68
Εικόνα 3. 12: Οι ηλεκτρονικές μονάδες της διάταξης.....	69
Εικόνα 3. 13: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης NaI 3”x3” και δειγματολήπτη υψηλού όγκου αέρα	69
Εικόνα 4. 1: Η μονάδα NIM και ο ενισχυτής	71
Εικόνα 4. 2: Ο ADC ρυθμισμένος στα 1024 κανάλια και η μονάδα AIM (MCA)	72
Εικόνα 4. 3: Φάσμα του δείγματος φίλτρου και τα επιλεγμένα ROI.....	78
Εικόνα 4. 4: Διαγραμματική απεικόνιση ροής σήματος στην διάταξη NaI 2”x2” και της αντλίας F&J	103

Εικόνα Γ 1: Εικόνα παλμογράφου	136
Εικόνα Γ 2: Εικόνα παλμογράφου	136

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2. 1: Η ραδιενεργός σειρά του Ουρανίου	23
Σχήμα 2. 2: Η ραδιενεργός σειρά του Θορίου	24
Σχήμα 2. 3: Η ραδιενεργός σειρά του Ακτινίου	25
Σχήμα 2. 4: Επαύξηση του βραχύβιου ^{234}Th από το μακρόβιο μητρικό ^{238}U ως ότου επέλθει ισορροπία	27
Σχήμα 2. 5: Επαύξηση και διάσπαση του βραχύβιου θυγατρικού ^{230}Th από το ελαφρώς μακροβιότερο του πατρικό ^{234}U στην μεταβατική ισορροπία	28
Σχήμα 2. 6: Τα μονοπάτια της ραδιενεργούς διάσπασης του ^{214}Bi με την εκπομπή γ ακτινοβολίας 0,768 και 1,120 MeV αντίστοιχα.	31
Σχήμα 2. 7: Προσδιορισμός της επιφάνειας; Φωτοκορυφής.....	35
Σχήμα 2. 8: Οι διαφορετικές περιοχές λειτουργίας των ανιχνευτών αερίου.....	37
Σχήμα 2. 9: Διαγραμματική απεικόνιση της διαδικασίας δημιουργίας ηλεκτρικού σήματος σε ανιχνευτή σπινθηρισμού.....	40
Σχήμα 2. 10: Διαγραμματική απεικόνιση των διαφορετικών αλληλεπιδράσεων που συμβαίνουν σε έναν ανιχνευτή σπινθηρισμού με ακτινοβολία γ	41
Σχήμα 2. 11: Η μονάδα AMS-02 by GIHMM.....	48
Σχήμα 2. 12: Τα φίλτρα της AMS-02 by GIHMM.....	49
Σχήμα 2. 13: Η ταινία φίλτρου της AMS-02T by GIHMM	51
Σχήμα 2. 14: Η ASU, GIHMM (1.Οθόνη δεδομένων, 2. Στοιχεία ελέγχου, 3. Router, 4. Σύστημα συγκράτησης φίλτρου, 5. Ανιχνευτής, 6. Ελεγκτής συχνότητας, 7. Ροόμετρο, 8. Αντλία)	52
Σχήμα 6. 1: Πρόσωση προτεινομένης διάταξης.....	130
Σχήμα 6. 2: Τομή AA, τομή κάτοψης προτεινομένης διάταξης	130
Σχήμα 6. 3: Πλάγια όψη προτεινομένης διάταξης.....	131
Σχήμα 6. 4: Τομή BB, τομή στην πλάγια όψη της προτεινομένης διάταξης.....	131

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Ως φυσική ραδιενέργεια γήινης προέλευσης ορίζονται οι ακτινοβολίες που προέρχονται κατά τη διάσπαση των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων τα οποία βρίσκονται στο φλοιό της Γης από τον σχηματισμό της, ή παράγονται από τα θυγατρικά τους ισότοπα. Η γήινη ραδιενέργεια μπορεί να προέρχεται είτε από μεμονωμένα ραδιοϊσότοπα όπως το ^{40}K είτε ως ραδιοϊσότοπα που ανήκουν στις τρεις κύριες ραδιενεργές σειρές (^{238}U , ^{235}U και ^{232}Th). Γενικά, τα ισότοπα αυτά και τα παράγωγά τους υπάρχουν σε πολλά πετρώματα και τύπους εδάφους και μπορούν να περάσουν με φυσικές διεργασίες στο νερό και στον αέρα. Ειδικότερα τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα τα οποία ανιχνεύονται είναι κυρίως¹ τα ισότοπα του ραδονίου ^{222}Rn και ^{220}Rn και τα θυγατρικά τους. Η συγκέντρωσή των ισοτόπων του ραδονίου και των θυγατρικών τους στον αέρα παρουσιάζει μεγάλη κύμανση που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η συγκέντρωση στο χώμα των αντίστοιχων ισοτόπων του ραδίου ^{226}Ra και ^{224}Ra , το ύψος από το έδαφος, το είδος και το πορώδες του εδάφους, η θερμοκρασία και η υγρασία, η εποχή, η βροχή ή η χιονόπτωση κ.α. Σε ηπειρωτικές περιοχές η ενεργότητα (ειδική ραδιενέργεια σε Bq/m^3) του ^{222}Rn στον αέρα συνήθως κυμαίνεται από 1-40 Bq/m^3 (UNSCEAR,2000). Πάνω από τους ωκεανούς καθώς και σε απομονωμένα νησιά η ενεργότητα είναι σε πολύ μικρότερα επίπεδα λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης σε ράδιο στο θαλασσινό νερό ενώ πιο αυξημένες τιμές εμφανίζονται σε κλειστούς χώρους. Με βάση τη μέτρηση της ολικής-γ ακτινοβολίας από το τηλεμετρικό δίκτυο της ΕΕΑΕ η τυπική τιμή του ρυθμού δόσης στην Αθηνά (στην περιοχή Αγίας Παρασκευής) είναι ~55 nSv/h ενώ οι τιμές ενεργότητας του ^{222}Rn την ίδια περιοχή φτάνουν στα 30 Bq/m^3 (ΕΕΑΕ, 26/11/2022). Στον αέρα ανιχνεύονται και ραδιενεργά ισότοπα λόγω της αιωρούμενης σκόνης. Η προέλευση της είναι το έδαφος, ηφαιστειακή δραστηριότητα, ανθρωπογενείς δραστηριότητες, δασικές πυρκαγιές όπως και άλλοι συναφείς λόγοι.

Ο προσδιορισμός της ραδιενέργειας στον ατμοσφαιρικό αέρα γίνεται είτε μέσω κατάλληλης δειγματοληψίας του αερολύματος πάνω σε ειδικά φίλτρα αέρα και εν συνεχεία γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης στο εργαστήριο, είτε μέσω ανιχνευτικών συστημάτων που μετρούν συνεχώς τη ραδιενέργεια του αέρα μέσω συγκεκριμένων φωτοκορυφών. Μία τέτοια διάταξη είναι εγκατεστημένη και λειτουργεί στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ) για περισσότερα από 30 χρόνια. Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η συγκρότηση, δοκιμή και αξιολόγηση μιας διάταξης που αποτελείται από συνδυασμό ανιχνευτή γ-ακτινοβολίας Ιωδιούχου Νατρίου (NaI) και αντλίας αέρα/φίλτρου, η οποία αποσκοπεί στη μέτρηση με μεγαλύτερη ακρίβεια της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα. Τέτοια αυτόματα συστήματα μετρήσεων ραδιενέργειας της ατμόσφαιρας χρησιμοποιούνται ευρέως, τόσο για την παρακολούθηση της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα όσο και ως συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης σε περίπτωση

¹ Μία ειδική περίπτωση είναι και η επαναιώρηση εδαφικής σκόνης που μπορεί να γίνει για διάφορους λόγους, όπως ηφαιστειακή δραστηριότητα, ανθρωπογενείς δραστηριότητες, δασικές πυρκαγιές και άλλοι λόγοι, και η οποία μπορεί να περιέχει και άλλα ραδιενεργά ισότοπα, όπως ^{238}U .

ραδιολογικού ή πυρηνικού ατυχήματος. Αντικείμενο της ΔΕ ήταν η συγκρότηση μίας τέτοιας διάταξης χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες που παρέχει το εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ (ΕΠΤ-ΕΜΠ).

Η διερεύνηση και η αξιολόγηση της συγκεκριμένης διάταξης, όπως και η μελέτη της διακύμανσης της φυσικής ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα έγινε στα πλαίσια της Διπλωματικής Εργασίας με αξιοποίηση του ^{214}Bi , βραχύβιου θυγατρικού του ^{222}Rn , καθώς – όπως διαπιστώθηκε από τη διερεύνηση που έγινε – είναι το ευκολότερα ανιχνεύσιμο θυγατρικό του ραδονίου, από τα φωτόνια ενέργειας 609,3 keV που εκπέμπει.

Η Διπλωματική Εργασία αποτελείται από 6 Κεφάλαια.

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρατίθενται στοιχεία από τη θεωρία με στόχο την πλήρη κατανόηση των φυσικών φαινομένων που εξετάζονται και θεμάτων που έχουν να κάνουν με τη φυσική ραδιενέργεια, τις ραδιενεργές σειρές και τη ραδιενεργό ισορροπία. Επιπλέον, αναπτύσσονται θέματα σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας με την ύλη, την ανίχνευση της ακτινοβολίας και τους συνήθεις τύπους ανιχνευτών γ-ακτινοβολίας. Τέλος, παρουσιάζονται και ολοκληρωμένα εμπορικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ραδιενέργειας περιβάλλοντος σε κανονικές συνθήκες ή σε περίπτωση ατυχήματος.

Στο 3^ο Κεφάλαιο το ενδιαφέρον στρέφεται στα διαδοχικά βήματα βελτίωσης της διάταξης αντλία/ανιχνευτή. Παρουσιάζονται οι διάφοροι ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν (σταθεροποιημένος NaI 2"x2", NaI 3"x3") και τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά τους καθώς και οι δύο αντλίες υψηλής παροχής που χρησιμοποιήθηκαν (TFIA της Staplex και 60810DTE της F&J). Εν συνεχεία παρουσιάζονται οι διάφοροι συνδυασμοί ανιχνευτών και αντλιών που μελετήθηκαν με στόχο τη βελτίωση της μέτρησης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε συγκρότησης. Η διερεύνηση αυτή έγινε τόσο σε εσωτερικό χώρο, όπου τα επίπεδα ραδονίου είναι υψηλότερα και η μέτρηση είναι ως εκ τούτου ευκολότερη, όσο και σε εξωτερικό χώρο, όπου άλλωστε προβλέπεται να λειτουργήσει η υπό συγκρότηση διάταξη.

Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα πειράματα που έγιναν με τις διάφορες συγκροτήσεις της μετρητικής διάταξης, οι διαδικασίες βαθμονόμησης, η μεθοδολογία που κάθε φορά δοκιμάστηκε για τη λήψη του φάσματος και του υποστρώματος της εκάστοτε διάταξης, ενώ ακολουθεί αξιολόγηση του συνολικού φάσματος αλλά και του σήματος που κάθε φορά προέκυπτε από τη φωτοκορυφή του ^{214}Bi . Τα πειράματα και οι αξιολογήσεις που έγιναν βασίστηκαν τόσο στα φωτόνια που εκπέμπει το ^{214}Bi της ατμόσφαιρας, όσο και αυτά που εκπέμπονται από πηγή ^{226}Ra . Η χρήση της πηγής αυτή βελτίωσε τη στατιστική των πειραμάτων και διευκόλυνε την εξαγωγή των σχετικών συμπερασμάτων. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων τα οποία περιγράφονται για όλες τις διαφορετικές εκδοχές της μετρητικής διάταξης που δοκιμάστηκαν οδήγησαν στην συγκρότηση της ανιχνευτικής διάταξης η οποία παρουσιάζεται και αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Το 5^ο Κεφάλαιο αναφέρεται στα πειράματα που έγιναν με την τελική προτεινόμενη συγκρότηση της διάταξης αντλίας/ανιχνευτή. Η διάταξη αυτή αποτελείται από τον

ανιχνευτή NaI 3"x3", την αντλία υψηλού όγκου αέρα F&J και φίλτρο αέρα 8"x10". Παρατίθεται η αντίστοιχη μελέτη που έχει γίνει και για τις προηγούμενες διατάξεις, ενώ επιπλέον ελέγχεται η σταθερότητα της διάταξης με τη θερμοκρασία και το χρόνο όπου διαπιστώνεται πόσο σημαντικό είναι να εξασφαλισθεί η σταθερότητα της θερμοκρασίας στη διάταξη ή να ληφθεί μέριμνα για να γίνονται κατάλληλες διορθώσεις για την ολίσθηση λόγω της θερμοκρασίας. Ακολούθως έγιναν πειράματα για την παρακολούθηση της επαύξησης των θυγατρικών του ραδονίου πάνω στο φίλτρο της αντλίας, όσο η αντλία είναι σε λειτουργία και την απομείωσή τους μετά την παύση λειτουργίας της. Από τα αποτελέσματα αυτά διαπιστώθηκε ότι είναι δυνατή η παρακολούθηση των φαινομένων επαύξησης και απομείωσης με καλή στατιστική. Επιπλέον, κατά τη φάση της ισορροπίας παραγωγής-κατανάλωσης πάνω στην αντλία διαπιστώνεται μία ικανοποιητική σταθερότητα του σήματος του ^{214}Bi το οποίο μάλιστα είναι αισθητά υψηλότερο από το σήμα του ανιχνευτή όταν δεν χρησιμοποιείται η αντλία, κάτι που δείχνει ότι ο στόχος για βελτίωση του σήματος με τη διάταξη που συγκροτήθηκε στα πλαίσια της ΔΕ έχει επιτευχθεί και κατά συνέπεια το σήμα αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της κύμανσης των θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα για λόγους που έχουν να κάνουν με τις μετεωρολογικές συνθήκες την ύπαρξη προσεισμικών σημάτων κλπ.

Στο 6^ο Κεφάλαιο της ΔΕ γίνεται σύννομή της εργασίας, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από όλη την πειραματική διαδικασία, η τελική πρόταση της διάταξης και σκαριφήματα αυτής για την αναπαραγωγή της καθώς και σειρά από προτάσεις για βελτιστοποίηση της διάταξης και παραπάνω διερεύνηση για την μελέτη της ραδιενέργειας με χρήση αυτής.

Τέλος παρατίθενται τα Παραρτήματα και η Βιβλιογραφία της εργασίας.

Κεφάλαιο 2:

Ραδιενεργός διάσπαση, ακτινοβολίες και ανίχνευσή τους

2.1 Ραδιενέργεια και μηχανισμοί αποδιέγερσης

Η ραδιενεργός διάσπαση είναι η διαδικασία κατά την οποία πυρήνες οι οποίοι είναι διεγερμένοι εκπέμπουν αυθόρμητα σωματίδια ή φωτόνια, με ενέργεια από μερικά eV έως και μερικά MeV, μεταπίπτοντας έτσι σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν νέοι πυρήνες, οι οποίοι μπορεί να είναι επίσης σε διεγερμένοι, οπότε η διαδικασία συνεχίζεται έως το σημείο που παράγεται πυρήνας σε σταθερή κατάσταση. Οι αρχικοί πυρήνες (μητρικοί) που διασπώνται σε νέους (θυγατρικούς) παρουσιάζουν διαφορετικό ατομικό και συνήθως και μαζικό αριθμό, ανάλογα από τον τρόπο διάσπασης, που μπορεί να είναι με εκπομπή ακτινοβολίας-α (με μορφή πυρήνα ηλίου ^4He) ή ακτινοβολία β (ηλεκτρόνιο β^- ή ποζιτρόνιο β^+). Αμέσως μετά τη διάσπαση ο θυγατρικός πυρήνας συνήθως βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση οπότε αποβάλλει την περίσσεια ενέργεια με μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ακτίνες-γ). Η εκπομπή αυτή της πάσης φύσεως ακτινοβολίας για την αποδιέγερση των αρχικά διεγερμένων ονομάζεται ραδιενέργεια.

Ειδική περίπτωση ραδιενεργού διάσπασης θεωρείται και η σχάση, κατά την διάρκεια της οποίας ένας βαρύς πυρήνας χωρίζεται σε δύο μικρότερους (θραύσματα σχάσης) εκπέμποντας ταυτόχρονα και άλλα είδη ακτινοβολίας, όπως νετρόνια.

Αναλυτικότερα για τους κύριους μηχανισμούς αποδιέγερσης ισχύουν τα εξής:

Η διάσπαση-α συναντάται ως μηχανισμός αποδιέγερσης σε βαρείς πυρήνες, δηλαδή πυρήνες με μεγάλο μαζικό αριθμό A. Η γενική εξίσωση που περιγράφει την συγκεκριμένη διάσπαση είναι:



Όπου Q είναι η διαφορά της δυναμικής ενέργεια του πυρήνα Ηλίου και του θυγατρικού πυρήνα, από τον μητρικό.

Το σωματίδιο-α που εκπέμπεται στο συγκεκριμένο είδος διάσπασης είναι ένας πυρήνας ηλίου ^4He , ενώ για να πραγματοποιηθεί μια διάσπαση-α πρέπει η μάζα του αρχικού

πυρήνα να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των μαζών του θυγατρικού και του πυρήνα He.

Με το γενικό όρο διάσπαση-β περιγράφονται τρία διαφορετικά είδη διάσπασης: (i) η διάσπαση με εκπομπή ηλεκτρονίων (β^-), (ii) η διάσπαση με εκπομπή ποζιτρονίων (β^+) και (iii) η σύλληψη ηλεκτρονίου (EC^2). Κατά τη διάσπαση-β, η οποία αποτελεί και το συνηθέστερο είδος ραδιενεργού διάσπασης, μέσα στον πυρήνα γίνεται ένας από τους παρακάτω μετασχηματισμούς – ανάλογα με το είδος της διάσπασης.

$$n = p + e^- + \bar{\nu} \quad (2.2)$$

$$p = n + e^+ + \nu \quad (2.3)$$

$$p + e^- = n + \nu \quad (2.4)$$

Ειδικότερα, στη διάσπαση β^- ένα νετρόνιο του πυρήνα μετατρέπεται σε: ένα πρωτόνιο, ένα ηλεκτρόνιο και ένα αντινεutrino³ εκ των οποίων τα δύο τελευταία εκπέμπονται από τον πυρήνα, με αποτέλεσμα τη μεταστοιχείωση του αρχικού πυρήνα ως εξής:



Για να πραγματοποιηθεί μια διάσπαση β^- πρέπει η μάζα του αρχικού πυρήνα να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των μαζών του θυγατρικού και του ηλεκτρονίου.

Στην διάσπαση β^+ ένα πρωτόνιο του πυρήνα μετασχηματίζεται σε: ένα νετρόνιο, ένα ποζιτρόνιο και ένα νεutrino⁴. Από αυτά το ποζιτρόνιο και το νεutrino εκπέμπονται από τον πυρήνα και έτσι ο αρχικός πυρήνας μεταστοιχειώνεται στον θυγατρικό του όπως φαίνεται παρακάτω.



Για να πραγματοποιηθεί μια διάσπαση β^+ πρέπει η μάζα του αρχικού πυρήνα είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των μαζών του θυγατρικού πυρήνα και του ποζιτρονίου κάτι που ισχύει αντίστοιχα και για την δυναμική ενέργεια.

Η σύλληψη ηλεκτρονίου (Electron Capture) ουσιαστικά περιγράφει την διαδικασία απορρόφησης ενός ηλεκτρονίου της εσωτερικής στιβάδας K από τον πυρήνα. Η σύλληψη ηλεκτρονίου, η οποία αποτελεί ανταγωνιστικό φαινόμενο της διάσπασης β^+ ,

² Electron capture

³ Σωματίδιο χωρίς φορτίο και μάζας ηρεμίας

⁴ Έχει αντίστοιχα χαρακτηριστικά με το αντινεutrino

κυριαρχεί σε πιο βαρείς πυρήνες και περιγράφεται από την γενική εξίσωση που ακολουθεί:



Κατά τη σύλληψη ηλεκτρονίου δημιουργείται κενό στη στιβάδα K το οποίο αμέσως καλύπτεται από ηλεκτρόνιο υψηλότερων στιβάδων, κάτι που προκαλεί ανακατανομή όλων των ηλεκτρονίων στις στιβάδες με ταυτόχρονη εκπομπή ακτίνων-X.

Η εκπομπή ακτινοβολίας-γ δεν αποτελεί ένα συγκεκριμένο είδος διάσπασης αλλά μπορεί να εμφανίζεται σε έναν πυρήνα όταν αυτός μεταπίπτει σε χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση, είτε γιατί έχει απλά διεγερθεί εξωτερικά, είτε ως αποτέλεσμα προηγούμενης διάσπασης-α ή -β. Η ακτινοβολία-γ είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσης, αποτελεί τον βασικό τρόπο απώλειας ενέργειας κατά την αποδιέγερση του πυρήνα και λαμβάνει συγκεκριμένες τιμές ενέργειας, γεγονός που σχετίζεται με τις αντίστοιχες ενεργειακές στάθμες του συγκεκριμένου πυρήνα. Ένας πυρήνας μπορεί να αποδιεγερθεί είτε με μοναδική, είτε με διαδοχικές αποδιεγέρσεις και εκπομπή των αντίστοιχων ακτίνων-γ. Γίνεται φανερό από τα παραπάνω ότι η ενέργεια μίας ακτίνας-γ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως το δακτυλικό αποτύπωμα του πυρήνα ο οποίος την εκπέμπει και κατά συνέπεια να οδηγήσει στην ανίχνευση του.

2.1.1 Νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων

Η ραδιενεργός διάσπαση αποτελεί μια τυχαία, στατιστική διαδικασία με συνέπεια να μην μπορεί να γίνει πρόβλεψη πότε ακριβώς ένας συγκεκριμένος πυρήνας θα διασπαστεί. Αυτό που έχει όμως νόημα και πολύ μεγάλη σημασία είναι το πλήθος των αρχικών πυρήνων που θα έχουν διασπασθεί σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ο νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων που περιγράφει μαθηματικά την παραπάνω διαδικασία είναι:

$$A = \frac{-dN}{dt} = \lambda N \quad (2.8)$$

Όπου N είναι το πλήθος των ραδιενεργών πυρήνων που δεν έχουν διασπασθεί σε μια δεδομένη στιγμή t , dN το πλήθος των πυρήνων που προβλέπεται να διασπασθούν στο επόμενο διάστημα dt και λ είναι η σταθερά διάσπασης του συγκεκριμένου είδους πυρήνων. Η σταθερά λ εκφράζει την ανά μονάδα χρόνου πιθανότητα ένας πυρήνας να διασπασθεί. Το αρνητικό πρόσημο της εξίσωσης δείχνει ότι ο αριθμός των πυρήνων στο δείγμα μειώνεται με τον χρόνο. Τέλος, η ποσότητα $A = \lambda \cdot N$ εκφράζει το πλήθος

των ραδιενεργών διασπάσεων στη μονάδα του χρόνου (ρυθμός). Το μέγεθος αυτός συχνά καλείται ως ενεργότητα (activity), ή και ως ραδιενέργεια.

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ο Εκθετικός Νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων:

$$N(t) = N_{(0)} \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.9)$$

Όπου $N_{(0)}$ είναι το πλήθος των πυρήνων που βρίσκονται αδιάσπαστοι τη χρονική στιγμή $t=0$.

Η σχέση (2.9) μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$A(t) = A_{(0)} \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.10)$$

Από την παραπάνω σχέση μπορούν εύκολα να προκύψουν οι παρακάτω χαρακτηριστικοί για το είδος πυρήνων χρόνοι:

Μέσος χρόνος ζωής ενός πυρήνα που ορίζεται ως η μέση τιμή του χρόνου διάσπασης των πυρήνων του συγκεκριμένου είδους:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (2.11)$$

Και ο χρόνος ημιζωής⁵ που ορίζεται ως ο απαιτούμενος χρόνος για τη διάσπαση του 50% των αρχικών ραδιενεργών πυρήνων

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (2.12)$$

Ιστορικά, η πρώτη μονάδα μέτρησης της ενεργότητας που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Curie (Ci) που αντιστοιχεί στην ενεργότητα ενός γραμμαρίου Ραδίου (^{226}Ra) και ισούται με $3,7 \cdot 10^{10}$ διασπάσεις πυρήνων ανά δευτερόλεπτο. Ωστόσο, η σύγχρονη μονάδα ενεργότητας, κατά το σύστημα SI, είναι το 1 Becquerel (Bq) που ορίζεται ως μια διάσπαση το δευτερόλεπτο.

2.2 Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας-γ με την ύλη

Για την κατανόηση των μεγεθών που χρησιμοποιούνται σε τεχνολογίες ανίχνευσης των ακτινοβολιών είναι σημαντική η γνώση των μηχανισμών αλληλεπίδρασης των διαφόρων ειδών πυρηνικών ακτινοβολιών με την ύλη. Ο τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρά η ακτινοβολία κατά την διείσδυσή της στην ύλη διαφέρει

⁵ Χρόνος υποδιπλασιασμού

ανάλογα με το είδος της ακτινοβολίας, γι' αυτό και η μελέτη των φαινομένων που παρατηρούνται, μελετάται διαφορετικά για ακτινοβολίες φορτισμένων σωματιδίων και για ηλεκτρικά ουδέτερες ακτινοβολίες όπως είναι οι ακτίνες-γ. Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης των φορτισμένων σωματιδίων με τα άτομα της ύλης είναι οι δυνάμεις Coulomb που αναπτύσσονται μεταξύ των πεδίων των σωματιδίων της ακτινοβολίας και των περιφερειακών ηλεκτρονίων ή των πυρήνων – σπανιότερα. Από την άλλη, όταν οι ηλεκτρομαγνητικής φύσης ακτινοβολίες (ακτίνες γ και X) διαδίδονται σε ένα μέσο και αλληλεπιδρούν με αυτό χάνουν ενέργεια με έναν από τους παρακάτω κύριους μηχανισμούς: φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ελαστική σκέδαση, μη-ελαστική σκέδαση Compton και δίδυμη γένεση. Η ακτινοβολία-γ, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ποιοτικό αλλά και τον ποσοτικό προσδιορισμό ραδιενεργών πυρήνων. Για τον λόγο αυτό στη συνέχεια θα γίνει μία αναλυτική παρουσίαση των μηχανισμών αλληλεπίδρασης της γ-ακτινοβολίας με την ύλη.

- **Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** (photoelectric effect): κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ένα φωτόνιο ενέργειας E_γ αλληλεπιδρά με ένα ισχυρά δεσμευμένο ηλεκτρόνιο του ατόμου, με αποτέλεσμα τον ιονισμό του ατόμου. Το ηλεκτρόνιο λόγω του ιονισμού διαφεύγει με κινητική ενέργεια T που δίνεται από τη σχέση:

$$T = E_\gamma - E_\sigma \quad (2.13)$$

όπου E_σ είναι η ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου. Γενικά, για την πραγματοποίηση του φαινομένου με ηλεκτρόνιο μίας στιβάδας πρέπει η ενέργεια του φωτονίου να είναι παραπλήσια και οπωσδήποτε μεγαλύτερη ή ίση από την ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου μιας στιβάδας (συνήθως K ή L), ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργειά του φωτονίου από την ενέργεια σύνδεσης μίας στιβάδας τόσο η πιθανότητα αλληλεπίδρασης με ηλεκτρόνιο της στιβάδας ελαττώνεται. Την ανακατανομή των ηλεκτρονίων μεταξύ των στιβάδων του ατόμου που ακολουθεί του ιονισμού, συνοδεύει η εκπομπή χαρακτηριστικών ακτίνων-X. Κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο η ενέργεια του αρχικού φωτονίου συνήθως απορροφάται πλήρως στην περιοχή που έγινε η αλληλεπίδραση.

- **Σκέδαση Compton:** Ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα περιφερειακό ηλεκτρόνιο, που είναι ασθενέστερα συνδεδεμένο στο άτομο. Η συγκεκριμένη

αλληλεπίδρασή μπορεί να θεωρηθεί ως μη-ελαστική κρούση κατά την οποία υπάρχει μεταφορά ορμής από το αρχικό φωτόνιο ενέργειας E_γ στο ηλεκτρόνιο, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής. Το φωτόνιο σκεδάζεται υπό γωνία θ με ενέργεια E'_γ – μικρότερη της αρχικής – ενώ το ηλεκτρόνιο αποκτά κινητική ενέργεια T και κινείται σε τροχιά που σχηματίζει γωνία φ σε σχέση με αυτήν του αρχικού φωτονίου. Κατά τη σκέδαση Compton ένα ποσοστό της ενέργειας απορροφάται στην περιοχή της αλληλεπίδρασης, ενώ η ενέργεια που φέρει το φωτόνιο θεωρείται ότι μεταφέρεται μακριά από τη θέση αλληλεπίδρασης.

- **Δίδυμη γένεση:** Ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας ($E_\gamma > 1.022\text{MeV}^6$), αλληλεπιδρά με το ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα του ατόμου με αποτέλεσμα την εξαφάνιση του φωτονίου και την μετατροπή του σε ύλη υπό την μορφή ενός ζεύγους ηλεκτρονίου – ποζιτρονίου (pair production). Το πλεόνασμα της ενέργειας, υπεράνω του $2 \cdot mc^2$, που απαιτείται για την υλοποίηση των δύο σωματιδίων κατανέμεται ως κινητική ενέργεια T στα δύο σωματίδια σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_\gamma = (mc^2 + T^-) + (mc^2 + T^+) \quad (2.14)$$

Τα προϊόντα της αντίδρασης αυτής αλληλεπιδρούν περαιτέρω με την ύλη ως ότου χάσουν όλη την κινητική ενέργειά τους. Συγκεκριμένα, το ηλεκτρόνιο καταλήγει να γίνει μέρος του ηλεκτρονικού πληθυσμού του υλικού, ενώ το ποζιτρόνιο επιβραδύνεται και τελικά συναντά ένα ηλεκτρόνιο και εξαυλώνεται με εκπομπή δύο φωτονίων ενέργειας 0,511 MeV το καθένα. Κατά τη δίδυμη γένεση θεωρείται ότι όλη η ενέργεια του αρχικού φωτονίου αποτίθεται στην περιοχή της αλληλεπίδρασης του αρχικού φωτονίου.

2.3 Πηγές και είδη ραδιενέργειας

Τα ραδιενεργά ισότοπα που συναντώνται στη φύση κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την προσέλευσή τους σε ισότοπα κοσμικής προέλευσης (ραδιοϊσότοπα που παράγονται από την αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ανώτερη ατμόσφαιρα), τεχνητά ραδιοϊσότοπα (είναι αποτέλεσμα ανθρώπινης δραστηριότητας) και φυσικά ραδιοϊσότοπα (πρόκειται για ραδιοϊσότοπα που παρήχθησαν λόγω πυρηνικών αντιδράσεων που πραγματοποιήθηκαν στον φλοιό της γης κατά την αρχή

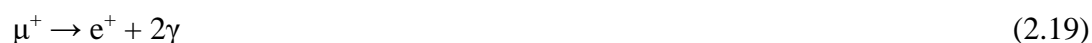
⁶ Πρόκειται για το διπλάσιο του ενεργειακού ισοδύναμου της μάζας ακινησίας του ηλεκτρονίου που ισούται με 511keV

της δημιουργίας της). Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στα διάφορα είδη ραδιενέργειας, με έμφαση στη φυσική ραδιενέργεια γήινης προέλευσης.

2.3.1 Κοσμική ακτινοβολία

Η προέλευση της κοσμικής ακτινοβολίας είναι ποικίλες γαλαξιακές και εξωγαλαξιακές πηγές (M. F. LAnnunziata, 2012, J. P. McLaughlin, 2005). Η πιο κοντινή πηγή κοσμικής ακτινοβολίας στην Γη είναι ο Ήλιος, λόγω της έντονης δραστηριότητας από το εσωτερικό του, των αντιδράσεων πυρηνικής σύντηξης και από των ηλιακών εκρήξεων και κηλίδων που συμβαίνουν επάνω στην επιφάνεια του. Η κοσμική ακτινοβολία αποτελείται κυρίως από σωματίδια υψηλών ενεργειών, όπως πρωτόνια, σωματίδια-α και ένα μικρό ποσοστό ηλεκτρονίων, νετρίνων και ακτίνων-γ ακτίνων-X, ενώ σε μικρότερο βαθμό παρατηρούνται βαρύτερα ιόντα. Τα σωματίδια αυτά της κοσμικής ακτινοβολίας φτάνουν μέχρι την ατμόσφαιρα της γης και χαρακτηρίζεται ως πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία.

Από την στιγμή που η ακτινοβολία αυτή περάσει στην ατμόσφαιρα αρχίζει να αλληλεπιδρά με τα στοιχεία που βρίσκονται σε αυτήν παράγοντας έτσι δευτερογενή σωματίδια, όπως πρωτόνια, πιόνια, ηλεκτρόνια και μίονια τα οποία με την σειρά τους προκαλούν περαιτέρω ιονισμούς και άλλες πυρηνικές αντιδράσεις με αποτέλεσμα να παραχθούν ραδιενεργά ισότοπα όπως, ^7Be , ^{22}Na , ^3H , ^{14}C (A. Marin, S. Harbison, 2006, R. Tykva, D. Berg, 2004, N. C., 1975). Τα ισότοπα αυτά χαρακτηρίζονται ως ραδιενεργά ισότοπα κοσμικής προέλευσης⁷. Οι σημαντικότερες αλληλεπιδράσεις της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα φαίνονται παρακάτω.



Η κοσμική ακτινοβολία κυμαίνεται έντονα και εξαρτάται από διάφορους γεωγραφικούς και φυσικούς παράγοντες. Συγκεκριμένα, η κοσμική ακτινοβολία αυξάνεται ανάλογα με το ύψος, επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο της γης, το

⁷ Cosmogenic radionuclides

γεωγραφικό μήκος και πλάτος (στο επίπεδο της θάλασσας) και αντίστοιχα από τον 11ετή κύκλο του ήλιου σε ότι αφορά την μεταβολή της σχετικά με τον χρόνο.

2.3.2 Τεχνητή ραδιενέργεια

Η τεχνητή ραδιενέργεια αποτελείται από ραδιοϊσότοπα που παράγονται τεχνητά σε εγκαταστάσεις όπως πυρηνικούς αντιδραστήρες και επιταχυντές σωματιδίων για επιστημονικούς, ιατρικούς και βιομηχανικούς σκοπούς. Οι πυρηνικές αντιδράσεις στις οποίες οφείλεται η δημιουργία των συγκεκριμένων ισοτόπων είναι δυνατές και πραγματοποιήσιμες αλλά δεν συμβαίνουν αυθόρμητα στην φύση.

Τα τεχνητά παραγόμενα ραδιοϊσότοπα μπορούν να εντοπιστούν ωστόσο και στο περιβάλλον, εξ' αιτίας των επίγειων και υποθαλάσσιων πυρηνικών δοκιμών που πραγματοποιούνταν έντονα στο παρελθόν όσο δεν ήταν γνωστή η επιβλαβής δράση της ραδιενέργειας στον άνθρωπο και το περιβάλλον. Επιπλέον τα ατυχήματα σε πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος όπως Windscale (1957), Three Mile Island (1979), Chernobyl (1986) και Fukushima (2011) και άλλα ραδιολογικά ατυχήματα έχουν συμβάλει στην απελευθέρωση τεχνητών ραδιοϊσοτόπων στο περιβάλλον. Τα ραδιοϊσότοπα αυτά εισέρχονται στη βιόσφαιρα και λόγω της κίνησης των αέριων και θαλάσσιων μαζών εξαπλώνονται σε ευρεία περιοχή.

2.3.3 Φυσική ραδιενέργεια

Ως φυσική ραδιενέργεια που προέρχεται από γήινες πηγές (terrestrial gamma radiation) ορίζονται όλα τα μακρόβια ραδιοϊσότοπα που υπάρχουν στην Γη από τη δημιουργία της⁸, καθώς και τα λιγότερο μακρόβια θυγατρικά τους τα οποία παράγονται κατά τη ραδιενεργό διάσπαση των παραπάνω. Τα σημαντικότερα από τα μακρόβια αυτά ισότοπα είναι το ^{40}K και οι μητρικοί πυρήνες των τριών φυσικών ραδιενεργών σειρών: ^{238}U , ^{235}U και ^{232}Th .

Το ^{40}K έχει ιδιαίτερη ραδιοβιολογική σημασία. Βρίσκεται σε διάφορα πετρώματα, και στο θαλασσινό νερό κάτι που το καθιστά αρκετά διαδεδομένο, καθώς ως αλκαλική γαία είναι αρκετά αντιδραστικό. Ακόμα βρίσκεται στα τρόφιμα και σε σημαντική ποσότητα στο ανθρώπινο σώμα και συμβάλλει στην εσωτερική ακτινοβόληση. Το ^{40}K έχει χρόνο ημίσειας ζωής $1,28 \times 10^9$ χρόνια και διασπάται με ένα σχετικά περίπλοκο σχήμα διάσπασης, εκπέμποντας σωματιδίου β^- (yield 89%) κατά τη

⁸ Primordial radionuclides

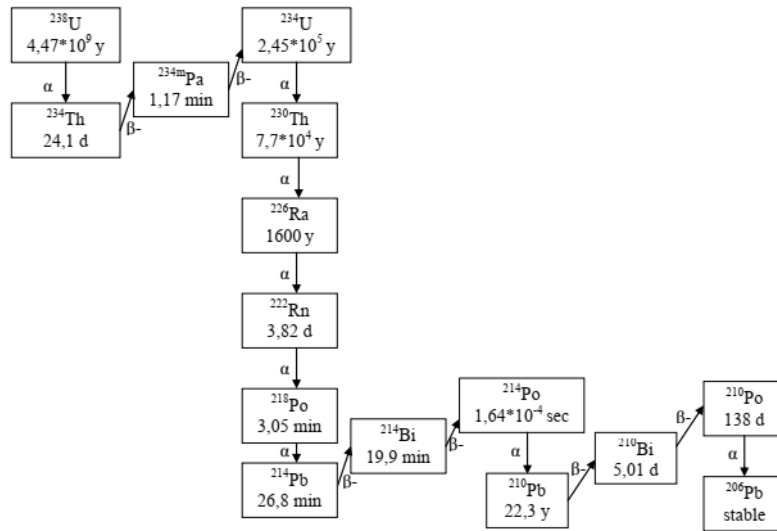
μετάπτωσή του σε ^{40}Ca , ή σωματιδίου β^+ (yield 11%) κατά τη μετάπτωσή του σε ^{40}Ar . Κατά την τελευταία μετάπτωση εκπέμπει και φωτόνια ενέργειας 1460 keV.

Οι βασικές ραδιενεργές σειρές είναι η σειρά του ουρανίου ^{238}U που αποτελείται από δεκαπέντε ισότοπα και καταλήγει στο σταθερό ισότοπο του μόλυβδου ^{206}Pb , η σειρά του ακτινίου ^{235}U με δώδεκα ισότοπα που καταλήγει στο σταθερό ισότοπο του μόλυβδου ^{207}Pb και η σειρά του θορίου ^{232}Th με δεκαπέντε ισότοπα που καταλήγει στο σταθερό ισότοπο του μόλυβδου ^{208}Pb . Στο περιβάλλον ανιχνεύεται και μία ακόμα ραδιενεργός σειρά, αυτή του ποσειδωνίου ^{237}Np το οποίο όμως αποτελεί τεχνητό ραδιοϊσότοπο. Η σειρά αυτή ξεκινάει από το ^{241}Pu και καταλήγει στο σταθερό ισότοπο του θαλίου ^{205}Tl .

Τα ισότοπα των παραπάνω φυσικών ραδιενεργών σειρών ανιχνεύονται σε πολλά πετρώματα, ορυκτά και εν γένει στο έδαφος με τη συγκέντρωσή τους να εξαρτάται από την διαδικασία σχηματισμού του εδάφους και από το είδος του πετρώματος, και μπορούν με φυσικές διαδικασίες να περάσουν στο νερό, τον αέρα και την τροφική αλυσίδα. Τα μητρικά ραδιοϊσότοπα σε αυτές τις σειρές είναι αρχέγονης προέλευσης και εξακολουθούν να υπάρχουν ακόμη και σήμερα επειδή έχουν πολύ μεγάλο χρόνο υποδιπλασιασμού.

Οι ραδιενεργές σειρές αρχίζουν από ένα συγκεκριμένο ισότοπο με μεγάλο χρόνο ζωής και καταλήγουν σε ένα σταθερό ισότοπο, ενώ ο μαζικός και ατομικός αριθμός των στοιχείων μεταβάλλεται με συγκεκριμένο τρόπο αφού σχετίζεται με συγκεκριμένου τύπου διασπάσεις α και β . Από όλες αυτές τις ραδιενεργές σειρές τα πλέον σημαντικά στοιχεία είναι το ράδιο (Ra) και το ραδόνιο (Rn) τα οποία παρουσιάζονται με διάφορα ισότοπά τους. Το ράδιο έχει τρία ισότοπα: ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{228}Ra , είναι διαλυτό στο νερό, απορροφάται από τα φυτά και μπορεί να αντικαταστήσει το ασβέστιο γιατί ανήκει στην ίδια ομάδα του περιοδικού συστήματος με αυτό. Από τα ισότοπα του Ραδίου το ^{226}Ra είναι το πλέον σημαντικό γιατί διασπάται στο ραδιενεργό αέριο ^{222}Rn . Το ραδόνιο έχει τρία ισότοπα, το ^{222}Rn (ραδόνιο), ^{220}Rn (θορόνιο) και το ^{219}Rn , με σημαντικότερο το ^{222}Rn γιατί είναι ευγενές αέριο και αποτελεί την κύρια αιτία εσωτερικής ακτινοβόλησης των ζωντανών οργανισμών. Στα σχήματα 2.1, 2.2 και 2.3 και στους πίνακες 2.1, 2.2 και 2.3 παρατίθενται οι πλέον σημαντικές πληροφορίες για τις τρεις ραδιενεργές σειρές των ^{238}U , ^{232}Th και ^{235}U , όπως το σχήμα διάσπασης, τα

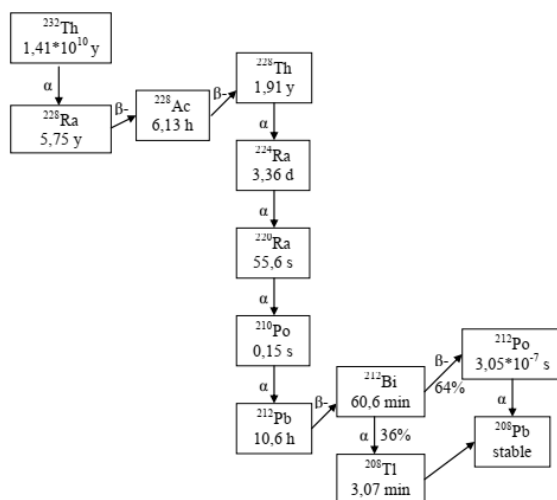
θυγατρικά ισότοπα κάθε σειράς, ο χρόνοι υποδιπλασιασμού και τα διάφορα είδη ακτινοβολίας που εκπέμπονται.



ΣΧΗΜΑ 2. 1: Η ραδιενεργός σειρά του Ουρανίου

Isotope	Half-life	Radiation	Energies (MeV)	Yield (%)
^{238}U	4.5×10^9 y	α	4.19, 4.15	79, 21
^{234}Th	24.1 d	γ	0.049	0.064
		β	0.199, 0.107	78, 14
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	6.7 h	γ	0.063, 0.092	3.7, 4.23
		β	2.27	98
^{234}U	2.5×10^5 y	γ	1.001	0.84
		α	4.77, 4.72	71, 28
^{230}Th	8×10^4 y	γ	4.68, 4.61	76, 23
^{226}Ra	1600 y	α	4.78, 4.60	94, 6
		γ	0.186	3.6
^{222}Rn	3.8 d	α	5.49	100
^{218}Po	3.1 m	α	6.0	100
^{218}At	1.5 s	α	6.7, 6.8	89, 4
^{214}Pb	26.8 m	β	0.67, 0.72, 1.02	46, 40, 11
		γ	0.352, 0.295, 0.242	36, 18, 7
^{214}Bi	20 m	β	3.27, 1.54, 1.50	19, 18, 17
		γ	0.609, 1.76, 1.12	15.3, 14.9, 45
^{214}Po	1.6×10^{-6} s	α	7.68	100
^{210}Tl	1.3 m	β	1.86	24
		γ	0.79	98
^{210}Pb	22 y	γ	0.046	4.25
		β	0.017, 0.063	84, 16
^{210}Bi	5.0 d	γ	0.27, 0.30	51, 28
		α	4.95, 4.91	55, 40
^{210}Po	138 d	α	5.3	100
^{206}Pb	stable	-	-	-

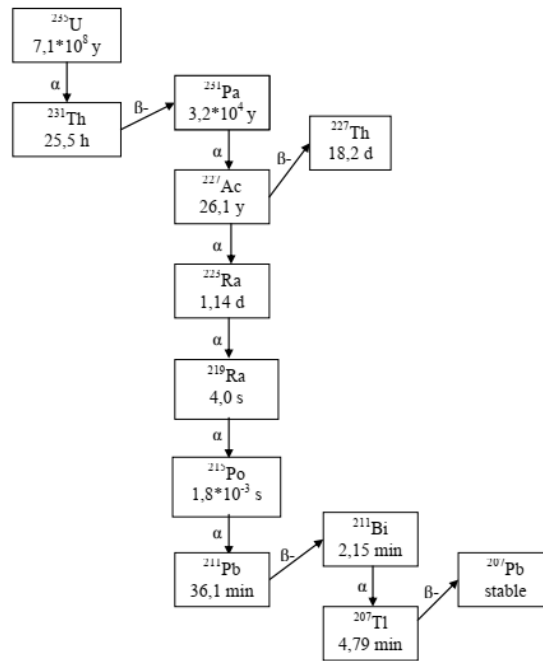
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. 1: Τα ισότοπα της ραδιενεργού σειράς του Ουρανίου, με τους χρόνους ημιζωής, τις ακτινοβολίες και τα ποσοστά εκπομπής τους



ΣΧΗΜΑ 2. 2: Η ραδιενεργός σειρά του Θορίου

Isotope	Half-life	Radiation	Energies (MeV)	Yield (%)
^{232}Th	$14 \times 10^9 \text{ y}$	α	4.01, 3.95	78, 22
		γ	0.064	0.26
^{228}Ra	5.8 y	β	0.039, 0.025	40, 20
^{228}Ac	6.15 h	β	1.17, 2.08	30, 7
		γ	0.911, 0.969, 0.338, 0.328	26, 16, 11, 3
^{228}Th	1.9 y	α	5.42, 5.34	72, 27
^{224}Ra	3.66 d	α	45.42, 5.34	95, 5
		γ	0.24	4.1
^{220}Rn	56 s	α	6.29	>99
^{216}Po	$15 \times 10^{-2} \text{ s}$	α	6.78	100
^{212}Pb	10.64 h	β	0.331, 570	100
		γ	0.239, 0.300	43.6, 3.30
^{212}Bi	60.6 m	α	6.05, 6.90	25, 10
		β	2.25	55
		γ	0.727	7
^{212}Po	$3 \times 10^{-7} \text{ s}$	α	8.78	100
		γ	2.61	3
^{208}Tl	3.1 m	β	1.80, 1.29, 1.52	49, 24, 22
		γ	2.614, 0.583, 0.510, 0.861	99.8, 85, 23, 13
^{208}Pb	stable	-	-	-

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. 2: Τα ισότοπα της ραδιενεργού σειράς του Θορίου, με τους χρόνους ημιζωής, τις ακτινοβολίες και τα ποσοστά εκπομπής τους



ΣΧΗΜΑ 2. 3: Η ραδιενεργός σειρά του Ακτινίου

Isotope	Half-life	Radiation	Energies (MeV)	Yield (%)
²³⁵ U	7 x 10 ⁸ y	α	4.40, 4.36, 4.2, 4.6	58, 19, 6, 5
²³¹ Th	25.5 h	γ	0.185, 0.143, 0.163, 0.205	57, 11, 5, 5
		β	0.30, 0.31, 0.29	40, 32, 12
²³¹ Pa	3.3 x 10 ⁴ y	γ	0.027, 0.302	10, 2.2
		α	5.01, 4.95, 5.03, 5.06	25, 23, 20, 11
²²⁷ Ac	21.8 y	α	4.94	0.55
²²⁷ Th	18.7 d	α	6.04, 5.98, 5.76, 5.71	24, 24, 20, 8
		γ	0.24, 0.26	13, 7
²²³ Fr	22 m	β	1.10, 1.07, 0.91	70, 15, 10
		γ	0.05	34
²²³ Ra	11.4 d	α	5.72, 5.61	52, 25
		γ	0.27, 0.32, 0.34	14, 4, 3
²¹⁹ Rn	4.0 s	α	6.82, 6.55, 6.42	80, 13, 8
		γ	0.271, 0.402	11, 7
²¹⁵ Po	1.78 x 10 ⁻³ s	α	7.39	100
²¹⁵ At	10 ⁻⁵ s	α	8.03	100
²¹¹ Pb	36 m	β	1.37	91
		γ	0.40	4
²¹¹ Bi	2.14 m	α	6.62, 6.28	84, 16
		γ	0.351	13
²⁰⁷ Tl	4.77 m	β	1.42	>99
²⁰⁷ Pb	stable	-	-	-

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. 3: Τα ισότοπα της ραδιενεργού σειράς του Ακτινίου, με τους χρόνους ημιζωής, τις ακτινοβολίες και τα ποσοστά εκπομπής τους

2.3.3.1 Ραδιενεργός ισορροπία και διαταραχή της ραδιενεργού ισορροπίας

Σε όλες τις ραδιενεργές σειρές η «μετάβαση» από το μητρικό ραδιοϊσότοπο στο σταθερό στοιχείο στο τέλος της σειράς, περιλαμβάνει μια σειρά από ραδιενεργές

διασπάσεις και ενδιάμεσα ισότοπα με διαφορετικούς χρόνους ημιζωής και συνήθως και διαφορετικές χημικές ιδιότητες. Σε ένα δείγμα που περιέχει όλα τα στοιχεία μίας ραδιενεργού σειράς μπορεί μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα να επέλθει ισορροπία, δηλαδή η ραδιενέργεια (ρυθμός διάσπασης) να είναι ίδια για όλα τα στοιχεία της αντίστοιχης σειράς (M. Ivanovich, 1992). Βασική προϋπόθεση για να συμβεί αυτό είναι, ο μοναδικός λόγος μεταβολής του πλήθους πυρήνων κάθε ισότοπου στο δείγμα να είναι αποκλειστικά η ραδιενεργός διάσπαση (παραγωγή και καταπόνηση) και να μην υπάρχουν εισροές και εκροές πυρήνων από το δείγμα. Η μαθηματική μοντελοποίηση της ραδιενεργού ισορροπίας εξετάζεται για δυο επικρατέστερες περιπτώσεις ισορροπίας. Οι δυο βασικές περιπτώσεις ισορροπίας είναι (i) η αιώνια ισορροπία, (ii) η μεταβατική ισορροπία (M. F. LAnnunziata, 2007, G. Choppin, 2013).

Αιώνια ισορροπία: Η ισορροπία εξαρτάται από τον μηχανισμό διάσπασης και παραγωγής ραδιονουκλιδίων σε μια αλυσιδωτή διάσπαση. Εάν ο πατρικός πυρήνας έχει μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής από τον θυγατρικό, $\lambda_p \gg \lambda_d$, το θυγατρικό στοιχείο θα αποκτήσει την ίδια δραστηριότητα με το μητρικό σε ένα κλειστό σύστημα (W. E. Burchan, 1973). Σε αυτήν την περίπτωση, ισχύει ότι δημιουργείται καθολική ισορροπία μεταξύ των ραδιονουκλιδίων και η δραστηριότητα του θυγατρικού θα μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό όπως και του πατρικού (K. S. Krane, 1988). Κατά συνέπεια, το θυγατρικό στοιχείο θα συμπεριφέρεται σαν να είχε τον ίδιο χρόνο ημιζωής με το μητρικό.

Σε αυτήν την περίπτωση, η ισορροπία είναι πιθανό να εδραιωθεί σε ολόκληρη την σειρά, καθώς τα ραδιονουκλίδια στην αρχή μιας ραδιενεργούς σειράς έχουν πάντα πολύ μεγαλύτερους χρόνους ημιζωής από τα υπόλοιπα. Ο χρόνος επίτευξης της ισορροπίας εξαρτάται ουσιαστικά από τον χρόνο ημιζωής του θυγατρικού στοιχείου. Εάν η ραδιενέργεια του θυγατρικού στοιχείου είναι αρχικά μηδενική, θα χρειαστούν 7 με 9 χρόνοι ημιζωής του, πριν θεωρηθεί ότι έχει επέλθει ισορροπία. Επομένως, απαιτούνται διαφορετικά χρονικά διαστήματα για την επίτευξη της ισορροπίας μεταξύ διαφορετικών ραδιονουκλιδίων. Τα πολύ βραχύβια ραδιονουκλίδια αναμένεται να φτάσουν σε ισορροπία με τους μητρικούς πυρήνες τους ταχύτερα από τα μακρόβια, τα οποία μπορεί να έχουν, είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη ενεργότητα από τα θυγατρικά (M. F. LAnnunziata, 2007, H. Cembe, 2008, W. E. Burchan, 1973).

Η διάσπαση του ^{238}U με χρόνο ημιζωής 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια σε ^{234}Th με χρόνο ημιζωής 24,1 ημέρες αναφέρεται ως παράδειγμα στην εξήγηση της ραδιενεργού ισορροπίας. Σύμφωνα με τις εξισώσεις ραδιενεργού διάσπασης, η διάσπαση του ^{238}U υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2.20

$$A_1 = A_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (2.20)$$

Όπου A_1^0 είναι η ποσότητα του ραδιενεργού νουκλεοτιδίου την χρονική στιγμή $t = 0$ και λ_1 η σταθερά διάσπασης με βάση τον χρόνο ημιζωής του στοιχείου, εδώ του ^{238}U . Ωστόσο, η ανάπτυξη και η διάσπαση του ^{234}Th μπορεί να δοθεί ως εξής:

$$A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + A_2^0 e^{-\lambda_2 t} \quad (2.21)$$

Όπου A_2^0 είναι η ενεργότητα τη χρονική στιγμή $t = 0$ και λ_2 η σταθερά διάσπασης του θυγατρικού στοιχείου, εδώ του ^{234}Th .

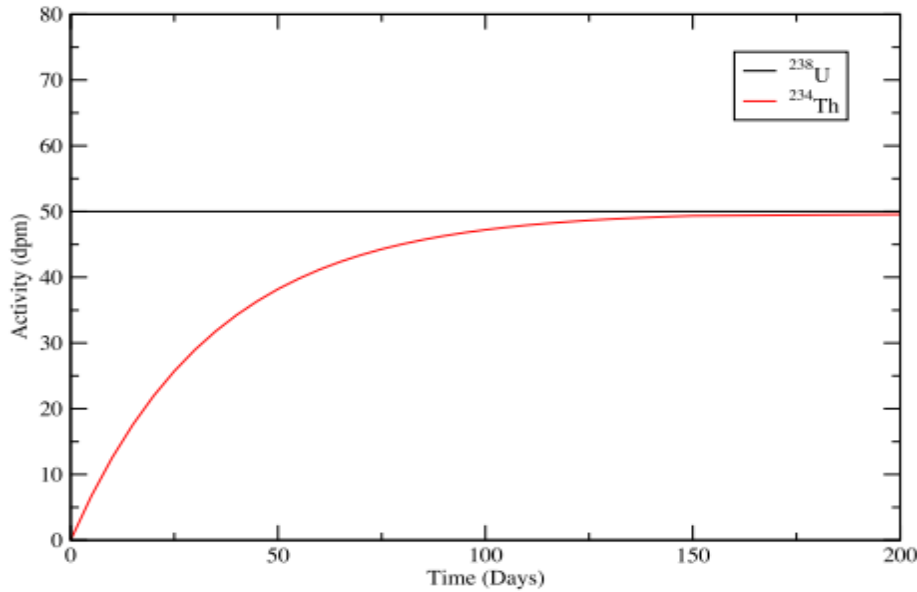
Όταν $\lambda_1 \ll \lambda_2$, η N_1 διασπάται πού πιο αργά από την N_2 και η ποσότητα $e^{-\lambda_1 t}$ είναι πολύ μεγαλύτερη από την $e^{-\lambda_2 t}$ και η εξίσωση 2.16 μπορεί να γραφτεί:

$$A_2 = A_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.22)$$

$$\text{Για } \lambda_1 = 0 \text{ είναι } A_2 = A_1^0 (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.23)$$

Όταν ο χρόνος είναι άπειρος, δηλαδή $\lambda_2 t = 1$, ο ρυθμός διάσπασης του μητρικού πυρήνα είναι ίσος με τον ρυθμό διάσπασης του θυγατρικού, $A_1 = A_2$. Αυτό συνεπάγεται γενικά για οποιαδήποτε σειρά, υπό την προϋπόθεση ότι κανένα από τα θυγατρικά δεν απομακρύνεται από το σύστημα (M. Ivanovich and R. S. Harmon, 1992).

Το συγκεκριμένο είδος ισορροπίας όπως προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα μέσα από το παράδειγμα του Ουρανίου φαίνεται στην εικόνα 2.4

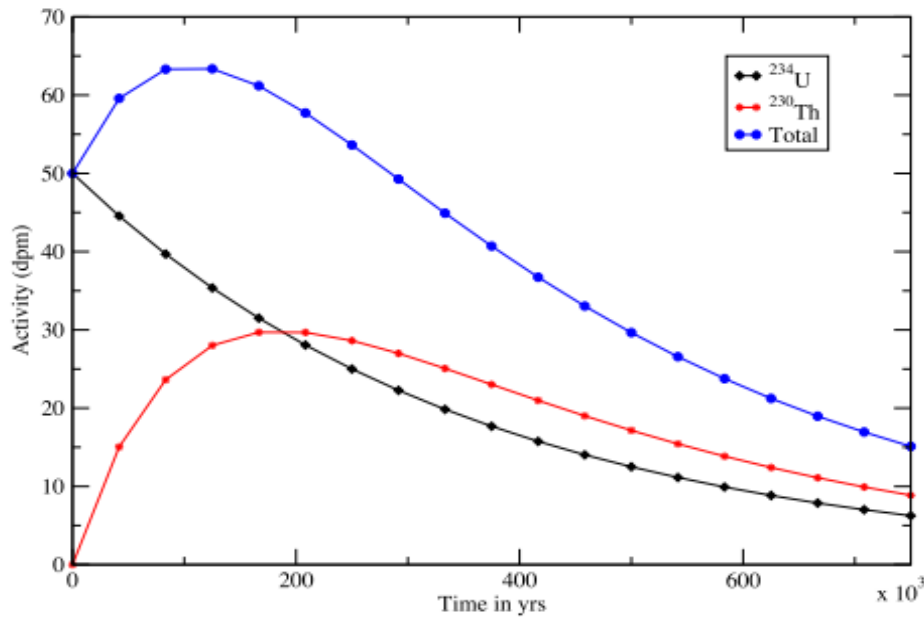


ΣΧΗΜΑ 2. 4: Επαύξηση του βραχύβιου ^{234}Th από το μακρόβιο μητρικό ^{238}U ως ότου επέλθει ισορροπία

Μεταβατική ισορροπία: Η κατάσταση της μεταβατικής ισορροπίας είναι παρόμοια με αυτήν της αιώνιας, κατά την οποία μεταξύ του μητρικού και θυγατρικού νουκλιδίου επικρατεί σταθερή κατάσταση, αυτή η κατάσταση μπορεί να συμβεί αν ο χρόνος ημιζωής του μητρικού ραδιονουκλιδίου είναι μεν μεγαλύτερος από αυτόν του θυγατρικού αλλά όχι σημαντικά μεγαλύτερος. Τότε η προσέγγιση $\lambda_p = 0$ δεν ισχύει (H. Cember and T. E. Johnson, 2008). Όταν αποκαθίσταται μεταβατική ισορροπία, τα θυγατρικά και μητρικά ισότοπα διασπώνται με τον ίδιο χρόνο ημιζωής με αυτόν του πατρικού αλλά δεν έχουν την ίδια ραδιενέργεια (M. F. LAnnunziata, 2012). Με βάση

την περίπτωση του ^{238}U και ^{230}Th , με χρόνους ημιζωής 2,5M και 75000 έτη και την εφαρμογή των εξισώσεων Bateman προκύπτουν τα παρακάτω. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η αρχική ενεργότητα του ^{230}Th για $t = 0$ είναι μηδέν η ανάπτυξη του θυγατρικού Th και η ισορροπία θα επέλθουν μετά από αρκετό χρόνο, δηλαδή μετά από περίπου τρεις χρόνους ημιζωής του θυγατρικού και τότε η ποσότητα αυτού θα είναι μεγαλύτερη από αυτήν του πατρικού, Ουρανίου. Η ραδιενέργεια αυτών υπολογίζεται στην κατάσταση ισορροπίας με βάση την σχέση και η πορεία εξέλιξής της φαίνεται στην Εικόνα 2.5

$$A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.24)$$



ΣΧΗΜΑ 2. 5: Επαύξηση και διάσπαση του βραχύβιου θυγατρικού ^{230}Th από το ελαφρώς μακροβιότερο του πατρικό ^{234}U στην μεταβατική ισορροπία.

Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις που οι φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στο περιβάλλον προκαλούν μεταβολή της ποσότητας των διάφορων στοιχείων κάθε ραδιενεργού σειράς και των θυγατρικών τους, με αποτέλεσμα τη διαταραχή της ραδιενεργού ισορροπίας (M. Ivanovich, 1992). Παραδείγματα τέτοιων διεργασιών είναι η απομάκρυνση διαλυτών στοιχείων λόγω της επίδρασης του νερού ή η διαφυγή από το υλικό ραδιενεργών αερίων όπως το ραδόνιο στο περιβάλλον (radon exhalation) (A.S. Murray, 1992). Στην περίπτωση αυτή υπάρχει διαταραχή της ραδιενεργού ισορροπίας. Η διαταραχή της ραδιενεργού ισορροπίας αποτελεί ένα πολύ συχνό φαινόμενο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο χρονολόγησης των γεωλογικών διεργασιών. Παρά το γεγονός ότι η διαταραχή της ισορροπίας στις ραδιενεργές σειρές αποτελεί ισχυρό εργαλείο χρονολόγησης είναι αναγκαία η δυνατότητα ποσοτικού προσδιορισμού και ακριβούς μέτρησης των ισοτόπων των ραδιενεργών σειρών είτε για

να διερευνηθεί αν σε ένα δείγμα υπάρχει ή όχι ραδιενεργός ισορροπία είτε για έλεγχο της ραδιενέργειας στο περιβάλλον.

2.4 Μελέτη της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα

Στο περιβάλλον υπάρχουν αρκετά ραδιενεργά ισότοπα, τα οποία μπορεί να είναι φυσικής προέλευσης (φυσικά ραδιενεργά ισότοπα γήινης προέλευσης ή κοσμικής προέλευσης) ή να είναι αποτελέσματα ανθρώπινων δραστηριοτήτων (π.χ. από τις πυρηνικές δοκιμές, τα πυρηνικά ατυχήματα ή ακόμα και από τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας για ειρηνικούς σκοπούς). Αυτό που συνήθως ενδιαφέρει είναι να προσδιοριστούν οι συγκεντρώσεις των ραδιενεργών ισοτόπων και ορισμένες φορές και οι ισοτοπικές τους αναλογίες. Τα τελευταία 50 χρόνια η ραδιενέργεια στο περιβάλλον έχει μελετηθεί εκτενώς σε ολόκληρο τον κόσμο με αποτέλεσμα την ανάπτυξη του κλάδου της ραδιο-οικολογίας και την απόκτηση γνώσεων σχετικών με τις επιπτώσεις που μπορεί να έχει μια υπάρχουσα ή μελλοντική έκθεση των ζωντανών οργανισμών – κυρίως του ανθρώπου – σε ραδιενεργές ακτινοβολίες. Εκτός από το ενδιαφέρον για την προστασία των ζωντανών οργανισμών από την ακτινοβολία, τις τελευταίες δεκαετίες οι έρευνες για τη μελέτη της ραδιενέργειας στο περιβάλλον στοχεύουν επίσης στην απόκτηση γνώσεων σχετικά με τη χρήση ραδιενεργών ισοτόπων ως ιχνηλατών περιβαλλοντικών διεργασιών.

Ένα από τα ισότοπα που ανιχνεύονται στην ατμόσφαιρα το οποίο παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον είναι το ραδόνιο (^{222}Rn), το οποίο μπορεί να ανιχνευτεί στην ατμόσφαιρα ακόμα και σε χαμηλά επίπεδα ενεργότητας, γεγονός που καθιστά αυτό και τα θυγατρικά του ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο σε πολλές εφαρμογές ανίχνευσης και χαρτογράφησης φυσικών διεργασιών. Η ενεργότητα του ραδονίου μπορεί να αποτελεί δείκτη για πολλές γεωχημικές διαδικασίες, όπως για παράδειγμα ως ένδειξη της ύπαρξης κοιτασμάτων ουρανίου, υδρογονανθράκων, γεωθερμικών πόρων, αλλά και επικείμενων σεισμών ή και ηφαιστειακών εκρήξεων. Για το λόγο αυτό το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΠΤ-ΕΜΠ) έχει θεσπίσει από το 1986 ένα πρόγραμμα παρακολούθησης της ραδιενέργειας περιβάλλοντος (Karangelos D.J., 2005) με έμφαση στην παρακολούθηση της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στο εξωτερικό περιβάλλον.

Επιπλέον, το ^{222}Rn και τα θυγατρικά του (κυρίως τα ^{210}Pb , ^{210}Bi και ^{210}Po) παρέχουν πληθώρα πληροφοριών σχετικά με την προέλευση των αερολυμάτων,

μάλιστα ο ^{210}Pb θεωρείται ως ιδανικός ιχνηλάτης σε μελέτες ατμοσφαιρικών αερολυμάτων.

Ένας ακόμη σημαντικός λόγος για την παρακολούθηση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα και μάλιστα τη μακροπρόθεσμη παρακολούθησή του είναι το γεγονός ότι η έκθεση του ανθρώπου σε φυσική ακτινοβολία προέρχεται κυρίως από αυτό. Όπως είναι ευρέως γνωστό, το ραδόνιο είναι ο πλέον σημαντικός παράγοντας δόσης του γενικού πληθυσμού λόγω ιοντίζουσας ακτινοβολίας και είναι η δεύτερη πιο συχνή αιτία καρκίνου του πνεύμονα μετά το κάπνισμα (UNSCEAR, 2000).

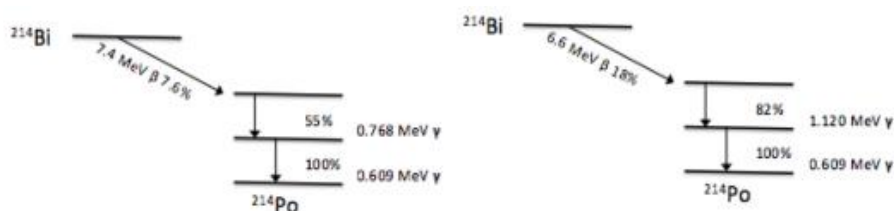
2.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την συγκέντρωση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα

Όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία, πολλοί είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν της συγκέντρωση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα. Αναλυτικότερα, η αλλαγή της ατμοσφαιρικής πίεσης φέρνει στην επιφάνεια ραδόνιο από βαθύτερα στρώματα του εδάφους μέσω ρωγμών του εδάφους. Επίσης, η συγκέντρωση του ραδονίου επηρεάζεται από μετεωρολογικές παραμέτρους όπως η ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου, η διαφορά θερμοκρασίας, η συχνότητα και η ποσότητα της βροχόπτωσης (Αρετή Σπανάκου, 2017). Συγκεκριμένα, η ταχύτητα του ανέμου και ιδιαίτερα οι ισχυροί άνεμοι κοντά στο έδαφος μειώνουν την επιφανειακή πίεση και την περιεκτικότητα σε ραδόνιο στα ανώτερα στρώματα του εδάφους. Σε ότι αφορά την διαφορά θερμοκρασίας, παρατηρείται ότι στον αέρα στην επιφάνεια του εδάφους το ραδόνιο έχει υψηλότερες τιμές τον χειμώνα και χαμηλότερες το καλοκαίρι. Τέλος, οι βροχοπτώσεις είναι ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει τη συγκέντρωση του ραδονίου μέσω πολλών μηχανισμών. Όσον αφορά τη συγκέντρωση στην κατοικία (indoors), με βάση τις μέχρι σήμερα μετρήσεις, η μέση ετήσια συγκέντρωση ραδονίου στην Ελλάδα εκτιμάται στα 60 Bq/m^3 πολύ κάτω από το επίπεδο αναφοράς των 300 Bq/m^3 με τις πιο υψηλές τιμές να εμφανίζονται κυρίως σε βόρεια τμήματα της χώρας και κυμαίνονται από 11 έως 150 Bq/m^3 (EEAE).

Λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή των μετεωρολογικών συνθηκών στην επόπτευση της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα, όλα τα πειράματα στην συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκαν σε περιόδους με την ελάχιστη πιθανότητα βροχής και με ανέμους μικρής έντασης. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η εξάλειψη των θυγατρικών του Βισμούθιου και του Μόλυβδου στην ατμόσφαιρα.

2.4.2 Το ραδόνιο και τα θυγατρικά του

Το Ραδόνιο είναι το βαρύτερο από όλα τα φυσικά ευγενή αέρια και έχει συνολικά 36 ισότοπα, τα οποία είναι όλα ραδιενεργά. Από αυτά, τα τρία εμφανίζονται φυσικά από τις αντίστοιχες ραδιενεργές σειρές ^{238}U (^{222}Rn), ^{235}U (^{219}Rn) και του ^{232}Th (^{220}Rn). Στην συγκεκριμένη ΔΕ θα μας απασχολήσει το ^{222}Rn ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία της ραδιενεργού σειράς του ^{238}U . Τα προϊόντα διάσπασης του ^{222}Rn είναι έξι ισότοπα που παράγονται συνεχώς, τόσο στο έδαφος όσο και στην ατμόσφαιρα: ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Pb , ^{210}Bi και ^{210}Po στην ατμόσφαιρα. Εξ αυτών τα βραχύβια θυγατρικά του ^{222}Rn είναι τα ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po . Συγκεκριμένα το ^{214}Pb έχει χρόνο ημιζωής 27,06m και προσδιορίζεται με γ-φασματοσκοπική ανάλυση από τα φωτόνια ενεργειών 295,6keV (ποσοστό εκπομπής 18,47%) και 351,9keV (ποσοστό εκπομπής 35,72). Αντίστοιχα, το θυγατρικό του ^{214}Bi έχει χρόνο ημιζωής 19,71m και εκπέμπει φωτόνια ενεργειών 609,3keV (ποσοστό εκπομπής 45,44%), 1120,3keV (ποσοστό εκπομπής 14,90%) και 1764,5keV (ποσοστό εκπομπής 15,29). Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται αναλυτικά ο μηχανισμός διάσπασης του ^{214}Bi με την εκπομπή των ακτίνων γ που ανιχνεύονται (E. Browne, J. M. Dairiki, 1978).



ΣΧΗΜΑ 2. 6: Τα μονοπάτια της ραδιενεργούς διάσπασης του ^{214}Bi με την εκπομπή γ ακτινοβολίας 0,768 και 1,120 MeV αντίστοιχα.

Τα θυγατρικά αυτά, αμέσως μετά την παραγωγή τους συνδέονται γρήγορα με αερολύματα (Knuth et al. 1983, Turekian and Graustein, 2003).

Μέσα σε μια ραδιενεργό σειρά, η εξέλιξη της συγκέντρωσης ενός θυγατρικού ραδιενεργού ισότοπου εξαρτάται από τον ρυθμό διάσπασής του καθώς και από την παραγωγή του από τον πατρικό πυρήνα. Ειδικότερα η εξέλιξη της συγκέντρωσης των ισότοπων σε μια σειρά διάσπασης περιγράφεται από τις εξισώσεις Bateman (Porcelli και Baskaran, 2011).

Οι εξισώσεις του Bateman που εφαρμόζονται στην ραδιενεργό διάσπαση μπορούν να γραφούν τόσο για τα μητρικά όσο και για τα θυγατρικά στοιχεία ως εξής

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.25)$$

$$\frac{dN_i}{dt} = -\lambda_i N_i + \lambda_{(i-1)} N_{(i-1)} \quad (2.26)$$

Όπου ο δείκτης (i-1) δηλώνει το επόμενο ισότοπο στη σειρά και λ είναι η σταθερά διάσπασης.

Η λύση των παραπάνω εξισώσεων οδηγεί στις παρακάτω σχέσεις:

$$N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (2.27)$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_2^0 e^{-\lambda_2 t} \quad (2.28)$$

Όπου N_1^0 και N_2^0 είναι οι μητρικοί και θυγατρικοί πυρήνες την χρονική στιγμή $t=0$, αντίστοιχα. Ο πρώτος όρος της εξίσωσης 2.28 υποδηλώνει την αύξηση του N_2 από την διάσπαση του N_1 και την διάσπαση του N_2 . Ο δεύτερος όρος στα δεξιά αντικατοπτρίζει την συνεισφορά οποιουδήποτε αρχικά παραγόμενου N_2 στο σύστημα (A. El-Taher, 2007). Αυτή η μαθηματική διαδικασία μπορεί να επεκταθεί στο n-οστό στάδιο της αποδιέγερσης. Για παράδειγμα, εάν υπάρχει μια σειρά ραδιονουκλιδίων $N_1, N_2, N_3 \dots N_M, N_N$ και οι αντίστοιχες σταθερές διάσπασης, το N_N θα δίνεται ως εξής.

$$N_N = N_1^0 (C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + C_3 e^{-\lambda_3 t} \dots + C_M e^{-\lambda_M t} + C_N e^{-\lambda_N t}) \quad (2.29)$$

Στην οποία οι τιμές των συντελεστών γράφονται ως εξής

$$C_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_N - \lambda_1} * \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} * \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_1} \dots * \frac{\lambda_M}{\lambda_M - \lambda_1} \quad (2.30)$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} * \frac{\lambda_2}{\lambda_N - \lambda_2} * \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} \dots * \frac{\lambda_M}{\lambda_M - \lambda_2} \quad (2.31)$$

$$C_M = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_M} * \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_M} * \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_M} \dots * \frac{\lambda_M}{\lambda_N - \lambda_M} \quad (2.32)$$

$$C_N = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_N} * \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_N} * \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_N} \dots * \frac{\lambda_M}{\lambda_M - \lambda_N} \quad (2.33)$$

Τη χρονική στιγμή $t = 0$, η $N_N = 0$ πρέπει να είναι μηδέν και επομένως η τιμή των συντελεστών πρέπει επίσης να:

$$C_1 + C_2 + C_3 \dots + C_M + C_N = 0 \quad (2.34)$$

Καθώς το ραδόνιο δεν εκπέμπει ακτινοβολία- γ , συχνά ο προσδιορισμός του γίνεται έμμεσα, από τα βραχύβια θυγατρικά του, υπό την προϋπόθεση ότι μπορεί να θεωρηθεί

ότι υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία. Στο σημείο αυτό έχει ενδιαφέρον να αναφερθεί ότι και το ^{226}Ra – μητρικός πυρήνας του ^{222}Rn – παρουσιάζει δυσκολία στην ανίχνευσή του, καθώς τα μόνα φωτόνια που εκπέμπει είναι στην ενέργεια 186,2 keV, παραπλήσια με την ενέργεια των φωτονίων ενέργειας 185,72 keV του ^{235}U , έτσι ώστε να είναι δύσκολη έως αδύνατη η διάκρισή τους. Στην περίπτωση αυτή και υπό την προϋπόθεση ότι μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ ^{226}Ra και ^{222}Rn , το ^{226}Ra μπορεί να εκτιμηθεί από τα βραχύβια θυγατρικά του ^{222}Rn , ^{214}Bi και ^{214}Pb .

Όπως για το ^{222}Rn έτσι και για τα θυγατρικά του, η συγκέντρωσή τους στην ατμόσφαιρα παρουσιάζει γεωγραφικές και εποχιακές διακυμάνσεις ανάλογα με την περιεκτικότητα των εδαφών σε ^{226}Ra , το πορώδες του εδάφους και τη μετεωρολογία μιας συγκεκριμένης περιοχής (Feichter J., 1991).

2.4.3 Ανίχνευση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα

Οι βασικές τεχνικές για την παρακολούθηση του ραδονίου και των βραχύβιων ισοτόπων του είναι είτε η ανάλυση φίλτρων από δειγματοληψίες αέρα σε ανιχνευτές υψηλής διακριτικής ικανότητας, είτε οι επί τόπου μετρήσεις, με κύριο χαρακτηριστικό την ταυτόχρονη δειγματοληψία και μέτρηση. Για την ανίχνευση του ραδονίου και των θυγατρικών του στην ατμόσφαιρα και για συνεχή παρακολούθηση έχουν αναπτυχθεί πολλά συστήματα και όργανα. Όργανα πιο πρόσφατης τεχνολογίας που αναπτύχθηκαν είναι το Smart Radon Duo (www.roopcreators.com) και οι οθόνες σπινθηρισμού ραδονίου (www.eeipl.in) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συνεχή παρακολούθηση του ^{222}Rn καθώς και του ^{220}Rn στον αέρα, το έδαφος ή στο νερό. Πολλά από τις συστήματα συνεχών μετρήσεων είναι φορητά και σχεδόν όλες οι διατάξεις έχουν σχεδιαστεί για ανίχνευση της ακτινοβολίας-α που εκπέμπεται από το ραδόνιο και τα θυγατρικά του (με θάλαμο ιονισμού, ολική-α ή φασματοσκοπία-α). Πιο δύσκολο είναι να κατασκευαστεί ένας φορητός ακτινοβολίας-β ή φασματόμετρο ακτίνων-γ που να έχει, τόσο χαμηλό επίπεδο ανίχνευσης όσο και υψηλή ευαισθησία. Για την ανίχνευση του ραδονίου έχει εφαρμοσθεί και η τεχνική Φασματομετρίας Μάζας Πλάσματος (ICP-MS)⁹. Αυτή η τεχνική επιτρέπει μετρήσεις υψηλής ακριβείας. Η φασματομετρία ακτινοβολίας-α είναι μια άλλη μέθοδος για την ανάλυση

⁹ Inductivity Coupled Plasma Mass Spectrometry

ραδιοϊσοτόπων (M. Baskaran, 2012), η οποία όμως είναι χρονοβόρος και έχει πολλές απαιτήσεις για την υπό ανάλυση πηγή (P. Mookongprai, V. Cheenarorn, 1996).

Όσον αφορά στην ανίχνευση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου, η πιο διαδεδομένη είναι η τεχνική της φασματοσκοπίας- γ , κυρίως λόγω της ευκολίας της και διότι δεν απαιτεί περίπλοκες και μακρές προετοιμασίες του δείγματος.

2.4.4 Φασματοσκοπία γ

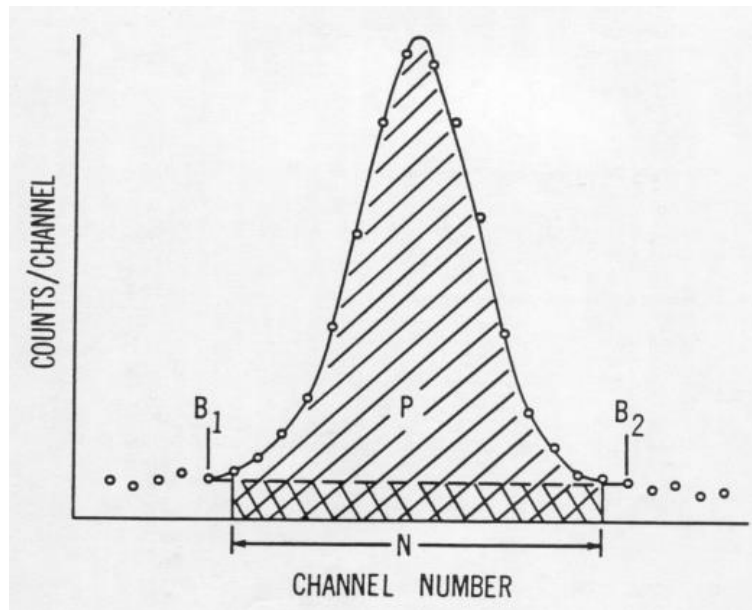
Η φασματοσκοπία ακτίνων- γ είναι για μια μη καταστροφική αναλυτική τεχνική για τον προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων που εκπέμπουν ακτίνες- γ . Σκοπός της φασματοσκοπίας είναι ο ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός των ραδιενεργών ισοτόπων ενός δείγματος. Βασική αρχή της είναι πως τα φωτόνια που εκπέμπονται από ένα ραδιενεργό πυρήνα αποτελούν δακτυλικό του αποτύπωμα. Συχνά, ένα ισότοπο μπορεί να προσδιορίζεται από περισσότερα από ένα φωτόνια, όπως είναι περίπτωση των θυγατρικών του ραδονίου.

Η διαδικασία της φασματοσκοπίας- γ περιλαμβάνει τη λήψη φάσματος στο οποίο ανιχνεύονται οι φωτοκορυφές που ενδιαφέρουν και τον εντοπισμό συγκεκριμένης περιοχής γύρω από τις φωτοκορυφές ενδιαφέροντος. Ακολουθεί για κάθε φωτοκορυφή, ο προσδιορισμός του κεντροειδούς και της ενέργειας των αντίστοιχων φωτονίων καθώς και η επιφάνεια της (σχήμα 2.7). Από τα παραπάνω δεδομένα προσδιορίζεται το ισότοπο – εφόσον είναι γνωστή η συνάρτηση ενεργειακής βαθμονόμησης – κάθε και η αντίστοιχη ραδιενέργεια, εφόσον είναι γνωστή η συνάρτηση απόδοσης φωτοκορυφής για την ανιχνευτική διάταξη που χρησιμοποιείται. Η εύρεση της επιφάνειας μιας φωτοκορυφής λαμβάνοντας υπόψη το υπόστρωμα γίνεται από τη σχέση:

$$area = P - \frac{N}{2} * (B_1 + B_2) \quad (2.35)$$

όπου:

Area	η επιφάνεια της φωτοκορυφής
P	η συνολική επιφάνεια (integral) στην περιοχή κεντροειδές $\pm 1,5fwhm$
B ₁ , B ₂	τα γεγονότα που αντιστοιχούν σε κανάλια εκατέρωθεν της φωτοκορυφής σε επίπεδα υποστρώματος
N	το πλήθος των καναλιών



ΣΧΗΜΑ 2. 7: Προσδιορισμός της επιφάνειας; Φωτοκορυφής

Συνήθως, η επιφάνεια λαμβάνεται απευθείας από τον πολυκαναλικό αναλυτή, εφόσον έχουν επιλεγεί κατάλληλα τα όρια της φωτοκορυφής. Εν συνεχεία, ο υπολογισμός της ραδιενέργειας γίνεται από τη σχέση:

$$Activity = area/time * yield * efficiency \quad (2.36)$$

όπου:

- Area η επιφάνεια της φωτοκορυφής,
- Time η διάρκεια δειγματοληψίας,
- Yield το ποσοστό εκπομπής φωτονίων
- Efficiency η απόδοση φωτοκορυφής.

Στη φασματοσκοπία-γ χρησιμοποιούνται ανιχνευτές κατασκευασμένοι από υλικό με το οποίο τα φωτόνια έχουν σημαντική πιθανότητα να αλληλεπιδράσουν και να παράγουν ηλεκτρικό σήμα. Για το λόγο αυτό από τη φασματοσκοπία-γ αποκλείονται οι ανιχνευτές αερίων. Αντίθετα, οι ανιχνευτές σπινθηρισμού χρησιμοποιούνται στη φασματοσκοπία-γ ευρέως, ειδικά μετά την καθιέρωση του NaI ως υλικό σπινθηρισμού το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε κατασκευή ανιχνευτών με υψηλή ανιχνευτική απόδοση και καλή ενεργειακή ανάλυση. Η φασματοσκοπία με χρήση σπινθηριστών χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές και διάφορα τεχνικά πεδία. Η χρήση του κρυστάλλου NaI, ως υλικού για τη φασματοσκοπία, οφείλεται στην υψηλή παραγωγή

φωτός, την εξαιρετική του απόδοση και τον υψηλό ατομικό αριθμό των συστατικών του.

Οι ανιχνευτές ημιαγωγών στην φασματοσκοπία-γ και η χρήση τους έρχεται να «συμπληρώσει» τους ανιχνευτές σπινθηρισμού, όταν η διακριτική τους ικανότητα δεν επιτρέπει την ανάλυση πολύπλοκων φασμάτων. Οι ανιχνευτές ημιαγωγών έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί ευρέως στη φασματοσκοπία-γ τις τελευταίες δεκαετίες.

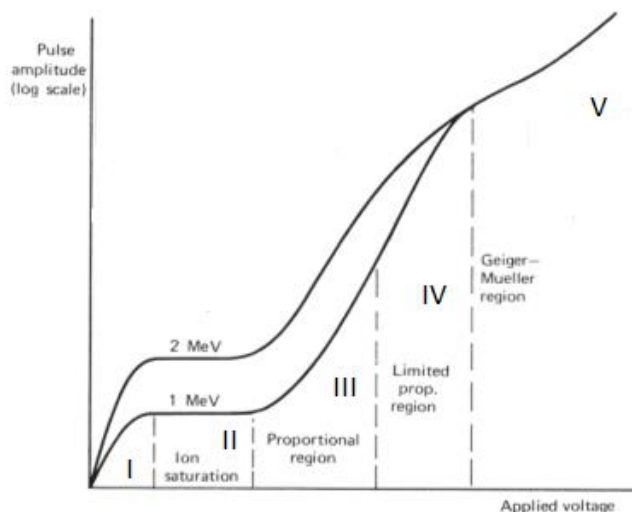
2.5 Ανιχνευτικά συστήματα

Οι ανιχνευτές είναι συστήματα ανίχνευσης και καταγραφής της ιοντίζουσας ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτούς. Ένας ανιχνευτής είναι ένας μεταλλάκτης που μετατρέπει το γεγονός της διέλευσης ενός ενεργητικού φωτονίου ή ενός φορτισμένου σωματιδίου σε ένα ορατό ή αναγνώσιμο φαινόμενο. Οι ανιχνευτικές διατάξεις έχουν σχεδιαστεί για κάθε ακτινοβολία που αλληλεπιδρά με συγκεκριμένο υλικό και παράγει ανιχνεύσιμο σήμα το οποίο είναι περαιτέρω επεξεργάσιμο. Τα ανιχνευτικά συστήματα αποτελούνται από ένα θάλαμο που καλείται ευαίσθητος θάλαμος και περιέχει το υλικό ανίχνευσης της ακτινοβολίας, τα ηλεκτρόδια συλλογής του παραγόμενου φορτίου από την ακτινοβολία, το οποίο αποτελεί και το ηλεκτρικό σήμα, καθώς και διατάξεις ελέγχου των παραμέτρων της διάταξης. Κατά τη σχεδίαση ενός ανιχνευτή πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα εξής σημεία: οι ιδιότητες της ακτινοβολίας που πρόκειται να μελετηθούν, σχετικά με την ενέργεια και το είδος της, η εκτίμηση της έντασης της ακτινοβολίας, η εύρεση του κατάλληλου μέσου αλληλεπίδρασης και το είδος του ανιχνευτή, ο καθορισμός της γεωμετρίας και το μέγεθος του ανιχνευτή, η μελέτη των πιθανών άλλων ακτινοβολιών στις οποίες είναι ευαίσθητος ο ανιχνευτής, ώστε να μειωθεί ο παρασιτικός θόρυβος.

2.5.1 Ανιχνευτές αερίων

Στην κατηγορία αυτών των ανιχνευτών ανήκουν όσοι βασίζουν την λειτουργία τους στην αλληλεπίδραση της προς ανίχνευση ακτινοβολίας με αέριο υλικό μέσο. Οι ανιχνευτές αερίου αποτελούνται από τα εξής βασικά μέρη, δύο ηλεκτρόδια και έναν θάλαμο γεμάτο με ειδικό αέριο και διακρίνονται σε τρεις τύπους: τους θαλάμου ιονισμού, τους αναλογικούς ανιχνευτές και τους ανιχνευτές Geiger-Mueller. Σε πολλές περιπτώσεις ο ίδιος ο θάλαμος μπορεί να είναι κατασκευασμένος από μέταλλο ώστε να παίζει τον ρόλο του ενός εκ των δύο ηλεκτροδίων. Μεταξύ των ηλεκτροδίων εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού, η οποία μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα και

επηρεάζει τη συλλογή των ιόντων που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση των σωματιδίων ή των φωτονίων με το αέριο του θαλάμου και άρα και το ύψος του σήματος εξόδου. Τα «φορτία» που συλλέγονται σε κάθε ηλεκτρόδιο ανά αλληλεπίδραση εξαρτώνται μεν από το είδος της ακτινοβολίας (σωματίδιο α, σωματίδιο β), αλλά εμφανίζουν για όλα πέντε βασικές περιοχές που σχετίζονται με την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού.



ΣΧΗΜΑ 2. 8: Οι διαφορετικές περιοχές λειτουργίας των ανιχνευτών αερίου

Συγκεκριμένα, η περιοχή I ονομάζεται περιοχή επανασύνδεσης γιατί, καθώς το δυναμικό είναι χαμηλό και ως αποτέλεσμα τα ιόντα τείνουν να ενώνονται στις αρχικές δομές και να μην καταφέρνουν να φτάσουν στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια για την συλλογή του σήματος. Βέβαια, όσο αυξάνει η διαφορά του δυναμικού γίνεται λιγότερο έντονο το φαινόμενο της επανασύνδεσης και οδηγούμαστε στην δεύτερη περιοχή του διαγράμματος, περιοχή II που είναι γνωστή ως περιοχή κόρου. Στην περιοχή αυτή το πλήθος των ιόντων που συλλέγονται από τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια είναι ίσο με το πλήθος αυτών που δημιουργούνται ανά διερχόμενο σωματίδιο της ακτινοβολίας, και το σήμα που παράγεται εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας και την ενέργεια. Οι ανιχνευτές που λειτουργούν σε αυτήν την περιοχή χαρακτηρίζονται ως θάλαμοι ιονισμού.

Η περιοχή III είναι γνωστή και ως περιοχή αναλογίας, και αποτελεί τη βάση λειτουργίας των αναλογικών ανιχνευτών. Σε αυτήν, τα πρωτογενή ιόντα, δηλαδή τα

ίόντα που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με το αέριο του θαλάμου, επιταχύνονται από το πεδίο και αποκτούν ενέργεια τέτοια ώστε να προκαλέσουν δευτερογενείς ιονισμούς. Έτσι, τα ίόντα πολλαπλασιάζονται και το πλήθος που τελικά φτάνει στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια είναι αναλογικά μεγαλύτερα από τα πρωτογενή με εξαίρεση το τέλος αυτής της περιοχής που η αναλογία αυτή χάνεται. Στο μεγαλύτερο μέρος όμως της περιοχής αυτής, υπάρχει εξάρτηση του ύψους του παλμού από την αρχική ενέργεια που αποτέθηκε στον ανιχνευτή και ο συντελεστής αναλογίας ποικίλλει ανάλογα το αέριο του θαλάμου. Στην επόμενη περιοχή IV βασικό χαρακτηριστικό αποτελεί η μη εξάρτηση των συλλεγόμενων ιόντων στα ηλεκτρόδια από τα αντίστοιχα πρωτογενή αλλά αποκλειστικά από την γεωμετρία του θαλάμου ανίχνευσης, του αερίου εντός αυτού και εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα που συμπληρώνει την όλη διάταξη. Στην περιοχή αυτή λειτουργεί ο ανιχνευτής Geiger-Mueller (G-M). Τέλος η περιοχή V η εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού είναι τόσο μεγάλη που το σήμα που δεν έχει καμιά σχέση με την ενέργεια των σωματιδίων που αλληλεπιδρούν με το αέριο.

Οι πιο συνήθεις εφαρμογές των θαλάμων ιονισμού είναι ως δοσίμετρα άμεσης ανάγνωσης, όργανα που υπολογίζουν την έκθεση σε ακτίνες-γ και ως όργανα μέτρησης του ρυθμού έκθεσης, όργανα που εντοπίζουν πεδία ακτινοβολίας-γ υπολογίζοντας το ρεύμα που δημιουργείται από τον θάλαμο ιονισμού όταν αυτός εκτεθεί σε πεδίο ακτινοβολίας.

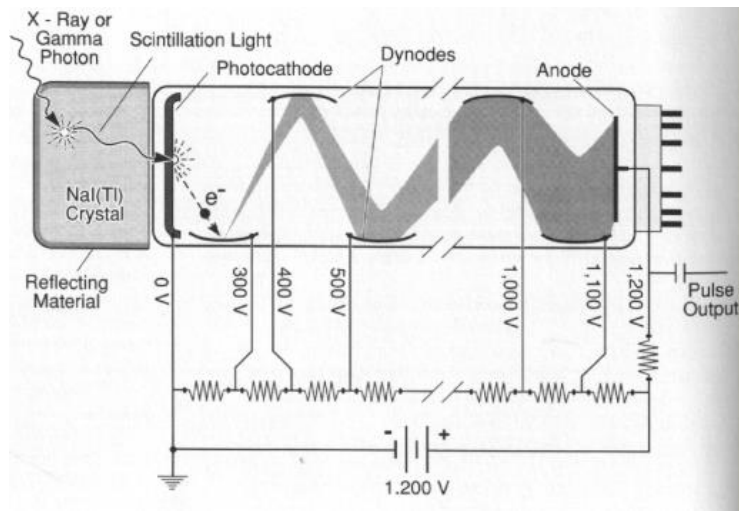
Για τους αναλογικούς ανιχνευτές ισχύει ότι κάθε διαφορετικός τύπος αναλογικού ανιχνευτή αντιστοιχεί σε ανίχνευση διαφορετικού είδους ακτινοβολίας και τα κύρια στοιχεία που επηρεάζουν αυτούς είναι το αέριο πλήρωσης και το υλικό τοιχώματος. Συγκεκριμένα, οι κυλινδρικοί αναλογικοί ανιχνευτές χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανίχνευση γ-ακτινοβολίας, έχουν σχετικά μικρό μέγεθος και είναι πληρωμένα με ένα ευγενές αέριο ή CO₂ ή CH₄. Τη μεγαλύτερη έκταση εφαρμογών καλύπτουν οι αναλογικοί ανιχνευτές για ακτινοβολία-α και νετρόνια. Αυτοί είναι συνήθως κυλινδρικοί και όταν πρόκειται για νετρόνια έχουν ειδικό αέριο πλήρωσης ή κατάλληλο υλικό επίστρωσης εσωτερικά, ενώ όταν πρόκειται για α-σωματίδια μπορεί να έχουν ημισφαιρικό ή και σφαιρικό σχήμα και το αέριο πλήρωσης να ανανεώνεται συνεχώς. Πολύ σημαντική για όλους τους ανιχνευτές είναι η τάση λειτουργίας τους, ειδικά όταν χρησιμοποιείται ο ανιχνευτής για συγκεκριμένο είδος ακτινοβολίας. Οι

αναλογικοί ανιχνευτές μπορούν να δώσουν παλμούς που διαφέρουν στον χρόνο συλλογής διότι τα ηλεκτρόνια που παράγονται στους ιονισμούς είναι ταχύτερα και συλλέγονται σε χρόνο τάξης 10^{-7} s ενώ τα θετικά ιόντα είναι πιο βραδυκίνητα και συλλέγονται σε χρόνο τάξης 10^{-4} s. Η επιλογή τους εξαρτάται από την εφαρμογή και συγκεκριμένα αν γίνεται απλή απαρίθμηση σωματιδίων αρκεί ο χρόνος συλλογής των ηλεκτρονίων, ενώ στις περιπτώσεις που ενδιαφέρει και το ύψος του παλμού χρειάζεται να γίνει καταμέτρηση όλων των φορέων σήματος για τον προσδιορισμό κάθε ξεχωριστού παλμού.

Οι ανιχνευτές Geiger-Mueller (G-M) αποτελούνται στις περισσότερες περιπτώσεις από έναν κυλινδρικό θάλαμο, δυο ηλεκτρόδια και κατάλληλο αέριο πλήρωσης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, συνήθως το ένα ηλεκτρόδιο είναι αξονικό (άνοδος/ συλλέκτης) και το άλλο κυλινδρικό ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις που ο ίδιος ο θάλαμος μπορεί να αναλάβει τον ρόλο του ενός ηλεκτροδίου είτε όντας μεταλλικός είτε έχοντας επικάλυψη από κατάλληλο υλικό. Τα αέρια που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι ευγενή αέρια, υδρογόνο ή άζωτο, ενώ συχνά περιέχουν και προσμίξεις αλκοόλης ή αλογόνου για την αντιμετώπιση του φαινομένου των εκκενώσεων.

2.5.2 Ανιχνευτές σπινθηρισμού

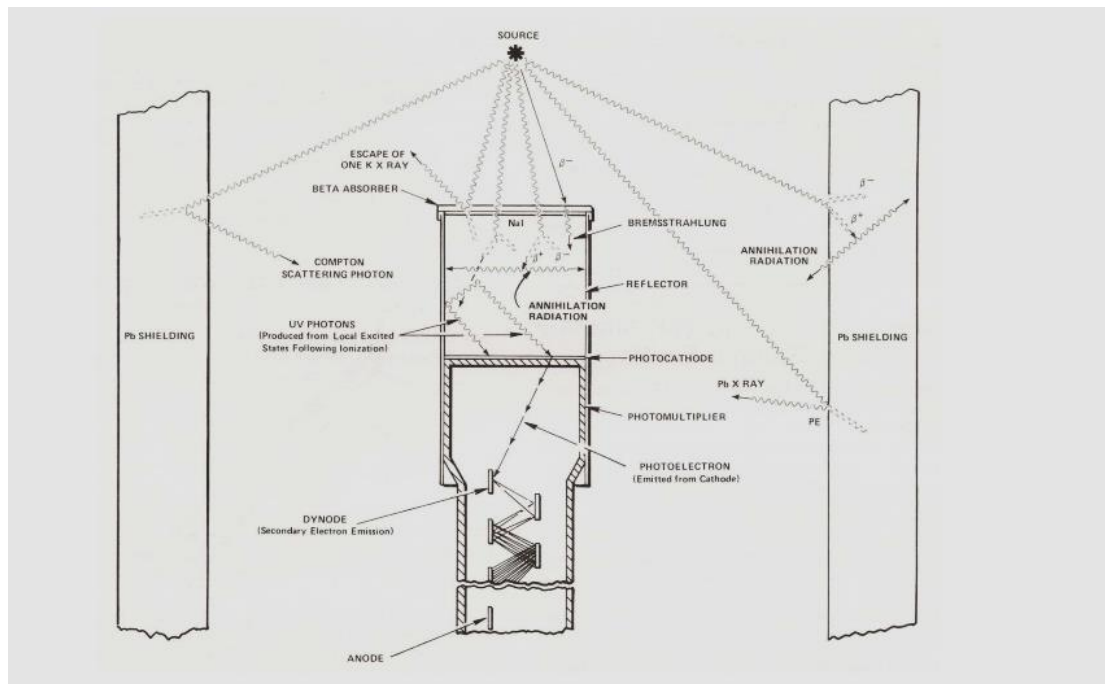
Οι ανιχνευτές σπινθηρισμού χρησιμοποιούνται ευρέως στην ανίχνευση πυρηνικών ακτινοβολιών, όχι μόνο για απλή καταμέτρηση γεγονότων αλλά και για τον προσδιορισμό της ενέργειας ή του ενεργειακού τους φάσματος και αποτελείται από δυο βασικές συνιστώσες, τον σπινθηριστή και τον φωτοπολλαπλασιαστή, που θα περιγραφούν παρακάτω αναλυτικότερα. Η λειτουργία των ανιχνευτών αυτών και η διεργασίες που συμβαίνουν από την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας μέχρι τη λήψη του σήματος αναλύονται πλήρως σε πέντε διαφορετικά στάδια.



ΣΧΗΜΑ 2.9: Διαγραμματική απεικόνιση της διαδικασίας δημιουργίας ηλεκτρικού σήματος σε ανιχνευτή σπινθηρισμού

Αρχικά, η ακτινοβολία προσπίπτει στον κρύσταλλο του σπινθηριστή και αλληλεπιδρά με αυτόν με αποτέλεσμα οι πολλαπλοί ιονισμοί να οδηγήσουν τα μόρια και άτομα του κρυστάλλου σε διεγερμένες ή μετασταθείς καταστάσεις. Κατά την επιστροφή αυτών στην θεμελιώδη κατάσταση εκπέμπονται φωτόνια με συχνότητες αντίστοιχες του ορατού (φωταύγεια). Τα φωτόνια αυτά οδηγούνται στην συνέχεια στην φωτοκάθοδο του φωτοπολλαπλασιαστή από όπου εκλύονται ηλεκτρόνια εξ αιτίας φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Τέλος μερικά από αυτά τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στον φωτοπολλαπλασιαστή και καταλήγουν ενισχυμένα στην άνοδο.

Στο Σχήμα 2.10 φαίνονται οι διάφορες δυνατές αλληλεπιδράσεις που μπορούν να συμβούν σε έναν ανιχνευτή σπινθηρισμού όταν σε αυτόν προσπέσουν ακτίνες γ ορισμένης ενέργειας, αρκετά μεγάλης ώστε να ξεπερνά τα 1022keV. Διαδοχικά είναι δυνατόν να συμβούν αλληλεπιδράσεις φωτοηλεκτρικής απορρόφησης, σκέδαση Compton και δίδυμης γένεσης, τόσο στον ανιχνευτή, όσο και στο περιβάλλον του που θα οδηγήσουν τελικά στην απορρόφηση ενέργειας από τον ανιχνευτή. Η επίδραση του μεγέθους του ανιχνευτή φαίνεται στο σήμα που προκύπτει από την απορρόφηση αυτής της ενέργειας και της κορυφής που αποδίδει (J. E. Martin, 2000, G. F. Knoll, 2010).



ΣΧΗΜΑ 2. 10: Διαγραμματική απεικόνιση των διαφορετικών αλληλεπιδράσεων που συμβαίνουν σε έναν ανιχνευτή σπινθηρισμού με ακτινοβολία γ .

Ο σπινθηριστής είναι κρύσταλλος και αποτελεί το μέσο με το οποίο αλληλεπιδρά η ακτινοβολία. Το υλικό του σπινθηριστή μπορεί να είναι κρυσταλλικό, όπως ιωδιούχο νάτριο NaI ή οργανικό. Οι ανόργανοι κρύσταλλοι είναι κυρίως αλογονούχα αλκάλια που περιέχουν μικρές προσμίξεις από συγκεκριμένα υλικά. Στην περιγραφή της δομής των ανόργανων κρυστάλλων δεν αναφερόμαστε σε στάθμη ενέργειας αλλά αντί αυτής στην ευρύτερη έννοια των επιτρεπόμενων ζωνών ενέργειας και των απαγορευμένων ζωνών ενέργειας (οι περιοχές μεταξύ των επιτρεπόμενων ζωνών) ενώ η υψηλότερη πλήρης ζώνη χαρακτηρίζεται ως ζώνη σθένους και η διαδοχική κενή αυτής ως ζώνη αγωγιμότητας. Κατά το φαινόμενο του ιονισμού τα ηλεκτρόνια από την ζώνη σθένους μεταπηδούν στην ζώνη αγωγιμότητας ή απλά απομακρύνονται από αυτήν δημιουργώντας τα εξιτόνια (ζεύγος οπής- ηλεκτρονίου). Σε κάθε μια από τις περιπτώσεις αυτές όταν τα ηλεκτρόνια αυτά συλληφθούν από άτομα και τα διεγείρουν αναμένεται η επαναφορά τους στην αρχική κατάσταση εκπέμποντας φωτόνια/σπινθήρες. Από την άλλη πλευρά, οι πιο συνηθισμένοι οργανικοί κρύσταλλοι είναι αρωματικοί υδρογονάνθρακες με πιο συχνά χρησιμοποιούμενους το ανθρακένιο και το διφαινυλαιθυλένιο. Σημαντικό για αυτούς τους κρυστάλλους είναι η απουσία προσμίξεων από άλλα στοιχεία διότι εμποδίζει την εκπομπή ακτινοβολίας. Στην περίπτωση των οργανικών κρυστάλλων το φαινόμενο της εκπομπής ακτινοβολίας είναι ενδομοριακό και πρόκειται για την αλλαγή της σχέσης

μεταξύ των μορίων από ελκτική σε απωστική από την στιγμή που κάποιο από τα ηλεκτρόνια μεταβεί σε μεγαλύτερη ενεργειακή στάθμη, που οδηγεί το μόριο σε διεγερμένη κατάσταση ή ακόμα και σε χημική διάσπαση. Στην τελευταία περίπτωση διάσπασης και κατά την αποδιέγερση του ατόμου προς την θεμελιώδη κατάσταση εκπέμπεται ακτινοβολία.

Ο φωτοπολλαπλασιαστής αποτελείται από το ηλεκτρόδιο εστίασης, τα ζεύγη των βοηθητικών ανόδων που αναφέρονται ως δύνοδοι και την άνοδο, ενώ στο εσωτερικό του υπάρχει κενό. Το ηλεκτρόδιο εστίασης αρχικά καθοδηγεί την δέσμη των ηλεκτρονίων της φωτοκαθόδου στην πρώτη δύνοδο. Μεταξύ της φωτοκαθόδου και της δυνόδου και κάθε επόμενου ζεύγους δυνόδων δημιουργείται ηλεκτροστατικό πεδίο, μέσω της επιβαλλόμενης υψηλής τάσης, το οποίο επιταχύνει τα ηλεκτρόνια. Για κάθε ηλεκτρόνιο που προσπίπτει σε μία δύνοδο εκλύονται από δύο έως και πέντε δευτερογενή ηλεκτρόνια με αποτέλεσμα έτσι να πολλαπλασιάζονται τα αρχικά ηλεκτρόνια και να φτάνει στην άνοδο πολύ μεγαλύτερο πλήθος ηλεκτρονίων. Γενικά, ο αριθμός των ηλεκτρονίων που θα προκύψουν από κάθε αλληλεπίδραση εξαρτάται τόσο από την ένταση του πεδίου μεταξύ κάθε ζεύγους δυνόδων όσο και από την ένταση του πεδίου από την φωτοκάθοδο μέχρι και την άνοδο. Η φωτοκάθοδος και οι δύνοδοι αποτελούνται από στρώματα cesίου Cs και αντιμονίου Sb ή Ag-Mg και η πρώτη έχει υψηλή ευαισθησία που σχετίζεται με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τέλος η γεωμετρία του φωτοπολλαπλασιαστή και η θέση των συνιστωσών του (κάθοδος, δύνοδοι, άνοδος) είναι τέτοια ώστε να συλλέγονται κάθε φορά όλα τα ηλεκτρόνια που έχουν παραχθεί και να μειώνεται ο χρόνος ανταπόκρισης, δηλαδή ο χρόνος από την εκπομπή του πρώτου ηλεκτρονίου μέχρι την καταγραφή του πρώτου παλμού στην άνοδο.

2.5.3 Ανιχνευτές στερεάς κατάστασης

Οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης γνωστοί και ως ανιχνευτές ημιαγωγών είναι ανιχνευτές στους οποίους το μέσο αλληλεπίδρασης με την ακτινοβολία είναι ημιαγωγό υλικό. Τα πιο γνωστά υλικά που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου τύπου ανιχνευτές είναι το γερμάνιο Ge και το πυρίτιο Si, ενώ οι πιο συνηθισμένοι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης είναι οι υπερκαθαρού γερμανίου HPGe, οι ανιχνευτές GeLi, SiLi, BEGe και συναντώνται ευρέως σε εφαρμογές γ-φασματοσκοπία. Το βασικό τους πλεονέκτημα έναντι των άλλων ανιχνευτών είναι η υψηλή ικανότητα ενεργειακού

διαχωρισμού, ενώ το κύριο μειονέκτημά τους είναι η απαραίτητη ψύξη. Η λειτουργία των ανιχνευτές ημιαγωγών βασίζεται στην δημιουργία και συλλογή ζευγών-οπών από την διέλευση ιονίζουσας ακτινοβολίας με την βοήθεια ηλεκτρικού πεδίου. Τα πλεονεκτήματα των ανιχνευτών αυτών έναντι των ανιχνευτών ιονισμού ή σπινθηρισμού οφείλονται στο ότι η μέση απαιτούμενη ενέργεια για τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής είναι αρκετά μικρότερη από αυτήν που απαιτείται στα άλλα είδη ανιχνευτών. Όταν ο κρύσταλλος βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος η θερμική ενέργεια του αγωγού αρκεί ώστε ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους να μεταπηδήσουν στην ζώνη αγωγιμότητας και να δημιουργήσουν ρεύμα διαρροής, δηλαδή εντέλει θόρυβο, πράγμα που καθιστά την ψύξη του ημιαγωγού απαραίτητη. Τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη των ανιχνευτών στερεάς κατάστασης που παίζουν ρόλο στις διάφορες εφαρμογές είναι το πάχος του παραθύρου, η επιφάνεια του ανιχνευτή, το ρεύμα διαρροής, η διακριτική ικανότητα και ο χρόνος ανόδου παλμού.

2.6 Μετρήσεις ραδονίου με χρήση φασματοσκοπίας-γ

Ο προσδιορισμός του ραδονίου σε ένα δείγμα με τεχνικές γ-φασματοσκοπίας μπορεί να γίνει μόνον έμμεσα από τα θυγατρικά του ^{214}Bi και ^{214}Pb (O. Agar, I. Boztosun, 2014), καθώς το ραδόνιο δεν εκπέμπει ακτίνες-γ. Η μέθοδος βασίζεται στην υπόθεση ότι του ραδονίου και των θυγατρικών του ^{214}Bi και ^{214}Pb υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία.

Ο ανίχνευση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα μπορεί να γίνει επίσης με μέτρηση των ^{214}Pb και ^{214}Bi με τεχνικές φασματοσκοπίας-γ (π.χ. Duenas et al., 1994). Τα φωτόνια που σχετίζονται με τη διάσπαση του ^{214}Bi είναι φωτόνια ενέργειας 609,3 KeV, 1120,3 KeV και 1764,5 KeV και του ^{214}Pb είναι φωτόνια ενέργειας 315,9 KeV, 295,6 KeV και 242,0 KeV. Τα πειράματα που έγιναν στα πλαίσια της ΔΕ περιορίστηκαν στη χρήση του φωτονίου ενέργειας 0,609 MeV του Βισμούθιου.

2.6.1 Δειγματοληψία κι επεξεργασία δειγμάτων ατμοσφαιρικού αεροζόλ

Για την πραγματοποίηση δειγματοληψιών σε δείγματα αέρα με στόχο τη μελέτη της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιούνται αντλίες αέρα στις οποίες τοποθετούνται συνήθως φίλτρα από ίνες γυαλιού (fiber-glass) ή φίλτρα κυτταρίνης

(cellulose filters) πάνω στα οποία θα συγκρατηθεί το ατμοσφαιρικό αερόλυμα και τα περιεχόμενα σε αυτό ραδιενεργά ισότοπα. Σε αυτές τις δειγματοληψίες αέρα η διάρκεια ποικίλει ανάλογα την εφαρμογή. Στην βιβλιογραφία συναντώνται συχνά μηνιαίες (Phametal., 2011, 2013, και εβδομαδιαίες δειγματοληψίες (Papastefanou and Ioannidou, 1995; Azahra et al., 2003; Duenas et al., 2003, 2009; Leppanen et al., 2012; Chao et al., 2013, 2014; Steinmann et al., 2013; Blazej and Mietelski, 2014; Bourcier et al., 2014) ακόμη και αρκετών ημερών ή ωρών. Εντούτοις, οι ολιγόωρες δειγματοληψίες καθιστούν εφικτή τη μελέτη των μεταβολών στη συγκέντρωση των ραδιενεργών στοιχείων της ατμόσφαιρας σε μικρές χρονικές κλίμακες, π.χ. κατά τη διάρκεια μιας ημέρας ή εν μέσω κάποιου μετεωρολογικού φαινομένου. Ειδικά για τη μελέτη της κύμανσης του ραδονίου και των βραχύβιων θυγατρικών του, λόγω των πολύ μικρών χρόνων υποδιπλασιασμού τους, δεν έχει νόημα μία μακροχρόνια δειγματοληψία.

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ οι δειγματοληψίες αέρα γίνονται με αντλία αέρα υψηλής παροχής (~80m³/h), που βρίσκεται εγκαταστημένη σε ύψος περίπου 10m από το έδαφος στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Στην αντλία αυτή τοποθετούνται φίλτρα από ίνες γυαλιού (glass-fiber) τυποποιημένων διαστάσεων 8x10” (Αρετής Σπανάκου, 2017). Μετά το τέλος της δειγματοληψίας η αντλία παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ροή του αέρα, την ατμοσφαιρική πίεση και τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας. Η δειγματοληψίες αυτές συνήθως δεν αποσκοπούν στη μελέτη των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου.

Στα πλαίσια αυτής της Διπλωματικής Εργασίας πραγματοποιήθηκαν επιπλέον δειγματοληψίες και με φορητή αντλία αέρα. Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιείται η αντλία μικρού όγκου αέρα STAPLEX. Σε αυτήν τοποθετούνται κυκλικά φίλτρα από ίνες γυαλιού (glass-fiber) τυποποιημένων διαστάσεων, διαμέτρου 4” ιντσών.

Παρ’ όλο που οι συγκεκριμένοι δειγματολήπτες χρησιμοποιούνται κυρίως για την απορρόφηση αέρα μέσα από τα φίλτρα για ορισμένο χρονικό διάστημα, ώστε να αναλυθούν εν συνεχεία στο εργαστήριο σε ειδικούς ανιχνευτές, στα πειράματα που έγιναν στα πλαίσια της ΔΕ η φασματοσκοπική ανάλυση γίνεται κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, όπως θα περιγραφεί με λεπτομέρεια σε επόμενα κεφάλαια. Στις παραγράφους που ακολουθούν, για λόγους πληρότητας θα παρουσιασθούν αντίστοιχα συστήματα συνεχούς μέτρησης που διατίθενται στην αγορά.

2.6.2 Συνεχείς μετρήσεις (*Continuous Monitors*)

Οι συσκευές συνεχούς παρακολούθησης των σωματιδίων στον αέρα (*Continuous Particle Analysis Monitor System, CPAM*) χρησιμοποιούνται εδώ και αρκετά χρόνια. Τα CPAM χρησιμοποιούν μια αντλία για την άντληση αέρα μέσω ενός φίλτρου, για τη συλλογή των αιωρούμενων σωματιδίων του αερολύματος, πάνω στα οποία μπορεί να έχουν προσκολληθεί ραδιενεργά ισότοπα όπως προϊόντα διάσπασης του ραδονίου (π.χ. ^{212}Pb) ή άλλα ανθρωπογενή ισότοπα όπως προϊόντα σχάσης (π.χ. ^{137}Cs).

Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας η ακτινοβολία που μπορεί να εκπέμπεται από το αερόλυμα που αποτίθεται στο φίλτρο καταγράφεται συνεχώς από έναν ανιχνευτή ακτινοβολίας, σε αντίθεση με τα κλασσικά συστήματα δειγματοληψίας αέρα, όπου το φίλτρο αφαιρείται περιοδικά από το δειγματολήπτη και μεταφέρεται σε ξεχωριστό σύστημα ανίχνευσης ακτινοβολίας για ανάλυση.

Γενικά, η δειγματοληψία και εν συνεχεία ανάλυση στο εργαστήριο έχει καλύτερη ευαισθησία ανίχνευσης για χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας, λόγω του πολύ μεγαλύτερου συνολικού όγκου αέρα που διέρχεται από το μέσο φίλτρου κατά το διάστημα δειγματοληψίας (που μπορεί να είναι της τάξης των ωρών), αλλά και της ευαισθησίας του ανιχνευτικού συστήματος. Από την άλλη πλευρά, η παρακολούθηση με CPAM παρέχει σχεδόν σε πραγματικό χρόνο ένδειξη επιπέδου ραδιενέργειας στον αέρα.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι CPAM, σταθερού φίλτρου και κινούμενου φίλτρου. Στον πρώτο, το φίλτρο δεν κινείται ενώ συλλέγεται το αερομεταφερόμενο υλικό. Ο δεύτερος τύπος έχει δύο κύριες παραλλαγές, την ορθογώνια περιοχή εναπόθεσης και το κυκλικό παράθυρο. Και στους δύο τύπους CPAM, ο αέρας απορροφάται από μια αντλία μέσω των σωληνώσεων προς τη δομή που συγκρατεί το μέσο φίλτρου. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι αντλίες CPAM είναι ειδικά σχεδιασμένες για να διατηρούν σταθερή ογκομετρική παροχή.

Καθώς ο αέρας περνά μέσα από το μέσο συλλογής, τα σωματίδια εναποτίθενται στο φίλτρο, ανάλογα με τη σχεδίαση του οργάνου. Ολόκληρη η περιοχή εναπόθεσης, ανεξάρτητα από το γεωμετρικό της σχήμα, θεωρείται ότι παρατηρείται από έναν ανιχνευτή ακτινοβολίας κατάλληλου τύπου που είναι τοποθετημένος σε μικρή απόσταση από το φίλτρο.

Η συνεχής παρακολούθηση φίλτρων με κινούμενο φίλτρο χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές όπου η φόρτωση του φίλτρου με σκόνη αποτελεί πρόβλημα. Αυτό το φορτίο σκόνης μειώνει τη ροή του αέρα με την πάροδο του χρόνου. Το κινούμενο φίλτρο (υπό μορφή ταινίας) θεωρείται ότι κινείται με σταθερό και γνωστό ρυθμό. Αυτός ο ρυθμός καθορίζεται συχνά με τέτοιο τρόπο ώστε ένα ρολό της ταινίας φίλτρου να διαρκεί περίπου ένα μήνα. Ένας τυπικός ρυθμός κίνησης του φίλτρου είναι περίπου μία ίντσα ανά ώρα.

2.6.3 Το διεθνές δίκτυο παρακολούθησης της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα.

Η ανάπτυξη αυτοματοποιημένων συστημάτων παρακολούθησης της ραδιενέργειας στο περιβάλλον προωθήθηκε σημαντικά από τη δημιουργία ενός διεθνούς δικτύου ελέγχου της ραδιενέργειας περιβάλλοντος που ονομάζεται CTBTO (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, CTBTO). Το δίκτυο αυτό το οποίο οργανώθηκε υπό την αιγίδα του ΟΗΕ, αποσκοπεί στην παρακολούθηση της τήρησης της συμφωνίας για την απαγόρευση των πυρηνικών δοκιμών σε παγκόσμια κλίμακα. Οι απαιτήσεις του δικτύου (Werzi, 2009) ήταν ένας τριήμερος κύκλος για δείγματα, με δειγματοληψία 24 ωρών, περίοδο αναμονής 24 ωρών για διάσπαση των θυγατρικών του ραδονίου και μέτρηση 24 ωρών. Εκτός από τη βελτίωση της ικανότητας συνεχούς παρακολούθησης της ραδιενέργειας περιβάλλοντος, η μικρότερη περίοδος δειγματοληψίας οδήγησε και στην ανίχνευση στοιχείων με μικρότερο χρόνο υποδιπλασιασμού, όπως των θυγατρικών του ραδονίου, αλλά η μικρή διάρκεια μέτρησης συνεπάγεται χειρότερα όρια ανίχνευσης σε σχέση με την προηγούμενη γενιά χειροκίνητων συστημάτων και τα συστήματα του δικτύου Ro5¹⁰ (Harry S. Mileya, Jonathan L. Burnett).

Ωστόσο, οι μετρήσεις με πολύ μικρό χρόνο δειγματοληψίας είναι απαραίτητες, αφού μια έγκαιρη ειδοποίηση από την ανίχνευση σε «οριακά πραγματικό χρόνο» αύξησης της ραδιενέργειας περιβάλλοντος θα μπορούσε να επιτρέψει την προσαρμογή ή και την επέκταση της διαδικασίας δειγματοληψίας. Επίσης ο «τριήμερος κύκλος» όπως αναφέρθηκε και παραπάνω έχει επίσης μέτρια αξία για την υποβολή εκθέσεων κατά τη διάρκεια εμφάνισης υψηλών επιπέδων ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα. Εξάλλου, οι μικρότερης διάρκειας δειγματοληψίες παρέχουν πολύ πιο χρήσιμα δεδομένα για την ατμοσφαιρική μοντελοποίηση που μπορεί να γίνει με στόχο την

¹⁰ Ring of Five, διεθνές δίκτυο παρακολούθησης της ραδιενέργειας περιβάλλοντος

εκτίμηση της τοποθεσίας αρχικής εκπομπής της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα (Eslinger and Schrom, 2016).

Το τηλεμετρικό δίκτυο αντίστοιχα χρησιμοποιείται για τη συνεχή καταγραφή των μετρήσεων, αλλά και ως σύστημα συναγερμού σε περίπτωση υπέρβασης των προκαθορισμένων φυσιολογικών επιπέδων. Σκοπός είναι η συνεχής επόπτευση των επιπέδων ραδιενέργειας, η έγκαιρη ειδοποίηση σε περίπτωση ανίχνευσης ραδιενέργειας στο περιβάλλον.

Για τη δειγματοληψία του αερολύματος χρησιμοποιούνται στα περισσότερα συστήματα δύο τύποι φίλτρων, κοινά φίλτρα και φίλτρα με ενεργό άνθρακα, ένα σύστημα αντλίας αέρα και ανιχνευτές τύπου PIPS ακτινοβολία-α και -β και τύπου NaI για ακτινοβολία-γ. Οι ανιχνευτές NaI χρησιμοποιούνται κυρίως για την μελέτη και παρακολούθηση του ^{131}I και των θυγατρικών του ραδονίου στην ατμόσφαιρα.

2.6.4 Σταθμοί μέτρησης αερολύματος στην ατμόσφαιρα

Τα πλήρως αυτόματα συστήματα (Air Monitoring Systems, AMS) είναι ικανά να ανιχνεύουν την ακτινοβολία-γ που εκπέμπεται από τα ραδιενεργά ισότοπα που συλλέγονται με το αερόλυμα στο φίλτρο, και αρκετά συχνά μπορεί να κάνει ποσοτικούς υπολογισμούς σχετικά με την ραδιενέργεια των ^7Be και ^{210}Pb , ενώ παρουσιάζει και υψηλό επίπεδο διαθεσιμότητας δεδομένων 90% εντός της περιόδου αναφοράς (M. Zaehring, J. Bieringer, C. Schlosser).

2.6.4.1 Τύποι συστημάτων μέτρησης αερολύματος AMS-02 και AMS-02T

Τα συστήματα παρακολούθησης αερολυμάτων AMS-02, χρησιμοποιούνται κυρίως σε σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης για την ανίχνευση ακτινοβολίας – κυρίως λόγω πυρηνικών ατυχημάτων – ώστε να προειδοποιηθεί εγκαίρως ο πληθυσμός, αλλά και για τον έλεγχο πραγματοποίησης πυρηνικών δοκιμών που έχουν απαγορευτεί. Τέλος, χρησιμοποιούνται και για την παρακολούθηση πυρηνικών σταθμών παραγωγής ενέργειας ή πυρηνικών εγκαταστάσεων για την παραγωγή ισοτόπων για τεχνικές και ιατρικές εφαρμογές.



ΣΧΗΜΑ 2. 11: Η μονάδα AMS-02 by GIHMM

Τα πλεονεκτήματα του on-line συστήματος παρακολούθησης αερολυμάτων με AMS-02 είναι η μέτρηση τόσο άλφα, βήτα και γάμμα ακτινοβολίας με ένα μόνο σύστημα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση 4 ανιχνευτών σε ένα ενιαίο σύστημα, από τους οποίους οι 3 χρησιμοποιούνται για on-line μετρήσεις και ο ένας βρίσκεται σε ξεχωριστή θέση με ειδικό υλικό φίλτρου για την μέτρηση και αξιολόγηση του ιωδίου (σε περίπτωση αυξημένης συγκέντρωσης). Το ραδιενεργό ιώδιο παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην παρακολούθηση των πυρηνικών ατυχημάτων, καθώς η παρουσία του στον αέρα θεωρείται σημαντική ένδειξη πυρηνικού συμβάντος. Τα επιπλέον πλεονεκτήματα που εμφανίζει το σύστημα φίλτρου ταινίας αερολύματος είναι ότι είναι σχετικά εύελο και μπορεί να τοποθετηθεί σε ξεχωριστό ερμάριο ή στον τοίχο ή ακόμα και να εγκατασταθεί σε όχημα.

Το σύστημα μέτρησης του αεροζόλ AMS-02, διατίθεται σε δυο τύπους, ο ένας χρησιμοποιεί κινούμενο φίλτρο, είτε σε μορφή ταινίας ή με βηματική μεταβολή φίλτρων τυποποιημένης διάστασης και ο άλλος με σταθερό φίλτρο ορθογωνικής ή κυκλικής μορφής. Επίσης ο AMS-02 φέρει δύο διαδοχικά στατικά φίλτρα, το πρώτο εκ των οποίων χρησιμοποιείται για σωματίδια αερολύματος και το δεύτερο για μόρια ιωδίου. Η παρουσία αφύσικων επιπέδων ραδιενέργειας σε ένα από τα φίλτρα, διαπιστώνεται με ανιχνευτές α , β και γ ακτινοβολίας.

Το σύστημα έχει διαστάσεις 73x92x152 cm, λειτουργεί σε θερμοκρασίες από -30°C έως +40°C και αποτελείται από ανιχνευτές, επεξεργαστές, αντλία και φίλτρα (AMS02 Datasheet). Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται είναι ανιχνευτής σπινθηρισμού NaI διαστάσεων 2”x2” και φωτοπολλαπλασιαστή διαμέτρου 2” και ενεργειακό εύρος 0,04 - 2 MeV ενώ έχει γίνει βαθμονόμησή του στην κορυφή των 662keV του ¹³⁷Cs. Οι ανιχνευτές αυτοί είναι διαχωρισμένοι από το υπόλοιπο σύστημα δειγματοληψίας, μέσω του πλαστικού καλύμματος. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των ανιχνευτών και της επιφάνειας των φίλτρων είναι 15 mm. Επιπλέον, στα συστήματα αυτά υπάρχει και ανιχνευτής PIPS εμβαδού ενεργού επιφανείας 1700 mm², με διακριτική ικανότητα 55 keV για σωματίδια άλφα και 30 keV για σωματίδια βήτα.

Η αντλία που χρησιμοποιείται στο AMS-02 έχει ονομαστική παροχή ~6 m³/h. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται είναι τύπου glass-fiber διαμέτρου 60 mm (Schleicher & Schull 10), με ελάχιστη ικανότητα φιλτραρίσματος 99%, για σωματίδια διαμέτρου άνω των 0,5μm (DIN 24 184). Τα φίλτρα τοποθετούνται μεταξύ του ανιχνευτή NaI και του ανιχνευτή PIPS, ενώ αφαιρούνται και αποθηκεύονται αυτόματα με την βοήθεια ελεγχόμενου καθοδηγητή (manipulator) ενώ υπάρχει βάση δεδομένων στην οποία καταγράφονται αυτόματα όλες οι πληροφορίες οι σχετικές με τα φίλτρα.



ΣΧΗΜΑ 2. 12: Τα φίλτρα της AMS-02 by GIHMM

Το όλο μετρητικό σύστημα περιβάλλεται από θωράκιση μόλυβδου. Οι θέσεις εργασίας των στοιχείων (slots) διαχωρίζονται με φύλλα μόλυβδου πάχους 20 mm ώστε να εξασθενήσει το υπόβαθρο της εξωτερικής ολικής ακτινοβολίας. Ο αέρας απορροφάται από την αντλία με ονομαστικό ρυθμό ~6 m³/h. Η εκροή του αέρα μετράται εμμέσως, μέσω των αισθητήρων πίεσης και θερμοκρασίας και μετατρέπεται σε «κανονικά κυβικά μέτρα» (θερμοκρασία 20° C, πίεση 1 bar). Τελικά, ως αποτέλεσμα των μετρήσεων καταγράφεται η ειδική ενεργότητα (Bq/m³). Επισημαίνεται ότι πριν την έναρξη της λειτουργίας της αντλίας, πρέπει να γίνεται

μέτρηση της ακτινοβολίας του υποβάθρου με κενά φίλτρα. Οι μετρήσεις αυτές έχουν διάρκεια 15 λεπτών για κάθε ανιχνευτή και επαναλαμβάνονται κάθε φορά που αλλάζεται ένα φίλτρο.

Το σύστημα έχει δυο ρυθμίσεις για κανονική (Normal operation) και μη κανονική (Off-normal operation) λειτουργία του σταθμού. Σε κανονική λειτουργία, αφού γίνουν οι μετρήσεις υποβάθρου, ξεκινά η λειτουργία της αντλίας αέρα και καταγράφεται κάθε πέντε λεπτά το πλήθος των γεγονότων που παράγονται στους ανιχνευτές, ενώ γίνεται και ταυτόχρονη καταγραφή του όγκου αέρα. Το φάσμα που λαμβάνεται από τον ανιχνευτή NaI(Tl) δεν ανανεώνεται σε κάθε πεντάλεπτη περίοδο μέτρησης, προκειμένου να βελτιωθεί το όριο ανίχνευσης, γεγονός που έχει νόημα μόνο για τεχνητά ραδιοϊσότοπα με μεγάλους χρόνους ημιζωής. Για την μελέτη των φυσικών ραδιοϊσοτόπων χρησιμοποιείται ο συνδυασμός των μετρήσεων των ανιχνευτών PIPS και NaI(Tl) που δίνουν μία εκτίμηση της τρέχουσας συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του (σε Bq/m³). Το φίλτρο του αερολύματος αντικαθίσταται μετά από 12-24 ώρες κανονικής λειτουργίας του σταθμού. Ο νέος κύκλος εργασίας του σταθμού ξεκινά με την αντικατάσταση του φίλτρου.

Κατά τη μη κανονική λειτουργία, δηλαδή μετά από ένα προειδοποιητικό μήνυμα ή μήνυμα συναγερμού οι μετρήσεις που γίνονται έχουν διάρκεια λίγα λεπτά. Σε αυτήν την περίπτωση δεν γίνονται μετρήσεις υποβάθρου και τα φίλτρα του αερολύματος και του Ιωδίου συλλέγονται κάθε ώρα, ενώ ο όγκος του αέρα μετράται πιο συστηματικά.

Το σύστημα AMS-02T έχει αντίστοιχες λειτουργίες με αυτές του AMS-02, δηλαδή διαθέτει σύστημα μέτρησης ενός και δύο ανιχνευτών: Όταν χρησιμοποιείται σύστημα ενός ανιχνευτή, χρησιμοποιείται πάντα ένας ανιχνευτής PIPS για τη μέτρηση άλφα και βήτα με φίλτρο υαλοβάμβακα. Σε σύστημα δύο ανιχνευτών, εγκαθίσταται ένας πρόσθετος ανιχνευτής σπινθηρισμού NaI(Tl), ή ένας ανιχνευτής σπινθηρισμού LaBr₃(Ce), για μετρήσεις ακτινοβολίας-γ και του ιωδίου στο αερόλυμα. Η διαφορά που έχει από το σύστημα AMS-02 είναι ότι η συσκευή διαθέτει δύο ταινίες φίλτρων. Η μια ταινία βρίσκεται πάνω από τον ανιχνευτή και είναι κατασκευασμένη από υαλοβάμβακα πλάτους 60 mm για τη συλλογή του αερολύματος, ενώ η άλλη ταινία βρίσκεται κάτω από τον ανιχνευτή και είναι κατασκευασμένη από φίλτρο πλάτους 60 mm, με ενσωματωμένο ενεργό άνθρακα, για την κατακράτηση του ιωδίου. Ο βηματικός κινητήρας της ταινίας φίλτρου μετακινεί το φίλτρο κάθε 1-3 ημέρες σε συνθήκες

κανονικής λειτουργία μέτρησης. Σε περίπτωση μη-κανονικής λειτουργίας γίνεται ένα βήμα κάθε ώρα.



ΣΧΗΜΑ 2. 13: Η ταινία φίλτρου της AMS-02T by GIHMM

2.6.4.2 Τύποι συστημάτων ASU-Online

Ο κύριος σκοπός του δειγματολήπτη ASU Aerosol High Volume Sampler είναι η μέτρηση του αέρα και η έγκαιρη προειδοποίηση σε περίπτωση που η ενεργότητα υπερβαίνει τα προκαθορισμένα επίπεδα. Αυτό επιτυγχάνεται φιλτράροντας το αερόλυμα μέσα από φίλτρα, ενώ η μέτρηση γίνεται ταυτόχρονα. Βασικές εφαρμογές της μονάδας αυτής είναι σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης, παρακολούθησης πυρηνικών εγκαταστάσεων και σε συστήματα παρακολούθησης πιθανών πυρηνικών δοκιμών. Άλλες χρήσεις του συστήματος αυτού αφορούν την επιστημονική μελέτη της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα.

Η μονάδα ASU περιέχει 2 διαδοχικά στατικά φίλτρα, ένα για την συσσώρευση και μελέτη των σωματιδίων αερολυμάτων και ένα για το μοριακό ιώδιο. Τα φίλτρα αερολύματος συλλέγουν σωματίδια από μεγάλη ποσότητα αέρα σε σχετικά μικρή επιφάνεια, με αποτέλεσμα η ραδιενέργεια που έχει συλλεχθεί στα φίλτρα να μπορεί να μετρηθεί με καλή απόδοση και να είναι έτσι δυνατή η ανίχνευση ακόμη και χαμηλών επιπέδων ραδιενέργειας. Η μέτρηση των ραδιενεργών αερολυμάτων γίνεται μόνο με ανάλυση της ακτινοβολίας-γ. Η μονάδα πρέπει να εγκαθίσταται σε θερμικά μονωμένο κλωβό, προστατευμένο από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία.



1. Data logger
2. Control Elements (Key lock, Reset Button)
3. Router
4. Filter Holder
5. Gamma Probe
6. Frequency Controller
7. Flowmeter
8. Pump

ΣΧΗΜΑ 2. 14: Η ASU, GIHMM (1.Οθόνη δεδομένων, 2. Στοιχεία ελέγχου, 3. Router, 4. Σύστημα συγκράτησης φίλτρου, 5. Ανιχνευτής, 6. Ελεγκτής συχνότητας, 7. Ροόμετρο, 8. Αντλία)

Τέλος η μονάδα έχει σταθερή παροχή ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία ή τη χρήση του φίλτρου. Σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας αυτής υπάρχει η δυνατότητα δυο διαφορετικών αντλιών $100 \text{ m}^3/\text{h} \pm 2\%$ και $150 \text{ m}^3/\text{h} \pm 2\%$ καθώς και τη δυνατότητα χρήσης ανιχνευτή διαστάσεων 2”x2” ή 3”x3”.

2.7 Ανίχνευση ραδιενεργών ισοτόπων και ακτινοβολίας γ

Όπως προαναφέρθηκε, κάθε μία από τις παραπάνω διατάξεις διαθέτει – εκτός των άλλων – και έναν ανιχνευτή ακτινοβολίας- γ . Η λειτουργία των ανιχνευτών πυρηνικών ακτινοβολιών βασίζεται στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με το υλικό του ανιχνευτή, κατά την οποία αποτίθεται μέρος ή όλη η ενέργεια της ακτινοβολίας σε

αυτό. Βέβαια για τη μέτρηση, πέραν του ανιχνευτή απαιτείται η συγκρότηση μίας ολόκληρης διάταξης η οποία αποτελείται από μία σειρά ηλεκτρικών μονάδων για την επεξεργασία του σήματος. Κάθε συνιστώσα της διάταξης αυτής επηρεάζει την διακριτική ικανότητα και την απόδοση του όλου ανιχνευτικού συστήματος.

2.7.1 Διακριτική ικανότητα του ανιχνευτικού συστήματος

Έστω μία μονοενεργειακή πηγή ακτινοβολίας-γ. Στο φάσμα της πηγής η αντίστοιχη κορυφή εμφανίζεται διευρυμένη, έχοντας μορφή κατανομής Gauss (συμμετρική στατιστική διακύμανση γύρω από μία κεντρική τιμή ενέργειας). Οι στατιστικές διακυμάνσεις στο σήμα της ανίχνευσης που προκαλούν αυτή τη μορφή των κορυφών οφείλονται κυρίως στον τύπο και τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή.

Η ακτινοβολία μίας πολυενεργειακής πηγής καταγράφεται από έναν ανιχνευτή ως ένα φάσμα που περιέχει πολλές φωτοκορυφές. Εάν το εύρος κάθε φωτοκορυφής είναι μεγάλο, δύο γειτονικές φωτοκορυφές θα είναι δύσκολο να διακριθούν, καθώς θα δημιουργούν μία διπλή κορυφή ή ακόμα θα εμφανίζονται και ως μία κορυφή. Αυτό δημιουργεί προβλήματα στην ταυτοποίηση των ραδιενεργών ισοτόπων της πηγής και στον προσδιορισμό της ενεργότητας τους.

Η διακριτική ικανότητα ενός ανιχνευτικού συστήματος είναι η ικανότητα του συστήματος να διακρίνει δύο φωτόνια τα οποία έχουν παραπλήσιες ενέργειες. Αυτό συμβαίνει όταν στο παραγόμενο φάσμα διακρίνονται οι δύο φωτοκορυφές που παράγονται από τα διαφορετικής ενέργειας φωτόνια. Η διακριτική ικανότητα εκφράζεται συνήθως από το εύρος της φωτοκορυφής στο μισό του καθαρού ύψους της (Full Width at Half Maximum FWHM). Εναλλακτικά εκφράζεται ως ποσοστό της ενέργεια των φωτονίων (σχετική διακριτική ικανότητα). Η μαθηματική έκφραση της σχετικής διακριτικής ικανότητας περιγράφεται από την σχέση:

$$R = w_{1/2}/E_0 \quad (2.37)$$

Όπου $w_{1/2}$ εύρος ημίσεως ύψους (FWHM) σε μονάδες ενέργειας και E_0 η ενέργεια που αντιστοιχεί στο κεντροειδές της φωτοκορυφής.

2.7.2 Απόδοση συστήματος

Η απόδοση ανίχνευσης ενός συστήματος, εκφράζει το ποσοστό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας που καταγράφεται σε αυτόν. Εξαρτάται από την ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου, τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή και της πηγής, τη στερεά γωνία μεταξύ ανιχνευτή και δευτερευόντως από τα ηλεκτρονικά της διάταξης που επεξεργάζονται το αρχικό σήμα. Για τη περιγραφή της ανιχνευτικής ικανότητας ενός ανιχνευτή χρησιμοποιείται η έννοια της απόδοσης, η οποία εμφανίζεται με πολλές μορφές και ορισμούς, δύο από τις οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

A) Ως απόδοση φωτοκορυφής ενός ανιχνευτικού συστήματος για μία ισοτροπική πηγή ορισμένης γεωμετρίας ορίζεται ο λόγος:

$$\epsilon_{\text{απόλυτη}} = \frac{N_{\text{κορυφής}}}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}} \quad (2.38)$$

Όπου $N_{\text{κορυφής}}$ είναι το πλήθος των φωτονίων που καταγράφει ο ανιχνευτής σε μία κορυφή σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και $N_{\text{εκπεμπόμενα}}$ είναι το πλήθος των φωτονίων της αντίστοιχης ενέργειας που εκπέμπει η πηγή στο ίδιο χρονικό διάστημα (G. Knoll, 1999).. Το πλήθος $N_{\text{εκπεμπόμενα}}$ των φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή είναι ίσο με το γινόμενο της ραδιενέργειας της πηγής, του ποσοστού εκπομπής των φωτονίων και του χρόνου.

B) Ως εσωτερική απόδοση ενός ανιχνευτικού συστήματος για ισοτροπική πηγή ορισμένης γεωμετρίας ορίζεται ο λόγος:

$$\epsilon_{\text{εσωτερική}} = \frac{N_{\text{κορυφής}}}{N_{\text{εισερχόμενα}}} \quad (2.39)$$

Όπου $N_{\text{κορυφής}}$ είναι το πλήθος των φωτονίων που καταγράφει το ανιχνευτικό σύστημα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και $N_{\text{εισερχόμενα}}$ είναι το πλήθος των φωτονίων της υπόψη ενέργειας τα οποία εισήλθαν στον ανιχνευτή στο ίδιο διάστημα. Η εσωτερική απόδοση αντιστοιχεί στην ικανότητα του ανιχνευτή να καταγράψει στο φάσμα ως γεγονότα τα φωτόνια τα οποία εισέρχονται σε αυτόν (G. Knoll, 1999).

Οι δύο παραπάνω ποσότητες, για ισοτροπική πηγή, συνδέονται μέσω της σχέσης :

$$\epsilon_{\text{εσωτερική}} = \epsilon_{\text{απόλυτη}} * \frac{4\pi}{\Omega} \quad (2.40)$$

Κεφάλαιο 3:

Η ανιχνευτική διάταξη

3.1 Εισαγωγή

Σημαντική παράμετρο στην επόπτευση της ραδιενέργειας του περιβάλλοντος αποτελεί η παρακολούθηση της ραδιενέργειας στον αέρα, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την περίπτωση του Ραδονίου. Για την ανίχνευση και τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης τόσο φυσικών όσο και τεχνητών ραδιοϊσοτόπων, έχει αναπτυχθεί πληθώρα μεθόδων και τεχνικών, όπως αναφέρονται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 2. Ειδικότερα, για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση ατμοσφαιρικών δειγμάτων, συνήθη περίπτωση αποτελούν οι *in situ* μετρήσεις με χρήση φορητών ανιχνευτών (π.χ. Ιωδιούχου Νατρίου), ενώ ευρύτατα διαδεδομένη είναι επίσης η λήψη δειγμάτων και η επακόλουθη φασματοσκοπική ανάλυσή τους στο εργαστήριο.

Ιδιαίτερα για την περίπτωση του Ραδονίου ^{222}Rn , κατά τη διάσπαση του οποίου εκπέμπονται α -σωματίδια, η ανίχνευση και ο προσδιορισμός της συγκέντρωσής του με γ-φασματοσκοπική ανάλυση επιτυγχάνεται έμμεσα, μέσω των βραχύβιων προϊόντων διάσπασής του, Μολύβδου ^{214}Pb και Βισμούθιου ^{214}Bi , καθώς κατά τη διάσπασή τους εκπέμπονται φωτόνια ενέργειας 295,2 keV και 351,9 keV από το ^{214}Pb , και 609,3 keV, 1120,3 keV και 1764,5 keV από το ^{214}Bi . Ακόμη, υπό την προϋπόθεση ύπαρξης ραδιενεργού ισορροπίας, δύναται να επιτευχθεί – με την προϋπόθεση ραδιενεργού ισορροπίας – και ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του Ραδίου ^{226}Ra , μητρικού πυρήνα του ^{222}Rn , το οποίο εν γένει δεν ανιχνεύεται εύκολα μέσω γ-φασματοσκοπίας, καθώς κατά τη διάσπασή του εκπέμπονται φωτόνια παραπλήσιας ενέργειας με εκείνα του ^{235}U .

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αναβάθμιση της μεθόδου που εφαρμόζεται στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας (ΕΠΤ-ΕΜΠ) για τη μέτρηση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στην ατμόσφαιρα και ειδικότερα του ^{214}Bi , με την συγκρότηση διάταξης η οποία θα συνδυάζει τη μέθοδο της δειγματοληψίας αέρα και της *in-situ* μέτρησης των θυγατρικών του ραδονίου. Για το σκοπό αυτό προτείνεται η χρήση αντλίας αέρα (δειγματολήπτη) σε συνδυασμό με φίλτρο κατάλληλα προσαρμοσμένο στην αναρρόφηση της αντλίας, το οποίο αποτελεί το δείγμα της

μέτρησης, και τοποθέτηση ανιχνευτή Ιωδιούχου Νατρίου (NaI) πλησίον του δείγματος για την ανάλυσή του. Η χρήση της αντλίας, η οποία διοχετεύει αέρα δια μέσου του φίλτρου, αποσκοπεί στη συγκέντρωση των ραδιενεργών ισοτόπων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα πάνω στο φίλτρο, ενισχύοντας κατά αυτόν τον τρόπο τη ραδιενέργεια τους πάνω στο φίλτρο με προσδοκώμενο αποτέλεσμα την ακριβέστερη μέτρηση. Για τη συγκρότηση της εν λόγω διάταξης και τον έλεγχο της λειτουργίας της αξιοποιήθηκε ο ήδη υπάρχων εξοπλισμός του ΕΠΤ-ΕΜΠ, συμπεριλαμβανομένων δύο αντλιών αέρα οι οποίες έχουν τη δυνατότητα προσαρμογής διαφορετικών ειδών φίλτρων.

Μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικές εκδοχές της παραπάνω προτεινόμενης διάταξης, καθεμία εκ των οποίων προέκυψε από τον συνδυασμό ενός ανιχνευτή γ-ακτινοβολίας κι ενός δειγματολήπτη αέρα με προσαρμοσμένο το κατάλληλο φίλτρο. Για τη διεξαγωγή των σχετικών πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο ανιχνευτές NaI, διαστάσεων 2”x2” και 3”x3”, ενώ ακόμη αξιοποιήθηκε και ένας ανιχνευτής BEGe (Broad Energy Germanium) για τον έλεγχο της λειτουργίας της διάταξης. Για τη δειγματοληψία αέρα χρησιμοποιήθηκε μία αντλία αέρα χαμηλής παροχής με φίλτρο κυκλικής διατομής διαμέτρου 4”, καθώς και μία αντλία αέρα υψηλής παροχής με φίλτρο διαστάσεων 8”x10”. Σε κάθε περίπτωση ο ανιχνευτής τοποθετούνταν όσο το δυνατόν εγγύτερα στο φίλτρο αέρα για καλύτερη απόδοση ανίχνευσης. Οι παραπάνω ανιχνευτές διαθέτουν τα απαραίτητα ηλεκτρονικά για την ενίσχυση, επεξεργασία και καταγραφή του σήματος. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται αρχικά οι βασικές συνιστώσες των διατάξεων, καθώς και οι τέσσερις διαφορετικές εκδοχές της συγκρότησης της μετρητικής διάταξης που αναπτύχθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, καθώς και η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα ελέγχου.

3.2 Συνιστώσες της διάταξης

3.2.1 Ανιχνευτές

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται σε μετρήσεις στο πεδίο είναι κυρίως ανιχνευτές NaI και ανιχνευτές Γερμανίου υψηλής καθαρότητας (High Purity Germanium - HPGe). Η προτεινόμενη διάταξη στηρίζεται στη χρήση ανιχνευτή NaI, ενώ στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε και ανιχνευτής BEGe. Τα χαρακτηριστικά τους παρατίθενται στην συνέχεια.

3.2.1.1 Ανιχνευτής NaI

Οι ανιχνευτές σπινθηρισμού είναι από τους πιο συνηθισμένους στην γ-φασματοσκοπία. Σε αυτή τη κατηγορία εμπίπτουν κι οι ανιχνευτές Ιωδιούχου Νατρίου (NaI) που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα. Οι ανιχνευτές NaI κυκλοφορούν σε διάφορα μεγέθη και σχήματα ανάλογα με την προοριζόμενη χρήση, και συνηθέστερα έχουν σχήμα κυλινδρικό. Σημαντικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου ανιχνευτή είναι η υψηλή απόδοσή του, ενώ ακόμη η σχετικά καλύτερη διακριτική του ικανότητα αποτελεί την αιτία της επιλογής του έναντι άλλων ανιχνευτών σπινθηρισμού. Παρόλα αυτά οι ανιχνευτές Ιωδιούχου Νατρίου, όπως κι οι υπόλοιποι ανιχνευτές σπινθηρισμού εν γένει, χαρακτηρίζονται από χαμηλή διακριτική ικανότητα, κάτι που αποτελεί το βασικό τους μειονέκτημα και απαιτείται να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό πειραμάτων. Η χαμηλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα που εκφράζεται από μεγάλο εύρος ημίσειας ύψους (Full Width Half Maximum – FWHM), οδηγεί σε διευρυμένες (πεπλατυσμένες) φωτοκορυφές στο ενεργειακό φάσμα. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί η ευαισθησία των ανιχνευτών NaI στις επικρατούσες συνθήκες, ιδιαίτερα κατά τη λήψη μετρήσεων όπου παρατηρείται έντονη θερμοκρασιακή διακύμανση, καθώς το ποσοστό εκπομπής φωτός από τον κρύσταλλο του ανιχνευτή (light yield) εξαρτάται από τη θερμοκρασία του κρυστάλλου.

Στα πειράματα που διενεργήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο ανιχνευτές NaI, της CANBERRA, διαστάσεων κρυστάλλου 2”x2” και 3”x3” με ενσωματωμένο φωτοπολλαπλασιαστή. Σημαντική διαφορά ανάμεσα στις δύο διαφορετικές διατάξεις που συγκροτήθηκαν για κάθε έναν από τους δύο ανιχνευτές αποτελεί η χρήση σταθεροποιητή φάσματος (stabilizer) με τον ανιχνευτή διαστάσεων 2”x2”, σε αντίθεση με τη διάταξη του ανιχνευτή 3”x3” όπου δεν εφαρμόστηκε σταθεροποίηση φάσματος. Ο λόγος είναι ότι ο ανιχνευτής 2”x2” περιέχει ενσωματωμένη πηγή ²⁴¹Am (Americium doped) η οποία παρέχει σταθερά σήμα λόγω των σωματιδίων-α τα οποία εκπέμπει το ²⁴¹Am το οποίο χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση του φάσματος.

3.2.1.2 Ανιχνευτής BEGe

Οι ανιχνευτές καθαρού Γερμανίου (High Purity Germanium – HPGe) χαρακτηρίζονται από αρκετά υψηλές αποδόσεις, λόγω της σχετικά μεγάλης επιφάνειάς τους. Υπερέχουν σημαντικά των ανιχνευτών σπινθηρισμού ως προς την ενεργειακή

διακριτική ικανότητα, και ως εκ τούτου κρίθηκε σκόπιμη η διενέργεια συμπληρωματικών μετρήσεων με ανιχνευτή HPGe, με σκοπό την καλύτερη καταγραφή του φάσματος της ακτινοβολίας και τον έλεγχο της αξιοπιστίας της πειραματικής διάταξης. Η καλύτερη διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών γερμανίου συνεπάγεται μικρότερο ενεργειακό εύρος ανά κανάλι, προκαλώντας έτσι καλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων.

Στα πλαίσια της ΔΕ και στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με την αντλία μεγάλου όγκου αέρα και ορθογώνιο φίλτρο διαστάσεων 8"x10" χρησιμοποιήθηκε ο φορητός ανιχνευτής γερμανίου ευρείας ενεργειακής περιοχής λειτουργίας BEGe (Broad Energy Germanium) του ΕΠΤ-ΕΜΠ, ενεργειακού εύρους από 3 keV έως 3 MeV. Επιπροσθέτως, ο συγκεκριμένος ανιχνευτής, λόγω του μεγέθους και του σχήματός του, εμφανίζει σχετικά χαμηλά όρια ανίχνευσης και μειωμένο υπόβαθρο, το οποίο συνεπάγεται μειωμένο θόρυβο σήματος (Κ. Αγραφιώτης, Αθήνα 2009). Βάσει των παραπάνω, εύλογα προκύπτει ότι ο παραπάνω ανιχνευτής BEGe είναι κατάλληλος για τον έλεγχο της λειτουργίας της πειραματικής διάταξης του ανιχνευτή NaI. Πέραν του ανιχνευτή, οι υπόλοιπες συνιστώσες της μετρητικής διάταξης είναι το τροφοδοτικό υψηλής τάσης, ο ενισχυτής, ο αναλογοψηφιακός μετατροπέας και ο πολυκαναλικός αναλυτής τα οποία είναι συγκεντρωμένα σε μία μονάδα, η οποία ελέγχεται ως προς τις ρυθμίσεις της (υψηλή τάση, ενίσχυση, πλήθος καναλιών) μέσω του λογισμικού genie, από τον εν σειρά συνδεδεμένο Η/Υ. Το ίδιο λογισμικό είναι επιφορτισμένο για τη συλλογή του φάσματος και την καταρχήν επεξεργασία του.

3.2.2 Η δειγματοληψία αέρα

Για τη συλλογή του δείγματος αέρα¹¹ με σκοπό τη μέτρηση της ραδιενέργειας στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα, στα πλαίσια της ΔΕ χρησιμοποιήθηκαν δύο αντλίες, τα στοιχεία των οποίων δίνονται αναλυτικά παρακάτω. Το δείγμα αερολύματος συλλέγεται σε κάθε περίπτωση πάνω το φίλτρο από ίνες γυαλιού (glass-fiber), τυποποιημένων διαστάσεων, το οποίο ήταν προσαρμοσμένο κατάλληλα στην αναρρόφηση κάθε μίας εκ των δύο αντλιών.

¹¹ Στην πραγματικότητα αυτό που συλλέγεται στο φίλτρο είναι τα αιωρούμενα στον αέρα σωματίδια

Παρόλο που η συνήθης πρακτική ορίζει τα φίλτρα να αποσπώνται από τους δειγματολήπτες ώστε αναλυθούν στη συνέχεια εργαστηριακά, στα πλαίσια των πειραμάτων της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν *in situ* μετρήσεις των φίλτρων αέρα, κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας.

3.2.2.1 Φορητή αντλία υψηλής παροχής

Αναφορικά με τη φορητή αντλία αέρα που χρησιμοποιήθηκε, πρόκειται για το μοντέλο TFIA της STAPLEX (s/n 21688N) με μέση παροχή αέρα 0,7 m³/min. Στην αναρρόφησή της υπάρχει δυνατότητα προσαρμογής κυκλικού φίλτρου αέρα διατομής 4". Η αντλία ήταν βαθμονομημένη και η εξίσωση βαθμονόμησής της είναι η:

$$Q_{\text{real}} = 0,8669 Q_{\text{exp}} + 0,3619 \quad (3.1)$$

Όπου Q_{real} είναι η πραγματική παροχή και Q_{exp} η ένδειξη της παροχής στην αντλία. Έπειτα από επεξεργασία των μετρήσεων που έγιναν στα πλαίσια των πειραμάτων της παρούσας εργασίας, υπολογίστηκε η πραγματική παροχή αέρα κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας $Q_{\text{real}}=0,97 \text{ m}^3/\text{min}$, μέσω της οποίας προσδιορίστηκε και ο συνολικός όγκος αέρα που περνάει μέσα από το φίλτρο σε χρόνο t :

$$V = Q_{\text{real}} * t \quad (3.2)$$

Μία ιδιαιτερότητα της αντλίας είναι ότι συνιστάται από τον κατασκευαστή να μην λειτουργεί για χρόνο περισσότερο από ~1 ώρα καθώς υπερθεμαίνεται.

3.2.2.2 Δειγματολήπτης υψηλού όγκου αέρα

Ο δειγματολήπτης υψηλού όγκου αέρα (παροχής ~80 m³/h), τύπου DH-50810E, κατασκευασμένος από την F&J Specialty Products, είναι εγκατεστημένος στην οροφή του κτιρίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ, σε ύψος ~10 m από την επιφάνεια του εδάφους. Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας καταγράφεται η παροχή του αέρα, η ατμοσφαιρική πίεση και η θερμοκρασία, μέσω των αισθητήρων που διαθέτει, και εμφανίζονται οι καταγεγραμμένες τιμές μετά από κάθε περίοδο λειτουργίας. Στην αναρρόφηση της αντλίας μπορεί να προσαρμοσθεί ορθογώνιο φίλτρο διαστάσεων 8"x10" (Α. Σπανάκου, 2017), τύπου FP10M, επίσης από την F&J Specialty Products, ή κυκλικό φίλτρο διαμέτρου 4".

Η αντλία μπορεί να λειτουργεί επί σειρά ημερών χωρίς πρόβλημα, επιτρέποντας τη συλλογή αερολύματος όγκου πολλών χιλιάδων κυβικών μέτρων.

3.2.3 Οι ηλεκτρονικές συνιστώσες της ανιχνευτικής διάταξης

Πέραν του ανιχνευτή, η ανιχνευτική διάταξη αποτελείται από μία σειρά ηλεκτρονικών μονάδων για την επεξεργασία και καταγραφή του σήματος. Οι μονάδες αυτές προσαρτώνται στην μονάδα υποδοχής NIM-BIN. Αναλυτικά, οι ηλεκτρονικές μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκρότηση της ανιχνευτικής διάταξης – στις διάφορες εκδοχές της – παρατίθενται παρακάτω:

- Τροφοδοτικό υψηλής τάσης (High Voltage Power Supply), μοντέλο 3002 της CANBERRA το οποίο τροφοδοτεί τον ανιχνευτή με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης. Για τα πειράματα που διενεργήθηκαν, η υψηλή τάση τέθηκε στα 800 V.

- Ενισχυτής ύψους παλμών (Amplifier), μοντέλα 1412 και 1413 της CANBERRA, για την ενίσχυση και διαμόρφωση των παλμών του προενισχυτή. Το κέρδος (gain) του ενισχυτή προκύπτει ως το γινόμενο μεταξύ των τιμών των ρυθμίσεων «fine gain» και «course gain».

- Αναλογοψηφιακός μετατροπέας (Analog-to-Digital Converter – ADC) μοντέλο 8701 της CANBERRA, με δυνατότητα ρύθμισης του πλήθους καναλιών. Ο ADC δέχεται στην είσοδό του το ενισχυμένο σήμα, (παλμός τάσης 0–10 V), αντιστοιχεί το αναλογικό σήμα σε μία διακριτή τιμή τάσης και μεταβιβάζει τη παραγόμενη ψηφιακή πληροφορία στον πολυκαναλικό αναλυτή. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα επιλογής του πλήθους των καναλιών του ADC ανάλογα με τη διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή και την ενεργειακή περιοχή ενδιαφέροντος.

- Πολυκαναλικός αναλυτής (Multi-Channel Analyzer – MCA), ο οποίος δέχεται ως είσοδο το ενισχυμένο ψηφιακό σήμα (παλμός τάσης 0-10 V) και, αφού αναλύσει το ύψος του, καταχωρεί ένα γεγονός στο αντίστοιχο κανάλι, δηλαδή αυξάνει το περιεχόμενο της αντίστοιχης θέσης μνήμης κατά μία μονάδα. Το περιεχόμενο όλων των καναλιών του πολυκαναλικού αναλυτή εμφανίζεται σε οθόνη H/Y, όπου και σχηματίζεται το διαφορικό φάσμα. Στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το σύστημα επεξεργασίας ψηφιακού σήματος (Digital Signal Processing – DSP) InSpector 2000, κατασκευής CANBERRA, με ικανότητα ανάλυσης ύψους παλμού (Pulse Height Analysis – PHA).

- Μονοκαναλικός αναλυτής (Single Channel Analyzer – SCA), μοντέλο 2030 της CANBERRA, ο οποίος διαχωρίζει τους παλμούς βάσει του ύψους τους. Ο διαχωρισμός

επιτυγχάνεται μέσω των ρυθμίσεων επιπέδου διαχωρισμού (Lower Level, LL) και ενεργειακού παραθύρου (energy window, ΔE). Από την έξοδο της μονάδας εξέρχονται μόνον οι παλμοί με ύψος εντός του επιθυμητού εύρους (LL,LL+ΔE), ενώ οι υπόλοιποι παλμοί απορρίπτονται και ως εκ τούτου δεν καταμετρώνται. Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η καταγραφή αποκλειστικά των φωτονίων ορισμένου ενεργειακού εύρους.

- Καταμετρητής (counter), ο οποίος δέχεται τα σήματα που εξέρχονται του διαχωριστή και καταγράφει το πλήθος τους. Η μονάδα του καταμετρητή διαθέτει και ψηφιακή οθόνη LED έξι ψηφίων για εμφάνιση του πλήθους των γεγονότων που καταγράφονται. Για τα πειράματα αξιοποιήθηκε ο καταμετρητής (dual counter), μοντέλο 1776 της CANBERRA, δύο καναλιών-θέσεων μνήμης για να καταγράφεται παράλληλα και η χρονική διάρκεια των μετρήσεων, ώστε η μονάδα να λειτουργεί επίσης ως χρονόμετρο.

- Σταθεροποιητής φάσματος (spectrum stabilizer), μοντέλο 2050 της CANBERRA, η λειτουργία του οποίου συμβάλλει σημαντικά στην ακρίβεια και επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Ειδικότερα, σε περιπτώσεις πειραματικών μετρήσεων όπου επικρατεί έντονη διακύμανση της θερμοκρασίας, είναι αναγκαία η χρήση σταθεροποιητή καθώς το ποσοστό εκπομπής φωτός από τον κρύσταλλο του ανιχνευτή NaI (light yield) εξαρτάται από την θερμοκρασία. Για τη χρήση του σταθεροποιητή επιλέγεται μία φωτοκορυφή η οποία αναμένεται να εμφανιστεί στο φάσμα (π.χ. του Αμερικού ^{241}Am στον ανιχνευτή NaI 2"X2") και αντιστοίχως ρυθμίζονται η θέση (peak position), το πλάτος (window width) και το διάστημα μετατόπισης (spacing). Βάσει των ρυθμίσεων αυτών ορίζονται δύο κανάλια v_1 και v_2 , αριστερά και δεξιά της φωτοκορυφής. Ο σταθεροποιητής συγκρίνει το περιεχόμενο των δύο καναλιών v_1 και v_2 και, εάν εντοπιστεί απόκλιση του πλήθους των καταγραφομένων γεγονότων λόγω ολίσθησης της φωτοκορυφής, επιδρά στην ενίσχυση μετακινώντας το φάσμα, ώστε η φωτοκορυφή να επανέλθει στη θέση που έχει οριστεί από τις ρυθμίσεις (F. V. Finkel, 2019).

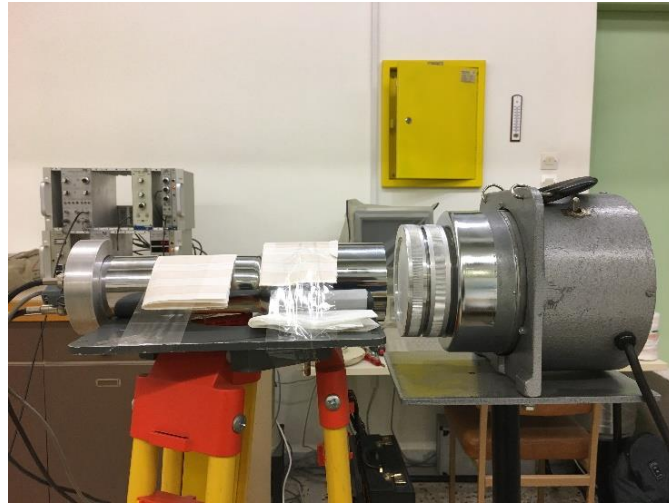
- Ηλεκτρονικός υπολογιστής για την απεικόνιση και επεξεργασία του φάσματος, με χρήση του λογισμικού GENIE 2000 (R. G. Ordua, 2010).

3.3 Περιγραφή των διατάξεων

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι τέσσερις διαφορετικές εκδοχές πειραματικής διάταξης που συγκροτήθηκαν και δοκιμάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Κάθε εκδοχή της διάταξης συγκροτήθηκε βάσει των εκάστοτε προσφερόμενων μέσων για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, με κριτήριο την πρακτικότητά της αλλά και την εγγύτητα με τα εγκατεστημένα συστήματα μέτρησης του ραδονίου της ατμόσφαιρας. Βεβαίως, πριν από τη δοκιμή της διάταξης σε πειραματικές συνθήκες απαιτείται η επαλήθευση της δυνατότητας πραγματοποίησης της προτεινόμενης μεθόδου κι ο έλεγχος της λειτουργικότητας του όλου σχεδιασμού. Για αυτό και αρχικά αποφασίστηκε η συγκρότηση και η λειτουργία μίας απλής προδρόμου διάταξης αντλίας-φίλτρου και ανιχνευτή σε εσωτερικό εργαστηριακό χώρο. Κύριο πλεονέκτημα της παραπάνω επιλογής αποτελεί η δυνατότητα λήψης μετρήσεων σε περιβάλλον προστατευμένο από καιρικές συνθήκες, το οποίο χαρακτηρίζεται από μειωμένο θόρυβο και κύμανση της θερμοκρασίας, ενώ συγχρόνως λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης της ραδιενέργειας στους εσωτερικούς χώρους επιτρέπεται η καλύτερη διερεύνηση του φαινομένου. Η συγκρότηση της μετρητικής αυτής διάταξης έγινε στο εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας, κάτι που επιπλέον επέτρεψε και τη συλλογή του φάσματος που λαμβάνει ο ανιχνευτής κατά τη διάρκεια της μέτρησης, με χρήση ηλεκτρονικών συνιστωσών της διάταξης του ανιχνευτή Ge και συγκεκριμένα του αναλογοψηφιακού μετατροπέα.

3.3.1 Διάταξη με ανιχνευτή NaI 3"x3" και αντλία STAPLEX

Η δοκιμαστική διάταξη, η οποία συγκροτήθηκε με σκοπό την καταγραφή του σήματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το φίλτρο βασίστηκε στη λογική των AMS συστημάτων (βλ. 2.6.4). Αποτελούνταν από έναν ανιχνευτή NaI, διαστάσεων 3"x3", και έναν δειγματολήπτη, δηλαδή μία φορητή αντλία αέρα STAPLEX, στην αναρρόφηση της οποίας βρισκόταν κατάλληλα προσαρμοσμένο τυποποιημένο φίλτρο αέρα κυκλικής διατομής 4" (Εικόνες 3.1, 3.2).



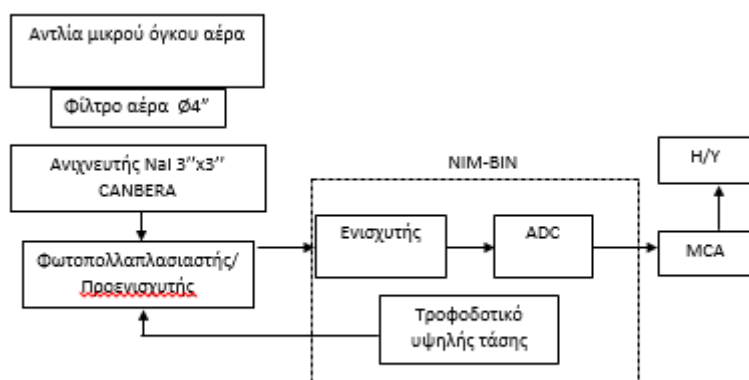
ΕΙΚΟΝΑ 3. 1: Πλάγια όψη της διάταξης



ΕΙΚΟΝΑ 3. 2: Πρόσωση της διάταξης και απεικόνιση της εξόδου του φωτοπολλαπλασιαστή

Η αντλία αέρα τοποθετήθηκε με την βοήθεια ρυθμιζόμενου τρίποδου σε κατάλληλο ύψος. Ο ανιχνευτής NaI τοποθετήθηκε οριζόντια, στο ίδιο ύψος με την αντλία, ακριβώς μπροστά από το φίλτρο και σε μικρή απόσταση (~1 cm) από αυτό, για καλύτερη απόδοση αλλά και αποφυγή τυχόν στραγγαλισμού της ροής. Η επεξεργασία, ψηφιοποίηση κι ανάλυση του σήματος του ανιχνευτή πραγματοποιούνταν από τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά στοιχεία της διάταξης, ήτοι ενισχυτή, αναλογοψηφιακό μετατροπέα (ADC) και πολυκαναλικό αναλυτή (MCA). Η απεικόνιση του ενεργειακού φάσματος πραγματοποιούνταν στο τερματικό H/Y, με χρήση του λογισμικού GENIE. Η συνδεσμολογία της διάταξης παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 3.3. Τα

αποτελέσματα των σχετικών μετρήσεων καταγράφονται και σχολιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.



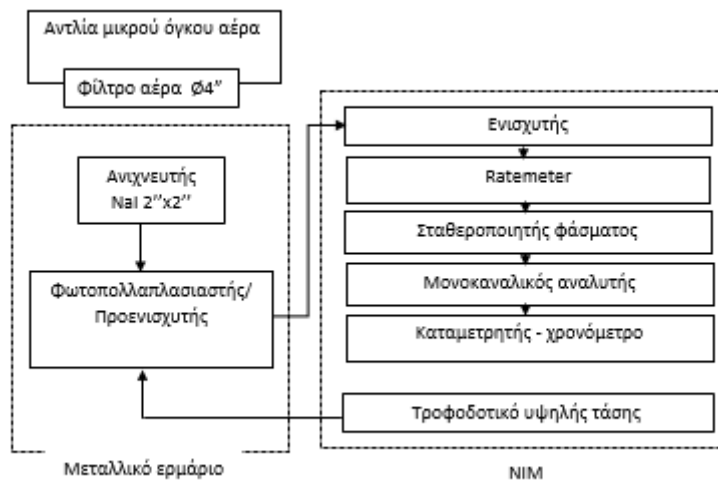
ΕΙΚΟΝΑ 3. 3: Σχηματική αναπαράσταση δοκιμαστικής διάταξης

3.3.2 Διάταξη NaI 2"x2" και αντλίας μικρής παροχής αέρα

Έπειτα από τις δοκιμές λειτουργικότητας της μεθόδου μέσω της προδρόμου διάταξης, συγκροτήθηκε αντίστοιχη μετρητική διάταξη για εφαρμογή σε εξωτερικό χώρο (οροφή κτιρίου ΕΠΤ-ΕΜΠ). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής του συστήματος επιτήρησης της ραδιενέργειας περιβάλλοντος που είναι εγκατεστημένη σε ειδικό κλωβό στην οροφή του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Ειδικότερα, το σύστημα επιτήρησης αποτελείται από ανιχνευτή NaI 2"x2", τοποθετημένο εντός μεταλλικού κλωβού για προστασία από τις καιρικές συνθήκες (βροχή, αέρα). Το σύστημα ολοκληρώνουν οι ηλεκτρονικές μονάδες για την τροφοδοσία ανιχνευτή-φωτοπολλαπλασιαστή με ρεύμα υψηλής τάσης (HV power supply), την ενίσχυση του σήματος (amplifier), την εποπτεία του ρυθμού σημάτων του ανιχνευτή (ratemeter), τη σταθεροποίηση του φάσματος (stabilizer), τον διαχωρισμό των παλμών (SCA) και τη καταμέτρησή τους (dual counter). Η πειραματική διάταξη που συγκροτήθηκε συμπληρώθηκε με δειγματολήπτη μικρής παροχής STAPLEX και τυποποιημένο φίλτρο αέρα Ø4" (Εικόνα 3.4). Το φίλτρο αέρα, το οποίο ήταν προσαρμοσμένο στην αναρρόφηση της αντλίας, τοποθετήθηκε όσο το δυνατόν εγγύτερα στον ανιχνευτή (~1 cm).



ΕΙΚΟΝΑ 3. 4: Διάταξη αντλίας μικρής παροχής και ανιχνευτή NaI 2"x2"



ΕΙΚΟΝΑ 3. 5: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης NaI 2"x2" και δειγματολήπτη μικρής παροχής.

Σημαντικό μειονέκτημα της πειραματικής αυτής διάταξης αποτελεί η εγγύτητα με τον εξωτερικό τοίχο του κτηρίου όπου βρισκόταν τοποθετημένο το μεταλλικό ερμάριο του ανιχνευτή, καθώς η φυσική ραδιενέργεια των οικοδομικών υλικών αλλά και οι σκεδάσεις στο υλικό του τοίχου συμβάλλουν στην αύξηση του υποστρώματος της ανιχνευτικής διάταξης.

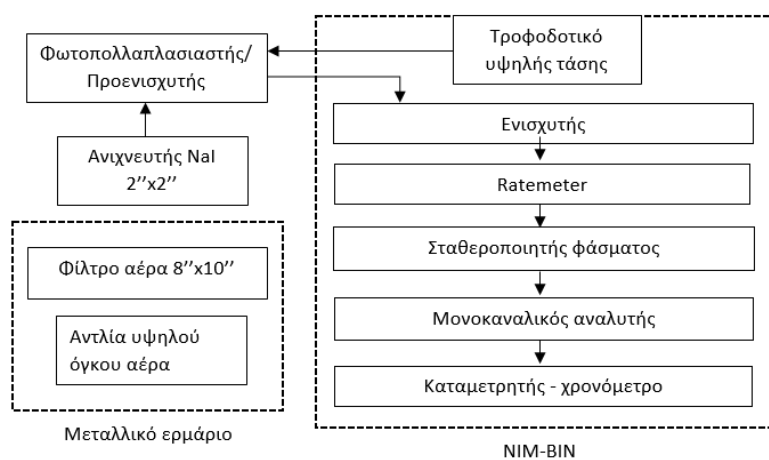
3.3.3 Διάταξη ανιχνευτή NaI 2"x2" και δειγματολήπτη F&J υψηλού όγκου αέρα

Η διάταξη που συγκροτήθηκε περιλάμβανε τον ανιχνευτή NaI 2"x2" με τα ηλεκτρονικά του όπως περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο και τον δειγματολήπτη υψηλού όγκου F&J και τυποποιημένο φίλτρο αέρα ορθογωνικής διατομής 8"x10", το οποίο βρισκόταν προσαρτημένο στην αναρρόφηση της αντλίας (Εικόνες 3.6α, 3.6β). Ο ανιχνευτής NaI τοποθετήθηκε οριζόντια πάνω από το φίλτρο (~1cm) και παράλληλα με αυτό. Η συγκρότηση της διάταξης παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 3.7.



ΕΙΚΟΝΑ 3. 6: (α) Πλάγια όψη διάταξης

(β) Πρόσωση διάταξης



ΕΙΚΟΝΑ 3. 7: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης NaI 2"x2" και μεγάλης αντλίας

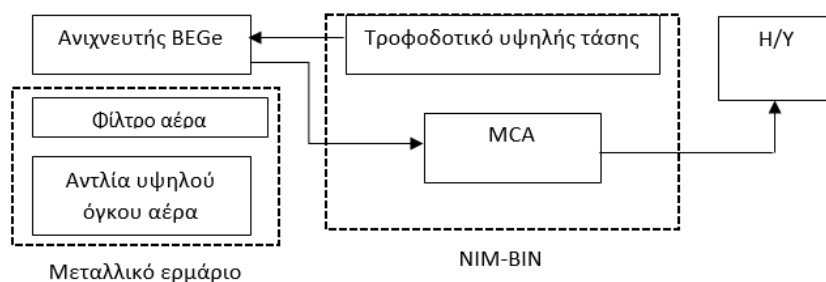
3.3.4 Διάταξη με ανιχνευτή BEGe και δειγματολήπτη F&J υψηλού όγκου αέρα

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των μετρητικών διατάξεων ανιχνευτών NaI που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιήθηκε και ανιχνευτής HPGe, λόγω της υπεροχής των ανιχνευτών Γερμανίου έναντι των ανιχνευτών NaI. Συγκεκριμένα, η διάταξη αποτελούνταν από τον ανιχνευτή BEGe (Broad Energy Germanium) με τα ηλεκτρονικά του, τον δειγματολήπτη μεγάλου όγκου αέρα και τυποποιημένο φίλτρο διαστάσεων 8"x10" προσαρτημένο στην αναρρόφηση της αντλίας (Εικόνα 3.8). Ο ανιχνευτή BEGe τοποθετήθηκε οριζόντια, κατά προσέγγιση περί το μέσο του φίλτρου, εξ' αιτίας περιορισμών διαστάσεων και σχήματος.



ΕΙΚΟΝΑ 3. 8: Πλάγια όψη της διάταξη BEGe και δειγματολήπτη μεγάλου όγκου αέρα.

Η συγκρότηση της διάταξης παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 3.9.



ΕΙΚΟΝΑ 3. 9: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης BEGe και δειγματολήπτη υψηλού όγκου αέρα

3.3.5 Διάταξη με ανιχνευτή NaI 3"x3" και δειγματολήπτη F&J υψηλού όγκου αέρα

Η τελική διάταξη που συγκροτήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη των θυγατρικών του ραδονίου στην ατμόσφαιρα βασίστηκε στα πρότυπα των AMS συστημάτων. Συγκεκριμένα, η διάταξη αποτελούνταν από ανιχνευτή NaI, διαστάσεων 3"x3", τον δειγματολήπτη υψηλού όγκου F&J και τυποποιημένο φίλτρο αέρα ορθογωνικής διατομής 8"x10" (Εικόνες 3.10, 3.11). Ο ανιχνευτής NaI τοποθετήθηκε οριζόντια, ακριβώς πάνω από το φίλτρο και σε μικρή απόσταση από αυτό (~1cm).



ΕΙΚΟΝΑ 3. 10: Πλάγια όψη διάταξης



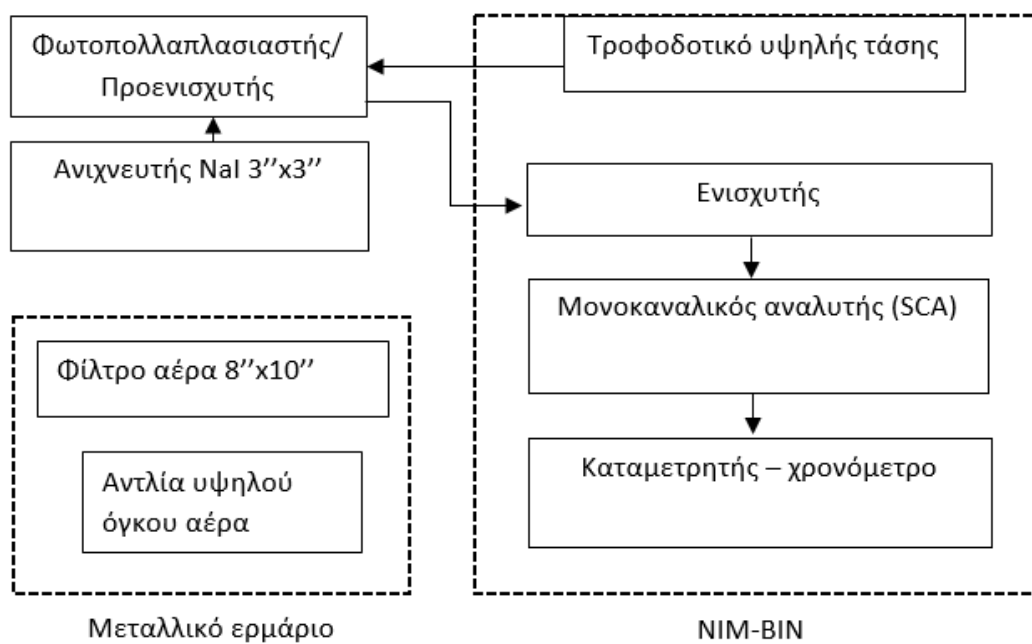
ΕΙΚΟΝΑ 3. 11: Κάτοψη διάταξης

Τη διάταξη υποστηρίζουν οι ηλεκτρονικές μονάδες για την τροφοδοσία του ανιχνευτή (H.V. power supply), την ενίσχυση του σήματος (amplifier), τον διαχωρισμό των παλμών (SCA) και τον καταμετρητή (dual counter) των παλμών που περνούν το διαχωρισμό (Εικόνα 3.12).



ΕΙΚΟΝΑ 3. 12: Οι ηλεκτρονικές μονάδες της διάταξης

Η σχηματική απεικόνιση της διάταξης και των ηλεκτρονικών μονάδων που την συνοδεύουν φαίνεται στην Εικόνα 3.13.



ΕΙΚΟΝΑ 3. 13: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης NaI 3''x3'' και δειγματολήπτη υψηλού όγκου αέρα

Κεφάλαιο 4

Μεθοδολογία μετρήσεων

Στο παρόν Κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα πειράματα που διενεργήθηκαν για την αξιολόγηση των μετρητικών διατάξεων οι οποίες διαδοχικά συγκροτήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για τη μέτρηση των θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα. Συγκεκριμένα, παρατίθενται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για κάθε μια από τις διαφορετικές εκδοχές της διάταξης, όπως περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3, καθώς και οι λόγοι που οδήγησαν στις διαδοχικές τροποποιήσεις κάθε εκδοχής της μετρητικής διάταξης.

4.1 Πρώτη σειρά μετρήσεων με τη διάταξη NaI 3"x3" και την αντλία STAPLEX

Η πρόδρομη διάταξη, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της λειτουργικότητας του πειραματικού σχεδιασμού, συγκροτούνταν από τον ανιχνευτή NaI και την αντλία STAPLEX TFIA. Τα ηλεκτρονικά της διάταξης αυτής και συγκεκριμένα η έξοδος του ενισχυτή συνδέθηκε με μονάδα ADC και αναλογοψηφιακό μετατροπέα, κάτι που επέτρεψε τη συλλογή του φάσματος της ακτινοβολίας από τα θυγατρικά του ραδονίου που συλλέγονται πάνω στο φίλτρο. Πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε η ενεργειακή βαθμονόμηση και η βαθμονόμηση διακριτικής ικανότητας της διάταξης. Τέλος, πρέπει να τονισθεί ότι τα πρώτα αυτά πειράματα διεξήχθησαν σε εσωτερικό χώρο (εργαστήριο γ-φασματοσκοπίας) και αφορούσαν στον ποιοτικό προσδιορισμό των ραδιενεργών ισοτόπων ^{214}Pb και ^{214}Bi , καθώς και για την παρακολούθηση της διακύμανσης των συγκεντρώσεών τους.

4.1.1 Ενεργειακή βαθμονόμηση

Για κάθε διάταξη γ-φασματοσκοπίας, η οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την ταυτοποίηση δείγματος άγνωστης σύστασης, απαιτείται η πρότερη βαθμονόμηση της ενεργειακής κλίμακας. Ως ενεργειακή βαθμονόμηση ορίζεται αυτή η διαδικασία βαθμονόμησης που οδηγεί στον προσδιορισμό της συσχέτισης μεταξύ της ενέργειας φωτονίων και του κεντροειδούς (centroid) της φωτοκορυφής του φάσματος στην οποία αυτά καταγράφονται.

Η βαθμονόμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση φωτοκορυφών που παράγονται από γνωστή πηγή, οι οποίες καλύπτουν κατά το δυνατόν όλο το ενεργειακό

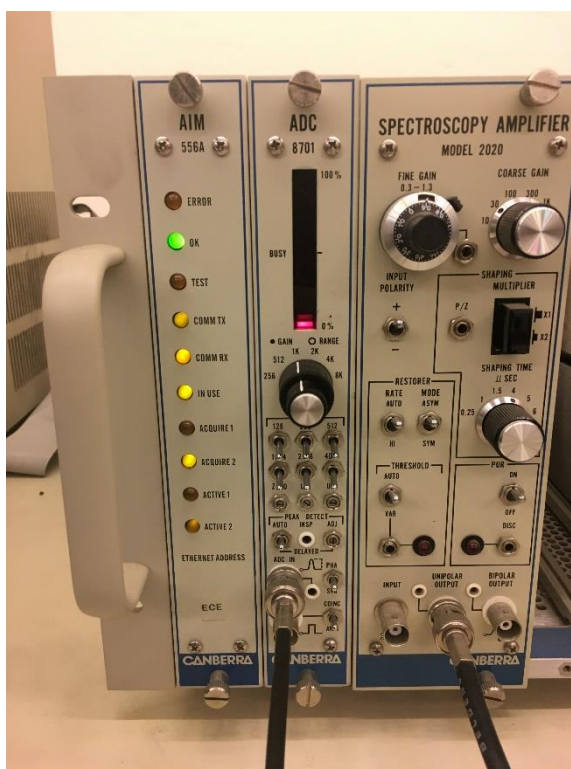
εύρος ενδιαφέροντος. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, ως πηγές βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκαν μία πηγή Κεσίου (^{137}Cs), το οποίο εκπέμπει ένα φωτόνιο ενέργειας 661,62 keV, καθώς και μία πηγή Κοβαλτίου (^{60}Co) που εκπέμπει φωτόνια ενεργειών 1173,2 και 1332,5 keV. Οι συγκεκριμένες πηγές επιλέχθηκαν διότι, στο ενεργειακό φάσμα, οι φωτοκορυφές τους βρίσκονται σε αρκετή απόσταση μεταξύ τους και αποφεύγονται φαινόμενα επικάλυψης φωτοκορυφών, ενώ επιπλέον καλύπτουν με επάρκεια την ενεργειακή περιοχή όπου ανιχνεύονται τα φωτόνια ενδιαφέροντος.

Η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε για τη βαθμονόμηση της διάταξης ανιχνευτή $\text{NaI } 3''\times 3''$ (βλ. 3.3.1), αποτελούνταν από τα εξής βήματα:

- Αρχικά συγκροτήθηκε η διάταξη (Εικόνα 3.3), και ρυθμίστηκαν κατάλληλα οι συνιστώσες της διάταξης. Ο ανιχνευτής τροφοδοτούνταν με ρεύμα υψηλής τάσης 900V. Το σήμα από την έξοδο του φωτοπολλαπλασιαστή μεταφερόταν στον ενισχυτή, ο οποίος ήταν ρυθμισμένος για κέρδος ενίσχυσης 20 (course gain) επί 1.0 (fine gain). Από την έξοδο του ενισχυτή το σήμα οδηγούνταν στον ADC (Μοντέλο 8701 της CANBERRA), ο οποίος ήταν ρυθμισμένος στα 1024 κανάλια και εν συνεχεία στον MCA (AIM, Μοντέλο 556A της CANBERRA) και τέλος τον H/Y (Εικόνες 4.1, 4.2).



ΕΙΚΟΝΑ 4. 1: Η μονάδα NIM και ο ενισχυτής



ΕΙΚΟΝΑ 4. 2: Ο ADC ρυθμισμένος στα 1024 κανάλια και η μονάδα AIM (MCA)

- Οι δυο πηγές βαθμονόμησης τοποθετήθηκαν διαδοχικά σε μικρή απόσταση (~1 cm) από τον ανιχνευτή, όπου και πραγματοποιήθηκε η συλλογή φασμάτων με την βοήθεια του πολυκαναλικού αναλυτή (MCA) και του λογισμικού GENIE του Η/Υ. Η συλλογή κάθε φάσματος διήρκεσε 5 λεπτά. Στη συνέχεια, προσδιορίστηκαν στο φάσμα το κανάλι του κεντροειδούς κάθε φωτοκορυφής. Συνοπτικά τα δεδομένα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Αντιστοίχιση φωτοκορυφών σε κανάλια

Πηγή	Ενέργεια	Κανάλι
^{137}Cs	661,62 keV	308
^{60}Co	1173,2 keV	532
	1332,5 keV	600

- Το κανάλι (θέση) του κεντροειδούς μίας φωτοκορυφής θεωρήθηκε ανάλογο της ενέργειας των φωτονίων τα οποία σχημάτισαν την εν λόγω φωτοκορυφή, καθώς η απόκριση του κρυστάλλου, τόσο σε ακτίνες-X όσο και σε ακτίνες-γ, είναι

γραμμική σε όλο το χρήσιμο εύρος λειτουργίας των ανιχνευτών. Η κλίμακα των καναλιών μπορεί να μετατραπεί σε κλίμακα ενέργειας ($E = f(\text{channel})$) μέσω μιας γραμμικής σχέσης της μορφής: $y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot x$.

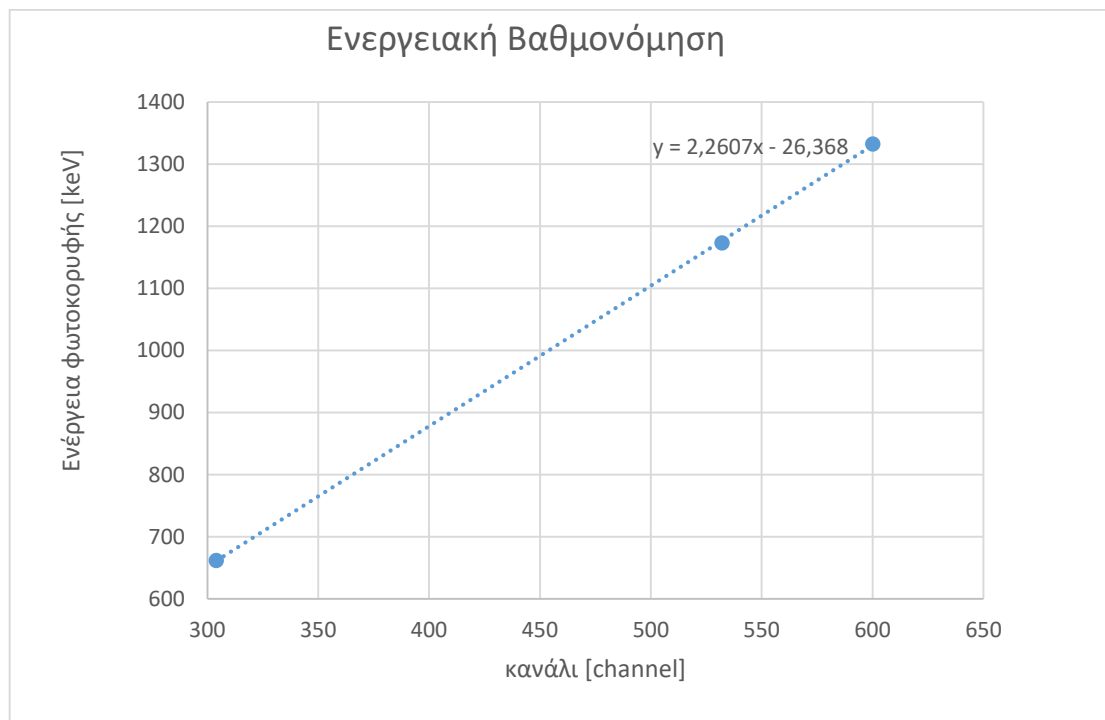
- Με τη βοήθεια υπολογιστικού φύλλου EXCEL και χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του Πίνακα 4.1 για τη συσχέτιση ενέργειας-καναλιού, προέκυψε η συνάρτηση αναδρομής (εξίσωση 4.1) με συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0.999$, η οποία παρίσταται γραφικά στο Διάγραμμα 4.1.

$$E = 2.2607 * ch - 26.368 \quad (4.1)$$

όπου:

ch το κανάλι,

E η ενέργεια σε keV.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 1: Ενεργειακή βαθμονόμηση ανιχνευτικής διάταξης

4.1.2 Βαθμονόμηση διακριτικής ικανότητας (FWHM)

Σε συνέχεια της ενεργειακής βαθμονόμησης, πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση της διακριτικής ικανότητας της διάταξης. Ως διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή ορίζεται η ικανότητα του ανιχνευτή να διακρίνει φωτοκορυφές παραπλήσιας

ενέργειας και εκφράζεται από το εύρος κάθε φωτοκορυφής και ειδικότερα από το εύρος ημίσεως ύψους (FWHM) της φωτοκορυφής, το οποίο εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων που ανιχνεύονται. Μέσω της βαθμονόμησης διακριτικής ικανότητας προσδιορίζεται το πλήθος των καναλιών που αντιστοιχούν στο FWHM κάθε φωτοκορυφής, συναρτήσει του καναλιού του κεντροειδούς.

Από τα φάσματα που συλλέχθηκαν προσδιορίστηκε για κάθε φωτοκορυφή, εκτός του καναλιού του κεντροειδούς, το εύρος ημίσεως ύψους μετρούμενο σε αριθμό καναλιών. Συγκεκριμένα, για τη φωτοκορυφή 661,62 keV από τη πηγή Κεσίου (^{137}Cs) προσδιορίστηκε εύρος ημίσεως ύψους ίσο με 26 κανάλια, ενώ για τις φωτοκορυφές 1173,2 και 1332,5 keV από τη πηγή Κοβαλτίου (^{60}Co) τα εύρη ημίσεως ύψους προσδιορίστηκαν ίσα με 31 και 37 κανάλια, αντίστοιχα. Συνοπτικά, τα παραπάνω δεδομένα των μετρήσεων φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Αντιστοίχιση καναλιού με εύρος ημίσεως ύψους			
Στοιχείο	Φωτοκορυφή	Κανάλι	Εύρος ημίσεως ύψους (FWHM)
Cs^{137}	661,62 KeV	308	26
Co^{60}	1173,2 keV	532	31
	1332,5 keV	600	37

Όπως ισχύει και στην περίπτωση της ενεργειακής βαθμονόμησης, για τη βαθμονόμηση της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή, η απόκριση του κρυστάλλου θεωρήθηκε γραμμική σε όλο το χρήσιμο εύρος λειτουργίας του. Επομένως, ο αριθμός των καναλιών που αντιστοιχεί στο εύρος ημίσεως ύψους μίας φωτοκορυφής είναι ανάλογος της ενέργειας της φωτοκορυφής. Με προσαρμογή των πειραματικών σημείων σε ευθεία γραμμή, προσδιορίστηκε η συσχέτιση $FWHM=f(ch)$, μορφής $FWHM = b_0 * ch + b_1$.

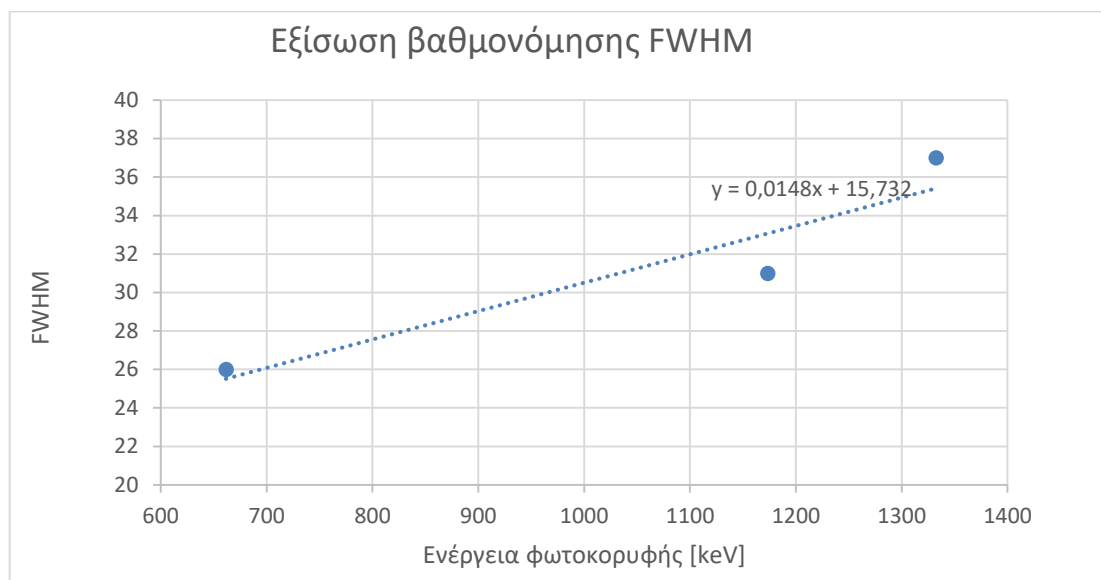
Με την βοήθεια υπολογιστικού φύλλου EXCEL και χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του Πίνακα 4.2 για την αντιστοιχία ενέργειας και εύρος ημίσεως ύψους (FWHM), προέκυψε η συνάρτηση αναδρομής (4.2) με συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0.8845$, η οποία παρίσταται γραφικά στο Διάγραμμα 4.2.

$$FWHM = 0.333 * ch + 15.389 \quad (4.2)$$

όπου:

FWHM το εύρος ημίσειας ύψους σε keV

ch το εύρος ημίσειας ύψους σε κανάλια V.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 2: Συνάρτηση βαθμονόμησης FWHM

4.1.3 Προσδιορισμός ραδιενεργών ισοτόπων ενδιαφέροντος στο φίλτρο αέρα

Μετά την ενεργειακή βαθμονόμηση και τη βαθμονόμηση διακριτικής ικανότητας της ανιχνευτικής διάταξης, η διάταξη ήταν έτοιμη για να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις και αναλύσεις άγνωστων δειγμάτων, και στη συγκεκριμένη περίπτωση για τον προσδιορισμό των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου σε δείγματα αέρα.

4.1.3.1 Θόρυβος μετρήσεων και πηγές θορύβου

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθή ανάλυση και αξιοποίηση των φασμάτων που συλλέχθηκαν είναι ο προσδιορισμός του υποστρώματος της διάταξης. Το υπόστρωμα προκαλείται από σήματα τα οποία δεν αντιστοιχούν στα φωτόνια ενδιαφέροντος και δεν συλλέγονται κάτω από τη φωτοκορυφή, προκαλώντας θόρυβο. Ως υπόστρωμα ορίζεται οποιοδήποτε άλλο σήμα το οποίο ανιχνεύεται από την ανιχνευτική διάταξη, στην συγκεκριμένη περίπτωση από τον ανιχνευτή NaI, και δεν αντιστοιχεί στην πλήρη απορρόφηση της ενέργειας των φωτονίων που εκπέμπονται

από ραδιοϊσότοπα του δείγματος που μελετάται. Η σημασία του προσδιορισμού του υποστρώματος σε κάθε μέτρηση είναι μεγάλη γιατί επηρεάζει το σήμα από την ανάλυση του φίλτρου. Η λήψη φασμάτων μόνο από το υπόστρωμα είναι απαραίτητη σε όλα τα πειράματα, ώστε να μπορεί να αφαιρεθεί από τα συνολικά γεγονότα που καταγράφονται στα κανάλια των φωτοκορυφών.

Για τον περιορισμό του υποστρώματος, ή τουλάχιστον για να μπορέσουν να αξιολογηθούν τα φάσματα, χρειάζεται να αναφερθούν κάποιες τυπικές πηγές που το προκαλούν. Ως θόρυβος θεωρείται τόσο ο ηλεκτρονικός θόρυβος (από τις διάφορες συνιστώσες της διάταξης) όσο και το υπόστρωμα ραδιενέργειας από άλλες πηγές που υπάρχουν στο περιβάλλον, το οποίο δεν μπορεί να αμεληθεί στην περίπτωση μετρήσεων σε εσωτερικούς χώρους. Το σήμα αυτό ανιχνεύεται από το σύστημα αλλά δεν αποτελεί χρήσιμη πληροφορία για τον σκοπό του πειράματος. Συγκεκριμένα, πηγές ραδιενέργειας υποστρώματος αποτελούν η κοσμική ακτινοβολία, η ραδιενέργεια του εδάφους, των οικοδομικών υλικών και του αέρα. Στην περίπτωση μετρήσεων σε εξωτερικούς χώρους, κύρια αιτία ύπαρξης του υποστρώματος αποτελεί η φυσική ραδιενέργεια, από ισότοπα των (φυσικών) ραδιενεργών σειρών Ουρανίου και Θορίου (όπως αναφέρεται αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο) και από ραδιοϊσότοπα στοιχείων όπως το Κάλιο (^{40}K). Επίσης πολλά ραδιενεργά ισότοπα – όπως τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου – βρίσκονται στην ατμόσφαιρα προσκολλημένα στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και είναι ιδιαίτερα σημαντικά διότι παρουσιάζουν έντονη διακύμανση λόγω διαφόρων παραγόντων (μετεωρολογικές συνθήκες κ.ά.).

Σημαντική παράμετρο για τον ακριβή προσδιορισμό του υποστρώματος των μετρήσεων αποτελεί η διάρκεια συλλογής του φάσματος υποστρώματος, συγκριτικά με τη διάρκεια των εκάστοτε πειραματικών μετρήσεων. Παρ' όλο που ιδανικά το υπόστρωμα θα έπρεπε να λαμβάνεται για μεγάλα χρονικά διαστήματα, ταυτόχρονα με τις πειραματικές μετρήσεις, αυτό είναι δύσκολο έως αδύνατο στην πράξη. Ως εκ τούτου, καθιερώθηκε η συλλογή του φάσματος υποστρώματος να γίνεται πριν από κάθε σειρά μετρήσεων και για διάστημα αντίστοιχης διάρκειας με τις πειραματικές μετρήσεις.

4.1.3.2 Μεθοδολογία ανάλυσης

Κατά την δοκιμή της διάταξης σε πραγματικές πειραματικές συνθήκες, πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός των ραδιενεργών ισotόπων σε δείγμα αέρα που

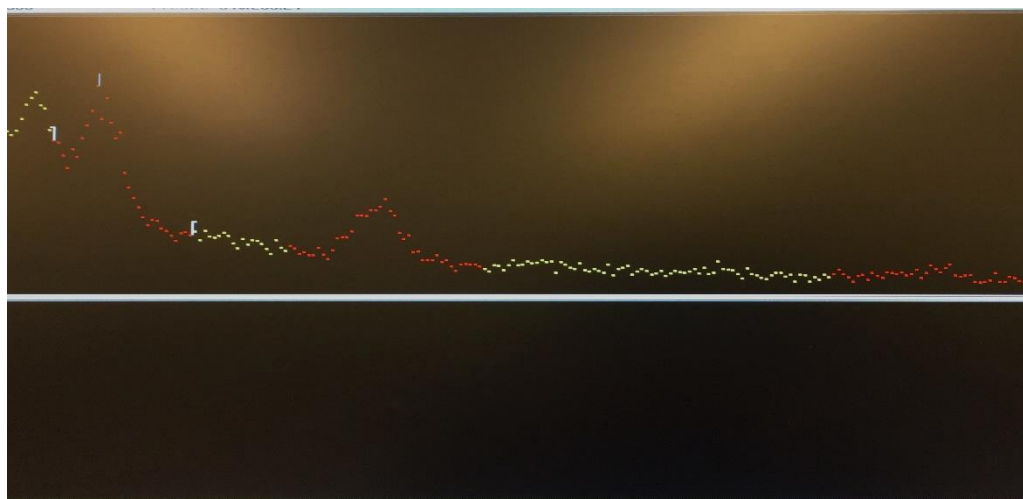
συλλέχθηκε σε φίλτρο Glass fiber διαμέτρου Ø4” που είχε προσαρμοστεί κατάλληλα στην αναρρόφηση της αντλίας TFIA STAPLEX.

Η συλλογή του φάσματος και του δείγματος διήρκησε μια ώρα με την αντλία σε συνεχή λειτουργία, με μέση παροχή $0,6 \text{ m}^3/\text{min}$. Οι φωτοκορυφές που εμφανίστηκαν στο φάσμα θεωρήθηκε ότι σχηματίστηκαν με καλή στατιστική, ώστε να δώσουν αξιόλογες πληροφορίες. Με την βοήθεια του πολυκαναλικού αναλυτή (MCA) και του λογισμικού GENIE, το ληφθέν φάσμα αναλύθηκε ως εξής: Επιλέχθηκαν οι καλοσχηματισμένες φωτοκορυφές του φάσματος, οι οποίες αντιστοιχήθηκαν βάσει της θέσης τους στο φάσμα στις ενέργειες 186,2 keV, 295,2 keV, 351,9 keV, 609,3 keV, 1120,3 keV, 1460,8 keV και 1764,5 keV. Από αυτές, οι φωτοκορυφές των 186,2 keV και 1460,8 keV αντιστοιχούν στο ^{226}Ra και το ^{40}K , αντίστοιχα, δύο μακρόβια ισότοπα φυσικής ραδιενέργειας που υπάρχουν στα οικοδομικά υλικά. Ωστόσο, δεν αναφέρονται στον παρακάτω Πίνακα 4.4, καθώς δεν αποτελούν ισότοπα ενδιαφέροντος για το πείραμα. Επίσης, από το φάσμα προσδιορίστηκαν προσεγγιστικά τα εύρη ημίσειας ύψους κάθε κορυφής, και συγκρίθηκαν με τις τιμές που προβλέπονται από τη συνάρτηση (4.2). Συγκεντρωτικά, τα κεντροειδή, οι ενέργειες των ανιχνευόμενων φωτονίων και τα εύρη ημίσειας ύψους (FWHM) των φωτοκορυφών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα αυτό οι τιμές του FWHM δεν παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στις υψηλές ενέργειες, ενώ αντίθετα για τις χαμηλές ενέργειες φαίνεται ότι η συνάρτηση 4.3 υπερεκτιμά το FWHM.

Πίνακας 4.3: Κανάλι ενέργεια και FWHM των φωτοκορυφών που ανιχνεύθηκαν στο φάσμα

Κανάλι	Ενέργεια (από συνάρτηση βαθμονόμησης 4.1)	FWHM (από φάσμα)	FWHM (από συνάρτηση 4.2)
112	226,8	12	19,1
135	278,8	13	19,9
162	339,9	16	20,8
278	602,2	27	24,6
496	1095,0	30	31,9
611	1354,9	34	35,7
769	1712,1	41	41,0

Το πρόγραμμα GENIE δίνει την δυνατότητα να σημειωθούν οι φωτοκορυφές υπό μελέτη, ώστε να είναι εύκολα αναγνωρίσιμες σε περιπτώσεις πολλών πειραμάτων. Στην Εικόνα 4.3 έχουν επισημανθεί με κόκκινο χρώμα οι περιοχές ενδιαφέροντος (Range of Interest, ROI). Σημειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις θέσεις των φωτοκορυφών ^{214}Pb και ^{214}Bi , διευκολύνεται η διαδικασία της αναγνώρισης των ισοτόπων αυτών στις επόμενες σειρές πειραμάτων.



ΕΙΚΟΝΑ 4. 3: Φάσμα του δείγματος φίλτρου και τα επιλεγμένα ROI

Στο φάσμα που συλλέχθηκε τελικά εντοπίστηκαν και ταυτοποιήθηκαν οι φωτοκορυφές των ισοτόπων ^{214}Pb και ^{214}Bi . Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.4, η θέση των κεντροειδών των φωτοκορυφών 295,2 keV και 351,9 keV του ^{214}Pb εντοπίστηκε στα κανάλια 112 και 162, ενώ τα κεντροειδή των φωτοκορυφών 609,3 keV, 1120,3 keV και 1764,5 keV του ^{214}Bi βρέθηκαν στα κανάλια 278, 496 και 769 αντίστοιχα. Με χρήση της συνάρτησης βαθμονόμησης (4.1), έγινε ο υπολογισμός της ενέργειας που αντιστοιχεί στα συγκεκριμένα κανάλια (Πίνακας 4.4).

Βέβαια, όπως αναφέρεται σε προηγούμενα εδάφια, ένα βασικό μειονέκτημα των ανιχνευτών Ιωδιούχου Νατρίου είναι, πέραν του εύρους της φωτοκορυφής και η μετατόπιση της θέσης των φωτοκορυφών με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του κρυστάλλου. Αυτό διαπιστώνεται άμεσα από τον Πίνακα 4.4. Ως εκ τούτου, οι περιοχές ενδιαφέροντος (ROI) στο φάσμα εξετάστηκαν και επανατοποθετήθηκαν για κάθε σειρά μετρήσεων.

Πίνακας 4.4: Σύγκριση της ενέργειας των φωτοκορυφών από τη συνάρτηση βαθμονόμησης με τις πραγματικές τιμές

Κανάλια	Ενέργεια (από συνάρτηση 4.1)	Φωτοκορυφή και ενέργεια
112	226,8	-
135	278,8	²¹⁴ Pb 295,2keV
162	339,9	²¹⁴ Pb 351,9keV
278	602,1	²¹⁴ Bi 609,3keV
496	1095,0	²¹⁴ Bi 1120,3keV
611	1354,9	-
769	1712,1103	²¹⁴ Bi/1764,5keV

4.1.4 Μελέτη της διακύμανσης των θυγατρικών του ραδονίου

Σκοπός των μετρήσεων που έγιναν ήταν η εποπτεία της κύμανσης των συγκεντρώσεων των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου μέσω των φωτονίων που εκπέμπουν. Στην συνέχεια, περιγράφονται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων, καθώς και το πείραμα που έγινε για την επαλήθευση της διαδικασίας και της επαναληψιμότητας των μετρήσεων.

4.1.4.1 Παρακολούθηση της αύξησης των θυγατρικών στο φίλτρο αέρα

Έχοντας προκαθορίσει ως φωτοκορυφές ενδιαφέροντος, οι οποίες και θα μελετηθούν, τις φωτοκορυφές που αντιστοιχούν στις ενέργειες 351,9 keV, 609,3 keV, 1120,3 keV και 1764,5 keV, πραγματοποιήθηκαν τα ακόλουθα πειράματα για την αποτύπωση της αύξησης της συγκέντρωσης πάνω στο φίλτρο αέρα. Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη της υποενότητας 3.3.1. Το τροφοδοτικό υψηλής τάσης ρυθμίστηκε στα 900 V, το κέρδος ενίσχυσης σε 50x1,0 («coarse gain» και «fine gain» αντίστοιχα) και ο ADC στα 1024 κανάλια.

Αρχικά, έγινε συλλογή φάσματος για δέκα λεπτά (10'), χωρίς την αντλία σε λειτουργία, ώστε να σχηματιστούν καθαρά οι φωτοκορυφές του υποστρώματος και να επανατοποθετηθούν οι περιοχές ενδιαφέροντος (ROI) προς αποφυγής τυχόν ολίσθησης. Οι νέες τιμές των καναλιών που ορίζουν τις περιοχές ενδιαφέροντος για τα δυο αυτά πειράματα αναφέρονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Εντοπισμός ROI φωτοκορυφών

Ενέργεια φωτοκορυφής [keV]	ROI αρχικού πειράματος [κανάλια]	ROI επαναληπτικού πειράματος [κανάλια]
351,9	135-176	145-186
609,3	218-296	230-308
1120,3	434-507	444-517
1764,5	693-790	701-798

Με δεδομένες τις νέες περιοχές ενδιαφέροντος και χωρίς την αντλία σε λειτουργία, έγιναν 5 διαδοχικές μετρήσεις του υποστρώματος, διάρκειας τεσσάρων λεπτών (4') η κάθε μία. Για κάθε ROI υπολογίστηκε η μέση τιμή υποστρώματος και η αντίστοιχη αβεβαιότητα σε επίπεδο 1 σ (Πίνακας 4.6).

Πίνακας 4.6: Υπόστρωμα φωτοκορυφών (διάρκεια μέτρησης: 4') και αβεβαιότητα (1 σ)

	ROI ₁ / 351,9keV		ROI ₂ / 609,3keV		ROI ₃ / 1120,3keV		ROI ₄ / 1764,5keV	
Γεγονότα υποστρώματος	Μέση τιμή	Αβεβαιότητα	Μέση τιμή	Αβεβαιότητα	Μέση τιμή	Αβεβαιότητα	Μέση τιμή	Αβεβαιότητα
		121,4	0,23	226,6	0,5	86,6	0,8	47,8

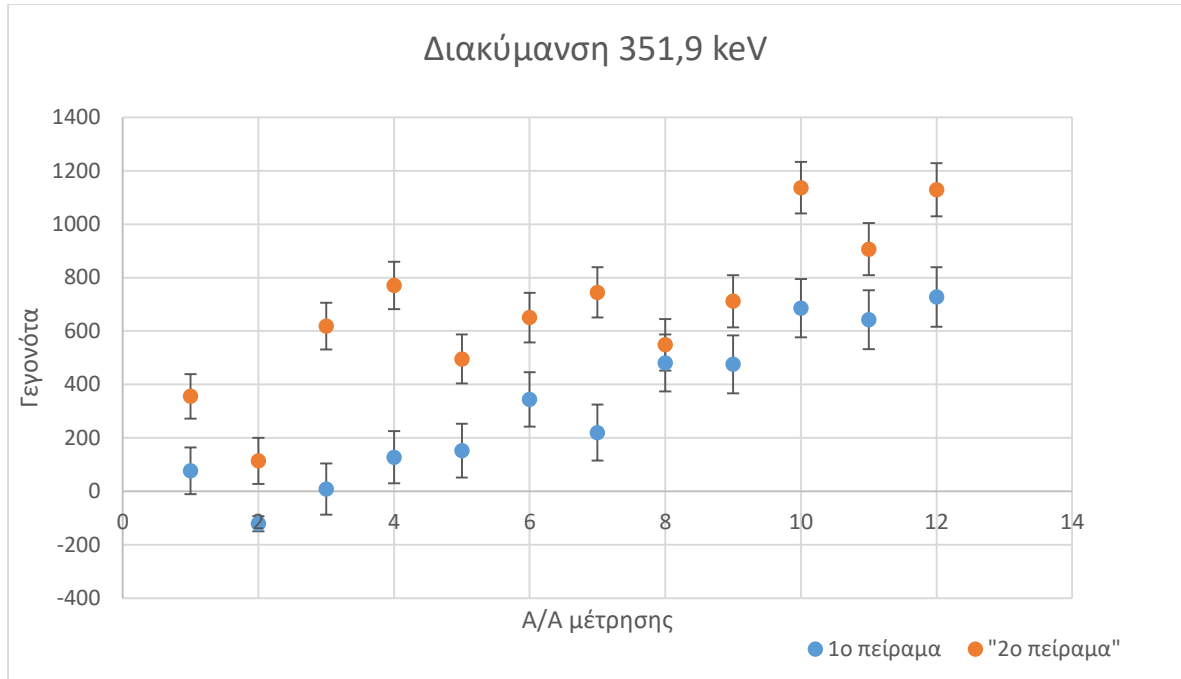
Στη συνέχεια ακολούθησαν οι μετρήσεις για την παρακολούθηση της εξέλιξης των θυγατρικών του ραδονίου στο φίλτρο. Οι μετρήσεις άρχισαν ταυτόχρονα με τη λειτουργία της αντλίας, για παροχή αέρα 0,6 m³/min. Το πείραμα είχε διάρκεια μιας ώρας, κατά την οποία έγιναν δώδεκα μετρήσεις των τεσσάρων λεπτών (12x4'), με καθυστέρηση ενός λεπτού ανάμεσα στις μετρήσεις προκειμένου να γίνει η καταγραφή των δεδομένων. Από τα φάσματα που προέκυψαν, καταγράφηκαν τα συνολικά γεγονότα (area) των φωτοκορυφών του ²¹⁴Pb και ²¹⁴Bi τα οποία υπέστησαν την κατάλληλη επεξεργασία. Συγκεκριμένα, αφαιρέθηκαν από τα καταγραφέντα γεγονότα όσα αποδίδονταν στο υπόστρωμα, σύμφωνα με την σχέση (4.3).

$$\text{Area}_{(\text{net})} = \text{Area}_{(\text{total})} - \text{Area}_{(\text{background})} \quad (4.3)$$

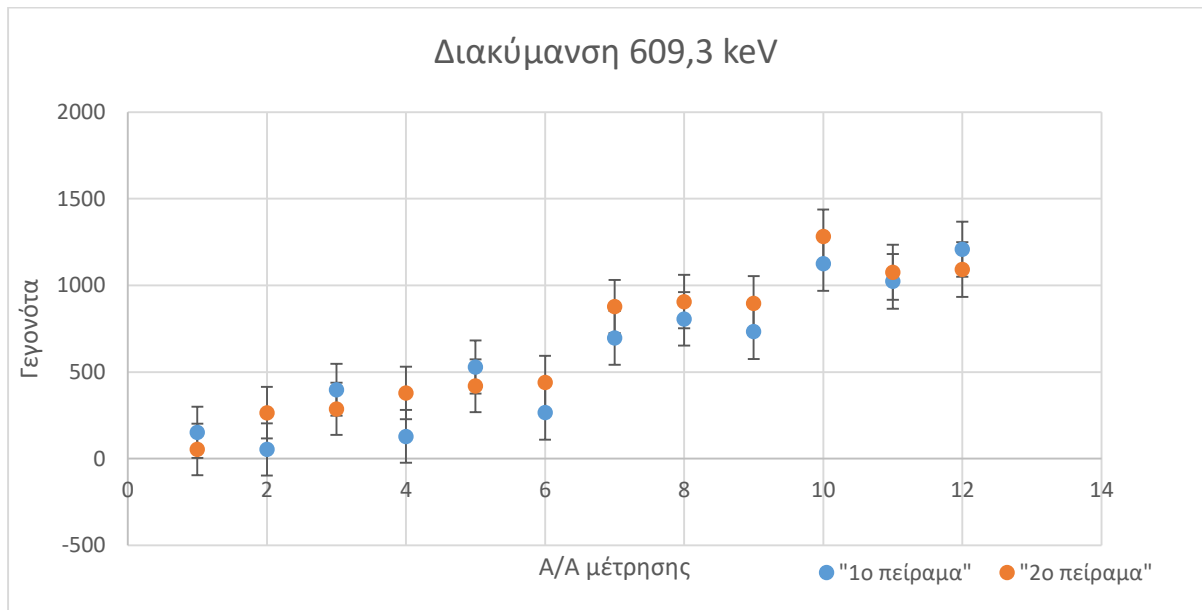
Στο συγκεκριμένο πείραμα το φίλτρο αέρα μετά τη δειγματοληψία αναλύθηκε και με ανιχνευτή Υπέρ-καθαρού Γερμανίου (HPGe), σχετικής απόδοσης 33,8% και τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής βρίσκονται στο Παράρτημα Α. Το πείραμα

επαναλήφθηκε, ώστε να ελεγχθεί η επαναληψιμότητά του. Ωστόσο, στο επαναληπτικό πείραμα έγιναν μετρήσεις για συνολικά δύο ώρες. Κατά την 1^η ώρα, πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές μετρήσεις τεσσάρων λεπτών (4'), με ρυθμίσεις ίδιες με το πρώτο πείραμα. Οι δώδεκα πρώτες μετρήσεις έγιναν με την αντλία σε λειτουργία (με μέση παροχή 0,6 m³/min), ενώ ο συνολικός όγκος αέρα υπολογίστηκε στα ~58 m³. Στο δεύτερο πείραμα οι μετρήσεις συνεχίστηκαν και μετά το κλείσιμο της αντλίας για μία επιπλέον ώρα, έως ότου φτάσουν οι τιμές των γεγονότων κάθε φωτοκορυφής σε επίπεδα κοντά στο υπόστρωμα. Όμοια με προηγουμένως, καταγράφηκαν τα γεγονότα για κάθε φωτοκορυφή και στην συνέχεια επεξεργάστηκαν βάσει της εξίσωσης (4.3).

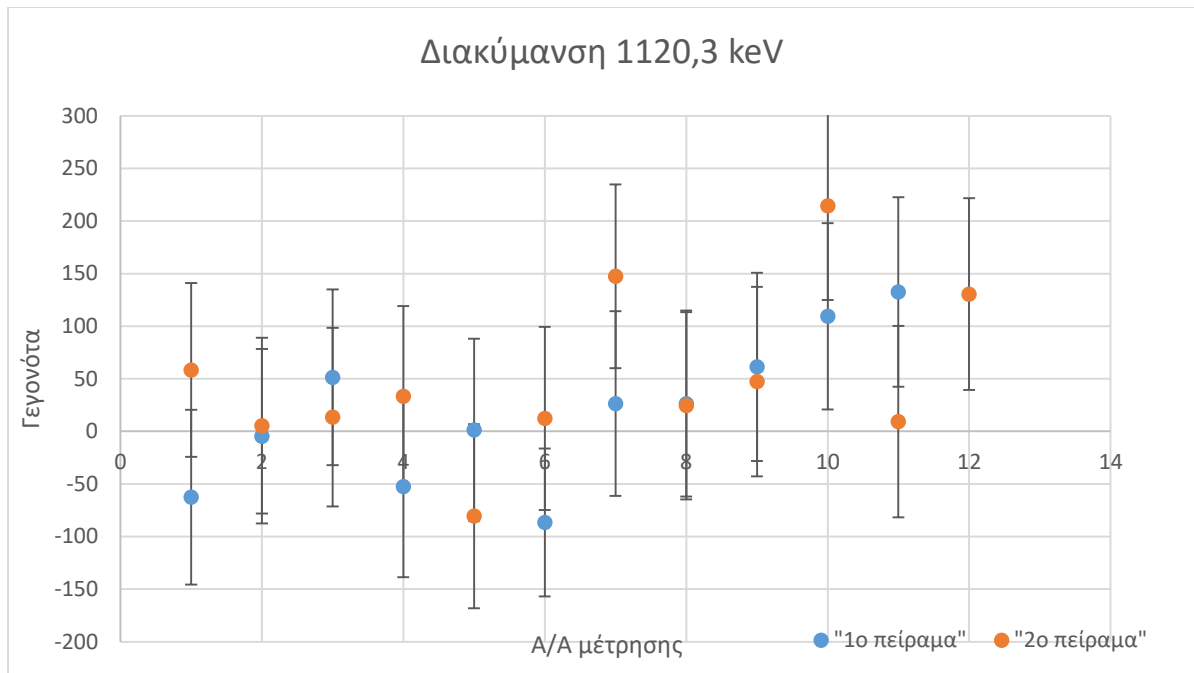
Στα Διαγράμματα 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 που ακολουθούν, παρίστανται τα γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε φωτοκορυφή και στα δύο αυτά πειράματα για την πρώτη ώρα, όπως προκύπτουν μετά την αφαίρεση του υποστρώματος. Τα σημεία αντιστοιχούν στα καθαρά γεγονότα του φαινομένου της προσαύξεσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στο φίλτρο αέρα, όπως μετρήθηκαν κατά την διάρκεια λειτουργίας της αντλίας. Από τα γραφήματα αυτά διαπιστώνεται ότι οι φωτοκορυφές οι οποίες δείχνουν καλύτερα την αύξηση της συγκέντρωσης των θυγατρικών πάνω στο φίλτρο είναι αυτές στις ενέργειες 351,9 και 609,3 keV. Μάλιστα οι μετρήσεις της φωτοκορυφής στα 609,3 παρουσιάζουν και καλύτερη επαναληψιμότητα. Σε κάθε περίπτωση οι αρνητικές τιμές που καταγράφονται οφείλονται καθαρά σε στατιστικούς λόγους. Στο Παράρτημα Β εμφανίζονται αναλυτικότερα οι πίνακες δεδομένων, η επεξεργασία και τα διαγράμματα του επαναληπτικού πειράματος για τις συνολικές μετρήσεις.



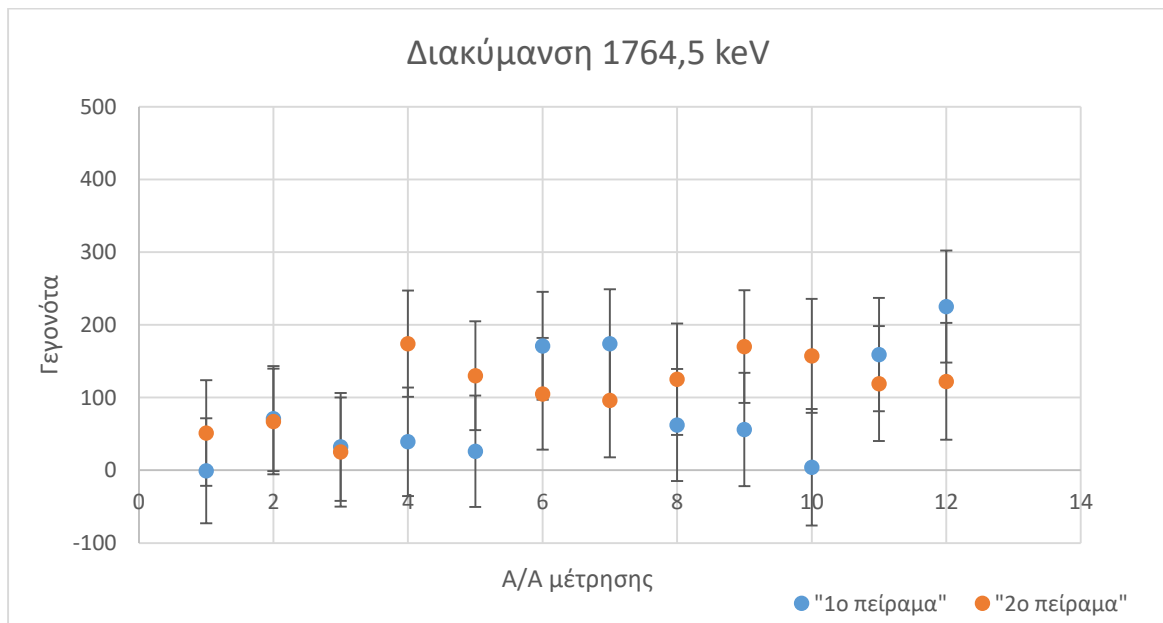
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 3: Εξέλιξη του ^{214}Pb βάσει της φωτοκορυφής 351,9keV.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 4: Εξέλιξη του ^{214}Bi βάσει της φωτοκορυφής 609,3 keV.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 5: Εξέλιξη του ^{214}Bi βάσει της φωτοκορυφής 1120,3 keV.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 6: Εξέλιξη του ^{214}Bi βάσει της φωτοκορυφής 1764,5 keV

4.1.4.2 Διερεύνηση της επίδρασης των πλήθους των καναλιών του ADC στα αποτελέσματα των μετρήσεων

Η στατιστική και η μορφή του φάσματος επηρεάζεται έντονα από την μεταβολή των ρυθμίσεων της διάταξης και τα χαρακτηριστικά της πειραματικής διαδικασίας. Οι

ανιχνευτές NaI έχουν χειρότερη διακριτική ικανότητα από τους ανιχνευτές υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe), και ως εκ τούτου κρίθηκε ότι έπρεπε εξετασθεί με περισσότερη λεπτομέρεια η επίδραση του πλήθους των καναλιών του φάσματος που επιλέχθηκαν σε πρώτη φάση (1024), αλλά και η διάρκεια δειγματοληψίας, ώστε να μειωθεί όσο γίνεται περισσότερο η στατιστική κύμανση των μετρήσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν με διαφορετικό πλήθος καναλιών του ADC, ώστε μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων να καταδειχθούν οι βέλτιστες ρυθμίσεις για τη συγκεκριμένη διάταξη.

4.1.4.3 Μελέτη της παρακολούθησης της διακύμανσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου για διαφορετικό πλήθος καναλιών του ADC

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται τρεις σειρές μετρήσεων που έγινα, χρησιμοποιώντας διαφορετικό πλήθος καναλιών του ADC για κάθε σειρά μετρήσεων και λαμβάνοντας συνεπώς διαφορετική μορφή φάσματος μέσω του λογισμικού GENIE. Τα κανάλια του ADC ήταν αρχικά 1024 και στη συνέχεια ρυθμίστηκαν σε 512 και 256.

Της συλλογής κάθε φάσματος προηγήθηκε η λήψη μετρήσεων με κλειστή την αντλία για χρονικό διάστημα περίπου δέκα λεπτών (10'), ώστε να ελεγχθούν και να επανατοποθετηθούν οι περιοχές ενδιαφέροντος (ROI). Κατ' αυτόν τον τρόπο, προέκυψαν οι νέες θέσεις των φωτοκορυφών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7: ROI φωτοκορυφών του φάσματος για διάφορες ρυθμίσεις του πλήθους καναλιών

Κανάλια ADC	1024	512	256
Ενέργεια φωτοκορυφής [keV]	ROI 1 ^{ου} πειράματος [κανάλια]	ROI 2 ^{ου} πειράματος [κανάλια]	ROI 3 ^{ου} πειράματος [κανάλια]
351,9	149-191	74-103	40-51
609,3	245-324	124-164	63-83
1120,3	477-562	238-277	120-139
1764,5	761-901	382-432	187-225

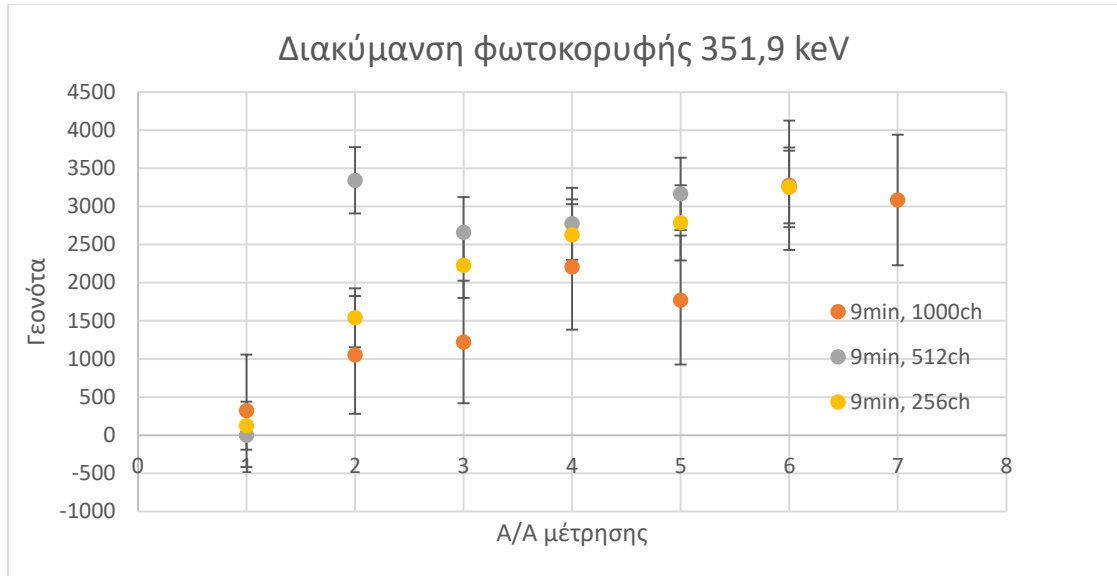
Μετά από τον προσδιορισμό των ROI του Πίνακα 4.7, έγιναν ακόμα τρεις διαδοχικές μετρήσεις για τον υπολογισμό του υποστρώματος. Κάθε μέτρηση επιλέχθηκε να έχει διάρκεια εννιά λεπτών (9'), διότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια της μέτρησης, τόσο περισσότερα δεδομένα συλλέγονται και τόσο καλύτερη είναι η στατιστική της μέτρησης. Στον Πίνακα 4.8 παρατίθενται οι μέσες τιμές των γεγονότων λόγω του υποστρώματος και η αντίστοιχη αβεβαιότητα τους, όπως υπολογίστηκαν από τις μετρήσεις.

Πίνακας 4.8: Υπόστρωμα φωτοκορυφών

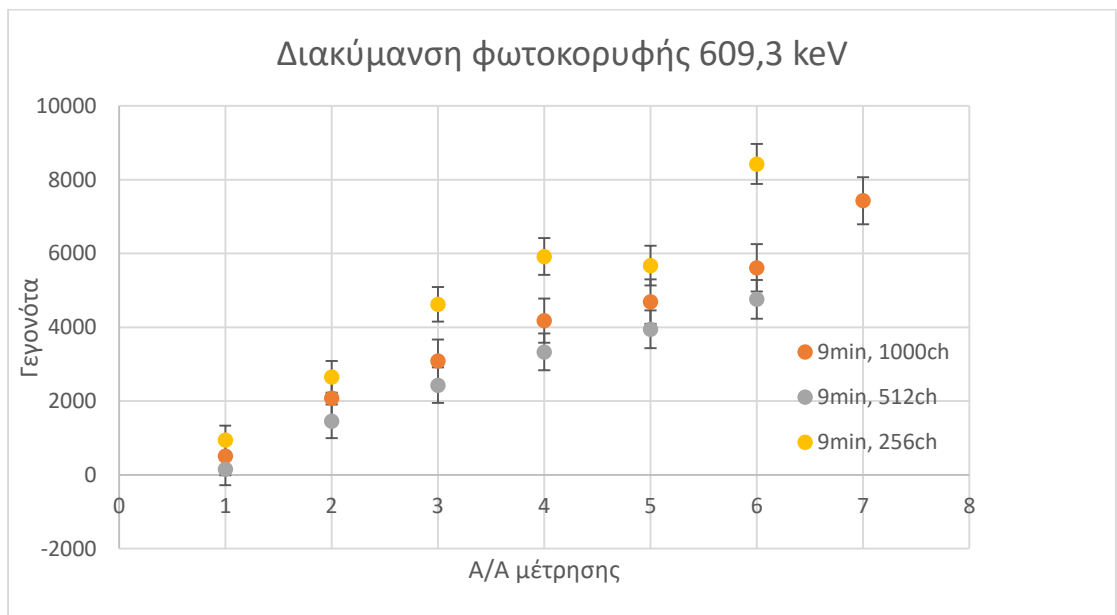
Πλήθος καναλιών ADC	ROI ₁ /352keV		ROI ₂ /609keV		ROI ₃ /1120keV		ROI ₄ /1764keV	
	Μέση τιμή	Αβεβαι -ότητα	Μέση τιμή	Αβεβαι -ότητα	Μέση τιμή	Αβεβαι -ότητα	Μέση τιμή	Αβεβαι -ότητα
1024	167,7	1,2	668,0	0,18	-	-	171,7	0,33
512	-	-	690,7	0,15	104,3	0,32	108,7	0,41
256	-	-	551,7	0,16	101,7	0,25	137,3	0,30

Η μεθοδολογία των πειραμάτων είναι ίδια και για τις τρεις σειρές μετρήσεων. Συγκεκριμένα, η αντλία λειτουργούσε στην μέγιστη παροχή και λαμβάνονταν φάσματα κάθε δέκα λεπτά, με διάρκεια κάθε μέτρησης εννέα λεπτά (9'). Σε κάθε μέτρηση καταγράφηκαν τα συνολικά γεγονότα για τις επιλεγμένες φωτοκορυφές, από τα οποία αφαιρέθηκαν τα γεγονότα λόγω υποστρώματος σύμφωνα με την εξίσωση (4.3).

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών, δηλαδή η εξέλιξη της καθαρής περιοχής (net area) κάθε φωτοκορυφής για τις τρεις διαφορετικές ρυθμίσεις του ADC, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 4.7, 4.8, 4.9, 4.10).



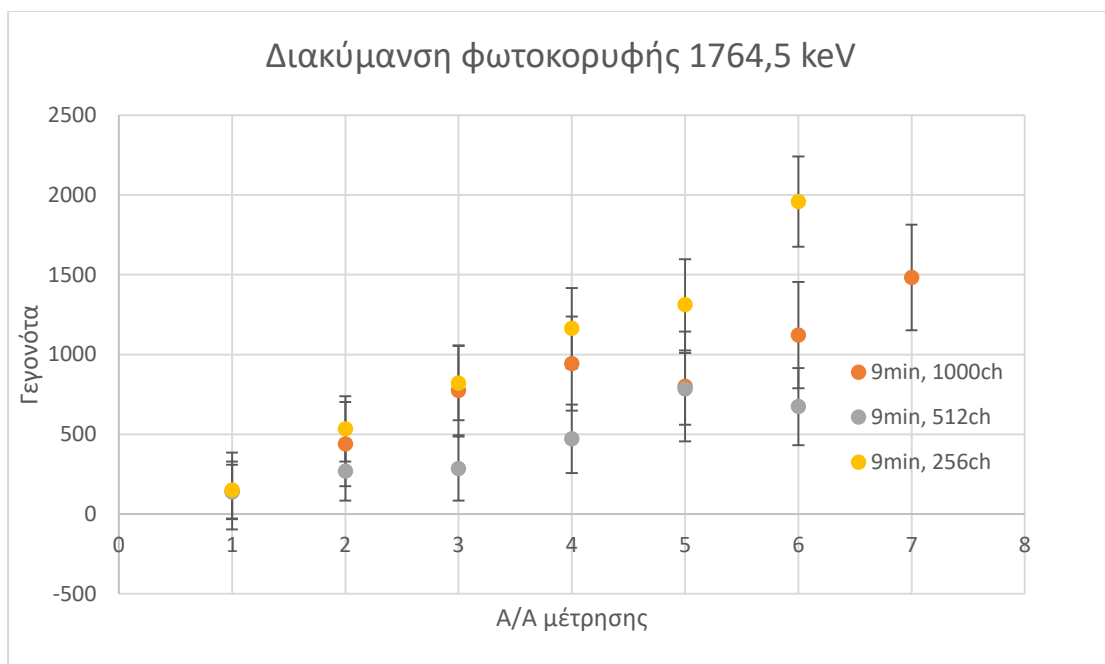
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 7: Εξέλιξη του ^{214}Pb βάσει της φωτοκορυφής 351,9 keV για τις διαφορετικές ρυθμίσεις του ADC.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 8: Εξέλιξη του ^{214}Bi βάσει της φωτοκορυφής 609,3keV για τις διαφορετικές ρυθμίσεις του ADC.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 9: Εξέλιξη του ^{214}Bi βάσει της φωτοκορυφής 1120 keV για τις διαφορετικές ρυθμίσεις του ADC.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 10: Εξέλιξη του ^{214}Bi βάσει της φωτοκορυφής 1764,5 keV για τις διαφορετικές ρυθμίσεις του ADC.

Στα παραπάνω διαγράμματα αποτυπώνεται η αναμενόμενη συσσώρευση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στο φίλτρο, λόγω της διέλευσης του αέρα διαμέσου αυτού. Παρόλο που δεν μπορεί να προκύψει ένα σαφές συμπέρασμα από τα προηγούμενα γραφήματα αναφορικά με την επίδραση του πλήθους των καναλιών του ADC, φαίνεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η υψηλότερη τιμή της επιφάνειας

των φωτοκορυφών εμφανίζεται για την περίπτωση των 256 καναλιών. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε πραγματικά υψηλότερη τιμή της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου στο φίλτρο, είτε καλύτερη εκτίμηση της επιφάνειας της φωτοκορυφής, ενδεχομένως λόγω καλύτερης επιλογής του ROI. Αυτό πάντως που είναι βέβαιο είναι ότι επιβεβαιώθηκε η ικανότητα της διάταξης για αποτύπωση της εξέλιξης των φωτοκορυφών των θυγατρικών ραδονίου, για τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούσαν στον εσωτερικό χώρο του εργαστηρίου.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται τα πειράματα με τις διατάξεις των υποενοτήτων 3.3.2, 3.3.3 και 3.3.4, για τις μετρήσεις που διενεργήθηκαν σε εξωτερικό χώρο, στην οροφή του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι η συγκέντρωση του ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους είναι μεγαλύτερη, τουλάχιστον κατά 10 φορές (UNSCEAR 2000). Αυτό σημαίνει ότι τα πειράματα σε εξωτερικό περιβάλλον θα παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη δυσκολία και χειρότερη στατιστική, εκτός των άλλων και λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης του ραδονίου.

4.2 Μετρήσεις στο εξωτερικό περιβάλλον με τη διάταξη NaI 2"x2" και την αντλία TFIA STAPLEX (2^η σειρά μετρήσεων)

Σε αυτή τη σειρά μετρήσεων, η μελέτη επικεντρώθηκε στον προσδιορισμό του ^{214}Bi από τα φωτόνια ενέργειας 609,3 keV που όπως φαίνεται παρουσιάζουν και τις καλύτερα ποιοτικά μετρήσεις, και στην παρακολούθηση της διακύμανσής του σε διάστημα έξι ωρών. Στο παρόν εδάφιο γίνεται αρχικά εκτενής αναφορά στα πειράματα για τον έλεγχο λειτουργίας της διάταξης.

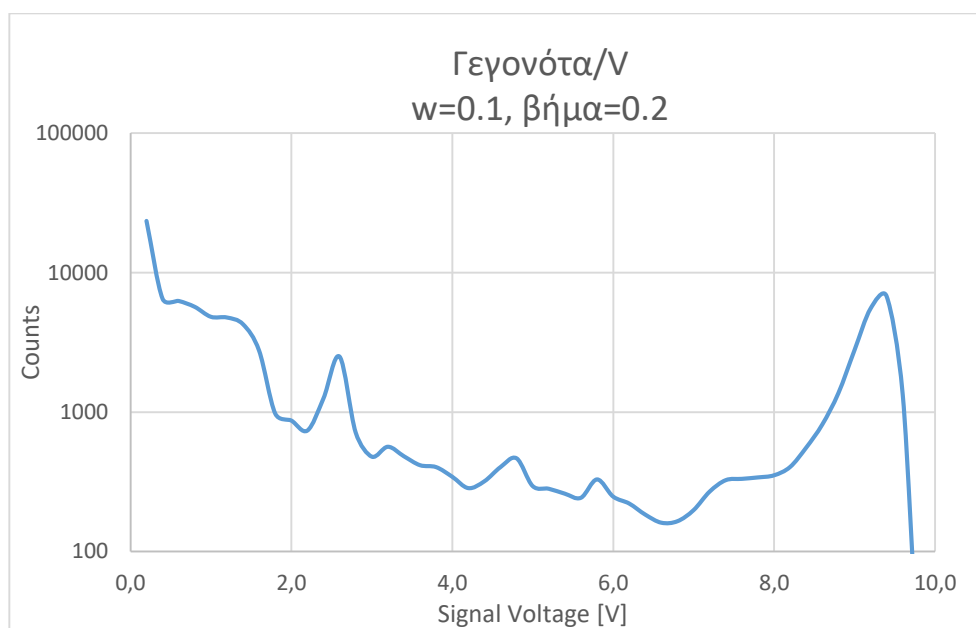
Χρησιμοποιώντας τη διάταξη με τον ανιχνευτή NaI 2"x2"¹² και την αντλία TFIA STAPLEX πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τη συλλογή του ενεργειακού φάσματος και τον προσδιορισμό της θέσης της φωτοκορυφής 609,3 keV. Της συλλογής κάθε φάσματος προηγήθηκε η λήψη μετρήσεων με κλειστή την αντλία, ώστε να προσδιοριστεί το υπόστρωμα. Η διάταξη για όλες τις μετρήσεις τροφοδοτούνταν με υψηλή τάση 800 V ενώ, οι συντελεστές κέρδους ενίσχυσης «course gain» και «fine gain» στα 50 και 1,1 αντίστοιχα. Στην συγκεκριμένη συγκρότηση της διάταξης

¹² Πρόκειται ουσιαστικά για τη διάταξη εποπτείας της ραδιενέργειας περιβάλλοντος του ΕΠΤ-ΕΜΠ

χρησιμοποιείται και ο σταθεροποιητής φάσματος (Stabilizer) για την σταθεροποίηση του φάσματος βάσει της ψευδοκορυφής του Αμερικίου. Οι ρυθμίσεις αυτού παρέμεναν σταθερές, με το παράθυρο (Window Width) στα 1,5 V, θέση της φωτοκορυφής (Peak Position) στα 8,8 V και το Spacing στο 1 V.

4.2.2 Λήψη του φάσματος με χρήση του μονοκαναλικού ανιχνευτή SCA

Στο πείραμα αυτό, το παράθυρο (window) του SCA ρυθμίστηκε σε 0,1 V, και το κατώτερο όριο (Lower Level, LL) τέθηκε στην χαμηλότερη δυνατή θέση (0 V). Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μέχρι το επίπεδο 10V. Η διάρκεια λήψης του φάσματος επιλέχθηκε να είναι 100 s. Επιπλέον, προκειμένου σε αυτά τα δοκιμαστικά πειράματα να παραχθεί ισχυρό σήμα, προκειμένου να εντοπισθούν με ακρίβεια οι φωτοκορυφές ενδιαφέροντος, χρησιμοποιήθηκε αρχικά πηγή Ραδίου (^{226}Ra)¹³ τοποθετημένη 1-2cm από τον ανιχνευτή. Για κάθε μέτρηση σημειώθηκε ο αριθμός των καταγεγραμμένων γεγονότων, και με την βοήθεια υπολογιστικού φύλλου EXCEL έγινε η αναπαραγωγή του φάσματος (Διάγραμμα 4.11).

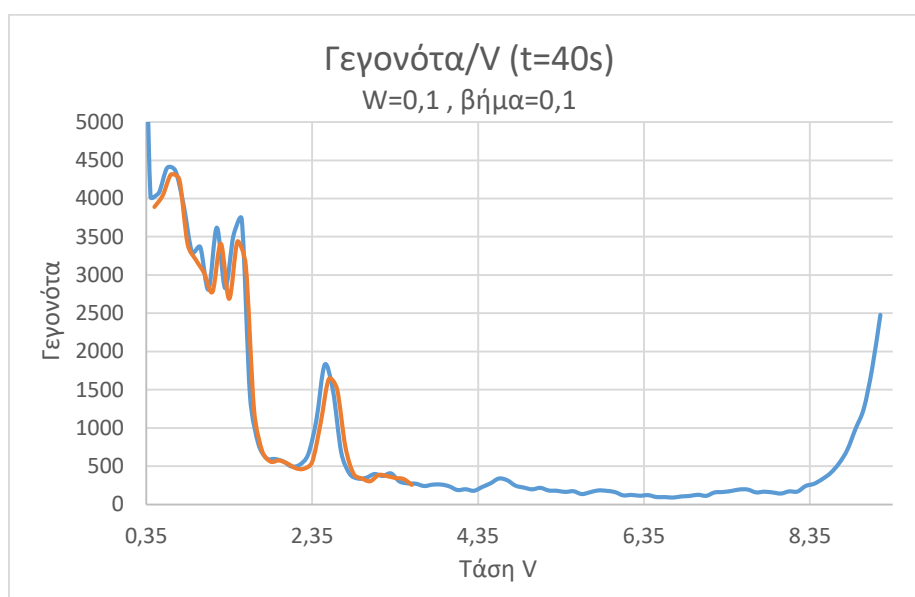


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 11: Φάσμα με SCA.

¹³ Η οποία εκπέμπει και φωτόνια των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου που ενδιαφέρουν

Οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν και με άλλες ρυθμίσεις του SCA, ώστε να διερευνηθεί κατά πόσον μπορεί να επιτευχθεί απεικόνιση του φάσματος με καλύτερη λεπτομέρεια, έτσι στο διάγραμμα 4.12 απεικονίζονται:

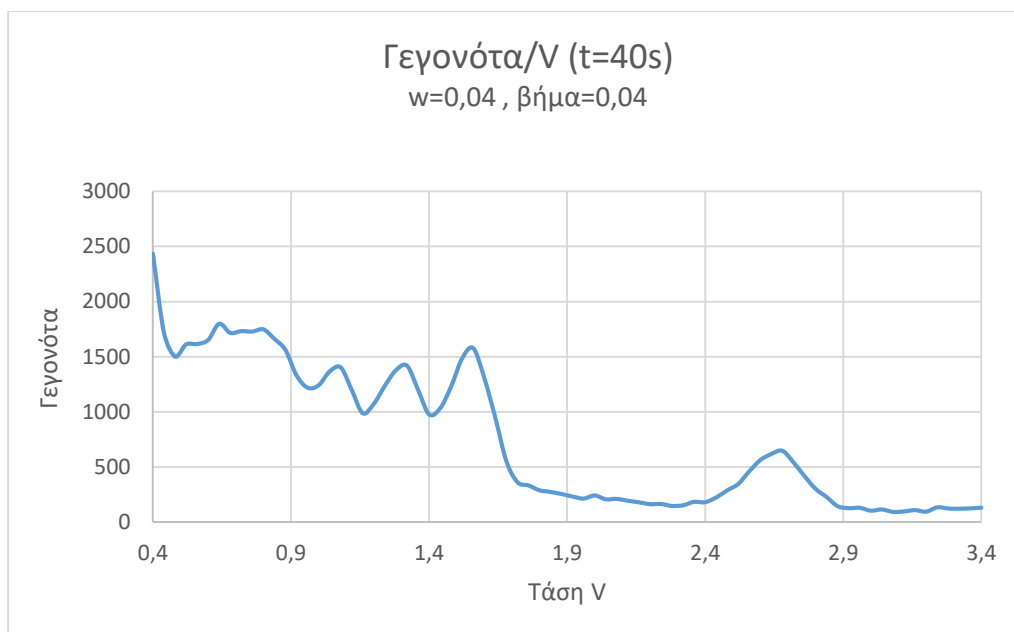
- Το φάσμα με (LL) από 0,0 V έως 9,2 V, παράθυρο (window) ίσο με 0,1 V, βήμα 0,1 V και διάρκεια μέτρησης 40 s (μπλε σειρά).
- Τμήμα του φάσματος στην περιοχή από 0,45 V έως 3,55 V¹⁴, με παράθυρο 0,1 V και βήμα 0,05 V για τον ίδιο χρόνο (κόκκινη σειρά).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 12: Φάσμα με έμφαση στις χαμηλές ενέργειες.

Τα αποτελέσματα, όπως αυτά αποτυπώνονται στο Διάγραμμα 4.12, οδήγησαν στην απόφαση να μελετηθεί το υπόστρωμα με μεγαλύτερη ενδελέχεια – κυρίως μικρότερο εύρος παραθύρου. Για τον σκοπό αυτό επαναλήφθηκαν οι μετρήσεις για την λήψη του φάσματος με διαφορετικές ρυθμίσεις στον μονοκαναλικό αναλυτή. Συγκεκριμένα, ορίστηκε το παράθυρο (window) ίσο με 0,04 V και βήμα 0,04 V. Στο επόμενο Διάγραμμα 4.13 φαίνεται το φάσμα όπως προέκυψε με κατώτερο επίπεδο (LL) του καναλιού κάθε μέτρησης από 0,4 V έως 3,4 V.

¹⁴ Η περιοχή αυτή περιλαμβάνει την φωτοκορυφή ενδιαφέροντος στα 609,3



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 13: Παραγωγή φάσματος με μικρότερο βήμα.

Στα Διαγράμματα 4.11, 4.12 και 4.13, όπου φαίνεται το φάσμα των ακτινοβολιών της πηγής ^{226}Ra που καταγράφονται στον ανιχνευτή. Στα αρχικά κανάλια παρατηρείται υψηλό συνεχές υπόστρωμα, κυρίως λόγω της επίδρασης του φαινομένου Compton χαρακτηριστικές ακτίνες-X, ακτίνες-X λόγω πέδησης σωματιδίων-β και. Επίσης, στα διαγράμματα 4.11 και 4.12 φαίνονται αυξημένο πλήθος γεγονότων που είναι καταγεγραμμένα στα τελευταία κανάλια του φάσματος, τα οποία αντιστοιχούν στην α-κορυφή του Αμερικίου, βάσει της οποίας γίνεται η σταθεροποίηση του φάσματος.

Καθώς οι παραπάνω μετρήσεις που έγιναν με την συγκεκριμένη διάταξη πραγματοποιήθηκαν χωρίς να έχει προηγηθεί ενεργειακή βαθμονόμηση της στις καινούριες συνθήκες. Για τον λόγο αυτό, κρίθηκε αναγκαία η οπτική ταυτοποίηση των φωτοκορυφών του φάσματος, θεωρώντας γραμμική συσχέτιση μεταξύ καναλιών και ενέργειας. Κατ' αυτόν τον τρόπο διαπιστώθηκε η θέση (κανάλι) κεντροειδούς των φωτοκορυφών ενδιαφέροντος, όπως παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.9. Στη συνέχεια, προσδιορίστηκαν με γραμμική παρεμβολή και οι θέσεις των κεντροειδών των φωτοκορυφών 295,2 keV και 351,9 keV στα 1,32 V και 1,56 V,

αντίστοιχα. Στον παρακάτω Πίνακα 4.9 καταγράφονται τα LL που θεωρείται ότι αντιστοιχούν στο κεντροειδές κάθε φωτοκορυφής¹⁵.

Πίνακας 4.9: Αντιστοίχιση ενεργειών φωτοκορυφών στο κεντροειδές σε μονάδες τάσης

Κεντροειδές [V]	Ενέργεια [keV]
1,32	295,2
1,56	351,9
2,55	609,3
4,60	1120,3

4.2.3 Μελέτη της φωτοκορυφής ενδιαφέροντος στα 609,3 keV

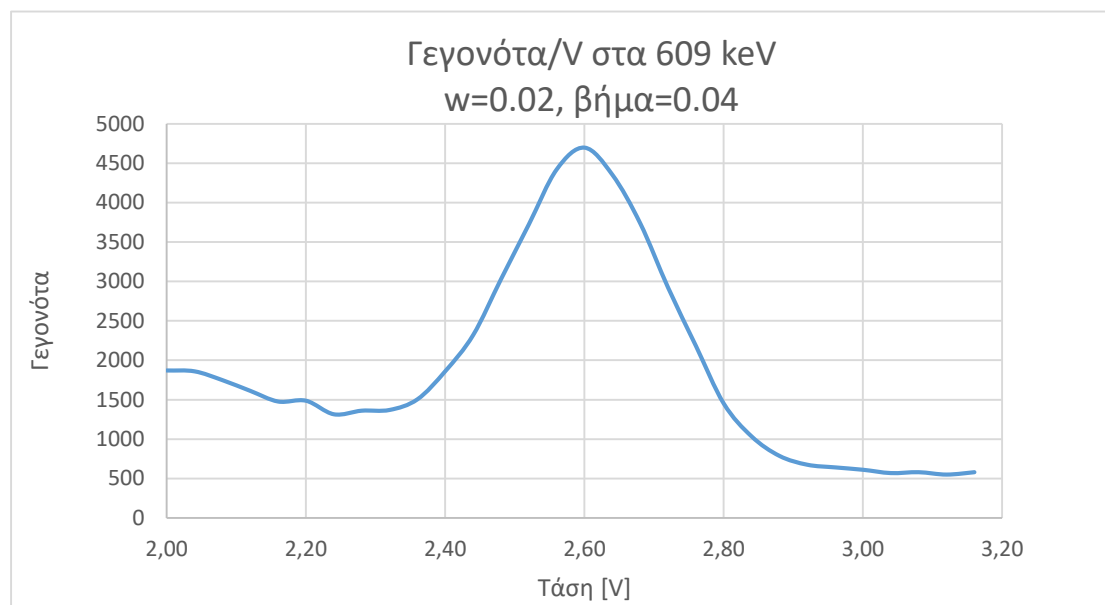
Η μεθοδολογία για την απεικόνιση της φωτοκορυφής ενδιαφέροντος 609,3 keV με χρήση του SCA ήταν όμοια με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την απεικόνιση ολόκληρου του φάσματος. Η θέση κεντροειδούς της φωτοκορυφής 609,3 keV στο φάσμα εντοπίστηκε περί τα 2,6 V, οπότε το κατώτατο όριο (LL) ρυθμίστηκε αρχικά στα 2,0 V και το παράθυρο (window) στα 0,02 V. Πραγματοποιήθηκε η πρώτη μέτρηση διάρκειας 200 s και καταγράφηκε η ένδειξη του καταμετρητή. Στη συνέχεια, το επίπεδο διαχωρισμού (LL) προσαυξανόταν κάθε φορά με βήμα 0,04 V και πραγματοποιούνταν η επόμενη μέτρηση, ώστε να καλυφθεί όλο το εύρος μέχρι τα 3,2 V.

Επιπλέον, συγκρίνοντας με τα διαγράμματα 4.11, 4.12 και 4.13 της προηγούμενης παραγράφου παρατηρούμε ότι στο τελευταίο μειώνονται τα γεγονότα που καταμετρώνται ανά κανάλι. Μικραίνοντας το παράθυρο και άρα το ενεργειακό εύρος (ΔE) κάθε καναλιού, αποδυναμώνεται το σήμα που λαμβάνουμε. Σε αυτήν την περίπτωση ο μόνος τρόπος ενίσχυσης του σήματος είναι η αύξηση του χρόνου δειγματοληψίας ώστε να αλληλεπιδράσουν περισσότερα φωτόνια με τον ανιχνευτή.

Από τις συνολικά 30 μετρήσεις που έγιναν στην περιοχή από 2,0 V έως 3,2 V, προέκυψε το Διάγραμμα 4.14 σύμφωνα με το οποίο το εύρος της φωτοκορυφής 609,3 keV εντοπίζεται από τα 2,26 V έως και τα 3,02 V. Επομένως, για να καταγραφεί το σύνολο των γεγονότων που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη φωτοκορυφή, το κατώτερο

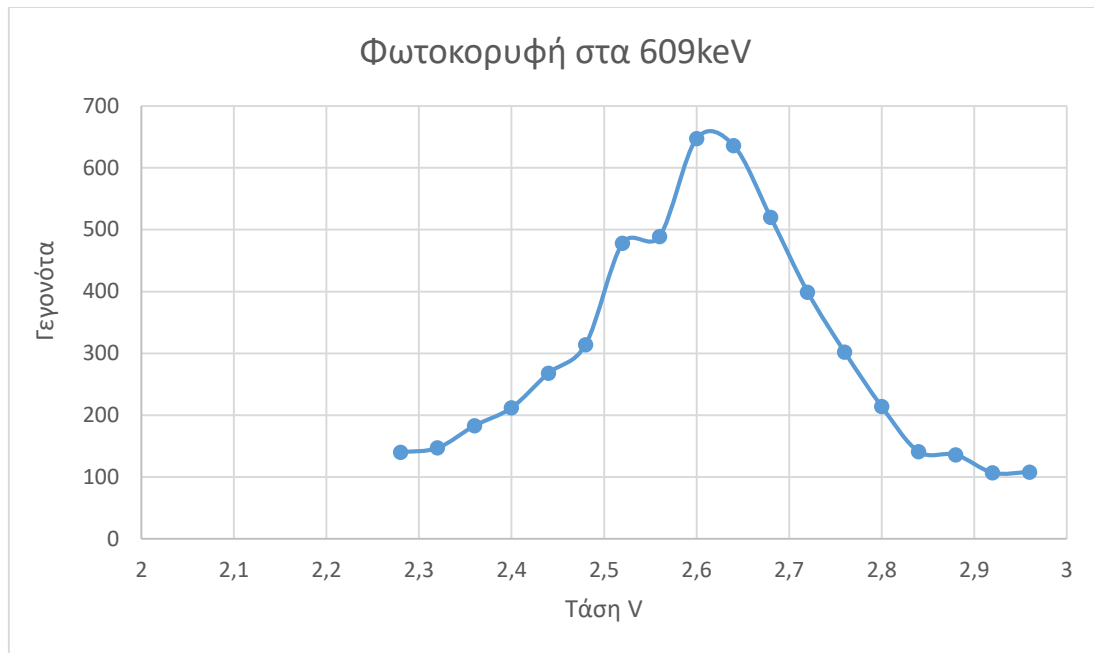
¹⁵ Η φωτοκορυφή περί τα 1764,5 δεν αναφέρεται καθώς δεν διακρίνεται στο φάσμα, ακόμα και με την πηγή ²²⁶Ra

όριο (LL) του SCA θα έπρεπε να ρυθμιστεί στα 2,26 V, και το παράθυρο (ΔΕ) στα 0,76 V.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 14: Φωτοκορυφή 609 keV του ^{214}Bi .

Για την καλύτερη αποτύπωση της φωτοκορυφής των 609,3 keV η οποία κυρίως ενδιαφέρει και την επαλήθευση της θέσης της, έγινε πιο εκτενής καταμέτρηση γεγονότων ανά κανάλι, για κατώτερο επίπεδο (LL) ρυθμισμένο από 0,28 V έως 2,96 V, μεταβαλλόμενο με βήμα 0,04 V. Για τις μετρήσεις αυτές, το παράθυρο (ΔΕ) του SCA ρυθμίστηκε στα 0,04 V ενώ η διάρκεια κάθε μέτρησης ρυθμίστηκε στα 100 s. Με χρήση υπολογιστικού φύλλου EXCEL προέκυψε φωτοκορυφή 609,3 keV του ^{214}Bi του Διαγράμματος 4.15. Συγκρίνοντας τα Διαγράμματα 4.14 και 4.15, προσδιορίστηκαν οι κατάλληλες ρυθμίσεις του μονοκαναλικού αναλυτή ώστε να καταγράφονται όλα τα φωτόνια ενέργειας 609,3 keV και παράλληλα να αποκλείονται όσο των δυνατών σήματα που αποτελούν θόρυβο των μετρήσεων. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, ορίστηκαν οι τελικές ρυθμίσεις του SCA, με το κατώτερο επίπεδο (LL) στα 2,28 V και το παράθυρο (ΔΕ) στα 0,64 V.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 15: Επανάλεγχος της θέσης της φωτοκορυφής ενέργειας 609,3 keV

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας διερευνήθηκε η περαιτέρω βελτίωση των μετρήσεων, αξιοποιώντας τις δυνατότητες του εργαστηρίου. Όσο μεγαλύτερη είναι η ροή αέρα μέσα από το φίλτρο αναμένεται να είναι και μεγαλύτερη η συγκέντρωση των βραχύβιων θυγατρικών πάνω σε αυτό. Επομένως, αναμένεται ότι θα υπάρξει μεγάλη βελτίωση της στατιστικής των μετρήσεων με την χρήση της αντλίας μεγάλου όγκου αέρα F&J.

4.3 Τρίτη σειρά μετρήσεων με τη διάταξη ανιχνευτή BEGe και τον δειγματολήπτη υψηλού όγκου αέρα F&J

4.3.1 Ποιοτικός προσδιορισμός φωτοκορυφών ενδιαφέροντος

Επόμενο βήμα της πειραματικής διερεύνησης αποτέλεσε ο ποιοτικός προσδιορισμός των θυγατρικών του ραδονίου και ο εντοπισμός της ακριβούς θέσης τους στο φάσμα, με την χρήση του φορητού ανιχνευτή υπερ-καθαρού Γερμανίου BEGe. Και πάλι, οι φωτοκορυφές που μελετήθηκαν ήταν του ^{214}Pb , στα 295,2 keV και 351,9 keV, του ^{214}Bi , στα 609,3 keV, 1120,3 keV και 1764,5 keV, και η φωτοκορυφή του Καλίου ^{40}K στα 1460,7 keV. Το δείγμα των μετρήσεων στην περίπτωση αυτή ήταν ορθογώνιο φίλτρο αέρα διαστάσεων $8'' \times 10''$, το οποίο ήταν κατάλληλα προσαρτημένο στην αναρρόφηση της αντλίας αέρα υψηλής παροχής F&J.

Μέσω των μετρήσεων που έγιναν¹⁶ πραγματοποιήθηκε ο εντοπισμός των φωτοκορυφών των ισοτόπων ενδιαφέροντος, ο προσδιορισμός του υποστρώματος και η συλλογή φάσματος με τον δειγματολήπτη σε λειτουργία. Ειδικότερα, για τον εντοπισμό των φωτοκορυφών και τον προσδιορισμό του υποστρώματος με καλή στατιστική, το φάσμα συλλέχθηκε για δύο ώρες με την αντλία εκτός λειτουργίας. Το φάσμα, αναλύθηκε και αποθηκεύτηκε μέσω του λογισμικού GENIE φορητού Η/Υ. Στο φάσμα που συλλέχθηκε, εντοπίστηκαν και ταυτοποιήθηκαν οι φωτοκορυφές ενδιαφέροντος (Range of Interest, ROI), ενώ με λήψη φάσματος όταν η αντλία ήταν εκτός λειτουργίας προσδιορίστηκε το υπόστρωμα κάθε μίας από αυτές. Στον Πίνακα 4.10 φαίνονται συγκεντρωτικά το κεντροειδές και τα όρια κάθε μίας φωτοκορυφής σε κανάλια. Επιπλέον, υπολογίστηκε η επιφάνεια (Area) του υποστρώματος φωτοκορυφής μαζί με την αβεβαιότητα (u), οι τιμές των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.11.

Πίνακας 4.10: Κεντροειδές και όρια φωτοκορυφών στον ανιχνευτή BEGe

Φωτοκορυφή [keV]	Κάτω όριο [ch]	Κεντροειδές [ch]	Άνω όριο [ch]
295,2	601	605	610
351,9	717	722	722
609,3	1243	1249	1249
1120,3	2292	2298	2298
1460,7	2991	2997	2997
1764,5	3614	3621	3621

¹⁶ Στην πραγματικότητα πρόκειται για την λήψη του φάσματος

Πίνακας 4.11: Επιφάνεια υποστρώματος φωτοκορυφών στον ανιχνευτή BEGe

Φωτοκορυφή [keV]	Επιφάνεια υποστρώματος	Αβεβαιότητα u (%)
295,2	354	10,23
351,9	681	5,27
609,3	643	4,77
1120,3	180	9,27
1460,7	529	4,50
1764,5	150	9,04

Μετά τη συλλογή του υποστρώματος ακολούθησε η συλλογή φάσματος με την αντλία σε λειτουργία, με μέση παροχή 1190,8 SLPM¹⁷. Η συλλογή του φάσματος πραγματοποιείται για δύο ώρες (συνολικός όγκος αέρα 1,4297x10⁵ SL), ώστε να διαπιστωθεί καθαρά το φαινόμενο της προσαύξεσης (growth) των θυγατρικών του ραδονίου στο φίλτρο. Το φάσμα αποτυπώνεται με χρήση του λογισμικού GENIE, από το οποίο παρέχονται επίσης πληροφορίες για την επιφάνεια (Area) και την αντίστοιχη αβεβαιότητα κάθε φωτοκορυφής. Για να υπολογιστεί η **καθαρή επιφάνεια** κάθε φωτοκορυφής, αφαιρούνται τα γεγονότα του υποστρώματος καθεμιάς (Πίνακας 4.11), σύμφωνα με την σχέση (4.4)

$$ROI_{(net)} = ROI_{(total)} - ROI_{(background)} \quad (4.4)$$

Για τον υπολογισμό της συνολικής αβεβαιότητας των μετρήσεων έγινε χρήση των αβεβαιοτήτων που υπολογίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα GENIE. Το συνολικό σφάλμα για κάθε φωτοκορυφή προκύπτει από την ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων καθενός από τα σφάλματα του υποστρώματος και των μετρήσεων και υπολογίζεται από την εξίσωση 4.5.

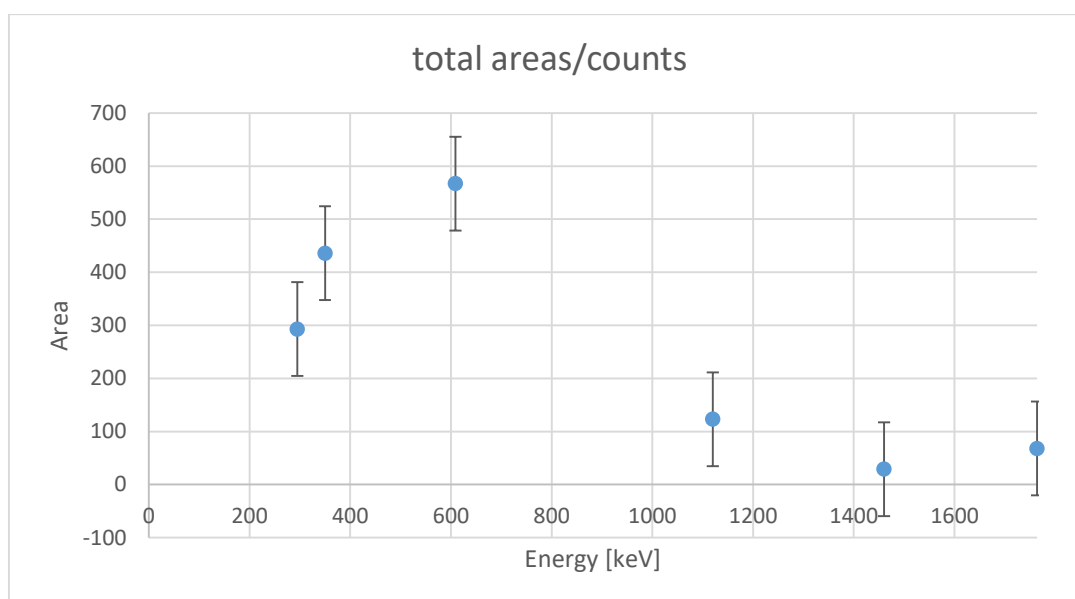
$$\Sigma\sigma_{\text{φάλμα}_{\text{πειράματος}}} = \sqrt{\sigma_{\text{υποστρώματος}}^2 + \sigma_{\text{φάσματος}}^2} \quad (4.5)$$

¹⁷ Standard Liters per Minute

Βάσει της παραπάνω επεξεργασίας, προέκυψαν οι επιφάνειες των φωτοκορυφών και οι αντίστοιχες αβεβαιότητες τους (Πίνακας 4.12), όπως αποτυπώνονται και στο Διάγραμμα 4.16.

Πίνακας 4.12: Καθαρή επιφάνεια φωτοκορυφών

Φωτοκορυφή [ch]	Επιφάνεια	Αβεβαιότητα
295,2	293	167
351,9	436	169
609,3	567	150
1120,3	123	79
1460,7	29	103
1764,5	68	62



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 16: Επιφάνεια των φωτοκορυφών ενδιαφέροντος για τον ανιχνευτή BEGe.

4.3.2 Διακύμανση της επιφάνειας των φωτοκορυφών κατά τη διάρκεια δειγματοληψίας διάρκειας 6 ωρών

Αφού πραγματοποιήθηκε ο εντοπισμός των φωτοκορυφών με χρήση του ανιχνευτή BEGe, καταγράφηκε η εξέλιξη κάθε φωτοκορυφής για έλεγχο εμφάνισης των φαινομένων συσσώρευσης (Growth) και απομείωσης (Decay), με τον

δειγματολήπτη υψηλής παροχής αέρα F&J σε λειτουργία, που αναμένεται να παρατηρηθούν στο συγκεκριμένο πείραμα. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια του πειράματος αναμένονταν να παρατηρηθούν τα φαινόμενα επαύξησης (Growth) και απομείωσης (Decay). Οι μετρήσεις αυτές είχαν συνολική διάρκεια πέντε ωρών και διακρίνονταν σε τρεις φάσεις. Η αναμενόμενη διάρκεια του φαινομένου συσσώρευσης για τα περισσότερα θυγατρικά του ραδονίου ήταν δύο ώρες. Το φαινόμενο αυτό διαδέχθηκε χρονικό διάστημα μιας ακόμα ώρας με την αντλία σε λειτουργία, στην διάρκεια του οποίου δεν αναμενόταν κάποια σημαντική αλλαγή στην συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου, αλλά παρατηρήθηκε η διακύμανση των συγκεντρώσεών τους στην ατμόσφαιρα. Η τελευταία φάση του πειράματος αφορούσε μετρήσεις δύο ωρών με την αντλία κλειστή, για την παρακολούθηση του φαινομένου απομείωσης. Κατά τη διάρκεια του πειράματος η μέση παροχή αέρα της αντλίας F&J ήταν 1176 SLPM¹⁸ και ο συνολικός όγκος αέρα μέσα από το φίλτρο υπολογίστηκε σε $V=2,0376 \times 10^5$ SL.

Οι μετρήσεις που έγιναν ήταν διάρκειας είκοσι λεπτών (20') η κάθε μία, λαμβάνονταν διαδοχικά κάθε είκοσι λεπτά και τα ενεργειακά φάσματα αποθηκεύονταν σε δυο τύπους αρχείων, CNF και IEC. Την πρώτη μία ώρα συλλέχθηκαν χειροκίνητα τρία φάσματα, ενώ στην συνέχεια η συλλογή έγινε μέσω task του προγράμματος GENIE, για την αυτόματη λήψη και αποθήκευση των φασμάτων. Συγκεκριμένα, αφού επιλέχθηκε ο ανιχνευτής από τον όποιον θα λαμβάνονταν τα δεδομένα, καθώς και η διάρκεια λήψης κάθε φάσματος ξεκίνησε η καταγραφή των γεγονότων με την εντολή START. Πριν την λήψη του επόμενου φάσματος εκκαθαριζόταν το περιεχόμενο του MCA με την εντολή Clear. Μετά την αποθήκευση και του τρίτου φάσματος ορίστηκε και προγραμματίστηκε κατάλληλο task του προγράμματος GENIE, για την αυτόματη λήψη και αποθήκευση των φασμάτων, αυτοματοποιώντας την διαδικασία λήψης και αποθήκευσης των φασμάτων για τις επόμενες μετρήσεις. Σημαντικός παράγοντας στην ρύθμιση αυτή ήταν η χρονική ταύτιση του τέλους του έκτου φάσματος που συλλέχθηκε (2^η ώρα), με το κλείσιμο της αντλίας και το πέρασμα στην τελευταία φάση του πειράματος.

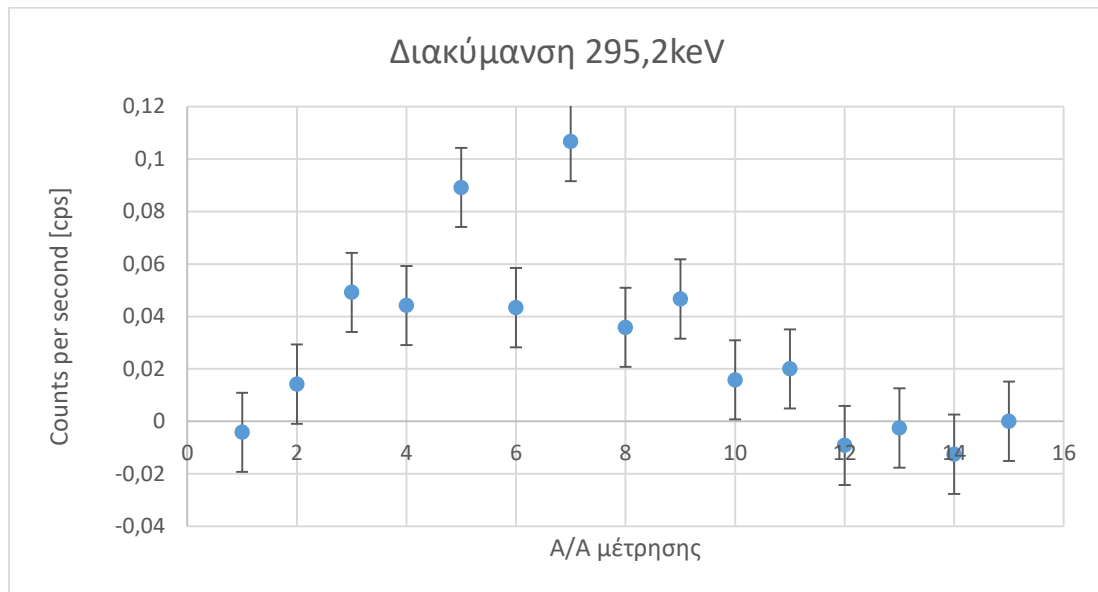
Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων, από τα αποθηκευμένα αρχεία αντλήθηκαν οι κατάλληλες πληροφορίες (επιφάνεια φωτοκορυφής και αβεβαιότητα u),

¹⁸ Standard Liters per Minute

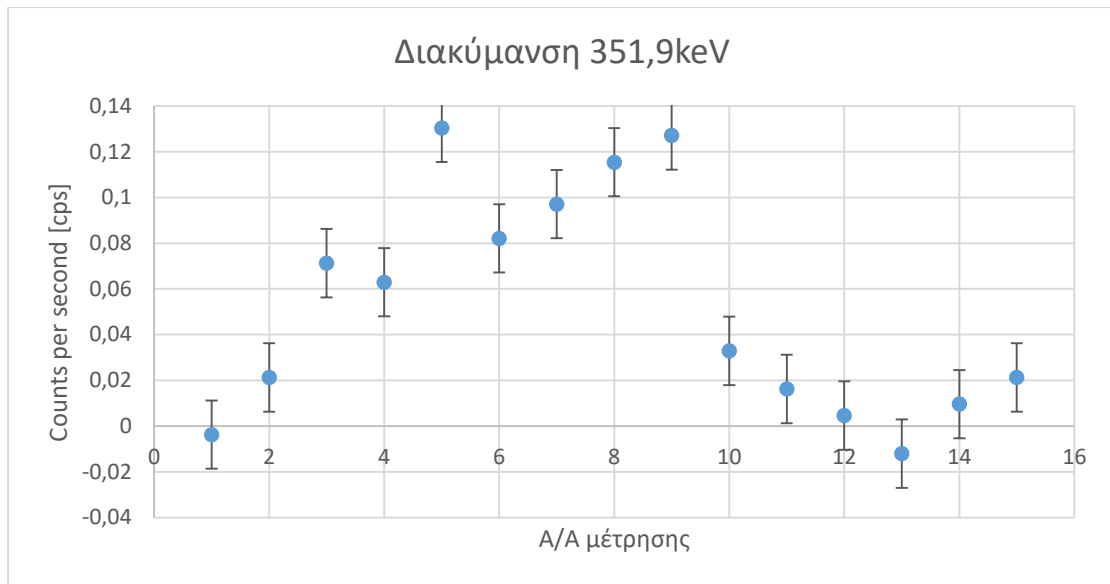
για κάθε φάσμα και με βάση την Εξίσωση 4.6 υπολογίστηκε ο ρυθμός καταγραφής γεγονότων (counts per second, cps). Αντίστοιχη μετατροπή έγινε και για την επιφάνεια υποστρώματος κάθε φωτοκορυφής:

$$cps = \frac{area [counts]}{d [sec]} \quad (4.6)$$

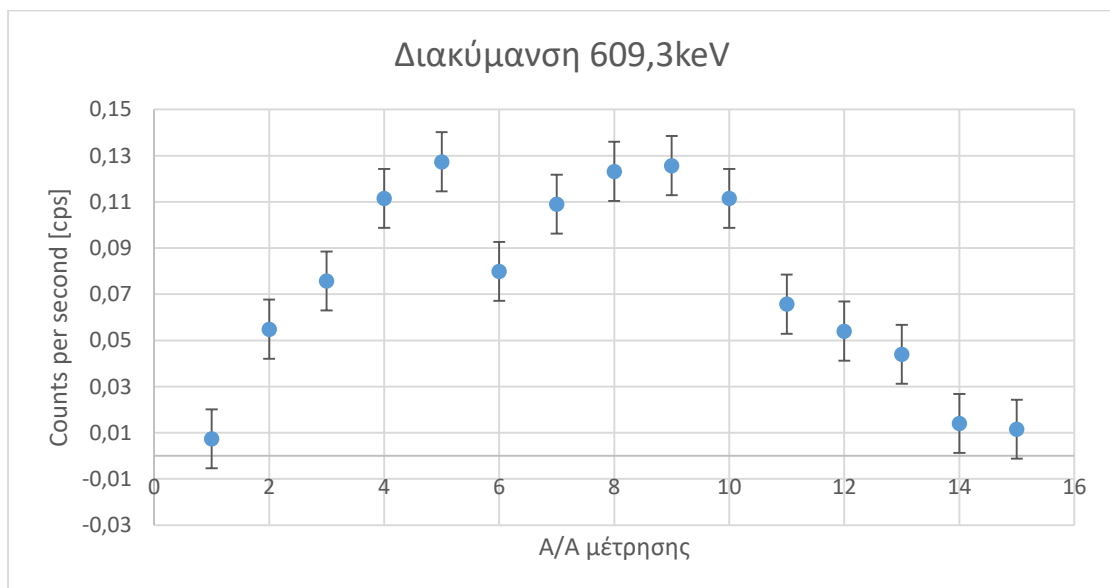
Στα Διαγράμματα 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 και 4.22 παρουσιάζεται η εξέλιξη όλων των φωτοκορυφών ενδιαφέροντος. Η αναμενόμενη συμπεριφορά (φαινόμενα Growth και Decay) παρατηρείται εντονότερα για τα φωτόνια ενέργειας 295,2 keV και 609,3 keV, συγκριτικά με τη περίπτωση φωτονίων ενέργειας 1120,3 keV και 1764,5 keV, ενώ για τις ενέργειες 351,9 keV και 1460,7 keV δεν παρατηρείται καθόλου το φαινόμενο της συσσώρευσης. Ειδικά για τα φωτόνια ενέργειας 1460,7 keV που εκπέμπονται από το φυσικό ραδιενεργό ισότοπο ^{40}K , η σταθερότητα (στα πλαίσια της στατιστικής κύμανσης) ήταν αναμενόμενη. Και στην περίπτωση αυτή, οι αρνητικές τιμές υποδεικνύουν τιμές υποστρώματος.



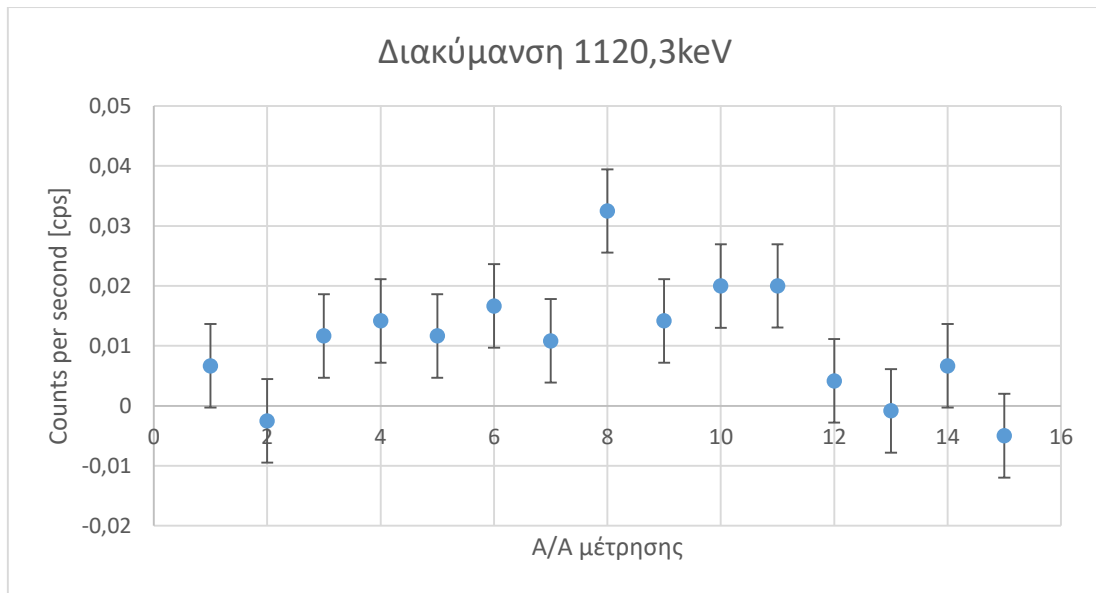
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 17: Εξέλιξη του ^{214}Pb με βάση την φωτοκορυφή 295,2 keV



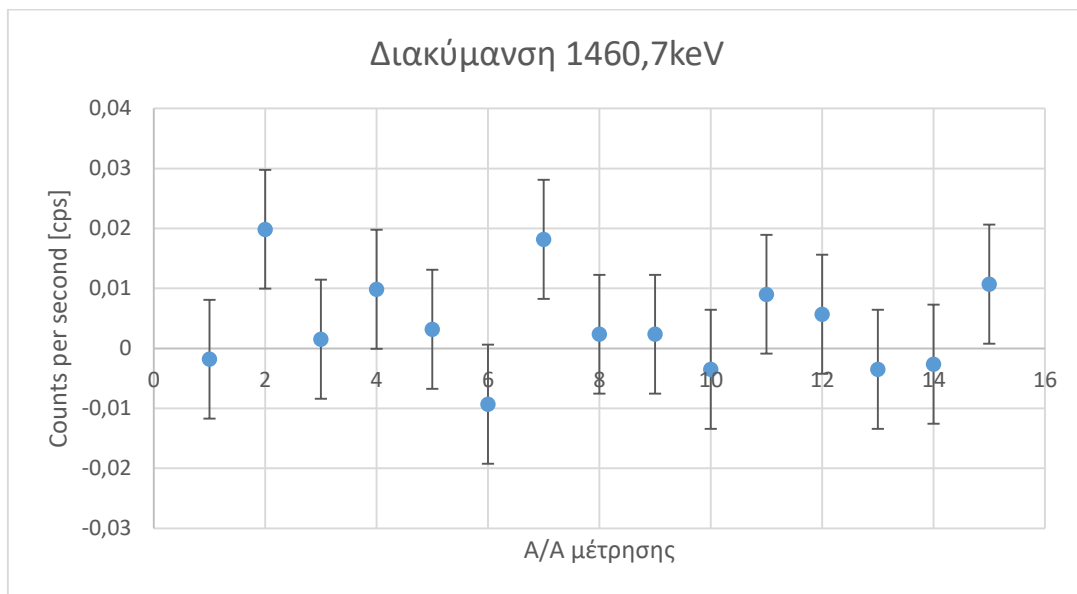
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 18: Εξέλιξη του ^{214}Pb μα βάση την φωτοκορυφή 351,9 keV



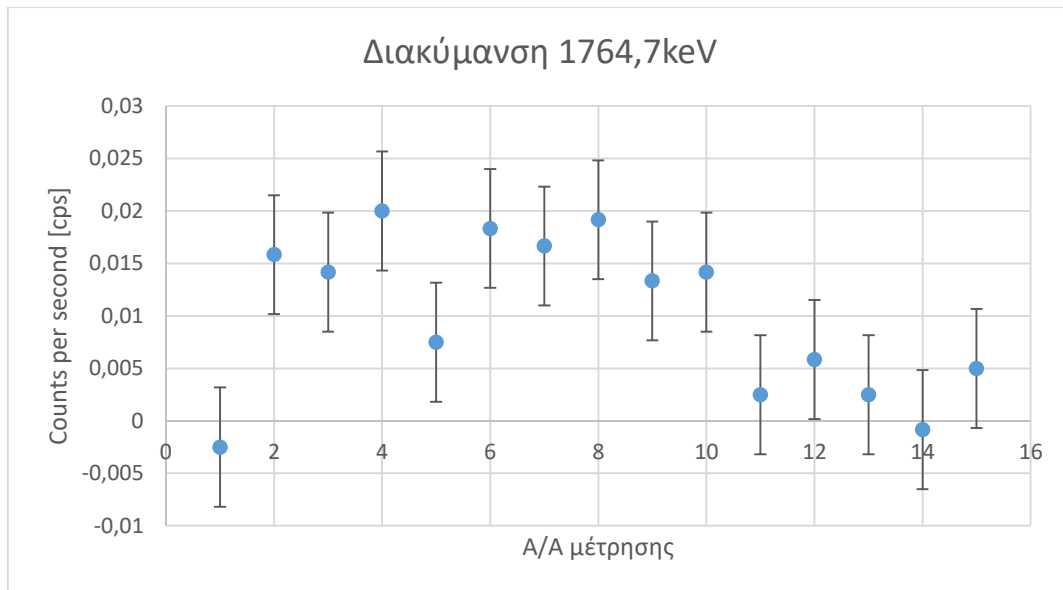
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 19: Εξέλιξη του ^{214}Bi με βάση την φωτοκορυφή 609,3 keV



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 20: Εξέλιξη του ^{214}Bi με βάση την φωτοκορυφή 1120,3 keV



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 21: Εξέλιξη του ^{40}K με βάση την φωτοκορυφή 1460,7keV



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 22: Εξέλιξη του ^{214}Bi με βάση την φωτοκορυφή 1764,7 keV

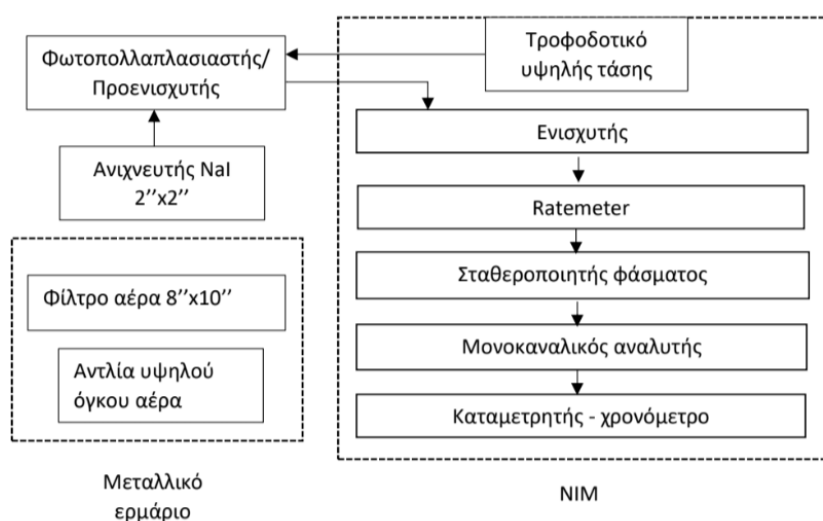
Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 4.17 έως και 4.22, επιβεβαιώνεται ότι η καλύτερη απεικόνιση των υπό μελέτη φαινομένων γίνεται μέσω της φωτοκορυφής των 609,3 keV του ^{214}Bi . Για τον λόγο αυτό, στα επόμενα πειράματα η μελέτη επικεντρώθηκε στη συγκεκριμένη φωτοκορυφή. Κάτι που έχει ενδιαφέρον είναι ότι – αν και δεν φαίνεται να είναι στατιστικά σημαντικές – οι τιμές της επιφάνειας της φωτοκορυφής του ^{40}K , φαίνεται να παρουσιάζονται αυξημένες κατά τη διάρκεια του πειράματος, κάτι που πιθανότατα οφείλεται σε υποεκτίμηση της αρχικής τιμής του αντίστοιχου υποστρώματος

4.4 Τέταρτη σειρά μετρήσεων με τη διάταξη NaI 2"x2" και το δειγματολήπτη υψηλού όγκου αέρα F&J

Αφού επιβεβαιώθηκε η δυνατότητα παρατήρησης στο εξωτερικό περιβάλλον της διακύμανσης της φωτοκορυφής των 609,3 keV με τον ανιχνευτή BEGe, συγκροτήθηκε εκ νέου η προτεινόμενη διάταξη με τον ανιχνευτή NaI 2"x2" και τον δειγματολήπτη υψηλού όγκου αέρα, όπως περιγράφεται αναλυτικότερα στο εδάφιο 3.3.3.

Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος αέρα που περνά μέσα από το φίλτρο, τόσο μεγαλύτερη είναι και η συγκέντρωση των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου που συσσωρεύονται στο φίλτρο, με αποτέλεσμα την ενίσχυση του σήματος. Αυτός ήταν ο βασικός λόγος χρήσης του δειγματολήπτη υψηλού όγκου αέρα. Ταυτόχρονα, η

μετακίνηση του ανιχνευτή NaI 2''x2'' από τον κλωβό όπου ήταν εγκατεστημένος δίπλα στον τοίχο του κτηρίου, στη θέση του δειγματολήπτη F&J αναμένεται ότι θα μειώσει αισθητά τον θόρυβο που προκαλείται από τα οικοδομικά υλικά, είτε λόγω απευθείας ακτινοβολήσης είτε λόγω σκεδάσεων. Στις μετρήσεις που ακολούθησαν, μελετήθηκε η διακύμανση των θυγατρικών του ραδονίου με τη νέα συγκρότηση της διάταξης (Εικόνα 4.4) , η λήψη του ενεργειακού φάσματος και η επαλήθευση της θέσης της φωτοκορυφής, ενώ επιπλέον έγινε προσδιορισμός του υποστρώματος και για τις δύο αυτές περιπτώσεις. Η μεθοδολογία που ακολούθηθηκε ήταν όμοια με τις προηγούμενες σειρές μετρήσεων.

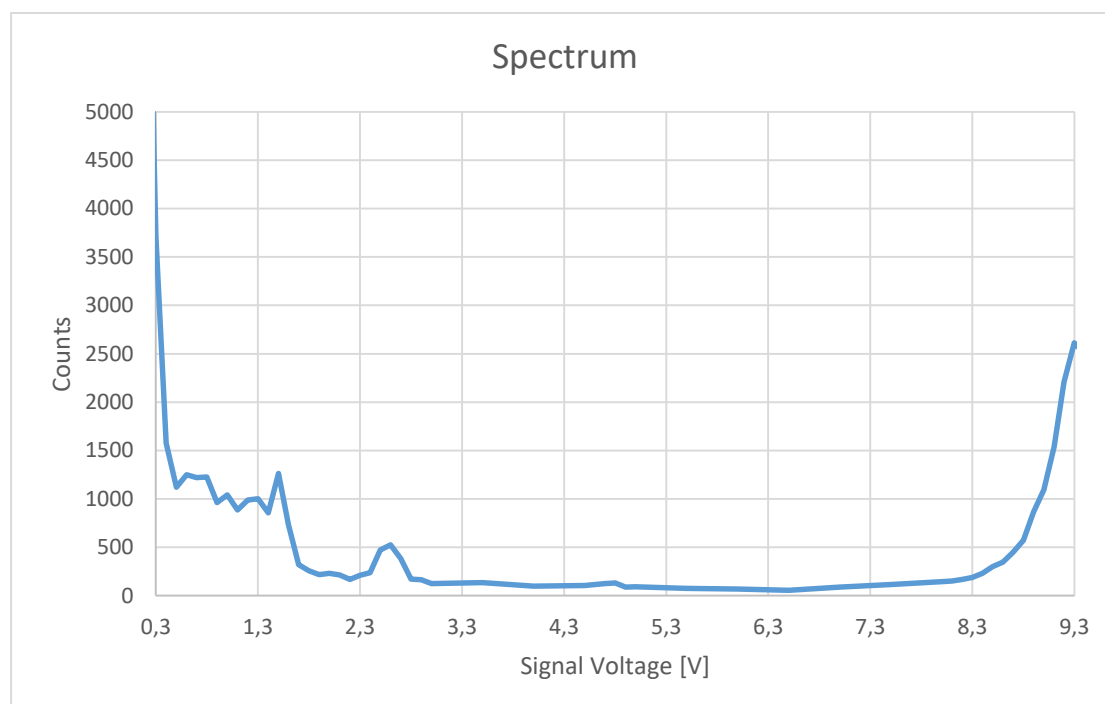


ΕΙΚΟΝΑ 4. 4: Διαγραμματική απεικόνιση ροής σήματος στην διάταξη NaI 2''x2'' και της αντλίας F&J

4.4.1 Παραγωγή φάσματος με χρήση του SCA

Σε αυτή την αρχική φάση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε πηγή Ραδίου (^{226}Ra) σε ελάχιστη απόσταση (1-2 cm) από τον ανιχνευτή NaI, ώστε να ενισχυθεί το σήμα και να καταγραφεί το φάσμα με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η μεθοδολογία λήψης του φάσματος απαιτεί να ρυθμιστούν, το παράθυρο (window) του SCA σε 0,1 V, και το κατώτερο όριο (Lower Level, LL) στην χαμηλότερη δυνατή θέση (0 V). Η καταμέτρηση των γεγονότων (σημάτων από τον ανιχνευτή) πραγματοποιείται για χρονική διάρκεια 40 s. Το επίπεδο διαχωρισμού των παλμών (LL) μεταβαλλόταν με συγκεκριμένο βήμα 0,1 V, με εξαίρεση την περιοχή από 3,0 V έως 8,0 V, όπου το βήμα μεταβολής ορίστηκε 0,5 V, καθώς η περιοχή αυτή του φάσματος δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον. Μετά από κάθε μέτρηση καταγράφονταν το πλήθος των

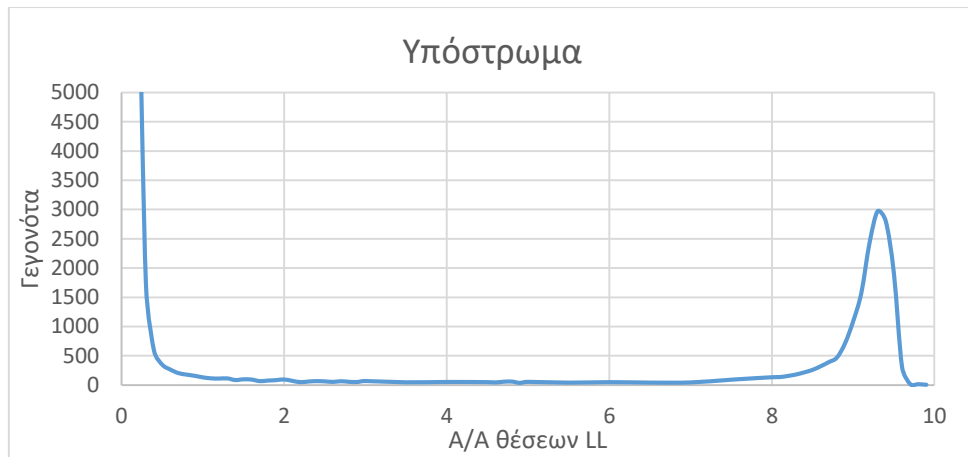
καταγεγραμμένων γεγονότων, και με την βοήθεια υπολογιστικού φύλλου EXCEL έγινε η αναπαραγωγή του φάσματος (Διάγραμμα 4.23).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 23: Φάσμα του ανιχνευτή NaI 2”x2” με χρήση πηγής Ραδίου

4.4.2 Μελέτη υποστρώματος με χρήση του SCA

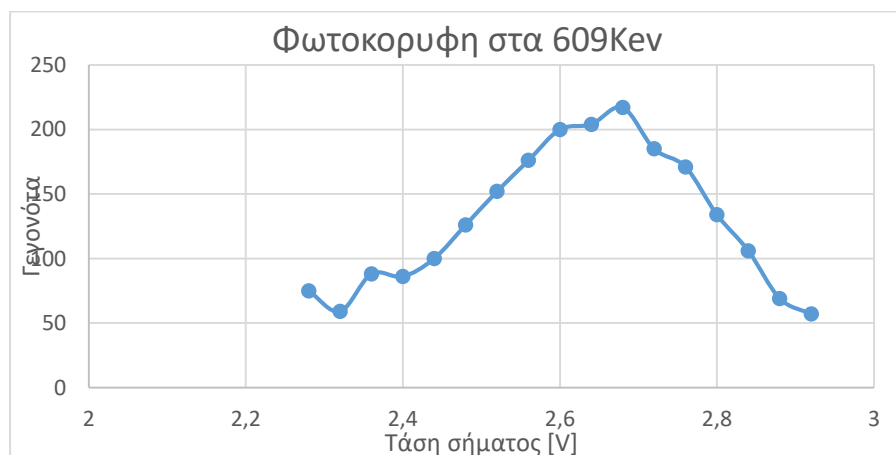
Για τον προσδιορισμό του υποστρώματος, πραγματοποιήθηκε σειρά μετρήσεων με χρήση του μονοκαναλικού αναλυτή. Το κατώτερο επίπεδο (LL) ρυθμίστηκε στην χαμηλότερη δυνατή θέση (0,0 V) και έγιναν μετρήσεις έως και τα 10,0V με βήμα μεταβολής 0,1 V, με εξαίρεση και πάλι την περιοχή από 3,0 V έως 8,0 V, όπου το βήμα ορίστηκε στα 0,5 V. Σε αυτά τα πειράματα τα οποία έγιναν με την αντλία να μην είναι σε λειτουργία, απομακρύνθηκε η πηγή Ραδίου από το ανιχνευτή, το παράθυρο παρέμεινε ρυθμισμένο στα 0,1V και η διάρκεια κάθε μέτρησης ήταν 40 s. Μετά την καταγραφή των γεγονότων για κάθε κανάλι, προέκυψε το φάσμα του Διαγράμματος 4.24.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 24: Διάγραμμα υποστρώματος με τον ανιχνευτή NaI 2"x2" επί του δειγματολήπτη F&J και την αντλία εκτός λειτουργίας

4.4.3 Προσδιορισμός της θέσεως της φωτοκορυφής ενδιαφέροντος

Η μεθοδολογία για τον εντοπισμό και την απεικόνιση της φωτοκορυφής ενδιαφέροντος 609,3 keV με χρήση του SCA ήταν όμοια με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την απεικόνιση ολόκληρου του φάσματος. Η θέση της φωτοκορυφής 609,3 keV στο φάσμα εντοπίστηκε περί του εύρους από 2,0 V έως και 3,0 V, οπότε το κατώτατο όριο (LL) ρυθμίστηκε αρχικά στα 2,2 V και το παράθυρο (window) στα 0,04 V. Από τις συνολικές μετρήσεις που έγιναν στην περιοχή εύρους τάσης από 2,0 V έως 3,0 V, προέκυψε το Διάγραμμα 4.25 σύμφωνα με το οποίο το εύρος της φωτοκορυφής 609 keV εντοπίζεται στην περιοχή από τα 2,28 V έως και τα 2,92 V. Επομένως, εκτιμήθηκε ότι για να καταγραφεί το σύνολο των γεγονότων που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη φωτοκορυφή, το κατώτερο όριο (LL) του SCA θα έπρεπε να ρυθμιστεί στα 2,28 V, και το παράθυρο (ΔΕ) στα 0,66 V.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. 25: Προσδιορισμός φωτοκορυφής 609 keV.

Παρόλο που η συγκρότηση αυτή, με τον ανιχνευτή NaI 2'x2' τοποθετημένο επί του δειγματολήπτη F&J αναμένονταν ότι θα δίνει υψηλότερης ακρίβειας αποτελέσματα, από τη διάταξη η οποία βασιζόταν στην αντλία TFIA, τελικά δεν αξιοποιήθηκε και δεν έγιναν πειράματα με την αντλία σε λειτουργία για δύο λόγους:

- διαπιστώθηκε δυσλειτουργία (αστάθεια) της διάταξης και δυσκολία ρύθμισης του σταθεροποιητή φάσματος
- εκτιμήθηκε ότι η αξιοποίηση του μεγαλύτερου ανιχνευτή NaI (3'x3') θα οδηγούσε σε μεγαλύτερη απόδοση ανίχνευσης, αλλά και – ενδεχομένως – μειωμένο υπόστρωμα, καθώς δεν περιέχει πηγή ^{241}Am

Η συγκρότηση και λειτουργία της νέας αυτής προτεινόμενης διάταξης παρουσιάζεται με λεπτομέρεια στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

Κεφάλαιο 5:

Τελική συγκρότηση της μετρητικής διάταξης

5.1 Εισαγωγή

Με την ολοκλήρωση των πειραμάτων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο διαπιστώθηκε η βέλτιστη διάταξη και η κατάλληλη γεωμετρία για τη μελέτη της διακύμανσης των θυγατρικών του ραδονίου στην ατμόσφαιρα και συγκεκριμένα του ^{214}Bi . Η διάταξη αυτή αποτελούνταν από τον ανιχνευτή NaI, διαστάσεων κρυστάλλου 3"x3" και την αντλία υψηλής παροχής αέρα F&J με προσαρμοσμένο ορθογώνιο φίλτρο αέρα 8"x10" στην αναρρόφησή της. Αφού συγκροτήθηκε η μετρητική διάταξη αυτή, διενεργήθηκαν τα πειράματα του βασικού και τελευταίου τμήματος της εργασίας. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται ο έλεγχος της αποδοτικότητας της διάταξης αυτής ως προς την αποτύπωση του φάσματος και τον εντοπισμό της φωτοκορυφής ενδιαφέροντος, ενώ επίσης αναλύεται η διακύμανση του ^{214}Bi στον ατμοσφαιρικό αέρα με χρήση της αντλίας. Παράλληλα, σε αυτό το Κεφάλαιο θα μας απασχολήσει και η μελέτη του βασικού μειονεκτήματος των ανιχνευτών Ιωδιούχου Νατρίου, δηλαδή η μετατόπιση του φάσματος εξαιτίας της κύμανσης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.

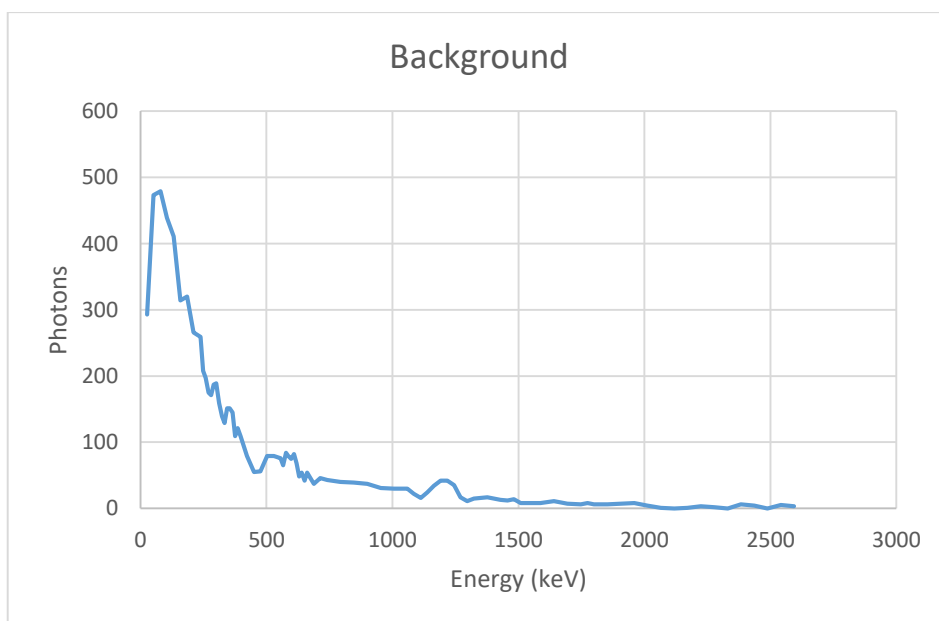
5.2 Το υπόστρωμα της διάταξης

Η αξιολόγηση της αποδοτικότητας της διάταξης έγινε με κριτήριο το λόγο του σήματος που λαμβάνεται προς τον αντίστοιχο θόρυβο. Για την μελέτη του λόγου αυτού ήταν απαραίτητος ο προσδιορισμός του υποστρώματος των μετρήσεων το οποίο πρέπει να εκτιμάται και να αφαιρείται από αυτές. Για τον υπολογισμό του υποστρώματος οι μετρήσεις έγιναν με τον δειγματολήπτη εκτός λειτουργίας. Ο ανιχνευτής τροφοδοτούνταν με υψηλή τάση 800V και οι ρυθμίσεις του ενισχυτή ήταν 50x1,1 (coarse gain x fine gain). Για τη λήψη φάσματος του υποστρώματος υποτέθηκε αμελητέα μεταβολή, τόσο των συγκεντρώσεων των ισοτόπων στην ατμόσφαιρα, όσο και της θέσης των φωτοκορυφών του φάσματος, λαμβάνοντας υπόψη τις αρκετά σταθερές μετεωρολογικές συνθήκες (θερμοκρασία) που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Η λήψη των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε κυρίως με την χρήση του μονοκαναλικού αναλυτή και του καταμετρητή, και αποτελούνταν από τα παρακάτω βήματα:

1. Ρύθμιση του ενεργειακού παραθύρου (ΔE) του μονοκαναλικού αναλυτή.
2. Επιλογή του κατάλληλου βήματος μεταβολής του κατώτερου επιπέδου (Lower Level, LL) του μονοκαναλικού αναλυτή
3. Λήψη μετρήσεων διάρκειας 60 s για όλες τις επιλεγμένες θέσεις του κατώτερου επιπέδου (LL) και καταγραφή των ανιχνευόμενων γεγονότων.

Αναλυτικότερα, το παράθυρο ΔE (Window) του μονοκαναλικού αναλυτή ρυθμίστηκε στα 0,04 V και το βήμα μεταβολής του κατώτερου επιπέδου LL ήταν 0,1 V, με εξαίρεση τα εύρη τάσης [0,9 V, 0,98 V], [1,1 V, 1,5 V] και [2,1 V, 2,5 V] τα οποία αντιστοιχούσαν στις φωτοκορυφές ενδιαφέροντος 295,3 keV και 351,9 keV του ^{214}Pb και 609,3 keV του ^{214}Bi αντίστοιχα, όπου η μεταβολή γινόταν με βήμα 0,04 V. Η μέθοδος αυτή αποσκοπούσε στη μελέτη όλων των ενεργειακών περιοχών όπου μπορούσε να ανιχνευθεί κάποιο φωτόνιο από τα ισότοπα ενδιαφέροντος. Για το λόγο αυτό στα εύρη τάσης από 3 V έως 4 V και από 5 V έως 9,8 V, η μεταβολή του κατώτερου επιπέδου (LL) έγινε με μεγαλύτερο βήμα 0,2 V, διότι στις περιοχές αυτές δεν αναμενόταν κάποια φωτοκορυφή ενδιαφέροντος. Κατά αυτόν τον τρόπο, προέκυψε το φάσμα του Διαγράμματος 5.1.



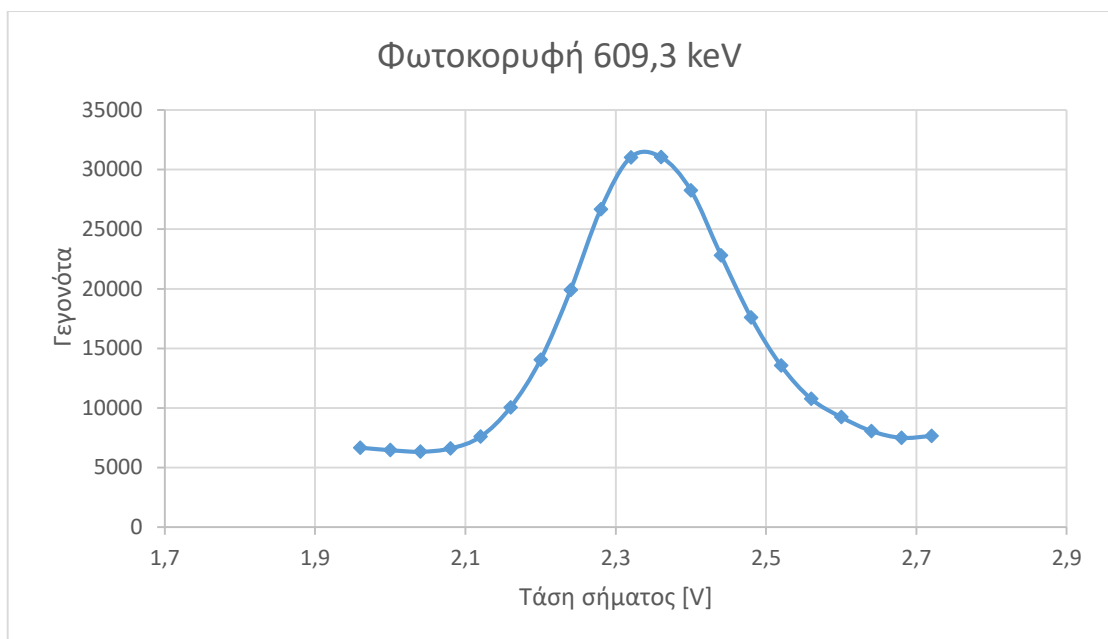
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5. 1: Φάσμα υποστρώματος

Στο διάγραμμα 5.1 τα γεγονότα στις χαμηλές ενέργειες είναι αυξημένα κυρίως λόγω του φαινομένου Compton καθώς και ακτίνων-X, ενώ στις υψηλότερες ενέργειες –άνω των 500keV –το συνεχές υπόστρωμα είναι σε αρκετά χαμηλά επίπεδα, με τα καταγεγραμμένα γεγονότα να είναι πολύ λιγότερα από 100. Εκτός από το συνεχές υπόστρωμα, μπορεί να εντοπίσει κανείς καθαρά στο διάγραμμα 5.1 φωτοκορυφές περί τις ενέργειες [500 keV-700 keV]¹⁹ και [1100 keV-1300 keV]. Από τις μετρήσεις εκτιμήθηκε η θέση της φωτοκορυφής 609,3 keV στην περιοχή [2,1 V, 2,6 V] και για τον προσδιορισμό του υποστρώματός της πραγματοποιήθηκε σχετική μέτρηση διάρκειας 60 s, με τον μονοκαναλικό αναλυτή ρυθμισμένο για κατώτερο επίπεδο (LL) 2,1 V και παράθυρο (Window) 0,5 V. Κατά την εν λόγω μέτρηση καταγράφηκαν συνολικά 268 γεγονότα, τα οποία αντιστοιχούσαν στο υπόστρωμα της φωτοκορυφής για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

5.3 Επαλήθευση της θέσης της φωτοκορυφής 609,3 keV

Με τον υπολογισμό του υποστρώματος, τόσο για όλο το φάσμα όσο και στην περιοχή των 609,3 keV, επαναπροσδιορίστηκε και ελέγχθηκε η θέση της φωτοκορυφής 609,3 keV με χρήση πηγής Ραδίου ²²⁶Ra, η οποία τοποθετήθηκε ακριβώς δίπλα στον ανιχνευτή NaI 3”x3”. Η λήψη των σχετικών μετρήσεων έγινε με την αντλία εκτός λειτουργίας. Το ενεργειακό παράθυρο (ΔΕ) του μονοκαναλικού αναλυτή ήταν ρυθμισμένο στα 0,04 V, ενώ το κατώτερο επίπεδο του καναλιού (LL) μεταβαλλόταν με βήμα 0,04 V. Για κάθε μέτρηση από τα 1,96 V έως τα 2,76 V έγινε καταγραφή των γεγονότων που ανιχνεύθηκαν σε διάστημα 60 s. Παρ’ όλο που η θέση της φωτοκορυφής προσδιορίστηκε στην περιοχή από 2,1 V έως 2,5 V, επιλέχθηκαν μερικά ακόμη κανάλια δεξιά και αριστερά αυτής, για τον έλεγχο πιθανής ολίσθησής της. Μέσω αυτών των μετρήσεων επιβεβαιώθηκε η ικανότητα του ανιχνευτή NaI να εντοπίσει με πολύ καλή απόδοση την κορυφή, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.2.

¹⁹ Παρότι οι μετρήσεις έγιναν με μεταβολή του επιπέδου διαχωρισμού (0-10V) στο γράφημα η κλίμακα δίνεται σε keV, μετά από σχετική αντιστοίχιση (βαθμονόμηση) που έγινε με χρήση σημειακών πηγών ¹³⁷Cs και ²²⁶Ra



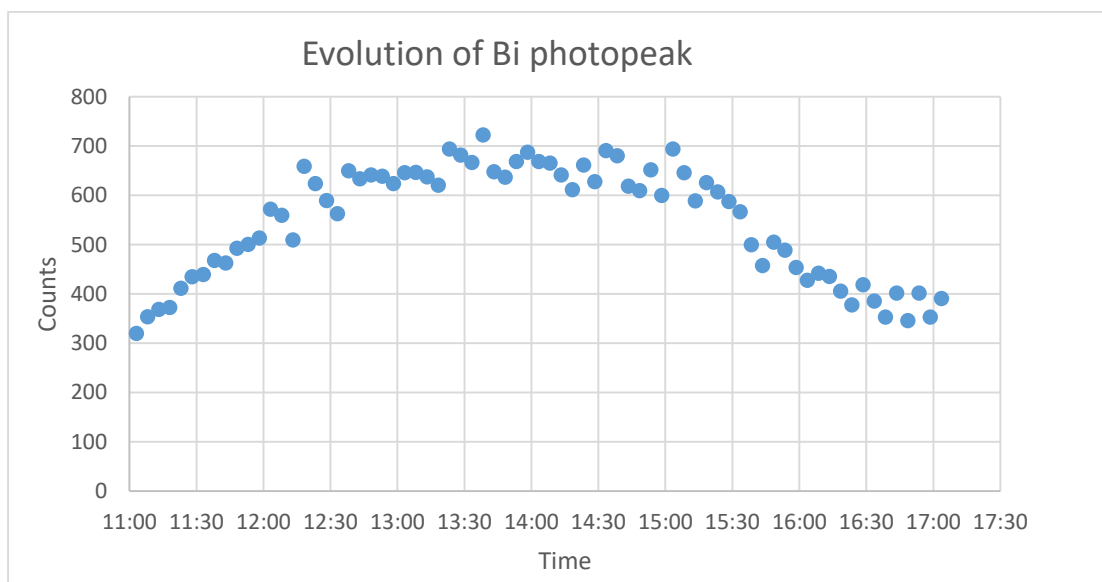
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5. 2: Φωτοκορυφή Βισμούθίου ενέργειας 609,3 keV

Η φωτοκορυφή του ^{214}Bi στα 609,3 keV όπως αποτυπώνεται στο διάγραμμα 5.2 αποτυπώνει με πολύ καλή προσέγγιση την αναμενόμενη μορφή κανονικής κατανομής.

5.4 Μελέτη διακύμανσης της φωτοκορυφής του ^{214}Bi

Αφού προσδιορίστηκε η θέση της συγκεκριμένης φωτοκορυφής του ^{214}Bi , ακολούθησε η μελέτη της εξέλιξης της με ταυτόχρονη λειτουργία της αντλίας. Στα πλαίσια των μετρήσεων αυτών ελέγχθηκε η εμφάνιση των φαινομένων προσαύξησης (Growth) και απομείωσης (Decay), καθώς και η δυνατότητα της διάταξης να καταγράψει ισχυρό σήμα το οποίο θα βοηθούσε την καλύτερη παρακολούθηση της διακύμανσης της φωτοκορυφής για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι μετρήσεις διακρίνονταν σε τρεις φάσεις, τα οποία αντιστοιχούν στις τρεις διαφορετικές φάσεις εξέλιξης της συγκέντρωσης των βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου στο φίλτρο αέρα. Κατά τις πρώτες δύο ώρες μετρήσεων με την αντλία σε λειτουργία παρατηρήθηκε η συσσώρευση των ραδιοϊσοτόπων στο φίλτρο, ενώ κατά τη διάρκεια των επόμενων δύο ωρών παρατηρούνταν απλώς η διακύμανση των ισοτόπων αυτών, καθώς η παραγωγή και η κατανάλωση είχε πλέον εξισορροπηθεί. Το τελευταίο σκέλος του πειράματος, διάρκειας δύο ωρών, αφορούσε μετρήσεις με την αντλία κλειστή για την παρακολούθηση του φαινομένου της απομείωσης των θυγατρικών του ραδονίου έως του υποστρώματος.

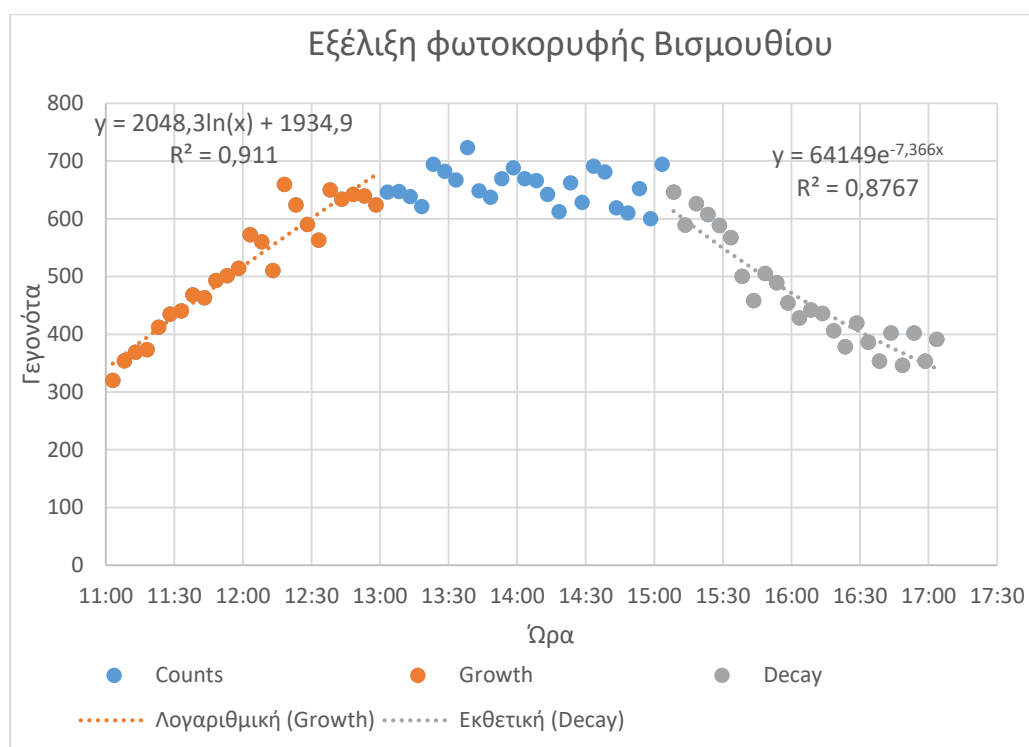
Για την παρακολούθηση της διακύμανσης της φωτοκορυφής 609,3 keV του ^{214}Bi , ο μονοκαναλικός αναλυτής ρυθμίστηκε για κατώτερο επίπεδο (LL) καναλιού 2,1 V και παράθυρο (ΔE) 0,4 V. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν μόλις τέθηκε σε λειτουργία ο δειγματολήπτης αέρα και λαμβάνονταν κάθε πέντε λεπτά, με διάρκεια μέτρησης $\Delta t = 100\text{s}$. Η μέση παροχή της αντλίας ήταν 1098 SLPM. Μετά από δύο ώρες και αφού η συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου στο φίλτρο έφτασε σε ένα μέγιστο επίπεδο, ακολούθησαν μετρήσεις συνολικής διάρκειας δύο ωρών, κατά τις οποίες παρατηρούνταν η διακύμανση της επιφάνειας της φωτοκορυφής 609,3 keV. Ο συνολικός όγκος αέρα που καταγράφηκε από τον δειγματολήπτη για τις τέσσερις ώρες λειτουργίας ήταν $V = 2,6346 \times 10^5 \text{ SL}$. Στο Διάγραμμα 5.3 παρουσιάζεται η εξέλιξη της φωτοκορυφής 609 keV κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Οι μετρήσεις συνέχισαν για δύο ώρες μετά το κλείσιμο της αντλίας.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3: Η εξέλιξη του ^{214}Bi σε διάστημα έξι ωρών, μέσω παρακολούθησης της φωτοκορυφής 609,3 keV.

Η επίδραση του φαινομένου της συσσώρευσης (growth) παρατηρείται αμέσως μετά τη θέση της αντλίας σε λειτουργία, καθώς τα θυγατρικά του ραδονίου που φέρει ο ατμοσφαιρικός αέρας συλλέγονται στο φίλτρο οπότε και οι συγκεντρώσεις τους αυξάνουν (Διάγραμμα 5.4), μέχρις ότου η συσσώρευση των ραδιοϊσοτόπων αντισταθμιστεί από τη διάσπασή τους καθώς πρόκειται για ανταγωνιστικούς μηχανισμούς. Για το ^{214}Bi , η προσ αύξηση της συγκέντρωσής του διήρκεσε περίπου 2 ώρες, λόγω του χρόνου ημιζωής του (19,7 min). Με τη θέση της αντλίας εκτός λειτουργίας, τα θυγατρικά του ραδονίου συνεχίζουν να διασπώνται (decay) και η

συγκέντρωσή τους μειώνεται, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.4. Για το ^{214}Bi η συγκέντρωση αναμένεται να φτάνει σε επίπεδα υποβάθρου μετά από περίπου δύο ώρες, επίσης λόγω του χρόνου ημιζωής του. Το φαινόμενο της συσσώρευσης (growth) μπορεί να περιγραφεί από λογαριθμική ή γραμμική²⁰ συνάρτηση, ενώ το φαινόμενο της διάσπασης (decay) με εκθετική ή γραμμική συνάρτηση. Με την βοήθεια υπολογιστικού φύλλου EXCEL έγινε προσαρμογή της αντίστοιχης ευθείας αναδρομής σε κάθε φάση εξέλιξης του φαινομένου, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.4, και υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης R^2 .



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.4: Η εξέλιξη του ^{214}Bi σε διάστημα έξι ωρών, μέσω παρακολούθησης της φωτοκορυφής 609 keV. Διακρίνεται η επίδραση των φαινομένων συσσώρευσης (Growth) και απομείωσης (Decay), με τις αντίστοιχες καμπύλες προσαρμογής.

Για το φαινόμενο της προσαύξησης δοκιμάστηκαν τόσο προσαρμογή γραμμικής τάσης όσο και λογαριθμική. Η καλύτερη προσαρμογή και ο μεγαλύτερος συντελεστής συσχέτισης ήταν για την λογαριθμική εξίσωση $y = 2048,3 \ln(x) + 1934,9$, ($R^2=0,91$). Για το φαινόμενο της απομείωσης η προσαρμογή έγινε με εκθετική συνάρτηση $y = 64149e^{-7,366x}$ ($R^2=0,87$). Επισημαίνεται ότι με τη διάταξη αυτή τα γεγονότα που ανιχνεύονται μετά την συσσώρευση των θυγατρικών στο φίλτρο είναι

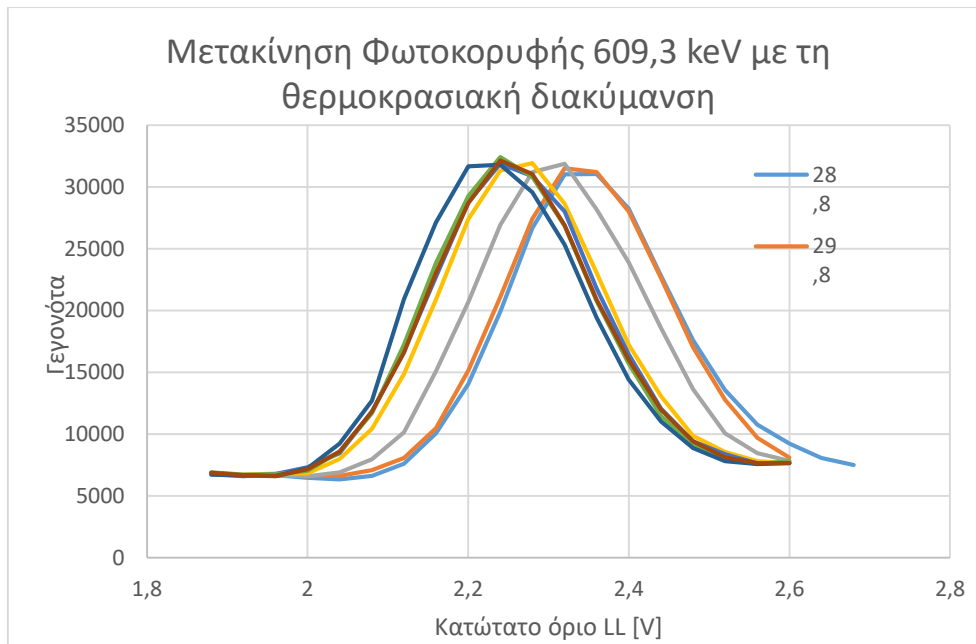
²⁰ Λόγω της στατιστικής των μετρήσεων δεν είναι εμφανής η ακριβής μορφή της καμπύλης αύξησης της συγκέντρωσης του ^{214}Bi

της τάξης των 700 γεγονότων ενώ στην αρχή των μετρήσεων τα γεγονότα ανιχνεύονται ήταν περί τα 300 κάτι που σαφώς δείχνει μία σημαντική αύξηση του «σήματος» από τα θυγατρικά του ραδονίου στην ατμόσφαιρα.

5.5 Παρακολούθηση της διακύμανσης της φωτοκορυφής 609,3 keV συναρτήσει της θερμοκρασίας περιβάλλοντος

Βασικό μειονέκτημα του ανιχνευτή NaI, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι η μετακίνηση (ολίσθηση) του ενεργειακού φάσματος κατά τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Το παραπάνω αποτελεί την κύρια αιτία που χρησιμοποιείται σταθεροποιητής φάσματος (stabilizer) για μετρήσεις σε περιβάλλοντα όπου παρατηρείται έντονη θερμοκρασιακή μεταβολή. Όμως, στην περίπτωση των τελευταίων πειραμάτων δε χρησιμοποιήθηκε σταθεροποιητής φάσματος, ενώ τα πειράματα διήρκησαν πολλές ώρες και διενεργήθηκαν σε εξωτερικό χώρο. Στη διάρκεια των έξι ωρών όπου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, η θερμοκρασιακή διακύμανση ήταν 4-5 °C. Επομένως, δημιουργήθηκε η βάσιμη υποψία για ολίσθηση του φάσματος και κατέστη αναγκαία η μελέτη της θέσης της φωτοκορυφής των 609,3 keV συναρτήσει της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, ώστε να προσδιοριστεί αν η ενδεχόμενη ολίσθησή κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν τέτοια ώστε να επηρεάζει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Για τον έλεγχο της παραπάνω υπόθεσης προγραμματίστηκε μία νέα σειρά μετρήσεων. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανά μία ώρα, από τις 8:40 το πρωί μέχρι και τις 15:40, δηλαδή σε διάστημα έξι ωρών, παράλληλα με την καταγραφή της θερμοκρασίας κατά την εκάστοτε μέτρηση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο ανιχνευτής NaI 3"x3" και η πηγή ραδίου ²²⁶Ra, η οποία τοποθετήθηκε σε μικρή απόσταση (~ 1cm) από τον ανιχνευτή, ενώ καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων η αντλία παρέμεινε εκτός λειτουργίας. Για τη συλλογή κάθε φάσματος με τον μονοκαναλικό αναλυτή (SCA), λαμβάνονταν μετρήσεις διάρκειας 60s με κατώτερο επίπεδο (LL) καναλιού από 1,88 V έως 2,76 V, ενεργειακό παράθυρο 0,04 V και βήμα 0,04 V. Η θερμοκρασία προσδιοριζόταν κάθε μία ώρα, πριν τη λήψη των μετρήσεων, με χρήση ηλεκτρονικού θερμομέτρου. Στο Διάγραμμα 5.5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι αιχμές που αντιστοιχούν στην ενέργεια των 609,3 keV, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις, για κάθε μία θερμοκρασία (για λόγους ευκολίας στην παρατήρηση τα πειραματικά σημεία έχουν ενωθεί μεταξύ τους).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.5: Αιχμές που αντιστοιχούν στην ενέργεια 609,3 keV για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Κάθε μία από αυτές τις αιχμές προσαρμόστηκε σε καμπύλη κανονικής κατανομής και προσδιορίστηκαν η μέση τιμή της κάθε φωτοκορυφής που αντιστοιχεί στο κεντροειδές της, το εύρος ημίσειος ύψους (FWHM) και η επιφάνεια των αντίστοιχων κανονικών καμπυλών όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

Η προσαρμογή των καμπυλών έγινε σε υπολογιστικό φύλλο EXCEL με χρήση της εντολής NORMDIST. Της προσαρμογής των δεδομένων προηγήθηκε μία σειρά απαραίτητων υπολογισμών. Αρχικά υπολογίστηκε η μέση τάση του σήματος που καταγράφεται σε κάθε κανάλι, σύμφωνα με την εξίσωση (5.1). Γνωρίζοντας την τάση του κατώτερου επιπέδου (LL) και για παράθυρο καναλιού του μονοκαναλικού αναλυτή 0,4 V, ισχύει:

$$V_{\text{μέσο}} = LL + 0.04/2 \quad (5.1)$$

Για κάθε μέτρηση υπολογίστηκε επίσης το συνεχές υπόστρωμα της φωτοκορυφής. Για το προσδιορισμό του υποστρώματος επιλέχθηκαν ύστερα από παρατήρηση τρία κανάλια δεξιά και αριστερά της φωτοκορυφής και καταγράφηκαν τα συνολικά γεγονότα που είχαν καταμετρηθεί σε αυτά. Για N_1 κανάλια αριστερά της καμπύλης με καταγεγραμμένα C_1 γεγονότα και N_2 κανάλια δεξιά της καμπύλης με C_2 καταγεγραμμένα γεγονότα αντίστοιχα, το υπόβαθρο υπολογίστηκε όπως στην εξίσωση (5.2):

$$Bg_{(συνεχές)} = (C_1 + C_2) / (N_1 + N_2) \quad (5.2)$$

Στην συνέχεια, αφαιρέθηκε από τα καταγεγραμμένα γεγονότα κάθε καναλιού το υπόστρωμα $Bg_{(συνεχές)}$ για τον προσδιορισμό του καθαρού σήματος C_{net} , σύμφωνα με την σχέση:

$$C_{net} = C - Bg_{(συνεχές)} \quad (5.3)$$

όπου C τα γεγονότα που καταμετρήθηκαν από τον καταμετρητή. Ταυτόχρονα, υπολογίστηκε η συχνότητα εμφάνισης γεγονότων σε κάθε κανάλι σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$fr_{sample} = C_{net} / Sum(C_{net}) \quad (5.4)$$

όπου $Sum(C_{net})$ είναι το άθροισμα των γεγονότων από τα κανάλια της φωτοκορυφή. Βάσει των παραπάνω, υπολογίστηκε ο σταθμισμένος μέσος και η τυπική απόκλιση των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, είναι:

$$\mu = sum(w) / sum(C_{net}) \quad (5.5)$$

όπου $w = V_{net} * C_{net}$, και

$$\sigma = \sqrt{sum(s) / sum(C_{net})} \quad (5.6)$$

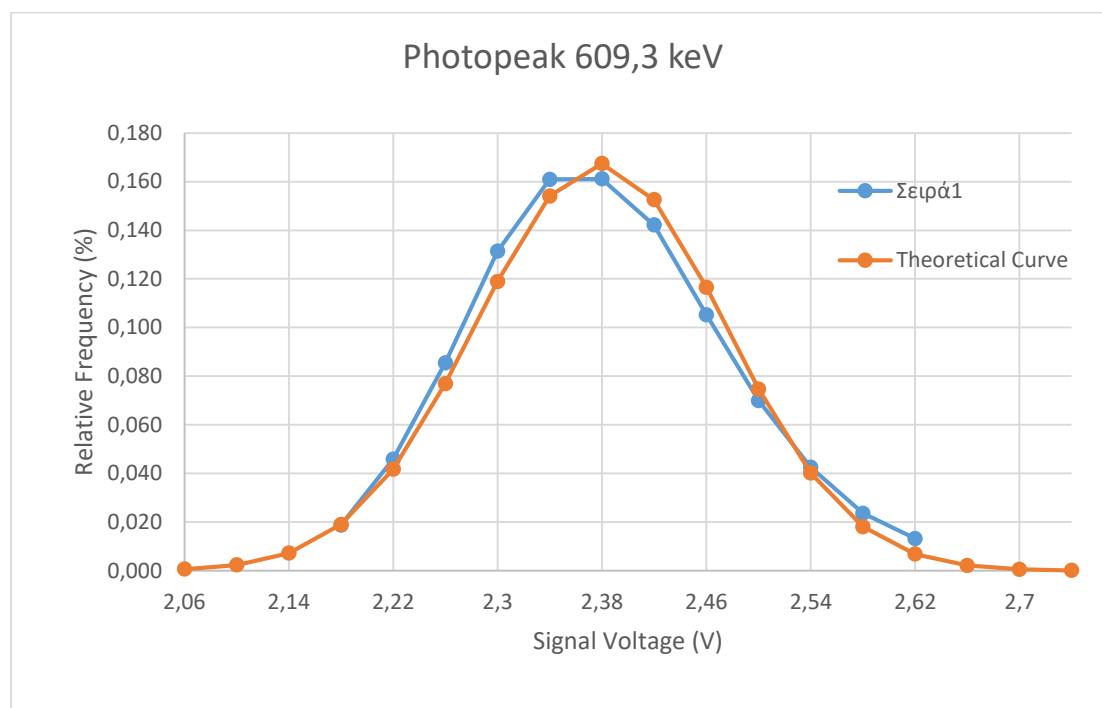
όπου $s = (V_{net} - \mu)^2 * C_{net}$.

Τέλος, έγινε χρήση της εντολής NORMDIST με είσοδο τις παραμέτρους LL, μ και σ . Επειδή μέσω της εντολής NORMDIST υπολογίζεται η πιθανότητα από την κατώτερη τιμή τάσης ενός καναλιού μέχρι την κατώτερη τιμή του επόμενου, η θεωρητική καμπύλη και τα γεγονότα που αντιστοιχούν σε κάθε κανάλι προέκυψαν από την παρακάτω εξίσωση (5.7).

$$C_i = NORMDIST_i - NORMDIST_{i-1} \quad (5.7)$$

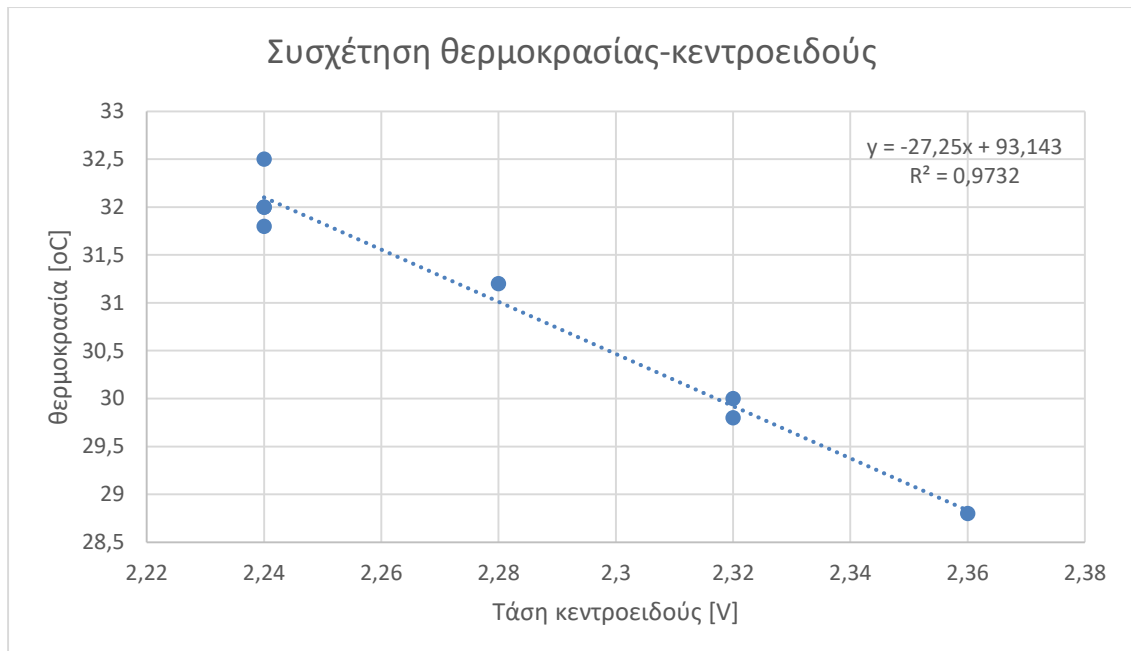
Με χρήση της εξίσωσης (5.7) κατασκευάστηκε το διάγραμμα της αντίστοιχης θεωρητικής καμπύλης και προσαρμόστηκε στις καμπύλες των μετρήσεων που προέκυψαν από τα καταγεγραμμένα γεγονότα. Αυτή η διαδικασία επαναλήφθηκε για κάθε μέτρηση εντός του χρονικού διαστήματος έξι ωρών και τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής για την πρώτη σειρά μετρήσεων φαίνονται ενδεικτικά στο

Διάγραμμα 5.6. Στο Παράρτημα Δ παρατίθενται τα διαγράμματα όλων των υπόλοιπων μετρήσεων, στα οποία εμφανίζεται η φωτοκορυφή των 609,3 keV, η αντίστοιχη κανονική καμπύλη το συνεχές υπόστρωμα των φωτοκορυφών, για κάθε χρονική στιγμή μετρήσεων από το πρωί μέχρι και νωρίς το απόγευμα.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5. 6: Φωτοκορυφή 609,3 keV από πειραματικά δεδομένα και η αντίστοιχη θεωρητική καμπύλη για μετρήσεις 8:40 και θερμοκρασίας 28,8 °C

Από τη συγκεκριμένη διερεύνηση προέκυψε το Διάγραμμα 5.7, στο οποίο φαίνεται η συσχέτιση της θέσης του κεντροειδούς της φωτοκορυφής με τη θερμοκρασία, από όπου γίνεται σαφές πόσο μεταβάλλεται το κεντροειδές, συναρτήσει της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.7: Συσχέτιση της θέσης του κεντροειδούς της φωτοκορυφής 609,3 keV με την θερμοκρασία.

5.5.2 Προσδιορισμός του υποβάθρου της φωτοκορυφής

Στην περίπτωση που η φωτοκορυφή εντοπίζεται στο φάσμα του υποστρώματος για τον προσδιορισμό της καθαρής επιφάνειας της φωτοκορυφής πρέπει να γίνεται η αφαίρεση της επιφάνειας της φωτοκορυφής του υποβάθρου.

Για τον υπολογισμό του υποστρώματος της φωτοκορυφής και με την βοήθεια των πρωτογενών δεδομένων που οδήγησαν στη χάραξη του Διαγράμματος 5.1, προσδιορίστηκαν τα κανάλια που αντιστοιχούν στην φωτοκορυφή των 609,3 keV, τα οποία προέκυψαν 10 σε αριθμό, ενώ επιλέχθηκαν και τρία κανάλια δεξιά και αριστερά αυτής, όπως φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Γεγονότα υποστρώματος

LL	Πλήθος γεγονότων
1,80	56
1,90	79
2,00	79
2,10	76
2,14	65
2,18	84

2,22	79
2,26	75
2,30	82
2,34	68
2,38	48
2,42	54
2,46	42
2,50	54
2,60	37
2,70	46

Από τα στοιχεία του Πίνακα 5.1, υπολογίστηκε το συνεχές υπόστρωμα και για τη φωτοκορυφή υποστρώματος, οπότε η επιφάνεια της φωτοκορυφής υποβάθρου υπολογίστηκε από την παρακάτω σχέση:

$$NETBg_{609} = sum(C_{2,1-2,46}) - 10 * average(C_{1,8-2}, C_{2,5-2,7}) \quad (5.8)$$

όπου ο πρώτος όρος $sum(C_{2,1-2,46})$ αντιστοιχεί στη συνολική επιφάνεια της φωτοκορυφής και $10 * average(C_{1,8-2}, C_{2,5-2,7})$ στο συνεχές υπόστρωμα. Από τα παραπάνω υπολογίστηκε η καθαρή επιφάνεια φωτοκορυφής υποστρώματος $NETBg_{609}$ των μετρήσεων αυτών στα 110,43 γεγονότα για μέτρηση διάρκειας 60 s.

5.5.3 Προσδιορισμός της καθαρής επιφάνειας φωτοκορυφής και του λόγου σήματος προς θόρυβο

Η καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής (Net_{Area}) προσδιορίστηκε αφαιρώντας από τη συνολική επιφάνεια της φωτοκορυφής ($Total_{Area}$), το συνεχές υπόστρωμα ($Bg_{(συνεχής)}$) και την επιφάνεια υποβάθρου της φωτοκορυφής ($NETBg_{609}$), το οποίο υπολογίστηκε από την εξίσωση (5.8):

$$Net_{Area} = Total_{Area} - NETBg_{609} - Bg_{(συνεχής)} \quad (5.9)$$

Κατά την προσαρμογή των φωτοκορυφών σε καμπύλες κανονικής κατανομής, προσδιορίστηκε και η καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής, δηλαδή το σύνολο των ανιχνευόμενων γεγονότων συγκεκριμένης ενέργειας από το οποίο έχει αφαιρεθεί το

πλήθος γεγονότων που αποδίδεται στο υπόστρωμα, οπότε κατέστη δυνατή η μελέτη του λόγου σήματος προς θόρυβο αποσκοπώντας στη βελτίωση της πειραματικής μεθόδου.

Αφού υπολογίστηκε η καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής και το συνεχές υπόστρωμα των μετρήσεων, ορίστηκε ο λόγος σήματος προς θόρυβο σύμφωνα με την σχέση

$$signal/noise = Net_{Area}/Bg_{συνεχές} \quad (5.10)$$

Στον Πίνακα 5.2, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών για όλες τις μετρήσεις που έγιναν στο διάστημα των έξι ωρών με την πηγή Ραδίου, καθώς και η θερμοκρασία που επικρατούσε σε κάθε μέτρηση.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα προσδιορισμού της καθαρής φωτοκορυφής

Χρονική στιγμή	8:40	9:40	10:40	11:40	12:40	13:40	14:40	15:40
Θερμοκρασία [°C]	28,8	29,8	30,0	31,2	32,5	32,0	31,8	32,0
Total Area	235072	227113	230377	228782	239104	237894	242185	237160
$Bg_{συνεχές}$	87626	85476	83745	83791	88866	88064	87248	87824
$NETBg_{609}$	110	110	110	110	110	110	110	110
Net_{Area}	147336	141527	146522	144881	150128	149720	144827	149226

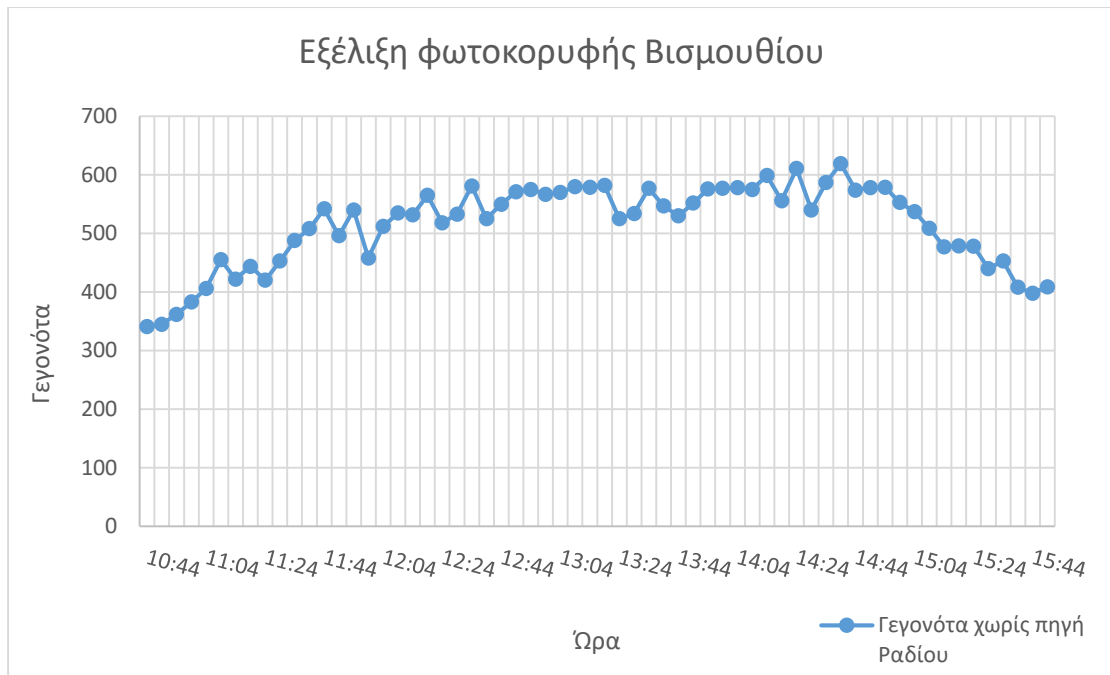
5.6 Επίδραση της ολίσθησης της φωτοκορυφής στη μελέτη της διακύμανσης της φωτοκορυφής 609,3 keV

Καθώς, όπως έχει διαπιστωθεί νωρίτερα το φάσμα παρουσιάζει ολίσθηση λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας, έχει μεγάλο ενδιαφέρον να ελεγχθεί το κατά πόσον η καταγραφή της διακύμανσης της φωτοκορυφής στα 609,3 keV επηρεάζεται από την ολίσθηση του φάσματος. Για το λόγο αυτό, το τελευταίο πείραμα που έγινε συνδύαζε τη μελέτη της διακύμανσης του της φωτοκορυφής 609,3 keV λόγω της συγκέντρωσης του ^{214}Bi στο φίλτρο με τον ταυτόχρονο έλεγχο ενδεχόμενης μετακίνησης της φωτοκορυφής λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών.

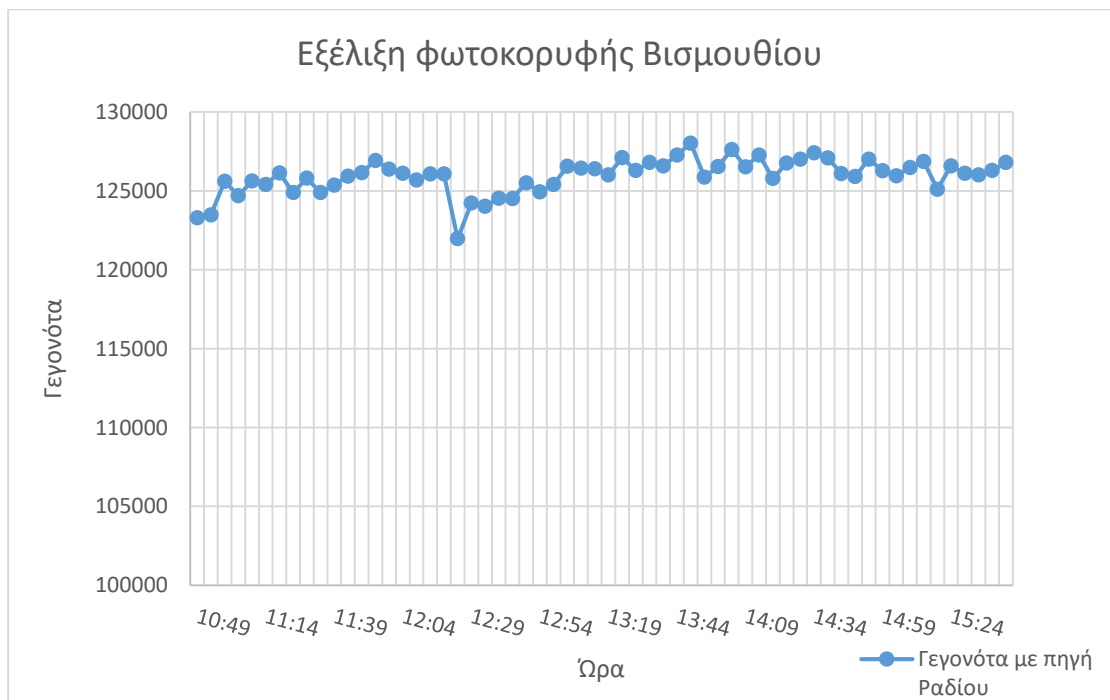
Το πείραμα εξελίχθηκε σε διάστημα πέντε ωρών, όπου κατά τις πρώτες τέσσερις ώρες μετρήσεων ήταν σε λειτουργία ο δειγματολήπτης υψηλού όγκου αέρα, ενώ κατά την τελευταία ώρα των μετρήσεων μελετήθηκε η εξέλιξη της φωτοκορυφής με το δειγματολήπτη εκτός λειτουργίας. Η μέση παροχή αέρα του δειγματολήπτη για το χρονικό διάστημα λειτουργίας του ήταν 1107,3 SLPM, ενώ ο συνολικός όγκος αέρα που πέρασε από αυτήν για τέσσερις ώρες ήταν $V = 2,6608 \cdot 10^2$ SL. Η γεωμετρία του πειράματος ήταν ίδια με εκείνη του εδαφίου 5.4, και περιγράφεται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 3. Για το συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε επιπλέον και η πηγή Ραδίου (^{226}Ra). Ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε ακριβώς πάνω από το φίλτρο, με τον κρύσταλλο NaI τοποθετημένο περίπου στο μέσο του φίλτρου. Για το συγκεκριμένο πείραμα έγιναν δύο σειρές μετρήσεων :

- Η πρώτη σειρά μετρήσεων αφορούσε σε μετρήσεις διάρκειας 100 s οι οποίες διενεργούνταν ανά δέκα λεπτά, με στόχο τη συλλογή του φάσματος εξαιτίας των θυγατρικών του ραδονίου που συλλέγονται πάνω στο φίλτρο. Κατά τη διάρκεια μίας μέτρησης της πρώτης σειράς η πηγή Ραδίου ήταν τοποθετημένη πίσω από θωράκιση πολύ μακριά από τον ανιχνευτή.
- Η δεύτερη σειρά μετρήσεων αφορούσε σε μετρήσεις οι οποίες λαμβάνονταν επίσης ανά δέκα λεπτά, με την πηγή του Ραδίου όμως τοποθετημένη σε ορισμένη θέση ακριβώς επάνω από τον ανιχνευτή. Οι δυο αυτές σειρές μετρήσεων πραγματοποιούνταν ταυτόχρονα, όπως περιγράφεται παρακάτω. Κατά τη δεύτερη σειρά μετρήσεων, ο ρυθμός καταγραφής λόγω του ^{214}Bi που είχε συγκεντρωθεί πάνω στο φίλτρο μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος σε σχέση με τον αντίστοιχο ρυθμό λόγω της πηγής Ραδίου.

Ο προγραμματισμός των μετρήσεων έγινε έτσι ώστε αμέσως μετά από κάθε μέτρηση της πρώτης σειράς να ακολουθεί μέτρηση της δεύτερης σειράς, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι οι δύο σειρές μετρήσεων έγιναν πρακτικά «ταυτόχρονα». Καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων, η διάταξη τροφοδοτούνταν με Υψηλή Τάση 800 V ενώ διατηρήθηκαν σταθερές οι ρυθμίσεις των υπόλοιπων ηλεκτρονικών μερών της διάταξης, ήτοι ο ενισχυτής ήταν ρυθμισμένος για «coarse gain» 50 και «fine gain» 1,1 και ο SCA είχε ρυθμισμένο κατώτερο όριο (LL) 2,1 V και παράθυρο 0,4 V. Στο Διάγραμμα 5.8 αποτυπώνεται η εξέλιξη της φωτοκορυφής του ^{214}Bi χωρίς χρήση της πηγής Ραδίου (1^η σειρά μετρήσεων), ενώ στο Διάγραμμα 5.9 με χρήση της πηγής Ραδίου (2^η σειρά μετρήσεων).



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5. 8: Εξέλιξη φωτοκορυφής ^{214}Bi σε διάστημα έξι ωρών με μέτρηση $\text{NaI } 3''\times 3''$ και αντλία F&J



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5. 9: Μετρήσεις γεγονότων Βισμούθίου με ενίσχυση από πηγή Ραδίου με την διάταξη $\text{NaI } 3''\times 3''$ και της αντλίας μεγάλου όγκου αέρα σε διάστημα έξι ωρών

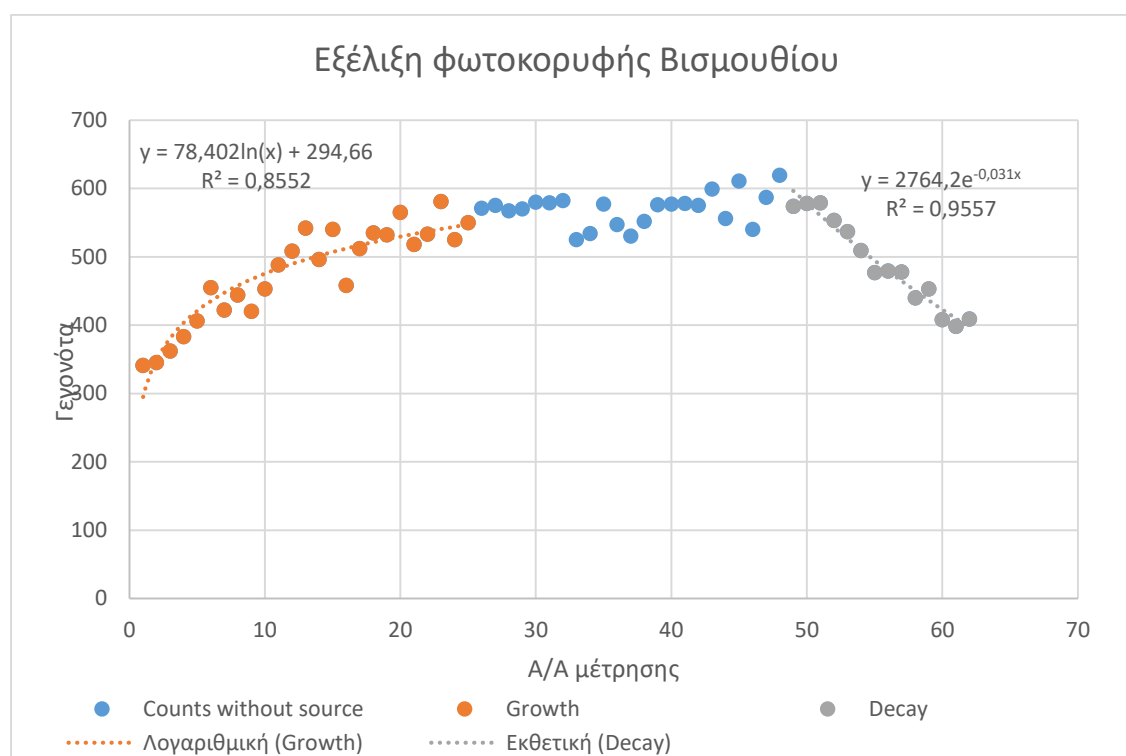
Στο Διάγραμμα 5.8 αποτυπώνονται τα φαινόμενα συσσώρευσης και απομείωσης συναρτήσει του χρόνου, ενώ δεν παρατηρείται αντίστοιχη συμπεριφορά

στο Διάγραμμα 5.9 όπου χρησιμοποιείται η πηγή Ραδίου, κάτι αναμενόμενο. Αναλυτικά, στο πρώτο τμήμα του γραφήματος στο Διάγραμμα 5.8, από χρόνο 10:44 έως και 12:44, η συγκέντρωση του ^{214}Bi αυξανόταν. Κατά το τελευταίο διάστημα μετρήσεων, από 14:44 έως και 15:44 οι πυρήνες ^{214}Bi δεν συλλέγονταν πλέον στο φίλτρο, οπότε η συγκέντρωσή τους έβαινε μειούμενη λόγω των διασπάσεών τους. Με χρήση υπολογιστικών φύλλων EXCEL έγινε η προσαρμογή των αντίστοιχων καμπύλων σε κάθε φάση εξέλιξης του φαινομένου, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.10. Συγκεκριμένα για την περίοδο της συσσώρευσης προσαρμόστηκαν:

- η γραμμική συνάρτηση αναδρομής $y = 8,68 \cdot t + 363,72$ με $R^2 = 0,8158$ και
- η λογαριθμική συνάρτηση $y = 78,402 \cdot \ln(t) + 294,66$ με $R^2 = 0,8552$

Αντίστοιχα, για την περίοδο της απομείωσης προσαρμόστηκε η εκθετική συνάρτηση:

- $y = 2764,2e^{-0,031x}$ με συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0,9557$



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5. 10: Εξέλιξη της επιφάνειας της φωτοκορυφής του ^{214}Bi σε διάστημα έξι ωρών

Στο διάστημα των δύο ωρών όπου η συσσώρευση των ραδιοϊσοτόπων αντισταθμιζόταν από τις διάσπασή τους, μεταξύ 12:44 και 14:44 η διακύμανση του ^{214}Bi οφείλεται κατά κύριο λόγο στη στατιστική διακύμανση. Εκτιμάται ότι για ένα τόσο σύντομο χρονικό διάστημα δεν θα ήταν εύκολο να διαπιστωθεί η πραγματική

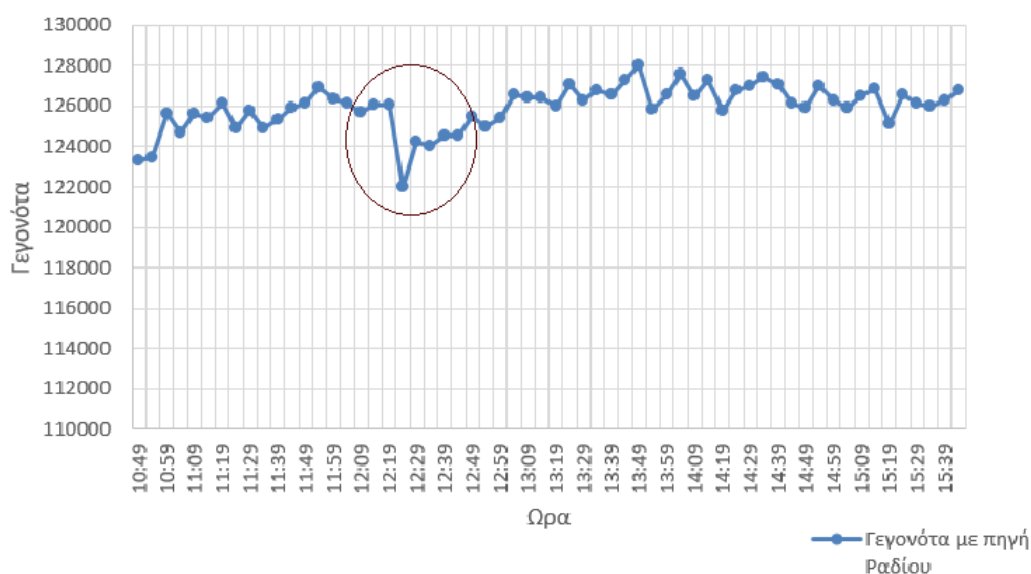
διακύμανση του στην ατμόσφαιρα και κατά συνέπεια πάνω στο φίλτρο αέρα. Για τη χρονική περίοδο από 12:44 έως 14:44 (ισορροπία) η μέση τιμή της επιφάνειας της φωτοκορυφής εκτιμήθηκε σε 570 counts . Θεωρώντας από το ίδιο γράφημα 5.8 μια τιμή υποστρώματος στην αρχή των μετρήσεων περί τα 340 counts, προκύπτει μία καθαρή επιφάνεια $570 - 340 = 230$ counts, που αντιστοιχεί σε 2,3 cps κάτι που δείχνει μία σαφή βελτίωση του καθαρού ρυθμού καταγραφής φωτονίων σε σχέση με τις προηγούμενες διατάξεις που μελετήθηκαν, όπου δεν είχε χρησιμοποιηθεί ο δειγματολήπτης αέρα F&J.

5.6.1 Σχόλια για την οργάνωση διεξαγωγής του πειράματος

Η οργάνωση του πειράματος σε δυο σκέλη, δηλαδή σε μετρήσεις μόνον του φίλτρου αέρα και μετρήσεις με ταυτόχρονη χρήση της πηγή Ραδίου για ενίσχυση του σήματος, πραγματοποιήθηκε όπως έχει ήδη αναφερθεί για τον ταυτόχρονο έλεγχο της μετακίνησης της φωτοκορυφής. Συγκεκριμένα, κάθε μέτρηση όπου θα παρατηρούνταν μία έντονη και αδικαιολόγητη μεταβολή του σήματος που καταγράφονταν από τον ανιχνευτή χωρίς την χρήση πηγής Ραδίου (Διάγραμμα 5.8), θα παρέπεμπε σε έλεγχο της αντίστοιχης μέτρησης που είχε γίνει με χρήση της πηγής Ραδίου (Διάγραμμα 5.9). Αν και σε εκείνη τη μέτρηση παρατηρούνταν αντίστοιχη μεταβολή του σήματος, τότε αυτό πιθανόν θα οφείλονταν σε πρόβλημα κατά τη διάρκεια της μέτρησης, όπως ολίσθηση του φάσματος. Σε αντίθετη περίπτωση η διακύμανση των γεγονότων θα έπρεπε να αποδίδεται σε άλλους παράγοντες, οι οποίοι θα έχρηζαν περαιτέρω διερεύνησης.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων δεν παρατηρήθηκε τέτοια αδικαιολόγητη κύμανση των μετρήσεων των θυγατρικών που συλλέγονταν πάνω στο φίλτρο, και κατά συνέπεια θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι η ολίσθηση της φωτοκορυφής λόγω διακύμανσης της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν μάλλον αμελητέα. Ωστόσο, παρατηρήθηκε μια διακύμανση του σήματος $\sim 3\%$, στη σειρά μετρήσεων με την πηγή Ραδίου (Διάγραμμα 5.11), η οποία όμως, αν και «φαίνεται» αδικαιολόγητη, εντέλει δεν προέκυψε ότι ήταν στατιστικά σημαντική και αποδόθηκε στη στατιστική κύμανση των μετρήσεων.

Εξέλιξη φωτοκορυφής Βισμούθιου



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5. 11: Διακύμανση του πλήθους των γεγονότων κατά τη δεύτερη σειρά μετρήσεων

5.7 Συμπέρασμα από τα αποτελέσματα των μετρήσεων με την τελική συγκρότηση της διάταξης

Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 5, με χρήση της τελικής, «βέλτιστης» γεωμετρίας προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα: Τα επίπεδα υποστρώματος της φωτοκορυφής του ^{214}Bi που κατέγραψε ο ανιχνευτής $\text{NaI } 3''\times 3''$ ήταν της τάξεως των 340 καταγεγραμμένων γεγονότων ανά μέτρηση, ενώ οι αντίστοιχες μετρήσεις στην κατάσταση ισορροπίας κατά τη λειτουργία του δειγματολήπτη, ήταν της τάξεως των 570 γεγονότων για το ίδιο χρονικό διάστημα μέτρησης (Διάγραμμα 5.10). Επομένως κατέστη σαφές ότι υπάρχει σημαντική βελτίωση στην καταγραφή των γεγονότων του ^{214}Bi με χρήση του δειγματολήπτη υψηλού όγκου F&J στην ενίσχυση του σήματος λόγω του ^{214}Bi , κάτι που δίνει ελπίδες για την καλύτερη παρακολούθηση της κύμανση της πραγματικής συγκέντρωσής του στον αέρα. Όσον αφορά στη σταθερότητα του φάσματος, για το χρονικό διάστημα που έγινε το συγκεκριμένο πείραμα δεν διαπιστώθηκε κάποια αξιολογη ολίσθηση, χωρίς αυτό όμως να αποτελεί κανενός είδους εξασφάλιση για άλλες μελλοντικές μετρήσεις, ιδιαίτερα αν αυτές είναι μεγαλύτερης διάρκειας.

Κεφάλαιο 6:

Συμπεράσματα, συζήτηση, ιδέες για περαιτέρω έρευνα

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική αναφορά στο περιεχόμενο της Διπλωματικής Εργασίας και στα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν. Μετά από το σχολιασμό των αποτελεσμάτων της εργασίας παρουσιάζονται σκέψεις και προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση και βελτιώσεις, καθώς και η προτεινόμενη συγκρότηση της διάταξης για περαιτέρω μελέτη.

Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας ήταν η βελτίωση των τεχνικών παρακολούθησης της ραδιενέργειας περιβάλλοντος και ειδικότερα του ^{214}Bi , οι οποίες εφαρμόζονται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ. Μέχρι σήμερα η παρακολούθηση της ραδιενέργειας του ^{214}Bi στην ατμόσφαιρα από το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΠΤ-ΕΜΠ πραγματοποιείται μέσω:

- ενός συστήματος συνεχούς παρακολούθησης που βασίζεται σε έναν σταθεροποιημένο ανιχνευτή $\text{NaI } 2'' \times 2''$ και
- με την περιοδική ανάλυση του ατμοσφαιρικού αερολύματος μέσω δειγματοληψίας φίλτρων αέρα και την ανάλυσή τους με ανιχνευτές HPGe .

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και αξιοποιώντας τις δυνατότητες που παρέχει το εργαστήριο, προτάθηκε, δοκιμάστηκε και αξιολογήθηκε μια διάταξη που συνδυάζει χρήση ανιχνευτή NaI και δειγματοληπτών αέρα (χαμηλής και υψηλής παροχής) για την ενίσχυση του δείγματος και την λήψη αποτελεσματικότερων μετρήσεων.

Αρχικά, έγινε μία βιβλιογραφική ανασκόπηση και παρουσιάστηκαν συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για μετρήσεις στην ατμόσφαιρα. Ορισμένα τέτοια συστήματα χρησιμοποιούν συνδυασμό ανιχνευτικής διάταξης και δειγματολήπτη αέρα. Έμφαση δόθηκε στα συστήματα αυτά, γιατί συνδυάζουν τη χρήση ανιχνευτή NaI με δειγματολήπτες διαφορετικής παροχής, μία συγκρότηση που δοκιμάστηκε στα πλαίσια της εργασίας. Στην συνέχεια, έγινε αναλυτική περιγραφή όλων των διαφορετικών εκδοχών συγκρότησης της διάταξης που δοκιμάστηκαν και ελέγχθηκαν στα πλαίσια της Διπλωματικής εργασίας για την εύρεση της καλύτερης δυνατής διάταξης. Από αυτές, η πρώτη εκδοχή της διάταξης συγκροτήθηκε εντός του εργαστηρίου, ενώ όλες οι υπόλοιπες σε εξωτερικό χώρο, ο οποίος και αποτελεί και τον χώρο όπου προβλέπεται να αξιοποιηθεί μια τέτοια διάταξη. Η αρχική δοκιμή έγινε σε εσωτερικό χώρο εντός

του εργαστηρίου γιατί εκεί οι συνθήκες ήταν ευνοϊκότερες λόγω αυξημένης συγκέντρωσης ραδονίου σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον, ενώ επιπλέον υπήρχε και η δυνατότητα εύκολης συλλογής του φάσματος της ακτινοβολίας από το φίλτρο. Στα πλαίσια αυτής της διερεύνησης πραγματοποιήθηκαν και οι κατάλληλες βαθμονομήσεις της διάταξης, ενέργειας και διακριτικής ικανότητας. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων επιβεβαιώθηκε, κάτι που ήταν αναμενόμενο, ότι η φωτοκορυφή που οφείλεται στα φωτόνια ενέργειας 609,3 keV του ^{214}Bi είναι η καλύτερη από στατιστικής άποψης για την παρακολούθηση της ραδιενέργειας του ισότοπου πάνω στο φίλτρο.

Για τη διερεύνηση αναφορικά με τη συγκρότηση της διάταξης που έγινε στο εξωτερικό περιβάλλον χρησιμοποιήθηκαν, ο ανιχνευτής BEGe, ένας ^{241}Am -doped ανιχνευτής NaI 2"x2" και ένας ανιχνευτής NaI 3"x3". Οι ανιχνευτές αυτού συνδυάστηκαν με δύο αντλίες αέρα υψηλής παροχής, συγκεκριμένα μία αντλία TFIA STAPLEX με φίλτρο διαμέτρου 4" και την αντλία υψηλού όγκου αέρα F&J με φίλτρο 8"x10". Για κάθε μία διάταξη που συγκροτήθηκε, οι μετρήσεις έγιναν με χρήση αναλυτή ενός καναλιού (SCA). Σε κάθε περίπτωση διερευνήθηκε το πλήρες φάσμα της ακτινοβολίας που συλλέγεται από τον ανιχνευτή και προσδιορίστηκαν οι φωτοκορυφές που ανιχνεύονται, βρέθηκε η κατάλληλη περιοχή (low level, window) για την παρακολούθηση της φωτοκορυφής στα 609,3 keV και προσδιορίστηκε το υπόστρωμα της διάταξης (με την αντλία εκτός λειτουργίας). Παράλληλα, μελετήθηκε η σταθερότητα της διάταξης με τη θερμοκρασία, ένα θέμα ιδιαίτερα σημαντικό για ανιχνευτικές διατάξεις με ανιχνευτή NaI.

Μετά τη συγκρότηση της εκάστοτε διάταξης έγιναν πειράματα διάρκειας 5-6 ωρών, με στόχο την παρακολούθηση της μεταβολής της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της αντλίας αέρα και για σύντομο χρονικό διάστημα μετά την παύση λειτουργίας της. Κατά τη συνολική διερεύνηση που έγινε διαπιστώθηκε ότι:

- Η χρήση της αντλίας οδηγεί σε μέτρηση με καλύτερη στατιστική της φωτοκορυφής 609,3keV.
- Οι μετρήσεις που γίνονται με χρήση της διάταξης με τον ανιχνευτή NaI 2"x2" στη θέση του μέσα στον κλωβό παρουσιάζουν υψηλό συνεχές υπόστρωμα, κάτι που δυσκολεύει την ανίχνευση των φωτονίων ενέργειας 609,3keV.

- Οι μετρήσεις που γίνονται με χρήση της διάταξης με τον ανιχνευτή NaI 3"x3" παρουσιάζουν το χαμηλότερο συνεχές υπόστρωμα.
- Η σταθεροποίηση του φάσματος για τον ανιχνευτή NaI 2"x2" δεν κατέστη δυνατή, πιθανότατα λόγω προβλήματος στο σταθεροποιητή φάσματος ή τον ενισχυτή.
- Η κύμανση της φωτοκορυφής 609,3 keV στο φάσμα με τη θερμοκρασία ήταν σημαντική – ανεξαρτήτως του ανιχνευτή που χρησιμοποιείται – ακόμα και για μικρό εύρος θερμοκρασιακής διακύμανσης και αυτό φαίνεται να είναι το σημαντικότερο θέμα που θα πρέπει να αντιμετωπισθεί για την όποια διάταξη συγκροτηθεί τελικά.
- Η βέλτιστη συγκρότηση της διάταξης αποτελείται από τον ανιχνευτή NaI 3"x3" τοποθετημένο σε μικρή απόσταση από το φίλτρο αέρα επί του δειγματολήπτη F&J. Επισημαίνεται ότι ο δειγματολήπτης αυτός μπορεί να χρησιμοποιείται για δειγματοληψίας διάρκειας πολλών ημερών, κάτι που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την υπόψη έρευνα.

Μετά τη συγκρότηση της τελικής-βέλτιστης διάταξης, πραγματοποιήθηκε και το τελικό πείραμα για τη μελέτη της εξέλιξης της φωτοκορυφής του ^{214}Bi παράλληλα με τη μελέτη της σταθερότητας του φάσματος κατά τη διάρκεια του πειράματος η οποία έγινε με χρήση πηγής ραδίου. Κατά τη διάρκεια του πειράματος αυτού διαπιστώθηκε, τόσο η αύξηση της συγκέντρωσης του ^{214}Bi κατά το πρώτο δίωρο του πειράματος (growth), όσο και η αντίστοιχη μείωση μετά την παύση λειτουργίας της αντλίας (decay). Επιπλέον, διαπιστώθηκε η ικανοποιητική σταθερότητα της συγκέντρωσης του ^{214}Bi κατά το δεύτερο δίωρο του πειράματος, οπότε αναμένεται και σταθερότητα της συγκέντρωσης του πάνω στο φίλτρο. Από τα αποτελέσματα αυτά φαίνεται ότι μετά από το πρώτο δίωρο λειτουργίας της αντλίας η διάταξη μπορεί να αποτυπώσει την κύμανση της συγκέντρωσης του ^{214}Bi στην ατμόσφαιρα που είναι και το ζητούμενο. Μάλιστα από το τελευταίο αυτό πείραμα της εργασίας προκύπτει ότι η μέση τιμή του πλήθους των γεγονότων που οφείλονται στη φωτοκορυφή του ^{214}Bi τα οποία καταγράφει η διάταξη είναι περίπου διπλάσια, όταν η αντλία είναι σε λειτουργία, δηλαδή υπάρχει σαφής βελτίωση του σήματος.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας επιτεύχθηκε η ποιοτική παρακολούθηση των φαινομένων της συσσώρευσης (growth) και της απομείωσης

(decay) των θυγατρικών του ραδονίου πάνω στο φίλτρο της αντλίας, ωστόσο κρίθηκε ότι είναι απαραίτητη στο μέλλον η πραγματοποίηση εν νέου πειραμάτων και η λήψη επιπλέον μετρήσεων για τον ποσοτικό προσδιορισμό των θυγατρικών ισοτόπων που συγκεντρώνονται στο φίλτρο και την εφαρμογή των εξισώσεων Bateman σε αυτά.

Αναλογιζόμενοι τα προβλήματα που προέκυψαν κατά την πειραματική διαδικασία και τις παραδοχές που έγιναν, προτείνονται παρακάτω σημεία που μπορούν να μελετηθούν περισσότερο.

Βασικός παράγοντας που επηρεάζει τόσο την συγκέντρωση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα όσο και τη λειτουργία των διαφόρων συνιστωσών της διάταξης είναι οι μετεωρολογικές συνθήκες. Η τελική συγκρότηση της διάταξης θα πρέπει να συνδυάζει και την προστασία από τις καιρικές συνθήκες, με ιδιαίτερη έμφαση στον κατά το δυνατόν περιορισμό των μεταβολών της θερμοκρασίας (π.χ. εξαιτίας απευθείας ακτινοβολίας της διάταξης από τον ήλιο). Παράλληλα πάντως, θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να γίνονται οι κατάλληλες διορθώσεις στο φάσμα, λόγω της αναπόφευκτης κύμανσης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Ακόμη, ιδιαίτερη σημασία στην παρακολούθηση της ραδιενέργειας στην ατμόσφαιρα έχει το μέγεθος το υπόστρωμα της διάταξης λόγω των οικοδομικών υλικών, αφού αποτελεί βασική πηγή θορύβου στις μετρήσεις. Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, θα ήταν χρήσιμη η μελέτη και η πρόταση τρόπων και μεθόδων για την μείωση του υποστρώματος, ενδεχομένως και η τοποθέτηση της διάταξης σε νέα θέση.

Ένα άλλο σημείο τα οποίο έχει ενδιαφέρον να διερευνηθεί είναι η βέλτιστη επιλογή της περιοχής καταγραφής της φωτοκορυφής του ^{214}Bi αλλά και η επίδραση που έχει το πλήθος των καναλιών στα οποία ρυθμίζονται η ανιχνευτική διάταξη στην περίπτωση χρήσης πολυκαναλικού αναλυτή.

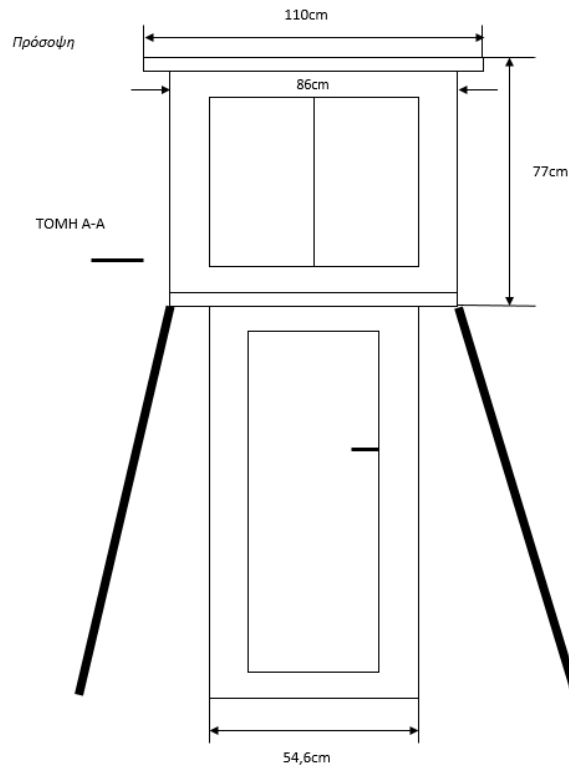
Εξυπακούεται ότι η τελική δοκιμή της διάταξης θα πρέπει να γίνει με δειγματοληψία αρκετών ημερών και όχι μόνο μερικών ωρών. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί αυτοματοποιημένη διαδικασία συλλογής, αποθήκευσης και επεξεργασίας του σήματος και φυσικά να εφαρμοσθούν τεχνικές διόρθωσης λόγω της ολίσθησης του φάσματος. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να προσδιορισθεί και ο βέλτιστος χρονικός ορίζοντας για την αλλαγή του φίλτρου, καθώς η συσσώρευση

σκόνης σε αυτό μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία της αντλίας προκαλώντας στραγγαλισμό της ροής.

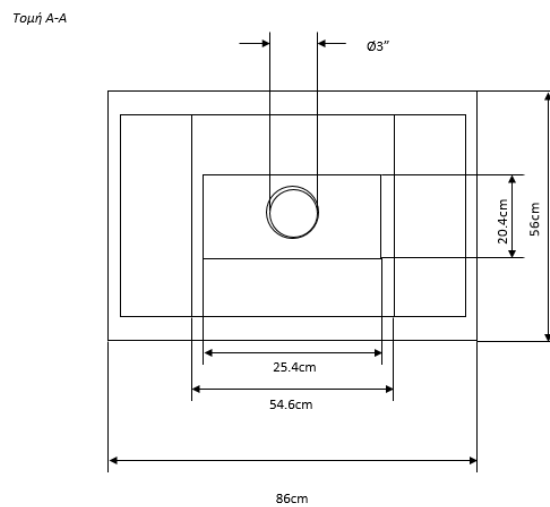
Ως αποτέλεσμα της όλης διαδικασίας διερεύνησης που έγινε, παρουσιάζεται στη συνέχεια και μία πρόταση για τη συγκρότηση αυτόνομης διάταξης για συνεχείς μετρήσεις ραδιενέργειας και για την παρακολούθηση των φυσικών ραδιοϊσοτόπων στην ατμόσφαιρα, απαρτιζόμενη από τα μέρη που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Ειδικότερα, τα τμήματα που απαρτίζουν τη συγκεκριμένη διάταξη είναι ένας δειγματολήπτης υψηλού όγκου αέρα, όπως ο δειγματολήπτης που χρησιμοποιείται ήδη στο εργαστήριο για μετρήσεις στην ατμόσφαιρα (DH-50810E της εταιρείας F&J Specialty Products) με χαρακτηριστική μέση παροχή περίπου 80 m³/h, και ένας ανιχνευτής Ιωδιούχου Νατρίου 3”x3”, όπως αυτός που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας. Ωστόσο στην συγκεκριμένη διάταξη για την προστασία από τις καιρικές συνθήκες προτείνεται η χρήση και η τοποθέτηση του ανιχνευτή εντός μετεωρολογικού κλωβού. Η κατασκευή προφυλάσσει τα όργανα που βρίσκονται στο εσωτερικό του κλωβού κυρίως από τη βροχή και τις ακτίνες του Ήλιου. Ο κλωβός συνοδεύεται από μια μεταλλική ή ξύλινη βάση (ικρίωμα), η οποία δίνει την δυνατότητα τοποθέτησης του σε μεγαλύτερο ύψος από την επιφάνεια του εδάφους. Τα διπλά τοιχώματα με περσίδες επιτρέπουν στον αέρα να κυκλοφορεί ελεύθερα στο εσωτερικό και ταυτόχρονα προστατεύουν τα όργανα από την απευθείας έκθεση σε ρεύματα αέρα που μπορούν να αλλοιώσουν τις μετρήσεις.

Όπως φαίνονται στα Σχήματα 6.1 και 6.3 ο κλωβός τοποθετείται με την βοήθεια της βάσης ακριβώς επάνω από το μεταλλικό κουτί της αντλίας και μέσα σε αυτόν βρίσκεται κατάλληλα τοποθετημένος ο ανιχνευτής Ιωδιούχου Νατρίου. Με την βοήθεια μιας απλής κατασκευής που συνδυάζει έναν σωλήνα και δύο πλάκες, δημιουργείται μια σταθερή βάση για να τοποθετηθεί ο ανιχνευτής κατακόρυφα σε συγκεκριμένη θέση αρκετά κοντά στο φίλτρο, η οποία εξασφαλίζει επαναλήψιμη τοποθέτηση του ανιχνευτή. Κατά τη συγκρότηση προτείνεται η αφαίρεση του κάτω τμήματος του κλωβού και το άνω κάλυμμα του μεταλλικού περιβλήματος της αντλίας ώστε να δημιουργηθεί εσωτερικά ένας ενιαίος χώρος μεταξύ φίλτρου και ανιχνευτή. Στην συνέχεια παρατίθενται οι όψεις της διάταξης (Σχήμα 6.1 και Σχήμα 6.3) όπως ακριβώς προτείνεται αλλά και οι δύο τομές AA και BB (Σχήμα 6.2 και Σχήμα 6.4) που δίνουν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις αντίστοιχες διαστάσεις και

λεπτομέρειες για την θέση που προτείνεται να έχουν τα διάφορα μέρη. Σύμφωνα με το Σχήμα 6.2 και συμπληρωματικά με την κατάδειξη της κατακόρυφης κατεύθυνσης του ανιχνευτή ως κατάλληλη, προσδιορίζεται και η θέση αυτού το κέντρο του ορθογώνιου φίλτρου 8”x10”.



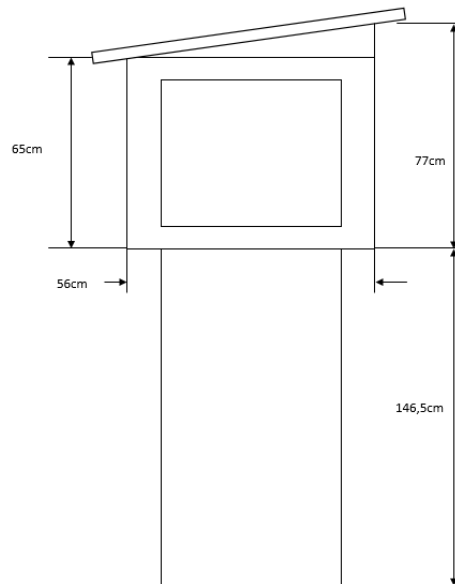
ΣΧΗΜΑ 6. 1: Πρόσωση προτεινομένης διάταξης



ΣΧΗΜΑ 6. 2: Τομή ΑΑ, τομή κάτοψης προτεινομένης διάταξης

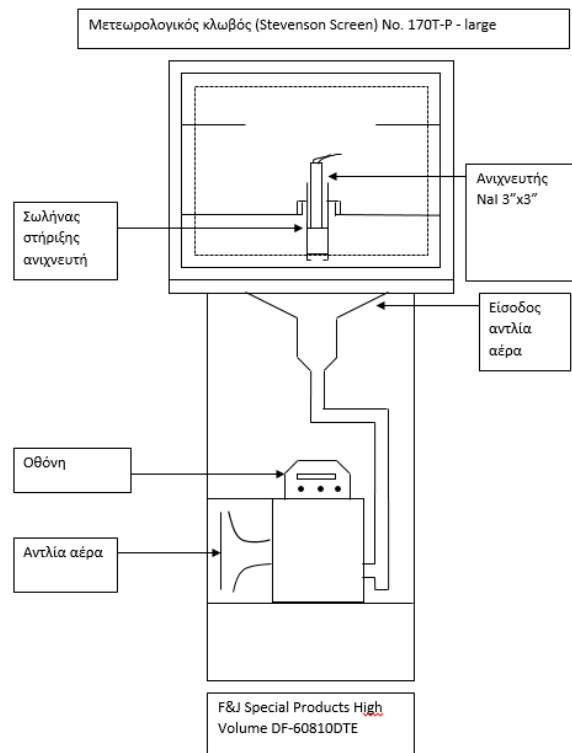
Πλάγια όψη

TOMH B-B



ΣΧΗΜΑ 6. 3: Πλάγια όψη προτεινομένης διάταξης

Τομή Β-Β



ΣΧΗΜΑ 6. 4: Τομή ΒΒ, τομή στην πλάγια όψη της προτεινομένης διάταξης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Ανάλυση δείγματος φίλτρου αέρα 4'' σε ανιχνευτή Υπερκαθαρού Γερμανίου HPGe.

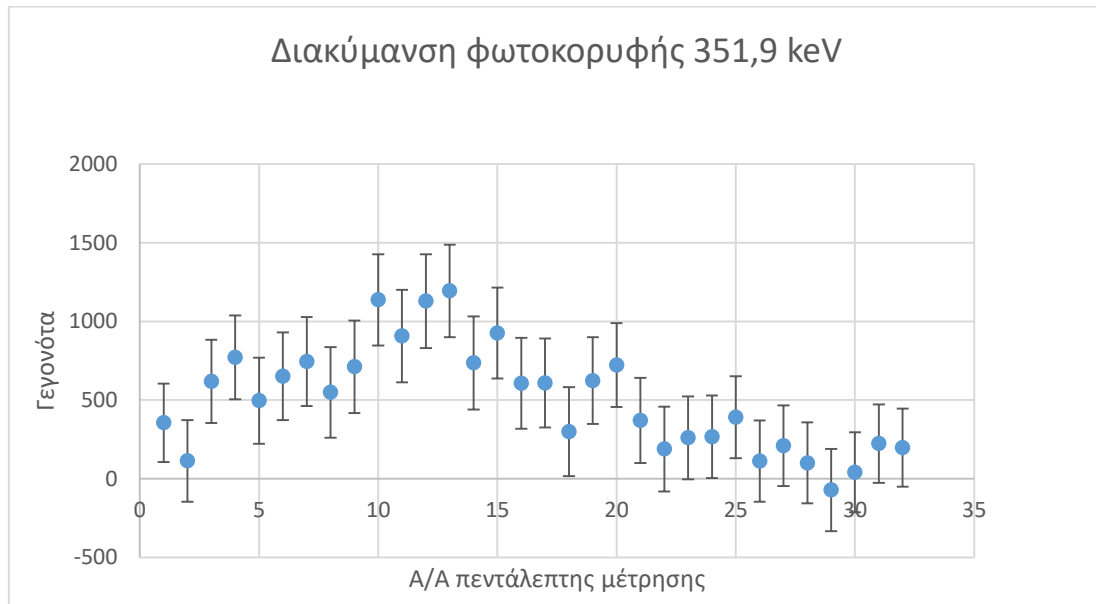
Πίνακας Α1: Αποτελέσματα από την ανάλυση φίλτρου αέρα με ανιχνευτή Υπερ-καθαρού Γερμανίου

Background spectrum: BG3240									
Analysis Parameter	:								
Application ID	:	0	Start Channel	:	1		End channel	:	4095
Peak Analysis	:	S&M	Analysis depth	:	7		Debugging Level	:	0
Sigma units	:	1.0	Energy window (keV)	:	1.0		Raw efficiency	:	1
ID-Library	:	S01							
Material (LEne)	:	O O – Unidentified – Low energy analysis applicable							

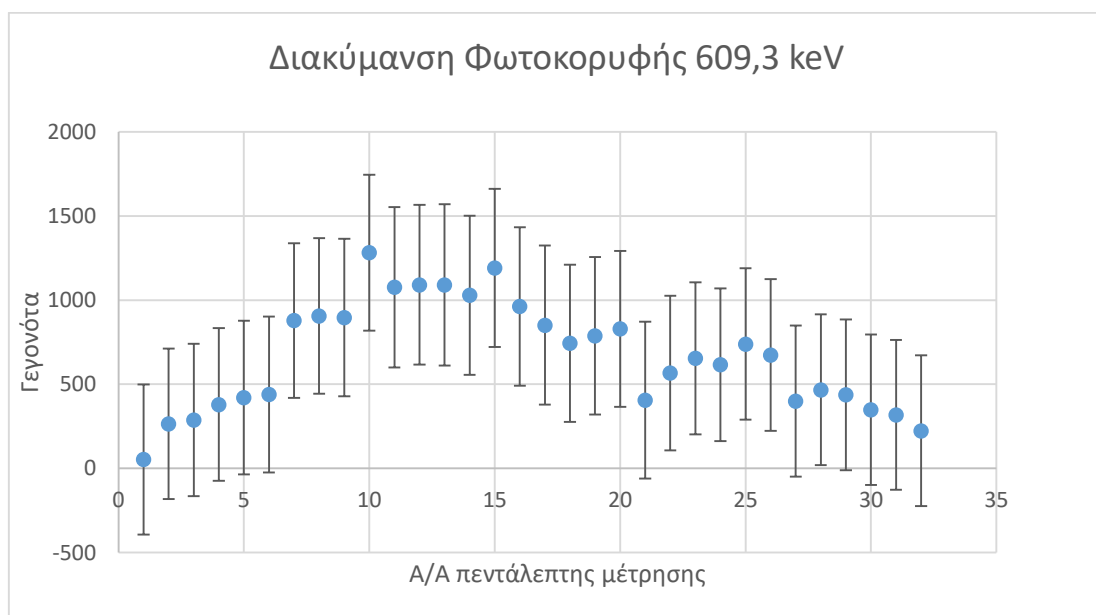
Library file	:	/user1/spectra/imitsios/ISOLIB.SOI								
GAMMA SPECTROGRAPHIC ANALYSIS										
channel	B	RMS (%)	Area	90%Err	Count rate (cps)	Energy (keV)	Isotope	Energy	Main Peak	Significancy
55,59	So*		254925	0,4	0,255E+00	32,27				
63,99	So*		106457	1,1	0,106E+00	36,43				
84,27	So*		11360	8,8	0,114E-01	46,48	Pb-210	46,52	46,52	0,469 E+0,1
97,61	So		1576	63,1	0,157E-02	53,09				
110,93	So		885	113,4	0,885 E-0,3	59,68	Am-261	59,54	55,54	
119,31	So*		16345	6,3	0,163 E-0,1	63,33	Th-224	63,29	63,29	0,126 E+0,1
127,37	So		1133	89,1	0,113 E-0,2	67,82				
141,61	M	0,4	20889	3,9	0,209 E-0,1	74,88	Pb-214	74,80	351,99	
146,20	M	0,4	34030	3,9	0,340 E-0,1	77,15	Pb-215 Pb-212	76,30 77,11	239,63 238,63	
153,66	So		802	126,4	0,802 E-03	80,84	Ce-144A I-1310	80,12 80,18	133,53 364,48	
160,39	M	1,9	5100	27,4	0,510 E-02	84,18				
166,62	M	1,9	12729	15,8	0,127 E-01	87,26	Pb-212A	87,20	238,63	
172,68	M	3,1	11060	27,1	0,111 E -01	89,97				
177,70	M	3,1	29466	11,2	0,295 E-01	92,75				
190,56	So		2849	47,2	0,285 E-02	99,12				
239,01	So		1175	119,0	0,117 E-02	123,12	Eu-154A	123,10	123,10	
251,10	So		3054	45,5	0,305 E-02	129,10	Fm-2570	130,00	116,07	
280,70	So		1235	109,0	0,123 E-02	143,76				
320,28	So		1140	114,4	0,114 E-02	163,36				
365,90	M	1,4	17917	12,4	0,179 E-01	185,96	U-235 U5-Ra6 Ra-226	185,72 185,99 186,25	185,72 185,99 186,25	0,250 E+01
369,63	M	1,4	3901	34,3	0,390 E-02	187,80				
412,61	S		2911	45,3	0,291 E-02	209,09				
472,43	M	3,2	31605	7,8	0,316 E-01	238,73	Pb-212B	238,63	238,63	0,211 E+02
...

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

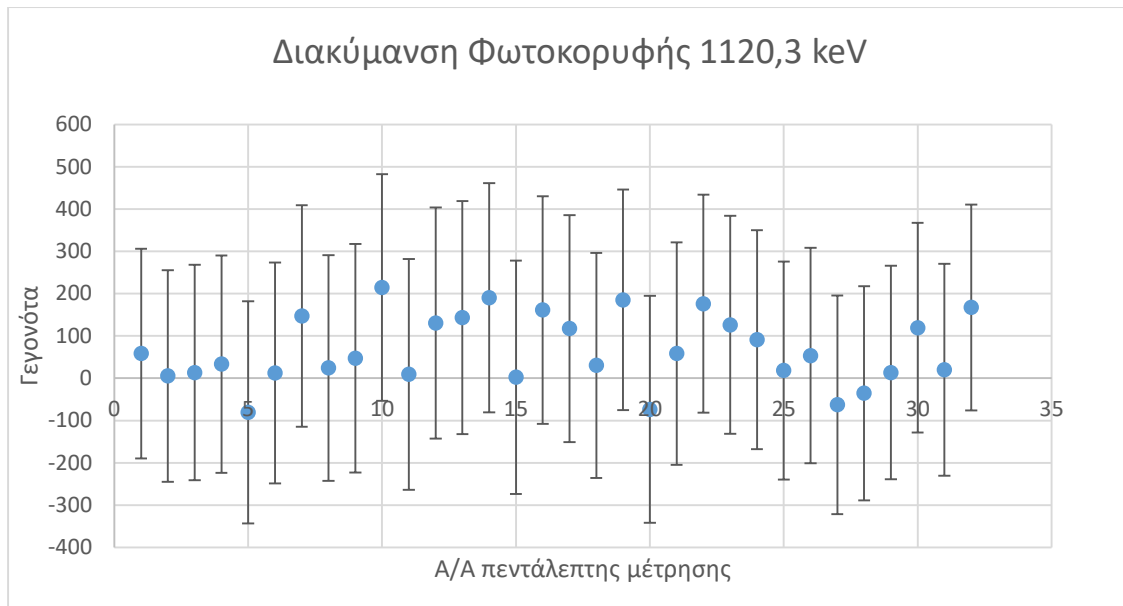
Αναλυτικοί πίνακες δεδομένων και επιπλέον διαγράμματα από τα πειράματα με την δοκιμαστική διάταξη, NaI 3”x3” και αντλία μικρής παροχής στο εργαστήριο.



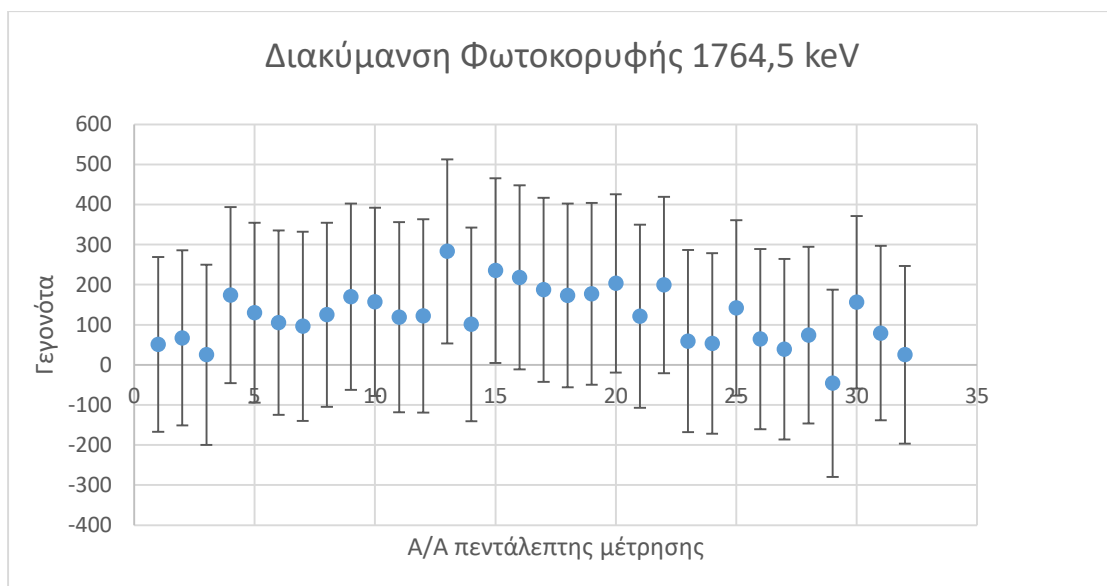
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Β 1: Διακύμανση φωτοκορυφής 351,9 keV για 6 ώρες



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Β 2: Διακύμανση φωτοκορυφής 609,3 keV για 6 ώρες



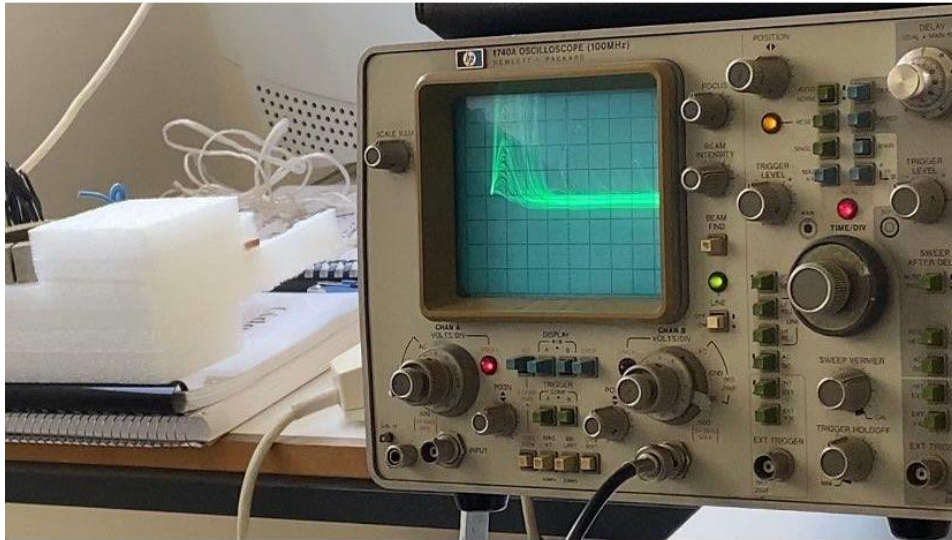
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Β 3: Διακύμανση φωτοκορυφής 1120,3 keV για 6 ώρες



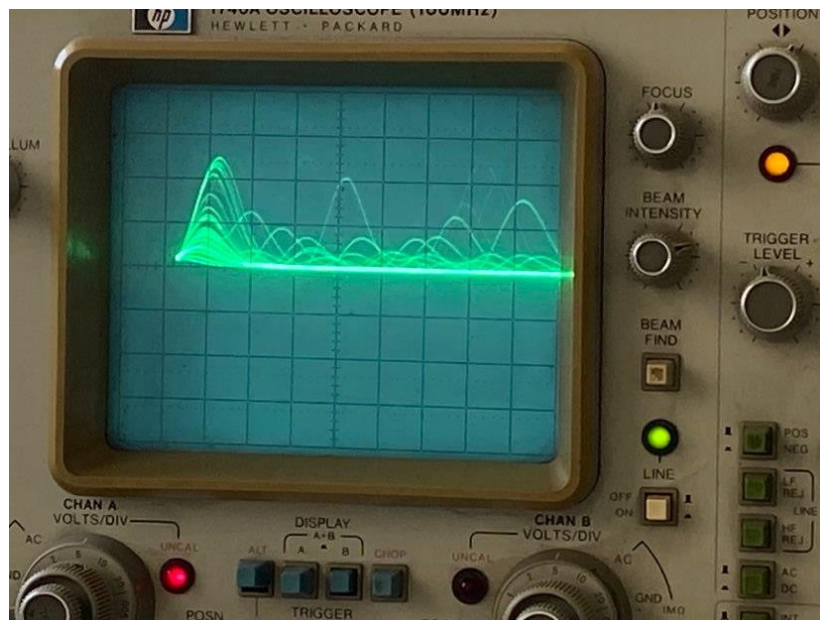
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Β 4: Διακύμανση φωτοκορυφής 1764,5 keV για 6 ώρες

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Χρήση παλμογράφου για έλεγχο παλμών



ΕΙΚΟΝΑ Γ 1: Εικόνα παλμογράφου



ΕΙΚΟΝΑ Γ 2: Εικόνα παλμογράφου

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Agar O., Boztosun I., Korkmaz M. E. and Ozmen S. F., 2014, “*Measurement of radioactivity levels and assessment of radioactivity hazards of soil samples in Karaman, Turkey,*” Radiation Protection Dosimetry, vol. 162, p. 630-637.

Alnour I.A., Ibrahim N. and Hossain I., “*Concentration of ^{214}Pb , ^{214}Bi in ^{238}U series and ^{208}Tl , ^{228}Ac in ^{232}Th series in granite rock in (Kadugli) Sudan.,*” Indian Journal of Pure and Applied Physics, vol. 50, pp. 285-288, 2012.

Ashokkumar P., Sahoo B.K., Raman A., Mayya Y.S., 2014, “*Development and characterization of a silicon PIN diode array based highly sensitive portable continuous radon monitor*”, J Radiol Prot 34:149–160.

Balkanski, Y.J., Jacob D.J., and Gardner G.M. and Geophys J., 1993, Res., 98, p. 573.

Barrientos D., Boston A.J., Boston H.C., Quintana B., Sagrado I.C., Unsworth C., Moon S. and Cresswell J.R., 2011, “*Characterization of a broad energy germanium (BEGe) detector.*” Journal of Nuclear Instrumentation and Methods in Physics Research, vol. 648, pp. S228 - S231.

Baskaran M., 2016, “*Radon: A Tracer for Geological, Geophysical and Geochemical Studies,*” Wayne State University, Detroit, MI, USA.

Baskaran M., 2012, ed., *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. Springer.

Bourdon B., Henderson G.M., Lundstrom C.C. and Turner P., 2003, “*Uranium-Series Geochemistry: Reviews in Mineralogy and Geochemistry,*” vol. 52. The Mineral Society of America, USA.

Bateman, H., 1910. “*The solution of a system of differential equations, occurring in the theory of radioactive decay*”, Proc. Camb. Philos. Soc. 15, 423-427.

Britton R., Burnett J. and Davies A., 2013, “*Determining the efficiency of a broad-energy HPGe detector using Monte Carlo simulations.*” Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, vol. 295, pp. 2035 – 2041.

Browne E., Dairiki J.M. and Doebler R.E., *Table of Isotopes, 7th Edition*. Wiley and Sons Inc, 1978.

Burchan W.E., “*Nuclear Physics an Introduction,*” 2nd edn. William Clowes & Sons, London, 1973.

Cannizzaro et al., 1999, “*Applied Radiation and Isotopes,*” 51, p. 239.

Cember H. and Johnson T.E., “*Introduction to Health Physics,*” 4th Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc, 2008.

Chambers S.D., Hong S.B., Williams A.G., Crawford J., Griffiths A.D., Park S.J., 2014, “*Characterizing terrestrial influences of Antarctic air masses using Radon-222 measurements at King George Island.*” *Atmos Chem Phys* 14:9903–9916.

Choppin G., Liljenzin J. and Rydberg J., “*Radiochemistry and Nuclear Chemistry*”, 4th edn. Elsevier Inc, 2013.

Culbert R. and Leighton D.G., “*Low energy gamma spectrometry in the geochemical exploration for Uranium,*” *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 14, pp. 49-68, 1981.

David B., “*Environmental radioactivity in the UK: the airborne geophysical view of dose rate estimates.*”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 138, p. 249-263, 2014.

Duenas C., Perez M., Fernandez M.C., Carretero J., 1994 “*Disequilibrium of Radon and its short-lived daughters near the ground with atmospheric stability.*” *J. Geophys Res* 99(D6):12865–12872.

Eisenbud M., *Environmental radioactivity, 3rd Edition*. Academic Press, Inc, 1987.

Eisenbud M. and Gesell T., ed., *Environmental Radioactivity from Natural, Industrial and Military Sources*”, 4th Edition. Academic Press, San Diego, CA, 1997.

El-Taher, A., Uosif M.A. and Orabi A.A., “*Natural radioactivity levels and radiation hazard indices in granite from Aswan to Wadi el-Allaqi southeastern desert, Egypt.*” *Journal of Radiation Protection Dosimetry*, vol. 124, pp. 148-154, 2007.

Feichter J. et al., 1991, *J. of Geophysical Research*, 96, p. 22-447, 1991.

Finkel F.V., et al. “*Performance Stabilization of Scintillation Spectrometers, Nuclear Technology Radiation Protection*”, 2019, Vol. 34, No. 1, pp. 72-78.

- Graustein, W. C., and Turekian K.K., *Geophys. Res. Lett.*, 1996, 23, p. 539.
- Han J.H. and Choi J.H., “*Broad energy HPGe gamma spectrometry for dose rate estimation for trapped charge dating,*” *Journal of Analytical Science and Technology.*, vol. 2, pp. 98-108, 2010.
- Harms, A.V., Jerome, S.M., 2004. “*On the integrated decay and in growth equations used in the measurement of radioactive decay families: the general solution*”, *Appl. Radiat. Isot* 61(2-3), 367- 372.
- Hyde K.E., Perlman I. and Seaborg G.T., “*The nuclear properties of the heavy element,*” Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, vol. 2, p. 1107, 1964.
- Ivanovich M. and Harmon R. S., 1992, “*Uranium-series disequilibrium : applications to earth, marine, and environmental sciences,*” 2nd Edition. Clarendon Press, Oxford.
- Joshi, L. U., Rangarajan C., and Gopalakrishnan S., *Tellus*, 21, p. 107 (1969).
- Knoll, Glenn F., 1999, “*Radiation detection and measurement,*” 3rd edition.
- Knoll G.F., :*Radiation Detection and Measurement*”, 4th Edition. USA, 2010.
- Knuth R.H., Knutson E.O., Feely H.W., Volchock H.L. (1983) “*Size distribution of atmospheric Pb and Pb-210 in rural New Jersey: implications for wet and dry deposition.*”
- Krane K.S., *Introductory: Nuclear Physics.* Wiley & Sons, Ltd, USA, 1988.
- Pruppacher H.R., Semonin R.G., Slinn W.G.N. (eds) “*Precipitation scavenging, dry deposition, and resuspension*”. Elsevier, Amsterdam and Oxford, pp 1325–1334.
- LAnnunziata M.F., *Handbook of Radioactivity Analysis, 3rd Edition.* Elsevier Inc, 2012.
- LAnnunziata M.F., “*Radioactivity: Introduction and History.*” Elsevier B.V, Amsterdam, 2007.
- Marin A. and Harbison S., “*An introduction to radiation protection, 5th Edition.*” Hodder Arnold Education, 2006.
- Martin J.E., *Physics for radiation protection, 1st Edition.* Wiley & Sons Inc, USA, 2000.

McLaughlin J.P., Simopoulos E.S., Steinhuser F., “*The Natural Radiation Environment VII.*” Elsevier Science, 2005.

Mernagh T.P. and Miezitis Y., “*A review of the geochemical processes controlling the distribution of Thorium in the earth’s crust and Australia’s Thorium resources.*” Journal of Geoscience Australia, 2008.

Mike. S. Lee, ed., *Mass Spectrometry Handbook.* Wiley, 2012.

Mokkongpai P. and Cheevaporn V., “*Pb-210 radiometric dating of estuarine sediments from the eastern coast of Thailand.*,” Journal of the Science Society of Thailand, vol. 22, pp. 313 - 324, 1996.

Mubarakmand S., Chaudhry P. and Nagi F.I., “*Absolute determination of uranium concentration in rocks by gamma-ray spectroscopy,*” Nuclear Instrumentation and Methods, vol. 140, pp. 133-135, 1977.

Murray A. S., Wohl E. and East J., 1992, “*Thermoluminescence and excess 2α Ra decay dating of late quaternary fluvial sands east alligator river,*” Quaternary Research, vol. 37, pp. 29 - 41.

National Nuclear Data Centre (NNDC), “*Chart of nuclides,*” <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>,” 2012.

N. C. on Radiation Protection and Measurements, “*Natural background radiation in the united states,*” Report 45, 1975.

Oddone M., Giordani L., Giacobbo F., Mariani M., Morandi S., “*Practical considerations regarding high resolution gamma-spectrometry measurements of naturally occurring radioactive samples.*” Radioanalytical and Nuclear Chemistry, vol. 277, pp. 579-585, 2008.

Ordua R. G., Hult M., Andreotti E. and Marissens G., “*Pulse shape analysis for background reduction in BEGe detectors,*” Journal of Analytical Science and Technology, vol. 286, pp. 1 - 32, 2010.

Pomme, S., Collins, S.M., 2014. “*Unbiased equations for ^{95}Zr – ^{95}Nb chronometry*”, Appl. Radiat. Isot 90, 234-240.

Porcelli D, Baskaran M (2011), “*An overview of Isotope Geochemistry in Environmental Studies.*” In: Baskaran M (ed) Handbook of environmental isotope geochemistry, pp. 11–32. Springer (ISBN: 978-3-642-10636-1).

Roberts R.G., Spooner N.A., Jones R., Cane S., Olley J.M., Murray A.S. and Head M.J., “*Preliminary luminescence dates for archaeological sediments on the nullarbor plain, South Australia,*” Australian Archaeology, vol. 42, pp. 7-16, 1996.

Turekian K. K. et al., Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 5, p. 227, 1977.

Tykva R. and Berg D., “*Man-made and natural radioactivity in environmental pollution and radiochronology.*” Kluwer Academic Publishers, 2004.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (2000) Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. UNSCEAR, United Nations, New York.

Vrtes A., Nagy S. and Svegh K., ed., “*Nuclear Methods in Mineralogy and Geology: Techniques and Applications.* Springer Science Business Media”, 1998.

Yaprak G. and Yener G., “*Direct measurement of ^{238}U and disequilibrium state in geological samples by low energy scintillation gamma spectroscopy,*” Journal of Geochemical Exploration, vol. 42, pp. 345-350, 1992.

AMS-02, GIHMM Datasheet (available at): https://www.gihmm.com/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/GIHMM_AMS02_Flyer_ENG_V4.pdf.

AMS-02T, GIHMM Datasheet (available at): https://www.gihmm.com/wordpress/wp-content/uploads/2022/01/GIHMM_AMS02T_Flyer_ENG_V3.pdf.

ASU, GIHMM Datasheet (available at): https://www.gihmm.com/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/GIHMM_ASU_Flyer_ENG_V4-1.pdf.

InSpector 2000 DSP Portable Spectroscopy Workstation, by Mirion technologies (Canberra), 2017. <https://www.gammadata.se/assets/Uploads/InSpector-2000-SS-C20387.pdf>

Σπανάκου Αρετή, Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία: Χρήση φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων στη μελέτη περιβαλλοντικών διεργασιών στην ατμόσφαιρα και στο έδαφος, Αθήνα, 2017.

