52
Η Υ/Σ

ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μοντελοποίηση Καταγραφής Στερεών Ανιχνευτών Καταγραφής Ιχνών στα σωμάτια άλφα του Ραδονίου με τη Μέθοδο Μόντε Κάρλο

Βλαμάκης Εμμανουήλ 36726

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

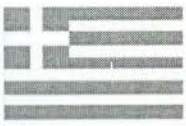
Επιβλέπων Καθηγητής

Γιαννακόπουλος Παναγιώτης
Καθηγητής ΤΕΙ Πειραιά

Συνεπιβλέπων Καθηγητής

Νικολόπουλος Δημήτριος
Αναπληρωτής Καθηγητής

HIGHER TECHNOLOGICAL EDUCATION INSTITUTE OF PIRAEUS
FACULTY OF TECHNOLOGICAL APPLICATIONS
DEPARTMENT OF ELECTRONIC COMPUTER SYSTEMS ENGINEERING



THESIS

Modelling Detection Efficiency of Solid State Nuclear Track Detectors of Radon α- particles using a Monte Carlo Method

Vlamakis Emmanuel Reg No: 36726

Advisor Professor

Yiannakopoulos Panayiotis
Professor TEI of Piraeus

Co-Advisor Professor

Nikolopoulos Dimitrios
Associate Professor

Στην οικογένειά μου,
στους φίλους και συνεργάτες μου
για την υποστήριξή τους
όλα αυτά τα χρόνια

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στους
καθηγητές και δασκάλους μου
Δρ. Νικολόπουλο
και Δρ. Γιαννακόπουλο
Β.Ε.

Βλαμάκης Εμμανουήλ

.....

Copyright 2013©

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

Με επιφύλαξη παντός νομίμου δικαιώματος.
All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

Περίληψη

Η συνεχής έκθεση του ανθρώπου στο ραδόνιο και τα θυγατρικά του, μας οδηγεί στην μελέτη της συμπεριφοράς και της καταμέτρησής του με ήδη υπάρχοντα μοντέλα, για τον διασφαλισμό της υγείας του [22,27]. Η ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση μιας πιο ακριβούς προσέγγισης, οδήγησε στο πλαίσιο της παρούσας πτυχιακής την μελέτη και την ανάπτυξη νέων μεθόδων μοντελοποίησης της διαδικασίας καταγραφής του ραδονίου και των θυγατικών παραγώγων στους παθητικούς στερεούς ανιχνευτές καταγραφής ιχνών, κάνοντας χρήση τεχνικών μόντε κάρλο. Ένα νέο μοντέλο προκύπτει ως παραγόμενο μοντελοποίησης, όπου υπολογίζει την ευαισθησία καταγραφής του ραδονίου καθώς και των θυγατρικών παραγώγων για το καθένα ξεχωριστά.

Λέξεις – κλειδιά

Ραδόνιο, σωμάτια άλφα, ΣΑΚΙ, CR-39, μοντελοποίηση, μόντε κάρλο, C/C++

Abstract

Continuous human exposure to radon and daughters leads us to the study of behavior and detection efficiency with existing models for human health assurance [22,27]. The need for further investigation of a more precise approach resulted this thesis to the development of a new modelling method of radon and daughters detection efficiency on solid state nuclear track detectors using a monte carlo method. A new model outcomes through modelling, which computes the detection efficiency for radon and daughters separately.

Keywords

Radon, alpha particles, SSNTD, CR-39, modelling, monte carlo, C/C++

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ - 11 -

1.1 Ραδονιο - 11 -
1.2 Πηγες Ραδονιου - 12 -
1.3 Συμπεριφορα Ραδονιου - 14 -
1.4 Παραγοντας Ισορροπιας - 14 -
1.5 Ραδιενεργος ισορροπια - 15 -
1.6 Τεχνικες Μετρησης Συγκεντρωσης Ραδονιου - 15 -
1.7 Βιολογικες Επιδρασεις - 1 -

2. ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗ - 19 -

2.1 Γενικα - 19 -
2.2 Τυποι Διασπασεων - 19 -
2.3 Διασπαση Αλφα - 20 -

3. ΣΩΜΑΤΙΑ ΑΛΦΑ - 23 -

3.1 Γενικα - 23 -
3.2 Εύρος - 23 -
3.3 Straggling - 24 -

4. Ο ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ CR-39 - 25 -

4.1 Γενικα - 25 -
4.2 Συνθεση - 25 -
4.3 Καταγραφη στον CR-39 - 26 -
4.4 Ενεργος Περιοχη - 26 -
4.5 Κρισιμη γωνια - 27 -
4.6 Ευαισθησια CR-39 - 28 -

5. ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ CR-39 & ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ - 29 -

5.1 Δυσκολιες - 30 -
5.2 Προτεινομενη Μεθοδος - 30 -
5.3 Μεθοδος Μοντε Καρλο - 30 -

5.4 Τροπος Μοντελοποιησης - 31 -
5.5 Τεχνικες Μοντελοποιησης & Κυβος - 31 -
5.6 Γεωμετρια Ενεργου Περιοχης - 33 -
5.7 Κατατμηση Ενεργου Περιοχης - 34 -
5.8 Περιοχη 1 - 35 -
5.9 Περιοχη 2 - 38 -
5.10 Περιοχη 3 - 38 -
5.11 Περιοχη 4 - 40 -
5.12 Περιοχη 5 - 41 -
5.13 Περιοχη 6 - 43 -
5.14 Περιοχη 7 - 44 -
5.15 Περιοχη 8 - 45 -

6. Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ - 47 -

6.1 Η Εφαρμογη ως Μαυρο Κουτι -47-

6.2 ΠΗΓΑΙΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ - 49 -

6.3 Η συναρτηση main() - 54 -
6.4 Η συναρτηση isRejected() - 57 -
6.5 Η συναρτηση isBackScattered() - 58 -
6.6 Η συναρτηση isInside() - 58 -
6.7 Η συναρτηση hitsDet() - 62 -

7. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ -65-

7.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ - 66 -

7.2 ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ - 68 -

ΕΠΙΛΟΓΟΣ - 70 -

ΕΞΕΛΙΞΗ - 70 -

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ - 72 -

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΟΡΩΝ - 74 -

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - 76 -

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ραδόνιο

Ηδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, τόσο ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO), όσο και η επιστημονική κοινότητα της Ευρώπης και των Ηνωμένων Πολιτειών, επικέντρωσαν την προσοχή τους στην ποιότητα του αέρα του εσωτερικού περιβάλλοντος στις κατοικίες και στους χώρους εργασίας, όπου ένας μέσος κάτοικος περνά έως και 80% του χρόνου του. Στη διάρκεια αυτού του χρόνου εκτίθεται σε ένα πλήθος ρύπων, οι οποίοι πολλές φορές εντοπίζονται σε συγκεντρώσεις που ξεπερνούν κατά πολύ τις συγκεντρώσεις που υπάρχουν στον ατμοσφαιρικό αέρα [38].

Η ποιότητα του αέρα των εσωτερικών χώρων επηρεάζεται από μία σειρά από παράγοντες, όπως για παράδειγμα οι τεχνικές οικοδόμησης, τα υλικά επίπλωσης, η ελάττωση της ανανέωσης του αέρα των κατοικιών με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας κτλ. Οι ρύποι στον αέρα των εσωτερικών χώρων μπορεί να προέρχονται τόσο από φυσικές όσο και από τεχνητές πηγές. Τεχνητοί ρύποι είναι βέβαια όλα τα προιόντα καύσης, οι πτητικές οργανικές ενώσεις, ο αμίαντος, ο καπνός του τσιγάρου κ.α. Από τους φυσικούς ρύπους, ο σημαντικότερος είναι το φυσικώς ραδιενεργό αέριο ραδόνιο[38].

Το ραδόνιο (^{222}Rn) είναι ένα φυσικό ραδιενεργό αέριο που παράγεται από τη ραδιενεργό διάσπαση του ραδίου (^{222}Ra), το οποίο είναι παρόν σε μικρές ή μεγάλες συγκεντρώσεις σε όλα τα εδάφη και τα πετρώματα του πλανήτη. Το ραδόνιο παραγόμενο στο έδαφος αναδύεται στον ατμοσφαιρικό αέρα όπου αραιώνεται σύντομα σε αβλαβείς συγκεντρώσεις, και από αυτή την άποψη δεν συνιστά ραδιολογικό κίνδυνο για τον άνθρωπο. Παρ'όλ'αυτά, όταν βρίσκει δίοδο από το έδαφος προς το εσωτερικό των κατοικιών ή των χώρων εργασίας, μπορεί να δημιουργήσει υψηλές συγκεντρώσεις στον αέρα των εσωτερικών χώρων. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι αναγκαίο να εκτιμηθεί ο συνεπαγόμενος κίνδυνος για τους κατοίκους, εξαιτίας της ακτινοβόλησης των πνευμόνων τους από το ραδιενεργό ραδόνιο. Ο καρκίνος του πνεύμονα μάλιστα, είναι και το μοναδικό σημαντικό βιολογικό αποτέλεσμα της έκθεσης στο ραδόνιο. Θεωρείται μάλιστα, ότι είναι ο κυριότερος φυσικός καρκινογόνος παράγοντας και ο δεύτερος σε επικινδυνότητα για ανάπτυξη καρκίνου του πνεύμονα, μετά το κάπνισμα. Σύμφωνα με τα δεδομένα από το UNSCEAR 2000 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) το 47% της ετήσιας δόσης που λαμβάνει ο μέσος κάτοικος του πλανήτη οφείλεται στο Ραδόνιο και στα ραδιενεργά θυγατρικά του [37].

Το ραδόνιο (Rn) είναι ένα χημικό ραδιενεργό στοιχείο, που προκύπτει φυσικά ως προϊόν διάσπασης του ουρανίου ή του θορίου, με ατομικό αριθμό 86 και ατομικό βάρος 222. Η θερμοκρασία τήξης του ορίζεται στους -71 °C και η θερμοκρασία βρασμού στους -61,8 °C. Είναι ένα άγευστο άοσμο και άχρωμο

στοιχείο, που ανήκει στην οικογένεια των ευγενών αερίων. Το πιο σταθερό του ισότοπο είναι το ^{222}Rn με χρόνο ημιζωής 3,8 ημέρες.

Αν και έχει χρόνο ημιζωής μόλις 3.8 ημέρες, διασπάται σε άλλα ραδιενεργά στοιχεία, τα οποία έχουν χρόνο ημιζωής δεκαετιών, με αποτέλεσμα η εισπνοή ραδονίου να αποτελεί συνεχή κίνδυνο. Η ραδιενεργός διάσπαση του ραδονίου έχει ως εξής:

Πρόγονος	**Τύπος διάσπασης**	**Θυγατρικό παράγωγο**	**Ημιπερίοδος ζωής**
U-218 (Ουράνιο)	α	Th-234	
Th-234 (Θόριο)	β	Pa-234	
Pa-234 (Πρωτακτίνιο)	β	U-234	
U-234 (Ουράνιο)	α	Th-230	
Th-230 (Θόριο)	α	Ra-226	
Ra-226 (Ράδιο)	α	Rn-222	
Rn-222 (Ραδόνιο)	**α**	**Po-218**	**3.8 d**
Po-218 (Πολώνιο)	α	Pb-214	3.1 min
Pb-214 (Μολύβι)	β	Bi-214	26.8 min
Bi-214 (Βισμούθιο)	β	Po-214	19.9 min
Po-214 (Πολώνιο)	α	Pb-210	0.1643 msec
Pb-210 (Μολύβι)	β	Bi-210	22.3 y
Bi-210 (Βισμούθιο)	β	Po-210	5.013 d
Po-210 (Πολώνιο)	α	Pb-206	138.3376 d
Pb-206 (Μολύβι)	--	--	σταθερό

Πίνακας 1. Η σειρά ραδιενεργού διάσπασης του ραδονίου

1.2 Πηγές Ραδονίου

Η φυσική ραδιενέργεια υπήρξε ανέκαθεν μέρος του ανθρώπινου περιβάλλοντος. Οι κυριότερες συνιστώσες της φυσικής ραδιενέργειας είναι η κοσμική ακτινοβολία, η εξωτερική ακτινοβόληση από τα φυσικά ραδιοϊσότοπα του εδάφους, των πετρωμάτων και των οικοδομικών υλικών και τέλος η εσωτερική ακτινοβόληση από τις ραδιενεργές ουσίες που βρίσκονται στις τροφές και στον εισπνεόμενο αέρα. Πρέπει να τονισθεί ότι, κατά μέσο όρο, σχεδόν 90% της

ραδιενέργειας στην οποία εκτίθεται ο άνθρωπος οφείλεται σε φυσικές πηγές. Το μισό περίπου αυτού του ποσοστού οφείλεται στο ραδόνιο.

Το ραδόνιο στο εσωτερικό των κατοικιών οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ύπαρξη πατρικών πυρήνων ραδίου-226 στο έδαφος και στα οικοδομικά υλικά. Ο αέρας της ατμόσφαιρας με το ραδόνιο που περιέχει συμβάλλει και αυτός στην αύξηση των συγκεντρώσεων στους εσωτερικούς χώρους μέσω των συστημάτων εξαερισμού και των άλλων ανοιγμάτων. Οι περισσότεροι ερευνητές φαίνεται να συμφωνούν ότι τυχόν αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους μπορούν να αποδοθούν στο ραδόνιο που παράγεται από το ράδιο στα πετρώματα του εδάφους [38].

Η κυριότερη πηγή ραδονίου που επηρεάζει εκείνους που ζούν πλησίον του εδάφους, για παράδειγμα σε ισόγεια ή ημιυπόγεια, είναι το ράδιο-226 του εδάφους. Εδάφη με υψηλή διαπερατότητα παρουσιάζουν και υψηλούς ρυθμούς εκροής ραδονίου. Εδάφη που είναι δυνατόν να παράγουν πολύ ραδόνιο είναι για παράδειγμα τα γρανιτικά και ηφαιστειακά πετρώματα και τα λιγνιτικά κοιτάσματα που από τη φύση της δημιουργίας τους παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις ραδίου ιδιαίτερα όταν αυτά βρίσκονται σε μορφή άμμου ή βράχων μικρών διαστάσεων διότι τότε χαρακτηρίζονται και από υψηλή διαπερατότητα. Επίσης εδάφη μολυσμένα με παραπροϊόντα εξόρυξης, εμπλουτισμού και περαιτέρω επεξεργασίας ουρανίου ή φωσφατικών κοιτασμάτων παρουσιάζουν και αυτά υψηλούς ρυθμούς εκροής ραδονίου. Ο σημαντικότερος παράγοντας που ωθεί το ραδόνιο στο εσωτερικό μιας κατοικίας και μάλιστα στα διαμερίσματα που είναι πλησιέστερα στο έδαφος, είναι η διαφορά πίεσης που δυνατόν να παρουσιαστεί μεταξύ της κατοικίας και του εδάφους.

Τα οικοδομικά υλικά είναι γενικά η δεύτερη σημαντικότερη πηγή ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους. Οι ρυθμοί εκροής ραδονίου από οικοδομικά υλικά δεν εξαρτώνται μόνο από την περιεκτικότητα του υλικού σε ράδιο αλλά επιπλέον και από παράγοντες όπως το ποσοστό του ραδονίου σε σχέση με το συνολικά παραγόμενο ραδόνιο, το οποίο έχει τη δυνατότητα να διαφύγει από το υλικό και το πορώδες του υλικού.

Ο ατμοσφαιρικός αέρας δρα κατά κανόνα ως διαλύτης, λόγω της χαμηλής συγκέντρωσής του σε ραδόνιο. Παρ'όλ'αυτά σε μερικές περιπτώσεις, όπως π.χ. σε διαμερίσματα που βρίσκονται σε ορόφους άνω του δευτέρου και τα οποία έχουν χτιστεί με οικοδομικά υλικά χαμηλής συγκέντρωσης σε ράδιο, ο ατμοσφαιρικός αέρας παραμένει η κύρια πηγή ραδονίου για τους εσωτερικούς χώρους. Η συγκέντρωση ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα εξαρτάται κυρίως από την ατμοσφαιρική πίεση, και (σε περίπτωση που δεν υπάρχουν θερμοκρασιακές αναστροφές) παρουσιάζει ταλαντώσεις με υψηλότερες τιμές κατά τη διάρκεια της νύχτας.

1.3 Συμπεριφορά Ραδονίου

Η διάσπαση του ραδονίου οδηγεί στο σταθερό στοιχείο μόλυβδο-206 (^{206}Pb - Πίνακας 1). Τα θυγατρικά πολώνιο-218 (^{218}Po), μόλυβδος-214 (^{214}Pb), βισμούθιο-214 (^{214}Bi) και πολώνιο-214 (^{214}Po) έχουν χρόνους ημιζωής πολύ μικρότερους από εκείνο του ραδονίου. Τα υπόλοιπα θυγατρικά έχουν πολύ υψηλότερους χρόνους ημιζωής από το ραδόνιο. Ολα τα θυγατρικά προιόντα είναι βαρέα μέταλλα τα οποία γενικά είναι δυνατόν:

- να παραμείνουν αδέσμευτα στην ατμόσφαιρα του χώρου.
- να καταπέσουν όντας αδέσμευτα στις επιφάνειες του χώρου.
- να δεσμευθούν στα σωματίδια του αεροζόλ του περιβάλλοντος αέρα και να παραμείνουν έτσι δεσμευμένα στην ατμόσφαιρα του χώρου.
- να δεσμευθούν στα σωματίδια του αεροζόλ του περιβάλλοντος αέρα και έτσι δεσμευμένα να καταπέσουν στις επιφάνειες του χώρου

Ο βαθμός και ο ρυθμός με τον οποίο λαμβάνουν χώρα όλες αυτές οι διαδικασίες επηρεάζονται από πάρα πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων της κατανομής μεγέθους και της συγκέντρωσης των σωματιδίων των αερολυμάτων, του όγκου του χώρου, των συνθηκών κλιματισμού και αερισμού κ.λπ.

Σαν συνέπεια αυτών των διαδικασιών ο αέρας των εσωτερικών χώρων περιέχει στην πραγματικότητα ένα μίγμα αερίου ραδονίου και θυγατρικών του προϊόντων. Εισπνεόμενο το ραδόνιο πιθανόν να διασπασθεί μέσα στον πνεύμονα, ακτινοβολώντας τον. Όμως πολύ επιβλαβέστερη ραδιολογικά είναι η εισπνοή των αιωρούμενων θυγατρικών του ραδονίου. Τα περισσότερα από αυτά, που βρίσκονται στον αέρα που εισπνέεται, αποτίθενται στους ιστούς του πνεύμονα. Ιδιαίτερα επιβλαβή μάλιστα, έχει αποδειχθεί ότι είναι εκείνα από τα θυγατρικά που εκπέμπουν α-σωματίδια διότι ακτινοβολούν με σημαντική ενέργεια πολύ μικρό όγκο ιστού. Τα θυγατρικά παράγωγα του ραδονίου μετά τον σχηματισμό τους προσκολλώνται σε αερολύματα, τα οποία με την εισπνοή επικάθονται στο πνευμονικό επιθήλιο. Διασπώνται εκεί εκπέμποντας σωμάτια άλφα, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στον πνεύμονα, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα ανάπτυξης καρκίνου του πνεύμονα. Οπως εκτιμάται 98% των α-σωματιδίων που ακτινοβολούν ένα πνεύμονα προέρχονται από τις διασπάσεις των θυγατρικών του ραδονίου που εισπνέονται και μόλις 2% οφείλονται στις διασπάσεις του ίδιου του ραδονίου [38].

1.4 Παράγοντας Ισορροπίας

Το μέτρο που δείχνει πόσα από τα θυγατρικά ισότοπα του ραδονίου είτε αδέσμευτα είτε δεσμευμένα στα αερολύματα δεν έχουν καταπέσει αλλά αιωρούνται σε έναν χώρο είναι ο παράγοντας ισορροπίας F (equilibrium factor). Ο συντελεστής

ισορροπίας F ορίζεται ως ο λόγος της ισοδύναμης συγκέτρωσης ραδονίου σε συνθήκες κλειστού αέρα, προς την πραγματική συγκέντρωση του ραδονίου σε συνθήκες ανοιχτού αέρα [17, 22,23], ο οποίος ορίζεται ως

$$F=Cd/Cr \quad (1)$$

όπου Cd = 0.105A + 0.515B + 0.380C, Cr η συγκέντρωση του ραδονίου στο χώρο σε Bqm^{-3} A η συγκέντρωση του πολωνίου-218 σε Bqm^{-3} B η συγκέντρωση του μολύβδου-214 σε Bqm^{-3} και C η συγκέντρωση του βισμουθίου-214 σε Bqm^{-3}.

Ένα ζεύγος ανιχνευτών έχει σχεδιαστεί και χρησιμοποιείται για την ταυτόχρονη εκτίμηση της συγκέντρωσης των σωματίων α, καθώς και την συγκέντρωση του αερίου σε ένα περιβάλλον ραδονίου [24]. Ο ένας ανιχνευτής, ο οποίος βρίσκεται σε ένα δοχείο και προσομειώνει καταστάσεις κλειστού αέρα, καταγράφει τα ίχνη όπου αναλογούν στην συγκέντρωση του αερίου και ο ανιχνευτής ο οποίος βρίσκεται εξωτερικά του δοχείου, καταγράφει τα κομμάτια που αναλογούν στο αέριο αλλά και στα θυγατρικά του [24]. Αν είναι F = 1 τότε όλα τα παραγόμενα από το ραδόνιο θυγατρικά αιωρούνται και κανένα δεν έχει καταπέσει. Αντίθετα αν F = 0 τότε όλα τα θυγατρικά έχουν καταπέσει και στην ατμόσφαιρα υπάρχει μόνο ραδόνιο. Κάθε ενδιάμεση τιμή αντιπροσωπεύει και μία ενδιάμεση κατάσταση.

1.5 Ραδιενεργός ισορροπία

Για να επέλθει ραδιενεργός ισορροπία σε ένα χώρο, πρέπει να σφραγιστεί αεροστεγώς, να μην υπάρχουν πηγές αερολυμάτων εντός του χώρου και μεταβολές στην ποιότητα του αέρα. Από την στιγμή εκείνη πρέπει να περάσουν περίπου 4 ώρες, για να επέλθει ραδιενεργός ισορροπία. Το ραδόνιο με τα βραχύβια θυγατρικά του δεν βρίσκεται απαραίτητα σε ισορροπία [27,17].

1.6 Τεχνικές Μέτρησης Συγκέντρωσης Ραδονίου

Μέχρι σήμερα έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές για τη μέτρηση των συγκεντρώσεων του ραδονίου στον αέρα. Όλες οι τεχνικές στηρίζονται στην ανίχνευση και την καταγραφή της ραδιενεργού ακτινοβολίας, η οποία εκπέμπεται κατά τις διασπάσεις της αλυσίδας του ραδονίου που περιέχεται σε ένα συγκεκριμένο όγκο αέρα. Κυρίως γίνεται ανίχνευση και καταγραφή των α-σωματιδίων ή των γ-φωτονίων. Συνδυασμένες τεχνικές μετρήσεων α- και γ-ακτινοβολιών έχουν επίσης αναφερθεί. Κατάλληλοι συντελεστές βαθμονόμησης, χρησιμοποιούνται ώστε το σύνολο των α- ή γ-εκπομπών που καταγράφονται, να μετατρέπεται σε συγκέντρωση ραδονίου. Τεχνική που να μετρά τη συγκέντρωση

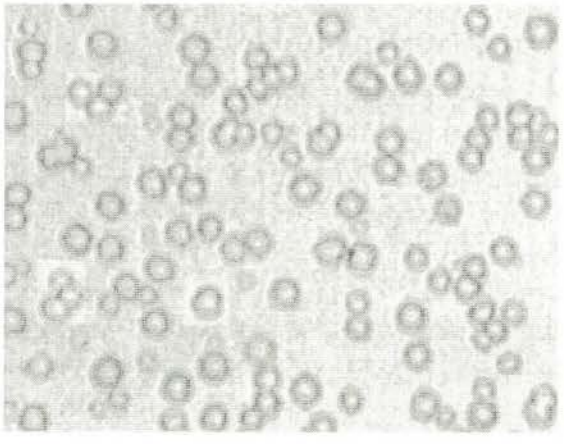
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

ραδονίου, αποκλειστικά από τις διασπάσεις του ιδίου του ραδονίου, δεν έχει αναφερθεί. Οι τεχνικές μέτρησης διακρίνονται ανάλογα με το είδος των ανιχνευτών που χρησιμοποιείται. Η διάκριση γίνεται σε τεχνικές μέτρησης με ενεργητικούς ανιχνευτές και σε τεχνικές μέτρησης με παθητικούς ανιχνευτές.

Ενεργητικές ονομάζονται οι μέθοδοι που κάνουν χρήση εξωτερικής ενέργειας, συνήθως ηλεκτρικής, για να πραγματοποιήσουν την μέτρηση (κάνοντας χρήση αντλιών αέρα). Παθητικές μέθοδοι χαρακτηρίζονται εκείνες που δεν απαιτείται εξωτερική ενέργεια για για πραγματοποιήσουν τη διαδικασία και η μέτρηση ξεκινάει από την στιγμή τοποθέτησης του ανιχνευτή στην θέση του. Οι παθητικές μέθοδοι έχουν περισσότερες εφαρμογές καθότι διακρίνονται πιο φιλικές στη χρήση, πιο οικονομικές, κατάλληλες για μετρήσεις από ερευνητές ή και για μακροχρόνιες μετρήσεις. Το κυριότερο μειονέκτημά τους όμως, είναι ότι το αποτέλεσμα της μέτρησης δεν μπορεί να δοθεί αμέσως, αλλά πρέπει προηγουμένως, οι ανιχνευτές να σταλούν στο κατάλληλο εργαστήριο το οποίο να είναι εφοδιασμένο με τον εξοπλισμό για την επεξεργασία και τη μέτρησή τους. Οι ανιχνευτές αυτού του τύπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο μία φορά.

Η μέτρηση του Ραδονίου κάνοντας χρήση παθητικών ανιχνευτών μπορέι να εκφραστεί σε Bq/m^3. Αυτό αντιπροσωπεύει την μέση ολοκληρωμένη συγκέντρωση του ραδονίου για τον εσωτερικό αέρα του κτηρίου. Για παράδειγμα, $1Bq/m^3$ σημαίνει ότι κατά μέσο όρο σε κάθε κυβικό μέτρο αέρα, συμβαίνει μία διάσπαση ενός ατόμου ραδονίου σε κάθε δευτερόλεπτο.

Οι στερεοί ανιχνευτές καταγραφής ιχνών είναι πλαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως για την ολοκληρωμένη μέτρηση του ραδονίου και των ισότοπων αυτού. Τα σωμάτια α που παράγονται κατά τη διάσπαση του ραδονίου και των θυγατρικών του, ακτινοβολούν στο πλαστικό, προκαλώντας στίγμα, καταστρέφοντας το πλαστικό σε εκείνο το σημείο. Ακολουθεί μια χημική διαδικασία, όπου διαβρώνει τα στίγματα, μέχρις ώτου γίνουν ορατά στο μικροσκόπιο και μετρήσιμα [28]. Έχουν δημιουργηθεί λογισμικά ανά καιρούς τα οποία κάνουν καταμέτρηση των στιγμάτων, με τεχνικές αναγνώρισης μοτίβων αλλά και φωτεινοτήτων, για να προσδιορίσουν αν έγινε προσπτωση σε ένα στίγμα παραπάνω του ενός ιόντος. Η παρακάτω εικόνα δείχνει τη μορφή ενός ανιχνευτή μετά από το στάδιο χημικής διάβρωσης [28].



Εικόνα 1. Χημική διάβρωση παθητικού ΣΑΚΙ

1.7 Βιολογικές Επιδράσεις

Η ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας που λαμβάνει κάποιος εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας και την ενέργειά της. Σχετικά με τα είδη ακτινοβολίας που οφείλονται στις διασπάσεις του ραδονίου και των θυγατρικών του ισοτόπων, σημειώνονται τα ακόλουθα. Οι α και β ακτινοβολίες θεωρούνται ακίνδυνες για εξωτερική ακτινοβόληση επειδή η εμβέλειά τους είναι πολύ μικρή, οπότε μπορούν να σταματήσουν ακόμα και σε μερικά εκατοστά αέρα ή στα ήδη νεκρά κύτταρα του εξωτερικού δέρματος του ανθρώπου. Δε συμβαίνει όμως το ίδιο και για την εσωτερική ακτινοβόληση. Τότε η α-ακτινοβολία είναι εξαιρετικά επικίνδυνη, λόγω της μεγάλης πυκνότητας ιονισμών που προκαλούν τα α-σωματίδια κατά μήκος της τροχιάς τους. Χάνουν την ενέργειά τους σε πάρα πολύ μικρή απόσταση από το σημείο που δημιουργήθηκαν, προσφέροντας έτσι μεγάλο ποσό ενέργειας σε μικρό όγκο. Αντίθετα οι β-ακτινοβολίες προκαλούν μικρή πυκνότητα ιονισμού στον ανθρώπινο ιστό και έτσι μπορούν να θεωρηθούν αμελητέας επίπτωσης για εσωτερική ακτινοβόληση. Οσον αφορά στις γ-ακτινοβολίες που εκπέμπονται από τις ραδιενεργές διασπάσεις στην αλυσίδα του ραδονίου, δεν θεωρούνται σημαντικές, τόσο στην περίπτωση εξωτερικής, όσο και στην περίπτωση εσωτερικής ακτινοβόλησης.

Η εμβέλεια των α-σωματιδίων που παράγονται από τα θυγατρικά του ραδονίου είναι πολύ μικρή - μεταξύ 41 μm και 70 μm [16]. Το επιθήλιο είναι μεταξύ 15 μm και 80 μm [8] και έτσι τα α-σωματίδια μπορούν και εναποθέτουν όλη την ενέργειά τους στα κύτταρα της βασικής στιβάδας, προκαλώντας κατ' αυτόν τον τρόπο έντονο ιονισμό. Δημιουργούνται τότε χημικές μορφές που αντιδρούν και αλλοιώνουν τη δομή μεγαλομοριακών σχηματισμών στο εσωτερικό του κυττάρου, με αποτέλεσμα απορύθμιση της ομάλης λειτουργίας και ίσως αργότερα την καρκινογέννεση.

2. Ραδιενεργός Διάσπαση

2.1 Γενικά

Πυρήνες με μεγάλο ατομικό αριθμό, διασπώνται αυθόρμητα η εξαιτίας εξωτερικής διέγερσης σε άλλους με διαφορετικό ατομικό αριθμό, υπό ταυτόχρονη έκλυση ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ραδιενεργός διάσπαση. Η ουσία που προκύπτει είναι συνήθως ραδιενεργή. Αυτή με τη σειρά της διασπάται είτε σε κάποιο άλλο ραδιενεργό στοιχείο, είτε σε ένα σταθερό πλέον στοιχείο. Οι αρχικοί πυρήνες ονομάζονται μητρικοί και οι παραγόμενοι, θυγατρικοί.

Η μετάπτωση των αρχικών πυρήνων σε πυρήνες άλλων στοιχείων, ονομάζεται μεταστοιχείωση. Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη ραδιενεργό διάσπαση είτε με τη μορφή κινητικής ενέργειας των σωματίων είτε με τη μορφή ηλεκτομαγνητικής ακτινοβολίας, προέρχεται από μετατροπή μέρους της μάζας του αρχικού πυρήνα σε ενέργεια. Οι πυρήνες μεταστοιχειώνονται αυτόματα για να πέσουν σε μια ευνοϊκότερη ενεργειακή κατάσταση [36].

Ο ρυθμός με τον οποίο διασπάται ένα ισότοπο εκφράζεται με την ημιπερίοδο ζωής (ή χρόνος ημιζωής) αυτού. Ημιπερίοδος ζωής θεωρείται ο χρόνος που απαιτείται για τη διάσπαση του μισού πυρήνα ενός ραδιενεργού ισοτόπου σε ένα δείγμα. Αυτός ο χρόνος είναι σταθερός και δεν επηρεάζεται από κάποιον φυσικό η χημικό παράγοντα. Συχνά χρησιμοποιείται στη γεωλογία για τον προσδιορισμό της ηλικίας ορυκτών και πετρωμάτων. Αυτή η προσέγγιση ονομάζεται ραδιοχρονολόγηση.

2.2 Τύποι Διασπάσεων

Υπάρχουν τρία βασικά είδη διασπάσεων. Η άλφα διάσπαση, η βήτα διάσπαση και η γάμμα διάσπαση.

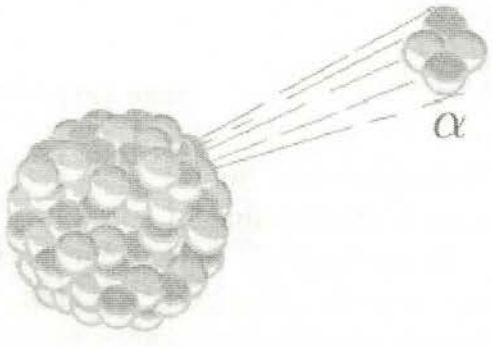
Οι ακτίνες άλφα, βήτα, και οι ακτινοβολίες γάμμα εκπέμπονται από τους μητρικούς πυρήνες τους με τεράστιες ταχύτητες. Τα άλφα σωματίδια επιβραδύνονται και σταματούν καθώς περνούν μέσω της ύλης, πρώτιστα μέσω της αλληλεπίδρασης τους με τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε εκείνη την ύλη. Επιπλέον, τα περισσότερα από τα άλφα σωματίδια εκπεμπόμενα από την ίδια ουσία εκτινάσσονται με σχεδόν ίδια ταχύτητα. Κατά συνέπεια σχεδόν όλα τα άλφα σωματίδια από το πολώνιο- 210 ταξιδεύουν 3,8 cm μέσω του αέρα πριν να σταματήσουν εντελώς , και εκείνα από το πολώνιο- 212 ταξιδεύουν 8,5 cm υπό τους ίδιους όρους. Η μέτρηση της απόστασης που διανύεται από τα άλφα σωματίδια χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τα ισότοπα.

Τα βήτα σωματίδια εκτινάσσονται με πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες από τα άλφα σωματίδια, και έτσι θα διαπεράσουν αρκετά περισσότερη ύλη, αν και ο μηχανισμός με τον οποίο αυτά σταματούν είναι ουσιαστικά παρόμοιος. Αντίθετα από τα άλφα σωματίδια, όμως, τα βήτα σωματίδια εκπέμπονται με πολλές διαφορετικές ταχύτητες, και οι βήτα εκπομπές πρέπει να διακριθούν μεταξύ τους από τις χαρακτηριστικές μέγιστες και μέσες ταχύτητες των βήτα σωματιδίων τους. Η κατανομή στις ενέργειες βήτα-σωματιδίων (ταχυτήτων) απαίτησε την υπόθεση της ύπαρξης, ένος σωματιδίου χωρίς μάζα αποκαλούμενο νετρίνο. Η εκπομπή νετρίνο συνοδεύει όλες τις διασπάσεις βήτα.

Η εκπομπή γάμμα εμφανίζεται συνήθως σε συνδυασμό με την άλφα και την βήτα εκπομπή. Οι ακτίνες γάμμα δεν φέρουν κανένα φορτίο ή μάζα και κατά συνέπεια η εκπομπή των ακτίνων γάμμα από έναν πυρήνα δεν οδηγεί σε καμιά αλλαγή στις χημικές ιδιότητες του πυρήνα αλλά μόνο στην απώλεια ενός ορισμένου ποσού ακτινοβόλου ενέργειας. Η εκπομπή των ακτίνων γάμμα οφείλεται σε μια αποδιέγερση του πυρήνα που βρισκόταν σε μια ασταθή κατάσταση, λόγω των εκπομπών άλφα ή βήτα από τον πυρήνα. Το αρχικό άλφα ή βήτα σωματίδιο και η επακόλουθη εκπομπή ακτίνων γάμμα εκπέμπονται σχεδόν ταυτόχρονα.

2.3 Διάσπαση Άλφα

Διάσπαση άλφα ονομάζεται η μεταστοιχείωση ενός πυρήνα όταν αυτός εκπέμπει ένα σωμάτιο α δηλαδή έναν πυρήνα Ηλίου, οι οποίοι ονομάστηκαν έτσι όταν ανακαλύφθηκαν, διότι τότε δεν γνώριζαν την πραγματική φύση τους. Στα δεξιά, μπορούμε να δούμε την σχηματική αναπαράσταση μιας άλφα διάσπασης. Παλαιότερα μάλιστα, η διάσπαση άλφα θεωρούνταν ακτινοβολία και όχι σωμάτιο. Η αντίδραση η οποία γίνεται, δηλαδή η μεταστοιχείωση ενός πυρήνα (του στοιχείου X) με ατομικό αριθμό Z και μαζικό αριθμό A σε έναν άλλο πυρήνα (του στοιχείου Y) εκπέμποντας ένα σωμάτιο α, γράφεται συμβολικά ως εξής:



Εικόνα 2. Σχηματική αναπαράσταση άλφα διάσπασης

$$^{A}_{Z}X \Rightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He + Q$$

όπου Q η ενέργεια της αντίδρασης.

Ακόμη και αν η διάσπαση ενός πυρήνα με εκπομπή σωματίου α είναι εφικτή ενεργειακά, δηλαδή το Q είναι θετικό, αυτό δε σημαίνει ότι η αντίδραση θα γίνεται οπωσδήποτε και αυτομάτως. Άλλωστε αν γινόταν πάντα και χωρίς κανέναν περιορισμό, δε θα υπήρχαν οι βαρείς πυρήνες. Ο περιορισμός που τίθεται εδώ είναι το ηλεκτροστατικό δυναμικό Coulomb, αφού μέσα στον πυρήνα λόγω της έλξης της ισχυρής πυρηνικής δύναμης, το δυναμικό γίνεται πολύ μικρότερο. Για να γίνει η διάσπαση άλφα πρέπει ή να δοθεί αρκετή ενέργεια ώστε να ξεπεραστεί αυτό το φράγμα δυναμικού ή να γίνει φαινόμενο σύραγγος σύμφωνα με την κβαντική μηχανική και να περάσει δηλαδή το σωμάτιο α το φράγμα δυναμικού Coulomb αυθόρμητα και χωρίς να έχει την ενέργεια για να το κάνει σύμφωνα με την κλασσική φυσική [32].

3. Σωμάτια Άλφα

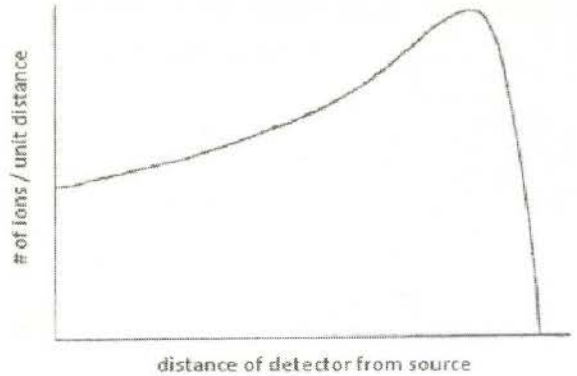
3.1 Γενικά

Το σωμάτιο άλφα είναι η σύζευξη δύο πρωτονίων και δύο νετρονίων. Η δομή αυτή έχει συνολικά μηδενικό σπίν και είναι ταυτόσημη με αυτήν ενός πυρήνα του ατόμου του Ηλίου (He).

Όταν το ραδόνιο ή κάποιο από τα θυγατρικά του υπόκειται σε διάσπαση άλφα, ο πυρήνας του απελευθερώνει ένα σωμάτιο α συγκεκριμένης ενέργειας. Η ενέργεια αυτή συνεπαγεται ένα συγκεκριμένο φάσμα για το σωμάτιο. Έτσι αποκτά ένα σχεδόν συγκεκριμένο εύρος κίνησης στα αέρια, στα υγρά και στα στερεά υλικά [29]. Η ενέργεια που χάνει κατά κύριο λόγο το σωμάτιο, οφείλεται στην αλληλεπίδραση των ατόμων του μέσου. Αυτό όμως δεν είναι αρκετό για να αλλάξει την κατεύθυνσή του, μιας και το σωμάτιό α έχει αρκετά υψηλή ενέργεια και ορμή. Μέσω των αλληλεπιδράσεων, φτάνει τελικά να έχει χάσει όλη την κινητική του ενέργεια.

3.2 Εύρος

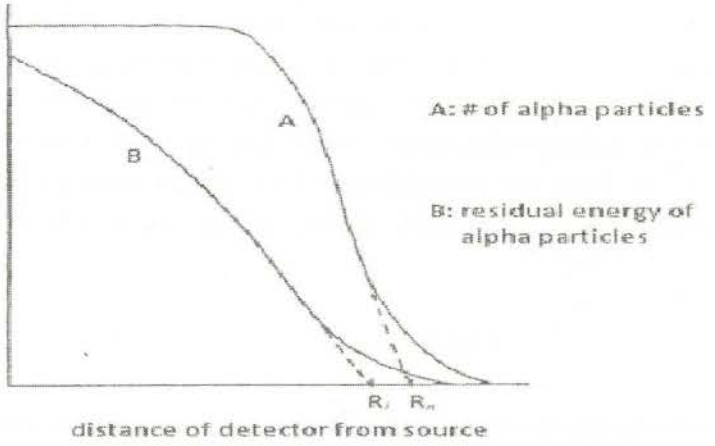
Η συνολική απόσταση που έχει διανύσει ένα σωμάτιο α, ονομάζεται εύρος. Συνήθως είναι μια ευθεία ή έχει μια καμπύλη στο τελικό άκρο. Το εύρος εξαρτάται από την αρχική ενέργεια του σωματίου α, την πυκνότητα του μέσου, καθώς και τις συνολικές αλληλεπιδράσεις με τα άτομα σε αυτό [29]. Ένα σωμάτιο α χαμηλής ενέργειας, τείνει να χάνει περισσότερη ενέργεια από τις αλληλεπιδράσεις στο μέσον, διότι έχει περισσότερο χρόνο για να αλληλεπιδράσει με τα άτομα του μέσου. Σε αντίθεση, ένα σωμάτιο α υψηλής ενέργειας, ξοδεύει λιγότερο χρόνο σε ένα άτομο, επομένως χάνει λιγότερη ενέργεια [29]. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί κατά μήκος της πορείας ενός α σωματίου, όπου στην αρχή της ο αριθμός των ιόντων που παράγονται ανά μονάδα απόστασης είναι μικρός, έπειτα κορυφώνεται κοντά στο τέλος της διαδρομής και στη συνέχεια πέφτει απότομα στο μηδέν όταν το σωμάτιο γίνεται πολύ αργό για οποιαδήποτε αλληλεπίδραση. Παρατείθεται ένα τέτοιο γράφημα σχέσης αριθμού ιόντων που αλληλεπίδρασαν και απόστασης από την πηγή, γνωστό και ως καμπύλη του Bragg [29].



Εικόνα 3. Καμπύλη του Bragg

Δεδομένου ότι η απώλεια ενέργειας του σωματίου α ανά ιόν είναι σχεδόν σταθερή, ο ρυθμός αλληλεπίδρασης είναι ανάλογος με την απώλεια ενέργειας του σωματίου α, -dE/dx κι έτσι προκύπτει ότι το διάγραμμα σχέσης απώλειας ενέργειας ανά μονάδα απόστασης και απόστασης από την πηγή, θα έχει παρόμοια μορφή με την καμπύλη του Bragg όπως την εικόνα 3 [29].

Οι μετρήσεις που θα χρησιμοποιηθούν για να καθοριστεί το εύρος των σωματιδίων α, είναι να ανιχνεύεται ο αριθμός των σωματιδίων συναρτήσει της απόστασης από την πηγή και να καταγράφεται η εναπομενουσα ενέργεια των σωματίων α ως συνάρτηση της απόστασης από την πηγή. Γραφήματα για αυτά τα δεδομένα κοντά στο εύρος των σωματίων παρατείθενται παρακάτω [29].



Εικόνα 4. Γράφημα δεδομένων κοντά στο εύρος α-σωματίων

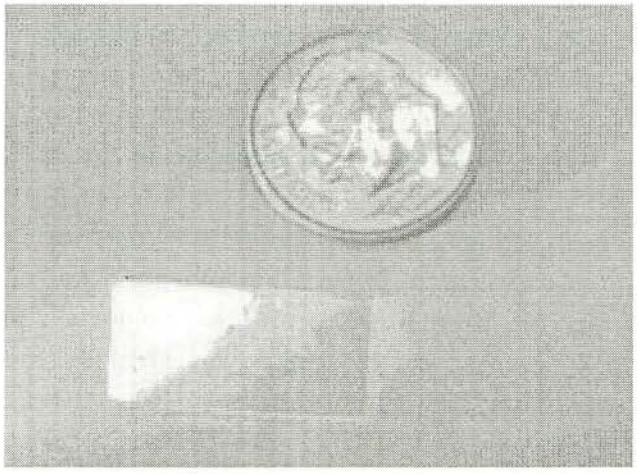
3.3 Straggling

Η απόκλιση που παρουσιάζουν οι καμπύλες στο τέλος τους, ονομάζεται straggling. Αυτό σημαίνει ότι στο ίδιο μέσον, σωμάτια α με ίδια αρχική ενέργεια, μπορεί να έχουν διαφορετική τελική ενέργεια, λόγω διαφορετικού αριθμού αλληλεπιδράσεων με ιόντα του μέσου. Λόγω αυτού του φαινομένου το εύρος ενός σωματίου α δεν είναι απόλυτα σταθερό [29].

4. Ο ανιχνευτής CR-39

4.1 Γενικά

Ένας κορυφαίος, ευρέως χρησιμοποιούμενος παθητικός ανιχνευτής είναι ο CR-39 (Columbia Resin 39), ο οποίος μετρά την συγκέτρωση ραδονίου, μελετώντας την ενέργεια και την γωνία του σωματίου άλφα του ραδονίου και των θυγατρικών παραγώγων που φθάνουν στον CR-39 καθώς και τον συντελεστή βαθμονόμησής του [15,25]. Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε έναν τέτοιο ανιχνευτή [21].



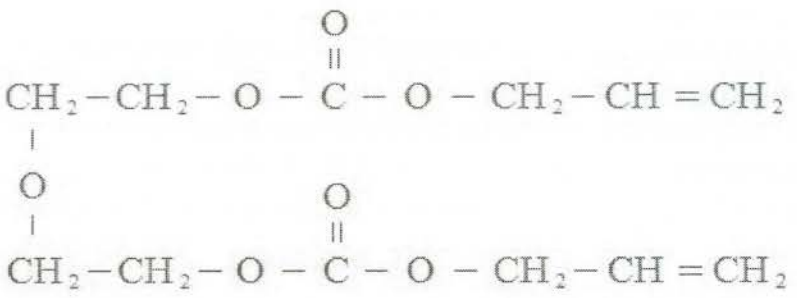
Εικόνα 5. Ο ανιχνευτής CR-39

4.2 Σύνθεση

Ο CR-39 είναι ένα πλαστικό πολυμερές που συνήθως χρησιμοποιούταν σε κατασκευή φακών γυαλιών. Η συντομογραφία σημαίνει Columbia Resin #39 που σημαίνει ότι είναι η 39η φόρμουλα ενός θερμοσκληρυνόμενου πλαστικού που αναπτύχθηκε από το Columbia Resigns το 1940.

Ο CR-39 κατασκευάζεται με πολυμερισμό διαιθυλενογλυκόλης δυ-αλλυλοανθρακικού με παρουσία υπεροξυδιανθρακικού δυ-ισοπροπυλίου καταλύτη. Οι ομάδες αλλυλίου, βοηθούν στον σχηματισμό σταυροτών δεσμών και ως εκ τούτου είναι μια θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη.

Η χημική του σύνθεση έχει ώς εξής, $C_{12}H_{18}O_7$, με μοριακό βάρος 274amu και πυκνότητα 1.32gr/cm^3. Η χημική σύνθεση του ανιχνευτή, εκφράζεται αναλυτικότερα στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6. Χημική σύνθεση του CR-39

4.3 Καταγραφή στον CR-39

Για να καταμετρήσουμε το χρόνο έκθεσης του ραδονίου και των θυγατρικών του, δημιουργείται η ανάγκη για μια απλή και αξιόπιστη μέθοδο, η οποία θα εκτιμά την δυνητική συγκέτρωση των σωματίων άλφα στο χώρο. Οι παθητικοί στερεοί ανιχνευτές καταγραφής ιχνών είναι οι μόνοι κατάλληλοι για μακροπρόθεσμες εκτιμήσεις των συγκεκτρώσεων α σωματίων [24]. Ο CR-39 όντας ένας κορυφαίος παθητικός ανιχνευτής, είναι άξιος έρευνας και μελέτης και αναλύουμε τον τρόπο λειτουργίας, ανίχνευσης σωματίων καθώς και τις τεχνικές που χρησιμοποιήσαμε για την μοντελοποίησή του στη συνέχεια.

Το ραδόνιο σαν ευγενές αέριο περιφέρεται στον αέριο χώρο, ενώ το πολώνιο είναι στερεά υλικά και επικάθονται σταδιακά στην επιφάνεια του ανιχνευτή. Λόγω της καθυστερημένης επικάθισης των θυγατρικών του ραδονίου στις επιφάνειες, η συγκέντρωσή τους θεωρείται ομοιογενείς στο περιβάλλον. Σχεδόν το 100% του ^{214}Po και το 20% του ^{218}Po επικάθονται σε επιφάνειες. Λόγω όμως της μικρής ημιζωής τους η πλειοψηφία αυτών θα εκπέψουν σωμάτιο άλφα, πριν προλάβουν να προσκολληθούν σε κάποια επιφάνεια [7].

4.4 Ενεργός Περιοχή

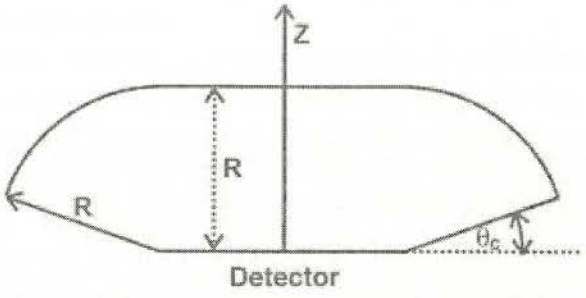
Ενεργός περιοχή του ανιχνευτή, χαρακτηρίζεται ως ο χώρος γύρω από τον ανιχνευτή, όπου θα μπορούσε να ανιχνεύσει και να καταγράψει ένα άλφα σωμάτιο. Αυτός ο χώρος περιορίζεται από πολλούς τεχνικούς παράγοντες. Οι περισσότεροι από αυτούς βασίζονται στα σωμάτια άλφα.

Έστω πως το ραδόνιο ή ένα θυγατρικό του, πραματοποιεί μια διάσπαση άλφα σε μία απόσταση I από τον ανιχνευτή με ενέργεια E_1 και προσπίπτει στον ανιχνευτή με ενέργεια E_2. Για να ισχύει αυτή η υπόθεση, πρέπει αρχικά η απόσταση I να είναι μικρότερη από το εύρος του σωμάτιου άλφα στο συγκεκριμένο μέσον. Η διαφορά στο εύρος R_1 του άλφα και της απόστασης I, ισούται με την ενέργεια E_1 και το εύρος R_2 με ενέργεια E_2 όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση [9,26,35].

$$I=R_1-R_2=R_{max}-R \quad (3)$$

Εάν E1 είναι η πρωτεύουσα ενέργεια του σωματίου, συνεπάγεται το μέγιστο εύρος για το σωμάτιο αυτό. Οι ενέργειες των άλφα σωματίων για το ραδόνιο και τα θυγατρικά έχουν ως εξής: ^{222}Rn – 5.49MeV, ^{218}Po – 6.0MeV, ^{214}Po – 7.69MeV [14,18,30].

Οι ενέργειες αυτές συνεπάγονται ένα συγκεκριμένο μέγιστο έυρος για το κάθε σωμάτιο άλφα των θυγατρικών. Ένας επιπλέον παράγοντας που περιορίζει την ενεργή περιοχή του ανιχνευτή μας, είναι εκτός από το εύρος και η γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια του ανιχνευτή. Αν η γωνία αυτή είναι μικρότερη από μια κρίσιμη γωνία ανίχνευσης το σωμάτιο δεν θα διεισδύσει στον ανιχνευτή και συνεπώς δεν θα καταμετρηθεί. Μια εικονική αναπαράσταση της ενεργού περιοχής και της κρίσιμης γωνίας, φαίνονται στο παρακάτω σχήμα [19].



Εικόνα 7. Η ενεργός περιοχή του CR-39

4.5 Κρίσιμη γωνία

Η αποδοτικότητα ενός στερεού ανιχνευτή καταγραφής ιχνών εξαρτάται από τη γωνία της πρόπτωσης που έχουν τα σωμάτια α. Κάτω από μια κρίσιμη γωνία θ_c, η επίπτωση του αλφα σωματίου, δεν θα αφήσει ορατή τροχιά κατά την διαδικασία της χημικής διάβρωσης και η απόδοση του ανιχνευτή, πέφτει στο μηδεν [2].

Για την πρακτική χρήση των ανιχνευτών στη φυσική και την δοσιμετρία, η κρίσιμη γωνία εξαρτάται από την αρχική ενέργεια του σωματίου και από τον χρόνο της χημικής διάβρωσης. Ένα θεωριτικό μοντέλο για την περιγραφή της σχέσης

αυτής έχει αναπτυχθεί [4]. Το μοντέλο αυτό μπορεί να προβλέπει την κρίσιμη γωνία για κάθε είδους σωμάτιο και ενέργειας, εάν είναι γνωστά ο χρόνος διάβρωσης κατά μήκους της τροχιάς των σωματίων. Συνήθως η κρίσιμη γωνία καθορίζεται στην έναρξη της διαδικασίας της χημικής διάβρωσης.

4.6 Ευαισθησία CR-39

Το ευγενές αέριο ραδόνιο, παράγεται από διάσπαση άλφα του ραδίου το οποίο βρίσκεται στο χώμα και τα οικοδομικά υλικά. Συνήθως οι συγκετνρώσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, είναι υψηλότερη από την συγκέντρωση στους εξωτερικούς.

Η δόση που ισούται με την συγκέντρωση ραδονίου στον αέρα και στα θυγατρικά του, εκτιμάται πολλαπλασιάζοντας την συγκέντρωση άλφα σωματίων στον αέρα c_j (j= 0, 1, 2, 3, 4) με την δόση που ισούται στους παράγοντες μετατροπής [3]. Ωστόσο ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης άλφα σωματίων από το μίγμα ραδιονουκλεϊδίων στον αέρα, κάνοντας χρήση ενός στερεού ανιχνευτή καταγραφής ιχνών για την ανίχνευση του καθενός ραδιονουκλεϊδίου, καθίσταται εξαιρετικά δύσκολος.

Ένα μη ισοσταθμισμένο μίγμα του ραδονίου και των θυγατρικών, αναπαρίσταται από τον συντελεστή ισορροπίας F που είναι ο λόγος της συγκέντρωσης του ραδονίου (c_E) προς την πραγματική συγκέντρωση του ραδονίου στον αέρα (c_0) ή

$$F=c_E/c_0 \quad (4)$$

όπου c_E η συγκέτρωση του ραδονίου σε ισορροπία με τα θυγατρικά τα οποία έχουν την ίδια πιθανή ενέργεια συγκέντρωσης άλφα με το δεδομένο μη ισοσταθμισμένο μίγμα του ραδονίου και των θυγατρικών [27].

Αν οι δραστηριότητες του ραδονίου και των θυγατρικών στον αέρα καταμετρηθούν με την τεχνική ενός ζέυγους ανιχνευτών όπως αναφέραμε πιο πάνω στον συντελεστή ισορροπίας, με έναν ανιχνευτή ανοιχτού αέρα και έναν δεύτερο κλειστού αέρα, οι ανάλογες πυκνότητες τροχίας D και D_0 σχετίζονται με τις συγκεντρώσεις του ^{222}Rn (c_0), ^{218}Po (c_1) και ^{214}Po (c_4) με την ακόλουθη σχέση.

$$D = k(c_0 + c_1 + c_4), \quad (5)$$

$$D_0 = kc_0 \quad (6)$$

όπου k ο συντελεστής ευαισθησίας του ανιχνευτή μας.

Η εξίσωση 2 θεωρεί την ίδια ευαισθησία για το ραδόνιο και το καθένα από τα θυγατρικά του. Η εξίσωση 3 είναι εγκυρη, διότι τα φίλτρα στον κλειστό ανιχνευτή, έχουν υψηλή διεισδυτικότητα για τα σωμάτια άλφα του ραδονίου, αλλά μηδενική για τα θυγατρικά του παράγωγα.

5. Ευαισθησία CR-39 & Προτεινόμενη Προσέγγιση

Ας δούμε όμως πιο προσεκτικά την εξίσωση 5 και την θεωρία που ισχύει γύρω από αυτήν. Το μέχρι τώρα μοντέλο που χρησιμοποιείται, θεωρεί έναν κοινό συντελεστή ευαισθησίας για το ραδόνιο και τα θυγατρικά του παράγωγα. Αυτό σαφώς διευκολύνει πολύ τους υπολογισμούς μας και την μοντελοποίηση του συστήματος, αλλά περιέχει ένα σημαντικό σφάλμα.

Παραπάνω είδαμε ότι η ευαισθησία ενός ανιχνευτή επηρεάζεται από το εύρος του σωματίου και την κρίσιμη γωνία καταγραφής, όπου μαζί συνθέτουν τον ενεργό χώρο, στον οποίο μπορεί ο ανιχνευτής να καταγράψει ένα σωμάτιο.

Ας μελετήσουμε αρχικά τον παράγοντα του εύρους του σωμαδίου. Το εύρος ενός σωματίου άλφα, εξαρτάται άμεσα από την αρχική του ενέργεια και τα ιόντα του μέσου στο οποίο κινείται. Μιας και όλα τα παραγόμενα άλφα σωμάτια κινούνται στο ίδιο μέσον (τον αέρα) βλέπουμε ότι δεν επηρεαζόμαστε κάπως άμεσα από τον παράγοντα του μέσου. Απεναντίας κάθε άλφα σωμάτιο που παράγεται από τη διάσπαση ραδονίου ή κάποιο θυγατρικό παράγωγο, αποκτά διαφορετική αρχική ενέργεια, που συνεπάγεται διαφορετικό μέγιστο εύρος για το κάθε σωμάτιο. Αυτό σημαίνει ότι αλλάζει η ενεργός περιοχή καταγραφής του ανιχνευτή μας. Επομένως δεν θα μπορούσαμε να έχουμε έναν κοινό ισοσταθμισμένο παράγοντα για το ραδόνιο και όλα τα θυγατρικά του.

Όσον αφορά την κρίσιμη γωνία καταγραφής. Αναλύσαμε πρωτίστως, ότι η κρίσιμη γωνία επηρεάζεται από δύο εξωτερικούς παράγοντες. Ο ένας είναι ο χρόνος της διαδικασίας της χημικής διάβρωσης, όπου εφόσον αποτελεί ανθρώπινο παράγοντα και είναι κοινός για όλα τα σωμάτια, ανεξαρτήτου ενέργειας δεν αποτελεί στοιχείο που θα μπορούσε να επηρεάσει την ευαισθησία καταγραφής σε ένα μεμονομένο θυγατρικό. Ο άλλος παράγοντας που επηρεάζει την κρίσιμη γωνία καταγραφής, είναι η αρχική ενέργεια του σωματίου. Όπως παρουσιάσαμε η αρχική ενέργεια δεν είναι ίση στα προϊόντα διάσπασης του ραδονίου και των θυγατρικών.

Συνοψίζοντας βλέπουμε ότι το υπάρχον μοντέλο με έναν κοινό συντελεστή ευαισθησίας k για το ραδόνιο και τα θυγατρικά του, τα οποία όπως αναλύσαμε δεν παρουσιάζουν αρκετά κοινά για να είναι αποδεκτό κάτι τέτοιο. Κάθε παραγόμενο σωμάτιο άλφα έχει διαφορετικό εύρος και διαφορετική κρίσιμη γωνία, αλλάζοντας έτσι την ενεργό περιοχή καταγραφής του ανιχνευτή, άρα και την ευαισθησία για το συγκεκριμένο σωμάτιο, σημαντικά. Κάτι τέτοιο όμως αφήνει μεγάλα περιθώρια σφάλματος στους υπολογισμούς μας.

Συνειδητοποιούμε λοιπόν, ότι καθίσταται απαραίτητη μια προσέγγιση, η οποία λαμβάνει υπόψην της **καθένα** από το ραδόνιο και τα θυγατρικά του **μεμονομένα** και υπολογίζει *ένα συντελεστή ευαισθησίας για κάθε ένα από αυτά!*

5.1 Δυσκολίες

Πώς όμως θα επιτευχθεί κάτι τέτοιο, από την στιγμή που δεν μπορεί να μεμονωθεί το ραδόνιο ή κάποιο από τα θυγατρικά; Κάποιος άμεσος πειραματικός τρόπος μέχρι τη σήμερον ημέρα δεν υπάρχει. Έτσι η προσέγγιση ενός ακόμα θεωριτικού μαθηματικού μοντέλου, θα προέκυπτε εσφαλμένη, καθώς δεν θα μπορούσε να καθοριστεί κάτι με ακρίβεια.

5.2 Προτεινόμενη Μέθοδος

Τη λύση στο πρόβλημά μας, έρχεται να δώσει η μοντελοποίηση σε ένα υπολογιστικό σύστημα, της διαδικασίας της καταγραφής στους στερεούς ανιχνευτές καταγραφής ιχνών, των σωματίων άλφα του ραδονίου και των θυγατρικών παραγώγων με την μέθοδο μόντε κάρλο.

5.3 Μέθοδος Μόντε Κάρλο

Η μέθοδος μόντε κάρλο είναι μια ευρεία κατηγορία υπολογιστικών αλγορίθμων που βασίζονται σε επαναλαμβανόμενη τυχαία δειγματοληψία για την απόκτηση αριθμητικών αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, εκτελούνται προσομοιώσεις πολλές φορές, προκειμένου να υπολογιστούν οι ίδιες πιθανότητες ευριστικά, ακριβώς όπως σε μια πραγματική κατάσταση καζίνο, εξού και το όνομα της μεθόδου αυτής [10].

Συχνά χρησιμοποιούνται στην επιστήμη των μαθηματικών και της φυσικής και θεωρούνται οι καταληλότερες προς εφαρμογή, όταν το πρόβλημα δεν μπορεί να λυθεί με έναν ντετερμινιστικό αλγόριθμο. Οι μέθοδοι μόντε κάρλο χρησιμοποιούνται ευρέως σε προβλήματα ανάλυσης κινδύνου, στην βελτιστοποίηση ενός προβλήματος, στην αριθμητική ολοκλήρωση και στην παραγωγή δειγμάτων από μια πιθανοτική κατανομή. Σημαντική επίδραση παρουσιάζουν και σε προβλήματα φύσεως πυρηνικής φυσικής, ιατρικής απεικόνισης, χημείας κ.α.

Ένα κλασικό παράδειγμα αλγορίθμου που κάνει χρήση της μεθόδου μόντε κάρλο, είναι η εκτίμηση της σταθεράς π. Η λογική που ακολουθείται σε αυτήν την προσέγγιση είναι η εξής: Εντός ενός προκαθορισμένου τετραγώνου, σχεδιάζεται ένας κύκλος με διάμετρο όσο η πλευρά του τετραγώνου. Κατά την εκκίνηση τυχαία σημεία παράγονται εντός του τετραγώνου και η σταθερά π, υπολογίζεται ως τον λόγο των συνολικών σημείων προς τα σημεία που παράχθηκαν εντός του κύκλου [11].

5.4 Τρόπος Μοντελοποίησης

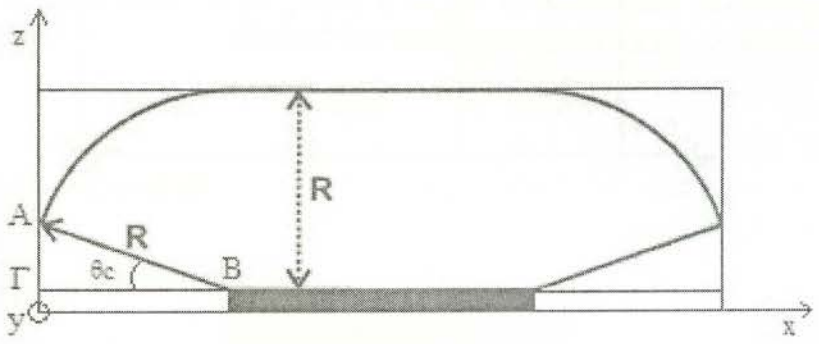
Ο συνιστώμενος τρόπος μοντελοποίησης της διαδικασίας ακολουθεί την επόμενη μεθοδολογία. Εφόσον γίνουν γνωστές οι διαστάσεις του ανιχνευτή μας από τον χρήστη, δημιουργείται ένας κύβος γύρω από τον ανιχνευτή, εφαπτόμενος στα άκρα της ενεργού περιοχής του. Κατόπιν, δημιουργείται ο ενεργός χώρος ανίχνευσης για το ραδόνιο με τις κατάλληλες εξισώσεις. Σωμάτια άλφα γεννιούνται μέσα στον κύβο που έχει δημιουργηθεί, και με τους κατάλληλους ελέγχους, διασταυρώνουμε εάν έχει γεννηθεί εντός του ενεργου χώρου το σωμάτιο, και υπαρχει πιθανότητα καταγραφής. Εφόσον περάσει τους παραπάνω ελέγχους, παράγονται οι αζιμουθιακές γωνίες κίνησης του σωματίου θ και φ. Πραγματοποιούνται οι κατάλληλοι έλεγχοι για την φορά του σωματίου, την κρίσιμη γωνία ανίχνευσης και άλλοι στατιστικοί έλεγχοι πάνω στο σωμάτιο. Υπολογίζεται η τελική θέση του σωματίου και καταγράφεται στην προσωμοίωση, εάν ανιχνεύθηκε τελικά το σωμάτιο ή όχι. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για αριθμό N σωματίων προσδιοριζόμενου από τον χρήστη.

Η παραπάνω προσωμοίωση, περιλαμβάνει μόνο το ραδόνιο. Ακολουθεί η προσωμοίωση του ^{218}Po και του ^{214}Po με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, ξαναχτίζοντας την γεωμετρία από την αρχή για το καθε θυγατρικό. Επομένως προσομοιώνουμε τη διαδικασία καταγραφής για κάθε ένα από τα ραδόνιο και τα θυγατρικά, με τις ίδιες μαθηματικές μεθόδους, τροποποιώντας όμως στο κάθε σωμάτιο τις δικές του συνθήκες ανίχνευσης, βάση της αρχικής του ενέργειας.

Τελικό παραγόμενο της μοντελοποίησης του συστήματος, είναι η ευαισθησία ξεχωριστά για κάθε σωμάτιο άλφα διαφορετικής αρχικής ενέργειας και ένα αρχείο με πιο αναλυτικά νούμερα και στατιστικά στοιχεία προς έρευνα και μελέτη.

5.5 Τεχνικές Μοντελοποίησης & Κύβος

Περιγράφοντας τα όρια του κύβου γεωμετρικά στον τρισδιάστατο χώρο, έχουμε το παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 8. Κύβος μοντελοποίησης

Θέτουμε το σημείο μηδέν στην τομή των αξόνων, στην κάτω αριστερά γωνία. Το ύψος του κύβου μας προκύπτει από την πρόσθεση της μέγιστης εμβέλειας του σωματίου άλφα με το ύψος του ανιχνευτή. Δηλαδή:

$$Zcube=Zcr+Rmax \quad (7)$$

Το μηκος X του κύβου μας, προκύπτει από την πρόσθεση του μήκους X του ανιχνευτή συν το ευθύγραμμο τμήμα ΓΒ δύο φορές.

$$Xcube=Xcr+2ΓΒ \quad (8)$$

Το μήκος του ανιχνευτή είναι γνωστό, άρα μένει να υπολογίσουμε το ευθύγραμμο τμήμα ΓΒ. Παρατηρώντας, σχηματίζεται ένα ορθογώνιο τρίγωνο ΑΒΓ με γνωστά την υποτείνουσα και μία εφαπτόμενη γωνία. Επομένως το ΓΒ ισούται με το γινόμενο της υποτείνουσας επί το συνημίτονο της εφαπτόμενης γωνίας.

$$ΓΒ=Rmax*\cos\theta_c \quad (9)$$

Από τις εξισώσεις 7,8 έχουμε,

$$Xcube=Xcr+2*Rmax*\cos\theta_c \quad (10)$$

Αντίστοιχα, περιστρέφοντας το σχήμα εννενήντα μοίρες στον τρισδιάστατο χώρο, οι ίδιες εξισώσεις περιγράφουν τη διάσταση Y του κύβου μας. Έτσι έχουμε:

$$Ycube=Ycr+2*Rmax*\cos\theta_c \quad (11)$$

Μόλις κατασκευάσαμε και οριοθετήσαμε τον κύβο μας, συναρτήσει των διαστάσεων του ανιχνευτή της κρίσιμης γωνίας και του μέγιστου εύρους του σωματίου, στον οποίο θα γεννιούνται σωμάτια άλφα. Έτσι παράγουμε ένα τυχαίο σωμάτιο α (x, y, z) εντός του κύβου, εύρους [0 Xcube], [0 Ycube], [0 Zcube], για το x το y και το z αντιστοίχως.

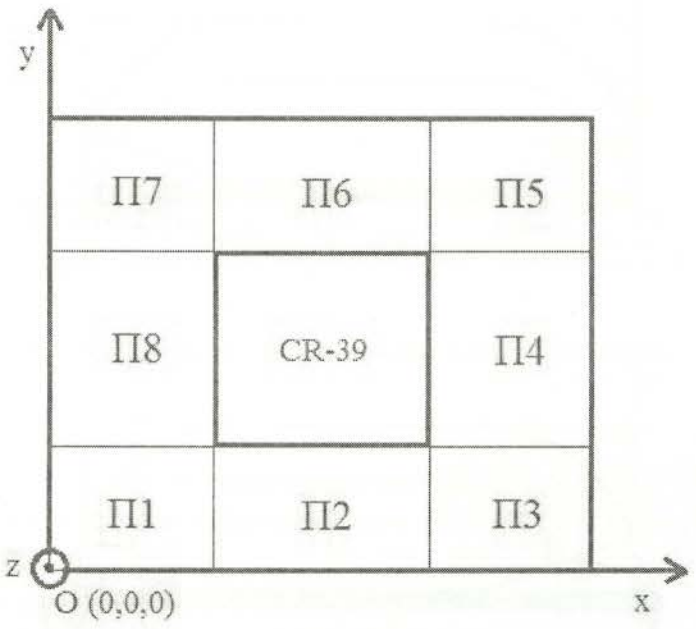
Βέβαια δεν θα είναι όλα αυτά τα σωμάτια αποδεκτά μιας και δεν μας ενδειαφέρουν τα σωμάτια εντός του κύβου αλλά τα σωμάτια εντός του χώρου της ενεργής περιοχής του ανιχνευτή. Από τη στιγμή που δεν υπόκειται σε κάποιο ήδη γνωστό γεωμετρικό τυποποιημένο σχήμα ο χώρος αυτός, δημιουργείται η ανάγκη να καταστρώσουμε εμείς τις εξισώσεις που τον διέπουν.

5.6 Γεωμετρία Ενεργού Περιοχής

Η απόπειρα κατάστρωσης μίας μόνο εξίσωσης που να διέπει όλο το χώρο της ενεργού περιοχής, αποδεικνύεται χρονοβόρα και πιθανότατα η λύση της, να μην είναι η βέλτιστη για να χρησιμοποιηθεί σε μοντελοποίηση συστήματος. Δηλαδή μία εξίσωση με ενδεχομένως ολοκληρωτικούς ή διαφορικούς τελεστές, συστήματα διανυσμάτων και μητρών, για χρήση σε κάθε παραγόμενο σωμάτιο θα άυξανε κατά πολύ τον χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος κατασπαταλώντας τους πόρους του συστήματός μας. Έτσι ο τεμαχισμός αυτού του χώρου σε απλούστερους και μικρότερους, όπου διέπονται από μη πολύπλοκες εξισώσεις, θεωρήθηκε καλύτερη προσέγγιση, φιλικότερη προς το μηχάνιμα. Αντί λοιπόν να έχουμε μία "βαριά" πράξη ελέγχου για κάθε παραγόμενο σωμάτιο, έχουμε περισσότερες, αλλά πολύ απλούστερες, αυξάνοντας την ταχύτητα υπολογισμών και μειώνοντας την πολυπλοκότητα του προβλήματος.

Ας δούμε σε ποιές γεωμετρικές μπορεί να χωριστεί, διευκολύνοντας τόσο εμάς όσο και τους υπολογιστικούς μας πόρους.

Επειδή τα επιμέρους κομμάτια θα είναι αρκετά, είναι προτιμότερο να χωριστεί και ο κύβος σε κάποια μέρη, έτσι ώστε ανάλογα το μέρος του κύβου που έχει παραχθεί το σωμάτιο, να γίνεται ένα μέρος των ελέγχων της ενεργού περιοχής και να μην ελέγχονται όλες οι αποκλεισμένες περιοχές κάθε φορά. Ας δούμε μια κάτοψη του κύβου και πως μπορεί να χωριστεί ώστε να εξοικονομούμε ελέγχους κατά την εκτέλεση.



Εικόνα 9. Κατάτμηση κύβου

Παρατηρούμε ότι σχηματίζονται 8 περιοχές. Στις άρτιες περιοχές χρειάζονται το πολύ δύο έλεγχοι, ενώ στις περιττές χρειάζεται να πραγματοποιηθούν το πολύ τέσσερις για να διευκρινιστεί εάν το σωμάτιο είναι εντός του ενεργού χώρου η όχι. Εάν δεν προβαίναμε σε αυτή τη μέθοδο θα είχαμε τέσσερις περιοχές με δύο ελέγχους και τέσσερις περιοχές με τέσσερις ελέγχους δηλαδή για κάθε ένα σωμάτιο που παράγεται θα είχαμε 24 ελέγχους μόνο για διευκρινίσουμε εάν είναι εντός τις ενεργής περιοχής. Με αυτή τη μέθοδο πραγματοποιούνται το πολύ δέκα με δώδεκα έλεγχοι για κάθε σωμάτιο, οκτώ για να βρεθεί σε ποιά περιοχή ανήκει και δύο ή τέσσερις στη συνέχεια για να βρεθεί αν είναι εντός του χώρου, μειώνοντας δραματικά τον φόρτο στο υπολογιστικό μας σύστημα κατά το ήμισυ. Αν αναλογιστεί κανείς ότι τα σωμάτια που θα παραχθούν καθορίζονται από τον χρήστη και συνήθως είναι μερικές χιλιάδες, καταλαβαίνει κανείς τη σκοπιμότητα του παραπάνω εγχειρήματος.

5.7 Κατάτμηση Ενεργού Περιοχή

Η πρώτη και πιο έυκολη προς αποκοπή περιοχή η οποία είναι ανεξάρτητη από τις περιοχές που ορίσαμε παραπάνω, είναι η περιοχή που περιλαμβάνει τον χώρο από την επιφάνεια του ανιχνευτή και κάτω. Δηλάδή βλέποντας μια πρόοψη του κύβου,

$$Za<Zcr \quad (12)$$

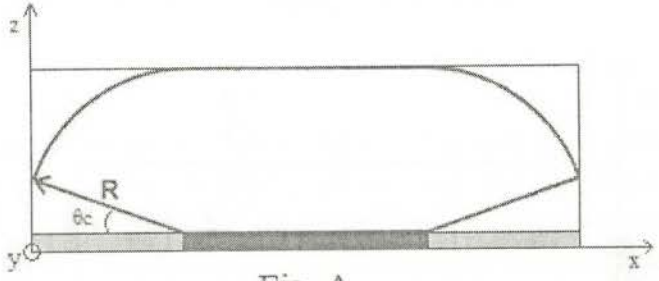


Fig. A

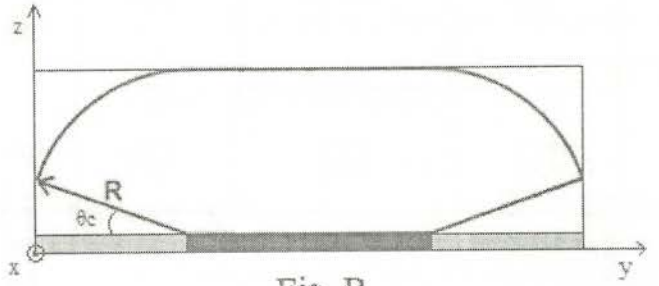


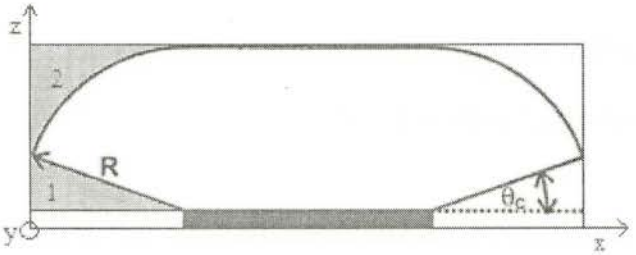
Fig. B

Εικόνα 10. α)Κύβος κατά zyx β) Κύβος κατά zxy

Τα σωμάτια στις γκρι περιοχές είναι αδύνατον να καταγραφούν από τον ανιχνευτή μας. Η μαύρη περιοχή στο κέντρο συμβολίζει τον ανιχννευτή, όπου εκεί είναι αδύνατον να παραχθεί κάποιο σωμάτιο άλφα. Επομένως κάθε σωμάτιο α(x,y,z) με z χαμηλότερο από αυτό του ανιχνευτή μας, απορρίπτεται.

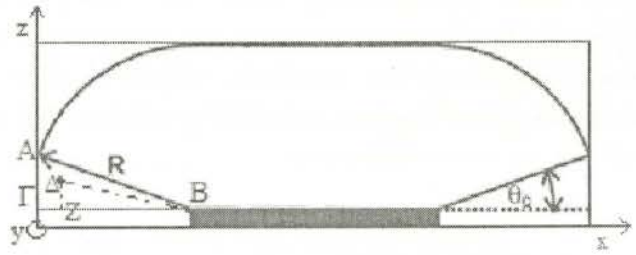
5.8 Περιοχή 1

Ας δούμε τώρα την περιοχή Π1 και πως μπορούμε να την περιγράψουμε μαθηματικά. Οι δύο περιοχές με γκρί χρώμα, πρέπει να αποκλειστούν όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 11. Περιοχές προς αποκλεισμό

Μια πιο κοντινή ματιά στην περιοχή 1 έχει ως εξής.



Εικόνα 12. Περιοχή 1 προς αποκλεισμό και περιγραφή

Έστω ότι έχουμε το παραγόμενο σωμάτιο στο σημείο Δ κάπου εντός της περιοχής ΑΒΓ. Αυτό που μας ενδειαφέρει είναι να βρεθεί η εξίσωση που θα έχει ως παραγόμενο αν το σημείο Δ είναι άνωθεν του εύθυγραμμου τμήματος ΑΒ (του επιπέδου ΑΒ, στον τρισδιάστατο χώρο) ή όχι. Ο τρόπος να ελεγχθεί μια τέτοια υπόθεση είναι βρίσκοντας και συγκρίνοντας τις κλίσεις των ευθειών που διέπουν τα ΑΒ και ΔΒ.

Τα σημεία έχουν συντεταγμένες A(0, 0, $R_{max}*\sin\theta_c+Zcr$), B($R_{max}*\cos\theta_c$, $R_{max}*\cos\theta_c$, Zcr) και Δ(Xa, Ya, Za). Η κλίση του AB υπολογίζεται ως εξής:

A: $z=ax+b \Rightarrow R_{max}*\sin\theta_c+Zcr=a*0+b \Rightarrow b= R_{max}*\sin\theta_c+Zcr$ (13)

B: $z=ax+b \Rightarrow Zcr=a* R_{max}*\cos\theta_c+b$ (14)

Από 13,14 έχουμε,

$Zcr= a* R_{max}*\cos\theta_c + R_{max}*\sin\theta_c +Zcr \Rightarrow a* R_{max}*\cos\theta_c = -R_{max}*\sin\theta_c \Rightarrow$

$a1 = -\tan\theta_c$ (15)

Για το ΔB έχουμε,

Δ: $z=ax+b \Rightarrow Za=a*Xa+b \Rightarrow b= Za-a*Xa$ (16)

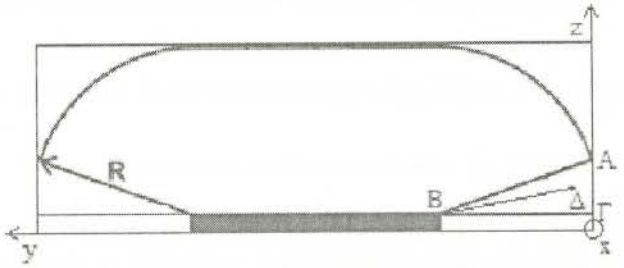
B: $z=ax+b \Rightarrow Zcr=a* R_{max}*\cos\theta_c + b$ (17)

Από 16,17 έχουμε,

$Zcr=a* R_{max}*\cos\theta_c + Za-a*Xa \Rightarrow Zcr-Za=a*(R_{max}*\cos\theta_c - Xa) \Rightarrow$

$a2 =(Zcr-Za)/(R_{max}*\cos\theta_c - Xa)$ (18)

Άρα για να είναι το σωμάτιο άνωθεν του AB τμήματος πρέπει a2>a1. Επειδή όμως είμαστε στον τρισδιάστατο χώρο και παίρνοντας προβολές για ευκολία υπολογισμών, πρέπει να υπολογίσουμε την περίπτωση που ενώ είμαστε άνω του AB, δεν είμαστε εντός ενεργού περιοχής στην 3η διάσταση. Περιστρέφοντας το σχήμα στον 3Δ χώρο, μπορούμε να δούμε πως είναι εφικτό κάτι τέτοιο και πως μπορούμε να το αποφύγουμε.



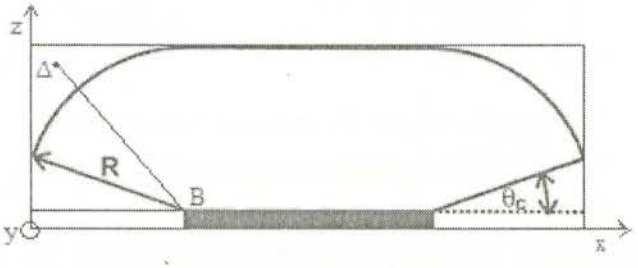
Εικόνα 13. Κύβος Π1 περιστραμένος κατά yxz

Για να αποφευχθεί μια κατάσταση που περιγράψαμε, πρέπει να επανασχεδιάσουμε τις παραπάνω εξισώσεις για τους περιστραμένους άξονες αυτή τη φορά. Για το ΑΒ, εφόσον η κρίσιμη γωνία είναι πάντα σταθερή κατά την εκτέλεση του προγράμματος και η κλίση δεν αλλάζει έχουμε,

$a1.1=-\tan\theta_c$ (19)

Για το ΒΔ: $Zcr=a* R_{max}*\cos\theta_c + Za-a*Ya \Rightarrow Zcr-Za=a*(R_{max}*\cos\theta_c - Ya) \Rightarrow a2.1 =(Zcr-Za)/(R_{max}*\cos\theta_c - Ya)$ (20)

Άρα για ένα σωμάτιο της περιοχής Π1, πρέπει (a2>a1) **&&** (a2.1>a1.1) για να είναι άνω του τμήματος ΑΒ. Όμως αρκεί αυτός ο έλεγχος για να είναι το σωμάτιο εντός της ενεργού περιοχής; Έστω το παρακάτω παράδειγμα.



Εικόνα 14. Κύβος Π1 περιοχή αποκλεισμού 2

Έστω το παραπάνω παραγόμενο σωμάτιο στο σημείο Δ που υπόκειται στην γκρι περιοχή 2. Επαληθεύει τις παραπάνω συνθήκες χωρίς να είναι εντός του ενεργού χώρου του ανιχνευτή. Έτσι χρειαζόμαστε έναν τελευταίο έλεγχο αποκλεισμού. Εύκολα μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση ΔΒ και να την συγκρίνουμε με το μέγιστο εύρος του σωματίου. Εάν είναι μεγαλύτερο, τότε το σωμάτιο είναι εκτός του ενεργού χώρου και συνεπώς απορρίπτεται. Η απόσταση 2 σημείων στο χώρο δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$D=\sqrt{(X2-X1)^2+(Y2-Y1)^2} \quad (21)$$

Αντικαθιστώντας, έχουμε:

$$D1=\sqrt{(Xb-Xa)^2+(Zb-Za)^2} \Rightarrow \sqrt{Rmax\cdot\cos(\theta c)-Xa)^2+(Zcr-Za)^2} \quad (22)$$

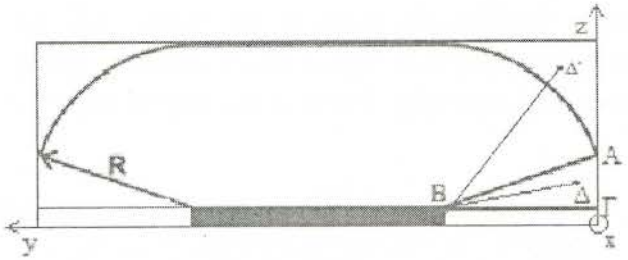
Περιστρέφοντας το σχήμα στον 3Δ χώρο κατά εννενήντα μοίρες, προκύπτει ομοίως,

$$D2=\sqrt{Rmax\cdot\cos(\theta c)-Ya)^2+(Zcr-Za)^2} \quad (23)$$

Εν τέλη για την περιοχή Π1, οι ολικοί απαραίτητοι έλεγχοι που πρέπει να γίνουν, για να εντοπιστεί εάν το παραγόμενο σωμάτιο άλφα είναι εντός του ενεργού χώρου, είναι (a2>a1) && (a2.1>a1.1) και (D1<= R_{max}) && (D2 <= R_{max}).

5.9 Περιοχή 2

Η περιοχή Π2 έχει περιοριστεί αρκετά για να ξεκαθαριστεί με έναν μόνο έλεγχο για κάτω της ενεργού περιοχής και άνω της. Επομένως έχουμε να ελεγξουμε μόνο την κλίση και την απόσταση.



Εικόνα 15. Κύβος Π2 περιοχή αποκλεισμού 2

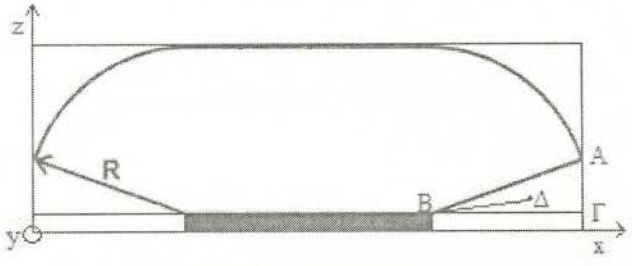
$$a1=-\tan\theta_c \text{ , } a2=(Zcr-Za)/(R_{max}*\cos\theta_c-Ya) \quad (24)$$

$$\text{και } D1=\sqrt{(Rmax\cdot\cos(\theta c)-Ya)^2+(Zcr-Za)^2} \quad (25)$$

Έχουμε λοιπόν a2>a1 και D1<=Rmax.

5.10 Περιοχή 3

Ομοίως με την περιοχή 1 έχουμε το παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 16. Κύβος Π3 περιοχή αποκλεισμού 1

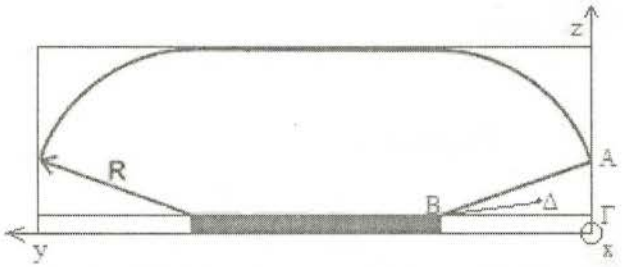
Στην περίπτωση αυτή τα σημεία ΑΒΔέχουν τις εξής συντεταγμένες: $A(2*R_{max}*\cos\theta_c+Xcr,\ 0,\ Zcr+R_{max}*\sin\theta_c)$, $B(Xcr + R_{max}*\cos\theta_c,\ R_{max}*\cos\theta_c,\ Zcr)$, $\Delta(Xa, Ya, Za)$.

Η σταθερή κλίση ΒΑ είναι $a1 = -\tan\theta_c$.

Η κλίση ΒΔ προκύπτει ομοίως με την περιοχή 1,

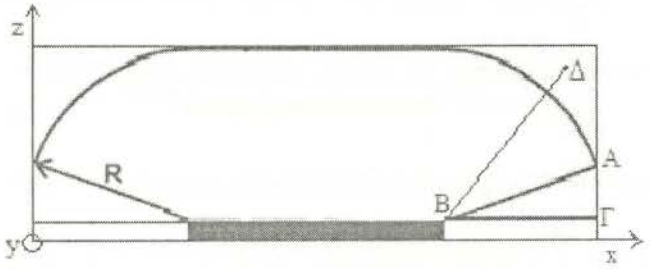
$$a2=(Zcr-Za)/(Xa-(R_{max}*\cos\theta_c + Xcr)) \quad (26)$$

Περιστρέφοντας στον χώρο προκύπτει:



Εικόνα 17. Περιστραμένος κύβος Π3 περιοχή αποκλεισμού 1

Η κλίση ΒΔ υπολογίζεται $a2.1=(Zcr-Za)/(R_{max}*\cos\theta_c - Ya)$. Για την περίπτωση που έρχεται άνω του ΒΑ έχουμε τα σχήματα:

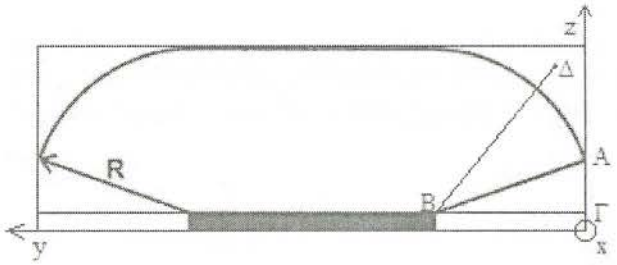


Εικόνα 18. Κύβος Π3 περιοχή αποκλεισμού 2

Και ομοίως με την περιοχή 1 προκύπτει:

$$D1 = \sqrt{Rmax\,\square\cos(\theta c) - Xa)^2 + (Zcr - Za)^2} \quad (27)$$

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

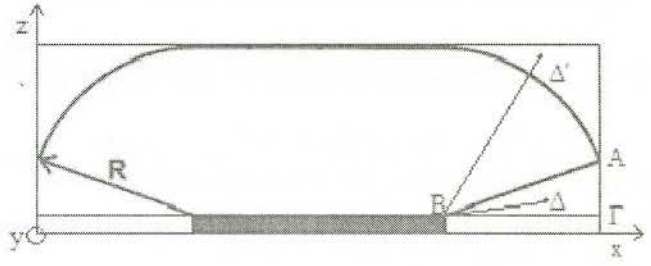


Εικόνα 19. Περισταμένος κύβος Π3 περιοχή αποκλεισμού 2

$$D2 = \sqrt{Rmax \cdot \cos(\theta c) - Ya)^2 + (Zcr - Za)^2} \quad (28)$$

Για την περιοχή 3 οι έλεγχοι που προκύπτουν είναι (a2>a1), (a2.1>a1), (D1<=Rmax) και (D2<=Rmax).

5.11 Περιοχή 4



Εικόνα 20. Κύβος Π4 περιοχές αποκλεισμού 1 και 2

Όπως αναφέραμε για τις άρτιες περιοχές έχουμε μόνο δύο ελέγχους να διατυπώσουμε.

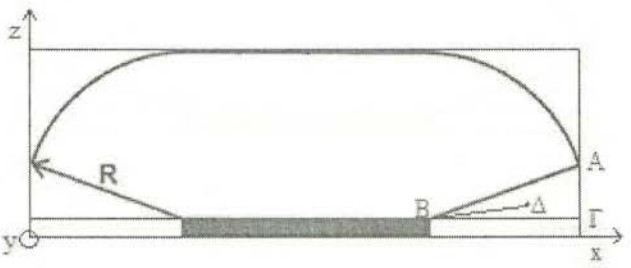
$$a1 = -\tan\theta_c \,,\; a2 = (Zcr - Za)/(Xa - R_{max} * \cos\theta_c) \quad (29)$$

$$D1 = \sqrt{Rmax \cdot \cos(\theta c) + Xcr - Xa)^2 + (Zcr - Za)^2} \quad (30)$$

Για την περιοχή 4 έχουμε a2>a1 και D1<=Rmax.

5.12 Περιοχή 5

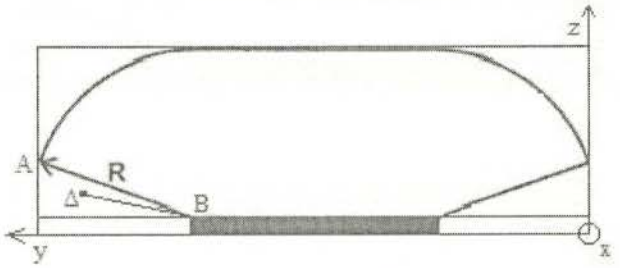
Σε αυτήν την περιοχή ισχύουν οι εξής περιπτώσεις για την κλίση:



Εικόνα 21. Κύβος Π5 περιοχή αποκλεισμού 1

ΒΑ: $a1=-\tan\theta_c$

ΒΔ: $a2=(Zcr-Za)/(Xa-R_{max}*\cos\theta_c+Xcr)$ (31)

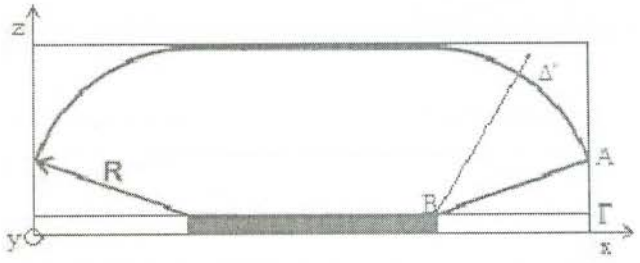


Εικόνα 22. Περιστραμένος κύβος Π5 περιοχή αποκλεισμού 1

ΒΑ: $a1.1=a1$

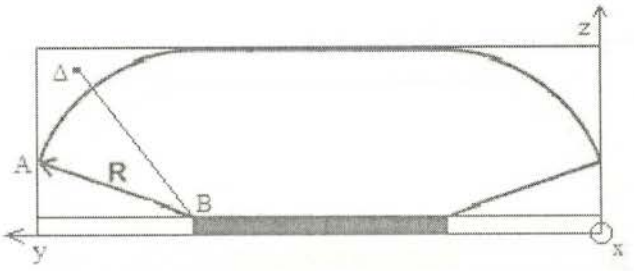
ΒΔ: $a2.1=(Zcr-Za)/(Ya-R_{max}*\cos\theta_c+Ycr)$ (32)

Οι περιπτώσεις απόστασης έχουν ώς εξής:



Εικόνα 23. Κύβος Π5 περιοχή αποκλεισμού 2

$$D1 = \sqrt{Rmax \cdot \cos(\theta c) - Xa)^2 + (Zcr - Za)^2} \quad (33)$$



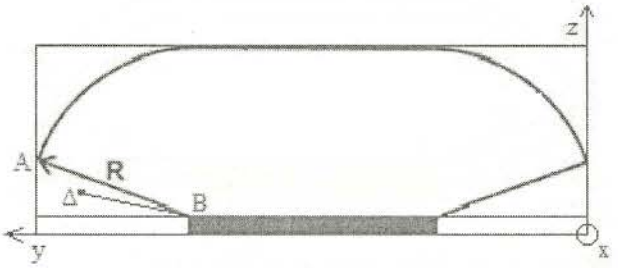
Εικόνα 24. Περισταμένος κύβος Π5 περιοχή αποκλεισμού 2

$$D2 = \sqrt{Rmax \cdot \cos(\theta c) + Ycr - Ya)^2 + (Zcr - Za)^2} \quad (34)$$

Επομένως για την περιοχή 5 έχουμε (a2>a1), (a2.1>a1), (D1<=Rmax) και (D2<=Rmax).

5.13 Περιοχή 6

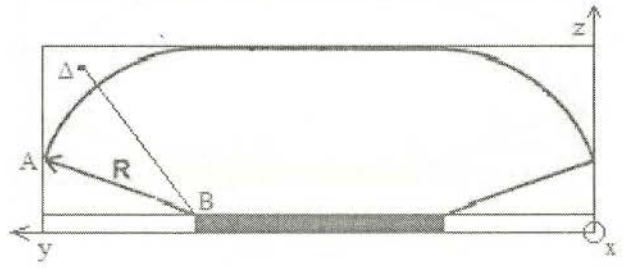
Οι εξισώσεις που προκύπτουν εδώ έχουν ως παρακάτω:



Εικόνα 25. Κύβος Π6 περιοχή αποκλεισμού 1

BA: $a1=-\tan\theta_c$

BΔ: $a2=(Zcr-Za)/(Ya-R_{max}*\cos\theta_c+Ycr)$ (35)



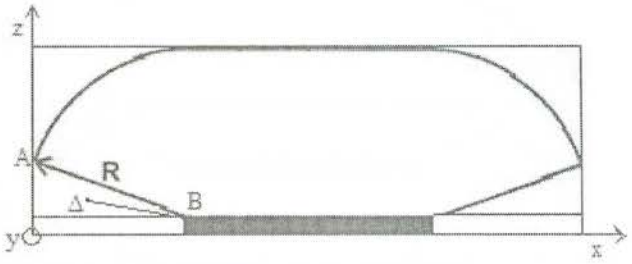
Εικόνα 26. Κύβος Π6 περιοχή αποκλεισμού 2

$$D1=\sqrt{(Rmax\cdot\cos(\theta c)+Ycr-Ya)^2+(Zcr-Za)^2} \quad (36)$$

Για την περιοχή 6 έχουμε (a2>a1) και (D1<=Rmax).

5.14 Περιοχή 7

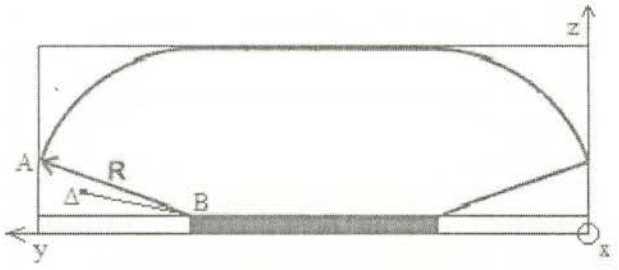
Οι εξισώσεις της περιοχής αυτής περιγράφονται ως ακολούθως:



Εικόνα 27. Κύβος Π7 περιοχή αποκλεισμού 1

AB: $a1=-\tan\theta_c$

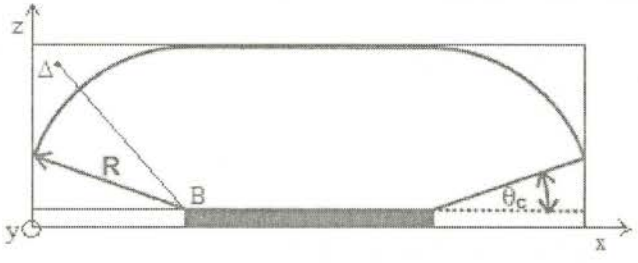
BΔ: $a2 =(Zcr-Za)/(R_{max}*\cos\theta_c - Xa)$ (37)



Εικόνα 28. Περισταμένος κύβος Π7 περιοχή αποκλεισμού 1

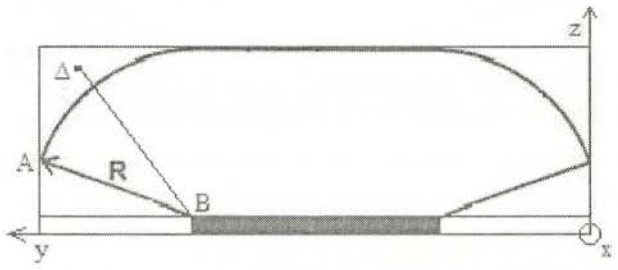
BA: $a1.1=a1$

BΔ: $a2.1=(Zcr-Za)/(Ya-R_{max}*\cos\theta_c +Ycr)$ (38)



Εικόνα 29. Κύβος Π7 περιοχή αποκλεισμού 2

$$D1=\sqrt{Rmax\cdot\cos(\theta c)-Xa)^2+(Zcr-Za)^2} \quad (39)$$



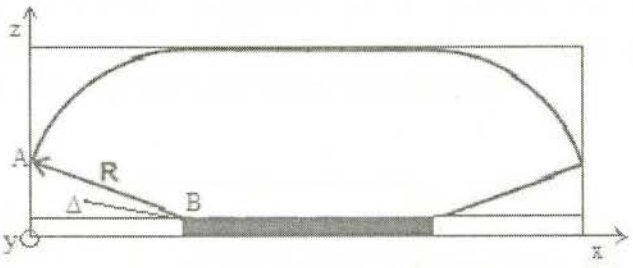
Εικόνα 30. Περισταμένος κύβος Π7 περιοχή αποκλεισμού 2

$$D2=\sqrt{Rmax\cdot\cos(\theta c)+Ycr-Ya)^2+(Zcr-Za)^2} \quad (40)$$

Επομένως για την περιοχή 7 έχουμε (a2>a1), (a2.1>a1), (D1<=Rmax) και (D2<=Rmax).

5.15 Περιοχή 8

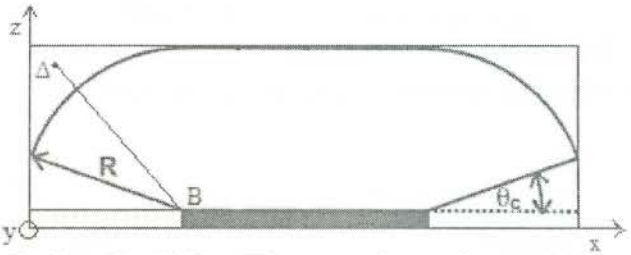
Τέλος για την περιοχή αυτή οι εξισώσεις περιγράφονται ώς εξής:



Εικόνα 31. Κύβος Π8 περιοχή αποκλεισμού 1

AB: $a1=-\tan\theta_c$

BΔ: $a2=(Zcr-Za)/(R_{max}*\cos\theta_c - Xa)$ (41)



Εικόνα 32. Κύβος Π8 περιοχή αποκλεισμού 2

$$D1 = \sqrt{Rmax \cdot \cos(\theta c) - Xa)^2 + (Zcr - Za)^2} \quad (42)$$

Για την περιοχή 8 έχουμε (a2>a1) και (D1<=Rmax).

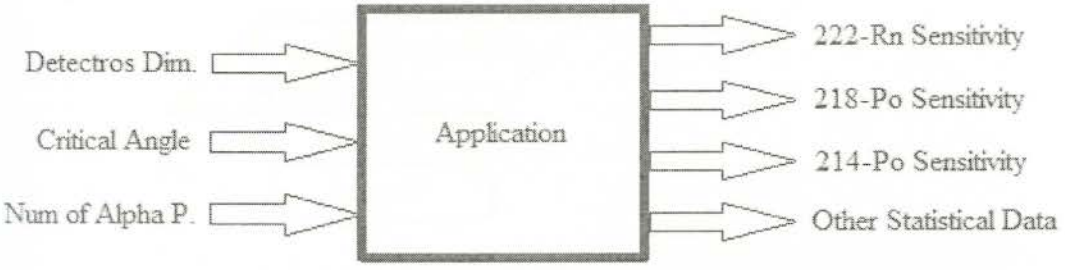
6. Η Εφαρμογή

6.1 Η εφαρμογή ως Μαύρο Κουτί

Εφόσον καταστρώσαμε όλες τις εξισώσεις και μοντελοποιήσαμε τον χώρο μας τώρα μπορούμε εύκολα να υλοποιήσουμε σε κώδικα όλα τα παραπάνω. Πριν γίνει αυτό όμως πρέπει να δούμε μια πιο γενική εικόνα της εφαρμογής μας και του τι θέλουμε να κάνει. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να καθοριστούν οι είσοδοι και οι έξοδοι του προγράμματος. Στην προκειμένη φάση, βλέπουμε τον κώδικα ως ένα "μαύρο κουτί" και το μόνο που μας ενδειαφέρει είναι η είσοδος που παίρνει και τα παραγόμενα της εξόδου.

Για να προσδιοριστεί αυτό πρέπει να δούμε τους παράγοντες που επηρεάζουν την εφαρμογή και μπορούν να αλλάξουν από τον χρήστη. Ένας τέτοιος παράγοντας είναι οι διαστάσεις του ανιχνευτή μας, καθώς κάθε χρήστης μπορεί να έχει διαφορετικό ανιχνευτή για τις ανάγκες του. Επίσης ο χρήστης στο τέλος της καταγραφής, προβαίνει στη διαδικασία χημικής διάβρωσης που επηρεάζει την κρίσιμη γωνία. Άρα μια ακόμη είσοδος είναι αυτή η γωνία σε μοίρες. Ο τελικός παράγοντας οριζόμενος από τον χρήστη, είναι ο χρόνος έκθεσης του ανιχνευτή. Έτσι τελευταία είσοδος του προγράμματός μας είναι ο αριθμός των παραγόμενων σωματίων άλφα του χώρου.

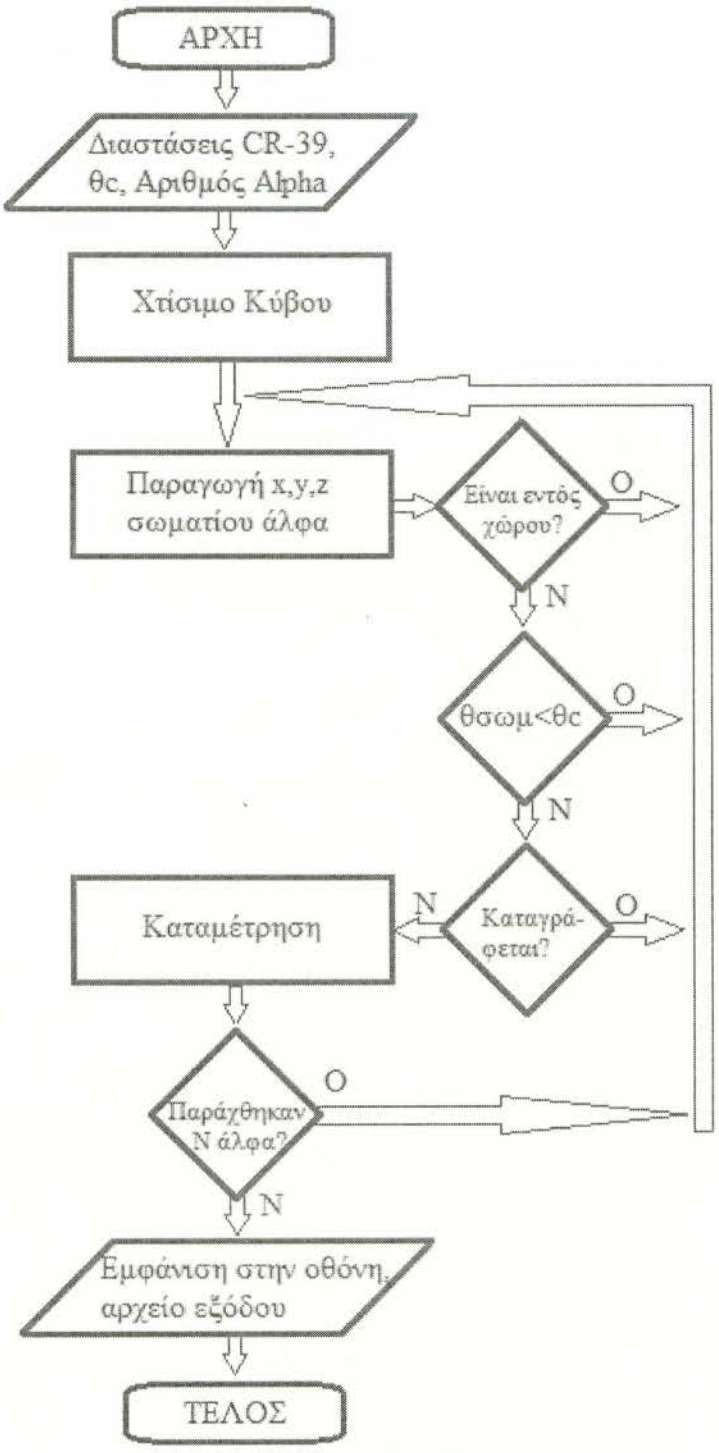
Έχοντας καθορίσει τους μεταβλητούς από τον χρήστη παράγοντες στην αρχή του προγράμματος, έχουμε συγκετρώσει όλα τα απαραίτητα στοιχεία για να προβούμε στην προσομοίωση. Η εφαρμογή μας είναι έτοιμη να παράγει ως έξοδο τις ευαισθησίες του ανιχνευτή, ξεχωριστά για το ραδόνιο και καθένα από τα θυγατρικά του. Σε ένα αρχείο, εξάγονται στατιστικά στοιχεία για τον υπολογισμό της ευαισθυσίας και άλλων χαρακτηριστικών του σωματίου.



Εικόνα 33. Η εφαρμογή ως μαύρο κουτί

Πριν προβούμε στην ανάπτυξη της εφαρμογής, συνετό είναι να κατασκευάσουμε ένα διάγραμμα ροής της εφαρμογής, που θα περιγράφει την βασική πορεία του προγράμματός μας.

Εικόνα 34. Διάγραμμα ροής μοντελοποίησης



6.2 Πηγαίος Κώδικας

Ας αναλύσουμε τον πηγαίο κώδικα της εφαρμογής που αναπτύχθηκε προκειμένου να μοντελοποιήσει την παραπάνψ διαδικασία. Ο κορμός του προγράμματος, δηλαδή η ρουτίνα main() παραβάλεται και εξηγείται στη συνέχεια.

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#define PI 3.14159265


int main(int argc, char *argv[]){

        //Declarations
        FILE *fp;
        unsigned long
backscattered=0,rejectedTh=0,inside=0,rejectedR=0,

      rejectedHit=0,rejectedTot=0,N=0,Hit=0,i;

        float xgeo, ygeo, zgeo;
        float xp, yp, zp;
        float phi,theta,tmp;
        float Range;

        //Input
        printf("Insert detector dimensions in mm (x y z): ");
        scanf("%f %f %f",Xc,Yc,Zc);

        printf("Insert detectors critical angle in degrees: ");
        scanf("%f",thetaCr);

        printf("Insert number of alpha particles generated :");
        scanf("%d",N);

        Rmax=40.92;

        //Building Cube
        printf("Building Cube... -");
        zgeo=Zc+Rmax;
        xgeo=2*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))+Xc;
        ygeo=2*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))+Yc;
        printf("Done!\n\n");

        printf("Starting Simulation with %d alphas...
                              This might take a while...\n\n",N);

        for(i=0;i<N;i++){
                //Generate alpha-particles inside Cube
                xp=(rand()/RAND_MAX)*xgeo;
                yp=(rand()/RAND_MAX)*ygeo;
                zp=(rand()/RAND_MAX)*zgeo;
                //printf("%f %f %f\n",xp,yp,zp);

                //Check if is inside Active area
                if(!(isinside(xp,yp,zp))){
```

```
                rejectedTot++;
                continue;
        }
        inside++;

        //Generate zenith and azimuth angles
        phi=((rand()/RAND_MAX)*(2*PI);    //zenith
        theta=(rand()/RAND_MAX)*(2*PI); //azimuth
        //printf("%f %f \n",phi,theta);

        //Check if backscattered
        if(isbackscattered(theta)){
                backscattered++;
                continue;
        }


        //Check if angle < theta critical
        if(isrejected(theta)){
                rejectedTh++;
                continue;
        }

        //Check if hits CR-39 and calc Range
        Range=hitsDet(xp,yp,zp,phi,theta);

        if(Range>Rmax){
                rejectedR++;
                continue;
        }

        if(-1==Range){
                rejectedHit++;
                continue;
        }
        Hit++;

  }//for end
  if(!(fp=fopen("AlphasIMS.txt","w"))){
        perror("fopen");
        exit(3);
  }
  fprintf(fp,"Starting simulation for %d alpha particles\n
      Detector dimensions (x y z) %f %f %f in mm \n
      Theta critical %f in degrees\n\n",N,Xc,Yc,Zc,thetaCr);
  printf("Sensitivity for Rn-222: %f\%\n",
                          ((float)Hit/(float)N)*100);
  fprintf(fp,"Sensitivity for Rn-222: %f\%\n",
                          ((float)Hit/(float)N)*100);
  fprintf(fp,"Total alpha generated within cube: %d\n",N);
  fprintf(fp,"Total alpha generated within detectors Active
                                        Area:%d\n",inside);
  fprintf(fp,"Total alpha rejected: %d\n",

rejectedHit+rejectedR+rejectedTh+backscattered+rejectedTot);
  fprintf(fp,"\tBackscattered: %d\n",backscattered);
  fprintf(fp,"\tRejected by theta: %d\n",rejectedTh);
```

```
fprintf(fp,"\tRejected by range: %d\n",rejectedR);
fprintf(fp,"\tRejected by not hiting: %d\n",rejectedHit);

fprintf(fp,"Total Hits: %d\n\n",Hit);

backscattered=rejectedTh=inside=
                rejectedR=rejectedHit=rejectedTot=Hit=0;



Rmax=46.52;

//Building Cube
zgeo=Zc+Rmax;
xgeo=2*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))+Xc;
ygeo=2*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))+Yc;

for(i=0;i<N;i++){
        //Generate alpha-particles inside Cube
        xp=(rand()/RAND_MAX)*xgeo;
        yp=(rand()/RAND_MAX)*ygeo;
          zp=(rand()/RAND_MAX)*zgeo;
        //printf("%f %f %f\n",xp,yp,zp);

        //Check if is inside Active area
        if(!(isinside(xp,yp,zp))){
                rejectedTot++;
                continue;
        }
        inside++;

        //Generate zenith and azimuth angles
        phi=(rand()/RAND_MAX)*(2*PI);    //zenith
        theta=(rand()/RAND_MAX)*(2*PI); //azimuth
        //printf("%f %f \n",phi,theta);

        //Check if backscattered
        if(isbackscattered(theta)){
                backscattered++;
                continue;
        }

        //Check if angle < theta critical
        if(isrejected(theta)){
                rejectedTh++;
                continue;
        }

        //Check if hits CR-39 and calc Range
        Range=hitsDet(xp,yp,zp,phi,theta);

        if(Range>Rmax){
                rejectedR++;
                continue;
        }

        if(-1==Range){
```

```
                rejectedHit++;
                continue;
            }
            Hit++;

    }//for end

    printf("Sensitivity for Po-218: %f\%\n",

((float)Hit/(float)N)*100);
    fprintf(fp,"Sensitivity for Po-218: %f\%\n",

((float)Hit/(float)N)*100);
    fprintf(fp,"Total alpha generated within cube: %d\n",N);
    fprintf(fp,"Total alpha generated within detectors Active
                                        Area: %d\n",inside);
    fprintf(fp,"Total alpha rejected: %d\n",

rejectedHit+rejectedR+rejectedTh+backscattered+rejectedTot);
    fprintf(fp,"\tBackscattered: %d\n",backscattered);
    fprintf(fp,"\tRejected by theta: %d\n",rejectedTh);
    fprintf(fp,"\tRejected by range: %d\n",rejectedR);
    fprintf(fp,"\tRejected by not hiting: %d\n",rejectedHit);

    fprintf(fp,"Total Hits: %d\n\n",Hit);

    backscattered=rejectedTh=inside=
                rejectedR=rejectedHit=rejectedTot=Hit=0;


    Rmax=67.77;

    //Building Cube
    zgeo=Zc+Rmax;
    xgeo=2*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))+Xc;
    ygeo=2*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))+Yc;

    for(i=0;i<N;i++){
            //Generate alpha-particles inside Cube
            xp=(rand()/RAND_MAX)*xgeo;
            yp=(rand()/RAND_MAX)*ygeo;
              zp=(rand()/RAND_MAX)*zgeo;
            //printf("%f %f %f\n",xp,yp,zp);

            //Check if is inside Active area
            if(!(isinside(xp,yp,zp))){
                    rejectedTot++;
                    continue;
            }
            inside++;

            //Generate zenith and azimuth angles
            phi=(rand()/RAND_MAX)*(2*PI);    //zenith
            theta=(rand()/RAND_MAX)*(2*PI); //azimuth
            //printf("%f %f \n",phi,theta);

            //Check if backscattered
```

```
                if(isbackscattered(theta)){
                        backscattered++;
                        continue;
                }

                //Check if angle < theta critical
                if(isrejected(theta)){
                        rejectedTh++;
                        continue;
                }

                //Check if hits CR-39 and calc Range
                Range=hitsDet(xp,yp,zp,phi,theta);

                if(Range>Rmax){
                        rejectedR++;
                        continue;
                }

                if(-1==Range){
                        rejectedHit++;
                        continue;
                }
                Hit++;

        }//for end

        printf("Sensitivity for Po-214: %f\%\n",

    ((float)Hit/(float)N)*100);
        fprintf(fp,"Sensitivity for Po-214: %f\%\n",

    ((float)Hit/(float)N)*100);
        fprintf(fp,"Total alpha generated within cube: %d\n",N);
        fprintf(fp,"Total alpha generated within detectors Active
                                        Area: %d\n",inside);
        fprintf(fp,"Total alpha rejected: %d\n",

    rejectedHit+rejectedR+rejectedTh+backscattered+rejectedTot);
        fprintf(fp,"\tBackscattered: %d\n",backscattered);
        fprintf(fp,"\tRejected by theta: %d\n",rejectedTh);
        fprintf(fp,"\tRejected by range: %d\n",rejectedR);
        fprintf(fp,"\tRejected by not hiting: %d\n",rejectedHit);

        fprintf(fp,"Total Hits: %d\n\n",Hit);
        fprintf(fp,"(C) 2013, by Emmanuel M. Vlamakis\n");
        fclose(fp);

        printf("\n**************************************\n
                |-(C) 2013, by Emmanuel  M.Vlamakis-|\n
                **************************************\n\n");

    return 0;
}
```

6.3 Η συνάρτηση main()

Πριν την είσοδο στη ρουτίνα main() βλέπουμε κάποιες εντολές που ξεκινούν με το σύμβολο #. Αυτές οι εντολές δεν είναι προς εκτέλεση διότι δεν απευθύνονται στον επεξεργαστή. Οι εντολές που ξεκινούν με αυτό το σύμβολο, αποτελούν οδηγίες προς τον μεταγλωττιστή. Ειδικότερα οι εντολές που μετά το σύμβολο ακολουθεί η λέξη include, αποτελούν οδηγία να εσωκλείσει στο πρόγραμμά μας άλλα προγράμματα ήδη γραμμένα (βιβλιοθήκες) και περιέχουν δηλώσεις βασικών συναρτήσεων της γλώσσας C. Για παράδειγμα η βιβλιοθήκη stdio.h περιλαμβάνει τις δηλώσεις και τον κώδικα των συναρτήσεων εισόδου και εξόδου όπως η printf() και η scanf(), εξού και το όνομά της (stdio – standard input output). Η επόμενη δήλωση περιλαμβάνει τη δήλωση της σταθεράς του π που θα χρησιμοποιείται κατά μήκος του προγράμματος.

Ξεκινώντας η main() καλείται με την υπογραφή της ως int main (int argc, char *argv[]), που σημάινει ότι είναι συνάρτηση που επιστρέφει ακέραιο αριθμό και δέχεται ως ορίσματα έναν ακέραιο αριθμό και έναν δέικτη χαρακτήρων. Ακολουθούν κάποιες δηλώσεις μεταβλητών και αρχικοποιήσεις για την τήρηση στατιστικών στοιχέιων. Στη συνέχεια ζητάμε από τον χρήστη να μας εισάγει τις διαστάσεις του ανιχνευτή σε χιλιοστά του μέτρου κατά σειρά x, y, z και κατόπιν να ορίσει την κρίσιμη γωνία σε μοίρες. Αφού προβεί στις παραπάνω ενέργειες, εισάγει το πλήθος των σωματίων άλφα για την οποία θέλει να προσωμοιωθεί η διαδικασία.

Η προσωμοίωση ξεκινάει, χτίζοντας αρχικά τον κύβο της γεωμετρίας με τις εξισώσεις που ορίσαμε παραπάνω, ειδοποιώντας με κατάλληλα μηνύματα τον χρήστη. Παρατηρούμε ότι πρωτού γίνει αυτό έχουμε ορίσει ως μέγιστο εύρος του σωματίου τον αριθμό 40,92. Ο αριθμός αυτός απευθύνεται στο μέγιστο εύρος σωματίων άλφα που παράγονται απο το ραδόνιο με αρχική ενέργεια 5.49MeV και εκφράζεται σε χιλιοστά του μέτρου [5].

Εν συνεχεία ένας βρόχος επανάληψης ξεκινά να εκτελείται τόσες φορές όσα και τα σωμάτια άλφα που έχει ορίσει ο χρήστης. Εντός του βρόχου, παράγονται οι συντεταγμένες x,y,z του σωματίου. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της συνάρτησης rand().

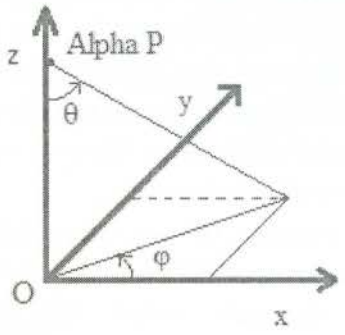
Η συνάρτηση rand() έχει υπογραφή int rand(void), δεν δέχεται ορίσματα και επιστρέφει έναν ακέραιο αριθμό μεταξύ του διαστήματος [0 RAND_MAX]. Ο αριθμός αυτός παράγεται κάθε φορά που καλείται από έναν αλγόριθμο που επιστρέφει μια ακολουθία από αριθμούς, μη συνδεδεμενους μεταξύ τους.

Για να περιορίσουμε την τυχαιότητα στο επιθυμητό διάστημα, διαιρούμε τον αριθμό που επιστρέφει η συνάρτηση με RAND_MAX ώστε οι αριθμοί που επιστρέφει πλέον να είναι του διαστήματος [0 1]. Έτσι πολλαπλασιάζουμε τον παραγόμενο αριθμό με την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή μας και έχουμε έναν αριθμό στο επιθυμητό διάστημα.

Έχουμε λοιπόν την θέση του σωματίου στο χώρο. Καλείται η συνάρτηση που ελέγχει εάν το σωμάτιο βρίσκεται εντός του ενεργού χώρου του ανισχνευτή και υπάρχει πιθανότητα καταγραφής. Εάν βρίσκεται εντός του ενεργόυ χώρου, καταμετράται και συνεχίζεται η προσωμοίωση. Σε διαφορετική περίπτωση,

καταμετράται ως απορριφθέν σωμάτιο και το πρόγραμμα τοποθετείται στην αρχή του βρόχου για να συνεχίσει με το επόμενο σωμάτιο.

Εφόσον βρεθεί εντός της ενεργής περιοχής του ανιχνευτή, το επόμενο βήμα είναι να παραχθούν οι αζιμουθιακές γωνίες θ και φ που ορίζουν την κίνηση του σωματίου στον τρισδιάστατο χώρο. Σχηματικά αυτές οι γωνίες έχουν ως εξής:



Εικόνα 35. Αζιμουθιακές γωνίες σωματίου άλφα

Καλείται μια συνάρτηση η οποία με βάση τις παραγόμενες γωνίες υπολογίζει εάν έχουμε το φαινόμενο οπισθοσκέδασης. Εάν κάτι τέτοιο είναι αληθές καταμετράται ως σωμάτιο οπισθοσκέδασης και συνεχίζουμε με το επόμενο σωμάτιο. Εάν όχι το πρόγραμμα συνεχίζει τους ελέγχους και ο αμέσως επόμενος είναι η σύγκριση της κρίσιμης γωνίας καταγραφής με την γωνία που έχει το σωμάτιο. Αν είναι μικρότερη της κρίσιμης γωνίας, καταμετράται, απορρίπτεται και συνεχίζουμε με το επόμενο σωμάτιο. Σε διαφορετική περίπτωση ακολουθεί η κλήση μιας συνάρτησης που δέχεται ως ορίσματα τα χαρακτηριστικά του σωματίου, η οποία επιστρέφει το συνολικό εύρος που έχει διανύσει το σωμάτιο στο μέσον μέχρις ώτου προσκρούσει στην επιφάνεια του ανιχνευτή μας. Εάν αυτό το εύρος είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο εύρος του σωματίου στο μέσον, τότε η συνάρτηση επιστρέφει αρνητικό ακέραιο αριθμό. Με τους κατάλληλους ελέγχους καταμετράται εάν απορρίφθηκε λόγω εύρους, αν δεν χτύπησε ή αν χτύπησε στην επιφάνεια του ανιχνευτή.

Όταν ολοκληρωθεί ο βρόχος για το συνολικό πλήθος των σωματίων δημιουργείται ένα αρχείο με όνομα AlphasIMS.txt (Alphas In Matter Simulation). Στο εσωτερικό του γράφονται τα στοιχεία που εισήγαγε ο χρήστης, η ευαισθησία του ανιχνευτή για το ραδόνιο η οποία εμφανίζεται και στην οθόνη, τα συνολικά άλφα σωμάτια που παράχθηκαν, πόσα από αυτά ήταν εντός του ενεργού χώρου του ανιχνευτή καθώς και πόσα απορριφθηκαν. Στη συνέχεια παρουσιάζει πόσα από εκείνα που απορριφθηκαν ήταν εξαιτίας οπισθοσκέδασης, πόσα λόγω κρίσιμης γωνίας, πόσα λόγω περιορισμένου εύρους και πόσα τελικά δεν χτύπησαν τον ανιχνευτή. Τέλος παραβάλλονται τα σωμάτια που χτύπησαν την επιφάνεια του ανιχνευτή και καταγράφηκαν.

Έπειτα οι μεταβλητές που σύλλέγουν στατιστικά στοιχεία επαναφέρονται στο μηδέν και το μέγιστο έυρος αλλάζει σε 46,52 χιλιοστά του μέτρου που αντιστοιχούν στα 6MeV ενέργειας του πολωνίου [5]. Με το νέο εύρος χτίζεται ο νέος κύβος για το πολώνιο και αφού πραγματοποιηθεί αυτό, ένας νέος βρόγχος εκτελείται ομοίως με πριν για το ραδόνιο και παράγεται η ευαισθησία για το συγκεκριμένο θυγατρικό. Τα στατιστικά στοιχεία που συλλέγχθηκαν με όμοιο τρόπο, εγγράφονται στη συνέχεια του αρχείου καθώς και η ευαισθησία του, η οποία εμφανίζεται και στην οθόνη. Κατόπιν το μέγιστο εύρος ορίζεται ως 67,77 χιλιοστά του μέτρου για την ενέργεια των 7,69MeV του πολωνίου [5]. Χτίζεται ο νέος κύβος, ακολουθεί ο βρόχος υπολογισμού, καταγράφονται τα παραγόμενα στο αρχείο και εμφανίζεται η ευαισθησία στην οθόνη. Κλείνει το ρεύμα του αρχείου, και τερματίζεται το πρόγραμμα.

6.4 Η συνάρτηση isrejected()

Η ρουτίνα αυτή έχει υπογραφή **int** isrejected(**float** the); που σημαίνει ότι επιστρέφει ακέραιο αριθμό και δέχεται ως όρισματα αριθμό κινητής υποδιαστολής την γωνία θ του σωματίου. Η συνάρτηση αυτή επιστρέφει 1 εάν το σωμάτιο απορρίφθηκε βάση της γωνίας θ, ή 0 εάν η γωνία θ είναι επιτρεπτή και το σωμάτιο δεν απορρίπτεται.

```
int isrejected(float the){

        //max permited angle in order to be detected
        float tmp=PI/2-(thetaCr*PI/180);

        if(the<PI/2){
                if (the>tmp){
                        return 1;
                }
        }else{  // > 3pi/2
                if((2*PI-the)>tmp){
                        return 1;
                }
        }

        return 0;
}//isrejected end
```

Εφόσον η γωνία θ ορίζεται στο διάστημα [0 2π], και το μηδέν της είναι στον κάθετο άξονα, καταλαβαίνουμε ότι πρέπει να ελέγξουμε αν είναι στο διάστημα π/2 η στο διάστημα 3π/2. Στα άλλα διαστήματα έχουμε το φαινόμενο της οπισθοσκέδασης επομένως δεν μας ενδειαφέρει να τα ελέγξουμε άμεσα. Αν η γωνία του σωματίου είναι μεγαλύτερη απο την κρίσιμη γωνία τότε επιτρέπεται το σωμάτιο στο διάστμα π/2. Στο διάστημα 3π/2 πρέπει, είτε να αφαιρέσουμε από το

2π την κρίσιμη γωνία και να κάνουμε την σύγκριση, είτε να μετατρέψουμε την γωνία στο διάστημα π/2 και η σύγκριση να είναι η ίδια.

6.5 Η συνάρτηση isbackscattered()

Η υπογραφή αυτής της συνάρτησης ορίζεται ως **int** isbackscattered(**float** the); όπου επιστρέφει έναν ακέραιο αριθμό και δέχεται ως όρισμα έναν αριθμό κινητής υποδιαστολής, την γωνία θ του σωματίου. Σε περίπτωση που επιστραφεί ο ακέραιος αριθμός 1 σημαίνει ότι το σωμάτιο υποκύπτει στο φαινόμενο της οπισθοσκέδασης και απορρίπτεται. Σε διαφορετική περίπτωση επιστρέφεται η τιμή μηδέν.

```
int isbackscattered(float the){

        if(the>(PI/2) && the<(3*PI/2)){
                return 1;
        }

        return 0;
}//isbackscattered end
```

Εδώ ελέγχεται αν η γωνία θ, είναι στο διάστημα (π/2 3π/2), όπου αν συμβάινει κάτι τέτοιο, το σωμάτιο κινείται αντίθετα από την κατεύθυνση που βρίσκεται ο ανιχνευτής και προφανώς έχουμε οπισθοσκέδαση.

6.6 Η συνάρτηση isinside()

Η συνάρτηση έχει υπογραφή **int** isinside(**float** xa, **float** ya, **float** za);. Επιστρέφει ακέραιο αριθμό και δέχεται ως ορίσματα τις συντεταγμένες του σωματίου στον χώρο. Εάν επιστραφεί ο αριθμός μηδέν το σωμάτιο δεν έιναι εντός του χώρου της ενεργού περιοχής, ενώ σε αντίθετη περίπτωση που επιστραφεί ο αριθμός 1, το σωμάτιο είναι εντός του χώρου της ενεργού περιοχής.

```
int isinside(float xa, float ya, float za){

        char inside=1;
        float a, ap, a2, ap2, d, d2, tmp;

        if (za<Zc){
                //zone one
                inside=0;
        }else if(za<(Rmax*sin(thetaCr*PI/180)+Zc)){
                //zone two
                if(ya<(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))){
```

```
                    if(xa<(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))){
                            //Π1 Area
                            a=tan(thetaCr*PI/180);
                            ap=(za-
Zc)/(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-xa);

                            a2=a;
                            ap2=(za-
Zc)/(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-ya);

                            if ((ap<a) || (ap2<a2)){
                                    inside=0;
                            }
                    }else
if(xa>(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc)){
                            //Π3 Area
                            a=tan(thetaCr*PI/180);
                            ap=(za-Zc)/(xa-
(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc));

                            a2=a;
                            ap2=(za-
Zc)/(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-ya);
                            if ((ap<a) || (ap2<a2)){
                                    inside=0;
                            }
                    }else{
                            //Π2 Area
                            a=tan(thetaCr*PI/180);
                            ap=(za-
Zc)/(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-ya);
                            inside=(ap<a)?0:1;
                    }// inner if
            }else if(ya>(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Yc)){
                    if(xa<(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))){
                            //Π7 Area
                            a=tan(thetaCr*PI/180);
                            ap=(za-
Zc)/(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-xa);

                            a2=a;
                            ap2=(za-Zc)/(ya-
(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Yc));
                            if ((ap<a) || (ap2<a2)){
                                    inside=0;
                            }
                    }else
if(xa>(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc)){
                            //Π5 Area
                            a=tan(thetaCr*PI/180);
                            ap=(za-Zc)/(xa-
(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc));
```

```
                                a2=a;
                                ap2=(za-Zc)/(ya-
    (Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Yc));
                                if ((ap<a) || (ap2<a2)){
                                        inside=0;
                                }
                        }else{
                                //П6 Area
                                a=tan(thetaCr*PI/180);
                                ap=(za-Zc)/(ya-
    (Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Yc));
                                inside=(ap<a)?0:1;
                        }// inner if
                }else {
                        if(xa<(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))){
                                //П8 Area
                                a=tan(thetaCr*PI/180);
                                ap=(za-
    Zc)/(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-xa);
                                inside=(ap<a)?0:1;
                        }else
    if(xa>(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc)){
                                //П4 Area
                                a=tan(thetaCr*PI/180);
                                ap=(za-Zc)/(xa-
    (Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc));
                                inside=(ap<a)?0:1;
                        }else{
                                //Above CR-39 Area
                                inside=1;
                        }// inner if
                }//outer if
        }else{
                //zone 3
                if(ya<(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))){
                        if(xa<(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))){
                                //П1 Area

tmp=(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-
    xa)*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-xa)+(Zc-za)*(Zc-za);
                                d=sqrtf(tmp);

tmp=(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-
    ya)*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-ya)+(Zc-za)*(Zc-za);
                                d2=sqrtf(tmp);
                                if(d>Rmax || d2>Rmax){
                                        inside=0;
                                }
                        }else
    if(xa>(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc)){
                                //П3 Area
```

```
        tmp=(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc-
        xa)*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc-xa)+(Zc-za)*(Zc-za);
                                    d=sqrtf(tmp);

        tmp=(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc-ya)
        *(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc-ya)+(Zc-za)*(Zc-za);
                                    d2=sqrtf(tmp);
                                    if(d>Rmax || d2>Rmax){
                                            inside=0;
                                    }
                            }else{
                                    //Π2 Area

tmp=(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-
        ya)*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-ya)+(Zc-za)*(Zc-za);
                                    d=sqrtf(tmp);
                                    inside=(d>Rmax)?0:1;
                            }// inner if
                    }else if(ya>(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Yc)){
                            if(xa<(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))){
                                    //Π7 Area

tmp=(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-
        xa)*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-xa)+(Zc-za)*(Zc-za);
                                    d=sqrtf(tmp);

        tmp=(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Yc-
        ya)*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Yc-ya)+(Zc-za)*(Zc-za);
                                    d2=sqrtf(tmp);
                                    if(d>Rmax || d2>Rmax){
                                            inside=0;
                                    }
                            }else
        if(xa>(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc)){
                                    //Π5 Area

        tmp=(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc-
        xa)*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc-xa)+(Zc-za)*(Zc-za);
                                    d=sqrtf(tmp);

        tmp=(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Yc-
        ya)*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Yc-ya)+(Zc-za)*(Zc-za);
                                    d2=sqrtf(tmp);
                                    if(d>Rmax || d2>Rmax){
                                            inside=0;

                                    }
                            }else{
                                    //Π6 Area

        tmp=(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Yc-
```

```
      ya)*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Yc-ya)+(Zc-za)*(Zc-za);
                                    d=sqrtf(tmp);
                                    inside=(d>Rmax)?0:1;
                              }// inner if
                        }else {
                              if(xa<(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))){
                                    //П8 Area

tmp=(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-
      xa)*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)-xa)+(Zc-za)*(Zc-za);
                                    d=sqrtf(tmp);
                                    inside=(d>Rmax)?0:1;
                              }else
      if(xa>(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc)){
                                    //П4 Area

      tmp=(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc-
      xa)*(Rmax*cos(thetaCr*PI/180)+Xc-xa)+(Zc-za)*(Zc-za);
                                    d=sqrtf(tmp);
                                    inside=(d>Rmax)?0:1;
                              }else{
                                    //Above CR-39 Area
                                    inside=1;
                              }// inner if
                        }//outer if
            }//else end
            return inside;
}//isinside end
```

Στον παραπάνω κώδικα, ελέγχονται τμηματικά οι περιοχές του κύβου όπως τις ορίσαμε στην θεωρία, με τις εξισώσεις τις οποίες καταστρώσαμε για κάθε ένα τμήμα του κύβου. Ο κώδικας ξεκινάει με την υπόθεση ότι το σωμάτιο είναι εντός του χώρου της περιοχής ανίχνευσης και στη συνέχεια πραγματοποιεί τους ελέγχους, στους οποίους αν βρεθεί οτι δεν πληρούνται, τότε αλλάζουμε την υπόθεσή μας, ότι το σωμάτιο είναι εκτός ενεργού περιοχής. Παρατηρώντας οι περιοχές που ελέγχονται δεν είναι με αριθμητική σειρά. Αυτό γίνεται διότι έτσι έχουμε περισσότερες πιθανότητες να γίνουν λιγότεροι έλεγχοι.

6.7 Η συνάρτηση hitsDet()

Η υπογραφή αυτής της συνάρτησης είναι η **float** hitsDet(**float** xa, **float** ya, **float** za, **float** ph, **float** the);. Επιστρέφει έναν κινητής υποδιαστολής αριθμό και δέχεται ως ορίσματα τις συντεταγμένες του σωματίου στο χώρο καθώς και τις αζιμουθιακές γωνίες του. Αν το σωμάτιο δεν προσκρούει στον ανιχνευτή τότε επιστρέφεται η τιμή -1. Εάν χτυπάει το σωμάτιο την επιφάνεια του ανιχνευτή, τότε επιστρέφεται το εύρος που διάνυσε από το σημείο γέννησής του, μέχρι την επιφάνεια του ανιχνευτή.

```
float hitsDet(float xa, float ya, float za, float ph, float
the){
        float a,b,c,d,xt,yt,tmp;

        c=za-Zc;
        if(ph<(PI/2)){
                if(the<PI){
                        d=c*tan(the);
                        a=d*cos(ph);
                        b=d*sin(ph);
                        xt=xa+a;
                        yt=ya+b;
                }else{
                        tmp=2*PI-the;
                        d=c*tan(tmp);
                        a=d*cos(ph);
                        b=d*sin(ph);
                        xt=xa-a;
                        yt=ya-b;
                }
        }else if(ph<PI){
                        if(the<PI){
                        d=c*tan(the);
                        tmp=PI-ph;
                        a=d*cos(tmp);
                        b=d*sin(tmp);
                        xt=xa-a;
                        yt=ya+b;
                }else{
                        tmp=2*PI-the;
                        d=c*tan(tmp);
                        tmp=PI-ph;
                        a=d*cos(tmp);
                        b=d*sin(tmp);
                        xt=xa+a;
                        yt=ya-b;
                }
        }else if(ph<(3*PI/2)){
                        if(the<PI){
                        d=c*tan(the);
                        tmp=3*PI/2-ph;
                        a=d*cos(tmp);
                        b=d*sin(tmp);
                        xt=xa-a;
                        yt=ya-b;
                }else{
                        tmp=2*PI-the;
                        d=c*tan(tmp);
                        tmp=3*PI/2-ph;
```

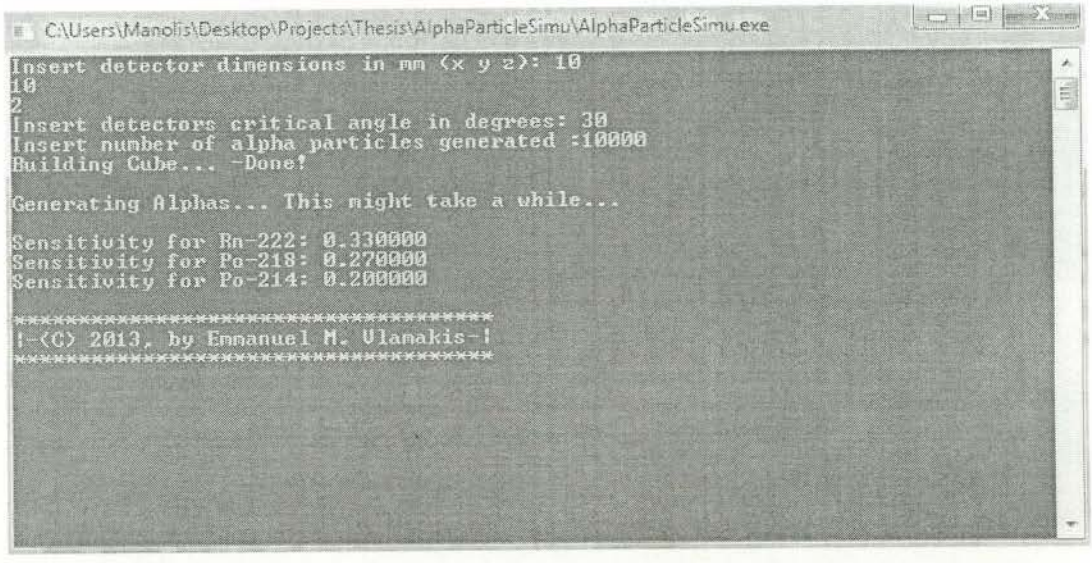
```
                    a=d*cos(tmp);
                    b=d*sin(tmp);
                    xt=xa+a;
                    yt=ya+b;
            }
        }else{ //<2PI
            if(the<PI){
                    d=c*tan(the);
                    tmp=2*PI-ph;
                    a=d*cos(tmp);
                    b=d*sin(tmp);
                    xt=xa+a;
                    yt=ya-b;
            }else{
                    tmp=2*PI-the;
                    d=c*tan(tmp);
                    tmp=2*PI-ph;
                    a=d*cos(tmp);
                    b=d*sin(tmp);
                    xt=xa-a;
                    yt=ya+b;
            }
        }

if(xt>(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))&&xt<((Rmax*cos(thetaCr*PI/18
0))+Xc)){

if(yt>(Rmax*cos(thetaCr*PI/180))&&yt<((Rmax*cos(thetaCr*PI/18
0))+Yc)){
                    return sqrtf(c*c+d*d);
            }
        }
        return -1;
}//hitsDet end
```

Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει τη θέση που θα έχει το σωμάτιο όταν βρίσκεται στο ύψος του ανιχνευτή. Αυτό υλοποιείται εύκολα, υπολογίζοντας τις προβολές του δυανύσματος του σωματίου με βάση τις αζιμουθιακές γωνίες. Στη συνέχεια προστίθενται ή αφαιρούνται στις διαστάσεις του σωματίου, όπου αποτελούσαν την αρχική του θέση, βρίσκοντας έτσι την τελική θέση που θα έχει στους άξονες x και y για z=Zcr. Αφού υπολογιστεί η τελική θέση, ελέγχεται εάν αυτή είναι εντός των διαστάσεων του ανιχνευτή. Αν όχι, σημαίνει ότι δεν καταγράφεται το σωμάτιο και ενδεχομένως κινείται προς άλλη κατεύθυνση του χώρου. Αν πάλι είναι εντός ορίων, πρέπει να ελέγξουμε αν το εύρος που δυάνυσε το σωμάτιο είναι μεγαλύτερο από το επιτρεπόμενο εύρος και συνεπώς να απορριφθεί. Εφόσον δεν ισχύσει κάτι τέτοιο, υπολογίζεται και επιστρέφεται το εύρος του σωματίου άλφα.

7. Προσομοίωση και Επικύρωση

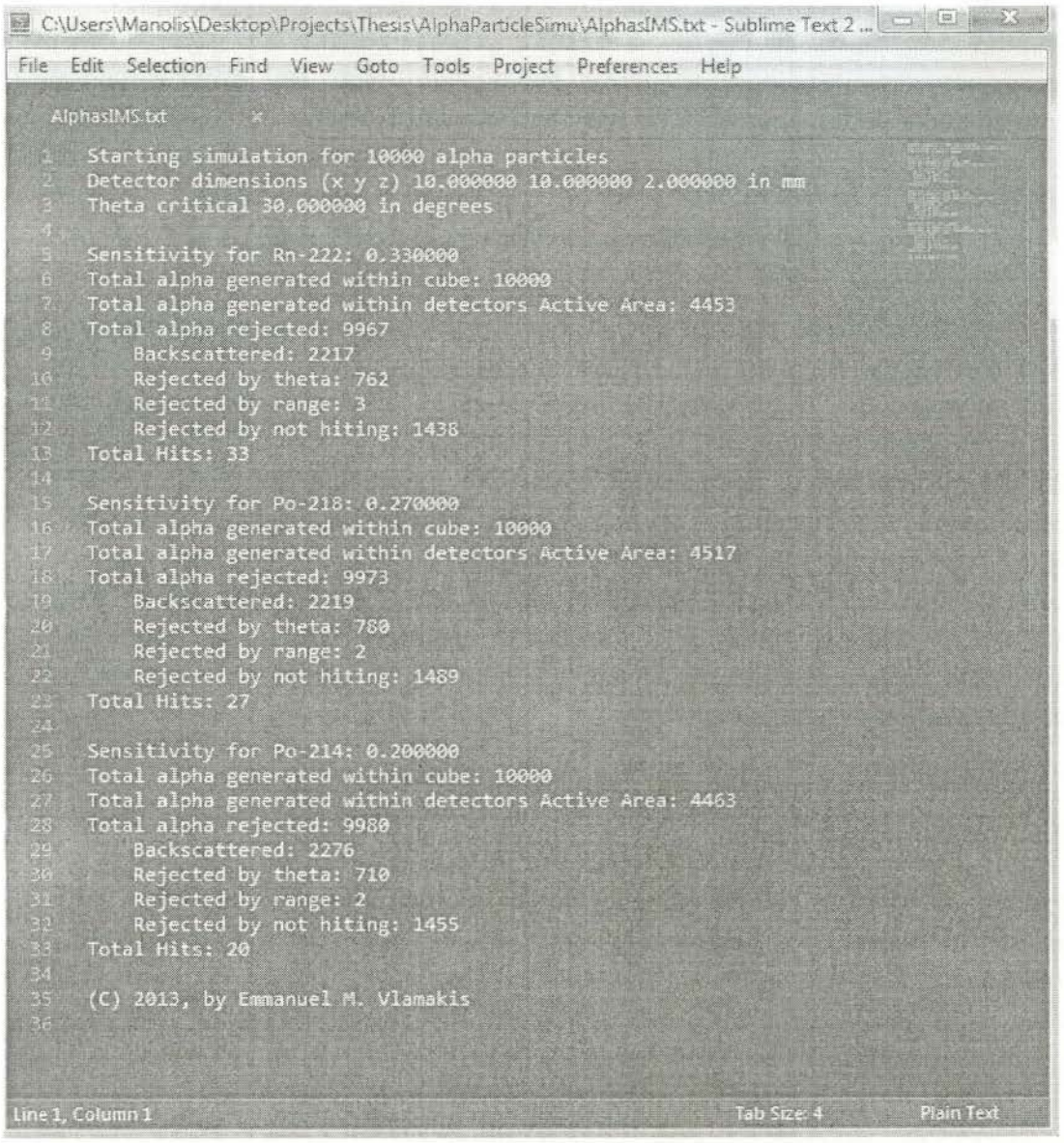
7. 1 Προσομοίωση Πραγματικού Χρόνου

Μια εκτέλεση του προγράμματος μας δίνει τα παρακάτω παραγόμενα τα οποία επισυνάπτονται σε στιγμιότυπα. Η ακόλουθη εικόνα είναι ένα στιγμιότυπο εκτέλεσης.



Εικόνα 36. Στιγμιότυπο εκτέλεσης προγράμματος

Ως είσοδοι είναι φανερό ότι έχουμε διαστάσεις ανιχνευτή ως 10x10x2 mm, δηλαδή ενός τετραγωνικού εκατοστού με κρίσιμη γωνία 30^{o} και 10.000 παραγόμενα σωμάτια άλφα στο χώρο αυτό. Έτσι ως άμεσα παραγόμενα έχουμε τις τρεις διαφορετικές ευαισθυσίες για το ^{222}Rn, το ^{218}Po και το ^{214}Po. Στο αρχείο εξόδου που παραβάλλεται παρακάτω, φαίνονται τα στατιστικά στοιχεία τα οποία οδήγησαν τους υπολογισμούς μας να φτάσουν στις συγκεκριμένες ευαισθησίες για τον ανιχνευτή.



Εικόνα 37. Αρχείο εξόδου εφαρμογής

Εδώ έχουμε πλήρεις πληροφορίες για την συγκεκριμένη εκτέλεση καθώς μπορεί να αποθηκευθεί για μελλοντική χρήση το αρχείο, δίνοντας αρχικά πληροφορίες προσωμοίωσης, τις διαστάσεις του ανιχνευτή, την κρίσιμη γωνία και τον αριθμό των άλφα που παράχθηκαν. Εν συνεχεία παραβάλονται η ευαισθησία και τα στοιχεία για καθένα από τα ραδόνιο και θυγατρικά ξεχωριστά. Έτσι βλέπουμε ότι οι πληροφορίες που μπορούμε να συλλέξουμε είναι το ποσό που γεννήθηκε εντός ενεργού περιοχής, πόσα απορρίφθηκαν και πόσα τελικά

καταγράφηκαν. Ειδικότερα από αυτά τα σωμάτια που απορρίφθηκαν, μπορούμε να δούμε τον λόγο τον οποίο απορρίφθηκαν, δηλαδή πόσα προέβησαν σε οπισθοσκέδαση, πόσα δεν είχαν κατάλληλη γωνία θ, πόσα δεν είχαν αρκετή ενέργεια και δεν καταγράφηκαν λόγω εύρους και πόσα δεν στόχευσαν τον ανιχνευτή καθώς πληρούσαν όλες τις προδιαγραφές καταγραφής.

7.2 Επικύρωση Παραγόμενων Μοντελοποίησης

Ας δούμε όμως την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της εφαρμογής μας, καθότι ξεκινήσαμε την ανάπτυξή της με υποθέσεις που υσχύουν, αλλά πρέπει να είμαστε σίγουροι για το παραγόμενο αποτέλεσμα. Η μέγιστη θεωριτική τιμή του συντελεστή ευαισθησίας του CR-39 έχει βρεθεί 0.333 (track/cm^2)/(Bq.d/m^3) το 2008 [34]. Αυτό βέβαια απέχει κατά πολυ από μια πειρματική τιμή που είχε προσδιοριστεί σε μελέτη του 2003 και ορίζεται στα 0.168 (track/cm^2)/(Bq.d/m^3) [19]. Μια πιο σύγχρονη μελέτη του 2013, έδειξε ότι ο συντελεστής ευαισθισίας του CR-39 στον αέρα είναι 0.253 (track/cm^2)/(Bq.d/m^3). Ο συνολικός συντελεστής ευαισθησίας στην εφαρμογή μας προκύπτει, εάν προσθέσουμε τις επιμέρους ευαισθησίας και διαιρέσουμε με το πλήθος. Έτσι για το στιγμιότυπο εκτέλεστης που έχουμε παραπάνω, προκύπτει:

$$(0.33 + 0.27 + 0.20)\ /3 = \mathbf{0.266}\ (\text{track/cm}^2)/(\text{Bq.d/m}^3)$$

Παρατηρείται ότι το σφάλμα είναι αρκετά μικρό συγκριτικά με την πιο σύγχρονη μελέτη η οποία το προσδιορίζει την ευαισθησία στα 0.253 (track/cm^2)/(Bq.d/m^3). Ας θυμηθούμε τι πρότεινε το παλαιό μοντέλο ευαισθησίας. Έχουμε:

$$D = k(c_0 + c_1 + c_4), \quad (43)$$

$$D_0 = kc_0 \quad (44)$$

Τώρα οι 43,44 μπορούν να γραφούν ως ακολούθως:

$$D = k_0c_0 + k_1c_1 + k_4c_4, \quad (45)$$

$$D_0 = k_0c_0 \quad (46)$$

όπου $k_0 = 0.33$, $k_1 = 0.27$ και $k_4 = 0.20$ (track/cm^2)/(Bq.d/m^3).

Είναι φανερό, ότι το παραγόμενο μοντέλο, απέχει κατά πολύ από το ήδη υπάρχον. Έτσι αντί για έναν κοινό συντελεστή ευαισθησίας για το ραδόνιο και τα θυγατρικά, έχουμε τρεις ξεχωριστούς, βελτιώνοντας δραματικά την ακρίβεια του μοντέλου και μειώνοντας τα περιθώρια σφάλματος. Ο συνολικός συντελεστής επιβεβαιώθηκε με την πιο σύγχρονη εργασία προσδιορισμού του [19], όπου

ακολούθησε η επιμέρους επικύρωση του μοντέλου μας. Ολική επικύρωση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμα, διότι δεν είναι γνωστοί οι συντελεστές ευαισθησίας για τα θυγατρικά του ραδονίου μέχρι στιγμής.

Επίλογος

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη της καταγραφής των σωματίων άλφα του ραδονίου και των θυγατρικών παραγώγων στους στερεούς ανιχνευτές καταγραφής ιχνών με τη μέθοδο μόντε κάρλο.

Για να αναδειχτεί η σημασία και η αναγκαιότητα μιας τέτοιας μελέτης, παρατείθενται στοιχεία για το ραδόνιο και τα θυγατρικά του. Αναλύνονται βασικές έννοιες για την κατανόηση της διαδικασίας παραγωγής των σωματίων άλφα από το ραδόνιο και τα θυγατρικά καθώς και το πώς αυτά καταγράφονται στις διάφορες μετρητικές συσκευές ανίχνευσης που υπάρχουν. Μελετήθηκε η εθαισθησία αυτών των συσκευών στο ραδόνιο και στα θυγατρικά του με τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα.

Η ανάγκη βελτιστοποίησης αυτών των μοντέλων, μας οδήγησε σε αυτήν την πτυχιακή εργασία, στα πλαίσια της οποίας αναπτύσεται ένα νέο ακριβές μοντέλο για τον υπολογισμό της ευαισθησίας καταγραφής του ραδονίου και για κάθε ένα από τα θυγατρικά του παράγωγα ξεχωριστά. Αναπτύχθηκε μια εφαρμογή όπου μοντελοποιεί την διαδικασία καταγραφής και εξάγει ως αποτέλεσμα τις ευαισθησίες του ραδονίου και των θυγατρικών. Τέλος το νέο μοντέλο επικυρώθηκε σύμφωνα με την πιο σύγχρονη βιβλιογραφία.

Εξέλιξη

Η παρούσα πτυχιακή όμως δεν σταματά εδώ. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε ακολουθεί μια σωστή δομή έτσι ώστε να επιτρέπει τη συνεχή ανάπτυξή του. Ρουτίνες μπορούν να δημιουργηθούν, είτε και ολόκληρες βιβλιοθήκες που ενσωματώνονται στα εκάστοτε σημεία του κώδικα με εξαιρετικά μεγάλη ευκολία.

Ήδη έχει ξεκινήσει μια προσπάθεια με τη συμβολή του προγράμματος SRIM 2013 (Stopping and Range of Ions in Matter) από τον James F. Ziegler, ο οποίος έχει διακρίσεις στον συγκεκριμένο τομέα. Το SRIM κατά την εκτέλεση παράγει για όλες τις ενέργειες του σωματίου άλφα, τα εναπομείναντα εύρη, στον αέρα, αλλά και εντός του ανιχνευτή. Επίσης για τιμές του εύρους μπορεί να υπολογιστεί και η ενέργεια που έχει εναπομείνει στο σωμάτιο. Έτσι για τα σωμάτια που τελικά προσκρούουν στον ανιχνευτή, έχουμε την ενέργεια πρόσκρουσης, επομένως το εύρος εντός του ανιχνευτή, άρα και την τελική θέση του σωματίου. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε στατιστικά στοιχεία για τις κατανομές των σωματίων εντός του ανιχνευτή τις κατανομές ενέργειας στην επιφάνειά του και πολλά ακόμα στοιχεία, χωρίς να σταματάει ποτέ η εξέλιξη της εφαρμογής.

Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1. ΧΗΜΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΑΘΗΤΙΚΟΥ ΣΑΚΙ - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 2. ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΑΛΦΑ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 3. ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΟΥ BRAGG - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 4. ΓΡΑΦΗΜΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΕΥΡΟΣ Α-ΣΩΜΑΤΙΩΝ - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 5. Ο ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ CR-39 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 6. ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ CR-39 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 7. Η ΕΝΕΡΓΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ CR-39 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 8. ΚΥΒΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 9. ΚΑΤΑΤΜΗΣΗ ΚΥΒΟΥ - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 10. Α)ΚΥΒΟΣ ΚΑΤΑ ΖΥΧ Β) ΚΥΒΟΣ ΚΑΤΑ ΖΧΥ - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 11. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΠΡΟΣ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟ - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 12. ΠΕΡΙΟΧΗ 1 ΠΡΟΣ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 13. ΚΥΒΟΣ Π1 ΠΕΡΙΣΤΡΑΜΕΝΟΣ ΚΑΤΑ ΥΧΖ - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 14. ΚΥΒΟΣ Π1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 2 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 15. ΚΥΒΟΣ Π2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 2 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 16. ΚΥΒΟΣ Π3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 1 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 17. ΠΕΡΙΣΤΡΑΜΕΝΟΣ ΚΥΒΟΣ Π3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 1 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 18. ΚΥΒΟΣ Π3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 2 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 19. ΠΕΡΙΣΤΑΜΕΝΟΣ ΚΥΒΟΣ Π3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 2 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 20. ΚΥΒΟΣ Π4 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 1 ΚΑΙ 2 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 21. ΚΥΒΟΣ Π5 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 1 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 22. ΠΕΡΙΣΤΡΑΜΕΝΟΣ ΚΥΒΟΣ Π5 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 1 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 23. ΚΥΒΟΣ Π5 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 2 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 24. ΠΕΡΙΣΤΑΜΕΝΟΣ ΚΥΒΟΣ Π5 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 2 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 25. ΚΥΒΟΣ Π6 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 1 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 26. ΚΥΒΟΣ Π6 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 2 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 27. ΚΥΒΟΣ Π7 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 1 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 28. ΠΕΡΙΣΤΑΜΕΝΟΣ ΚΥΒΟΣ Π7 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 1 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 29. ΚΥΒΟΣ Π7 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 2 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 30. ΠΕΡΙΣΤΑΜΕΝΟΣ ΚΥΒΟΣ Π7 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 2 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 31. ΚΥΒΟΣ Π8 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 1 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 32. ΚΥΒΟΣ Π8 ΠΕΡΙΟΧΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΜΟΥ 2 - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 33. Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΩΣ ΜΑΥΡΟ ΚΟΥΤΙ - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 34. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 35. ΑΖΙΜΟΥΘΙΑΚΕΣ ΓΩΝΙΕΣ ΣΩΜΑΤΙΟΥ ΑΛΦΑ - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 36. ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ - 1 -
ΕΙΚΟΝΑ 37. ΑΡΧΕΙΟ ΕΞΟΔΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ - 1 -

Ευρετήριο Κυριότερων Όρων

Ραδιενέργεια: Με τον όρο ραδιενέργεια χαρακτηρίζεται η ιδιότητα που μπορεί να έχει ένας πυρήνας να διασπάται εκπέμποντας ενέργεια και να μεταπίπτει σε έναν άλλο πυρήνα. Οι συνήθεις τρόποι εκπομπής ενέργειας είναι τρεις και χαρακτηρίζονται σαν α-, β-, και γ- εκπομπές.

Becquerel: Ο αριθμός διασπάσεων στη μονάδα του χρόνου ονομάζεται ενεργότητα και μετριέται σε Bq (Becquerel). Ένα μπεκερέλ ισούται με το ποσό από μία ραδιενεργό ουσία που υπόκειται πυρηνική διάσπαση ανά δευτερόλεπτο. Για παράδειγμα 2 Bq σημαίνει ότι έχουμε δύο διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο.

Συγκέντρωση Ραδονίου: Η συγκέντρωση ραδονίου μετράται σαν η ενεργότητα του ραδονίου ανά κυβικό μέτρο αέρα. Η μονάδα μέτρησης είναι το Bqm^{-3}.

Δόση: Ο όρος δόση μπορεί να αναφέρεται κυρίως σε απορροφούμενη ή ισοδύναμη δόση. Η απορροφούμενη δόση αντιστοιχεί στην ενέργεια που απορροφάται από ιστό ανά μονάδα μάζας. Η ισοδύναμη δόση ισούται με την απορροφούμενη δόση πολλαπλασιασμένη με κάποιους παράγοντες απορρόφησης οι οποίοι σχετίζονται με τη διαφορετική ζημία που υφίστανται τα διάφορα όργανα από τα διαφορετικά είδη ακτινοβολιών. Συνήθως η δόση αναφέρεται στην ισοδύναμη δόση. Μετράται σε Sv. 1 Sv αντιστοιχεί σε απορρόφηση ενέργειας 1 Joule από 1 Kg ιστού με παράγοντα απορρόφησης 1. Συνήθως για τη δόση από τη φυσική ραδιενέργεια χρησιμοποιείται το mSv. 1mSv ισούται με 1/1000 του Sv.

Χρόνος Ημιζωής: Ο χρόνος ημιζωής ενός ραδιενεργού υλικού είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε να διασπαστεί η μισή ποσότητα του υλικού. Μπορεί να είναι από εξαιρετικά μικρός ώς εξαιρετικά μεγάλος.

Βιβλιογραφία

[1] Alsos the digital library for nuclear issues - http://alsos.wlu.edu/qsearch.aspx?browse=science/Fission

[2] B. Dorschel , D. Hermsdorf, U. Reichelt, 2002. Experimental determination of the critical angle for particle registration and comparison with model predictions, Radiation Measurements 35, 189 – 193

[3] C.L.P. Mauricio, L. Tauhata and L. Bertelli,1985. Internal Dosimetry for Radon and Radon Daughters, Radiation Protection Dosimetry, 249-255.

[4] Dorschel, B., Bretschneider, R., Hermsdorf, D., Kadner, K.,1999. Computation of the critical angle of track registration in alpha-irradiated CR-39 detectors on the basis of the time-dependent track etch rates. Radiat. Prot. Dosim. 82, 85–92.

[5] Dragoslav Nikezić, 1994. Determination of detection efficiency for radon and radon daughters with CR 39 track detector - a Monte Carlo study, NIMA,406–414

[6] F. O. López, A. C. Canoba, 2003. Passive method for the determination of the equilibrium factor between 222Rn gas and its short period progeny,Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 269-274

[7] G. Y. S¸en M. Ic¸hedef M. M. Sac¸ G. Yener, 2013. Effect of natural gas usage on indoor radon levels,2013 J Radioanal Nucl Chem, 295:277–282.

[8] Gastineau, R.M., Walsh, P.J. and Underwood, N., 1972. Thickness of bronchial epithelium with relation to exposure to radon, Health Phys., 23, 857

[9] Henshaw D, Fews A, Keitsch P, Wilding R, Close J, Heather N, et al., 2001. Atmospheric washout of Radon shortlived daughters: implications for the radiation dose to the skin. 12th UK Aerosol Conf. Bath, UK.

[10] http://en.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_method

[11] http://en.wikipedia.org/wiki/Pi

[12] http://www.pugwash.org/

[13] http://www.tsarbomba.org/

[14] Iacob O, Grecea C, Capitanu O, Rascanu V, Agheorghiesei D, Botezatu E, et al, 2001. Population exposure to indoor Radon and thoron progeny. Population,9(1):5-12.

[15] J. Stajic,D.Nikezic, 2012. Detection efficiency of a disk shaped detector with acritical detection angle for particles with a finite rang eemitted by a point-likesource. Applied Radiation and Isotopes

[16] James, A.C.,1988. Lung Dosimetry In : Radon and its decay products in indoor air, (eds Nero, A.V. and Nazaroff, W.W.), John Wiley and Sons. New York

[17] K.P. Eappen ,Y.S. Mayya, R.L. Patnaik, H.S. Kushwaha, 2006. Estimation of radon progeny equilibrium factors and their uncertainty bounds using solid state nuclear track detectors Radiat. Meas. 41, 342-348.

[18] Kendall GM, Smith TJ, 2002. Doses to organs and tissues from Radon and its decay products. J Radiol Prot, 22(4):389-406.

[19] Lopez FO, Canoba AC,2004. Passive Method for the Equilibrium Factor Determination between 222Rn Gas and its Short Period Progeny. 11th International Congress on the International Radiation Protection Association, 23-28

[20] Mohammad Reza Rezaie, Mehdi Sohrabi, Ali Negarestani, 2013. Studying the response of CR-39 to radon in non-polar liquids above water by Monte Carlo simulation and measurement, Radiation Measurements, 103–108

[21] Photo by Steven B. Krivit, New Energy Times

[22] Planinic, J and Faj, Z., 1989. The equilibrium Factor F between Radon and its Daughters. Nucl. Instrum. Methods A278, 550-552.

[23] Planinic, J and Faj, Z., 1990. Equilibrium Factor and Dosimetry of Rn by a Nuclear Track Detector. Health Phys. 59, 349-351.

[24] Planinic, J and Faj, Z., 1991. Dosimetry of Radon and its Daughters by two SSNT Detectors. Radiat. Prot. Dosim. 35, 265-268.

[25] Rehman FU, Jamil K, Zakaullah M, Abu-Jarad F, Mujahid SA, 2003. Experimental and Monte Carlo simulation studies of open cylindrical Radon monitoring device using CR-39 detector. J Environ Radioact.

[26] Sharma, A., Kumar, S., Sharma, S.K., Diwan, P.K., Nath, N., Mittal, V.K., Ghosh, S., Avasthi, D.K., 2000. Stopping power of Mylar for heavy ions up to copper. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 170, 323-328.

[27] Swedjemark, G. A., 1983. The equilibrium Factor F. Health Phys. 45, 453-462.

[28] University of Ioannina - http://omega.physics.uoi.gr/radon/English/Instrumentation.htm

[29] University of Saskatchewan, Canada - http://physics.usask.ca/~bzulkosk/modphyslab/phys251manual/alpha_2011.pdf

[30] UNSCEAR, 2008. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic

[31] Viktor Suvorov, Kuz'kina Mat'. A Chronicle of Great Decade, Dedicated to 50 years of Caribbean Crisis Moscow, 2011, ISBN 978-5-98124-561-9

[32] W.N. Cottingham, D.A. Greenwood, Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική

[33] World Nuclear Association - http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Nuclear-Power-Reactors/

[34] Y.L. Law, D. Nikezic, K.N. Yu, 2008. Optical appearance of alpha-particle tracks in CR-39 SSNTDs, Radiation Measurements ,128–131

[35] Yu K, Yip C, Nikezic D, Ho J, Koo V. Comparison among alpha-particle energy losses in air obtained from data of SRIM, ICRU and experiments. Applied radiation and isotopes. 2003;59(5):363-6.

[36] Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών - http://www.aua.gr/~bethanis/radioactivity_alpha_beta_gama_radiation.pdf

[37] Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας - http://www.eeae.gr/gr/docs/president/_radonio.pdf

[38] Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας – Δ.Νικολόπουλος, Ν.Πετρόπουλος, Κ.Ποτηριάδης,1997. Μελέτη σκοπιμότητας για την διεξαγωγή εθνικής επισκόπησης ραδονίου στην Ελλάδα.

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ