



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

*ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ*

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ FLUKA

ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΑΤΣΕΑ ΕΛΕΝΗ

ΑΘΗΝΑ, 2015

0.1 Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μιχάλη Κόκκορη και τη Ρόζα Βλαστού για την φιλοξενία τους στην ομάδα της Πυρηνικής Φυσικής και που ήταν πάντα διαθέσιμοι όταν χρειάστηκα τη βοήθειά τους. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τη Φρόσω Ανδρουλακάκη, όπου χωρίς την καθοδήγησή της και την πολύτιμη βοήθειά της δε θα είχα καταφέρει να τελειώσω την εργασία αυτή. Όπως και ευχαριστώ τον Ανδρέα Τσιγγάνη, που την κατάλληλη στιγμή μου προσέφερε τις γνώσεις του.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου και τον Γιαννακό, για την υποστήριξή τους κατά την διάρκεια την παραμονής μου στην Αθήνα.

0.2 Εισαγωγή

Στο περιβάλλον, υπάρχει ραδιενέργεια που προέρχεται από φυσικές διεργασίες και εκπέμπεται από συγκεκριμένα υλικά που περιλαμβάνουν τις ραδιενεργές σειρές των ^{238}U , ^{235}U και ^{232}Th με τα θυγατρικά τους προϊόντα, καθώς και το φυσικό ^{40}K . Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως οι διαδικασίες εξόρυξης και εκμετάλλευσης των ορυκτών ή οι πυρηνικές δοκιμές και τα πυρηνικά ατυχήματα, έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Οπότε, η μέτρηση ραδιονουκλιδίων σε συγκεκριμένες περιοχές, για παράδειγμα στο νερό και στο ίζημα, είναι σημαντική για τη μελέτη των επιπέδων ραδιενέργειας από φυσικές ή τεχνητές πηγές στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Για τις μετρήσεις της ραδιενέργειας, είτε συλλέγονται δείγματα από το ίζημα και μετά από ειδική επεξεργασία γίνεται η μέτρηση σε εργαστήριο, είτε με ανιχνευτή ιωδιούχου νατρίου (NaI), που τοποθετείται μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον, γίνονται επιτόπιες μετρήσεις. Όμως και στις δυο περιπτώσεις, ο ανιχνευτής είναι πολύ κοντά ή και σε επαφή με την πηγή για λόγους καλύτερης στατιστικής και έτσι εμφανίζεται το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence summing). Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν από έναν πυρήνα αποδιεγείρονται δύο ή περισσότερες ακτίνες-γ σε σειρά (cascade) σχεδόν ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα, σε περίπτωση που βρίσκεται μέσα στη στερεά γωνία που καλύπτει ο ανιχνευτής να γίνονται αντιληπτές ως ένα μόνο γεγονός και να αθροίζεται η ενέργεια που εναποθέτουν στον ανιχνευτή, λόγω της τεράστιας διαφοράς χρόνου ανάμεσα στην κλίμακα των συνήθων πυρηνικών αποδιεγέρσεων σταθμών (t πολύ μικρό) και της χρονικής διακριτικής ικανότητας των ηλεκτρονικών μας (t πολύ μεγάλο). Λαμβάνοντας υπόψιν την πραγματική σύμπτωση, υπάρχει ανάγκη χρήσης ενός κώδικα προσομοίωσης Monte Carlo, με τον οποίο θα μπορεί να υπολογιστεί η απόδοση του ανιχνευτικού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε θεωρητικά.

Στην εργασία αυτή, επιλέχτηκε ο κώδικας FLUKA. Το FLUKA, είναι ένα πρόγραμμα Monte Carlo γενικού σκοπού για την αλληλεπίδραση και τη μεταφορά των αδρονίων, βαρέων ιόντων και ηλεκτρομαγνητικών σωματιδίων, από μερικά KeV μέχρι κοσμικής ακτινοβολίας ενέργειες σε οποιοδήποτε υλικό. Έχει κατασκευαστεί και διατηρείται με στόχο να περιλαμβάνει τα καλύτερα δυνατά μοντέλα φυσικής, όσον αφορά την πληρότητα και την ακρίβεια. Αρχικά δημιουργήθηκε και έγινε γνωστό για τη γέννηση αδρονικών γεγονότων, αλλά μπορεί να χειριστεί, με την ίδια ή με καλύτερη ακρίβεια, ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα. Έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει την πραγματική τυχαία άθροιση δύο ή περισσότερων ενεργειών, που λόγω την άμεσης επαφής του ανιχνευτή με το νερό ή το ίζημα, υπάρχει πάντα στις μετρήσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον. Επίσης, δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να πραγματοποιήσει οποιαδήποτε προσομοίωση με οποιαδήποτε γεωμετρία, καθώς μπορεί να παρέμβει ο ίδιος στην ρουτίνα του προγράμματος και επίσης έχει την ελευθερία να διαλέξει ποιες αλληλεπιδράσεις τον ενδιαφέρουν να παρακολουθήσει ο αλγόριθμος.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας, είναι η εφαρμογή του προγράμματος FLUKA στο θαλάσσιο περιβάλλον για την εύρεση της απόδοσης του ανιχνευτή και στο τελικό στάδιο αυτής, για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, γίνεται σύγκριση του προγράμματος FLUKA με το πρόγραμμα MCNP-CP, που χρησιμοποιείται συνήθως για παρόμοιες εφαρμογές. Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια παρουσίαση του προγράμματος μέσω μιας

απλής εφαρμογής, χρησιμοποιώντας για σημειακή πηγή το ραδιονουκλίδιο ^{60}Co σε απόσταση 2 cm από τον ανιχνευτή. Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στην μελέτη του γινομένου ϵV , (η απόδοση κορυφής πολλαπλασιασμένη με το συνολικό όγκο του νερού που χρησιμοποιήθηκε) για την εύρεση της ενεργού ακτίνας για την εφαρμογή στο θαλάσσιο περιβάλλον με πηγή το ισότοπο του ^{208}Tl . Έπειτα στο 3^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η εφαρμογή του κώδικα σε εκτεταμένη γεωμετρία επαφής στο θαλάσσιο περιβάλλον για το ραδιονουκλίδιο ^{208}Tl και συγκρίνεται με τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα MCNP-CP. Επίσης γίνεται και γενική σύγκριση των δύο αυτών κωδίκων από άποψη φιλικότητας προς τον χρήστη, ακρίβειας και λειτουργικότητας. Στο 4^ο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για όλα τα συνήθη ραδιονουκλίδια που υπάρχουν στο θαλάσσιο περιβάλλον και τέλος, στο 5^ο κεφάλαιο, διατυπώνονται τα γενικά συμπεράσματα και οι ερευνητικές προοπτικές που δημιουργεί η χρήση του κώδικα FLUKA.

Περιεχόμενα

0.1	Ευχαριστίες	i
0.2	Εισαγωγή	ii
1	Το πρόγραμμα προσομοίωσης Monte Carlo FLUKA	1
1.1	Γενικά Στοιχεία	1
1.2	FLAIR	1
1.3	Εφαρμογή στο θαλάσσιο περιβάλλον	3
1.3.1	Γεωμετρία	3
1.3.2	Υλικά	6
1.3.3	Πηγή	7
1.3.4	Επιλογή μοντέλων φυσικής	9
1.4	Αποτελέσματα	11
2	Μελέτη του γινομένου ϵV	14
3	Σύγκριση κωδίκων FLUKA - MCNP-CP	18
3.1	Οι κώδικες FLUKA και MCNP-CP	18
3.1.1	MCNP5 και MCNP-CP	18
3.1.2	Επιλογή των συγκεκριμένων κωδίκων	19
3.2	Η περίπτωση ^{208}Tl	19
3.3	Τεχνική εξασφάλισης της ομοιότητας των δεδομένων εισαγωγής στους δύο κώδικες	20
3.3.1	Γεωμετρία	20
3.3.2	Επιλογή μοντέλων φυσικής	21

3.3.3	Πηγή	24
3.3.4	Τυχαίος Αριθμός	25
3.3.5	Βιβλιοθήκες Δεδομένων	25
3.4	Αποτελέσματα	26
4	Προσομοίωση της απόκρισης του ανιχνευτή (NaI) για μετρήσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον	32
4.1	^{214}Pb	35
4.2	^{214}Bi	36
4.3	^{234}Pa	37
4.4	^{226}Ra	38
4.5	^{219}Rn	39
4.6	^{220}Rn	40
4.7	^{228}Ac	41
4.8	^{212}Bi	42
4.8.1	Αποτελέσματα με την ρουτίνα για 30,000,000 αρχικά γεγονότα	42
4.8.2	Αποτελέσματα με τη μέθοδο της αφαίρεσης για 100,000,000 αρχικά γεγονότα	42
4.9	^{212}Pb	45
4.10	^{40}K	46
5	Συμπεράσματα	47
6	Αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν	48
6.1	Αρχείο εισόδου για το στοιχείο του ^{60}Co για νερό για τον κώδικα FLUKA	48
6.2	Αρχείο εισόδου για το στοιχείο του ^{60}Co για ίζημα για τον κώδικα FLUKA	50
6.3	Τροποποιημένο Αρχείο source.f	52
6.4	Τροποποιημένο Αρχείο usrmed.f	57
6.5	Αρχείο για την εξαγωγή στοιχείων από το αρχείο εξόδου της κάρτας EVENT-BIN	59
6.6	Αρχείο εισόδου για το στοιχείο του ^{208}Tl στο θαλάσσιο περιβάλλον για τον κώδικα FLUKA	59
6.7	Αρχείο εισόδου για το στοιχείο του ^{208}Tl στο θαλάσσιο περιβάλλον για τον κώδικα MCNP-CP	61
	Βιβλιογραφία	63

Κατάλογος Σχημάτων

1.2.1	Το περιβάλλον FLAIR	2
-------	---------------------	---

1.3.1	Οι κάρτες TITLE και GLOBAL	3
1.3.2	Οι κάρτες RANDOMIZ, START και STOP	3
1.3.3	Κάρτες για τον ορισμό των συνόρων της γεωμετρίας του παραδείγματος	4
1.3.4	Κάρτες για τον ορισμό των περιοχών ανάμεσα από τα σώματα	4
1.3.5	Γεωμετρία Ανιχνευτή	5
1.3.6	Ο Ανιχνευτής στο περιβάλλον του νερού. Με μαύρη γραμμή τα όρια της πηγής	5
1.3.7	Ο Ανιχνευτής στο περιβάλλον του νερού-ίζημα. Με μαύρη γραμμή τα όρια της πηγής μας που βρίσκεται στο ίζημα	6
1.3.8	Κάρτες για τον ορισμό του νερού	7
1.3.9	Οι κάρτες BEAM, ISOTOPE, HI-PROPE, RADDECAY και DCYSCOPE	8
1.3.10	Τα γεγονότα που δημιουργούνται (α) στο νερό και (β) στο ίζημα	8
1.3.11	Η κάρτα DEFAULTS	9
1.3.12	Οι κάρτες DELTARAY και EMFCUT	10
1.3.13	Οι κάρτες SCORING και EVENTBIN	10
1.4.1	Διάγραμμα αποδιέγερσης του ^{60}Co (level scheme)	11
1.4.2	Φάσμα ^{60}Co στο νερό με τον κώδικα FLUKA	12
1.4.3	Φάσμα ^{60}Co στο ίζημα με τον κώδικα FLUKA	12
2.0.1	Γραφική παράσταση της ποσότητας εV συναρτήσει της ενεργούς ακτίνας	16
3.2.1	Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών (level scheme) του ^{208}Tl	20
3.3.1	Η γεωμετρία του προβλήματος όπως απεικονίζεται στο πρόγραμμα FLAIR	21
3.3.2	Διάγραμμα του συντελεστή απορρόφησης συναρτήσει της ενέργειας για ^{208}Tl στο νερό	24
3.4.1	Φάσμα για το ^{208}Tl στο νερό	29
4.0.1	Σχηματική παράσταση των ραδιενεργών σειρών	33
4.1.1	Φάσμα για το ^{214}Pb στο νερό	35
4.2.1	Φάσμα για το ^{214}Bi στο νερό	36
4.3.1	Φάσμα για το ^{234}Pa στο νερό	37
4.4.1	Φάσμα για το ^{226}Ra στο νερό	38
4.5.1	Φάσμα για το ^{219}Rn στο νερό	39
4.6.1	Φάσμα για το ^{220}Rn στο νερό	40
4.7.1	Φάσμα για το ^{228}Ac στο νερό	41
4.8.1	Φάσμα για το ^{212}Bi στο νερό με τη ρουτίνα	42
4.8.2	Φάσμα για το ^{212}Bi στο νερό	43
4.8.3	Φάσμα για το ^{208}Tl στο νερό	44
4.8.4	Φάσμα για το ^{212}Bi στο νερό με τη μέθοδο της αφαίρεσης	44
4.9.1	Φάσμα για το ^{212}Pb στο νερό	45
4.10.1	Φάσμα για το ^{40}K στο νερό	46

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Γεγονότα που καταγράφηκαν στο νερό και στο ίζημα για κάθε ενέργεια . . .	13
2.1	Αποτελέσματα για την ενέργεια 583.191 keV	15
3.1	Αντιστοιχία των εντολών των κωδικών MCNP-CP και FLUKA και οι φυσικές διεργασίες που ενεργοποιούνται	23
3.2	Αντιστοίχιση για τον ορισμό της πηγής για τους 2 κώδικες	25
3.3	Αποτελέσματα για σημειακή πηγή ^{60}Co στον αέρα σε απόσταση 1 mm . . .	26
3.4	Αποτελέσματα για σημειακή πηγή ^{60}Co στον αέρα σε απόσταση 2 cm . . .	27
3.5	Αποτελέσματα για σημειακή πηγή ^{60}Co στον αέρα σε απόσταση 10 cm . . .	27
3.6	Αποτελέσματα για σημειακή πηγή ^{60}Co στο θαλάσσιο περιβάλλον σε απόσταση 1 cm	28
3.7	Σύγκριση των δύο κωδικών για το ^{208}Tl στο θαλάσσιο περιβάλλον	30
4.1	Ραδιονουκλίδια που χρησιμοποιήθηκαν	34
4.2	Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{214}Pb	35
4.3	Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{214}Bi	36
4.4	Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{234}Pa	37
4.5	Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{226}Ra	38
4.6	Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια ^{219}Rn	39
4.7	Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{220}Rn	40
4.8	Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{228}Ac	41
4.9	Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{212}Bi με την ρουτίνα . .	42
4.10	Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{212}Bi	43
4.11	Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{212}Bi με τη μέθοδο της αφαίρεσης	45
4.12	Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{212}Pb	46
4.13	Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{40}K	46

1 Το πρόγραμμα προσομοίωσης Monte Carlo FLUKA

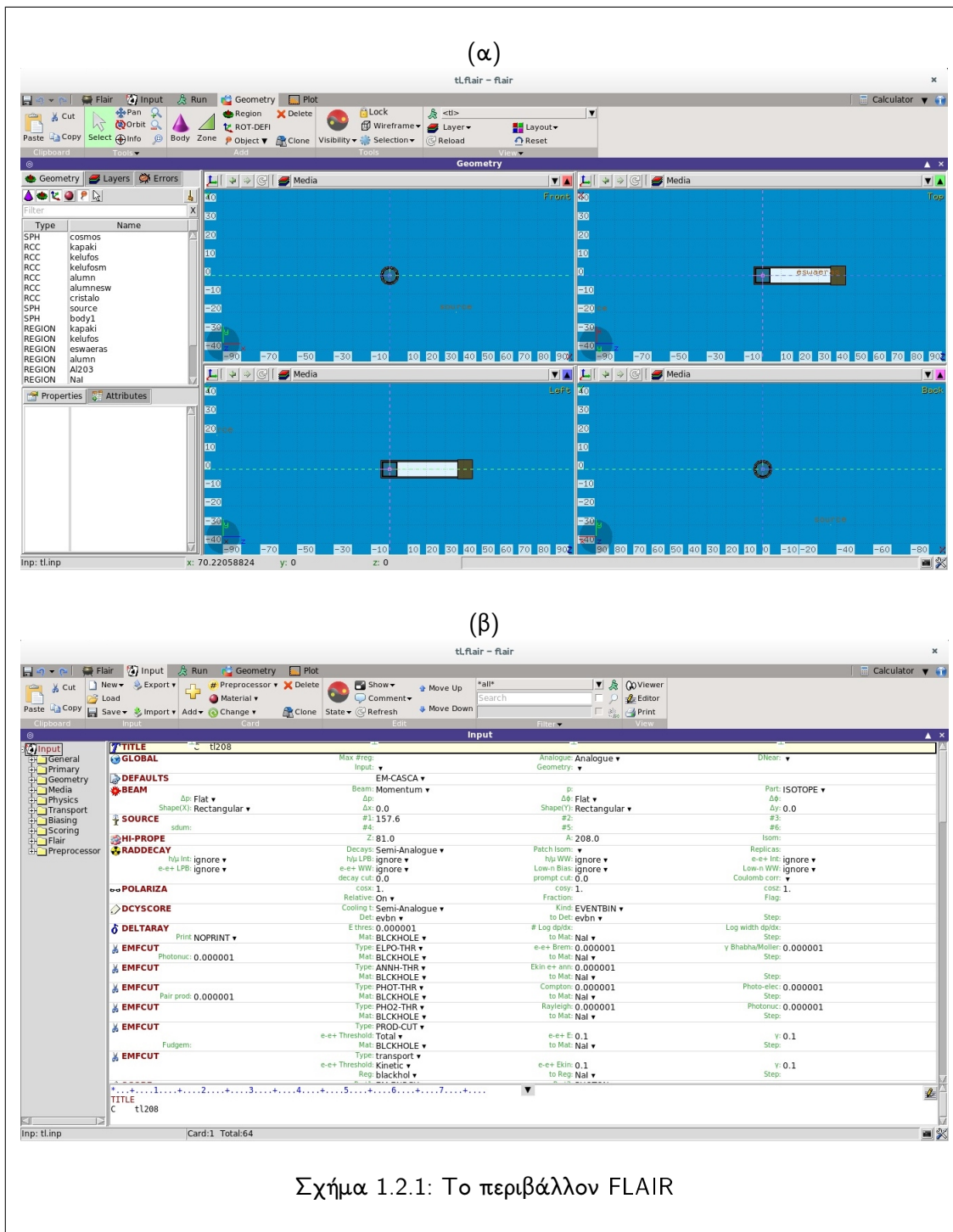
1.1 Γενικά Στοιχεία

Ο κώδικας FLUKA είναι ένα εργαλείο Monte Carlo γενικής χρήσης, που υπολογίζει τη μεταφορά σωματιδίων και την αλληλεπίδραση τους με την ύλη, καλύπτοντας έτσι ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που κυμαίνεται από τη θωράκιση επιταχυντή ηλεκτρονίων και πρωτονίων έως τη σχεδίαση στόχου, καλορίμετρων, τη δοσιμετρία, τη σχεδίαση και μελέτη ανιχνευτών, συστημάτων επιταχυντών, τις κοσμικές ακτίνες, τη φυσική νετρίνων, την πρόβλεψη βλάβης ακτινοβολίας, τη ραδιοθεραπεία κτλ.

Μπορεί να προσομοιώσει με μεγάλη ακρίβεια την αλληλεπίδραση και τη διάδοση περίπου 60 διαφορετικών σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένων των φωτονίων και των ηλεκτρονίων από ενέργεια 1keV έως χιλιάδες TeV, νετρίνα, μόνια κάθε ενέργειας, αδρόνια για ενέργειες πάνω από 20 TeV και όλα τα αντίστοιχα αντισωματίδια, νετρόνια σε θερμικές ενέργειες και βαριά ιόντα. Το πρόγραμμα μπορεί επίσης μεταφέρει πολωμένα φωτόνια(π.χ. ακτινοβολία συγχρότρου) και οπτικά φωτόνια. Επίσης μπορεί να παρακολουθήσει και να υπολογίσει τη χρονική εξέλιξη της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από ασταθείς πυρήνες.[7]

1.2 FLAIR

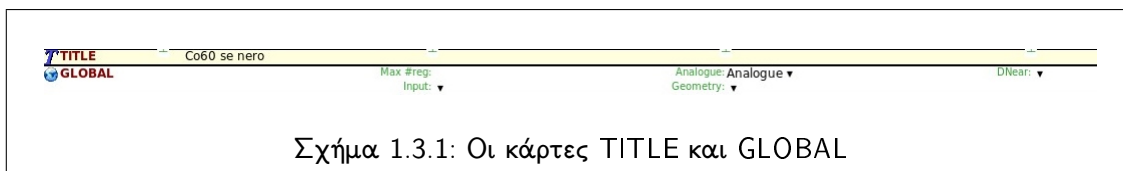
Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα, ο χρήστης μπορεί να ελέγχει τι θα υπολογίζει και να θέσει τις δικές του προδιαγραφές, με βάση τις λεγόμενες 'κάρτες' μέσω του FLAIR, όπου είναι ένα φιλικό γραφικό περιβάλλον που διευκολύνει την επεξεργασία των αρχείων εισόδου στο FLUKA, εκτελεί τον κώδικα και απεικονίζει τα αρχεία εξόδου. Η παρακάτω εικόνα δείχνει το γραφικό περιβάλλον όπου εργάζεται ο χρήστης. Στο μενού που φαίνεται επάνω, επιλέγοντας το Input εισάγεται το αρχείο εισόδου, επιλέγοντας το Geometry φαίνεται η γεωμετρία του προβλήματος με δυνατότητα επεξεργασίας επιτόπου, επιλέγοντας το Run εκτελείται ο κώδικας και επιλέγοντας το Plot, εμφανίζεται κάθε τυχόν διάγραμμα που δημιουργήθηκε. Επίσης υπάρχει και η δυνατότητα εμφάνισης των αρχείων εξόδου. [8]



1.3 Εφαρμογή στο θαλάσσιο περιβάλλον

Για εφαρμογές στο θαλάσσιο περιβάλλον, είναι σημαντικό ο χρήστης να μπορεί να σχεδιάζει ανιχνευτές με οποιαδήποτε γεωμετρία και ο κώδικας να μπορεί να παράγει πυρήνες και να παρακολουθεί τις συνολικά εκπεμπόμενες, από αυτούς, ακτίνες-γ. Επίσης, να μπορεί να υπολογίζει την ενέργεια που εναποτίθεται από ένα γεγονός σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Το πιο σημαντικό, είναι, όμως, να μπορεί και υπολογίζει το φαινόμενο τυχαίας άθροισης, που υπάρχει σε μετρήσεις με ανιχνευτή στο θαλάσσιο περιβάλλον, γιατί ο ανιχνευτής είναι σε άμεση επαφή με την πηγή. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ο ανιχνευτής είναι κυλινδρικός σπινθηριστής ιωδιούχου νατρίου που βρίσκεται στην πρώτη περίπτωση μέσα στη θάλασσα και στη δεύτερη περίπτωση βρίσκεται πάλι μέσα στη θάλασσα αλλά σε επαφή με το ίζημα.[1] Και στις 2 περιπτώσεις χρησιμοποιείται για πηγή το ^{60}Co .

Φτιάχνοντας το αρχείο εισόδου, στην αρχή χρειάζονται κάποιες κάρτες που είναι αναγκαίες για να τρέξει το πρόγραμμα. Έτσι, στην αρχή του αρχείου υπάρχει η κάρτα TITLE που ο χρήστης γράφει τον τίτλο του αρχείου. Μετά, υπάρχει η κάρτα GLOBAL όπου επιλέγοντας τη λειτουργία analogue, κάθε αλληλεπίδραση προσομοιώνεται με τη φυσική της πιθανότητα, όπως αυτή έχει προκύψει από δεδομένα της βιβλιοθήκης NNDC την οποία και διαβάζει ο κώδικας.



Σχήμα 1.3.1: Οι κάρτες TITLE και GLOBAL

Στο τέλος του αρχείου υπάρχουν οι τρεις παρακάτω κάρτες:

- RANDOMIZ, όπου ορίζει τον τυχαίο αριθμό με τον οποίο ξεκινάει η προσομοίωση
- START, ορίζει τον αριθμό των γεγονότων που θα προσομοιωθούν
- STOP, ορίζει το τέλος της προσομοίωσης



Σχήμα 1.3.2: Οι κάρτες RANDOMIZ, START και STOP

Μετά από αυτά, υπάρχουν οι εξής ενότητες που πρέπει να δημιουργηθούν στο αρχείο.

1.3.1 Γεωμετρία

Στην ενότητα γεωμετρία συμπεριλαμβάνονται ο σχεδιασμός του ανιχνευτή και ο σχεδιασμός του περιβάλλοντος που βρίσκεται ο ανιχνευτής. Στο FLAIR υπάρχουν 2 τρόποι να

σχεδιαστεί η γεωμετρία, είτε από το Input που ορίζονται τα σώματα και οι διαστάσεις τους επιγραμματικά, είτε μέσω του Geometry, όπου ο χρήστης δημιουργεί τη γεωμετρία γραφικά. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ορίζεται μέσω του Input με τις παρακάτω επιλογές.

Η αρχή και το τέλος αυτής της ενότητας, πρέπει να οριοθετούνται από τις καρτέλες GEOBEGIN και END αντίστοιχα. Μετά ορίζονται τα σύνορα του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο βρίσκεται ο ανιχνευτής. Για να φτιάξει ο χρήστης τα σύνορα αυτά, το FLAIR μας δίνει διάφορα σχήματα και διαλέγοντας το κατάλληλο, στη συνέχεια ορίζει τις διαστάσεις του. Για τον ανιχνευτή αντιστοιχούν οι παρακάτω κάρτες.

 kapaki	kapaki	X: 0.0 Hz: 0.0 R: 5.31	Y: 0.0 Hz: 0.0	Z: 36.83 Hz: 8.0
 kelufos eksw	kelufos	X: 0.0 Hz: 0.0 R: 4.93	Y: 0.0 Hz: 0.0	Z: -4.93 Hz: 41.76
 kelufos mesa	kelufosm	X: 0.0 Hz: 0.0 R: 4.15	Y: 0.0 Hz: 0.0	Z: -4.15 Hz: 40.98
 ekswtteriko alumn	alumn	X: 0.0 Hz: 0.0 R: 4.02	Y: 0.0 Hz: 0.0	Z: -3.97 Hz: 7.94
 eswtteriko alumn	alumnesw	X: 0.0 Hz: 0.0 R: 3.97	Y: 0.0 Hz: 0.0	Z: -3.97 Hz: 7.94
 cristalos	cristalo	X: 0.0 Hz: 0.0 R: 3.81	Y: 0.0 Hz: 0.0	Z: -3.81 Hz: 7.62
 cosmos	cosmos	X: 0.0 R: 300.0	Y: 0.0	Z: 0.0
 water source	source	X: 0.0 R: 157.6	Y: 0.0	Z: 0.0
 blackhol	blackhol	X: 0.0 R: 388.32975677895	Y: 0.0	Z: 0.0

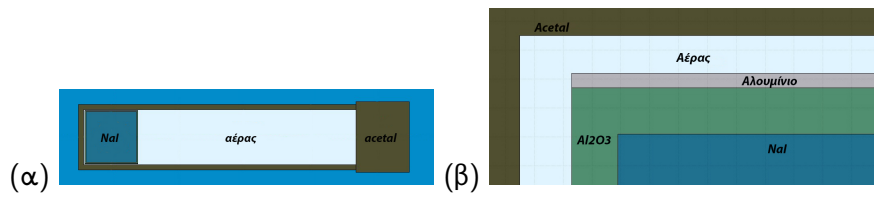
Σχήμα 1.3.3: Κάρτες για τον ορισμό των συνόρων της γεωμετρίας του παραδείγματος

Επίσης ο χρήστης πρέπει να ορίσει γεωμετρικά τις περιοχές ανάμεσα από τα σύνορα, που ουσιαστικά αποτελούν τα όποια διάφορα άλλα σώματα που παρεμβάλλονται.

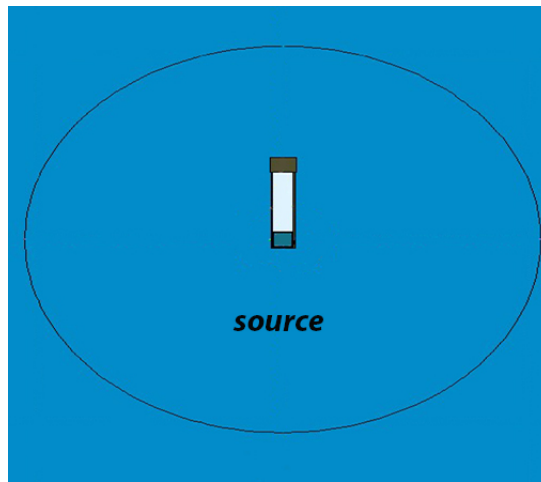
 REGION	kapaki	Neigh: 5	Volume:
	expr: +kapaki		
 REGION	kelufos	Neigh: 5	Volume:
	expr: +kelufos -kelufosm		
 REGION	eswtteriko alumn	Neigh: 5	Volume:
	expr: +kelufosm -alumn -alumnesw -cristalo		
 REGION	alumn	Neigh: 5	Volume:
	expr: +alumn -alumnesw		
 REGION	Al2O3	Neigh: 5	Volume:
	expr: +alumnesw -cristalo		
 REGION	NaI	Neigh: 5	Volume:
	expr: +cristalo		
 REGION	water	Neigh: 5	Volume:
	expr: +cosmos -source -kapaki -kelufos -kelufosm -alumn -alumnesw -cristalo		
 REGION	source	Neigh: 5	Volume:
	expr: +source -kapaki -kelufos -kelufosm -alumn -alumnesw -cristalo		
 REGION	blackhol	Neigh: 5	Volume:
	expr: +blackhol -cosmos		

Σχήμα 1.3.4: Κάρτες για τον ορισμό των περιοχών ανάμεσα από τα σώματα

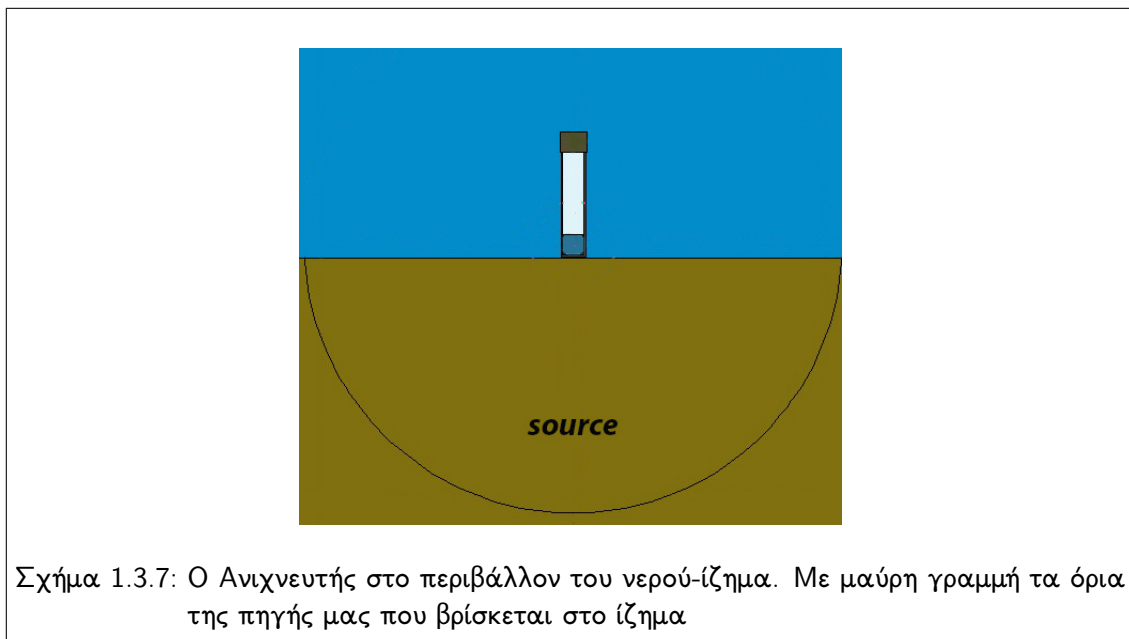
Έτσι, θέτοντας τις κάρτες αυτές, είναι δυνατή η απεικόνιση ολόκληρης της γεωμετρίας. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται μια τομή του ανιχνευτή και το περιβάλλον που βρίσκεται στην περίπτωση του νερού και στην περίπτωση του ιζήματος. Η μαύρη γραμμή δείχνει τα όρια της πηγής.



Σχήμα 1.3.5: Γεωμετρία Ανιχνευτή



Σχήμα 1.3.6: Ο Ανιχνευτής στο περιβάλλον του νερού. Με μαύρη γραμμή τα όρια της πηγής



1.3.2 Υλικά

Το FLAIR έχει από μόνο του μια μεγάλη ποικιλία από υλικά που μπορούν να χρειαστούν για διάφορες εφαρμογές. Ωστόσο, μπορεί να υπάρξουν μερικά που δε τα διαθέτει και να πρέπει να τα ορίσει ο χρήστης. Για να οριστεί ένα υλικό, χρειάζονται 2 κάρτες. Η κάρτα MATERIAL, όπου ορίζονται το όνομα του υλικού και η πυκνότητά του και η κάρτα COMPOUND, όπου προσδιορίζουμε τη σύνθεση του υλικού. Τέλος, για να αντιστοιχηθεί το κάθε υλικό με την κάθε περιοχή της γεωμετρίας μας, χρησιμοποιείται η κάρτα ASSIGNMA. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω υλικά:

- **νερό (water, H₂O)**, αποτελεί την πηγή και βρίσκεται γύρω από τον ανιχνευτή. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, στην κάρτα MATERIAL ορίζεται το όνομα του υλικού (Name:WATER) και η πυκνότητά του (ρ :1.026). Στην κάρτα COMPOUND με την επιλογή (NAME:WATER) ορίζεται για ποιο υλικό θα είναι η σύνθεση που θα δημιουργηθεί και επιλέχθηκε η αναλογία των στοιχείων να είναι ανάλογη με τη μάζα(Mix:Mass). Η σύνθεση είναι 0.111 HYDROGEN και 0.889 OXYGEN. Τέλος, με τις κάρτες ASSIGNMA επιλέγεται ποια περιοχή της γεωμετρίας επιθυμεί ο χρήστης να αποτελεί το συγκεκριμένο υλικό. Όπου με την εντολή (Mat:WATER) επιλέγεται το υλικό με την ονομασία WATER και με την εντολή (Reg:water, Reg:water2) επιλέγεται η περιοχή.
- **αέρας (air)**, βρίσκεται στο εσωτερικό του ανιχνευτή και η σύνθεσή του είναι: 0.000125 CARBON, 0.755267 NITROGEN, 0.231781 OXYGEN, 0.012827 ARGON και με πυκνότητα 0.00120479
- **ιωδιούχο νάτριο (sodium iodide, NaI)**, αποτελεί τον κρύσταλλο και η σύνθεσή

του είναι: 0.8467 IODINE, 0.1533 SODIUM και με πυκνότητα 3.667

- **ακετάλη (acetal)**, αποτελεί το κέλυφος του ανιχνευτή και η σύνθεσή του είναι: 0.1905 OXYGEN, 0.381 HYDROGEN, 0.4285 CARBON και με πυκνότητα 0.825
- **αλουμίνιο (aluminium)**, είναι το παράθυρο και βρίσκεται γύρω από τον κρύσταλλο με πυκνότητα 2.94
- **οξείδιο του αργιλίου (aluminium oxide, Al_2O_3)**, είναι ο ανακλαστήρας του ανιχνευτή και η σύνθεσή του είναι: 0.470749 OXYGEN, 0.529251 ALUMINUM και με πυκνότητα 0.55
- **κενό (blackhole)**, βρίσκεται γύρω από τη σφαίρα του νερού
- **ίζημα (sediment)**, βρίσκεται σε επαφή με τον ανιχνευτή που βρίσκεται μέσα στο νερό και η σύνθεσή του είναι: 0.2 AIR, 0.45 SiO₂, 0.25 CaO, 0.1 Al₂O₃ και με πυκνότητα 1.62

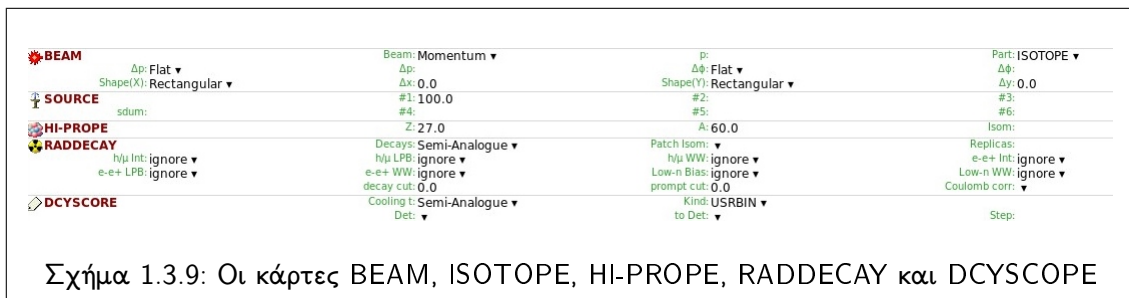
Water	
MATERIAL	Name: WATER # ρ: 1.026
	Am: WATER A: dEdx: ▼
COMPOUND	Name: WATER Mix: Mass Elements: 1..3 ▼
	f1: 0.111 M1: HYDROGEN f2: 0.889 M2: OXYGEN ▼
	f3: MS: ▼
ASSIGNMA	Mat: WATER Reg: water2 ▼ to Reg: ▼
	Mat(Decay): ▼ Step: Field: ▼
ASSIGNMA	Mat: WATER Reg: water ▼ to Reg: ▼
	Mat(Decay): ▼ Step: Field: ▼

Σχήμα 1.3.8: Κάρτες για τον ορισμό του νερού

1.3.3 Πηγή

Ένα σημαντικό στοιχείο του FLUKA είναι, πως μπορεί να του θέσει ο χρήστης για πηγή ένα ραδιενεργό ισότοπο και από βιβλιοθήκες δεδομένων να γνωρίζει τις διασπάσεις του. Έτσι στο συγκεκριμένο παράδειγμα που χρησιμοποιήθηκε ⁶⁰Co (κοβάλτιο) χρειάστηκαν οι εξής κάρτες.

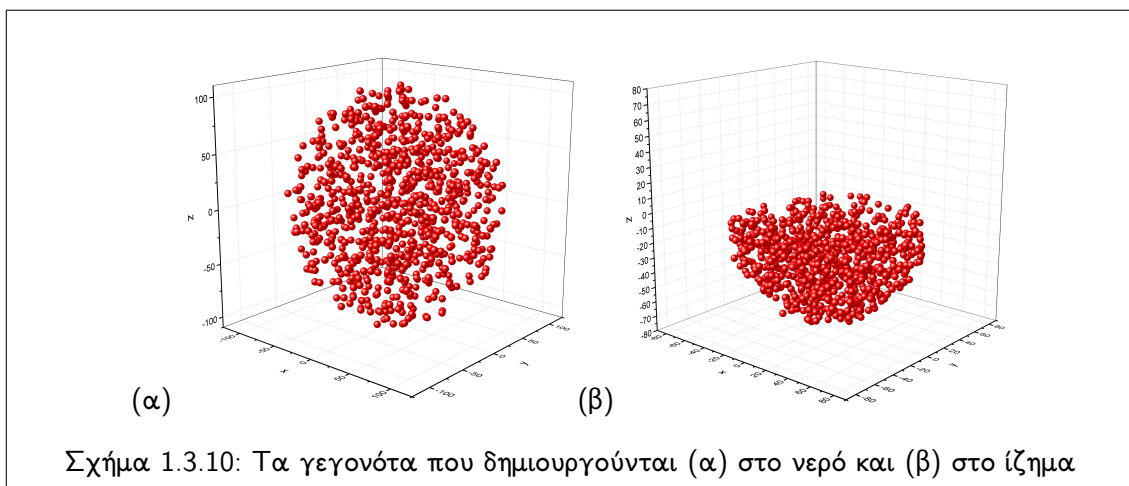
Αρχικά στην κάρτα BEAM επειδή χρησιμοποιήθηκε ισότοπο στην επιλογή part επιλέχθηκε το ISOTOPE και μετά με την κάρτα HI-PROPE εισάγεται το ισότοπο που χρησιμοποιείται γράφοντας τον ατομικό αριθμό(Z) και τον μαζικό αριθμό(A). Για να ενεργοποιηθεί αυτή η επιλογή, όμως, χρειάζονται κάποιες πρόσθετες κάρτες. Έτσι, για να ενεργοποιηθεί η προσομοίωση των ραδιενεργών διασπάσεων, προστέθηκε η κάρτα RADDECAY και θέτοντας τη λειτουργία σε Semi-Analogue, τα αποτελέσματα είναι εκφρασμένα ανά διάσπαση πυρήνα και το πρόγραμμα μπορεί και παρακολουθεί περισσότερα από ένα φωτόνια ταυτόχρονα. Επίσης για να ενεργοποιηθεί η επιλογή της αποτύπωσης των αποτελεσμάτων στο τέλος, προστέθηκε η κάρτα DCYSCORE σε λειτουργία Semi-Analogue που σημειώνει τα σωματίδια που προέρχονται από ραδιενεργές διασπάσεις.[7]



Σχήμα 1.3.9: Οι κάρτες BEAM, ISOTOPE, HI-PROPE, RADDECAY και DCYSCOPE

Έχοντας θέσει παραπάνω την πηγή, μένει να ορισθεί η γεωμετρία της πηγής αυτής. Το FLUKA προσφέρει κάποιες έτοιμες γεωμετρίες, όπως π.χ. σφαιρική, σημειακή γεωμετρία, αλλά όταν η γεωμετρία που χρειάζεται είναι πιο πολύπλοκη από αυτές που προσφέρει το FLUKA, υπάρχει η δυνατότητα να επέμβει ο χρήστης στην ρουτίνα που ορίζει την γεωμετρία της πηγής και να δημιουργήσει εύκολα οποιαδήποτε γεωμετρία επιθυμεί. Η ρουτίνα αυτή συνδέεται με το αρχείο εισόδου με την κάρτα SOURCE. Συγκεκριμένα εδώ, στο πρώτο παράδειγμα χρειάστηκε μια κυκλική σφαίρα νερού γύρω από τον ανιχνευτή χωρίς να περιλαμβάνει τον ανιχνευτή και στο δεύτερο παράδειγμα, ένα ημισφαίριο ιζήματος κάτω από τον ανιχνευτή και ένα ημισφαίριο νερού γύρω από τον ανιχνευτή και σε επαφή με το ημισφαίριο του ιζήματος, όπως φαίνεται στις εικόνες 1.3.6 και 1.3.7. Έτσι, στη ρουτίνα που ορίζονται τα στοιχεία της πηγής, γράφοντας τις συνθήκες γεωμετρίας που αναφέρθηκαν παραπάνω, το πρόγραμμα δημιουργεί γεγονότα, μέσα στα όρια που του τέθηκαν, με τυχαία επιλογή και για να μη χρειάζεται κάθε φορά που χρειάζεται να αλλάξει η ακτίνα της σφαίρας ο χρήστης να αλλάξει τα δεδομένα στη ρουτίνα, επιλέχθηκε να εισάγεται στην κάρτα SOURCE, όπου ο κώδικας διαβάζει την ακτίνα από την κάρτα αυτή. Οι ρουτίνες που χρησιμοποιήθηκαν βρίσκονται στο παράρτημα.

Η επιλογή της ακτίνας της σφαίρας και στις 2 περιπτώσεις, εξηγείται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 2. Για τον έλεγχο των παραπάνω, αποθηκεύοντας τις συντεταγμένες των γεγονότων που δημιουργήθηκαν, δημιουργήθηκε η παρακάτω τρισδιάστατη απεικόνιση:



Σχήμα 1.3.10: Τα γεγονότα που δημιουργούνται (α) στο νερό και (β) στο ίζημα

Και βάζοντας στους άξονες των παραπάνω γραφικών παραστάσεων, για όρια τα γεωμετρικά όρια του χώρου που καλύπτει ο όγκος του ανιχνευτή, παρατηρήθηκε πως δεν γεννιούνται γεγονότα στον χώρο αυτό.

1.3.4 Επιλογή μοντέλων φυσικής

Η κάρτα DEFAULTS έχει κάποιες έτοιμες επιλογές για το τι σωματίδια επιθυμεί ο χρήστης να παρακολουθεί το πρόγραμμα. Για τη μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ενεργοποιούμε την επιλογή EM-CASCA, και μέσω αυτής συνυπολογίζονται οι παρακάτω διεργασίες :

1. **Σκέδαση Compton:** μέρος της αρχικής ενέργειας της ακτίνας-γ μεταφέρεται σε ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο του μέσου. Το ηλεκτρόνιο απορροφά μέρος της ενέργειας της ακτίνας-γ και το φωτόνιο σκεδάζεται κατά γωνία θ .
2. **Σκέδαση Rayleigh:** η ελαστική σκέδαση της ακτίνας-γ από σωματίδια πολύ μικρότερα από το μήκος κύματος της ακτίνας-γ. Είναι αποτέλεσμα της ηλεκτρικής πολικότητας των σωματιδίων.
3. **Σκέδαση Moller και Bhabha:** η σκέδαση ηλεκτρονίου - ηλεκτρονίου και ηλεκτρονίου - ποζιτρονίου αντίστοιχα, στην κβαντική ηλεκτροδυναμική.
4. **Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο:** η ακτίνα-γ αλληλεπιδρά με ένα δεσμευμένο ατομικό ηλεκτρόνιο και εξαφανίζεται. Τη θέση της παίρνει ένα ενεργητικό φωτοηλεκτρόνιο, το οποίο διαφεύγει από το άτομο.
5. **Φθορισμός Φωτονίων:** όταν ένα ηλεκτρόνιο ενός ατόμου εκπέμπει ένα φωτόνιο, αφού έχει πρώτα διεγερθεί από κάποια ενέργεια
6. **Ακτινοβολία Bremsstrahlung (ακτινοβολία πέδησης):** ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία λόγω της επιβράδυνσης ενός φορτισμένου σωματιδίου, συνήθως ηλεκτρόνιο, από έναν ατομικό πυρήνα.
7. **Δίδυμη Γένεση:** η ακτίνα-γ εξαφανίζεται και τη θέση της παίρνει ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Η περίσσεια ενέργειας πάνω από τα 1.02 MeV που απαιτείται για τη δημιουργία του ζεύγους, μοιράζεται σε κινητική ενέργεια μεταξύ του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου. Το ποζιτρόνιο, μετά την επιβράδυνσή του στο μέσο, εξαυλώνεται παράγοντας δύο φωτόνια, ενέργειας 0.511 MeV το καθένα, ως δευτερεύοντα προϊόντα της αλληλεπίδρασης.
8. **Απορρόφηση φωτονίου από πυρήνα**
9. **Πολλαπλή Σκέδαση**

DEFAULTS

EM-CASCA

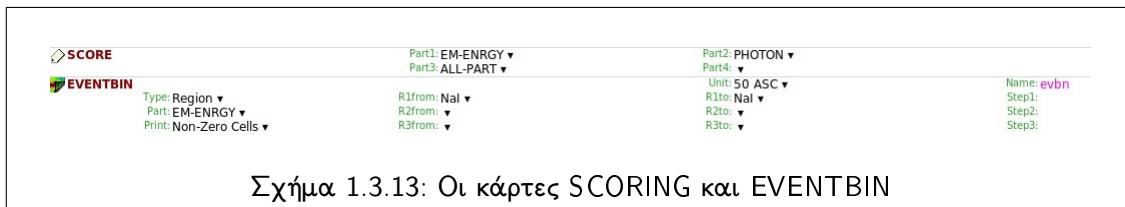
Σχήμα 1.3.11: Η κάρτα DEFAULTS

Επίσης προστέθηκε η κάρτα DELTARAY για να ενεργοποιηθεί η παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων από ηλεκτρόνια και ορίζεται το κατώφλι στο 1KeV. Με την κάρτα EMFCUT ορίζεται το κατώφλι στο 1 KeV για τα φαινόμενα: σκέδαση Reyleigh, σκέδαση Compton, φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, απορρόφηση φωτονίου από πυρήνα, Bremsstrahlung, δίδυμη γέννηση, Bhabha και Moller σκέδαση. Και τέλος, προστέθηκε και η κάρτα για το κατώφλι παραγωγής φωτονίων και ηλεκτρονίων, PROD-CUT, όπου είναι επιλογή της κάρτας EMFCUT. Μ' αυτήν την επιλογή, ορίζεται η κατώτερη ενέργεια (1 KeV) όπου θα παρακολουθεί ο κώδικας τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια.



Σχήμα 1.3.12: Οι κάρτες DELTARAY και EMFCUT

Στο τέλος, προστίθενται οι κάρτες που καθιστούν δυνατή την καταγραφή και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Έτσι με την κάρτα SCORING ενεργοποιείται η διαδικασία εναπόθεσης ενέργειας σε κάθε περιοχή ενδιαφέροντος και με την κάρτα EVENTBIN ορίζεται η περιοχή που ενδιαφέρει τον χρήστη, να εναποτίθεται η ενέργεια, δηλαδή ο κρύσταλλος NaI. Έπειτα, το FLUKA αποθηκεύει σε ένα αρχείο τις ενέργειες αυτές για κάθε γεγονός ξεχωριστά στη συγκεκριμένη περιοχή.[7]



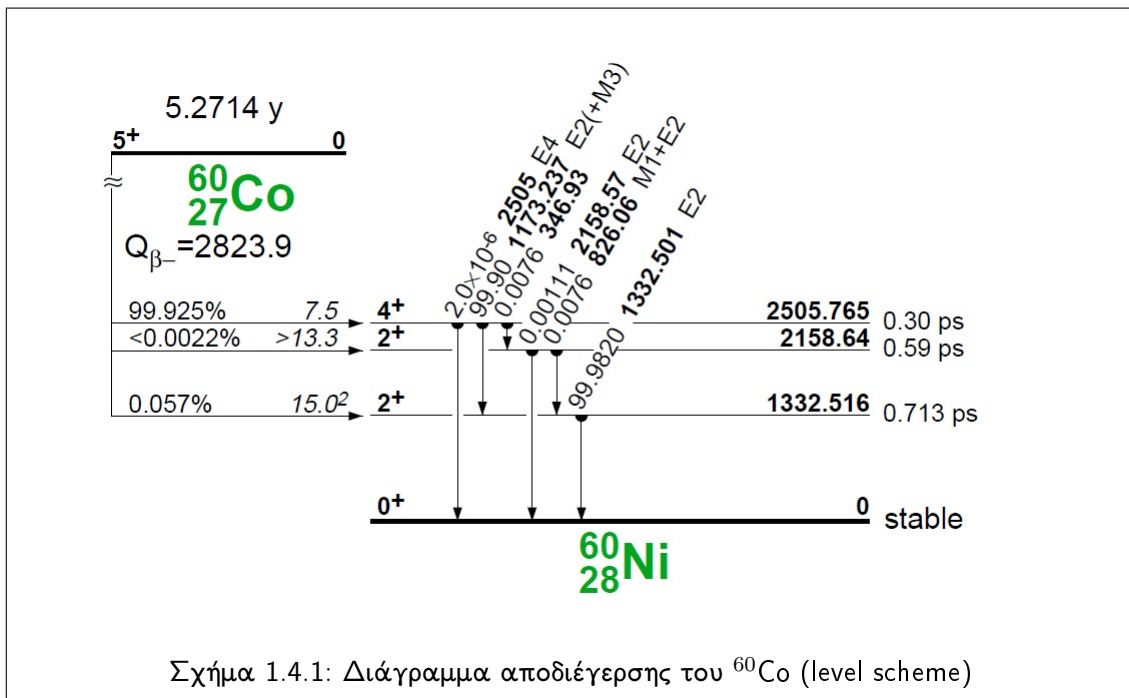
Σχήμα 1.3.13: Οι κάρτες SCORING και EVENTBIN

Σ' αυτό το σημείο, πρέπει να αναφερθεί πως για τη δημιουργία κατάλληλης μορφής αρχείου εξόδου, δίχως περιορισμό στον αριθμό των ενεργειακών διαμερίσεων, χρησιμοποιήθηκε η κάρτα EVENTBIN καθώς αποθηκεύει την ενέργεια κάθε γεγονός ξεχωριστά. Όμως, εκτυπώνει τις ενέργειες αυτές με όχι τόσο εύχρηστο τρόπο, καθώς το αρχείο που δημιουργεί εκτός από τις ενέργειες ανά γεγονός εκτυπώνει και άλλα στοιχεία, όπως χρόνος κτλ. και γι' αυτόν τον λόγο ο χρήστης χρησιμοποιεί ένα μικρό πρόγραμμα, που ξεχωρίζει από το αρχείο τις τιμές των ενεργειών κάθε γεγονός και από τα στοιχεία αυτά είναι δυνατή η απεικόνιση του επιθυμητού φάσματος. Υπάρχει η κάρτα DETECT, η οποία δημιουργεί κατευθείαν φάσμα για τη συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος, αλλά μας περιορίζει σημαντικά καθώς, οι ενεργειακές διαμερίσεις του φάσματος είναι 1024

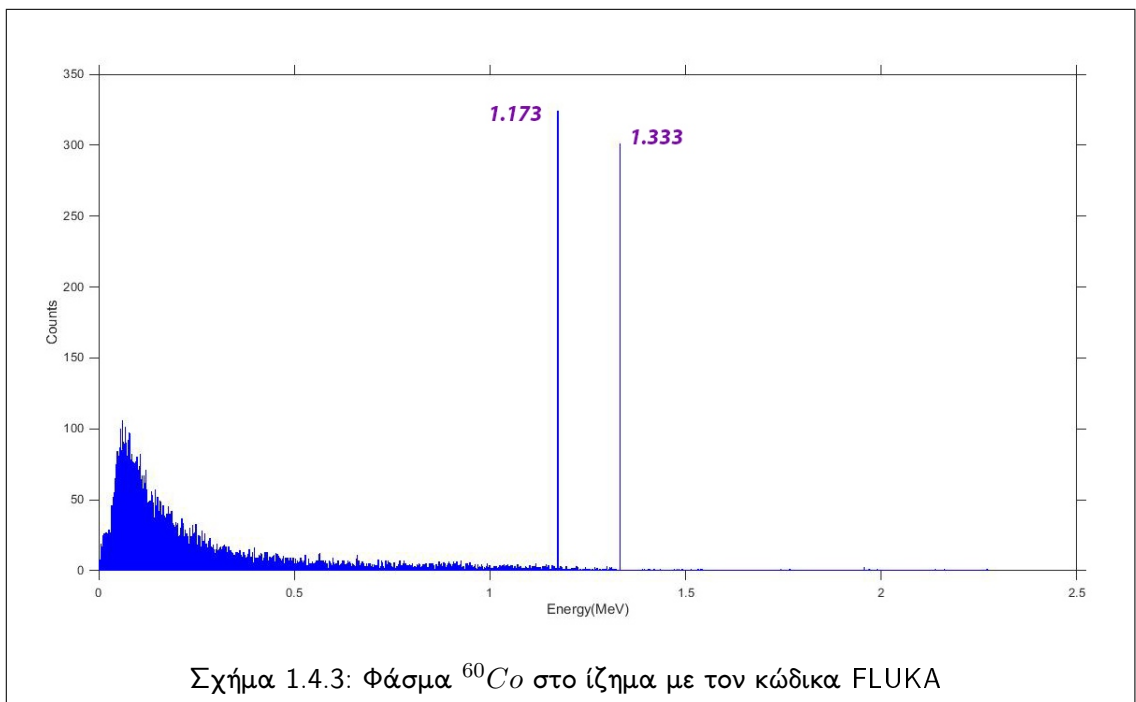
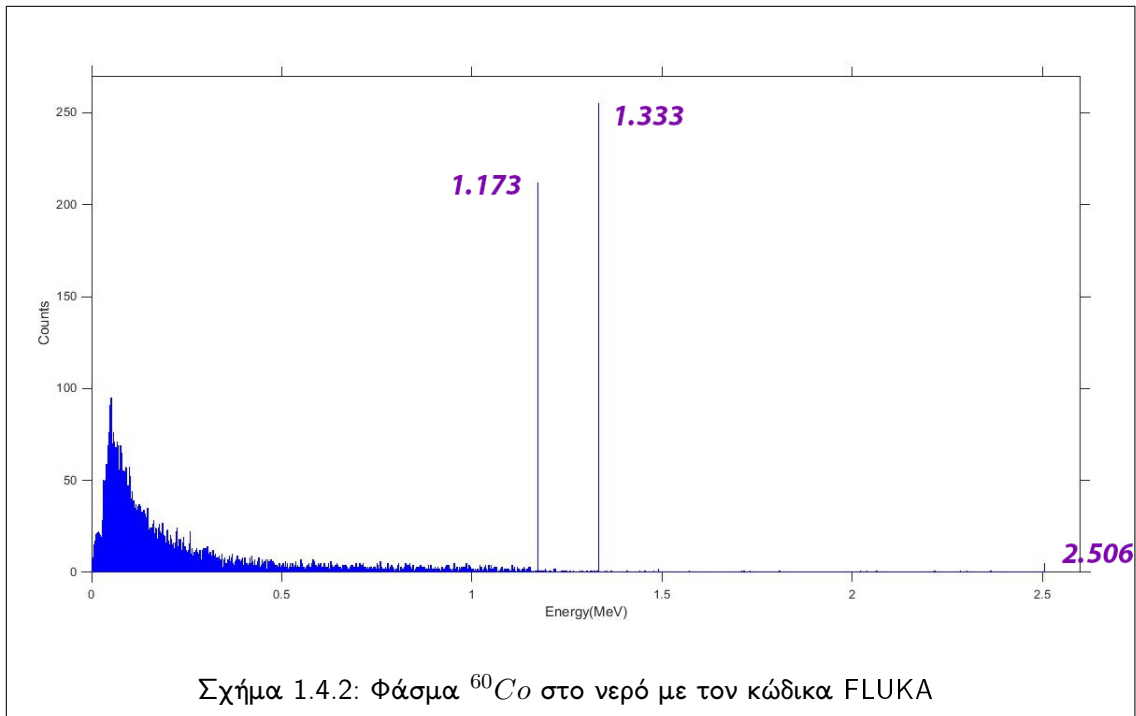
και δε μεταβάλλονται. Οπότε επιλέχθηκε η κάρτα EVENTBIN, που αν και χρειάζεται μεγαλύτερη επεξεργασία, ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει φάσμα με όσες ενεργειακές διαμερίσεις επιθυμεί.

1.4 Αποτελέσματα

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα αποτελέσματα πάρθηκαν από ένα αρχείο που δημιουργεί η κάρτα EVENTBIN και μ' ένα κατάλληλο πρόγραμμα, από αυτό το αρχείο, επιλέγεται οποιαδήποτε πληροφορία χρειαστεί. Συγκεκριμένα εδώ, δημιουργείται ένα καινούριο αρχείο με τις μη μηδενικές ενέργειες των γεγονότων που έφτασαν μέχρι τον κρύσταλλο NaI. Έπειτα, με το πρόγραμμα MATLAB, με τις ενέργειες αυτές φτιάχτηκε το φάσμα, επιλέχθηκε το κάθε κανάλι ενέργειας να έχει εύρος 1KeV. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το ισότοπο του ^{60}Co με αρχικά γεγονότα 6,000,000, αν και δε βρίσκεται στο θαλάσσιο περιβάλλον, αλλά έχει απλό διάγραμμα αποδιέγερσης και έτσι είναι ιδανικό για τη δοκιμή του κώδικα FLUKA. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα αποδιέγερσης του ^{60}Co με τις αντίστοιχες πιθανότητες[9].



όπου βλέπουμε το ^{60}Co που κάνει αποδιέγερση β^- και τον θυγατρικό του ^{60}Ni . Αριστερά φαίνονται οι πιθανοί κλάδοι αποδιέγερσης και δίπλα η πιθανότητα αποδιέγερσης για κάθε φωτόνιο με την αντίστοιχη ενέργεια. Τέλος φαίνεται το φάσμα του ^{60}Co όπως δημιουργήθηκε από το πρόγραμμα MATLAB για το νερό και για το ίζημα αντίστοιχα



Παρατηρούμε και στα δύο φάσματα τις κορυφές για τις ενέργειες 1.173 MeV και 1.332 MeV, καθώς και την κορυφή της πραγματικής σύμπτωσης (sum peak) των δύο ακτίνων-γ με ενέργεια 2.506 MeV. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα γεγονότα που καταγράφηκαν σε κάθε κορυφή:

Ενέργειες(MeV)	Γεγονότα στο νερό	Γεγονότα στο ίζημα
1.173	212	324
1.332	255	301
ολικά γεγονότα	10933	16983

Πίνακας 1.1: Γεγονότα που καταγράφηκαν στο νερό και στο ίζημα για κάθε ενέργεια

Όπως φάνηκε, ο κώδικας FLUKA είναι ικανός να προσομοιώσει παραδείγματα ανίχνευσης ραδιενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον και απομένει η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του, με την σύγκριση τους με αυτά του κώδικα MCNP-CP για το ισότοπο του ^{208}Tl .

2 Μελέτη του γινομένου $\epsilon \cdot V$

Η απόσταση που μπορεί να διανύσει μια δέσμη φωτονίων μέσα στο νερό μέχρι να απορροφηθεί τελείως απ' αυτό, δηλαδή να μειωθεί η ένταση της ακτινοβολίας κατά 1000 φορές από την αρχική, ονομάζεται ενεργός ακτίνα και εξαρτάται από την ενέργεια του φωτονίου και το υλικό του μέσου (ατομικός αριθμός Z , πυκνότητα). Υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$\{I=I_0e^{-\mu x}\} \text{ και } \{I = 0.001 \cdot I_0\} \iff x = \ln(1000)/\mu \quad (2.0.1)$$

όπου:

x : Η διανυθείσα απόσταση στο μέσο μετρημένη σε cm

μ : Ο ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένησης που εκφράζει την συνολική πιθανότητα αλληλεπίδρασης ενός φωτονίου (με οποιαδήποτε από τις τρεις παραπάνω διαδικασίες) με το υλικό του μέσου ανά μονάδα μήκους διαδρομής, μετρημένος σε μονάδες cm^{-1} . Η ποσότητα αυτή ορίζεται ως το άθροισμα των γραμμικών συντελεστών εξασθένησης κάθε επιμέρους διαδικασίας, της φωτοηλεκτρικής απορρόφησης, μ_{photo} , της απορρόφησης λόγω παραγωγής ζεύγους μ_{pair} και της εξασθένησης λόγω σκέδασης Compton μ_{coh} και υπολογίζεται από τις αντίστοιχες ενεργές διατομές για κάθε αλληλεπίδραση. Η ίδια ποσότητα υπολογίζεται και σε μονάδες αντίστροφης επιφανειακής πυκνότητας (cm^2/gr). Στην περίπτωση αυτή ορίζεται ο ολικός μαζικός συντελεστής εξασθένησης και δεν εξαρτάται από την πυκνότητα του υλικού.

Και γνωρίζοντας την ενεργό ακτίνα, μπορεί να υπολογιστεί και ο ενεργός όγκος.[3]

$$V_{eff} = 4\pi x^3/3 \quad (2.0.2)$$

Χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα X-COM δίνεται η δυνατότητα αναπαραγωγής των συνολικών ή μεμονωμένων ενεργών διατομών σε μονάδες barn/atom, των συνολικών μαζικών συντελεστών εξασθένησης σε μονάδες cm^2/gr των επιμέρους συντελεστών που συνεισφέρουν στη συνολική εξασθένηση, που είναι: οι συντελεστές ομοιόμορφης σκέδασης, μ_{coh} , (Rayleigh) και μη ομοιόμορφης σκέδασης, μ_{incoh} , (Compton), ο συντελεστής φωτοηλεκτρικής απορρόφησης μ_{photo} , και οι συντελεστές δίδυμης γέννησης, στο πεδίο του πυρήνα, μ_{pair-n} , και στο πεδίο των ηλεκτρονίων, $\mu_{pair-e-}$, του ατόμου. Στο πρόγραμμα υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής οποιουδήποτε στοιχείου (π.χ. H), ένωσης (π.χ. H₂O), ή μίγματος (π.χ. SiO₂ 45%, H₂O 55 %) και ενέργειες ακτίνων-γ από 1keV έως 100 GeV. Το πρόγραμμα X-COM χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του συντελεστή εξασθένησης των ακτίνων-γ του ²⁰⁸Tl στο ίζημα και στο νερό. [10] Παίρνοντας το αποτέλεσμα από το X-COM, πολλαπλασιάζοντάς το με την πυκνότητα του νερού ή του ιζήματος ανάλογα, βρίσκουμε τον συντελεστή εξασθένησης σε μονάδες cm^{-1} .

Το FLUKA δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής ενός ραδιονουκλιδίου, χωρίς να χρειαστεί να του δοθούν οι αποδιεγέρσεις του, καθώς τις παίρνει από βιβλιοθήκες. Για το ^{208}Tl , που θα χρησιμοποιηθεί αργότερα, οι δύο βασικές ενέργειες αποδιέγερσης, 2.614 MeV με πιθανότητα 99% και 0.583 MeV με πιθανότητα 84.5%, έχουν διαφορετικές ενεργές ακτίνες, δηλαδή για την 2.614 MeV η ενεργός ακτίνα είναι 157.6 cm και για την 0.583 MeV η ενεργός ακτίνα είναι 74.3 cm. Οπότε πρέπει να μελετηθεί κατά πόσο αλλάζει η ανιχνευτική απόδοση του συστήματος για την ενέργεια 0.583 MeV αν αυξηθεί η ενεργός ακτίνα του πάνω από 74.3 cm. Παίρνοντας για ακτίνα ένα φάσμα τιμών, μελετήθηκε κατά πόσο το γινόμενο ϵV παραμένει σταθερό μέχρι την τιμή της ενεργού ακτίνας που αντιστοιχεί για την μεγαλύτερη ενέργεια, 2.614 MeV. Η ανιχνευτική απόδοση του συστήματος για μετρήσεις στο νερό, υπολογίζεται ως η απόδοση φωτοκορυφής (ϵ) πολλαπλασιασμένη με τον συνολικό ενεργό όγκο του νερού ($1/m^3$). Έτσι τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων στο νερό εκφράζονται σε Bq/m^3 . Για να ελεγχθεί αν η ανιχνευτική απόδοση του συστήματος αλλάζει, πρέπει ο αριθμός των αρχικών γεγονότων ως προς τον όγκο του νερού, να παραμένει σταθερός όσο αυξάνεται η ενεργός ακτίνα. Κι αυτό, γιατί πρέπει να ελεγχθεί η ανιχνευτική απόδοση σε σχέση με τον όγκο του νερού και ανεξάρτητα από τα αρχικά γεγονότα.

r(cm)	V(cm ³)	N _{εκ}	ε	error	εV(cm ³)	σφάλμα
20	31630	47266	5.88x10 ⁻³	0.0599	0.186	0.011
30	110446	165669	2.23x10 ⁻³	0.0521	0.246	0.013
40	264629	396944	9.37x10 ⁻⁴	0.0518	0.248	0.013
50	519701	779552	4.80x10 ⁻⁴	0.0517	0.249	0.013
60	900881	1351322	2.83x10 ⁻⁴	0.0511	0.255	0.013
70	1432860	2149290	1.80x10 ⁻⁴	0.0508	0.258	0.013
80	2140760	3211140	1.23x10 ⁻⁴	0.0504	0.263	0.013
90	3049730	4574595	8.74x10 ⁻⁵	0.0500	0.267	0.013
100	4184890	6277335	6.53x10 ⁻⁵	0.494	0.273	0.013
110	5571380	8357070	5.10x10 ⁻⁵	0.0485	0.284	0.014
120	7234330	10851495	3.66x10 ⁻⁵	0.502	0.265	0.013
130	9198870	13798305	2.99x10 ⁻⁵	0.0492	0.275	0.014
140	11490100	17235150	2.48x10 ⁻⁵	0.0484	0.285	0.014
150	14133300	21199950	1.92x10 ⁻⁵	0.0495	0.272	0.013
160	17153400	25730100	1.57x10 ⁻⁵	0.0498	0.269	0.014
170	20575600	30863400	1.33x10 ⁻⁵	0.0494	0.273	0.013
180	24425100	36637650	1.17x10 ⁻⁵	0.0484	0.285	0.014
190	28727000	43090500	9.84x10 ⁻⁶	0.0486	0.283	0.014
200	33506400	50259600	8.28x10 ⁻⁶	0.0490	0.277	0.014

Πίνακας 2.1: Αποτελέσματα για την ενέργεια 583.191 keV

Όπου η απόδοση ισούται με

$$\varepsilon = \sqrt{N_{\alpha\nu}}/N_{\alpha\nu} \quad (2.0.3)$$

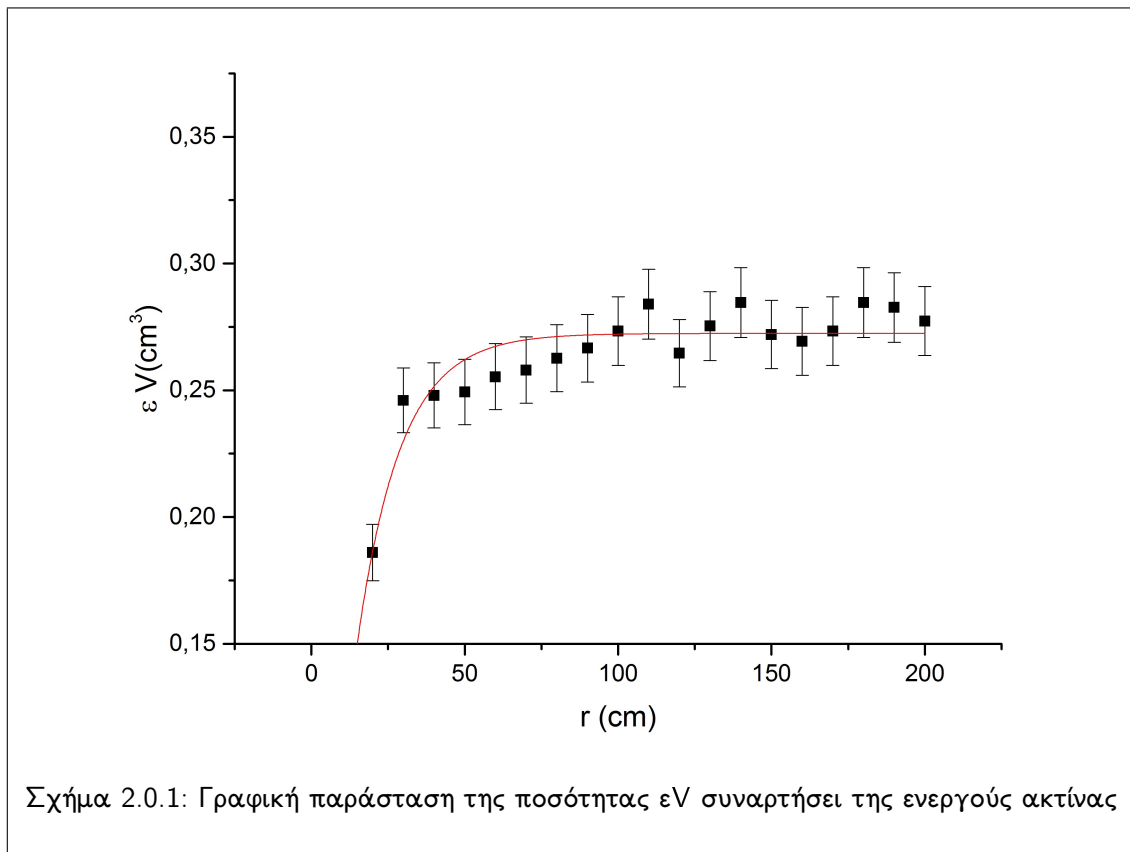
και για το σφάλμα της απόδοσης, λόγω του ότι το FLUKA δεν υπολογίζει τα σφάλματα, χρησιμοποιήθηκε ο τύπος :

$$error = \frac{\sqrt{N_{\alpha\nu}}}{N_{\alpha\nu}} \quad (2.0.4)$$

όπου $N_{\alpha\nu}$ είναι τα γεγονότα που ανιχνεύθηκαν στη συγκεκριμένη ενέργεια. Η ποσότητα εV είναι εκφρασμένη ανά λίτρο νερού δηλαδή διαιρέθηκε με 1000 και από τη διάδοση σφαλμάτων υπολογίστηκε το σφάλμα της ποσότητας εV :

$$\sigma_{\varepsilon V} = \varepsilon \cdot V \cdot error/1000 \quad (2.0.5)$$

όπου κι αυτό διαιρέθηκε με 1000 για να βρεθεί το σφάλμα ανά λίτρο νερού. Από τα παραπάνω αποτελέσματα και με τη βοήθεια του προγράμματος ORIGIN, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα:



Για τη συνάρτηση προσαρμογής, χρησιμοποιήθηκε ο τύπος

$$y = y_0 + A_1(1 - e^{(-x/t_1)}) \quad (2.0.6)$$

και για τις μεταβλητές ισχύουν οι τιμές:

$$y_0 = -0.079 \pm 0.029, A_1 = 0.352 \pm 0.028, t_1 = 14 \pm 1.$$

Απ' αυτό το διάγραμμα διαπιστώνεται πως για την ενέργεια 0.583 MeV όταν η ακτίνα είναι ίση με την ενεργό ακτίνα της ενέργειας 2.613 MeV, δηλαδή ισούται με 157.6 cm, το γινόμενο απόδοσης και όγκου παραμένει σταθερό. Άρα αυτό σημαίνει πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενεργός ακτίνα, αυτή της μεγαλύτερης ενέργειας, δηλαδή στο ^{208}Tl , η ενεργός ακτίνα της ενέργειας 2.613 MeV.

3 Σύγκριση κωδίκων FLUKA - MCNP-CP

3.1 Οι κώδικες FLUKA και MCNP-CP

Στο κεφάλαιο αυτό, θα συγκριθούν τα αποτελέσματα του κώδικα FLUKA με αυτά του κώδικα MCNP-CP, όπου είναι μια επέκταση του κώδικα MCNP5, για το παράδειγμα του κεφαλαίου 1, με τη μόνη διαφορά πως εδώ χρησιμοποιήθηκε το ισότοπο του ^{208}Tl σε αντίθεση με το κεφάλαιο 1 που χρησιμοποιήθηκε το ισότοπο του ^{60}Co .

3.1.1 MCNP5 και MCNP-CP

Ο κώδικας MCNP5 μεταφοράς νετρονίων και φωτονίων χρησιμοποιείται για τη διάδοση-μεταφορά νετρονίων, ηλεκτρονίων, φωτονίων ή τη μεταφορά συνδυασμένων φωτονίων/νετρονίων /ηλεκτρονίων. Ο κώδικας παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της μεταφοράς σωματιδίων με ενέργειες από 1 keV μέχρι 100 MeV σε υλικά των οποίων οι παράμετροι όπως επιφάνεια, γεωμετρική έκταση, πυκνότητα και θέση καθορίζονται από τον χρήστη. Ο χρήστης καθορίζει επίσης τα γεωμετρικά στοιχεία του προβλήματος, καθώς και τα δεδομένα της πηγής όπως ενέργεια, χρόνος, έκταση, στοιχείο εκκίνησης (cell), είδος ακτινοβολίας. Ο κώδικας χρησιμοποιεί έτοιμες συναρτήσεις όπως είναι οι εικονικοί ανιχνευτές ύψους παλμών (F8 tally), μετρητές μήκους διαδρομής F6, F4 τους οποίους χρησιμοποιεί για να υπολογίσει την ποσότητα που ζητήθηκε από τον χρήστη πχ. ρεύμα σε μια επιφάνεια, ροή σωματιδίων αποτιθέμενη ενέργεια, επαγόμενη θερμότητα σε μια περιοχή και άλλα. Το αποτέλεσμα του MCNP5 συνοδεύεται από μια ποσότητα σ που αποτελεί το σχετικό σφάλμα της μέτρησης, $\delta\xi/\xi$, αφού το αποτέλεσμα υποβληθεί σε δέκα στατιστικούς ελέγχους. Το αποτέλεσμα του κώδικα θεωρείται αποδεκτό εάν η τιμή του σ δεν είναι μεγαλύτερη από 0.05 για σημειακό ανιχνευτή και 0.1 για μη σημειακό ανιχνευτή. Η μείωση της ποσότητας σ επιτυγχάνεται με την αύξηση των γεγονότων N που δημιουργούνται και παρακολουθούνται στον κώδικα. Σημαντικό μειονέκτημα του κώδικα είναι ότι μπορεί και παρακολουθεί μια ακτίνα κάθε φορά, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να υπολογίσει το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης. [4]

Για τον λόγο αυτό, υπάρχει ο κώδικας MCNP-CP, που είναι μια επέκταση του MCNP5 και μπορεί να υπολογίζει το φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης, παρακολουθώντας πάνω από μία ακτίνα- γ . Επίσης λαμβάνει υπόψη τη γωνιακή συσχέτιση δύο ακτίνων- γ , όπου όταν από έναν πυρήνα εκπέμπονται διαδοχικά δύο ακτίνες- γ , το σπιν του πυρήνα επηρεάζει τη γωνιακή κατανομή των φωτονίων που εκπέμπονται. Πραγματοποιεί στατιστική προσομοίωση των διεργασιών που συνοδεύουν τις ραδιενεργές διασπάσεις ενός συγκεκριμένου ραδιονουκλιδίου, δίνοντας χαρακτηριστικά των εκπεμπόμενων σωματιδίων, τα

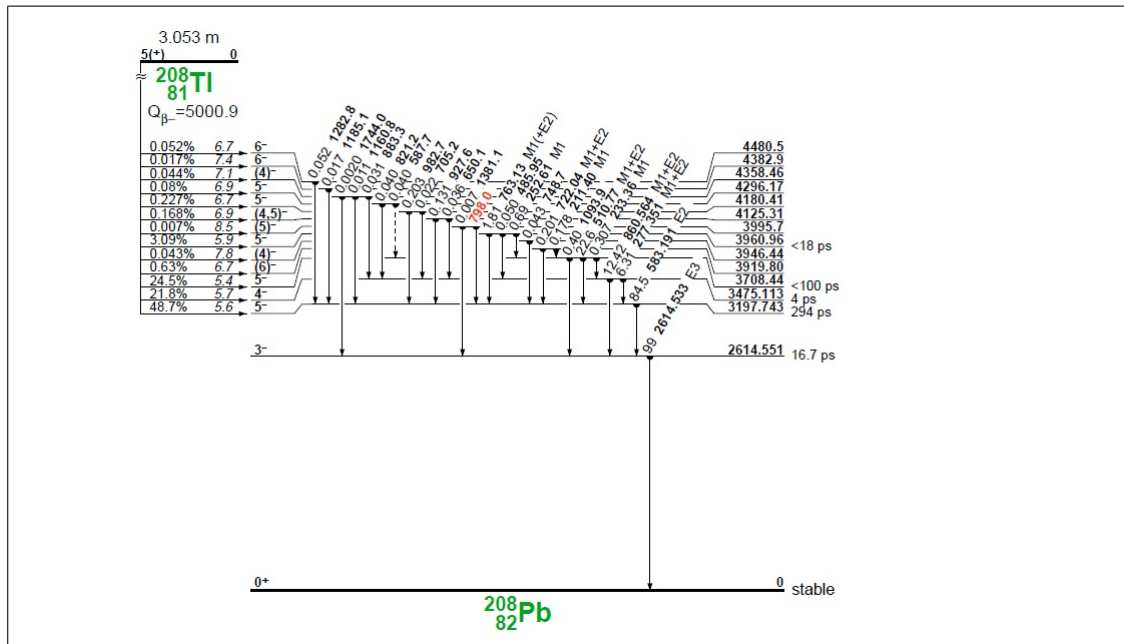
οποία και παρακολουθεί στη γεωμετρία που του έχει δοθεί και τα συμπεριλαμβάνει στο ίδιο γεγονός. Τα στοιχεία για την αποδιέγερση των ραδιονουκλιδίων τα παίρνει από τη βιβλιοθήκη ENSDF.[5] Έτσι στην εργασία αυτή, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας MCNP-CP για να αξιολογήσει τα αποτελέσματα από τον κώδικα FLUKA.

3.1.2 Επιλογή των συγκεκριμένων κωδίκων

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, επιλέχτηκε ο κώδικας FLUKA καθώς μπορεί να υπολογίζει το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης (true coincidence summing), που εμφανίζεται σε εφαρμογές στο θαλάσσιο περιβάλλον λόγω της άμεσης επαφής του ανιχνευτή με την πηγή. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να κατασκευαστούν δύσκολα γεωμετρικά προβλήματα κι αυτό γιατί ο χρήστης μπορεί να επεμβαίνει στην ρουτίνα του προγράμματος και να ορίζει με κατάλληλες συναρτήσεις τη γεωμετρία που επιθυμεί. Όπως και το FLUKA έτσι και το MCNP-CP μπορεί να υπολογίζει το φαινόμενο πραγματικής σύμπτωσης και επίσης είναι το πιο διαδεδομένο για τέτοιου είδους προβλήματα. Και τα δύο, είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα, καθώς είναι φιλικά, ως προς τον χρήστη, προγράμματα βασίζονται στη γλώσσα προγραμματισμού fortran και αφορούν γενικές εφαρμογές, δηλαδή καλύπτουν ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών και δεν ειδικεύονται μόνο σε μια περιοχή (π.χ. ιατρικές εφαρμογές).

3.2 Η περίπτωση ^{208}Tl

Η επιλογή του ραδιονουκλιδίου ^{208}Tl , έγινε λόγω του διαγράμματος των ενεργειακών σταθμών του (level scheme) που φαίνεται παρακάτω[9], καθώς δεν είναι πολύ περίπλοκο. Επίσης το ^{208}Tl είναι ένα φυσικό στοιχείο που συναντάται στο θαλάσσιο περιβάλλον.



Σχήμα 3.2.1: Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών (level scheme) του ^{208}Tl

Όπου βλέπουμε το ^{208}Tl που κάνει αποδιέγερση β-και τον θυγατρικό του ^{208}Pb . Αριστερά φαίνονται οι πιθανοί κλάδοι αποδιέγερσης και δίπλα η πιθανότητα αποδιέγερσης για κάθε φωτόνιο με την αντίστοιχη ενέργεια. Για παράδειγμα, για τον τελευταίο κλάδο αποδιέγερσης αριστερά, διακρίνεται με πιθανότητα 84.5% η αποδιέγερση του φωτονίου με ενέργεια 583.191 KeV στην κατάσταση με ενέργεια 2614.551 KeV και χρόνο ημιζωής 16.7 ps. Έπειτα, αποδιεγείρεται στη βασική κατάσταση εκπέμποντας φωτόνιο ενέργειας 2614.533 KeV με πιθανότητα 99%.

3.3 Τεχνική εξασφάλισης της ομοιότητας των δεδομένων εισαγωγής στους δύο κώδικες.

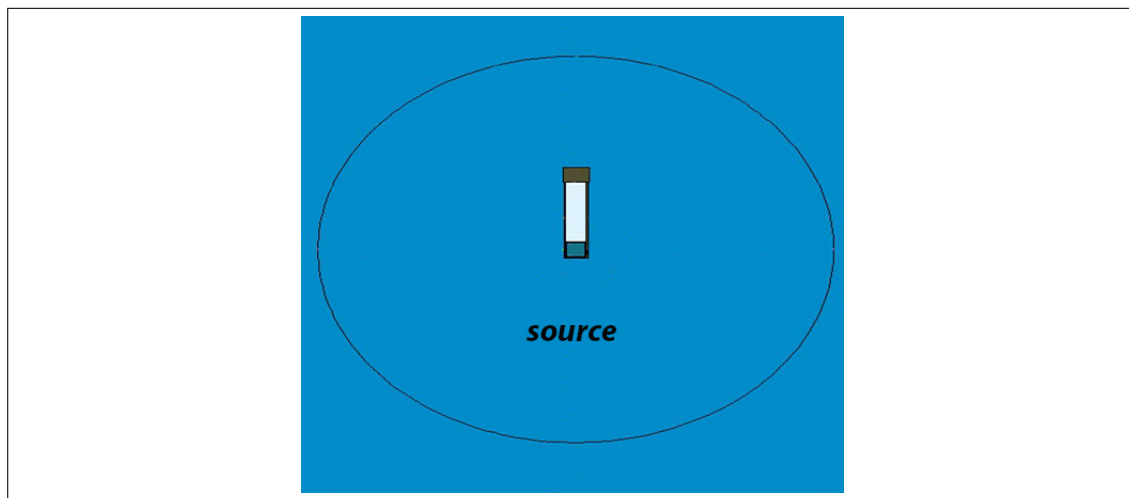
Για να είναι η σύγκριση αξιόπιστη, πρέπει τα δεδομένα που εισάγουμε και στους δύο κώδικες να είναι ίδια. Δηλαδή, θα πρέπει να έχουν ακριβώς την ίδια γεωμετρία και ακριβώς τα ίδια δεδομένα για τη φυσική που θα χρησιμοποιήσουν. Έτσι για αυτές τις ενότητες, έχουμε τα παρακάτω.

3.3.1 Γεωμετρία

Μέσω του FLAIR, υπάρχει η δυνατότητα να εισάγουμε στο (ή και να εξάγουμε από το) FLUKA τη γεωμετρία ενός συγκεκριμένου προβλήματος από κάποια άλλα συγκεκριμένα

προγράμματα που μέσα σε αυτά είναι και το MCNP. Έτσι φτιάχνοντας τη γεωμετρία του προβλήματος στο MCNP την εισάγαμε στο FLUKA, αλλά επειδή η εφαρμογή αυτή δεν είναι ακόμα ολοκληρωμένη, χρειάστηκαν μερικές διορθώσεις στον ορισμό των υλικών και των περιοχών που ανήκουν. Αυτό συμβαίνει γιατί ο ορισμός των υλικών στο FLUKA γίνεται με διαφορετικό τρόπο από το MCNP και επίσης οι δύο κώδικες ορίζουν με άλλον τρόπο το κενό έξω από τη γεωμετρία ελέγχου.

Η γεωμετρία του προβλήματος στο MCNP-CP δημιουργήθηκε μέσω του VisEd (Visual Editor) ,το οποίο είναι ένα πρόγραμμα απεικόνισης της γεωμετρίας του αρχείου εισόδου για το MCNP. Μπορεί να δημιουργεί επιφάνειες και 'κελιά' για τη δημιουργία και την απεικόνιση της γεωμετρίας, υλικά και να απεικονίζει πηγές. Τα δεδομένα για τη γεωμετρία που εισήχθησαν, είναι τα ίδια με αυτά του παραδείγματος στο κεφάλαιο 2. Παρακάτω φαίνεται η γεωμετρία του προβλήματος όπως απεικονίζεται στο πρόγραμμα FLAIR. Στο παράρτημα δίδεται ολόκληρο το αρχείο εισόδου για τον κώδικα MCNP-CP.



Σχήμα 3.3.1: Η γεωμετρία του προβλήματος όπως απεικονίζεται στο πρόγραμμα FLAIR

3.3.2 Επιλογή μοντέλων φυσικής

Για την εξασφάλιση των ίδιων μοντέλων φυσικής, ήταν πιο εύκολο να προσαρμοστεί το FLUKA στα δεδομένα του MCNP-CP, κι αυτό γιατί στο FLUKA είναι πιο εύκολη η επιλογή των φυσικών διεργασιών που επιθυμούμε και η προσαρμογή στα δεδομένα του MCNP-CP γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι, στο MCNP-CP διαλέγοντας τις ρυθμίσεις για την παρακολούθηση φωτονίων και ηλεκτρονίων (mode p,e), ενεργοποιούνται τα εξής: Σκέδαση Compton, Σκέδαση Thomson, Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο, Δίδυμη Γένεση, Απορρόφηση φωτονίου από πυρήνα, παραγωγή δευτερέων σωματιδίων (Delta rays), Φθορισμός Φωτονίων, Ακτινοβολία Πέδησης (bremsstrahlung), Σκέδαση Moller και Πολλαπλή Σκέδαση.

Επίσης, στο MCNP-CP υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής της κάρτας PHYS: P και CPS όπου ρυθμίζουν τις προεπιλεγμένες τιμές όπως φαίνεται παρακάτω:

PHYS P: EMCPF IDES NOCOH GLECS DE511 [5]

EMCPF: ανώτερο κατώφλι ενέργειας για τη λεπτομερή αντιμετώπιση των φωτονίων ως προς τη φυσική τους

IDES: 0(1) τα φωτόνια θα(δε θα) παράγουν ηλεκτρόνια

NOCOH: 0(1) ενεργοποιείται(απενεργοποιείται) η σκέδαση Thomson

GLECS: 1(0) ενεργοποιείται (απενεργοποιείται) η λειτουργία φυσικής για χαμηλές ενέργειες

DE511: τιμή ενέργειας τυπικής απόκλισης για Doppler shift για το κατώφλι εξασθένησης των φωτονίων με 511 KeV ενέργεια

και έχει χρησιμοποιηθεί με τις επιλογές PHYS P: 10 0 0 1 0.001

PHYS E: EMAX IDES IPHOT IBAD ISTRG BNUM XNUM RNOK ENUM NUMB [4]

EMAX: ανώτερο κατώφλι ενέργειας για τα ηλεκτρόνια

IDES: 0(1) τα φωτόνια θα (δε θα) παράγουν ηλεκτρόνια

IPHOT: 0(1) τα ηλεκτρόνια θα (δε θα) παράγουν φωτόνια

IBAD: (0): ολικός υπολογισμός ακτινοβολίας πέδησης για επίπεδη γωνιακή κατανομή (1): απλός υπολογισμός ακτινοβολίας πέδησης για γωνιακή κατανομή

ISTRG: (0): προσομοίωση διασκεδασμού (straggling) για την ενέργεια που χάνουν τα ηλεκτρόνια (1): αναμενόμενη τιμή για την ενέργεια που χάνουν τα ηλεκτρόνια

BNUM: (<0): εφαρμόζεται μόνο για την αξιολόγηση της βιβλιοθήκης e103 (=0): φωτόνια πέδησης δε θα παράγονται (>0): παράγονται φωτόνια πέδησης

XNUM: >0(=0) παράγονται(δεν παράγονται) φωτόνια ακτίνων-x από ηλεκτρόνια

RNOK: >0(=0) παράγονται(δεν παράγονται) δευτερεύοντα σωματίδια (Delta rays)

ENUM: >0(=0) παράγονται(δεν παράγονται)

NUMB: (>0): παράγεται ακτινοβολία πέδησης σε κάθε υπο-βήμα (=0): ονομαστική παραγωγή ακτινοβολία πέδησης

και έχει χρησιμοποιηθεί με τις προεπιλεγμένες της τιμές, δηλαδή: PHYS E: 100 0 0 0 0 1 1 1 1 0

CPS: DCPGT IAS IGA IKX ILX IPO IBT ICE IAE IGG IIS [5]

DCPGT: (>0): κατηγοριοποιεί τα σωματίδια σε ομάδες και κάθε ομάδα είναι και ένα ξεχωριστό γεγονός και είναι ανεξάρτητη η μία από την άλλη (=0): όλα τα σωματίδια βρίσκονται σε μια ομάδα ανεξάρτητα από το χρόνο εκπομπής τους (=1): κάθε σωματίδιο αποτελεί ένα ξεχωριστό γεγονός και είναι ανεξάρτητο

από τα άλλα γεγονότα (<-1): όλα τα σωματίδια προσομοιώνονται ανεξάρτητα χρησιμοποιώντας τις πιθανότητες ανά αποδιέγερση και κάθε σωματίδιο αποτελεί και ένα γεγονός

IAS: (1): ενεργοποιείται η αναλογική λειτουργία, όπου οι πυρήνες αποδιεγείρονται με τις φυσικές του πιθανότητες **(0):** ενεργοποιείται η ημι-αναλογική λειτουργία, όπου οι πυρήνες αποδιεγείρονται με τις ίδιες πιθανότητες και όχι με τις φυσικές τους

IGA: 1(0) ενεργοποιείται(απενεργοποιείται) η εκπομπή των ακτίνων-γ από αποδιέγερση

IKX: 1(0) ενεργοποιείται(απενεργοποιείται) η εκπομπή των K ακτίνων-x

ILX: 1(0) ενεργοποιείται(απενεργοποιείται) η εκπομπή των L ακτίνων-x

IPO: 1(0) ενεργοποιείται(απενεργοποιείται) η εκπομπή ποζιτρονίων

IBT: 1(0) ενεργοποιείται(απενεργοποιείται) η εκπομπή σωματιδίων-β

ICE: 1(0) ενεργοποιείται(απενεργοποιείται) η μετατροπή των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων

IAE: 1(0) ενεργοποιείται(απενεργοποιείται) η εκπομπή ηλεκτρονίων-Auger

IGG: 1(0) ενεργοποιείται(απενεργοποιείται) η γωνιακή συσχέτιση ακτίνων-γ (gamma-gamma angular correlation)

IIS: 1(0) ενεργοποιείται(απενεργοποιείται) η καταστολή της ακτινοβολίας αποδιέγερσης από ισομερή επίπεδα

και έχει χρησιμοποιηθεί με τις προεπιλεγμένες της τιμές, δηλαδή : CPS 50 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 . Η κάρτα CPS υπάρχει μόνο για τον κώδικα του MCNP-CP και όχι στο MCNP, όπως και επίσης στην κάρτα phys:p οι 2 τελευταίες ρυθμίσεις στο MCNP είναι διαφορετικές.

Για τις επιλογές των φυσικών διεργασιών για τον κώδικα FLUKA, υπάρχει εκτενής ανάλυση στο κεφάλαιο 1. Στον παρακάτω πίνακα υπάρχει η αντιστοιχία των εντολών του MCNP-CP με αυτές του FLUKA και τις φυσικές διεργασίες που ενεργοποιούνται.

MCNP-CP	Φυσικές Διεργασίες	FLUKA
mode p	Σκέδαση Thomson	EM-CASCA
	Σκέδαση Bhabha, Rayleigh	
	Σκέδαση Compton, Moller,	
mode p	Φθορισμός Φωτονίων	
	Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο, Δίδυμη Γένεση	
	Απορρόφηση φωτονίου από πυρήνα	
mode e	Πολλαπλή Σκέδαση	
	Ακτινοβολία Πέδησης (bremsstrahlung)	
	Παραγωγή δευτερεύων σωματιδίων (Delta rays)	

Πίνακας 3.1: Αντιστοιχία των εντολών των κωδίκων MCNP-CP και FLUKA και οι φυσικές διεργασίες που ενεργοποιούνται

Όπου όσα ενεργοποιεί η εντολή CPS του MCNP-CP, στο FLUKA περιλαμβάνονται στην κάρτα EM-CASCA. Επίσης, το κατώτερο κατώφλι ενέργειας για την παρακολούθηση ενός ηλεκτρονίου ή ενός φωτονίου στο MCNP-CP είναι προεπιλεγμένα 1KeV. Στο FLUKA η αντίστοιχη κάρτα είναι η EMFCUT, που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 1. Με την ίδια κάρτα ορίζουμε και το κατώφλι ενέργειας για την παραγωγή των ηλεκτρονίων και φωτονίων. Παρατηρείται πως το MCNP-CP δεν λαμβάνει υπόψη τη σκέδαση Rayleigh και Bhabha, ενώ το FLUKA δεν λαμβάνει υπόψη τη σκέδαση Thomson. Η σκέδαση Thomson έχει να κάνει με ελαστική σκέδαση μιας ακτίνας-γ με ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και είναι το ελάχιστο όριο της σκέδασης Compton, ενώ η σκέδαση Rayleigh έχει να κάνει με την ελαστική σκέδαση μιας ακτίνας-γ με τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου. Επειδή όμως είναι και οι δύο ελαστικές σκεδάσεις, δεν έχουν συνεισφορά στην απορρόφηση της ακτίνας-γ, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα που είναι αποτέλεσμα του προγράμματος XCOM για το νερό.

Σχήμα 3.3.2: Διάγραμμα του συντελεστή απορρόφησης συναρτήσει της ενέργειας για

3.3.3 Πηγή

Το πώς ορίζεται η πηγή στον κώδικα FLUKA έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 1. Στο MCNP-CP ορίζεται με την εντολή SDEF όπως παρακάτω[5]:

```
sdef par=2 pos=0 0 0 rad=d1 cell=8 zam=0812080
si1 0. 157.7
```

όπου

par=2: ορίζεται πως η πηγή εκπέμπει φωτόνια

pos=000: θέτει το κέντρο της πηγής στο σημείο με συντεταγμένες(0 0 0)

rad=d1: ορίζει πως η πηγή θα έχει ακτίνα ίση με τη μεταβλητή d1 όπου ορίζεται παρακάτω

cell=8: θέτει την πηγή στο κελί 8

zam=0812080(ZZZAAM): ορίζεται η πηγή να είναι το ^{208}Tl με ατομικό αριθμό (Z) = 81 και μαζικό αριθμό (A) = 208 και M = 0 στη θεμελιώδη κατάσταση

si1 0. 157.7: ορίζεται η μεταβλητή d1, δηλαδή η ακτίνα της πηγής να είναι από) έως 157.7 cm

Στον παρακάτω πίνακα υπάρχει η αντιστοίχιση για τον ορισμό της πηγής για τους 2 κώδικες.

FLUKA	Λειτουργίες	MCNP-CP
BEAM	ισότοπο	SDEF
HI-PROPE	²⁰⁸ Tl	
SOURCE	γεωμετρία πηγής	
RADDECAY	ενεργοποιείται η λειτουργία εκπομπής φωτονίων	
DCYSCORE	αποτυπώνει τα αποτελέσματα	

Πίνακας 3.2: Αντιστοίχιση για τον ορισμό της πηγής για τους 2 κώδικες

3.3.4 Τυχαίος Αριθμός

Κάθε πρόγραμμα Monte Carlo, χρησιμοποιεί μια ακολουθία τυχαίων αριθμών για να προσομοιώνει τις κατανομές πιθανοτήτων. Ο κώδικας MCNP-CP χρησιμοποιεί το σύστημα Lahmer[4] ενώ ο κώδικας FLUKA χρησιμοποιεί το FLRN 64 που γράφτηκε από τον Sala και βασίζεται στον αλγόριθμο των Marsaglia και Tsang [7]. Και στους 2 κώδικες χρησιμοποιήθηκε για αρχικός τυχαίος αριθμός ο 19,073,486,328,125 ,όπου στο MCNP-CP είναι προεπιλογή και στο FLUKA ορίζεται με την κάρτα RANDOMIZ.

3.3.5 Βιβλιοθήκες Δεδομένων

Για τη σύγκριση των 2 κωδίκων, πρέπει να ληφθεί υπόψιν από ποιες βιβλιοθήκες παίρνουν τις πληροφορίες για τις φυσικές διεργασίες των φωτονίων, των ηλεκτρονίων και των πυρήνων. Ο κώδικας FLUKA παίρνει τα δεδομένα για [7]:

- Δίδυμη Γέννεση, Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο, Compton ενεργές διατομές και παράγοντες διόρθωσης για άτομα από τη βιβλιοθήκη EPDL97
- Για τους πυρήνες και τις αποδιεγέρσεις των πυρήνων από τη βιβλιοθήκη NNDC
- Για τα υλικά από τις βιβλιοθήκες ENDF, JEFF και JENDL

και ο κώδικας MCNP-CP για:

- Δίδυμη Γέννεση, Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο, Compton, Thomson ενεργές διατομές και παράγοντες διόρθωσης για άτομα από τη βιβλιοθήκη ENDF/B-IV εκτός από τους πυρήνες με ατομικό αριθμό $Z=84, 85, 87, 88, 89, 91$ και 93 που είναι από Storm and Israel [4]
- Για το φθορισμό για στοιχεία με $Z=1-94$ από τη βιβλιοθήκη ENDF/B-IV [4]
- Για τις αποδιεγέρσεις των πυρήνων από τη βιβλιοθήκη ENSDF [5]

3.4 Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, έγινε σύγκριση του κώδικα FLUKA με τον κώδικα MCNP-CP για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του κώδικα FLUKA. Πριν γίνει η σύγκριση για το ^{208}Tl στο θαλάσσιο περιβάλλον, έγινε σύγκριση για σημειακή πηγή ^{60}Co στον αέρα για αποστάσεις 1 mm, 2 cm και 10 cm και στο θαλάσσιο περιβάλλον για σημειακή πηγή ^{60}Co σε απόσταση 1 cm. Οπότε, έχουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Ενέργεια(MeV)	FLUKA	FLUKA error	MCNP-CP	MCNP-CP error (%)	διαφορά(%)
1.1732	51560	0.4	50880	0.4	1.0
1.3325	45800	0.5	45590	0.5	0.5
2.5057	3480	2.0	3490	1.5	-0.5
total	312230	0	307945	0	1.5
compton	211400	0	207980	0	1.5
summing	16150	1	16230	1	0.5

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα για σημειακή πηγή ^{60}Co στον αέρα σε απόσταση 1 mm

Όπου παρατηρείται πως για τη σημειακή πηγή ^{60}Co στον αέρα σε απόσταση 1 mm και για 1000000 αρχικά γεγονότα έχουμε για τις ενέργειες:

- 1.1732: η διαφορά των 2 κωδίκων είναι περίπου 3 σ δηλαδή εκτός σφάλματος με περισσότερα γεγονότα να έχει ανιχνεύσει το FLUKA
- 1.3325: η διαφορά είναι στο 1 σ δηλαδή εντός σφάλματος των 2 κωδίκων. Περισσότερα γεγονότα έχει ανιχνεύσει FLUKA
- 2.5055: στην κορυφή πραγματικής σύμπτωσης η διαφορά είναι εντός σφάλματος με περισσότερα γεγονότα να έχει ανιχνεύσει το MCNP-CP

Ενέργεια(MeV)	FLUKA	FLUKA error	MCNP-CP	MCNP-CP error (%)	διαφορά(%)
1.1732	54810	0.5	54000	0.5	2.
1.3325	48760	0.5	48770	0.5	0.
2.5057	1660	2.5	1670	2.5	-1.
total	306000	0	303100	0	1.
compton	200780	0	198710	0	1.
summing	6990	1	7520	1	-7.

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα για σημειακή πηγή ^{60}Co στον αέρα σε απόσταση 2 cm

Όπου παρατηρείται πως για τη σημειακή πηγή ^{60}Co στον αέρα σε απόσταση 2 cm και για 2000000 αρχικά γεγονότα έχουμε για τις ενέργειες:

1.1732: η διαφορά των 2 κωδίκων είναι περίπου 4 σ δηλαδή εκτός σφάλματος με περισσότερα γεγονότα να έχει ανιχνεύσει το FLUKA

1.3325: η διαφορά είναι μηδενική

2.5055: στην κορυφή πραγματικής σύμπτωσης η διαφορά είναι εντός σφάλματος με περισσότερα γεγονότα να έχει ανιχνεύσει το MCNP-CP

Ενέργεια(MeV)	FLUKA	FLUKA error	MCNP-CP	MCNP-CP error (%)	διαφορά(%)
1.1732	11060	1.	11050	1.	0.
1.3325	9970	1.	10030	1.	-1.
2.5057	50	14.4	50	14.	-0.
total	58590	0.5	58560	0.5	0.
compton	37510	0.5	37430	0.5	0.
summing	240	6.	265	6.	9.

Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα για σημειακή πηγή ^{60}Co στον αέρα σε απόσταση 10 cm

Όπου παρατηρείται πως για τη σημειακή πηγή ^{60}Co στον αέρα σε απόσταση 10 cm και για 2000000 αρχικά γεγονότα έχουμε για τις ενέργειες:

1.1732: η διαφορά των 2 κωδίκων είναι μηδενική

1.3325: η διαφορά είναι στο μισό σ δηλαδή εντός σφάλματος των 2 κωδίκων. Περισσότερα γεγονότα έχει ανιχνεύσει το MCNP-CP

2.5055: στην κορυφή πραγματικής σύμπτωσης η διαφορά είναι μηδενική

Παρατηρείται γενικά, πως όσο απομακρυνόμαστε από τον ανιχνευτή η διαφορά των γεγονότων που ανιχνεύτηκαν από τους δύο κώδικες, μικραίνει. Αυτό σημαίνει πως έχουν διαφορά στον υπολογισμό του φαινομένου της πραγματικής σύμπτωσης, καθώς όσο απομακρυνόμαστε από τον ανιχνευτή, τόσο πιο ασθενές γίνεται το φαινόμενο αυτό.

Ενέργεια(MeV)	FLUKA	FLUKA error	MCNP-CP	MCNP-CP error (%)	διαφορά(%)
1.1732	65280	0.5	64430	0.5	1.
1.3325	58300	0.5	57960	0.5	0.5
2.5057	2690	2.	2760	2.	-2.
total	584260	0.	579630	0.	1.
compton	457990	0.	454477	0.	1.
summing	19540	1.	19430	1.	0.5

Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα για σημειακή πηγή ^{60}Co στο θαλάσσιο περιβάλλον σε απόσταση 1 cm

Όπου παρατηρείται πως για τη σημειακή πηγή ^{60}Co στο θαλάσσιο περιβάλλον σε απόσταση 1 cm και για 2000000 αρχικά γεγονότα έχουμε για τις ενέργειες:

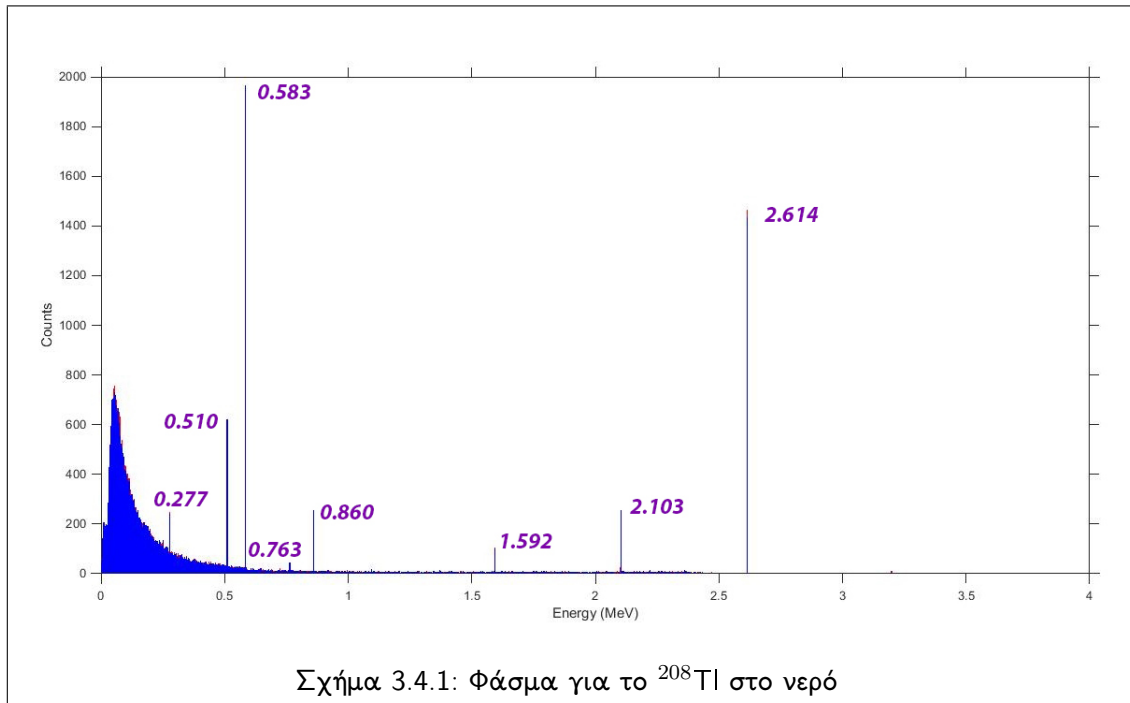
1.1732: η διαφορά των 2 κωδίκων είναι περίπου 3 σ δηλαδή εκτός σφάλματος με περισσότερα γεγονότα να έχει ανιχνεύσει το FLUKA

1.3325: η διαφορά είναι στο 1 σ δηλαδή εντός σφάλματος των 2 κωδίκων. Περισσότερα γεγονότα έχει ανιχνεύσει FLUKA

2.5055: στην κορυφή πραγματικής σύμπτωσης η διαφορά είναι εντός σφάλματος με περισσότερα γεγονότα να έχει ανιχνεύσει ο κώδικας MCNP-CP

Αφού διαπιστώθηκε πως σε απλή γεωμετρία υπάρχει σύγκλιση των αποτελεσμάτων των δύο κωδίκων, έγινε σύγκριση για το στοιχείο ^{208}Tl στο θαλάσσιο περιβάλλον με αρχικά γεγονότα 145,553,600. Όπως είχε αναφερθεί στο κεφάλαιο 1, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων γίνεται με το πρόγραμμα MATLAB και για τους δύο κώδικες. Παίρνοντας τα αποτελέσματα από τον κώδικα FLUKA, όπου είναι σε μορφή στήλης και σε μονάδες GeV, τα εισάγαμε στο MATLAB και πολλαπλασιάστηκαν με τον αριθμό 1000 για να μετατραπούν σε MeV και με αυτά φτιάχτηκε ένα ιστόγραμμα. Τα αποτελέσματα από το MCNP-CP, εξάχθηκαν από το αρχείο εξόδου του και είναι σε 3 στήλες όπου η πρώτη είναι η ενέργεια, η δεύτερη τα γεγονότα που ανιχνεύτηκαν για κάθε ενέργεια αλλά είναι εκφρασμένα ανά τα αρχικά γεγονότα και η τρίτη είναι το σφάλμα για την κάθε μέτρηση. Στο MATLAB η δεύτερη στήλη πολλαπλασιάστηκε με τον αριθμό των αρχικών

γεγονότων για να λάβουμε τον πραγματικό αριθμό γεγονότων που ανιχνεύτηκαν. Έτσι, φτιάχνοντας και για τα αποτελέσματα του MCNP-CP το αντίστοιχο διάγραμμα φαίνεται παρακάτω το φάσμα, όπου είναι και τα δύο αποτελέσματα μαζί. Με έντονο κόκκινο είναι τα αποτελέσματα του MCNP-CP και με μπλε του FLUKA.



Φαίνονται οι φωτοκορυφές για τις ενέργειες 0.277, 0.510, 0.583, 0.763, 0.860 και 2.614 MeV που αντιστοιχούν στις αποδιεγέρσεις του ^{208}Tl . Όμως, φαίνονται και οι φωτοκορυφές για τις ενέργειες 2.103 και 1.592 MeV, όπου είναι κορυφές μονής και διπλής διαφυγής αντίστοιχα για την φωτοκορυφή της ενέργειας 2.614 MeV. Αυτό συμβαίνει γιατί, για φωτόνια ενέργειας μεγαλύτερης των 1.022 MeV υπάρχουν γεγονότα που οφείλονται στη δίδυμη γένεση. Αν μετά την εξαύλωση του ποζιτρονίου το ένα από τα δύο φωτόνια ενέργειας 0.511 MeV διαφύγει από τον ανιχνευτή και το άλλο απορροφηθεί πλήρως, έχουμε την κορυφή μονής διαφυγής όπου είναι ενέργειας 0.511 MeV μικρότερη από την φωτοκορυφή. Αντίστοιχα, η κορυφή διπλής διαφυγής δημιουργείται όταν και τα 2 φωτόνια από την εξαύλωση του ποζιτρονίου διαφύγουν από τον ανιχνευτή. Τότε έχουμε την κορυφή με ενέργεια μικρότερη κατά 1.022 MeV από την φωτοκορυφή. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα γεγονότα για κάθε κορυφή που κατέγραψαν οι δύο κώδικες.

Ενέργεια(MeV)	FLUKA	FLUKA error	MCNP-CP	MCNP-CP error (%)	διαφορά(%)
0.277	240	6.5	250	6.	-3.
0.510	620	4.	540	4.	13.
0.583	1960	2.	1930	2.	2.
0.763	45	15.	40	15.	18.
0.860	260	6.	260	6.	0.5
1.592	100	10.	100	10.	-3.
2.103	260	6.	260	6.	0.
2.614	1435	3.	1470	3.	-2.
2.614(+ κορυφές διαφυγής)	1790	3.	1830	2.	-2.
3.198(sum peak)	10	38.	10	30.	0
ολικά	102200	0.3	100170	0.3	2.
compton	97270	0.3	95320	0.3	2.
summing	90	10.5	100	10.	-8.

Πίνακας 3.7: Σύγκριση των δύο κωδίκων για το ^{208}Tl στο θαλάσσιο περιβάλλον

Όπου παρατηρείται για τις κορυφές:

- 0.277:** Η διαφορά είναι 3% με περισσότερα γεγονότα να έχει ανιχνεύσει το MCNP-CP. Αυτή η διαφορά βρίσκεται μέσα στα περιθώρια σφάλματος που μας δίνει το MCNP-CP
- 0.510:** Η διαφορά είναι 13% με περισσότερα γεγονότα να έχουν ανιχνευτεί από το FLUKA. Η διαφορά είναι εκτός από τα περιθώρια του σφάλματος, κάτι που μπορεί να δικαιολογηθεί στην ιδιομορφία της φωτοκορυφής αυτής, καθώς συμπίπτει με την κορυφή εξαύλωσης που δημιουργείται από τις αλληλεπιδράσεις δίδυμης γένεσης στα υλικά γύρω από τον ανιχνευτή. Πιθανότατα, αν αυξάνονταν τα αρχικά γεγονότα, η στατιστική θα ήταν καλύτερη και η διαφορά αυτή να μειωνόταν μέσα στα όρια του σφάλματος.
- 0.583:** Η διαφορά είναι κάτω από 2% με περισσότερα γεγονότα να έχει ανιχνεύσει το FLUKA. Βρίσκεται εντός ορίων του σφάλματος κάτι που είναι σημαντικό καθώς είναι μια από τις δύο κύριες ενέργειες αποδιέγερσης.
- 0.763:** Η διαφορά είναι 18% και βρίσκεται εκτός ορίων του σφάλματος του MCNP-CP. Αν όμως υποθέσουμε ένα ανάλογο σφάλμα του FLUKA και λαμβάνοντας υπόψιν την κακή στατιστική της κορυφής αυτής, με περισσότερα αρχικά γεγονότα η διαφορά θα ήταν ικανοποιητική.
- 0.860:** Η διαφορά είναι κάτω από 0.5% και βρίσκεται εντός σφάλματος του MCNP-CP

1.592: Η διαφορά είναι 3% με περισσότερα γεγονότα να έχει ανιχνεύσει το MCNP-CP .
Η διαφορά είναι εντός σφάλματος.

2.103: Η διαφορά είναι 0%.

2.614: Η διαφορά είναι λίγο περισσότερο από 2% με περισσότερα γεγονότα να έχουν ανιχνευτεί από το MCNP-CP. Η διαφορά είναι μέσα στα όρια του σφάλματος, κάτι που είναι σημαντικό καθώς είναι η δεύτερη κυριότερη ενέργεια αποδιέγερσης.

2.614(συνολικό): Προσθέτοντας τα γεγονότα της κορυφής της ενέργειας 2.614 MeV και των κορυφών πρώτης και δεύτερης διαφυγής η διαφορά μικραίνει κατά 0.2 %, δηλαδή είναι λίγο λιγότερο από 2%.

3.198(sum_peak): Η διαφορά είναι 0 % Η διαφορά αυτή δεν είναι αντιπροσωπευτική, καθώς η στατιστική της κορυφής αυτής είναι πολύ χαμηλή.

ολικά: Συγκρίνοντας τα συνολικά γεγονότα που ανιχνεύτηκαν παρατηρήθηκε διαφορά 2% με περισσότερα να ανιχνεύονται από το FLUKA.

compton: Συγκρίνοντας τα γεγονότα που ανιχνεύτηκαν χωρίς τα γεγονότα των κορυφών, η διαφορά είναι 2 % με περισσότερα να ανιχνεύει το FLUKA.

summing: Συγκρίνοντας τα γεγονότα που ανιχνεύτηκαν με ενέργεια μεγαλύτερη από 2.614 MeV και χωρίς αυτά της κορυφής άθροισης, δηλαδή τα γεγονότα της πραγματικής σύμπτωσης, παρατηρήθηκε διαφορά μικρότερη από 8%. Αυτό δείχνει πως το MCNP-CP δημιουργεί περισσότερα γεγονότα πραγματικής σύμπτωσης, αν και αυξάνοντας την στατιστική της μέτρησης η διαφορά αυτή θα μπορούσε να μειωθεί.

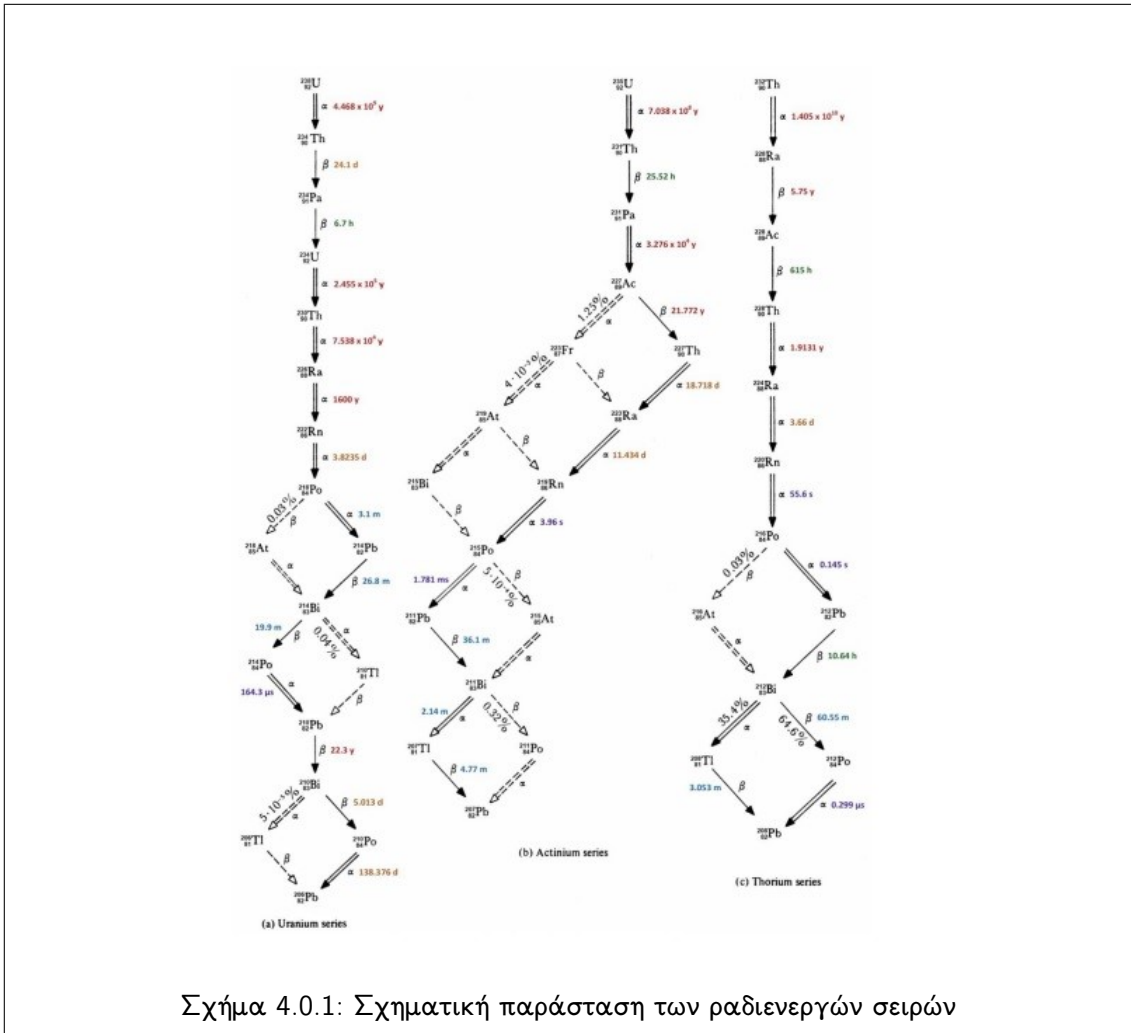
4 Προσομοίωση της απόκρισης του ανιχνευτή (NaI) για μετρήσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας FLUKA καθώς μπορεί και υπολογίζει το φαινόμενο της πραγματικής σύμπτωσης που εμφανίζεται σε εφαρμογές στο θαλάσσιο περιβάλλον λόγω της άμεσης επαφής του ανιχνευτή με την πηγή. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να κατασκευαστούν δύσκολα γεωμετρικά προβλήματα κι αυτό γιατί ο χρήστης μπορεί να επεμβαίνει στην ρουτίνα του προγράμματος και να ορίζει με κατάλληλες συναρτήσεις τη γεωμετρία που επιθυμεί. Επειδή ο όγκος της θάλασσας είναι μεγάλος, δε μπορούμε να τον προσομοιώσουμε όλο, οπότε πρέπει να βρούμε τον ενεργό όγκο, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2. Η απόσταση που μπορεί να διανύσει μια δέσμη φωτονίων μέσα στο νερό μέχρι να απορροφηθεί τελείως απ' αυτό, δηλαδή να μειωθεί η ένταση της ακτινοβολίας κατά 10000 φορές από την αρχική, ονομάζεται ενεργός ακτίνα και εξαρτάται από την ενέργεια του φωτονίου και το υλικό του μέσου (ατομικός αριθμός Z , πυκνότητα). Υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$\{I=I_0e^{-\mu x}\} \text{ και } \{I = 0.001 \cdot I_0\} \iff x = \ln(10000)/\mu \quad (4.0.1)$$

Στη φύση σήμερα βρίσκονται τρεις ραδιενεργές σειρές, που υπάρχουν από τη δημιουργία της Γης, πριν από περίπου $4.5 \cdot 10^9$ χρόνια. Η κάθε μια από αυτές ξεκινά από ένα μητρικό πυρήνα (^{238}U , ^{235}U ή ^{232}Th) με πολύ μεγάλο χρόνο ημιζωής, που ρυθμίζει τις αποδιεγέρσεις των ασταθών θυγατρικών του, τα οποία έχουν όλα μικρότερους χρόνους ημιζωής. Όλα τα υλικά τα οποία περιέχουν ραδιονουκλίδια που δημιουργούνται από φυσικές διεργασίες ονομάζονται NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials) και περιλαμβάνουν τις τρεις ραδιενεργές σειρές, και το φυσικό ^{40}K το οποίο μεταπίπτει στα σταθερά ισότοπα ^{40}Ar και ^{40}Ca .

Άλλες πηγές φυσικής ραδιενέργειας είναι προϊόντα πυρηνικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα που προέρχονται από κοσμική ακτινοβολία, όπως το τρίτιο και ο ^{14}C . Επιπλέον, υπάρχουν τεχνητές πηγές ραδιενέργειας που οφείλονται σε πυρηνικά όπλα, πυρηνικές δοκιμές, πυρηνικά ατυχήματα, όπως το ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό παραγωγής ενέργειας του Τσερνόμπιλ το 1986 και απόβλητα από πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας.[13]



Σχήμα 4.0.1: Σχηματική παράσταση των ραδιενεργών σειρών

από τα ραδιονουκλίδια των 3 σειρών, επιλέχθηκαν όσα έχουν ένταση μεγαλύτερη από 1% και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

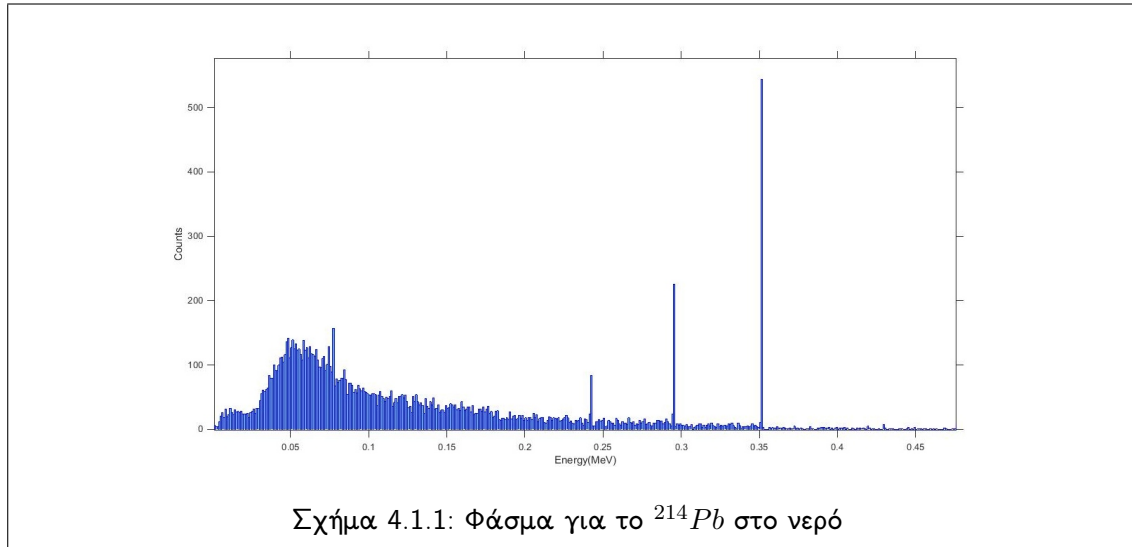
	Σειρά	Ραδιονουκλίδια	E_{max} (MeV)	r_{eff} (cm)	Πιθανότητα(%)
1	^{238}U	^{214}Pb	0.786	113	1.07
2	^{238}U	^{214}Bi	2.204	192	5.08
3	^{238}U	^{234}Pa	1.394	150	2.06
4	^{238}U	^{226}Ra	0.186	63.98	3.59
5	^{235}U	^{219}Rn	0.402	84.77	6.37
6	^{232}Th	^{220}Rn	0.550	96.5	0.11
7	^{232}Th	^{228}Ac	1.388	150	3.22
8	^{232}Th	^{212}Bi	0.727	110	6.58
9	^{232}Th	^{212}Pb	0.301	76	3.28
10	-	^{40}K	1.461	154	1460.8

Πίνακας 4.1: Ραδιονουκλίδια που χρησιμοποιήθηκαν

όπου E_{max} είναι η μέγιστη ενέργεια εκπομπής του ραδιονουκλιδίου, r_{eff} η ενεργός ακτίνα και Intensity είναι η πιθανότητα εκπομπής του φωτονίου.

Ο κώδικας FLUKA, σε αντίθεση με τον κώδικα MCNP-CP, όταν του εισαχθεί ένα ραδιονουκλίδιο από τις παραπάνω ραδιενεργές σειρές, δημιουργεί και τα επόμενα ραδιονουκλίδια στη σειρά, μέχρις ότου να φτάσει σε ένα σταθερό ισότοπο. Για να πάρει τελικά ο χρήστης καθαρά αποτελέσματα μόνο από το ραδιονουκλίδιο που ενδιαφέρεται, πρέπει επεμβαίνοντας στην κατάλληλη ρουτίνα να σταματήσει τη διαδικασία αυτή, ή με μια κατάλληλη μέθοδο να αφαιρέσει τα γεγονότα που δημιουργούνται από τα επόμενα στη σειρά ραδιονουκλίδια (μέθοδος της αφαίρεσης). Για τα παραπάνω ραδιονουκλίδια χρησιμοποιήθηκε η κατάλληλη τροποποιημένη ρουτίνα usrmed.f, όπου σταματάει τη διαδικασία αυτή και μόνο για το ραδιονουκλίδιο ^{212}Bi έγινε σύγκριση των δυο αυτών μεθόδων. Επομένως, έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα για αρχικά γεγονότα 30,000,000:

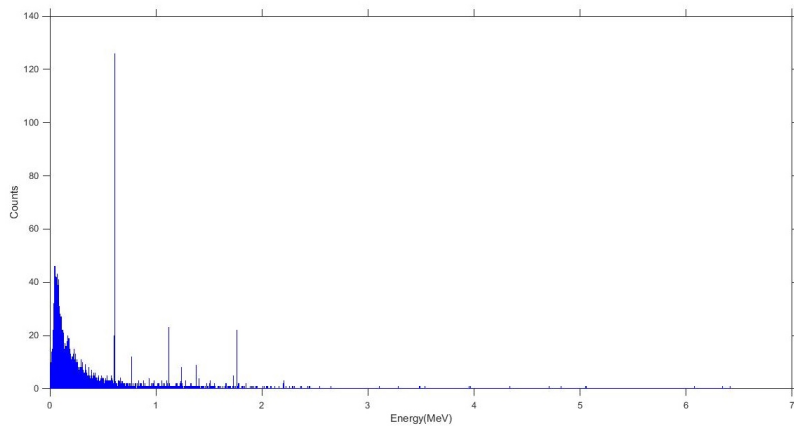
4.1 ^{214}Pb



Ενέργειες (MeV)	Γεγονότα	σφάλμα (%)	Πιθανότητα (%)
0.295	230	7	19
0.352	540	4	38
ολικά	1350	0.	

Πίνακας 4.2: Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{214}Pb

4.2 ^{214}Bi

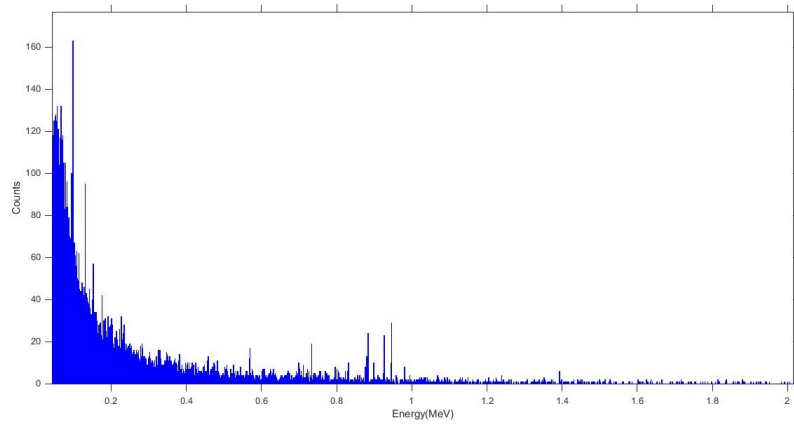


Σχήμα 4.2.1: Φάσμα για το ^{214}Bi στο νερό

Ενέργειες (MeV)	Γεγονότα	σφάλμα (%)	Πιθανότητα (%)
0.609	130	9	46
0.768	10	29	5
1.120	20	21	15
1.238	10	35	6
1.378	10	33	4
1.730	5	45	3
1.764	20	20	15
2.204	5	50	5
ολικά	5910		

Πίνακας 4.3: Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{214}Bi

4.3 ^{234}Pa

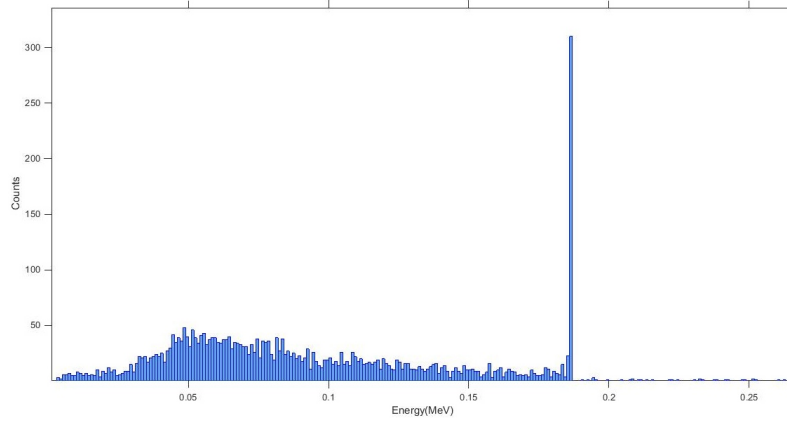


Σχήμα 4.3.1: Φάσμα για το ^{234}Pa στο νερό

Ενέργειες(MeV)	Γεγονότα	σφάλμα(%)	πιθανότητα(%)
0.131	100	10	18
0.569	20	23	4
0.733	20	23	7
0.832	40	16	4
0.881	10	28	4
0.926	20	20	2
0.946	30	19	13
ολικά	1540	0	

Πίνακας 4.4: Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{234}Pa

4.4 ^{226}Ra

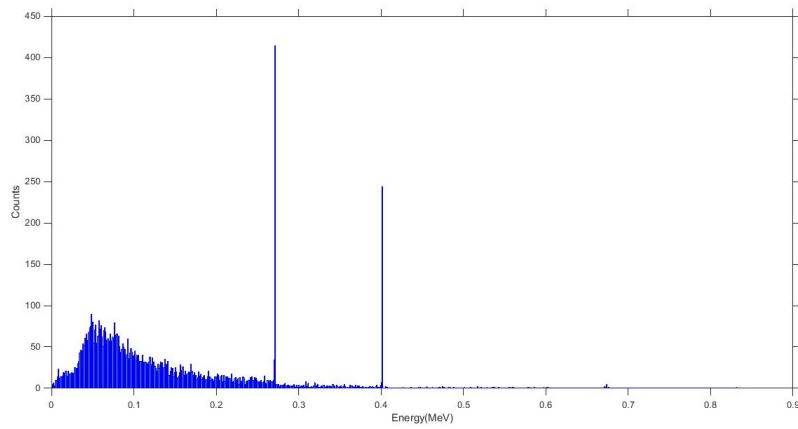


Σχήμα 4.4.1: Φάσμα για το ^{226}Ra στο νερό

Ενέργειες(MeV)	Γεγονότα	σφάλμα(%)	πιθανότητα(%)
0.187	310	6	4
ολικά	3620		

Πίνακας 4.5: Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{226}Ra

4.5 ^{219}Rn

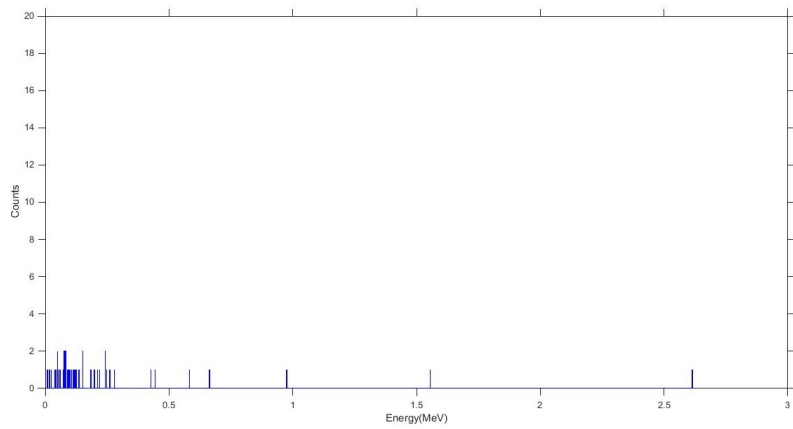


Σχήμα 4.5.1: Φάσμα για το ^{219}Rn στο νερό

Ενέργειες(MeV)	Γεγονότα	σφάλμα(%)	πιθανότητα(%)
0.272	410	5	11
0.402	240	6	6
ολικά	8130		

Πίνακας 4.6: Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια ^{219}Rn

4.6 ^{220}Rn

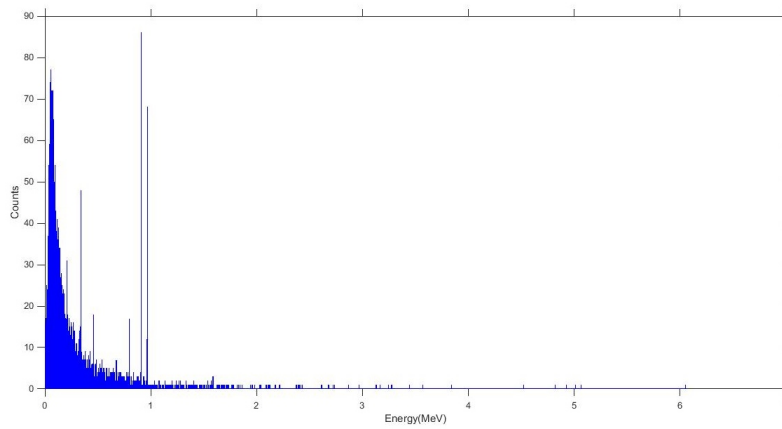


Σχήμα 4.6.1: Φάσμα για το ^{220}Rn στο νερό

Ενέργειες(MeV)	Γεγονότα	σφάλμα(%)	πιθανότητα(%)
ολικά	60		

Πίνακας 4.7: Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{220}Rn

4.7 ^{228}Ac



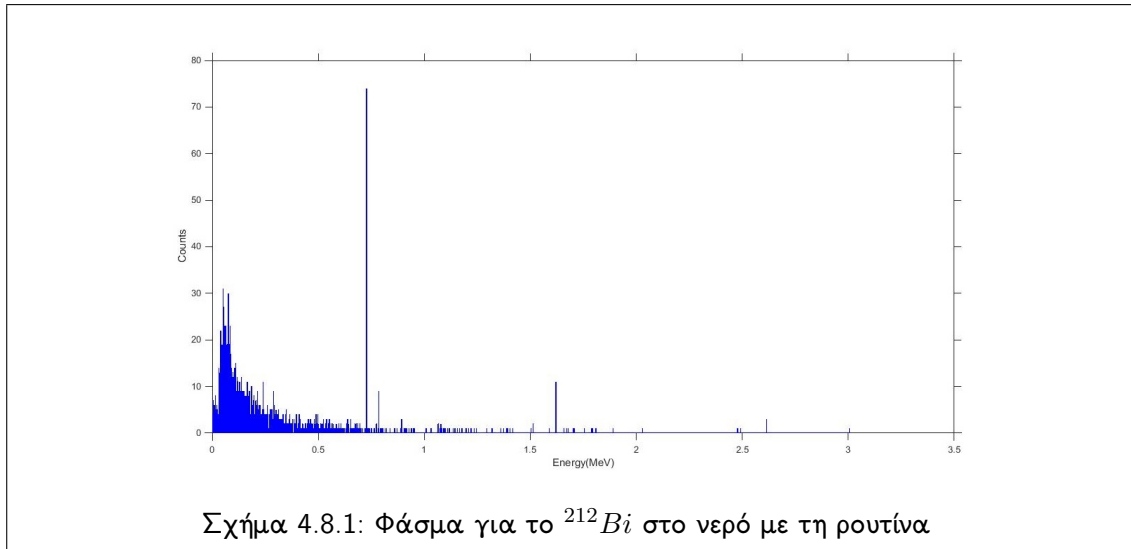
Σχήμα 4.7.1: Φάσμα για το ^{228}Ac στο νερό

Ενέργειες(MeV)	Γεγονότα	σφάλμα(%)	πιθανότητα(%)
0.339	50	14	11
0.463	20	24	4
0.795	20	24	4
0.912	90	11	26
0.969	68	12	16
ολικά	9480		

Πίνακας 4.8: Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{228}Ac

4.8 ^{212}Bi

4.8.1 Αποτελέσματα με την ρουτίνα για 30,000,000 αρχικά γεγονότα



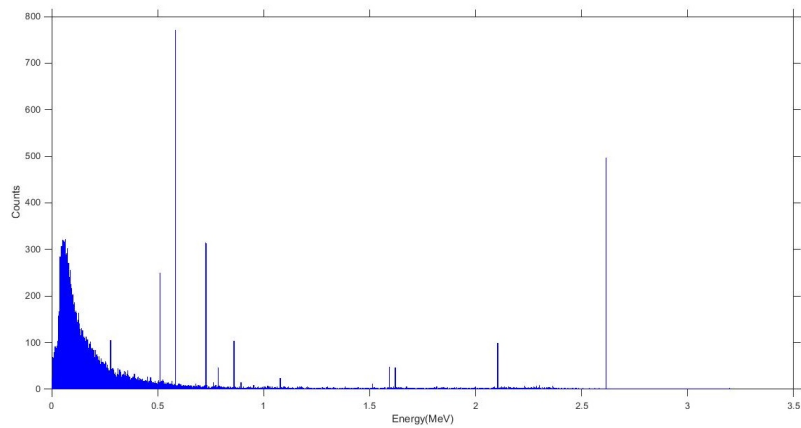
Ενέργειες(MeV)	Γεγονότα	σφάλμα(%)	πιθανότητα(%)
0.727	70	12	7
0.785	10	30	1
1.621	10	30	1
ολικά	2870		

Πίνακας 4.9: Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{212}Bi με την ρουτίνα

4.8.2 Αποτελέσματα με τη μέθοδο της αφαίρεσης για 100,000,000 αρχικά γεγονότα

Με τη μέθοδο της αφαίρεσης γίνονται τα εξής βήματα:

Αρχικά εξάγεται από τον κώδικα FLUKA, το φάσμα του ^{212}Bi το οποίο όμως έχει και τις φωτοκορυφές του ^{208}Tl που βρίσκεται μετά το ^{212}Bi , στη ραδιενεργή σειρά του ^{232}Th .

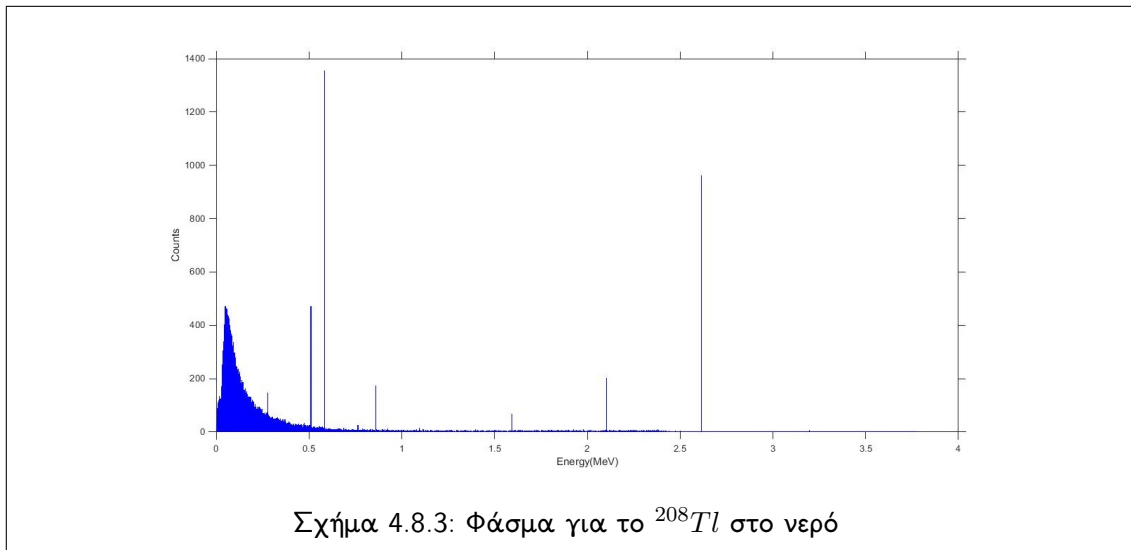


Σχήμα 4.8.2: Φάσμα για το ^{212}Bi στο νερό

Ενέργειες(MeV)	Γεγονότα	σφάλμα(%)	πιθανότητα(%)
0.727	310	6	7
0.785	50	14	1
1.621	50	14	1
ολικά	46400		

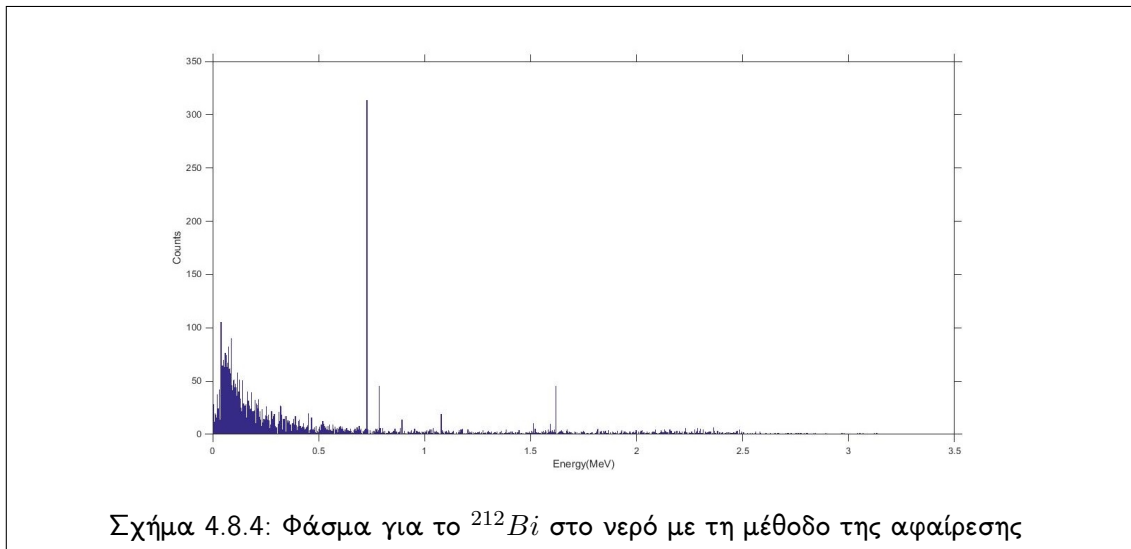
Πίνακας 4.10: Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{212}Bi

Τρέχοντας στο FLUKA και το ^{208}Tl , προκύπτει και το φάσμα για το ^{208}Tl .



Διαλέγοντας μια φωτοκορυφή του ^{208}Tl η οποία έχει μεγάλη στατιστική, δηλαδή πολλά γεγονότα, βρίσκουμε τα καταγεγραμμένα γεγονότα σε καθένα από τα δύο φάσματα και βρίσκουμε το πηλίκό τους. Συγκεκριμένα, για την ενέργεια 0.583 MeV από το φάσμα του ^{212}Bi παίρνουμε 770 γεγονότα και από το φάσμα του ^{208}Tl παίρνουμε 1353. Άρα έχουμε το πηλίκο 0.569

Έπειτα πολλαπλασιάζουμε με τον αριθμό αυτό το φάσμα του ^{208}Tl και από το φάσμα του ^{212}Bi αφαιρούμε το καινούριο αυτό φάσμα. Έτσι έχουμε το καθαρό πλέον φάσμα του ^{212}Bi .

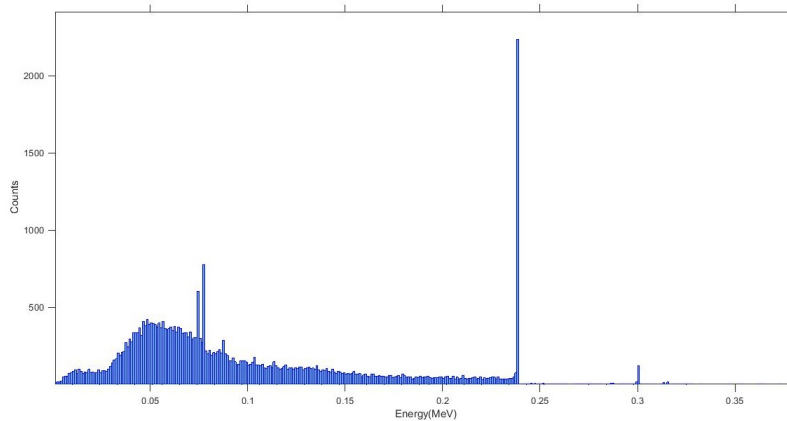


Ενέργειες(MeV)	Γεγονότα	σφάλμα(%)	πιθανότητα(%)
0.727	310	6	7
0.785	50	14	1
1.621	50	14	1
ολικά	3220		

Πίνακας 4.11: Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{212}Bi με τη μέθοδο της αφαίρεσης

Παρατηρείται πως και με τη μέθοδο της αφαίρεσης τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά, καθώς οι φωτοκορυφές του ^{212}Bi παραμένουν αμετάβλητες, ενώ οι κορυφές του ^{208}Tl έχουν απαλειφθεί.

4.9 ^{212}Pb

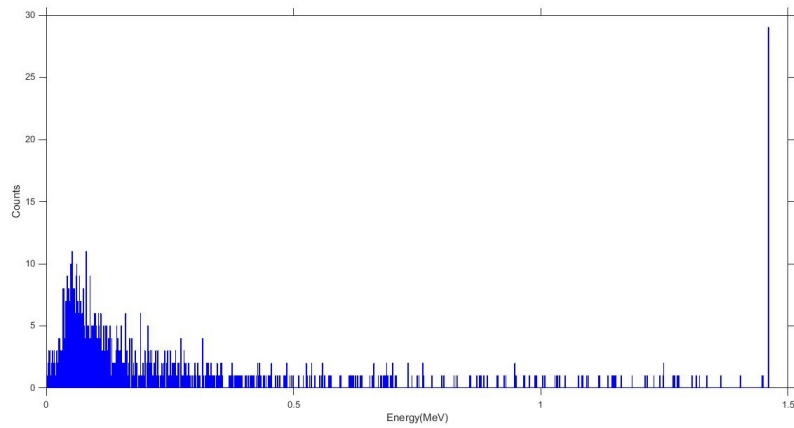


Σχήμα 4.9.1: Φάσμα για το ^{212}Pb στο νερό

Ενέργειες(MeV)	Γεγονότα	σφάλμα(%)	πιθανότητα(%)
0.239	2240	2	43
0.300	120	9	3
ολικά	35140		

Πίνακας 4.12: Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{212}Pb

4.10 ^{40}K



Σχήμα 4.10.1: Φάσμα για το ^{40}K στο νερό

Ενέργειες(MeV)	Γεγονότα	σφάλμα(%)	πιθανότητα(%)
1.461	30	20	11
ολικά	1025		

Πίνακας 4.13: Γεγονότα που καταγράφηκαν για κάθε ενέργεια για ^{40}K

5 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή, έγινε εφαρμογή του κώδικα FLUKA στο θαλάσσιο περιβάλλον. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του, έγινε σύγκριση με τον κώδικα MCNP-CP για το στοιχείο του ^{208}Tl . Από τη σύγκριση αυτή, φάνηκε πως ο κώδικας FLUKA είναι αξιόπιστος για τέτοιου είδους εφαρμογές, καθώς σε σχέση με τα αποτελέσματα του κώδικα MCNP-CP έχει διαφορά περίπου 2% για τις κύριες ενέργειες αποδιέγερσης, η οποία βρίσκεται εντός του σφάλματος που μας δίνει ο κώδικας MCNP-CP. Έπειτα, έγινε χρήση του κώδικα FLUKA για την προσομοίωση της απόκρισης του ανιχνευτή NaI για φυσικά ραδιονουκλίδια των ραδιενεργών σειρών των ^{238}U , ^{235}U και ^{232}Th και το ραδιονουκλίδιο ^{40}K . Ένα επόμενο βήμα, θα μπορούσε να είναι η εφαρμογή του και στο ίζημα για κάθε στοιχείο καθώς και για τεχνητά ραδιονουκλίδια. Επίσης, για να μπορούμε να έχουμε άμεση σύγκριση με πειραματικά δεδομένα, θα μπορούσε να γίνει προσομοίωση και των ηλεκτρονικών του ανιχνευτή, δηλαδή να ληφθεί υπόψιν το FWHM και η ενεργειακή βαθμονόμηση.

Ο κώδικας FLUKA έχει τα εξής θετικά:

- Είναι αρκετά γρήγορος.
- Ο έλεγχος των παραμέτρων είναι εύκολος
- Υπάρχει η δυνατότητα πρόσβασης στη ρουτίνα
- Έχει μεγάλο εύρος εφαρμογών
- Υπάρχουν συνέχεια αναβαθμίσεις που προσφέρονται δωρεάν

αλλά και τα αρνητικά :

- Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων δεν είναι πάντα εύκολη
- Δεν παραθέτει σφάλμα των μετρήσεων

6 Αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν

Παρακάτω παραθέτονται τα αρχεία εισόδου, τα τροποποιημένα αρχεία source.f και us-rmed.f και το αρχείο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων από τον κώδικα FLUKA, για τα παραδείγματα με το ^{60}Co και το ^{208}Tl .

6.1 Αρχείο εισόδου για το στοιχείο του ^{60}Co για νερό για τον κώδικα FLUKA

TITLE

```
Co60 se nero
GLOBAL -1.
DEFAULTS EM-CASCA
BEAM 0.0 0.0 ISOTOPE
SOURCE 110.0
HI-PROPE 27.0 60.0
RADDECAY 2.
DELTARAY 0.000001 BLCKHOLE NaI NOPRINT
EMFCUT 1E-06 0.000001 BLCKHOLE NaI PHO2-THR
EMFCUT 1E-06 0.000001 BLCKHOLE NaI ANNH-THR
EMFCUT 1E-06 0.000001 BLCKHOLE NaI PHOT-THR
EMFCUT 1E-06 0.000001 BLCKHOLE NaI ELPO-THR
EMFCUT BLCKHOLE NaI PROD-CUT
SCORE EM-ENRGY PHOTON ALL-PART E+&E-
DCYSCORE -1. evbn evbn EVENTBIN
EVENTBIN 12.0 EM-ENRGY 50. NaI evbn
EVENTBIN NaI &
GEOBEGIN COMBNAME
0 0 C Co60
* kapaki
RCC kapaki 0.0 0.0 36.83 0.0 0.0 8.0 5.31
* kelufos eksw
RCC kelufos 0.0 0.0 -4.93 0.0 0.0 41.76 4.93
* kelufos mesa
RCC kelufosm 0.0 0.0 -4.15 0.0 0.0 40.98 4.15
* ekswteriko alumn
RCC alumn 0.0 0.0 -3.97 0.0 0.0 7.94 4.02
* eswteriko alumn
```

RCC alumnesw 0.0 0.0 -3.97 0.0 0.0 7.94 3.97
* water source
SPH source 0.0 0.0 0.0 110.0
SPH blackhol 0.0 0.0 0.0 388.
* cristalos
RCC cristalo 0.0 0.0 -3.81 0.0 0.0 7.62 3.81
* cosmos
SPH cosmos 0.0 0.0 0.0 300.0
END
kapaki 5 +kapaki
kelufos 5 +kelufos -kelufosm
eswaeras 5 +kelufosm -alumn -alumnesw -cristalo
alumn 5 +alumn -alumnesw
Al2O3 5 +alumnesw -cristalo
NaI 5 +cristalo
water 5 +cosmos -source -kapaki -kelufos -kelufosm -alumn -alumnesw -cristalo
source 5 +source -kapaki -kelufos -kelufosm -alumn -alumnesw -cristalo
blackhol 5 +blackhol -cosmos
END
GEOEND
* Al2O3
*
MATERIAL 0.55 Al2O3
COMPOUND -0.470749 OXYGEN -0.529251 ALUMINUM Al2O3
ASSIGNMA Al2O3 Al2O3
* NaI Crystal
MATERIAL 3.667 NaI
MATERIAL 53.0 4.93 IODINE
COMPOUND 0.8467 IODINE 0.1533 SODIUM NaI
ASSIGNMA NaI NaI
* Acetal
MATERIAL 0.825 Acetal
COMPOUND -0.1905 OXYGEN -0.381 HYDROGEN -0.4285 CARBONAcetal
ASSIGNMA Acetal kapaki
ASSIGNMA Acetal kelufos
*
*
MATERIAL .00120479 AIR
COMPOUND -0.000125 CARBON -0.755267 NITROGEN -0.231781 OXYGENAIR
COMPOUND -0.012827 ARGON AIR
ASSIGNMA AIR eswaeras
COMPOUND -0.111 HYDROGEN -0.889 OXYGEN WATER
MATERIAL 13. 2.94 ALUMINUM
ASSIGNMA WATER source

ASSIGNMA WATER water
ASSIGNMA ALUMINUM alumn
ASSIGNMA BLCKHOLE blackhol
RANDOMIZ 1.90735E13
START 6000000.
STOP

6.2 Αρχείο εισόδου για το στοιχείο του ^{60}Co για ίζημα για τον κώδικα FLUKA

TITLE

C Co60 se izima
GLOBAL -1.
DEFAULTS EM-CASCA
BEAM 0.0 0.0 ISOTOPE
SOURCE 75.81
HI-PROPE 27.0 60.0
RADDECAY 2.
POLARIZA 1. 1. 1. 1.
DELTARAY 0.000001 BLCKHOLE NaI NOPRINT
EMFCUT 1E-06 0.000001 BLCKHOLE NaI PHO2-THR
EMFCUT 1E-06 0.000001 BLCKHOLE NaI ANNH-THR
EMFCUT 1E-06 0.000001 BLCKHOLE NaI PHOT-THR
EMFCUT 1E-06 0.000001 BLCKHOLE NaI ELPO-THR
EMFCUT 0.1 0.1 0.1 BLCKHOLE NaI PROD-CUT
SCORE EM-ENRGY PHOTON ALL-PART E+&E-
DCYSCORE -1. evbn evbn EVENTBIN
EVENTBIN 12.0 50. NaI evbn
EVENTBIN NaI &
GEOBEGIN COMBNAME
0 0 C tl
* cosmos
SPH cosmos 0.0 0.0 0.0 300.0
* kapaki
RCC kapaki 0.0 0.0 36.83 0.0 0.0 8.0 5.31
* kelufos eksw
RCC kelufos 0.0 0.0 -4.93 0.0 0.0 41.76 4.93
* kelufos mesa
RCC kelufosm 0.0 0.0 -4.15 0.0 0.0 40.98 4.15
* ekswteriko alumn
RCC alumn 0.0 0.0 -3.97 0.0 0.0 7.94 4.02
* eswteriko alumn
RCC alumnesw 0.0 0.0 -3.97 0.0 0.0 7.94 3.97

* cristalos
 RCC cristal0 0.0 0.0 -3.81 0.0 0.0 7.62 3.81
 * water source
 SPH source 0.0 0.0 0.0 107.14
 SPH blackhol 0.0 0.0 0.0 388.32975677895
 XYP grammi -5.63
 END
 kapaki 5 +kapaki
 kelufos 5 +kelufos -kelufosm
 * aluminio
 eswaeras 5 +kelufosm -alumn -alumnesw -cristalo
 alumn 5 +alumn -alumnesw
 Al203 5 +alumnesw -cristalo
 NaI 5 +cristalo
 water 5 +cosmos +source -kapaki -kelufos -kelufosm -alumn -alumnesw -cristalo -grammi
 source 5 +source -kapaki -kelufos -kelufosm -alumn -alumnesw -cristalo +grammi
 blackhol 5 +blackhol -cosmos
 izima 5 +cosmos -source -kapaki -kelufos -kelufosm -alumn -alumnesw -cristalo +grammi
 water2 5 +cosmos -source -kapaki -kelufos -kelufosm -alumn -alumnesw -cristalo -grammi
 END
 GEOEND
 * Acetal
 MATERIAL 0.825 Acetal
 COMPOUND -0.1905 OXYGEN -0.381 HYDROGEN -0.4285 CARBONAcetal
 ASSIGNMA Acetal kapaki
 ASSIGNMA Acetal kelufos
 * NaI Crystal
 MATERIAL 3.667 NaI
 MATERIAL 53.0 4.93 IODINE
 COMPOUND 0.8467 IODINE 0.1533 SODIUM NaI
 ASSIGNMA NaI NaI
 * Air
 *
 MATERIAL .00120479 AIR
 COMPOUND -0.000125 CARBON -0.755267 NITROGEN -0.231781 OXYGENAIR
 COMPOUND -0.012827 ARGON AIR
 ASSIGNMA AIR eswaeras
 * Water
 MATERIAL 1.026 WATER
 COMPOUND -0.111 HYDROGEN -0.889 OXYGEN WATER
 ASSIGNMA WATER water2
 ASSIGNMA WATER water
 * Al203
 *

```

MATERIAL 0.55 Alo
COMPOUND -0.470749 OXYGEN -0.529251 ALUMINUM Alo
ASSIGNMA Alo Al203
* Izima
MATERIAL 1.62 izima
COMPOUND -0.2 AIR -0.45 SiO2 -0.25 CaOizima
COMPOUND -0.1 Alo izima
* Calcium oxide Ca_ O
*
MATERIAL 3.3 CaO
COMPOUND -0.285299 OXYGEN -0.714701 CALCIUM CaO
* Silicon dioxide Si_ O2
*
MATERIAL 2.32 SiO2
COMPOUND -0.532565 OXYGEN -0.467435 SILICON SiO2
ASSIGNMA izima source
ASSIGNMA izima izima
MATERIAL 13. 2.94 ALUMINUM
ASSIGNMA ALUMINUM alumn
ASSIGNMA BLCKHOLE blackhol
RANDOMIZ 1.90735E13
START 6000000.0
STOP

```

6.3 Τροποποιημένο Αρχείο source.f

Με κόκκινα έντονα γράμματα είναι τα αρχικά στοιχεία και με μαύρα έντονα γράμματα είναι τα στοιχεία με τα οποία αντικαταστήσαμε τα αρχικά.

```

*§ CREATE SOURCE.FOR
*COPY SOURCE
*
*==== source =====
*
SUBROUTINE SOURCE ( NOMORE )
INCLUDE '(DBLPRC)'
INCLUDE '(DIMPAR)'
INCLUDE '(IOUNIT)'
*
*
*_____ *
* *
* Copyright (C) 1990-2010 by Alfredo Ferrari & Paola Sala *
* All Rights Reserved. *

```

```

* *
* *
* New source for FLUKA9x-FLUKA20xy: *
* *
* Created on 07 January 1990 by Alfredo Ferrari & Paola Sala *
* Infn - Milan *
* *
* Last change on 17-Oct-10 by Alfredo Ferrari *
* *
* This is just an example of a possible user written source routine. *
* note that the beam card still has some meaning - in the scoring the *
* maximum momentum used in deciding the binning is taken from the *
* beam momentum. Other beam card parameters are obsolete. *
* *
* Output variables: *
* *
* Nomore = if > 0 the run will be terminated *
* *
*-----*
*
INCLUDE '(BEAMCM)'
INCLUDE '(FHEAVY)'
INCLUDE '(FLKSTK)'
INCLUDE '(IOIOCM)'
INCLUDE '(LTCLCM)'
INCLUDE '(PAPROP)'
INCLUDE '(SOURCM)'
INCLUDE '(SUMCOU)'
*
LOGICAL LFIRST
*
SAVE LFIRST
DATA LFIRST / .TRUE. /
*=====
* *
* BASIC VERSION *
* *
*=====
NOMORE = 0
* +-----*
* | First call initializations:
IF ( LFIRST ) THEN
* | *** The following 3 cards are mandatory ***
TKESUM = ZERZER

```

```

LFIRST = .FALSE.
LUSSRC = .TRUE.
* | *** User initialization ***
END IF
* |
* +-----.*
* Push one source particle to the stack. Note that you could as well
* push many but this way we reserve a maximum amount of space in the
* stack for the secondaries to be generated
* Npflka is the stack counter: of course any time source is called it
* must be =0
NPFLKA = NPFLKA + 1
* Wt is the weight of the particle
WTFLK (NPFLKA) = ONEONE
WEIPRI = WEIPRI + WTFLK (NPFLKA)
* Particle type (1=proton.....). Ijbeam is the type set by the BEAM
* card
* +-----.*
* | (Radioactive) isotope:
IF ( IJBEAM .EQ. -2 .AND. LRDBEA ) THEN
IARES = IPROA
IZRES = IPROZ
IISRES = IPROM
CALL STISBM ( IARES, IZRES, IISRES )
IJHION = IPROZ * 1000 + IPROA
IJHION = IJHION * 100 + KXHEAV
IONID = IJHION
CALL DCDION ( IONID )
CALL SETION ( IONID )
* |
* +-----.*
* | Heavy ion:
ELSE IF ( IJBEAM .EQ. -2 ) THEN
IJHION = IPROZ * 1000 + IPROA
IJHION = IJHION * 100 + KXHEAV
IONID = IJHION
CALL DCDION ( IONID )
CALL SETION ( IONID )
ILOFLK (NPFLKA) = IJHION
* | Flag this is prompt radiation
LRADDC (NPFLKA) = .FALSE.
* | Group number for "low" energy neutrons, set to 0 anyway
IGROUP (NPFLKA) = 0
* |

```

```

* +-----*
* | Normal hadron:
ELSE
IONID = IJBEAM
ILOFLK (NPFLKA) = IJBEAM
* | Flag this is prompt radiation
LRADDC (NPFLKA) = .FALSE.
* | Group number for "low" energy neutrons, set to 0 anyway
IGROUP (NPFLKA) = 0
END IF
* |
* +-----*
* From this point .....
* Particle generation (1 for primaries)
LOFLK (NPFLKA) = 1
* User dependent flag:
LOUSE (NPFLKA) = 0
* No channeling:
LCHFLK (NPFLKA) = .FALSE.
DCHFLK (NPFLKA) = ZERZER
* User dependent spare variables:
DO 100 ISPR = 1, MKBMX1
SPAREK (ISPR,NPFLKA) = ZERZER
100 CONTINUE
* User dependent spare flags:
DO 200 ISPR = 1, MKBMX2
ISPARK (ISPR,NPFLKA) = 0
200 CONTINUE
* Save the track number of the stack particle:
ISPARK (MKBMX2,NPFLKA) = NPFLKA
NPARMA = NPARMA + 1
NUMPAR (NPFLKA) = NPARMA
NEVENT (NPFLKA) = 0
DFNEAR (NPFLKA) = +ZERZER
* ... to this point: don't change anything
* Particle age (s)
AGESTK (NPFLKA) = +ZERZER
AKNSHR (NPFLKA) = -TWOTWO
* Kinetic energy of the particle (GeV)
TKEFLK (NPFLKA) = SQRT ( PBEAM**2 + AM (IONID)**2 ) - AM (IONID)
* Particle momentum
PMOFLK (NPFLKA) = PBEAM
* PMOFLK (NPFLKA) = SQRT ( TKEFLK (NPFLKA) * ( TKEFLK (NPFLKA)
* & + TWOTWO * AM (IONID) ) )

```

* Cosines (tx,ty,tz)
 TXFLK (NPFLKA) = UBEAM
 TYFLK (NPFLKA) = VBEAM
 TZFLK (NPFLKA) = WBEAM
 * TZFLK (NPFLKA) = SQRT (ONEONE - TXFLK (NPFLKA)**2
 * & - TYFLK (NPFLKA)**2)
 * Polarization cosines:
 TXPOL (NPFLKA) = -TWOTWO
 TYPOL (NPFLKA) = +ZERZER
 TZPOL (NPFLKA) = +ZERZER
 * Particle coordinates

* Σφαιρική πηγή νερού
 10 xxx = -WHASOU(1) + 2 * WHASOU(1) * FLRNDM(X)
 yyy = -WHASOU(1) + 2 * WHASOU(1) * FLRNDM(X)
 zzz = -WHASOU(1) + 2 * WHASOU(1) * FLRNDM(X)
 IF((xxx**2 + yyy**2 + zzz**2).GT.WHASOU(1)**2) GOTO 10
 IF(zzz.GT.-4.93.AND. zzz.LT.44.83.AND.
 & sqrt(xxx**2 + yyy**2).LE.4.93) GOTO 10
 XFLK (NPFLKA) = xxx
 YFLK (NPFLKA) = yyy
 ZFLK (NPFLKA) = zzz

* Ημισφαιρική πηγή ιζήματος
 * 10 xxx = -WHASOU(1) + 2 * WHASOU(1) * FLRNDM(X)
 * yyy = -WHASOU(1) + 2 * WHASOU(1) * FLRNDM(X)
 * zzz = -WHASOU(1) + 2 * WHASOU(1) * FLRNDM(X)
 * IF((xxx**2 + yyy**2 + zzz**2).GT.WHASOU(1)**2) GOTO 10
 * IF(zzz.GT.-4.93.AND. zzz.LT.44.83.AND.
 * & sqrt(xxx**2 + yyy**2).LE.4.93) GOTO 10
 * XFLK (NPFLKA) = xxx
 * YFLK (NPFLKA) = yyy
 * ZFLK (NPFLKA) = zzz
 * IF(zzz.GT.-5.63) GOTO 10

* Αρχικά Στοιχεία
 * XFLK (NPFLKA) = XBEAM
 * YFLK (NPFLKA) = YBEAM
 * ZFLK (NPFLKA) = ZBEAM
 * Calculate the total kinetic energy of the primaries: don't change

```

IF ( ILOFLK (NPFLKA) .EQ. -2 .OR. ILOFLK (NPFLKA) .GT. 100000 )
& THEN
TKESUM = TKESUM + TKEFLK (NPFLKA) * WTFLK (NPFLKA)
ELSE IF ( ILOFLK (NPFLKA) .NE. 0 ) THEN
TKESUM = TKESUM + ( TKEFLK (NPFLKA) + AMDISC (ILOFLK(NPFLKA)) )
& * WTFLK (NPFLKA)
ELSE
TKESUM = TKESUM + TKEFLK (NPFLKA) * WTFLK (NPFLKA)
END IF
RADDLY (NPFLKA) = ZERZER
* Here we ask for the region number of the hitting point.
* NREG (NPFLKA) = ...
* The following line makes the starting region search much more
* robust if particles are starting very close to a boundary:
CALL GEOCRS ( TXFLK (NPFLKA), TYFLK (NPFLKA), TZFLK (NPFLKA) )
CALL GEOREG ( XFLK (NPFLKA), YFLK (NPFLKA), ZFLK (NPFLKA),
& NRGFLK(NPFLKA), IDISC )
* Do not change these cards:
CALL GEOHSM ( NHSPNT (NPFLKA), 1, -11, MLATTC )
NLATTC (NPFLKA) = MLATTC
CMPATH (NPFLKA) = ZERZER
CALL SOEVSV
RETURN
*==== End of subroutine Source =====*
END

```

6.4 Τροποποιημένο Αρχείο usrmed.f

```

*$ CREATE USRMED.FOR
*COPY USRMED
* *
*==== usrmed =====*
* *
SUBROUTINE USRMED ( IJ, EKSCO, PLA, WEE, MREG, NEWREG, XX, YY, ZZ,
& TXX, TYY, TZZ, TXXPOL, TYYPOL, TZZPOL )
INCLUDE '(DBLPRC)'
INCLUDE '(DIMPAR)'
INCLUDE '(IOUNIT)'
*
*_____*
* *
* Copyright (C) 1991-2011 by Alfredo Ferrari & Paola Sala *
* All Rights Reserved. *

```



```

* *
* *
* USeR MEDium dependent directives: *
* *
* Created on 10 May 1996 by Alfredo Ferrari & Paola Sala *
* Infn - Milan *
* *
* Last change on 31-Mar-11 by Alfredo Ferrari *
* *
* Input variables: *
* ij = particle id *
* Eksco = particle kinetic energy (GeV) *
* Pla = particle momentum (GeV/c) *
* Wee = particle weight *
* Mreg = (original) region number *
* Newreg = (final) region number *
* Xx,Yy,Zz = particle position *
* Txx,Tyy,Tzz = particle direction *
* Txx,Tyy,Tzzpol = particle polarization direction *
* *
* The user is supposed to change only WEE if MREG = NEWREG and *
* WEE, NEWREG, TXX, TYY, TZZ (TXXPOL, TYYPOL, TZZPOL) if *
* MREG .NE. NEWREG *
* *
* *
* Routing to kill secondary ISOTOPE products as well as the non *
* gammas of the primary ISOTOPE . *
* *
* Last change on 18-Aug-15 by Eleftherios Skordis *
* *
*_____.*
*
INCLUDE '(CASLIM)'
INCLUDE '(FLKMAT)'
INCLUDE '(TRACKR)'
INCLUDE '(FLKSTK)'
*
* COMMON / PRMORGIN / ORGINZ
*
* usual flag for first call:
LOGICAL LFIRST
SAVE LFIRST
DATA LFIRST / .TRUE. /
*

```

```

*
IF ( LFIRST ) THEN
WRITE(LUNOUT,*) "
WRITE(LUNOUT,*) 'usrmed.f modified by E. Skordis'
WRITE(LUNOUT,*) ' version: 2015-08-18'
WRITE(LUNOUT,*) 'Filtering decay products for initial ISOTOPE
& gamma rays'
WRITE(LUNOUT,*) 'Warning: might not work if the half life
& of the initial ISOTOPE is more than 10 milion years'
WRITE(LUNOUT,*) "
LFIRST = .FALSE.
ENDIF
IF ( LTRACK .EQ. 2 .AND. MREG .EQ. NEWREG ) THEN
IF ( ATRACK .GT. (Agestk(1)) .OR. IJ .NE. 7)
& WEE = ZERZER
ENDIF
100 CONTINUE
*
RETURN
*==== End of subroutine Usrmed =====
END

```

6.5 Αρχείο για την εξαγωγή στοιχείων από το αρχείο εξόδου της κάρτας EVENTBIN

```

# Run as : ./get_eventbin.sh [file]
cat $1 | grep -v ^$ |grep -v 'DATE' |grep -v 'a' > dump1
awk '{if (NR>6) {print}}' dump1 > eventbin_clean.dat
grep -v 0.0000E+00 eventbin_clean.dat >kathara.dat
echo ' Done!'
rm dump1
rm eventbin_clean.dat

```

6.6 Αρχείο εισόδου για το στοιχείο του ²⁰⁸Tl στο θαλάσσιο περιβάλλον για τον κώδικα FLUKA

```

TITLE
C tl208
GLOBAL -1.
DEFAULTS EM-CASCA
BEAM 0.0 0.0 ISOTOPE
SOURCE 157.6

```

HI-PROPE 81.0 208.0
 RADDECAY 2.
 DELTARAY 0.000001 BLCKHOLE NaI NOPRINT
 EMFCUT 0.000001 0.000001 0.000001 BLCKHOLE NaI ELPO-THR
 EMFCUT 0.000001 0.000001 0.000001 BLCKHOLE NaI ANNH-THR
 EMFCUT 0.000001 0.000001 0.000001 BLCKHOLE NaI PHOT-THR
 EMFCUT 0.000001 0.000001 BLCKHOLE NaI PHO2-THR
 EMFCUT BLCKHOLE NaI PROD-CUT
 SCORE EM-ENRGY PHOTON ALL-PART
 DCYSCORE -1. evbn evbn EVENTBIN
 EVENTBIN 12.0 EM-ENRGY 50. NaI evbn
 EVENTBIN NaI &
 GEOBEGIN COMBNAME
 0 0 C tl
 * cosmos
 SPH cosmos 0.0 0.0 0.0 300.0
 * kapaki
 RCC kapaki 0.0 0.0 36.83 0.0 0.0 8.0 5.31
 * kelufos eksw
 RCC kelufos 0.0 0.0 -4.93 0.0 0.0 41.76 4.93
 * kelufos mesa
 RCC kelufosm 0.0 0.0 -4.15 0.0 0.0 40.98 4.15
 * ekswteriko alumn
 RCC alumn 0.0 0.0 -3.97 0.0 0.0 7.94 4.02
 * eswteriko alumn
 RCC alumnesw 0.0 0.0 -3.97 0.0 0.0 7.94 3.97
 * cristalos
 RCC cristalo 0.0 0.0 -3.81 0.0 0.0 7.62 3.81
 * water source
 SPH source 0.0 0.0 0.0 157.6
 SPH body1 0.0 0.0 0.0 388.
 END
 kapaki 5 +kapaki
 kelufos 5 +kelufos -kelufosm
 * aluminio
 eswaeras 5 +kelufosm -alumn -alumnesw -cristalo
 alumn 5 +alumn -alumnesw
 Al203 5 +alumnesw -cristalo
 NaI 5 +cristalo
 water 5 +cosmos -source -kapaki -kelufos -kelufosm -alumn -alumnesw -cristalo
 source 5 +source -kapaki -kelufos -kelufosm -alumn -alumnesw -cristalo
 blackhol 5 +body1 -cosmos
 END
 GEOEND

```

* Al2O3
*
MATERIAL 0.55 AlO
MATERIAL 53.0 4.93 IODINE
* NaI Crystal
MATERIAL 3.667 NaI
MATERIAL 0.825 Acetal
* Air
*
MATERIAL .00120479 AIR
* Water
MATERIAL 1.026 WATER
MATERIAL 13. 2.94 ALUMINUM
COMPOUND -1.248E-4 CARBON -0.755267 NITROGEN -0.231781 OXYGENAIR
COMPOUND -0.012827 ARGON AIR
COMPOUND -0.1905 OXYGEN -0.381 HYDROGEN -0.4285 CARBONAcetal
COMPOUND 0.8467 IODINE 0.1533 SODIUM NaI
COMPOUND -0.470749 OXYGEN -0.52925 ALUMINUM AlO
COMPOUND -0.111 HYDROGEN -0.889 OXYGEN WATER
ASSIGNMA WATER source
ASSIGNMA NaI NaI
ASSIGNMA AlO Al2O3
ASSIGNMA ALUMINUM alumn
ASSIGNMA AIR eswaeras
ASSIGNMA Acetal kapaki
ASSIGNMA Acetal kelufos
ASSIGNMA WATER water
ASSIGNMA BLCKHOLE blackhol
RANDOMIZ 1.190734863.
START 145553600.
STOP

```

6.7 Αρχείο εισόδου για το στοιχείο του ^{208}Tl στο θαλάσσιο περιβάλλον για τον κώδικα MCNP-CP

```

c Cells
1 1 -0.825 -2 $kapaki
2 1 -0.825 -3 4 $kelufos
3 2 -0.00120479 -4 5 6 7 $eswteriko-aeras
4 3 -2.94 -5 6 $aluminio
5 5 -0.55 -6 7 $Al2O3
6 4 -3.667 -7 $cristalos NaI
7 6 -1.026 -1 8 2 3 4 5 6 7 $water

```

```
8 6 -1.026 -8 2 3 4 5 6 7 $source water
9 0 1 $universe
c Geometry
1 so 200 $cosmos
2 rcc 0 0 36.83 0 0 8 5.31 $kapaki
3 rcc 0 0 -4.93 0 0 41.76 4.93 $kelufos eksw
4 rcc 0 0 -4.15 0 0 40.98 4.15 $kelufos mesa
5 rcc 0 0 -3.97 0 0 7.94 4.02 $ekswteriko alumn
6 rcc 0 0 -3.97 0 0 7.94 3.97 $eswteriko alumn
7 rcc 0 0 -3.81 0 0 7.62 3.81 $crystalos
8 so 157.6 $water source
mode p e
imp:p 1 1 1 1 1 1 1 1 0
imp:e 1 1 1 1 1 1 1 1 0
sdef par=2 pos=0 0 0 rad=d1 cell=8 zam=0812080
phys:p 10 0 0 1 0.001
phys:e 10
si1 0. 157.7
CPS
f8:p,e 6
e8 0 0.000001 0.00092 3989i 3.99
m1 8000 -0.1905 1000 -0.381 6000 -0.4285 $Acetal
m2 7000 -0.755267 8000 -0.231781 18000 -0.012827 6000 -0.000125 $Air insite
m3 13000 -1.0 $Aluminum
m4 11000 -0.1533 53000 -0.8467 $NaI
m5 13000 -0.529251 8000 -0.470749 $Al2O3
m6 1000 -0.111 8000 -0.889 $Water
nps 300000000
```

Βιβλιογραφία

- [1] Ευφροσύνη Ανδρουλάκη, Ανάπτυξη μεθοδολογίας φασματοσκοπίας ακτίνων-γ για in-situ μετρήσεις σε θαλάσσιο ίζημα, Μεταπτυχιακή εργασία 2013
- [2] Χρήστος Μπαγατέλας, Μελέτη απόδοσης και της ελάχιστης ανιχνευόμενης ενεργότητας ραδιονουκλιδίων από ανιχνευτή NaI(Tl) στο υδάτινο περιβάλλον, Μεταπτυχιακή εργασία, 2008
- [3] C. Bagatelas · C. Tsabaris · M. Kokkoris · C. T. Papadopoulos · R. Vlastou, Determination of marine gamma activity and study of the minimum detectable activity (MDA) in 4π geometry based on Monte Carlo simulation, Springer Science + Business Media B.V. 2009
- [4] X-5 Monte Carlo Team, MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Volume I,II,III, 2003
- [5] Andrey N. Berlizov¹, MCNP-CP Upgrade Patch Version 3.2 A CORRELATED PARTICLE SOURCE EXTENSION OF A GENERAL PURPOSE MONTE CARLO N-PARTICLE TRANSPORT CODE MANUAL, 2010
- [6] J. K. Shultis and R. E. Faw, AN MCNP PRIMER
- [7] Alfredo Ferrari, Paola R. Sala, Alberto Fassò, Johannes Ranft, Fluka: a multi-particle transport code , 2011
- [8] Vasilis Vlachoudis, flair for FLUKA Quick Start Guide: Basic, 2013
- [9] Richard B. Firestone, Table of Isotopes (TOI), 1996
- [10] M.J. Berger, J.H. Hubbell, S.M. Seltzer, J. Chang, J.S. Coursey, R. Sukumar, D.S. Zucker, and K. Olsen, XCOM: Photon Cross Sections Database, NIST, PML, Radiation Physics Division
- [11] Κωνσταντίνος Ν. Αναγνωστόπουλος, Προγραμματισμός με εφαρμογές στην επιστήμη του μηχανικού, 2010
- [12] Giuseppe Battistoni, Till Boehlen, Francesco Cerutti, Pik Wai Chin, Luigi Salvatore Esposito, Alberto Fassò, Alfredo Ferrari, Anton Lechner, Alessio Mereghetti, Pablo Garcia Ortega, Johannes Ranft, Stefan Roesler, Paola R. Sala, and Vasilis Vlachoudis, Overview of the FLUKA code, 2013

[13] Μιχαλοπούλου- Πετροπούλου Βεατρίκη, Μελέτη επιπέδων ραδιενέργειας και συγκέντρωσεων βαρέων μετάλλων σε παράκτιες περιοχές του Λαυρίου, Διπλωματική εργασία 2014