



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΥΛΙΚΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ
ΦΥΣΙΚΗΣ**



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»

**Μελέτη ανιχνευτή micromegas σε πεδίο φωτονίων και
νετρονίων με χρήση του πακέτου προσομοίωσης Geant4**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της Καστριώτου Μαρίας

Επιβλέπων: Γεώργιος Τσιπολίτης

Αθήνα, Φεβρουάριος, 2013



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών
Τομέας Φυσικής
Δ.Π.Μ.Σ. Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές
Ε.Μ.Π./Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος

**Μελέτη του Ανιχνευτή MicroMEGAS
σε πηγές νετρονίων και φωτονίων
με χρήση του προγράμματος Geant4**

Καστριώτου Μαρία

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Καθηγητής ΕΜΠ
Αλεξόπουλος Θεόδωρος

Καθηγητής ΕΜΠ
Γαζής Ευάγγελος

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ
Τσιπολίτης Γεώργιος

.....

.....

.....

.....
Καστριώτου Μαρία
Διπλωματούχος Φυσικός Εφαρμογών

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα. Δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.



Αυτή η εργασία χορηγείται με άδεια Creative Commons Αναφορά Δημιουργού-Μη Εμπορική Χρήση-Όχι Παράγωγα Έργα 3.0 Ελλάδα¹

¹<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/gr/>

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	1
1 Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας-ύλης	6
1.1 Εισαγωγή	6
1.2 Αλληλεπίδραση νετρονίων με την ύλη	6
1.2.1 Μικροσκοπική ενεργός διατομή πυρηνικής αντίδρασης με νετρόνια	7
1.2.2 Πυρηνικές αντιδράσεις με νετρόνια	7
1.2.3 Ολική ενεργός διατομή - Μέση ελεύθερη διαδρομή . . .	11
1.3 Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη	11
1.3.1 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	12
1.3.2 Σκέδαση Compton	13
1.3.3 Δίδυμη γέννεση	14
1.4 Αλληλεπίδραση φορτισμένων σωματιδίων με την ύλη	15
1.4.1 Αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων με την ύλη	17
1.4.2 Ενεργειακές απώλειες φορτισμένων σωματιδίων	18
2 Ο ανιχνευτής MICROMEGAS	20
2.1 Εισαγωγή	20
2.2 Δομή του Micromegas	20
2.3 Λειτουργία του Micromegas	22
2.4 Ο ανιχνευτής σε σχέση με την προσομοίωση	24
3 Λογισμικά πακέτα	25
3.1 Εισαγωγή	25
3.2 Το GEANT4	25
3.2.1 Επισκόπηση της λειτουργίας του Geant4	26
3.3 Το λογισμικό ROOT	29

4	Μεθοδολογία της προσομοίωσης	31
4.1	Εισαγωγή	31
4.2	Γεωμετρία	31
4.3	Πηγή	36
4.3.1	Πηγές νετρονίων	36
4.3.2	Πηγές φωτονίων	38
4.4	Φυσική στην προσομοίωση	40
4.5	Πληροφορίες για τα γεγονότα	41
4.6	Μελέτη των γεγονότων	41
4.6.1	Προσομοίωση νετρονίων	41
4.7	Αποθήκευση των δεδομένων	43
4.8	Διεξαγωγή του πειράματος	44
5	Προσομοίωση Φωτονίων	45
5.1	Εισαγωγή	45
5.2	Πηγή $^{55}_{22}\text{Fe}$	45
5.3	Πηγή $^{48}_{109}\text{Cd}$	51
6	Αποτελέσματα Νετρονίων	56
6.1	Η φυσική πίσω από το πείραμα	56
6.2	Δέσμη νετρονίων κάθετη στον ανιχνευτή	64
6.2.1	Με αναλογίες αερίου $\text{Ar} : \text{CO}_2$ 80 : 20, στον ανιχνευτή με το ρομβοειδές παράθυρο	64
6.2.2	Υπολογισμός της ενέργειας που εναποτίθεται από πρωτόνια 72	
6.2.3	Με αναλογίες αερίου $\text{Ar} : \text{CO}_2$ 93 : 7, στον ανιχνευτή με το ρομβοειδές παράθυρο	75
6.2.4	Σύγκριση των δύο αερίων στον ανιχνευτή με το ρομβοειδές παράθυρο	76
6.2.5	Με αναλογίες αερίου $\text{Ar} : \text{CO}_2$ 93 : 7, στον ανιχνευτή με το απλό παράθυρο	78
6.2.6	Σύγκριση των δύο ανιχνευτών	81
6.3	Δέσμη στο πλάι του ανιχνευτή (οριζόντια)	83
6.3.1	Με αναλογίες αερίου $\text{Ar} : \text{CO}_2$ 93 : 7, στον ανιχνευτή με το ρομβοειδές παράθυρο	83
6.3.2	Σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάλογα με την κατεύθυνση της δέσμης	86
7	Συμπεράσματα	88
A'	X-rays και ενέργειες σύνδεσης	90

Β' Κώδικας για το Geant4	91
Βιβλιογραφία	110

Περίληψη

Οι ανιχνευτές αερίου, βασισμένοι στην τεχνολογία του Micromegas, χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορα πειράματα ατομικής, πυρηνικής και σωματιδιακής φυσικής. Επιπλέον, έχουν ιδιαίτερα χαμηλό κόστος κατασκευής, παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε περιβάλλον υψηλής ακτινοβολίας, ενώ συνδυάζουν ικανότητες σκανδαλισμού και προσδιορισμού τροχιάς. Οι παραπάνω ιδιότητες τους καθιστούν ιδανικούς υποψήφιους για την αναβάθμιση του συστήματος ανίχνευσης μιονίων, ως αντικαταστάτες των ανιχνευτών Cathode Strip Chambers(CSC), του πειράματος ATLAS. Στο πείραμα αυτό συγκρούονται δέσμες πρωτονίων με αποτέλεσμα την παραγωγή καταιγισμών σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένων νετρονίων. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η μελέτη της συμπεριφοράς του Micromegas σε περιβάλλον νετρονίων έτσι ώστε να προβλεφθεί η απόκριση του ανιχνευτή στον σωματιδιακό «θόρυβο», δεδομένου ότι το ενδιαφέρον εστιάζεται στην ανίχνευση των μιονίων. Για τις ανάγκες της μελέτης χρησιμοποιήθηκε το πακέτο προσομοίωσης Monte Carlo Geant4, με το οποίο μελετήθηκε η εναπόθεση ενέργειας νετρονίων 5.5 MeV σε δύο διαφορετικούς τύπους ανιχνευτή Micromegas, σε διαφορετικές αναλογίες αερίου και σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Επίσης πραγματοποιήθηκε εικονικό πείραμα με φωτόνια χαμηλών ενεργειών, προκειμένου να μελετηθεί η λειτουργία του ανιχνευτή σε τέτοια πεδία καθώς και η σημαντική συμβολή των υλικών κατασκευής του.

Abstract

Gaseous detectors based on the Micromegas principle have already been used in several atomic, nuclear and particle physics experiments. Moreover, they have low construction cost and are resistant to high levels of radiation. They also succeed in combining triggering and tracking properties. Consequently, they provide an excellent candidate for replacing the Cathode Strip Chambers (CSC) of the ATLAS muon spectrometer in the very forward/backward region. In the ATLAS experiment, two proton beams collide, producing particle showers, including neutrons. Therefore it is vital that the performance of the detectors in a neutron radiation field be studied, in order to predict the response of the detector to the particle "noise", taking into consideration the fact that the purpose of the detector is to detect muons. To meet this end, the Monte-Carlo simulation toolkit Geant4 has been utilized in the present work, in order to study the energy deposition of 5.5 MeV neutrons on two different types of Micromegas detectors, with different proportion of gases and at different direction. In addition to that, a virtual experiment with low energy photons has been held, in order to study the function of the detector in such fields as well as the significant contribution of its construction materials.

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με στήριξαν σε αυτό το πόνημα, και που η συμβολή τους ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωσή του. Ως εκ τούτου οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή και επιβλέποντα μου, Καθ. Γιώργο Τσιπολίτη, ο οποίος με τη διδασκαλία του κίνησε το ενδιαφέρον μου για τη Φυσική Υψηλών Ενεργειών αρχικά, και στη συνέχεια για την υπέροχη φυσική που κρύβεται στο αντικείμενο των ανιχνευτών. Τον ευχαριστώ επίσης για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με κάτι εντελώς καινούριο, να διευρύνω τους ορίζοντές μου, καθώς επίσης και για την εμπιστοσύνη του.

Για την ανεξάντλητη διάθεσή του στα πειράματα στο CERN, το μεράκι του στο εργαστήριο και την υπομονή του να ασχοληθεί με οποιαδήποτε απορία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθ. Θεόδωρο Αλεξόπουλο. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμη τον καθηγητή μου κύριο Ευάγγελο Γαζή για τις συζητήσεις μαζί του, την υποστήριξη και βοήθειά του σε θέματα που προέκυπταν, και τη συμβολή του στο να γίνει η ζωή στο CERN πιο εύκολη, ειδικά τις πρώτες μέρες.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω τον κύριο Μιχάλη Κόκκορη, τον άνθρωπο που ήταν πάντα στο διπλανό γραφείο, έτοιμος να βοηθήσει σε οποιαδήποτε ζήτημα, είτε είχε σχέση με τη φυσική, είτε με τη ζωή μας. Η επιμονή του στις λεπτομέρειες και ο τρόπος που σκέφτεται και αναλύει τα πράγματα με δίδαξαν πολλά, και για όλα αυτά τον ευχαριστώ.

Οι συμφοιτητές και φίλοι μου Θάνος Σταματόπουλος και Στέργιος Τσιγαρίδας μου έμαθαν τί θα πει συνάδελφος, και έκαναν τις ατελείωτες ώρες στο εργαστήριο να περνάνε γρήγορα και ευχάριστα. Ήταν πάντα δίπλα μου, με βοήθησαν ανεκτίμητα όλον αυτόν τον καιρό και τους αξίζει ένα μεγάλο ευχαριστώ.

Ειδικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Τάσο Μαγγέλη και την Ιωάννα Παπαζάνη. Τα τελευταία 3 χρόνια ήμασταν μαζί τόσο στη δουλειά όσο και στην ξεκούραση. Μάθαμε πόσο μεγάλη αξία έχει μια κανάτα τσάι, και τώρα μαθαίνουμε πόσο πολύτιμες είναι κάποιες στιγμές.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον φίλο μου Λευτέρη Σκορδή, για τη στήριξη και την υπομονή του όλον αυτόν τον καιρό, και για όλα όσα μου έμαθε. Επίσης, για τις ατέλειωτες συζητήσεις για την παρούσα εργασία και τη σημαντική βοήθειά του στην εκπόνησή της.

Τέλος, ένα τεράστιο ευχαριστώ οφείλω σε έναν υπέροχο άνθρωπο. Τη μητέρα μου, που τόσα χρόνια με στηρίζει υλικά και ηθικά, και είναι δίπλα μου σε κάθε μου βήμα.

Κεφάλαιο 1

Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας-ύλης

1.1 Εισαγωγή

Ο ανιχνευτής micromegas (MICRO-MEsh Gaseous Structure) είναι ένας ανιχνευτής αερίου, το σχέδιο του οποίου προτάθηκε τη δεκαετία του 1990 από τους J.Collag και Γ. Γιοματάρη, ως εξέλιξη των wire chambers. Σήμερα ο micromegas χρησιμοποιείται στην πειραματική φυσική, και κυρίως στη σωματιδιακή φυσική, την πυρηνική φυσική και την αστροφυσική, για την ανίχνευση φορτισμένων σωματιδίων αλλά και ακτινοβολίας γάμμα.

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί η ανίχνευση φωτονίων και νετρονίων από ανιχνευτές τύπου micromegas, έτσι για αρχή πρέπει να γίνει αναφορά στις αλληλεπιδράσεις αυτών με την ύλη. Όπως θα γίνει φανερό από εκείνες τις παραγράφους, από τις αλληλεπιδράσεις προκύπτουν σωματίδια όπως ηλεκτρόνια, πρωτόνια και διάφορα βαρέα ιόντα και συνεπώς είναι απαραίτητο να παρατεθούν και οι αλληλεπιδράσεις αυτών των σωματιδίων με την ύλη. Τέλος, δεδομένου ότι η μελέτη αφορά τους ανιχνευτές τύπου micromegas, δεν γίνεται παρά να αναφερθούμε στις αρχές λειτουργίας και στα γενικά χαρακτηριστικά τους.

1.2 Αλληλεπίδραση νετρονίων με την ύλη

Τα νετρόνια είναι σωματίδια ηλεκτρικά ουδέτερα, ως εκ τούτου δεν είναι δυνατόν να αλληλεπιδράσουν μέσω δυνάμεων Coulomb με τα περιφερειακά ηλεκτρόνια ή τους πυρήνες των ατόμων της ύλης. Έτσι η συμπεριφορά τους μέσα στην ύλη είναι τελείως διαφορετική από εκείνη των φορτισμένων σωματιδίων

και των φωτονίων.

1.2.1 Μικροσκοπική ενεργός διατομή πυρηνικής αντίδρασης με νετρόνια

Το μέγεθος που χαρακτηρίζει την πιθανότητα ορισμένου τύπου αντίδρασης των νετρονίων με ορισμένου είδους πυρήνες είναι γνωστό ως *μικροσκοπική ενεργός διατομή* της αντίδρασης. Η μικροσκοπική ενεργός διατομή δίνεται από τη σχέση

$$\sigma = \frac{\Delta R}{I \cdot \Delta N \cdot \Delta t} \quad (1.1)$$

όπου ΔN είναι το πλήθος των πυρήνων, και ουσιαστικά παριστάνει το πλήθος των αντιδράσεων (ΔR) που πραγματοποιούνται ανά μονάδα χρόνου, ανά μονάδα εντάσεως της δέσμης (I) και ανά πυρήνα. Επομένως η πιθανότητα αλληλεπίδρασης των νετρονίων με τους πυρήνες ενός υλικού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το τύπο του υλικού και από την ενέργεια των νετρονίων. Γενικώς, η ενεργός διατομή σ , είναι πολύ μικρή και τα νετρόνια μπορούν να ταξιδεύουν μεγάλες αποστάσεις (αρκετά εκατοστά) χωρίς αλληλεπίδραση μέσα στην ύλη.

1.2.2 Πυρηνικές αντιδράσεις με νετρόνια

Όπως φάνηκε παραπάνω, η ενεργός διατομή της κάθε είδους πυρηνικής αντίδρασης νετρονίου με ορισμένο πυρήνα εξαρτάται από την ενέργεια του νετρονίου. Είναι προφανές ότι, αν μπορούν να πραγματοποιηθούν παραπάνω από μία πυρηνικές αντιδράσεις για κάποια τιμή ενέργειας του νετρονίου, η πιθανότερη να πραγματοποιηθεί εκείνη η οποία για την συγκεκριμένη ενέργεια έχει τη μεγαλύτερη ενεργό διατομή. Μπορεί λοιπόν κανείς να πει ότι από την ενέργεια του νετρονίου καθορίζεται με κάποια πιθανότητα το είδος της πυρηνικής αντίδρασης που θα πραγματοποιηθεί με ορισμένο πυρήνα.

Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί πως για περιοχές ενέργειας αρκετά μεγάλου εύρους, τα χαρακτηριστικά των μηχανισμών αλληλεπίδρασης με ορισμένου τύπου πυρήνες δεν μεταβάλλονται. Έτσι, ανάλογα με την ενέργειά τους, τα νετρόνια κατατάσσονται χονδρικά στις παρακάτω κατηγορίες:

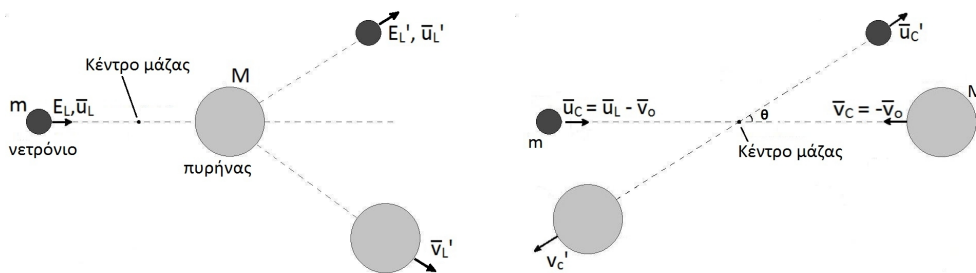
- Υψηλής ενέργειας: $E > 100 \text{ MeV}$
- Ταχεία νετρόνια: $100 \text{ keV} < E < 100 \text{ MeV}$
- Επιθερμικά: $0.1 \text{ eV} < E < 100 \text{ keV}$
- Θερμικά νετρόνια: $E \sim kT \sim 1/40 \text{ eV}$

- Ψυχρά ή Υπέρ-ψυχρα: $E \sim \text{meV}$ ή μeV

α. Ελαστική σκέδαση νετρονίου - πυρήνα, (n,n)

Η ελαστική σκέδαση είναι ο βασικότερος μηχανισμός απώλειας ενέργειας των νετρονίων με αρχική ενέργεια της τάξης του MeV, αλλά είναι πιθανή για οποιαδήποτε ενέργεια νετρονίου. Όπως είναι φανερό και από το όνομά της, κατά την ελαστική σκέδαση διατηρούνται τόσο η ενέργεια όσο και η ορμή του συστήματος νετρονίου - πυρήνα. Η αντίδραση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο μηχανισμούς. Κατά τον πρώτο, που ονομάζεται *σύνθετη* ή *εκλεκτική ελαστική σκέδαση*, θεωρείται ότι το νετρόνιο απορροφάται από τον πυρήνα, με αποτέλεσμα έναν νέο πυρήνα, ισοτοπικό του πρώτου, και σε διεγερμένη κατάσταση. Κατά την αποδιέγερσή του ο πυρήνας αυτός εκπέμπει ένα νετρόνιο, μεταβαίνοντας έτσι στην αρχική, μη διεγερμένη του κατάσταση. Ο δεύτερος μηχανισμός ονομάζεται *δυναμική ελαστική σκέδαση*. Κατ' αυτόν, το νετρόνιο προσεγγίζει τον πυρήνα χωρίς να ενσωματωθεί σε αυτόν, αλλά πραγματοποιείται μεταξύ τους ένα είδος ελαστικής κρούσης.

Ένας απλός τρόπος μελέτης της ελαστικής κρούσης ενός νετρονίου με "ελεύθερο" πυρήνα είναι σαν την ελαστική κρούση δύο μικρών σφαιρών.



(α) στο σύστημα του εργαστηρίου

(β) στο σύστημα κέντρου μάζας

Σχήμα 1.1: Η ελαστική σκέδαση νετρονίου με τον πυρήνα ατόμου

Εφαρμόζοντας τις αρχές διατήρησης ορμής και ενέργειας σε δύο συστήματα αναφοράς, το *σύστημα εργαστηρίου* (σύστημα-L) και το *σύστημα κέντρου μάζας* (σύστημα-C), προκύπτει η παρακάτω σχέση, που συσχετίζει την ενέργεια του νετρονίου πριν και μετά τη σκέδαση:

$$\frac{E'_L}{E_L} = \frac{A^2 + 2A \cos \theta + 1}{(1 + A)^2} \quad (1.2)$$

όπου: E_L, E'_L , η κινητική ενέργεια του νετρονίου πριν και μετά τη σκέδαση στο σύστημα του εργαστηρίου

A , ο μαζικός αριθμός του πυρήνα - στόχου και

θ , η γωνία σκέδασης του νετρονίου στο σύστημα κέντρου μάζας

Στην περίπτωση που $\theta = \pi$, η ενέργεια που αποκτά το νετρόνιο μετά τη σκέδαση θα είναι η ελάχιστη δυνατή, και εύκολα υπολογίζεται από την (1.2)

$$E'_{L,min} = E_L \cdot \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2 \quad (1.3)$$

β. Ανελαστική σκέδαση νετρονίου - πυρήνα, (n,n')

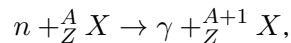
Όταν η ενέργεια του νετρονίου είναι αρκετά MeV, το νετρόνιο μπορεί να ενσωματωθεί στον πυρήνα, ο σύνθετος πυρήνας που δημιουργείται θα αποδιεγερθεί μερικώς με την εκπομπή νετρονίου, και ο πυρήνας που απομένει να βρίσκεται ακόμη σε διεγερμένη κατάσταση. Προκειμένου να αποδιεγερθεί πλήρως, ο πυρήνας εκπέμπει σχεδόν αμέσως μετά το νετρόνιο, ένα ή περισσότερα φωτόνια, και η αντίδραση αυτή είναι γνωστή ως *μη ελαστική* ή πιο σωστά *ανελαστική σκέδαση*.

Δεδομένης της εκπομπής φωτονίου από τον πυρήνα είναι προφανές ότι για να πραγματοποιηθεί η ανελαστική σκέδαση, θα πρέπει η ενέργεια του νετρονίου στο σύστημα κέντρου μάζας να είναι τουλάχιστον ίση με την ενέργεια της πρώτης στάθμης διέγερσης του πυρήνα, $E_C \geq E_1$. Για το σύστημα του εργαστηρίου αποδεικνύεται ότι το *κατώφλι της κινητικής ενέργειας του νετρονίου για τη πραγματοποίηση μη ελαστικής σκέδασης* είναι ίσο με

$$(E_L)_{min} = \frac{A+1}{A} E_1 \quad (1.4)$$

γ. Ραδιενεργός ενσωμάτωση, (n,γ)

Αν ο σύνθετος πυρήνας που δημιουργείται κατά την ενσωμάτωση νετρονίου, αποδιεγερθεί με εκπομπή ενός ή περισσότερων φωτονίων χωρίς εκπομπή σωματιδίου, τότε η πυρηνική αντίδραση ονομάζεται *ραδιενεργός ενσωμάτωση*. Η αντίδραση αυτή λοιπόν είναι της μορφής



και παρουσιάζει μεγάλη πιθανότητα για νετρόνια χαμηλής κινητικής ενέργειας, της τάξης του keV.

δ. Πυρηνικές αντιδράσεις τύπου (n,p), (n,d), (n,α)

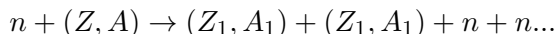
Όταν η κινητική ενέργεια του νετρονίου που αλληλεπιδρά με τον πυρήνα είναι αρκετά μεγάλη, ο δημιουργούμενος σύνθετος πυρήνας είναι δυνατόν να αποδιεγερθεί με εκπομπή ενός νουκλεονίου ή ακόμα και συγκροτήματος νουκλεονίων, όπως με εκπομπή πρωτονίου, δευτερίου ή και σωματιδίου-α.

ε. Πυρηνικές αντιδράσεις τύπου (n,2n), (n,3n)

Όταν τα νετρόνια είναι πολύ μεγάλης ενέργειας είναι δυνατή η πραγματοποίηση πυρηνικών αντιδράσεων που οδηγούν σε εκπομπή δύο ή τριών νετρονίων. Η πυρηνική αντίδραση (n,2n) πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Κατά το πρώτο πραγματοποιείται ανελαστική σκέδαση νετρονίου - πυρήνα, και κατά το δεύτερο ο πυρήνας, που απομένει σε κατάσταση διεγέρσεως, αποδιεγείρεται με την εκπομπή ενός ακόμα νετρονίου. Αντίστοιχα, η πυρηνική αντίδραση (n,3n) πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Τα δύο πρώτα είναι της (n,2n), και μετά το δεύτερο στάδιο ο πυρήνας παραμένει διεγερμένος. Έτσι, αποδιεγείρεται με εκπομπή και τρίτου νετρονίου. Όπως στην ανελαστική σκέδαση, έτσι και εδώ η πραγματοποίηση των πυρηνικών αντιδράσεων απαιτούν ένα κατώφλι ενέργειας του νετρονίου, που για την (n,2n) κυμαίνεται στα 7-10 MeV (με εξαίρεση την αντίδραση ${}^9\text{Be}(n, 2n){}^8\text{Be}$ που έχει κατώφλι ενέργειας μόλις 1.8 MeV) και στην (n,3n) στα 11-30 MeV.

στ. Πυρηνική σχάση βαρέος πυρήνα με νετρόνια

Η σχάση βαρέος πυρήνα είναι ουσιαστικά ο τεμαχισμός του σε δύο ελαφρότερους. Σε σπάνιες περιπτώσεις η σχάση είναι *αυθόρμητη*, ενώ γίνεται πολύ πιθανή με την πρόσδοση ενέργειας (μέσω απορρόφησης φωτονίου ή νετρονίου) μεγαλύτερης από ορισμένη ποσότητα που ονομάζεται *κατώφλι ενέργειας σχάσεως*. Έτσι πρόκειται για μια αντίδραση της μορφής



και σε κάθε περίπτωση συνοδεύεται από έκλυση ενέργειας της τάξης των 200 MeV.

ζ. Κατατεμαχισμός πυρήνων

Στην περίπτωση που νετρόνια ενέργειας της τάξης των 100 MeV συγκρουστούν με πυρήνες, η πυρηνική αντίδραση μεταξύ τους έχει ως αποτέλεσμα τον *κατατεμαχισμό* των πυρήνων, δηλαδή τον τεμαχισμό

τους σε διάφορα σωματίδια-συγκροτήματα νουκλεονίων και σε πυρήνες-θραύσματα. Τα σωματίδια που προκύπτουν είναι συνήθως αδρόνια και τέτοιες αντιδράσεις έχουν ως αποτέλεσμα τους λεγόμενους *πίδακες αδρονίων*, που αποτελούν αντικείμενο μελέτης της Φυσικής Υψηλών Ενέργειών.

1.2.3 Ολική ενεργός διατομή - Μέση ελεύθερη διαδρομή

Η *ολική ενεργός διατομή* είναι το άθροισμα των ενεργών διατομών της κάθε πιθανής αντίδρασης (όπως $\sigma_{el}, \sigma_{inel}, \sigma_{capt}$) νετρονίων ορισμένης ενέργειας με ορισμένους πυρήνες-στόχους, δηλαδή

$$\sigma_{tot} = \sigma_{el} + \sigma_{inel} + \sigma_{capt} + \dots$$

και ουσιαστικά εκφράζει την ολική πιθανότητα αλληλεπίδρασης νετρονίων ορισμένης ενέργειας με συγκεκριμένους πυρήνες. Το μέγεθος

$$\Sigma_{tot} = N \cdot \sigma_{tot}$$

όπου N η πυκνότητα των πυρήνων του υλικού, ονομάζεται *ολική μακροσκοπική ενεργός διατομή*.

Ένα ακόμα πολύ χαρακτηριστικό μέγεθος της κίνησης των νετρονίων στο υλικό μέσο είναι το *μέσο μήκος ελεύθερης διαδρομής*, το οποίο περιγράφει τη μέση απόσταση που διανύει το νετρόνιο μεταξύ δύο αλληλεπιδράσεων, και ισούται με

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma_{tot}}.$$

1.3 Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη

Τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με την ύλη με τρεις κυρίως μηχανισμούς:

- το Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Photoelectric effect)
- τη σκέδαση Compton (Compton scattering)
- τη δίδυμη γέννεση (Pair production)

Θεωρώντας ότι παράλληλη δέσμη μονοενεργειακών φωτονίων εντάσεως I_0 προσπίπτει κάθετα σε επίπεδο απορροφητή (απορροφητή σε σχήμα πλάκας) πάχους d , αποδεικνύεται ότι η ένταση κατά την έξοδο της από την πλάκα θα έχει ένταση

$$I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu d} \quad (1.5)$$

με $\mu = \sigma \cdot N$ όπου ο συντελεστής μ ονομάζεται *ολικός γραμμικός συντελεστής εξασθένισης*, και εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων της δέσμης και το είδος του υλικού, σ η ολική ενεργός διατομή ανά άτομο και N η πυκνότητα των ατόμων.

Ο ολικός γραμμικός συντελεστής μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συνιστώσες

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$

όπου οι τρεις αυτές συνιστώσες, ή *μερικοί γραμμικοί συντελεστές εξασθένισης*, τ , σ και κ , αναφέρονται στους τρεις μηχανισμούς αλληλεπίδρασης, δηλαδή το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (τ), το φαινόμενο Compton (σ), και τη δίδυμη γέννηση (κ).

1.3.1 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ένας μηχανισμός αλληλεπίδρασης φωτονίων ενέργειας E_γ (συνήθως μικρότερης του 0.1 MeV με ένα από τα ηλεκτρόνια του ατόμου. Κατά το φαινόμενο αυτό το ηλεκτρόνιο απορροφά όλη την ενέργεια του φωτονίου, με αποτέλεσμα να αποσπάται με κινητική ενέργεια

$$T = E_\gamma - E_j \quad (1.6)$$

όπου E_j είναι η ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου και είναι διαφορετική σε κάθε άτομο και σε κάθε μια από $j = K, L, M, \dots$ στιβάδες.

Είναι προφανές επομένως ότι για να πραγματοποιηθεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο πρέπει η ενέργεια του φωτονίου να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων. Παρόλο που περιμένει κανείς ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια του φωτονίου τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα πραγματοποίησης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Αντιθέτως, με την αύξηση της ενέργειας η πραγματοποίηση του φαινομένου είναι ολοένα και ασθενέστερη, ενώ το φαινόμενο είναι πιθανότερο στις χαμηλές ενέργειες. Επιπλέον, όταν η ενέργεια του φωτονίου έχει τιμή παραπλήσια (αλλά μεγαλύτερη ή ίση) προς την ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων ενός φλοιού, τότε ευνοείται ιδιαίτερα η απόσπαση ηλεκτρονίων από τον φλοιό αυτό, και είναι λιγότερο πιθανό το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στους φλοιούς χαμηλότερης ενέργειας. Όσον αφορά το κενό που δημιουργείται σε έναν φλοιό κατά την απομάκρυνση του ηλεκτρονίου, αυτό συμπληρώνεται κατά την ανακατάταξη των περιφερειακών ηλεκτρονίων με τους παρακάτω τρόπους:

- Με *εκπομπή ακτίνων-X*: Στο φαινόμενο αυτό, που ονομάζεται **φθορισμός ακτίνων-X**, τις ανακατατάξεις των (ενός ή περισσότερων) ηλεκτρονίων ακολουθεί η εκπομπή ενός ή περισσότερων φωτονίων (ακτίνες-X), ενέρ-

γείας $\Phi_j - \Phi_i$, ίσης δηλαδή με τη διαφορά ενέργειας των στιβάδων μεταξύ των οποίων κινήθηκε το ηλεκτρόνιο.

- Με το φαινόμενο **Auger**, κατά το οποίο η ενέργεια που αποκτά το άτομο στη διεγερμένη κατάσταση αντί να εκπεμφθεί ως ακτίνα-X, μεταφέρεται σε ένα από τα ατομικά ηλεκτρόνια φλοιού μεγαλύτερης τάξεως. Επειδή η ενέργεια αποδιεγέρσεως του ατόμου είναι προφανώς μεγαλύτερη από την ενέργεια ιονισμού τους αυτά αποδεσμεύονται έχοντας κινητική ενέργεια το περίσσευμα της ενέργειας. Έτσι, τα ηλεκτρόνια *Auger* είναι μονοενεργειακά. Πρόκειται λοιπόν για ένα *εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο*, ενώ το αρχικό κενό αντικαθίσταται πλέον από δύο κενά.
- Με συνδυασμό των δύο τρόπων.

Η πιθανότητα αποδιέγερσης μέσω φθορισμού ακτίνων-X ή ηλεκτρονίων Auger είναι συνάρτηση του ατομικού αριθμού του στοιχείου και της (υπό-)στιβάδας.

Στα ελαφρά στοιχεία κυριαρχεί σημαντικά η πιθανότητα για αποδιέγερση μέσω φαινομένου Auger.

1.3.2 Σκέδαση Compton

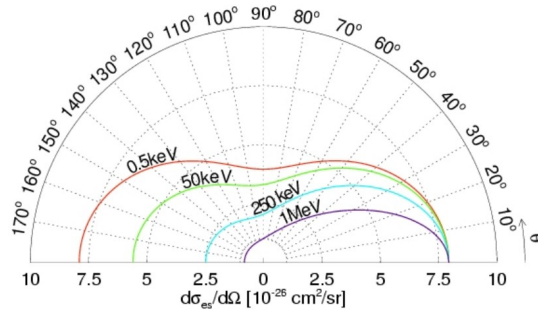
Ως σκέδαση Compton ονομάζουμε την αλληλεπίδραση ενός φωτονίου με ένα από τα περιφερειακά ηλεκτρόνια του ατόμου, και συνήθως τα ασθενέστερα συνδεδεμένα στο άτομο. Το φωτόνιο αρχικής ενέργειας E_γ σκεδάζεται μη ελαστικά πάνω στο ηλεκτρόνιο, και η ενέργειά του μειώνεται κατά την κινητική ενέργεια T που αποκτά το ηλεκτρόνιο.

Οι Klein και Nishina υπολόγισαν θεωρητικά την γωνιακή κατανομή των σκεδαζόμενων φωτονίων, δηλαδή τη *διαφορική ενεργό διατομή ανά ηλεκτρόνιο για το φαινόμενο Compton*, που δίνεται σε cm^{-2} και ανά ηλεκτρόνιο από τη σχέση

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{e^4}{2m_0^2 \cdot c_0^4} \cdot \left[\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right]^2 \cdot \left[1 + \cos^2\theta + \frac{a^2(1 - \cos\theta)^2}{1 + a(1 - \cos\theta)} \right] \cdot d\Omega \quad (1.7)$$

όπου

$$\alpha = \frac{E_\gamma}{m_0 \cdot c_0^2}$$

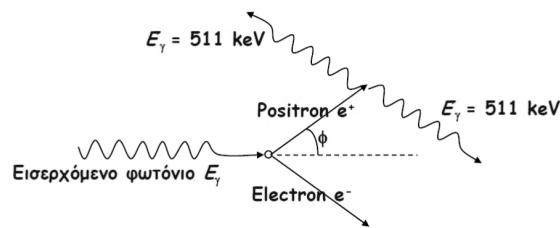


Σχήμα 1.2: Γωνιακή κατανομή των σκεδαζόμενων φωτονίων(Κλειν { Νισινα)

1.3.3 Δίδυμη γέννεση

Η δίδυμη γέννεση είναι το φαινόμενο αυτό κατά το οποίο ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με το ηλεκτρικό πεδίο πυρήνα και στη θέση του εμφανίζονται ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο. Για να πραγματοποιηθεί η αλληλεπίδραση αυτή είναι απαραίτητο το πεδίο Coulomb του πυρήνα, και απαιτείται φυσικά η ενέργεια του φωτονίου να είναι $E_{\gamma} \geq 1.02 MeV$. Γενικά όμως η δίδυμη γέννεση είναι πιο πιθανή στις υψηλές ενέργειες.

Όσον αφορά τα προϊόντα της αλληλεπίδρασης αυτής, το ηλεκτρόνιο καταλήγει να γίνει μέρος του ηλεκτρονικού πληθυσμού του υλικού μέσου ενώ το ποζιτρόνιο χάνει την ενέργειά του στο υλικό μέσο μέχρι να αποκτήσει χαμηλή ενέργεια ώστε να ενωθεί με ένα ηλεκτρόνιο και να εξαυλωθεί, αποδίδοντας ένα ζεύγος φωτονίων ενέργειας 0.511 MeV το καθένα.



Σχήμα 1.3: Δίδυμη γέννεση ηλεκτρονίου και ποζιτρονίου από φωτόνιο, και εξαύλωση του ποζιτρονίου με ηλεκτρόνιο και με αποτέλεσμα την παραγωγή ζεύγους φωτονίων.

1.4 Αλληλεπίδραση φορτισμένων σωματιδίων με την ύλη

Τα φορτισμένα σωματίδια κινούμενα μέσα στην ύλη, αλληλεπιδρούν κατά κύριο λόγο με ηλεκτροστατικές δυνάμεις (Coulomb) με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του απορροφητή, και πολύ λιγότερο με τους πυρήνες των ατόμων. Έτσι η απώλεια ενέργειάς τους οφείλεται σε

- διεγέρσεις και ιονισμούς των ατόμων (κύρια αλληλεπίδραση)
- ελαστικές και ανελαστικές σκεδάσεις με τους πυρήνες
- πυρηνικές αλληλεπιδράσεις

ενώ υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί απώλειας ενέργειας, όπως η ακτινοβολία πέδησης (bremsstrahlung), η εκπομπή ακτινοβολίας Cherenkov ή ακτινοβολίας μετάπτωσης (transition radiation), που η συνεισφορά τους είναι αμελητέα όσον αφορά στους ανιχνευτές αερίου.

Οι μηχανισμοί αυτοί έχουν ως αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας καθώς και αλλαγές στην τροχιά του σωματιδίου, ενώ αυτό επιβραδύνεται και εν τέλει απορροφάται από το υλικό. Η απόσταση πέρα από την οποία δεν διεισδύουν πλέον σωματίδια στον ανιχνευτή ονομάζεται εύρος (**range**) των συγκεκριμένων σωματιδίων συγκεκριμένης ενέργειας, για τον συγκεκριμένο απορροφητή.

Το μέγεθος που έχει οριστεί για την μέση απώλεια ενέργειας λόγω αλληλεπιδράσεων Coulomb ανά μονάδα μήκους είναι γνωστό και ως *Stopping Power* ή απλά $\frac{dE}{dx}$ και έχει υπολογιστεί πρώτα από τον Bohr (Κλασικός Υπολογισμός) και αργότερα από τους Bethe-Bloch (Κβαντομηχανική).

Η βασική έκφραση που χρησιμοποιείται είναι αυτή των Bethe-Bloch, η οποία δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \quad (1.8)$$

όπου

$$2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 = 0.1535 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$$

και

r_e : κλασσική ακτίνα ηλεκτρονίου = $2.817 \times 10^{-13} cm$	ρ : πυκνότητα του απορροφητή
m_e : μάζα του ηλεκτρονίου	z : φορτίο του προσπίπτοντος σωματιδίου σε μονάδες φορτίου του ηλεκτρονίου
N_a : αριθμός Avogadro = $6.022 \times 10^{23} mol^{-1}$	$\beta = v/c$ του προσπίπτοντος σωματιδίου
I : μέσο δυναμικό ιονισμού	$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$
Z : ατομικός αριθμός του απορροφητή	δ : παράγοντας διόρθωσης πυκνότητας
A : ατομικό βάρος του απορροφητή	C : παράγοντας διόρθωσης φλοιών
	W_{max} : η μέγιστη μεταφορά ενέργειας σε μια σύγκρουση

Η μέγιστη ενέργεια που μεταφέρεται υπολογίζεται από την κινηματική για τις κατά μέτωπον συγκρούσεις. Έτσι, για προσπίπτον σωματίδιο μάζας M είναι

$$W_{max} = \frac{2m_e c^2 \eta^2}{1 + 2s\sqrt{1 + \eta^2 + s^2}} \quad (1.9)$$

με $s = m_e/M$ και $\eta = \beta\gamma$.

Το μέσο δυναμικό ιονισμού, είναι η κύρια παράμετρος της σχέσης Bethe-Bloch, όμως ο θεωρητικός υπολογισμός του είναι ιδιαίτερα δύσκολος. Έτσι από πειραματικές μετρήσεις έχουν προκύψει για τον υπολογισμό του ημι-εμπειρικοί τύποι, όπως ο παρακάτω:

$$\begin{aligned} \frac{I}{Z} &= 12 + \frac{7}{Z} eV \\ \frac{I}{Z} &= 9.76 + 58.8Z^{-1.19} eV \end{aligned} \quad (1.10)$$

Οι παράγοντες διόρθωσης πυκνότητας και φλοιών δ και C είναι διορθώσεις της σχέσης πολύ σημαντικές για τις υψηλές και της χαμηλές ενέργειες αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τον Sternheimer οι τιμές για το δ δίνονται από τη σχέση

$$\delta = \begin{cases} 0 & X < X_0 \\ 4.6052X + C_0 + a(X_1 - X)^m & X_0 < X < X_1 \\ 4.6052X + C_0 & X > X_1 \end{cases} \quad (1.11)$$

όπου $X = \log_{10}(\beta\gamma)$ και οι ποσότητες X_0, X_1, C_0, m και a εξαρτώνται από τον απορροφητή.

Όσον αφορά τη διόρθωση φλοιού, αυτή καλύπτει τα φαινόμενα εκείνα στα οποία η ταχύτητα του προσπίπτοντος σωματιδίου είναι μικρότερη από την

τροχιακή ταχύτητα των δέσμιων ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα η υπόθεση ότι αυτά είναι ακίνητα σε σχέση με το προσπίπτον σωματίδιο να μην ισχύει.

Ένας εμπειρικός τύπος για το C όταν $\eta \geq 0.1$ είναι

$$C(I, \eta) = (0.422377 \eta^{-2} + 0.0304043 \eta^{-4} - 0.00038106 \eta^{-6}) \times 10^{-6} I^2 + (3.850190 \eta^{-2} - 0.1667989 \eta^{-4} + 0.00157955 \eta^{-6}) \times 10^{-9} I^3. \quad (1.12)$$

1.4.1 Αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων με την ύλη

Τα ηλεκτρόνια (σωματίδια-β) κατά τη διέλευσή τους από κάποιο υλικό μέσο χάνουν ενέργεια κυρίως με τους παρακάτω δύο τρόπους:

- Μέσω μη ελαστικών σκεδάσεων με τα περιφερειακά ηλεκτρόνια, κατά τις οποίες πραγματοποιούνται λόγω των πεδίων Coulomb φαινόμενα διεγέρσεων και ιονισμών, με αποτέλεσμα την απώλεια της ενέργειας των ηλεκτρονίων και την απόκλιση από την αρχική τους τροχιά.

Όταν η κινητική ενέργεια του αρχικού ηλεκτρονίου είναι μεγάλη, το ηλεκτρόνιο που προκύπτει από τον ιονισμό είναι δυνατό να έχει επαρκή ενέργεια ώστε να προκαλέσει επιπλέον ιονισμούς, οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως *δευτερογενείς*. Τα ηλεκτρόνια που προκαλούν τους δευτερογενείς ιονισμούς ονομάζονται *σωματίδια δέλτα*.

- Με ακτινοβολία πέδησης (**Bremsstrahlung**), δηλαδή εκπομπή ακτινοβολίας κατά τη σκέδαση από το ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα.

Όσον αφορά τις σκεδάσεις με τα περιφερειακά ηλεκτρόνια, τα ηλεκτρόνια ακολουθούν τον ίδιο μηχανισμό με τα βαρέα φορτισμένα σωματίδια, όμως η Bethe-Bloch πρέπει να προσαρμοστεί για δύο λόγους: Πρώτον, γιατί τα ηλεκτρόνια έχουν πολύ μικρή μάζα, έτσι δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι η τροχιά του ηλεκτρονίου δεν παρεκκλίνει από τη σύγκρουση. Δεύτερον, καθώς οι συγκρούσεις πραγματοποιούνται μεταξύ όμοιων σωματιδίων, η μέγιστη επιτρεπτή μεταφορά ενέργειας είναι προφανώς $T_{max} = T_e/2$, όπου T_e είναι η κινητική ενέργεια του προσπίπτοντος ηλεκτρονίου. Έτσι για τα ηλεκτρόνια η Εξ.1.8 γράφεται

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{coll} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \frac{\tau^2(\tau+2)}{1(I/m_e c^2)^2} + F(\tau) - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \quad (1.13)$$

όπου τ είναι η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου σε μονάδες $m_e c^2$ και

$$F(\tau) = 1 - \beta^2 + \frac{\tau^2}{8} - \frac{(2r+1)\ln 2}{(\tau+1)^2},$$

ενώ οι υπόλοιπες ποσότητες είναι αυτές που περιγράφονται για την Εξ.1.8.

Η ακτινοβολία πέδησης αντιθέτως είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται κατεξοχήν στα ηλεκτρόνια, τα οποία λόγω της μικρής τους μάζας όταν αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρικά πεδία του πυρήνα αποκλίνουν έντονα με αποτέλεσμα την εκπομπή ακτινοβολίας, και συνεπώς την μείωση της ενέργειας του ηλεκτρονίου (γι αυτό το λόγο χαρακτηρίζεται και ακτινοβολία *πέδησης*). Στα βαρύτερα σωματίδια το φαινόμενο αυτό είναι αμελητέο.

Μία έκφραση για την ακτινοβολία πέδησης δίνεται από τη Σχ.1.14

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = N\alpha \left(\frac{e^2}{m_0c^2}\right)^2 Z^2(E + m_0c^2) \int_0^1 B\left(Z, \frac{hv}{E}\right) d\left(\frac{hv}{E}\right) \quad (1.14)$$

όπου

Z, N : ο ατομικός αριθμός και η πυκνότητα ατόμων του μέσου, αντίστοιχα

E : η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου σε MeV

$\alpha = \frac{1}{137}$: η σταθερά της λεπτής υφής

hv : η ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων κυμαινόμενη μεταξύ 0 και E σε MeV

$B\left(Z, \frac{hv}{E}\right)$: συντελεστής που εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό Z και την κινητική ενέργεια E του ηλεκτρονίου.

Προφανώς η συνολική απώλεια ενέργειας είναι

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{tot} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{coll} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} \quad (1.15)$$

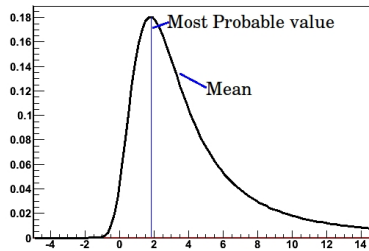
1.4.2 Ενεργειακές απώλειες φορτισμένων σωματιδίων

Η Bethe-Bloch είναι μια συνάρτηση που ουσιαστικά δίνει τη μέση τιμή των ενεργειακών απωλειών ενός φορτισμένου σωματιδίου κατά τη διέλευσή του στην ύλη. Όμως, όπως συμβαίνει σε όλες τις φυσικές διεργασίες, το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται σε κάθε σύγκρουση έχει στατιστικό χαρακτήρα. Συγκεκριμένα, ακολουθεί την κατανομή Landau

$$f(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\lambda + e^{-\lambda})} \quad (1.16)$$

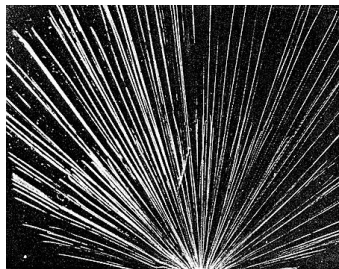
όπου με λ συμβολίζεται η κανονικοποιημένη απόκλιση από την πιο πιθανή ενεργειακή απώλεια $(\Delta E)_{mp}$, με (ΔE) η πραγματική απώλεια και με $\xi = K\rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2}$ η μέση ενεργειακή απώλεια. Έτσι

$$\lambda = \frac{(\Delta E) - (\Delta E)_{mp}}{\xi}$$

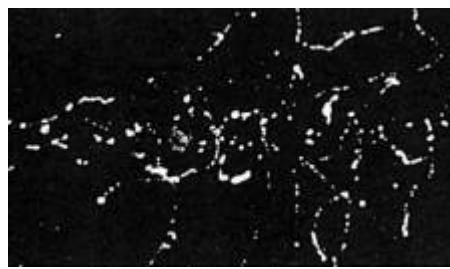


Σχήμα 1.4: Η απώλεια ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων στην ύλη ακολουθεί την κατανομή Landau, η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα. Όπως παρατηρείται, η πιο πιθανή τιμή απώλειας ενέργειας διαφέρει από τη μέση τιμή.

Η διαφορά μάζας ανάμεσα στα ηλεκτρόνια και τα βαρέα φορτισμένα σωματίδια έχει προφανώς αντίκτυπο όχι μόνο στις ενεργειακές απώλειες τους αλλά και στη μορφή της διαδρομής που ακολουθούν μέσα στην ύλη. Τα βαρέα φορτισμένα σωματίδια ακολουθούν ευθύγραμμη πορεία, ενώ τα σωματίδια-β σκεδαζόμενα από τα ατομικά ηλεκτρόνια αλλάζουν έντονα κατευθύνσεις. Το γεγονός αυτό παρατηρεί κανείς στο Σχ.1.5



(α') τροχιές σωματιδίων-α



(β') τροχιές ηλεκτρονίων

Σχήμα 1.5: Σύγκριση τροχιών σωματιδίων-α και ηλεκτρονίων σε έναν Cloud Chamber. Ενώ τα πρώτα ακολουθούν ευθύγραμμη πορεία, η πορεία των ηλεκτρονίων είναι τεθλασμένη

Κεφάλαιο 2

Ο ανιχνευτής MICROME GAS

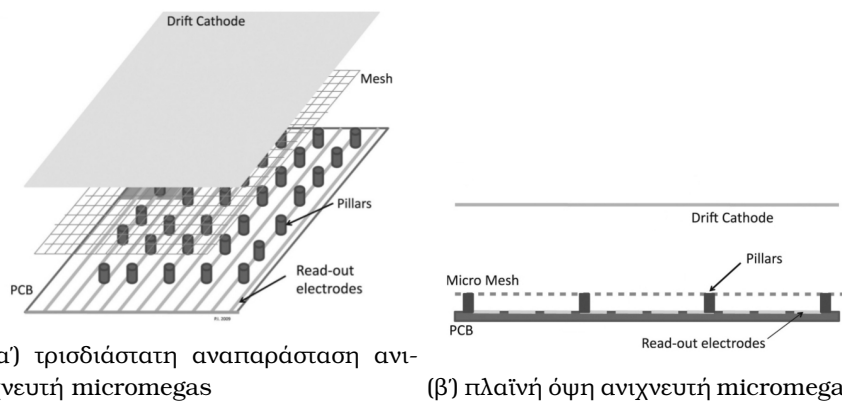
2.1 Εισαγωγή

Ο ανιχνευτής micromegas (MICRO-MEsh GAseous Structure) είναι ένας ανιχνευτής αερίου, το σχέδιο του οποίου προτάθηκε τη δεκαετία του 1990 από τους J.Collar και Γ. Γιοματάρη με σκοπό την ανίχνευση φωτονίων χαμηλών ενεργειών (1-10 keV). Χάριν στα πλεονεκτήματά του όμως, ο micromegas μπορεί χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση τόσο φορτισμένων σωματιδίων όσο και αφόρτιστων διαφόρων ενεργειών, ενώ συνεχίζεται να μελετάται η συμπεριφορά ανιχνευτών του τύπου αυτού με μικρές παραλλαγές ώστε να γίνουν πλήρως κατανοητές οι δυνατότητές του.

Σήμερα ο micromegas χρησιμοποιείται στην πειραματική φυσική, και κυρίως στη σωματιδιακή φυσική, την πυρηνική φυσική και την αστροφυσική, για την ανίχνευση φορτισμένων σωματιδίων αλλά και ακτινοβολίας γάμμα.

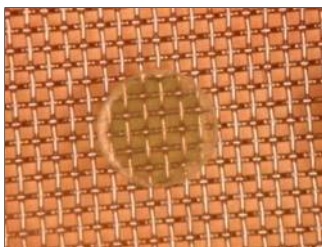
2.2 Δομή του Micromegas

Ο ανιχνευτής micromegas είναι ένας σχεδιαστικά απλός ανιχνευτής, κατασκευασμένος από υλικά χαμηλού κόστους. Τα χαρακτηριστικά που του δίνουν προβάδισμα σε σχέση με άλλους ανιχνευτές αερίου είναι η σταθερότητά του, η καλή ενεργειακή και εξαιρετική χωρική διακριτική του ικανότητα, και η ταχεία απόκρισή του που έχει ως αποτέλεσμα τη μέτρηση μεγάλου ρυθμού σωματιδίων. Οι καινοτομίες του micromegas, που του δίνουν το πλεονέκτημα τόσο όσον αφορά τις μετρήσεις χαμηλής ενέργειας όσο και την ταχεία χρονική απόκριση, είναι αφενός η ιδιαίτερα ασύμμετρη κατασκευή του και αφετέρου η χρήση ενός πλέγματος με την ονομασία micromesh, από το οποίο άλλωστε πήρε το όνομά του και ο ανιχνευτής.



Σχήμα 2.1: Σχηματικές αναπαραστάσεις ανιχνευτή τύπου micromegas και των βασικών του στοιχείων, drift, micromesh, pillars και read-out electrodes. Το micromesh χωρίζει τον ανιχνευτή σε δύο περιοχές, την περιοχή μετατροπής και την περιοχή ενίσχυσης. Οι διαστάσεις δεν είναι σε αναλογία.

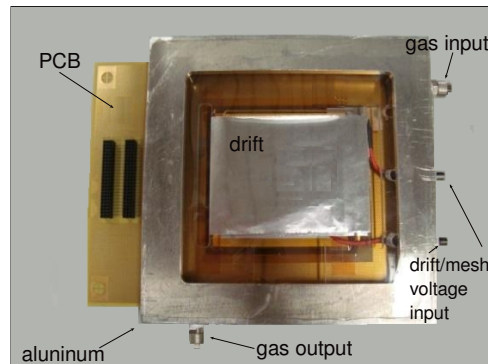
Στα Σχήματα 2.1α' και 2.1β' παρουσιάζεται η δομή του micromegas. Τρεις δομές ηλεκτροδίων χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του ανιχνευτή, το ηλεκτρόδιο ολίσθησης (drift), το micromesh (ή mesh) και τα ηλεκτρόδια ανάγνωσης (Read-out electrodes). Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένες οι δομές αυτές διαφέρει από ανιχνευτή σε ανιχνευτή, και έχουν δοκιμαστεί διάφοροι αγωγοί όπως χαλκός, αλουμίνιο και ανοξείδωτο ατσάλι. Το ηλεκτρόδιο ολίσθησης μπορεί να είναι ένα φύλλο αλουμινίου ή ένα πλέγμα όπως το micromesh, πάχους της τάξης των $10 - 20 \mu m$. Το micromesh είναι ένα πλέγμα με οπές διαμέτρου της τάξης των $25 \mu m$ ανά $50 \mu m$, και η απόστασή του από το drift κυμαίνεται στα $3 - 5 mm$. Τα ηλεκτρόδια ανάγνωσης είναι γνωστά και ως strips, και αυτό γιατί στην απλούστερη μορφή τους είναι λω-



Σχήμα 2.2: Εικόνα με μεγέθυνση από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο του micromesh και του pillar που το στηρίζει.

ρίδες χαλκού πλάτους $150 - 350 \mu m$ τοποθετημένα σε απόσταση της τάξης των $200 \mu m$ (από το μέσο του πλάτους τους). Η απόσταση mesh-strips είναι $128 \mu m$. Για να διατηρηθεί η απόσταση αυτή σταθερή και να είναι σε όλη την έκτασή του το πλέγμα παράλληλο με το επίπεδο των strips τοποθετούνται ανά $2 mm$ κυλινδρικά στηρίγματα διαμέτρου $50 - 150 \mu m$, τα pillars. Τα strips, τα pillars και το micromesh εντυπώνονται μια πλακέτα από μονωτικό υλικό (συνήθως G10 ή Kαρτον) με τη μέθοδο της φωτολιθογραφίας (PCB-Printed Circuit Board).

Ένας τυπικός ανιχνευτής micromegas παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3 . Όπως φαίνεται, τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα σε ένα πλαίσιο αλουμινίου, το οποίο κλείνει από πίσω με την πλακέτα PCB και από μπροστά με ένα λεπτό φύλλο από mylar. Όπως όλοι οι ανιχνευτές αερίου (όπως προδίδει άλλωστε και το όνομά τους) έτσι και ο micromegas για να λειτουργήσει σωστά πρέπει να είναι γεμισμένος με ένα μείγμα αερίων, στο οποίο θα γίνει αναφορά στην επόμενη παράγραφο.

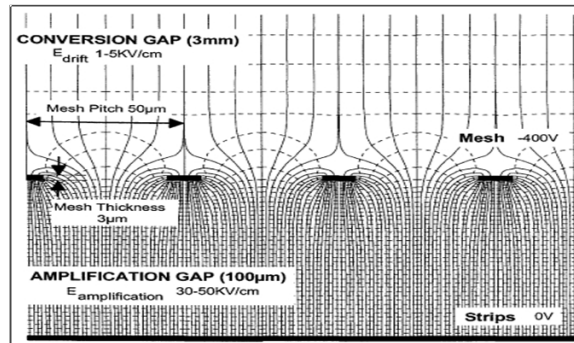


Σχήμα 2.3: Εικόνα ενός τυπικού ανιχνευτή micromegas με πλαίσιο από αλουμίνιο, παράθυρο από mylar και ένα φύλλο αλουμινίου για drift

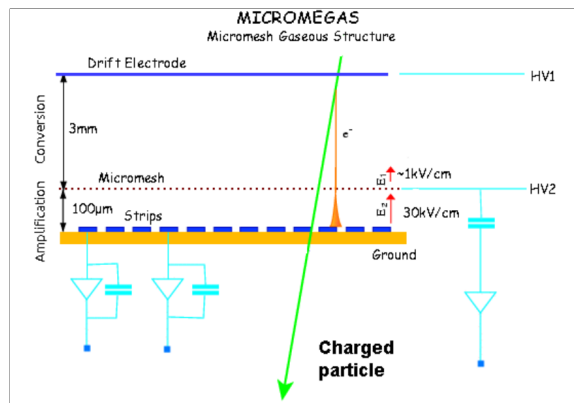
2.3 Λειτουργία του Micromegas

Όπως είναι φανερό από τη δομή του, ο micromegas μπορεί να αναλυθεί σε δύο τμήματα. Το πρώτο, ανάμεσα στο drift και το mesh, ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης (conversion region ή conversion gap), ενώ το δεύτερο, μεταξύ mesh και strips ονομάζεται περιοχή ενίσχυσης (amplification region ή amplification gap). Για τη λειτουργία του ανιχνευτή το ηλεκτρόδιο ολίσθησης και το micromesh τροφοδοτούνται με διαφορετική τάση, ενώ τα ηλεκτρόδια ανάγνωσης μένουν γειωμένα. Στις δύο περιοχές του ανιχνευτή δημιουργείται

ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο ανάλογα με την τάση που εφαρμόζεται κυμαίνεται στο conversion gap στα $1 - 3 \text{ kV/cm}$, ενώ στο amplification gap είναι πολύ ισχυρότερο εξαιτίας των πολύ μικρών του διαστάσεων, και κυμαίνεται στα $30 - 50 \text{ kV/cm}$. Μια σχηματική αναπαράσταση του δημιουργούμενου ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 .



Σχήμα 2.4: Προσομοίωση με το πρόγραμμα Maxwell του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή του micromesh



Σχήμα 2.5: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του ανιχνευτή micro-megas. Το φορτισμένο σωματίδιο καθώς διέρχεται από την περιοχή μετατροπής ionίζει το αέριο, τα ηλεκτρόνια κατευθύνονται στην περιοχή ενίσχυσης όπου εξαιτίας του υψηλού ηλεκτρικού πεδίου δημιουργούν καταιγισμό.

Όσον αφορά το αέριο που χρησιμοποιείται στον micromegas, όπως και σε όλους τους ανιχνευτές αερίου, πρόκειται για ένα μείγμα ευγενούς αερίου, όπως το αργό (Ar), και αερίου από πολυατομικά μόρια, όπως το μεθάνιο (CH_4), το ισοβουτάνιο (C_4H_{10}) ή το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2).

2.4 Ο ανιχνευτής σε σχέση με την προσομοίωση

Στην παρούσα εργασία μελετάται ο ανιχνευτής micromegas σε πηγές φωτονίων και νετρονίων. Όσον αφορά τις πηγές φωτονίων, το ζητούμενο είναι να εξηγηθεί το φάσμα που λαμβάνεται από την εκάστοτε πηγή, αλλά και να γίνει βαθύτερα κατανοητή η λειτουργία του ανιχνευτή και η φυσική που κρύβεται πίσω από αυτήν. Βέβαια οι ανιχνευτές που μελετώνται δεν είναι κατάλληλοι για την ανίχνευση νετρονίων. Ο σκοπός της μελέτης σε πηγή νετρονίων είναι να υπολογιστεί το υπόβαθρο που μπορεί να δημιουργήσουν τα νετρόνια συγκεκριμένης ενέργειας κατά την ανίχνευση άλλων σωματιδίων.

Σύμφωνα με την προηγούμενη παράγραφο, ο micromegas παίρνει σήμα (ουσιαστικά ανιχνεύει) από οποιοδήποτε σωματίδιο προκαλέσει ιονισμούς στην ενεργό περιοχή, δηλαδή στην περιοχή μεταξύ των ηλεκτροδίων ολίσθησης και ανάγνωσης. Ένα σωματίδιο αφήνει ενέργεια στην ενεργό περιοχή ionίζοντας τα άτομα, και στη συνέχεια από τα ηλεκτρόνια που παράγονται δημιουργούνται εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου οι καταγισμοί των ηλεκτρονίων και τελικά το σήμα στα ηλεκτρόδια ανάγνωσης. Όπως είναι προφανές, το σήμα εξαρτάται άμεσα από την αρχική ενέργεια που άφησε το σωματίδιο στην ενεργό περιοχή. Αυτή ακριβώς η ενέργεια είναι και το αντικείμενο της παρούσας μελέτης.

Όπως προκύπτει από το Κεφάλαιο 1, τα φωτόνια αφήνουν ενέργεια παράγοντας ηλεκτρόνια (είτε με φαινόμενο Compton είτε με φωτοηλεκτρικό είτε μέσω της δίδυμης γέννησης). Επίσης ο μόνος τρόπος να "γίνουν ορατά" τα νετρόνια, είναι αν αλληλεπιδράσουν με τα υλικά του ανιχνευτή. Τότε θα προκύψουν είτε φωτόνια, είτε δευτερογενείς πυρήνες (από υλικά του ανιχνευτή, πρωτόνια, σωματίδια α και άλλοι). Και οι πυρήνες αυτοί αφήνουν ενέργεια μέσω ιονισμών. Άρα και στις δύο περιπτώσεις η ενέργεια εναποτίθεται μέσω ιονισμών στην ενεργό περιοχή και αυτή ακριβώς η ενέργεια είναι το ζητούμενο.

Κεφάλαιο 3

Λογισμικά πακέτα

3.1 Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία αφορά στη Monte Carlo προσομοίωση ενός πειράματος με χρήση του λογισμικού πακέτου Geant4. Κρίνεται σκόπιμο λοιπόν, πριν την παρουσίαση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε, να γίνει αναφορά στη δομή του Geant4 και τη μεθοδολογία του. Μικρή αναφορά θα γίνει επίσης και στο ROOT, το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των δεδομένων της προσομοίωσης.

3.2 Το GEANT4

Το Geant4 είναι ένα ανοιχτό πακέτο Monte Carlo λογισμικού που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της διέλευσης σωματιδίων μέσα από την ύλη. Είναι ο διάδοχος των προγραμμάτων GEANT (από το ακρονύμιο GEometry ANd Tracking), τα οποία ξεκίνησαν να αναπτύσσονται το 1974 για το CERN με τη συνεργασία φυσικών και προγραμματιστών από διάφορα πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα του κόσμου, με στόχο την προσομοίωση πειραμάτων Φυσικής Υψηλών Ενεργειών.

Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα λογισμικά GEANT μέχρι την έκδοση 3.21, που ήταν γραμμένα σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, το Geant4 (το όνομα σε αυτήν την έκδοση τυπικά δεν είναι πλέον σε κεφαλαία) ξεκίνησε να αναπτύσσεται το 1994 και C++ με αντικειμενοστρεφή σχεδιασμό. Σήμερα εκτός από τη Φυσική Υψηλών Ενεργειών χρησιμοποιείται και σε άλλα επιστημονικά πεδία όπως η Πυρηνική Φυσική, η Ιατρική Φυσική και η Διαστημική Τεχνολογία.

Το λογισμικό πακέτο Geant4 επιτρέπει στο χρήστη-προγραμματιστή να

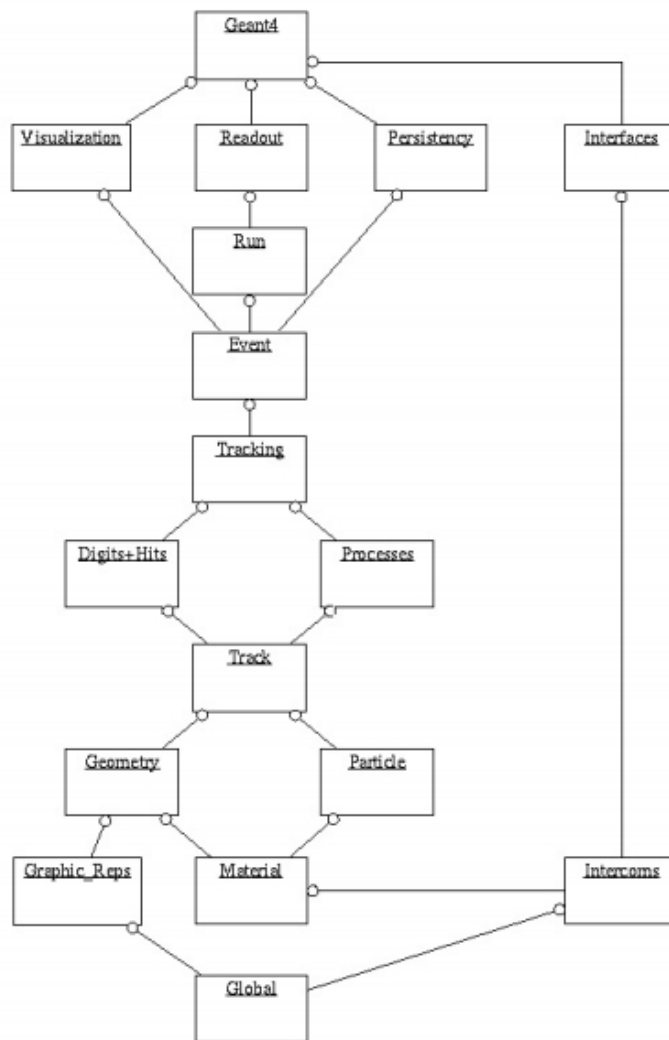
υλοποιήσει το δικό του εικονικό πείραμα με πολύ μεγάλη ακρίβεια, καθώς περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία για τη προσομοίωση του πειράματος:

- τη γεωμετρία της διάταξης
- τα υλικά που περιλαμβάνονται
- τα σωματίδια που ενδιαφέρουν τον χρήστη
- την παραγωγή πρωταρχικών γεγονότων από την πηγή
- την παρακολούθηση των σωματιδίων μέσα από τα διάφορα υλικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία
- τις φυσικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την αλληλεπίδραση των σωματιδίων με την ύλη
- τα τμήματα των ανιχνευτών
- την παραγωγή γεγονότων
- την αποθήκευση των δεδομένων από τα γεγονότα
- την οπτικοποίηση των ανιχνευτών και των τροχιών των σωματιδίων
- τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων της προσομοίωσης με διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας και "ραφινάρισματος".

3.2.1 Επισκόπηση της λειτουργίας του Geant4

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το Geant4 είναι γραμμένο σε C++, μια αντικειμενοστρεφή γλώσσα προγραμματισμού. Στον αντικειμενοστρεφή προγραμματισμό τα αντικείμενα υλοποιούνται από κλάσεις, και κάθε ένα από αυτά φέρει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (πεδία). Οι κλάσεις συνδέονται με άλλες μέσω των ιδιοτήτων της κληρονομικότητας. Αυτό δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να διαμορφώσει μια κλάση όπως επιθυμεί χωρίς όμως να επηρεάσει τις υπόλοιπες, καθιστώντας έτσι και τη διόρθωση του κώδικα πιο εύκολη.

Το Geant4 αποτελείται από μια πληθώρα κλάσεων ήδη υλοποιημένων από τους προγραμματιστές του *Geant4 Collaboration*. Πρόκειται για κλάσεις που κατασκευάζουν σωματίδια, γεωμετρικά σχήματα, ιδιότητες υλικών και άλλα αντικείμενα, τα οποία ο χρήστης δεν επιτρέπεται να πειράξει. Για παράδειγμα, η κλάση που κατασκευάζει ένα αντικείμενο του τύπου "φωτοηλεκτρικό φαινόμενο" ή ένα αντικείμενο της κλάσης "φωτόνιο" που πραγματοποιούνται υπό τις ίδιες προϋποθέσεις σε οποιοδήποτε πείραμα, δεν πρέπει να υποστούν



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα κλάσεων του Geant4

αλλαγές. Σε περίπτωση που κάποιος θέλει να τις μελετήσει, οι κλάσεις αυτές βρίσκονται στο φάκελο *geant4.<version>/source/*.

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται οι κατηγορίες των υλοποιημένων κλάσεων του Geant4 ενώ απεικονίζεται και η ιεραρχία τους. Οι κατηγορίες στο κάτω μέρος του διαγράμματος είναι αυτές που χρησιμοποιούνται από πρακτικά όλες τις υπόλοιπες και αποτελούν την θεμελίωση του λογισμικού. Η πρώτη κατηγορία κλάσεων, *Global*, αποτελείται από τις κλάσεις που καθορίζουν τις μονάδες μέτρησης, παγκόσμιες σταθερές και τις γεννήτριες παραγωγής τυχαίων αριθμών. Οι κατηγορίες *Particle* και *Material* περιγράφουν τα φυσικά χαρακτηριστικά σωματιδίων και υλικών για την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων σωματιδίου-υλικού, ενώ η *Geometry* δίνει τη δυνατότητα περιγραφής γεωμετρικών δομών και αναπαράγει τα σωματίδια που διέρχονται μέσα σε αυτές. Πάνω από αυτές τοποθετούνται οι κατηγορίες εκείνες που περιγράφουν τις τροχιές των σωματιδίων και τις φυσικές διαδικασίες που υφίστανται. Η *Track* περιέχει κλάσεις για τις τροχιές και τα "βήματα", που χρησιμοποιούνται από την κατηγορία *Processes* για να υλοποιήσει τις φυσικές αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων με την ύλη. Σε αυτό το σημείο είναι προφανείς οι σχέσεις κληρονομικότητας καθώς για να εξαχθεί η τροχιά και να υπολογισθούν οι φυσικές αλληλεπιδράσεις στη συνέχεια θα πρέπει να είναι γνωστό το είδος του σωματιδίου και τα υλικά από τα οποία διέρχεται. Οι κλάσεις της *Digits+Hits* είναι αυτές που υπολογίζουν τις κρούσεις των σωματιδίων στην ύλη καθώς και την ενέργεια που άφησαν. Οι *Processes* καλούνται από την *Tracking* που χειρίζεται τη συμβολή τους στην τροχιά και και παρέχει στους ανιχνευτές (sensitive detectors) τις κατάλληλες πληροφορίες για τις κρούσεις που έγιναν. Ακόμα πιο πάνω τοποθετείται η κατηγορία *Event*, που χειρίζεται κάθε γεγονός ανάλογα με τις τροχιές που δημιουργούνται. Ως ένα event το Geant4 αντιλαμβάνεται το πρωταρχικό γεγονός, αυτό δηλαδή που ξεκίνησε από την πηγή, μαζί με όλα τα δευτερεύοντα σωματίδια που παράγονται κατά τη διέλευσή του από τα διάφορα υλικά. Ακόμα πιο πάνω η *Run* διαχειρίζεται τη συλλογή των events που ανήκουν σε κοινή δέσμη και για έναν συγκεκριμένο ανιχνευτή. Τέλος η *Readout* χειρίζεται τα συσσωρευμένα δεδομένα που προκύπτουν από τα προηγούμενα. Τρεις ακόμα κατηγορίες κλάσεων, η *Visualization*, η *Persistency* και η *Interface* δίνουν τη δυνατότητα γραφικής απεικόνισης του "εικονικού" πειράματος, και επικοινωνίας με τον χρήστη.



3.3 Το λογισμικό ROOT

Το ROOT είναι ένα επίσης ανοιχτό πακέτο λογισμικού, το οποίο ξεκίνησε να αναπτύσσεται για το CERN στα μέσα του 1990. Η δημιουργία του προέκυψε από την ανάγκη για ανάλυση ενός τεράστιου όγκου δεδομένων για το πείραμα NA49 του CERN σε συνδυασμό με την τεράστια πρόοδο που είχε κάνει η επιστήμη των υπολογιστών στον αντικειμενοστρεφή προγραμματισμό.

Πρόκειται για ένα λογισμικό γραμμένο σε C++, σχεδιασμένο για μεγάλη υπολογιστική αποδοτικότητα και ικανό να αποθηκεύσει και να επεξεργαστεί δεδομένα της τάξης των αρκετών petabytes ανά χρόνο. Έτσι ενώ σχεδιάστηκε αρχικά για τις ανάγκες των πειραμάτων της Φυσικής Υψηλών Ενεργειών, χρησιμοποιείται και σε πολλούς άλλους τομείς της Φυσικής, όπως η Αστρονομία, αλλά και στη βιομηχανία.

Το ROOT αναπτύχθηκε και ακόμα αναπτύσσεται σύμφωνα με το Bazaar style, όπως το ορίζει το βιβλίο *The Cathedral and the Bazaar* του Eric S. Raymond. Ο όρος αυτός σημαίνει πως ο κώδικας αναπτύσσεται στο διαδίκτυο και η εξέλιξή του είναι θεατή από το κοινό, και η αποτελεσματικότητα του μοντέλου αυτού είναι, όπως σχολιάζει ο Raymond, ότι "όταν υπάρχουν πολλά ζευγάρια μάτια, όλα τα bugs είναι επιπόλαια". Πρόκειται λοιπόν για έναν ελεύθερο, ανεπίσημο τρόπο ανάπτυξης λογισμικού που βασίζεται ιδιαίτερα στο πολυποϊκίλο ταλέντο των χρηστών του προγράμματος. Έτσι ουσιαστικά οι ίδιοι οι φυσικοί ανέπτυξαν το ROOT για δική τους χρήση, με αποτέλεσμα ένα κατάλληλο, χρήσιμο, πολύ ισχυρό λογισμικό που εκκαθαρίζεται συνεχώς. Η ανάπτυξή του είναι μια συνεχής συζήτηση μεταξύ μεταξύ των χρηστών και των προγραμματιστών, με τη διαχωριστική γραμμή ανάμεσά τους ώρες ώρες να θολώνει.

Δεν μπορεί κανείς να μην αναφέρει επίσης τον C++ διερμηνευτή του ROOT, τον CINT, καθώς και τα πολλά χρήσιμα πακέτα που περιλαμβάνονται στο λογισμικό όπως πακέτα για :

- ιστογράμματα και γραφήματα για την σχεδίαση και την ανάλυση κατανομών και συναρτήσεων

- fitting
- εργαλεία στατιστικής για την ανάλυση δεδομένων
- άλγεβρα πινάκων
- υπολογισμούς με τετραδιανύσματα
- μαθηματικές συναρτήσεις
- τρισδιάστατες οπτικοποιήσεις
- πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων
- διασύνδεση με Monte Carlo γεννήτορες γεγονότων

Κεφάλαιο 4

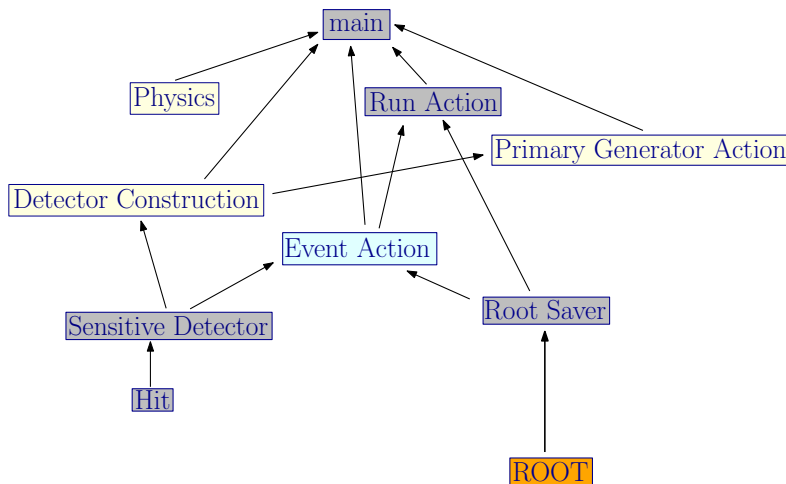
Μεθοδολογία της προσομοίωσης

4.1 Εισαγωγή

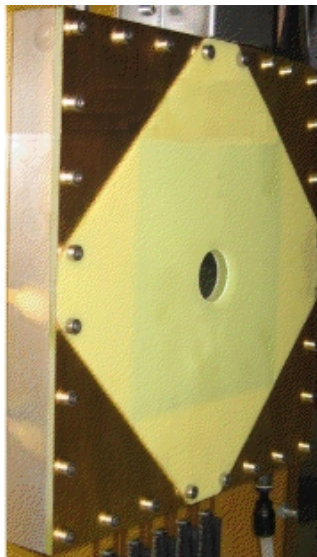
Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε κατά την προσομοίωση, των εικονικών πειραμάτων που προσομοιώθηκαν, της γεωμετρίας των ανιχνευτών καθώς και της φυσικής που κρύβεται πίσω από κάθε πείραμα. Τα βασικά πειράματα που προσομοιώθηκαν είναι δύο τύπων: το πρώτο είναι η κατασκευή ενός ανιχνευτή micromegas και η μελέτη του σε πεδίο φωτονίων, ένα πείραμα που (όπως και στην πραγματικότητα) είναι δοκιμαστικό για το αν το εικονικό (ή πραγματικό) πείραμα έχουν σφάλματα. Το δεύτερο πείραμα είναι πιο πολύπλοκο καθώς ο ανιχνευτής σε αυτή την περίπτωση βρίσκεται σε πεδίο νετρονίων, ενώ η μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε αυτή την περίπτωση είναι λεπτομερέστερη. Οι κλάσεις που γράφτηκαν (που παρουσιάζουν μικρές διαφορές για τους δύο τύπους πειραμάτων), καθώς και οι σχέσεις κληρονομικότητας μεταξύ τους παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1, και θα παρουσιαστούν στις επόμενες παραγράφους.

4.2 Γεωμετρία

Η κλάση που πραγματοποιεί την κατασκευή των ανιχνευτών για το εικονικό πείραμα είναι η `UMDetectorConstruction`.



Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση των κλάσεων που αναπτύχθηκαν για την προσομοίωση της παρούσας εργασίας, και των σχέσεων κληρονομικότητας μεταξύ τους.

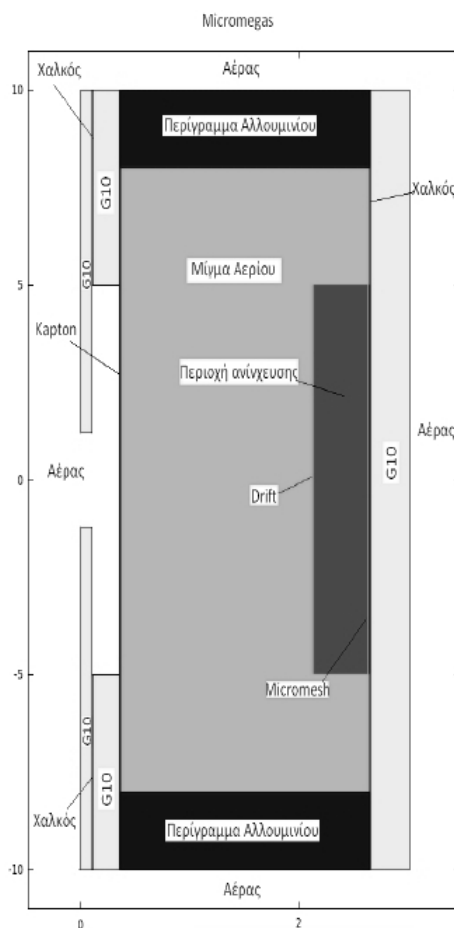


Σχήμα 4.2: Ο βασικός ανιχνευτής που προσομοιώθηκε

Ο βασικός ανιχνευτής που θα μελετηθεί είναι αυτός που παρουσιάζεται στο Σχ.4.2. Πρόκειται για έναν ανιχνευτή micromegas $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ με αλουμινένιο πλαίσιο των 2 cm και στην πρόσοψη μια κατασκευή που περιλαμβάνει ένα φύλλο από Karton, ένα πλαίσιο από G10 με ένα κενό τετράγωνο ακμής 10 cm στο κέντρο, ένα αντίστοιχο πλαίσιο από χαλκό και τέλος ένα ρομβικό φύλλο από G10 με οπή διαμέτρου 2.4 cm στο κέντρο του. Το mesh και το drift καλύπτουν επιφάνεια $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ και αποτελούνται το πρώτο από πλέγμα καλωδίων από ανοξείδωτο χάλυβα (Stainless Steel) διαμέτρου $18\text{ }\mu\text{m}$ με απόσταση μεταξύ των αξόνων τους (pitch) $60\text{ }\mu\text{m}$ και το δεύτερο από πλέγμα όμοιων καλωδίων με pitch $56\text{ }\mu\text{m}$. Στην προσομοίωση παραλείφθηκαν τα pillars, οι βίδες που ενώνουν τα τμήματα του "παραθύρου" με τον ανιχνευτή, η είσοδος και έξοδος για το αέριο και οι υποδοχείς της τάσης,

καθώς κρίθηκε ότι δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα τα αποτελέσματά της προσομοίωσης, ενώ θα δυσκόλευαν την "κατασκευή" του ανιχνευτή. Όμως όσον αφορά στο αέριο που περιέχει ο ανιχνευτής, προσομοιώθηκαν δύο περιπτώσεις: Η περίπτωση αναλογίας αερίων Ar:CO₂ 93 : 20 και η περίπτωση αναλογίας 80 : 20.

Στο Σχ.4.3 παρουσιάζεται η πλάγια τομή στο μέσο του ανιχνευτή και τα αντίστοιχα πάχη των υλικών. Πρόκειται για ένα σχήμα που σχεδιάστηκε στο



Σχήμα 4.3: Πλάγια τομή του ανιχνευτή micromegas, σε μη κανονικό σύστημα συντεταγμένων. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία του ανιχνευτή. Το παράθυρο του ανιχνευτή βρίσκεται στα αριστερά και η ενεργός περιοχή στα δεξιά.

πρόγραμμα Flair, το γραφικό περιβάλλον ενός άλλου προγράμματος προσο-

μοίωσης, του FLUKA. Το υλικό κάθε στοιχείου, η σύστασή του και το πάχος του όπως προσομοιώθηκαν παρουσιάζεται στους Πίνακες 4.2 και 4.1.

Υλικό	Σύσταση
G10	1.1% Na_2O , 3.2% CaO , 0.7% Al_2O_3 , 47.4% SiO_2 , 2.6% MgO , 35.1% $Epoxy$
Stainless Steel	0.1% C , 0.7% Si , 18% Cr , 1% Mn , 71.2% Fe , 9% Ni
Kapton	2.7% H , 72.1% C , 7.7% N , 17.5% O

Πίνακας 4.1: Σύσταση των υλικών του micromegas

Στοιχείο του ανιχνευτή	Υλικό	Πάχος
PCB	G10	3.5 mm
Mesh	Stainless Steel	18 μm
Drift	Stainless Steel	18 μm
τετραγωνικό πλαίσιο αλουμινίου	Al	22.85 mm
παράθυρο	Kapton	50.0 μm
τετραγωνικό πλαίσιο	G10	2.4 mm
τετραγωνικό πλαίσιο χαλκού	Cu	100.0 μm
ρομβοειδές περίβλημα	G10	1.0 mm

Πίνακας 4.2: Στοιχεία του ανιχνευτή micromegas

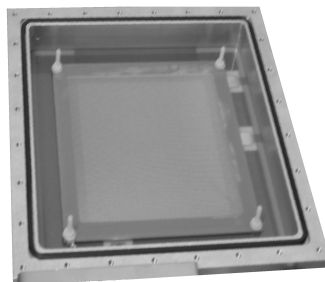
Όσον αφορά το Epoxy, πρόκειται για έναν τύπο πολυμερούς με διάφορες προσθήκες, και το συγκεκριμένο έχει χημικό τύπο C_3H_5OCl .

Η κατασκευή του συγκεκριμένου micromegas ήταν σχετικά απλή, αν και κάποια τμήματα της γεωμετρίας είναι πιο σύνθετα και σε αυτά θα αναφερθούμε. Το ένα είναι το drift, και κατ' αντιστοιχίαν το mesh, στα οποία πρώτα κατασκευάζεται το solid καλώδιο από stainless steel και έπειτα πραγματοποιείται με έναν *for* βρόγχο η επανάληψη των logical volumes, σε κάθετες διευθύνσεις. Ο αριθμός των καλωδίων προφανώς υπολογίστηκε έτσι ώστε να καλύπτεται επιφάνεια 10 cm \times 10 cm.

Το δεύτερο σχετικά πολύπλοκο και άξιο να αναφερθεί τμήμα της γεωμετρίας είναι το ρομβικό στοιχείο από G10, που επιπλέον έχει μια οπή στο κέντρο του. Για την κατασκευή του πολύγωνου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος *G4ExtrudedSolid* ενώ για τη δημιουργία της οπής η μέθοδος *G4SubtractionSolid*.

Ο κώδικας που αναπτύχθηκε, στον οποίο βρίσκονται τα παραπάνω στοιχεία, βρίσκεται στο Παράρτημα Β της παρούσας εργασίας.

Εκτός από τον παραπάνω ανιχνευτή όμως, προσομοιώθηκε και ένας δεύτερος, απλούστερος. Η διαφορά του micromegas αυτού είναι το παράθυρο, το οποίο σε αντίθεση με την πολύπλοκη κατασκευή του προηγούμενου, είναι ένα απλό φύλλο πάχους 0.5 mm από mylar. Τα στοιχεία του ανιχνευτή αυτού παρουσιάζονται συνοπτικά στους Πίνακες 4.3 και 4.4.



Σχήμα 4.4: Ο δεύτερος ανιχνευτής micromegas

Στοιχείο του ανιχνευτή	Υλικό	Πάχος
PCB	G10	3.5 mm
Mesh	Stainless Steel	18μm
Drift	Stainless Steel	18μm
τετραγωνικό πλαίσιο αλουμινίου	Al	22.85 mm
παράθυρο	mylar	0.5 mm

Πίνακας 4.3: Στοιχεία του δεύτερου ανιχνευτή micromegas που προσομοιώθηκε

Υλικό	Σύσταση
mylar	46%C, 36%H, 18%O

Πίνακας 4.4: Σύσταση των υλικών του mylar

Ο τύπος αυτός ανιχνευτή micromegas χρησιμοποιήθηκε σε δύο περιπτώσεις: Πρώτον για τις προσομοιώσεις της ανίχνευσης χαμηλοενεργειακών φωτονίων, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι ο κώδικας λειτουργεί σε γενικές γραμμές σωστά, και δεύτερον για να γίνει σύγκριση της "αντίδρασης" των δύο ανιχνευτών σε πεδίο νετρονίων.

Το τελευταίο ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι της προσομοίωσης ήταν ο ορι-

σμός των *sensitive detectors*, δηλαδή των περιοχών ανίχνευσης. Επειδή ένα καίριο σημείο της προσομοίωσης είναι ο εντοπισμός της προέλευσης των σωματιδίων, κρίθηκε σκόπιμο να οριστούν ως *sensitive detector* όλα τα τμήματα του ανιχνευτή. Στόχος της παρούσας εργασίας όμως ήταν η εναπόθεση ενέργειας μόνο στην ενεργό περιοχή, αυτό ήταν κάτι που καθορίστηκε "με το χέρι" μέσω μιας άλλης κλάσης, της *UMEventAction*, η οποία περιγράφεται στην παράγραφο 4.6.

4.3 Πηγή

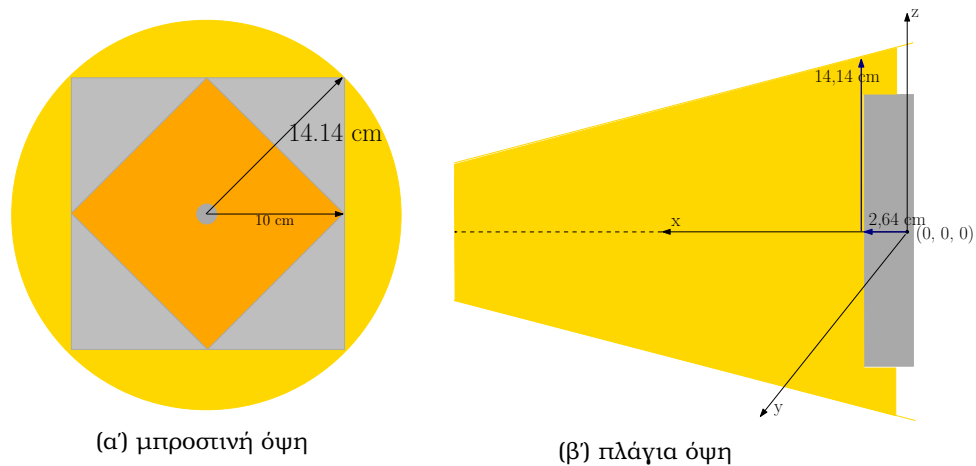
Ένα ιδιαίτερο κομμάτι της κάθε προσομοίωσης είναι φυσικά ο ορισμός της πηγής. Η κλάση στην οποία πραγματοποιείται αυτό είναι η *UMPrimaryGeneratorAction* η οποία "δημιουργεί" την πηγή, ορίζει δηλαδή τη μορφή της καθώς και το πόσα σωματίδια θα εκπέμπει σε κάθε γεγονός (**event**). Ως **γεγονός** χαρακτηρίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων του εικονικού πειράματος. Έτσι, εάν η πηγή εκπέμπει ένα σωματίδιο κάθε φορά, κάθε γεγονός ισοδυναμεί με ένα σωματίδιο. Επειδή σε κάθε γεγονός η πηγή στέλνει όλα τα σωματίδια που εκπέμπει στην ίδια διεύθυνση, για στατιστικούς λόγους είναι προτιμότερο σε κάθε γεγονός να γεννάται ένα σωματίδιο, και αυτή η λογική ακολουθήθηκε και στην παρούσα προσομοίωση.

4.3.1 Πηγές νετρονίων

Στη δεδομένη περίπτωση η πηγή έπρεπε να είναι σφαιρική, ομοιόμορφη, και βέβαια να καλύπτει την επιφάνεια του ανιχνευτή αλλά με όσο το δυνατόν λιγότερη περιττή επιφάνεια. Αυτό απαιτείται επειδή οι προσομοιώσεις των νετρονίων είναι αρκετά πολύπλοκες για κάθε κώδικα Monte Carlo και απαιτούν πολύ υπολογιστικό χρόνο, έτσι είναι σκόπιμο να αποφευχθούν οι περιττές αλληλεπιδράσεις.

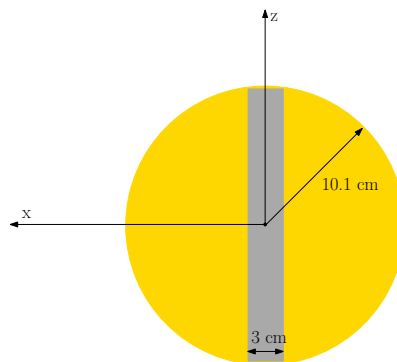
Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν είναι δύο τύπων, με τη δέσμη παράλληλα στον άξονα των x , να προσπίπτει δηλαδή στη μεγάλη πλευρά του ανιχνευτή, και με τη δέσμη κάθετα στον άξονα των x (με κατεύθυνση του άξονα των y) να προσπίπτει στο πλάι. Και στις δύο περιπτώσεις η δέσμη νετρονίων πρέπει να καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του ανιχνευτή. Έτσι η πηγή υλοποιήθηκε με τα παρακάτω γεωμετρικά χαρακτηριστικά :

Στην πρώτη περίπτωση η πηγή βρίσκεται 230 *cm* μακριά από το (0, 0, 0) του *World Volume*. Αρχικά, αφού το κέντρο του *World Volume* βρίσκεται μέσα στον ανιχνευτή πρέπει να ληφθεί υπόψιν ο όγκος του ανιχνευτή, να υπολογιστεί δηλαδή η πραγματική απόσταση πηγής-ανιχνευτή. Το πάχος του micromegas στον θετικό ημιάξονα των x είναι 2.64 *cm*, επομένως η απόσταση είναι ίση με



Σχήμα 4.5: Σχηματική αναπαράσταση της δέσμης (κίτρινο) όπως προσπίπτει στον ανιχνευτή, παράλληλα στον άξονα των x

$(230 - 2.64) \text{ cm}$. Όσον αφορά τη διαγώνιο από το κέντρο του micromegas ως τη γωνία του, αυτή ισούται με $\sqrt{10^2 + 10^2} = 14.14 \text{ cm}$, αφού η κάθε πλευρά του είναι 10 cm . Έτσι, δεδομένου ότι η πηγή είναι σφαιρική αλλά βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τον ανιχνευτή, για να καλυφθεί ο micromegas πρέπει να καλυφθεί κυκλική επιφάνεια ακτίνας 14.14 cm .



Σχήμα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση της δέσμης (κίτρινο) όπως προσπίπτει στον ανιχνευτή, κάθετα στον άξονα των x

Στην δεύτερη περίπτωση η πηγή βρίσκεται σε απόσταση 2.30 m από το $(0, 0, 0)$ του *World Volume* και προσπίπτει στο πλάι του ανιχνευτή. Όπως και πριν, υπολογίζουμε την απόσταση της πηγής από την άκρη του micromegas, που είναι ίση με $(230 - 2.64) \text{ cm}$, ενώ ο κύκλος που πρέπει να καλύπτει η δέσμη

αυτή την φορά έχει ακτίνα $\sqrt{10^2 + 1.5^2} = 10.1 \text{ cm}$. Σε αυτή την περίπτωση όμως μπορεί εύκολα να δει κανείς ότι ο ανιχνευτής καταλαμβάνει πολύ μικρότερο χώρο από αυτόν της δέσμης με αποτέλεσμα βέβαια τα γεγονότα που ανιχνεύονται να είναι πολύ λιγότερα.

Προκειμένου να είναι ικανοποιητική η στατιστική της προσομοίωσης, να είναι δηλαδή επαρκής ο αριθμός των γεγονότων για την εξαγωγή συμπερασμάτων, αλλά και για να γίνει μια σωστή συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων της ακτινοβολίας όταν αυτή προσπίπτει παράλληλα και κάθετα στον ανιχνευτή, ο αριθμός των σωματιδίων που εκπέμπονται από την πηγή στη δεύτερη περίπτωση πρέπει να προσαρμοστεί.

Πράγματι, η επιφάνεια που καλύπτει η δέσμη είναι $\pi \cdot r^2 = \pi \cdot 10.1^2 = 320.47 \text{ cm}^2$, όπου ως ακτίνα χρησιμοποιείται η διαγώνιος της πλευράς του ανιχνευτή, ενώ η επιφάνεια της πλάγιας όψης του micromegas είναι $20 \text{ cm} \cdot 3 \text{ cm} = 60 \text{ cm}^2$. Έτσι, για μελετηθεί η αλληλεπίδραση N σωματιδίων με τον ανιχνευτή, τα αρχικά σωματίδια πρέπει να είναι περίπου

$$\frac{320.47 \text{ cm}^2}{60 \text{ cm}^2} \cdot N = 5.34 \cdot N \text{ σωματίδια}$$

Η ακρίβεια της μεθόδου όμως αυτής, το γεγονός δηλαδή ότι στον ανιχνευτή προσπίπτει αριθμός σωματιδίων που προσεγγίζει τον N , προϋποθέτει ότι η ίδια διαδικασία θα ακολουθηθεί και για την πρώτη περίπτωση, που η δέσμη προσπίπτει στην μπροστινή όψη του ανιχνευτή. Σε αυτή την περίπτωση η επιφάνεια που καλύπτει η δέσμη είναι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.5α', $\pi \cdot r^2 = \pi \cdot 10.4^2 = 628.13 \text{ cm}^2$, ενώ η επιφάνεια του micromegas είναι 400 cm^2 . Έτσι, για μελετηθεί η αλληλεπίδραση περίπου N σωματιδίων με τον ανιχνευτή, πρέπει να εκπεμφθούν από την πηγή

$$\frac{628.13 \text{ cm}^2}{400 \text{ cm}^2} \cdot N = 1.57 \cdot N \text{ σωματίδια}$$

4.3.2 Πηγές φωτονίων

Προσομοιώθηκαν 2 πηγές φωτονίων, οι πηγές ${}^{55}_{26}\text{Fe}$ και ${}^{109}_{48}\text{Cd}$, σε σχέση με τον δεύτερο ανιχνευτή, με το παράθυρο από mylar. Οι πηγές τοποθετήθηκαν σε επαφή με το παράθυρο του ανιχνευτή και στο κέντρο του. Οι ενέργειες και η ένταση (*Intensity*) της κάθε ακτινοβολίας παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν, και λήφθηκαν από τη βάση δεδομένων πυρηνικής φυσικής (Nuclear Data) του Πανεπιστημίου του Lund, της Σουηδίας.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί η έννοια της **έντασης**. Σε αντίθεση με την ενεργότητα, που ορίζεται ως ο μέσος αριθμός ραδιενεργών διασπάσεων στη μονάδα του χρόνου, η ένταση είναι το ποσό της ενέργειας που διέρχεται σε

δεδομένη επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας και σε δεδομένη μονάδα χρόνου. Επειδή είναι δύσκολο να μετρηθεί η ενεργότητα της πηγής, ο αριθμός δηλαδή των διασπάσεων ανά δευτερόλεπτο, η " ισχύς" μιας πηγής αναφέρεται συχνά σε όρους έντασης. Ουσιαστικά μετρώντας την ένταση μιας πηγής μετράμε τον αριθμό των φωτονίων που ανιχνεύει ένας ανιχνευτής σε κάποιο χρονικό διάστημα, ενώ αυτό ανάγεται στη συνέχεια στη μονάδα του χρόνου και της επιφάνειας, δίνοντάς μας πληροφορίες για την ενεργότητα.

Στην Nuclear Database είναι καταχωρημένες η εντάσεις των ακτινοβολιών που εκπέμπονται από κάθε ραδιενεργό πηγή. Για να υπολογιστεί σε τί ποσοστό έκαστη πηγή εκπέμπει κάθε ακτινοβολία, χρειάζεται απλά να γίνει μια κανονικοποίησης. Τα δεδομένα και οι υπολογισμοί για τις πηγές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα προσομοίωση παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.



$T_{1/2} = 2.73y$ Decay Mode: Electron Capture		
Ενέργεια ακτινοβολίας γάμμα (keV)	Intensity (ένταση)	Ποσοστό (%)
0.64	0.00421	1
5.888	0.08239	29
5.899	0.16280	58
6.49	0.03290	12

Πίνακας 4.5: Πληροφορίες για το ραδιενεργό σίδηρο ${}_{26}^{55}\text{Fe}$



$T_{1/2} = 1.27y$ Decay Mode: Electron Capture		
Ενέργεια ακτινοβολίας γάμμα (keV)	Intensity (ένταση)	Ποσοστό (%)
2.98	0.112	9.6
21.990	0.291	24.9
22.163	0.552	47.2
24.9	0.178	15.2
88.034	0.0361	3.1

Πίνακας 4.6: Πληροφορίες για το ραδιενεργό κάδμιο ${}_{109}^{48}\text{Cd}$

4.4 Φυσική στην προσομοίωση

Στο Geant4 ο ορισμός της φυσικής, των αλληλεπιδράσεων δηλαδή που θα συμβούν στο εικονικό πείραμα, είναι μια αρκετά πολύπλοκη υπόθεση. Η κατασκευή μιας κλάσης Physics Lists απαιτεί τον ορισμό όλων των σωματιδίων που μπορεί να δημιουργηθούν αλλά και όλων των αλληλεπιδράσεων που μπορεί να πραγματοποιηθούν στην προσομοίωση, απαιτεί λοιπόν πολύ καλές γνώσεις φυσικής. Δεν είναι υπερβολή να πει κανείς ότι αυτό είναι και το πιο κρίσιμο κομμάτι μιας προσομοίωσης. Εκτός βέβαια από τις αλληλεπιδράσεις που εισάγονται “με το χέρι” από τον χρήστη στο πρόγραμμα, υπάρχουν και έτοιμα από τους προγραμματιστές του Geant4 Physics Lists, και η επιλογή του κατάλληλου κώδικα επαφίεται στην κρίση του χρήστη.

Είναι αυτονόητο ότι τα Physics Lists που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση του πειράματος με πηγή φωτονίων είναι διαφορετικό από αυτό με την πηγή νετρονίων. Στην περίπτωση των πρώτων κατασκευάστηκε η κλάση UMPysicsList, στην οποία

- “κατασκευάζονται” τα σωματίδια που χρειαζόμαστε, όπως ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και φυσικά φωτόνια
- ορίζονται τα **cut values**, δηλαδή από ποια ενέργεια και έπειτα το πρόγραμμα σταματάει να παρακολουθεί τις αλληλεπιδράσεις ενός σωματιδίου και του αντιστοιχίζει αυτό το ποσότητας ενέργειας
- προστίθεται η φυσική. Μετά από διάφορες προσπάθειες, το πιο κατάλληλο πακέτο για χαμηλοενεργειακά φωτόνια φάνηκε να είναι το **G4EmPenelope**.

Στην περίπτωση των νετρονίων, ήταν πολύ χρονοβόρο ακόμα και να οριστούν τα σωματίδια που εμφανίζονται στην προσομοίωση. Οι προσπάθειες που πραγματοποιήθηκαν για το να προτεθούν οι αλληλεπιδράσεις που μπορεί να εμφανιστούν σε ένα τέτοιο πείραμα, δεν ήταν πετυχημένες καθώς οι παράγοντες που παίζουν ρόλο είναι πάρα πολλοί. Έτσι χρησιμοποιήθηκε το έτοιμο από τους προγραμματιστές του Geant4 πακέτο **QGSP_BERT_HP**. Το πακέτο αυτό έχει τα εξής χαρακτηριστικά: Το QGSP προέρχεται από τα αρχικά του quark gluon string μοντέλου για αλληλεπιδράσεις υψηλής ενέργειας πρωτονίων, νετρονίων, πιονίων, καονίων και πυρήνων. Το BERT σημαίνει ότι για τα πρωταρχικά νετρόνια, πρωτόνια, πόνια και καόνια ενέργειας κάτω των $\sim 10 \text{ GeV}$ χρησιμοποιείται η αλληλουχία Bertini (*Bertini cascade*), η οποία έχει παρουσιάζει μεγαλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Όσο για το HP, αυτό υποδηλώνει ότι για τη μετάβαση νετρονίων χαμηλής ενέργειας (κάτω από 20 MeV) σε θερμικές ενέργειες χρησιμοποιούνται δεδομένα από το πακέτο

υψηλής ακρίβειας νετρονίων (NeutronHP). Το QGSP_BERT_HP είναι από τα προτεινόμενα πακέτα για προσομοιώσεις αδρονίων, και χρησιμοποιείται για ευρύ φάσμα ενεργειών.

4.5 Πληροφορίες για τα γεγονότα

Για να συλλεχθούν διάφορες πληροφορίες για τα γεγονότα, τί συμβαίνει πρακτικά όταν ένα σωματίδιο διέρχεται από τον ανιχνευτή (σύμφωνα βέβαια με τα *Physics Lists* που χρησιμοποιήθηκαν και τα οποία θα μελετηθούν στη συνέχεια), χρησιμοποιείται ο Sensitive Detector μέσω της κλάσης *UMSD*. Για να λειτουργήσει η κλάση αυτή κληρονομεί μια άλλη, την *UMHit*. Η *UMHit* ουσιαστικά ορίζει τις πληροφορίες που ο χρήστης επιθυμεί να πάρει από την προσομοίωση, όπως το σωματίδιο, τη θέση του ή την ενέργεια που αφήνει. Κληρονομώντας αυτήν και τις έτοιμες από το πακέτο Geant4 *G4Track* και *G4Step* συλλέγει πληροφορίες για κάθε βήμα (step) τις τροχιάς και τις αποθηκεύει σε ένα *map*.

Ο χρήστης ορίζει τα τμήματα του ανιχνευτή που θέλει να λειτουργήσουν ως sensitive detectors, δηλαδή τα τμήματα από τα οποία θέλει να λάβει πληροφορίες, στην κλάση *UMDetectorConstruction*. Στην παρούσα προσομοίωση η βασική πληροφορία ήταν η ενέργεια που εναποτίθεται στην ενεργό περιοχή, παρ' όλα αυτά ειδικά για το πεδίο νετρονίων όπου υπάρχουν πολλές αλληλεπιδράσεις με τα υλικά του ανιχνευτή και πολλές σκεδάσεις είναι σημαντική η προέλευση των σωματιδίων, έτσι ορίστηκαν ως sensitive detectors όλα τα στοιχεία του ανιχνευτή.

4.6 Μελέτη των γεγονότων

4.6.1 Προσομοίωση νετρονίων

Ένα από τα κύρια και βασικότερα κομμάτια της προσομοίωσης με το Geant4, προκειμένου η προσομοίωση να είναι το δυνατόν σωστότερη και να δίνει στο χρήστη περισσότερες πληροφορίες, είναι αυτό στο οποίο γίνεται η μελέτη των γεγονότων (*UMEventAction*). Στην κλάση αυτή αναλύονται τα δεδομένα του *map* που κατασκευάζει η *UMSD* σε κάθε γεγονός (*step*). Το κάθε στοιχείο του *map* με τις πληροφορίες του, όπως το σωματίδιο που άφησε ενέργεια σε κάθε step και το ποσό της ενέργεια αυτής, ο τύπος της αλληλεπίδρασης που υπέστη, η θέση του step και το σε ποια τροχιά ανήκει, ορίζεται ως ένα *hit*. Τα hits στη συνέχεια δέχονται κατάλληλη επεξεργασία ώστε να εξαχθούν χρήσιμα αποτελέσματα.

Στην παρούσα προσομοίωση, και ιδίως για τα νετρόνια, η επεξεργασία που χρειάστηκε έπρεπε να είναι αρκετά προσεκτική. Κατ' αρχάς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ενέργεια που τελικά ανιχνεύει micromegas είναι αυτή που έχει εναποτεθεί στην ενεργό περιοχή. Έτσι είναι σημαντικό να οριστεί στον κώδικα αυτή η περιοχή, η οποία έχει διαστάσεις $5.153 \text{ mm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, εξαιρώντας όμως το drift και το mesh. Σε αυτά σαφώς εναποτίθεται ενέργεια από τα διάφορα σωματίδια, ενέργεια όμως που εν τέλει δεν ανιχνεύεται.

Ένα άλλο ζήτημα είναι ότι στο Geant4 τα αποτελέσματα εξάγονται για κάθε *hit* με τη μορφή **σωματίδιο - ενέργεια στο συγκεκριμένο hit - θέση του hit**. Όμως το ζητούμενο της εργασίας ήταν να βρεθούν τα σωματίδια που αφήνουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή, η ενέργεια αυτή (αποκλειστικά στην ενεργό περιοχή και όχι σε όλον το χώρο του ανιχνευτή), αλλά και η θέση στην οποία παράχθηκαν. Για να κάνει βέβαια το Geant4 tracking των εκάστοτε σωματιδίων, αυτά πρέπει να αφήνουν ενέργεια. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν "ίχνη" των σωματιδίων, όπως για παράδειγμα για ένα νετρόνιο το οποίο δεν αλληλεπιδράσε, η έξοδος του προγράμματος θα είναι λίγα (3 ή 4 στη συγκεκριμένη γεωμετρία) τυπικά steps με μηδενική ενέργεια έκαστο. Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, η θέση στην οποία παράχθηκαν τα σωματίδια που αφήσαν ενέργεια στην ενεργό περιοχή ορίστηκε στον κώδικα να είναι η πρώτη θέση όπου το σωματίδιο αφήνει ενέργεια. Η θεώρηση αυτή είναι αρκετά ακριβής για την πλειοψηφία των σωματιδίων που συναντάμε (βαρέα φορτισμένα σωματίδια, πρωτόνια, ηλεκτρόνια).

Συνοπτικά, ο κώδικας κατασκευάστηκε έτσι ώστε όποτε έχουμε νέο σωματίδιο να αποθηκεύεται το είδος, η θέση που δημιουργήθηκε και η ενέργεια που άφησε στην ενεργό περιοχή το προηγούμενο. Επίσης, στο τέλος της μελέτης κάθε γεγονότος αποθηκεύεται ο αριθμός ο αύξων αριθμός του γεγονότος, ο αριθμός των hits, η ενέργεια που εναποτέθηκε στην ενεργό περιοχή καθώς και η συνολική ενέργεια που έχασε το νετρόνιο στον ανιχνευτή.

Στην προσομοίωση έπρεπε να ληφθεί υπόψη επίσης ότι όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα του Παραρτήματος η χαμηλότερη ενέργεια σύνδεσης για το άτομο του αργού, που κυριαρχεί στον ανιχνευτή, είναι τα 15.7 eV. Ενέργειες χαμηλότερες από αυτή δεν μπορούν να ιονίσουν τα άτομα του αργού, ούτε και κάποιου άλλου υλικού του ανιχνευτή, και στην πραγματικότητα απορροφώνται από το CO_2 . Έτσι ο κώδικας προσαρμόστηκε ώστε να μην "ακολουθεί" ενέργειες χαμηλότερες από αυτήν την τιμή.

Το καίριο βέβαια τμήμα της προσομοίωσης όμως ήταν να καθοριστεί η ενέργεια που αφήνει κάθε σωματίδιο, ενώ σωματίδια-κλειδί είναι τα ηλεκτρόνια. Άλλωστε αυτά είναι που εν τέλει δίνουν σήμα στον ανιχνευτή.

Τα ηλεκτρόνια του συγκεκριμένου πειράματος παράγονται κατά κύριο λόγο με τους εξής τρεις τρόπους:

- Πρώτον από τα φωτόνια, που είναι κατά βάση αποτέλεσμα των πυρηνικών αλληλεπιδράσεων των νετρονίων με τα υλικά του ανιχνευτή, μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου, φαινομένου Compton και διδυμης γέννησης.
- Δεύτερον από άλλα ηλεκτρόνια μέσω σκεδάσεων
- Τρίτον, από ιοντισμούς που προκαλούνται από τα πρωτόνια και τα θετικά ιόντα, προϊόντα της αλληλεπίδρασης των νετρονίων με τα υλικά του ανιχνευτή.

Έτσι, για να υπολογιστεί η εναπόθεση ενέργειας που οφείλεται στα θετικά ιόντα και τα πρωτόνια έπρεπε σε αυτήν να προστεθεί και η ενέργεια των ηλεκτρονίων που αυτά ιονίζουν, σε άλλη περίπτωση άλλωστε τα αποτελέσματα δεν ήταν λογικά. Για το σκοπό αυτό έγινε μια τροποποίηση της κλάσης, και χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος *GetUMProcessName*, που κληρονομείται από την κλάση *UMSD* και έχει οριστεί έτσι ώστε να δίνει την αλληλεπίδραση που πραγματοποιήθηκε. Σε περίπτωση που το όνομα της αλληλεπίδρασης είναι "hIoni" ή "ionIoni", δηλαδή όταν πρόκειται για ιοντισμούς που προκαλούνται από πρωτόνιο ή κάποιο ιόν, η ενέργεια που εναποτίθεται αποθηκεύεται ως ενέργεια του αντίστοιχου σωματιδίου. Το ίδιο συμβαίνει όταν τα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται από αυτούς τους ιοντισμούς σκεδάζουν και δευτερογενή ηλεκτρόνια.

Αξίζει εδώ να αναφέρουμε τί ακριβώς ορίζεται στο Geant4 ως *energy deposition*. Στον οδηγό αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι *η συνολική ενέργεια που εναποτίθεται σε ένα βήμα (total energy deposited) είναι το άθροισμα*

- της ενέργειας που εναποτίθεται μέσω της διαδικασίας απώλειας ενέργειας
- της ενέργειας που χάθηκε από δευτερεύοντα σωματίδια που δεν δημιουργήθηκαν γιατί η ενέργεια του καθενός ήταν μικρότερη από το όριο των *cuts*.

Άρα προφανώς όταν φαίνεται πως κάποιο θετικά φορτισμένο ιόν αφήνει ενέργεια χωρίς να ακολουθούν ιοντισμοί, αυτοί στην πραγματικότητα συμβαίνουν αλλά η ενέργεια που εναποτίθεται συμπεριλαμβάνεται στην ενέργεια που φαίνεται να έχει αφήσει το ιόν.

4.7 Αποθήκευση των δεδομένων

Η κλάση που είναι υπεύθυνη για το "σώσιμο" των δεδομένων του εικονικού πειράματος είναι η *UMRootSaver*, μια κλάση που για να είναι αποτελεσματική χρησιμοποιεί τις βιβλιοθήκες του προγράμματος ROOT.

Η κλάση αυτή αποτελείται από πολλές, απλές μεθόδους. Έτσι υπάρχουν μέθοδοι για την δημιουργία των ntuples, το κλείσιμό τους, την αποθήκευση δεδομένων της προσομοίωσης και, στην περίπτωση των φωτονίων, για την προσθήκη της response function (συνάντηση απόκρισης) του ανιχνευτή.

Η αποθήκευση των δεδομένων σε ntuples είναι ιδιαίτερα χρηστική, καθώς δίνει τη δυνατότητα της αποθήκευσης μεγάλου όγκου πληροφοριών, αλλά και της εύκολης επεξεργασίας αυτών για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

4.8 Διεξαγωγή του πειράματος

Μια κλάση ακόμα παίζει σημαντικό ρόλο στη διεξαγωγή του πειράματος, καθώς είναι "υπεύθυνη" για το κάθε run του πειράματος. Είναι αυτή που καθορίζει ώστε να δημιουργηθεί ένας RootSaver με τα καθορισμένα ntuples στην αρχή, να σώζει τα δεδομένα στη συνέχεια και να κλείνει το αρχείο στο τέλος κάθε run. Για το λόγο αυτό και κληρονομεί τις UMLAction και RootSaver. Η κλάση αυτή είναι η RunAction.

Όλες οι παραπάνω κλάσεις όμως δεν θα είχαν νόημα χωρίς την *main*, το βασικό "οργανωτή" της προσομοίωσης, καθώς αυτή είναι που καλεί τις UMLDetectorConstruction, UMLPrimaryGeneratorAction, RunAction καθώς και τα Physics Lists.

Κεφάλαιο 5

Προσομοίωση Φωτονίων

5.1 Εισαγωγή

Όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 προσομοιώθηκαν 2 πηγές φωτονίων, οι πηγές $^{55}_{26}\text{Fe}$ και $^{109}_{48}\text{Cd}$, σε σχέση με τον δεύτερο ανιχνευτή, με το παράθυρο από mylar, και με αναλογίες αερίων Ar:CO₂ 93:7. Οι πηγές τοποθετήθηκαν σε επαφή με το παράθυρο του ανιχνευτή και στο κέντρο του. Τα αποτελέσματα του εικονικού πειράματος παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

5.2 Πηγή $^{55}_{22}\text{Fe}$

Η πηγή σιδήρου που προσομοιώθηκε έχει τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Πρόκειται για μια χαμηλοενεργειακή πηγή φωτονίων, η οποία εξαιτίας της έντονης και χαρακτηριστικής κορυφής της στα 5.9keV χρησιμοποιείται συχνά για την βαθμονόμηση του ανιχνευτή. Στις ενέργειες αυτής της τάξης η μόνη αλληλεπίδραση που αναμένεται να παρατηρηθεί από τα φωτόνια είναι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Ένα χαρακτηριστικό φαινόμενο κατά την ανίχνευση φωτονίων ραδιενεργού σιδήρου $^{55}_{26}\text{Fe}$, αλλά και φωτονίων άλλων χαμηλοενεργειακών πηγών, είναι το ονομαζόμενο "**argon escape**". Το φωτόνιο της πηγής αλληλεπιδρά με το αέριο αργό ιονίζοντάς το, πραγματοποιώντας φωτοηλεκτρικό φαινόμενο με ένα ηλεκτρόνιο της K στιβάδας. Εκπέμπεται ένα φωτοηλεκτρόνιο, που επειδή προέρχεται από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και από συγκεκριμένης ενέργειας φωτόνια θα έχει και αυτό τη χαρακτηριστική ενέργεια $E_{\text{photon}} - E_{\text{Binding}}^K$. Το ιονισμένο άτομο του αργού αποδιεγείρεται με εκπομπή K_{α} ή K_{β} ακτίνων-X. Αν οι ακτίνες-X και το φωτοηλεκτρόνιο απορροφηθούν στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή, τότε ουσιαστικά όλη η ενέργεια του φωτονίου έχει "μείνει" εκεί.

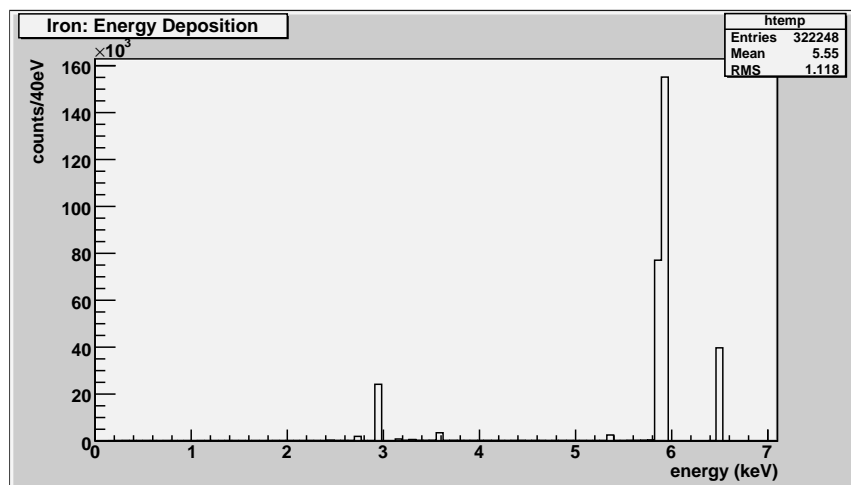


$T_{1/2} = 2.73y$ Decay Mode: Electron Capture		
Ενέργεια ακτινοβολίας γάμμα (keV)	Intensity (ένταση)	Ποσοστό (%)
0.64	0.00421	1
5.888	0.08239	29
5.899	0.16280	58
6.49	0.03290	12

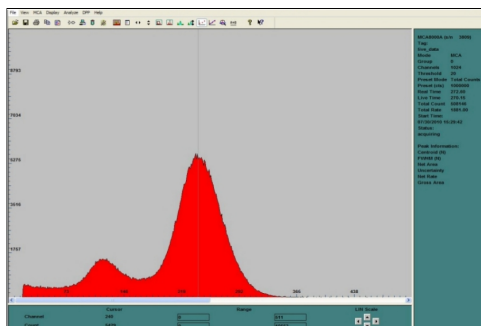
Πίνακας 5.1: Πληροφορίες για το ραδιενεργό σίδηρο $^{55}_{26}\text{Fe}$

Στην πιθανή περίπτωση όμως που η ακτίνα-X ξεφύγει από την ενεργό περιοχή αλλά το φωτοηλεκτρόνιο απορροφηθεί, θα ανιχνευτεί μόνο η δική του, χαρακτηριστική ενέργεια. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργηθεί μια κορυφή στην ενέργεια αυτή, γνωστή και ως *argon escape peak* (κορυφή διαφυγής του αργού, αφού η χαρακτηριστική ακτινοβολία-X του αργού "δραπέτευσε").

Στην Σχήμα 5.1 φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Παρατηρούνται η διπλή κορυφή στα 5.9 keV και μία ακόμα κορυφή στα 6.4 keV , που σημαίνει ότι τα φωτόνια αυτά άφησαν όλη τους την ενέργεια στην ενεργό περιοχή. Επίσης παρατηρείται μια κορυφή στα 2.9 keV , η κορυφή του argon escape.



Σχήμα 5.1: Εναπόθεση ενέργειας από φωτόνια που εκπέμπονται από ραδιενεργό σίδηρο $^{55}_{26}\text{Fe}$ στην ενεργό περιοχή του micromegas



Σχήμα 5.2: Τυπικό φάσμα ραδιενεργού σιδήρου $^{55}_{26}Fe$ που έχει ληφθεί στο εργαστήριο ΦΥΕ του ΕΜΠ με τη βοήθεια του λογισμικού ADMCA. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζονται τα γεγονότα(counts), και στον οριζόντιο το αντίστοιχο κανάλι ενέργειας.

Το ενδεικτικό πειραματικό φάσμα, όπως λήφθηκε στο Εργαστήριο Φυσικής Υψηλών Ενεργειών του ΕΜΠ, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2. Παρατηρούνται δύο κορυφές, η δεξιά αντιστοιχίζεται στα φωτόνια των 5.9 keV και 6.4 keV και η αριστερή είναι η κορυφή διαφυγής του αργού. Σε αυτό το σημείο το συγκεκριμένο εικονικό πείραμα μπορεί να θεωρηθεί επιτυχές, όμως οι προσομοιώσεις εκτός των άλλων δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να κατανοήσει περισσότερο για το πείραμα, ακόμα και για τη φυσική που κρύβεται πίσω αυτό. Για το σκοπό αυτό κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθούν και οι μικρές κορυφές του φάσματος του $^{55}_{26}Fe$, αυτές που σε καρτεσιανές συντεταγμένες είναι αμελητέες αλλά σε λογαριθμικές ξεχωρίζουν, σε συνδυασμό με τους Πίνακες του παραρτήματος Α, που δίνουν την ενέργεια σύνδεσης και τις χαρακτηριστικές ακτίνες-Χ για τις διάφορες στιβάδες των στοιχείων.

Έτσι στο Σχήμα 5.3 παρατηρούμε κορυφές στα 2.7keV , 2.95keV , 3.2keV , 3.3keV , 3.55keV , και 5.35keV . Τα δεδομένα του παραρτήματος Α για το αργό συνοψίζονται για ευκολία στον Πίνακα 5.2.

Πολύ εύκολα υπολογίζει κανείς τις ενέργειες των φωτοηλεκτρονίων, που την περίπτωση της ακτινοβολίας των 5.899 keV είναι $5.899 - 3.206 = 2.693 \simeq 2.7\text{ keV}$, στην πολύ κοντινή ακτινοβολία των 5.888 keV είναι πάλι $\simeq 2.7\text{ keV}$, ενώ για τα 6.49 keV είναι $6.49 - 3.206 = 3.284 \simeq 3.3\text{ keV}$. Οι κορυφές 2.7 keV και 3.3 keV στο γράφημα δεν είναι τίποτα άλλο παρά η περίπτωση του argon escape, ότι δηλαδή η ακτίνα-Χ διέφυγε και μόνο το φωτοηλεκτρόνιο άφησε ενέργεια. Η περίπτωση της ενέργειας 3.2 keV είναι η αντίθετη, όταν ανιχνεύεται μόνο η χαρακτηριστική ακτινοβολία, πιθανόν γιατί το φωτοηλεκτρικό πραγματοποιήθηκε εκτός της ενεργού περιοχής και το ηλεκτρόνιο,

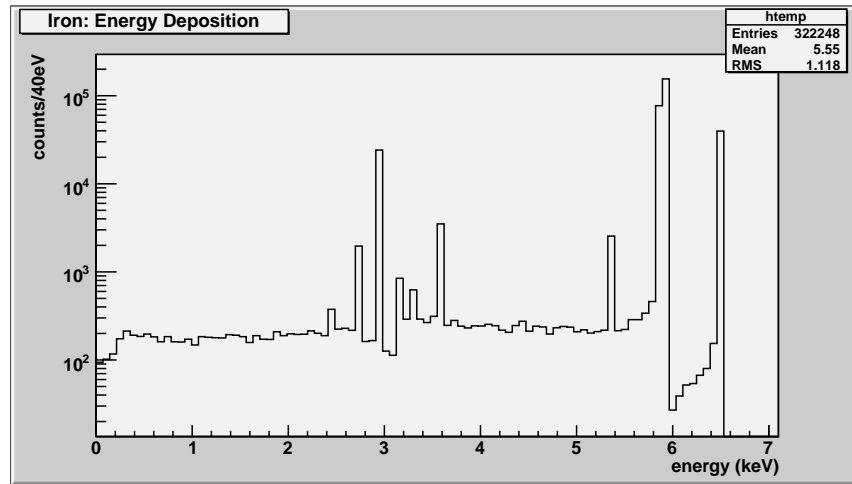
Argon Binding Energies (eV)

K	L_1	L_2	L_3	M_1	M_2	M_3
3206	326	250	248	29	16	16

Argon X-rays (eV)

$K\alpha_1$	$K\alpha_2$	$K\beta_1$
2956	2958	3190

Πίνακας 5.2: Ενέργειες σύνδεσης των ηλεκτρονίων και οι σημαντικότερες από τις χαρακτηριστικές ακτίνες-X για το αργό



Σχήμα 5.3: Εναπόθεση ενέργειας από φωτόνια που εκπέμπονται από ραδιενεργό σίδηρο $^{55}_{26}Fe$ στην ενεργό περιοχή του micromegas, σε λογαριθμική κλίμακα

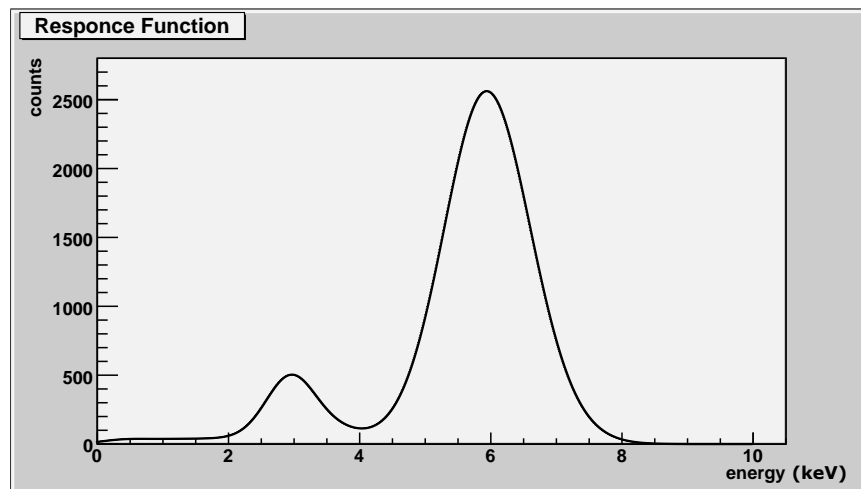
που σε αυτές τις ενέργειες έχει εμβέλεια μικρότερη από τα 2 mm , απορροφήθηκε. Όπως φαίνεται πρόκειται για την ακτίνα $K\beta_1$, που εκπέμπεται κατά τη μετάβαση ενός ηλεκτρονίου από την M στην K στιβάδα του ατόμου του αργού. Όσο για την κορυφή των 5.36 keV , αυτή δεν είναι τίποτα άλλο από το argon escape στην περίπτωση που η ακτινοβολία 5.888 keV αλληλεπιδράσει με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο με το άτομο του οξυγόνου, του οποίου η K στιβάδα έχει ενέργεια σύνδεσης 525 eV . Τα φωτοηλεκτρόνια έχουν ενέργεια $5888 - 524 = 5.364 \simeq 5.36\text{ keV}$.

Αυτό που μένει να εξηγηθεί είναι οι κορυφές στα 2.95 keV και 3.35 keV . Η πρώτη μάλιστα φαίνεται στο Σχήμα 5.1 ιδιαίτερα υψηλή, και μπορεί να

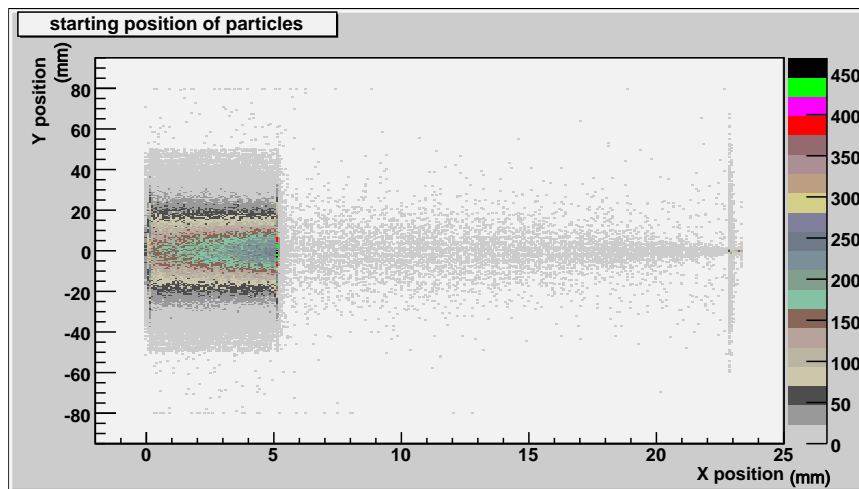
θεωρήσει κανείς ότι πρόκειται για την κορυφή του argon escape. Πράγματι έτσι είναι. Πρόκειται για τη διαδικασία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου στην K στιβάδα, με διαφορά όμως στη διαδικασία αποδιέγερσης. Και πάλι το άτομο αποδιεγείρεται με φθορισμό ακτίνων-X, όμως αυτή τη φορά με ανακατάταξη δύο ηλεκτρονίων. Ένα ηλεκτρόνιο μεταβαίνει από τη στιβάδα L στη στιβάδα K, εκπέμποντας μία από τις χαρακτηριστικές ακτινοβολίες $K\alpha_1$ και $K\alpha_2$, ενώ τη θέση του στην L καλύπτει ένα δεύτερο που προέρχεται από την M, και βασικά από την M_2 ή την M_3 , εκπέμποντας φωτόνιο ενέργειας $250 - 16 = 234\text{keV}$ ή $248 - 16 = 232\text{keV}$. Το φωτόνιο των 234keV απορροφάται στην ενεργό περιοχή, το ίδιο συμβαίνει και στο φωτοηλεκτρόνιο ενέργειας 2.7 ή 3.3keV , ενώ το η ακτινοβολία $K\alpha_1$ (ή $K\alpha_2$) διαφεύγει από τον ανιχνευτή. Έτσι η ενέργεια προς ανίχνευση ισούται με $2.7 + 0.234 \simeq 2.93\text{keV}$ ή $3.3 + 0.234 \simeq 3.53\text{keV}$.

Επίσης στον κώδικα της προσομοίωσης εισήχθη μια ρουτίνα, η οποία προσαρμόζει στα δεδομένα τη συνάρτηση απόκρισης του πειραματικού συστήματος ανιχνευτή-ηλεκτρονικών και μας δίνει το πειραματικά αναμενόμενο φάσμα. Το φάσμα αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4, και συγκρίνοντάς το με το αντίστοιχο πειραματικό φάσμα του Σχήματος 5.2 παρατηρεί κανείς ότι έχουν πολύ ικανοποιητική ομοιότητα.

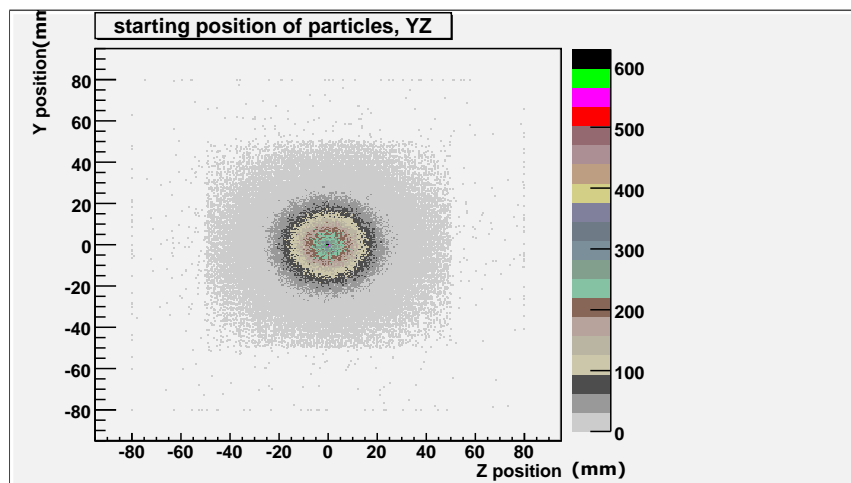
Τέλος, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπολογίστηκε η θέση στην οποία αρχίζουν να αφήνουν ενέργεια τα σωματίδια που καταλήγουν να ανιχνευθούν στην ενεργό περιοχή του micromegas. Όπως ήταν



Σχήμα 5.4: Προσομοίωση του φάσματος του $^{55}_{26}\text{Fe}$ δεδομένης της συνάρτησης απόκρισης του micromegas και των ηλεκτρονικών



Σχήμα 5.5: Σχηματική αναπαράσταση της αρχικής θέσης των σωματιδίων που αφήνουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή, σε σχέση με την πλαϊνή όψη του micromegas



Σχήμα 5.6: Σχηματική αναπαράσταση της αρχικής θέσης των σωματιδίων που αφήνουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή, σε σχέση με την μπροστινή επιφάνεια του micromegas

αναμενόμενο, τα περισσότερα φωτόνια που ανιχνεύονται ξεκινούν να αφήνουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή, κάποια γεγονότα ξεκινούν να αφήνουν ενέργεια αλληλεπιδρώντας με τα υλικά του παραθύρου, ενώ σαφώς πολλές αλληλεπι-

δράσεις πραγματοποιούνται με τα υλικά του drift και του mesh. Επίσης, όπως είναι λογικό, τα περισσότερα σωματίδια που αρχίζουν να αφήνουν ενέργεια εκτός της ενεργού περιοχής και καταλήγουν να ανιχνεύονται είναι αυτά που ακολουθούν τη συντομότερη διαδρομή, που κινούνται δηλαδή κοντά στον νοητό άξονα του micromegas.

5.3 Πηγή $^{48}_{109}\text{Cd}$

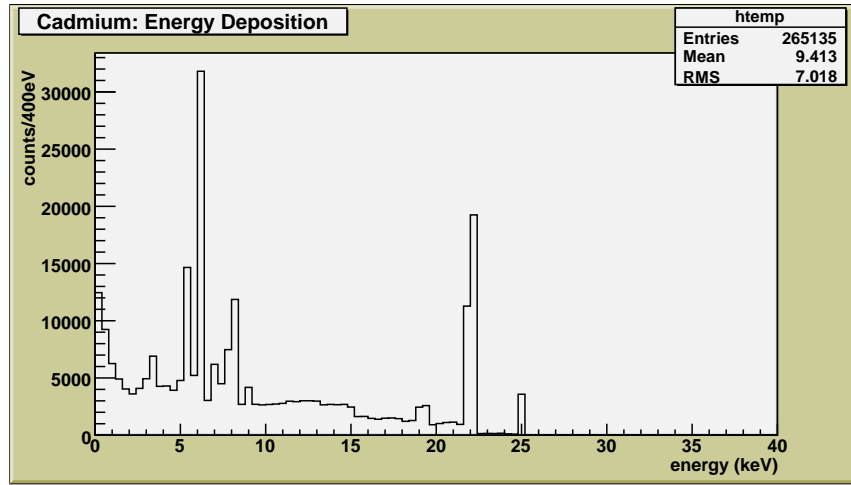
Η δεύτερη πηγή που προσομοιώθηκε ήταν η πηγή του καδμίου, με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3. Πρόκειται για μία πηγή που εκπέμπει μία τάξη μεγέθους υψηλότερη ενέργεια από την προηγούμενη πηγή, αυτή του σιδήρου, και η μελέτη της έχει επίσης μεγάλο ενδιαφέρον.

Η εναπόθεση ενέργειας στην ενεργό περιοχή του micromegas από τα φωτόνια που εκπέμπει το $^{48}_{109}\text{Cd}$ παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.7, και άμεσα παρατηρεί κανείς ότι έχει την εξής διαφορά σε σχέση με το αντίστοιχο γράφημα για τα φωτόνια του σιδήρου (Σχήμα 5.1): Στην περίπτωση του σιδήρου παρατηρούνται μονο κορυφές, ενώ στην περίπτωση του καδμίου εκτός από κορυφές παρατηρείται και μια χαμηλή κατανομή με εναπόθεση ενέργειας σε όλο σχεδόν το φάσμα των ενεργειών του.

Ξεκινώντας την ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι σημαντικό να γνωρίζει κανείς τους τρόπους με τους οποίους αλληλεπιδρούν τα φωτόνια των συγκεκριμένων ενεργειών με την ύλη. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρονική βάση δεδομένων **XCOM** του National Institute of Standards and Technology των Η.Π.Α. (NIST), και οι τιμές που έχουν ενδιαφέρον παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4. Από τον Πίνακα φαίνεται ότι στα φωτόνια χαμηλής ενέργειας του καδμίου ($\sim 25 \text{ keV}$) κυριαρχεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, με

$^{48}_{109}\text{Cd}$		
$T_{1/2} = 1.27y$		
Decay Mode: Electron Capture		
Ενέργεια ακτινοβολίας γάμμα (keV)	Intensity (ένταση)	Ποσοστό (%)
2.98	0.112	10
21.990	0.291	25
22.163	0.552	47
24.9	0.178	15
88.034	0.0361	3

Πίνακας 5.3: Πληροφορίες για το ραδιενεργό κάδμιο $^{48}_{109}\text{Cd}$



Σχήμα 5.7: Εναπόθεση ενέργειας από φωτόνια που εκπέμπονται από ραδιενεργό κάδμιο $^{48}_{109}\text{Cd}$ στην ενεργό περιοχή του micromegas

πιθανότητα δεκαπλάσια από αυτή του φαινομένου Compton, ενώ στα φωτόνια των 88keV τα δύο φαινόμενα είναι σχεδόν ισοπίθανα.

Επειδή η ακτινοβολία των 88 keV έχει μόλις 3% πιθανότητα να εμφανιστεί, θα μελετηθούν κυρίως οι άλλες ακτινοβολίες, και αρχικά για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στο αργό, φαινόμενο που έχει τη μεγαλύτερη πιθανότητα να πραγματοποιηθεί. Οι ενέργειες των ηλεκτρονίων που θα προκύψουν είναι $24.9 - 3.206 = 21.694 \simeq 21.7 \text{ keV}$, $22.163 - 3.206 = 18.957 \simeq 19 \text{ keV}$ και $21.990 - 3.206 = 18.784 \simeq 18.8 \text{ keV}$. Από τη βάση δεδομένων **ESTAR** του NIST μπορεί να υπολογιστεί κανείς την εμβέλεια των ηλεκτρονίων κάποιας ενέργειας, στη παρούσα περίπτωση θα υπολογιστεί η εμβέλεια στο αργό για τα 20 keV. Από το ESTAR φαίνεται ότι σε αυτή την ενέργεια η εμβέλεια των ηλεκτρονίων σε μονάδες επιφανειακής πυκνότητας είναι $1.289 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$.

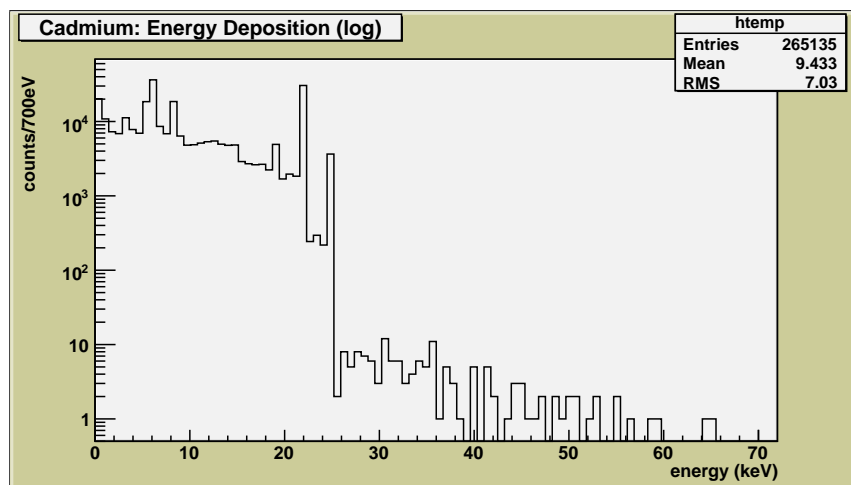
συντελεστής απορρόφησης μ/ρ σε μονάδες cm^2/g

Ενέργεια (keV)	Compton μ_C/ρ	φωτοηλεκτρικό μ_{phot}/ρ	συνολικός μ_{tot}/ρ
20	1.213×10^{-1}	8.207×10^0	8.630×10^0
30	1.316×10^{-1}	2.403×10^0	2.696×10^0
80	1.322×10^{-1}	1.127×10^{-1}	2.760×10^{-1}
100	1.280×10^{-1}	5.564×10^{-1}	2.043×10^{-1}

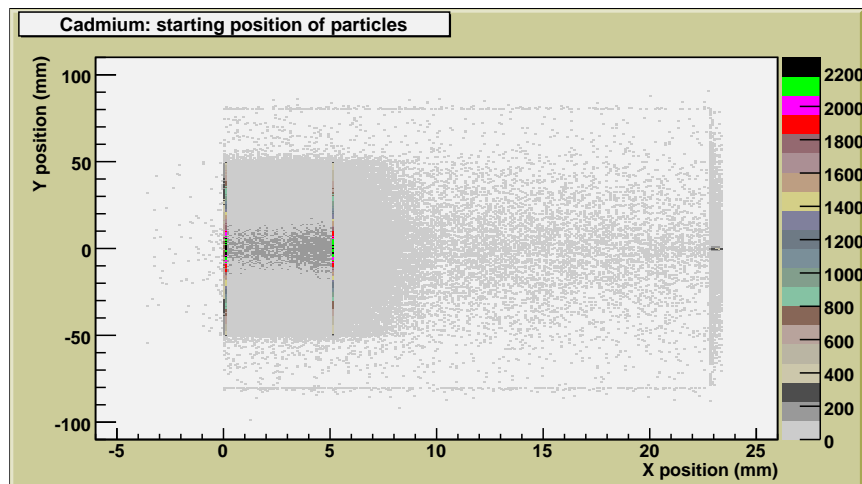
Πίνακας 5.4: συντελεστής απορρόφησης για το αργό ^{18}Ar σύμφωνα με τη βάση δεδομένων XCOM

Διαιρώντας τη με την πυκνότητα του αργού, που είναι για τη συγκεκριμένη βάση δεδομένων $1.662 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ υπολογίζεται η εμβέλεια του ηλεκτρονίου ενέργειας 20 keV στο αργό ίση με 0.77 cm . Καθώς το μήκος της ενεργού περιοχής είναι περίπου 0.5 cm και δεδομένου ότι τα ηλεκτρόνια σκεδάζονται στην ύλη και κάνουν τεθλασμένη πορεία, μπορεί να αφήσουν όλη την ενέργειά τους ή τμήμα της εκεί. Προφανώς τα φωτοηλεκτρόνια που προέρχονται από την L σιβάδα έχουν ακόμα μεγαλύτερη ενέργεια και είναι ακόμα λιγότερο πιθανό να αφήσουν όλη την ενέργειά τους στην ενεργό περιοχή. Στα ηλεκτρόνια αυτά που αφήνουν τμήμα της ενέργειάς τους, καθώς και σε εκείνα που προέρχονται από το φαινόμενο Compton, οφείλεται το πλατώ των ενεργειών. Οι κορυφές των 25 και των 22 keV σχηματίζονται όταν τα φωτόνια απορροφούνται πλήρως στην ενεργό περιοχή, ενώ η κορυφή των 22 keV προφανώς περιλαμβάνει και την κορυφή διαφυγής του αργού, για την ακτινοβολία των 24.9 keV . Στο argon escape οφείλεται και η κορυφή στα 19 keV και 18.8 keV , από τα φωτοηλεκτρόνια που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Για να εξηγηθούν οι υπόλοιπες κορυφές είναι σκόπιμο να κατασκευαστούν γραφήματα με τις θέσεις όπου τα σωματίδια ξεκινούν να αφήνουν ενέργεια, σημαντικότερο εκ των οποίων είναι το Σχήμα 5.9. Σε αυτό παρατηρούμε ότι τα σωματίδια που προέρχονται από το drift και το mesh είναι τουλάχιστον κατά μία τάξη μεγέθους περισσότερα από αυτά που ξεκινάνε από τα υπόλοιπα σημεία του ανιχνευτή. Η εξήγηση για τις κορυφές αυτές είναι λογικό να αναζη-



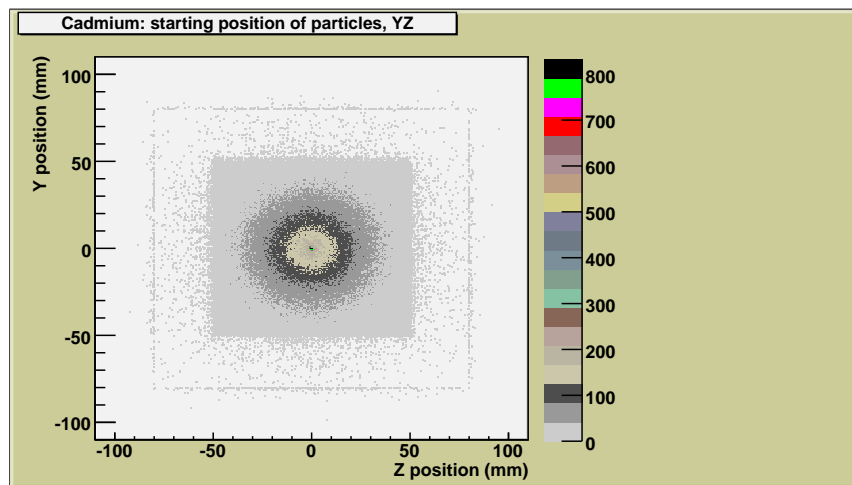
Σχήμα 5.8: Εναπόθεση ενέργειας από φωτόνια που εκπέμπονται από ραδιενεργό κάδμιο $^{48}_{109}\text{Cd}$ στην ενεργό περιοχή του micromegas, σε λογαριθμική κλίμακα



Σχήμα 5.9: Σχηματική αναπαράσταση της αρχικής θέσης των σωματιδίων που αφήνουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή, σε σχέση με την πλαϊνή όψη του micromegas, σε μη κανονικό σύστημα συντεταγμένων, για το κάδμιο

τηθεί στα στοιχεία του Stainless Steel, από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα δύο αυτά τμήματα του ανιχνευτή. Το Stainless Steel που έχει κατασκευαστεί στο παρόν εικονικό πείραμα αποτελείται σε μεγαλύτερο ποσοστό από σίδηρο, σε αναλογία 70%, χρώμιο σε αναλογία 18% και νικέλιο σε αναλογία 9%. Όπως φαίνεται από τους οι χαρακτηριστικές ακτίνες-X από το σίδηρο έχουν ενέργειες 6.4 keV , 6.39 keV και 7.1 keV , και σε αυτές ανήκουν οι αντίστοιχες κορυφές του Σχήματος 5.7, ενώ η κορυφή στα 5.4 keV αντιστοιχεί σε χαρακτηριστική ακτίνα-X από το χρώμιο.

Τέλος σε σύγκριση με τα Σχήματα 5.5 και 5.6 για τις θέσεις όπου ξεκινούν τα σωματίδια που αφήνουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή του micromegas για το σίδηρο, στην περίπτωση του ραδιενεργού καδμίου που εκπέμπει μεγαλύτερης ενέργειας φωτόνια παρατηρούμε ότι, όπως είναι αναμενόμενο, πολύ περισσότερα σωματίδια φτάνουν στην ενεργό περιοχή από σημεία μακριά από αυτήν, από το αέριο στην περιοχή πριν από το drift καθώς και από το πλαίσιο του ανιχνευτή.



Σχήμα 5.10: Σχηματική αναπαράσταση της αρχικής θέσης των σωματιδίων που αφήνουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή, σε σχέση με την μπροστινή επιφάνεια του micromegas, για το κάδμιο

Κεφάλαιο 6

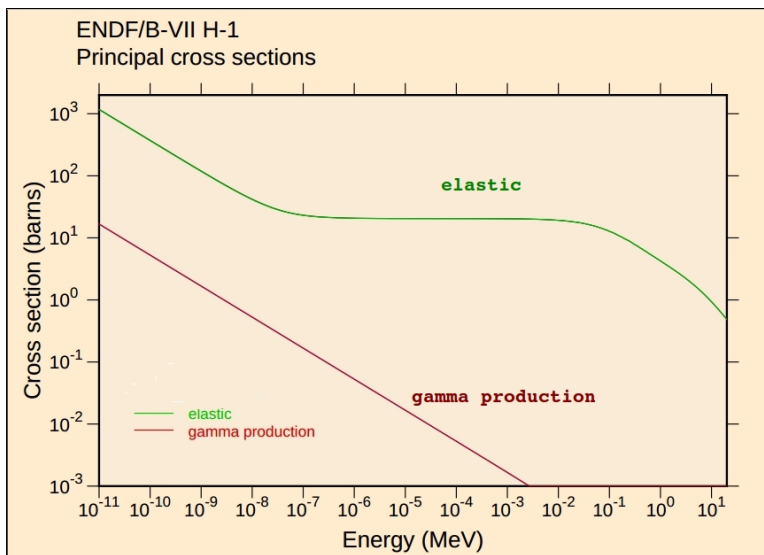
Αποτελέσματα Νετρονίων

6.1 Η φυσική πίσω από το πείραμα

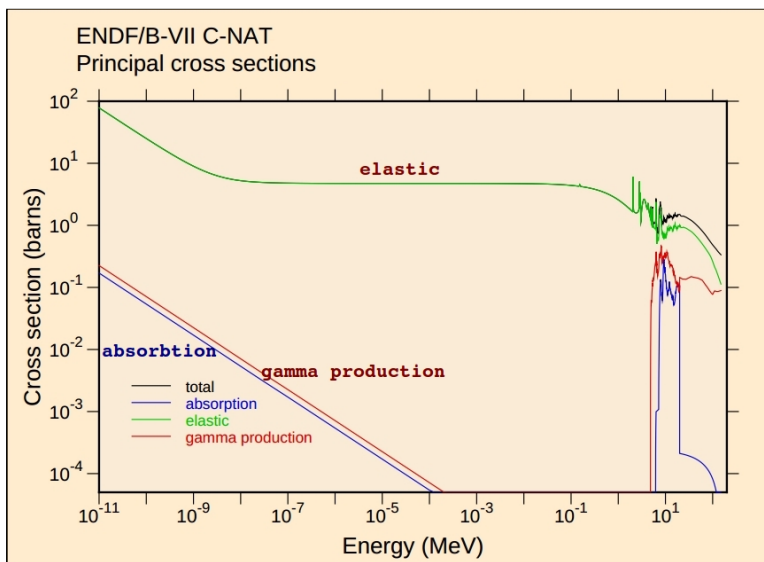
Προτού παρατεθούν τα αποτελέσματα και γίνει ο σχολιασμός τους, κρίνεται σκόπιμο αλλά και σημαντικό να γίνει μια εκτενέστερη αναφορά στη φυσική πίσω από αυτό το εικονικό πείραμα.

Το πρώτο που πρέπει να δει κανείς είναι οι πιθανές αλληλεπιδράσεις που πραγματοποιούν τα νετρόνια με τα υλικά του ανιχνευτή. Πρόκειται φυσικά για αλουμίνιο Al, αργό Ar, υδρογόνο H (στα πλαστικά τμήματα G10-PCB), άνθρακα (C), οξυγόνο (O), καθώς και με το σίδηρο (Fe) που υπάρχει σε μεγάλο ποσοστό στο ανοξείδωτο ατσάλι (Stainless Steel) του drift και του mesh. Στα Σχήματα 6.1-6.5 παρατίθενται τα γραφήματα με τις ενεργούς διατομές των κυρίαρχων αλληλεπιδράσεων των νετρονίων με αυτά τα υλικά σύμφωνα με τα δεδομένα της βάσης δεδομένων **ENDF/B-VII** (Evaluated Nuclear Data File), ενώ όταν χρειαστεί θα παρατεθούν και γραφήματα με τις δευτερεύουσες αλληλεπιδράσεις. Στα συγκεκριμένα γραφήματα ο όρος **absorbition (απορρόφηση)** αντιστοιχεί στις αντιδράσεις όπου το νετρόνιο απορροφάται από έναν πυρήνα σχηματίζοντας έναν καινούριο, ο οποίος διασπάται είτε με διαδικασία σχάσης είτε σχηματίζοντας ένα νέο πυρήνα και εκπέμποντας σωματίδια α, β, γ . Στην συγκεκριμένη προσομοίωση τα υλικά είναι ελαφριά οπότε αποκλείεται το ενδεχόμενο της σχάσης, και η απορρόφηση αφορά αποκλειστικά αντιδράσεις τύπου (n,p), (n,d), (n,a) κλπ και ο όρος gamma production (παραγωγή φωτονίων ακτίνων γ), σε αντιδράσεις τύπου (n,n'), δηλαδή στην ανελαστική σκέδαση. Ο λόγος για τον οποίο προτιμήθηκε η συγκεκριμένη βάση δεδομένων είναι ότι είναι αυτή που χρησιμοποιείται και από το Geant4.

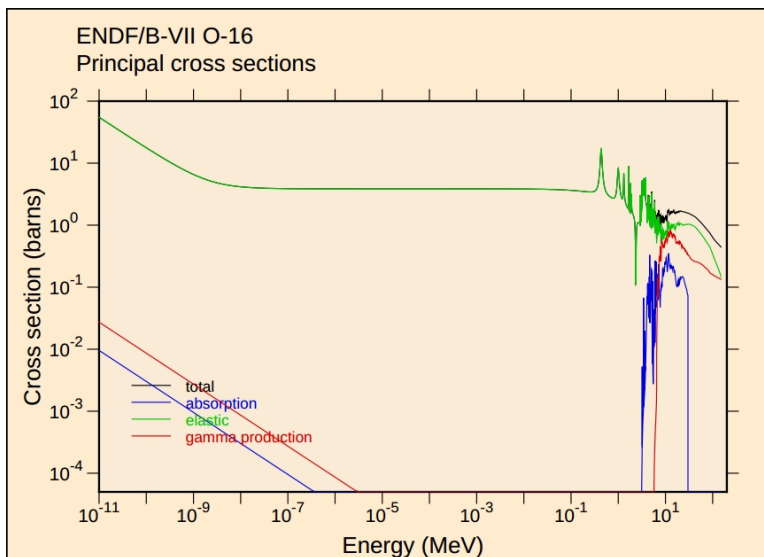
Από τα παραπάνω σχήματα για νετρόνια ενέργειας 5.5 MeV παρατηρούμε τα εξής:



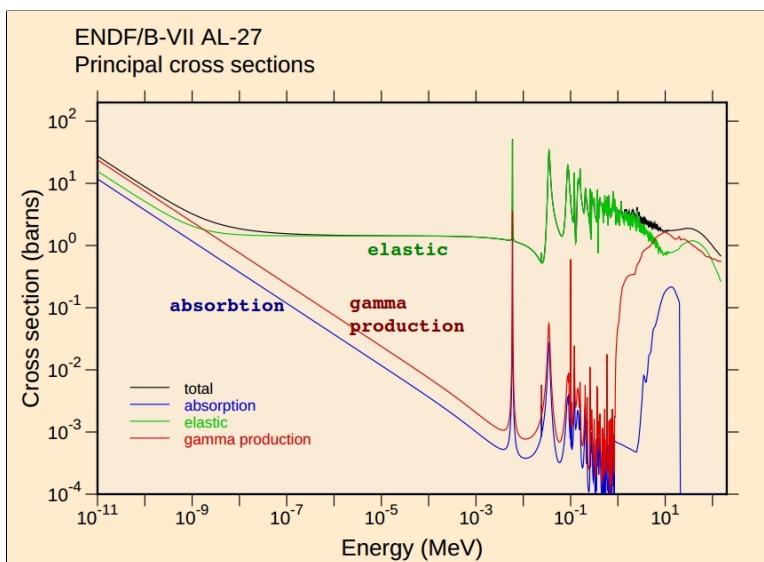
Σχήμα 6.1: Ενεργός διατομή των αντιδράσεων (n,p), (n,γ) των νετρονίων με το 1H , σύμφωνα με την ENDF/B-VII



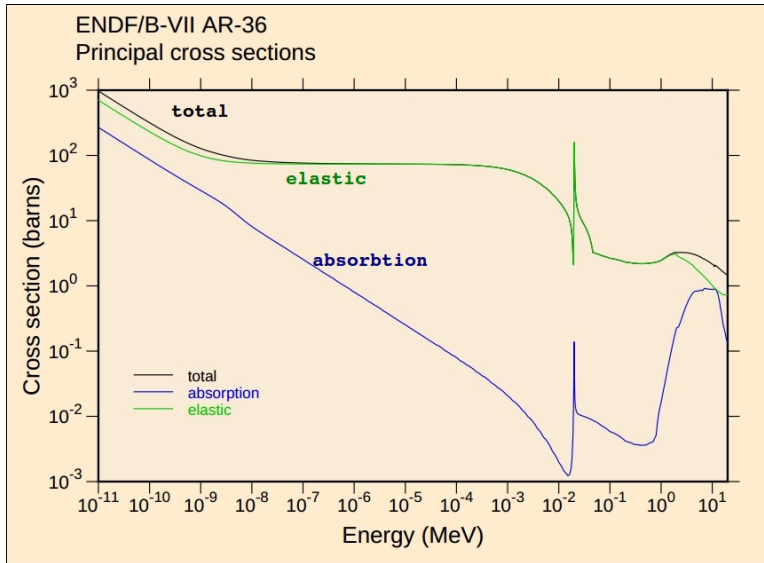
Σχήμα 6.2: Ενεργός διατομή των αντιδράσεων (n,p), (n,d), (n,a), (n,γ) των νετρονίων με το ^{12}C , σύμφωνα με την ENDF/B-VII



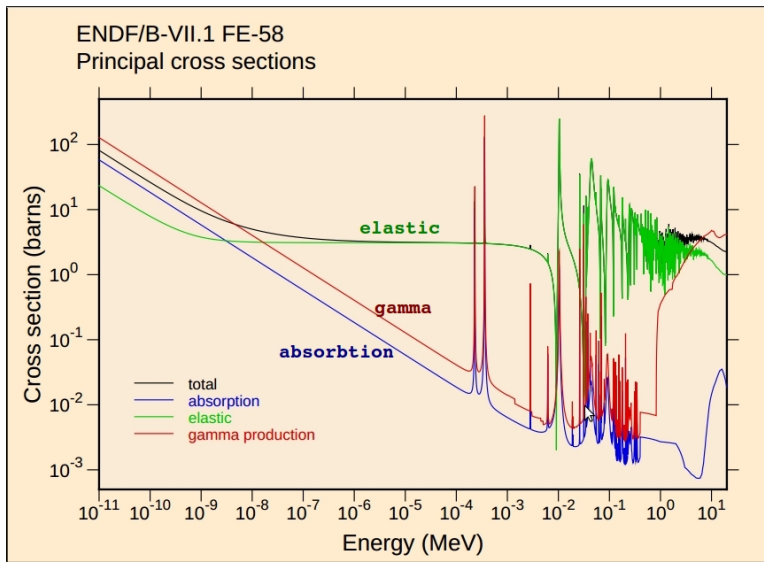
Σχήμα 6.3: Ενεργός διατομή των αντιδράσεων (n,p), (n,d), (n,α), (n,γ) των νετρονίων με το ^{16}O , σύμφωνα με την ENDF/B-VII



Σχήμα 6.4: Ενεργός διατομή των αντιδράσεων (n,p), (n,d), (n,α), (n,γ) των νετρονίων με το ^{27}Al , σύμφωνα με την ENDF/B-VII



Σχήμα 6.5: Ενεργός διατομή των αντιδράσεων (n,p), (n,d), (n,a) με το ^{40}Ar , σύμφωνα με την ENDF/B-VII



Σχήμα 6.6: Ενεργός διατομή των αντιδράσεων (n,p), (n,d), (n,a), (n,γ) με το ^{56}Fe , σύμφωνα με την ENDF/B-VII

- Στο 1H μοναδική αλληλεπίδραση που μπορεί να συμβεί σε αυτές τις ενέργειες είναι η ελαστική σκέδαση.
- Στον ^{12}C εκτός από ελαστική μπορεί να πραγματοποιηθεί και ανελαστική σκέδαση. Στην περίπτωση αυτή εκτός από την ενέργεια του σκεδαζόμενου φωτονίου, είναι πιθανό να απορροφηθεί και η ενέργεια του φωτονίου (ακτίνα-γ), κάτι που καθιστά την αλληλεπίδραση εξίσου σημαντική.
- Στο ^{16}O εκτός από ελαστική σκέδαση μπορεί να πραγματοποιηθεί και απορρόφηση, με μικρότερη πιθανότητα. Επομένως μπορεί να υπάρξει δημιουργία βαρέων φορτισμένων ιόντων, που θα αφήσουν την ενέργειά τους στον ανιχνευτή.
- Στο ^{27}Al η ελαστική και η ανελαστική σκέδαση είναι πρακτικά ισοπίθανες, ενώ υπάρχει μικρότερη πιθανότητα για απορρόφηση. Όμως επειδή τα άτομα αλουμινίου βρίσκονται στο στερεό πλαίσιο του ανιχνευτή, ούτε τα σκεδαζόμενα άτομα αλουμινίου ούτε τα βαρέα ιόντα αναμένεται να φτάσουν στην ενεργό περιοχή. Η μόνη ενεργειακή εναπόθεση που μπορεί να γίνει στον micromegas λοιπόν εξαιτίας του αλουμινίου είναι από τις ακτίνες-γ.
- Όσο για το ^{40}Ar η πιθανότητα ελαστικής σκέδασης και απορρόφησης είναι και οι δύο πολύ σημαντικές.
- Τέλος τα νετρόνια αλληλεπιδρούν με το ^{56}Fe σε αυτές τις ενέργειες κυρίως με ελαστική και ανελαστική σκέδαση, όμως πραγματοποιούνται και αντιδράσεις απορρόφησης. Επειδή βέβαια ο ^{56}Fe είναι σε αντίθεση με τα άλλα στοιχεία και σε στερεά μορφή στον ανιχνευτή αλλά και οριοθετεί (drift) και βρίσκεται μέσα (mesh) στην ενεργό περιοχή, αναμένεται να φανούν και τα στοιχεία που προκύπτουν από αυτές τις αντιδράσεις.

Στη συνέχεια είναι πολύ σημαντικό να υπολογιστούν οι ενέργειες που μπορεί να προκύψουν από αυτές τις αλληλεπιδράσεις και τί ενέργεια μπορεί να αφήσει το κάθε ένα από αυτά τα σωματίδια στον ανιχνευτή. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα κινηματικής **CIRE**, ένα λογισμικό που υπολογίζει τις ελαστικές σκεδάσεις μεταξύ των ατόμων, και την ενέργεια που μπορεί να εκλυθεί κατά μια πυρηνική αλληλεπίδραση. Ο Πίνακας 6.1 παρουσιάζει τη μέγιστη ενέργεια που μπορούν να αποκτήσουν μετά από ελαστική κρούση με ένα νετρόνιο ενέργειας $5.5 MeV$ οι πυρήνες των στοιχείων του micromegas που είναι πιο πιθανό να αφήσουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή. Στην ελαστική σκέδαση η ενέργεια που θα παρουν τα σωματίδια εξαρτάται

από τη γωνία στην οποία θα σκεδαστούν, και η μέγιστη ενέργεια για το σκεδαζόμενο σωματίο είναι όταν σκεδαστεί σε γωνία 0° , δηλαδή στην κατεύθυνση του νετρονίου, ενώ αυτό θα ακινητοποιηθεί.

Πυρήνας	$E_{max} (MeV)$
H	5.500
C	1.577
O	1.230
Ar	0.530
Fe	0.384

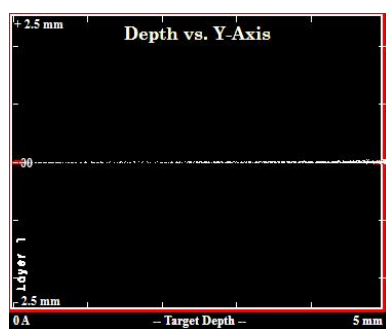
Πίνακας 6.1: Μέγιστη ενέργεια που θα αποκτήσει ένας πυρήνας μετά από ελαστική σκέδαση με νετρόνιο ενέργειας 5.5 MeV

Μετά τον παραπάνω υπολογισμό είναι σκόπιμο να γνωρίζει κανείς και πόση ενέργεια ενέργεια από αυτήν που απέκτησε το ιόν θα εναποτεθεί στην ενεργό περιοχή. Έτσι χρησιμοποιήθηκε ένα άλλο λογισμικό, το **SRIM** (*the Stopping and Range of Ions in Matter*), το οποίο υπολογίζει διάφορες παραμέτρους της μεταφοράς ιόντων στην ύλη.

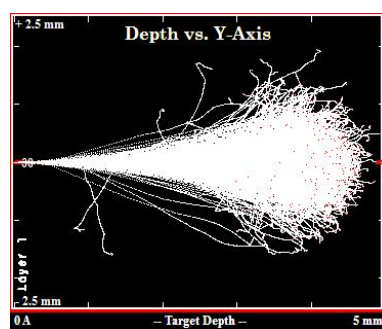
Αυτό που πρέπει ουσιαστικά να ελεγχθεί είναι η μέγιστη τιμή της ενέργειας που μπορεί εναποτεθεί στην ενεργό περιοχή από το κάθε ιόν που θα διέλθει από αυτήν. Ένας εύκολος τρόπος να γίνει αυτό με το SRIM είναι ο εξής: Θεωρώντας ότι το ιόν απέκτησε τη μέγιστη ενέργειά του από ελαστική σκέδαση όπως αυτή παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1, θέτοντας παραμέτρους για τη σύσταση του υλικού (αέριο Ar : CO_2 με αναλογίες 93:7), το πάχος του (5 mm, ενώ το πάχος της ενεργού περιοχής είναι 5.1 mm), και την κατεύθυνση του ιόντος (στις 0° , δηλαδή να διέρχεται κάθετα στην ενεργό περιοχή διανύοντας τη μικρότερη δυνατή απόσταση μέσα σε αυτήν), πραγματοποιείται προσομοίωση για πυρήνες C, O, Ar και H (πρωτόνια) ώστε να ελεγχθεί αν σταματάνε και απορροφώνται ή όχι. Στην πρώτη περίπτωση, τα ιόντα μπορεί να αφήσουν όλη την ενέργειά τους στην ενεργό περιοχή, που σημαίνει ότι στα γραφήματα του εικονικού πειράματος με το geant4 η μέγιστη ενέργεια που θα παρατηρηθεί για τα αντίστοιχα ιόντα πρέπει να είναι αυτή του Πίνακα 6.1, ενώ στην περίπτωση που διέρχονται από αυτήν χωρίς να απορροφηθούν, πρέπει να ακολουθηθεί διαφορετική μέθοδος για τον έλεγχο του εικονικού πειράματος.

Τα αποτελέσματα του SRIM παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.7. Από τα Σχήματα 6.7β', 6.7γ' και 6.7δ' για τους πυρήνες άνθρακα, οξυγόνου και αργού αντίστοιχα βγαίνει το συμπέρασμα ότι μπορούν να χάσουν και όλη την ενέργειά τους στην ενεργό περιοχή, καθώς η εμβέλειά τους για τις συγκεκριμένες ενέργειες είναι μικρότερη από την απόσταση drift-strips ($\simeq 5.1mm$). Άρα στα

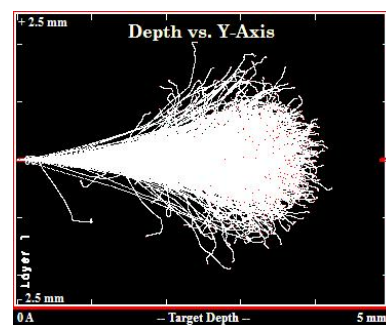
γραφήματα του Geant4 το φάσμα της ενεργειακής τους εναπόθεσης των ιόντων άνθρακα πρέπει να φτάνει μέχρι τα 1.721 MeV , του οξυγόνου τα 1.343 MeV και του αργού τα 0.639 MeV . Βέβαια όσο πιο μεγάλη είναι η ενέργεια του ιόντος, τόσο αυξάνεται και η εμβέλεια του και επομένως η πιθανότητα το ιόν να μην χάσει όλη, αλλά τμήμα της ενέργειάς του στην ενεργό περιοχή. Έτσι, τα τελικά φάσματα εμφανίζουν διαφορά σε σχέση με την πραγματική ενέργεια που αποκτούν τα ιόντα, για την ακρίβεια μία αύξηση των γεγονότων στις χαμηλότερες ενέργειες και μείωση στις υψηλότερες. Φυσικά αυτό είναι το φαινόμενο θα πιο έντονο στον άνθρακα, που μπορεί να αποκτήσει τη μεγαλύτερη ενέργεια σε σχέση με τα υπόλοιπα ιόντα και που η εμβέλεια του τότε είναι συγκρίσιμη με το μήκος της ενεργού περιοχής, και λιγότερο έντονο στο αργό, που η εμβέλεια που αντιστοιχεί στη μέγιστη ενέργειά του δεν υπερβαίνει το 40% του μήκους της ενεργού περιοχής.



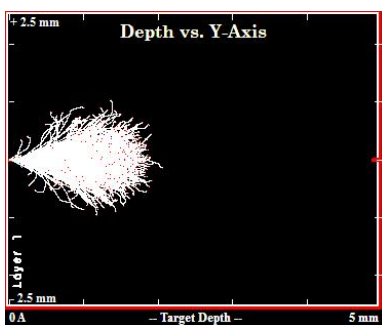
(α) Ιόντα H (πρωτόνια) ενέργειας 5.5 MeV



(β) Ιόντα C ενέργειας 1.721 MeV



(γ) Ιόντα O ενέργειας 1.343 MeV



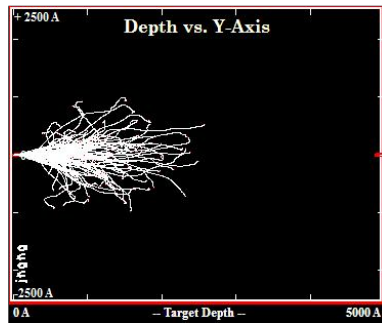
(δ) Ιόντα Ar ενέργειας 0.639 MeV

Σχήμα 6.7: Προσομοίωση της διείσδυσης ιόντων σε μείγμα αερίου $Ar : CO_2$ 93 : 7 πάχους 5 mm με χρήση του προγράμματος SRIM

Όσον αφορά τα πρωτόνια που από την ελαστική σκέδαση των ατόμων του υδρογόνου με το νετρόνιο αποκτούν όλη του την ενέργεια (5.5 MeV), η διέλευσή τους από το αέριο της ενεργού περιοχής σύμφωνα με το SRIM παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.7α'. Όχι μόνο δεν υπάρχουν πρωτόνια που σταματάνε, αλλά και η δέσμη δεν διευρύνεται σχεδόν καθόλου, που σημαίνει πως πολύ μικρό τμήμα της συνολικής ενέργειας που μπορεί να αποκτήσουν τα πρωτόνια θα ανιχνευτεί.

Τέλος είναι σκόπιμο να μελετηθεί αν τα στοιχεία που αποτελούν το drift και το mesh αφήνουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή. Για το λόγο αυτό έγινε μια ακόμα προσομοίωση με το SRIM, για να βρεθεί η εμβέλεια του πυρήνα του σιδήρου (Fe), που έχει αποκτήσει τη μέγιστη με ελαστική σκέδαση ενέργεια δυνατή (384 keV) μέσα σε σίδηρο (το υλικό από το οποίο αποτελείται σε μεγαλύτερο ποσοστό το Stainless Steel). Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.8 και όπως είναι εμφανές, η εμβέλεια των πυρήνων σιδήρου κατά την ελαστική σκέδαση δεν υπερβαίνει τα $0.25 \mu\text{m}$, όταν το πάχος των drift και mesh είναι $18 \mu\text{m}$, άρα υπάρχει πολύ μικρή πιθανότητα να αφήσει πυρήνας σιδήρου ενέργεια στην ενεργό περιοχή.

Στις επόμενες παραγράφους θα παρατεθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το Geant4 με, όπου είναι απαραίτητο, περαιτέρω μελέτη των αλληλεπιδράσεων που πραγματοποιούνται μέσα στον ανιχνευτή.

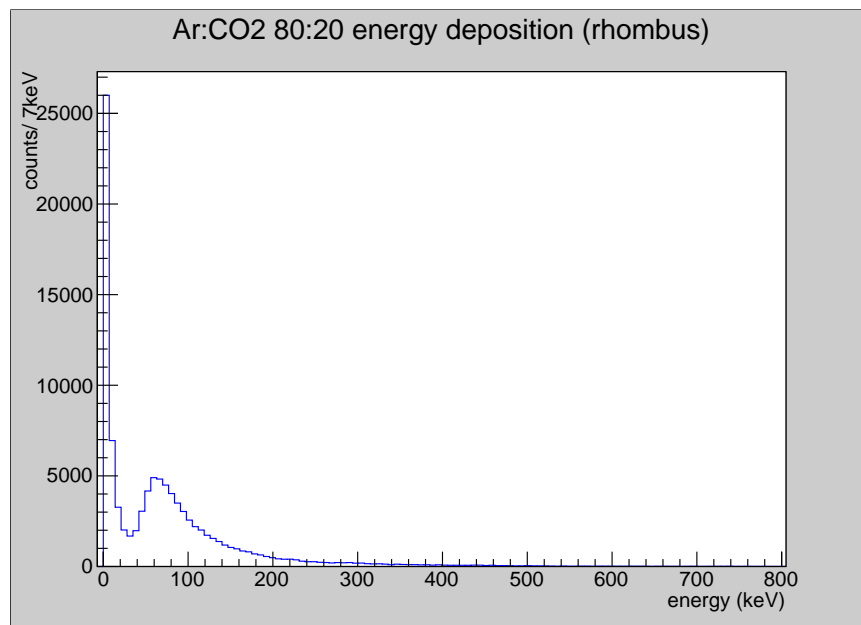


Σχήμα 6.8: Προσομοίωση της διείσδυσης ιόντων ^{56}Fe σε μείγμα αερίου $\text{Ar} : \text{CO}_2$ 93 : 7 πάχους 5 mm με χρήση του προγράμματος SRIM.

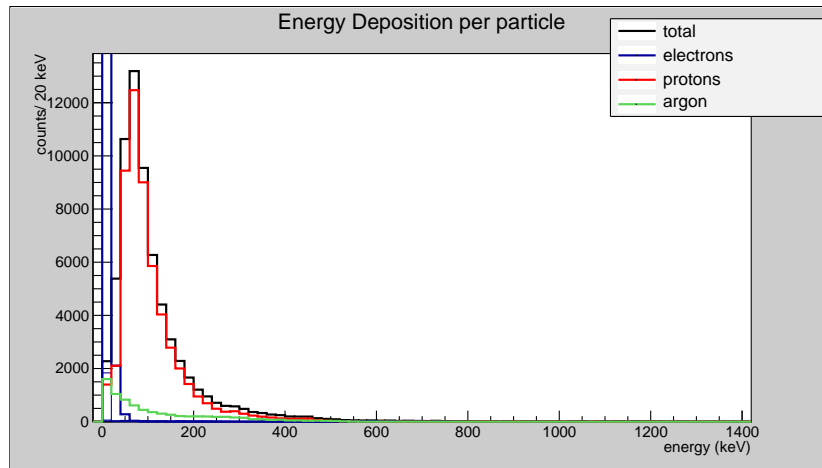
6.2 Δέση νετρονίων κάθετη στον ανιχνευτή

6.2.1 Με αναλογίες αερίου $Ar : CO_2$ 80 : 20, στον ανιχνευτή με το ρομβοειδές παράθυρο

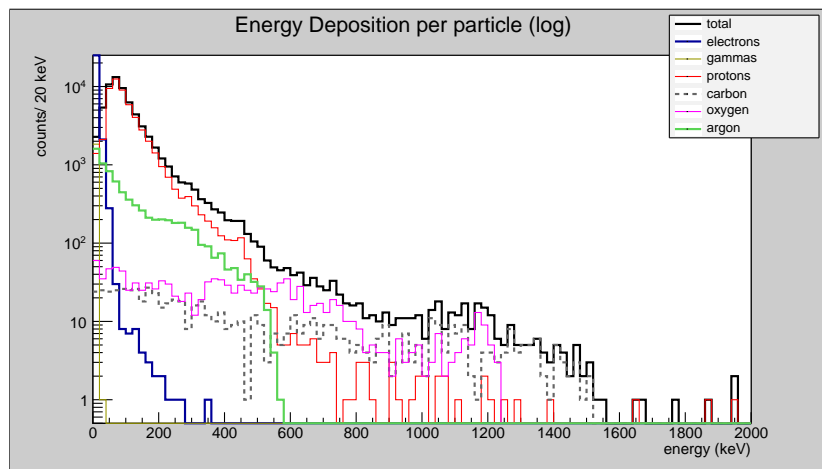
Η πρώτη προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε ήταν για μια πηγή νετρονίων 5.5 MeV , με τον ανιχνευτή με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογίες αερίου 80:20. Στον ανιχνευτή προσέπεσαν 10^9 νετρόνια, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.9-6.19. Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζεται η συνολική εναπόθεση ενέργειας που παρατηρείται στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή, ενώ τα επόμενα σχήματα παρουσιάζουν τις συνεισφορές ενέργειας από τα διάφορα σωματίδια, καθώς και τη θέση στην οποία ξεκίνησαν τα κυριότερα από αυτά. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 6.10 και 6.11 η κύρια συνεισφορά ενέργειας ανήκει στα πρωτόνια, και κατά δεύτερο λόγο στους πυρήνες αργού. Η συνεισφορά των ηλεκτρονίων είναι επίσης αρκετά σημαντική αλλά μόνο στις πολύ χαμηλές ενέργειες. Έτσι στο Σχήμα 6.9 κυριαρχεί η κορυφή από την απώλεια ενέργειας των πρωτονίων.



Σχήμα 6.9: Ιστόγραμμα της εναπόθεσης ενέργειας 10^9 νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 80 : 20, όπως προσομοιώθηκε με τον κώδικα Geant4.



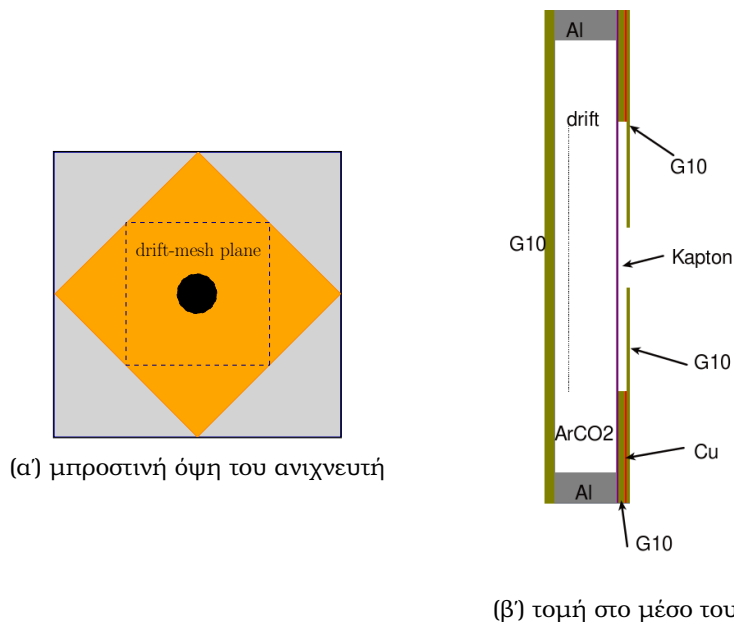
Σχήμα 6.10: Ιστόγραμμα της εναπόθεσης ενέργειας 10^9 νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογία αερίων $\text{Ar} : \text{CO}_2$ 80 : 20, και των σχετικών συνεισφορών από τα δευτερογενώς παραγόμενα σωματίδια, όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4.



Σχήμα 6.11: Ιστόγραμμα σε λογαριθμική κλίμακα της εναπόθεσης ενέργειας 10^9 νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογία αερίων $\text{Ar} : \text{CO}_2$ 80 : 20, και οι σχετικές συνεισφορές από τα δευτερογενώς παραγόμενα σωματίδια, όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4.

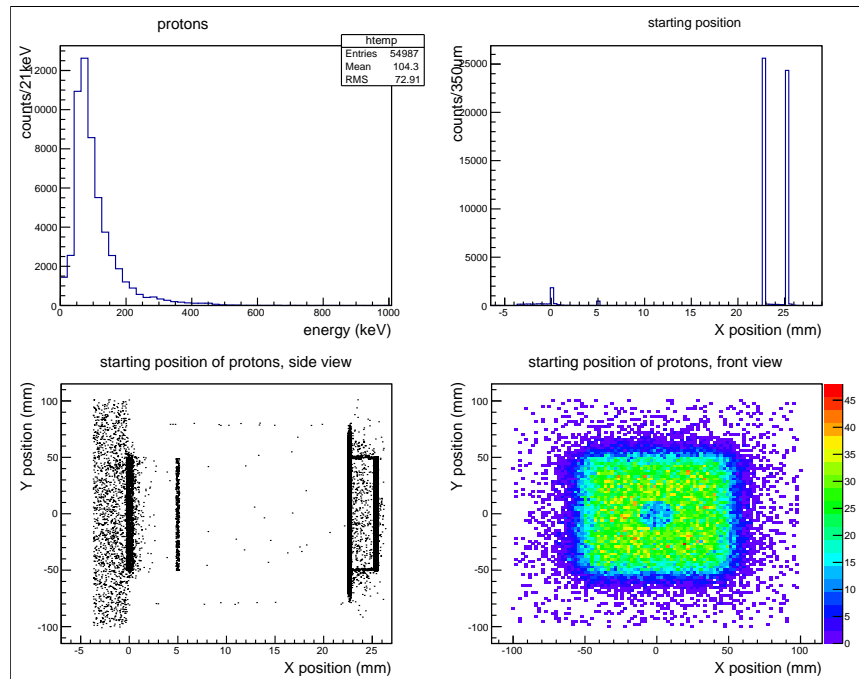
Τέλος για τους βαρύτερους πυρήνες (αργό, οξυγόνο, άνθρακα) η μέγιστη ενέργεια που φαίνεται να αποκτούν στο Σχήμα 6.11 ικανοποιεί τις προβλέψεις του Πίνακα 6.1. Όσον αφορά τους πυρήνες υδρογόνου (πρωτόνια), εξαιτίας της μεγάλης τους ενέργειας και δεδομένου ότι ως φορτισμένα σωματίδια χάνουν ενέργεια ακολουθώντας τη σχέση Bethe-Bloch, ήταν αναμενόμενο οι απώλειες ενέργειάς τους στην ενεργό περιοχή να είναι μικρές. Η ορθότητα όμως της κατανομής που προκύπτει από την προσομοίωση θα ελεγχθεί στην Παράγραφο 6.2.2.

Τα επόμενα σχήματα παρουσιάζουν ξεχωριστά για τα πρωτόνια, τα ηλεκτρόνια και τους πυρήνες αργού την ενεργειακή τους απώλεια μέσα στην ενεργό περιοχή και τη θέση του ανιχνευτή στην οποία ξεκίνησαν να αφήνουν ενέργεια. Για να γίνει κατανοητή η προέλευση των σωματιδίων και κυρίως των πρωτονίων, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η δομή του συγκεκριμένου micromegas, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.12.



Σχήμα 6.12: Ο ανιχνευτής με το ρομβοειδές παράθυρο που προσομοιώθηκε.

Οι πληροφορίες για τα πρωτόνια φαίνονται στο Σχήμα 6.13, ενώ στο Σχήμα 6.14 παρουσιάζεται πιο καθαρά η θέση στην οποία ξεκίνησαν να αφήνουν ενέργεια τα πρωτόνια που αφήνουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή, σε σχέση με τα διάφορα στοιχεία του ανιχνευτή. Συμπεραίνει κανείς ότι τα πρωτόνια παράγονται πρωτίστως από την ελαστική σκέδαση των νετρονίων με άτομα

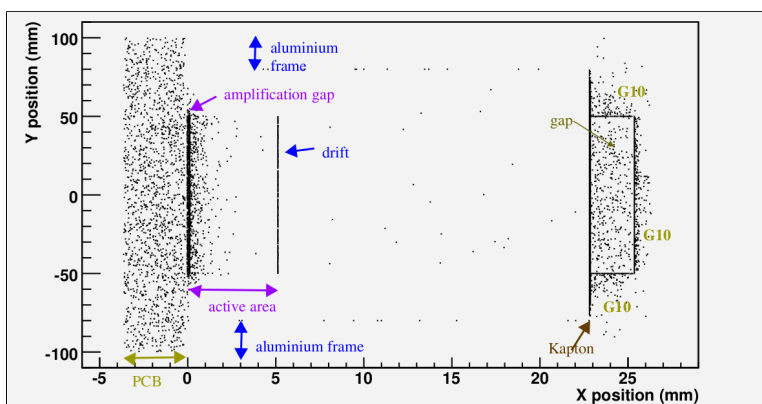


Σχήμα 6.13: Ιστογράμματα της εναπόθεσης ενέργειας από πρωτόνια στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 80 : 20, τα οποία παράγονται όταν αυτός ακτινοβοληθεί με 10^9 νετρόνια ενέργειας $5.5 MeV$, και η θέση του ανιχνευτή στην οποία αυτά πρωτοεμφανίζονται, όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4

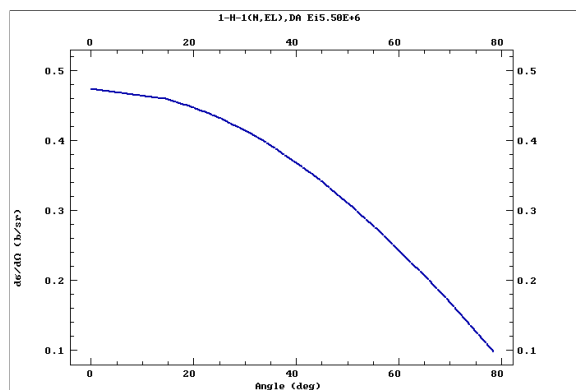
υδρογόνου, στα τμήματα του ανιχνευτή που το περιέχουν. Αυτά είναι η PCB και τα τμήματα του παραθύρου από G10 και Kapton. Επίσης παράγονται στο drift, το mesh και τα strips, προφανώς από αντιδράσεις (n,p) με τα υλικά των στοιχείων αυτών.

Στην πρώτη περίπτωση, αυτή της ελαστικής σκέδασης, κατ'αρχάς παρατηρείται ότι συνεισφέρει ολόκληρη η πλακέτα PCB, καθώς τα πρωτόνια που παράγονται μπορεί να κάνουν οπισθοσκέδαση και να αφήσουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή. Βέβαια εκτός από το υδρογόνο που περιέχει το G10, στην παραγωγή πρωτονίων μπορεί να συνεισφέρουν και τα υπόλοιπα στοιχεία του υλικού μέσω αντιδράσεων (n,p). Ενδιαφέρον έχει να παρατηρήσει κανείς το τέταρτο γράφημα του Σχήματος 6.13, όπου φαίνεται ότι τα περισσότερα πρωτόνια που φτάνουν στην ενεργό περιοχή προέρχονται από μια επιφάνεια αντίστοιχη αυτής της ενεργού περιοχής, παρότι το ένα επίπεδο από G10 έχει

κενό ακριβώς ίδιο με την επιφάνεια της ενεργού περιοχής (δηλαδή του drift). Αυτό μπορεί εύκολα να εξηγηθεί εάν λάβει κανείς υπόψιν και το Σχήμα 6.15, στο οποίο φαίνεται η διαφορετική ενεργός διατομή για την ελαστική σκέδαση νετρονίου-πυρήνα υδρογόνου, για την ενέργεια νετρονίων που μελετάται (5.5 MeV). Στο Σχήμα αυτό είναι φανερό ότι πιο πιθανό είναι οι πυρήνες υδρογόνου να σκεδαστούν σε μικρές γωνίες, και άρα υπάρχει μεγαλύτερη



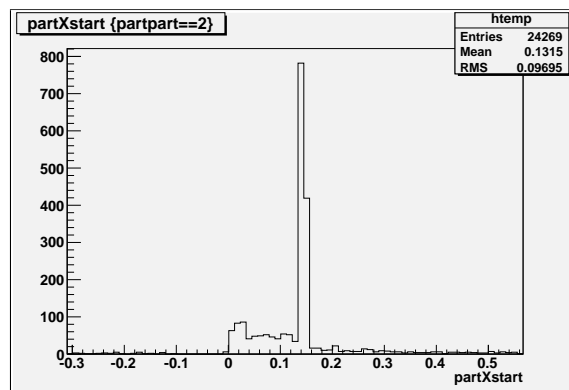
Σχήμα 6.14: Η θέση του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 80 : 20, στην οποία πρωτοεμφανίζονται τα πρωτόνια που προκύπτουν όταν αυτός ακτινοβοληθεί με 10^9 νετρόνια ενέργειας 5.5 MeV και εναποθέτουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή του, όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4. Πλαϊνή όψη.



Σχήμα 6.15: Η διαφορετική ενεργός διατομή $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ για την ελαστική σκέδαση νετρονίου-πυρήνα υδρογόνου, σε συνάρτηση με τη γωνία σκέδασης στο σύστημα του εργαστηρίου, για ενέργειες νετρονίου 5.5 MeV

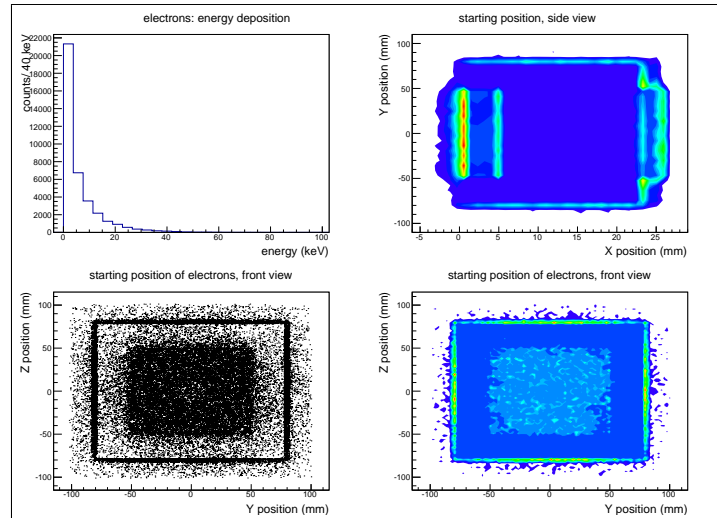
πιθανότητα να φτάσει στην ενεργό περιοχή ένα πρωτόνιο από την επιφάνεια του παραθύρου που αντιστοιχεί (είναι "παράλληλη") στην ενεργό περιοχή (πρακτικά στο drift), απ' ότι ένα πρωτόνιο από τα περιφερειακά σημεία του παραθύρου. Τη σημασία της διαφορικής ενεργού διατομής στην προέλευση των πρωτονίων τονίζει το γεγονός ότι στο τέταρτο γράφημα είναι φανερή η οπή που έχει στη μέση το ρομβικό παράθυρο, καθότι δείχνει πως η κατεύθυνση μεγάλου ποσοστού των πρωτονίων είναι σχεδόν παράλληλη στον κάθετο άξονα του ανιχνευτή. Η οπή αυτή είναι ενδεικτική και της μεγάλης συνεισφοράς του G10 σε πρωτόνια.

Τέλος, στο Σχήμα 6.14 φαίνεται μια μεγάλη σε πρωτόνια συνεισφορά από την περιοχή ενίσχυσης, χωρίς όμως να είναι φανερή η προέλευση των πρωτονίων αυτών. Η μεγέθυνση της εικόνας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.16 υποδεικνύει ότι τα πρωτόνια προέρχονται από το mesh και παράγονται προφανώς από (n,p) αντιδράσεις. Οι βαρείς πυρήνες που δημιουργούνται από τις αντιδράσεις αυτές απορροφώνται μέσα στο ίδιο το υλικό του mesh, και έτσι δεν κινούνται μέσα στο αέριο ώστε να απολέσουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή.



Σχήμα 6.16: Ιστόγραμμα της θέσης στην περιοχή του mesh, στην οποία πρωτοεμφανίζονται πρωτόνια που εναποθέτουν ενέργεια στη ενεργό περιοχή ανιχνευτή micromegas και τα οποία προήλθαν από την ακτινοβόληση του ανιχνευτή με 10^9 νετρόνια ενέργειας 5.5MeV, όπως προσομοιώθηκε με τον κώδικα Geant4

Στο επόμενο σχήμα, το Σχήμα 6.17, παρουσιάζεται η ενεργειακή συνεισφορά των ηλεκτρονίων και οι θέσεις όπου αυτά ξεκίνησαν. Όπως φαίνεται, τα ηλεκτρόνια προέρχονται κυρίως από τα στέρεα τμήματα του ανιχνευτή, από το πλαίσιο του αλουμινίου και το παράθυρο, το drift, το mesh και πολύ λιγότερο την PCB, και δημιουργούνται από φωτόνια που παράγονται κατά τις

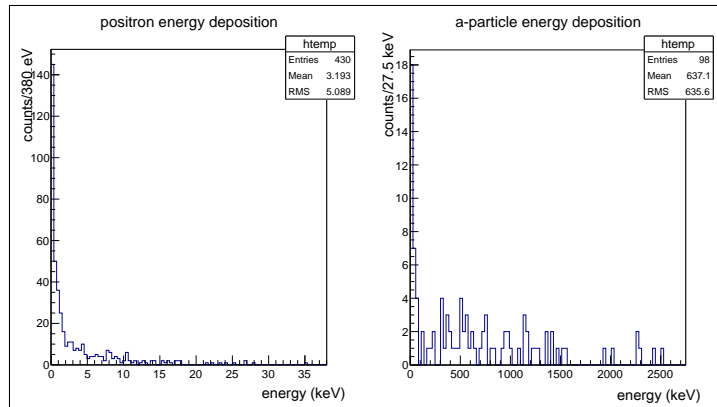


Σχήμα 6.17: Ιστογράμμο της εναπόθεσης ενέργειας από ηλεκτρόνια στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 80 : 20, τα οποία παράγονται όταν αυτός ακτινοβοληθεί με 10^9 νετρόνια ενέργειας $5.5 MeV$, και η θέση του ανιχνευτή στην οποία αυτά πρωτοεμφανίζονται, όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4

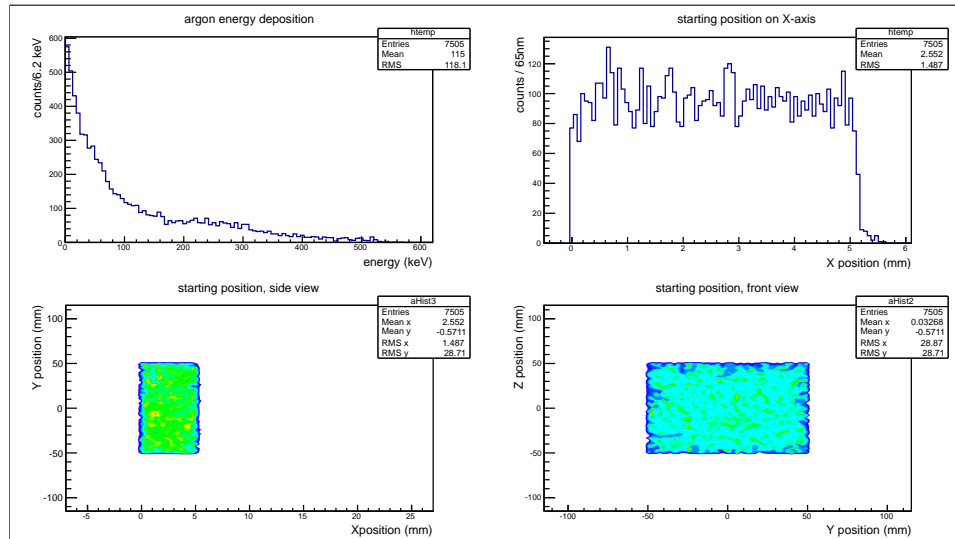
πυρηνικές αντιδράσεις και αλληλεπιδρούν με τα υλικά του ανιχνευτή.

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 6.19 παρουσιάζονται πληροφορίες για τα άτομα αργού. Όπως είναι φανερό, οι πυρήνες αργού που αφήνουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή έχουν αφειρησία και την ενεργό περιοχή. Αυτό εξηγείται από τη μικρή εμβέλεια των πυρήνων αργού στο αέριο, καθώς και από το γεγονός ότι παρεμβάλλεται το drift, το οποίο απορροφά τυχόν πυρήνες αργού δημιουργούνται πλησίον αλλά εκτός της ενεργού περιοχής.

Τέλος, στο Σχήμα 6.18 παρουσιάζεται η ενεργειακή εναπόθεση από δύο δευτερεύοντα σωματίδια, τα ποζιτρόνια και τα σωματίδια-α, στην ενεργό περιοχή. Τα ποζιτρόνια δημιουργούνται προφανώς μέσω δίδυμης γέννησης από φωτόνια, ενώ τα σωματίδια-α από πυρηνικές αντιδράσεις τύπου (ν, π), και όπως φαίνεται το πακέτο προσομοίωσης Geant4 είναι ικανό να παρακολουθεί και τέτοιου τύπου, δευτερεύουσες, αλληλεπιδράσεις.



Σχήμα 6.18: Ιστόγραμμα της εναπόθεσης ενέργειας από δευτερεύοντα σωματίδια (ποζιτρόνια και σωματίδια-α) στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 80 : 20, τα οποία παράγονται όταν αυτός ακτινοβοληθεί με 10^9 νετρόνια ενέργειας $5.5 MeV$, όπως προσομοιώθηκε με τον κώδικα Geant4



Σχήμα 6.19: Ιστόγραμμα της εναπόθεσης ενέργειας από ιόντα αργού στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 80 : 20, τα οποία παράγονται όταν αυτός ακτινοβοληθεί με 10^9 νετρόνια ενέργειας $5.5 MeV$, και η θέση του ανιχνευτή στην οποία αυτά πρωτοεμφανίζονται, όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4

6.2.2 Υπολογισμός της ενέργειας που εναποτίθεται από πρωτόνια

Σε αυτό το σημείο αξίζει να πραγματοποιηθεί μια μελέτη για τα πρωτόνια. Τα πρωτόνια, με ενέργειες της τάξης του MeV, θα χάσουν μόνο ένα μικρό τμήμα της ενέργειάς τους στην ενεργό περιοχή. Για να υπολογιστεί κατά προσέγγιση η τιμή της ενέργειας αυτής, θα ακολουθηθεί μια διαδικασία που περιλαμβάνει τα δεδομένα της ENDF και τα δεδομένα από τη χρήση των προγραμμάτων SRIM και CIRE.

Αρχικά, χρειάζονται δεδομένα για τη διαφορική ενεργό διατομή $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ της ελαστικής σκέδασης νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV με άτομα υδρογόνου, τα οποία λαμβάνονται από την ENDF (Σχήμα 6.15). Με ένα πρόγραμμα ανάλυσης δεδομένων υπολογίζεται η βέλτιστη καμπύλη στο γράφημα $\Omega - \frac{d\sigma}{d\Omega}$, που προσεγγιστικά είναι η σχέση που συνδέει την γωνία (στο σύστημα εργαστηρίου) που μπορεί να σκεδαστεί ένας πυρήνας υδρογόνου με την πιθανότητα να σκεδαστεί στη γωνία αυτή, ως

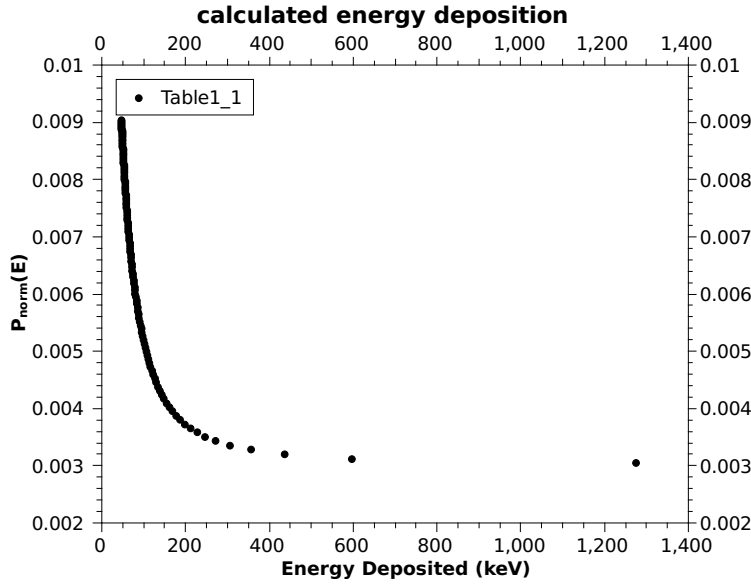
$$P(\Omega) = 4.72 \times 10^{-1} + 2.88 \times 10^{-4}x - 8.01 \times 10^{-5}x^2 \quad (6.1)$$

Σημειώνουμε εδώ ότι κρατήθηκαν οι γωνίες μέχρι 71° , καθώς για μεγαλύτερες γωνίες η πιθανότητα μειωνόταν ιδιαίτερα και οι υπολογισμοί γίνονταν δυσκολότεροι. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα CIRE, που για γωνίες σκέδασης του πρωτονίου από $0^\circ - 71^\circ$ με βήμα 0.5° δίνει την αντίστοιχη ενέργεια που θα αποκτήσει. Έτσι χρησιμοποιώντας τη σχέση 6.1 υπολογίζεται η πιθανότητα να αποκτήσει το πρωτόνιο την εκάστοτε ενέργεια.

Το τελευταίο βήμα προϋποθέτει την γνώση της συνάρτησης της απώλειας ενέργειας των ηλεκτρονίων στο αέριο. Θεωρώντας ότι το αέριο αποτελείται αποκλειστικά από αργό, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SRIM από το οποίο μπορούμε να πάρουμε την απώλεια ενέργειας ($\frac{dE}{dx}$) ενός σωματιδίου (στην περίπτωση μας πρωτονίου) σε $\frac{\text{MeV}}{\text{mm}}$ για διάφορες ενέργειες του πρωτονίου, από $0 - 5.5 \text{ MeV}$. Και πάλι από τη βέλτιστη καμπύλη του γραφήματος του $\frac{dE}{dx}$ συναρτήσει του E (για ευκολία εξαιρέθηκαν οι χαμηλότερες των 100 keV ενέργειες, που άλλωστε είναι εκτός του φάσματος των ενεργειών που μας ενδιαφέρει) υπολογίστηκε προσεγγιστικά η αντίστοιχη σχέση

$$\frac{dE}{dx} (\text{MeV}/\text{mm}) = 1.221 \cdot x^{(-0.572)} \quad (6.2)$$

Τέλος θεωρήθηκε ότι το πρωτόνιο ξεκινάει από το παράθυρο και διανύει 17 mm μέχρι να φτάσει στην ενεργό περιοχή, και 5.1 mm εκεί. Έτσι από κάθε πιθανή αρχική των προηγούμενων υπολογισμών ενέργεια αφαιρέθηκε



Σχήμα 6.20: Θεωρητικός υπολογισμός της ενέργειας που εναποθέτουν σε 5.1 mm αέριου αργού πρωτόνια που έχουν προκύψει από την ελαστική σκέδαση νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV με υδρογόνο, και έχουν διανύσει άλλα 17.5 mm στο αέριο.

η ενέργεια που θα έχανε αν διένυε 17 mm μέχρι το drift και για τη νέα του ενέργεια υπολογίστηκε η απώλεια στα 5.1 mm , υποθέτοντας ότι κινείται κάθετα στην ενεργό περιοχή, δηλαδή

$$E_{dep}(keV) = 1000 \times \frac{dE}{dx}(E_{rem}) \cdot 5mm, \quad (6.3)$$

όπου

$$E_{rem}(keV) = E_{init} - 1000 \times \frac{dE}{dx}(E_{init}) \times 17 \text{ mm} \quad (6.4)$$

17 Στο τέλος πραγματοποιήθηκε και η κανονικοποίηση της πιθανότητας.

Ένα τμήμα των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 6.2, ενώ το γράφημα που προκύπτει για την απώλεια ενέργειας και την αντίστοιχη πιθανότητα παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.20.

Φυσικά οι υπολογισμοί αυτοί δεν αποτελούν παρά μια προσέγγιση της απώλειας ενέργειας των πρωτονίων στην ενεργό περιοχή, αφενός γιατί βασίζονται σε γραφικές προσεγγίσεις και αφετέρου επειδή δεν λαμβάνεται υπόψιν το ότι κατά τη διάρκεια όλης της διαδρομής του πρωτονίου στο αέριο, όσο αυτό

$\theta_{lab}(deg)$	$E_{init}(MeV)$	$P_{norm}(\theta)$	$\frac{dE}{dx}(E_{init})(\frac{MeV}{mm})$	$E_{rem}(keV)$	$E_{dep}(keV)$
0.000	5500.0	9.508E-03	8.782E-03	5346.31	45.53
0.500	5499.6	9.511E-03	8.783E-03	5345.90	45.53
1.000	5498.3	9.513E-03	8.784E-03	5344.58	45.54
1.500	5496.2	9.514E-03	8.786E-03	5342.45	45.55
2.000	5493.3	9.514E-03	8.788E-03	5339.50	45.56
2.500	5489.5	9.513E-03	8.792E-03	5335.64	45.58
3.000	5484.9	9.511E-03	8.796E-03	5330.97	45.61
3.500	5479.4	9.509E-03	8.801E-03	5325.38	45.63
4.000	5473.2	9.506E-03	8.807E-03	5319.08	45.67
4.500	5466.0	9.502E-03	8.814E-03	5311.76	45.70
5.000	5458.1	9.497E-03	8.821E-03	5303.73	45.74
5.500	5449.3	9.492E-03	8.829E-03	5294.78	45.79
6.000	5439.7	9.485E-03	8.838E-03	5285.03	45.84
6.500	5429.3	9.478E-03	8.848E-03	5274.45	45.89
7.000	5418.1	9.470E-03	8.859E-03	5263.07	45.95
7.500	5406.0	9.461E-03	8.870E-03	5250.77	46.01
8.000	5393.2	9.452E-03	8.883E-03	5237.76	46.07
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Πίνακας 6.2: Οι προσεγγιστικοί υπολογισμοί για της ενέργειας που εναποθέτουν σε 5.1 mm αέριου αργού πρωτόνια που έχουν προκύψει από την ελαστική σκέδαση νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV με υδρογόνο, και έχουν διανύσει άλλα 17.5 mm στο αέριο.

χάνει ενέργεια τόσο αυξάνεται και η απώλεια ενέργειάς του. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα πρωτόνια θα διανύσουν μεγαλύτερο από 5.1mm (απόσταση drift-strips) μήκος στην ενεργό περιοχή, γιατί κατά κύριο λόγο δεν θα κινηθούν κάθετα σε αυτήν, καθώς και τη μείωση της ενέργειάς τους όταν διέρχονται από τα ηλεκτρόδια, έχει ως αποτέλεσμα η καμπύλη στην πραγματικότητα να είναι μετατοπισμένη ελαφρώς δεξιότερα από αυτή που προκύπτει από τους παραπάνω υπολογισμούς, δηλαδή η απώλεια ενέργειας των πρωτονίων στην ενεργό περιοχή να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη.

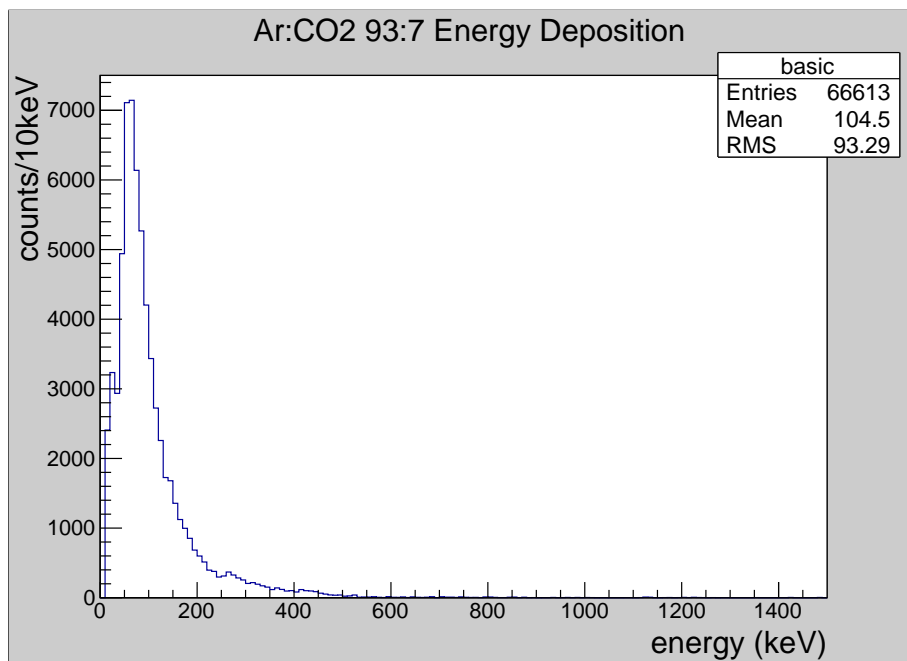
Πράγματι από τα αποτελέσματα του εικονικού πειράματος για τα πρωτόνια, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.13, φαίνεται πως η καμπύλη της εναπόθεσης ενέργειας των πρωτονίων στην ενεργό περιοχή έχει τη μορφή που υπολογίστηκε προσεγγιστικά στο παραπάνω, ενώ είναι μετατοπισμένη ελαφρώς προς τα δεξιά, δηλαδή σε μεγαλύτερες ενέργειες, όπως αναμενόταν.

6.2.3 Με αναλογίες αερίου $Ar : CO_2$ 93 : 7, στον ανιχνευτή με το ρομβοειδές παράθυρο

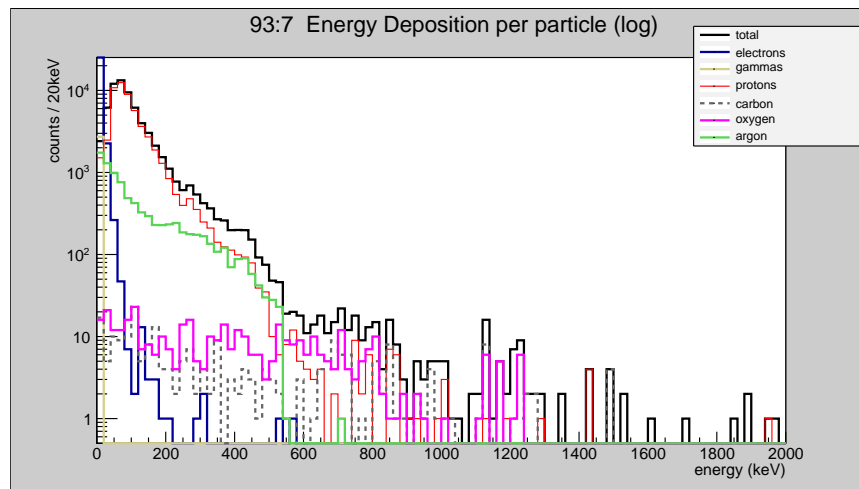
Το ίδιο πείραμα επαναλήφθηκε, με διαφορετική σύσταση του αερίου. Ο σκοπός ήταν να μελετηθεί το πόσο σχετίζεται η εναπόθεση ενέργειας από νετρόνια με το εκάστοτε μείγμα αερίου.

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συνολικής εναπόθεσης ενέργειας στον ανιχνευτή, αλλά και αναλυτικά της ενέργειας που παρατίθεται από τα βασικά παραγόμενα σωματίδια.

Εκ πρώτης όψεως, από τα Σχήματα 6.21 και 6.22 φαίνεται να μην υπάρχει κάποια σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αναλογιών των αερίων. Στην επόμενη παράγραφο παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τα δύο αέρια.



Σχήμα 6.21: Ιστόγραμμα της εναπόθεσης ενέργειας 10^9 νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 93 : 7, όπως προσομοιώθηκε με τον κώδικα Geant4.

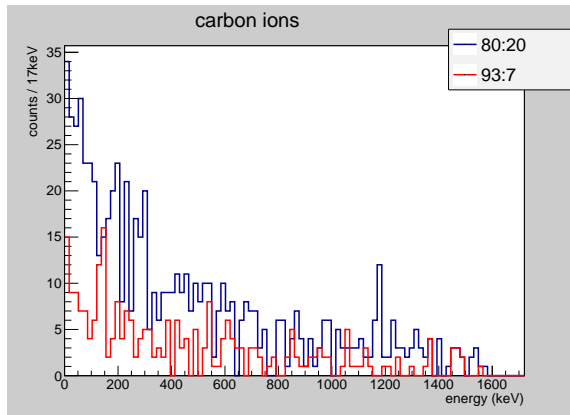


Σχήμα 6.22: Ιστόγραμμα σε λογαριθμική κλίμακα της εναπόθεσης ενέργειας 10^9 νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micro-megas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 93 : 7, και οι σχετικές συνεισφορές από τα δευτερογενώς παραγόμενα σωματίδια, όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4.

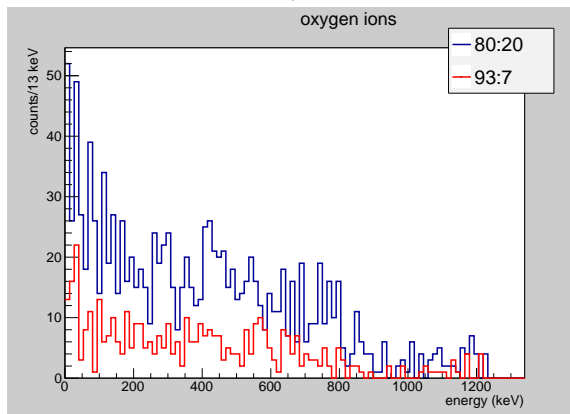
6.2.4 Σύγκριση των δύο αερίων στον ανιχνευτή με το ρομβοειδές παράθυρο

Στο Σχήμα 6.24 παρουσιάζεται η σύγκριση της ενέργειας που εναποτίθεται στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή, όταν αυτός ακτινοβοληθεί με 10^9 νετρόνια ενέργειας 5.5 MeV , για δύο διαφορετικές συστάσεις αερίου $ArCO_2$, 80:20 και 93:7. Όπως είναι φανερό οι διαφορές είναι αμυδρές, και φαίνονται ουσιαστικά στην "ουρά" του φάσματος, εκεί που, όπως παρατηρήθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, κυριαρχεί η ενέργεια από τα βαρέα ιόντα.

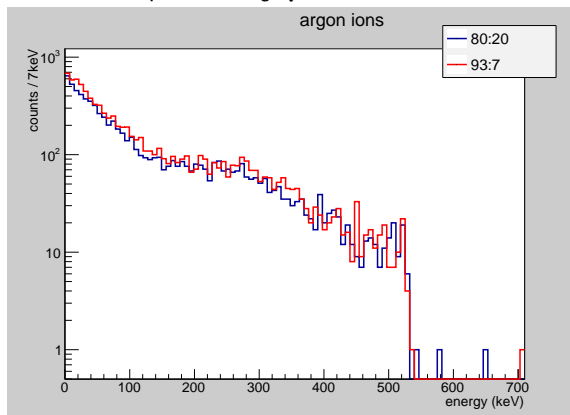
Στα Σχήματα 6.23α'-6.23γ' παρουσιάζονται τα συγκριτικά γραφήματα για τα σημαντικότερα ιόντα που εμφανίζονται, αυτά του άνθρακα, του οξυγόνου και του αργού. Οι διαφορές παρατηρούνται στα ιόντα άνθρακα και οξυγόνου, όπου σαφώς και όπως είναι λογικό είναι περισσότερα στην περίπτωση του μείγματος 80:20. Όσον αφορά στα ιόντα αργού, οι διαφορές στα δύο μείγματα μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.



(α) ιόντα άνθρακα

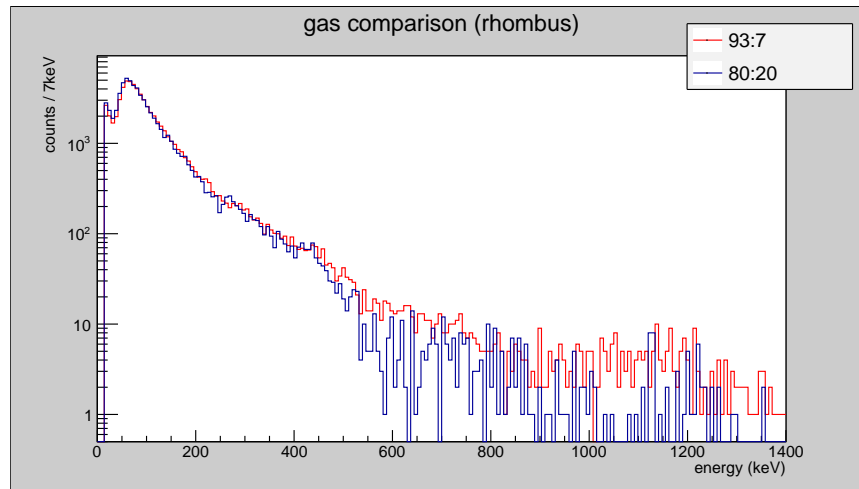


(β) ιόντα οξυγόνου



(γ) ιόντα αργού (λογαριθμική κλίμακα)

Σχήμα 6.23: Σύγκριση των ιστογραμμάτων της εναπόθεσης ενέργειας στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από τα ιόντα που παράγονται όταν αυτός αλληλοβλήθει με 10^9 νετρόνια ενέργειας 5.5 MeV , για αναλογίες αερίων $\text{Ar} : \text{CO}_2$ 93 : 7 και 80 : 20, όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4.

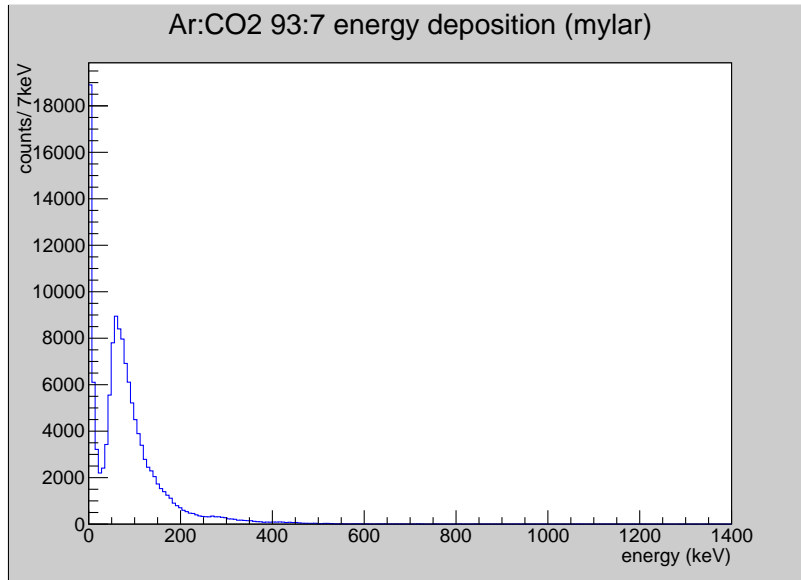


Σχήμα 6.24: Σύγκριση των ιστογραμμάτων σε λογαριθμική κλίμακα της ενεργότητας ενέργειας 10^9 νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογίες αερίων $\text{Ar} : \text{CO}_2$ 93 : 7 και 80 : 20 όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4.

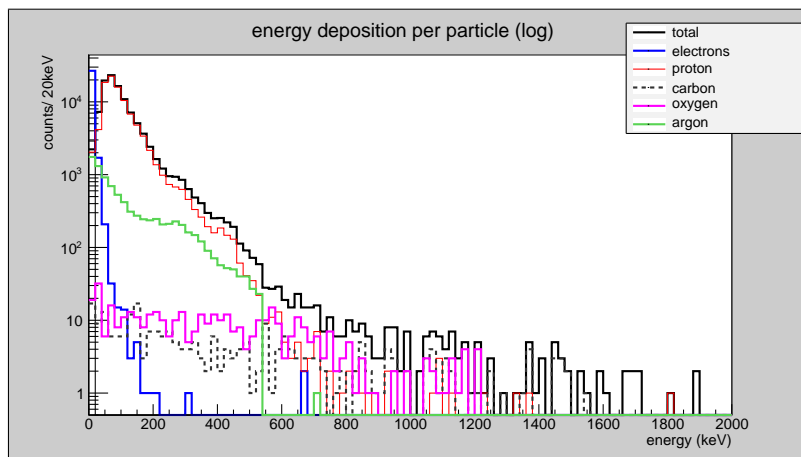
6.2.5 Με αναλογίες αερίου $\text{Ar} : \text{CO}_2$ 93 : 7, στον ανιχνευτή με το απλό παράθυρο

Μετά την σύγκριση των δύο αερίων, είναι σκόπιμο να πραγματοποιηθεί και σύγκριση των δύο ανιχνευτών, του ενός με ρομβικό παράθυρο από συνδυασμό υλικών και του δεύτερου με το παράθυρο πάχους 0.5 mm από mylar. Πραγματοποιήθηκε έτσι και ένα εικονικό πείραμα με 10^9 νετρόνια ενέργειας 5.5 MeV που προσπίπτουν στο δεύτερο ανιχνευτή, με αναλογίες αερίων $\text{Ar} : \text{CO}_2$ 93 : 7. Η ενέργεια που αφήνουν τα νετρόνια και τα σωματίδια που την αποτελούν παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.25 και 6.26. Τα Γράφηματα έχουν παραπλήσια μορφή με αυτά για τον ανιχνευτή με το ρομβικό παράθυρο, περαιτέρω σύγκριση όμως θα πραγματοποιηθεί στην επόμενη παράγραφο.

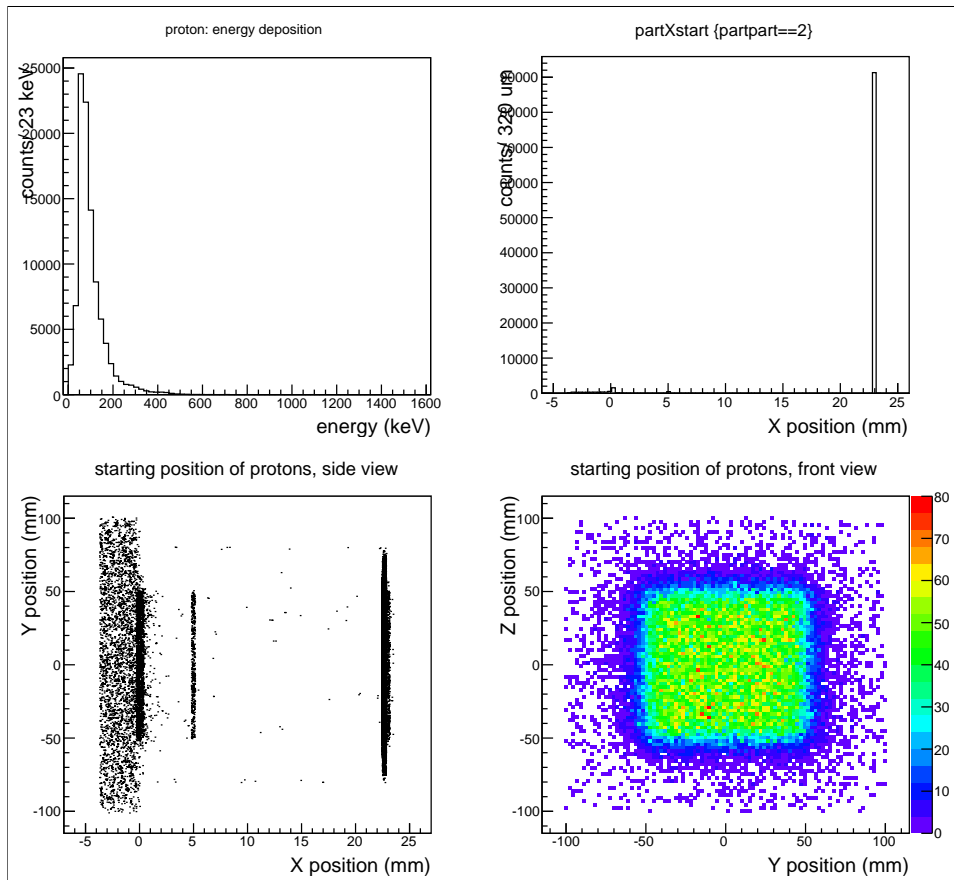
Όσον αφορά την ενέργεια που χάνουν ξεχωριστά τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια στην ενεργό περιοχή, καθώς και τη θέση από την οποία ξεκίνησαν, αυτά παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.27 και 6.28. Όπως ήταν αναμενόμενο, γενικά δεν υπάρχουν διαφορές συγκριτικά με τον ανιχνευτή με το ρομβοειδές παράθυρο, παρά μόνο στην προέλευση των σωματιδίων από το παράθυρο.



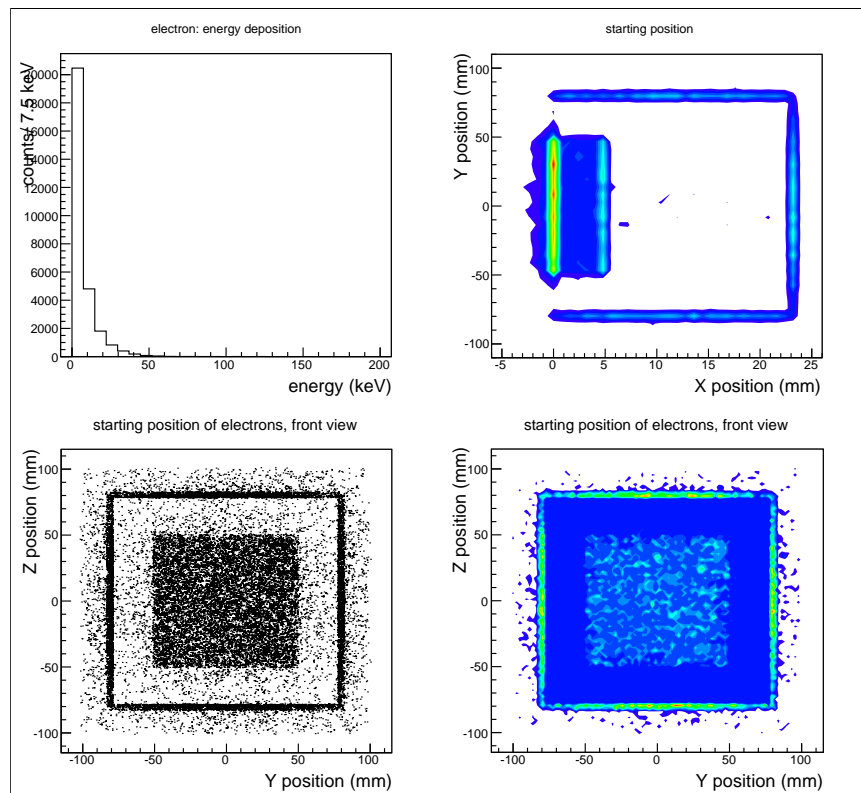
Σχήμα 6.25: Ιστόγραμμα της εναπόθεσης ενέργειας 10^9 νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το παράθυρο από mylar και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 93 : 7, όπως προσομοιώθηκε με τον κώδικα Geant4.



Σχήμα 6.26: Ιστόγραμμα σε λογαριθμική κλίμακα της εναπόθεσης ενέργειας 10^9 νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το απλό παράθυρο από mylar και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 80 : 20, και οι σχετικές συνεισφορές από τα δευτερογενώς παραγόμενα σωματίδια, όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4.



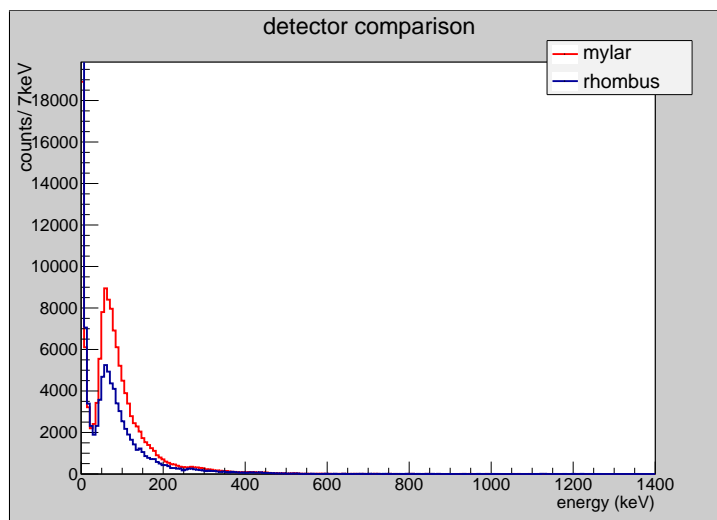
Σχήμα 6.27: Ιστόγραμμα της εναπόθεσης ενέργειας από πρωτόνια στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το απλό παράθυρο από mylar και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 93 : 7, τα οποία παράγονται όταν αυτός ακτινοβοληθεί με 10^9 νετρόνια ενέργειας $5.5 MeV$, και η θέση του ανιχνευτή στην οποία αυτά πρωτοεμφανίζονται, όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4



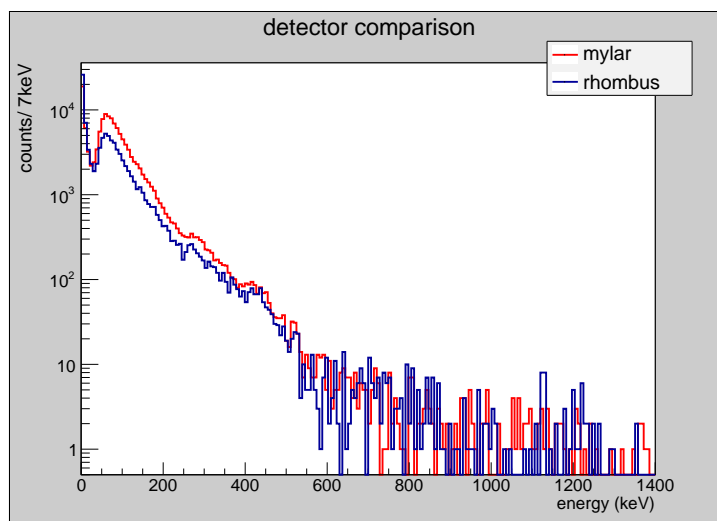
Σχήμα 6.28: Ιστόγραμμα της εναπόθεσης ενέργειας από πρωτόνια στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το απλό παράθυρο από mylar και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 93 : 7, τα οποία παράγονται όταν αυτός ακτινοβοληθεί με 10^9 νετρόνια ενέργειας $5.5 MeV$, και η θέση του ανιχνευτή στην οποία αυτά πρωτοεμφανίζονται, όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4

6.2.6 Σύγκριση των δύο ανιχνευτών

Στα Σχήματα 6.29 και 6.30 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα για τους δύο ανιχνευτές. Αυτό που παρατηρεί κανείς είναι η συνεισφορά των πρωτονίων στην περίπτωση του ανιχνευτή με το απλό και λεπτό παράθυρο από mylar είναι πολύ μεγαλύτερη, σχεδόν διπλάσια, σε σχέση με την περίπτωση του ανιχνευτή με το πολύπλοκο ρομβοειδές παράθυρο. Ανατρέχοντας στην Παράγραφο 4.2 μπορεί να βρει κανείς την εξήγηση στην σύσταση των δύο υλικών, του G10 και του mylar, καθώς το πρώτο περιέχει πολύ λιγότερο υδρογόνο από το δεύτερο.



Σχήμα 6.29: Σύγκριση των ιστογραμμάτων της εναπόθεσης ενέργειας 10^9 νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV στην ενεργό περιοχή σε δύο ανιχνευτές micromegas, με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και το απλό παράθυρο από mylar, με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 93 : 7, όπως προσομοιώθηκαν με το Geant4.

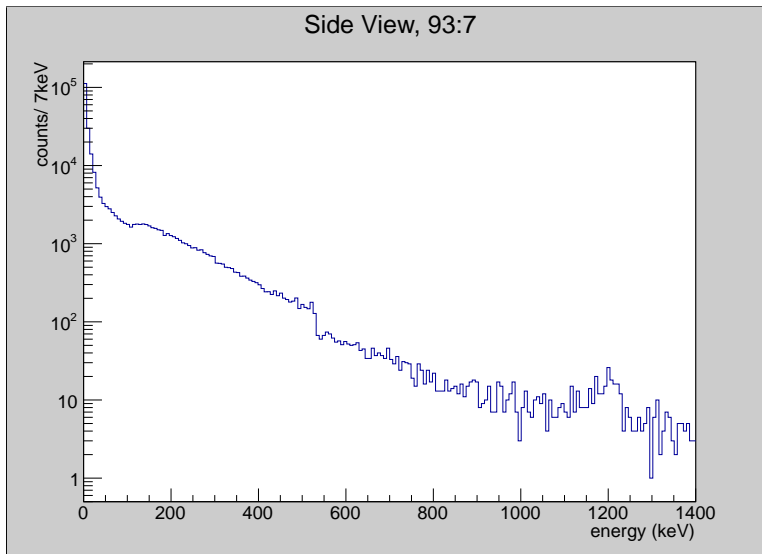


Σχήμα 6.30: Σύγκριση των ιστογραμμάτων της εναπόθεσης ενέργειας 10^9 νετρονίων 5.5 MeV στην ενεργό περιοχή δύο ανιχνευτών micromegas, με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και το απλό παράθυρο από mylar, με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 93 : 7, όπως προσομοιώθηκαν με το Geant4. (λογαριθμική κλίμακα)

6.3 Δέσμη στο πλάι του ανιχνευτή (οριζόντια)

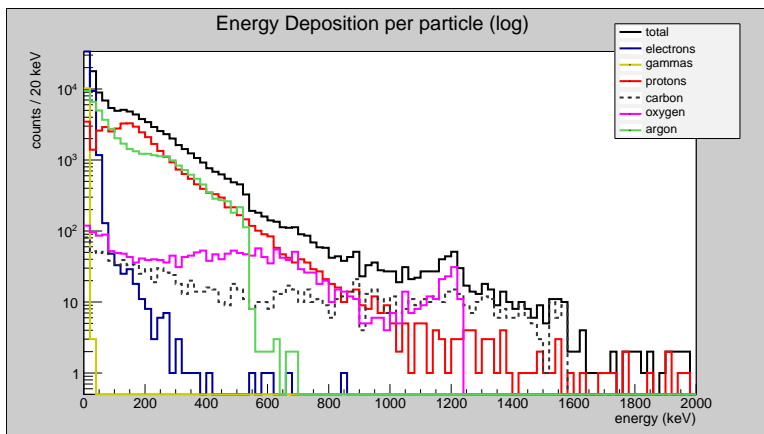
6.3.1 Με αναλογίες αερίου $Ar : CO_2$ 93 : 7, στον ανιχνευτή με το ρομβοειδές παράθυρο

Το αντίστοιχο πείραμα, με 10^9 νετρόνια ενέργειας 5.5 MeV πραγματοποιήθηκε και για την περίπτωση που η κατεύθυνση της δέσμης ήταν παράλληλη στον ανιχνευτή, δηλαδή στο πλάι του, όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 4.3.1. Τα αποτελέσματα του εικονικού αυτού πειράματος, για την συνολική εναπόθεση ενέργειας στην ενεργό περιοχή αλλά και την ανά σωματίδιο, παρατίθενται στα Σχήματα 6.31 και 6.32

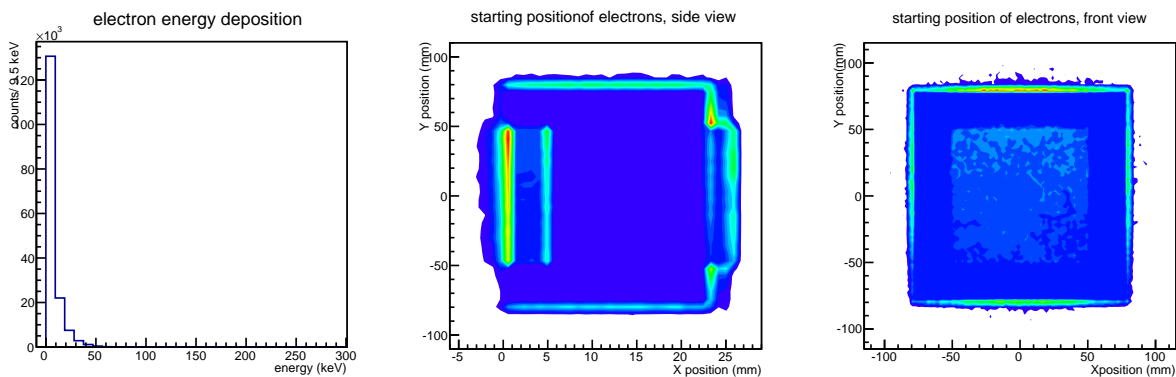


Σχήμα 6.31: Ιστόγραμμα της εναπόθεσης ενέργειας 10^9 νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 93 : 7, όταν τα νετρόνια ακτινοβολούνται στο πλάι του ανιχνευτή, όπως προσομοιώθηκε με τον κώδικα Geant4.

Όπως ήταν αναμενόμενο, είναι πολύ έντονες οι συνεισφορές των ιόντων στην εναπόθεση ενέργειας, και αυτό γιατί τα νετρόνια που διέρχονται από την πλαϊνή όψη του ανιχνευτή διανύουν πολύ μεγαλύτερη απόσταση εντός της ενεργού περιοχής ($\sim 10cm$) σε σχέση με την περίπτωση που διέρχονται από το μπροστινό μέρος, και έτσι έχουν πολύ περισσότερες περιπτώσεις να αλληλεπιδράσουν με τα άτομα του αερίου εντός της ενεργού περιοχής.

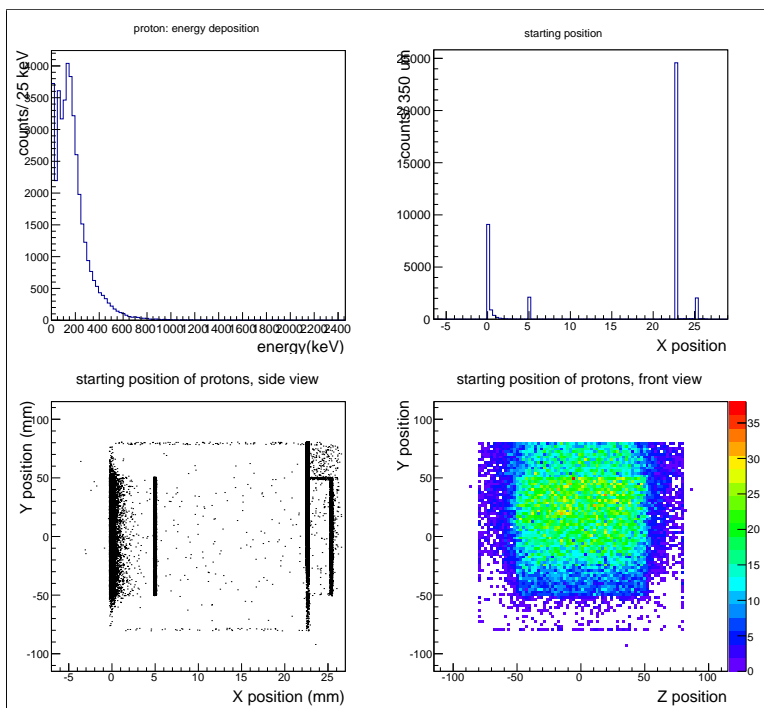


Σχήμα 6.32: Ιστόγραμμα σε λογαριθμική κλίμακα της εναπόθεσης ενέργειας 10^9 νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 93 : 7, όταν τα νετρόνια ακτινοβολούνται στο πλάι του ανιχνευτή, και οι σχετικές συνεισφορές από τα δευτερογενώς παραγόμενα σωματίδια, όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4.



Σχήμα 6.33: Ιστόγραμμα της εναπόθεσης ενέργειας από ηλεκτρόνια στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 93 : 7, τα οποία παράγονται όταν αυτός ακτινοβοληθεί στο πλάι του με 10^9 νετρόνια ενέργειας 5.5 MeV , και η θέση του ανιχνευτή στην οποία αυτά πρωτοεμφανίζονται, όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4

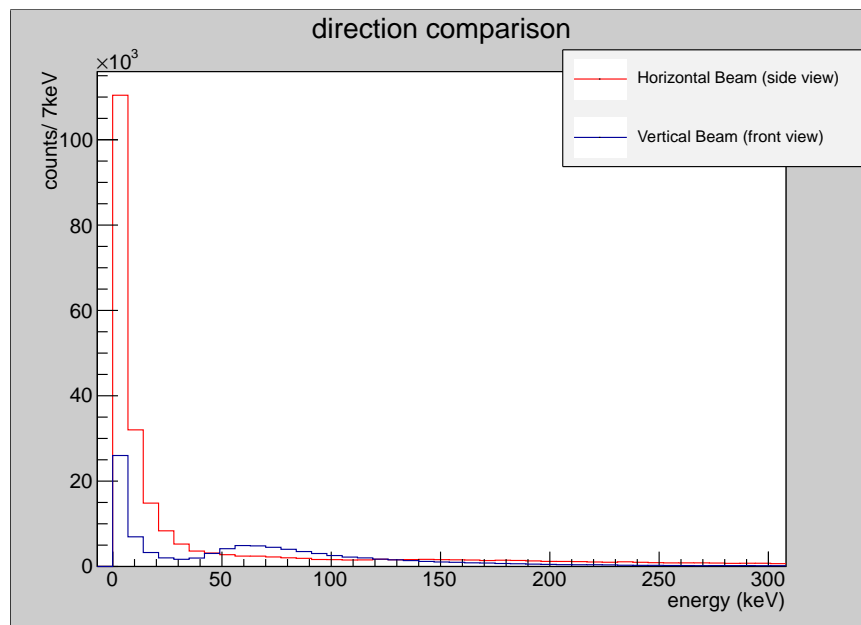
Στα Σχήματα 6.34 και 6.33 παρουσιάζεται για τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια αντίστοιχα η ενέργεια που εναπόθεσαν στην ενεργό περιοχή και η θέση του ανιχνευτή από την οποία ξεκίνησαν. Όπως ήταν αναμενόμενο, είναι αυξημένος ο αριθμός των σωματιδίων που “δημιουργούνται” στο πλάι του micromegas, δηλαδή στην πλευρά στην οποία προσπίπτει η δέσμη, σε σχέση με τον υπόλοιπο ανιχνευτή. Επίσης για τα πρωτόνια παρατηρείται ότι δεν φαίνεται να ξεκινούν από την πλακέτα PCB. Αυτό οφείλεται σε προγραμματιστικό σφάλμα, καθώς όπως παρατηρήθηκε τα νετρόνια δεν γεννούνται σε αυτήν την πλευρά του χώρου.



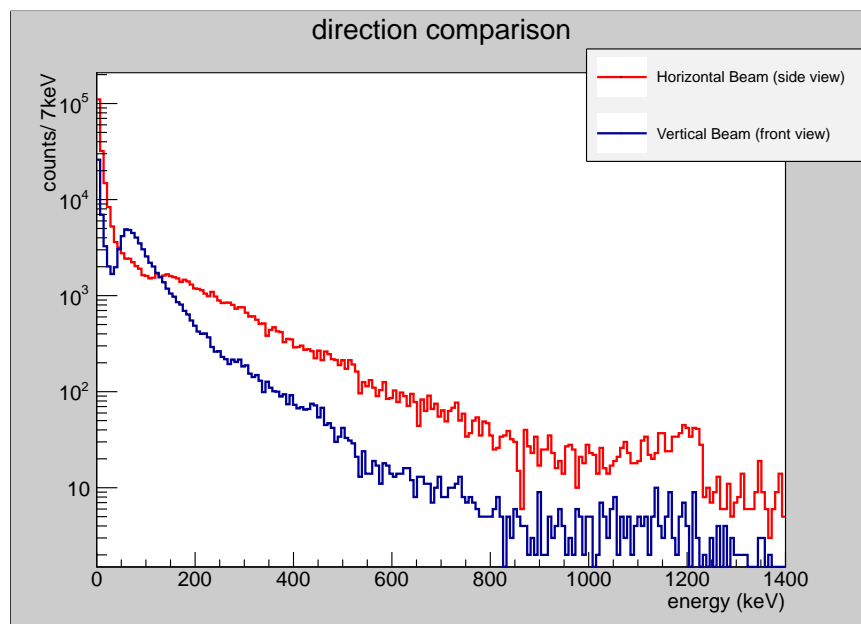
Σχήμα 6.34: Ιστόγραμμα της εναπόθεσης ενέργειας από πρωτόνια στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο από G10 και με αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 93 : 7, τα οποία παράγονται όταν αυτός ακτινοβοληθεί στο πλάι του με 10^9 νετρόνια ενέργειας $5.5 MeV$, και η θέση του ανιχνευτή στην οποία αυτά πρωτοεμφανίζονται, όπως προσομοιώθηκαν με τον κώδικα Geant4

6.3.2 Σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάλογα με την κατεύθυνση της δέσμης

Τέλος, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάλογα με την κατεύθυνση της δέσμης, οριζόντια ή κάθετα στον ανιχνευτή, για την περίπτωση του micromegas με το ρομβοειδές παράθυρο, και αναλογίες αερίου $Ar : CO_2$ 80 : 20. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.35 και 6.36. Παρατηρείται ότι οι δύο κατευθύνσεις παρουσιάζουν διαφορές όσον αφορά την εναπόθεση ενέργειας. Ενώ στην περίπτωση της κάθετης στον ανιχνευτή δέσμης υπερσχύουν τα πρωτόνια, και είναι έντονη η κορυφή τους, στην περίπτωση της οριζόντιας δέσμης κυριαρχούν τα ηλεκτρόνια και φωτόνια, με μια έντονη κορυφή στις πολύ χαμηλές, κοντά στο μηδέν, ενέργειες, και τα ιόντα στις πολύ μεγαλύτερες ενέργειες.



Σχήμα 6.35: Σύγκριση ανάλογα με την κατεύθυνση της δέσμης των ιστογραμμάτων της εναπόθεσης ενέργειας 10^9 νετρονίων ενέργειας $5.5 MeV$ στην ενεργό περιοχή ανιχνευτή micromegas με ρομβοειδές παράθυρο από G10 και αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ 80 : 20, όπως προσομοιώθηκαν με το Geant4.



Σχήμα 6.36: Σύγκριση ανάλογα με την κατεύθυνση της δέσμης των ιστογραμμάτων (σε λογαριθμική κλίμακα) της εναπόθεσης ενέργειας 10^9 νετρονίων ενέργειας 5.5 MeV στην ενεργό περιοχή ανιχνευτή micromegas με ρομβοειδές παράθυρο από G10 και αναλογία αερίων $Ar : CO_2$ $80 : 20$, όπως προσομοιώθηκαν με το Geant4.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ο ανιχνευτής micromegas με το πακέτο Monte Carlo προσομοίωσης Geant4, τόσο με πηγές χαμηλοενεργειακών φωτονίων όσο και με ταχέα νετρόνια. Σκοπός ήταν να μελετηθεί τόσο η λειτουργία του ανιχνευτή και η εναπόθεση ενέργειας των ταχέων νετρονίων σε αυτόν, όσο και η λειτουργία του πακέτου Geant4.

Όσον αφορά τις πηγές χαμηλοενεργειακών φωτονίων, το προκύπτον φάσμα ταιριάζει με τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ γίνεται απόλυτα κατανοητή η διαδικασία του argon escape. Επιπλέον, γίνεται αντιληπτός ο σημαντικός ρόλος των υλικών του ανιχνευτή στα αποτελέσματα ενός τέτοιου πειράματος, και κυρίως των στοιχείων αυτών που βρίσκονται κοντά στην ενεργό περιοχή, δηλαδή του drift και του mesh.

Όσον αφορά την πηγή των ταχέων νετρονίων, τα αποτελέσματα έπρεπε να επαληθευθούν και με άλλα προγράμματα προσομοίωσης. Διαπιστώθηκε πως το Geant4 προσομοιώνει ικανοποιητικά πειράματα με νετρόνια, τουλάχιστον στο συγκεκριμένο φάσμα ενεργειών. Το εικονικό πείραμα φανερώνει ότι σημαντική εναπόθεση ενέργειας πραγματοποιείται κυρίως από πρωτόνια, που προέρχονται από τις αντιδράσεις των νετρονίων με το υδρογόνο και τα υπόλοιπα υλικά του micromegas, καθώς και από ηλεκτρόνια, αποτέλεσμα των φωτονίων που δημιουργούνται στις διάφορες αλληλεπιδράσεις των νετρονίων με την ύλη. Τα άτομα του αερίου αργού (Ar) έχουν επίσης σημαντική συνεισφορά στην εναπόθεση ενέργειας, ενώ μικρή συνεισφορά έχουν τα άτομα του άνθρακα (C) και οξυγόνου (O). Παρατηρήθηκε η διαφορά της εναπόθεσης ενέργειας των νετρονίων στον ανιχνευτή, ανάλογα με την κατεύθυνση με την οποία προσπίπτουν σε αυτόν, καθώς επίσης και η μικρή διαφορά των φασμάτων στην περίπτωση διαφορετικών αναλογιών αερίων. Τέλος, με την πραγματοποίηση του ίδιου εικονικού πειράματος σε δύο ανιχνευτές έγινε φανερή η μεγάλη

σημασία που έχουν τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένος ο *micromegas*. Με τη βοήθεια τέτοιων προσομοιώσεων είναι δυνατόν να βρεθούν τα καταλληλότερα υλικά για την κατασκευή του ανιχνευτή.

Ένα ακόμα σημαντικό κομμάτι της μελέτης που πραγματοποιήθηκε ήταν το *tracking* και στις δύο περιπτώσεις πηγών, κατά το οποίο φαίνεται από που ξεκινούν τα σωματίδια που αφήνουν ενέργεια στην ενεργό περιοχή, δείχνοντας τη συνεισφορά κάθε στοιχείου του ανιχνευτή.

Καταλήγοντας, το πακέτο προσομοίωσης *Geant4* φάνηκε ικανό να προσομοιώσει με επιτυχία τον ανιχνευτή *micromegas* σε πεδίο χαμηλοενεργειακών φωτονίων αλλά και ταχέων νετρονίων, και να δώσει αποτελέσματα που ταιριάζουν με τη θεωρία. Κατά συνέπεια, κρίνεται σκόπιμη η σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα για επιβεβαίωση, και στη συνέχεια η πραγματοποίηση περαιτέρω προσομοιώσεων με διάφορα υλικά και αναλογίες αερίου, αλλά και με τη προσθήκη ηλεκτρικού πεδίου στην ενεργό περιοχή, έτσι ώστε να βρεθούν οι συνθήκες εκείνες που θα ικανοποιούν στο μέγιστο τις απαιτήσεις του πειράματος *ATLAS*, στο οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ο ανιχνευτής.

Παράρτημα Α΄

X-rays και ενέργειες σύνδεσης

Ενέργειες σύνδεσης διαφόρων στοιχείων (eV)

<i>Element</i>	<i>K</i>	<i>L₁</i>	<i>L₂</i>	<i>L₃</i>	<i>M₁</i>	<i>M₂</i>	<i>M₃</i>
<i>C</i>	284						
<i>O</i>	543	42					
<i>Ar</i>	3206	326	250	248	29	16	16
<i>Cr</i>	5989	696	584	574	74	42	42
<i>Fe</i>	7112	845	720	707	91	53	53
<i>Ni</i>	8333	1009	870	853	111	68	66

Ακτίνες X διαφόρων στοιχείων σε (eV)

<i>Element</i>	<i>Kα₁</i>	<i>Kα₂</i>	<i>Kβ₁</i>	<i>Lα₁</i>	<i>Lα₂</i>	<i>Lβ₁</i>
<i>C</i>	277					
<i>O</i>	525					
<i>Ar</i>	2956	2958	3190			
<i>Cr</i>	5415	5406	5947	573	573	583
<i>Fe</i>	6404	6391	7058	705	705	718
<i>Ni</i>	7478	7461	8265	852	852	869

Παράρτημα Β΄

Κώδικας για το Geant4

```
#include "UMDetectorConstruction.hh"
#include "G4Box.hh"
#include "G4Tubs.hh"
#include "G4LogicalVolume.hh"
#include "G4VPhysicalVolume.hh"
#include "G4PVPlacement.hh"
#include "globals.hh"
#include "G4ThreeVector.hh"
#include "G4Material.hh"
#include "G4VSolid.hh"
#include "G4ExtrudedSolid.hh"
#include "G4SubtractionSolid.hh"
#include "G4VisAttributes.hh"
#include "G4Colour.hh"
#include "G4ios.hh"
#include "G4SDManager.hh"
#include "G4VSensitiveDetector.hh"
#include "UMSD.hh"

UMDetectorConstruction::UMDetectorConstruction() {
}

UMDetectorConstruction::~UMDetectorConstruction() {
}

G4VPhysicalVolume* UMDetectorConstruction::Construct()
{
    DefineMaterials();
    return ConstructDetector();
}

void UMDetectorConstruction::DefineMaterials()
{
    G4String name, symbol;
    G4double density, fractionmass;
    G4double a,z;
```

```

G4int ncomponents, natoms;
G4double temperature, pressure;

//-----elements
a = 1.008*g/mole;
G4Element* H = new G4Element(name="Hydrogen",symbol="H" , z= 1., a);
a = 12.00*g/mole;
G4Element* C = new G4Element(name="Carbon" ,symbol="C" , z= 6., a);
a = 14.00*g/mole;
G4Element* N = new G4Element(name="Nitrogen" ,symbol="N" , z= 7., a);
a = 16.00*g/mole;
G4Element* O = new G4Element(name="Oxygen" ,symbol="O" , z= 8., a);
a = 22.99*g/mole;
G4Element* Na = new G4Element(name="Sodium" ,symbol="Na" , z= 11., a);
a = 24.31*g/mole;
G4Element* Mg = new G4Element(name="Magnesium" ,symbol="Mg" , z= 12., a);
a = 26.98*g/mole;
G4Element* elAl = new G4Element(name="Aluminum" ,symbol="Al" , z= 13., a);
a = 28.09*g/mole;
G4Element* Si = new G4Element(name="Silicon" ,symbol="Si" , z= 14., a);
a=58.693*g/mole;
G4Element* elNi = new G4Element(name="Nickel" , symbol="Ni" , z=28., a);
a = 54.9381*g/mole;
G4Element* elMn = new G4Element(name="Manganese" , symbol="Mn" , z=25., a);
a = 51.9961*g/mole;
G4Element* elCr = new G4Element(name="Chromium" , symbol="Cr" , z=24., a);
a = 35.45*g/mole;
G4Element* Cl = new G4Element(name="Chlorine" ,symbol="Cl" , z= 17., a);
a = 39.95*g/mole;
G4Element* Ar = new G4Element(name="Argon",symbol="Ar" , z= 18., a);
a = 40.08*g/mole;
G4Element* Ca = new G4Element(name="Calcium",symbol="Ca" , z= 20., a);
a = 55.845*g/mole;
G4Element* elFe = new G4Element(name="Iron" ,symbol="Fe" , z= 26., a);
a = 63.546*g/mole;
G4Element* elCu = new G4Element(name="Copper" ,symbol="Cu" , z= 29., a);

//-----materials
temperature = 300.00*kelvin;
pressure = 3*atmosphere;

density = 1.977*mg/cm3;
CO2 = new G4Material(name="CO2", density, ncomponents=2 ,kStateGas ,temperature
 ,pressure);
CO2->AddElement(C, natoms=1);
CO2->AddElement(O, natoms=2);

density = 1.25*mg/cm3;
N2 = new G4Material(name="N2", density, ncomponents=1);
N2->AddElement(N, natoms=2);

density = 1.428*mg/cm3;
O2 = new G4Material(name="O2", density, ncomponents=1);
O2->AddElement(O, natoms=2);

density=1.78*mg/cm3;

```

```

ArgonGas = new G4Material("ArgonGas",density,ncomponents=1,kStateGas,
    temperature ,pressure);
ArgonGas->AddElement(Ar,100.0*perCent);

density= 1.657*mg/cm3;
ArCO2 = new G4Material(name="ArCO2", density, ncomponents=2 ,kStateGas ,
    temperature ,pressure);
ArCO2->AddMaterial(ArgonGas, fractionmass=80*perCent);
ArCO2->AddMaterial(CO2, fractionmass=20*perCent);

density=1.2927*mg/cm3;
Air = new G4Material(name="Air", density , ncomponents=3);
Air->AddMaterial(N2, fractionmass=78*perCent);
Air->AddMaterial(O2, fractionmass=21*perCent);
Air->AddElement(Ar, fractionmass=1*perCent);

density = 7.87*g/cm3;
Fe = new G4Material(name="Iron",density, 1);
Fe->AddElement(elFe, fractionmass=100*perCent);

density = 8.94*g/cm3;
Cu = new G4Material(name="Copper",density, 1);
Cu->AddElement(elCu, fractionmass=100*perCent);

density = 2.70*g/cm3;
Al = new G4Material(name="Aluminum",density, 1);
Al->AddElement(elAl, fractionmass=100*perCent);

density = 2.27*g/cm3;
Na2O = new G4Material(name="Na2O",density, ncomponents=2);
Na2O->AddElement(Na, natoms=1);
Na2O->AddElement(O, natoms=2);

density = 2.196*g/cm3;
SiO2 = new G4Material(name="SiO2",density, ncomponents=2);
SiO2->AddElement(Si, natoms=1);
SiO2->AddElement(O, natoms=2);

density = 3.35*g/cm3;
CaO = new G4Material(name="CaO",density, ncomponents=2);
CaO->AddElement(Ca, natoms=1);
CaO->AddElement(O, natoms=1);

density = 3.58*g/cm3;
MgO = new G4Material(name="MgO",density, ncomponents=2);
MgO->AddElement(Mg, natoms=1);
MgO->AddElement(O, natoms=1);

density = 3.97*g/cm3;
Al2O3 = new G4Material(name="Al2O3",density, ncomponents=2);
Al2O3->AddElement(elAl, natoms=2);
Al2O3->AddElement(O, natoms=3);

density = 3.97*g/cm3;
Epoxy = new G4Material(name="C3H5ClO",density, ncomponents=4);
Epoxy->AddElement(C, natoms=3);

```



```

Epoxy->AddElement(H, natoms=5);
Epoxy->AddElement(O, natoms=1);
Epoxy->AddElement(Cl, natoms=1);

density = 1.43*g/cm3;
Kapton = new G4Material(name="Kapton",density, ncomponents=4);
Kapton->AddElement(H, fractionmass = 0.0273);
Kapton->AddElement(C, fractionmass = 0.7213);
Kapton->AddElement(N, fractionmass = 0.0765);
Kapton->AddElement(O, fractionmass = 0.1749);
density=1.09*g/cm3;

G10 = new G4Material(name="G10",density, ncomponents=6);
G10->AddMaterial(Na2O, fractionmass=0.110);
G10->AddMaterial(CaO, fractionmass=0.032);
G10->AddMaterial(Al2O3, fractionmass=0.007);
G10->AddMaterial(SiO2, fractionmass=0.474);
G10->AddMaterial(MgO, fractionmass=0.026);
G10->AddMaterial(Epoxy, fractionmass=0.351);

density= 1.397*g/cm3;
Mylar = new G4Material("Mylar", density, ncomponents=3);
Mylar->AddElement(C, natoms=10);
Mylar->AddElement(H, natoms= 8);
Mylar->AddElement(O, natoms= 4);

StainlessSteel = new G4Material("StainlessSteel", density= 8.06*g/cm3,
ncomponents=6);
StainlessSteel->AddElement(C, fractionmass=0.001);
StainlessSteel->AddElement(Si, fractionmass=0.007);
StainlessSteel->AddElement(elCr, fractionmass=0.18);
StainlessSteel->AddElement(elMn, fractionmass=0.01);
StainlessSteel->AddElement(elFe, fractionmass=0.712);
StainlessSteel->AddElement(elNi, fractionmass=0.09);
}

G4VPhysicalVolume* UMDetectorConstruction::ConstructDetector()
{
    G4int i;
    G4int k;

    G4Box* worldSolid= new G4Box("world", 500.*cm, 30.*cm, 50.*cm);

    G4LogicalVolume* worldLogic= new G4LogicalVolume( worldSolid, Air, "World", 0,
    0, 0);

    G4VPhysicalVolume* worldPhysic = new G4PVPlacement(0, // no rotation
    G4ThreeVector(), // at (0,0,0)
    worldLogic, // its logical volume
    "World", // its name
    0, // its mother volume
    false, // no boolean operations
    0); // copy number

    //-----PCB
    G4VSolid* PCBSolid=new G4Box("PCB", 1750.*um, 10.*cm, 10.*cm);

```

```

G4LogicalVolume* PCBLogic = new G4LogicalVolume(PCBSolid, G10, "PCBLogic");
G4VPhysicalVolume* PCBPhysic = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(-1850.*um
    ,0., 0.), PCBLogic,"PCB", worldLogic, 0,false , 0);

//-----StripPane
G4Box* strippane=new G4Box("strippane",50.0*um, 10*cm, 10*cm);
G4LogicalVolume* StripLogic = new G4LogicalVolume(strippane, Cu, "Strippane");
G4VPhysicalVolume* StripPhysic = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(-50.0*um
    ,0.0*cm,0.0*cm), StripLogic,"Strips", worldLogic, 0,false , 0);

//-----Alouminium Box
G4Box* SideSolid=new G4Box("side", 11.425*mm, 9.*cm, 1.*cm);
G4LogicalVolume* SideLogic = new G4LogicalVolume(SideSolid, Al, "SideLogic");

G4RotationMatrix *rm=new G4RotationMatrix;
rm->rotateX(90*deg);
G4VPhysicalVolume* SidePhysic_zr = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(11.425*mm
    , 1.0*cm, 9.0*cm), SideLogic,"box", worldLogic, 0,false , 0);
G4VPhysicalVolume* SidePhysic_zl = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(11.425*mm
    , -1.0*cm, -9.0*cm), SideLogic,"box", worldLogic, 0,false , 0);
G4VPhysicalVolume* SidePhysic_yu = new G4PVPlacement(rm,G4ThreeVector(11.425*mm
    , 9.0*cm, -1.0*cm), SideLogic,"box", worldLogic, 0,false , 0);
G4VPhysicalVolume* SidePhysic_yd = new G4PVPlacement(rm,G4ThreeVector(11.425*mm
    , -9.0*cm, 1.0*cm), SideLogic,"box", worldLogic, 0,false , 0);

//-----gas ArCO2
G4Box* ArCO2Box=new G4Box("ArCO2", 11.425*mm, 8.0*cm, 8.0*cm);
G4LogicalVolume* ArCO2Logic = new G4LogicalVolume(ArCO2Box, ArCO2, "ArCO2Logic"
    );
G4VPhysicalVolume* ArCO2Physic = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(11.425*mm
    ,0.0*cm,0.0*cm), ArCO2Logic,"ArCO2", worldLogic, 0,false , 0);

//-----Window
G4Box* KWindow=new G4Box("Kapton", 0.025*mm, 10.0*cm, 10.0*cm);
G4LogicalVolume* KWindowLogic = new G4LogicalVolume(KWindow, Kapton, "
    KWindowLogic");
G4VPhysicalVolume* KWindowPhysic = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector(22.875*mm
    ,0.0*mm,0.0*mm), KWindowLogic,"Window", worldLogic, 0,false , 0);

//-----Drift
G4Tubs* DriftWire=new G4Tubs("DriftWire", 0.*cm, 9.*um,5.*cm, 0.*deg, 360.*deg)
    ;
G4LogicalVolume* DriftWireLogic=new G4LogicalVolume(DriftWire,StainlessSteel,"
    DriftWireLogic");
for (k=-893;k<894;k++)
{
    G4VPhysicalVolume* DriftWire_H=new G4PVPlacement(rm, G4ThreeVector(-6.263*
        mm ,0.0*cm,(56*k)*um),DriftWireLogic,"Drift",ArCO2Logic,0,false ,0);
    G4VPhysicalVolume* DriftWire_V=new G4PVPlacement(0, G4ThreeVector(-6.263*mm
        ,(56*k)*um,0.0*cm),DriftWireLogic,"Drift",ArCO2Logic,0,false ,0);
}

//-----Mesh
G4Tubs* MeshWire=new G4Tubs("MeshWire", 0.*cm, 9.*um, 5.*cm, 0.*deg, 360.*deg);

```

```

G4LogicalVolume* MeshWireLogic = new G4LogicalVolume(MeshWire, StainlessSteel,
    "MeshWireLogic");
for (i=-833; i<834; i++)
{
    G4VPhysicalVolume* MStripsPhysic_v = new G4PVPlacement(rm,G4ThreeVector
        (-11.281*mm ,0.0*cm, (60.0*i)*um), MeshWireLogic,"Mesh", ArCO2Logic,
        0,false , 0);
    G4VPhysicalVolume* MStripsPhysic_h = new G4PVPlacement(0,G4ThreeVector
        (-11.281*mm ,(60.0*i)*um,0.0*um),MeshWireLogic,"Mesh", ArCO2Logic, 0,
        false , 0);
}

//-----G10Frame
G4Box* G10Pane=new G4Box("G10Pane", 1.2*mm, 10.0*cm, 10.0*cm);
G4Box* gap=new G4Box("gap", 1.2*mm, 5.0*cm, 5.0*cm);
G4SubtractionSolid* G10Frame=new G4SubtractionSolid("G10Pane-gap",G10Pane,gap);
G4LogicalVolume* G10FrameLogic = new G4LogicalVolume(G10Frame, G10, "
    G10FrameLogic");
G4VPhysicalVolume* G10FramePhysic = new G4PVPlacement(0 ,G4ThreeVector(24.1*mm
    ,0.0*cm,0.0*cm), G10FrameLogic,"G10", worldLogic, 0,false , 0);

//-----CopperFrame
G4Box* CopperPane=new G4Box("CopperPane", 0.05*mm, 10.0*cm, 10.0*cm);
G4Box* CopperGap=new G4Box("gap", 0.05*mm, 5.0*cm, 5.0*cm);
G4SubtractionSolid* CopperFrame=new G4SubtractionSolid("CopperPane-gap",
    CopperPane,CopperGap);
G4LogicalVolume* CopperFrameLogic = new G4LogicalVolume(CopperFrame, Cu, "
    CopperFrameLogic");
G4VPhysicalVolume* CopperFramePhysic = new G4PVPlacement(rm,G4ThreeVector
    (25.35*mm ,0.0*cm,0.0*cm), CopperFrameLogic,"Copper", worldLogic, 0,false
    , 0);

G4RotationMatrix *rml=new G4RotationMatrix;
rml->rotateY(90*deg);
std::vector<G4TwoVector> poligon(8);
poligon[0]=G4TwoVector(10*cm,2*cm);
poligon[1]=G4TwoVector(10*cm,-2*cm);
poligon[2]=G4TwoVector(2*cm,-10*cm);
poligon[3]=G4TwoVector(-2*cm,-10*cm);
poligon[4]=G4TwoVector(-10*cm,-2*cm);
poligon[5]=G4TwoVector(-10*cm,2*cm);
poligon[6]=G4TwoVector(-2*cm,10*cm);
poligon[7]=G4TwoVector(2*cm,10*cm);
G4ExtrudedSolid *poligonSolid=new G4ExtrudedSolid("polygon",poligon,0.5*mm,
    G4TwoVector(0, 0), 1.0,G4TwoVector(0, 0), 1.0);
G4Tubs* hole = new G4Tubs("hole", 0*cm, 1.2*cm,2*mm, 0.*deg, 360.*deg);
G4SubtractionSolid* poligonwhole=new G4SubtractionSolid("poligonwithhole",
    poligonSolid, hole);
G4LogicalVolume* poligonLogic = new G4LogicalVolume(poligonwhole, G10, "
    poligonLogic");
G4VPhysicalVolume* poligonPhysic = new G4PVPlacement(rml,G4ThreeVector(25.9*mm
    , 0.0*cm, 0.0*cm), poligonLogic,"poligonLogic", worldLogic, 0, false , 0);

G4SDManager *SDManager = G4SDManager::GetSDMpointer();
G4VSensitiveDetector *sensitive = new UMSD("/mydet/UMSD");

```

```

SDManager->AddNewDetector(sensitive);
ArCO2Logic->SetSensitiveDetector(sensitive);
KWindowLogic->SetSensitiveDetector(sensitive);
G10FrameLogic->SetSensitiveDetector(sensitive);
CopperFrameLogic->SetSensitiveDetector(sensitive);
poligonLogic->SetSensitiveDetector(sensitive);
DriftWireLogic->SetSensitiveDetector(sensitive);
MeshWireLogic->SetSensitiveDetector(sensitive);
SideLogic->SetSensitiveDetector(sensitive);
PCBLogic->SetSensitiveDetector(sensitive);

//-----Visualization Attributes!-----
G4VisAttributes* BoxVisAtt= new G4VisAttributes(G4Colour(1.0,1.0,1.0)); //white
worldLogic ->SetVisAttributes(BoxVisAtt);
worldLogic -> SetVisAttributes (G4VisAttributes::Invisible);

G4VisAttributes* magenta = new G4VisAttributes(true,G4Colour(1.0,0.0,1.0));
//magenta
G4VisAttributes* blue = new G4VisAttributes(G4Colour(0.0,0.0,1.0)); //blue
G4VisAttributes* red = new G4VisAttributes(G4Colour(1.0,0.0,0.0)); //red
G4VisAttributes* gray = new G4VisAttributes(G4Colour(0.5,0.5,0.5)); //gray
G4VisAttributes* yellow = new G4VisAttributes(G4Colour(1.0,1.0,0.0)); //yellow

ArCO2Logic->SetVisAttributes(blue);
// MeshWireLogic->SetVisAttributes(gray);
PCBLogic->SetVisAttributes(yellow);
// DriftWireLogic ->SetVisAttributes(blue);
KWindowLogic->SetVisAttributes(gray);
CopperFrameLogic->SetVisAttributes(red);
G10FrameLogic->SetVisAttributes(yellow);
SideLogic->SetVisAttributes(blue);
return worldPhysic;
}

```

```

#include "UMPrimaryGeneratorAction.hh"
#include "UMDetectorConstruction.hh"
#include "Randomize.hh"
#include "globals.hh"
#include "G4ParticleDefinition.hh"
#include "G4ParticleTable.hh"
#include "G4Event.hh"
#include "G4ParticleGun.hh"
#include <fstream>
#include <iostream>

UMPrimaryGeneratorAction::UMPrimaryGeneratorAction()
{
    G4int nparticle=1;
    particleGun=new G4ParticleGun(nparticle); // particles per event
    G4ParticleTable* particleTable=G4ParticleTable::GetParticleTable();
    G4String particleName;
    neutronray=particleTable->FindParticle(particleName="neutron");
}

UMPrimaryGeneratorAction::~UMPrimaryGeneratorAction()

```

```

{
    delete particleGun;
}

void UMPPrimaryGeneratorAction::GeneratePrimaries(G4Event* anEvent)
{
    x0=230.0*cm;
    y0=0.0*cm;
    z0=0.0*cm;
    particleGun->SetParticlePosition(G4ThreeVector(x0, y0, z0));
    particleGun->SetParticleDefinition(neutronray);
    particleGun->GeneratePrimaryVertex(anEvent);
    particleGun->SetParticleEnergy(5.5*MeV);

    dist=x0-2.64*cm;
    G4double tantheta = ((14.14*cm)/dist);

    G4double theta = atan(tantheta);
    G4double phi= (G4UniformRand()*2*pi;
    G4double cosrand = 1-(G4UniformRand()*(1-cos(theta)));

    G4double uy= cos(phi) * sqrt(1-cosrand*cosrand);
    G4double uz= sin(phi) * sqrt(1-cosrand*cosrand);
    G4double ux =cosrand;

    particleGun->SetParticleMomentumDirection(G4ThreeVector(-ux,uy,uz));
}

```

```

#include "UMHit.hh"
#include "UMSD.hh"
#include "G4ios.hh"
#include "globals.hh"
#include "G4VVisManager.hh"
#include "G4Circle.hh"
#include "G4Colour.hh"
#include "G4UnitsTable.hh"
#include "G4VisAttributes.hh"
#include <iostream>
#include <fstream>
using namespace std;

G4Allocator<UMHit> UMHitAllocator;

UMHit::UMHit(const UMHit& right)
{
    UMEdep = right.UMEDep;
    UMParticleName = right.UMParticleName;
    UMProcessName = right.UMProcessName;
    MotherID=right.MotherID;
    Position = right.Position;
}

const UMHit& UMHit::operator=(const UMHit& right)
{

```

```

    UMEdep = right.UMEdep;
    UMParticleName = right.UMParticleName;
    UMProcessName = right.UMProcessName;
    MotherID=right.MotherID;
    Position = right.Position;
    return *this;
}

G4bool UMHit::operator==(const UMHit& right) const
{
    return (this==&right) ? 1 : 0;
}

```

```

#include "UMSD.hh"
#include "UMHit.hh"
#include "G4HCofThisEvent.hh"
#include "G4TouchableHistory.hh"
#include "G4Step.hh"
#include "G4SDManager.hh"
#include <fstream>
#include <iostream>
#include "G4Track.hh"
#include "G4VProcess.hh"

UMSD::UMSD(G4String SDname) : G4VSensitiveDetector(SDname)
{
    G4cout<<"Creating SD with name: "<<SDname<<G4endl;
    G4String myCollectionName = "UMCollection";
    collectionName.insert(myCollectionName);

    HCID = -1;
    hitsCollection = NULL;
}

G4bool UMSD::ProcessHits(G4Step * step, G4TouchableHistory*)
{
    G4Track* thistrack = step->GetTrack();

    G4ThreeVector Position = thistrack->GetPosition();
    G4double edep = step->GetTotalEnergyDeposit();
    G4String ParticleName = thistrack->GetDefinition()->GetParticleName();
    G4int MotherID = thistrack->GetParentID();

    G4String processName ;
    if (thistrack->GetCreatorProcess() != 0)
        processName = thistrack->GetCreatorProcess()->GetProcessName();

    UMHit * newHit = new UMHit();
    newHit->SetUMEdep(edep);
    newHit->SetUMParticleName(ParticleName);
    newHit->SetUMProcessName(processName);
    newHit->SetPosition(Position);
    newHit->SetMotherID(MotherID);
}

```

```

newHit->Print();
newHit->Draw();

hitsCollection->insert(newHit);
return true;
}

void UMSD::Initialize(G4HCofThisEvent * HCE)
{
    hitsCollection = new UMHitsCollection(SensitiveDetectorName,collectionName[0]);
    if (HCID < 0)
    {
        HCID = G4SDManager::GetSDMpointer()->GetCollectionID(collectionName[0]);
    }
    HCE->AddHitsCollection(HCID, hitsCollection);
    hitMap.clear();
}

void UMSD::EndOfEvent(G4HCofThisEvent* HCE)
{
    //~ hitsCollection->PrintAllHits();
}

```

```

#include "UMEventAction.hh"
#include "UMRootSaver.hh"
#include "UMHit.hh"
#include "UMSD.hh"
#include "G4Event.hh"
#include "G4EventManager.hh"
#include "G4HCofThisEvent.hh"
#include "G4VHitsCollection.hh"
#include "G4SDManager.hh"
#include "G4UnitsTable.hh"
#include "globals.hh"
#include "G4ios.hh"
#include <fstream>
#include <iostream>
#include "TROOT.h"
#include "TFile.h"
#include "TTree.h"
using namespace std;

UMEventAction::UMEventAction(): DeposCount(0), mum(0), RSaver(0)// umhisto(0),
    printModulo(1),hitsCollName("UMCollection"),
{
    hitsCollID=-1;
}

UMEventAction::~UMEventAction()
{
    delete pDetector;
}

UMSD* UMSD::GetSensitiveDetector(G4String detname)
{

```

```

G4SDManager* SDman = G4SDManager::GetSDMpointer();
UMSD* sens = static_cast<UMSD*>(SDman->FindSensitiveDetector(detname));
return sens;
}

void UMEventAction::BeginOfEventAction(const G4Event* anEvent)
{
    if (anEvent->GetEventID()%100000==0)
    {
        G4cout << "Event" << anEvent-> GetEventID() <<G4endl;
    }//endif
    if ( hitsCollID == -1 )
    {
        G4SDManager * SDman = G4SDManager::GetSDMpointer();
        hitsCollID = SDman->GetCollectionID("UMCollection");
    }//endif
}

void UMEventAction::EndOfEventAction(const G4Event* anEvent)
{
    if (hitsCollID<0)
        return;

    G4HCofThisEvent* EventHitColl = anEvent->GetHCofThisEvent();
    UMHitsCollection* hits = NULL;

    if (EventHitColl)
    {
        hits = (UMHitsCollection*)(EventHitColl->GetHC(hitsCollID));
    }//endif
    int n_hit = hits->entries();
    if (hits)
    {
        typedef std::vector<UMHit*>::const_iterator hitsVector_it;
        hitsVector_it hit = hits->GetVector()->begin();
        hitsVector_it end = hits->GetVector()->end();

        EDep=0.0;
        TotalEDep=0.0;
        areaEDep=0.0;
        partEDep=0.0;
        startEDep=0.0;
        b=1000;
        elecIoni = false;
        strange = false;
        hadrontime=false;
        hIoniz=false;

        for ( ; hit != end ; ++hit)
        {
            EDep = (*hit)->GetUMEDep();
            mum=(*hit)->GetMotherID();
            particle=(*hit)->GetUMParticleName();
            position=(*hit)->GetPos();
            process=(*hit)->GetUMProcessName();

```



```

xpos=position.getX();
ypos=position.getY();
zpos=position.getZ();

    if (particle=="gamma")
        a=0;
    else if (particle=="e-")
        a=1;
    else if (particle=="proton")
        a=2;
    else if (particle=="deuteron")
        a=3;
    else if (particle=="alpha")
        a=4;
    else if (particle == "C12[0.0]")
        a=12;
    else if (particle == "O16[0.0]")
        a=16;
    else if (particle == "Al27[0.0]")
        a=27;
    else if (particle == "Si28[0.0]")
        a=28;
    else if (particle == "Si30[0.0]")
        a=30;
    else if (particle=="S33[0.0]")
        a=33;
    else if (particle=="Cl35[0.0]")
        a=35;
    else if (particle == "Ar40[0.0]")
        a=40;
    else if (particle == "Cr52[0.0]")
        a=52;
    else if (particle == "Fe54[0.0]")
        a=54;
    else if (particle == "Mn55[0.0]")
        a=55;
    else if (particle == "Fe56[0.0]")
        a=56;
    else if (particle == "Ni58[0.0]")
        a=58;
    else if (particle == "Ni60[0.0]")
        a=60;
    else if (particle=="neutron")
        a=100;
    else if (particle=="e+")
        a=101;
    else
    {
        a=500;
        strangeParticle=particle;
    }

TotalEDep+=EDep;
if ((EDep>0.0)&&(TotalEDep==EDep))
{
    xstartpos=position.getX();

```

```

        ystartpos=position.getY();
        zstartpos=position.getZ();
        startPos=position;
        startParticle=particle;
        startEDep=EDep;
        starta=a;
        pStartPos=position;
    }
    if (process=="hIoni")
        hIoniz=true;

    if ((hIoniz==true)&&(process=="eIoni"))
        hadrontime=true;

    if ((process!="hIoni")&&(hadrontime==0))
    {
        if (a!=b)
        {
            if (partEDep>15.0*eV)
            {
                RSaver->AddParticle(b,partEDep/keV,pStartPos);
                DeposCount++;
                if (b==500)
                    trial<<anEvent-> GetEventID()<<"\t"<<b<<"\t"<<
                        strangeParticle<<"\t"<<partEDep/keV<<"\t"<<
                        pStartPos<<"\n";
                if (DeposCount%10==0)
                    G4cout<<"****"<<"Detected Particle Count:...."<<"\t"<<
                        DeposCount<<"****"<<endl;
            }
            partEDep= 0.0;
            pStartPos=position;
            b=a;
        }
    }
    if (((xpos>=0)&&(xpos<0.135)) || ((xpos>0.153)&&(xpos<5.153))) {
    if (abs(ypos)<50){
    if (abs(zpos)<50){
        if (EDep>0.0)
        {
            areaEDep+=EDep;
            partEDep+=EDep;
        }
    }
    }
} //endfor hits
if (partEDep>0.0)
{
    RSaver->AddParticle(b,partEDep/keV,pStartPos);
    if (b==500)
        trial<<anEvent-> GetEventID()<<"\t"<<b<<"\t"<<strangeParticle<<"\t"
            <<partEDep/keV<<"\t"<<pStartPos<<"\n";
}
evarray[0]=a;
evarray[1]=n_hit;
evarray[2]=anEvent->GetEventID();
enarray[0]=TotalEDep/keV;

```

```

        enarray[1]=areaEDep/keV;
        enarray[2] =startEDep/keV;
    }
    RSaver->AddEvent(evarray, enarray, startPos, position);
}

```

```

#include "UMRootSaver.hh"
#include "UMEventAction.hh"
#include "TNtuple.h"
#include "TFile.h"
#include "TTree.h"
#include "TGraph.h"map
#include "TCanvas.h"
#include "TH1F.h"
#include <TH2F.h>
#include "TMath.h"
#include <sstream>
#include <cassert>
using namespace std;

UMRootSaver::UMRootSaver() :RFile(0),runCounter(0)
{
}

UMRootSaver::~UMRootSaver()
{
    if (partntuple)
    {
        CloseTree();
    }
}

void UMRoosaver::CreateTree()
{
    if ( partntuple )
    {
        std::cerr<<"TTree already created, first call CloseTree"<<std::endl;
        return;
    }

    std::ostringstream fn;
    fn<<"rhombus_"<< runCounter++<<".root";
    RFile = TFile::Open(fn.str().data(), "recreate");
    cntuple = new TNtuple("cntuple", "cntp", "A:C");
    areantuple = new TNtuple("areantuple", "antp", "REvID:RPart:RHits:RTotalEDep:
        RAreaEDep:RstartEDep");
    partntuple = new TNtuple("partntuple", "particle", "partpart:parten:partXstart:
        partYstart:partZstart");
    areaHisto = new TH1F("areaHisto", "area energy deposition", 200, 0, 8000);
    areaHisto->GetXaxis()->SetTitle("Energy (keV)");
    areaHisto->GetYaxis()->SetTitle("Events");

    cout<<"Tree for Run " << runCounter<<endl;
    /*** Responce Function ***/
    A[0] = 0.0;
}

```

```

cout<<"enchannel is: " <<enchannel<<endl;
for (int n=0; n<1024; n++)
{
    C[n] = 0.0;
    A[n+1] = A[n]+enchannel;
}
for (int n=0; n<1024; n++)
    B[n] = 0;
}

void UMRotSaver::CloseTree()
{
    if (partntuple)
    {
        RFile->Write();
        G4cout<<"Writing RootTTree:"<<RFile->GetName()<<"...."<<G4endl;

        if (partntuple->Write() !=0)
            G4cout<<"RootTree successfully written in the file"<<G4endl;
        else
            G4cout<<"error in writing the tree"<<G4endl;

        RFile->Close();
        cntuple = 0;
        areantuple = 0;
        partntuple= 0;
        areaHisto = 0;
    }
}

void UMRotSaver::AddResponceFunction()
{
    for (int i=0;i<1024;i++)
    {
        if (B[i]>0)
        {
            if (A[i]<250)
                W=(0.12223*A[i]+0.84944)*0.6;
            else
                W=(0.12223*A[i]+0.84944)*0.8;

            for (int m=0;m<1024;m++)
            {
                C[m]=C[m]+B[i]*(1/(W*sqrt(Pi/2.))*exp(-(2.*pow((A[m]-A[i]),2.)/pow(
                    W,2.)))*0.01534);
            }
        }
    }
    int w = 0 ;
    for (int k=0;k<1024;k++)
    {
        w+=B[k];
        cntuple->Fill(A[k],C[k]);
    }
    G4cout<<"&&&&&&" <<w<<"&&&&&&" <<G4endl;
}

```

```

void UMRotSaver::AddParticle(G4int part, G4double En, G4ThreeVector partpos)
{
    partpart=part;
    parten=En;
    partXstart=partpos.getX();
    partYstart=partpos.getY();
    partZstart=partpos.getZ();
    partntuple->Fill(partpart, parten, partXstart, partYstart, partZstart);
}

void UMRotSaver::AddEvent(G4int info[3],G4double energies[3], G4ThreeVector
    StartPos, G4ThreeVector Pos)
{
    RPart=info[0];
    RHits=info[1];
    REvID=info[2];
    RTotalEDep=energies[0];
    RAreaEDep=energies[1];
    RStartEDep=energies[2];
    ypos = Pos.getY();
    zpos = Pos.getZ();
    ystartpos = StartPos.getY();
    zstartpos = StartPos.getZ();

    if (RAreaEDep>0)
    {
        areaHisto->Fill(RAreaEDep);
        areantuple->Fill(REvID,RPart,RHits,RTotalEDep,RAreaEDep,RStartEDep);
    }
    // ***Responce Function***
    for (int j=0;j<1024;j++)
    {
        if ((A[j]<RAreaEDep)&&(RAreaEDep<=A[j+1]))
            B[j]++;
    }
}

```

```

#include "RunAction.hh"
#include "UMEventAction.hh"
#include "UMRotSaver.hh"
#include "G4Run.hh"
#include <sstream>
#include <iostream>

RunAction::RunAction(UMEventAction* theEventAction ) : umEventAction(theEventAction
)
{
    umEventAction->SetRootSaver( &RSaver );
}

void RunAction::BeginOfRunAction(const G4Run* aRun )
{
    G4cout<<"Starting Run: "<<aRun->GetRunID()<<G4endl;
    G4cout << "!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! Creating ROOT TTree!!!!!!!!!!!!!!!!!! " << G4endl;
}

```

```

    RSaver.CreateTree();
}

void RunAction::EndOfRunAction( const G4Run* aRun )
{
    G4cout<<"Ending Run: "<<aRun->GetRunID()<<G4endl;
    G4cout<<"Number of events: "<<aRun->GetNumberOfEvent()<<G4endl;
    RSaver.AddResponceFunction();
    RSaver.CloseTree();
}

```

```

#include "UMPhysicsList.hh"
#include "globals.hh"
#include "G4Decay.hh"
#include "G4EmPenelopePhysics.hh"
#include "G4DecayPhysics.hh"
#include "G4LossTableManager.hh"
#include "G4ProcessManager.hh"

UMPhysicsList::UMPhysicsList(): G4VUserPhysicsList()
{
    G4LossTableManager::Instance();
    defaultCutValue = 1.*um;
    cutForGamma = defaultCutValue ;
    cutForElectron = defaultCutValue ;
    cutForPositron = defaultCutValue ;

    SetVerboseLevel(1);

    emPhysicsList = new G4EmPenelopePhysics();
    decayPhysicsList = new G4DecayPhysics();
}

UMPhysicsList::~UMPhysicsList()
{
    delete emPhysicsList;
}

void UMPhysicsList::ConstructProcess()
{
    AddTransportation();
    AddDecay();
    emPhysicsList->ConstructProcess();
    decayPhysicsList->ConstructProcess();
}

void UMPhysicsList::AddDecay()
{
    G4Decay* fDecayProcess = new G4Decay();

    theParticleIterator->reset();
    while( (*theParticleIterator)() )
    {
        G4ParticleDefinition* particle = theParticleIterator->value();
        G4ProcessManager* pmanager = particle->GetProcessManager();
    }
}

```

```

        if (fDecayProcess->IsApplicable(*particle) && !particle->IsShortLived())
        {
            pmanager ->AddProcess(fDecayProcess);
            pmanager ->SetProcessOrdering(fDecayProcess, idxPostStep);
            pmanager ->SetProcessOrdering(fDecayProcess, idxAtRest);
        }
    }
}

```

```

#include "G4RunManager.hh"
#include "G4UImanager.hh"
#include "UMDetectorConstruction.hh"
#include "UMPhysicsList.hh"
#include "UMPrimaryGeneratorAction.hh"
#include "UMEventAction.hh"
#include "RunAction.hh"
#include "UMSD.hh"
#include "QGSP_BERT_HP.hh"
#include "G4RadioactiveDecayPhysics.hh"
#ifdef G4VIS_USE
#include "G4VisExecutive.hh"
#endif
#include "Randomize.hh"
#include "time.h"
#ifdef G4UI_USE
#include "G4UIExecutive.hh"
#endif

int main(int argc, char** argv)
{
    G4RunManager* runManager = new G4RunManager;
    UMDetectorConstruction* UMDetector = new UMDetectorConstruction;
    runManager->SetUserInitialization(UMDetector);
    G4VModularPhysicsList* physics = new QGSP_BERT_HP;
    /* G4VModularPhysicsList* physics = new UMPysicsList;
    runManager->SetUserInitialization(physics);
    physics->SetDefaultCutValue(0.01*mm);
    physics->RegisterPhysics(new G4RadioactiveDecayPhysics());

    CLHEP::HepRandom::setTheEngine(new CLHEP::RanecuEngine());
    G4long seed = time(NULL);
    CLHEP::HepRandom::setTheSeed(seed);
    runManager->Initialize();

    runManager->SetUserAction(new UMPPrimaryGeneratorAction);
    UMEventAction* evt = new UMEventAction;
    runManager->SetUserAction(evt);
    runManager->SetUserAction(new RunAction(evt));

    G4int numberOfEvent = 75000000;
    runManager->BeamOn(numberOfEvent);

#ifdef G4VIS_USE
    G4VisManager* visManager = new G4VisExecutive;

```

```

visManager->Initialize();
#endif
G4UImanager * UImanager = G4UImanager::GetUIpointer();
if (argc!=1) // batch mode
{
    G4String command = "/control/execute ";
    G4String fileName = argv[1];
    UImanager->ApplyCommand(command+fileName);
}
else // interactive mode : define UI session
{
    #ifndef G4UI_USE
    G4UIExecutive * ui = new G4UIExecutive(argc,argv);
    #endif G4VIS_USE
    UImanager->ApplyCommand("/control/execute vis.mac");
    #endif
    ui->SessionStart();
    delete ui;
    #endif

    #ifndef G4VIS_USE
    delete visManager;
    #endif
}
delete runManager;
return 0;
}

```


Βιβλιογραφία

- [1] Δ. Λεωνίδου - Αλληλεπιδράσεις Ακτινοβολιών & Ύλης - Δοσιμετρία - Θωράκιση (1984)
- [2] Π. Α. Ασημακόπουλου - Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική (2002)
- [3] Γ.Τσιπολίτης - Σημειώσεις Ανιχνευτικών και Επιταχυντικών Διατάξεων, Αθήνα ΕΜΠ (2008)
- [4] P. Rinard - Neutron Interactions with Matter, (1991), *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials (Ed. by D. Reilly, N. Ensslin, H. Smith Jr)*, US Nuclear Regulatory Commission
- [5] G.F. Knoll - Radiation Detection and Measurement, Wiley India Pvt.Ltd.
- [6] W.R. Leo - Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer
- [7] I. Giomataris - Micromegas: results and prospects, CEA/Saclay, DAPNIA,
- [8] B. Beckhoff, B. Kanngiesser, N. Langhoff, R. Wedell, H. Wolff (Eds.)- Handbook of Practical X-ray Fluorescence Analysis, Springer
- [9] R. M. Sternheimer, M. J. Berger, and S. M. Seltzer - Density effect for the ionization loss of charged particles in various substances., Atomic Data and Nuclear Data Tables, 30.
- [10] X-ray DataBooklet , Laurence Berkeley International Laboratory, University of California
- [11] ROOT User's Guide
- [12] Geant4 User's Guide, Geant4 Collaboration Group

- [13] Σκορδής Ελευθέριος - Διπλωματική Εργασία: Μελέτη της συμπεριφοράς ενός ανιχνευτή MICROMEGAS σε μεικτό πεδίο (n+γ) με την χρήση του κώδικα FLUKA
- [14] James F. Ziegler, Jochen P. Biersack, Matthias D. Ziegler - SRIM:The Stopping and Range of Ions in Matter
- [15] Ιστοσελίδες όπως:
- <http://nucleardata.nuclear.lu.se/Database/Nudat/>
 - <http://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>
 - <http://ie.lbl.gov/toi/index.asp>

