



**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 ενός ανιχνευτή MICROMEAS κατάλληλο για
μετρήσεις σχάσης και νετρονικής ροής με χρήση του κώδικα
FLUKA**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Σκορδή Ελευθέριου

Επιβλέπων: Δρ. Κόκκορης Μιχαήλ

Αθήνα, Φεβρουάριος, 2013

Στην μνήμη της μητέρας μου Σκορδή Ιουλία (1956-2010)

**«Ο θάνατος δεν φτάνει παρά μόνο μία φορά, όμως γίνεται
αισθητός κάθε στιγμή της ζωής. Είναι πιο σκληρό να τον φοβάσαι
παρά να τον υποφέρεις.»**

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	- 1 -
Περίληψη.....	- 4 -
Abstract	- 5 -
Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή στην φυσική λειτουργίας του πρότυπου Micromegas	- 7 -
Εισαγωγή	- 7 -
1.1 Αρχή λειτουργίας και γεωμετρία του Micromegas	- 7 -
1.1.1 Αρχή λειτουργίας του Micromegas	- 8 -
1.1.2 Γεωμετρία του Micromegas	- 9 -
1.2 Φυσική νετρονίων.....	- 11 -
1.2.1 Αλληλεπίδραση νετρονίων με την ύλη.....	- 11 -
1.2.2 Η αντίδραση $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$	- 12 -
1.2.3 Η αντίδραση σχάσης του ^{237}Np	- 17 -
Κεφάλαιο 2^ο: Προσομοίωση Monte Carlo	- 20 -
2.1 Το λογισμικό	- 20 -
2.1.1 Το λογισμικό FLUKA	- 20 -
2.1.2 Το λογισμικό Flair.....	- 21 -
2.2 Εισαγωγή στο FLUKA/Flair	- 22 -
2.2.1 Το αρχείο εισόδου του FLUKA.....	- 22 -
2.2.2 Προσομοίωση της γεωμετρίας του ανιχνευτή Micromegas.....	- 25 -
2.2.3 Προσομοίωση της πηγής των σωματιδίων προς ανίχνευση	- 26 -
2.2.4 Προσομοίωση της φυσικής.....	- 27 -
Κεφάλαιο 3^ο: Προσομοίωση της αντίδρασης $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$.....	- 29 -
3.1 Παραγωγή των σωματιδίων.....	- 29 -
3.2.1 Αποτελέσματα με ενέργεια νετρονίων 1 keV.....	- 32 -
3.2.2 Αποτελέσματα με ενέργεια νετρονίων 400keV.....	- 35 -
Κεφάλαιο 4^ο: Αποτελέσματα προσομοίωσης των θραυσμάτων σχάσης του ^{237}Np -	- 40 -
4.1 Προσομοίωση σωματιδίων άλφα του ^{237}Np	- 40 -
4.2 Παραγωγή θραυσμάτων σχάσης	- 43 -
4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης των θραυσμάτων σχάσης	- 45 -

4.5	Βαθμονόμηση και υπολογισμός απόδοσης του ανιχνευτή.	- 47 -
	Κεφάλαιο 5^ο: Συμπεράσματα	- 50 -
	Κεφάλαιο 6^ο: Βιβλιογραφία	- 52 -
	Παράρτημα Α	- 53 -
•	Το αρχείο εισόδου του FLUKA.....	- 53 -
•	Η τροποποιημένη ρουτίνα "source" του FLUKA.....	- 56 -
	Παράρτημα Β	- 61 -
•	Η εξωτερική ρουτίνα για την παραγωγή των θραυσμάτων σχάσης.....	- 61 -

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία, με τίτλο «**Μελέτη ενός ανιχνευτή MICROMEGAS κατάλληλο για μετρήσεις σχάσης και νετρονικής ροής με χρήση του κώδικα FLUKA**», εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών σπουδών μου με σκοπό την απόκτηση του μεταπτυχιακού διπλώματος με τίτλο « Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές» της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ.Π

Όπως σε κάθε πόνημα, έτσι και σ' αυτή την εργασία, η συμβολή μιας σειράς προσώπων ήταν καθοριστική. Ως εκ τούτου, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ κατ' αρχήν στον Δρ. Μιχαήλ Κόκκορη, Επίκουρο Καθηγητή του Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου και φυσικά στην Δρ Ρόζα Βλαστού-Ζάννη Καθηγήτρια του Ε.Μ.Π.. Η απαιτητικότητα και η επιμονή τους στις λεπτομέρειες με έκαναν καθημερινά καλύτερο. Επίσης είναι βέβαιο ότι χωρίς την πολύτιμη βοήθεια της υποψήφιας διδάκτορος Μαίρης Διακάκη, αυτή η εργασία θα πραγματοποιούταν με πολλαπλάσιο κόπο και γι' αυτό την ευχαριστώ θερμά.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Ιωάννη Σκορδή, την αδερφή μου Ελένη Σκορδή και τη φίλη μου Μαρία Καστριώτου για την τεράστια στήριξή τους όλον αυτόν τον δύσκολο καιρό.

Περίληψη

Οι ανιχνευτές αερίου, βασισμένοι στην τεχνολογία Micromegas[1], 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. Με βάση αυτές τις ιδιότητες κατασκευάστηκε στο CERN μια συστοιχία ανιχνευτών Micromegas με την τεχνολογία Microbulk [2] κλεισμένων μέσα σε ένα κυλινδρικό αλουμινένιο θάλαμο με σκοπό την ταυτόχρονη έμμεση μέτρηση νετρονίων διαφόρων ενεργειών καθώς και θραυσμάτων σχάσης. Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής χρησιμοποιείται σε δύο διαφορετικά πειράματα. Το πρώτο πείραμα είναι το η_TOF [3,4] που πραγματοποιείται στο CERN, με σκοπό την προσδιορισμό της ροής των νετρονίων της «λευκής» (όλων των ενεργειών) δέσμης του πειράματος που παράγεται από τη διαδικασία κατακερματισμού (spallation) στόχου μολύβδου που βομβαρδίζεται από δέσμη πρωτονίων ενέργειας 1 GeV. Το δεύτερο πείραμα πραγματοποιήθηκε με την συνεργασία της ομάδας πυρηνικής φυσικής του τομέα φυσικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ [5,6] και είχε ως σκοπό τον υπολογισμό της ενεργού διατομής της σχάσης του ^{237}Np με νετρόνια 5-8 MeV. Βασικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής ήταν η πραγματοποίηση προχωρημένων προσομοιώσεων με χρήση του κώδικα προσομοίωσης Monte Carlo FLUKA [7] με σκοπό την θεωρητική πρόβλεψη της απόκρισης του ανιχνευτή στην ανίχνευση των προϊόντων της αντίδρασης $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, καθώς και των θραυσμάτων σχάσης του ^{237}Np . Τέλος για τις ανάγκες της προσομοίωσης αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε μια συμπληρωματική ρουτίνα στην γλώσσα προγραμματισμού gFortran με σκοπό την σωστή παραγωγή των αρχικών σωματιδίων προς προσομοίωση.

Abstract

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. Consequently, very recently a new transparent neutron detector based on the Micromegas Micro-Bulk [2] technology has been developed. The challenge was to obtain a neutron transparent detector as a monitor of a neutron beam that was big enough to avoid significant neutron background generated by neutrons scattering from the chamber structure. Thus a large detector was developed at CERN within the context of the n_TOF collaboration [3,4], that was also capable of performing neutron induced fission and (n, α) cross section measurements. In this specific study, Monte Carlo simulations were carried out using the FLUKA [7] code, as part of computational support to two different experiments.

The first part of the simulations was a study carried out for the n_TOF experiment which included the simulation of energy deposited by the products of the $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ reaction inside the active gas area of the Micromegas detector. In order to better integrate the above reaction to the FLUKA code, an external routine was developed in the FORTRAN programming language in order to create a separate input file which contained information about the particles that had to be simulated. More to the point the routine was responsible for creating a file that included the energy and the position and direction coordinates of the α and ^7Li particles. The routine took into consideration the kinematics of the reaction as well as the cross section which was taken from the ENDF/B-VII.1 [8] library. Furthermore, a modified version of the FLUKA source routine was used in order to feed the information of the particles to the FLUKA code and simultaneously to simulate the energy deposition of both products inside the active gas area. The final result was an event by event histogram of energy deposition which modelled the expected spectra of the Micromegas detector. After the study was accomplished, the final results were then compared to the actual experimental data and a fair agreement between the simulation and the experiment was found.

The second part of the simulations was related to the experimental measurement of the $^{236}\text{Np}(n,f)$ cross section that was conducted by the Nuclear Physics group of the Physics Department of the NTUA and took place at the Tandem accelerator facility of NCSR "Demokritos" in Athens [5,6]. The purpose of the study was to once again provide the experiment with information about the expected experimental spectra as well as to aid in the specification of the detector's limits in the lower energy part of the spectra, where the noise from the electronics cannot be decoupled from the experimental data. Moreover, this was a two scale study, since the ^{236}Np de-excites to ^{233}Pa with the emittance of α particles of 4.8 MeV energy. Consequently there was a need of studying both the energy deposition, in the active

gas volume of the detector, of α -particles as well as the fission fragments of the above mentioned reaction. The same strategy as for the previous simulations was adopted and an external routine was implemented as input to the FLUKA code. The α -particles were isotropically produced and simulated with precise energies. The results of the α -particles study were afterwards compared to the experimental spectra with a satisfactory agreement and the values of the simulated α efficiencies agreed with the experimental ones within 2-3%. For the second scale of this study the external routine integrated experimental data of the reaction based on the published studies [9] and [10], in order to create fission fragments in the following way. A heavy fission fragment was selected from a Gaussian distribution with mean value $\mu=140$ and standard deviation $\sigma=6.5$. Then 1-3 neutrons were assumed to be emitted in order to calculate the mass number of the light fragment and an average total kinetic energy of 174 MeV was distributed to their mass. The atomic number Z of the fission fragments was sampled from ± 5 around the mean value given in [9]. The fission fragments produced were isotropically distributed in the volume of the target and their energy deposition was scored in the active gas area of the detector. The result was, once again, an event by event energy deposition histogram that was used as reference for the calibration of the detector.

In a nutshell, the results of the Monte Carlo simulations using the FLUKA code that were conducted in the frame of this Master thesis, were more than satisfactory when compared to the experimental spectra. Moreover the study that was conducted clearly contributed in the success of the experiments and in the final publication of the experimental results. Last but not least, the outcome of this study showed that simulations seem to play a significant role in the experimental area and significantly aid in better understanding the physics that is involved behind any experiment.

Κεφάλαιο 1⁰: Εισαγωγή στην φυσική λειτουργίας του πρότυπου Micromegas

Εισαγωγή

Οι ανιχνευτές Micromegas ανήκουν σε μία νέα γενιά ανιχνευτών με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (όπως είναι η πολύ καλή χωρική ακρίβεια, ο υψηλός ρυθμός μέτρησης με πολύ χαμηλό χρόνο απόκρισης, η γρήγορη ανάκαμψη, η καλή ενεργειακή ανάλυση κ.α.) ιδιότητες που τους καθιστούν κατάλληλους για εφαρμογές σε πολλά επιστημονικά πεδία. Έτσι, την τρέχουσα περίοδο, κατασκευάστηκε ένας πρότυπος ανιχνευτής βασισμένος στην τεχνολογία του Micromegas με κύριο σκοπό την ανίχνευση προϊόντων αντιδράσεων νετρονίων διάφορων ενεργειών.

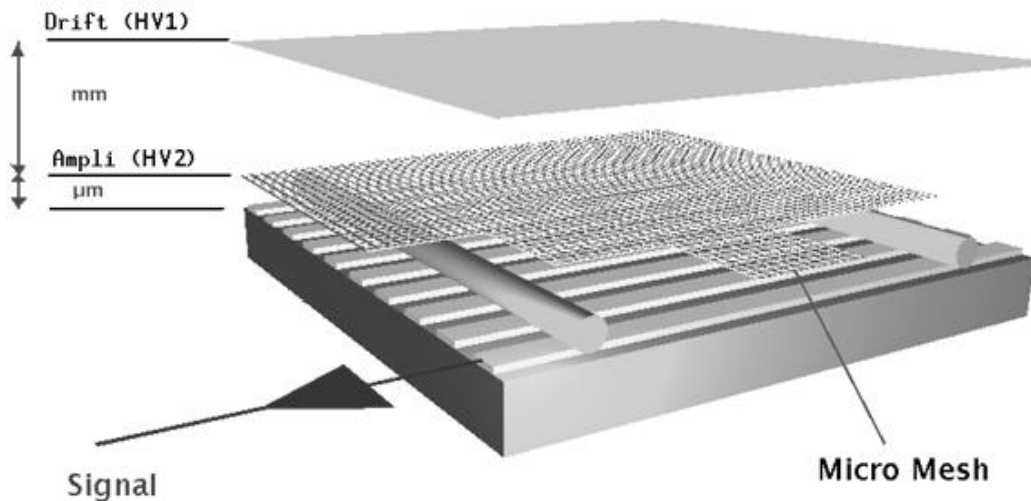
Ο ανιχνευτής Micromegas, ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία ανιχνευτών αερίου. Έτσι, οι γενικές αρχές λειτουργίας του βασίζονται στις αρχές λειτουργίας των ανιχνευτών αερίου. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφέρουμε τη γεωμετρία και την αρχή λειτουργίας του ανιχνευτή καθώς και εκείνα τα χαρακτηριστικά τα οποία κάνουν τον συγκεκριμένο πρότυπο ανιχνευτή μοναδικό. Στην συνέχεια θα αναλύσουμε την φυσική που «κρύβεται» πίσω από την εναπόθεση ενέργειας στον ανιχνευτή την οποία και θα προσομοιώσουμε στην συνέχεια.

1.1 Αρχή λειτουργίας και γεωμετρία του Micromegas

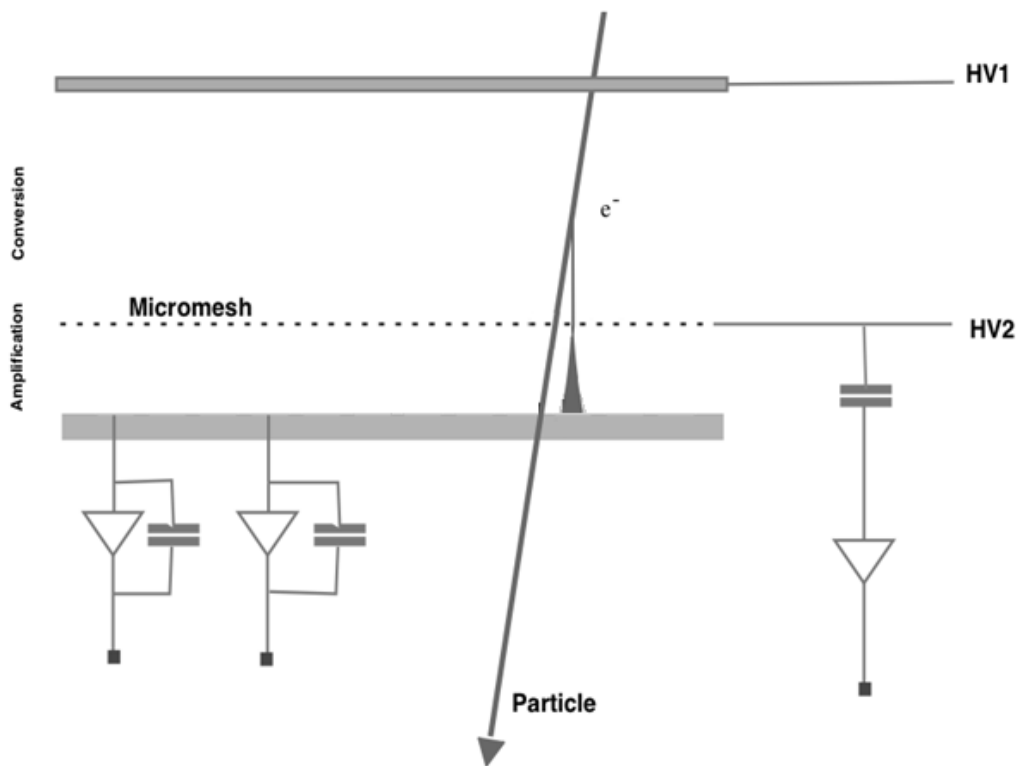
Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούμε στην αρχή λειτουργίας του ανιχνευτή Micromegas (**MICROME**sh **GA**seous **Str**ucture), καθώς και στη γεωμετρία του πρότυπου ανιχνευτή που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο, με τα κύρια χαρακτηριστικά του και τις τεχνικές λεπτομέρειες του. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η εξοικείωση με τον ανιχνευτή έτσι ώστε να μπορέσουμε στην συνέχεια να εστιάσουμε τη φυσική στις απαιτήσεις του πειράματος.

1.1.1 Αρχή λειτουργίας του Micromegas

Ο ανιχνευτής Micromegas είναι στην πραγματικότητα εξαιρετικά απλός στην υλοποίησή του αλλά πολύ αποτελεσματικός. Η υλοποίησή του μάλιστα μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους που όλοι όμως χρησιμοποιούν την ίδια αρχή λειτουργίας. Η αρχή λειτουργίας του Micromegas, πολύ γενικά, βασίζεται στην ύπαρξη ενός ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα σε δύο μεταλλικές επιφάνειες, μίας συμπαγούς (στην συγκεκριμένη περίπτωση) από αλουμίνιο (Drift) και ενός συρμάτινου διάτρητου πλέγματος (Micromesh), καθώς και μιας ακόμα μεταλλικής επιφάνειας (pad) η οποία ορίζει την περιοχή ενίσχυσης. Τέλος ανάμεσα στις επιφάνειες αυτές απαιτείται η ύπαρξη ενός μίγματος αερίου διαφορετικού κάθε φορά ανάλογα με το πείραμα. Κάθε ανιχνευτής τέτοιου είδους ανεξαρτήτως των λοιπών εξωτερικών χαρακτηριστικών πρέπει να διαθέτει τα παραπάνω ώστε να λειτουργήσει. Στην **Εικόνα 1.1** βλέπουμε την αναπαράσταση της διάταξης των παραπάνω. Καθώς διέρχεται ένα σωματίδιο αλληλεπιδρά με το αέριο που βρίσκεται στο εσωτερικό, ιονίζει το αέριο ελευθερώνοντας ηλεκτρόνια και αυτά χάρη στην διαφορά δυναμικού που υπάρχει ανάμεσα στο Drift – Mesh και στο Mesh – Pad ενισχύονται, προκαλούν καταιγισμούς, και μας δίνουν το σήμα (**Εικόνα 1.2**). Τα στοιχεία του μίγματος του αερίου καθώς και οι διαφορές δυναμικού, οι διαστάσεις των στοιχείων, και τα εξωτερικά χαρακτηριστικά διαφέρουν από ανιχνευτή σε ανιχνευτή για αυτό και εμείς θα ασχοληθούμε μόνο με τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή του εργαστηρίου, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω.



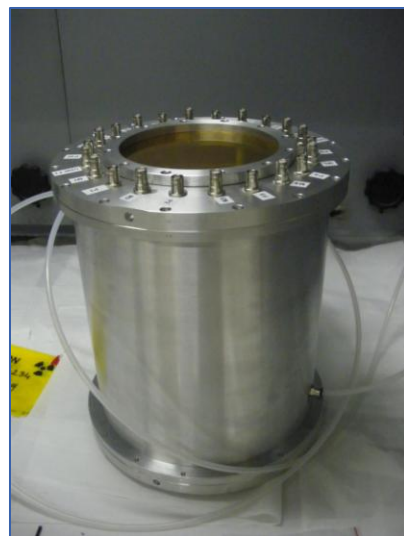
Εικόνα 1.1: Τα βασικά στοιχεία της περιοχής ανίχνευσης του Micromegas



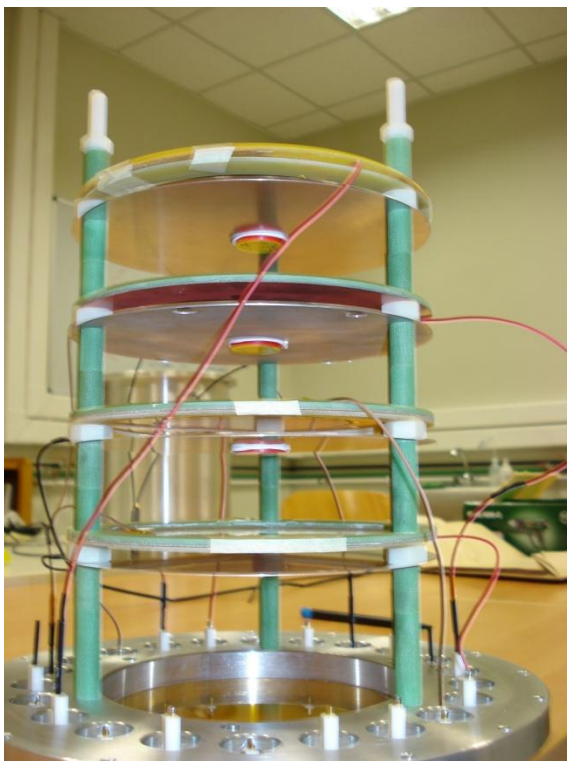
Εικόνα 1.2 Αρχή λειτουργίας του ανιχνευτή Micromegas

1.1.2 Γεωμετρία του Micromegas

Ο πρότυπος αυτός ανιχνευτής αποτελείται από ένα κυλινδρικό αλουμινένιο δοχείο (**Εικόνα 1.3**) στο εσωτερικό του οποίου βρίσκεται μια συστοιχία τεσσάρων ή και περισσότερων ανιχνευτών Micromegas (**Εικόνα 1.4**). Στην **Εικόνα 1.5** βλέπουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ανιχνευτών Micromegas που αποτελούν τη συστοιχία. Φυσικά τα εικονιζόμενα στοιχεία είναι αυτά τα οποία έχουν εισαχθεί στον κώδικα προσομοίωσης και είναι αυτά τα οποία απασχολούν την συγκεκριμένη εργασία όσον αφορά έναν Micromegas του πειράματος στο n_TOF, ενώ η πραγματική υλοποίηση των υπόλοιπων Micromegas μπορεί να διαφέρει σε κάποια σημεία. Η εικόνα επίσης δεν μεταφέρει την αναλογία σε μήκος και πλάτος καθώς είναι παραποιημένη έτσι ώστε να φαίνονται όλα τα στοιχεία του καλύτερα. Το Drift αποτελείται στον συγκεκριμένο Micromegas από επιχλωμένο Carbon ενώ



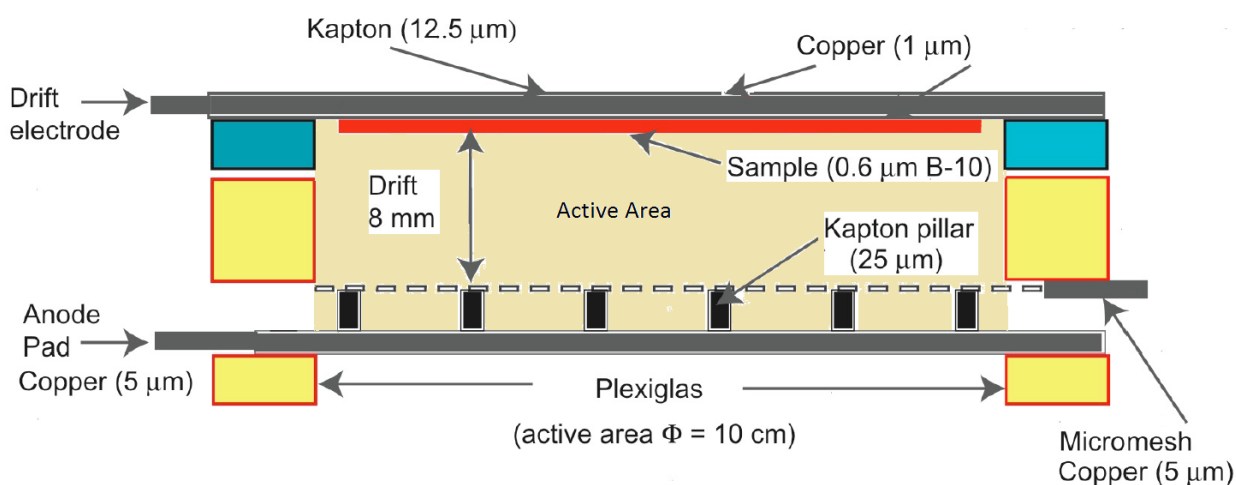
Εικόνα 1.3: Ο θάλαμος από Αλουμίνιο του ανιχνευτή Micromegas.



το Micromesh είναι κατασκευασμένο από χαλκό (copper) αλλά μπορεί να είναι κατασκευασμένα και από διαφορετικό υλικό. Ως περιοχή ανίχνευσης (Active Area) έχουμε ορίσει την περιοχή στην οποία λόγω της διαφοράς δυναμικού, τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από τον ιονισμό επιταχύνονται και μας δίνουν σήμα. Το αέριο μίγμα αποτελείται από 88% Ar, 10% CF₄ και 2% C₄H₁₀ για την προσομοίωση που έγινε για το πείραμα στο η_TOF ενώ για το πείραμα στον «Δημόκριτο» χρησιμοποιήθηκε μίγμα αποτελούμενο από 80% Ar και 20% CO₂. Τέλος, παρατηρούμε ότι ο Micromegas είναι ανιχνευτής λεπτού στόχου με αποτέλεσμα τα σωματίδια μεγάλων ενεργειών να αφήνουν μέρος της ενέργειάς τους ανάλογα με το μήκος της τροχιάς που διανύουν στην περιοχή

Εικόνα 1.4: Συστοιχία τεσσάρων ανιχνευτών Micromegas.

ανίχνευσης.



Εικόνα 1.5: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός από τους Micromegas με στόχο (Sample) ¹⁰B

Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι εκτός από το γεγονός ότι χρησιμοποιείται συστοιχία ανιχνευτών για ταυτόχρονη μέτρηση διαφορετικών πραγμάτων, αυτό που κάνει τον συγκεκριμένο ανιχνευτή μοναδικό είναι και ότι το υλικό το οποίο ανιχνεύουμε βρίσκεται ήδη μέσα στην ανιχνεύσιμη περιοχή. Με την τεχνική «painting» το υλικό προς ανίχνευση εναποτίθεται πάνω στο Drift με αποτέλεσμα ο ανιχνευτής να ανιχνεύει πλήρως σε στερεά γωνία σχεδόν 2π , χωρίς να έχουμε απώλειες από ενδιάμεσα υλικά που πιθανόν να υπάρχουν σε κάποιον άλλο ανιχνευτή. Τα υλικά τα οποία προσομοιώθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι για το μεν πείραμα στο η_TOF το Βόριο-10 (^{10}B) ενώ για το πείραμα στον «Δημόκριτο» είναι το Νεπτούνιο (Ποσειδώνιο) ^{237}Np . Στα συγκεκριμένα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν και άλλοι στόχοι στους υπόλοιπους ανιχνευτές της συστοιχίας οι οποίοι όμως δεν προσομοιώθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

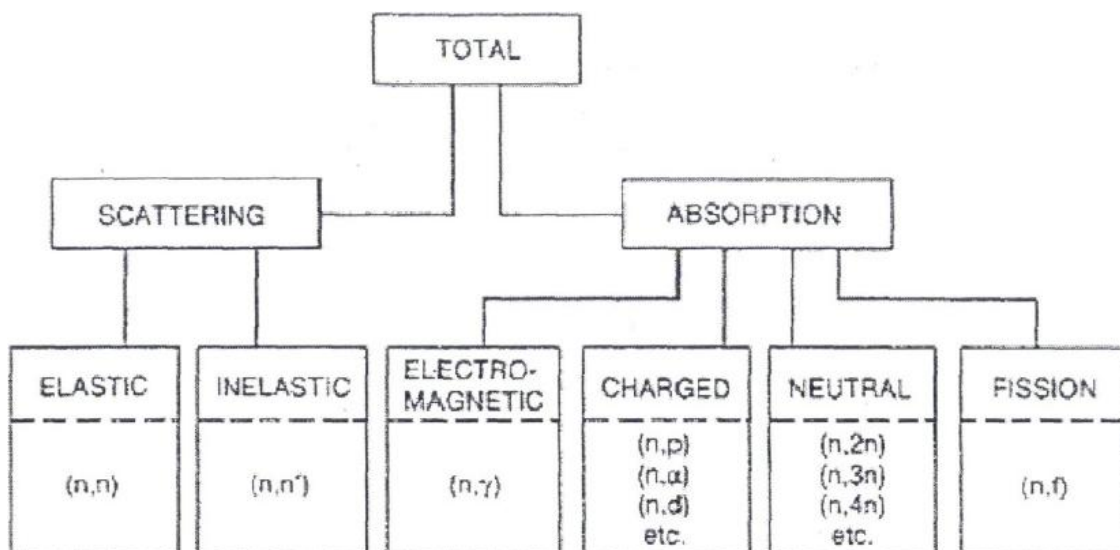
Στην συνέχεια θα αναλύσουμε την φυσική πίσω από την εναπόθεση ενέργειας από τα νετρόνια. Όπως είδαμε, ο ανιχνευτής Micromegas, ανιχνεύει τα ηλεκτρόνια τα οποία ιονίζουν το αέριο του ανιχνευτή. Για αυτό τον λόγο είναι πολύ σημαντικό να περιγράψουμε τις διαδικασίες με τις οποίες ένα σωματίδιο θα προκαλέσει ιονισμό, καθώς αυτό θα διέλθει από την ενεργό περιοχή.

1.2 Φυσική νετρονίων

1.2.1 Αλληλεπίδραση νετρονίων με την ύλη

Τα νετρόνια είναι αφόρτιστα ουδέτερα σωματίδια, και για αυτό τον λόγο αλληλεπιδρούν με την ύλη μέσω πυρηνικών αλληλεπιδράσεων που εξαρτώνται από την ενεργειακή κατάσταση του πυρήνα «στόχου». Οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τη σκέδαση (scattering) και την απορρόφηση (absorption) η οποίες με την σειρά τους χωρίζονται σε υποκατηγορίες οι οποίες φαίνονται στην **Εικόνα 1.6**.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μας απασχόλησαν μόνο οι διεργασίες τις απορρόφησης και συγκεκριμένα οι αντιδράσεις (n,α) στο ^{10}B και οι αντιδράσεις σχάσης στο ^{237}Np . Αυτό συνέβη διότι η προσομοίωση έγινε έμμεσα και όχι άμεσα. Αυτό γίνεται λόγω αδυναμίας των προγραμμάτων Monte Carlo να παρακολουθήσουν και να αναπαράγουν όλες τις διεργασίες που γίνονται από τα νετρόνια, καθώς και την σοβαρή αδυναμία να «δημιουργήσουν» και να παρακολουθήσουν αναλυτικά τα δευτερεύοντα σωματίδια. Έτσι, αντί να προσομοιώσουμε τα νετρόνια εξαρχής, «γεννήσαμε» και προσομοιώσαμε κατευθείαν τα προϊόντα των αντιδράσεων των νετρονίων.



Εικόνα 1.6: Μηχανισμοί αλληλεπίδρασης των νετρονίων με την ύλη

1.2.2 Η αντίδραση $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$

Στο πείραμα n_TOF που πραγματοποιήθηκε στο CERN ο ένας από του ανιχνευτές Micromegas της συστοιχίας περιείχε ως στόχο το ^{10}B με σκοπό την έμμεση ανίχνευση των νετρονίων με ενέργειες από θερμικά έως 1 MeV. Στην **Εικόνα 1.7** βλέπουμε μία αναπαράσταση της αντίδρασης αυτής για θερμικά νετρόνια η οποία καταλήγει στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση του ^{11}B με αποτέλεσμα την εκπομπή ενός σωματιδίου άλφα, ενός πυρήνα ^7Li και μιας ακτίνας γάμμα.

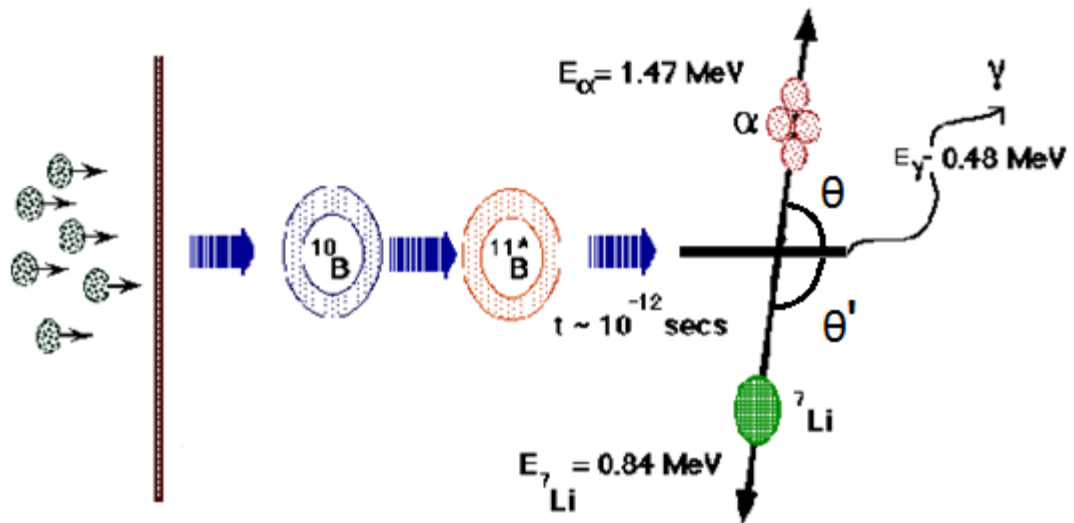
Στην **Εικόνα 1.8** φαίνονται η ολική ενεργός διατομή της αντίδρασης καθώς και η ενεργός διατομή της θεμελιώδους στάθμης του ^{11}B για διάφορες τιμές της ενέργειας των νετρονίων. Οι τιμές, καθώς και τα ποσοστά αναλογίας, για δύο αντιπροσωπευτικές ενέργειες, φαίνονται στον **Πίνακα 1**. Επειδή όπως προείπαμε προσομοιώνουμε κατευθείαν τα προϊόντα της αντίδρασης, αυτό που μας ενδιαφέρει κυρίως είναι το ποσοστό αναλογίας της $\sigma(n, \alpha_0)$ και $\sigma(n, \alpha_1)$, έτσι ώστε να «γεννήσουμε» τα σωματίδια με την σωστή αναλογία.

Το επόμενο θέμα που μας απασχόλησε ήταν το γεγονός ότι οι γωνίες σκέδασης θ και θ' που φαίνονται στην **Εικόνα 1.7**, είναι συσχετισμένες μεταξύ τους καθώς και

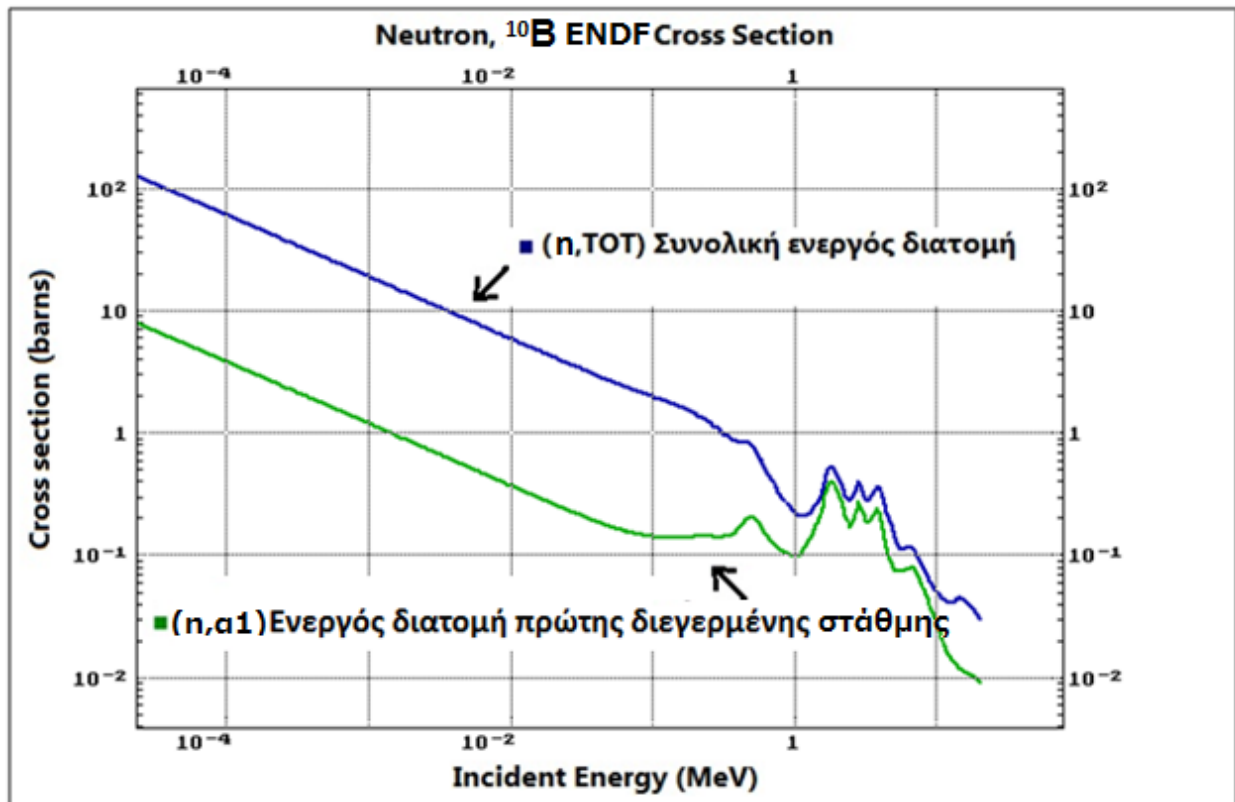
	1keV (barn)	1keV (%)	400keV (barn)	400keV (%)
$\sigma(n, \alpha_{\text{tot}})$	19.1	100	0.85	100
$\sigma(n, \alpha_0)$	1.2	6.3	0.17	20
$\sigma(n, \alpha_1)$	17.9	93.7	0.69	80

Πίνακας 1: Αντιπροσωπευτικές τιμές της ενεργούς διατομής της αντίδρασης $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$

Incident Neutrons

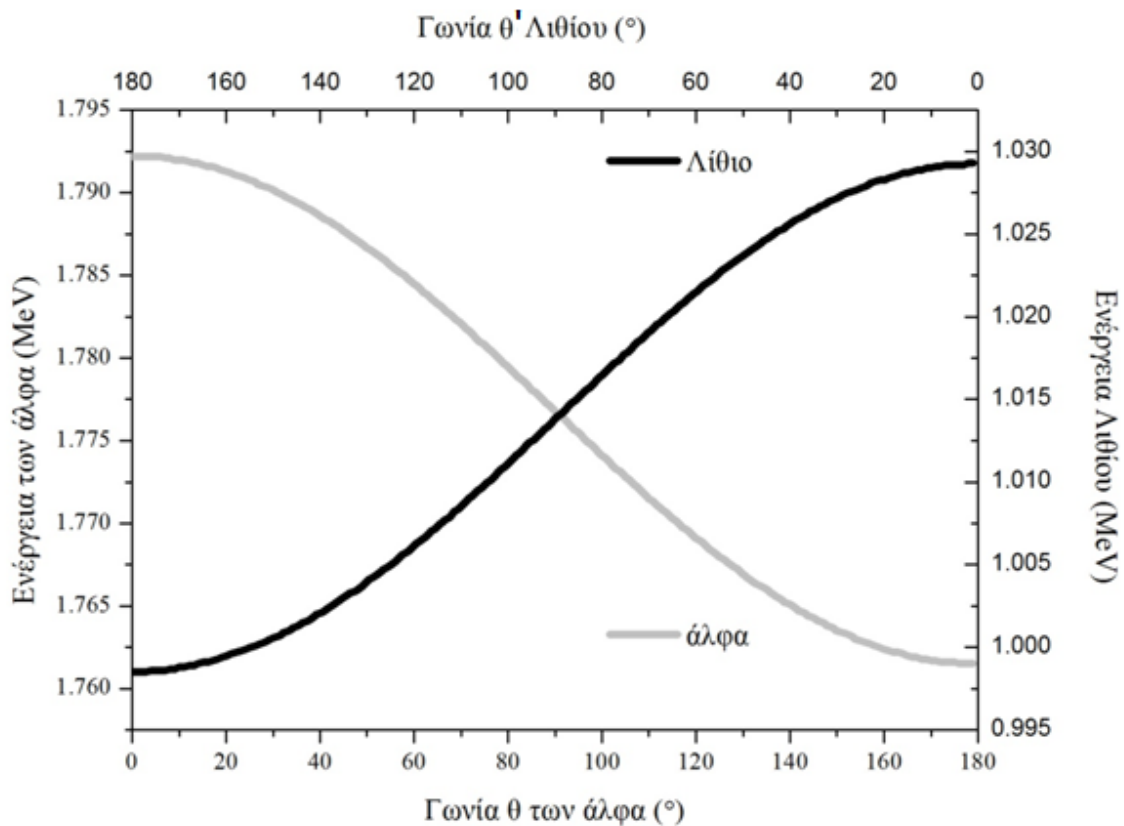


Εικόνα 1.7: Σχεδιάγραμμα της αντίδρασης $^{10}\text{B} (n,\alpha) ^7\text{Li}$

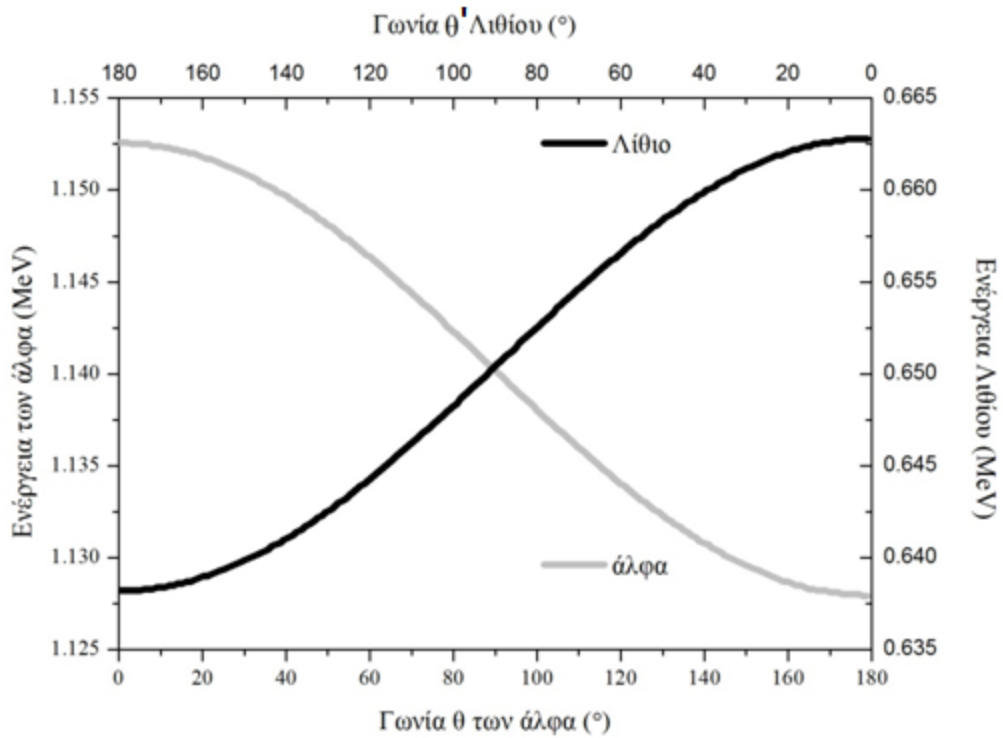


Εικόνα 1.8: Ενεργός διατομή της αντίδρασης $^{10}\text{B} (n,\alpha) ^7\text{Li}$

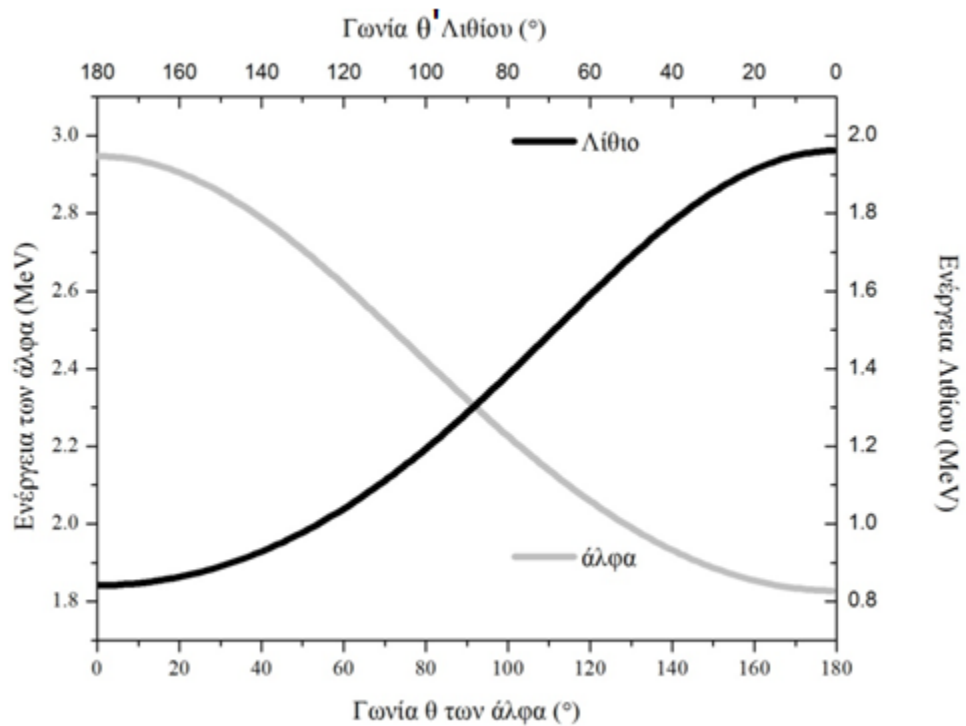
με την ενέργεια που θα αποκτήσει το κάθε σωματίδιο και βρέθηκαν με την βοήθεια του προγράμματος κινηματικής Cice – Ganil. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι σχέσεις των γωνιών θ και ϕ καθώς και οι ενέργειες που αποκτούν τα σωματίδια μετά την αντίδραση. Στις **Εικόνες 1.9 και 1.10** παρουσιάζονται οι γωνίες και οι ενέργειες για νετρόνια ενέργειας 1keV για την θεμελιώδη και την πρώτη διεγερμένη αντίστοιχα. Στις **Εικόνες 1.11 και 1.12** παρουσιάζονται οι γωνίες και οι ενέργειες για 1 MeV νετρόνιο για την θεμελιώδη και την πρώτη διεγερμένη αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι οι ενέργειες των σωματιδίων αλλάζουν από ενέργεια σε ενέργεια καθώς και όπως ήταν αναμενόμενο από την θεμελιώδη στην πρώτη διεγερμένη. Αυτά τα διαγράμματα θα μας βοηθήσουν αργότερα στο να εκτιμήσουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καθώς σε με βάση τις ενέργειες τους θα μπορέσουμε να ξεχωρίσουμε τα σωματίδια στο τελικό φάσμα.



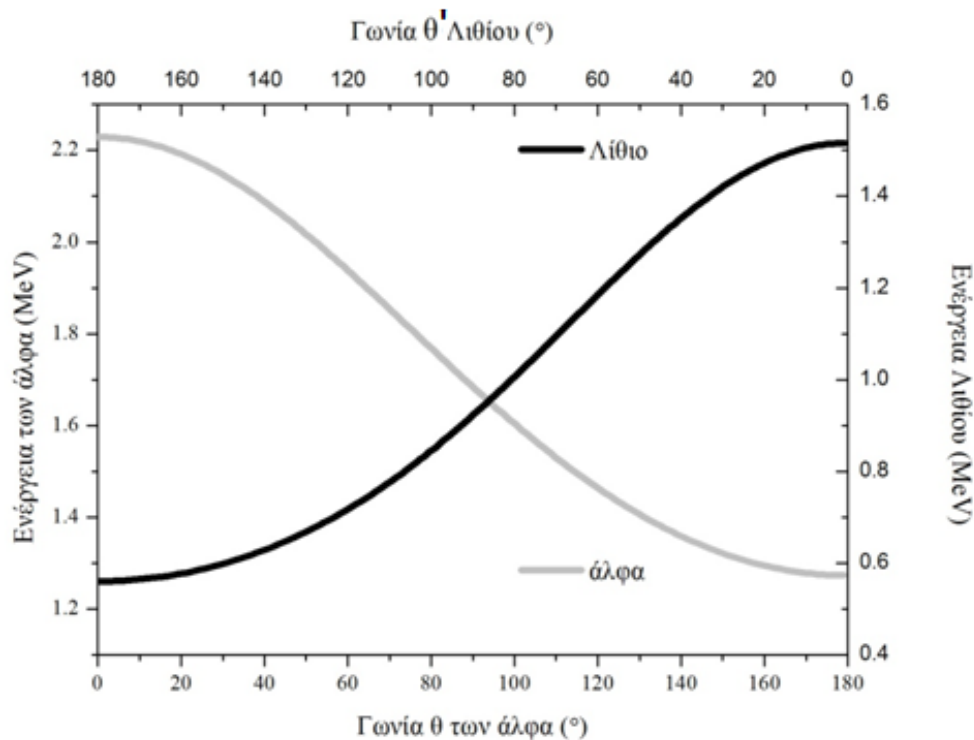
Εικόνα 1.9: Συσχέτιση γωνιών θ και θ' με τις αντίστοιχες ενέργειές του για 1keV νετρόνιο και θεμελιώδη στάθμη διεγερσης του ${}^7\text{Li}$



Εικόνα 1.10: Συσχέτιση γωνιών θ και θ' με τις αντίστοιχες ενέργειές του για 1keV νετρόνιο και πρώτη διεγερμένη στάθμη του ${}^7\text{Li}$



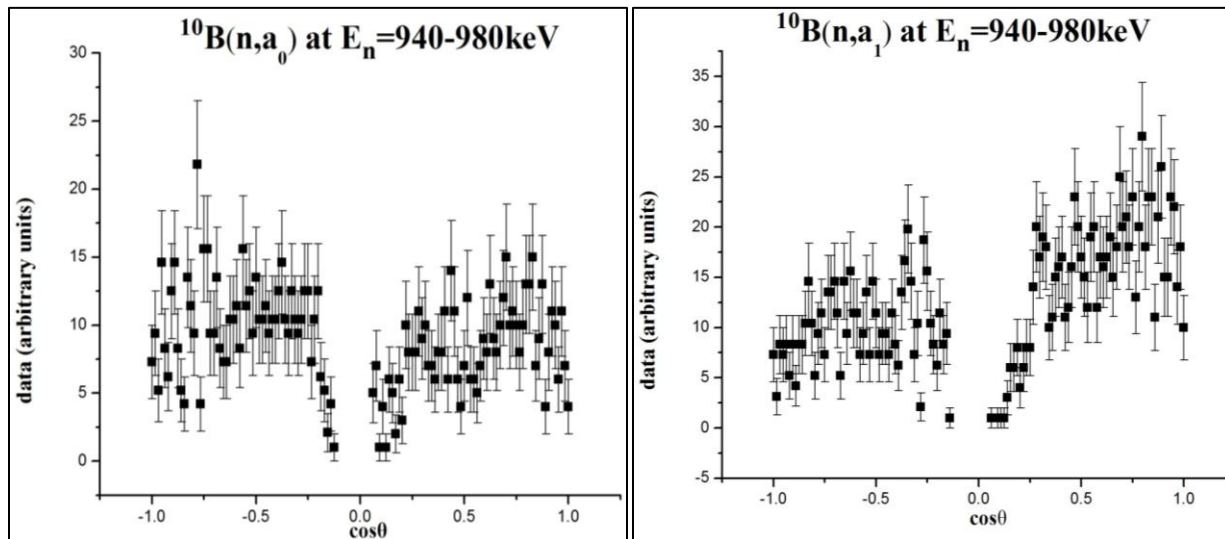
Εικόνα 1.11: Συσχέτιση γωνιών θ και θ' με τις αντίστοιχες ενέργειές του για 1MeV νετρόνιο και θεμελιώδη στάθμη του ${}^7\text{Li}$



Εικόνα 1.12: Συσχέτιση γωνιών θ και θ' με τις αντίστοιχες ενέργειές του για 1MeV νετρόνιο και πρώτη διεγερμένη στάθμη του ${}^7\text{Li}$

Τέλος αυτό που απομένει να δούμε είναι τη διαφορική ενεργός διατομή της αντίδρασης έτσι ώστε να μπορέσουμε να δώσουμε είτε ισοτροπικά είτε με κάποιο «βάρος» τη γωνία θ και με βάση τα παραπάνω να εξαγάγουμε την γωνία ϕ και τις αντίστοιχες ενέργειες. Στην δημοσιευμένη εργασία [11] υπάρχουν αναλυτικά πειραματικά δεδομένα για την διαφορική ενεργό διατομή της αντίδρασης ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ για ενέργειες νετρονίων από 1keV έως 1MeV .

Γενικά στις χαμηλές ενέργειες παρατηρείται ισοτροπική συμπεριφορά ενώ καθώς η ενέργεια του νετρονίου αυξάνεται παρατηρείται μια αύξηση της προτίμησης στις εμπρόσθιες γωνίες θ , ειδικά στην περίπτωση της αντίδρασης $(n,\alpha 1)$. Ενδεικτικά παραθέτουμε δύο γραφήματα (**Εικόνα 1.13**) για την διαφορική ενεργό διατομή της θεμελιώδους (αριστερά) και της πρώτης διεγερμένης στάθμης του ${}^7\text{Li}$ (δεξιά) για ενέργεια νετρονίων κοντά στο 1MeV . Όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις και για ισοτροπική διαφορική ενεργό διατομή αλλά και λαμβάνοντας υπόψη τα πειραματικά δεδομένα για την καλύτερη σύγκριση και αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

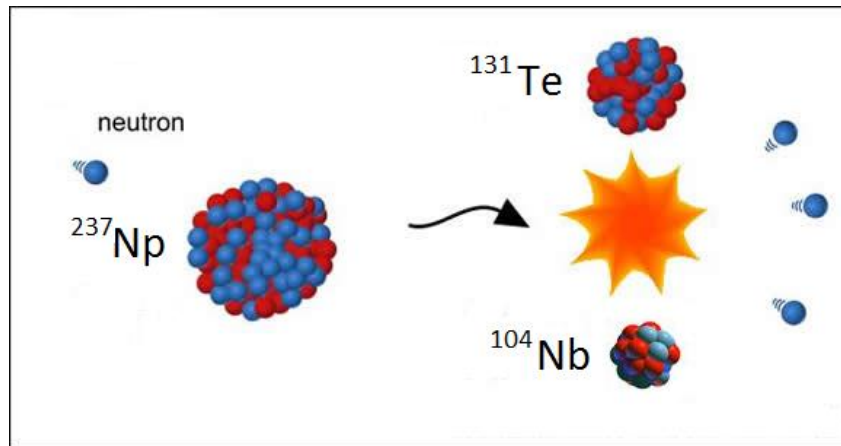


Εικόνα 1.13: Διαφορική ενεργός διατομή σε τυχαίες μονάδες ως συνάρτηση της γωνίας θ

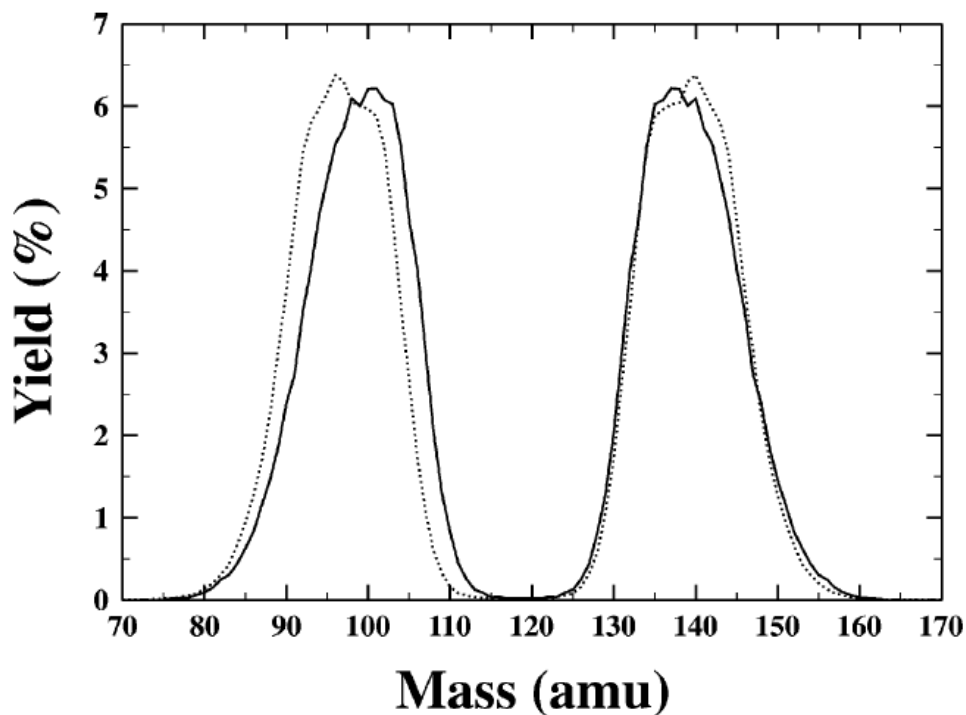
1.2.3 Η αντίδραση σχάσης του ^{237}Np

Οι αντιδράσεις σχάσης είναι αρκετά γνωστές πολλά χρόνια τώρα. Κυρίως όμως γνωρίζουμε τις αντιδράσεις του ουρανίου και του πολωνίου καθώς έχουν ποικίλες εφαρμογές στην βιομηχανία. Η αντίδραση σχάσης του ^{237}Np δεν διαφέρει σημαντικά από τις αντιδράσεις των υπόλοιπων ακτινιδών. Η κύρια διαφορά του έγκειται στο γεγονός ότι για να γίνει η αντίδραση σχάσης του ^{237}Np χρειάζονται νετρόνια σχετικά μεγάλης ενέργειας, από 300keV μέχρι 8 MeV.

Στην **Εικόνα 1.14** βλέπουμε μια σχηματική αναπαράσταση της αντίδρασης σχάσης με ένα πιθανό ζευγάρι προϊόντων. Σύμφωνα με την θεωρία, τα ζευγάρια προϊόντων σχάσης μπορεί να είναι πολλά και διάφορα τα οποία όμως ακολουθούν μια κανονική κατανομή γύρω από μία μέση τιμή του μαζικού αριθμού. Στην δημοσιευμένη εργασία [9] υπάρχουν αναλυτικά πειραματικά δεδομένα, για το ποια είναι αυτά τα προϊόντα σχάσης καθώς και για τις κινητικές ενέργειες που αποκτούν. Στην **Εικόνα 1.15** φαίνεται χαρακτηριστικά σύγκριση των πιθανών θραυσμάτων σχάσης του ^{237}Np με το πολύ καλά μελετημένο ^{235}U . Παρατηρούμε ότι τα θραύσματα σχάσης χωρίζονται σε βαριά τα οποία ακολουθούν μια κανονική κατανομή με κεντροειδές το 140 και σε ελαφριά με κεντροειδές το 100. Και τα δύο παρουσιάζουν μια μέση διασπορά στο 5.5, η οποία εξαρτάται από την ενέργεια των νετρονίων και φαίνεται στην **Εικόνα 1.16**.



Εικόνα 1.14: Σχηματική αναπαράσταση της αντίδρασης σχάσης του ^{237}Np

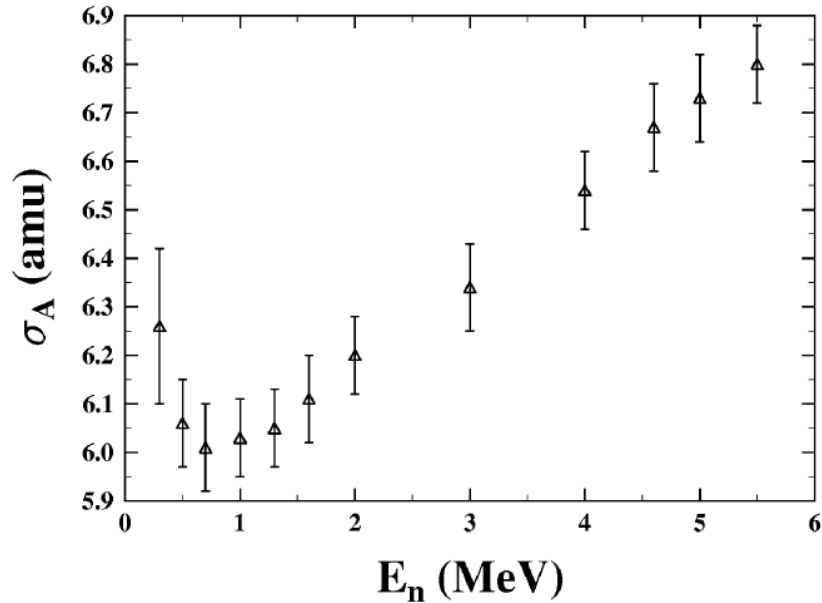


Εικόνα 1.15: Σχηματική αναπαράσταση της αντίδρασης σχάσης του ^{237}Np και του ^{235}U (με διακεκομμένη γραμμή)

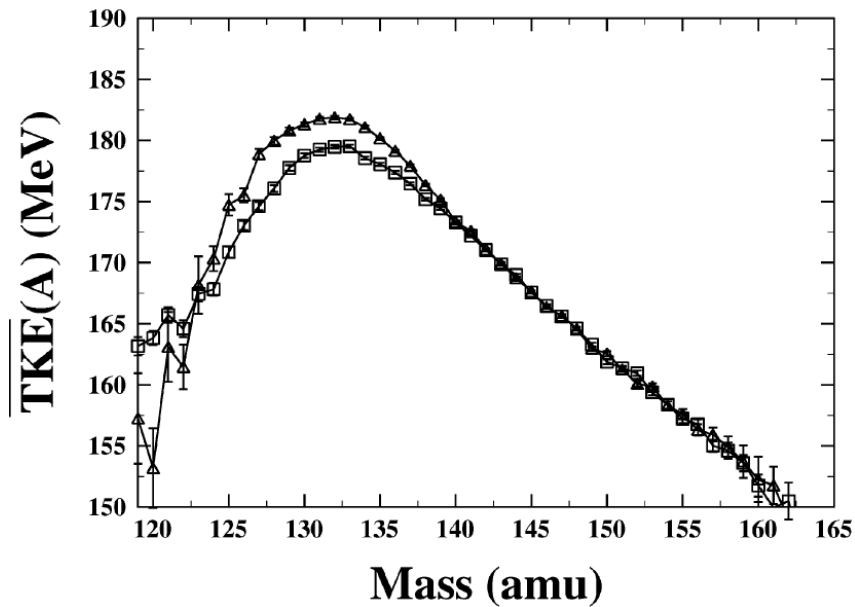
Τέλος, έχει μείνει να προσδιορίσουμε την κινητική ενέργεια που θα αποκτήσουν τα θραύσματα της σχάσης. Επειδή η πειραματική διάταξη είναι έτσι φτιαγμένη ώστε να ανιχνεύει μόνο την κινητική ενέργεια των θραυσμάτων, δεν μας ενδιαφέρει καθόλου η ενέργεια που εκλύεται με άλλους τρόπους όπως η ενέργεια που αποκτούν τα νετρόνια κτλ. Στην **Εικόνα 1.17** φαίνεται η μέση κινητική ενέργεια (\overline{TKE}) και των δύο θραυσμάτων μαζί ως συνάρτηση του μαζικού αριθμού του βαρέως θραύσματος. Παρατηρούμε ότι οι ενέργειες κυμαίνονται από 150 έως 182 MeV. Για τον υπολογισμό

της ενέργειας που αποκτά το κάθε θραύσμα θα πρέπει, αφού διαλέξουμε κάποιο ζευγάρι ελαφρύ-βαρύ, να χρησιμοποιήσουμε τους παρακάτω τύπους από κινηματική:

$$E_{\beta\alpha\rho\upsilon} = \frac{\overline{TKE}}{1 + \frac{A_{\beta\alpha\rho\upsilon}}{A_{\epsilon\lambda\alpha\phi\rho\upsilon}}} \quad E_{\epsilon\lambda\alpha\phi\rho\upsilon} = \overline{TKE} - E_{\beta\alpha\rho\upsilon} \quad (2.1)$$



Εικόνα 1.16: Διασπορά του μαζικού αριθμού των βαρέων θραυσμάτων συναρτήσει της ενέργειας των νετρονίων



Εικόνα 1.17: Μέση κινητική ενέργεια των θραυσμάτων σχάσης συναρτήσει του μαζικού αριθμού των βαρέων θραυσμάτων

Κεφάλαιο 2^ο: Προσομοίωση Monte Carlo

Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγράψουμε γενικά την προσομοίωση Monte Carlo του ανιχνευτή Micromegas και τις γενικές αρχές του λογισμικού FLUKA ενώ θα αναφερθούμε και στο Flair [13], το πρόγραμμα το οποίο κατέστησε δυνατή δημιουργία των αρχείων εισόδου του FLUKA μέσω γραφικού περιβάλλοντος και διευκόλυνε κατά πολύ την διαδικασία προσομοίωσης. Θα δούμε επίσης και το τελικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης του Micromegas καθώς και κάποιες αναγκαστικές συμβάσεις που απαιτήθηκαν.

2.1 Το λογισμικό

2.1.1 Το λογισμικό FLUKA



Το πρόγραμμα FLUKA (FLUktuierende KAskade) δημιουργήθηκε με την συνεργασία του Italian National Institute for Nuclear Physics (INFN) και του European Organization for Nuclear Research (CERN) και είναι ένα πακέτο προσομοίωσης Monte Carlo με δυνατότητα μελέτης αλληλεπίδρασης νετρονίων, φωτονίων, ηλεκτρονίων και γενικά όλων των σωματιδίων με την ύλη. Συνολικά το FLUKA έχει την δυνατότητα να προσομοιώνει 63 σωματίδια συν όλα τα είδη βαρέων ιόντων. Για τον λόγο αυτό ο κώδικας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό και την προσομοίωση πληθώρας εφαρμογών σε διάφορα επιστημονικά πεδία όπως στη σωματιδιακή φυσική, στην πειραματική πυρηνική φυσική, καθώς και στην μηχανική, ακτινοπροστασία και θωράκιση, σχεδιασμό ανιχνευτών, μελέτη κοσμικής ακτινοβολίας, δοσιμετρία, ιατρική φυσική και ραδιοβιολογία. Το FLUKA βασίζεται σε εκτενείς βάσεις δεδομένων και βιβλιοθήκες ενεργών διατομών όπως την Evaluated Nuclear Data File (ENDF) [8], ενώ για τις ενεργειακές περιοχές που δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα, χρησιμοποιούνται θεωρητικές προσεγγίσεις και προσαρμογές (fit) στα πειραματικά. Το πρόγραμμα παρέχεται δωρεάν και δίνεται η δυνατότητα σε οποιονδήποτε να το κατεβάσει από την ιστοσελίδα του προγράμματος και να το χρησιμοποιήσει για μη εμπορικούς σκοπούς.

2.1.2 Το λογισμικό Flair



Το FLUKA δέχεται ως είσοδο (input) ένα αρχείο εισόδου γραμμένο με ένα αυστηρά καθορισμένο τρόπο έτσι ώστε να αντιλαμβάνεται πλήρως την γεωμετρία και τα υλικά του πειράματος. Εδώ αξίζει να αναφέρουμε το πρόγραμμα FLAIR [13] (FLuka Advanced InterFace), σχεδιασμένο από τον Δρ. Βασιλή Βλαχούδη για το CERN, το οποίο είναι στην ουσία ένας κατασκευαστής αρχείων εισόδου με γραφικό περιβάλλον έτσι ώστε να απλουστεύει την διαδικασία δημιουργίας αυτών. Μέσα στις δυνατότητες του προγράμματος, εκτός των άλλων, είναι και η δυσδιάστατη αναπαράσταση της γεωμετρίας, ο εντοπισμός και διόρθωση των σφαλμάτων στο αρχείο εισόδου, καθώς και η εκτέλεσή του με χρήση του FLUKA. Επίσης προσφέρει ανάλυση των αποτελεσμάτων καθώς και μία μεγάλη λίστα με την σύνθεση και την στοιχειομετρία διαφόρων υλικών. Γενικά είναι ένα εργαλείο το οποίο βοήθησε σε μεγάλο βαθμό στην κατανόηση και την υλοποίηση του μοντέλου(format) των αρχείων εισόδου και διευκόλυνε κατά πολύ την αναγνώριση και διόρθωση τυχόν σφαλμάτων κατά την διαδικασία μοντελοποίησης του πειράματος. Διευκόλυνε ακόμα και την ανάγνωση του εγχειρίδιου του FLUKA παραπέμποντας στην εκάστοτε ενότητα η οποία αφορούσε την αντίστοιχη λειτουργία.

Τα παραπάνω προγράμματα (Flair, FLUKA) χρειάζονται λειτουργικό σύστημα βασισμένο στην τεχνολογία UNIX, όπως είναι τα LINUX, για να λειτουργήσουν. Το λειτουργικό σύστημα με το οποίο εργαστήκαμε και είναι ένα αρκετά φιλικό προς τον χρήστη, είναι η έκδοση UBUNTU των LINUX το οποίο διατίθεται δωρεάν. Απαραίτητες θεωρούνται και βασικές γνώσεις κάποιας γλώσσας προγραμματισμού για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων των προγραμμάτων.

2.2 Εισαγωγή στο FLUKA/Flair

Στο παρόν κεφάλαιο θα κάνουμε μία μικρή εισαγωγή στην μεθοδολογία που χρησιμοποιήσαμε για να δημιουργήσουμε την γεωμετρία του πειράματος καθώς και την αντίστοιχη προσομοίωσή του.

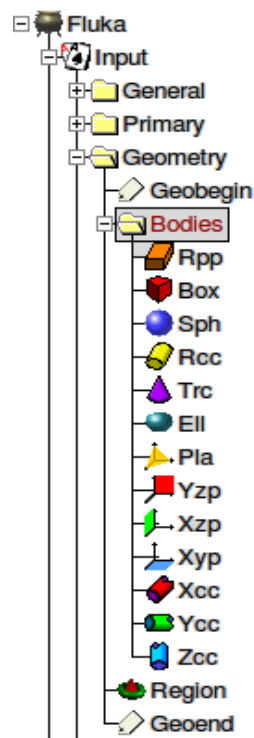
2.2.1 Το αρχείο εισόδου του FLUKA

Το FLUKA δέχεται ως αρχείο εισόδου ένα αρχείο κειμένου γραμμένο σε αυστηρά κατάλληλη μορφή έτσι ώστε να ορίζονται με επιτυχία όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά τα οποία αποτελούν την πειραματική διάταξη που θέλουμε να προσομοιώσουμε. Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα FLAIR απλουστεύσαμε την δημιουργία του αρχείου εισόδου ανάγοντάς την σε 3 βασικά μέρη.

A. Ορισμός γεωμετρικών σχημάτων (Bodies)

Η γεωμετρία στο FLUKA ορίζεται με την βοήθεια κάποιων γεωμετρικών σχημάτων, όπως άπειρα επίπεδα, σφαίρες, κύλινδροι, παραλληλεπίπεδα, κώνοι, και άλλα. Κάθε αναγνωρίσιμο σχήμα δέχεται ως είσοδο τις ελάχιστες πληροφορίες που χρειάζεται ώστε να οριστεί πλήρως. Για παράδειγμα για να οριστεί ένα επίπεδο αρκεί να του δώσουμε τις συντεταγμένες σε (x,y,z) τριών σημείων, ενώ για μία σφαίρα χρειάζονται οι συντεταγμένες του κέντρου O(x,y,z) και το μήκος της ακτίνας ρ κ.ο.κ.. Εδώ να πούμε ότι η προεπιλεγμένη μονάδα μέτρησης του μήκους του FLUKA είναι το εκατοστό (cm).

Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.3** το FLAIR παρέχει έναν πλήρη κατάλογο με τα διαθέσιμα σχήματα και επιλέγοντάς τα, κατευθείαν εισάγει την αντίστοιχη κάρτα στο αρχείο εισόδου, την οποία και μπορούμε να παραμετροποιήσουμε ώστε να ικανοποιεί την δική μας γεωμετρία. Χρησιμοποιώντας το FLAIR εισάγουμε όλα τα απαραίτητα σχήματα τα οποία θα μας βοηθήσουν για να ορίσουμε της αντίστοιχες περιοχές στις οποίες θα χωρίσουμε την γεωμετρία του προβλήματός μας. Αφού ορίσουμε τα σχήματα αυτά σε μεταβλητές με αντίστοιχο όνομα, ώστε να τα ξεχωρίζουμε, ορίζουμε χρησιμοποιώντας τα και τις αντίστοιχες περιοχές.



Εικόνα 2.3:
Λίστα με τα διαθέσιμα σχήματα χρησιμοποιώντας το FLAIR

B. Ορισμός περιοχών (Regions)

Τα παραπάνω σχήματα χωρίζουν τον χώρο σε δύο υποχώρους, έναν θετικό και έναν αρνητικό. Πιο συγκεκριμένα κάθε σχήμα έχει και την δικιά του $f(x,y,z)=0$ εξίσωση, έτσι ως θετικό εννοούμε των χώρο $f(x,y,z)<0$ και ως αρνητικό τον $f(x,y,z)>0$. Για παράδειγμα η εξίσωση $f(x,y,z)=x-230=0$ παριστάνει ένα άπειρο YZ επίπεδο στο $x=230$, έτσι τα σημεία με $x<230$ είναι θετικά κ.ο.κ.. Ακόμα, σε σχήματα, όπως η σφαίρα, το παραλληλεπίπεδο κ.τ.λ., ως θετικό ορίζουμε τον υποχώρο ο οποίος περικλείεται στο αντίστοιχο σχήμα.

Με την βοήθεια του FLAIR εισάγουμε μια κάρτα REGION και αφού της δώσουμε ένα όνομα, την ορίζουμε. Για να ορίσουμε μια περιοχή, χρησιμοποιούμε τα εργαλεία της τομής και της ένωσης υποχώρων. Η τομή είναι προεπιλεγμένη λειτουργία του FLUKA και την αντιλαμβάνεται αυτόματα, αρκεί να γράψουμε δυο υποχώρους στην σειρά χωρισμένους με ένα κενό « » ενώ η ένωση συμβολίζεται με μια κάθετη γραμμή «|». Στην **Εικόνα 2.4** φαίνεται ένα παράδειγμα ορισμού του «νεκρού» χώρου (Black hole) που χρησιμοποιείται σε κάθε αρχείο εισόδου ως το τέλος του χώρου του πειράματος που διενεργούμε, καθώς και ο ορισμός του πλαισίου από αλουμίνιο του Micromegas. Γράφοντας λοιπόν +blkbody -void ορίζω την περιοχή που είναι η τομή του εσωτερικού υποχώρου της σφαίρας blkbody και του εξωτερικού υποχώρου της σφαίρας void, ορίζοντας τελικά στην ουσία ένα σφαιρικό κέλυφος.

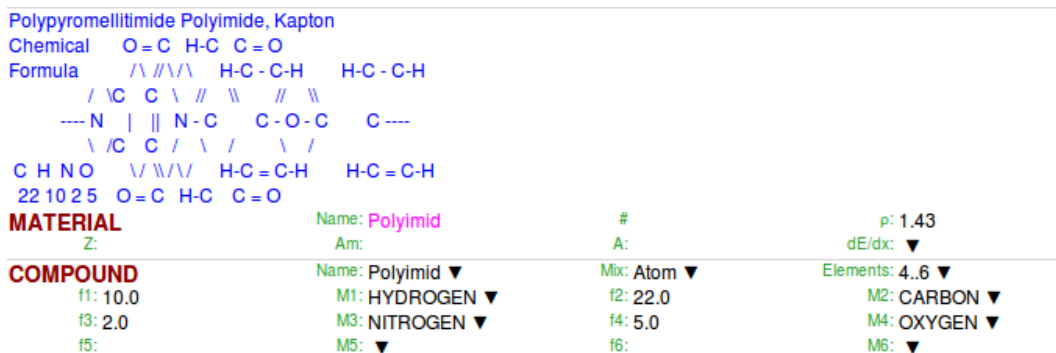
Το πιο συνηθισμένο σφάλμα που γίνεται σε μεγάλο ποσοστό κατά την διάρκεια «χτισίματος» της γεωμετρίας είναι ο μη ορισμός κάποιας περιοχής. Το FLUKA είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα που σημαίνει ότι τίποτε δεν εννοείται, άρα και η παραμικρή γεωμετρική λεπτομέρεια πρέπει να ορίζεται πλήρως. Όσο μικρή και να είναι μία περιοχή πρέπει να οριστεί έτσι ώστε να μην υπάρχουν κενά στην γεωμετρία με αποτέλεσμα τα σωματίδια τα οποία διέρχονται από εκεί να «χάνονται».

Black hole		
REGION BLKBODY		Neigh: 5
expr: +blkbody -void		
Air around		
REGION Air		Neigh: 5
expr: +void -(+Up -Bottom +Left -Right +Back -FG10) -(+UL +UR +BR +BL		
MICROMEGAS		
REGION ALCASE		Neigh: 5
expr: +Up -Bottom +Left -Right -(-RFAL +LFAL +UFAL -BFAL) -KAF +BC		

Εικόνα 2.4: Παράδειγμα ορισμού περιοχών

Γ. Ορισμός υλικών

Αφού έχουμε ορίσει τις περιοχές που μας ενδιαφέρουν, ήρθε η ώρα να τις συμπληρώσουμε με τα υλικά από τα οποία αποτελούνται. Τα υλικά στο FLUKA ορίζονται με την κάρτα «material» στην οποία ο χρήστης εισάγει πέντε βασικά χαρακτηριστικά του υλικού: τον ατομικό και τον μαζικό αριθμό, Z και A αντίστοιχα του στοιχείου, το όνομά του, καθώς και την πυκνότητά του. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής επιμέρους παραμέτρων, όπως πίεση αερίου κ.α., με την βοήθεια της κάρτας MAT-PROP. Στην περίπτωση χημικών ενώσεων όλα τα παραπάνω στοιχεία παραλείπονται, εκτός από το όνομα, όπου θα πρέπει να είναι το ίδιο με της κάρτας COMPOUND που απαιτείται για να οριστεί η χημική σύσταση του υλικού. Η κάρτα COMPOUND δέχεται ως παραμέτρους τα χημικά στοιχεία της ένωσης, και την αναλογία τους κατά άτομο ή κατά βάρος.



Εικόνα 2.5: Ορισμός της χημικής ένωσης του υλικού Kapton

Γενικά το FLUKA περιέχει στην βιβλιοθήκη του τα 25 πιο σημαντικά στοιχεία όπως οξυγόνο υδρογόνο κ.τ.λ. σε συνθήκες μίας ατμόσφαιρας και 20°, τα οποία μπορούμε να καλέσουμε με το όνομά τους. Στην **Εικόνα 2.5** φαίνεται ένα παράδειγμα ορισμού του χημικού στοιχείου KAPTON. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.7** το Flair διαθέτει μια μεγάλη βιβλιοθήκη από «έτοιμα» υλικά τα οποία έχουν εισαχθεί από διάφορους χρήστες του προγράμματος και εύκολα μπορεί κάποιος να ανατρέξει στην βιβλιοθήκη για αναζήτηση κάποιου δημοφιλούς υλικού όπως ο αέρας, το διοξείδιο του άνθρακα κ.α.

Αφού ορίσουμε με επιτυχία όλα μας τα υλικά χρησιμοποιούμε την κάρτα ASSIGNMA (**Εικόνα 2.6**) ώστε να αναθέσουμε το αντίστοιχο υλικό στην αντίστοιχη περιοχή που ορίσαμε προηγουμένως. Τα μπλε γράμματα είναι σχόλια τα οποία διευκολύνουν την κατανόηση του αρχείου εισόδου και σε τρίτους αλλά και στον ίδιο τον κατασκευαστή.

Kapton window
ASSIGNMA
Mat: Polyimid ▼ Reg: KAfoil ▼ to Reg: ▼
Mat(Decay): ▼ Step: Field: ▼

Εικόνα 2.6: Ανάθεση του υλικού Polyimid(Kapton) στην περιοχή KAfoil

Material Database			
Group	Material List		
	Material	Density	Stoichiometry
Biological	520 Nitric Oxide	0.00125	N-1, O-1
Elements	Phenylacetylene	0.9281	H-6, C-8
General	Polymethyl methacrylate lucite plexiglas	1.19	H-8.05, C-60, O-32
ICRU	Ethyl cellulose (C12_H22_O5)n	1.13	H-9, C-58.5, O-32.5
Implantation	Argon	0.001662	Ar
Liquids / Gases	Valine C5_H11_N_O2	1.23	H-9.46, C-51.3, N-12, O-27.3
Metal Alloys	300 Acetaldehyde (Ethanal)	0.7834	H-4, C-2, O-1
Plastics / Polymers	Scandium	2.989	Sc
Targets	Anthracene C14_H10	1.283	H-5.66, C-94.3
User	Glass (Pyrex)	2.23	O-65, Si-25, B-7, Na-2, Al-1

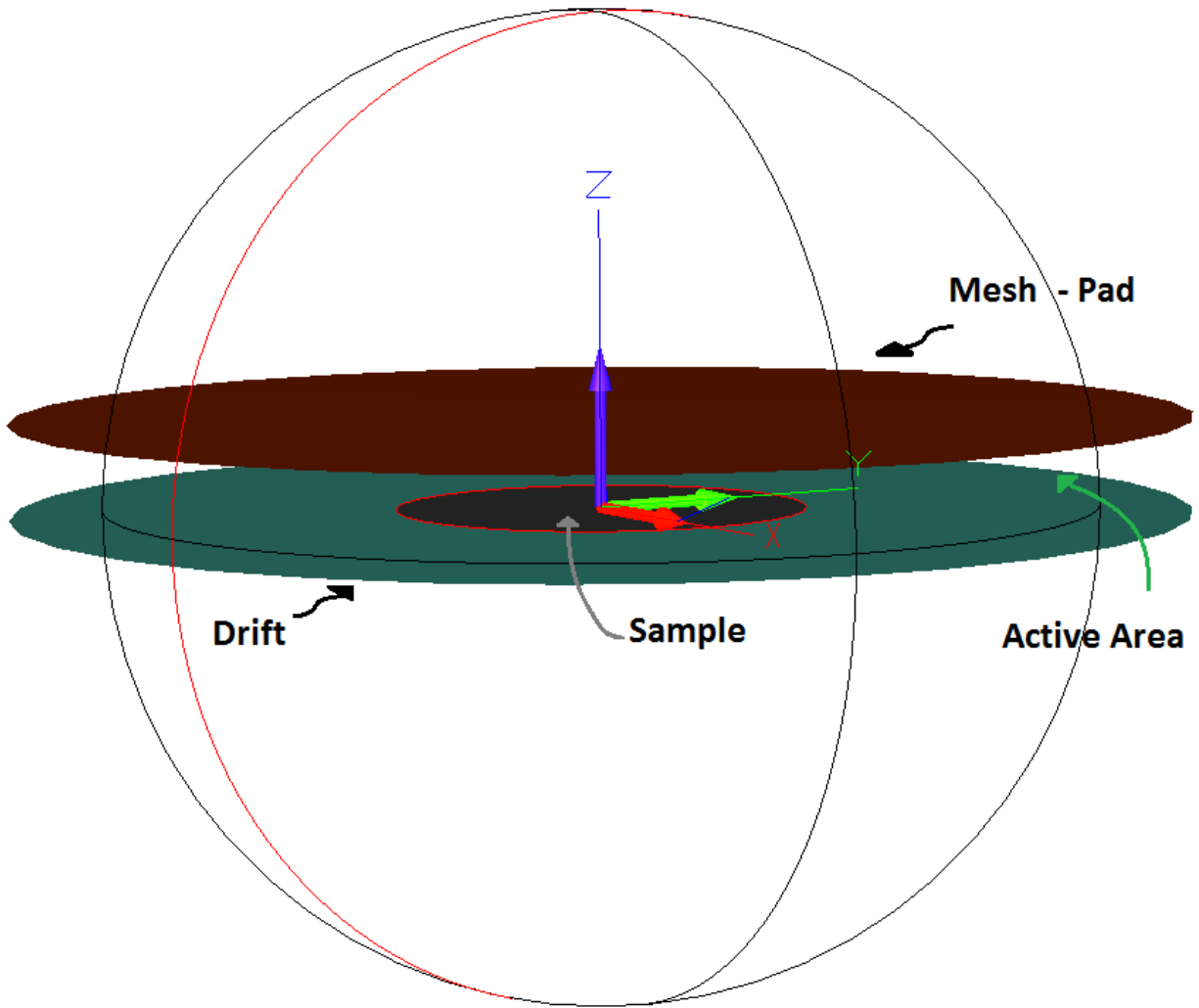
Εικόνα 2.7: Η βιβλιοθήκη υλικών του Flair

Τα παραπάνω είναι αρκετά ώστε να περαστεί με επιτυχία η διάταξη όσον αφορά την γεωμετρία του πειράματος. Τώρα απομένει να ορίσουμε την πηγή καθώς και το τι θα ανιχνεύουμε. Αυτό γίνεται με τις κάρτες BEAM, BEAMPOS και BEAMAXES, ορίζουμε το είδος των σωματιδίων της πηγής, το σχήμα της δέσμης, καθώς και τις συντεταγμένες της πηγής και την κατεύθυνση διάδοσης. Οι διάφορες μετρήσεις (scoring) που μας ενδιαφέρει να κάνουμε υλοποιούνται από διάφορες κάρτες, ανάλογα με τις ανάγκες μας.

2.2.2 Προσομοίωση της γεωμετρίας του ανιχνευτή Micromegas

Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 1 η γεωμετρία ολόκληρου του ανιχνευτή είναι εκτεταμένη, πολύπλοκη και περιέχει από το κυλινδρικό θάλαμο από αλουμίνιο μέχρι τα στηρίγματα και τις συνδέσεις της συστοιχίας από Micromegas. Βέβαια όπως είδαμε ο στόχος ο οποίος «γεννάει» έμμεσα τα σωματίδια προς ανίχνευση, βρίσκεται ήδη μέσα στην ενεργό περιοχή. Έτσι για τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής δεν ήταν αναγκαία η προσομοίωση ολόκληρου του πρότυπου ανιχνευτή παρά μόνο μία γεωμετρία η οποία αναφέρεται στο βασικό καλούπι ενός Micromegas και στην οποία οι διαστάσεις, του προς ανίχνευση στοιχείου (sample), διαμορφώνονταν κατά περίπτωση. Έτσι τα βασικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις τις εξάγαμε από την **Εικόνα 1.5** με τις διαστάσεις του δείγματος να αλλάζουν κατά περίπτωση.

Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στην **Εικόνα 2.8** με την βοήθεια του προγράμματος SimpleGeo [12] το οποίο μας επιτρέπει να του εισάγουμε το αρχείο εισόδου του FLUKA και να σχεδιάζει τρισδιάστατα την γεωμετρία. Ως ενεργός περιοχή ή περιοχή ανίχνευσης, ορίσαμε τον χώρο ανάμεσα στο Drift και στο Pad στον οποίο υπάρχει το μίγμα αερίου, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 80% Argon και 20% CO₂.



Εικόνα 2.8: Τρισδιάστατη απεικόνιση του Micromegas με την βοήθεια του SimpleGeo

2.2.3 Προσομοίωση της πηγής των σωματιδίων προς ανίχνευση

Το σημείο αυτό της διπλωματικής εργασίας ήταν το πιο απαιτητικό στοιχείο της. Το FLUKA παρέχει βοήθεια για κάποιες απλές μορφές πηγής, όπως ιστροπικής ή κωνικής, με μία συγκεκριμένη ενέργεια κάποιου σωματιδίου. Στην περίπτωσή μας όμως δεν ήταν δεδομένη ούτε η μορφή της πηγής ούτε η ενέργεια ούτε η κατεύθυνση των σωματιδίων. Για αυτόν τον λόγο έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε την κάρτα SOURCE του FLUKA η οποία συνδέει το αρχείο εισόδου του FLUKA με κάποιο αρχείο txt στο οποίο περιέχονται οι πληροφορίες των σωματιδίων που θα «γεννήσει» το FLUKA [Φ]. Για την δημιουργία αυτού του αρχείου txt αναπτύχθηκε μία ρουτίνα σε γλώσσα προγραμματισμού gFortran η οποία είναι διαθέσιμη στο **Παράρτημα Β**.

Αυτό που κάνει στην ουσία η ρουτίνα είναι να δημιουργεί ένα μεγάλο αρχείο txt η κάθε σειρά του οποίου περιέχει την πλήρη πληροφορία για την «γέννηση» του

σωματιδίου προς ανίχνευση. Στην **Εικόνα 2.9** φαίνεται ένα κομμάτι από το αρχείο txt όπου στην κάθε γραμμή περιέχεται η εξής πληροφορία:

Από δεξιά προς τα αριστερά

- Στήλες 1 και 2 - περιέχουν τον Ατομικό (**Z**) και τον Μαζικό (**A**) αριθμό του σωματιδίου
- Στήλες 3 , 4 , 5, - περιέχουν τις συντεταγμένες **x, y, z**, του σημείου «γέννησης» του σωματιδίου (σε cm)
- Στήλες 6, 7, 8, - περιέχουν τις συνιστώσες **u_x, u_y, u_z**, του διανύσματος διεύθυνσης του σωματιδίου
- Στήλη 9 – περιέχει την **ενέργεια** του σωματιδίου (σε GeV)

```

32 99 -3.69268133837829327 0.71019078538779234 0.00135510717542979 -0.04000864196727250 0.99877520254396235 0.02911019325256348 0.1017416
52 134 0.93271784188630191 2.80185671374721057 0.00135316002048020 -0.06927362473953393 0.33707176576960213 0.93892693519592285 0.0773747
30 92 2.89113306462268582 0.27210157918226491 0.00135029236956692 0.84530056364717743 0.38518790523097080 0.37026643753051769 0.1035899
62 144 -0.93215897726847619 -0.95691912097421783 0.00135873389385929 0.36455175940647583 -0.72834854564157225 0.58018136024475098 0.0673597
32 97 -1.574613614397272313 1.99976247269376173 0.00136972202891953 -0.82385829882166028 0.51869545703295428 0.22850060462951660 0.1023953
60 148 1.04531787593105951 1.84671456015187885 0.00136933642979292 0.75130732670648892 0.02266164559540283 0.65956330299377441 0.0631725
36 103 -3.85932514127709014 1.00588191093702317 0.00135984923024926 -0.77959748841671228 0.00550421070859757 0.62625670433044434 0.1001494
57 143 2.40781664730187828 -1.03024321359452897 0.00136054161685897 -0.73696393860487297 -0.61386258330629617 0.28294324874877930 0.0683934
36 91 -0.91704084228299854 0.90587183507004454 0.00135032322093028 0.67773025450753066 0.64463761800225527 0.35372877120971680 0.1037503
57 151 -0.94015102508340043 3.46884904369937752 0.00136439611562482 0.47721717030248134 -0.30449198878221118 0.82434725761413574 0.0599884

```

Εικόνα 2.9: Μέρος του αρχείου txt που δημιουργεί η ρουτίνα

Το πως επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες τιμές των μεταβλητών εξαρτάται από τις παραμέτρους του εκάστοτε προβλήματος και θα επεξηγηθεί στα επιμέρους κεφάλαια.

2.2.4 Προσομοίωση της φυσικής

Η φυσικές διεργασίες που χρειαζόμαστε για να μελετήσουμε τον ανιχνευτή Micromegas σε περιβάλλον βαρέων ιόντων είναι ενσωματωμένη στον κώδικα του FLUKA και θεωρητικά το μόνο που χρειαζόμαστε να δηλώσουμε είναι, ανάλογα με το είδος του πειράματος που θέλουμε να προσομοιώσουμε, αντίστοιχο είδος προεπιλεγμένων τιμών. Για το συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήσαμε της προεπιλεγμένες τιμές με το όνομα PRECISION χρησιμοποιώντας την κάρτα Defaults. Με την κάρτα αυτή ενεργοποιήθηκαν οι επιλογές του FLUKA που φαίνονται στην λεζάντα “**PRECISION DEFAULTS**”, ο οποίες είναι απαραίτητες για περιβάλλον φωτονίων και νετρονίων.

Το FLUKA όπως παρατηρούμε στις επιλογές του PRECISION είναι βελτιστοποιημένο για υψηλές ενέργειες με αποτέλεσμα το κατώφλι (threshold) παραγωγής (production), μεταφοράς και παρακολούθησης (transport), των σωματιδίων να βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα σε σχέση με αυτά που θέλουμε να μελετήσουμε. Για να το παρακάμψουμε αυτό χρησιμοποιήσαμε τις κάρτες EMF-CUT, PART-THR και DELTARAY που φαίνονται στην **Εικόνα 2.10** μαζί με τον ορισμό των προεπιλογών. Έτσι θέσαμε την παραγωγή και παρακολούθηση των σωματιδίων με τις αλληλεπιδράσεις τους στο 1keV όπου αποτελεί μια «λογική ενέργεια». Ως «λογική» θεωρήσαμε την κατώτατη ενέργεια που το FLUKA έχει δυνατότητα να επεξεργάζεται, αφού παρατηρήσαμε ότι ακόμα και να θέταμε το κατώφλι σε χαμηλότερη ενέργεια δεν άλλαζαν καθόλου τα αποτελέσματα, ενώ παράλληλα αυξανόταν σημαντικά ο υπολογιστικός χρόνος. Οι παραπάνω κάρτες είναι

πολύ σημαντικές για την προσομοίωση καθώς τα αποτελέσματά μας είναι σε ενέργειες κάτω των 100KeV όπου βρίσκονται τα περισσότερα προεπιλεγμένα κατώφλια.

PRECISION DEFAULTS	
- ElectroMagnetic FLUKA (EMF) on: Transport of electrons positrons and photons	
- Rayleigh scattering and inelastic form factor corrections to Compton scattering activated	
- Detailed photoelectric edge treatment and fluorescence photons activated	
- Low energy neutron transport on down to thermal energies included, (high energy neutron threshold at 20 MeV)	
- Fully analogue absorption for low-energy neutrons	
- Particle transport threshold set at 100 keV, except neutrons (1E-5 eV), and (anti)neutrinos (0, but they are discarded by default anyway)	
- Multiple scattering threshold at minimum allowed energy, for both primary and secondary charged particles	
- Delta ray production on with threshold 100 keV (see option DELTARAY)	
- Restricted ionisation fluctuations on, for both hadrons/muons and EM particles	
- Tabulation ratio for hadron/muon dp/dx set at 1.04, fraction of the kinetic energy to be lost in a step set at 0.05, number of dp/dx tabulation points set at 80	
- Heavy particle e+/e- pair production activated with full explicit production (with the minimum threshold = 2m _e)	
- Heavy particle bremsstrahlung activated with explicit photon production above 300 keV	
- Muon photonuclear interactions activated with explicit generation of secondaries	
- Heavy fragment transport activated	

DEFAULTS	PRECISION ▼		
DELTARAY Print NOPRINT ▼	E thres: 0.000001 Mat: HYDROGEN ▼	# Log dp/dx: to Mat: @LASTMAT ▼	Log width dp/dx: Step:
EMFCUT Fudgem:	Type: PROD-CUT ▼ Mat: BLCKHOLE ▼	e-e+: -.000001 to Mat: @LASTMAT ▼	γ: .000001 Step:
EMFCUT Old brems.: off ▼ Compton: off ▼	Type: ▼ Bremsstrahlung: off ▼ Bhabha&Moller: off ▼ Reg: BLKBODY ▼	e-e+: -0.000001 Pair Prod.: off ▼ Photo-electric: off ▼ to Reg: @LASTREG ▼	γ: .000001 e+ ann @rest: off ▼ e+ ann @flight: off ▼ Step:
EMFCUT Pair prod:	Type: PHOT-THR ▼ Mat: BLCKHOLE ▼	Compton: 0.000001 to Mat: @LASTMAT ▼	Photo-elec: .000001 Step:
EMFCUT	Type: PHO2-THR ▼ Mat: BLCKHOLE ▼	Rayleigh: 0.000001 to Mat: @LASTMAT ▼	Photonuc: .000001 Step:
PART-THR	Type: Energy ▼ Part: PROTON ▼	E: 1e-06 to Part: ▼	Step:

Εικόνα 2.10: Από πάνω προς τα κάτω
Ορισμός των προεπιλογών PRECISION

Αλλαγή στο κατώφλι παρακολούθησης και μεταφοράς των DELTARAYs
Αλλαγή στο κατώφλι παραγωγής ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων και φωτονίων
Αλλαγή στο κατώφλι παρακολούθησης ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων και φωτονίων
Αλλαγή στο κατώφλι της σκέδασης Compton και του Φωτοηλεκτρικού φαινομένου
Αλλαγή στο κατώφλι της σκέδασης Rayleigh και φωτοπυρηνικού φαινομένου.

Κεφάλαιο 3⁰: Προσομοίωση της αντίδρασης $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$

3.1 Παραγωγή των σωματιδίων

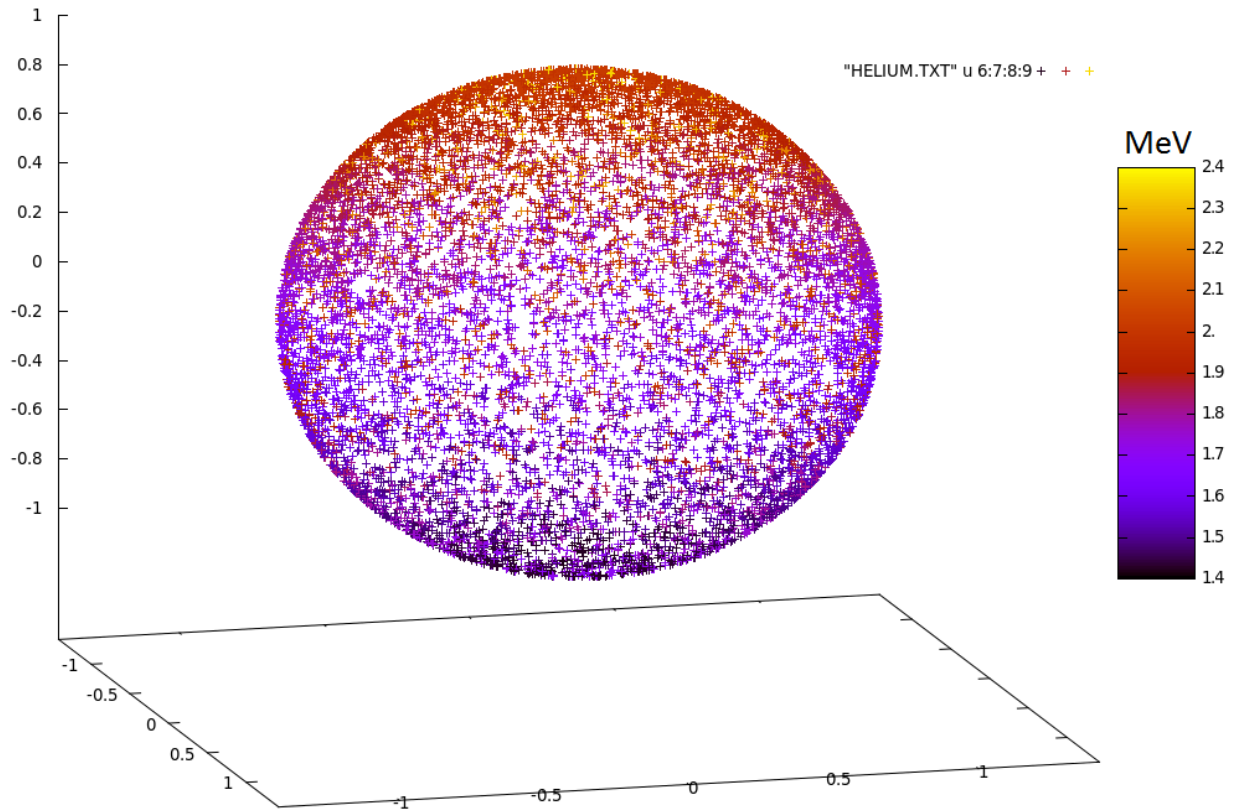
Όπως αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιήθηκε εξωτερική ρουτίνα η οποία δημιουργεί ένα αρχείο με όλη την πληροφορία των σωματιδίων προς προσομοίωση. Έτσι μέσα σε αυτήν την ρουτίνα ενσωματώθηκε όλη η φυσική της αντίδρασης που αναφέρθηκε στο **Κεφάλαιο 1.2.2**. Αυτό που έπρεπε να γίνει είναι να δημιουργηθούν τα προϊόντα της αντίδρασης, δηλαδή το ^4He και το ^7Li , στην περιοχή όπου βρίσκεται το ^{10}B , με ενέργειες και γωνίες οι οποίες προκύπτουν από την κινηματική (**Εικόνες 1.9, 1.10, 1.11, 1.12**). Παρακάτω θα δούμε πως αναθέτουμε τιμές στις στήλες του αρχείου εξόδου της ρουτίνας που φαίνεται στην **Εικόνα 2.9**.

Στην αρχή διαλέγουμε τυχαία ένα $\cos \theta$ από -1 έως 1 για το σωματίδιο άλφα. Ύστερα διαλέγουμε μία τυχαία γωνία ϕ από 0 έως 2π . Έτσι έχουμε δημιουργήσει μια ιστροπική πηγή σε στερεά γωνία 4π . Οι συνιστώσες \mathbf{u}_x , \mathbf{u}_y , \mathbf{u}_z για τις στήλες 5,6,7 για το σωματίδιο άλφα συμπληρώνονται με του παρακάτω τύπους:

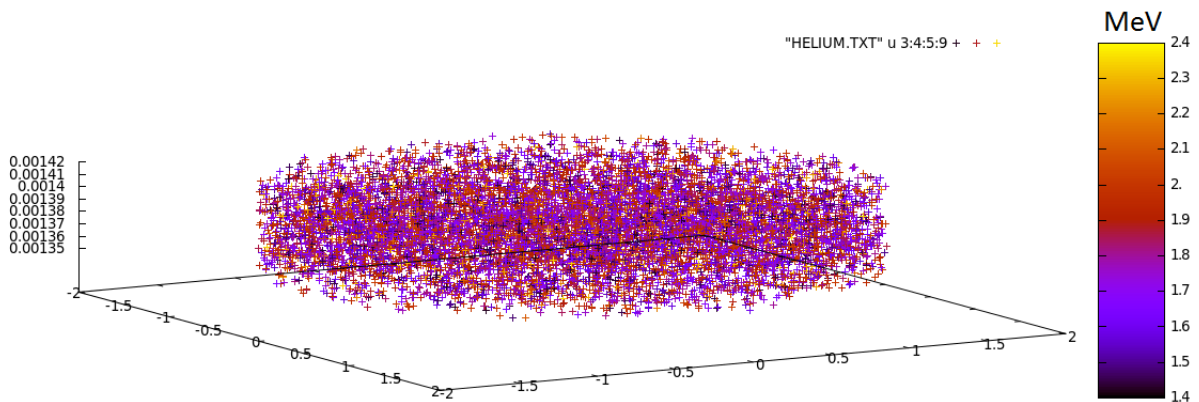
$$\begin{aligned}u_z &= \cos \theta \\u_x &= \cos \varphi \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \theta} \\u_y &= \sin \varphi \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \theta}\end{aligned}$$

Στην συνέχεια ανάλογα με την γωνία θ βρίσκουμε σύμφωνα με την κινηματική την γωνία θ' για το ^7Li και προσδίδουμε τις κατάλληλες ενέργειες στα δύο σωματίδια ώστε να συμπληρώσουμε την τελευταία στήλη. Στους παραπάνω τύπους χρησιμοποιώντας όπου $\theta \rightarrow \theta'$ και όπου $\phi \rightarrow \phi + \pi$ εξάγουμε και την διεύθυνση του ^7Li . Τέλος διαλέγουμε τυχαία μία θέση μέσα στο ^{10}B ως κοινή «αρχή» για τα δύο σωματίδια και συμπληρώνουμε τις στήλες 3,4,5. Φυσικά οι στήλες 1 και 2 είναι το Z και το A του ^4He και του ^7Li . Η κινηματική φυσικά όπως είδαμε αλλάζει ανάλογα με την ενέργεια του νετρονίου και το είδος της αντίδρασης που γίνεται. Έτσι για κάθε πείραμα έπρεπε να εισαγάγουμε ξανά τους αντίστοιχους πίνακες κινηματικής.

Για το κάθε σωματίδιο δημιουργήσαμε και από ένα ξεχωριστό αρχείο txt με τις πληροφορίες που εξάγαμε παραπάνω. Στην συνέχεια εξεργαστήκαμε την ρουτίνα Source του Fluka έτσι ώστε να «γεννάει» ταυτόχρονα τα δύο σωματίδια, διαβάζοντας τα παραπάνω αρχεία txt. Στην **Εικόνα 3.1** φαίνεται μια τρισδιάστατη απεικόνιση των τιμών από τις στήλες 6, 7, 8, οι οποίες είναι στην ουσία οι τιμές των συντεταγμένων του



Εικόνα 3.1: Τρισδιάστατη αναπαράσταση των τιμών των στηλών 6, 7, 8, σε σχέση με τις τιμές της ενέργειας της στήλης 9

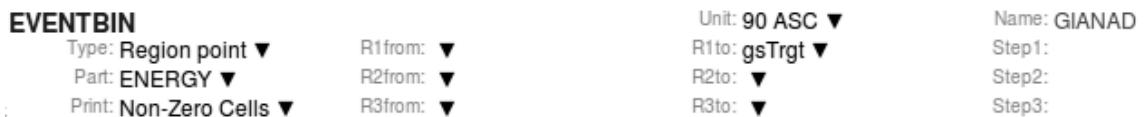


Εικόνα 3.2: Τρισδιάστατη αναπαράσταση των τιμών των στηλών 3,4,5, σε σχέση με τις τιμές της ενέργειας της στήλης 9

διανύσματος της ταχύτητας των σωματιδίων άλφα με κέντρο την αρχή της σφαίρας. Στην κλίμακα χρώματος παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας που προσδίδουμε στο σωματίδιο από τις τιμές της στήλης 9. Οι συγκεκριμένες τιμές αφορούν την περίπτωση που έχουμε 400keV νετρόνια και περιέχουν την $(n,\alpha 0)$ και την $(n,\alpha 1)$ καθώς και τη γωνιακή κατανομή όπως προβλέπεται από την θεωρία. Όπως βλέπουμε οι τιμές αυτές ακολουθούν το γράφημα της κινηματικής της **Εικόνας 1.10**, ενώ παράλληλα είναι φανερή η προτίμηση στις χαμηλές ενέργειες καθώς τα σωματίδια με χαμηλότερη ενέργεια είναι αυτά που αντιστοιχούν στην αντίδραση $(n,\alpha 1)$. Ακόμα είναι εμφανής και η προτίμηση στις εμπρόσθιες γωνίες, πράγμα το οποίο είναι λογικό αφού έχουμε συμπεριλάβει την διαφορική ενεργό διατομή της αντίδρασης. Στην **Εικόνα 3.2** φαίνονται τα σημεία γέννησης (στήλες 3, 4, 5) των σωματιδίων σε αλλοιωμένες αναλογίες, καθώς η z συνιστώσα είναι πολύ μικρότερη από τις υπόλοιπες.

Τα κατώφλια ενέργειας στα οποία το πρόγραμμα προσομοιώνει τις φυσικές διεργασίες, όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, την σκέδαση Compton καθώς και αυτά για τα οποία το πρόγραμμα παράγει και παρακολουθεί τα ηλεκτρόνια, τα φωτόνια και τις ακτίνες δέλτα, τέθηκαν στο 1KeV. Στις ενέργειες κάτω από αυτό το κατώφλι, το πρόγραμμα θεωρεί ότι όλη η ενέργεια εναποτέθηκε στο συγκεκριμένο σημείο στο οποίο για παράδειγμα ένα ηλεκτρόνιο έμεινε με ενέργεια 1KeV.

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η κάρτα EVENTBIN (**Εικόνα 3.3**) η οποία δίνει εντολή στο FLUKA να παρακολουθεί την πορεία κάθε αρχικού σωματιδίου ξεχωριστά (Region point) και να δίνει σαν αρχείο εξόδου ένα αρχείο πολύ μεγάλου μεγέθους (90 ASC) το οποίο αναφέρει ξεχωριστά για το κάθε αρχικό σωματίδιο πόση ενέργεια (ENERGY) εναπόθεσε στην ενεργή περιοχή (gsTrgt).

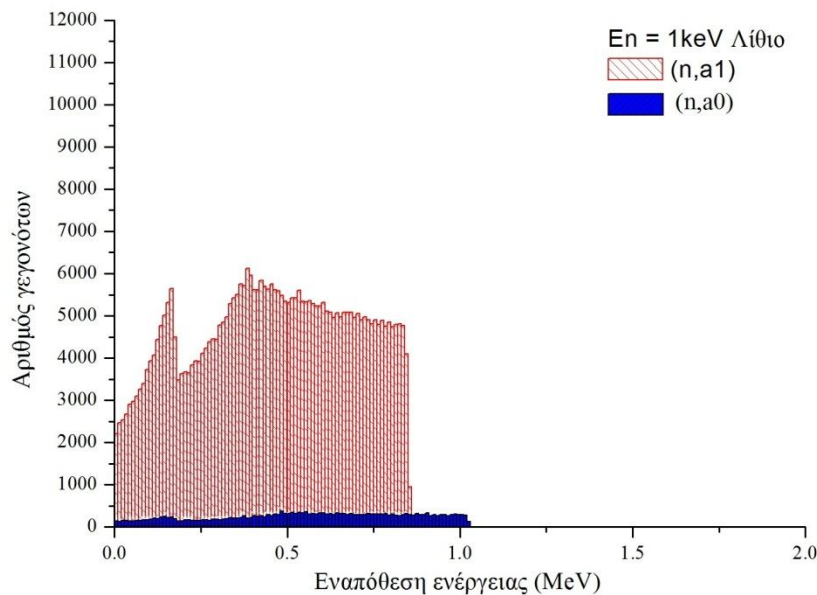
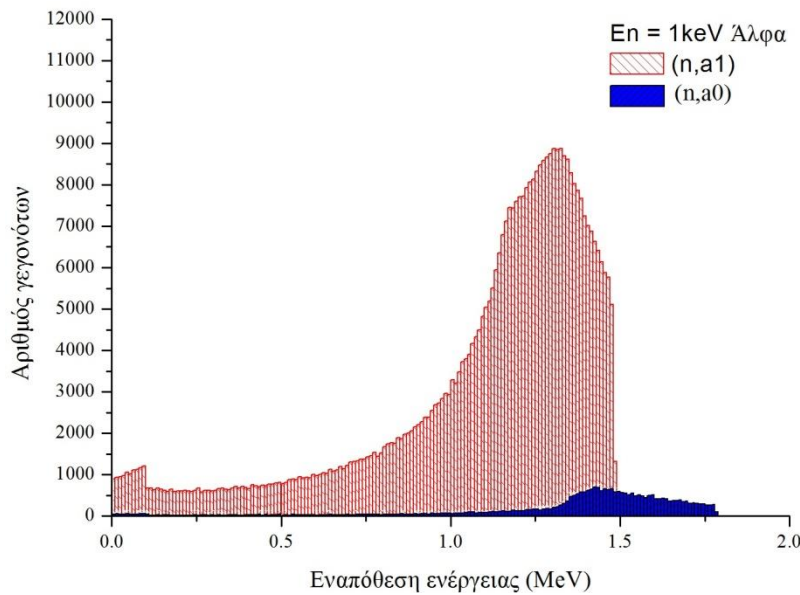


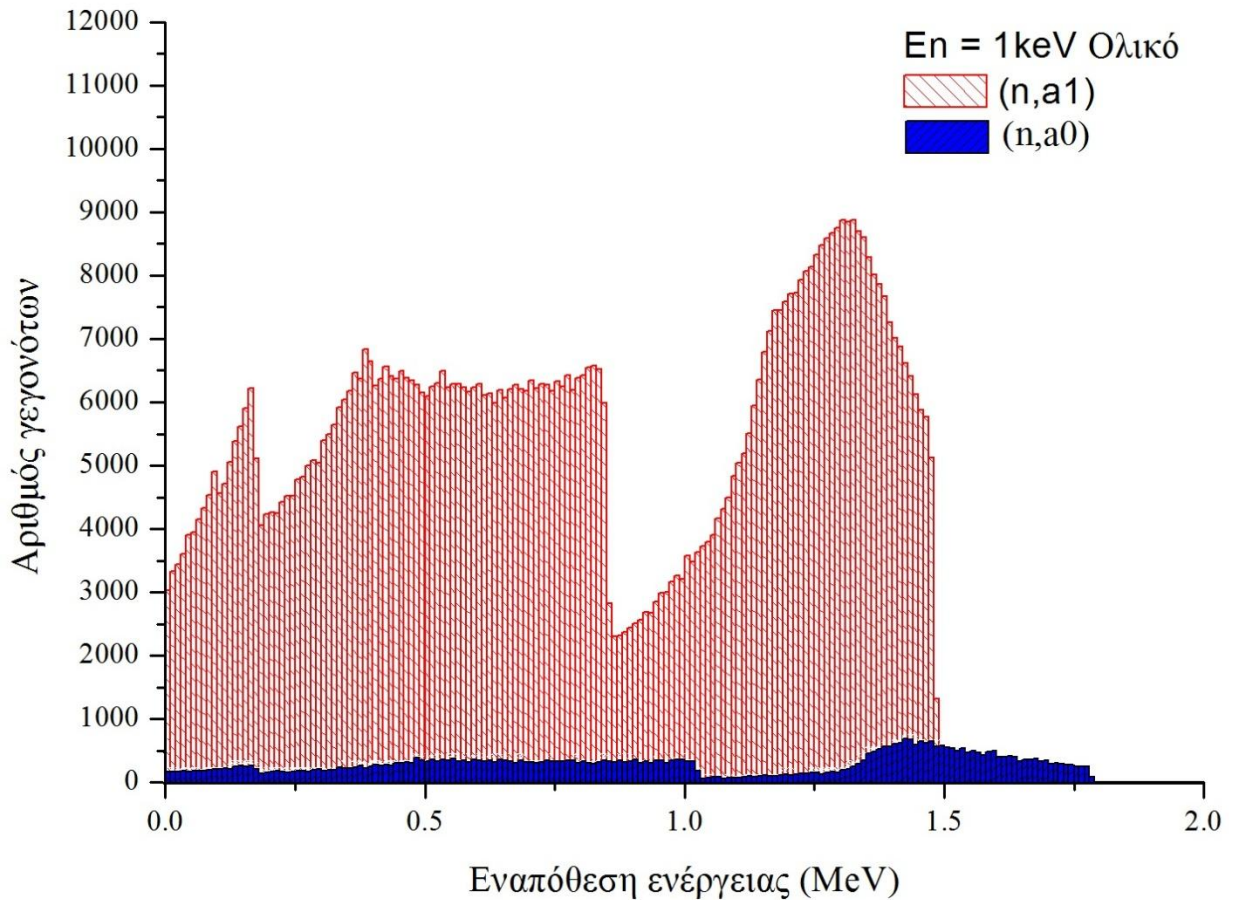
Εικόνα 3.3: Η κάρτα EVENTBIN για ανίχνευση εναποτιθέμενης ενέργειας

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή ιστογραμμάτων όπου στον ένα άξονα έχουμε τον αριθμό των γεγονότων και στον άλλον το αντίστοιχο εύρος ενέργειας μήκους πέντε κιλοηλεκτρονιοβόλτ (5 KeV). Για παράδειγμα στο κελί δέκα αντιστοιχούν γεγονότα σωματιδίων τα οποία εναπόθεσαν ενέργειες από 45 έως 50 KeV. Επίσης για της ανάγκες του πειράματος έγιναν πάρα πολλές, και διαφορετικές προσομοιώσεις με διαφορετικές ενέργειες και επιμέρους δοκιμές για την εγκυροποίηση των αποτελεσμάτων, αλλά παρακάτω θα παρουσιαστούν μόνο τα κυριότερα αποτελέσματα τα οποία είναι και άμεσα συγκρίσιμα με τα πειραματικά.

3.2.1 Αποτελέσματα με ενέργεια νετρονίων 1 keV

Παρακάτω παραθέτουμε τα αποτελέσματα τις προσομοίωσης για νετρόνια ενέργειας 1keV. Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων «τρέξαμε» από τρεις προσομοιώσεις για την κάθε ενέργεια. Μία για την κάθε αντίδραση, (n,a0) και (n,a1) καθώς και μία συνολική. Επίσης, ανιχνεύαμε την συνολική ενέργεια που εναποτέθηκε στην ενεργό περιοχή και από τα δύο σωματίδια, αλλά και ξεχωριστά ώστε να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε την συνεισφορά από κάθε διαφορετικό παράγοντα. Τέλος θα παρουσιαστούν για λόγους σύγκρισης και πειραματικά δεδομένα από το n_TOF.





Εικόνα 3.4: Τελικά αποτελέσματα για $E_n=1\text{keV}$

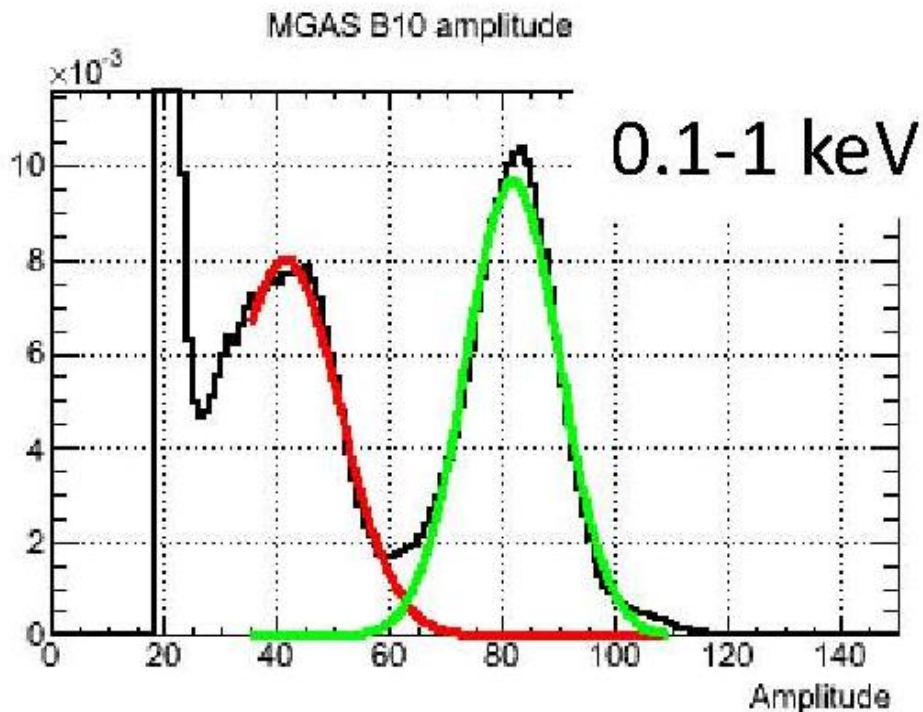
Παρατηρήσεις:

Στα πρώτα δύο γραφήματα φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τα σωματίδια άλφα και τους πυρήνες λιθίου ξεχωριστά. Στα σωματίδια άλφα παρατηρείται μία άνοδος στον αριθμό των γεγονότων που αφήνουν ενέργεια κοντά στη μέγιστη των σωματιδίων άλφα. Αυτό είναι λογικό καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία στην οποία «γεννιούνται» τα σωματίδια τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που χάνουν μέσα στο ίδιο το βόριο. Από την άλλη μεριά όμως η κορυφή της καμπύλης δεν είναι στη μέγιστη ενέργεια καθώς το μήκος του ανιχνευτή δεν είναι αρκετό ώστε να σταματήσει τα σωματίδια με μέγιστη ενέργεια τα οποία φεύγουν σε μικρές γωνίες και άρα διανύουν την μικρότερη δυνατή απόσταση στον ανιχνευτή. Έτσι αφήνουν λιγότερη ενέργεια μέσα στον ανιχνευτή από αυτή που έχουν και συνεχίζουν την πορεία τους εκτός ενεργού περιοχής.

Για το λίθιο οι παραπάνω παρατηρήσεις ισχύουν με την διαφορά ότι τα σωματίδια χάνουν πολύ περισσότερη ενέργεια μέσα στο βόριο αντί για τα άλφα, με αποτέλεσμα η ενέργεια που αφήνουν να εξαρτάται πάρα πολύ από το βάθος μέσα στο

βόριο στο οποίο γεννιούνται. Επίσης παρατηρείται μία κορυφή στις χαμηλές ενέργειες η οποία οφείλεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του βορίου. Δηλαδή, επειδή η μία διάσταση του βορίου είναι πολύ μικρότερη από τις άλλες, υπάρχει μια κρίσιμη γωνία πάνω από την οποία τα σωματίδια χάνουν την περισσότερη ενέργειά τους μέσα στο ίδιο το βόριο. Σε εκείνη την γωνία δημιουργείται αυτή η κορυφή στις μικρές ενέργειες.

Τέλος, βλέπουμε το τελικό αποτέλεσμα και των δύο σωματιδίων μαζί, το οποίο θα είναι και το ιστόγραμμα που θα δημιουργήσει το τελικό πειραματικό φάσμα. Επιπλέον, και στα τρία διαγράμματα βλέπουμε την συνεισφορά της αντίδραση (n_0, α), η οποία είναι σε χαμηλό ποσοστό όπως είπαμε στο **Κεφάλαιο 1**, αλλά παίζει σημαντικό ρόλο στην τελική διαμόρφωση του φάσματος καθώς και κύριο ρόλο στα γεγονότα με μεγάλη εναπόθεση ενέργειας. Παρακάτω παρουσιάζεται το πειραματικό φάσμα από το πείραμα στο n_TOF .

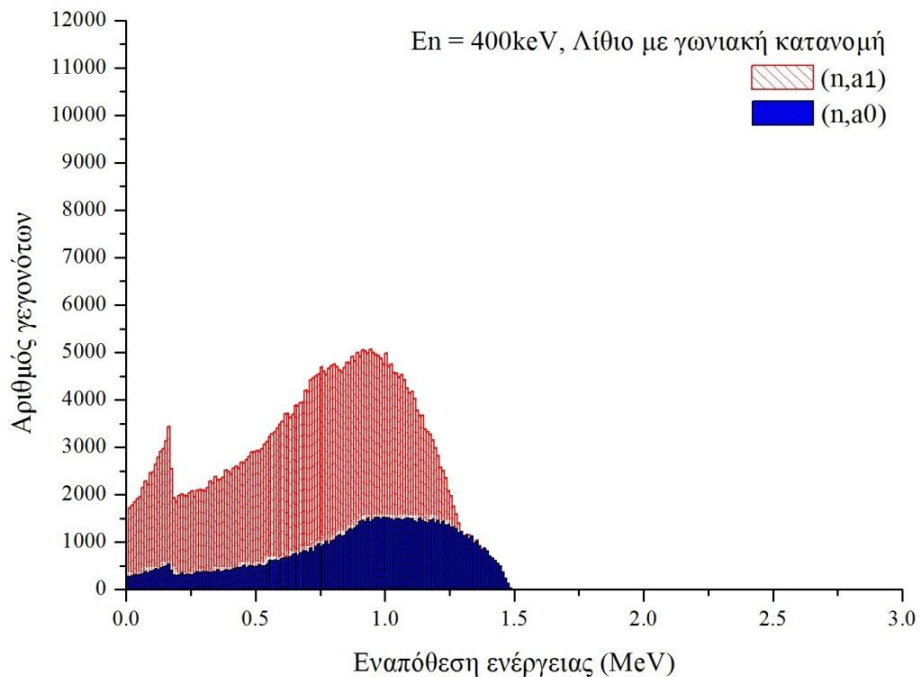
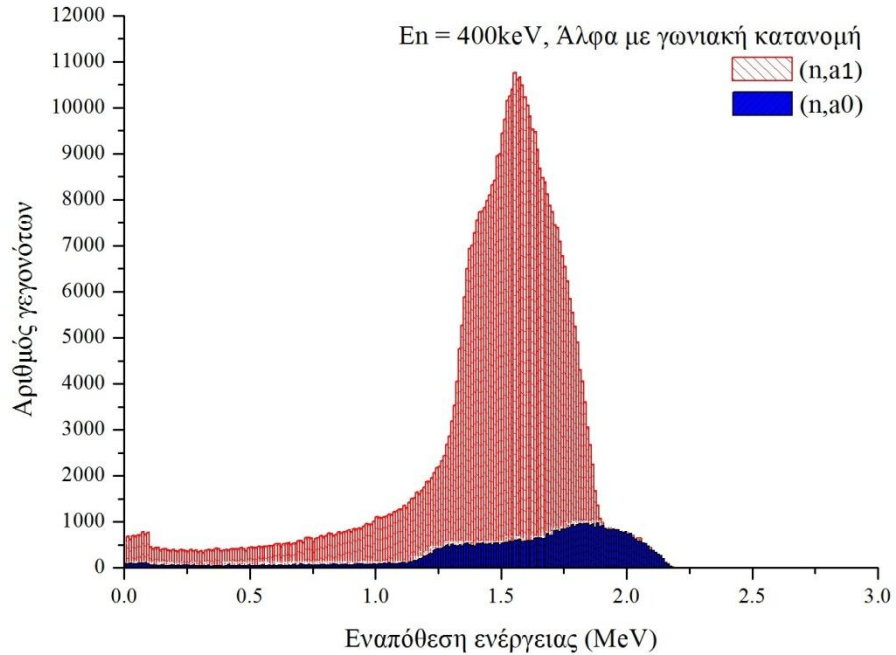


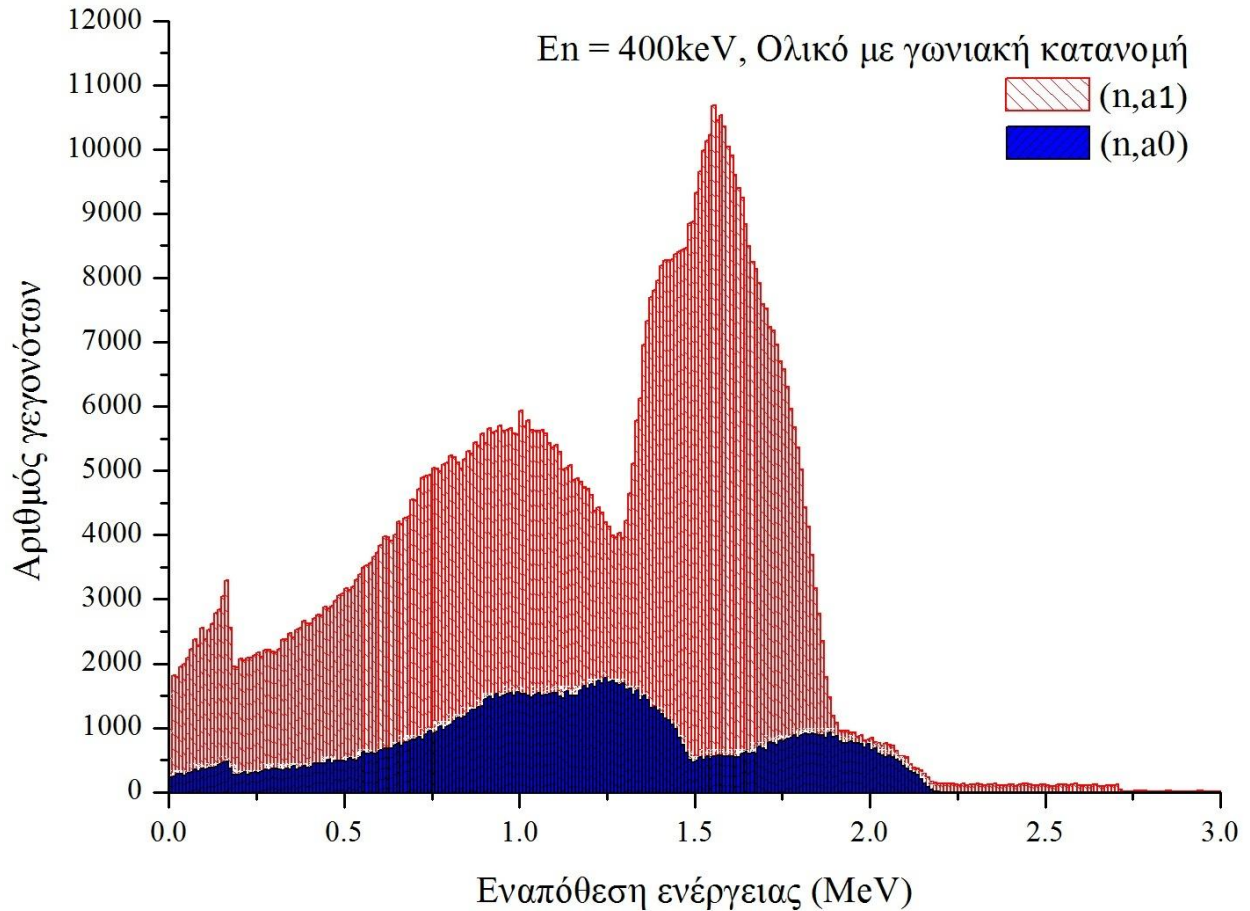
Εικόνα 3.4: Πειραματικό φάσμα από το n_TOF για ενέργειες νετρονίων 0.1-1 keV (μαύρη γραμμή)

Παρατηρούμε, μία πολύ καλή συμφωνία της θεωρητικής προσέγγισης της αντίδρασης με τα πειραματικά δεδομένα. Έτσι μπορούμε με ασφάλεια να εκτιμήσουμε ποιο είναι το ποσοστό των σωματιδίων τα οποία χάνονται στο πειραματικό φάσμα λόγω μεγάλου υποβάθρου στις χαμηλές ενέργειες, και έτσι να εξάγουμε πόσα τελικά πραγματικά γεγονότα είχαμε, έτσι ώστε γνωρίζοντας την ενεργό διατομή της αντίδρασης να βρούμε τον αρχικό αριθμό προσπιπτόντων νετρονίων.

3.2.2 Αποτελέσματα με ενέργεια νετρονίων 400keV

Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ενέργεια νετρονίων 400keV. Επειδή οι τιμές της διαφορικής ενεργού διατομής προέρχονται από μία και μόνο δημοσίευση[11], επιλέξαμε εκτός από αποτελέσματα με γωνιακή εξάρτηση να παρουσιάσουμε και αποτελέσματα με ισοτροπική κατανομή των σωματιδίων.





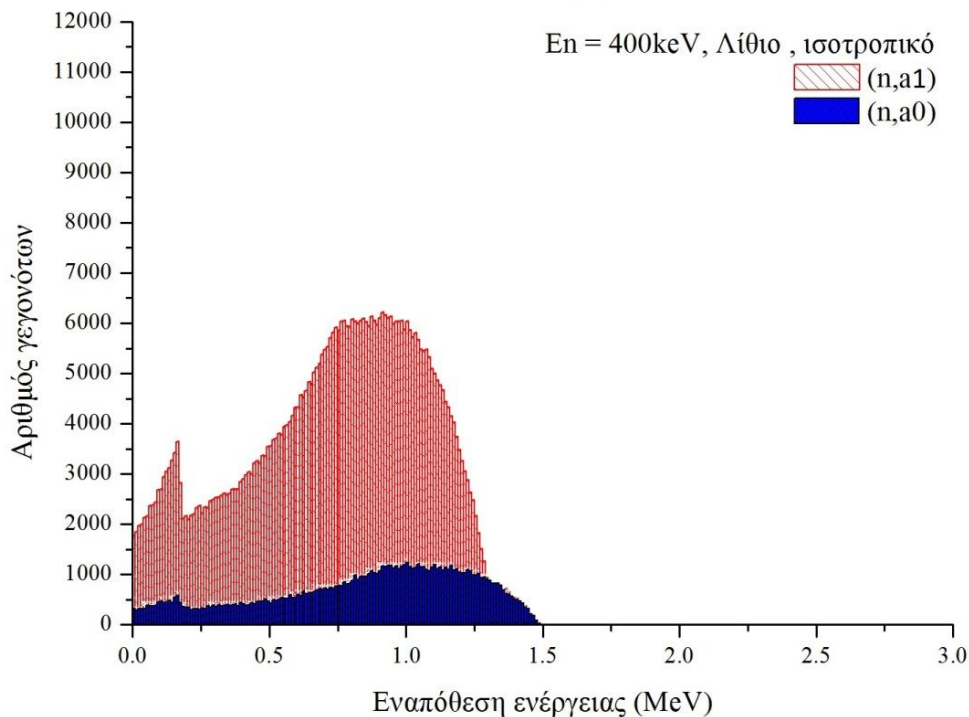
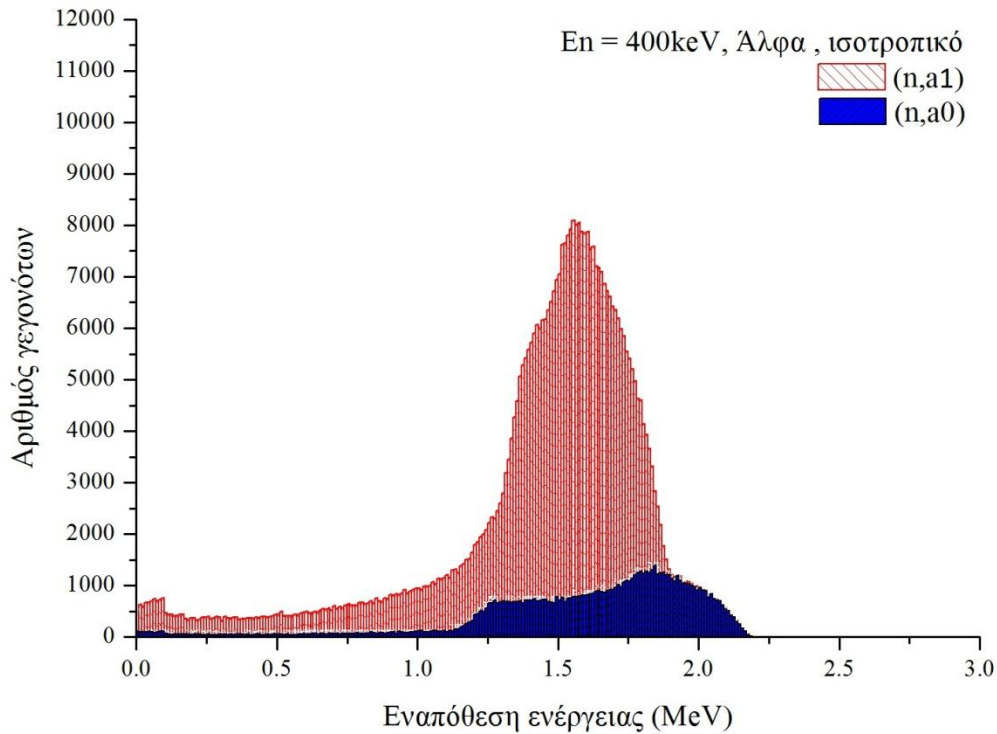
Εικόνα 3.5: Τελικά αποτελέσματα για $E_n=400\text{keV}$ με γωνιακή κατανομή

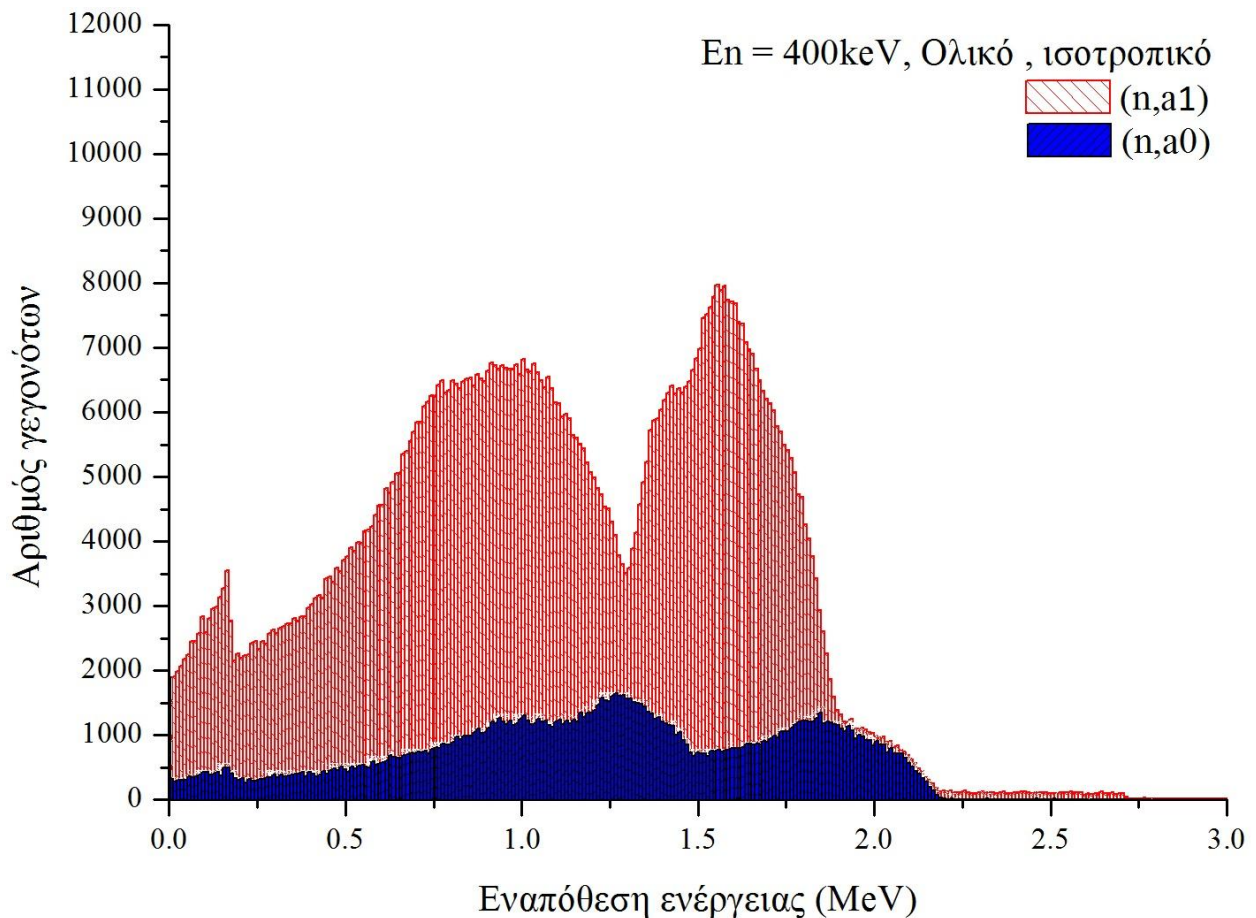
Παρατηρήσεις:

Όπως και προηγουμένως, στα πρώτα δύο γραφήματα φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τα σωματίδια άλφα και τους πυρήνες λιθίου ξεχωριστά. Οι παρατηρήσεις είναι σχεδόν ίδιες με την περίπτωση $E_n=1\text{keV}$ με την διαφορά ότι λόγω της μεγαλύτερης ενέργειας των σωματιδίων άλφα παρατηρείται πιο απότομη κορυφή στις μεγάλες ενέργειες, καθώς και ότι το ποσοστό των σωματιδίων που αφήνουν ενέργεια μικρότερη από την μέγιστη αυξήθηκε σημαντικά. Επίσης, λόγω της γωνιακής κατανομής υπάρχει μια προτίμηση στο να σκεδάζονται περισσότερα σωματίδια άλφα προς τις μικρές γωνίες, και άρα μέσα στην ενεργό περιοχή, με αποτέλεσμα τα σωματίδια άλφα να είναι περισσότερα από τους πυρήνες λιθίου και η δεύτερη κορυφή πολύ υψηλότερη από την πρώτη. Τέλος, στο τελευταίο διάγραμμα παρατηρούμε ότι υπάρχουν γεγονότα με ενέργεια μεγαλύτερη από την μέγιστη των σωματιδίων. Αυτή η εναπόθεση ενέργειας οφείλονται σε ζεύγη άλφα-λιθίου που εισέρχονται ταυτόχρονα στην ενεργό περιοχή, και έτσι η τελική εναπόθεση που

καταγράφεται είναι το άθροισμα των επιμέρους ενεργειών του σωματιδίου άλφα και του πυρήνα λιθίου.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ισοτροπική κατανομή των σωματιδίων, με σκοπό την σύγκρισή τους με την γωνιακή κατανομή, καθώς και με τα πειραματικά αποτελέσματα που θα δοθούν παρακάτω.



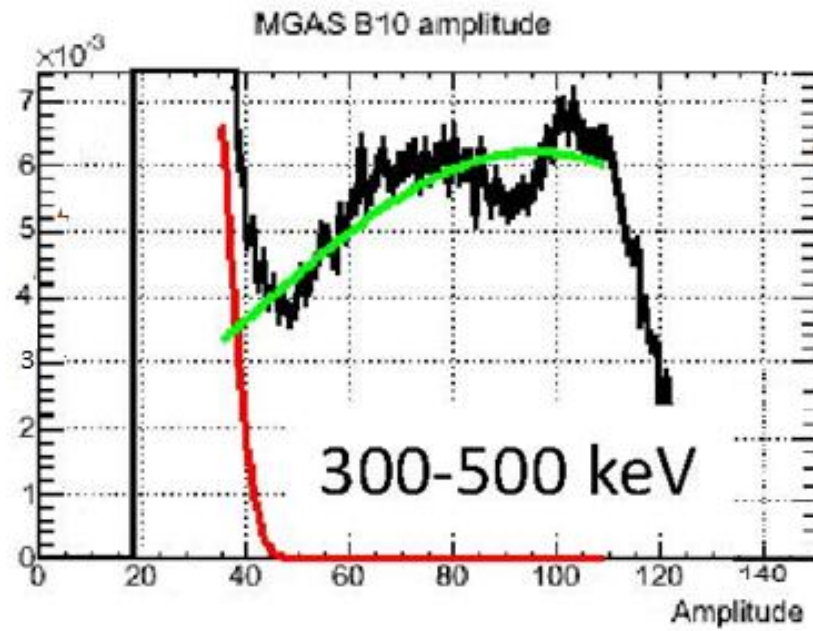


Εικόνα 3.5: Τελικά αποτελέσματα για $E_n=400\text{keV}$, με ισοτροπική κατανομή

Παρατηρήσεις:

Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της γωνιακής κατανομής, βλέπουμε, όπως ήταν αναμενόμενο, αύξηση της συνεισφοράς των σωματιδίων του λιθίου με αποτέλεσμα την εξίσωση του ύψους των δύο κορυφών. Επίσης, παρατηρείται και αύξηση της συνεισφοράς της αντίδρασης (n,a_0) , αφού η μεγαλύτερη ανομοιομορφία της γωνιακής κατανομής είναι στην αντίδραση (n,a_1) , η οποία στην ισοτροπική κατανομή εξομαλύνεται. Ακόμη, και στις δύο γωνιακές κατανομές παρατηρούμε ότι στις χαμηλές ενέργειες κυρίαρχο ρόλο παίζουν οι πυρήνες λιθίου. Τέλος, παρατηρούμε ότι λόγω της αύξησης της ενέργειας καθώς και λόγω της αύξησης του εύρους ενεργειών, ο διαχωρισμός των ενεργειών του λιθίου και των άλφα δυσκολεύει. Έτσι στις μεγαλύτερες ενέργειες νετρονίων ο διαχωρισμός των δύο κορυφών αναμένεται να καταστεί αδύνατος. Παρ' όλα αυτά επειδή στο πείραμα δεν υπάρχει ανάγκη καταγραφής του αριθμού των άλφα και των λιθίων ξεχωριστά, παρά μόνο το άθροισμά τους, αυτό δεν μας προκαλεί προβλήματα.

Στην **Εικόνα 3.5** φαίνεται το πειραματικό φάσμα στην ενέργεια των 400keV.



Εικόνα 3.5: Πειραματικό φάσμα από το n_TOF για ενέργειες νετρονίων 300-400 keV (μαύρη γραμμή)

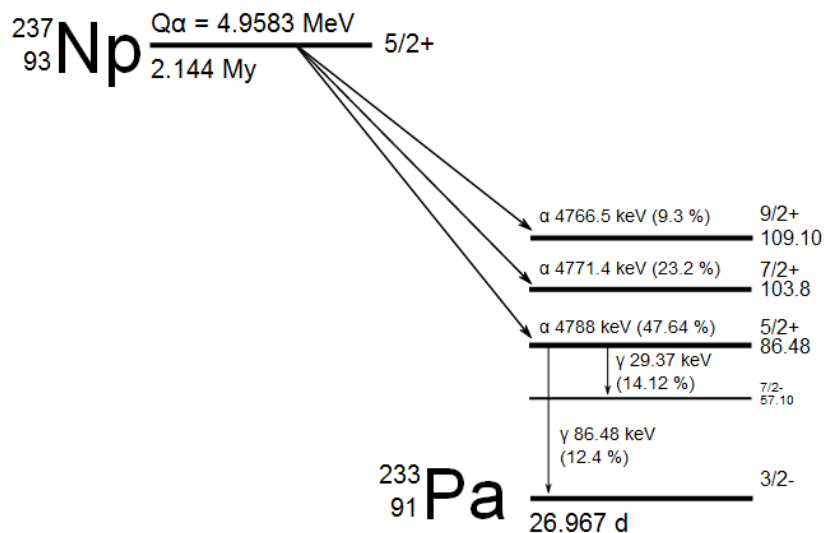
Βλέπουμε ότι τα πειραματικά δεδομένα ταιριάζουν πάρα πολύ καλά με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ιστροπική κατανομή. Παρατηρούμε μια ποιοτική ομοιότητα η οποία μας ενθαρρύνει ώστε να εκτιμήσουμε με ακρίβεια το ποσοστό των σωματιδίων που χάνονται μέσα στο υψηλό υπόβαθρο.

Κεφάλαιο 4^ο: Αποτελέσματα προσομοίωσης των θραυσμάτων σχάσης του ^{237}Np

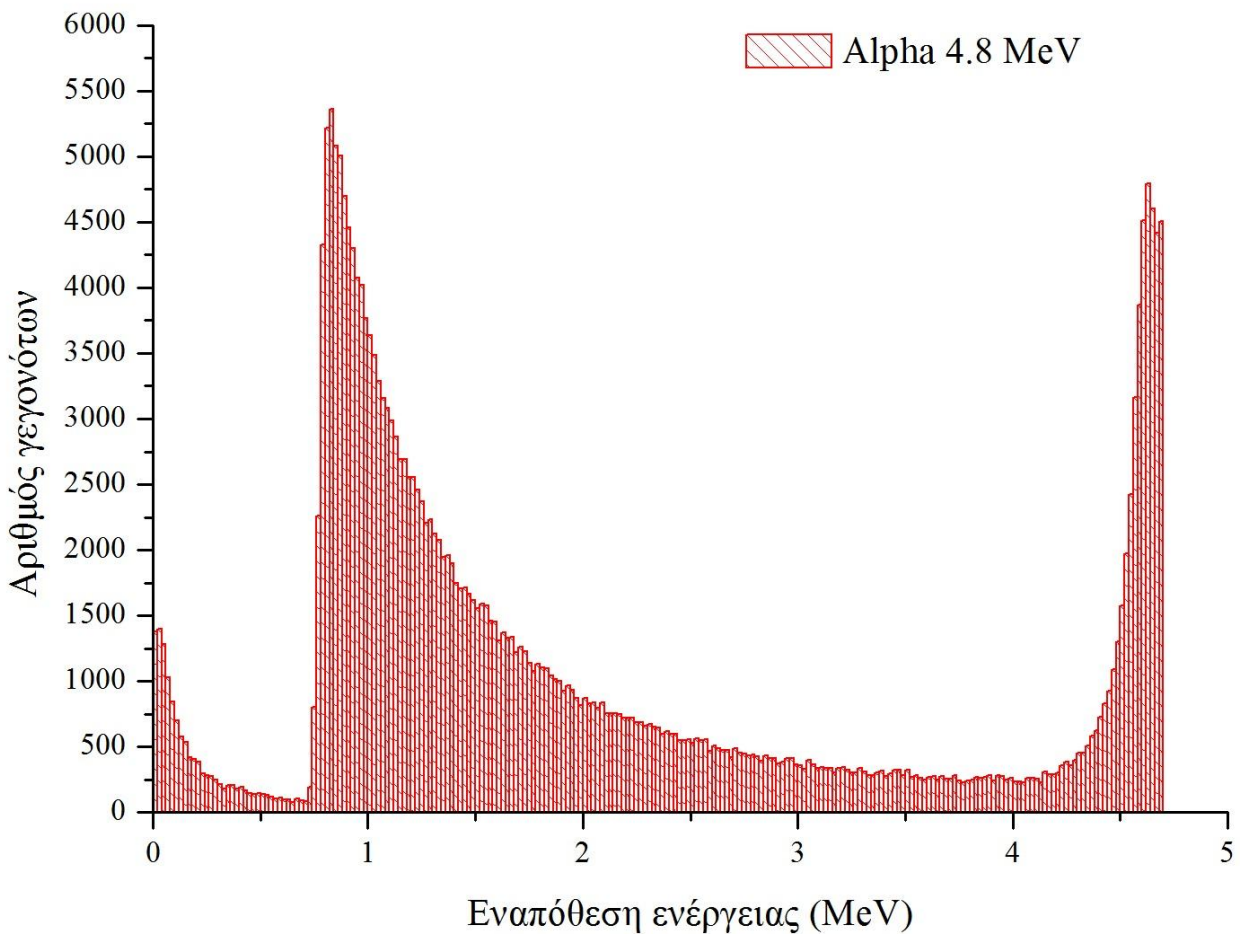
4.1 Προσομοίωση σωματιδίων άλφα του ^{237}Np

Όπως βλέπουμε στην **Εικόνα 4.1** το ^{237}Np από μόνο του αποδιεγείρεται σε ^{233}Pa με εκπομπή σωματιδίων άλφα περίπου 4.8 MeV. Το γεγονός αυτό έχει θετικές και αρνητικές επιπτώσεις στο πείραμα. Οι αρνητικές, ευτυχώς περιορίζονται στο γεγονός ότι αυξάνεται η ενέργεια υποβάθρου, αφού τα άλφα πλέον θεωρούνται υπόβαθρο, και έτσι υπάρχει περίπτωση να μπλέκονται στο φάσμα μαζί με τα θραύσματα σχάσης. Μέσα στις θετικές, περιέχεται και το γεγονός ότι με αυτή την αυθόρμητη αυτοδιέγερση του ^{237}Np είμαστε σε θέση να δοκιμάσουμε την καλή λειτουργία του ανιχνευτή, πριν τον εκθέσουμε στην δέσμη νετρονίων. Για τον σκοπό αυτό επιστρατεύτηκε η προσομοίωση ώστε να δούμε αν όντως η μορφή των φασμάτων ανταποκρίνεται στους θεωρητικούς υπολογισμούς.

Τα σωματίδια άλφα που παράχθηκαν από την ρουτίνα, ακολουθούν ισοτροπική κατανομή (αφού η εκπομπή είναι τυχαία), και έχουν ενέργεια 4.8 MeV. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης φαίνονται στην **Εικόνα 4.2**



Εικόνα 4.1: Αποδιέγερση του ^{237}Np σε ^{233}Pa

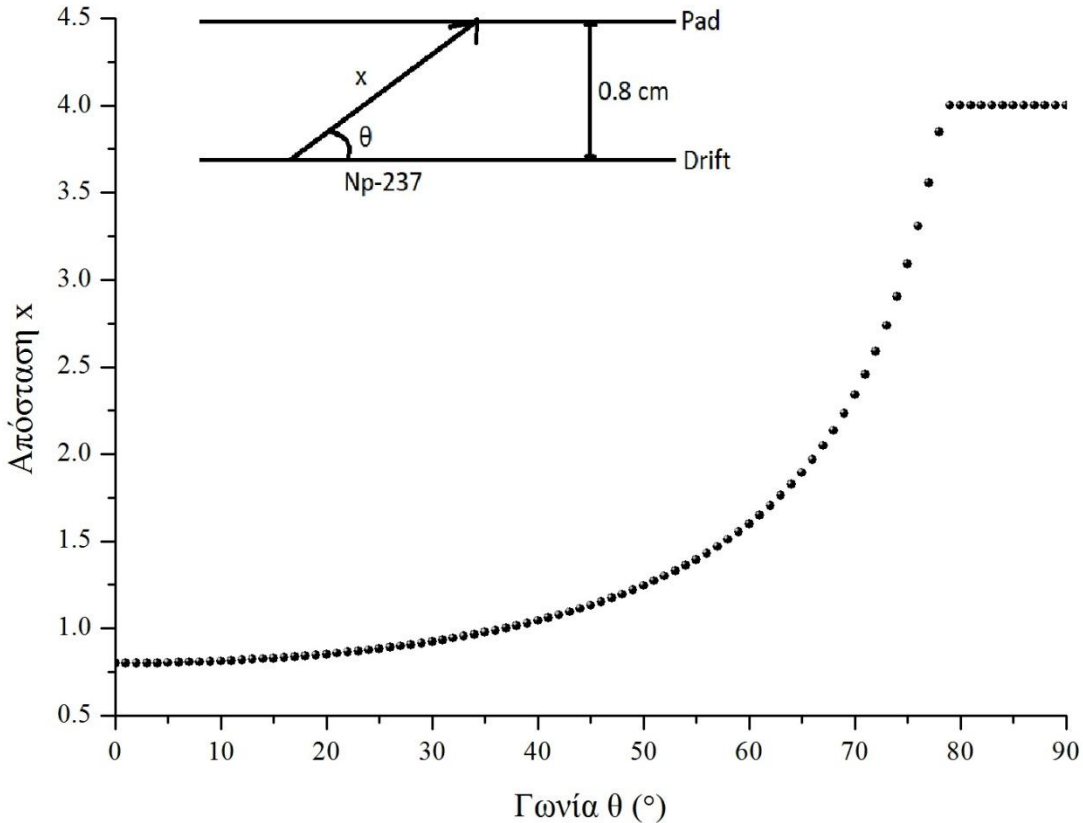


Εικόνα 4.2: Αποτέλεσμα της προσομοίωσης των σωματιδίων άλφα από την αποδιέγερση του ^{237}Np σε ^{233}Pa

Παρατηρήσεις:

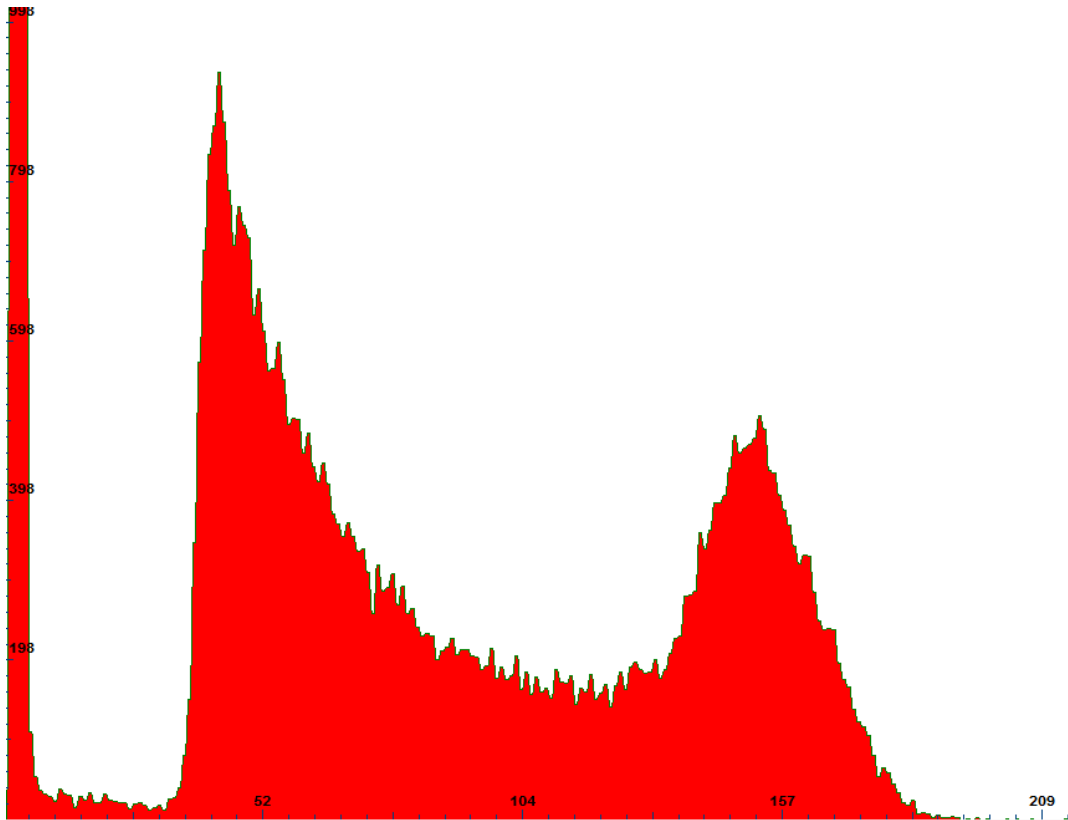
Αφού τα άλφα, που εκπέμπονται ιστροπικά, είναι μονοενεργειακά, κανείς θα περίμενε μια και μόνον κορυφή στα 4.8 MeV. Αυτό βέβαια θα ίσχυε αν η γεωμετρία του ανιχνευτή ήταν τέτοια ώστε να μπορούσε να σταματήσει όλα τα σωματίδια άλφα που εκπέμπονται και έτσι τα σωματίδια να αφήνουν όλη την ενέργειά τους μέσα στην ενεργό περιοχή. Στην δική μας περίπτωση όμως, η γεωμετρία όπως, είδαμε στο **Κεφάλαιο 2**, δεν παρέχει αναλογία στις διαστάσεις. Δηλαδή η μία διάστασή της είναι πολύ μικρότερη από τις άλλες δύο. Έτσι τα σωματίδια τα οποία εκπέμπονται σε μικρές γωνίες διανύουν μικρή απόσταση μέσα στον ανιχνευτή και άρα αφήνουν πολύ μικρό ποσοστό της ενέργειάς τους στην ενεργό περιοχή. Στην **Εικόνα 4.3** βλέπουμε ένα γράφημα της απόστασης (x) που διανύουν τα σωματίδια σε σχέση με την γωνία (θ) εκπομπής λαμβάνοντας υπόψη μας ότι η εμβέλεια των σωματιδίων άλφα μέσα σε

αέριο αργό είναι περίπου 4 cm. Όπως βλέπουμε για γωνίες μέχρι 70 μοίρες η απόσταση που διανύουν τα σωματίδια είναι λιγότερη από το μισό της εμβέλειας. Παρατηρούμε όμως ότι λόγω της γεωμετρίας η εμβέλεια αυξάνεται πάρα πολύ γρήγορα από τις 75 μοίρες και μετά. Το γεγονός αυτό εξηγεί και την απότομη δεύτερη κορυφή στην **Εικόνα 4.2**.



Εικόνα 4.3: Γράφημα της απόσταση που διανύουν τα σωματίδια στην ενεργό περιοχή σε σχέση με την γωνία εκπομπής θ

Τέλος στην **Εικόνα 4.4** βλέπουμε το πειραματικό φάσμα των σωματιδίων άλφα. Παρατηρούμε πολύ καλή ομοιότητα των πειραματικών με τα θεωρητικά φάσματα, ιδιαίτερα αν λάβουμε υπόψη μας ότι τα θεωρητικά είναι απλά ιστογράμματα ενώ τα πειραματικά έχουν μέσα και την συνάρτηση απόκρισης του ανιχνευτή. Επίσης η 'ουρά' στο πειραματικό φάσμα πιθανότατα οφείλεται και στην ταυτόχρονη ανίχνευση δύο ή και περισσότερων σωματιδίων άλφα με αποτέλεσμα την καταγραφή μεγαλύτερης από την μέγιστη ενέργειας. Το γεγονός αυτό μας δείχνει ότι και η προσομοίωση αλλά και ο ανιχνευτής παρουσιάζουν την αναμενόμενη συμπεριφορά. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των θραυσμάτων σχάσης για το ^{237}Np .



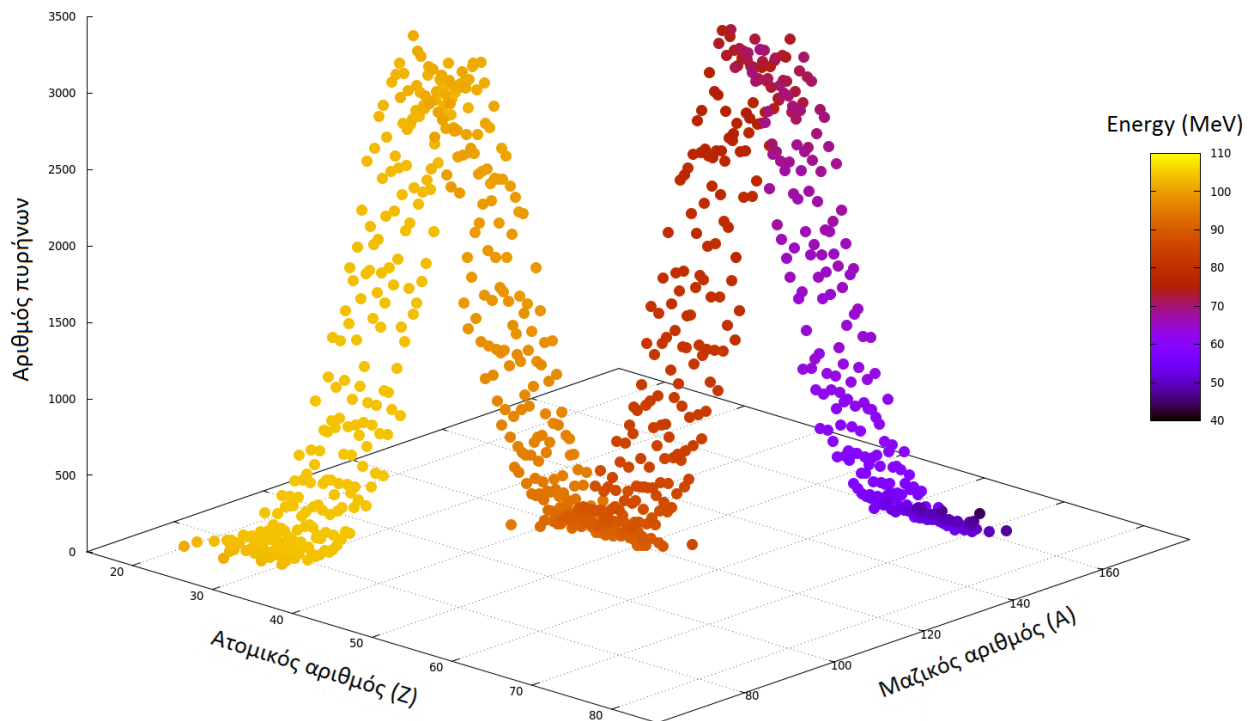
Εικόνα 4.4: Πειραματικό φάσμα των σωματιδίων άλφα από την αποδιέγερση του ^{237}Np σε ^{233}Pa

4.2 Παραγωγή θραυσμάτων σχάσης

Για την παραγωγή του αρχείου txt για τα θραύσματα σχάσης χρησιμοποιήθηκε μία τροποποιημένη έκδοση της ρουτίνας η οποία παίρνει υπόψη της τη θεωρία που αναφέραμε στο **κεφάλαιο 1**. Η λογική που ακολουθεί η ρουτίνα είναι η εξής. Με βάση την **Εικόνα 1.15** διαλέγουμε έναν μαζικό αριθμό A_1 για τον βαρύ πυρήνα από μία κανονική κατανομή με κεντροειδές το 139.5 και διασπορά $\sigma=5.5$ (όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.16**). Διαλέγουμε στην τύχη έναν αριθμό νετρονίων (N_{fiss}) ο οποίος θα παραχθεί, από 1 έως 3 και βρίσκουμε τον μαζικό αριθμό του ελαφρού πυρήνα με τον τύπο $A_2 = A_{(237)} + 1 - A_1 - N_{fiss}$. Ύστερα βρίσκουμε χρησιμοποιώντας τους παρακάτω τύπους τον ατομικό αριθμό Z' του πιο σταθερού πυρήνα με το αντίστοιχο A .

$$Z_s(A) = \frac{A}{2 + 0.0156A^{2/3}} \quad Z'_1 = 0.5 [Z + Z_s(A_1) - Z_s(A_2)]$$

Διαλέγουμε ένα τυχαίο $Z_1=Z'_1\pm 5$, ενώ το $Z_2=Z_{Np}-Z_1$ και έτσι έχουμε κατασκευάσει έναν βαρύ και έναν ελαφρύ πυρήνα. Τώρα απομένει να τους δώσουμε μια ενέργεια. Η ολική ενέργεια και των δύο θραυσμάτων προέρχεται από έναν προσεγγιστικό τύπο που εξάγαμε από το γράφημα της **Εικόνας 2.17**, ενώ η τελική ενέργεια των δύο βρέθηκε χρησιμοποιώντας τους τύπους **(2.1)**. Για την θέση και την διεύθυνση των σωματιδίων χρησιμοποιήθηκε η ίδια τεχνική για ιστροπική πηγή που χρησιμοποιήθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην **Εικόνα 4.5** φαίνεται μία τρισδιάστατη απεικόνιση του τελικού αποτελέσματος της παραγωγής των θραυσμάτων της σχάσης. Βλέπουμε στους άξονες χ, γ το Z και το A των βαρέων πυρήνων που παράχθηκαν. Στον άξονα Z βλέπουμε τον αριθμό των πυρήνων ενώ στην χρωματική κλίμακα παρουσιάζεται η ενέργεια που αποκτούν οι πυρήνες. Παρατηρούμε ότι όντως η κατανομή ακολουθεί την θεωρία και στον αριθμό των θραυσμάτων που δημιουργούνται αλλά και στις ενέργειες αφού όσο πιο ελαφρύς είναι ο πυρήνας τόσο περισσότερη ενέργεια αποκτά.

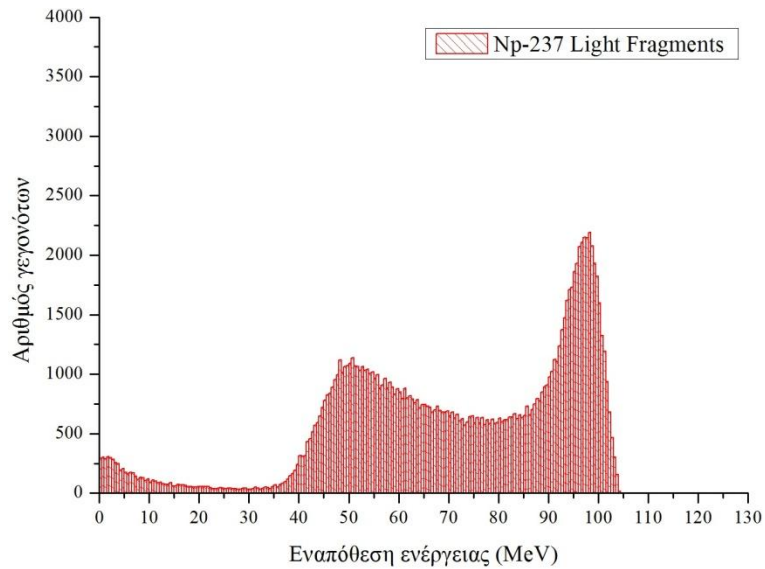


Εικόνα 4.5: Τρισδιάστατο γράφημα της παραγωγής των θραυσμάτων σχάσης

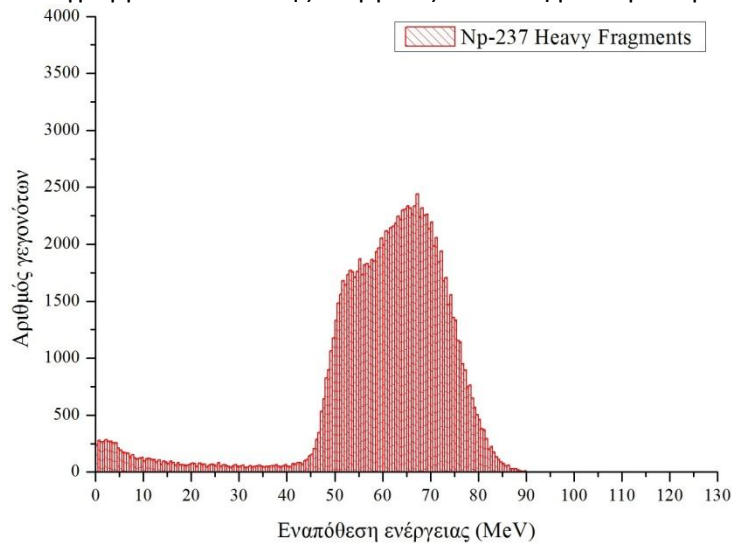
Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των θραυσμάτων σχάσης μαζί με τα πειραματικά για την αντίστοιχη σύγκριση.

4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης των θραυσμάτων σχάσης

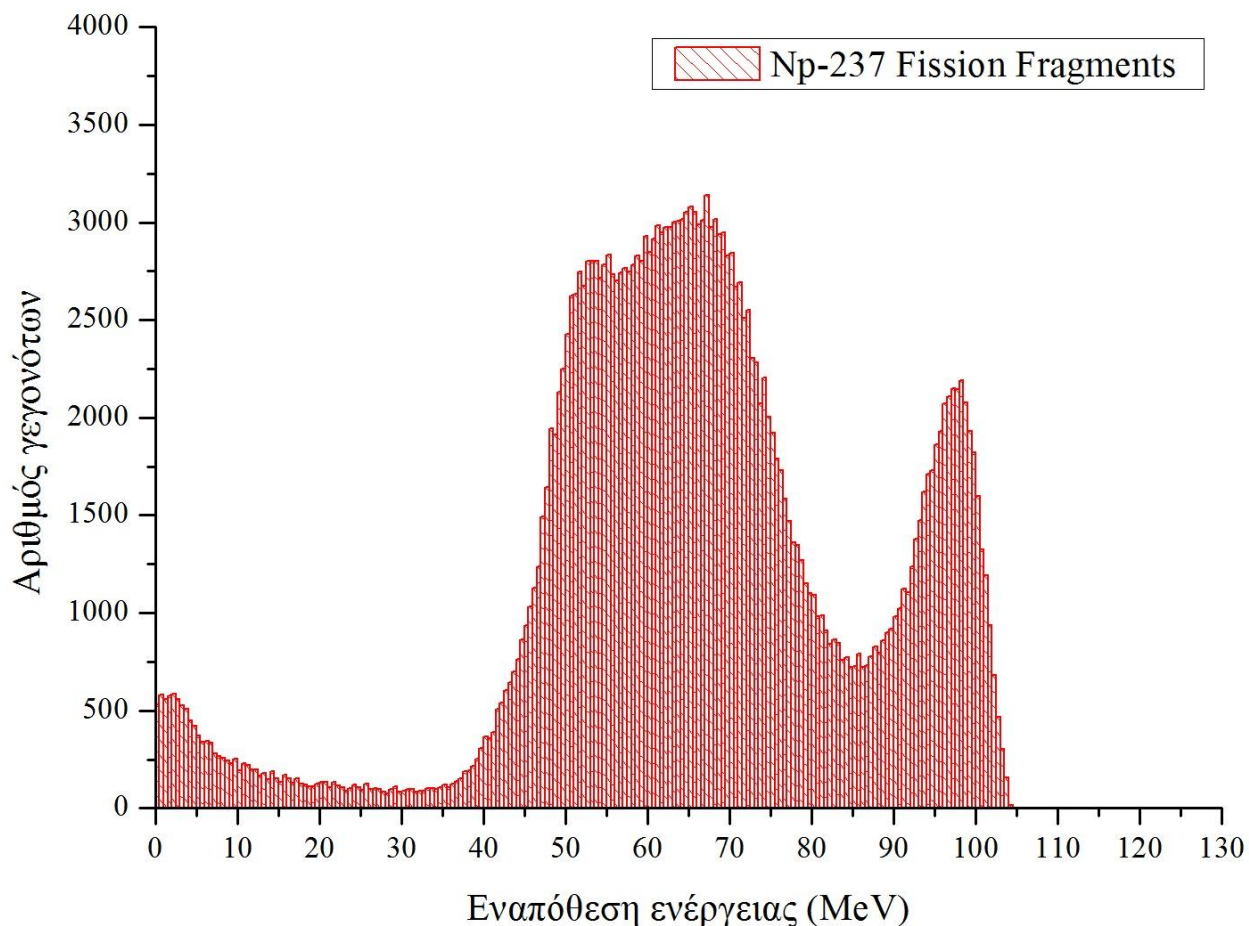
Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων θα παρουσιαστούν ξεχωριστά γραφήματα των βαρέων και των ελαφρών θραυσμάτων καθώς και το τελικό αποτέλεσμα. Στην **εικόνα 4.6** βλέπουμε το ιστόγραμμα εναπόθεσης ενέργειας από τα ελαφριά θραύσματα (Τα αριστερά της **εικόνας 4.5**) ενώ στην **εικόνα 4.7** για τα βαρέα θραύσματα (Τα δεξιά της **εικόνας 4.5**). Τέλος στην **εικόνα 4.8** παρουσιάζεται το τελικό φάσμα της προσομοίωσης το οποίο είναι και αυτό που θα συγκρίνουμε με το αναμενόμενο πειραματικό.



Εικόνα 4.6: Ιστόγραμμα εναπόθεσης ενέργειας των ελαφρών θραυσμάτων σχάσης



Εικόνα 4.7: Ιστόγραμμα εναπόθεσης ενέργειας των βαρέων θραυσμάτων σχάσης



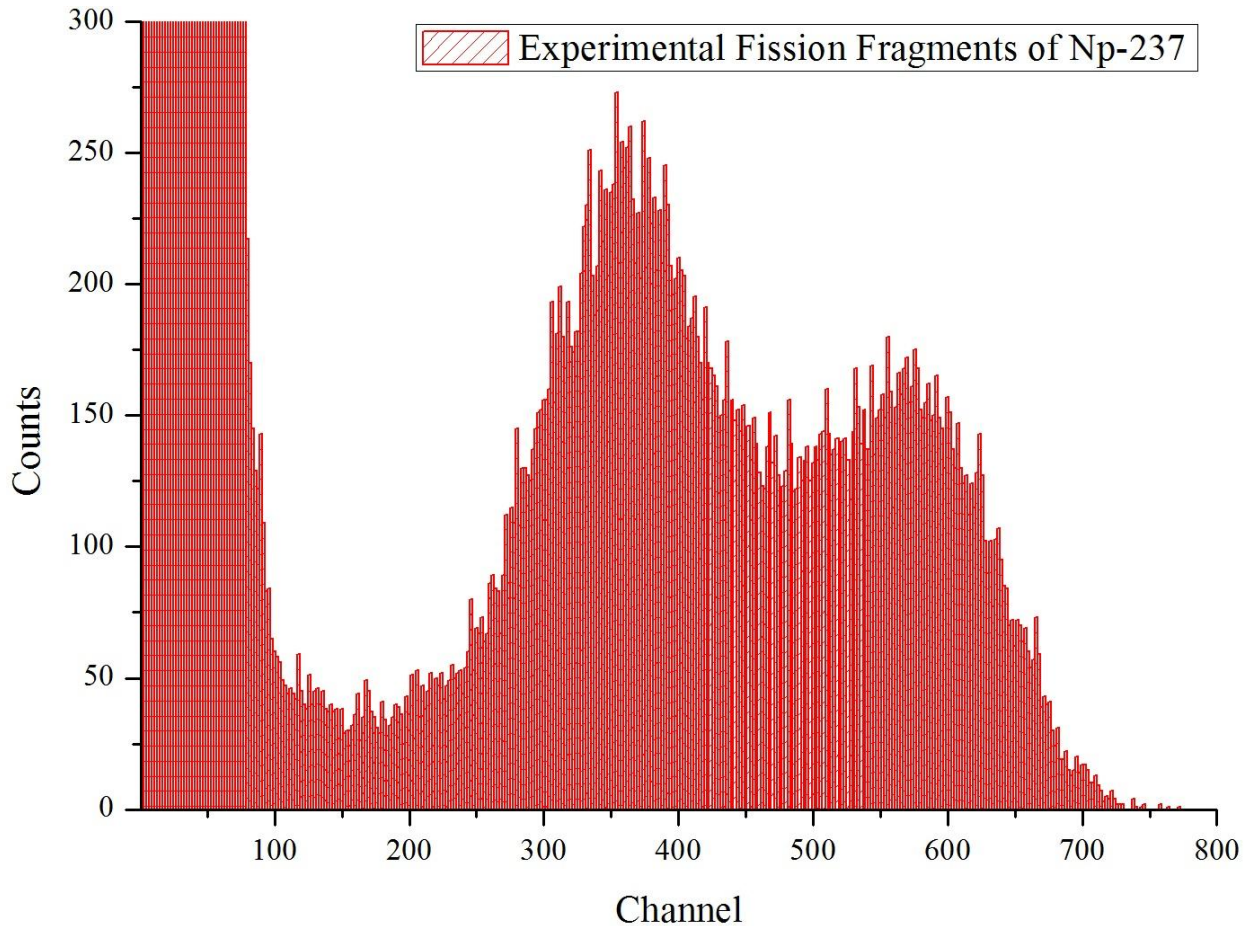
Εικόνα 4.8: Ιστόγραμμα εναπόθεσης ενέργειας όλων των θραυσμάτων της σχάσης του ^{237}Np

Παρατηρήσεις:

Βλέπουμε ότι το αποτέλεσμα των βαρέων θραυσμάτων (**Εικόνα 4.6**) είναι απόλυτα λογικό και σύμφωνο με την θεωρία καθώς η ενεργειακή διασπορά ακολουθεί αυτή της **Εικόνας 4.5**. Το αποτέλεσμα των ελαφρών θραυσμάτων (**Εικόνα 4.6**) εξηγείται αν παραδειγματιστούμε από το αντίστοιχο με τα σωματίδια άλφα. Όπως και πριν, η διαδρομή που διανύουν τα σωματίδια μέσα στην ενεργό περιοχή δεν είναι αρκετή ώστε να χάσουν όλη τους την ενέργεια, και έτσι δημιουργείται μία δεύτερη κορυφή σε χαμηλότερη ενέργεια. Το τελικό αποτέλεσμα είναι στην ουσία το άθροισμα των δύο προηγουμένων και είναι εκείνο το οποίο μας δίνει μια ιδέα για το πειραματικό φάσμα.

Στην **Εικόνα 4.9** φαίνεται το πειραματικό φάσμα των θραυσμάτων σχάσης του ^{237}Np . Συγκρίνοντας το πειραματικό με το θεωρητικό παρατηρούμε κάποιες διαφορές οι οποίες οφείλονται, όπως προείπαμε, στο γεγονός ότι το φάσμα εμπεριέχει μέσα την συνάρτηση απόκρισης του ανιχνευτή ενώ το θεωρητικό είναι ένα απλό ιστόγραμμα εναπόθεσης ενέργειας από τα σωματίδια που εκπέμπονται. Τέλος παρατηρούμε ότι

στις μικρές ενέργειες (στα μικρά κανάλια) υπάρχει ένα σκαλοπάτι το οποίο οφείλεται στα σωματίδια άλφα που εκπέμπονται από το ^{237}Np και τα οποία φαίνεται αν είναι πολλές τάξεις μεγέθους περισσότερα από τα θραύσματα σχάσης. Στο επόμενο κεφάλαιο θα βαθμονομήσουμε τον ανιχνευτή βρίσκοντας παράλληλα και την απόδοση του στα θραύσματα σχάσης.



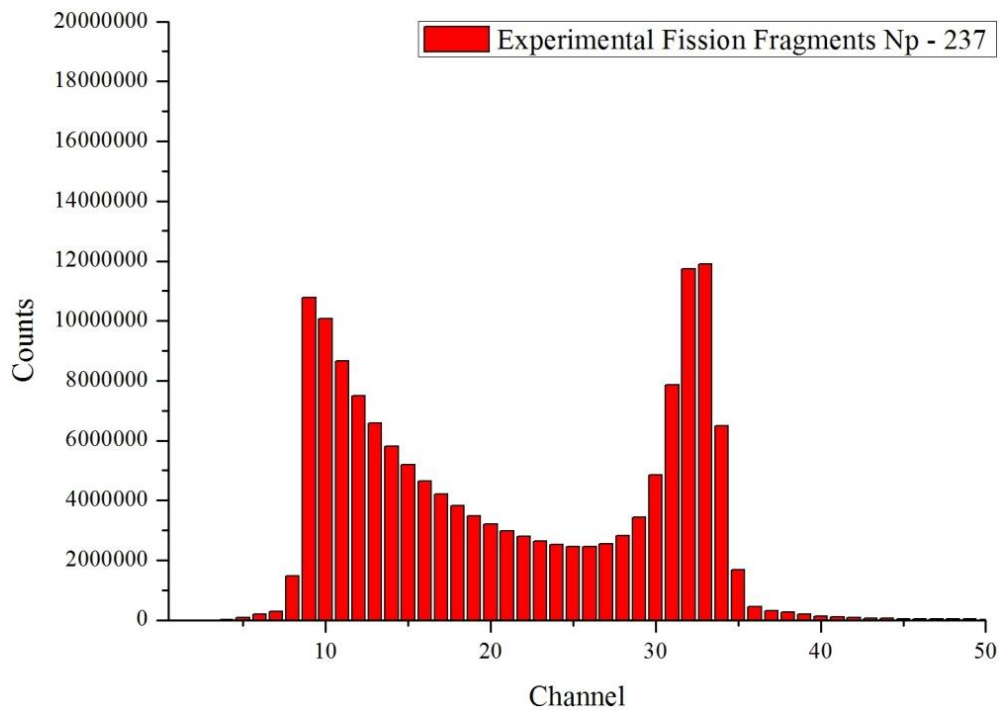
Εικόνα 4.9: Πειραματικό φάσμα των θραυσμάτων σχάσης του ^{237}Np

4.5 Βαθμονόμηση και υπολογισμός απόδοσης του ανιχνευτή.

Πολύ σημαντικό ρόλο στην συγκεκριμένη εργασία παίζει η βαθμονόμηση και ο υπολογισμός της απόδοσης του ανιχνευτή για τα θραύσματα σχάσης. Ως απόδοση του ανιχνευτή ορίζουμε το ποσοστό των θραυσμάτων σχάσης τα οποία ο ανιχνευτής είναι σε θέση να διακρίνει στο πειραματικό φάσμα χωρίς η εναπόθεση ενέργειας από τα θραύσματα να συμπίπτει με την εναπόθεση ενέργειας από τα σωματίδια άλφα (pile up problem). Όπως είδαμε στο πειραματικό φάσμα στην **Εικόνα 4.9** στις χαμηλές ενέργειες

δεν μπορούμε να ξεχωρίσουμε τον αριθμό των γεγονότων που οφείλονται σε θραύσματα σχάσης από αυτά που οφείλονται σε σωματίδια άλφα.

Στην **Εικόνα 4.10** βλέπουμε το κομμάτι του πειραματικού φάσματος της **Εικόνας 4.9** το οποίο ήταν «κρυμμένο» λόγω εστίασης στα μεγαλύτερα κανάλια. Βλέπουμε ξεκάθαρα τις δύο κορυφές τις οποίες παρατηρήσαμε στην μελέτη που κάναμε για τα σωματίδια άλφα. Χρησιμοποιώντας τώρα το πειραματικό φάσμα και τα φάσματα προσομοίωσης μπορούμε να αντιστοιχίσουμε τις τέσσερις κορυφές (δύο για τα θραύσματα σχάσης και δύο για τα σωματίδια άλφα) στις αντίστοιχες ενέργειές τους.

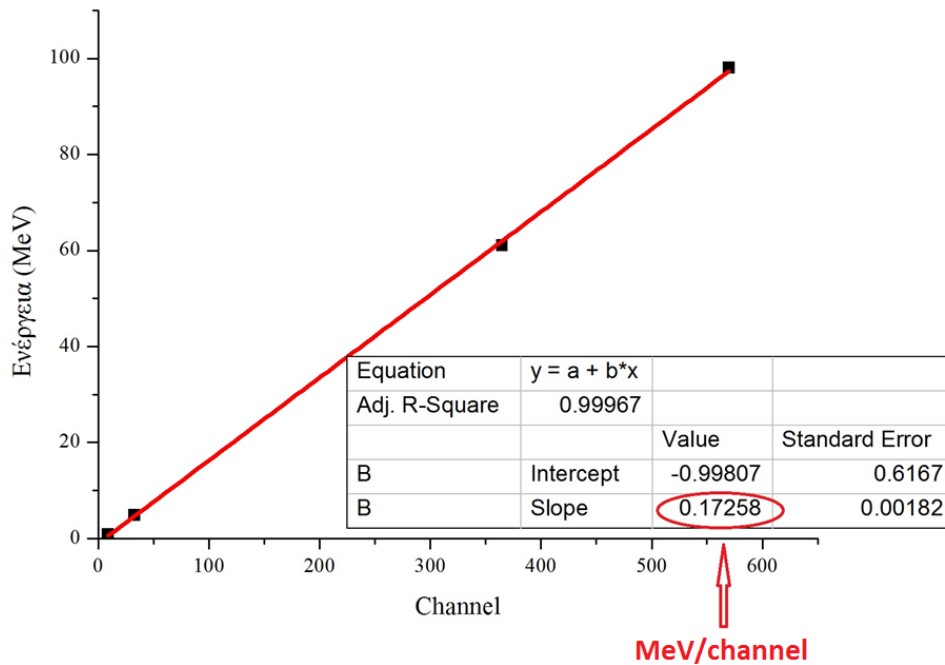


Εικόνα 4.10: Πειραματικό φάσμα των θραυσμάτων σχάσης του ^{237}Np εστιασμένο στα μικρά κανάλια

Κανάλι	Ενέργεια (MeV)
9	0.82
33	4.8
365	61
570	98

Πίνακας 4.1: Πίνακας βαθμονόμησης

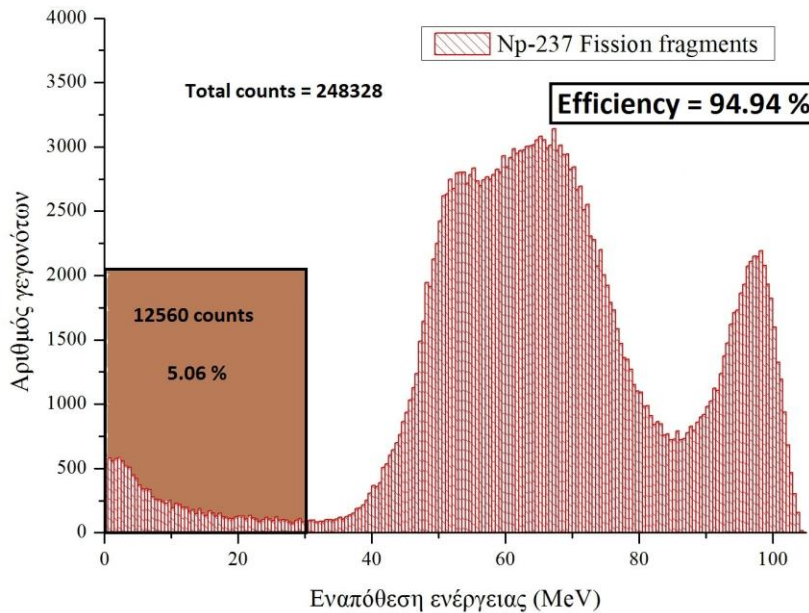
Αντιστοιχίζοντας τα κανάλια του πειραματικού φάσματος σε αναμενόμενες ενέργειες, χρησιμοποιώντας τις χαρακτηριστικές κορυφές, μπορούμε να πραγματοποιήσουμε την βαθμονόμηση του ανιχνευτή. Στον **Πίνακα 4.1** βλέπουμε τις τιμές αντιστοίχισης ενέργειας και καναλιού με βάση τις κορυφές. Ενώ στην **Εικόνα 4.11** βλέπουμε το αντίστοιχο γράφημα και τον υπολογισμό της ευθείας που διέρχεται από τα σημεία.



Εικόνα 4.11: Γράφημα βαθμονόμησης του ανιχνευτή.

Από το γράφημα συμπεραίνουμε ότι ο ανιχνευτής μας είναι εξαιρετικά γραμμικός σε όλο το φάσμα των ενεργειών μας με βαθμονόμηση 0.17258 MeV/κανάλι.

Τέλος για τον υπολογισμό της απόδοσης του ανιχνευτή πρέπει να υπολογίσουμε από ποια ενέργεια και πάνω είναι σε θέση ο ανιχνευτής να ξεχωρίσει τα σωματίδια άλφα από τα θραύσματα σχάσης. Παίρνοντας υπόψη μας το γεγονός ότι τα σωματίδια άλφα εκπέμπονται με πολύ μεγάλο ρυθμό, υπάρχει η δυνατότητα παραπάνω από ένα σωματίδια άλφα να ανιχνεύονται ταυτόχρονα με αποτέλεσμα να έχουμε γεγονότα μέχρι και ενέργειες τριπλάσιες από αυτές των σωματιδίων άλφα. Επίσης λόγω της διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή αυτά τα γεγονότα μπορούν να βρεθούν σε μεγαλύτερα κανάλια. Βάση των παραπάνω και συμβουλευόμενος και το πειραματικό φάσμα μπορούμε να πούμε ότι ο ανιχνευτής μπορεί να διακρίνει (θραύσματα από άλφα) με βεβαιότητα από την ενέργεια των 25 MeV και πάνω. Στην **Εικόνα 4.12** φαίνεται ο υπολογισμός της απόδοσης ο οποίος φθάνει αισίως το 95%.



Εικόνα 4.11: Υπολογισμός της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή

Κεφάλαιο 5^ο: Συμπεράσματα

Τελειώνοντας, σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάζουμε τα συμπεράσματα από την συγγραφή της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, Παρουσιάσαμε μία εκτενή μελέτη αυτού του πρότυπου ανιχνευτή Micromegas, ως προς την εναποτιθέμενη ενέργεια στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή.

Όσον αφορά το πείραμα στην εγκατάσταση η_TOF στο CERN, το κίνητρο για την προσομοίωση αυτή ήταν να κατανοήσουμε την μορφή των πειραματικών φασμάτων ώστε να εκτιμήσουμε σε ποιο ποσοστό αληθινών γεγονότων αντιστοιχούν τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδωσαν μια ξεκάθαρη εικόνα για το πώς έπρεπε στην πραγματικότητα να είναι το φάσμα και ποιοι φυσικοί παράγοντες συνέβαλαν στην δημιουργία του. Το πειραματικό με το θεωρητικό φάσμα παρουσίασαν συμφωνία σε πολύ μεγάλο βαθμό, τόσο ώστε να είμαστε σχεδόν σίγουροι για την ορθότητα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης καθώς και των πειραματικών. Δείξαμε επίσης ότι σε καμία ενέργεια δεν φαίνεται να υπάρχει μη ισοτροπική εκπομπή των σωματιδίων. Ακόμη, σε περίπτωση που αυξηθεί και άλλο η ενέργεια των νετρονίων, τότε θα γίνει εξαιρετικά δύσκολος έως αδύνατος ο διαχωρισμός των σωματιδίων άλφα από τους πυρήνες λιθίου καθώς ανεβαίνει σε ενέργεια το φάσμα των πυρήνων λιθίου και κατεβαίνει αυτό των σωματιδίων άλφα. Έτσι σίγουρα θα υπάρχει μεγαλύτερο ποσοστό επικάλυψης των δύο φασμάτων.

Για το πείραμα ανίχνευσης των θραυσμάτων σχάσης του ^{237}Np το κίνητρο ήταν να υπάρχει μία πρόβλεψη για το ποια μορφή πρέπει να έχουν τα πειραματικά φάσματα έτσι

ώστε να βεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του ανιχνευτή. Επίσης πολύ σημαντική θα είναι και η εκτίμηση του ποσοστού των θραυσμάτων σχάσης τα οποία «χάνονται» στο υπόβαθρο με σκοπό την καλύτερη εκτίμηση του αριθμού των θραυσμάτων που γεννιούνται και κατ' επέκταση την ενεργό διατομή της αντίδρασης σχάσης. Όπως είδαμε, τα θεωρητικά με τα πειραματικά αποτελέσματα σχεδόν ταυτίστηκαν, με μικροδιαφορές να οφείλονται στο γεγονός ότι δεν προσομοιώθηκε η συνάρτηση απόκρισης του ανιχνευτή. Η συμφωνία αυτή οδήγησε στην εμπιστοσύνη των αποτελεσμάτων και των θεωρητικών, αλλά κυρίως και των πειραματικών. Είδαμε, τον ρόλο τον οποίο έπαιξε η γεωμετρία του ανιχνευτή στα τελικά αποτελέσματα και το πόσο σημαντικό στην μορφή των φασμάτων ήταν το γεγονός ότι η ανιχνευτική διάταξη δεν μπορούσε να «σταματήσει» πλήρως τα σωματίδια, με αποτέλεσμα την δημιουργία δευτερευόντων κορυφών στα φάσματα.

Καταλήγοντας, το πρόγραμμα προσομοίωσης FLUKA αποδείχθηκε ικανό να προσομοιώσει με επιτυχία της αντιδράσεις των βαρέων ιόντων στον ανιχνευτή Micromegas και να δώσει αποτελέσματα που υπάκουαν στην θεωρία και συνέπιπταν εντυπωσιακά με τα πειραματικά δεδομένα. Να αναφέρουμε επίσης και ότι οι προσομοιώσεις αυτές δεν θα ήταν δυνατές χρησιμοποιώντας μόνο τα εργαλεία που προσφέρει το FLUKA καθώς η παραγωγή σωματιδίων με τόσο εξεζητημένη μορφή χρειάζεται την πρόσθετη συγγραφή ρουτίνας και την αξιοποίηση της κάρτας SOURCE του FLUKA.

Κεφάλαιο 6^ο: Βιβλιογραφία

- [1] Y. Giomataris, Ph. Rebourgeard, J.P. Robert, G. Charpak, Nucl. Instr. and Meth. A376 (1996) 29.
- [2] 20. S. Andriamonje et al. (The n TOF Collaboration), Journal of the Korean Physical Society 59, No 2, (August 2011) 1597- 1600.
- [3] C. Rubbia, et al., A high resolution spallation driven facility at the CERN-PS to measure neutron cross-sections in the Interval from 1 eV to 250 MeV, CERN/ LHC/98-02 (EET).
- [4] U. Abbondanno, et al., n TOF Performance Report. CERN/INTC-O-011 INTC-2002, 2002, p. 037.
- [5] G. Vourvopoulos, T. Paradellis, A. Asthenopoulos, Nucl. Instrum. Methods A 220 (1984) 23-25.
- [6] R. Vlastou, M. Kokkoris, M. Diakaki, Ch. Constantinou, C. A. Kalfas, A. Kotrotsou, A. Lagoyannis, M. Lambrou, V.Loizou, E. Mara, V. Paneta, G. Provas, A. Tsinganis, Nucl. Instrum. Methods B 269 (2011) 3266-3270.
- [7] "FLUKA: a multi-particle transport code", A. Ferrari, P.R. Sala, A. Fasso, and J. Ranft, CERN-2005-10 (2005), INFN/TC 05/11, SLAC-R-773.
- [8] M. B. Chadwick et al, Nuclear Data Sheets 112 (2011) 2887-2996.
- [9] G. D. Adeev et al., *A method of calculation of mass and energy distributions of fission residuals in reactions induced by intermediate energy particles*, Preprint INR RAS 861/93, 1993.
- [10] F.-J. Hamsch, F. Vives, P. Siegler, S. Oberstedt, Nuclear Physics A 679 (2000) 3-24.
- [11] F. J.Hamsch, I. Ruskov, Nuclear Science and Engineering, 163, 1-16 (2009)
- [12] Theis C., Buchegger K.H., Brugger M., Forkel-Wirth D., Roesler S., Vincke H., " Interactive three dimensional visualization and creation of geometries for Monte Carlo calculations", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 562, pp. 827-829 (2006).
- [13] V.Vlachoudis "FLAIR: A Powerful But User Friendly Graphical Interface For FLUKA" Proc. Int. Conf. on Mathematics, Computational Methods & Reactor Physics (M&C 2009), Saratoga Springs, New York, 2009 [14] J. Pancin, S. Aune, E. Berthoumieux, S. Boyer, E. Delagnes, V. Macary, B. Poumared, H. Safa, Nucl. Instr. and Meth. A572 (2007) 859.

Παράρτημα Α

- Το αρχείο εισόδου του FLUKA

```
TITLE

GLOBAL                                1.          1.
* Set the defaults for precision simulations
DEFAULTS
PRECISIO
* Define the beam characteristics
* WARNING: Maximum Beam Energy/momentum per stack of particles
BEAM                                  -0.02
HEAVYION
*Activates Source Routine
SOURCE
GEOBEGIN
COMBNAME
    0    0
* Black body
SPH blkbody    0.0 0.0 0.0 100000.0
* Void sphere
SPH void       0.0 0.0 0.0 10000.0
* Cylindrical space
RCC Cyl        0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.80485 5.0
RCC B10rcc     0.0 0.0 -1. 0.0 0.0 11. 1.75
RCC Mrcc       0.0 0.0 -2. 0.0 0.0 12. 4.6753
RCC Plrcc      0.0 0.0 -3. 0.0 0.0 13. 4.
XYP Cu1        0.0001
XYP Drft       0.00125
XYP Cu2        0.00135
XYP B10x       0.001357
XYP Msh        0.80135
XYP Plrs       0.80185
XYP Anod       0.80435
END
* Black hole
BLKBODY       5 +blkbody -void
* Void around
VOID          5 +void -Cyl
* Target
Coperd1       5 +Cyl +Cu1
* Target
Drift         5 +Cyl -Cu1 +Drft
* Target
Coperd2       5 +Cyl -Drft +Cu2
* Target
Boron         5 +B10rcc -Cu2 +B10x
* Target
Mesh          5 +Mrcc -Msh +Plrs
```

```

* Target
Pillars      5 +Plrcc -Plrs +Anod
* Target
Anode        5 +Cyl -Anod
* Target
Active       5 +Cyl -Cu2 +Anod -( +B10rcc  -Cu2 +B10x ) -( +Plrcc -
Plrs +Anod ) -( +Mrcc -Msh +Plrs)

```

END

GEOEND

MATERIAL 5. 10. 2.34

BORON

* Boron carbide B4_C

*

MATERIAL 2.52

B4C

COMPOUND 0.78261 BORON 0.21739 CARBON

B4C

MAT-PROP 84.7 B4C

STERNHEI 2.9859 0.0093 2.1006 0.37087 2.8076

B4C

* 340 Butane

* Chemical

* Formula

```

*           H   H   H   H
*           |   |   |   |
*           H --- C -- C -- C -- C --- H
*           |   |   |   |
*           H   H   H   H

```

* C H

* 4 10

MATERIAL 0.00125

Butane

COMPOUND 10.0 HYDROGEN 4.0 CARBON

Butane

MATERIAL 0.001611

ActivGas

COMPOUND -0.88 ARGON -0.1 Carbon_T -0.02

ButaneActivGas

MATERIAL 9.18.9984032 0.001696

FLUORINE

* 370 Carbon Tetrafluoride

* Chemical Formula

*

*

```

*           F
*           |
*           F -- C -- F
*           |
*           F

```

* C F

* 4

MATERIAL 0.00125

Carbon_T

COMPOUND 1.0 CARBON 4.0 FLUORINE

Carbon_T

*

..+...1...+...2...+...3...+...4...+...5...+...6...+...7..

ASSIGNMA BLCKHOLE BLKBODY

*

..+...1...+...2...+...3...+...4...+...5...+...6...+...7..


```

ASSIGNMA      BLCKHOLE      BLKBODY
ASSIGNMA      VACUUM        VOID
ASSIGNMA      COPPER       Coperd1
ASSIGNMA      KAPTON       Drift
ASSIGNMA      COPPER       Coperd2
ASSIGNMA      B4C         Boron
ASSIGNMA      COPPER       Mesh
ASSIGNMA      KAPTON       Pillars
ASSIGNMA      COPPER       Anode
ASSIGNMA      ActivGas     Active
* Enable full transport of heavy and light ions
IONTRANS      HEAVYION
* Set thresholds for delta ray production
DELTARAY      0.000001      HYDROGEN  @LASTMAT
EMFCUT        0.000001      0.000001  HYDROGEN  @LASTMAT
PROD-CUT
EMFCUT        0.000001      0.000001
EMFCUT        0.000001      0.000001  HYDROGEN  @LASTMAT
PHOT-THR
EMFCUT        0.000001      0.000001  HYDROGEN  @LASTMAT
PHO2-THR
* Set the random number seed
RANDOMIZ       1.0
EVENTBIN      -2.0                90.    Active
Lithium
AUXSCORE      EVENTBIN  -700300.    Lithium
EVENTBIN      -2.0                91.    Active
Helium
AUXSCORE      EVENTBIN  -400200.    Helium
EVENTBIN      -2.0                92.    Active
TotalDep
OPEN          21.
OLD
LITHIUM.TXT
OPEN          22.
OLD
HELIUM.TXT
START         1000000.                0.0
STOP

```

• Η τροποποιημένη ρουτίνα "source" του FLUKA

Σημείωση:

Οι αλλαγές στην ρουτίνα έχουν τονιστεί με έντονο χρώμα και μεγαλύτερη γραμματοσειρά

```
*$ CREATE SOURCE.FOR
*COPY SOURCE
*
*=== source =====*
*
  SUBROUTINE SOURCE ( NOMORE )

  INCLUDE ' (DBLPRC) '
  INCLUDE ' (DIMPAR) '
  INCLUDE ' (IOUNIT) '
*
*-----*
*
* Copyright (C) 1990-2009      by      Alfredo Ferrari & Paola Sala *
* All Rights Reserved.      *
*
*
* New source for FLUKA9x-FLUKA20xy: *
*
* Created on 07 january 1990  by      Alfredo Ferrari & Paola Sala *
*                               Infn - Milan *
*
* Last change on 08-feb-09    by      Alfredo Ferrari *
*
* This is just an example of a possible user written source routine. *
* note that the beam card still has some meaning - in the scoring the *
* maximum momentum used in deciding the binning is taken from the *
* beam momentum. Other beam card parameters are obsolete. *
*
* Output variables: *
*
*       Nomore = if > 0 the run will be terminated *
*
*-----*
*
  INCLUDE ' (BEAMCM) '
  INCLUDE ' (FHEAVY) '
  INCLUDE ' (FLKSTK) '
  INCLUDE ' (IOIOCM) '
  INCLUDE ' (LTCLCM) '
  INCLUDE ' (PAPROP) '
  INCLUDE ' (SOURCM) '
  INCLUDE ' (SUMCOU) '
*
  LOGICAL LFIRST
*
  SAVE LFIRST
  DATA LFIRST / .TRUE. /
```

```

* Atomic and mass numbers, cosines, energy
  INTEGER IZ,IA
  INTEGER I
  DOUBLE PRECISION X,Y,Z,COSX,COSY,COSZ
  REAL KINE

*=====*
*
*                               BASIC VERSION
*
*=====*
      NOMORE = 0
* +-----*
* | First call initializations:
* |   IF ( LFIRST ) THEN
* |   *** The following 3 cards are mandatory ***
* |     TKESUM = ZERZER
* |     LFIRST = .FALSE.
* |     LUSSRC = .TRUE.
* |   *** User initialization ***
* |   END IF
* |
* +-----*
* Push one source particle to the stack. Note that you could as well
* push many but this way we reserve a maximum amount of space in the
* stack for the secondaries to be generated
* Npflka is the stack counter: of course any time source is called it
* must be =0
C      NPFLKA = 0
* Load 2 particles into the stack
*   DO 55 I=1,2
*     NPFLKA = NPFLKA + 1

* Wt is the weight of the particle
*   WTFLK (NPFLKA) = ONEONE
*   WEIPRI = WEIPRI + WTFLK (NPFLKA)
* Particle type (1=proton.....). Ijbeam is the type set by the BEAM
* card
* +-----*
* | (Radioactive) isotope:
* |   IF ( IJBEAM .EQ. -2 .AND. LRDBEA ) THEN
* |     IARES = IPROA
* |     IZRES = IPROZ
* |     IISRES = IPROM
* |     CALL STISBM ( IARES, IZRES, IISRES )
* |     IJHION = IPROZ * 1000 + IPROA
* |     IJHION = IJHION * 100 + KXHEAV
* |     IONID = IJHION
* |     CALL DCDION ( IONID )
* |     CALL SETION ( IONID )
* |
* +-----*
* | Heavy ion:
* |   ELSE IF ( IJBEAM .EQ. -2 ) THEN
*

```

```

* Choose the right file depending on particle transport to
* load into the stack.
* Read particle information from files
  IF ( I .EQ. 1) THEN
    READ(21,*) IZ,IA,X,Y,Z,COSX,COSY,COSZ,KINE
  ELSE
    READ(22,*) IZ,IA,X,Y,Z,COSX,COSY,COSZ,KINE
  ENDIF
* Added normalisation check: if condition is not met,
* skip event, go to next. Brought cosines section to top.

* Directional Cosines (tx,ty,tz)
  TXFLK (NPFLKA) = COSX
  TYFLK (NPFLKA) = COSY
  TZFLK (NPFLKA) = COSZ
C   NORM = TXFLK (NPFLKA)**2 + TYFLK (NPFLKA)**2

*   WRITE(22,*) 'EVENT= ',COUNT
*   WRITE(22,999) 'NPFLKA= ',NPFLKA,' COSX= ',TXFLK(NPFLKA),
*   &' COSY= ',TYFLK(NPFLKA),' NORM= ',NORM

* 999 FORMAT(A8,I5,A7,F20.17,A7,F20.17,A7,F20.17)

C   IF(NORM.GE.ONEONE) THEN

C   TXFLK(NPFLKA)=ONEONE
C   TYFLK(NPFLKA)=ZEROZERO
C   TZFLK(NPFLKA)=ZEROZERO
C   NORM = TXFLK (NPFLKA)**2 + TYFLK (NPFLKA)**2
C
C   ERRCOUNT=ERRCOUNT+1

*   WRITE(22,*) 'NEW VALUES:'
*   WRITE(22,999) 'NPFLKA= ',NPFLKA,' COSX= ',TXFLK(NPFLKA),
*   &' COSY= ',TYFLK(NPFLKA),' NORM= ',NORM

*   WRITE(LUNERR,*) 'Normalisation error! NPFLKA= ', NPFLKA,
*   &' TXFLKA= ', TXFLKA, ' TYFLKA= ', TYFLKA

C   ENDIF

C   IF(COUNT.EQ.39110000) WRITE(LUNERR,*) 'NUMBER OF CORRECTIONS: ',
C   &ERRCOUNT

  IF ( IJBEAM .EQ. -2 ) THEN
* Particle ID
  IPROZ=IZ
  IPROA=IA

  IJHION = IPROZ * 1000 + IPROA
  IJHION = IJHION * 100 + KXHEAV
  IONID = IJHION
  CALL DCDION ( IONID )
  CALL SETION ( IONID )

```

```

        ILOFLK (NPFLKA) = IJHION
* | Flag this is prompt radiation
        LRADDC (NPFLKA) = .FALSE.
* | Group number for "low" energy neutrons, set to 0 anyway
        IGROUP (NPFLKA) = 0
* |
* +-----*
* | Normal hadron:
        ELSE
        IONID = IJBEAM
        ILOFLK (NPFLKA) = IJBEAM
* | Flag this is prompt radiation
        LRADDC (NPFLKA) = .FALSE.
* | Group number for "low" energy neutrons, set to 0 anyway
        IGROUP (NPFLKA) = 0
        END IF
* |
* +-----*
* From this point .....
* Particle generation (1 for primaries)
        LOFLK (NPFLKA) = 1
* User dependent flag:
        LOUSE (NPFLKA) = 0
* User dependent spare variables:
        DO 100 ISPR = 1, MKBMX1
            SPAREK (ISPR,NPFLKA) = ZERZER
100 CONTINUE
* User dependent spare flags:
        DO 200 ISPR = 1, MKBMX2
            ISPARK (ISPR,NPFLKA) = 0
200 CONTINUE
* Save the track number of the stack particle:
        ISPARK (MKBMX2,NPFLKA) = NPFLKA
        NPARMA = NPARMA + 1
        NUMPAR (NPFLKA) = NPARMA
        NEVENT (NPFLKA) = 0
        DFNEAR (NPFLKA) = +ZERZER
* ... to this point: dont change anything
* Particle age (s)
        AGESTK (NPFLKA) = +ZERZER
        AKNSHR (NPFLKA) = -TWOTWO

* Kinetic energy of the particle (GeV)
        TKEFLK (NPFLKA) = KINE
*
        TKEFLK (NPFLKA) = SQRT ( PBEAM**2 + AM (IONID)**2 ) - AM (IONID)

* Particle momentum
*
        PMOFLK (NPFLKA) = PBEAM
        PMOFLK (NPFLKA) = SQRT ( TKEFLK (NPFLKA) * ( TKEFLK (NPFLKA)
&
        + TWOTWO * AM (IONID) ) )

*
        TXFLK (NPFLKA) = UBEAM
*
        TYFLK (NPFLKA) = VBEAM
*
        TZFLK (NPFLKA) = WBEAM

```

```

* Polarization cosines:
  TXPOL (NPFLKA) = -TWOTWO
  TYPOL (NPFLKA) = +ZERZER
  TZPOL (NPFLKA) = +ZERZER
* Particle coordinates
* Uniform distribution in Sample allready imported
  XFLK (NPFLKA) = X

  YFLK (NPFLKA) = Y

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

```

Παράρτημα Β

- Η εξωτερική ρουτίνα για την παραγωγή των θραυσμάτων σχάσης

```
PROGRAM PartGen
C
*****
C   *
C   *
C   *   Gaussian fission fragment ENERGY AND DIRECTION DISTRIBUTIONS   *
C   *
C   *   INCIDENT NEUTRON ENERGY)                                         *
C   *
C   *   Final Version: 10.05.2012
C   *
C
*****
C
C   VARIABLE DECLARATIONS -----
C
C   Number of events
C   INTEGER EVENTS,result,result1
C   Number of random event
C   INTEGER ANGLE
C   Counters, seeds
C   INTEGER I,J,iseed
C   Atomic and mass numbers, Pi
C   REAL ZL,AL,ZH,AH,Nfiss,Zed,Alpha
C   Random Number Generator Variables
C   DOUBLE PRECISION ISEED1,rand,RND,time
C   INTEGER*4 timeArray(3)
C   DOUBLE PRECISION ONE,ZERO,PI,ONEHE
c   Energy arrays
C   REAL ENLI(361)
C   REAL ENHE(361)
C   Angle and Energy arrays (length depends on number of lines in diff. cs.
files)
C   DOUBLE PRECISION ZANGLI(18000),ZANGHE(18000),ZANGLIF(18000)
C   DOUBLE PRECISION ZANGHEF(18000),ELITHF(18000),EHELF(18000)
C   DOUBLE PRECISION ELITH(18000),EHEL(18000)
C   Angles
C   DOUBLE PRECISION YANG,ZANG
C   Cosines, normalisation check
C   DOUBLE PRECISION XCOSL,YCOSL,ZCOSL
C   DOUBLE PRECISION XCOSH,YCOSH,ZCOSH
C   DOUBLE PRECISION NORM,NORM1,LVL
C   Recoil energy values
C   DOUBLE PRECISION ENERGYLI,ENERGYHE
c   Cordinates of creation point
C   DOUBLE PRECISION X,Y,Z,De
C   Spherical Coordinates
```

```

DOUBLE PRECISION THETA,PHI,R,AR
C   Progress indicator
REAL PROG
INTEGER PROGSTEP,RESULT2,NN,particle
C   Other auxiliary variables
REAL LIT,HEL,COUNT,COUNT1
REAL VAR,VAR1,ZSA,SR,ETOT
C   Filenames, user repeat option
CHARACTER(30)::FILENAM,USER
CHARACTER(10)::OUTPATH='./Output/'
call itime(timeArray)
iseed = rand( timeArray(1)*210+timeArray(2)*12+timeArray(3)*142 )
time=timeArray(3)
C   Constants (seed, atomic and mass numbers)

C   Double precision constants (one, zero, pi, 180)
ONE=1.D+00
ZERO=0.D+00
PI=3.1415926535897932384626433832795D+00
ONEHE=180.D+00

C   USER INTERFACE AND INPUT (# OF EVENTS AND OUTPUT FILENAMES) -----
1 WRITE(*,*) ' Number of fission events (integer please): '
  READ *,EVENTS
  WRITE(*,*) ' Radius of Target in cm: '
  READ *,AR
  WRITE(*,*) ' Thickness of Target in um: '
  READ *,De
  De= De/10000
  WRITE(*,*) ' Type of FFragments: 1-heavy, 2-light,3-both'
  READ *,particle
c   EVENTS=EVENTS/2

  Zed=93
  Alpha=237
  mean=139.5
  sigma=6.5

C
C   OPEN OUTPUT FILES -----
C   (written to 'Output' directory)

  OPEN(72,FILE='./TOT/EVENTS.TXT',STATUS='UNKNOWN')

C
C   PRODUCE EVENTS, WRITE TO FILES -----
C
C   Format statement for final file and progress indicator

910 FORMAT((I2,' '), (I3,' '), 6(F20.17,' '), F9.7)
930 FORMAT(' ',F4.0,'%')

C   CONSTRUCTING -----

```



```

c     COUNT=0
c     COUNT=1
c     WRITE(*,*) 'Generating events:'
c     DO J=1,90
c     DO I=1,EVENTS

c
c     DEFINE HEAVY ION Z,A AND ENERGY
c
c
c
c
c     Gaussian sampler
c
c
c
c     if (flag.eq.0) then
c     rsq=2.0
c     do while(rsq.ge.1.0.or.rsq.eq.0.0) ! new from for do
c     r1=2.0*ran(0)-1.0
c     r2=2.0*ran(0)-1.0
c     rsq=r1*r1+r2*r2
c     enddo
c     fac=sqrt(-2.0*log(rsq)/rsq)
c     gsave=r1*fac
c     tmp=r2*fac
c     flag=1
c     else
c     tmp=gsave
c     flag=0
c     endif
c     normal=tmp*sigma+mean
c
c     end of Gaussian sampler
c
c
c     Nfiss=INT(rand(0)*3+2)
c
c     AL=INT(normal)
c     AH=Alpha+1- AL
c     ZL=INT(0.5*(Zed+ZSA(AL)-ZSA(AH))) + (rand(0)*10-5)
c     ZH=Zed-ZL
c     SR=AL/Alpha
c
c     ETOT=-13*(Alpha**(0.6666666666666666))
c     +*(1-SR)**(0.6666666666666666)+
c     +SR**(0.6666666666666666-1)+0.6*(Zed**2)*
c     +(1/Alpha**(0.3333333333333333))
c     +*(1-SR**(1.6666666666666666))
c     +- (1-SR)**(1.6666666666666666)
c
c     ENERGYLI=(ETOT/(1+AL/AH))/1000
c     ENERGYHE=(ETOT/1000-ENERGYLI)
c     write(*,*) ETOT,ENERGYLI,ENERGYHE
c
c

```

```

c
c   END OF DEFINE Heavy Ions
c
c
c
c
c   RND=rand(0)*1
c   ANGLE=INT(DACOS(RND)*18000/PI)
c
c   PHI=rand(0)*2*PI
c
c   Light Ion Directional Cosines
c
c   ZCOSH=RND
c   XCOSH=DCOS(PHI)*DSQRT(1-ZCOSH**2)
c   YCOSH=DSIN(PHI)*DSQRT(1-ZCOSH**2)
c
c   NORM=ZCOSH**2+XCOSH**2+YCOSH**2
129 IF (NORM .EQ. 1 ) THEN
c   CONTINUE
c
c   ELSE
128   ZCOSH=ZCOSH+0.0000000000000001
c   XCOSH=DSQRT(1-ZCOSH**2)*DCOS(PHI)
c   YCOSH=DSQRT(1-ZCOSH**2)*DSIN(PHI)
c   NORM=ZCOSH**2+XCOSH**2+YCOSH**2
c   IF (NORM .EQ. 1) THEN
c     GOTO 129
c   ELSE
c     GOTO 128
c   ENDIF
c ENDIF
c   IF (LVL .EQ. 0) THEN
c
c
c   Heavy Ion Directional Cosines
c
c   ZCOSL=DCOS(PI-DACOS(RND))
c   XCOSL=DCOS(PHI+PI)*DSIN(PI-DACOS(RND))
c   YCOSL=DSIN(PHI+PI)*DSIN(PI-DACOS(RND))
c   ZCOSL=rand(0)*1
c   XCOSL=DCOS(PHI)*DSQRT(1-ZCOSL**2)
c   YCOSL=DSIN(PHI)*DSQRT(1-ZCOSL**2)
c
c   NORM1=ZCOSL**2+XCOSL**2+YCOSL**2
149 IF (NORM1 .EQ. 1 ) THEN
c   CONTINUE
c
c   ELSE
148   ZCOSL=ZCOSL+0.0000000000000001
c   XCOSL=DSQRT(1-ZCOSL**2)*DCOS(PHI+PI)
c   YCOSL=DSQRT(1-ZCOSL**2)*DSIN(PHI+PI)
c   NORM1=ZCOSL**2+XCOSL**2+YCOSL**2
c   IF (NORM1 .EQ. 1) THEN
c     GOTO 149
c   ELSE

```

```

                GOTO 148
            ENDIF
        ENDIF

c      Change random Seed every 10 seconds)
      if (ABS(timeArray(3)-time) .EQ. 10) THEN
      call itime(timeArray)
      iseed=rand ( timeArray(1)*1233+timeArray(2)*437+timeArray(3)*142 )
      time=timeArray(3)
      end if

C
c      Uniform points on a Cylindercircle
C      Calculating creation point X,Y,Z
c      AR=4
c      De=0.00004

c
c      Fixing accuracy error by moving the code to number 48 and
c      rejecting some of the particles generated
c
48      R=(rand(0)*(AR)**2)
      THETA=rand(0)*2*PI
      X=DSQRT(R)*DCOS(THETA)
      Y=DSQRT(R)*DSIN(THETA)
      Z=rand(0)*De +0.00135
      R=X**2 + Y**2

      IF ( Z .LT. 0.00135 .OR. Z .GT. 0.00135+De ) THEN
          goto 48
      END IF
      IF ( R .GT. AR**2) THEN
          goto 48
      END IF

      IF (particle .EQ. 1 .OR. particle .EQ. 3) THEN
c      IF (mod(I,2) .EQ.0) THEN
      WRITE(72,910) INT(ZL),INT(AL),X,Y,Z,XCOSL,YCOSL,ZCOSL,ENERGYLI
c      endif
      ENDIF

47      R=(rand(0)*(AR)**2)
      THETA=rand(0)*2*PI
      X=DSQRT(R)*DCOS(THETA)
      Y=DSQRT(R)*DSIN(THETA)
      Z=rand(0)*De +0.00135
      R=X**2 + Y**2
      IF ( Z .LT. 0.00135 .OR. Z .GT. 0.00135+De ) THEN
          goto 47
      END IF
      IF ( X**2+Y**2 .GT. AR**2) THEN
          WRITE(*,*) ' Events written for '
          goto 47
      END IF

```

```

IF (particle .EQ. 2 .OR. particle .EQ. 3) THEN
c   IF (mod(I,2) .EQ. 1) THEN
WRITE (72, 910) INT (ZH) , INT (AH) , X, Y, Z, XCOSH, YCOSH, ZCOSH, ENERGYHE
c   EndIF
ENDIF

PROG=(100*I)/EVENTS           ! Progress indicator
PROGSTEP=INT(EVENTS/10)
IF (MOD(I, PROGSTEP) .EQ. 0) THEN
WRITE (*, 930) PROG
ENDIF

449 END DO

WRITE (*, *) ''
WRITE (*, *) ' Events written for both Heavy and Light Fragments.'
WRITE (*, *) ''

C   Close files
CLOSE (72)
CLOSE (73)

C   Ask for repeat
WRITE (*, ' (A) '), ' PROGRAMME COMPLETE!'
WRITE (*, ' (A) ') ' TRY ANOTHER SET? (y/n): '
READ (*, 920) USER
920 FORMAT (A1)
IF (USER.EQ.'y'.or.USER.EQ.'Y') THEN
WRITE (*, *) ''
GOTO 1
ENDIF
END

REAL FUNCTION ZSA(A)
real A
ZSA=A/(2+0.0156*A**(2/3))
return
end

```