

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ
ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ
ΚΑΙ ΥΛΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ
MONTE CARLO "FLUKA"**

**INTRODUCTION TO THE "FLUKA" MONTE CARLO
COMPUTER CODE FOR THE SIMULATION OF
PARTICLE INTERACTIONS WITH MATTER**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ
ΠΕΤΡΙΔΟΥ ΑΘΗΝΑ του ΑΝΤΩΝΙΟΥ

Σπουδάστριας της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επίκουρος Καθηγητής Ν.Π. Πετρόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2019

Αποποίηση τυχόν ευθυνών

Αυτό το κείμενο συντάχθηκε ως προϊόν φοιτητικής Διπλωματικής Εργασίας και δεν είναι το αποτέλεσμα επαγγελματικής μελέτης διπλωματούχου μηχανικού. Στο κείμενο αυτό περιέχονται επιστημονικές πληροφορίες και αποτελέσματα σε σχέση με το αντικείμενο που περιγράφεται στον τίτλο. Για το περιεχόμενο αυτό έχει δοθεί κατά το δυνατό η αναγκαία προσοχή ώστε να διασφαλισθεί η ποιότητά του κατά τη στιγμή της δημοσίευσης. Διευκρινίζεται ότι η δημοσίευση του κειμένου αυτού γίνεται χωρίς να υπάρχει άμεση ή έμμεση σύνδεση της συγγραφέως ή του επιβλέποντός της με σχετικά εμπορικά ή οικονομικά συμφέροντα. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της, ούτε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο διατυπώνουν κάποια γραπτή εγγύηση, ρητή ή έμμεση, συμπεριλαμβανομένων των εγγυήσεων που αφορούν στην ασφάλεια και την προστασία ατόμων και υλικού και στην καταλληλότητα για χρήση των περιεχόμενων επιστημονικών πληροφοριών και αποτελεσμάτων για τους σκοπούς επαγγελματικών εφαρμογών του κώδικα FLUKA ή γενικότερα άλλου σχετικού ραδιολογικού επιστημονικού ή / και τεχνολογικού προβλήματος. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της ούτε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο αποδέχονται κάποια νομική ή άλλη ευθύνη για την ποιότητα, την ακρίβεια, την πληρότητα, τη χρησιμότητα, τυχόν λάθη, τυχόν παραλείψεις στο περιεχόμενο του κειμένου ή για τις συνέπειες οποιασδήποτε απόφασης που θα ληφθεί με βάση το περιεχόμενο αυτό. Επίσης δεν αποδέχονται ειδικότερα και νομική ευθύνη για την απώλεια προσδοκώμενων κερδών ή για την δημιουργία συνακόλουθων ζημιών από τη χρήση του περιεχόμενου αυτού. Παρόλα αυτά, καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια ώστε η παραγωγή των περιεχόμενων αποτελεσμάτων να προκύψει ως αποτέλεσμα καλών πρακτικών επιστημονικής ανάλυσης. Η συγγραφέας και ο επιβλέπων της είναι διαθέσιμοι για την παροχή συμβουλών σε ό,τι αφορά επιβεβαίωση των περιεχόμενων αποτελεσμάτων καθώς και για οδηγίες σχετικά με την ενδεδειγμένη χρήση τους

Πνευματικά δικαιώματα και σχετικές ευθύνες

Οι αναγνώστες μπορούν να χρησιμοποιούν το μέρος του περιεχομένου που τους ενδιαφέρει για δική τους προσωπική και αποκλειστική χρήση αλλά όχι για δημοσίευση ή παρουσίασή του ως δικό τους ή χωρίς κατάλληλη αναφορά στην πηγή. Τυχόν παράλειψη της αναφοράς στην πηγή συνιστά το αδίκημα της λογοκλοπής. Οι αναγνώστες έχουν τη ρητή υποχρέωση να μην παραβιάζουν ή να μην ενθαρρύνουν / επιτρέπουν την παραβίαση των νομίμων πνευματικών δικαιωμάτων των σχετικών με το κείμενο αυτό χρησιμοποιώντας τα περιεχόμενα αποτελέσματα με ανάρμοστο τρόπο. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της θα αποδεχθούν ποτέ όποια ευθύνη τυχόν προκύψει ως συνέπεια παραβιάσεων πνευματικών δικαιωμάτων. Τα φυσικά ή τα νομικά πρόσωπα, τα υπεύθυνα για τις παραβιάσεις αυτές θα είναι, ως εκ τούτου, τα μόνα υπόλογα για τυχόν ζημιές ή άλλες συνέπειες. Το κείμενο αυτό προστατεύεται σε ό,τι αφορά τα πνευματικά δικαιώματα από άδεια [Creative Commons License](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/) by Attribution / No Derivatives, βάσει της οποίας οι χρήστες επιτρέπεται κυρίως να αντιγράψουν, διανέμουν και να χρησιμοποιούν το περιεχόμενο του (αλλά να μην δημιουργούν παράγωγα από αυτό), υπό την προϋπόθεση ότι κάνουν την πρέπουσα αναφορά στην πηγή. Όσοι από εσάς γνωρίζετε την συμβολική γλώσσα της αντίστοιχης άδειας Creative Commons, η σχετική εικόνα σήμανσης έχει ως εξής:



Η συνιστώμενη αναφορά στην πηγή είναι:

Petridou, A.A., Introduction to the "FLUKA" Monte Carlo Computer Code for the Simulation of Particle Interactions with Matter (in Greek), Nuclear Engineering Laboratory, National Technical University of Athens, Athens, 2019, available on-line (αναφέρατε διαδικτυακό σύνδεσμο και ημερομηνία ανάγνωσης). Σε περίπτωση που εντοπίσατε αυτό το κείμενο μέσω άλλης δημοσίευσης των συγγραφέων, παρακαλείσθε να αναφέρετε ως πηγή και αυτή τη δημοσίευση.

Disclaimer

This document has been edited as a result of a Diploma Dissertation project accomplished by a student and it is not the result of a professional study by a certified engineer. This document is designed to provide scientific information and results with regard to the matter covered by its title; all reasonable care has been taken to ensure quality of the results at the time of publication. This document is published on the understanding that neither the author nor her supervisor are directly or indirectly connected to any relevant commercial or financial interests. Neither the author nor her supervisor or the National Technical University of Athens (NTUA) make any warranty, expressed or implied, including the warranties of personnel and installations safety and security and fitness for use of the herein included data for the purposes of professional computation using the FLUKA code or in general for other radiology related scientific and/or technological environments or accept any legal liability or responsibility for the quality, accuracy, completeness, usefulness, any errors, any omissions within the content of this document, or for the consequences of any decisions taken on the basis of the information provided. This includes, but is no limited to, loss of anticipatory profits or consequential damages from the use of this information. Nonetheless, considerable effort has been put so that best scientific analysis practices were followed during the production of the presented results. The author and her supervisor are available for consultation regarding the verification and implementation of the presented data.

Copyright note and relevant liabilities

Readers may copy the part of the content, in which they are interested, for their own use and not for publication, display and/or plagiarism. Readers are expressly required not to infringe or authorize any infringement of any legal rights related to this content by inappropriately using the information provided. Neither the author nor her supervisor will accept any liability in respect of such infringement, and the individuals or entities responsible will be personally liable for any damages or other liability arising. This document is protected by the [Creative Commons License](#) by Attribution / No Derivatives, which primarily means that licensees may copy, distribute, display and repeat the work (but not make derivatives based on it) only if they give the author the credits. For those of you familiar with the Creative Commons Symbolic Signs, then the respective marking is as it follows:



Recommended citation is as it follows:

Petridou, A.A., A Practical Introduction to the FLUKA Monte Carlo Computer Code - Solution of a simple Interaction Problem between $-\alpha$ Particles And Beryllium Screen, Diploma Dissertation (in Greek), Nuclear Engineering Laboratory, National Technical University of Athens, Athens, 2018, available on-line (please mention URL and access date). *In case that you have reached this document through another publication of the authors, please, cite this publication as well.*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	vi
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	viii
EXTENDED ABSTRACT	ix
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	
1.1 Γενικά.....	1-1
1.2 Monte Carlo και ιοντίζουσες ακτινοβολίες	1-1
1.3 Κώδικες Monte Carlo για ιοντίζουσες ακτινοβολίες.....	1-4
1.4 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας.....	1-8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Συνοπτική περιγραφή του κώδικα	
2.1 Γενικά.....	2-1
2.2 Αλληλεπιδράσεις που προσομοιώνονται στον FLUKA	2-2
2.2.1 Μη ελαστικές αλληλεπιδράσεις με αδρόνια	2-2
2.2.2 Ελαστικές σκεδάσεις	2-4
2.2.3 Αλληλεπιδράσεις τύπου πυρήνα - πυρήνα	2-5
2.2.4 Μεταφορά φορτισμένων αδρονίων και μιονίων στην ύλη	2-5
2.2.5 Αλληλεπιδράσεις με νετρόνια χαμηλής ενέργειας.....	2-6
2.2.6 Αλληλεπιδράσεις με ηλεκτρόνια.....	2-7
2.2.7 Αλληλεπιδράσεις με φωτόνια υψηλών ενεργειών.....	2-7
2.2.8 Αλληλεπιδράσεις με φωτόνια ορατού φωτός	2-8
2.2.9 Αλληλεπιδράσεις με (αντι)νεutrίνο.....	2-8
2.3 Γεωμετρία.....	2-8
2.4 Παρακολούθηση μεταφοράς σωματιδίων στην ύλη	2-10
2.5 Δυνατά αποτελέσματα	2-10
2.6 Τεχνικά χαρακτηριστικά του FLUKA	2-11
2.7 Εφαρμογές	2-11
2.8 Βοηθητικός κώδικας FLAIR	2-12
2.9 Ιστορικά στοιχεία.....	2-13
2.10 Μέγεθος και άλλα χαρακτηριστικά FLUKA.....	2-14
2.11 Σχόλια και συμπεράσματα	2-14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Χρησιμοποίηση του κώδικα FLUKA σε Λειτουργικό Σύστημα MS WINDOWS	
3.1 Εισαγωγή	3-1

3.2 Λογισμικό υποδοχής εικονικής μηχανής.....	3-1
3.2.1 Γενικά.....	3-1
3.2.2 Εγκατάσταση του λογισμικού υποδοχής <i>Oracle VM VirtualBox</i>	3-2
3.3 Λειτουργικό Σύστημα εικονικής μηχανής.....	3-3
3.3.1 Γενικά.....	3-3
3.3.2 Εγκατάσταση και ρύθμιση <i>Flurix</i> στο λογισμικό υποδοχής.....	3-4
3.4 Δοκιμές και ρυθμίσεις λειτουργικότητας <i>Flurix</i>	3-9
3.4.1 Γενικά.....	3-9
3.4.2 Ανάγνωση του δίσκου <i>flurix.vdi</i>	3-11
3.4.3 Βελτιστοποίηση <i>PATH</i>	3-12
3.4.4 Επιτρεπόμενη διάρκεια χρήσης.....	3-14
3.5 Σχόλια και συμπεράσματα.....	3-16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Παράδειγμα εφαρμογής του κώδικα FLUKA	
4.1 Εισαγωγή.....	4-1
4.2 Περιγραφή του παραδείγματος.....	4-2
4.2.1 Γενικά.....	4-2
4.2.2 Αρχείο εισόδου - στάδιο "pre".....	4-2
4.3 Εκτέλεση του παραδείγματος και έκδοση αποτελεσμάτων.....	4-23
4.3.1 Εντολές εκτέλεσης.....	4-23
4.3.2 Αρχεία εξόδου.....	4-23
4.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων - στάδιο "post".....	4-24
4.4.1 Συμβατική επεξεργασία.....	4-24
4.4.2 Γραφική επεξεργασία.....	4-29
4.5 Σχόλια και συμπεράσματα.....	4-31
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4: Αρχείο Εισόδου Παραδείγματος.....	4-31
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	E-1
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	E-3

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι μέθοδοι Monte Carlo, είναι υπολογιστικοί αλγόριθμοι που βασίζονται σε επαναλαμβανόμενες τυχαίες δειγματοληψίες για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων μιας διεργασίας. Οι μέθοδοι βασίζονται στην παραδοχή ότι με τη βοήθεια της τυχαιότητας και των πιθανοτήτων μπορούν να επιλυθούν ευκολότερα προβλήματα, (των οποίων η επίλυση θα μπορούσε να είναι και αναλυτική) με εκμετάλλευση της στατιστικής τους φύσης. Τέτοια είναι και τα προβλήματα διάδοσης ιοντιζουσών ακτινοβολιών στην ύλη. Στο πλαίσιο της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας γίνεται προσπάθεια για μια πρώτη γνωριμία με τον κώδικα FLUKA, ο οποίος είναι ένας από τους πλέον γνωστούς κώδικες για την επίλυση προβλημάτων διάδοσης ιοντιζουσών ακτινοβολιών στην ύλη και ο οποίος βασίζεται σε μεθόδους Monte Carlo.

Ο κώδικας FLUKA είναι ένα σύγχρονο, γενικού σκοπού, ελεύθερα διαθέσιμο, εργαλείο ανοιχτού λογισμικού που χρησιμοποιείται κυρίως για υπολογισμούς μεταφοράς στοιχειωδών σωματιδίων στην ύλη και των αλληλεπιδράσεων τους με αυτή. Ο κώδικας καλύπτει ένα εκτεταμένο φάσμα εφαρμογών, όπως (α) υπολογισμούς θωρακίσεων προστασίας σε εγκαταστάσεις επιταχυντών πρωτονίων και ηλεκτρονίων, (β) σχεδιασμό κατάλληλων στόχων για χρήση σε διατάξεις επιταχυντών, (γ) υπολογισμούς θερμοδομετρίας, (δ) υπολογισμούς νετρονικής ενεργοποίησης, (ε) δοσιμετρικούς υπολογισμούς, (στ) σχεδίαση ανιχνευτικών διατάξεων κ.ά. Η προτεραιότητα κατά το σχεδιασμό και την ανάπτυξη του FLUKA ήταν πάντα η υλοποίηση σύγχρονων και καλώς θεμελιωμένων φυσικών μοντέλων. Τα αποτελέσματα είναι γενικά συγκρίσιμα με πειραματικά δεδομένα σε κάθε στάδιο των αλληλεπιδράσεων. Όπου δεν υπάρχουν άμεσα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για επαλήθευση των αποτελεσμάτων, γίνονται εύλογες προβλέψεις με τη χρήση εύλογων υποθέσεων, παρεμβολών ή προεκβολών και νόμων ομοιότητας. Ο FLUKA μπορεί επιπλέον να χειριστεί πολύπλοκες γεωμετρίες ύλης με την οποία αλληλεπιδρούν σωματίδια. Μαζί με τον κώδικα διατίθενται επιπλέον διάφορα εργαλεία οπτικοποίησης εισόδου και αποτελεσμάτων και εντοπισμού σφαλμάτων. Το κυριότερο από τα εργαλεία αυτά είναι το λογισμικό FLAIR.

Ο FLUKA είναι κατασκευασμένος για να λειτουργεί σε Λειτουργικό Σύστημα LINUX 64 bit. Διατίθεται διαδικτυακά μετά από μία απλή διαδικασία εγγραφής, ως πλήρης πηγαίος κώδικας, ο οποίος μπορεί να μεταφρασθεί και να εγκατασταθεί σε συμβατό Λειτουργικό Σύστημα LINUX 64 bit. Για να καλυφθούν και περιπτώσεις που χρήστες χρειάζεται να τρέξουν τον FLUKA σε περιβάλλον Λειτουργικού Συστήματος WINDOWS, οι δημιουργοί

του FLUKA έχουν δημιουργήσει ορισμένα κατάλληλα εργαλεία διευκόλυνσης, όπως το ονομαζόμενο *Flurix* Linux Live CD. Η χρήση του *Flurix* Linux Live CD είναι ο τρόπος που χρησιμοποιήθηκε ο FLUKA σε αυτήν τη Διπλωματική Εργασία.

Η αποδοτική χρήση του FLUKA ως κώδικα υψηλών δυνατοτήτων στα πλαίσια των εφαρμογών Monte Carlo για τις ανάγκες πρόβλεψης των αποτελεσμάτων αλληλεπιδράσεων πυρηνικής και ατομικής φυσικής προϋποθέτει τρία στάδια: Το προκαταρκτικό - προεπεξεργαστικό (στα αγγλικά *pre-processing* ή απλώς στάδιο "pre"), την υπολογιστική επίλυση του προβλήματος (δηλ. το τρέξιμο του κώδικα) και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων (στα αγγλικά *post-processing* ή απλώς στάδιο "post"). Κατά το στάδιο "pre" χρησιμοποιείται ένα αρχείο εισόδου, με βάση το οποίο παραμετροποιείται ο κώδικας για την επίλυση ενός προβλήματος. Για το πρόβλημα προκύπτουν αποτελέσματα ως αρχεία εξόδου, τα οποία αξιολογούνται κατά το στάδιο "post".

Για τους σκοπούς αυτής της Διπλωματικής Εργασίας και για την αρχική εξοικείωση με τον κώδικα FLUKA, κρίθηκε ότι πρέπει να επιλεγθεί προς παρουσίαση το πρώτο παράδειγμα εφαρμογής του κώδικα. Το παράδειγμα αυτό παρουσιάζεται στο βασικό εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα FLUKA (FLUKA Manual σε μορφή pdf), το οποίο βρίσκεται εύκολα στην επίσημη ιστοσελίδα του κώδικα, την www.fluka.org. Από τη διαπραγμάτευση αυτή προκύπτουν κυρίως συμπεράσματα σχετικά με το που πρέπει να δώσει το βάρος κατανόησης ο χρήστης που θα ζητήσει να λύσει με τον FLUKA μεγαλύτερα και πολυπλοκότερα προβλήματα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Ν.Π. Πετρόπουλο για την συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της Διπλωματικής Εργασίας. Οι ευχαριστίες επεκτείνονται στον Ειδικό Λειτουργικό Επιστήμονα της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας Δρ. Μηχανολόγο ΕΜΠ Κ.Α. Καρφόπουλο για την ευγενική του βοήθεια στο Κεφάλαιο 4 της παρούσης Εργασίας

EXTENDED ABSTRACT
INTRODUCTION TO THE "FLUKA" MONTE CARLO COMPUTER
CODE FOR THE SIMULATION OF PARTICLE INTERACTIONS
WITH MATTER

Diploma Dissertation by A. Petridou

Monte Carlo are algorithms based on the repetition of random samplings aiming to the prediction of processes results. Monte Carlo methods accept that using random and probabilistic approaches and exploiting the statistical nature of several problems (for which, in some cases, an analytical solution could be found) a good approximation of the solution could be possible. The problems of radiation transport within matter are suitable for solving with Monte Carlo methods. Within the present Diploma Dissertation, an attempt is made for the first acquaintance with the FLUKA code, which is one of the most prominent Monte Carlo codes employed for solving radiation transport problems.

The FLUKA code is a contemporary tool of general purpose, freely available and open source software that is used mainly for particle transport calculations and particle interactions calculations within matter. FLUKA is applicable for problems of (a) proton / electron accelerators shielding design, (b) accelerators targets design, (c) calorimetry calculations, (d).neutron activation calculations, (e) dosimetric calculations, (f) detectors design etc. The main priority during the FLUKA development and layout was to implement the latest and most reliable physical models. FLUKA results are generally in good agreement with experimental data in most transport and interactions stages. In cases when there exist no data for the verification of the FLUKA results, estimations are based on plausible assumptions, interpolations and / or extrapolations and laws of similarity. FLUKA is capable of handling complex matter geometries within which particles would interact. Along with FLUKA, visualization software tools are provided, useful for input preprocessing and output post processing. The most useful of these tools is called FLAIR.

FLUKA is suitable for use within the LINUX Operating System environment. Obtaining the full FLUKA source from the FLUKA site is an easy process that involves a simple registration. The source can then be compiled and installed in a suitable LINUX system. In order to facilitate FLUKA usage in WINDOWS Operating System environments the FLUKA providers have prepared appropriate tools, like the so-called *Flupix* Linux Live CD. Within

this dissertation the *Flupix* Linux Live CD was the method of employing FLUKA in a WINDOWS Operating System.

The effective exploitation of the FLUKA Monte Carlo capabilities, in order to predict the results of nuclear and atomic interactions in matter requires three main stages: Preprocessing (or just "pre"), Computation and Post processing (or just "post") of the obtained results. During the "pre" stage one has to prepare the input file in which the problem to be solved is described and the proper parameters of FLUKA are set. The evaluation of the results is done during the "post" stage, when the produced output files are examined.

This Diploma Dissertation aims to the familiarization with FLUKA. To this end it was decided to present and analyze the first example available for FLUKA usage. The input file of this example is presented in the FLUKA manual to be found in pdf at the FLUKA site, i.e. www.fluka.org. During the analysis of this example conclusions were drawn with regard to the knowledge of FLUKA details required for solving bigger and more complex problems.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Οι μέθοδοι *Monte Carlo*, είναι μια διακριτή και μεγάλη ομάδα υπολογιστικών αλγορίθμων που βασίζονται σε επαναλαμβανόμενες τυχαίες δειγματοληψίες για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων μιας διεργασίας. Οι μέθοδοι βασίζονται στην παραδοχή ότι με τη βοήθεια της τυχειότητας μπορούν να επιλυθούν ευκολότερα προβλήματα των οποίων η επίλυση θα μπορούσε να είναι και αναλυτική. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται συχνά για προβλήματα φυσικής και μαθηματικών και είναι ιδιαίτερα χρήσιμες όταν ο υπολογισμός της αναλυτικής επίλυσης ή τυχόν άλλος τρόπος επίλυσης είναι πολύ δύσκολος ή αδύνατος. Οι μέθοδοι *Monte Carlo* χρησιμοποιούνται κυρίως για τρία είδη προβλημάτων: βελτιστοποίηση, αριθμητική ολοκλήρωση και αριθμητικές προσεγγίσεις συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας. Το τελευταίο είδος προβλημάτων είναι αυτό που ενδιαφέρει για την επίλυση προβλημάτων διάδοσης ιοντιζουσών ακτινοβολιών στην ύλη.

Για τα προβλήματα διάδοσης ιοντιζουσών ακτινοβολιών στην ύλη, με χρήση καταλλήλων γεννητριών τυχαίων αριθμών δειγματολαμβάνονται συναρτήσεις πυκνοτήτων πιθανότητας δια των οποίων περιγράφονται διεργασίες που εξελίσσονται διαδοχικά. Για περισσότερη ακρίβεια οι δειγματοληψίες επαναλαμβάνονται σε ικανό αριθμό ώστε το αποτέλεσμα να προσεγγίζει την αναλυτική επίλυση ή να επαληθεύουν τα πειραματικά δεδομένα

1.2 Monte Carlo και ιοντίζουσες ακτινοβολίες

Για τη μελέτη της διάδοσης των ιοντιζουσών ακτινοβολιών στην ύλη έχουν αναπτυχθεί μια σειρά από αριθμητικές μεθόδους για την εκτίμηση των αλληλεπιδράσεων τους (π.χ. νετρονίων, φωτονίων, ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων, α σωματιδίων, άλλων σωματιδίων, ακόμα και υποατομικών). Οι μέθοδοι αυτοί διαχωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες. Στις μεθόδους της πρώτης κατηγορίας επιλύονται οι εξισώσεις μεταφοράς (*transport equations*) με χρήση κατάλληλων αριθμητικών τεχνικών, ώστε να προκύψει ο τρόπος συμπεριφοράς των ακτινοβολιών σε υλικά μέσα. Για τις μεθόδους αυτές έχουν γραφθεί ειδικοί κώδικες, οι οποίοι επιτρέπουν τον υπολογισμό της διάδοσης των ακτινοβολιών σε ύλη διαφορετικών γεωμετριών, διαφορετικών συνθέσεων και διαφορετικών παχών.

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι αριθμητικές μέθοδοι *Monte Carlo* (Η ονομασία *Monte Carlo*, δόθηκε ως κωδικός για τις μεθόδους αυτές κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου

Πολέμου). Η ιδέα για τις μεθόδους αυτές μπορεί να κατανοηθεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη αναλογία. Έστω ότι κάποιος θέλει να καθορίσει την πιθανότητα να πετύχει άθροισμα 7 ρίχνοντας δύο ζάρια, κάθε ένα από τα οποία έχουν αριθμούς από 1 έως και έξι.. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις για τη λύση. Κατά την πρώτη, υπολογίζεται πρώτα ο αριθμός όλων των δυνατών συνδυασμών των ζαριών. Αυτοί είναι συνολικά 36. Υπολογίζονται επίσης όλοι οι συνδυασμοί που δίνουν άθροισμα 7. Αυτοί είναι συνολικά 6. Η πιθανότητα επομένως ο παίκτης να πετύχει άθροισμα 7 είναι $6/36 = 0.167$. Αυτή η προσέγγιση είναι ασφαλώς ακριβής, παρόλα αυτά είναι καλή μόνο για απλά προβλήματα υπολογισμού συνδυασμών και πιθανοτήτων. Για παράδειγμα, η επίλυση με αυτόν τον τρόπο δυσκολεύει πολύ αν τα ζάρια είναι τρία ή περισσότερα και τα ζητούμενα αθροίσματα είναι περισσότερα από ένα. Κατά τη δεύτερη προσέγγιση, ακολουθείται μια πολύ απλούστερη και μάλλον ευχάριστη διαδικασία, σύμφωνα με την οποία τα ζάρια παίζονται μερικές φορές και καταγράφονται οι φορές που επιτεύχθηκε το ζητούμενο άθροισμα. Ο αριθμός των επιτυχιών διαιρείται με τον αριθμό των παιχνιδιών και υπολογίζεται μια εκτίμηση της πιθανότητας επίτευξης του ζητούμενου αθροίσματος. Όσες περισσότερες φορές παιχθούν τα ζάρια, τόσο καλύτερη γίνεται η εκτίμηση (χωρίς τελικά να χρειάζεται να εξαντληθούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί).

Με τον ίδιο περίπου τρόπο, οι υπολογισμοί Monte Carlo για τη διάδοση των ακτινοβολιών στην ύλη, γίνονται παρακολουθώντας την εξέλιξη (δηλαδή, όπως λέγεται, την ιστορία) της ζωής ενός π.χ. νετρονίου ή ενός φωτονίου καθώς περιπλανάται στην ύλη, από το σημείο που εισέρχεται σε αυτή, έως το σημείο που απορροφάται ή έως το σημείο από όπου εξέρχεται. Ο αριθμός των νετρονίων (π.χ.) που διασχίζουν την εξεταζόμενη ύλη διαιρεμένος με τον αριθμό των νετρονίων που την προσβάλλουν είναι μία εκτίμηση της πιθανότητας ότι ένα νετρόνιο δεν θα απορροφηθεί στην ύλη αυτή.

Πιο συγκεκριμένα, και για παράδειγμα, έστω ένας Monte Carlo υπολογισμός της εξασθένισης μιας παράλληλης δέσμης μονοενεργειακών νετρονίων ενέργειας E_0 σε μία επίπεδη πλάκα πάχους a . Για να ξεκινήσει η ιστορία του πρώτου νετρονίου, είναι αναγκαίο να ορισθεί σε ποιο σημείο, το νετρόνιο θα κάνει την πρώτη του αλληλεπίδραση. Αυτό γίνεται με βάση τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της πρώτης αλληλεπίδρασης

$$p(x) = \Sigma_t e^{-\Sigma_t x}$$

όπου η Σ_t είναι αυτή της ενέργειας E_0 . Υπάρχουν κατάλληλες μέθοδοι για τη με τυχαίο τρόπο δειγματοληψία της υπόψη συνάρτησης κατανομής. Έστω τώρα ότι, με αυτόν τον τρόπο, η τιμή της x προσδιορίζεται ως x_1 . Στη συνέχεια ελέγχεται αν η τιμή x_1 είναι μεγαλύτερη της a .

Αν $x_1 > a$, τότε το νετρόνιο διέσχισε τη θωράκιση χωρίς να αλληλεπιδράσει, το γεγονός καταγράφεται και η ιστορία του νετρονίου τερματίζεται. Αν όμως $x_1 < a$, έχει συμβεί αλληλεπίδραση μέσα στη θωράκιση στη θέση x_1 .

Αν τα πράγματα είναι έτσι, πρέπει τότε να καθορισθεί το είδος της αλληλεπίδρασης. Αν υποθεθεί ότι οι δυνατές αλληλεπιδράσεις των νετρονίων είναι μόνο δύο, η απορρόφηση και η ελαστική σκέδαση, οι πιθανότητες να πραγματοποιηθούν είναι $p_a = \Sigma_a/\Sigma_t$ για την απορρόφηση και $p_s = \Sigma_s/\Sigma_t$ για την ελαστική σκέδαση και ισχύει $p_a + p_s = 1$. Οι τιμές όλων των διατομών εννοούνται για την ενέργεια E_0 . Το είδος της αλληλεπίδρασης καθορίζεται συγκρίνοντας την p_a με έναν αριθμό R που έχει επιλεγεί με τυχαίο τρόπο από μια ομάδα τυχαίων αριθμών με τιμές μεταξύ του 0 και του 1. Τότε αν

$$R < p_a$$

η αλληλεπίδραση θεωρείται ότι είναι απορρόφηση. Αν

$$R > p_a$$

η αλληλεπίδραση θεωρείται ότι είναι ελαστική σκέδαση. Η λογική πίσω από την τεχνική αυτή είναι ότι ο τυχαίος αριθμός R ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ 0 και 1. Επομένως το μέρος των τυχαίων αριθμών που θα προκύψουν ως απορροφήσεις θα είναι αναγκαστικά p_a , όπως και απαιτείται.

Αν η αλληλεπίδραση είναι απορρόφηση, τότε η ιστορία του νετρονίου τερματίζεται. Αν η αλληλεπίδραση είναι ελαστική σκέδαση, τότε πρέπει να καθορισθεί η γωνία με την οποία σκεδάζεται το νετρόνιο. Αυτό γίνεται με τυχαία δειγματοληψία της κατανομής των γωνιών σκέδασης. Η κατανομή αυτή έχει προκύψει πειραματικά. Έστω ότι η δειγματοληψία δείχνει γωνία θ_1 . Επομένως, η ενέργεια του σκεδασθέντος νετρονίου υπολογίζεται με βάση τις αρχές διατήρησης της κινητικής ενέργειας και της ορμής ως

$$E_1 = \frac{E_0}{(A+1)^2} \left[\cos \theta_1 + \sqrt{A^2 - \sin^2 \theta_1} \right]^2$$

όπου A είναι ο μαζικός αριθμός του πυρήνα, με τον οποίο έγινε η σκέδαση. Η ιστορία αυτού του νετρονίου συνεχίζεται. Δειγματολαμβάνεται ξανά η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας σκέδασης $p(x)$, ώστε να καθορισθεί σε ποιο σημείο το νετρόνιο θα πραγματοποιήσει τη δεύτερη αλληλεπίδρασή του, λαμβάνοντας φυσικά υπόψη ότι αυτή τη φορά το νετρόνιο ξεκινάει από τη θέση x_1 και ακολουθεί τη διεύθυνση θ_1 . Και σε αυτή την περίπτωση γίνεται έλεγχος αν η δεύτερη αλληλεπίδραση είναι εντός της εξεταζόμενης ύλης. Αν ναι καθορίζεται

το είδος της αλληλεπίδρασης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Όταν αυτοί οι συλλογισμοί έχουν υλοποιηθεί σε έναν κώδικα ηλεκτρονικού υπολογιστή, κάθε ένα από τα προηγούμενα βήματα είναι ένα υποπρόγραμμα, το οποίο χρησιμοποιείται κάθε φορά που χρειάζεται καθώς τα βήματα της διαδικασίας προχωρούν.

1.3 Κώδικες Monte Carlo για ιοντίζουσες ακτινοβολίες

Λόγω της πολυπλοκότητας των υπολογιστικών κωδίκων Monte Carlo, για ιοντίζουσες ακτινοβολίες, δεν διατίθεται ένας μόνο κώδικας που να υλοποιεί υπολογιστικές εκτιμήσεις με τη μέθοδο αυτή για όλα τα είδη ακτινοβολιών, όλες τις δυνατές ενέργειες, όλα τα υλικά αλληλεπίδρασης κ.ο.κ. Αντίθετα έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικοί κώδικες κατάλληλοι για την εξυπηρέτηση επιμέρους υπολογιστικών εκτιμήσεων για ορισμένα είδη ακτινοβολιών, ορισμένες ενέργειες, ορισμένα υλικά μέσα κ.λπ. Στη συνέχεια, με βάση κυρίως εγκυκλοπαιδικές πηγές, γίνεται μια σύντομη αναφορά σε ορισμένους από τους κυριότερους τέτοιους κώδικες.

α. Κώδικας EGS (Electron Gamma Shower)

Ο κώδικας EGS είναι ένα πακέτο προγραμμάτων κατάλληλων για προσομοιώσεις Monte Carlo για τις αλληλεπιδράσεις φωτονίων και ηλεκτρονίων στην ύλη σε τυχαίες γεωμετρικές ύλης. Ο κώδικας αυτός είναι από τους πρώτους που διαδόθηκαν ευρέως και έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί τις ιστορίες φωτονίων που αλληλεπιδρούν παράγοντας και ηλεκτρόνια καθώς και τις ιστορίες ηλεκτρονίων που αλληλεπιδρούν παράγοντας φωτόνια. Οι ενέργειες των αλληλεπιδρώντων φωτονίων και ηλεκτρονίων μπορούν να κυμαίνονται από μερικά keV έως και αρκετές εκατοντάδες GeV. Ο κώδικας αυτός συγκροτήθηκε για πρώτη φορά στο Stanford Linear Accelerator Center των Η.Π.Α. Από τις αρχές της δεκαετίας του 80 στην ανάπτυξη του κώδικα συμμετείχαν και το National Research Council of Canada και το KEK (High Energy Accelerator Research Organization) της Ιαπωνίας. Η ανάπτυξη αυτού του κώδικα έφθασε μέχρι και την έκδοση EGS4.

Ακολούθησαν άλλες εκδόσεις με νέα και ακριβέστερα μοντέλα φυσικής: Η έκδοση EGSnrc, που αναπτύσσεται και συντηρείται από το Ionizing Radiation Standards Group, Measurement Science and Standards του National Research Council of Canada, και η έκδοση EGS5, που αναπτύσσεται και συντηρείται από το KEK Ιαπωνίας.

Ειδικά η έκδοση EGSnrc χρησιμοποιείται ευρέως και διεθνώς για την επίλυση προβλημάτων πεδίων ακτινοβολίας φωτονίων - ηλεκτρονίων. Ο κώδικας διακρίνεται για την ακρίβειά του σε σχέση με την προσομοίωση των μηχανισμών μεταφοράς φορτισμένων σωματιδίων και

των σκεδάσεών τους στο ατομικό επίπεδο. Πολλαπλές διαδοχικές σκεδάσεις φορτισμένων σωματιδίων σε μεγάλα ενεργειακά βήματα προσομοιώνονται επίσης επιτυχώς χωρίς να θυσιάζεται η ακρίβεια, πράγμα που οδηγεί σε σημαντική οικονομία χρόνου υπολογισμών. Στον EGSnrc περιλαμβάνεται και μια βιβλιοθήκη C++ ονομαζόμενη egs++, η οποία χρησιμοποιείται για την υλοποίηση πολύπλοκων γεωμετριών ύλης ή πηγών σωματιδίων. Τέλος, ο κώδικας αυτός διατίθενται ως ανοιχτού λογισμικού (open source) σύμφωνα με την άδεια τύπου GNU Affero General Public License. Η διάθεση του κώδικα είναι διαδικτυακή και δωρεάν. Το εγχειρίδιο χρήσης είναι και αυτό δωρεάν διαθέσιμο στο διαδίκτυο.

β. Κώδικας GEANT (GEometry ANd Tracking)

Ο κώδικας GEANT είναι ένα πακέτο υπολογιστικών προγραμμάτων σχεδιασμένο για την προσομοίωση της μεταφοράς στοιχειωδών σωματιδίων δια μέσου της ύλης με τη χρήση μεθόδων Monte Carlo. Η ανάπτυξη του υπόψη κώδικα ξεκίνησε στο CERN για να εξυπηρετήσει την προσομοίωση πειραμάτων φυσικής υψηλών ενεργειών, παρόλα αυτά σήμερα χρησιμοποιείται και για διαφορετικούς σκοπούς. Η πρώτη έκδοση του GEANT έγινε το 1974. Ακολούθησε η επόμενη έκδοση GEANT3 το 1982. Όλες οι επόμενες εκδόσεις και μέχρι την 3.21 συντάχθηκαν σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Μετά το έτος 2000 η τελευταία αυτή έκδοση παραμένει στάσιμη αλλά κατά περιόδους διορθώνονται bugs. Σήμερα ο κώδικας GEANT3 χρησιμοποιείται ακόμα, αλλά περιορισμένα, για την προσομοίωση ορισμένων πειραμάτων. Τέλος, ο κώδικας αυτός διατίθενται ελεύθερα σύμφωνα με την άδεια τύπου GNU General Public License. Εξαιρούνται κάποια τμήματά του για αδρονιακές αλληλεπιδράσεις, τα οποία προήρθαν από συνεργασία με την ομάδα που ανέπτυξε τον κώδικα FLUKA (βλ. λίγο πιο κάτω).

γ. Κώδικας Geant4

Πρόκειται για κώδικα παρομοίου σκοπού με τον GEANT3. Για διάκριση μεταξύ των δύο ο Geant4 γράφεται με πεζά γράμματα. Πρόκειται για επανεγγραφή του κώδικα GEANT εξ' ολοκλήρου σε γλώσσα C++. Ο Geant4 αναπτύχθηκε για πρώτη φορά μεταξύ 1994 και 1998 και στη συνέχεια αναπτύσσεται και συντηρείται από την ονομαζόμενη Geant4 international collaboration. Ο κώδικας αυτός είναι ελεύθερα διαθέσιμος σύμφωνα με την ειδική άδεια Geant4 Software License.

Ο κώδικας Geant4 περιλαμβάνει εργαλεία για την ανάπτυξη γεωμετριών ύλης και πηγών, για την παρακολούθηση ιστοριών μεταφοράς, για τον υπολογισμό αποκρίσεων ανιχνευτών, για τη διαχείριση της εκτέλεσης της προσομοίωσης, για την αλληλεπίδραση με το χρήστη και για

την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Με τα εργαλεία αυτά εξοικονομείται πολύς χρόνος που διαφορετικά χρειάζεται να αφιερώνεται σε μικρολεπτομέρειες και οι ερευνητές μπορούν να ξεκινήσουν να ασχολούνται με το φυσικό πρόβλημα που απασχολεί σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Μετά και την έκδοση 10.0, ο Geant4 απέκτησε δυνατότητες παράλληλης επεξεργασίας. Οι δυνατότητες αυτές είναι προς το παρόν διαθέσιμες μόνο για Λειτουργικά Συστήματα τύπου LINUX (όπως MACOS, Ubuntu, κ.λπ.).

δ. Κώδικας PENELOPE (PENetration and Energy LOSS of Positrons and Electrons)

Πρόκειται για κώδικα παρόμοιου σκοπού με τον EGS. Στην πορεία ανάπτυξής του εκτός από τα φορτισμένα σωματίδια προστέθηκε και η προσομοίωση φωτονίων. Η προσομοίωση βασίζεται σε ένα μοντέλο σκέδασης που συνδυάζει αριθμητικά δημιουργούμενες βάσεις δεδομένων με αναλυτικές εκφράσεις διατομών για τις διάφορες αλληλεπιδράσεις. Ο κώδικας μπορεί να εφαρμόζεται για ενέργειες στην περιοχή από μερικές εκατοντάδες eV έως περίπου 1 GeV. Δίνεται η δυνατότητα να ορίζονται κατώτερα όρια για τις γωνίες σκέδασης καθώς και για τη μείωση της ενέργειας των αλληλεπιδρώντων. Μετά τα όρια αυτά η προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων γίνεται με λεπτομέρεια. Η χρήση των ορίων επιτρέπει στον κώδικα PENELOPE να γίνεται ικανοποιητικά ταχύτερος χωρίς απώλεια ακρίβειας. Ο κώδικας PENELOPE εκδόθηκε για πρώτη φορά το 1996. Η τρέχουσα έκδοση του κώδικα είναι η 14 (εννοείται του 2014) και προέκυψε από τη συνεχή ανάπτυξη του κώδικα του 1996. Η γλώσσα προγραμματισμού στην οποία αναπτύχθηκε και λειτουργεί ο κώδικας είναι η FORTRAN. Έχουν γίνει απόπειρες μεταγραφής του σε γλώσσα C, προκειμένου να διευκολυνθεί η παράλληλη επεξεργασία. Ο κώδικας διατίθεται δωρεάν, μετά από αίτηση, από τη βάση δεδομένων NEADB (Nuclear Energy Agency Data Base) του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) καθώς και από τη βάση δεδομένων RSICC (Radiation Safety Information Computational Center) του Oak Ridge National Laboratory των Η.Π.Α. Σημειώνεται ότι στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ, υπάρχει μεγάλη εμπειρία στη χρήση του κώδικα PENELOPE, τόσο σε επίπεδο Διπλωματικών Εργασιών, όσο και σε επίπεδο επιστημονικών δημοσιεύσεων, με την επίβλεψη του Αν. Καθηγητή του Τομέα Μάριου Αναγνωστάκη.

ε. Κώδικας MCNP (Monte Carlo N-Particle transport code)

Ο κώδικας MCNP είναι ένα πακέτο λογισμικού κατάλληλο για την προσομοίωση κυρίως πυρηνικών αντιδράσεων. Υπάρχει από το 1957 και αναπτύχθηκε από το Los Alamos

National Laboratory των Η.Π.Α. Η ανάπτυξή του και η βελτίωσή του συνεχίζεται μέχρι και σήμερα. Όπως και ο κώδικας PENELOPE, έτσι και ο κώδικας MCNP διατίθεται δωρεάν, μετά από αίτηση, από τη βάση δεδομένων NEADB (Nuclear Energy Agency Data Base) του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) καθώς και από τη βάση δεδομένων RSICC (Radiation Safety Information Computational Center) του Oak Ridge National Laboratory των Η.Π.Α. Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση π.χ. σχάσεων αλλά μπορεί να παρακολουθήσει και άλλες αλληλεπιδράσεις σωματιδίων με την ύλη, όπως π.χ. νετρονίων, φωτονίων, ηλεκτρονίων και άλλων. Τα πεδία εφαρμογής του αφορούν κυρίως (αλλά βεβαίως δεν περιορίζονται) στην ακτινοπροστασία, τη δοσιμετρία, τη θωράκιση έναντι ακτινοβολιών, την υγειοφυσική, την ασφάλεια αντιδραστήρων σε συνθήκες κρισιμότητας, το σχεδιασμό και την ανάλυση συμπεριφοράς ανιχνευτών, το σχεδιασμό στόχων επιταχυντών, τη ραδιογραφία, το σχεδιασμό αντιδραστήρων σχάσης και σύντηξης, την απορρύπανση από ραδιενέργεια, τη διάλυση πυρηνικών αντιδραστήρων κ.λπ. Η τρέχουσα έκδοση του κώδικα είναι η MCNP6.

στ. Κώδικας FLUKA (FLUktuierende KAskade)

Ο κώδικας FLUKA είναι το πλέον πλήρες και ολοκληρωμένο πακέτο λογισμικού για προσομοιώσεις Monte Carlo κατάλληλο για την περιγραφή των αλληλεπιδράσεων και της μεταφοράς πάρα πολλών σωματιδίων στην ύλη συμπεριλαμβανομένων ακόμα και πυρήνων. Ο κώδικας FLUKA έχει πολλές εφαρμογές στη σωματιδιακή φυσική, στα πειράματα φυσικής υψηλών ενεργειών, στις θωρακίσεις έναντι ακτινοβολίας, στο σχεδιασμό ανιχνευτών και τηλεσκοπίων ακτινοβολίας, στις μελέτες κοσμικής ακτινοβολίας, στη δοσιμετρία, στην ιατρική φυσική, στη ραδιοβιολογία και αλλού. Σχετικά πρόσφατα προστέθηκαν στον κώδικα δυνατότητες προσομοίωσης θεραπείας με αδρόνια. Ο κώδικας FLUKA διατίθεται σε διάφορες μορφές αλλά συνηθέστερα ως προμεταφρασμένος αντικειμενικός κώδικας κυρίως για λειτουργικά συστήματα LINUX. Ο πηγαίος κώδικας είναι επίσης διαθέσιμος αλλά κάτω από τους περιορισμούς που επιβάλλει η αντίστοιχη άδεια με το όνομα FLUKA license. Ο κώδικας FLUKA έχει αναπτυχθεί σε FORTRAN. Σε λειτουργικά συστήματα LINUX, ο χρήστης του κώδικα, αν χρειάζεται, μπορεί να αναπτύξει δικά του προγράμματα FORTRAN, τα οποία πρέπει να μεταφράσει με τον μεταφραστή g77. Από το 2011 και μετά (έκδοση > 4.5) ο FLUKA διατίθεται και σε μορφή 64 bit. Επιπλέον, υπάρχει διαθέσιμο και ένα γραφικό περιβάλλον χρήστη για τη διευκόλυνση των προσομοιώσεων με τον FLUKA, το οποίο ονομάζεται Flair. Το λογισμικό Flair έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα προγραμματισμού Python και είναι επίσης διαθέσιμο. Ο κώδικας FLUKA υποστηρίζεται από το CERN και το INFN

(Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) της Ιταλίας. Αυτοί οι δύο οργανισμοί έχουν και τα δικαιώματα του κώδικα.

Το αδρονιακό μέρος των πρώιμων εκδόσεων του FLUKA, χρησιμοποιήθηκε, όπως ήδη αναφέρθηκε, και στον κώδικα GEANT3 και πρέπει να διακρίνεται από την τρέχουσα έκδοση του FLUKA, διότι η ανάπτυξη του GEANT3 έχει σταματήσει και οι αδρονιακοί υπολογισμοί στην τρέχουσα έκδοση του FLUKA γίνονται πλέον με διαφορετικό τρόπο.

1.4 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Στο πλαίσιο της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας γίνεται προσπάθεια για μια πρώτη γνωριμία με τον κώδικα FLUKA χωρίς να αναπτύσσεται κάποια επίλυση συγκεκριμένου προβλήματος. Αυτό επιβάλλεται από το γεγονός ότι ο κώδικας είναι μεγάλος, πολύπλοκος, πολλών δυνατοτήτων και η χρήση του δεν είναι εύκολη για κάποιον που δεν γνωρίζει πολύ καλά πυρηνική φυσική. Επιπλέον ο κώδικας στην μορφή που εξετάστηκε προϋποθέτει βασικές γνώσεις λειτουργικού συστήματος LINUX, πράγμα που σήμερα δεν είναι αυτονόητο για τους περισσότερους.

Η Διπλωματική Εργασία αναπτύσσεται στις ακόλουθες επόμενες ενότητες:

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται μια πολύ συνοπτική περιγραφή του κώδικα FLUKA με βάση τα αναφερόμενα στο σχετικό εγχειρίδιο. Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο ο κώδικας FLUKA, μπορεί να εγκατασταθεί και να λειτουργήσει σε Λειτουργικό Σύστημα MS Windows, ώστε αυτός καταρχήν να δοκιμασθεί και να αποκτηθεί μικρή εμπειρία από έναν νέο χρήστη. Στο 4^ο Κεφάλαιο αναπτύσσεται η επίλυση ενός από τα απλά παραδείγματα που συνοδεύουν τον κώδικα. Με αφορμή το παράδειγμα αυτό εξετάζονται θέματα όπως το είδος και η γεωμετρία της πηγής, το είδος και η γεωμετρία της ύλης στην οποία γίνονται οι αλληλεπιδράσεις, το είδος των ανιχνευτών, τα αποτελέσματα που προκύπτουν και η μορφή τους καθώς και η χρήση του γραφικού περιβάλλοντος. Σε Επίλογο που ακολουθεί αναφέρονται συμπεράσματα που προέκυψαν καθώς και δυνατότητες χρήσης του κώδικα FLUKA σε τυπικά προβλήματα που απασχολούν στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ.

Οι βιβλιογραφικές παραπομπές που χρησιμοποιούνται στη Διπλωματική Εργασία είναι τυπικές λόγω του εισαγωγικού χαρακτήρα του κειμένου. Για παράδειγμα οι βιβλιογραφικές αναφορές που υπάρχουν στο εγχειρίδιο του κώδικα FLUKA είναι πάρα πολλές και δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του προβλήματος - παράδειγμα που είναι μεταξύ των στόχων της Εργασίας. Οι ερευνητές ή οι ερευνητικές ομάδες που γενικά

συνέβαλλαν στη συγκρότηση του κώδικα FLUKA είτε με θεωρητικά συμπεράσματα είτε συμμετέχοντας στη συγγραφή του, αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2 μόνο ονομαστικά, χωρίς χρονολογίες ή άλλα στοιχεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ FLUKA

2.1 Γενικά

Ο κώδικας FLUKA είναι ένα γενικού σκοπού, ελεύθερα διαθέσιμο, εργαλείο ανοιχτού λογισμικού που βασίζεται στην μέθοδο Monte Carlo, για υπολογισμούς μεταφοράς στοιχειωδών σωματιδίων στην ύλη και των αλληλεπιδράσεων τους με αυτή. Τα πνευματικά δικαιώματα του κώδικα ανήκουν στα ερευνητικά κέντρα στα οποία κυρίως αναπτύχθηκε, δηλαδή στο INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) Ιταλίας και στο CERN (European Organization for Nuclear Research). Ο κώδικας FLUKA καλύπτει ένα εκτεταμένο φάσμα εφαρμογών, όπως (α) υπολογισμούς θωρακίσεων προστασίας σε εγκαταστάσεις επιταχυντών πρωτονίων και ηλεκτρονίων, (β) σχεδιασμό κατάλληλων στόχων για χρήση σε διατάξεις επιταχυντών, (γ) υπολογισμούς θερμιδομετρίας, (δ) υπολογισμούς νετρονικής ενεργοποίησης, (ε) δοσιμετρικούς υπολογισμούς, (στ) σχεδίαση ανιχνευτικών διατάξεων κ.ά.

Η προτεραιότητα κατά το σχεδιασμό και την ανάπτυξη του FLUKA ήταν πάντα η υλοποίηση σύγχρονων και καλώς θεμελιωμένων φυσικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά υλοποιούνται με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται συμβατότητα μεταξύ διαδοχικών σταδίων αλληλεπιδράσεων σωματιδίων με την ύλη, και να εφαρμόζονται οι αναγκαίοι νόμοι διατήρησης σε κάθε στάδιο. Τα μοντέλα και ο τρόπος υλοποίησής τους στον FLUKA περιγράφονται σε πλήθος επιστημονικών άρθρων δημοσιευμένων σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια. Τα αποτελέσματα είναι γενικά συγκρίσιμα με πειραματικά δεδομένα σε κάθε στάδιο των αλληλεπιδράσεων. Με αυτή τη μέθοδο, οι τελικές προβλέψεις επιτυγχάνονται με ένα ελάχιστο σύνολο ελεύθερων παραμέτρων που μπορούν να καθορίζονται για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ενεργειών / στόχων / βλημάτων. Ως αποτέλεσμα, σε περίπλοκα προβλήματα, τα αποτελέσματα προκύπτουν άμεσα από την εφαρμογή των φυσικών μοντέλων. Φυσικά, όπου δεν υπάρχουν άμεσα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για επαλήθευση των αποτελεσμάτων, γίνονται εύλογες προβλέψεις με τη χρήση εύλογων υποθέσεων, παρεμβολών ή προεκβολών και νόμων ομοιότητας.

Ο κώδικας FLUKA μπορεί να προσομοιώσει με μεγάλη ακρίβεια τις αλληλεπιδράσεις με την ύλη και τη διάδοση στην ύλη περίπου 60 διαφορετικών στοιχειωδών σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένων φωτονίων και ηλεκτρονίων ενέργειας από 100 eV - 1 keV μέχρι ενέργειας τάξεως PeV, νετρίνο, μιονίων οποιασδήποτε ενέργειας, αδρονίων ενέργειας έως 20 TeV και όλων των αντίστοιχων αντι-σωματιδίων, νετρονίων μέχρι την περιοχή των θερμικών

ενεργειών και βαρέων ιόντων. Άλλη δυνατότητα του FLUKA είναι υπολογισμοί φαινομένων μεταφοράς πολωμένων φωτονίων (π.χ. ακτινοβολία από σύγχροτρα) όπως και φωτονίων ορατού φωτός. Η χρονική εξέλιξη και η παρακολούθηση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας που παράγεται από ασταθείς πυρήνες ή ασταθή σωματίδια που δημιουργούνται από τις επιμέρους αλληλεπιδράσεις μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια της υπολογιστικής εξέλιξης της μεταφοράς των σωματιδίων.

Ο κώδικας FLUKA μπορεί επιπλέον να χειριστεί εξαιρετικά πολύπλοκες γεωμετρίες ύλης με την οποία αλληλεπιδρούν σωματίδια. Διατίθενται επιπλέον διάφορα εργαλεία οπτικοποίησης αποτελεσμάτων και εντοπισμού σφαλμάτων. Για τις περισσότερες εφαρμογές ο χρήστης δεν χρειάζεται να προγραμματίσει κάτι. Παρόλα αυτά για ειδικές περιπτώσεις παρέχονται στο χρήστη για τροποποίηση κατάλληλες υπορουτίνες σε γλώσσα Fortran77.

Ο κώδικας φιλοδοξεί να υπηρετεί ένα δύσκολο και ανταγωνιστικό συνδυασμό ιδιοτήτων όπως αποτελεσματικότητα, ακρίβεια, συνέπεια και ευελιξία. Η αποτελεσματικότητα έχει επιτευχθεί με την προσφυγή του κώδικα -όταν χρειάζεται- σε πίνακες ιδιοτήτων ύλης και σωματιδίων (look-up tables) παρά στον υπολογισμό αυτών των ιδιοτήτων, καθώς και με τη συστηματική χρήση μεταβλητών διπλής ακρίβειας που έχουν μεγάλη επίδραση στη συνολική ακρίβεια: και οι δύο αυτές μέθοδοι έχουν βελτιστοποιηθεί με την προσεκτική επιλογή κατάλληλων αλγορίθμων. Για να επιτευχθεί μια λογική ευελιξία και για την ελαχιστοποίηση της ανάγκης για μέρη κώδικα που μπορούν να γράφονται από τον χρήστη, ο FLUKA παρέχει μεγάλο αριθμό επιλογών στη διάθεση του χρήστη και χρησιμοποιεί δυναμικές διαστάσεις πινάκων.

2.2 Αλληλεπιδράσεις που προσομοιώνονται στον FLUKA

Ακολουθεί μια σύντομη περίληψη των δυνατοτήτων και των περιορισμών του FLUKA σε ό,τι αφορά τις αλληλεπιδράσεις που προσομοιώνονται, όπως αυτή υπάρχει στο εγχειρίδιο πρακτικής χρήσης του Ferrari (2011). Η ανάλυση αυτή γίνεται κατά είδη αλληλεπιδράσεων σωματιδίων που μπορούν να προσομοιωθούν στον FLUKA.

2.2.1 Μη ελαστικές αλληλεπιδράσεις με αδρόνια

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στον FLUKA για την περιγραφή μη ελαστικών αλληλεπιδράσεων αδρονίων με πρωτόνια ή νετρόνια διακρίνονται ανάλογα με την ενέργεια των αδρονίων (όπου, προχέιρως, ως αδρόνια νοούνται σύνθετα σωματίδια αποτελούμενα από υποατομικά σωματίδια όπως τα quark τα antiquark και τα μεσόνια, π.χ. τα πρωτόνια και τα νετρόνια είναι αδρόνια που αποτελούνται από quark και μεσόνια):

(i) αν η ενέργεια των αδρονίων είναι μικρότερη από λίγα GeV χρησιμοποιούνται μοντέλα εκλεκτικών αλληλεπιδράσεων που εξαρτώνται προφανώς από αντίστοιχες στάθμες διέγερσης και μοντέλα διάσπασης στοιχειωδών σωματιδίων

(ii) αν η ενέργεια είναι μεγαλύτερη χρησιμοποιείται το μοντέλο Dual Parton (DPM)

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στον FLUKA για την περιγραφή μη ελαστικών αλληλεπιδράσεων αδρονίων με πυρήνες διακρίνονται ανάλογα με την ορμή των αδρονίων:

(α) αν το μέτρο της ορμής είναι μικρότερο από 3 - 5 GeV/c (όπου c η ταχύτητα του φωτός) χρησιμοποιείται ένα πολύ λεπτομερές μοντέλο τύπου Generalized Intra-Nuclear Cascade (GINC), το οποίο ονομάζεται PEANUT.

(β) αν το μέτρο της ορμής είναι μεγαλύτερο χρησιμοποιείται το μοντέλο πολλαπλών σκεδάσεων Gribov-Glauber σε συνδυασμό με ένα απλούστερο GINC που αναλαμβάνει τη μοντελοποίηση όταν η ορμή μειωθεί.

Και στις δύο αυτές περιπτώσεις παρακολουθούνται και συνεπαγόμενες διαδικασίες μετά τις αλληλεπιδράσεις, όπως π.χ. σχάση, αποδιέγερση με εκπομπή φωτονίων (photon de-excitation), αποδιέγερση με εκπομπή σωματιδίων (nucleon evaporation) κλπ.

Ο κώδικας FLUKA μπορεί επίσης να προσομοιώνει αλληλεπιδράσεις με βλήματα φωτόνια.

Λίγο πιο αναλυτικά και υπό μορφή καταλόγου αναφέρεται:

- Οι μικροσκοπικές ενεργές διατομές αλληλεπιδράσεων τύπου αδρόνιο - αδρόνιο υπολογίζονται με συσχετίσεις που βασίζονται σε διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα.
- Οι μικροσκοπικές ενεργές διατομές τύπου αδρόνιο - πυρήνας υπολογίζονται από ένα μίγμα αποτελούμενο από δεδομένα σε πίνακες και από συσχετίσεις
- Οι διατομές δυναμικών αλληλεπιδράσεων (όπου διατηρείται η κινητική ενέργεια) και αλληλεπιδράσεων ανταλλαγής φορτίου εκτιμώνται με κβαντομηχανικές μεθόδους κυματικής ανάλυσης, όπως η μετατόπιση φάσης (phase shift analysis) και η ονομαζόμενη eikonal approximation.
- Οι διατομές μη ελαστικών αλληλεπιδράσεων τύπου αδρόνιο - αδρόνιο προσομοιώνονται ανάλογα με την ενέργεια των αντιδρώντων χονδρικά ως εξής:
 - o για μέτρο ορμής $< 20 \text{ TeV}/c$ και $> 5 \text{ GeV}/c$ χρησιμοποιείται το μοντέλο DPM

- για μέτρο ορμής από το επιτρεπόμενο κατώφλι αλληλεπίδρασης έως 5 GeV/c χρησιμοποιούνται μοντέλα εκλεκτικών αλληλεπιδράσεων και μοντέλα διάσπασης στοιχειωδών σωματιδίων
- Οι διατομές μη ελαστικών αλληλεπιδράσεων τύπου αδρόνιο - πυρήνας προσομοιώνονται ανάλογα με την ενέργεια και το είδος του βλήματος:
 - για μέτρο ορμής < 20 TeV/c και > 5 GeV/c χρησιμοποιείται το μοντέλο Gribov-Glauber σε συνδυασμό με το μοντέλο GINC
 - για μέτρο ορμής κάτω από 5 GeV/c σε ό,τι αφορά σε νουκλεόνια, αντι-νουκλεόνια και πόνια (δηλαδή P-μεσόνια) και για κινητική ενέργεια μικρότερη από 1.5 GeV σε ό,τι αφορά σε καόνια (δηλαδή K-μεσόνια) χρησιμοποιείται το μοντέλο PEANUT (GINC)
 - ειδικά για καόνια και ανάλογα με την ενέργειά τους, υπάρχουν περιπτώσεις που πρέπει να χρησιμοποιείται μοντέλο ενδιάμεσο μεταξύ του PEANUT (GINC) και του DPM

Η μοντελοποίηση που υλοποιείται στον FLUKA μπορεί να προβλέψει -αν συντρέχουν οι προϋποθέσεις από την αλληλεπίδραση που μελετάται, και τον κατακερματισμό ακόμα και ελαφρών πυρήνων μέχρι και σε 6 επιμέρους τμήματα, σύμφωνα και με το μοντέλο "διάλυσης" του Fermi. Επίσης ο FLUKA συμπεριλαμβάνει και μοντελοποίηση για ενσωματώσεις (συλλήψεις) αντι-σωματιδίων.

2.2.2 Ελαστικές σκεδάσεις

Για το σκοπό αυτό ο FLUKA χρησιμοποιεί:

- Παραμετρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό διατομών ελαστικών σκεδάσεων νουκλεονίου - νουκλεονίου. Υπενθυμίζεται ότι ως νουκλεόνια ορίζονται τα σωματίδια που συμμετέχουν στο σχηματισμό ενός πυρήνα, δηλαδή τα πρωτόνια και τα νετρόνια.
- Πίνακες με τιμές διατομών ελαστικών σκεδάσεων πυρήνα - πυρήνα.
- Πίνακες με δεδομένα μετατόπισης φάσης για ανάλυση ελαστικών σκεδάσεων πιονίου - πρωτονίου και καονίου - πρωτονίου.

- Λεπτομερή κινηματική ανάλυση της ελαστικής σκέδασης με πυρήνες υδρογόνου και της προκύπτουσας μεταφοράς στην ύλη των πρωτονίων που αποκτούν σημαντική κινητική ενέργεια.

2.2.3 Αλληλεπιδράσεις τύπου πυρήνα - πυρήνα

Οι αλληλεπιδράσεις τύπου πυρήνα - πυρήνα που προκύπτουν κυρίως εξαιτίας παραγωγής ιόντων υπολογίζονται με τη βοήθεια ειδικών για το σκοπό μοντέλων.

- για κινητικές ενέργειες άνω των 5 GeV ανά νουκλεόνιο χρησιμοποιούνται τα μοντέλα DPJMET-II ή DPJMET-III, με ειδική διαδικασία αρχικοποίησης.
- για μικρότερες κινητικές ενέργειες μεταξύ 0.125 και 5 GeV ανά νουκλεόνιο χρησιμοποιείται ένα τροποποιημένο μοντέλο RQMD (Relativistic Quantum Molecular Dynamics)
- για κινητικές ενέργειες κάτω από 0.125 GeV ανά νουκλεόνιο χρησιμοποιείται ένα μοντέλο BME (Boltzmann Master Equation)

2.2.4 Μεταφορά φορτισμένων αδρονίων και μιονίων στην ύλη

Μια πρωτότυπη υλοποίηση στον FLUKA των σκεδάσεων Coulomb και των φαινομένων ιονισμού επιτρέπει στον κώδικα να χειριστεί με ακρίβεια δύσκολα προβλήματα όπως η οπισθοσκέδαση ηλεκτρονίων και η απορρόφηση ενέργειας στην ύλη ακόμα και από σωματίδια πολύ χαμηλής ενέργειας επιπέδου keV.

Για την απορρόφηση ενέργειας χρησιμοποιούνται και συνεκτιμώνται:

- Η θεωρία Bethe - Bloch, το φαινόμενο Barkas Z^3 και το φαινόμενο Bloch Z^4 και η διόρθωση Mott στην διατομή σκέδασης Rutherford.
- Η παραγωγή και μεταφορά (προαιρετικά) ακτίνων $-δ$ (δηλαδή ηλεκτρονίων υψηλής κινητικής ενέργειας) με συνεκτίμηση φαινομένων που σχετίζονται με το spin και τους ιονισμούς. Ο κώδικας υλοποιεί για το σκοπό αυτό την παραγωγή και την μεταφορά ακτίνων $-δ$ λαμβάνοντας υπόψη και φαινόμενα όπως τη διόρθωση Blunck - Leisegang
- Διορθώσεις χαμηλής ενέργειας που συνδέονται με φαινόμενα σχετιζόμενα με τις στιβάδες ηλεκτρονίων, όπως εξετάστηκαν από τον Ziegler
- Η επίδραση φαινομένων ιονισμού και ο ρόλος της πυκνότητας σύμφωνα με τις εργασίες των Sternheimer, Berger και Seltzer

- Μη ιοντίζουσες απώλειες ενέργειας (NIEL, Non-Ionizing Energy Losses)
 - Μετατοπίσεις ανά άτομο (DPA, Displacements Per Atom)
 - Ένας ειδικός αλγόριθμος μεταφοράς, βασισμένος στη θεωρία του Moliere σχετικά με την σκέδαση Coulomb που βελτιώθηκε από τον Bethe, χρησιμοποιώντας κατάλληλες συσχετίσεις
 - Ο αυστηρός καθορισμός οριακών συνθηκών
 - Η αυστηρή περιγραφή καμπύλων τροχιών σε μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία
 - Ο διαρκής και αυτόματος έλεγχος του βήματος
 - Ο συνεχής έλεγχος του μήκους διάδοσης
 - Ο συνυπολογισμός σχετικιστικών φαινομένων spin στο επίπεδο της δεύτερης προσέγγισης Born
 - Οι επιπτώσεις των αλληλεπιδράσεων στον όγκο των πυρήνων
 - Η διόρθωση Fano για πολλαπλές σκεδάσεις με βαριά φορτισμένα σωματίδια
 - Η απλή σκέδαση με πυρήνα με βάση το μοντέλο του Rutherford
 - Η ακτινοβολία πέδησης και η δίδυμη γένεση. Ο χρήστης του κώδικα μπορεί να επιλέξει αν αυτά τα φαινόμενα θα θεωρούνται διακριτές ή συνεχείς διαδικασίες απορρόφησης ενέργειας.
- και
- Οι φωτοπυρηνικές αλληλεπιδράσεις (φωτοαντιδράσεις) με μόνια, με ή χωρίς τη μεταφορά των παραγόμενων δευτερογενών σωματιδίων.

2.2.5 Αλληλεπιδράσεις με νετρόνια χαμηλής ενέργειας

Για νετρόνια με ενέργεια μικρότερη των 20 MeV, ο FLUKA χρησιμοποιεί δική του βιβλιοθήκη μικροσκοπικών ενεργών διατομών νετρονίων, η οποία περιέχει περισσότερα από 250 διαφορετικά υλικά, που έχουν επιλεγεί λόγω του ρόλου τους στην Φυσική, τη Δοσιμετρία και τις εφαρμογές των Επιταχυντών. Η βιβλιοθήκη αυτή βασίζεται στα πιο πρόσφατα αξιολογημένα δεδομένα:

Το φαινόμενο της μεταφοράς των νετρονίων στην ύλη υλοποιείται να περιλαμβάνει:

- Μεταφορά νετρονίων πολλαπλών ομάδων ενέργειας με παράλληλη παραγωγή και παρακολούθηση φωτονίων και νετρονίων σχάσης από αντίστοιχες αλληλεπιδράσεις.
- Μερική επιβράδυνση που προκύπτει από ελαστικές σκεδάσεις με πυρήνες υδρογόνου
- Παραγωγή πρωτονίων από πυρηνικές αντιδράσεις διάσπασης τύπου (n, p)

Για τους πυρήνες εκτός από το υδρογόνο, χρησιμοποιούνται παράγοντες kerma για τον υπολογισμό ενέργειας που εναποτίθεται στην αντίστοιχη ύλη.

2.2.6 Αλληλεπιδράσεις με ηλεκτρόνια

Ο FLUKA χρησιμοποιεί έναν δικό του πρωτότυπο αλγόριθμο μεταφοράς για ηλεκτρόνια. Η κατώτερη ενέργεια ηλεκτρονίων που μπορεί να διαχειρισθεί ο κώδικας είναι 1 keV. Στον αλγόριθμο αυτό λαμβάνονται υπόψη ακόμα και μικρές μεταβολές των ενεργών διατομών ανάλογα με την ενέργεια προκειμένου για την ακριβή περιγραφή διακριτών αλληλεπιδράσεων καθώς και όλες οι συνεχείς απώλειες ενέργειας σε κάθε στάδιο μεταφοράς. Επίσης λαμβάνονται υπόψη οι διαφορές μεταξύ των ποζιτρονίων και των ηλεκτρονίων όσον αφορά την ισχύ πεδήσεως και την ακτινοβολία πεδήσεως. Ο κώδικας μπορεί να προβλέψει την γωνιακή κατανομή των φωτονίων που παράγονται από ακτινοβολία πεδήσεως, την εξαύλωση ποζιτρονίων, την παραγωγή ακτίνων -δ. Τα αποτελέσματα είναι ακριβή αν:

(α) τα ηλεκτρόνια της πρωτεύουσας δέσμης είναι ενέργειας $> 50 - 100$ keV και το υλικό αλληλεπίδρασης είναι χαμηλού Z

και

(β) τα ηλεκτρόνια της πρωτεύουσας δέσμης είναι ενέργειας $> 100 - 200$ keV και το υλικό αλληλεπίδρασης είναι υψηλού Z

2.2.7 Αλληλεπιδράσεις με φωτόνια υψηλών ενεργειών

Για τα παρακάτω αναφερόμενα η ελάχιστη ενέργεια φωτονίων μιας πρωτεύουσας δέσμης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από περίπου 1 keV. Επιπλέον, τα φωτόνια που παράγονται μπορούν να μελετώνται και να συμμετέχουν στην προσομοίωση αλληλεπιδράσεων μέχρι και την ενέργεια των 100 eV.

Σε ό,τι αφορά στη δίδυμη γένεση, ο FLUKA μπορεί να προβλέψει την γωνιακή κατανομή των παραγόμενων ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων. Ο κώδικας επίσης λαμβάνει υπόψη και τα φαινόμενα καταστολής παραγωγής δίδυμης γένεσης Landau - Pomeranchuk - Migdal.

Σε ό,τι αφορά στη σκέδαση Compton ο κώδικας λαμβάνει υπόψη και φαινόμενα Doppler. Επίσης ο κώδικας υλοποιεί και τη σκέδαση Rayleigh.

Σε ό,τι αφορά στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ο κώδικας μπορεί επίσης να προβλέψει την γωνιακή κατανομή των φωτοηλεκτρονίων, σύμφωνα με την πλήρως σχετικιστική θεωρία του Sauter. Οι σχετικές ενεργές διατομές φωτοηλεκτρικού φαινομένου καλύπτουν άτομα μέχρι $Z = 100$ και φωτόνια από ενέργειες λίγων eV. Παρέχεται η προαιρετική δυνατότητα για τον υπολογισμό του φθορισμού ακτίνων -x και των ηλεκτρονίων Auger που εκπέμπονται λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, τόσο όταν το φαινόμενο αφορά σε ηλεκτρόνια της στιβάδας K, όσο και όταν αφορά σε ηλεκτρόνια της L. Σημειώνεται ότι οι υπόψη ακτίνες -x που εκπέμπονται λόγω μετάβασης ηλεκτρονίου εξωτερικής στιβάδας στη στιβάδα K για υλικά με υψηλό Z δεν υπολογίζονται απολύτως σωστά διότι δεν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο Coster-Kronig.

Κατά τη προσομοίωση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου αλλά και των σκεδάσεων Compton και Rayleigh λαμβάνεται υπόψη και η πόλωση των εμπλεκόμενων φωτονίων.

Τέλος, υπάρχει και η δυνατότητα πρόβλεψης των αποτελεσμάτων των λεγόμενων φωτοαδρονικών αλληλεπιδράσεων, κατά τις οποίες φωτόνια πολύ υψηλής ενέργειας αλληλεπιδρούν με αδρόνια και μπορεί να παράγουν άλλα αδρόνια.

2.2.8 Αλληλεπιδράσεις με φωτόνια ορατού φωτός

Οι υπολογισμοί που αφορούν τέτοιες αλληλεπιδράσεις είναι προαιρετικοί και μπορούν να προσομοιώσουν φαινόμενα όπως: η ακτινοβολία Cherenkov, ο σπινθηρισμός και η διάδοση του φωτός στην ύλη.

2.2.9 Αλληλεπιδράσεις με (αντι)νεutrίνο

Τα νεutrίνο ή τα αντινεutrίνο που προκύπτουν από αλληλεπιδράσεις που παράγουν ηλεκτρόνια ή μίονια μπορούν να υπολογίζονται προαιρετικά και να παρακολουθούνται εντός της ύλης αλλά χωρίς περεταίρω αλληλεπιδράσεις. Ο κώδικας έχει πάντως ενσωματωμένα και μοντέλα (υποπρογράμματα) υπολογισμού αλληλεπιδράσεων με (αντι)νεutrίνο.

2.3 Γεωμετρία

Η αποτελεσματικότητα, η ακρίβεια, η συνέπεια και η ευελιξία του κώδικα FLUKA εξυπηρετούνται από το μέρος του κώδικα που ρυθμίζει τη γεωμετρία και τη σύνθεση της ύλης στην οποία προσομοιώνονται οι αλληλεπιδράσεις. Το μέρος αυτό υλοποιήθηκε κυρίως για το σκοπό της αποτελεσματικής παρακολούθησης της μεταφοράς φορτισμένων

σωματιδίων στην ύλη ακόμα και αν υπάρχουν μαγνητικά πεδία. Για το σκοπό αυτό έχουν εισαχθεί ειδικά "σώματα" ύλης (bodies), προκειμένου να παρέχεται βελτιωμένη ακρίβεια στρογγυλοποίησης, και να επιτυγχάνεται ταχύτητα υπολογισμών και εύκολη προετοιμασία των αρχείων εισόδου. Πιο αναλυτικά:

- Ο κώδικας υλοποιεί σώματα όπως (α) κυκλικός και ελλειπτικός κύλινδρος παράλληλος προς τους άξονες X, Y ή Z απείρου μήκους, (β) επίπεδα απείρου επιφάνειας, (γ) επίπεδα κάθετα προς τους άξονες και (δ) γενικά quadrics όπως ελλειψοειδή, παραβολοειδή και υπερβολοειδή από περιστροφή.
- Τα σώματα, ή περιοχές (regions) μέσα σε αυτά μπορεί να ονομάζονται με αλφαριθμητικές συμβολοσειρές και όχι να συμβολίζονται απλά με αριθμούς.
- Επιτρέπεται με ευκολία η χρήση "σώματος μέσα σε σώμα" (εμφώλευση ή στα αγγλικά nesting)
- Η γεωμετρία πληροφορεί το μέρος του κώδικα που υλοποιεί τις αλληλεπιδράσεις σχετικά με τα γεωμετρικά σύνορα, προκειμένου να προσδιορίζονται αυτόματα οι οριακές συνθήκες.
- Στις οριακές συνθήκες λαμβάνονται υπόψη και ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία τα οποία μπορούν να εκτείνονται πέρα από τα υλικά όρια μιας γεωμετρίας
- Ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός περιοχών σε μια προσομοίωση είναι 10000. Για περισσότερες περιοχές χρειάζεται νέα μετάφραση τροποποιημένου κώδικα.
- Η γεωμετρία μπορεί κατ' αρχήν να ορίζεται ως σύνθεση στοιχειωδών όγκων οι οποίοι επαναλαμβάνονται με τρόπο ανάλογο όπως γίνεται στα προβλήματα Υπολογιστικής Μηχανικής των Ρευστών. Αυτό επιτρέπει τον ορισμό ενός στοιχειώδους όγκου μία και μόνη φορά και την επανάληψή του όσες φορές χρειάζεται. Αυτή η επανάληψη δεν χρειάζεται στο στάδιο της εισόδου, αλλά γίνεται αυτόματα στο εσωτερικό του κώδικα. Κατά συνέπεια οι επαναλαμβανόμενοι στοιχειώδεις όγκοι δεν έχουν καταχωρηθεί στη μνήμη, αλλά δημιουργούνται ως αποτέλεσμα συμμετρίας και με αυτόν τον τρόπο η επίλυση των αλληλεπιδράσεων γίνεται μόνο χρησιμοποιώντας την ελάχιστη ποσότητα των απαιτούμενων στοιχειωδών όγκων, περιοχών ή σωμάτων. Αυτό επιτρέπει κατ' αρχήν να περιγραφούν γεωμετρίες ακόμα και με δεκάδες χιλιάδες όμοιες περιοχές με έναν λογικό και περιορισμένο αριθμό ορισμών περιοχών και σωμάτων.
- Η γεωμετρία τύπου Voxel (pixel όγκου) διατίθεται επίσης κατόπιν επιλογής

- Σφάλματα γεωμετρίας (φυσικώς αδύνατες γεωμετρίες) συνήθως αναγνωρίζονται αυτόματα.
- Διατίθενται εργαλεία γραφικής απεικόνισης γεωμετρίας.

2.4 Παρακολούθηση μεταφοράς σωματιδίων στην ύλη

Παρέχεται η δυνατότητα της παρακολούθησης μεταφοράς φορτισμένων σωματιδίων στην ύλη, ακόμα και αν υπάρχουν ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία. Ρυθμίζεται ο χρόνος παρακολούθησης. Για τα νετρόνια χαμηλής ενέργειας που σκεδάζονται χρησιμοποιούνται οριακές συνθήκες γωνιακής επέκτασης Legendre. Η παρακολούθηση υλοποιείται εντός των ακολούθων ενεργειακών ορίων:

	Δευτερογενή σωματίδια	Πρωτεύοντα σωματίδια
φορτισμένα αδρόνια	1 keV - 20 TeV(*)	100 keV - 20 TeV(*) (†)
νετρόνια	θερμικά - 20 TeV(*)	θερμικά - 20 TeV(*)
αντινετρόνια	1 keV - 20 TeV(*)	10 MeV - 20 TeV(*)
μύονια	1 keV - 1000 TeV	100 keV-1000 TeV (†)
ηλεκτρόνια	1 keV - 1000 TeV	70 keV - 1000 TeV (υλικά χαμηλού Z) (†) 150 keV - 1000 TeV (υλικά υψηλού Z) (†)
φωτόνια	100 eV - 10000 TeV	1 keV-10000 TeV
βαρέα ιόντα	<10000 TeVn ⁻¹	<10000 TeVn ⁻¹

(*) Ανώτερο όριο 10 PeV (†) κατώτατο όριο 10 keV αν θεωρούνται μόνο απλές σκεδάσεις

2.5 Δυνατά αποτελέσματα

Συνοπτικά είναι δυνατόν να προκύπτουν τα ακόλουθα:

Η πυκνότητα ενέργειας ανά περιοχή και σωματίδιο. Η ολική πυκνότητα ενέργειας ανά περιοχή, η πυκνότητα ενέργειας ανά περιοχή και ηλεκτρόνιο και η πυκνότητα ενέργειας ανά περιοχή και φωτόνιο. Η πυκνότητα μεταφοράς ενέργειας ανά σωματίδιο, η πυκνότητα ολικής μεταφοράς ενέργειας, η πυκνότητα μεταφοράς ενέργειας ανά ηλεκτρόνιο και η πυκνότητα μεταφοράς ενέργειας ανά φωτόνιο. Η πυκνότητα μεταφοράς ορμής. Η ειδική ραδιενέργεια ανά δοχείο ύλης (bin), το μέγεθος και ο αριθμός των οποίων ορίζεται από το χρήστη σε καρτεσιανές ή κυλινδρικές συντεταγμένες (τα δοχεία αυτά είναι ανεξάρτητα από την υπόλοιπη γεωμετρία των περιοχών ή των σωμάτων). Η απόθεση ενέργειας στην ύλη με

συντελεστή απόσβεσης σύμφωνα με τον νόμο Birks. Το μήκος βήματος αυτόματα (εκτός αν έχει οριστεί από τον χρήστη, ο υπολογισμός αυτός είναι ανεξάρτητος από το μέγεθος των δοχείων). Λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα σύμπτωσης και αντι-σύμπτωσης για φωτόνια. Υπολογίζονται οι σωματιδιακές ροές σε κάθε θέση ως συνάρτηση της ενέργειας και της γωνίας. Οι προκύπτουσες ισοδύναμες δόσεις. Τα σωματίδια που προκύπτουν από αντιδράσεις με στόχους ή από αντιδράσεις με διατομές απειροστού πάχους. Οι πυρήνες προϊόντα από πυρηνικές αντιδράσεις ή διασπάσεις. Η πυκνότητα σχάσεων. Το ισοζύγιο νετρονίων.

2.6 Τεχνικά χαρακτηριστικά του FLUKA

Το σύνολο του κώδικα, συμπεριλαμβανομένων των αριθμητικών σταθερών, χρησιμοποιεί διπλή ακρίβεια. Οι μοναδικές εξαιρέσεις είναι οι διατομές νετρονίων χαμηλής ενέργειας, οι οποίες αποθηκεύονται με απλή ακρίβεια για εξοικονόμηση χώρου. Στον κώδικα ενσωματώνονται ανελλιπώς οι πλέον σύγχρονες τιμές του συνιστώμενου συνόλου φυσικών σταθερών. Η δυναμική κατανομή μνήμης εφαρμόζεται όσο το δυνατόν περισσότερο. Γίνεται εκτεταμένη χρήση εντολών INCLUDE προκειμένου να επιτυγχάνεται η παραμετροποίηση σταθερών. Η γεννήτρια τυχαίων αριθμών είναι 64-bit.

2.7 Εφαρμογές

Ο κώδικας FLUKA της δεκαετίας του '80 ήταν ουσιαστικά ένα εξειδικευμένο λογισμικό για τον υπολογισμό θωρακίσεων επιταχυντών πρωτονίων υψηλής ενέργειας. Η τρέχουσα έκδοση μπορεί αντίθετα να θεωρηθεί ως εργαλείο γενικού σκοπού για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Εκτός από τον παραδοσιακό σχεδιασμό στόχων και θωρακίσεων, οι εφαρμογές αυτές καλύπτουν από την θερμιδομετρία έως την πρόβλεψη ενεργοποιήσεων, εκπεμπόμενων ακτινοβολιών, μεταστοιχείωσης ισοτόπων καθώς και μελέτες νέων ανιχνευτών και μελέτες δοσιμετρίας.

Η πρόβλεψη βλαβών από ακτινοβολία ήταν πάντα ένα παραδοσιακό πεδίο εφαρμογής του FLUKA, αλλά σε παλαιότερες εκδόσεις περιοριζόταν σε ζημιές από αδρόνια στα εξαρτήματα των επιταχυντών πρωτονίων. Η νέα δυνατότητα ενσωμάτωσης νετρονίων χαμηλής ενέργειας στον κώδικα έχει επεκτείνει το πεδίο εφαρμογής ώστε να περιλαμβάνει και τις ζημιές σε ηλεκτρονικά και άλλα ευαίσθητα μέρη ανιχνευτών και άλλων υλικών. Επιπλέον, οι υπολογισμοί των βλαβών από ακτινοβολία και ο σχεδιασμός θωρακίσεων δεν περιορίζονται πλέον σε επιταχυντές πρωτονίων, αλλά περιλαμβάνουν επιταχυντές ηλεκτρονίων

οποιασδήποτε ενέργειας, εγκαταστάσεις παραγωγής φωτονίων και κάθε είδους πηγή ακτινοβολίας, είτε τεχνητή είτε φυσική.

Η τρέχουσα έκδοση του FLUKA έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε ποικίλους τομείς, όπως μελέτες υποστρώματος για ανιχνευτές σε υπόγειες εγκαταστάσεις, για μελέτες κοσμικής ακτινοβολίας, για τον υπολογισμό των δόσεων που λαμβάνουν τα πληρώματα των αεροσκαφών και διαστημοπλοίων, για την αξιολόγηση της δόσης οργάνων λόγω εξωτερικής ακτινοβολίας όπως, π.χ. από τομογραφίες, για τον σχεδιασμό ανιχνευτών, για ακτινοπροστασία καθώς και για εφαρμογές φυσικής υψηλών ενεργειών. Επίσης, έχει χρησιμοποιηθεί για μελέτες ακτινοθεραπείας με ηλεκτρόνια, πρωτόνια και βαρέα ιόντα, για μελέτες μεταστοιχείωσης πυρήνων, για μελέτες φυσικής νετρίνο, για μελέτες θωράκισης λέιζερ τεχνολογίας ελευθέρων ηλεκτρονίων, για υπολογισμούς παραγωγής τριτίου σε επιταχυντές ηλεκτρονίων, για μελέτες σχεδιασμού λαβύρινθων για ιατρικούς επιταχυντές κλπ.

2.8 Βοηθητικός κώδικας FLAIR

Ο βοηθητικός κώδικας FLAIR (FLuka Advanced InteRface), ο οποίος σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο CERN σε γλώσσα προγραμματισμού Python, δημιουργεί τα αρχεία εισόδου για τον FLUKA, μέσω γραφικού περιβάλλοντος ώστε να διευκολυνθεί και κυρίως να συντομευθεί, η διαδικασία οργάνωσης μιας προσομοίωσης. Γενικά ο FLUKA, όπως και όλοι οι κώδικες Monte Carlo δέχεται ως είσοδο ένα αρχείο ASCII συνταγμένο με αυστηρά καθορισμένο τρόπο έτσι ώστε να αντιλαμβάνεται πλήρως την γεωμετρία και τα υλικά της προσομοίωσης. Μέσα στις δυνατότητες του FLAIR, εκτός πολλών άλλων είναι η προεργασία (preprocessing), δηλαδή χονδρικά: (α) η δισδιάστατη αναπαράσταση της γεωμετρίας, (β) ο εντοπισμός και διόρθωση των σφαλμάτων στο αρχείο εισόδου, (γ) η εισαγωγή των υλικών από βιβλιοθήκες υλικών, και (δ) η κλήση του FLUKA για εκτέλεση προσομοίωσης. Επίσης προσφέρει μετα-ανάλυση (post processing) αποτελεσμάτων. Γενικά ο βοηθητικός κώδικας FLAIR είναι ένα εργαλείο, το οποίο βοηθάει σε μεγάλο βαθμό το χρήστη στην μορφοποίηση (format) αλλά και την κατανόηση των αρχείων εισόδου. Επιπλέον, ο FLAIR διευκολύνει και στην ανάγνωση του εγχειριδίου του FLUKA, διότι παραπέμπει στις ενότητες του εγχειριδίου τις σχετικές με όλες τις διαδικασίες προεργασίας (ή απλώς "pre") και μετα-ανάλυσης (ή απλώς "post").

2.9 Ιστορικά στοιχεία

Η ιστορία του κώδικα FLUKA ξεκινά με τη πρώτη γενιά που αναπτύχθηκε την δεκαετία του 1960 και αναφέρεται ως η γενιά του '70. Ακολούθησε η δεύτερη γενιά του '80 και σήμερα ο FLUKA θεωρείται ότι βρίσκεται στην τρίτη γενιά του. Κάθε επόμενη γενιά παρόλο που ξεκινάει από την προηγούμενη δεν περιέχει απλές βελτιώσεις αλλά πολύ σημαντικές αλλαγές. Ως αποτέλεσμα η τρέχουσα 3^η γενιά δεν έχει σχεδόν καμία σχέση με την πρώτη. Κατά την περίοδο που σταμάτησε η ανάπτυξη του FLUKA 2^{ης} γενιάς, άρχισαν να προγραμματίζονται πειράματα συγκρούσεων πρωτονίων με ενέργειες της τάξης αρκετών TeV. Λόγω των δυνατοτήτων πολύ καλών προσομοιώσεων αλληλεπιδράσεων αδρονίων υψηλών ενεργειών, ο FLUKA ως κατάλληλο για προσομοιώσεις λογισμικό έγινε αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος και άρχισε να χρησιμοποιείται για υπολογισμούς θωράκισης και ειδικότερα, για την πρόβλεψη βλαβών από ακτινοβολία σε εξαρτήματα μηχανών και πειραμάτων. Σύντομα ωστόσο, έγιναν εμφανείς κάποιες ελλείψεις του κώδικα: ο σχεδιασμός των νέων επιταχυντών Superconducting Super Collider (SSC) και Large Hadron Collider (LHC) και τα σχετικά πειράματα απαιτούσαν τη διαχείριση μεγάλων και ισχυρών μαγνητικών πεδίων, την μελέτη εναπόθεσης ενέργειας σε πολύ μικρούς όγκους, τη μελέτη αλληλεπιδράσεων υψηλής ενέργειας, αλλά και αλληλεπιδράσεων νετρονίων χαμηλής ενέργειας. Για τη συμπλήρωση του FLUKA συγκροτήθηκε επιστημονική ομάδα, η οποία μετέτρεψε τον κώδικα από έναν εργαλείο μελέτης αποκλειστικά υψηλών ενεργειών κατάλληλο κυρίως για θωρακίσεις, σε έναν κώδικα που θα μπορούσε να χειριστεί τα περισσότερα στοιχειώδη σωματίδια πρακτικού ενδιαφέροντος και τις αλληλεπιδράσεις τους στο ευρύτερο δυνατό ενεργειακό εύρος.

Η προσπάθεια για τη συμπλήρωση του κώδικα, ξεκίνησε το 1989, και κινήθηκε προς πολλές κατευθύνσεις ταυτόχρονα. Στο πλαίσιο αυτό ο κώδικας απέκτησε νέα δομή και αναπτύχθηκε το τρέχον λογισμικό για τα φαινόμενα μεταφοράς, η τρέχουσα προσομοίωση του ηλεκτρομαγνητικού μέρους, μια βελτίωση και επέκταση του αδρονιακού μέρους, ο τρέχων τρόπος για τη μεταφορά νετρονίων χαμηλής ενέργειας και μια επέκταση των δυνατοτήτων της γεωμετρίας. Προστέθηκαν επιπλέον ρυθμίσεις και νέες ομάδες αποτελεσμάτων. Στο τέλος του 1990, αν και σε αρχική μορφή, η δουλειά πάνω σε αυτές τις κατευθύνσεις ολοκληρώθηκε. Στη συνέχεια, τα χρόνια που ακολούθησαν, τα νέα χαρακτηριστικά του FLUKA βελτιώθηκαν και εξευγενίστηκαν.

2.10 Μέγεθος και άλλα χαρακτηριστικά FLUKA

Η τρέχουσα μορφή του FLUKA αθροίζει σε περίπου 540 000 γραμμές Fortran code (25 MB πηγαίου κώδικα) και 60 000 lines (2 MB) βοηθητικού κώδικα FLAIR, ο οποίος, όπως αναφέρθηκε, μπορεί να χρησιμοποιείται offline για την παραγωγή και τη δοκιμή διαφόρων αρχείων δεδομένων που απαιτούνται για το "τρέξιμό" του. Το μεγαλύτερο μέρος του κυρίως κώδικα FLUKA έχει σχέση με τον αλγόριθμο PEANUT. Για σύγκριση αναφέρεται ότι ο FLUKA της προηγούμενης γενιάς περιείχε περίπου 30 000 γραμμές (1.2 MB), από τις οποίες πολύ λίγες επιζούν στην τρέχουσα μορφή.

Μεγάλη σημασία έχει δοθεί στην αριθμητική ακρίβεια. Όπως ήδη σημειώθηκε, ολόκληρος ο κώδικας είναι διπλής ακρίβειας συμπεριλαμβανομένων και των γεννητριών τυχαίων αριθμών. Ως αποτέλεσμα, η διατήρηση της ενέργειας εξασφαλίστηκε στην τάξη του 10^{-10} . Στο πλαίσιο αυτό το κατάλληλο υλικό περιβάλλον μηχανής για τον κώδικα είναι πλέον 64 bit. Επιπλέον, στο περιβάλλον αυτό μπορεί να αποφεύγεται κάθε περιττή στρωγγυλοποίηση και να χρησιμοποιείται με συνέπεια η πλήρης διαθέσιμη ακρίβεια όλων των φυσικών σταθερών και των πειραματικών δεδομένων για όλες τις δυνατές αλληλεπιδράσεις, όπως αυτά διατίθενται σε πιστοποιημένες βάσεις δεδομένων. Έτσι επιτεύχθηκε η σημαντική μείωση των σφαλμάτων στα αποτελέσματα του κώδικα.

Ο κώδικας FLUKA και ο βοηθητικός κώδικας FLAIR είναι σχεδιασμένοι για λειτουργικό σύστημα LINUX.

2.11 Σχόλια και συμπεράσματα

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν, πάρα πολύ συνοπτικά οι βασικές δυνατότητες του κώδικα FLUKA, μαζί με ορισμένα λίγα ιστορικά και τεχνικά στοιχεία. Το εύκολο συμπέρασμα είναι ότι πρόκειται για κώδικα Monte Carlo με πολύ μεγάλες δυνατότητες, ο οποίος αρχικά κατασκευάστηκε για την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων βαριών φορτισμένων ή ουδέτερων σωματιδίων με την ύλη σε μεγάλες κινητικές ενέργειες. Στη σημερινή του μορφή ο κώδικας έχει επεκταθεί και λειτουργεί πρακτικά για όλα τα σωματίδια που μπορεί να ενδιαφέρουν καθώς και για φωτόνια σε μεγάλες περιοχές ενεργειών. Κατ' αυτή την έννοια ο FLUKA μπορεί να είναι ένα υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο μπορεί θεωρητικά να αντικαταστήσει άλλους παρόμοιους εξειδικευμένους κώδικες, οι οποίοι ειδικεύονται π.χ. σε προσομοιώσεις αλληλεπιδράσεων φωτονίων, ή ηλεκτρονίων ή νετρονίων κ.λπ. Για το λόγο αυτό ο κώδικας FLUKA, είναι ο κώδικας Monte Carlo που προτιμάται για προσομοιώσεις σε μεγάλα ερευνητικά κέντρα ή βιομηχανίες καθώς καλύπτει πολλές

περιπτώσεις αλληλεπιδράσεων μέσα στο ίδιο υπολογιστικό περιβάλλον. Ένα τέτοιο κέντρο είναι το CERN, το οποίο είναι επικεφαλής στην ανάπτυξη του κώδικα και μια τέτοια βιομηχανία είναι η πυρηνική βιομηχανία. Ένα δεύτερο συμπέρασμα είναι ότι ο FLUKA, είναι ένα πολύπλοκο εργαλείο, στο οποίο η πολυπλοκότητα επιβάλλεται από τις μεγάλες του δυνατότητες. Επομένως, η χρήση του δεν είναι εύκολη ούτε αυτονόητη. Οι νέοι χρήστες πρέπει να γνωρίζουν αρκετή σωματιδιακή φυσική και θεωρία αλληλεπιδράσεων με την ύλη, αν είναι να γίνουν γρήγορα παραγωγικοί στη χρήση του κώδικα. Με βάση αυτό, δεν πρέπει να ενθαρρύνεται η χρήση του κώδικα χωρίς προηγούμενη εμπειρία και εκπαίδευση, διότι είναι δυνατόν να παραχθούν λανθασμένα αποτελέσματα βασισμένα σε λανθασμένη οργάνωση του προς επίλυση προβλήματος. Στο επόμενο 3^ο Κεφάλαιο θα περιγραφεί η εγκατάσταση του κώδικα FLUKA, σε Λειτουργικό Σύστημα MS Windows, ώστε αυτός καταρχήν να δοκιμασθεί και να αποκτηθεί μικρή εμπειρία από έναν νέο χρήστη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ FLUKA ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MS WINDOWS

3.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο 2^ο Κεφάλαιο, ο κώδικας FLUKA είναι κατασκευασμένος για να λειτουργεί σε Λειτουργικό Σύστημα LINUX 64 bit. Για το σκοπό αυτό, σε κατάλληλο δικτυακό τόπο και μετά από μία απλή διαδικασία εγγραφής, διατίθεται ελεύθερα ο πλήρης πηγαίος κώδικας, ο οποίος μπορεί να εγκατασταθεί σε συμβατό Λειτουργικό Σύστημα LINUX 64 bit. Παρόλα αυτά, πάρα πολλοί από αυτούς που ενδιαφέρονται να ασχοληθούν με τον κώδικα FLUKA, δεν έχουν στη διάθεσή τους Η/Υ με Λειτουργικό Σύστημα LINUX, αλλά συνηθέστερα διαθέτουν κάποιον Η/Υ με Λειτουργικό Σύστημα MS Windows. Για να καλύψουν αυτές τις (πολλές) περιπτώσεις οι δημιουργοί του FLUKA έχουν δημιουργήσει ορισμένα κατάλληλα εργαλεία διευκόλυνσης, όπως το ονομαζόμενο *Flurix Linux Live CD*, σε μορφοποίηση ".iso", το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία. Το CD αυτό, είτε σε φυσική μορφή (δηλ. ως οπτικός δίσκος) είτε σε λογική μορφή (δηλ. ως αρχείο ".iso") είναι δυνατόν με τις κατάλληλες ρυθμίσεις να χρησιμοποιηθεί ως αποθηκευτικός χώρος (οιονεί σκληρός δίσκος) εκκίνησης εικονικού Λειτουργικού Συστήματος LINUX με προεγκατεστημένα FLUKA και FLAIR αν στον προσωπικό υπολογιστή με Λειτουργικό Σύστημα MS Windows υπάρχει κατάλληλο λογισμικό υποδοχής εικονικών Λειτουργικών Συστημάτων. Οι σχετικές ενέργειες για την Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκαν σε προσωπικούς Η/Υ με Λειτουργικό Σύστημα MS Windows 7 64 bit και MS Windows 10 64 bit. Στο παρόν Κεφάλαιο περιγράφεται η σχετική διαδικασία αναγκαίων εγκαταστάσεων και ρυθμίσεων. Αρχικά περιγράφεται η εγκατάσταση και οι ρυθμίσεις του λογισμικού υποδοχής εικονικής μηχανής. Κατόπιν περιγράφεται η σύνδεση του λογισμικού αυτού με το δίσκο εκκίνησης *Flurix Linux Live CD* δηλαδή το Λειτουργικό Σύστημα LINUX που περιέχει ήδη εγκατεστημένο και τον FLUKA αλλά και το γραφικό περιβάλλον εργασίας FLAIR.

3.2 Λογισμικό υποδοχής εικονικής μηχανής

3.2.1 Γενικά

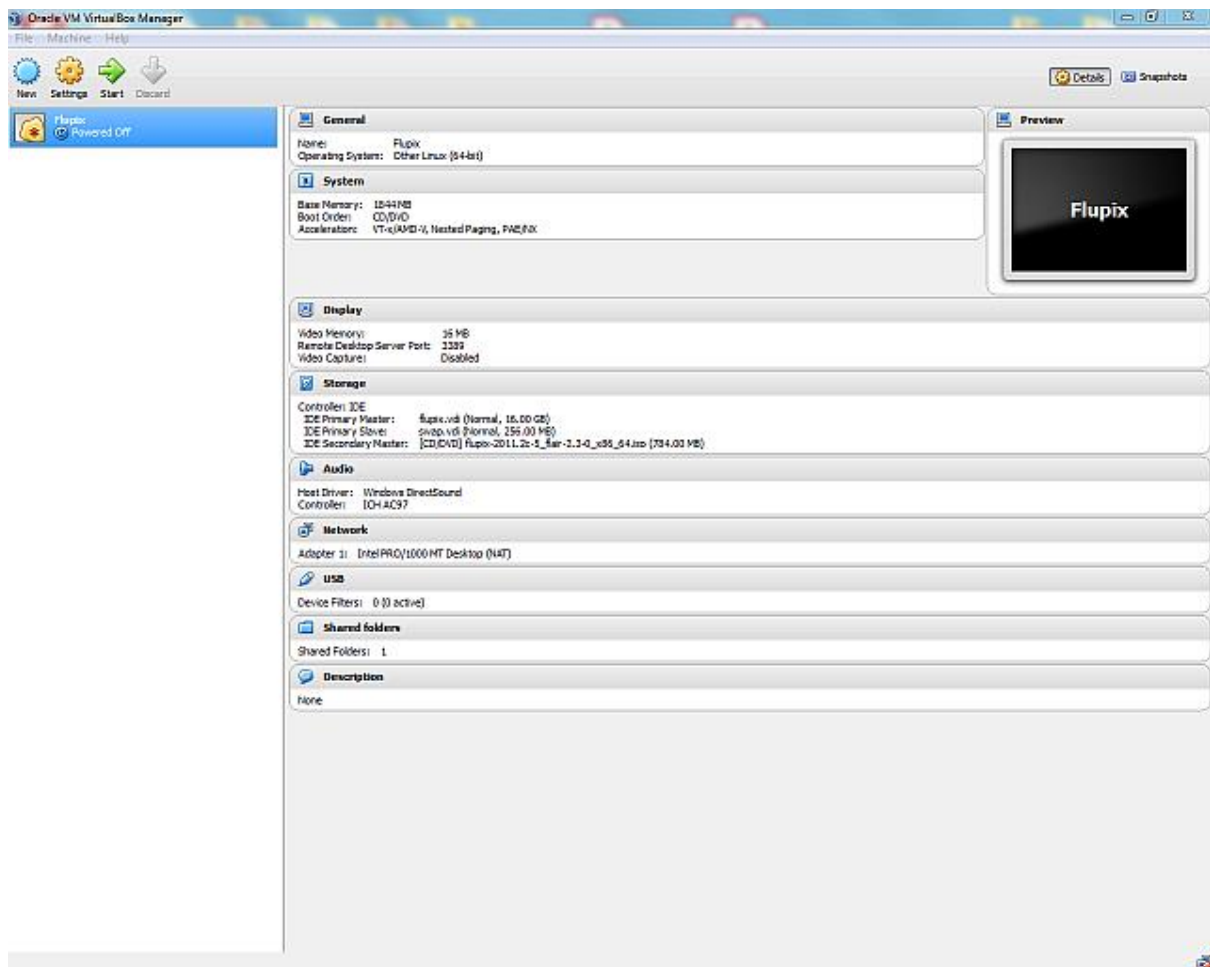
Για την εκκίνηση Λειτουργικού Συστήματος LINUX από Live CD που περιέχει το LINUX και σε αυτό προεγκατεστημένα τόσο το FLUKA, και το FLAIR, απαιτείται ένα λογισμικό

υποδοχής εικονικών Λειτουργικών Συστημάτων ή, όπως αλλιώς λέγεται, εικονικών μηχανών. Η διαδικασία εγκατάστασης εικονικών μηχανών περιγράφεται με το γενικό όρο VIRTUALIZATION και είναι πλέον ιδιαίτερα συνηθισμένη σε μια μεγάλη γκάμα λειτουργιών σε Η/Υ. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνεται είτε εντός άλλου Λειτουργικού Συστήματος με χρήση κατάλληλου λογισμικού υποδοχής τους, είτε σε επίπεδο Υλικού, χωρίς άλλο εγκατεστημένο Λειτουργικό Σύστημα, στο οποίο Υλικό εγκαθίσταται λογισμικό υποδοχής εικονικών μηχανών πολύ μικρού μεγέθους που λειτουργεί πρακτικά ως Firmware. Για τις ανάγκες της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας επιλέχθηκε ο πρώτος τρόπος VIRTUALIZATION, με χρήση του λογισμικού υποδοχής εικονικών μηχανών *Oracle VM VirtualBox*, το γραφικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης του οποίου μετά την εγκατάστασή του και την εγκατάσταση της εικονικής μηχανής φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Είναι σαφές ότι εφόσον η λειτουργία μιας εικονικής μηχανής με κάποιο Λειτουργικό Σύστημα προσομοιάζει την πλήρη λειτουργία ενός Η/Υ, αυτός ο Η/Υ ανταποκρίνεται διαφανώς με τρόπο που ανταποκρίνεται και ένας φυσικός Η/Υ. Είναι βεβαίως δυνατό και αυτός ο Η/Υ να "κολλήσει", να εμφανίσει μπλε οθόνη αλλά και να μολυνθεί με κακόβουλο λογισμικό ή ιούς.

Το *Flurix* Live CD καταφορτώθηκε μετά από απλή εγγραφή, από την επίσημη ιστοσελίδα του FLUKA (την www.fluka.org). Η έκδοση που καταφορτώθηκε ήταν η *flurix-2011.2c-6_flair-2.3-1_x86_64.iso*. Πρόκειται φυσικά για έκδοση 64 bit. Συνοδευτικά καταφορτώθηκε και το αρχείο *flurix-vdi.zip*, στο οποίο περιέχονται οι εικονικοί δίσκοι *flurix.vdi* και *swar.vdi*, των οποίων η χρήση θα εξηγηθεί.

3.2.2 Εγκατάσταση του λογισμικού υποδοχής *Oracle VM VirtualBox*

Για την εγκατάσταση του λογισμικού υποδοχής της εικονικής μηχανής χρησιμοποιήθηκε ο φορητός υπολογιστής laptop τύπου PC συμβατός του γράφοντος, ο οποίος διαθέτει επεξεργαστή Intel(R) Core(TM) i7, τεσσάρων (4) πυρήνων, ονομαστικής ταχύτητας 2.60 GHz, εγκατεστημένη μνήμη RAM 4 GB και Λειτουργικό Σύστημα MS Windows 10 Education (64bit). Το λογισμικό υποδοχής που χρησιμοποιήθηκε είναι το *VM VirtualBox* της εταιρείας *Oracle Corporation*, έκδοση *VirtualBox-5.1.24-117012-Win*. Το λογισμικό αυτό διατίθεται σήμερα (2018) ελεύθερα σύμφωνα με τους όρους αδειοδότησης χρήσης *GNU General Public License*. Το λογισμικό αυτό πρέπει να εγκαθίστανται από τον υπερχρήστη (διαχειριστή) του συστήματος. Η γλώσσα διαχείρισης του λογισμικού πέρα από την προφανή Αγγλική μπορεί να επιλεγθεί κατά την εγκατάσταση και να είναι η Ελληνική ή άλλη. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα αλλαγής της γλώσσας διαχείρισης.



Εικόνα 3.1 Γραφικό περιβάλλον λογισμικού υποδοχής εικονικών μηχανών *Oracle VM VirtualBox* μετά την εγκατάστασή του και την εγκατάσταση της εικονικής μηχανής (φαίνεται αριστερά ως επιλογή με την ονομασία "*Flurix*")

Για λόγους καλύτερης επίβλεψης της Διπλωματικής Εργασίας αυτό το λογισμικό υποδοχής εγκαταστάθηκε και στον υπολογιστή γραφείου του επιβλέποντος, ο οποίος διαθέτει επεξεργαστή Intel(R) Core(TM) i7, τεσσάρων (4) πυρήνων, ονομαστικής ταχύτητας 3.4 GHz, εγκατεστημένη μνήμη RAM 4 GB και Λειτουργικό Σύστημα MS Windows 7 Pro (64bit). Η εγκατάσταση του λογισμικού αυτού έγινε με τα τυποποιημένα βήματα που προτείνονται από τον κατασκευαστή.

3.3 Λειτουργικό Σύστημα εικονικής μηχανής

3.3.1 Γενικά

Όπως ήδη αναφέρθηκε επιλέχθηκε ο κώδικας FLUKA είναι κατασκευασμένος για να τρέχει σε περιβάλλον Λειτουργικού Συστήματος LINUX. Όπως είναι γνωστό το Λειτουργικό αυτό Σύστημα βασίζεται στο *UNIX* αλλά ακολουθεί την τυποποίηση *POSIX* και είναι κυρίως

κατασκευασμένο για επεξεργαστές αρχιτεκτονικής Intel 80x86. Το LINUX είναι σήμερα (2018) πλέον προσαρμοσμένο για λειτουργία σε πολύ μεγάλο φάσμα H/Y και για επεξεργαστές διαφορετικούς από τους 80x86 ενώ, παρόλο που στις αρχές της ανάπτυξής του είχε δυνατότητες μόνο για "γραμμή εντολών", συνεχώς εξελίσσεται και σε διανομές με πολύ ευέλικτο "παραθυρικό περιβάλλον" συγκρίσιμο ή καλύτερο και από τα αντίστοιχα περιβάλλοντα των Λειτουργικών Συστημάτων της Microsoft ή της Apple. Χαρακτηριστικά σημειώνεται ότι το Λειτουργικό Σύστημα *Android* των "έξυπνων τηλεφώνων" είναι μία παραλλαγή του συστήματος LINUX.

3.3.2 Εγκατάσταση και ρύθμιση *Flurix* στο λογισμικό υποδοχής

Το λογισμικό *Oracle VM VirtualBox*, το οποίο κατ' αρχήν παρέχει ρυθμίσεις σε επίπεδο ενός εικονικού BIOS έχει περίπου τις λειτουργίες ενός φυσικού υπολογιστή. Για την εγκατάσταση της εικονικής μηχανής *Flurix* (δηλ. ενός Λειτουργικού Συστήματος LINUX με προεγκατεστημένους τους κώδικες FLUKA και FLAIR, το οποίο θα φιλοξενηθεί στο Λειτουργικό Σύστημα MS Windows) απαιτείται να ρυθμισθεί στα βασικά του στοιχεία το BIOS αυτό, δηλαδή (i) να δοθεί πρώτα όνομα στην εικονική μηχανή που θα δημιουργηθεί, εφόσον μπορεί στο λογισμικό υποδοχής να υπάρχουν πολλές, φυσικά επιλέχθηκε το όνομα *Flurix*, (ii) να χαρακτηριστεί ο τύπος (type) της εικονικής μηχανής ως LINUX και (iii) να χαρακτηριστεί η έκδοση (version) της εικονικής μηχανής ως *Other Linux (64 - bit)*. Αυτά γίνονται από την καρτέλα New του λογισμικού υποδοχής (βλ. Εικόνα 3.1). Επίσης πρέπει στην ίδια ακολουθία ρυθμίσεων να ορισθεί το μέγεθος της κεντρικής μνήμης. Σύμφωνα με τις συστάσεις που δίνονται στο FLUPIX readme (στο σύνδεσμο <http://www.fluka.org/contents/tools/flurix>) και ανάλογα με τις δυνατότητες του H/Y, στον οποίο χρειάζεται να "τρέξει" το *Flurix*, η κεντρική μνήμη πρέπει να ρυθμίζεται σε μεγαλύτερη ίση από 1024MB και αυτό έγινε. Στη συνέχεια ορίστηκε ο εικονικός σκληρός δίσκος του εικονικού συστήματος. Ως τέτοιος επιλέχθηκε ο flurix.vdi, με μέγιστη χωρητικότητα 16GB, ο οποίος προέκυψε με εξαγωγή σε κατάλληλο φάκελο από το συμπιεσμένο αρχείο flurix-vdi.zip. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε η μηχανή με το όνομα *Flurix* και πατήθηκε Start. Άμεσα το λογισμικό υποδοχής αναζήτησε από πού θα γίνει η εκκίνηση (boot). Για το σκοπό αυτό δόθηκε το σημείο όπου είναι αποθηκευμένο το αρχείο διαμόρφωσης ".iso" με το όνομα

flurix-2011.2c-6_flair-2.3-1_x86_64.iso

Όπως εκ των υστέρων διαπιστώθηκε, αυτό το μέσο εκκίνησης του *Flurix* περιέχει έκδοση Λειτουργικού Συστήματος LINUX, με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της διανομής KNOPPIX

(που είναι κλώνος της διανομής DEBIAN) στην Αγγλική, προκειμένου να μην υπάρχει κανένα πρόβλημα επικοινωνίας του Λειτουργικού Συστήματος με τον κώδικα FLUKA και τον FLAIR, οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί πλήρως στα αγγλικά. Φυσικά αυτή η διανομή τύπου DEBIAN είναι εκτεταμένα τροποποιημένη και απλοποιημένη ώστε να εξυπηρετεί μόνο τις βασικές ανάγκες των FLUKA και FLAIR. Το αποτέλεσμα της εγκατάστασης αυτής της εικονικής μηχανής στο λογισμικό υποδοχής φαίνεται στην Εικόνα 3.1 αριστερά ως επιλογή με την ονομασία "*Flurix*".

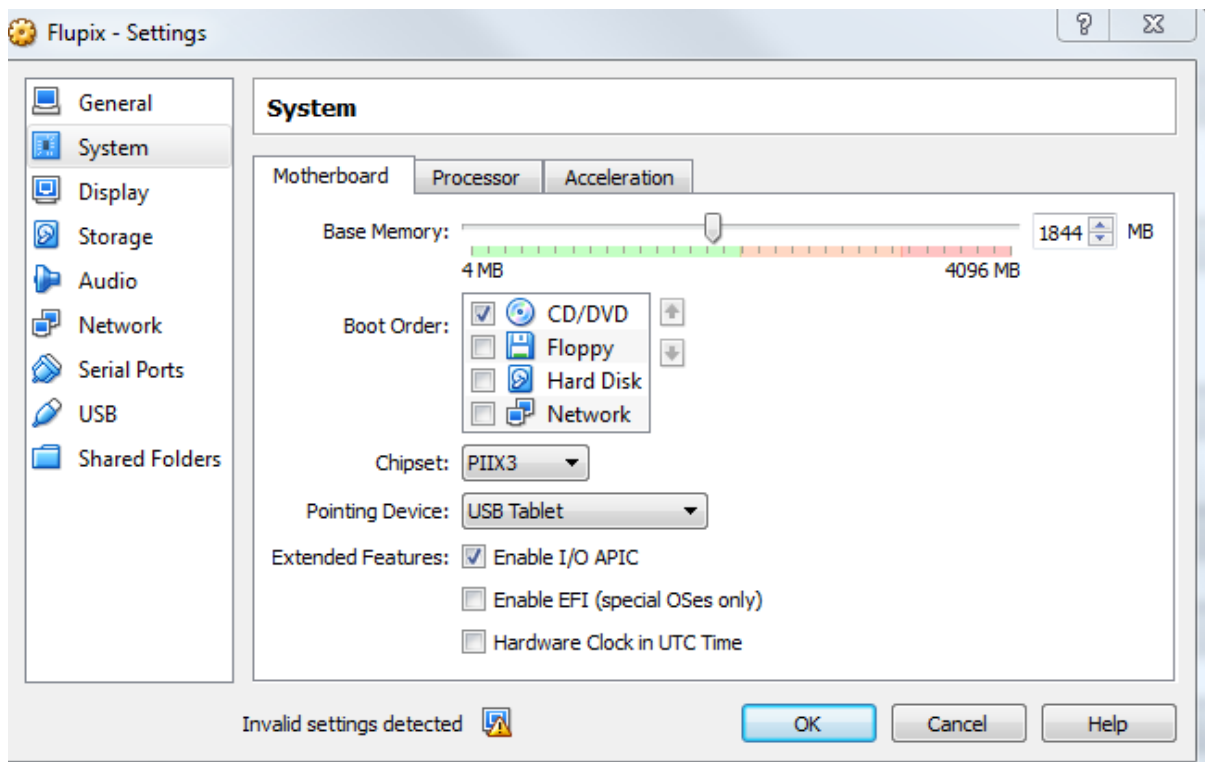
Για την καλύτερη λειτουργία της εικονικής μηχανής *Flurix*, χρειάζεται να προστεθεί και ο εικονικός δίσκος *swap.vdi* με μέγιστη χωρητικότητα 256MB. Το σημείο της φυσικής ύπαρξης του εικονικού δίσκου *swap.vdi*, αλλά και του *flurix.vdi* δεν επηρεάζει, παρόλα αυτά, για να μην δημιουργείται σύγχυση, καλό είναι αυτοί να τοποθετούνται στο χώρο που το λογισμικό υποδοχής δημιούργησε το αρχείο της εικονικής μηχανής *Flurix* (εξ ορισμού με το όνομα *Flurix.vbox*). Και ο εικονικός δίσκος *swap.vdi* προκύπτει αν εξαχθεί από το συμπιεσμένο αρχείο *flurix-vdi.zip*. Η χρήση του εικονικού δίσκου *swap.vdi* είναι προφανής: πρόκειται για τον χώρο *swap* του *Flurix*. Η χρήση του εικονικού δίσκου *flurix.vdi* παίζει το ρόλο του αποθηκευτικού χώρου της εικονικής μηχανής *Flurix*. Η ύπαρξη αυτού του χώρου είναι αναγκαία, διότι εφόσον η πηγή εκκίνησης της μηχανής *Flurix* είναι της λογικής μορφής και της διαμόρφωσης ενός οπτικού δίσκου, το αντίστοιχο Λειτουργικό Σύστημα όταν τρέχει έχει πρακτικά μόνο δικαίωμα ανάγνωσης και εκτέλεσης των περιεχομένων του οπτικού δίσκου. Δεν έχει επομένως δικαίωμα μόνιμης τροποποίησης των περιεχομένων αυτών, δηλαδή ούτε καν δικαίωμα μόνιμης γραφής αποτελεσμάτων ή ό,τι άλλο που εισάγει μόνιμες αλλαγές στο περιεχόμενο του δίσκου αυτού. Φυσικά και μόνο η διαδικασία *boot* στο *Flurix* δημιουργεί αλλαγές, γράφει ημερολόγια κλπ, όμως μόνο σε επίπεδο Κεντρικής Μνήμης και επομένως οι εγγραφές αυτές χάνονται με τη διαδικασία "*shutdown*". Διατηρούνται μόνο με τη διαδικασία "*suspend*" ή την "*hibernate*", η οποία παρέχεται από το λογισμικό *Oracle VM VirtualBox*, αλλά δεν είναι ορθό να βασίζεται κανείς στο ότι πάντοτε θα θυμάται να κάνει π.χ. *hibernate* όταν διακόπτει τη λειτουργία του *Flurix*.

Αν η εικονική μηχανή δεν έχει ρυθμισθεί πλήρως πριν την εγκατάσταση, το λογισμικό υποδοχής παρέχει δυνατότητες ώστε και μετά την εγκατάσταση, η εικονική μηχανή να μπορεί να ρυθμισθεί σε διάφορες παραμέτρους της. Οι δυνατότητες ρύθμισης είναι ανάλογες με εκείνες που παρέχονται από το BIOS ενός φυσικού Η/Υ και παρέχονται μέσω κατάλληλης γραφικής διεπαφής με το χρήστη. Όπως αναφέρεται και παρακάτω πιο αναλυτικά, με αυτόν τον τρόπο ρυθμίζονται π.χ. η κεντρική μνήμη (αν χρειάζεται ρύθμιση διαφορετική από την

αρχική), η σειρά των συσκευών από τις οποίες γίνεται η εκκίνηση (boot), η μνήμη που χρειάζεται η οθόνη της εικονικής μηχανής, η δυνατότητα ήχου ή όχι, η σύνδεση στο διαδίκτυο ή όχι, η χρήση σειριακών θυρών ή όχι, η χρήση περιφερειακών συσκευών USB (π.χ. Flash Memories) ή όχι κ.ά. Εννοείται φυσικά ότι μια εικονική μηχανή, όπως αυτή, υπόκειται σε περιορισμούς οι οποίοι οφείλονται κυρίως στη διαχείριση των πόρων του Η/Υ που το φιλοξενεί μιας και είναι απαραίτητη η αφοσίωση κάποιων από αυτούς στην εικονική μηχανή σε βάρος του φυσικού Υπολογιστικού Συστήματος.

Πιο αναλυτικά λοιπόν, για την ολοκλήρωση της εγκατάστασης του *Flupix* χρειάστηκαν (πέρα από τη ρύθμιση της μνήμης) και επιπλέον ενέργειες του υπερχρήστη ή αλλιώς διαχειριστή (super user ή αλλιώς administrator) του φυσικού Υπολογιστικού Συστήματος, ως εξής:

Στις ρυθμίσεις της εικονικής μας μηχανής, και από την καρτέλα "Σύστημα" (System, στην Εικόνα 3.1) επιλέγεται για τον εξ ορισμού τρόπο εκκίνησης (boot order) ο οπτικός δίσκος (CD/DVD), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2. Οι υπόλοιποι τρόποι εκκίνησης απενεργοποιούνται



Εικόνα 3.2 Καθορισμός του τρόπου εκκίνησης της εικονικής μηχανής *Flupix*

Στη συνέχεια, και από την καρτέλα "Αποθήκευση" (Storage), επιλέγεται ποια ιδιότητα αποθηκευτικού χώρου θα έχει το μέσον CD/DVD από το οποίο θα εκκινεί το Flupix.

Υπενθυμίζεται ότι οι ιδιότητες των αποθηκευτικών χώρων (δίσκων) στα Λειτουργικά Συστήματα της ομάδας MS Windows οι ιδιότητες αυτές είναι:

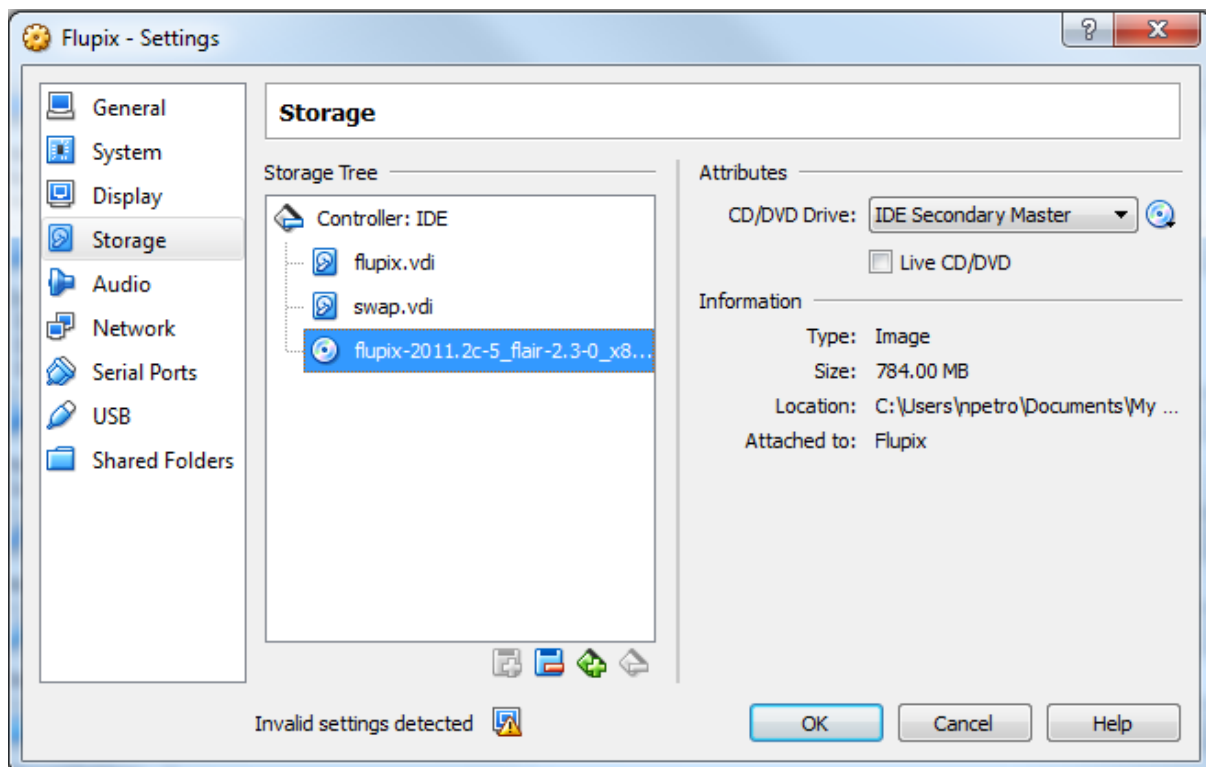
- (α) Primary Master (πρωτεύων κύριος)
- (β) Secondary Master (πρωτεύων βοηθητικός)
- (γ) Primary Slave (δευτερεύων κύριος)
- (δ) Secondary Slave (δευτερεύων βοηθητικός)

Επιλέγεται η ιδιότητα "πρωτεύων βοηθητικός" και συνδέεται (αν δεν είναι ήδη συνδεδεμένη) με το αρχείο διαμόρφωσης ".iso" με το όνομα

flupix-2011.2c-6_flair-2.3-1_x86_64.iso

το οποίο είναι ο λογικός οπτικός δίσκος που λειτουργεί ως οδηγός CD/DVD, στον οποίο εισάγεται η εικονική μηχανή *Flupix* (βλ. Εικόνα 3.3).

Η ιδιότητα αυτή επιλέχθηκε διότι στη συνήθη πράξη αντιστοιχεί στην ιδιότητα του οπτικού δίσκου από άποψη υλικού. Το υλικό αυτό δέχεται ως είσοδο και αναπαράγει προς χρήση του φυσικού Υπολογιστικού Συστήματος ή του εικονικού Υπολογιστικού Συστήματος, οπτικούς δίσκους με διάφορες διαμορφώσεις (format), η συνηθέστερη των οποίων είναι η διαμόρφωση ".iso".

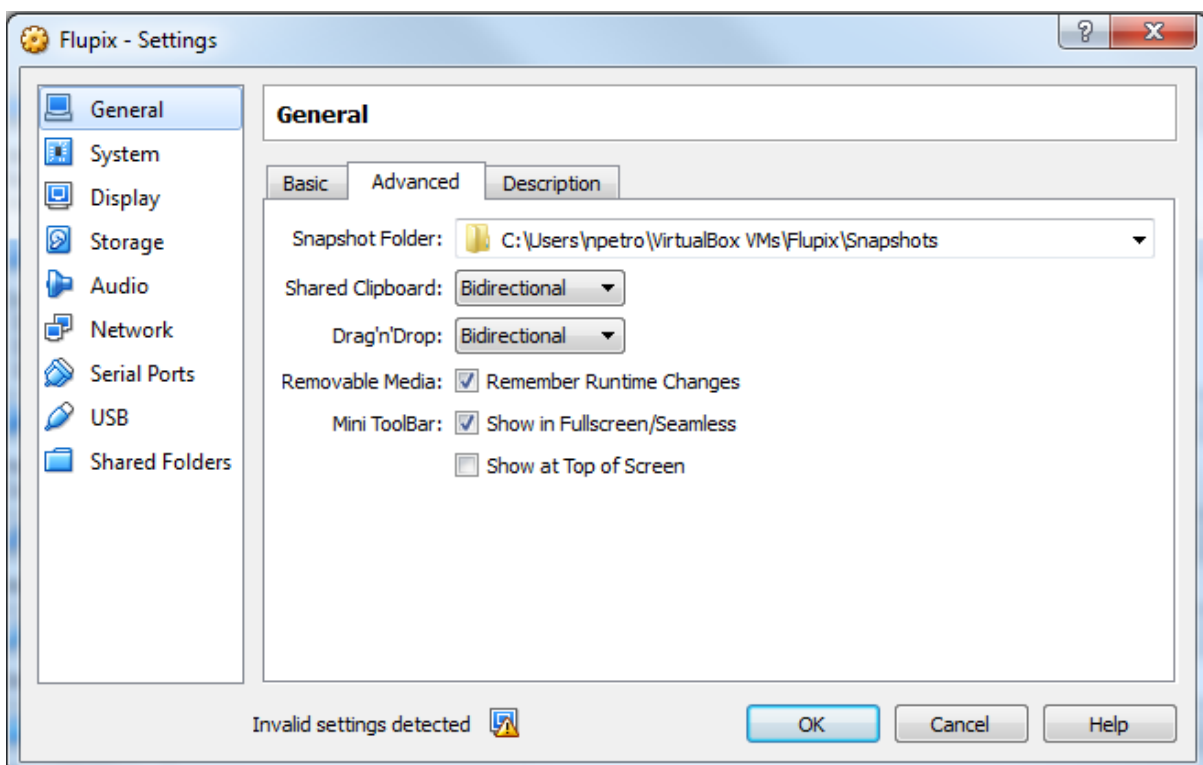


Εικόνα 3.3 Καθορισμός ιδιοτήτων αποθήκευσης (γραφής, ανάγνωσης και εκτέλεσης)

Όλοι οι υπολογιστές με οδηγούς CD-ROM ή DVD-ROM μπορούν να διαβάσουν οπτικούς δίσκους που χρησιμοποιούν αυτό το πρότυπο διαμόρφωσης. Όπως ήδη διευκρινίστηκε, πλην εξαιρέσεων, συνήθως οι διαμορφώσεις αυτές δεν έχουν δυναμικό χαρακτήρα και επομένως δεν μπορούν σε αυτές να γίνονται εγγραφές οι διαγραφές από τον χρήστη ή το Λειτουργικό Σύστημα.

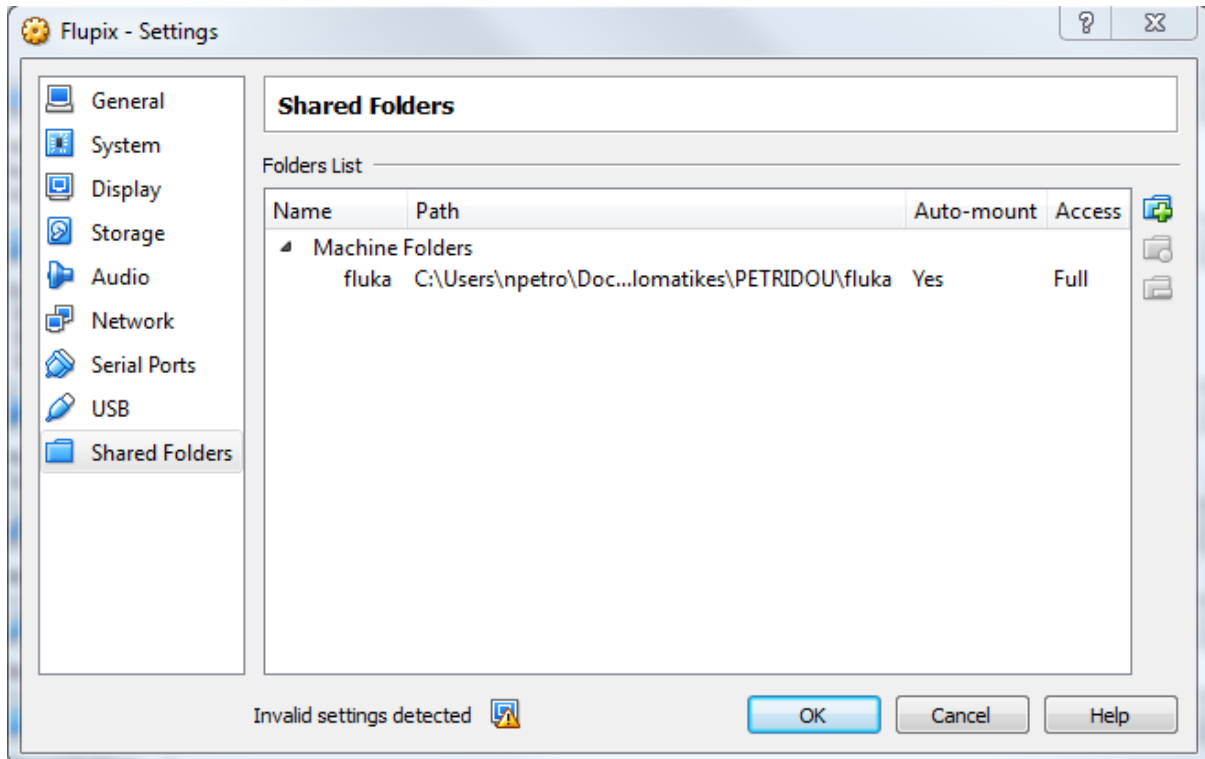
Στη συνέχεια και από την ίδια καρτέλα χαρακτηρίζονται στην εικονική μηχανή (αν δεν είναι ήδη χαρακτηρισμένοι) οι εικονικοί δίσκοι flupix.vdi (με ιδιότητα "πρωτεύων κύριος") και swar.vdi (με ιδιότητα "δευτερεύων βοηθητικός"), βλ. Εικόνα 3.3. Οι εικονικοί αυτοί δίσκοι έχουν δυναμικό χαρακτήρα και δέχονται εγγραφές, διαγραφές, έχουν δηλαδή τη δυνατότητα να μεγαλώνουν και να μικραίνουν.

Στην καρτέλα Γενικά / Προχωρημένες (εννοείται ρυθμίσεις) (General / Advanced) ορίζονται ρυθμίσεις που διευκολύνουν την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ του φυσικού Υπολογιστικού Συστήματος και της εικονικής μηχανής. Με αυτόν τον τρόπο επιλέχθηκαν αμφίδρομες δυνατότητες για τις λειτουργίες Copy/Paste (δηλ. Κοινά Πρόχειρα ή αλλιώς Shared Clipboard) και τη λειτουργία Drag and Drop (για αρχεία) μεταξύ του Λειτουργικού Συστήματος του φιλοξενούντος Υπολογιστικού Συστήματος και του Λειτουργικού Συστήματος της εικονικής μηχανής (βλ. Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4 Αμφίδρομες επικοινωνίες φυσικού υπολογιστικού συστήματος με την εικονική μηχανή

Τέλος, στην καρτέλα Ρυθμίσεις / Κοινοί Φάκελοι (Settings / Shared Folders) ο φάκελος ή οι φάκελοι, με τους οποίους επιτρέπεται να γίνονται οι αμφίδρομες επικοινωνίες όπως ρυθμίσθηκαν προηγουμένως (βλ. Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5 Κοινοί φάκελοι φυσικού υπολογιστικού συστήματος και εικονικής μηχανής

Σημειώνεται ότι δεν ρυθμίσθηκε η σύνδεση συσκευών USB με την εικονική μηχανή *Flurix*.

3.4 Δοκιμές και ρυθμίσεις λειτουργικότητας *Flurix*

3.4.1 Γενικά

Μετά την εκκίνηση της εικονικής μηχανής, ο χρήστης εισέρχεται σε ένα παραθυρικό περιβάλλον LINUX, το οποίο μοιάζει με αυτό στην ακόλουθη Εικόνα 3.6. Το περιβάλλον αυτό ανήκει σε έναν μοναδικό χρήστη που ονομάζεται *flurix* και του οποίου ο χώρος είναι ο */home/flurix*. Η εκκίνηση ενός τερματικού στο περιβάλλον αυτό δείχνει ότι ο φλοιός του υπόψη LINUX είναι τύπου *bash*. Από τη διερεύνηση του περιβάλλοντος αυτού προκύπτει ότι:

(α) η διαδικασία Copy/Paste δεν λειτουργεί προς καμία κατεύθυνση από και προς μεταξύ της εικονικής μηχανής και του φυσικού Υπολογιστικού Συστήματος.

(β) η διαδικασία Drag/Drop δεν λειτουργεί προς καμία κατεύθυνση από και προς μεταξύ της εικονικής μηχανής και του φυσικού Υπολογιστικού Συστήματος.

Προηγούμενη εμπειρία με αυτό το λογισμικό υποδοχής εικονικών μηχανών, έχει δείξει ότι αυτό μπορεί να οφείλεται στην έλλειψη εγκατάστασης κάποιου από τα extension packs του *Oracle VM VirtualBox* είτε από τη μεριά του φυσικού Υπολογιστικού Συστήματος (host system) είτε από τη μεριά της εικονικής μηχανής (client system). Είναι δυνατόν το απαραίτητο extension να χρειάζεται να εγκατασταθεί και στα δύο μέρη. Στο πλαίσιο της παρούσας Εργασίας δεν έγιναν άλλες ενέργειες για να επιλυθούν τα προβλήματα (α) και (β).

(γ) Οι Κοινοί Φάκελοι που ορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα έχουν συνδεθεί μεταξύ τους

Για παράδειγμα έστω ο Κοινός Φάκελος που στο φυσικό Υπολογιστικό Σύστημα έχει το όνομα *fluka* και βρίσκεται στη θέση π.χ.

C:\A\B\C\fluka

Αυτός ο Κοινός Φάκελος στην φιλοξενούμενη εικονική μηχανή βρίσκεται στη θέση

/media/sf_fluka

Συντόμευση αυτού του Κοινού Φακέλου ή οποιουδήποτε άλλου τέτοιου μπορεί να τοποθετείται στην επιφάνεια εργασίας, δηλαδή στο χώρο */home/flurix/Desktop*. Η συντόμευση του Κοινού Φακέλου */media/sf_fluka* στην επιφάνεια εργασίας της εικονικής μηχανής είναι στην περίπτωσή μας η *fluka*, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.6.

Το προφανές συμπέρασμα είναι ότι:

***ΟΤΙΔΗΠΟΤΕ ΕΓΓΡΑΦΕΙ ΣΕ ΕΝΑΝ ΚΟΙΝΟ ΦΑΚΕΛΟ ΔΕΝ ΔΙΑΓΡΑΦΕΤΑΙ
ΟΤΑΝ Η ΕΙΚΟΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ Flurix ΓΙΝΕΙ SHUTDOWN***

διευκολύνοντας αποφασιστικά την επικοινωνία του φυσικού Υπολογιστικού Συστήματος με την εικονική μηχανή, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά την προετοιμασία δεδομένων για τον κώδικα *FLUKA* και την παραλαβή αποτελεσμάτων από αυτόν.

(δ) Οτιδήποτε νέο αρχείο ή φάκελο δημιουργεί ο χρήστης *flurix* μέσα στο χώρο */home/flurix* σώζεται στον εικονικό δίσκο *flurix.vdi*. Φυσικά μέσα στο χώρο αυτό μπορούν να τοποθετηθούν και τα αόρατα αρχεία που να ρυθμίζουν το προφίλ του χρήστη, όπως π.χ. το αρχείο *.bashrc*

Μετά τη διαδικασία *shutdown* της εικονικής μηχανής, ο εικονικός δίσκος *flurix.vdi* δεν διαγράφεται και τα περιεχόμενα του παραμένουν όπως τα δημιούργησε ή

τροποποίησε ο χρήστης flurix. Για παράδειγμα αν ο χρήστης flurix έχει δημιουργήσει στην επιφάνεια εργασίας τον φάκελο Athina (βλ. Εικόνα 3.6), αυτός ο φάκελος θα υπάρχει ακέραιος με τα περιεχόμενά του και όταν ξαναξεκινήσει η εικονική μηχανή μετά από shutdown. Παρόλα αυτά η ανάγνωση του δίσκου flurix.vdi από το Λειτουργικό Σύστημα του φυσικού Υπολογιστικού Συστήματος δεν είναι αυτονόητη. Αν όμως είναι με κάποιο τρόπο δυνατή, τότε διευκολύνεται ακόμα περισσότερο η επικοινωνία του φυσικού Υπολογιστικού Συστήματος με την εικονική μηχανή, διότι δεν θα είναι τότε απαραίτητοι οι Κοινοί Φάκελοι.

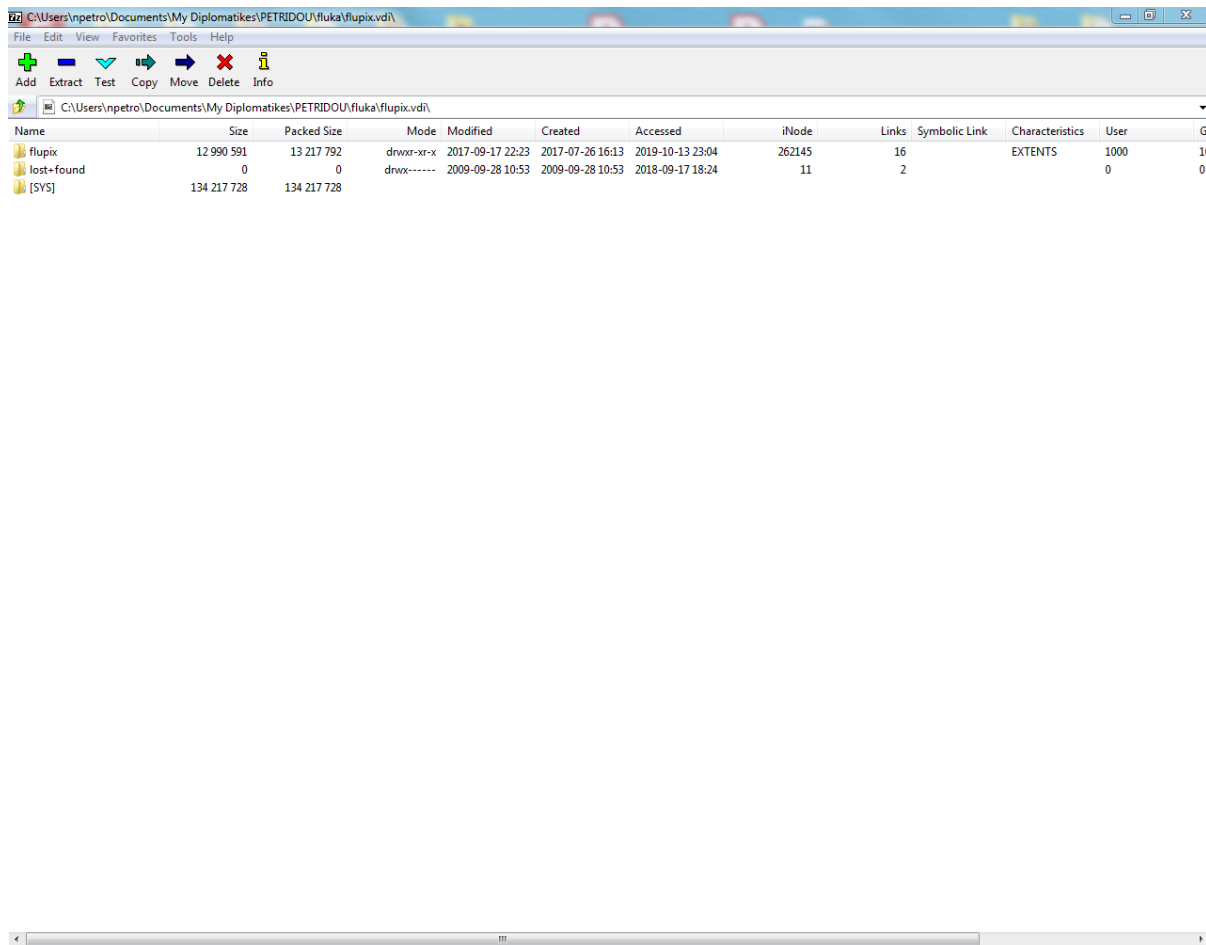


Εικόνα 3.6 Το παραθυρικό περιβάλλον *Flurix*

3.4.2 Ανάγνωση του δίσκου flurix.vdi

Τα αρχεία με διαμόρφωση ".vdi" (από τα αρχικά των αγγλικών λέξεων virtual disk image) είναι αυτά που μπορούν να χρησιμοποιούνται ως εικονικοί δίσκοι σε διάφορα λογισμικά υποδοχής εικονικών μηχανών. Η ανάγνωσή τους και η γραφή σε αυτούς πέρα και εκτός των λογισμικών αυτών δεν είναι αυτονόητη. Παρόλα αυτά έχουν κατασκευασθεί σήμερα λογισμικά, τα οποία εξυπηρετούν και αυτήν την ανάγκη. Τα λογισμικά αυτά ανήκουν συνήθως στην κατηγορία εκείνων που χρησιμοποιούνται για την συμπίεση και την

αποσυμπίεση αρχείων και φακέλων. Ένα από αυτά είναι και το λογισμικό 7-zip (www.7-zip.org), το οποίο παρέχει τέτοια δυνατότητα. Στους Η/Υ, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την Διπλωματική Εργασία με Λειτουργικό Σύστημα MS Windows εγκαταστάθηκε το υπόψη λογισμικό, προκειμένου ο ερευνητής, να μπορεί να έχει πρόσβαση ανάγνωσης και εγγραφής στον εικονικό δίσκο flurix.vdi, χωρίς να χρειάζεται να εκκινήσει την εικονική μηχανή *Flurix*. Στην Εικόνα 3.7 δίνεται το πώς γίνεται παραθυρικά η πρόσβαση στον δίσκο flurix.vdi με τη βοήθεια του λογισμικού 7-zip στο Λειτουργικό Σύστημα MS Windows.



Εικόνα 3.7 Πρόσβαση στον εικονικό δίσκο flurix.vdi με τη βοήθεια του λογισμικού 7-zip

3.4.3 Βελτιστοποίηση PATH

Τα εκτελέσιμα αρχεία για τους κώδικες FLUKA και FLAIR βρίσκονται τοποθετημένα στον φάκελο /usr/local//fluka/flutil. Κατά συνέπεια προκειμένου οι κώδικες αυτοί να εκτελεστούν ο χρήστης flurix πρέπει να γράψει στη γραμμή εντολών, π.χ. για να εκτελεσθεί ο FLUKA

`$ /usr/local//fluka/flutil/rfluka [+ παράμετροι εκτέλεσης]`

Όπως γίνεται κατανοητό, αυτό δεν είναι καθόλου βολικό και έπρεπε να απλοποιηθεί. Ο τρόπος με τον οποίο απλοποιήθηκε είναι ο ακόλουθος:

Στο χώρο `/home/flurix` του χρήστη δημιουργήθηκε το άρατο αρχείο ρυθμίσεων περιβάλλοντος χρήστη με το όνομα `.bashrc`. Στο αρχείο αυτό, με χρήση του κειμενογράφου `vi`, δόθηκε το περιεχόμενο

```
PATH=$PATH:/usr/local/fluka/flutil
```

```
export PATH
```

Με αυτήν τη ρύθμιση ο χρήστης `flurix` έχει προσθέσει στο `path` του συστήματος της εικονικής μηχανής *Flurix* το `path` των εκτελέσιμων αρχείων για τους κώδικες FLUKA και FLAIR. Έτσι τα εκτελέσιμα αρχεία του κώδικα "τρέχουν" χωρίς να χρειάζεται η χρήση της πολύπλοκης απόλυτης διαδρομής για τη θέση τους. Για παράδειγμα για την εκκίνηση του κώδικα FLUKA, αρκεί ο χρήστης, από οποιονδήποτε φάκελο εργασίας, να δώσει απλά:

```
$ rfluka [+ παράμετροι εκτέλεσης]
```

Αν απουσιάζουν οι παράμετροι εκτέλεσης τότε ο FLUKA απαντά "missing input file".

Σε ένα καλύτερο εικονικό σύστημα LINUX, στο οποίο το Λειτουργικό Σύστημα είναι το ίδιο σε εικονικό δίσκο, στον οποίο μπορούν να γίνονται και εγγραφές, η απλοποίηση του `path` μπορεί να γίνει και με άλλους τρόπους. Ένας από αυτούς είναι και ο παρακάτω απλός:

- μετάβαση στον φάκελο `/bin` στον οποίο δείχνει το `path` των εκτελέσιμων προγραμμάτων του συστήματος, που αντιστοιχούν στις εντολές του φλοιού

```
$ cd /bin
```

- με την ιδιότητα του υπερχρήστη δημιουργία συμβολικού λογικού συνδέσμου (symbolic link) `rfluka` με το φάκελο των εκτελέσιμων των κωδίκων FLUKA και FLAIR

```
$ sudo ln -s rfluka /usr/local/fluka/flutil/rfluka
```

- διασφάλιση ότι ο συμβολικός σύνδεσμος, μπορεί να εκτελείται

```
$ sudo chmod +x rfluka
```

Αυτή η ακολουθία ρυθμίσεων, δεν μπορεί να εφαρμοσθεί στην εικονική μηχανή *Flurix*, διότι, ο φάκελος `/bin` στον οποίο αυτές εφαρμόζονται, έχει φυσική μορφή στον οπτικό δίσκο από τον οποίο εκκινεί η μηχανή. Επειδή λοιπόν ο οπτικός αυτός δίσκος είναι "για ανάγνωση

μόνο" (read only) τυχόν εγγραφές με τον παραπάνω τρόπο (που τηρούνται προσωρινά στην κεντρική μνήμη) διαγράφονται αυτόματα όταν η *Flurix* γίνει shutdown.

3.4.4 Επιτρεπόμενη διάρκεια χρήσης

Κατά τη διάρκεια της Διπλωματικής Εργασίας διαπιστώθηκε ότι τα εκτελέσιμα του κώδικα FLUKA, είχαν περιορισμένη επιτρεπόμενη διάρκεια χρήσης. Αυτό είναι κατανοητό διότι ο κώδικας αυτός, λόγω της πολυπλοκότητάς του, αναπτύσσεται και διορθώνεται συνεχώς με συνέπεια να αναβαθμίζεται διαρκώς η ποιότητα και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του με τις νεότερες εκδόσεις. Ο χρήστης του κώδικα δηλαδή, ενθαρρύνεται με τον τρόπο αυτό ώστε να τρέχει πάντοτε την νεότερη επίσημη έκδοση του κώδικα. Παρόλα αυτά οι σκοποί της Διπλωματικής Εργασίας, ως αυτής που εισάγει τον αναγνώστη στους σκοπούς και τη λειτουργία του υπόψη κώδικα δεν εξυπηρετούνταν από την αλλαγή έκδοσης. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό δοκιμάστηκε η αλλαγή της ημερομηνίας του συστήματος σε προγενέστερη. Η αλλαγή αυτή δεν είναι αυτονόητη διότι το σύστημα της εικονικής μηχανής συγχρονίζεται με το χρόνο του συστήματος του φυσικού H/Y που την φιλοξενεί και αυτός με τη σειρά του συγχρονίζεται με την παγκόσμια ώρα από κατάλληλο time server που βρίσκεται στο διαδίκτυο.

Ένας απλοϊκός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι ασφαλώς, η αποσύνδεση του φυσικού H/Y από τον time server και η ρύθμιση της ώρας του σε παλαιότερη κατάλληλη, αλλά αυτός ο τρόπος δημιουργεί περισσότερα προβλήματα από όσα επιλύει. Ένας άλλος τρόπος σωστότερος τρόπος είναι τα ακόλουθα βήματα:

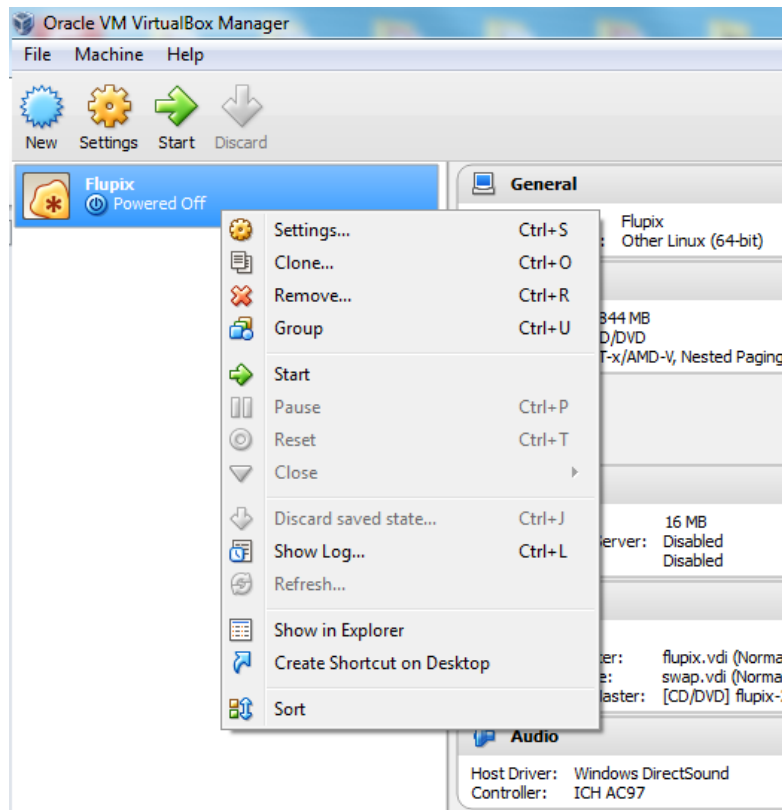
(A) Παύση του συγχρονισμού χρόνου της εικονικής μηχανής με τον χρόνο του φυσικού H/Y.

Αυτό επιτυγχάνεται σύμφωνα με τις οδηγίες που δίνονται στο σύνδεσμο:

<https://superuser.com/questions/984040/how-to-disable-time-sync-with-windows-7-as-host-os-in-virtualbox>

Συνοπτικά:

1. Εντοπίζεται η θέση, στην οποία βρίσκεται η εικονική μηχανή Flurix (δηλ. το αρχείο *Flurix.vbox*) στο σκληρό δίσκο του φυσικού H/Y, πατώντας "δεξί πλήκτρο" / Show in Explorer , όπως στην Εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.8 Εντοπισμός θέσης αρχείου Flurix.vbox

2. Η εικονική μηχανή Flurix πρέπει να είναι "κλειστή"
3. Το λογισμικό υποδοχής εικονικών μηχανών δεν πρέπει να "τρέχει".
4. Δημιουργείται ένα αντίγραφο του αρχείου Flurix.vbox, έστω το Flurix.vbox.old, ώστε να υπάρχει ένα αντίγραφο ασφαλείας (backup) της εικονικής μηχανής, στο οποίο να είναι δυνατόν να καταφύγει κάποιος αν τυχόν το αρχείο Flurix.vbox καταστραφεί.
5. Το αρχείο Flurix.vbox επεξεργάζεται με έναν κειμενογράφο, έστω τον WordPad.
6. Στο αρχείο, με την βοήθεια του κειμενογράφου και πριν την τελευταία γραμμή του τμήματος ExtraData (δηλ. την `</ExtraData>`) προστίθεται


```
<ExtraDataItem
name="VBoxInternal/Devices/VMMDev/0/Config/GetHostTimeDisabled"
value="1"/>
```

(B) Ορισμός κατάλληλης ώρας στην εικονική μηχανή *Flurix*

Αυτό επιτυγχάνεται αν στο αρχείο `.bashrc` προστεθεί μια εντολή ορισμού παλαιότερου χρόνου στο ρολόι π.χ. η

```
sudo date -s "17 SEP 2017 19:20:00"
```

Με τον τρόπο αυτό βέβαια, η ώρα εκκίνησης του συστήματος της μηχανής *Flurix*, μολονότι καταλλήλως παλαιά, θα είναι πάντοτε η ίδια.

3.5 Σχόλια και συμπεράσματα

Η χρήση λογισμικού υποδοχής εικονικής μηχανής και της προετοιμασμένης για το σκοπό αυτό εικονικής μηχανής *Flurix*, βασισμένης στη διανομή LINUX / Knoppix, με προεγκατεστημένους τους κώδικες FLUKA και FLAIR αντί για τη χρήση μιας φυσικής εγκατάστασης LINUX, στην οποία εκ των υστέρων θα ακολουθούσε η εγκατάσταση των κωδίκων FLUKA και FLAIR, παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το κυριότερο πλεονέκτημα είναι ότι η εικονική μηχανή είναι έτοιμη προς χρήση πλήρως παραμετροποιημένη για τις ανάγκες του FLUKA και του FLAIR, χωρίς να απαιτούνται ρυθμίσεις από τον χρήστη. Τα μειονεκτήματα είναι δεν είναι σημαντικά, αλλά υπάρχουν σίγουρα αρκετά προβλήματα, τα οποία αντιμετωπίστηκαν κατά περίπτωση με τρόπους που περιγράφηκαν. Τα προβλήματα αυτά βέβαια, παρότι απλά, δεν διευκολύνουν τον νέο χρήστη να μπει κατευθείαν στη χρήση του FLUKA. Αυτό, κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αναγνωρίστηκε εμμέσως και από τους δημιουργούς των FLUKA και FLAIR, οι οποίοι προσάρμοσαν τις επόμενες εκδόσεις στο νεότερο, καλύτερο, απλούστερο λογισμικό υποδοχής εικονικών μηχανών που ονομάζεται `docker` (βλ. www.docker.com), το οποίο βασίζεται σε μία καλύτερη τεχνολογία, βασικό στοιχείο της οποίας είναι τα "δοχεία λογισμικού" (`software containers`).

Στο επόμενο 4^ο Κεφάλαιο, θα αναπτυχθεί συνοπτικά ο τρόπος που λειτουργεί ο κώδικας FLUKA με τη βοήθεια του πρώτου από τα διαθέσιμα παραδείγματα. Με το συγκεκριμένο παράδειγμα θα γίνει και μία πρώτη γνωριμία με τον τρόπο που οργανώνονται τα δεδομένα εισόδου, με τον τρόπο που ο κώδικας τρέχει και με τον τρόπο με τον οποίο αποδίδονται τα αποτελέσματα. Για το σκοπό αυτό δίνονται εξηγήσεις σχετικά με το περιεχόμενο και την οργάνωση των αρχείων εισόδου καθώς και για το περιεχόμενο και την οργάνωση των αρχείων αποτελεσμάτων. Το γραφικό περιβάλλον FLAIR μπορεί να είναι αρκετά βοηθητικό ως προς αυτά τα δύο ζητούμενα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ FLUKA

4.1 Εισαγωγή

Η αποδοτική χρήση του FLUKA ως μεγάλου κώδικα υψηλών δυνατοτήτων στα πλαίσια των εφαρμογών Monte Carlo για τις ανάγκες πρόβλεψης των αποτελεσμάτων αλληλεπιδράσεων πυρηνικής και ατομικής φυσικής προϋποθέτει τρία στάδια: Το προκαταρκτικό - προεπεξεργαστικό (στα αγγλικά pre-processing ή απλώς στάδιο "pre"), την υπολογιστική επίλυση του προβλήματος (δηλ. το τρέξιμο του κώδικα) και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων (στα αγγλικά post-processing ή απλώς στάδιο "post"). Κατά το στάδιο "pre" χρησιμοποιείται ένα αρχείο εισόδου, με βάση το οποίο παραμετροποιείται ο κώδικας για την επίλυση ενός προβλήματος και ορίζονται ή δίδονται κυρίως δεδομένα όπως η γεωμετρία της πηγής ακτινοβολίας, το είδος της ακτινοβολίας, η γεωμετρία και η σύνθεση της ύλης με την οποία αλληλεπιδρά η ακτινοβολία και φυσικά το σημείο ή τα σημεία ανίχνευσης της ακτινοβολίας μετά τις αλληλεπιδράσεις της με την ύλη του προβλήματος. Για τα σημεία αυτά προκύπτουν αποτελέσματα ως αρχείο εξόδου, τα οποία αξιολογούνται κατά το στάδιο "post". Προσοχή χρειάζεται ώστε τα αποτελέσματα να αποδίδουν τη φυσική απόκριση του προβλήματος. Για το σκοπό αυτό απαιτείται ικανή γνώση και εμπειρία του χρήστη ώστε να μην οδηγηθεί στην αναγνώριση λανθασμένων αποτελεσμάτων ως ορθών. Οι αιτίες λάθους ασφαλώς θα οφείλονται στον κακό ορισμό του προβλήματος κατά τη συγκρότηση του αρχείου εισόδου. Για τους σκοπούς αυτής της Διπλωματικής Εργασίας και για την αρχική εξοικείωση με τον κώδικα FLUKA, κρίθηκε ότι πρέπει να επιλεγθεί προς παρουσίαση το πρώτο παράδειγμα εφαρμογής του κώδικα. Το παράδειγμα αυτό παρουσιάζεται στο βασικό εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα FLUKA (FLUKA Manual σε μορφή pdf), το οποίο βρίσκεται εύκολα στην επίσημη ιστοσελίδα του κώδικα την www.fluka.org. Το συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέχθηκε όχι μόνο διότι είναι το πρώτο και απλούστερο που προτείνεται για την καλύτερη κατανόηση του κώδικα αλλά επίσης διότι παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με γεωμετρίες προβλημάτων για τα οποία υπάρχει ενδιαφέρον να επιλυθούν αργότερα στον Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ.

4.2 Περιγραφή του παραδείγματος

4.2.1 Γενικά

Στο πρόβλημα του προς επίλυση παραδείγματος, μονοενεργειακή δέσμη πρωτονίων ορμής 50GeV/c (δηλ. 5.36×10^{-19} kgm/s, όπου $1 \text{ GeV} = 1.609 \times 10^{-10} \text{ J}$ και c η ταχύτητα του φωτός στο κενό περίπου ίση με 3×10^8 m/s) προσπίπτει σε λεπτό στόχο βηρυλλίου σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με διαστάσεις $20 \times 20 \times 5 \text{ cm}$. Σκοπός του παραδείγματος είναι ο υπολογισμός της ροής φορτισμένων πιονίων που παράγονται από την αλληλεπίδραση αυτής της δέσμης πρωτονίων με τον παραπάνω στόχο μέσα και γύρω από τον στόχο αυτόν. Υπενθυμίζεται ότι τα πόνια είναι είδος μεσονίων τα οποία έχουν την ιδιότητα να μην εξαφανίζονται άμεσα. Για λόγους ευκολίας σε αυτό το παράδειγμα, ο περιβάλλον χώρος θεωρείται αμελητέος ως ύλη και αντικαθίσταται με το λεγόμενο "ιδανικό κενό" του οποίου τα χαρακτηριστικά θα εξηγηθούν. Το αρχείο εισόδου του παραδείγματος δίνεται στο Παράρτημα του Κεφαλαίου 4, το οποίο ακολουθεί στο τέλος του Κεφαλαίου. Ακολουθεί στο σημείο αυτό μία όσο το δυνατόν πληρέστερη περιγραφή του αρχείου εισόδου και μια μικρή και παράλληλη εξήγηση του κώδικα FLAIR. Στην εικονική μηχανή το εξεταζόμενο παράδειγμα βρίσκεται, στο χώρο /usr/local/fluka ως αρχείο με το όνομα example.inp.

4.2.2 Αρχείο εισόδου - στάδιο "pre"

Ένα αρχείο εισόδου του κώδικα FLUKA αποτελείται από πληροφορίες σε κώδικα ASCII, είναι δηλαδή κείμενο με κατάλληλη διαμόρφωση (format) το οποίο ο χρήστης μπορεί να επεξεργάζεται σε απλούς κειμενογράφους, όπως είναι για παράδειγμα ο vi ή σε γραφικό περιβάλλον με τον κώδικα FLAIR. Το αρχείο εισόδου περιέχει τις εξής κύριες ομάδες πληροφοριών εισόδου:

- α) Τίτλο και γενική περιγραφή του προβλήματος
- β) Γεωμετρία, θέση και είδος της πηγής ακτινοβολίας
- γ) Γεωμετρία και θέση της ύλης που διασχίζει η ακτινοβολία
- δ) Γεωμετρία και θέση του στόχου της ακτινοβολίας
- ε) Υλικά της ύλης που διασχίζει η ακτινοβολία
- στ) Υλικά του στόχου στον οποίο προσπίπτει η ακτινοβολία

ζ) Θέσεις ανίχνευσης των προϊόντων αλληλεπίδρασης με την ακτινοβολία

η) Κατάλληλοι ανιχνευτές στις εξεταζόμενες θέσεις με τους οποίους διαπιστώνονται τα διαφορετικά αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με τον στόχο.

και άλλα.

Η γενική δομή των δεδομένων εισόδου (και αργότερα των αποτελεσμάτων εξόδου αντίστοιχα) χωρίζεται σε κάρτες δηλαδή ακολουθίες από γραμμές (records), η κάθε μια εκ των οποίων έχει το δικό της τίτλο. Τα records στα οποία βρίσκονται σχόλια έχουν στην πρώτη στήλη τον χαρακτήρα "*". Το πρώτο record ενός αρχείου εισόδου είναι συνήθως σχόλιο:

```
*...+...1...+...2...+...3...+...4...+...5...+...6...+...7...+...8
```

Με βάση αυτό το record/σχόλιο και τη βοήθεια του κειμενογράφου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να στοιχήσει τις επιλογές του κατά τον τρόπο που απαιτεί ο κώδικας FLUKA. Το record αυτό επαναλαμβάνεται όσες φορές χρειάζεται στο αρχείο εισόδου για να διευκολύνεται ο χρήστης. Τα πεδία στοίχισης είναι 8:

Το 1^ο από * - 1 είναι συνήθως αλυσίδα χαρακτήρων με κατάλληλο περιεχόμενο για οδηγία ή εντολή ή περιγραφή,

το από 1 - 2 είναι το ονομαζόμενο WHAT(1), το από 2 - 3 είναι το WHAT(2), το από 3 - 4 είναι το WHAT(3), το από 4 - 5 είναι το WHAT(4), το από 5 - 6 είναι το WHAT(5), το από 6 - 7 είναι το WHAT(6)

και το 8^ο από 7 - 8 είναι το ονομαζόμενο SDUM που είναι επίσης μια αλυσίδα χαρακτήρων με κατάλληλο περιεχόμενο.

Τα πεδία WHAT(1) έως και WHAT(6) μπορούν να παίρνουν αλφαριθμητικές ή αριθμητικές τιμές.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να πληρώνει τα πεδία σεβόμενος το μήκος τους, όπως δίνεται από τη γραμμή σχολίου

```
*...+...1...+...2...+...3...+...4...+...5...+...6...+...7...+...8
```

δημιουργώντας το αρχείο εισόδου με διαμόρφωση (formatted). Το 1^ο πεδίο τελειώνει στο "1", το δεύτερο στο "2", κ.ο.κ.

Ο χρήστης έχει επίσης τη δυνατότητα να πληρώνει τα πεδία χωρίζοντας τις τιμές που τους δίνει με κόμμα ή κενό, δημιουργώντας το αρχείο εισόδου χωρίς διαμόρφωση (unformatted). Ο κώδικας FLUKA δέχεται ότι ΟΛΑ τα πεδία μπορεί να πληρώνονται με αριθμούς ακόμα και εκεί που προβλέπεται να πληρώνονται αλφαριθμητικά. Αυτό γίνεται διότι για κάθε αλφαριθμητική είσοδο υπάρχει κατάλληλος αριθμός που σηματοδοτεί το ίδιο αποτέλεσμα. Οι αντιστοιχίες αριθμών και αλφαριθμητικών ακολουθιών και το νόημά τους βρίσκονται στα διάφορα εγχειρίδια του κώδικα.

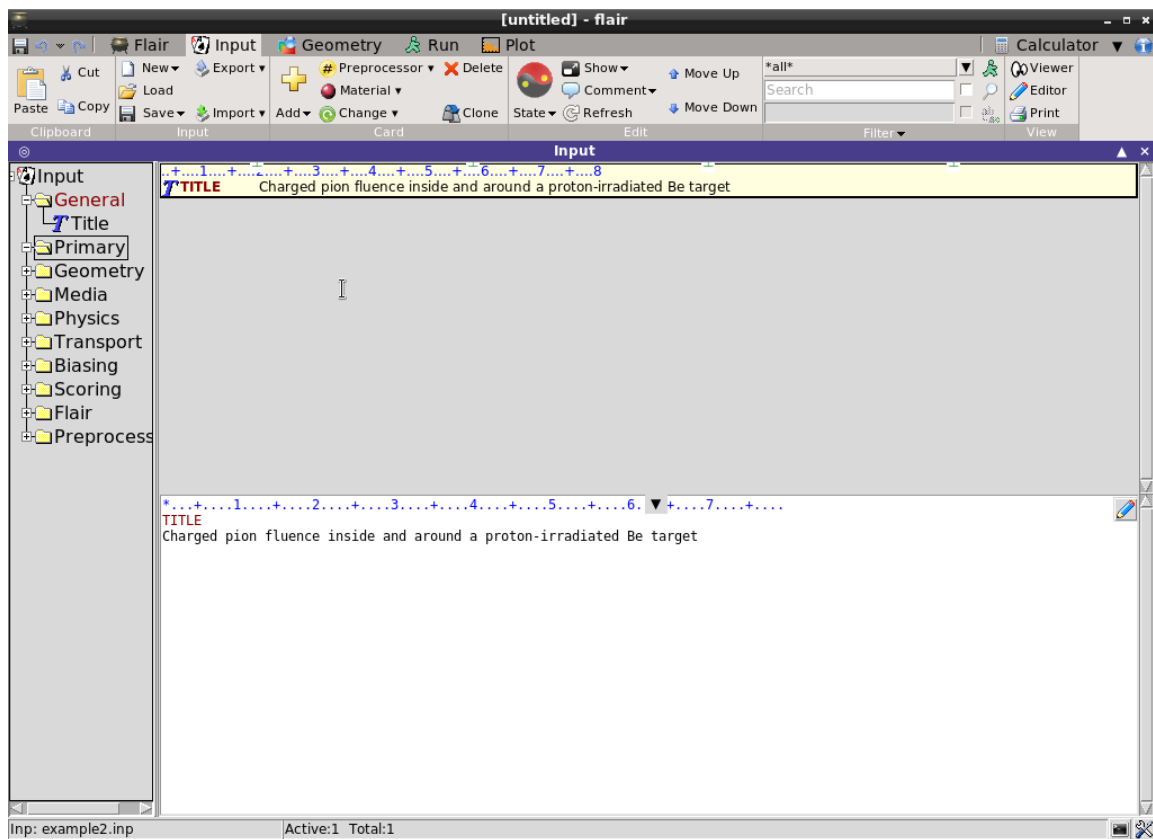
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πρώτο record ενός αρχείου εισόδου είναι η λέξη TITLE, στο πρώτο πεδίο ακολουθούμενη από ένα extra πεδίο στο ίδιο record, το οποίο καταλαμβάνεται από μία περιγραφή του προβλήματος. Στην περίπτωση του παραδείγματος που εξετάζεται αυτά τα δύο πεδία του record είναι:

```
TITLE
```

```
Charged pion fluence inside and around a proton-irradiated Be target
```

Στο γραφικό περιβάλλον FLAIR, το αρχείο εισόδου εμφανίζεται σε δύο κύρια παράθυρα: Το παράθυρο γραφικής επεξεργασίας και το παράθυρο παραγόμενου αρχείου εισόδου, δεξιά πάνω στην Εικόνα 4.1 και δεξιά κάτω στην Εικόνα 4.1 αντίστοιχα.



Εικόνα 4.1 Γραφικό περιβάλλον FLAIR

Το extra πεδίο στην περίπτωση της οδηγίας TITLE δεν ανήκει στα πεδία WHAT(i) ή SDUM.

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

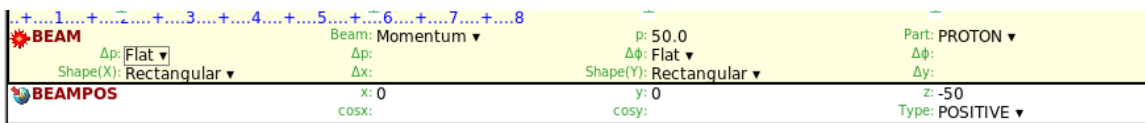
Στη συνέχεια ακολουθεί το record με το οποίο ορίζονται οι ιδιότητες της δέσμης ακτινοβολίας. Το record ξεκινάει με τη λέξη BEAM στο 1^ο πεδίο * - 1. Το 2^ο πεδίο WHAT(1) περιέχει την ορμή εκπεμπόμενων σωματιδίων (σε GeV/c). Τα υπόλοιπα πεδία WHAT(i>1) στο συγκεκριμένο παράδειγμα παραμένουν κενά και το τελευταίο 8^ο πεδίο προσδιορίζει το είδος των σωματιδίων (SDUM=PROTON). Τα πεδία WHAT(2) έως WHAT(6) μπορεί να έχουν άλλες πληροφορίες για τη δέσμη, αν χρειάζεται, π.χ. το WHAT(4) είναι το πλάτος κατά x και το WHAT(5) είναι το πλάτος κατά y. Όταν τα WHAT(2) έως WHAT (6) είναι κενά, ο κώδικας FLUKA καταλαβαίνει ότι αυτά πρέπει να πάρουν εξορισμού τιμές.

BEAM	50.E+00	PROTON
------	---------	--------

Στο επόμενο record δίνονται στοιχεία για τη (σημειακή) θέση (BEAMPOS) εκπομπής της δέσμης, σε τρία πεδία:

Δηλαδή η πηγή εκπέμπει από τις συντεταγμένες $(x, y, z) = (0.0, 0.0, -50.0)$, **όλες οι μονάδες διαστάσεων και αποστάσεων εννοούνται σε cm**. Αν δεν υπάρχουν άλλες πληροφορίες, σημαίνει ότι η δέσμη κινείται πάνω στον άξονα z με κατεύθυνση προς το $+\infty$ (POSITIVE).

Στην Εικόνα 4.2 διακρίνονται οι πληροφορίες αυτών των δύο record όπως φαίνονται με το FLAIR



Εικόνα 4.2 Ιδιότητες της δέσμης στο γραφικό περιβάλλον FLAIR

Παρατηρείται ότι στο FLAIR τα πεδία που στο αρχείο εισόδου είναι κενά (και άρα έχουν τις εξορισμού τιμές) έχουν διευκρινισθεί με τις εξορισμού τιμές. Επιπλέον δίπλα από τα πεδία αυτά, στο FLAIR πάντα, διατίθενται τοξάκια, τα οποία οδηγούν σε pull down επιλογές που αλλάζουν τη γεωμετρία και την κατεύθυνση της δέσμης.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ ΥΛΗΣ και ΣΤΟΧΟΥ

Η γεωμετρία στον κώδικα FLUKA είναι η λεγόμενη συνδυαστική (combinatorial). Για το σκοπό αυτό πρέπει να ορίζονται "σώματα" (bodies), από τους συνδυασμούς των οποίων προκύπτουν οι "περιοχές" (regions) ύλης τις οποίες διασχίζει η εξεταζόμενη ακτινοβολία και η περιοχή (region) - στόχος στον οποίο αυτή προσπίπτει. Από τους συνδυασμούς των σωμάτων προκύπτουν επίσης και οι διεπιφάνειες μεταξύ των σωμάτων, που και αυτές ενδιαφέρουν ως περιοχές. Το τμήμα του αρχείου εισόδου στο οποίο ορίζεται η γεωμετρία ξεκινά με ένα record που περιέχει την οδηγία GEOBEGIN και τελειώνει με ένα record με την οδηγία GEOEND. Μεταξύ GEOBEGIN και GEOEND παρεμβάλλονται records που αφορούν στην περιγραφή των "σωμάτων" ακολουθούμενα από την οδηγία END και records που αφορούν στην περιγραφή των "περιοχών" ακολουθούμενα από ένα δεύτερο END. Στην οδηγία GEOBEGIN το πεδίο SDUM μπορεί να παίρνει την τιμή COMBNAME ή COMBINAT. Στην περίπτωση που έχει επιλεγθεί COMBNAME όπως στο παράδειγμα που εξετάζεται, ο χρήστης μπορεί να περιγράψει τα σώματα με αλφαριθμητικές περιγραφές. Αν η επιλογή είναι COMBINAT οι περιγραφές πρέπει να είναι αριθμητικές. Επιτρέπεται μόνο μία εντολή GEOBEGIN.

Στον FLUKA οι κυριότεροι δυνατοί τύποι γεωμετρίας σωμάτων είναι οι:

RPP = rectangular parallelepiped (ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο)

SPH = sphere (σφαίρα)

XYP = επίπεδο XY άπειρης έκτασης

XZP = επίπεδο XZ άπειρης έκτασης

YZP = επίπεδο YZ άπειρης έκτασης κάτω ή πάνω από κάθετο επίπεδο P

PLA = ημιχώρος απείρου όγκου

XCC = κυκλικός κύλινδρος απείρου μήκους (CC) παράλληλος στον άξονα X

YCC = κυκλικός κύλινδρος απείρου μήκους (CC) παράλληλος στον άξονα Y

ZCC = κυκλικός κύλινδρος απείρου μήκους (CC) παράλληλος στον άξονα Z

XEC = ελλειψοειδής κύλινδρος απείρου μήκους (EC) παράλληλο στον άξονα X

YEC = ελλειψοειδής κύλινδρος απείρου μήκους (EC) παράλληλο στον άξονα Y

ZEC = ελλειψοειδής κύλινδρος απείρου μήκους (EC) παράλληλο στον άξονα Z

RCC =κυκλικός κύλινδρος ορισμένου μήκους με βάσεις κάθετες στην πλευρά

REC = ελλειπτικός κύλινδρος ορισμένου μήκους με βάσεις κάθετες στην πλευρά

TRC = κόλουρος κώνος με βάση κάθετη στον άξονα συμμετρίας

ELL = ελλειψοειδές από περιστροφή

Κάθε τύπος γεωμετρίας σώματος 3 χαρακτήρων ακολουθείται από το όνομα του σώματος που αυτή αντιπροσωπεύει. Στη συνέχεια δίνονται στα πεδία στοιχεία για τις συντεταγμένες του σώματος.

Το αντίστοιχο απόσπασμα του αρχείου εισόδου που αφορά στα "σώματα" (από GEOBEGIN έως το πρώτο END), είναι:

```
GEOBEGIN COMBNAME
0 0 A simple Be target inside vacuum
RPP body1 -5000000.0 +5000000.0 -5000000.0 +5000000.0 -5000000.0 +5000000.0
RPP body2 -1000000.0 +1000000.0 -1000000.0 +1000000.0 -100.0 +1000000.0
RPP body3 -10.0 +10.0 -10.0 +10.0 0.0 +5.0
* plane to separate the upstream and downstream part of the target
XYP body4 2.5
END
```

Το ίδιο απόσπασμα στο FLAIR φαίνεται όπως στην Εικόνα 4.3:

Geometry	Title	Xmin	Xmax	Ymin	Ymax	Zmin	Zmax
RPP	body1	-5000000	5000000	-5000000	5000000	-5000000	5000000
RPP	body2	-1000000	1000000	-1000000	1000000	-100	1000000
RPP	body3	-10	10	-10	10	0	5
XYP	body4	z: 2.5					
END							

Εικόνα 4.3 Περιγραφή των σωμάτων στο γραφικό περιβάλλον FLAIR

Σύμφωνα με τα records γεωμετρίας σωμάτων του παραδείγματος, η γεωμετρία αποτελείται από τρία σώματα RPP, τα body1, body2 και body3 και ένα XYP.

Ένα RPP ορίζεται με μία ακολουθία 6 συντεταγμένων σε σχέση με την αρχή των αξόνων, τοποθετημένων στα αντίστοιχα πεδία, των εξής:

$x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}, z_{min}, z_{max}$

Φυσικά άλλες γεωμετρίες σωμάτων ορίζονται με άλλες ακολουθίες συντεταγμένων, οι οποίες μπορούν να βρεθούν στο εγχειρίδιο του FLUKA.

Επομένως το σώμα body1 είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο σώμα μεγάλου όγκου, το οποίο συμπεριλαμβάνει το σημείο εκπομπής της ακτινοβολίας. Συνακόλουθα το body2 είναι επίσης πολύ μεγάλο και συμπεριλαμβάνει επίσης το σημείο εκπομπής της ακτινοβολίας. Τέλος το body3 έχει μήκος 20 cm, πλάτος 20 cm και βάθος $z = 5$ cm και αντιπροσωπεύει τον στόχο βηρυλλίου. Το επίπεδο XYP body4 διαχωρίζει ως επίπεδο συμμετρίας τον στόχο στο $z = 2.5$ cm.

Τα επόμενα records ορίζουν αυτό που ο κώδικας εννοεί ως "περιοχές" (μετά το πρώτο END και μέχρι την GEOEND).

```
* black hole
regBH1    5    +body1 -body2

* vacuum around
regVA2    5    +body2 -body3

* Be target 1st half
regBE3    5    +body3 +body4

* Be target 2nd half
regBE4    5    +body3 -body4

END
GEOEND
```

Η οδηγία GEOEND που δηλώνει την λήξη της περιγραφής της γεωμετρίας σωμάτων και περιοχών.

Μία περιοχή ορίζεται ως μια BOOLEAN πράξη μεταξύ σωμάτων προκειμένου να προσδιορισθεί, η τομή δύο σωμάτων (πράξη +), η ένωση δύο σωμάτων (πράξη OR ή συμβολικά |) ή η αφαίρεση σώματος από σώμα (πράξη -). **Μια περιοχή πρέπει υποχρεωτικά να είναι από ομογενή ύλη, το είδος της οποίας πρέπει να ορισθεί.**

Ένα record το οποίο ορίζει μία περιοχή αποτελείται από το όνομα της περιοχής, τον μέγιστο αριθμό των περιοχών με τις οποίες αυτή η περιοχή μπορεί να συνορεύει (συνήθως αυτός ορίζεται ως 5 για να καλύπτεται πάντα ο αριθμός γειτονικών περιοχών)

και την BOOLEAN πράξη μεταξύ σωμάτων που ορίζει τον όγκο της περιοχής η απλώς μία διεπιφάνεια μεταξύ περιοχών .

Στο παράδειγμα, ο όγκος αλληλεπίδρασης πρωτονίων - στόχου βρίσκεται βυθισμένος μέσα στην περιοχή regBH1 body1 - body2 που πρέπει να ορισθεί ως ύλη "μαύρης τρύπας" (black hole), όπως πληροφορεί το σχόλιο που προηγείται.

Μέσα στη "μαύρη τρύπα" υπάρχει το "ιδανικό κενό" της περιοχής regVA2 body2 - body1 που είναι ύλη προσδιοριζόμενη στο σχόλιο ως "vacuum around".

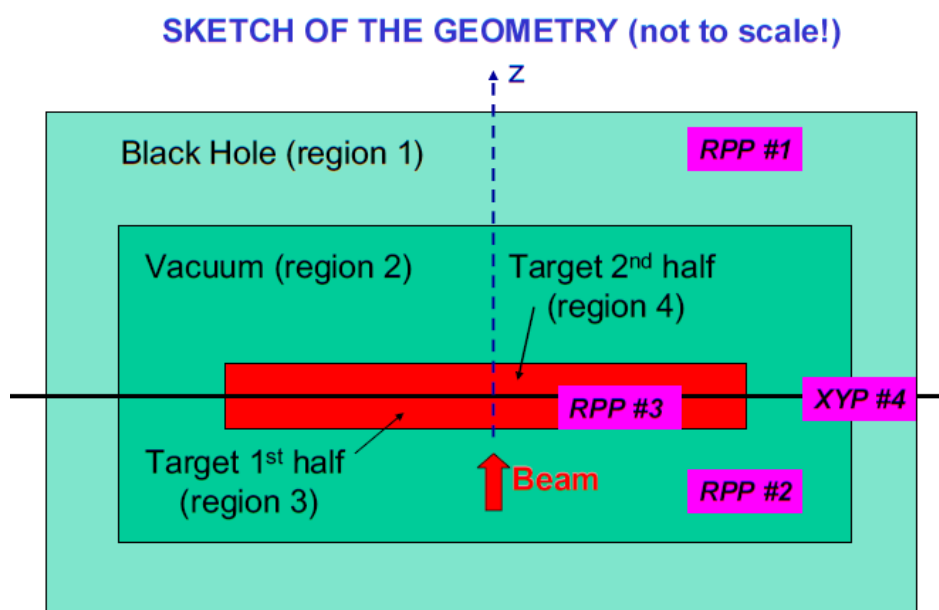
Μέσα στο "ιδανικό κενό" υπάρχει το βηρύλλιο του στόχου προσδιοριζόμενο ως δύο ημιπεριοχές, την regBE3 ως body3 + body4 και την regBE4 ως body3-body4.

Στο γραφικό περιβάλλον FLAIR οι περιοχές φαίνονται όπως στην Εικόνα 4.4.

black hole	REGION regBH1	Neigh: 5
expr: +body1 -body2		
vacuum around	REGION regVA2	Neigh: 5
expr: +body2 -body3		
Be target 1st half	REGION regBE3	Neigh: 5
expr: +body3 +body4		
Be target 2nd half	REGION regBE4	Neigh: 5
expr: +body3 -body4		
END		
GEOEND		

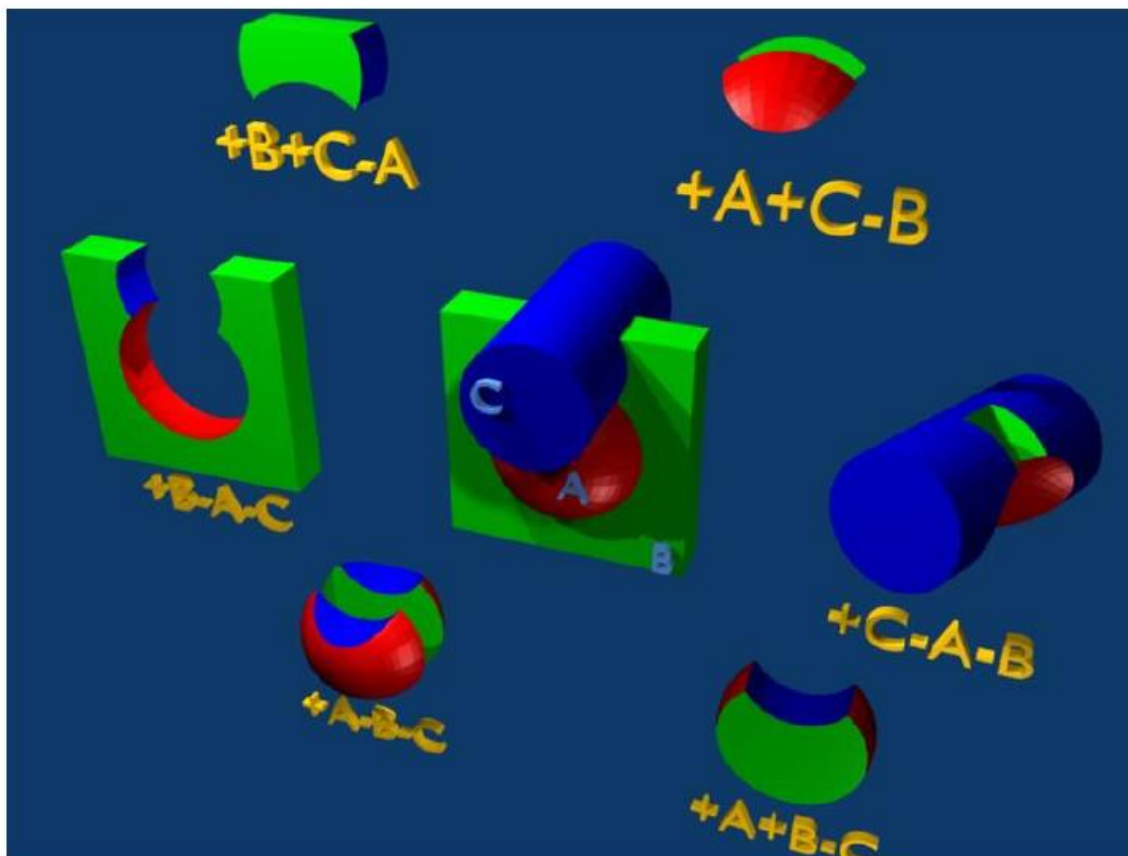
Εικόνα 4.4 Περιγραφή των περιοχών στο γραφικό περιβάλλον FLAIR

Στην Εικόνα 4.5, δίνεται η γεωμετρία των περιοχών του εξεταζόμενου παραδείγματος.



Εικόνα 4.5 Η γεωμετρία του παραδείγματος (δεν είναι υπό κλίμακα)

Για την καλύτερη κατανόηση της άλγεβρας BOOL μεταξύ σωμάτων δίνεται και η Εικόνα 4.6.



Εικόνα 4.6 Άλγεβρα BOOL μεταξύ σωμάτων προκειμένου για τον ορισμό περιοχών

ΔΗΛΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ

Στη συνέχεια του αρχείου εισόδου ακολουθεί η δήλωση των υλικών. Τα υλικά μπορεί να είναι:

23 φυσικά στοιχεία, τα οποία συνολικά μπορούν να βρεθούν στο εγχειρίδιο του FLUKA + δύο ειδικά υλικά: η "μαύρη τρύπα" με το όνομα BLCKHOLE, υλικό που συμβολίζει ύλη με άπειρη απορροφητικότητα όλων των ειδών ακτινοβολίας και το "ιδανικό κενό" με το όνομα VACUUM.

Υπάρχουν επίσης 12 ενώσεις/μίγματα.

Στην περίπτωση που εξετάζεται φανερό είναι ότι υπάρχουν ΤΡΙΑ υλικά, Βηρύλλιο (BERYLLIU), Μαύρη Τρύπα (BLCKHOLE) και Ιδανικό Κενό (VACUUM).

Για το Βηρύλλιο εισάγεται το record MATERIAL με SDUM=BERYLLIU και WHAT(1) = Z του Βηρυλλίου (δηλ. 4), WHAT(2) = Ατομικό Βάρος του βηρυλλίου και WHAT(3) = πυκνότητα του βηρυλλίου.

Το υλικό βηρύλλιο αποδίδεται με προφανή τρόπο (οδηγία ASSIGNMA) στις περιοχές regBE3 και regBE4,

το υλικό VACUUM αποδίδεται με προφανή τρόπο στην περιοχή regVA2

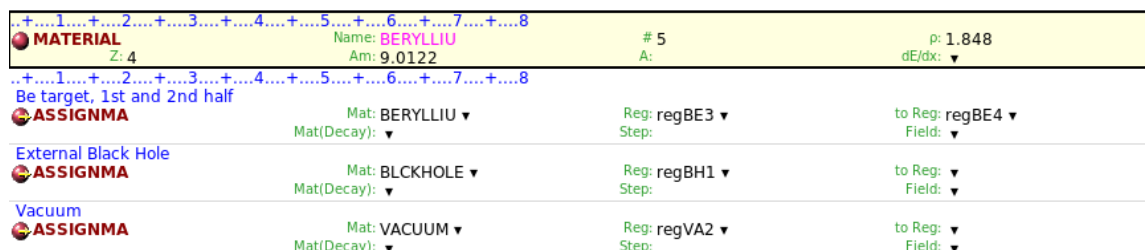
και

το υλικό BLCKHOLE αποδίδεται στην περιοχή regBH1.

Το αντίστοιχο τμήμα του αρχείου εισόδου είναι όπως παρακάτω:

```
MATERIAL          4.0    9.0122    1.848    5.0                BERYLLIU
*...+...1...+...2...+...3...+...4...+...5...+...6...+...7...+...8
* Be target, 1st and 2nd half
ASSIGNMAT  BERYLLIU    regBE3    regBE4
* External Black Hole
ASSIGNMAT  BLCKHOLE    regBH1
* Vacuum
ASSIGNMAT  VACUUM      regVA2
```

Στην Εικόνα 4.7 διακρίνεται η ίδια εισόδος όπως φαίνεται στο γραφικό περιβάλλον FLAIR. Όπου στην Εικόνα 4.7 διακρίνονται τοξάκια, ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τα στοιχεία της εισόδου επιλέγοντας από pull down λίστα επιλογών.



Εικόνα 4.7 Περιγραφή των υλικών στο γραφικό περιβάλλον FLAIR

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για μία πρώτη επεξεργασία σε ό,τι αφορά σε αποτελέσματα πρέπει να δοθούν κατάλληλες οδηγίες στο αρχείο εισόδου. Στο εξεταζόμενο παράδειγμα δίνονται κατ'

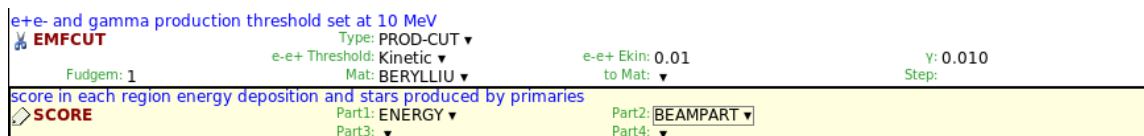
αρχήν δύο τέτοιες οδηγίες, η EMFCUT και η SCORE. Το σχετικό απόσπασμα του αρχείου εισόδου είναι:

```
* e+e- and gamma production threshold set at 10 MeV
EMFCUT      -0.010      0.010      1.0 BERYLLIU      PROD-CUT
* score in each region energy deposition and stars produced by primaries
SCORE       ENERGY    BEAMPART
```

Με την οδηγία EMFCUT ορίζεται η ελάχιστη κινητική ενέργεια (PROD-CUT) των ηλεκτρονίων ή των ποζιτρονίων ή των φωτονίων που προσπίπτουν ή παράγονται στον στόχο βηρυλλίου κάτω από την οποία δεν υπολογίζονται αλληλεπιδράσεις, καθόσον δεν ενδιαφέρουν διότι κάτω από αυτήν την ενέργεια δεν παράγονται πιόνια. Η ενέργεια αυτή ορίζεται σε 10 MeV (ή 0.01 GeV που είναι η μονάδα ενέργειας του κώδικα). Το σύμβολο "-" στο πεδίο WHAT(1) της EMFCUT δηλώνει ότι αυτό το κατώφλι αφορά σε ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια. Το πεδίο WHAT(2) (=0.010) αφορά στο κατώφλι των φωτονίων. Το πεδίο SDUM=PROD-CUT μπορεί να πάρει και άλλες αλφαριθμητικές τιμές, οι οποίες συνδέονται με άλλου είδους κατώφλια που δεν θα εξετασθούν εδώ.

Με την οδηγία SCORE, η οποία είναι από τις παλαιότερες στον FLUKA, ο κώδικας εντέλλεται να παρακολουθεί και να καταγράφει την ενέργεια που αποτίθεται στον στόχο από "άστρα" (stars). Τα "άστρα" είναι μη ελαστικές σκεδάσεις αδρονίων. Η οδηγία SCORE, επειδή είναι πολύ παλαιά, έχει μόνο 4 πεδία WHAT. Το δεύτερο πεδίο έχει τιμή BEAMPART, πράγμα που σημαίνει ότι για τον υπολογισμό των άστρων, λογίζονται μόνο τα σωματίδια (πρωτόνια) της δέσμης. Θα μπορούσε στη θέση του BEAMPART, να είναι ALLPART (για όλα τα αλληλεπιδρώντα σωματίδια) ή άλλη ρύθμιση, η λεπτομέρεια της οποίας δεν ενδιαφέρει σε αυτή τη φάση.

Στην Εικόνα 4.8 διακρίνεται η ίδια είσοδος όπως φαίνεται στο γραφικό περιβάλλον FLAIR. Όπου στην Εικόνα 4.8 διακρίνονται τοξάκια, ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τα στοιχεία της εισόδου επιλέγοντας από pull down λίστα επιλογών.



Εικόνα 4.8 Ενεργειακό κατώφλι και οδηγία SCORE στο FLAIR

ANIXNEYTEΣ

Η οδηγία SCORE είναι πολύ αδύναμη για να αποδώσει τις σημερινές δυνατότητες της σύγχρονης έκδοσης του κώδικα FLUKA. Για αυτό έχουν δημιουργηθεί κατάλληλοι ανιχνευτές μερικοί από τους οποίους χρησιμοποιούνται στο εξεταζόμενο παράδειγμα. Αυτοί είναι οι USRBDX, USRTRACK και USRBIN. Στο εξεταζόμενο παράδειγμα υπάρχουν δύο ανιχνευτές τύπου USRBDX, δύο τύπου USRTRACK και δύο τύπου USRBIN.

Διευκρινίζεται ότι για τον ορισμό των ανιχνευτών χρειάζονται περισσότερα από 8 πεδία ανά record και για αυτό το λόγο το record ενός ανιχνευτή έχει μήκος δύο γραμμών. Προκειμένου ο κώδικας να καταλάβει ότι η δεύτερη γραμμή αποτελεί το δεύτερο τμήμα του ίδιου record, στο τέλος της δεύτερης γραμμής τοποθετείται ένα "&" στις στήλες από 71 έως 78.

Για τον ανιχνευτή USRBDX σημειώνεται ότι πρόκειται για ανιχνευτή ροής ή ρεύματος σωματιδίων.

Το record δύο γραμμών που περιγράφει τον πρώτο ανιχνευτή USRBDX στο αρχείο εισόδου του εξεταζόμενου παραδείγματος είναι:

* Boundary crossing fluence in the middle of the target (log intervals, one-way)						
USRBDX	99.0	PIONS+-	-47.0	regBE3	regBE4	400. piFluenUD
USRBDX	+50.0		+50.0		0.0	10.0 &

Για τον ανιχνευτή αυτόν ισχύει:

πρώτη γραμμή

πεδίο WHAT(1) = 99, σημαίνει ότι ανιχνευτής χρησιμοποιείται για ροή σωματιδίων. Ο διαμερισμός (binning) είναι λογαριθμικός και ο διαμερισμός της γωνίας είναι γραμμικός.

πεδίο WHAT(2) = PIONS+-, σημαίνει ότι ο ανιχνευτής ασχολείται με πιόνια

πεδίο WHAT(3) = -47, σημαίνει ότι ο ανιχνευτής θα γράψει τα αποτελέσματα στο δυαδικό (BIN) αρχείο εξόδου ως μονάδα εξόδου 47, χωρίς διαμόρφωση

πεδίο WHAT(4) = regBE3

και

πεδίο WHAT(5) = regBE4

σημαίνουν ότι ο ανιχνευτής ασχολείται με το χώρο που καταλαμβάνει το εμπρός (το κάτω) μισό του ανιχνευτή.

πεδίο WHAT(6) = 400, σημαίνει τη διατομή του ανιχνευτή σε cm^2

πεδίο SDUM = piFluentUD, σημαίνει το όνομα του ανιχνευτή, οι χαρακτήρες UD υπονοούν τις έννοιες UPSTREAM και DOWNSTREAM

δεύτερη γραμμή

πεδίο WHAT(1) = 50, σημαίνει τη μέγιστη ενέργεια (σε GeV) των σωματιδίων των οποίων ζητούνται οι αλληλεπιδράσεις

πεδίο WHAT(2) = κενό, σημαίνει την ελάχιστη εξορισμού ενέργεια των σωματιδίων των οποίων ζητούνται οι αλληλεπιδράσεις. Αυτή είναι 0.0 GeV.

πεδίο WHAT(3) = 50, σημαίνει ότι για τον λογαριθμικό διαμερισμό της ενέργειας θα χρησιμοποιηθούν 50 διαμερίσεις

πεδίο WHAT(4) = κενό, σημαίνει ότι ο ανιχνευτής είναι εξορισμού 2π

πεδίο WHAT(5) = 0.0, σημαίνει ότι η ελάχιστη στερεά γωνία για τον γραμμικό διαμερισμό γωνίας είναι 0

πεδίο WHAT(6) = 10, σημαίνει ότι για τον λογαριθμικό διαμερισμό της στερεάς γωνίας θα χρησιμοποιηθούν 10 διαμερίσεις

και

πεδίο SDUM = & όπως εξηγήθηκε

Το record δύο γραμμών που περιγράφει τον δεύτερο ανιχνευτή USRBDX στο αρχείο εισόδου του εξεταζόμενου παραδείγματος είναι:

```
* Boundary crossing current in the middle of the target (log intervals, one-way)
USRBDX      -1.0  PIONS+-  -47.0  regBE3  regBE4      400.  piCurrUD
USRBDX      +50.0                +50.0                0.0      10.0 &
```

Για τον ανιχνευτή αυτόν ισχύει:

πρώτη γραμμή

πεδίο WHAT(1) = -1, σημαίνει ότι ανιχνευτής χρησιμοποιείται για ρεύμα σωματιδίων. Ο διαμερισμός (binning) είναι λογαριθμικός και ο διαμερισμός της γωνίας είναι γραμμικός.

πεδίο WHAT(2) = PIONS+-, σημαίνει ότι ο ανιχνευτής ασχολείται με πιόνια

πεδίο WHAT(3) = -47, σημαίνει ότι ο ανιχνευτής θα γράψει τα αποτελέσματα στο δυαδικό (BIN) αρχείο εξόδου ως μονάδα εξόδου 47, χωρίς διαμόρφωση

πεδίο WHAT(4) = regBE3

και

πεδίο WHAT(5) = regBE4

σημαίνουν ότι ο ανιχνευτής ασχολείται με το χώρο που καταλαμβάνει το εμπρός (το κάτω) μισό του ανιχνευτή.

πεδίο WHAT(6) = 400, σημαίνει τη διατομή του ανιχνευτή σε cm^2

πεδίο SDUM = piCurrUD, σημαίνει το όνομα του ανιχνευτή, οι χαρακτήρες UD υπονοούν τις έννοιες UPSTREAM και DOWNSTREAM

δεύτερη γραμμή

πεδίο WHAT(1) = 50, σημαίνει τη μέγιστη ενέργεια (σε GeV) των σωματιδίων των οποίων ζητούνται οι αλληλεπιδράσεις

πεδίο WHAT(2) = κενό, σημαίνει την ελάχιστη εξορισμού ενέργεια των σωματιδίων των οποίων ζητούνται οι αλληλεπιδράσεις. Αυτή είναι 0.0 GeV.

πεδίο WHAT(3) = 50, σημαίνει ότι για τον λογαριθμικό διαμερισμό της ενέργειας θα χρησιμοποιηθούν 50 διαμερίσεις

πεδίο WHAT(4) = κενό, σημαίνει ότι ο ανιχνευτής είναι εξορισμού 2π

πεδίο WHAT(5) = 0.0, σημαίνει ότι η ελάχιστη στερεά γωνία για τον γραμμικό διαμερισμό γωνίας είναι 0

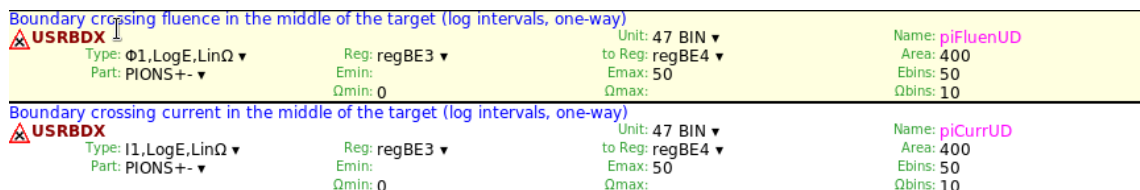
πεδίο WHAT(6) = 10, σημαίνει ότι για τον λογαριθμικό διαμερισμό της στερεάς γωνίας θα χρησιμοποιηθούν 10 διαμερίσεις

και

πεδίο SDUM = & όπως εξηγήθηκε

Στην Εικόνα 4.9 διακρίνεται η είσοδος για τους δύο ανιχνευτές USRBDX, όπως φαίνεται στο γραφικό περιβάλλον FLAIR. Όπου στην Εικόνα 4.9 διακρίνονται τοξάκια,

ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τα στοιχεία της εισόδου επιλέγοντας από pull down λίστα επιλογών.



Εικόνα 4.9 Ανιχνευτές USRBDX στο FLAIR

Για τον ανιχνευτή USRTRACK σημειώνεται ότι πρόκειται για ανιχνευτή ροής, της ροής οριζόμενης ως

$$\Phi = L/V$$

όπου L το μήκος της ευθύγραμμης απόστασης που διανύει ένα σωματίδιο μεταξύ δύο διαδοχικών σκεδάσεων εντός ενός στοιχειώδους όγκου με όγκο V .

Το record δύο γραμμών που περιγράφει τον πρώτο ανιχνευτή USRTRACK στο αρχείο εισόδου του εξεταζόμενου παραδείγματος είναι:

```
* Tracklength fluence inside the target, Upstream part and Downstream part
* Logarithmic energy intervals
USRTRACK      -1.0  PIONS+-  -48.0  regBE3    1000.0    20. piFluenU
USRTRACK      50.0  0.001
```

Για τον ανιχνευτή αυτόν ισχύει:

πρώτη γραμμή

πεδίο WHAT(1) = -1, σημαίνει ότι η ενέργεια θα διαμερισθεί με λογαριθμικό τρόπο.

πεδίο WHAT(2) = PIONS+-, σημαίνει ότι ο ανιχνευτής ασχολείται με πιόνια

πεδίο WHAT(3) = -48, σημαίνει ότι ο ανιχνευτής θα γράψει τα αποτελέσματα στο δυαδικό (BIN) αρχείο εξόδου ως μονάδα εξόδου 48 χωρίς διαμόρφωση

πεδίο WHAT(4) = regBE3, σημαίνει ότι τα αποτελέσματα θα αφορούν την περιοχή regBE3

πεδίο WHAT(5) = 1000, είναι όγκος της εξεταζόμενης περιοχής σε cm^3

πεδίο WHAT(6) = 20, σημαίνει ότι για το λογαριθμικό διαμερισμό της ενέργειας θα χρησιμοποιηθούν 20 διαμερίσεις

πεδίο SDUM = piFluentU, σημαίνει το όνομα του ανιχνευτή, ο χαρακτήρας U υπονοεί την έννοια UPSTREAM

δεύτερη γραμμή

πεδίο WHAT(1) = 50, σημαίνει τη μέγιστη ενέργεια (σε GeV) των σωματιδίων των οποίων ζητούνται οι αλληλεπιδράσεις

πεδίο WHAT(2) = 0.001, σημαίνει την ελάχιστη ενέργεια των σωματιδίων των οποίων ζητούνται οι αλληλεπιδράσεις.

πεδίο WHAT(3) = κενό

πεδίο WHAT(4) = κενό

πεδίο WHAT(5) = κενό

πεδίο WHAT(6) = κενό

και

πεδίο SDUM = & όπως εξηγήθηκε

Το record δύο γραμμών που περιγράφει τον δεύτερο ανιχνευτή USRTRACK στο αρχείο εισόδου του εξεταζόμενου παραδείγματος είναι:

USRTRACK	-1.0	PIONS+-	-49.0	regBE4	1000.0	20. piFluenD
USRTRACK	50.0	0.001				&

Για τον ανιχνευτή αυτόν ισχύει:

πρώτη γραμμή

πεδίο WHAT(1) = -1, σημαίνει ότι η ενέργεια θα διαμερισθεί με λογαριθμικό τρόπο.

πεδίο WHAT(2) = PIONS+-, σημαίνει ότι ο ανιχνευτής ασχολείται με πόνια

πεδίο WHAT(3) = -49, σημαίνει ότι ο ανιχνευτής θα γράψει τα αποτελέσματα στο δυαδικό (BIN) αρχείο εξόδου ως μονάδα εξόδου 49, χωρίς διαμόρφωση

πεδίο WHAT(4) = regBE4, σημαίνει ότι τα αποτελέσματα θα αφορούν την περιοχή regBE3

πεδίο WHAT(5) = 1000, είναι όγκος της εξεταζόμενης περιοχής σε cm³

πεδίο WHAT(6) = 20, σημαίνει ότι για το λογαριθμικό διαμερισμό της ενέργειας θα χρησιμοποιηθούν 20 διαμερίσεις

πεδίο SDUM = piFluentD, σημαίνει το όνομα του ανιχνευτή, ο χαρακτήρας D υπονοεί την έννοια DOWNSTREAM

δεύτερη γραμμή

πεδίο WHAT(1) = 50, σημαίνει τη μέγιστη ενέργεια (σε GeV) των σωματιδίων των οποίων ζητούνται οι αλληλεπιδράσεις

πεδίο WHAT(2) = 0.001, σημαίνει την ελάχιστη ενέργεια των σωματιδίων των οποίων ζητούνται οι αλληλεπιδράσεις.

πεδίο WHAT(3) = κενό

πεδίο WHAT(4) = κενό

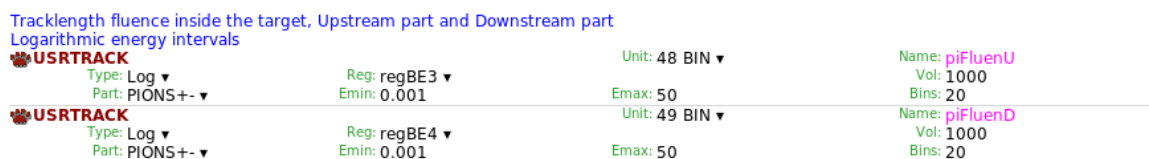
πεδίο WHAT(5) = κενό

πεδίο WHAT(6) = κενό

και

πεδίο SDUM = & όπως εξηγήθηκε

Στην Εικόνα 4.10 διακρίνεται η είσοδος για τους δύο ανιχνευτές USRTRACK, όπως φαίνεται στο γραφικό περιβάλλον FLAIR. Όπου στην Εικόνα 4.10 διακρίνονται τοξάκια, ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τα στοιχεία της εισόδου επιλέγοντας από pull down λίστα επιλογών.



Εικόνα 4.10 Ανιχνευτές USRTRACK στο FLAIR

Για τον ανιχνευτή USRBIN σημειώνεται ότι πρόκειται για ανιχνευτή ροής σε σημεία ή αποτιθέμενης ενέργειας σε σημεία.

Το record δύο γραμμών που περιγράφει τον πρώτο ανιχνευτή USRBIN στο αρχείο εισόδου του εξεταζόμενου παραδείγματος είναι:

```
* Cartesian binning of the pion fluence inside and around the target
USRBIN      10.0  PIONS+-  -50.0   50.0   50.0   50.0  piFluBin
USRBIN     -50.0  -50.0  -10.0  100.0  100.0  60.0  &
```

Για τον ανιχνευτή αυτόν ισχύει:

πρώτη γραμμή

πεδίο WHAT(1) = 10, σημαίνει ότι τα σημεία καταγραφής ορίζονται ως καρτεσιανό πλέγμα

πεδίο WHAT(2) = PIONS+-, σημαίνει ότι ο ανιχνευτής ασχολείται με ροή πιονίων

πεδίο WHAT(3) = -50, σημαίνει ότι ο ανιχνευτής θα γράψει τα αποτελέσματα στο δυαδικό (BIN) αρχείο εξόδου ως μονάδα εξόδου 50, χωρίς διαμόρφωση

πεδίο WHAT(4) = 50, είναι το x_{max} του εξεταζόμενου χώρου

πεδίο WHAT(5) = 50, είναι το y_{max} του εξεταζόμενου χώρου

πεδίο WHAT(6) = 50, είναι το z_{max} του εξεταζόμενου χώρου

πεδίο SDUM = piFluBin, σημαίνει το όνομα του ανιχνευτή

δεύτερη γραμμή

πεδίο WHAT(1) = -50, είναι το x_{min} του εξεταζόμενου χώρου

πεδίο WHAT(2) = -50, είναι το y_{min} του εξεταζόμενου χώρου

πεδίο WHAT(3) = -10, είναι το z_{min} του εξεταζόμενου χώρου

πεδίο WHAT(4) = 100, είναι τα βήματα πλέγματος κατά x

πεδίο WHAT(5) = 100, είναι τα βήματα πλέγματος κατά y

πεδίο WHAT(6) = 60, είναι τα βήματα πλέγματος κατά z

και

πεδίο SDUM = & όπως εξηγήθηκε

Το record δύο γραμμών που περιγράφει το δεύτερο ανιχνευτή USBIN στο αρχείο εισόδου του εξεταζόμενου παραδείγματος είναι:

* Cartesian binning of the deposited energy inside the target						
USBIN	10.0	ENERGY	-51.0	10.0	10.0	5. Edeposit
USBIN	-10.0	-10.0	0.0	20.0	20.0	5.0 &

Για τον ανιχνευτή αυτόν ισχύει:

πρώτη γραμμή

πεδίο WHAT(1) = 10, σημαίνει ότι τα σημεία καταγραφής ορίζονται ως καρτεσιανό πλέγμα

πεδίο WHAT(2) = ENERGY, σημαίνει ότι ο ανιχνευτής ασχολείται με αποτιθέμενη ενέργεια

πεδίο WHAT(3) = -51, σημαίνει ότι ο ανιχνευτής θα γράψει τα αποτελέσματα στο δυαδικό (BIN) αρχείο εξόδου ως μονάδα εξόδου 51, χωρίς διαμόρφωση

πεδίο WHAT(4) = 10, είναι το x_{max} του εξεταζόμενου χώρου

πεδίο WHAT(5) = 10, είναι το y_{max} του εξεταζόμενου χώρου

πεδίο WHAT(6) = 5, είναι το z_{max} του εξεταζόμενου χώρου

πεδίο SDUM = Edeposit, σημαίνει το όνομα του ανιχνευτή
δεύτερη γραμμή

πεδίο WHAT(1) = -10, είναι το x_{min} του εξεταζόμενου χώρου

πεδίο WHAT(2) = -10, είναι το y_{min} του εξεταζόμενου χώρου

πεδίο WHAT(3) = 0, είναι το z_{min} του εξεταζόμενου χώρου

πεδίο WHAT(4) = 20, είναι τα βήματα πλέγματος κατά x

πεδίο WHAT(5) = 20, είναι τα βήματα πλέγματος κατά y

πεδίο WHAT(6) = 5, είναι τα βήματα πλέγματος κατά z

και

πεδίο SDUM = & όπως εξηγήθηκε

Στην Εικόνα 4.11 διακρίνεται η είσοδος για τους δύο ανιχνευτές USRBIN, όπως φαίνεται στο γραφικό περιβάλλον FLAIR. Όπου στην Εικόνα 4.11 διακρίνονται τοξάκια, ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τα στοιχεία της εισόδου επιλέγοντας από pull down λίστα επιλογών.



Εικόνα 4.11 Ανιχνευτές USRBIN στο FLAIR

ΑΛΛΕΣ ΕΙΣΟΔΟΙ

Με την οδηγία RANDOMIZ η αρχικοποίηση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών.

Με την οδηγία START και αν όλα τα άλλα είναι κατ' αρχάς ορθά ξεκινάει το τρέξιμο του κώδικα. Στο πεδίο WHAT(1) δίνεται ο αριθμός των πρωτονίων για τα οποία θα τρέξει ο κώδικας.

Η οδηγία STOP είναι προφανούς σκοπού.

Τα σχετικά records από το εξεταζόμενο παράδειγμα είναι:

```
RANDOMIZ      1.0
*...+...1...+...2...+...3...+...4...+...5...+...6...+...7...+...8
START         100000.0
STOP
```

Σημειώνεται εδώ ότι αν υπάρχουν λάθη στο αρχείο εισόδου που μπορούν να ανιχνεύονται σε αυτό το στάδιο, τα αντίστοιχα πεδία στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού FLAIR γίνονται "ροζ" και ο χρήστης πρέπει να επέμβει διορθωτικά.

Στην Εικόνα 4.12 διακρίνονται και οι τελευταίες οδηγίες εισόδου του εξεταζόμενου παραδείγματος στο γραφικό περιβάλλον FLAIR. Όπου στην Εικόνα 4.12 διακρίνονται τοξάκια, ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τα στοιχεία της εισόδου επιλέγοντας από pull down λίστα επιλογών.

```
..+...1...+...2...+...3...+...4...+...5...+...6...+...7...+...8
RANDOMIZ      Unit 01 ▼ Seed:
..+...1...+...2...+...3...+...4...+...5...+...6...+...7...+...8
START       No.: 100000 Core: ▼
           Time: Report: default ▼
STOP
```

Εικόνα 4.12 Κλείσιμο του αρχείου εισόδου στο FLAIR

4.3 Εκτέλεση του παραδείγματος και έξοδος αποτελεσμάτων

4.3.1 Εντολές εκτέλεσης

Αρχικά γίνεται η εκκίνηση της μηχανής και μεταφέρεται το αρχείο εισόδου `example.inp` σε φάκελο που βρίσκεται στην επιφάνεια εργασίας, ώστε τυχόν αποτελέσματα συνδεόμενα με αυτό το αρχείο να μην χαθούν όταν η εικονική μηχανή γίνει `shutdown`. Έστω ότι ο κατάλληλος για αυτόν το σκοπό είναι ο φάκελος `Athina`, στον οποίον έγινε αναφορά στο Κεφάλαιο 3. Το παράδειγμα εκτελείται από γραμμή εντολών, αν πρώτα ενεργοποιηθεί "τερματικό". Οι εντολές είναι:

```
$ cd Desktop/Athina
```

```
$ rfluka -N0 -M5 example.inp
```

Όπου ο διακόπτης `N0` σημαίνει ότι οι ιστορίες αλληλεπιδράσεων που θα διερευνηθούν είναι 10000 ενώ ο διακόπτης `-M5` σημαίνει ότι θα επαναληφθούν 5 τέτοιοι ανεξάρτητοι κύκλοι για την επίτευξη καλύτερης στατιστικής. Ισοδύναμα μπορεί να δοθεί:

```
$ rfluka example.inp
```

καθόσον οι τιμές `N0` και `M5` είναι οι αυτόματες εξορισμού τιμές.

Μετά την εκτέλεση της εντολής στην οθόνη εμφανίζονται πληροφορίες για το τρέξιμο πέντε κύκλων.

4.3.2 Αρχεία εξόδου

Αν το αρχείο εισόδου είναι σωστά συντεταγμένο και δεν εμφανιστούν λάθη εκτέλεσης τότε είναι δυνατόν ανάλογα και με τις οδηγίες που δόθηκαν, να παράγονται στον τρέχοντα κατάλογο του χρήστη (εδώ στον `/home/flurix/Desktop/Athina`) τα παρακάτω αρχεία. Για κάθε `n` κύκλο επανάληψης δημιουργούνται τα αρχεία `example_00n.err`, `example_00n.log` και `example_00n.out` (συνολικά 15 τέτοια αρχεία). Στο πρώτο είδος αρχείων με κατάληξη `err` καταγράφονται τυχόν σφάλματα που εμφανίστηκαν κατά την εκτέλεση όπως και ο αριθμός των τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιήθηκαν από τον κώδικα για την προσομοίωση. Στο δεύτερο με κατάληξη `log`, και αν όλα έχουν πάει καλά είναι οι όροι και προϋποθέσεις άδειας χρήσης του κώδικα και στο τρίτο με κατάληξη `out` αναγράφονται μεταξύ άλλων μια σύνοψη των πυρηνικών δεδομένων υπολογισμού που

χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση (πίνακες, βιβλιοθήκες του FLUKA κλπ) και όλες οι βασικές πληροφορίες του αρχείου εισόδου.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών για κάθε ανιχνευτή και κάθε κύκλο είναι οργανωμένα σε αρχεία εξόδου με την ονοματολογία `example_00n fort.mm`, όπου στη θέση του `n` είναι ο αριθμός του κύκλου (1, 2, 3, 4 ή 5) και `mm` ο αριθμός που ορίστηκε από τον χρήστη ως μονάδα εξόδου για έναν ανιχνευτή στο αρχείο εισόδου. Στην εξεταζόμενη περίπτωση οι μονάδες εξόδου των ανιχνευτών είναι πέντε: 47, 48, 49, 50 και 51). Έτσι τα αρχεία αποτελεσμάτων με κατάληξη `fort.47` αφορούν στους δύο ανιχνευτές `USRBDX`, τα αρχεία με κατάληξη `fort.48` και `fort.49` αφορούν στους δύο ανιχνευτές `USRTRACK` και τέλος τα αρχεία με κατάληξη `fort.50` και `fort.51` αφορούν στους δύο ανιχνευτές `USRBIN`. Προφανώς τα αρχεία με τις καταλήξεις `fort.mm` είναι 25. Τέλος, δημιουργούνται και τα αρχεία `ranexample_00n` ($n = 1, 2, 3, 4$ ή 5) τα οποία περιέχουν τους τυχαίους αριθμούς που χρησιμοποιήθηκαν.

4.4 Επεξεργασία αποτελεσμάτων - στάδιο "post"

4.4.1 Συμβατική επεξεργασία

Ενδιαφέρουν κατ' αρχήν τα περιεχόμενα των αρχείων με την κατάληξη `fort.mm`. Δεδομένης της δυαδικής τους μορφής αυτά πρέπει να περάσουν από μετατροπή ώστε να αποδοθούν σε ASCII μορφή. Αυτό θα επιτρέψει την επεξεργασία τους από τον χρήστη είτε σε κειμενογράφους, είτε σε λογιστικά φύλλα, είτε σε πακέτα γραφικών παραστάσεων όπως το `gnuplot` και άλλα, είτε με τη βοήθεια του λογισμικού `FLAIR`. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η εντολή του `FLUKA` `usxsuw` για κάθε ανιχνευτή και για όσους ή όποιους κύκλους είναι επιθυμητό. Το αποτέλεσμα είναι αν εισάγονται περισσότεροι του ενός κύκλοι, να προκύπτουν μέσοι όροι των κύκλων. Γίνεται ως εξής (ΕΔΩ ΘΑ ΕΞΗΓΗΘΕΙ Η ΕΞΟΔΟΣ ΜΟΝΟ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ 47, η έξοδος των άλλων ανιχνευτών εξηγείται αναλόγως):

```
$ usxsuw
```

```
Type the input file: example001_fort.47
```

```
Charged pion fluence inside and around a proton-irradiated Be target
```

```
DATE: 7/15/ 5, TIME: 16:22:11
```

```
100000.
```

```
100000
```

```
Type the input file: example002_fort.47
```

```
Charged pion fluence inside and around a proton-irradiated Be target
```

```
DATE: 7/15/ 5, TIME: 16:23: 3
```

```
100000.
```

```
100000
```

```
Type the input file:
```

```
Type the output file name: pionbdx
```

\$

Όταν δεν υπάρχει ή δεν χρειάζεται η επεξεργασία επόμενου αρχείου fort.47 στο ερώτημα

```
Type the input file:
```

δίνεται ENTER και ο κώδικας ρωτάει σε ποιο αρχείο να γραφθούν τα αποτελέσματα. Για λόγους εύκολης ερμηνείας δόθηκε η απάντηση pionbdx. Το pionbdx προκύπτει ως binary αρχείο, παράλληλα όμως με αυτό δημιουργούνται και τα ASCII αρχεία pionbdx_sum.lis και pionbdx_tab.lis Τα αρχεία αυτά μπορούν να διαβαστούν απευθείας στο τερματικό με την εντολή more, αλλά και με οποιονδήποτε άλλο πρόσφορο τρόπο. Το πλέον ενδιαφέρον από τα δύο αυτά αρχεία είναι το pionbdx_sum.lis. Η τελική απάντηση (Total response) που δίνεται στην αρχή, είναι η μέση τιμή της ροής: σε σωματίδια (πιόνια)/(cm² ιστορία) $8.8513934E-04 \pm 1.264974 \%$, και πολλαπλασιάζοντάς την με 400cm² (επιφάνεια ανιχνευτή) προκύπτει ο αριθμός των διερχόμενων σωματιδίων ανά ιστορία: $0.3540557 \pm 1.264974 \%$. Βλέπε:

```
Tot. resp. (Part/cm2/pr) 8.8513934E-04 +/- 1.264974 %  
( --> (Part/pr) 0.3540557 +/- 1.264974 % )
```

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ενεργειακά όρια του διαμερισμού της ενέργειας σε 50 λογαριθμικές διαμερίσεις. Βλέπε:

```
Energy boundaries (GeV):
```

```
49.99990      40.27075      32.43473      26.12348      21.04028  
16.94620      13.64875      10.99293      8.853889      7.131070  
5.743482      4.625896      3.725774      3.000801      2.416895  
1.946607      1.567830      1.262756      1.017045      0.8191451  
0.6597531     0.5313762     0.4279792     0.3447016     0.2776284  
0.2236066     0.1800965     0.1450527     0.1168279     9.4095103E-02  
7.5785771E-02 6.1039120E-02 4.9161926E-02 3.9595835E-02 3.1891145E-02  
2.5685661E-02 2.0687660E-02 1.6662186E-02 1.3420003E-02 1.0808694E-02
```

8.7055024E-03 7.0115570E-03 5.6472248E-03 4.5483690E-03 3.6633322E-03
2.9505088E-03 2.3763890E-03 1.9139834E-03 1.5415541E-03 1.2415934E-03
Lowest boundary (GeV): 1.0000000E-03

Έπειτα για κάθε ένα από αυτά τα διαστήματα διαμέρισης δίνονται οι ροές σε πόνια/(GeV cm² ιστορία) και η αντίστοιχη αβεβαιότητα %. Για παράδειγμα, στο ενεργειακό κανάλι εύρους από 40.27075 - 49.99990 GeV αντιστοιχεί ροή 3.0839589E-09 ± 31.18223 %. Βλέπε:

Flux (Part/GeV/cm²/pr):

3.0839589E-09 +/-	31.18223	%	4.7225036E-08 +/-	8.384002	%
2.3059116E-07 +/-	5.166484	%	6.0413720E-07 +/-	2.448102	%
1.3855955E-06 +/-	2.555879	%	2.5929619E-06 +/-	2.209707	%
4.9124951E-06 +/-	2.107503	%	8.0259897E-06 +/-	2.276928	%
1.2721162E-05 +/-	0.8607837	%	1.9049659E-05 +/-	1.201858	%
2.7019571E-05 +/-	1.253590	%	3.6782210E-05 +/-	1.178073	%
5.0388837E-05 +/-	0.8762500	%	6.8228263E-05 +/-	1.743432	%
8.8792534E-05 +/-	0.9011276	%	1.1286687E-04 +/-	1.601081	%
1.4309553E-04 +/-	0.8837711	%	1.8797483E-04 +/-	1.514151	%
2.3039077E-04 +/-	0.8293962	%	2.8751741E-04 +/-	0.5936901	%
3.5400380E-04 +/-	2.165320	%	4.5544154E-04 +/-	2.055502	%
5.4490939E-04 +/-	2.164438	%	6.3240976E-04 +/-	1.533790	%
6.9940503E-04 +/-	1.276957	%	7.1251002E-04 +/-	3.556689	%
7.7267113E-04 +/-	0.9588154	%	1.1279281E-03 +/-	30.41184	%
7.8780774E-04 +/-	3.954076	%	8.1521826E-04 +/-	3.686234	%
7.3875888E-04 +/-	9.079244	%	7.3419313E-04 +/-	6.524555	%
6.5677299E-04 +/-	4.593053	%	6.3076662E-04 +/-	11.71816	%
5.0607417E-04 +/-	5.894004	%	4.2810358E-04 +/-	11.19539	%
4.0554485E-04 +/-	7.094213	%	4.4359817E-04 +/-	16.16496	%
2.6756315E-04 +/-	10.58274	%	1.9619867E-04 +/-	19.69175	%
1.1716569E-04 +/-	19.70325	%	7.4469586E-05 +/-	28.73936	%
1.7739680E-04 +/-	36.85508	%	1.3050654E-04 +/-	22.44189	%
9.1881135E-05 +/-	32.57293	%	5.3233856E-05 +/-	79.38391	%
7.2484523E-05 +/-	51.12383	%	1.4824944E-04 +/-	36.04924	%
1.6653600E-04 +/-	42.54820	%	1.9413754E-04 +/-	45.12822	%

Έπειτα, παρουσιάζονται τα ίδια αποτελέσματα πολλαπλασιασμένα όμως με το ενεργειακό εύρος ΔΕ του κάθε καναλιού δηλαδή σε μονάδες μέτρησης πόνια/(cm² ιστορία). Σημείωση: εφόσον ο διαμερισμός της ενέργειας έχει γίνει με λογαριθμικό τρόπο, τα ενεργειακά εύρη ΔΕ διαφέρουν μεταξύ τους. Βλέπε:

Cumul. Flux (Part/cm ² /pr):					
3.0004280E-08 +/-	31.18223	%	4.0006043E-07 +/-	7.904940	%
1.8553807E-06 +/-	4.791718	%	4.9263263E-06 +/-	2.444885	%
1.0599076E-05 +/-	1.671772	%	1.9149229E-05 +/-	1.601683	%
3.2195923E-05 +/-	1.239148	%	4.9363844E-05 +/-	0.5019842	%
7.1280097E-05 +/-	0.5403051	%	9.7713164E-05 +/-	0.6488156	%
1.2790985E-04 +/-	0.5827850	%	1.6101834E-04 +/-	0.6420135	%
1.9754891E-04 +/-	0.6039996	%	2.3738779E-04 +/-	0.7004924	%
2.7914581E-04 +/-	0.4999818	%	3.2189721E-04 +/-	0.3271600	%
3.6555188E-04 +/-	0.3623147	%	4.1173943E-04 +/-	0.4106555	%
4.5733378E-04 +/-	0.4414825	%	5.0316175E-04 +/-	0.3722182	%
5.4860767E-04 +/-	0.4229643	%	5.9569895E-04 +/-	0.3976365	%
6.4107770E-04 +/-	0.4592223	%	6.8349543E-04 +/-	0.4760551	%
7.2127860E-04 +/-	0.5070726	%	7.5228000E-04 +/-	0.5053701	%
7.7935733E-04 +/-	0.5076813	%	8.1119291E-04 +/-	1.416287	%
8.2910195E-04 +/-	1.364558	%	8.4402802E-04 +/-	1.336680	%
8.5492228E-04 +/-	1.318535	%	8.6364243E-04 +/-	1.267816	%
8.6992513E-04 +/-	1.282303	%	8.7478501E-04 +/-	1.291585	%
8.7792549E-04 +/-	1.292574	%	8.8006514E-04 +/-	1.291828	%
8.8169763E-04 +/-	1.292172	%	8.8313589E-04 +/-	1.277454	%
8.8383455E-04 +/-	1.277097	%	8.8424719E-04 +/-	1.271845	%
8.8444568E-04 +/-	1.268687	%	8.8454725E-04 +/-	1.266509	%
8.8474219E-04 +/-	1.266209	%	8.8485773E-04 +/-	1.264938	%
8.8492321E-04 +/-	1.263570	%	8.8495377E-04 +/-	1.265921	%
8.8498730E-04 +/-	1.265641	%	8.8504248E-04 +/-	1.264141	%
8.8509242E-04 +/-	1.265266	%	8.8513934E-04 +/-	1.264974	%

Έπειτα, δίνονται τα άνω όρια των 10 διαστημάτων στερεάς γωνίας στα οποία έχει γίνει ο γραμμικός χωρικός διαμερισμός, σύμφωνα με το αρχείο εισόδου, σε στερεοακτίνια και μοίρες. Βλέπε:

```

Solid angle minimum value (sr): 0.000000

Solid angle upper boundaries (sr):

0.6283185      1.256637      1.884956      2.513274      3.141593
3.769911      4.398230      5.026548      5.654867      6.283185

Angular minimum value (deg.): 0.000000

Angular upper boundaries (deg.):

25.84193      36.86990      45.57299      53.13010      60.00000
66.42182      72.54239      78.46304      84.26083      90.00000

```

Στη συνέχεια αναλύεται η ροή σε κάθε ενεργειακό διάστημα κατά 10 στερεές γωνίες σε στερεοακτίνια και μοίρες. Βλέπε:

```

Energy interval (GeV): 49.99990      40.27075

Flux (Part/sr/GeV/cmq/pr):

4.9082729E-09 +/- 31.18223 % 0.000000 +/- 0.000000 %
0.000000 +/- 0.000000 % 0.000000 +/- 0.000000 %
0.000000 +/- 0.000000 % 0.000000 +/- 0.000000 %
0.000000 +/- 0.000000 % 0.000000 +/- 0.000000 %
0.000000 +/- 0.000000 % 0.000000 +/- 0.000000 %

Flux (Part/deg/GeV/cmq/pr):

1.1933933E-10 +/- 31.18223 % 0.000000 +/- 0.000000 %
0.000000 +/- 0.000000 % 0.000000 +/- 0.000000 %
0.000000 +/- 0.000000 % 0.000000 +/- 0.000000 %
0.000000 +/- 0.000000 % 0.000000 +/- 0.000000 %
0.000000 +/- 0.000000 % 0.000000 +/- 0.000000 %

```

Αφού εξαντληθεί και αυτό ακολουθούν στο ίδιο αρχείο τα αποτελέσματα για τον δεύτερο ανιχνευτή USRBDX που είναι ανιχνευτής ρεύματος πιονίων. Φυσικά ο τρόπος παρουσίασής τους είναι εντελώς ανάλογος για αυτό και δεν επαναλαμβάνεται εδώ.

Στο αρχείο rionbdx_tab.lis περιέχονται ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα απλά αλλιώς παρουσιασμένα. Δηλαδή για κάθε ανιχνευτή υπάρχει η ίδια δομή πίνακα 4 στηλών με τα μεγέθη E_{min} , E_{max} , ροή και σφάλμα %, όπου τα κανάλια ακολουθούν αύξουσα σειρά. Ο πρώτος πίνακας δείχνει τη ροή των σωματιδίων σε κάθε ενεργειακό κανάλι με το σφάλμα της και στη συνέχεια ακολουθούν 10 πίνακες ίδιας δομής όπου ο κάθε ένας όμως αντιστοιχεί σε κάθε ένα διάστημα γωνίας.

4.4.2 Γραφική επεξεργασία

Ο κώδικας FLAIR είναι κατ' αρχήν το προτεινόμενο εργαλείο επεξεργασίας και παρουσίασης των αποτελεσμάτων. Το αρχείο εισόδου στην περίπτωση αυτή είναι το: rionbdx_tab.lis. Η διαδικασία έχει ως εξής:

```
$ flair
```

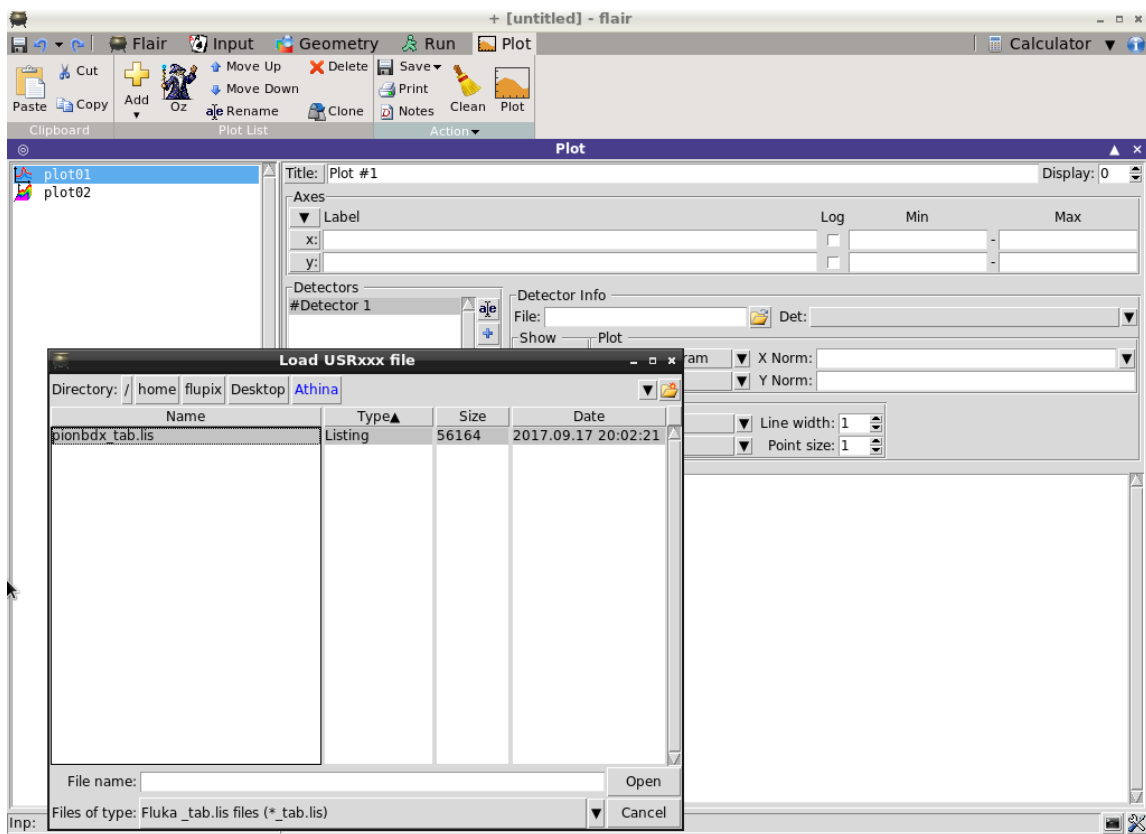
```
Plot > Add > USR-1D (για ανιχνευτές USR και διδιάστατη παράσταση)
```

```
ή
```

```
Plot > Add > USR-2D (για ανιχνευτές USR και τρισδιάστατη παράσταση)
```

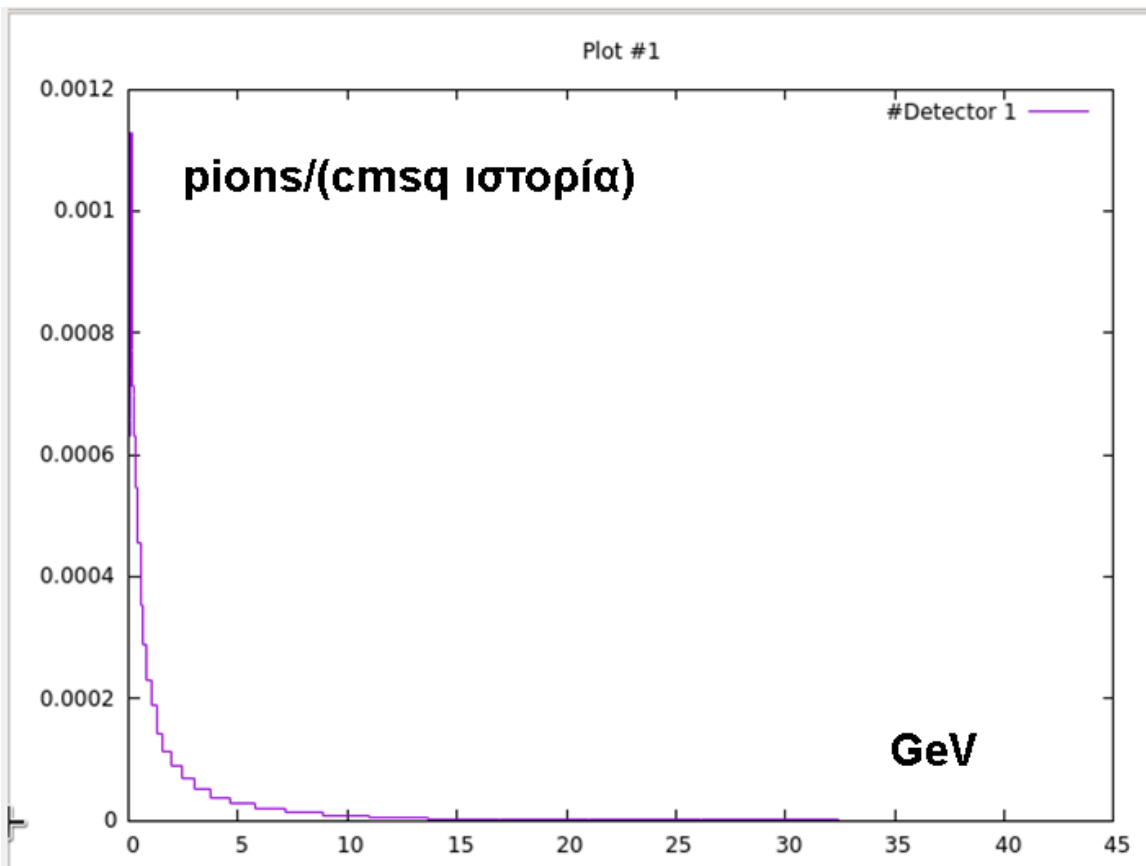
Στη συνέχεια στο δεξί παράθυρο:

```
File > rionbdx_tab.lis (όπως στην ακόλουθη Εικόνα 4.13)
```



Εικόνα 4.13 Εισαγωγή αρχείου αποτελεσμάτων για επεξεργασία στο FLAIR

Τέλος επιλέγοντας Plot, λαμβάνεται ένα από τα δυνατά αποτελέσματα, όπως στην Εικόνα 4.14



Εικόνα 4.14 Γραφική παράσταση αποτελεσμάτων με το FLAIR

4.5 Σχόλια και συμπεράσματα

Είναι όπως φαίνεται πολύ σημαντικό, ο χρήστης του FLUKA, πέρα από την ευχέρεια που πρέπει να αποκτήσει σε σχέση με την προετοιμασία της εισόδου, να αποκτήσει ευχέρεια και με το λογισμικό FLAIR. Για παράδειγμα κατά το στάδιο "pre" ο χρήστης θα πρέπει να εξοικειωθεί με όλες τις δυνατές μεθόδους με τους οποίους το FLAIR μπορεί να του αποδώσει γραφικά και με κατανοητό τρόπο τη γεωμετρία του προβλήματος που διαπραγματεύεται. Επιπλέον, κατά το στάδιο "post", θα πρέπει επίσης ο χρήστης να εξοικειωθεί με όλες τις δυνατές μεθόδους με τους οποίους το FLAIR μπορεί να του αποδώσει γραφικά και με κατανοητό τρόπο τα αποτελέσματα του κώδικα FLUKA. Δυστυχώς, σε αυτή τη Διπλωματική δεν έγινε κατορθωτό να γίνει ανάλυση των δυνατοτήτων του FLAIR σε τέτοιο βάθος. Οποσδήποτε πάντως μπορεί κανείς να πει ότι η σημερινή σύγχρονη μορφή του FLUKA, είναι μάλλον δύσκολο, λόγω πολλών δυνατοτήτων, να χρησιμοποιηθεί χωρίς τα γραφικά εργαλεία του FLAIR.

Ένα άλλο σημείο στο οποίο οφείλεται προσοχή είναι οι Boolean πράξεις μεταξύ σωμάτων, ιδιαίτερα οι πράξεις MEION και OR, δια των οποίων ορίζονται περιοχές που προκύπτουν είτε ως όγκοι είτε ως επιφάνειες.

Τέλος, σημαντικό θέμα είναι η κατανόηση της γεωμετρίας των ανιχνευτών, η οποία μπορεί να είναι 2π , ή 4π , να είναι γεωμετρία όγκου, ή επιφάνειας ή και σημείου. Επιπλέον σε συνάφεια με τη γεωμετρία ενός ανιχνευτή πρέπει ο χρήστης να κατανοεί σε ποιον χώρο, ημιχώρο ή επιφάνεια υπολογίζονται τα προς ανίχνευση μεγέθη.

Για την κατανόηση των παραπάνω απαιτείται τριβή των χρηστών και αυτή μπορεί να επιτευχθεί με την εξάντληση της περιγραφής των διαθέσιμων παραδειγμάτων που δίνονται τόσο με τον κώδικα FLUKA, όσο και με τον κώδικα FLAIR.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4

Αρχείο Εισόδου Παραδείγματος

```
*...+....1....+....2....+....3....+....4....+....5....+....6....+....7....+....8
TITLE
Charged pion fluence inside and around a proton-irradiated Be target
*...+....1....+....2....+....3....+....4....+....5....+....6....+....7....+....8
BEAM          50.E+00                                PROTON
BEAMPOS        0.0          0.0          -50.0
*
GEOBEGIN                                             COMBNAME
  0 0                      A simple Be target inside vacuum
RPP body1 -5000000.0 +5000000.0 -5000000.0 +5000000.0 -5000000.0 +5000000.0
RPP body2 -1000000.0 +1000000.0 -1000000.0 +1000000.0   -100.0 +1000000.0
RPP body3   -10.0       +10.0       -10.0       +10.0       0.0       +5.0
* plane to separate the upstream and downstream part of the target
XYP body4      2.5
END
* black hole
regBH1   5   +body1 -body2
* vacuum around
regVA2   5   +body2 -body3
* Be target 1st half
regBE3   5   +body3 +body4
* Be target 2nd half
regBE4   5   +body3 -body4
END
GEOEND
*...+....1....+....2....+....3....+....4....+....5....+....6....+....7....+....8
MATERIAL      4.0      9.0122      1.848      5.0                                BERYLLIU
*...+....1....+....2....+....3....+....4....+....5....+....6....+....7....+....8
* Be target, 1st and 2nd half
ASSIGNMAT BERYLLIU  regBE3  regBE4
* External Black Hole
```

```

ASSIGNMAT  BLCKHOLE  regBH1

* Vacuum

ASSIGNMAT  VACUUM  regVA2

*...+...1...+...2...+...3...+...4...+...5...+...6...+...7...+...8

* e+e- and gamma production threshold set at 10 MeV

EMFCUT      -0.010    0.010    1.0  BERYLLIU          PROD-CUT

* score in each region energy deposition and stars produced by primaries

SCORE      ENERGY  BEAMPART

* Boundary crossing fluence in the middle of the target (log intervals, one-way)

USRBDX      99.0  PIONS+-  -47.0  regBE3  regBE4    400. piFluenUD

USRBDX      +50.0          +50.0          0.0    10.0  &

* Boundary crossing current in the middle of the target (log intervals, one-way)

USRBDX      -1.0  PIONS+-  -47.0  regBE3  regBE4    400. piCurrUD

USRBDX      +50.0          +50.0          0.0    10.0  &

* Tracklength fluence inside the target, Upstream part and Downstream part

* Logarithmic energy intervals

USRTRACK    -1.0  PIONS+-  -48.0  regBE3    1000.0    20. piFluenU

USRTRACK    50.0    0.001          &

USRTRACK    -1.0  PIONS+-  -49.0  regBE4    1000.0    20. piFluenD

USRTRACK    50.0    0.001          &

* Cartesian binning of the pion fluence inside and around the target

USRBIN      10.0  PIONS+-  -50.0    50.0    50.0    50. piFluBin

USRBIN      -50.0  -50.0  -10.0    100.0    100.0    60.0  &

* Cartesian binning of the deposited energy inside the target

USRBIN      10.0  ENERGY  -51.0    10.0    10.0    5. Edeposit

USRBIN      -10.0  -10.0    0.0    20.0    20.0    5.0  &

*...+...1...+...2...+...3...+...4...+...5...+...6...+...7...+...8

RANDOMIZ      1.0

*...+...1...+...2...+...3...+...4...+...5...+...6...+...7...+...8

START      100000.0

STOP

```

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία έγινε μια πρώτη γνωριμία με τον κώδικα FLUKA, ο οποίος είναι ένα από τα δημοφιλή υπολογιστικά εργαλεία για την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων αλληλεπιδράσεων ακτινοβολιών με την ύλη με βάση τη μέθοδο Monte Carlo. Για το σκοπό αυτό και μετά από μία μικρή εισαγωγή στις αρχές της μεθόδου Monte Carlo (βλ. Κεφάλαιο 1), παρουσιάστηκαν περιληπτικά, η ιστορία του κώδικα FLUKA από την πρώτη γενιά του (1962) και οι βασικές δυνατότητές του σύγχρονου FLUKA σε συνάρτηση με τα πραγματικά πολυάριθμα είδη αλληλεπιδράσεων που μπορεί να προσομοιώσει (βλ. Κεφάλαιο 2). Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο ο κώδικας αυτός μπορεί κατ' αρχήν να λειτουργήσει σε περιβάλλον Λειτουργικού Συστήματος WINDOWS, παρόλο που εκ κατασκευής πρέπει να λειτουργεί σε περιβάλλον Λειτουργικού Συστήματος LINUX. Αυτό μπορεί να γίνεται με τη βοήθεια εργαλείων που παρέχουν οι κατασκευαστές του κώδικα και συγκεκριμένα του λεγόμενου *Flurix* Live CD καθώς και λογισμικού υποδοχής εικονικής μηχανής LINUX. Ως τέτοιο επιλέχθηκε το λογισμικό Oracle VirtualBox. Η σχετική διαδικασία παρουσιάζει αρκετά προβλήματα και περιορισμούς που οδηγούν ασφαλώς στο συμπέρασμα ότι καλό θα ήταν ο κώδικας FLUKA καθώς και το σχετικό βοηθητικό λογισμικό FLAIR να χρησιμοποιούνται μόνο σε περιβάλλον Λειτουργικού Συστήματος LINUX (βλ. Κεφάλαιο 3).

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια ενός απλού παραδείγματος παρουσιάστηκε κατ' αρχήν ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο κώδικας FLUKA και το βοηθητικό λογισμικό FLAIR (βλ. Κεφάλαιο 4). Τα βασικά σημεία που αναπτύχθηκαν σε αδρές γραμμές ήταν, (α) η προετοιμασία και η κατανόηση του αρχείου εισόδου είτε με έναν απλό κειμενογράφο είτε με τη βοήθεια του FLAIR, (β) το τρέξιμο του παραδείγματος με χρήση γραμμής εντολών, (γ) η παραγωγή ASCII αρχείων αποτελεσμάτων μετά από επεξεργασία αρχείων binary αποτελεσμάτων και (δ) η εκμετάλλευση των ASCII αρχείων αποτελεσμάτων για την παραγωγή γραφικών παραστάσεων για την ερμηνεία τους. Το συμπέρασμα από την απλή γενικά αυτή διαδικασία είναι ότι ο χρήστης που φιλοδοξεί να χρησιμοποιήσει αποδοτικά τον κώδικα FLUKA, πρέπει να μάθει όσο το δυνατόν καλύτερα το βοηθητικό λογισμικό FLAIR και να κατανοήσει (i) τις Boolean πράξεις μεταξύ σωμάτων για τη δημιουργία περιοχών-όγκου, περιοχών - επιφανειών

ή ακόμα και σημείων και (ii) την εισαγωγή και τη χρήση ανιχνευτών κατάλληλα ρυθμισμένων ιδιοτήτων.

Σε επόμενες Διπλωματικές Εργασίες προτείνεται να γίνουν τα εξής με βάση τα παραπάνω αναφερόμενα:

(Α) Εγκατάσταση του κώδικα FLUKA και του βοηθητικού FLAIR σε περιβάλλον Λειτουργικού Συστήματος LINUX, έτσι ώστε να αποφευχθούν τα θέματα που αντιμετωπίστηκαν με το Λειτουργικό Σύστημα WINDOWS.

(Β) Σταδιακή ανάπτυξη και παρουσίαση των άλλων διαθέσιμων παραδειγμάτων του κώδικα FLUKA, και του FLAIR ώστε να αναπτυχθεί καλή εμπειρία με τα λογισμικά αυτά, τόσο από τους φοιτητές όσο και από το προσωπικό του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας που ενδιαφέρεται. Ειδικότερα θα πρέπει να δοθεί βάρος σε πολυπλοκότερες γεωμετρίες και στην εισαγωγή και άλλου είδους ανιχνευτών.

(Γ) Επίλυση προβλημάτων που ενδιαφέρουν και σχετίζονται με τον κώδικα. Ένα πολύ απλό και μάλιστα αρκετά κοντινό στο απλό παράδειγμα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 είναι το εξής:

Μονοενεργειακή δέσμη α σωματιδίων τυπικής ενέργειας 5 MeV προσπίπτει σε λεπτό στόχο βηρυλλίου σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου με διαστάσεις $20 \times 20 \times 0.1$ cm. Σκοπός είναι ο υπολογισμός της ροής νετρονίων που παράγονται από την αλληλεπίδραση αυτής της δέσμης με τον στόχο πίσω από το τοίχωμά του.

Το πρόβλημα αυτό ενδιαφέρει διότι πιστεύεται ότι μπορεί να δημιουργηθεί μια απλή πηγή νετρονίων αν πίσω από μία οθόνη βηρυλλίου τοποθετηθεί μια πηγή σωματιδίων α χαμηλής ραδιενέργειας. Η σχετική μικροσκοπική διατομή εκτιμάται από τη βιβλιογραφία ότι είναι περίπου στο 1 barn.

Σημειώνεται, ότι πραγματοποιήθηκε απόπειρα υλοποίησης του παραπάνω προβλήματος, αλλά φαίνεται ότι αυτό ίσως δεν μπορεί να τρέξει σε περιβάλλον εικονικής μηχανής. Όπως και να έχει το θέμα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω.

(Δ) Στο απώτερο μέλλον επίλυση προβλημάτων νετρονικών ροών.

Παράλληλα αξίζουν να διερευνηθούν τρόποι παραλληλοποίησης του FLUKA, στην περίπτωση που τα εξεταζόμενα προβλήματα γίνουν χρονοβόρα, πράγμα που είναι σύνηθες στους κώδικες Monte Carlo με πολλές ιστορίες, μεγάλη πυκνότητα ύλης αλληλεπίδρασης και πολλούς ανιχνευτές στο χώρο.

Κλείνοντας μπορεί να σημειωθεί συμπερασματικά ότι:

Ο κώδικας FLUKA είναι σύγχρονος, μεγάλων δυνατοτήτων αλλά πολυπλοκότερος από άλλους κώδικες Monte Carlo. Για τη σωστή χρήση του κώδικα, δεν προτείνεται το Λειτουργικό Σύστημα WINDOWS. Η είσοδος στον κώδικα μπορεί να προετοιμάζεται τόσο με κειμενογράφο όσο και με γραφικό περιβάλλον (FLAIR). Οι πηγές ακτινοβολίας που διαθέτει ο κώδικας είναι περισσότερες από άλλους κώδικες, αλλά δίνεται έμφαση στις σωματιδιακές ακτινοβολίες μεγάλης ενέργειας. Τα υλικά αλληλεπίδρασης στις βιβλιοθήκες του κώδικα είναι πολλά και υπάρχει η δυνατότητα συγκρότησης μιγμάτων. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει και δικά του υλικά, αρκεί να γνωρίζει τις ιδιότητές τους (Z , A , AB , ρ).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Η Διπλωματική Εργασία βασίσθηκε κυρίως στο εγχειρίδιο χρήσης του FLUKA, το οποίο είναι διαθέσιμο στο διαδίκτυο:

A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fassò, J. Ranft, "*Fluka: a multi-particle transport code*" (Program version 2011) CERN EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH CERN-2005-010, INFN TC_05/11, SLAC-R-773,12 October 2005, Geneva 2011 (<http://www.fluka.org/content/manuals/FM.pdf>)