



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Εξομοίωση του Μικρού Ανιχνευτή Ιοντισμού  
του CERN για πιθανή χρήση του ως ανιχνευτή  
πρωτονίων σε Νοσοκομειακούς Επιταχυντές για την Αδρονιακή  
Θεραπεία του καρκίνου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Άρης Ι. Χατζηχρήστος  
Christos Aris I. Chatzichristos

Επιβλέπων : Δημήτριος Δ. Κουτσούρης

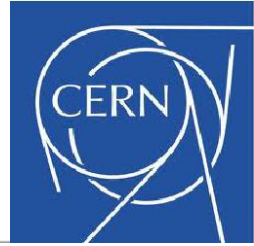
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Εξομοίωση του Μικρού Ανιχνευτή Ιοντισμού  
του CERN για πιθανή χρήση του ως ανιχνευτή  
πρωτονίων σε Νοσοκομειακούς Επιταχυντές για την Αδρονιακή  
Θεραπεία του καρκίνου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Άρης Ι. Χατζηχρήστος  
Christos Aris I. Chatzichristos

Επιβλέπων : Δημήτριος Δ. Κουτσούρης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2<sup>η</sup> Ιουλίου 2013.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

.....  
Δημήτριος Κουτσούρης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ευάγγελος Γαζής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Ματσόπουλος  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Χρήστος Άρης Ι. Χατζηχρήστος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Χρήστος Άρης Ι. Χατζηχρήστος, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

# **Simulation of the characteristics of Little Ionization Chamber of CERN, for a possible use as a proton detector in Medical Accelerators for the Hadronic Therapy of cancer.**

---

---

## **Abstract**

This study aims to propose a type of ionization chamber as a possible candidate-detector that is well suited for the needs of the Beam Loss Monitoring (BLM) system of a typical Medical Accelerator for the Hadronic Therapy of Cancer.

This detector, called the Little Ionization Chamber (LIC), is used as a secondary detector around the Large Hadron Collider (LHC) at CERN. The characteristics and the response of LIC to incoming protons are simulated with two different simulation toolkits, namely Geant4 and CST Particle Studio.

Geant4 is used for the study of the energy deposition of protons inside the gas-filled volume of LIC, as well as for the study of the profile of the secondary particles created in the same area. The (simulated) performance of LIC is then compared to the respected performance of CERN's standard Ionization Chamber (IC).

CST Particle Studio is used for the simulation of the Electric Field inside LIC, for the study of the propagation of electrons and ions in the aforementioned field and in order to probe the extent in which the response of LIC changes, when the detector is put into an external Magnetic field.

The simulated results acquired by the two simulation studies are compared to the experimental data of a calibration experiment that has been conducted by the BLM team of CERN at the dump line of the Proton Synchrotron Booster (PSB).

---

---

**Keywords: Hadronic therapy of Cancer, CERN, Beam Loss Monitoring, Little Ionization Chamber, Geant4, CST Particle Studio**



---

---

## Περίληψη

Η παρούσα μελέτη στοχεύει στο να προτείνει ένα συγκεκριμένο είδος ανιχνευτή Ιονισμού για χρήση στο Σύστημα Ανίχνευσης Απωλειών Δέσμης - Beam Loss Monitoring System (BLM) - ενός τυπικού Νοσοκομειακού Επιταχυντή για την Αδρονιακή Θεραπεία του καρκίνου.

Αυτός ο ανιχνευτής, ο Μικρός Ανιχνευτής Ιονισμού - Little Ionization Chamber (LIC) - έχει αναπτυχθεί στο CERN και χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής απωλειών γύρω από τους υπεραγωγίσιμους μαγνήτες του Μεγάλου Επιταχυντή Αδρονίων - Large Hadron Collider (LHC) -. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά και το συλλεγόμενο σήμα του LIC όταν αλληλεπιδρά με εισερχόμενα πρωτόνια υψηλής ενέργειας, εξομοιώθηκαν με τη χρήση δύο εξομοιωτικών πακέτων, του Geant4 και του CST Particle Studio.

Το πακέτο Geant4 χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της εναπόθεσης ενέργειας σε κάθε σημείο του αερίου του ανιχνευτή από τα εισερχόμενα πρωτόνια, καθώς και για τη στατιστική ανάλυση της χωρικής κατανομής των παραγόμενων δευτερογενών σωματιδίων στο ίδιο χώρο. Στη συνέχεια, η (εξομοιωμένη) ενεργειακή απόδοση του LIC συγκρίνεται με την αντίστοιχη ενός Τυπικού Ανιχνευτή Ιονισμού - Standard Ionization Chamber (IC) - του CERN.

Ο εξομοιωτής CST Particle Studio χρησιμοποιήθηκε για την εξομοίωση του ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται από τη διαφορά δυναμικού των ηλεκτροδίων του ανιχνευτή LIC, για τη μελέτη της διάδοσης, στο εσωτερικό του αερίου του ανιχνευτή, των ηλεκτρονίων και των ιόντων που παράγονται από τον ιονισμό του αερίου  $N_2$ , καθώς και για να μελετηθεί τυχών μεταβολή του σήματος του ανιχνευτή στη περίπτωση που ο τελευταίος βρίσκεται μέσα σε ένα εγκάρσιο μαγνητικό πεδίο σταθερής έντασης.

Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τις άνωθεν εξομοιωτικές μελέτες συγκρίνεται με τα πειραματικά δεδομένα που λήφθηκαν από την ομάδα BLM του

CERN, κατά τη διάρκεια πειράματος βαθμονόμησης (calibration) του καινούριου ανιχνευτή LIC στο Σύγχροτρον Επιτάχυνσης Πρωτονίων - Proton Synchrotron Booster (PSB) -.

---

---

**Λέξεις Κλειδιά: Αδρονιακή θεραπεία του καρκίνου, CERN, Σύστημα Ανίχνευσης Απωλειών Δέσμης, Μικρός Ανιχνευτής Ιονισμού, Geant4, CST Particle Studio**



# Acknowledgements

With this Diploma Thesis, my studies at the School of Electrical and Computer Engineering of the National Technical University of Athens come to an end. I want to use this chance to thank all my professors for their guidance and their inspiring example that helped me all these years.

More specifically, I have to express my deepest thanks to three of my professors, who were always willing to help or guide me. Without them this Thesis would have been impossible: I thank prof. Dimitrios Koutsouris for his consults all these years, as well as for the acceptance of this Diploma Thesis. Moreover, I want to thank prof. Evangellos Gazis for his great help regarding my two visits at CERN, as a Summer Student and as a Technical Student, as well as this study in particular. Finally, I want to express my deepest gratitude to my professor Nikolas Trakas for his guidance and his undivided help all through my studies.

The backbone of this study is the work that was carried out during my Technical Studentship at CERN. For this reason I would like to express my deepest thanks to dr Bernd Dehring, the section leader of CERN's BLM team, for the great opportunity that he gave me by accepting me as a Technical Student, as well as for his hospitality in his office. Moreover, I want to thank deeply dr Eduardo Nebot Del Busto, my supervisor, for without our excellent cooperation and his constant help and support, this study would have been impossible. Finally, I would like to thank all the members of CERN's BLM team for their valuable consults all through my stay and for their great hospitality.



# Ευχαριστίες

Με την παράδοση αυτής της Διπλωματικής Εργασίας κλείνει ο κύκλος των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την ευκαιρία αυτή, θα ήθελα λοιπόν να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου, που με την καθοδήγηση και το παράδειγμά τους με ενέπνευσαν και με βοήθησαν όλα αυτά τα χρόνια.

Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να ευχαριστήσω βαθιά τρεις απ' τους καθηγητές μου, οι οποίοι ήταν πάντα πρόθυμοι να με βοηθήσουν ή να με συμβουλέψουν και χωρίς τους οποίους αυτή η εργασία θα ήταν παντελώς αδύνατη: Ευχαριστώ λοιπόν τον κ. καθ. Δημήτριο Κουτσούρη για τις συμβουλές του όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και για την ανάληψη της Διπλωματικής μου Εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ πολύ τον κ. καθ. Ευάγγελο Γαζή για τη σημαντικότερη βοήθειά του, τόσο αναφορικά με τις δύο «εξορμήσεις» μου στο CERN, ως Summer Student και ως Technical Student, όσο και με τη παρούσα εργασία συγκεκριμένα. Τέλος, θα είμαι πάντοτε ευγνώμον προς τον κ. καθ. Νικόλαο Τράκα για την καθοδήγησή του και για την αμέριστη βοήθεια που μου πρόσφερε όλα αυτά τα χρόνια.

Τη ραχοκοκαλιά αυτής της μελέτης αποτελεί η δουλειά που έγινε στα πλαίσια της εργασίας μου στο CERN. Για το λόγο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον dr Bernd Dehring, τον αρχηγό της ομάδας BLM του CERN, τόσο για την ευκαιρία που μου έδωσε επιλέγοντάς με ως Technical Student, όσο και για τη φιλοξενία στο γραφείο του, καθώς και προς τον dr Eduardo Nebot Del Busto, τον υπεύθύνό μου, που χωρίς την άριστη συνεργασία του και την αμέριστη βοήθειά του αυτή η μελέτη θα ήταν αδύνατη. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ομάδας BLM του CERN, τόσο για τις πολύτιμες συμβουλές τους καθ' όλη τη διάρκεια της παραμονής μου, όσο και για τη σπουδαία φιλοξενία τους.



# Περιεχόμενα

<b>Abstract</b>	<b>5</b>
<b>Περίληψη</b>	<b>7</b>
<b>Acknowledgements</b>	<b>9</b>
<b>Ευχαριστίες</b>	<b>11</b>
<b>Κατάλογος Σχημάτων</b>	<b>15</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων</b>	<b>17</b>
<b>Συνομογραφίες</b>	<b>19</b>
<b>1. Εισαγωγή</b>	<b>21</b>
<b>2. Αδρνιακή Θεραπεία του Καρκίνου</b>	<b>23</b>
2.1. Γενικά περί της Θεραπείας του Καρκίνου.....	23
2.2. Αλληλεπίδραση των σωματιδίων δέσμης με ανθρώπιν κύτταρα.....	24
2.3. Σωματιδιακοί Επιταχυντές για θεραπεία με πρωτόνια και βαρέα ιόντα.....	26
2.4. Στατιστικά δεδομένα της Αδρνιακής Θεραπείας του Καρκίνου.....	28
<b>3. Σύστημα Ανίχνευσης Απωλειών Δέσμης</b>	<b>32</b>
<b>4. Εξομοίωση του Μικρού Ανιχνευτή Ιονισμού με Geant4</b>	<b>35</b>
4.1. Γενικά περί Geant4.....	35
4.2. Γεωμετρία της Εξομοίωσης.....	36
4.3. Γενικά Χαρακτηριστικά της Εξομοίωσης.....	40
4.4. Αποτελέσματα των Εξομοιώσεων με Geant4.....	41
4.4.1. Ενεργειακή Απόθεση.....	41
4.4.2. Ενεργειακή Απόθεση για διάφορα εύρη δέσμης.....	46
4.4.3. Προφίλ Δευτερογενών Σωματιδίων.....	49
<b>5. Εξομοίωση του Μικρού Ανιχνευτή Ιονισμού με CST Particle Studio</b>	<b>52</b>
5.1. Γεωμετρία του LIC και εξομοίωση του Ηλεκτρικού του Πεδίου.....	53
5.2. Χωρική Κατανομή της Συλλογής Φορτίου.....	57

5.2.1. Ποσοστό Συλλογής Ηλεκτρονίων.....	61
5.2.2. Ποσοστό Συλλογής Ιόντων.....	62
5.3. Μελέτη του Σήματος του LIC υπό την επίδραση Μαγνητικού Πεδίου.....	65
<b>6. Σύγκριση των Εξομοιωτικών αποτελεσμάτων με Πειραματικά δεδομένα</b>	<b>68</b>
<b>7. Συμπεράσματα</b>	<b>71</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>73</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

2.1 Διάδοση διάφορων σωματιδίων στο νερό.....	25
2.2 Αναπαράσταση του Ιατρικού Επιταχυντή του κέντρου HIT στη Χαϊδελβέργη.....	27
2.3 Στατιστικά δεδομένα της αδρονιακής θεραπείας του καρκίνου.....	28
2.4 Αριθμός πιθανών ασθενών ανά 10 εκατομμύρια κατοίκους .....	29
2.5 Εξέλιξη της θεραπείας του καρκίνου με πρωτόνια.....	30
2.6 Ευρωπαϊκά κέντρα της αδρονιακής θεραπείας του καρκίνου.....	31
3.1 Οι ανιχνευτές BLM του επιταχυντή SPS.....	32
3.2 Εικόνα του ανιχνευτή IC.....	33
4.1 Το πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης του CERN, το ROOT.....	36
4.2 Σχέδιο της πειραματικής διάταξης .....	37
4.3 3D απεικονίσεις του ανιχνευτή LIC.....	38
4.4 Εικόνα από τις Τεχνικές Προδιαγραφές του ανιχνευτή IC.....	39
4.5 Ενέργεια Ιονισμού που εναποτέθηκε στους δύο ανιχνευτές.....	42
4.6 Χωρική κατανομή της εναπόθεσης Ενέργειας Ιονισμού στους ανιχνευτές LIC και IC.....	43
4.7 Αριθμός ζευγών ιονισμού που παράγονται στο αέριο του LIC και του IC.....	45
4.8 Ιστογράμματα την Ενεργειακής Απόθεσης στο αέριο του LIC και του IC για διάφορα εύρη δέσμης.....	47
4.9 Η διαμήκης (z) κατανομή της παραγωγής διαφόρων ειδών δευτερογενών σωματιδίων στο αέριο του LIC.....	49
4.10 Η διαμήκης (z) κατανομή της παραγωγής διαφόρων ειδών δευτερογενών σωματιδίων στο αέριο του IC.....	50
5.1: Τα επίπεδα του δυναμικού στο εσωτερικό του αερίου κυλίνδρου του LIC.....	53
5.2: 3D απεικόνιση του ηλεκτρικού πεδίου του LIC.....	54
5.3: 3D απεικόνιση του ηλεκτρικού πεδίου του LIC.....	54
5.4: 3D απεικόνιση του ηλεκτρικού πεδίου του LIC.....	55
5.5: Ο αέριος δίσκος που εισήχθη για τη μελέτη της διάδοσης των ιόντων και των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του αερίου του LIC.....	57
5.6: Οπτικοποίηση της τροχιάς μερικών ιόντων. Ένα μέρος αυτών φθάνουν στη Παροχή Σήματος και ένα άλλο μέρος τους συγκρούονται με την εξωτερική ατσάλινη πλάκα του LIC.....	58
5.7: Οι διάφορες επιφάνειες παραγωγής σωματιδίων ιονισμού που ορίστηκαν για τη μελέτη της διάδοσής τους στο εσωτερικό του LIC.....	59
5.8: Μεταβολή του ποσοστού των ηλεκτρονίων που συλλέγονται ως σήμα συναρτήσει της διαμήκους (z) συνιστώσας του σημείου παραγωγής τους μέσα	

<i>στο αέριο του LIC. Οι τρεις κάθετες γραμμές αναπαριστούν τα ηλεκτρόδια του ανιχνευτή.....</i>	<b>61</b>
<b>5.9:</b> <i>Μεταβολή της συνολικής πιθανότητας συλλογής ζεύγους ιονισμού από τον LIC, συναρτήσει της διαμήκους συντεταγμένης (z). Οι τρεις κάθετες γραμμές αναπαριστούν τα ηλεκτρόδια του ανιχνευτή.....</i>	<b>62</b>
<b>5.10:</b> <i>Η μεταβολή της πιθανότητας συλλογής ιόντος συναρτήσει της διαμήκους συντεταγμένης στο αέριο του LIC για κάθε μία από τις ορισμένες επιφάνειες παραγωγής σωματιδίων.....</i>	<b>63</b>
<b>5.11:</b> <i>Μεταβολή της κανονικοποιημένης συλλογής ηλεκτρονίων και ιόντων για κάθε μία από τις επιφάνειες παραγωγής σωματιδίων. Η κατανομή είναι κανονικοποιημένη για 10,000 σωματίδια.....</i>	<b>64</b>
<b>5.12:</b> <i>Μεταβολή της ηλεκτρονιακής και ιοντικής συνιστώσας του κανονικοποιημένου σήματος του LIC συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου.....</i>	<b>66</b>
<b>6.1:</b> <i>Η πειραματικά μετρημένη συλλογή φορτίου του LIC και του IC, συναρτήσει της πυκνότητας της δέσμης πρωτονίων.....</i>	<b>68</b>



# Κατάλογος Πινάκων

<i>4.1 Χαρακτηριστικά των εξομοιώσεων που αφορούν την Ενεργειακή Απόθεση στο αέριο των δύο ανιχνευτών.....</i>	<i>46</i>
<i>4.2 Στατιστικά στοιχεία της Ενεργειακής Απόθεσης στον ανιχνευτή LIC για διάφορα εύρη δέσμης πρωτονίων.....</i>	<i>47</i>
<i>4.3 Στατιστικά στοιχεία της Ενεργειακής Απόθεσης στον ανιχνευτή IC για διάφορα εύρη δέσμης πρωτονίων.....</i>	<i>48</i>
<i>4.4 Χαρακτηριστικά των εξομοιώσεων που αφορούν την Ενεργειακή Απόθεση με διάφορα εύρη δέσμης.....</i>	<i>48</i>
<i>5.1 Τα γεωμετρικά (r,φ) χαρακτηριστικά κάθε επιφάνειας του δίσκου για τη μελέτη της συλλογής φορτίου.....</i>	<i>60</i>



# Συντομογραφίες

<b>BLM</b>	<b>Beam Loss Monitoring System</b> (Σύστημα Ανίχνευσης Απωλειών Δέσμης)
<b>LIC</b>	<b>Little Ionization Chamber</b> (Μικρός Ανιχνευτής Ιονισμού)
<b>LHC</b>	<b>Large Hadron Collider</b> (Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων)
<b>PSB</b>	<b>Proton Synchrotron Booster</b> (Σύγχροτρον Επιτάχυνσης Πρωτονίων)
<b>IC</b>	<b>standard Ionization Chamber</b> (τυπικός Ανιχνευτής Ιονισμού)
<b>CT</b>	<b>Computerized Axial Tomography</b> (Υπολογιστική Αξονική Τομογραφία)
<b>MRI</b>	<b>Magnetic Resonance Imaging</b> (Μαγνητική Τομογραφία)



# 1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η Αδρονιακή Θεραπεία του Καρκίνου καθίσταται όλο και πιο δημοφιλής στην προσπάθεια καταπολέμησης κακοήθων όγκων. Ως άμεση συνέπεια, ο αριθμός των Ιατρικών Επιταχυντών σε νοσοκομεία ανά την υφήλιο (Ευρώπη, Ιαπωνία, Αμερική κ.α.) αυξάνει συνεχώς. Η εξέλιξη αυτή προϋποθέτει τη χρησιμοποίηση διατάξεων και συσκευών της Φυσικής Υψηλών Ενεργειών (High Energy Physics) σε τελείως διαφορετικές συνθήκες, τόσο από άποψη χρήσης, όσο και περιβάλλοντος χώρου. Έτσι, η συμβατότητα καθενός απ' τα συστήματα ενός τυπικού σωματιδιακού επιταχυντή υπό τις συνθήκες ενός Νοσοκομειακού Επιταχυντή πρέπει να μελετηθεί εξ' αρχής.

Ένα πολύ βασικό σύστημα κάθε σωματιδιακού επιταχυντή είναι το Σύστημα Ελέγχου Απωλειών Δέσμης - *Beam Loss Monitoring (BLM) System* -. Αυτό αποτελείται από έναν αριθμό ανιχνευτών εγκατεστημένων γύρω από τον εξοπλισμό του επιταχυντή, για τη μελέτη σε πραγματικό χρόνο και *in situs* της πυκνότητας σωματιδίων απωλειών από τη δέσμη που επιταχύνεται. Μεγάλη πυκνότητα απωλειών μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή μηχανικών ή ηλεκτρικών συστημάτων της διάταξης και να θέσει σε κίνδυνο την υγεία εργαζομένων και ασθενών του νοσοκομείου. Μια φθηνή και πολύ αξιόπιστη λύση για το άνωθεν πρόβλημα είναι ο Ανιχνευτής Ιονισμού [1].

Ανιχνευτές Ιονισμού χρησιμοποιούνται συχνά σε πειράματα Φυσικής Υψηλών Ενεργειών (π.χ. CERN, Fermilab), σε διαστημικές αποστολές (NASA), καθώς και σε διατάξεις ανίχνευσης κοσμικής ακτινοβολίας. Ο σχετικά μικρός τους όγκος, το χαμηλό τους κόστος και η σταθερότητα της λειτουργίας τους, καθιστά τους Ανιχνευτές Ιονισμού επίσης πολύ καλούς υποψήφιους για Ιατρικές Εφαρμογές.

Σε αυτή την εργασία θα μελετηθούν τα χαρακτηριστικά ενός τέτοιου ανιχνευτή. Αυτός ο ανιχνευτής, ο Μικρός Ανιχνευτής Ιονισμού - *Little Ionization Chamber (LIC)* -, χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής απωλειών δέσμης γύρω από τους υπεραγωγίμους μαγνήτες του Μεγάλου Επιταχυντή Αδρονίων - *Large Hadron Collider (LHC)* - στο CERN.

Πριν την εγκατάσταση των καινούριων ανιχνευτών τύπου LIC γύρω από τον LHC, η ομάδα του συστήματος BLM του CERN, πραγματοποίησε για λόγους βαθμονόμησης (*calibration*) ένα πείραμα στη Γραμμή Απόρριψης Δέσμης (*dump line*) του επιταχυντή *Proton Synchrotron Booster (PSB)*. Ένας ανιχνευτής τύπου LIC, κι ένας ανιχνευτής του παλαιότερου τύπου *standard Ionization Chamber (IC)* τοποθετήθηκαν

στην τροχιά μιας δέσμης πρωτονίων, ορμής 1.4 GeV. Το συνολικό φορτίο που σύλλεξε ο κάθε ανιχνευτής ανά δέσμη πρωτονίων χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση του νέου ανιχνευτή [2].

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μια σειράς εξομοιώσεων, τύπου Monte Carlo, χρησιμοποιώντας το πακέτο εξομοίωσης *Geant4 (version 9.3)*, για τη προσομοίωση της άνωθεν πειραματικής διάταξης και την λήψη πληροφοριών σχετικά με την ενεργειακή απόθεση των εισερχόμενων σωματιδίων στο αέριο των δύο ανιχνευτών (LIC, IC), καθώς και για το προφίλ των δευτερογενών σωματιδίων που παράγονται από την αλληλεπίδραση των πρωτονίων με την ύλη των ανιχνευτών.

Επιπλέον, για την εξομοίωση του ηλεκτρικού πεδίου που υπάρχει μέσα στο αέριο του LIC και για τη μελέτη της διάδοσης των ζευγών ηλεκτρονίων/ιόντων που δημιουργούν το σήμα του ανιχνευτή, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα *CST Particle Studio*. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η εύρεση του σήματος του ανιχνευτή, συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των δύο εξομοιώσεων με *Geant4* και *CST Particle Studio*. Τέλος, θα μελετηθεί τυχόν αλλαγή της στάθμης του σήματος του ανιχνευτή LIC σε περιβάλλον με μαγνητικά πεδία.

## 2. Αδρνιακή Θεραπεία του Καρκίνου

### 2.1. Γενικά περί της θεραπείας του Καρκίνου

Το βέλτιστο είδος θεραπείας για κάθε καρκινοπαθή ασθενή εξαρτάται πάρα πολύ από το στάδιο της εξέλιξης του όγκου, καθώς και από τον τύπο και την τοποθεσία της κακοήθειας. Αν ο καρκίνος έχει διαγνωστεί έγκαιρα και ο όγκος είναι χειρουργικά προσβάσιμος, η χειρουργική αφαίρεση του όγκου είναι συνήθως η προτεινόμενη οδός δράσης.

Σε περίπτωση όμως που ο όγκος είναι αρκετά μεγάλος, είναι πιθανό να έχει διαδώσει μικροσκοπικούς καρκινικούς σπόρους σε μια μεγαλύτερη περιοχή γύρω από το φανερό του σχήμα. Αντίθετα με τον ίδιο τον όγκο, η μικροσκοπικοί σπόροι δεν γίνονται αισθητοί μέσω της χρήσης τεχνολογιών απεικόνισης, όπως η Υπολογιστική Αξονική Τομογραφία – *Computerized Axial Tomography (CT)* – ή η Μαγνητική Τομογραφία – *Magnetic Resonance Imaging (MRI)* –. Σ' αυτή την περίπτωση, η Ακτινοθεραπεία είναι συνήθως η προτεινόμενη διαδικασία για τη θεραπεία του ασθενούς.

Στην Ακτινοθεραπεία, το DNA των καρκινικών κυττάρων του ασθενούς βομβαρδίζεται με πολύ ενεργητικά σωματίδια, για παράδειγμα: φωτόνια, ηλεκτρόνια ή αδρόνια (δηλαδή νετρόνια, πρωτόνια ή βαρύτερους πυρήνες). Καταστρέφοντας το DNA των καρκινικών κυττάρων, η Ακτινοθεραπεία αποτρέπει τον πολλαπλασιασμό τους, με αποτέλεσμα αυτά τελικά να πεθαίνουν. Το σώμα του ασθενούς απορρίπτει τα νεκρά καρκινικά κύτταρα με τον ίδιο τρόπο που απορρίπτει και κάθε άλλο νεκρό ιστό.

Τυπικές δόσης ακτινοβολίας στην Ακτινοθεραπεία είναι περίπου 40-45 Gray (joules/kilogram) στην περιοχή που περιέχει τον φανερό καρκινικό όγκο καθώς και τους γύρω ιστούς, για την καταστροφή πιθανών μικροσκοπικών όγκων. Μια πρόσθετη δόση δίνεται στον φανερό όγκο, αυξάνοντας έτσι την συνολική δόση ακτινοβολίας ανά καρκινικό όγκο σε περίπου 60-70 Gray [3].

Ακόμα και αν η χειρουργική οδός έχει επιλεγεί για την ίαση ενός καρκινοπαθούς, η Ακτινοθεραπεία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετά τη χειρουργική επέμβαση, εφ' όσον υπάρχουν ενδείξεις ότι ο χειρουργός δεν κατάφερε να αφαιρέσει το σύνολο των καρκινικών κυττάρων. Σ' αυτή την περίπτωση, ένας συνδυασμός Ακτινοθεραπείας και

Χημειοθεραπείας προτιμάται συνήθως, έτσι ώστε να προληφθεί η μετάσταση του καρκίνου σε άλλες περιοχές του σώματος, καθώς και για την καταστροφή τυχών υπολειμμάτων του αρχικού όγκου.

## 2.2. Αλληλεπίδραση των σωματιδίων δέσμης με ανθρώπινα κύτταρα

Η μελέτη της διάδοσης διαφόρων τύπων σωματιδίων στο εσωτερικό του σώματος και της αλληλεπίδρασής τους με τα ανθρώπινα κύτταρα, μπορεί να γίνει με πολλούς εναλλακτικούς τρόπους, όπως με θεωρητικά εργαλεία, με πειραματικές μετρήσεις ή με υπολογιστικές εξομοιώσεις [4].

Για τη θεωρητική μελέτη της διάδοσης και της μεταφοράς ενέργειας από τα εισερχόμενα σωματίδια προς την ύλη του ανθρώπινου σώματος, συνήθως λαμβάνεται ως αφετηρία η εξίσωση Bethe-Bloch (Σχέση 2.1). Μέσω της σχέσης αυτής, είναι δυνατός ο υπολογισμός της ενεργειακής απόθεσης (energy loss) ανά μονάδα μήκους τροχιάς ενός συγκεκριμένου σωματιδίου (με γνωστή μάζα, φορτίο και αρχική ορμή) στο εσωτερικό ενός υλικού με γνωστά χαρακτηριστικά.

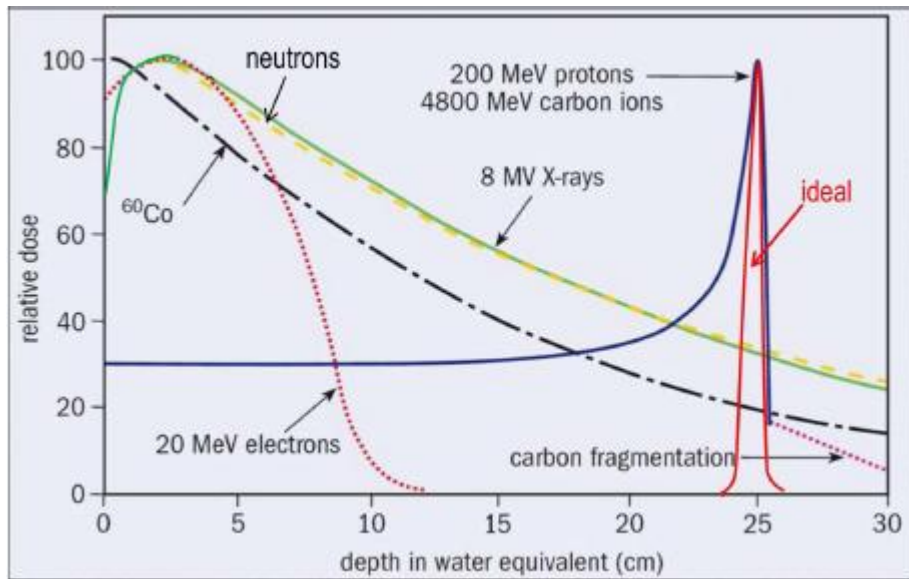
$$-\frac{dE}{dx} = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

$ze$	Charge of incident particle	$K/A$	$4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 / A$
$Z$	Atomic number of absorber	$T_{\max}$	max energy transfer to free electron
$A$	Atomic mass of absorber	$I$	Mean excitation energy

### Σχέση 2.1

Στη περίπτωση της μελέτης της αλληλεπίδρασης σωματιδίων με ανθρώπινα κύτταρα, το ρόλο του υλικού, στο εσωτερικό του οποίου διαδίδονται τα διάφορα σωματίδια, παίζει συνήθως το νερό. Το ανθρώπινο σώμα αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από νερό, άρα αυτό αποτελεί και τη γενική βάση για κάθε επιμέρους μελέτη της ενεργειακής απόθεσης των εισερχομένων σωματιδίων σε διάφορους ειδικούς τύπους ανθρώπινου ιστού. Μια συγκριτική παρουσίαση της ενεργειακής απόθεσης σε νερό διαφόρων τύπων σωματιδίων, γίνεται στο Σχήμα 2.1.





**Σχήμα 2.1:** Διάδοση διάφορων σωματιδίων στο νερό [5].

Από το Σχήμα 2.1 γίνεται εμφανές ότι ο κάθε τύπος σωματιδίου έχει μια πολύ διαφορετική συμπεριφορά όταν διαδίδεται στο νερό. Για παράδειγμα, τα ηλεκτρόνια (ενέργειας 20 MeV) εναποθέτουν όλη τους την ενέργεια σχεδόν αμέσως, ενώ οι ακτίνες X και τα νετρόνια, που έχουν πολύ παρόμοια συμπεριφορά, χάνουν ενέργεια πιο σταδιακά, με το μέγιστο της ενεργειακής τους απόθεσης να βρίσκεται πάντως στην αρχή της τροχιάς τους. Αντιθέτως, τα πρωτόνια και τα ιόντα άνθρακα έχουν μια μικρή και σταθερή ενεργειακή απόθεση για το μεγαλύτερο μέρος της τροχιάς τους και μια πολύ απότομη κορυφή στο τέλος της. Το πόσο βαθιά βρίσκεται αυτή η κορυφή εξαρτάται εξ' ολοκλήρου από την αρχική ορμή των πρωτονίων ή των ιόντων, συνεπώς είναι δυνατή η στόχευση του μέγιστου της ενεργειακής απόθεσης σε κάποιο προαποφασισμένο βάθος διείσδυσης.

Για να είναι χρήσιμο κάποιο σωματίδιο στην Ακτινοθεραπεία, πρέπει να αλληλεπιδρά ισχυρά με τα καρκινικά κύτταρα, να τους εκχωρεί δηλαδή ένα μεγάλο ποσό ενέργειας και παράλληλα να μεταφέρει όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια στα υγιή κύτταρα. Είναι προφανές, ότι το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο καρκινικός όγκος είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για την επιλογή της κατάλληλης μορφής Ακτινοθεραπείας. Αν ο όγκος είναι επιφανειακός, οι ακτίνες X (κλασική Ακτινοθεραπεία), τα ηλεκτρόνια και τα νετρόνια είναι πολύ καλοί υποψήφιοι ως σωματίδια-φορείς της απαιτούμενης αντικαρκινικής ενεργειακής δόσης.

Αν ο όγκος βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος, μια θεραπεία με τα πιο πάνω σωματίδια θα είχε ως αποτέλεσμα την απορρόφηση του μεγαλύτερου μέρους της ενέργειάς τους από υγιείς ιστούς, με μόνο ένα μικρό κλάσμα της ενέργειας να φθάνει στον καρκινικό όγκο.

Στην περίπτωση αυτή, η χρήση πρωτονίων ή ελαφρών πυρήνων (πχ Οξυγόνο, Άνθρακας) έχει προφανή προτερήματα, αφού επιτρέπει την παροχή πολύ στοχευμένης δόσης ακτινοβολίας στον καρκινικό όγκο, με μόνο μια πολύ μικρή παράπλευρη δόση σε υγιείς ιστούς. Το πρόσθετο γεγονός ότι το μέγιστο της δόσης ακτινοβολίας μπορεί να αλλάξει κατά το δοκούν, απλώς αυξομειώνοντας την ορμή των σωματιδίων της εισερχόμενης δέσμης, προσθέτει έναν επιπλέον παράγοντα ευελιξίας κι ελέγχου στην όλη διαδικασία της Ακτινοθεραπείας με πρωτόνια και ιόντα, τη λεγόμενη και *Αδρονιακή Θεραπεία*, μιας και τα σωματίδια αυτά είναι αδρόνια (hadrons), δηλαδή αντιλαμβάνονται την Ισχυρή Πυρηνική δύναμη.

Πρόσθετα με τα παραπάνω, τα ιόντα ελαφρών πυρήνων, κυρίως άνθρακα, έχουν βρεθεί από καινούριες σχετικά μελέτες [5] να είναι κατάλληλα για βομβαρδισμό καρκινικών όγκων ανθεκτικών στην ακτινοβολία. Ο λόγος είναι ότι τα σωματίδια αυτά αλληλεπιδρούν πολλαπλά με το μόριο του DNA, με αποτέλεσμα να σπάνε στατιστικά πολλούς δεσμούς νουκλεοδίων (multi-strand break), αντί για μόνον ένα κατά μέσον όρο (single-strand break), όπως συμβαίνει με τους υπόλοιπους τύπους σωματιδίων. Με περισσότερες της μίας θραύσης δεσμού ανά μόριο DNA, το καρκινικό κύτταρο χάνει την ικανότητα να αυτό-επιδιορθώνεται, σκοτώνοντας έτσι ακόμα και ανθεκτικούς όγκους.

### **2.3. Σωματιδιακοί Επιταχυντές για θεραπεία του καρκίνου με πρωτόνια και βαρέα ιόντα**

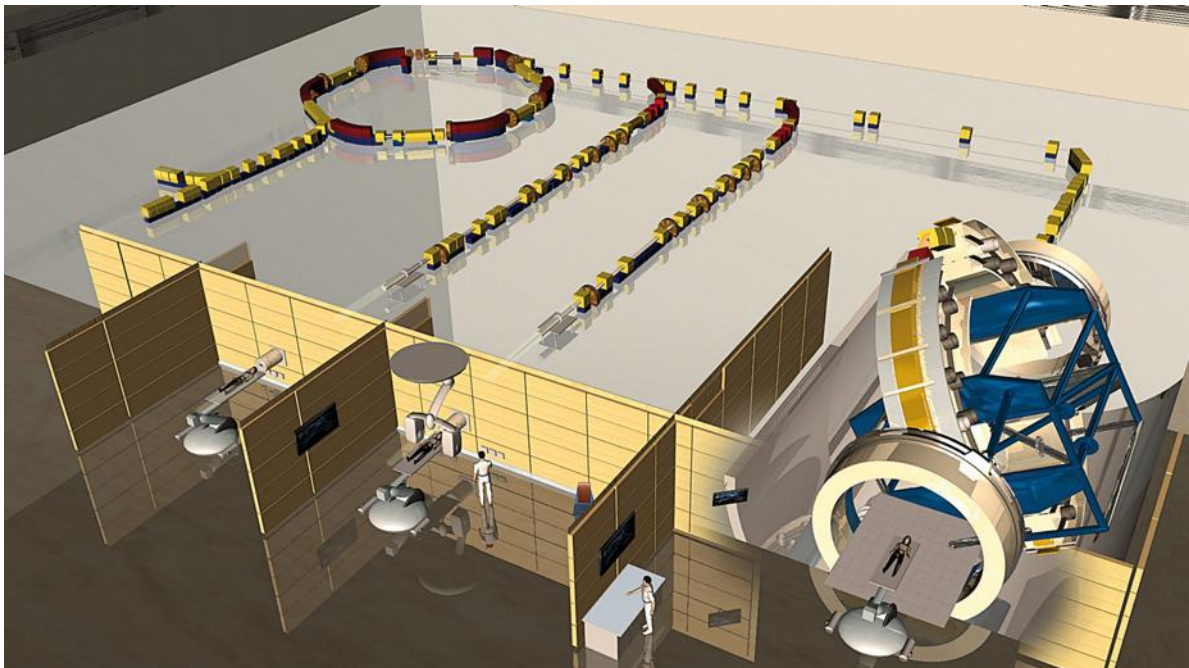
Η ενέργεια ανά πρωτόνιο που απαιτείται για την κάλυψη κάθε πιθανού βάθους του καρκινικού όγκου είναι 60-250 MeV. Γενικά στην Αδρονιακή Θεραπεία με πρωτόνια, η μέγιστη ενέργεια ανά σωματίδιο της δέσμης επιτάχυνσης είναι τα 300 MeV, ενώ η πυκνότητα σωματιδίων μιας τυπικής δέσμης πρωτονίων για τις εφαρμογές αυτές κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20 nA.

Πρώιμες νοσοκομειακές εγκαταστάσεις θεραπείας του καρκίνου με βομβαρδισμό πρωτονίων χρησιμοποιούσαν κύκλοτρα (synchrocyclotrons) που επιτάχυναν τα σωματίδια σε μία και μόνο ενέργεια μεταξύ 160 και 340 MeV. Στη συνέχεια, μια σειρά από διατάξεις μείωναν την ενέργεια της δέσμης πρωτονίων στα επιθυμητά επίπεδα που απαιτούνταν για την ίαση του συγκεκριμένου ασθενούς.

Μοντέρνες εγκαταστάσεις της Αδρονιακής θεραπείας του καρκίνου χρησιμοποιούν σύγχροντρα (synchrotrons) που είναι σε θέση να επιταχύνουν τη δέσμη των

πρωτονίων σε οποιαδήποτε ορμή απαιτείται. Έτσι, δεν είναι πλέον αναγκαία η επιτάχυνση της δέσμης σε μια μεγαλύτερη τιμή και στη συνέχεια η μείωση της ενέργειας των πρωτονίων στο επιθυμητό επίπεδο [6].

Η Αδρνιακή θεραπεία με βαρέα ιόντα, αν και έχει να επιδείξει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα, είναι ακόμα σε πιο πρώιμο στάδιο μελέτης. Ενώ η θεραπεία με πρωτόνια ή νετρόνια είναι εδώ και δεκαετίες διαθέσιμη σε συνθήκες μιας τυπικής κλινικής, μόλις τα τελευταία χρόνια το ίδιο έχει αρχίσει να ισχύει για τα βαρέα ιόντα. Μέχρι πρότινος, η έρευνα στον τομέα αυτόν πραγματοποιούνταν με σωματιδιακούς επιταχυντές της Φυσικής Υψηλών Ενεργειών, όπου ήταν δυνατόν να γίνει χρήση εξελιγμένων τεχνικών παράδοσης δέσμης. Στην θεραπεία βαρέων ιόντων (πχ ηλίου, άνθρακα, οξυγόνου) η πυκνότητα της σωματιδιακής δέσμης είναι αντίστοιχη με αυτή της θεραπείας με πρωτόνια, αλλά οι ενέργειες ανά σωματίδιο που απαιτούνται είναι πολύ μεγαλύτερες, με εύρος 50 ως 430 MeV/amu.



**Σχήμα 2.2:** Αναπαράσταση του Ιατρικού Επιταχυντή του κέντρου HIT στη Χαϊδελβέργη.

## 2.4. Στατιστικά δεδομένα της Αδρνιακής Θεραπείας του Καρκίνου

Η υπεροχή της ικανότητας καταπολέμησης κακοηθών όγκων με την Αδρνιακή Θεραπεία του καρκίνου, σε σύγκριση με παραδοσιακές μορφές Ακτινοθεραπείας, αποτυπώνεται σε μια σειρά από μελέτες (Σχήμα 2.3) [7]. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 2.3 αντιπαραβάλλονται στατιστικά δεδομένα βιωσιμότητας και μακροήμερευσης ασθενών με διάφορους τύπους καρκίνου, οι οποίοι υποβλήθηκαν είτε σε θεραπεία με ακτίνες Χ (τρίτη στήλη), είτε σε θεραπεία με ιόντα άνθρακα (τέταρτη και πέμπτη στήλη). Η υπεροχή της Αδρνιακής Θεραπείας του καρκίνου είναι τουλάχιστον εμφανής, σε όλους τους υπό μελέτη τύπους καρκίνου.

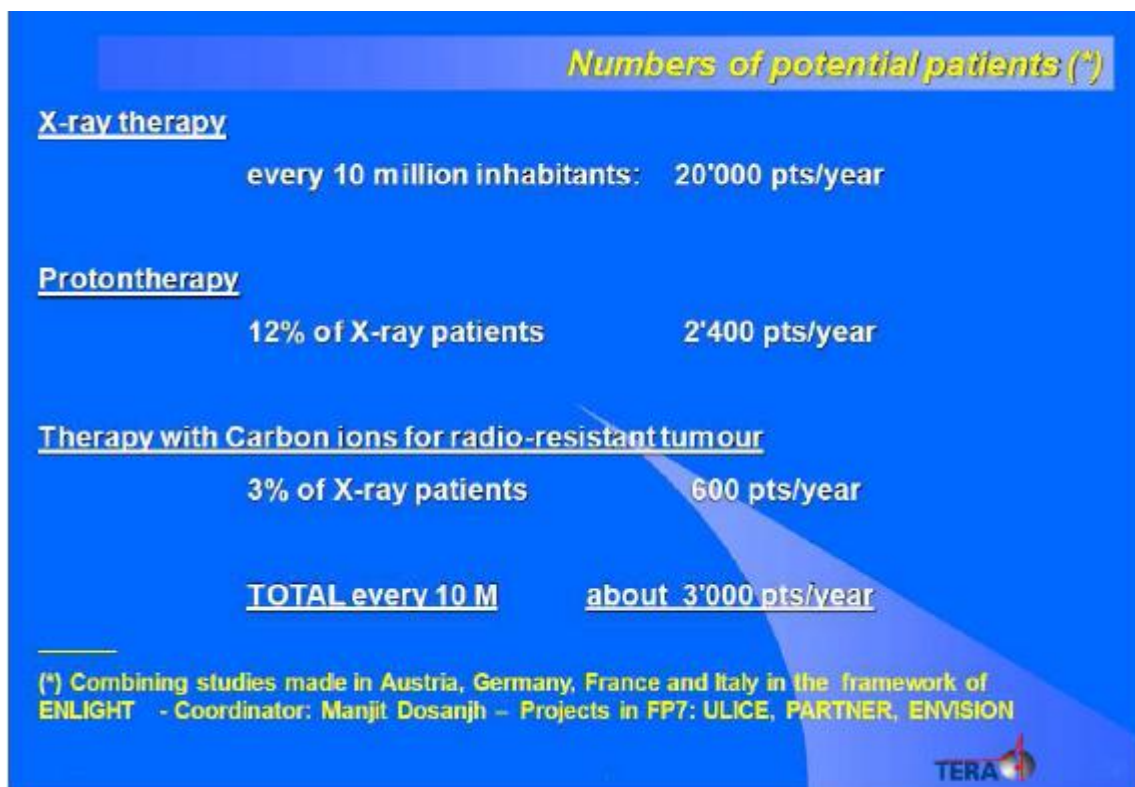
Αιτία αυτής της υπεροχής είναι τα χαρακτηριστικά της αλληλεπίδρασης των αδρονίων με την ύλη, όπως αυτά αναλύθηκαν στην Ενότητα 2.2. Η ικανότητα πολύ στοχευόμενου βομβαρδισμού των καρκινικών όγκων με πρωτόνια ή βαρέα ιόντα μειώνει εξαιρετικά τη επιβάρυνση των υγιών ιστών του ασθενή με παραπανίσια ακτινοβολία, με αποτέλεσμα τη βέλτιστη ανάρρωση του τελευταίου. Το γεγονός ότι η θεραπεία με βαρέα ιόντα καθιστά ευάλωτους ακόμα και τους πιο ανθεκτικούς τύπους καρκίνους, λόγω της πολλαπλής βλάβης του DNA από κάθε σωματίδιο, αυξάνει θεαματικά τα επίπεδα προσδόκιμου ζωής για τους ασθενείς που υποβλήθηκαν στην εν λόγω θεραπεία (Σχήμα 2.3).

Indication	End point	Results photons	Results carbon HIMAC-NIRS	Results carbon GSI
Chordoma	local control rate	30 – 50 %	65 %	70 %
Chondrosarcoma	local control rate	33 %	88 %	89 %
Nasopharynx carcinoma	5 year survival	40 -50 %	63 %	
Glioblastoma	av. survival time	12 months	16 months	Table by G. Kraft 2007 Results of C ions
Choroid melanoma	local control rate	95 %	96 % (*)	
Paranasal sinuses tumours	local control rate	21 %	63 %	
Pancreatic carcinoma	av. survival time	6.5 months	7.8 months	
Liver tumours	5 year survival	23 %	100 %	
Salivary gland tumours	local control rate	24-28 %	61 %	77 %
Soft-tissue carcinoma	5 year survival	31 – 75 %	52 -83 %	

**Σχήμα 2.3:** Στατιστικά δεδομένα της αδρνιακής θεραπείας του καρκίνου.

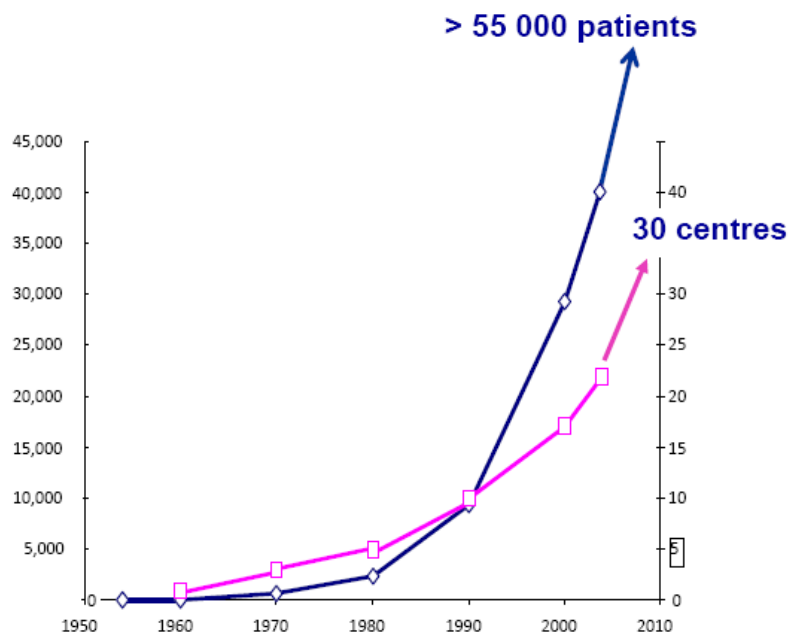


Η Αδρονιακή Θεραπεία παραμένει όμως μια σχετικά, αν και όχι απαγορευτικά, ακριβή μέθοδος, με κόστος περίπου τριπλάσιο από αυτό της κλασικής Ακτινοθεραπείας με φωτόνια γ. Επιπλέον, αποτελεί μια σοβαρή επιβάρυνση για τον προϋπολογισμό ενός νοσοκομείου, αφού απαιτεί την ύπαρξη εκτεταμένου εξοπλισμού για την επιτάχυνση, τη στόχευση και τον έλεγχο των σωματιδίων. Για το λόγο αυτό, στατιστικές μελέτες βιωσιμότητας της εκάστοτε επένδυσης πρέπει να γίνονται εκ των προτέρων, λαμβάνοντας υπόψη τις γενικές στατιστικές πληθυσμιακής πυκνότητας ασθενών, η πάθηση των οποίων απαιτεί τη χρήση της Αδρονιακής Θεραπείας. Σύμφωνα με τις υπάρχουσες στατιστικές μελέτες (Σχήμα 2.4) ανά δέκα εκατομμύρια κατοίκους, κάθε χρόνο 20,000 εξ αυτών θα χρειαστούν θεραπεία με ακτίνες X, ενώ το 12% αυτού του αριθμού, δηλαδή 2,400 ασθενείς ετησίως, έχουν καρκίνο τέτοιου τύπου ή σε τέτοια τοποθεσία, που για την ίασή τους απαιτούν Θεραπεία με πρωτόνια. Τέλος, το 3% των ασθενών θεραπείας με ακτίνες X, δηλαδή 600 άτομα κατ' έτος ανά δέκα εκατομμύρια κατοίκους γενικού πληθυσμού, έχουν όγκους ανθεκτικούς στην ακτινοβολία, οπότε η ίασή τους απαιτεί βομβαρδισμό των καρκινικών κυττάρων με βαρέα ιόντα.



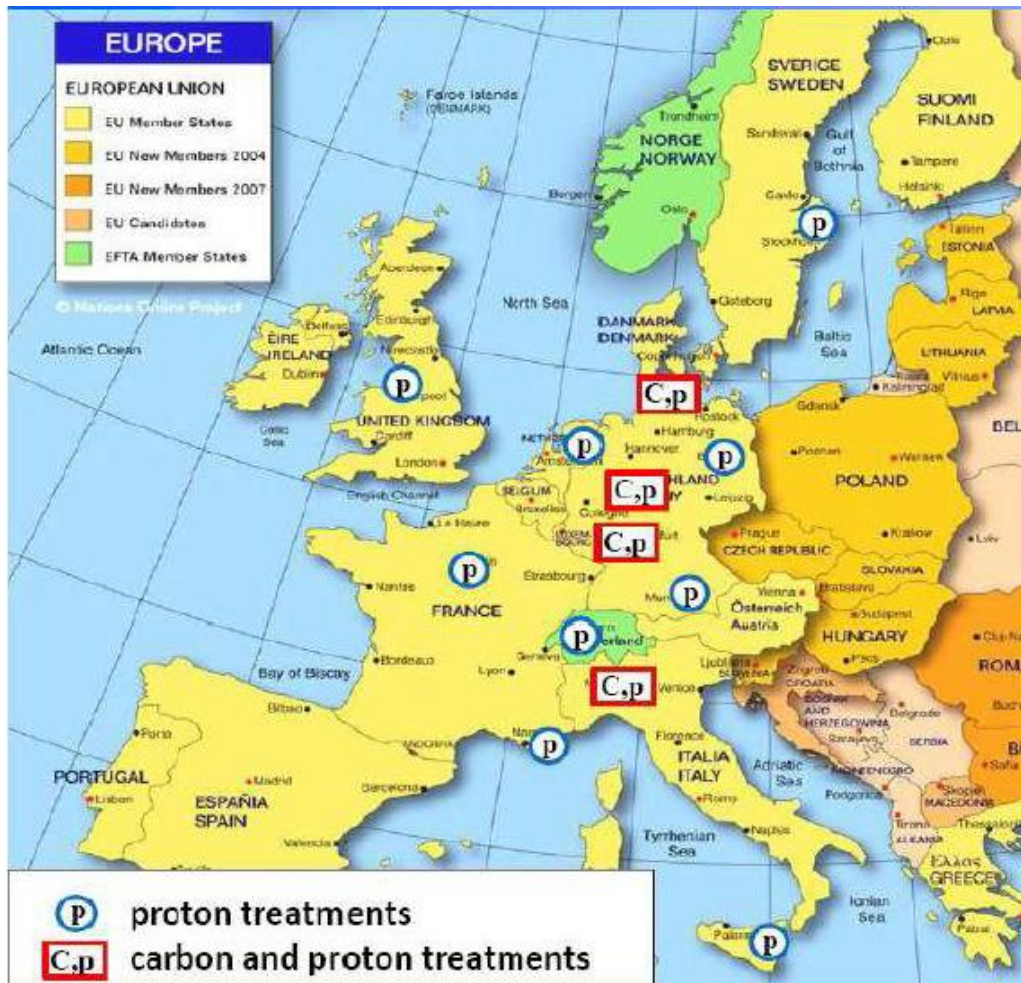
**Σχήμα 2.4:** Αριθμός πιθανών ασθενών ανά 10 εκατομμύρια κατοίκους.

Τις τελευταίες δεκαετίες αυξάνει εκθετικά τόσο ο αριθμός των νοσοκομειακών κέντρων παγκοσμίως που διαθέτουν εξοπλισμό για την Αδρνιακή Θεραπεία του καρκίνου, όσο και ο αριθμός των ασθενών που υποβάλλονται σε θεραπεία τέτοιου τύπου. Σήμερα υπάρχουν πάνω από τριάντα τέτοια κέντρα παγκοσμίως, τα οποία θεραπεύουν κάθε χρόνο πάνω από 55,000 άτομα, με τον αριθμό αυτόν να αυξάνει ραγδαία χρόνο με το χρόνο.



**Σχήμα 2.5: Εξέλιξη της θεραπείας του καρκίνου με πρωτόνια**

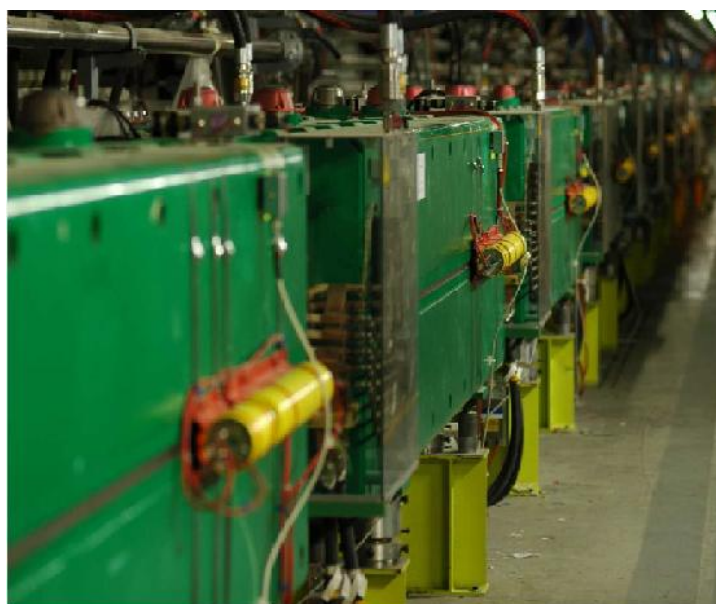
Η Ευρώπη είναι μεγάλος πρωταγωνιστής παγκοσμίως, τόσο στη κατασκευή ενός ολοένα αυξανόμενου αριθμού τέτοιων κέντρων, όσο και στην έρευνα για βελτίωση των τεχνικών αντιμετώπισης καρκινικών όγκων με βομβαρδισμό με αδρόνια. Πανευρωπαϊκά, τα περισσότερα κέντρα Αδρνιακής Θεραπείας του καρκίνου βρίσκονται στη Γερμανία, την Ιταλία και τη Γαλλία, με την Ελλάδα να μη διαθέτει δυστυχώς κανένα τέτοιο κέντρο (Σχήμα 2.6).



**Σχήμα 2.6:** Ευρωπαϊκά κέντρα της αδρονιακής θεραπείας του καρκίνου.

### 3. Σύστημα Ανίχνευσης Απωλειών Δέσμης

Το σύστημα Ανίχνευσης Απωλειών Δέσμης – *Beam Loss Monitoring (BLM) system* – του Μεγάλου Επιταχυντή Αδρονίων - *Large Hadron Collider (LHC)* - στο CERN, είναι υπεύθυνο για τη μέτρηση της ακτινοβολίας που παράγεται από την πρόσκρουση των σωματιδίων απωλειών της δέσμης του LHC με το σωλήνα επιτάχυνσης. Το σύστημα αυτό προστατεύει τον επιταχυντή από απώλειες γρήγορης μορφής (*fast losses*), έτσι ώστε να προληφθεί μια καταστροφική αλλαγή φάσης των υπεραγωγίμων μαγνητών. Όταν ένα αδρόνιο υψηλής ενέργειας προσκρούει σε κάποιο από τα όργανα του LHC, όπως για παράδειγμα σε έναν τετραπολικό μαγνήτη, μπορεί να δημιουργήσει μια πλειάδα από πολύ ενεργητικά σωματίδια (*hadronic shower*), η τροχιά των οποίων επεκτείνεται πολύ πέρα από το σημείο πρόσκρουσης. Οι Ανιχνευτές Απωλειών Δέσμης πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύουν αυτή την ακτινοβολία με μικρό σχετικά χρόνο απόκρισης. Τα ηλεκτρονικά πρώτης βαθμίδας που βρίσκονται πολύ κοντά στους ανιχνευτές στέλνουν πολύ γρήγορα τις πληροφορίες που συλλέγονται στα ηλεκτρονικά ανάλυσης, τα οποία συγκρίνουν την τιμή της συλλεγόμενης δόσης ακτινοβολίας με μια προκαθορισμένη δόση καταωφλίου, η οποία εγγυάται τη σωστή λειτουργία του επιταχυντή. Οι ανιχνευτές BLM's είναι τοποθετημένοι γύρω από τους υπεραγωγίμους μαγνήτες, στις τοποθεσίες όπου προβλέπονται οι υψηλότερες απώλειες στη διαδρομή της σωματιδιακής δέσμης.



**Σχήμα 3.1: Οι ανιχνευτές BLM του επιταχυντή SPS.**



Το σύστημα BLM του CERN βασίζεται πρωτίστως σε περίπου 3600 κυλινδρικούς Ανιχνευτές Ιονισμού - *Ionization Chambers (IC's)* – [1] με ενεργό όγκο περίπου 1.5 λίτρα αερίου  $N_2$  σε πίεση 1.1 bar. Ο IC είναι ένας ευρέως διαδεδομένος τύπος σωματιδιακού ανιχνευτή. Η αρχή λειτουργίας του είναι ότι όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο περάσει μέσα απ' έναν όγκο γεμάτο με αέριο υπό πίεση, μπορεί να ιονίσει ένα ή περισσότερα μόρια του αερίου μέσου. Τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια ιονισμού που παράγονται κατ' αυτόν τον τρόπο μπορούν να οδηγηθούν από ένα ηλεκτρικό πεδίο σε κατάλληλα τοποθετημένα ηλεκτρόδια, όπου και συλλέγονται. Χρησιμοποιώντας την ισχύ του ρεύματος που παράγεται σε πραγματικό χρόνο στα ηλεκτρόδια του ανιχνευτή, μπορεί να υπολογιστεί η πυκνότητα της δέσμης σωματιδίων, μιας και η απόκριση του ανιχνευτή είναι γραμμική στο μεγαλύτερο εύρος του φάσματος σωματιδιακών πυκνοτήτων. Παρ' όλα αυτά, πολύ μεγάλη πυκνότητα σωματιδίων μπορεί να δημιουργήσει το λεγόμενο "space-charge effect" [8], το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του σήματος του Ανιχνευτή Ιονισμού.



**Σχήμα 3.2: Εικόνα του ανιχνευτή IC.**

Υπάρχουν κάποιες τοποθεσίες γύρω από τον LHC, όπου το σήμα των Ανιχνευτών Απωλειών Δέσμης είναι τόσο ισχυρό, που κορέζει τα ηλεκτρονικά των ανιχνευτών IC. Η σχεδίαση μιας νέας γενιάς ηλεκτρονικών με υψηλή αντοχή στις ακτινοβολίες, που να αντέχουν μεγαλύτερο ρεύμα κορεσμού, βρέθηκε να είναι μια πολύ ακριβή λύση. Για να λυθεί το πρόβλημα, προτιμήθηκε η σχεδίαση ενός νέου τύπου Ανιχνευτή Ιονισμού, του Μικρού Ανιχνευτή Ιονισμού - *Little Ionization Chamber (LIC)* -.

Ο ανιχνευτής τύπου LIC έχει μικρότερο όγκο αερίου, καθώς και μικρότερη πίεση σε σχέση με τον ανιχνευτή IC (0.4 bar αντί για 1.1 bar). Επιπλέον, ο LIC έχει τρία αντί για εξήντα-ένα ηλεκτρόδια, με αποτέλεσμα να συλλέγει πολύ μικρότερη ποσότητα ρεύματος, για την ίδια πυκνότητα εισερχόμενων σωματιδίων σε σχέση με τον ανιχνευτή IC. Ως αποτέλεσμα, ο ανιχνευτής τύπου LIC μπορεί να ανιχνεύει απώλειες δέσμης μεγαλύτερης πυκνότητας, χωρίς να απαιτείται μια δαπανηρή αναβάθμιση των ηλεκτρονικών του.

Στα επόμενα κεφάλαια, τα χαρακτηριστικά και η απόδοση του ανιχνευτή τύπου LIC θα μελετηθούν, χρησιμοποιώντας τα εξομοιωτικά πακέτα *Geant4* και *CST Particle*

*Studio.* Τα εξομοιωτικά αποτελέσματα θα συγκριθούν στη συνέχεια με τα δεδομένα που λήφθηκαν από την ομάδα BLM του CERN στη Γραμμή Απόρριψης (dump line) του επιταχυντή PSB, κατά τη διάρκεια ενός πειράματος βαθμονόμησης [2].

# 4. Εξομοίωση του Μικρού Ανιχνευτή Ιονισμού με Geant4

## 4.1. Πακέτο εξομοίωσης Geant4

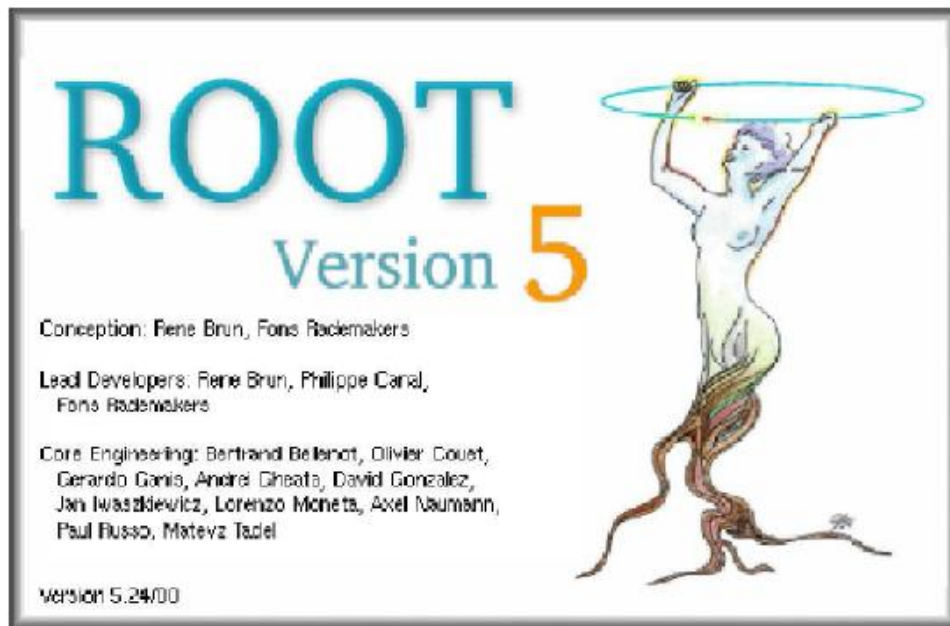
Το *Geant4* είναι ένα αντικειμενοστραφές πακέτο εξομοίωσης σωματιδιακής φυσικής τύπου Monte-Carlo, βασισμένο εξολοκλήρου στη γλώσσα C++. Άρχισε να αναπτύσσεται το 1993 από τη παγκόσμια συνεργατική προσπάθεια RD44 [9] και η πρώτη έκδοση του προγράμματος δημοσιεύτηκε το 1998. Το λογισμικό του Geant4 είναι ανοικτό (open source) και οι κατά καιρούς επανεκδόσεις του (updates) είναι απ' τη στιγμή της έκδοσής τους διαθέσιμες δωρεάν στην επίσημη ιστοσελίδα του προγράμματος [10].

Ο κώδικας του *Geant4* είναι σχετικά περίπλοκος, αφού οφείλει να είναι σε θέση να εξομοιώσει μια μεγάλη γκάμα εφαρμογών. Ο κώδικας είναι πολύ ευέλικτος και επαφίεται στο χρήστη να ορίσει και να ελέγχει κάθε πλευρά της εξομοίωσης. Ο πυρήνας του προγράμματος περιέχει τη *διάδοση σωματιδίων* (tracking), το *γεωμετρικό ορισμό όγκων και επιφανειών* (ανιχνευτές, επιταχυντές, κ.α.), τον *ορισμό υλικών και σωματιδίων*, την εισαγωγή των σχετικών με την εφαρμογή *φυσικών αλληλεπιδράσεων*, την *ανάλυση των γεγονότων*, τον *ορισμό ευαίσθητων ανιχνευτών*, *μεθόδους γραφικής απεικόνισης* και άλλα.

Όσον αφορά τις φυσικές αλληλεπιδράσεις, ο χρήστης με την κέλευση ορισμένων ήδη έτοιμων βιβλιοθηκών είναι σε θέση να προσομοιώσει αλληλεπιδράσεις όλων των ειδών, για ένα πολύ μεγάλο εύρος ενεργειών: Από χαμηλή ενέργεια (οπτικά φωτόνια, θερμικά νετρόνια) ως ενέργειες της τάξης μεγέθους λειτουργίας του LHC (μερικά TeV) και των κοσμικών ακτινοβολιών. Το πακέτο περιέχει σωματίδια όλων των ειδών, λεπτόνια, αδρόνια, φωτόνια και βαρέα ιόντα.

Προτού μια εφαρμογή είναι έτοιμη για εξομοίωση, ο χρήστης πρέπει να πραγματοποιήσει μια σειρά από προγραμματιστικά βήματα. Οι προσομοιωμένες φυσικές διαδικασίες που θα ληφθούν υπόψη απ' την εφαρμογή πρέπει να οριστούν υποχρεωτικά, όπως και τα ενεργειακά όρια της εξομοίωσης, σε μια κλάση που ονομάζεται *Physics List*. Η γεωμετρία και τα λοιπά υλικά χαρακτηριστικά της εξομοίωσης πρέπει να οριστούν στην κλάση *Detector Construction*. Στο βασικό αρχείο (main file) πρέπει να αρχικοποιείται ο διαχειριστής εξομοίωσης (Run Manager), καθώς και να οριστεί η γεννήτρια τυχαίων αριθμών (τύπου Monte-Carlo) που θα χρησιμοποιηθεί.

Στη μελέτη αυτή, η στατιστική ανάλυση των δεδομένων των εξομοιώσεων με *Geant4* έγινε με το *ROOT* (Σχήμα 4.1), που είναι πρόγραμμα ανεπτυγμένο από το CERN για την εύκολη στατιστική ανάλυση δεδομένων και την παραγωγή ιστογραμμάτων και γραφημάτων παντός είδους.



**Σχήμα 4.1:** Το πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης του CERN, το ROOT.

## 4.2.Γεωμετρία της Εξομοίωσης

Η διάταξη των διαφόρων μερών της εξομοίωσης με το πακέτο *Geant4* ακολουθεί πιστά τη δομή της πειραματικής διάταξης [2] υπό μελέτη. Κατ' αυτό τον τρόπο καθίσταται εφικτή η σύγκριση των εξομοιωτικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Ακολουθώντας τη τροχιά των εισερχόμενων πρωτονίων, η διάταξη της εξομοίωσης αποτελείται από: Ένα θάλαμο κενού (το τελικό κομμάτι του επιταχυντή PSB) που τελειώνει με μια λεπτή πλάκα ανοξειδωτου ατσαλιού. Μετά από 35 cm αέρα, η δέσμη των πρωτονίων συναντά τρεις ανιχνευτές τοποθετημένους σε σειρά και στη συνέχεια η δέσμη απορρίπτεται.

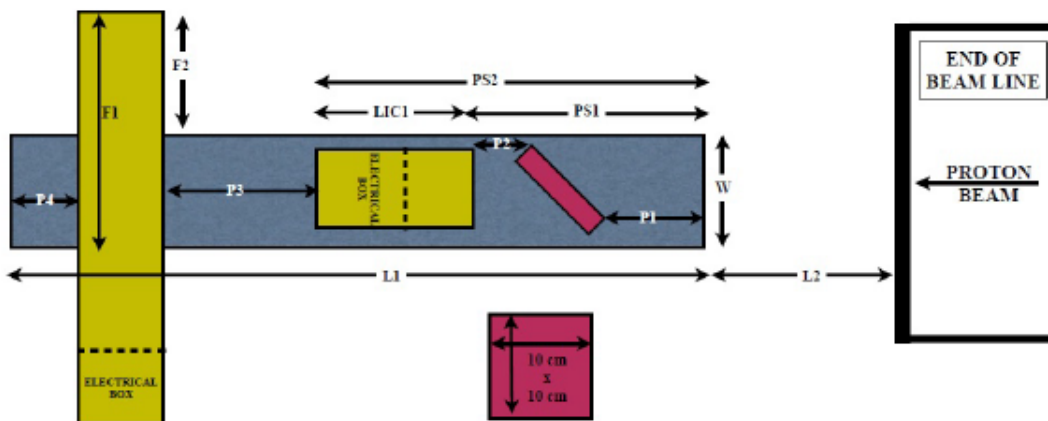
Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν στη πειραματική διάταξη ήταν:

- Μια οθόνη φθορισμού από  $Al_2O_3$ , διαστάσεων (10 cm x 10 cm x 1cm) , για την μέτρηση των εισερχόμενων σωματιδίων με χρήση μιας φωτοκάμερας.
- Ένας Μικρός Ανιχνευτής Ιονισμού - *Little Ionization Chamber (LIC)* -, τοποθετημένος πάνω στην τροχιά της δέσμης πρωτονίων, με το μεγάλο άξονα συμμετρίας του ανιχνευτή παράλληλο με τη τροχιά των σωματιδίων.
- Ένας τυπικός Ανιχνευτής Ιονισμού - *standard Ionization Chamber (IC)* -, ο οποίος είχε τοποθετηθεί κάθετα στη τροχιά της δέσμης.

Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η συνολική εικόνα της πειραματικής διάταξης:

## Layout of the experimental setup

L1 (cm)	L2 (cm)	PS1 (cm)	PS2 (cm)	LIC1 (cm)	P1 (cm)	P2 (cm)	P4 (cm)	F1 (cm)	F2 (cm)	W (cm)
64.5	27	14.5	32	16	6	3.5	10	17.5	5.5	12

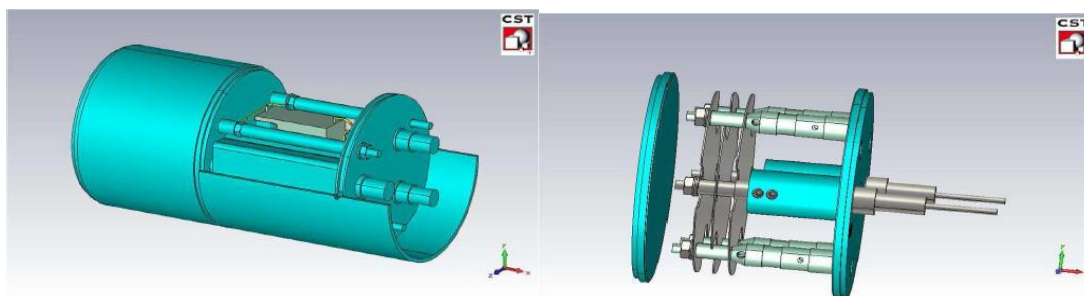


**Σχήμα 4.2:** Σχέδιο της πειραματικής διάταξης

Το πιο σημαντικό μέρος της εξομοιωτικής γεωμετρίας είναι φυσικά οι δύο κύριοι ανιχνευτές (ο LIC και ο IC). Η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά τους εξομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας ως βάση τις Τεχνικές Προδιαγραφές (technical drawings) των δύο ανιχνευτών.

Ο Μικρός Ανιχνευτής Ιονισμού (LIC), διαθέτει τρία κυκλικά αλουμινένια ηλεκτρόδια, ακτίνας 37 mm. Τα έξωθεν δύο ηλεκτρόδια είναι σε υψηλή τάση (1500 Volt) και το κεντρικό, το Ηλεκτρόδιο Σήματος, είναι γειωμένο. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων είναι 5.25 mm και το πάχος του κάθε ενός είναι 0.5 mm. Αυτά τα τρία ηλεκτρόδια είναι εμφωλευμένα μέσα σε έναν κύλινδρο γεμάτο με αέριο αζώτου ( $N_2$ ), ακτίνας 42.5 mm και μήκους 65 mm. Η πίεση του αερίου είναι 0.4 atm. Ο όγκος του αερίου χωρίζεται από το περιβάλλοντα χώρο από δύο κυκλικές ατσάλινες πλάκες πάχους 5 mm και από έναν κυλινδρικό κέλυφος πάχους 2 mm. Τα ηλεκτρόδια είναι συνδεδεμένα με τις αντίστοιχες ηλεκτρικές παροχές, που είναι φτιαγμένες από ατσάλι. Οι παροχές συνδέουν τα ηλεκτρόδια με τα εξωτερικά ηλεκτρονικά στοιχεία του ανιχνευτή, μέσω δύο οπών στην άνωθεν ατσάλινη πλάκα του αερίου κυλίνδρου. Τέσσερις δοκοί από αλούμινα ( $Al_2O_3$ ) είναι επίσης παρόντες μέσα στο αέριο του ανιχνευτή, για τη μηχανική σταθερότητα των ηλεκτροδίων.

Η γεωμετρία του ανιχνευτή LIC παρουσιάζεται στις Εικόνες 4.3(α) και 4.3(β).



(α) Εξωτερική θέαση του ανιχνευτή LIC (β) Το εσωτερικό του αερίου του LIC

**Σχήμα 4.3: 3D απεικονίσεις του ανιχνευτή LIC**

Ο Τυπικός Ανιχνευτής Ιονισμού (IC), είναι ένας κύλινδρος ακτίνας 44.5 mm και μήκους 410 mm, γεμάτος με αέριο αζώτου ( $N_2$ ). Η πίεση του αερίου είναι μεγαλύτερη εκείνης του LIC, δηλαδή 1.1 atm. Μέσα στον όγκο του αερίου είναι τοποθετημένα εξήντα-ένα κυκλικά αλουμινένια ηλεκτρόδια, τα μισά εκ των οποίων είναι σε υψηλή τάση (1.5 kV) και τα άλλα μισά είναι γειωμένα. Η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων είναι 5 mm. Όπως και στην περίπτωση του ανιχνευτή LIC, τα γειωμένα Ηλεκτρόδια Σήματος (Signal Electrodes) είναι συνδεδεμένα με την Παροχή Σήματος (Signal Feedthrough) και τα Ηλεκτρόδια Υψηλής Τάσης (High Voltage Electrodes) με την Παροχή Υψηλής Τάσης (High Voltage Feedthrough). Τέσσερις αλουμινένιοι δοκοί είναι επίσης παρόντες για την





### 4.3. Γενικά Χαρακτηριστικά της Εξομοίωσης

Για την εξομοίωση της πειραματικής διάταξης και των ανιχνευτών, τα χαρακτηριστικά των οποίων αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *Geant4* (version 9.3) [11].

Ο χρήστης του λογισμικού *Geant4*, πρέπει να επιλέξει μόνος του ποιες φυσικές διαδικασίες θα ληφθούν υπόψη από το πρόγραμμα για κάθε ειδική εφαρμογή. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει τις δικές του φυσικές διαδικασίες, ή εναλλακτικά να καλέσει κάποιες από τις ήδη υπάρχουσες φυσικές αλληλεπιδράσεις της βιβλιοθήκης *G4 Physics*. Για τη βελτιστοποίηση τόσο του βαθμού ρεαλισμού της εξομοίωσης, όσο και της υπολογιστικής απόδοσης του προγράμματος, απαιτείται από το χρήστη να λάβει υπόψη του τις αλληλεπιδράσεις που μπορεί να διαδραματίζουν κάποιο ρόλο στην εφαρμογή που τον ενδιαφέρει (πχ *H/M*, *Ισχυρή και Ασθενής Πυρηνική κ.α.*), καθώς και την Ενεργειακή Περιοχή της εφαρμογής (φυσική Χαμηλών ή Υψηλών Ενεργειών κλπ).

Στην εξομοίωση που παρουσιάζεται εδώ, η Φυσική Βιβλιοθήκη που χρησιμοποιήθηκε ήταν η *Bertini Cascade HadronPhysics QGSP-BERT-HP* για την προσομοίωση όλων των σχετικών αδρονιακών αλληλεπιδράσεων. Αυτή είναι, σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία [12], η καλύτερη επιλογή για τη προσομοίωση των αδρονιακών αλληλεπιδράσεων για ενέργειες μέχρι 10 GeV. Οι ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις ελήφθησαν υπόψη καλώντας τη βιβλιοθήκη *G4EmStandardPhysics* του πακέτου *Geant4*.

Στο πρόγραμμα εξομοίωσης, η γεννήτρια των κύριων εισερχομένων σωματιδίων (*primary particles generator*) σχεδιάστηκε έτσι ώστε να παράγει πρωτόνια ορμής 1.4 GeV. Η ορμή αυτή ήταν μονότιμη, δεν υπήρχε καμία διασπορά στην τιμή της αρχικής ορμής των πρωτονίων. Η δέσμη των εισερχόμενων αυτών πρωτονίων σχεδιάστηκε να έχει δύο εναλλακτικές κατανομές, δηλαδή τη *σταθερή κατανομή* και τη *γκαουσιανή* (Gaussian). Η πρώτη κατανομή χρησιμοποιήθηκε για τη πραγματοποίηση διάφορων μελετών της συμπεριφοράς του ανιχνευτή υπό συνθήκες ολικού φωτισμού (*full illumination*), ενώ η γκαουσιανή κατανομή χρησιμοποιήθηκε για να μιμηθεί τη συμπεριφορά της δέσμης πρωτονίων του επιταχυντή PSB.

Τα ενεργειακά όρια των διαδιδόμενων σωματιδίων στο πρόγραμμα ήταν 10 eV – 100 GeV. Οποιοδήποτε σωματίδιο είχε ενέργεια εκτός των ορίων αυτών, απορρίπτονταν αυτόματα. Το βήμα της εξομοίωσης, δηλαδή η ακρίβεια που είχε η διάδοση των



σωματιδίων, ήταν 1  $\mu\text{m}$ . Τα άνωθεν όρια βρέθηκαν να είναι τα στενότερα που επιτρέπουν τη μέτρηση των παραγόμενων δευτερογενών σωματιδίων και της ενεργειακής απόθεσης στους ανιχνευτές χωρίς σημαντικές απώλειες. Ευρύτερα όρια θα είχαν ως συνέπεια πολύ βαρύτερες εξομοιώσεις και πρακτικά καμία αλλαγή στα αποτελέσματα της μελέτης.

#### 4.4. Αποτελέσματα των Εξομοιώσεων με Geant4

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται διάφορες μελέτες των χαρακτηριστικών των ανιχνευτών LIC και IC. Με τη χρήση του προγράμματος *Geant4*, μελετείται η Ενεργειακή Απόθεση (Energy Deposition) στο αέριο των δύο ανιχνευτών, άρα και η χωρική κατανομή της παραγωγής, μέσω ιονισμού, των ζευγών ηλεκτρονίων/ιόντων, καθώς και το προφίλ των δευτερογενών σωματιδίων που παράγονται στο εσωτερικό των δύο ανιχνευτών.

##### 4.4.1. Ενεργειακή Απόθεση

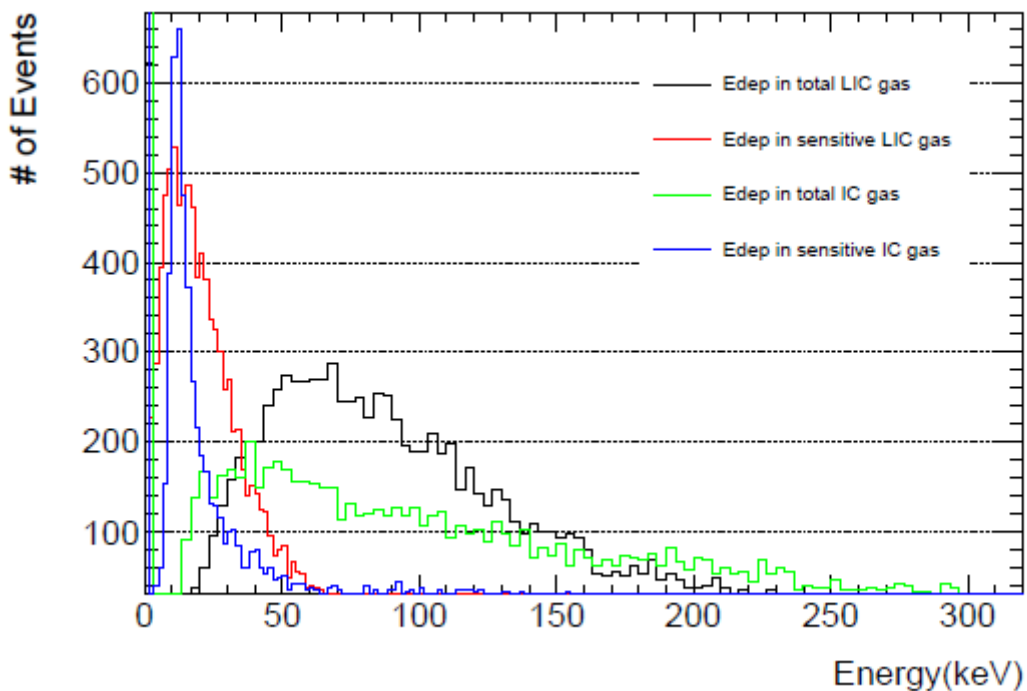
Το πρώτο πράγμα που θα μελετηθεί σ' αυτή τη σειρά από εξομοιώσεις με *Geant4* είναι η Ενεργειακή Απόθεση των εισερχόμενων σωματιδίων στο αέριο των ανιχνευτών LIC και IC. Για το σκοπό αυτόν θα χρησιμοποιηθούν οι πληροφορίες που αποθηκεύονται στη κλάση *G4Step* του εξομοιωτή *Geant4*.

Η Ενεργειακή Απόθεση των εισερχομένων σωματιδίων στο αέριο των ανιχνευτών είναι ίσως η πιο σημαντική παράμετρος προς μελέτη. Το κλάσμα αυτής της ενέργειας που προέρχεται από διεργασίες ιονισμού του αερίου (και όχι για παράδειγμα από πυρηνικές διεργασίες), δηλαδή η Ενεργειακή Απόθεση Ιονισμού (Ionization Energy Deposition), επιτρέπει τον υπολογισμό του αριθμού των παραγόμενων ζευγών ηλεκτρονίων/ιόντων που ευθύνονται για το σήμα των δύο ανιχνευτών. Με τον τρόπο αυτόν, είναι δυνατή η σύγκριση αυτής της εξομοιωτικής μελέτης με τα πειραματικά αποτελέσματα της διάταξης που αναλύθηκε παραπάνω.

Η συνολική Ενέργεια Ιονισμού που εναποτέθηκε σε κάθε ένα από τους δύο ανιχνευτές παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5. Σημειώνουμε ότι η λεγόμενη Ευαίσθητη Περιοχή (Sensitive Area) του κάθε ανιχνευτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5 είναι η περιοχή του αερίου που βρίσκεται μεταξύ των ηλεκτροδίων του. Αυτή είναι η πιο σημαντική περιοχή του όγκου του αερίου, μιας και το μεγαλύτερο μέρος του σήματος κάθε ανιχνευτή πηγάζει από αυτόν τον όγκο. Ιδανικά, μόνο η Ενεργειακή Απόθεση στην άνωθεν περιοχή θα έπρεπε

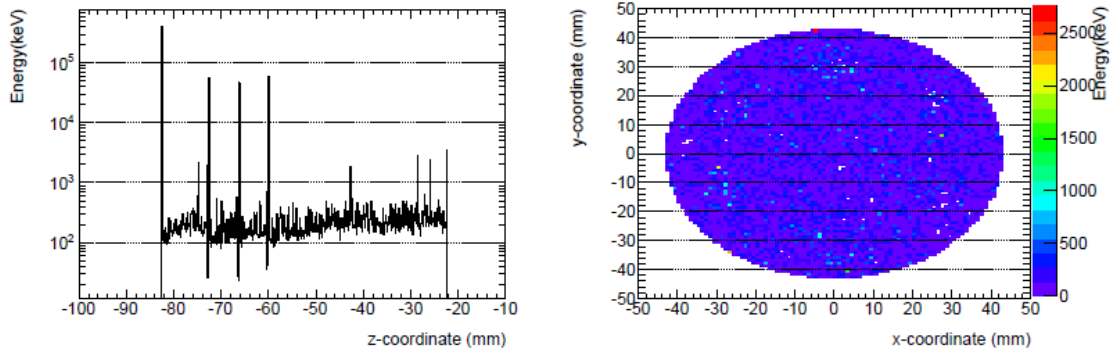
να παράγει μετρήσιμο σήμα, μιας και η περιοχή αυτή είναι (ιδανικά) η μόνη που περιέχει ένα σταθερό ηλεκτρικό πεδίο, ικανό να καθοδηγεί τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα αζώτου στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια. Όμως, η πολύπλοκη γεωμετρία των ανιχνευτών και η ύπαρξη δευτερογενών ηλεκτρικών πεδίων γύρω από τις Ηλεκτρικές Παροχές (Electrical Feedthroughs) μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη συλλογή φορτίων από περιοχές εκτός της Ευαίσθητης Ζώνης. Έτσι, στη μελέτη αυτή θα ληφθεί υπόψη η Ενεργειακή Απόθεση στο συνολικό όγκο του αερίου του κάθε ανιχνευτή. Η μελέτη της συλλογής φορτίων από κάθε περιοχή θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο, με χρήση του λογισμικού *CST Particle Studio*.

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η Ενεργειακή Απόθεση των εισερχομένων σωματιδίων, τόσο στην Ευαίσθητη Περιοχή, όσο και στο συνολικό όγκο του αερίου των ανιχνευτών LIC και IC. Το ιστόγραμμα αυτό δημιουργήθηκε από εξομοίωση της πειραματικής διάταξης με 10,000 εισερχόμενα πρωτόνια, με δέσμη γκαουσιανού σχήματος και τυπικής απόκλισης  $\sigma = 44.5$  mm. Σημειώνουμε ότι η τυπική απόκλιση της δέσμης είναι ίση με την ακτίνα του κυλίνδρου LIC. Ως συνέπεια, η τροχιά πολλών πρωτονίων παρέκαμπε πλήρως τον όγκο ενός ή και των δύο ανιχνευτών. Αυτός είναι και ο λόγος που στο Σχήμα 4.5 υπάρχει μια μεγάλη κορυφή για μηδενική Ενεργειακή Απόθεση.

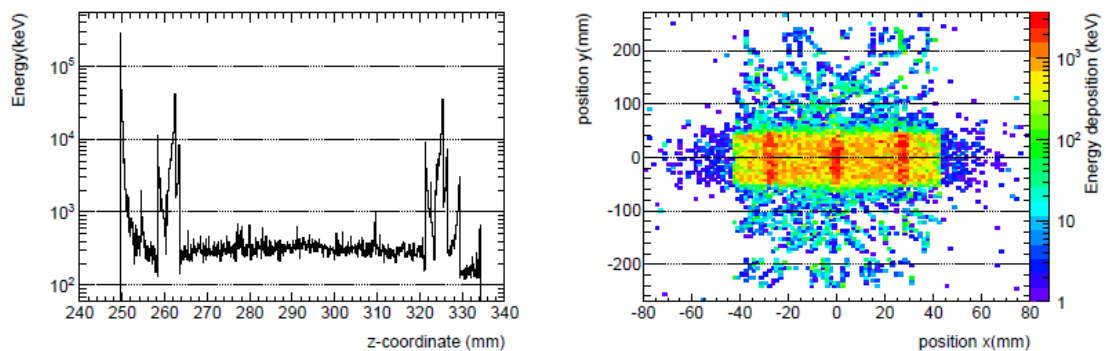


**Σχήμα 4.5:** *Ενέργεια Ιονισμού που εναποτέθηκε στους δύο ανιχνευτές*

Η χωρική κατανομή της Ενεργειακής Απόθεσης στο αέριο του LIC και του IC μελετήθηκε με μια ευρεία δέσμη πρωτονίων σταθερής πυκνότητας, έτσι ώστε το παραγόμενο προφίλ της κατανομής να μην είναι προκατειλημμένο (unbiased profile).



(α) Ενεργειακή απόθεση στον LIC συναρτήσει της διαμήκουσ συντεταγμένης (β) Ενεργειακή απόθεση στον LIC συναρτήσει της εγκάρσιας συντεταγμένης



(γ) Ενεργειακή απόθεση στον IC συναρτήσει της διαμήκουσ συντεταγμένης (δ) Ενεργειακή απόθεση στον IC συναρτήσει της εγκάρσιας συντεταγμένης

**Σχήμα 4.6:** Χωρική κατανομή της εναπόθεσης Ενέργειας Ιονισμού στους ανιχνευτές LIC και IC

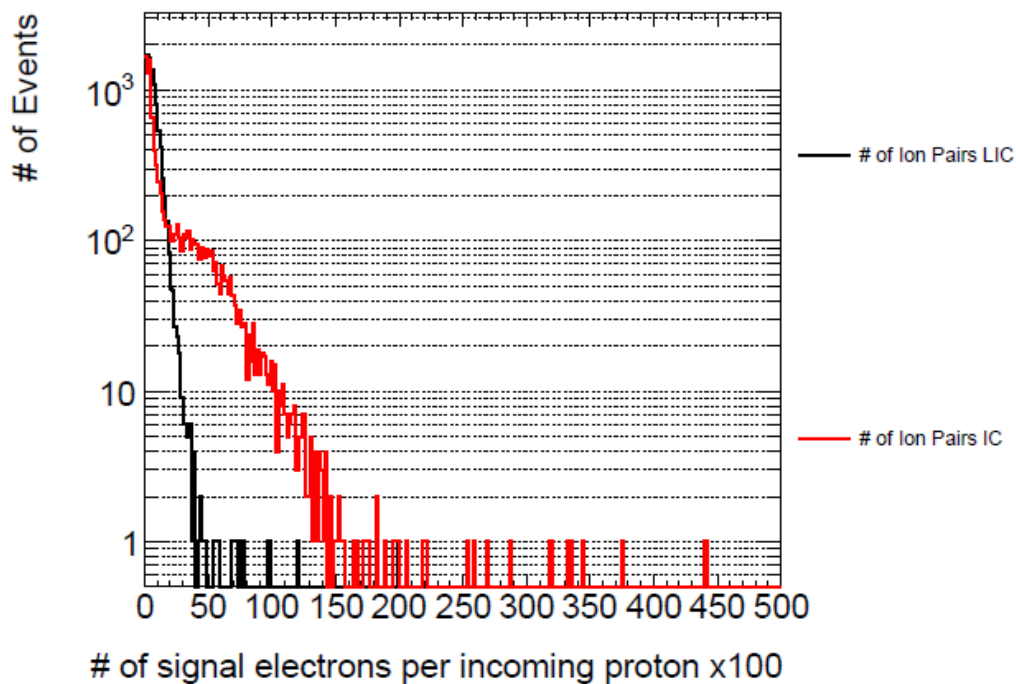
Τα Σχήματα 4.6(α) και 4.6(β) απεικονίζουν τη διαμήκη και την εγκάρσια (ως προς την κατεύθυνση διάδοσης της δέσμης) κατανομή της Ενεργειακής Απόθεσης στο εσωτερικό του όγκου του αερίου του LIC και αποκαλύπτουν ότι η ενέργεια είναι σχεδόν ισοκατανεμημένη σ' αυτόν τον όγκο. Τα μόνα σημεία του αερίου με μια σημαντικά διαφορετική Ενεργειακή Απόθεση (Σχήμα 4.6(α)) είναι αυτά που βρίσκονται ακριβώς μετά από το τέλος κάποιου μεταλλικού στοιχείου, δηλαδή: Μετά από τη πλάκα από ανοξείδωτο

ατσάλι στα -80 mm και μετά τα τρία ηλεκτρόδια από αλουμίνιο στα -75,-67 and -60 mm. Ο λόγος γι' αυτές τις ξαφνικές αυξήσεις Ενεργειακής Απόθεσης είναι ότι στο εσωτερικό των μεταλλικών στοιχείων τα πρωτόνια αλληλεπιδρούν πυρηνικά ή ηλεκτρομαγνητικά με μεγάλο πλήθος σωματιδίων, με αποτέλεσμα να παράγουν μια βροχή από δευτερογενή σωματίδια (particle shower). Έτσι, μετά από το τέλος κάθε ενός από τα παραπάνω στοιχεία, το αέριο του ανιχνευτή ιονίζεται από ένα μεγαλύτερο πλήθος σωματιδίων και έτσι η Ενεργειακή Απόθεση (ιονισμού) αυξάνει απότομα.

Στο Σχήμα 4.6(γ), παρουσιάζεται η διαμήκη κατανομή της Ενεργειακής Απόθεσης στο εσωτερικό του ανιχνευτή IC. Για άλλη μια φορά, παρατηρούνται απότομες αυξήσεις της Ενεργειακής Απόθεσης Ιονισμού μετά από το τέλος καθενός από τα μεταλλικά στοιχεία του ανιχνευτή. Στα 250 mm, τα πρωτόνια διασχίζουν τον όγκο του εξωτερικού ατσάλινου περιβλήματος του ανιχνευτή και στα 260 και 320 mm διασχίζουν τις μεταλλικές δοκούς και τις ηλεκτρικές παροχές, όπου και παράγουν πάλι μέγα πλήθος δευτερογενών σωματιδίων.

Από την εγκάρσια κατανομή της Ενεργειακής Απόθεσης στον IC (Σχήμα 4.6(δ)), είναι εμφανές ότι το μεγαλύτερο μέρος της Ενεργειακής Απόθεσης στο αέριο του ανιχνευτή είναι στη περιοχή που στοχεύει η ευρεία δέσμη πρωτονίων, η οποία έχει ακτίνα 44.5 mm και στις δύο εγκάρσιες κατευθύνσεις. Επιπλέον, πρακτικά όλη η Ενεργειακή Απόθεση λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό του αερίου κυλίνδρου του IC, ο οποίος έχει μήκος 410 mm, δηλαδή εκτείνεται από τα -205 ως τα 205 mm στην κατεύθυνση  $\pm y$  του Σχήματος 4.6(δ).

Έχοντας μελετήσει τη χωρική κατανομή της Ενεργειακής Απόθεσης, στη συνέχεια θα μελετηθεί ο αριθμός των ζευγών ιονισμού που παράγει κάθε εισερχόμενο πρωτόνιο στον όγκο κάθε ενός από τους δύο ανιχνευτές.



**Σχήμα 4.7:** Αριθμός ζευγών ιονισμού που παράγονται στο αέριο του LIC και του IC

Το Σχήμα 4.7 απεικονίζει τον αριθμό των ζευγών ιονισμού που παρήχθησαν ανά πρωτόνιο στο συνολικό όγκο των αερίων των LIC και IC. Ο υπολογισμός του αριθμού των ζευγών αυτών, έγινε διαιρώντας τη συνολική Ενεργειακή Απόθεση Ιονισμού κάθε πρωτονίου με την ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία (μέσω ιονισμού) ενός ηλεκτρονίου και ενός ιόντος  $N_2^+$  στο αέριο αζώτου. Αυτή η ενέργεια, η ονομαζόμενη και Τιμή  $W$  ( $W$  factor) του αερίου, υπολογίζεται από το πρόγραμμα *Geant4* να είναι **35.1 eV**. Ο συνολικός αριθμός ζευγών ιονισμού που παράγει κάθε πρωτόνιο στο εσωτερικό του ανιχνευτή IC, είναι **3.5487** φορές μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο αριθμό στο εσωτερικό του LIC. Αυτό, όμως, δεν συνεπάγεται ότι ο IC είναι 3.5 φορές πιο ευαίσθητος από τον LIC, μιας και οι δύο ανιχνευτές έχουν μεγάλες διαφορές στη γεωμετρία, με αποτέλεσμα ο κάθε ανιχνευτής να συλλέγει διαφορετικά ποσοστά αυτού του παραγόμενου φορτίου.

Τα ειδικά χαρακτηριστικά των σχετικών εξομοιώσεων αυτής της ενότητας συλλέχτηκαν στον Πίνακα 4.1.

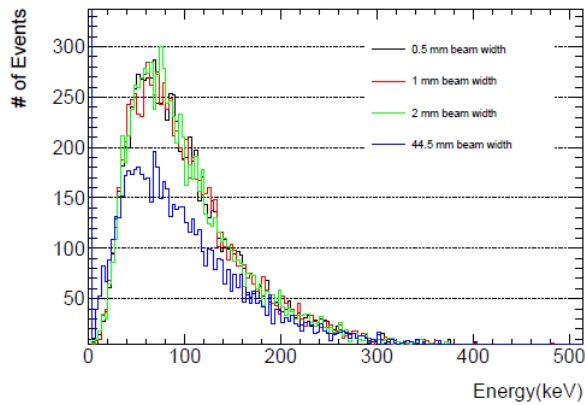
<b><u>Ευρεία Δέσμη 1</u></b>	<b>Αριθμός Πρωτονίων:</b>	10,000
	<b>Εύρος Δέσμης:</b>	44.5 mm
	<b>Τύπος Δέσμης:</b>	γκαουσιανή
<b><u>Ευρεία Δέσμη 2</u></b>	<b>Αριθμός Πρωτονίων:</b>	10,000
	<b>Εύρος Δέσμης:</b>	44.5 mm
	<b>Τύπος Δέσμης:</b>	σταθερή

**Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά των εξομοιώσεων που αφορούν την Ενεργειακή Απόθεση στο αέριο των δύο ανιχνευτών**

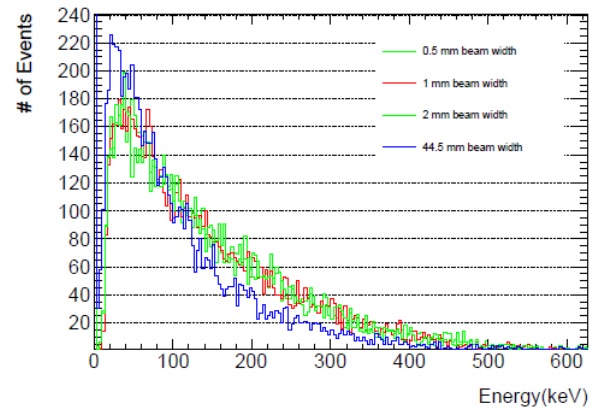
#### **4.4.2. Ενεργειακή Απόθεση για διάφορα εύρη δέσμης**

Στη πειραματική διαδικασία που εξομοιώνεται σ' αυτό το κεφάλαιο, το εύρος της δέσμης πρωτονίων, όπως μετρήθηκε στο κύκλοτρο του επιταχυντή PSB ήταν της τάξης του 1 mm. Στην Γραμμή Απόρριψης (dump line), δεν ελήφθησαν μετρήσεις του εύρους της δέσμης, αλλά θεωρητικοί υπολογισμοί υποδεικνύουν ότι το εύρος εκεί ήταν της τάξης των 2-3 mm. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από εξομοιώσεις για να μελετηθεί τυχόν μεταβολή της Ενεργειακής Απόθεσης ανά πρωτόνιο όταν το εύρος της δέσμης μεταβάλλεται από 1 ως 3 mm.

Τα άνωθεν εύρη είναι χρήσιμα για τη σύγκριση με το πείραμα βαθμονόμησης (calibration), αλλά μια δέσμη με εύρος ίσο με τη διάμετρο του ανιχνευτή είναι πιο ρεαλιστική, αφού στην πραγματικότητα κάθε σημείο του ανιχνευτή έχει την ίδια πιθανότητα να αλληλεπιδράσει με ένα πρωτόνιο. Τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων με εύρη κοντά στην πειραματική τιμή (1-3 mm διάμετρος) και με συνολική επισκόπηση του ανιχνευτή (44.5 mm ακτίνα) παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.8(α) και 4.8(β).



(α) Ολική κατανομή Ενέργειας ανά πρωτόνιο στον LIC



(β) Ολική κατανομή Ενέργειας ανά πρωτόνιο στον IC

**Σχήμα 4.8:** Ιστογράμματα την Ενεργειακής Απόθεσης στο αέριο του LIC και του IC για διάφορα εύρη (ακτίνα) δέσμης

Οι Πίνακες 4.2 και 4.3 περιέχουν τα στατιστικά μέτρα (μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις) των Σχημάτων 4.7(α) και 4.7(β).

Εύρος Δέσμης (ακτίνα)	Συνολική Ενεργειακή Απόθεση (keV)	Ενεργειακή Απόθεση στην Ευαίσθητη Περιοχή (keV)
0.5 mm	$102.14 \pm 78.8744$	$22.4058 \pm 20.9717$
1 mm	$102.647 \pm 83.125$	$22.3679 \pm 20.1748$
2 mm	$102.931 \pm 93.1982$	$22.9833 \pm 45.9526$
44.5 mm	$77.1922 \pm 43.6464$	$17.2069 \pm 9.07599$

**Πίνακας 4.2:** Στατιστικά στοιχεία της Ενεργειακής Απόθεσης στον ανιχνευτή LIC για διάφορα εύρη δέσμης πρωτονίων.

Εύρος Δέσμης (ακτίνα)	Συνολική Ενεργειακή Απόθεση (keV)	Ενεργειακή Απόθεση στην Ευαίσθητη Περιοχή (keV)
0.5 mm	126.961 ± 174.677	68.3775 ± 111.643
1 mm	123.316 ± 127.493	66.5997 ± 97.3578
2 mm	124.693 ± 146.85	68.412 ± 125.145
44.5 mm	84.1171 ± 111.917	32.2152 ± 71.4973

**Πίνακας 4.3:** Στατιστικά στοιχεία της Ενεργειακής Απόθεσης στον ανιχνευτή IC για διάφορα εύρη δέσμης πρωτονίων.

Για δέσμες με διάμετρο μέχρι και 4 mm (ακτίνα 2 mm), η ενεργειακή απόδοση των δύο ανιχνευτών είναι αναλλοίωτη εντός στατιστικών σφαλμάτων. Ο λόγος που η τυπική απόκλιση είναι τόσο μεγάλη, στην ίδια τάξη μεγέθους με τη μέση τιμή της Ενεργειακής Απόθεσης, είναι γιατί οι αδρονιακές αλληλεπιδράσεις μπορούν να δημιουργήσουν κάποια σπάνια αλλά πολύ ενεργητικά γεγονότα. Ως αποτέλεσμα, η κατανομή της Ενεργειακής Απόθεσης δεν ακολουθεί την κανονική κατανομή, αλλά την κατανομή *Landau* [13]. Αυτή έχει μια μεγάλη ασύμμετρη ουρά για υψηλές ενέργειες, που συνεπάγεται μια υψηλή τιμή τυπικής απόκλισης.

Η Ενεργειακή Απόθεση και στους δύο ανιχνευτές είναι σημαντικά μικρότερη για μια δέσμη πρωτονίων ακτίνας 44.5 mm. Αυτό συμβαίνει, διότι η δέσμη είχε εύρος ίσο με τη διάμετρο του ανιχνευτή LIC κι έτσι ένας μεγάλος αριθμός πρωτονίων της δέσμης παρέκαμπε έναν ή και τους δύο ανιχνευτές και δεν συνέβαλλε στην Ενεργειακή Απόθεση.

Τα ειδικά χαρακτηριστικά των εξομοιώσεων αυτής της ενότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4:

<b><u>0.5 mm Εύρος Δέσμης</u></b>	<b>Αριθμός Πρωτονίων:</b>	10,000
	<b>Εύρος Δέσμης:</b>	0.5 mm
	<b>Τύπος Δέσμης:</b>	γκουαουσιανή
<b><u>1 mm Εύρος Δέσμης</u></b>	<b>Αριθμός Πρωτονίων:</b>	10,000
	<b>Εύρος Δέσμης:</b>	1 mm
	<b>Τύπος Δέσμης:</b>	γκουαουσιανή

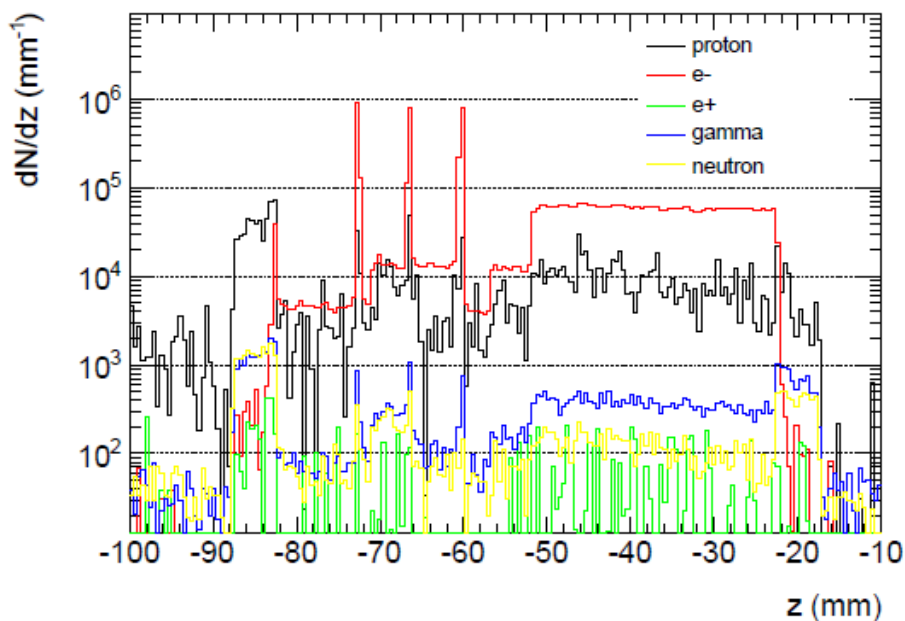


<b><u>2 mm Εύρος Δέσμης</u></b>	<b>Αριθμός Πρωτονίων:</b>	10,000
	<b>Εύρος Δέσμης:</b>	2 mm
	<b>Τύπος Δέσμης:</b>	γκαουσιανή
<b><u>44.5 mm Εύρος Δέσμης</u></b>	<b>Αριθμός Πρωτονίων:</b>	10,000
	<b>Εύρος Δέσμης:</b>	44.5 mm
	<b>Τύπος Δέσμης:</b>	γκαουσιανή

**Πίνακας 4.4:** Χαρακτηριστικά των εξομοιώσεων που αφορούν την Ενεργειακή Απόθεση με διάφορα εύρη δέσμης.

#### 4.4.3. Προφίλ Δευτερογενών Σωματιδίων

Η σύνθεση της «βροχής» (shower) των δευτερογενών σωματιδίων που παράγονται από τα πρωτόνια όταν περνούν μέσα από τους δύο Ανιχνευτές Ιονισμού μελετείται σ' αυτή την ενότητα. Η εξάρτηση από τη z-συντεταγμένη (διαμήκης συνιστώσα) των διαφόρων τύπων δευτερογενών σωματιδίων που παράγονται στους κυλίνδρους των ανιχνευτών LIC και IC παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.9 και 4.10 αντιστοίχως. Σημειώνεται ότι στα άνωθεν Σχήματα παρουσιάζονται μόνο τύποι σωματιδίων με σημαντική στατιστική παρουσία.

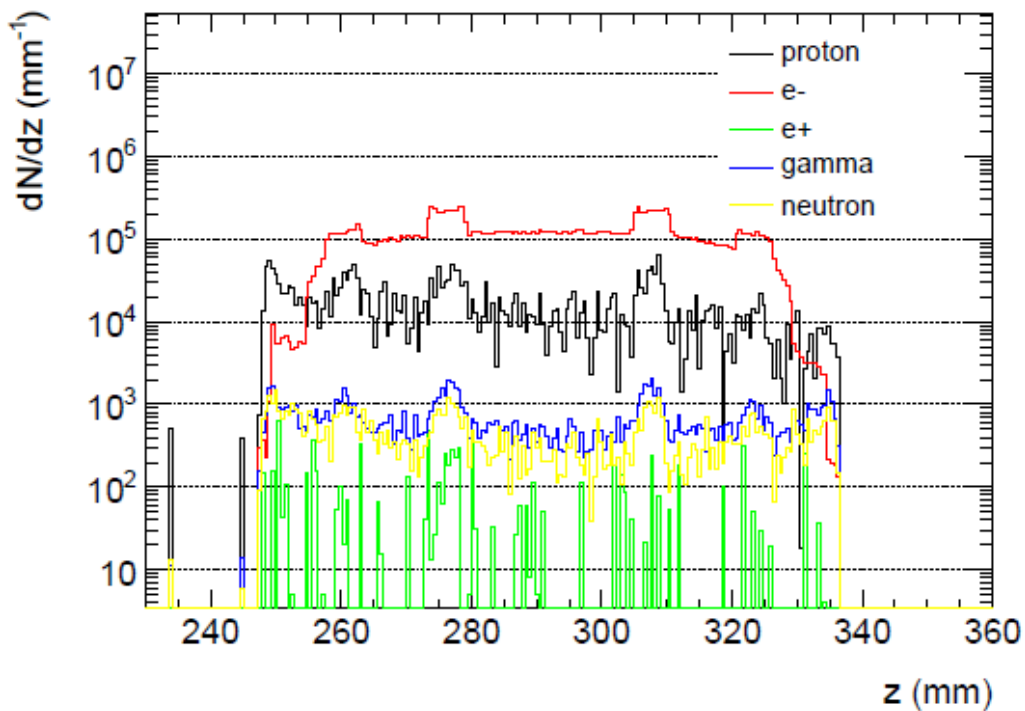


**Σχήμα 4.9:** Η διαμήκης (z) κατανομή της παραγωγής διαφόρων ειδών δευτερογενών σωματιδίων στο αέριο του LIC.

Στο Σχήμα 4.9, αναγνωρίζεται η εσωτερική δομή του κυλίνδρου LIC:

Ξεκινώντας από το -90 mm και προχωρώντας προς τα θετικά z, καταρχήν τα πρωτόνια διαπερνούν την εξωτερική ατσάλινη πλάκα, παράγοντας μια βροχή από αδρονιακά δευτερογενή σωματίδια (νετρόνια,  $e^+$ , πρωτόνια), αλλά μόνον λίγα ηλεκτρόνια ιονισμού (ηλεκτρόνια δέλτα). Έπειτα, υπάρχουν περίπου 10 mm αερίου, όπου οι διαδικασίες ιονισμού είναι κυρίαρχες. Στη συνέχεια βρίσκονται τα τρία αλουμινένια (Al) ηλεκτρόδια του ανιχνευτή, με αέριο άζωτο ανάμεσά τους. Το προφίλ των δευτερογενών σωματιδίων στο Αλουμίνιο είναι πολύ διαφορετικό από αυτό του ατσαλιού και αποτελείται κυρίως από ηλεκτρόνια ιονισμού (δέλτα). Μετά από τα τρία ηλεκτρόδια (από -60 μέχρι -20 mm), υπάρχει αέριο, αλλά επίσης οι μεταλλικές παροχές (Feedthroughs) και οι δοκοί στήριξης, ως αποτέλεσμα τα δευτερογενή σωματίδια έχουν ένα μικτό προφίλ σ' αυτή την περιοχή. Τέλος, στα -20 mm βρίσκεται η δεύτερη εξωτερική ατσάλινη πλάκα και το προφίλ των δευτερογενών σωματιδίων μοιάζει πάρα πολύ με αυτό της πρώτης πλάκας.

Το προφίλ των δευτερογενών σωματιδίων που παράγονται στον κύλινδρο του ανιχνευτή IC παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10. Υπενθυμίζεται ότι ο ανιχνευτής IC είναι τοποθετημένος εγκάρσια στην τροχιά των πρωτονίων, τόσο στη πειραματική διάταξη, όσο και στην εξομοιωτική μελέτη που παρουσιάζεται.



**Σχήμα 4.10:** Η διαμήκης (z) κατανομή της παραγωγής διαφόρων ειδών δευτερογενών σωματιδίων στο αέριο του IC.

Στο Σχήμα 4.10, η γεωμετρία του ανιχνευτή IC μπορεί να ταυτοποιηθεί:

Από τα 250 ως τα 340 mm, τα πρωτόνια διασχίζουν κάθετα τον κύλινδρο του IC. Στην περιοχή αυτή υπάρχουν δύο είδη μεταλλικών μερών: Το ατσάλινο περίβλημα και παροχές και τα αλουμινένια ηλεκτρόδια και δοκοί στήριξης. Κάθε υλικό έχει το δικό της προφίλ δευτερογενών σωματιδίων. Στα 250 και στα 330 mm, τα πρωτόνια διασχίζουν το ατσάλινο περίβλημα του IC και παράγουν πολλά νετρόνια, ποζιτρόνια και ακτίνες  $\gamma$ , αλλά μόνο λίγα ηλεκτρόνια δέλτα. Μεταξύ των δύο αυτών σημείων ο αριθμός των ηλεκτρονίων ιονισμού αυξάνει, αφού στον όγκο αυτόν υπάρχει κυρίως αέριο άζωτο και τα αλουμινένια ηλεκτρόδια. Οι τέσσερις κορυφές στο διάγραμμα αντιστοιχούν στις δοκούς και στις τροφοδοσίες (υπάρχουν δύο παροχές και τέσσερις δοκοί, αλλά οι δύο δοκοί είναι τοποθετημένες παράλληλα με τις άλλες δύο, έτσι δεν αναγνωρίζονται απ' αυτή τη γωνία).

Τα δεδομένα αυτής την ενότητας ελήφθησαν από μια εξομοίωση με 50,000 πρωτόνια. Το εύρος της δέσμης ήταν 44.5 mm και η δέσμη είχε σταθερή πυκνότητα πρωτονίων, ώστε το παρουσιαζόμενο προφίλ να μην είναι προκατειλημμένο (unbiased profile).

## 5. Εξομοίωση του Μικρού Ανιχνευτή Ιονισμού με CST Particle Studio

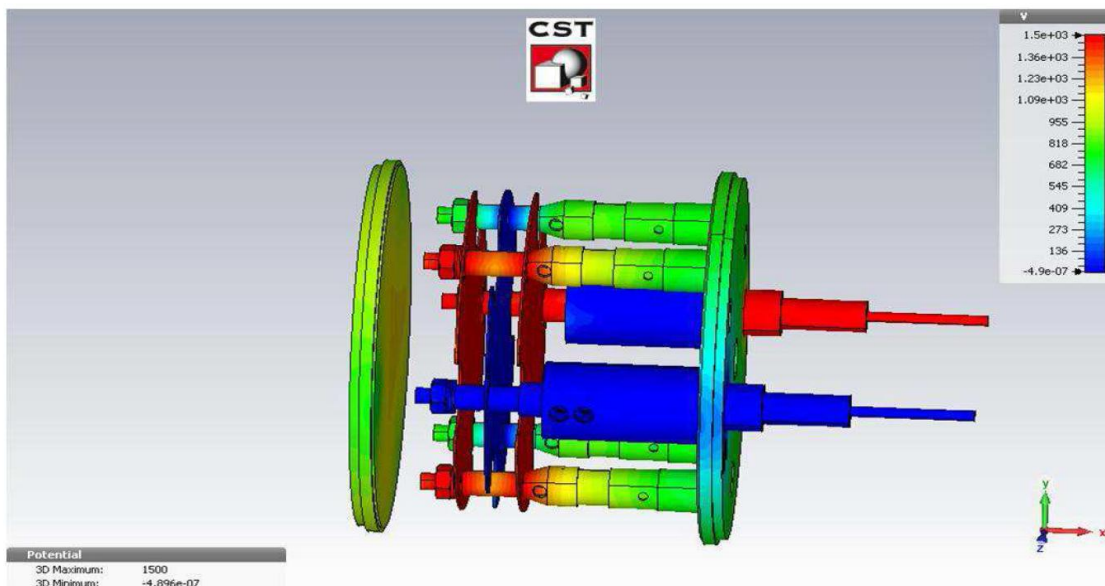
Αν και το εξομοιωτικό πακέτο *Geant4* επιτρέπει τη μελέτη της Ενεργειακής Απόθεσης στο εσωτερικό του ανιχνευτή, δεν είναι σε θέση να ακολουθήσει τις τροχιές των ηλεκτρονίων και των ιόντων αζώτου προς τα ηλεκτρόδια του ανιχνευτή. Ιδανικά, μόνο φορτία που παράγονται στο εσωτερικό της Ευαίσθητης Ζώνης του LIC (δηλαδή στο αέριο που βρίσκεται μεταξύ των τριών ηλεκτροδίων του ανιχνευτή) θα έπρεπε να συλλέγεται ως σήμα. Όμως, φαινόμενα Οριακού Πεδίου (field edge effects) που πηγάζουν από τη περίπλοκη γεωμετρία του LIC μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα τη συλλογή φορτίων που παράγονται εκτός της αναμενόμενης ζώνης. Κάθε ιόν που συλλέγεται από τη Παροχή Σήματος (Signal Feedthrough) και κάθε ηλεκτρόνιο που φθάνει στη Παροχή Υψηλής Τάσης (High Voltage Feedthrough) προσμετρείται επίσης στο συνολικό συλλεγόμενο φορτίου του ανιχνευτή. Αφ' στιγμής που οι παροχές αυτές βρίσκονται στην ίδια τάση με τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια, παράγουν γύρω τους ένα ηλεκτρικό πεδίο ικανό να οδηγήσει τα σωματίδια προς αυτές, αντί προς τα ηλεκτρόδια. Το γεγονός ότι οι ηλεκτρικές παροχές εκτείνονται σε όλο σχεδόν το πλάτος του όγκου του αερίου του ανιχνευτή, καθιστά δυνατή τη συλλογή φορτίου από περιοχές εκτός της Ευαίσθητης Ζώνης.

Σ' αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται η μελέτη της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου μέσα σ' ολόκληρο τον όγκο του αερίου του ανιχνευτή LIC, καθώς και της διάδοσης των σωματιδίων ιονισμού προς τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια και τις ηλεκτρικές παροχές. Επιπλέον, μελετάται η τυχών αλλαγή της συμπεριφοράς του LIC, όταν αυτός βρίσκεται υπό την επίδραση ενός εξωτερικού εγκάρσιου μαγνητικού πεδίου σταθερής έντασης. Για τη μελέτη όλων των παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα *CST Particle Studio* [14].

## 5.1. Γεωμετρία του LIC και εξομοίωση του Ηλεκτρικού του Πεδίου

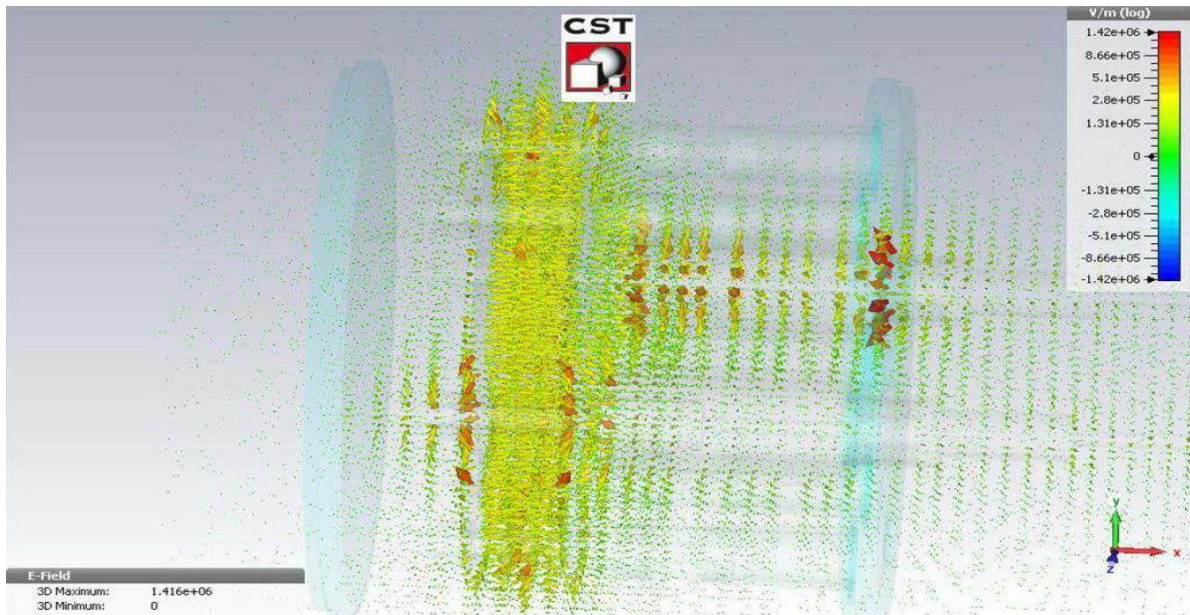
Το πρόγραμμα *CST Studio* επιτρέπει την απευθείας εισαγωγή ολόκληρης της γεωμετρίας του ανιχνευτή LIC, χρησιμοποιώντας ως είσοδο τα 3D-CAD αρχεία των τεχνικών προδιαγραφών του ανιχνευτή.

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της γεωμετρίας του πραγματικού ανιχνευτή LIC, το οποίο δεν καλύπτεται από τις τεχνικές προδιαγραφές, είναι το ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει μεταξύ των τριών ηλεκτροδίων του ανιχνευτή και που στοχεύει στη συλλογή των ηλεκτρονίων και των ιόντων  $N_2^+$  που παράγονται μέσω ιονισμού από τα εισερχόμενα σωματίδια στο αέριο του LIC. Το πεδίο αυτό παράγεται από τη διαφορά δυναμικού των δύο Ηλεκτροδίων Υψηλής Τάσης (1500 Volts) και του – γειωμένου – Ηλεκτροδίου Σήματος. Με αυτές τις οριακές συνθήκες και λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του LIC (βλ. Σχήμα 5.1), το πρόγραμμα *CST Studio* υπολογίζει και προμηθεύει τον τρισδιάστατο χάρτη του ηλεκτρικού πεδίου σ' ολόκληρο τον όγκο του αερίου του ανιχνευτή. Η ένταση και το σχήμα του πεδίου αυτού μπορεί να αναγνωριστεί από τα Σχήματα 5.2, 5.3 και 5.4.

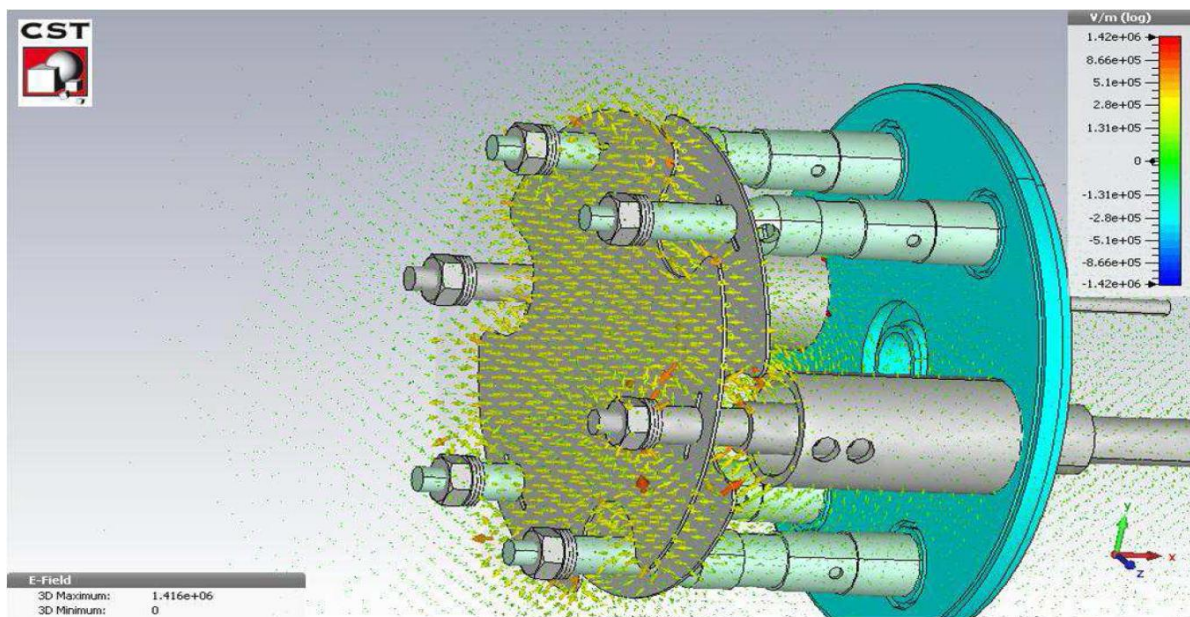


**Σχήμα 5.1:** Τα επίπεδα του δυναμικού στο εσωτερικό του αερίου κυλίνδρου του LIC.

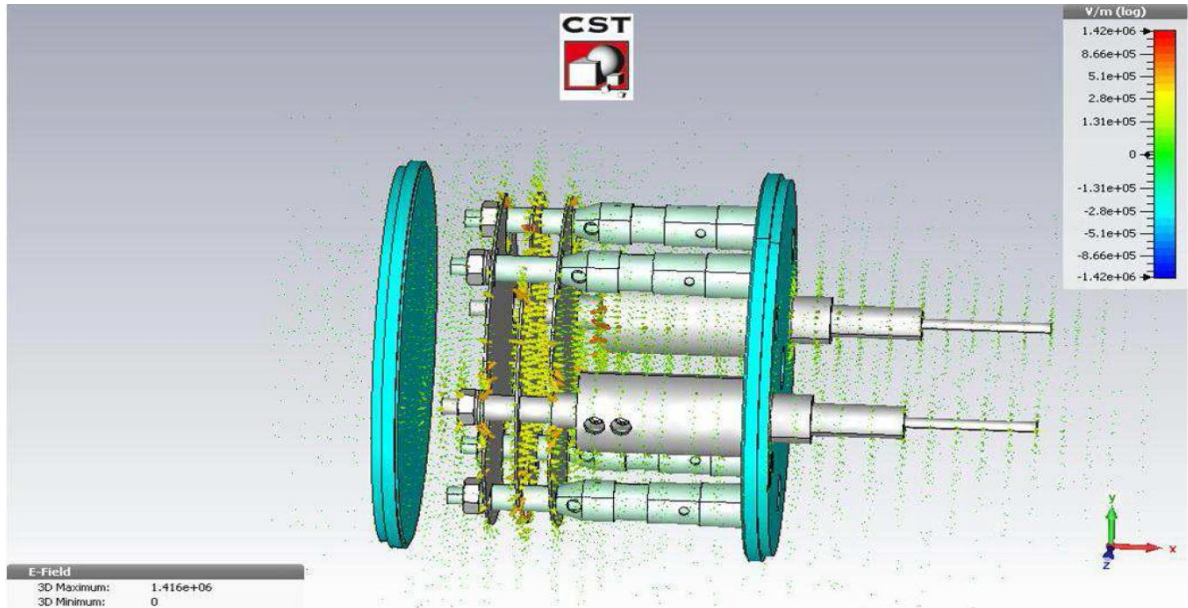




**Σχήμα 5.2:** 3D απεικόνιση του ηλεκτρικού πεδίου του LIC.



**Σχήμα 5.3:** 3D απεικόνιση του ηλεκτρικού πεδίου του LIC.



**Σχήμα 5.4:** 3D απεικόνιση του ηλεκτρικού πεδίου του LIC.

Τα Σχήματα 5.2-5.4 αποκαλύπτουν ότι το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των ηλεκτροδίων του LIC είναι πρακτικά σταθερό και ότι η έντασή του είναι περίπου  $(2.4-2.6) \cdot 10^5$  V/m, που ταυτίζεται με τη θεωρητικά αναμενόμενη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται από δύο ηλεκτρόδια με διαφορά δυναμικού 1.5 kV, τα οποία χωρίζονται από 5.25 mm αέρα. Επιπλέον, στο Σχήμα 5.3 είναι εμφανές το φαινόμενο Οριακού Πεδίου (edge field effect), αφού φαίνεται η ύπαρξη ηλεκτρικών γραμμών έξω από την Ευαίσθητη Ζώνη του ανιχνευτή, οι οποίες κατευθύνονται προς τη Παροχή Σήματος (Signal Feedthrough). Αυτό το φαινόμενο είναι καίριο για τη μελέτη της Συλλογής Φορτίου από τον ανιχνευτή.

Για να είναι το σήμα του LIC μη μηδενικό, πρέπει να συλληχθεί τόσο το ηλεκτρόνιο ιονισμού και το αντίστοιχό του ιόν  $N_2^+$ . Μόνο τότε παράγεται ρεύμα μεταξύ του (γειωμένου) Ηλεκτροδίου Σήματος και των δύο Ηλεκτροδίων Υψηλής Τάσης του ανιχνευτή LIC. Ρεύμα δημιουργείται επίσης μεταξύ του ασάλινου περιβλήματος και των Ηλεκτροδίων Υψηλής Τάσης, αλλά αυτό δεν διαρρέει το ηλεκτρονικό κύκλωμα του ανιχνευτή και δεν μετρείται στο σήμα. Έτσι, για να υπολογιστεί το σήμα του LIC πρέπει να βρεθεί η πιθανότητα ενός ιόντος να φτάσει στο Ηλεκτρόδιο ή στην Παροχή Σήματος ( $P_{ion}$ ) καθώς και η πιθανότητα ενός ηλεκτρονίου να συλληχθεί από το Ηλεκτρόδιο ή την Παροχή Υψηλής Τάσης ( $P_e$ ). Το γινόμενο των δύο αυτών πιθανοτήτων, δίνει την ολική πιθανότητα ενός ζεύγους ιονισμού να συλληχθεί ως σήμα. Δηλαδή:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{ion}} \cdot P_e \quad (\text{Σχέση 5.1})$$

Στη Σχέση 5.1 έγινε η λογική υπόθεση ότι οι πιθανότητες  $P_{\text{ion}}$  και  $P_e$  είναι ανεξάρτητες.

Η παραπάνω πιθανότητες εξαρτούνται, φυσικά, από τον τόπο παραγωγής του ζεύγους ηλεκτρονίου-ιόντος στο εσωτερικό του αερίου του ανιχνευτή LIC. Ως εκ τούτου, η Σχέση 5.1 πρέπει να ξαναγραφεί ως:

$$P_{\text{total}}(x,y,z) = P_{\text{ion}}(x,y,z) \cdot P_e(x,y,z) \quad (\text{Σχέση 5.2})$$

Έχοντας υπολογίσει την ολική πιθανότητα συλλογής του ζεύγους σε κάθε σημείο του αερίου, το σήμα του ανιχνευτή μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας αυτή τη πιθανότητα με τον αριθμό των ζευγών ιονισμού που έχουν δημιουργηθεί σε κάθε σημείο του αερίου:

$$dS(x,y,z) = N(x,y,z) \cdot P_{\text{total}}(x,y,z) \quad (\text{Σχέση 5.3})$$

και

$$S = \iiint N(x,y,z) \cdot P_{\text{total}}(x,y,z) dV$$

(Σχέση 5.4)

Όπου  $S$ , ο αριθμός του συνολικά συλλεγομένου φορτίου από τον ανιχνευτή ανά εισερχόμενο πρωτόνιο.

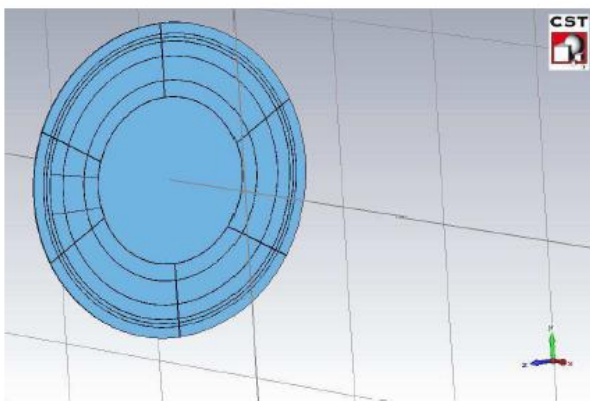
ΣΓια τον εξομοιωτικό υπολογισμό του παραπάνω ολοκληρώματος, θα δημιουργηθεί μια χωρική κατανομή της πιθανότητας συλλογής ενός ηλεκτρονίου κι ενός ιόντος σε διάφορα μέρη του αερίου του LIC, με τη χρήση του *CST Particle Studio*. Στη συνέχεια η πιθανότητα αυτή θα συσχετιστεί με τον αριθμό των ζευγών ιονισμού ανά πρωτόνιο που υπολογίστηκε με τη βοήθεια του *Geant4* (Σχήματα 4.6(α) και 4.6(β)).



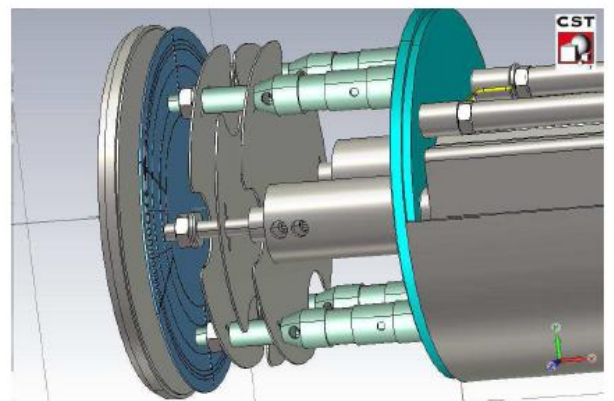
## 5.2. Χωρική Κατανομή της Συλλογής Φορτίου

Για την αντιμετώπιση του άνωθεν προβλήματος με το *CST Particle Studio*, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω μέθοδος:

Ένας κυκλικός δίσκος από αέρα εισήχθη στο εσωτερικό του αερίου του LIC, με εξωτερική ακτίνα να συμπίπτει με την εσωτερική του κυλίνδρου του LIC (42.5 mm). Εφ' όσον ο δίσκος αυτός ήταν από αέρα, δεν άλλαζε σε τίποτα τη γεωμετρία ή τα πεδία του ανιχνευτή, ήταν δηλαδή μια φανταστική επιφάνεια. Η επιφάνεια του δίσκου αυτού χωρίστηκε σε μικρότερους τομείς, καθένας εκ των οποίων αφορούσε κάποιο τμήμα του ανιχνευτή με ιδιαίτερη σημασία. Σε κάθε τέτοιον τομέα το *CST Studio* παρήγαγε έναν αριθμό από ηλεκτρόνια και ιόντα σταθερής πυκνότητας (Σχήμα 5.5(α)). Το πρόγραμμα *CST Particle Studio* ήταν σε θέση στη συνέχεια να εξομοιώνει τις τροχιές των σωματιδίων αυτών μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο του ανιχνευτή και να μετράει τον αριθμό αυτών των σωματιδίων που φθάνουν σε κάποια επιφάνεια ενδιαφέροντος, πχ στην επιφάνεια κάποιου ηλεκτροδίου (Σχήμα 5.6). Έτσι, το ποσοστό των ηλεκτρονίων και ιόντων που συλλέγονται ως σήμα από κάθε σημείο της επιφάνειας αυτής υπολογίζεται. Μετακινώντας το δίσκο αυτόν παράλληλα προς τον άξονα συμμετρίας του ανιχνευτή LIC (Σχήμα 5.5(β)), η χωρική κατανομή της πιθανότητας συλλογής ενός ηλεκτρονίου και ενός ιόντος μπορεί να δημιουργηθεί.

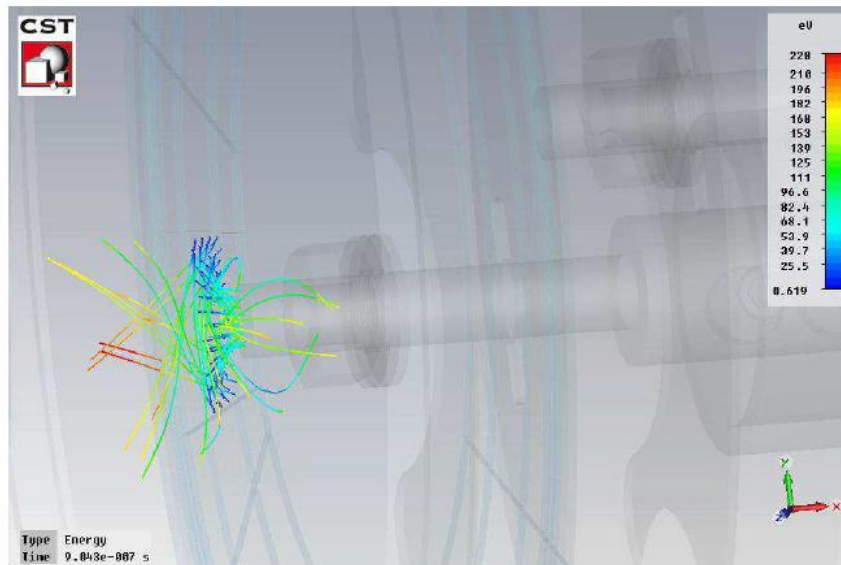


(α) Εικόνα του αερίου δίσκου



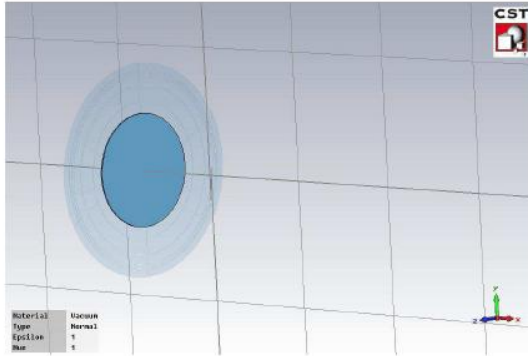
(β) Τοποθέτηση του αερίου δίσκου στο εσωτερικό του LIC

**Σχήμα 5.5:** Ο αέριος δίσκος που εισήχθη για τη μελέτη της διάδοσης των ιόντων και των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του αερίου του LIC.

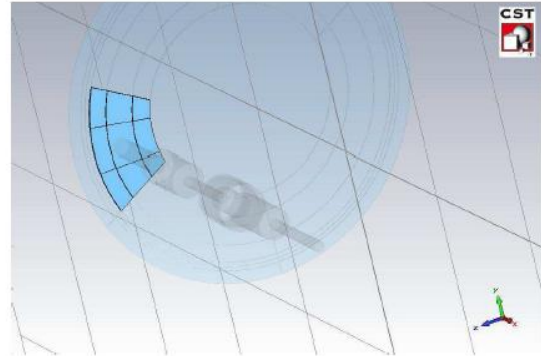


***Σχήμα 5.6: Οπτικοποίηση της τροχιάς μερικών ιόντων. Ένα μέρος αυτών φθάνουν στη Παροχή Σήματος και ένα άλλο μέρος τους συγκρούονται με την εξωτερική ατσάλινη πλάκα του LIC.***

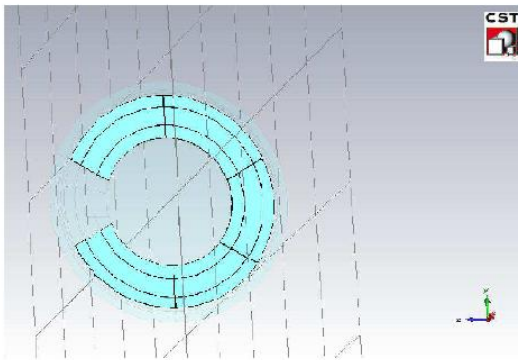
Κάθε επιφάνεια του προαναφερθέντος δίσκου έχει τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να μελετά μια περιοχή ενδιαφέροντος. Οι διαφορετικές επιφάνειες εμφανίζονται στα Σχήματα 5.7(α)-5.7(δ). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διαφόρων επιφανειών είναι μαζεμένα στον Πίνακα 5.1.



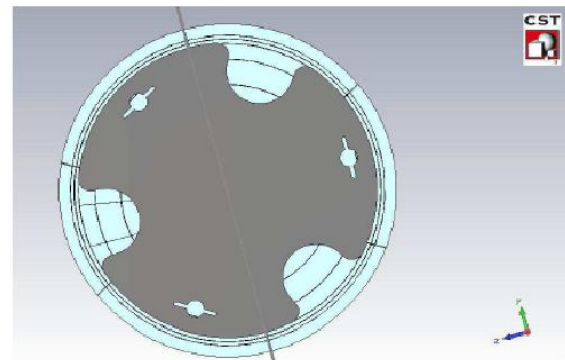
**(α)** Η κεντρική περιοχή (ακτίνα 0-23 mm) του αέριου δίσκου



**(β)** Η περιοχή του αέριου δίσκου που βρίσκεται γύρω από τη Παροχή Σήματος



**(γ)** Άποψη της επιφάνειας του αέριου δίσκου που μελετά τη περιοχή της Παροχής YT των τεσσάρων Δοκών στήριξης



**(δ)** Η εξωτερική επιφάνεια του αέριου δίσκου, μεταξύ των ηλεκτροδίων και του εξωτερικού περιβλήματος του LIC

**Σχήμα 5.7:** Οι διάφορες επιφάνειες παραγωγής σωματιδίων ιονισμού που ορίστηκαν για τη μελέτη της διάδοσής τους στο εσωτερικό του LIC.

Το κεντρικό κομμάτι του αέριου κυλίνδρου εξετάζεται μέσω της κεντρικής επιφάνειας του αέριου δίσκου, εξωτερικής ακτίνας 23 mm. Αυτή η επιφάνεια αναπαριστά τρόπον τινά ένα ιδανικό Θάλαμο Ιονισμού, με ένα τέλειο ηλεκτρικό πεδίο κάθετο προς τα ηλεκτρόδια και σταθερό παντού (Σχήμα 5.7(α)).

Η επόμενη επιφάνεια είναι τοποθετημένη ακριβώς πάνω στη Παροχή Σήματος (Σχήμα 5.7(β)) και είναι πολύ σημαντική για τη μελέτη της συλλογής των ιόντων. Η Παροχή Σήματος είναι γειωμένη, έτσι το ηλεκτρικό πεδίο ωθεί κάποια από τα ιόντα προς τη παροχή αυτή, συμβάλλοντας κατ' αυτόν τον τρόπο στο συλλεγόμενο σήμα του ανιχνευτή LIC. Γεωμετρικά, η περιοχή αυτή είναι ένα κομμάτι του κυκλικού δίσκου, εσωτερικής ακτίνας 23 mm και εξωτερικής ακτίνας 37.5 mm, το οποίο εκτείνεται σε 60°, έχοντας ως κέντρο τη Παροχή Σήματος.

Το υπόλοιπο κομμάτι του άνωθεν κυκλικού δίσκου καλύπτεται από μια επιφάνεια 300° και μελετά την περιοχή της Παροχής Υψηλής Τάσης, καθώς και των τεσσάρων Δοκών Στήριξης (Σχήμα 5.7(γ)).

Το εξωτερικό κομμάτι του αερίου του ανιχνευτή, πιο συγκεκριμένα το κομμάτι του αερίου που βρίσκεται μετά το τέλος του κυκλικού δίσκου των ηλεκτροδίων του LIC και πριν την αρχή του ατσάλινου περιβλήματος του ανιχνευτή (Σχήμα 5.7(δ)) καλύπτεται από την τελευταία επιφάνεια του δίσκου, η οποία εκτείνεται για ακτίνες μεταξύ 37 mm και 42.5 mm.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των άνωθεν επιφανειών, συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.

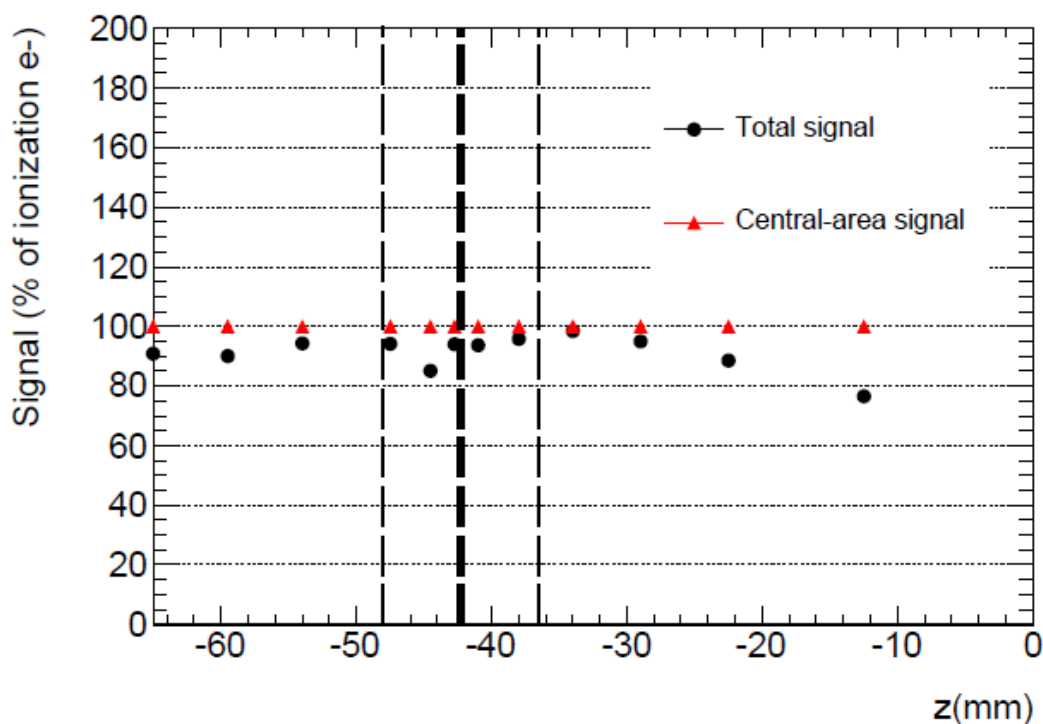
Επιφάνεια	Ακτίνες κάλυψης (mm)	Γωνίες κάλυψης
Κεντρική	0 – 23	0° – 360°
Παροχή Σήματος	23 – 37.5	150° – 210°
Παροχή ΥΤ και Δοκοί	23 – 37.5	(-150°) – 150°
Εξωτερική	37.5 – 42.5	0° – 360°

**Πίνακας 5.1:** Τα γεωμετρικά ( $r, \varphi$ ) χαρακτηριστικά κάθε επιφάνειας του δίσκου για τη μελέτη της συλλογής φορτίου

Χρησιμοποιώντας την άνωθεν μέθοδο του διαχωρισμού των επιφανειών και της μετακίνησής τους μέσα στο αέριο του ανιχνευτή, μελετήθηκε η χωρική κατανομή της συλλογής ηλεκτρονίων και ιόντων από κάθε επιφάνεια ξεχωριστά.

### 5.2.1. Ποσοστό Συλλογής Ηλεκτρονίων

Όσον αφορά το προφίλ της συλλογής ηλεκτρονίων, το ποσοστό τους που συλλέγεται από τα Ηλεκτρόδια και τη Παροχή Υψηλής Τάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.8 συναρτήσει της θέσης της παραγωγής τους μέσα στον αέριο κύλινδρο του LIC.



**Σχήμα 5.8:** Μεταβολή του ποσοστού των ηλεκτρονίων που συλλέγονται ως σήμα συναρτήσει της διαμήκουσ ( $z$ ) συνιστώσας του σημείου παραγωγής τους μέσα στο αέριο του LIC. Οι τρεις κάθετες γραμμές αναπαριστούν τα ηλεκτρόδια του ανιχνευτή.

Είναι εμφανές ότι πρακτικά όλα τα ηλεκτρόνια συλλέγονται ως σήμα, ακόμα και στην περίπτωση της ευρείας δέσμης σωματιδίων, με τα ηλεκτρόνια να παράγονται στο σύνολο του αερίου του ανιχνευτή. Η μικρή πτώση κατά περίπου 5% που παρατηρείται για  $z = -45$  mm (Σχήμα 5.8) δεν είναι επαρκής για να αλλάξει την γενική αυτή εικόνα. Επιπλέον, τα ηλεκτρόνια που παράγονται στο κεντρικό κομμάτι του αερίου κυλίνδρου (περίπτωση στενής δέσμης σωματιδίων) συλλέγονται ως σήμα απολύτως.

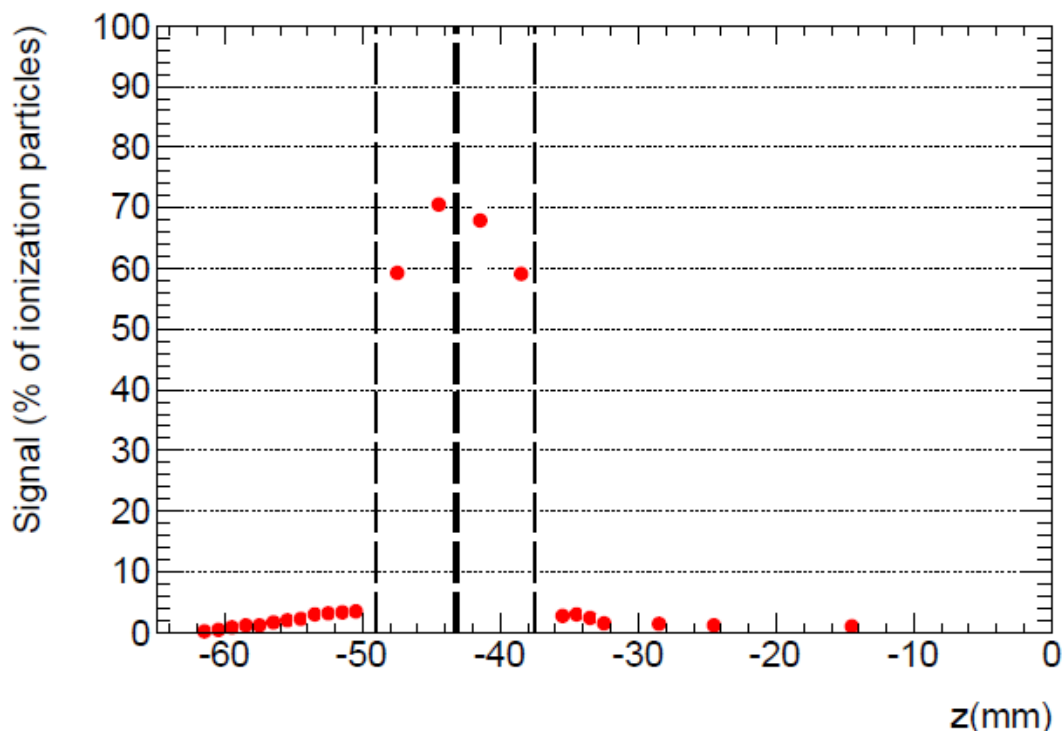
Για το λόγο αυτό, η πιθανότητα ενός ηλεκτρονίου να συλλεχθεί ως σήμα από τα Ηλεκτρόδια ή τη Παροχή Υψηλής Τάσης μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι 1, ασχέτως από τη θέση παραγωγής των ηλεκτρονίων μέσα στο αέριο του LIC. Ως εκ τούτου, αυτή η μελέτη

θα επικεντρωθεί στα ιόντα, αφού η χωρική κατανομή της πιθανότητας συλλογής τους είναι το κρίσιμο κομμάτι για τη μελέτη του σήματος του ανιχνευτή.

### 5.2.2. Ποσοστό συλλογής Ιόντων

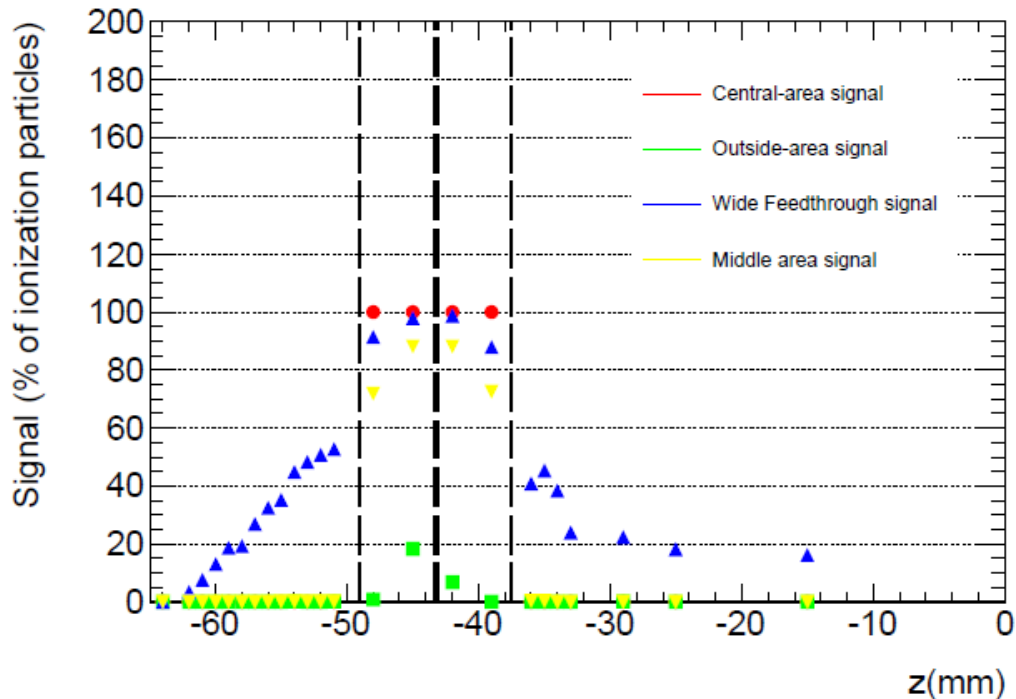
Το ποσοστό των ιόντων που φθάνουν στο Ηλεκτρόδιο ή τη Παροχή Σήματος είναι συνάρτηση της θέσης παραγωγής των σωματιδίων αυτών, ως εκ τούτου η μελέτη του προφίλ τους θα βασιστεί στις διαφορετικές επιφάνειες παραγωγής που ορίστηκαν στα Σχήματα 5.7(α)-5.7(δ) και στον Πίνακα 5.1. Όταν όλες αυτές οι επιφάνειες αθροιστούν για να σχηματίσουν τον αρχικό αέριο δίσκο, η συνολική αυτή επιφάνεια μιμείται μια ευρεία δέσμη σωματιδίων, ακτίνας 42.5 mm. Με αυτό το σενάριο, σχεδιάστηκε στο Σχήμα 5.9 η ολική πιθανότητα ενός ιόντος να συλλεχθεί ως σήμα συναρτήσει της διαμήκους συντεταγμένης στο αέριο του LIC.

Εφ' όσον η πιθανότητα συλλογής για τα ηλεκτρόνια είναι 1, η ολική πιθανότητα συλλογής ενός ζεύγους ηλεκτρονίου/ιόντος,  $P_{total}$ , ταυτίζεται με την πιθανότητα συλλογής του αντίστοιχου ιόντος,  $P_{ion}$ .



**Σχήμα 5.9:** Μεταβολή της συνολικής πιθανότητας συλλογής ζεύγους ιονισμού από τον LIC, συναρτήσει της διαμήκους συντεταγμένης (z). Οι τρεις κάθετες γραμμές αναπαριστούν τα ηλεκτρόδια του ανιχνευτή.

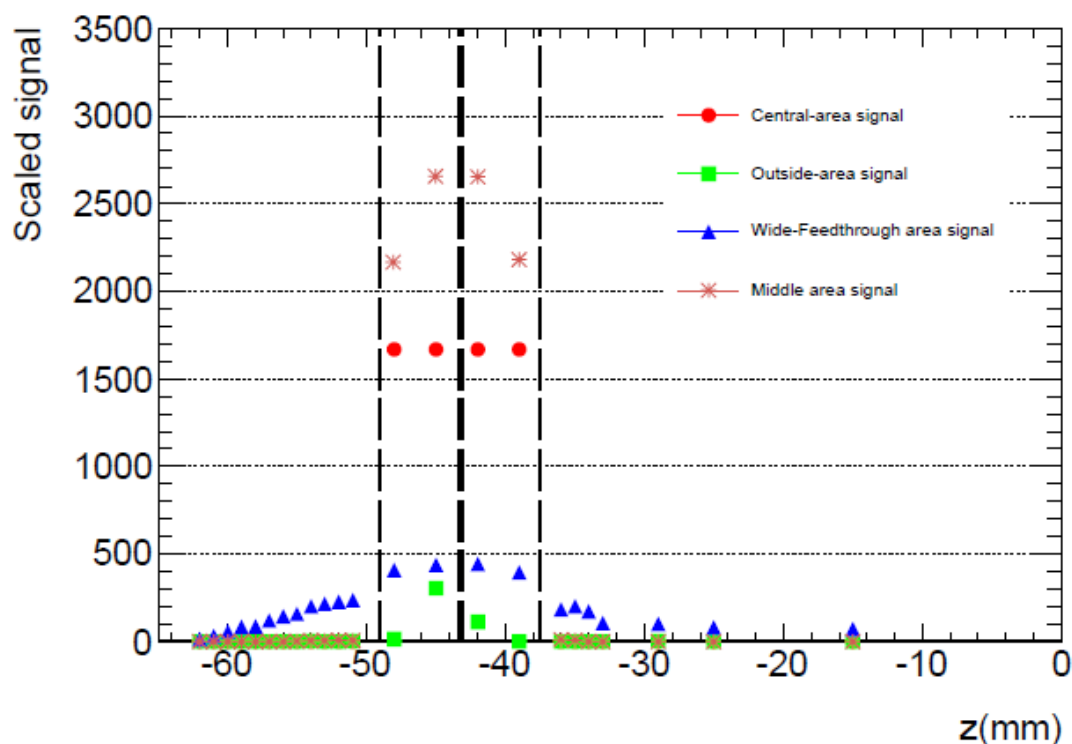
Το ποσοστό των ιόντων που συλλέγονται από το Ηλεκτρόδια ή τη Παροχή Σήματος για κάθε μεμονωμένη επιφάνεια του αερίου δίσκου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.10.



**Σχήμα 5.10:** Η μεταβολή της πιθανότητας συλλογής ιόντος συναρτήσει της διαμήκουσ συντεταγμένης στο αέριο του LIC για κάθε μία από τις ορισμένες επιφάνειες παραγωγής σωματιδίων.

Στο προηγούμενο Σχήμα σχεδιάστηκαν οι πιθανότητες συλλογής φορτίου (ιόν και ηλεκτρόνιο) για κάθε μια από τις ορισμένες επιφάνειες του δίσκου, οι οποίες όμως έχουν πολύ διαφορετικά εμβαδά. Εφ' όσον ο αριθμός των παραγομένων σωματιδίων ιονισμού σε μια εγκάρσια επιφάνεια του αερίου του LIC είναι ανάλογος με το εμβαδόν αυτής της επιφάνειας, όπως αποκαλύπτει το Σχήμα 4.6(β), κάποιες επιφάνειες του Σχήματος 5.10 μπορεί να παρουσιάζονται πιο σημαντικές για τη συλλογή σήματος απ' ό,τι είναι. Για το λόγο αυτόν, στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζεται η συλλογή σήματος από κάθε επιφάνεια ξεχωριστά, κανονικοποιημένη στα 10,000 σωματίδια ανά αέριο δίσκο. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε ξεχωριστή επιφάνεια αναλογεί ένας αριθμός από αρχικά σωματίδια ανάλογος του ποσοστού του εμβαδού του συνολικού δίσκου που καλύπτει αυτή η επιφάνεια και η τιμή που εμφανίζεται στο Σχήμα 5.11 για κάθε επιφάνεια είναι η πιθανότητα συλλογής του

ζεύγους ιονισμού από αυτή την επιφάνεια, πολλαπλασιασμένη με τον κανονικοποιημένο αριθμό αρχικών σωματιδίων που αντιστοιχούν στην εκάστοτε επιφάνεια.



**Σχήμα 5.11:** Μεταβολή της κανονικοποιημένης συλλογής ηλεκτρονίων και ιόντων για κάθε μία από τις επιφάνειες παραγωγής σωματιδίων. Η κατανομή είναι κανονικοποιημένη για 10,000 σωματίδια.

Χρησιμοποιώντας το Σχήμα 5.11, μπορεί να υπολογιστεί ο λόγος της συνιστώσας του σήματος που συλλέγεται από την περιοχή εκτός της Ευαίσθητης Ζώνης με τη συνιστώσα του σήματος που προέρχεται από ζεύγη ιονισμού που δημιουργήθηκαν εντός της Ευαίσθητης Ζώνης. Ο λόγος αυτός βρέθηκε να είναι **16.946%**. Αυτό σημαίνει ότι το μεγαλύτερο κομμάτι του σήματος προέρχεται από τον Ευαίσθητο Όγκο του LIC (83% περίπου), αλλά ότι ένα μη αμελητέο ποσοστό πηγάζει από ζεύγη ιονισμού που παρήχθησαν σε περιοχές που δεν αναμένονταν σε εξιδανικευμένες συνθήκες να παράγουν σήμα.

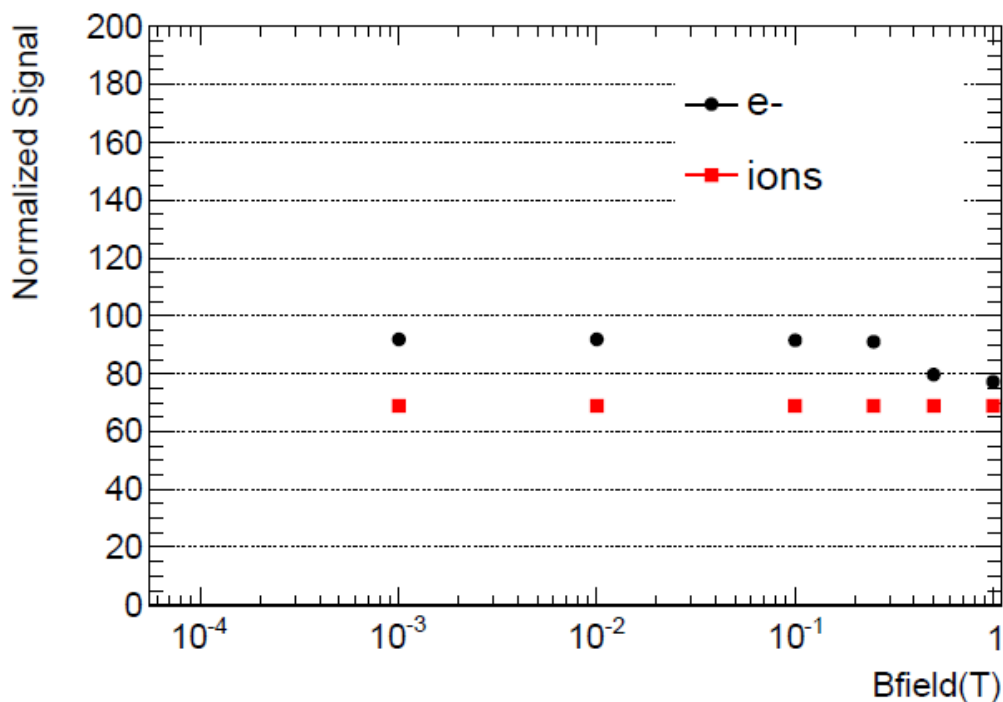


### 5.3. Μελέτη του Σήματος του LIC υπό την επίδραση Μαγνητικού Πεδίου

Σ' αυτή την ενότητα μελετάται η αντίδραση του ανιχνευτή LIC όταν ο τελευταίος βρίσκεται υπό την επίδραση ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Σε διάφορα μέρη μέσα στο αέριο όγκου του LIC, παράχθηκε ένας αριθμός από ηλεκτρόνια και ιόντα με αρχική κινητική ενέργεια από 0-100 eV, με κατεύθυνση προς τα θετικά του διαμήκη άξονα του ανιχνευτή. Αυτή η γκάμα τιμών αρχικής κινητικής ενέργειας επιλέχθηκε ως τυπική για ηλεκτρόνια και ιόντα ιονισμού, σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία [13]. Τα σωματίδια αυτά ήταν κατανεμημένα ομοιογενώς σε μια σειρά από παράλληλα τοποθετημένους αέριους δίσκους (όμοιους με αυτούς της Ενότητας 5.2) με ακτίνα 42.5 mm. Η κίνηση των ιόντων και των ηλεκτρονίων υπό την επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων εξομοιώθηκε από το *CST Particle Studio*, το οποίο επιτρέπει τη καταγραφή του αριθμού των σωματιδίων που φθάνουν στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια ή ζώνες που παράγουν ένα μετρήσιμο σήμα στα ηλεκτρονικά του ανιχνευτή.

Η αντίδραση του LIC υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου κάθετου στο ηλεκτρικό πεδίο που υφίσταται μεταξύ των ηλεκτροδίων του ανιχνευτή σχεδιάστηκε στο Σχήμα 5.12. Το κανονικοποιημένο σήμα υπολογίστηκε ως ο αριθμός των ιόντων και ηλεκτρονίων που φθάνουν στις επίμαχες ζώνες, κανονικοποιημένος με το συνολικό αριθμό παραγόμενων σωματιδίων. Για άλλη μια φορά το συνολικό σήμα εξαρτάται πρωτίστως από τη συλλογή των ιόντων, αφού τα ηλεκτρόνια συλλέγονται σχεδόν εξολοκλήρου.

Στο Σχήμα 5.12, σχεδιάστηκε το συνολικό ποσοστό των ηλεκτρονίων και των ιόντων που συλλέχθηκαν ως σήμα αθροιστικά από ολόκληρο τον κύλινδρο του LIC συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου.



**Σχήμα 5.12:** Μεταβολή της ηλεκτρονιακής και ιοντικής συνιστώσας του κανονικοποιημένου σήματος του LIC συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

Από το σχήμα αυτό μπορεί να συναχθεί ότι το σήμα του ανιχνευτή LIC είναι εντελώς αναλλοίωτο από ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έντασης ως και 0.1 Tesla. Πάνω από αυτή την τιμή, το μαγνητικό πεδίο είναι ικανό να απωθήσει έναν αξιόλογο αριθμό ηλεκτρονίων μακριά από τα Ηλεκτρόδια Υψηλής Τάσης. Ως συνέπεια, το συνολικό σήμα μειώνεται.

Απεναντίας, η συνιστώσα του σήματος που οφείλεται σε ιόντα παραμένει ανεπίδραστη από ένα μαγνητικό πεδίο έντασης ως και 1 Tesla. Υπάρχουν δύο λόγοι για το γεγονός αυτό: Πρώτον, η μάζα των ιόντων  $N_2^+$  είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από αυτή ενός ηλεκτρονίου, συνεπώς η καμπύλωση της τροχιάς των σωματιδίων αυτών από το ίδιο μαγνητικό πεδίο είναι εξαιρετικά μικρότερη. Επιπλέον, τα ιόντα που συλλέγονται ως σήμα από τον LIC προέρχονται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα από τη περιοχή ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του ανιχνευτή (Σχήμα 5.9). Οι τροχιές τους λοιπόν είναι πολύ βραχύτερες από τις αντίστοιχες των ηλεκτρονίων, άρα το μαγνητικό πεδίο δεν έχει το χρόνο να τις καμπυλώσει αισθητά.

Στην περίπτωση του LHC, του ισχυρότερου και μεγαλύτερου επιταχυντή του κόσμου, το υπολειπόμενο μαγνητικό πεδίο γύρω από τους υπεραγωγίμους μαγνήτες, όπου

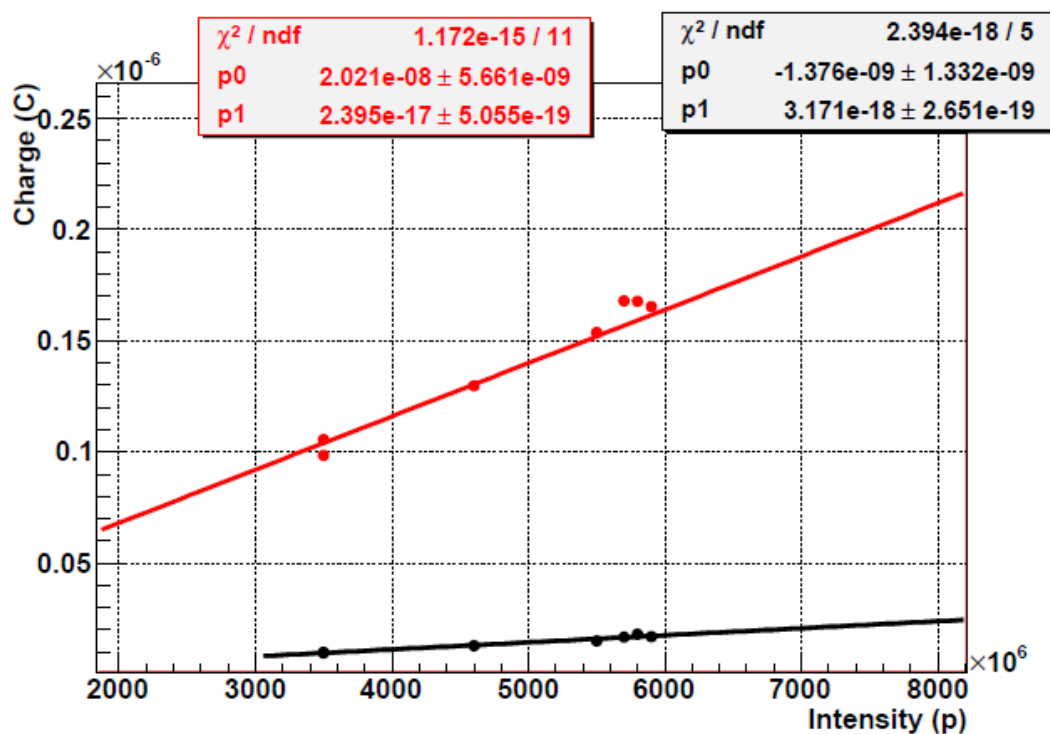
οι Ανιχνευτές Ιονισμού είναι τοποθετημένοι, μπορεί να φτάσει σε ένταση μέχρι μερικά miliTesla. Η παρούσα μελέτη υποδεικνύει ότι το σήμα του ανιχνευτή LIC παραμένει αναλλοίωτο υπό τέτοιες συνθήκες.

Αυτό φυσικά συνεπάγεται ότι τα υπολειπόμενα μαγνητικά πεδία των πολύ ασθενέστερων μαγνητών των Νοσοκομειακών Επιταχυντών για την Αδρονιακή Θεραπεία του Καρκίνου δεν αναμένεται να έχουν καμία επίδραση στο σήμα Ανιχνευτών Ιονισμού τύπου LIC.

## 6. Σύγκριση των Εξομοιωτικών αποτελεσμάτων με Πειραματικά δεδομένα

Το εξομοιωμένο σήμα του ανιχνευτή LIC με μια ευρεία δέσμη πρωτονίων θα υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την πληροφορία του αριθμού των ζευγών ηλεκτρονίων/ιόντων ιονισμού που παράγεται σε διάφορα μέρη του αερίου του LIC από κάθε πρωτόνιο (Σχήμα 4.6(α)) και το ποσοστό αυτών των σωματιδίων που συλλέγονται ως σήμα από κάθε σημείο (Σχήμα 5.10). Με αυτά τα δεδομένα, ο αριθμός των  $e^-$  και  $N_2^+$  που συλλέγονται ως σήμα από τον ανιχνευτή LIC, βρέθηκε να είναι **33.8641** ανά εισερχόμενο πρωτόνιο. Όταν αυτός ο αριθμός μετατραπεί σε ισοδύναμο φορτίο και υπολογιστεί για  $6 \cdot 10^9$  πρωτόνια (που είναι η πυκνότητα μιας τυπικής δέσμης πρωτονίων του επιταχυντή PSB), τότε το φορτίο που συλλέγεται ανά δέσμη πρωτονίων από τον ανιχνευτή είναι  **$0.03168 \cdot 10^{-6}$  Coulomb**.

Η τιμή του συλλεγομένου φορτίου μετρήθηκε και πειραματικά από την ομάδα BLM του CERN στη Γραμμή Απόρριψης (dump line) του επιταχυντή PSB και το αποτέλεσμα έχει σχεδιαστεί στο Σχήμα 6.1.



**Σχήμα 6.1:** Η πειραματικά μετρημένη συλλογή φορτίου του LIC (μαύρη γραμμή) και του IC (κόκκινη γραμμή) συναρτήσει της πυκνότητας της δέσμης πρωτονίων [2].

Το φορτίο που συλλέχθηκε από τον ανιχνευτή LIC κατά την πειραματική διαδικασία, ανά δέσμη πρωτονίων πυκνότητας  $6 \cdot 10^9$  πρωτόνια/δέσμη, ήταν **(0.01-0.02)·10<sup>-6</sup> Coulomb**. Εμφανώς, η εξομοιωτική τιμή του φορτίου που συλλέγει ο ανιχνευτής είναι στην σωστή τάξη μεγέθους, σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν μια σειρά παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη, πριν οι δύο αυτοί αριθμοί μπορούν να συγκριθούν με ασφάλεια:

- i. Η πειραματική δέσμη ήταν στενή (1-2 mm διάμετρος), ενώ για την εξαγωγή του εξομοιωτικού αποτελέσματος χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της Ενεργειακής Απόθεσης με ευρεία δέσμη (44.5 mm διάμετρος). Αυτή η διαφορά μπορεί να γεφυρωθεί, αν ληφθεί υπόψη μόνο το κεντρικό κομμάτι του σήματος με ευρεία δέσμη. Μια προσεκτική ματιά στο Σχήμα 5.10 αποκαλύπτει ότι το κεντρικό κομμάτι της δέσμης έχει μια μη μηδενική τιμή συλλογής φορτίου μόνο στον όγκο μεταξύ των τριών ηλεκτροδίων. Ήδη έχει υπολογιστεί ότι αυτό το κομμάτι προσφέρει το 83% του συνολικού σήματος που συλλέγει ο ανιχνευτής, άρα το εξομοιωτικό σήμα με μια στενή δέσμη είναι 0.83 φορές το σήμα που συλλέγεται με μια ευρεία δέσμη. Αυτό σημαίνει ότι το εξομοιωτικό σήμα με στενή δέσμη πρωτονίων είναι **0.026·10<sup>-6</sup> Coulomb**. Αυτή η τιμή είναι ακόμα κοντύτερα στην πειραματικά μετρημένη για τη συλλογή φορτίου.
- ii. Για τον υπολογισμό του αριθμού των φορτισμένων σωματιδίων που συλλέγονται από τον LIC, χρησιμοποιήθηκε η χωρική κατανομή της παραγωγής ζευγών ιονισμού, όπως αυτή εξομοιώθηκε από το πρόγραμμα *Geant4* με μια ευρεία δέσμη πρωτονίων. Από την άλλη, το Σχήμα 4.8(α) υπονοεί ότι η ενέργεια ιονισμού που εναποτίθεται στο αέριο του ανιχνευτή, άρα και ο αριθμός των ζευγών ιονισμού που παράγονται, είναι μεγαλύτερος για μια στενή δέσμη, στην τάξη του 130% της τιμής για ευρεία ζώνη (βλ. Πίνακα 2). Αυτό το φαινόμενο αυξάνει λίγο την τιμή του εξομοιωτικού σήματος, αλλά η αύξηση αυτή δεν είναι σπουδαία, ουσιαστικά απλώς αναιρεί τη μείωση του σήματος που επιφέρει ο συλλογισμός i.
- iii. Οι εξομοιωτικές μελέτες που αναπτύχθηκαν (τόσο με *Geant4*, όσο και με *CST Particle Studio*) δεν ήταν σε θέση να λάβουν υπόψη το φαινόμενο «space-charge» [8], το οποίο έχει σαν συνέπεια το πραγματικό φορτίο που συλλέγει ο

ανιχνευτής να είναι 2-3 φορές μικρότερο από το θεωρητικά αναμενόμενο, λόγω του ότι η ύπαρξη μεγάλης πυκνότητας φορτίου στο εσωτερικό του ηλεκτρικού πεδίου του ανιχνευτή διαταράσσει αυτό το πεδίο, με αποτέλεσμα να συλλέγεται εν τέλει μικρότερο ποσοστό σήματος.

- iv. Το φορτίο που συλλέγεται πειραματικά είναι μια συνάρτηση του εύρους που χρησιμοποιείται για τη χρονική ολοκλήρωση του σήματος. Τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα έχουν πολύ διαφορετικές ταχύτητες συλλογής, οπότε δεν συλλέγεται όλο το φορτίο ταυτόχρονα. Για να είναι συγκρίσιμη η πειραματική τιμή με την εξομοιωτική μελέτη που παρουσιάστηκε εδώ, πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα πειραματικά δεδομένα με το ευρύτερο δυνατό παράθυρο (στο προκείμενο πείραμα βαθμονόμησης αυτό ήταν 80  $\mu\text{sec}$ ).

Οι άνωθεν συλλογισμοί δείχνουν ότι μια απευθείας σύγκριση των εξομοιωτικών με τα πειραματικά αποτελέσματα προϋποθέτει μια ενδελεχή μελέτη πολλών παραμέτρων. Σε κάθε περίπτωση, το γεγονός ότι τα δύο αποτελέσματα για τη συλλογή φορτίου είναι εμφανώς στην ίδια τάξη μεγέθους, αν όχι μέσα στο πειραματικό σφάλμα, υπονοεί ότι η εργασία που παρουσιάστηκε εδώ είναι πιθανότατα έγκυρη.

## 7. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά και η ανάδραση του Μικρού Ανιχνευτή Ιονισμού (LIC) του CERN, χρησιμοποιώντας τα εξομοιωτικά πακέτα *Geant4* και *CST Particle Studio*. Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης για το σήμα του ανιχνευτή δείχθηκε ότι είναι στην ίδια τάξη μεγέθους με τα πειραματικά δεδομένα που λήφθηκαν από την ομάδα BLM του CERN στη Γραμμή Απόρριψης (dump line) του επιταχυντή PSB. Επίσης αποδείχθηκε ότι ένα μαγνητικό πεδίο έντασης ως και 0.1 Tesla δεν αναμένεται να έχει την παραμικρή επίδραση στο σήμα του LIC, ενώ πάνω από αυτή την τιμή έντασης πεδίου, η ανάδραση του ανιχνευτή υπό πανομοιότυπες συνθήκες δέσμης σωματιδίων μειώνεται ελαφρώς. Επιπλέον, οι υπολογισμοί της Ενεργειακής Απόθεσης και της Συλλογής Φορτίου έδειξαν ότι το μεγαλύτερο μέρος του σήματος προέρχεται από την Ευαίσθητη Ζώνη μεταξύ των ηλεκτροδίων του ανιχνευτή, μόνο ένα 17% του σήματος να προέρχεται από τον υπόλοιπο όγκο του αερίου. Τέλος, η εξομοίωση με *CST Studio* έδειξε ότι ο ανιχνευτής LIC είναι σε θέση να συλλέγει το σύνολο των ηλεκτρονίων ιονισμού, αλλά μόνο ένα κλάσμα των αντίστοιχων ιόντων, πράγμα που ελαττώνει το σήμα του ανιχνευτή σημαντικά.

Όσον αφορά τη χρήση του ανιχνευτή LIC ως μέρος ενός Συστήματος Απωλειών Δέσμης (BLM) ενός τυπικού Νοσοκομειακού Επιταχυντή για την Αδρονιακή Θεραπεία του καρκίνου, η μελέτη αυτή υποστηρίζει τη πιθανή χρήση του για τους εξής λόγους:

- i. Ο ανιχνευτής LIC έχει γραμμική συμπεριφορά σε μεγάλο εύρος της γκάμας σωματιδιακών πυκνοτήτων (Σχήμα 6.1).
- ii. Είναι μια οικονομικά βιώσιμη λύση για ένα πρόγραμμα με στενότητα πόρων, όπως αυτό ενός Συστήματος Απωλειών Δέσμης σε νοσοκομεία.
- iii. Το υπολειπόμενο μαγνητικό πεδίο (residual magnetic field) γύρω από τους πανίσχυρους υπεραγωγίμους μαγνήτες του LHC δεν είναι σε θέση να ασκήσει την παραμικρή επίδραση στο σήμα του LIC, πράγμα που σημαίνει ότι το πολύ ασθενέστερο πεδίο γύρω από ένα τυπικό μαγνήτη νοσοκομειακού επιταχυντή δεν αναμένεται να επιδρά καθόλου στο σήμα του ανιχνευτή.
- iv. Το μικρό του μέγεθος (170 mm μήκος και 88 mm διάμετρος) τον καθιστούν ιδανικό για τις συνθήκες στενότητας χώρου που έχει να αντιμετωπίσει ένας επιταχυντής νοσοκομείου.

- v. Ο ανιχνευτής LIC σχεδιάστηκε για να μη κορέζει τα ηλεκτρονικά του για πυκνότητες σωματιδιακών απωλειών γύρω από τον LHC, συνεπώς η γραμμική του συμπεριφορά σε δέσμες πολύ μικρότερης ενέργειας είναι δεδομένη.



# Βιβλιογραφία

- [1] D.H.~Wilkinson. , *Ionization chambers and counters*, Cambridge at the University press, 1950.
- [2] E. Nebot del Busto et al. *Study of the response of low pressure Ionization Chambers*. Proceedings of IPAC2012, New Orleans, USA (2012)
- [3] Arlene J. Lennox. , *Accelerators for cancer therapy*, Radiation Physics and Chemistry, Issue 61 Pages 223-226, 2001.
- [4] Igor Pshenichnov, Igor Mishustin, Walter Greiner , *Comparative study of depth–dose distributions for beams of light and heavy nuclei in tissue-like media* , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 266 (2008) 1094–1098
- [5] Ugo Amaldi, *Accelerators in cancer therapy*, University Milano Bicocca and TERA Foundation (2011)
- [6] Coutrakon, G , *Proton synchrotrons for cancer therapy*. Proceedings of the Third International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology. American Nuclear Society, LaGrange Park, IL, pp. 36–42. (1999)
- [7] D. Schardt , *Five Years Tumor Therapy with Heavy Ions at GSI Darmstadt* , Gesellschaft fur Schwerionenforschung, Biophysics Division (2005)
- [8] Robert M. Zwaska et al. *Beam Tests of Ionization Chambers for the NuMI Neutrino Beam*, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 50, NO. 4, AUGUST 2003
- [9] S. Agostinelli et al., *Geant4 - A Simulation Toolkit*, Nuclear Instruments and Methods A 506 (2003) 250-303.
- [10] GEANT4 official web site, <http://geant4.cern.ch>

[11] S. Agostinelli et al. *Geant4-a simulation toolkit*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 506, Issue 3, 1 July 2003, Pages 250-303

[12] John Apostolakis et al. *Progress in hadronic physics modeling in Geant4*. Journal of Physics: Conference Series 160 (2009) 012073.

[13] J. Beringer et al. (Particle Data Group) *The Review of Particle Physics* Phys. Rev. D86, 010001 (2012)

[14] Dr. Ulrich Becker. *CST DESIGN STUDIO is a new electromagnetic simulation tool for an efficient design of complex and highly resonant structures*. Wireless Design and Development (2001)