ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ & ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

— Μέθοδοι προσομοιώσεων Monte Carlo ανιχνευτικών διατάξεων πυριτίου με την χρήση της πλατφόρμας λογισμικού Allpix Squared —

ΔΗΜΗΤΡΗΣ Τ. Ν. ΚΥΡΙΑΚΟΥ

Επιβλέπων:
Κοψαλής Ιωάννης
Επίκουρος Καθηγητής,
ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ

Τριμελής Επιτροπή:
Κοψαλής Ιωάννης
Επίκουρος Καθηγητής, ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ
Αλεξόπουλος Θεόδωρος
Καθηγητής, ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ
Μαλτέζος Σταύρος
Ομότιμος Καθηγητής, ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ

Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ανιχνευτών πυριτίου τύπου pixel με την χρήση της πλατφόρμας λογισμικού Allpix Squared και η χρήση της ως εισαγωγική βάση για μελλοντικές προσομοιώσεις με την χρήση της πλατφόρμας λογισμικού Allpix Squared. Συγκεκριμένα γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στην πλατφόρμα λογισμικού και τις βασικές απαιτήσεις για την χρήση της, έγινε μελέτη με βάση την πειραματική διάταξη χαρακτηρισμού (test beam) του DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron DESY) το οποίο βρίσκεται στο Αμβούργο και χρησιμοποιείται κατά κόρον για την μελέτη και τον χαρακτηρισμό ανιχνευτών πυριτίου. Γράφτηκε κώδικας βασισμένος στο παράδειγμα χρήσης EUDET with RD53a DUT που βρίσκεται ανηρτημένο στην επίσημη ιστοσελίδα του Allpix Squared και εξήχθησαν διαγράμματα χαρακτηρισμού της διάταξης για διάφορες ενέργειες. Τέλος έγινε σχολιασμός των αποτελεσμάτων και δόθηκαν ιδέες για μελλοντική βελτίωση της μελέτης.

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή **1**

1.1 Ανιχνευτές στερεάς κατάστασης 1

1.2 Δίοδος PN 2

1.3 Αρχή λειτουργίας 4

1.3.1 Σχηματισμός και ανάγνωση σήματος. 5

1.3.2 Σήμα από ελάχιστα ιονίζον σωματίδιο (MIP -Minimum-Ionizing Particle). 5

1.4 Ανιχνευτές Pixel 6

1.5 Ψηφιακή και Αναλογική Ανάγνωση 7

2 Πλατφόρμα λογισμικού Allpix² **9**

2.1 Σύντομη Εισαγωγή 9

2.2 Απαιτήσεις Εγκατάστασης - Προϋποθέσεις Εκτέλεσης. . 10

2.3 Χρήση του προγράμματος 11

3 Προσομοίωση - Μελέτη Αποτελεσμάτων **14**

3.1 Περιγραφή της διάταξης της δέσμης στο DESY και της γεωμετρίας προσομοίωσης 14

3.1.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης 19

3.1.1.1 Δέσμη 1GeV χωρίς μαγνητικό πεδίο . . . 19

3.1.1.2 Δέσμη 1GeV με μαγνητικό πεδίο 22

3.1.1.3 Δέσμη 3GeV χωρίς μαγνητικό πεδίο . . . 25

3.1.1.4 Δέσμη 3GeV με μαγνητικό πεδίο 28

3.1.1.5 Δέσμη 5GeV χωρίς μαγνητικό πεδίο . . . 31

3.1.1.6 Δέσμη 5GeV με μαγνητικό πεδίο 34

4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης **37**
4.1 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων 37
4.2 Προτεινόμενες Βελτιώσεις για Μελλοντική Εργασία . . . 44

5 Κώδικας **45**
5.1 main.conf - Κώδικας κυρίως αρχείου 45
5.2 dut.conf - Αρχείο Γεωμετρίας 48

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ανιχνευτές στερεάς κατάστασης

Οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης είναι ημιαγώγιμες διατάξεις που η λειτουργία τους βασίζεται στην δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων και οπών και τη θεωρία των ζωνών των στερεών. Όταν μια προσπίπτουσα ακτινοβολία έρθει σε επαφή με την επιφάνεια του ανιχνευτή δημιουργείτε μια διέγερση στην ζώνη αγωγιμότητας δημιουργώντας ταυτόχρονα κενές θέσεις ηλεκτρονίων (οπές) στην ζώνη σθένους του κρυσταλλικού πλέγματος. Τα διεγερμένα ηλεκτρόνια και οι οπές είναι στην περίπτωση αυτή οι φορείς αρνητικού και θετικού φορτίου που συλλέγονται από ένα ηλεκτρικό πεδίο και μας επιτρέπουν να προβούμε στην ανίχνευση της ακτινοβολίας αντίστοιχα με την τις συσκευές ιονισμού αερίων. Για την κατασκευή αυτών των διατάξεων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τόσο ενδογενείς ημιαγωγούς όπως για παράδειγμα το γερμάνιο και το πυρίτιο, ή ημιαγωγούς προσμείξεων (impurity or extrinsic semiconductors) ανάλογα με τις προσμείξεις έχουμε ημιαγωγούς τύπου P (περίσσια ελεύθερων οπών) ή N (περίσσια ελεύθερων ηλεκτρονίων). [1–3]

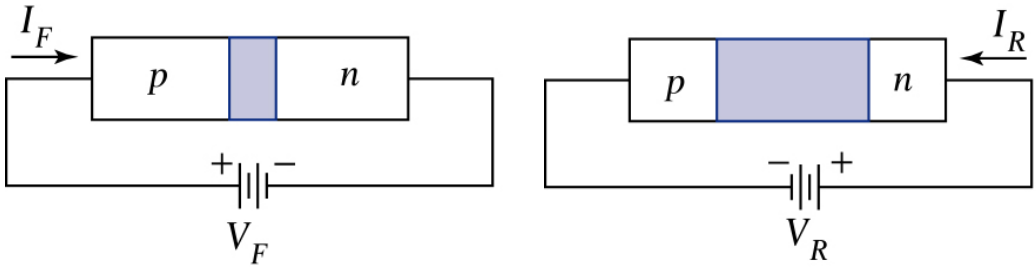
1.2 Δίοδος PN

Ένα ανόθευτο κομμάτι ημιαγωγού δεν έχει ιδιότητες που να το καθιστούν χρήσιμο στην κατασκευή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Όταν όμως ένα κομμάτι ημιαγωγού τύπου p και ένα κομμάτι ημιαγωγού τύπου n έρθουν σε επαφή δημιουργούν μια επαφή τύπου pn (pn junction) η οποία έχει ενδιαφέρουσες ιδιότητες. Η επαφή pn αποτελεί την βάση της ημιαγώγιμης διόδου. [1–3]

Όταν μια δίοδος είναι ορθά πολωμένη το δυναμικό της επαφής μειώνεται και η διάχυση των φορέων πλειονότητας υποβοηθείται από την εξωτερική πηγή τάσης. Έτσι το ρεύμα διάχυσης αυξάνεται σαν συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Μια εξίσωση που περιγράφει το ρεύμα της διόδου συναρτήσει της τάσης που εφαρμόζουμε στα άκρα της είναι η εξίσωση Shockley, γνωστή και ως εξίσωση της διόδου. [4]

$$I = I_S \left(\exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right) \tag{1.1}$$

Όπου I_S το ανάστροφο ρεύμα κόρου (reverse saturation current), q το φορτίο του ηλεκτρονίου, k η σταθερά Boltzmann και T η θερμοκρασία της διόδου.



(α′) Ορθή πόλωση. (β′) Ανάστροφη πόλωση.

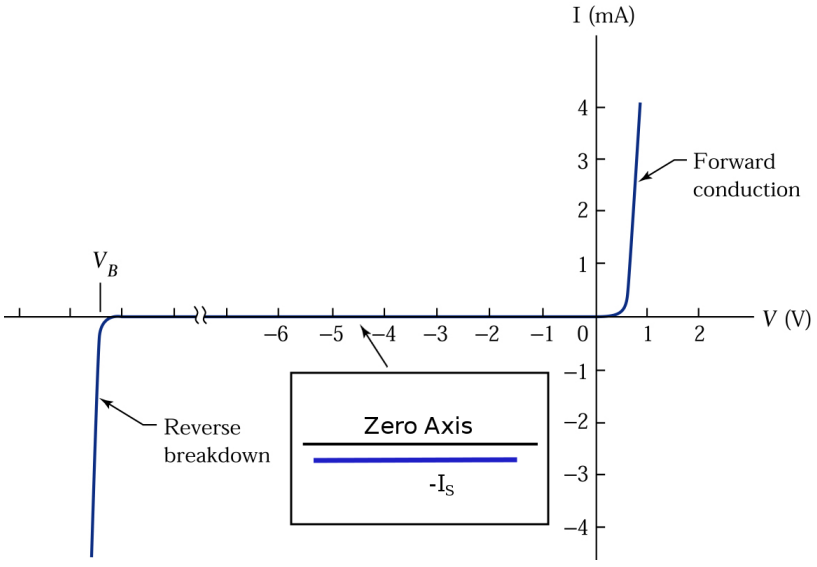
Σχήμα 1.1: Ορθά και ανάστροφα πολωμένη pn επαφή, με γαλάζιο χρώμα παριστάνεται η περιοχή αραίωσης (depletion region).

Αν και η παραπάνω εξίσωση περιγράφει αρκετά καλά την συμπεριφορά της διόδου, δεν λαμβάνει υπόψιν την εσωτερική της αντίσταση

(R_S) και το φαινόμενο της επανασύνδεσης φορέων το οποίο μπορούμε να εκφράσουμε μέσω του συντελεστή ιδεατότητας η με το παρακάτω απλό σκεπτικό: Ο συντελεστής ιδεατότητας είναι ένας αδιάστατος αριθμός ο οποίος μας δείχνει κατά πόσο επικρατεί η επανασύνδεση έναντι της διάχυσης όταν είναι 1 σημαίνει ότι η δίοδος συμπεριφέρεται ιδανικά, δηλαδή εμφανίζονται μόνο φαινόμενα διάχυσης, οπότε και η έννοια της εσωτερικής αντίστασης δεν έχει νόημα. Όταν είναι 2 σημαίνει η επανασύνδεση επικρατεί της διάχυσης. Με βάση λοιπόν τα παραπάνω η εξίσωση (1.1) μετασχηματίζεται στην παρακάτω μορφή. [4]

$$I = I_S \left(\exp\left(\frac{q\,(V - IR_S)}{\eta k T} \right) - 1 \right) \tag{1.2}$$

Τέλος η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος τάσης μιας ημιαγώγιμης διόδου αναμένεται να έχει την παρακάτω γενική μορφή. [1–3]



Το βασικό πλεονέκτημα των ημιαγωγών είναι ότι η μέση ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής είναι περίπου 10 φορές μικρότερη από αυτή που απαιτείται για τον ιονισμό αερίου. Έτσι, η ποσότητα ιονισμού που παράγεται για μια δεδομένη

ενέργεια είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη με αποτέλεσμα αυξημένη ενεργειακή διακριτική ικανότητα. Επιπλέον, λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητάς τους, έχουν μεγαλύτερο dE/dx (απώλεια ενέργειας ανά μήκος) από τους ανιχνευτές αερίων. Είναι συμπαγή σε μέγεθος επιτρέποντας μεγάλη πυκνότητα ανιχνευτών ανά όγκο και μπορούν να έχουν πολύ γρήγορους χρόνους απόκρισης. [1–3]

1.3 Αρχή λειτουργίας

Ένα φορτισμένο σωματίδιο που διέρχεται τον απογυμνωμένο (depleted) όγκο πυριτίου εναποθέτει σε αυτόν ενέργεια μέσω ιονισμού, παράγοντας ζεύγη ηλεκτρονίου–οπής. Με εφαρμοζόμενη ανάστροφη πόλωση, το ηλεκτρικό πεδίο E ωθεί τους φορείς προς τα ηλεκτρόδια συλλογής, και το επαγόμενο σήμα περιγράφεται από το την αρχή Shockley-Ramo [3].

$$i \;=\; E_v \, q \, v$$

όπου i το επαγόμενο ρεύμα, E_v η συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου κατά την διευθέτηση της ταχύτητας, q το φορτίο του σωματιδίου και v η στιγμιαία ταχύτητα. Η μεταφορά φορτίου γίνεται με ολίσθηση (drift) και διάχυση (diffusion). Σε παρουσία μαγνητικού πεδίου (B), οι φορείς αποκλίνουν με γωνία Lorentz $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, τροποποιώντας την κατανομή φορτίου (Cluster). Η τελική απόθεση φορτίου ανά pixel εξαρτάται από το πάχος, το υλικό αισθητήρα, την πόλωση, τη θερμοκρασία και το κατώφλι/θόρυβο των ηλεκτρονικών ανίχνευσης [5].

Ο πυρήνας ενός ανιχνευτή πυριτίου είναι μία *ανάστροφα* πολωμένη δίοδος p–n: η ανάστροφη πόλωση δημιουργεί περιοχή απογύμνωσης πλάτους W με ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο. Φορτισμένο σωματίδιο που διέρχεται ιονίζει το υλικό, δημιουργώντας ζεύγη ηλεκτρονίου–οπής· τα φορτία παρασύρονται από το πεδίο και συλλέγονται στα ηλεκτρόδια, παράγοντας μετρήσιμο σήμα [6, 7]. Για *απότομη* (abrupt) επαφή

p–n, το θεωρητικό πλάτος απογύμνωσης προσεγγίζεται από

$$W \;=\; \sqrt{\frac{2\,\varepsilon_s}{q}\,\left(V_{\text{bi}} + V_R\right)\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)}\,, \tag{1.3}$$

ενώ για αισθητήρα πάχους d η τάση πλήρους απογύμνωσης δίνεται προσεγγιστικά από

$$V_{\text{dep}} \;\approx\; \frac{q\,N_{\text{eff}}\,d^2}{2\,\varepsilon_s}\,, \tag{1.4}$$

και η χωρητικότητα ζώνης απογύμνωσης από $C \simeq \varepsilon\,A/W$ [8, 9].

1.3.1 Σχηματισμός και ανάγνωση σήματος.

Η κίνηση των φορέων υπό μέτριο πεδίο χαρακτηρίζεται από ταχύτητα ολίσθησης $v_d = \mu E$, και χρόνο συλλογή $t_c \approx L/v_d$ με L χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής. Το στιγμιαίο επαγόμενο ρεύμα στο ηλεκτρόδιο δίνεται από το θεώρημα Shockley–Ramo:

$$i(t) \;=\; q\,\vec{v}(t)\cdot\vec{E}_{\text{w}}\big(\vec{r}(t)\big)\,, \tag{1.5}$$

όπου $\vec{E}_{\text{w}}$ είναι το *weighting field* [10–12].

1.3.2 Σήμα από ελάχιστα ιονίζον σωματίδιο (MIP -Minimum-Ionizing Particle).

Στο πυρίτιο, η μέση απώλεια ενέργειας ενός MIP είναι περίπου $\sim 1.66\,\text{MeV}\,\text{g}^{-1}\text{cm}^2$ (≈ 3.8–3.9 MeV/cm), ενώ η μέση ενέργεια για δημιουργίας ζεύγους είναι $\sim\ 3.6$ eV έτσι προκύπτουν περίπου 75–80 ζεύγη e–h ανά μm, δηλαδή $\sim 2.2\times10^4$ ηλεκτρόνια σε αισθητήρα $d = 300\ \mu$m (most-probable τιμή).Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως στον σχεδιασμό συστημάτων [11–13].

1.4 Ανιχνευτές Pixel

Οι ανιχνευτές pixel (pixel detectors) είναι ημιαγώγιμες δομές ανίχνευσης σωματιδίων με δισδιάστατη διαμέριση της επιφάνειας σε στοιχειώδεις κυψέλες (pixels). Στη φυσική υψηλών ενεργειών τοποθετούνται πλησιέστερα στο σημείο αλληλεπίδρασης για να παρέχουν ακριβή ανακατασκευή τροχιών, εντοπισμό πρωτογενών/δευτερογενών κορυφών και αναγνώριση σωματιδίων με υψηλή χωρική ανάλυση και γρήγορη απόκριση[7,9]. Τα βασικά πλεονεκτήματα είναι: (i) εξαιρετική χωρική ανάλυση, (ii) χαμηλό *occupancy* χάρη στη λεπτή τμηματοποίηση, (iii) καλή αντοχή σε ακτινοβόληση και υψηλούς ρυθμούς γεγονότων [3].

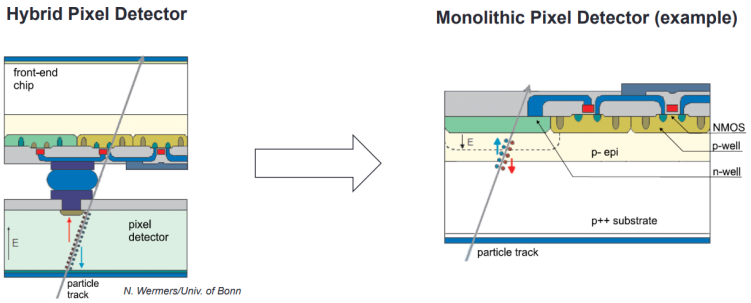
Στους ανιχνευτές τύπου pixel έχουμε δύο κύριους τρόπους σχεδιασμού:

- **Υβριδικός σχεδιασμός (Hybrid pixel detector)**: Αισθητήρας και ASIC ανάγνωσης κατασκευάζονται χωριστά και ενώνονται με bump-bonding (μικρά pitch, μεγάλη ακτινοβολιακή αντοχή, ώριμη τεχνολογία) [14].
- **Μονολιθικός σχεδιασμός (MAPS -Monolithic Active Pixel Sensors)**: Αισθητήρας και ηλεκτρονικά βρίσκονται στο ίδιο υπόστρωμα CMOS έτσι έχουμε μια πιο οικονομική εναλλακτική σε σχέση με τους υβριδικούς ανιχνευτές.Οι MAPS έχουν μεγάλη πυκνότητα κυκλωμάτων (on-chip circuitry) με εξεζητημένη in-pixel logic που τους δίνει γρήγορη απόκριση και low-noise signal processing, αυτό τους καθιστά ιδανικούς για tracking σωματιδίων σε περιβάλλον υψηλής ακτινοβολίας [15].

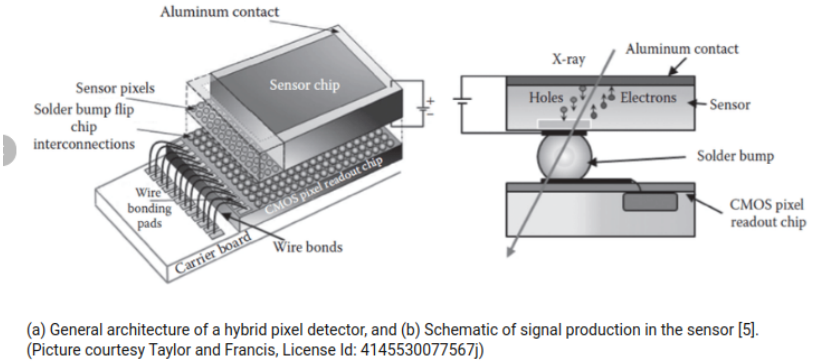
Η πλήρης δισδιάστατη διαμέριση στους ανιχνευτές pixel μειώνει την αμφισημία συσχέτισης hits–τροχιών σε περιβάλλοντα υψηλών ρυθμών, διατηρώντας χαμηλή πληρότητα και χωρική ανάλυση επιπέδου λίγων μm [6, 15, 16].

Παρακάτω βλέπουμε μια σχηματική αναπαράσταση των δύο διαφορε-

τικών αρχιτεκτονικών καθώς και ένα παράδειγμα γεωμετρίας υλοποίησης ενός hybrid detector με την πλακέτα ASIC.



Σχήμα 1.2: Υβριδικός και Μονολιθικός σχεδιασμός.Πηγή [17].



Σχήμα 1.3: Hybrid Detector with ASIC.

1.5 Ψηφιακή και Αναλογική Ανάγνωση

Στους ανιχνευτές Pixel έχουμε δύο κύριους τρόπους ανάγνωσης των συμβάντων, τον αναλογικό τρόπο και τον ψηφιακό (binary). Κατά τον αναλογικό τρόπο ανάγνωσης (analog readout) ο ανιχνευτής καταγράφει την τιμή μεγέθους του φορτίου και αυτό μας επιτρέπει μια πιο λεπτομερή αλλά πολύπλοκη διαδικασία χαρακτηρισμού του συμβάντος μέσω ανάλυσης δεδομένων (data processing/analysis). Στον ψηφιακό τρόπο ανάγνωσης παίρνουμε πληροφορία για πρόσπτωση ή μη

σε κάθε pixel (”hit” (1) / ”no hit” (0)). Ο ψηφιακός τρόπος μας παρέχει γρήγορη και απλή ανάγνωση ενώ ο αναλογικός μας δίνει περισσότερη πληροφορία απαιτώντας όμως πιο πολύπλοκες ηλεκτρονικές διατάξεις ανάγνωσης και φιλτραρίσματος. Ωστόσο και στις δυο περιπτώσεις ο θόρυβος των ηλεκτρονικών και το κατώφλι ανάγνωσης επηρεάζει την απόδοση και την διακριτική ικανότητα της διάταξής μας.

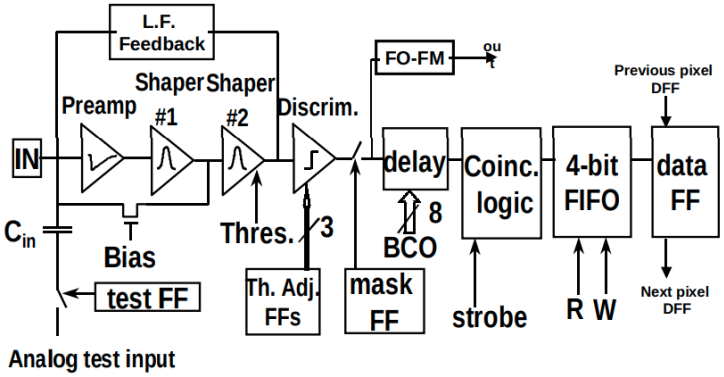


Fig. 5. Schematic of the Alice/LHCb pixel cell.

Σχήμα 1.4: Παράδειγμα κυκλώματος readout. Πηγή [18]

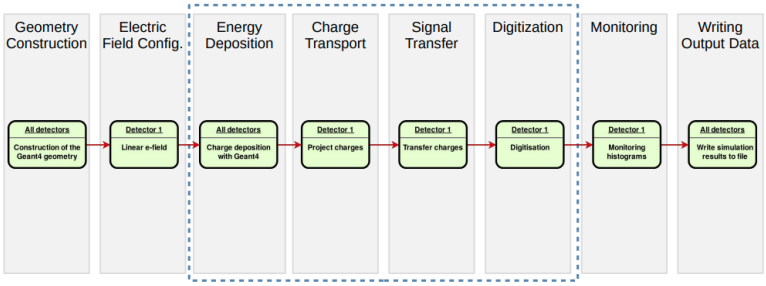
Κεφάλαιο 2

Πλατφόρμα λογισμικού Allpix²

2.1 Σύντομη Εισαγωγή

Πολλές φορές η χρήση πειραματικών διατάξεων για τη μελέτη ανιχνευτών δεν είναι δυνατή για πολλούς διαφορετικούς λόγους όπως για παράδειγμα το κόστος της όλης διαδικασίας, η μικρή διαθεσιμότητα δεσμών ελέγχου και χαρακτηρισμού (test beam) κτλ. Για το λόγο αυτό η χρήση λογισμικού για την προσομοίωση και μελέτη αντί πραγματικού πειραματικού χαρακτηρισμού είναι μια πολύ συνήθης πρακτική. Στην εργασία αυτή θα κάνουμε χρήση της πλατφόρμας λογισμικού Allpix² (Allpix Squared).

Το Allpix Squared είναι μια πλατφόρμα λογισμικού ανοιχτού κώδικα, με αρθρωτό πλαίσιο προσομοίωσης (modular framework) για ημιαγώγιμους ανιχνευτές, που ενοποιεί τα υλικά, τη γεωμετρία, τις σωματιδιακές αλληλεπιδράσεις, τη δημιουργία και μεταφορά φορτίου, καθώς και τα ηλεκτρονικά ανάγνωσης σε μία συνεκτική ροή προσομοίωσης



Σχήμα 2.1: Αλυσίδα-Ροή προσομοίωσης της πλατφόρμας Allpix².

2.2 Απαιτήσεις Εγκατάστασης - Προϋποθέσεις Εκτέλεσης.

Για να το πετύχει αυτό κάνει χρήση άλλων προγραμμάτων λογισμικού τα οποία είναι απαραίτητα για την εγκατάσταση και λειτουργία της πλατφόρμας. Συγκεκριμένα απαιτείται η εγκατάσταση :

- **ROOT 6:** αντικειμενοστρεφές πρόγραμμα και βιβλιοθήκες ανοιχτού κώδικα για την ανάλυση δεδομένων που αναπτύσσεται από το CERN με ευρεία χρήση στην σωματιδιακή φυσική και τη φυσική υψηλών ενεργειών.
- **Boost Random:** Πρόκειται για μια STL-compatible (C++ Standard Template Library -STL) γεννήτρια τυχαίων αριθμών και βιβλιοθήκες κατανομών που μας βοηθά να έχουμε επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα ανεξαρτήτως πλατφόρμας.
- **Geant4:** πλατφόρμα για την δημιουργία της γεωμετρίας, των υλικών και των σωματιδιακών αλληλεπιδράσεων με τη χρήση μεθόδων Monte Carlo.
- **Eigen3:** Το Eigen είναι μια βιβλιοθήκη προτύπων C++ για γραμμική άλγεβρα. Περιέχει αλγορίθμους για αριθμητικές μεθόδους, διανύσματα, πίνακες κτλ. Στην περίπτωσή μας χρησιμοποιείται για την αρθριτική ολοκλήρωση με μέθοδο Runge-Kutta που απαι-

τείται μερικές φορές από τη ροή της προσομοίωσης.

2.3 Χρήση του προγράμματος

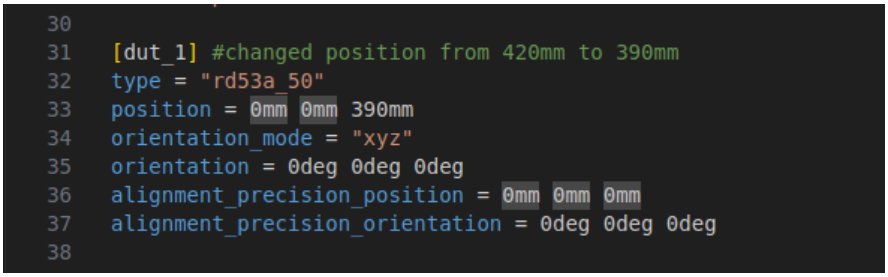
Για το τρέξιμο μιας προσομοίωσης με το Allpix² χρειαζόμαστε 3 επίπεδα αρχείων παραμετροποίησης (configuration files). Τα αρχεία παραμετροποίησης έχουν την κατάληξη .conf και δομή που περιγράφεται με λεπτομέρεια στο manual του προγράμματος, παρακάτω θα δοθούν μερικά απλά παραδείγματα κώδικα από την προσομοίωση της εργασίας για την συνοπτική παρουσίασή τους. Τα βασικά αρχεία είναι

- **Βασικό/Κυρίως αρχείο (main configuration):** στο αρχείο αυτό περιέχονται οι βασικές παράμετροι της προσομοίωσής μας καθώς και το ποια modules θα χρησιμοποιηθούν. Το αρχείο αυτό είναι το αρχείο το οποίο δίνουμε ως είσοδο στο εκτελέσιμο του Allpix² για να τρέξει την προσομοίωση. Πλήρες παράδειγμα ακολουθεί στο παράρτημα της εργασίας. Για την εκτέλεση της προσομοίωσης δίνουμε στο τερματικό την εντολή :

  ```
  $ allpix -c Path_To_File/main.conf
  ```

  όπου allpix το εκτελέσιμο του Allpix² και main.conf το βασικό αρχείο της προσομοίωσής μας το οποίο μπορεί να έχει ότι ονομασία θέλουμε.

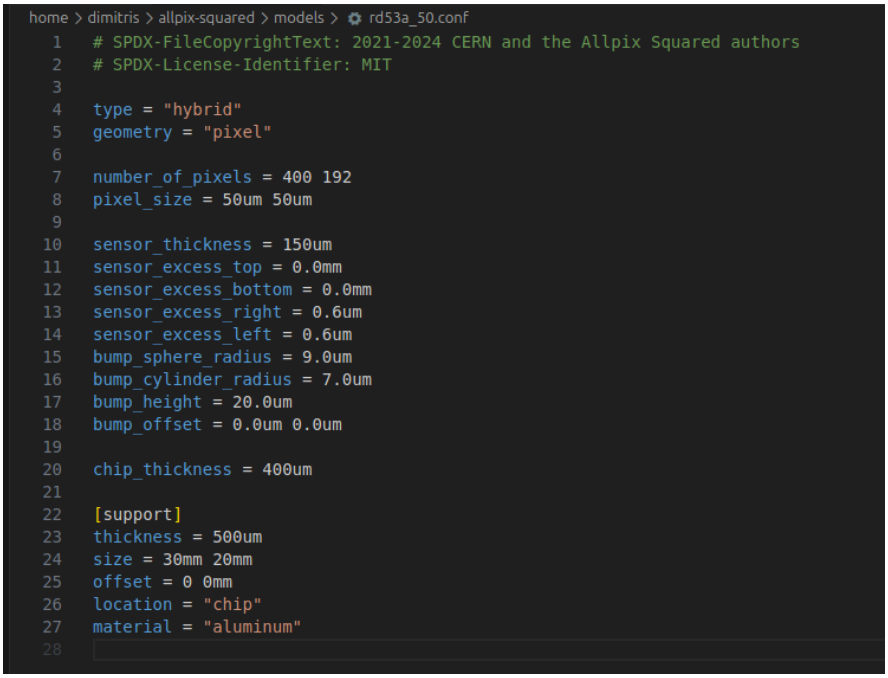
- **Αρχείο γεωμετρίας (geometry configuration):** στο αρχείο αυτό ορίζουμε την γεωμετρία της προσομοίωσης, περιέχει τις θέσεις των στοιχείων, τα υλικά και τον τύπο των ανιχνευτών που θα μελετηθούν.



Σχήμα 2.2: Ορισμός στο αρχείο γεωμετρίας του υπό δοκιμή ανιχνευτή.

Όπως βλέπουμε στην παραπάνω εικόνα στο αρχείο γεωμετρίας το κάθε στοιχείο ορίζεται με την ονομασία του [dut_1] και τις παραμέτρους τύπου στην περίπτωση αυτή ανιχνευτής που ορίζεται στο αρχείο ανιχνευτών και καλείται με την ονομασία του ”rd53a_50”, τη θέση του σε συντεταγμένες xyz και την περιστροφή του ως προς τους εκάστοτε άξονες.

- **Αρχείο με τον ορισμό του ανιχνευτή (detector model configuration):** στο αρχείο αυτό βρίσκονται οι παράμετροι που ορίζουν τον κάθε ανιχνευτή, διαστάσεις, αριθμός και μέγεθος pixel, υλικά κτλ.



Σχήμα 2.3: Ορισμός στο αρχείο ανιχνευτών του μοντέλου rd53a_50.

Βλέπουμε ένα παράδειγμα ορισμού ενός μοντέλου ανιχνευτή και συγκεκριμένα του rd53a_50 που χρησιμοποιούμε στην προσομοίωσή μας ως DUT, για τον ορισμό του εισάγουμε, τύπο και ενεργό επιφάνεια ως pixel, τις διαστάσεις τις επιφάνειας, τον αριθμό και το μέγεθος των pixels, καθώς και το υλικό και τις διαστάσεις των υπολοίπων μερών του (στήριξη, κυρίως σώμα κτλ).

Κεφάλαιο 3

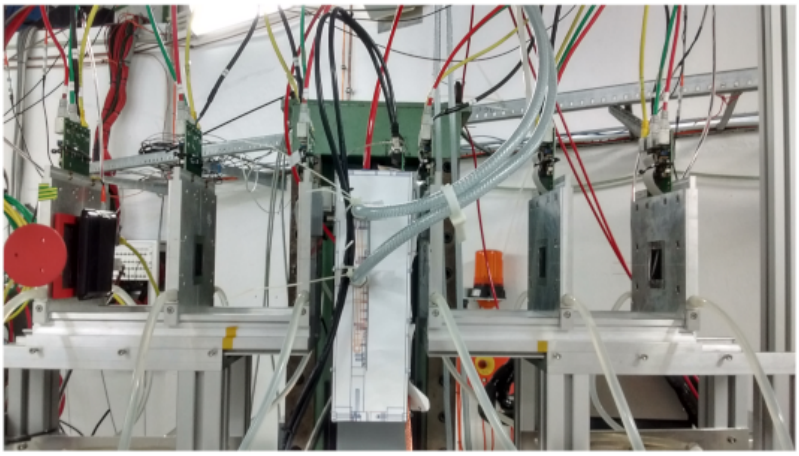
Προσομοίωση - Μελέτη Αποτελεσμάτων

3.1 Περιγραφή της διάταξης της δέσμης στο DESY και της γεωμετρίας προσομοίωσης

Σκοπός αυτής προσομοίωσης είναι ο χαρακτηρισμός μιας της διάταξης υπό δοκιμή (Device Under Test, DUT) όπως αυτή θα γινόταν στη δοκιμαστική δέσμη DESY (DESY test beam) στο Αμβούργο, η δοκιμαστική δέσμη παράγει ηλεκτρονιακές δέσμες με ενέργειες από 1 έως 6 GeV. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε μια πλειάδα δεσμών ηλεκτρονίων με ενέργειες 1GeV,3GeV και 5 GeV.

Το DUT τοποθετήθηκε στο εσωτερικό ενός τηλεσκοπίου τύπου EUDET, το οποίο χρησιμοποιείται ως σύστημα αναφοράς υψηλής ακρίβειας. Το τηλεσκόπιο αποτελείται από έξι αισθητήρες Mimosa26 (monolithic active pixel sensors – MAPS), τοποθετημένους γραμμικά κατά μήκος του άξονα της δέσμης. Τρεις επίπεδες διατάξεις βρίσκονται πριν από το DUT και τρεις μετά, στις θέσεις z = 0 mm, 100 mm, 200 mm, 571 mm, 681 mm και 793 mm, αντίστοιχα. Όπως περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα. Κάθε επίπεδο Mimosa26 διαθέτει εγγενή χωρική ανάλυση με-

ρικών μm και λειτούργησε με ανάστροφη πόλωση -4 V, που αντιστοιχεί σε βάθος απογύμνωσης περίπου 15 μm. Η σύμπτωση ενεργοποιήθηκε μέσω εξωτερικών σκανδαλιστών (scintillators) συνδεδεμένων σε Trigger Logic Unit (TLU), ώστε να διασφαλιστεί ο συγχρονισμός της ανάγνωσης μεταξύ τηλεσκοπίου και DUT.

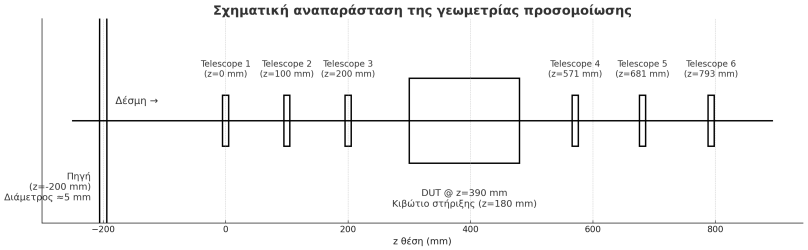


Σχήμα 3.1: Το τηλεσκόπιο DURANTA στο DESY, το DUT βρίσκεται στο κεντρικό κουτί της διάταξης.Πηγή: [24].

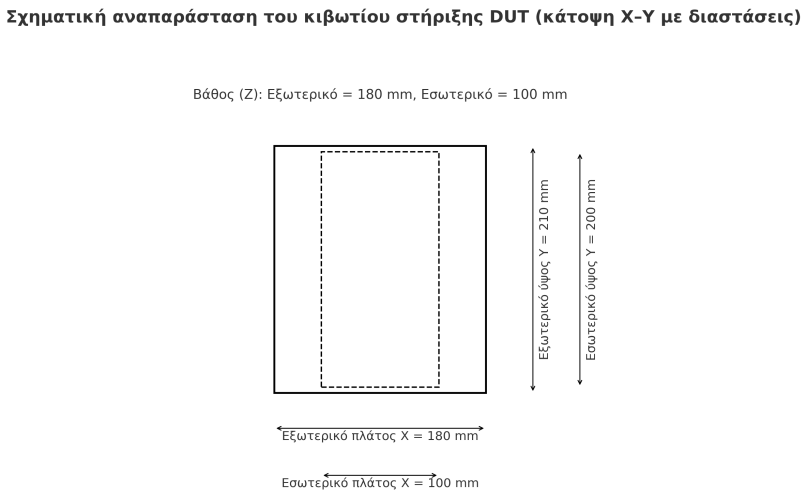
Η συσκευή υπό δοκιμή ήταν ένα πρωτότυπο RD53A, εξεταζόμενο σε διαφορετικές ενέργειες καθώς και στην ύπαρξη ή μη μαγνητικού πεδίου (B). Τοποθετήθηκε στη θέση z = 390 mm, κεντραρισμένο ως προς τον άξονα του τηλεσκοπίου και προσανατολισμένο κάθετα στη δέσμη. Το DUT λειτουργούσε με ανάστροφη πόλωση -100 V, πολύ υψηλότερη από την ονομαστική τάση απογύμνωσης των -50 V, ώστε να εξασφαλιστεί πλήρης απογύμνωση του ημιαγώγιμου όγκου. Μία παθητική μηχανική δομή στήριξης, προσομοιωμένη ως κιβώτιο από αφρό ppo με εξωτερικές διαστάσεις 180 × 210 × 180 mm^3 και εσωτερική κοιλότητα 100 × 200 × 100 mm^3, περιέβαλε το DUT στην προσομοίωση.

Η δέσμη ηλεκτρονίων για τις διάφορες ενέργειες δημιουργήθηκε με γκαουσιανό προφίλ και εγκάρσιο μέγεθος περίπου 5 mm, εγχύθηκε στη διάταξη από πηγή τοποθετημένη 200 mm πριν από το πρώτο επίπεδο του τηλεσκοπίου. Η δέσμη διαδόθηκε κατά μήκος του άξονα z

(0, 0, 1) διαπερνώντας όλη την πειραματική δομή, αναπαράγοντας με τον τρόπο αυτό τις πειραματικές συνθήκες που θα είχαμε στην δοκιμαστική δομή.



Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση της γεωμετρίας προσομοίωσης.

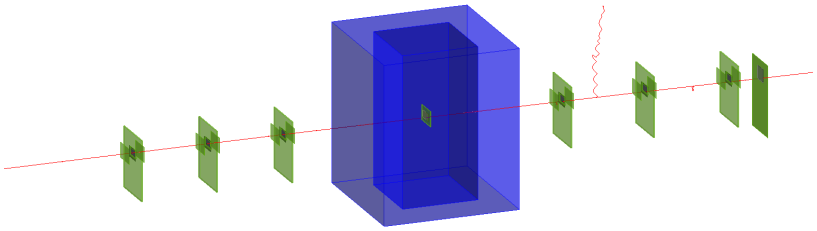


Σχήμα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση του κιβωτίου στήριξης DUT (κάτοψη X–Y με διαστάσεις)

Η προσομοίωση της διάταξης πραγματοποιήθηκε με το Allpix², σε συνδυασμό με το Geant4 για την περιγραφή της διάδοσης σωματιδίων και των απωλειών ενέργειας. Χρησιμοποιήθηκε η λίστα φυσικής FTFP_BERT_EMZ για την ακριβή μοντελοποίηση των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων των ηλεκτρονίων στο πυρίτιο. Το μέγιστο βήμα ολοκλήρωσης της Geant4 περιορίστηκε σε 1 μm για τη διατήρηση της χωρικής ακρίβειας σε λεπτά στρώματα ανιχνευτών.

Η μεταφορά φορτίου στο DUT και στα επίπεδα Mimosa26 προσομοιώθηκε με γραμμικό ηλεκτρικό πεδίο. Για το DUT εφαρμόστηκε πεδίο που αντιστοιχούσε σε πόλωση -100 V, ενώ για τα επίπεδα Mimosa26 χρησιμοποιήθηκε χαμηλότερη πόλωση -4 V με βάθος απογύμνωσης 15 μm. Τα ζεύγη ηλεκτρονίων–οπών που δημιουργήθηκαν από ιονιστικές απώλειες ενέργειας προωθήθηκαν λαμβάνοντας υπόψιν μετατόπιση (drift) και διάχυση (diffusion), με βήμα προσομοίωσης 10 φορτίων ανά βήμα σε θερμοκρασία 293 K.

Στο στάδιο ψηφιοποίησης συμπεριλήφθηκαν ρεαλιστικά χαρακτηριστικά ηλεκτρονικών. Για το DUT λήφθηκε υπόψη ηλεκτρονικός θόρυβος 50 e^-, κατώφλι 1500 e^- με γκαουσιανή διασπορά 200 e^- και QDC smearing 50 e^-. Για τα επίπεδα Mimosa26, τα αντίστοιχα μεγέθη ήταν 13 e^- θόρυβος, 60 e^- κατώφλι με διασπορά 4 e^- και αμελητέα παραμόρφωση QDC. Στις δύο περιπτώσεις η ψηφιοποίηση παρήγαγε τόσο δυαδικούς χάρτες χτυπημάτων όσο και αναλογικές μετρήσεις φορτίου, όπου αυτό ήταν ήταν δυνατόν.



Σχήμα 3.4: Γεωμετρίας προσημείωσης όπως παράγεται από το Allpix²

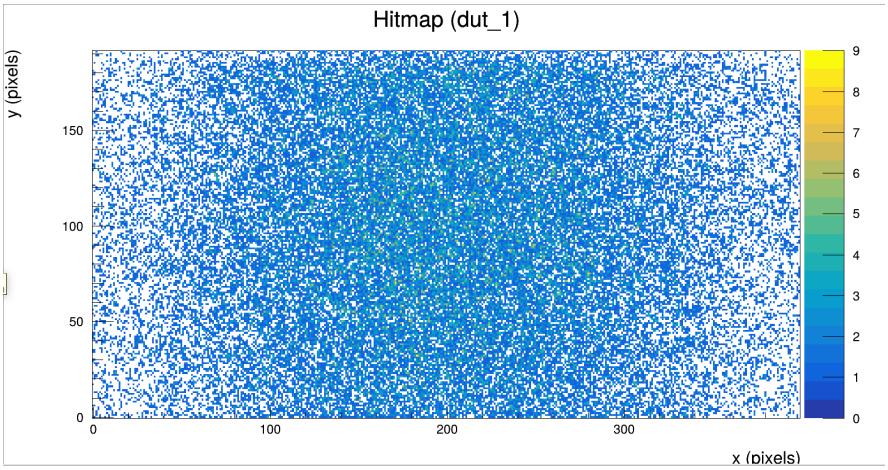
Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν τα modules DetectorHistogrammer για δημιουργία διαγραμμάτων και το ROOTObjectWriter του Allpix² για την εξαγωγή προσομοιωμένων παρατηρήσιμων μεγεθών. Αυτά περιλάμβαναν hit maps, κατανομές μεγέθους συστάδων (cluster size), residuals σε σχέση με τις θέσεις των σωματιδίων Monte Carlo και συνολικά μεγέθη χωρικής ανάλυσης. Η ρύθμιση της προσομοίωσης επομένως έχει σκοπό να αναπαραγάγει με ακρίβεια τη γεωμετρία και τις συνθήκες

λειτουργίας της δοκιμαστικής δέσμης του DESY, επιτρέποντας άμεση σύγκριση μεταξύ προσομοίωσης και πειραματικών δεδομένων όταν αυτά είναι στην διάθεσή μας.

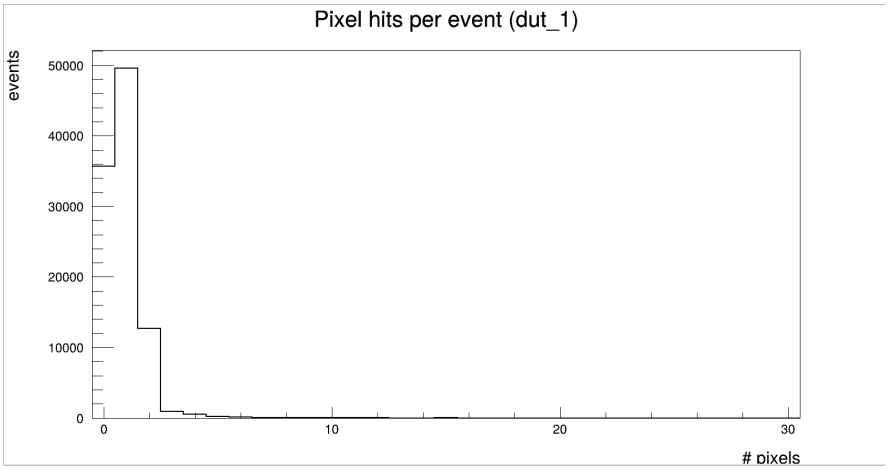
3.1.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

3.1.1.1 Δέσμη 1GeV χωρίς μαγνητικό πεδίο

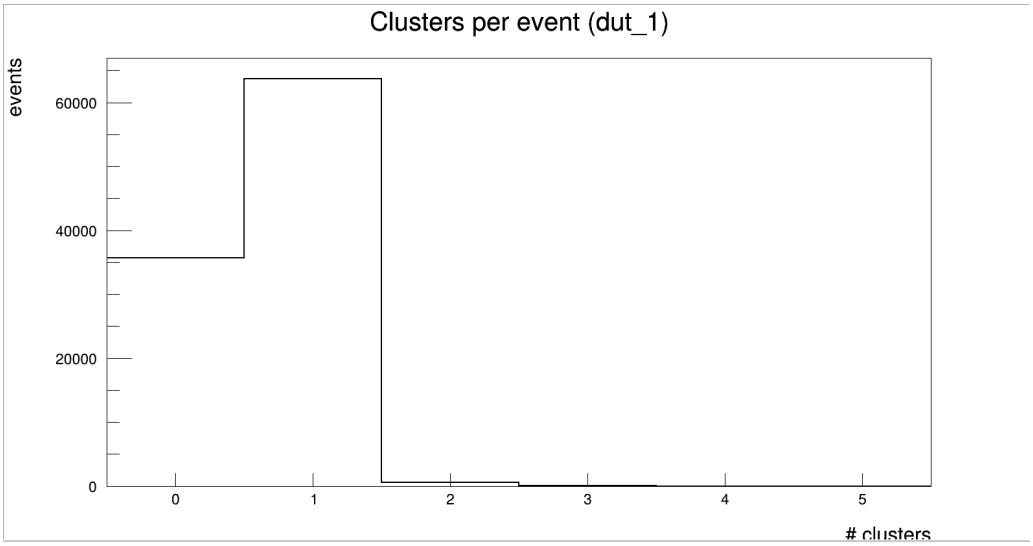
Μετά το τρέξιμο της προσομοίωσης για ενέργεια προσπίπτουσας δέσμης 1 GeV χωρίς την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου B=0T πήραμε τα παρακάτω διαγράμματα για μελέτη.



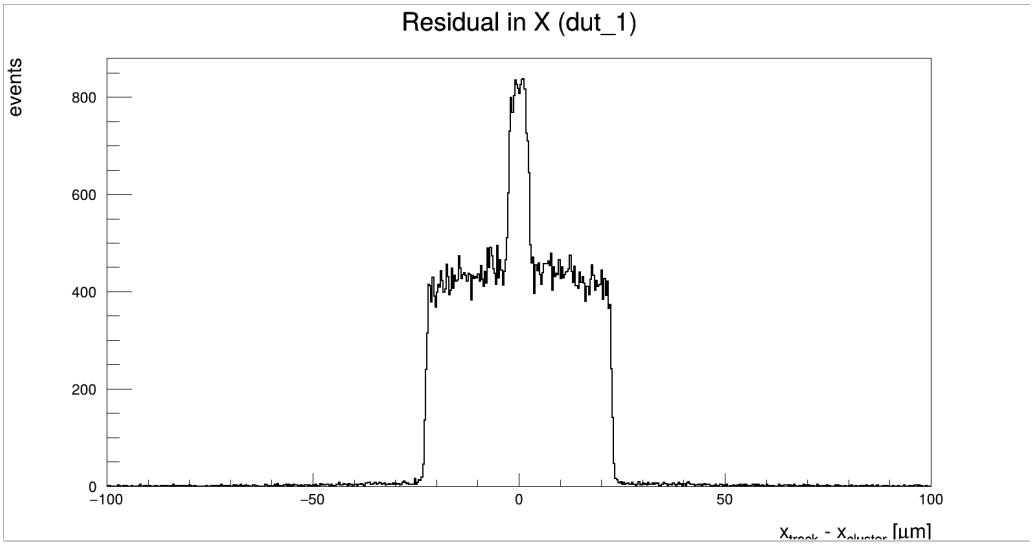
Σχήμα 3.5: Χάρτης πρόσπτωσης (Hitmap) για ενέργεια 1GeV χωρίς B.



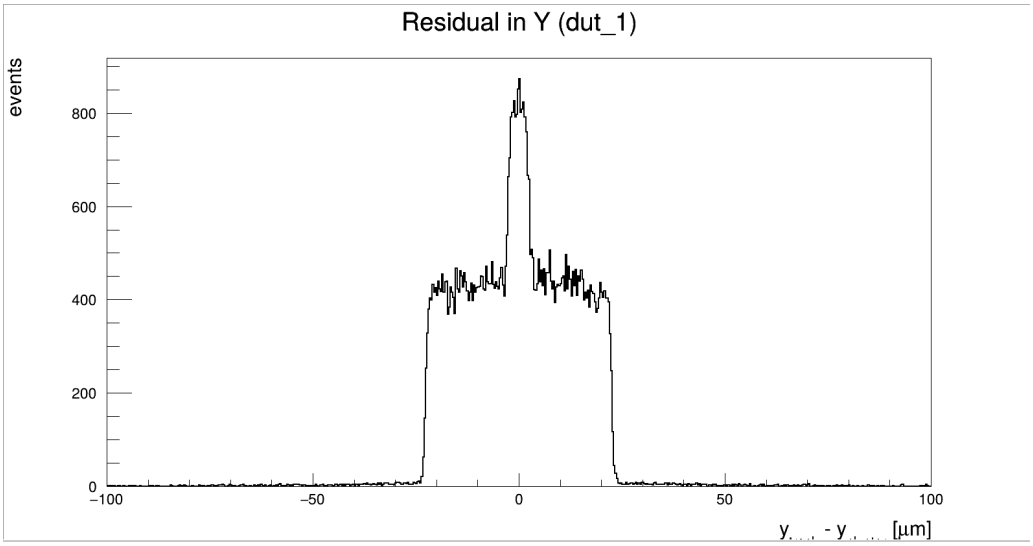
Σχήμα 3.6: Γεγονότα πρόσπτωσης στην προσομοίωση για ενέργεια 1GeV χωρίς B.



Σχήμα 3.7: Μέγεθος Cluster στην προσομοίωση για ενέργεια 1GeV χωρίς B.



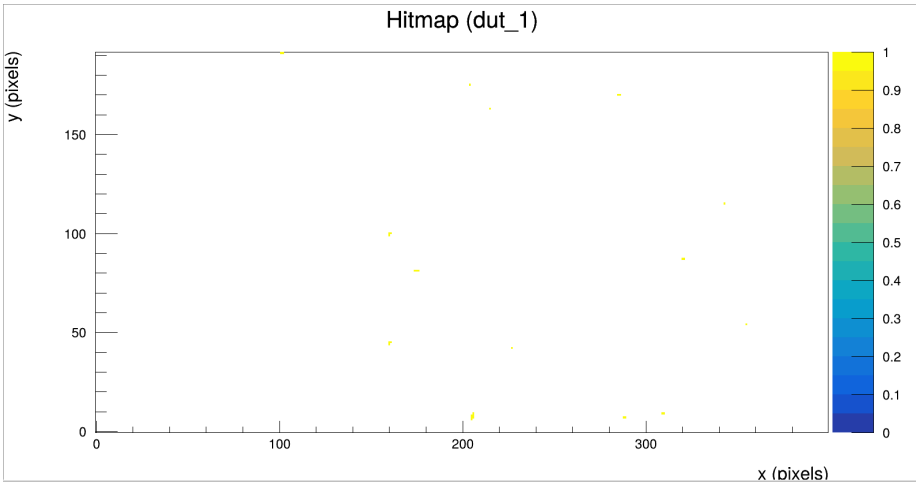
Σχήμα 3.8: Residual κατά X στην προσομοίωση για ενέργεια 1GeV χωρίς B.



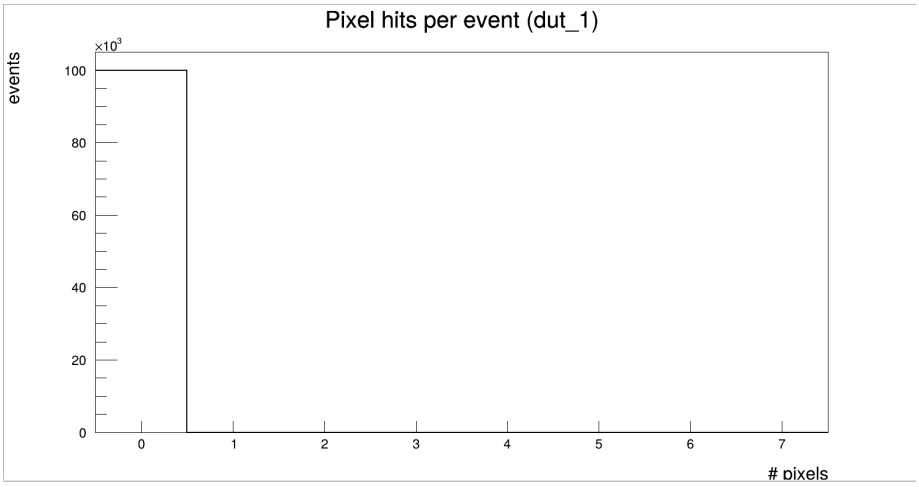
Σχήμα 3.9: Residual κατά X στην προσομοίωση για ενέργεια 1GeV χωρίς B.

3.1.1.2 Δέσμη 1GeV με μαγνητικό πεδίο

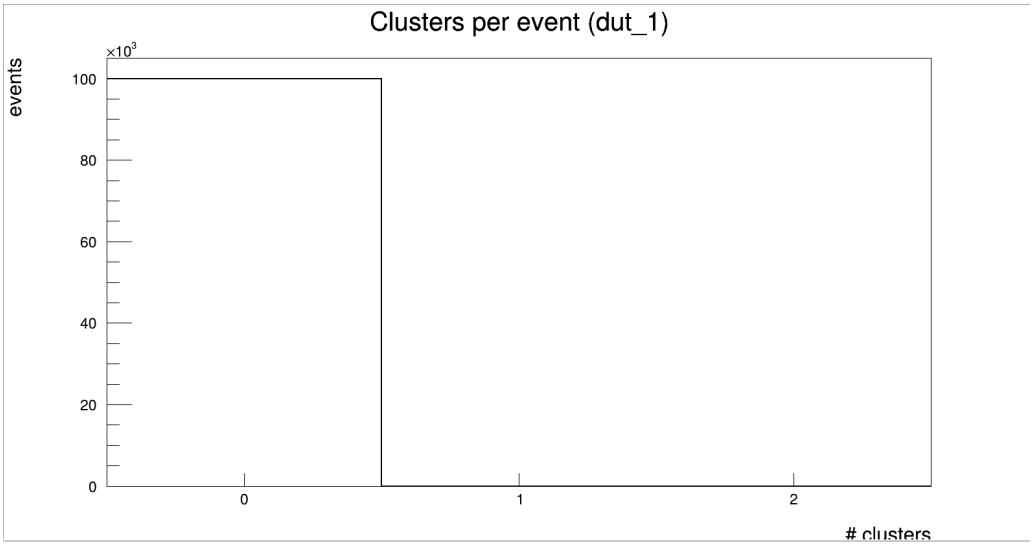
Μετά το τρέξιμο της προσομοίωσης για ενέργεια προσπίπτουσας δέσμης 1 GeV και την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου B=0.65T πήραμε τα παρακάτω διαγράμματα για μελέτη.



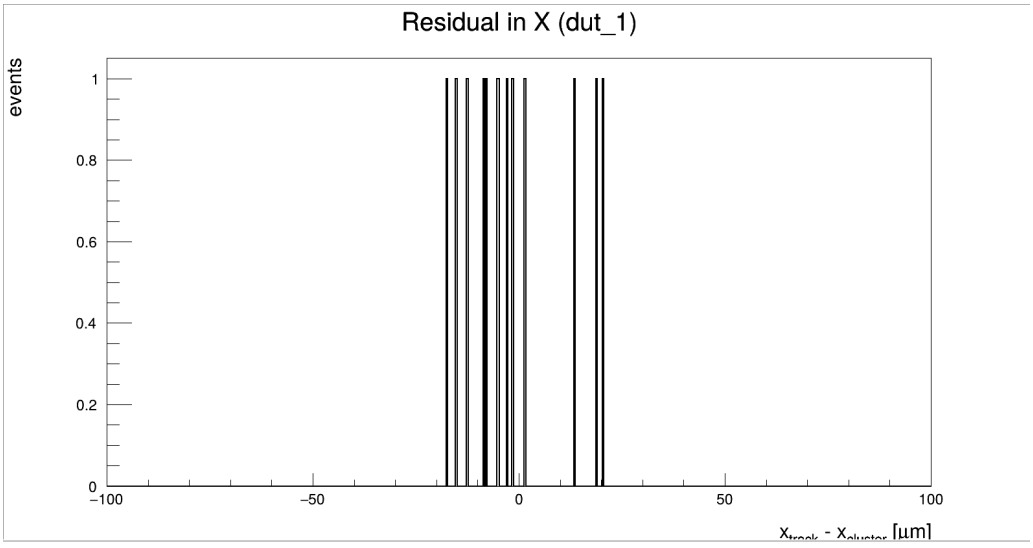
Σχήμα 3.10: Χάρτης πρόσπτωσης (Hitmap) για ενέργεια 1GeV με B=0.65T.



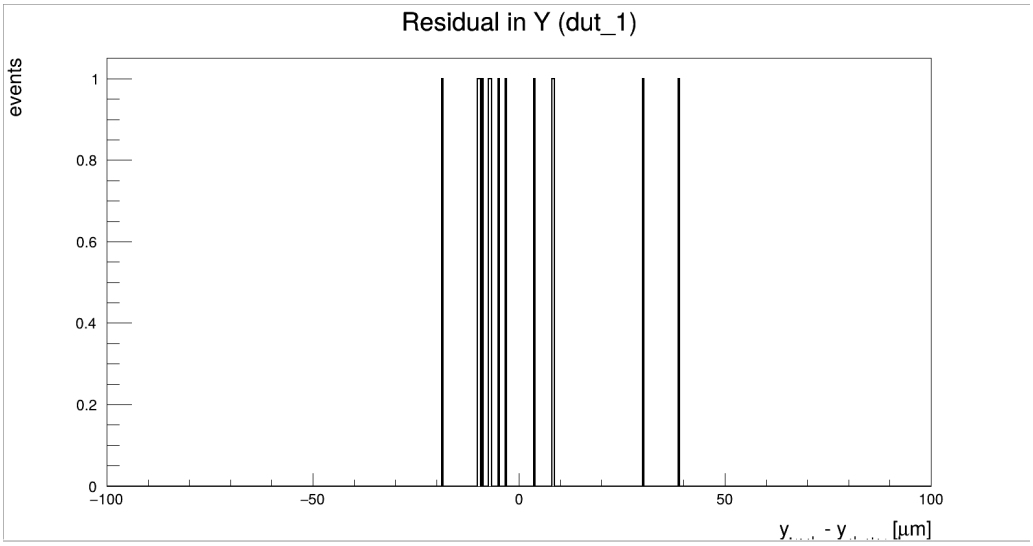
Σχήμα 3.11: Γεγονότα πρόσπτωσης στην προσομοίωση για ενέργεια 1GeV με B=0.65T.



Σχήμα 3.12: Μέγεθος Cluster στην προσομοίωση για ενέργεια 1GeV με B=0.65T.



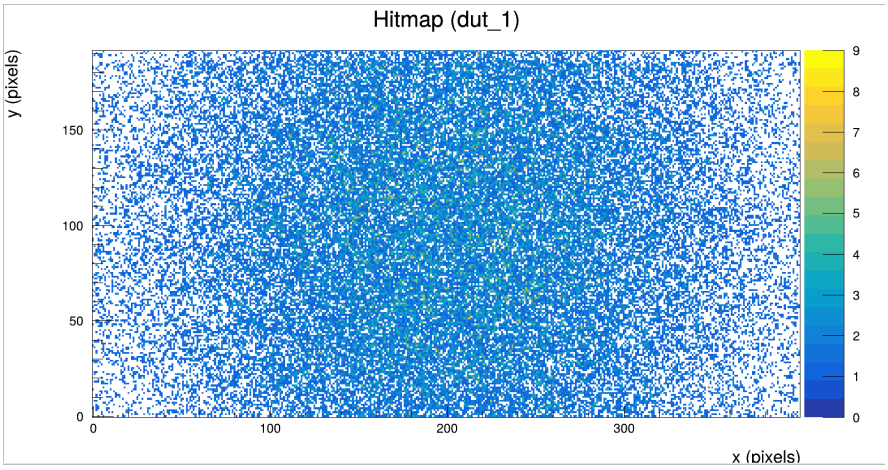
Σχήμα 3.13: Residual κατά X στην προσομοίωση για ενέργεια 1GeV με B=0.65T.



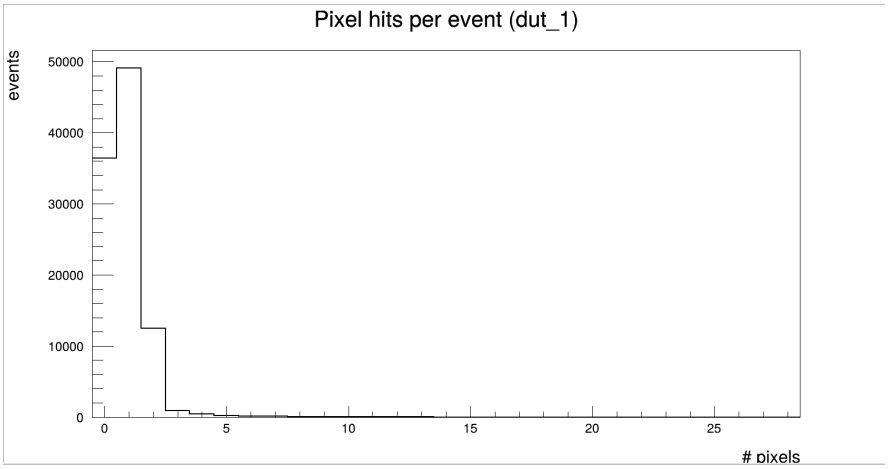
Σχήμα 3.14: Residual κατά X στην προσομοίωση για ενέργεια 1GeV με B=0.65T.

3.1.1.3 Δέσμη 3GeV χωρίς μαγνητικό πεδίο

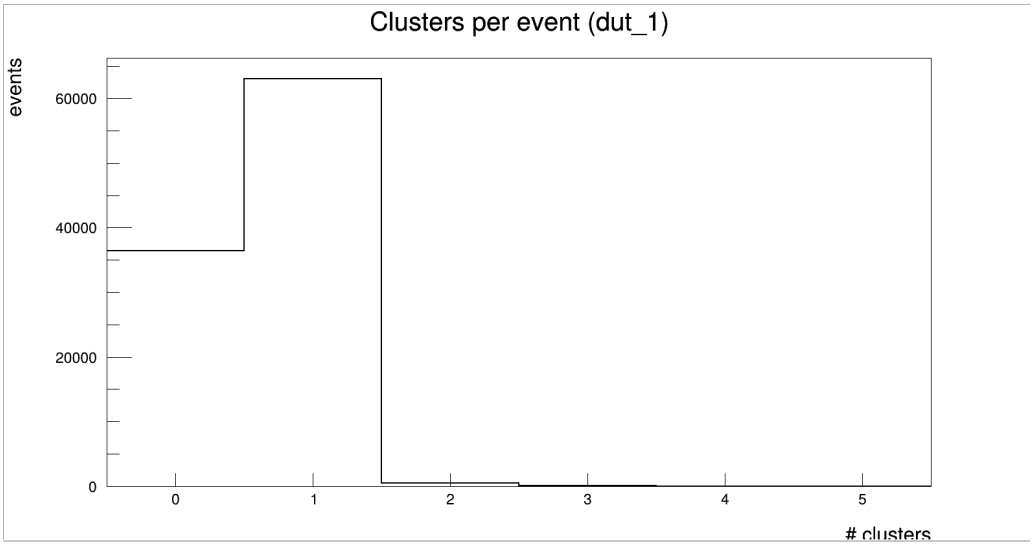
Μετά το τρέξιμο της προσομοίωσης για ενέργεια προσπίπτουσας δέσμης 3 GeV χωρίς την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου B=0T πήραμε τα παρακάτω διαγράμματα για μελέτη.



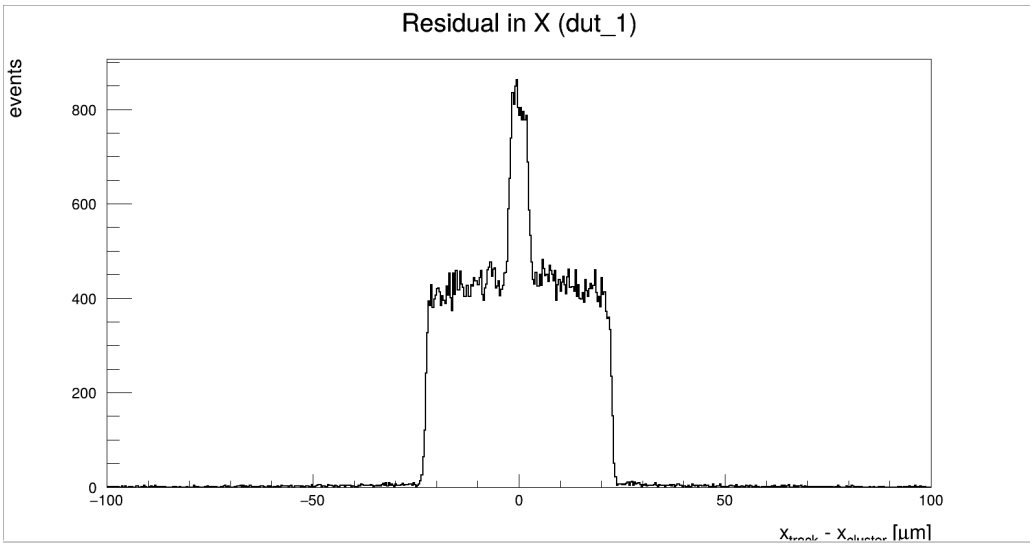
Σχήμα 3.15: Χάρτης πρόσπτωσης (Hitmap) για ενέργεια 3GeV χωρίς B.



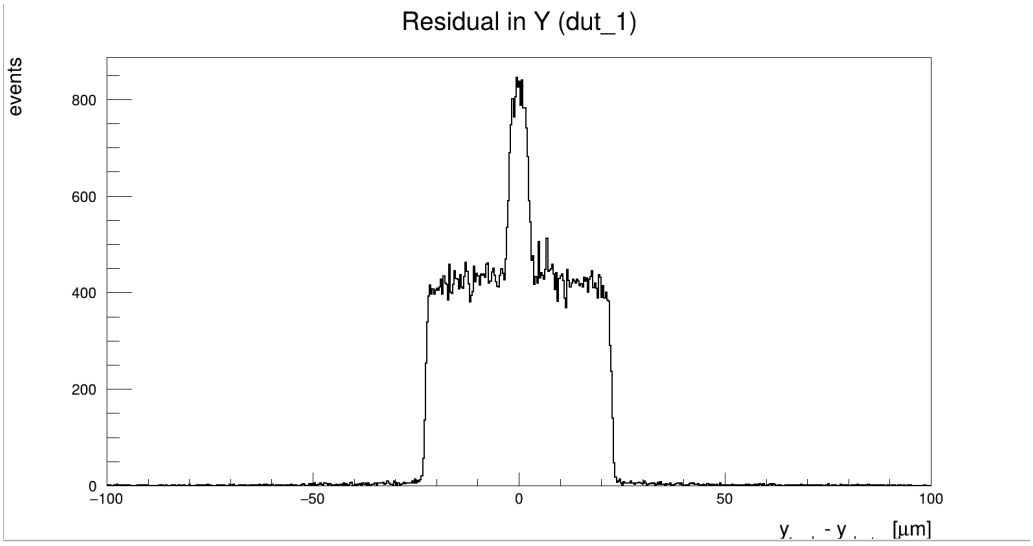
Σχήμα 3.16: Γεγονότα πρόσπτωσης στην προσομοίωση για ενέργεια 3GeV χωρίς B.



Σχήμα 3.17: Μέγεθος Cluster στην προσομοίωση για ενέργεια 3GeV χωρίς B.



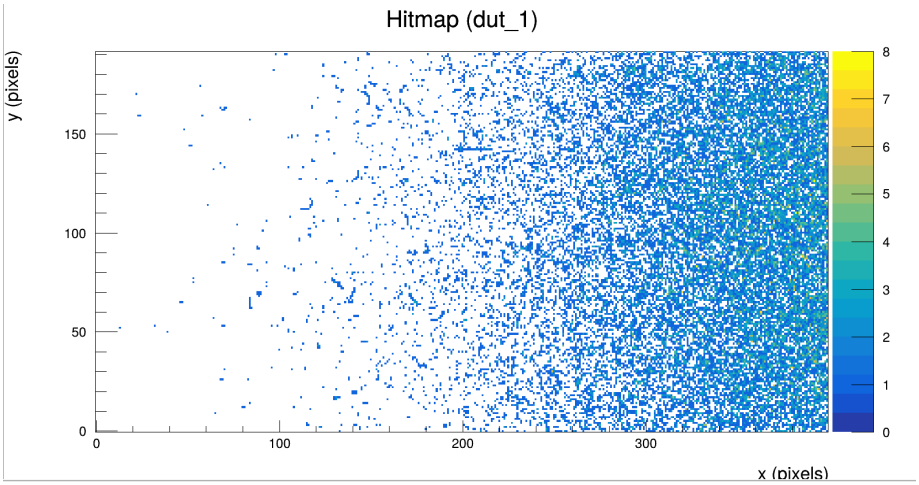
Σχήμα 3.18: Residual κατά X στην προσομοίωση για ενέργεια 3GeV χωρίς B.



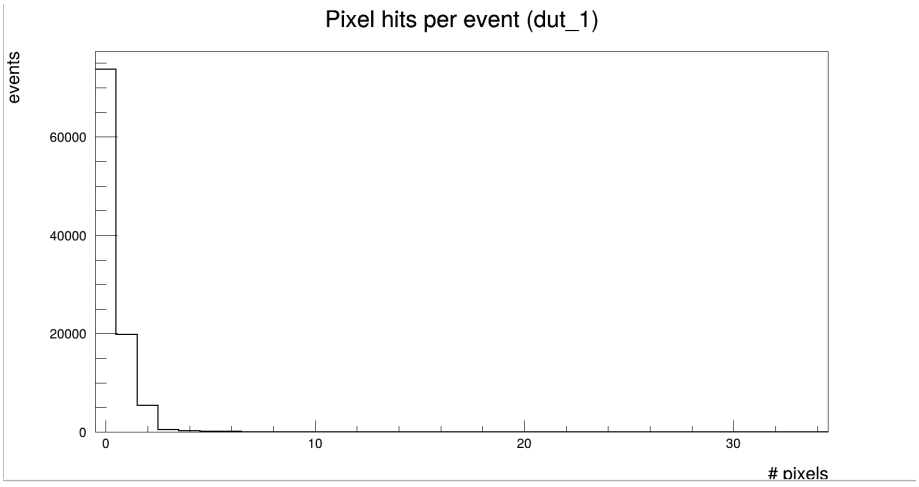
Σχήμα 3.19: Residual κατά X στην προσομοίωση για ενέργεια 3GeV χωρίς B.

3.1.1.4 Δέσμη 3GeV με μαγνητικό πεδίο

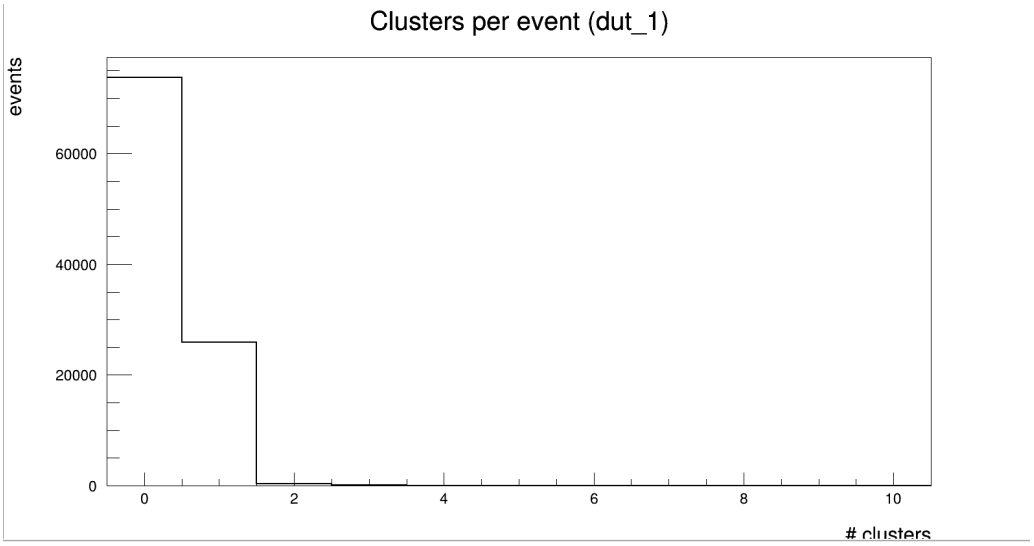
Μετά το τρέξιμο της προσομοίωσης για ενέργεια προσπίπτουσας δέσμης 3 GeV και την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου B=0.65T πήραμε τα παρακάτω διαγράμματα για μελέτη.



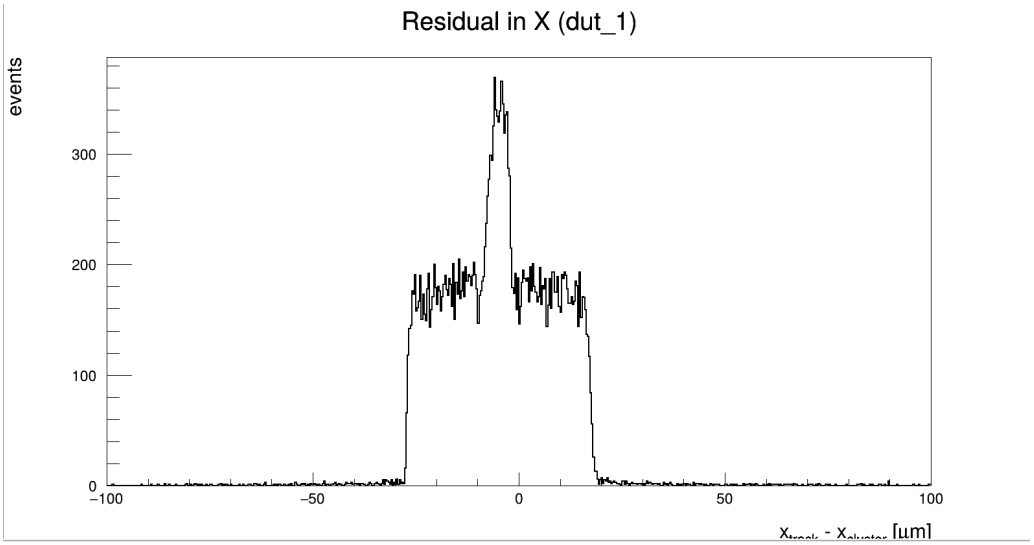
Σχήμα 3.20: Χάρτης πρόσπτωσης (Hitmap) για ενέργεια 3GeV με B=0.65T.



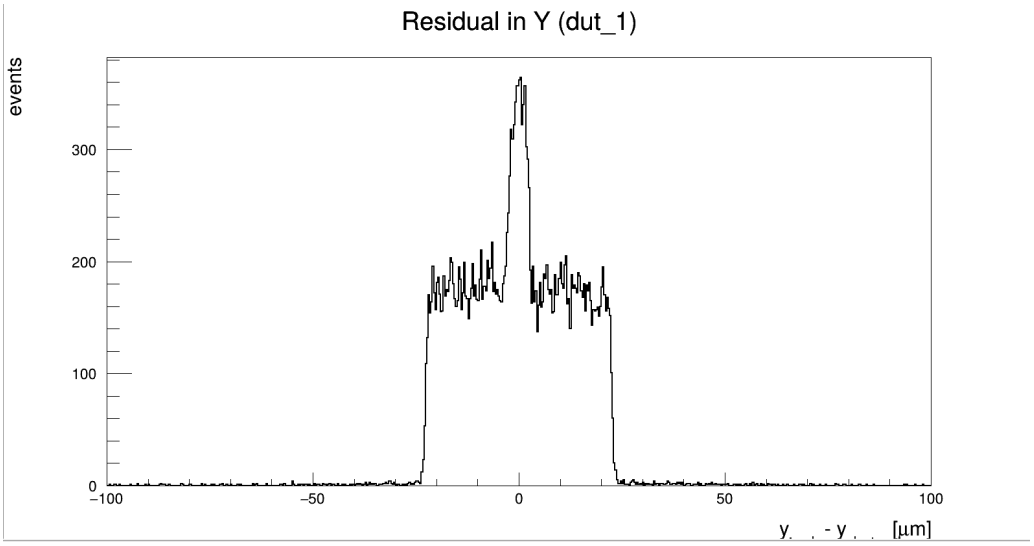
Σχήμα 3.21: Γεγονότα πρόσπτωσης στην προσομοίωση για ενέργεια 3GeV με B=0.65T.



Σχήμα 3.22: Μέγεθος Cluster στην προσομοίωση για ενέργεια 3GeV με B=0.65T.



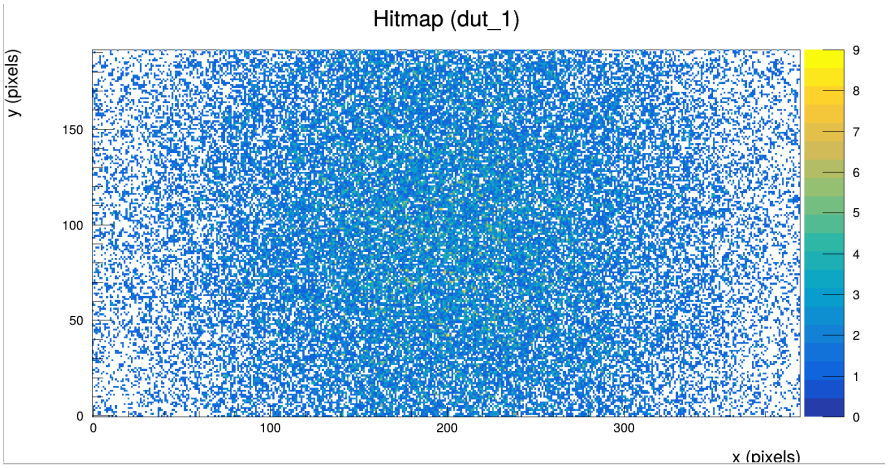
Σχήμα 3.23: Residual κατά X στην προσομοίωση για ενέργεια 3GeV με B=0.65T.



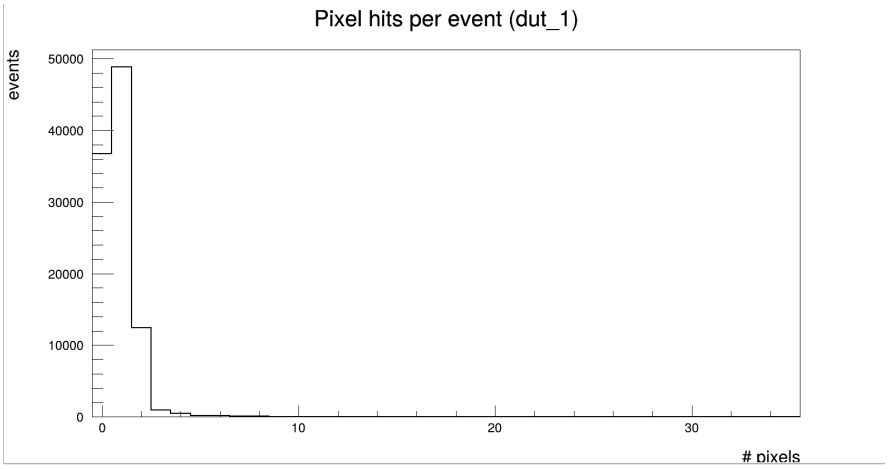
Σχήμα 3.24: Residual κατά X στην προσομοίωση για ενέργεια 3GeV με B=0.65T.

3.1.1.5 Δέσμη 5GeV χωρίς μαγνητικό πεδίο

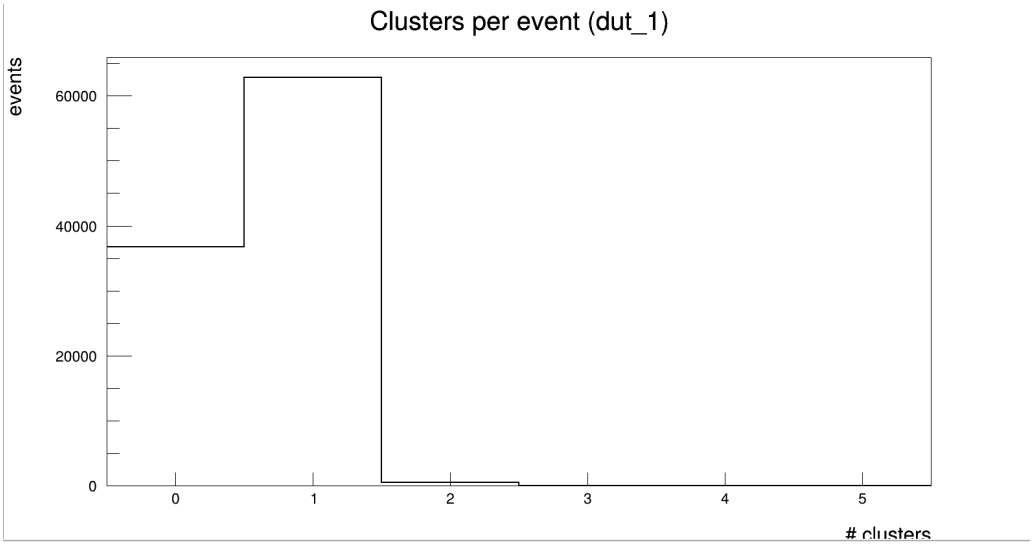
Μετά το τρέξιμο της προσομοίωσης για ενέργεια προσπίπτουσας δέσμης 5 GeV χωρίς την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου B=0T πήραμε τα παρακάτω διαγράμματα για μελέτη.



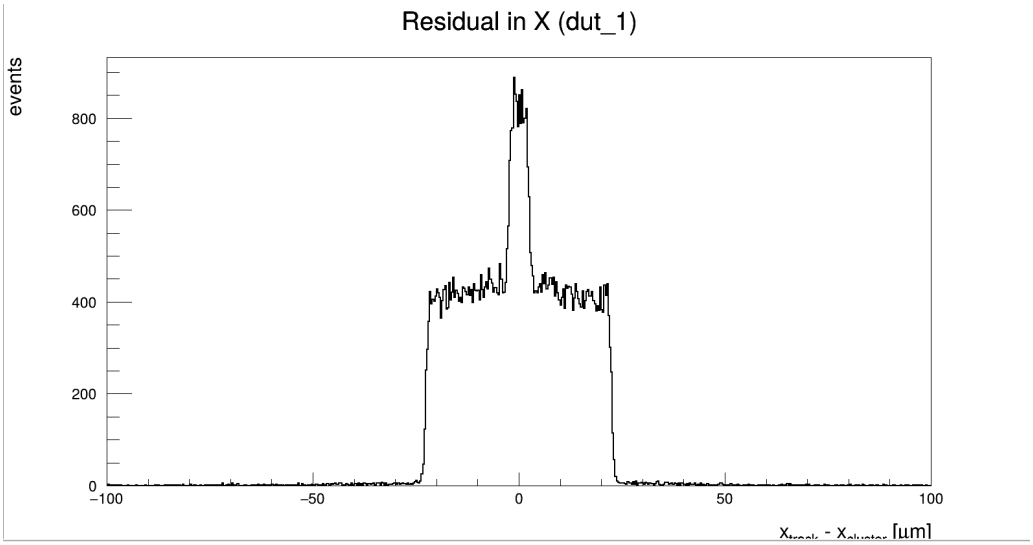
Σχήμα 3.25: Χάρτης πρόσπτωσης (Hitmap) για ενέργεια 5GeV χωρίς B.



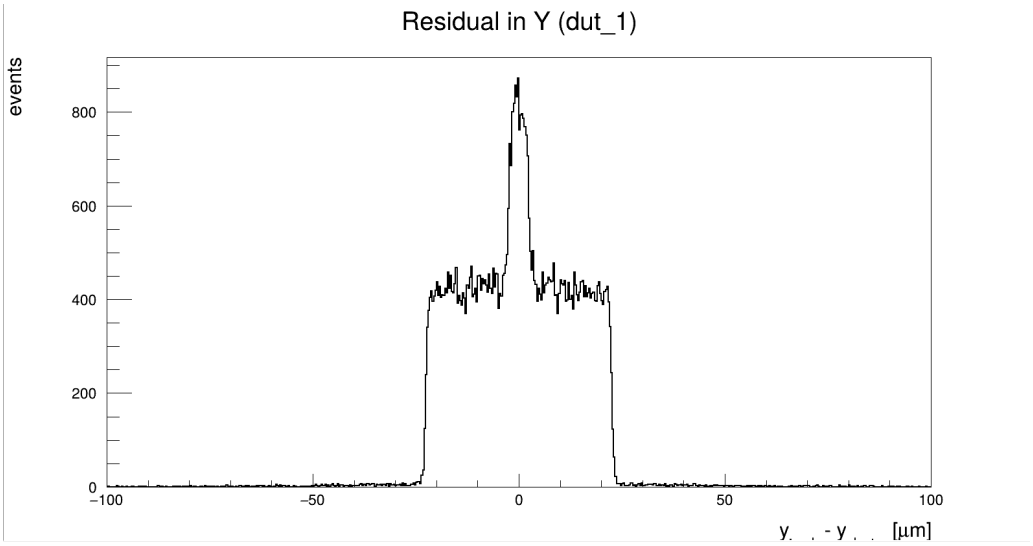
Σχήμα 3.26: Γεγονότα πρόσπτωσης στην προσομοίωση για ενέργεια 5GeV χωρίς B.



Σχήμα 3.27: Μέγεθος Cluster στην προσομοίωση για ενέργεια 5GeV χωρίς B.



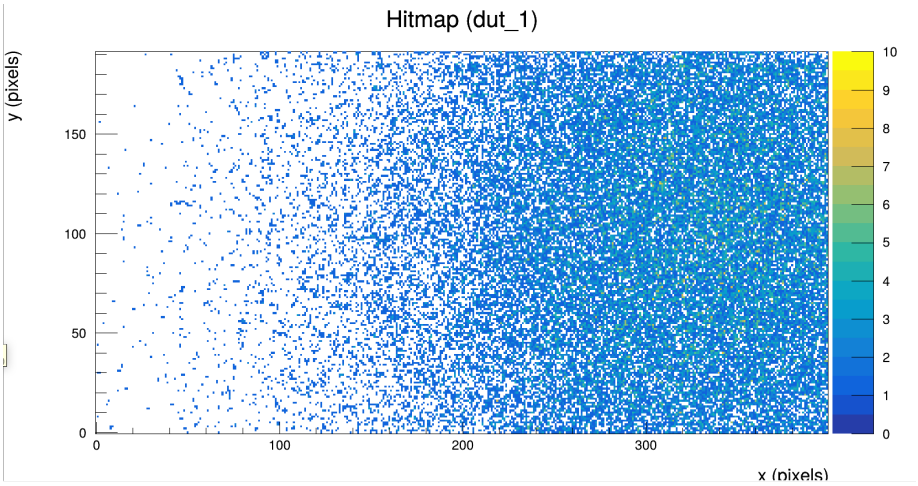
Σχήμα 3.28: Residual κατά X στην προσομοίωση για ενέργεια 5GeV χωρίς B.



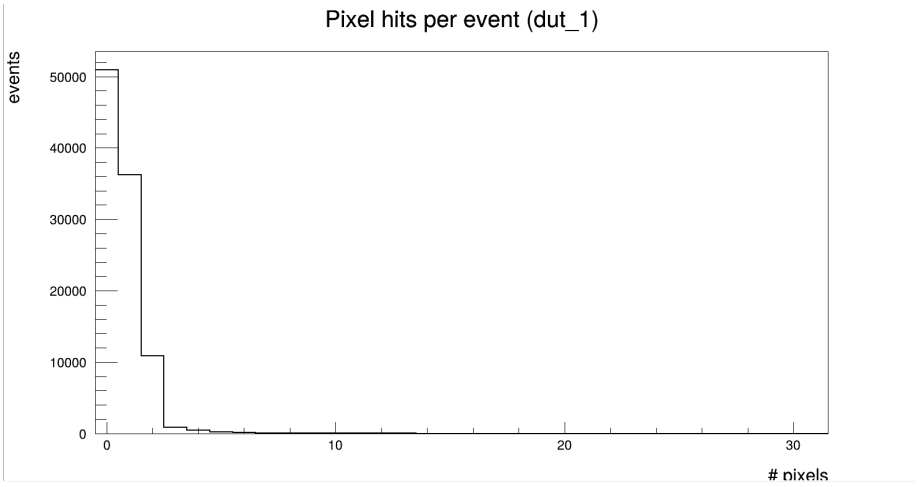
Σχήμα 3.29: Residual κατά X στην προσομοίωση για ενέργεια 5GeV χωρίς B.

3.1.1.6 Δέσμη 5GeV με μαγνητικό πεδίο

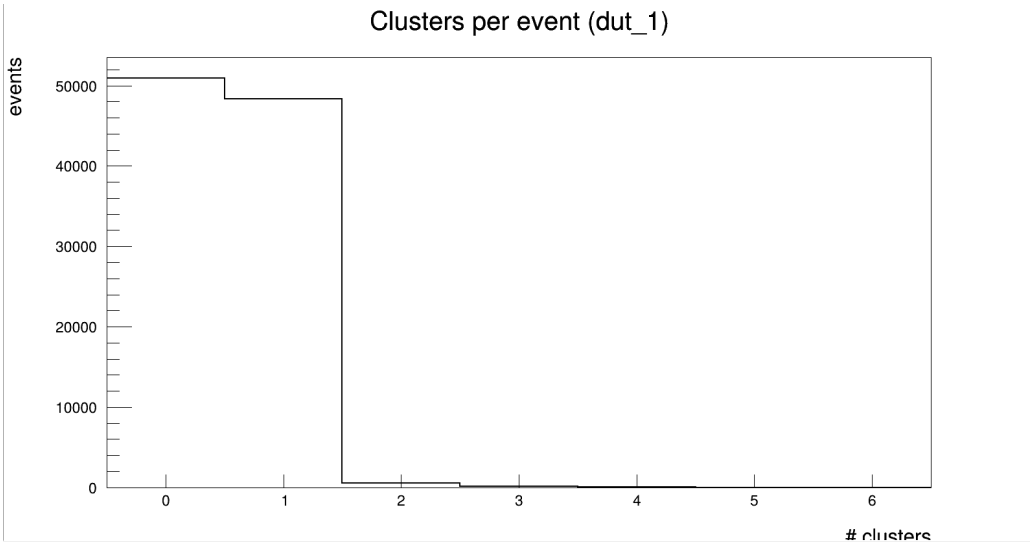
Μετά το τρέξιμο της προσομοίωσης για ενέργεια προσπίπτουσας δέσμης 5 GeV και την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου B=0.65T πήραμε τα παρακάτω διαγράμματα για μελέτη.



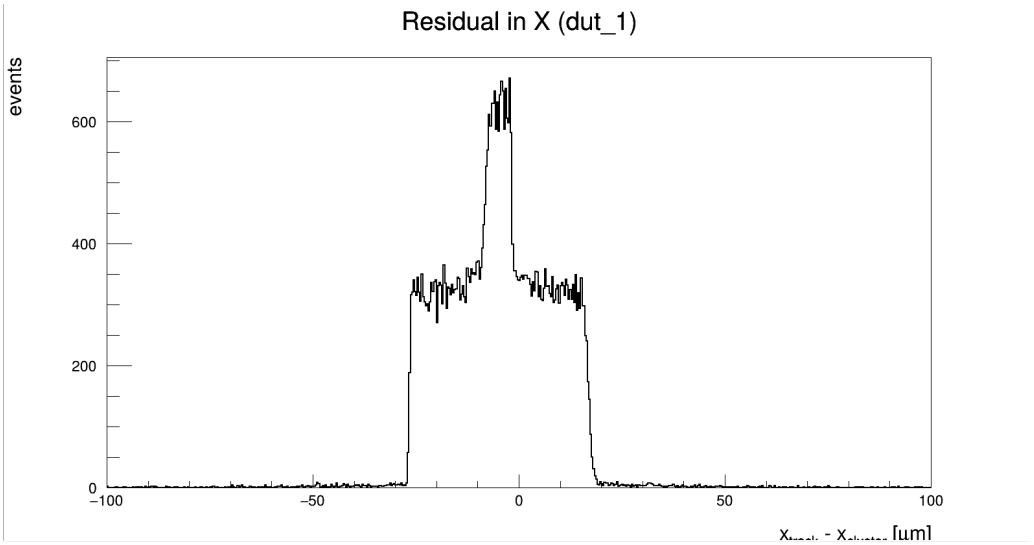
Σχήμα 3.30: Χάρτης πρόσπτωσης (Hitmap) για ενέργεια 5GeV με B=0.65T.



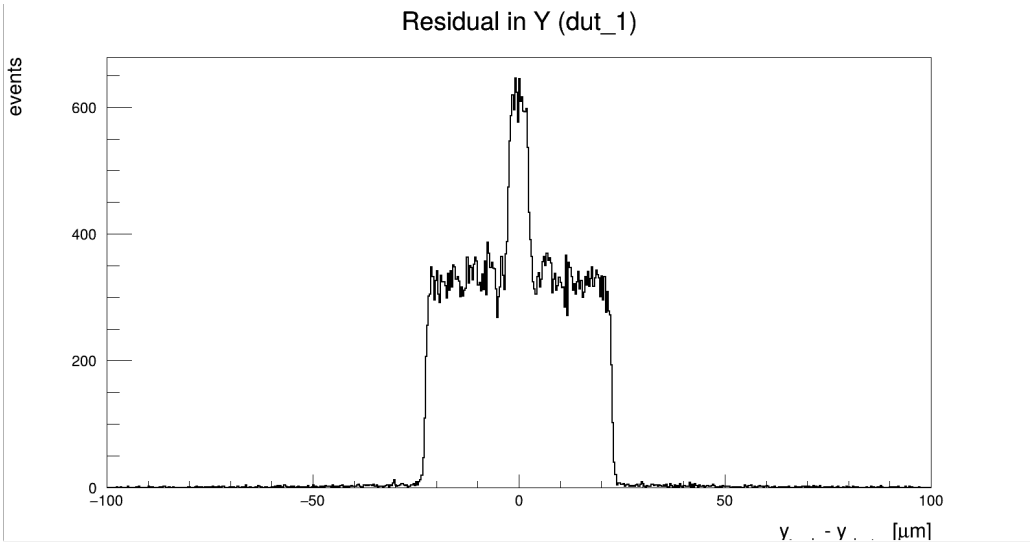
Σχήμα 3.31: Γεγονότα πρόσπτωσης στην προσομοίωση για ενέργεια 5GeV με B=0.65T.



Σχήμα 3.32: Μέγεθος Cluster στην προσομοίωση για ενέργεια 5GeV με B=0.65T.



Σχήμα 3.33: Residual κατά X στην προσομοίωση για ενέργεια 5GeV με B=0.65T.



Σχήμα 3.34: Residual κατά X στην προσομοίωση για ενέργεια 5GeV με B=0.65T.

Κεφάλαιο 4

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης

4.1 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

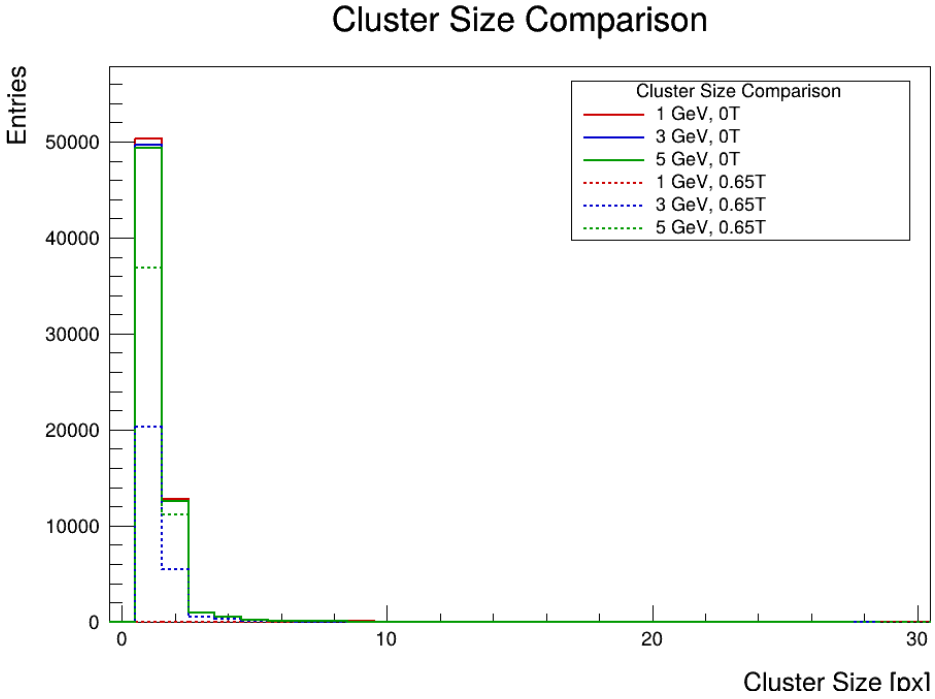
Παρατηρούμε ότι η γεωμετρία και οι παραδοχές που χρησιμοποιήσαμε στο μοντέλο μας δίνουν ένα ρεαλιστικό αποτέλεσμα για την συμπεριφορά του ανιχνευτή μας υπό την παρακάτω λογική.

Χωρίς την παρουσία μαγνητικού πεδίου ο ανιχνευτής συμπεριφέρεται συμμετρικά και ομοιόμορφα δηλαδή δεν έχει κάποια προτιμητέα κατεύθυνση στην οποία να ανιχνεύει σωματίδια ή όχι. Με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου κατά τον άξονα Υ παρατηρούμε μετατόπιση των γεγονότων κατά τον άξονα Χ και μόνο όπως θα περίμενε κανείς από την ύπαρξη δύναμης Lorentz, αναμένουμε

$$x(L) \;=\; -\frac{q\,B_y}{2\,p}\,L^2$$

όπως παρατηρείται και στα αποτελέσματά μας. Η επίδραση του πεδίου είναι λιγότερο σημαντική στις μεγαλύτερες ενέργειες δέσμης κάτι το οποίο είναι επίσης απόλυτα αναμενόμενο καθώς μεγαλύτερης ταχύτητας σωματίδια παρουσιάζουν μικρότερη εκτροπή. Παρακάτω βλέ-

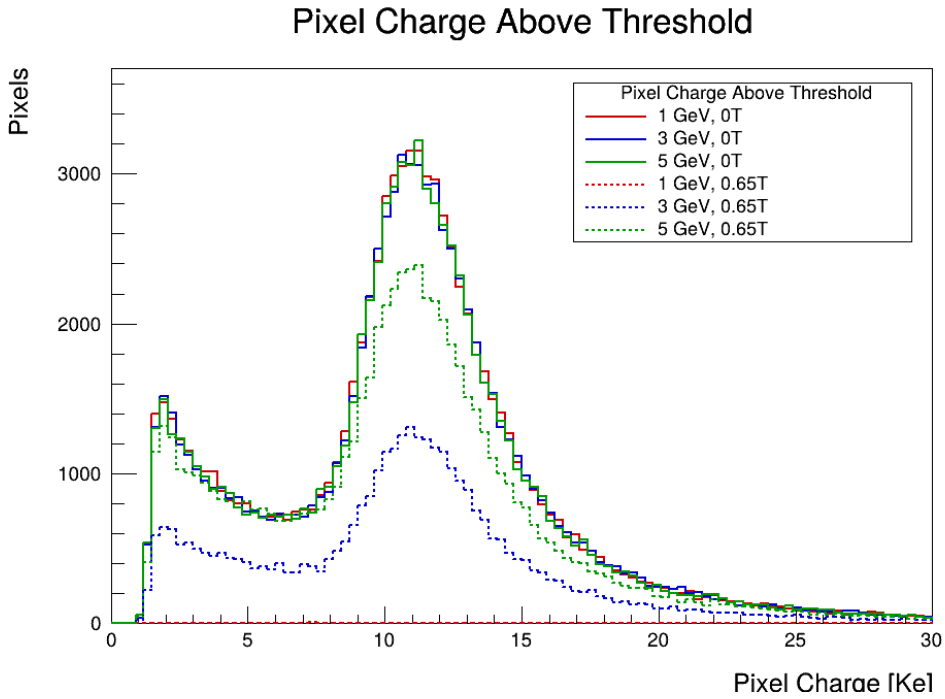
πουμε συγκριτικά σε διαγράμματα τα clusters που δημιουργούνται στην επιφάνεια του ανιχνευτή ανά περίπτωση καθώς και το φορτίο ανά περίπτωση.



Σχήμα 4.1: Σύγκριση μεγέθους cluster σε κάθε περίπτωση της προσομοίωσής μας.

Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό καθώς στην περίπτωση μη ύπαρξης μαγνητικού πεδίου έχουμε ομοιόμορφη κατανομή της δέσμης στην επιφάνεια του ανιχνευτή συνεπώς παρατηρούμε μικρό συνωστισμό γεγονότων ανά επιφάνεια και μη προτιμητέα κατεύθυνση αυτών, σε αντίθεση με την ύπαρξη πεδίου όπου μετατοπίζει τα γεγονότα κατά X ή -X ανάλογα με τον τύπο του φορτισμένου σωματιδίου.

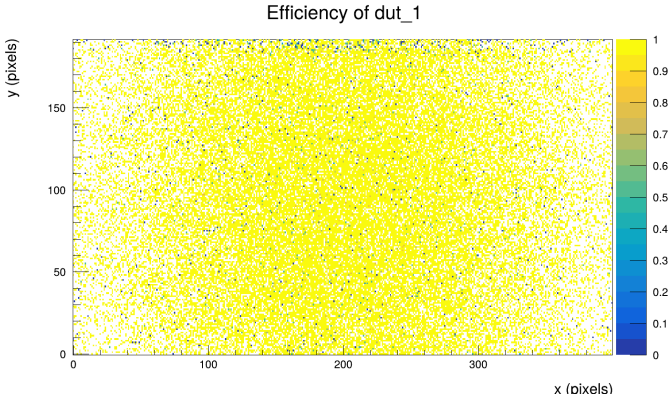
Στην περίπτωση του φορτίου που παράγεται από τις προσκρούσεις θεωρούμε γεγονότα τα οποία παράγουν φορτίο άνω του κατωφλιού που έχουμε ορίσει στις παραμέτρους της προσομοίωσής μας για το module DefaultDigitizer το οποίο μας δίνει την παρακάτω κατανομή ανά περίπτωση ενέργειας και μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 4.2: Φορτίο ανά Pixel σε κάθε περίπτωση της προσομοίωσής μας.

Βλέπουμε ότι οι δέσμες υψηλότερων ενεργειών επηρεάζονται λιγότερο από το μαγνητικό πεδίο και δίνουν περισσότερα pixels με μεγαλύτερο φορτίο, συνεπώς είναι πιο εύκολος και μεγαλύτερης ακρίβειας ο εντοπισμός και χαρακτηρισμός τους. Τέλος όσο αφορά την απόδοση του ανιχνευτή μας στην εκάστοτε περίπτωση έχουμε τα παρακάτω διαγράμματα:

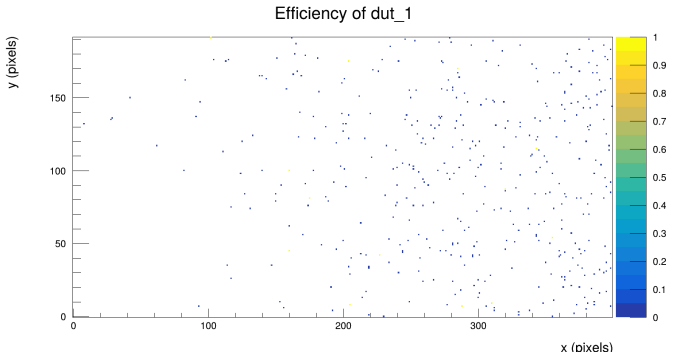
(α′) E=1 GeV, B=0 T



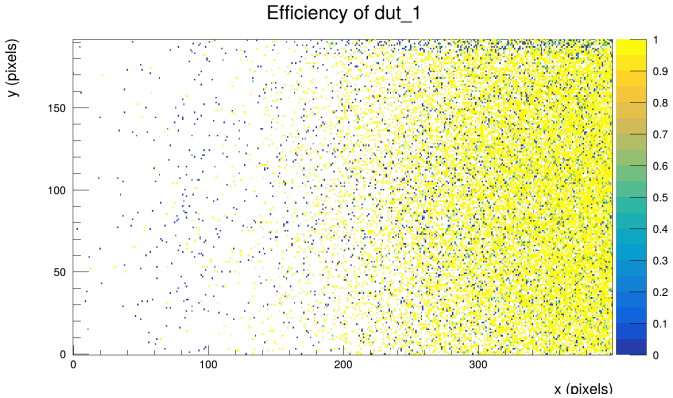
(β′) E=3 GeV, B=0 T

(γ′) E=5 GeV, B=0 T

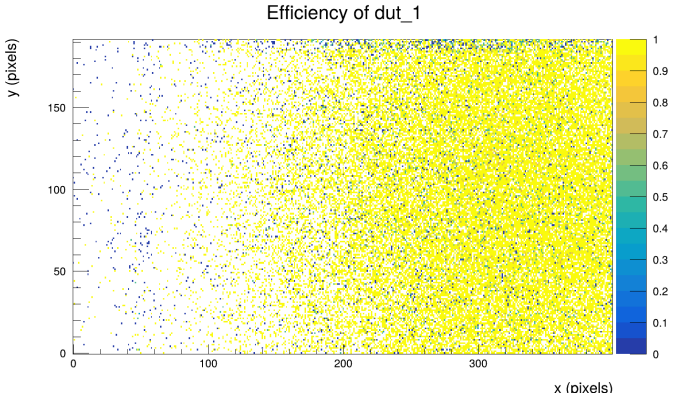
Σχήμα 4.3: Χάρτης αποδοτικότητας του DUT για τις τρεις ενέργειες δέσμης.



(α′) E=1 GeV, B=0.65 T

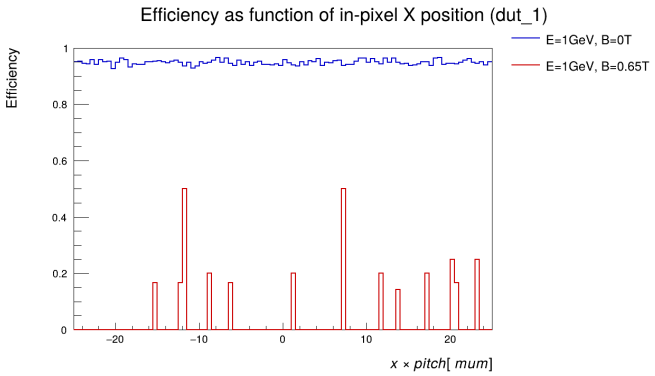


(β′) E=3 GeV, B=0.65 T

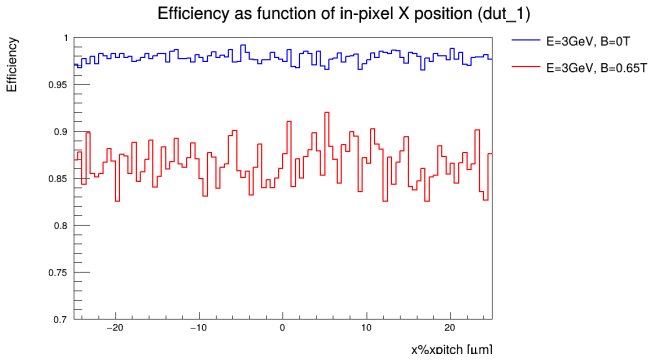


(γ′) E=5 GeV, B=0.65 T

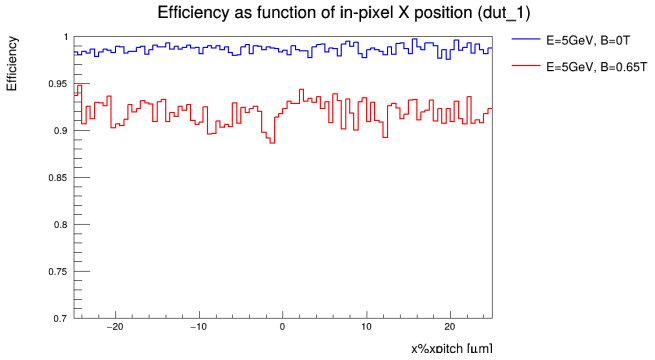
Σχήμα 4.4: Χάρτης αποδοτικότητας του DUT για τις τρεις ενέργειες δέσμης.



(α′) E=1 GeV

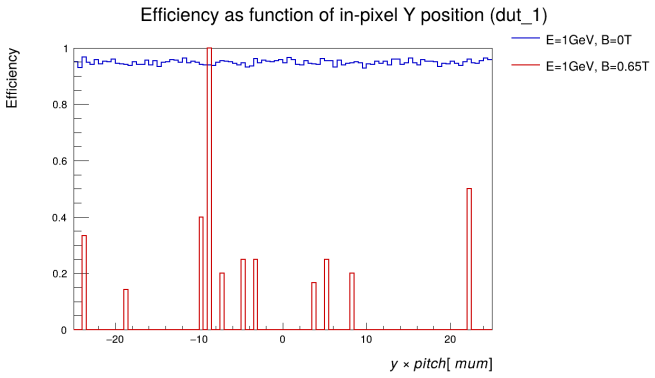


(β′) E=3 GeV

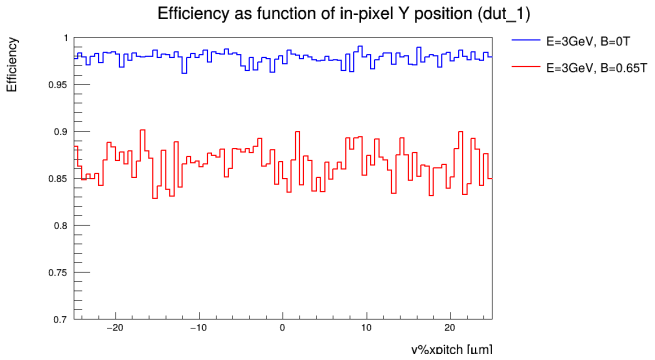


(γ′) E=5 GeV

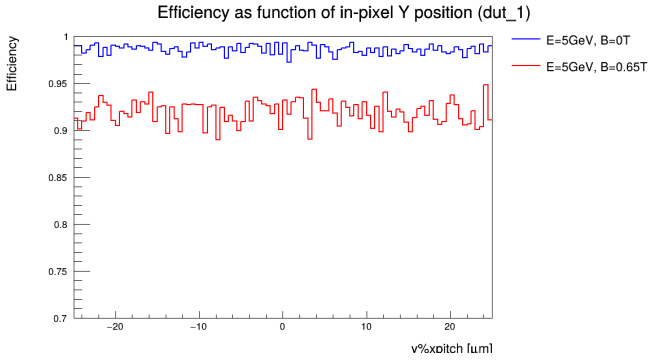
Σχήμα 4.5: Αποδοτικότητα του DUT κατά X για τις τρεις ενέργειες δέσμης.



(α′) E=1 GeV



(β′) E=3 GeV



(γ′) E=5 GeV

Σχήμα 4.6: Αποδοτικότητα του DUT κατά Y για τις τρεις ενέργειες δέσμης.

Βλέπουμε ότι σε γενικές γραμμές η αποδοτικότητα παραμένει στα-

θερή ανεξάρτητα της ενέργειας δέσμης όταν δεν έχουμε ύπαρξη μαγνητικού πεδίου, αυτό καθώς και η πολύ υψηλή τιμή της οφείλεται στο ότι υποεκτιμάται ο θόρυβος των readout ηλεκτρονικών καθώς και το μη ρεαλιστικό ηλεκτρικό πεδίο στον ανιχνευτή. Η ύπαρξη μαγνητικού πεδίου μειώνει την αποδοτικότητα ανάλογα με την εκτροπή της δέσμης αλλά ακολουθεί την ίδια χωρική κατανομή με τα hitmaps του DUT όπως αναμένεται.

4.2 Προτεινόμενες Βελτιώσεις για Μελλοντική Εργασία

Τέλος, για την περαιτέρω μελέτη και βελτίωση του μοντέλου μας προτείνονται τα εξής:

- Σύγκριση των αποτελεσμάτων μας με πραγματικά πειραματικά δεδομένα για επαλήθευση της ορθότητας του μοντέλου και ποσοτικό fine tuning των παραμέτρων μας βάση του πειραματικού DUT.
- Αντικατάσταση του γραμμικού πεδίου που χρησιμοποιήσαμε με χάρτη πεδίου που προκύπτει από προσομοίωση TCAD του ανιχνευτή.
- Χρήση μεταγενέστερης έκδοσης της πλατφόρμας Allpix² και διασύνδεση των αποτελεσμάτων με προγράμματα ηλεκτρονικών τύπου SPICE ώστε να προσομοιωθούν τα κυκλώματα readout και να εξαχθεί πιο ρεαλιστική μορφή του τελικού σήματος του ανιχνευτή.
- Μελέτη κατά βάθος της πρόσπτωσης και της δημιουργίας ζευγών e^{-}–h^{+} στην περιοχή απογύμνωσης, καθώς και της ταχύτητας drift τους προς τα αρνητικά και θετικά ηλεκτρόδια.

Κεφάλαιο 5

Κώδικας

5.1 main.conf - Κώδικας κυρίως αρχείου

Listing 5.1: main.conf

```
[AllPix]
log_level = "WARNING"
log_format = "DEFAULT"
number_of_events = 100000
detectors_file = "dut.conf"
root_file = "Histograms_3GeV_B"

[GeometryBuilderGeant4]
world_material = "air"

[MagneticFieldReader] #magnetic field
model="constant"       #remove module for
magnetic_field = 0mT 0.65T 0T #no field run

[DepositionGeant4]
physics_list = FTFP_BERT_EMZ
particle_type = "e□"
```

```
number_of_particles = 1
source_energy = 3GeV
source_position = 0um 0um −200mm
source_type = "beam"
beam_size = 5mm
beam_direction = 0 0 1
max_step_length = 1.0um

[ElectricFieldReader]
name =  "dut_1" #, "Reference"
model = "linear"
bias_voltage = − 100V
depletion_voltage = − 50V

[ElectricFieldReader]
type = "mimosa26"
model = "linear"
bias_voltage = −4V
depletion_depth = 15um

[GenericPropagation]
name =  "dut_1" #, "Reference"
temperature = 293K
charge_per_step = 10

[SimpleTransfer]
max_depth_distance = 5um

[DefaultDigitizer]
name = "dut_1"#, "Reference"
type = "rd53a_50"
electronics_noise = 50e
threshold = 1500e
```

```
threshold_smearing = 200e
qdc_smearing = 50e
output_plots = 1
qdc_resolution = 1

[DefaultDigitizer]
type = "mimosa26"
electronics_noise = 13e
threshold = 60e
threshold_smearing = 4e
qdc_smearing = 0e
output_plots = 1
qdc_resolution = 1

[ROOTObjectWriter]
file_name = "Data_3GeV□B"

[DetectorHistogrammer]
granularity = 100, 100

#[VisualizationGeant4]
#mode = "gui"
#store_parameters = true
#display_depth = 2
#style = "wireframe"
```

5.2 dut.conf - Αρχείο Γεωμετρίας

```
[telescope0]
type = ”mimosa26”
position = 0mm 0mm 0mm
orientation_mode = ”xyz”
orientation = 0deg 0deg 0deg
alignment_precision_position = 0mm 0mm 0mm

[telescope1]
type = ”mimosa26”
position = 0mm 0mm 100mm
orientation_mode = ”xyz”
orientation = 0deg 0deg 0deg
alignment_precision_position = 0mm 0mm 0mm

[telescope2]
type = ”mimosa26”
position = 0mm 0mm 200mm
orientation_mode = ”xyz”
orientation = 0deg 0deg 0deg
alignment_precision_position = 0mm 0mm 0mm

[box1]
type = ”box”
size = 180mm 210mm 180mm
inner_size = 100mm 200mm 100mm
position = 0mm 0mm 390mm
orientation = 0deg 0deg 0deg
material = ”ppofoam”
role = ”passive”
```

```
[dut_1] #changed position from 420mm to 390mm
type = ”rd53a_50”
position = 0mm 0mm 390mm
orientation_mode = ”xyz”
orientation = 0deg 0deg 0deg
alignment_precision_position = 0mm 0mm 0mm
alignment_precision_orientation = 0deg 0deg 0deg


[telescope3]
type = ”mimosa26”
position = 0mm 0mm 571mm
orientation_mode = ”xyz”
orientation = 0deg 0deg 0deg
alignment_precision_position = 0mm 0mm 0mm

[telescope4]
type = ”mimosa26”
position = 0mm 0mm 681mm
orientation_mode = ”xyz”
orientation = 0deg 0deg 0deg
alignment_precision_position = 0mm 0mm 0mm

[telescope5]
type = ”mimosa26”
position = 0mm 0mm 793mm
orientation_mode = ”xyz”
orientation = 0deg 0deg 0deg
alignment_precision_position = 0mm 0mm 0mm
```

Βιβλιογραφία

[1] Gerhard Lutz. *Semiconductor Radiation Detectors*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1999. ISBN 9783540641101. Foundational text on semiconductor detectors.

[2] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 4 edition, 2010. ISBN 9780470131480. Classic reference on radiation detection.

[3] Helmut Kolanoski and Norbert Wermes. *Particle Detectors: Fundamentals and Applications*. Oxford University Press, Oxford, 2020. ISBN 9780198858362. Textbook covering silicon and pixel detectors.

[4] Ben G. Streetman and Sanjay Banerjee. *Solid State Electronic Devices*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 6 edition, 2006. ISBN 9780131497269. pn junctions, depletion, Shockley equation.

[5] L. Rossi, P. Fischer, T. Rohe, and N. Wermes. *Pixel Detectors: From Fundamentals to Applications*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. ISBN 9783540283332. Comprehensive monograph on pixel detectors.

[6] Semiconductor detector. `https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_detector`, 2025. URL `https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_detector`. Wikipedia.

[7] P–n junction. https://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93n_junction, 2025. URL https://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93n_junction. Wikipedia.

[8] Depletion region. https://en.wikipedia.org/wiki/Depletion_region, 2025. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Depletion_region. Wikipedia.

[9] Silicon detectors — lecture 1. https://indico.cern.ch/event/1374332/sessions/545939/attachments/2858788/5001138/silicon-detectors-1.pdf, 2024. URL https://indico.cern.ch/event/1374332/sessions/545939/attachments/2858788/5001138/silicon-detectors-1.pdf. CERN Indico, event 1374332, session 545939.

[10] Shockley–ramo theorem. https://en.wikipedia.org/wiki/Shockley%E2%80%93Ramo_theorem, 2025. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Shockley%E2%80%93Ramo_theorem. Wikipedia.

[11] M. Tanabashi et al. Review of particle physics: Passage of particles through matter. *Physical Review D*, 98(3):030001, 2018. doi: 10.1103/PhysRevD.98.030001. Particle Data Group.

[12] Silicon detectors — lecture 2 (manzari). https://indico.cern.ch/event/453690/sessions/99350/attachments/1184199/1726998/2015-11_SiliconDetectors_manzari_Lecture2.pdf, 2015. URL https://indico.cern.ch/event/453690/sessions/99350/attachments/1184199/1726998/2015-11_SiliconDetectors_manzari_Lecture2.pdf. CERN Indico, event 453690, session 99350.

[13] Stopping power (particle radiation). https://en.wikipedia.org/wiki/Stopping_power_(particle_radiation), 2025. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Stopping_power_(particle_radiation). Wikipedia.

[14] Hybrid pixel detector. https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_pixel_detector, 2025. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_pixel_detector. Wikipedia.

[15] Monolithic active pixel sensor. https://en.wikipedia.org/wiki/Monolithic_active_pixel_sensor, 2025. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Monolithic_active_pixel_sensor. Wikipedia.

[16] Michael Krammer. Silicon detectors in high energy physics experiments. http://www.scholarpedia.org/article/Silicon_detectors_in_High_Energy_Physics_experiments, 2022. URL http://www.scholarpedia.org/article/Silicon_detectors_in_High_Energy_Physics_experiments. Scholarpedia.

[17] Petra Riedler. Overview of monolithic silicon pixel detectors. https://indico.cern.ch/event/374145/contributions/1796414/attachments/745477/1022655/CLIC_seminar_032015_priedler.pdf, 2015. URL https://indico.cern.ch/event/374145/contributions/1796414/attachments/745477/1022655/CLIC_seminar_032015_priedler.pdf. CLIC Seminar, CERN, 19 March 2015.

[18] ATLAS Collaboration. Atlas pixel detector technical note (p11). https://cds.cern.ch/record/528415/files/p11.pdf, 2002. URL https://cds.cern.ch/record/528415/files/p11.pdf. CERN CDS.

[19] Διαλέξεις Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας — Δρ. Α. Κατσούφη (Σχολή Φυσικής, ΕΚΠΑ). https://www.physics.ntua.gr/~katsoufi/iontizouses/HKlecture8.pdf, 2020. URL https://www.physics.ntua.gr/~katsoufi/iontizouses/HKlecture8.pdf. Lecture notes.

[20] Modern physics slides (university of ioannina). http://nuclear.physics.uoi.gr/classes/slides/mod_phys26.pdf, 2020. URL http://nuclear.physics.uoi.gr/classes/slides/mod_phys26.pdf. Lecture slides.

[21] Βιβλίο Ραδιοχημείας Καθηγητού Μισαηλίδη ΑΠΘ. https://tinyurl.com/mrbrdztj, 2010. URL https://tinyurl.com/mrbrdztj. Book reference (URL shortlink).

[22] Detectors notes (auth). http://accelerator.physics.auth.gr/Detectors.pdf, 2019. URL http://accelerator.physics.auth.gr/Detectors.pdf. Lecture notes.

[23] Ημιαγωγοί Α' Μέρος (ΔΠΘ eclass). https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMA287/diaf.%CE%97%CE%BC%CE%B9%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%BF%CE%AF%20%CE%91%20%CE%BC%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%82..pdf, 2018. URL https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMA287/diaf.%CE%97%CE%BC%CE%B9%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%BF%CE%AF%20%CE%91%20%CE%BC%CE%B5%CF%81%CE%BF%CF%82..pdf. Course notes.

[24] ATLAS Collaboration. Technical design report for the atlas inner tracker strip detector. Technical Report CERN-LHCC-2017-005; ATLAS-TDR-025, CERN, Geneva, 2017. URL https://cds.cern.ch/record/2257755. Inner Tracker Strip Detector TDR.

[25] Allpix squared project website. https://cern.ch/allpix-squared. URL https://cern.ch/allpix-squared. Project homepage.

[26] Simon Spannagel, Koen Wolters, Daniel Hynds, Niloufar Alipour Tehrani, Mathieu Benoit, Dominik Dannheim, Neal Gauvin, Andreas Nurnberg, Paul Schutze, Mateus Vicente Barreto Pinto, et al. Allpix^2: A modular simulation framework for silicon detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 901:164–172, 2018. doi: 10.1016/j.nima.2018.06.020. Open access.