

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους δασκάλους και καθηγητές μου όλα αυτά τα χρόνια, για την αγάπη που μου ενέπνευσαν στη μόρφωση και ιδιαιτέρως όλους αυτούς που με καθοδήγησαν και με βοήθησαν καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου.

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου κύριο Θεόδωρο Αλεξόπουλο , κύριο Γιώργο Τσιπολίτη και κύριο Κόκκορη Μιχαήλ για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθεια τους. Ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον κ. Αλεξόπουλο ως επιβλέπων της διπλωματικής αλλά και ως σύμβουλο στις αποφάσεις που είχα να κάνω για θέματα εκτός διπλωματικής.

Ευχαριστώ επίσης τους μεταπτυχιακούς φοιτητές του κ.Αλεξόπουλου και κυρίως τον μεταπτυχιακό φοιτητή Λεοντοίνη Στέφανο για την πολύτιμη βοήθεια τους σε θέματα κώδικα Root και χρήσης του λειτουργικού Linux όπως και του προγράμματος Latex.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει στους γονείς μου για την αστείρευτη αγάπη τους, την υπομονή τους, την κατανόηση, καθώς επίσης και την ηθική και υλική υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου και γενικότερα στη ζωή μου.

Πρόλογος

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με τους ανιχνευτές Micromegas. Οι ανιχνευτές Micromegas αποτελούν μια καινούρια γενιά ανιχνευτών με πολλά υποσχόμενες ιδιότητες (όπως η καλή χωρική ακρίβεια, σκληρότητα ακτινοβολίας, υψηλός ρυθμός μέτρησης, γρήγορη ανάκαμψη, καλή ενεργειακή ανάλυση κλπ) που τους καθιστούν κατάλληλους για διάφορες εφαρμογές. Έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί ή θα χρησιμοποιηθούν σε διάφορα πειράματα σωματιδιακής φυσικής σε όλο τον κόσμο (π.χ. CAST, COMPASS, HELLAZ, TOF), μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ιατρικές εφαρμογές (π.χ. κρυσταλλογραφία πρωτεϊνών, ιατρική ραδιογραφία, ακτινογραφία-β) και είναι υπό μελέτη ώστε να χρησιμοποιηθούν ως ανιχνευτές ανίχνευσης τροχίας (όπως οι μιονικοί ανιχνευτές) στο πείραμα super LHC.

Με βάση τον στόχο για την χρήση τους στο ποιο πάνω πείραμα έκανα την μελέτη του Micromegas ως προς το φαινόμενο crosstalk και πως εμφανίζεται σε αυτόν με την χρήση του προγράμματος HSpice που κάνει προσομοίωση κυκλωμάτων. Επίσης έγινε και μία σύγκριση με τον ανταγωνιστικό ανιχνευτή TGC ως προς το φαινόμενο αυτό.

Επίσης έγινε μελέτη της κατανομής της ενέργειας στο χώρο του ανιχνευτή Micromegas στέλνοντας φωτόνια από διάφορες ραδιενεργές πηγές με την χρήση του προγράμματος Fluka (Monte Carlo προσομοίωση) με στόχο την παρατήρηση του Argon Escape και την σύγκριση με την πειραματική κατανομή. Η μελέτη αυτή έγινε με στόχο να γίνει fitting των κορυφών που εμφανίζονται στη προσομοίωση σε Gaussian κατανομές ούτως ώστε να γίνει μια ταύτιση με τα πειραματικά δεδομένα.

Abstract

In this paper we dealt with Micromegas detectors. Micromegas detectors are a new generation of detectors with promising properties (such as good spatial accuracy, toughness radiation, high rate measurement, rapid recovery, good energy resolution, etc.) that make them suitable for various applications. They have been used or will be used in various particle physics experiments around the world (eg CAST, COMPASS, HELLAZ, TOF), also can be used in medical applications (eg protein crystallography, medical radiography, X-b) and are under study to be used as detectors for track detection (like muon detectors) in the experiment super LHC. Based on the objective to use them to the above experiment, I did the study of Micromegas in the crosstalk phenomenon and how it appears to him, by using the program HSpice for simulation electronic circuits. Also a comparison was made with the competitive TGC detector in this phenomenon.

There is also a study of the energy distribution at the detector Micromegas using the program for simulations Fluka (Monte Carlo); sending photons from various radioactive sources to the observation of Argon Escape and for a comparison with the experimental distribution.

Περιεχόμενα

1 Περιγραφή φαινομένων που εμφανίζονται κατά την ανίχνευση σωματιδίων σε αέρια	4
1.1 Φωτόνια	4
1.1.1 Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	5
1.2 Ηλεκτρόνια	6
1.2.1 Απώλεια ενέργειας λόγω αλληλεπίδρασης Coulomb	6
1.2.2 Η κατανομή απώλεια ενέργειας	6
1.2.3 Βεληνεκές αργών ηλεκτρονίων	7
1.3 Διέγερση και ιονισμός αερίων	8
1.3.1 Διέγερση	8
1.3.2 Ιονισμός	8
1.4 Μεταφορά ηλεκτρονίων και ιόντων στα αέρια	8
1.4.1 Διάχυση	9
1.4.2 Ολίσθηση και ευκινησία	10
1.4.3 Πολλαπλασιασμός Χιονοστοιβάδα	10
2 Ανιχνευτές Αερίων	12
2.1 Micromegas	16
2.1.1 Περιγραφή της διάταξης του Micromegas	16
2.1.2 Διαμόρφωση Ηλεκτρικού Πεδίου	17
2.1.3 Πλεονέκτηματα του μικρού χάσματος	17
2.1.4 Ιδιότητες του Gain(κέρδους)	19
2.1.5 Εξέλιξη του σήματος και χρονική ανάλυση	21
2.1.6 Χωρική ανάλυση	22
2.1.7 Micromegas με resistive layer(resistive anode readout)	23
2.2 Simulation στο Fluka-Flair για διάφορες ραδιενεργές πηγές	26
2.2.1 Περιγραφή Fluka-Flair	26
2.2.2 Περιγραφή του προβλήματος	28
2.2.3 Κώδικας που γράφτηκε στο Fluka-Flair για την προσομοίωση	30
2.2.4 Διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων	36
2.3 Προσομοίωση του Micromegas στο H-Spice	39
2.3.1 Θεωρεία Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων	39
2.3.2 Θεωρεία για τους TGC	43
2.3.3 Hspice προσομοίωση των TGC (Thin Gap Cathode Strip Chambers)	48
2.3.4 Ηλεκτρονικό μοντέλο του Micromegas chamber	56

1.

Κεφάλαιο 1

Περιγραφή φαινομένων που εμφανίζονται κατά την ανίχνευση σωματιδίων σε αέρια

Παρακάτω θα παρουσιάσω τα κύρια φαινόμενα που συναντήσουμε κατά την μελέτη της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη σε ανιχνευτή αερίου.

1.1 Φωτόνια

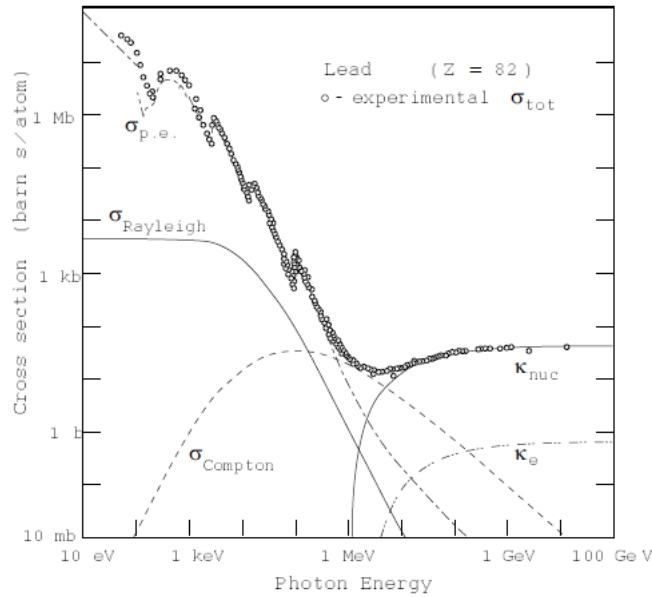
Μια δέσμη φωτονίων με ένταση I_0 περνώντας μέσα από ένα μέσο πάχους x θα έχει ένταση

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

όπου $\mu = N\sigma$ είναι ο συνολικός συντελεστής απορρόφησης, με N η η πυκνότητα των ατόμων και σ η συνολική ενεργός διατομή των φωτονίων ανά άτομο. Η εικόνα 1.1 δείχνει ένα παράδειγμα για σ , το οποίο αποτελείται από τρεις βασικούς παράγοντες,

$$\sigma = \sigma_{photo} + Z\sigma_C + \tau_{pair}$$

το καθένα αντιστοιχεί σε μία από τις κύριες αλληλεπιδράσεις των φωτονίων: το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, Compton σκέδαση και την παραγωγή ζεύγους. Η πιο ενδιαφέρων διαδικασία είναι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Κάθε μια από αυτές τις αλληλεπιδράσεις δείχνουν την προτίμησή τους σε ένα μέρος του φάσματος της ενέργειας των φωτονίων: το κατώτερο τμήμα του του φάσματος, μέχρι αρκετά keV διέπεται από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Έπειτα έρχεται η σκέδαση Compton, δεσπόζει μέχρι εκατοντάδες keV, ενώ η τελευταία περιοχή (πάνω από 1.22MeV) έχει απομείνει για την παραγωγή ζεύγους.



Σχήμα 1.1: Η συνολική διατομή για την απορρόφηση φωτονίων σε μόλυβδο. Ανάλογα με την ενέργεια του φωτονίου, η αλληλεπίδραση μπορεί να ακολουθήσει διαφορετικούς μηχανισμούς. Σε χαμηλές ενέργειες και μέχρι αρκετές keV, το φωτοηλεκτρικό (σ_{p.e.}) κατέχει δεσποζουσα θέση. Μέχρι μερικές εκατοντάδες keV η σκέδαση Compton (σ_{Compton}) παρουσιάζεται με περισσότερη πιθανότητα, ενώ όταν φτάνουμε το φράγμα του 1.22MeV ($2 \times 0.511\text{MeV}$) η παραγωγή ζεύγους (κ_{nuc}) ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου είναι η πιο πιθανή διαδικασία. Στο σχήμα σημειώνονται επίσης η σ_{Rayleigh}, για σκέδαση Rayleigh (coherent) και κ_e για την παραγωγή ζεύγους στον πεδίο του ηλεκτρονίου.

1.1.1 Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Ένα φωτόνιο συναντά ένα ατομικό ηλεκτρόνιο και απορροφάται, επιτρέποντας στο ηλεκτρόνιο να εκτιναχτεί από το άτομο, με μια ενέργεια

$$E = h\nu - E_\beta$$

για $h\nu$ την ενέργεια του φωτονίου και E_β την ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων. Στην περιοχή της ενέργειας των ακτίνων X, η ενεργός διατομή(ανά άτομο) υπολογίζεται

$$\Phi_{photo} = 4\alpha^4 \Phi_0 \left(\frac{m_e c^2}{h\nu} \right)^{\frac{7}{2}} Z^5$$

Όπου $\alpha = 1/137$, $\Phi_0 = 8\pi r_e^2/3 = 6.651 \times 10^{-25} \text{cm}^2$ (r_e η ακτίνα του ηλεκτρονίου) και Z ο ατομικός αριθμός. Από την εξίσωση που πάνω προκύπτει η ισχυρή εξάρτηση από το Z , το οποίο, ανάλογα με την εφαρμογή, θα έχει σημαντικό ρόλο στην απόφαση για τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση. Ένα ενδιαφέρον στοιχείο που προκύπτει είναι αυτό που ακολουθεί μετά την εκπομπή των ηλεκτρονίων. Όταν βγαίνει, το ηλεκτρόνιο προκαλεί μια αναδιάρταξη στο κέλυφος, η οποία μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

α) Η επίδραση Auger (μετάβαση χωρίς εκπομπή ακτινοβολίας), η οποία είναι η εκπομπή ενός ηλεκτρονίου ενέργειας κοντά στην ενέργεια σύνδεσης μετά από μια εσωτερική αναδιάρταξη των ηλεκτρονίων, ή

β) φθορισμό, η διαδικασία μέσω της οποίας ένα ηλεκτρόνιο από μια εσωτερική στοιβάδα παίρνει τη θέση του ηλεκτρονίου που εκτινάχθηκε, εκπέμποντας ένα φωτόνιο με ενέργεια την ενεργειακή διαφορά μεταξύ των δύο στοιβάδων.

1.2 Ηλεκτρόνια

Από όλες τις αλληλεπιδράσεις τα φορτισμένα σωματίδια μπορούν ενδεχομένως να συμμετέχουν, μόνο οι ηλεκτρομαγνητικές πρακτικά που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευσή τους (Coulomb αλληλεπιδράσεις, bremsstrahlung, Cerenkov, ακτινοβολία μετάβασης), των οποίων η διατομή είναι μερικές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες. Σε ανιχνευτές αερίου, η ανίχνευση των σωματιδίων οφείλεται κυρίως στις αλληλεπιδράσεις Coulomb.

1.2.1 Απώλεια ενέργειας λόγω αλληλεπίδρασης Coulomb

Ο βασικός υπολογισμός της απώλειας ενέργειας δίνεται από την Bethe-Bloch φόρμουλα

$$-\frac{dE}{dx} = K\rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 E_{max}}{I^2 (1 - \beta^2)} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right]$$

όπου:

$$K = \frac{2\pi N_a e^4}{m_e c^2}$$

$$N_a = 6.022 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1} \quad (\text{ο αριθμός Avogadro})$$

$$\rho, Z, A \quad \text{πυκνότητα, Ατομικός αριθμός, μάζα του μέσου}$$

$$I = I_0 Z \quad \text{όπου } I_0 \simeq 10 \text{ eV} \quad (\text{ενεργό δυναμικό ιονισμού του μέσου})$$

$$z, \beta \quad \text{φορτίο (σε μονάδες } e \text{), ταχύτητα του προσπίπτοντος σωματιδίου}$$

$$E_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2}{1 - \beta^2} \quad (\text{μέγιστη επιτρεπτή μεταφερόμενη ενέργεια})$$

και οι δύο παράγοντες διόρθωσης:

$$\delta \quad \text{η διόρθωση της επίδρασης της πυκνότητας, σημαντική για υψηλές ενέργειες}$$

$$C \quad \text{η διόρθωση για το κέλυφος, σημαντικό για χαμηλές ενέργειες}$$

1.2.2 Η κατανομή απώλεια ενέργειας

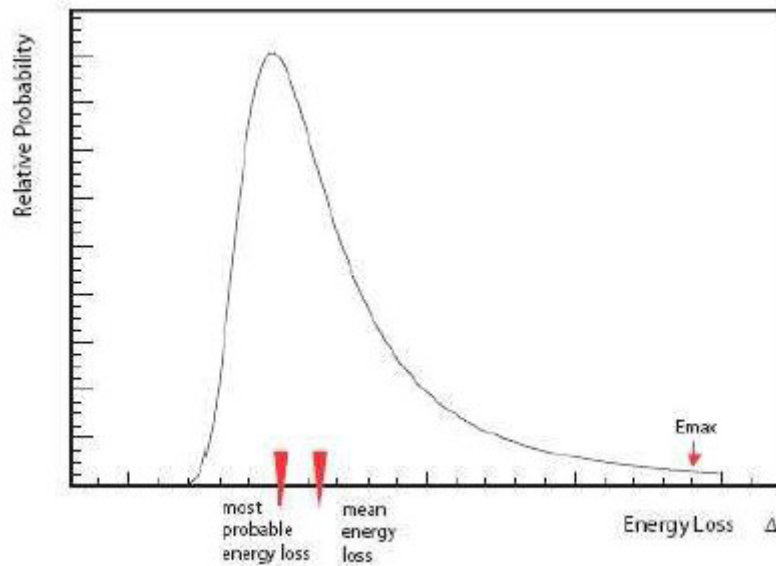
Η Bethe-Bloch φόρμουλα παρέχει τη μέση τιμή της απώλειας ενέργειας. Ωστόσο, λόγω της στατιστική διακυμάνσεις του αριθμού των συγκρούσεων που λαμβάνουν χώρα τελικά, και για την μεταφερόμενη ενέργεια σε κάθε μία από αυτές, η ενέργεια που χάνεται από οποιοδήποτε σωματίδιο θα είναι, πιθανότατα, διαφορετική από αυτή. Το σχήμα 1.2 δείχνει μια τυπική κατανομή των απωλειών ενέργειας σε λεπτά μέσα. Αυτή η Landau κατανομή έχει ένα πολύ χαρακτηριστικό σχήμα, που μπορεί να εκφραστεί ως:

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

Όπου λ υποδηλώνει την κανονικοποιημένη απόκλιση από την πιο πιθανή απώλεια ενέργειας $(\Delta E)_{mp}$ όταν

το ΔE είναι η πραγματική απώλεια και ξ η μέση απώλεια ενέργειας:

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



Σχήμα 1.2: Η χαρακτηριστική κατανομή Landau. Η αιχμή δείχνει την πιθανότερη απώλεια ενέργειας ΔE_{mp} . Η κατανομή αυτή δείχνει μια ουρά στην υψηλή περιοχή απώλεια ενέργειας, λόγω σπάνιων ενεργητικών δ ηλεκτρονίων. Αυτή η ουρά προκαλεί η μέση τιμή ξ της απώλεια ενέργειας να μετατοπιστεί προς τα δεξιά της κορυφής της κατανομής. Φαίνεται και η μέγιστη επιτρεπόμενη απώλεια ενέργειας ανά σύγκρουση (E_{max}).

1.2.3 Βεληγεκές αργών ηλεκτρονίων

Το ηλεκτρόνιο που εκτινάσσεται μετά από ιονισμό, μπορεί να έχει οποιαδήποτε ενέργεια μέχρι E_{max} , η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή. Εκείνα με ενέργεια πάνω από λίγα keV, είναι γνωστά ως δ-rays. Ο αριθμός των δ-rays που μπορούν να έχουν ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από E_0 είναι:

$$N(E \geq E_0) = \int_{E_0}^{E_{max}} P(E) dE = W \left(\frac{1}{E_0} - \frac{1}{E_{max}} \right)$$

όπου $P(E)$ αντιπροσωπεύει την πιθανότητα ενός ηλεκτρονίου να έχει ενέργεια E και είναι ουσιαστικά ο πρώτος όρος της Bethe-Bloch. Αυτά τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται σε μια γωνία που δίνεται:

$$\cos^2 \theta = \frac{E}{E_{max}}$$

πράγμα που σημαίνει ότι για υψηλές ενέργειας (αρκετά keV) εκπέμπονται κάθετα. Παρ' όλα αυτά, πολλαπλές σκέδασεις μέσα στο μέσο προκαλείται τυχαία κατεύθυνση τους, και περιορίζει την κίνησή τους. Μια εμπειρική φόρμουλα για τον υπολογισμό του εύρους είναι (E σε MeV)

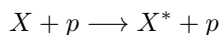
$$R_p = 0.71 E^{1.72}$$

1.3 Διέγερση και ιονισμός αερίων

Η απώλεια ενέργειας που συζητήσαμε πιο πάνω μπορεί να μεταφερθεί στα ηλεκτρόνια με δύο μηχανισμούς, διέγερση και ιονισμό.

1.3.1 Διέγερση

Η διέγερση ενός ατόμου X αποδίδεται με την μορφή:



και είναι μια συντονισμένη αντίδραση, όπου δεν παράγονται ζεύγη ηλεκτρονίων-ιόντων. Το άτομο τελικά επιστρέφει στην σταθερή του κατάσταση, συνήθως με την εκπομπή ενός φωτονίου. Ένα μόριο μπορεί να έχει πολλούς χαρακτηριστικούς τρόπους διέγερσης, για παράδειγμα ευγενή αέρια μπορούν να διεγερθούν μόνο μέσω της απορρόφησης φωτονίων ή εκπομπής, ενώ πολυατομικά μόρια έχουν μεταβάσεις περιστροφικής και δόνητικής φύσης. Η διέγερση μπορεί να οδηγήσει σε ιονισμό. Σε ένα μείγμα αερίων, που αποτελείται από ένα ευγενές αέριο και ένα πολυατομικά αέριο, συνήθως υδρογονάνθρακες, το διεγερμένο ευγενές αέριο μπορεί να ιονίσει το άλλο, η αποδιέγερση γίνεται μέσω συγκρούσεων (Penning effect).

1.3.2 Ιονισμός

Σε αντίθεση με τη διέγερση, ένας ιονισμός λαμβάνει χώρα, όταν ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ιόντος έχει δημιουργηθεί. Για να συμβεί αυτό, η ενέργεια του σωματιδίου που περνά θα πρέπει να είναι πάνω από ένα όριο ίσο με το δυναμικό ιονισμού του μέσου. Όταν ο ιονισμός γίνεται από το ίδιο το προσπίπτον σωματίδιο, καλείται πρωτοβάθμιος ιονισμός. Αν το ηλεκτρόνιο του ζεύγους πάρει ενέργεια πάνω από το όριο αυτό ιονίζει περαιτέρω, και παράγει δευτερογενή ιονισμό. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να συνεχιστεί μέχρι να φτάσει το όριο για αντιδράσεις ιονισμού.

Αν και δεν υπάρχει απλός τρόπος υπολογισμού του αριθμού των πρωτογενών ζευγών ιονισμού που παράγονται, είναι περίπου γραμμική η αύξηση με το μέσο ατομικό αριθμό του αερίου (με εξαίρεση το Xe). Ωστόσο, δεδομένου ότι ακολουθούν Poissonian κατανομή, μπορεί κανείς να υπολογίσει ότι η πιθανότητα να έχουμε k σε ένα γεγονός, είναι:

$$P_k^n = \frac{n^k}{k!} e^{-n}$$

όπου n είναι ο μέσος αριθμός των πρωτογενών αλληλεπιδράσεων. Ο συνολικός αριθμός των ζευγών που δημιουργούνται (το άθροισμα της πρωτογενών και δευτερογενών ιονισμών) δίνεται από:

$$n_T = \frac{\Delta E}{W_i}$$

ΔE είναι η ενέργεια που χάθηκε και W_i η αποτελεσματική ενέργεια για τη δημιουργία ενός ηλεκτρονίου-ιόντος ζεύγους. Για μείγματα αερίων ο προηγούμενος τύπος παίρνει τη μορφή:

$$n_T = \sum_i \frac{\Delta E}{W_i} \times q$$

όπου i υποδηλώνει κάθε στοιχείο(αέριο), και q το ποσοστό του συστατικού στο μίγμα.

1.4 Μεταφορά ηλεκτρονίων και ιόντων στα αέρια

Για τους ανιχνευτές ιονισμού, η κατανόηση της κίνησης των ηλεκτρονίων και των ιόντων μέσα στα αέρια, είναι εξαιρετικά σημαντική καθώς η κίνηση αυτή επηρεάζει πολλά λειτουργικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή. Κατά κύριο λόγο η κίνηση αυτή περιγράφεται από την κλασική κινητική θεωρία των αερίων. Τα κυριότερα φαινόμενα που απαντώνται κατά την κίνηση αυτή είναι δυο, η διάχυση (diffusion) και η ολίσθηση (drift) σε ένα ηλεκτρικό πεδίο.

1.4.1 Διάχυση

Ο ιονισμός του αερίου από ιονίζουσα ακτινοβολία παράγει ελεύθερα ηλεκτρόνια και ιόντα. Όταν κανένα ηλεκτρικό πεδίο δεν είναι παρόν, τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα που παράγονται με τη διάβαση της ακτινοβολίας αυτής, διαχέονται ομοιόμορφα απομακρυνόμενα από το σημείο δημιουργίας τους. Κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ακολουθώντας ακανόνιστες τροχιές, χάνουν την ενέργειά τους σύντομα λόγω των πολλαπλών συγκρούσεων με τα μόρια του αερίου και τελικά επανενώνονται. Η μέση ενέργεια που αποκτούν μετά από τις συγκρούσεις αυτές, ονομάζεται θερμική και δίνεται από τον τύπο του Maxwell:

$$\epsilon_r = \frac{3}{2}kT$$

όπου K η σταθερά του Boltzmann και T η θερμοκρασία, ενώ η μέση ταχύτητά τους είναι:

$$u = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

όπου m η μάζα του σωματιδίου. Είναι προφανές ότι η μέση ταχύτητα των ηλεκτρονίων είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των ιόντων, λόγω της διαφοράς των μαζών τους. Σε θερμοκρασία δωματίου η ταχύτητα των ηλεκτρονίων είναι της τάξης των 106 cm/s, ενώ η αντίστοιχη των θετικών ιόντων είναι της τάξης των 104 cm/s.

$$\frac{dN}{dx} = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

όπου το N_0 είναι ο συνολικός αριθμός των φορτίων, x η απόσταση από το σημείο της δημιουργίας και D ο συντελεστής διάχυσης. Η σταθερή απόκλιση (rms spread) κατά τον άξονα x , εκφράζεται χρησιμοποιώντας το συντελεστή διάχυσης

$$\sigma(x) = \sqrt{2Dt}$$

ενώ για της τρεις διαστάσεις, η “σφαιρική” απόκλιση δίνεται:

$$\sigma(x) = \sqrt{6Dt}$$

όπου r είναι η ακτινική απόσταση. Η ακτινική απόκλιση των ιόντων στον αέρα υπό φυσιολογικές συνθήκες, για παράδειγμα, είναι περίπου 1mm το δευτερόλεπτο. Ο συντελεστής διάχυσης είναι μια παράμετρος η οποία δύναται να υπολογιστεί από την κινητική θεωρία και συγκεκριμένα είναι:

$$D = \frac{1}{3}v\lambda$$

όπου λ είναι η μέση ελεύθερη διαδρομή του ηλεκτρονίου ή του ιόντος στο αέριο. Για ένα κλασικό ιδανικό αέριο η μέση ελεύθερη διαδρομή εξαρτάται από την θερμοκρασία T και την πίεση p , ως εξής:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{KT}{p\sigma_0}$$

όπου σ_0 η συνολική ενεργός διατομή για μια σύγκρουση με ένα μόριο αερίου. Αντικαθιστώντας στην συνέχεια στον τύπο του συντελεστή διάχυσης την μέση ελεύθερη διαδρομή και την μέση ταχύτητα καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση, στην οποία φαίνεται καθαρά η εξάρτηση του συντελεστή D από τις παραμέτρους του αερίου:

$$D = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{1}{p\sigma_0} \frac{\sqrt{KT^3}}{m}$$

Τυπικές τιμές των παραμέτρων του συντελεστή διάχυσης, δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Gas	λ (cm)	u (cm/s)	D (cm ² /s)	μ (cm ² s ⁻¹ V ⁻¹)
H ₂	1.8×10^{-5}	2.0×10^5	0.34	13.0
He	2.8×10^{-5}	1.4×10^5	0.26	10.2
Ar	1.0×10^{-5}	4.4×10^4	0.04	1.7
O ₂	1.0×10^{-5}	5.0×10^4	0.06	2.2

1.4.2 Ολίσθηση και ευκινησία

Με την παρουσία ηλεκτρικού πεδίου, τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα που έχουν απελευθερωθεί από την ακτινοβολία επιταχύνονται κατά μήκος των δυναμικών γραμμών του πεδίου προς την άνοδο και την κάθοδο αντίστοιχα. Η επιτάχυνση αυτή διακόπτεται από τις συγκρούσεις με τα μόρια του αερίου, τα οποία περιορίζουν την μέγιστη μέση ταχύτητα που δύναται να αποκτηθεί από τα φορτία κατά μήκος της διεύθυνσης του ηλεκτρικού πεδίου. Η μέση αυτή ταχύτητα η οποία αποκτάται είναι γνωστή με τον όρο ταχύτητα ολίσθησης (drift velocity) του φορτίου και είναι αποτέλεσμα της τυχαίας κίνησης των φορτίων. Συγκρινόμενη με την θερμική ταχύτητα, η ταχύτητα αυτή των ιόντων είναι μικρή, ενώ η αντίστοιχη των ηλεκτρονίων είναι αρκετά μεγαλύτερη, δεδομένου ότι τα ηλεκτρόνια είναι πολύ ελαφρύτερα συγκρινόμενα με τα ιόντα. Στην κινητική θεωρία, είναι πολύ χρήσιμο να καθορίσουμε το μέγεθος της ευκινησίας ενός φορτίου. Το μέγεθος αυτό ισούται με τον όρο:

$$\mu = \frac{v}{E}$$

όπου v είναι η ταχύτητα ολίσθησης και E το ηλεκτρικό πεδίο.

Για θετικά ιόντα έχει βρεθεί ότι η v εξαρτάται γραμμικά από το πηλίκιο, E/p (το οποίο ονομάζεται ανηγμένο ηλεκτρικό πεδίο), ακόμη και για αρκετά ισχυρά πεδία. Για σταθερή πίεση, αυτό συνεπάγεται ότι η ευκινησία μ είναι σταθερή, ενώ για δοσμένο ηλεκτρικό πεδίο E , γίνεται εμφανές ότι το μ μεταβάλλεται ανάλογα με το $1/p$.

Για ιδανικά αέρια στα οποία τα κινούμενα φορτισμένα σωματίδια παραμένουν σε θερμική ισορροπία με το αέριο είναι εύκολο να δειχθεί ότι η ευκινησία συνδέεται με την σταθερά διάχυσης μέσω του τύπου:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{KT}{e}$$

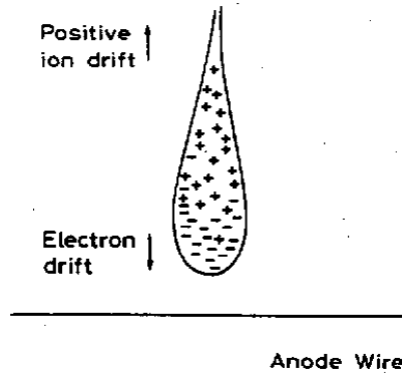
ο οποίος ονομάζεται τύπος του Einstein.

Στην περίπτωση των ηλεκτρονίων, η ευκινησία είναι πολύ μεγαλύτερη και εξαρτάται από την ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου. Ενδεικτικά, παρατηρούνται ταχύτητες της τάξης των 106cm/s προτού επέλθει κορεσμός. Σε αυτήν την περιοχή ταχυτήτων το E είναι της τάξης του 1 kV/cm.

Η απολαβή του ενισχυτή (Gain) στην ταχύτητα των ηλεκτρονίων είναι επίσης πιθανό να επηρεάσει το ρυθμό διάχυσης στην περίπτωση που η μέση ενέργεια των ηλεκτρονίων ξεπερνά τις θερμικές ενέργειες. Ο παράγοντας KT στη σχέση $D/\mu=KT/e$ αντικαθίσταται τότε από την μέση ενέργεια. Η σταθερά διάχυσης, D , τότε αυξάνεται και οδηγεί σε μεγαλύτερη διασπορά και εξάπλωση του ηλεκτρονικού νέφους. Αυτό έχει σημαντικές συνέπειες για τους ανιχνευτές, όπως για παράδειγμα στους θαλάμους ιονισμού, οι οποίοι προσπαθούν να καθορίσουν την τροχιά του σωματιδίου μετρώντας τον χρόνο ολίσθησης των ηλεκτρονίων ιονισμού (drift time).

1.4.3 Πολλαπλασιασμός Χιονοστιβάδα

Στους ανιχνευτές αερίων η εμφάνιση και ο πολλαπλασιασμός της χιονοστιβάδας λαμβάνει χώρα όταν τα αρχικά ηλεκτρόνια, από τον ιονισμό που προκάλεσε το σωματίδιο που διέσχισε το χώρο του αερίου, αποκτήσουν κατά την ελεύθερη διαδρομή τους, αρκετή ενέργεια εξαιτίας της δράσης του εξωτερικού πεδίου, ώστε να είναι σε θέση να προκαλέσουν την δημιουργία νέων ιονισμών στο αέριο. Έτσι, τελικά επιτυγχάνεται ο σχηματισμός μεγάλου πλήθους ζευγών ιόντων-ηλεκτρονίων που έχουν σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό της χιονοστιβάδας. Επειδή τα ηλεκτρόνια έχουν μεγαλύτερη κινητικότητα, η χιονοστιβάδα έχει σχήμα σταγόνας υγρού με τα ηλεκτρόνια να προπορεύονται, αποτελώντας την «κεφαλή» αυτής, ενώ τα πιο αργά ιόντα ακολουθούν πίσω, διαμορφώνοντας, έτσι, την «ουρά» της σταγόνας.



Αν λ είναι η μέση ελεύθερη διαδρομή του ηλεκτρονίου μεταξύ συγκρούσεων που οδηγούν σε ιονισμό, τότε το $\alpha=1/\lambda$ συμβολίζει την πιθανότητα ιονισμού ανά μονάδα μήκους. Αυτός ο συντελεστής, λέγεται “first Townsend coefficient” και αναπαριστά τη μέση ελεύθερη διαδρομή ανάμεσα σε δύο ιονισμούς. Μια καλή προσέγγιση του συντελεστή αυτού δίνεται από την σχέση:

$$\alpha = pAe^{\frac{Bp}{E}}$$

όπου E είναι το ηλεκτρικό πεδίο και A, B είναι παράμετροι, οι οποίοι εξαρτώνται από το μίγμα του αερίου. Αν υπάρχουν n ηλεκτρόνια, τότε σε μια διαδρομή dx θα έχουμε δημιουργία επιπλέον dn ηλεκτρονίων, όπου ισχύει ότι:

$$dn = n\alpha \cdot dx$$

Από αυτή τη σχέση βρίσκουμε τον αριθμό των ηλεκτρονίων, n , που δημιουργούνται σε διαδρομή x , μέσω της σχέσης:

$$n = n_0 \cdot e^{\alpha x}$$

όπου n_0 ο αριθμός των αρχικών ηλεκτρονίων που προέκυψαν από τον ιονισμό που προκάλεσε το σωματίδιο. Ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας (ή ενίσχυση αερίου) είναι επομένως,

$$M = \frac{n}{n_0} e^{\alpha x}$$

Ο παράγοντας πολλαπλασιασμού ή αλλιώς gas gain είναι σημαντικός για την ανάπτυξη αναλογικών αпарιθμητών (proportional counters). Γενικότερα στην περίπτωση ενός ανομοιόμορφου ηλεκτρικού πεδίου, η πιθανότητα ιονισμού α , θα είναι μια συνάρτηση του x της μορφής $\alpha = \alpha(x)$, οπότε θα ισχύει ότι:

$$M = e^{\int \alpha(x) dx}$$

όπου η ολοκλήρωση γίνεται από το σημείο r_1 μέχρι το σημείο r_2 .

Ενώ η σχέση αυτή για το M δύναται να αυξάνει χωρίς κάποιο περιοριστικό όριο, ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας M δύναται να φτάσει μέχρι την τιμή 108 (ή αλλιώς, $\alpha x \leq 20$). Αυτό το όριο είναι γνωστό ως όριο του Raether. Πέρα από αυτήν την τιμή διαδικασίες όπως η εκπομπή ηλεκτρονίου που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία χιονοστιβάδας καθώς επίσης και ο μετασχηματισμός φορτίου-χώρου του ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο γίνεται πολύ μεγάλο κοντά στην χιονοστιβάδα, έχουν σαν αποτέλεσμα την κατάρρευση, καθώς γίνεται διάσπαση του αερίου με αποτέλεσμα την εμφάνιση σπινθήρα. Η αποφυγή της ενδεχόμενης κατάρρευσης αυτής επιβάλλει την λειτουργία σε παράγοντα πολλαπλασιασμού M μέχρι την τάξη μεγέθους 106. Η αύξηση του πάχους του χάσματος (gap), έχει σαν αποτέλεσμα το όριο Raether να συναντάται σε χαμηλότερες τιμές της πιθανότητας. Το γεγονός αυτό μαρτυράει ότι για συγκεκριμένο πεδίο, η πιθανότητα κατάρρευσης μειώνεται, όσο μειώνεται το πάχος του χάσματος.

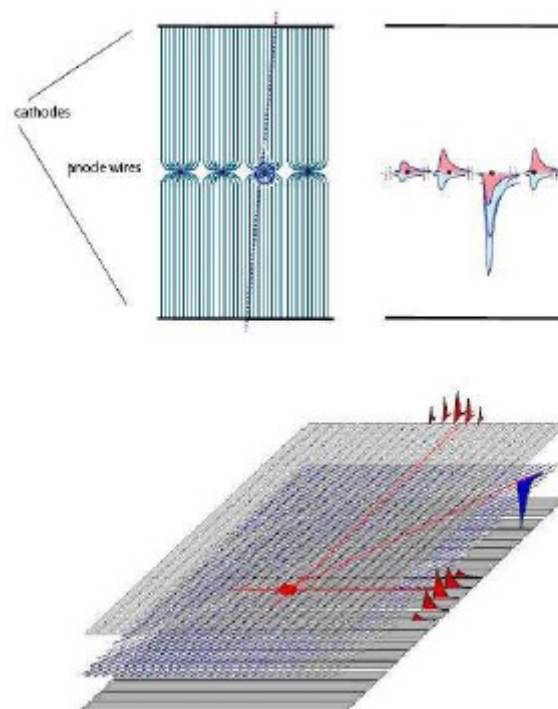
Κεφάλαιο 2

Ανιχνευτές Αερίων

Από την ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εμφανίστηκε το ερώτημα πώς την ανιχνεύουμε. Λόγω της μεγαλύτερης κινητικότητας των ηλεκτρονίων και των ιόντων, ένα αέριο είναι το ιδανικό μέσο για να χρησιμοποιηθεί. Έγιναν πολλές εφευρέσεις, που χωρίζουν την ιστορία των ανιχνευτών αερίου σε περιόδους. Παρακάμπτοντας την πρώτη περίοδο με τις τρεις αρχικές συσκευές, τον θάλαμο ιονισμού, το αναλογικό μετρητή και την Geiger-Muller μετρητή, αυτό το ταξίδι μέσα από το χρόνο θα ξεκινήσει από μια πολύ σημαντική στιγμή η οποία αξίζει το βραβείο Νόμπελ (1992) στον εφευρέτη του MultiWire Αναλογικού θαλάμου τον G. Charpak το 1968.

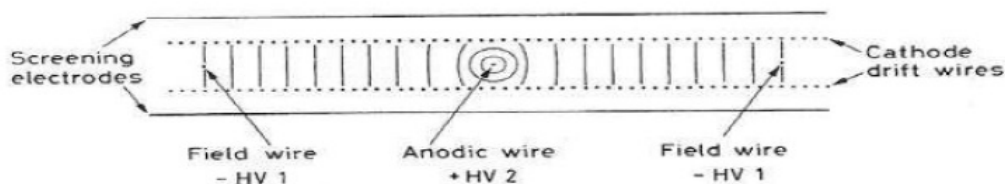
Τα κύρια χαρακτηριστικά του MWPC (σχήμα 2.1) είναι η καλή διακριτική ικανότητα στο χώρο (λίγες εκατοντάδες μm), η εξαιρετική διακριτική ικανότητα της ενέργειας και μια μεσαίου ρυθμού μετρητική ικανότητα (10^4 γεγονότα $\text{mm}^{-2}\text{s}^{-2}$). Ο θάλαμος χρησιμοποιείται ευρέως εκτός από τη σωματιδιακή φυσική και σε άλλους τομείς όπως οι ακτίνες X για ιατρική απεικόνιση, νετρονίων και μελέτες περίθλασης κρυσταλλών, και άλλα.

Η ανακάλυψη του MWPC πυροδότησε πολλές ιδέες, όπως η χρησιμοποίηση του χρόνου ολίσθησης των ηλεκτρονίων για απόκτηση χωρικών πληροφοριών: ο θάλαμος ολίσθησης. Με τη βοήθεια ενός σπινθηριστή (trigger chamber), υπολογίζουμε την «ώρα μηδέν» του γεγονότος, και μετρώντας το χρόνο ολίσθησης των ηλεκτρονίων, το μήκος της διαδρομής του και ως εκ τούτου την προέλευσή του είναι εύκολο να βγει καποιο συμπεράσμα (σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.1: Αναπαράσταση MWPC θαλάμου

Στο πάνω αριστερό μέρος της προηγούμενης εικόνας εμφανίζεται η αναπαράσταση ενός θαλάμου MWPC. Συγκεκριμένα, ένα επίπεδο από ισαπέχοντα σύρματα, είναι ορατό, τοποθετημένα στο μέσο ανάμεσα στα δυο επίπεδα καθόδου. Τυπικές αποστάσεις ανάμεσα στα σύρματα ανόδου είναι 1 έως 4 mm, ενώ τα δυο επίπεδα καθόδου κυμαίνονται από 5 έως 15 mm. Στην εικόνα μπορούμε ακόμα να δούμε τις γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου. Τα ηλεκτρόνια που παράγονται στην περιοχή σταθερού πεδίου θα ολισθήσουν προς το πιο κοντινό σύρμα ανόδου, όπου θα επιταχυνθούν και θα παράγουν χιονοστιβάδα υπό την πίεση του μεγαλύτερου πεδίου. Στο πάνω δεξί μέρος της εικόνας, παρατηρούμε το σήμα που προκαλείται στο πιο κοντινό σύρμα και στα γειτονικά του. Θα είναι αρνητικό ως προς το προηγούμενο, ενώ θα είναι θετικό ως προς τα γειτονικά. Τέλος, στο κάτω μέρος της εικόνας, με την υλοποίηση του δεύτερου επιπέδου συρμάτων που τοποθετούνται κάθετα στο πρώτο, βελτιώνονται οι χωρικές πληροφορίες.

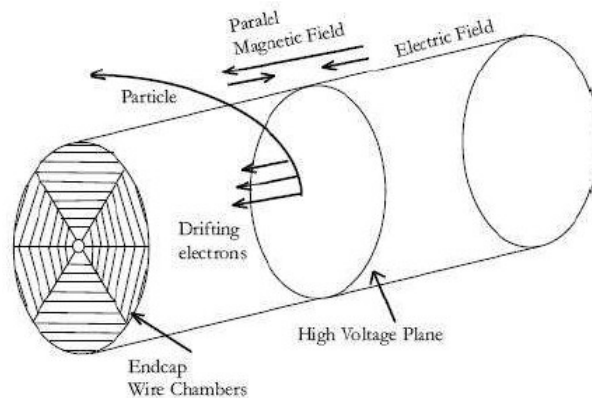


Σχήμα 2.2: Ανοδικά σύρματα θαλάμου ολίσθησης με τα πεδία ανόδου

Στον θάλαμο ολίσθησης πληροφορίες για το χώρο αποκτούνται με τη μέτρηση του χρόνου ολίσθησης των ηλεκτρονίων προς την άνοδο. Για μια τέτοια μέτρηση η ταχύτητα ολίσθησης και ως εκ τούτου το ηλεκτρικό

πεδίο πρέπει να διατηρούνται σταθερά. Στο θάλαμο που φαίνεται στο σχήμα, αυτο επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των πρόσθετων καλωδίων μεταξύ των ανόδων. Το δυναμικό του κάθοδικου σύρματος κυμαίνεται ομοιόμορφα από 0 έως μια υψηλή αρνητική τάση, διατηρώντας το ηλεκτρικό πεδίο σταθερό, όπως αποδεικνύουν οι ισοδυναμικές γραμμές. Συνήθως οι περιοχές ολίσθησης είναι περίπου 5-10 cm, συνεπώς, για μια τυπική ταχύτητα μετακίνησης από 5 cm/μs η μέτρηση του χρόνου μετακίνησης θα πρέπει να είναι 1 ή 2 μ s.

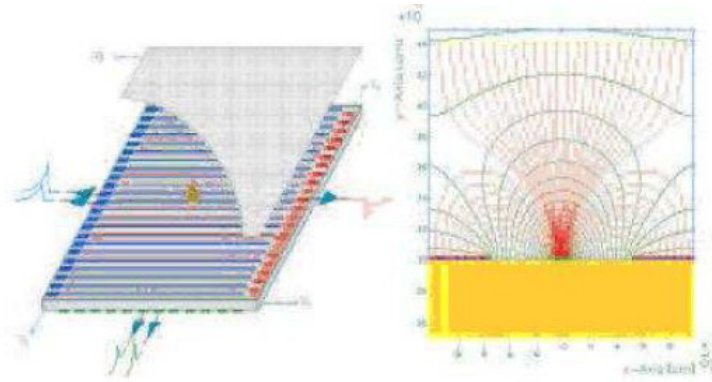
Η τρισδιάστατη πληροφορία των σωματιδίων επιτεύχθηκε με την κατασκευή του Time Projection Chamber (TPC): μια πιο εξελιγμένη συσκευή που συνδυάζει τα χαρακτηριστικά τόσο του θαλάμου ολίσθησης όσο και του MWPC. Ένας τυπικός TPC παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3. Οι πληροφορίες σχετικά με τις δύο διαστάσεις δίνονται από τις ανόδους και καθόδους των endcaps, ενώ η τρίτη συνάγεται από το χρόνο ολίσθησης.



Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση θαλάμου TPC

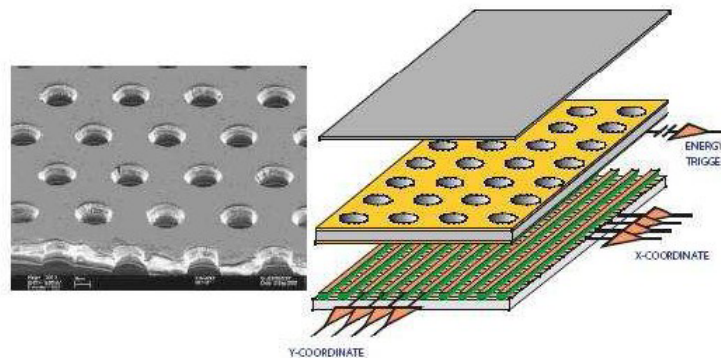
Όσο επιτυχής και να ήταν αυτοί οι θαλάμοι, συναντήσαν βασικούς περιορισμούς όταν ζητήθηκε από αυτούς καλύτερη ανάλυση χώρου και υψηλότερες μετρητικές ικανότητες : καλώδια δεν μπορούσαν να τοποθετηθούν πιο κοντά χωρίς να συναντήσουν λειτουργικά προβλήματα, και όσο αφορά τις μετρήσεις τα θετικά ιόντα δεν εκκενώνονταν αρκετά γρήγορα.

Για την κάλυψη αυτών των περιορισμών, ο Oed εφηύρε τον Micro-Strip θάλαμο αερίων (MSGC), σηματοδοτώντας μια νέα εποχή στην ιστορία των ανιχνευτών αερίων. Αξιοποιώντας τη βελτίωση της μικροηλεκτρονικής και την ανάπτυξη της διαδικασίας της φωτολιθογραφίας, πολύ λεπτές λωρίδες αποτυπώνονται σε μια απομονωμένη πλακέτα σχήμα 2.4, σε μια σειρά από στενές ανόδους και καθόδους, πιο κοντά από τα καλώδια σε ένα MWPC (τυπικές αποστάσεις γύρω στα 50 έως 100 μm). Λόγω της μορφής του ηλεκτρικού πεδίου, τα ιόντα που παράγονται από τη χιονοστιβάδα γρήγορα εκκενώνονται, αυξάνοντας την μετρητική χωρητικότητα του θαλάμου κατά 100 φορές περισσότερο από ότι τον MWPC, φτάνοντας τα $10^6 \text{ counts mm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Παραλλαγές αυτού του σχεδίου ήταν, για παράδειγμα, Micro-Gap Chamber (MGC) και ο WELL ανιχνευτής. MSGCs έγιναν δεκτοί και αναπτύχθηκαν για να συμπεριληφθούν στα πειράματα υψηλής φωτεινότητας. Ωστόσο, ήταν ευαίσθητοι στη γήρανση και ζημιών λόγω αποφόρτισης. Η εποχή των MSGC ακολουθείται από μια σειρά από άλλες εφευρέσεις, που οδηγεί στο σχεδιασμό των "Micro-Pattern" ανιχνευτών, που αξιοποιούν την νέα τεχνολογία σε μικρο-ηλεκτρονική και φωτολιθογραφία. Η "Compteur a Trous" (CAT) (εξελιχθηκε αργότερα στο micro-CAT) ήταν ένα από τα πρώτα παραδείγματα του 1996, μια τρύπα (0,1 έως 2mm σε διάμετρος) σε μια (λιγότερο από) πάχους 2mm μεταλλική πλάκα πάνω από την άνοδο, συνθέτει μια συσκευή η οποία δρα ως φακός συγκεντρώνοντας τα ηλεκτρόνια ολίσθησης και σχηματίζει έτσι μια χιονοστιβάδα. Το gain που επιτυγχάνεται είναι περίπου 10^4 .



Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση θαλάμου MicroStrip Gas Chamber

Περίπου την ίδια εποχή, ο Micromegas εισήχθη. Η αρχή του ανιχνευτής θα εξηγηθεί αργότερα. Στην ίδια γενιά ανήκει ο ανιχνευτής microdot και το GEM. Ο Microdot (μDOT) ανιχνευτής αποτελείται από μια περιοδική δομή ομοαξονικών καθόδων και ανόδων δαχτυλιδίων με πολύ μικρή διάμετρο, 200 και 20 μm, αντίστοιχα, πάνω σε ένα διηλεκτρικό υπόστρωμα. Με αυτόν τον τύπο του ανιχνευτή έφθασε το gain στην τάξη του 10^5 . Παραλλαγές του είναι η 3D έκδοση του ανιχνευτή, ή το Micro-Pin Array (MIPA). Χρησιμοποιώντας την Karton-etching τεχνολογία, το λεγόμενο πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων Αερίου (GEM), (σχήμα 2.5) εισάγεται μια νέα έννοια. Ένα λεπτό (50 μm) φύλλο Karton, επιμεταλλωμένο και στις δύο πλευρές, έχει τρύπες των 100 μm σε διάμετρο κάθε 150 μm. Επιτυγχάνεται έτσι gain 10^4 , και κατά τη χρήση πολλαπλών στρώσεων GEMs η ικανότητα μέτρησης φθάνει το 10^6 .



Σχήμα 2.5: Τρισδιάστατη αναπαράσταση ανιχνευτή micromegas

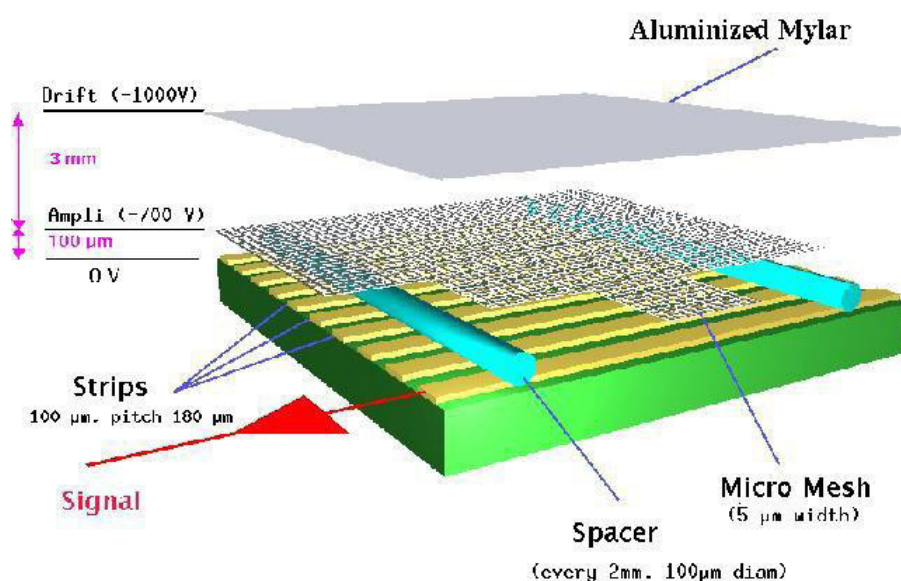
2.1 Micromegas

Ο Micromegas είναι ένας υψηλής απολαβής ανιχνευτής αερίου, ο οποίος μπορεί να σταθεί μόνος του χωρίς την ανάγκη ενός επιπλέον ενισχυτή. Συνδυάζει υψηλή ακρίβεια, υψηλή ικανότητα μέτρησης, εξαιρετικές χρονικές ιδιότητες και ευρωστία.

2.1.1 Περιγραφή της διάταξης του Micromegas

Όπως φαίνεται πιο κάτω ένας τέτοιος ανιχνευτής αποτελείται από τρία βασικά επίπεδα. Το ανώτερο επίπεδο αποτελεί την κάθοδο. Στην ουσία είναι το ηλεκτρόδιο της ολίσθησης (drift electrode) στο οποίο εφαρμόζεται μία αρνητική τάση της τάξης των 1000V. Η δομή του είναι πλεγματική, φτιαγμένη από νικέλιο πάχους 100μm. Η διαφάνεια του προσεγγίζεται γύρω στα 80 % με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η διέλευση μέσα από αυτό ποικίλες ραδιενεργές ακτινοβολίες, διατηρώντας όμως παράλληλα μεγάλη αποδοτικότητα. Το κατώτερο επίπεδο αποτελεί το ηλεκτρόδιο της ανόδου. Είναι και αυτό πλεγματικής διάταξης, κατασκευασμένο από χάλκινες λωρίδες (strips), επικαλυμμένες με χρυσό, μήκους 150 μm. Το πάχος της κάθε χάλκινης λωρίδας είναι 5 μm. Οι λωρίδες αυτές τοποθετούνται, για κάθε μια από τις δύο διευθύνσεις, η μια παράλληλα με την άλλη με μια απόσταση ανάμεσά τους ίση με 200 μm. Οι τιμές αυτές είναι τυπικές καθώς τα κενά ανάμεσα τους όπως και το πλάτος των λωρίδων αυτών δύναται να μεταβληθεί αναλόγως με το πείραμα που λαμβάνει χώρα κάθε φορά. Όλες οι λωρίδες τοποθετούνται στην θέση τους μέσω διαφόρων τεχνικών επιμετάλλωσης σε ένα απομονωμένο στρώμα από αρωματικό πολυμερές (Karton) πάχους 50 μm και γειώνονται μέσω προενισχυτών υψηλής ενίσχυσης (4 V/pC) και χαμηλού εσωτερικού θορύβου.

Το μεσαίο επίπεδο αποτελεί το μικρο-πλέγμα (micromesh), το οποίο φαινομενικά διαχωρίζει της δύο περιοχές της μετατροπής και της ενίσχυσης, παρόλα αυτά ο ρόλος του είναι πολλαπλός. Αποτελεί το μεσαίο ηλεκτρόδιο της όλης διάταξης. Πρόκειται για ένα μεταλλικό πλέγμα, πάχους 5 μm, με ανοίγματα 25μm με βήμα 50 μm. Είναι κατασκευασμένο από χαλκό, χρησιμοποιώντας την τεχνική της φωτολιθογραφίας. Είναι εύκαμπτο και προσδίδει στο στρώμα έναν υψηλό βαθμό ακρίβειας εναπόθεσης ηλεκτρονίων. Η τάση η οποία εφαρμόζεται σε αυτό είναι της τάξης των 500V.

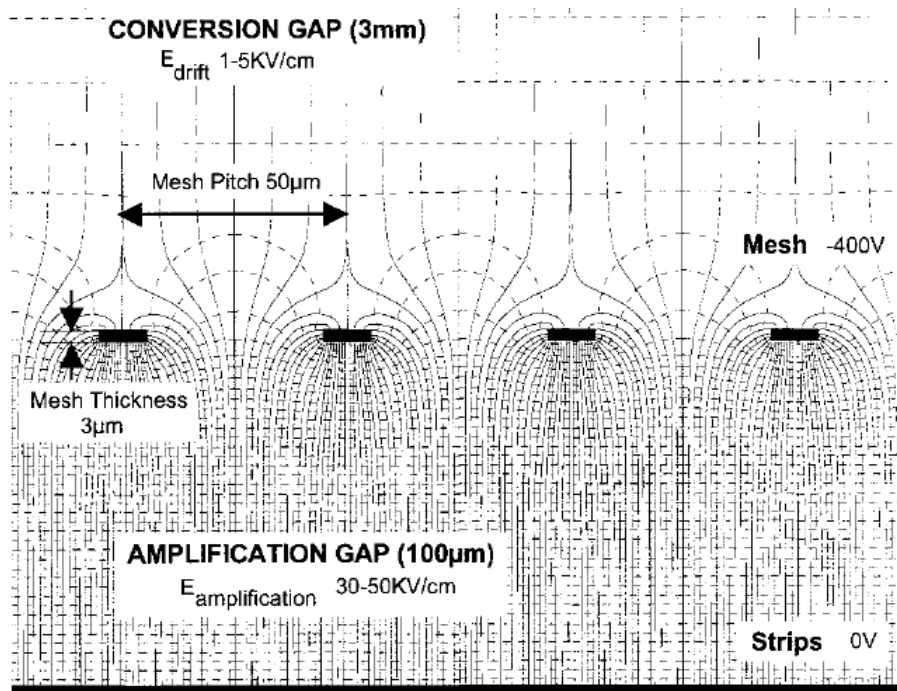


Σχήμα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση τυπικού ανιχνευτή micromegas

2.1.2 Διαμόρφωση Ηλεκτρικού Πεδίου

Η γνώση του σχήματος των ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών του πεδίου κοντά στο micromesh είναι ένα βασικό κλειδί για τη βέλτιστη λειτουργία του ανιχνευτή και ιδιαίτερα για την αποτελεσματική μεταφορά των ηλεκτρονίων στην περιοχή ενίσχυσης. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι ομοιογενές και στις δύο περιοχές μετατροπής(ολίσθησης) και ενίσχυσης. Παρουσιάζουν ένα σχήμα σαν χωνί γύρω από τα ανοίγματα του microgrid: οι γραμμές του πεδίου είναι πολύ πυκνές προς το κέντρο των ανοιγμάτων, σε μια μικρή διαδρομή ίση με μερικά μικρά σε διάμετρο. Ο συντελεστής συμπίεσης είναι ευθέως ανάλογος προς το λόγο των ηλεκτρικών πεδίων μεταξύ των δύο περιοχών.

Στην επόμενη εικόνα φαίνονται λεπτομερώς οι δυναμικές γραμμές του πεδίου κοντα στο grid



Σχήμα 2.7: Χάρτης των ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών γύρω από το micromesh(50µm βήμα, 37µm διάμετρο των ανοιγμάτων

Τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται στην περιοχή ολίσθησης από την ιοντίζουσα ακτινοβολία ακολουθούν τις γραμμές και συγκεντρώνονται στην περιοχή ενίσχυσης όπου εκεί γίνεται η διαδικασία της ενίσχυσης. Ο λόγος μεταξύ του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή ενίσχυσης και της περιοχής ολίσθησης πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 5 για να γίνει η πλήρης μεταφορά των ηλεκτρονίων, και να μειώσει μέρος του νέφους των ιόντων που δημιουργείται στην χιονοστιβάδα να ξεφύγει στην περιοχή ολίσθησης.

2.1.3 Πλεονέκτηματα του μικρού χάσματος

Μια ενδιαφέρουσα ιδιότητα του Micromegas είναι ότι, χάρη στο στενό χάσμα του, σε τοπικό επίπεδο μικρές διακυμάνσεις στο χάσμα (περιοχή) ενίσχυσης, λόγω, για παράδειγμα, μηχανικών βλάβων, δεν προκαλούν διακύμανση στην ενίσχυση, οι διακυμάνσεις αυτές αντισταθμίζονται από μια αντίστροφη μεταβολή του συντελεστή ενίσχυσης. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να εξηγηθεί από μια απλή θεωρία:

Ο πολλαπλασιασμός των ηλεκτρονίων (M), στο ενιαίο ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ δύο παράλληλων πλακών σε ένα αέριο με πίεση p , περιγράφεται από:

$$M = e^{ad}$$

Όπου d είναι το μήκος του κενού μεταξύ των δύο παράλληλων ηλεκτροδίων και το a είναι ο πρώτος συντελεστής Townsend, ο οποίος αντιπροσωπεύει την μέση ελεύθερη διαδρομή μεταξύ δύο ιονισμών. Μια καλή προσέγγιση αυτού του συντελεστή δίνεται από την Rose and Korff φόρμουλα:

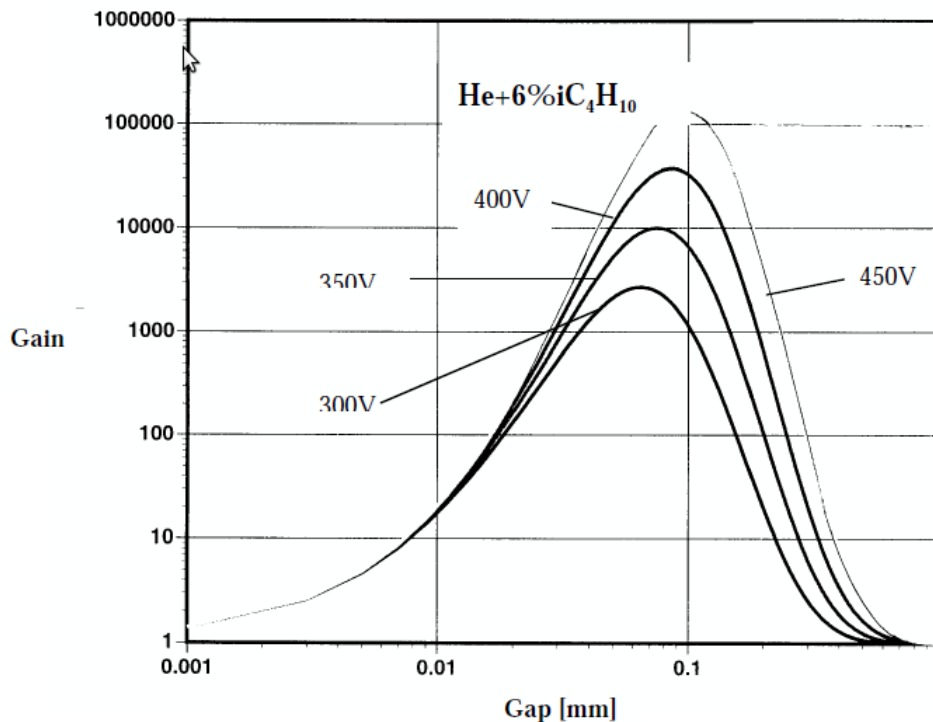
$$a = pAe^{Bp/E}$$

όπου E είναι το ηλεκτρικό πεδίο και A, B παράμετροι εξαρτώμενοι από το μίγμα του αερίου.

Σε υψηλές τιμές ηλεκτρικού πεδίου ο πρώτος συντελεστής Townsend φτάνει σε κορεσμό, επειδή η τιμή του προσεγγίζει τα μέση ελεύθερη διαδρομή που δίνει η ανελαστική σύγκρουσης ενεργός διατομή. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι $E = V / d$, όπου V είναι η εφαρμοζόμενη τάση. Αντικαθιστώντας την προηγούμενη εξίσωση στην προ-προηγούμενη έχουμε:

$$\text{Log}(M) = A p d e^{-B p d / V}$$

Ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας M είναι μια συνάρτηση της ποσότητας $p d$. Η επόμενη εικόνα δίνει το M συναρτήσει του χάσματος (d) για μίγμα αερίου Ar + 5% DME, και για τάση $V=300,350,400$ volts με πίεση 1 bar.

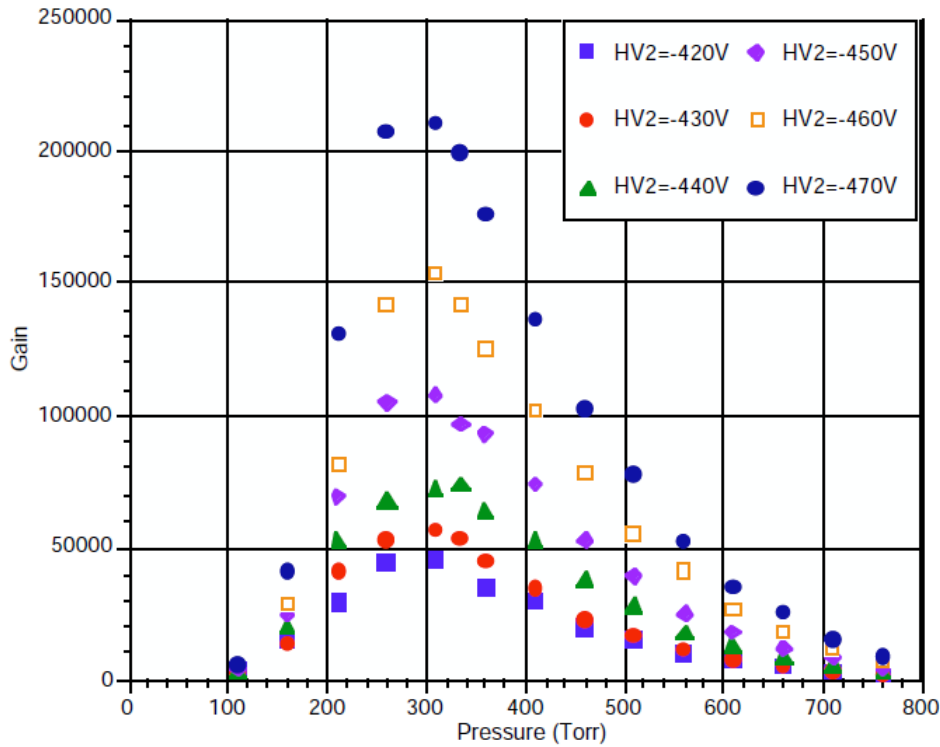


Σχήμα 2.8: Κέρδος αερίου He + 6% Ισοβουτάνιο ως συνάρτηση του μήκους της περιοχής ενίσχυσης για διάφορα δυναμικά που εφαρμόζονται στο microgrid.

Μπορούμε να δούμε ότι το M αυξάνεται όσο το d αυξάνει, φθάνει σε ένα μέγιστο και στη συνέχεια πέφτει, σε μεγάλες τιμές του d . Η μέγιστη τιμή επιτυγχάνεται με μια διαφοροποίηση της προηγούμενης εξίσωσης, με αποτέλεσμα $\Delta M / M = ad(1 - Bd/V)$. Η μέγιστη τιμή είναι για $d = V/B$ σε $p = 1$ bar. Το χάσμα ενίσχυσης εξαρτάται ελαφρώς από το μίγμα του αερίου. Για ένα δεδομένο εφαρμοζόμενο δυναμικό, ο συντελεστής πολλαπλασιασμού είναι στο μέγιστο του για μέγεθος περιοχής ενίσχυσης 30-100 μικρά. Αυτό είναι το φάσμα που χρησιμοποιείται σήμερα από τους ανιχνευτές Micromegas. Σε αυτό το φάσμα ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας μεγιστοποιείται και εκμηδενίζονται οι διακυμάνσεις λόγω των ελαττωμάτων της επιπεδότητας των δύο παράλληλων ηλεκτροδίων. Με λίγες λέξεις τέτοιου μεγέθους χάσματα είναι ιδανικά για τη βέλτιστη λειτουργία των παραλλήλων πλακών των ανιχνευτών αερίων, δεδομένου ότι όλες οι διακυμάνσεις λόγω μηχανικής βλάβης, ατμοσφαιρικής πίεσης ή τις αυξομειώσεις της θερμοκρασίας εκμηδενίζονται.

Είναι λίγο δύσκολο να επιβεβαιωθούν τα προηγούμενα αποτελέσματα πειραματικά λόγω του ότι χρειάζεται ένα μεγάλο πλήθος στενών χάσμάτων. Είναι ποιο εύκολο να επιβεβαιωθεί η μεταβολή του M συναρτήσει της πίεσης, το οποίο αναμένεται να είναι ισότιμο με τη μεταβολή λόγω της αλλαγής του χάσματος.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας συναρτήσει της πίεσης σε περιοχή ενίσχυσης 50 μικρά και αναλογίες αερίου He+6% ισοβουτάνιο.



Σχήμα 2.9: Gain σε αέριο He+6% ισοβουτάνιο ως συνάρτηση της πίεσης του αερίου για διάφορες τιμές της τάσης που εφαρμόζεται στο micro-grid

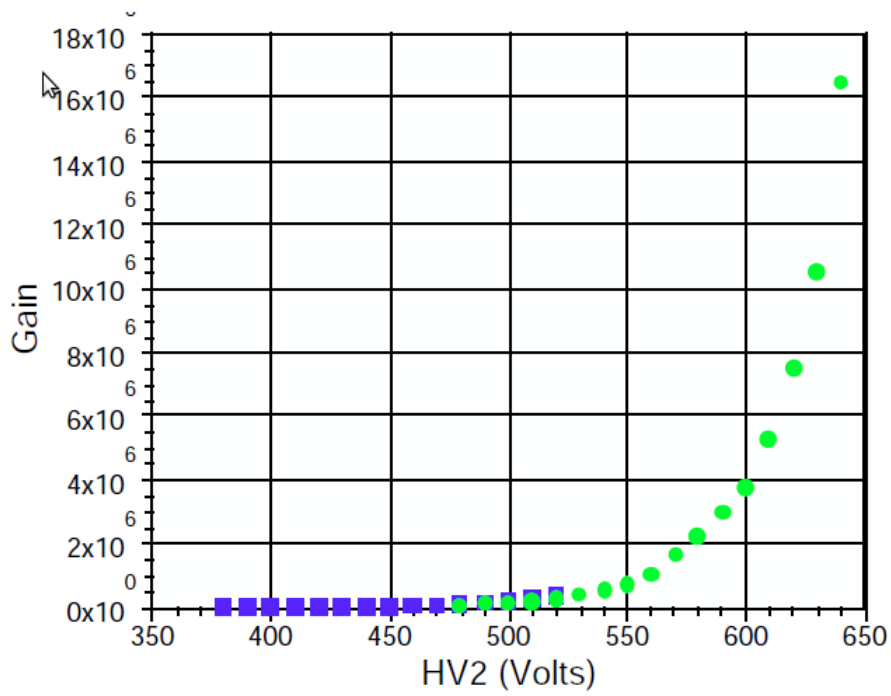
Οι καμπύλες δείχνουν καθαρά ότι υπάρχει ένα μέγιστο στην πίεση $p=500\text{mbar}$.

2.1.4 Ιδιότητες του Gain(κέρδους)

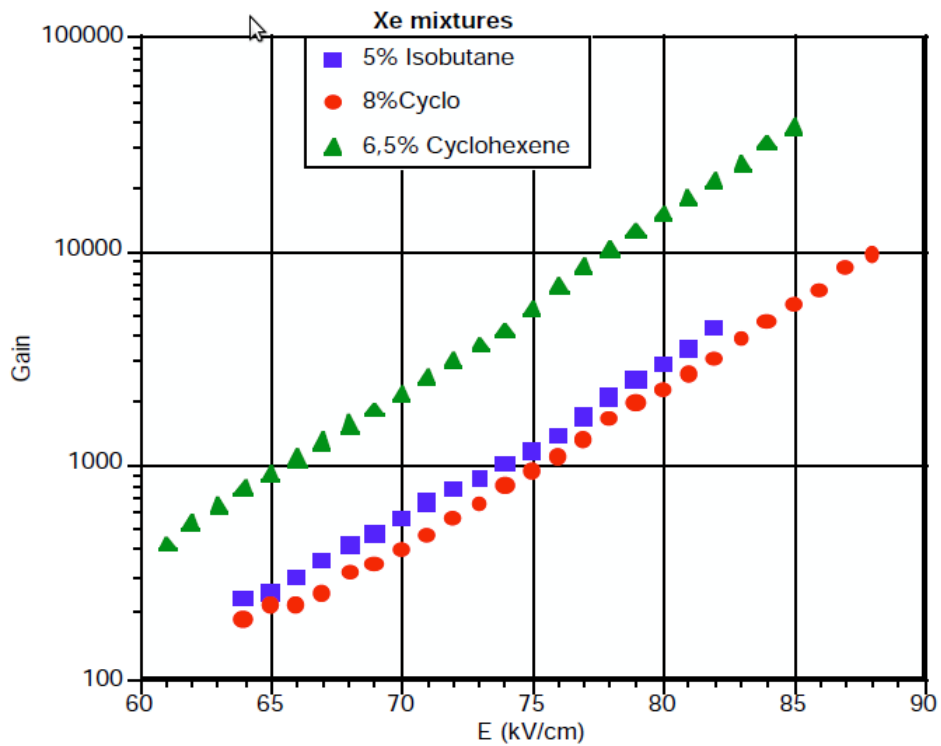
Το μέγιστο gain που μπορεί να έχει ένας ανιχνευτής αερίου είναι σημαντικό στοιχείο για ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Ποιό συγκεκριμένα, η ανίχνευση της ελάχιστης ιονίζουσας ενέργειας σωματιδίων απαιτεί ένα μεγάλο εύρος δυναμικών, λόγω της Landau διακύμανση της εναποτεθημένης ενέργειας και την εκπομπή βαρέων ιονίζουσων σωματιδίων. Ο στόχος ενός «καλού» ανιχνευτή είναι να επιτευχθεί μία σταθερή λειτουργία πριν από την ανάλυση, η οποία αντιστοιχεί σε συνολικό φορτίο(ηλεκτρόνια) ανά χιονοστιβάδα $10^7 - 10^8$ (το λεγόμενο Rather όριο).

Ο Micromegas δοκιμάστηκε με μια μεγάλη γκάμα από μίγματα αερίου. Τα αποτελέσματα έχουν δημοσιευθεί για μείγματα αργού με διάφορους υδρογονάνθρακες. Το ανώτατο ασφαλές κέρδος είναι κοντά στο 10^5 με 5-10% προσθήκη Ισοβουτάνιο, και τρεις φορές υψηλότερο με την προσθήκη μικρού ποσοστού από κυκλοεξάνιο. Προσθέτοντας CF_4 στα προηγούμενα μείγματα είναι σημαντικό, διότι βελτιώνει την ανάλυση χρόνου και τη συνολική εναποτιθέμενη ενέργεια. Μείγματα Neon ή He με υδρογονάνθρακες επιτρέπουν την αύξηση του συνολικού φορτίου ανά χιονοστιβάδα, σε τιμές υψηλές κοντά στο όριο Rather (περίπου 10^8).

Για παράδειγμα, το επόμενο σχήμα δείχνει το gain που μετράται σε He + 6% μίγμα Ισοβουτάνιο χρησιμοποιώντας απλά φωτοηλεκτρόνια που παράγονται κάτω από υπεριώδη φωτισμό. Το μέγιστο gain που έφτασε ήταν $\approx 1.8 * 10^7$.



Σχήμα 2.10: Gain σε αέριο He+6% ισοβουτάνιο ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης

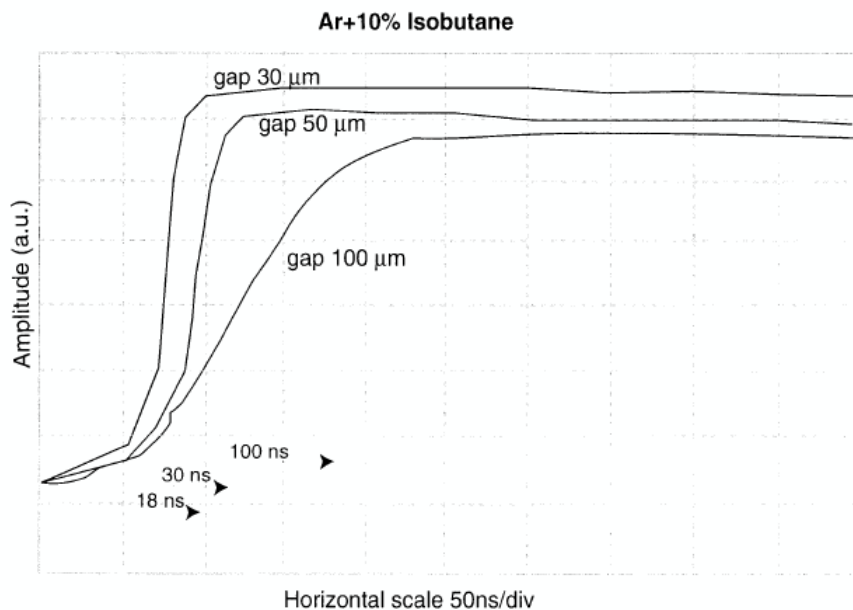


Σχήμα 2.11: Gain σε μίγματα αέριου Xe ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης

Μίγματα αερίου με μεγάλο Z αριθμό όπως Kr και Xe είναι σημαντικά για εφαρμογές όπως X-ray ψηφιακή ραδιογραφία, κρυσταλλογραφία και μελέτη της ακτινοβολίας συγχρότρου. Έγιναν πολλά tests με τη χρήση αυτών των μιγμάτων αερίου στο εραστήριο για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας του ανιχνευτή. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι το μέγιστο εφικτό κέρδος του αερίου αυξάνεται με βαρύτερους υδρογονάνθρακες με χαμηλότερο δυναμικό ιονισμού. Για παράδειγμα, το προηγούμενο σχήμα δείχνει το κέρδος του αερίου που μετριέται ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης και για διάφορους υδρογονάνθρακες ανιμιγμένους στο αέριο Xenon. Το μέγιστο εφικτό κέρδος αερίου αυξάνεται από το Ισοβουτάνιο (4500) για το κυκλοεξάνιο (10^4), και τελικά το κυκλοεξενο ($3 \cdot 10^4$). Ένα τέτοιο υψηλό gain παρέχει τον απαιτούμενο συντελεστή όταν ένας ανιχνευτής έχει να αντιμετωπίσει περιβάλλοντα με υψηλές ενέργειες ακτίνες X, ή σε υψηλής πίεσης λειτουργίες.

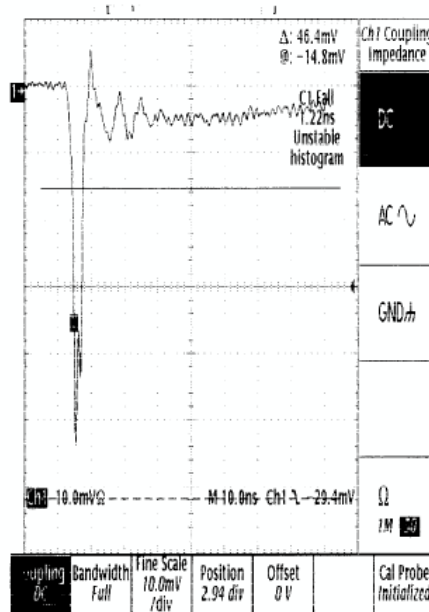
2.1.5 Εξέλιξη του σήματος και χρονική ανάλυση

Ένα σήμα που προκαλείται από την άνοδο είναι ένα σήμα άθροισμα των ηλεκτρονίων και ιόντων. Το φορτίο του σήματος είναι κυρίως λόγω των θετικών ιόντων που ολισθαίνουν προς το ηλεκτρόδιο micromesh, η διαδικασία λαμβάνει χώρα συνήθως εντός 100ns, ανάλογα σχετικά με το χάσμα ενίσχυσης και το μείγμα αερίων. Το επόμενο σχήμα δείχνει την ανταπόκριση του προενισχυτή για ένα μίγμα αερίου Ar + 10% Ισοβουτάνιο και για διάφορα χάσματα. Η μείωση του χάσματος ενίσχυσης 100 έως 50 microns μειώνει το χρόνο άνοδο του σήματος, κατά ένα παράγοντα 3. Χρησιμοποιώντας ένα κενό 30 mm ο χρόνος ανόδου είναι μόνο 17ns, μείωση κατά ένα παράγοντα 2. Έτσι, στην τελευταία περίπτωση, τη διαμόρφωση του σήματος στα 17ns επιτρέπεται να ανιχνευτή όλο το προκαλούμενο φορτίο και κατά συνέπεια επιτρέπει μια άνετη λειτουργία του ανιχνευτή σε μέτρια επίπεδα gain. Πρέπει επίσης να λάβουμε υπόψη ότι ο χρόνος συλλογής ιόντων μειώνεται με τη χρήση αερίων όπου τα ιόντα έχουν μεγαλύτερη κινητικότητα όπως Ne ή He.



Σχήμα 2.12: Σήμα που δίνει ένας προενισχυτής φορτίου για διάφορα μήκη της πειοχής ενίσχυσης: 100, 50, 25 mm

Το συμπέρασμα είναι ότι Micromegas μπορεί να χρησιμοποιηθεί με χαμηλού θορύβου προενισχυτές φορτίου χωρίς απώλεια που οφείλεται σε βαλλιστικό έλλειμμα, που συμβαίνει σε άλλους micro-strip μηχανισμούς. Επιλέγοντας τη σωστή ενίσχυση και το σωστό μίγμα αερίου, την άνοδο του ανιχνευτή μπορεί να είναι συμβατή με την διαμόρφωση του ενισχυτή του φορτίου. Λόγω της ταχύτερης ταχύτητας ολίσθησης, το ρεύμα ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερο και ταχύτερο (περίπου 1ns αντί 100ns για το σήμα ιόντων). Κατά συνέπεια, μια πολύ γρήγορη άνοδος του σήματος, ακολουθούμενη από μια ουρά που οφείλεται στο νέφος ιόντων, είναι αναμενόμενο. Τέτοια γρήγορα σήματα ηλεκτρονίων είναι αρκετά δύσκολο να τα πιάσεις, αλλά είναι εφικτό με τα σημερινά ηλεκτρονικά. Για παράδειγμα, με χρησιμοποιώντας τους τώρα ευαίσθητους προενισχυτές με έναν γρήγορο χρόνο ανόδου ($t < 1$ ns), το αποτέλεσμα είναι θεαματικό (βλέπε επόμενο διάγραμμα).



Σχήμα 2.13: Σήμα γρήγορων ηλεκτρονίων από το ρεύμα του προενισχυτή σε μίγμα αερίου Ar + 10% ισοβουτάνιο. Παρατηρούμε επίσης ότι το σήμα των ηλεκτρονίων και της ουράς των θετικών ιόντων αναπτύσσεται μάζα σε 5ns και 80ns αντίστοιχα.

Το γρήγορο σήμα έχει άνοδο σε 1ns και πλάτος δέκα φορές υψηλότερο από την ουρά ιόντων. Τέτοια γρήγορα σήματα θα επιτρέψουν την ανάπτυξη νέων τμημάτων ολίσησης ή μικρά TCP με χρονική ανάλυση κάτω από 1ns.

Η χρονική ανάλυση του Micromegas για πρώτη φορά διερευνήθηκε με χρήση του Lecroy-MQS104 προενισχυτή. Το καλύτερο αποτέλεσμα (4.5ns) έχει ληφθεί με αέριο υψηλής ταχύτητας ολίσησης: μείγμα αργού, CF_4 και ισοβουτάνιο. Συνεπώς, είναι απολύτως λογικό να υποθέσουμε ότι χρησιμοποιώντας CF_4 ως φέρον αέριο, σε βάθος μετατροπής 1 mm και ποιό γρήγορα ηλεκτρονικά, μπορεί κανείς να φτάσει σε χρονική ακρίβεια 1ns.

2.1.6 Χωρική ανάλυση

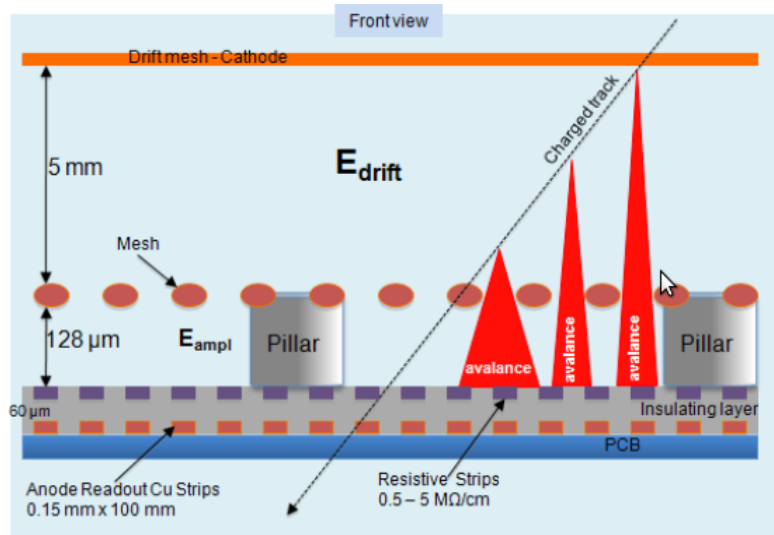
Διάφορες ομάδες, χρησιμοποιώντας διάφορες συνθέσεις του ανιχνευτή, διερεύνησαν την χωρική ανάλυση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έχουν δημοσιευθεί και παρουσιάζονται στον ποιο κάτω πίνακα.

Η ομάδα Saclay έχει δοκιμάσει αρχικά ανιχνευτές, που έχουν 317 micron pitch. Μετρήθηκε ακρίβεια 60 μm με τη χρήση αργού + DME μίγματος. Πρόσφατα αποτελέσματα με μικρό pitch ανιχνευτές (50 και 100 μm) έδωσε χωρική ανάλυση 25 μm με μίγμα He + 20% DME, και 12 μm με μίγμα CF_4 και 20% Ισοβουτάνιο. Η Subathec-Nantes ομάδα, χρησιμοποιώντας ένα pitch 200 μm, έχει μετρήσει ακρίβεια 45 μm. Ένα συγκρίσιμο αποτέλεσμα έχει προκύψει από την ομάδα Mulhouse χρησιμοποιώντας Ne + 10% DME αέριο. Το συμπέρασμα είναι ότι η ακρίβεια των Micromegas μπορεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες των περισσότερων από τις υψηλής ενέργειας πειραμάτων για σκοπούς παρακολούθησης. Επιπλέον, με στενές λωρίδες (strips) και χαμηλής διάχυσης συμπληρωματικά αέρια, η χωρική ανάλυση μπορεί να φτάσει αυτή του silicon micro-strip detector. Μπορεί κάποιος να υποθέσει ότι μπορεί ο Micromegas να χρησιμοποιηθεί ως micro-vertex ανιχνευτής στην περιοχή αλληλεπίδρασης των επιταχυντών σωματιδίων με πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση τον ανιχνευτή πυριτίου: υψηλότερη αντίσταση ακτινοβολίας, χαμηλότερο κόστος και χαμηλότερο προϋπολογισμό υλικού.

Table I

Resolution MICROMEAS			
σ (μm)	PITCH (μm)	Gas mixture	Institute
80	317	Ar+10% iC_4H_{10}	Saclay
60	317	Ar+10% DME	Saclay
45	200	Ar+25% CO_2	Subatech
		Ne+10% DME	UNI-Mulhouse
24	50	He+10% DME	Saclay
12	100	CF_4 +20% iC_4H_{10}	

2.1.7 Micromegas με resistive layer(resistive anode readout)



Η τεχνική micromegas εφευρέθηκε στα μέσα του 1990. Επιτρέπει την κατασκευή ενός λεπτού ασύρματου ανιχνευτή αερίου σωματιδίων. Ο Micromegas ανιχνευτής αποτελείται από ένα επίπεδο (drift) ηλεκτρόδιο, ένα κενό αερίου λίγα mm πάχος που ενεργεί ως μετατροπέας και περιοχή drift, και ένα λεπτό μεταλλικό πλέγμα συνήθως 100 μm απόσταση από το ηλεκτρόδιο ανάγνωσης, δημιουργώντας την περιοχή ενίσχυσης. Το ηλεκτρόδιο μετατόπιση και το πλέγμα ενίσχυσης βρίσκονται σε αρνητικές υψηλές τάσης (HV), το readout ηλεκτρόδιο είναι στο δυναμικό εδάφους. Οι τάσης HV επιλέγονται τέτοιες ώστε το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή του drift είναι μερικές εκατοντάδες V/cm και περίπου 50 kV/cm στην περιοχή ενίσχυσης. Φορτισμένα σωματίδια που διέρχονται στο χώρο του drift ιονίζουν το αέριο, τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται από τον ιονισμό ολισθάνουν προς την κατεύθυνση του mesh. Το mesh είναι διαφανείς για τα περισσότερα ηλεκτρόνια για όσο διάστημα το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή ενίσχυση είναι της τάξης του 100 φορές μεγαλύτερο από το πεδίο στο drift. Η χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων λαμβάνει χώρα στη λεπτή περιοχή ενίσχυσης, αμέσως πάνω από το ηλεκτρόδιο ανάγνωσης.

Το εξέχον χαρακτηριστικό της τεχνικής Micromegas είναι ότι επιτρέπει τη λειτουργία σε πολύ υψηλές ροές σωματιδίων, κυρίως λόγω της γρήγορης εκκένωσης περίπου 100 ns των θετικών ιόντων.

Η Micromegas τεχνολογία αναπτύχθηκε λίγα χρόνια μετά την εφεύρεση της τεχνικής Micromegas. Απασχολεί βιομηχανικές διεργασίες, που χρησιμοποιούνται στην printed board τεχνολογία, για την τοποθέτηση του πλέγματος σε σταθερή απόσταση πάνω από το ηλεκτρόδιο ανάγνωσης.

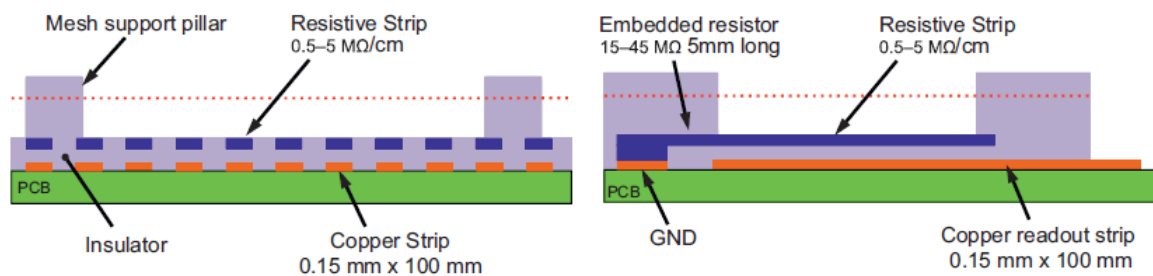
Micromegas ανιχνευτές έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πειράματα φυσικής υψηλής ενέργειας τα τελευταία χρόνια, όταν καλή χωρική ανάλυση σε υψηλά ποσοστά δεδομένων ήταν απαραίτητη. Micromegas έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί με επιτυχία θαλάμοι ανάγνωσης σε Time Projection Chambers.

Το ιδιαίτερα σκληρό περιβάλλον υποβάθρου στους ανιχνευτές στο Large Hadron Collider στο CERN για τη φωτεινότητα που υπερβαίνει τα $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ θέτει μια σειρά από σοβαρούς περιορισμούς στις απόδοση αυτών των ανιχνευτών. Για παράδειγμα, ρυθμοί μέτρησης μέχρι 20 kHz/cm² στις πλέον αντίξοες περιοχές του συστήματος μιονίων στο ATLAS μπορεί να χρειαστεί να αντιμετωπιστούν. Λιγότερο από το 10% αυτού του ρυθμού είναι αναμενόμενο να προέλθει από μόνια, περίπου το 20% από τα πρωτόνια και τα πιόνια, το υπόλοιπο, σε κατά προσέγγιση αναλογία 2:1, πηγάζει από φωτόνια και αλληλεπιδράσεις νετρονίων. Τα νετρόνια που αλληλεπιδρούν στους θαλάμους δημιουργούν αργά κινούμενα οπισθοσκεδαζόμενα από ελαστική σκέδαση και/ή με χαμηλή ενέργειας ανδρόνια από την πυρηνική διάσπαση. Και οι δύο είναι σε μεγάλο βαθμό ιοντίζουσες και οδηγούν σε μεγάλη εναπόθεση ενέργειας στους θαλάμους μιονίων με τον κίνδυνο σπινθήρων. Εκτός από νετρόνια, επίσης φορτισμένα ανδρόνια αλληλεπιδρούν και μπορούν να δημιουργήσουν με χαμηλής ενέργειας συντρίμια αδρονίων.

Οι συγκεκριμένες ιδιότητες του Micromegas θαλάμου, με μια πολύ λεπτή περιοχή ενίσχυσης, τους κάνουν ιδιαίτερα ευάλωτους σε σπινθήρες. Οι σπινθήρες εμφανίζονται όταν ο συνολικός αριθμός των ηλεκτρονίων σε μια χιονοστιβάδα φτάνει τιμές των 10^7 (Raether όριο). Υψηλή αποτελεσματικότητα ανίχνευσης για μόνια ελάχιστου ιονισμού επιφέρει ένα παράγοντα ενίσχυσης αερίου της τάξης των 10^4 . Ως εκ τούτου, διαδικασίες ιονισμού που παράγουν περισσότερα από 1000 ηλεκτρόνια σε αποστάσεις συγκρίσιμες με τη χαρακτηριστική πλευρική έκταση μιας χιονοστιβάδας (μερικές εκατοντάδες μικρά) ενέχει τον κίνδυνο να προκαλέσει σπινθήρα. Τέτοια επίπεδα ιονισμού εύκολα πετυχεύονται από χαμηλής ενέργειας σωματίδια άλφα- ή αργά-κινούμενα φορτισμένα συντρίμια από αλληλεπιδράσεις νετρονίων (ή άλλες) στο αέριο του ανιχνευτή ή τα υλικά του ανιχνευτή. Οι σπινθήρες μπορεί να προκαλέσουν βλάβη στον ανιχνευτή και τα ηλεκτρονικά ανάγνωσης ή/και να οδηγήσει σε μεγάλο νεκρό χρόνο, ως αποτέλεσμα της βλάβης του HV.

Παρακάτω θα παρουσιάσω μια μέθοδος κατασκευής θαλάμων Micromegas πιο ανθεκτικούς σε σπινθήρες, διατηρώντας παράλληλα την ικανότητά τους να μέτρουν με εξαιρετική ακρίβεια σωματίδια ελάχιστου ιονισμού σε υψηλού ρυθμού περιβάλλοντα.

Σχεδιασμός ανιχνευτή Η αρχή του σχεδιασμού του ανιχνευτή φαίνεται στο επόμενο σχήμα, το οποίο δείχνει δύο ορθογώνιες πλευρικές εμφανίσεις του θαλάμου. Πρόκειται για μια Micromegas δομή χτισμένη στην κορυφή ενός τυπωμένου κυκλώματος (PCB) με 18μm πάχους Cu strips ανάγνωσης που καλύπτονται από ένα στρώμα προστατευτικής αντίστασης, όπως εξηγείται στη συνέχεια.



Η προστασία αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα μονωτή (στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι κατασκευασμένο από photoimageable coverlay και 64 μm πάχος) πάνω από το οποίο τοποθετούνται strips από αντιστατικό στρώμα (με ειδική αντίσταση των λίγων MΩ/cm). Γεωμετρικά, η αντιστατικές λωρίδες strips ταυριάζουν με το μοτίβο των strips ανάγνωσης. Και οι δύο είναι 150μm πλάτος και περίπου 100 mm μήκος, το strip pitch (απόσταση μεταξύ των strips) τους είναι 250 μm. Τα αντιστατικά strips είναι 64 μm πάχος, το 100 μm εύρος χάσμα μεταξύ των γειτονικών strips είναι γεμισμένα με μονωτικό υλικό. Τα αντιστατικά strips είναι γειωμένα στο ένα άκρο μέσω μιας περιοχής του strip το οποίο έχει μεγαλύτερη αντίσταση, που ισοδυναμεί με 15-50 MΩ αντίσταση.

Τα ωμικά στρώματα πάνω από το ηλεκτρόδιο ανάγνωσης έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν. Ωστόσο, στη γνώση μας, όλοι χρησιμοποίησαν συνεχή ωμικά στρώματα, στις περισσότερες περιπτώσεις με πρωταρχικό στόχο την εξάπλωση του παραγόμενου φορτίου για να αποκτήσουν καλή ανάλυση με ευρύτερα (λιγότερες)

strips. Για την προστασία επίσης από τα sparks δοκιμάστηκαν και ωμικά mesh.

Η προσέγγισή που θα περιγράψω είναι διαφορετική. Έχουμε επιλέξει χωριστές ωμικές λωρίδες αντί για μια συνεχή ωμικό στρώμα για να αποφευχθεί η εξάπλωση του φορτίου σε διάφορα strip ανάγνωσης και να κρατήσει την όσο ποιά μικρή περιοχή ανεπηρέαστη από κάποια αποφόρτιση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η πιθανότητα αποφόρτισης είναι η ίδια για ένα ωμικό και ένα τυπικό θάλαμο. Τα sparks σπινθήρες είναι ηλεκτρικά τόξα μεταξύ των mesh και της ανόδου στο δυναμικό της γείωσης, είτε πρόκειται για ωμικά strips ή μεταλλικά strips ανάγνωσης. Ο σκοπός του στρώματος προστασίας από σπίθες είναι να περιοριστεί, σε περίπτωση σπίθας, το ρεύμα αποφόρτισης σε τέτοιο επίπεδο ώστε η πτώση της τάσης HV του mesh να γίνει ασήμαντη.

Η δομή Micromegas είναι χτισμένη πάνω από τα ωμικά strips. Έχει ένα ανοξείδωτο πλέγμα με 400 γραμμές ίντσα και πάχος σύρματος 18 μm . Το πλέγμα διατηρείται σε απόσταση 128 μm από τα ωμικά strips μέσω μικρών πυλώνων (400 μm διάμετρο) κατασκευασμένους από το ίδιο photoimageable coverlay υλικό που χρησιμοποιείται για το στρώμα μόνωσης. Οι πυλώνες είναι τοποθετημένοι σε σχήμα τακτικής μήτρας με απόσταση μεταξύ γειτονικών πυλώνων 2,5 mm στους x και y άξονες. Ο διαστάσεις του mesh είναι 100X100 mm², η ενεργός περιοχή του ανιχνευτή είναι 90mm εγκάρσιως και 80 mm κατά μήκος των strips.

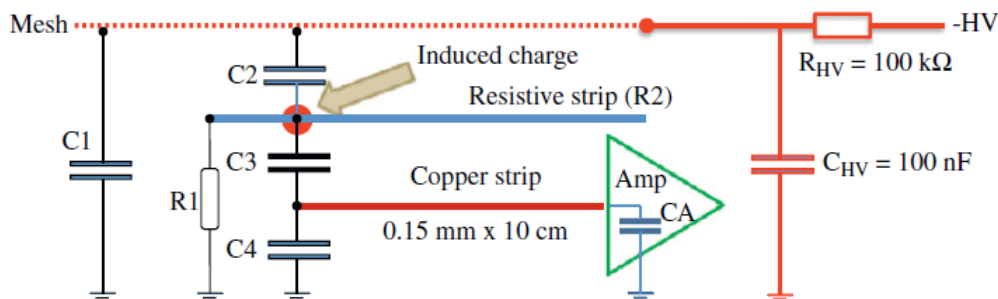
Πάνω από το πλέγμα ενίσχυσης, σε απόσταση 4 ή 5 mm, ένα άλλο δικτυωτό πλέγμα από ανοξείδωτο χάλυβα (350 γραμμές/ίντσα με διάμετρο σύρματος από 22 μm) χρησιμεύει ως ηλεκτρόδιο drift ολίσθησης. Οι πλευρικές διαστάσεις του είναι οι ίδιες όπως και για το πλέγμα ενίσχυσης.

Ο θάλαμος αποτελείται από 360 strips ανάγνωσης. Τα strips ανάγνωσης είναι αφημένες να αιωρούνται στο ένα άκρο. Στο άλλο άκρο είναι συνδεδεμένα σε ομάδες των 72 strips σε πέντε υποδοχείς 80 ακίδων. Ο υπόλοιπες οκτώ ακίδες του κάθε υποδοχέα χρησιμεύουν ως σημεία γείωσης.

Το περίβλημα του ανιχνευτή αποτελείται από ένα 20 mm ύψους αλουμινένιο πλαίσιο, τοποθετημένο στην κορυφή της πλάκας ανάγνωσης και σφραγισμένο από ένα O-ring, και ένα κάλυμμα (και πάλι σφραγισμένο από O-ring) με κάποια παράθυρα που ανοίγουν, κατασκευασμένο από 50 μm πάχους φύλλο Krypton.

Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του θαλάμου φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



R1 είναι η αντίσταση μεταξύ του ωμικού strip και της γείωσης του ανιχνευτή (βλ. επόμενο Πίνακα).

Table 13: Resistivity values for the three tested chambers.

Chamber	Resistance to ground R1 (MΩ)	Resistance along strip R2 (MΩ/cm)	Equivalent surface resistivity R2 (MΩ/□)
R11	15	2	0.030
R12	45	5	0.075
R13	20	0.5	0.0075

C1 είναι η χωρητικότητα μεταξύ των mesh και της γείωσης του ανιχνευτή. Είναι περίπου 4 nF, πολύ μεγάλη σε σχέση τις άλλες χωρητικότητες που εμπλέκονται. C2 είναι η χωρητικότητα μεταξύ του ωμικού strip και του mesh, C3 είναι η χωρητικότητα μεταξύ του ωμικού strip και των strips ανάγνωσης. Οι τιμές τους εξαρτώνται από την εξάπλωση του φορτίου στα ωμικά strips, τις σχετικές αποστάσεις των resistive strips με τα strip ανάγνωσης και το mesh, και στην τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς του μονωτικού υλικού μεταξύ των resistive strips και των strips ανάγνωσης(readout). Μια υψηλότερη αντίσταση οδηγεί σε μια μικρότερη εξάπλωση του φορτίου και, συνεπώς, μικρότερες χωρητικότητες για τις C2 και C3. Οι αναλογίες τους, όμως, παραμένει σταθερή. Στην παραπάνω περιγραφόμενη ρύθμιση είναι περίπου 1:8. C4 είναι η χωρητικότητα μεταξύ των readout strips και της γείωσης του ανιχνευτή, η τιμή του είναι περίπου 1,5 pF. C αντιπροσωπεύει τη χωρητικότητα εισόδου του προ-ενισχυτή.

Η HV παρέχεται στο πλέγμα μέσω ενός αντιστάτη 100KΩ, ακολουθούμενη από μια ρυθμιστική χωρητικότητα των 100 nF στη γείωση του ανιχνευτή.

Σε περίπτωση που δεν έχουμε το ωμικό στρώμα η κίνηση της χιονοστιβάδας ηλεκτρονίων προκαλεί ένα σήμα άμεσα στα readout strips. Σε περίπτωση που ένα συνεχές ωμικό στρώμα είναι παρόν μεταξύ του κενού(χάσμα, περιοχή αερίου) του αερίου και των readout strips, η κίνηση του φορτίου στο στρώμα έχει ως αποτέλεσμα ένα «RC-τύπου» διαφοριστή του σήματος. Προκαλεί επίσης την εξάπλωση του σήματος σε γειτονικά strips. Εάν, ωστόσο, η ωμική στρώση είναι κατακερματισμένη, όπως αναφέρθηκε, η διάδοση του σήματος σε γειτονικές λωρίδες αποφεύγεται. Μόνο το φορτίο που προκαλείται στα strip ανάγνωσης κάτω από τα resistive strip φαίνεται από τον προ-ενισχυτή. Το φορτίο στο resistive strip οδηγείται στη γείωση μέσω της αντίστασης R1.

Έχουν σχεδιαστεί και δοκιμαστεί τρεις θαλάμους με ενεργό περιοχή 100X80 mm², οι R11, R12, R13, με διαφορετικές τιμές της αντίστασης κατά μήκος των strips και της αντίστασης στη γείωση. Οι αντίστοιχες τιμές της αντίστασης δίνονται στον πάνω πίνακα.

Οι τιμές των αντιστάσεων των τριών θαλάμων επιλέχθηκαν ως συμβιβαστική λύση για τη διατήρηση της ικανότητας ροής του ανιχνευτή ενώ παράλληλα αυξάνουν την αντίσταση για την καλύτερη προστασία από σπινθήρες. Με τα resistive strips μπορούμε να επιλέξουμε υψηλές τιμές της αντίστασης στη γείωση (20-50 MΩ) διατηρώντας παράλληλα την ισοδύναμη αντίσταση επιφανείας κάτω από 0,1MΩ/square. Οι τιμές αντίστασης που χρησιμοποιήθηκαν για αυτούς τους θαλάμους δεν έχουν βελτιστοποιηθεί, αλλά, όπως έχει αποδειχθεί πληρούν όλες τις απαιτήσεις.

2.2 Simulation στο Fluka-Flair για διάφορες ραδιενεργές πηγές

2.2.1 Περιγραφή Fluka-Flair

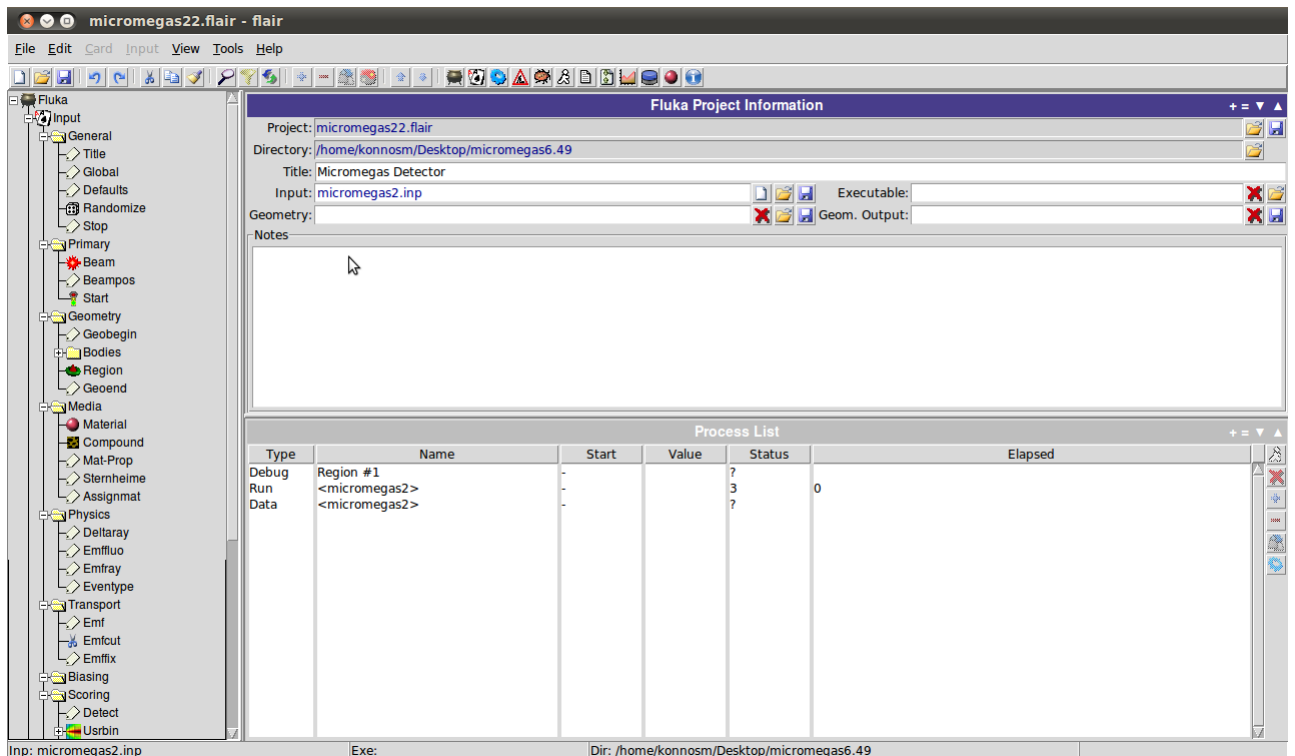
Το Fluka είναι ένα εργαλείο το οποίο υπολογίζει την μεταφορά και αλληλεπίδραση σωματιδίων. Με το Fluka μπορείς να προσομοιώσεις διάφορου είδους διατάξεις, στόχους και πηγές(beams), ακόμα και ένα ολοκληρωμένο πείραμα σε πραγματικό χρόνο.

Το Flair είναι ένα interface για το Fluka που χρησιμοποιείται για διευκόλυνση στην επεξεργασία των αρχείων εισόδου του Fluka, την εκτέλεση του κώδικα και την απεικόνιση των αρχείων εξόδου. Η φιλοσοφία του Flair είναι να δουλεύει σε ένα μέτριο επίπεδο σαν interface ουσώστε ο χρήστης να αναγνωρίζει και να συμπληρώνει την κάθε κάρτα. Μέσα στο πρόγραμμα επεξεργασίας του Flair ο χρήστης δουλεύει απευθείας με τις κάρτες του Fluka.

Το Fluka διαβάζει από ένα αρχείο με extension .inp . Το input file περιέχει διάφορες εντολές που ονομάζονται "options" όπου η κάθε μια αποτελείται από μια ή περισσότερες γραμμές ("cards"). Εκτός από εντολές του Fluka το input file μπορεί να περιέχει την περιγραφή της γεωμετρίας από συγκεκριμένες "command cards". Η περιγραφή της γεωμετρίας μπορεί να φυλακτεί σε διαφορετικό ASCII file αν θέλω να χρησιμοποιήσω την γεωμετρία που έκανα σε διαφορετικά inputs.

Τυπική δομή του Fluka input file όπως και του πιο εύκολου σε χρήση Flair interface:

- Τίτλος και σχόλια για λόγους περιγραφής του προβλήματος(προαιρετική, αλλά προτείνεται).
- Περιγραφή της γεωμετρίας του προβλήματος (στερεά σώματα και τις επιφάνειες, σε συνδιασμό με την κατάτμηση του χώρου σε περιοχές).(υποχρεωτικό)
- Περιγραφή και ορισμός των υλικών που θα χρησιμοποιήσω.
- Ανάθεση του κάθε υλικού στις διάφορες περιοχές που έχω ορίσει.
- Περιγραφή της πηγής των σωματιδίων που θα χρησιμοποιήσω.
- Περιγραφή των ζητούμενων ανιχνευτών. Κάθε ένας είναι ένα πεδίο του χώρου φάσης όπου ο χρήστης μπορεί να υπολογίσει την αναμενόμενη τιμή μιας φυσικής ποσότητας.
- Περιγραφή πολωμένων συστημάτων.
- Περιγραφή προβλημάτων στις ρυθμίσεις, όπως ενεργειακά κατώφλια, μέγεθος βήματος που θα τρέξει η προσομίωση, φυσικά φαινόμενα που δεν προσομιώνονται από προεπιλογή, σωματίδια που δεν πρέπει να μεταφέρονται κ.τ.λ.
- Αρχικοποίηση ακολουθίας τυχαίων αριθμών.(Υποχρεωτικό εαν επιθυμώ εκτίμηση του στατιστικού σφάλματος.
- Σήμα εκκίνησης και τον αριθμό των σωματιδίων που θέλω να έχει το σήμα μου.
- Επιπλέον, υπάρχουν ειδικές εντολές διαθέσιμες στο Fluka για πιο πολύπλοκα προβλήματα, π.χ. μαγνητικά πεδία, υπολογισμούς συναρτήση του χρόνου, καταγραφή φακέλων ιστορικού του προβλήματος, η μεταφορά φωτονίων, καλώντας ρουτίνες που έχει φτιάξει ο χρήστης.



Σχήμα 2.14: Εικόνα δομής του interface Flair

2.2.2 Περιγραφή του προβλήματος

Το πρόβλημα που είχα περιορίστηκε στην απλή παρακολούθηση της κατανομής της ενέργειας στον χώρο του Micromegas ανιχνευτή (στην περιοχή μεταξύ drift και mesh), στέλνοντας φωτόνια (πηγή) ενέργειας ίσης με τα φωτόνια, ακτίνες γ που εκπέμπουν τα ραδιενεργά Am^{241} Fe^{55} Cd^{109} . Οι τρεις αυτές πηγές εκπέμπουν γ ακτινοβολία στις ποιό κάτω ενέργειες και με συγκεκριμένη πιθανότητα:

Για Fe^{55} :

Ενέργεια ακτινοβολίας γ (keV)	Πιθανότητα
0.64	0.00421
5.88765	8.24E-02
5.89875	0.1628
6.49	0.0329

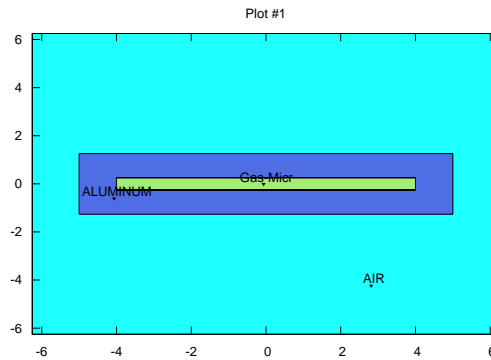
Για Am^{241} :

Ενέργεια ακτινοβολίας γ (keV)	Πιθανότητα
13.9	0.42
26.3448	0.024
33.196	0.00126
59.54121	0.359

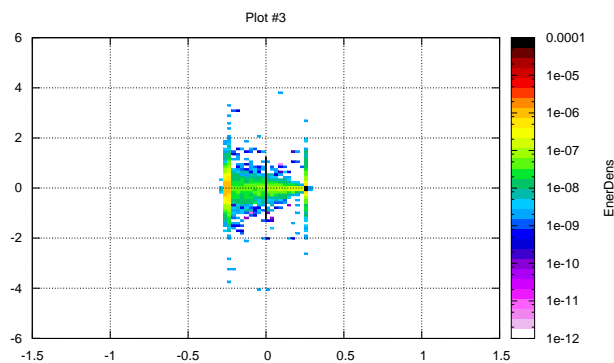
Για Cd^{109} :

Ενέργεια ακτινοβολίας γ (keV)	Πιθανότητα
2.98	0.112
21.9903	0.291
22.1629	0.552
24.9	0.178
88.0341	0.0361

Η διάταξη η οποία έχω σχεδιάσει φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα:



Σχήμα 2.15: Διάταξη του Micromegas όπως την δίνει το output του Flair. Τα στοιχεία mesh, grid και strips δεν φαίνονται λόγω του μικρού τους μεγέθους.(άξονες σε cm)



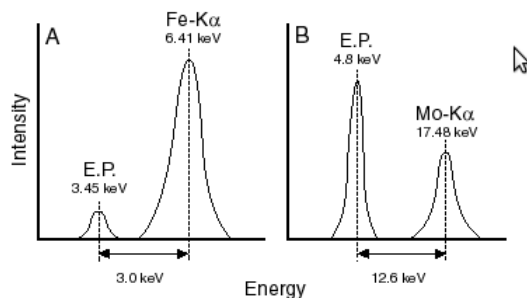
Σχήμα 2.16: Η κατανομή της ενέργειας των φωτονίων σε όλο τον ανιχνευτή για ακτινοβολία γ ενέργειας 5.89875 keV από Fe^{55}

Τα φαινόμενα που παρατηρούνται κυρίως όπως φαίνεται από τα δεδομένα (απώλειες ενέργειας) είναι το φωτοηλεκτρικό και Compton.

Το σημαντικότερο φαινόμενο που θέλουμε να παρακολουθήσουμε σε αυτή την προσομοίωση είναι το Argon escape που παρατηρείται κοντά στα 3,2 keV.

Αν η ενέργεια των εισερχόμενων ακτίνων X είναι μεγαλύτερη από την αιχμή απορρόφησης του αερίου ανιχνευτή, μπορεί να παραχθούν χαρακτηριστικές ακτίνες X από το αέριο αυτές που ορίζουμε ως κορυφές διαφυγής (escape peaks). Το όνομα προέρχεται από το γεγονός ότι ορισμένοι ενέργεια των εισερχόμενων ακτίνων X εκπέμπεται ως χαρακτηριστική ακτίνα X από το αέριο ανιχνευτή και είτε ανιχνευεται από τον ανιχνευτή, είτε διαφεύγει, έτσι αν διαύγει ο ανιχνευτής ανιχνεύει την υπόλοιπη ενέργεια που αφήνεται σε αυτόν από το σωματίδιο ή φωτόνιο που εισέρχεται.

Για παράδειγμα, όταν εισέρχεται φωτόνιο ενέργειας περίπου 6 keV στον ανιχνευτή διεγείρει το Ar που έχει μέσα και στην συνέχεια με αποδιέγερση παράγεται μια χαρακτηριστική ακτίνα X ενέργειας περίπου 2,95 keV, αυτή η ενέργεια μπορεί να διαφύγει από τον ανιχνευτή και η υπόλοιπη ενέργεια να ανιχνευτεί από τον ανιχνευτή και η οποία είναι περίπου 3 keV. Το μέγεθος της κορυφής διαφυγής είναι συνάρτηση του φθορισμού απόδοσης, w , και είναι γενικά μικρότερη από ό, τι η χαρακτηριστική κορυφή, διότι σχετικά λίγες ακτίνες X διεγείρουν το αέριο σε σύγκριση με όσες έχουν ανιχνευθεί. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, το μέγεθος της μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο.



Σχήμα 2.17: Κορυφές διαφυγής: (A) για Ar($w_k = 0.12$), (B) για Kr($w_k = 0.65$)

2.2.3 Κώδικας που γράφτηκε στο Fluka-Flair για την προσομοίωση

***** Next control card ***** TITLE 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

Micromegas Detector

***** Next control card ***** GLOBAL 0.000 0.000 0.000 1.000 1.000 0.000

***** Next control card ***** DEFAULTS 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 PRECISIO

```
*----- MATERIAL 18. 39.948 0.0017837
40.Argon -----*
*----- MATERIAL 20. 40.078 1.55
40.CALCIUMm -----*
*----- MATERIAL 9.018.9984032 0.001696
19.0FLUORINE -----*
*----- MATERIAL 5.0 10.012937 2.34
10.0BORON-10 -----*
*----- MATERIAL 19.0 39.0983 0.862
39.0POTASSIU -----*
*----- G10
-----*
*----- MATERIAL 1.8
G10 -----*
*----- COMPOUND 0.1512 HYDROGEN .01326 BORON-10 .2754
CARBONG10 -----*
*----- COMPOUND .01416 NITROGEN .361578 OXYGEN .0042
FLUORINEG10 -----*
*----- COMPOUND .004442 SODIUM .009 MAGNESIU .04128
ALUMINUMG10 -----*
*----- COMPOUND 0.1512 SILICON .00498 POTASSIU .08142
CALCIUMG10 -----*
*----- COMPOUND .00288 TITANIUM .0021 IRON
G10 -----*
*----- Air
-----*
*----- Micromegas Gas
-----*
*----- MATERIAL 24.0 51.9961 7.18
```

```

Chromium -----*
*----- MATERIAL 28. 58.6934 8.908
Nickel -----*
*----- MyCopper
-----*
*----- MATERIAL 2.2436
MyCopper -----*
*----- COMPOUND COPPER
MyCopper -----*
*----- ..+...1...+...2...+...3...+...4...+...5...+...6...+...7.. -----*
*----- ASSIGNMA Gas-Micr Gas
-----*
*----- ASSIGNMA AIR Hole
-----*
*----- EMFFIX Gas-Micr 5.
-----*
*----- DETECT 0.0 0.000001 6. 0.0 1.
Gasdetecotr -----*
*----- DETECT 0.0 Air Box Mesh Drift
Strips& -----*
*----- DETECT 0.0
&& -----*
*----- EVENTDAT 91.
EventsSim -----*

```

```

***** Next control card ***** BEAM -5.9541E-06 0.000 1.3140E+04 0.000
0.000 0.000 PHOTON

```

```

***** Density scaling factors start at location 1 and end at 4000 (I*4 addr.) *****

```

```

***** Next control card ***** BEAMPOS 0.000 0.000 0.2592 0.000 0.000 0.000 NEGATIVE

```

```

***** Next control card ***** EVENTYPE 0.000 0.000 1.000 0.000 0.000 0.000 EVAP

```

```

***** Next control card ***** GEOBEGIN 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 COMBNAME

```

```

1

```

```

Micromegas Detector

```

```

IVOPT = 0 IDBG = 0

```

```

Body data

```

```

*
*----- G10 ekso
-----*
*
*
*----- Black hole
-----*
*
RPP Out 1 -0.50000000E+01 0.50000000E+01 -0.50000000E+01 0.50000000E+01 -0.12592000E+01 0.12592000E+01
5
*
*----- Void

```

```

-----*
*
SPH BLKBODY 2 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.1000000E+07 0.0000000E+00 0.0000000E+00
15
*
*----- G10 mesa
-----*
*
SPH VOID 3 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.1000000E+05 0.0000000E+00 0.0000000E+00
25
*
*----- mesh
-----*
*
RPP In 4 -0.4000000E+01 0.4000000E+01 -0.4000000E+01 0.4000000E+01 -0.2592000E+00 0.2592000E+00
35
*
*----- Drift
-----*
*
RPP Mesh 5 -0.4000000E+01 0.4000000E+01 -0.4000000E+01 0.4000000E+01 -0.2454000E+00 -0.2436000E+00
45
*
*----- Strips
-----*
*
RPP Drift 6 -0.4000000E+01 0.4000000E+01 -0.4000000E+01 0.4000000E+01 0.2564000E+00 0.2574000E+00
55
RPP STRIPS 7 -0.4000000E+01 0.4000000E+01 -0.4000000E+01 0.4000000E+01 -0.2592000E+00 -0.2582000E+00
65
RPP Target 8 -0.4000000E+01 0.4000000E+01 -0.4000000E+01 0.4000000E+01 -0.2436000E+00 0.2564000E+00
75
RPP Aerio1 9 -0.4000000E+01 0.4000000E+01 -0.4000000E+01 0.4000000E+01 0.2574000E+00 0.2592000E+00
85
RPP Aerio3 10 -0.4000000E+01 0.4000000E+01 -0.4000000E+01 0.4000000E+01 -0.2582000E+00 -0.2454000E+00
95
END 11 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
105
Number of bodies 10
Length of FPD-Array 110

Input region data
*
*----- Black hole
-----*
*
BLKBODY 5 + BLKBODY - VOID
*
*----- Air around
-----*
*
Air 5 + VOID - Out
*
*----- Wholebox
-----*
*

```


Box 5 + Out - In
 Mesh 5 + Mesh
 Drift 5 + Drift
 Strips 5 + STRIPS
 TARGET 5 + Target
 AERIO1 5 + Aerio1
 AERIO3 5 + Aerio3
 END Number of input regions 9
 Number of code zones 9
 Length of integer array 218

CODE ZONE	INPUT REGION	ZONE DATA LOC.	NO. OF BODIES	REGION NO.
1	1	71	2	1
2	2	80	2	2
3	3	89	2	3
4	4	98	1	4
5	5	103	1	5
6	6	108	1	6
7	7	113	1	7
8	8	118	1	8
9	9	123	1	9

I	IIR1(I)	IR2(I)
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	4	4
5	5	5
6	6	6
7	7	7
8	8	8
9	9	9

Interpreted body echo

Body n. 1 RPP Out
 -5.000000 5.000000 -5.000000 5.000000 -1.259200 1.259200
 Body n. 2 SPH BLKBODY
 0.000000 0.000000 0.000000 1000000.
 Body n. 3 SPH VOID
 0.000000 0.000000 0.000000 10000.00
 Body n. 4 RPP In
 -4.000000 4.000000 -4.000000 4.000000 -0.2592000 0.2592000
 Body n. 5 RPP Mesh
 -4.000000 4.000000 -4.000000 4.000000 -0.2454000 -0.2436000
 Body n. 6 RPP Drift
 -4.000000 4.000000 -4.000000 4.000000 0.2564000 0.2574000
 Body n. 7 RPP STRIPS
 -4.000000 4.000000 -4.000000 4.000000 -0.2592000 -0.2582000
 Body n. 8 RPP Target
 -4.000000 4.000000 -4.000000 4.000000 -0.2436000 0.2564000
 Body n. 9 RPP Aerio1
 -4.000000 4.000000 -4.000000 4.000000 0.2574000 0.2592000
 Body n. 10 RPP Aerio3
 -4.000000 4.000000 -4.000000 4.000000 -0.2582000 -0.2454000

Interpreted region echo

Region n. 1 BLKBODY

2 -3
 Region n. 2 Air
 3 -1
 Region n. 3 Box
 1 -4
 Region n. 4 Mesh
 5
 Region n. 5 Drift
 6
 Region n. 6 Strips
 7
 Region n. 7 TARGET
 8
 Region n. 8 AERIO1
 9
 Region n. 9 AERIO3
 10
 1 OPTION 0 WAS USED IN CALCULATING VOLUMES, FOR 9 REGIONS
 3: INPUT VOLUMES, ANYTHING ELSE: VOLUMES = 1.0

VOLUMES (CM**3)
 1 REG 1 2 3 4 5 6 7 8 9
 VOLUME 1.000E+00 1.000E+00 1.000E+00 1.000E+00 1.000E+00 1.000E+00 1.000E+00 1.000E+00 1.000E+00
 ONGEOM= 4002, NGLAST= 4598

**** Stars/Energy accumulation arrays start at location 4601 and end at 4672 (I*4 addr.) ****
 GEOEND

Total time used for geometry initialization: 3.200E-02 s

***** Next control card ***** MATERIAL 0.000 0.000 1.2048E-03 0.000 0.000 0.000 AIR
 ***** Next control card ***** MATERIAL 0.000 0.000 1.6450E-03 0.000 0.000 0.000 MyArgon
 ***** Next control card ***** MATERIAL 0.000 0.000 1.8230E-03 0.000 0.000 0.000 Carbon_D
 ***** Next control card ***** MATERIAL 0.000 0.000 1.6570E-03 0.000 0.000 0.000 Gas-Micr
 ***** Next control card ***** MATERIAL 0.000 0.000 8.000 0.000 0.000 0.000 Stainle
 ***** Next control card ***** MATERIAL 24.00 52.00 7.180 0.000 0.000 0.000 CHROMIUM
 ***** Next control card ***** MATERIAL 0.000 0.000 2.004 0.000 0.000 0.000 StainMes
 ***** Next control card ***** EMF 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 ***** Next control card ***** COMPOUND -1.2480E-04 6.000 -0.7553 7.000 -0.2318 8.000 AIR
 ***** Next control card ***** COMPOUND -1.2800E-02 20.00 0.000 0.000 0.000 0.000 AIR
 ***** Next control card ***** COMPOUND 1.000 20.00 0.000 0.000 0.000 0.000 MyArgon
 ***** Next control card ***** COMPOUND 1.000 6.000 2.000 8.000 0.000 0.000 Carbon_D
 ***** Next control card ***** COMPOUND -0.9300 -27.00 -7.0000E-02 -28.00 0.000 0.000 Gas-Micr

***** Next control card ***** COMPOUND 18.00 31.00 74.00 11.00 8.000 25.00 Stainle
 ***** Next control card ***** COMPOUND 18.00 31.00 74.00 11.00 8.000 25.00 StainMes
 ***** Next control card ***** RANDOMIZ 1.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 RM64 INITIALIZED: 98765 12345 0 0
 ***** Next control card ***** EMFFLUO 1.000 2.000 32.00 0.000 0.000 0.000
 ***** Next control card ***** EMFRAY 4.000 2.000 9.000 0.000 0.000 0.000
 ***** Next control card ***** DELTARAY 1.0000E-09 0.000 0.000 2.000 32.00 0.000 PRINT
 ***** Next control card ***** MAT-PROP 0.000 0.000 257.0 31.00 0.000 0.000
 ***** Next control card ***** MAT-PROP 40.00 0.000 0.000 31.00 0.000 0.000 DPA-ENER
 ***** Next control card ***** MAT-PROP 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 ***** Next control card ***** STERNHEI 4.178 3.4000E-02 3.045 0.1542 2.990 0.1400 31
 ***** Next control card ***** ASSIGNMA 1.000 1.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 ***** Next control card ***** ASSIGNMA 26.00 2.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 ***** Next control card ***** ASSIGNMA 10.00 3.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 ***** Next control card ***** ASSIGNMA 32.00 4.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 ***** Next control card ***** ASSIGNMA 30.00 5.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 ***** Next control card ***** ASSIGNMA 12.00 6.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 ***** Next control card ***** ASSIGNMA 29.00 7.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 ***** Next control card ***** ASSIGNMA 29.00 8.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 ***** Next control card ***** ASSIGNMA 29.00 9.000 0.000 0.000 0.000 0.000
 ***** Next control card ***** EMFCUT 1.0000E-09 1.0000E-09 0.000 2.000 32.00 0.000 PHOT-THR
 ***** Next control card ***** EMFCUT 1.0000E-09 1.0000E-09 0.000 2.000 32.00 0.000 PHO2-THR
 ***** Next control card ***** EMFCUT 1.0220E-03 1.0000E-09 0.000 2.000 32.00 0.000 PROD-CUT
 ***** Next control card ***** USRBIN 10.00 208.0 -50.00 5.100 5.100 1.369 EneDepth
 ***** Next control card ***** USRBIN -5.100 -5.100 -1.369 100.0 100.0 100.0 &
 ***** Next control card ***** EVENTBIN -12.00 208.0 52.00 7.000 0.000 0.000 Evedep
 ***** Next control card ***** EVENTBIN 7.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 &
 ***** Next control card ***** START 1.0000E+06 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

2.2.4 Διαδικασία επεξεργασίας δεδομένων

Τρέχουμε τον ποιό πάνω πρόγραμμα στο Fluka αλλά με διαφορετικές ενέργειες ουτοσώστε να πάρουμε δεδομένα για όλες τις χαρακτηριστικές ακτίνες X των τριών στοιχείων που θέλω να μελετήσω (Am, Cd, Fe). Πέρνουμε τα δεδομένα και με ένα script του οποίου ο κώδικας φαίνεται παρακάτω πέρνουμε μόνο τα χρήσιμα δεδομένα από το output file του Fluka και τα αποθηκεύουμε σε ένα άλλο αρχείο. Ο κώδικας αυτός εκτελείται στο Terminal των Ubuntu.

```
#bin/sh

name=micromegas2001_fort.52
mkdir outputfiles_ $name

echo -e "Processing Total energy deposition..."
cat $name |grep -v 0.0000E+00 | grep -v ^ $ |grep -v Event |grep -v 'Number' TOTAL.txt
echo -e "The Total Energy Deposition TOTAL.txt"

mv *.txt outputfiles_ $name

echo -e "Done!"
```

Επειδή η κάθε χαρακτηριστική ακτίνα X έχει διαφορετική πιθανότητα να εκπεφθεί, γράφτηκε πρόγραμμα στην Root (το οποίο φαίνεται παρακάτω) έκανε τις γραφικές για κάθε μια ακτίνα X σε αρχεία .Root. Και μετά ένα άλλο προγραμματάκι πρόσθετα όλες τις γραφικές για το κάθε στοιχείο κάνοντας και νορμαλισμό της κατανομής αναλόγος των πιθανοτήτων της κάθε ακτίνας X και έκανε plot.

Ο κώδικας που έκανε τα αρχεία .Root :

```
{
/* reset the system */
gROOT -> Reset();

/* open input and output files */
FILE *fp = fopen ("/home/konnosm/Desktop/Fe55micro/TOTAL6,49.txt", "r");
TFile *f = new TFile ("test1_histo.root", "RECREATE");

char line[80];
Int_t i; //,counts;
Float_t counts;

TH1F *h_Fe_6_49 = new TH1F ("h_Fe_6_49", "h_Fe_6_49", 30, 0, 30);

/* Reads line by line the data file and fills the histogram */

for (int i=0; i<1000000; i++) {
if (fgets(&line, 80, fp)) {
sscanf (&line[0], "///printf("Counts =/h_Fe_6_49->Fill(counts*1000000);
// histo -> SetBinError(i, sqrt(counts));
}
}
/* close the input data file and save the histogram as a .root output file */
/* "f->Write() saves the current memory histogram in file f. */
fclose(fp);
/* f -> Write(); */

/* Set the Canvas background color */
/* Name the x,y - axis */
/* Set the histogram's line color */
```

```
h_Fe_6_49->Draw();
h_Fe_6_49->GetXaxis()->SetTitle("keV");
```

```
    TFile hfile1("Fe_6_49.root","Recreate");
h_Fe_6_49->Write();
hfile1.Close();
}
```

Ο κώδικας του προγράμματος που γράφτηκε για τον νορμαλισμό και την πρόσθεση των γραφικών είναι ο παρακάτω.

PlotAll.C

```
void run () {
/*
TCanvas *c12 = new TCanvas("c12","c12",600,500);
h_Cd_2_98->Draw();
h_Cd_2_98->SetLineColor(kRed);
h_Cd_21_99->Draw("same");
h_Cd_21_99->SetLineColor(kBlue);
h_Cd_22_16->Draw("same");
h_Cd_22_16->SetLineColor(kOrange);
h_Cd_24_9->Draw("same");
h_Cd_24_9->SetLineColor(kGreen);
h_Cd_88_03->Draw("same");
*/
TCanvas *c22 = new TCanvas("c22","c22",600,500);

    TH1F *h_Fe_5_88 = (TH1F*)gDirectory->Get("h_Fe_5_88");
    TH1F *h_Fe_5_89 = (TH1F*)gDirectory->Get("h_Fe_5_89");
    TH1F *h_Fe_6_49 = (TH1F*)gDirectory->Get("h_Fe_6_49");

    TH1F *h_Fe_all_1 = new TH1F ("h_Fe_all_1","h_Fe_all_1",30,0,30);
    TH1F *h_Fe_all_2 = new TH1F ("h_Fe_all_2","h_Fe_all_2",30,0,30);
    TH1F *h_Fe_all = new TH1F ("h_Fe_all","h_Fe_all",30,0,30);

    double c1, c2, c3, c4;
    h_Fe_all_1->Add(h_Fe_5_88, h_Fe_5_89, c1=0.0824, c2=0.1628);
    h_Fe_all_2->Add(h_Fe_all_1, h_Fe_6_49, c3=1, c4=0.0329);
    h_Fe_all_2->Draw();
    h_Fe_all_2->SetFillStyle(3001);
    h_Fe_all_2->SetFillColor(kBlue);

    h_Fe_5_88->Scale(0.0824);
    h_Fe_5_88->Draw("same");
    h_Fe_5_88->SetLineColor(kRed);

    h_Fe_5_89->Scale(0.1628);
    h_Fe_5_89->Draw("same");
    h_Fe_5_89->SetLineColor(kBlue);

    h_Fe_6_49->Scale(0.0329);
    h_Fe_6_49->Draw("same");
    h_Fe_6_49->SetLineColor(kOrange);
```

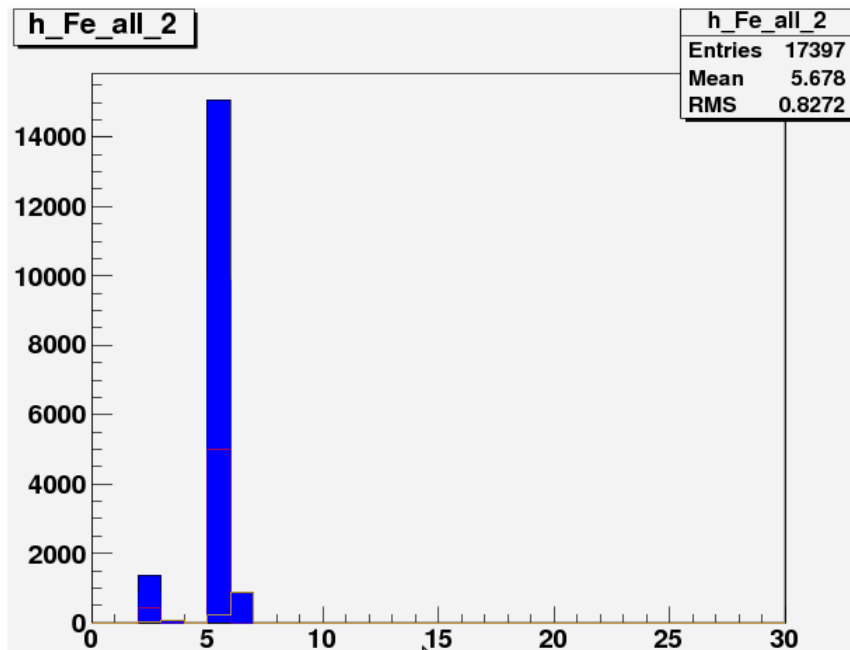
```
}
```

Οι εντολές που δόθηκαν στο terminal των ubuntu για να τρέξουν τα προγράμματα είναι.

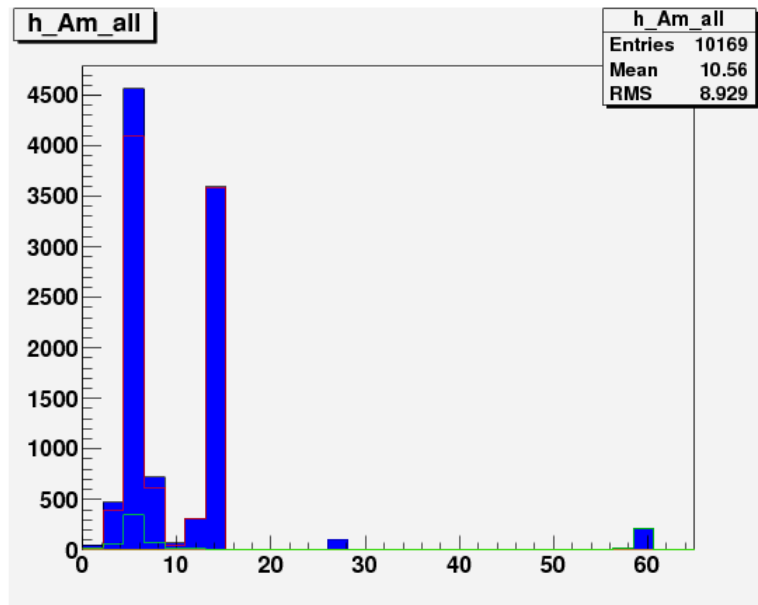
```
root -l Fe_all.root  
.L PlotAll.C  
run()
```

Αποτελέσματα της ανάλυσης δεδομένων

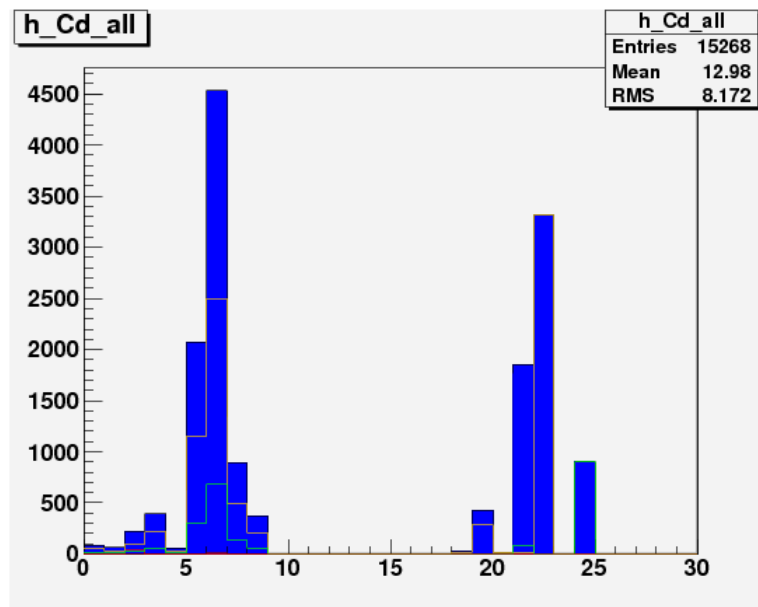
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των δεδομένων είναι οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις, όπου φαίνεται το Argon Escape όπως και η διέγερση υλικών που είχε ο ανιχνευτής π.χ. στον Fe που είναι κατασκευασμένο το mesh και το drift.



Σχήμα 2.18: Ακτινές X από ραδιενεργό Fe55



Σχήμα 2.19: Ακτινές X από ραδιενεργό Am241



Σχήμα 2.20: Ακτινές X από ραδιενεργό Cd109

2.3 Προσομοίωση του Micromegas στο H-Spice

2.3.1 Θεωρία Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων

RC κύκλωμα

Το πιο απλό κύκλωμα RC είναι ένας πυκνωτής και μια αντίσταση σε σειρά. Όταν ένα κύκλωμα αποτελείται μόνο από έναν φορτισμένο πυκνωτή και μια αντίσταση, ο πυκνωτής θα ελευθερώσει την αποθηκευμένη ενέργεια του στην αντίσταση. Η τάση κατά μήκος του πυκνωτή, η οποία εξαρτώνται από το χρόνο, μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας τον νόμο του Kirchhoff, όπου το ρεύμα του πυκνωτή πρέπει να ισούται με το ρεύμα της αντίστασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη γραμμική διαφορική εξίσωση

$$C \frac{dV}{dt} + \frac{v}{R} = 0$$

Λύνοντας την εξίσωση αυτή για το V αποδόσεις του τύπου για την εκθετική αποσύνθεση:

$$V(t) = V_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

όπου V_0 είναι η τάση πυκνωτή τη χρονική στιγμή $t = 0$.

Ο χρόνος που απαιτείται για την τάση να πέσει στο $\frac{V_0}{e}$ ονομάζεται RC σταθερά χρόνου και δίνεται από

$$\tau = RC$$

The complex impedance, Z_C (in ohms) of a capacitor with capacitance C (in farads) is

$$Z_c = \frac{1}{sC}$$

The complex frequency s is, in general, a complex number,

$$s = \sigma + j\omega$$

where

* j represents the imaginary unit:

$$j^2 = -1$$

* σ is the exponential decay constant (in radians per second), and

* ω is the sinusoidal angular frequency (also in radians per second).

Ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση είναι μια ειδική περίπτωση στην οποία η τάση εισόδου αποτελείται από μια καθαρή ημιτονοειδής (χωρίς εκθετική αποσύνθεση). Ως εκ τούτου,

$$\sigma = 0$$

και η τιμή της S γίνεται

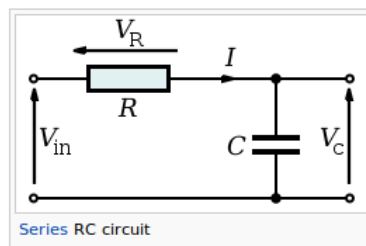
$$s = j\omega$$

Προβάλλοντας το κύκλωμα ως διαιρέτη τάσης, η τάση σε όλη την πυκνωτή είναι:

$$V_C(s) = \frac{1/Cs}{R + 1/Cs} V_{in}(s) = \frac{1}{1 + RCS} V_{in}(s)$$

και η τάση στα άκρα της αντίστασης είναι:

$$V_R(s) = \frac{R}{R + 1/K} V_{in}(s) = \frac{RCS}{1 + RCS} V_{in}(s)$$



Ο πιο απλός τρόπος για να καταλάβει κάποιος τη συμπεριφορά στο χρόνο του συστήματος είναι να χρησιμοποιήσει το μετασχηματισμό Laplace των εκφράσεων για V_C και V_R που δίνεται παραπάνω. Αυτό ουσιαστικά μετατρέπει το $j\omega$ σε s . Εάν υποτεθεί μια βηματική είσοδο (δηλαδή $V_{in} = 0$ πριν από $t = 0$ και στη συνέχεια $V_{in} = V$ στη συνέχεια):

$$V_{in}(s) = V \frac{1}{s}$$

$$V_C(s) = V \frac{1}{1 + SRC} \frac{1}{s}$$

και

$$V_R(s) = V \frac{SRC}{1 + SRC} \frac{1}{s}$$

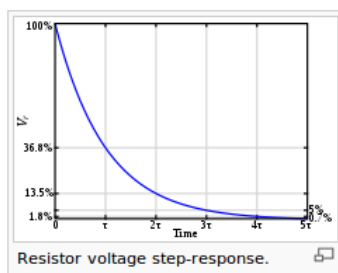
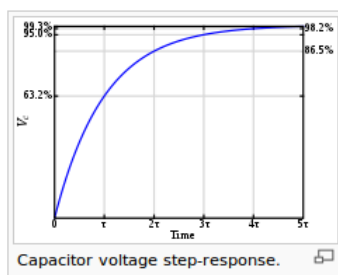
Ο αντίστροφος Μετασχηματισμός Laplace:

$$V_C(t) = V \left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

$$V_R(t) = V e^{-t/RC}$$

Οι εξισώσεις αυτές είναι για τον υπολογισμό της τάσης στον πυκνωτή και την αντίσταση, αντίστοιχα, ενώ ο πυκνωτής φορτίζεται. Για την εκφόρτιση, οι εξισώσεις είναι το αντίστροφο. Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να ξαναγραφτούν με τη χρήση των σχέσεων $C = Q/V$ και $V = IR$ (νόμος του Ohm).

Έτσι, η τάση σε όλο τον πυκνωτή τείνει προς V όσο περνάει ο καιρός, ενώ η τάση σε όλη την αντίσταση τείνει προς 0, όπως φαίνεται στις εικόνες. Αυτό είναι σύμφωνο με το διαισθητικό σημείο ότι ο πυκνωτής θα φόρτιση από την τάση τροφοδοσίας όσο περνάει ο καιρός, και τελικά θα φορτιστεί πλήρως.



Αυτές οι εξισώσεις δείχνουν ότι μια σειρά RC κύκλωμα έχει μια σταθερά χρόνου, συνήθως συμβολίζεται $\tau = RC$ είναι ο χρόνος που χρειάζεται η τάση σε όλη την συνιστώσα για είτε να αυξηθεί (σε C) ή μείωση (σε όλη την R) μέχρι $1/e$ της τελικής αξίας της. Δηλαδή, τ είναι ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το V_C σε $V(1-1/e)$ και V_R να φτάσει $V(1/e)$.

Ο ρυθμός της αλλαγής είναι ένα κλάσμα $\left(1 - \frac{1}{e}\right)$ ανά τ . Έτσι, για να μεταβούμε από $t = N\tau$ σε $t = (N + 1)\tau$, η τάση θα έχει μετακινηθεί περίπου 63,2% προς την τελική αξία της. Έτσι, ο C θα φορτιστεί σε περίπου 63,2% μετά από χρόνο τ , και κατ' ουσίαν πλήρως φορτισμένη (99,3%) μετά από περίπου 5τ . Όταν η πηγή τάσης αντικαθίσταται με ένα βραχυκύκλωμα, με τον πυκνωτή C φορτισμένο πλήρως, η τάση στα άκρα C πέφτει εκθετικά με το χρόνο t από V προς 0. Ο C θα αποφορτίζεται στο περίπου 36,8% μετά από τ ,

και κατ' ουσίαν πλήρως αποφορτιστεί (0,7%) μετά από περίπου 5τ. Σημειώστε ότι το τρέχον, I, στο κύκλωμα συμπεριφέρεται όπως η τάση σε όλη την R, μέσω του νόμου του Ohm.

Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν επίσης να προκύψουν από την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το κύκλωμα:

$$\frac{V_{in} - V_C}{R} = C \frac{dV_C}{dt}$$

και

$$V_R = V_{in} - V_C$$

Οι λύσεις είναι ακριβώς οι ίδιες με εκείνες που λαμβάνονται μέσω των μετασχηματισμών Laplace.

Ολοκληρωτής

Εξετάζουμε την έξοδο στον πυκνωτή σε υψηλή συχνότητα, δηλαδή

$$\omega \gg \frac{1}{RC}$$

Αυτό σημαίνει ότι ο πυκνωτής δεν έχει αρκετό χρόνο για να φορτιστεί και έτσι η τάση του είναι πολύ μικρή. Έτσι, η τάση εισόδου ισούται περίπου με την τάση στα άκρα της αντίστασης. Για να δείτε αυτό, θεωρήστε την έκφραση για το I αφού έχουμε κύκλωμα σε σειρά:

$$I = \frac{V_{in}(s)}{R + 1/j\omega C}$$

αλλά σημειώνουμε ότι η κατάσταση της συχνότητας που περιγράφεται σημαίνει ότι

$$\omega C \gg \frac{1}{R}$$

έτσι
 $I \approx \frac{V_{in}}{R}$ που είναι μόνο ο νόμος του Ohm.
 τώρα,

$$V_C = \frac{1}{C} \int_0^t I dt$$

έτσι

$$V_C \approx \frac{1}{RC} \int_0^t V_{in} dt$$

η οποία είναι ένας ολοκληρωτής κατά μήκος του πυκνωτή.

Διαφοριστής

Εξετάζουμε την έξοδο σε όλη την αντίσταση σε χαμηλή συχνότητα, δηλαδή,

$$\omega \ll \frac{1}{RC}$$

Αυτό σημαίνει ότι ο πυκνωτής έχει το χρόνο να φορτιστεί μέχρι η τάση του να είναι σχεδόν ίση με την τάση της πηγής. Λαμβάνοντας υπόψη την έκφραση για το ρεύμα και πάλι, όταν

$$R \ll \frac{1}{\omega C}$$

έτσι

$$I \approx \frac{V_{in}}{1/j\omega C}$$

$$V_{in} \approx \frac{I}{j\omega C} = V_C$$

τόρα,

$$V_R = IR = C \frac{dV_C}{dt} R$$

$$V_R \approx RC \frac{dV_{in}}{dt}$$

η οποία είναι στοιχείο διαφοροποίησης σε όλη την αντίσταση.

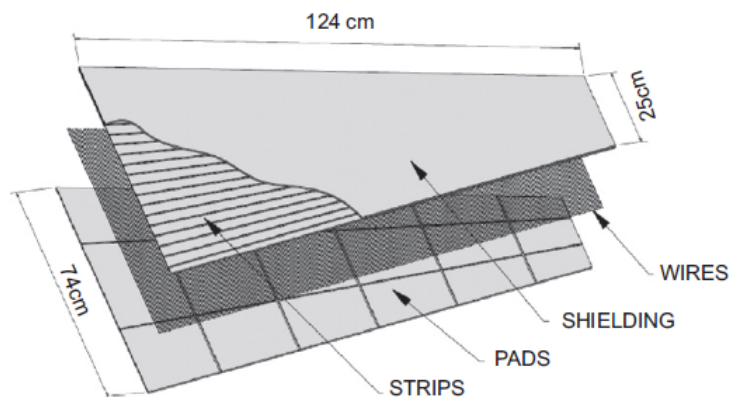
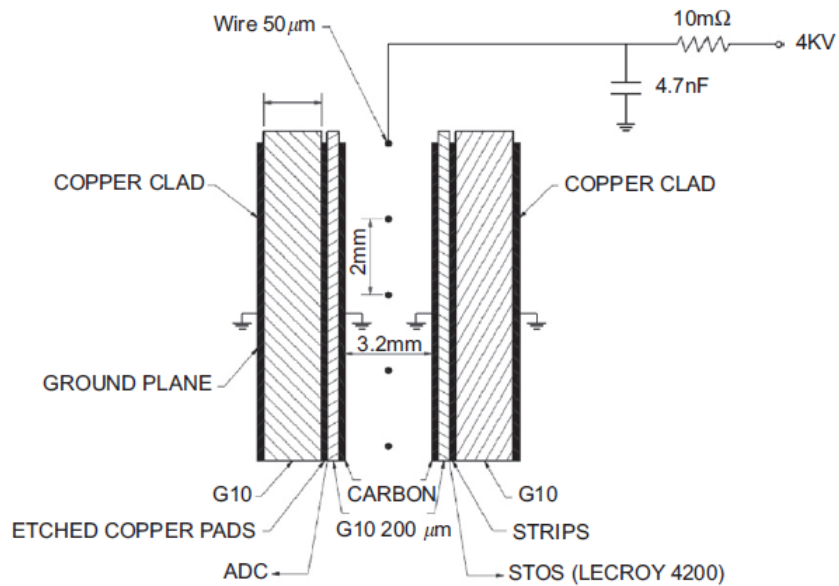
Φαινόμενο crosstalk:

Είναι το φαινόμενο το οποίο παρατηρείται στα strips του ανιχνευτή, διάχυση του ρεύματος (αρχικού σήματος) από το ένα στο άλλο.

2.3.2 Θεωρία για τους TGC

TGC για αναβάθμιση του SLHC:

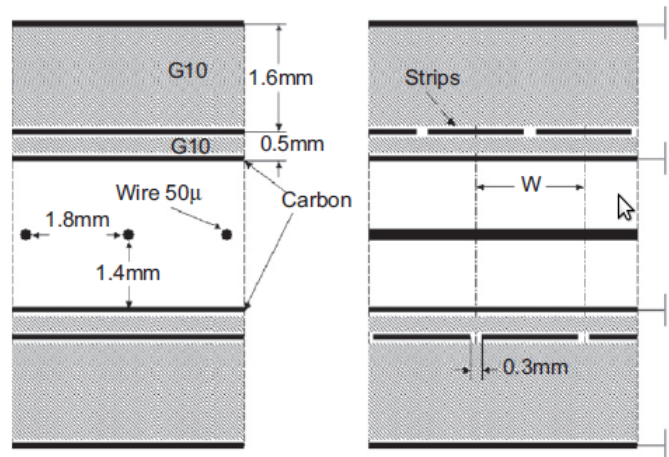
TGC έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στον ανιχνευτή OPAL στο LEP και είναι τώρα ένα μέρος του ανιχνευτή ATLAS στο LHC. Η cross-section και οι κύριες πλάκες του TGC φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.

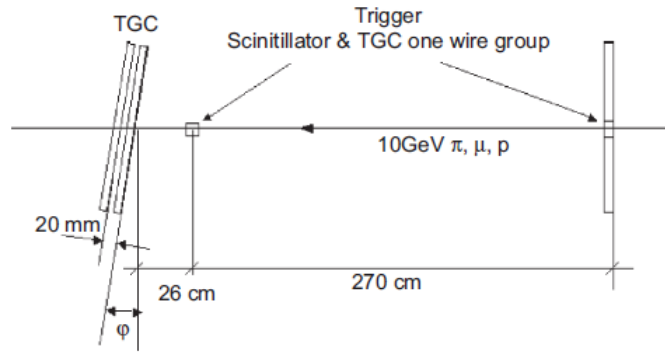


Στον OPAL, οι cathode strip/pads χωρίζονταν 200 μm από τον γραφίτη, που επιτρέπει στον ανιχνευτή να λειτουργεί με αντίσταση γραφίτη 10 $\text{K}\Omega/\text{cm}^2$. Η συσκευή αυτή μπορεί να πάρει τις τοπικές τιμές των σωματιδίων μέχρι 50 kHz/cm^2 . Μακροπρόθεσμη σταθερότητα του έχει μελετηθεί από ακτινοβολία με 10^{11} $\text{particles}/\text{cm}^2$ σε διάστημα ενός μήνα. Η απόκριση του ανιχνευτή παρέμεινε σταθερή στο 10%. Στον ATLAS οι cathode strip/pads χωρίστηκαν με 1,6 χιλιοστά από το γραφίτη, που επιτρέπει στον ανιχνευτή να λειτουργεί με αντίσταση γραφίτη 1 $\text{M}\Omega/\text{square}$. Το κέρδος βρέθηκε να παραμένει σταθερό μέχρι σε ένα τοπικό ποσοστό 100 kHz/cm^2 . Στο ενιαίο ποσοστό άνω των 100 kHz/cm^2 , μια μείωση της στάθμης λόγω της επίδρασης των φορτίων χώρου παρατηρήθηκε. Δεν παρατηρήθηκε σημαντική επιδείνωση στη ADC κατανομή μέχρι τη συσσώρευση φορτίου 1 C ανά 1 εκατοστό του ανοδικού σύρματος. Για μια μεγάλη TGC περιοχή, πτώση τάσης μελετήθηκε εφαρμόζοντας ποσοστό υποβάθρου μέχρι 1 kHz/cm^2 και βρέθηκε να είναι αμελητέα. Η ικανότητα ανίχνευσης των μεγάλων ανιχνευτών μπορεί να βελτιωθεί με τοποθέτηση των strip readout όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο στρώμα γραφίτη (π.χ. 100 μm). Οι εν λόγω ρυθμίσεις θα επιτρέπουν τη μείωση της επιφανειακής αντίστασης έως 10-20 $\text{K}\Omega/\text{square}$, διατηρώντας παράλληλα την ίδια διαφάνεια των καθόδων από γραφίτη. Αυτή η χαμηλή αντίσταση επιφανείας θα κρατήσει την τάση λειτουργίας σχεδόν σταθερή καθ' όλη την περιοχή του θαλάμου, διατηρώντας παράλληλα τις δυνατότητες των υψηλών τοπικών ποσοστών. Η ανάγκη για τρεις ανεξάρτητες μετρήσεις σε κάθε gas gap (άνοιγμα αερίου) επιτυγχάνεται με τη χρήση των δύο επιπέδων καθόδου (το ένα εξοπλισμένο με strips για μετρήσεις ακριβείας και το άλλο με pads για σκοπούς σκανδαλισμού (trigger)), και τα καλώδια που είναι συνδεδεμένα σε μικρές ομάδες να μετρήσουν τον αζιμουθιακό συντονισμό.

TGC και ρυθμίσεις ελέγχου:

Το βασικό ζήτημα είναι η αναμενόμενη ανάλυση θέσης, για την οποία κάποιος χρειάζεται για να βελτιστοποιήσει τη γεωμετρία των strips τη χωρητικότητα των strips, και τα ηλεκτρονικά εξόδοι. Τα αποτελέσματα της πρώτης δοκιμής η οποία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δύο μικρών ($18 \times 12 \text{ cm}^2$) TGC ανιχνευτών εκτιθέμενων σε 10 GeV/c δέσμη πιονίων στο PS-T9 test beam στο CERN. Κάθε ανιχνευτής ήταν εξοπλισμένος με τα ίδια readouts strips και στις δύο καθόδους με ομάδες της τάξης του 1,5 και 2mm pitch strips (με διακενά μεταξύ strips της τάξης των 0,3 mm). Αυτά τα strips θα μπορούσαν επίσης να συνδυαστούν για να σχηματίσουν strips 3 και 4 χιλιοστών. Και τα δύο θάλαμοι ήταν εξοπλισμένοι με τον ίδιο τύπο του front-end ηλεκτρονικών ειδών, όπως χρησιμοποιείται στο ATLAS TGC, καθώς επίσης και με αναλογική ανάγνωση. Σχηματική άποψη και η διάταξη φαίνεται στα σχήματα παρακάτω.



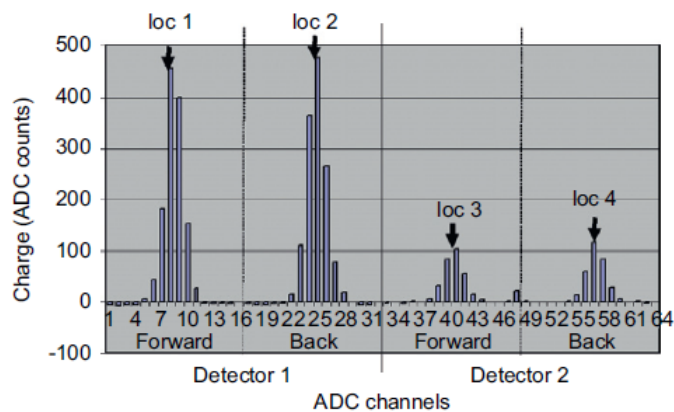


Οι ανιχνευτές έχουν κατασκευαστεί με την απόσταση strip-γραφίτη 500 mm και με επιφανειακή αντίσταση γραφίτη 70 KΩ/square. Αυτό οδήγησε σε μικρότερη διαφάνεια του γραφίτη, αλλά τα σήματα ήταν αρκετά μεγάλα για να δώσουν ωραία εικόνα της χιονοστιβάδας, χρησιμοποιώντας το φορτίο που συλλέγεται σε κάθε strip.

Η γωνιακή εξάρτηση της ανάλυσης μελετήθηκε περιστρέφοντας τους θαλάμους σε σχέση με τον άξονα της δέσμης. Έγιναν ένα σύνολο από 64 μετρήσεις. Οι μετρήσεις ελήφθησαν σε τέσσερις διαφορετικές γωνίες: 0, 10, 20 και 30 μοίρες, σε τέσσερις υψηλής τάσης τιμές: 2.9, 3.0, 3.1 και 3.2 kV, και σε τέσσερα strip pitch τιμές: 1.5, 2, 3 και 4 χιλιοστά. Strips 3 και 4 χιλιοστών γίνονται από δύο 1,5 ή 2 χιλιοστών strips ενώνοντας τα σε "Η σχήμα", στα οποία τα δύο strips διαβάζονται από δύο ADCs. Αυτό μας βοηθά να αξιολογηθεί ο ηλεκτρονικός θόρυβος και ως εκ τούτου επαναξιολογήσει της ακρίβειας του ανιχνευτή.

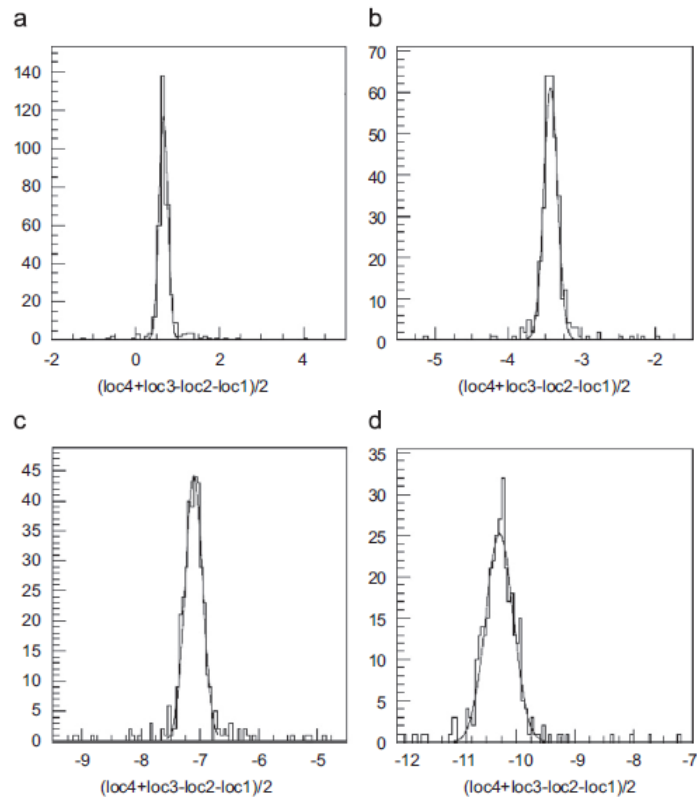
Ανάλυση θέσης και γωνιακή εξάρτηση

Η ανάλυση θέσης έχει άμεση σχέση με την κατανομή του παραγόμενου φορτίου στα strips και την ακρίβεια της μέτρησης. Το πραγματικό φορτίο για κάθε ένα από τα συμμετέχον strips μετρήθηκε με ένα ολοκληρωτή φορτίου 32-καναλιών ADC CAEN μοντέλο C205. Το ιστόγραμμα του ADC που μετράει για ένα τυπικό συμβάν φαίνεται στην επόμενη εικόνα, όπου τα κανάλια 1-16, 17-32, 33-48, 49-64 αντιστοιχούν σε 16 strips του πρώτου θαλάμου προς τα εμπρός πλευρά, πρώτου θαλάμου προς τα πίσω πλευρά, δεύτερου θαλάμου προς τα εμπρός πλευρά και του δεύτερου θαλάμου προς τα πίσω πλευρά, αντίστοιχα.

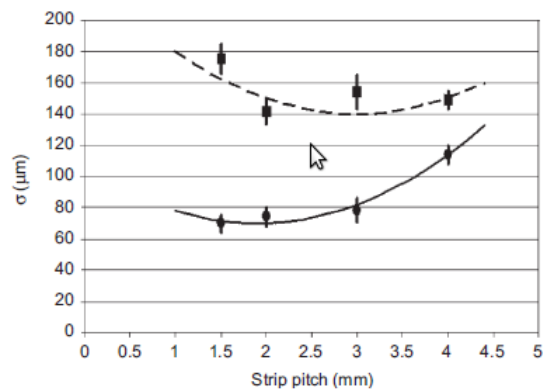


Οι τέσσερις θέσεις τροχίας loc1, loc2, loc3 και loc4 όπως φαίνεται στην ποιά πάνω εικόνα προσδιορίζονται από έναν αλγόριθμο κέντρου βάρους για κάθε συμβάν. Τυπικές υπολειμματικές κατανομές $(loc4 + loc3 - loc2 - loc1)/2$ σε διαφορετικές γωνίες φαίνονται στο επόμενο σχήμα. Τα πλάτη αυτών των κατανομών, $\sigma_{residual}$, προσδιορίστηκαν από ένα κατάλληλο Gaussian fit. Μπορούμε να δούμε από το σχήμα ότι το πλάτος αυξάνεται καθώς η γωνία αυξάνεται. Υποθέτοντας ότι τα δύο στρώματα για να είναι το ίδιο, η ανάλυση της θέσης ενός απλού στρώματος δίνεται από τον τύπο

$$\sigma = \sigma/\sqrt{2}$$



Το δείγμα των 64 δεδομένων διαιρείται σε ένα μικρής γωνίας δείγμα (0-10) και ένα μεγάλης γωνίας δείγμα (20-30). Η εξάρτηση της ανάλυσης θέσης από τα strip pitch και για τα δύο δείγματα εμφανίζεται στο σχήμα πουό κάτω. Το βέλτιστο pitch καταλήγει να είναι περίπου 2mm για τις μικρές γωνίες και 3 mm για τις μεγάλες γωνίες.

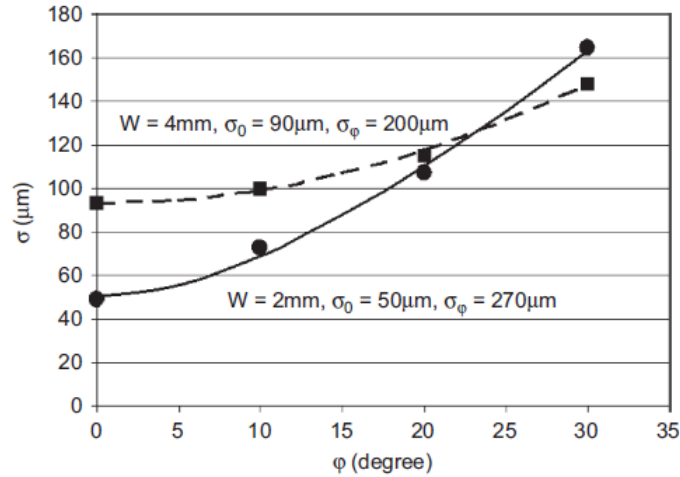


Η ανάλυση επηρεάζεται από την ϕ γωνία, δεδομένου ότι αυτή η γωνία καθορίζει την προβολή της τροχιάς στην άνοδο σύρμα. Διακυμάνσεις στον αρχικό ιονισμό κατά μήκος της τροχιάς, στον αριθμό των δευτερογενών ηλεκτρονίων στα clusters, και των ηλεκτρονίων πολλαπλασιασμού κοντά την άνοδο μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω υποβάθμιση της ανάλυσης σε μεγάλες γωνίες. Η γωνιακή εξάρτηση είναι σημαντική και μπορεί να επηρεάσει τον σχεδιασμό του ανιχνευτικού συστήματος.

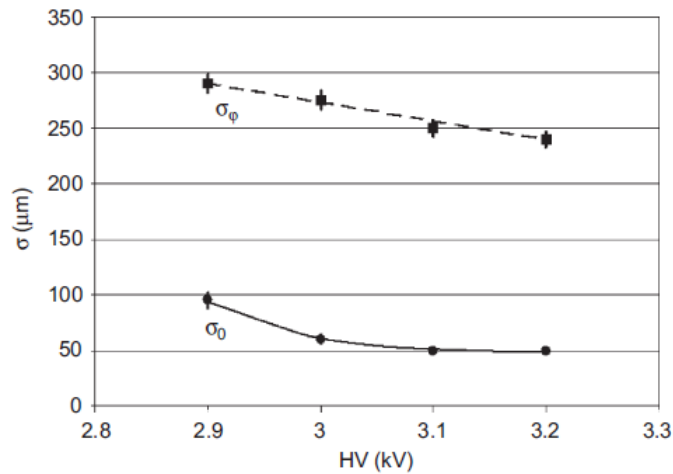
Η εξάρτηση της ανάλυσης σχετικά με τη γωνία ϕ μπορεί να γραφτεί

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + \sigma_\phi^2 * \tan^2 \phi$$

όπου σ_0 είναι η ανάλυση της τροχιάς με $\phi=0$ και σ_ϕ είναι η συμπληρωματική συνεισφορά στην ανάλυση από τη γωνία πρόσπτωσης. Η ανάλυση ως συνάρτηση της γωνίας ϕ για μια υψηλή τάση 3,1 kV φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Η εξάρτηση των σ_0 και σ_ϕ στην υψηλή τάση φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Η τελική ποιότητα ανάλυσης θέσης του TGC εξαρτάται από τις φυσικές διεργασίες στο αέριο, την γεωμετρία των strips και την αντίσταση της καθόδου. Ο ηλεκτρονικός θόρυβος μπορεί να υποβαθμίσει την ποιότητα ανάλυσης, αν του συνολικό σήμα προς το θόρυβο είναι πάρα πολύ χαμηλό. Σημειώστε ότι δεν μπορούμε να αυξήσουμε αυθαίρετα την ενίσχυση του αερίου προκειμένου να έχουμε χαμηλό θόρυβο. Έχει αποδειχθεί ότι στα περισσότερα μείγματα αερίων η υποβάθμιση της ποιότητας για φορτίο ανόδου μεγαλύτερο από $2pC$, οφείλεται, κυρίως, στις διακυμάνσεις της χιονοστιβάδας που δημιουργείται από τα φωτόνια.

Μια παραμετροποίηση αναπτύχθηκε από τους Rahak και Gatti και αφορά το πλάτος της κατανομής Landau με τη ποιότητα ανάλυσης θέσης για υπό γωνία τροχιές:

$$\sigma_\phi = \frac{2h}{\sqrt{12}} \frac{\sigma_L}{\langle Q_L \rangle}$$

όπου h είναι το διάστημα άνοδος-κάθοδος, και σ_L και $\langle Q_L \rangle$ είναι οι r.m.s και η μέση φόρτιση της κατανομής Landau, σε συμφωνία με τα αποτελέσματά μας.

Η ανάλυση θέσης που κυμαίνεται μεταξύ 50 και 150 μm έχει λειφθεί μέχρι και γωνία 30 μοιρών. Η επιδείνωση της ποιότητας της ανάλυσης της θέσης ως συνάρτηση της γωνίας αναμένεται σε αυτού του είδους τους ανιχνευτές, λόγω της επιμήκυνσης της χιονοστιβάδα κατά μήκος του σύρματος. Ωστόσο, τα αποτελέσματα ανταποκρίνονται στις ανάγκες για την αναβάθμιση του SLHC.

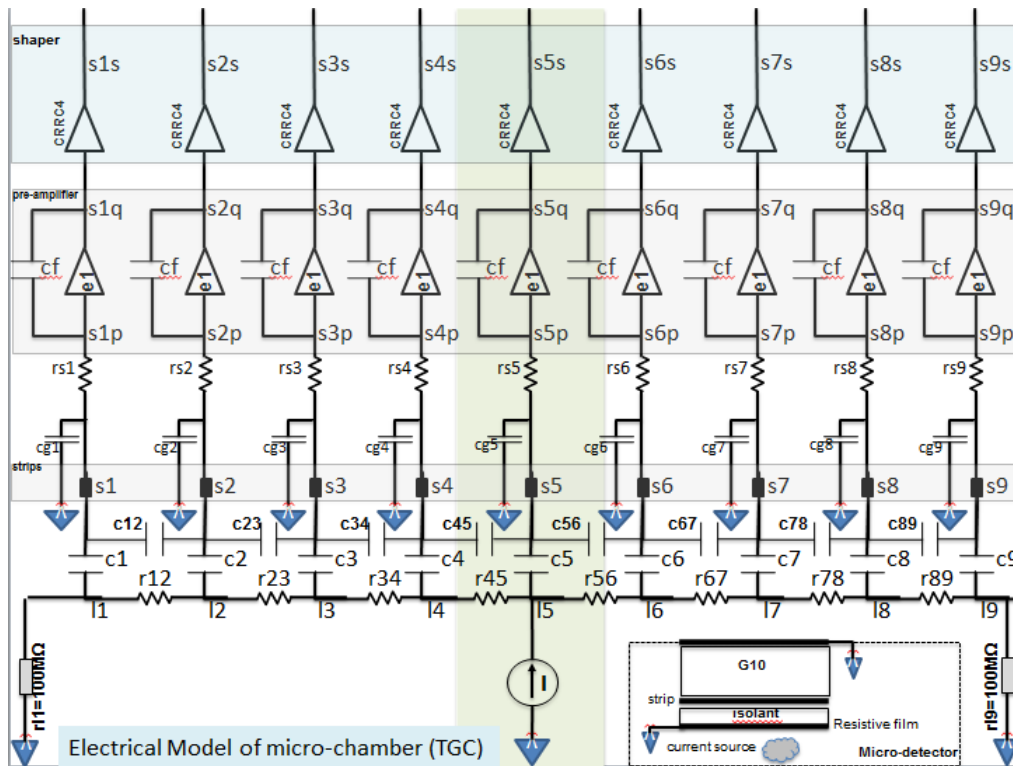
2.3.3 Hspice προσομοίωση των TGC (Thin Gap Cathode Strip Chambers)

Ηλεκτρονικό μοντέλο του TGC:

Ο θάλαμος προσομοιώνεται όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα: Από 9 συνδεδεμένα strips. Κάθε strip μοντελοποιείται ως ένας ενιαίος αγωγικός κόμβος του και το resistive layer είναι εγκάρσια τοποθετημένο κάτω από τα strips. Τα strips υποτίθεται ότι είναι ενσωματωμένα με G-10 σε απόσταση 200 μm πάνω από το resistive layer και 2mm κάτω από την ασπίδα (γείωση). Οι άκρες του στρώματος συνδέονται με το έδαφος με υψηλές αντιστάσεις περίπου 100 MW.

Κάθε strip είναι συνδεδεμένο με μια μικρή αντίσταση σε ένα ιδανικό προενισχυτή, το οποίο μας επιτρέπει να παρακολουθούμε το συνολικό φορτίο σε κάθε strip. Η έξοδος του ολοκληρωτή μπορεί προαιρετικά να περάσει μέσα από ένα ιδανικό semiGaussian διαμορφωτής και να παράγει μονοπολικούς παλμούς οποιασδήποτε επιθυμητού peaking time.

Το ρεύμα της χιονοστιβάδα παρουσιάζεται ως μια χρονικά και χωρικά εξαρτώμενη πηγή ρεύματος από τα ανοδικά καλώδια (AC έδαφος) στην καθοδική αντίσταση. Για τη μοντελοποίηση της χωρικής εξάρτησης της χιονοστιβάδα, έχουμε τρεις γεννητριες ρευματος σε αναλογία 1:3:1. Για το μεγαλύτερο μέρος αυτής της μελέτης, η τρέχουσα κυματομορφή παρουσιάζεται ως ένας απλός παλμός των 10 nsec διάρκειας και αυθαίρετου πλάτους.



$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{WL}{d} R = \frac{RqW}{L}$$

όπου ϵ_r είναι η διηλεκτρική σταθερά και d είναι ο διαχωρισμός μεταξύ του strip και της καθοδικής αντίστασης, και R_0 είναι η αντίσταση στην κάθοδο σε Ohms ανά τετραγωνικό.

$$t = RC = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r W^2}{d}$$

Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε στο HSpice * Thingap section along wire -- 9 strips 1 lump each
* Chamber-related parameters


```
.param cs=20p capacitanceofstripstoresistivelayer(F/cm2)
.param cgs=4p cap.ofstriptognd
.param rsq=50k resistivityoflayerinohms/square
.param l=10 lengthofsegment
.param w=.25 andwidthofstrip(cm)(precisionchambers)
.param rlg=100x resistanceofconnectionoflayertognd
.param rterm=1 resistancetotheopreamplifier,shouldbeverysmall
```

```
* Nine strips, one transverse lump per strip
* include capacitance of strip to gnd
.subckt s91lump s1 s2 s3 s4 s5 s6 s7 s8 s9 k1 k2 k3 k4 k5 k6 k7
+ k8 k9
```

```
    c1 s1 k1 'cs*w*I'
cg1 s1 0 'cgs*w*I'
c2 s2 k2 'cs*w*I'
cg2 s2 0 'cgs*w*I'
c3 s3 k3 'cs*w*I'
cg3 s3 0 'cgs*w*I'
c4 s4 k4 'cs*w*I'
cg4 s4 0 'cgs*w*I'
c5 s5 k5 'cs*w*I'
cg5 s5 0 'cgs*w*I'
c6 s6 k6 'cs*w*I'
cg6 s6 0 'cgs*w*I'
c7 s7 k7 'cs*w*I'
cg7 s7 0 'cgs*w*I'
c8 s8 k8 'cs*w*I'
cg8 s8 0 'cgs*w*I'
c9 s9 k9 'cs*w*I'
cg9 s9 0 'cgs*w*I'
r12 k1 k2 'rsq*w/l'
r23 k2 k3 'rsq*w/l'
r34 k3 k4 'rsq*w/l'
r45 k4 k5 'rsq*w/l'
r56 k5 k6 'rsq*w/l'
r67 k6 k7 'rsq*w/l'
r78 k7 k8 'rsq*w/l'
r89 k8 k9 'rsq*w/l'
.ends s91lump
```

```
*****
* CRRC4 from Vennie
*****
.subckt CRRC4 in out tm=200n
r1 in 0 1g
e1 1 0 in 0 1
c2 1 2 'tm/4'
r2 2 0 1
e2 3 0 2 0 1
r3 3 4 1
c3 4 0 'tm/4'
e3 5 0 4 0 1
r4 5 6 1
c4 6 0 'tm/4'
e4 7 0 6 0 1
```

```

r5 7 8 1
c5 8 0 'tm/4'
e5 9 0 8 0 1
r6 9 10 1
c6 10 0 'tm/4'
e6 out 0 10 0 5.118577
r7 out 0 1g
.ends CRRC4
*****
*****end of CRRC4.cir*****
*****

*****
*****

* 9 strips
x1 s1 s2 s3 s4 s5 s6 s7 s8 s9 k1 k2 k3 k4 k5 k6 k7 k8 k9 s91lump

* Excitation: 1:3:1 current pulses into center of each strip
i4 0 k4 pulse 0 5u 0 1n 1n 1n 1
i5 0 k5 pulse 0 15u 0 1n 1n 1n 1
i6 0 k6 pulse 0 5u 0 1n 1n 1n 1
* Or edge strip only pulsed
*i5 0 k5 pulse 0 1 0 1n 1n 10n 1 ac 1

* strip terminations
rs1 s1 s1p 'rterm'
rs2 s2 s2p 'rterm'
rs3 s3 s3p 'rterm'
rs4 s4 s4p 'rterm'
rs5 s5 s5p 'rterm'
rs6 s6 s6p 'rterm'
rs7 s7 s7p 'rterm'
rs8 s8 s8p 'rterm'
rs9 s9 s9p 'rterm'

.subckt integ in out
e1 out 0 in 0 -1x
cf in out 1n
*rf in out 10x
.ends integ

xp1 s1p s1q integ
xp2 s2p s2q integ
xp3 s3p s3q integ
xp4 s4p s4q integ
xp5 s5p s5q integ
xp6 s6p s6q integ
xp7 s7p s7q integ
xp8 s8p s8q integ
xp9 s9p s9q integ

xs1 s1q s1s CRRC4 tm=200n
xs2 s2q s2s CRRC4 tm=200n
xs3 s3q s3s CRRC4 tm=200n
xs4 s4q s4s CRRC4 tm=200n
xs5 s5q s5s CRRC4 tm=200n

```

```
xs6 s6q s6s CRRC4 tm=200n
xs7 s7q s7s CRRC4 tm=200n
xs8 s8q s8s CRRC4 tm=200n
xs9 s9q s9s CRRC4 tm=200n
```

```
* layer connection to gnd
r11 k1 0 'rlg'
* r12 k2 0 'rlg'
* r13 k3 0 'rlg'
* r14 k4 0 'rlg'
* r15 k5 0 'rlg'
* r16 k6 0 'rlg'
* r17 k7 0 'rlg'
* r18 k8 0 'rlg'
r19 k9 0 'rlg'
```

```
.probe tran i(rs1) i(rs2) i(rs3) i(rs4) i(rs5) i(rs6) i(rs7)
+ i(rs8) i(rs9)
.probe tran i(i5)
```

```
.probe ac im(rs1) im(rs2) im(rs3) im(rs4) im(rs5) im(rs6)
+ im(rs7) im(rs8) im(rs9)
.probe ac im(i5)
```

```
.tran 10n 2u sweep rsq dec 4 100 100x
*.tran 10n 100n
*.tran 10n 2u sweep rsq POI 1 50k
*.ac dec 10 1m 1g
```

```
.measure tran s1mx min v(s1s)
.measure tran s2mx min v(s2s)
.measure tran s3mx min v(s3s)
.measure tran s4mx min v(s4s)
.measure tran s5mx min v(s5s)
.measure tran s6mx min v(s6s)
.measure tran s7mx min v(s7s)
.measure tran s8mx min v(s8s)
.measure tran s9mx min v(s9s)
```

```
.measure tran s1ra param='s1mx/s5mx'
.measure tran s2ra param='s2mx/s5mx'
.measure tran s3ra param='s3mx/s5mx'
.measure tran s4ra param='s4mx/s5mx'
.measure tran s6ra param='s6mx/s5mx'
.measure tran s7ra param='s7mx/s5mx'
.measure tran s8ra param='s8mx/s5mx'
.measure tran s9ra param='s9mx/s5mx'
```

```
.measure tran s1ix max i(rs1)
.measure tran s2ix max i(rs2)
.measure tran s3ix max i(rs3)
.measure tran s4ix max i(rs4)
.measure tran s5ix max i(rs5)
.measure tran s6ix max i(rs6)
.measure tran s7ix max i(rs7)
.measure tran s8ix max i(rs8)
```

```

.measure tran s9ix max i(rs9)
* measure cathode transparency
.measure tran s54a param='s5ix/s4ix/3'
.measure tran s56a param='s5ix/s6ix/3'

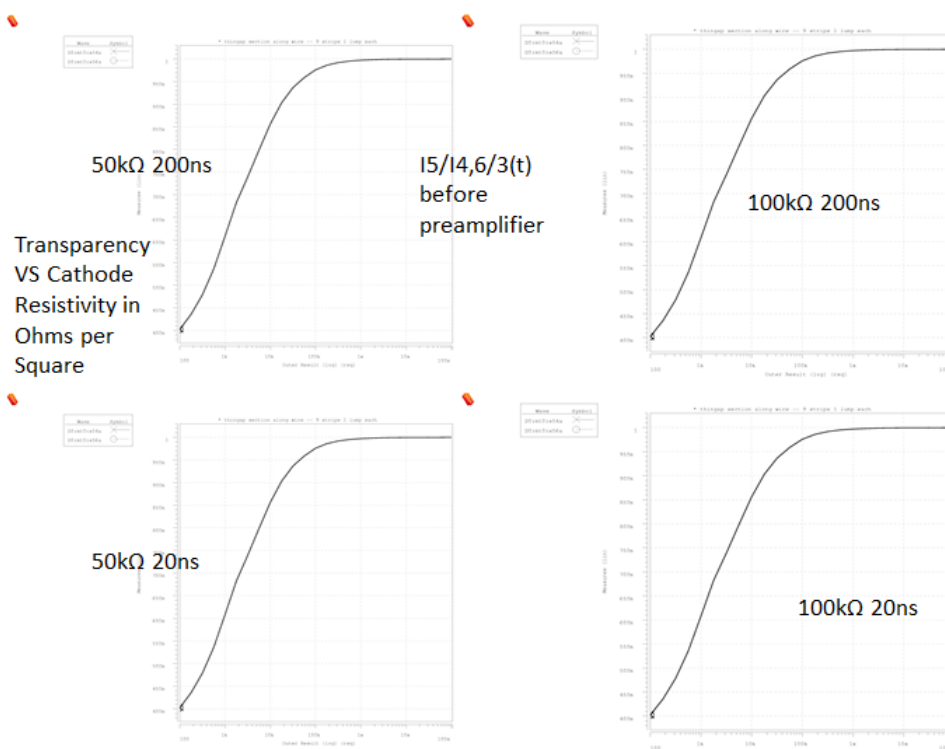
.options post list accurate

** .alter
** .param w=2.5 l=100 triggerchambergeometry
** .alter ** .param w=.1 l=10 prototypechambergeometry
.end

```

Prototype Champer Χαρακτηριστικά
 Πυκνωτής μεταξύ strip και resistive layer=20pf/cm²
 Πυκνωτής μεταξύ strip και ground=4pf
 Αντίσταση των resistive layers=100kΩ/cm²
 Μήκος του strip=10cm
 Πλάτος του strip==0.25cm
 Αντίσταση μεταξύ layer και ground=100*10⁶ Ω
 Αντίσταση στον pre-amplifier=1Ω

Μελέτη της καθοδικής διαφάνειας:
 Σύντομος 10nsec παλμός σε αναλογία 1:3:1 εφαρμόζεται στο resistive layer στα 3 κεντρικά strips. Η διαφάνεια καθορίζεται ως ο λόγος του ρεύματος του κεντρικού strip με τα υπόλοιπα νορμαλισμένο με το 3 του κεντρικού strip με άπειρη καθοδική αντίσταση.



Μελέτη του Crosstalk Εφαρμόζουμε ένα παλμό ρεύματος 10nsec στην κάθοδο κάτω από το κεντρικό strip δηλαδή το πέμπτο. Το ρεύμα όπως φαίνεται και στην γραφική ρέει κυρίως στο πέμπτο strip αλλά διαρρέει και στα γειτονικά. Η μορφή της συνάρτησης του ρεύματος στο strip δείχνει την μικρή διαφορά που γίνεται στον αρχικό τετραγωνικό παλμό. Σε αυτό τον ανιχνευτή η σταθερά χρόνου RC είναι περίπου 62.5 nsec. Καθώς το φορτίο απλώνεται σε όλη την κάθοδο, το ρεύμα του strip που δέχεται το φορτίο γίνεται αρνητικό και

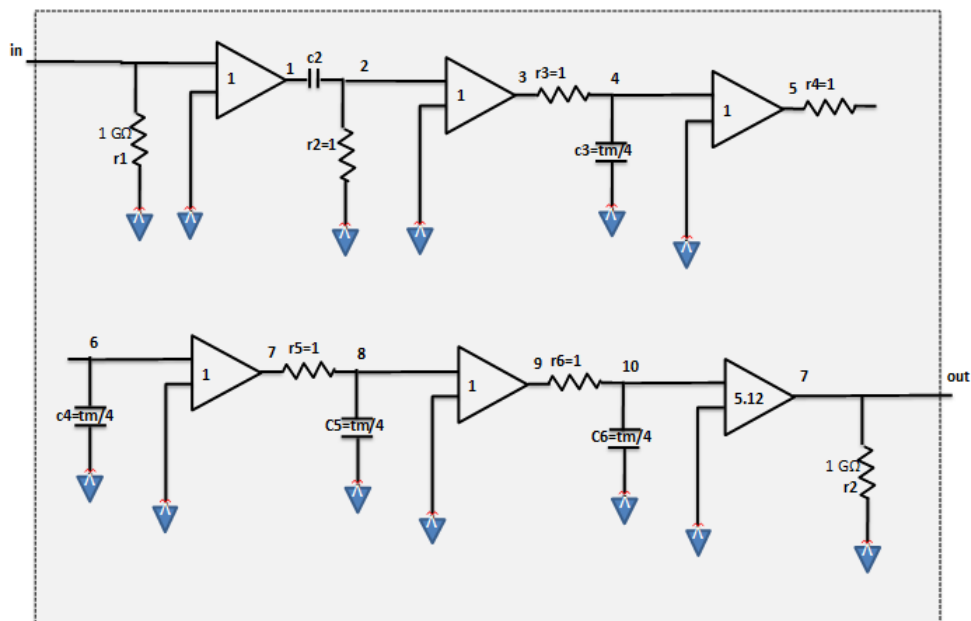
το ρεύμα στα γειτονικά strips αρχίζει να γίνεται θετικό με πιο αργό χρόνο άνοδου. Στην εικόνα $V(t)$ μετά τον pre-amplifier δείχνει το φορτίο που έχουμε στα 1-9 strips. Το μεγαλύτερο σήμα στο σχήμα (αρνητικό πλάτος) είναι από το 5 strip. Αρχικά, όλο το φορτίο από τη χιονοστιβάδα εκβάλλει σε αυτό το strip, αλλά μετά από αρκετό χρόνο κάποια $\tau=RC$ το αναδιανέμει εξίσου σε όλη την κάθοδο, προκαλώντας έτσι ίσο φορτίο σε όλα τα άλλα strips.

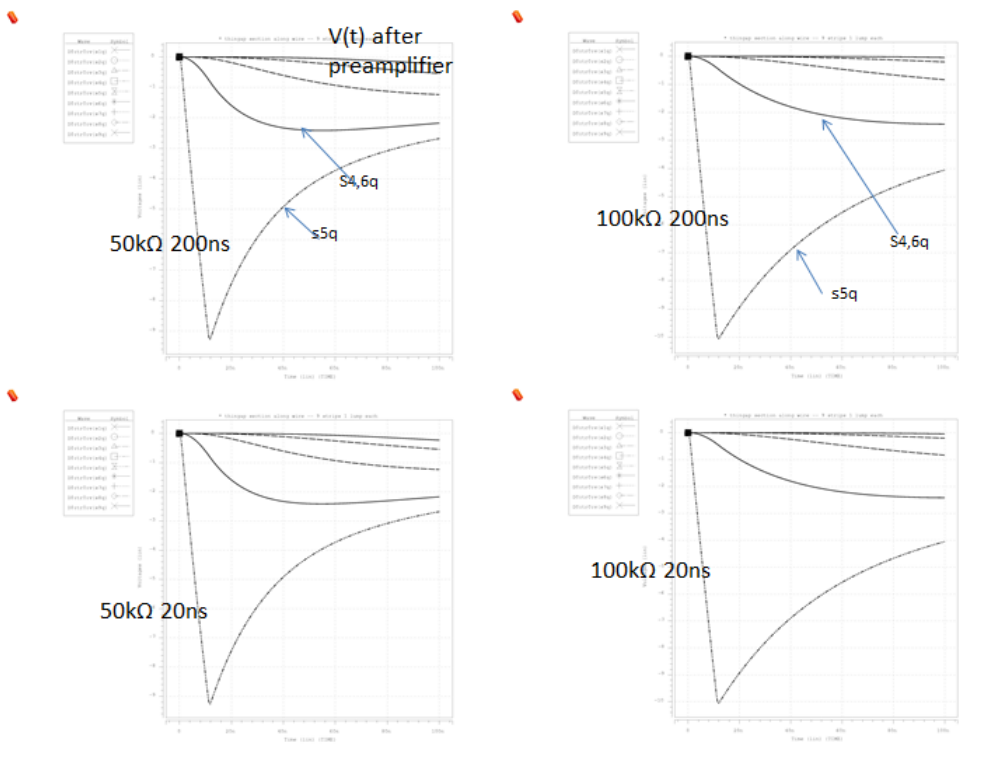
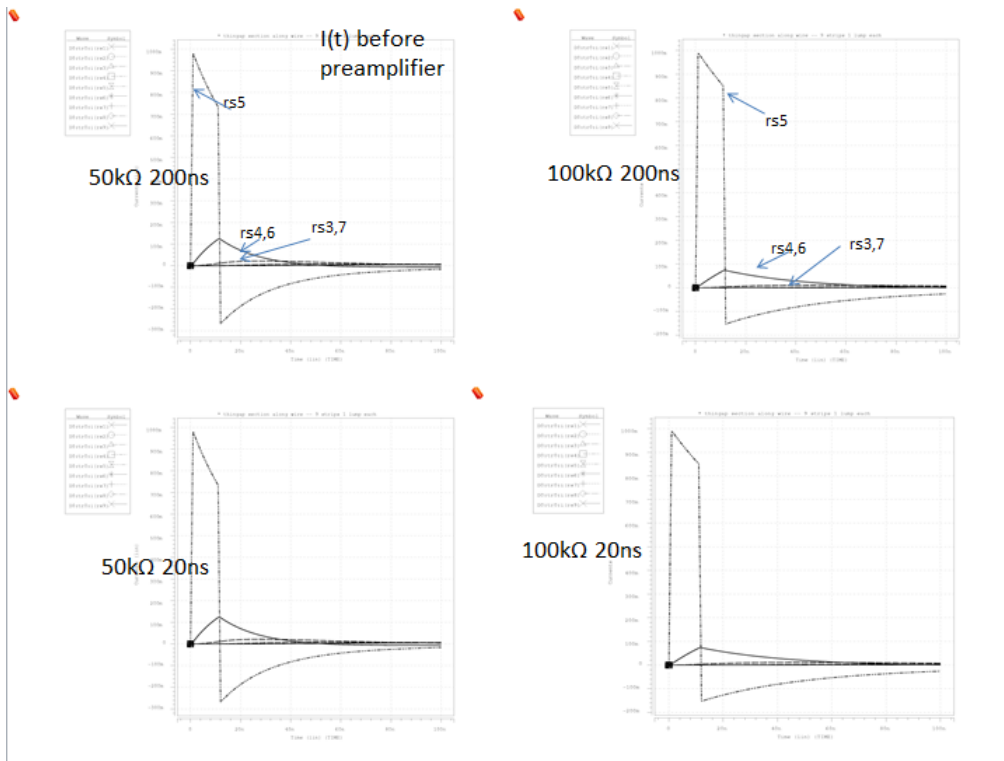
Το διαμορφωμένο σήμα μετά τον διαμορφωτή (shaper) CCR4 δηλαδή στην έξοδο φαίνεται στο ποιο κάτω σχήμα με 20 και 200 nsec semiGaussian μονοπολικό φίλτρο. Σήματα σχετικά με τα γειτονικά strips είναι αποτέλεσμα της αναδιανομής του φορτίου στην κάθοδο και της χαμηλής αναλογίας του χρόνου τ με το χρόνο κορύφωσης του διαμορφωτή.

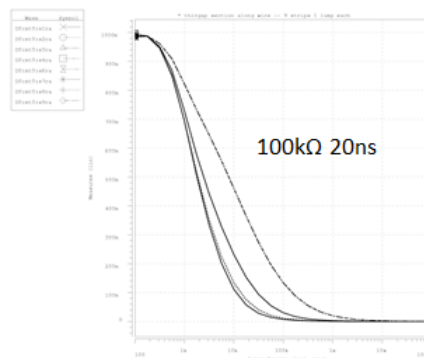
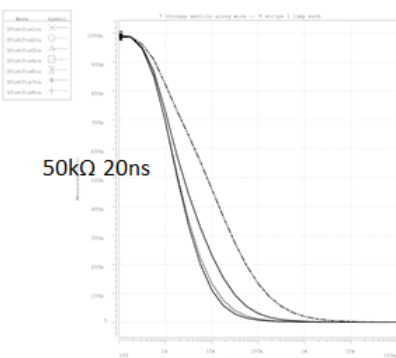
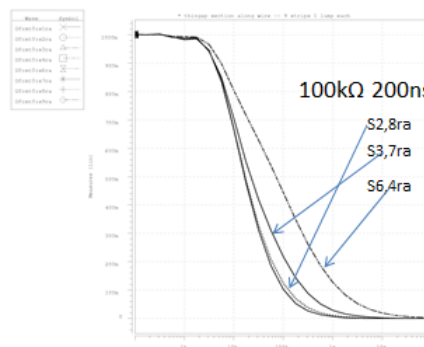
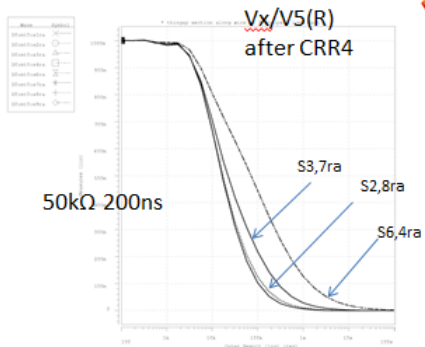
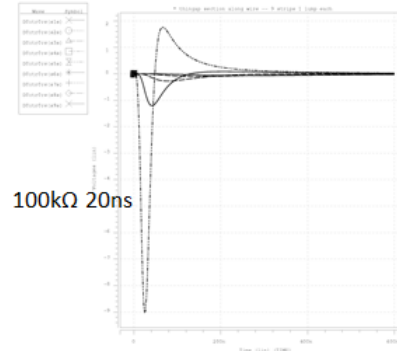
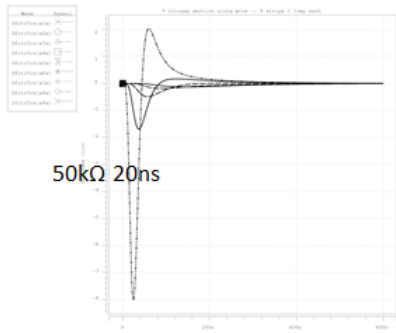
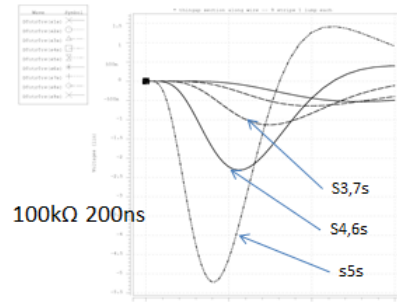
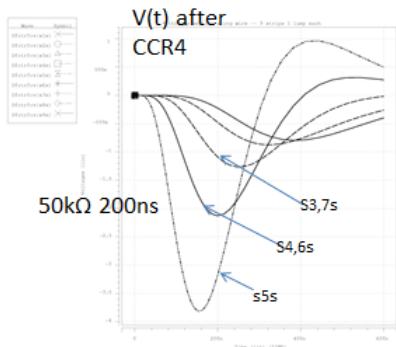
Το κλάσμα του crosstalk, το οποίο ορίζεται ως ο λόγος του πλάτους παλμού σε κάθε μία από τα γειτονικά strips με το πλάτος του strip το οποίο έχει χτυπηθεί φαίνεται στο επόμενο σχήμα, ως συνάρτηση της αντίστασης της καθόδου.

Σε 50 k Ω /square, το φορτίο του πλησιέστερα γειτονικού strip μετά τον shaper έχει μέγιστη πλάτος 71% από το κεντρικό strip. Για να πάρετε την ένταση του πρώτου κοντινότερου γείτονα στο 5% από το κεντρικό strip, κάποιος πρέπει να έχει $R > 5$ M Ω /square. Για να φτάσετε στο 1% για το πλησιέστερο γείτονα απαιτείται περίπου 30 M Ω /square.

CCR4- shaper

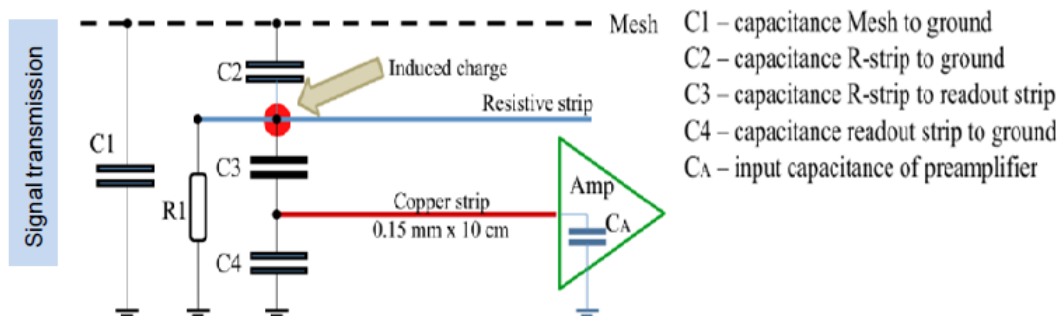
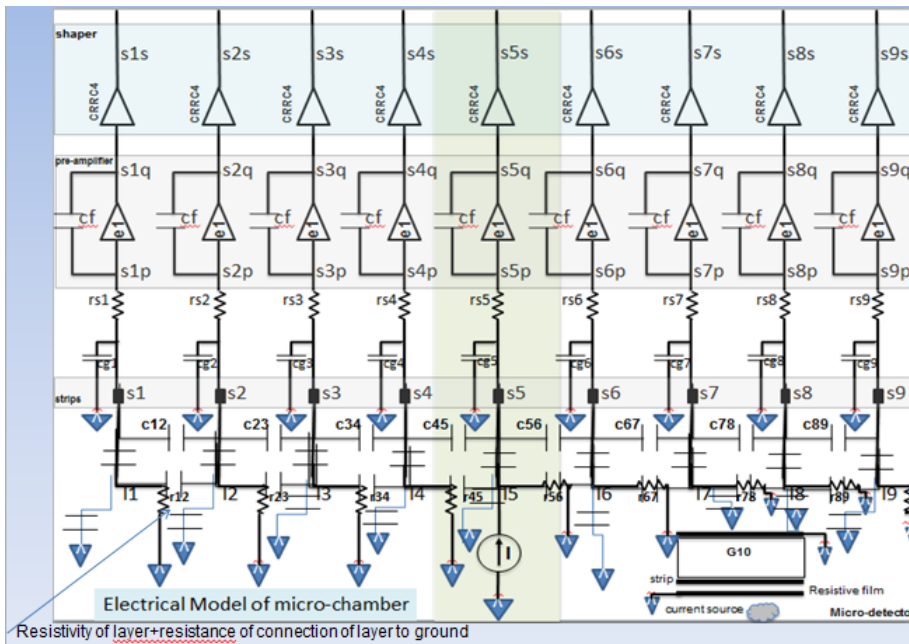






2.3.4 Ηλεκτρονικό μοντέλο του Micromegas chamber

Το ηλεκτρονικό κύκλωμα του ανιχνευτή φαίνεται πιο κάτω.



Αποτελείται από:
 Πυκνωτής μεταξύ strip και resistive layer=94.81pf/cm²

Πυκνωτής μεταξύ strip και ground=7.31pf
 Πυκνωτής μεταξύ strip-strip=32.91pF/cm
 Αντίσταση των resistive layers=50kΩ/cm²
 Μήκος του strip=10cm
 Πλάτος του strip=0.015cm
 Πάχος των strips=0.005cm
 Αντίσταση μεταξύ layer και ground=100*10⁶ Ω
 Αντίσταση στον pre-amplifier=1Ω
 Συντελεστής αυτεπαγωγής των Strips=0.2nH
 Η φόρμουλα που χρησιμοποιείθηκε: $L = 0.2 * 1 * [0.5 + \ln(2 * 1 / (w + h))] * 0.22 * (w + h) / h$ μονάδες σε nH
 αλλά 1 σε mm.
 Ύψος από το strip στον γραφίτη=0.02cm
 Ύψος από το strip στο ground=0.2cm
 Πυκνωτής μεταξύ mesh και ground=35.948pf
 Πυκνωτής μεταξύ strip και mesh=3.3pf

Κώδικας

```

* Micromegas
* Chamber-related parameters

.param cs=0.9p $ capacitance of strips to res lay (F/cm2)
.param cgs=0.06p $ cap. of strip to gnd
.param cc=0.32p $ capacitance between strips (F/cm),
.param ccc=0.18p $ capacitance between resistive strips (F/cm),

.param rsq=50k $ resistivity of layer in ohms/square
.param l=10 w=0.015 $ length of segment and width of
.param th=0.005 $ thickness of strips in cm, 50um

.param rlg=100x $ resistance of connection of layer to gnd
.param rterm=1 $ resistor to the input of the preamplifier

*.param lstrip=0.2n $ inductance in H, needed for the
$ formual used: L = 0.2*1*[0.5+ln(2*1
*.param hs=0.02 $ height of strip from graphite in cm
*.param hgs = 0.20 $ height of strip from ground plane
.param cc1=0.35p $ mesh resist strip
.param cc2=3.6p $ ground resist strip

* Nine strips, one transverse lump per strip
* include capacitance of strip to gnd
.subckt s9lump s1 s2 s3 s4 s5 s6 s7 s8 s9 L1 l2 l3 l4 l5 l6 l7 + l8 l9

c1 s1 L1 'cs*I'
cg1 s1 0 'cgs*I'
c2 s2 l2 'cs*I'
cg2 s2 0 'cgs*I'
c3 s3 l3 'cs*I'
cg3 s3 0 'cgs*I'
c4 s4 l4 'cs*I'
cg4 s4 0 'cgs*I'
c5 s5 l5 'cs*I'
cg5 s5 0 'cgs*I'
c6 s6 l6 'cs*I'
cg6 s6 0 'cgs*I'
  
```

c7 s7 l7 'cs*1'
 cg7 s7 0 'cgs*1'
 c8 s8 l8 'cs*1'
 cg8 s8 0 'cgs*1'
 c9 s9 l9 'cs*1'
 cg9 s9 0 'cgs*1'

*Lstrip1 s1 L1 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lgstrip1 s1 0 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lstrip2 s2 l2 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lgstrip2 s2 0 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lstrip3 s3 l3 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lgstrip3 s3 0 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lstrip4 s4 l4 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lgstrip4 s4 0 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lstrip5 s5 l5 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lgstrip5 s5 0 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lstrip6 s6 l6 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lgstrip6 s6 0 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lstrip7 s7 l7 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lgstrip7 s7 0 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lstrip8 s8 l8 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lgstrip8 s8 0 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lstrip9 s9 l9 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'
 *Lgstrip9 s9 0 'lstrip*10*1*(0.5+log(2*1/(w+hgs)) +0.2235*(w+hgs)/l)'

r12 L1 0 'rsq*1/w/2+rlg'
 r23 l2 0 'rsq*1/w/2+rlg'
 r34 l3 0 'rsq*1/w/2+rlg'
 r45 l4 0 'rsq*1/w/2+rlg'
 r56 l5 0 'rsq*1/w/2+rlg'
 r67 l6 0 'rsq*1/w/2+rlg'
 r78 l7 0 'rsq*1/w/2+rlg'
 r89 l8 0 'rsq*1/w/2+rlg'
 r910 l9 0 'rsq*1/w/2+rlg'

ct1 L1 0 'cc2*cc1/(cc2+cc1)'
 ct2 l2 0 'cc2*cc1/(cc2+cc1)'
 ct3 l3 0 'cc2*cc1/(cc2+cc1)'
 ct4 l4 0 'cc2*cc1/(cc2+cc1)'
 ct5 l5 0 'cc2*cc1/(cc2+cc1)'
 ct6 l6 0 'cc2*cc1/(cc2+cc1)'
 ct7 l7 0 'cc2*cc1/(cc2+cc1)'
 ct8 l8 0 'cc2*cc1/(cc2+cc1)'
 ct9 l9 0 'cc2*cc1/(cc2+cc1)'

c12 s1 s2 'cc*1' \$ using Venie's formula
 c23 s2 s3 'cc*1'
 c34 s3 s4 'cc*1'
 c45 s4 s5 'cc*1'
 c56 s5 s6 'cc*1'
 c67 s6 s7 'cc*1'
 c78 s7 s8 'cc*1'
 c89 s8 s9 'cc*1'

```

c112 L1 I2 'ccc*'
c123 I2 I3 'ccc*'
c134 I3 I4 'ccc*'
c145 I4 I5 'ccc*'
c156 I5 I6 'ccc*'
c167 I6 I7 'ccc*'
c178 I7 I8 'ccc*'
c189 I8 I9 'ccc*'

```

```

* $c12 s1 s2 'cc*th*I' $ cross capacitance
* $c23 s2 s3 'cc*th*I'
* $c34 s3 s4 'cc*th*I'
* $c45 s4 s5 'cc*th*I'
* $c56 s5 s6 'cc*th*I'
* $c67 s6 s7 'cc*th*I'
* $c78 s7 s8 'cc*th*I'
* $c89 s8 s9 'cc*th*I'

```

```

.ends s91lump

```

```

*****
* CRRC4 from Vennie
*****

```

```

.subckt CRRC4 in out tm=20n
r1 in 0 1g
e1 1 0 in 0 1
c2 1 2 'tm/4'
r2 2 0 1
e2 3 0 2 0 1
r3 3 4 1
c3 4 0 'tm/4'
e3 5 0 4 0 1
r4 5 6 1
c4 6 0 'tm/4'
e4 7 0 6 0 1
r5 7 8 1
c5 8 0 'tm/4'
e5 9 0 8 0 1
r6 9 10 1
c6 10 0 'tm/4'
e6 out 0 10 0 5.118577
r7 out 0 1g
.ends CRRC4

```

```

*****
*****end of CRRC4.cir*****
*****

```

```

*****
*****

```

```

* 9 strips
x1 s1 s2 s3 s4 s5 s6 s7 s8 s9 L1 I2 I3 I4 I5 I6 I7 I8 I9 s91lump

```

```

* Excitation: 1:3:1 current pulses into center of each strip
i4 0 I4 pulse 0 5u 0 1n 1n 10n 1
i5 0 I5 pulse 0 15u 0 1n 1n 10n 1
i6 0 I6 pulse 0 5u 0 1n 1n 10n 1

```

```

* Or edge strip only pulsed
*i5 0 15 pulse 0 1 0 1n 1n 10n 1 ac 1
*****i5 0 15 pulse 0 1 0 *
0.01n 0.01n 2n 1 ac 1

```

```

* strip terminations
rs1 s1 s1p 'rterm'
rs2 s2 s2p 'rterm'
rs3 s3 s3p 'rterm'
rs4 s4 s4p 'rterm'
rs5 s5 s5p 'rterm'
rs6 s6 s6p 'rterm'
rs7 s7 s7p 'rterm'
rs8 s8 s8p 'rterm'
rs9 s9 s9p 'rterm'

```

```

.subckt integ in out
e1 out 0 in 0 -1x
cf in out 1n
*rf in out 10x
.ends integ

```

```

xp1 s1p s1q integ
xp2 s2p s2q integ
xp3 s3p s3q integ
xp4 s4p s4q integ
xp5 s5p s5q integ
xp6 s6p s6q integ
xp7 s7p s7q integ
xp8 s8p s8q integ
xp9 s9p s9q integ

```

```

xs1 s1q s1s CRR4 tm=20n
xs2 s2q s2s CRR4 tm=20n
xs3 s3q s3s CRR4 tm=20n
xs4 s4q s4s CRR4 tm=20n
xs5 s5q s5s CRR4 tm=20n
xs6 s6q s6s CRR4 tm=20n
xs7 s7q s7s CRR4 tm=20n
xs8 s8q s8s CRR4 tm=20n
xs9 s9q s9s CRR4 tm=20n

```

```

* layer connection to gnd
****r11 L1 0 'rlg'
****r19 I9 0 'rlg'

```

```

.probe tran i(rs1) i(rs2) i(rs3) i(rs4) i(rs5) i(rs6) i(rs7) i(rs8) i(rs9)
.probe tran i(i5)
.probe ac im(rs1) im(rs2) im(rs3) im(rs4) im(rs5) im(rs6) im(rs7) im(rs8)
im(rs9)
.probe ac im(i5)
.tran 10n 2u sweep rsq dec 4 100 100x
*.tran 10n 2u sweep rsq POI 1 10x
*.ac dec 10 1m 1g
*.tran 10n 200n

```

```

.measure tran s1mx min v(s1s)
.measure tran s2mx min v(s2s)
.measure tran s3mx min v(s3s)
.measure tran s4mx min v(s4s)
.measure tran s5mx min v(s5s)
.measure tran s6mx min v(s6s)
.measure tran s7mx min v(s7s)
.measure tran s8mx min v(s8s)
.measure tran s9mx min v(s9s)

.measure tran s1ra param='s1mx/s5mx'
.measure tran s2ra param='s2mx/s5mx'
.measure tran s3ra param='s3mx/s5mx'
.measure tran s4ra param='s4mx/s5mx'
.measure tran s6ra param='s6mx/s5mx'
.measure tran s7ra param='s7mx/s5mx'
.measure tran s8ra param='s8mx/s5mx'
.measure tran s9ra param='s9mx/s5mx'

.measure tran s1ix max i(rs1)
.measure tran s2ix max i(rs2)
.measure tran s3ix max i(rs3)
.measure tran s4ix max i(rs4)
.measure tran s5ix max i(rs5)
.measure tran s6ix max i(rs6)
.measure tran s7ix max i(rs7)
.measure tran s8ix max i(rs8)
.measure tran s9ix max i(rs9)
* measure cathode transparency
.measure tran s54a param='s5ix/s4ix/3'
.measure tran s56a param='s5ix/s6ix/3'

.options post list accurate

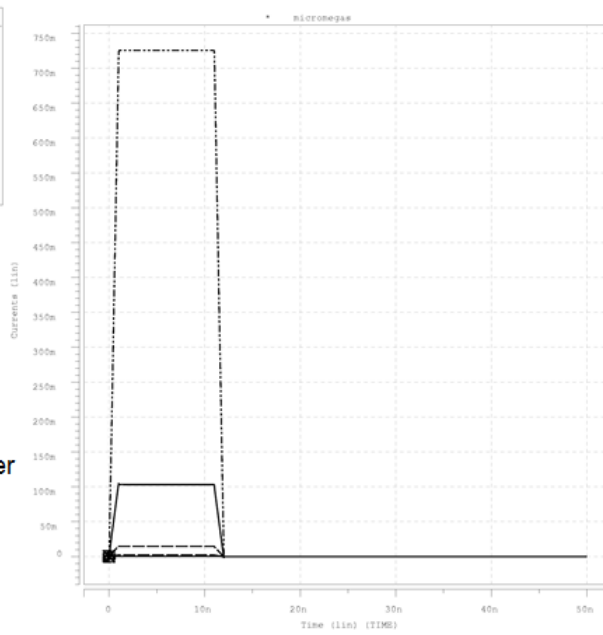
** .alter
** .param w=2.5 l=100 $ trigger chamber geometry
** .alter
** .param w=.1 l=10 $ prototype chamber geometry
.end

```



50kΩ 20ns

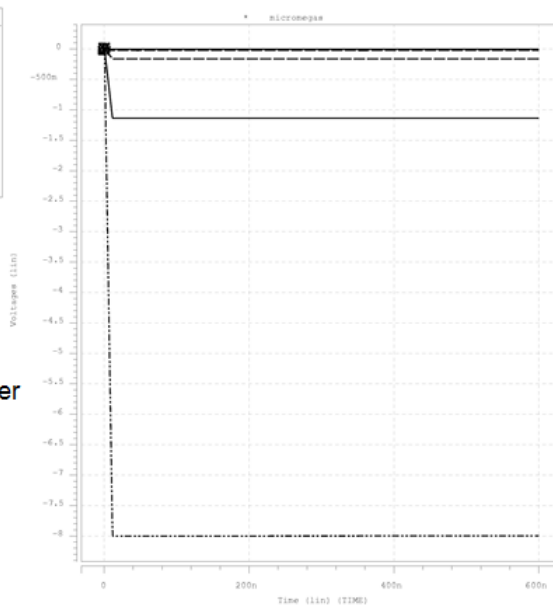
Wave	Symbol
D0:tr0:l (ra1)	⊗
D0:tr0:l (ra2)	⊙
D0:tr0:l (ra3)	⊕
D0:tr0:l (ra4)	⊖
D0:tr0:l (ra5)	⊗
D0:tr0:l (ra6)	⊙
D0:tr0:l (ra7)	⊕
D0:tr0:l (ra8)	⊖
D0:tr0:l (ra9)	⊗



I(t) before preamplifier

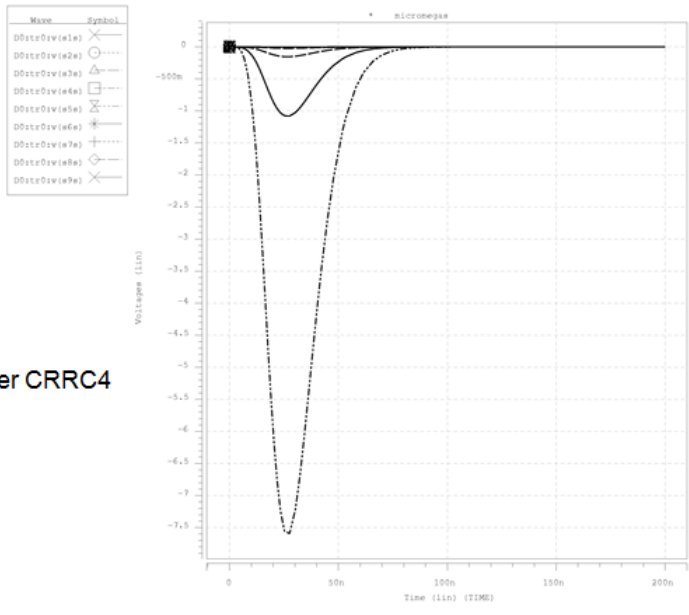


Wave	Symbol
D0:tr0:viw1q	⊗
D0:tr0:viw2q	⊙
D0:tr0:viw3q	⊕
D0:tr0:viw4q	⊖
D0:tr0:viw5q	⊗
D0:tr0:viw6q	⊙
D0:tr0:viw7q	⊕
D0:tr0:viw8q	⊖
D0:tr0:viw9q	⊗

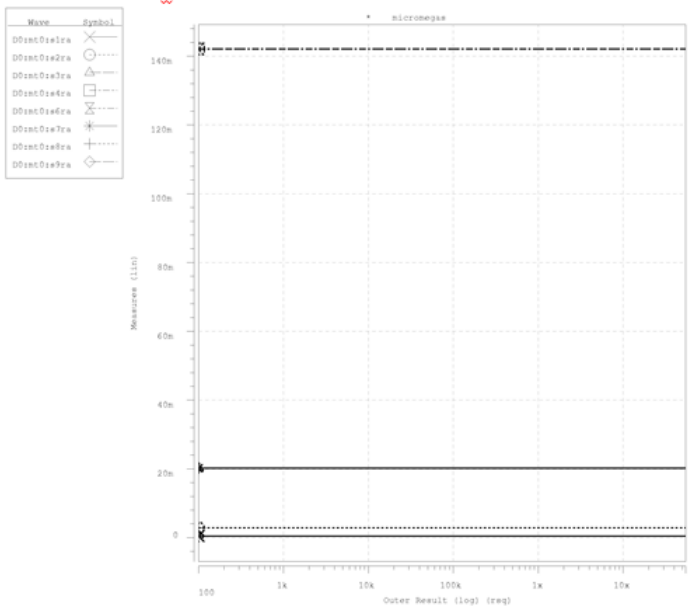


V(t) after preamplifier

V(t) after CRRC4

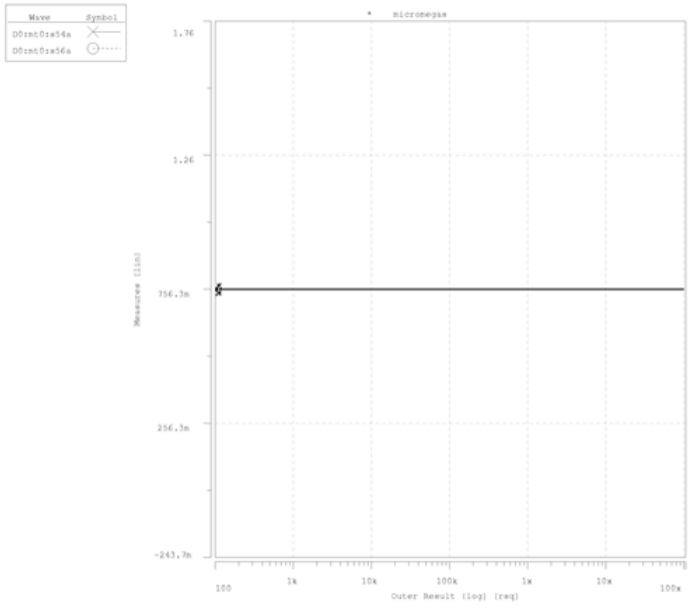


$V_x/V_5(R)$ after CRRC4





$I_5/I_{4,6}/3(R)$ before preamplifier



Συμπεράσματα:

HSpice

1. Απ' ότι φαίνεται από όλες τις γραφικές παραστάσεις μετά τον pre-amplifair, μετά τον CRRC4 και στις 2 κανονικοποιημένες γραφικές ο Micromegas chamber παρουσιάζει μικρότερο crosstalk σε σχέση με τον TGC ο οποίος παρουσιάζει διάχυση του σήματος στα γειτονικά strips. Ο λόγος της τάσης $V(t)$ μετά των διαμορφωτή $V_{4,6}/V_5$ για τον TGC είναι περίπου 0.225, ενώ για των Micromegas με ίδια χαρακτηριστικά είναι περίπου 0.145.

Στο κύκλωμα του TGC αυτό οφείλεται στην αντίσταση που ενώνει τα strips μεταξύ τους r12,r23... η οποία απουσιάζει από το κύκλωμα του Micromegas.

2. Στη γραφική $V(t)$ μετά των preamplifair στον TGC φέεται ότι το φορτίο που δέχεται το κεντρικό strip κατανέμεται σε όλα τα άλλα strip και μετά από κάποιο χρονικό διάστημα όλα τα strip έχουν το ίδιο φορτίο. Στον Micromegas το φορτίο που κατανέμεται από το κεντρικό στα υπόλοιπα strip λογο του crosstalk παραμένει αναλλοίωτο στο χρόνο.

Fluka

3. Στο simulatio του Fluka όπως φαίνεται από τα ιστογράμματα παρατηρείται το Argon Escape στην ενέργεια που το αναμέναμε. Επίσης φαίνεται ότι ταυτίζεται και με τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία έχουν δυο κορυφες στα 6 και 3,2 keV.

Βιβλιογραφία

1. Theo Alexopoulos NTU Athens On behalf of the Muon ATLAS MicroMegas Activity (MAMMA R&D) Progress Report on Micromegas Chambers
2. V. Smakhtin, G. Mikenberg, A. Klier, Y. Rozen, E. Duchovni, E. Kajamovitz, A. Hershenhorn Thin Gap Chamber upgrade for SLHC: Position resolution in a test beam Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A
3. T. Alexopoulos, J. Burnens, R. deOliveira, G. Glonti, O. Pizzirusso, V. Polychronakos, G. Sekhniaidze, G. Tsipolitis, J. Wotschack A spark-resistant bulk-micromegas chamber for high-rate applications Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A
4. Y. Giomataris Development and prospects of the new gaseous detector Micromegas
5. G. Charpaka, J. Derr, Y. Giomataris, Ph. Rebourgeard Micromegas, a multipurpose gaseous detector
6. I. Giomataris Micromegas: Results and prospects
7. P. Desauvais, J. Jeanjean, V. Puill Performance of a new type of Micromegas detector with stainless Steel woven wire mesh and resistive anode readout
8. P. O'Connor HSPICE simulation of Thin-Gap Cathode Strip Chambers
9. T. Alexopoulos Simulation of Micromegas chambers with HSPICE
10. T. Alexopoulos Update on Simulation of Micromegas chambers with HSPICE
11. Alfredo Ferrari, Paola R. Sala, Alberto Fasso, Johannes Ranft Fluka: a multi-particle transport code
12. V. Vlachoudis Flair for FLUKA
13. Avant Star-Hspice Manual, HSPICE Quick Reference Guide
14. Ε. Δρης Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά (Σημειώσεις)