



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΕΣΤΙΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ MICROCHANNEL PLATES»

ΤΟΥ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ

ΓΕΩΡΓΙΟΥ Κ. ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ

A.M. 09100296

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΦΩΚΙΤΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΜΕΛΗ ΤΡΙΜΕΛΟΥΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

ΦΩΚΙΤΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΦΑΝΟΥΡΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ, ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΡΕΥΝΑΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΤΣΟΥΚΑΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ABSTRACT.....	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1 ΠΕΡΙ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	5
1.2 ΑΚΤΙΝΕΣ Χ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ.....	6
1.3 ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ.....	10
1.4 Ο ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ.....	11
2. MICROCHANNEL PLATES	12
2.1 ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ MICROCHANNEL PLATES	12
2.2 ΕΙΔΗ MICROCHANNEL PLATES.....	17
2.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΕΣΤΙΑΚΩΝ MICROCHANNEL PLATES	22
2.4 ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΥΛΗΣ	27
2.4.1 ΔΕΙΚΤΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ	27
2.4.2 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΥΛΗΣ	28
2.5 ΟΛΙΚΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ.....	34
3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ MICROCHANNEL PLATES.....	36
3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ MICROCHANNEL PLATES ΤΗΣ PHOTONIS.....	36
3.2 ΠΗΓΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ.....	38
3.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	38
3.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΠΗΓΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ.....	38
3.3 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ MICROMEGAS.....	44
3.4 ΕΣΤΙΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ MICROCHANNEL PLATES ΤΗΣ PHOTONIS.....	46
3.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	46

3.4.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	46
3.4.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	53
3.4.4	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	53
3.5	ΕΣΤΙΑΣΗ ΔΕΣΜΗΣ LASER 532NM ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ MICROCHANNEL PLATE ΤΗΣ PHOTONIS.....	57
3.5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	57
3.5.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	58
3.5.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	59
3.5.4	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	60
3.5.5	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	60
4.	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	64
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	65
	Α. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ, ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ MICROCHANNEL PLATES.....	65
	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ	65
	ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ.....	65
	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ.....	66
	Β. ΚΑΜΕΡΕΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ CCD (CHARGE-COUPLED DEVICE).....	67
	Γ. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΣΤΙΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ	69
	Δ. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΣΤΙΑΣΗΣ ΣΤΟ ΟΠΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ	88
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	89

ABSTRACT

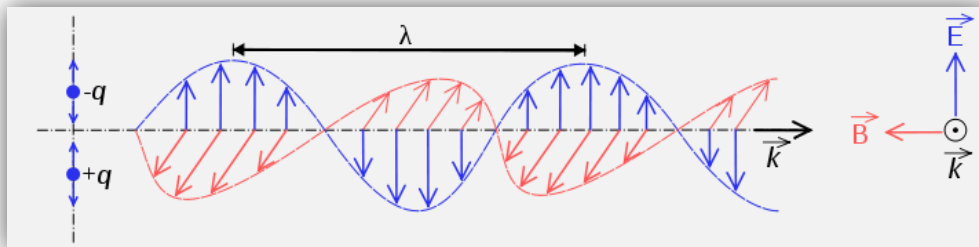
Η οπτική συμπεριφορά των MicroChannel Plates (MCP) «lobster-eye» γεωμετρίας σε ακτίνες X έχει περιγραφεί συχνά στη βιβλιογραφία. Ερευνήσαμε τις εστιακές ιδιότητες ενός MCP ακτινικής γεωμετρίας, τετραγωνικών οπών χρησιμοποιώντας μια πηγή ακτίνων X. Μια τέτοια οπτική συσκευή λειτουργεί με ολικές ανακλάσεις των ακτίνων X στα τοιχώματα των διαύλων του, οδηγώντας, έτσι, την ακτινοβολία σε συγκεκριμένο εστιακό σημείο. Κάποια βασικά χαρακτηριστικά των MCPs χάρη στα οποία βρίσκουνε πολλές εφαρμογές όπως σε τηλεσκοπία ακτίνων X είναι το σχετικά μικρό κόστος κατασκευής σε σύγκριση με άλλες συσκευές εστίασης ακτίνων X, το μικρό τους βάρος αλλά και το μεγάλο εύρος του φακού.

Στην συγκεκριμένη εργασία ερευνήσαμε την αποδοτικότητα και τις ιδιότητες εστίασης ακτίνων X ενός κυκλικού μικροδιαυλικού επίπεδου πλακιδίου (MCP), τετραγωνικών διαύλων, κατασκευασμένο από την Photonis SAS. Χρησιμοποιήσαμε ακτίνες X ενέργειας 8,05 keV παραγόμενες από ένα δισκίο χαλκού.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΠΕΡΙ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι ένα είδος κύματος (εικόνα 1.1) με συνιστώσες ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου και συναντάται σε πολλές μορφές, όπως ραδιοκύματα, μικροκύματα, υπέρυθρες, ορατό φάσμα, υπεριώδης, ακτίνες Χ και ακτίνες γ ανάλογα με τη συχνότητα του κύματος (εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.1 Αναπαράσταση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος (πηγή: διαδικτυακός ιστότοπος www.wikipedia.com)

Λόγω της δυσπρόστατης φύσης της, όπως απέδειξε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα η κβαντομηχανική, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εμφανίζει ιδιότητες και κύματος και σωματιδίου (φωτονίου¹), μεταφέροντας ορμή και ενέργεια στην ύλη με την οποία μπορεί να αλληλεπιδράσει. Κάποια φαινόμενα που εμφανίζονται είναι οπτικής φύσεως όπως η διάθλαση, η περίθλαση, η ανάκλαση κα. Η βασική σχέση που ενώνει την ενέργεια του φωτονίου με το μήκος κύματος είναι η $E = h\nu = hc/\lambda$. Ένας τρόπος επιβεβαίωσης της

¹ Το φωτόνιο είναι το κβάντο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ο φορέας της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης.

² Εξίσωση Planck-Einstein

παράξενης φύσης του φωτονίου είναι η μελέτη του φωτοηλεκτρικού³ φαινομένου, αποδεικνύοντας ότι φωτόνια μπορούν να αλληλεπιδράσουν με την ύλη μεταφέροντας ενέργεια σε ηλεκτρόνια.

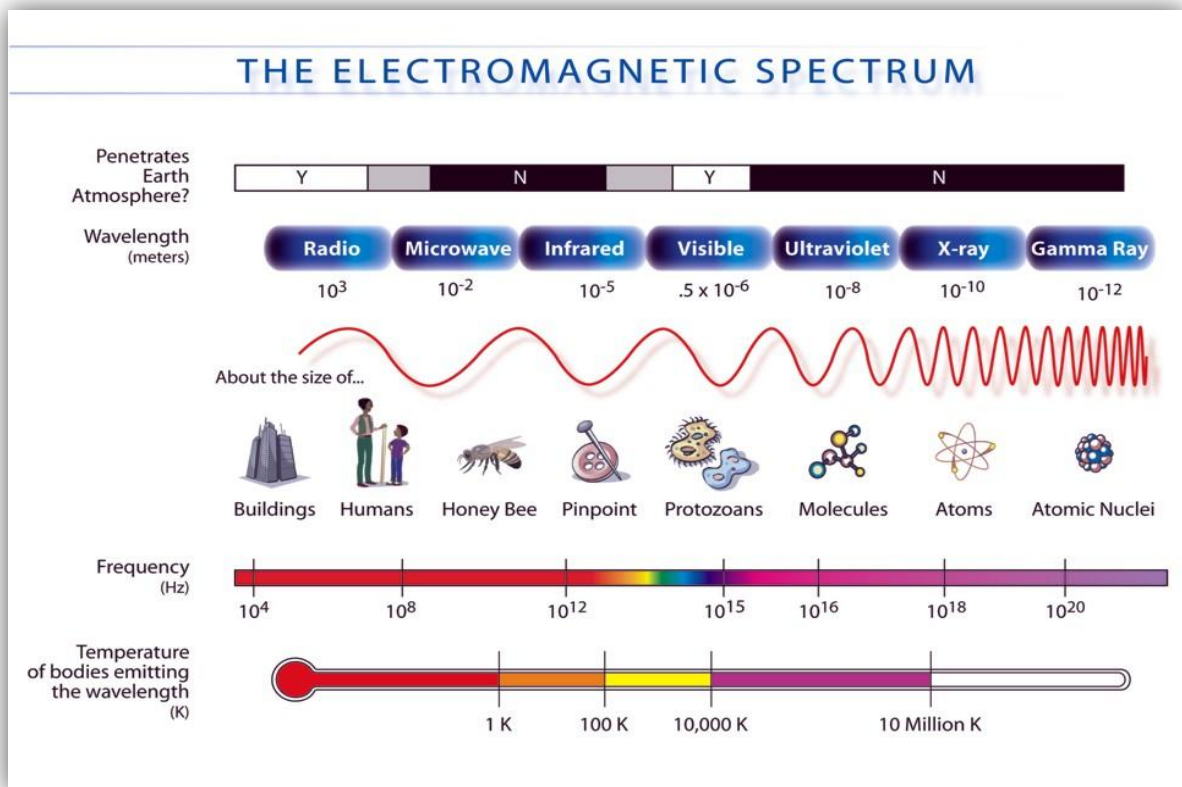
1.2 ΑΚΤΙΝΕΣ Χ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Οι ακτίνες Χ είναι μια μορφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ως ακτίνες Χ μπορούμε να θεωρήσουμε (ποιοτικά) τις ακτινοβολίες με μήκη κύματος από 0,01 nm έως 10 nm αποτελούμενες από φωτόνια με ενέργειες από 120 eV έως 120 keV (εικόνα 1.2). Σε πολλούς είναι γνωστές ως ακτινοβολία Röntgen από τον Wilhelm Conrad Röntgen, ο οποίος τις ανακάλυψε πρώτος και τους απέδωσε το όνομα X-Rays υποδεικνύοντας έτσι ένα άγνωστο ως τότε τύπο ακτινοβολίας.

Αυτό που παρατήρησε ο Röntgen λίγο μετά την ανακάλυψή τους το 1895, ήτανε ότι οι συγκεκριμένες ακτίνες απορροφούνται πολύ εύκολα από την ύλη, ενώ διαθλώνται ελάχιστα και σαν αποτέλεσμα η χρήση τους σε οπτικά συστήματα που έχουν ως αρχή λειτουργίας τους την διάθλαση, την περίθλαση ή την ανάκλαση ήτανε αδύνατη. Σιγά-σιγά, όμως, νέες τεχνολογίες αρχίσανε να αναπτύσσονται. Το 1914, ο van Laue τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ για το έργο του πάνω στην περίθλαση ακτίνων Χ από κρυστάλλους. Αργότερα, το 1929 πρωτοχρησιμοποιήθηκε η ολική ανάκλαση για να εκτρέψουνε μια δέσμη ακτίνων Χ. Περισσότερο λεπτομερής περιγραφή της ιστορίας των οπτικών στοιχείων ακτίνων Χ έχει περιγραφεί αναλυτικά σε διάφορα βιβλία της φυσικής [1]. Παραδόξως, αν και η φυσική που κρύβεται πίσω από την διάθλαση, την περίθλαση και την ανάκλαση ήτανε γνωστή για σχεδόν ένα ολόκληρο αιώνα, οι συγκεκριμένες οπτικές συσκευές ανα-

³ Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι μια κβαντική διεργασία κατά την οποία απελευθερώνονται ηλεκτρόνια από μια επιφάνεια αγωγού όταν προσπέσει σε αυτή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνότητας τέτοιας ώστε τα ηλεκτρόνια να κατορθώσουν να υπερπηδήσουν το φράγμα δυναμικής ενέργειας που τα "εγκλωβίζει" στην επιφάνεια αυτή.

πτύχθηκαν και εξελίχτηκαν με ραγδαίους ρυθμούς τον τελευταίο μόνο καιρό.



Εικόνα 1.2 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Πηγή: διαδικτυακός ιστότοπος http://wisp.physics.wisc.edu/xray/Intro_to_X-rays.html).

Έτσι, τις τελευταίες δεκαετίες πολλοί κλάδοι της επιστήμης έχουν ασχοληθεί με την ανάπτυξη νέων οπτικών στοιχείων ακτίνων X και συγκεκριμένα εστιακών φακών. Όπως έχει αναφερθεί οι ακτίνες X είναι αρκετά δύσκολο να εστιαστούν μιας και οι συμβατικοί οπτικοί φακοί που στηρίζονται στην διάθλαση και ελάχιστη απορρόφηση της ακτινοβολίας δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ένας τρόπος να εστιάσουμε ακτίνες X είναι η ολική ανάκλαση σε μεταλλικές επιφάνειες προσκρούοντας σε πολύ μικρές γωνίες (grazing incidence angles). Τα οπτικά στοιχεία ακτίνων X που αποτελούνται από έναν ή πολλαπλούς τριχοειδείς δίαυλους και η λειτουργία τους βασίζεται στο παραπάνω φαινόμενο έχουν λάβει μεγάλο ενδιαφέρον κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών. Μονοδιαυλικά οπτικά συστήματα έχουν αναπτυχθεί για μελέτες μικροανάλυσης και μικροφθορισμού χρησιμοποιώντας πηγές ακτίνων X, και στοιχεία με συστοιχίες πολλαπλών τριχοει-

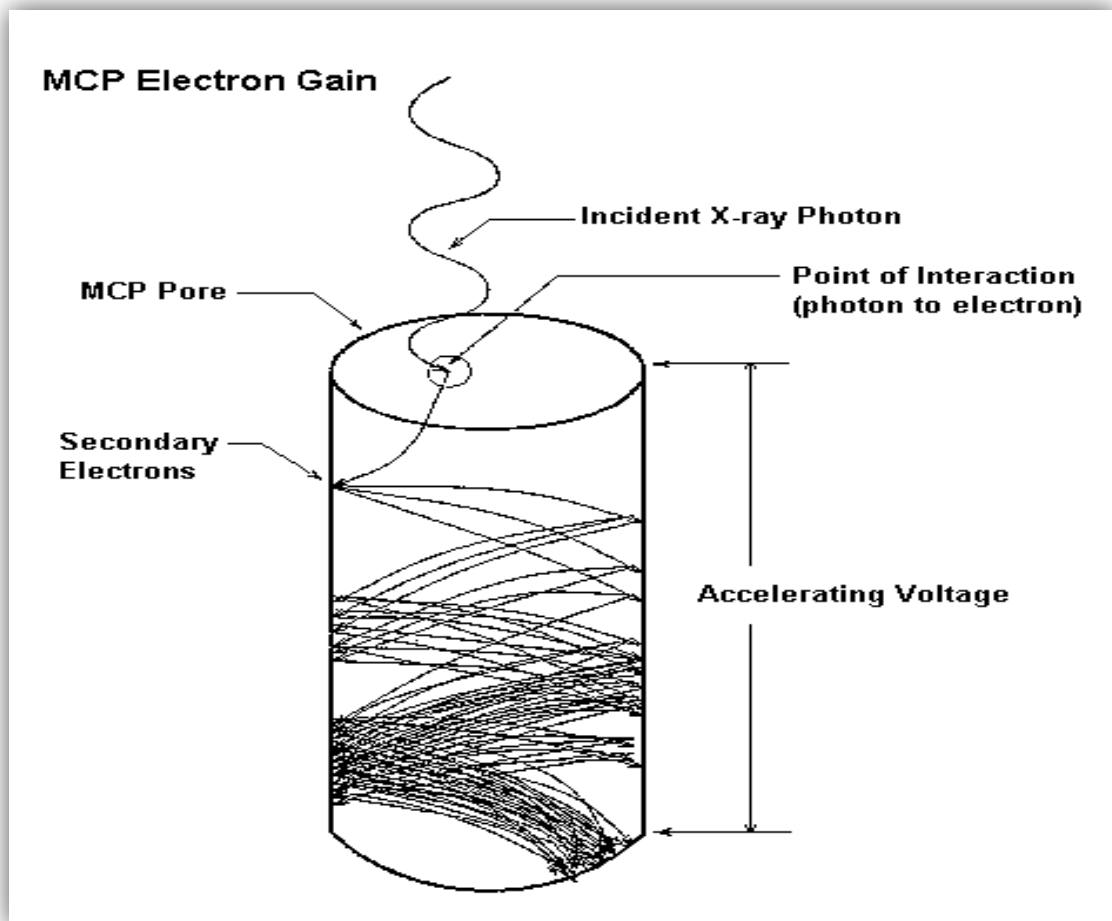
δών διαύλων εξελίσσονται συνεχώς. Ένας συναφής, αλλά ξεχωριστός τομέας ανάπτυξης είναι αυτός των MicroChannel Plates (Μικροδιαυλικά πλακίδια) ή MCPs. Τα MCPs είναι πλακίδια πάχους 1-2 mm με εκατομμύρια μικροσκοπικά κανάλια τετραγωνικής ή κυκλικής διατομής διαστάσεων της τάξης των μm.

Αρχικά τα MCPs αναπτύχθηκαν ως φωτοπολλαπλασιαστές⁴ σε ανιχνευτικές διατάξεις. Κάθε μικροδιάυλος αποτελεί έναν πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων, στον οποίο ο πολλαπλασιασμός πραγματοποιείται υπό την παρουσία ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Κάθε φωτόνιο που εισέρχεται σε ένα από τα κανάλια είναι εγγυημένο ότι θα χτυπήσει τον τοίχο του διαύλου και οφείλεται στο γεγονός ότι το κανάλι βρίσκεται υπό γωνία με την διεύθυνση κίνησης του φωτονίου. Η πρόσκρουση ξεκινά μια αλληλουχία γένεσης δευτερογενών ηλεκτρονίων δια μέσου του καναλιού λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Αυτά τα δευτερογενή ηλεκτρόνια επιταχύνονται λόγω του ηλεκτρικού πεδίου και δημιουργούν με τη σειρά τους επιπλέον ηλεκτρόνια καθώς προσκρούουν ξανά στα τοιχώματα του διαύλου. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η ενίσχυση της αρχικής πληροφορίας ανάλογα με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και τη γεωμετρία του μικροδιαυλικού πλακιδίου. Τα ηλεκτρόνια εξέρχονται, τελικά, από τα κανάλια από την αντίθετη πλευρά, όπου και εντοπίζονται από πρόσθετες ανιχνευτικές διατάξεις. Μια ποιοτική περιγραφή του φαινομένου γίνεται στην εικόνα 1.3.

Ερευνητές που ασχολούνταν με την αστρονομία ακτίνων Χ έδειξαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των MCPs και ιδιαίτερα για τις οπτικές ιδιότητες που παρουσιάζουν ως φακοί εστίασης ακτίνων Χ. Η αιτία ήτανε το γεγονός ότι τα MCPs κυρτών τετραγωνικών διαύλων οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι με σφαιρική γεωμετρία είναι ισοδύναμα με τα λεγόμενα lobster-eye⁵ τηλεσκοπία (2) τα οποία μπορεί να έχουνε πολύ μεγάλο παράθυρο και άριστη ευαισθησία.

⁴ Φωτοπολλαπλασιαστές: συσκευές ενίσχυσης του προσπίπτοντος φωτός.

⁵ Τα τηλεσκοπία lobster-eye είναι βασισμένα στην γεωμετρία του ματιού του αστακού



Εικόνα 1.3 Μηχανισμός λειτουργίας ενός MicroChannel Plate φωτοπολλαπλασιαστή. (Πηγή: διαδικτυακός ιστότοπος <http://he-www.harvard.edu/HRC/mcp/mcp.html>)

Γενικά τα MCPs μπορούνε να χρησιμοποιηθούνε προς εστίαση ακτίνων X που εκπέμπονται από μια σημειακή πηγή ή για εστίαση μιας παράλληλης δέσμης. Στην 1^η περίπτωση οι διάυλοι του πλακιδίου είναι παράλληλοι, ενώ στην 2^η περίπτωση οι διάυλοι βρίσκονται υπό κατάλληλες γωνίες έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η εστίαση. Εκτενέστερη περιγραφή των εστιακών MicroChannel Plates γίνεται στο 2^ο κεφάλαιο.

1.3 ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Η μελέτη αντικειμένων που εκπέμπουν ακτίνες Χ, ακτίνες γ και υπεριώδη ακτινοβολία έγινε εφικτή με την πρόοδο της τεχνολογίας. Τέτοια είδη ακτινοβολίας απορροφούνται έντονα από την ατμόσφαιρα της Γης με αποτέλεσμα η παρατήρησή τους να είναι εφικτή μόνο από το διάστημα.

Το 1962, η επιστήμη της αστρονομίας ακτίνων Χ γεννήθηκε με την εκτόξευση ενός μικρού πυραύλου εφοδιασμένο με ανιχνευτές Geiger από μια ομάδα επιστημόνων στο New Mexico (3). Οι ανιχνευτές κατέγραψαν απροσδόκητα νέα στοιχεία σχετικά με τις πηγές ακτίνων Χ στο διάστημα και αυτό είχε ως αποτέλεσμα μέσα στα επόμενα να χρόνια να σταλούν στο διάστημα δεκάδες παρόμοιες συσκευές. Έτσι, ανακαλύφθηκαν εκατοντάδες νέες πηγές ακτίνων Χ όπως τα υπολείμματα supernova, διάφοροι γαλαξίες και κάποια συμπλέγματα γαλαξιών.

Κάποια από τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη των πηγών ακτίνων Χ ήτανε ένα μικρό τηλεσκόπιο ακτίνων Χ με το οποίο είχαν εφοδιαστεί ο δορυφόρος της NASA Copernicus, δύο δορυφόροι παρατήρησης του ηλίου της NASA και πολλές άλλες αποστολές. Κάποιες από τις ανακαλύψεις που έγιναν χάρη σε αυτές τις αποστολές είναι:

- οι διπλοί pulsars ακτίνων Χ – ένας αστέρας νετρονίων σε τροχιά γύρω από ένα κανονικό ουράνιο σώμα, συνήθως ένα άλλο pulsar ή ένα λευκό νάνο ή ένα αστέρα νετρονίων, παράγοντας έτσι ακτινοβολία Χ,
- εκπομπή ακτίνων Χ από ενεργούς αστέρες,
- ενεργοί γαλαξίες των οποίων οι κεντρικές περιοχές εκπέμπουν τεράστια ποσά ακτινοβολίας Χ,
- quasars, ουράνια σώματα που ακτινοβολούνε έως και χίλιες φορές περισσότερη ενέργεια από τον γαλαξία μας, τον Milky Way, από περιοχές της τάξης του ηλιακού μας συστήματος

Όλες αυτές οι ανακαλύψεις και πολλές ακόμη γίνανε από συσκευές που αρχικά ήτανε ικανές να εντοπίσουνε την θέση των πηγών ακτίνων Χ, να μετρήσουνε το φάσμα εκπομπής τους και να καταγράψουν τυχόν αλλαγές στην φωτεινότητά τους σε βάθος χρόνου. Όσο, όμως, η τεχνολογία των οπτικών στοιχείων εξελισσότανε νέες δυνατότητες παρακολούθησης και μελέτης εμφανίστηκαν. Πλέον οι επιστήμονες μπορούνε όχι μόνο να εντοπίσουν την θέση της πηγής αλλά και να δημιουργήσουνε μια εικόνα αυτής. Μια ολόκληρη οικογένεια τηλεσκοπίων αναπτύχθηκε και συνεχίζει να αναπτύσσεται με στόχο την όλο και πιο επαρκή και λεπτομερή καταγραφή των ακτίνων Χ. Κάποια από αυτά τα τηλεσκόπια βασίζονται στην ολική ανάκλαση των ακτίνων σε σειρά επιφανειών επιτυγχάνοντας εστίαση αυτών. Ένα από αυτά είναι το Lobster-Eye Wide-Field X-ray Telescope (4), (5) που θα τοποθετηθεί στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (International Space Station – ISS) και θα χρησιμοποιεί μια συστοιχία μικροδιαυλικών πλακιδίων (MicroChannel Plates – MCPs) που αναπτύχθηκαν σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του Leicester.

1.4 Ο ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ

Σε αυτή την εργασία αρχικά έγινε μια μελέτη της οπτικής συμπεριφοράς των MicroChannel Plates της PHOTONIS σε δύο στάδια. Στο 1^ο στάδιο χρησιμοποιήθηκε ακτινοβολία στο φάσμα του ορατού φωτός, ενώ στο 2^ο ακτίνες Χ. Η εργασία περιλαμβάνει 5 κεφάλαια συμπεριλαμβανομένου και του παραρτήματος.

Το κεφάλαιο 1 εισάγει τον αναγνώστη στην ιστορία των ακτίνων Χ, ξεκινώντας από την ανακάλυψή τους και περιγράφοντας τις ιδιότητες τους και τη φύση τους. Στη συνέχεια περιγράφεται η εξέλιξη των διάφορων οπτικών στοιχείων ακτίνων Χ και γίνονται κάποιες αναφορές στη χρήση τους στην αστρονομία.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια εκτενής περιγραφή των MicroChannel Plates παραθέτοντας στοιχεία για την ιστορία τους, τα είδη, την γεωμετρία και τον τρόπο κατασκευής και λειτουργίας.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρατίθενται τα εργαστηριακά πειράματα που κάναμε μελετώντας τις εστιακές ιδιότητες των MicroChannel Plates χρησιμοποιώντας δύο είδη ακτινοβολίας: α) ακτίνες Χ και β) ακτινοβολία στο ορατό φάσμα του φωτός.

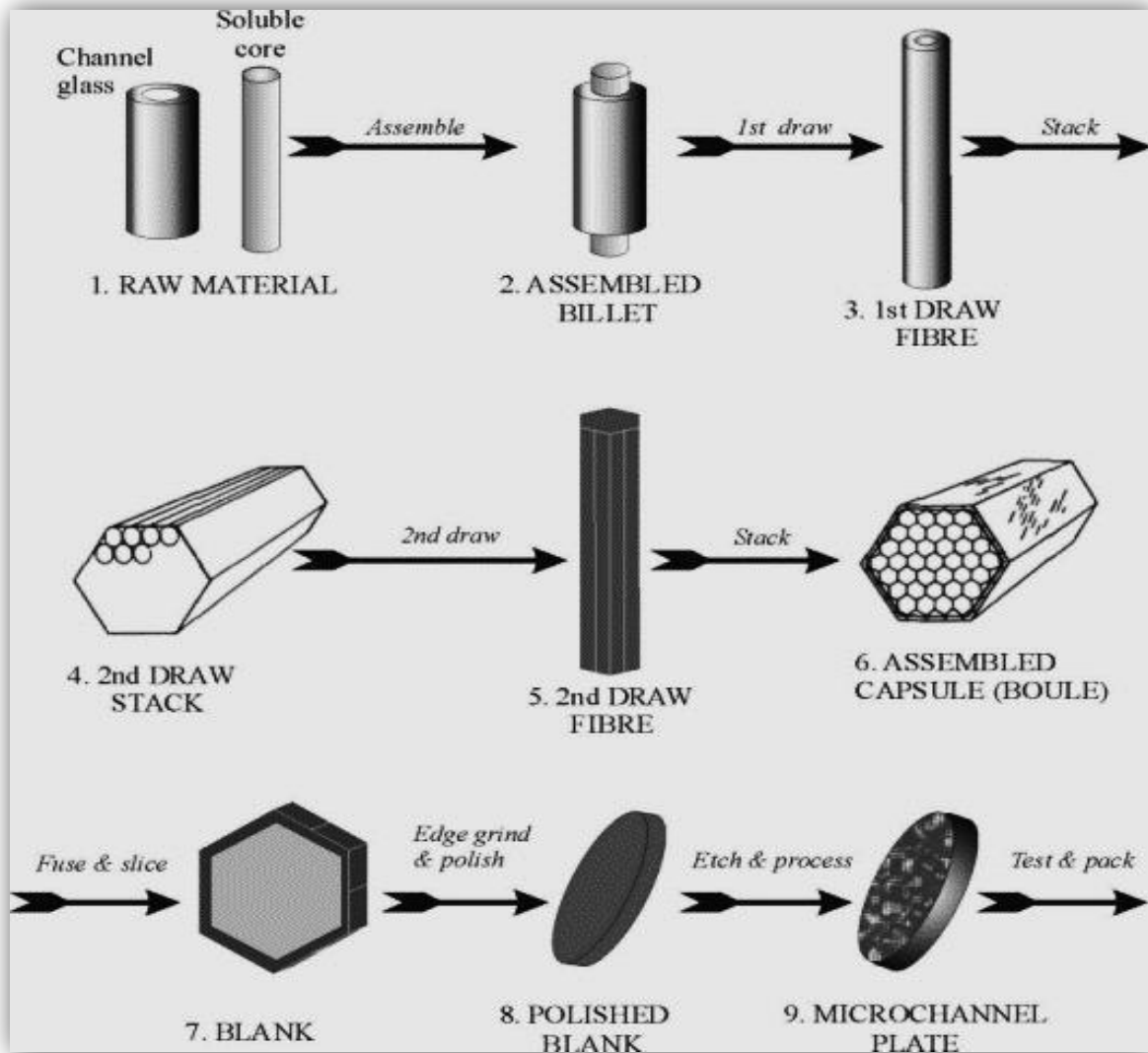
Το 4^ο κεφάλαιο αποτελεί μία σύνοψη των αποτελεσμάτων της διπλωματικής εργασίας αξιολογώντας την όλη μελέτη.

2. MICROCHANNEL PLATES

2.1 ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ MICROCHANNEL PLATES

Όλα τα μικροδιαυλικά πλακίδια είναι κατασκευασμένα με τρόπο παρόμοιο όπως και στους MCP φωτοπολλαπλασιαστές (Εικόνα 2.1). Αρχικά γίνεται η επεξεργασία ενός υαλώδους πυρήνα ορθογωνικής ή κυκλικής διατομής που είναι διαλυτός στο οξύ (παρόμοιος τρόπος παραγωγής με τις οπτικές ίνες). Αφού γυαλιστεί και αφαιρεθούν οι όποιες ανωμαλίες από την επιφάνειά του στη συνέχεια τοποθετείται στο κέντρο μολυβδούχων υαλικών σωλήνων σχηματίζοντας ένα ενιαίο ζεύγος το οποίο κόβεται σε λεπτές ίνες (monofibres). Αυτές οι πρώτες ίνες κόβονται στο κατάλληλο μήκος και στοιβάζονται σχηματίζοντας τετραγωνικές διατάξεις, οι οποίες με τη σειρά τους επαναστοιβάζονται σχηματίζοντας νέες τετραγωνικές διατάξεις, τις πολυίνες (multifibres). Στην περίπτωση των MCPs ακτινικής στοίβαξης οι πολυίνες τοποθετούνται σε ομόκεντρους δακτυλίους και συγκολλούνται σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσία κενού αέρος σχηματίζοντας ένα μπλοκ υλικού (boule) αρκετών εκατοστών. Στη συνέχεια το boule κόβεται σε λεπτά τεμάχια πάχους μερικών χιλιοστών και αφαιρείται ο πυρήνας υαλώδους. Μετέπειτα τα τε-

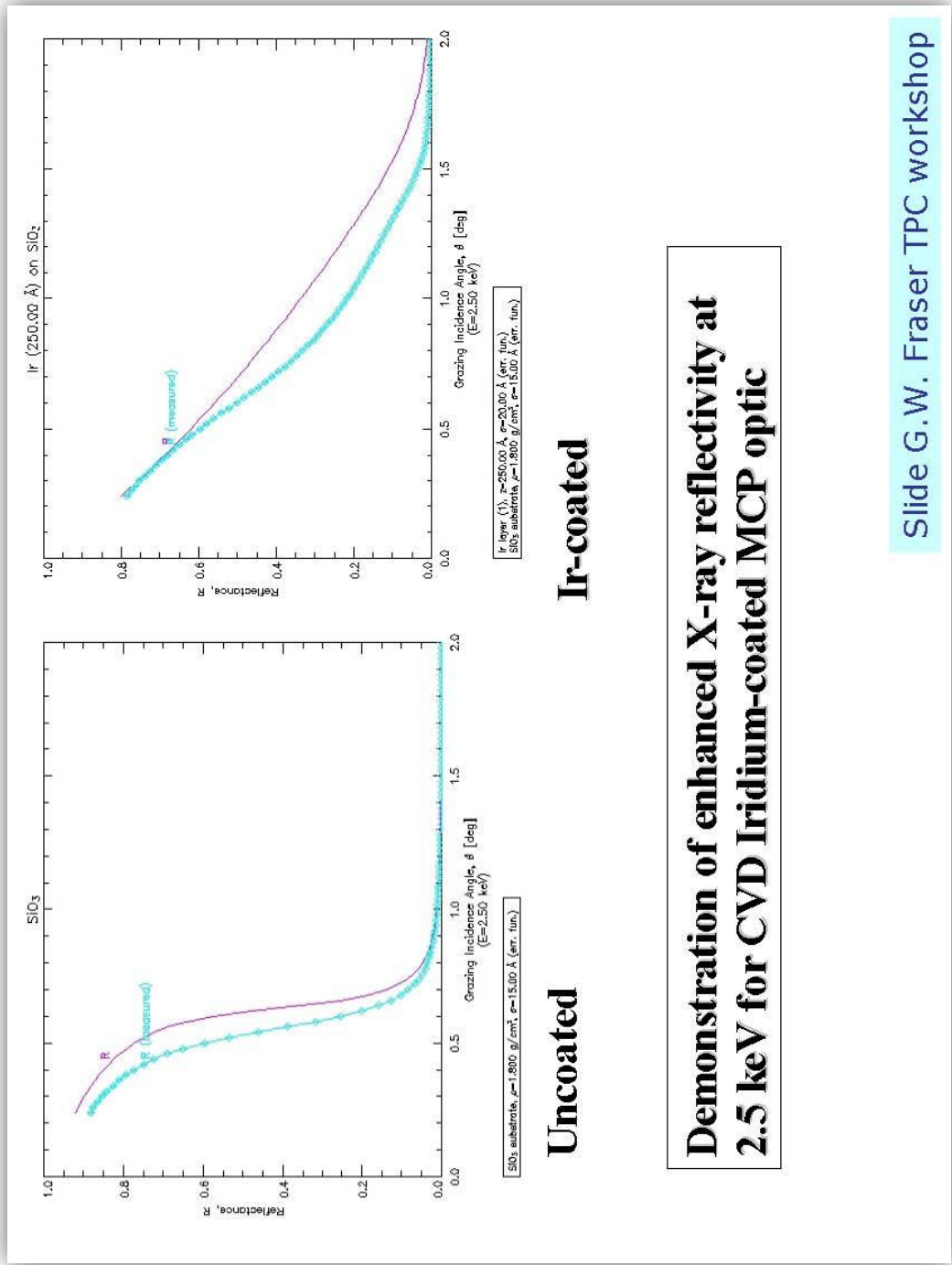
μάχια υπόκεινται σε νέα επεξεργασία γυαλίσματος για να αφαιρεθούν υπολείμματα του πυρήνα ή να λειανθούν επιφανειακές ανωμαλίες. Τα πλακίδια που μένουν αποτελούν τα MCPs και ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να επεξεργαστούν θερμικά αποκτώντας επιφάνεια σφαιρικής μορφής συγκεκριμένης ακτίνας.



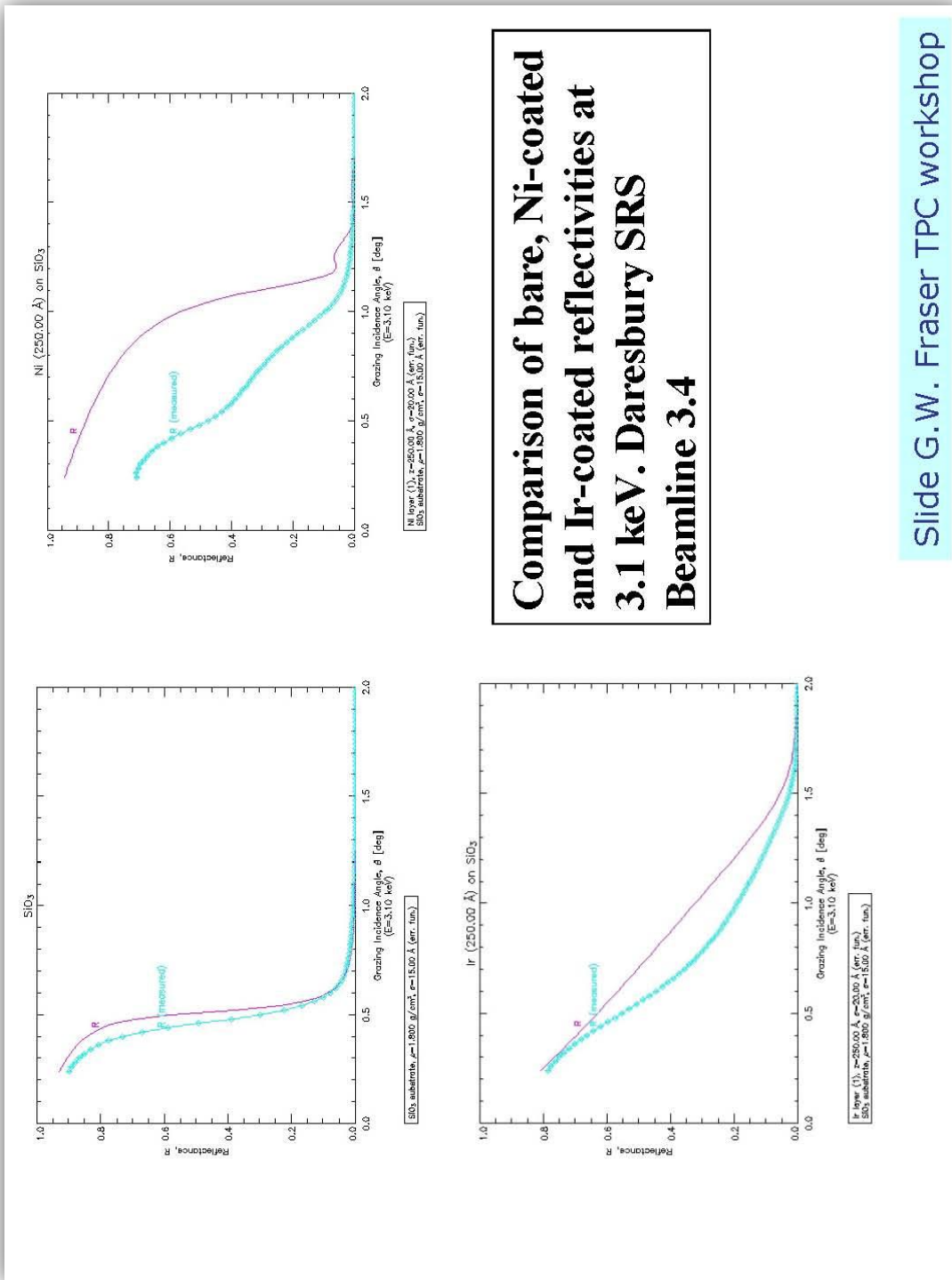
Εικόνα 2.1 Στάδια κατασκευής ενός MicroChannel Plate (Πηγή: διαδικτυακός ιστότοπος <http://www.harvard.edu/HRC/mcp/mcp.html>).

Για να φτάσουν να αποκτήσουν τις τελικές ιδιότητές τους τα MicroChannel Plates κατασκευάζονται με απόλυτη ακρίβεια έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν τυχόν σφάλματα στη δομή τους και να αποκτήσουν μικρή επιφανειακή τραχύτητα μειώνοντας

έτσι τις επιφανειακές σκεδάσεις. Γι αυτό το λόγο τα εστιακά MicroChannel Plates κατασκευάζονται από υλικά υψηλής ανακλαστικότητας στις ακτίνες Χ ή και χρησιμοποιούνε επιπλέον επιμεταλλώσεις στις επιφάνειες των διαύλων με υλικά όπως το νικέλιο (Ni) ή το ιρίδιο (Ir). Στις εικόνες 2.2 και 2.3 φαίνονται διαγράμματα ανακλαστικότητας – γωνίας πρόσκρουσης για MCPs χωρίς επιμετάλλωση και με επιμετάλλωση Ni και Ir. Κάποιοι παράγοντες που μπορούνε να επηρεάσουν την απόδοση των MCPs είναι περιστροφές ή στρεβλώσεις των καναλιών οι οποίες οδηγούνε σε μείωση της αποδοτικότητας της συσκευής.



Εικόνα 2.2 Διαγράμματα ανακλαστικότητα – γωνίας πρόσκρουσης uncoated και Ir-coated MicroChannel Plates (Πηγή: Esther Ferrer Ribas for the MicroMegas Group Collaboration Meeting Article)



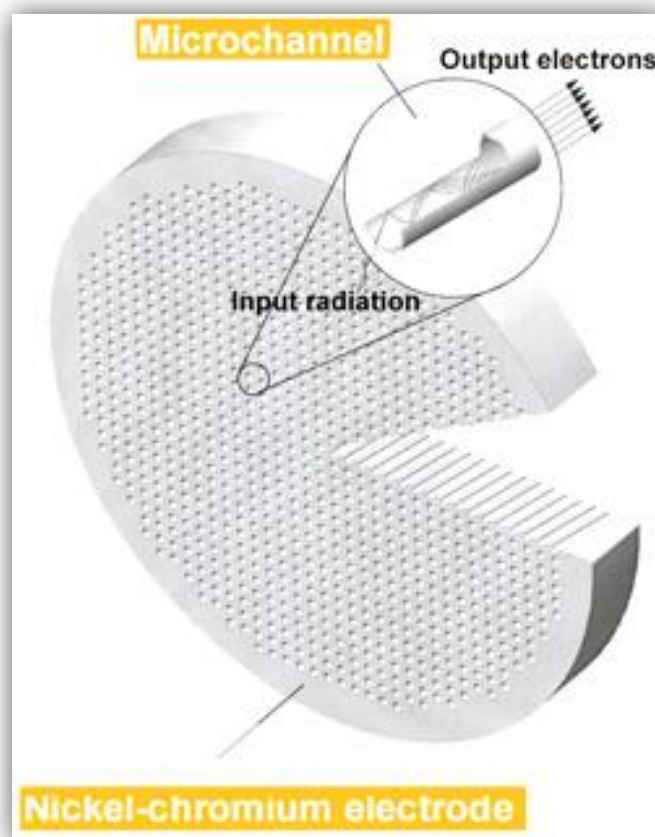
Comparison of bare, Ni-coated and Ir-coated reflectivities at 3.1 keV. Daresbury SRS Beamline 3.4

Slide G.W. Fraser TPC workshop

Εικόνα 2.3 Διαγράμματα ανακλαστικότητας – γωνίας πρόσκρουσης uncoated, Ni-coated και Ir-coated MicroChannel Plates (Πηγή: Esther Ferrer Ribas for the MicroMegas Group Collaboration Meeting Article)

2.2 ΕΙΔΗ MICROCHANNEL PLATES

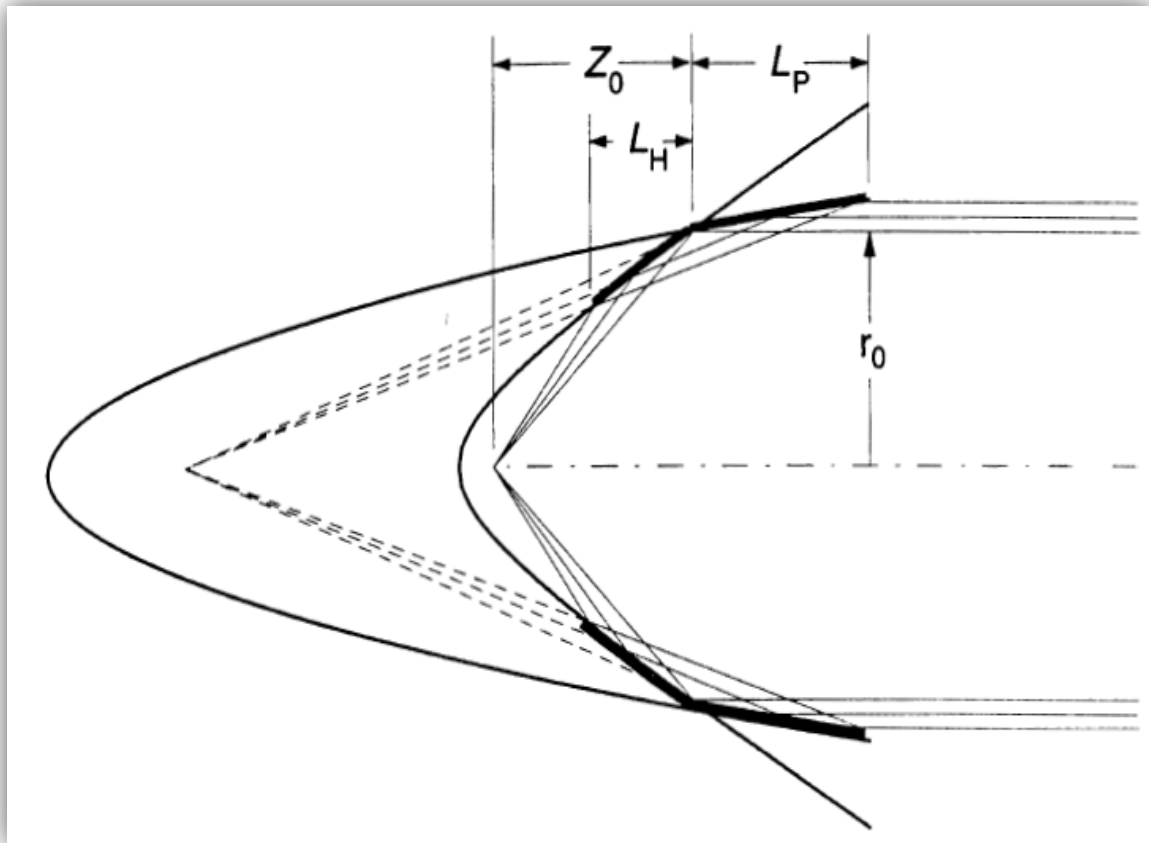
Όπως έχει αναφερθεί τα MicroChannel Plates αρχικά αναπτύχθηκαν σαν φωτοπολλαπλασιαστές (εικόνα 2.4) και όχι σαν οπτικές συσκευές για την εστίαση των ακτίνων Χ. Στην πραγματικότητα τα MCPs που μπορούν να εστιάσουν τις ακτίνες Χ αποτέλεσαν μια εξέλιξη των μονοδιαυλικών ή πολυδιαυλικών συστημάτων που χρησιμοποιούνταν ήδη για την καθοδήγηση και επεξεργασία των ακτίνων Χ. Έτσι εμφανίστηκαν αρκετά είδη μικροδιαυλικών πλακιδίων.



Εικόνα 2.4 Μικροδιαυλικό πλακίδιο (φωτοπολλαπλασιαστής) της Photonis με κανάλια κυκλικής διατομής (Πηγή: Photonis SAS)

Ένα από τα πιο αντιπροσωπευτικά είδη πολυδιαυλικών πλακιδίων είδη είναι τα Wolter type (6), τα οποία έχουνε χρησιμοποιηθεί σε αρκετά τηλεσκόπια και αποτελού-

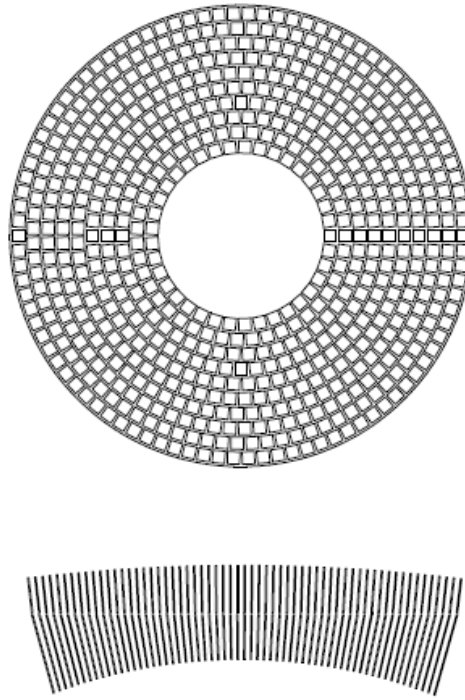
νται από δύο ομόκεντρα κωνικά τμήματα (ένα σε σχήμα παραβολής και ένα σε σχήμα υπερβολής, ή ένα σε σχήμα παραβολής και ένα σε σχήμα έλλειψης⁶). Ο πιο συνηθισμένος τύπος (Wolter type I) αποτελείται από ένα τμήμα παραβολής και ένα τμήμα υπερβολής (εικόνες 2.5, 2.6).



Εικόνα 2.5 Γεωμετρία εστίασης ενός μικροδιαυκτικού πλακιδίου Wolter type I. Η παράλληλη ακτίνα έρχεται από τα δεξιά και ανακλάται πρώτα από την παραβολική επιφάνεια και στην συνέχεια από την υπερβολική επιφάνεια σε μικρές γωνίες (grazing incidence). (Πηγή: Handbook of Optics 2nd Edition Vol. 3)

⁶ Το κριτήριο επιλογής του τύπου της καμπύλης είναι η αποφυγή σφαλμάτων στην εστίαση, όπως για παράδειγμα η σφαιρική εκτροπή της ακτινοβολίας (spherical aberrations)

Wolter Type 1

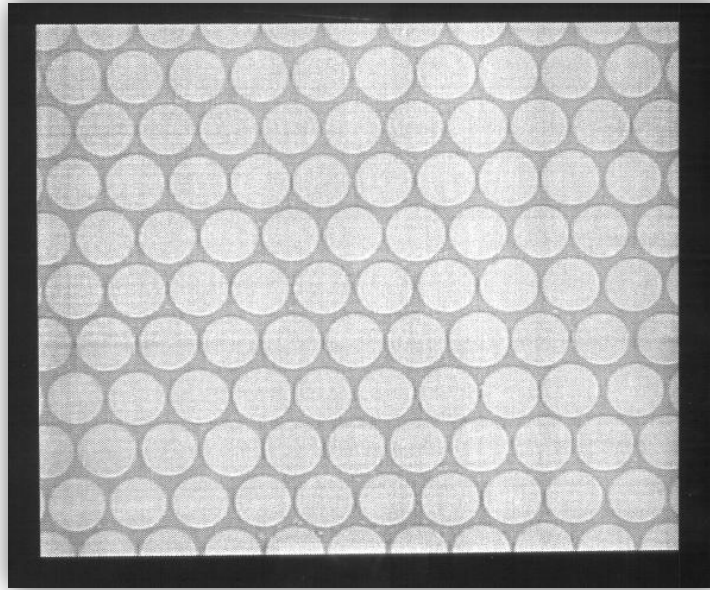


Εικόνα 2.6 Πρόσοψη και τομή ενός MicroChannel Plate Wolter type I (Πηγή: MicroChannel Plate X-Ray Optics, G.W.Fraser).

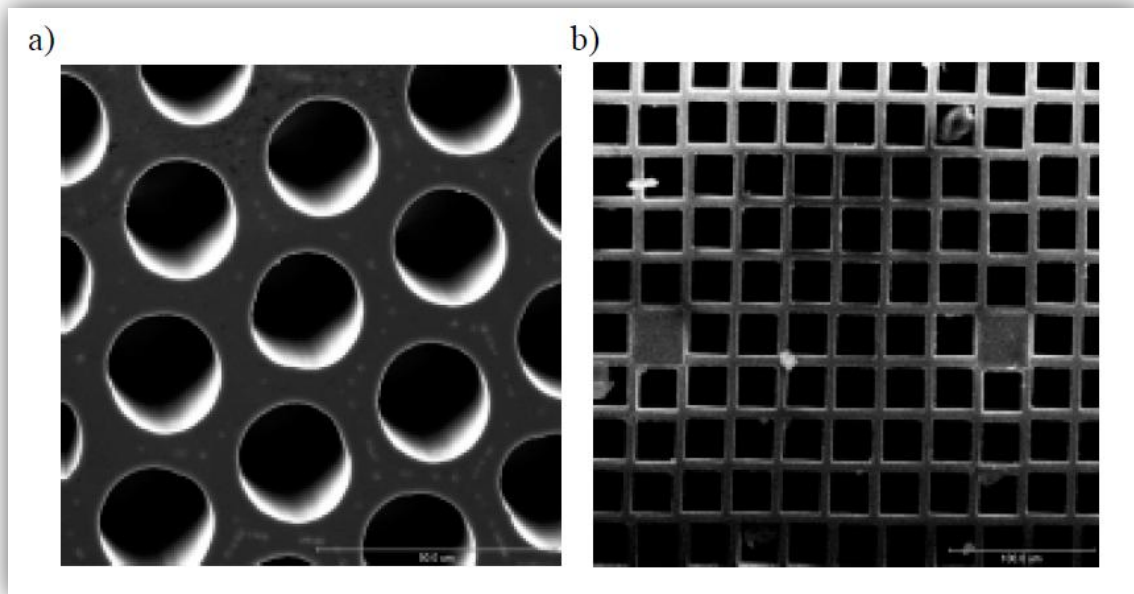
Τα MicroChannel Plates μπορούνε να έχουνε διαύλους είτε κυκλικής είτε τετραγωνικής διατομής, παράλληλους μεταξύ τους ή προσανατολισμένους ακτινικά σε καμπύλη συγκεκριμένης ακτίνας. Στις παρακάτω εικόνες παρατίθενται κάποια είδη MCPs.



Εικόνα 2.7 Μεγέθυνση ενός MicroChannel Plate με κανάλια τετραγωνικής διατομής. (Πηγή: διαδικτυακός ιστότοπος)



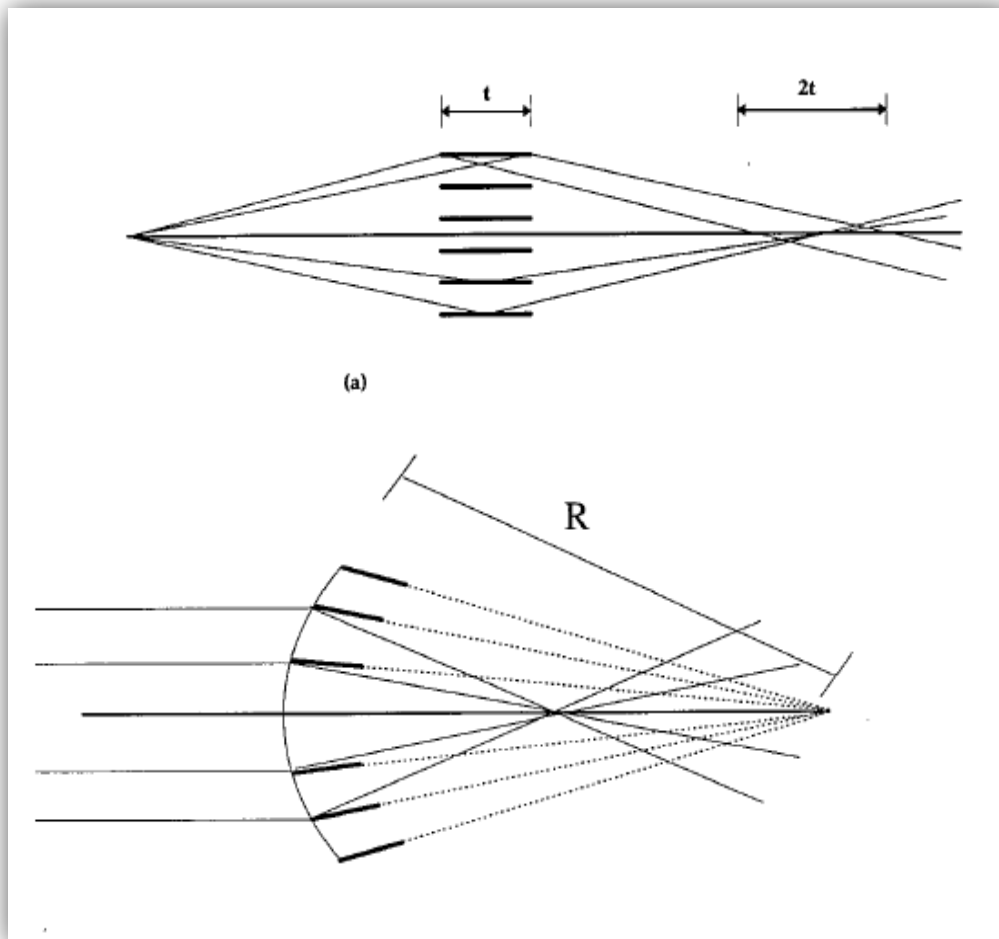
Εικόνα 2.8 Φωτομικρογραφία ενός MCP της Philips Photonics. Τα κυκλικά κανάλια έχουν διάμετρο 12,5 μm και 15 μm απόσταση μεταξύ τους. Για σύγκριση η ανθρώπινη τρίχα έχει 60 - 80 μm διάμετρο. (Πηγή: διαδικτυακός ιστότοπος <http://he-www.harvard.edu/HRC/mcp/mcp.html>)



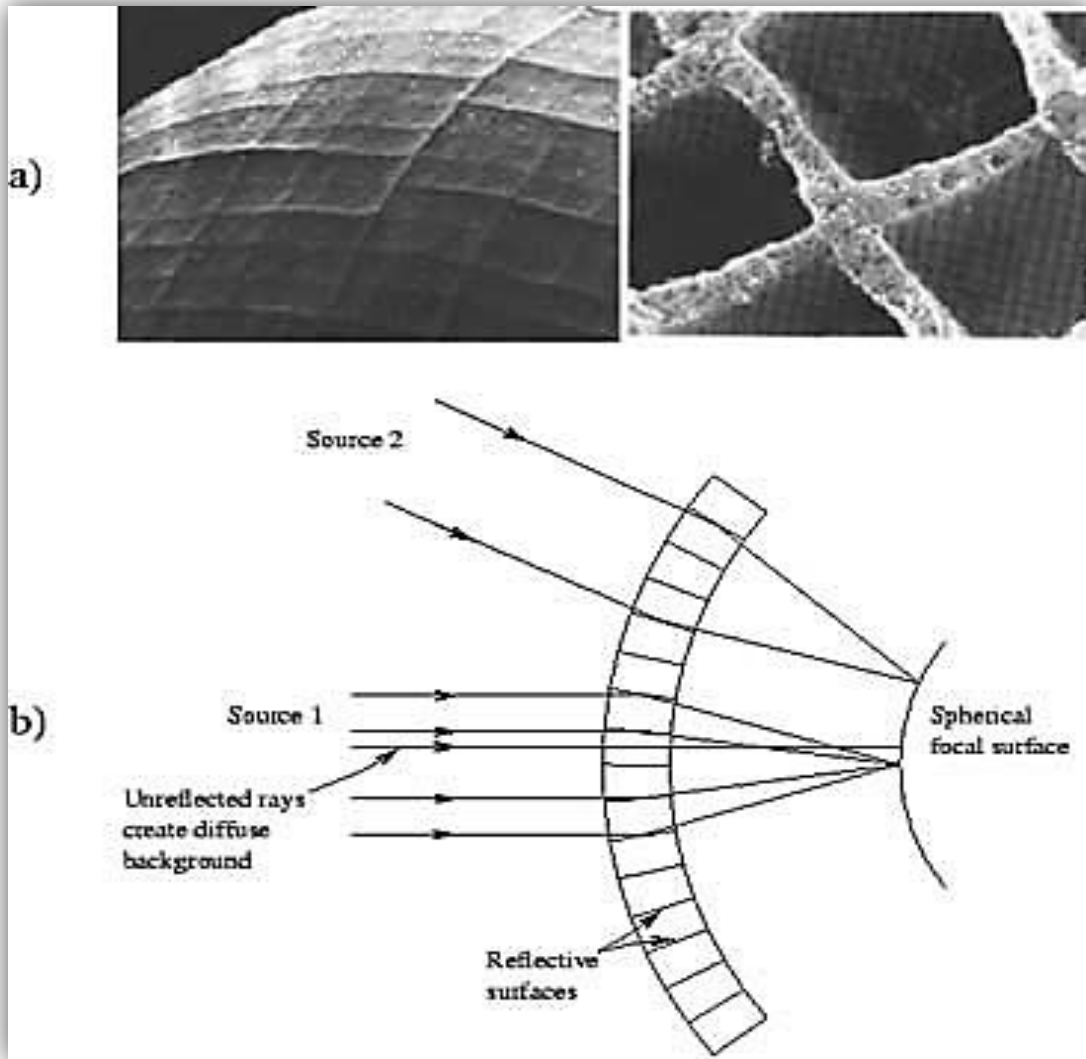
Εικόνα 2.9 Μεγέθυνση των καναλιών δύο μικροδιαλυκίων πλακιδίων. Στην περίπτωση a) τα κανάλια είναι κυκλικής διατομής, ενώ στην b) τετραγωνικής. Κάποια κανάλια τετραγωνική διατομής είναι συμπαγή και κλειστά για να απορροφούν τις ακτίνες X που περνάνε από τα τοιχώματα του πλακιδίου. (Πηγή: Imaging X-Ray Fluorescence Using MicroChannel Plates (MCP) Optics, Melissa Skala)

2.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΕΣΤΙΑΚΩΝ MICROCHANNEL PLATES

Η αρχή λειτουργίας των εστιακών μικροδιαυλικών πλακιδίων βασίζεται στην φύση και πιο συγκεκριμένα στο τρόπο λειτουργίας του οπτικού συστήματος του αστακού (Lobster). Η βασική ιδέα φαίνεται στην εικόνα 2.10. Στην (a) περίπτωση παρατηρούμε μία point-to-point εστίαση χρησιμοποιώντας μια σειρά επίπεδων ανακλαστικών επιφανειών. Στην περίπτωση, που θέλουμε να εστιάσουμε ένα μακρινό αντικείμενο οι επιφάνειες θα πρέπει να είναι καμπυλωμένες (περίπτωση (b)), όπως στην περίπτωση του ματιού του αστακού (εικόνα 2.11).



Εικόνα 2.10 a) Point-to-point εστίαση, b) Εστίαση παράλληλης δέσμης (Πηγή: X-Ray focusing with lobster eye Optics: A comparison of theory with experiment article)

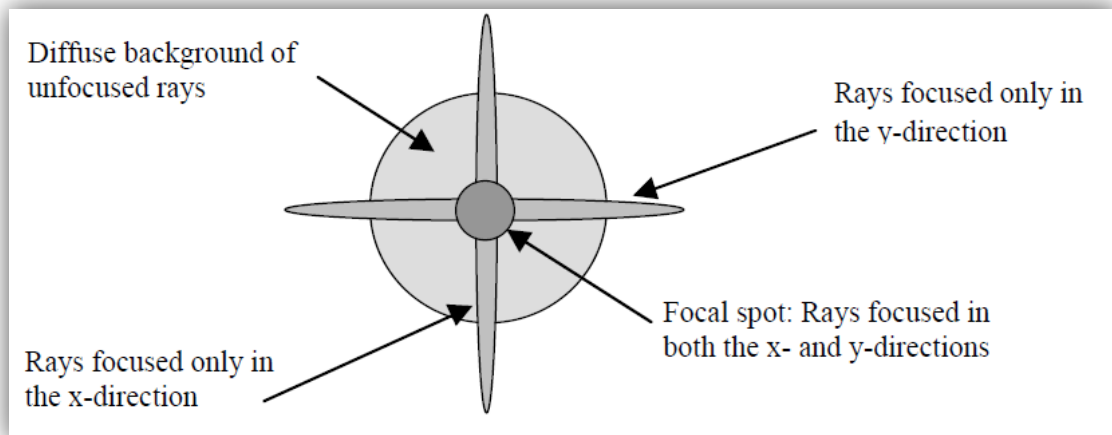


Εικόνα 2.11 (α) Μεγέθυνση του ματιού του αστακού, (β) Τρόπος λειτουργίας του ματιού του αστακού (Πηγή: Lobster eye Optics article)

Το MCP αποτελείται από μια διάταξη τετραγωνικών διαύλων. Οι ακτίνες που προσκρούουν στα εξωτερικά τοιχώματα της πρόσοψης του MCP χάνονται. Από αυτές, όμως, που εισέρχονται στα κανάλια του, ένα μέρος ανακλάται στις δύο κάθετες επιφάνειες του διαύλου⁷ και οδηγείται στο εστιακό σημείο, ένα άλλο μέρος ανακλάται μόνο από μία από

⁷ Ανάλογα με την κατασκευή του MCP η εστίαση μπορεί να επιτευχθεί και με μία μόνο ανάκλαση της δέσμης στα τοιχώματα των διαύλων

τις δύο επιφάνειες και εστιάζεται μόνο κατά μια διεύθυνση δημιουργώντας έτσι μία γραμμή που περνά από την εστία και ένα τρίτο μέρος περνά δια μέσω των διαύλων χωρίς να ανακλαστεί δημιουργώντας ένα μη εστιασμένο υπόβαθρο (εικόνα 2.12). Σημειώνεται ότι ανακλάσεις μεγαλύτερης τάξεως μπορεί να εμφανιστούν αλλά τα φωτόνια τελικά καταλήγουν σε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις.

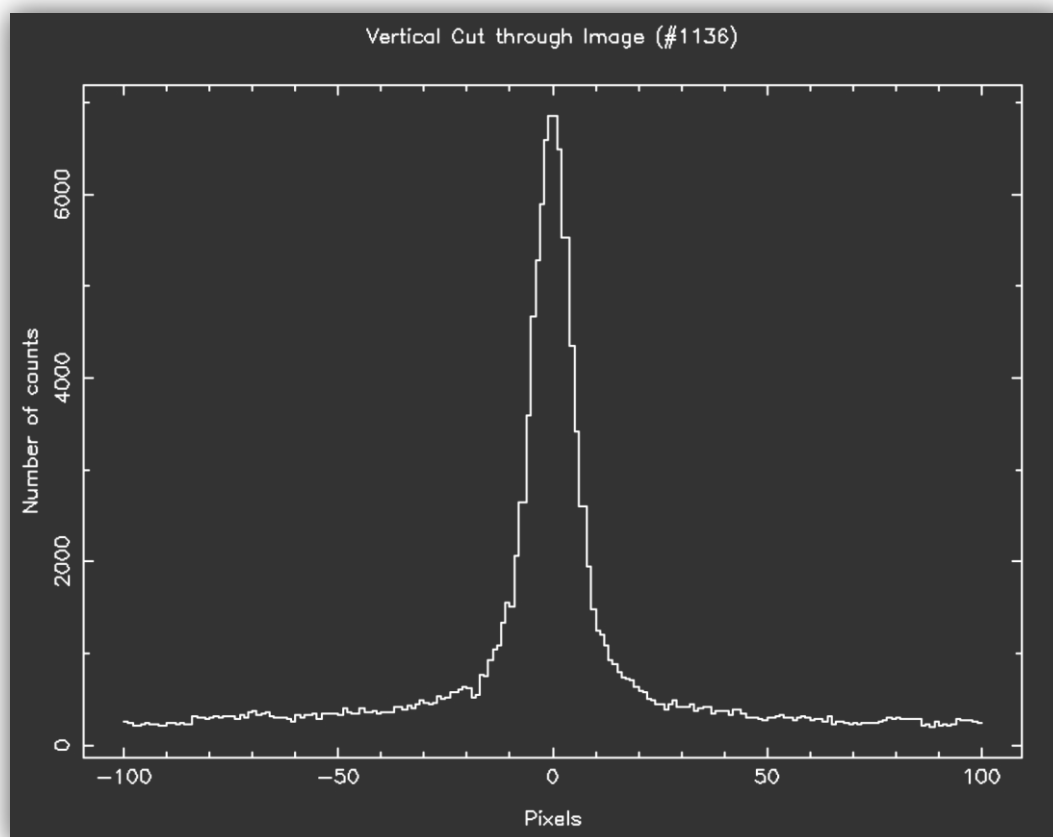


Εικόνα 2.12 Περιοχές εστιαζόμενων φωτονίων (Πηγή: Imaging X-Ray Fluorescence Using MicroChannel Plates (MCP) Optics, Melissa Skala)

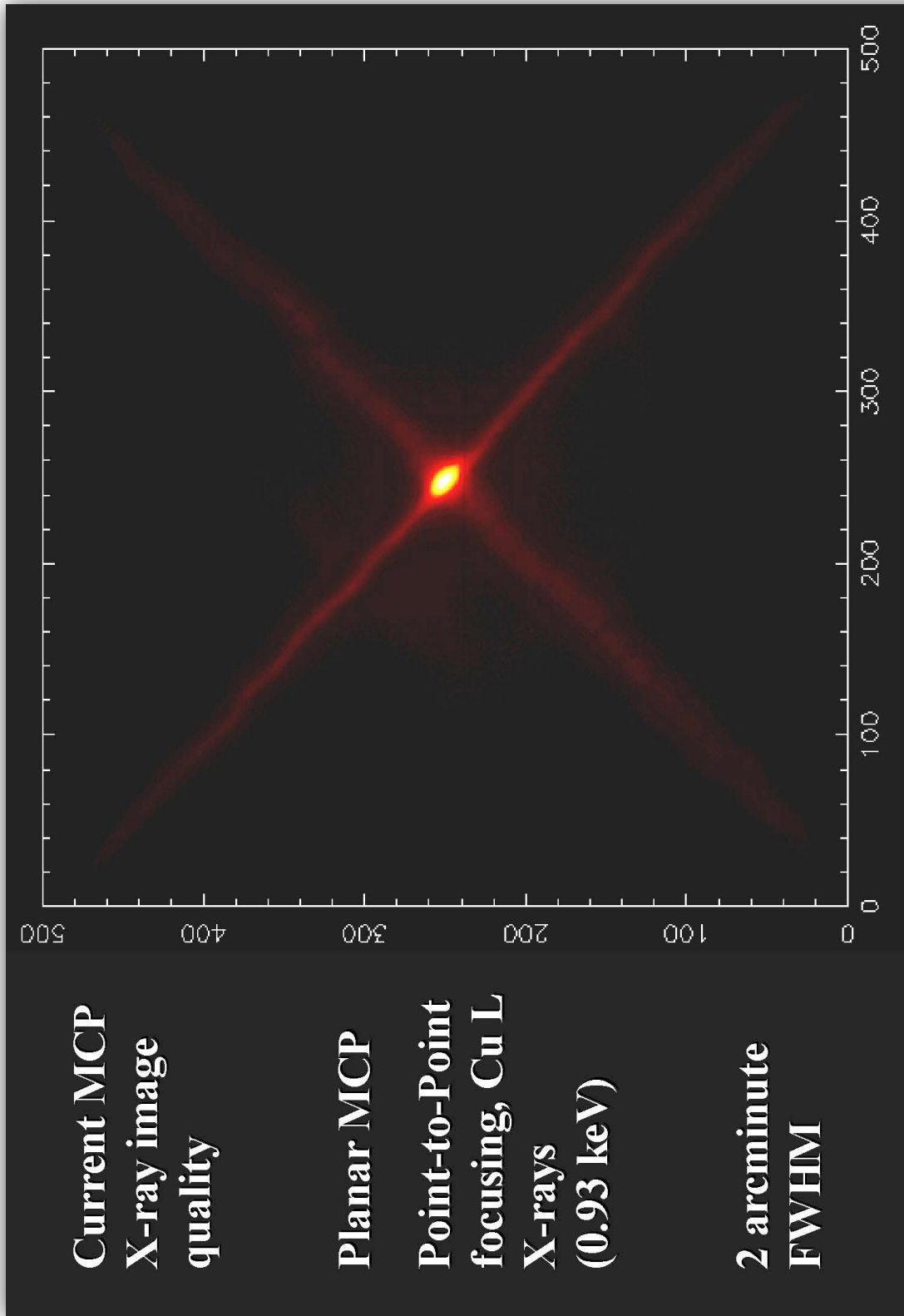
Η εικόνα της εστίασης, τελικά, αποτελείται από ένα έντονο εστιακό σημείο (spot), ένα πιο αχνό σταυρό και ένα ακόμη πιο αχνό υπόβαθρο (εικόνες 2.12, 2.14). Ο αριθμός των φωτονίων που αντιστοιχούνε στις παραπάνω περιοχές εξαρτάται από την αναλογία μήκος-προς-πλευρά του καναλιού (side-to-length ratio). Για ένα φακό με ιδανική αναλογία και 100% ανακλαστικότητα, θεωρητικά το 34,3% των φωτονίων εστιάζονται στο κέντρο, το 24,3% καταλήγουν σε κάθε ένα σκέλος του σταυρού και το 17,2% δεν εστιάζεται καθόλου δημιουργώντας το υπόβαθρο⁸. Πρέπει να επισημανθεί ότι λόγω της συμμετρίας των τηλεσκοπίων πολλών διατάξεων MicroChannel Plates η εστίαση επιτυγχάνεται το ίδιο

⁸ Οι τιμές είναι ενδεικτικές παρμένες από ήδη υπάρχουσα μελέτη σε MCP παρόμοιας κατασκευής με αυτή του εργαστηριακού

καλά ανεξάρτητα της διεύθυνσης πρόσπτωσης της ακτινοβολίας και αυτή είναι μία από τις ιδιότητές τους που τις καθιστά ικανές να χρησιμοποιηθούν ως τηλεσκόπια.



Εικόνα 2.13 Κατανομή έντασης (counts) μιας εστιασμένης εικόνας MCP (Πηγή: Esther Ferrer Ribas for the MicroMegas Group Collaboration Meeting Article)



Slide G.W. Fraser TPC workshop

Εικόνα 2.14 Κανονικοποιημένη εικόνα εστίασης ενός MicroChannel Plate με διαύλους τετραγωνικής διατομής (Πηγή: Esther Ferrer Ribas for the MicroMegas Group Collaboration Meeting Article)

2.4 ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΥΛΗΣ

2.4.1 ΔΕΙΚΤΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

Ο δείκτης διάθλασης n αποτελεί ένα μέτρο του πόσο γρήγορα κινείται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μέσα σε ένα υλικό.

$$n = \frac{c}{v}$$

Όπου c : η ταχύτητα του φωτός στο κενό και v η ταχύτητά του στο υλικό. Εύκολα μπορεί να υποθεθεί ότι οι τιμές του δείκτη διάθλασης (n) είναι πάντα μεγαλύτερες της μονάδος. Παρ' όλα αυτά όπως θα δούμε αυτό δεν ισχύει πάντα, χωρίς όμως να σημαίνει ότι έρχεται σε αντίθεση με την θεωρία της σχετικότητας του A. Einstein⁹.

Για να γίνεται κατανοητό θα πρέπει να εισάγουμε δύο έννοιες της κυματικής: την ταχύτητα φάσης v_{ph} (phase velocity) και την ταχύτητα κυματοομάδας v_g (group velocity). Η ταχύτητα κυματοομάδας εκφράζει το πόσο γρήγορα μεταβάλλεται το πλάτος της ταλάντωσης, ενώ η ταχύτητα φάσης το πόσο γρήγορα κινείται το κύμα στον χώρο. Μια ενδιαφέρουσα διαφορά στην υφή των δύο αυτών ταχυτήτων είναι ότι η ταχύτητα φάσης δεν μεταφέρει ενέργεια, σε αντίθεση με την ταχύτητα ομάδος. Συνεπώς, η ταχύτητα φάσης μπορεί να πάρει τιμές μεγαλύτερες από αυτή του φωτός μιας και δε μεταφέρει ενέργεια. Επανέρχοντας, τώρα στον δείκτη διάθλασης και δεδομένου ότι όταν δεν υπάρχει απορρόφηση, σε ένα κύμα που δεν παραμορφώνεται καθώς διαδίδεται, η ταχύτητα φάσης είναι αυτή που καθορίζει το πόσο γρήγορα διαδίδεται μια πληροφορία (όπως για πα-

⁹ Η σχετική θεωρία προβλέπει ότι η μεγαλύτερη ταχύτητα με την οποία μάζα ή ενέργεια μπορεί να ταξιδέψει στο κενό είναι αυτή του φωτός.

ράδειγμα ένας παλμός φωτός μέσα σε μια οπτική ίνα) και γι αυτό το λόγο ο δείκτης διάθλασης μπορεί να παίρνει τιμές μικρότερες της μονάδας.

Στην πραγματικότητα ο δείκτης διάθλασης είναι ένας μιγαδικός αριθμός ίσος με

$$\hat{n} = n + ik$$

, όπου το πραγματικό μέρος σχετίζεται με την ταχύτητα φάσης και το φανταστικό με την απορρόφηση του κύματος από το υλικό. Και τα δύο αυτά μεγέθη εξαρτούνται από τη συχνότητα του κύματος.

2.4.2 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΥΛΗΣ

Μπορούμε να εκφράσουμε το φως, που είναι ένα είδος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ως ένα επίπεδο ηλεκτρικό κύμα της μορφής

$$E(\vec{x}, t) = E_0 e^{i(\vec{k}\vec{x} - \omega t)}$$

το οποίο εισέρχεται σε ένα στερεό υλικό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτρικών δίπολων στο εσωτερικό του και αυτό διότι τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τον πυρήνα των ατόμων (αρνητικά ηλεκτρικά φορτία) θα μετακινηθούν ακολουθώντας τις μεταβολές στο ηλεκτρικό πεδίο. Τα επαγόμενα ηλεκτρικά δίπολα θα έχουνε διπολική ροπή ίση με

$$\vec{p} = \alpha \vec{E}$$

, όπου α είναι η ατομική πολωσιμότητα και \vec{E} το διάνυσμα της έντασης.. Συνεπώς, για N αριθμό ατόμων (δίπολων) ανά μονάδα όγκου προκύπτει πόλωση \vec{P} ίση με:

$$\vec{P} = N\vec{p}$$

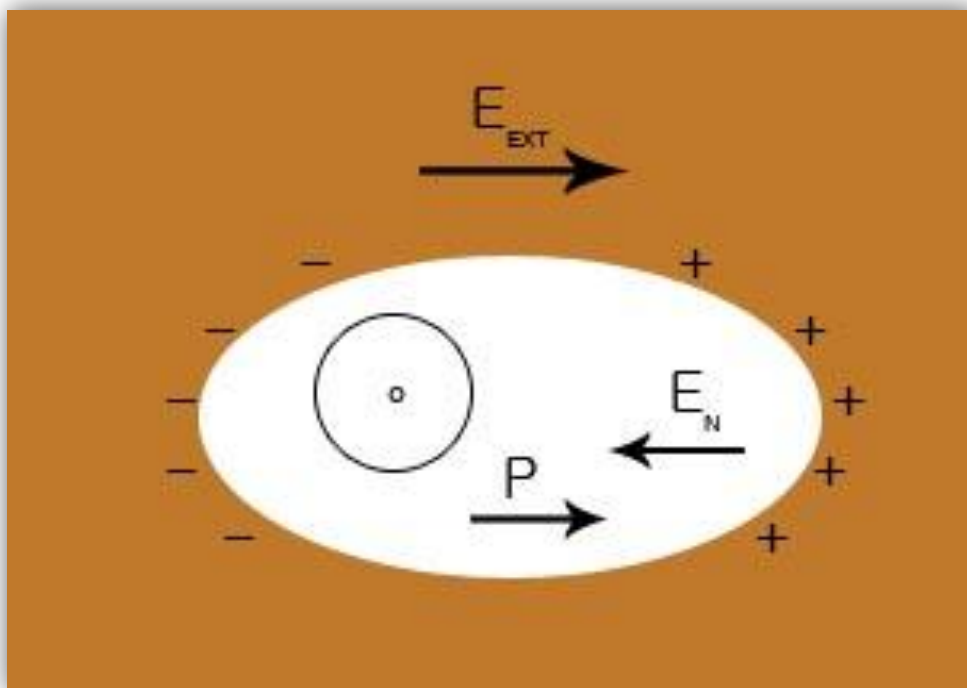
Σ' ένα συγκεκριμένο σημείο-δίπολο τώρα μέσα στο υλικό θεωρούμε το τοπικό ηλεκτρικό πεδίο \vec{E}_{loc} . Εκεί η πόλωση θα είναι ίση με:

$$\vec{P} = \epsilon_0 N \alpha \vec{E}_{loc} \stackrel{\text{def}}{=} \epsilon_0 \chi \vec{E}_{loc}$$

,όπου ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά στο κενό, χ η διηλεκτρική επιδεκτικότητα¹⁰ και ισχύει

$$\epsilon_r = 1 + \chi$$

ϵ_r η σχετική διηλεκτρική σταθερά. Για τον υπολογισμό του τοπικού πεδίου ακολουθούμε την εξής διαδικασία.



Εικόνα 2.15. Τα διανύσματα των ηλεκτρικών πεδίων στο προς μελέτη στερεό

Στην εικόνα 2.15 φαίνεται το στερεό υλικό προς μελέτη, στο οποίο έχουμε δημιουργήσει μια εικονική σπή. Θέλουμε να υπολογίσουμε το τοπικό ηλεκτρικό πεδίο στο άτομο που φαίνεται στο σχήμα. Το εξωτερικά εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο \vec{E}_{ext} επάγει ηλεκτρικά

¹⁰ Στην πραγματικότητα η διηλεκτρική επιδεκτικότητα δεν είναι ένα μονοδιάστατο μέγεθος αλλά ένας τένσορας. Λόγω συμμετρίας, όμως, της κρυσταλλικής δομής την οποία μελετούμε μπορεί να απλοποιηθεί.

δίπολα στο εσωτερικό του στερεού. Έτσι, στα τοιχώματα της κοιλότητας εμφανίζονται ηλεκτρικά φορτία, τα οποία με τη σειρά τους παράγουν ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο \vec{E}_N (πεδίο εκπόλωσης). Αυτό το πεδίο είναι άμεσα εξαρτώμενο από το σχήμα του δείγματος και στην προκειμένη περίπτωση ίσο με:

$$\vec{E}_N = -\frac{1}{\epsilon_0} N\vec{p}$$

,όπου N ο παράγοντας εκπόλωσης. Ένα επιπλέον ηλεκτρικό πεδίο που εμφανίζεται είναι το πεδίο Lorentz, το οποίο οφείλεται στην πόλωση σε ατομικό επίπεδο, διότι και εκεί έχουμε επαγόμενα φορτία και είναι ίσο με:

$$\vec{E}_L = -\frac{1}{3\epsilon_0} \vec{p}$$

Τέλος, πρέπει να λάβουμε υπόψη τις αλληλεπιδράσεις των δίπολων μεταξύ τους μέσα στην κοιλότητα. Σε κυβικά κρυσταλλικά συστήματα¹¹ λόγω συμμετρίας αυτές οι αλληλεπιδράσεις εξουδετερώνουν η μία την άλλη και επομένως δεν δημιουργούν κάποιο επιπλέον πεδίο. Συνεπώς, το τοπικό ηλεκτρικό πεδίο θα είναι το διανυσματικό άθροισμα όλων των παραπάνω και ίσο με

$$\vec{E}_{loc} = \vec{E}_{ext} - \frac{1}{\epsilon_0} N\vec{p} + \frac{1}{3\epsilon_0} \vec{p} = \vec{E} + \frac{1}{3\epsilon_0} \vec{p}$$

Συνδυάζοντας τα παραπάνω η πόλωση θα ισούται με:

$$\vec{P} = \epsilon_0 N\alpha \vec{E}_{loc} = \epsilon_0 \frac{N\alpha}{1 - \frac{1}{3}N\alpha} \vec{E} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \Rightarrow \chi = \frac{N\alpha}{1 - \frac{1}{3}N\alpha}$$

Τώρα, μπορούμε να συνεχίσουμε με τον υπολογισμό της διηλεκτρικής σταθεράς.

¹¹ Κυβικά κρυσταλλικά συστήματα όπως τα simple cubic (sc), face centered cubic (fcc), body centered cubic (bcc) παρουσιάζουν υψηλή συμμετρία στη δομή τους (9)

Θεωρούμε ότι τα ηλεκτρόνια ταλαντώνονται σύμφωνα με το μοντέλο του ταλαντωτή του Lorentz και ακολουθούν την παρακάτω εξίσωση κίνησης:

$$m\ddot{x} + m\beta\dot{x} + m\omega_0^2x = -eE_{loc,0}e^{-i\omega t}$$

Μια λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης είναι η

$$x_{(t)} = x_0e^{-i\omega t}$$

Αντικαθιστώντας και λύνοντας ως προς x βρίσκουμε:

$$x_{(t)} = -\frac{e}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\beta\omega} E_{loc}$$

Και η ατομική πολωσιμότητα προκύπτει:

$$\alpha_{(\omega)} = -\frac{e^2}{\epsilon_0 m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\beta\omega}$$

Εφ' όσων

$$\chi = \frac{N\alpha}{1 - \frac{1}{3}N\alpha}$$

$$\epsilon = 1 + \chi$$

Προκύπτει:

$$\epsilon_{(\omega)} = 1 + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \frac{1}{\omega_1^2 - \omega^2 - i\beta\omega}$$

όπου θέσαμε

$$\omega_1^2 = \omega_0^2 - \frac{Ne^2}{3\epsilon_0 m}$$

Η διηλεκτρική σταθερά προέκυψε μιγαδικός αριθμός και χωρίζοντας το πραγματικό με το φανταστικό μέρος έχουμε:

$$\varepsilon'(\omega) = 1 + \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m} \frac{\omega_1^2 - \omega^2}{(\omega_1^2 - \omega^2)^2 + \beta^2 \omega^2}$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m} \frac{\beta \omega}{(\omega_1^2 - \omega^2)^2 + \beta^2 \omega^2}$$

Με

$$\hat{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega)$$

Γνωρίζουμε ότι

$$\hat{\varepsilon} = \hat{n}^2 = (n + i\kappa)^2 = n^2 - \kappa^2 + i2n\kappa$$

Και συνεπώς:

$$\varepsilon' = n^2 - \kappa^2, \varepsilon'' = 2n\kappa$$

Στα μέταλλα τώρα, τα οποία σύμφωνα με το μοντέλο του Drude, υπάρχει ένα νέφος ελεύθερων ηλεκτρονίων η εξίσωση κίνησης είναι:

$$m^* \ddot{x} + m^* \beta \dot{x} + 0 = -eE_{loc,0} e^{-i\omega t}$$

,όπου m^* είναι η ενεργή μάζα¹². Με τον ίδιο τρόπο βρίσκουμε:

$$x(t) = -\frac{e}{m^*} \frac{1}{\omega \left(\omega + i \frac{1}{\tau} \right)} E$$

Όπου αντικαταστήσαμε το συντελεστή απόσβεσης β με $1/\tau$, όπου τ ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών συγκρούσεων μεταξύ ηλεκτρονίων. Για N αριθμό αγώγιμων ηλεκτρονίων βρίσκουμε:

¹² Με τον όρο ενεργή μάζα σε γενικές γραμμές εκφράζουμε την επίπτωση του κρυσταλλικού πλέγματος και κατά συνέπεια του ηλεκτρικού δυναμικού που παράγει, στην κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων των μετάλλων.

$$P = -exN = -\frac{Ne^2}{m^*} \frac{1}{\omega \left(\omega + i \frac{1}{\tau} \right)} E$$

$$\chi_{e,free} = -\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m^*} \frac{1}{\omega \left(\omega + i \frac{1}{\tau} \right)}$$

Τώρα η διηλεκτρική σταθερά εξαρτάται όχι μόνο από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια αλλά και από τα δέσμια στο άτομο. Οπότε:

$$\epsilon = 1 + \chi_{e,free} + \chi_{e,bound} = \epsilon_{e,bound} + \chi_{e,free}$$

$$\epsilon = \epsilon_{e,bound} \left(1 - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 \epsilon_{e,bound} m^*} \frac{1}{\omega \left(\omega + i \frac{1}{\tau} \right)} \right)$$

Και ορίζοντας την συχνότητα πλάσματος ίση με:

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 \epsilon_{e,bound} m^*}$$

Προκύπτει:

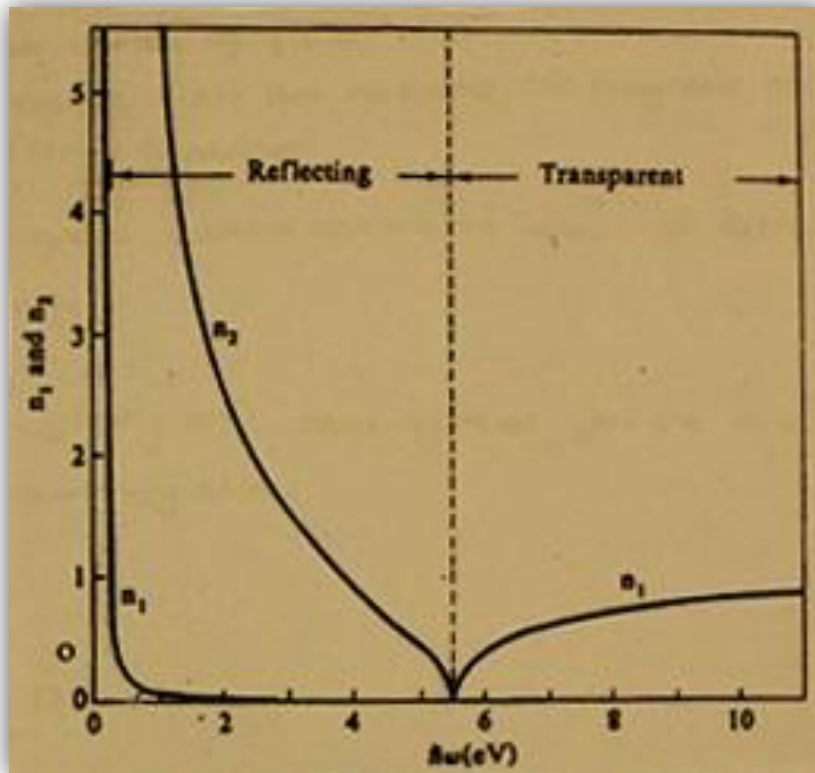
$$\epsilon = \epsilon_{e,bound} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)$$

Αγνοώντας τον όρο $1/\tau$ αφού μία τυπική τιμή του τ είναι 10^{-3} sec και για την κυκλική συχνότητα στην περιοχή των ακτίνων Χ για παράδειγμα 10^{18} sec.

Αυτό που προκύπτει συνεπώς είναι ότι για ακτινοβολίες με κυκλική συχνότητα μικρότερη της συχνότητας πλάσματος, π.χ. ακτίνες Χ, η διηλεκτρική σταθερά παίρνει αρνητική τιμή. Αυτό συνεπάγεται ότι ο δείκτης διάθλασης είναι φανταστικός αριθμός (μηδενικό πραγματικό μέρος). Έτσι, από τον ορισμό του συντελεστή ανάκλασης (Fresnel) βρίσκουμε:

$$R = \frac{(n-1)^2 + \kappa^2}{(n+1)^2 + \kappa^2} \cong 1$$

Που σημαίνει ότι τα μέταλλα στην περιοχή ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών με συχνότητα μικρότερη από τη συχνότητα πλάσματος τείνουν να ανακλούν όλη την εισερχόμενη ακτινοβολία.



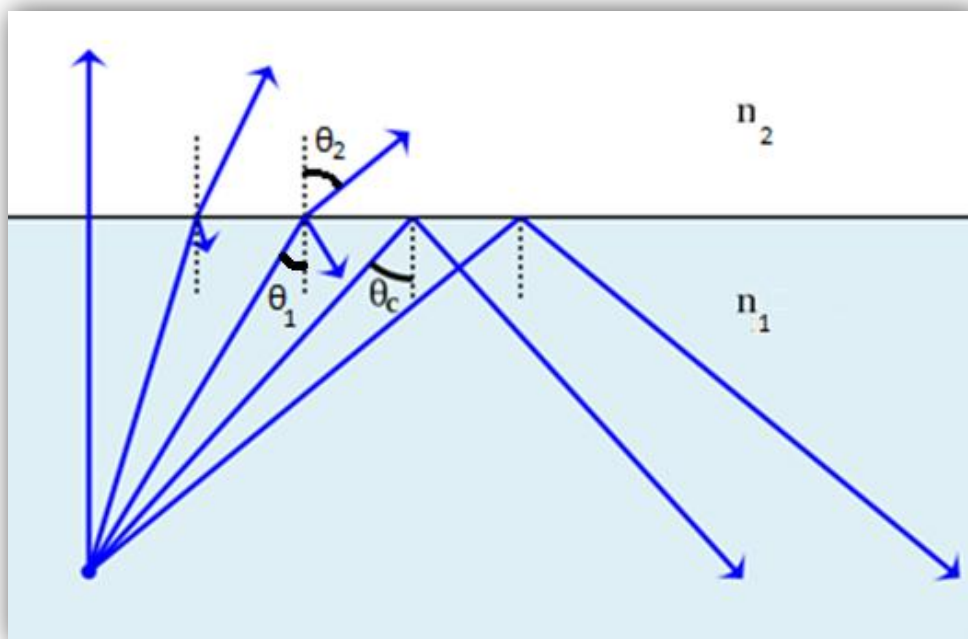
Εικόνα 2.16. Διάγραμμα του δείκτη διάθλασης των μετάλλων ως προς την ενέργεια της ακτινοβολίας

2.5 ΟΛΙΚΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήθηκε η αλληλεπίδραση ύλης και ακτίνων Χ και πως παράμετροι όπως η διηλεκτρική σταθερά και ο δείκτης διάθλασης μπορούν να αλλάξουν. Σε αυτό θα γίνει μια μελέτη της ανάκλασης στα τοιχώματα των μικροδιαύλων.

Θεωρούμε μια δέσμη ακτίνων η οποία προσπίπτει στην διεπιφάνεια δύο υλικών (εικόνα 2.17). Ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης και τους δείκτες διάθλασης των υλικών

η δέσμη είτε θα διαθλαστεί στο δεύτερο υλικό είτε θα ανακλαστεί στην διεπιφάνεια είτε και τα δύο ταυτοχρόνως. Ο νόμος που διέπει αυτό το φαινόμενο είναι αυτός του Snell.



Εικόνα 2.17 Δέσμη ακτίνων που προσπίπτει στην διεπιφάνεια δύο υλικών υπό διαφορετικές γωνίες (Πηγή: www.wikipedia.org)

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι για να ανακλαστεί πλήρως η δέσμη της ακτινοβολίας αρκεί να θέσουμε την γωνία θ_2 ίση με 90° . Από τον νόμο του Snell θα προκύψει:

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ \Rightarrow \theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

Η ελάχιστη γωνία (που σχηματίζεται από την δέσμη και την κάθετο στην διεπιφάνεια) που απαιτείται για ολική ανάκλαση στην διεπιφάνεια αέρα – μετάλλου είναι $\theta_c = \sin^{-1} n_\mu$ αφού ο δείκτης διάθλασης του αέρα είναι ίσος με 1. Ή διαφορετικά διατυπωμένο: Για να επιτύχουμε ολική ανάκλαση των ακτίνων X στα τοιχώματα των διαύλων, οι ακτίνες πρέπει να προσπίπτουν στα τοιχώματα υπό γωνίες μικρότερες από

$$\theta_{max} = 90^\circ - \theta_c = 90^\circ - \sin^{-1} n_\mu$$

3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ MICROCHANNEL PLATES

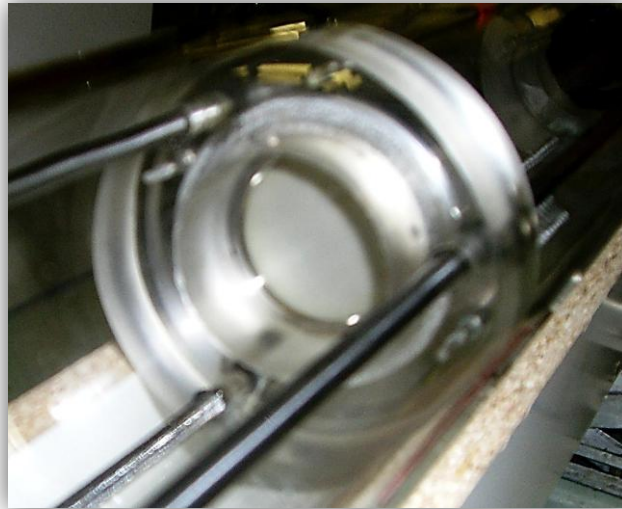
3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ MICROCHANNEL PLATES ΤΗΣ PHOTONIS

Στα εργαστηριακά πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δύο MicroChannel Plate κατασκευασμένα από την Photonis (πρώην Philips Photonics, Galileo and Burle) με πάνω από 30 χρόνια εμπειρίας στην κατασκευή τους. Ο τρόπος κατασκευής τους δεν διαφέρει από τα συμβατικά MCPs, όμως έχουν αναπτυχθεί προηγμένες μέθοδοι απομάκρυνσης του υαλώδους πυρήνα και γυαλίσματος του MCP με αποτέλεσμα να αποκτούν πάρα πολύ καλές ανακλαστικές ιδιότητες. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εργαστηριακών MCPs.

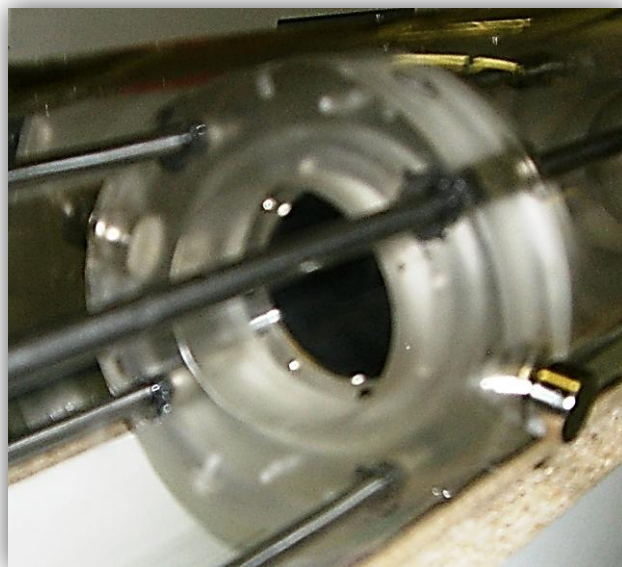
Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά MCP της Photonis

Διάμετρος	45 mm
Ενεργή διάμετρος	Min 40 +/- 0.05 mm
Αναλογία μήκος-προς-πλευρά καναλιού (Length-to-side ratio)	100:1
Πάχος πλακιδίου	2.0 +/- 0.02 mm
Διαστάσεις διατομής καναλιού	20 x 20 μm
Ανοικτή επιφάνεια	min. 59 %
Κατεύθυνση διαύλων ακτινικά σε καμπύλη ακτίνας	Θεωρητική τιμή 260 cm
Εστιακή απόσταση	Θεωρητική τιμή 130 cm

Σημειώνεται ότι τα κανάλια του ενός πλακιδίου είχαν επίστρωση ιριδίου ενώ του άλλου όχι. Στις εικόνες 3.1 και 3.2 διακρίνονται τα δύο εργαστηριακά MicroChannel Plates τοποθετημένα στις βάσεις στήριξής τους.



Εικόνα 3.1 Uncoated MicroChannel Plate της Photonis (πηγή: φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»).



Εικόνα 3.2 Ir-Coated MicroChannel Plate της Photonis (πηγή: φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»).

3.2 ΠΗΓΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

3.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ακτίνες Χ παράγονται πρωτίστως από την επιτάχυνση φορτισμένων σωματιδίων, από την διέγερση ηλεκτρονίων του πυρήνα των ατόμων, ή από την ακτινοβολία μέλανος σώματος όπως φαίνεται από το χαρακτηριστικό φάσμα εκπομπής πολύ θερμών πηγών όπως πλάσμα παραγόμενο από laser ή αστρικά σώματα. Ακτίνες Χ παράγονται, επίσης από την απότομη επιβράδυνση ηλεκτρονίων καθώς η κινητική ενέργεια εκπέμπεται σε μορφή φωτονίων (Bremsstrahlung radiation).

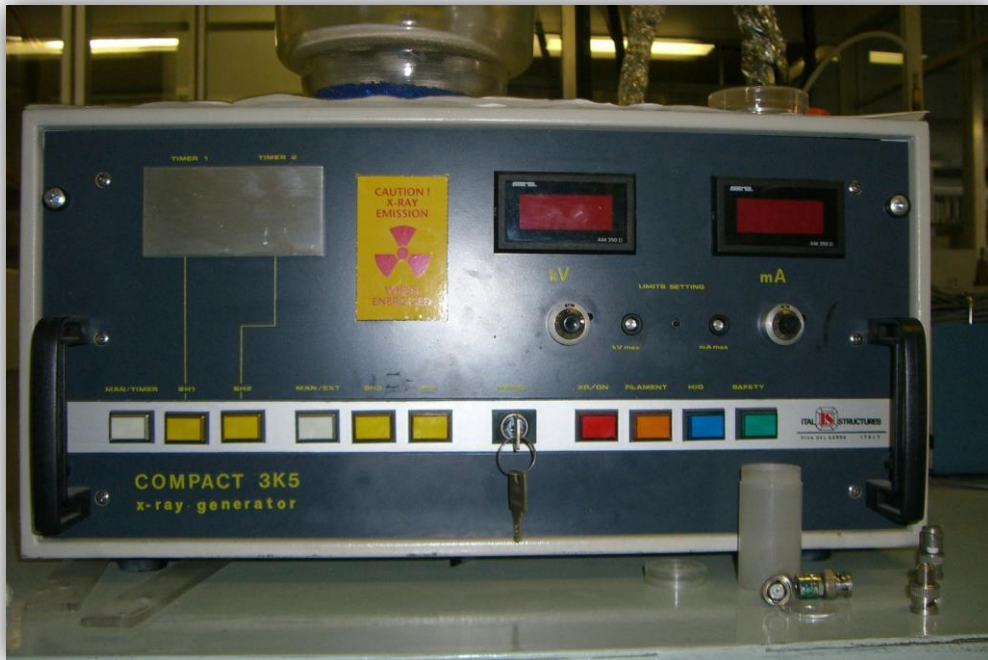
Η παραγωγή ακτίνων Χ με διέγερση ηλεκτρονίων του πυρήνα είναι ένα μηχανισμός παραγωγής χαρακτηριστικών γραμμών στο φάσμα εκπομπής συμβατικών πηγών ακτίνων Χ. Ένα ηλεκτρόνιο προσκρούει και διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο του ατόμου το οποίο και διαφεύγει από αυτό, δημιουργώντας έτσι μια οπή, η οποία με τη σειρά της καλύπτεται από ένα ηλεκτρόνιο εξωτερικής στοιβάδας. Η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των δύο σταθμών εκπέμπεται με την μορφή ενός φωτονίου ακτίνων Χ, η οποία είναι και χαρακτηριστική του υλικού.

3.2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΠΗΓΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Στο εργαστηριακό μας πείραμα χρησιμοποιήσαμε μια γεννήτρια ακτίνων Χ και βομβαρδίσαμε ένα δισκίο χαλκού. Η παρουσία του χαλκού θεωρήθηκε απαραίτητη για να φιλτράρουμε το ευρύ ενεργειακό φάσμα των ακτίνων Χ της γεννήτριας και να εκμεταλλευτούμε την K_{α} κορυφή στο φάσμα εκπομπής του χαλκού (8,05 keV).



Εικόνα 3.3 Στην εικόνα φαίνεται η εργαστηριακή πηγή ακτίνων Χ (πηγή: φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»).

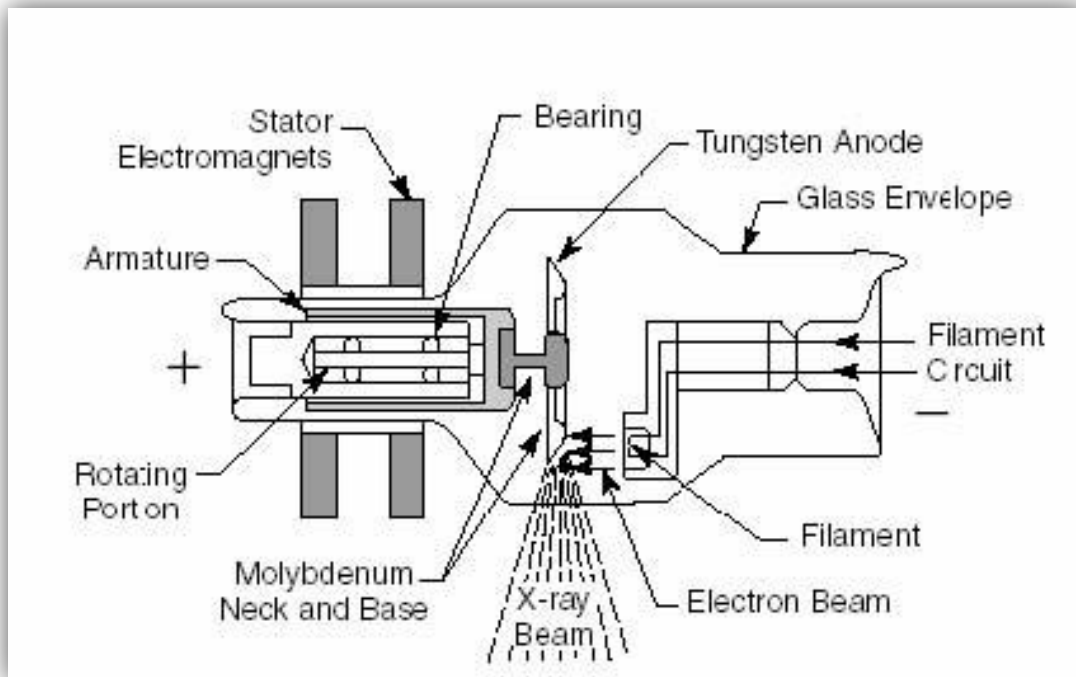


Εικόνα 3.4 Συσκευή ελέγχου της γεννήτριας ακτίνων Χ. (πηγή: φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»).



Εικόνα 3.5 Εργαστηριακή πηγή ακτίνων Χ (πηγή: φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»).

Όπως αναφέραμε οι ακτίνες Χ μπορούν να παραχθούν όταν ηλεκτρόνια με μεγάλη κινητική ενέργεια αλληλεπιδράσουν με την ύλη και μετατρέψουν την ενέργειά τους σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η λυχνία παραγωγής των ακτίνων Χ αποτελείται από μια πηγή ηλεκτρονίων, χώρο για την επιταχυνόμενη κίνηση των ηλεκτρονίων σε κενό, ένα ηλεκτρόδιο-στόχο και πηγή ενέργειας για την επιτάχυνση των ηλεκτρονίων (εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6 Σχηματική αναπαράσταση των μερών μιας γεννήτριας ακτίνων X (πηγή: Διαδικτυακός ιστότοπος).

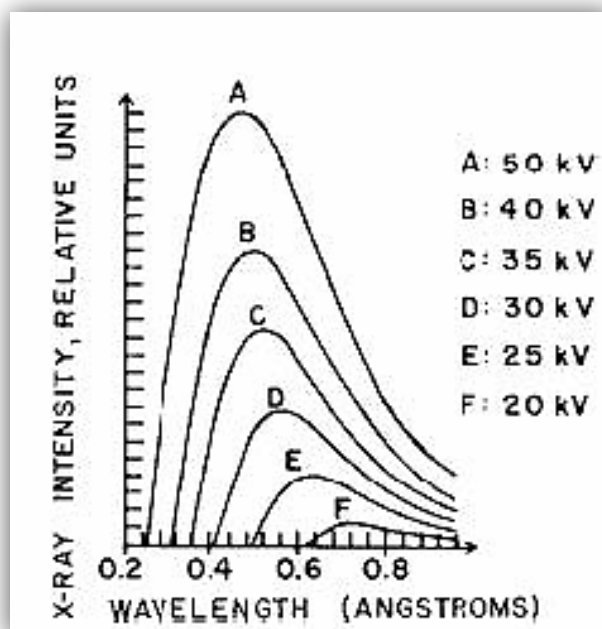
Η λυχνία είναι κατάλληλα θωρακισμένη (ώστε οι ακτίνες X να εξέρχονται μόνο από το ειδικό παράθυρο) και εξοπλισμένη με συστήματα ψύξης. Ειδικοί κατευθυντήρες διαμορφώνουν τη γεωμετρία της εξερχόμενης δέσμης και ειδικά φίλτρα-ηθομοί διαμορφώνουν την ποιότητα (τις ενέργειες) της εξερχόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η γεννήτρια είναι η πηγή ενέργειας για τη λειτουργία της λυχνίας και σε αυτήν ρυθμίζονται: (α) η τιμή τα διαφοράς δυναμικού που θα επιταχύνει τα ηλεκτρόνια (ενέργεια), (β) η τιμή της έντασης του ρεύματος που καθορίζει τον αριθμό των παραγομένων φωτονίων (ένταση) και (γ) ο χρόνος έκθεσης.

Η λυχνία είναι ουσιαστικά δύο ηλεκτρόδια στα άκρα ενός αερόκενου σωλήνα, τα οποία και δέχονται μια μεγάλη διαφορά δυναμικού (kV) για την επιτάχυνση των ηλεκτρονίων. Η κάθοδος είναι αρνητικά φορτισμένη και λειτουργεί ως πηγή ηλεκτρονίων. Η άνοδος είναι θετικά φορτισμένη και λειτουργεί ως κατάλληλος στόχος για τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια, ώστε με τη σύγκρουση να παραχθούν ακτίνες X με την καλύτερη δυνα-

τή απόδοση (στη μετατροπή της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων σε ηλεκτρομαγνητική ενέργεια).

Η κινητική ενέργεια που αποκτούν τα ηλεκτρόνια είναι ανάλογη της διαφοράς δυναμικού που τα επιτάχυνε. Π.χ. ηλεκτρόνια που επιταχύνονται σε διαφορά δυναμικού 20 και 100 kVp (kilovolt peak) αποκτούν 20 και 100 keV ενέργειας, αντίστοιχα, στο τέλος της διαδρομής τους (φθάνοντας στην άνοδο).

Η μέγιστη τιμή ενέργειας των φωτονίων καθορίζεται, όπως προαναφέρθηκε, από την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων κατά την πρόσκρουσή τους στο υλικό της ανόδου.



Εικόνα 3.7 Καμπύλη κατανομής φωτονίων X ανάλογα με την ενέργειά τους (πηγή: Διαδικτυακός Ιστότοπος)

Η καμπύλη της εικόνας 3.7 παριστά μια τυπική κατανομή φωτονίων X, ανάλογα με την ενέργειά τους, έχει ένα μέγιστο που αντιστοιχεί στο $1/3$ (ένα τρίτο) με $1/2$ (ένα δεύτερο) της μέγιστης ενέργειας.

Όπως και σε όλα τα άτομα, έτσι και στα άτομα του υλικού της ανόδου υπάρχουν ηλεκτρόνια που περιφέρονται σε προκαθορισμένες (σε ακτίνα και ενέργεια) στιβάδες. Η δεσμευτική ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου εξαρτάται από την τροχιά – στιβάδα στην οποία βρίσκεται. Η πλησιέστερη στον πυρήνα στιβάδα K περιέχει δύο ηλεκτρόνια που έχουν και την μεγαλύτερη δεσμευτική ενέργεια. Ακολουθούν τα 8 ηλεκτρόνια της L στιβάδας κ.ο.κ.

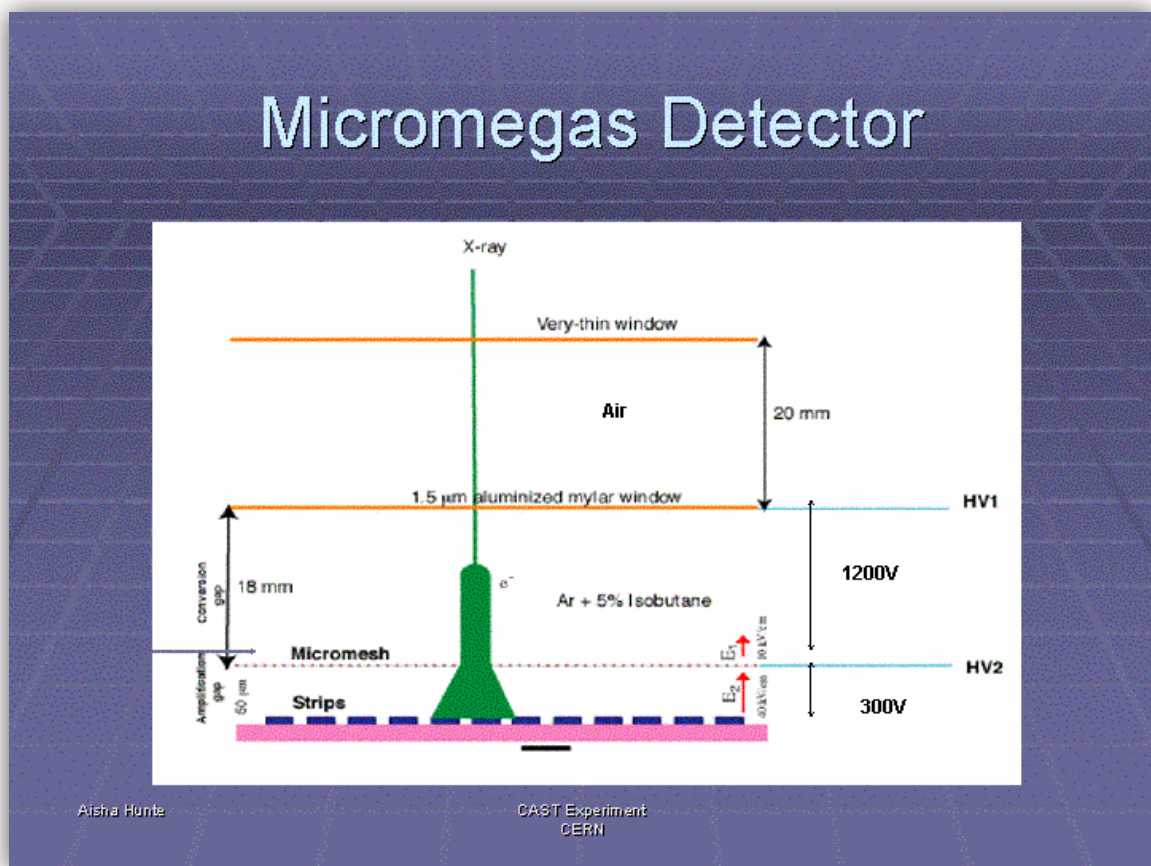
Όταν η ενέργεια προσπίπτοντος στην άνοδο ηλεκτρονίου είναι μεγαλύτερη της δεσμευτικής ενέργειας του περιφερόμενου ηλεκτρονίου, είναι πιθανόν (ενεργειακά) το προσπίπτον ηλεκτρόνιο να εκδιώξει το περιφερόμενο και να ιοντίσει το άτομο. Η τροχιά-στιβάδα θα παρουσιάσει ένα κενό, θα τραπεί σε ασταθή, όσον αφορά την ενέργειά της, και ένα ηλεκτρόνιο από τις εξωτερικές στιβάδες με μικρότερη δεσμευτική ενέργεια θα έρθει να συμπληρώσει το κενό. Καθώς αυτό το τελευταίο ηλεκτρόνιο μεταπηδά σε χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση, θα περισσέψει ενέργεια, που θα εκπεμφθεί στο περιβάλλον ως φωτόνιο χαρακτηριστικής ακτινοβολίας X, με ενέργεια ίση με τη διαφορά ενέργειας των δύο τροχιών-στιβάδων (αρχικής και τελικής της μεταπήδησης). Οι δεσμευτικές ενέργειες είναι χαρακτηριστικές (και μοναδικές) κάθε στοιχείου-ατόμου, όπως χαρακτηριστικές (και μοναδικές) είναι και οι διαφορές τους. Συνεπώς η ακτινοβολία αυτή είναι χαρακτηριστική του συγκεκριμένου ατόμου του υλικού του στόχου (στην άνοδο της λυχνίας). Πολλές είναι οι δυνατές μεταπηδήσεις από γειτονικές ή πιο μακρινές στιβάδες ή υποστιβάδες του ατόμου. Γι' αυτό παρουσιάζεται μια ομάδα διακριτών ενεργειακών κορυφών που επικάθονται στο συνεχές φάσμα των ακτίνων X.

Οι κορυφές που επικρατούν είναι αυτές που αντιστοιχούν σε κενό που δημιουργείται στη στιβάδα K και το συμπληρώνουν ηλεκτρόνια των στιβάδων L, M και ίσως N, με αντίστοιχα ονόματα K_α ή K_β . Το μικρό α υποδηλώνει ότι το ηλεκτρόνιο για τη συμπλήρωση του κενού ξεκίνησε από γειτονική στιβάδα (την L), ενώ το μικρό β δηλώνει ηλεκτρόνια που ξεκίνησαν από εξωτερικότερες στιβάδες. Δηλαδή η κορυφή K_β αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη ενέργεια από την K_α . Επειδή δε, σε κάθε στιβάδα (εκτός της K) υπάρχουν και υποστιβάδες, υπάρχει και λεπτότερος διαχωρισμός στις ενεργειακές κορυφές: $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$, $K_{\beta 1}$, κ.λπ.

3.3 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ MICROME GAS

Υπάρχουν πολλά είδη ανιχνευτών ακτίνων Χ ανάλογα με τη χρήση. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένας σχετικά νέος ανιχνευτής που ονομάζεται MicroMegas.

Ο MICRO-MESH-GASeous ανιχνευτής είναι ένας ανιχνευτής αέριου γεμίσματος και η αρχή λειτουργίας του είναι σχετικά απλή και περιγράφεται σχηματικά στην εικόνα 3.8. Σημειώνεται ότι ο συγκεκριμένος ανιχνευτής μπορεί να ανιχνεύσει τόσο φορτισμένα όσο και ουδέτερα σωματίδια ρυθμίζοντας κατάλληλα τις συνθήκες λειτουργίας.



Εικόνα 3.8 Σχηματική αναπαράσταση ενός ανιχνευτή MicroMegas (πηγή; Cast Experiment, CERN)

Σε γενικές γραμμές, τα σωματίδια προς ανίχνευση καθώς εισέρχονται στον ανιχνευτή αλληλεπιδρούν με το αέριο που υπάρχει στο εσωτερικό του και ως αποτέλεσμα παράγεται φορτίο. Στη συνέχεια και με εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου επιτυγχάνεται πολλαπλασιασμός του φορτίου, το οποίο τελικά συλλέγεται και γίνεται η επεξεργασία του σήματος με κατάλληλα ηλεκτρονικά συστήματα.

Στην εικόνα 3.8 διακρίνουμε τις 2 βασικές περιοχές λειτουργίας:

- 1) Περιοχή μετατροπής-ολίσθησης (conversion-drift gap). Σε αυτή την περιοχή λαμβάνει χώρα ο ιονισμός του αερίου και η ολίσθηση των ιόντων και των ηλεκτρονίων.
- 2) Περιοχή ενίσχυσης (amplification gap). Εδώ λόγω του ιδιαίτερα ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου το πρωτογενές φορτίο ενισχύεται μέσω των πολλαπλασιασμών των ηλεκτρονίων (φαινόμενο χιονοστιβάδας¹³) και αναπτύσσεται το σήμα το οποίο συλλέγεται στην κάθοδο.

Σ αυτή την εφαρμογή τα σωματίδια προς μέτρηση είναι φωτόνια με ενέργειες ~ 8 keV, οπότε η ανίχνευση τους γίνεται μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου στην περιοχή μετατροπής-ολίσθησης. Τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με τα άτομα του αργού, τα εκπεμπόμενα φωτοηλεκτρόνια ιονίζουν το αέριο και τα ηλεκτρόνια από τον ιονισμό ολισθαίνουν προς την περιοχή ενίσχυσης όπου πολλαπλασιάζονται και καταγράφονται.

¹³ Κατά το φαινόμενο της χιονοστιβάδας, επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια προσκρούουν σε άτομα με αποτέλεσμα την απόσπαση ηλεκτρονίων που βρίσκονται στις εξωτερικές στιβάδες. Έτσι δημιουργούνται νέα ελεύθερα ηλεκτρόνια τα οποία με τη σειρά τους επιταχύνονται και παράγουν επιπλέον ηλεκτρόνια. Εν τέλει δημιουργείται ένα είδος χιονοστιβάδας ηλεκτρονίων αυξάνοντας το ρεύμα με ταχείς ρυθμούς

3.4 ΕΣΤΙΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ MICROCHANNEL PLATES ΤΗΣ PHOTONIS

3.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το πείραμα ερευνούμε τις εστιακές ιδιότητες των MCP της Photonis χρησιμοποιώντας ως πηγή ακτίνων Χ την γραμμή εκπομπής K_{α} στα 8,05 keV του χαλκού (Cu) παραγόμενη από ένα δισκίο (στόχος) βομβαρδίζοντάς το με την εργαστηριακή γεννήτρια ακτίνων Χ.

3.4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Κατά την κατασκευή της πειραματική μας διάταξης συναντήσαμε πολλές δυσκολίες, οι οποίες εν μέρει ξεπεράστηκαν, αλλά εισήγαγαν έναν σημαντικό παράγοντα σφάλματος κατά τις μετρήσεις. Το αρχικό πλάνο της διάταξης περιελάμβανε ένα MicroChannel Plate, όμως στη συνέχεια ήταν αναγκαία η χρήση και δεύτερου. Ο λόγος ήταν η απουσία εργαστηριακής πηγής ικανής να παράγει παράλληλη δέσμη ακτίνων Χ. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε ένα MicroChannel Plate σε Reverse-mode κάνοντας παράλληλη δηλαδή την αποκλίνουσα δέσμη της πηγής και το δεύτερο MCP την επανεστίαζε.

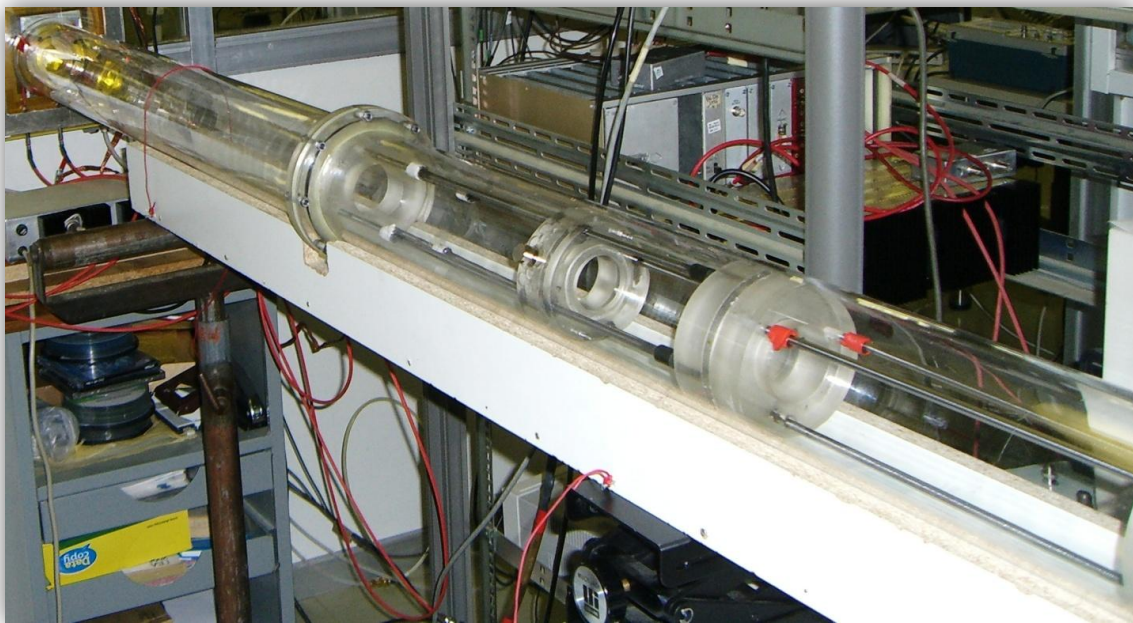
Πιο αναλυτικά, η πειραματική μας διάταξη περιλαμβάνει:

- ✚ Μια πηγή ακτίνων Χ και το δισκίο του Cu
- ✚ Ένα ανιχνευτή MicroMegas με τα απαραίτητα ηλεκτρονικά στοιχεία
- ✚ Ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή εφοδιασμένο με το λογισμικό MAMMA MicroMegas για την καταγραφή και επεξεργασία των μετρήσεων του ανιχνευτή
- ✚ Μια αντλία κενού και δύο μετρητές κενού

- ✚ Έναν κύλινδρο Plexiglas
- ✚ Δύο MicroChannel Plates της Photonis
- ✚ Δύο βάσεις στήριξης-μετακίνησης για τα MicroChannel Plates
- ✚ Μια βάση στήριξης του κυλίνδρου
- ✚ Δύο παράθυρα ακτίνων Χ από Karton¹⁴
- ✚ Δύο παλμογράφους

Στις συνέχεια γίνεται μια αναλυτικότερη περιγραφή της διάταξης και περιγράφεται η συναρμολόγησή της

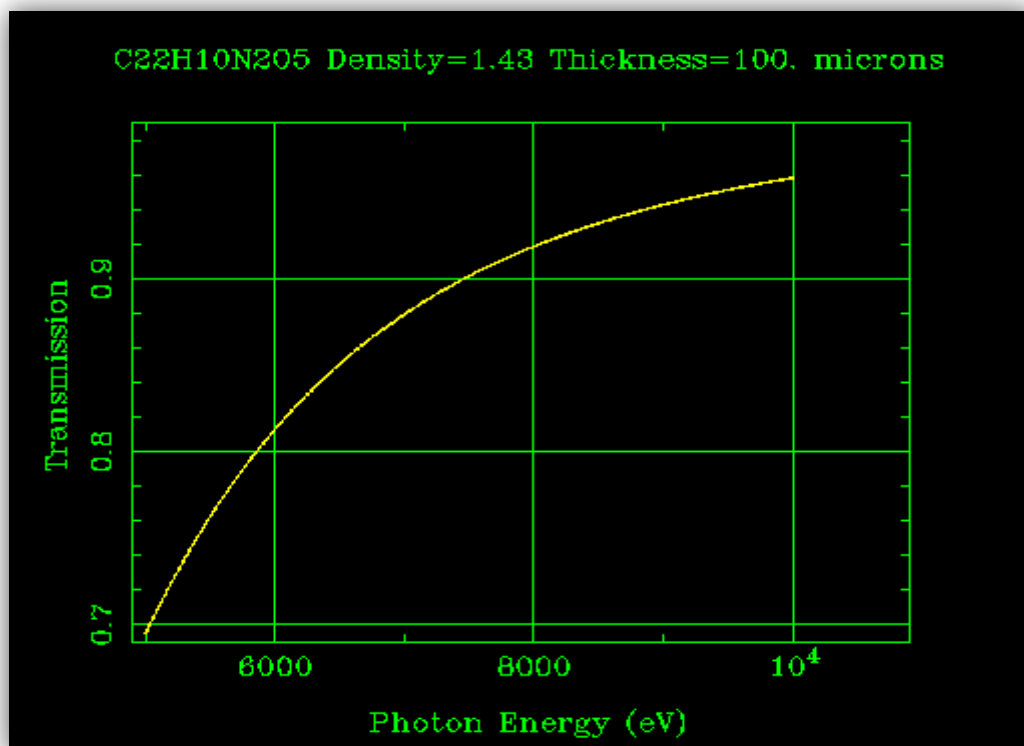
Χρησιμοποιήσαμε έναν κύλινδρο από Plexiglas μήκους 3m, εσωτερικής διαμέτρου 100mm με στόχο την τοποθέτηση των οπτικών στοιχείων στο εσωτερικό του και το σφράγισμά του αεροστεγώς (εικόνα 3.9).



Εικόνα 3.9 Μέρος της πειραματικής διάταξης. Στην παρούσα εικόνα διακρίνεται ένα μέρος του σωλήνα Plexiglas (πηγή: φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»).

¹⁴ Το Karton είναι ένα Polyimide film υψηλής αντοχής και ελάχιστης απορρόφησης στις ακτίνες Χ.

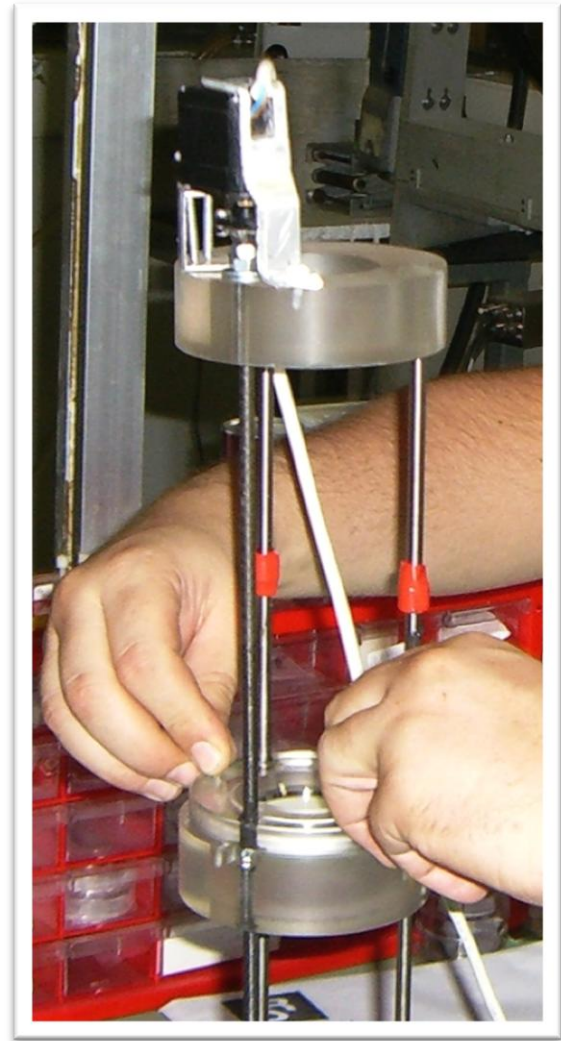
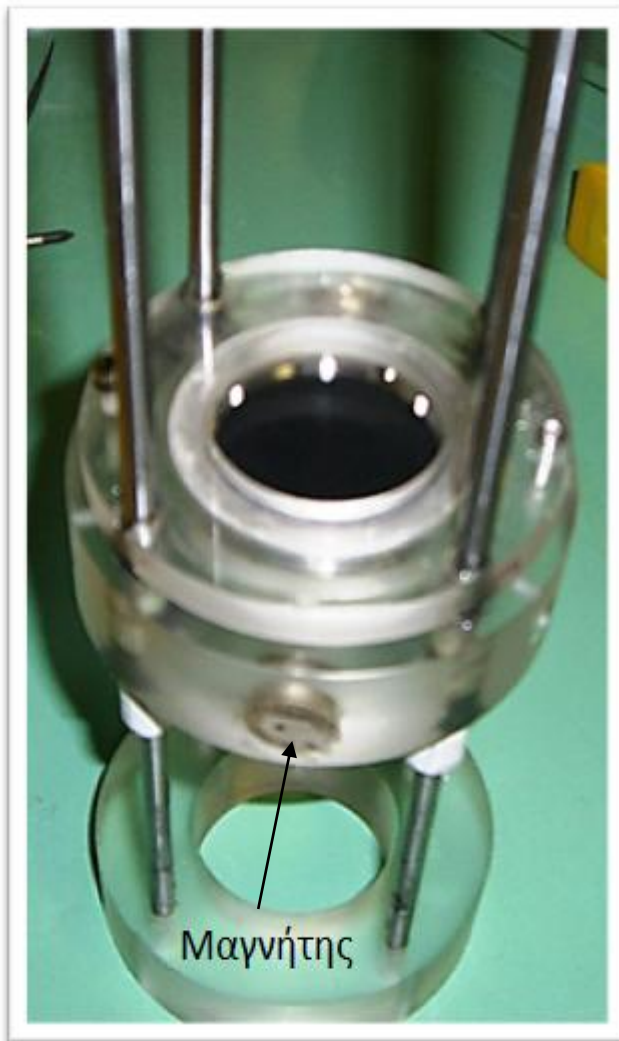
Στα άκρα του κυλίνδρου τοποθετήθηκαν ειδικές κυλινδρικές τάπες φτιαγμένες από Plexiglas εφοδιασμένες με κατάλληλα μονωτικά O-Rings σφραγίζοντας τον σωλήνα. Το κέντρο τους ήταν διαμπερές και τοποθετήθηκαν φύλλα Karton ως παράθυρα ακτίνων Χ για την όσο το δυνατόν μικρότερη απορρόφηση των ακτίνων. Το Karton είναι ένα πολυμερές υλικό με χημικό τύπο $C_{22}H_{10}N_2O_5$. Στην εικόνα 3.10 παριστάνεται ένα διάγραμμα μετάδοσης ακτίνων Χ δια μέσου ενός φύλλου Karton πάχους 0,1mm σε σχέση με την ενέργεια των ακτίνων.



Εικόνα 3.10 Κατανομή διάδοσης – ενέργειας ακτίνων Χ δια μέσου ενός φύλλου Karton πάχους 100microns (πηγή: Διαδικτυακός ιστότοπος http://henke.lbl.gov/optical_constants/filter2.html)

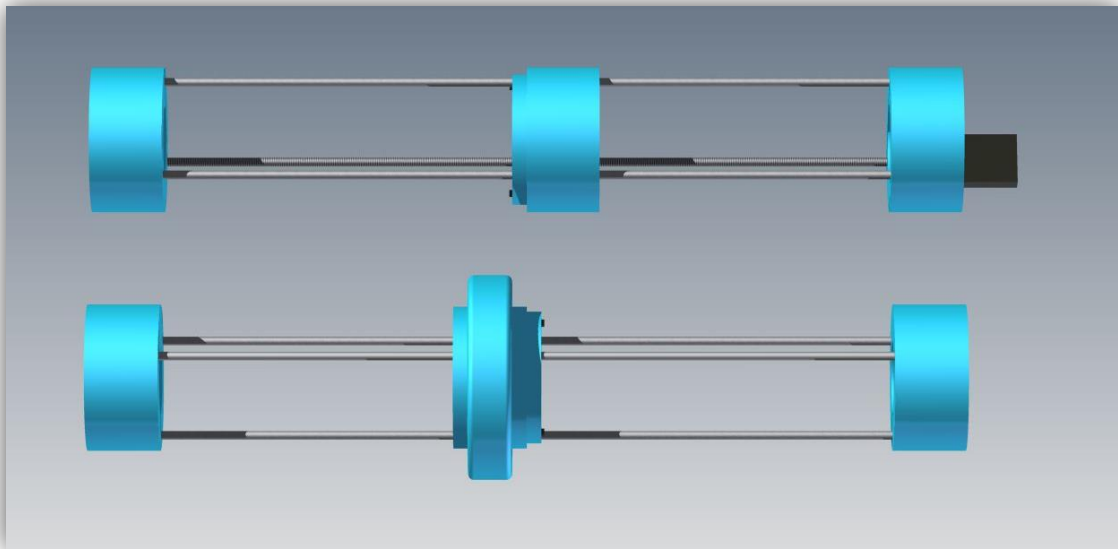
Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν δύο βάσεις στήριξης για τα δύο MicroChannel Plates. Χρησιμοποιήθηκε και πάλι Plexiglas και ατσάλινοι οδηγοί. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι δύο βάσεις στήριξης που χρησιμοποιήθηκαν και μια τρισδιάστατη γραφική απεικόνισή τους χρησιμοποιώντας το λογισμικό Autodesk Inventor Pro. Η μία βάση μας δίνει την δυνατότητα να μετακινούμε το MicroChannel Plate πάνω στους οδηγούς με τη

βοήθεια ισχυρών μαγνητών, ενώ στην άλλη βάση η μετακίνηση επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ηλεκτρικού μοτέρ χαμηλής τάσης και υψηλής ροπής περιστρέφοντας ένα κοχλία.

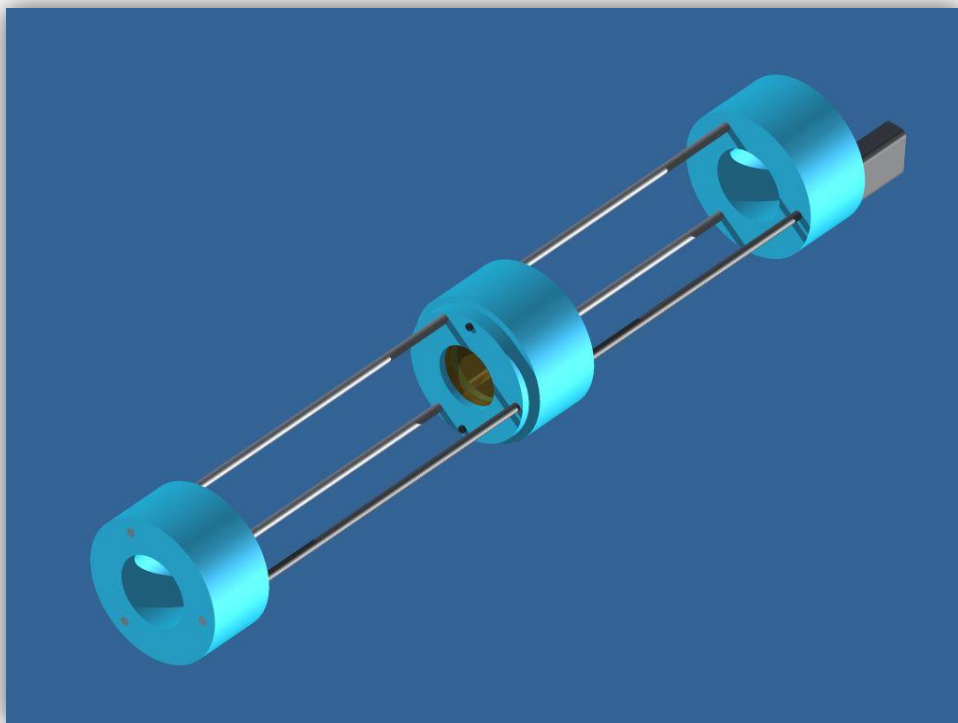


Αριστερά (Εικόνα 3.11): Μία από τις δύο βάσεις στήριξης. Στην εικόνα διακρίνονται οι μαγνήτες που χρησιμοποιήθηκαν για την μετακίνηση του MicroChannel Plate (πηγή: φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»).

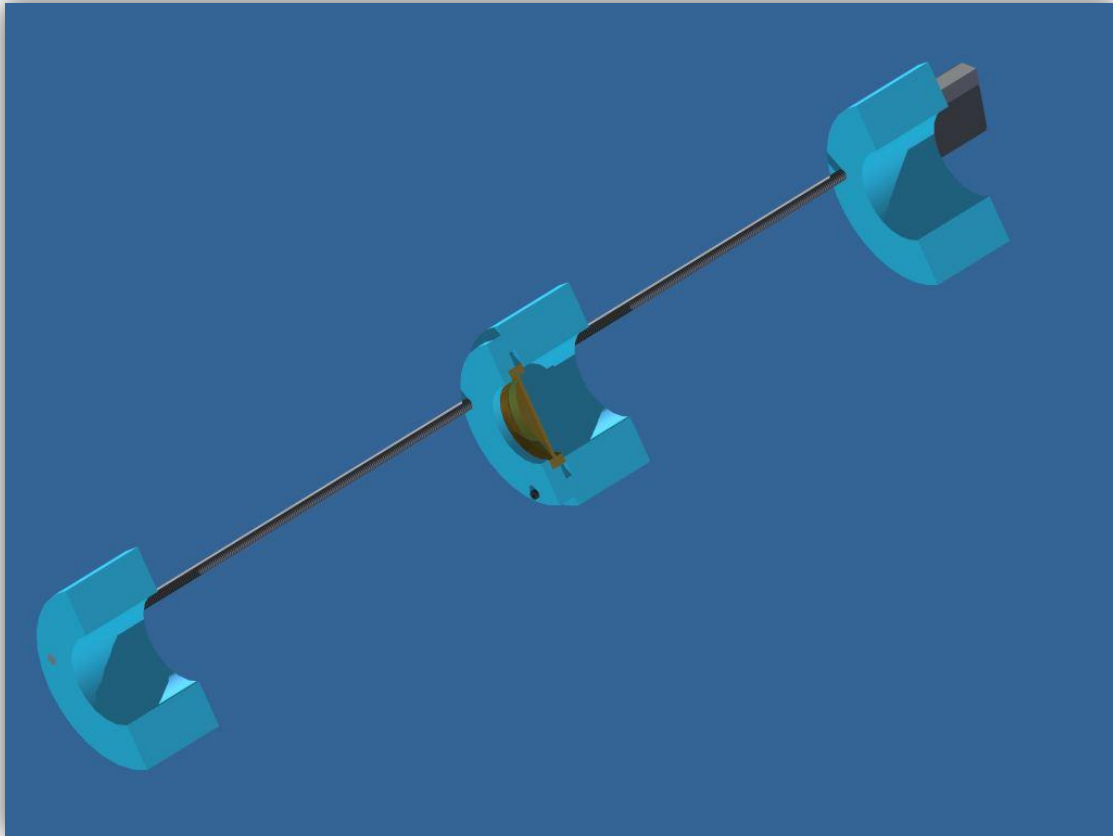
Δεξιά (Εικόνα 3.12): Βάση στήριξης MicroChannel Plate. Στην φωτογραφία διακρίνεται το ηλεκτρικό μοτέρ που χρησιμοποιήθηκε για την μετακίνηση του MicroChannel Plate (πηγή: φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»).



Εικόνα 3.13 Γραφική απεικόνιση των δύο βάσεων με τη χρήση του λογισμικού Autodesk Inventor Pro.

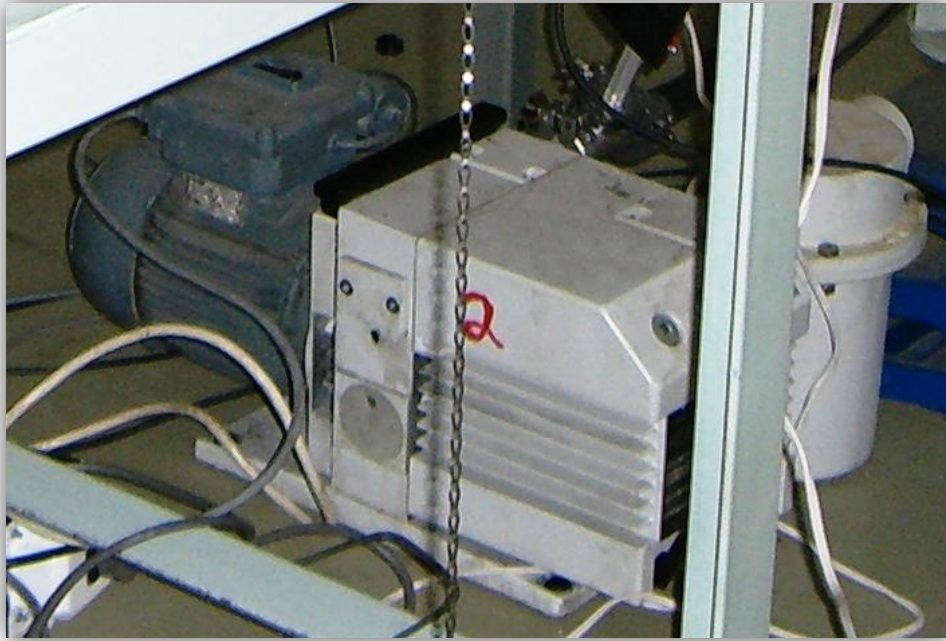


Εικόνα 3.14 Τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση της μιας βάσης με τη χρήση του λογισμικού Autodesk Inventor Pro.



Εικόνα 3.15 Τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση της μιας βάσης με τη χρήση του λογισμικού Autodesk Inventor Pro (Τομή).

Λόγω της φύσης των ακτίνων Χ, όπως έχει ήδη αναφερθεί ήταν αναγκαία η αφαίρεση του αέρα από το εσωτερικό του σωλήνα. Χρησιμοποιήσαμε, λοιπόν, μια αντλία κενού (εικόνα 3.16) και τους κατάλληλους συνδετικούς σωλήνες. Επίσης, συνδέθηκε στον σωλήνα ένας μετρητής κενού για ευνόητους λόγους (εικόνα 3.17). Η πηγή των ακτίνων Χ, και η ανιχνευτική διάταξη που χρησιμοποιήθηκαν έχει ήδη περιγραφεί.



Εικόνα 3.16 Εργαστηριακή αντλία κενού (πηγή: φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»).



Εικόνα 3.17 Μετρητής κενού (πηγή: φωτογραφίες κατά τη διάρκεια του πειράματος στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»).

3.4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Αρχικά, τοποθετήθηκαν τα δύο MCPs με τις βάσεις τους στο εσωτερικό του κυλίνδρου και θέσαμε σε λειτουργία την αντλία κενού. Στη συνέχεια ευθυγραμμίσαμε την πειραματική μας διάταξη χρησιμοποιώντας την πηγή των ακτίνων X και τον ανιχνευτή και «βελτιώσαμε» την δέσμη των ακτίνων X τοποθετώντας ένα pinhole (collimator) στην δέσμη που παράγαγε η πηγή μας κάνοντας τη πιο στενή και κατευθυντική.

Αφού το καλιμπράρισμα της διάταξης μας επιτεύχθηκε, μετρήθηκε η ακτινοβολία υποβάθρου και ο τυχόν θόρυβος του ανιχνευτή και αποθηκεύτηκε με σκοπό να αφαιρεθεί κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Για την μελέτη των εστιακών ιδιοτήτων των MCPs πάρθηκαν διαδοχικές μετρήσεις του προφίλ της δέσμης (πως κατανέμεται η ένταση της δέσμης στα 96 strips του ανιχνευτή) μετακινώντας κάθε φορά τα 2 MCPs, με σκοπό να υπολογιστεί η εστιακή απόσταση των συσκευών αλλά και τα χαρακτηριστικά του εστιακού σημείου (ένταση, κατανομή, μέγεθος, βάθος εστίασης).

3.4.4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

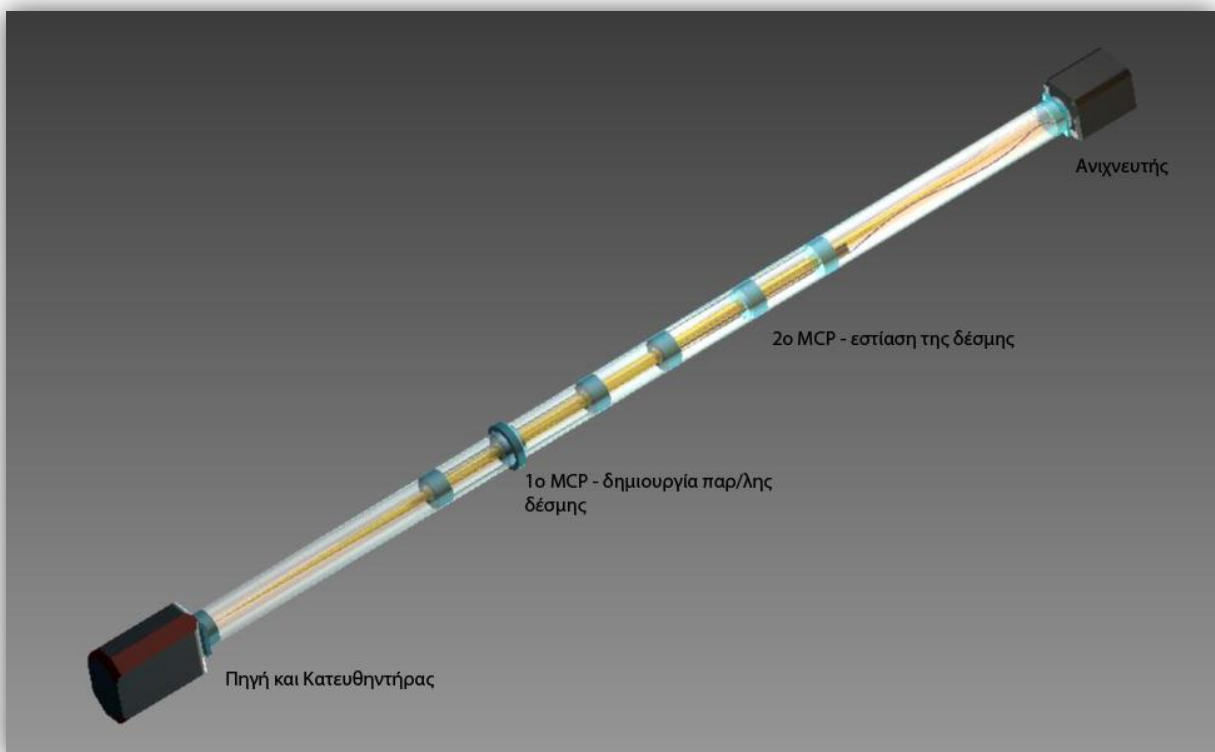
Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήσαμε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή συνδεδεμένο με τον ανιχνευτή παράγοντας αρχεία μορφής DAT και αφού αφαιρέθηκε από αυτά η ακτινοβολία υποβάθρου, τα μετατρέψαμε σε μορφή TXT έχοντας τον αριθμό των γεγονότων (counts) σε κάθε strip του ανιχνευτή. Δυστυχώς, τα πολλά σφάλματα που εισάχθηκαν κατά την εκπόνηση του πειράματος δεν μας δώσανε την δυνατότητα να εξάγουμε ασφαλή αποτελέσματα όσον αφορά την εστιακή απόσταση των MCPs, πόσο μάλλον για την ποιότητα της εστίασης. Παρ' όλα αυτά, τα αρχεία των μετρήσεων επεξεργάστηκαν μέσω του λογισμικού Origin, δημιουργήθηκαν γραφήματα της κατανομής της δέσμης στα strips του ανιχνευτή και έγινε προσαρμογή καμπυλών Gauss (Gaussian fits) με σκοπό των υπο-

λογισμό του εύρους και του ύψους της προσαρμοζόμενης καμπύλης σε κάποια κορυφή του γραφήματος. Οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα παρατίθενται στο παράρτημα.

Οι αιτίες που προκάλεσαν τα σφάλματα είναι αρκετές:

- Αποκλίσεις στην ευθυγράμμιση των MCPs στον οπτικό άξονα (πηγή - ανιχνευτής)

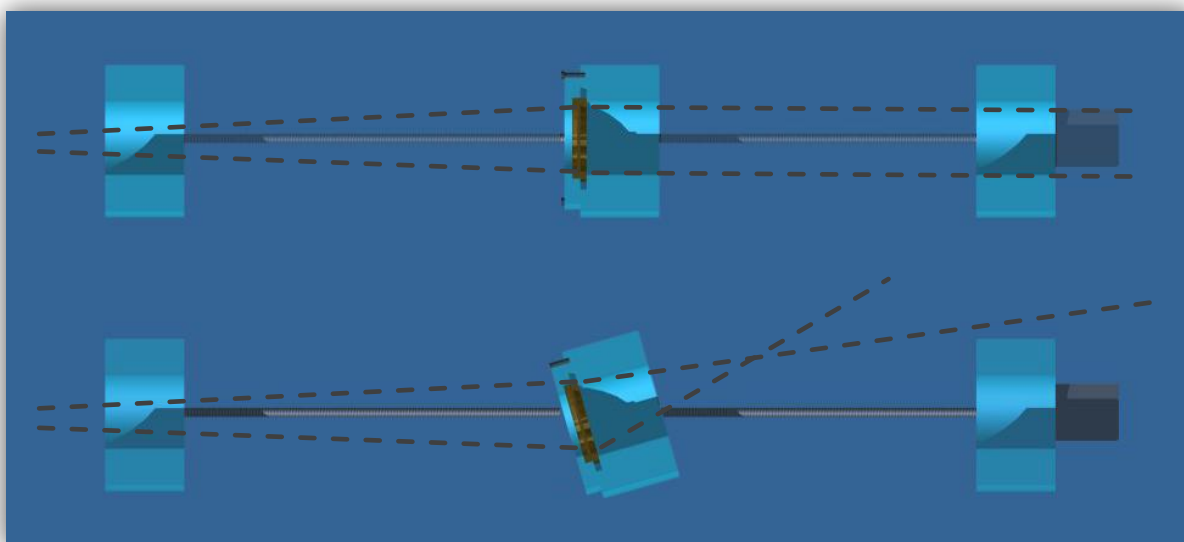
Η πειραματική μας διάταξη περιλάμβανε στοιχεία όπως η πηγή, ο κατευθυντήρας, τα παράθυρα, 2 MicroChannel Plates και τον ανιχνευτή. Για την σωστή διεξαγωγή του πειράματος μια ακριβής ευθυγράμμιση όλων των στοιχείων ήταν απαραίτητη, η οποία έγινε με την χρήση ακτινοβολίας laser. Παρόλα αυτά λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση πηγής – ανιχνευτή, που ξεπερνούσε τα 3 μέτρα και την απόκλιση από την καθετότητα του επιπέδου των MCPs με την δέσμη, οδηγεί τελικά στην απόκλιση της διεύθυνσης διάδοσης της ακτινοβολίας από τον οπτικό άξονα (πηγής – ανιχνευτή).



Εικόνα 3.18 Πειραματική διάταξη

- Απόκλιση στην καθετότητα των MCPs με τον οπτικό άξονα

Η γεωμετρία των MicroChannel Plates προϋποθέτει μια παράλληλη δέσμη που εισέρχεται κάθετα στην επιφάνεια των πλακιδίων. Στο πείραμα μας τα πλακίδια ήταν τοποθετημένα σε βάσεις οι οποίες μετακινούνταν πάνω σε ράβδους. Η κατασκευή των βάσεων, των οπών μέσα από τις οποίες θα περνούσαν οι ράβδοι αλλά και η επιλογή των υλικών αποδείχθηκε ακατάλληλη αφού οι βάσεις σχημάτιζαν γωνία με τις ράβδους-μετακίνησης και με τον οπτικό άξονα (προϋποθέτει ακριβή ευθυγράμμιση) 90 μοιρών με απόκλιση της τάξης της 1 μοίρας. Συνεπώς, η δέσμη δεν ανακλάται ομοιογενώς σε όλους τους μικροδιαύλους οδηγώντας στην αλλοίωση της εστίασης ή της παραλληλοποίησης της.



Εικόνα 3.19 Παράδειγμα δέσμης κάθετης και υπό γωνία στην επιφάνεια ενός MCP

- Αλληλεπίδραση της εστιακής απόστασης των δύο MCPs

Ένα παράγοντας που επηρέασε άμεσα την ποιότητα των αποτελεσμάτων ήταν η ίδια η φύση της πειραματικής διάταξης: η χρησιμοποίηση ενός MCP για την παραλληλοποίηση της δέσμης και παράλληλα ενός δεύτερου για την επανεστίαση. Μια τέτοια διάταξη προϋποθέτει την ικανότητα του 1^{ου} πλακιδίου να κάνει μια αποκλίνουσα δέσμη παράλληλη

εφόσον η πηγή τοποθετηθεί στην κατάλληλη απόσταση, ένα γεγονός που υποτέθηκε εφικτό. Στη συνέχεια ο συνδυασμός των δύο πλακιδίων και η αναζήτηση των δύο εστιακών αποστάσεων ταυτόχρονα, όπως είναι κατανοητό οδηγεί στην αλληλεπίδραση των σφαλμάτων των δύο πλακιδίων. Για παράδειγμα τοποθέτηση του 1^{ου} πλακιδίου σε τέτοια θέση που δεν παράγει παράλληλη δέσμη ή παράγει παράλληλη δέσμη η οποία έχει διαφορετική διεύθυνση από τον οπτικό άξονα (λόγω σφαλμάτων στην ευθυγράμμιση) ή είναι μη ομοιόμορφη αναπόφευκτα επηρεάζει την ποιότητα εστίασης του 2^{ου} πλακιδίου δραματικά. Τέτοια σφάλματα θα μπορούσαν να αποφευχθούν με τη χρήση πηγής παράλληλης δέσμης (σύγχροτρον) και την αποφυγή χρησιμοποίησης 2 MCPs.

- Ενέργεια της δέσμης των ακτίνων X (άμεση σχέση με την κρίσιμη γωνία για την ολική ανάκλαση της δέσμης)

Κατά την μελέτη της αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας και ύλης, διαπιστώσαμε ότι οι οπτικές ιδιότητες ενός υλικού, όπως διάθλαση, ανάκλαση κτλ εξαρτώνται άμεσα από το μήκος κύματος της εισερχόμενης ακτινοβολίας. Αυτό οφείλεται στην μεταβολή του δείκτη διάθλασης. Συνεπώς, ίσως η χρήση δέσμης ακτίνων X ενέργειας 8,05KeV να μην ήταν η κατάλληλη για την διεξαγωγή του πειράματος. Θα μπορούσαμε να αποκτήσουμε πιο ασφαλή συμπεράσματα με την χρήση ακτινοβολίας σύγχροτρον, αφού θα είχαμε την δυνατότητα να επιλέξουμε ακτινοβολία οποιασδήποτε ενέργειας (μέσα στα όρια της πηγής) και όχι απλά την σταθερή τιμή των 8,05KeV του χαλκού ή τις διακριτές τιμές των χαρακτηριστικών γραμμών ακτινοβολίας άλλων υλικών. Φυσικά μια τέτοια διαδικασία προϋποθέτει την αποφυγή επιπλέον σφαλμάτων που εισάγονται στο πείραμα λόγω γεωμετρίας, ευθυγράμμισης της διάταξης.

- Γωνία απόκλισης της δέσμης από οπτικό άξονα

Κατά την διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε ένας αυτοσχέδιος κατευθυντήρας (collimator) για τον περιορισμό της γωνίας απόκλισης της δέσμης, ανοίγοντας μια οπή διαμέτρου ~0,5 χιλιοστών σε ένα πλακίδιο μολύβδου. Καλύτερα αποτελέσματα θα μπορούσαν να επιτευχθούν με τη χρήση ενός collimator μεγαλύτερης ακριβείας.

- Πολυπλοκότητα της διάταξης

Όπως είναι κατανοητό η διάταξη μας περιείχε πολλά στοιχεία και η σωστή ευθυγράμμιση όλων αυτών αποδείχθηκε μη εφικτή. Συνολικά όλοι οι παραπάνω παράμετροι έπρεπε να ληφθούν υπόψη και να μειωθεί η εισαγωγή σφαλμάτων στο ελάχιστο. Κάτι τέτοιο αποδείχθηκε πολύ δύσκολο. Για παράδειγμα ακόμη και αν γινότανε ευθυγράμμιση όλων των στοιχείων στον οπτικό άξονα με ακρίβεια μικρότερη του χιλιοστού και τοποθετούσαμε τα MCPs κάθετα στον οπτικό άξονα με ακρίβεια λεπτών της μοίρας, η χρησιμοποίηση ακτινοβολίας «ακατάλληλης» ενέργειας θα μπορούσε να δώσει λάθος αποτελέσματα. Επομένως, όλα αυτά τα σφάλματα πολλαπλασιάζονται με αποτέλεσμα οι μετρήσεις μας να μην μπορούν να δώσουν ασφαλή συμπεράσματα.

3.5 ΕΣΤΙΑΣΗ ΔΕΣΜΗΣ LASER 532NM ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ MICROCHANNEL PLATE ΤΗΣ PHOTONIS

3.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο συγκεκριμένο πείραμα ερευνήσαμε τις εστιακές ιδιότητες του μικροδιαυλικού πλακιδίου στο ορατό φάσμα του φωτός χρησιμοποιώντας μια παράλληλη δέσμη laser.

Τα laser αποτελούνε μια πολύ χρήσιμη πηγή φωτός με πάρα πολλές εφαρμογές. Ο τρόπος παραγωγής μιας δέσμης laser βασίζεται στον μηχανισμό της απορρόφησης και εκπομπής φωτονίων. Οι βασικές ιδιότητες της δέσμης των laser που τα καθιστούν πολύ χρήσιμα εργαλεία είναι οι εξής:

- ✚ Είναι μονοχρωματική, δηλαδή το laser εκπέμπει σε πολύ στενή περιοχή μηκών κύματος
- ✚ Έχει μικρή διατομή της τάξης των υποδιαιρέσεων του mm

- ✚ Έχει μικρό γωνιακό άνοιγμα της τάξης των υποδιαιρέσεων της μοίρας
- ✚ Είναι σύμφωνη
- ✚ Έχει μεγάλη λαμπρότητα

3.5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η πειραματική διάταξη μας περιλάμβανε τα εξής:

- ✚ Ένα laser πράσινου φωτός στα 532 nm με δυνατότητα μεταβολής της ισχύος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μεταβάλλοντας την ένταση του ρεύματος ενίσχυσης του laser και το τροφοδοτικό του (εικόνα).



Εικόνα 3.20. Laser πράσινου φωτός στα 532nm (πηγή: διαδικτυακός ιστότοπος).

- ✚ Ένα σύστημα 2 οπτικών φακών για τον παραλληλισμό της δέσμης
- ✚ Μία προστατευτική αεροστεγής θήκη για το μικροδιαυλικό πλακίδιο με βαλβίδα εισαγωγής αερίου για την αποφυγή επικάλυψης σκόνης και σωματιδίων στους διαύλους του MCP
- ✚ Το Uncoated MCP της PHOTONIS (εικόνα)
- ✚ Μία φωτογραφική μηχανή της NIKON με αισθητήρα CCD (εικόνα 3.21)
- ✚ Εργαστηριακοί βραχίονες, ράγες, στηρίγματα.



Εικόνα 3.21. Φωτογραφική μηχανή της Nikon με αισθητήρα CCD

3.5.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Αρχικά ρυθμίσαμε τις αποστάσεις των 2 οπτικών φακών ώστε να επιτύχουμε τον παραλληλισμό της δέσμης. Στη συνέχεια τοποθετήσαμε το μικροδιαυλικό πλακίδιο στην προστατευτική θήκη, συνδέσαμε την παροχή αερίου αζώτου και ανοίξαμε την βαλβίδα

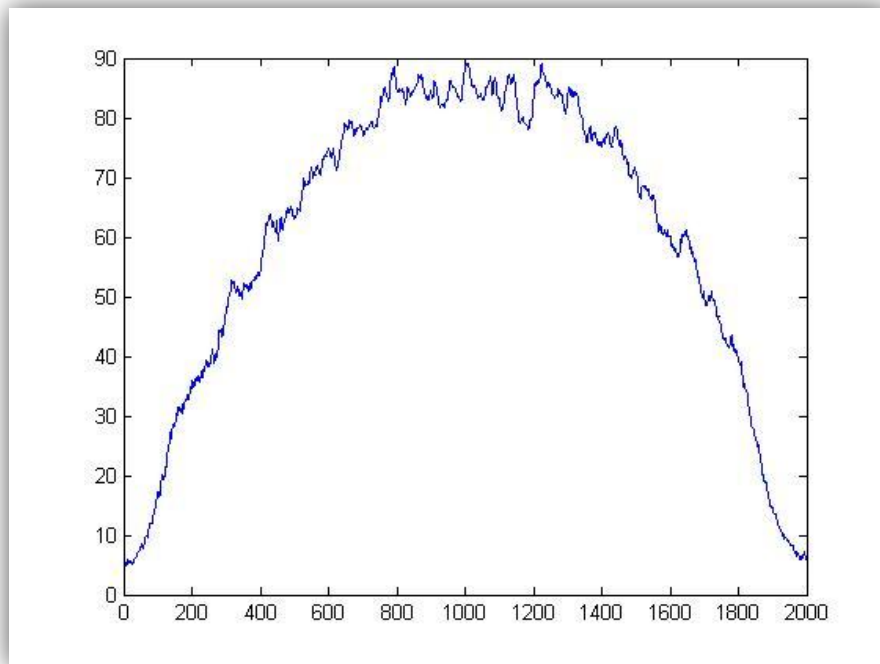
τροφοδοσίας αερίου. Τελικά, ευθυγραμμίσαμε την διάταξή μας τοποθετώντας το MCP, μέσα στη θήκη του, αλλά και την φωτογραφική μηχανή.

3.5.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

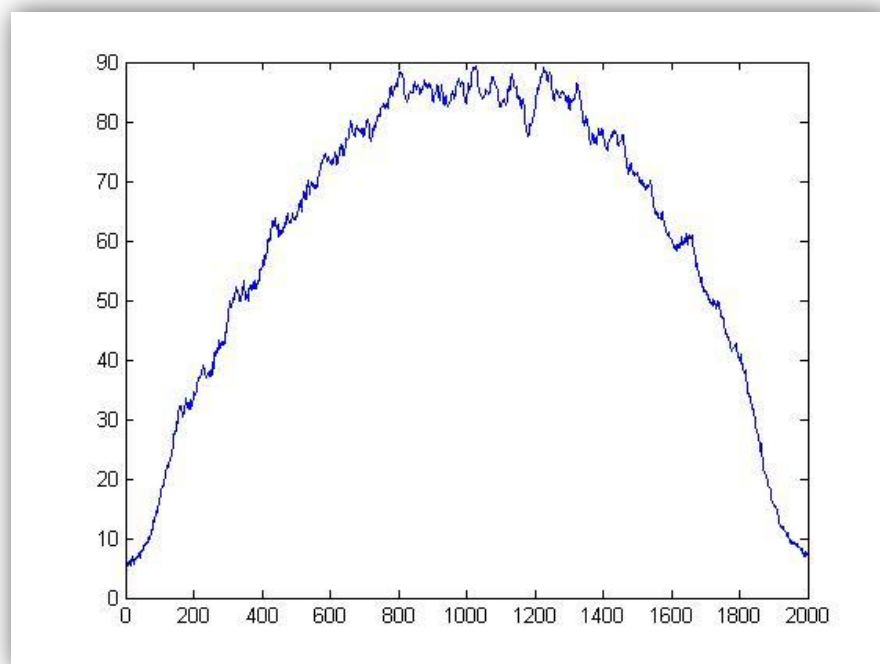
Αφού στήσαμε την διάταξη μας πήραμε φωτογραφίες της δέσμης σε διάφορες αποστάσεις αναζητώντας την εστιακή απόσταση, ξεκινώντας από απόσταση 80cm και φτάνοντας στα 160cm από το MCP. Οι μετρήσεις παρατίθενται στο παράρτημα.

3.5.5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

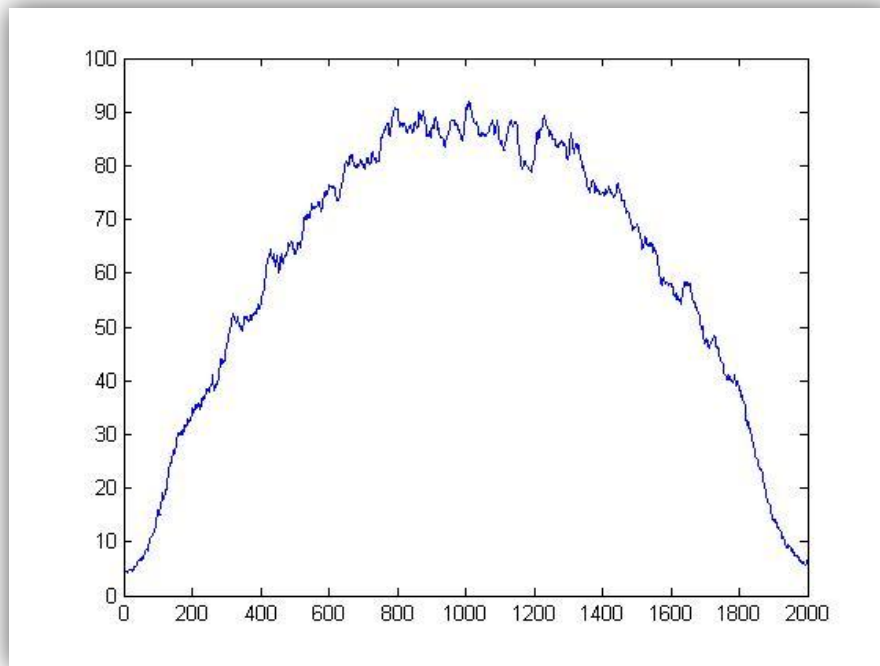
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν ήτανε τα αναμενόμενα από την άποψη ότι δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα εστίασης της δέσμης. Θεωρητικά το εύρος της δέσμης θα έπρεπε να μειώνεται καθώς πλησιάζαμε το εστιακό σημείο και να αυξάνεται καθώς απομακρυνόμαστε από αυτό. Επίσης, κάτι τέτοιο θα οδηγούσε στην αύξηση της έντασης της δέσμης ως αποτέλεσμα της εστίασης. Αντιθέτως οι φωτογραφίες που τραβήχτηκαν δεν παρουσίαζανε κανένα φαινόμενο εστίασης. Στις επόμενες φωτογραφίες φαίνεται το προφίλ της εντάσεως της δέσμης σε διάφορες αποστάσεις. Η επεξεργασία έγινε χρησιμοποιώντας το λογισμικό Η/Υ MatLab. Στον κάθετο άξονα παριστάνεται ο αριθμός των γεγονότων που κατέγραψε η κάμερα και στον οριζόντιο το εύρος της δέσμης σε χιλιοστά.



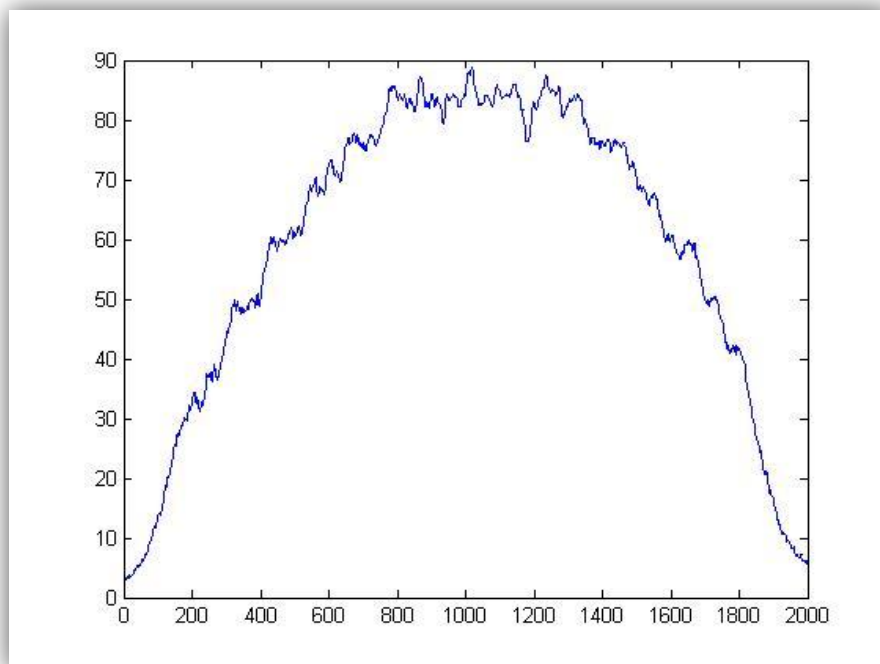
Εικόνα 3.22. Προφίλ δέσμης σε απόσταση 80cm από το MCP.



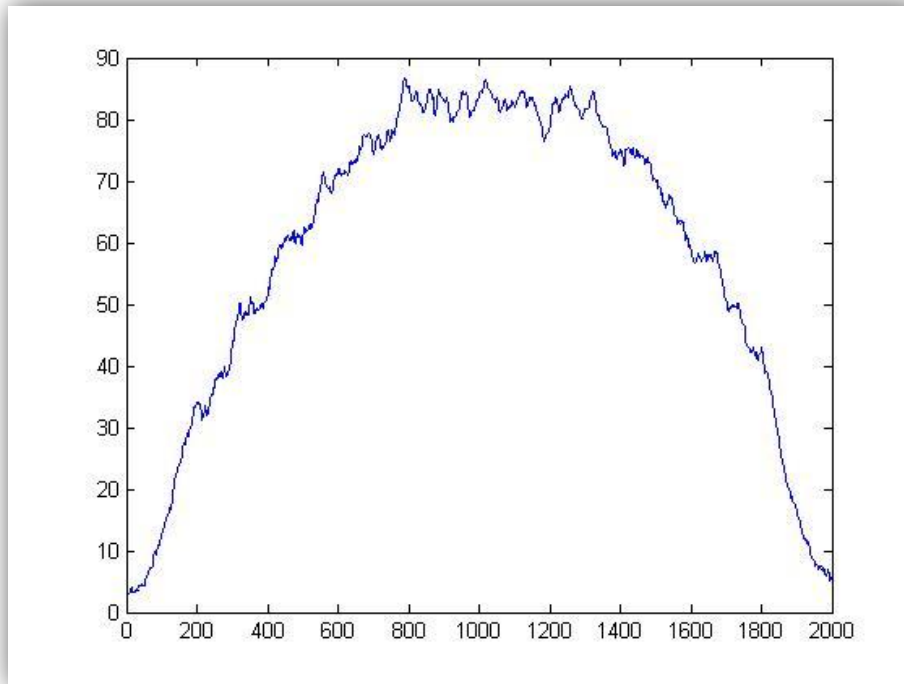
Εικόνα 3.23. Προφίλ δέσμης σε απόσταση 90cm από το MCP.



Εικόνα 3.24. Προφίλ δέσμης σε απόσταση 100cm από το MCP.



Εικόνα 3.25. Προφίλ δέσμης σε απόσταση 110cm από το MCP.



Εικόνα 3.26. Προφίλ δέσμης σε απόσταση 120cm από το MCP.

Επίσης ένα επιπλέον φαινόμενο που παρατηρήθηκε ήταν ένα σύστημα πολλών εικόνων της δέσμης σε grid διάταξη αμετάβλητο και ανεπηρέαστο καθώς προσεγγίζαμε το εστιακό σημείο του πλακιδίου. Έτσι έγινε μια προσπάθεια να ερμηνεύσουμε την εμφάνιση των παραπάνω αποτελεσμάτων.

Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 2 το κάθε MCP είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να εστιάζει τις ακτίνες X σε συγκεκριμένη απόσταση εκμεταλλεύοντας την ολική ανάκλαση τους σε grazing incidence γωνίες στις δύο επιφάνειες του κάθε διαύλου. Στο συγκεκριμένο πείραμα εμείς χρησιμοποιήσαμε μία δέσμη φωτός στο φάσμα του ορατού. Η συγκεκριμένη δέσμη έχει διαφορετικές ιδιότητες σε σχέση με τις ακτίνες X όσο αφορά των δείκτη διάθλασης των MCPs με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ανακλαστεί με τρόπο ικανό ώστε να επιτευχθεί η δημιουργία εστίας.

Κατά δεύτερο λόγο, χρησιμοποιώντας ως πηγή το συγκεκριμένο laser παρουσιάζονται εντονότερα φαινόμενα περίθλασης. Ως γνωστόν οι ακτίνες X έχουν πολύ μικρό

μήκος κύματος με αποτέλεσμα τα φαινόμενα περίθλασης να μειώνονται στο ελάχιστο. Αντιθέτως, ακτίνες με μεγαλύτερα μήκη κύματος περιθλώνται εντονότερα, όταν συναντούν εμπόδια στην διεύθυνση διάδοσής τους (περίθλαση Fresnel, Fraunhofer).

4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία έγινε μελέτη των εστιακών ιδιοτήτων των Micro-Channel Plates σε ακτίνες X χαμηλής ενέργειας αφενός και της συμπεριφοράς των Micro-Channel Plates στο ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αφετέρου.

Στο κύριο μέρος της εργασίας, στη χρήση των MCPs στο φάσμα των ακτίνων X, δυστυχώς, η πειραματική μας διάταξη δεν επέτρεψε την διεξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων όσον αφορά την αποδοτικότητα των Μικροδιαυλικών πλακιδίων ως εστιακοί φακοί. Η απουσία πηγής παράλληλης δέσμης ακτίνων X μας ανάγκασε στην χρήση ενός επιπλέον MCP για την μετατροπή της δέσμης από αποκλίνουσα σε παράλληλη. Αυτό εισήγαγε αρκετές πηγές σφαλμάτων με αποτέλεσμα να μην μελετηθεί με ακρίβεια η εστιακή απόσταση των μικροδιαυλικών πλακιδίων αλλά ούτε και η αποδοτικότητα εστίασης.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας επιβεβαιώθηκε η αδυναμία των συγκεκριμένων συσκευών να εστιάσουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο οπτικό φάσμα.

Παρ' όλα αυτά, έγινε μια εις βάθος μελέτη των αλληλεπιδράσεων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ύλης σε θεωρητικό αλλά και σε πειραματικό επίπεδο. Μελετήθηκε πως επηρεάζονται οι οπτικές ιδιότητες των στερεών και πιο συγκεκριμένα των μετάλλων ανάλογα με την συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Σε πειραματικό επίπεδο, ο φοιτητής ήρθε σε επαφή με διάφορα είδη συσκευών όπως ανιχνευτές, πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, οπτικά στοιχεία, όπως επίσης και με την διαδικασία σχεδιασμού και υλοποίησης κατάλληλης πειραματικής διάταξης για την διεξαγωγή πειραμάτων και με την επεξεργασία αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας διάφορα λογισμικά ηλεκτρονικού υπολογιστή.

A. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ, ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ MICROCHANNEL PLATES

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ

Λόγω της δομής και της φύσης των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τον χειρισμό και την λειτουργία των MCPs. Οι επόμενες προφυλάξεις είναι απαραίτητες:

Οι θήκες μέσα στις οποίες έχουνε σταλεί τα MicroChannel Plates δεν είναι κατάλληλες για αποθήκευση μετά το άνοιγμα της συσκευασίας.

Κατά την αποστολή των MicroChannel Plates στον παραλήπτη τα MCPs θα πρέπει να βρίσκονται σε κατάλληλη συσκευασία μακράς διάρκειας.

- Το πιο αποτελεσματικό μακράς διάρκειας αποθηκευτικό περιβάλλον είναι το κενό.
- Ένα διαρκώς στεγανό στεγνό δοχείο το οποίο μπορεί να τροφοδοτηθεί με κάποιο αδρανές αέριο, όπως αργό ή άζωτο, είναι επίσης ιδανικό.
- Δοχεία αποξήρανσης του αέρα που χρησιμοποιούν silica gel ή άλλα στερεά παρόμοια υλικά έχουν κριθεί μη αποδεκτά

ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ

- Οι συσκευασίες αποστολής θα πρέπει να ανοίγονται μόνο σε καθαρά δωμάτια κλάσης 100 Laminar flow.

- Το προσωπικό θα πρέπει να φορά πάντα καθαρά γάντια βινυλίου κατά την χρήση. Κανένα αντικείμενο δεν πρέπει να έρθει σε επαφή με την ενεργό περιοχή του πλακιδίου. Το MCP θα πρέπει να πιάνεται μόνο από τα άκρα του χρησιμοποιώντας καθαρά, απολιπανθέντα εργαλεία κατασκευασμένα από ανοξείδωτο ατσάλι, Teflon ή άλλα συμβατά με υψηλό κενό υλικά.
- MCPs χωρίς συμπαγές γυάλινα άκρα θα πρέπει να χειρίζονται με πολύ μεγάλη προσοχή έρχοντας σε επαφή μόνο με την εξωτερική επιφάνεια του πλακιδίου.
- Όλα τα MicroChannel Plates με φραγμό ιόντων (ion barrier) πρέπει να τοποθετούνται στην συσκευασία τους με τον φραγμό ιόντων προς τα κάτω.
- Το MCP θα πρέπει να προφυλάσσεται από την έκθεση σε σωματίδια. Σωματίδια που επικολλούνται στην επιφάνεια του πλακιδίου μπορούν να αφαιρεθούν χρησιμοποιώντας ειδικό πινέλο και ιονισμένο στεγνό πιστόλι αζώτου.
- Το MCP πρέπει να τοποθετείται σε ειδικές βάσεις κατασκευασμένες για αυτό το λόγο.
- ΠΡΟΣΟΧΗ: Δεν πρέπει να ασκούνται ηλεκτρικά δυναμικά στην συσκευή υπό ατμοσφαιρική πίεση. Η πίεση θα πρέπει να είναι ίση ή λιγότερη με 10^{-5} γιατί, σε αντίθετη περίπτωση, θα προκληθεί βλάβη στην συσκευή.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

- Ένα αποξηραμένο περιβάλλον λειτουργίας είναι επιθυμητό.
- Ένα όχι και τόσο καλά μονωμένο περιβάλλον κενού πιθανόν να μειώσει την ζωή του MCP ή να αλλάξει τα χαρακτηριστικά του.
- Πίεση 10^{-6} ή και καλύτερη είναι επιθυμητή. Υψηλότερη πίεση μπορεί να προκαλέσει θόρυβο υποβάθρου.
- Τα MCPs μπορούν να τοποθετηθούν σε φούρνους κενού 380°C (χωρίς την εφαρμογή δυναμικού)

B. ΚΑΜΕΡΕΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ CCD (CHARGE-COUPLED DEVICE)

Το βασικό στοιχείο μια κάμερας στερεάς κατάστασης (solid-state camera) είναι η διάταξη στερεάς κατάστασης (solid-state array), η οποία μετατρέπει το φως σε μετρήσιμες ηλεκτρικές τάσεις. Το σήμα εξόδου ενισχύεται και μορφοποιείται σε κάποιο είδος δομής βίντεο (video format). Επειδή οι πρώτες κάμερες χρησιμοποιούσανε Charged-Coupled Devices (CCDs) συνηθίζεται μέχρι τις ημέρες μας όλες οι solid-state cameras να ονομάζονται και CCDs αν και μπορεί να χρησιμοποιούνε άλλες διατάξεις όπως Charge Injection Devices (CIDs) ή Complementary Metal-Oxide Devices (CMOS).

Οι πρώτες CCDs ανακαλύφθηκαν από τους Boyle and Smith και Amelis et al. Το 1970. Από τότε, έχουνε γραφτεί πολλά βιβλία και εγχειρίδια σχετικά με την φυσική, την κατασκευή και την λειτουργία των CCDs. Η αρχιτεκτονική αυτών των συσκευών είναι βασισμένη στους ημιαγωγούς και περιλαμβάνει τρεις βασικές λειτουργίες:

- Την συλλογή του φορτίου (πληροφορία)
- Την μεταφορά του φορτίου και
- Την μετατροπή του φορτίου σε μετρήσιμη ηλεκτρική τάση.

Το βασικό δομικό στοιχείο είναι ένας πυκνωτής ημιαγωγών μετάλλου-μονωτή (Metal-Insulator Semiconductor, MIS capacitor).

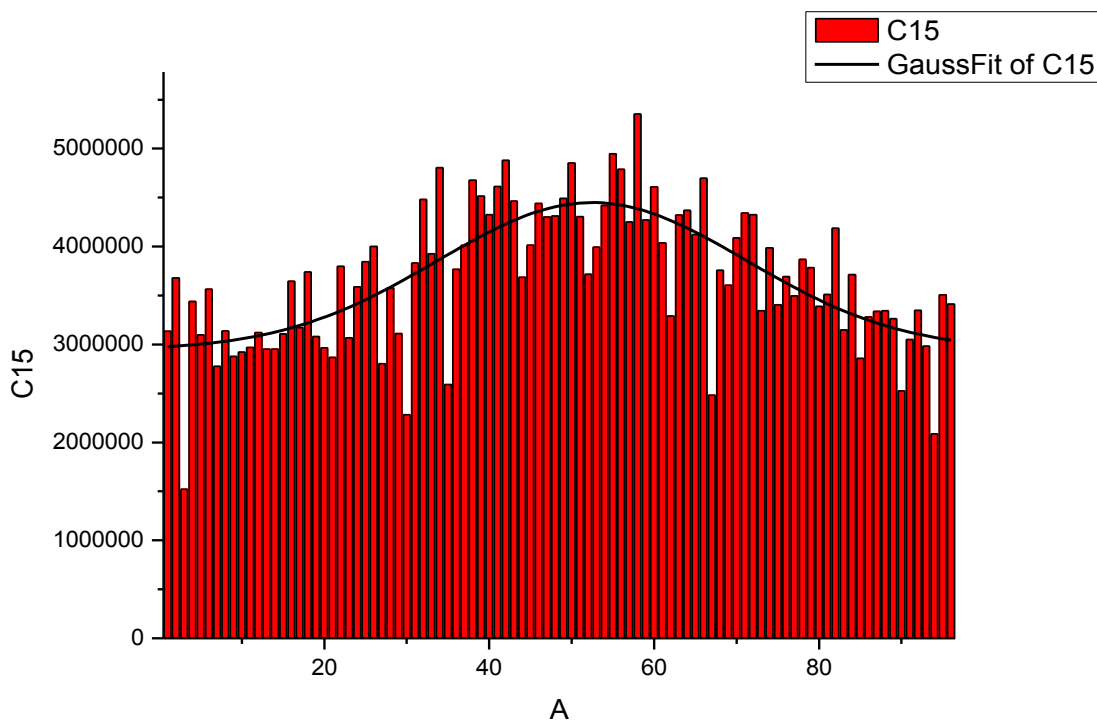
Η παραγωγή του φορτίου συχνά αναφέρεται ως η αρχική λειτουργία του CCD. Όταν οι φωτοανιχνευτές πυριτίου λαμβάνουνε ένα φωτόνιο παράγουνε ένα ζεύγος ελεύθερου ηλεκτρονίου (Ζώνη Αγωγιμότητας) – Οπής (Ζώνη Σθένους). Σαν αποτέλεσμα μπορούμε να συλλέξουμε, αποθηκεύσουμε ή μεταφέρουμε είτε το ελεύθερο ηλεκτρόνιο είτε την οπή. Στις συσκευές μεταφοράς πλαισίου (frame transfer devices), η παραγωγή του

φορτίου γίνεται με ένα πυκνωτή MOS (φωτοπύλη). Σε κάποιες συσκευές και κυρίως τις interline transfer devices, το φορτίο παράγεται από φωτοδιόδους.

Γενικά, τέτοιου είδους κάμερες περιγράφονται σύμφωνα με την αρχιτεκτονική τους (frame transfer, interline transfer κτλ) ή σύμφωνα με την εφαρμογή τους. Για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος, η περιπλοκότητα της διάταξης και η ηλεκτρονική επεξεργασία η αρχιτεκτονική τους σχεδιάζεται σύμφωνα με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται η κάμερα. Η απόσταση, όμως, μεταξύ των συσκευών γενικής χρήσης, των επιστημονικών συσκευών και των στρατιωτικών συσκευών μικραίνει συνεχώς, καθώς η τεχνολογία αναπτύσσεται.

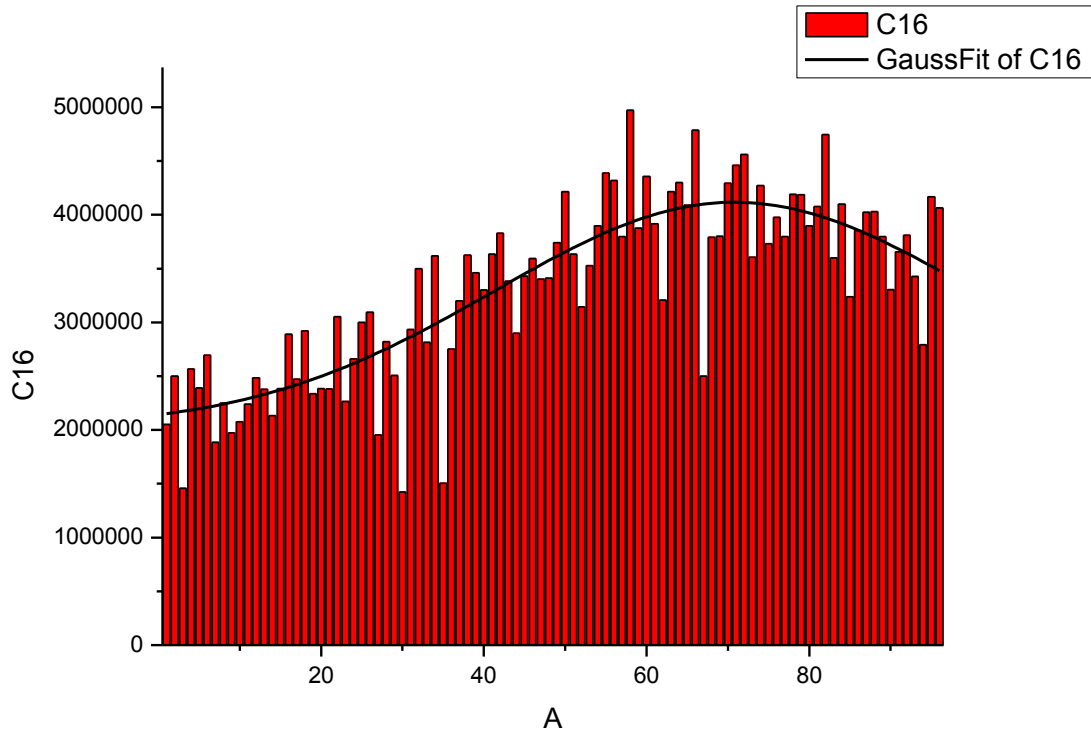
Γ. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΣΤΙΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5019- 5000_DATA	118 (Uncoated)	118 (Coated)



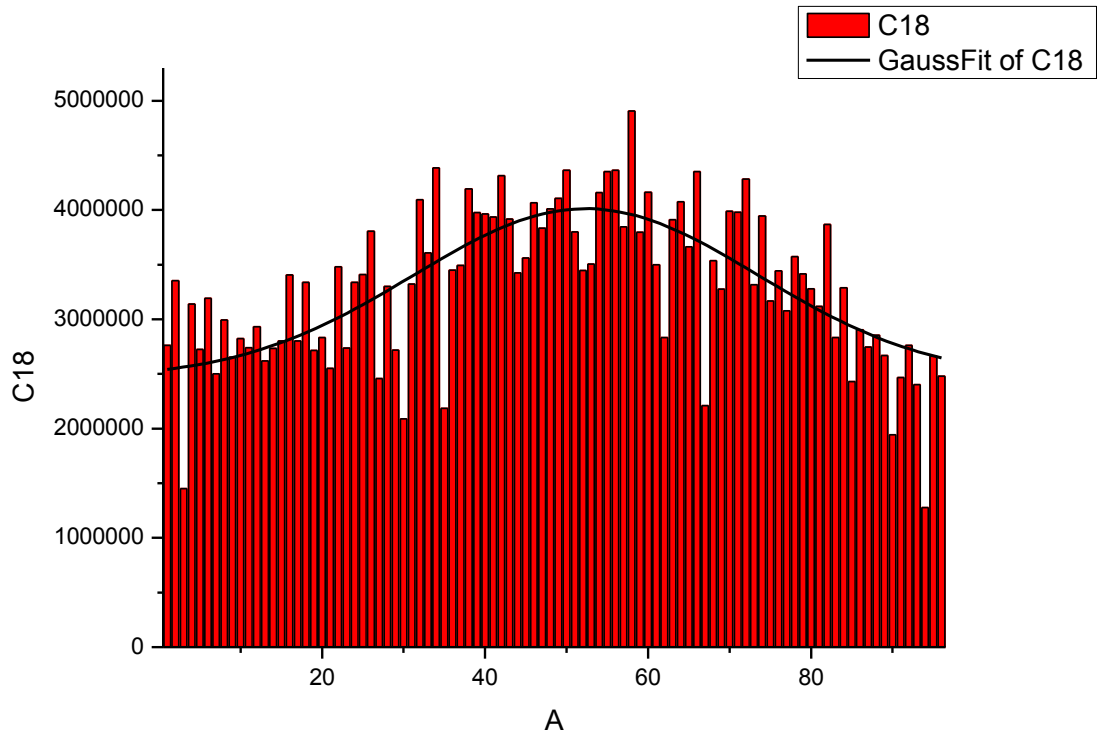
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	2,49E+11		
Adj. R-Square	0,49983		
		Value	Standard Error
C15	y0	2,94E+06	183065,7
C15	xc	52,48478	1,53181
C15	w	37,49649	6,35731
C15	A	7,08E+07	1,80E+07
C15	sigma	18,74825	
C15	FWHM	44,14874	
C15	Height	1,51E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5020- 5000_DATA	95 (Uncoated)	95 (Coated)



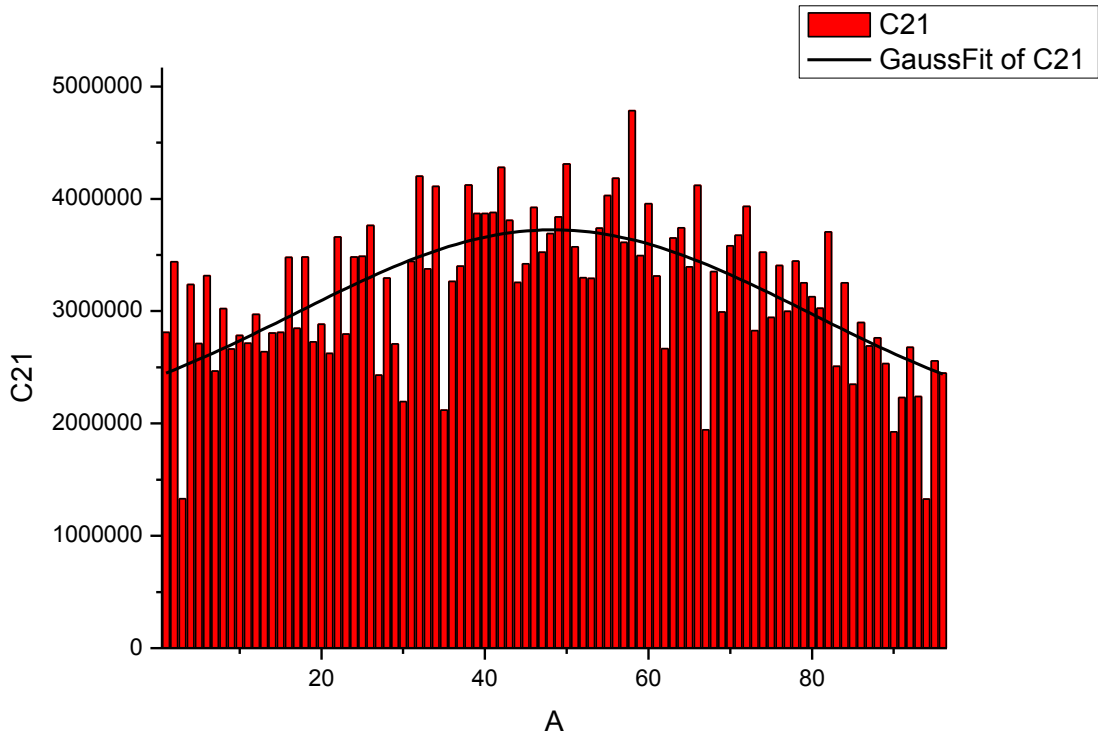
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2}))*\exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	2,14E+11		
Adj. R-Square	0,68373		
		Value	Standard Error
C16	y0	2,02E+06	244054,2
C16	xc	70,83941	2,06746
C16	w	59,04036	8,994
C16	A	1,55E+08	3,74E+07
C16	sigma	29,52018	
C16	FWHM	69,51471	
C16	Height	2,09E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5022- 5000_DATA	123 (Uncoated)	123 (Coated)



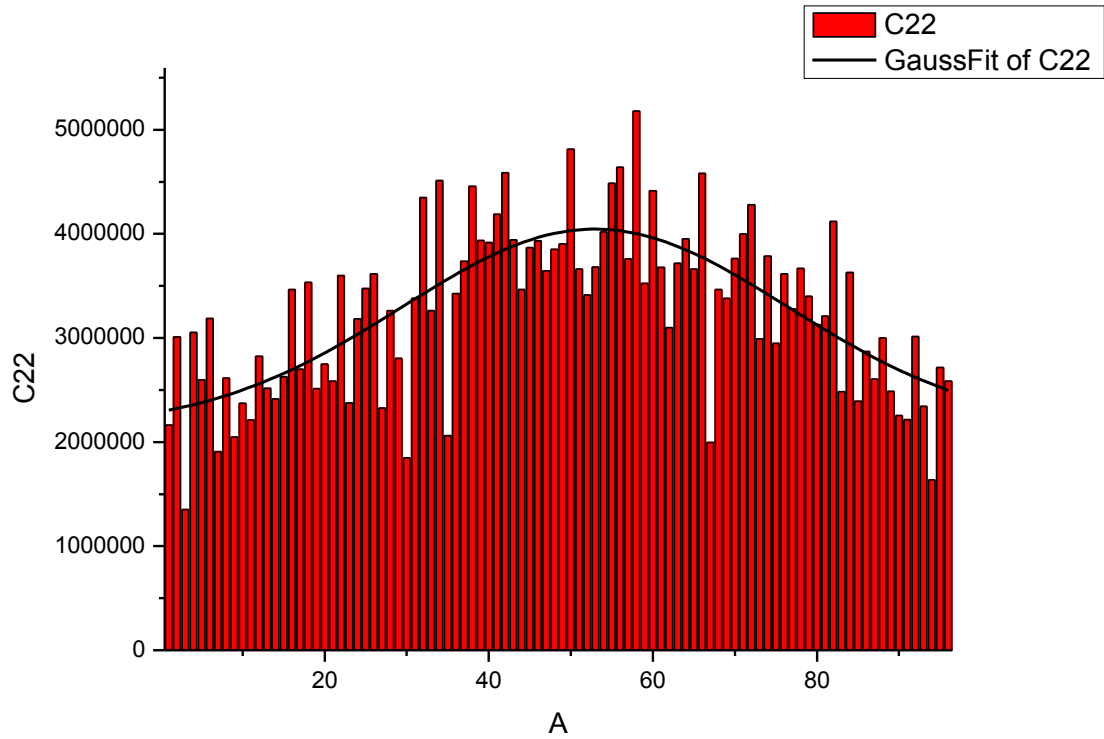
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	2,48E+11		
Adj. R-Square	0,4869		
		Value	Standard Error
C18	y0	2,46E+06	254270,7
C18	xc	52,36537	1,59153
C18	w	42,38564	8,35255
C18	A	8,25E+07	2,68E+07
C18	sigma	21,19282	
C18	FWHM	49,90527	
C18	Height	1,55E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5027- 5000_DATA	135 (Uncoated)	135 (Coated)



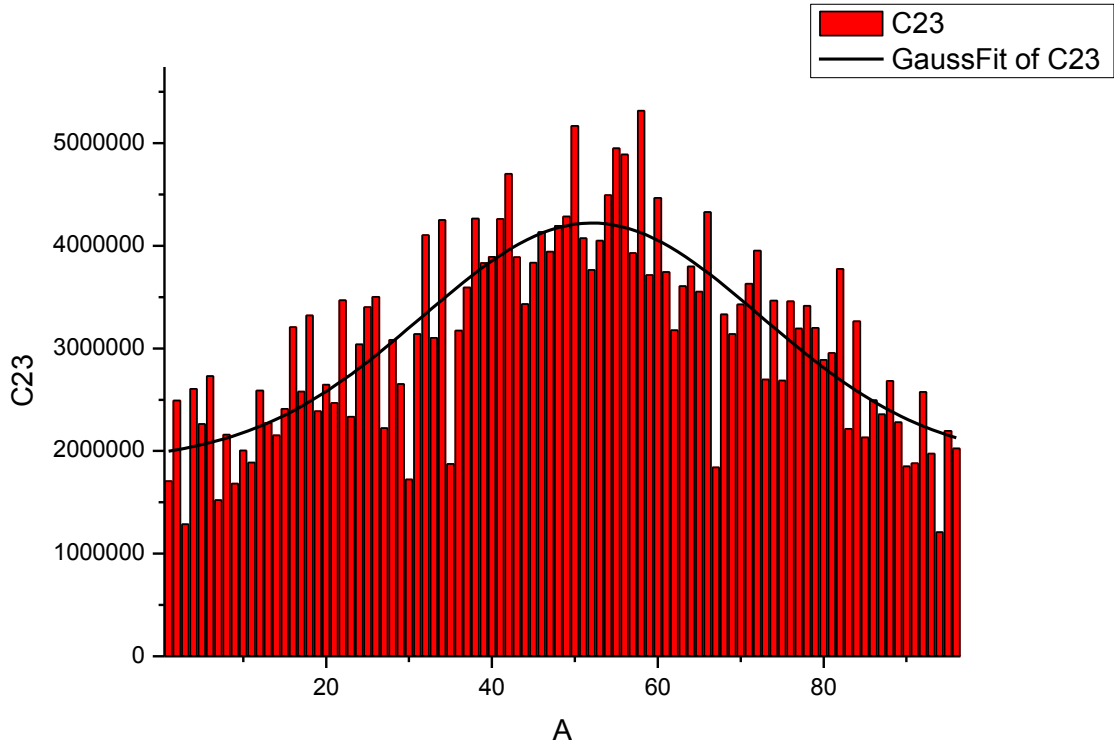
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	2,53E+11		
Adj. R-Square	0,39701		
		Value	Standard Error
C21	y0	1,85E+06	1,07E+06
C21	xc	48,31919	1,77941
C21	w	62,59551	28,30749
C21	A	1,47E+08	1,46E+08
C21	sigma	31,29775	
C21	FWHM	73,70058	
C21	Height	1,87E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5028- 5000_DATA	145 (Uncoated)	143 (Coated)



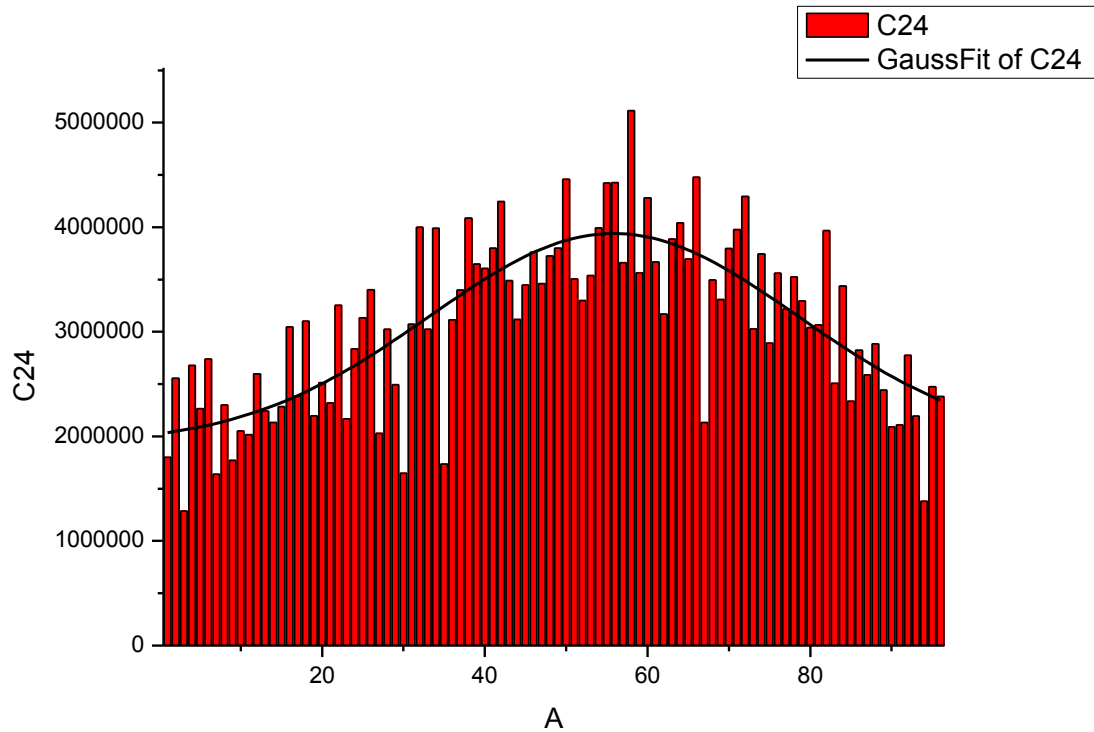
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	3,12E+11		
Adj. R-Square	0,50014		
		Value	Standard Error
C22	y0	2,14E+06	382737,1
C22	xc	52,94308	1,56334
C22	w	47,10605	10,10764
C22	A	1,13E+08	4,31E+07
C22	sigma	23,55303	
C22	FWHM	55,46314	
C22	Height	1,91E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5029- 5000_DATA	140 (Uncoated)	120 (Coated)



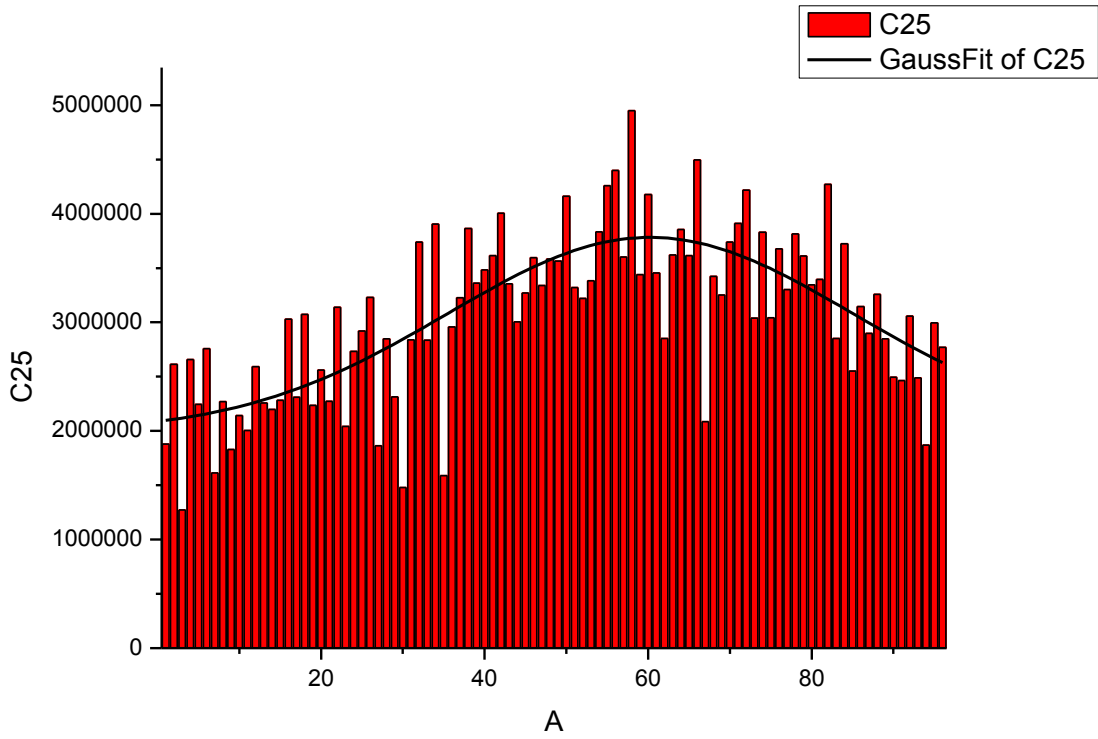
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-x_c)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	3,07E+11		
Adj. R-Square	0,64463		
		Value	Standard Error
C23	y0	1,89E+06	259408,5
C23	x _c	52,03549	1,15556
C23	w	40,98208	5,7136
C23	A	1,20E+08	2,68E+07
C23	sigma	20,49104	
C23	FWHM	48,25271	
C23	Height	2,33E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5030- 5000_DATA	135 (Uncoated)	120 (Coated)



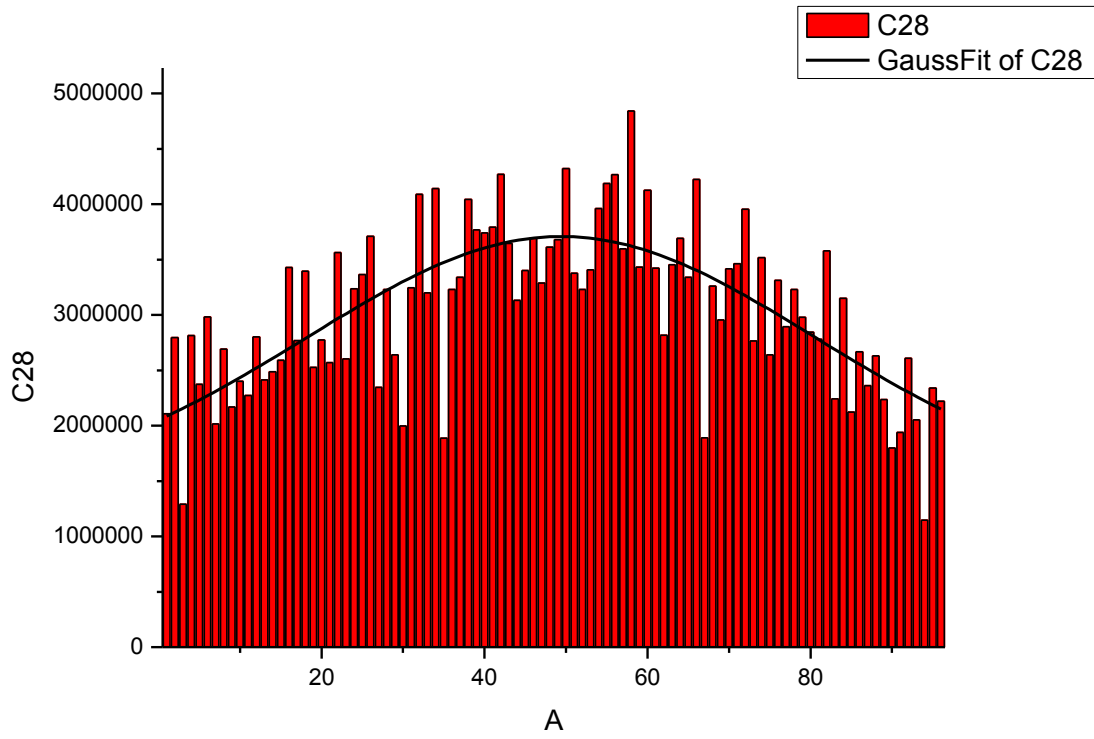
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	2,68E+11		
Adj. R-Square	0,58819		
		Value	Standard Error
C24	y0	1,93E+06	273647,4
C24	xc	55,84779	1,35505
C24	w	45,3047	7,10295
C24	A	1,14E+08	3,03E+07
C24	sigma	22,65235	
C24	FWHM	53,34221	
C24	Height	2,01E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5031- 5000_DATA	130 (Uncoated)	120 (Coated)



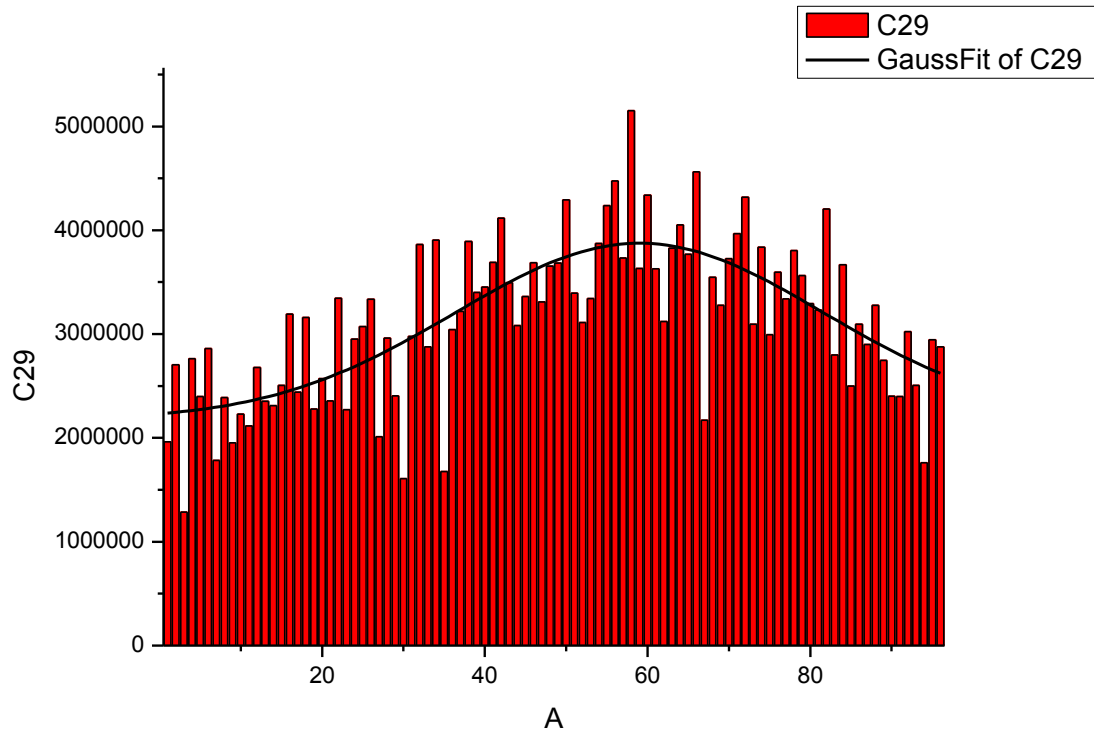
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	2,65E+11		
Adj. R-Square	0,52675		
		Value	Standard Error
C25	y0	1,99E+06	275222,7
C25	xc	60,25883	1,69283
C25	w	49,66843	8,64984
C25	A	1,11E+08	3,30E+07
C25	sigma	24,83422	
C25	FWHM	58,48011	
C25	Height	1,79E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5034- 5000_DATA	115 (Uncoated)	120 (Coated)



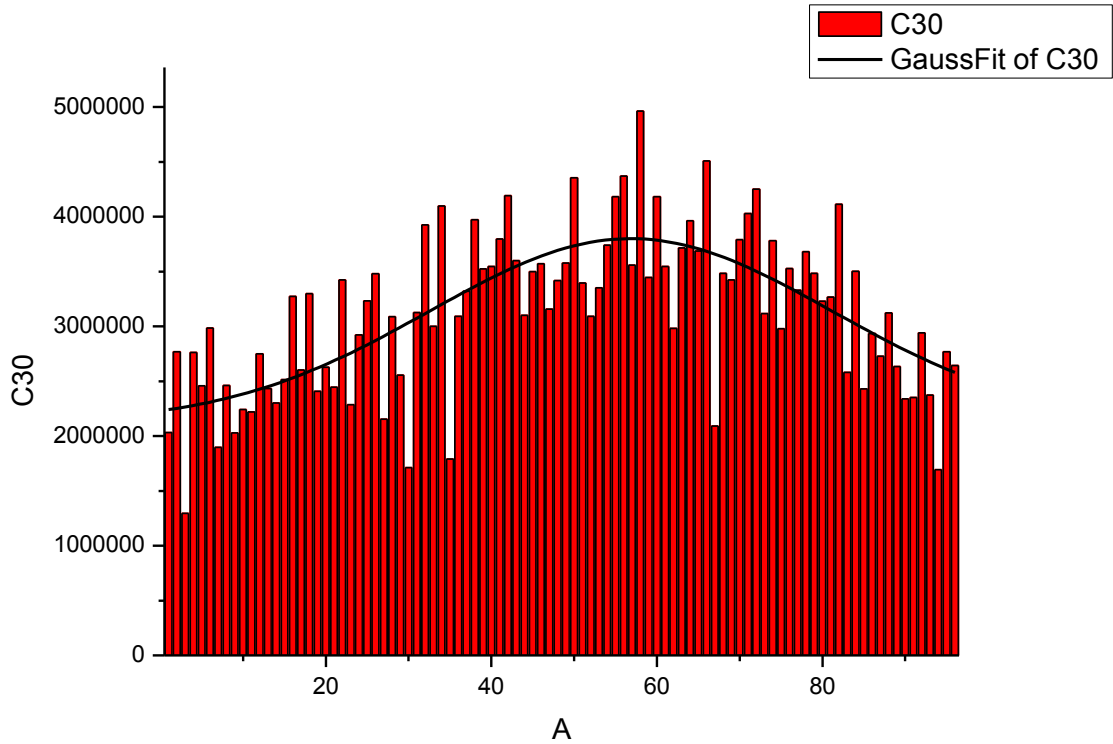
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	2,60E+11		
Adj. R-Square	0,50185		
		Value	Standard Error
C28	y0	1,38E+06	1,07E+06
C28	xc	49,40512	1,45491
C28	w	62,50299	22,83816
C28	A	1,82E+08	1,46E+08
C28	sigma	31,25149	
C28	FWHM	73,59164	
C28	Height	2,32E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5035- 5000_DATA	138 (Uncoated)	120 (Coated)



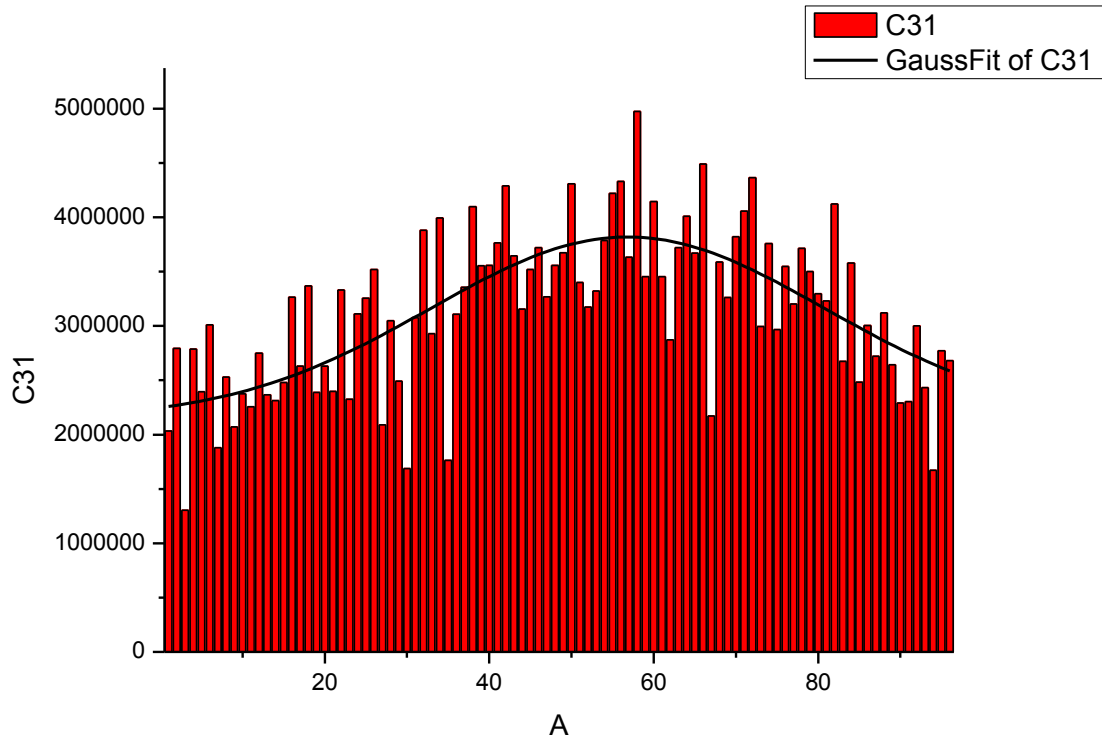
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	2,68E+11		
Adj. R-Square	0,5168		
		Value	Standard Error
C29	y0	2,18E+06	231749,8
C29	xc	59,00603	1,63189
C29	w	45,23955	7,48425
C29	A	9,64E+07	2,60E+07
C29	sigma	22,61978	
C29	FWHM	53,2655	
C29	Height	1,70E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5036- 5000_DATA	140 (Uncoated)	120 (Coated)



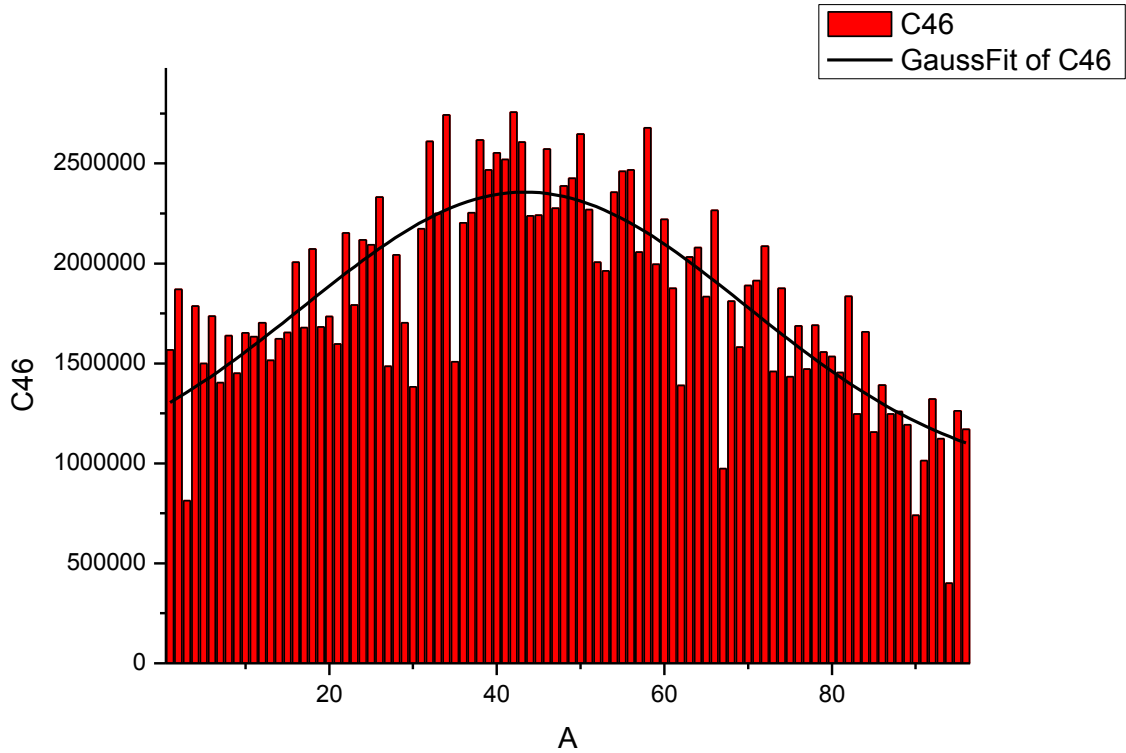
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	2,69E+11		
Adj. R-Square	0,47704		
		Value	Standard Error
C30	y0	2,12E+06	316690,2
C30	xc	56,84891	1,73121
C30	w	48,63044	9,93715
C30	A	1,02E+08	3,68E+07
C30	sigma	24,31522	
C30	FWHM	57,25797	
C30	Height	1,68E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5037- 5000_DATA	142 (Uncoated)	120 (Coated)



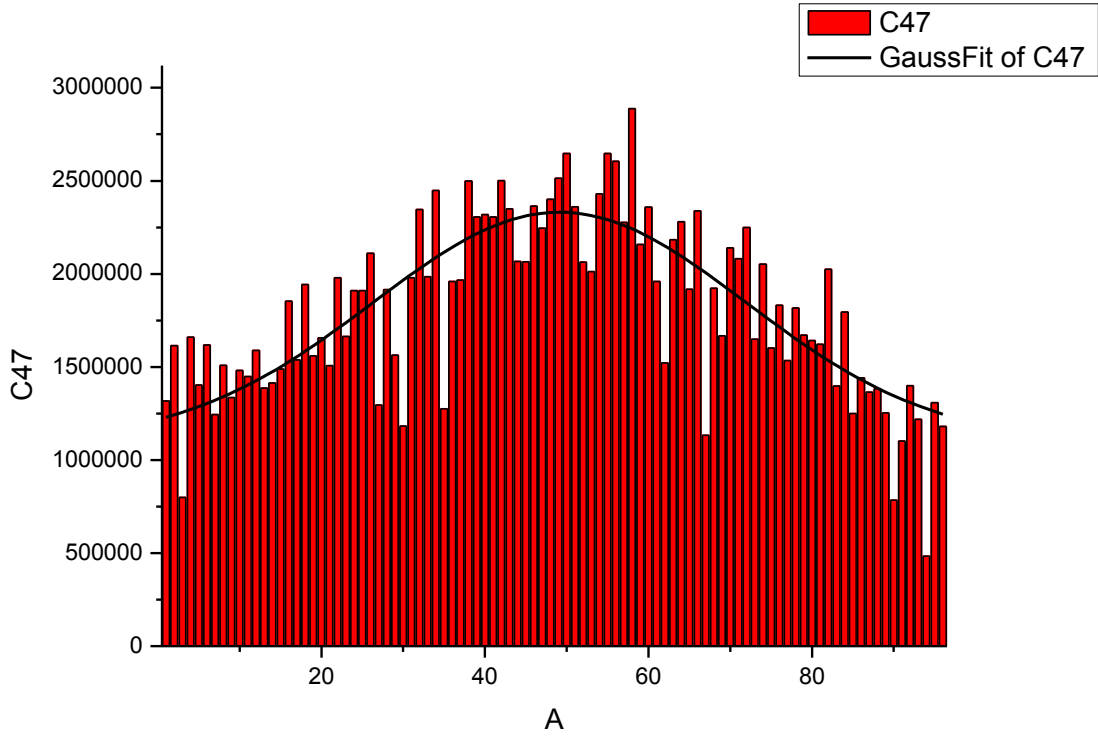
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	2,76E+11		
Adj. R-Square	0,47302		
		Value	Standard Error
C31	y0	2,15E+06	307090
C31	xc	56,82114	1,73882
C31	w	47,87205	9,69126
C31	A	1,00E+08	3,53E+07
C31	sigma	23,93603	
C31	FWHM	56,36504	
C31	Height	1,67E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5074- 5000_DATA	120 (Coated)	135 (Coated)



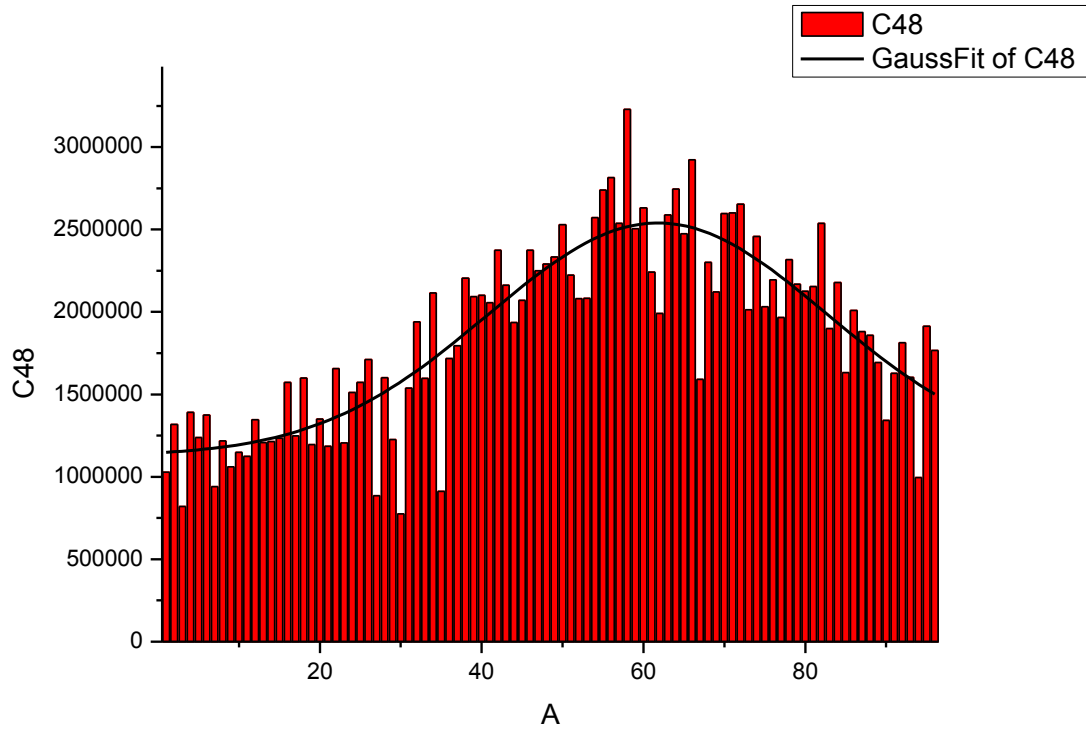
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	8,62E+10		
Adj. R-Square	0,64254		
		Value	Standard Error
C46	y0	899111,2	283853,8
C46	xc	43,38122	1,18562
C46	w	52,9977	9,78344
C46	A	9,68E+07	3,46E+07
C46	sigma	26,49885	
C46	FWHM	62,40003	
C46	Height	1,46E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5075- 5000_DATA	120 (Coated)	130 (Coated)



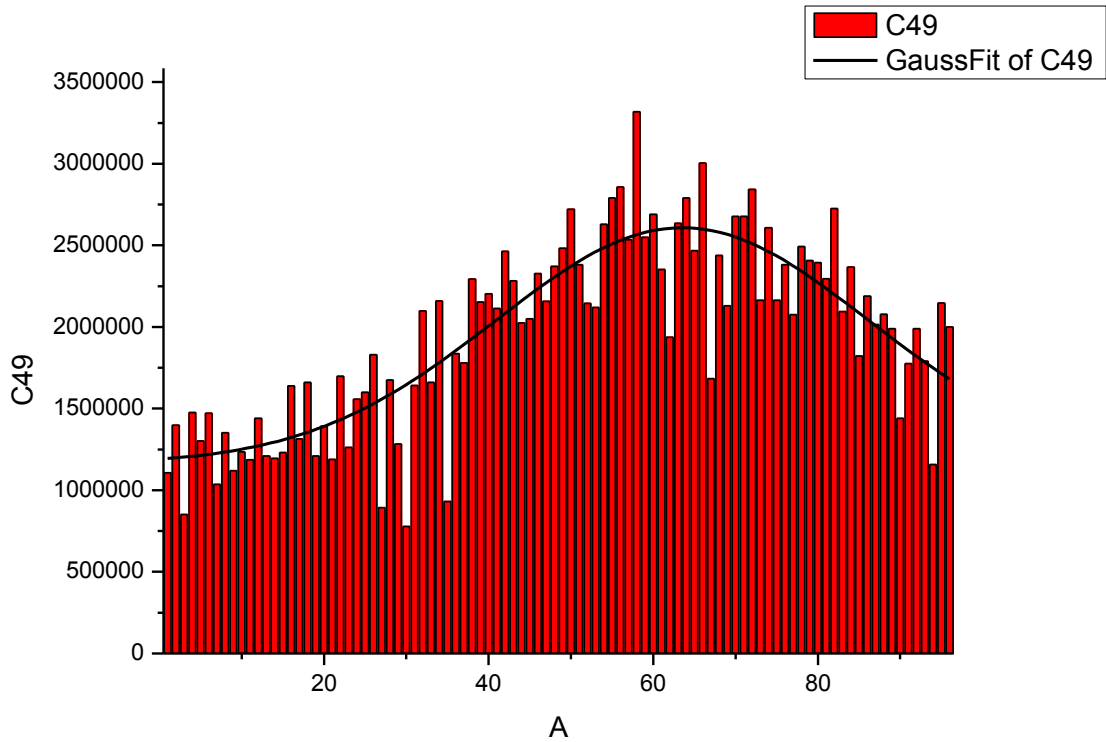
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	8,52E+10		
Adj. R-Square	0,614		
		Value	Standard Error
C47	y0	1,10E+06	201865,7
C47	xc	49,13517	1,21972
C47	w	45,65933	8,12058
C47	A	7,07E+07	2,22E+07
C47	sigma	22,82966	
C47	FWHM	53,75975	
C47	Height	1,23E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5076- 5000_DATA	120 (Coated)	125 (Coated)



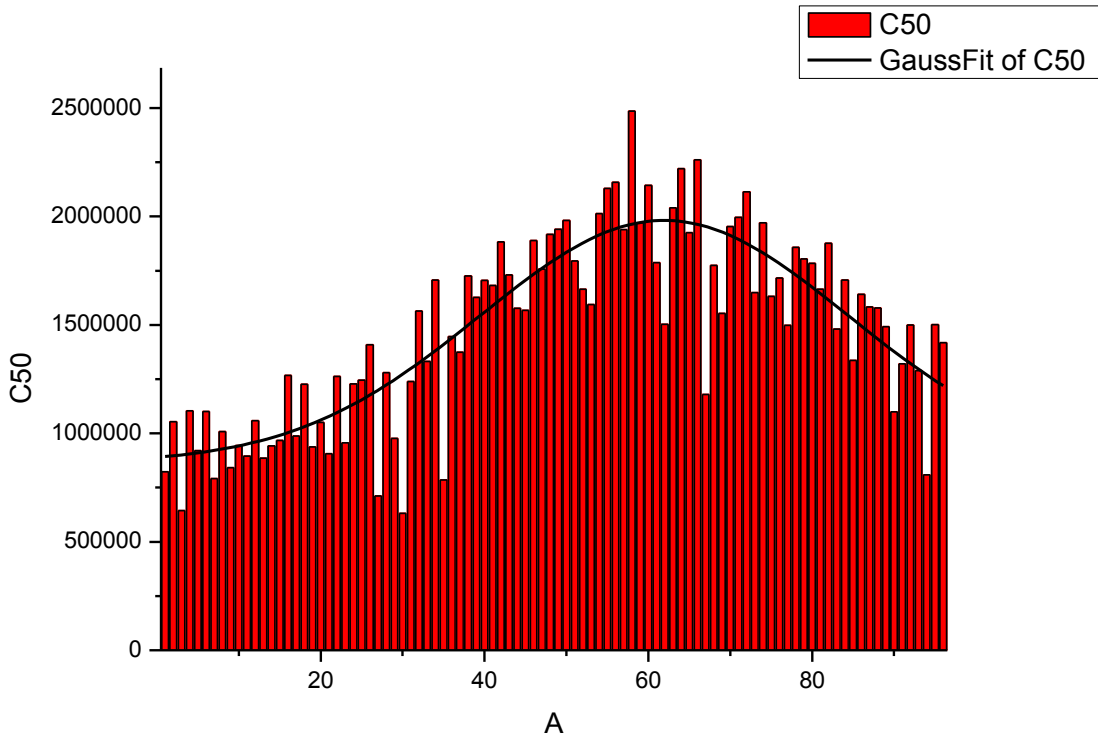
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	8,03E+10		
Adj. R-Square	0,73732		
		Value	Standard Error
C48	y0	1,13E+06	94736,05
C48	xc	61,77526	1,03174
C48	w	41,95995	3,87738
C48	A	7,43E+07	1,03E+07
C48	sigma	20,97997	
C48	FWHM	49,40406	
C48	Height	1,41E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5077- 5000_DATA	125 (Coated)	135 (Coated)



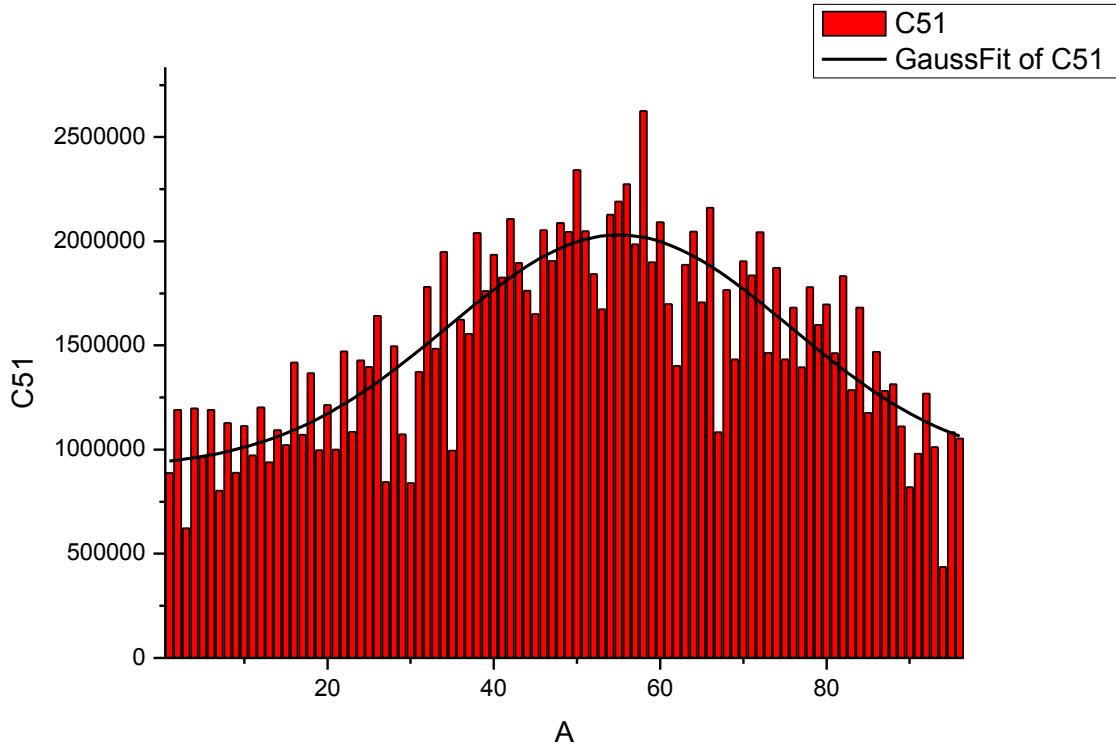
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	9,21E+10		
Adj. R-Square	0,71536		
		Value	Standard Error
C49	y0	1,16E+06	110818
C49	xc	63,5222	1,17299
C49	w	45,34517	4,64058
C49	A	8,22E+07	1,28E+07
C49	sigma	22,67259	
C49	FWHM	53,38986	
C49	Height	1,45E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5078- 5000_DATA	130 (Coated)	135 (Coated)



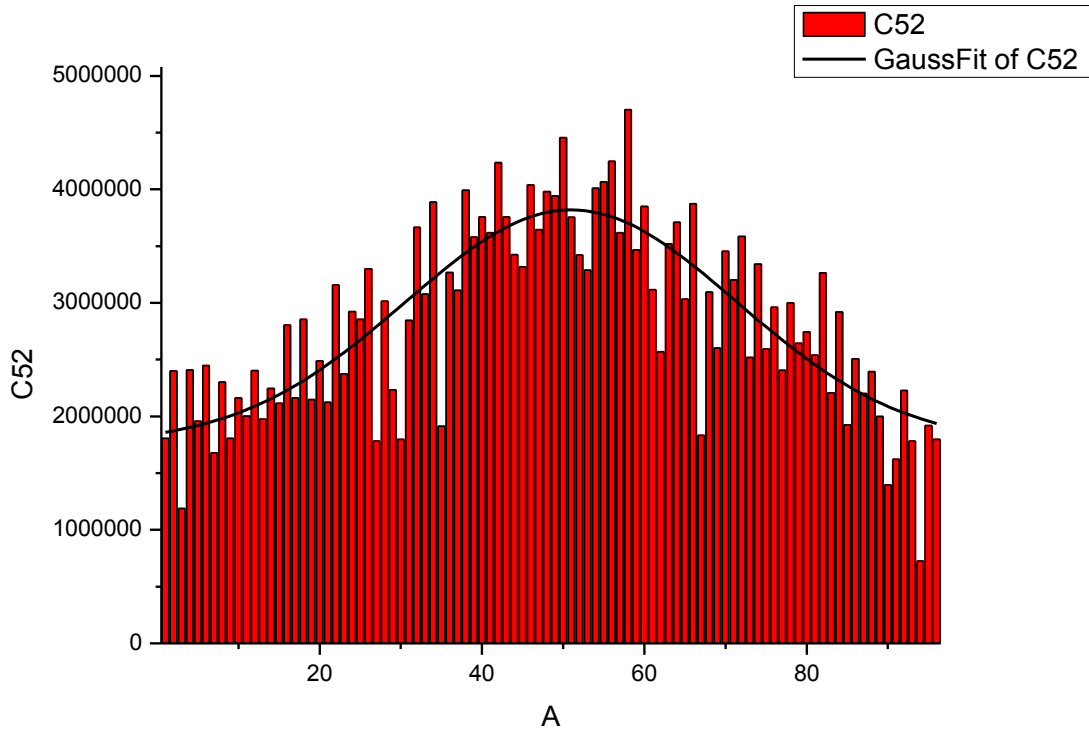
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	5,10E+10		
Adj. R-Square	0,72462		
		Value	Standard Error
C50	y0	864689	86849,85
C50	xc	61,93347	1,10365
C50	w	44,98231	4,52983
C50	A	6,30E+07	9,86E+06
C50	sigma	22,49116	
C50	FWHM	52,96263	
C50	Height	1,12E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5083- 5000_DATA	115 (Coated)	135 (Coated)



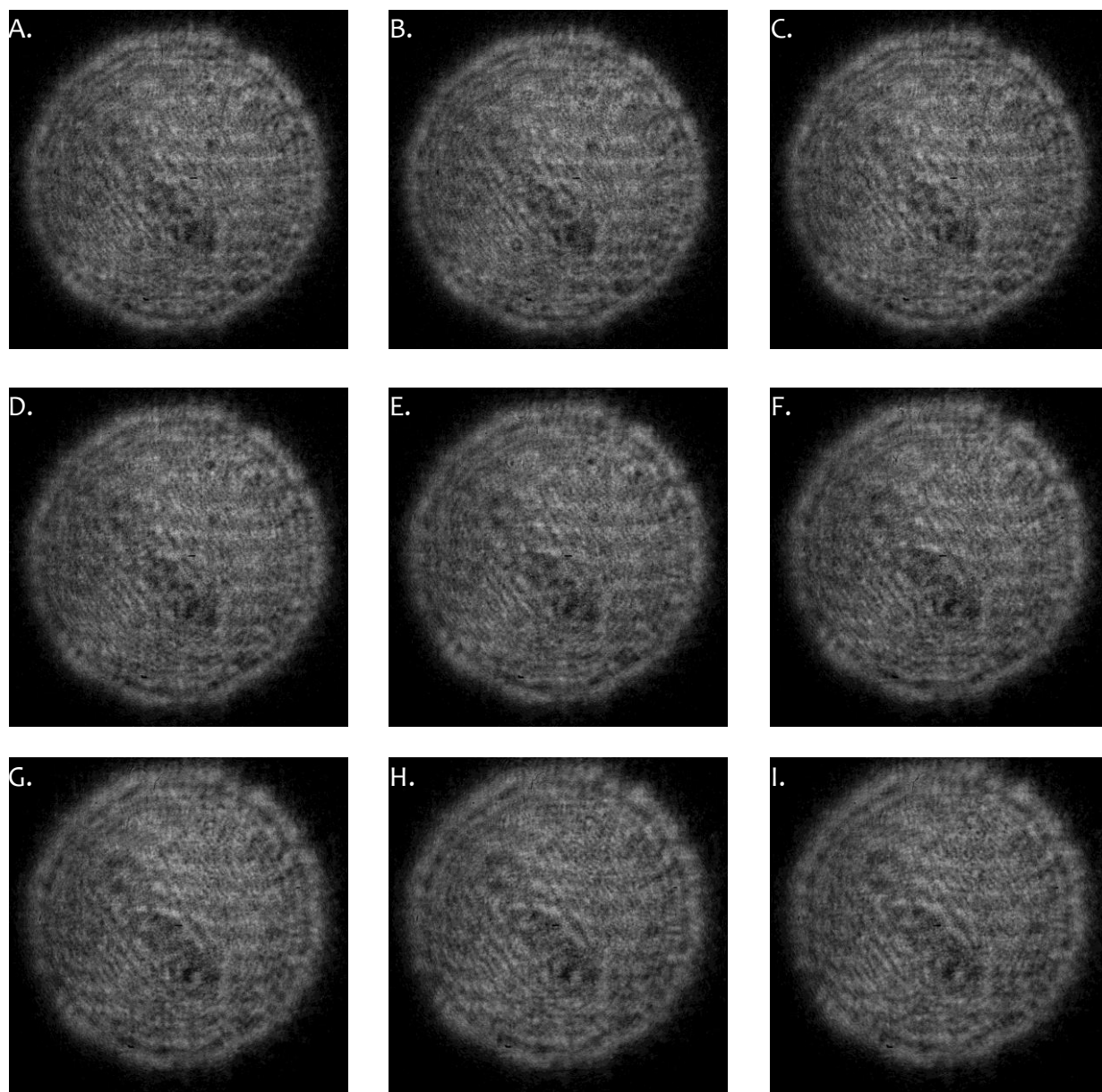
Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-x_c)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	6,59E+10		
Adj. R-Square	0,66619		
		Value	Standard Error
C51	y0	908924,3	109443,7
C51	x_c	55,04554	1,12337
C51	w	41,1707	5,10813
C51	A	5,79E+07	1,14E+07
C51	sigma	20,58535	
C51	FWHM	48,4748	
C51	Height	1,12E+06	

Αρχείο (*.DAT)	Απόσταση 1 ^{ου} MCP από την πηγή (cm) – (Τύπος)	Απόσταση 2 ^{ου} MCP από τον ανι- χνευτή (cm) – (Τύπος)
Run5084- 5000_DATA	111 (Coated)	135 (Coated)



Model	Gauss		
Equation	$y=y_0 + (A/(w*\sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$		
Reduced Chi-Sqr	2,34E+11		
Adj. R-Square	0,65146		
		Value	Standard Error
C52	y0	1,76E+06	229661,2
C52	xc	50,98379	1,13388
C52	w	40,80076	5,68561
C52	A	1,05E+08	2,36E+07
C52	sigma	20,40038	
C52	FWHM	48,03922	
C52	Height	2,06E+06	

Δ. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΣΤΙΑΣΗΣ ΣΤΟ ΟΠΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ



Εικόνα 1. Φωτογραφίες (ίδιου μεγέθους) της δέσμης σε απόσταση Α. 80 cm, Β. 90cm, C. 100 cm, D. 110 cm, E. 120 cm, F. 130 cm, G. 140 cm, H. 150 cm και I. 160 cm από το MicroChannel Plate.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Carolyn A. MacDonald, Walter M. Gibson.** *Handbook Of Optics Second Edition Vol.2.*
2. **A. G. Peele, K. A. Nugent, A. V. Rode, K. Gabel, M. C. Richardson, R. Strack,.** *X-ray focusing with lobster-eye optics: a comparison of theory with experiment.*
3. NASA's IMAGINE THE UNIVERSE. http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/known_12/history_xray.html.
[Ηλεκτρονικό]
4. **R. Hudec, L. Sveda, L. Pina, A. Inneman and V. Simon.** *Lobster Eye Telescopes as X-ray All-Sky Monitors.*
5. **Fraser, G.W.** *The Wide Field X-ray Telescope (WFT) for Spectrum Rontgen-Gamma (SRG).*
6. **G.J Prince, A.N. Brunton, M.W. Beijersbergen, G.W. Fraser, M.Bavdaz, J-P Boutot, R. Fairbend, S-O. Flyckt, A. Peacock, E.Tomaselli.** *X-Ray focusing with Wolter microchannel plate optics.*
7. **Michael, Bass.** *Handbook of Optics, Third Edition Volume IV Optical Properties of Materials, Nonlinear Optics, Quantum Optics.*
8. <http://en.wikipedia.org/wiki/Bremsstrahlung>. [Ηλεκτρονικό]
9. **Kittel, C.** *Introduction to Solid State Physics 8th Edition.*