

ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΕΙΔΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ (e / m) ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ

A. ΣΤΟΧΟΙ

- Η εξοικείωση με τη χρήση τροφοδοτικού (χαμηλών και υψηλών τάσεων), σωληνοειδούς πηνίου και πολύμετρου που είναι βασικά όργανα του ηλεκτρισμού.
- Η γνωριμία του καθοδικού σωλήνα και η εξοικείωση με την κατασκευή, τη λειτουργία και τις χρήσεις του.
- Η παρατήρηση της δέσμης ηλεκτρονίων που παράγονται και επιταχύνονται στον καθοδικό σωλήνα.
- Η παρατήρηση της εκτροπής μιας δέσμης ηλεκτρονίων από το γήινο μαγνητικό πεδίο, καθώς και από το ομογενές μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου σωληνοειδούς πηνίου.
- Η παρατήρηση της εκτροπής μιας δέσμης ηλεκτρονίων από ομογενές ηλεκτρικό πεδίο.
- Η κατανόηση της αρχής στην οποία στηρίζεται η λειτουργία της καθοδικής τηλεόρασης (CRT).

B. ΘΕΜΑ

- Ο υπολογισμός του λόγου e / m του ηλεκτρονίου, μετρώντας :
 - ✓ την ανοδική τάση στον καθοδικό σωλήνα
 - ✓ το ρεύμα που είναι υπεύθυνο για το μαγνητικό πεδίο στο σωληνοειδές πηνίο και γνωρίζοντας από τον κατασκευαστή :
 - ✓ την απόσταση D μεταξύ των πλακιδίων οριζόντιας απόκλισης $X'X$ και της οθόνης
 - ✓ τη σταθερά λ του σωληνοειδούς πηνίου

Γ. ΟΡΓΑΝΑ

- Καθοδικός σωλήνας πάνω σε κατάλληλη βάση στήριξης / τροφοδοσίας.
- Κατάλληλο σωληνοειδές πηνίο 550 σπειρών χωρίς πυρήνα.
- Καλώδια συνδέσεων.
- Τροφοδοτικό χαμηλών και υψηλών σταθεροποιημένων τάσεων DC και AC.
- Αμπερόμετρο 0–20 A DC.



Δ. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ

- Για την πραγματοποίηση και κατανόηση της άσκησης χρειάζονται οι παρακάτω γνώσεις από το σχολικό βιβλίο Κατεύθυνσης της Β' τάξης Γενικού Λυκείου :
 - ✓ Ενότητα 3-8 : Κινήσεις φορτισμένων σωματιδίων σε ομογενές ηλεκτροστατικό πεδίο
 - ✓ Ενότητα 4-8 : Κίνηση φορτισμένων σωματιδίων μέσα σε μαγνητικό πεδίο
 - ✓ Ενότητα 4-9 : Εφαρμογές της κίνησης φορτισμένων σωματιδίων (το πείραμα του Thomson και η μέτρηση του e/m)

Ε. ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ

- Για τη μέτρηση του λόγου e/m χρησιμοποιούμε έναν καθοδικό σωλήνα που επιτρέπει την επίδραση ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων πάνω σε δέσμη ηλεκτρονίων.
- Η δέσμη των ηλεκτρονίων στον καθοδικό σωλήνα :
 - ✓ δημιουργείται από ένα θερμαινόμενο νήμα (κάθοδος)

- ✓ επιταχύνεται με την εφαρμογή μίας υψηλής ανοδικής τάσης V_a που εφαρμόζεται μεταξύ καθόδου και ανόδου
- ✓ οδηγείται σε μία φθορίζουσα οθόνη στο άλλο άκρο του σωλήνα, όπου και δημιουργεί μία φωτεινή κηλίδα.
- Η δέσμη ηλεκτρονίων, μετά την έξοδό της από την άνοδο και πριν την πρόσπτωσή της στην οθόνη, περνάει κατά σειρά μέσα από δύο ζεύγη πλακιδίων (YY' και $X'X$) καθέτων μεταξύ τους στα οποία εφαρμόζεται κάποια συνεχής τάση :
 - ✓ εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μηδενική, η δέσμη πέφτει ακριβώς στο κέντρο της οθόνης.
 - ✓ εάν εφαρμοστεί τάση στο ζεύγος των πλακιδίων YY' , η δέσμη υπό την επίδραση του ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται, εκτρέπεται κατακόρυφα (πάνω ή κάτω) και αντίστοιχα αν εφαρμοστεί τάση στο ζεύγος $X'X$ η δέσμη εκτρέπεται οριζόντια (δεξιά ή αριστερά).
 - ✓ εάν εφαρμοστεί τάση και στα δύο ζεύγη των πλακιδίων, η δέσμη ακολουθεί μία σύνθετη εκτροπή.
- Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την κάθοδο επιταχύνονται υπό την επίδραση της ανοδικής τάσης V_a και αποκτούν κινητική ενέργεια ίση με το έργο της δύναμης του ηλεκτρικού πεδίου :

$$\frac{1}{2} m v_o^2 = e V_a \quad \text{ή} \quad v_o = \sqrt{\frac{2eV_a}{m}} \quad (1)$$

- Εάν εφαρμοστεί μία τάση στα πλακίδια οριζόντιας εκτροπής $X'X$ (ή στα YY'), τα ηλεκτρόνια της δέσμης καθώς διέρχονται από αυτά εκτρέπονται από την ευθύγραμμη πορεία και αποκτούν ταχύτητα η οποία μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες :
 - ✓ μία συνιστώσα v_{\perp} κάθετη προς τον άξονα του καθοδικού σωλήνα
 - ✓ μία συνιστώσα v_{\parallel} παράλληλη προς τον άξονα
- Εάν μαζί με το ηλεκτρικό πεδίο που αναφέραμε, εφαρμόσουμε και μαγνητικό πεδίο παράλληλο με τον άξονα του καθοδικού σωλήνα, τότε στα ηλεκτρόνια της δέσμης ασκείται μία δύναμη Lorentz λόγω της ταχύτητας v_{\perp} :

$$F_L = e v_{\perp} B \quad (2)$$

η οποία ενεργεί σαν κεντρομόλος δύναμη πάνω στα ηλεκτρόνια και επομένως :

$$e v_{\perp} B = \frac{m v_{\perp}^2}{R} \quad (3)$$

- Τα ηλεκτρόνια εκτελούν ταυτόχρονα δύο κινήσεις :
 - ✓ μία ομαλή κυκλική γύρω από τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου με ταχύτητα v_{\perp}
 - ✓ μία ευθύγραμμη ομαλή κατά μήκος των δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου με ταχύτητα v_{\parallel}

Από τη σύνθεση των δύο κινήσεων προκύπτει ελικοειδής κίνηση γύρω από τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου με σταθερό βήμα έλικας.

- Ο χρόνος που απαιτείται για τη μετακίνηση D ενός ηλεκτρονίου από το κέντρο των πλακιδίων οριζόντιας εκτροπής $X'X$ μέχρι την οθόνη υπολογίζεται από την σχέση :

$$v_o = \frac{D}{t_o} \quad \text{ή} \quad t = \frac{D}{v_o}$$

όπου v_o η ταχύτητα με την οποία εξέρχονται τα ηλεκτρόνια από την άνοδο.

- Στο ίδιο χρονικό διάστημα υπό την επίδραση της δύναμης Lorentz το ηλεκτρόνιο είναι δυνατόν να εκτελέσει ημικυκλική τροχιά με ακτίνα R και ταχύτητα v_{\perp} :

$$v_{\perp} = \frac{1}{2} \frac{2\pi R}{t} \quad \text{ή} \quad t = \frac{\pi R}{v_{\perp}}$$

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ :

Αν το μαγνητικό πεδίο έχει αρκετά μικρή τιμή, τα ηλεκτρόνια δεν θα προλάβουν να ολοκληρώσουν μισή περιστροφή μέχρι να πέσουν στη φθορίζουσα οθόνη.

- Δεδομένου ότι τα δύο αυτά χρονικά διαστήματα είναι ίσα, ισχύει :

$$\frac{D}{v_{\circ}} = \frac{\pi R}{v_{\perp}} \quad \text{ή} \quad R = \frac{D v_{\perp}}{\pi v_{\circ}} \quad (4)$$

- Από τις σχέσεις (1), (3) και (4) έχουμε :

$$\frac{e}{m} = \frac{2\pi^2 V_{\alpha}}{B^2 D^2} \quad (5)$$

- Είναι γνωστό ότι το μαγνητικό πεδίο B στο εσωτερικό του σωληνοειδούς είναι ανάλογο της έντασης I του ηλεκτρικού ρεύματος στο πηνίο :

$$B = \lambda I = \mu_{\circ} n I \quad (6)$$

όπου $\lambda = \mu_{\circ} n$ η σταθερά του σωληνοειδούς, μ_{\circ} η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, n ο αριθμός σπειρών ανά μονάδα μήκους του σωληνοειδούς.

- Από τις σχέσεις (5) & (6) βρίσκουμε τελικά τη σχέση :

$$\frac{e}{m} = \frac{2\pi^2}{\lambda^2 D^2} \cdot \frac{V_{\alpha}}{I^2} \quad (7)$$

από την οποία προκύπτει ότι ο λόγος e/m του ηλεκτρονίου μπορεί να υπολογιστεί μετρώντας :

- ✓ την απόσταση D μεταξύ των πλακιδίων οριζόντιας απόκλισης X'X και της οθόνης
- ✓ την ανοδική τάση V_{α} στον καθοδικό σωλήνα
- ✓ το ρεύμα I στο σωληνοειδές πηνίο το οποίο προκαλεί τη μετακίνηση του στίγματος πάνω στην οθόνη κατά μισή περιφέρεια
- Η ακριβής τιμή του λόγου που γνωρίζουμε σήμερα είναι :

$$\frac{e}{m} = 1,75881962 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

- ΙΣΤΟΡΙΚΟ : ο Millikan με το ομώνυμο πείραμα μέτρησε το φορτίο e του ηλεκτρονίου, οπότε ο Thomson από τον λόγο e/m μπόρεσε να προσδιορίσει τη μάζα m του ηλεκτρονίου.

ΣΤ. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

- Τοποθετούμε τον καθοδικό σωλήνα στο εσωτερικό του σωληνοειδούς και τα δύο μαζί στις υποδοχές της βάσης στήριξης / τροφοδοσίας του καθοδικού σωλήνα. Το σωληνοειδές στηρίζεται στο εμπρόσθιο τμήμα του πάνω σε συρόμενο πάνω-κάτω βραχίονα σχήματος (Y) που ρυθμίζει την κλίση του καθοδικού σωλήνα, ώστε να είναι δυνατή η ευθυγράμμιση του δημιουργούμενου μαγνητικού πεδίου με το μαγνητικό πεδίο της Γης στη συγκεκριμένη τοποθεσία όπου διεξάγεται το πείραμα. Για τη σταθερή συγκράτηση του σωληνοειδούς πάνω στο βραχίονα, ώστε να μην ανατρέπεται ακόμη και σε περιπτώσεις μεγάλης κλίσης, χρησιμοποιείται ένας λαστιχένιος ιμάντας. Ο προσανατολισμός του σωληνοειδούς πρέπει να είναι τέτοιος ώστε ο κόκκινος ακροδέκτης του να βρίσκεται στο εμπρόσθιο μέρος της βάσης.
- Με το τροφοδοτικό ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ :
 - ✓ συνδέουμε τους ακροδέκτες ΝΗΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΕΩΣ της βάσης στήριξης / τροφοδοσίας του καθοδικού σωλήνα με την έξοδο 6,3 V AC του τροφοδοτικού
 - ✓ συνδέουμε τον κόκκινο ακροδέκτη του ΠΗΝΙΟΥ (που βρίσκεται μπροστά) με τον θετικό ακροδέκτη της εξόδου 0–20 V DC του τροφοδοτικού και τον μαύρο ακροδέκτη του πηνίου με τον αντίστοιχο αρνητικό, αφού προηγουμένως παρεμβάλουμε στο κύκλωμα αυτό το αμπερόμετρο με την υποδοχή 20 A και θέτοντας τον επιλογέα του στο 20 A DC.
 - ✓ συνδέουμε τους ακροδέκτες ΑΝΟΔΟΣ – ΚΑΘΟΔΟΣ της βάσης του ΑΝΟΔΙΚΟΥ ΣΩΛΗΝΑ με την έξοδο υψηλής τάσης 0 – 500 V DC του τροφοδοτικού, προσέχοντας τις πολικότητες και χρησιμοποιώντας τα καλώδια με τις μπανάνες ασφαλείας.

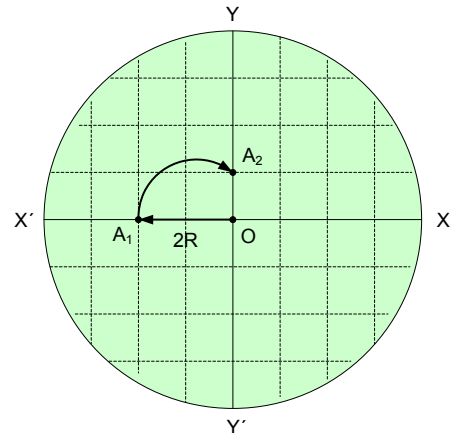
Ζ. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

1. Στρέφουμε τέρμα αριστερά τα κουμπιά ρύθμισης των τάσεων εξόδου 0–20 V DC και 0–500 V DC του τροφοδοτικού.
2. Θέτουμε ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ το τροφοδοτικό με το διακόπτη ON – OFF.

3. Ρυθμίζουμε την υψηλή τάση σε μία τιμή π.χ. $V_a = 300$ V DC. Στην οθόνη του σωλήνα θα εμφανιστεί μία φωτεινή κηλίδα. Χρησιμοποιώντας το ρυθμιστικό της εστίασης πάνω στην βάση στήριξης / τροφοδοσίας εστιάζουμε την κηλίδα, ώστε να είναι κυκλική και κατά το δυνατόν σημειακή.
4. Επειδή η πορεία της δέσμης επηρεάζεται από το γήινο μαγνητικό πεδίο, περιστρέφουμε τη βάση στήριξης / τροφοδοσίας καθώς και τον καθοδικό σωλήνα μέσα στο πηνίο, προσπαθώντας να συμπίσει η φωτεινή κηλίδα πάνω στο κέντρο O του διαγραμμισμένου δίσκου. Πιθανόν να χρειαστεί να αλλάξει και η κλίση του συστήματος πηνίου / καθοδικού σωλήνα. Για να το επιτύχουμε αυτό χαλαρώνουμε την πεταλούδα σταθεροποίησης του βραχίονα ανύψωσης του πηνίου και αφού το ρυθμίσουμε στην κατάλληλη θέση την ξανασφίγγουμε.
5. Με τη βοήθεια των κατάλληλων καλωδίων :
 - ✓ Συνδέουμε κατ' αρχήν (μόνο) τον κόκκινο ακροδέκτη των πλακιδίων οριζόντιας απόκλισης X'X στον θετικό ακροδέκτη της εξόδου ± 5 V DC του τροφοδοτικού. Παρατηρούμε ότι η κηλίδα εκτρέπεται από το κέντρο O του διαγραμμισμένου δίσκου και σχηματίζει μια γραμμή. Στρέφουμε τον διαγραμμισμένο δίσκο, που βρίσκεται μπροστά στην οθόνη, ώστε ο άξονας X να ταυτιστεί με τη γραμμή.
ΠΡΟΣΟΧΗ : περιστρέφουμε μόνο τον διαγραμμισμένο δίσκο και όχι ολόκληρο τον καθοδικό σωλήνα !
 - ✓ Συνδέουμε κατόπιν και τον μαύρο ακροδέκτη των πλακιδίων X'X στον αρνητικό ακροδέκτη της εξόδου ± 5 V DC του τροφοδοτικού. Παρατηρούμε ότι η κηλίδα μετακινείται από την αρχική θέση O σε μία νέα θέση A_1 . Περιστρέφουμε το διαγραμμισμένο δίσκο (όχι τον καθοδικό σωλήνα), ώστε ο άξονας X να περνάει από το σημείο A_1 .
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ : ο άξονας X του διαγραμμισμένου δίσκου στη θέση αυτή δεν είναι απαραίτητα οριζόντιος.

Λήψη μετρήσεων

6. Σημειώνουμε στον ΠΙΝΑΚΑ 1 τη σταθερά $\lambda = 4,4 \cdot 10^{-3}$ N/A² m του σωληνοειδούς πηνίου και την απόσταση μεταξύ των πλακιδίων οριζόντιας απόκλισης X'X και της οθόνης που είναι $D = 7$ cm. (Η κατασκευαστική ανοχή στην απόσταση D είναι $\pm 0,5$ cm).
7. Σημειώνουμε την τιμή της ανοδικής τάσης π.χ. $V_a = 300$ V DC στον ΠΙΝΑΚΑ 1.
8. Αυξάνουμε αργά την τάση εξόδου 0–20 V DC του τροφοδοτικού με την οποία τροφοδοτείται το πηνίο. Παρατηρούμε ότι η κηλίδα, ξεκινώντας από το σημείο A_1 του άξονα X, τείνει να διαγράψει στην οθόνη μία σχεδόν κυκλική δεξιόστροφη τροχιά για ένα μόνο τεταρτημόριο του κύκλου μέχρι το σημείο A_2 του άξονα Y.
9. Σημειώνουμε στον ΠΙΝΑΚΑ 1 την ένταση I του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο, όταν η κηλίδα συναντήσει τον άξονα Y. Για καλύτερη ακρίβεια μπορούμε να ρυθμίσουμε πάλι σ' αυτή τη θέση την εστίαση της δέσμης ηλεκτρονίων, ώστε να βρίσκεται ακριβώς πάνω στον άξονα Y.



$$(O) : V_{\pi} = 0, \quad I_{\pi} = 0$$

$$(A_1) : V_{\pi} = 5V, \quad I_{\pi} = 0$$

$$(A_2) : V_{\pi} = 5V, \quad I_{\pi} = I$$

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ :

- ✓ Για την προστασία του πηνίου η ένταση του ρεύματος δεν πρέπει να ξεπεράσει τα 5 A.
- ✓ Η απόσταση OA_1 είναι ίση με τη διάμετρο $2R$ της κυκλικής τροχιάς της δέσμης των ηλεκτρονίων.
- ✓ Η τροχιά της δέσμης γίνεται αριστερόστροφη αν το ρεύμα στο πηνίο είναι αντίθετο.
- ✓ Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για μεγαλύτερη εκτροπή της δέσμης τα πλακίδια κατακόρυφης απόκλισης YY' του καθοδικού σωλήνα, αλλά τότε :
 - ο πρέπει να γνωρίζουμε για τους υπολογισμούς την απόσταση D μεταξύ κέντρου πλακιδίων YY' και οθόνης

- ο πρέπει να ευθυγραμμίσουμε τη γραμμή εκτροπής της δέσμης με τον άξονα Y του διαγραμμισμένου δίσκου
10. Επαναλαμβάνουμε την πειραματική διαδικασία 1–9 χρησιμοποιώντας νέες τάσεις καθόδου-ανόδου, όπως π.χ. τα 400 V και τα 500 V DC.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ				
A / A	λ (N/A ² m)	D (m)	V _α (V)	I (A)
1	4,4 · 10 ⁻³	0,07	300	
2			400	
3			500	

Επεξεργασία μετρήσεων

- Καταχωρούμε τη θεωρητική τιμή του λόγου $(e/m)_\theta$ του ηλεκτρονίου στον ΠΙΝΑΚΑ 2.
- Υπολογίζουμε την πειραματική τιμή του λόγου $(e/m)_\pi$ του ηλεκτρονίου για κάθε ζεύγος τιμών της ανοδικής τάσης και του ρεύματος (V_α, I) και την καταχωρούμε στον ΠΙΝΑΚΑ 2.
- Υπολογίζουμε τη μέση πειραματική τιμή του λόγου $(e/m)_{\mu\pi}$ του ηλεκτρονίου και την καταχωρούμε στον ΠΙΝΑΚΑ 2.
- Υπολογίζουμε την απόκλιση σ % μεταξύ θεωρητικής και μέσης πειραματικής τιμής του λόγου e/m του ηλεκτρονίου και την καταχωρούμε στον ΠΙΝΑΚΑ 2. [$\sigma \% = (\Lambda_\theta - \Lambda_{\mu\pi}) / \Lambda_\theta \cdot 100\%$]

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ				
A/A	Θεωρητική τιμή $\left(\frac{e}{m}\right)_\theta$ (C/kg)	Πειραματική τιμή $\left(\frac{e}{m}\right)_\pi = \frac{2\pi^2}{\lambda^2 D^2} \cdot \frac{V_\alpha}{I^2}$ (C/kg)	Μέση Πειραματική τιμή $\left(\frac{e}{m}\right)_{\mu\pi}$ (C/kg)	Απόκλιση Θεωρητικής και Μέσης Πειραματικής τιμής του λόγου e / m σ %
1	1,76 · 10 ¹¹			
2				
3				

Η. ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

- Τι θα συμβεί στη δέσμη των ηλεκτρονίων αν υπάρχει το ηλεκτρικό πεδίο στα πλακίδια X και αντιστρέψουμε το ρεύμα στο πηνίο ;
- Τι μεταβάλλεται στην οθόνη του καθοδικού σωλήνα κατά την αύξηση της ανοδικής τάσης, όταν συνυπάρχει το ηλεκτρικό πεδίο στα πλακίδια X και το μαγνητικό πεδίο στο σωληνοειδές ; Πώς δικαιολογείται αυτό ;
- Ο λόγος e/m του ηλεκτρονίου εξαρτάται από την ανοδική τάση V_α ;
- Ο λόγος e/m του ηλεκτρονίου εξαρτάται από το ρεύμα I ;
- Πώς μπορούμε να υπολογίσουμε το βήμα της έλικας, που διαγράφουν τα ηλεκτρόνια ;
- Πού οφείλεται η απόκλιση στην πειραματική μέτρηση του λόγου e/m του ηλεκτρονίου ;

