

### 1. Σκοπός

Στην εργαστηριακή αυτή άσκηση παρουσιάζεται η επίδραση ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου σε δέσμη ηλεκτρονίων συγκεκριμένης ενέργειας. Η δέσμη των ηλεκτρονίων δημιουργεί ένα σχετικά λεπτό αλλά ευδιάκριτο ίχνος, κυκλικού σχήματος στο εσωτερικό μιας λυχνίας. Με την μέτρηση της ακτίνας της κυκλικής τροχιάς προσδιορίζεται το ειδικό φορτίο ( $e / m$ ) του ηλεκτρονίου και συγκρίνεται με την αντίστοιχη θεωρητική τιμή  $1.76 \times 10^{11} \text{ C / Kg}$ .

### 2. Θεωρία

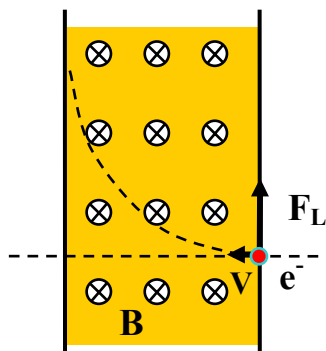
Ηλεκτρόνιο μάζας  $m$  και φορτίου  $e$  κινείται με ταχύτητα  $v$  μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο  $B$  που έχει διεύθυνση κάθετη στην διεύθυνση της κίνησης. Το ηλεκτρόνιο δέχεται δύναμη Laplace το μέτρο της οποίας είναι ίσο με :

$$F_{\text{Laplace}} = e B v.$$

Η δύναμη αυτή εξαναγκάζει το ηλεκτρόνιο σε κυκλική κίνηση ακτίνας  $R$  έτσι ώστε να ισχύει :

$$F_{\text{Laplace}} = m v^2 / R \text{ ή ακόμη } e B v = m v^2 / R, \text{ και τελικά :}$$

$$e / m = v / B R$$



Τώρα, εάν η ταχύτητα  $v$  είναι το αποτέλεσμα της επίδρασης ενός επιταχυντικού ηλεκτροστατικού πεδίου διαφοράς δυναμικού  $V$  τότε ισχύει :

$$m v^2 / 2 = e V \text{ ή}$$

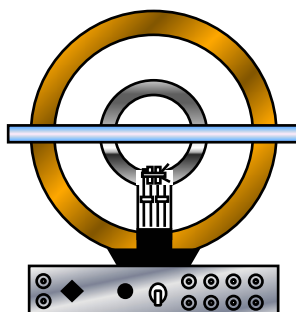
$$v^2 = 2 e V / m = ( e / m )^2 B^2 R^2 \text{ και έτσι :}$$

$$e / m = 2 V / ( B R )^2 \quad (1)$$

Η τάση  $V$  επιλέγεται από τον πειραματιστή όπως άλλωστε και το ομογενές μαγνητικό πεδίο  $B$  (μέσω του ρεύματος  $I$  που διαρρέει το ζευγάρι των πηνίων Helmholtz). Με δεδομένα τα  $V$  και  $I$  εάν μετρηθεί πειραματικά η ακτίνα  $R$  υπολογίζεται το ειδικό φορτίο του ηλεκτρονίου  $e / m$ .

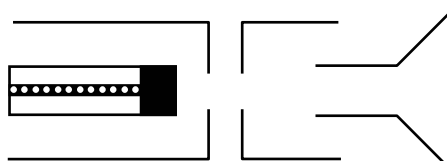
### 3. Πειραματική διαδικασία

Η σφαιρική, γυάλινη λυχνία περιέχει αέριο ήλιο ( $\text{He}$ ) υπό πίεση  $10^{-2}$  mm στήλης υδραργύρου ( $\text{Hg}$ ) ενώ στην βάση της διαθέτει μικροσκοπικό «ηλεκτρονικό πυροβόλο» που θερμαινόμενο εκπέμπει ηλεκτρόνια. Η δέσμη ηλεκτρονίων δημιουργεί ένα ορατό, ευδιάκριτο ίχνος στο εσωτερικό της λυχνίας διότι κάποια από αυτά συγκρούονται και διεγείρουν τα άτομα του ηλίου τα οποία αποδιεγείρονται εκπέμποντας ορατή α-



κτινοβολία γαλάζιας απόχρωσης.

Το ηλεκτρονικό πυροβόλο παρουσιάζεται σχηματικά στην συνέχεια. Το νήμα θέρμανσης θερμαίνει την κάθοδο η οποία εκπέμπει έτσι μεγάλο αριθμό ηλεκτρονίων. Τα



ηλεκτρόνια αυτά επιταχύνονται στο ηλεκτροστατικό δυναμικό μεταξύ ανόδου και καθόδου. Το πλέγμα χαρακτηρίζεται από θετικό δυναμικό σε σχέση με την κάθοδο και αρνητικό δυναμικό σε σχέση με την άνοδο. Ο ρόλος του πλέγματος είναι για την καλλίτερη εστίαση της δέσμης των ηλεκτρονίων.

Η γεωμετρία των πηνίων Helmholtz είναι τέτοια ώστε η ακτίνα του κάθε πηνίου να είναι ακριβώς ίση με την μεταξύ τους απόσταση. Η διάταξη αυτή δημιουργεί ένα σχεδόν ομογενές μαγνητικό πεδίο στο κατακόρυφο επίπεδο της κίνησης των ηλεκτρονίων. Τα πηνία Helmholtz έχουν εν προκειμένω ακτίνα 15 cm, αυτή άλλωστε είναι και η απόσταση μεταξύ τους. Κάθε πηνίο διαθέτει 130 σπείρες από μεταλλικό σύρμα που διαρρέεται από ρεύμα σταθερής φοράς, εντάσεως  $I$ . Το ομογενές μαγνητι-

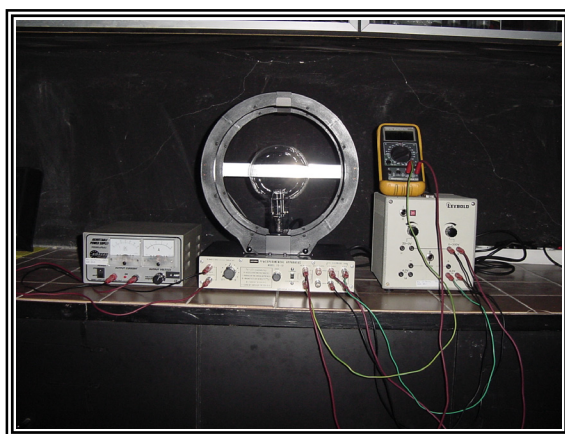
κό πεδίο που δημιουργείται στο μέσον της διάταξης των πηνίων είναι ανάλογο του ρεύματος  $I$  που τα διαρρέει και μάλιστα δίνεται, στην συγκεκριμένη διάταξη, από την σχέση :

$$B \text{ (σε Tesla)} = 0.78 \times 10^{-3} I \text{ (σε A)} \quad (2)$$

Η σφαιρική γυάλινη λυχνία τοποθετείται κατακόρυφα σε ορθογώνιο, μεταλλικό κιβώτιο συνδεσμολογίας στο οποίο στηρίζονται ήδη και τα πηνία Helmholtz. Το κιβώτιο αυτό έχει και τις κατάλληλες, σημειωμένες υποδοχές για την απαιτούμενη συνδεσμολογία της πειραματικής διάταξης.

Στο μέσον της διάταξης και σε οριζόντιο προσανατολισμό υπάρχει κλίμακα κατοπτρικής επιφάνειας, βαθμολογημένης σε εκατοστά (cm). Η κλίμακα αυτή φωτίζεται κατάλληλα και βοηθάει έτσι στον πειραματικό προσδιορισμό της ακτίνας των ηλεκτρονίων. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται παρατηρώντας την αντιστοίχιση του ίχνους των αντιδιαμετρικών περιοχών αριστερά – δεξιά ( $-R_1$ ,  $+R_2$ ) της κυκλικής τροχιάς στην οριζόντια βαθμολογημένη κλίμακα. Για την αποφυγή σφαλμάτων παράλαξης θα πρέπει το σημείο παρατήρησης να ευθυγραμμιστεί με την ευθεία που ενώνει το ίχνος της τροχιάς με το φανταστικό του είδωλο μέσω του κατόπτρου. Η πειραματική τιμή της ακτίνας  $R$  προσδιορίζεται από την σχέση :  $R = [ R_2 - ( - R_1 ) ] / 2$ . Εάν για παράδειγμα το παρατηρούμενο ίχνος δεξιά του μηδενός είναι  $R_2 = + 3.8$  cm ενώ αριστερά  $R_1 = - 4.2$  cm τότε η ακτίνα  $R$  του κύκλου υπολογίζεται σε : 4.0 cm.

Με σκοπό την βελτίωση των συνθηκών παρατήρησης η όλη διάταξη της λυχνίας καλύπτεται από αδιαφανές, σκούρο ύφασμα και έτσι οι μετρήσεις του ίχνους της ακτίνας των ηλεκτρονίων μπορεί να πραγματοποιηθούν και σε εργαστηριακές συνθήκες με φωτεινό σχετικά περιβάλλον. Το κύκλωμα του πειράματος αποτελείται από δυο κυρίως μέρη που συνδυάζονται με το προαναφερθέν κιβώτιο της συνδεσμολογίας. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η πλήρης πειραματική διάταξη με την

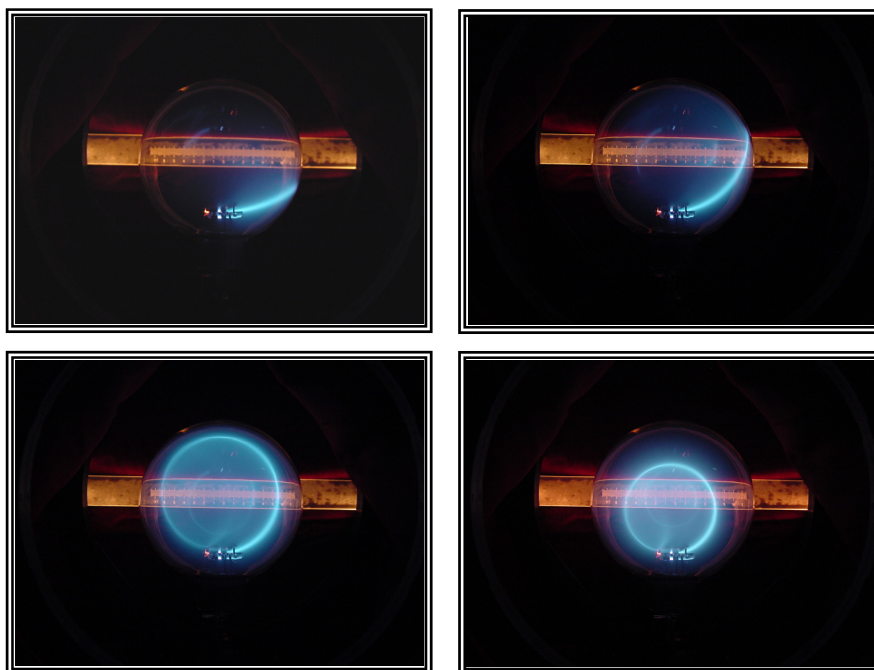


σφαιρική λυχνία, τα δυο τροφοδοτικά και το ψηφιακό πολύμετρο.

Αριστερά είναι το τροφοδοτικό των πηνίων Helmholtz, η τάση μεταβάλλεται από 5 έως 9 Volts ενώ η αντίστοιχη μεταβολή στο ρεύμα των πηνίων είναι από 1.0 έως (το πολύ) 2.0 A. Δεξιά της λυχνίας βρίσκεται το τροφοδοτικό που εξυπηρετεί ταυτόχρονα δυο απαιτήσεις. Η μια είναι να τροφοδοτεί με την σταθερή τάση θέρμανσης των 6.5 V το νήμα της καθόδου ενώ η άλλη είναι να δημιουργεί κατάλληλα το επιταχυντικό

δυναμικό με τιμές της τάσης από 100 έως και 250 Volts. Το ψηφιακό πολύμετρο που παρουσιάζεται στο επάνω μέρος του δεξιά τροφοδοτικού αξιοποιείται σαν βολτόμετρο και αφού συνδεθεί κατάλληλα με το κιβώτιο της συνδεσμολογίας καταμετρά κάθε φορά την τάση που εφαρμόζεται για την επιτάχυνση των ηλεκτρονίων.

Είναι προφανές ότι η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς των ηλεκτρονίων είναι ανάλογη του  $V^{1/2}$  και αντιστρόφως ανάλογη του ρεύματος  $I$  των πηνίων Helmholtz. Αυτό σημαίνει ότι, για μικρά ρεύματα πηνίων ή αντίστοιχα για μεγάλες τιμές του επιταχυντικού δυναμικού  $V$  η ακτίνα είναι ιδιαίτερα μεγάλη με αποτέλεσμα η διάσταση της σφαιρικής λυχνίας να μην επαρκεί για την ανάδειξη ενός πλήρη κύκλου. Αποτέλεσμα είναι τα ηλεκτρόνια της δέσμης να προσπίπτουν στο εσωτερικό τοίχωμα του σφαιρικού γυάλινου περιβλήματος. Στις εικόνες που ακολουθούν παρατηρεί κανείς πως οι



κυκλικές τροχιές των ηλεκτρονίων μεταβάλλονται διαδοχικά με την σταδιακή ελάττωση της ακτίνας της κυκλικής τροχιάς. Η μεταβολή αυτή προήλθε από την κατάλληλη αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου ενώ το επιταχυντικό δυναμικό παραμένει σταθερό.

Με δεδομένη την βασική σχέση :  $e / m = 2 V / (B R)^2$  που απεδείχθη στο θεωρητικό μέρος και αξιοποιώντας την σχέση (2) προσδιορίζεται η αναλυτική σχέση που συνδέει το επιταχυντικό δυναμικό  $V$ , το ρεύμα  $I$  των πηνίων Helmholtz και την ακτίνα  $R$  της τροχιάς των ηλεκτρονίων με το ειδικό φορτίο  $e / m$ . Η σχέση αυτή είναι :

$$e / m = 0.3287 \times 10^{11} V / (I R)^2 \quad (3)$$

Η σχέση (3) που προηγήθηκε είναι αυτή που τελικά αξιοποιείται στο πειραματικό μέρος της άσκησης προκειμένου να υπολογιστεί το πηλίκο  $e / m$ . Υπενθυμίζεται ότι στην σχέση (3) τα μεγέθη της τάσης  $V$ , του ρεύματος  $I$  και της ακτίνας  $R$  πρέπει να είναι εκφρασμένα αντίστοιχα σε Volts, Ampere και cm.

Η σχέση (3) μπορεί ισοδύναμα να γραφτεί υπό την μορφή :

$$V = 3.0423 \times 10^{-11} (e/m) \times (IR)^2 \quad (4)$$

Αυτό σημαίνει ότι σε διάγραμμα  $V = f [(IR)^2]$  η κλίση της πειραματικής ευθείας ισούται με τον παράγοντα  $3.0423 \times 10^{-11} (e/m)$ .

### 3.1 Εκτέλεση πειράματος – Επεξεργασία μετρήσεων

Προτού αναφερθούμε αναλυτικά στα βήματα που θα ακολουθήσουμε προκειμένου να πραγματοποιηθεί με επιτυχία η συγκεκριμένη άσκηση θα πρέπει να προσέξουμε τα εξής σημεία :

- (α) Η τάση θέρμανσης στο νήμα να μην είναι μεγαλύτερη από 6.5 V.
- (β) Το ρεύμα δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2.0 A.
- (γ) Το επιταχυντικό δυναμικό να μην είναι μεγαλύτερο από 250 V, τέλος
- (δ) Μην αφήνετε την λυχνία σε λειτουργία άσκοπα, για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο χρόνος ζωής της δεν είναι απεριόριστος ενώ το κόστος της είναι σημαντικό.

1. Κατανοούμε το κύκλωμα της άσκησης με την βοήθεια του επιβλέποντα υπεύθυνου. Εφαρμόζουμε την τάση θέρμανσης (6.5 V), χρειάζεται χρόνος μερικών μόνο λεπτών έτσι ώστε η κάθοδος να λειτουργήσει ικανοποιητικά. Αυξάνουμε την τάση επιτάχυνσης και παρατηρούμε την σχεδόν οριζόντια δέσμη των ηλεκτρονίων στο κάτω μέρος της γυάλινης λυχνίας.
2. Μεταβάλλουμε (από το Voltage Adjust του τροφοδοτικού) το ρεύμα που διαρρέει τα πηνία Helmholtz και παρατηρούμε την κυκλική τροχιά των ηλεκτρονίων. Η κίνηση των ηλεκτρονίων οφείλεται στην ύπαρξη μαγνητικού πεδίου συγκεκριμένης διεύθυνσης και φοράς. Το ρεύμα των πηνίων Helmholtz μετριέται στην οθόνη του αντίστοιχου τροφοδοτικού. Η τιμή του ρεύματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2.0 A.
3. Με σταθερή τιμή ρεύματος τα 1.3 A στα πηνία Helmholtz παρατήρησε τον τρόπο που επηρεάζεται η δέσμη των ηλεκτρονίων σε σχέση με την μεταβολή του επιταχυντικού δυναμικού. Τι συμβαίνει όταν η τάση αυξάνει ή όταν αντίστοιχα μειώνεται ; Σχολίασε γραπτά το αποτέλεσμα.
4. Με σταθερή την τάση στα 180 V παρατήρησε την επίδραση που έχει η ένταση του ρεύματος των πηνίων ( που δημιουργούν το μαγνητικό πεδίο ) στη δέσμη των ηλεκτρονίων. Τι συμβαίνει όταν το ρεύμα αυξάνει ή αντίστοιχα μειώνεται ; Σχολίασε γραπτά το αποτέλεσμα.
5. Μεταβάλλοντας την τάση V (από 100 έως 250 V) και σε συγκεκριμένες τιμές του ρεύματος I (από 1.2 έως 1.8 A) μετριέται η διάσταση της ακτίνας R μέσω της βαθμολογημένης οριζόντιας κλίμακας. Πως θα γίνει σωστά αυτή η μέτρηση ώστε να περιοριστεί το σφάλμα της παράλλαξης ; Συμπληρώνονται οι αντίστοιχες στήλες του Πίνακα Μετρήσεων - Υπολογισμών και υπολογίζουμε κάθε φορά το ειδικό φορτίο  $e/m$ .

Πίνακας Μετρήσεων – Υπολογισμών

α.α.	V (Volts)	I ( A )	-R <sub>1</sub> +R <sub>2</sub> (cm)	R (cm)	(I R) <sup>2</sup>	V / (I R) <sup>2</sup>	(e/m) (x10 <sup>11</sup> )	< (e/m) > (x10 <sup>11</sup> )
1	100	1.2						
2		1.4						
3		1.6						
4		1.8						
5	120	1.2						
6		1.4						
7		1.6						
8		1.8						
9	150	1.2						
10		1.4						
11		1.6						
12		1.8						
13	200	1.2						
14		1.4						
15		1.6						
16		1.8						
17	250	1.2						
18		1.4						
19		1.6						
20		1.8						

- Υπολογίστε την μέση τιμή <e/m> των πειραματικών τιμών του Πίνακα Μετρήσεων - Υπολογισμών. Συγκρίνουμε την τιμή αυτή με την αντίστοιχη θεωρητική. Ποια η επί της % διαφορά ;
- Να γίνει η γραφική παράσταση  $V = f [ (I R)^2 ]$  και να χαραχθεί η – κατά προσέγγιση – πειραματική ευθεία.
- Να προσδιοριστεί η κλίση της προηγούμενης πειραματικής ευθείας και γνωρίζοντας ότι αυτή είναι ίση με  $3.0423 \times 10^{-11}$  (e/m) να υπολογιστεί το ειδικό φορτίο του ηλεκτρονίου e/m. Να συγκρίνετε την τιμή που μόλις βρέθηκε με την μέση τιμή < (e/m) > της ερώτησης 6.
- Ποιο κατά την γνώμη σας από τα πειραματικά μεγέθη V, I, και R κυριαρχεί στην αβεβαιότητα του μετρούμενου ειδικού φορτίου e/m του ηλεκτρονίου ; Δικαιολογείστε την απάντησή σας.
- Ζητήστε από τον υπεύθυνο της άσκησης να σας δείξει πως επηρεάζεται η κυκλική τροχιά από την παρουσία ενός μόνιμου μαγνήτη που τον πλησιάζετε εξωτερικά, στην σφαιρική επιφάνεια της λυχνίας. Τι ακριβώς συμβαίνει σε αυτή την περίπτωση ;

#### 4. Θεματολογικές Ερωτήσεις Κατανόησης

1. Τι ταχύτητες  $u$  μπορεί να αναπτύξει το ηλεκτρόνιο στην συγκεκριμένη διάταξη ; Αξιοποιείστε την σχέση  $u = [ 2 (e / m) V ]^{1/2}$ . Να συγκρίνετε την τιμή που υπολογίσατε με αυτή της ταχύτητας  $c$  του φωτός.
2. Να υπολογιστεί ο χρόνος που χρειάζεται ώστε το κάθε ηλεκτρόνιο να εκτελέσει ένα πλήρη κύκλο.
3. Πότε πρώτο - προσδιορίστηκε πειραματικά το ειδικό φορτίο του ηλεκτρονίου ; Ποιος το προσδιόρισε ; (J.J. Thomson, Βραβείο Νόμπελ Φυσικής 1906)
4. Πόση είναι η ενέργεια ενός φωτονίου μπλε χρώματος ; Αξιοποιείστε την σχέση  $E_{\text{photon}} = 1240 \text{ eV nm} / \lambda$  (σε nm) όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος (π.χ.  $\lambda = 400 \text{ nm}$  στο μπλε).
5. Μπορείτε να διαπιστώσετε εάν η λαμπρότητα της κυκλικής τροχιάς είναι περισσότερο έντονη στην αρχή της (κάτω δεξιά) από ότι στο τέλος της ; Πως δικαιολογείται ένα τέτοιο φαινόμενο ;
6. Αφού το ηλεκτρόνιο διαθέτει μάζα γιατί η βαρύτητα της γης δεν συμμετέχει στους υπολογισμούς ;
7. Γιατί ηλεκτρόνια της άσκησης με μεγάλη ή μικρή ταχύτητα ενώ κινούνται σε κύκλους με διαφορετική ακτίνα έχουν όλα την ίδια κυκλική συχνότητα  $\omega$  ;
8. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου της γης (οριζόντια συνιστώσα) συμμετέχει ή όχι στην κίνηση του ηλεκτρονίου ;
9. Τι θα αλλάξει στην εικόνα της δέσμης των ηλεκτρονίων εάν : (α) αλλάξουμε το αέριο της λυχνίας, (β) αλλάξουμε το υλικό της καθόδου και (γ) περιστρέψουμε, αξονικά την λυχνία ;

#### 5. Απαραίτητες Γνώσεις

Μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ρευματοφόρους αγωγούς – πηνία, δύναμη Laplace, κινήσεις ηλεκτρονίων σε μαγνητικά – ηλεκτρικά πεδία.