

Η Μέτρηση του λόγου e/m του ηλεκτρονίου

Εργαστήριο Ατομικής Φυσικής
Δ. Σαμψωνίδης

Εισαγωγή

- Η πρώτη μας μέτρηση της ατομικής δομής
- Ο λόγος φορτίου προς μάζα ηλεκτρονίου:
 - Κίνητρο και ιστορικό της πρώτης μέτρησης e/m
 - Συνέπειες του πειράματος του Thomson
- Η φυσική πίσω από το πείραμα:
 - Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από έναν μόνο βρόχο
 - Φορτισμένο σωματίδιο σε σταθερό μαγνητικό πεδίο
- Μετρήσεις:
 - Η διάταξη
 - Το μαγνητικό πεδίο
 - Η μέτρηση του λόγου φορτίου προς μάζα κάμπτοντας το ηλεκτρόνιο με σταθερό μαγνητικό πεδίο
- Ανάλυση

Γιατί μετράμε το λόγο e/m

- Πριν από αυτήν τη μέτρηση (~1897), τι γνωρίζαμε για την ύλη;
 - ΑΠΑΝΤΗΣΗ: Πολύ λίγα!
- Καταλάβαμε τις κλασικές μακροσκοπικές δυνάμεις μεταξύ των συστατικών της ύλης:

- Βαρύτητα:
$$\vec{F}_g = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r}$$

- Ηλεκτρομαγνητισμός:

- Οι εξισώσεις του Maxwell

- Δυνάμεις Coulomb και Lorentz:
$$\vec{F}_e = -k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}; \quad \vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$$

- Κανείς δεν ήξερε πραγματικά ποια ήταν τα συστατικά της ύλης.
Ή αν υπήρχαν!

Τι είναι η ύλη

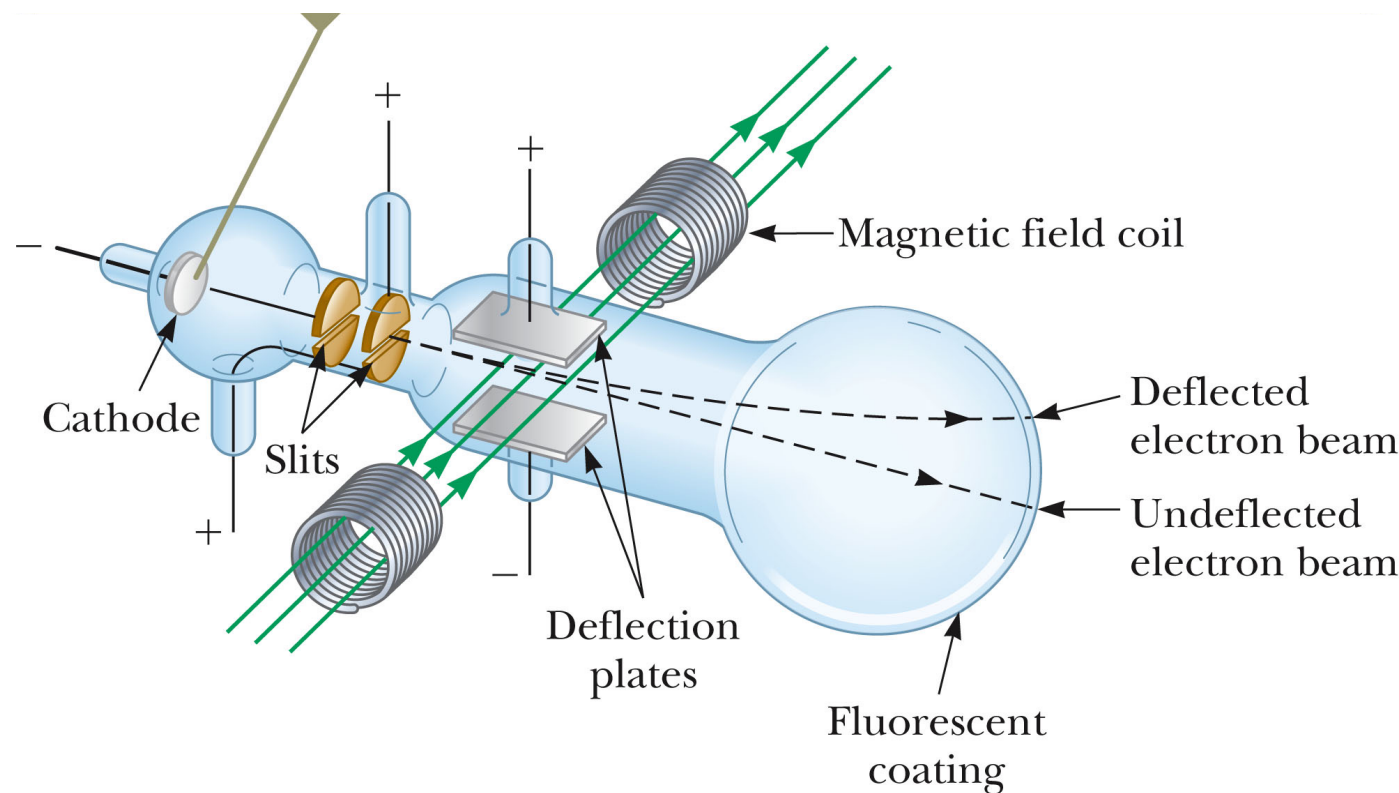
- Από τι είναι πραγματικά η ύλη;
- Απεριόριστα διαιρέσιμο (δηλαδή συνεχής ύλη);
- Αποτελείται από μεμονωμένα συστατικά;
- Ο J.J.Thomson έδωσε πειραματικά στοιχεία για την ύπαρξη διακριτών συστατικών της ύλης:
 - Έδειξε ότι η ύλη έχει συστατικά που είναι αρνητικά φορτισμένα και του οποίου ο λόγος φορτίου/μάζας είναι σταθερός.
 - Αυτό υποδηλώνει ότι το φορτίο του δεν είναι απείρως “συνεχές” αλλά εμφανίζεται ως διακριτά σωμάτια (π.χ. ηλεκτρόνια).
- Αυτό είναι το πρώτο παράδειγμα κβάντωσης (ύπαρξη διακριτών συστατικών) της φύσης!



1906 Nobel Prize

Το πείραμα του Thomson e/m

- Ηλεκτρόνια επιταχύνονται από μια θερμαινόμενη κάθοδο
- Αποκλίνουν της πορείας τους με τη βοήθεια ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων
- Η δέσμη των ηλεκτρονίων κτυπά σε φθορίζουσα επιφάνεια
- Μετρήθηκε ο λόγος e/m



Το πείραμα του Thomson e/m



Ο Thomson θεώρησε τρία μοντέλα που θα ήταν συνεπή με τις ιδιότητες των ατόμων που ήταν τότε γνωστά:

- Κάθε αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόνιο συνδυάζεται με ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο που το ακολουθεί παντού μέσα στο άτομο.
- Τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από μια κεντρική περιοχή θετικού φορτίου που έχει το ίδιο μέγεθος με το συνολικό φορτίο όλων των ηλεκτρονίων.
- Τα αρνητικά ηλεκτρόνια καταλάμβαναν μια περιοχή χώρου που ήταν ομοιόμορφα θετικά φορτισμένη (συχνά θεωρείται ως ένα είδος «σούπας» ή «νέφους» θετικού φορτίου).

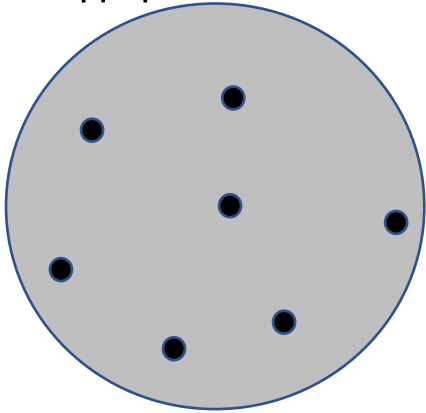
Ο Thomson επέλεξε την τρίτη περίπτωση ως την πιο πιθανή δομή ατόμων.

Δημοσίευσε το προτεινόμενο μοντέλο του στην έκδοση Μαρτίου 1904 του Philosophical Magazine, το κορυφαίο βρετανικό επιστημονικό περιοδικό της ημέρας. Κατά την άποψη του Thomson:

... τα άτομα των στοιχείων αποτελούνται από έναν αριθμό αρνητικά ηλεκτρισμένων σωμάτων εγκλεισμένων σε μια σφαίρα ομοιόμορφου θετικού φορτίου, ...

ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ

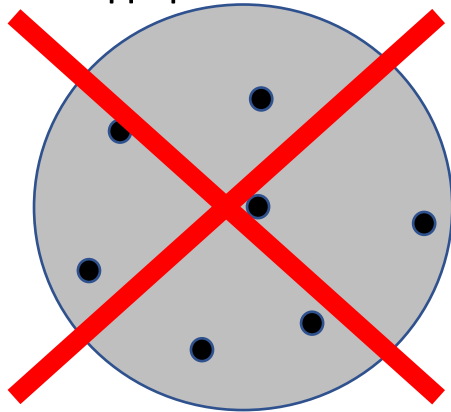
- Αυτό οδήγησε τον Thomson να προτείνει το ατομικό μοντέλο του «σταφιδόψωμου»:
"plum pudding"



Quanta (ηλεκτρόνια) κλεισμένα σε
ένα συνεχές θετικό μέσο.

ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ

- Αυτό οδήγησε τον Thomson να προτείνει το ατομικό μοντέλο του «σταφιδόψωμου»:



← Quanta (ηλεκτρόνια) κλεισμένα σε ένα συνεχές θετικό μέσο.

Ωραία ιδέα ... αλλά δυστυχώς εντελώς λάθος ...

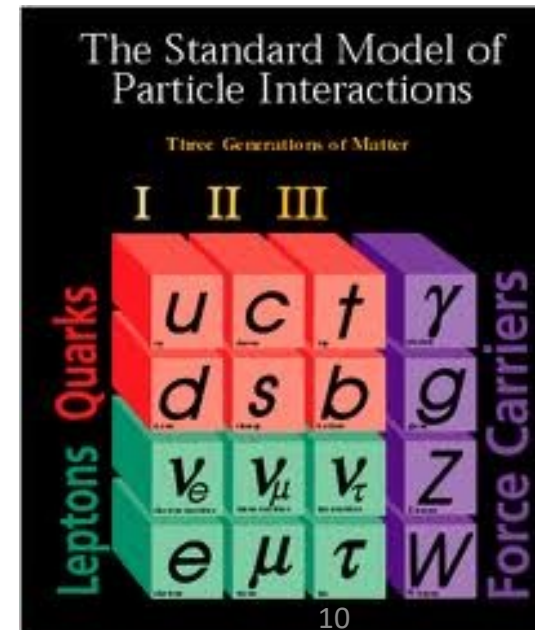
- Πειράματα σκέδασης Rutherford (1911):
 - Η ύλη αποτελείται από συμπαγείς εντοπισμένους πυρήνες
- Ανάπτυξη της Κβαντομηχανικής (1920's):
 - Τα μικροσκοπικά συστατικά της ύλης ακολουθούν νέους και εκπληκτικούς νόμους της φυσικής!

Δεν έχουμε τελειώσει ακόμα!

- Αρκετά πειράματα δείχνουν ότι τα ηλεκτρόνια μπορεί πράγματι να είναι στοιχειώδη, αδιαίρετα σωματίδια
- Ωστόσο, τα νουκλεόνια (πρωτόνια ή νετρόνια) δεν είναι!
 - 1968: Πειράματα σκέδασης στον Γραμμικό Επιταχυντή του Στάνφορντ ([Stanford Linear Accelerator](#) SLAC) δείχνουν ότι τα νουκλεόνια αποτελούνται από πιο θεμελιώδη σωματίδια: κουάρκ

Δεν έχουμε τελειώσει ακόμα!

- Αρκετά πειράματα δείχνουν ότι τα ηλεκτρόνια μπορεί πράγματι να είναι στοιχειώδη, αδιαίρετα σωματίδια
- Ωστόσο, τα νουκλεόνια (πρωτόνια ή νετρόνια) δεν είναι!
 - 1968: Πειράματα σκέδασης στον Γραμμικό Επιταχυντή του Στάνφορντ ([Stanford Linear Accelerator](#) SLAC) δείχνουν ότι τα νουκλεόνια αποτελούνται από πιο θεμελιώδη σωματίδια: κουάρκ
- Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη του [Καθιερωμένου Πρότυπου στοιχειωδών σωματιδίων \(Standard Model\)](#).

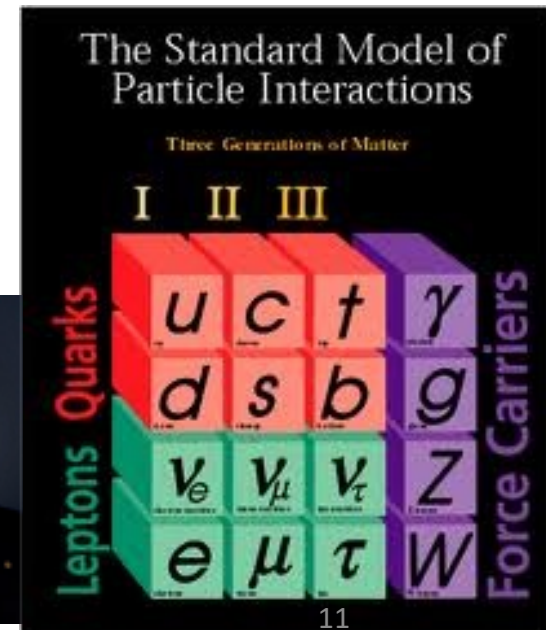


Δεν έχουμε τελειώσει ακόμα!

- Αρκετά πειράματα δείχνουν ότι τα ηλεκτρόνια μπορεί πράγματι να είναι στοιχειώδη, αδιαίρετα σωματίδια
- Ωστόσο, τα νουκλεόνια (πρωτόνια ή νετρόνια) δεν είναι!
 - 1968: Πειράματα σκέδασης στον Γραμμικό Επιταχυντή του Στάνφορντ ([Stanford Linear Accelerator](#) SLAC) δείχνουν ότι τα νουκλεόνια αποτελούνται από πιο θεμελιώδη σωματίδια: κουάρκ
- Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη του [Καθιερωμένου Πρότυπου στοιχειωδών σωματιδίων](#) (Standard Model).
- Το 2012 το τελευταίο κομμάτι του παζλ ολοκληρώνει την εικόνα (Higgs) !
- Και τώρα; Τι έπεται?
- Είναι δυνατόν να προχωρήσουμε ακόμη περισσότερο;



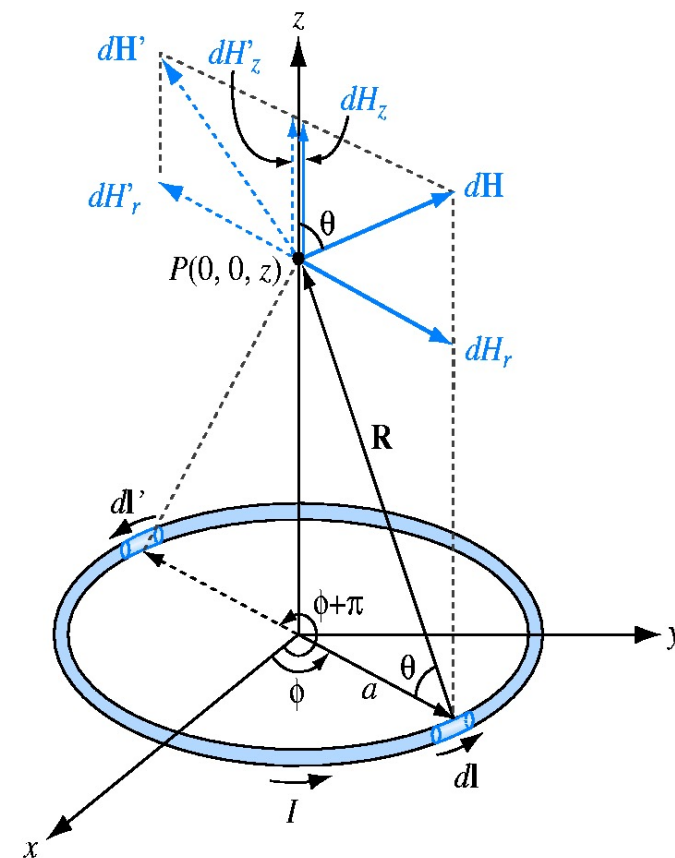
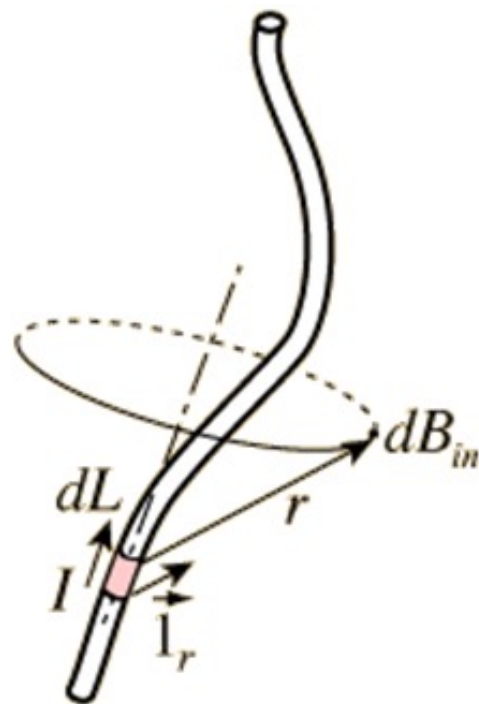
Peter Higgs



Μαγνητικό πεδίο απλού βρόγχου

Θυμηθείτε τον νόμο Biot-Savart:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{\ell} \times \hat{r}}{r^2}$$
$$\Downarrow$$
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \oint \frac{d\vec{\ell} \times \hat{r}}{r^2}$$



Μαγνητικό πεδίο απλού βρόγχου

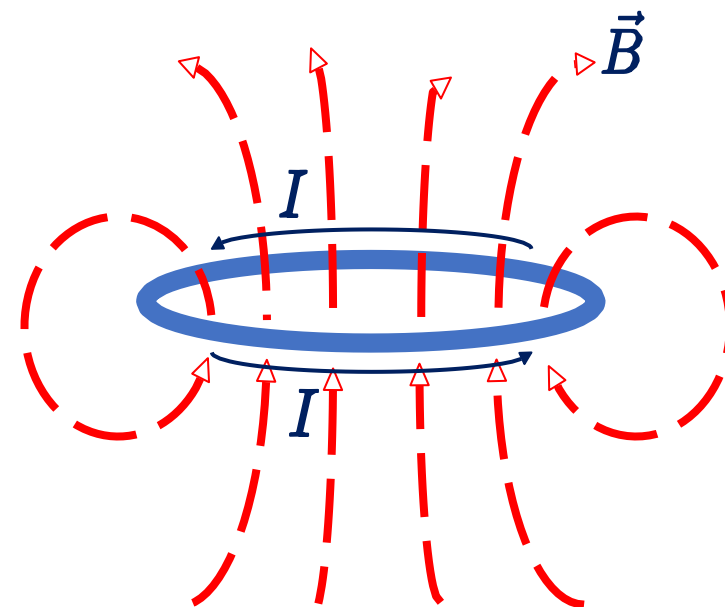
Θυμηθείτε τον νόμο Biot-Savart:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{\ell} \times \hat{r}}{r^2}$$

⇓

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \oint \frac{d\vec{\ell} \times \hat{r}}{r^2}$$

Ένας βρόγχος θα δημιουργήσει ένα μαγνητικό πεδίο που υπακούει στον κανόνα του δεξιού χεριού



Μαγνητικό πεδίο απλού βρόγχου

Θυμηθείτε τον νόμο Biot-Savart:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{\ell} \times \hat{r}}{r^2}$$

⇓

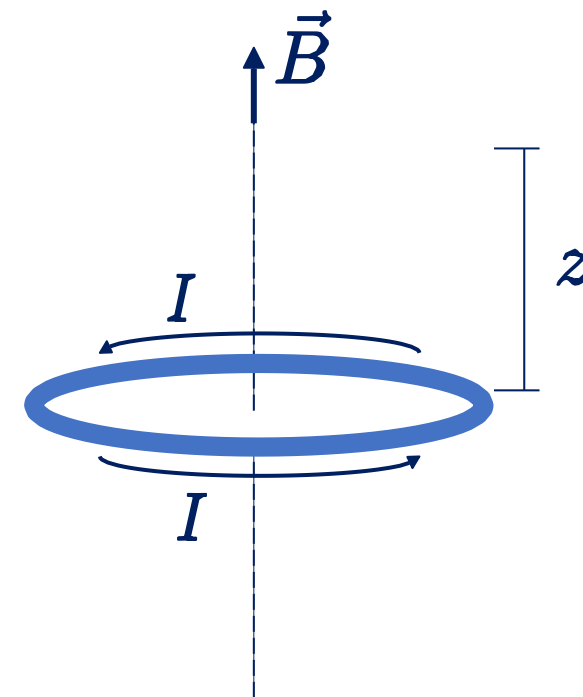
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \oint \frac{d\vec{\ell} \times \hat{r}}{r^2}$$

Ένας βρόγχος θα δημιουργήσει ένα μαγνητικό πεδίο που υπακούει στον κανόνα του δεξιού χεριού και με μέγεθος στον άξονα του βρόγχου:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + z^2)^{3/2}}$$

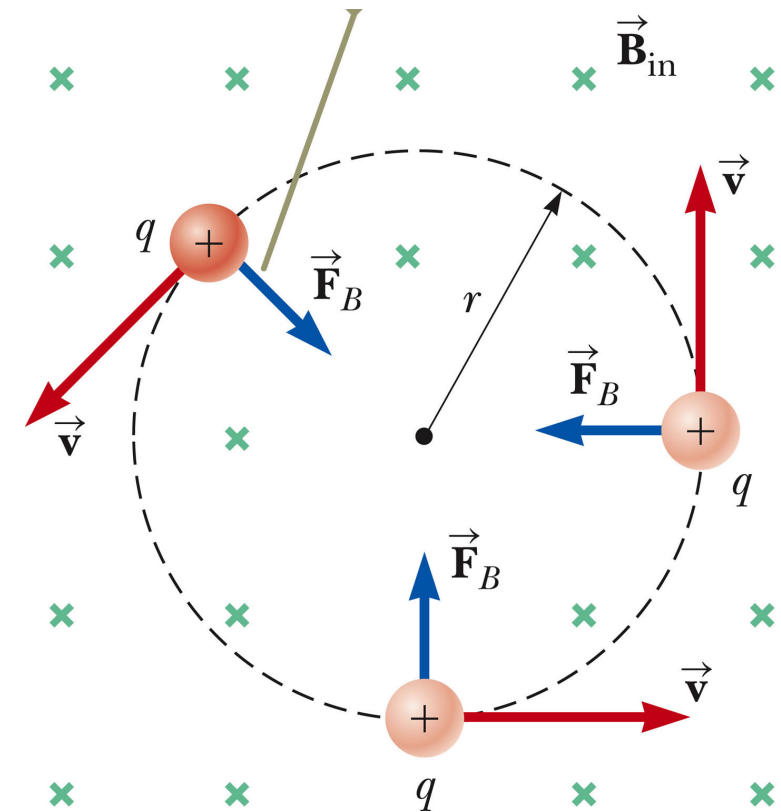
R = ακτίνα του βρόχου

z = ύψος από το επίπεδο του βρόχου



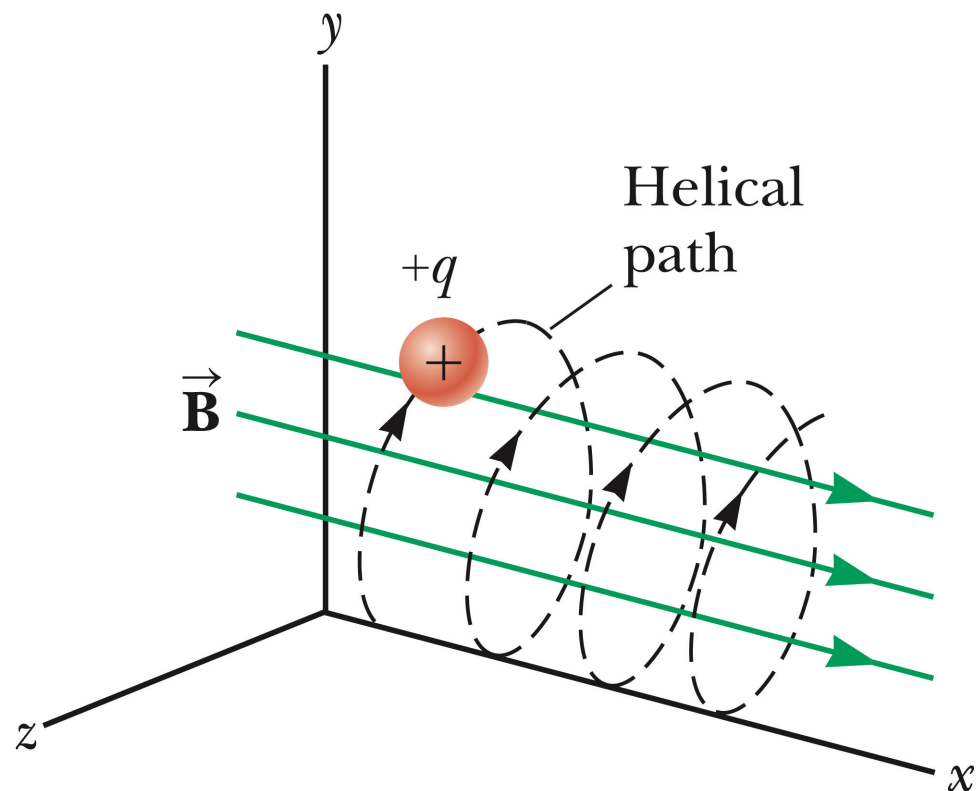
Φορτισμένο σωματίδιο σε Μαγνητικό Πεδίο

- Θεωρήστε ένα σωματίδιο που κινείται σε ένα μαγνητικό πεδίο έχοντας την ταχύτητα κάθετη στο πεδίο.
- Η δύναμη που δέχεται το σωματίδιο έχει διεύθυνση προς το κέντρο μιας κυκλικής τροχιάς.
- Η δύναμη παίζει το ρόλο της κεντρομόλου δύναμης.



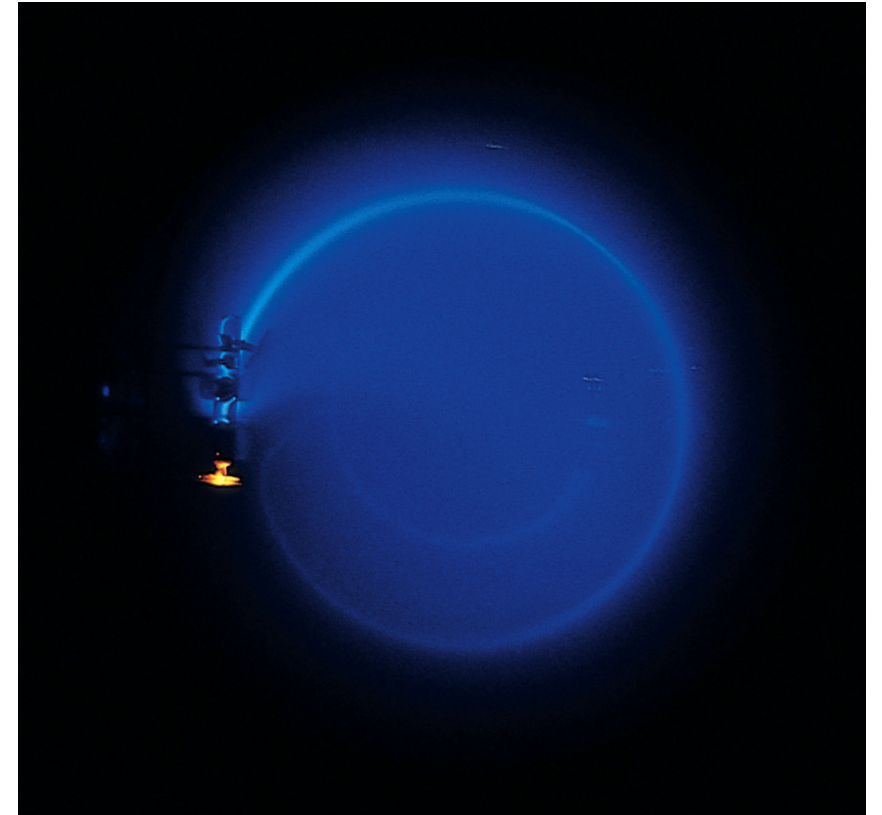
Κίνηση σωματιδίου σε μαγνητικό πεδίο, γενικά

- Αν το φορτισμένο σωματίο κινείται στο μαγνητικό πεδίο με τυχαία διεύθυνση και την ταχύτητά του να σχηματίζει γωνία (όχι κάθετη) με το μαγνητικό πεδίο, η τροχιά του έχει μορφή έλικας



Κάμπτοντας μια δέσμη ηλεκτρονίων

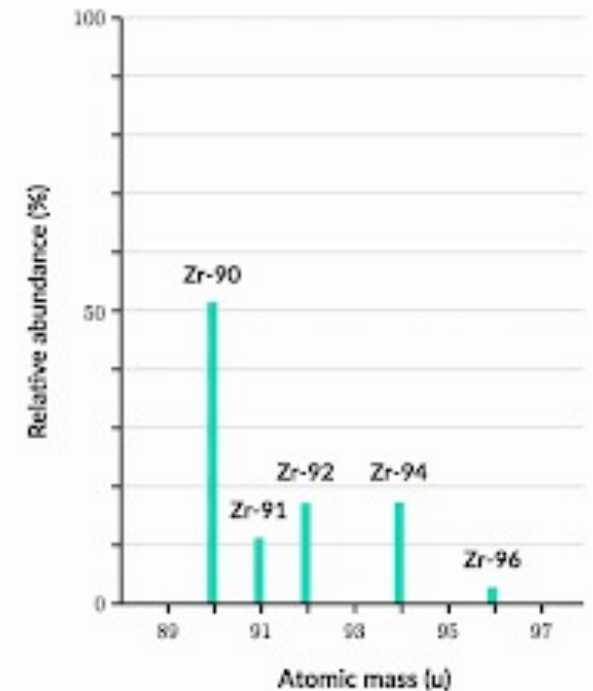
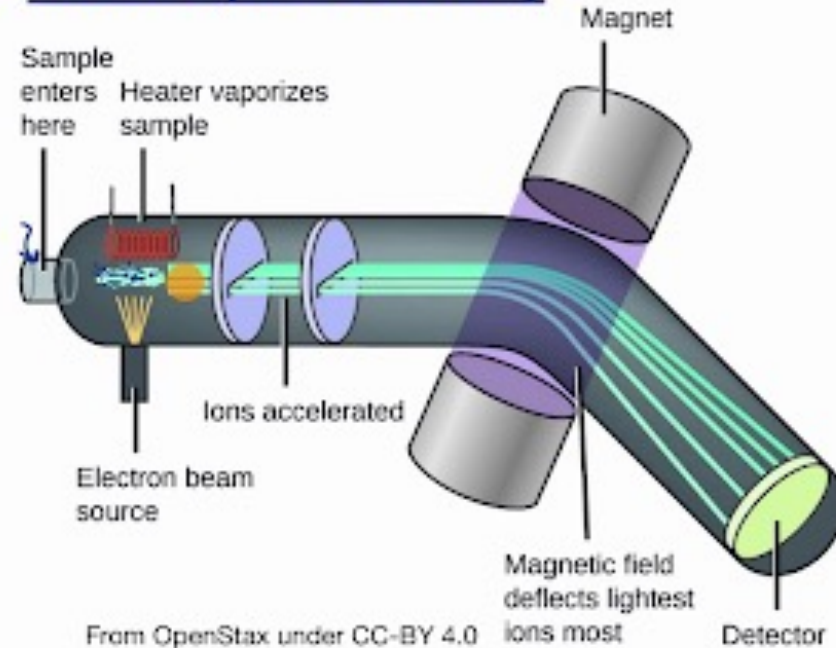
- Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από την ηρεμία μέσω μιας διαφοράς δυναμικού.
- Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια εισέρχονται σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο που είναι κάθετο στην ταχύτητα των ηλεκτρονίων.
- Τα ηλεκτρόνια διαγράφουν καμπύλη τροχιά.
- Η διατήρηση της ενέργειας μπορεί να δώσει την ταχύτητα των ηλεκτρονίων.
- Μπορούν να βρεθούν και άλλες παράμετροι.



Φασματογράφος Μάζας

- Το υπό έλεγχο δείγμα μετατρέπεται σε αέριο (ατμοί) και ιονίζεται από μια δέσμη ηλεκτρονίων.
- Η δέσμη των ιόντων επιταχύνεται και περνά από ένα μαγνητικό πεδίο όπου διαχωρίζονται τα ιόντα που έχουν διαφορετικό λόγο q/m .
- Τα ιόντα χτυπούν σ'ένα ανιχνευτή δίνοντας τελικά την ισοτοπική σύσταση του δείγματος.
- Πολύ ευαίσθητη και αξιόπιστη μέθοδος ανίχνευσης.

* Mass Spectrometry



Κυκλική κίνηση φορτίου στο πεδίο B

- Το δεύτερο συστατικό που πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε είναι η κίνηση ενός φορτίου σε σταθερό μαγνητικό πεδίο
- Είδαμε ότι ένα σωματίδιο φορτίου q , εισερχόμενο σε περιοχή με σταθερό μαγνητικό πεδίο B , έχοντας ταχύτητα v “αισθάνεται” μια δύναμη Lorentz:

$$\mathbf{F} = qv\mathbf{B}$$

$$\vec{F} = \underbrace{q\vec{E}}_{\text{Electric force}} + \underbrace{q\vec{v} \times \vec{B}}_{\text{Magnetic force}}$$

- Επειδή η ταχύτητα και η δύναμη είναι κάθετες μεταξύ τους η κίνηση θα είναι κυκλική
- Συγκεκριμένα, η κεντρομόλος δύναμη πρέπει να παρέχεται από τη δύναμη Lorentz και ως εκ τούτου:

$$qvB = m \frac{v^2}{r} \quad \Rightarrow \quad \frac{q}{m} = \frac{v}{rB}$$

Κυκλική κίνηση φορτίου στο πεδίο B

Ωστόσο, η μέτρηση της ταχύτητας ενός στοιχειώδους σωματιδίου δεν είναι και τόσο απλό

Μια απλή λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η επιτάχυνση των ηλεκτρονίων χάρη σε μια γνωστή διαφορά δυναμικού (π.χ. δημιουργείται από δύο πλάκες με αντίθετο φορτίο)

Σε αυτήν την περίπτωση, η διατήρηση ενέργειας μας λέει ότι:

$$qV = \frac{1}{2}mv^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{q}{m} = \frac{v^2}{2V}$$

Συνδυάζοντας το με το προηγούμενο αποτέλεσμα, μπορούμε να απαλείψουμε την ταχύτητα από την εξίσωση:

$$\frac{q}{m} = \frac{2V}{r^2 B^2}$$

Το πείραμα

Κύριοι στόχοι

Ο εξοπλισμός:

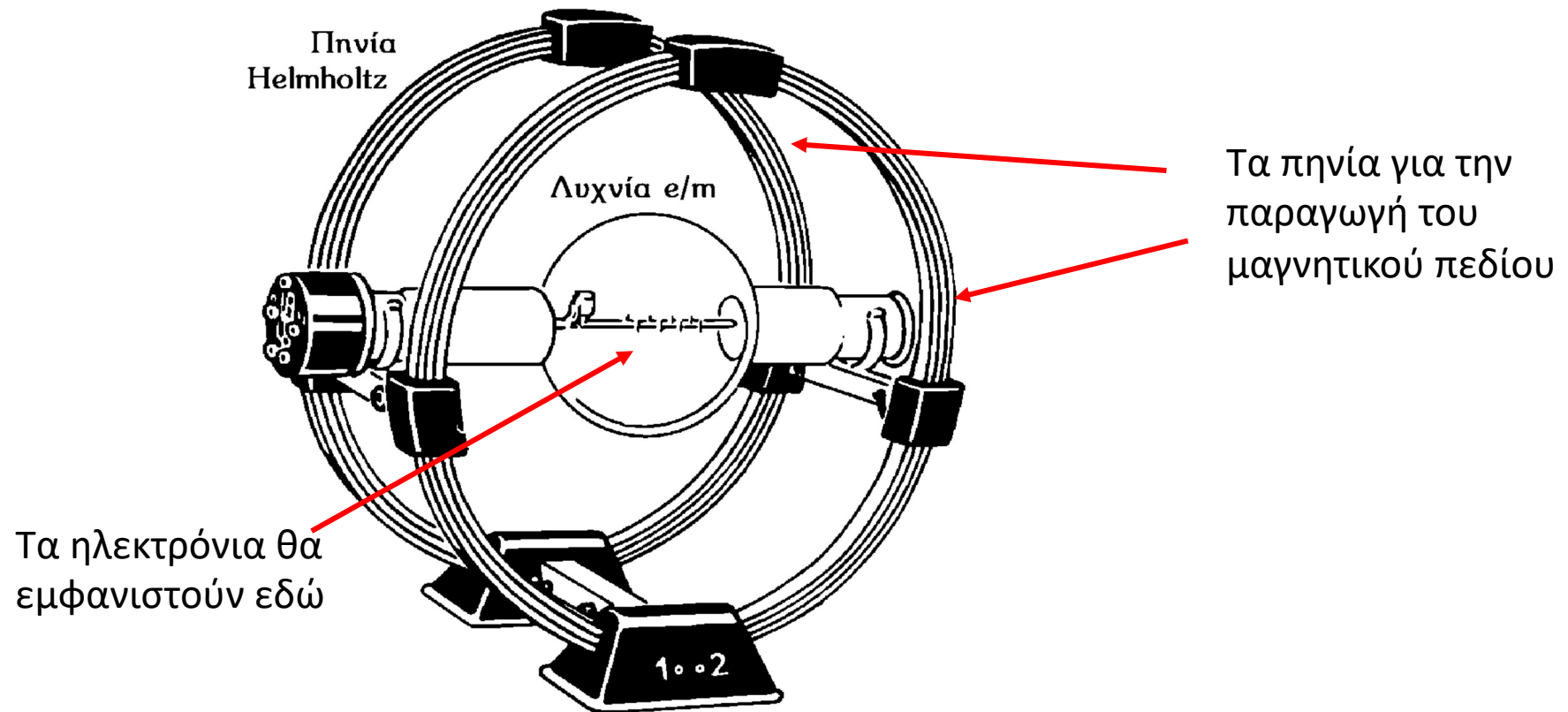
- Πηνία Helmholtz: παροχή μαγνητικού πεδίου
- Λυχνία : παρέχει δέσμη ηλεκτρονίων
- Ράβδοι μέτρησης: για τη μέτρηση της ακτίνας της κυκλικής κίνησης
- Τροφοδοτικά

Το πείραμα:

- Δέσμη ηλεκτρονίων σε ομογενές μαγνητικό πεδίο → μέτρηση του λόγου e/m

ΣΥΣΚΕΥΕΣ

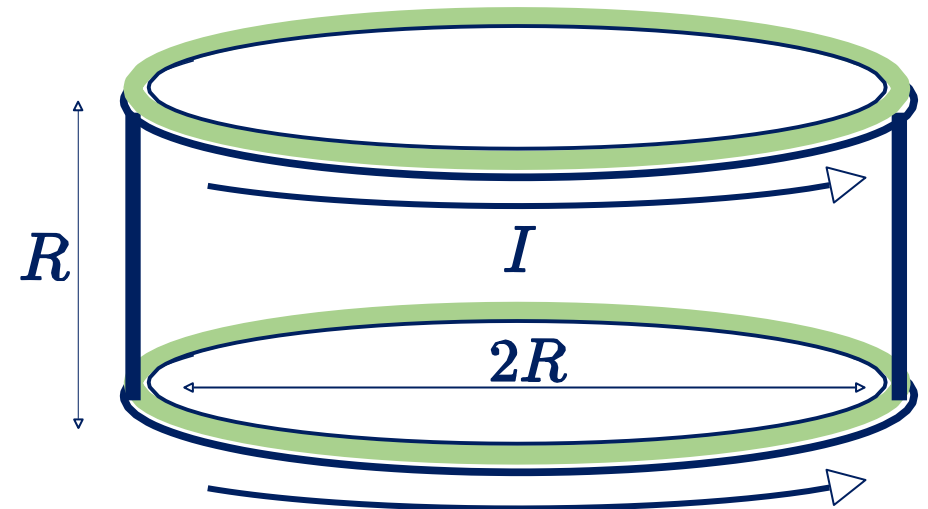
Θα χρησιμοποιήσουμε δύο πηνία που διαρρέονται από ένα ρεύμα I
Λυχνία στο κέντρο μεταξύ των πηνίων Helmholtz



τα πηνία Helmholtz

Για αυτό το πείραμα:

Θα χρησιμοποιήσετε δύο πηνία που διαρρέονται από ρεύμα I



τα πηνία Helmholtz

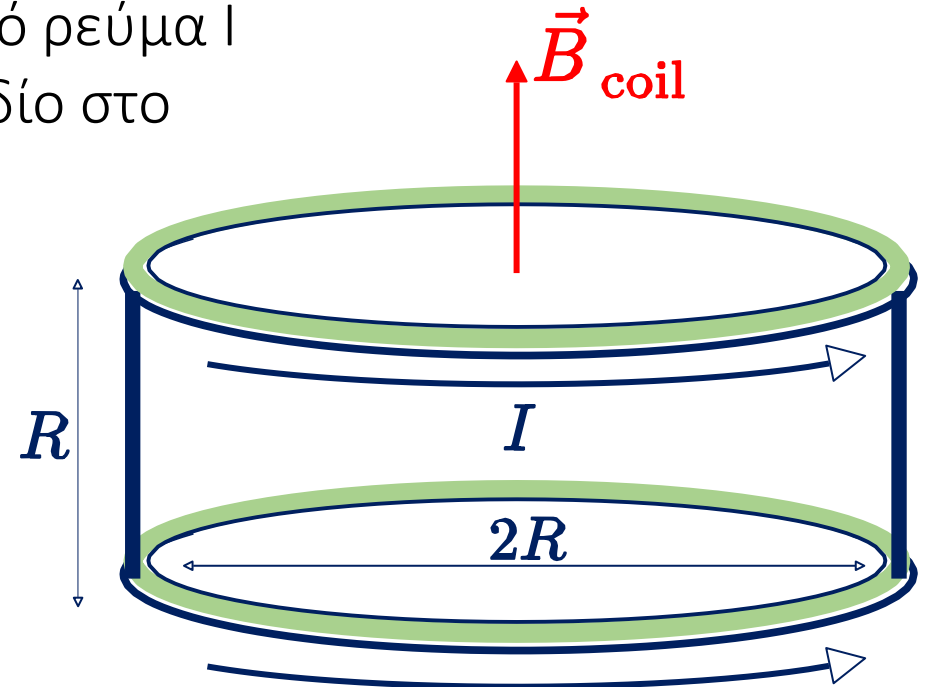
Για αυτό το πείραμα:

Θα χρησιμοποιήσετε δύο πηνία που διαρρέονται από ρεύμα I

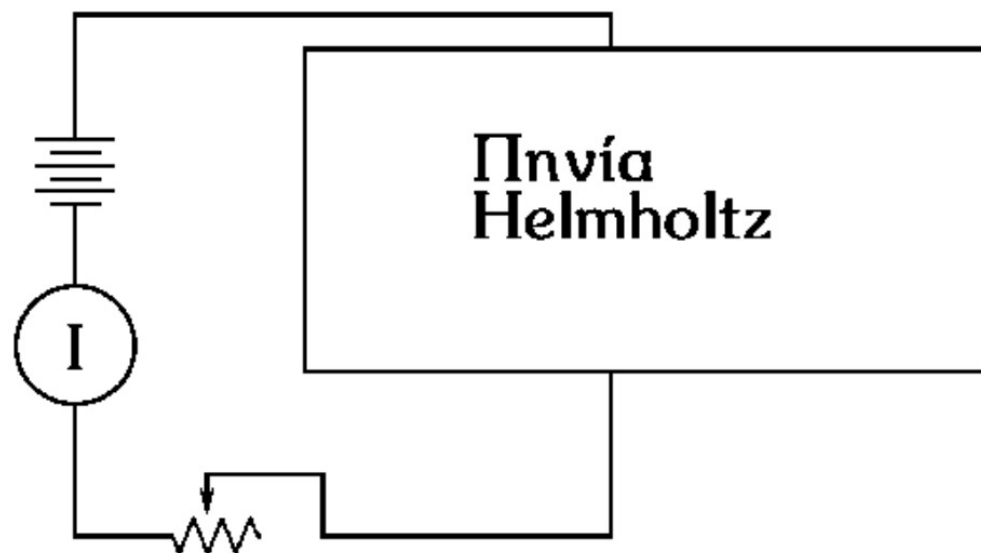
Για αυτήν τη διάταξη χρειαζόμαστε το μαγνητικό πεδίο στο κέντρο των πηνίων Helmholtz ($z = R / 2$):

$$B_I = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 N I}{(R^2 + (R/2)^2)^{3/2}}$$
$$\equiv C I$$

Αυτό αντιπροσωπεύει μαγνητικό πεδίο στο κέντρο της πειραματικής συσκευής. (Θέση όπου βρίσκεται η λυχνία)



Πώς να διαχειριστείτε το μαγνητικό πεδίο



Μεταβολή
Αντίστασης

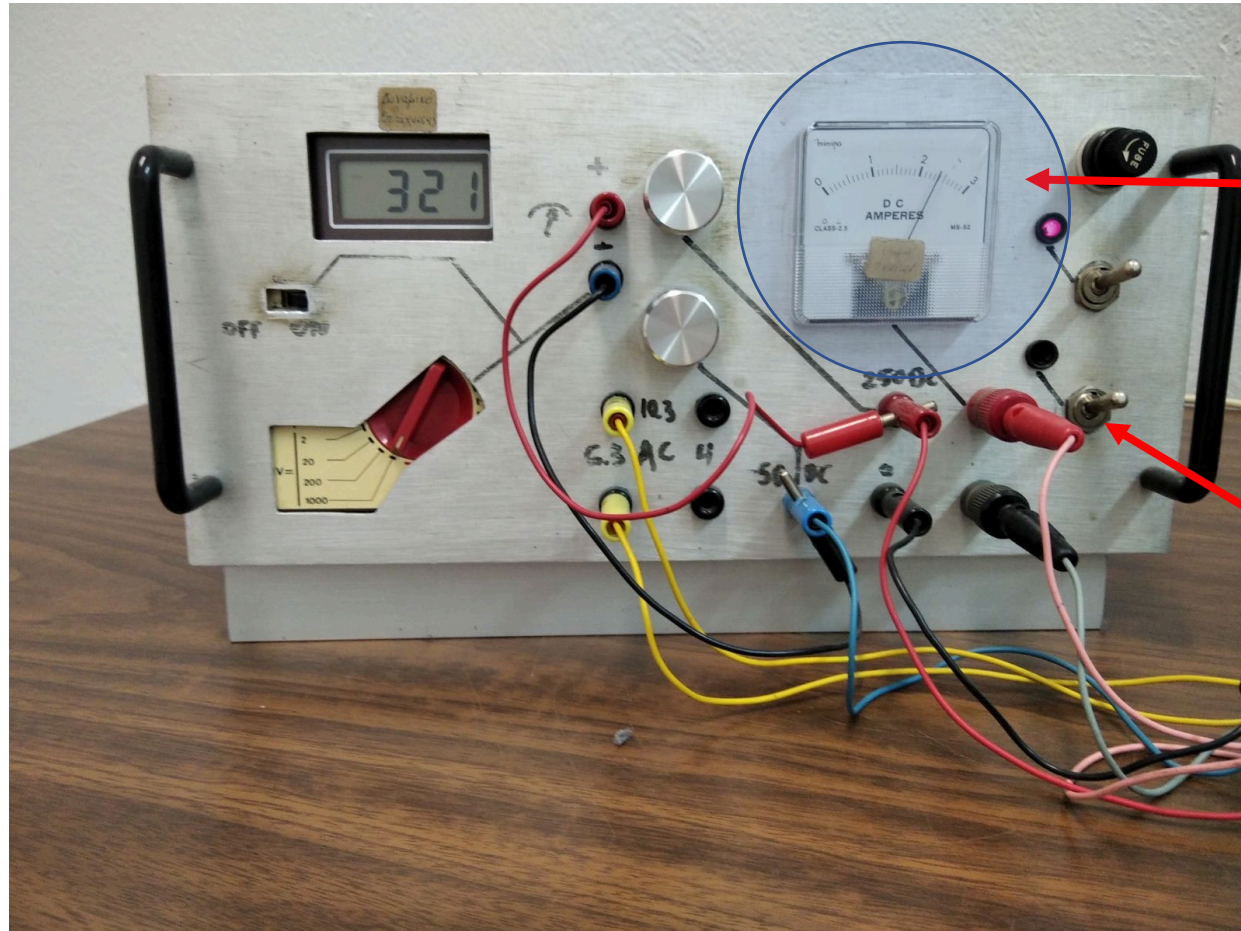


Μεταβολή
Ρεύματος

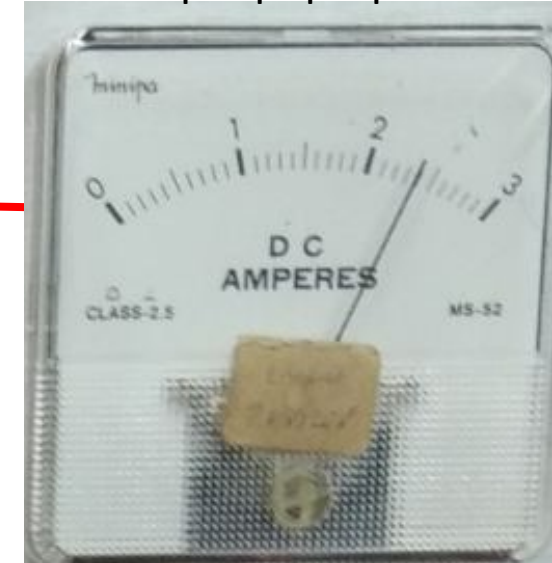


Μεταβολή Μαγνητικού
Πεδίου

Πώς να διαχειριστείτε το μαγνητικό πεδίο

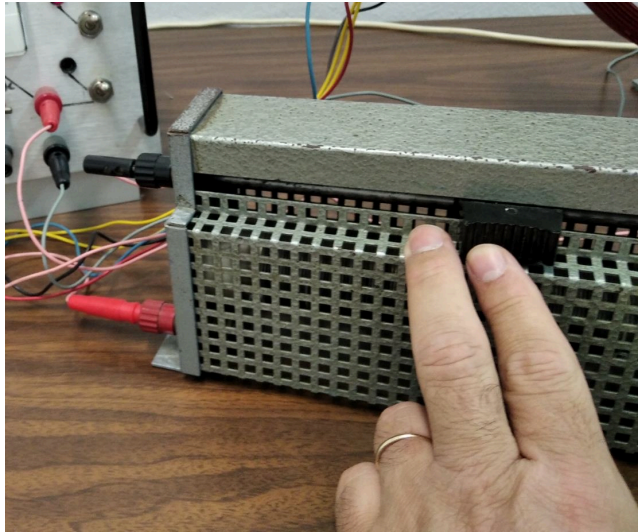


Αμπερόμετρο

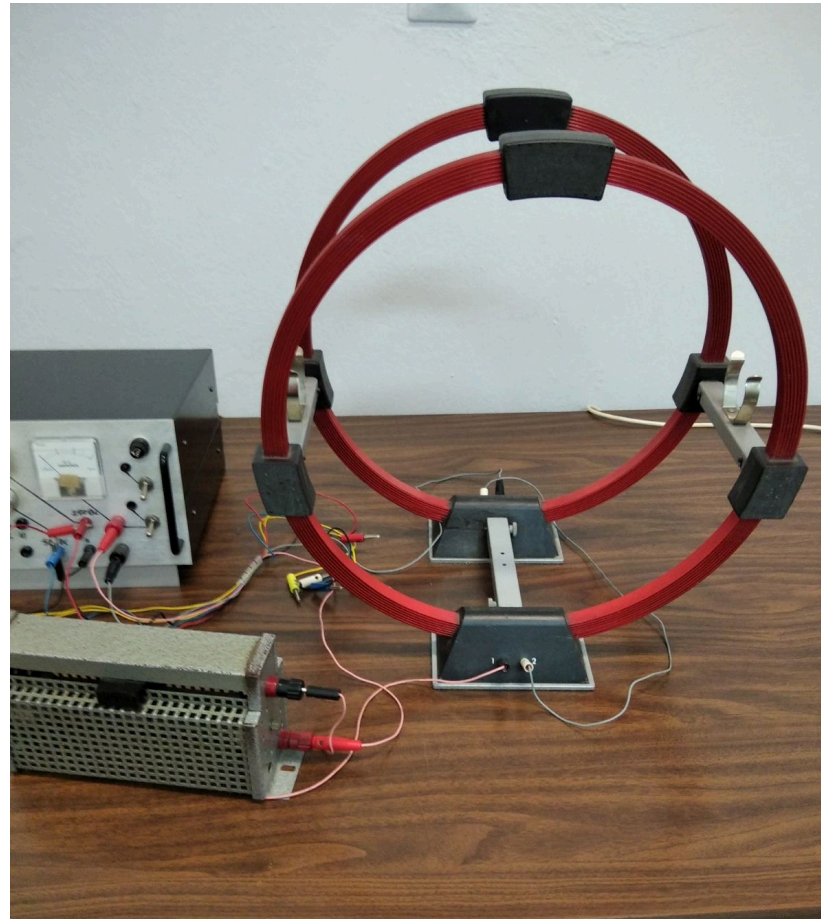


Διακόπτης ON/OFF

Πώς να διαχειριστείτε το μαγνητικό πεδίο

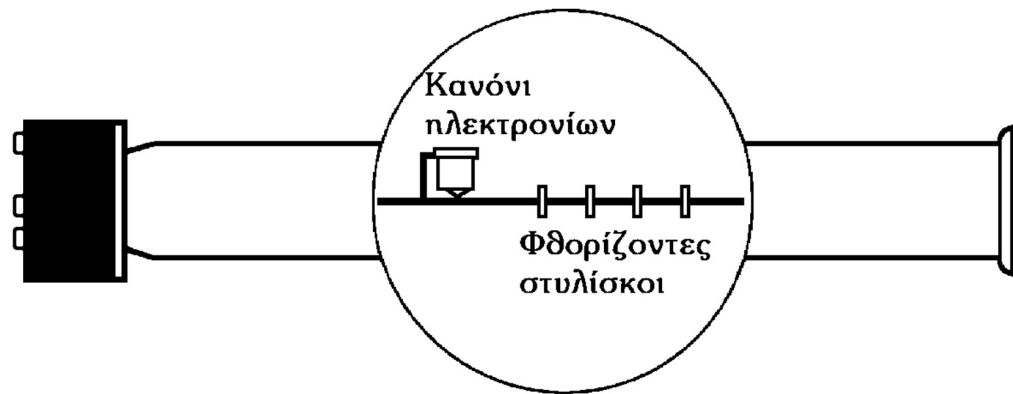


Μεταβλητή αντίσταση

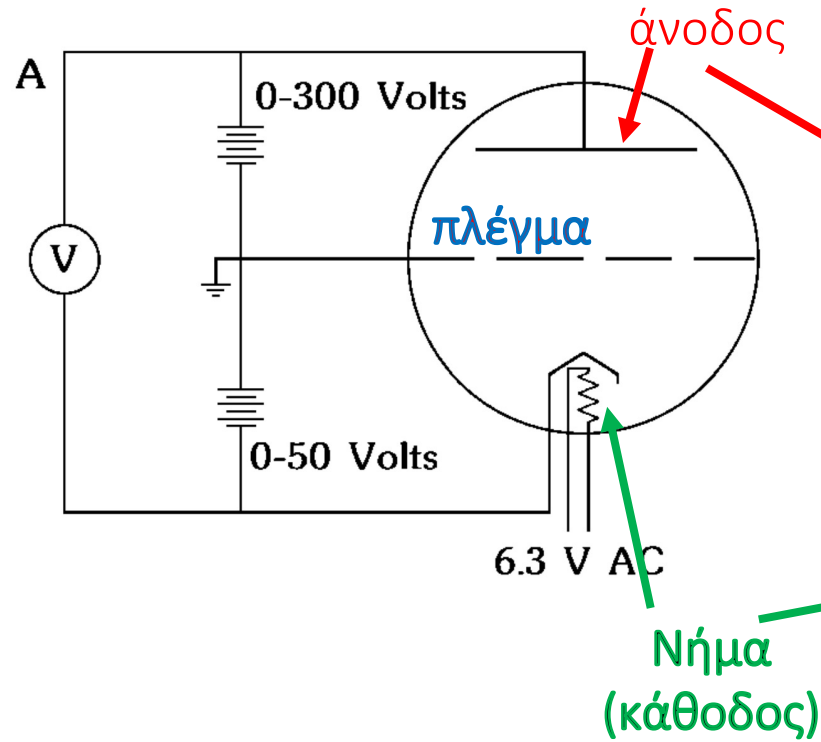


Πηνία Helmholtz

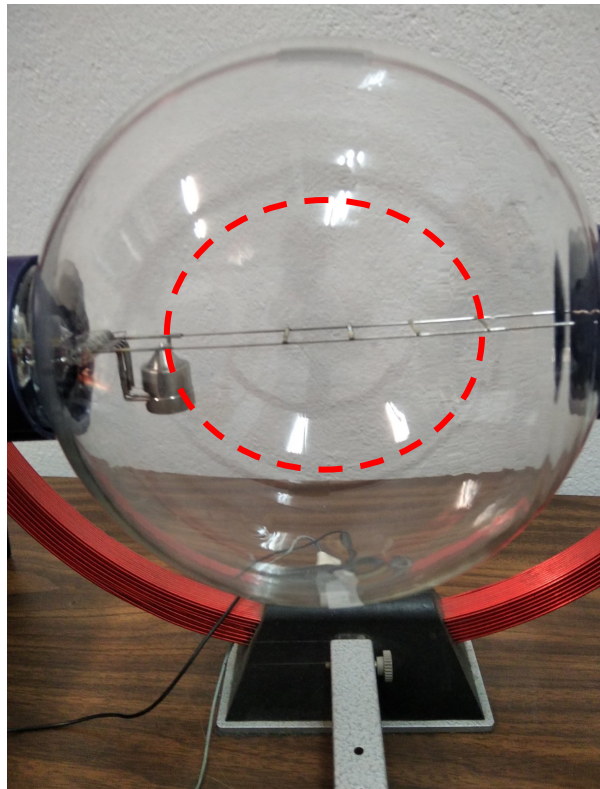
Λυχνία



Λυχνία



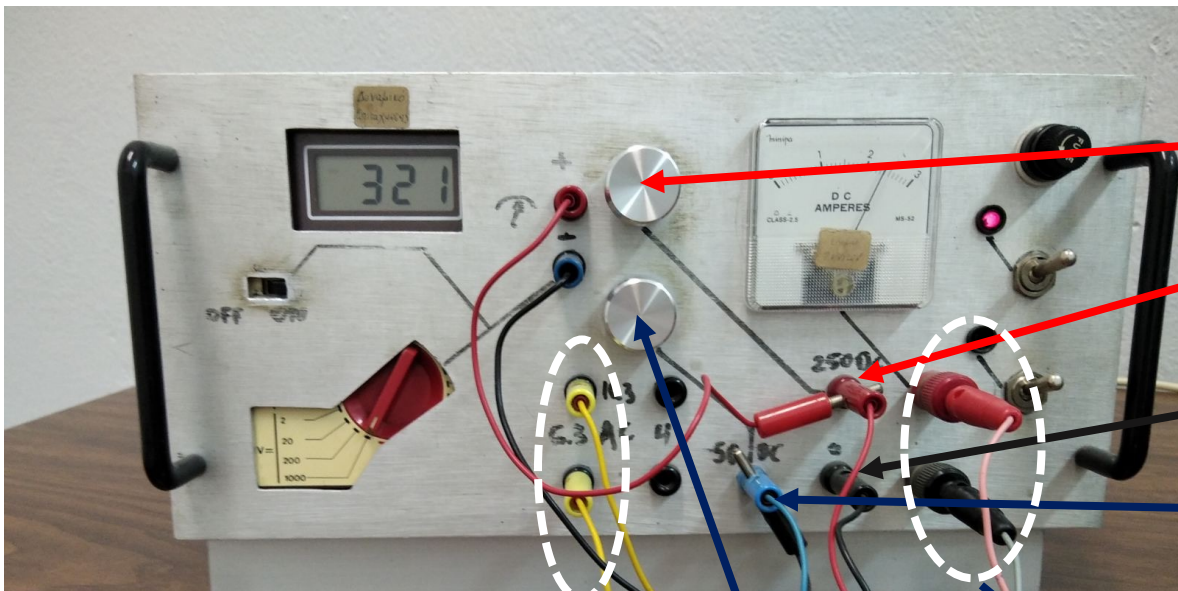
Λυχνία



Αποστάσεις των στυλίσκων από την οπή της ανόδου.

| Στυλίσκος | Απόσταση (m) |
|-----------|--------------|
| 1 | 0,04 |
| 2 | 0,06 |
| 3 | 0,08 |
| 4 | 0,10 |

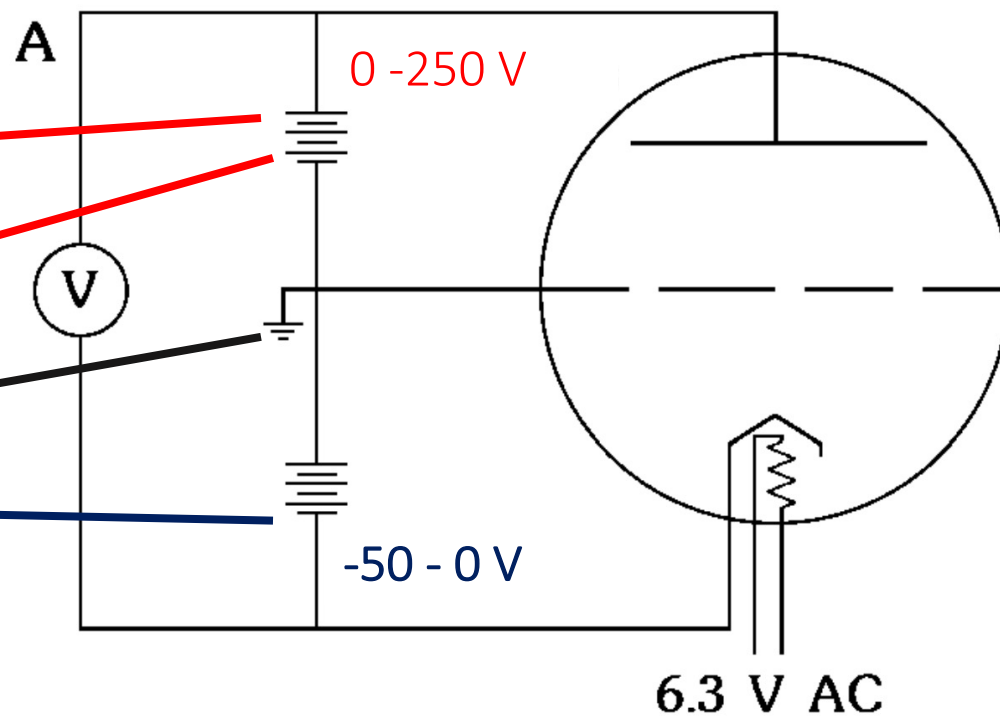
Τροφοδοτικά



6.3 V AC
Τάση
θέρμανσης

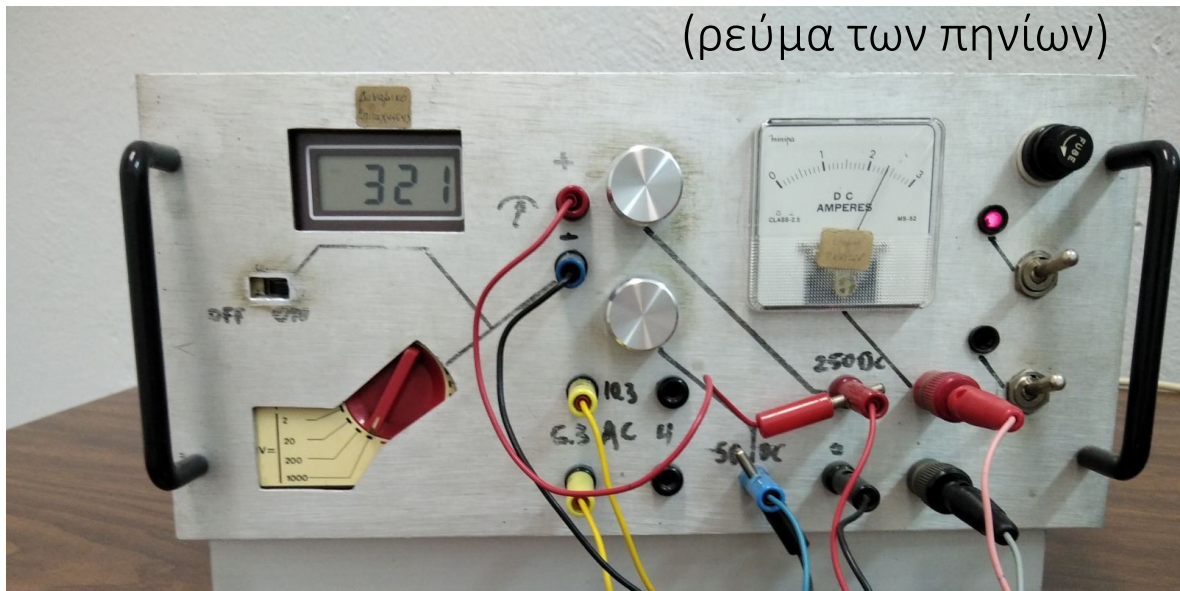
-50 - 0 V

Τροφοδοσία
πηνίων

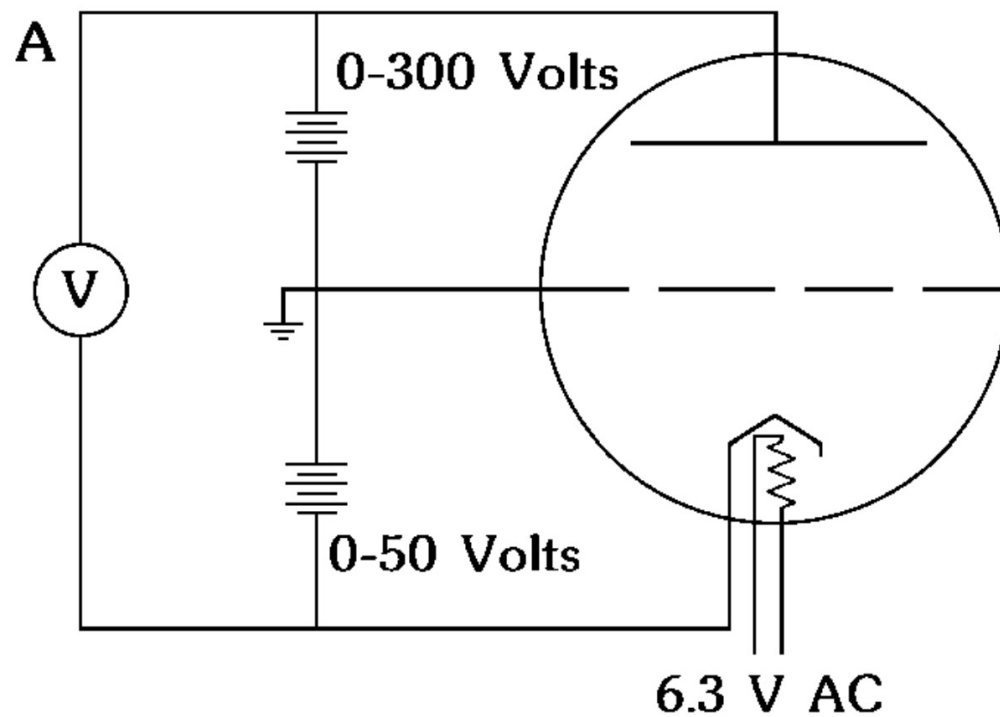


Τροφοδοτικά

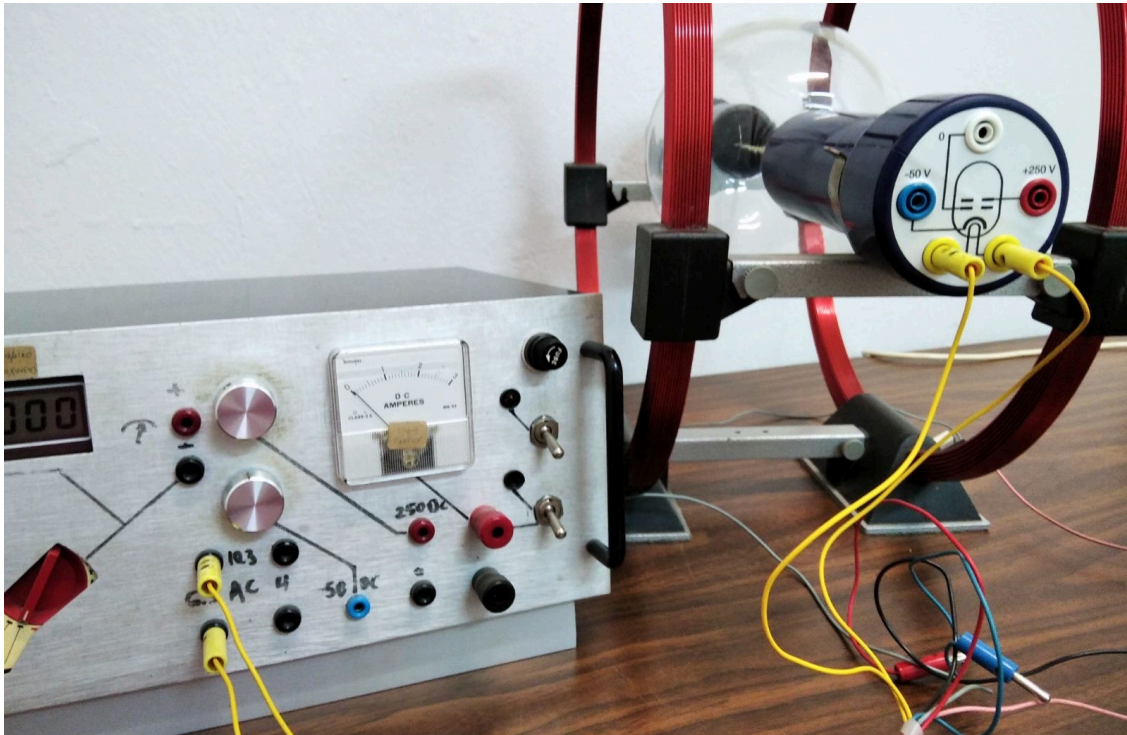
Αμπερόμετρο
(ρεύμα των πηνίων)



Βολτόμετρο
(τάση επιτάχυνσης)

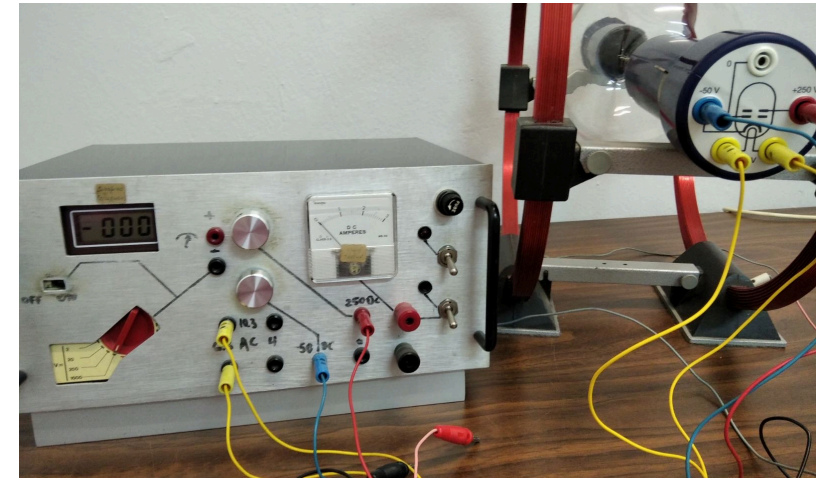


Συνδεσμολογία



1. Τάση θέρμανσης του νήματος (καθόδου) για την παραγωγή των ηλεκτρονίων

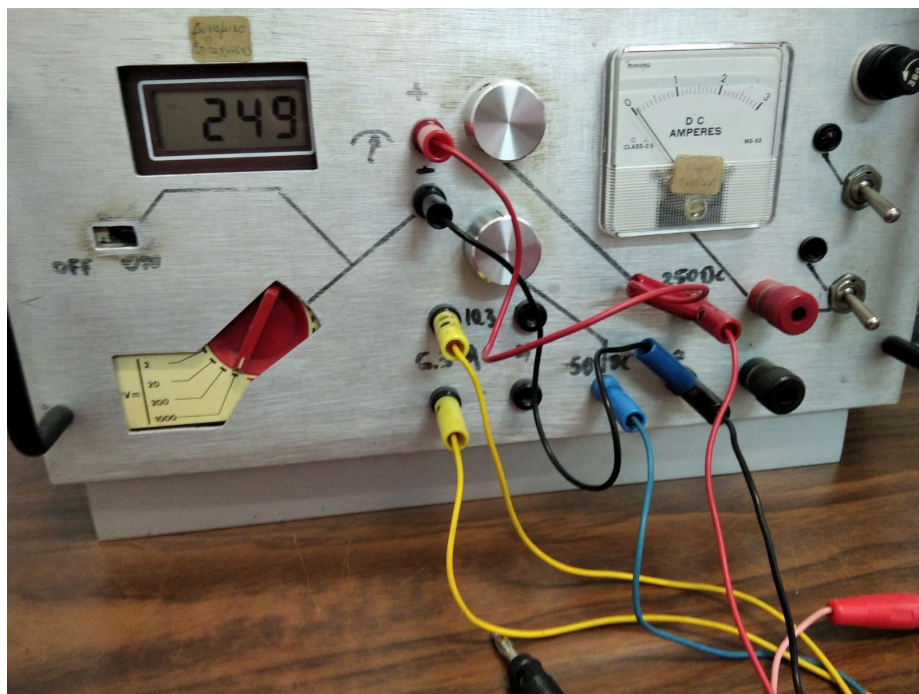
2. Τάση επιτάχυνσης (250 V) στην άνοδο (κόκκινο) και -50 στην κάθοδο (μπλε).



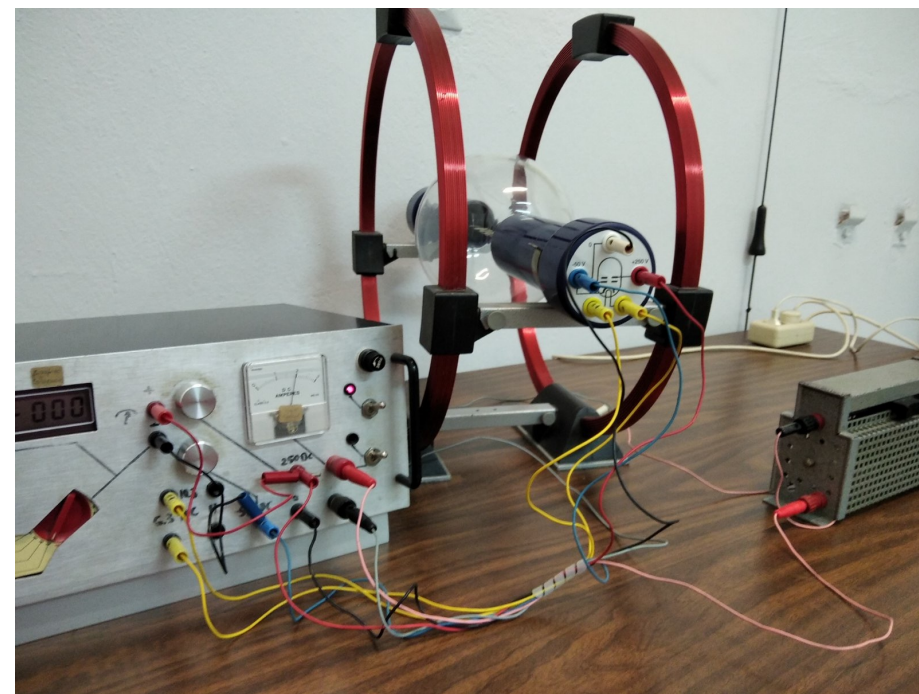
3. Το πλέγμα στη γή 0 V, (μαύρο).



Συνδεσμολογία



4. Βολτόμετρο (-50 – 250) για τη μέτρηση της συνολικής τάσης επιτάχυνσης.

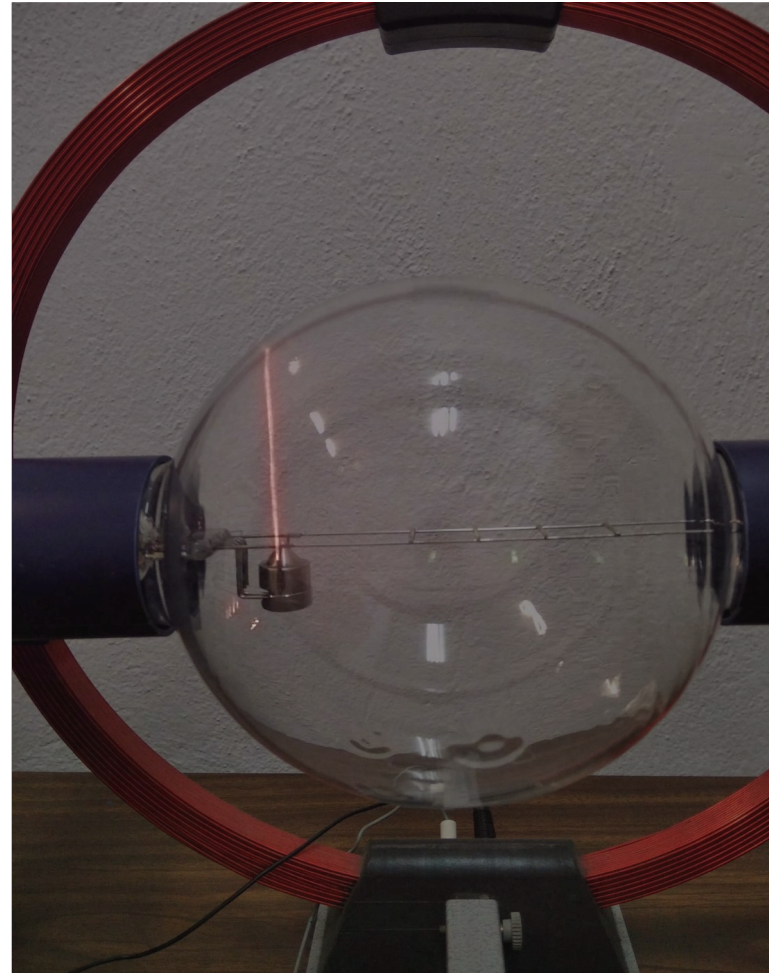


5. Τροφοδοσία των πηνίων

Μετρήσεις

Ανοίγοντας το τροφοδοτικό (χωρίς μαγνητικό πεδίο) θα πρέπει να δείτε τη δέσμη των ηλεκτρονίων που βγαίνουν από την άνοδο (ευθεία). .

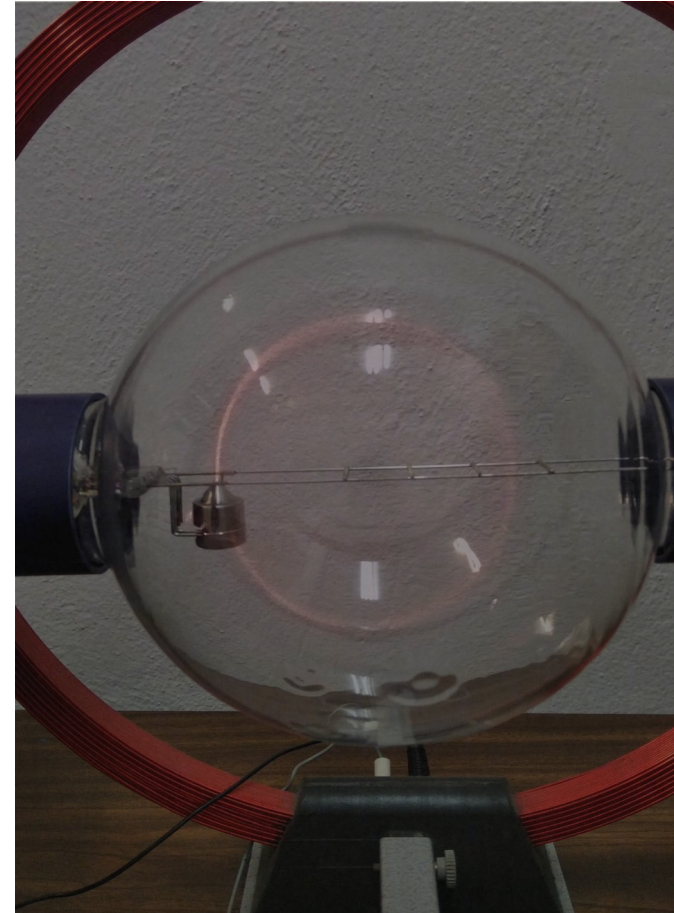
Ίσως θα πρέπει να σβήσετε το φως του δωματίου σας



Μετρήσεις

Ίσως θα πρέπει να σβήσετε το φως του δωματίου σας

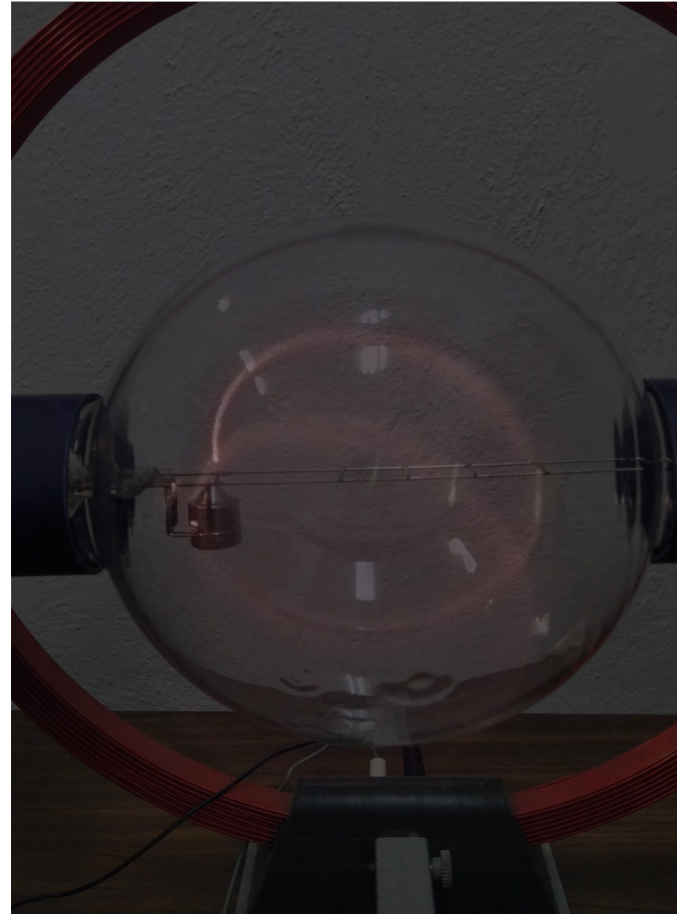
Ανοίγοντας και την τροφοδοσία των πηνίων θα δείτε τη δέσμη των ηλεκτρονίων να κάμπτετε και να σχηματίζεται κυκλική τροχιά.



Μετρήσεις

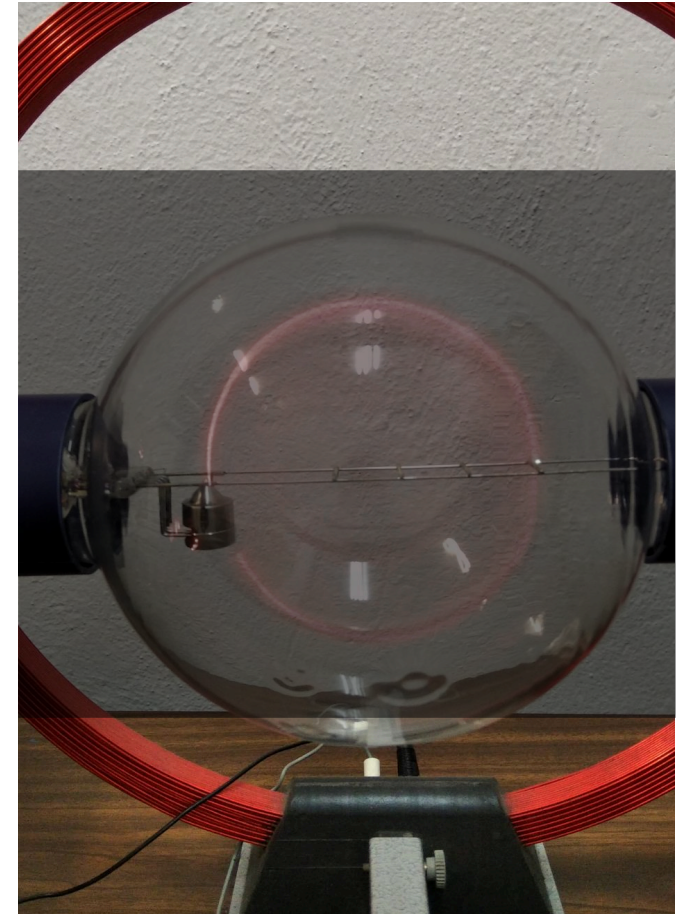
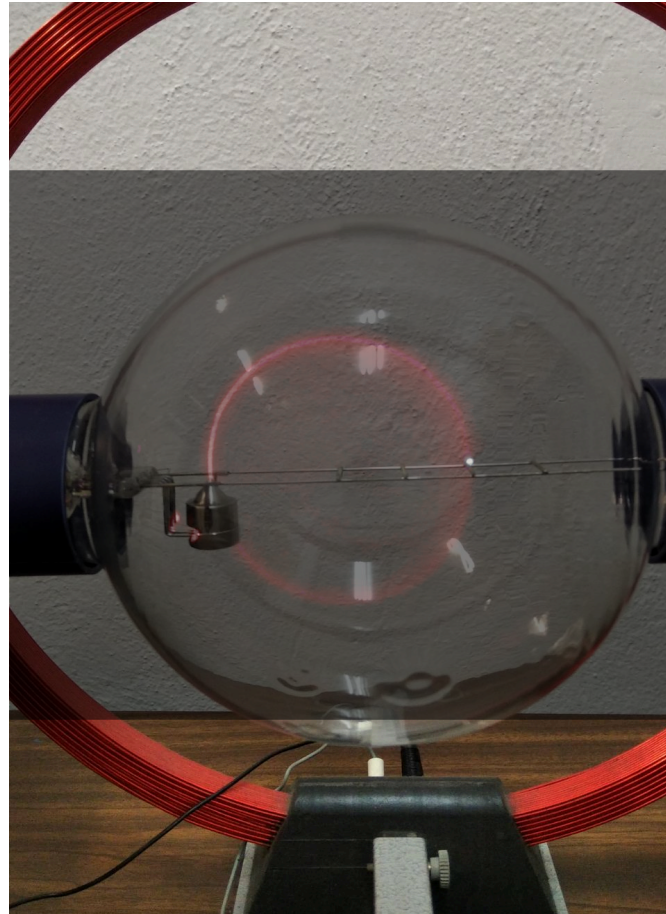
Αν ανοίγοντας και την τροφοδοσία των πηνίων δείτε τη δέσμη των ηλεκτρονίων να κάμπτετε και να σχηματίζεται σπειροειδής τροχιά

Τι θα πρέπει να κάνετε?

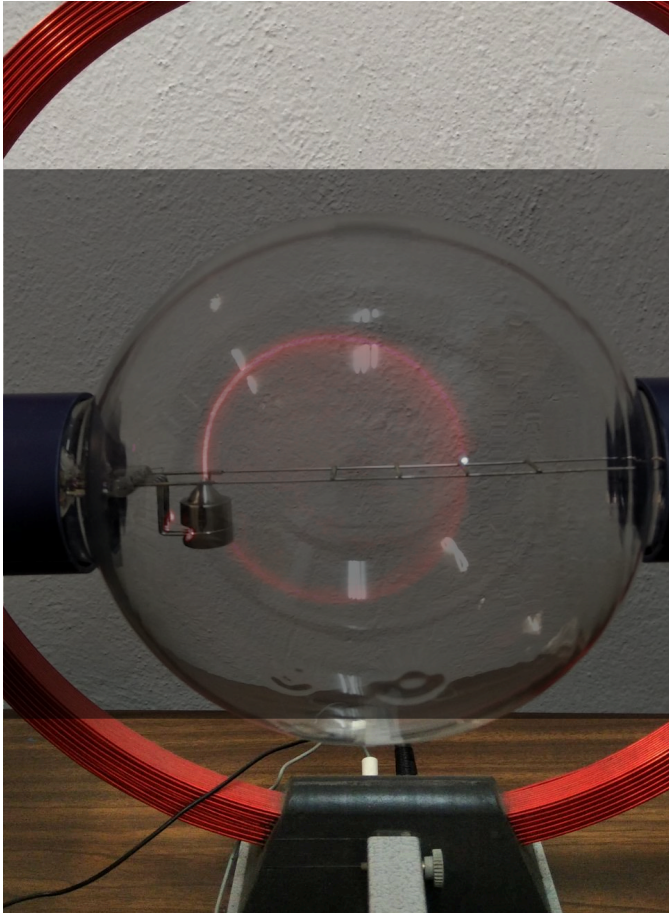


Μετρήσεις

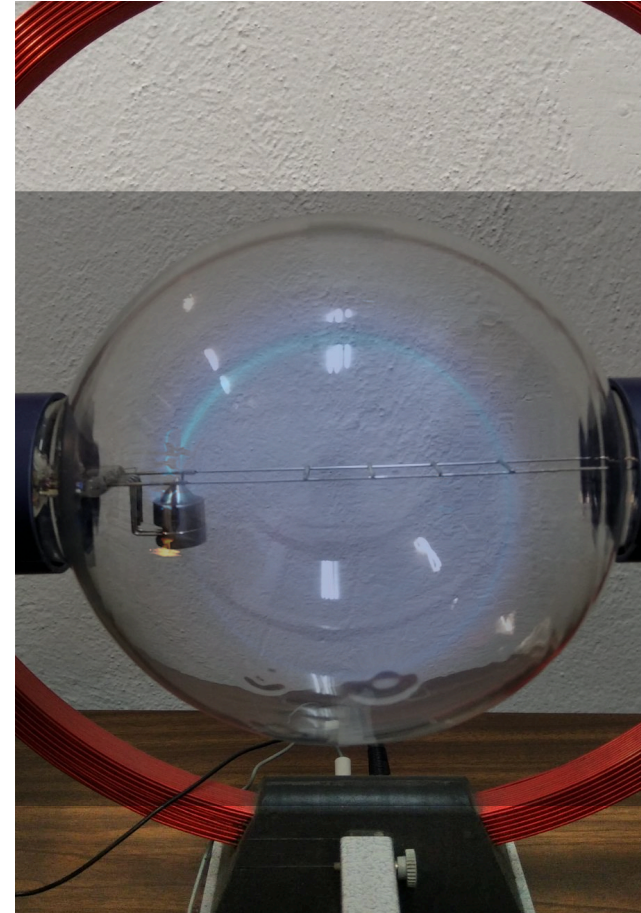
Ρυθμίζοντας είτε την τάση επιτάχυνσης είτε το μαγνητικό πεδίο μπορείτε να ρυθμίσετε την ακτίνα της κυκλικής τροχιάς των ηλεκτρονίων έτσι ώστε τα ηλεκτρόνια να κτυπούν σε κάποιο φθορίζοντα στυλίσκο.



Μετρήσεις (Χρώμα !!)



???



Μετρήσεις

Δύναμη Laplace :

$$\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}$$

Η δύναμη Laplace ως κεντρομόλος :

$$\frac{mv^2}{r} = evB \quad \frac{e}{m} = \frac{v}{rB}$$

Διατήρηση της ενέργειας :

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \quad \text{ή} \quad v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

Το μαγνητικό πεδίο των πηνίων :

$$B[T] = \frac{8\mu_0}{\sqrt{125}} \frac{N}{a} I$$

Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω \rightarrow

$$\frac{e}{m} = 2,47 \times 10^{12} \frac{a^2}{N^2} \frac{V}{I^2 r^2} [C/kg]$$

Σφάλματα

$$\frac{e}{m} = 2,47 \times 10^{12} \frac{a^2}{N^2} \frac{V}{I^2 r^2} [C/kg]$$

Για κάθε μέγεθος που μετράτε υπεισέρχεται ένα πειραματικό σφάλμα.

- σ(V) (τάση) → όργανο (ψηφιακό)
- σ(I) (ένταση) → όργανο (αναλογικό)
- σ(r) (ακτίνα) → εκτίμηση του πάχους της δέσμης
(πειραματιστείτε μεταβάλλοντας
I και V και βλέποντας το στυλίσκο)

Σφάλματα

$$\frac{e}{m} = 2,47 \times 10^{12} \frac{a^2}{N^2} \frac{V}{I^2 r^2} [C/kg]$$

Για κάθε μέγεθος που μετράτε υπεισέρχεται ένα πειραματικό σφάλμα, V (τάση) , I (ένταση) , r (ακτίνα) , το οποίο μεταδίδεται στο τελικό αποτέλεσμα

$$\sigma_u^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots$$

$$\sigma_{e/m} = \left[\left(\frac{de/m}{dV} \sigma_V\right)^2 + \left(\frac{de/m}{dI} \sigma_I\right)^2 + \left(\frac{de/m}{dr} \sigma_r\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Μετρήσεις

$$\frac{e}{m} = 2,47 \times 10^{12} \frac{a^2}{N^2} \frac{V}{I^2 r^2} \text{ [C/kg]}$$

Για τη διάταξή μας
 $a = 0,2 \text{ m}$ ακτίνα των πηνίων
 $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Tm/A}$
 $N = 154$ σπείρες

Σφάλματα για V , I και r

παράδειγμα

| a/a | V (V) | $\sigma(V)$ | I (A) | $\sigma(I)$ | r (m) | $\sigma(r)$ | e/m | $\sigma(e/m)$ |
|-------|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|----------|---------------|
| 1 | 80 | | 1.3 | | 0.02 | | 4.93E+11 | 6.23E+10 |
| 2 | 90 | | 1.5 | | 0.02 | | 4.17E+11 | 5.01E+10 |
| 3 | | | | | 0.03 |  | .... | .... |
| 4 | | | | | 0.03 |  | .... | .... |
| 5 | | | | | 0.03 |  | .... | .... |
| 6 | | | | | 0.04 |  | .... | .... |
| 7 | | | | | 0.04 |  | .... | .... |
| 8 | | | | | 0.05 |  | .... | .... |
| 9 | | | | | 0.05 |  | .... | .... |
| 10 |  |  |  |  |  |  | .... | .... |
| 11 |  |  |  |  |  |  | .... | .... |
| 12 |  |  |  |  |  |  | .... | .... |
| 13 |  |  |  |  |  |  | .... | .... |
| 14 |  |  |  |  |  |  | .... | .... |
| 15 |  |  |  |  |  |  | .... | .... |
| | | | | | | | MO | $\sigma(MO)$ |

Σχόλια - Συμπεράσματα