

Το Σέλας Στο ... Μπουκάλι!

Δημήτρης Τσαούσης

Σχολικός Σύμβουλος ΠΕ4, Σεφέρη 8, Ελεούσα Ιωαννίνων, Ιωάννινα 45500,
E-mail: me00034@cc.uoi.gr.

Περίληψη

Η μελέτη της κίνησης φορτίου σε ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο και της μαγνητικής φιάλης έλειπε από τη διδασκαλία της Φυσικής στη Μέση Εκπαίδευση και εισήλθε για πρώτη φορά με το νέο πρόγραμμα σπουδών του 1999. Η προσθήκη αυτή δημιούργησε ανάγκες για την κατανόηση της θεωρίας, για τις ασκήσεις αλλά και για τις εργαστηριακές ασκήσεις και τα εργαστηριακά όργανα.

Με την εργασία μας αυτή θέλουμε να βοηθήσουμε προς αυτή την κατεύθυνση. Ερμηνεύουμε την ελικοειδή κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων στη μαγνητική φιάλη παρακάμπτοντας τις διαφορικές εξισώσεις με τις οποίες γίνεται η ερμηνεία της ανωτέρω κίνησης στην ηλεκτροδυναμική σε πανεπιστημιακές εκδόσεις. Έτσι η ερμηνεία της γίνεται εύπεπτη για το επίπεδο της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης. Επίσης απαντάται εύκολα το εύλογο ερώτημα των μαθητών πως είναι δυνατόν να επιταχύνεται το ηλεκτρικό φορτίο κατά τον άξονα του στατικού μαγνητικού πεδίου.

Στην προσπάθειά μας να κάνουμε πιο εποπτική τη διδασκαλία της κίνησης του ηλεκτρονίου σε ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο μετατρέψαμε τη συσκευή της πειραματικής μέτρησης του λόγου e/m σε μαγνητική φιάλη με την προσθήκη εξωτερικού ανομοιογενούς μαγνητικού πεδίου. Το πείραμα πέτυχε. Σχηματίστηκε η ελικοειδής τροχιά των ηλεκτρονίων στη μαγνητική φιάλη. Πραγματοποιήθηκε ο εγκλωβισμός των φορτίων στο μαγνητικό πεδίο. Σχηματίστηκε το βόρειο και το νότιο σέλας μέσα σε μια φιάλη. Οι φωτογραφίες που πήραμε είναι μοναδικές.

Εκτός από τα πειράματα που κάναμε για τη μελέτη μας, πραγματοποιήσαμε και πειράματα επίδειξης σε μαθητές πολλών Ενιαίων Λυκείων κατά την διάρκεια της διδασκαλίας της αντίστοιχης παραγράφου στο σχολείο τους. Οι μαθητές μας εντυπωσιάστηκαν πάρα πολύ. Είδαν το σέλας μέσα στο εργαστήριο. Είδαν με τα μάτια τους αυτά που προβλέπει η θεωρία για δυνάμεις από μαγνητικό πεδίο σε κινούμενα φορτία. Είδαν τις μαθηματικές εξισώσεις να παίρνουν μορφή.

Κίνηση Φορτίου σε Μαγνητικό Πεδίο

Το μαγνητικό πεδίο ασκεί στα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία δύναμη [δύναμη Lorentz (Λόρεντζ)] μέτρου

$$F = B|q|v\eta\mu\phi \quad (1)$$

όπου ϕ η γωνία που σχηματίζει η ταχύτητα του σωματιδίου με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Η δύναμη αυτή είναι κάθετη στο επίπεδο που ορίζεται από την ταχύτητα και τη διεύθυνση του πεδίου και η φορά της δίνεται από τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού.

Κίνηση κάθετα στις δυναμικές γραμμές

Στην ειδική περίπτωση της κίνησης φορτισμένου σωματίου με το διάνυσμα της ταχύτητάς του κάθετο σε ένα εξωτερικό ομογενές μαγνητικό πεδίο θα έχουμε κυκλική κίνηση.

Το μαγνητικό πεδίο ασκεί στο σωματίδιο δύναμη το μέτρο της οποίας είναι

$$F = B|q|v \quad (2)$$

που προκύπτει από την (1), αν λάβουμε υπόψη ότι $\eta\mu 90^\circ = 1$

Η δύναμη αυτή παίζει ρόλο κεντρομόλου δύναμης και αναγκάζει το σωματίδιο να κινηθεί κυκλικά.

$$F = m \frac{v^2}{R} \quad (3)$$

όπου R η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς που διαγράφει το σωματίδιο.

$$\text{ή} \quad R = \frac{mv}{B|q|} \quad (4)$$

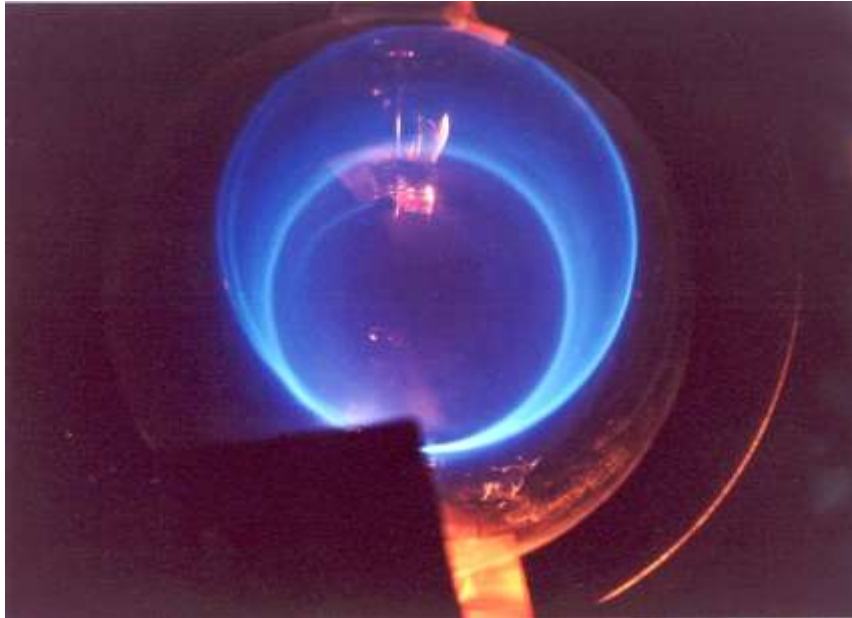


Σχήμα 1. Φωτογραφία του σωλήνα LEYBOLD. Διακρίνονται τα πηνία Helmholtz και οι πρόσθετοι κυκλικοί μόνιμοι μαγνήτες στα κέντρα των πηνίων Helmholtz.

Πραγματοποιήσαμε την κίνηση ηλεκτρονίων σε μαγνητικό πεδίο με ένα σωλήνα της εταιρίας **LEYBOLD** που φαίνεται στο Σχήμα 1 και χρησιμεύει για πειράματα προσδιορισμού του λόγου e/m . Ο σωλήνας αποτελείται από υάλινη σφαίρα διαμέτρου 155 mm και περιέχει υδρογόνο σε πίεση 10^{-2} mmHg. Καθοδικές ακτίνες που εκπέμπονται από θερμαινόμενη κάθοδο εντός του αραιωμένου αερίου γίνονται ορατές

λόγω διέγερσης και αποδιέγερσης του αερίου σχηματίζοντας μια μπλε ευθεία τροχιά[1].

Κίνηση φορτίου σε ομογενές μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 2. Φωτογραφία των τροχιών ηλεκτρονίων που κινούνται κάθετα σε ομογενές πεδίο.

Χρησιμοποιήσαμε πηνία Helmholtz για τη δημιουργία ομογενούς μαγνητικού πεδίου. Τα πηνία Helmholtz, είναι ένα ζεύγος κυκλικών πλαισίων ακτίνας L παραλλήλων μεταξύ τους, που η μεταξύ τους απόσταση είναι πάλι L . Τα δύο κυκλικά πλαίσια δημιουργούν στην κεντρική περιοχή τους μαγνητικό πεδίο τέτοιο ώστε για πρακτικούς λόγους να θεωρείται ομογενές[2,3]. Πήραμε κυκλικές τροχιές εσωτερικά εφαπτόμενες στο σημείο εκπομπής, όπως φαίνεται στη φωτογραφία του Σχήματος 2, διότι τα ηλεκτρόνια που βγαίνουν από την κάθοδο δεν έχουν όλα την ίδια ακριβώς ταχύτητα και επομένως η ακτίνα τους κυμαίνεται από κάποια τιμή R_1 μέχρι κάποια άλλη τιμή R_2

Κίνηση με τυχαία γωνία ως προς τις δυναμικές γραμμές.

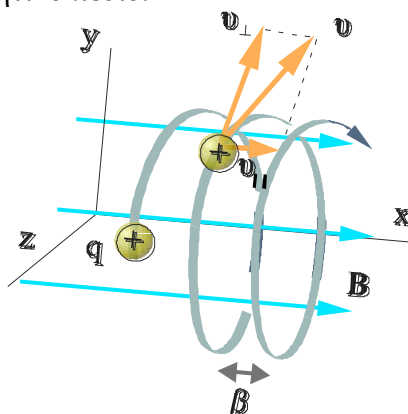
Ένα σωματίδιο που εισέρχεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο και η κατεύθυνση της ταχύτητάς του σχηματίζει με τις δυναμικές γραμμές γωνία $0 < \varphi < 90^\circ$ κάνει ελικοειδή κίνηση όπως του Σχήματος 3.

$$\text{με ακτίνα } R = \frac{mv_{\perp}}{B|q|}, \quad (5)$$

$$\text{περίοδο } T = \frac{2\pi m}{B|q|}. \quad (6)$$

$$\text{και βήμα } \beta = v_{\parallel} \cdot T = v_{\parallel} \frac{2\pi m}{B|q|} \quad (7)$$

όπου (v_{\parallel}) η παράλληλη συνιστώσα και (v_{\perp}) η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας v του σωματιδίου προς το μαγνητικό πεδίο.

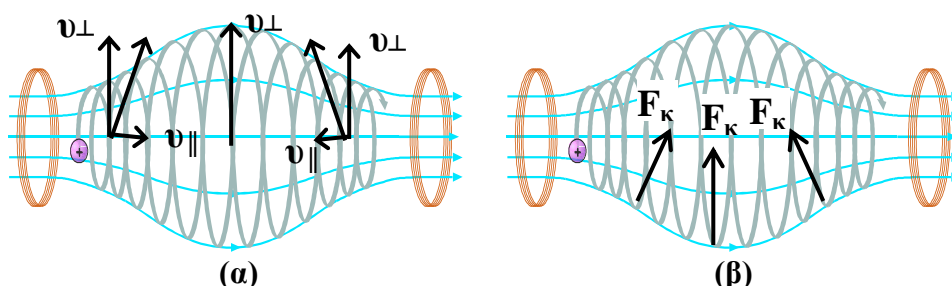


Σχήμα 3. Ελικοειδής κίνηση φορτισμένου σωματιδίου σε ομογενές μαγνητικό πεδίο.

Αν στρέψουμε τον σωλήνα LEYBOLD σε σχέση με τα πηνία Helmholtz παίρνουμε εύκολα την ελικοειδή κίνηση των ηλεκτρονίων σε ομογενές μαγνητικό πεδίο.

Κίνηση σε ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο

Η τροχιά που διαγράφει ένα φορτισμένο σωματίδιο μέσα σε ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο είναι γενικά πολύπλοκη και εξαρτάται κάθε φορά από τη μορφή του πεδίου.



Σχήμα 4. Ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο. Μαγνητική φιάλη.

Το Σχήμα 4 παριστά ένα ανομοιογενές πεδίο που δημιουργείται από δυο κυκλικά πηνία (πηνία που το μήκος τους είναι πολύ μικρότερο από τη διάμετρό τους), τα οποία έχουν τοποθετηθεί σε μεγάλη απόσταση, με τα επίπεδά τους παράλληλα. Ένα τέτοιο πεδίο είναι ισχυρό κοντά στα πηνία και ασθενές στο μέσο της διάταξης. Εδώ οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές καμπυλώνονται και άρα η γωνία φ που σχηματίζει η ταχύτητα του σωματιδίου με το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται. Αποτέλεσμα της μεταβολής της γωνίας φ είναι η δημιουργία μιας σπείρας μεταβλητής ακτίνας και μεταβλητού βήματος. Για να εξηγήσουμε την κίνηση αυτή του φορτίου παρατηρούμε ότι:

- I. Το σωματίδιο σε κάθε σημείο του πεδίου δέχεται διαφορετική κεντρομόλο δύναμη η οποία σε κάθε περίπτωση κατευθύνεται προς το κέντρο της περιοχής του μαγνητικού πεδίου (Σχ. 4α)[4].
- II. Αν αντιμετωπίσουμε το θέμα ενεργειακά, το σωματίδιο σε κάθε σημείο της τροχιάς του έχει κινητική ενέργεια λόγω μεταφοράς εξ αιτίας της v_{\parallel} και

κινητική ενέργεια εξ αιτίας της v_{\perp} λόγω περιστροφής (Σχ. 4β). Η μεταβολή της γωνίας φ συνεπάγεται μετατροπή της μιας μορφής ενέργειας στην άλλη με το άθροισμά τους σταθερό[5,6]. Αυτό συμβαίνει διότι η μαγνητική δύναμη που δρα πάνω στο φορτισμένο σωματίδιο το οποίο κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο είναι πάντοτε κάθετη στην κατεύθυνση του σωματίου. Το έργο που ασκεί η μαγνητική δύναμη είναι μηδενικό, διότι η μετατόπιση του φορτισμένου σωματίου είναι πάντοτε κάθετη στη μαγνητική δύναμη. Δηλαδή, ένα στατικό μαγνητικό πεδίο μεταβάλλει μόνο την κατεύθυνση της ταχύτητας του φορτισμένου σωματίου, διότι δεν μπορεί να επηρεάσει το μέτρο της ταχύτητας ή την ολική κινητική του ενέργεια[5, 6, 7].

III. Η δύναμη που επιβραδύνει το σωματίδιο κατά την κίνησή του παράλληλα στο B οφείλεται στη διαμήκη μεταβολή του B και έχει σχέση με τη διατήρηση επί πλέον της κινητικής ενέργειας, της μαγνητικής ροπής μ του σωματιδίου[8]. Μπορεί να αποδειχθεί* ότι το μέτρο της μαγνητικής ροπής μ διατηρείται:

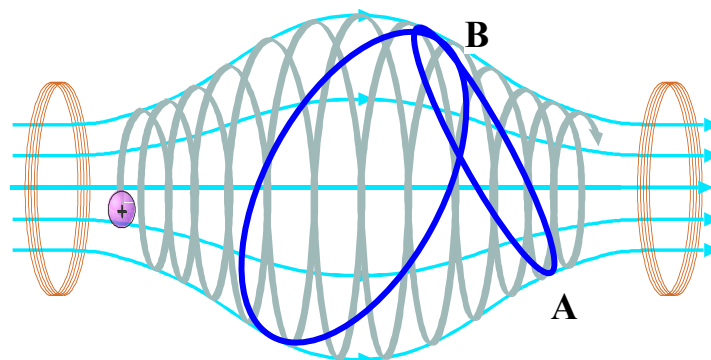
$$\mu = \frac{(1/2)mv_{\perp}^2}{B} = \frac{W_{\perp}}{B} \quad (8)$$

όπου W_{\perp} είναι η κινητική ενέργεια λόγω της ταχύτητας v_{\perp} κάθετα στο B . Επομένως καθώς το σωματίδιο κινείται από το μεσοεπίπεδο, όπου το B είναι ασθενές, προς το άκρο, όπου το B είναι ισχυρό, η ταχύτητα v_{\perp} θα πρέπει να αυξάνει ώστε η μαγνητική ροπή να παραμένει σταθερή. Κατά συνέπεια, λόγω διατήρησης της ολικής του κινητικής ενέργειας η παράλληλη ταχύτητα v_{\parallel} θα ελαττώνεται και, αν μηδενιστεί μέχρι να φθάσει στο άκρο, το σωματίδιο μπορεί να ανακλαστεί. Δεν ανακλώνται, ωστόσο, όλα τα σωματίδια, δηλ. με τυχαίο λόγο $v_{\perp} / v_{\parallel}$ στο μεσοεπίπεδο. Τόσο μεγαλύτερο ποσοστό σωματιδίων ανακλάται όσο ο λόγος της φιάλης B_{\max} / B_{\min} είναι μεγαλύτερος. Η δύναμη F_{\parallel} που επιβραδύνει το σωματίδιο κατά την κίνησή του παράλληλα στο B από το μεσοεπίπεδο προς το άκρο είναι ανάλογη προς τη μαγνητική ροπή και προς τη μεταβολή (βαθμίδα) του B αλλά ανεξάρτητη από το φορτίο και τη μάζα του σωματιδίου:

$$F_{\parallel} = -\mu \frac{\partial B}{\partial s} = -\mu \nabla_{\parallel} B \quad (9)$$

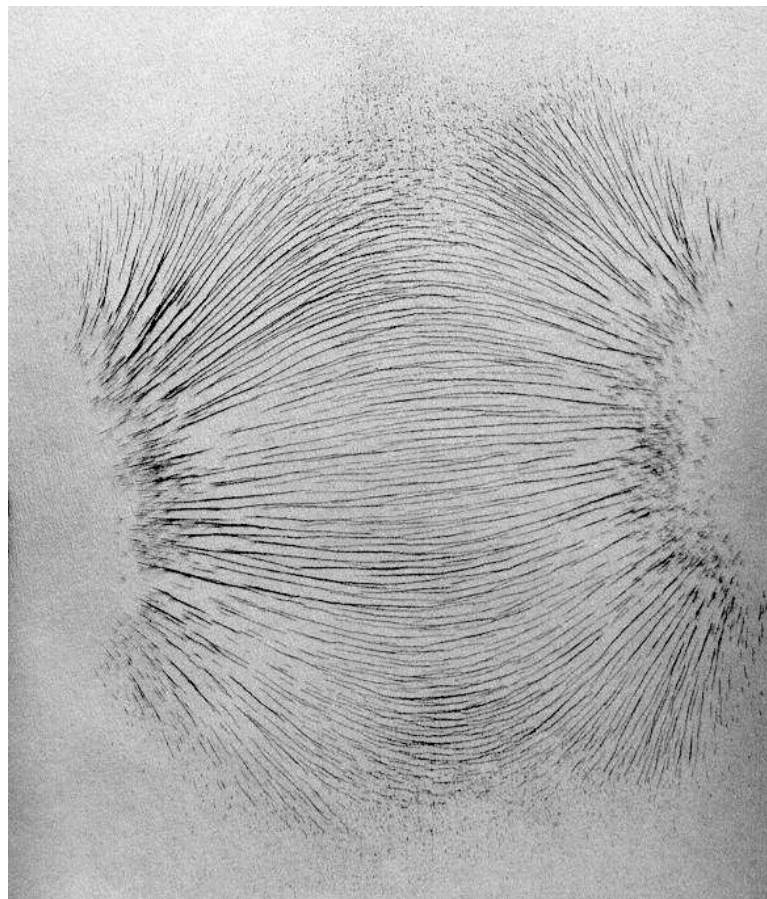
όπου ds στοιχειώδες μήκος παράλληλο στο B .

Τέλος σημειώνεται ότι η μαγνητική φιάλη χρησιμοποιείται για τον περιορισμό (confinement) του εργαστηριακού πλάσματος σύντηξης καθώς και για τη θέρμανσή του με αδιαβατική συμπίεση[8].



Σχήμα 5. Μαγνητική φιάλη. Ταλάντωση των κυκλικών τροχιών φορτισμένου σωματιδίου

IV. Αφού η κεντρομόλος δύναμη είναι κάθετη κάθε φορά στις δυναμικές γραμμές και στην ταχύτητα του σωματιδίου, αν κάποια χρονική στιγμή το σωματίδιο βρισκόταν στο σημείο **A** θα διέγραφε τον κύκλο του Σχήματος 5 που διέρχεται από το σημείο **A**. Όταν όμως το σωματίδιο φθάσει στο σημείο **B** της τροχιάς, βρίσκεται σε δυναμικές γραμμές διαφορετικής κλίσης και θα πρέπει να αλλάξει η τροχιά του ώστε η ακτίνα του νέου κύκλου να είναι πάλι κάθετη στις νέες δυναμικές γραμμές. Δηλαδή η κυκλική τροχιά κάνει μια ταλάντωση μέσα στο ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο και αυτό που βλέπουμε είναι μια σύνθεση διαδοχικών κυκλικών τροχιών (ανάλογη με τα σχήματα Lissajous) με αποτέλεσμα μια ελικοειδή τροχιά που αναστρέφεται στους δυο μαγνητικούς πόλους. Στη σκέψη αυτή οδηγηθήκαμε από το γεγονός ότι αν στο πείραμα παραμορφώσουμε λίγο το πεδίο του Σχήματος 6 με αύξηση της απόστασης των μόνιμων μαγνητών μεταξύ τους, βλέπουμε τέτοιες κυκλικές τροχιές σε διάφορες φάσεις. Στόχος μας ήταν να εξηγήσουμε την παλινδρομική κίνηση του ηλεκτρονίου σε στατικό μαγνητικό πεδίο κατά τον άξονά του. Η ιδέα της ταλάντωσης προήλθε από το γεγονός ότι η ταλάντωση δεν απαιτεί απορρόφηση ενέργειας.

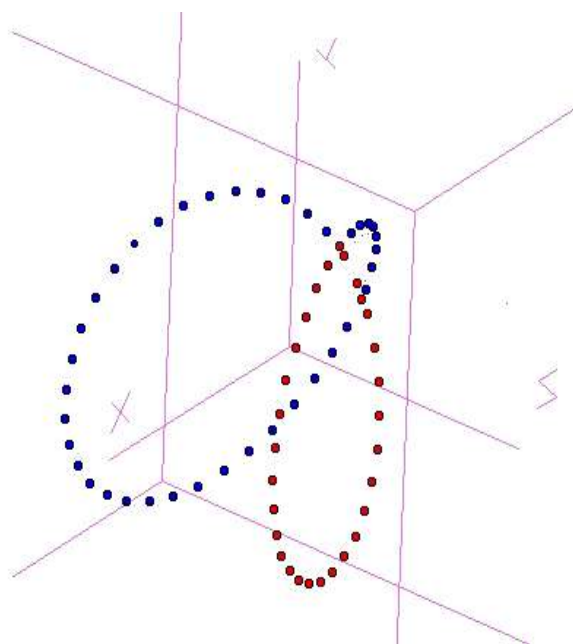


Σχήμα 6. Ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο. Φωτογραφία προσανατολισμένων ρινισμάτων σιδήρου από το πεδίο.

Κάναμε προσομοίωση της κίνησης φορτίου σε ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο. Χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα προσομοίωσης PHYSIKY[9] που έχει τη δυνατότητα να εργάζεται σε τρεις διαστάσεις. Τα αποτελέσματα ήταν σε συμφωνία με την άποψη για ταλάντωση μιας κυκλικής τροχιάς, αφού το πρόγραμμα μας έδωσε πράγματι ότι το ηλεκτρόνιο κινείται σε δυο

καμπυλόγραμμες, σχεδόν κυκλικές τροχιές, που ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Η τροχιά που πήραμε θυμίζει παραμορφωμένη καμπύλη οκτώ (∞). Το ηλεκτρόνιο αφού διαγράψει την πρώτη καμπυλόγραμμη τροχιά συνεχίζει να περιστρέφεται στη δεύτερη καμπυλόγραμμη τροχιά του οκτώ σε διαφορετικό επίπεδο από την πρώτη και κατόπιν ξαναγυρίζει στην αρχική τροχιά. Η συνεχής μετάπτωση της στροφορμής του ηλεκτρονίου δικαιολογείται από την επίδραση της μεταβαλλόμενης τοπικά δύναμης Lorentz. Άλλωστε στην προηγούμενη παράγραφο παρατηρήσαμε μεταβολή της κινητικής ενέργειας λόγω περιστροφής, δηλαδή μεταβολή στη στροφορμή του ηλεκτρονίου.

Σαν αποτέλεσμα έχουμε το σωματίδιο να επιταχύνεται και να επιβραδύνεται κατά τον άξονα του πεδίου χωρίς όμως να αυξάνεται η ολική του ενέργεια. Έτσι ένα φορτισμένο σωματίδιο που ξεκινάει από το ένα άκρο του πεδίου κάνει ελικοειδή κίνηση. Όταν φτάσει στο άλλο άκρο του πεδίου η κίνησή του αναστρέφεται και το σωματίδιο διαγράφοντας και πάλι ελικοειδή τροχιά, επιστρέφει στο σημείο εκκίνησης. Η κίνηση αυτή του σωματιδίου επαναλαμβάνεται διαρκώς[10]. Ένα τέτοιο πεδίο παγιδεύει τα φορτισμένα σωματίδια και αναφέρεται συχνά ως «μαγνητική φιάλη».



Σχήμα 7. Προσομοίωση της κίνησης ηλεκτρονίου σε ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο

Δημιουργήσαμε ένα ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο με δυο πρόσθετους κυκλικούς μόνιμους μαγνήτες, από ηχεία μεγαφώνων, που τοποθετήσαμε στα κέντρα των πηνίων Helmholtz, τα οποία πλέον δεν διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα και η μορφή του φαίνεται στο Σχήμα 6. Δημιουργήσαμε με τον τρόπο αυτό μια μαγνητική φιάλη και όταν δώσαμε τάση στον καθοδικό σωλήνα εμφανίστηκε η ελικοειδής τροχιά των ηλεκτρονίων. Φωτογραφίσαμε την κίνηση των ηλεκτρονίων στο ανομοιογενές αυτό μαγνητικό πεδίο και πήραμε την φωτογραφία του Σχήματος 8.

Βλέπουμε ότι τα ηλεκτρόνια έρχονται από την πηγή των καθοδικών ακτίνων προς τα επάνω και μπαίνουν στο μαγνητικό πεδίο. Κινούνται με ελικοειδή τροχιά προς τα αριστερά, κατόπιν η κίνησή τους αναστρέφεται προς τα δεξιά και αφού διανύσουν

το μαγνητικό πεδίο, η τροχιά τους αναστρέφεται για δεύτερη φορά προς τα αριστερά. Στη συνέχεια η συντονισμένη κίνηση των ηλεκτρονίων χάνεται λόγω απώλειας ενέργειας και δεν φαίνεται πλέον η συνεχής μπλε γραμμή αλλά τα ηλεκτρόνια εγκλωβίζονται στο μαγνητικό πεδίο που γίνεται αντιληπτό από το διάχυτο μπλε χρώμα σε όλη την έκταση του μαγνητικού πεδίου. **Το διάχυτο μπλε χρώμα είναι εντονότερο στις περιοχές των δυο μαγνητικών πόλων όπως συμβαίνει με το σέλας στους μαγνητικούς πόλους της γης.** Δηλαδή φτιάξαμε το Βόρειο και το Νότιο Σέλας κλεισμένο σε μια γυάλα στο εργαστήριο. Ασφαλώς δεν μπορέσαμε να φτάσουμε την ομορφιά της φύσης που είναι αξεπέραστη, αλλά καταφέραμε να κάνουμε ορατό το Βόρειο και το Νότιο Σέλας συγχρόνως, κλεισμένα σε ένα μπουκάλι.



Σχήμα 8. Φωτογραφία της ελικοειδούς τροχιάς ηλεκτρονίων σε μαγνητική φιάλη.

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι το φως που παίρνουμε οφείλεται μόνο σε διέγερση και αποδιέγερση του αερίου και όχι σε ακτινοβολία Cherenkov, αφού για να εκδηλωθεί το φαινόμενο Cherenkov πρέπει κατά τους Frank και Tamm τα ηλεκτρόνια να έχουν ταχύτητα μεγαλύτερη της ταχύτητας του φωτός στο μέσον που διαδίδονται[11]. Στα πειράματά μας τα ηλεκτρόνια είχαν ταχύτητα της τάξεως των 10^6 m/sec, πολύ μικρότερη της 10^8 m/sec που είναι η τάξη της ταχύτητας του φωτός σε πίεση αερίου των 10^{-2} mmHg που ήταν οι συνθήκες του πειράματός μας.

Οι φωτογραφίες του πειράματος ελήφθησαν σε σκοτεινό θάλαμο με ανοικτό το διάφραγμα της φωτογραφικής μηχανής και κρατήσαμε το διάφραγμα της φωτογραφικής μηχανής ανοικτό για 15 min (χρόνος έκθεσης του φιλμ).

Εκτός από τα πειράματα που κάναμε για τη μελέτη μας, πραγματοποιήσαμε και πειράματα επίδειξης σε μαθητές όλων των Ενιαίων Λυκείων των νομών Ιωαννίνων και Κερκύρας κατά την διάρκεια της διδασκαλίας της αντίστοιχης παραγράφου στο σχολείο τους. Οι μαθητές μας εντυπωσιάστηκαν πάρα πολύ. Ήταν η πρώτη φορά που έβλεπαν με τα μάτια τους αυτά που προβλέπει η θεωρία για δυνάμεις από μαγνητικό πεδίο σε κινούμενα φορτία. Ήταν η πρώτη φορά που έβλεπαν τις μαθηματικές εξισώσεις να παίρνουν μορφή.

*Ο προσδιορισμός της μ είναι ο ίδιος με εκείνο του προσδιορισμού της μαγνητικής ροπής ενός κυκλικού ρεύματος επιφάνειας A και ρεύματος I : $\mu = IA$. Στην περίπτωση ενός απλού ιόντος, το ρεύμα I δημιουργείται από την περιφορά ενός φορτίου e που περιφέρεται $\omega_c/2\pi$ φορές το δευτερόλεπτο: $I = e\omega_c/2\pi$. Η επιφάνεια A είναι $\pi r_{\perp}^2 = \pi v_{\perp}^2 / \omega_c^2$. Έτσι και λόγω της (5)

$$\mu = \frac{\pi v_{\perp}^2 e \omega_c}{\omega_c^2 2\pi} = \frac{1}{2} \frac{v_{\perp}^2 e}{\omega_c} = \frac{1}{2} \frac{m v_{\perp}^2}{B} = \frac{W_{\perp}}{B} \quad (10)$$

Η ενέργεια του σωματιδίου πρέπει να διατηρείται. Έτσι έχουμε

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m v_{\parallel}^2 + \frac{1}{2} m v_{\perp}^2 \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m v_{\parallel}^2 + \mu B \right) = 0 \quad (11)$$

Πολλαπλασιάζοντας τη συνιστώσα της εξίσωσης κίνησης του σωματιδίου παράλληλα στο μαγνητικό πεδίο, $m \frac{dv_{\parallel}}{dt} = F_{\parallel}$, επί $v_{\parallel} = \frac{ds}{dt}$ προκύπτει με τη βοήθεια της (9)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m v_{\parallel}^2 \right) = -\mu \frac{dB}{dt} \quad (12)$$

$$\text{οπότε} \quad -\mu \frac{dB}{dt} + \frac{d}{dt} (\mu B) = 0 \quad (13)$$

$$\text{άρα} \quad d\mu / dt = 0 \quad (14)$$

Ευχαριστίες

Ο σωλήνας της εταιρίας LEYBOLD ήταν απαραίτητος για τα πειράματα που πραγματοποιήσαμε. Είναι δωρεά των Ελλήνων του Καναδά στο Γυμνάσιο Πωγωνιανής Ηπείρου. Τον βρήκαμε σε κακή κατάσταση στις αποθήκες του Γυμνασίου και τον επισκευάσαμε με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού του Φυσικού Τμήματος του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων κ. Νικολάου Τάτση. Από της θέσεως αυτής ευχαριστούμε όλους τους ανωτέρω για την πολύτιμη βοήθειά τους.

Επίσης ευχαριστούμε τους: Σπύρο Μπαλταγιάννη Φυσικό, Δημήτριο Πανταζή Φυσικό, Παναγιώτη Μουρούζη Φυσικό, Κώστα Γεωργόπουλο Φυσικό, Αηδόνη Θεμελή Ξυλουργό, Χρήστο Πέτσιο Επιλοποιοί και Χριστόφορο Μπενέκο Φιλολόγο, οι οποίοι ο καθένας με τον τρόπο του βοήθησαν στην ολοκλήρωση της εργασίας μας.

Ιδιαίτερα ευχαριστούμε τον Επίκουρο Καθηγητή του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων κ. Γιώργο Θρουμουλόπουλο για το μέρος της θεωρητικής εξήγησης που αφορά τη διατήρηση της μαγνητικής ροπής και την παράλληλη δύναμη που οφείλεται στην διαμήκη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου.

Ακόμη, τον συνάδελφο Βασίλη Παπαντωνίου Φυσικό, σχεδιαστή του προγράμματος Physiki, για τη βοήθειά του στην πραγματοποίηση της προσομοίωσης της κίνησης του ηλεκτρονίου σε ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο.

Βιβλιογραφία

- [1] Σ. Καραβέλας, Κ. Μπατάς, Εργαστηριακές ασκήσεις ηλεκτρισμού, σελ. 121, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 1974.
- [2] E. M. Purcell, Electricity and Magnetism, Berkeley physics course – volume 2, page 237, Mcgraw – hill, New York, 1965.
- [3] Genzer/Youngner, PHYSICS, page 464, Silver Burdett, New Jersey, 1980.
- [4] Hugh D. Young, Physics, Eighth edition, Addison – Wesley Publishing Company, New York, 1991, Απόδοση στα Ελληνικά, σελ. 779, Εκδόσεις Παπαζήση.
- [5] John David Jackson, Classical Electrodynamics, Second Edition, page 591, John Wiley & Sons, New York 1961.
- [6] Roald K. Wangsness, Electromagnetic Fields, page 537, John Wiley & Sons, New York 1986.
- [7] Αλέκος Ιωάννου, Γιάννης Ντάνος, Άγγελος Πήττας, Σταύρος Ράπτης, Φυσική Θετικής & Τεχνολογικής Κατεύθυνσης Β' Ενιαίου Λυκείου, ΟΕΔΒ Αθήνα 2000.
- [8] F. F. Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion (second edition), page 32, Plenum Press, New York, 1984.
- [9] Physiki, version 1.2 (web site www.physiki.com) 1998.
- [10] Raymond A. Serway, PHYSICS For Scientists & Engineers, Saunders College Publishing, Philadelphia, Τόμος II, σελ. 190 –193, Απόδοση στα Ελληνικά Λεωνίδα Κ. Ρεσβάνη, Αθήνα, 1990.
- [11] More light on Cherenkov effect, CERN COURIER, International Journal of High-Energy Physics, **38** 7 December 1998.

Η εργασία παρουσιάστηκε στο 10^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Φυσικής, Λουτράκι 29,30,31 Ιανουαρίου και 1 Φεβρουαρίου 2004.

Πληροφορίες για την ακτινοβολία Cherenkov

<http://rd11.web.cern.ch/RD11/rkb/PH14pp/node26.html>

<http://hep.bu.edu/~superk/cherenkov.html>

Is there an equivalent of the sonic boom for light?

<http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SpeedOfLight/cherenkov.html>

Διευθύνσεις με πληροφορίες και φωτογραφίες για το Βόρειο (aurora borealis) και Νότιο Σέλας (aurora australis)

Πληροφορίες: <http://www.geo.mtu.edu/index.html>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

Φωτογραφίες: <http://www.ptialaska.net/~hutch/aurora.html>