ePublishing
ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ NATIONAL DOCUMENTATION CENTRE

Open Schools Journal for Open Science

Τόμ. 3, Αρ. 1 (2020)

Η κρίσιμη πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος, ως παράγων υπεραγωγιμότητας

Ηλίας Ανδρινόπουλος, Στέλιος Ζαρίφης, Αναστασία Κατηφόρη, Κατερίνα Λιάτη, Κλαίρη Μπάρτζη, Άρης Παναγιωτόπουλος, Βασίλης Συναδινός, Ελένη-Ειρήνη Τόγια, Μαρία-Ελένη Τσαπνίδου, Γιώργος Φαλαγγάς, Μιχάλης Ανδρεαδέλλης, Παύλος, Αρβανίτης, Αναστάσιος Αλεβίζος

doi: 10.12681/osj.22396

Copyright © 2020, Ηλίας Ανδρινόπουλος, Στέλιος Ζαρίφης, Αναστασία Κατηφόρη, Κατερίνα Λιάτη, Κλαίρη Μπάρτζη, Άρης Παναγιωτόπουλος, Βασίλης Συναδινός, Ελένη-Ειρήνη Τόγια, Μαρία-Ελένη Τσαπνίδου, Γιώργος Φαλαγγάς, Μιχάλης Ανδρεαδέλλης, Παύλος, Αρβανίτης, Αναστάσιος Αλεβίζος

Άδεια χρήσης Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0.

Βιβλιογραφική αναφορά:

Ανδρινόπουλος Η., Ζαρίφης Σ., Κατηφόρη Α., Λιάτη Κ., Μπάρτζη Κ., Παναγιωτόπουλος Ά., Συναδινός Β., Τόγια Ε.-Ε., Τσαπνίδου Μ.-Ε., Φαλαγγάς Γ., Ανδρεαδέλλης Μ., Αρβανίτης Π., & Αλεβίζος Α. (2020). Η κρίσιμη πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος, ως παράγων υπεραγωγιμότητας. *Open Schools Journal for Open Science*, *3*(1). https://doi.org/10.12681/osj.22396

https://epublishing.ekt.gr | **e-Εκδότης:** EKT | **Πρόσβαση:** 09/01/2026 23:24:26

Open Schools Journal for Open Science

Volume 4

Η κρίσιμη πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος, ως παράγων υπεραγωγιμότητας

Ηλίας Ανδρινόπουλος[1], Στέλιος Ζαρίφης[1] ,Αναστασία Κατηφόρη[1], Κατερίνα Λιάτη[1] , Κλαίρη Μπάρτζη[1] , Άρης Παναγιωτόπουλος[1], Βασίλης Συναδινός[1] , Ελένη Ειρήνη Τόγια[1] , Μαρία-Ελένη Τσαπνίδου[1], Γιώργος Φαλαγγάς[1] , Μιχάλης Ανδρεαδέλλης[2], Παύλος, Αρβανίτης[3], Αναστάσιος Αλεβίζος[4]

[1] 2ο Γενικό Λύκειο Χαλανδρίου, Αθήνα, Ελλάδα
[2] Φυσικός, 2 ο Γενικό Λύκειο Χαλανδρίου, Αθήνα, Ελλάδα
[3] Χημικός, 2 ο Γενικό Λύκειο Χαλανδρίου, Αθήνα, Ελλάδα
[4] Γεωλόγος, 2 ο Γενικό Λύκειο Χαλανδρίου, Αθήνα, Ελλάδα

Περίληψη

Θα μελετηθεί τα μέγεθος «κρίσιμη πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος» ως παράγοντας στην εκδήλωση του φαινομένου της υπεραγωγιμότητας σε ένα υπεραγώγιμο υλικό.

Θα πραγματοποιήσουμε την μαγνητική αιώρηση υπεραγωγού σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Σκοπός της άσκησης είναι να υπολογιστεί η πυκνότητα του κρίσιμου υπεραγώγιμου ρεύματος που ρέει στον υπεραγωγό.

Το ερώτημα το προσεγγίζουμε πειραματικά. Ο υπολογισμός της τιμής του μεγέθους θα γίνει μετρώντας το ύψος μαγνητικής αιώρησης, της μάζας του υπεραγώγιμου υλικού (μάζα του βαγονιού) και τη μεταβολή της κάθετης συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της κάθετης απόστασης από τους μαγνήτες.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Επιστήμης Υλικών στο Ε.ΚΕ.Φ.Ε. ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ με διάταξη τρένου (βαγόνι – υπεραγωγός, ράγες – μαγνήτης). Βιντεοσκοπήσαμε την επίσκεψή μας που περιλάμβανε ενημέρωση για το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας, όπως και την διεξαγωγή του πειράματος.

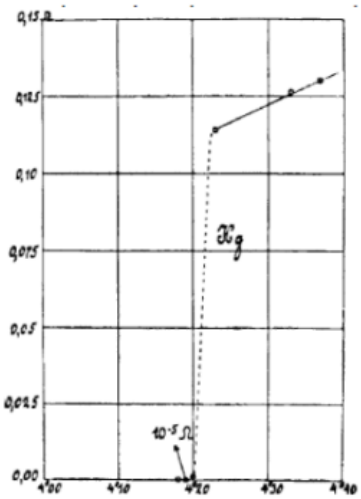
Λέξεις κλειδιά

Υπεραγωγιμότητα, υπεραγωγός, υπεραγώγιμα υλικά, μαγνητικό πεδίο Β, υπεραγώγιμο ρεύμα, κρίσιμη πυκνότητα υπεραγώγιμου ρεύματος, μαγνητική ροπή ηλεκτρικού ρεύματος.

Μεθοδολογία και Πειραματισμός

Υπεραγωγοί ονομάζονται τα υλικά στα οποία η ηλεκτρική αντίσταση και το μαγνητικό πεδίο μηδενίζονται στο εσωτερικό τους όταν αυτά ψυχθούν κάτω από μία συγκεκριμένη θερμοκρασία [1]. Η θερμοκρασία κάτω από την οποία ένα υλικό γίνεται υπεραγωγός λέγεται «κρίσιμη» θερμοκρασία.

Το φαινόμενο αυτό το ανακάλυψε ο Ολλανδός επιστήμονας Heike Kamerlingh – Onnes (Χάικε Κάμερλιγκ - Ονες), ο οποίος είχε καταφέρει να υγροποιήσει το Ήλιο (το σημείο βρασμού του υγρού He σε πίεση μίας ατμόσφαιρας είναι 4.2 K, -268,8oC). Πειραματιζόμενος τον Απρίλιο του 1911 σ' αυτές τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες με μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης μεταλλικών στοιχείων, ενώ περίμενε αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης των μετάλλων, όταν η θερμοκρασία μειωνόταν, τα πειράματα του, έδειξαν ακριβώς αντίθετο αποτέλεσμα! Δηλαδή η ηλεκτρική αντίσταση μειωνόταν με τη μείωση της θερμοκρασίας. Εκτός από αυτό το αποτέλεσμα παρατήρησαν και ένα νέο μη αναμενόμενο φαινόμενο. Συγκεκριμένα παρατήρησαν ότι η ηλεκτρική αντίσταση του Hg μηδενιζόταν σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία (Εικόνα 1). Ονόμασε το νέο φαινόμενο «υπεραγωγιμότητα». Στο διάγραμμα μπορούμε να δούμε τη γραφική παράσταση της αντίστασης του υδραργύρου συναρτήσει της θερμοκρασίας που προέκυψε από τα πειράματα του Kamerlingh – Onnes το 1911.Γ' αυτήν την ανακάλυψη το 1913 του απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ. Το 1933 oWaltherMeissner και ο RobertOchsenfeld δυο φυσικοί του Physikalish – TechnisheReichsantalt του Βερολίνου, πραγματοποίησαν το ακόλουθο πείραμα, που οδήγησε στο ομώνυμο φαινόμενο: φαινόμενο Meissner [1]. Τοποθέτησαν έναν στερεό κύλινδρο από κασσίτερο ή μόλυβδο μέσα σε σταθερό μαγνητικό πεδίο. Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου διεισδύουν στο εσωτερικό του μετάλλου. Στη συνέχεια το μέταλλο ψυχόταν κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία έτσι ώστε να γίνει υπεραγωγός.



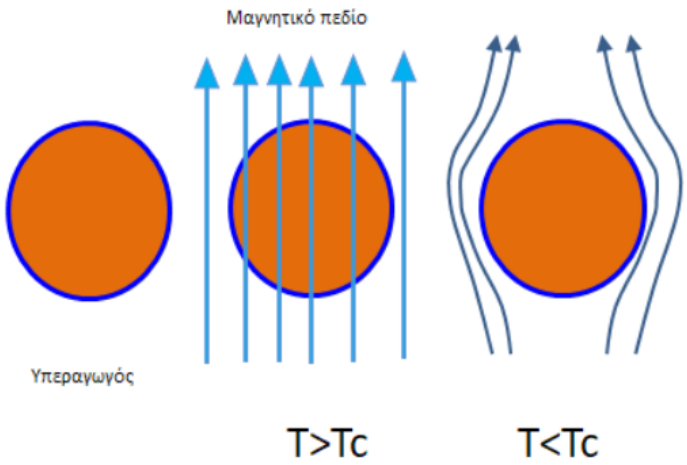
Εικόνα 1 Μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης του Hg που μετρήθηκε από τον Onnes και τους συνεργάτες του. Αυτή η μέτρηση σηματοδότησε την ανακάλυψη του φαινομένου της υπεραγωγιμότητας

Τότε οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου ξαφνικά αποβαλλόταν από το μέταλλο. Αυτό γιατί όταν ένας υπεραγωγός εκτίθεται σε ένα ασθενές εξωτερικό μαγνητικό πεδίο με H<Hc, αναπτύσσει επιφανειακά ρεύματα με φορά τέτοια ώστε να δημιουργούν μαγνητικό πεδίο αντίθετο από το εξωτερικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη εξώθηση των δυναμικών γραμμών του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου από το εσωτερικό του υλικού και είναι γνωστό ως φαινόμενο Meissner. (Εικόνα 2) Το φαινόμενο του τέλειου διαμαγνητισμού που παρατηρείται στους υπεραγωγούς προκαλεί την εντυπωσιακή ιδιότητα της μαγνητικής αιώρησης στους στοιχειακούς

υπεραγωγούς όπως ο Pb και Hg. Για να χαρακτηριστεί ένα υλικό σαν υπεραγωγός θα πρέπει να εμφανίζει στην ίδια θερμοκρασία το

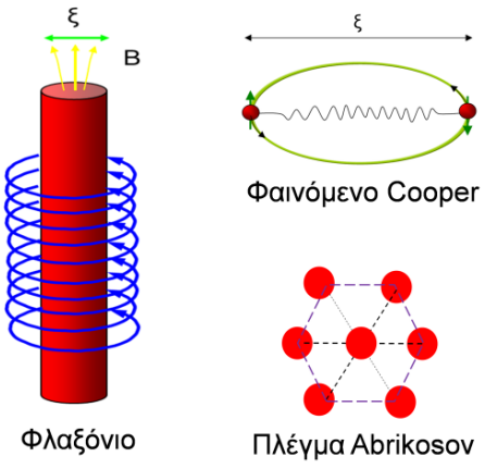
φαινόμενο της τέλειας αγωγιμότητας (ρ=0 μηδενική ειδική ηλεκτρική αντίσταση) και του τέλειου διαμαγνητισμού (B=0, αποβολή του μαγνητικού πεδίου).

Όλα τα υλικά παρουσιάζουν διαμαγνητικές ιδιότητες, αλλά συνήθως είναι αμελητέες. Στους υπεραγωγούς το φαινόμενο αυτό είναι έντονο και αναπτύσσονται ισχυρές δυνάμεις ικανές για μαγνητική αιώρηση.



Εικόνα 2. Φαινόμενο Meissner-Ochsenfeld.

Οι υπεραγωγοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες (υπεραγωγοί πρώτου και δευτέρου είδους ή τύπου I ή II) ανάλογα με την συμπεριφορά τους σε μαγνητικό πεδίο [1, 3].



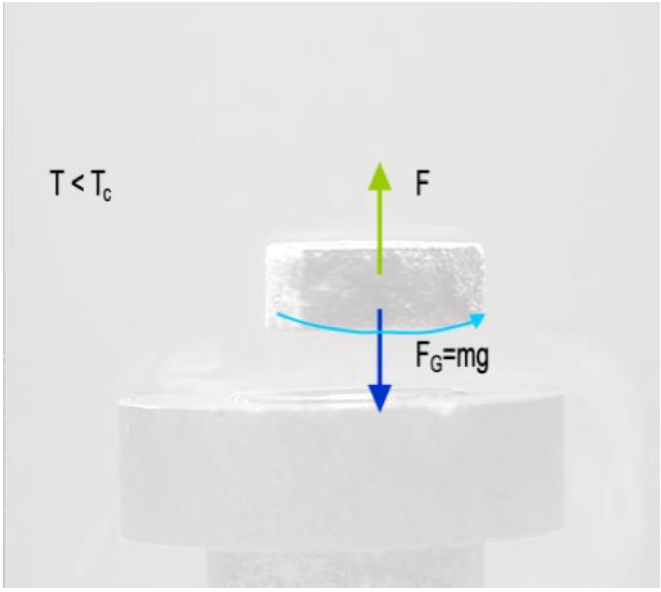
Εικόνα 3. Αριστερά: Δομή φλαξονίου υπεραγωγού δεύτερου είδους. Στο κέντρο του φλαξονίου το μαγνητικό πεδίο είναι μη μηδενικό. Στην περιφέρεια του φλαξονίου κυκλοφορεί υπεραγώγιμο ηλεκτρικό ρεύμα.. Κάτω δεξιά: Εξαγωνικό πλέγμα Abrikosov των φλαξονίων υπεραγωγού δευτέρου είδους. Πάνω δεξιά: Φαινόμενο Cooper (ζευγάρωμα δύο ηλεκτρονίων που συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα ενός υπεραγωγού όταν αυτός «μεταβεί στην υπεραγώγιμη κατάσταση). Για περισσότερες λεπτομέρειες δες αναφορές 1,3.

Στους υπεραγωγούς πρώτου είδους, μετά από μία μέγιστη τιμή μαγνητικού πεδίου (κρίσιμη τιμή μαγνητικού πεδίο, Hc), το μαγνητικό πεδίο διεισδύει στο εσωτερικό του, με αποτέλεσμα την καταστροφή της υπεραγωγιμότητας. Στους υπεραγωγούς δευτέρους είδους το μαγνητικό πεδίο δεν

καταστρέφει την υπεραγωγιμότητας όταν H>Hc. Σ' αυτή την κατηγορία υπεραγωγών το μαγνητικό πεδίο διεισδύει σε συγκεκριμένες περιοχές του υπεραγωγού οι οποίες σχηματίζουν ένα εξαγωνικό πλέγμα (πλέγμα Abrikosov, [1,3]. Οι περιοχές στο εσωτερικό των υπεραγωγών δευτέρου είδους που το μαγνητικό πεδίο είναι διάφορο του μηδενός ονομάζονται φλαξόνια (εικόνα 3).

Τα φλαξόνια είναι περιοχές μαγνητικού πεδίου με κβαντισμένη μαγνητική ροή. Το πλέγμα των φλαξονίων έχει ιδιότητες που μοιάζουν πολύ με αυτές της συμβατικής ύλης (που αποτελείται από άτομα). Όταν ένας υπεραγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα τα φλαξόνια κινούνται με αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας.

Οι μεταλλουργικές ατέλειες δεσμεύουν τα φλαξόνια με αποτέλεσμα στους υπεραγωγούς δευτέρου είδους να μπορούμε περάσουμε μεγάλες πυκνότητες ηλεκτρικού ρεύματος χωρίς απώλειες. Η δέσμευση των φλαξονίων στους υπεραγωγούς δευτέρου είδους τους καθιστά χρήσιμα υλικά για τη δημιουργία μεγάλων μαγνητικών πεδίων (υπεραγώγιμοι μαγνήτες). Στην ικανότητα των υπεραγωγών να διαρρέονται από μεγάλες πυκνότητες ρεύματος στηρίζεται και το φαινόμενο της μαγνητικής αιώρησης.



Εικόνα 4 Μαγνητική αιώρηση του υπεραγωγού με χημικό τύπο Bi_{2-x} $PbxSr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ [6]

Το 1986 οι Benjor& Muller ανακάλυψαν ότι ορισμένα οξείδια του χαλκού έχουν κρίσιμη θερμοκρασία που ξεπερνά τους 40 K. Αυτή η οικογένεια υπεραγωγών ονομάζονται υπεραγωγοί «υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας» (High Tcesuperconductors). Μέχρι στιγμής η ψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία που ανακαλύφθηκε (1990) σε έναν υπεραγωγό είναι για τον Ti2Ba2Ca2Cu3O8+x,Tc =

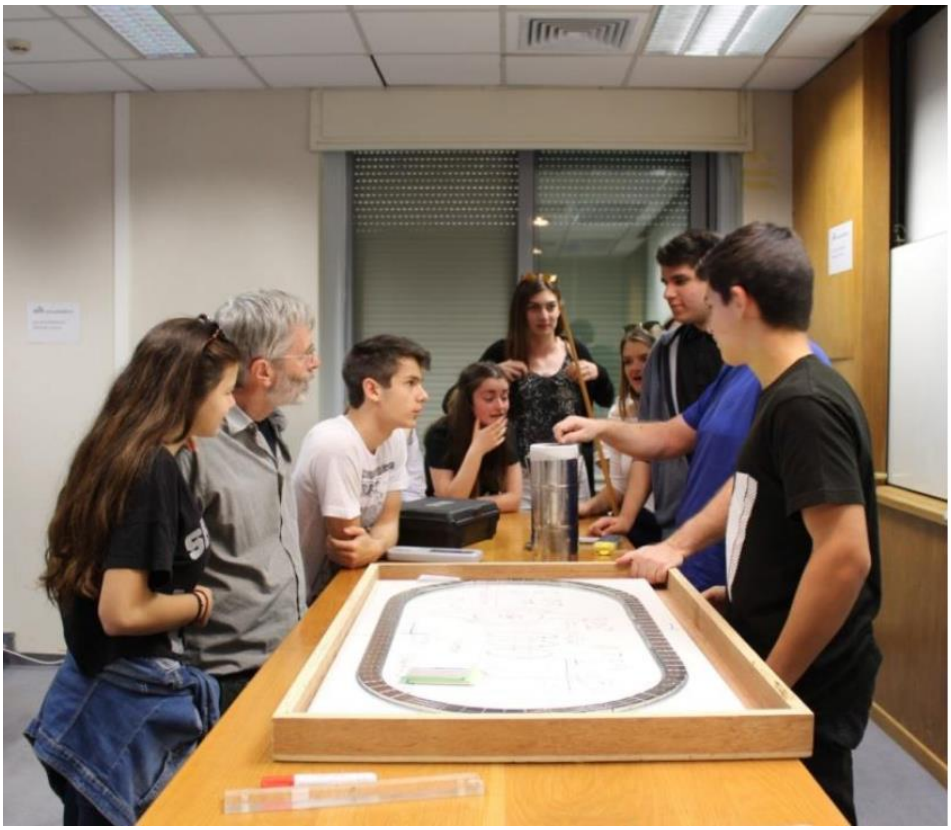
128K (-145oC). Η μεγάλη κρίσιμη θερμοκρασία αυξάνει σημαντικά το πεδίο εφαρμογών των υπεραγωγών. Μία ενδιαφέρουσα εφαρμογή των υπεραγωγών υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας είναι η μαγνητική αιώρηση (Εικόνα 4).

Ένα από τα σημαντικότερα φυσικά μεγέθη ενός υπεραγωγού δευτέρου είδους που συνδέεται άμεσα με την πρακτική εφαρμογή των υπεραγωγών είναι η κρίσιμη πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος Jc (critical current density). Η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος εξαρτάται από την θερμοκρασία και το μαγνητικό πεδίο. Στο πείραμα που ακολουθεί ασχοληθήκαμε με την εκτίμηση της κρίσιμης πυκνότητας ηλεκτρικού ρεύματος στους 77.3 K (θερμοκρασία βρασμού του N2 σε πίεση μιας ατμόσφαιρας).

Επιπρόσθετος σκοπός του πειράματος ήταν η επίδειξη και η κατανόηση της μαγνητικής αιώρησης υπεραγωγού δευτέρου είδους, πάνω από μόνιμο μαγνήτη.

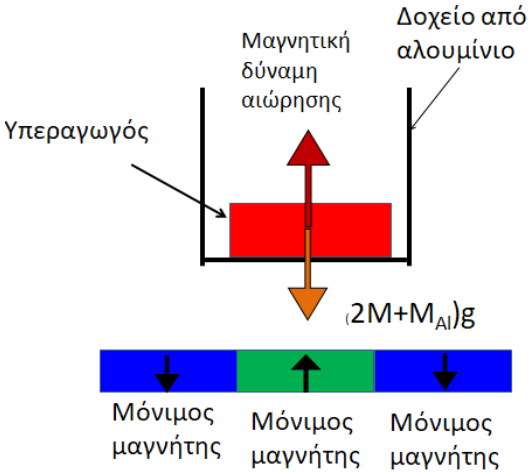
Πειραματιστήκαμε με τον υπεραγωγό YBa2Cu3O7–δ (δ = 0,1 – 0,4) (YBCO) ή υπεραγωγός 123 με κρίσιμη θερμοκρασία, Tc = 91,8 K, Τον υπεραγωγό αυτό ανακάλυψαν το 1987, ο Δρ. PaulChu και οι συνεργάτες του στο πανεπιστήμιο του Χιούστον (Houston, Texas).

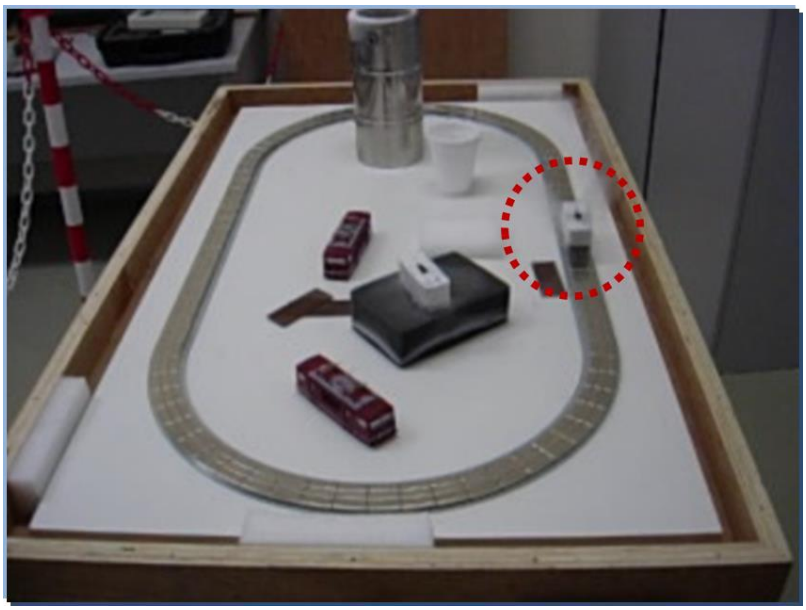
Το πείραμα μας έγινε υπό την επίβλεψη του Ερευνητή Α΄ Δρ. Μιχάλη Πίσσα του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του Ε.ΚΕ.Φ.Ε.ΔΗΜΟΚΡΤΙΤΟΣ.



Εικόνα 5. Η ομάδα των μαθητών κατά την διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος μαγνητικής αιώρησης.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση που δίνει τη δύναμη που ασκείται σε ένα μαγνητικό δίπολο (όταν αυτό βρίσκεται σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο), θα υπολογίσουμε την κρίσιμη πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος του υπεραγωγού YBa2Cu3O7, σε θερμοκρασία 77,3 K.





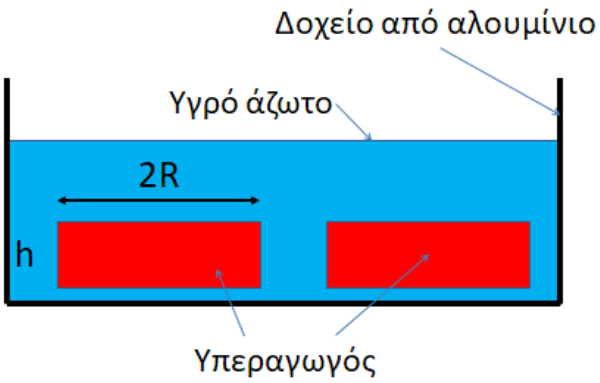
Εικόνα 6. Μαγνητική αιώρηση «υπεραγώγιμου βαγονιού» σε τροχιά από μόνιμους μαγνήτες.
Στο πάνω σχήμα φαίνεται μία εγκάρσια τομή της διάταξης και οι δυνάμεις που ασκούνται στο βαγόνι. Στο κάτω σχήμα φαίνεται μία φωτογραφία της διάταξης.

Ο υπολογισμός θα γίνει μετρώντας το ύψος μαγνητικής αιώρησης, την μάζα του βαγονιού και τη μεταβολή της κάθετης συνιστώσας του μαγνητικού πεδίο συναρτήσει της κάθετης απόστασης από τους μαγνήτες.

Η πειραματική διάταξη (Εικόνα 6) αποτελείται από μία τροχιά κατασκευασμένη από μόνιμους μαγνήτες και ένα βαγόνι που στο εσωτερικό του περιέχει δύο υπεραγώγιμες παστίλιες.

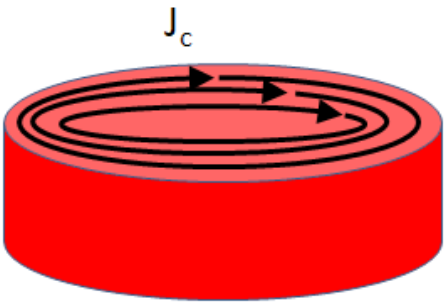
Το βαγόνι (Εικόνα 7) αποτελείται από ένα δοχείο αλουμινίου σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου. Στο εσωτερικό του δοχείου βρίσκονται δύο παστίλιες σχήματος κυλίνδρου, του υπεραγωγού YBa2Cu3O7, κρίσιμης θερμοκρασίας Tc=91,8 K.

Οι διαστάσεις της κάθε παστίλιας είναι: ύψος h=0,01 m και διαμέτρου D=0.026 m. Η μάζα κάθε παστίλιας είναι M=0,029 Kg. Η συνολική μάζα του βαγονιού είναι 0,1 Kg



Εικόνα 7. Βαγόνι υπεραγώγιμου τρένου(διαμήκης τομή). Το βαγόνι αποτελείται από το δοχείο αλουμινίου και τις δύο υπεραγώγιμες παστίλιες. Για να είναι οι παστίλιες στην υπεραγώγιμη κατάσταση αυτές είναι βυθισμένες σε υγρό άζωτο.

Όπως έχουνε προαναφέρει όταν ο υπεραγωγός YBa2Cu3O7, βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο, των μόνιμων μαγνητών, τότε αυτό διεισδύει στο εσωτερικό του υπό μορφή φλαξονίων (σωλήνες στο εσωτερικό των οποίων το μαγνητικό πεδίο είναι μη μηδενικό). Λόγω των ατελειών του υλικού (όρια των κόκκων, χημικές ατέλειες κλπ) τα φλαξόνια δεν σχηματίζουν το εξαγωνικό πλέγμα Abrikosov (κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας), αλλά «καρφώνονται» (στις ατέλειες). Αυτό το γεγονός έχει σαν αποτέλεσμα η μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό του υπεραγωγού να μην είναι ομογενής. Η μη ομογενής χωρική κατανομή της μαγνητικής επαγωγής συνδέεται με μία κατανομή ηλεκτρικού ρεύματος, των υπεραγώγιμων ζευγών ηλεκτρονίων (φαινόμενοcooper). Αν το μαγνητικό πεδίο ξεπεράσει μία συγκεκριμένη τιμή Hc, τότε τα φλαξόνια διεισδύουν μέχρι το κέντρο του υπεραγωγού (στο κέντρο της υπεραγώγιμης παστίλιας στην περίπτωση μας.



Εικόνα 8. Υπεραγώγιμος κύλινδρος στην κρίσιμη κατάσταση. Τα φλαξόνια έχουν διεισδύσει με τέτοιο τρόπο ώστε τα ηλεκτρικά ρεύματα που ρέουν γύρω από τους πυρήνες τους δημιουργούν

ένα σταθερό ηλεκτρικό ρεύμα που κυκλοφορεί σε όλο τον όγκο της παστίλιας με φορά παράλληλη στην κυλινδρική επιφάνεια της.

Άρα, παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, (H>Hc) σ' ένα υπεραγωγό δευτέρου είδους (όπως η παστίλια YBa2Cu3O7) το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του είναι μη ομογενές (έχει μη μηδενικό στροβιλισμό για να ακριβολογούμε [4,5]). Αυτή η κατάσταση μπορεί να περιγραφεί ισοδύναμα λέγοντας ότι ο υπεραγωγός διαρρέεται με υπεραγώγιμο ηλεκτρικό ρεύμα σταθερής πυκνότητας Jc, όπως φαίνεται στην Εικόνα8. Η πυκνότητα υπεραγώγιμου ηλεκτρικού ρεύματος Jc ονομάζεται κρίσιμη πυκνότητα υπεραγώγιμου ηλεκτρικού ρεύματος (απλούστερα, πυκνότητα κρίσιμου ρεύματος).

Ο υπεραγωγός με το μόνιμο ηλεκτρικό ρεύμα είναι ισοδύναμος με ένα σημειακό μαγνητικό δίπολο (όπως ένας μικρός μόνιμος μαγνήτης).

Η μαγνητική ροπή συναρτήσει της κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών θα δίνεται από τη εξίσωση [6]:

$$\mathbf{m} = \frac{\pi}{3} J_c h R^3 \hat{\mathbf{e}}_z$$

όπου Jc η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος (σε Amp/m2) που ρέει στον υπεραγωγό, h το ύψος του κυλίνδρου και R η ακτίνα του. Στον προηγούμενο τύπο έχουμε υποθέσει ότι το κρίσιμο ηλεκτρικό ρεύμα κυκλοφορεί παράλληλα στην περιφέρεια του κυλίνδρου,με αποτέλεσμα η μαγνητική ροπή να είναι παράλληλη με τον z-άξονα.

Η δύναμη μαγνητικής αιώρησης που ασκείται στην υπεραγώγιμη παστίλια μπορεί να προσεγγιστεί από τον τύπο που δίνει τη δύναμη που ασκείται μεταξύ μαγνητικού δίπολου, μόνιμης διπολικής μαγνητικής ροπής, και εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η συγκεκριμένη δύναμη θα δίνεται από τη σχέση [4,5,6]:

$$F_z = m \frac{\Delta B_z}{\Delta z}$$

όπου m είναι το μέτρο της μαγνητικής ροπής. Ο λόγος ΔBz/Δz δίνει την κλίση της z-συνιστώσας του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Προφανώς η φορά της δύναμης Fz θα εξαρτάται από το γινόμενο των πρόσημων των δύο παραγόντων που την αποτελούν.
Ποιο συγκεκριμένα για το πείραμά μας, για να έχουμε μαγνητική αιώρηση θα πρέπει η δύναμη μαγνητικής αιώρησης να γίνει ίση με την δύναμη βαρύτητας. Άρα, η συνθήκη μαγνητικής αιώρησης μπορεί να γραφτεί:

$$(2\mathrm{M} + M_{Al})g = m \frac{\Delta B_z}{\Delta z} \quad (3)$$

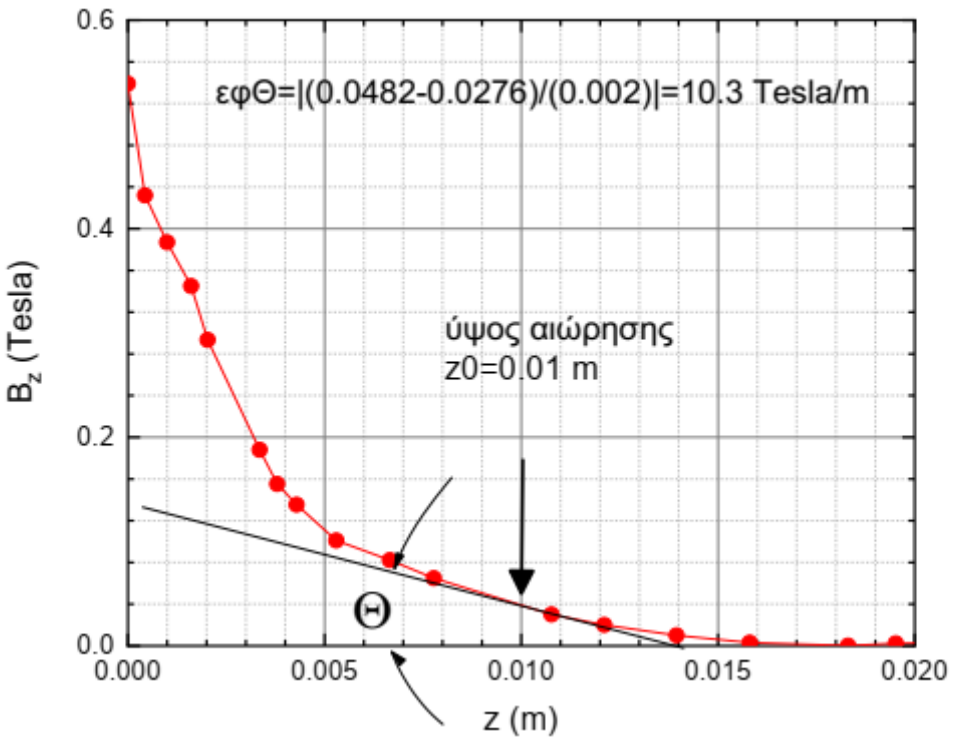
όπου 2M+MAl είναι η συνολική μάζα του βαγονιού (0,1 Kg) και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Τη μάζα του υγρού αζώτου που βρίσκεται στο βαγόνι, την αγνοούμε. Προφανώς, η ποσότητα ΔBz/Δz θα πρέπει να εκτιμηθεί στο ύψος που συμβαίνει η μαγνητική αιώρηση σε σχέση με την επιφάνεια των μαγνητών.

Αντικαθιστώντας τη σχέση της μαγνητικής ροπής (εξίσωση 1) στη συνθήκη ισορροπίας (εξίσωση 3), εύκολα, παίρνουμε.

$$(2\mathrm{M}+\mathrm{M}_{Al})g=\frac{\pi}{3}J_c hR^3\frac{\Delta B_z}{\Delta z}$$

$$\boxed{J_c=\frac{3(2\mathrm{M}+\mathrm{M}_{Al})g}{\pi hR^3\frac{\Delta B_z}{\Delta z}}} \qquad (0.1)$$

Για να υπολογίσουμε την κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος του υπεραγωγού στην θερμοκρασία T=77,3 K (η θερμοκρασία που βρίσκονται οι υπεραγώγιμες παστίλιες) χρειαζόμαστε την κλίση του μαγνητικού πεδίου στο ύψος της μαγνητικής αιώρησης. Η κλίση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να υπολογιστεί γραφικά από την εφαπτομένη της καμπύλης του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια των μαγνητών, στο ύψος αιώρησης. Στο πείραμα που εκτελέσαμε το ύψος αιώρησης βρέθηκε περίπου z0=0,01 m.



Εικόνα 9. Μεταβολή της z-συνιστώσας μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της κάθετης απόστασης από τους μαγνήτες (κόκκινοι κύκλοι). Στο σχήμα φαίνεται επίσης, ο γραφικός υπολογισμός της κλίσης του μαγνητικού πεδίου στο ύψος μαγνητικής αιώρησης Οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου *και το ύψος*

Στην εικόνα 9 φαίνεται η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια κεντρικού μαγνήτη (Εικόνα 6). Οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου έγιναν με την βοήθεια του οργάνου μέτρησης του μαγνητικού πεδίου της εταιρίας Lakeshore. Η απόλυτη τιμή της κλίσης του μαγνητικού πεδίου εκτιμήθηκε από την εφαπτομένη της γωνίας που σχηματίζει η εφαπτομένη της καμπύλης Bz(z), με τον οριζόντιο άξονα, στη θέση

z0=0,01 m (Εικόνα 9).

Αντικαθιστώντας τις αριθμητικές τιμές στην εξίσωση(4), παίρνουμε:

$$J_c = \frac{3\times 0.1\ \mathrm{Kg}\times 10\ \mathrm{m/s^2}}{\pi\times 0.01\ \mathrm{m}\times 0.013^3\ \mathrm{m^3}\times 10.3\ \mathrm{Tesla/m}} = 4.\ 2\mathrm{MAmp/m^2}$$

Άρα, η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος στους 77,3 K είναι ίση με Jc=~ 4.2±0.1 MAmp/m2 .

Συμπεράσματα

Έγινε προσπάθεια για τον ποιοτικό και ποσοτικό χαρακτηρισμό του πειράματος της μαγνητικής αιώρησης υπεραγωγού πάνω σε μόνιμο μαγνήτη. Η μαγνητική αιώρηση οφείλεται στην αλληλεπίδραση της διαμαγνητικής μαγνητικής ροπής του υπεραγωγού με την βαθμίδα του μαγνητικού πεδίου των μόνιμων μαγνητών (αλληλεπίδραση μαγνητικού δίπολου με ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο). Συγκεκριμένα, μετρήθηκε η μεταβολή της κάθετης συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου των μόνιμων μαγνητών συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια τους. Τα αποτελέσματα μας είναι σε καλή συμφωνία με αυτά που δίνουν οι κατασκευαστές των μαγνητών (7). Από την καμπύλη μεταβολής του μαγνητικού πεδίου εκτιμήσαμε την κλίση του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την απόσταση από την επιφάνεια του μαγνήτη. Τέλος κάνοντας χρήση της εξίσωσης ισορροπίας εκτιμήσαμε την κρίσιμη πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος του υπεραγωγού στους T=77.3 K. Η τιμή που υπολογίσαμε βρίσκεται πολύ κοντά στις τιμές που έχουν αναφερθεί στην βιβλιογραφία (8) για τον υπεραγωγό YBa2Cu3O7.

Βιβλιογραφία

[1] M. Tinkham (2006), *Introduction to superconductivity*, Dover Publications

[2] Heike KamerlinghOnnes (1913), *Investigations into the Properties of Substances at Low Temperatures, which Have Led, amongst Other Things, to the Preparation of Liquid Helium*, Nobel Lecture

[4] Μ. Πίσσας (2005), *Εισαγωγή στην Υπεραγωγιμότητα*, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

[5] E. H. Brandt (1989), *Levitation in Physics*, Science, σελ. 243, 349

[

6] Hyung-Woo Lee1, Ki-Chan Kim, and Ju Lee (2006), *Review of Maglev Train Technologies*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, σελ. 42, 1917

[6] Μ. Πίσσας (2018) (αδημοσίευτη μελέτη)

[7] Διαδικτυακή πρόσβαση: https://www.supermagnete.gr/faq/How-do-you-calculate-the-magnetic-flux-density

[8] K, S. Jin et al. (1988), *Melt-textured growth of polycrystalline YBa2Cu3O7-δ with high transport Jc* at 77, Phys. Rev. B 37, 7850