



Σχολή θετικών επιστημών και τεχνολογίας
Μεταπτυχιακή ειδίκευση καθηγητών φυσικών
επιστημών

Διπλωματική Εργασία

Υπεραγωγιμότητα: νόμοι, ιδιότητες, σύγχρονες εξελίξεις,
εφαρμογές και παρουσίαση τους στην Ελληνική τάξη

Ευθύμιος Φυδάνης

Επιβλέπων καθηγητής: Απόστολος Τσιριγώτης

Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2021

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



«Υπεραγωγιμότητα: νόμοι, ιδιότητες, σύγχρονες εξελίξεις
εφαρμογές και παρουσίαση τους στην Ελληνική τάξη»

«Ευθύμιος Φυδάνης»

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Απόστολος Τσιριγώτης

Συνεργαζόμενα εκπαιδευτικό προσωπικό
και μεταδιδακτορικός συνεργάτης του
εργαστηρίου φυσικής του ελληνικού
ανοικτού πανεπιστημίου

Λέισος Αντώνιος

Αναπληρωτής καθηγητής και διευθυντής
του εργαστηρίου φυσικής της σχολής
θετικών επιστημών του ελληνικού
ανοικτού πανεπιστημίου

Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Μεταπτυχιακή ειδίκευση Καθηγητών Φυσικών επιστημών» του θεματικού πεδίου ΚΦΕ51 «κίνηση, δομική συγκρότηση και βασικές αλληλεπιδράσεις της ύλης». Σκοπός της εργασίας είναι η παροχή διδακτικών σεναρίων και πειραμάτων- προσομοιώσεων σχετικά με την υπεραγωγιμότητα στη δευτεροβάθμια εκπαίδευση. Παρουσιάζεται η θεωρία των υπεραγωγών καθώς και μια ιστορική αναδρομή από τον πρωτοπόρο Ohnes και μετέπειτα. Επίσης γίνεται μνεία στο φαινόμενο Meissner στη μαγνητική αιώρηση και στις επαφές Josephson. Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκαν εφαρμογές στη γλώσσα javascript και χρησιμοποιήθηκαν βιβλιοθήκες όπως p5.js chart.js και jquery.js. Επίσης σε συνδυασμό με την javascript χρησιμοποιήθηκαν Cascading Style Sheets (Css) και html5. Το background στα εικονικά πειράματα είναι από τις εφαρμογές phet του πανεπιστήμιου του Colorado. Ακόμη για τους μετρητές στο πείραμα Superconductivity χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη gauge.js της javascript. Όλα τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και οι βιβλιοθήκες και ο κώδικας είναι ανοικτού λογισμικού (open source) και ο καθένας μπορεί να χρησιμοποιήσει ελεύθερα τον κώδικα. Οι εφαρμογές αναπτύχθηκαν σαν εκπαιδευτικό υλικό για τη δευτεροβάθμια εκπαίδευση που συνοδεύει τα σχέδια μαθήματος.

Λέξεις – Κλειδιά

Φαινόμενο Meissner, μαγνητική τομογραφία, επιταχυντές σωματιδίων, μαγνητικός συντονισμός.

superconductivity: laws ,properties, modern development,
applications and their presentation in the Greek class

Efthymios Fydanis

Abstract

The elaboration of this diploma thesis took place in the framework of the Postgraduate study program "Postgraduate specialization of Science Teachers" of the thematic field KFE51 "movement, structural composition and basic interactions of materials". The aim of this work is to provide teaching scenarios and experiments on superconductivity in secondary education.

Keywords

Meissner effect, Magnetic resonance imaging, particle accelerators, superconductivity simulation

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
Abstract	vi
Περιεχόμενα	vii
1. Εισαγωγή.....	1
2. Σχέδια μαθήματος	3
2.1 ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΑΓΩΓΩΝ (μέτρηση 4 σημείων).....	3
2.1.1 στόχοι	3
2.1.2 προτεινόμενο σενάριο	4
2.2 ΚΡΙΣΙΜΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΣΕ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΥΣ ΤΥΠΟΥ I (Φαινόμενο Meissner).....	11
2.2.1 Στόχοι	11
2.2.2 προτεινόμενο σενάριο	12
2.3 ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΙ ΤΥΠΟΥ II ΕΝΤΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ	18
2.3.1 στόχοι	18
2.3.2 προτεινόμενο σενάριο	18
2.4 ΠΑΡΑΜΕΝΟΝΤΑ ΡΕΥΜΑΤΑ, ΚΒΑΝΤΩΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ.....	24
2.4.1 Στόχοι	24
2.4.2 Σενάριο	25
2.5 ΕΙΚΟΝΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ: ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΑΙΩΡΗΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΗ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟ ΤΥΠΟΥ I	32
2.5.1 Στόχοι	32
2.5.2 Σενάριο	32
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	45
Πηγές.....	66
Βιβλιογραφία.....	68

Κατάλογος εικόνων / Σχημάτων

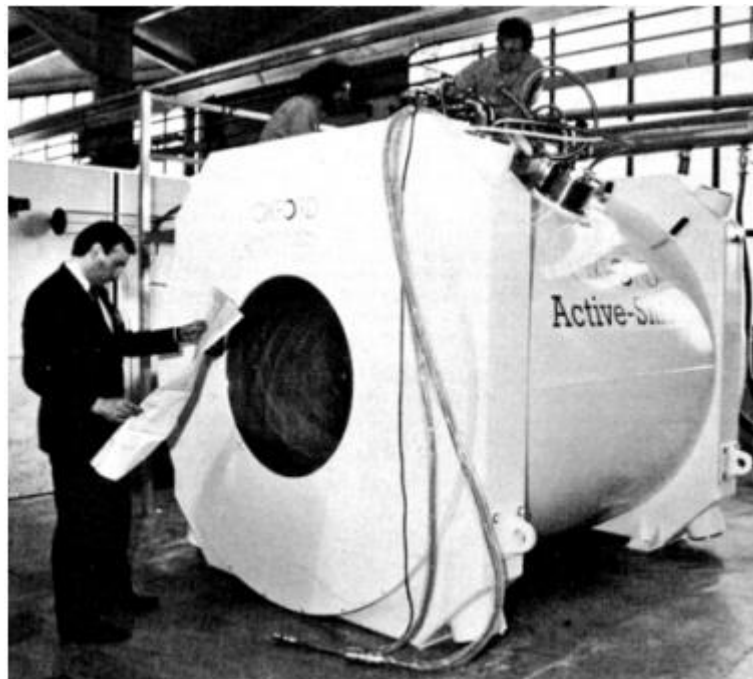
Εικόνα 1 Υπεραγωγίμα σωληνοειδή για μαγνητική τομογραφία. (Πηγή [1]).....	1
Εικόνα 2 Τρένο Maglev. (Πηγή [2])	2
Εικόνα 3 κρυσταλλική δομή του υπεραγωγού YBCO (Πηγή [3]).....	3
Εικόνα 4 Συνδεσμολογία 4 σημείων για την μέτρηση αντίστασης υπεραγωγού. Πηγή [26]	5
Εικόνα 5 Μέθοδος 4 σημείων. Τοποθέτηση των ακροδεκτών σε δείγμα για την μέτρηση τάσης και έντασης. Πηγη [27].....	5
Εικόνα 6 ισοδύναμο κύκλωμα μεθόδου 4 σημείων. Πηγή [27].....	5
Εικόνα 7: μεταβολή ελάχιστης κρίσιμης έντασης μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της θερμοκρασίας(Πηγή [4]).....	11
Εικόνα 8 Φαινόμενο Meissner Επιφανειακά ρεύματα (Πηγή [5]).....	12
Εικόνα 9 Η μαγνητική ροή μέσω μιας οπής. (Πηγή [5])	13
Εικόνα 10 : Εξάρτηση ιδιοτήτων υπεραγωγών από θερμοκρασία και εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. (Πηγή [6]).....	19
Εικόνα 11 διάφορες καταστάσεις μαγνητικού πεδίου Υπεραγωγών τύπου II. (Πηγή [7]).	20
Εικόνα 12 σωλήνες ροής (Δίνες Abrikosov) (Πηγή [8])	20
Εικόνα 13 νήματα στην κατάσταση στροβίλων . Πηγη[9]	24
Εικόνα 14 Δύο δίπολα σε απόσταση R και μήκους d το καθένα. Πηγη [20]	33
Εικόνα 15 Δύο δίπολα σε απόσταση R και μήκους d το καθένα. Πηγη [20]	41
Εικόνα 16. Μέθοδος εικόνων πηγη [21]	43
Εικόνα 17. Ανύψωση μόνιμου μαγνήτη. Τεχνική μεθόδου εικόνων. Πηγή [20].....	43
Εικόνα 18 Heike Kammerling Onnes	45
Εικόνα 19 Η γραφική παράσταση του Onnes που απεικονίζει την ηλεκτρική αντίσταση ενός δείγματος Hg σε σχέση με τη θερμοκρασία.....	46
Εικόνα 20 Κρίσιμο μαγνητικό πεδίο σε συνάρτηση με την θερμοκρασία Πηγη[10].....	48
Εικόνα 21 Για έναν υπεραγωγό τύπου I, η μαγνητική ροή αποβάλλεται Πηγή [11].....	49
Εικόνα 22 Ένας υπεραγωγός τύπου II έχει 2 κρίσιμα μαγνητικά πεδία (Hc1 και Hc2) Κάτω από Hc1 συμπεριφέρεται σαν τύπου I και πάνω από Hc2 συμπεριφέρεται σαν κανονικός αγωγός. Πηγη [11]	50
Εικόνα 23 μαγνητικές δυναμικές γραμμές κανονικού αγωγού. Πηγη [12]	51
Εικόνα 24 Μαγνητικές δυναμικές γραμμές σε μηδενική αντίσταση. Πηγή[12].....	52
Εικόνα 25 Υπεραγωγίμος δακτύλιος και ψύξη. Πηγη[14]	52
Εικόνα 26 Διάγραμμα Ac επαφής Josephson. Πηγη [17].....	55
Εικόνα 27 Τυπική γραφική παράσταση έντασης - τάσης επαφής Josephson. Πηγη [18] ..	56
Εικόνα 28 Φαινόμενο σήραγγας σε επαφή Josephson. Πηγή [20]	56
Εικόνα 29 SQUID και αλλαγές φάσης. Πηγή [19]	58
Εικόνα 30. Αυτή η κατασκευή χρησιμοποιείται για την μελέτη των κάθετων συνιστωσών των δυνάμεων μεταξύ ενός μόνιμου μαγνήτη (PM)και ενός υπεραγωγίμου δίσκου YBCO. Πηγή [23]	61
Εικόνα 31. Μαγνητικό ρουλεμάν. Πηγη [24]	62

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Θερμοκρασία και κρίσιμη μαγνητική ένταση.	17
Πίνακας 2 ένταση μαγνητικού πεδίου και αντίστοιχη θερμοκρασία για μέγιστη και ελάχιστη ένταση μαγνητικού πεδίου.....	23
Πίνακας 3 θερμοκρασία και B_{cmin} , B_{cmax}	23
Πίνακας 4 Ένταση μαγνητικού πεδίου και αριθμός στροβίλων.....	24
Πίνακας 5 Ένταση μαγνητικού πεδίου και λόγος Φ/Φ_0	28
Πίνακας 6 Δύναμη και ανύψωση.....	40
Πίνακας 7 Υλικά και κρίσιμη θερμοκρασία Πηγή[12].....	47
Πίνακας 8 Υλικά κρίσιμη θερμοκρασία και ένταση μαγνητικού πεδίου πηγη [13].....	50

1. Εισαγωγή

Στην τελευταία δεκαετία έχει εδραιωθεί μια συναίνεση σχετικά με την ανάγκη εισαγωγής της σύγχρονης φυσικής στα αναλυτικά προγράμματα σπουδών της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης. Άλλωστε το καινούριο πρόγραμμα σπουδών (2021-2022) εισαγάγει την σύγχρονη φυσική στο ελληνικό λύκειο και στην ύλη των πανελλαδικών εξετάσεων. Αποτελεί λοιπόν μια πρόκληση η εισαγωγή της σύγχρονης φυσικής και κατά συνέπεια και της υπεραγωγιμότητας στο νέο λύκειο. Είναι μια ευκαιρία για τους μαθητές να συνδυάσουν την προηγούμενη γνώση επάνω στον ηλεκτρομαγνητισμό με την υπεραγωγιμότητα και τις εφαρμογές τις (τρένα Maglev, μαγνητική τομογραφία κλπ.).



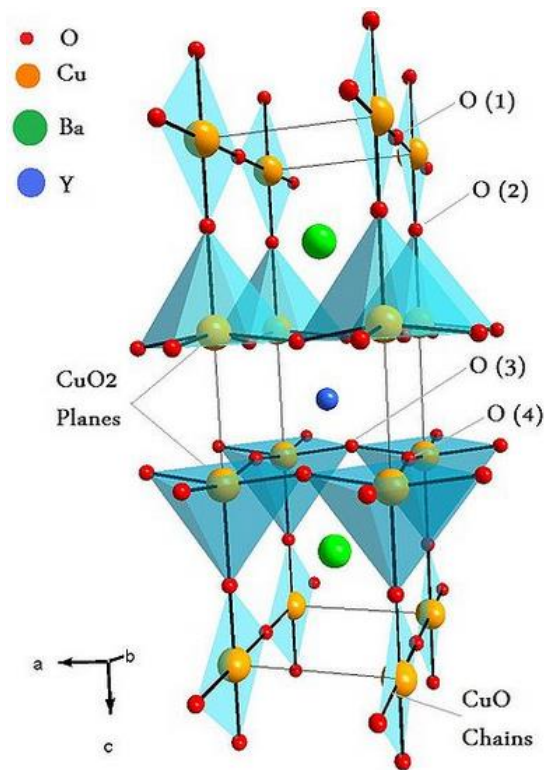
Εικόνα 1 Υπεραγωγίμα σωληνοειδή για μαγνητική τομογραφία. (Πηγή [1])



Εικόνα 2 Τρένο Maglev. (Πηγή [2])

Η μεθοδολογία που ακολουθεί η παρούσα εργασία στηρίζεται στην φαινομενολογική ερμηνεία της υπεραγωγιμότητας χρησιμοποιώντας τον ηλεκτρομαγνητισμό. Τα αποτελέσματα από την πειραματική διδασκαλία με την χρήση ΤΠΕ (εικονικά πειράματα) κρίνονται ικανοποιητικά καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό των μαθητών μετά την χρήση της εικονικής προσομοίωσης έχει κατανοήσει το φαινόμενο Meissner , το ζεύγος Cooper , την αλλαγή των μαγνητικών ιδιοτήτων των υπεραγωγών όσον αφορά την κρίσιμη θερμοκρασία καθώς και την μαγνητική αιώρηση.

Η προσπάθεια της παρούσας εργασίας έγκειται στην χρήση διδακτικών σεναρίων με τη βοήθεια εικονικού εργαστηρίου. Για την επίτευξη του εικονικού πειράματος χρησιμοποιήθηκε η προγραμματιστική γλώσσα Javascript σε συνδυασμό με css και html5. Στην πρώτη ενότητα εξετάζουμε το μηδενισμό της αντίστασης του υπεραγωγού YBCO. Με την χρήση της μεθόδου των τεσσάρων σημείων και προσδιορίζουμε την κρίσιμη θερμοκρασία του υπεραγωγού χρησιμοποιώντας το διάγραμμα αντίστασης – θερμοκρασίας.



Εικόνα 3 κρυσταλλική δομή του υπεραγωγού YBCO (Πηγή [3])

2. Σχέδια μαθήματος

2.1 ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΑΓΩΓΩΝ (μέτρηση 4 σημείων)

Προσομοίωση πειράματος αντίστασης αγωγού χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των τεσσάρων σημείων. (εικονικό πείραμα). Η διαδικασία θα πραγματοποιηθεί σε μαθητές β λυκείου. Απαιτείται η χρήση η/υ και σύγχρονος Browser (κατά προτίμηση google chrome)

2.1.1 στόχοι

Να υπολογίσουν οι μαθητές το σημείου μηδενισμού της αντίστασης του YBCO.

Να εξοικειωθούν με την ανάλυση δεδομένων και τη χρήση φυλλομετρητή (excel) για την παρουσίαση γραφικών παραστάσεων.

Να μετρούν την κρίσιμη θερμοκρασία.

Να βγάζουν συμπεράσματα χρησιμοποιώντας διαγράμματα

Να χειρίζονται το πρόγραμμα παρουσίασης εικονικού εργαστηρίου και να το χρησιμοποιούν για τη μελέτη των φαινομένων.

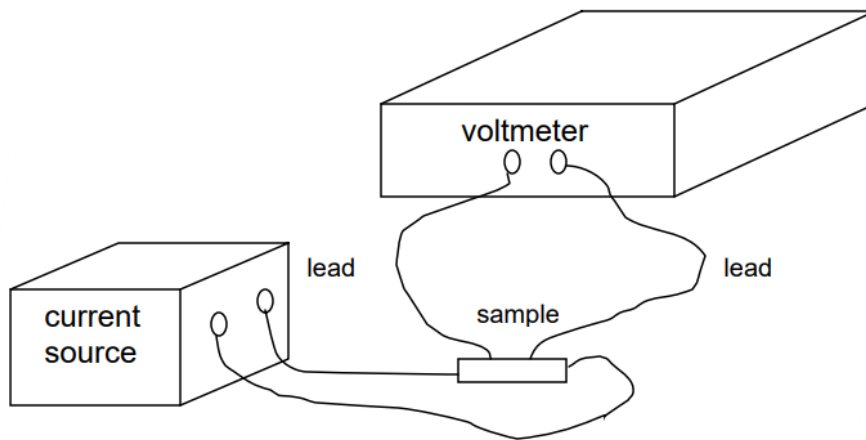
2.1.2 προτεινόμενο σενάριο

Πυλώνας της άσκησης είναι ένα φύλλο εργασίας όπου οι μαθητές καλούνται να υπολογίσουν την κρίσιμη θερμοκρασία. Αρχικά ξεκινάμε μια συζήτηση στην τάξη για το πως συμπεριφέρεται ένας υπεραγωγός σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν και τι συμβαίνει στην αντίσταση του υπεραγωγού. Οι μαθητές με την καθοδήγηση του εκπαιδευτικού αντιλαμβάνονται ότι η αντίσταση του υπεραγωγού μειώνεται εκθετικά όταν οι θερμοκρασίες έχουν τιμές χαμηλότερες από την κρίσιμη θερμοκρασία και κατόπιν η θερμοκρασία μηδενίζεται.

Για να μπορέσουν οι μαθητές να βρουν την κρίσιμη θερμοκρασία θα πρέπει να χρησιμοποιήσουν την μέθοδο των 4 σημείων. Με την μέθοδο των 4 σημείων μπορούν να υπολογίσουν την αντίσταση του υπεραγωγού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του.

Μέθοδος 4 σημείων

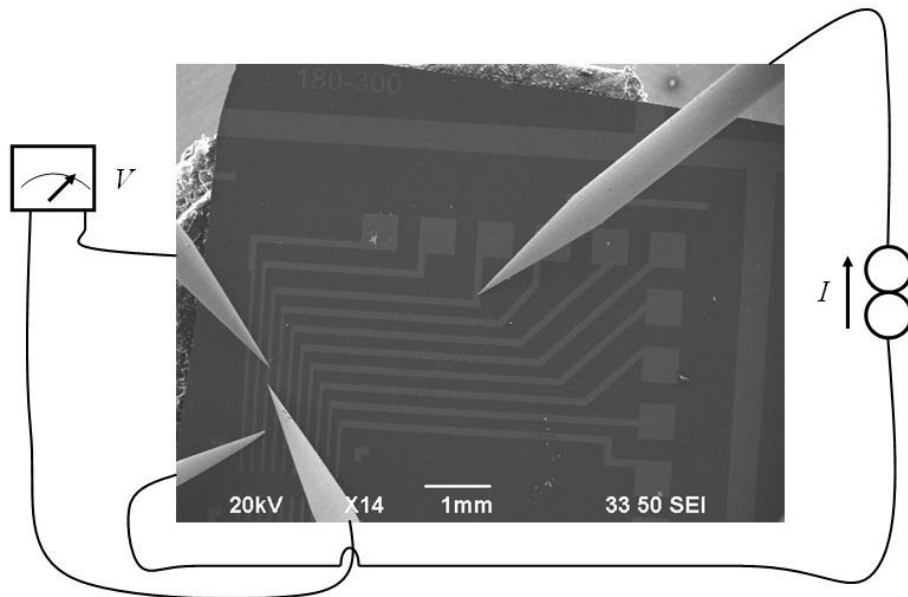
Όταν μετράμε την αντίσταση με ένα απλό ωμόμετρο, μετράμε και την αντίσταση των καλωδίων που οδηγούν στο δείγμα και τυχόν αντίσταση στις επαφές καθώς και την αντίσταση του δείγματος. Οι αντιστάσεις επαφής μπορεί να είναι ένα σοβαρό πρόβλημα



Εικόνα 4 Συνδεσμολογία 4 σημείων για την μέτρηση αντίστασης υπεραγωγού. Πηγή [26]

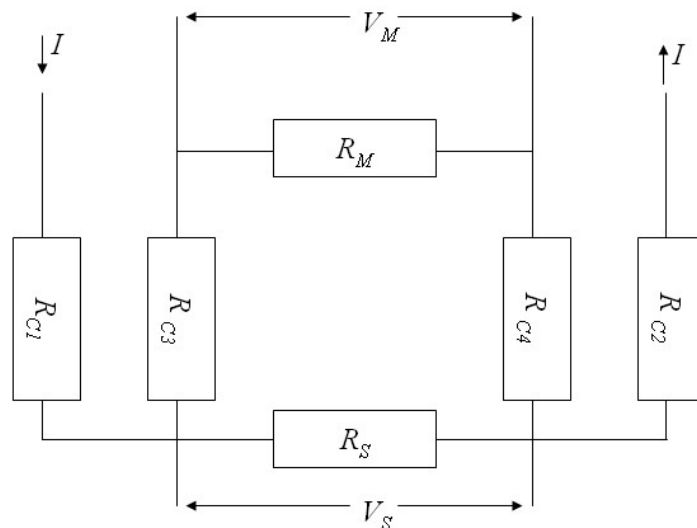
όταν η περιοχή επαφής είναι πολύ μικρή. Για ξεπεραστεί το πρόβλημα των αντιστάσεων επαφής, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια διαμόρφωση τεσσάρων σημείων.

1



Εικόνα 5 Μέθοδος 4 σημείων. Τοποθέτηση των ακροδεκτών σε δείγμα για την μέτρηση τάσης και έντασης. Πηγή [27]

Το ρεύμα διέρχεται από τις δύο εξωτερικές επαφές ενώ την τάση την μετράμε μεταξύ των δύο εσωτερικών επαφών. Έτσι μετράμε έμμεσα την αντίσταση του δείγματος αφού παίρνουμε τιμές για την τάση και την ένταση. Το ισοδύναμο κύκλωμα για μια μέτρηση τεσσάρων σημείων είναι:



Εικόνα 6 ισοδύναμο κύκλωμα μεθόδου 4 σημείων. Πηγή [27]

Το ρεύμα ρέει στο δείγμα στην επαφή 1 και εξέρχεται από το δείγμα στην επαφή 2. Εδώ το R_{C_i} είναι η αντίσταση του καλωδίου και η αντίσταση επαφής της επαφής i . Συνήθως η αντίσταση επαφής κυριαρχεί πάνω από την αντίσταση του καλωδίου. R_S είναι η

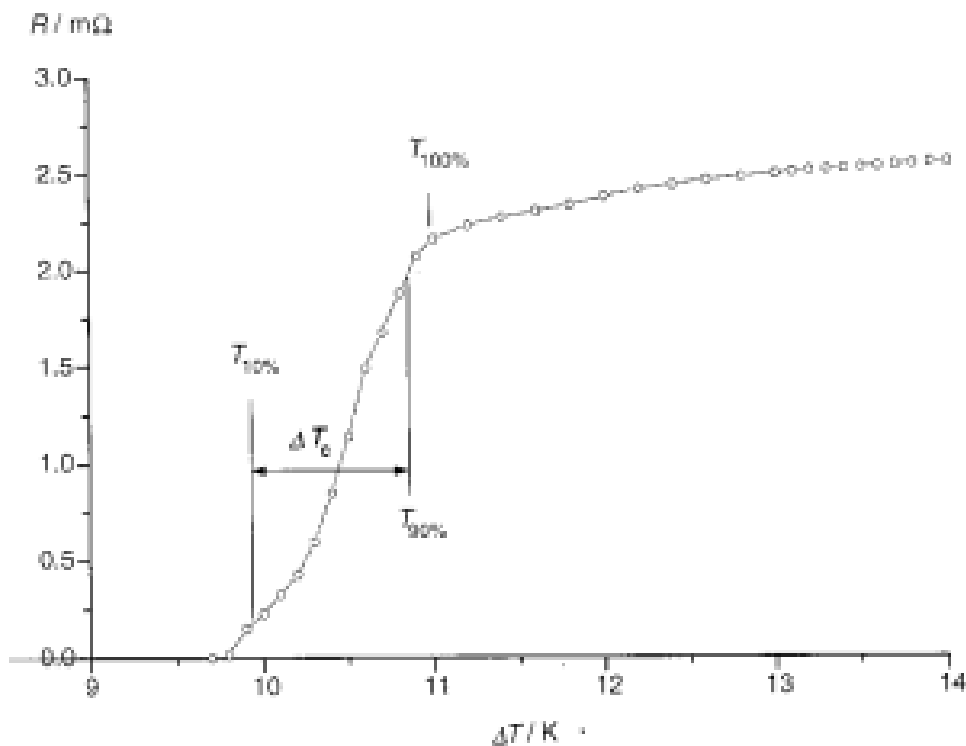
αντίσταση δείγματος και R_M είναι η ισοδύναμη αντίσταση του βολτόμετρου. V_S είναι η τάση στο δείγμα και V_M είναι η τάση που μετράται από το βολτόμετρο.

Το πείραμα που θα πραγματοποιήσουν οι μαθητές είναι εικονικό. Οι μαθητές θα βρουν την κρίσιμη θερμοκρασία του υπεραγωγού χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα excel με το οποίο θα κατασκευάσουν τη γραφική παράσταση R-T. Στο εικονικό πείραμα θα τοποθετήσουν το άζωτο κάτω από τον υπεραγωγό. Παρακολουθώντας τους μετρητές παρατηρούν ότι καθώς η θερμοκρασία ελαττώνεται η τάση ελαττώνεται και αυτή. Κατόπιν πατώντας το κουμπί της γραφικής παράστασης στην οθόνη εμφανίζεται το διάγραμμα R-T. Για να υπολογίσουν τη κρίσιμη θερμοκρασία οι μαθητές χρησιμοποιούν τον τύπο :

$$\Delta T_c = \frac{90}{100} T_{c(on)} - \frac{10}{100} T_{c(off)}$$

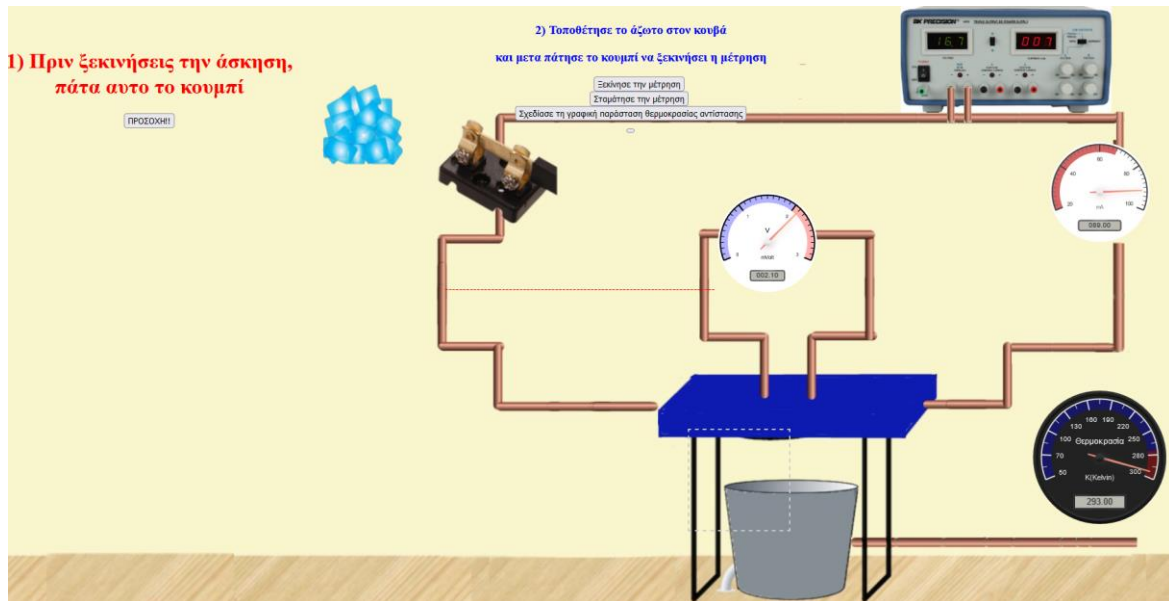
Όπου $T_{c(on)}$ η θερμοκρασία κατά την οποία ξεκινάει η μείωση της αντίστασης

Το εύρος ΔT είναι οι διαφορές των θερμοκρασιών από εκεί που η καμπύλη δείχνει το 90% της αντίστασης στην θερμοκρασία $T_{c(ON)}$, ως εκεί που δείχνει το 10% της αντίστασης στην θερμοκρασία $T_{c(OFF)}$



1^ο Φύλλο εργασίας

Ανοίγεται το αρχείο [superconductor.html](#) με google chrome. Σύρτε το άζωτο στον κουβά. Κατόπιν πατήστε το κουμπί να ξεκινήσει η μέτρηση. Παρατηρείστε τους μετρητές (μειώνεται η τάση και η θερμοκρασία, η ένταση όμως παραμένει περίπου η ίδια)



Πως εξηγείται την μείωση της τάσης;

.....

.....

.....

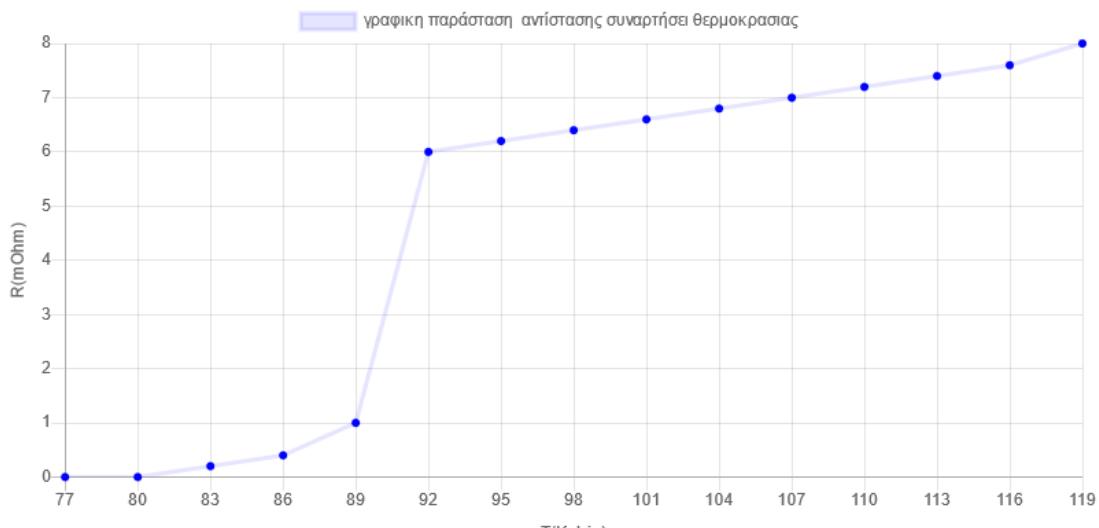
.....

.....

.....

Αφού σταματήσουν οι μετρητές, πατήστε το κουμπί “Σχεδιάσε τη γραφική παράσταση”

Βλέπουμε το διάγραμμα αντίστασης – θερμοκρασίας .



Γιατί η γραφική παράσταση αποτελείται από τρία διαφορετικά τμήματα;

.....
.....
.....
.....
.....
.....

Ποια είναι η κρίσιμη θερμοκρασία του πολυστρωματικού περοβσκίτη YBCO
($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$);

.....
.....
.....
.....
.....
.....

Πατήστε το κουμπί excel. Θα σας ζητηθεί να αποθηκεύσετε ένα αρχείο με τις τιμές της αντίστασης, της θερμοκρασίας, της τάσης και της έντασης.

A) Επιλέξτε τις στήλες A και B (αντίσταση και θερμοκρασία) και από το μενού εισαγωγή επιλέξτε διασπορά.

B) από τη μορφή της γραφικής παράστασης υπολογίστε τις χαρακτηριστικές θερμοκρασίες:

Κρίσιμη θερμοκρασία $T_{c(ex)}$ (το σημείο όπου η κλίση του διαγράμματος έχει την μέγιστη τιμή)

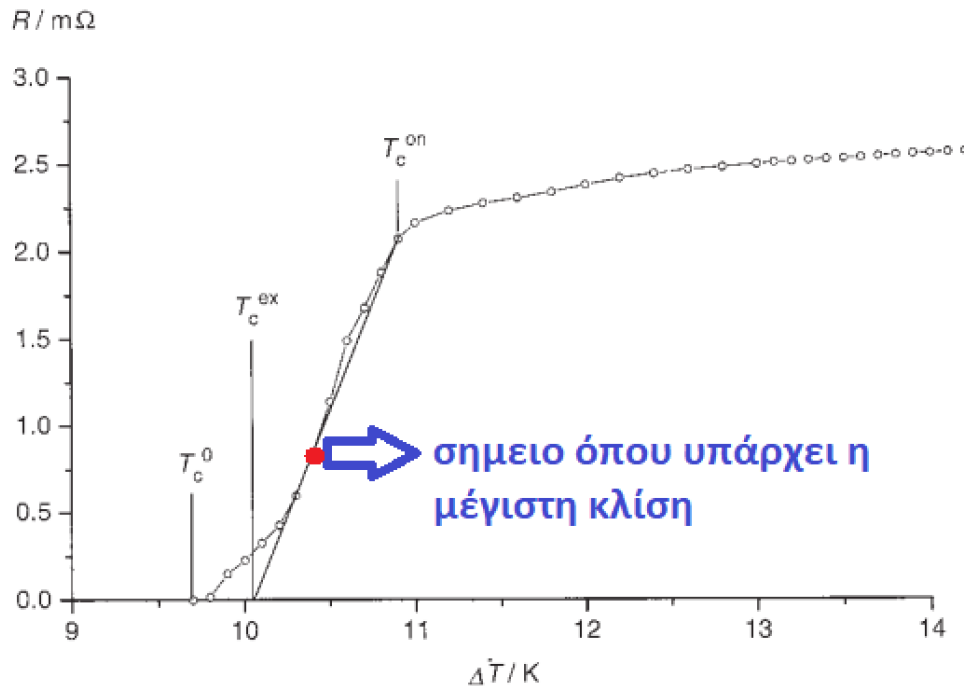
$T_{c(on)}$ (το σημείο όπου ξεκινάει η μείωση της αντίστασης)

$T_{c(0)}$ (το σημείο όπου η αντίσταση από τιμή μηδέν, αυξάνει)

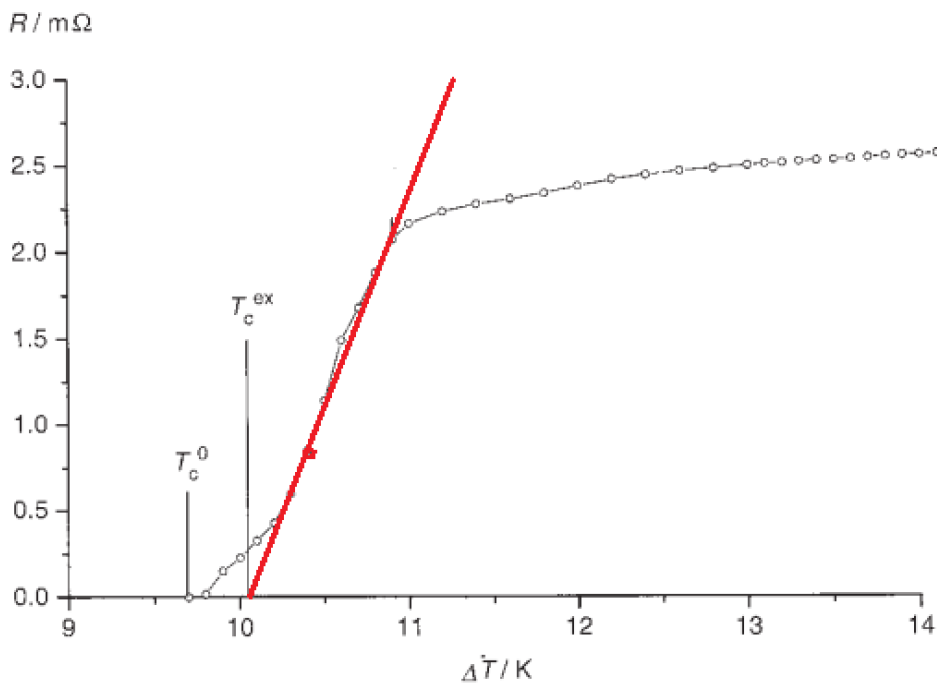
$$\text{Το ευρος : } \Delta T_c = \frac{90}{100} T_{c(on)} - \frac{10}{100} T_{c(on)}$$

Πως θα υπολογίσω το ΔT_c

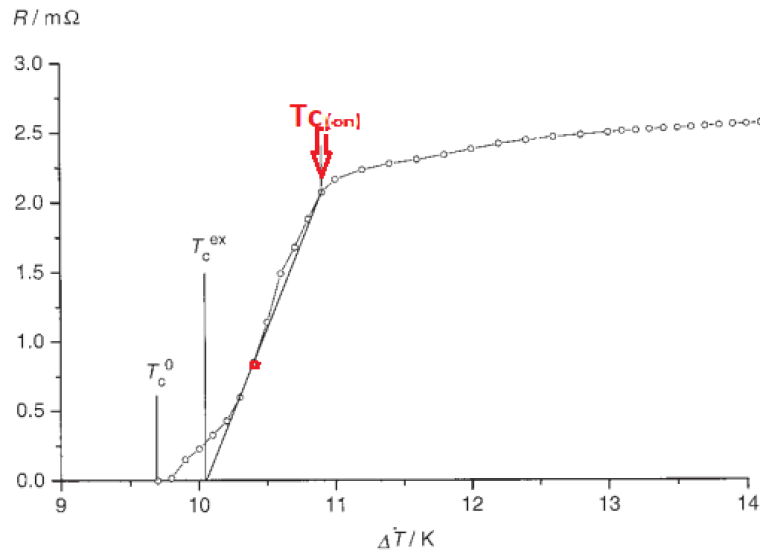
- 1) Από την γραφική παράσταση επιλέγουμε το σημείο όπου υπάρχει η μέγιστη κλίση. Γνωρίζουμε από τα μαθηματικά ότι το σημείο αυτό λέγεται σημείο καμπής, και είναι το σημείο όπου μηδενίζεται η δεύτερη παράγωγος.



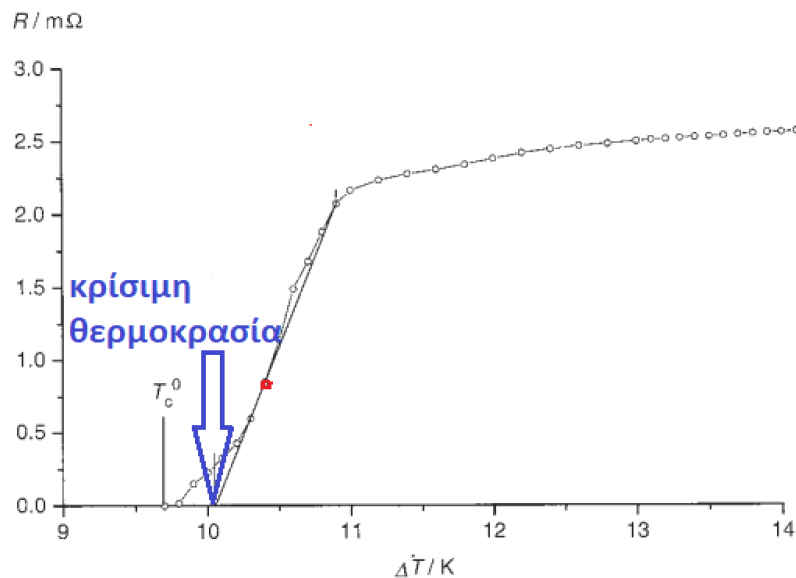
- 2) φέρνουμε μια ευθεία γραμμή εφαπτόμενη στην καμπύλη η οποία γραμμή περνάει από το σημείο καμπής.



- 3) Το σημείο όπου αυτή η ευθεία τέμνει την καμπύλη το ορίζουμε ως το σημείο όπου αρχίζει να ελαττώνεται η αντίσταση λόγω του φαινομένου της υπεραγωγιμότητας, $T_{c(ON)}$



- 4) Το σημείο όπου η ευθεία τέμνει τον οριζόντιο άξονα το ορίζουμε ως την κρίσιμη θερμοκρασία.



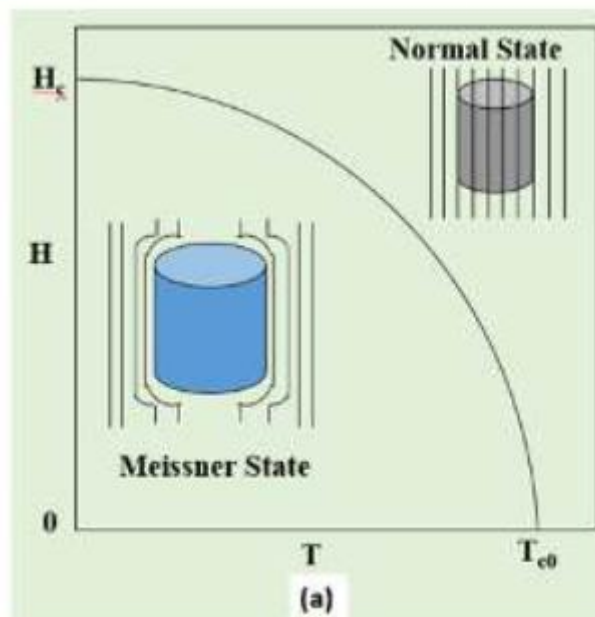
- 5) Το εύρος ΔT είναι οι διαφορές των θερμοκρασιών από εκεί που η καμπύλη δείχνει το 90% της αντίστασης στην θερμοκρασία $T_{c(ON)}$, ως εκεί που δείχνει το 10% της αντίστασης στην θερμοκρασία $T_{c(ON)}$

(αυτή η έννοια από το 10% στο 90% υπάρχει και στην επεξεργασία σήματος και εκεί λέγεται rise time (χρόνος ανόδου ενός ηλεκτρικού παλμού))

2.2 ΚΡΙΣΙΜΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΣΕ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΥΣ ΤΥΠΟΥ Ι (Φαινόμενο Meissner)

2.2.1 Στόχοι

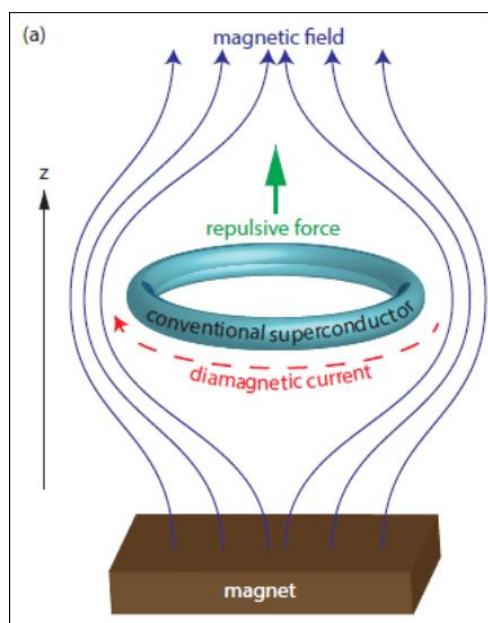
- να κατασκευάσουν διάγραμμα της ελάχιστης κρίσιμης μαγνητικής έντασης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία ($B_{cmin}(T) \rightarrow T$)
- από το διάγραμμα ($B_{cmin}(T) \rightarrow T$) να υπολογίσουν την $B_c(0)$ ενός υπεραγωγού
- να αντιληφθούν την μορφή των δυναμικών γραμμών στην κατάσταση Meissner και στη φυσιολογική κατάσταση συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου
- να κατανοήσουν πως μεταβάλλεται η διαμαγνητική ικανότητα σε σχέση με την ένταση του μαγνητικού πεδίου και τη θερμοκρασία



Εικόνα 7: μεταβολή ελάχιστης κρίσιμης έντασης μαγνητικού πεδίου συναρτήσει της θερμοκρασίας(Πηγή [4])

2.2.2 προτεινόμενο σενάριο

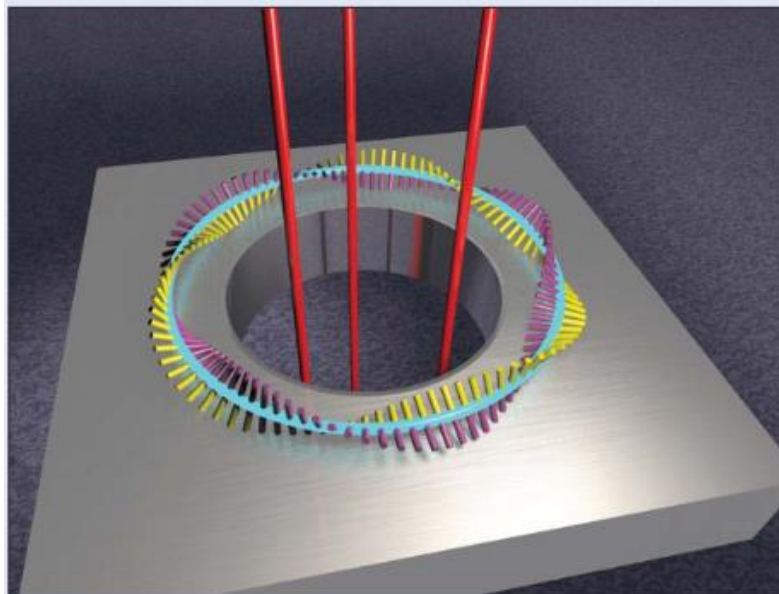
Για την υλοποίηση του σχεδίου θα χρειαστούμε 2 μαθητικές ώρες. Στην πρώτη ώρα θα μοιραστούν στους μαθητές το πρώτο φύλλο εργασίας όπου θα γίνει συσχέτιση της διαμαγνητικής ικανότητας με την θερμοκρασία και την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Ο εκπαιδευτικός ξεκινά μια συζήτηση με τους μαθητές για ποια μορφή πιστεύουν ότι θα έχουν οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές, μεταβάλλοντας την ένταση του πεδίου. Ο διδάσκων εξηγεί πως αποβάλλεται το μαγνητικό πεδίο από το εσωτερικό του υπεραγωγού εξαιτίας των επιφανειακών υπορρευμάτων που δημιουργούνται. Αυτά (τα υπορρεύματα) με την σειρά τους δημιουργούν μαγνητικό πεδίο το οποίο εξουδετερώνει το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (Φαινόμενο Meissner). Στη συνέχεια ο διδάσκων αναφέρει ότι η ύπαρξη των επιφανειακών ρευμάτων σχετίζονται με τη γενικευμένη μορφή του νόμου του Ohm. Ο λόγος που το φαινόμενο Meissner συνεπάγεται ότι υπάρχουν μόνο επιφανειακά ρεύματα είναι ότι το φαινόμενο Meissner απαιτεί το μαγνητικό πεδίο B να είναι μηδέν στο εσωτερικό του υπεραγωγού. Εφόσον, στη διαμόρφωση σταθερής κατάστασης, ισχύει ο νόμος του Ampere, το πεδίο B δεν μπορεί να εξαφανιστεί σε μια περιοχή όπου πυκνότητα ρεύματος J είναι μη μηδενική. Έτσι μια πυκνότητα ρεύματος όγκου J δεν είναι επιτρεπτή και όλα τα ρεύματα ρέουν στην επιφάνεια του υπεραγωγού. Τα επιφανειακά ρεύματα παράγουν ένα μαγνητικό πεδίο που ακυρώνει κάθε εξωτερικά εφαρμοσμένο B στο υπεραγωγίμο εσωτερικό. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον νόμο του Ohm στη γενικότερη μορφή του όπου J είναι η πυκνότητα ρεύματος



Εικόνα 8 Φαινόμενο Meissner Επιφανειακά ρεύματα (Πηγή [5])

Κατόπιν ο εκπαιδευτικός ρωτά τους μαθητές πως θα συμπεριφερθεί ο αγωγός εάν εφαρμόσουμε πρώτα μαγνητικό πεδίο και μετά ψύξουμε τον αγωγό σε θερμοκρασία χαμηλότερη από την κρίσιμη. Οι μαθητές μπορούν να διαπιστώσουν τι θα συμβεί, χρησιμοποιώντας την εφαρμογή.

Ο διδάσκων ερμηνεύει την συμπεριφορά των υπεραγωγών μέσω της θεωρίας των αδερφών London (Fritz και Heinz). Μέσω των εργασιών που ξεκίνησαν στην Οξφόρδη και προχώρησαν στο Παρίσι, ο Fritz London κατάλαβε ότι η υπεραγωγιμότητα είναι ένα παράδειγμα κβαντικής συνοχής όχι στην κλίμακα ενός μεμονωμένου ατόμου αλλά στην κλίμακα ενός υπεραγωγίου σύρματος με διάμετρο εκατοστών. Ο υπεραγωγός συμπεριφέρεται σαν ένα γιγάντιο άτομο. Σε ένα κανονικό μέταλλο, τα ηλεκτρόνια έχουν την ελευθερία να καταλαμβάνουν πολλές διαφορετικές κβαντικές καταστάσεις, αλλά ο London συνειδητοποίησε ότι οι φορείς σε έναν υπεραγωγό είναι περισσότερο περιορισμένοι. Το υπερρεύμα είναι σταθερό σε μία μόνο τιμή. Ο London παρατήρησε ότι αυτή η συμπεριφορά θυμίζει τις τροχιές των ηλεκτρονίων γύρω από ένα άτομο. Αν κάποιος πάρει μια θηλιά από σύρμα υπεραγωγού με ρεύμα που ρέει ατελείωτα γύρω του, η μαγνητική ροή που διαπερνά πρέπει να είναι κβαντισμένη (να παίρνει ορισμένες τιμές)



Εικόνα 9 Η μαγνητική ροή μέσω μιας οπής σε έναν υπεραγωγό σχετίζεται με το υπερρεύμα γύρω από το εσωτερικό της τρύπας. Το υπερρεύμα (γαλάζιο) πρέπει να τυλίγεται έναν ακέραιο αριθμό γύρω από τον βρόχο (εμφανίζεται σχηματικά με κίτρινες και μωβ ράβδους), που οδηγεί στη μαγνητική ροή (κόκκινο) που κβαντοποιείται. Ο αριθμός των φορών που περιστρέφεται ο βρόχος (εδώ τρεις) είναι ίσος με τον αριθμό των κβάντων μαγνητικής ροής μέσω του βρόχου. (Πηγή [5])

Ο London υπολόγισε ότι το κβάντο της μαγνητικής ροής θα ήταν εξαιρετικά μικροσκοπικό και επομένως είναι αδύνατο να παρατηρηθεί με τις τεχνικές που χρησιμοποιούνταν τότε. Στη συνέχεια ρωτάμε τους μαθητές πως επιδρά η αύξηση της θερμοκρασίας στην τιμή της $B_c(T)$ και οι μαθητές συμπληρώνουν το φύλλο εργασίας.

Κατόπιν οι μαθητές ξεκινάνε την εφαρμογή `meissner_without_Bc.html` όπου αποκρύπτεται η $B_c(T)$ ούτως ώστε να μπορέσουν οι μαθητές από την μορφή του μαγνητικού πεδίου να σχεδιάσουν την γραφική παράσταση $B_c(T), T$ αφού συμπληρώσουν των πίνακα τιμών $B_c(T), T$. Επίσης από την γραφική παράσταση, θα μπορέσουν να υπολογίσουν το σημείο για 0 Kelvin και να βρουν την αντίστοιχη κρίσιμη ένταση του μαγνητικού πεδίου $B_c(0)$. Ύστερα θα συγκρίνουν τα πειραματικά δεδομένα τους με βάση τον τύπο:

$$B_c(T) = B_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$


Από τη γραφική παράσταση που θα σχεδιάσουν από τα πειραματικά δεδομένα με τη βοήθεια προγράμματος (desmos, excel) και την γραφική παράσταση της παραπάνω εξίσωσης, θα συγκρίνουν τα αποτελέσματα.

1^ο Φύλλο εργασίας

Ξεκινάμε το πρόγραμμα `Meissner.html` υπάρχουν 2 κουμπιά: άλλαξε υπεραγωγό σε Βανάδιο και άλλαξε υπεραγωγό σε τεχνήτιο. Ο μαθητής παραμένει στην οθόνη του (Νιόβιο).


Φαινόμενο Meissner
 Νιόβιο : Ατομικός αριθμός $Z=41$
 Κρίσιμη Θερμοκρασία: $T=9.26.K$
 Κρίσιμο μαγνητικό πεδίο $B_{cmin}(0)=0,198T$

τιμή μαγνητικού πεδίου(Tesla): 0.006



7	AB	A1	8
7	BB	B1	8
7	CB	C1	8
7	DB	D1	8
7	EB	E1	8
7	FB	F1	8
7	GB	G1	8
7	HB	H1	8

θερμοκρασία(Kelvin): 0



A) για θερμοκρασίες μικρότερες από T_c και με $B=0$ ποια πιστεύετε πως θα είναι η μορφή του μαγνητικού πεδίου για ένταση κάτω από B_{cmin} ;

.....
.....
.....

B) μεταβάλλοντας την γραμμή κύλισης διαλέξτε τιμή κάτω από B_{cmin} . Συμφωνείται με την πρόβλεψη σας από το ερώτημα A;

.....
.....
.....

Γ) μεταβάλλεται η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών καθώς αυξάνεται την έντασή του μαγνητικού πεδίου (χωρίς να ξεπεράσουμε την B_c);

.....
.....
.....

Δ) Ποια είναι η συμπεριφορά του Νιοβίου για μαγνητική ένταση μικρότερη της B_c και ποια για $B > B_c$;

.....
.....
.....

Ε) εξακολουθώντας να έχουμε για υπεραγωγό το Νιόβιο μειώστε την θερμοκρασία κάτω από την κρίσιμη τιμή (T_c). Πως μεταβάλλεται η κρίσιμη ένταση μαγνητικού πεδίου; (B_{cmin});

.....
.....
.....

ΣΤ) εάν ο υπεραγωγός στην διαμαγνητική του κατάσταση έχει μικρούς μαγνήτες κατανεμημένους ομοιόμορφα, πως αυτοί μεταβάλλονται, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία;

.....
.....
.....

Ζ) διαλέξτε έναν άλλον υπεραγωγό (π.χ. Τεχνητίο). Υπάρχουν διαφορές μεταξύ Νιοβίου και Τεχνητίου όσον αφορά την μορφή του μαγνητικού πεδίου;

ΦΥΛΛΟ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Από το πρόγραμμα Meissner_without_bc.html και διαλέξτε το Βανάδιο

1) βρείτε την B_{cmin} για $T=5K$

.....

2) Βρείτε για το Τεχνητίο και για θερμοκρασία $T=3K$ την B_{cmin}

.....

3) Γυρίστε στο Νιόβιο και κρατώντας σταθερή την ένταση ($T=0.15T$) αυξήστε την θερμοκρασία από $0K$ σε $4 K$. Τι συμβαίνει στο Νιόβιο ως προς την διαμαγνητική του ιδιότητα. Μεταβάλλεται την θερμοκρασία στους $10K$. Τι συμβαίνει τότε; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

.....
.....
.....

2^ο ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Εξάρτηση κρίσιμης μαγνητικής έντασης B_{cmin} από θερμοκρασία.

Σχεδιάστε την γραφική παράσταση $B_{cmin}(T) - T$ για το τεχνητίο.

Μειώνοντας την θερμοκρασία από $T_c(\text{Technetium})=7.77K$ με βήμα $T=0.5K$ εως $T=2K$ συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1 Θερμοκρασία και κρίσιμη μαγνητική ένταση.

T(K)	B _c (T)

Στη συνέχεια μεταβείτε στο πρόγραμμα EXCEL και τοποθετήστε τα κελιά ξεκινώντας από πάνω αριστερά. Επιλέξτε «εισαγωγή – διασπορά» στη συνέχεια εισαγωγή γραφήματος διασποράς ή φυσαλίδας. Επιλέξτε πολυωνυμική εξίσωση και προβολή εξίσωσης στο γράφημα.

Υπολογίστε δύο φορές την B_c(0) μια με τη βοήθεια της γραφικής παράστασης και μια χρησιμοποιώντας την εξίσωση. Τι είδους καμπύλη προκύπτει;

.....

Επαναλάβετε τις μετρήσεις για το Βανάδιο και το Νιόβιο. Τι διαφορές παρατηρείται;

Χρησιμοποιείτε την παρακάτω εξίσωση για να υπολογίσετε την ένταση του κρίσιμου μαγνητικού πεδίου.

$$B_c(T) = B_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

Στη στήλη C αντιγράψτε τα περιεχόμενα της στήλης A

Στο κελί D2 γράψτε τον τύπο :

$$B_c(T) = B_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

με B_c(0)=0,141T και T_c=7,77K.

Περάστε τον τύπο σε όλα τα κελιά από D2 μέχρι D18

Χρησιμοποιώντας το μενού «εισαγωγή-διασπορά» συγκρίνετε τις 2 γραφικές παραστάσεις.

2.3 ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΙ ΤΥΠΟΥ II ΕΝΤΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

2.3.1 στόχοι

- να αντιληφθούν οι μαθητές ότι υπάρχουν 2 κρίσιμα μαγνητικά πεδία και την διαφορετική συμπεριφορά των υπεραγωγών ανάλογα με την τιμή του μαγνητικού πεδίου
- Να συσχετίσουν την αλλαγή των τιμών των κρίσιμων εντάσεων μαγνητικού πεδίου με την αλλαγή στη θερμοκρασία.
- Να κατανοήσουν ότι η πυκνότητα των στροβίλων Abrikosov είναι ανάλογη της έντασης του μαγνητικού πεδίου.
- Να συνδέουν την μορφή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του υπεραγωγού με την ένταση του εξωτερικού πεδίου σε σχέση με τις κρίσιμες τιμές του μαγνητικού πεδίου.
- Να καθορίζουν την φορά των νημάτων μαγνητικής ροής στην κατάσταση στροβίλων (vortex state)

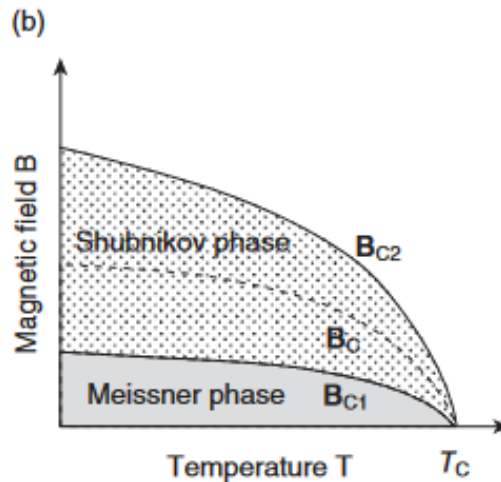
2.3.2 προτεινόμενο σενάριο

Θα χρησιμοποιήσουμε 2 φύλλα εργασίας. Στο πρώτο φύλλο θα εξετάσουμε πως μεταβάλλεται το εσωτερικό μαγνητικό πεδίο του υπεραγωγού σε διαφορετικές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με διαφορετικές τιμές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Θα προβάλλουμε video:

(1) [Quantum Locking Will Blow Your Mind—How Does it Work? - YouTube](#)

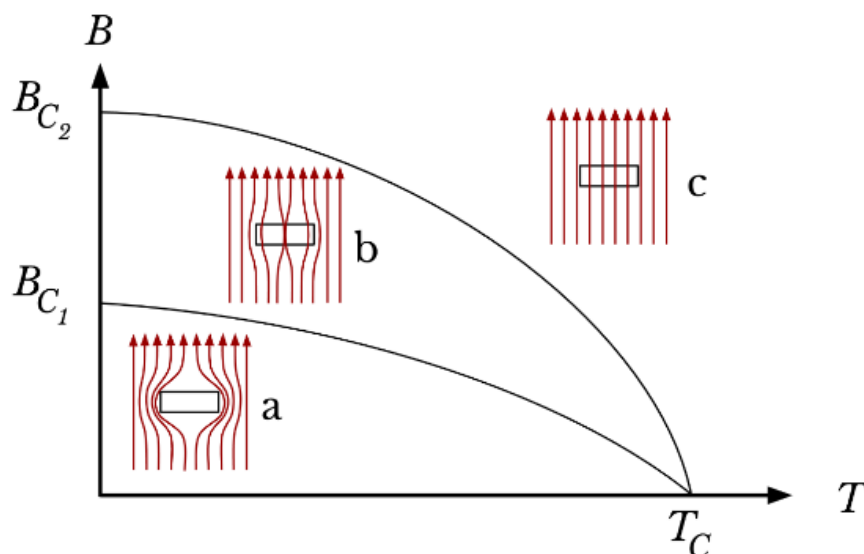
Όπου βλέπουμε τη σταθερότητα των υπεραγωγών λόγω δίνων Abrikosov (κατάσταση Shubnikov). Κατόπιν ο καθηγητής δίνει στοιχεία για τους υπεραγωγούς τύπου II. Πρόκειται για υπεραγωγούς που είναι κράματα των μετάλλων των στοιχείων μετάπτωσης της σειράς του ακτινίου (ραδιενεργά) Χαρακτηριστικό των υπεραγωγών τύπου II είναι ότι έχουν 2 κρίσιμες τιμές μαγνητικών πεδίων: μια ελάχιστη και μια μέγιστη. Στο πρώτο φύλλο ζητάμε από τους μαθητές να προβλέψουν τη συμπεριφορά του υπεραγωγού όταν η θερμοκρασία είναι μικρότερη της κρίσιμης θερμοκρασίας και ταυτόχρονα το εξωτερικό

μαγνητικό πεδίο είναι μικρότερο της B_{min} (φαινόμενο Meissner) και για B μεγαλύτερο της B_{max} (κανονικό μαγνητικό πεδίο). Οι μαθητές θα συμπεράνουν ότι οι υπεραγωγοί τύπου II εκτός των ορίων B_{min} και B_{max} έχουν παρόμοια συμπεριφορά με τους υπεραγωγούς τύπου II. Με τη βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσής θα μπορέσουν να βγάλουν τα συμπεράσματά τους.



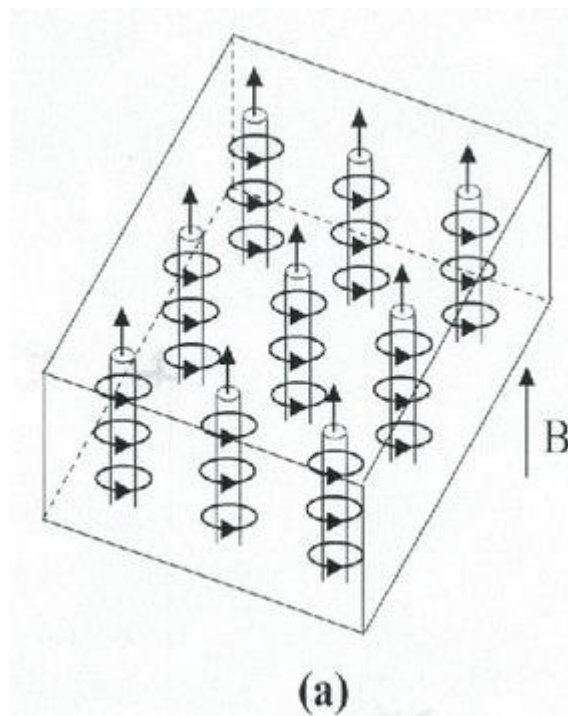
Εικόνα 10 : Εξάρτηση ιδιοτήτων υπεραγωγών από θερμοκρασία και εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. (Πηγή [6])

Στη συνέχεια οι μαθητές θα μελετήσουν την ενδιάμεση κατάσταση (Shubnikov Phase) όπου υπάρχει μια ενδιάμεση κατάσταση (μερική διείσδυση του μαγνητικού πεδίου) (δίνες Abrikosov)



Εικόνα 11 διάφορες καταστάσεις μαγνητικού πεδίου Υπεραγωγών τύπου II. (Πηγή [7])

Στο δεύτερο Φύλλο εργασίας συζητάμε την μεταβολή των B_{\min} και B_{\max} σε σχέση με τη θερμοκρασία. Οι υπεραγωγοί εξαιτίας της πολύ μικρής τους αντίστασης απωθούν το μαγνητικό πεδίο από το εσωτερικό τους. Μπορούμε να αναφέρουμε στους μαθητές ως ανάλογο σύστημα με τους υπεραγωγούς το νερό όπου η κατάσταση στην οποία βρίσκεται το νερό εξαρτάται από δύο παράγοντες: την πίεση και την θερμοκρασία. Επομένως, μεταβάλλοντας τις δυο αυτές μεταβλητές μπορούμε να πάρουμε το νερό σε διαφορετική κατάσταση (στερεό, υγρό, αέριο). Αντίστοιχα μεταβάλλοντας την θερμοκρασία και την ένταση του μαγνητικού πεδίου μπορούμε να βρισκόμαστε είτε σε κανονική κατάσταση είτε σε φάση Meissner είτε σε φάση Shubnikov (με σωλήνες μαγνητικής ροής, flux tubes). Οι μαθητές θα πρέπει να αντιληφθούν την επίδραση της θερμοκρασίας στις ταλαντώσεις των ιόντων στο κρυσταλλικό πλέγμα με αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο να εισέρχεται



Εικόνα 12 σωλήνες ροής (Δίνες Abrikosov) (Πηγή [8])

ευκολότερά στον υπεραγωγό. (ο υπεραγωγός εξακολουθεί να έχει έστω και μια πολύ μικρή αντίσταση). Με τη βοήθεια της εφαρμογής οι μαθητές υπολογίζουν για συγκεκριμένη τιμή της θερμοκρασίας (κατω από T_c) τις τιμές των B_{cmax} και B_{cmin} . Στο δεύτερο φύλλο οι μαθητές θα πρέπει να βρουν την φορά του υπερρεύματος που δημιουργείται από τους σωλήνες μαγνητικής ροής. Οι μαθητές τις B λυκείου γνωρίζουν τον κανόνα του δεξιού χεριού οπότε μπορούν να εκτιμήσουν την φορά του υπερρεύματος.

Οι μαθητές χρησιμοποιώντας την σχέση :

$$n = \frac{B}{\Phi_0}$$

(Φ_0 : κβάντο μαγνητικής ροής)

Μπορούν να υπολογίσουν τον αριθμό των στροβίλων ανα μονάδα επιφάνειας.

1^ο Φύλλο εργασίας

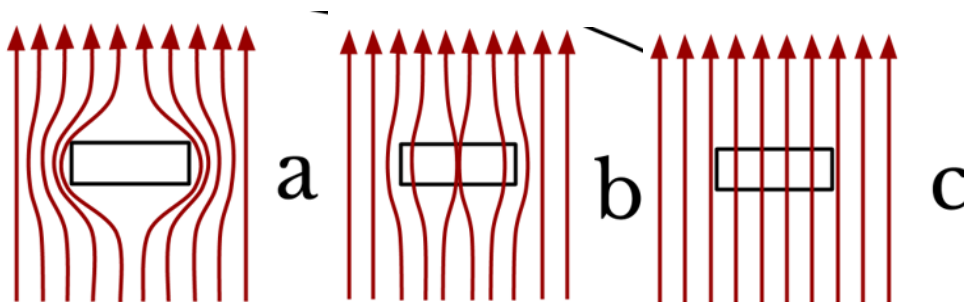
1^η δραστηριότητα

A) πως πιστεύετε ότι θα είναι η μορφή του μαγνητικού πεδίου στους υπεραγωγούς τύπου II εκτός του πεδίου τιμών της B_{cmin} και B_{cmax} σε σχέση με τους υπεραγωγούς τύπου I;

.....
.....
.....

B) ενεργοποιήστε την εφαρμογή `superconductors_type_ii.html`.

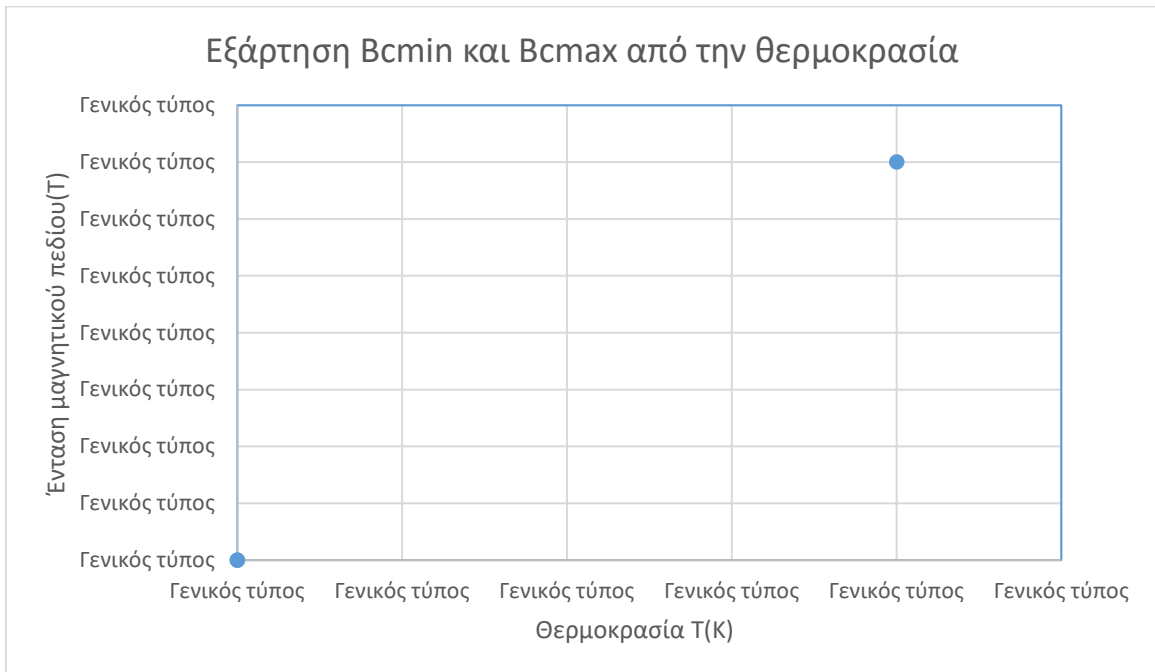
Για θερμοκρασίες μικρότερες της κρίσιμης θερμοκρασίας και για εξωτερικό πεδίο μικρότερο από B_{cmin} ποια από τις παρακάτω εικόνες συμφωνεί με την παρατήρησή σας;



Γ) ποια πιστεύετε ότι θα είναι η μορφή του πεδίου όταν η εξωτερική ένταση του μαγνητικού πεδίου παίρνει τιμές ανάμεσα στην B_{cmin} και B_{cmax} ;

.....

Δ) σχεδιάστε την γραφική παράσταση της μεταβολής των B_{cmin} και B_{cmax} σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.



2^η δραστηριότητα

A) επιλέξτε στην εφαρμογή $B=15T$. αυξήστε σταδιακά την θερμοκρασία από $0K$ μέχρι $20K$. στον παρακάτω πίνακα καταγράψτε τις τιμές τις θερμοκρασίας στις οποίες τα $15T$ αποτελούν B_{cmin} και B_{cmax} . Επαναλάβετε τα βήματα για $B=13T$ και $B=12T$.

Πίνακας 2 ένταση μαγνητικού πεδίου και αντίστοιχη θερμοκρασία για μέγιστη και ελάχιστη ένταση μαγνητικού πεδίου

B(T)	T για B_{cmin}	T για B_{cmax}
15		
13		
12		

B) Εξηγήστε γιατί μεταβάλλεται η τιμή των B_{cmin} και B_{cmax} συναρτήσει της θερμοκρασίας;

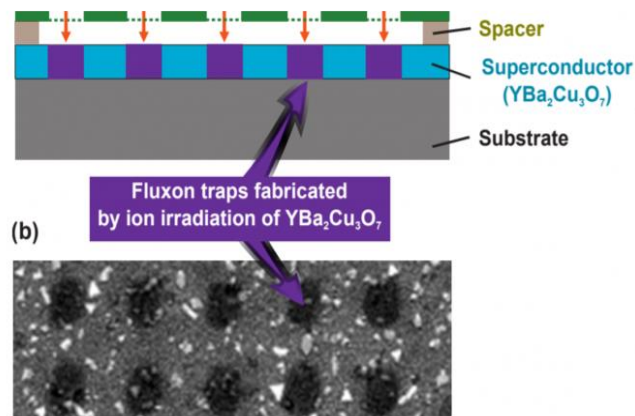
.....

B) Ξεκινήστε το πρόγραμμα `start3_without_Bc.html` και επιλέξτε θερμοκρασία μικρότερη από $T_c(K)$. Προσδιορίστε B_{cmin} και B_{cmax} μεταβάλλοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Κατόπιν συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3 θερμοκρασία και B_{cmin} , B_{cmax}

T(K)	B_{cmin}	B_{cmax}

Γ) πως μεταβάλλεται ο αριθμός των νημάτων στην κατάσταση στροβίλων (vortex state);



Εικόνα 13 νήματα στην κατάσταση στροβίλων . Πηγη[9]

Δ) επιλέξτε τιμές έντασης και θερμοκρασίας τέτοιες ώστε να βρίσκεστε σε κατάσταση στροβίλων. Εάν αυξηθεί το μαγνητικό πεδίο πως θα μεταβληθεί η πυκνότητα των νημάτων;

.....
.....

Ε) εάν n είναι ο αριθμός των στροβίλων ανά μονάδα επιφάνειας και A το εμβαδόν της επιφάνειας του υπεραγωγού να συμπληρώσετε τον παρακάτω πίνακα γνωρίζοντας ότι ισχύει η σχέση : $N=nA$. Χρησιμοποιήσετε διαφορετικές τιμές για το B .

Πίνακας 4 Ένταση μαγνητικού πεδίου και αριθμός στροβίλων

B	N	B/N

2.4 ΠΑΡΑΜΕΝΟΝΤΑ ΡΕΥΜΑΤΑ, ΚΒΑΝΤΩΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ.

2.4.1 Στόχοι

- Να μπορούν οι μαθητές να υπολογίζουν το υπερρεύμα που δημιουργείται στον αγωγό όταν αυτός βρίσκεται στη φάση του υπεραγωγού (για θερμοκρασίες μικρότερες της T_c)
- Να αντιληφθούν ότι εντός του εσωτερικού του αγωγού, η μαγνητική ροή είναι σε ακέραια πολλαπλάσια. (κβάντωση)
- Να κατανοήσουν τις ιδιότητες των υπεραγωγών, ανάλογα με την θερμοκρασία.
- Να χειρίζονται το εικονικό πείραμα και να μπορούν να εξάγουν συμπεράσματα.

2.4.2 Σενάριο

Το συγκεκριμένο σενάριο είναι δομημένο σε 4 φύλλα εργασίας, όπου μελετάται η συμπεριφορά ενός υπεραγωγίου δακτυλίου.

Με το πρώτο φύλλο και την πρώτη δραστηριότητα οι μαθητές θα αντιληφθούν ότι ο υπεραγωγός σε θερμοκρασίες υψηλότερες της κρίσιμης συμπεριφέρεται σαν κανονικό μέταλλο. Στη δεύτερη δραστηριότητα, οι μαθητές κατανοούν ότι εάν πρώτα εφαρμόσουμε μαγνητικό πεδίο και μετά ψύξουμε τον αγωγό, το πεδίο διατηρείται εντός του δακτυλίου ακόμη και εάν στη συνέχεια μηδενίσουμε το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Εάν όμως αρχικά ψύξουμε τον υπεραγωγό τότε όταν εφαρμόσουμε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τότε αυτό αποβάλλεται από το εσωτερικό του δακτυλίου. Κατά τη διάρκεια της τρίτης δραστηριότητας, ο καθηγητής αναφέρεται στην κβάντωση της μαγνητικής ροής Φ_0 και ότι η μαγνητική ροή είναι σε ακέραια πολλαπλάσια της Φ_0 . Οι μαθητές συμπληρώνουν έναν πίνακα όπου τοποθετούν τιμές τις εξωτερικής μαγνητικής έντασης σε συνάρτηση με την Φ . Με τις τιμές που παίρνουν οι μαθητές, τους ζητείται να σχεδιάσουν την γραφική παράσταση του ηλίικου Φ/Φ_0 στον άξονα Y και της έντασης του μαγνητικού πεδίου στον άξονα X .

Στην τέταρτη δραστηριότητα, οι μαθητές με τη βοήθεια του εικονικού πειράματος αντιλαμβάνονται ότι εάν ψύξουμε πρώτα τον υπεραγωγό και μετά εφαρμόσουμε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, αυτό θα αποβληθεί από το εσωτερικό του δακτυλίου.

Κατά τη διάρκεια της δεύτερης σχολικής ώρας, οι μαθητές ξεκινάνε το δεύτερο φύλλο εργασίας. Σκοπός των μαθητών είναι να υπολογίσουν το υπερρεύμα I_c θα σημειώσουν τις τιμές των r_1 (ακτίνα δακτύλιου) και L (συντελεστής αυτεπαγωγής) και αφού σημειώσουν την B_{ext} , μειώνουν την θερμοκρασία κάτω από την κρίσιμη και καταγράφουν την τιμή του υπερρεύματος I_c με τη βοήθεια της σχέσης $\Phi - n\Phi_0 = LI$ συγκρίνουν την τιμή του εικονικού πειράματος με την τιμή που βρήκαν από την σχέση.

Στη συνέχεια δίνεται το τρίτο φύλλο εργασίας (1^η δραστηριότητα) όπου οι μαθητές προβλέπουν τι θα συμβεί στην μαγνητική ροή εντός του δακτυλίου εάν μηδενιστεί το μαγνητικό πεδίο και, ο υπεραγωγός έχει ψυχθεί σε θερμοκρασίες μικρότερες της κρίσιμης. Τέλος στη δεύτερη δραστηριότητα του τρίτου φύλλου οι μαθητές χρησιμοποιώντας τον νόμο της επαγωγής υπολογίζουν το επαγωγικό υπερρεύμα με την κατάργηση του μαγνητικού πεδίου ενώ ο αγωγός είναι υπεραγωγίμος.

1^ο φύλλο εργασίας

1^η δραστηριότητα

Ανοίξτε στον υπολογιστή σας το αρχείο torus.html και βάλτε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τοροειδούς επιφάνειας. (εσωτερική και εξωτερική ακτίνα)

κβάντωση ροής σε τοροειδές δακτύλιο
τυπος συντελεστου αυτεπαγωγης τοροειδούς με βάση τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά
Κρίσιμη θερμοκρασια Tc=9.26K

$$L_{toroid} = \frac{\mu_0 \cdot h \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi} = \text{[]}$$

$$I(\text{mA}) = \text{[]}$$

A). Τι πιστεύεται ότι θα συμβεί στον δακτύλιο εάν η θερμοκρασία είναι υψηλότερη της κρίσιμης και αυξομειώνουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου;

.....

.....

.....

.....

B) κρατώντας σταθερή την θερμοκρασία στους 298K , μεταβάλλεται την ένταση του μαγνητικού πεδίο. Περνάει το μαγνητικό πεδίο από το εσωτερικό του δακτύλιου; Είναι διαφορετικό στο εσωτερικό του; Εξηγήστε

.....

.....

.....

.....

Γ) πως συμπεριφέρεται ο υπεραγωγός σε θερμοκρασίες υψηλότερες της κρίσιμης θερμοκρασίας;

.....

.....

.....

.....

2^η δραστηριότητα

A) εφαρμόστε πρώτα μαγνητικό πεδίο στον υπεραγωγό και κατόπιν κατεβάστε την θερμοκρασία κάτω από την τιμή της κρίσιμης. Το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται;

.....
.....
.....
.....

B) στο πρόγραμμα torus.html επιλέξτε την εσωτερική και εξωτερική ακτίνα του δακτυλίου. Αυξήστε την ένταση του μαγνητικού πεδίου και παράλληλα μειώστε την θερμοκρασία χαμηλότερα της κρίσιμης. Συμφωνεί η εικόνα με την πρόβλεψή σας στην προηγούμενη ερώτηση;

.....
.....
.....
.....

Πως συμπεριφέρεται ένας υπεραγωγός όσον αφορά τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές όταν βρίσκεται σε θερμοκρασία μικρότερη της κρίσιμης;

.....
.....
.....
.....

Γιατί το μαγνητικό πεδίο παραμένει στο εσωτερικό του δακτυλίου;

.....
.....
.....
.....

Τι ακριβώς κάνει το υπερρεύμα και γιατί έχει την συγκεκριμένη φορά;

.....
.....
.....
.....

3^η δραστηριότητα

Γραφική παράσταση της κβάντωσης της μαγνητικής ροής.

1. Ξεκινήστε την εφαρμογή torus.html και διαλέξτε εσωτερική και εξωτερική ακτίνα του δακτύλιου.
2. Αυξήστε την τιμή του μαγνητικού πεδίου και μειώστε την θερμοκρασία κάτω από T_c .
3. Χαμηλώστε την τιμή του μαγνητικού πεδίου και καταγράψτε στην πρώτη γραμμή του παρακάτω πίνακα το μαγνητικό πεδίο B(mG).

Πίνακας 5 Ένταση μαγνητικού πεδίου και λόγος Φ/Φ_0

B(mG)									
Φ/Φ_0									

4. Επαναλάβετε για μεγαλύτερες τιμές της B(mG)
5. Χρησιμοποιήσετε την σχέση :

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = f(B)$$

για να σχεδιάσετε την γραφική παράσταση του πηλίκου της μαγνητικής ροής με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. ($\Phi_0=2,07 \cdot 10^4 \text{ mG } \mu\text{m}^2$)

6. Ποια είναι η μορφή της γραφικής παράστασης;
7. Γιατί για μικρές αποκλίσεις της B_{ext} η τιμή της Φ δεν αλλάζει;

2^ο φύλλο εργασίας

1^η δραστηριότητα

1. Ξεκινήστε την εφαρμογή torus.html και διαλέξτε εσωτερική και εξωτερική ακτίνα του δακτύλιου. Η εσωτερική ακτίνα είναι:

$$r_1 = \dots \mu\text{m}$$

2. Η τιμή του συντελεστή αυτεπαγωγής είναι:

$$L = \dots \mu\text{H}$$

3. Αυξήστε την B και κρατήστε την θερμοκρασία πάνω από την κρίσιμη.
4. Χαμηλώστε την θερμοκρασία κάτω από την κρίσιμη.
5. Σημειώστε την τιμή της εντάσεως του υπερρεύματος

$$I = \dots \text{mA}$$

6. Βρείτε το εμβαδόν του δακτυλίου:

$$A = 3,14 * r_1^2 = \dots \mu\text{m}^2$$

7. Υπολογίστε την μαγνητική ροή:

$$\Phi = B * A = \dots \text{mG}\mu\text{m}^2$$

8. Στρογγυλοποιήστε προς τον μικρότερο φυσικό αριθμό:

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \dots$$

$$\Phi_0 = 2,07 * 10^4 (\text{mG}\mu\text{m}^2)$$

9. Χρησιμοποιώντας τον νόμο της επαγωγής, συγκρίνετε τις τιμές των υπερρευμάτων (θεωρητική και πειραματική)

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

3^ο φύλλο εργασίας

1^η δραστηριότητα

A) αυξήστε την ένταση του μαγνητικού πεδίου και στη συνέχεια κατεβάστε την θερμοκρασία κάτω από την κρίσιμη. Κατόπιν μηδενίστε την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Ποια επαγωγικά φαινόμενα παρατηρείτε;

.....
.....
.....

B)

1. ξεκινήστε την εφαρμογή [torus.html](#) και αφού επιλέξετε εσωτερική και εξωτερική ακτίνα αυξήστε την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

2. μειώστε την θερμοκρασία κάτω από την κρίσιμη τιμή.

3. μηδενίστε την ένταση B.

Πως συμπεριφέρεται ο αγωγός μετά από τον μηδενισμό του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και αφότου ή θερμοκρασία μειωθεί σε τιμές κάτω από την κρίσιμη;

.....
.....
.....

Γιατί διατηρείται η μαγνητική ροή; Γιατί η ένταση του υπερρεύματος έχει την συγκεκριμένη φορά;

.....
.....
.....

4^ο φύλλο εργασίας

1^η δραστηριότητα

A) αν πρώτα μειώσουμε την θερμοκρασία χαμηλότερα της κρίσιμης και μετά αυξήσουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου, τι θα συμβεί στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές;

.....
.....
.....

B)

1. ξεκινήστε την εφαρμογή torus.html και επιλέξτε εσωτερική και εξωτερική ακτίνα.

2. μειώστε την θερμοκρασία κάτω από τα επίπεδα της κρίσιμη θερμοκρασίας κρατώντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου στο μηδέν.

3. κατόπιν αυξήστε την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

4. πως αντιδρά ο υπεραγωγός στις μεταβολές αυτές και γιατί η ένταση του υπερρεύματος έχει την συγκεκριμένη φορά;

.....
.....
.....

2.5 ΕΙΚΟΝΙΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ: ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΎΨΟΥΣ ΑΙΩΡΗΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΗ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟ ΤΥΠΟΥ I

2.5.1 Στόχοι

- Να υπολογίσουν τον τύπο για την εύρεση του ύψους αιώρησης μαγνήτη πάνω από υπεραγώγιμη πλάκα σε συνδυασμό με μια κατακόρυφη δύναμη.
- Να αντιληφθούν τις μεταβλητές από τις οποίες εξαρτάται η δυναμική ενέργεια καθώς και η δύναμη μεταξύ διπόλων.
- Να αποκτήσουν εμπειρία στην χρήση εικονικών εργαστηρίων.

2.5.2 Σενάριο

Το σενάριο αποτελείται από 3 φύλλα εργασίας και 1 φύλλο αξιολόγησης. Ζητάμε από τους μαθητές να υπολογίσουν το ύψος αιώρησης ενός μαγνήτη πάνω από έναν υπεραγωγό ο οποίος έχει ψυχθεί σε θερμοκρασία μικρότερη της κρίσιμης. Επίσης οι μαθητές θα πρέπει να αποδείξουν τις σχέσεις της δυναμικής ενέργειας και των δυνάμεων που ασκούνται τόσο σε μαγνητικά δίπολα όσο και σε ηλεκτρικά δίπολα.

Στο πρώτο φύλλο εργασίας και στην πρώτη δραστηριότητα οι μαθητές ασχολούνται με εικονικό εργαστήριο και με το αρχείο `levitation.html`.

Στην δεύτερη δραστηριότητα οι μαθητές ασχολούνται με λογαριθμικά διαγράμματα και υπολογίζουν το ύψος αιώρησης σε σχέση με την κατακόρυφη δύναμη που ασκείται στον μόνιμο μαγνήτη.

Κατόπιν ο εκπαιδευτικός εισαγάγει τις έννοιες της διπολικής ροπής, του μαγνητικού και του ηλεκτρικού δίπολου.

Ο διδάσκων εξηγεί στους μαθητές ότι ουσιαστικά ένα μαγνητικό δίπολο πρόκειται για έναν μικροσκοπικό μαγνήτη, ενώ μαγνητική διπολική ροπή είναι το πόσο «δυνατό» είναι το μαγνητικό δίπολο όσον αφορά το μαγνητικό πεδίο.

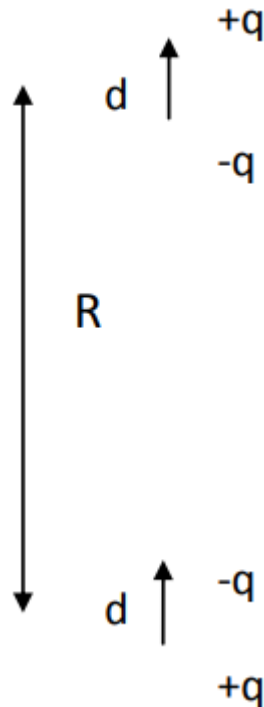
$$\mu = q_m d \quad (2.5.1)$$

Όπου q_m είναι η μαγνητική ποσότητα, d η απόσταση των δύο πόλων του δίπολου. Διεύθυνση η διεύθυνση της απόστασης d με φορά από τον Νότιο πόλο προς τον Βόρειο πόλο και μονάδα μέτρησης [Am^2]. Ομοίως ορίζεται και η ηλεκτρική διπολική ροπή ως το διανυσματικό μέγεθος $p=qd$ όπου q το θετικό φορτίο του δίπολου και d η απόσταση μεταξύ των δύο φορτίων.

$$p = qd \quad (2.5.2)$$

Στο δεύτερο φύλλο εργασίας οι μαθητές θα υπολογίσουν τη δύναμη που ασκείται μεταξύ ηλεκτρικών ή μαγνητικών δίπολων, τα οποία βρίσκονται στον άξονα z.

Για να το επιτύχουν αυτό, δηλαδή να υπολογίσουν τη δύναμη που ασκεί το ένα δίπολο στο άλλο (ηλεκτρικό), θα πρέπει να χρησιμοποιήσουν τη δύναμη Coulomb προσθέτοντας τις δυνάμεις που ασκούν μεταξύ τους τα φορτία των δίπολων.



Εικόνα 14 Δύο δίπολα σε απόσταση R και μήκους d το καθένα. Πηγή [20]

Έχουμε:

$$\sum F = \frac{Kq^2}{(R-d)^2} + \frac{Kq^2}{(R+d)^2} - \frac{2Kq^2}{R^2} \quad (2.5.3)$$

R: η απόσταση μεταξύ των διπόλων και d το μήκος τους και K η σταθερά Coulomb

$$\sum F = \frac{6Kp^2}{R^3} \quad (2.5.4)$$

Αυτή είναι η συνισταμένη Ηλεκτρική δύναμη μεταξύ ηλεκτρικών δίπολων.

Αντίστοιχα η Μαγνητική δύναμη μεταξύ μαγνητικών δίπολων είναι:

$$\sum F = \frac{6K_{\mu\alpha\gamma\nu}\mu^2}{R^4} \quad (2.5.5)$$

Όπου μ μαγνητική διπολική ροπή.

Περισσότερες λεπτομέρειες για την απόδειξη των τύπων της μαγνητικής και ηλεκτρικής δύναμης μπορούν να βρεθούν στο παράρτημα..

Αντίστοιχα για τις δυναμικές ενέργειες των ηλεκτρικών και μαγνητικών διπόλων ξεκινώντας από την σχέση:

$$U = \frac{Kq^2}{R+d} + \frac{Kq^2}{R-d} - \frac{2Kq^2}{R} \quad (2.5.6)$$

Και αγνοώντας το d^2 στη διαφορά τετραγώνων προκύπτει:

$$U = \frac{2K \cdot p^2}{R^3} \quad (2.5.7)$$

Και για το μαγνητικό πεδίο:

$$U = \frac{2K_{\mu\alpha\gamma\nu} \cdot \mu^2}{R^3} \quad (2.5.8)$$

Στο τρίτο φύλλο εργασίας, ξεκινώντας από την σχέση:

$$U_{ολ} = \frac{2K_{\mu\alpha\gamma\nu} \cdot \mu^2}{R^3} + mgR \quad (2.5.9)$$

Και παραγωγίζοντας ως προς R , παίρνουμε την σχέση :

$$h = \sqrt[4]{\frac{3K_{\mu\alpha\gamma\nu} \cdot \mu^2}{8mg}} \quad (2.5.10)$$

στη θέση του R βάλουμε $2h$

Στο τρίτο φύλλο εργασίας ζητάμε να βρεθεί το ύψος χρησιμοποιώντας την μέθοδο των εικόνων και τη συνθήκη ισορροπίας.

$$F_{\mu\alpha\gamma\nu} - F - W = 0 \quad (2.5.11)$$

Μετά από πράξεις (δες παράρτημα) καταλήγουμε στη σχέση:

$$h = \sqrt[4]{\frac{3K_{\mu\alpha\gamma\nu} \cdot \mu^2}{8(F + W)}} \quad (2.5.12)$$

από την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε το ύψος αιώρησης.

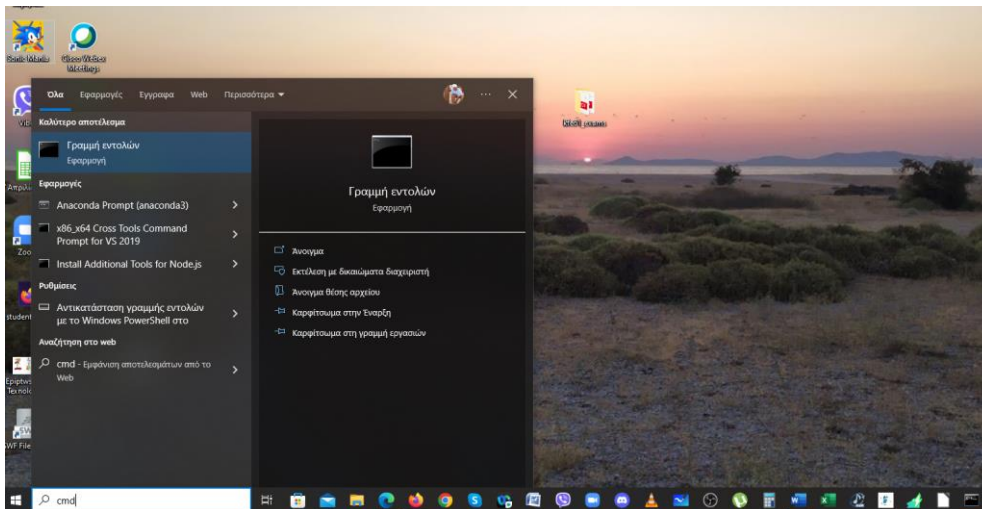
Τελευταία δίνουμε στους μαθητές το φύλλο αξιολόγησης όπου βρίσκουν τη σχέση μέσω του εικονικού πειράματος μεταξύ του ύψους h και της μαγνητικής διπολικής ροπής.

1^ο φύλλο εργασίας

Εικονικό πείραμα για την εύρεση του ύψους στο οποίο αιωρείται ένας μαγνήτης πάνω από μια υπεραγώγιμη πλάκα. Εδώ έχουμε την μαγνητική διπολική ροπή, το βάρος και μια εξωτερική δύναμη F που σπρώχνει τον μαγνήτη προς την υπεραγώγιμη πλάκα (προς τα κάτω).

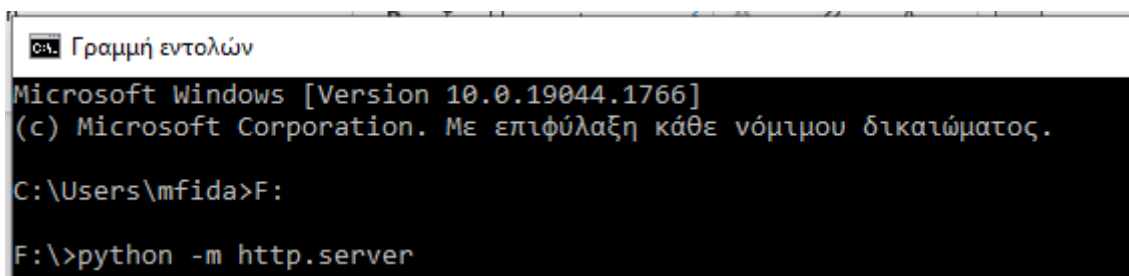
1^η δραστηριότητα

Για να ξεκινήσετε την διαδικασία θα πρέπει αρχικά να ξεκινήσετε ένα http server για να τρέξει το πρόγραμμα. Πηγαίνουμε στον φάκελο που είναι αποθηκευμένο το levitation.html και γράφουμε στο search bar των windows cmd.



Στη συνέχεια και αφού είμαστε στην γραμμή εντολών πληκτρολογούμε:

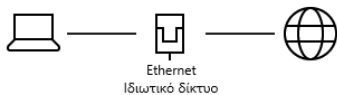
```
python -m http.server
```



Από ρυθμίσεις δικτύου και ίντερνετ πατάμε προβολή ιδιοτήτων υλικού και σύνδεσης

Κατάσταση

Κατάσταση δικτύου



Είστε συνδεδεμένοι στο Internet

Αν έχετε ένα περιορισμένο πρόγραμμα δεδομένων, μπορείτε να κάνετε αυτό το δίκτυο μια σύνδεση ογκοχρέωσης ή να αλλάξετε άλλες ιδιότητες.

Ethernet 27.63 GB
Από τις τελευταίες 30 ημέρες

Ιδιότητες

Χρήση δεδομένων

Εμφάνιση διαθέσιμων δικτύων
Προβολή των επιλογών σύνδεσης γύρω σας.

Σύνθετες ρυθμίσεις δικτύου

Αλλαγή επιλογών προσαρμογέα
Προβάλλετε τους προσαρμογείς δικτύου και αλλάζτε τις ρυθμίσεις σύνδεσης.

Κέντρο δικτύου και κοινής χρήσης
Για τα δίκτυα στα οποία συνδέεστε, αποφασίστε τι θέλετε να μοιράζεστε.

Πρόγραμμα αντιμετώπισης προβλημάτων δικτύου
Διαγνώστε και επιλύστε προβλήματα δικτύου.

[Προβολή ιδιοτήτων υλικού και σύνδεσης](#)

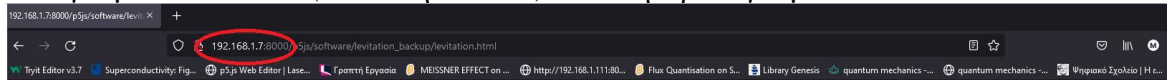
Στην προκειμένη περίπτωση η τοπική μας ip είναι 192.168.1.7

🏠 Προβολή ιδιοτήτων υλικού και σύνδεσης

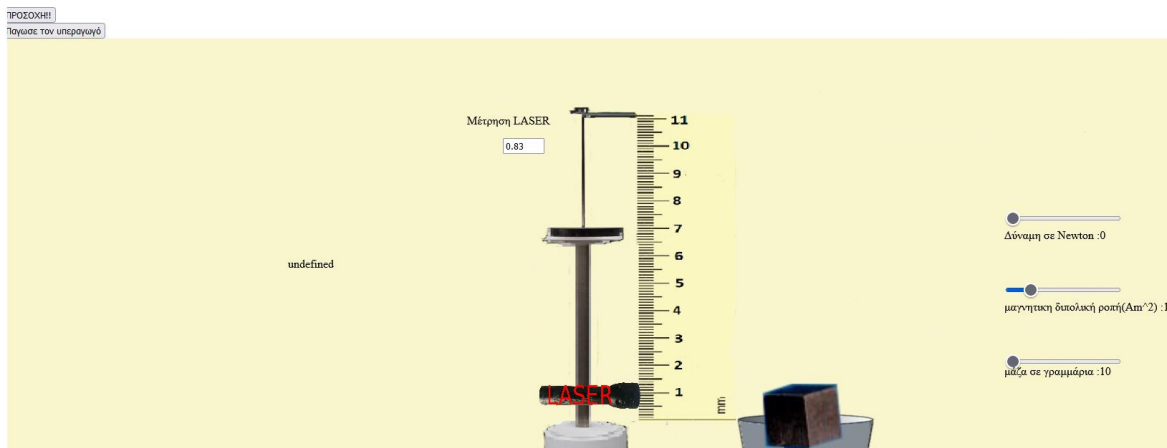
Ιδιότητες

Όνομα:	Ethernet
Περιγραφή:	Realtek PCIe GbE Family Controller
Φυσική διεύθυνση (MAC):	f0:2f:74:cc:6a:65
Κατάσταση:	Σε λειτουργία
Μέγιστη μονάδα μετάδοσης:	1500
Ταχύτητα σύνδεσης (Λήψη/ Μετάδοση):	100/100 (Mbps)
Ενεργοποιημένο DHCP:	Ναι
Διακομιστές DHCP:	192.168.1.1
Αποκτήθηκε μίσθωση DHCP:	Τετάρτη, 6 Ιουλίου 2022 2:22:41 μμ
Η μίσθωση DHCP λήγει:	Πέμπτη, 7 Ιουλίου 2022 2:22:41 μμ
Διεύθυνση IPv4:	192.168.1.7/24

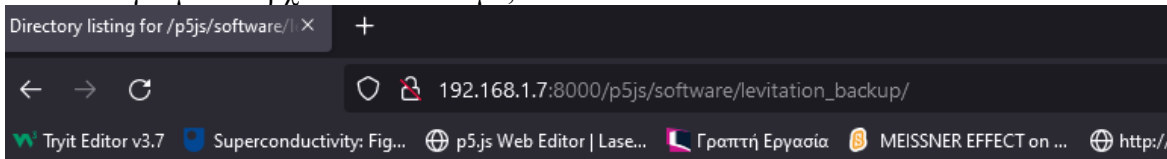
Ανοίγουμε ένα browser(firefox ή chrome) και πληκτρολογούμε 192.168.1.7:8000



1) Πριν ξεκινήσεις την άσκηση, πάτα αυτο το κουμπί



Και επιλέγουμε το αρχείο που θέλουμε, εδώ το levitation.html



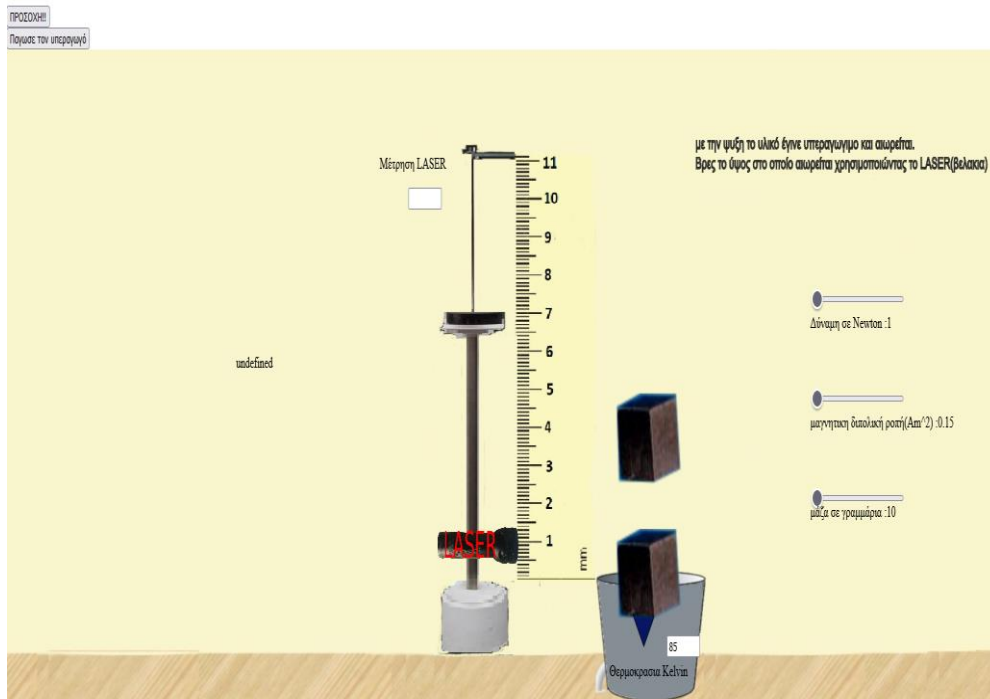
Directory listing for /p5js/software/levitation_backup/

- [21.jpg](#)
- [disc.png](#)
- [document.pdf](#)
- [flash.png](#)
- [iceCubeStack.png](#)
- [jquery-3.6.0.min.js](#)
- [levitation.html](#)
- [Measurement of levitation forces of high- Tc super.pdf](#)
- [p5_dom.min.js](#)
- [p5.min.js](#)
- [p5.sound.min.js](#)
- [sketch.js](#)
- [style.css](#)
- [Untitled 1.ods](#)
- [windows10.png](#)

Αφού πατήσουμε το κουμπί ΠΡΟΣΟΧΗ για οδηγίες, στη συνέχεια πατάμε το κουμπί πάγωσε τον υπεραγωγό για να κατέβει η θερμοκρασία στον κουβά (θα δείτε τη θερμοκρασία να κατεβαίνει) ώσπου να πέσει κάτω από 90K(κρίσιμη Θερμοκρασία) και

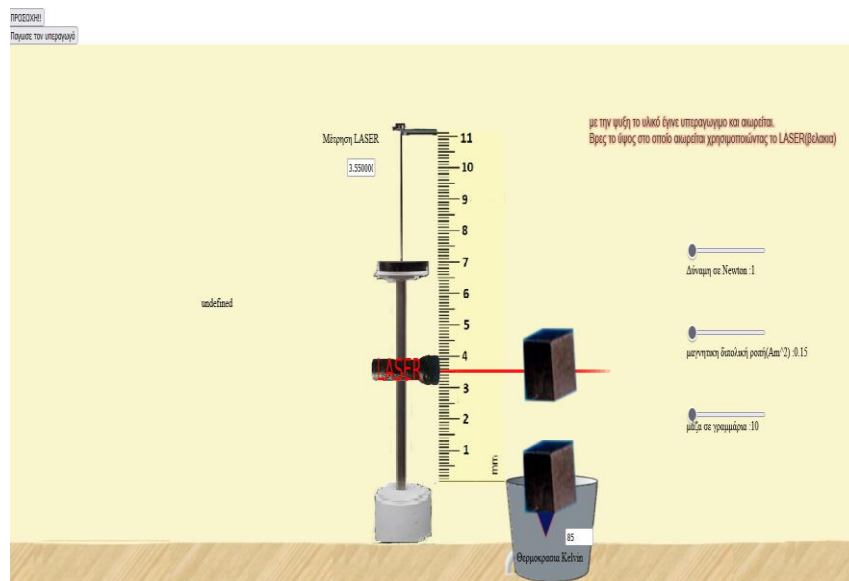
να μεταβεί η υπεραγώγιμη πλάκα σε υπεραγώγιμη κατάσταση . Θα δούμε στη συνέχεια τον μόνιμο μαγνήτη να αιωρείται.

1) Πριν ξεκινήσεις την άσκηση, πάτα αυτο το κουμπί



Για να μετρήσουμε το ύψος χρησιμοποιούμε τα βελάκια για να ανεβοκατεβάσουμε το LASER και με δεξί βελάκι βγαίνει μια ακτίνα LASER που μας βοηθάει να μετρήσουμε το ύψος. Για περισσότερη βοήθεια στο Κουτάκι Μέτρηση LASER αναγράφεται το ύψος.

1) Πριν ξεκινήσεις την άσκηση, πάτα αυτο το κουμπί



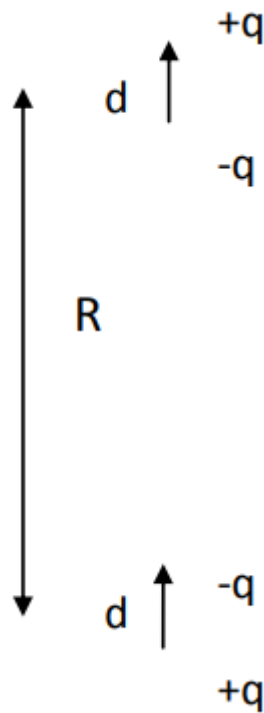
Αιτιολογήστε την απάντησή σας.

.....
.....
.....

11. Υπολογίστε το % σφάλμα στην μέτρηση σας γνωρίζοντας ότι ο θεωρητικός συντελεστής είναι -0.25

.....
.....
.....

2^ο φύλλο εργασίας



Εικόνα 15 Δύο δίπολα σε απόσταση R και μήκους d το καθένα. Πηγή [20]

1^η δραστηριότητα

A. Έστω ότι έχουμε 2 όμοια δίπολα. Η ολική δύναμη για κάθε δίπολο είναι:

$$\sum F = F_- + F_+ - 2F_{\pm}$$

F_- : Δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ αρνητικών φορτίων

F_+ : Δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ θετικών φορτίων

F_{\pm} : Δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ θετικού και αρνητικού φορτίου.

Με βάση το νόμο του Coulomb δείξτε ότι :

$$\sum F = \frac{6Kp^2}{R^2}$$

Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι $d \ll R$ και p είναι η ηλεκτρική διπολική ροπή ($p=qd$).

B. γράψτε κατά αντιστοιχία τον τύπο συνισταμένης δύναμης για δυο δίπολα μαγνητικά μαγνητικής ροπής μ .

2^η Δραστηριότητα

A. Χρησιμοποιώντας την σχέση:

$$U = K \frac{q_1 \cdot q_2}{r}$$

Αποδείξτε την σχέση της δυναμικής ενέργειας δύο δίπολων:

$$U = \frac{2Kp^2}{r^3}$$

p είναι η ηλεκτρική διπολική ροπή ($p=qd$).

.....

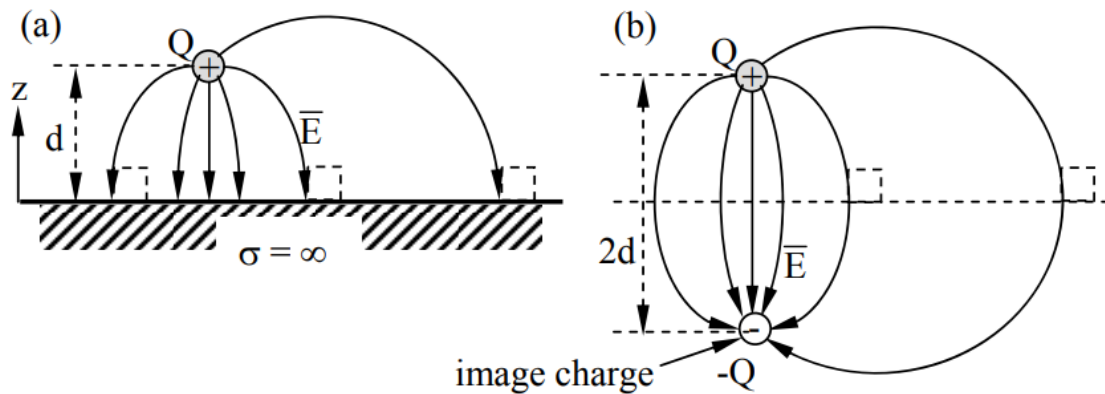
B. Γράψτε τον αντίστοιχο τύπο για 2 μαγνητικά δίπολα μαγνητικής ροπής μ

.....

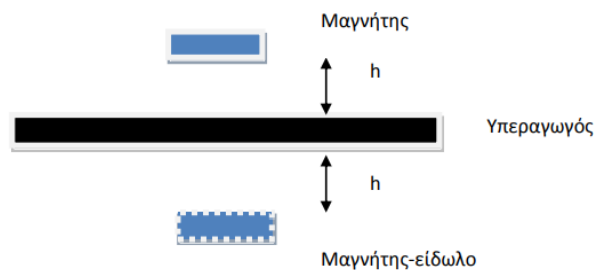
3^ο φύλλο εργασίας

1^η δραστηριότητα

Χρησιμοποιώντας την μέθοδο των εικόνων δηλαδή θεωρώντας ότι η υπεραγώγιμη πλάκα λειτουργεί σαν ένας ίδιος μαγνήτης σε απόσταση ίση από την κάτω πλάκα (mirror image technique) βρείτε το ύψος στο οποίο αιωρείται ο μαγνήτης.



Εικόνα 16. Μέθοδος εικόνων πηγή [21]



Εικόνα 17. Ανύψωση μόνιμου μαγνήτη. Τεχνική μεθόδου εικόνων. Πηγή [20]

Θα χρησιμοποιήσετε τον τύπο της βαρυτικής και μαγνητικής δυναμικής ενέργειας. Το άθροισμά τους θα μας δώσει την συνολική ενέργεια. Παίρνοντας το σημείο που μηδενίζεται η πρώτη παράγωγος ως προς h , θα βρούμε το h

$$U_{ολ} = U_{μαγν} + U_{βαρ}$$

$$U_{ολ} = \frac{2Kp^2}{(2h)^3} + mgh$$

$$\frac{dU}{dh} = 0$$

Με παραγωγή ως προς h βρίσκω:

$$h = \sqrt[4]{\frac{3K_{\text{μαγν}} \cdot \mu^2}{8(F + mg)}}$$

.....
.....
.....

2^η δραστηριότητα

Βρείτε το ύψος αιώρησης χρησιμοποιώντας τον πρώτο νόμο του Newton.

.....
.....
.....

Φύλλο αξιολόγησης

Χρήση του εικονικού εργαστηρίου για την εύρεση της σχέσης του ύψους h του μαγνήτη σε σχέση με την μαγνητική διπολική ροπή μ .

1. Ξεκινήστε το πρόγραμμα levitation.html.
2. Ορίστε τιμές για την μάζα του μαγνήτη και για την κατακόρυφη δύναμή F .
3. Μεταβάλετε τις τιμές της μαγνητικής διπολικής ροπής και σημειώστε τις τιμές της ανύψωσης h .
4. Φτιάξτε πίνακα τιμών με στήλες τις τιμές της διπολικής ροπή και το ύψος h και στις διπλανές στήλες τους λογαρίθμους αυτών. (Τουλάχιστον 15 τιμές)
5. Επιλέξτε τις λογαριθμικές στήλες και διαλέξτε γράφημα στο excel. Διαλέξτε συντεταγμένες της γραφικής παράστασης, προσθέστε γραμμή τάσης και στη συνέχεια επιλέξτε γραμμική και προβολή εξίσωσης.
6. Ποια είναι τα συμπεράσματά σας;

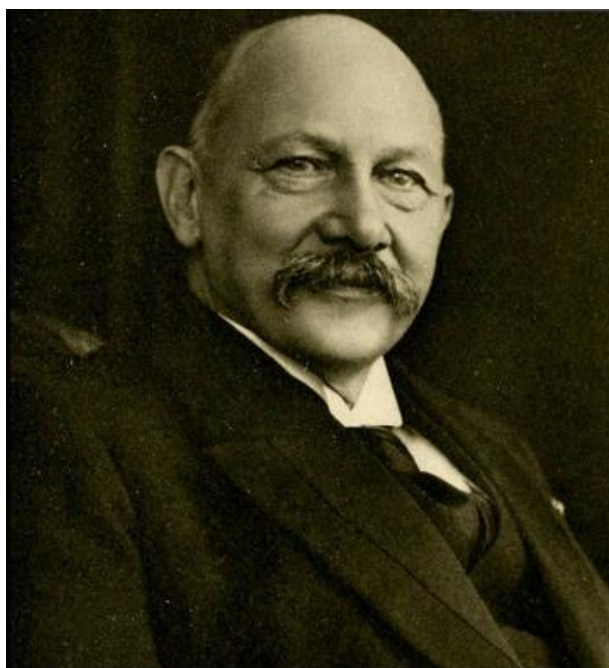
.....
.....
.....

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

A.1 ΘΕΩΡΙΑ

A.1.1 ΜΗΔΕΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΑΓΩΓΩΝ

Ο Heike Onnes κατάφερε το 1908 να υγροποιήσει το ήλιο στους 4,2K. Αργότερα το 1911 ανακάλυψε την υπεραγωγιμότητα. Ανακάλυψε ότι η ειδική αγωγιμότητα των μετάλλων συσχετίζεται με την καθαρότητά τους. Για αυτό χρησιμοποίησε υγρό υδράργυρο ώστε να έχει καθαρό δείγμα. Παρατήρησε ότι στους 4,15K η αντίσταση του υδραργύρου μηδενίζοταν. Το φαινόμενο αυτό το ονόμασε υπεραγωγιμότητα.



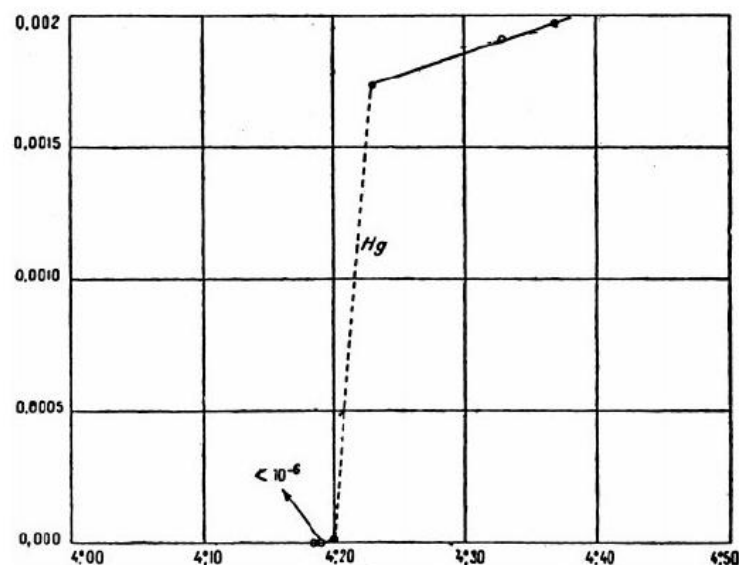
Εικόνα 18 Heike Kammerling Onnes

Σε έναν υπεραγωγό, κάτω από μια θερμοκρασία που ονομάζεται «κρίσιμη θερμοκρασία», η ηλεκτρική αντίσταση πέφτει πολύ ξαφνικά στο μηδέν. Σε μηδενική αντίσταση, το υλικό μεταφέρει τέλεια το ρεύμα. Αυτό το γεγονός δε γίνεται εύκολα αντιληπτό γιατί τα

ελαττώματα και οι δονήσεις των ατόμων θα πρέπει να προκαλούν αντίσταση στο υλικό όταν τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσα από αυτό. Ωστόσο, σε έναν υπεραγωγό, η ηλεκτρική αντίσταση είναι ίση με μηδέν, αν και εξακολουθούν να υπάρχουν ελαττώματα και δονήσεις.

Επιπλέον στους υπεραγωγούς, η ηλεκτρική αντίσταση είναι ίση με μηδέν. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ένα ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να κυκλοφορεί για πάντα σε έναν υπεραγωγό ακόμα και όταν η πηγή έχει αποσυνδεθεί. Έτσι δημιουργούνται τα μαγνητικά πεδία στις μαγνητικές τομογραφίες. Μπορεί να φαίνεται περίεργο ότι μια μπαταρία θα μπορούσε να δημιουργήσει ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσης στους ακροδέκτες ενός υπεραγωγίου δικτύου, καθώς η τάση θα πρέπει να είναι ίση με μηδέν λόγω της απουσίας ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι η ηλεκτρική τάση που δημιουργείται από την μπαταρία διαιρείται στα άλλα μέρη του δικτύου, δηλαδή στα μεταλλικά καλώδια που συνδέουν την μπαταρία με τον υπεραγωγό και με το εσωτερικό της μπαταρίας (εσωτερική αντίσταση).

Η αντίσταση είναι πραγματικά ίση με μηδέν. Οι μετρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια πολλών ετών δείχνουν ότι το ρεύμα δεν μειώνεται ποτέ. Αν και το ρεύμα είναι διαρκές, δεν αποτελεί παραβίαση των θερμοδυναμικών νόμων (που απαγορεύουν τις μηχανές αέναης κίνησης), γιατί σε αυτή την περίπτωση δεν δημιουργείται ενέργεια. Η ηλεκτρική και μαγνητική ενέργεια αποθηκεύεται απλώς στον δακτύλιο.



Εικόνα 19 Η γραφική παράσταση του Onnes που απεικονίζει την ηλεκτρική αντίσταση ενός δείγματος Hg σε σχέση με τη θερμοκρασία

Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια σχηματίζουν μια νέα αρχική κβαντική συλλογική κατάσταση που δεν είναι πλέον ευαίσθητη σε συγκρούσεις. Τα ηλεκτρόνια δεν επιβραδύνονται και η ηλεκτρική αντίσταση έχει εξαφανιστεί.

Σε μικροσκοπική κλίμακα, η κβαντική φυσική μας διδάσκει ότι το ηλεκτρόνιο συμπεριφέρεται σαν ένα μικρό κύμα. Όταν υπάρχει κάποια ατέλεια ή όταν ένα από τα άτομα του κρυσταλλικού σχεδίου δονείται, το κύμα διακόπτεται. Σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία, τα ηλεκτρόνια ζευγαρώνουν και συγχωνεύονται σε ένα κβαντικό κύμα που γεμίζει ολόκληρο το υλικό. Αυτό το μοναδικό κύμα δεν γίνεται αισθητό στις ατέλειες του υλικού. Τα ζεύγη αυτά (ζεύγη Cooper) είναι πολύ μικρά για να επιβραδύνουν όλο το κύμα. Επομένως η ηλεκτρική αντίσταση εξαφανίζεται.

Πολύ πιο μετά ανακαλύφθηκε ότι αυτά τα μέταλλα έχουν την ιδιότητα να αποβάλλουν την μαγνητική ροή που προϋπήρχε στο εσωτερικό τους όταν βρίσκονται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από την κρίσιμη.

A.1.2 ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΙ ΤΥΠΟΥ Ι ΚΡΙΣΙΜΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ΚΡΙΣΙΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Εκτός από τον υδράργυρο με τον οποίο πειραματίστηκε ο Onnes, υπάρχουν και άλλα μέταλλα με υπεραγώγιμες ιδιότητες. Στον παρακάτω πίνακα δίδονται οι εντάσεις του κρίσιμου μαγνητικού πεδίου και η κρίσιμη θερμοκρασία διαφόρων υπεραγωγών.

Πίνακας 7 Υλικά και κρίσιμη θερμοκρασία Πηγή[12]

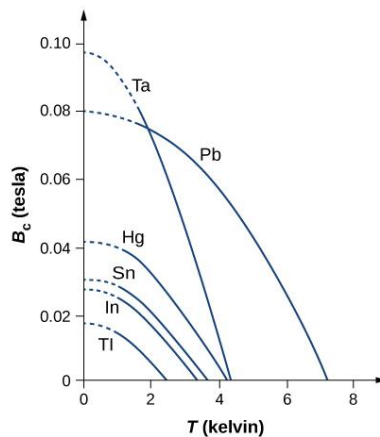
Υλικό	T _c (K)	B _c (0) Tesla*10 ⁻⁴
Γαλλιο	1.1	51
Αλουμίνιο	1.2	105
Ινδιο	3.4	293
Κασσίτερος	3.7	100
Υδράργυρος	4.2	412
Μόλυβδος	7.2	803
Νιόβιο	9.3	1980

Η ένταση του κρίσιμου μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$B_c(T) = B_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

Γενικά, οι υπεραγωγοί τύπου I είναι στοιχεία, όπως το αλουμίνιο και ο υδράργυρος. Είναι τέλεια διαμαγνητικά υλικά κάτω από ένα κρίσιμο πεδίο $B_c(T)$ και εισέρχονται στην κανονική μη υπεραγώγιμη κατάσταση μόλις το μαγνητικό πεδίο ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή. Τα κρίσιμα πεδία των υπεραγωγών τύπου I είναι γενικά αρκετά χαμηλά (πολύ κάτω από ένα Τέσλα). Για το λόγο αυτό, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές που απαιτούν την παραγωγή υψηλών μαγνητικών πεδίων, τα οποία θα κατέστρεφαν την υπεραγώγιμη κατάστασή τους. Η υπεραγωγιμότητα εμφανίζεται για μαγνητικά πεδία και θερμοκρασίες κάτω από τις καμπύλες που φαίνονται.

Σε θερμοκρασία 0 Kelvin υπολογίζουμε γραφικά την μέγιστη τιμή του κρίσιμου μαγνητικού πεδίου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η εξάρτηση του κρίσιμου μαγνητικού πεδίου από την θερμοκρασία για διάφορα υλικά.



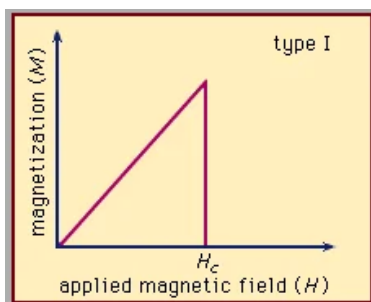
Εικόνα 20 Κρίσιμο μαγνητικό πεδίο σε συνάρτηση με την θερμοκρασία Πηγη[10]

A1.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ MEISSNER

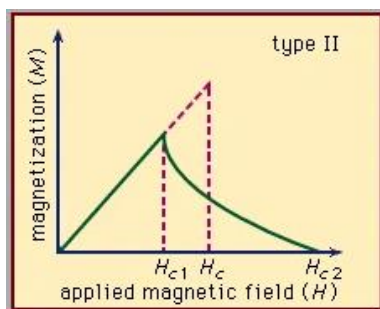
Ένας υπεραγωγός τύπου I με τη μορφή μακριού, λεπτού κυλίνδρου ή ελλειψοειδούς παραμένει υπεραγώγιμος σε σταθερή θερμοκρασία καθώς εφαρμόζεται ένα αξονικά προσανατολισμένο μαγνητικό πεδίο, υπό την προϋπόθεση ότι το εφαρμοζόμενο πεδίο δεν υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή (H_c). Υπό αυτές τις συνθήκες, οι υπεραγωγοί αποκλείουν το μαγνητικό πεδίο από το εσωτερικό τους, όπως θα μπορούσε να προβλεφθεί από τους

νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού και το γεγονός ότι ο υπεραγωγός δεν έχει ηλεκτρική αντίσταση. Ένα διαφορετικό αποτέλεσμα εμφανίζεται εάν το μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται με τον ίδιο τρόπο στον ίδιο τύπο δείγματος σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης και στη συνέχεια διατηρείται σε μια σταθερή τιμή ενώ το δείγμα ψύχεται. Διαπιστώθηκε ότι το δείγμα διώχνει τη μαγνητική ροή καθώς γίνεται υπεραγωγίμο. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται Meissner. Η πλήρης αποβολή της μαγνητικής ροής (ένα πλήρες φαινόμενο Meissner) συμβαίνει με αυτόν τον τρόπο για ορισμένους υπεραγωγούς τύπου I, αλλά μόνο για δείγματα που έχουν την περιγραφόμενη γεωμετρία. Για δείγματα άλλων σχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των κοίλων δομών, μέρος της μαγνητικής ροής μπορεί να παγιδευτεί, προκαλώντας ένα ατελές ή μερικό φαινόμενο Meissner.

Οι υπεραγωγοί τύπου II έχουν διαφορετική μαγνητική συμπεριφορά. Παραδείγματα υλικών αυτού του τύπου είναι το νιόβιο και το βανάδιο (οι μόνοι υπεραγωγοί τύπου II μεταξύ των χημικών στοιχείων) και ορισμένα κράματα και ενώσεις, συμπεριλαμβανομένων των ενώσεων υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας. Καθώς ένα δείγμα αυτού του τύπου, με τη μορφή ενός μακρού, λεπτού κυλίνδρου ή ελλειψοειδούς, εκτίθεται σε ένα μειούμενο μαγνητικό πεδίο που είναι αξονικά προσανατολισμένο με το δείγμα, η αύξηση της μαγνήτισης, αντί να εμφανίζεται ξαφνικά στο κρίσιμο πεδίο (H_c), τίθεται σταδιακά. Ξεκινώντας από το ανώτερο κρίσιμο πεδίο (H_{c2}), ολοκληρώνεται σε ένα χαμηλότερο κρίσιμο πεδίο (H_{c1}).



Εικόνα 21 Για έναν υπεραγωγό τύπου I, η μαγνητική ροή αποβάλλεται, δημιουργώντας μαγνήτιση, οποία αυξάνεται με το μαγνητικό πεδίο μέχρι μια κρίσιμη τιμή H_c . Πηγή [11]



Εικόνα 22 Ένας υπεραγωγός τύπου II έχει 2 κρίσιμα μαγνητικά πεδία (H_{c1} και H_{c2}) Κάτω από H_{c1} συμπεριφέρεται σαν τύπου I και πάνω από H_{c2} συμπεριφέρεται σαν κανονικός αγωγός. Πηγη [11]

Εάν το δείγμα είναι άλλου σχήματος, είναι κοίλο ή είναι ανομοιογενές ή τεντωμένο, κάποια μαγνητική ροή παραμένει παγιδευμένη και κάποια μαγνήτιση του δείγματος παραμένει μετά την πλήρη αφαίρεση του εφαρμοζόμενου πεδίου.

Η αποβολή της μαγνητικής ροής από υπεραγωγούς τύπου I σε πεδία κάτω από το κρίσιμο πεδίο (H_c) ή από υπεραγωγούς τύπου II σε πεδία κάτω από H_{c1} δεν είναι ποτέ τόσο πλήρης όσο αναφέρθηκε σε αυτήν την απλοποιημένη παρουσίαση, επειδή το πεδίο πάντα διεισδύει σε ένα δείγμα για μια μικρή απόσταση, γνωστή ως το βάθος ηλεκτρομαγνητικής διείσδυσης. Οι τιμές του βάθους διείσδυσης για τα υπεραγωγίμα στοιχεία σε χαμηλή θερμοκρασία κυμαίνονται από περίπου 390 έως 1.300 angstroms. Καθώς η θερμοκρασία πλησιάζει την κρίσιμη θερμοκρασία, το βάθος διείσδυσης γίνεται εξαιρετικά μεγάλο.

A 1.4 ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΙ ΤΥΠΟΥ II

Οι υπεραγωγοί που κατασκευάζονται από κράματα ονομάζονται υπεραγωγοί τύπου II. Εκτός του ότι είναι μηχανικά σκληρότεροι από τους υπεραγωγούς Τύπου I, παρουσιάζουν πολύ υψηλότερα κρίσιμα μαγνητικά πεδία. Υπεραγωγοί τύπου II όπως το νιόβιο-τιτάνιο (NbTi) χρησιμοποιούνται στην κατασκευή υπεραγωγίμων μαγνητών υψηλού πεδίου.

Οι υπεραγωγοί τύπου II συνήθως υπάρχουν σε μικτή κατάσταση κανονικών και υπεραγωγίμων περιοχών. Αυτό μερικές φορές ονομάζεται κατάσταση δίνης, επειδή δίνες υπεραγωγίμων ρευμάτων περιβάλλουν νήματα ή πυρήνες από κανονικό υλικό.

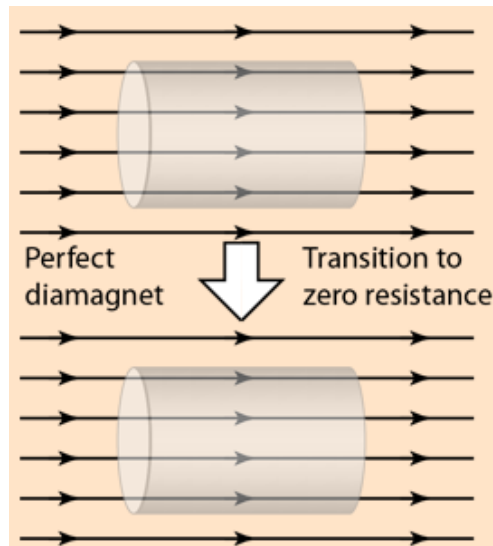
Πίνακας 8 Υλικά κρίσιμη θερμοκρασία και ένταση μαγνητικού πεδίου πηγη [13]

Υλικό	T_c (K)	B_c (T)
NbTi	10	15
PbMoS	1.2	6
V_3Ga	14.8	2.1
NbN	15.7	1.5

V_3Si	16.9	2.35
Nb_3Sn	18.0	24.5
Nb_3Al	18.7	32.4

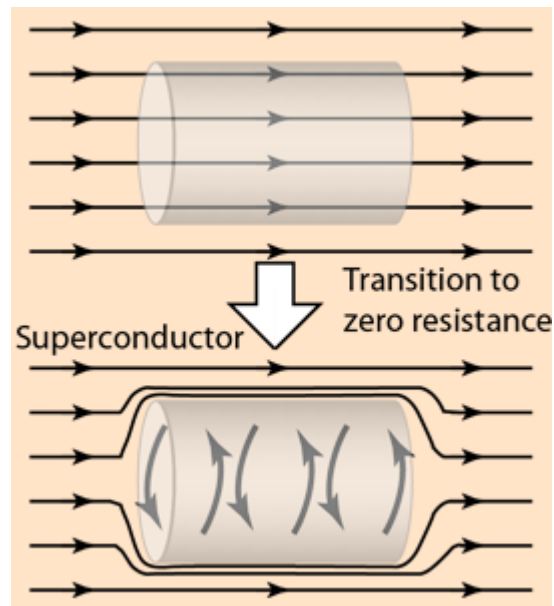
Τέλειο Διαμαγνητικό υλικό.

Εάν ένας αγωγός είχε ήδη ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο και στη συνέχεια ψύχεται σε κατάσταση μηδενικής αντίστασης, καθιστώντας το ένα τέλειο διαμαγνητικό υλικό, το μαγνητικό πεδίο θα αναμενόταν να παραμείνει το ίδιο υπεραγωγός.



Εικόνα 23 μαγνητικές δυναμικές γραμμές κανονικού αγωγού, ύστερα από ψύξη. Πηγή [12]

Παραδόξως η μαγνητική συμπεριφορά ενός υπεραγωγού διαφέρει από τον τέλειο διαμαγνητισμό. Αποκλείεται ενεργά οποιοδήποτε μαγνητικό πεδίο που υπάρχει κατα την αλλαγή φάσης στην υπεραγώγιμη κατάσταση.

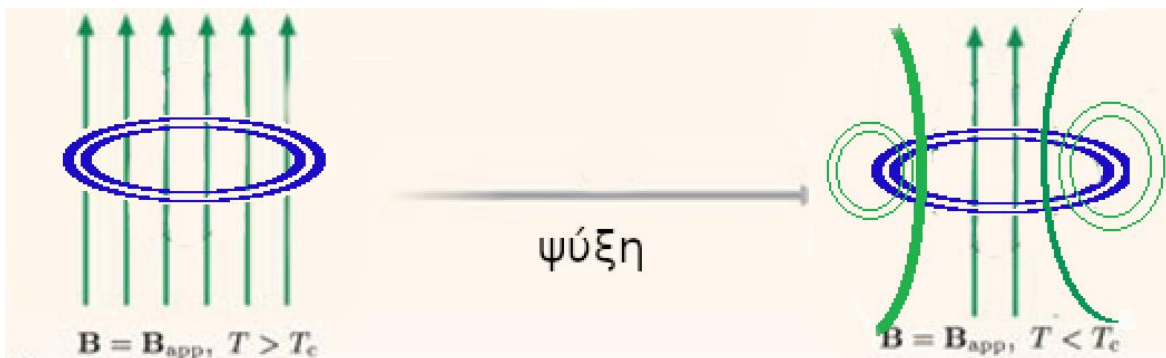


Εικόνα 24 Υπεραγωγός. Μαγνητικές δυναμικές γραμμές κατά την μετάβαση σε μηδενική αντίσταση. Πηγή[12]

A 1.5 ΠΑΡΑΜΕΝΟΝΤΑ ΡΕΥΜΑΤΑ

Το φαινόμενο Meissner έχει αξιοσημείωτες επιπτώσεις. Έστω ότι έχουμε έναν δακτύλιο που είναι υπεραγωγίμος σε θερμοκρασίες κάτω από την κρίσιμη T_c . Εάν η θερμοκρασία είναι αρχικά πάνω από T_c , εφαρμόζουμε ένα σταθερό μαγνητικό πεδίου B με αποτέλεσμα την πλήρη διείσδυση του πεδίου στο υλικό.

Αν η θερμοκρασία μειωθεί τώρα κάτω από το T_c , το εσωτερικό μαγνητικό πεδίο πρέπει εξαφανιστεί. Όμως όταν το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο μηδενιστεί η μαγνητική ροή παγιδεύεται και δεν μεταβάλλεται. Αυτό συνεπάγεται την παρουσία επιφανειακού ρεύματος γύρω από τον δακτύλιο. Το ρεύμα αυτό θα παραμείνει με την προϋπόθεση η αντίσταση να είναι μηδέν.



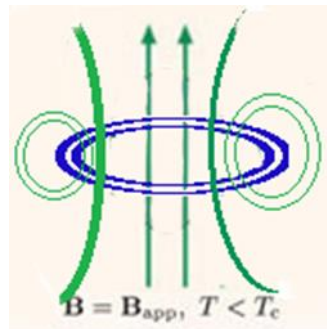
Εικόνα 25 Υπεραγωγίμος δακτύλιος και ψύξη. Πηγή[14]

Στην περίπτωση που ο δακτύλιος πρώτα ψυχθεί σε θερμοκρασίες μικρότερες της κρίσιμης, και στη συνέχεια εφαρμοστεί εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τότε στο εσωτερικό του δακτυλίου η μαγνητική ροή είναι μηδέν.

A 1.6 ΚΒΑΝΤΩΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

Έστω δακτύλιος που είναι υπεραγωγός (θερμοκρασία μικρότερη της κρίσιμης). Μηδενίζοντας το μαγνητικό πεδίο, οι γραμμές του πεδίου που βρίσκονται στο εσωτερικό του δακτυλίου παγιδεύονται και διατηρούνται.

Ο Fritz London εισήγαγε την ποσότητα κβάντο ροής (fluxoid) σύμφωνα με την οποία η ροή είναι κβαντισμένη σε ακέραια πολλαπλάσια του παράγοντα h/e . Το υπερρεύμα που δημιουργείται μεταφέρεται από μονήρη ηλεκτρόνια.



Η παραμένουσα μαγνητική ροή δίνεται από την θεωρία BCS από την σχέση:

$$\Phi = \frac{nh}{2e} = n\Phi_0$$

Φ_0 ονομάζουμε τον στρόβιλο Abrikosov (Abrikosov vortex) και έχει τιμή:

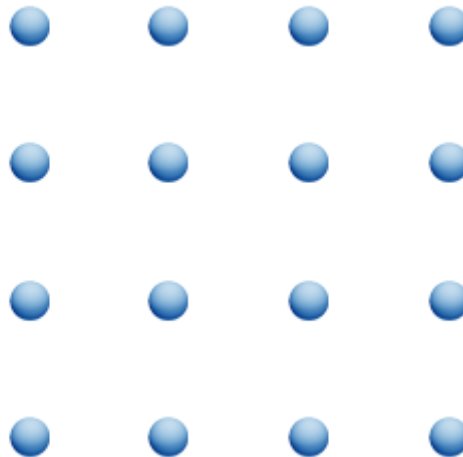
$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2,07 \cdot 10^{-15} Tm^2$$

A 1.7 ΘΕΩΡΙΑ BCS

Οι ιδιότητες των υπεραγωγών Τύπου I μοντελοποιήθηκαν με επιτυχία από τις προσπάθειες των John Bardeen, Leon Cooper και Robert Schrieffer σε αυτό που κοινώς αποκαλείται θεωρία BCS.

- Βασικά σημεία της θεωρίας BCS

1. Μέσα στον υπεραγωγό τα ηλεκτρόνια κινούνται και αλληλοεπιδρούν με το κρυσταλλικό πλέγμα, με αποτέλεσμα αυτό να παραμορφώνεται. Όπως προχωράει το ηλεκτρόνιο το κρυσταλλικό πλέγμα παραμορφώνεται τοπικά πλησίον του ηλεκτρονίου. . Βλέπε και την παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 19 Ζεύγος Cooper. Πηγη [16]

2. Ένα άλλο ηλεκτρόνιο , έλκεται λόγω αυτού του πλησιάσματος των θετικών φορτίων. Αυτό που συμβαίνει είναι η εμφάνιση δυνάμεων ηλεκτρονίου-φωτονίου. Τα ηλεκτρόνια έλκονται μεταξύ τους και σχηματίζουν ένα ζεύγος Cooper. Τα δύο αυτά ηλεκτρόνια είναι οι φορείς του ρεύματος.

Φωνόνιο:

είναι το κβάντο (ελάχιστο διακριτό πακέτο) ενέργειας που μπορεί να μεταφερθεί σε ένα στερεό κρύσταλλο, με μηχανικές ταλαντώσεις των ατόμων του, και αντιστοιχεί στη μηχανική ταλάντωση του ελάχιστου ταλαντωτή του κρυσταλλικού πλέγματος. Για μονοατομικό κρύσταλλο ο ελάχιστος ταλαντωτής είναι το ένα άτομο .

Τα ζεύγη ηλεκτρονίων συμπεριφέρονται διαφορετικά από τα μονήρη ηλεκτρόνια που είναι φερμιόνια και ακολουθούν την απαγορευτική αρχή του Pauli.

Απαγορευτική αρχή Pauli:

Η αρχή αποκλεισμού Pauli είναι η κβαντομηχανική αρχή που δηλώνει ότι δύο ή περισσότερα ίδια φερμιόνια (σωματίδια με μισό ακέραιο σπιν) δεν μπορούν να καταλάβουν την ίδια κβαντική κατάσταση σε ένα κβαντικό σύστημα ταυτόχρονα.

Μποζόνια:

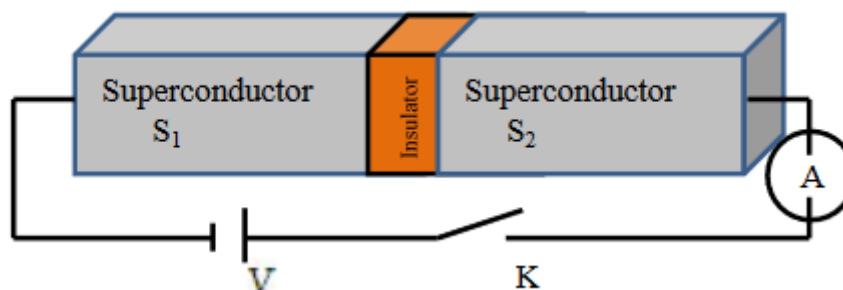
Πρόκειται για υποατομικά σωματίδια που έχουν μηδέν ή ακέραιο spin και ακολουθούν την στατιστική Bose- Einstein. Παράδειγμα στοιχειώδους μποζόνιου είναι το φωτόνιο ενώ σύνθετου μποζόνιου είναι το άτομο Ηλίου.

Οι Bardeen, Cooper και Schrieffer έλαβαν το βραβείο Νόμπελ το 1972 για την ανάπτυξη της θεωρίας της υπεραγωγιμότητας. Η θεωρία BCS όμως ισχύει για κρίσιμες θερμοκρασίες μέχρι 30-40K. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες απαιτείται μεγαλύτερα ποσά ενέργειας για να παραμείνουν σταθερά τα ζευγάρια Cooper. Μετά το 1986 ανακαλύφθηκαν υπεραγωγοί με υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία από τους 40K. Η υψηλότερη T_c σήμερα φτάνει τους 150K. Η θεωρία BCS δεν αρκεί για αυτούς τους υπεραγωγούς.

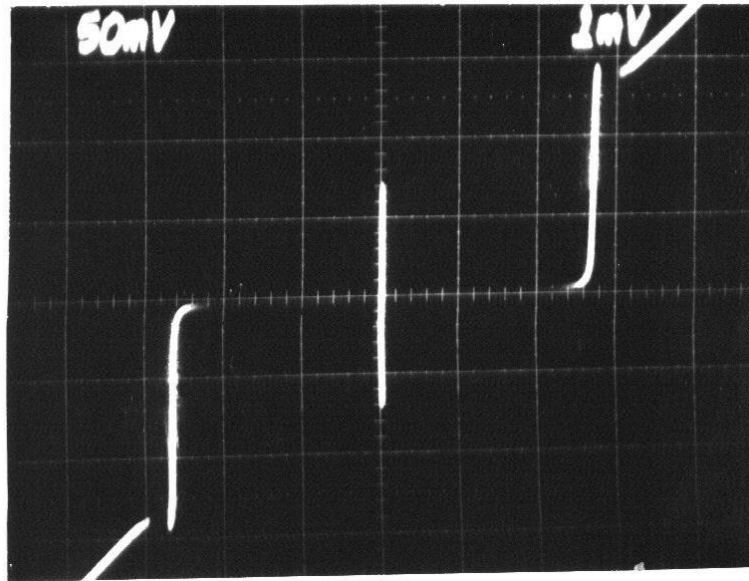
A 1.8 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ JOSEPHSON

Μεταξύ δύο υπεραγωγών υλικών μπορεί να υπάρχει ρεύμα έστω κι αν ανάμεσά τους βρίσκεται ένας μονωτής. Η πρόβλεψή του επιβεβαιώθηκε και 1973 τιμήθηκε με το βραβείο Nobel. Το φαινόμενο αυτό εφαρμόζεται στον ανιχνευτή SQUID, ο οποίος είναι ανιχνευτής μαγνητικών πεδίων με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Οι ανιχνευτές SQUID έχουν μεγάλη ευαισθησία όσον αφορά το μαγνητικό πεδίο και χρησιμοποιούνται τόσο στην ιατρική όσο και στην βιολογία.

Η επαφή Josephson χρησιμοποιείται για την μέτρηση του λόγου \hbar/e . Το φαινόμενο Josephson χρησιμοποιείται για την μέτρηση διαφορών δυναμικού. Χρησιμοποιώντας πολλές επαφές Josephson μαζί σε ένα κύκλωμα, μπορούμε να φτιάξουμε μια συσκευή για να μετράμε μαγνητικά πεδία με μεγάλη ακρίβεια.

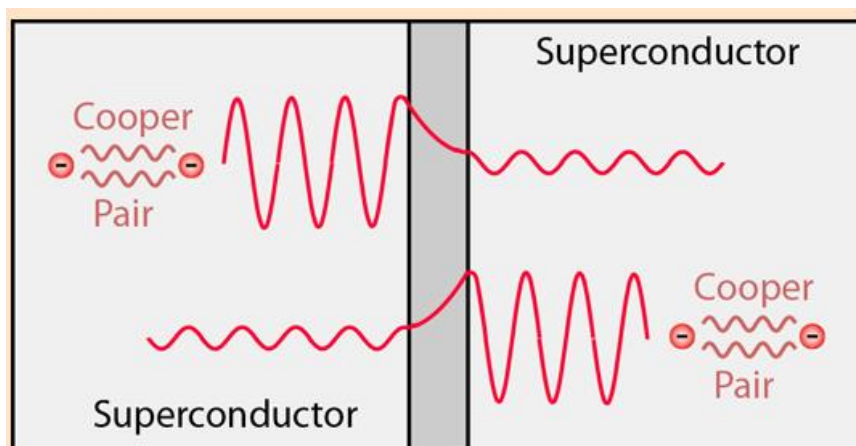


Εικόνα 26 Διάγραμμα Ac επαφής Josephson. Και τα δυο ηλεκτρόδια είναι συνδεδεμένα σε ένα συμβατικό εξωτερικό κύκλωμα. Πηγή [17]



Εικόνα 27 Τυπική γραφική παράσταση έντασης - τάσης επαφής Josephson. Πηγή [18]

Η κυματοσυνάρτηση που περιγράφει ένα ζεύγος ηλεκτρονίων Cooper σε έναν υπεραγωγό είναι μια εκθετική όπως η κυματοσυνάρτηση ελεύθερου σωματιδίου. Στην πραγματικότητα, όλα τα ζεύγη Cooper σε έναν υπεραγωγό μπορούν να περιγραφούν από μία μόνο κυματοσυνάρτηση απουσία ρεύματος. Εάν δύο υπεραγωγοί χωρίζονται από ένα λεπτό μονωτικό στρώμα, τότε μπορεί να συμβεί το φαινόμενο της κβαντομηχανικής σήραγγας για τα ζεύγη Cooper χωρίς να διασπαστούν τα ζεύγη. Έτσι ένα ρεύμα θα ρέει μέσω της διασταύρωσης απουσία εφαρμοζόμενης τάσης (το φαινόμενο DC Josephson).



Εικόνα 28 Φαινόμενο σήραγγας σε επαφή Josephson. Πηγή [20]

A 1.9 SQUIDS

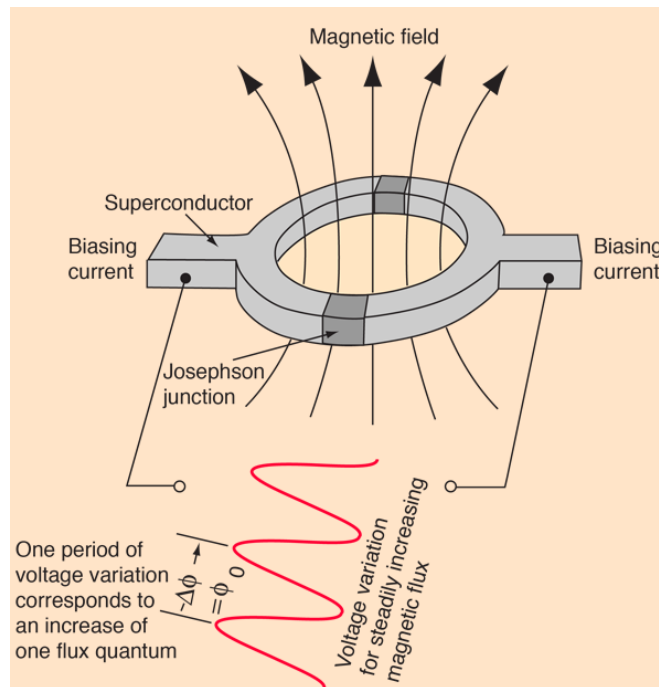
Η συσκευή υπεραγώγιμης κβαντικής παρεμβολής (SQUID) αποτελείται από δύο υπεραγωγούς που χωρίζονται από στρώσεις-μονώσεις και σχηματίζουν δύο συνδέσεις Josephson. Η συσκευή μπορεί να διαμορφωθεί ως μαγνητόμετρο για να ανιχνεύει πολύ μικρά μαγνητικά πεδία -- αρκετά μικρά ώστε να μετρούν τα μαγνητικά πεδία σε ζωντανούς οργανισμούς. Τα SQUID έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση των μαγνητικών πεδίων στον εγκέφαλο των ποντικών για να ελεγχθεί εάν υπάρχει αρκετός μαγνητισμός για να αποδοθεί η πλοηγική τους ικανότητα σε μια εσωτερική πυξίδα.

Το κατώφλι για μια συσκευή SQUID είναι 10^{-14}T ενώ το μαγνητικό πεδίο της καρδιάς έχει ένταση 10^{-10}T και του εγκεφάλου 10^{-13}T .

Η μεγάλη ευαισθησία των συσκευών SQUID σχετίζεται με τη μέτρηση των αλλαγών στο μαγνητικό πεδίο όσον αφορά ένα κβάντο ροής. Μία από τις ανακαλύψεις που σχετίζονται με τις επαφές Josephson ήταν ότι η ροή κβαντίζεται σε μονάδες

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2,07 \cdot 10^{-15}\text{Tm}^2$$

Εάν διατηρείται σταθερό το ρεύμα πόλωσης στη συσκευή SQUID, η μετρούμενη τάση ταλαντώνεται με τις αλλαγές της φάσης στις δύο επαφές, κάτι που εξαρτάται από τη μεταβολή της μαγνητικής ροής. Η καταμέτρηση των ταλαντώσεων μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε την αλλαγή ροής που έχει συμβεί.



Εικόνα 29 SQUID και αλλαγές φάσης. Πηγή [19]

Το μαγνητόμετρο SQUID μπορεί να είναι η πιο ευαίσθητη συσκευή μέτρησης που γνωρίζει ο άνθρωπος, σύμφωνα με τον John Clarke, έναν από τους δημιουργούς της ιδέας. Για να αντιληφθούμε την ευαισθησία του, υπάρχουν τα εξής παραδείγματα:

Μπορεί να μετρήσει μαγνητική ροή της τάξης ενός κβαντού ροής. Ένα κβάντο ροής μπορεί να απεικονιστεί ως η μαγνητική ροή του μαγνητικού πεδίου της Γης ($0,5 \text{ Gauss} = 0,5 \times 10^{-4} \text{ Tesla}$) μέσω ενός μόνο ανθρώπινου ερυθροκυττάρου (διάμετρος περίπου 7 μικρά). Επίσης μπορεί να μετρήσει εξαιρετικά μικροσκοπικά μαγνητικά πεδία. Η ενέργεια που σχετίζεται με τη μικρότερη ανιχνεύσιμη αλλαγή σε ένα δευτερόλεπτο, περίπου 10^{-32} Joules , είναι περίπου ισοδύναμη με το έργο που απαιτείται για να ανυψωθεί ένα μόνο ηλεκτρόνιο 1 χιλιοστό στο βαρυτικό πεδίο της Γης.

Η ευαισθησία του βασικού SQUID μπορεί να αυξηθεί προσαρτώντας το σε ένα επίπεδο πηνίο υπεραγωγίμου σύρματος, όπως το νιόβιο. Ονομάζεται "μετασηματιστής ροής", αυτό αυξάνει το ρεύμα που προκαλείται στην επαφή και επιτρέπει την ανίχνευση μαγνητικών πεδίων τόσο μικρών όσο 10^{-15} Tesla ή ενός femto-Tesla. Αυτή είναι μια ανάλυση περίπου 10-11 φορές μεγαλύτερη από το μαγνητικό πεδίο της Γης. Συγκριτικά, οι οθόνες σέλας στην πολική περιοχή της Γης παράγουν διακυμάνσεις μαγνητικού πεδίου της τάξης του 1% του γήινου πεδίου.

Λαμβάνοντας 1 fT ως την ονομαστική ανάλυση του SQUID, είναι ικανό να ανιχνεύει αλλαγές στα μαγνητικά πεδία στο ανθρώπινο σώμα:

Κατώφλι για SQUID: 1 fT

Μαγνητικό πεδίο καρδιάς: 50.000 fT

Μαγνητικό πεδίο του εγκεφάλου: λίγα fT

Το SQUID έχει χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση και τον εντοπισμό της δραστηριότητας επιληπτικών κρίσεων στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Αναλύσεις της τάξης των 30 fT έχουν επιτευχθεί με τους υπεραγωγούς υψηλής θερμοκρασίας τύπου YBaCO με τους οποίους το SQUID μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασία υγρού αζώτου.

A 1.10 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΙΩΡΗΣΗ ΥΠΕΡΑΓΩΓΩΝ

Η ελεύθερη επίπλευση στερεάς ακόμη και υγρής ύλης ονομάζεται αιώρηση. Το πρόβλημα στην αιώρηση δεν ήταν τόσο πολύ να βρεθούν οι αόρατες δυνάμεις χωρίς επαφή αλλά η επίτευξη της σταθερότητας. Το αιωρούμενο σώμα δεν πρέπει να γλιστράει στο πλάι αλλά θα πρέπει να υπόκειται σε δυνάμεις επαναφοράς προς όλες τις κατευθύνσεις οριζόντια και κάθετα όταν είναι ελαφρώς μετατοπισμένο από τη θέση ισορροπίας του.

Η αναζήτηση συστημάτων που παρουσιάζουν σταθερή αιώρηση δημιουργεί ένα ενδιαφέρον φυσικό πρόβλημα. Το 1842 Ο Earnshaw απέδειξε ότι η σταθερή αιώρηση ή ανάρτηση είναι αδύνατη για ένα σώμα τοποθετημένο σε ένα απωστικό ή ελκτικό πεδίο δύναμης στο οποίο η δύναμη και η απόσταση σχετίζονται με τον αντίστροφο

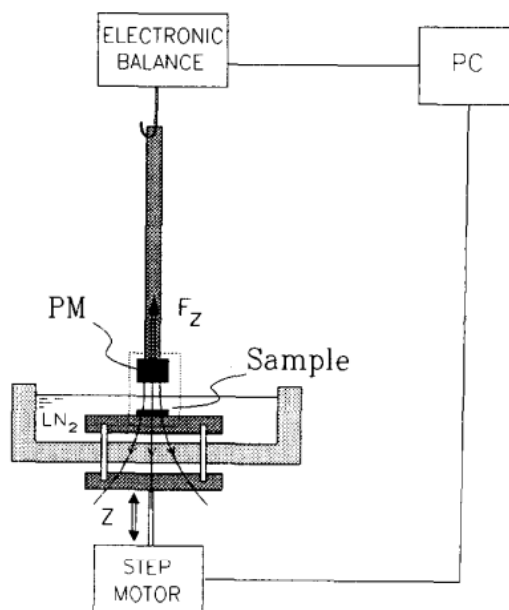
Του τετραγώνου της απόστασης. Από το θεώρημα του Earnshaw θα μπορούσε κανείς να συμπεράνει ότι η αιώρηση δεν είναι δυνατή, αλλά αυτό δεν είναι γενικά αλήθεια.

Η αιώρηση ενός μαγνήτη πάνω από έναν υπεραγωγό μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί με ψύξη του υπεραγωγού βυθίζοντάς τον σε ένα μπολ με υγρό άζωτο και ρίχνοντας ένα μικρό μαγνήτη πάνω στον υπεραγωγό με αποτέλεσμα ο μαγνήτης να σηκώνεται από την επιφάνεια του υπεραγωγού και να αιωρείται. Οι απωστικές δυνάμεις προκαλούν μια πολύ σταθερή αιώρηση η οποία εκτός από ψύξη δεν απαιτεί εισροή ενέργειας. Η υπεραγωγίμη αιώρηση είναι από τα πιο ενδιαφέροντα πειράματα που μπορούν να γίνουν σε μάθημα φυσικής. Από την ανακάλυψη της υπεραγωγιμότητας υψηλής θερμοκρασίας το 1986, μπορούμε πλέον να χρησιμοποιήσουμε υγρό άζωτο για την ψύξη των υπεραγωγών, το οποίο είναι φθηνότερο και ευκολότερο στον χειρισμό παρά το υγρό ήλιο. Λόγω αυτού του γεγονότος, όχι μόνο τα πειράματα αιώρησης μεταφέρονται πιο εύκολα αλλά εμφανίστηκαν και νέες δυνατότητες για τεχνικές εφαρμογές. Μεταξύ αυτών των νέων εφαρμογών είναι τα ρουλεμάν χωρίς τριβή και η υπεραγωγίμη αιώρηση στα τρένα.

Σκοπός του πειράματος είναι η μέτρηση της κατακόρυφης συνιστώσας της δύναμης αιώρησης μεταξύ ενός υπεραγωγού και ενός μόνιμου μαγνήτη σαν συνάρτηση της απόστασης μεταξύ τους. (σχέση 2.5.12). Το πραγματικό πείραμα αφορά την δύναμη αιώρησης μεταξύ μιας λεπτής μεμβράνης YBCO και ενός κυλινδρικού μόνιμου μαγνήτη. Αυτό το πείραμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μαθητές στο λύκειο, όπου ο καθηγητής θα πρέπει να εστιάσει στην υπεραγώγιμη αιώρηση.

Οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη βοήθεια του καθηγητή. Ωστόσο, η ανάλυση των δεδομένων είναι μαθηματικά περίπλοκη, και οι μαθητές στερούνται το απαραίτητο μαθηματικό υπόβαθρο. Σημαντικοί όροι όπως η πυκνότητα ρεύματος δεν τους είναι ακόμη γνωστά. Παρ' όλα αυτά γνωρίζουν για τη δύναμη Lorentz στην Τρίτη λυκείου καθώς και για τα μαγνητικά πεδία. Επομένως, ο καθηγητής θα πρέπει να επικεντρωθεί κυρίως στην παρατήρηση και στην περιγραφή των φαινομένων που αναφέρονται παρακάτω.

- Οι ελκτικές και απωστικές δυνάμεις αιώρησης είναι εύκολα κατανοητές. Σε απλά πειράματα, αυτές οι δυνάμεις γίνονται άμεσα αισθητές.
- Είναι δυνατή η σταθερή και ασταθής αιώρηση σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου ο μαγνήτης ή ο υπεραγωγός μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα γύρω από έναν άξονα. Αυτό το αποτέλεσμα χρησιμοποιείται σε ρουλεμάν αιώρησης.
- Η αιώρηση μπορεί επίσης να συμβεί σε διαφορετικούς τομείς της φυσικής.



Εικόνα 30. Αυτή η κατασκευή χρησιμοποιείται για την μελέτη των κάθετων συνιστωσών των δυνάμεων μεταξύ ενός μόνιμου μαγνήτη (PM) και ενός υπεραγωγίου δίσκου YBCO. Πηγή [23]

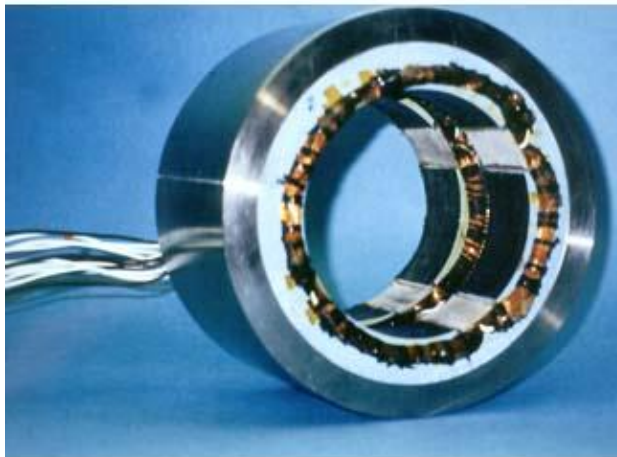
Α 1.11 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΑΙΩΡΗΣΗΣ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΥΠΕΡΑΓΩΓΩΝ

1) ΡΟΥΛΕΜΑΝ ΥΠΕΡΑΓΩΓΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (HTSC)

Τα ρουλεμάν HTSC (High Temperature Super Conductor) είναι απλές συσκευές. Χρησιμοποιούν HTSC ως στάτορα και μόνιμο μαγνήτη PM (Permanent Magnet) για ρότορα. Η άπωση της μαγνητικής δύναμης μεταξύ του στάτορα και του ρότορα προκαλεί τον στάτορα να αιωρείται στον αέρα, όπου μπορεί έτσι να περιστρέφεται ελεύθερα. Εάν ο ρότορας προσπαθήσει να μετακινηθεί από το κέντρο προς τα μέσα σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, μια δύναμη επαναφοράς το επαναφέρει στη θέση του. Αυτό είναι γνωστό ως μαγνητική "ακαμψία" των ρουλεμάν. Τα κύρια οφέλη που αποκομίζονται από τη χρήση υπεραγωγίων ρουλεμάν προέρχονται από το απλό γεγονός ότι ο ρότορας και ο στάτορας δεν βρίσκονται σε άμεση φυσική επαφή. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχει τριβή και εξαλείφεται το πρόβλημα της παραγωγής θερμότητας και της φθοράς. Περαιτέρω δεν υπάρχει ανάγκη για λιπαντικό. Σε πολλά πρακτικά μηχανικά συστήματα που λειτουργούν σε σκληρές συνθήκες, η εύρεση ενός κατάλληλο λιπαντικού μπορεί να είναι δύσκολη. Συχνά το λιπαντικό πρέπει να ψύχεται και να ανακυκλώνεται. Τα υδραυλικά που σχετίζονται με τη μεταφορά του λιπαντικού προς και από την επιφάνεια του ρουλεμάν μπορεί επίσης να προσθέσουν εξτρά μέγεθος και βάρος σε αυτά τα μηχανήματα. Όλα αυτά τα προβλήματα αποφεύγονται χρησιμοποιώντας υπεραγωγία ρουλεμάν.

Η ανακάλυψη των υλικών υπεραγωγών με βάση το οξειδίο του χαλκού επιτρέπει την αιώρηση πάνω από τους 77 K, που είναι η θερμοκρασία βρασμού του υγρού αζώτου. Η αφθονία, το χαμηλό κόστος και η απόδοση του υγρού αζώτου ως κρυογόνο είναι πολύ γνωστά. Η απαίτηση ψύξης των επιφανειών ρουλεμάν στα 77 K δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα για πολλές αεροδιαστημικές εφαρμογές, όπως οι πυραυλοκινητήρες, όπου τα κρυογόνα όπως το υγρό υδρογόνο και το οξυγόνο υπάρχουν ήδη, και σε πολλές περιπτώσεις οι θερμοκρασίες δεν ξεπερνούν τους 77 K. Ενώ, τα συμβατικά ρουλεμάν μπορεί να δυσκολεύονται να λειτουργήσουν τους σε τέτοια εχθρικά περιβάλλοντα. Εφαρμογές που δημιουργούν προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας ανά ώρα όπως οι εργαλειομηχανές υψηλής ταχύτητας, οι άξονες υφασμάτων ή τα συστήματα μεταφοράς τσιπ υπολογιστών θα μπορούσαν επίσης να δικαιολογήσουν το πρόσθετο κόστος της παροχής κρυογονικού περιβάλλοντος για υπεραγωγία ρουλεμάν.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε μεγάλο ενδιαφέρον για τις εφαρμογές παθητικών υπεραγώγιμων ρουλεμάν. Οι στόχοι της ανάπτυξης πιο βιώσιμων ρουλεμάν HTSC είναι η επίτευξη υψηλότερης ακαμψίας και ικανότητα ανύψωσης φορτίου.



Εικόνα 31. Μαγνητικό ρουλεμάν. Πηγη [24]

2) Σεληνιακό τηλεσκόπιο

Το φεγγάρι είναι η καλύτερη τοποθεσία για ένα αστρονομικό παρατηρητήριο. Είναι μια σταθερή πλατφόρμα με σκοτεινό ουρανό, τέλεια όραση και προσφέρει μήκος κύματος που δεν είναι προσβάσιμο από τη γη. Οι μεγάλοι χρόνοι παρατήρησης είναι δυνατό να κυμαίνονται από 14 ημέρες έως για πάντα (στους πόλους). Οι Chen et al. [25] έχουν προτείνει το σχέδιο ενός σεληνιακού τηλεσκοπίου που χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό προηγμένων τεχνικών οπτικής κατασκευής και αιώρησης από υπεραγωγούς οξειδίων. Οι επεξεργασμένοι με τήξη υπεραγωγοί YBCO χρησιμοποιούνται για αιώρηση, οδήγηση και τοποθετήστε τα τηλεσκόπια. Το φεγγάρι έχει επίσης αρκετά πλεονεκτήματα για την αιώρηση από τους υπεραγωγούς. Στο έδαφος της σελήνης εκτιμάται ότι η θερμοκρασία είναι 40 K εάν προστατεύεται μόνιμα από το ηλιακό φως. Αυτή η θερμοκρασία είναι αρκετά χαμηλή ώστε οι ενώσεις YBCO να είναι υπεραγώγιμες. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι η βαρύτητα στο φεγγάρι είναι επτά φορές μικρότερη από αυτή στη γη. Αυτό σημαίνει ότι ένα αντικείμενο επτά φορές βαρύτερο μπορεί να ανυψωθεί στο φεγγάρι.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της διπλωματικής είναι η εμπέδωση του φαινομένου της υπεραγωγιμότητας με τη χρήση τεχνολογιών πληροφορικής και εικονικών μέσων. Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής των περιγραφόμενων εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων στη δευτεροβάθμια εκπαίδευση (Εσπερινό ΕΠΑΛ Γιαννιτσών) οι μαθητές έδειξαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την πραγματοποίηση των εικονικών πειραμάτων. Ακόμη και μαθητές τους οποίους δεν ενδιέφερε ιδιαίτερα το μάθημα της φυσικής έδειξαν ζωηρό ενδιαφέρον για την πραγματοποίηση των εικονικών πειραμάτων. Χρησιμοποιώντας την περιέργεια των μαθητών για την εφαρμογή των εικονικών πειραμάτων θα μπορούσαμε πιο εύκολα να εξηγήσουμε το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας. Είναι σημαντική η ενασχόληση των παιδιών σε εκπαιδευτικές δραστηριότητες που αφορούν σύγχρονα επιστημονικά πεδία. ο τομέας της υπεραγωγιμότητας είναι ένας πολλά υποσχόμενος τομέας που εξελίσσεται διαρκώς και μπορεί να προσφέρει πολλά στην καθημερινότητα των ανθρώπων. Η παρουσίαση στην τάξη σύγχρονων επιστημονικών πεδίων όπως της υπεραγωγιμότητας πάσχει από τον ακριβή εξοπλισμό που χρειάζεται αλλά υπάρχει λύση μέσω εφαρμογών προσομοίωσης μέσω υπολογιστή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Απόδειξη συνισταμένης Ηλεκτρικής δύναμης μεταξύ ηλεκτρικών δίπολων (παράγραφος 2.5.2)

$$\sum F = \frac{Kq^2}{(R-d)^2} + \frac{Kq^2}{(R+d)^2} - \frac{2Kq^2}{R^2}$$

$$\sum F = \frac{Kq^2 \cdot (R+d)^2 \cdot R^2 + Kq^2 \cdot (R-d)^2 \cdot R^2 - 2Kq^2 \cdot (R-d)^2 \cdot (R+d)^2}{(R-d)^2 \cdot (R+d)^2 \cdot R^2}$$

$$\sum F = \frac{Kq(R^2 + 2dR + d^2) \cdot qR^2 + (R^2 - 2dR + d^2) \cdot qR^2 - 2q \cdot (R-d)^2 \cdot (R+d)^2}{(R-d)^2 \cdot (R+d)^2}$$

$$\sum F = \frac{Kq qR^4 + q2dR^3 + qd^2R^2 + qR^4 - q2dR^3 + qd^2R^2 - 2q \cdot (R-d)^2 \cdot (R+d)^2}{(R-d)^2 \cdot (R+d)^2}$$

$$\sum F = \frac{Kq 2qR^4 + 2qd^2R^2 - 2q \cdot (R-d)^2 \cdot (R+d)^2}{(R-d)^2 \cdot (R+d)^2}$$

$$\sum F = \frac{Kq 2qR^4 + 2qd^2R^2 - 2q \cdot (R^2 - 2dR + d^2) \cdot (R^2 + 2dR + d^2)}{(R-d)^2 \cdot (R+d)^2}$$

$$\sum F = \frac{Kq 2qR^4 + 2qd^2R^2 - 2R^4 - 4qdR^3 - 2qd^2R^2 + 4qdR^3 + 8qd^2R^2 + 4qdR^3 - 2qd^2R^2 + 4qdR^3 - 2qd^4}{4(R-d)^2 \cdot (R+d)^2}$$

Αγνοώ τον όρο qd^4 γιατί $R \gg d$ και έχω:

$$\sum F = \frac{6Kq^2d^2}{R^2}$$

Επειδή $p=qd$ (διπολική ροπή) :

$$\sum F = \frac{6Kp^2}{R^2}$$

Επίσης ο τύπος για το ύψος αιώρησης (παράγραφος 2.5.2) προκύπτει από:

$$F_{\mu\alpha\gamma\nu} - F - W = 0$$

$$\frac{6K_{\mu\alpha\gamma\nu}\mu^2}{R^4} - F - W = 0$$

$$\frac{6K_{\mu\alpha\gamma\nu}\mu^2}{(2h)^4} - F - W = 0$$

$$\frac{3K_{\mu\alpha\gamma\nu}\mu^2}{8h^4} = F + W$$

$$h^4 = \frac{3K_{\mu\alpha\gamma\nu}\mu^2}{8(F + W)}$$

$$h = \sqrt[4]{\frac{3K_{\mu\alpha\gamma\nu} \cdot \mu^2}{8(F + mg)}} \quad (2.5.12)$$

Πηγές

- [1] A.G. Shepelev The Discovery of Type II Superconductors (Shubnikov Phase) National Science Center «Kharkov Institute of Physics and Technology» Ukraine
- [2] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Yamanashi_Maglev_Test_Track6.jpg
- [3] <https://open.ocolearnok.org/physicalscience/chapter/resistance-and-resistors/>
- [4] <https://thiscondensedlife.wordpress.com/2020/06/04/meissner-effect-as-amplified-atomic-diamagnetism/>
- [5] <https://physics.duke.edu/sites/physics.duke.edu/files/documents/LondonBrothers2011.pdf>
- [6] Werner Buckel, Reinhold Kleiner, Superconductivity, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN: 3-527-40349-3
- [7] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Superconductor_interactions_with_magnetic_field.png
- [8] A.C. Rose-Innes E.H. Rhoderick , introduction to superconductivity, Pergamon Press ISBN-13: 978-0124054295
- [9] Georg Zechner, Kristijan Luka Mletschnig, Wolfgang Lang, Meirzhan Dosmailov, Marius Aurel Bodea and Johannes David Pedarnig, Unconventional critical state in YBa₂Cu₃O_{7-δ} thin films with a vortex-pin lattice fabricated by masked He⁺ ion beam irradiation. <https://nanocohybri.eu/unconventional-critical-state-in-yba2cu3o7-%CE%B4-thin-films-with-a-vortex-pin-lattice-fabricated-by-masked-he-ion-beam-irradiation/>
- [10] <https://opentextbc.ca/universityphysicsv3openstax/chapter/superconductivity/>
- [11] Encyclopedia Britannica
- [12] Rohlf, James William, Modern Physics from a to Z0, Wiley 1994
- [13] Blatt, Frank J., Modern Physics, McGraw-Hill, 1992
- [14] https://www.open.edu/openlearn/mod/oucontent/view.php?id=2685&extra=thumbnail_figure_idm295

- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Fermi_level
- [16] <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16057987>
- [17] H.M.A.R. MARUF 1, *, M.R. ISLAM 2 AND F.-U.-Z. CHOWDHUR Bangladesh Journal of Physics, 23 & 24, 105-113, 2018
- [18] https://en.wikipedia.org/wiki/Josephson_effect#/media/File:I_V_characteristics_of_Josephson_Junction.JPG
- [19] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/Squid.html>
- [20] Αλεξανδρόπουλος Ευάγγελος, Διπλωματική εργασία στο ανοικτό Πανεπιστήμιο, Επιβλέπων καθηγητής Πολάτογλου Χαρίτων, 2014
- [21] https://en.wikipedia.org/wiki/Josephson_effect#/media/File:I_V_characteristics_of_Josephson_Junction.JPG
- [22] Measurement of levitation forces of high- Tc superconductors DOI: 10.1088/0031-9120/45/1/004 Michael Rudolf Koblichka U. Hartmann
- [23] The vertical magnetic force and stiffness between a cylindrical magnet and a high-T, superconductor Physica C 234 (1994) 108-114 Anjali B. Riise, Tom H. Johansen, Harald Bratsberg
- [24] https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_bearing#/media/File:Magneticbearings.jpg
- [25] P.C. Chen, R.J. Oliversen, and H. Hojaji, Proceedings of the 1992 TCSUH Workshop, Houston, Texas, Feb.1992, eds. C.W. Chu, W.K. Chu, P.H. Hor and K. Salama, World Scientific, Singapore, pp. 513-524
- [26] PHYWE SYSTEME GMBH Laboratory Experiments Physics(2005), Superconductivity / Transition temperature, PHYWE series of publications : Göttingen, German
- [27] <http://lamp.tu-graz.ac.at/~hadley/sem/4pt/4pt.php>

Βιβλιογραφία

- [1] Armen Gulian - Shortcut to Superconductivity_ Superconducting Electronics via COMSOL Modeling-Springer International Publishing_Springer (2020)
- [2] Clarke, John, "SQUIDS", Scientific American 271, #2, August 1994, p 46.
- [3] Diefenderfer, James and Holton, Brian, Principles of Electronic Instrumentation, 2nd Ed. ,Saunders College Publ., 1994. Diefenderfer, James, Principles of Electronic Instrumentation, 2nd Ed. , W.B. Saunders, 1979.
- [5] Fishbane, Paul M., Gasiorowicz, Stephen, and Thornton, Stephen, Physics for Scientists and Engineers, 2nd Ed extended, Prentice Hall, 1996
- [6] Floyd, Thomas L., Electric Circuit Fundamentals, 2nd Ed., Merrill, 1991
- [7] Floyd, Thomas L., Electronic Devices 3rd Ed., Merrill, 1992
- [8] Giovanni Moruzzi - Essential Python for the Physicist-Springer (2020)
- [9] Ginzburg V.L, Andryushin E.A.Superconductivity, World Scientific Publishing Company (2004)
- [10] Halliday & Resnick, Fundamentals of Physics, 3E, Wiley 1988
- [11] Halliday, Resnick, Walker, Fundamentals of Physics 4th Ed, Essay 8, Superconductivity (Lindenfeld).
- [12] Horowitz, Paul and Hill, Winfred,The Art of Electronics, Cambridge University Press, 1980, 2nd Ed 1989
- [13] Jones, Edwin R (Rudy) and Childers, Richard L, Contemporary College Physics, Addison-Wesley, 1990. A well-illustrated non-calculus introductory physics text.
- [14] Kruchinin Sergei- Modern Aspects of Superconductivity_ Theory of Superconductivity-World Scientific Publishing Company (2021)
- [15] Kittel, Charles, Introduction to Solid State Physics, 7th Ed., Wiley, (1996).
- [16] Kittel, Charles and Kroemer, Herbert, Thermal Physics, 2nd Ed., W. H. Freeman, 1980.
- [17] Matsushita Teruo- Electricity and Magnetism New Formulation by Introduction of Superconductivity-Springer Nature (2021)

- [18] Ohanian, Hans, Physics, 2E Expanded, WW Norton 1989
- [19] Paolo Mele, Kosmas Prassides, Chiara Tarantini, Anna Palau, Petre Badica, Alok K. Jha, Tamio Endo - Superconductivity_ From Materials Science to Practical Applications- Springer International Publishing
- [20] R. G. Sharma – Superconductivity Basics and Applications to Magnets-Springer Nature
- [21] Reinhold Kleiner, Werner Buckel, Rudolf Huebener - Superconductivity_ An Introduction-Wiley-VCH (2016)
- [22] Rose-Innes A.C. Rhoderick E.H., Introduction to superconductivity, Введение в физику сверхпроводимости-Мир (1972)
- [23] James William Rohlf, Modern Physics from a to Z0, Wiley 1994
- [24] Tinkham Michael, Introduction to superconductivity, McCraw Hill 1996
- [25] Thornton, Steven T. and Rex, Andrew, Modern Physics for Scientists and Engineers, Saunders College Publishing, 1993.
- [26] Werner Buckel, Reinhold Kleiner, Superconductivity Fundamentals and Applications , Wiley 2004
- [27] Werner Buckel, Prof. Dr. Reinhold Kleiner(auth.) - Supraleitung_ Grundlagen und Anwendungen, 7.Auflage-Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2013)
- [28] Moon F C 1994 Superconducting Levitation (New York: Wiley)
- [29] Brandt E H 1989 Levitation in physics Science 243 349
- [30] Riise A, Johansen T H and Bratsberg H 1994 The vertical force and stiffness between a cylindrical magnet and a high-Tc superconductor Physica C 234 108
- [31] Riise A, Johansen T H, Bratsberg H, Koblischka M R and Shen Y Q 1999 Levitation force from high-Tc superconducting thin-film disks Phys. Rev. B 60 9855

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.