

**Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας  
Ινστιτούτο Ηλεκτρονικής Δομής και Λείζερ**

**Εργαστήρια Λείζερ και Μοντέρνας Οπτικής (ΕΛΜΟ)**

**Εργαστηριακή άσκηση  
Μετρητικές Τεχνικές Κβαντικών Υλικών**

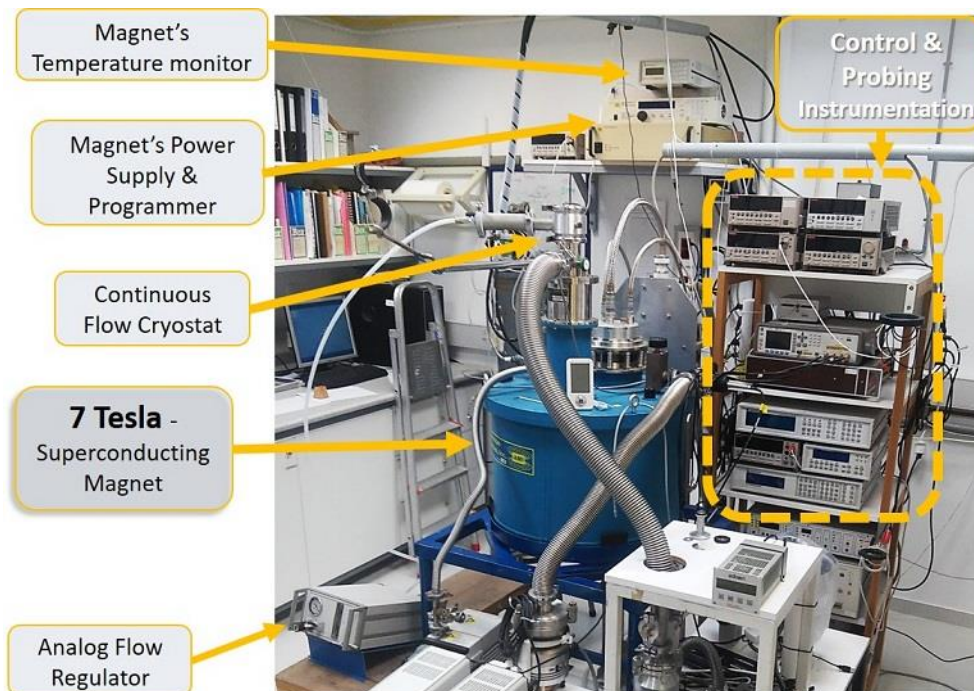
**Αλέξανδρος Λάππας**

## **Εισαγωγή.**

Οι περισσότεροι από εμάς έχουν κάποια εξοικείωση με τις «κλασικές» θεωρίες φυσικής, όπως αυτές που αφορούν τη βαρύτητα, την κίνηση και την ενέργεια, οι οποίες φαινομενικά είναι υπεύθυνες για όλα όσα κατανοούμε συνήθως για τη φύση. Ωστόσο, αυτές οι έννοιες ισχύουν μόνο για συμπεριφορά σε μακροσκοπικό ή «ορατό» επίπεδο. Μετά την αντίληψη αυτή, στις αρχές του 20ου αιώνα, οι επιστήμονες άρχισαν να εξερευνούν τη φυσική σε νέα κλίμακα. Η κβαντομηχανική περιγράφει τη φυσική στο υποατομικό επίπεδο - τη συμπεριφορά και τους μηχανισμούς των ατόμων και των συστατικών τους. Επειδή τα υποατομικά σωματίδια αποτελούν άτομα και τα άτομα ουσιαστικά αποτελούν τα πάντα στη φύση, η κβαντική φυσική βασίζεται στην «αληθινή» συμπεριφορά της φύσης!

Με την παρούσα άσκηση εισαγάγουμε κάποιες από τις μετρητικές δυνατότητες ενός πειραματικού σταθμού ανεπτυγμένου στο ΙΗΔΛ-ΙΤΕ (Σχήμα 1), με σκοπό την προσαρμογή διαγνωστικών μεθόδων στις απαιτήσεις για τη μελέτη και κατανόηση των ιδιοτήτων κβαντικών υλικών. [1]

Από τις διαφορετικές οικογένειες υποψηφίων υλικών, διαλέγουμε την περίπτωση των υπεραγωγών. Εξωτικά υλικά, με σημαντικές εφαρμογές στην ηλεκτρονική, [2] αφού κάτω από ορισμένες συνθήκες, χάνουν τελείως την ηλεκτρική τους αντίσταση, επιτρέποντας τη μεταφορά ρεύματος χωρίς καμία απώλεια ενέργειας. Οι τελευταίες παίρνουν συνήθως τη μορφή θερμικών φορτίων, που δημιουργούνται λόγω της σκέδασης των ηλεκτρικών φορέων (ηλεκτρονίων) κατά την κίνηση τους σε ένα αγώγιμο μέσο. Επομένως με τους υπεραγωγούς ως λειτουργικά στοιχεία, π.χ. ενός δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, είναι δυνατή σημαντικότερη εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων, με αξιόλογες, θετικές επιπτώσεις για το περιβάλλον.



**Σχήμα 1.** Πειραματικός σταθμός μετρήσεων φυσικών ιδιοτήτων κβαντικών υλικών ([IΗΔΔ-ΙΤΕ](#)).

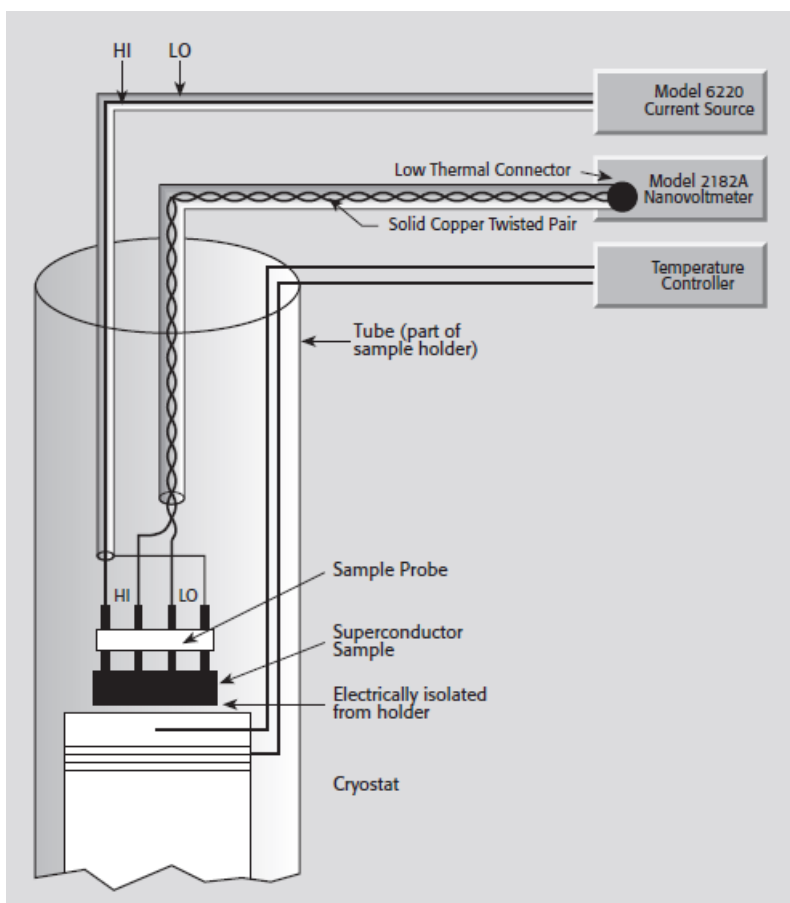
### Μετρήσιμες φυσικές ποσότητες.

Σε χαμηλές θερμοκρασίες, ορισμένα μέταλλα και κράματα χάνουν την αντίστασή τους στο ηλεκτρικό ρεύμα και γίνονται υπεραγωγοί. [3] Η κρίσιμη θερμοκρασία μετάβασης ενός υπεραγωγού ( $T_c$ ) και η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος ( $I_c$ ) είναι δύο παράμετροι που συνήθως επιζητούνται, γιατί αποτελούν μέρος των χαρακτηριστικών εκείνων που ρυθμίζουν την τεχνολογική τους προοπτική.

Η υπεραγωγίμη θερμοκρασία μετάβασης ( $T_c$ ) είναι το σημείο στο οποίο η αντίσταση ενός υλικού αλλάζει από μια πεπερασμένη τιμή στο μηδέν. Η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος είναι η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος ( $I_c$ ) που μπορεί να μεταφέρει ένα υλικό κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και εφαρμοσμένου εξωτερικά μαγνητικού πεδίου, πριν επανέλθει στην αγώγιμη (κανονική) του κατάσταση. Όσο υψηλότερες είναι αυτές οι δύο παράμετροι, τόσο καλύτερος είναι ο υπεραγωγός. Ο προσδιορισμός των ποσοτήτων αυτών απαιτεί μετρήσεις πολύ μικρής αντίστασης. Χρειάζεται λοιπόν απαραίτητως, κατάλληλης διακριτικής ικανότητας όργανα, όπως ένα νανοβολτόμετρο και μια προγραμματιζόμενη πηγή ρεύματος για μετρήσεις ακριβείας.

### Περιγραφή της Πειραματικής διάταξης.

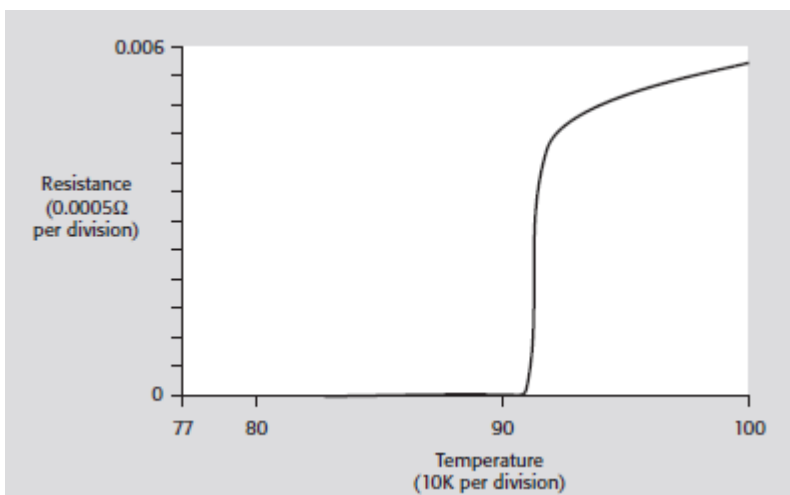
Το Σχήμα 2 δείχνει ένα τυπικό σύστημα δοκιμής μέτρησης αντίστασης υπεραγωγών. Σημαντικό λειτουργικό στοιχείο της όλης διάταξης είναι ο κρυοστάτης, συνεχούς ροή κρυογονικού ρευστού (π.χ. υγρό άζωτο ή ήλιο), ο οποίος παρέχει, μέσω ψηφιακού ελέγχου, ακριβή ρύθμιση της θερμοκρασίας ( $T = 4.5 - 325 \text{ K}$ ) του προς μελέτη υλικού. Χρησιμοποιώντας το συνδυασμό ενός νανοβολτόμετρου (2182A) και μίας πηγής ρεύματος (6220) είναι εφικτή η μέτρηση της αντίστασης σε κάθε θερμοκρασία (Σχήμα 3). Τα καλώδια ανίχνευσης της τάσης είναι κατασκευασμένα από υλικό με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (Seebeck) σε σχέση με το δείγμα. Η ευαισθησία του νανοβολτόμετρου είναι ζωτικής σημασίας στη λήψη μετρήσεων ακριβείας επειδή η εφαρμογή απαιτεί διάγνωση εξαιρετικά χαμηλών τάσεων.



**Σχήμα 2.** Σχηματική αναπαράσταση τυπικής πειραματικής διάταξης, [4] με δυνατότητα ελέγχου της θερμοκρασίας αλλά και του επιβαλλόμενου εξωτερικά μαγνητικού πεδίου.

Για μετρήσεις της θερμοκρασίας μετάβασης ( $T_c$ ), η πηγή ρεύματος πρέπει να διατηρείται κάτω από το κρίσιμο ρεύμα ( $I_c$ ) του δείγματος. Εάν το ρεύμα γίνει πολύ υψηλό, η απορροφούμενη ισχύς (ενέργεια) μπορεί να προκαλέσει ζημιά στο δείγμα και τον κρυοστάτη. Όπως δείχνεται στο σχηματικό (Σχήμα 2), είναι απαραίτητο να γίνει μια μέτρηση τεσσάρων σημείων («συρμάτων»  $I-V-V-I$ ). Αυτή η τεχνική εξαλείφει τη συνεισφορά της αντίστασης από τα καλώδια, οδηγώντας ένα ρεύμα μέσω του δείγματος από το ένα ζεύγος καλωδίων ( $I-I$ ) ενώ μετράτε η πτώση τάσης με ένα δεύτερο ζεύγος καλωδίων ( $V-V$ , HI - LO). [4]

Επιπλέον, εφαρμόζεται η μέθοδος «Delta». Αυτή η τεχνοτροπία μέτρησης είναι απαραίτητη αφού σκοπεύει στην εξάλειψη των επιπτώσεων λόγω θερμοηλεκτρικού φαινομένου (δηλ. συνεισφορές EMF στα σύρματα), το οποίο ενδέχεται να επηρεάσει την ακρίβεια της μέτρησης. Η μέθοδος Delta συνίσταται στη μέτρηση της πτώσης τάσης κατά μήκος του υλικού με το ρεύμα σε μία κατεύθυνση, ενώ στη συνέχεια αντιστρέφεται η πολικότητα της πηγής ρεύματος και μια δεύτερη μέτρηση τάσης καταγράφεται. Συνήθως χρησιμοποιούνται τρεις μετρήσεις τάσεις για τον υπολογισμό κάθε τιμής αντίστασης. [4]



**Σχήμα 3.** Σχηματική αναπαράσταση της μέτρησης της αντίστασης σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας για ένα υπεραγωγό.

Το νανοβολτόμετρο και η πηγή ρεύματος συνεργάζονται μέσω ψηφιακού ελέγχου για την αυτόματη εφαρμογή της μεθόδου Delta. Σε αυτήν τη λειτουργία, η πηγή εναλλάσσει

αυτόματα την πολικότητα της και στη συνέχεια ενεργοποιεί το νανοβολτόμετρο για να γίνει η ανάγνωση σε κάθε πολικότητα. Κατόπιν, υπολογίζεται στην πηγή η σταθμιζόμενη τιμή αντίστασης και γίνεται η καταγραφή των δεδομένων σε κάθε θερμοκρασία (Σχήμα 3) μέσω του περιβάλλοντος, ειδικού λογισμικού του H/Y.

### **Χαρακτηρισμός ενός υπεραγωγού.**

Θα μελετήσετε ένα μέλος της οικογένειας των υπεραγωγών υψηλών κρίσιμων θερμοκρασιών, όπου η πλήρης εξήγηση του μηχανισμού και η φύση των ηλεκτρικών φορέων που οδηγεί στη συμπεριφορά τους, αποτελεί ακόμα και σήμερα αντικείμενο εντατικής έρευνας. [5, 6] Ένα από τα εντυπωσιακότερα μέλη αυτής της ομάδας είναι το οξειδίο του χαλκού, με την περίπλοκη χημική δομή  $YB_2Cu_3O_{7-\delta}$ . [7] Σημειώνουμε ότι το  $YB_2Cu_3O_7$  γίνεται υπεραγωγός κάτω από την πολύ υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία των  $-180^\circ\text{C}$  ( $T_c = 93\text{ K}$ ). Είναι λοιπόν μία πρωτοπόρα ένωση, αφού η ανακάλυψή της επιτρέπει πλέον υπεραγωγιμότητα σε θερμοκρασίες πάνω από το σημείο βρασμού του υγρού αζώτου (77 K), και ως εκ τούτου οδηγεί σε οικονομικά προσβάσιμες τεχνολογικές εφαρμογές.

Κάνοντας χρήση της προαναφερθείσας πειραματικής διάταξης (Σχήμα 1) θα μετρήσετε τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης [ $\rho = (V/I) (S/L)$ ] του  $YB_2Cu_3O_7$  σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας, αλλά και κάτω από συνθήκες διαφορετικής εξωτερικής διέγερσης και ειδικά κατά τη μεταβολή της έντασης:

- (i) του εξωτερικά εφαρμοσμένου μαγνητικού πεδίου (υπό σταθερό ρεύμα,  $I$ )
- (ii) του ηλεκτρικού ρεύματος (υπό σταθερό μαγνητικό πεδίο,  $H$ )

Η παραμετροποίηση της κρίσιμης θερμοκρασίας μετάβασης ( $T_c$ ) από το μέγεθος των παραγόντων [ $I$ ,  $H$ ] είναι υπεύθυνη και για το εύρος των τεχνολογικών εφαρμογών αυτών των κβαντικών υλικών. Θα συζητήσετε πως οι μεταβολές στο [ $I$  ή  $H$ ] επηρεάζουν σε μικροσκοπικό επίπεδο τους πιθανούς φυσικούς μηχανισμούς των υλικών και κατά συνέπεια ρυθμίζουν τη μετάβαση στην υπεραγωγίμη κατάσταση.

## Βιβλιογραφία.

- [1] “Quantum Materials for Energy Relevant Technology”, *DOE - Office of Science*, Basic Research Needs Workshop, 8-10 February 2016.
- [2] “Superconductor Electronics and Power Applications”, T. van Duzer, *Proceedings of the IEEE* **100**, 2993-2995 (2012).
- [3] «Μαγνητικά Υλικά», Ι. Παγιωτόπουλος, Εκδόσεις Α.Γ. ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΟΣ, Αθήνα 2010.
- [4] “Low Level Measurements Handbook”, KEITHLEY Instruments, Inc., 6<sup>th</sup> Edition.
- [5] “Finally, the First Room-Temperature Superconductor”, *The New York Times*, 14 October 2020.
- [6] “Room-Temperature Superconductivity in a Carbonaceous Sulfur Hydride”, *Nature* **586**, 373-377 (2020).
- [7] “Single-phase 60-K Superconductor in Annealed  $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $0.3 < \delta < 0.4$ ) with Correlated Oxygen Vacancies in the Cu-O Chains”, *Phys. Rev. B* **36**, 5719-5722 (1987).