



«Σχολή Θετικών Σπουδών και Τεχνολογίας»
«Μεταπτυχιακή Εξειδίκευση Καθηγητών των Φυσικών
Επιστημών»

Διπλωματική Εργασία

Υπεραγωγιμότητα

Καλαμαράκης Δημήτριος

Επιβλέπων καθηγητής: Πολάτογλου Χαρίτων

Πάτρα, Φεβρουάριος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («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

Καλαμαράκης Δημήτριος

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Πολάτογλου Χαρίτων

«Ιδιότητα & Ίδρυμα Υπαγωγής»

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Λέισος Αντώνιος

«Ιδιότητα & Ίδρυμα Υπαγωγής»

Πάτρα, Φεβρουάριος 2026

«Στους γονείς μου, Ευτύχιο και Μιχαλίτσα»

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	4
Abstract	5
1. Εισαγωγή.....	6
1.1 Σκοπός και στόχοι της εργασίας	6
1.2 Δομή και οργάνωση της εργασίας.....	7
1.3 Βασικές έννοιες (αγωγιμότητα, αντίσταση, μέταλλα – μονωτές – ημιαγωγοί) ...	8
2. Ιστορική ανασκόπηση της υπεραγωγιμότητας.....	11
2.1 Η ανακάλυψη της υπεραγωγιμότητας (Onnes, 1911)	11
2.2 Βασικά πειράματα και ορισμός του φαινομένου	12
2.3 Εξέλιξη των θεωριών μέχρι τη θεωρία BCS	13
2.4 Ανακάλυψη υπεραγώγιμων υλικών υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας	14
2.5 Σύγχρονες τάσεις στην έρευνα της υπεραγωγιμότητας (σε γενικό επίπεδο)	15
3. Βασικές αρχές υπεραγωγιμότητας	16
3.1 Μηδενική ηλεκτρική αντίσταση	16
3.2 Μαγνητικές ιδιότητες των υπεραγωγών	17
3.3 Το φαινόμενο Meissner.....	18
3.4 Διείσδυση μαγνητικού πεδίου (βάθος διείσδυσης London).....	20
3.5 Κρίσιμη θερμοκρασία (T_c)	21
3.6 Κρίσιμο μαγνητικό πεδίο (H_c , H_{c1} , H_{c2}).....	22
3.7 Μαγνήτιση υπεραγώγιμων δειγμάτων	23
3.8 Ειδική θερμότητα υπεραγώγιμων υλικών	24
4. Τύποι υπεραγωγών	26
4.1 Γενική ταξινόμηση υπεραγώγιμων υλικών	26
4.2 Υπεραγωγοί τύπου I.....	26
4.2.1 Ορισμός και χαρακτηριστικά	26
4.2.2 Μαγνητικές ιδιότητες και κρίσιμο πεδίο.....	27
4.2.3 Παραδείγματα υλικών τύπου I.....	27
4.3 Υπεραγωγοί τύπου II.....	28
4.3.1 Ορισμός και χαρακτηριστικά	28
4.3.2 Κρίσιμα πεδία H_{c1} και H_{c2} – μικτή κατάσταση	28
4.3.3 Διείσδυση ροής και μαγνητικές ροικές δίνες (vortices).....	29
4.3.4 Παραδείγματα υλικών τύπου II.....	30
4.4 Σύγκριση υπεραγωγών τύπου I και τύπου II.....	30
5. Μικροσκοπική περιγραφή – Θεωρία BCS.....	33
5.1 Προβλήματα των κλασικών θεωριών και ανάγκη μικροσκοπικής προσέγγισης.....	33
5.2 Βασικές ιδέες της θεωρίας BCS.....	34
5.3 Σχηματισμός ζευγών Cooper.....	35
5.4 Ενεργειακό χάσμα στην υπεραγώγιμη κατάσταση	35
5.5 Σχέση θεωρίας BCS με τις μακροσκοπικές ιδιότητες (μηδενική αντίσταση, ειδική θερμότητα κ.λπ.)	36
5.6 Μήκος συνάφειας (coherence length) και φυσική του σημασία.....	37
6. Φυσικές ιδιότητες υπεραγωγών σε βάθος	39
6.1 Θερμοδυναμικές ιδιότητες	39
6.1.1 Ειδική θερμότητα στη μετάβαση από κανονική σε υπεραγώγιμη κατάσταση	39

6.1.2 Ελεύθερη ενέργεια και σταθερότητα της υπεραγώγιμης φάσης.....	40
6.2 Ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες	41
6.2.1 Εξισώσεις London.....	41
6.2.2 Διείσδυση μαγνητικού πεδίου και βάθος London.....	41
6.3 Χωρικές κλίμακες σε υπεραγωγούς	42
6.3.1 Μήκος συνάφειας ξ	42
6.3.2 Βάθος διείσδυσης λ και λόγος $\kappa = \lambda/\xi$	43
6.3.3 Σχέση του κ με τον διαχωρισμό σε τύπου I και τύπου II.....	44
7. Τεχνολογικές εφαρμογές της υπεραγωγιμότητας	45
7.1 Υπεραγώγιμοι μαγνήτες (MRI, NMR, επιταχυντές σωματιδίων).....	45
7.2 Υπεραγώγιμα καλώδια και γραμμές μεταφοράς ισχύος	46
7.3 SQUIDS (υπεραγώγιμοι κβαντικοί παρεμβολείς) και ευαίσθητη μαγνητομετρία.....	46
7.4 Υπεραγώγιμα ηλεκτρονικά στοιχεία (Josephson junctions, qubits)	47
7.5 Εφαρμογές σε κβαντικούς υπολογιστές.....	48
7.6 Άλλες εφαρμογές (μαγνητική αιώρηση – MAGLEV, αισθητήρες, φίλτρα μικροκυμάτων)	49
8. Συμπεράσματα	51
8.1 Σύνοψη των βασικών σημείων της εργασίας.....	51
8.2 Σημασία της υπεραγωγιμότητας στη σύγχρονη φυσική και τεχνολογία	51
8.3 Προοπτικές και μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας.....	52
Βιβλιογραφία.....	54

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας, από τις ιστορικές απαρχές του έως τις σύγχρονες θεωρητικές προσεγγίσεις και τις ποικίλες τεχνολογικές του εφαρμογές. Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της αγωγιμότητας, της ηλεκτρικής αντίστασης και η διάκριση των στερεών σε μέταλλα, μονωτές και ημιαγωγούς, ώστε να αναδειχθεί πώς η υπεραγωγιμότητα διαφοροποιείται ριζικά από τη συμβατική μεταλλική συμπεριφορά. Στη συνέχεια εξετάζεται η ιστορική πορεία, ξεκινώντας από την ανακάλυψη της υπεραγωγιμότητας από τον Onnes το 1911, την αναγνώριση του φαινομένου Meissner και την ανάπτυξη φαινομενολογικών θεωριών όπως οι εξισώσεις London και η θεωρία Ginzburg–Landau, μέχρι τη διατύπωση της μικροσκοπικής θεωρίας BCS και την ανακάλυψη υπεραγώγιμων υλικών υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας.

Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των βασικών φυσικών ιδιοτήτων των υπεραγωγών: μηδενική ηλεκτρική αντίσταση, πλήρης ή μερική αποβολή του μαγνητικού πεδίου, κρίσιμη θερμοκρασία και κρίσιμα μαγνητικά πεδία, ενεργειακό χάσμα και θερμοδυναμικά μεγέθη όπως η ειδική θερμότητα και η ελεύθερη ενέργεια. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις χωρικές κλίμακες του συστήματος, το μήκος συνάφειας ξ και το βάθος διείσδυσης λ , καθώς και στον λόγο $\kappa = \lambda/\xi$, που θεμελιώνει τον διαχωρισμό των υπεραγωγών σε τύπου I και τύπου II και εξηγεί τη μικτή κατάσταση με ροϊκές δίνες στους υπεραγωγούς τύπου II.

Στο μικροσκοπικό επίπεδο, η εργασία εστιάζει στη θεωρία BCS, αναδεικνύοντας την ανάγκη υπέρβασης των κλασικών προσεγγίσεων, τις βασικές ιδέες του σχηματισμού ζευγών Cooper, την εμφάνιση ενεργειακού χάσματος στο φάσμα των διεγέρσεων και τη σύνδεση των μικροσκοπικών μηχανισμών με μακροσκοπικές ιδιότητες, όπως η μηδενική αντίσταση, η θερμοκρασιακή εξάρτηση της ειδικής θερμότητας και η μαγνητική απόκριση.

Τέλος, εξετάζονται διεξοδικά οι τεχνολογικές εφαρμογές της υπεραγωγιμότητας: υπεραγώγιμοι μαγνήτες σε MRI, NMR και επιταχυντές σωματιδίων, υπεραγώγιμα καλώδια και γραμμές μεταφοράς ισχύος, συσκευές SQUID, υπεραγώγιμα ηλεκτρονικά στοιχεία τύπου Josephson, υπεραγώγιμα qubits και εφαρμογές σε κβαντικούς υπολογιστές, καθώς και εφαρμογές σε μαγνητική αιώρηση, αισθητήρες και φίλτρα μικροκυμάτων. Η εργασία καταλήγει στο ότι η υπεραγωγιμότητα αποτελεί κεντρικό πεδίο της σύγχρονης φυσικής στερεάς κατάστασης, με σημαντική επιστημονική και τεχνολογική σημασία και με πλούσιες προοπτικές για μελλοντική έρευνα και καινοτόμες εφαρμογές.

Abstract

This thesis deals with the phenomenon of superconductivity, from its historical origins to modern theoretical approaches and its diverse technological applications. It begins with a presentation of the basic concepts of electrical conduction and resistance, and the classification of solids into metals, insulators and semiconductors, in order to highlight how superconductivity differs fundamentally from conventional metallic behaviour. The historical development is then examined, starting from Onnes' discovery of superconductivity in 1911, the identification of the Meissner effect and the formulation of phenomenological theories such as the London equations and Ginzburg–Landau theory, up to the microscopic BCS theory and the discovery of high critical temperature superconductors.

The core physical properties of superconductors are analysed in detail: zero electrical resistance, complete or partial expulsion of magnetic field, critical temperature and critical magnetic fields, the superconducting energy gap and thermodynamic quantities such as specific heat and free energy. Particular emphasis is placed on the spatial scales of the system, the coherence length ξ and the London penetration depth λ , as well as on their ratio $\kappa = \lambda/\xi$, which underlies the classification of superconductors into type I and type II and explains the mixed state with quantized vortices in type II superconductors. At the microscopic level, the thesis focuses on BCS theory, underlining the limitations of classical approaches, the basic ideas of Cooper pair formation, the appearance of an energy gap in the excitation spectrum, and the connection between microscopic mechanisms and macroscopic properties such as zero resistance, the temperature dependence of specific heat and the magnetic response.

Finally, the technological applications of superconductivity are examined: superconducting magnets in MRI, NMR and particle accelerators, superconducting cables and power transmission lines, SQUID devices, Josephson-based superconducting electronics, superconducting qubits and applications in quantum computing, as well as applications in magnetic levitation, sensors and microwave filters. The thesis concludes that superconductivity is a central field of modern condensed matter physics, with major scientific and technological importance and rich prospects for future research and innovative applications.

1. Εισαγωγή

Η υπεραγωγιμότητα αποτελεί ένα από τα πιο εντυπωσιακά φαινόμενα της σύγχρονης φυσικής στερεάς κατάστασης, καθώς συνδυάζει την πλήρη εξαφάνιση της ηλεκτρικής αντίστασης με εξαιρετικά ιδιαίτερες μαγνητικές ιδιότητες. Η ανακάλυψή της στις αρχές του 20ού αιώνα οδήγησε σε μια νέα θεώρηση της αγωγιμότητας της ύλης και άνοιξε τον δρόμο για την κατανόηση του ρόλου των συλλογικών κβαντικών φαινομένων σε μακροσκοπική κλίμακα. Παρότι η συμπεριφορά των συνηθισμένων μετάλλων μπορεί σε μεγάλο βαθμό να περιγραφεί με κλασικές ή ημι-κλασικές θεωρίες, οι υπεραγωγοί απαιτούν πλήρη κβαντική περιγραφή, καθώς η οργάνωση των ηλεκτρονίων σε ζεύγη και η εμφάνιση ενεργειακού χάσματος δεν μπορούν να ερμηνευθούν διαφορετικά (Vinen, 2003). Εκτός από τη θεμελιώδη θεωρητική σημασία, η υπεραγωγιμότητα έχει και έντονη τεχνολογική διάσταση. Η δυνατότητα μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος χωρίς απώλειες, η δημιουργία ισχυρότατων μαγνητικών πεδίων με υπεραγώγιμους μαγνήτες και η αξιοποίηση κβαντικών φαινομένων σε συσκευές υψηλής ευαισθησίας ή σε κβαντικούς υπολογιστές, δείχνουν ότι το πεδίο αυτό δεν είναι μόνο αντικείμενο αμιγώς θεωρητικής μελέτης αλλά και βασικός πυλώνας της σύγχρονης τεχνολογικής εξέλιξης (Sharma, 2021). Για να γίνει κατανοητή σε βάθος η υπεραγωγιμότητα, είναι απαραίτητο να προηγηθεί μια συστηματική παρουσίαση των βασικών εννοιών της κλασικής αγωγιμότητας και των ιδιοτήτων των κοινών αγωγών, μονωτών και ημιαγωγών. Μέσα από αυτή τη σύγκριση αναδεικνύονται πιο καθαρά τα στοιχεία που καθιστούν τους υπεραγωγούς μοναδική κατηγορία υλικών. Η έννοια της ηλεκτρικής αντίστασης, ο ρόλος των ελεύθερων ηλεκτρονίων στα μέταλλα και η διάκριση των υλικών με βάση το ενεργειακό τους χάσμα αποτελούν θεμέλιο για την κατανόηση της μετάβασης στην υπεραγώγιμη κατάσταση (Warnes, 1990). Η εργασία εστιάζει κυρίως στους υπεραγωγούς τύπου I και τύπου II, στις διαφορές τους ως προς τις μαγνητικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες, αλλά και στη θεωρητική περιγραφή του φαινομένου μέσω της θεωρίας BCS και των επεκτάσεών της. Η κατανόηση της κλασικής συμπεριφοράς της αγωγιμότητας σε κανονικά μέταλλα, μονωτές και ημιαγωγούς λειτουργεί ως αφετηρία, ώστε η υπεραγώγιμη κατάσταση να παρουσιαστεί όχι ως ένα απομονωμένο φαινόμενο, αλλά ως φυσική συνέχεια και ανατροπή των παραδοσιακών αντιλήψεων για τη μεταφορά φορτίου στην ύλη (Latif, Husnain, & Siddique, 2022).

1.1 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Κύριος σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση, σε εισαγωγικό αλλά επιστημονικά τεκμηριωμένο επίπεδο, του φαινομένου της υπεραγωγιμότητας με έμφαση στους τύπους υπεραγωγών I και II και στις βασικές φυσικές τους ιδιότητες. Επιδιώκεται η σύνδεση των μακροσκοπικών χαρακτηριστικών, όπως η μηδενική αντίσταση και το φαινόμενο Meissner, με πιο θεμελιώδεις έννοιες της φυσικής στερεάς κατάστασης, όπως η δομή ενεργειακών ζωνών, το ενεργειακό χάσμα και τα συλλογικά κβαντικά φαινόμενα. Η εργασία στοχεύει να λειτουργήσει ως γέφυρα ανάμεσα στη βασική φυσική της αγωγιμότητας και στη σύγχρονη αντίληψη για τα υπεραγώγιμα υλικά (Hasan & Ali, 2022). Ένας επιμέρους στόχος είναι η κατανόηση των κριτηρίων με τα οποία διακρίνονται οι υπεραγωγοί τύπου I και τύπου II, καθώς και η ερμηνεία της συμπεριφοράς τους σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Αυτό περιλαμβάνει την εισαγωγή των εννοιών της κρίσιμης θερμοκρασίας, του κρίσιμου μαγνητικού πεδίου, του βάθους διείσδυσης του μαγνητικού πεδίου και του μήκους συνάφειας. Μέσα από αυτές τις έννοιες αναδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο η μικροσκοπική δομή και οι κβαντικές αλληλεπιδράσεις καθορίζουν τη

μακροσκοπική ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά των υπεραγωγών (Fetter & Hohenberg, 2018).

Ένας ακόμη σημαντικός στόχος είναι η ανάδειξη της θεωρίας BCS ως βασικού θεωρητικού πλαισίου για την κατανόηση της υπεραγωγιμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, αλλά και η κριτική θεώρησή της, ιδίως μέσα από τις σύγχρονες συζητήσεις για την επάρκειά της στην ερμηνεία του φαινομένου Meissner και άλλων ιδιοτήτων. Η εργασία αποσκοπεί επίσης στη συνοπτική παρουσίαση σύγχρονων θεωρητικών προσεγγίσεων που προτείνουν τροποποιήσεις ή εναλλακτικά μοντέλα σε σχέση με την κλασική θεωρία BCS, ώστε να δοθεί μια πιο πλήρης εικόνα της τρέχουσας επιστημονικής συζήτησης (Fernandes, 2015). Τέλος, σε πρακτικό επίπεδο, επιδιώκεται οι γνώσεις που θα παρουσιαστούν να συνδεθούν με πραγματικές τεχνολογικές εφαρμογές, όπως οι υπεραγώγιμοι μαγνήτες, οι υπεραγώγιμες γραμμές μεταφοράς ισχύος, οι συσκευές τύπου SQUID και τα υπεραγώγια κυκλώματα για κβαντικούς υπολογιστές. Με αυτόν τον τρόπο αναδεικνύεται η σημασία του θέματος όχι μόνο ως θεωρητικό αντικείμενο, αλλά και ως βάση για καινοτόμες τεχνολογικές λύσεις σε τομείς όπως η ιατρική απεικόνιση, η ενέργεια και η πληροφορική (Kim, 2019).

1.2 Δομή και οργάνωση της εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε διαδοχικά κεφάλαια που ακολουθούν μια λογική πορεία από τις βασικές έννοιες προς πιο σύνθετες θεωρητικές και τεχνολογικές πτυχές. Αρχικά παρουσιάζεται μια ιστορική ανασκόπηση της ανακάλυψης της υπεραγωγιμότητας, των πρώτων πειραματικών παρατηρήσεων και της εξέλιξης των θεωρητικών προσπαθειών μέχρι τη διατύπωση της θεωρίας BCS. Η ιστορική διάσταση βοηθά στην κατανόηση του πώς η υπεραγωγιμότητα αντιμετωπίστηκε αρχικά ως ένα «παράδοξο» φαινόμενο και πώς σταδιακά ενσωματώθηκε στη γενικότερη εικόνα της κβαντικής θεωρίας της ύλης (Sharma, 2015). Σε επόμενο στάδιο, αναπτύσσονται οι βασικές φυσικές ιδιότητες των υπεραγωγών, όπως η μηδενική ηλεκτρική αντίσταση, το φαινόμενο Meissner, η κρίσιμη θερμοκρασία και τα κρίσιμα μαγνητικά πεδία. Σε αυτό το μέρος εισάγονται οι έννοιες του βάθους διείσδυσης του μαγνητικού πεδίου και του μήκους συνάφειας, καθώς και η σημασία τους για τη διάκριση μεταξύ υπεραγωγών τύπου I και τύπου II. Παρουσιάζονται επίσης ορισμένες θερμοδυναμικές ιδιότητες, όπως η μεταβολή της ειδικής θερμότητας κατά τη μετάβαση στην υπεραγώγιμη κατάσταση και η συμπεριφορά της ελεύθερης ενέργειας (Vinen, 2003).

Ακολουθεί εκτενής ενότητα αφιερωμένη στη θεωρία BCS και στη μικροσκοπική περιγραφή της υπεραγωγιμότητας. Εκεί αναλύεται ο σχηματισμός ζευγών Cooper, η εμφάνιση ενεργειακού χάσματος, καθώς και η σύνδεση αυτών των εννοιών με παρατηρήσιμες φυσικές ποσότητες, όπως η κρίσιμη θερμοκρασία και η ειδική θερμότητα. Στην ίδια ενότητα γίνονται αναφορές σε επιπλέον θεωρητικές προσεγγίσεις και προτάσεις πέρα από το κλασικό πλαίσιο BCS, με σκοπό να παρουσιαστεί το εύρος των απόψεων που υπάρχουν στη σύγχρονη βιβλιογραφία (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022). Στα επόμενα κεφάλαια αναπτύσσεται η διάκριση μεταξύ υπεραγωγών τύπου I και τύπου II, τόσο από πειραματική όσο και από θεωρητική σκοπιά. Παρουσιάζονται χαρακτηριστικές καμπύλες μαγνήτισης, περιγράφεται η πλήρης και η μερική εκδήλωση του φαινομένου Meissner και αναλύεται η μικτή κατάσταση στους υπεραγωγούς τύπου II, όπου εμφανίζονται ροϊκές δίνες (vortices). Ο ρόλος του λόγου μεταξύ βάθους διείσδυσης και μήκους συνάφειας στην ταξινόμηση των υπεραγωγών αποκτά κεντρική σημασία σε αυτό το τμήμα (Huebener, 2019).

Τέλος, ένα από τα τελευταία κεφάλαια εστιάζει στις τεχνολογικές εφαρμογές της υπεραγωγιμότητας, αξιοποιώντας παραδείγματα από την ιατρική φυσική, τη μεταφορά ενέργειας, την υψηλή τεχνολογία αισθητήρων και τους κβαντικούς υπολογιστές. Η εργασία ολοκληρώνεται με κεφάλαιο συμπερασμάτων, όπου συγκεντρώνονται τα βασικά ευρήματα, αναδεικνύονται οι κυριότερες έννοιες που μελετήθηκαν και διατυπώνονται προοπτικές για τη μελλοντική ανάπτυξη του πεδίου της υπεραγωγιμότητας (Barnos, 2025).

1.3 Βασικές έννοιες (αγωγιμότητα, αντίσταση, μέταλλα – μονωτές – ημιαγωγοί)

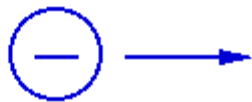
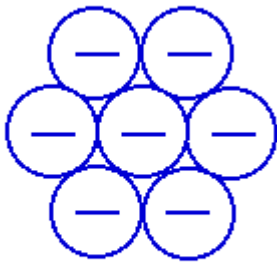
Η έννοια της ηλεκτρικής αγωγιμότητας βρίσκεται στον πυρήνα της κατανόησης της συμπεριφοράς των υλικών όταν αυτά εκτίθενται σε ηλεκτρικό πεδίο. Σε επίπεδο μακροσκοπικής περιγραφής, η αγωγιμότητα εκφράζει το πόσο εύκολα ένα υλικό επιτρέπει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος, και συνδέεται με την ηλεκτρική αντίσταση μέσω του νόμου του Ohm. Η ηλεκτρική αντίσταση αποτελεί μέτρο της δυσκολίας με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει ένα υλικό, και εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του υλικού όσο και από τη γεωμετρία του δείγματος. Η υπεραγωγιμότητα μπορεί να ιδωθεί ως οριακή περίπτωση όπου η αντίσταση γίνεται πρακτικά μηδενική κάτω από μια ορισμένη κρίσιμη θερμοκρασία (Warnes, 1990).

Σε μικροσκοπικό επίπεδο, η αγωγιμότητα σχετίζεται με την κίνηση φορτισμένων φορέων, συνήθως ηλεκτρονίων, μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του στερεού. Στα μέταλλα, τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μπορούν να θεωρηθούν ως σχεδόν ελεύθερα σωματίδια που διαδίδονται μέσα στο πλέγμα και συγκρούονται με ιόντα, ακαθαρσίες και φωνόνια, γεγονός που οδηγεί στην εμφάνιση αντίστασης. Η θερμοκρασία παίζει καθοριστικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία, καθώς η αύξησή της προκαλεί εντονότερες ταλαντώσεις του πλέγματος και αυξημένες συγκρούσεις, οδηγώντας σε αύξηση της αντίστασης στα συνηθισμένα μέταλλα (Latif et al., 2022). Η διάκριση μεταξύ μετάλλων, μονωτών και ημιαγωγών ερμηνεύεται αποτελεσματικά μέσα από τη θεωρία των ενεργειακών ζωνών. Σε αυτή τη θεώρηση, τα ηλεκτρόνια σε ένα στερεό καταλαμβάνουν ενεργειακές ζώνες, χωρισμένες από ενεργειακά χάσματα. Στα μέταλλα, η ζώνη σθένους και η ζώνη αγωγιμότητας είτε επικαλύπτονται είτε η ζώνη σθένους δεν είναι πλήρως γεμάτη, επιτρέποντας στα ηλεκτρόνια να κινηθούν εύκολα υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Στους μονωτές, το ενεργειακό χάσμα μεταξύ ζώνης σθένους και ζώνης αγωγιμότητας είναι τόσο μεγάλο ώστε σε συνηθισμένες θερμοκρασίες πολύ λίγα ηλεκτρόνια μπορούν να διεγερθούν στη ζώνη αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα η αγωγιμότητα να είναι εξαιρετικά μικρή (Fujita, Ito, & Godoy, 2009).

Οι ημιαγωγοί καταλαμβάνουν μια ενδιάμεση θέση μεταξύ μετάλλων και μονωτών, καθώς διαθέτουν ενεργειακό χάσμα μικρότερο από εκείνο των μονωτών. Αυτό σημαίνει ότι σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες ή με κατάλληλη πρόσμιξη (doping) μπορεί να δημιουργηθεί σημαντικός αριθμός φορέων αγωγιμότητας, είτε ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας είτε οπών στη ζώνη σθένους. Η ευαισθησία της αγωγιμότητας των ημιαγωγών στη θερμοκρασία, στο φως ή στην παρουσία προσμείξεων τους καθιστά θεμελιώδη υλικά για τη σύγχρονη ηλεκτρονική τεχνολογία (Warnes, 1990). Η κατανόηση της υπεραγωγιμότητας απαιτεί τη σύγκριση της συμπεριφοράς των υπεραγωγών με εκείνη των συμβατικών αγωγίων υλικών. Σε ένα τυπικό μέταλλο, η αντίσταση μειώνεται όσο η θερμοκρασία πλησιάζει το απόλυτο μηδέν, χωρίς όμως να μηδενίζεται πλήρως, καθώς παραμένουν συνεισφορές από ακαθαρσίες και στατικές ατέλειες. Αντίθετα, στον υπεραγωγό παρατηρείται απότομη πτώση της αντίστασης σε μηδενική τιμή όταν η

θερμοκρασία περάσει κάτω από μια καθορισμένη κρίσιμη τιμή, γεγονός που υποδηλώνει την εμφάνιση νέας, κβαντικής μορφής οργάνωσης των ηλεκτρονίων. Παράλληλα, εμφανίζεται και το φαινόμενο Meissner, δηλαδή η πλήρης ή μερική αποβολή του μαγνητικού πεδίου από το εσωτερικό του υλικού, χαρακτηριστικό που διαχωρίζει ουσιαστικά τους υπεραγωγούς από τους απλούς αγωγούς (Saipuddin, Hashim, & Suhaimi, 2022).

Electrons



moves fast

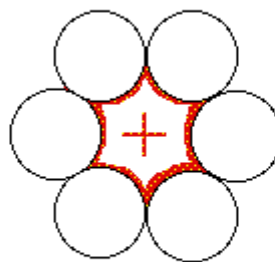


doesn't deform
background



smooth
wavefunction

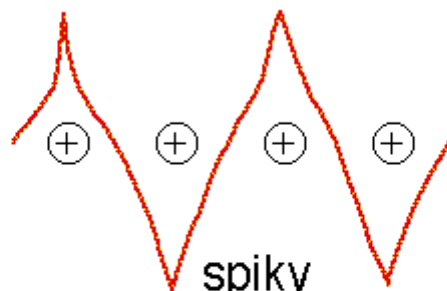
Holes



moves slowly



deforms background



spiky
wavefunction

Bonding

Antibonding

Εικόνα 1 Σχηματική σύγκριση της κίνησης και της επίδρασης στο κρυσταλλικό πλέγμα για ηλεκτρόνια (αριστερά) και οπές (δεξιά) ως φορείς φορτίου σε στερεά υλικά. Πηγή: <https://jorge.physics.ucsd.edu/hole.html>

Η κλασική έννοια της αντίστασης, όπως προκύπτει από το μοντέλο Drude ή παραλλαγές του, αδυνατεί να περιγράψει την πλήρη εξαφάνιση των απωλειών και την τέλεια διατήρηση ρεύματος στους υπεραγωγούς. Εδώ εισέρχεται η ανάγκη για κβαντική περιγραφή, με την οποία τα ηλεκτρόνια δεν αντιμετωπίζονται ως ανεξάρτητα σωματίδια αλλά ως συλλογική κατάσταση, όπου η σύζευξη με τα φωνόνια και ο σχηματισμός ζευγών Cooper οδηγεί σε κατάσταση με ενεργειακό χάσμα. Η ύπαρξη του ενεργειακού χάσματος σημαίνει ότι η σκέδαση των φορέων καταστέλλεται και το ρεύμα μπορεί να διατηρείται χωρίς απώλειες, κάτι που αποτελεί βασική διαφορά σε σχέση με τη συμπεριφορά των μετάλλων, των μονωτών και των ημιαγωγών σε μη υπεραγώγιμη κατάσταση (Fernandes, 2015). Τέλος, η κατανόηση των βασικών εννοιών αγωγιμότητας και αντίστασης, καθώς και η διάκριση των υλικών με βάση το ενεργειακό τους χάσμα, προετοιμάζει το έδαφος για τη μελέτη πιο εξειδικευμένων μεγεθών, όπως η κρίσιμη θερμοκρασία, το κρίσιμο μαγνητικό πεδίο, το βάθος διείσδυσης και το μήκος συνάφειας. Αυτά τα μεγέθη, που θα αναπτυχθούν στα επόμενα κεφάλαια, αποτελούν την τυπική «ταυτότητα» κάθε υπεραγωγού και καθορίζουν τόσο τη θεωρητική του περιγραφή όσο και την καταλληλότητά του για συγκεκριμένες τεχνολογικές εφαρμογές (Hasan & Ali, 2022).

2. Ιστορική ανασκόπηση της υπεραγωγιμότητας

Η ιστορία της υπεραγωγιμότητας ξεκινά στις αρχές του 20ού αιώνα, σε μια περίοδο όπου η κατανόηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα μέταλλα στηριζόταν ακόμα σε σχετικά απλές κλασικές προσεγγίσεις. Παρά τις προόδους στη θερμοδυναμική και στον ηλεκτρομαγνητισμό, η συμπεριφορά των μετάλλων σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες παρέμενε εν μέρει μυστηριώδης, ιδίως ως προς το τι συμβαίνει στην ηλεκτρική αντίσταση όταν η θερμοκρασία τείνει προς το απόλυτο μηδέν. Σε αυτό το πλαίσιο, τα πειράματα υγροποίησης των αερίων και η δυνατότητα επίτευξης θερμοκρασιών κοντά στο 0 K άνοιξαν τον δρόμο για ανακαλύψεις που δεν είχαν προβλεφθεί από τις υπάρχουσες θεωρίες (Vinen, 2003). Το κλασικό μοντέλο της αγωγιμότητας, όπως το μοντέλο Drude, προέβλεπε ότι η αντίσταση των μετάλλων θα έπρεπε να μειώνεται μονοτονικά με τη θερμοκρασία, εξαιτίας της μείωσης των θερμικών ταλαντώσεων του πλέγματος. Ωστόσο δεν υπήρχε σαφής πρόβλεψη για το αν η αντίσταση έτεινε σε ένα πεπερασμένο όριο ή μηδενιζόταν πλήρως. Πειράματα στα τέλη του 19ου και στις αρχές του 20ού αιώνα έδειχναν ότι η αντίσταση πράγματι μειώνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά οι μετρήσεις δεν μπορούσαν ακόμα να φτάσουν σε αρκούντως χαμηλά επίπεδα ώστε να αποκαλύψουν το νέο φαινόμενο που θα ονομαζόταν υπεραγωγιμότητα (Warnes, 1990). Παράλληλα, η κβαντική θεωρία δεν είχε ακόμη αναπτυχθεί πλήρως και η κατανόηση της δομής της ύλης βρισκόταν σε μεταβατικό στάδιο. Η ανακάλυψη της υπεραγωγιμότητας συνέπεσε χρονικά με την εμφάνιση των πρώτων ιδεών της κβαντικής θεωρίας και με τη σταδιακή διαμόρφωση της έννοιας των ενεργειακών ζωνών, γεγονός που επέτρεψε αργότερα να ενταχθεί το φαινόμενο σε ένα ευρύτερο θεωρητικό πλαίσιο. Ωστόσο, για αρκετές δεκαετίες μετά την ανακάλυψή της, η υπεραγωγιμότητα παρέμεινε ένα φαινόμενο που περιγραφόταν κυρίως φαινομενολογικά, χωρίς πλήρη μικροσκοπική ερμηνεία (Sharma, 2015).

2.1 Η ανακάλυψη της υπεραγωγιμότητας (Onnes, 1911)

Το 1911, στο εργαστήριο του Heike Kamerlingh Onnes στο Λέιντεν, πραγματοποιήθηκε η κλασική πλέον σειρά πειραμάτων που οδήγησε στην ανακάλυψη της υπεραγωγιμότητας. Ο Onnes, ο οποίος είχε ήδη καταφέρει την υγροποίηση του ήλιου και είχε στη διάθεσή του θερμοκρασίες της τάξης των λίγων Kelvin, μελέτησε τη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης του υδραργύρου καθώς αυτός ψυχόταν σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Αντί για μια απλή ομαλή μείωση της αντίστασης, παρατήρησε μια απότομη πτώση της σε πρακτικά μηδενική τιμή περίπου στους 4,2 K, γεγονός που δεν μπορούσε να εξηγηθεί με τα κλασικά μοντέλα (Vinen, 2003). Αυτή η απότομη μετάβαση σε κατάσταση μηδενικής αντίστασης ερμηνεύτηκε ως νέα φυσική φάση ύλης, στην οποία το υλικό αποκτά ιδιότητες ριζικά διαφορετικές από εκείνες της συνηθισμένης αγωγίμης κατάστασης. Ο Onnes διέκρινε ότι το φαινόμενο δεν ήταν απλή συνέχιση της γνωστής συμπεριφοράς των μετάλλων σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά ποιοτική αλλαγή, καθώς δεν υπήρχε κανένα ίχνος υπολειμματικής αντίστασης μέσα στα όρια πειραματικής ακρίβειας. Η παρατήρηση αυτή θεμελίωσε τον όρο «υπεραγωγιμότητα» για να περιγράψει την κατάσταση στην οποία το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να κυκλοφορεί χωρίς απώλειες (Warnes, 1990). Στα επόμενα χρόνια, ο Onnes και άλλοι ερευνητές επανέλαβαν τα πειράματα σε διαφορετικά μέταλλα, επιβεβαιώνοντας ότι η υπεραγωγιμότητα δεν ήταν ιδιότητα αποκλειστικά του υδραργύρου. Υλικά όπως ο κασσίτερος και ο μόλυβδος βρέθηκαν να εμφανίζουν αντίστοιχη απότομη εξαφάνιση της αντίστασης σε χαρακτηριστικές κρίσιμες θερμοκρασίες, αν και αυτές διέφεραν από υλικό σε υλικό. Η έννοια της κρίσιμης θερμοκρασίας T_c εισήχθη έτσι ως βασικό χαρακτηριστικό μέγεθος, καθορίζοντας το όριο

ανάμεσα στην κανονική και την υπεραγώγιμη κατάσταση (Latif, Husnain, & Siddique, 2022). Η ανακάλυψη της υπεραγωγιμότητας δεν εκτιμήθηκε αμέσως ως θεμελιώδες κβαντικό φαινόμενο, αλλά κυρίως ως ιδιαίτερη ιδιότητα ορισμένων μετάλλων σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Χρειάστηκαν αρκετές δεκαετίες και η περαιτέρω ανάπτυξη της κβαντικής μηχανικής, της στατιστικής φυσικής και της θεωρίας στερεάς κατάστασης για να γίνει κατανοητό ότι η υπεραγωγιμότητα εκπροσωπεί μια μακροσκοπική κβαντική κατάσταση, όπου μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων συμπεριφέρονται συλλογικά. Ωστόσο, ήδη από τα πρώτα χρόνια, η απόλυτη σταθερότητα του ρεύματος σε κλειστό κύκλωμα υπεραγωγού και η αδυναμία εξήγησης της συμπεριφοράς αυτής με κλασικούς όρους υπέδειξαν ότι επρόκειτο για φαινόμενο βαθιάς φυσικής σημασίας (Sharma, 2021).

2.2 Βασικά πειράματα και ορισμός του φαινομένου

Μετά την ανακάλυψη του Ohm, μεγάλο μέρος της έρευνας επικεντρώθηκε στη λεπτομερή μελέτη της ηλεκτρικής αντίστασης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, της έντασης του ρεύματος και της παρουσίας εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Ένα από τα βασικά πειραματικά αποτελέσματα ήταν ότι η μηδενική αντίσταση δεν είναι απεριόριστα σταθερή, αλλά καταστρέφεται όταν το ρεύμα ή το μαγνητικό πεδίο ξεπεράσουν ορισμένες κρίσιμες τιμές. Έτσι εισήχθησαν οι έννοιες του κρίσιμου ρεύματος και του κρίσιμου μαγνητικού πεδίου, που μαζί με την κρίσιμη θερμοκρασία περιγράφουν τα όρια ύπαρξης της υπεραγώγιμης κατάστασης (Vinen, 2003). Καθοριστικής σημασίας για τον ορισμό της υπεραγωγιμότητας ήταν τα πειράματα των Meissner και Ochsenfeld το 1933. Σε αυτά διαπιστώθηκε ότι ένας υπεραγωγός δεν είναι απλώς τέλει αγωγός, αλλά παρουσιάζει πλήρη αποβολή του μαγνητικού πεδίου από το εσωτερικό του όταν ψύχεται κάτω από την T_c παρουσία εξωτερικού πεδίου. Το φαινόμενο αυτό, γνωστό ως φαινόμενο Meissner, έδειξε ότι η υπεραγωγιμότητα είναι θερμοδυναμική φάση με ιδιότητες που δεν μπορούν να εξηγηθούν μόνο από τη μηδενική αντίσταση, αλλά απαιτούν ενεργό αποκλεισμό του μαγνητικού πεδίου από το υλικό (Sharma, 2015).

Η διαπίστωση ότι όλοι οι υπεραγωγοί παρουσιάζουν το φαινόμενο Meissner, ανεξάρτητα από τη γεωμετρία του δείγματος και την ιστορία του μαγνητικού πεδίου, οδήγησε σε έναν πιο αυστηρό ορισμό της υπεραγωγιμότητας. Ένα υλικό θεωρείται υπεραγωγός όταν, κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία του, εμφανίζει μηδενική ηλεκτρική αντίσταση και τέλεια διαμαγνητική απόκριση, δηλαδή πλήρη αποβολή του μαγνητικού πεδίου εκτός από ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα, όπου το πεδίο διεισδύει σε βάθος της τάξης του βάθους London. Αυτή η διπλή ιδιότητα διαχωρίζει την υπεραγωγιμότητα από την απλή ιδέα του τέλει αγωγού όπως ήταν γνωστή από την κλασική ηλεκτροδυναμική (Hasan & Ali, 2022). Τα πειράματα που μελέτησαν τη διείσδυση του μαγνητικού πεδίου οδήγησαν στην εισαγωγή του βάθους διείσδυσης London, το οποίο περιγράφει σε ποιο πάχος από την επιφάνεια του υλικού μπορεί να υπάρχει μη μηδενικό μαγνητικό πεδίο. Η ιδέα ότι το πεδίο δεν εξαφανίζεται απότομα στην επιφάνεια αλλά μειώνεται εκθετικά μέσα στο υλικό ήταν κλειδί για την ανάπτυξη φαινομενολογικών θεωριών, όπως η θεωρία των εξισώσεων London και αργότερα η θεωρία Ginzburg–Landau. Αυτές οι προσεγγίσεις παρείχαν ένα συνεκτικό πλαίσιο κατανόησης της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς των υπεραγωγών πριν ακόμη δοθεί ολοκληρωμένη μικροσκοπική θεωρία (Fetter & Hohenberg, 2018). Σημαντική πειραματική ανακάλυψη για την κατανόηση του μηχανισμού της υπεραγωγιμότητας ήταν το ισοτοπικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο η κρίσιμη θερμοκρασία T_c μεταβάλλεται με τη μάζα των ιόντων του πλέγματος. Η παρατήρηση αυτή έδειξε ότι οι ταλαντώσεις του πλέγματος, δηλαδή τα φωνόνια, παίζουν καθοριστικό ρόλο στη γένεση της υπεραγώγιμης κατάστασης, αφήνοντας να εννοηθεί ότι ένας

μηχανισμός σύζευξης ηλεκτρονίων μέσω των φωνονίων θα μπορούσε να είναι η βάση της θεωρητικής ερμηνείας. Αυτό το πειραματικό εύρημα αποτέλεσε έναν από τους ακρογωνιαίους λίθους πάνω στους οποίους οικοδομήθηκε αργότερα η θεωρία BCS (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022).

2.3 Εξέλιξη των θεωριών μέχρι τη θεωρία BCS

Η προσπάθεια θεωρητικής ερμηνείας της υπεραγωγιμότητας ξεκίνησε σχεδόν αμέσως μετά την ανακάλυψή της, αλλά αντιμετώπισε σημαντικές δυσκολίες. Οι πρώτες προσεγγίσεις βασίστηκαν στην επέκταση κλασικών μοντέλων αγωγιμότητας, με την ιδέα ότι η αντίσταση απλώς θα έπρεπε να τείνει στο μηδέν λόγω ελάττωσης των συγκρούσεων, χωρίς όμως να λαμβάνουν υπόψη τις κβαντικές ιδιότητες των ηλεκτρονίων. Αυτές οι θεωρίες σύντομα κρίθηκαν ανεπαρκείς, καθώς δεν μπορούσαν να εξηγήσουν το φαινόμενο Meissner ούτε την ύπαρξη κρίσιμων πεδίων και ρευμάτων (Warnes, 1990). Με τη σταδιακή διαμόρφωση της κβαντικής μηχανικής και της θεωρίας των ενεργειακών ζωνών, εμφανίστηκαν νέες ιδέες που συνδέαν την υπεραγωγιμότητα με κβαντικά φαινόμενα μεγάλης κλίμακας. Η ανάπτυξη των εξισώσεων London τη δεκαετία του 1930 αποτέλεσε σημαντική πρόοδο, καθώς παρείχαν φαινομενολογική περιγραφή του τρόπου με τον οποίο το μαγνητικό πεδίο εκτοπίζεται από το εσωτερικό του υπεραγωγού και εισάγουν την έννοια του βάθους διείσδυσης. Παρότι δεν πρόσφεραν μικροσκοπικό μηχανισμό, οι εξισώσεις London αναπαρήγαν με επιτυχία πολλές πειραματικές παρατηρήσεις, καθιστώντας τις θεμέλιο για την κατανόηση της μαγνητικής συμπεριφοράς των υπεραγωγών (Vinen, 2003). Η επόμενη σημαντική θεωρητική εξέλιξη ήταν η θεωρία Ginzburg–Landau, η οποία εισήγαγε μια σύνθετη παραμετρική συνάρτηση τάξης για την περιγραφή της υπεραγωγίμης κατάστασης. Η θεωρία αυτή, αν και επίσης φαινομενολογική, συνδύασε τις αρχές της θερμοδυναμικής φάσεων με κβαντικά στοιχεία και επέτρεψε την περιγραφή χωρικών μεταβολών της υπεραγωγίμης τάξης. Ειδικά ο λόγος μεταξύ του μήκους συνάφειας και του βάθους διείσδυσης αναδείχθηκε ως το κριτήριο που διαχωρίζει τους υπεραγωγούς σε τύπου I και τύπου II, προσφέροντας μια φυσική εξήγηση για την ύπαρξη υλικών που εμφανίζουν είτε πλήρη είτε μερική εκδίωξη του μαγνητικού πεδίου (Huebener, 2019).

Παρά τη φαινομενολογική επιτυχία, εξακολουθούσε να λείπει μια μικροσκοπική θεωρία η οποία να ξεκινά από τις θεμελιώδεις αρχές της κβαντικής μηχανικής και να εξηγεί γιατί τα ηλεκτρόνια σε έναν υπεραγωγό οργανώνονται σε κατάσταση μηδενικής αντίστασης και τέλει διαμαγνητικότητας. Το ισοτοπικό φαινόμενο υπέδειξε ότι τα φωνόνια είναι κεντρικά στον μηχανισμό, αλλά η ακριβής μορφή της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρονίων μέσω του πλέγματος παρέμενε ασαφής. Πολλές μερικές θεωρίες προτάθηκαν, αλλά καμία δεν κατάφερε να δώσει πλήρη, ποσοτικά ακριβή περιγραφή όλων των πειραματικών δεδομένων (Sharma, 2021). Η καθοριστική τομή ήρθε το 1957 με τη θεωρία BCS, που διατυπώθηκε από τους Bardeen, Cooper και Schrieffer. Στη θεωρία αυτή, τα ηλεκτρόνια κοντά στη στάθμη Fermi δεν αντιμετωπίζονται ως ανεξάρτητα σωματίδια, αλλά σχηματίζουν δεσμευμένα ζεύγη, τα ζεύγη Cooper, λόγω έμμεσης ελκτικής αλληλεπίδρασης που μεσολαβούν τα φωνόνια. Τα ζεύγη αυτά συμπυκνώνονται σε μια κοινή κβαντική κατάσταση με μακρινή συνοχή, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ενεργειακό χάσμα στο φάσμα των διεγέρσεων, το οποίο εμποδίζει τη σκέδαση και συνεπώς καταστέλλει την ηλεκτρική αντίσταση (Fernandes, 2015).

Η θεωρία BCS κατάφερε να εξηγήσει όχι μόνο τη μηδενική αντίσταση, αλλά και το ενεργειακό χάσμα, τη μεταβολή της ειδικής θερμότητας στη μετάβαση, το ισοτοπικό φαινόμενο, καθώς και μια σειρά από μαγνητικές ιδιότητες των συμβατικών, χαμηλής

θερμοκρασίας υπεραγωγών. Επιπλέον, επέτρεψε την αναγωγή των φαινομενολογικών παραμέτρων των θεωριών London και Ginzburg–Landau σε μικροσκοπικά μεγέθη, παρέχοντας έτσι γέφυρα μεταξύ μακροσκοπικής και μικροσκοπικής περιγραφής. Η επιτυχία της οδήγησε στην καθιέρωση της BCS ως της βασικής θεωρίας της παραδοσιακής υπεραγωγιμότητας (Trabelsi et al., 2022). Παρότι αργότερα προέκυψαν νέα υλικά, όπως οι υπεραγωγοί υψηλής θερμοκρασίας και διάφοροι «ασύμμορφοι» υπεραγωγοί, που δεν περιγράφονται πλήρως από τον κλασικό μηχανισμό BCS, η θεωρία εξακολουθεί να αποτελεί το θεμέλιο για την κατανόηση της υπεραγωγιμότητας στους περισσότερους μεταλλικούς και συμβατικούς υπεραγωγούς. Η ιστορική διαδρομή από τα πρώτα πειράματα του Onnes μέχρι τη διατύπωση της BCS δείχνει πώς η συνδυασμένη πρόοδος της πειραματικής τεχνολογίας, της κβαντικής θεωρίας και της θεωρίας στερεάς κατάστασης οδήγησε σε μια από τις πιο επιτυχημένες θεωρίες της σύγχρονης φυσικής (Vinen, 2003).

2.4 Ανακάλυψη υπεραγώγιμων υλικών υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας

Μετά τη διατύπωση της θεωρίας BCS η επικρατούσα άποψη ήταν ότι η κρίσιμη θερμοκρασία των υπεραγωγών δεν μπορούσε να υπερβεί σημαντικά τις τιμές της τάξης των 20–25 K. Οι περισσότεροι γνωστοί υπεραγωγοί ήταν καθαρά μέταλλα ή απλά κράματα, με σχετικά χαμηλές T_c και ιδιότητες που περιγράφονταν ικανοποιητικά από συμβατικές φωνονικές αλληλεπιδράσεις. Η υπεραγωγιμότητα θεωρούνταν φαινόμενο της «χαμηλής θερμοκρασίας», συνδεδεμένο άρρηκτα με πολύπλοκα και δαπανηρά κρυογενικά συστήματα που χρησιμοποιούσαν υγρό ήλιο, γεγονός που περιόριζε σημαντικά τις τεχνολογικές εφαρμογές (Sharma, 2021). Η κατάσταση άλλαξε ριζικά τη δεκαετία του 1980 με την ανακάλυψη των υπεραγωγών υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας, αρχικά σε κεραμικά υλικά βασισμένα στον χαλκό (cuprates). Η ανακάλυψη ενός οξειδίου λανθανίου–βαρίου–χαλκού με T_c περίπου 35 K αποτέλεσε το πρώτο βήμα, ακολουθούμενο σύντομα από την ανάπτυξη ενώσεων όπως το $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO), με κρίσιμη θερμοκρασία πάνω από 90 K. Το γεγονός ότι ορισμένοι υπεραγωγοί μπορούσαν να λειτουργήσουν πάνω από τη θερμοκρασία του υγρού αζώτου (77 K) έφερε επανάσταση στις προσδοκίες για την πρακτική αξιοποίηση της υπεραγωγιμότητας (Barnos, 2025).

Τα νέα αυτά υλικά παρουσίαζαν σημαντικές διαφορές σε σχέση με τους κλασικούς μεταλλικούς υπεραγωγούς. Είχαν κεραμική φύση, υψηλή ανισοτροπία, στρωματική κρυσταλλική δομή τύπου περοβσκίτη και έντονη συσχέτιση ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα η συμπεριφορά τους να μην εξηγείται εύκολα μέσα από το απλό φωνονικό σχήμα της θεωρίας BCS. Το διάγραμμα φάσεων των cuprates, όπου η υπεραγώγιμη φάση εμφανίζεται σε περιοχές ντόπινγκ μεταξύ μονωτικής και μεταλλικής κατάστασης, υποδηλώνει πολύπλοκη αλληλεπίδραση ανάμεσα σε μαγνητικές, φορτισμένες και πλεγματικές βαθμίδες ελευθερίας (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022). Στη συνέχεια ανακαλύφθηκαν και άλλες οικογένειες υπεραγωγών υψηλής T_c , όπως τα συστήματα με βάριο, βισμούθιο, θάλλιο και υδράργυρο, τα οποία έφτασαν σε ακόμη υψηλότερες κρίσιμες θερμοκρασίες, ιδίως υπό πίεση. Αργότερα, η ανακάλυψη των σιδηροπυκνιτών και σιδηροχαλκογενιδίων εισήγαγε μια νέα κατηγορία μη συμβατικών υπεραγωγών, με μηχανισμούς που φαίνεται να περιλαμβάνουν ισχυρές μαγνητικές διακυμάνσεις και πολύπλοκη ηλεκτρονική δομή. Αυτές οι εξελίξεις άνοιξαν νέο κεφάλαιο στην αναζήτηση υπεραγωγών με ακόμη υψηλότερες κρίσιμες θερμοκρασίες και νέους μηχανισμούς σύζευξης (Barnos, 2025).

Η ανακάλυψη υπεραγώγιμων υλικών υψηλής T_c έδειξε ότι η υπεραγωγιμότητα δεν είναι περιορισμένη σε λίγα καθαρά μέταλλα και απλά κράματα, αλλά μπορεί να εμφανιστεί σε σύνθετα οξειδία, πολυστρωματικά συστήματα και ισχυρά συσχετισμένες ηλεκτρονικές δομές. Η πρόκληση πλέον δεν είναι μόνο η κατανόηση των ήδη γνωστών μηχανισμών, αλλά και η διερεύνηση νέων δρόμων, όπως οι υπεραγωγοί υπό ακραίες πιέσεις ή τα νανοδομημένα και δισδιάστατα υλικά, που μπορεί να εμφανίσουν υψηλές T_c και ιδιαίτερες ιδιότητες (Trabelsi et al., 2022).

2.5 Σύγχρονες τάσεις στην έρευνα της υπεραγωγιμότητας (σε γενικό επίπεδο)

Η σύγχρονη έρευνα στην υπεραγωγιμότητα κινείται σε δύο βασικές κατευθύνσεις: την αναζήτηση νέων υλικών με αυξημένες κρίσιμες παραμέτρους και την εμβάθυνση στη θεμελιώδη κατανόηση των μηχανισμών που δημιουργούν την υπεραγώγιμη κατάσταση. Στο πρώτο πεδίο, σημαντικό ενδιαφέρον συγκεντρώνουν τα υπεραγώγιμα υδρίδια υπό πολύ υψηλή πίεση, όπου έχουν αναφερθεί T_c που προσεγγίζουν ή υπερβαίνουν τη θερμοκρασία δωματίου, αν και σε ακραίες συνθήκες πίεσης που δυσκολεύουν τη χρηστική αξιοποίησή τους. Παράλληλα, συνεχίζεται η αναζήτηση νέων οξειδίων, νιτρίδιων και πολυστρωματικών υλικών με ευνοϊκά κρυσταλλογραφικά χαρακτηριστικά για υπεραγωγιμότητα (Barnos, 2025). Σε θεωρητικό επίπεδο, μεγάλο μέρος της έρευνας ασχολείται με «μη συμβατικούς» μηχανισμούς σύζευξης, πέρα από τον καθαρά φωνονικό μηχανισμό της θεωρίας BCS. Σε πολλές οικογένειες υλικών, όπως οι cuprates και οι σιδηροπυκνίτες, φαίνεται ότι οι μαγνητικές διακυμάνσεις και οι ισχυρές ηλεκτρονικές συσχετίσεις παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο, οδηγώντας σε ανισοτροπικά διαγράμματα ενέργειας και πολύπλοκες δομές του ενεργειακού χάσματος. Ταυτόχρονα, έχουν προταθεί εναλλακτικές θεωρητικές προσεγγίσεις που αμφισβητούν την καθολική εγκυρότητα της κλασικής BCS και εξετάζουν άλλους τρόπους γένεσης του φαινομένου Meissner και της μηδενικής αντίστασης (Hirsch, 2012).

Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της υπεραγωγιμότητας σε περιορισμένες διαστάσεις και σε υβριδικές δομές, όπως λεπτές μεμβράνες, νανοσύρματα και ετεροδομές υπεραγωγού–μονωτή–μέταλλο. Σε τέτοιες γεωμετρίες εμφανίζονται νέα φαινόμενα, όπως η μεταβολή των κρίσιμων παραμέτρων με το πάχος, οι διακυμάνσεις φάσης και η ενισχυμένη επίδραση των ορίων και ατελειών. Η μελέτη διδιάστατων υπεραγωγών και υπεραγωγικών διεπαφών αποτελεί επίσης σημαντικό πεδίο, με πιθανές εφαρμογές σε υπεραγώγιμη ηλεκτρονική υψηλής ταχύτητας (Oli, n.d.). Ένα ακόμα πεδίο έντονης δραστηριότητας είναι η διερεύνηση της τοπολογικής υπεραγωγιμότητας και των πιθανών διεγέρσεων τύπου Majorana, που θα μπορούσαν να αποτελέσουν βάση για ανθεκτικά κβαντικά bits σε μελλοντικούς κβαντικούς υπολογιστές. Η σύνδεση υπεραγωγών με τοπολογικά μονωτικά, ισχυρά σπιν-τροχιακά συστήματα και νανοδομημένα υλικά δημιουργεί νέους συνδυασμούς, όπου η κβαντική συνοχή και η μη συμβατική δομή του χάσματος παίζουν καθοριστικό ρόλο. Παρά τις προκλήσεις, η κατεύθυνση αυτή θεωρείται πολλά υποσχόμενη για την ανάπτυξη νέων μορφών κβαντικής τεχνολογίας (Pei, n.d.).

Παράλληλα με τα θεμελιώδη ερωτήματα, σημαντικό μέρος της έρευνας εστιάζει στην εφαρμοσμένη πλευρά: βελτίωση καλωδίων υψηλού ρεύματος, ανάπτυξη σταθερών υπεραγώγιμων μαγνητών για επιταχυντές και ιατρικές εφαρμογές, βελτίωση των ιδιοτήτων των υλικών υπό μηχανικές καταπονήσεις και μαγνητικά πεδία, καθώς και στη σχεδίαση ευαίσθητων υπεραγώγιμων αισθητήρων. Η προσαρμογή των θεωρητικών

γνώσεων σε μηχανική υλικών και συστημάτων αποτελεί κρίσιμο βήμα ώστε η υπεραγωγιμότητα να ενταχθεί σε ευρύτερες τεχνολογικές εφαρμογές (Kim, 2019).

3. Βασικές αρχές υπεραγωγιμότητας

Οι βασικές αρχές της υπεραγωγιμότητας στηρίζονται σε δύο κεντρικές ιδιότητες: τη μηδενική ηλεκτρική αντίσταση και την ιδιαίτερη μαγνητική συμπεριφορά, γνωστή κυρίως μέσα από το φαινόμενο Meissner. Οι ιδιότητες αυτές δείχνουν ότι η υπεραγώγιμη κατάσταση δεν είναι απλώς ένα «παγωμένο» μεταλλικό στάδιο με λιγότερες συγκρούσεις, αλλά μια νέα κβαντική φάση της ύλης, στην οποία μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων οργανώνεται σε συλλογική κατάσταση με μακρινή συνοχή. Η μακροσκοπική αυτή κβαντική κατάσταση αποτυπώνεται σε παρατηρήσιμα μεγέθη, όπως η άπειρη αγωγιμότητα και η τέλεια διαμαγνητικότητα (Vinen, 2003). Η ύπαρξη κρίσιμων παραμέτρων είναι θεμελιώδες στοιχείο για τον ορισμό της υπεραγωγιμότητας. Κάθε υπεραγωγός χαρακτηρίζεται από μια κρίσιμη θερμοκρασία T_c , ένα ή περισσότερα κρίσιμα μαγνητικά πεδία και ένα κρίσιμο ρεύμα, πέρα από τα οποία η υπεραγώγιμη κατάσταση καταστρέφεται. Στους υπεραγωγούς τύπου I, ένα μοναδικό κρίσιμο πεδίο H_c χωρίζει την πλήρως υπεραγώγιμη κατάσταση από την κανονική, ενώ στους υπεραγωγούς τύπου II εμφανίζονται δύο κρίσιμα πεδία, H_{c1} και H_{c2} , ανάμεσα στα οποία το υλικό βρίσκεται σε μικτή κατάσταση με διείσδυση μαγνητικών νημάτων (vortices). Αυτές οι ιδιότητες συνδέονται στενά με τις θεμελιώδεις χωρικές κλίμακες, όπως το βάθος διείσδυσης και το μήκος συνάφειας (Saipuddin, Hashim, & Suhaimi, 2022).

Μικροσκοπικά, η υπεραγωγιμότητα ερμηνεύεται, στους συμβατικούς υπεραγωγούς, από τον σχηματισμό ζευγών Cooper και την ανάπτυξη ενεργειακού χάσματος στο φάσμα των ηλεκτρονικών διεγέρσεων. Η ύπαρξη αυτού του χάσματος σημαίνει ότι απαιτείται ελάχιστη ενέργεια για να διαταραχθεί το ζευγμένο σύστημα, με αποτέλεσμα να καταστέλλονται οι σκέδασεις που θα οδηγούσαν σε αντίσταση. Παράλληλα, η συλλογική κβαντική κατάσταση των ζευγών ερμηνεύεται μέσω μιας συνάρτησης τάξης με ορισμένο μέτρο και φάση, γεγονός που εξηγεί τη μακρινή συνοχή, τις κβαντικές παρεμβολές και τα φαινόμενα όπως το Josephson effect, που συνδέονται στενά με την υπεραγώγιμη φάση (Fernandes, 2015).

3.1 Μηδενική ηλεκτρική αντίσταση

Η πιο εντυπωσιακή και ίσως πιο άμεσα κατανοητή ιδιότητα της υπεραγωγιμότητας είναι η μηδενική ηλεκτρική αντίσταση. Πειραματικά, η ιδιότητα αυτή παρατηρείται ως απότομη πτώση της μετρούμενης αντίστασης σε τιμές κάτω από τα όρια ανίχνευσης των οργάνων, όταν η θερμοκρασία του υλικού ψύχεται κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία T_c . Σε ένα διάγραμμα αντίστασης–θερμοκρασίας, η μετάβαση εμφανίζεται ως σχεδόν κάθετη πτώση, διακριτή τόσο από την ομαλή μείωση της αντίστασης σε μέταλλα όσο και από την ασθενή αγωγιμότητα των ημιαγωγών και μονωτών (Latif, Husnain, & Siddique, 2022). Η μηδενική αντίσταση εκφράζεται συχνά με τον όρο «άπειρη αγωγιμότητα», καθώς από την άποψη της μακροσκοπικής περιγραφής η σχέση ρεύματος–τάσης υποδηλώνει ότι ένα πεπερασμένο ρεύμα μπορεί να διατηρηθεί με μηδενική διαφορά δυναμικού. Στο πλαίσιο του κλασικού νόμου του Ohm, αυτό σημαίνει ότι ο συντελεστής αντίστασης είναι μηδενικός. Ωστόσο, η υπεραγωγιμότητα δεν περιορίζεται σε αυτή την απλοϊκή περιγραφή, γιατί η συμπεριφορά της σε χρονικά μεταβαλλόμενα πεδία, σε υψηλές συχνότητες ή υπό την επίδραση μαγνητικών πεδίων απαιτεί πιο λεπτή ανάλυση από αυτήν ενός απλού «ιδανικού αγωγού» (Warnes, 1990).

Μικροσκοπικά, η μηδενική αντίσταση στους συμβατικούς υπεραγωγούς εξηγείται μέσω του μηχανισμού των ζευγών Cooper και της θεωρίας BCS. Τα ηλεκτρόνια κοντά στη στάθμη Fermi συζευγνύονται σε ζεύγη με αντίθετη ορμή και σπιν, σχηματίζοντας ένα κβαντικό συμπύκνωμα, στο οποίο η κίνηση περιγράφεται από κυματοσυναρτήσεις που εκτείνονται σε μακροσκοπικές αποστάσεις. Η ύπαρξη ενεργειακού χάσματος στα φάσματα διεγέρσεων των υπεραγωγών σημαίνει ότι μικρές διαταραχές του συστήματος δεν έχουν τη δυνατότητα να παράγουν διεγέρσεις που θα συντελούσαν σε σκέδαση και απώλεια ενέργειας, γεγονός που οδηγεί στη διατήρηση του ρεύματος χωρίς αντίσταση (Fernandes, 2015).

Ένα από τα κλασικά πειραματικά τεκμήρια της μηδενικής αντίστασης είναι η παρατήρηση σταθερών, μακρόβιων ρευμάτων σε υπεραγώγιμους κλειστούς βρόχους. Όταν ένα ρεύμα εγκατασταθεί σε έναν δακτύλιο υπεραγωγού, μπορεί να διατηρηθεί για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς μετρήσιμη μείωση, κάτι που καθιστά σαφές ότι δεν υπάρχουν ωμικές απώλειες. Στην πράξη, η διάρκεια αυτών των ρευμάτων περιορίζεται από εξωτερικούς παράγοντες, όπως ατελείς επαφές, μαγνητικές διαταραχές ή θερμικές αστάθειες, αλλά η βασική φυσική αρχή παραμένει ότι στην ιδανική περίπτωση δεν υπάρχει μηχανισμός διάχυσης ενέργειας μέσω αντίστασης (Vinen, 2003).

Η μηδενική αντίσταση συνδέεται επίσης με την ύπαρξη κρίσιμου ρεύματος. Αν το ρεύμα ξεπεράσει μια συγκεκριμένη πυκνότητα, η υπεραγώγιμη κατάσταση καταστρέφεται και εμφανίζεται ξανά πεπερασμένη αντίσταση. Στους υπεραγωγούς τύπου II, η παρουσία μαγνητικών ροϊκών δινών κάνει το φαινόμενο πιο περίπλοκο, καθώς η κίνηση των δινών μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα όπως το «flux creep» και το «flux flow», που εισάγουν μικρές αλλά υπαρκτές απώλειες. Έτσι, η πρακτική αξιοποίηση της μηδενικής αντίστασης απαιτεί τον έλεγχο της δομής του υλικού, την ελαχιστοποίηση ατελειών και τη σωστή διαχείριση των μαγνητικών πεδίων (Fetter & Hohenberg, 2018). Η ιδιότητα της μηδενικής αντίστασης έχει τεράστια σημασία για τις εφαρμογές, καθώς επιτρέπει τη μεταφορά μεγάλων ρευμάτων με ελάχιστες απώλειες ενέργειας. Υπεραγώγιμα καλώδια, υπεραγώγιμοι μαγνήτες και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας βασίζονται στην επίτευξη συνθηκών όπου το ρεύμα κυκλοφορεί χωρίς ωμικές απώλειες. Παρά τις τεχνικές δυσκολίες που σχετίζονται με την ψύξη και τη μηχανική σταθερότητα των υλικών, η προοπτική σχεδόν χωρίς απώλειες μεταφοράς ενέργειας αποτελεί βασικό κίνητρο για τη συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπεραγωγών (Kim, 2019).

3.2 Μαγνητικές ιδιότητες των υπεραγωγών

Οι μαγνητικές ιδιότητες των υπεραγωγών διαφέρουν ριζικά από εκείνες των κοινών διαμαγνητικών ή παραμαγνητικών υλικών, επειδή η υπεραγώγιμη κατάσταση συνοδεύεται από μια εξαιρετικά ισχυρή και μη γραμμική απόκριση στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Ο υπεραγωγός παρουσιάζει τέλεια διαμαγνητικότητα, δηλαδή τείνει να αποβάλλει το μαγνητικό πεδίο από το εσωτερικό του, με αποτέλεσμα η μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό του να είναι πρακτικά μηδενική κάτω από ορισμένες συνθήκες. Η ιδιότητα αυτή συνδέεται με τη δημιουργία επιφανειακών ρευμάτων που αντιτίθενται στο εξωτερικό πεδίο και αποτελεί θεμελιώδες γνώρισμα της υπεραγώγιμης φάσης (Vinen, 2003). Η μαγνητική συμπεριφορά των υπεραγωγών φαίνεται χαρακτηριστικά στις καμπύλες μαγνήτισης $M(H)$. Για έναν υπεραγωγό τύπου I, η μαγνήτιση παραμένει περίπου γραμμική και αρνητική, δείχνοντας τέλεια διαμαγνητικότητα μέχρι μια κρίσιμη τιμή του εξωτερικού πεδίου H_c . Κάτω από αυτήν την τιμή, το εσωτερικό του υπεραγωγού είναι μαγνητικά κενό, ενώ πάνω από H_c η υπεραγωγιμότητα καταστρέφεται απότομα και το υλικό μεταβαίνει στην κανονική μεταλλική κατάσταση, με μαγική συμπεριφορά

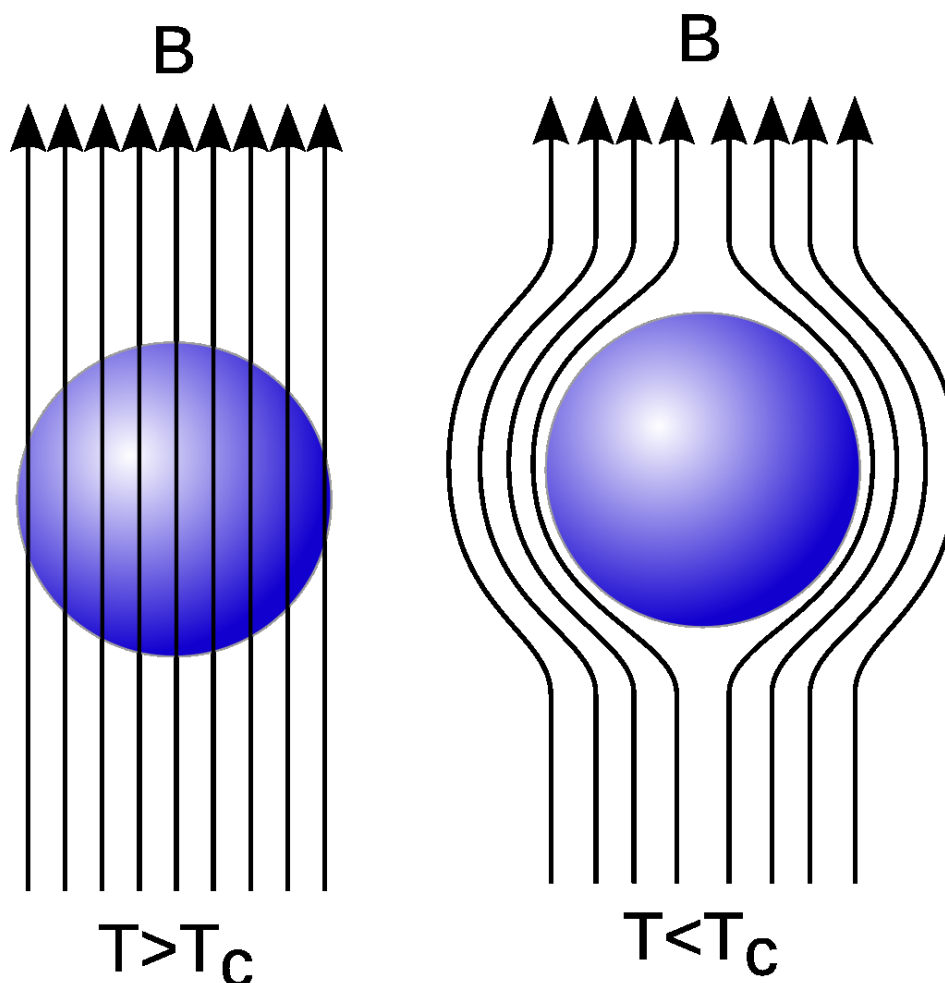
αντίστοιχη ενός απλού μετάλλου. Η μετάβαση αυτή έχει χαρακτηριστικά πρώτης τάξης ως προς το μαγνητικό πεδίο (Hasan & Ali, 2022).

Στους υπεραγωγούς τύπου II η κατάσταση είναι πιο σύνθετη, καθώς υπάρχουν δύο κρίσιμα πεδία, H_{c1} και H_{c2} . Για πεδία μικρότερα του H_{c1} , ο υπεραγωγός βρίσκεται σε καθαρή υπεραγωγίμη φάση με πλήρη αποβολή του μαγνητικού πεδίου, όπως και στον τύπο I. Όταν το πεδίο υπερβεί το H_{c1} , το υλικό εισέρχεται στη λεγόμενη μικτή κατάσταση, όπου μαγνητικές ροϊκές δίνες διεισδύουν στο εσωτερικό σχηματίζοντας ένα πλέγμα, ενώ μεταξύ των δινών παραμένουν υπεραγωγίμες περιοχές. Για πεδία μεγαλύτερα του H_{c2} , η υπεραγωγιμότητα καταστρέφεται πλήρως και το υλικό γίνεται κανονικός αγωγός (Fetter & Hohenberg, 2018). Η ύπαρξη ροϊκών δινών στους υπεραγωγούς τύπου II οφείλεται στο γεγονός ότι η μαγνητική ροή μέσα από κάθε δίνη είναι κβαντισμένη σε μονάδες του κβάντου ροής. Κάθε δίνη περιέχει στο κέντρο της έναν πυρήνα σε κανονική κατάσταση, γύρω από τον οποίο κυκλοφορούν υπεραγωγίμα ρεύματα που διαμορφώνουν την τοπική κατανομή του πεδίου. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των δινών, καθώς και η παγίδευσή τους σε ατέλειες του πλέγματος, καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις μαγνητικές και μεταφορικές ιδιότητες των υπεραγωγών τύπου II, ειδικά σε μεγάλα ρεύματα και πεδία (Huebener, 2019).

Η διακριτή συμπεριφορά των υπεραγωγών τύπου I και II συνδέεται με τη σχέση ανάμεσα στο βάθος διείσδυσης λ και στο μήκος συνάφειας ξ . Ο αδιάστατος λόγος $\kappa = \lambda/\xi$ λειτουργεί ως κριτήριο ταξινόμησης: για $\kappa < 1/\sqrt{2}$ προκύπτουν υπεραγωγοί τύπου I, ενώ για $\kappa > 1/\sqrt{2}$ εμφανίζονται υπεραγωγοί τύπου II. Αυτή η διάκριση προκύπτει από τη θερμοδυναμική σταθερότητα της διεπιφάνειας υπεραγωγίμης και κανονικής φάσης και επηρεάζει καθοριστικά τη μορφή των καμπυλών μαγνήτισης και την έκταση της μερικής διείσδυσης του μαγνητικού πεδίου (Vinen, 2003).

3.3 Το φαινόμενο Meissner

Το φαινόμενο Meissner αποτελεί κεντρική έννοια για την κατανόηση της υπεραγωγιμότητας, καθώς δείχνει ότι ο υπεραγωγός δεν είναι μόνο ένας τέλειος αγωγός με μηδενική αντίσταση, αλλά και ένα υλικό που αποβάλλει ενεργά το μαγνητικό πεδίο από το εσωτερικό του. Πειραματικά παρατηρείται ότι, όταν ένα υλικό ψύχεται κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία T_c παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, η μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό του τείνει σχεδόν στο μηδέν, ενώ το πεδίο παραμένει μόνο στο εξωτερικό ή σε ένα πολύ λεπτό επιφανειακό στρώμα. Η συμπεριφορά αυτή δεν μπορεί να αποδοθεί απλώς σε «παγωμένη» κατάσταση ενός τέλειου αγωγού, αλλά προϋποθέτει θερμοδυναμικά σταθερή φάση με χαρακτηριστική μαγνητική απόκριση (Sharma, 2015). Η διαφορά ανάμεσα σε έναν απλό τέλειο αγωγό και έναν υπεραγωγό φαίνεται αν εξεταστεί η εξέλιξη του συστήματος σε χρονική κλίμακα. Σε έναν ιδανικό αγωγό χωρίς αντίσταση, η κατανομή του μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από την ιστορία του συστήματος: αν το πεδίο εφαρμοστεί μετά την επίτευξη της τέλειας αγωγιμότητας, παραμένει παγιδευμένο στο εσωτερικό, ενώ αν υπάρχει ήδη πεδίο και στη συνέχεια «ενεργοποιηθεί» η τέλεια αγωγιμότητα, η κατάσταση είναι διαφορετική. Στον υπεραγωγό, αντίθετα, η τελική κατάσταση κάτω από T_c είναι ανεξάρτητη από το πώς εφαρμόστηκε το πεδίο: πάντα επιτυγχάνεται αποβολή του μαγνητικού πεδίου, γεγονός που χαρακτηρίζει την υπεραγωγίμη φάση ως γνήσια θερμοδυναμική κατάσταση (Hasan & Ali, 2022).



Εικόνα 2 Σχηματική σύγκριση κανονικού αγωγού (αριστερά), όπου το μαγνητικό πεδίο διεισδύει στο εσωτερικό, και υπεραγωγού (δεξιά), όπου το πεδίο αποβάλλεται λόγω του φαινομένου Meissner.

Πηγή: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b5/EfektMeisnera.svg>

Το φαινόμενο Meissner περιγράφεται φαινομενολογικά από τις εξισώσεις London, στις οποίες εισάγεται μια σχέση ανάμεσα στην πυκνότητα του υπεραγωγίμου ρεύματος και στο μαγνητικό πεδίο ή στο διανυσματικό δυναμικό. Η λύση των εξισώσεων αυτών δείχνει ότι το μαγνητικό πεδίο δεν είναι αυστηρά μηδενικό στο εσωτερικό του υπεραγωγού, αλλά μειώνεται εκθετικά από την επιφάνεια προς το εσωτερικό, με χαρακτηριστικό μήκος το βάθος διείσδυσης London. Αυτή η εκθετική συμπεριφορά συμφωνεί με τις πειραματικές παρατηρήσεις και υπογραμμίζει ότι το φαινόμενο Meissner είναι αποτέλεσμα ενός συνεκτικού υπεραγωγίμου ρεύματος σε κλίμακα μεγαλύτερη από τη μικροσκοπική κλίμακα του πλέγματος (Vinen, 2003). Στους υπεραγωγούς τύπου II, το φαινόμενο Meissner εκδηλώνεται πλήρως μόνο για πεδία κάτω από το H_{c1} . Όταν το πεδίο υπερβεί αυτή την τιμή, η αποβολή του μαγνητικού πεδίου δεν είναι πλέον πλήρης: μαγνητικές ροϊκές δίνες διεισδύουν στο εσωτερικό, δημιουργώντας περιοχές όπου το πεδίο είναι μη μηδενικό, ενώ οι υπόλοιπες περιοχές παραμένουν υπεραγωγίμες. Η μερική αυτή εφαρμογή του φαινομένου Meissner είναι χαρακτηριστική της μικτής κατάστασης και αποτυπώνεται σε καμπύλες μαγνήτισης που δεν φτάνουν στην ιδανική τιμή της τέλει διαμαγνητικότητας σε ενδιάμεσα πεδία (Fetter & Hohenberg, 2018).

Η ύπαρξη του φαινομένου Meissner έχει σημαντικές συνέπειες για την κατανόηση της υπεραγωγιμότητας ως κβαντικής φάσης, καθώς συνεπάγεται την ύπαρξη μιας μακροσκοπικής κβαντικής συνάρτησης τάξης. Η φάση αυτής της συνάρτησης συνδέεται άμεσα με την κυκλοφορία του υπεραγωγίμου ρεύματος και με την κβάντωση της μαγνητικής ροής, εξηγώντας γιατί η μαγνητική απόκριση είναι τόσο έντονα μη γραμμική και διακριτή από τη συμπεριφορά συμβατικών διαμαγνητικών υλικών. Το φαινόμενο Meissner χρησιμοποιείται πρακτικά ως «κριτήριο αναγνώρισης» της υπεραγωγίμης κατάστασης και αποτελεί βασικό στοιχείο στον ορισμό της (Hirsch & Marsiglio, 2021).

3.4 Διείσδυση μαγνητικού πεδίου (βάθος διείσδυσης London)

Η διείσδυση του μαγνητικού πεδίου σε έναν υπεραγωγό περιγράφεται από την έννοια του βάθους διείσδυσης London, συμβολίζεται συνήθως με λ και αντιπροσωπεύει το χαρακτηριστικό μήκος στο οποίο το μαγνητικό πεδίο μειώνεται από την τιμή που έχει στην επιφάνεια προς το εσωτερικό του υλικού. Πειραματικά παρατηρείται ότι το πεδίο δεν μηδενίζεται απότομα στην επιφάνεια, αλλά ακολουθεί μια εκθετική κατανομή της μορφής $B(x) = B_0 \exp(-x/\lambda)$, όπου x είναι η απόσταση από την επιφάνεια. Η συμπεριφορά αυτή αποτελεί άμεση συνέπεια των εξισώσεων London, που συνδέουν την υπεραγωγίμη πυκνότητα ρεύματος με το μαγνητικό πεδίο και το διανυσματικό δυναμικό (Vinen, 2003). Σε μικροσκοπικό επίπεδο, το βάθος διείσδυσης σχετίζεται με την πυκνότητα των υπεραγωγίμων φορέων και τη μάζα τους. Η θεωρία London οδηγεί σε μια έκφραση της μορφής $\lambda \propto (m / n_s e^2)^{1/2}$, όπου m είναι η μάζα των φορέων, n_s η πυκνότητα των υπεραγωγίμων ηλεκτρονίων και e το φορτίο τους. Αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα των φορέων που συμμετέχουν στην υπεραγωγίμη κατάσταση, τόσο μικρότερο είναι το βάθος διείσδυσης, δηλαδή το πεδίο περιορίζεται σε πιο λεπτό επιφανειακό στρώμα. Αντίθετα, χαμηλή πυκνότητα υπεραγωγίμων ηλεκτρονίων οδηγεί σε μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης (Latif, Husnain, & Siddique, 2022).

Η θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά το βάθος διείσδυσης, καθώς η πυκνότητα των υπεραγωγίμων φορέων μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Καθώς η θερμοκρασία πλησιάζει την T_c από κάτω, το n_s μειώνεται και το λ αυξάνεται, υποδηλώνοντας ότι το μαγνητικό πεδίο διεισδύει βαθύτερα στο υλικό. Σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες της T_c , η λ τείνει σε μια σχεδόν σταθερή τιμή, την τιμή μηδενικής θερμοκρασίας $\lambda(0)$. Αυτή η θερμοκρασιακή εξάρτηση μπορεί να μετρηθεί πειραματικά και να συγκριθεί με προβλέψεις θεωριών όπως η BCS, παρέχοντας πληροφορίες για τη δομή του ενεργειακού χάσματος και για τη φύση της υπεραγωγίμης κατάστασης (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022). Το βάθος διείσδυσης London, σε συνδυασμό με το μήκος συνάφειας ξ , καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τον τύπο του υπεραγωγού και τη συμπεριφορά του σε μαγνητικά πεδία. Όπως αναφέρθηκε, ο λόγος $\kappa = \lambda/\xi$ λειτουργεί ως κριτήριο για τον διαχωρισμό σε τύπου I και τύπου II. Σε υλικά με μεγάλο κ , το μαγνητικό πεδίο μπορεί να διεισδύει ως ροϊκές δίνες χωρίς να καταστρέφει πλήρως την υπεραγωγιμότητα, οδηγώντας στη μικτή κατάσταση. Αντίθετα, σε υλικά με μικρό κ η δημιουργία διεπιφανειών υπεραγωγίμης-κανονικής φάσης δεν είναι ευνοϊκή, και η υπεραγωγιμότητα καταρρέει απότομα όταν το πεδίο ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή (Fetter & Hohenberg, 2018).

Σε πραγματικά υλικά, το βάθος διείσδυσης μπορεί να είναι ανισότροπο και να εξαρτάται από την κρυσταλλογραφική διεύθυνση, ιδίως σε στρωματικά και ανισότροπα υπεραγωγικά συστήματα όπως τα κεραμικά υψηλής T_c . Η ύπαρξη διαφορετικών τιμών του λ κατά μήκος και κάθετα στα επίπεδα του κρυστάλλου οδηγεί σε πολύπλοκες κατανομές του μαγνητικού πεδίου και σε ιδιόμορφη συμπεριφορά των ροϊκών δινών. Η μελέτη αυτών των ανισοτροπιών είναι κρίσιμη για την κατανόηση της σταθερότητας της

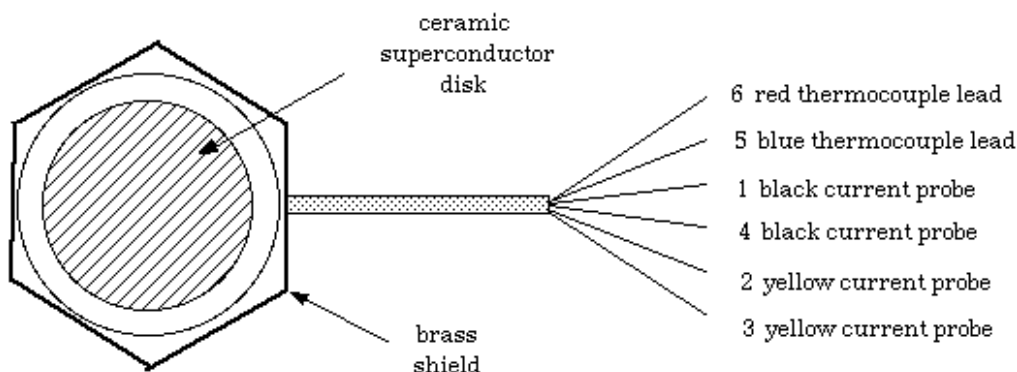
υπεραγώγιμης κατάστασης σε ισχυρά πεδία και για τη βελτιστοποίηση υλικών που προορίζονται για τεχνολογικές εφαρμογές (Barnos, 2025). Τέλος, το βάθος διείσδυσης London είναι μέγεθος που μπορεί να προσδιοριστεί με διάφορες πειραματικές τεχνικές, όπως μαγνητομετρία, μικροκυματικές μετρήσεις και τεχνικές επιφανειακής ανάκλασης νετρονίων ή φωτονίων. Τα δεδομένα που παρέχουν τέτοιες μετρήσεις χρησιμοποιούνται για να ελεγχθούν θεωρητικά μοντέλα και να εξαχθούν συμπεράσματα για την πυκνότητα και τη φύση των υπεραγώγιμων φορέων. Η κατανόηση της διείσδυσης του μαγνητικού πεδίου, σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη, επιτρέπει μια πλήρη περιγραφή της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς των υπεραγωγών (Vinen, 2003).

3.5 Κρίσιμη θερμοκρασία (T_c)

Η κρίσιμη θερμοκρασία T_c είναι ένα από τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε υπεραγωγού και ορίζει το όριο ανάμεσα στην κανονική και στην υπεραγώγιμη φάση. Πειραματικά προσδιορίζεται ως η θερμοκρασία στην οποία η ηλεκτρική αντίσταση του υλικού παρουσιάζει απότομη πτώση σε πρακτικά μηδενική τιμή, όταν το δείγμα ψύχεται σε συνθήκες απουσίας ή πολύ μικρού μαγνητικού πεδίου. Η μετάβαση αυτή δεν είναι απλώς σημείο σταδιακής ελάττωσης της αντίστασης, αλλά χαρακτηρίζει θερμοδυναμική αλλαγή φάσης, όπου μεταβάλλονται τα βασικά μακροσκοπικά μεγέθη του συστήματος και εμφανίζεται μακροσκοπική κβαντική συνοχή (Vinen, 2003).

Η T_c συνδέεται άμεσα με τις μικροσκοπικές ιδιότητες του υλικού, όπως τη δομή ζωνών, την πυκνότητα καταστάσεων στη στάθμη Fermi και τη φύση της αλληλεπίδρασης που οδηγεί στη σύζευξη των ηλεκτρονίων. Στους συμβατικούς, χαμηλής θερμοκρασίας υπεραγωγούς, η θεωρία BCS δίνει μια εκθετική εξάρτηση της T_c από την ισχύ της ελκτικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των ηλεκτρονίων και των φωνονίων, γεγονός που εξηγεί γιατί μικρές διαφοροποιήσεις στη χημική σύσταση ή στη δομή μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες αλλαγές της κρίσιμης θερμοκρασίας. Η παρουσία ακαθαρσιών, η τάξη του πλέγματος και η ύπαρξη μαγνητικών ιόντων παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο, καθώς μπορούν να καταστείλουν την υπεραγώγιμη τάξη και να μειώσουν την T_c (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022). Θερμοδυναμικά, η μετάβαση στην υπεραγώγιμη κατάσταση συνοδεύεται από μεταβολές στην ελεύθερη ενέργεια και εμφανή χαρακτηριστικά σε μετρήσεις ειδικής θερμότητας και μαγνητικής επιδεκτικότητας. Σε πολλούς συμβατικούς υπεραγωγούς, η μετάβαση μπορεί να περιγραφεί ως μετάβαση δεύτερης τάξης, όπου η ελεύθερη ενέργεια παραμένει συνεχής, αλλά η παράγωγός της ως προς τη θερμοκρασία, δηλαδή η εντροπία και η ειδική θερμότητα, παρουσιάζουν ασυνέχεια. Το άλμα στην ειδική θερμότητα στη T_c είναι χαρακτηριστικό πειραματικό αποτύπωμα της υπεραγώγιμης μετάβασης και παρέχει άμεση πρόσβαση στην ενέργεια συμπίκνωσης της υπεραγώγιμης φάσης (Latif, Husnain, & Siddique, 2022).

Ένα από τα σημαντικότερα πειραματικά ευρήματα σχετικά με την T_c είναι το ισοτοπικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο η κρίσιμη θερμοκρασία εξαρτάται από τη μάζα των ιόντων του πλέγματος. Σε πολλούς μεταλλικούς υπεραγωγούς, η T_c μεταβάλλεται περίπου ανάλογα με $M^{-\alpha}$, όπου M είναι η μέση ατομική μάζα και α παράμετρος κοντά στο $1/2$. Αυτή η εξάρτηση δείχνει ότι οι ταλαντώσεις του πλέγματος, δηλαδή τα φωνόνια, συμμετέχουν ενεργά στον μηχανισμό δημιουργίας της υπεραγώγιμης κατάστασης, υποστηρίζοντας την εικόνα της BCS για φωνονικό μηχανισμό σύζευξης (Vinen, 2003).



Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης για τη μελέτη κεραμικού υπεραγώγιμου δίσκου, με ορειχάλκινη θωράκιση, θερμοζεύγος και ακροδέκτες ρεύματος για τη μέτρηση της μετάβασης στην υπεραγώγιμη κατάσταση (T_c).

Πηγή: http://teacher.pas.rochester.edu/PHY_LABS/Superconductivity_old/Superconductivity.html

Στους υπεραγωγούς υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας και σε άλλες κατηγορίες μη συμβατικών υπεραγωγών, η T_c μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλές τιμές, ακόμα και σε κλίμακα εκατοντάδων Kelvin υπό πίεση, γεγονός που υπερβαίνει τις κλασικές προβλέψεις της BCS. Σε αυτά τα υλικά, η εξάρτηση της κρίσιμης θερμοκρασίας από παράγοντες όπως το ντόπινγκ, η πίεση, η ανισοτροπία και οι μαγνητικές διακυμάνσεις παρουσιάζει πολύ πιο περίπλοκη συμπεριφορά, υποδηλώνοντας τη συμμετοχή ισχυρά συσχετισμένων ηλεκτρονικών καταστάσεων. Η μελέτη των μεταβολών της T_c σε συνάρτηση με αυτούς τους παράγοντες αποτελεί βασικό εργαλείο για την κατανόηση νέων μηχανισμών υπεραγωγιμότητας (Barnos, 2025). Από πρακτική άποψη, η κρίσιμη θερμοκρασία καθορίζει τις απαιτήσεις κρυογενικής και το πεδίο εφαρμογών ενός υπεραγωγικού υλικού. Υλικά με T_c κοντά ή πάνω από τη θερμοκρασία του υγρού αζώτου επιτρέπουν πιο οικονομικά και απλά συστήματα ψύξης, ενώ υλικά με πολύ χαμηλές T_c απαιτούν υγρό ήλιο ή πιο σύνθετα κρυογονικά κυκλώματα. Η επιλογή υπεραγωγού για συγκεκριμένη εφαρμογή, όπως μαγνήτες, καλώδια ή αισθητήρες, εξαρτάται καίρια από την T_c , σε συνδυασμό με τα κρίσιμα πεδία και ρεύματα (Kim, 2019).

3.6 Κρίσιμο μαγνητικό πεδίο (H_c , H_{c1} , H_{c2})

Το κρίσιμο μαγνητικό πεδίο είναι το μέγεθος που καθορίζει τα όρια της υπεραγώγιμης κατάστασης σε συνθήκες εφαρμογής εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Για έναν υπεραγωγό τύπου I, το κρίσιμο πεδίο H_c είναι η τιμή του εξωτερικού πεδίου στην οποία η ελεύθερη ενέργεια της υπεραγώγιμης φάσης εξισώνεται με εκείνη της κανονικής. Κάτω από το H_c , η υπεραγώγιμη κατάσταση είναι θερμοδυναμικά ευνοϊκή και το υλικό αποβάλλει το μαγνητικό πεδίο από το εσωτερικό του, ενώ πάνω από το H_c η υπεραγώγιμη φάση καταστρέφεται και το υλικό μεταβαίνει στην κανονική κατάσταση με πλήρη διείσδυση του πεδίου (Vinen, 2003). Η θερμοκρασιακή εξάρτηση του κρίσιμου πεδίου για υπεραγωγούς τύπου I συχνά προσεγγίζεται με τη σχέση $H_c(T) = H_c(0) [1 - (T/T_c)^2]$, που προκύπτει από την εξισορρόπηση της ενεργειακής διαφοράς μεταξύ των δύο φάσεων. Η μορφή αυτή δείχνει ότι το κρίσιμο πεδίο μηδενίζεται στη T_c , όπου εξαφανίζεται η υπεραγωγιμότητα, και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του σε θερμοκρασία κοντά στο απόλυτο μηδέν. Η ακριβής συμπεριφορά μπορεί να εξαρτάται από λεπτομέρειες του υλικού, αλλά η γενική τάση είναι η μειούμενη H_c με αύξηση της θερμοκρασίας (Latif, Husnain, & Siddique, 2022).

Στους υπεραγωγούς τύπου II, η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη, καθώς εμφανίζονται δύο διαφορετικά κρίσιμα πεδία, H_{c1} και H_{c2} . Το H_{c1} είναι το κατώτερο κρίσιμο πεδίο, κάτω από το οποίο ο υπεραγωγός βρίσκεται σε καθαρή Meissner κατάσταση με πλήρη αποβολή

του μαγνητικού πεδίου. Όταν το πεδίο υπερβεί το H_{c1} , το μαγνητικό πεδίο αρχίζει να διεισδύει σε μορφή κβαντισμένων ροϊκών δινών, οδηγώντας στη μικτή κατάσταση, όπου συνυπάρχουν υπεραγώγιμες περιοχές και περιοχές κανονικής φάσης γύρω από τους πυρήνες των δινών (Fetter & Hohenberg, 2018). Το ανώτερο κρίσιμο πεδίο H_{c2} είναι η τιμή του πεδίου στην οποία η μικτή κατάσταση παύει να είναι σταθερή και η υπεραγώγιμη τάξη εξαφανίζεται εντελώς μέσα στο υλικό. Για πεδία μεγαλύτερα από H_{c2} , το δείγμα βρίσκεται σε κανονική, μη υπεραγώγιμη κατάσταση σε όλο τον όγκο του. Σε πολλά υλικά τύπου II, ιδίως σε εκείνα με υψηλό λόγο κ , το H_{c2} μπορεί να λάβει πολύ μεγάλες τιμές, επιτρέποντας τη διατήρηση της υπεραγώγιμης φάσης σε ισχυρά μαγνητικά πεδία, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές όπως οι υπεραγώγιμοι μαγνήτες υψηλού πεδίου (Huebener, 2019).

Η θερμοκρασιακή εξάρτηση των H_{c1} και H_{c2} είναι επίσης ουσιαστική για τη χαρτογράφηση του διαγράμματος φάσεων ενός υπεραγωγού τύπου II. Συνήθως, οι κρίσιμες αυτές τιμές μειώνονται καθώς η θερμοκρασία πλησιάζει την T_c , σχηματίζοντας χαρακτηριστικές καμπύλες στο επίπεδο $H-T$ που οριοθετούν τις περιοχές Meissner, μικτής και κανονικής κατάστασης. Η λεπτομερής μορφή των καμπυλών επηρεάζεται από ανισοτροπίες, ακαθαρσίες, φαινόμενα παγίδευσης ροής και άλλες μικροσκοπικές παραμέτρους του υλικού (Vinen, 2003). Για πρακτικούς σκοπούς, ιδιαίτερη σημασία έχει και το λεγόμενο πεδίο μη αντιστρεπτότητας, πέρα από το οποίο η υστέρηση στη μαγνήτιση εξαφανίζεται και η κίνηση των ροϊκών δινών γίνεται ελεύθερη, οδηγώντας σε ενεργειακές απώλειες. Η περιοχή μεταξύ H_{c1} και του πεδίου μη αντιστρεπτότητας χαρακτηρίζει το εύρος λειτουργίας του υπεραγωγού σε καθεστώς υψηλού ρεύματος χωρίς σημαντική διάχυση ενέργειας λόγω κίνησης δινών. Η βελτιστοποίηση των κρίσιμων πεδίων και της σταθερότητας της μικτής κατάστασης αποτελεί κεντρικό στόχο στην ανάπτυξη υλικών για ισχυρούς υπεραγώγιμους μαγνήτες και καλώδια (Barnos, 2025).

3.7 Μαγνήτιση υπεραγώγιμων δειγμάτων

Η μαγνήτιση ενός υπεραγωγού εκφράζει την απόκριση του υλικού σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και αποτελεί βασικό εργαλείο για τη μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων και των φάσεων του. Ορίζεται ως το μαγνητικό δίπολο ροπής ανά μονάδα όγκου και συνδέεται με τη διαφορά ανάμεσα στο εφαρμοζόμενο πεδίο και στη μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό του υλικού. Στους υπεραγωγούς, η μαγνήτιση εμφανίζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως μεγάλες αρνητικές τιμές που αντιστοιχούν σε τέλεια ή σχεδόν τέλεια διαμαγνητικότητα, καθώς και υστέρηση, ιδίως στους τύπου II όπου εμφανίζονται ροϊκές δίνες και φαινόμενα παγίδευσης ροής (Vinen, 2003). Για υπεραγωγούς τύπου I, οι καμπύλες μαγνήτισης $M(H)$ σε θερμοκρασία κάτω της T_c παρουσιάζουν μια καθαρή, περίπου γραμμική αρνητική περιοχή, όπου η μαγνήτιση αυξάνεται σε απόλυτη τιμή με το πεδίο μέχρι την τιμή H_c . Σε αυτή την περιοχή, η εσωτερική μαγνητική επαγωγή είναι σχεδόν μηδενική, γεγονός που αντανακλά την πλήρη εκδήλωση του φαινομένου Meissner. Όταν το πεδίο φτάσει το H_c , η μαγνήτιση πέφτει απότομα προς τιμές κοντά στο μηδέν, καθώς το υλικό μεταβαίνει στην κανονική κατάσταση και παύει να παρουσιάζει τέλεια διαμαγνητικότητα (Hasan & Ali, 2022).

Στους υπεραγωγούς τύπου II, οι καμπύλες μαγνήτισης είναι πιο σύνθετες και εμφανίζουν υστέρηση. Για πεδία μικρότερα από το H_{c1} , η συμπεριφορά μοιάζει με εκείνη των υπεραγωγών τύπου I, με ισχυρή αρνητική μαγνήτιση που αντιστοιχεί σε πλήρη Meissner κατάσταση. Όταν το πεδίο υπερβεί το H_{c1} , αρχίζουν να εισέρχονται ροϊκές δίνες, και η μαγνήτιση μειώνεται σταδιακά σε απόλυτη τιμή, καθώς μέρος του όγκου καταλαμβάνεται από περιοχές όπου το πεδίο δεν είναι μηδενικό. Για πεδία περίπου κοντά ή κάτω από το

Hc₂, το υλικό βρίσκεται στη μικτή κατάσταση, όπου η μαγνήτιση καθορίζεται από την πυκνότητα και την κατανομή των δινών (Fetter & Hohenberg, 2018).

Η παρουσία παγίδευσης ροής σε πραγματικούς υπεραγωγούς τύπου II οδηγεί σε χαρακτηριστικές βρόχους υστέρησης στις καμπύλες M(H). Κατά την αύξηση και στη συνέχεια μείωση του εξωτερικού πεδίου, η διαδρομή που ακολουθεί η μαγνήτιση δεν είναι αντιστρεπτή, επειδή οι ροϊκές δίνες παγιδεύονται σε ατέλειες, κόκκους ή άλλες ανομοιογένειες του υλικού. Η υστέρηση αυτή μπορεί να περιγραφεί με μοντέλα «κρίσιμης κατάστασης», όπως το μοντέλο Bean, και σχετίζεται άμεσα με το κρίσιμο ρεύμα που μπορεί να μεταφέρει το υλικό χωρίς σημαντική κίνηση δινών και απώλειες (Huebener, 2019). Η μαγνήτιση επηρεάζεται επίσης από τη γεωμετρία του δείγματος και τους παράγοντες απομαγνήτισης. Σε δείγματα με συγκεκριμένο σχήμα, το πραγματικό εσωτερικό πεδίο μπορεί να διαφέρει σημαντικά από το εφαρμοζόμενο, λόγω της κατανομής των επιφανειακών ρευμάτων και της καμπυλότητας της επιφάνειας. Οι διορθώσεις λόγω απομαγνήτισης είναι σημαντικές όταν επιχειρείται ο ακριβής προσδιορισμός κρίσιμων πεδίων και της πραγματικής μαγνητικής συμπεριφοράς από πειραματικές καμπύλες M(H), ιδίως σε μικρά ή ανισότροπα δείγματα (Vinen, 2003). Πειραματικά, η μαγνήτιση υπεραγωγών μετράται με διάφορες τεχνικές υψηλής ευαισθησίας, όπως μαγνητόμετρα τύπου SQUID ή δονητικά μαγνητόμετρα. Τέτοιες μετρήσεις επιτρέπουν τον προσδιορισμό των κρίσιμων πεδίων, την εκτίμηση του κρίσιμου ρεύματος μέσω του πλάτους των βρόχων υστέρησης, καθώς και τη μελέτη της θερμοκρασιακής και πεδιακής εξάρτησης της μαγνητικής απόκρισης. Η ανάλυση των καμπυλών μαγνήτισης είναι απαραίτητη τόσο για την κατανόηση των θεμελιωδών ιδιοτήτων των υπεραγωγών όσο και για τη βελτιστοποίηση υλικών που προορίζονται για εφαρμογές υψηλού πεδίου ή μεγάλου ρεύματος (Kim, 2019).

3.8 Ειδική θερμότητα υπεραγώγιμων υλικών

Η ειδική θερμότητα των υπεραγώγιμων υλικών αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά θερμοδυναμικά μεγέθη που αποκαλύπτουν τη φύση της υπεραγώγιμης μετάβασης. Πειραματικά παρατηρείται ότι, καθώς η θερμοκρασία πλησιάζει την κρίσιμη θερμοκρασία T_c από πάνω, η ειδική θερμότητα αυξάνεται και παρουσιάζει ένα απότομο άλμα κατά τη μετάβαση στην υπεραγώγιμη κατάσταση, υποδεικνύοντας αλλαγή φάσης. Η συμπεριφορά αυτή διαφέρει από εκείνη των συνηθισμένων μεταλλικών συστημάτων, όπου η ειδική θερμότητα αποτελεί άθροισμα ηλεκτρονικής και φωνονικής συνεισφοράς χωρίς αιφνίδια ασυνέχεια στη θερμοκρασία που εξετάζεται (Vinen, 2003). Στους συμβατικούς υπεραγωγούς, η θεωρία BCS προβλέπει ότι η ηλεκτρονική συνεισφορά στην ειδική θερμότητα μειώνεται εκθετικά για θερμοκρασίες πολύ μικρότερες της T_c, λόγω της ύπαρξης ενεργειακού χάσματος στο φάσμα των διεγέρσεων. Τα θερμικά διεγερμένα κουαζι-σωματίδια απαιτούν ενέργεια τουλάχιστον ίση με το χάσμα, με αποτέλεσμα η θερμική διέγερση να γίνεται όλο και πιο δύσκολη όσο η θερμοκρασία μειώνεται. Αυτό οδηγεί σε χαρακτηριστική καμπύλη C(T), όπου η ειδική θερμότητα είναι μικρή σε χαμηλές θερμοκρασίες και παρουσιάζει αιχμή στη T_c, η οποία συνδέεται άμεσα με την ενέργεια συμπίκνωσης της υπεραγώγιμης κατάστασης (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022).

Η φωνονική συνεισφορά στην ειδική θερμότητα, που οφείλεται στις ταλαντώσεις του κρυσταλλικού πλέγματος, παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανεπηρέαστη από τη μετάβαση στην υπεραγώγιμη κατάσταση και ακολουθεί γνωστούς νόμους, όπως τον νόμο T³ σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και την προσέγγιση στην κλασική τιμή υψηλότερα. Έτσι, η χαρακτηριστική μεταβολή της ειδικής θερμότητας κατά την υπεραγώγιμη μετάβαση

προέρχεται κυρίως από την ηλεκτρονική συνεισφορά και επιτρέπει τον διαχωρισμό μεταξύ φωνονικών και ηλεκτρονικών όρων μέσω προσεκτικής ανάλυσης πειραματικών δεδομένων (Latif, Husnain, & Siddique, 2022). Σε μη συμβατικούς υπεραγωγούς, όπως τα κεραμικά υψηλής T_c ή τα σιδηροπυκνίτες, η θερμοκρασιακή εξάρτηση της ειδικής θερμότητας μπορεί να διαφέρει αισθητά από την απλή εκθετική μορφή της BCS, αντανακλώντας ανισοτροπικά ή πολυ-χασματικά ενεργειακά κενά ή ακόμη και ύπαρξη κόμβων στο χάσμα. Η λεπτομερής μελέτη της $C(T)$ σε ευρεία περιοχή θερμοκρασιών επιτρέπει την εξαγωγή πληροφοριών για τη συμμετρία της υπεραγώγιμης τάξης, την παρουσία πρόσθετων διεγέρσεων και τη συσχέτιση με άλλα θερμοδυναμικά μεγέθη. Η ειδική θερμότητα, επομένως, αποτελεί κρίσιμο πειραματικό εργαλείο για τη διάκριση μεταξύ διαφορετικών κατηγοριών υπεραγώγιμων υλικών (Barnos, 2025).

4. Τύποι υπεραγωγών

Η κατάταξη των υπεραγωγών σε διαφορετικούς τύπους βασίζεται κυρίως στη μαγνητική τους συμπεριφορά και στον τρόπο που ανταποκρίνονται σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Η θεμελιώδης διάκριση είναι ανάμεσα σε υπεραγωγούς τύπου I και τύπου II, οι οποίοι παρουσιάζουν διαφορετική δομή φάσεων και διαφορετική μορφή των κρίσιμων μαγνητικών πεδίων. Παράλληλα, σε επίπεδο υλικών, μπορούν να διακριθούν μεταλλικοί, κεραμικοί, οργανικοί και υπεραγωγοί υπό υψηλή πίεση, ανάλογα με τη χημική σύσταση και τη δομή τους, ενώ η θεωρητική αντιμετώπιση διαχωρίζει συχνά τα υλικά σε συμβατικά (BCS-τύπου) και μη συμβατικά (Hasan & Ali, 2022). Η ταξινόμηση αυτή δεν είναι μόνο περιγραφική, αλλά έχει άμεσες συνέπειες στη χρήση των υπεραγωγίων υλικών σε εφαρμογές. Υπεραγωγοί τύπου I, όπως τα καθαρά μέταλλα, εμφανίζουν πλήρη αποβολή του μαγνητικού πεδίου μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή και είναι κατάλληλοι για πειραματικές μελέτες θεμελιωδών ιδιοτήτων. Αντίθετα, οι υπεραγωγοί τύπου II, με υψηλότερα κρίσιμα πεδία και δυνατότητα λειτουργίας σε μικτή κατάσταση, είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι για εφαρμογές υψηλού πεδίου, όπως ισχυροί μαγνήτες και καλώδια μεταφοράς ρεύματος (Fetter & Hohenberg, 2018).

4.1 Γενική ταξινόμηση υπεραγώγιμων υλικών

Σε γενικό επίπεδο, οι υπεραγωγοί μπορούν να ταξινομηθούν κατά υλικό, κατά μηχανισμό σύζευξης και κατά μαγνητική συμπεριφορά. Ως προς το υλικό, υπάρχουν απλά στοιχειακά μέταλλα (π.χ. Hg, Pb, Sn), κράματα και ενώσεις μετάλλων, κεραμικά οξειδία υψηλής T_c , διαμεταλλικές ενώσεις, οργανικοί υπεραγωγοί, βαρέα φερμιόνια, σιδηροπυκνίτες και πρόσφατα υδρίδια υπό υψηλή πίεση. Κάθε κατηγορία παρουσιάζει διαφορετικά δομικά χαρακτηριστικά, διαφορετικό εύρος κρίσιμων θερμοκρασιών και πεδίων, καθώς και ιδιαιτερότητες ως προς τη μαγνητική και μεταφορική της συμπεριφορά (Barnos, 2025). Ως προς τον μηχανισμό σύζευξης, συνηθίζεται η διάκριση σε συμβατικούς υπεραγωγούς, όπου η σύζευξη των ηλεκτρονίων αποδίδεται κυρίως σε φωνόνια, και σε μη συμβατικούς υπεραγωγούς, όπου φαίνεται να εμπλέκονται ισχυρές ηλεκτρονικές συσχετίσεις, μαγνητικές διακυμάνσεις ή πιο περίπλοκες αλληλεπιδράσεις. Η θεωρία BCS περιγράφει με επιτυχία τους περισσότερους μεταλλικούς και κραματικούς υπεραγωγούς χαμηλής T_c , ενώ στους υψηλής T_c και σε άλλες «εξωτικές» κατηγορίες υλικών απαιτούνται επεκτάσεις ή εναλλακτικά θεωρητικά πλαίσια για την κατανόηση του μηχανισμού σύζευξης (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022).

Ως προς τη μαγνητική συμπεριφορά, η διάκριση υπεραγωγών τύπου I και II βασίζεται στη θερμοδυναμική σταθερότητα της διεπιφάνειας υπεραγώγιμης–κανονικής φάσης και εκφράζεται μέσω του λόγου $\kappa = \lambda/\xi$. Οι υπεραγωγοί τύπου I χαρακτηρίζονται από $\kappa < 1/\sqrt{2}$ και παρουσιάζουν μία μόνο τιμή κρίσιμου πεδίου, ενώ οι υπεραγωγοί τύπου II έχουν $\kappa > 1/\sqrt{2}$ και δύο κρίσιμα πεδία, με αποτέλεσμα τη μικτή κατάσταση και τη δημιουργία ροϊκών δινών. Η κατάταξη αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανάλυση των καμπυλών μαγνήτισης και τον σχεδιασμό υλικών για συγκεκριμένες μαγνητικές απαιτήσεις (Vinen, 2003).

4.2 Υπεραγωγοί τύπου I

4.2.1 Ορισμός και χαρακτηριστικά

Οι υπεραγωγοί τύπου I είναι υλικά τα οποία, όταν βρεθούν κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία τους, παρουσιάζουν πλήρη αποβολή του μαγνητικού πεδίου από το εσωτερικό τους (πλήρες φαινόμενο Meissner), μέχρι μια μοναδική τιμή κρίσιμου πεδίου

H_c . Κάτω από αυτή την τιμή, η μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό του υλικού είναι πρακτικά μηδενική, ενώ πάνω από το H_c η υπεραγωγιμότητα καταστρέφεται απότομα και το υλικό μεταβαίνει στην κανονική κατάσταση. Η μετάβαση αυτή ως προς το μαγνητικό πεδίο έχει χαρακτηριστικά πρώτης τάξης, συνοδευόμενη από λανθάνουσα θερμότητα και απότομη αλλαγή στην μαγνήτιση (Vinen, 2003).

Χαρακτηριστικό των υπεραγωγών τύπου I είναι ότι ο λόγος $\kappa = \lambda/\xi$ είναι μικρότερος από $1/\sqrt{2}$, γεγονός που σημαίνει ότι η δημιουργία διεπιφανειών υπεραγωγίμης–κανονικής φάσης δεν είναι ενεργειακά ευνοϊκή. Έτσι, όταν το εξωτερικό πεδίο πλησιάζει την H_c , η υπεραγωγίμη φάση καταρρέει ομοιόμορφα, αντί να επιτρέπει μερική διείσδυση του πεδίου με μορφή ροϊκών δινών. Στην πράξη, αυτό οδηγεί σε πολύ καθαρές καμπύλες μαγνήτισης χωρίς μικτή κατάσταση στον ογκώδη πυρήνα του δείγματος, αν και μπορούν να υπάρξουν λεπτές ενδιάμεσες καταστάσεις κοντά στις επιφάνειες (Hasan & Ali, 2022).

4.2.2 Μαγνητικές ιδιότητες και κρίσιμο πεδίο

Οι μαγνητικές ιδιότητες των υπεραγωγών τύπου I χαρακτηρίζονται από τέλεια διαμαγνητικότητα στην περιοχή πεδίων μικρότερων από το H_c . Η μαγνήτιση είναι γραμμικά αρνητική ως προς το εφαρμοζόμενο πεδίο, με κλίση που αντιστοιχεί σε απόκριση σχεδόν ιδανικού διαμαγνήτη, έτσι ώστε η μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό να παραμένει μηδενική. Αυτή η συμπεριφορά απορρέει από την ανάπτυξη επιφανειακών υπεραγωγίμων ρευμάτων, τα οποία παράγουν μαγνητικό πεδίο αντίθετης κατεύθυνσης από το εξωτερικό και ακυρώνουν την εσωτερική επαγωγή (Vinen, 2003).

Η τιμή του κρίσιμου πεδίου H_c εξαρτάται από τη θερμοκρασία και συνδέεται με τη διαφορά ελεύθερης ενέργειας μεταξύ υπεραγωγίμης και κανονικής φάσης. Πολλές φορές περιγράφεται από τη σχέση $H_c(T) = H_c(0) [1 - (T/T_c)^2]$, που αποτυπώνει το γεγονός ότι η υπεραγωγίμη φάση είναι πιο σταθερή σε χαμηλές θερμοκρασίες και χάνει το πλεονέκτημά της ενεργειακά όσο πλησιάζουμε στην T_c . Όταν το εξωτερικό πεδίο φτάσει το H_c , η ελεύθερη ενέργεια εξισώνεται και η μετάβαση στην κανονική κατάσταση είναι απότομη, με αποτέλεσμα να παρατηρείται απότομη μεταβολή στη μαγνήτιση (Latif, Husnain, & Siddique, 2022). Σε δείγματα συγκεκριμένης γεωμετρίας, η επιφάνεια και οι παράγοντες απομαγνήτισης μπορούν να οδηγήσουν σε φαινόμενα ενδιάμεσης κατάστασης, όπου υπεραγωγίμες και κανονικές περιοχές συνυπάρχουν σε μοντέλα λωρίδων ή κηλίδων, πριν από την πλήρη καταστροφή της υπεραγωγίμης φάσης. Ωστόσο, στον ογκώδη πυρήνα του υλικού η συμπεριφορά παραμένει ουσιαστικά τύπου I, χωρίς σταθερή μικτή κατάσταση όπως στους υπεραγωγούς τύπου II. Αυτά τα χαρακτηριστικά εμφανίζονται καθαρά σε μετρήσεις μαγνήτισης, όπου η καμπύλη $M(H)$ παρουσιάζει μια σχεδόν ιδανική ευθεία μέχρι το H_c και απότομη μεταβολή μετά από αυτό (Huebener, 2019).

4.2.3 Παραδείγματα υλικών τύπου I

Στην κατηγορία των υπεραγωγών τύπου I ανήκουν κυρίως απλά στοιχειακά μέταλλα, όπως ο υδράργυρος (Hg), ο μόλυβδος (Pb), ο κασσίτερος (Sn), το αλουμίνιο (Al) και ο θάλλιος (Tl), τα οποία εμφανίζουν υπεραγωγιμότητα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και μετριοπαθή κρίσιμα πεδία. Τα υλικά αυτά ήταν από τα πρώτα που μελετήθηκαν ιστορικά και αποτέλεσαν το βασικό πειραματικό πεδίο πάνω στο οποίο δοκιμάστηκαν οι θεωρίες υπεραγωγιμότητας. Παρουσιάζουν σχετικά απλή κρυσταλλική δομή και οι ιδιότητές τους περιγράφονται ικανοποιητικά από την κλασική θεωρία BCS (Warnes, 1990).

Πέρα από τα στοιχειακά μέταλλα, ορισμένες απλές μεταλλικές ενώσεις και κράματα χαμηλής αντοχής σε μαγνητικά πεδία συμπεριφέρονται επίσης ως υπεραγωγοί τύπου I, αν

και στην πράξη η πλειονότητα των κραμάτων και σύνθετων υλικών με τεχνολογικό ενδιαφέρον ανήκουν στον τύπο II. Εξαιτίας των σχετικά χαμηλών τιμών κρίσιμης θερμοκρασίας και κρίσιμων πεδίων, οι υπεραγωγοί τύπου I χρησιμοποιούνται κυρίως ως πρότυπα για θεμελιώδεις μελέτες και όχι τόσο σε εφαρμογές υψηλού πεδίου ή μεγάλου ρεύματος, όπου προτιμώνται υπεραγωγοί τύπου II με πολύ ευρύτερη περιοχή σταθερής υπεραγωγίμης λειτουργίας (Hasan & Ali, 2022).

4.3 Υπεραγωγοί τύπου II

4.3.1 Ορισμός και χαρακτηριστικά

Οι υπεραγωγοί τύπου II αποτελούν κατηγορία υλικών που διαφέρουν θεμελιωδώς από τους υπεραγωγούς τύπου I ως προς τη μαγνητική συμπεριφορά τους και τον τρόπο με τον οποίο ανταποκρίνονται σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη δύο κρίσιμων μαγνητικών πεδίων, H_{c1} και H_{c2} , και από την εμφάνιση μιας ενδιάμεσης «μικτής κατάστασης», στην οποία το μαγνητικό πεδίο διεισδύει με τη μορφή κβαντισμένων ροϊκών δινών ενώ η υπεραγωγίμη τάξη διατηρείται στο μεγαλύτερο μέρος του υλικού. Η ύπαρξη αυτής της κατάστασης συνδέεται με το γεγονός ότι ο λόγος $\kappa = \lambda/\xi$, δηλαδή ο λόγος βάθους διείσδυσης προς μήκος συνάφειας, είναι μεγαλύτερος από $1/\sqrt{2}$, πράγμα που καθιστά ευνοϊκή την παρουσία διεπιφανειών μεταξύ υπεραγωγίμης και κανονικής περιοχής (Vinen, 2003).

Σε αντίθεση με τους υπεραγωγούς τύπου I, στους οποίους η μετάβαση από την υπεραγωγίμη στην κανονική κατάσταση γίνεται απότομα όταν το πεδίο υπερβεί το H_c , στους τύπου II η μετάβαση είναι σταδιακή ως προς το πεδίο. Για πεδία μικρότερα του H_{c1} , το υλικό βρίσκεται σε καθαρή Meissner κατάσταση με πλήρη αποβολή του πεδίου, ενώ για πεδία μεγαλύτερα του H_{c2} η υπεραγωγίμη τάξη εξαφανίζεται πλήρως και το υλικό συμπεριφέρεται ως κανονικός αγωγός. Στην περιοχή μεταξύ H_{c1} και H_{c2} , το υλικό παρουσιάζει μικτή συμπεριφορά, με μακροσκοπικά μη μηδενικό μαγνητικό πεδίο, αλλά ταυτόχρονα με μηδενική ωμική αντίσταση σε κατάλληλες συνθήκες, εφόσον οι δίνες παραμένουν καθηλωμένες (Fetter & Hohenberg, 2018). Βασικό χαρακτηριστικό των υπεραγωγών τύπου II είναι ότι μπορούν να διατηρήσουν την υπεραγωγίμη κατάσταση σε πολύ υψηλότερα μαγνητικά πεδία σε σύγκριση με τους τύπου I, γεγονός που τους καθιστά εξαιρετικά σημαντικούς για τεχνολογικές εφαρμογές όπως οι υπεραγωγίμοι μαγνήτες υψηλού πεδίου και τα καλώδια μεταφοράς μεγάλων ρευμάτων. Πολλά πρακτικά υλικά, όπως κράματα Nb–Ti ή ενώσεις Nb₃Sn, ανήκουν σε αυτή την κατηγορία και χρησιμοποιούνται σε επιταχυντές σωματιδίων, συστήματα MRI και άλλες εφαρμογές όπου απαιτούνται πολύ μεγάλα μαγνητικά πεδία σε κρυογενικές θερμοκρασίες (Hasan & Ali, 2022).

4.3.2 Κρίσιμα πεδία H_{c1} και H_{c2} – μικτή κατάσταση

Η παρουσία δύο κρίσιμων πεδίων είναι το κεντρικό στοιχείο που διακρίνει τους υπεραγωγούς τύπου II από τους τύπου I. Το κατώτερο κρίσιμο πεδίο H_{c1} αντιστοιχεί στην τιμή του εξωτερικού πεδίου πάνω από την οποία η πλήρης αποβολή του μαγνητικού πεδίου παύει να είναι σταθερή και το πεδίο αρχίζει να διεισδύει στο υλικό υπό μορφή κβαντισμένων νημάτων ροής. Για πεδία μικρότερα του H_{c1} , ο υπεραγωγός βρίσκεται σε καθαρή Meissner κατάσταση με μηδενική μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό του. Η θερμοκρασιακή εξάρτηση του H_{c1} είναι τέτοια ώστε να μειώνεται καθώς η θερμοκρασία πλησιάζει την T_c , οριοθετώντας μαζί με το H_{c2} την περιοχή σταθερής μικτής κατάστασης στο επίπεδο H–T (Vinen, 2003). Το ανώτερο κρίσιμο πεδίο H_{c2} είναι η μέγιστη τιμή του

εξωτερικού πεδίου στην οποία μπορεί να υπάρξει υπεραγώγιμη τάξη, έστω και ως μικροσκοπική συνιστώσα γύρω από τους πυρήνες των δινών. Όταν το πεδίο υπερβεί το H_{c2} , η υπεραγώγιμη κατάσταση καταστρέφεται σε όλο τον όγκο και το υλικό μεταβαίνει στην κανονική φάση. Στους περισσότερους υπεραγωγούς τύπου II, η τιμή του H_{c2} μπορεί να είναι αρκετά υψηλή, πολύ μεγαλύτερη από τα αντίστοιχα H_c των τύπου I, κάτι που επιτρέπει τη λειτουργία τους σε ισχυρά πεδία χωρίς πλήρη απώλεια της υπεραγωγιμότητας. Η θερμοκρασιακή εξάρτηση του H_{c2} , με χαρακτηριστική πτώση προς το μηδέν στη T_c , είναι κρίσιμη για τη χαρτογράφηση του διαγράμματος φάσεων (Fetter & Hohenberg, 2018).

Η μικτή κατάσταση, που υπάρχει μεταξύ H_{c1} και H_{c2} , χαρακτηρίζεται από την παρουσία υπεραγώγιμων περιοχών και περιοχών κανονικής φάσης γύρω από τους πυρήνες των ροϊκών δινών. Το μέσο μαγνητικό πεδίο στο υλικό είναι μη μηδενικό, αλλά η ηλεκτρική αντίσταση μπορεί να παραμένει μηδενική, υπό την προϋπόθεση ότι οι δίνες παραμένουν σταθεροποιημένες και δεν κινούνται κάτω από την επίδραση του ρεύματος. Η σταθερότητα και η οργάνωση της μικτής κατάστασης εξαρτώνται από ατέλειες του πλέγματος, από την ανισοτροπία και από την ένταση του ρεύματος, με άμεση επίδραση στις κρίσιμες τιμές ρεύματος που μπορούν να επιτευχθούν πρακτικά (Huebener, 2019).

4.3.3 Διείσδυση ροής και μαγνητικές ροϊκές δίνες (vortices)

Η διείσδυση του μαγνητικού πεδίου σε υπεραγωγούς τύπου II πραγματοποιείται μέσω κβαντισμένων νημάτων ροής, γνωστών ως μαγνητικές ροϊκές δίνες ή vortices. Κάθε δίνη περιέχει στο κέντρο της έναν πυρήνα σε κανονική κατάσταση, με ακτίνα τάξης του μήκους συνάφειας ξ , γύρω από τον οποίο κυκλοφορούν υπεραγώγιμα ρεύματα που παράγουν τοπικό μαγνητικό πεδίο. Η μαγνητική ροή που διαπερνά κάθε δίνη είναι κβαντισμένη σε μονάδες του κβάντου ροής $\Phi_0 = h/2e$, έκφραση της μακροσκοπικής κβαντικής φύσης της υπεραγώγιμης κατάστασης και της διπλής στοιχειώδους φόρτισης των ζευγών Cooper (Vinen, 2003). Σε ένα ομογενές υπεραγώγιμο υλικό υπό σταθερό εξωτερικό πεδίο μεταξύ H_{c1} και H_{c2} , οι δίνες διατάσσονται σε τακτικό πλέγμα, γνωστό ως πλέγμα Abrikosov, το οποίο συνήθως έχει εξαγωνική συμμετρία. Η πυκνότητα των δινών είναι ανάλογη με το μέσο μαγνητικό πεδίο, έτσι ώστε όσο αυξάνεται το πεδίο τόσο πλησιάζουν μεταξύ τους, μέχρις ότου, σε πεδία κοντά στο H_{c2} , οι περιοχές κανονικής φάσης επικαλύπτονται και η υπεραγώγιμη τάξη καταστρέφεται. Η σταθερότητα του πλέγματος επηρεάζεται από θερμικές διακυμάνσεις, ατέλειες του πλέγματος και εξωτερικά ρεύματα, που μπορούν να οδηγήσουν σε τήξη ή αποδιοργάνωση του πλέγματος των δινών (Fetter & Hohenberg, 2018).

Η κίνηση των ροϊκών δινών υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού ρεύματος είναι κρίσιμη για τη μεταφορική συμπεριφορά των υπεραγωγών τύπου II. Όταν οι δυνάμεις Lorentz που ασκούνται στις δίνες υπερβούν τις δυνάμεις παγίδευσης σε ατέλειες, οι δίνες αρχίζουν να κινούνται, με αποτέλεσμα την εμφάνιση τάσης κατά μήκος του δείγματος και την ανάπτυξη πεπερασμένης αντίστασης, φαινόμενα γνωστά ως flux flow ή flux creep. Για τεχνολογικές εφαρμογές, επιδιώκεται η ενίσχυση της παγίδευσης ροής, μέσω κατάλληλων δομικών ατελειών, ώστε να περιορίζεται η κίνηση των δινών και να διατηρείται η μηδενική αντίσταση σε υψηλά ρεύματα (Huebener, 2019). Το φαινόμενο της κβάντωσης της ροής και η δυναμική των δινών έχουν επίσης σημαντικές συνέπειες σε φαινόμενα κβαντικής παρεμβολής και σε υπεραγώγιμες διατάξεις όπως οι επαφές Josephson και οι υπεραγώγιμοι δακτύλιοι. Η κίνηση, η παγίδευση και η αλληλεπίδραση των δινών αποτελούν αντικείμενο εντατικής θεωρητικής και πειραματικής έρευνας, με άμεση συνάφεια τόσο με τις θεμελιώδεις ιδιότητες της υπεραγώγιμης φάσης όσο και με πρακτικά

ζητήματα σταθερότητας και απωλειών σε υπεραγώγιμα συστήματα (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022).

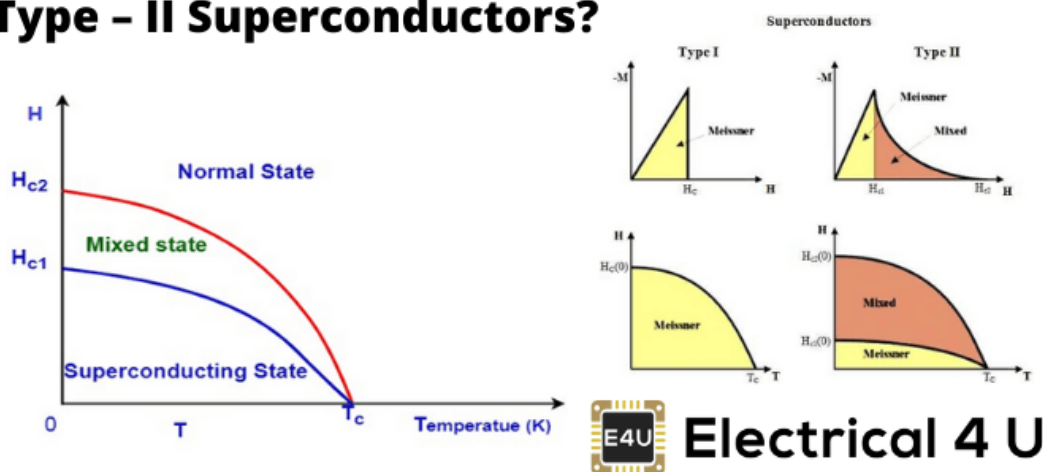
4.3.4 Παραδείγματα υλικών τύπου II

Η πλειονότητα των υπεραγώγιμων υλικών με εφαρμοστικό ενδιαφέρον ανήκει στην κατηγορία των υπεραγωγών τύπου II. Τυπικά παραδείγματα είναι τα κράματα Nb–Ti και η διαμεταλλική ένωση Nb₃Sn, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στην κατασκευή υπεραγώγιμων μαγνητών για επιταχυντές σωματιδίων, συστήματα NMR και MRI. Τα υλικά αυτά διαθέτουν σχετικά υψηλές κρίσιμες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τα απλά μέταλλα, αλλά κυρίως παρουσιάζουν πολύ υψηλά H_{c2}, επιτρέποντας λειτουργία σε ισχυρά μαγνητικά πεδία με μεγάλη κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος (Hasan & Ali, 2022). Στην ίδια κατηγορία ανήκουν και οι υπεραγωγοί υψηλής T_c, όπως οι χαλκοξείδες (YBCO, BSCCO κ.ά.) και οι σιδηροπυκνίτες, οι οποίοι παρουσιάζουν έντονη ανισοτροπία, πολύπλοκη δομή ενεργειακού χάσματος και μη συμβατικό μηχανισμό σύζευξης. Παρότι η θεωρητική περιγραφή τους είναι πιο περίπλοκη, η μαγνητική συμπεριφορά τους ως προς την ύπαρξη δύο κρίσιμων πεδίων και μικτής κατάστασης εντάσσεται στο πλαίσιο των υπεραγωγών τύπου II. Η ανάπτυξη καλωδίων, ταινιών και υμενίων από τέτοια υλικά αποτελεί βασική κατεύθυνση για την αξιοποίησή τους σε συστήματα μεταφοράς ισχύος και σε μαγνήτες υψηλού πεδίου (Barnos, 2025).

4.4 Σύγκριση υπεραγωγών τύπου I και τύπου II

Η σύγκριση μεταξύ υπεραγωγών τύπου I και τύπου II αναδεικνύει πώς οι θεμελιώδεις χωρικές κλίμακες ενός υπεραγωγού, το βάθος διείσδυσης λ και το μήκος συνάφειας ξ, καθορίζουν τη μαγνητική συμπεριφορά και τις κρίσιμες παραμέτρους. Στους τύπου I, όπου $\kappa = \lambda/\xi < 1/\sqrt{2}$, η δημιουργία διεπιφανειών υπεραγώγιμης–κανονικής φάσης είναι ενεργειακά δυσμενής και η υπεραγώγιμη φάση καταρρέει απότομα όταν το πεδίο ξεπεράσει το H_c. Αντίθετα, στους τύπου II, με $\kappa > 1/\sqrt{2}$, η παρουσία τέτοιων διεπιφανειών είναι ευνοϊκή, με αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της μικτής κατάστασης, όπου υπεραγώγιμες και κανονικές περιοχές συνυπάρχουν (Vinen, 2003).

What are the Type - I and Type - II Superconductors?



Εικόνα 4 : Διάγραμμα φάσεων μαγνητικού πεδίου–θερμοκρασίας για υπεραγωγούς τύπου I και τύπου II και χαρακτηριστικές καμπύλες μαγνήτισης που δείχνουν τις περιοχές υπεραγώγιμης, μικτής και κανονικής κατάστασης. Πηγή: <https://www.electrical4u.com/comparison-of-type-i-and-type-ii-superconductors/>

Ως προς τη μαγνητική απόκριση, οι υπεραγωγοί τύπου I παρουσιάζουν πλήρες φαινόμενο Meissner μέχρι το H_c , με τέλεια διαμαγνητικότητα και μηδενική εσωτερική μαγνητική επαγωγή, ενώ πάνω από το H_c η υπεραγώγιμη κατάσταση καταστρέφεται και το υλικό συμπεριφέρεται ως κανονικό μέταλλο. Αντίθετα, στους τύπου II, το πλήρες φαινόμενο Meissner υπάρχει μόνο μέχρι το H_{c1} , ενώ στη συνέχεια, μεταξύ H_{c1} και H_{c2} , το μαγνητικό πεδίο διεισδύει με τη μορφή δινών σε μικτή κατάσταση, και η υπεραγώγιμη τάξη επιβιώνει ανάμεσα στις δίνες. Για πεδία πάνω από το H_{c2} , και οι δύο τύποι καταλήγουν σε κανονική μεταλλική συμπεριφορά (Fetter & Hohenberg, 2018). Η συμπεριφορά στις καμπύλες μαγνήτισης είναι επίσης χαρακτηριστική. Στους τύπου I παρατηρείται μια απλή, σχεδόν γραμμική αρνητική μαγνήτιση μέχρι το H_c και απότομη κατάρρευση στη συνέχεια, ενώ η υστέρηση είναι περιορισμένη. Στους τύπου II, οι καμπύλες $M(H)$ εμφανίζουν έντονη υστέρηση λόγω παγίδευσης ροής και η μαγνήτιση μειώνεται σταδιακά σε απόλυτη τιμή καθώς αυξάνεται το πεδίο, αντανakλώντας την αύξηση της πυκνότητας των δινών στη μικτή κατάσταση. Η διαφορά αυτή έχει άμεση επίπτωση στην κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος και στην ενεργειακή απόδοση σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας (Huebener, 2019).

Από εφαρμοστική άποψη, οι υπεραγωγοί τύπου I, που είναι κυρίως στοιχειακά μέταλλα, χρησιμοποιούνται κυρίως ως πρότυπα σε θεμελιώδεις μελέτες, λόγω των σχετικά χαμηλών κρίσιμων πεδίων και θερμοκρασιών τους. Αντίθετα, οι υπεραγωγοί τύπου II, συμπεριλαμβανομένων των κραμάτων Nb-Ti, Nb₃Sn και των υπεραγωγών υψηλής T_c , αποτελούν τον κύριο πυλώνα των τεχνολογικών εφαρμογών, επειδή προσφέρουν υψηλές κρίσιμες παραμέτρους και δυνατότητα λειτουργίας σε ισχυρά μαγνητικά πεδία και υψηλές πυκνότητες ρεύματος. Η επιλογή κατάλληλου τύπου υπεραγωγού για κάθε εφαρμογή εξαρτάται από τον απαιτούμενο συνδυασμό T_c , H_{c1} , H_{c2} και κρίσιμου ρεύματος (Barnos, 2025).

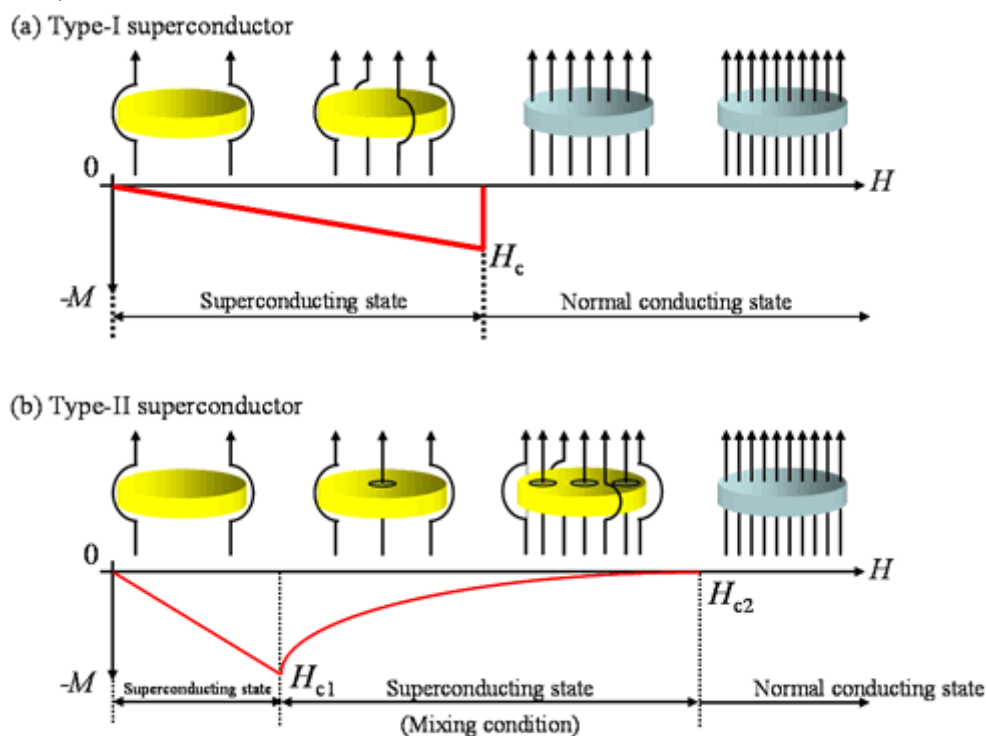


Fig.6 Difference of magnetic field dependence of magnetization between (a) Type-I and (b) Type-II superconductor

Εικόνα 5 Σύγκριση της εξάρτησης της μαγνήτισης από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο για (a) υπεραγωγό τύπου I και (b) υπεραγωγό τύπου II, με ένδειξη των κρίσιμων πεδίων H_c , H_{c1} , H_{c2} και

των περιοχών υπεραγωγίμης, μικτής και κανονικής κατάστασης. Πηγή: http://www.okayama-u.ac.jp/user/akimitsu/achievements/study_sc_chara_eng.html

5. Μικροσκοπική περιγραφή – Θεωρία BCS

5.1 Προβλήματα των κλασικών θεωριών και ανάγκη μικροσκοπικής προσέγγισης

Οι πρώτες θεωρητικές προσεγγίσεις της υπεραγωγιμότητας βασίστηκαν στην επέκταση κλασικών μοντέλων αγωγιμότητας, όπως το μοντέλο Drude και η ηλεκτρονική θεωρία των μετάλλων, τα οποία περιέγραφαν τα ηλεκτρόνια ως σχεδόν ελεύθερα σωματίδια που σκεδάζονται σε ιόντα και ακαθαρσίες. Τα μοντέλα αυτά μπορούσαν να ερμηνεύσουν ποιοτικά την μείωση της αντίστασης με τη μείωση της θερμοκρασίας, αλλά αδυνατούσαν να εξηγήσουν την απότομη εξαφάνιση της αντίστασης στην T_c και, κυρίως, το φαινόμενο Meissner, δηλαδή την πλήρη αποβολή του μαγνητικού πεδίου από το εσωτερικό του υπεραγωγού. Η ανικανότητα των κλασικών προσεγγίσεων να περιλάβουν κβαντική συνοχή μεγάλης κλίμακας κατέστησε σαφές ότι απαιτείται ριζικά διαφορετική θεώρηση (Vinen, 2003). Η διατύπωση φαινομενολογικών θεωριών, όπως οι εξισώσεις London, αποτέλεσε σημαντικό βήμα, καθώς περιέγραψαν με επιτυχία τη μαγνητική απόκριση των υπεραγωγών και εισήγαγαν την έννοια του βάθους διείσδυσης του μαγνητικού πεδίου. Ωστόσο, οι εξισώσεις London δεν βασίζονται σε μικροσκοπικό μοντέλο για τα ηλεκτρόνια και δεν εξηγούν γιατί εμφανίζεται η υπεραγώγιμη κατάσταση ούτε ποιος είναι ο μηχανισμός που οδηγεί στη μηδενική αντίσταση. Παρέχουν απλώς μια μακροσκοπική σχέση ανάμεσα στο ρεύμα και στο πεδίο, χωρίς πληροφορία για τις εσωτερικές διεργασίες στο ηλεκτρονικό σύστημα (Latif, Husnain, & Siddique, 2022).

Η θεωρία Ginzburg–Landau έκανε ένα βήμα πιο κοντά σε κβαντική περιγραφή, εισάγοντας μια σύνθετη συνάρτηση τάξης που συμπεριφέρεται σαν μακροσκοπικό κυματοσυνάρτημα για την υπεραγώγιμη φάση. Η θεωρία αυτή περιγράφει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά κοντά στην T_c , επιτρέπει την ανάλυση χωρικών μεταβολών και εξηγεί τη διάκριση μεταξύ υπεραγωγών τύπου I και II μέσω του λόγου $\kappa = \lambda/\xi$. Παρ' όλα αυτά, παραμένει φαινομενολογική, καθώς η συνάρτηση τάξης δεν προκύπτει από συγκεκριμένο μικροσκοπικό μοντέλο ηλεκτρονίων και δεν απαντά στο ερώτημα ποια είναι η προέλευση της υπεραγώγιμης πυκνότητας και του ενεργειακού χάσματος (Vinen, 2003). Επιπλέον, διάφορες «ημι-κλασικές» προσεγγίσεις προσπάθησαν να αποδώσουν την υπεραγωγιμότητα σε ιδέες όπως η τέλεια αγωγιμότητα λόγω ελάττωσης των συγκρούσεων ή η παγίδευση του μαγνητικού πεδίου σε τέλειους αγωγούς. Τέτοιες προσεγγίσεις δεν μπορούσαν να συμβιβαστούν με το γεγονός ότι ο υπεραγωγός αποβάλλει ενεργά το πεδίο κατά τη μετάβαση κάτω από την T_c , ανεξάρτητα από την ιστορία του συστήματος. Η ανακάλυψη του ισοτοπικού φαινομένου έδειξε ότι οι ταλαντώσεις του πλέγματος (φωνόνια) είναι κρίσιμες για την υπεραγώγιμη κατάσταση, κάτι που δεν μπορούσαν να ενσωματώσουν επαρκώς τα κλασικά μοντέλα (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022). Η συσσώρευση πειραματικών δεδομένων για το ενεργειακό χάσμα, τη θερμοκρασιακή εξάρτηση της ειδικής θερμότητας, την επίδραση των μαγνητικών προσμείξεων και την παρουσία κβαντισμένης μαγνητικής ροής ανέδειξε την ανάγκη για μια μικροσκοπική θεωρία, που να ξεκινά από την κβαντική μηχανική των ηλεκτρονίων σε στερεό, να λαμβάνει υπόψη τη σύζευξη με τα φωνόνια και να εξηγεί την εμφάνιση μακροσκοπικής κβαντικής συνοχής. Η θεωρία BCS αναπτύχθηκε ακριβώς για να καλύψει αυτό το κενό και να δώσει ενοποιημένη ερμηνεία στα παρατηρούμενα φαινόμενα (Fernandes, 2015).

5.2 Βασικές ιδέες της θεωρίας BCS

Η θεωρία BCS (Bardeen–Cooper–Schrieffer) αποτελεί την πρώτη πλήρως μικροσκοπική θεωρία που εξηγεί την υπεραγωγιμότητα σε συμβατικούς, χαμηλής θερμοκρασίας υπεραγωγούς. Ο βασικός της πυρήνας είναι η ιδέα ότι τα ηλεκτρόνια κοντά στη στάθμη Fermi δεν δρουν ως ανεξάρτητα σωματίδια, αλλά ζευγαρώνουν σχηματίζοντας ζεύγη Cooper, λόγω μιας έμμεσης ελκτικής αλληλεπίδρασης που μεσολαβούν τα φωνόνια. Αυτά τα ζεύγη συμπυκνώνονται σε μια κοινή κβαντική κατάσταση, η οποία διαθέτει μακρινή συνοχή και περιγράφεται από ενιαίο κυματοσυνάρτημα με καλά ορισμένη φάση, θεμέλιο της υπεραγωγίμης τάξης (Fernandes, 2015). Η θεωρία αντιμετωπίζει την υπεραγωγίμη κατάσταση ως μετασχηματισμό του ηλεκτρονικού αερίου Fermi, στο οποίο το έδαφος ενέργειας αναδιοργανώνεται λόγω μιας ασθενούς αλλά ουσιαστικής ελκτικής αλληλεπίδρασης μεταξύ ηλεκτρονίων σε στενά ενεργειακά όρια γύρω από τη στάθμη Fermi. Παρά το γεγονός ότι η αλληλεπίδραση αυτή μπορεί να είναι πολύ μικρότερη από τις τυπικές ενεργειακές κλίμακες στο στερεό, η συλλογική φύση του φαινομένου επιτρέπει το σχηματισμό μιας κατάστασης χαμηλότερης ενέργειας, όπου μεγάλο μέρος των ηλεκτρονίων συμμετέχει στη δημιουργία ζευγών. Η ελαχιστοποίηση της ενέργειας οδηγεί στη γένεση ενεργειακού χάσματος στο φάσμα διεγέρσεων (Vinen, 2003).

Η ύπαρξη ενεργειακού χάσματος σημαίνει ότι για να δημιουργηθούν διεγέρσεις (σπασμένα ζεύγη Cooper) απαιτείται ελάχιστη ενέργεια Δ , η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μηδενίζεται στην T_c . Στη θερμοκρασία μηδέν, η θεωρία BCS προβλέπει μια χαρακτηριστική σχέση μεταξύ του χάσματος και της κρίσιμης θερμοκρασίας, $2\Delta(0) \approx 3,52 k_B T_c$, που έχει επαληθευτεί σε μεγάλο αριθμό συμβατικών υπεραγωγών. Αυτή η σχέση συνδέει άμεσα μικροσκοπικά και μακροσκοπικά μεγέθη και επιβεβαιώνει την ισχυρή ενοποιητική δύναμη της θεωρίας (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022).

Η θεωρία BCS δίνει επίσης μια σαφή ερμηνεία της μηδενικής αντίστασης και της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς. Καθώς οι διεγέρσεις είναι κατασταλμένες λόγω του χάσματος, οι μηχανισμοί σκέδασης που θα οδηγούσαν σε ωμικές απώλειες δεν είναι διαθέσιμοι σε χαμηλές θερμοκρασίες. Το ρεύμα μεταφέρεται από τη συλλογική κίνηση των ζευγών Cooper, η οποία δεν συναντά αντίσταση όσο παραμένει κάτω από κρίσιμες τιμές ρεύματος και πεδίου. Η θεωρία εξηγεί ακόμη τη μορφή της ειδικής θερμότητας, που παρουσιάζει άλμα στην T_c και εκθετική μείωση σε χαμηλές θερμοκρασίες, σύμφωνα με την εικόνα ενός συστήματος με ενεργειακό χάσμα (Latif, Husnain, & Siddique, 2022).

Ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα της BCS είναι ότι ενσωματώνει φυσικά το ισοτοπικό φαινόμενο, αφού η ελκτική αλληλεπίδραση βασίζεται στη σύζευξη των ηλεκτρονίων με τα φωνόνια, των οποίων η συχνότητα εξαρτάται από τη μάζα των ιόντων. Η μεταβολή της μάζας μέσω ισοτοπικής υποκατάστασης μεταβάλλει τη χαρακτηριστική συχνότητα των φωνονικών τρόπων και, επομένως, τη δύναμη της σύζευξης και την T_c . Αυτή η εξήγηση ήταν κρίσιμη επιτυχία της θεωρίας, καθώς συνδέει απευθείας ένα παρατηρήσιμο πείραμα με το μικροσκοπικό μηχανισμό σύζευξης (Vinen, 2003). Παρότι η BCS περιγράφει με εντυπωσιακή ακρίβεια μεγάλο αριθμό μεταλλικών υπεραγωγών, η εφαρμογή της σε μη συμβατικά υλικά, όπως οι υπεραγωγοί υψηλής T_c , είναι πιο περιορισμένη. Σε αυτά τα συστήματα, ενδείξεις για ανισοτροπικά χάσματα, κόμβους στην ενέργεια και ισχυρές ηλεκτρονικές συσχετίσεις υποδηλώνουν πιο περίπλοκους μηχανισμούς σύζευξης, πέρα από την απλή φωνονική αλληλεπίδραση. Παρ' όλα αυτά, η BCS παραμένει η βασική αναφορά και το πρότυπο με το οποίο συγκρίνονται όλες οι νέες θεωρητικές προτάσεις (Barnos, 2025).

5.3 Σχηματισμός ζευγών Cooper

Ο σχηματισμός ζευγών Cooper αποτελεί την καρδιά της θεωρίας BCS και εξηγεί πώς μια ασθενής ελκτική αλληλεπίδραση μπορεί να οδηγήσει σε συλλογική κβαντική κατάσταση με μηδενική αντίσταση. Η βασική ιδέα είναι ότι, σε ένα μεταλλικό σύστημα με ηλεκτρόνια Fermi, η παρουσία του κρυσταλλικού πλέγματος επιτρέπει μια έμμεση ελκτική αλληλεπίδραση μεταξύ δύο ηλεκτρονίων μέσω της εκπομπής και απορρόφησης φωνονίων. Παρότι η άμεση Coulomb απώθηση είναι ισχυρή, σε κατάλληλες συνθήκες η φωνονική συνιστώσα μπορεί να την υπερνικήσει σε στενή ζώνη ενεργειών γύρω από τη στάθμη Fermi, δημιουργώντας καθαρό ελκτικό δυναμικό (Fernandes, 2015). Σε αυτό το πλαίσιο, ο Cooper έδειξε ότι δύο ηλεκτρόνια με αντίθετες ορμές και σπιν, που κινούνται σε ένα «θάλαμο» από άλλα ηλεκτρόνια, μπορούν να σχηματίσουν δεσμευμένη κατάσταση, ακόμη και όταν η ελκτική αλληλεπίδραση είναι εξαιρετικά ασθενής. Το κβαντικό αυτό δέσιμο έχει ενέργεια χαμηλότερη από το επίπεδο Fermi και συνεπάγεται ότι το σύστημα ευνοεί την ομαδική οργάνωση πολλών ζευγών σε τέτοιες καταστάσεις. Η διαφορά από ένα κλασικό μόριο είναι ότι τα ζεύγη Cooper καταλαμβάνουν πολύ μεγάλο χωρικό όγκο, με μέγεθος τάξης του μήκους συνάφειας ξ , πολύ μεγαλύτερο από την απόσταση μεταξύ των ηλεκτρονίων στο πλέγμα (Vinen, 2003).

Επειδή τα ζεύγη Cooper σχηματίζονται από δύο φερμιόνια, έχουν ολικό ακέραιο σπιν και, επομένως, υπακούν στη στατιστική Bose–Einstein. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να συμπυκνωθούν στην ίδια κβαντική κατάσταση, δίνοντας γέννηση σε μακροσκοπική κβαντική φάση με ενιαία φάση κυματοσυνάρτησης. Η ανάπτυξη μακρινής συνοχής επιτρέπει την κίνηση των ζευγών ως συλλογικού ρευστού, χωρίς σκέδαση σε ατέλειες ή φωνόνια, εφόσον δεν δημιουργούνται διεγέρσεις που σπάζουν τα ζεύγη. Αυτή η συλλογική κίνηση είναι η βάση για τη μηδενική αντίσταση και την εμφάνιση υπεραγωγίου ρεύματος (Latif, Husnain, & Siddique, 2022). Η δημιουργία και σταθερότητα των ζευγών Cooper εξαρτάται από τη λεπτή ισορροπία μεταξύ ελκτικών και απωστικών δυνάμεων, καθώς και από τη δομή ζωνών του υλικού. Μόνο ηλεκτρόνια σε ενεργειακό «κέλυφος» γύρω από τη στάθμη Fermi, με εύρος περίπου ίσο με τη χαρακτηριστική φωνονική ενέργεια, συμμετέχουν ενεργά στην υπεραγωγή σύζευξη. Αυτό περιορίζει τον αριθμό των ηλεκτρονίων που σχηματίζουν ζεύγη, αλλά η συλλογική φύση της κατάστασης κάνει το αποτέλεσμα μακροσκοπικά ορατό. Το γεγονός ότι το δέσιμο προκύπτει από ασθενή αλλά εκτεταμένη αλληλεπίδραση εξηγεί γιατί η υπεραγωγιμότητα είναι ευαίσθητη σε μαγνητικές προσμειζεις και σε διαταραχές που σπάνε τα ζεύγη (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022).

Το μέγεθος των ζευγών Cooper, εκφρασμένο μέσω του μήκους συνάφειας ξ , είναι πολύ μεγαλύτερο από τη μέση απόσταση μεταξύ των ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα τα ζεύγη να επικαλύπτονται έντονα μεταξύ τους. Αυτό διαφέρει από άλλες μορφές υπεραγωγικής σύζευξης, όπου μπορούν να σχηματιστούν «σφιχτά» ζεύγη, όπως σε σενάρια τύπου Bose–Einstein συμπύκνωσης μορίων. Στους συμβατικούς υπεραγωγούς BCS, η μεγάλη επικαλυπτόμενη δομή των ζευγών είναι κεντρικό χαρακτηριστικό, που συνδέεται με τη δομή του ενεργειακού χάσματος και με τις προβλέψεις της θεωρίας για θερμοδυναμικές και μαγνητικές ιδιότητες (Vinen, 2003).

5.4 Ενεργειακό χάσμα στην υπεραγωγή κατάσταση

Η έννοια του ενεργειακού χάσματος στην υπεραγωγή κατάσταση είναι κεντρική στη θεωρία BCS και στη μικροσκοπική κατανόηση της υπεραγωγιμότητας. Σε έναν κανονικό αγωγό, το φάσμα των ηλεκτρονικών διεγέρσεων είναι συνεχές γύρω από τη στάθμη Fermi, οπότε διεγέρσεις χαμηλής ενέργειας μπορούν να δημιουργηθούν με ελάχιστο

κόστος ενέργειας. Αντίθετα, στην υπεραγώγιμη κατάσταση, η σύζευξη των ηλεκτρονίων σε ζεύγη Cooper οδηγεί σε αναδιοργάνωση του φάσματος: εμφανίζεται ένα ενεργειακό χάσμα $\Delta(T)$, έτσι ώστε απαιτείται ελάχιστη ενέργεια Δ για να «σπάσει» ένα ζεύγος και να δημιουργηθούν διεγέρσεις τύπου κουαζι-σωματιδίων. Το χάσμα αυτό διαχωρίζει την υπεραγώγιμη θεμελιώδη κατάσταση από τις πρώτες διεγερμένες καταστάσεις και αποτελεί άμεση ένδειξη για τη συλλογική φύση της υπεραγώγιμης φάσης (Fernandes, 2015).

Θερμοδυναμικά, το ενεργειακό χάσμα εκφράζει την ενέργεια συμπύκνωσης της υπεραγώγιμης κατάστασης σε σχέση με την κανονική μεταλλική φάση. Στη θερμοκρασία μηδέν, το σύστημα όλων των ζευγών Cooper βρίσκεται στη χαμηλότερη ενεργειακή διαμόρφωση, ενώ για θερμοκρασίες $0 < T < T_c$ μέρος των ζευγών διασπάται θερμικά, δημιουργώντας διεγέρσεις, αλλά το χάσμα παραμένει μη μηδενικό. Καθώς η θερμοκρασία πλησιάζει την T_c , το μέτρο του χάσματος μειώνεται και τελικά μηδενίζεται στην κρίσιμη θερμοκρασία, οπότε το σύστημα επιστρέφει σε κατάσταση χωρίς ενεργειακή διαχωριστική γραμμή ανάμεσα σε κατειλημμένες και κενές καταστάσεις, όπως συμβαίνει σε έναν συμβατικό μέταλλο (Vinen, 2003).

Η θεωρία BCS προβλέπει συγκεκριμένη σχέση μεταξύ του ενεργειακού χάσματος και της κρίσιμης θερμοκρασίας, της μορφής $2\Delta(0) \approx 3,52 k_B T_c$, για ισότροπους, συμβατικούς υπεραγωγούς. Η σχέση αυτή επιβεβαιώθηκε από πειράματα φασματοσκοπίας, όπως το φαινόμενο σήραγγας (tunneling) και η οπτική φασματοσκοπία, στα οποία παρατηρείται σαφής απαγορευμένη περιοχή ενεργειών γύρω από τη στάθμη Fermi, συμβατή με την ύπαρξη χάσματος. Το γεγονός ότι το χάσμα είναι θερμοκρασιακά εξαρτώμενο και κλείνει στην T_c συνδέει άμεσα το μικροσκοπικό μηχανισμό σύζευξης με το μακροσκοπικό θερμοδυναμικό ορισμό της κρίσιμης θερμοκρασίας (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022). Το ενεργειακό χάσμα επηρεάζει άμεσα τον αριθμό των θερμικά διεγερμένων κουαζι-σωματιδίων σε μια δεδομένη θερμοκρασία. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, ο αριθμός αυτός είναι εκθετικά μικρός, επειδή η πιθανότητα θερμικής διεγερσης καταστέλλεται από τον παράγοντα $\exp(-\Delta/k_B T)$. Κατά συνέπεια, οι φυσικές ιδιότητες που εξαρτώνται από τις διεγέρσεις, όπως η ηλεκτρική αντίσταση και η ηλεκτρονική συνεισφορά στην ειδική θερμότητα, είναι ελάχιστες σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτός ο μηχανισμός εξηγεί τη μηδενική αντίσταση στην υπεραγώγιμη κατάσταση και την εκθετική συμπεριφορά της ειδικής θερμότητας κάτω από την T_c (Latif, Husnain, & Siddique, 2022).

Σε μη συμβατικούς υπεραγωγούς, η δομή του ενεργειακού χάσματος μπορεί να είναι ανισότροπη ως προς τη ζώνη Brillouin και ενδεχομένως να διαθέτει κόμβους (nodes), σημεία ή γραμμές όπου το χάσμα μηδενίζεται. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η θερμοκρασιακή εξάρτηση της ειδικής θερμότητας και άλλων μεγεθών διαφέρει από την κλασική εκθετική BCS μορφή και ακολουθεί συχνά δυναμονομοιακή συμπεριφορά. Η μελέτη της μορφής του χάσματος, μέσω πειραμάτων όπως η γωνιακή εξάρτηση της θερμικής αγωγιμότητας ή της ειδικής θερμότητας σε ισχυρά πεδία, αποτελεί βασικό εργαλείο για τη διάκριση διαφορετικών συμμετριών της συνάρτησης τάξης (Barnos, 2025).

5.5 Σχέση θεωρίας BCS με τις μακροσκοπικές ιδιότητες (μηδενική αντίσταση, ειδική θερμότητα κ.λπ.)

Η θεωρία BCS δεν περιορίζεται στην περιγραφή του ενεργειακού φάσματος, αλλά συνδέει άμεσα τις μικροσκοπικές ιδιότητες με παρατηρήσιμα μακροσκοπικά μεγέθη, όπως η μηδενική αντίσταση, η θερμοκρασιακή εξάρτηση της ειδικής θερμότητας και η μαγνητική συμπεριφορά. Η μηδενική αντίσταση εξηγείται από το γεγονός ότι το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται από το συμπύκνωμα των ζευγών Cooper, τα οποία κινούνται ως συλλογικό

κβαντικό ρευστό. Όσο το ρεύμα και το πεδίο παραμένουν κάτω από τις κρίσιμες τιμές, το συμπύκνωμα δεν σπάει και δεν δημιουργούνται διεγέρσεις, επομένως δεν υπάρχει μηχανισμός διάχυσης ενέργειας μέσω σκέδασης, και η αντίσταση είναι μη μετρήσιμη (Fernandes, 2015). Η ειδική θερμότητα αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά μεγέθη που επιβεβαιώνουν ποσοτικά τη θεωρία BCS. Πάνω από την T_c , η ειδική θερμότητα ενός μετάλλου περιγράφεται από άθροισμα μιας γραμμικής ηλεκτρονικής συνεισφοράς και μιας φωνονικής συνεισφοράς που αυξάνεται περίπου ως T^3 σε χαμηλές θερμοκρασίες. Κάτω από την T_c , η εμφάνιση ενεργειακού χάσματος οδηγεί σε απότομο άλμα στην ειδική θερμότητα, ενώ για χαμηλότερες θερμοκρασίες η ηλεκτρονική συνεισφορά μειώνεται εκθετικά, σε συμφωνία με την καταστολή των διεγέρσεων. Η μορφή της καμπύλης $C(T)$ που προκύπτει από την BCS ταιριάζει πολύ καλά με τα πειραματικά δεδομένα σε πληθώρα συμβατικών υπεραγωγών (Latif, Husnain, & Siddique, 2022). Η θεωρία BCS εξηγεί επίσης τη μαγνητική συμπεριφορά των υπεραγωγών, σε συνδυασμό με τις φαινομενολογικές εξισώσεις London και τη θεωρία Ginzburg–Landau. Οι υπεραγώγιμοι φορείς (ζεύγη Cooper) έχουν συγκεκριμένη πυκνότητα και μάζα, που εισέρχονται στις εξισώσεις London και καθορίζουν το βάθος διείσδυσης του μαγνητικού πεδίου. Η ύπαρξη ενεργειακού χάσματος σημαίνει ότι το συμπύκνωμα είναι σταθερό σε μικρές διαταραχές, εξασφαλίζοντας την τέλεια διαμαγνητικότητα μέχρι ορισμένες κρίσιμες τιμές πεδίου. Με αυτό τον τρόπο, η BCS παρέχει μικροσκοπική βάση για μακροσκοπικά μεγέθη όπως το βάθος διείσδυσης και το μήκος συνάφειας (Vinen, 2003). Η σχέση της θεωρίας με το ισοτοπικό φαινόμενο αποτελεί επίσης σημαντική σύνδεση μικρο-μακρο κλίμακας. Καθώς η σύζευξη μεταξύ ηλεκτρονίων και φωνονίων εξαρτάται από τη μάζα των ιόντων του πλέγματος, η κρίσιμη θερμοκρασία και, κατά συνέπεια, το ενεργειακό χάσμα και οι θερμοδυναμικές ιδιότητες, μεταβάλλονται με την ισοτοπική σύνθεση. Η παρατηρούμενη εξάρτηση της T_c από τη μάζα επαληθεύει τη φωνονική φύση της σύζευξης και ενισχύει τη συνοχή του θεωρητικού πλαισίου. Η αναπαραγωγή αυτού του φαινομένου από την BCS θεωρείται μια από τις πιο ισχυρές επιβεβαιώσεις της (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022). Η BCS ερμηνεύει επίσης μακροσκοπικά φαινόμενα όπως το Josephson effect, όπου υπεραγώγιμο ρεύμα μπορεί να ρέει μεταξύ δύο υπεραγωγών χωρισμένων από λεπτό μονωτικό φράγμα. Η δυνατότητα αυτόματης διέλευσης ζευγών Cooper μέσω σήραγγας και η εξάρτηση του ρεύματος από τη σχετική φάση των δύο συμπυκνωμάτων προκύπτουν από την ύπαρξη μακροσκοπικής κβαντικής φάσης στο κυματοσυνάρτημα της υπεραγώγιμης τάξης. Έτσι, φαινόμενα που παρατηρούνται σε μακροσκοπική κλίμακα, όπως οι ταλαντώσεις Josephson, βρίσκουν φυσική εξήγηση μέσα από το μικροσκοπικό πλαίσιο της BCS (Fernandes, 2015).

5.6 Μήκος συνάφειας (coherence length) και φυσική του σημασία

Το μήκος συνάφειας (coherence length), συνήθως συμβολίζεται με ξ , είναι θεμελιώδης χωρική κλίμακα στην υπεραγωγιμότητα και περιγράφει το χαρακτηριστικό μήκος πάνω στο οποίο μεταβάλλεται σημαντικά η υπεραγώγιμη συνάρτηση τάξης. Φυσικά, μπορεί να ερμηνευτεί ως το μέσο μέγεθος ενός ζεύγους Cooper, δηλαδή η απόσταση στην οποία διατηρείται η κβαντική συνοχή ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόνια του ζεύγους. Στους συμβατικούς μεταλλικούς υπεραγωγούς, το μήκος συνάφειας είναι πολύ μεγαλύτερο από την απόσταση μεταξύ των ατόμων του πλέγματος, με τιμές που μπορούν να φτάσουν εκατοντάδες ή και χιλιάδες Ångström (Vinen, 2003). Μέσα στη θεωρία BCS, το μήκος συνάφειας σχετίζεται με την ταχύτητα Fermi και το ενεργειακό χάσμα μέσω μιας σχέσης της μορφής $\xi \approx \hbar v_F / (\pi \Delta)$, όπου v_F είναι η ταχύτητα Fermi και Δ το ενεργειακό χάσμα

στη θερμοκρασία μηδέν. Αυτή η σχέση δείχνει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το χάσμα, τόσο μικρότερο είναι το μήκος συνάφειας, δηλαδή τα ζεύγη είναι πιο «σφιχτά» δεμένα.

Αντίθετα, για μικρό χάσμα ή για μεγάλα v_F , τα ζεύγη εκτείνονται σε μεγάλη απόσταση, γεγονός που συνδέεται με την έντονη επικάλυψη μεταξύ τους και τη συλλογική φύση του συμπυκνώματος στους κλασικούς υπεραγωγούς BCS (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022).

Το μήκος συνάφειας παίζει καθοριστικό ρόλο στη δομή των διεπιφανειών μεταξύ υπεραγώγιμης και κανονικής φάσης, καθώς και στον ορισμό της μικτής κατάστασης στους υπεραγωγούς τύπου II. Σε περιοχές όπου υπάρχει χωρική μεταβολή της τάξης, όπως κοντά σε επιφάνειες, σε ατέλειες ή στον πυρήνα μιας ροϊκής δίνης, η συνάρτηση τάξης μεταβάλλεται σε χαρακτηριστική απόσταση τάξης ξ . Στον πυρήνα της δίνης, η τάξη μηδενίζεται, και σε απόσταση μερικών ξ από το κέντρο αποκαθίσταται η μέγιστη τιμή της. Έτσι, το μέγεθος του πυρήνα της δίνης καθορίζεται από το μήκος συνάφειας (Fetter & Hohenberg, 2018).

Ο συνδυασμός του μήκους συνάφειας με το βάθος διείσδυσης λ καθορίζει το αν ένα υλικό θα συμπεριφερθεί ως υπεραγωγός τύπου I ή τύπου II. Ο λόγος $\kappa = \lambda/\xi$ χρησιμεύει ως κριτήριο διάκρισης: για $\kappa < 1/\sqrt{2}$, η δημιουργία διεπιφανειών υπεραγώγιμης–κανονικής φάσης είναι ενεργειακά δυσμενής, οπότε το υλικό είναι τύπου I, ενώ για $\kappa > 1/\sqrt{2}$ είναι ευνοϊκή, οδηγώντας σε τύπο II με μικτή κατάσταση. Το μήκος συνάφειας, επομένως, δεν είναι μόνο μέτρο της κβαντικής συνοχής, αλλά και παράμετρος που, σε συνδυασμό με το λ , καθορίζει τη μαγνητική ταξινόμηση του υπεραγωγού (Vinen, 2003). Σε ανισότροπα ή πολυστρωματικά υλικά, όπως οι υπεραγωγοί υψηλής T_c , το μήκος συνάφειας μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάμεσα σε διαφορετικές κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις. Συχνά είναι πολύ μικρό μέσα στα επίπεδα αγωγιμότητας και μεγαλύτερο κατά την κατεύθυνση κάθετα στα επίπεδα, δημιουργώντας έντονη ανισοτροπία στη χωρική δομή της υπεραγώγιμης τάξης και στην κίνηση των δινών. Η ανισοτροπία του ξ επηρεάζει τη σταθερότητα της υπεραγώγιμης κατάστασης σε ισχυρά μαγνητικά πεδία και καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο διαμορφώνεται το πλέγμα των δινών σε τρισδιάστατο χώρο (Barnos, 2025).

6. Φυσικές ιδιότητες υπεραγωγών σε βάθος

Οι φυσικές ιδιότητες των υπεραγωγών συνδέονται στενά με τη δομή της υπεραγώγιμης φάσης, η οποία δεν είναι απλώς μια κατάσταση μηδενικής αντίστασης, αλλά κβαντική φάση με ιδιαίτερη θερμοδυναμική και ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά. Θερμοδυναμικά μεγέθη, όπως η ειδική θερμότητα, η ελεύθερη ενέργεια και η μαγνητική επιδεκτικότητα, παρουσιάζουν χαρακτηριστικές μεταβολές κατά τη μετάβαση από την κανονική στη υπεραγώγιμη κατάσταση, γεγονός που επιτρέπει την περιγραφή της μετάβασης ως αλλαγή φάσης με σαφή ενεργειακή ερμηνεία (Vinen, 2003).

Παράλληλα, οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των υπεραγωγών, όπως η τέλεια διαμαγνητικότητα, η αποβολή του μαγνητικού πεδίου και η ύπαρξη χαρακτηριστικού βάθους διείσδυσης, αποτυπώνονται μαθηματικά στις εξισώσεις London και στη φαινομενολογική θεωρία Ginzburg–Landau. Οι σχέσεις αυτές, παρότι δεν είναι πλήρως μικροσκοπικές, μπορούν να προκύψουν από τη θεωρία BCS και να συνδεθούν με μικροσκοπικά μεγέθη, όπως η πυκνότητα των ζευγών Cooper και το ενεργειακό χάσμα, προσφέροντας ένα συνεκτικό πλαίσιο κατανόησης της υπεραγώγιμης κατάστασης σε μακροσκοπική κλίμακα (Latif, Husnain, & Siddique, 2022).

6.1 Θερμοδυναμικές ιδιότητες

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες των υπεραγωγών είναι κρίσιμες για την κατανόηση της φύσης της υπεραγώγιμης μετάβασης και της σταθερότητας της υπεραγώγιμης φάσης. Η μετάβαση στην υπεραγώγιμη κατάσταση περιγράφεται συχνά ως μετάβαση δεύτερης τάξης, όπου η ελεύθερη ενέργεια παραμένει συνεχής αλλά ορισμένες παράγωγοι ως προς τη θερμοκρασία, όπως η ειδική θερμότητα, παρουσιάζουν ασυνέχειες. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται καθαρά σε συμβατικούς υπεραγωγούς και επιβεβαιώνει ότι η υπεραγώγιμη φάση αντιστοιχεί σε θερμοδυναμικά ευνοϊκότερη κατάσταση με μικρότερη ελεύθερη ενέργεια σε σύγκριση με την κανονική φάση (Vinen, 2003).

6.1.1 Ειδική θερμότητα στη μετάβαση από κανονική σε υπεραγώγιμη κατάσταση

Η ειδική θερμότητα C ενός υπεραγωγού ως συνάρτηση της θερμοκρασίας παρουσιάζει χαρακτηριστική συμπεριφορά κατά τη μετάβαση από την κανονική στη υπεραγώγιμη κατάσταση. Πάνω από την T_c , η ειδική θερμότητα μεταλλικού συστήματος περιγράφεται τυπικά ως άθροισμα μιας ηλεκτρονικής συνιστώσας που είναι περίπου ανάλογη της θερμοκρασίας και μιας φωνονικής συνιστώσας που σε χαμηλές θερμοκρασίες ακολουθεί εξάρτηση περίπου T^3 . Καθώς το υλικό ψύχεται και πλησιάζει την T_c από πάνω, η C αυξάνεται ομαλά, χωρίς ιδιαίτερα ανώμαλη συμπεριφορά, μέχρι τη στιγμή της μετάβασης (Latif, Husnain, & Siddique, 2022). Στην T_c , εφόσον δεν εφαρμόζεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, παρατηρείται απότομο άλμα στην ειδική θερμότητα, χαρακτηριστικό μετάβασης δεύτερης τάξης. Το άλμα αυτό ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα της εμφάνισης ενεργειακού χάσματος στο φάσμα των ηλεκτρονικών διεγέρσεων και της αναδιοργάνωσης του ηλεκτρονικού συστήματος σε υπεραγώγιμη κατάσταση. Η θεωρία BCS προβλέπει συγκεκριμένη τιμή για την αναλογία του άλματος της ηλεκτρονικής ειδικής θερμότητας στη T_c προς τη γραμμική συνιστώσα της κανονικής φάσης, και αυτή η πρόβλεψη έχει επιβεβαιωθεί σε πολλούς συμβατικούς υπεραγωγούς (Fernandes, 2015).

Κάτω από την T_c , η ηλεκτρονική συνεισφορά στην ειδική θερμότητα δεν είναι πλέον γραμμική στη θερμοκρασία, όπως στον κανονικό μέταλλο, αλλά μειώνεται εκθετικά, εξαιτίας της ύπαρξης ενεργειακού χάσματος. Ο αριθμός των θερμικά διεγερμένων κουαζι-

σωματιδίων μειώνεται ταχύτατα με τη θερμοκρασία, καθώς απαιτείται ενέργεια τουλάχιστον ίση με $\Delta(T)$ για τη δημιουργία διεγέρσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ειδική θερμότητα να γίνεται πολύ μικρή σε θερμοκρασίες πολύ κάτω από την T_c , επιβεβαιώνοντας πειραματικά την εικόνα της υπεραγώγιμης κατάστασης ως φάσης με κατασταλμένες χαμηλής ενέργειας διεγέρσεις (Trabelsi, Hannachi, Alotaibi, & Slimani, 2022). Η λεπτομερής θερμοκρασιακή εξάρτηση της ειδικής θερμότητας αποτελεί σημαντικό διαγνωστικό εργαλείο για τον χαρακτηρισμό της υπεραγωγιμότητας. Σε υλικά με ανισότροπο ή πολυ-χασματικό ενεργειακό χάσμα, η $C(T)$ μπορεί να παρουσιάζει αποκλίσεις από την απλή BCS συμπεριφορά, όπως επιπλέον ώμους ή ελαφρύτερη καταστολή της C σε χαμηλές θερμοκρασίες. Στους υπεραγωγούς υψηλής T_c , η ανάλυση των δεδομένων της ειδικής θερμότητας έχει συμβάλει στην αναγνώριση πιο περίπλοκων μορφών συνάρτησης τάξης, όπως d-wave συμμετρία με κόμβους στο χάσμα (Barnos, 2025).

6.1.2 Ελεύθερη ενέργεια και σταθερότητα της υπεραγώγιμης φάσης

Η διαφορά ελεύθερης ενέργειας μεταξύ κανονικής και υπεραγώγιμης φάσης είναι αυτή που καθορίζει πότε η υπεραγώγιμη κατάσταση είναι θερμοδυναμικά ευνοϊκή. Σε θερμοκρασίες κάτω από την T_c και για πεδία μικρότερα από τα κρίσιμα, η ελεύθερη ενέργεια της υπεραγώγιμης φάσης είναι χαμηλότερη, γεγονός που σημαίνει ότι το σύστημα «επιλέγει» να βρεθεί σε αυτή την κατάσταση. Η θεωρία BCS επιτρέπει τον υπολογισμό της διαφοράς ελεύθερης ενέργειας ως προς τη θερμοκρασία και τη σύγκρισή της με την ενέργεια που αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο, όταν το πεδίο αποβάλλεται από το εσωτερικό του υπεραγωγού (Vinen, 2003). Για υπεραγωγούς τύπου I, το ολικό κρίσιμο πεδίο H_c συνδέεται άμεσα με τη διαφορά ελεύθερης ενέργειας μεταξύ υπεραγώγιμης και κανονικής φάσης. Αν θεωρηθεί ότι η μαγνητική ενέργεια $H^2/2\mu_0$ εξισορροπεί τη διαφορά ελεύθερης ενέργειας στην τιμή $H = H_c$, τότε προκύπτει ότι ο υπεραγωγός χάνει τη σταθερότητά του και μεταβαίνει στην κανονική φάση, όταν η αποβολή του πεδίου δεν αντισταθμίζει πλέον το ενεργειακό κόστος της διατήρησης της υπεραγώγιμης τάξης. Αυτή η σχέση επιτρέπει τη σύνδεση των θερμοδυναμικών μεγεθών με τα κρίσιμα μαγνητικά πεδία (Latif, Husnain, & Siddique, 2022).

Η θεωρία Ginzburg–Landau περιγράφει την ελεύθερη ενέργεια μέσω μιας συνάρτησης τάξης ψ , με όρους που περιλαμβάνουν τόσο το μέτρο όσο και τις χωρικές παραγώγους της. Η σταθερότητα της υπεραγώγιμης φάσης προκύπτει από την ελαχιστοποίηση αυτής της ελεύθερης ενέργειας, με αποτέλεσμα να προκύπτουν εξισώσεις που περιγράφουν τη χωρική κατανομή της τάξης και του μαγνητικού πεδίου. Σε αυτό το πλαίσιο, η εμφάνιση της μικτής κατάστασης στους υπεραγωγούς τύπου II ερμηνεύεται ως συμβιβασμός μεταξύ της μείωσης της ελεύθερης ενέργειας λόγω υπεραγώγιμης τάξης και του κόστους δημιουργίας περιοχών κανονικής φάσης γύρω από τις ροϊκές δίνες (Fetter & Hohenberg, 2018). Η σταθερότητα της υπεραγώγιμης φάσης επηρεάζεται επίσης από την παρουσία μαγνητικών προσμείξεων, ακαθαρσιών και δομικών ατελειών. Μαγνητικές προσμείξεις τείνουν να σπάνε τα ζεύγη Cooper και να αυξάνουν την ελεύθερη ενέργεια της υπεραγώγιμης κατάστασης, μειώνοντας έτσι την T_c και τα κρίσιμα πεδία. Αντίθετα, κατάλληλα κατανεμημένες μη μαγνητικές ατέλειες μπορούν να ενισχύσουν την παγίδευση ροής στους υπεραγωγούς τύπου II, βελτιώνοντας την πρακτική σταθερότητα της μικτής κατάστασης σε υψηλά ρεύματα, παρά το γεγονός ότι αυξάνουν την τοπική ελεύθερη ενέργεια (Huebener, 2019).

6.2 Ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες

Οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των υπεραγωγών είναι ιδιαίτερα εντυπωσιακές, καθώς συνδυάζουν μηδενική αντίσταση με τέλεια ή σχεδόν τέλεια διαμαγνητικότητα. Η περιγραφή αυτών των ιδιοτήτων βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις εξισώσεις London, οι οποίες εισάγουν μακροσκοπικές σχέσεις ανάμεσα στην πυκνότητα ρεύματος και στο μαγνητικό πεδίο ή στο διανυσματικό δυναμικό. Οι εξισώσεις αυτές, σε συνδυασμό με τις εξισώσεις Maxwell, εξηγούν το φαινόμενο Meissner, τη διείσδυση του μαγνητικού πεδίου σε βάθος λ και τη συμπεριφορά της υπεραγώγιμης κατάστασης σε στατικά και μεταβαλλόμενα πεδία (Vinen, 2003).

6.2.1 Εξισώσεις London

Οι εξισώσεις London αποτελούν φαινομενολογικό μοντέλο που περιγράφει τη μαγνητική απόκριση των υπεραγωγών, υποθέτοντας την ύπαρξη υπεραγώγιμης πυκνότητας ρευστού φορτίου, το οποίο ανταποκρίνεται στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με ιδιαίτερο τρόπο. Η πρώτη εξίσωση London συνδέει την παράγωγο του ρεύματος ως προς τον χρόνο με το ηλεκτρικό πεδίο, δείχνοντας ότι σε υπεραγώγιμο υλικό ένα στατικό ηλεκτρικό πεδίο δεν μπορεί να παραμείνει στο εσωτερικό, καθώς προκαλεί επιταχυνόμενο ρεύμα που τείνει να το εξαλείψει. Αυτή η συμπεριφορά διαφέρει από εκείνη ενός κανονικού αγωγού, όπου το ηλεκτρικό πεδίο συντηρείται από την ύπαρξη αντίστασης (Latif, Husnain, & Siddique, 2022). Η δεύτερη εξίσωση London, σε διανυσματική μορφή, συνδέει την πυκνότητα του υπεραγώγιμου ρεύματος με το διανυσματικό δυναμικό ή, σε άλλη μορφή, με τη μαγνητική επαγωγή. Αν εφαρμοστεί η συνθήκη βαθμίδας, προκύπτει ότι το μαγνητικό πεδίο μέσα σε έναν υπεραγωγό ικανοποιεί διαφορική εξίσωση της μορφής $\nabla^2 B = B/\lambda^2$, όπου λ είναι το βάθος διείσδυσης London. Η λύση αυτής της εξίσωσης για απλές γεωμετρίες δείχνει ότι το πεδίο δεν είναι αυστηρώς μηδενικό, αλλά μειώνεται εκθετικά από την επιφάνεια προς το εσωτερικό, σε συμφωνία με το φαινόμενο Meissner (Vinen, 2003).

Οι εξισώσεις London μπορούν να θεωρηθούν ως το όριο χαμηλών θερμοκρασιών και χαμηλών πεδίων της πιο γενικής θεωρίας Ginzburg–Landau και, τελικά, της θεωρίας BCS. Μέσα από κατάλληλες προσεγγίσεις, οι παράμετροι των εξισώσεων London, όπως το λ , μπορούν να εκφραστούν σε όρους μικροσκοπικών μεγεθών, όπως η πυκνότητα των ζευγών Cooper και η μάζα των φορέων. Αυτό επιτρέπει τη σύνδεση των μακροσκοπικών μαγνητικών ιδιοτήτων με τη μικροσκοπική δομή της υπεραγώγιμης φάσης (Fernandes, 2015).

6.2.2 Διείσδυση μαγνητικού πεδίου και βάθος London

Η διείσδυση του μαγνητικού πεδίου σε έναν υπεραγωγό περιγράφεται από το βάθος London λ , το οποίο είναι χαρακτηριστικό μήκος στο οποίο η μαγνητική επαγωγή μειώνεται κατά παράγοντα e . Σε μια απλή γεωμετρία ημι-απείρου υπεραγωγού, η λύση της εξίσωσης London οδηγεί σε κατανομή $B(x) = B_0 \exp(-x/\lambda)$, όπου x η απόσταση από την επιφάνεια. Αυτό σημαίνει ότι το μαγνητικό πεδίο περιορίζεται σε ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα, ενώ το εσωτερικό του υλικού παραμένει σχεδόν απολύτως απαλλαγμένο από μαγνητικό πεδίο, εφόσον βρισκόμαστε σε περιοχή κάτω από τα κρίσιμα πεδία (Vinen, 2003). Το βάθος διείσδυσης σχετίζεται με την πυκνότητα των υπεραγώγιμων φορέων και τη μάζα τους, μέσω μιας σχέσης της μορφής $\lambda \propto (m/n_s e^2)^{1/2}$, όπου n_s η πυκνότητα των ζευγών Cooper. Όσο μεγαλύτερη είναι η n_s , τόσο μικρότερο είναι το λ , άρα το πεδίο περιορίζεται σε πιο λεπτό επιφανειακό στρώμα. Η θερμοκρασία επηρεάζει την τιμή του λ , καθώς η n_s μειώνεται όταν η θερμοκρασία πλησιάζει την T_c , οδηγώντας σε μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης. Σε θερμοκρασίες πολύ

χαμηλότερες της T_c , το λ τείνει σε μια σχεδόν σταθερή τιμή $\lambda(0)$, που χαρακτηρίζει το υλικό (Latif, Husnain, & Siddique, 2022).

Η έννοια του βάθους London συνδέεται άμεσα με άλλες χαρακτηριστικές κλίμακες της υπεραγωγίμης κατάστασης, όπως το μήκος συνάφειας ξ . Ο λόγος $\kappa = \lambda/\xi$ καθορίζει αν το υλικό θα είναι τύπου I ή τύπου II, επηρεάζοντας τη μορφή της διείσδυσης του πεδίου και τη δομή της μικτής κατάστασης. Σε υπεραγωγούς με μεγάλο λ και μικρό ξ , το πεδίο διεισδύει μέσω ροϊκών δινών, ενώ σε υλικά με μικρό λ και μεγάλο ξ η υπεραγωγή–κανονική διεπιφάνεια δεν είναι σταθερή και η υπεραγωγιμότητα καταρρέει απότομα όταν το πεδίο φτάσει την τιμή H_c (Fetter & Hohenberg, 2018). Σε ανισότροπους υπεραγωγούς, το βάθος διείσδυσης μπορεί να είναι διαφορετικό σε διάφορες κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις, οδηγώντας σε πιο πολύπλοκες κατανομές του μαγνητικού πεδίου. Στα κεραμικά υψηλής T_c , για παράδειγμα, το λ κατά μήκος των επιπέδων αγωγιμότητας διαφέρει από αυτό στην κάθετη διεύθυνση, επηρεάζοντας τη δομή των δινών και την σταθερότητα της μικτής κατάστασης σε ισχυρά πεδία. Η μέτρηση του λ με τεχνικές όπως μαγνητομετρία, μικροκυματικές μετρήσεις ή σκέδαση νετρονίων επιτρέπει τον προσδιορισμό της υπεραγωγίμης πυκνότητας και τη δοκιμή θεωρητικών μοντέλων για τη φύση της υπεραγωγίμης φάσης (Barnos, 2025).

6.3 Χωρικές κλίμακες σε υπεραγωγούς

Η περιγραφή της υπεραγωγιμότητας δεν εξαρτάται μόνο από ενεργειακές κλίμακες, όπως η T_c και το ενεργειακό χάσμα Δ , αλλά και από χαρακτηριστικά μήκη, τα οποία καθορίζουν πώς κατανέμεται η υπεραγωγή τάξη και το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό ενός υλικού. Τα δύο βασικά τέτοια μήκη είναι το μήκος συνάφειας ξ και το βάθος διείσδυσης λ . Το πρώτο σχετίζεται κυρίως με τη χωρική μεταβολή της υπεραγωγίμης συνάρτησης τάξης, ενώ το δεύτερο περιγράφει το πώς ο υπεραγωγός «σβήνει» το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του (Vinen, 2003).

Οι χωρικές αυτές κλίμακες δεν είναι απλώς βοηθητικές παράμετροι, αλλά συνδέονται άμεσα με τη μικροσκοπική φύση του υπεραγωγίμου συμπυκνώματος. Το ξ συνδέεται με το μέγεθος των ζευγών Cooper και την έκταση της κβαντικής συνοχής, ενώ το λ συνδέεται με την πυκνότητα των υπεραγωγίμων φορέων και την απόκρισή τους σε μαγνητικά πεδία. Μαζί καθορίζουν τον λόγο $\kappa = \lambda/\xi$, ο οποίος είναι καθοριστικός για τον διαχωρισμό των υπεραγωγών σε τύπου I και τύπου II και για τη μορφή της μαγνητικής τους συμπεριφοράς (Fetter & Hohenberg, 2018).

6.3.1 Μήκος συνάφειας ξ

Το μήκος συνάφειας ξ μπορεί να οριστεί διαισθητικά ως η χαρακτηριστική απόσταση στην οποία η υπεραγωγή συνάρτηση τάξης μεταβάλλεται αισθητά στο χώρο. Σε περιοχές όπου η τάξη «διαταράσσεται», όπως κοντά σε επιφάνειες, ατέλειες ή στον πυρήνα μιας ροϊκής δίνης, η συνάρτηση τάξης μηδενίζεται ή μειώνεται σημαντικά και αποκαθίσταται σε τιμές κοντά στη μέγιστη τιμή της σε απόσταση τάξης ξ . Έτσι, η δομή της διεπιφάνειας μεταξύ υπεραγωγίμης και κανονικής φάσης, καθώς και η κατανομή της τάξης γύρω από δίνες, ελέγχονται από το μέγεθος του ξ (Fetter & Hohenberg, 2018). Μέσα στο πλαίσιο της θεωρίας BCS, το μήκος συνάφειας συνδέεται με τη μικροσκοπική δομή του υπεραγωγίμου συμπυκνώματος μέσω της σχέσης $\xi \approx \hbar v_F / (\pi \Delta)$, όπου v_F είναι η ταχύτητα Fermi και Δ το ενεργειακό χάσμα στη θερμοκρασία μηδέν. Αυτή η σχέση δείχνει ότι όσο ισχυρότερη είναι η σύζευξη (δηλαδή όσο μεγαλύτερο το Δ), τόσο μικρότερο είναι το ξ , καθώς τα ζεύγη Cooper γίνονται πιο «σφιχτά» και η τάξη μεταβάλλεται γρηγορότερα στο χώρο. Αντίθετα, σε υλικά με μεγάλο v_F και μικρό χάσμα,

το ξ μπορεί να γίνει πολύ μεγάλο, υποδηλώνοντας ισχυρή επικάλυψη μεταξύ των ζευγών (Fernandes, 2015).

Σε συμβατικούς μεταλλικούς υπεραγωγούς, το μήκος συνάφειας είναι συχνά πολύ μεγαλύτερο από την απόσταση μεταξύ γειτονικών ατόμων και μπορεί να φτάσει εκατοντάδες ή χιλιάδες Ångström. Αυτό σημαίνει ότι κάθε ζεύγος Cooper εκτείνεται σε περιοχή που περιέχει πολύ μεγάλο αριθμό ατόμων και πολλαπλά ηλεκτρόνια, υπογραμμίζοντας τον έντονα συλλογικό χαρακτήρα της υπεραγωγίμης κατάστασης. Η μεγάλη αυτή χωρική έκταση εξηγεί γιατί η υπεραγωγιμότητα είναι ευαίσθητη σε διαταραχές που επηρεάζουν την κβαντική συνοχή σε μεγαλύτερες κλίμακες, όπως μαγνητικές προσμειξείς ή ισχυρά πεδία (Vinen, 2003). Σε μη συμβατικούς ή ισχυρά συσχετισμένους υπεραγωγούς, το μήκος συνάφειας μπορεί να είναι αισθητά μικρότερο, πλησιάζοντας μερικές φορές μόνο λίγες φορές την απόσταση πλέγματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η εικόνα των πολύ εκτεταμένων ζευγών Cooper τροποποιείται, και ορισμένα υλικά φαίνεται να βρίσκονται σε ενδιάμεση περιοχή μεταξύ του ορίου BCS και του ορίου «σφιγτών» δεσμευμένων ζευγών. Η μελέτη της μεταβολής του ξ με τη θερμοκρασία, το πεδίο και τη χημική σύσταση βοηθά στην κατανόηση του είδους της σύζευξης και της γεωμετρίας της υπεραγωγίμης τάξης (Barnos, 2025).

6.3.2 Βάθος διείσδυσης λ και λόγος $\kappa = \lambda/\xi$

Το βάθος διείσδυσης λ περιγράφει το πώς ένα μαγνητικό πεδίο διεισδύει στο εσωτερικό ενός υπεραγωγού. Από τις εξισώσεις London προκύπτει ότι σε ένα ημι-άπειρο υπεραγωγίμο δείγμα η μαγνητική επαγωγή $B(x)$ φθίνει εκθετικά με την απόσταση x από την επιφάνεια, σύμφωνα με τη σχέση $B(x) = B_0 \exp(-x/\lambda)$. Το λ είναι, επομένως, το χαρακτηριστικό μήκος στο οποίο το πεδίο μειώνεται στο $1/e$ της αρχικής του τιμής και ορίζει το «πάχος» του επιφανειακού στρώματος μέσα στο οποίο υπάρχουν μη μηδενικά μαγνητικά πεδία (Vinen, 2003). Σε φαινομενολογικό επίπεδο, το βάθος διείσδυσης σχετίζεται με την πυκνότητα των υπεραγωγίμων φορέων n_s και τη μάζα τους μέσω σχέσης της μορφής $\lambda \propto (m / n_s e^2)^{1/2}$. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται προς την T_c , η n_s μειώνεται, με αποτέλεσμα το λ να αυξάνεται και το μαγνητικό πεδίο να διεισδύει βαθύτερα στο υλικό. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, το λ τείνει στην τιμή $\lambda(0)$, η οποία χαρακτηρίζει το υλικό και συνδέεται με τη μέγιστη πυκνότητα των ζευγών Cooper που συμμετέχουν στην υπεραγωγίμη κατάσταση (Latif, Husnain, & Siddique, 2022).

Ο λόγος $\kappa = \lambda/\xi$, γνωστός και ως παράμετρος Ginzburg–Landau, συνδυάζει τις δύο χωρικές κλίμακες σε μια αδιάστατη ποσότητα που παίζει κεντρικό ρόλο στη θεωρία των υπεραγωγών. Μικρές τιμές κ σημαίνουν ότι το μαγνητικό πεδίο σβήνει γρήγορα σε σύγκριση με τη χωρική μεταβολή της τάξης, ενώ μεγάλες τιμές κ σημαίνουν ότι η τάξη μπορεί να αλλάξει γρήγορα σε περιοχές όπου το πεδίο παραμένει σημαντικό. Αυτή η ισορροπία μεταξύ των δύο μηκών είναι που καθορίζει τη μορφή των διεπιφανειών υπεραγωγίμης–κανονικής φάσης και τη σταθερότητα της μικτής κατάστασης (Fetter & Hohenberg, 2018). Σε υπεραγωγούς υψηλής T_c και σε άλλα ανισότροπα συστήματα, τόσο το λ όσο και το ξ μπορούν να είναι έντονα ανισότροπα, διαφέροντας σημαντικά ανάμεσα σε διαφορετικές κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις. Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος κ δεν είναι ίδιας τιμής προς όλες τις κατευθύνσεις, οδηγώντας σε πολύπλοκες κατανομές μαγνητικού πεδίου και δομές δινών. Η κατανόηση της ανισοτροπίας του λ και του ξ είναι ουσιαστική για τη σχεδίαση υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες παγίδευσης ροής και υψηλές κρίσιμες πυκνότητες ρεύματος (Barnos, 2025).

6.3.3 Σχέση του κ με τον διαχωρισμό σε τύπου I και τύπου II

Ο διαχωρισμός των υπεραγωγών σε τύπου I και τύπου II βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην τιμή του λόγου $\kappa = \lambda/\xi$. Η θεωρία Ginzburg–Landau δείχνει ότι υπάρχει μια κρίσιμη τιμή $\kappa_c = 1/\sqrt{2}$, η οποία χωρίζει τα δύο καθεστώτα. Για $\kappa < 1/\sqrt{2}$, η διεπιφάνεια υπεραγωγίμης–κανονικής φάσης έχει θετική επιφανειακή ενέργεια, γεγονός που σημαίνει ότι η δημιουργία πολλών μικρών διεπιφανειών είναι ενεργειακά δυσμενής. Σε αυτή την περίπτωση, το σύστημα ευνοεί μια ομοιόμορφη υπεραγωγίμη ή μια ομοιόμορφη κανονική φάση, οδηγώντας σε συμπεριφορά τύπου I με μοναδικό κρίσιμο πεδίο H_c (Vinen, 2003). Για $\kappa > 1/\sqrt{2}$, η επιφανειακή ενέργεια της διεπιφάνειας γίνεται αρνητική, γεγονός που καθιστά ευνοϊκή την εμφάνιση πολλών διεπιφανειών υπεραγωγίμης–κανονικής φάσης. Αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη της μικτής κατάστασης, όπου μαγνητικές ροϊκές δίνες με κανονικούς πυρήνες συνυπάρχουν με υπεραγωγίμες περιοχές. Σε αυτή την περίπτωση, η υπεραγωγιμότητα δεν καταρρέει απότομα σε ένα μόνο κρίσιμο πεδίο, αλλά επιβιώνει μέχρι πολύ υψηλότερες τιμές πεδίου H_{c2} , διασπώμενη σταδιακά μέσω της αύξησης της πυκνότητας των δινών, χαρακτηριστική συμπεριφορά υπεραγωγών τύπου II (Fetter & Hohenberg, 2018). Η τιμή του κ καθορίζει επομένως το αν η αποβολή του μαγνητικού πεδίου θα είναι πλήρης μέχρι ένα μοναδικό H_c ή αν θα υπάρξει εμβόλιμη περιοχή μικτής κατάστασης μεταξύ H_{c1} και H_{c2} . Στους υπεραγωγούς τύπου I, το μαγνητικό πεδίο εκδιώκεται πλήρως μέχρι το H_c και στη συνέχεια η υπεραγωγιμότητα χάνεται απότομα, ενώ στους τύπου II το πεδίο αρχίζει να διεισδύει σε μορφή δινών ήδη από το H_{c1} , και η υπεραγωγιμότητα επιβιώνει μέχρι το H_{c2} . Αυτή η διαφορά στο μακροσκοπικό διάγραμμα φάσεων προκύπτει απευθείας από την ισορροπία μεταξύ λ και ξ (Vinen, 2003). Από πρακτική άποψη, υλικά με μεγάλο κ – άρα τύπου II – είναι τα πιο χρήσιμα για εφαρμογές όπου απαιτούνται ισχυρά μαγνητικά πεδία και μεγάλες πυκνότητες ρεύματος, επειδή μπορούν να διατηρήσουν την υπεραγωγίμη κατάσταση σε πολύ υψηλά H_{c2} . Αντίθετα, υλικά με μικρό κ – τύπου I – έχουν σχετικά χαμηλά κρίσιμα πεδία και η υπεραγωγιμότητά τους καταστρέφεται εύκολα από εξωτερικά πεδία, κάτι που περιορίζει τη χρήση τους κυρίως σε θεμελιώδεις μελέτες ή σε εφαρμογές χαμηλού πεδίου. Ο έλεγχος και η βελτιστοποίηση του κ , μέσω επιλογής υλικού και μικροδομής, είναι κεντρικό στοιχείο στη μηχανική υπεραγωγίμων υλικών για τεχνολογικές εφαρμογές (Barnos, 2025).

7. Τεχνολογικές εφαρμογές της υπεραγωγιμότητας

Η υπεραγωγιμότητα, πέρα από το θεμελιώδες θεωρητικό ενδιαφέρον που παρουσιάζει, έχει οδηγήσει σε ένα ευρύ φάσμα τεχνολογικών εφαρμογών που εκμεταλλεύονται τη μηδενική αντίσταση και την ιδιαίτερη μαγνητική συμπεριφορά των υπεραγωγών. Στον πυρήνα των περισσότερων εφαρμογών βρίσκεται η δυνατότητα μεταφοράς ισχυρών ρευμάτων χωρίς ωμικές απώλειες και η παραγωγή πολύ υψηλών και σταθερών μαγνητικών πεδίων, τα οποία θα ήταν δύσκολο ή αδύνατο να επιτευχθούν με συμβατικά αγώγιμα υλικά. Η εξέλιξη των υπεραγωγικών υλικών και ειδικά η ανάπτυξη υπεραγωγών τύπου II με υψηλά κρίσιμα πεδία και ρεύματα άνοιξε τον δρόμο για συστήματα που σήμερα είναι βασικά εργαλεία στην ιατρική, στη φυσική υψηλών ενεργειών και στην τεχνολογία ισχύος (Barnos, 2025).

Κρίσιμος παράγοντας για την πρακτική αξιοποίηση των υπεραγωγών είναι η επίτευξη μεγάλων κρίσιμων πυκνοτήτων ρεύματος σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας, δηλαδή σε παρουσία μαγνητικών πεδίων, μηχανικών τάσεων και θερμικών διακυμάνσεων. Η διαχείριση της μικτής κατάστασης και η παγίδευση ροής στους υπεραγωγούς τύπου II αποτελούν κεντρικά ζητήματα σχεδιασμού, καθώς η κίνηση των ροϊκών δινών μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες και σε θέρμανση. Έτσι, οι εφαρμογές βασίζονται όχι μόνο στις θεμελιώδεις φυσικές ιδιότητες, αλλά και σε προσεκτική μηχανική υλικών, σύνθετων γεωμετριών και προηγμένα κρυογενικά συστήματα (Huebener, 2019).

7.1 Υπεραγώγιμοι μαγνήτες (MRI, NMR, επιταχυντές σωματιδίων)

Οι υπεραγώγιμοι μαγνήτες είναι ίσως η πιο ώριμη και διαδεδομένη εφαρμογή της υπεραγωγιμότητας. Εκμεταλλεύονται τη δυνατότητα των υπεραγωγών να μεταφέρουν μεγάλα ρεύματα χωρίς ωμικές απώλειες, δημιουργώντας στατικά μαγνητικά πεδία υψηλής έντασης με εξαιρετική ομοιογένεια. Συστήματα όπως οι τομογράφοι MRI (Magnetic Resonance Imaging) και τα φασματόμετρα NMR (Nuclear Magnetic Resonance) βασίζονται σε υπεραγώγιμους μαγνήτες που λειτουργούν συνήθως σε πεδία από 1,5 έως και πάνω από 10 Tesla, κάτι που θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολο να επιτευχθεί με συμβατικούς ηλεκτρομαγνήτες λόγω των τεράστιων ωμικών απωλειών και θερμικών φορτίων (Kim, 2019). Σε ένα τυπικό σύστημα MRI, τα υπεραγώγιμα πηνία κατασκευάζονται από κράματα τύπου Nb–Ti ή Nb₃Sn, τα οποία είναι υπεραγωγοί τύπου II με υψηλά κρίσιμα πεδία και ρεύματα. Τα πηνία ψύχονται σε θερμοκρασίες κοντά στο 4 K με τη χρήση υγρού ηλίου ή κλειστών κρυογονικών κυκλωμάτων. Μόλις φορτιστεί το πηνίο με ρεύμα, ο μαγνήτης μπορεί να λειτουργεί σε «καθεστώς διατήρησης ρεύματος» (persistent mode), όπου το ρεύμα κυκλοφορεί επ' αόριστον χωρίς σημαντική πτώση, επιτρέποντας μαγνητικό πεδίο σταθερό τόσο σε μέτρο όσο και σε ομοιογένεια, απαραίτητο για ποιοτική απεικόνιση και φασματοσκοπία (Vinen, 2003).

Ομοίως, τα φασματόμετρα NMR υψηλής ανάλυσης απαιτούν εξαιρετικά σταθερά και ομοιογενή πεδία, καθώς η φασματική ανάλυση εξαρτάται απευθείας από τη σταθερότητα του μαγνητικού πεδίου σε χρονικές κλίμακες πολλών ωρών ή ημερών. Η χρήση υπεραγώγιμων μαγνητών επιτρέπει την επίτευξη πεδίων άνω των 20 Tesla σε σύγχρονα ερευνητικά συστήματα, με τη βοήθεια υβριδικών διατάξεων που συνδυάζουν υπεραγώγιμα και αντιστάσιμα πηνία, ανοίγοντας τον δρόμο για μελέτες δομής και δυναμικής πολύπλοκων μοριακών συστημάτων (Barnos, 2025).

Στους επιταχυντές σωματιδίων, υπεραγώγιμοι μαγνήτες χρησιμοποιούνται για την καμπύλωση και την εστίαση δεσμών υψηλής ενέργειας. Μεγάλες εγκαταστάσεις, όπως επιταχυντές κυκλικής διάταξης, απαιτούν χιλιάδες μαγνήτες υψηλού πεδίου, οι οποίοι να λειτουργούν με ελάχιστη κατανάλωση ισχύος. Υπεραγώγιμα πηνία Nb–Ti και Nb₃Sn

επιτρέπουν την επίτευξη πεδίων άνω των 8–10 Tesla στους καμπυλωτικούς μαγνήτες, καθιστώντας εφικτή την επίτευξη πολύ υψηλών ενεργειών σωματιδίων σε σχετικά περιορισμένη γεωμετρία δακτυλίου (Hasan & Ali, 2022). Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται το ενδιαφέρον για τη χρήση υπεραγωγών υψηλής T_c σε μαγνήτες, ιδιαίτερα σε μορφή ταινιών από υλικά τύπου YBCO, ώστε να λειτουργούν σε θερμοκρασίες υγρού αζώτου ή υψηλότερα. Παρότι οι μηχανικές και μαγνητικές απαιτήσεις είναι αυστηρές, η δυνατότητα μείωσης του κόστους κρυογενικής και αύξησης των κρίσιμων πεδίων καθιστά τις ταινίες υψηλής T_c ελκυστική επιλογή για μελλοντικές γενιές μαγνητών σε ιατρική και επιταχυντές (Barnos, 2025).

7.2 Υπεραγώγιμα καλώδια και γραμμές μεταφοράς ισχύος

Μια άλλη σημαντική κατηγορία εφαρμογών αφορά τη χρήση υπεραγώγιμων υλικών για μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος με ελάχιστες απώλειες. Σε αντίθεση με τα συμβατικά καλώδια χαλκού ή αλουμινίου, τα υπεραγώγιμα καλώδια μπορούν να μεταφέρουν πολύ μεγαλύτερες πυκνότητες ρεύματος στην ίδια διατομή, επιτρέποντας συμπαγείς γραμμές υψηλής ικανότητας, ιδανικές για αστικά κέντρα ή σημεία όπου ο χώρος είναι περιορισμένος. Η μηδενική ωμική αντίσταση σε DC μεταφορά μειώνει δραστικά τις απώλειες Joule, κάτι που είναι ιδιαίτερα ελκυστικό για μεγάλα δίκτυα ισχύος (Kim, 2019). Στην περίπτωση εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), εμφανίζονται επιπλέον φαινόμενα, όπως οι απώλειες λόγω κίνησης ροϊκών δινών και μεταβολών μαγνητικού πεδίου μέσα στον υπεραγωγό. Οι απώλειες αυτές δεν είναι μηδενικές και αποτελούν σημαντικό αντικείμενο μελέτης, καθώς επηρεάζουν την απόδοση των υπεραγώγιμων γραμμών. Η σχεδίαση των καλωδίων, η διάταξη των νημάτων ή ταινιών, καθώς και η επιλογή συχνότητας και τρόπου λειτουργίας είναι κρίσιμα στοιχεία για τη μείωση των AC απωλειών σε αντιπροσωπευτικές συνθήκες δικτύου (Huebener, 2019).

Η ανάπτυξη ταινιών υψηλής T_c , όπως YBCO, σε εύκαμπτα υπόστρα και η κατασκευή πολυστρωματικών καλωδίων επιτρέπουν τη λειτουργία σε θερμοκρασίες της τάξης των 70–77 K, χρησιμοποιώντας υγρό άζωτο αντί για υγρό ήλιο. Αυτό μειώνει σημαντικά το κόστος κρυογενικής και κάνει πιο ρεαλιστική την ένταξη υπεραγώγιμων γραμμών σε αστικά ή βιομηχανικά δίκτυα. Πειραματικές και πιλοτικές εγκαταστάσεις έχουν δείξει ότι υπεραγώγιμα καλώδια μπορούν να συνυπάρξουν με συμβατικές υποδομές, προσφέροντας υψηλή μεταφορική ικανότητα χωρίς μεγάλες απώλειες (Barnos, 2025). Πέρα από τις βασικές γραμμές μεταφοράς, υπεραγώγιμα υλικά εξετάζονται και σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως υπεραγώγιμοι δακτύλιοι (SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage), όπου η ενέργεια αποθηκεύεται ως μαγνητική ενέργεια σε υπεραγώγιμο πηνίο. Η μηδενική αντίσταση επιτρέπει τη διατήρηση του ρεύματος για μεγάλους χρόνους με μικρές απώλειες, καθιστώντας τέτοια συστήματα κατάλληλα για σταθεροποίηση δικτύου, εξομάλυνση αιχμών ή υποστήριξη ευαίσθητων φορτίων (Kim, 2019).

7.3 SQUIDS (υπεραγώγιμοι κβαντικοί παρεμβολείς) και ευαίσθητη μαγνητομετρία

Οι υπεραγώγιμοι κβαντικοί παρεμβολείς (SQUIDS – Superconducting Quantum Interference Devices) είναι από τις πιο εντυπωσιακές εφαρμογές της υπεραγωγιμότητας στον τομέα της μέτρησης εξαιρετικά ασθενών μαγνητικών πεδίων. Η λειτουργία τους βασίζεται στο φαινόμενο Josephson και στην κβάντωση της μαγνητικής ροής σε υπεραγώγιμους δακτυλίους. Ένα τυπικό SQUID αποτελείται από έναν υπεραγώγιμο βρόχο που περιέχει μία ή δύο επαφές Josephson, μέσω των οποίων το υπεραγώγιμο ρεύμα

εξαρτάται ευαίσθητα από τη μαγνητική ροή που διαπερνά τον βρόχο (Fernandes, 2015). Η βασική αρχή λειτουργίας στηρίζεται στη συμβολή των κυματοσυναρτήσεων των ζευγών Cooper στις δύο πλευρές των επαφών. Η μαγνητική ροή μέσα στον βρόχο επηρεάζει τη σχετική φάση των κυματοσυναρτήσεων και, συνεπώς, το μέγιστο επιτρεπτό υπεραγώγιμο ρεύμα, προκαλώντας περιοδική μεταβολή της ολικής απόκρισης του SQUID ως προς τη ροή με περίοδο ίση με το κβάντο ροής Φ_0 . Αυτό καθιστά τις διατάξεις αυτές εξαιρετικά ευαίσθητες σε πολύ μικρές μεταβολές μαγνητικού πεδίου, επιτρέποντας ανίχνευση πεδίων της τάξης των 10^{-14} T ή ακόμη μικρότερων (Vinen, 2003).

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι SQUID: τα DC SQUIDS, με δύο επαφές Josephson σε σειρά στον βρόχο, και τα RF SQUIDS, με μία μόνο επαφή σε συνδυασμό με συντονιζόμενο κύκλωμα ραδιοσυχνότητας. Τα DC SQUIDS προσφέρουν σε γενικές γραμμές μεγαλύτερη ευαισθησία και γραμμικότητα, ενώ τα RF SQUIDS είναι απλούστερα κατασκευαστικά. Σε κάθε περίπτωση, η σωστή κρυογενική ψύξη και η θωράκιση από εξωτερικούς θορύβους είναι κρίσιμες για να εκμεταλλευτεί κανείς την ακραία ευαισθησία αυτών των συστημάτων (Latif, Husnain, & Siddique, 2022). Τα SQUIDS έχουν βρει εφαρμογές σε ποικιλία πεδίων. Στη βιοϊατρική, χρησιμοποιούνται σε συστήματα μαγνητοεγκεφαλογραφίας (MEG) για τη μέτρηση των πολύ ασθενών μαγνητικών πεδίων που παράγονται από τη δραστηριότητα του ανθρώπινου εγκεφάλου. Στη γεωφυσική, βοηθούν στην ανίχνευση μικρών μαγνητικών ανωμαλιών του φλοιού της Γης ή στην αναζήτηση κοιτασμάτων. Στη φυσική στερεάς κατάστασης, χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων λεπτών υμενίων, νανοδομών και υπεραγώγιμων ή μαγνητικών δειγμάτων (Barnos, 2025).

Η εξέλιξη των SQUIDS συνδέεται στενά με την πρόοδο στην τεχνολογία λεπτών υμενίων υπεραγωγών και στην κατασκευή μικροσκοπικών επαφών Josephson. Η χρήση υπεραγωγών υψηλής T_c επιτρέπει τη λειτουργία ορισμένων συστημάτων σε θερμοκρασίες υγρού αζώτου, διευκολύνοντας τις εφαρμογές πεδίου και μειώνοντας την πολυπλοκότητα των κρυογονικών υποσυστημάτων. Η ευαισθησία και η ταχύτητα απόκρισης των SQUIDS τα καθιστούν μοναδικά όργανα για θεμελιώδη έρευνα, αλλά και για εξειδικευμένες μετρήσεις σε εφαρμοσμένα πεδία (Kim, 2019).

7.4 Υπεραγώγιμα ηλεκτρονικά στοιχεία (Josephson junctions, qubits)

Τα υπεραγώγιμα ηλεκτρονικά στοιχεία αξιοποιούν όχι μόνο τη μηδενική αντίσταση, αλλά κυρίως τη μακροσκοπική κβαντική φάση της υπεραγώγιμης συνάρτησης τάξης. Ένα από τα σημαντικότερα τέτοια στοιχεία είναι η επαφή Josephson, η οποία προκύπτει όταν δύο υπεραγωγοί χωρίζονται από ένα λεπτό μονωτικό στρώμα ή στενή μη υπεραγώγιμη περιοχή. Σε αυτή τη διάταξη, ζεύγη Cooper μπορούν να «περάσουν» μέσω σήραγγας, δημιουργώντας ρεύμα χωρίς πτώση τάσης, το οποίο εξαρτάται περιοδικά από τη διαφορά φάσης των δύο υπεραγώγιμων περιοχών. Το φαινόμενο Josephson αποτελεί θεμελιώδη εκδήλωση της κβαντικής συνοχής σε μακροσκοπική κλίμακα (Vinen, 2003). Η στατική (DC) μορφή του φαινομένου Josephson περιγράφεται από τη σχέση $I = I_c \sin(\varphi)$, όπου I_c είναι το κρίσιμο ρεύμα της επαφής και φ η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο υπεραγωγών. Για τάση μηδέν, μπορεί να ρέει πεπερασμένο ρεύμα μέχρι την τιμή I_c , πέρα από την οποία το σύστημα μεταβαίνει σε κατάσταση με πεπερασμένη τάση και χρονικά μεταβαλλόμενη φάση. Η δυναμική (AC) μορφή του φαινομένου προβλέπει ότι σταθερή τάση V στην επαφή οδηγεί σε χρονική εξέλιξη της φάσης και εμφάνιση ρεύματος που ταλαντώνεται με συχνότητα $f = 2eV/h$, συνδέοντας άμεσα τάση και συχνότητα με θεμελιώδη σταθερά της φύσης (Fernandes, 2015).

Οι επαφές Josephson μπορούν να θεωρηθούν ως «μη γραμμικά επαγωγικά» στοιχεία σε κυκλώματα υπεραγωγίμης ηλεκτρονικής. Ορίζεται μια ενέργεια Josephson E_J , που είναι ανάλογη του I_c , και ανταγωνίζεται την ενέργεια φόρτισης E_C που σχετίζεται με τη χωρητικότητα της επαφής. Η αναλογία E_J/E_C καθορίζει αν η συμπεριφορά της διάταξης θα είναι πιο «κυματική» (κυριαρχία φάσης) ή πιο «σωματιδιακή» (κυριαρχία φορτίου), κάτι που έχει άμεση σημασία για τον σχεδιασμό υπεραγωγίων qubits και λογικών στοιχείων υψηλής ταχύτητας (Latif, Husnain, & Siddique, 2022). Η ίδια φυσική των επαφών Josephson αξιοποιείται σε κβαντικά bits (qubits) υπεραγωγίμης τεχνολογίας. Υπεραγωγίμα κυκλώματα που περιλαμβάνουν επαφές Josephson, επαγωγές και χωρητικότητες μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να διαθέτουν διακριτά ενεργειακά επίπεδα, ανάμεσα στα οποία μπορεί να υπάρξει κβαντική υπέρθεση. Ανάλογα με τον κυρίαρχο βαθμό ελευθερίας, διακρίνονται qubits φορτίου, ροής, φάσης και πιο εξελιγμένοι τύποι όπως τα transmon qubits, τα οποία βελτιστοποιούν την ισορροπία E_J/E_C για αύξηση του χρόνου συνοχής έναντι θορύβου φορτίου (Fernandes, 2015). Πέρα από qubits, οι επαφές Josephson χρησιμοποιούνται σε υπεραγωγίμη λογική υψηλής ταχύτητας (RSFQ – Rapid Single Flux Quantum), σε χρονισμό με βάση κβαντισμένα παλμικά σήματα και σε πρότυπα τάσης και ρεύματος υψηλής ακρίβειας. Η κβάντωση της ροής και η ακριβής σχέση τάσης–συχνότητας μέσω του φαινομένου Josephson επιτρέπουν την υλοποίηση προτύπων μετρολογίας ηλεκτρικών μεγεθών που βασίζονται σε θεμελιώδεις φυσικές σταθερές, βελτιώνοντας τη σταθερότητα και την επαναληψιμότητα των μετρήσεων (Vinen, 2003).

7.5 Εφαρμογές σε κβαντικούς υπολογιστές

Οι υπεραγωγίμες πλατφόρμες κβαντικών υπολογιστών αποτελούν σήμερα μία από τις πιο ανεπτυγμένες προσεγγίσεις για την υλοποίηση υπολογιστικών συστημάτων που αξιοποιούν κβαντική υπέρθεση και διεμπλοκή. Στην καρδιά αυτών των συστημάτων βρίσκονται τα υπεραγωγίμα qubits, τα οποία είναι κυκλώματα με επαφές Josephson που εμφανίζουν διακριτά ενεργειακά επίπεδα και μπορούν να κωδικοποιήσουν καταστάσεις $|0\rangle$ και $|1\rangle$ ως διαφορετικές κβαντικές καταστάσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε ένα υπεραγωγίμο βρόχο ή σε έναν συντονιστή. Η δυνατότητα δημιουργίας και ελέγχου υπέρθεσης μεταξύ αυτών των καταστάσεων είναι θεμελιώδης για την κβαντική επεξεργασία πληροφορίας (Fernandes, 2015). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα transmon qubits, τα οποία βασίζονται σε επαφές Josephson σε παράλληλο συνδυασμό με χωρητικότητα, έτσι ώστε η ενέργεια φόρτισης E_C να είναι συγκριτικά μικρή σε σχέση με την ενέργεια Josephson E_J . Αυτό μειώνει σημαντικά την ευαισθησία σε θόρυβο φορτίου, αυξάνοντας τον χρόνο συνοχής των qubits, χωρίς να χάνεται η μη γραμμικότητα που απαιτείται για τον ορισμό διακριτών ενεργειακών επιπέδων. Τα qubits αυτά μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους μέσω υπεραγωγίων μικροκυματικών αντηχείων, σχηματίζοντας επεκτάσιμες αρχιτεκτονικές τύπου «μονοδιάστατης ή διδιάστατης συστοιχίας» (Latif, Husnain, & Siddique, 2022).

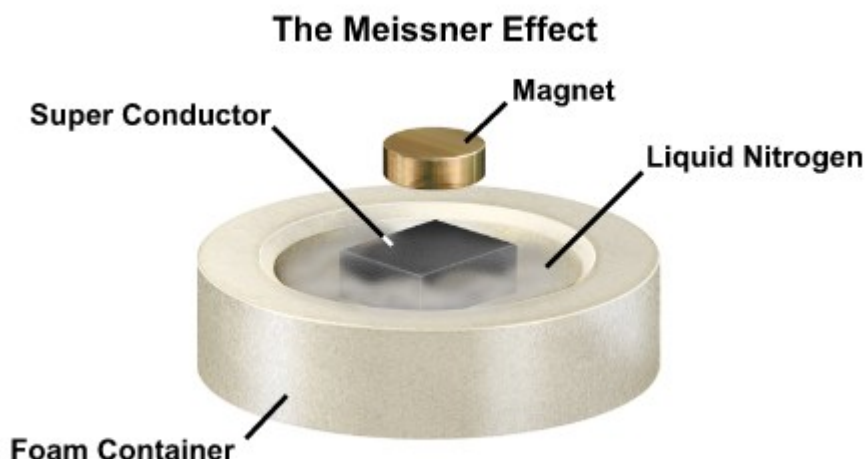
Η υλοποίηση κβαντικών πυλών σε υπεραγωγίμα qubits βασίζεται σε μικροκυματικά παλμικά σήματα κατάλληλης συχνότητας και διάρκειας, τα οποία διεγείρουν μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων του qubit ή δημιουργούν ελεγχόμενη σύζευξη μεταξύ γειτονικών qubits. Με αυτόν τον τρόπο υλοποιούνται μονο- και δι- qubit πύλες, όπως περιστροφές στο χώρο Bloch και πύλες ελεγχόμενης φάσης. Η ακρίβεια του χρονισμού, η σταθερότητα της συχνότητας και ο έλεγχος των θορυβωδών περιβαλλοντικών βαθμών ελευθερίας είναι κρίσιμα για την επίτευξη υψηλής πιστότητας στις κβαντικές πράξεις (Fernandes, 2015). Κεντρικό ζήτημα στην κβαντική υπολογιστική είναι η διατήρηση της

κβαντικής συνοχής (coherence) για χρόνο επαρκή ώστε να εφαρμοστούν πολλές διαδοχικές πύλες. Στα υπεραγώγιμα κυκλώματα, η συνοχή περιορίζεται από διάφορους μηχανισμούς αποσυνοχής, όπως θόρυβος φάσης, απώλειες στο διηλεκτρικό, θόρυβος ροής και ταλαντώσεις δύο επιπέδων σε ατέλειες υλικών. Η πρόοδος στην υλικολογία, στη γεωμετρία των κυκλωμάτων και στις τεχνικές θωράκισης έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των χρόνων συνοχής σε σύγκριση με τις πρώτες γενιές υπεραγώγιμων qubits (Barnos, 2025).

Η κλιμάκωση σε μεγαλύτερο αριθμό qubits απαιτεί όχι μόνο βελτίωση της συνοχής, αλλά και αποτελεσματικά σχήματα διόρθωσης σφαλμάτων. Αρχιτεκτονικές βασισμένες σε διδιάστατα πλέγματα υπεραγώγιμων qubits υποστηρίζουν κώδικες επιφανείας (surface codes), στους οποίους η πληροφορία κωδικοποιείται σε συλλογικές καταστάσεις πολλών φυσικών qubits. Η υλοποίηση τέτοιων σχημάτων απαιτεί υψηλή πιστότητα πύλης και γρήγορες μετρήσεις, αλλά προσφέρει θεωρητικά τη δυνατότητα ανοχής σε σφάλματα και κλιμάκωσης σε κβαντικούς υπολογιστές γενικής χρήσης (Fernandes, 2015). Παρά τις τεχνικές προκλήσεις, τα υπεραγώγιμα κυκλώματα θεωρούνται ιδιαίτερα υποσχόμενη πλατφόρμα λόγω της δυνατότητας μικροηλεκτρονικής κατασκευής, της συμβατότητας με υπάρχοντα τεχνολογικά εργαλεία και της σχετικά υψηλής ταχύτητας λειτουργίας. Η αξιοποίηση της υπεραγωγιμότητας σε κβαντικούς υπολογιστές δείχνει πως μια θεμελιώδης φυσική ιδιότητα μεταφράζεται σε πρακτική τεχνολογία αιχμής στον χώρο της επεξεργασίας πληροφορίας (Barnos, 2025).

7.6 Άλλες εφαρμογές (μαγνητική αιώρηση – MAGLEV, αισθητήρες, φίλτρα μικροκυμάτων)

Πέρα από τους μαγνήτες, τα καλώδια και τα κβαντικά κυκλώματα, η υπεραγωγιμότητα έχει οδηγήσει σε μια σειρά από άλλες εφαρμογές, όπου η τέλεια διαμαγνητικότητα, η μηδενική αντίσταση και η κβάντωση της ροής αξιοποιούνται με διαφορετικούς τρόπους. Εντυπωσιακό παράδειγμα αποτελεί η μαγνητική αιώρηση (MAGLEV), όπου υπεραγωγοί υψηλής T_c μπορούν να αιωρούνται πάνω από μόνιμους μαγνήτες λόγω του φαινομένου Meissner και της παγίδευσης ροής. Η σταθερή αιώρηση και η δυνατότητα καθοδήγησης χωρίς μηχανική επαφή έχουν άμεσες προεκτάσεις σε μεταφορικά μέσα και σε συστήματα χαμηλής τριβής (Kim, 2019). Στα συστήματα MAGLEV, η χρήση υπεραγωγών επιτρέπει την υλοποίηση οχημάτων που «επιπλέουν» πάνω από υπεραγώγιμες ράγες ή μαγνητικές διατάξεις, μειώνοντας τις τριβές κύλισης και επιτρέποντας υψηλές ταχύτητες με σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η σταθεροποίηση της αιώρησης επιτυγχάνεται μέσω της παγίδευσης ροής σε υπεραγωγούς τύπου II, όπου τα μαγνητικά πεδία δημιουργούν δίνες που «κλειδώνουν» τη σχετική θέση του υπεραγωγού ως προς τον μόνιμο μαγνήτη. Η πρακτική εφαρμογή τέτοιων συστημάτων απαιτεί όμως αξιόπιστα κρυογενικά υποσυστήματα και ανθεκτικά υπεραγώγιμα υλικά (Huebener, 2019).



Εικόνα 6 : Εργαστηριακή επίδειξη μαγνητικής αιώρησης. Υπεραγώγιμο δείγμα ψυχμένο με υγρό άζωτο πάνω στο οποίο αιωρείται μόνιμος μαγνήτης, ως αποτέλεσμα του φαινομένου Meissner και της παγίδευσης μαγνητικής ροής. Πηγή: <https://nationalmaglab.org/magnet-academy/read-science-stories/science-simplified/superconductivity-101/>

Εκτός από την μαγνητική αιώρηση, οι υπεραγωγοί χρησιμοποιούνται σε πληθώρα αισθητήρων πέρα από τα SQUIDS. Υπεραγώγιμοι βολομετρικοί ανιχνευτές εκμεταλλεύονται τη χιλιοστη διαφορά θερμοκρασίας κοντά στην T_c για να ανιχνεύσουν πολύ μικρές εισόδους ενέργειας από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, καθιστώντας τους κατάλληλους για αστροφυσική, υπέρυθρη φασματοσκοπία και ανίχνευση σωματιδίων. Η εξαιρετική ευαισθησία της ειδικής θερμότητας και της αντίστασης κοντά στη μετάβαση επιτρέπει τη μέτρηση αδύναμων σημάτων που θα ήταν άορατα με συμβατικούς ανιχνευτές (Latif, Husnain, & Siddique, 2022). Στον χώρο των μικροκυμάτων και των τηλεπικοινωνιών, υπεραγώγιμα φίλτρα και αντηχεία χρησιμοποιούνται για την επίτευξη πολύ υψηλού παράγοντα ποιότητας Q και χαμηλών απωλειών σε στενές ζώνες συχνοτήτων. Λεπτά υπεραγώγιμα υμένα σε κατάλληλα υποστρώματα μπορούν να σχηματίσουν συντονιστές και φίλτρα που παρουσιάζουν ελάχιστες απώλειες, επιτρέποντας υψηλή επιλεκτικότητα και χαμηλό θόρυβο σε δέκτες μικροκυμάτων, όπως σε σταθμούς βάσης κινητής τηλεφωνίας ή δορυφορικές εφαρμογές (Kim, 2019). Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν υπεραγώγιμα έδρανα μαγνητικής αιώρησης, στα οποία υπεραγωγοί και μόνιμοι μαγνήτες συνδυάζονται για να δημιουργήσουν συστήματα περιστροφής με εξαιρετικά χαμηλές τριβές. Τέτοια έδρανα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σαρωτές, δίσκους υψηλής ταχύτητας, ακόμα και σε ευαίσθητα επιστημονικά όργανα όπου η μηχανική τριβή πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Ο συνδυασμός μηδενικής αντίστασης και σταθερής αιώρησης επιτρέπει υψηλή σταθερότητα και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (Huebener, 2019). Η εξέλιξη των υπεραγωγικών εφαρμογών συνεχίζεται με έρευνα σε νέες γεωμετρίες, νανοδομές και υλικά, με στόχο την περαιτέρω μείωση των θερμοκρασιών λειτουργίας, την αύξηση των κρίσιμων παραμέτρων και την ενσωμάτωση υπεραγωγών σε υφιστάμενες τεχνολογικές πλατφόρμες. Η δυνατότητα συνδυασμού υπεραγωγιμότητας με άλλες τεχνολογίες, όπως η σπιντρονική και τα τοπολογικά υλικά, αφήνει ανοιχτά περιθώρια για νέες μορφές αισθητήρων, φίλτρων και υβριδικών συστημάτων με μοναδικές λειτουργικές ιδιότητες (Barnos, 2025).

8. Συμπεράσματα

8.1 Σύνοψη των βασικών σημείων της εργασίας

Η εργασία επικεντρώθηκε στη συστηματική παρουσίαση του φαινομένου της υπεραγωγιμότητας, ξεκινώντας από την ιστορική του ανακάλυψη και καταλήγοντας στις σύγχρονες θεωρίες και τεχνολογικές εφαρμογές. Στα αρχικά κεφάλαια παρουσιάστηκε η βασική έννοια της αγωγιμότητας και της ηλεκτρικής αντίστασης, καθώς και η διάκριση των υλικών σε μέταλλα, μονωτές και ημιαγωγούς, ώστε να γίνει σαφές σε ποιο σημείο το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας διαφοροποιείται ριζικά από τη συνηθισμένη μεταλλική συμπεριφορά. Με αυτό το υπόβαθρο, η μετάβαση στη μελέτη της μηδενικής αντίστασης και της μαγνητικής συμπεριφοράς των υπεραγωγών έγινε πιο ομαλή και εννοιολογικά σαφής.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ιστορική διαδρομή, από το πείραμα του Onnes το 1911 μέχρι την ανάπτυξη της θεωρίας BCS και την ανακάλυψη των υπεραγωγών υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας. Αναδείχθηκε πώς η πειραματική παρατήρηση της απότομης πτώσης της αντίστασης σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και η ανακάλυψη του φαινομένου Meissner οδήγησαν στην αναγνώριση της υπεραγωγιμότητας ως νέας κβαντικής φάσης της ύλης. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν οι θεωρητικές προσπάθειες, από τις φαινομενολογικές περιγραφές μέχρι τη μικροσκοπική θεωρία BCS, που επέτρεψαν την ερμηνεία του φαινομένου σε επίπεδο ηλεκτρονίων και φωνονίων.

Στα κεφάλαια που ακολούθησαν αναλύθηκαν σε βάθος οι φυσικές ιδιότητες των υπεραγωγών: μηδενική ηλεκτρική αντίσταση, φαινόμενο Meissner, μαγνητικές ιδιότητες, κρίσιμη θερμοκρασία και κρίσιμα μαγνητικά πεδία, ενεργειακό χάσμα, ειδική θερμότητα, μήκος συνάφειας και βάθος διείσδυσης. Παρουσιάστηκε ο ρόλος των χωρικών κλιμάκων ξ και λ , καθώς και ο λόγος $\kappa = \lambda/\xi$, που καθορίζει τη διάκριση των υπεραγωγών σε τύπου I και τύπου II. Η σύγκριση των δύο τύπων έδειξε πώς η μικροσκοπική δομή και οι μαγνητικές ιδιότητες επηρεάζουν τη μακροσκοπική συμπεριφορά και τις δυνατότητες εφαρμογών. Κεντρικό σημείο της εργασίας αποτέλεσε η μικροσκοπική περιγραφή μέσω της θεωρίας BCS. Αναλύθηκαν τα προβλήματα των κλασικών θεωριών, η ανάγκη για κβαντική προσέγγιση και οι βασικές ιδέες της BCS, όπως ο σχηματισμός ζευγών Cooper και η εμφάνιση ενεργειακού χάσματος. Εξηγήθηκε πώς η συλλογική κβαντική κατάσταση των ζευγών οδηγεί στη μηδενική αντίσταση και πώς η ύπαρξη χάσματος αποτυπώνεται σε θερμοδυναμικά μεγέθη, όπως η ειδική θερμότητα και η ελεύθερη ενέργεια.

Τέλος, εξετάστηκε το ευρύ φάσμα τεχνολογικών εφαρμογών: υπεραγωγάιμοι μαγνήτες σε MRI, NMR και επιταχυντές, υπεραγωγία καλώδια και γραμμές μεταφοράς ισχύος, συσκευές SQUID, υπεραγωγία ηλεκτρονικά στοιχεία τύπου Josephson και qubits, καθώς και εφαρμογές σε κβαντικούς υπολογιστές, μαγνητική αιώρηση, αισθητήρες και φίλτρα μικροκυμάτων. Φάνηκε ότι η υπεραγωγιμότητα δεν αποτελεί μόνο αντικείμενο θεωρητικής μελέτης, αλλά και θεμέλιο προηγμένων τεχνολογιών με σημαντικό πρακτικό αντίκτυπο.

8.2 Σημασία της υπεραγωγιμότητας στη σύγχρονη φυσική και τεχνολογία

Η υπεραγωγιμότητα κατέχει κεντρική θέση στη σύγχρονη φυσική, καθώς αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα μακροσκοπικής κβαντικής κατάστασης. Η ύπαρξη μακρινής κβαντικής συνοχής, η κβάντωση της μαγνητικής ροής και τα φαινόμενα παρεμβολής σε υπεραγωγία κυκλώματα δείχνουν ότι οι κβαντικοί νόμοι δεν περιορίζονται σε μικροσκοπικές κλίμακες, αλλά μπορούν να εκδηλωθούν σε μακροσκοπικά συστήματα. Η

υπεραγωγιμότητα, επομένως, λειτουργεί ως γέφυρα ανάμεσα στην κβαντική μηχανική και στη φυσική στερεάς κατάστασης μεγάλης κλίμακας.

Σε θεωρητικό επίπεδο, η μελέτη των υπεραγώγιμων υλικών συνέβαλε σημαντικά στην ανάπτυξη εργαλείων για την κατανόηση συστημάτων πολλών σωμάτων. Η θεωρία BCS αποτέλεσε πρότυπο για πολλές άλλες θεωρίες που περιγράφουν συλλογικά φαινόμενα, ενώ η ανακάλυψη μη συμβατικών και υψηλής T_c υπεραγωγών οδήγησε σε νέα ανοικτά ερωτήματα για τον ρόλο των ισχυρών συσχετίσεων, των μαγνητικών διακυμάνσεων και της τοπολογίας στην υπεραγώγιμη σύζευξη. Έτσι, η υπεραγωγιμότητα συνεχίζει να αποτελεί πεδίο όπου δοκιμάζονται και εξελίσσονται νέες θεωρητικές ιδέες. Στην τεχνολογία, η επίδραση της υπεραγωγιμότητας είναι ήδη ορατή σε κρίσιμους τομείς. Οι υπεραγώγιμοι μαγνήτες σε MRI έχουν αλλάξει ριζικά την ιατρική διαγνωστική, επιτρέποντας μη επεμβατική απεικόνιση με υψηλή ανάλυση. Στη φυσική υψηλών ενεργειών, η χρήση υπεραγώγιμων μαγνητών στους επιταχυντές σωματιδίων επιτρέπει τη μελέτη θεμελιωδών σωματιδίων και αλληλεπιδράσεων σε ενεργειακές κλίμακες που θα ήταν διαφορετικά απρόσιτες. Η ικανότητα παραγωγής σταθερών και ισχυρών μαγνητικών πεδίων είναι θεμελιώδης για πολλές επιστημονικές και τεχνολογικές διατάξεις.

Η σημασία της υπεραγωγιμότητας εκτείνεται και στον ενεργειακό τομέα. Η προοπτική μεταφοράς ισχύος με ελάχιστες απώλειες μέσω υπεραγώγιμων καλωδίων, η ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και η δυνατότητα μείωσης της σπατάλης ενέργειας στα δίκτυα μεταφοράς συνδέονται άμεσα με τις ιδιότητες των υπεραγωγών. Σε έναν κόσμο όπου η ενεργειακή απόδοση και η βιωσιμότητα αποτελούν κεντρικές προκλήσεις, η υπεραγωγιμότητα προσφέρει μια φυσική βάση για λύσεις υψηλής απόδοσης. Τέλος, στον τομέα της πληροφορικής και των υπολογιστών, η υπεραγωγιμότητα βρίσκεται στην καρδιά της ανάπτυξης κβαντικών υπολογιστών. Τα υπεραγώγιμα qubits, σε συνδυασμό με τις επαφές Josephson και τις ιδιότητες της μακροσκοπικής φάσης, επιτρέπουν την υλοποίηση κβαντικών λογικών πράξεων σε κλίμακα που μπορεί να κλιμακωθεί βιομηχανικά. Αντίστοιχα, οι υπεραγώγιμοι κβαντικοί παρεμβολείς και οι αισθητήρες υπερυψηλής ευαισθησίας προσφέρουν εργαλεία για εφαρμογές σε μετρολογία, νανοτεχνολογία και ανίχνευση ασθενών σημάτων.

8.3 Προοπτικές και μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας

Οι προοπτικές της υπεραγωγιμότητας είναι στενά συνδεδεμένες με την ανακάλυψη νέων υλικών, την κατανόηση νέων μηχανισμών σύζευξης και τη βελτίωση της τεχνολογικής ωριμότητας υπαρχόντων συστημάτων. Ένας βασικός στόχος παραμένει η αναζήτηση υπεραγωγών με υψηλότερες κρίσιμες θερμοκρασίες, ιδανικά σε ή κοντά στη θερμοκρασία δωματίου και σε πρακτικές πιέσεις. Οι πρόσφατες εξελίξεις σε υπεραγώγιμα υδρίδια υπό πολύ υψηλή πίεση δείχνουν ότι είναι δυνατή η επίτευξη πολύ υψηλών T_c , αν και η απαίτηση ακραίων πιέσεων περιορίζει προς το παρόν τις εφαρμογές. Η πρόκληση είναι η μεταφορά αυτών των επιτευγμάτων σε συνθήκες που να είναι τεχνολογικά αξιοποιήσιμες. Παράλληλα, η μελέτη μη συμβατικών υπεραγωγών, όπως οι χαλκοξειδές υψηλής T_c , οι σιδηροπυκνίτες, τα βαρέα φερμιόνια και τα τοπολογικά υπεραγώγιμα συστήματα, συνεχίζει να είναι ένα από τα πιο ενεργά πεδία έρευνας. Η κατανόηση του ρόλου των μαγνητικών διακυμάνσεων, της ανισοτροπίας και των ισχυρών ηλεκτρονικών συσχετίσεων μπορεί να οδηγήσει σε νέους μηχανισμούς σύζευξης πέρα από τη φωνονική εικόνα. Η επίλυση αυτών των θεμελιωδών ερωτημάτων ίσως ανοίξει τον δρόμο για στοχευμένο σχεδιασμό υλικών με επιθυμητές υπεραγώγιμες ιδιότητες.

Στον χώρο των εφαρμογών, σημαντική προοπτική αποτελεί η βελτίωση της μηχανικής των υπεραγώγιμων υλικών, ώστε να αντέχουν σε υψηλά ρεύματα, ισχυρά πεδία και

μηχανικές καταπονήσεις. Η ανάπτυξη ταινιών και πολυστρωματικών δομών υψηλής T_c , η βελτιστοποίηση της παγίδευσης ροής μέσω ελεγχόμενων ατελειών και η ενσωμάτωση υπεραγωγών σε σύνθετες διατάξεις αποτελούν ενεργές περιοχές έρευνας. Η μετάβαση από πειραματικές διατάξεις σε μαζική βιομηχανική χρήση απαιτεί διεπιστημονική προσέγγιση, που συνδυάζει φυσική στερεάς κατάστασης, υλικολογία και ηλεκτρομηχανολογία. Στον τομέα των κβαντικών υπολογιστών, οι μελλοντικές κατευθύνσεις εστιάζουν στη βελτίωση των χρόνων συνοχής, στην αύξηση του αριθμού των qubits και στην ανάπτυξη αποδοτικών πρωτοκόλλων διόρθωσης σφαλμάτων. Η πρόοδος στη σχεδίαση υπεραγώγιμων qubits, στη μείωση των θορυβωδών περιβαλλοντικών βαθμών ελευθερίας και στην ενσωμάτωση κβαντικού ελέγχου μεγάλης κλίμακας θα καθορίσει αν οι υπεραγώγιμες πλατφόρμες μπορούν να οδηγήσουν σε κβαντικούς υπολογιστές πρακτικής χρήσης. Επιπλέον, οι υβριδικές διατάξεις που συνδυάζουν υπεραγώγιμα κυκλώματα με σπιν-συστήματα, μηχανικές ταλαντώσεις ή φωτονικά στοιχεία ανοίγουν νέους δρόμους για αποθήκευση και επεξεργασία κβαντικής πληροφορίας. Άλλες μελλοντικές κατευθύνσεις περιλαμβάνουν τη χρήση υπεραγώγιμων υλικών σε νέες μορφές αισθητήρων, στις τηλεπικοινωνίες υψηλών συχνοτήτων και σε κβαντικές τεχνολογίες ακριβείας. Η ενσωμάτωση υπεραγώγιμων φίλτρων σε δίκτυα επικοινωνιών, η βελτίωση της ευαισθησίας σε μετρήσεις πεδίων, θερμοκρασίας ή ακτινοβολίας και η αξιοποίηση υπεραγώγιμων διατάξεων σε δορυφορικές εφαρμογές αποτελούν περιοχές με σημαντικές δυνατότητες. Καθώς η ανάγκη για υψηλότερη απόδοση, ακρίβεια και ενεργειακή αποδοτικότητα αυξάνεται, η υπεραγωγιμότητα προσφέρει ένα πλούσιο σύνολο φυσικών αρχών πάνω στις οποίες μπορούν να στηριχθούν οι τεχνολογίες του μέλλοντος.

Βιβλιογραφία

- Ali, S. S., & Hasan, M. S. (2022). *Properties and types of superconductors*. In *Materials Research Foundations*. MRForum.
- Barnos, A. O. K. (2025). *High-temperature superconductors: Their physical properties and technological applications*. *Albahit Journal of Applied Sciences*.
- Fetter, A. L., & Hohenberg, P. C. (2018). *Theory of type II superconductors*. In *Superconductivity*. Taylor & Francis.
- Fernandes, R. M. (2015). *Lecture notes: BCS theory of superconductivity*. Universidade Estadual de Campinas.
- Fujita, S., Ito, K., & Godoy, S. (2009). *Superconductors—Introduction*. In *Theory of Conducting Matter: Superconductivity*. Springer.
- Hasan, M. S., & Ali, S. S. (2022). *Properties and types of superconductors*. In *Superconductors: Materials and Applications*. Springer.
- Hirsch, J. E. (2008). *Spin Meissner effect in superconductors and the origin of the Meissner effect*. *Europhysics Letters*.
- Hirsch, J. E. (2009). *BCS theory of superconductivity: It is time to question its validity*. *Physica Scripta*.
- Hirsch, J. E. (2009). *BCS theory of superconductivity: The world's largest Madoff scheme? arXiv preprint arXiv:0901.4099*.
- Hirsch, J. E. (2012). *The origin of the Meissner effect in new and old superconductors*. *Physica Scripta*.
- Hirsch, J. E. (2017). *Momentum of superconducting electrons and the explanation of the Meissner effect*. *Physical Review B*.
- Hirsch, J. E. (2020). *Superconductivity begins with H: Both properly understood, and misunderstood: Superconductivity basics rethought*. World Scientific.
- Hirsch, J. E., & Marsiglio, F. (2021). *Meissner effect in nonstandard superconductors*. *Physica C: Superconductivity and its Applications*.
- Huebener, R. P. (2019). *The path to type-II superconductivity*. *Metals*.
- Kim, C. J. (2019). *Superconductor levitation*. Springer.
- Latif, S., Husnain, M., & Siddique, M. H. (2022). *Basic concepts and properties of superconductors*. In *Superconductors: Materials and Applications*. Springer.
- Nie, A., & Williams, M. (2016). *Determination of the critical field and critical temperature for various type I and type II metals and alloys*. Harvard University.
- Pei, T. H. (n.d.). *Beyond BCS: Proposing the single-electron model for superconductivity*. ResearchGate.
- Rani, P. (2021). *Analysis of different techniques of superconductivity*. In *Recent Trends in Thermal Engineering: Selected Papers*. Springer.
- Saipuddin, S. F., Hashim, A., & Suhaimi, N. E. (2022). *Type I and type II superconductivity*. In *Superconducting Materials*. Springer.
- Sharma, R. G. (2015). *A review of theories of superconductivity*. In *Superconductivity: Basics and Applications to Magnets*. Springer.
- Sharma, R. G. (2021). *The phenomenon of superconductivity and type II superconductors*. In *Superconductivity: Basics and Applications to Magnets*. Springer.
- Trabelsi, Z., Hannachi, E., Alotaibi, S. A., & Slimani, Y. (2022). *Superconductivity phenomenon: Fundamentals and theories*. In *Superconducting Materials*. Springer.
- Vinen, W. F. (2003). *An introduction to superconductivity*. In *Handbook of Superconducting Materials*. Springer.
- Warnes, L. A. A. (1990). *Superconductors*. In *Electronic Materials*. Springer.

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.