

Φυσική και Τεχνολογία Υλικών και Διατάξεων Στερεάς Κατάστασης

Ανδρέας Καϊδατζής

Αναπληρωτής Καθηγητής

Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

Π.Μ.Σ. Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική

Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών – Φωτονική»

Φυσική και Τεχνολογία Υλικών και Διατάξεων Στερεάς Κατάστασης

Μάιος – Ιούνιος 2025

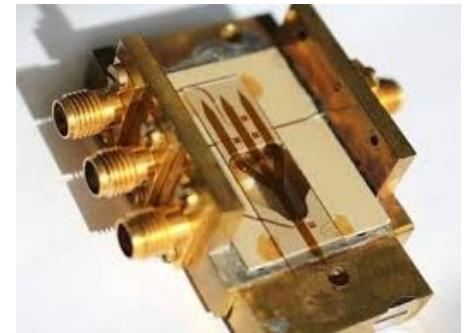
Μαγνητικές και υπεραγώγιμες διατάξεις

MRAMs



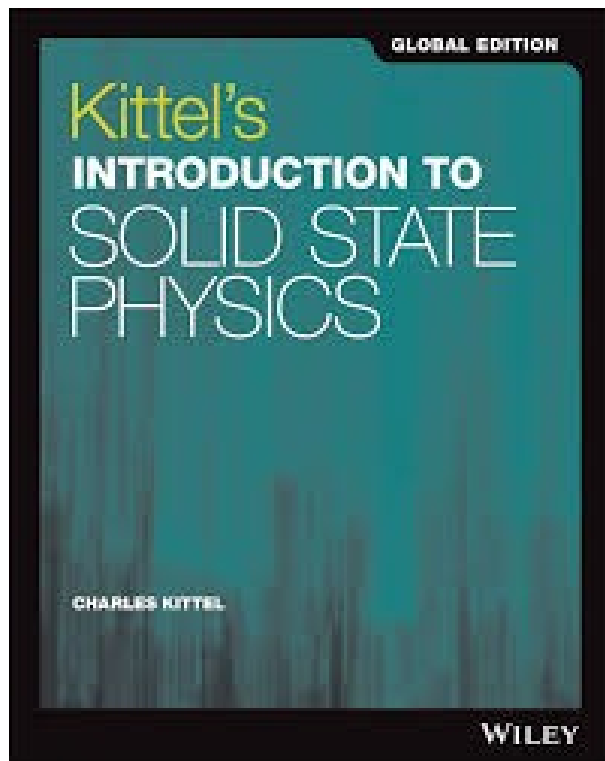
**Magnetic field
sensors**

**Spintronic and
magnonic microwave
devices**

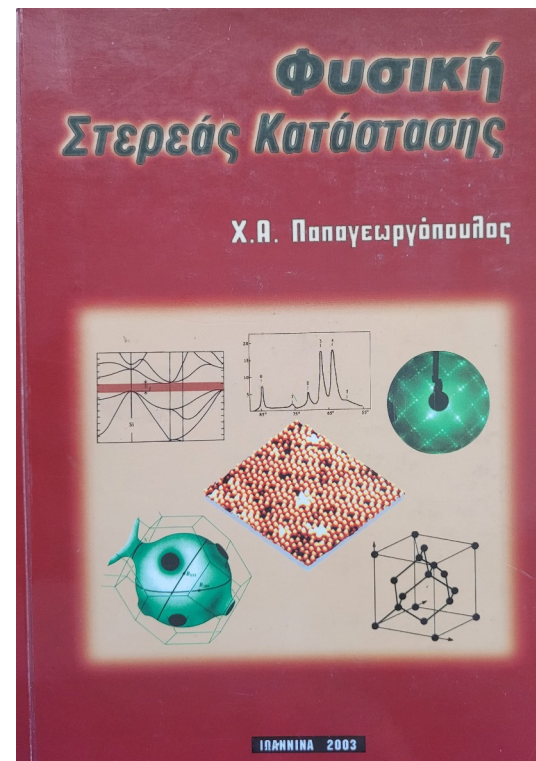


Υπεραγωγιμότητα

Βιβλιογραφία



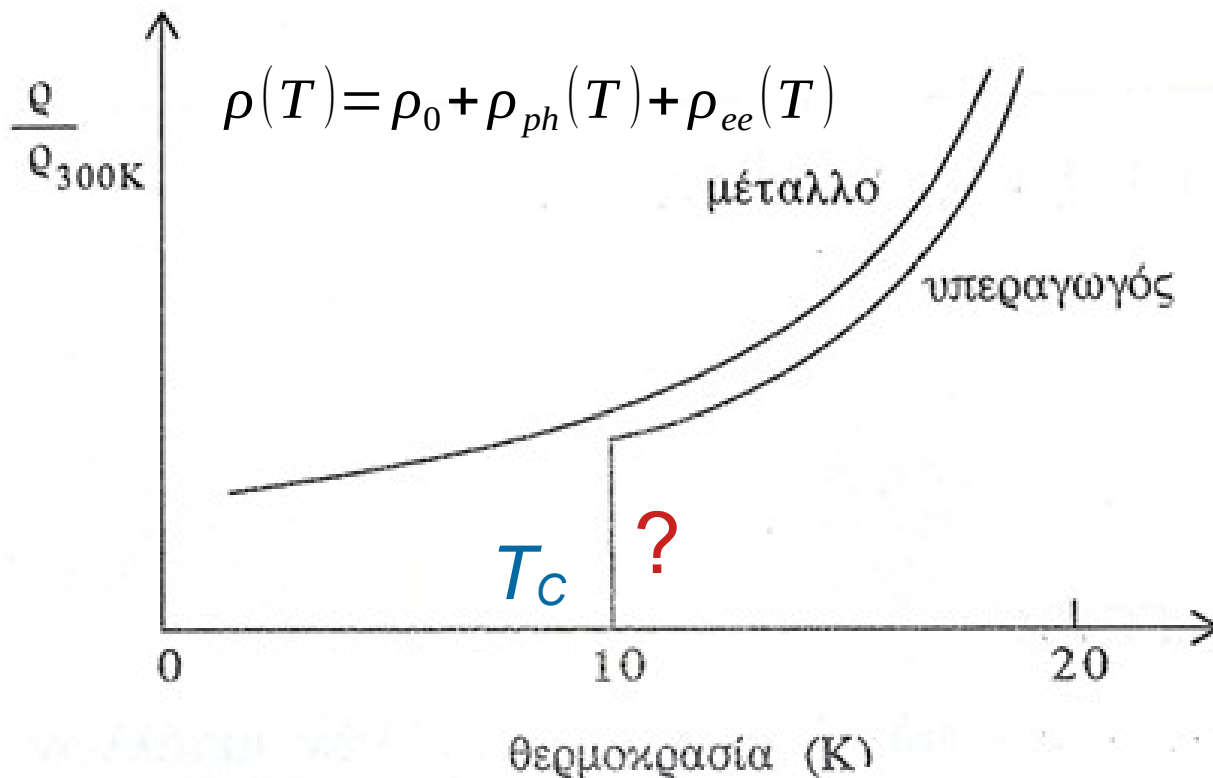
Charles Kittel,
2018



Χ. Α. Παπαγεωργόπουλος
Ιωάννινα, 2003

Υπεραγωγιμότητα

Ο απότομος **μηδενισμός** της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης πολλών μετάλλων και κραμάτων, όταν αυτά ψύχονται σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία



“Κρίσιμη” θερμοκρασία:
η θερμοκρασία όπου
συντελείται η αντιστρεπτή
μετατροπή φάσης
“υπεραγώγιμης” -
“κανονικής” κατάστασης

Υπεραγωγιμότητα

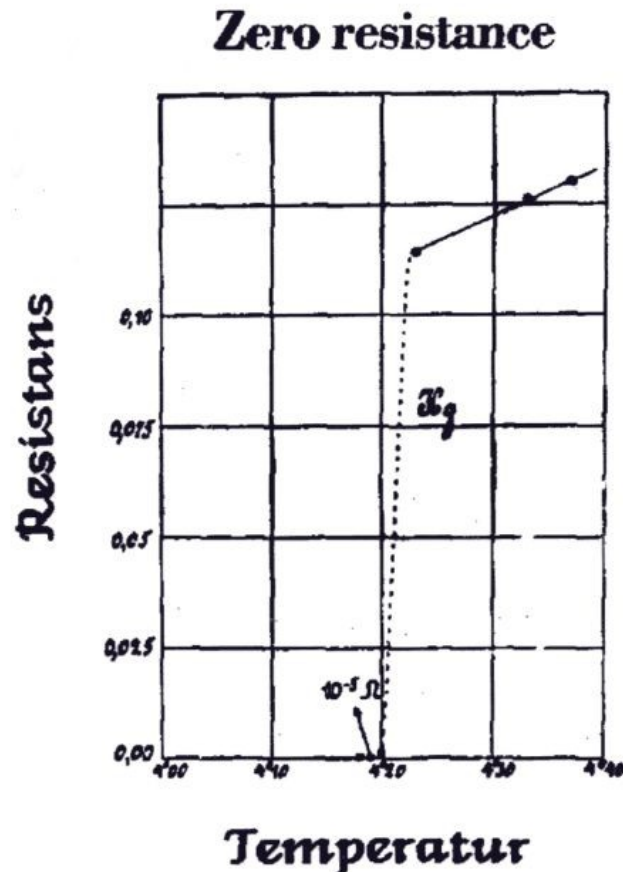
Πειραματική παρατήρηση - Kamerlingh Onnes, Leiden, 1911

Nobel Prize in Physics 1913



Photo from the Nobel Foundation archive.

Heike Kamerlingh Onnes

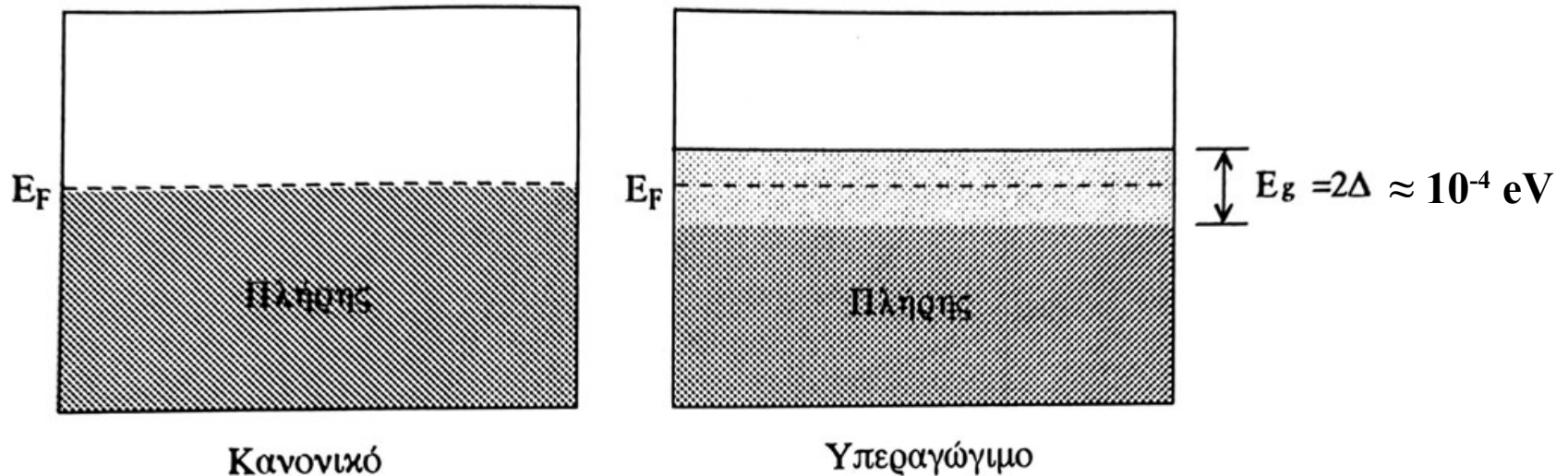


$$T_{LHe} \approx 4.2 K$$

[illegible][illegible][illegible][illegible]

Ενεργειακό Χάσμα Υπεραγωγών

Σε θερμοκρασίες μικρότερες του T_c , έχει παρατηρηθεί πειραματικά η ύπαρξη ενεργειακού χάσματος, το οποίο εκτείνεται εκατέρωθεν της στάθμης Fermi

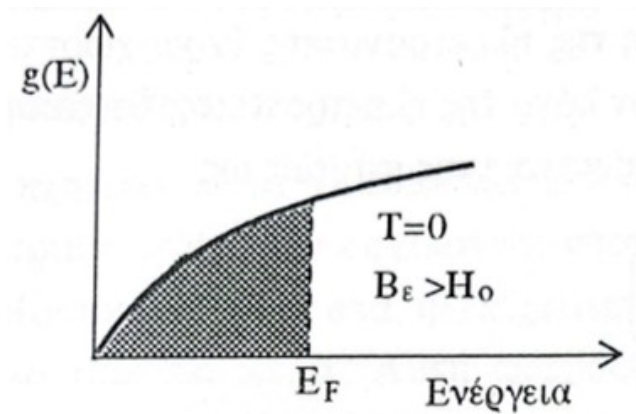


Εξάρτηση του Ενεργειακού Χάσματος
από τη θερμοκρασία:

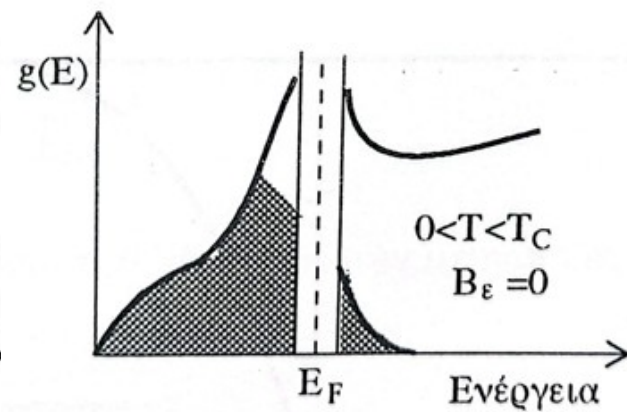
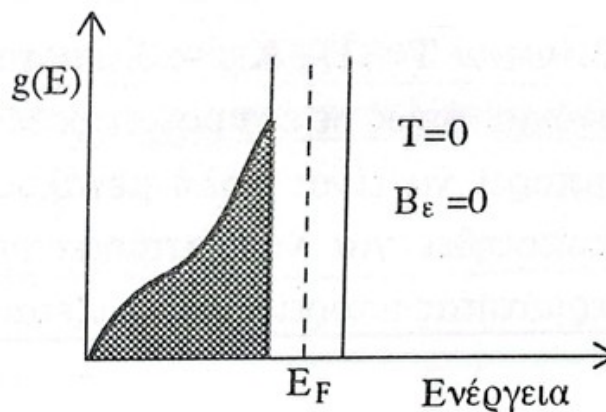
$$\frac{E_g(T)}{E_g(0)} = 1.74 \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Πυκνότητα Καταστάσεων

“Κανονική” κατάσταση

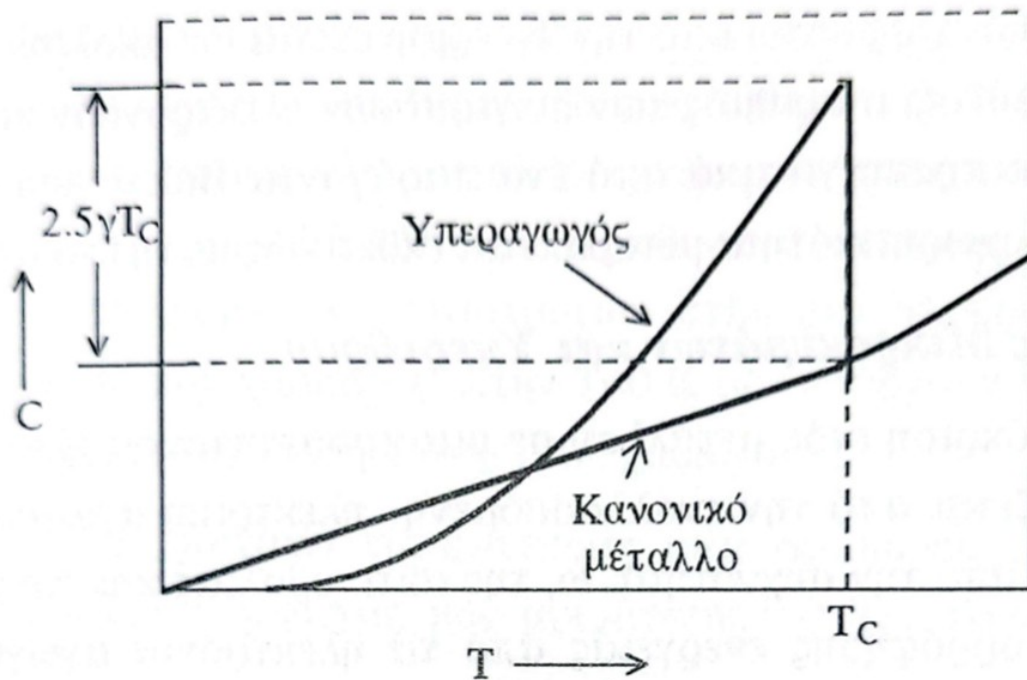


Υπεραγώγιμη κατάσταση



Θερμοχωρητικότητα

Η μετάβαση από την υπεραγώγιμη κατάσταση στην κανονική κατάσταση είναι μια **μετάβαση φάσης δεύτερης τάξης**. Συνεπώς, δεν υπάρχει λανθάνουσα θερμότητα, αλλά υπάρχει μια ασυνέχεια στην θερμοχωρητικότητα.



“Κανονική”
κατάσταση

$$C_n = A \cdot T + B \cdot T^3$$

Ηλεκτρονιακές
διεγέρσεις

Πλεγματικές
δονήσεις

Υπεραγώγιμη
κατάσταση

$$C_n = \gamma \cdot T_c \cdot a \cdot \exp\left(\frac{-b \cdot T_c}{T}\right) + B \cdot T^3$$

Ιδιότητες μικροκυμάτων και υπέρυθρου

Φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από $E_g=2\Delta$ δεν απορροφώνται από το υπεραγώγιμο υλικό

Η AC αγωγιμότητα είναι περίπου η ίδια όταν οι συχνότητες είναι μεγάλες (π.χ. οπτικές συχνότητες), σε σύγκριση με την $E_g/\hbar$.

Η συχνότητα $E_g/\hbar$ βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ των συχνοτήτων των μικροκυμάτων και του υπέρυθρου

→ Απότομη αύξηση της AC αγωγιμότητας όταν η ενέργεια των φωτονίων πλησιάζει αυτή του ενεργειακού χάσματος του υπεραγωγού

Θερμοδυναμική της Υπεραγώγιμης Μετάβασης

Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η μετάβαση μεταξύ της κανονικής και της υπεραγώγιμης κατάστασης είναι θερμοδυναμικά αντιστρεπτή.

$$\text{Ισχύει: } S_n > S_s$$

→ Τα ηλεκτρόνια είναι περισσότερο διατεταγμένα στην υπεραγώγιμη κατάσταση

Πειραματικά η μεταβολή της εντροπίας προσδιορίζεται σε $10^{-4}k_B$ ανά άτομο (π.χ. Al)

→ Μικρό κλάσμα (της τάξης των 10^{-4}) των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας βρίσκονται στην διατεταγμένη υπεραγώγιμη κατάσταση

Ισοτοπικό φαινόμενο

Ανακαλύφθηκε πειραματικά (1950) ότι η T_c εξαρτάται από τον μέσο όρο της ισοτοπικής μάζας M , των συστατικών ενός υπεραγωγού:

$$T_c \cdot M^{\frac{1}{2}} = \text{σταθερό}$$

→ Οι πλεγματικές δονήσεις παίζουν βασικό ρόλο στην ύπαρξη της υπεραγωγιμότητας

Θεωρία London

Σύμφωνα με τη θεωρία των αδερφών London (1935), ένας υπεραγωγός μπορεί να θεωρηθεί αποτελούμενος από κανονικά και υπέρευστα ηλεκτρόνια

$$n_o = n_n + n_s$$

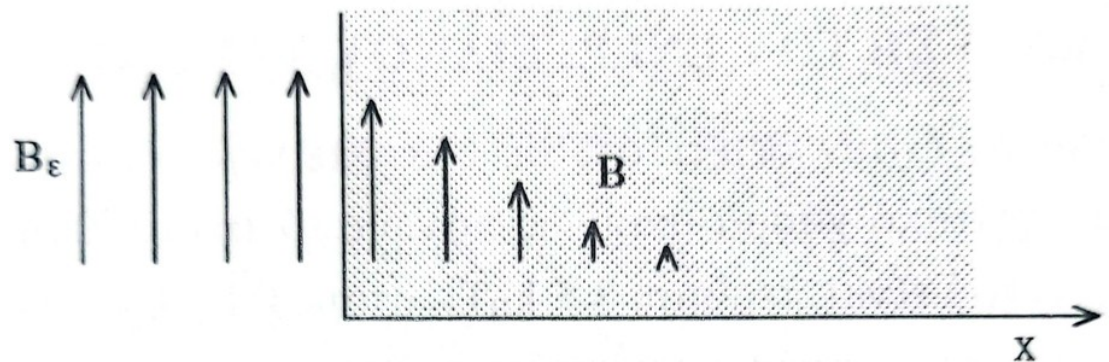
n_n, u_n : “κανονικά” ηλεκτρόνια

n_s, u_s : υπέρευστα ηλεκτρόνια

Βάθος διείσδυσης London:

$$\lambda_L = \left(\frac{m \cdot c^2}{4 \cdot \pi \cdot n_s \cdot e^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

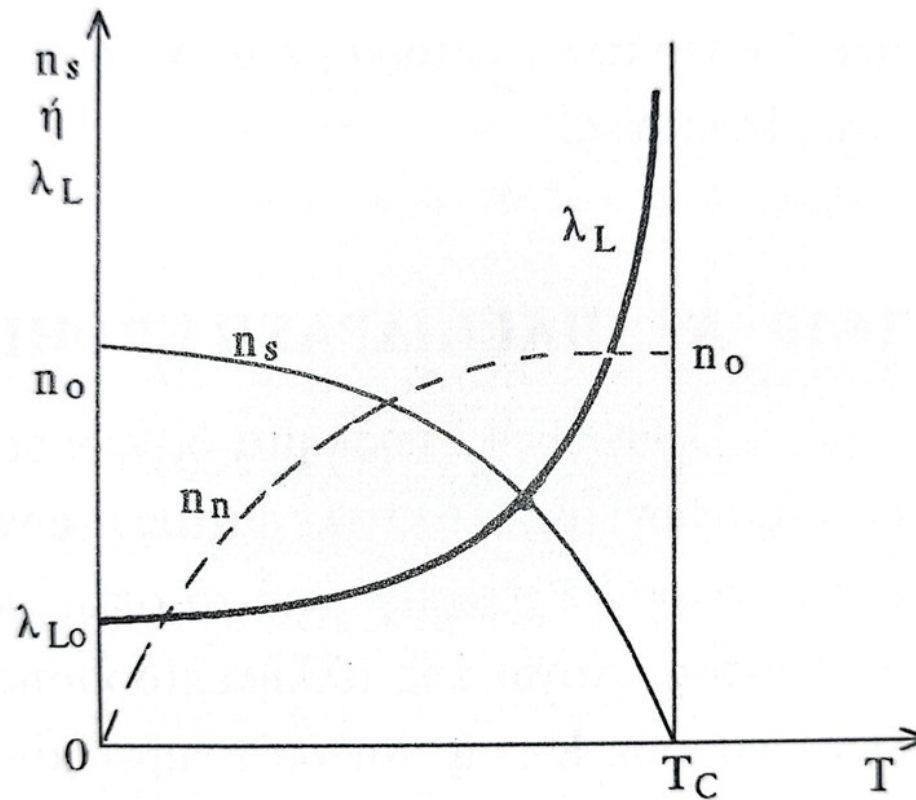
(της τάξης των 50 nm)



→ Ερμηνεία του φαινομένου Meissner!

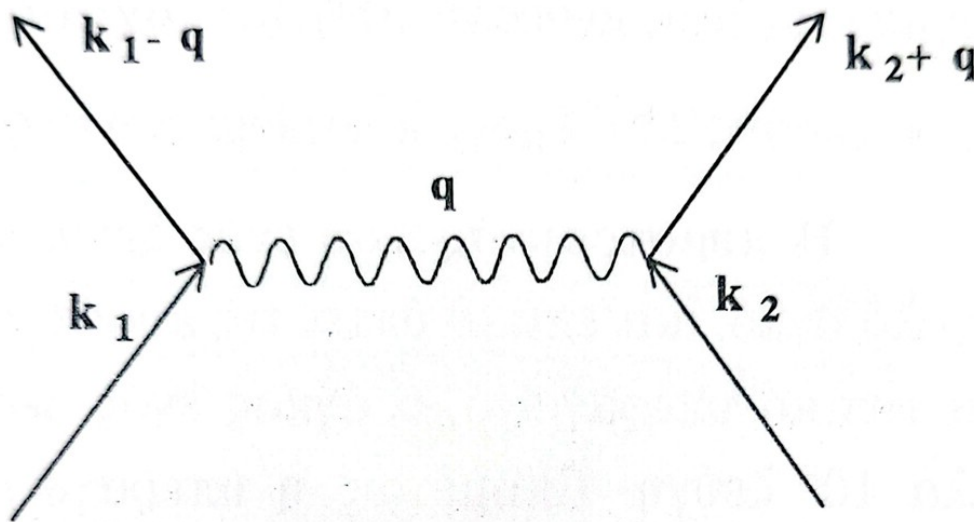
Θεωρία London

Εξάρτηση του βάθους διείσδυσης από τη θερμοκρασία



Αλληλεπίδραση Fröhlich

Αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων μέσω του πλέγματος (φωνονίων) του υπεραγωγού (1950)



Η ανταλλαγή φωνονίων μεταξύ των ηλεκτρονίων, οδηγεί σε αλληλεπίδραση ηλεκτρονίου-ηλεκτρονίου

→ Η αλληλεπίδραση είναι ισχυρά ελκτική όταν οι ορμές των δύο αλληλεπιδρώντων ηλεκτρονίων είναι **ίσες και αντίθετες**

Ζεύγη Cooper

Ζεύγος Cooper (Cooper pair) ονομάζεται ένα σύστημα δύο ηλεκτρονίων που έχουν ίσες και αντίθετες ορμές και **αντίθετα σπιν** και σχηματίζει μια κατάσταση δεσμού μέσω ανταλλαγής φωνονίων (1956)

- Το ζεύγος έχει μηδενικό σπιν
- Μόνο ένα κλάσμα (περίπου 10^{-4}) των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας συμμετέχει στη διαδικασία σύζευξης
- Η υπεραγώγιμη κατάσταση είναι μια **“συλλογική” κατάσταση**, κατά την οποία τα συζευγμένα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας ενεργούν ως σύνολο
- Το Ενεργειακό Χάσμα παριστάνει την ενέργεια που απαιτείται για να διασπαστεί ένα από τα ζεύγη Cooper

Τυχαία σκέδαση ενός ηλεκτρονίου από μια ατέλεια πλέγματος θα επηρέαζε τις συσχετίσεις των ηλεκτρονίων και θα απαιτούσε μετάβαση σε διεγερμένη κατάσταση πάνω από το ενεργειακό χάσμα

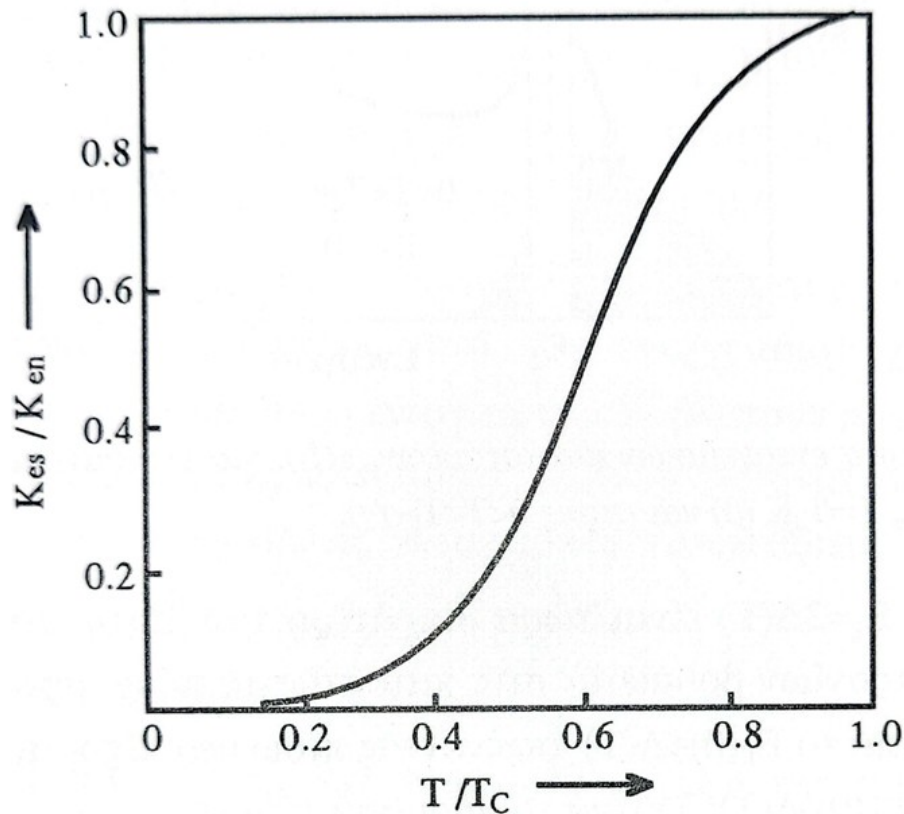
Ζεύγη Cooper

J. R. Schrieffer: “Τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας σε έναν υπεραγωγό είναι συμπυκνωμένα σε ένα **μακρομόριο**, το οποίο επεκτείνεται σε όλο τον όγκο του υπεραγωγίου συστήματος και είναι ικανό να κινηθεί ως ένα σύνολο”

→ Η κυματοσυνάρτηση ενός ζεύγους Cooper επεκτείνεται σε ένα αρκετά μεγάλο όγκο και επικαλύπτει τις κυματοσυναρτήσεις άλλων ζευγών Cooper (τυπικά 10^6 ζεύγη)

Μήκος Συνάφειας (coherence length) είναι η μέγιστη απόσταση στην οποία οι καταστάσεις των ζευγών των ηλεκτρονίων συσχετίζονται για να παράγουν υπεραγωγιμότητα. Τυπικά, τα ζυζευγμένα ηλεκτρόνια μπορεί να απέχουν πολλές χιλιάδες ενδοατομικών αποστάσεων ($\approx 10^{-4}$ cm)

Θερμική αγωγιμότητα



K_e : ηλεκτρονική συνεισφορά
στη θερμική αγωγιμότητα

Σε έναν υπεραγωγό, τα ζεύγη Cooper
έχουν μηδενική ενέργεια και δεν
συνεισφέρουν στο ρεύμα θερμότητας
→ Το K_e εξαρτάται μόνο από τον
αριθμό των κανονικών ηλεκτρονίων

$$\frac{K_{es}}{K_{en}} \sim \exp\left(\frac{-\Delta}{k_B \cdot T}\right)$$

Όταν $T \ll T_C$, $K_{es} \rightarrow 0$ και το θερμικό
ρεύμα μεταφέρεται μόνο από φωνόνια

→ Θερμικός “διακόπτης”

Υπεραγωγιμότητα

Θεωρία “BCS” (1957)

Nobel Prize in Physics 1972



Photo from the Nobel Foundation archive.

John Bardeen



Photo from the Nobel Foundation archive.

Leon Neil Cooper

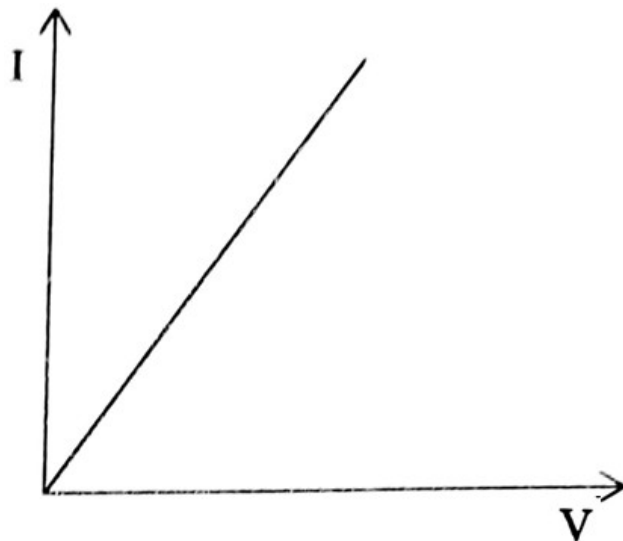


Photo from the Nobel Foundation archive.

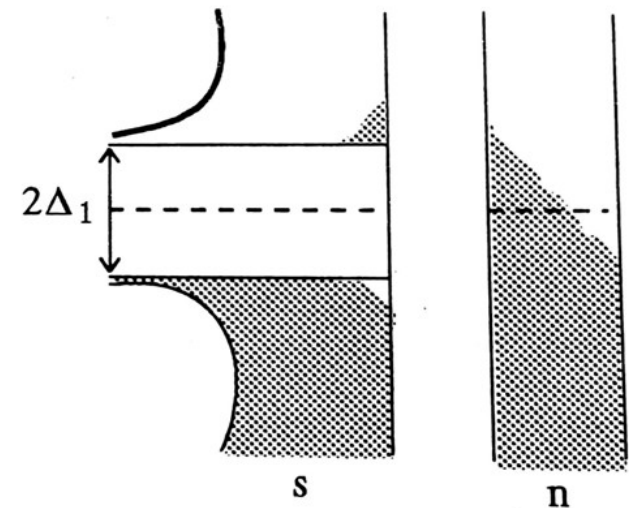
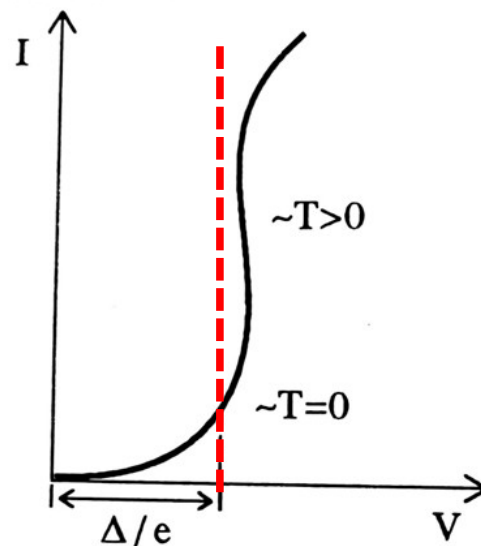
John Robert Schrieffer

Φαινόμενο Σήραγγας

Κανονικό μέταλλο – μονωτής –
κανονικό μέταλλο



Υπεραγώγιμο μέταλλο – μονωτής –
– **κανονικό** μέταλλο



Επαφή Josephson

Η επαφή Josephson είναι μια κβαντική διάταξη υπεραγωγού – μονωτή – υπεραγωγού

DC φαινόμενο Josephson (χωρίς εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης στα άκρα της επαφής):

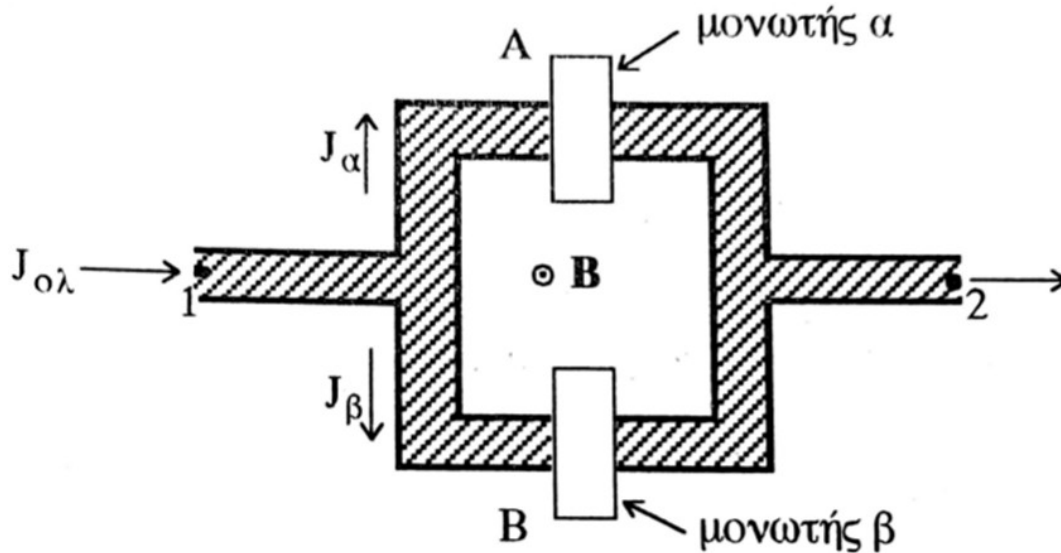
$$I_S = I_C \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$$

AC φαινόμενο Josephson (εφαρμογή σταθερής ηλεκτρικής τάσης V στα άκρα της επαφής):

$$f = \frac{2eV}{h} \approx 483.6 \text{ MHz} / \mu\text{V}$$

Εφαρμογές επαφής Josephson

→ DC Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)



$$\Phi = n \Phi_0$$

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} \approx 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$$

$$I_C(\Phi) = 2 I_C \left| \cos \left(\frac{\pi \Phi_{ext}}{\Phi_0} \right) \right|$$

→ Quantum bits (qubits)

→ Ταλαντωτές THz

Υπεραγωγιμότητα – Εφαρμογές

Εφαρμογές Υπεραγωγών - Μαγνητική τομογραφία! (MRI)



$\mu_0 \cdot H$: 1 – 7 T

→ Υπεραγώγιμοι μαγνήτες!



Φυσική και Τεχνολογία Υλικών και Διατάξεων Στερεάς Κατάστασης

Μάιος – Ιούνιος 2025

Μαγνητικές και υπεραγώγιμες διατάξεις

MRAMs



**Magnetic field
sensors**

**Spintronic and
magnonic microwave
devices**

