



Doctoral Thesis

Paramagnetic effect in NS proximity structures

Author(s):

Frassanito, Roberto

Publication Date:

1996

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001755934> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH ex. B

Diss. ETH No. 11925

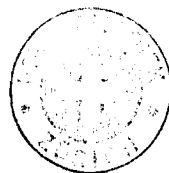
**Paramagnetic Effect
in
NS Proximity Structures**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

ROBERTO FRASSANITO
Dipl. Phys. ETH
born on the 30th October 1967
citizen of Italy



C 61 E

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A.C. Mota, examiner
Prof. Dr. P. Martinoli, co-examiner
Prof. Dr. G. Blatter, co-examiner

1996

Abstract

This thesis deals with the magnetic properties of proximity structures consisting of a normal metal (N) in good electrical contact with a superconductor (S) in the temperature range $10^{-5} T_{cNS} \leq T \leq T_{cNS}$. Here T_{cNS} is the critical temperature of the NS structure which corresponds to the critical temperature T_c of the superconductor S, since $\xi_{0S} \ll d_S$ for all the investigated specimens. Here ξ_{0S} is the coherence length of S at zero temperature and d_S is the dimension of the superconductor. In such systems, besides the induced diamagnetic superconducting currents due to the well known but still striking proximity effect, it has been observed that for temperatures lower than a characteristic temperature, the normal layers N can sustain *paramagnetic currents* which can be several times *larger* than the proximity induced diamagnetic screening currents.

The proximity effect and the novel paramagnetic effect have been investigated systematically in Ag and Cu cylinders of different sizes which surround superconducting cores of Nb or Ta. The custom made cylindrical specimens have been reduced in diameter using swaging and codrawing techniques. These guarantee a high electrical transmission coefficient at the NS interface. The typical dimension of the outer perimeter of the wires is $50 \mu\text{m} \leq L \leq 300 \mu\text{m}$ and the thickness d_N of the normal layers varies between $1.6 \mu\text{m}$ and $30 \mu\text{m}$.

The temperature and field dependence of the magnetic susceptibility χ_N of the normal metal were measured using highly sensitive SQUID-technology. Most measurements have been done in the dilution refrigerator of the laboratory of Prof. A. C. Mota in Zürich where the samples can be cooled down to temperatures as low as $T \simeq 6 \text{mK}$. However, for a deeper understanding of the paramagnetic effect which manifests itself

only at millikelvin temperatures, it was necessary to extend the investigations down to sub-millikelvin temperatures. With the help of a specially designed experimental cell various samples have been measured in a nuclear demagnetization refrigerator down to temperatures as low as $T \simeq 150 \mu\text{K}$. This was made possible by a collaboration with the group of Prof. F. Pobell at the University of Bayreuth.

For a specimen-dependent temperature interval below T_{cNS} , the screening length of the specimens considered in this work follows a power law behaviour $\rho(T) \propto T^{-n}$ with exponents n ranging between 0.7 and 2.4. According to the theory of de Gennes, NS specimens in the diffusive regime exhibit such a behaviour with an exponent $n \simeq 0.5$. From these values of n one can conclude, that in the temperature regime, where the superconducting state is still advancing into the normal layer, the samples most probably lie in a spectrum ranging from the diffusive to the clean limit.

The specimen-dependent temperature regime where the Ginzburg-Landau parameter $\kappa_N(d_N) = \lambda_N(d_N)/\xi_N \ll 1$ attracts special interest. Here $\lambda_N(x)$ is the spatially-dependent magnetic penetration depth in N and $\xi_N(T)$ is the coherence length of the normal metal. For these temperatures, $\xi_N(T)$ can be obtained experimentally from measurements of the thermodynamic critical field at the free surface $H_c(d_N)$. From the analysis of $H_c(d_N)$ it has been found that several of the samples lie in the diffusive regime and show a coherence length $\xi_N^d = \sqrt{\beta/T}$. The ratio β/ℓ_N , with the mean free path ℓ_N obtained independently, is close to the theoretical value of $\hbar v_F/6\pi k_B$. Furthermore, other specimens lie in the clean regime with $\xi_N^c = \alpha/T$, where α is close to the theoretical value $\hbar v_F/2\pi k_B$. Besides these two distinct tendencies, a third category of samples that behave in a hybrid way is observed; Their temperature-dependence of $H_c(d_N)$ can be fitted using both types of temperature dependencies for the coherence length, either the clean one with a parameter $\alpha \ll \hbar v_F/2\pi k_B$ or the diffusive one with $\beta/\ell_N \gg \hbar v_F/6\pi k_B$.

In agreement with previous results by Visani, Mota, and Pollini [1], one finds for most samples where strong superconductivity is about to reach the free surface of N, that below a characteristic temperature T_r a paramagnetic susceptibility χ_p superimposes the diamagnetic susceptibility χ_d . This temperature is inversely depending on the sample size. At the temperature where the total susceptibility starts to reenter (i.e. the paramagnetic susceptibility χ_p appears), the induced coherence length ξ_N is of the order of the

perimeter of the sample. The reentrant part of the susceptibility observed below T_r follows an exponential law of the form $\chi_p(T) = A \exp(-T/T^*)$, where A is the amplitude and T^* is a characteristic temperature. From the measured values of χ_p it follows that for clean samples $\xi_N^c(T^*) \simeq L$ and $A \propto 1/L^2$, while for diffusive samples $\xi_N^d(T^*) \simeq 2.5 d_N$. In that case A , which is about one order of magnitude smaller than for the clean limit, does not show a dependence on geometry. These considerations suggest that the paramagnetic effect could be a manifestation of long-range coherence, which is particularly strong in clean samples.

Previous investigations performed in the temperature interval $6 \text{ mK} \leq T \leq T_{\text{cNS}}$ revealed paramagnetic contributions of the NS structures, which at $T \simeq 6 \text{ mK}$, can almost cancel the induced diamagnetic screening currents (in the strongest case up to 80–85%). Stimulated by the fact that χ_p does not show any indication of saturation, the investigations presented in this thesis were extended down to microkelvin temperatures. For temperatures $150 \mu\text{K} \leq T \leq T_{\text{cNS}}$, the obtained results for the zero field cooled and the field cooled magnetic dc-susceptibility of the two investigated Ag/Nb samples ($L = 72 \mu\text{m}$ and $L = 130 \mu\text{m}$) yielded that:

- (i) The T -dependence of the exponential law of χ_p persists down to $T \simeq 0.4 \text{ mK}$. At these temperatures the coherence length is already 4 nm long and therefore much larger than the thickness of the samples ($d_N < 6 \mu\text{m}$).
- (ii) Once the condition $\xi_N \simeq L$ is met at $T \simeq T^*$, the logarithmic slope of χ_p suddenly increases by a factor of two on further cooling. A second doubling of the logarithmic slope occurs when the temperature $T \simeq T^*/2$, that is, $\xi_N \simeq 2L$ is reached.
- (iii) The paramagnetic contribution χ_p is very strong. For the Ag/Nb sample with $L = 130 \mu\text{m}$ the Meissner current in N is completely canceled and for the Ag/Nb sample with $L = 72 \mu\text{m}$ the *whole* NS structure is paramagnetic at $T \simeq 0.9 \text{ mK}$ with $\chi_p \simeq +1.5^{1/4\pi}$ with respect to the total volume of the NS system ($\chi_p \simeq +3^{1/4\pi}$ with respect to the volume of N).

Kurzfassung

Diese Dissertation beschreibt magnetische Eigenschaften von Proximity-Strukturen, bestehend aus einem Normalmetall (N) in gutem elektrischen Kontakt mit einem Supraleiter (S). Es wurde der Temperaturbereich $10^{-5} T_{\text{cNS}} \leq T \leq T_{\text{cNS}}$ untersucht, wobei T_{cNS} die kritische Temperatur der NS-Struktur bezeichnet. Diese entspricht der kritischen Temperatur T_c des Supraleiters, da für die untersuchten Proben $\xi_{0S} \ll d_S$ gilt, wobei ξ_{0S} die Kohärenzlänge von S für $T = 0$ und d_S die Grösse des Supraleiters bezeichnen. In solchen Systemen wurde neben dem heute gut bekannten, jedoch immer noch eindrücklichen, Proximity-Effekt ein neues Phänomen beobachtet: Für Temperaturen unterhalb einer charakteristischen Temperatur können die normalen Schichten N *paramagnetische Ströme* aufrecht erhalten, welche ein Vielfaches grösser sein können als die durch den Proximity-Effekt induzierten diamagnetischen Ströme.

Es wurde sowohl eine systematische Untersuchung des Proximity-Effektes als auch des neuen paramagnetischen Effektes für Zylinder verschiedener Grösse aus Ag und Cu mit supraleitenden Kernen aus Nb oder Ta durchgeführt. Der Durchmesser der selbst hergestellten zylindrischen Proben wurde mittels Hämmern und Ziehen reduziert. Dies garantiert einen hohen elektrischen Transmissionskoeffizienten an der NS-Grenzfläche. Der äussere Umfang der gemessenen Drähte beträgt typischerweise $50 \mu\text{m} \leq L \leq 300 \mu\text{m}$, die Dicke d_N der normalen Schicht liegt zwischen $1.6 \mu\text{m}$ und $30 \mu\text{m}$.

Die Temperatur- und Feldabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität χ_N des Normalmetalls wurde mittels hoch-empfindlicher SQUID-Technologie untersucht. Die meisten Messungen wurden im Mischkryostat im Labor von Prof. A. C. Mota in Zürich, in

dem die Proben bis zu tiefen Temperaturen $T \simeq 6 \text{ mK}$ gekühlt werden können, durchgeführt. Für ein tieferes Verständnis des paramagnetischen Effektes, der erst bei Temperaturen im Millikelvin-Bereich auftritt, war es jedoch nötig, die Untersuchungen auf Temperaturen im Sub-Millikelvin-Bereich auszudehnen. Mittels einer eigens entworfenen Messanordnung wurden verschiedene Proben in einem Kern-Entmagnetisierungs-Kryostaten bei Temperaturen bis zu $T \simeq 150 \mu\text{K}$ gemessen. Dies wurde dank einer Zusammenarbeit mit der Gruppe von Prof. F. Pobell an der Universität Bayreuth möglich.

Für das Temperatur-Intervall unterhalb T_{cNS} , dessen Grösse probenabhängig ist, zeigt die Abschirmlänge der in dieser Arbeit betrachteten Proben ein Potenzgesetz-Verhalten der Form $\rho(T) \propto T^{-n}$, wobei der Exponent n Werte zwischen 0.7 und 2.4 annimmt. Gemäss der Theorie von de Gennes zeigen NS-Proben im diffusiven Regime ein solches Verhalten mit einem Exponenten $n \simeq 0.5$. Aus den erhaltenen Werten für n lässt sich also schliessen, dass, für den Temperatur-Bereich, in dem sich die Supraleitung noch weiter in den Normalleiter ausbreitet, die betrachteten Proben sehr wahrscheinlich in einem Bereich anzusiedeln sind, der sich vom diffusiven bis in den reinen Grenzfall erstreckt.

Spezielles Interesse gilt dem Temperatur-Bereich, in dem der Ginzburg-Landau-Parameter $\kappa_N(d_N) = \lambda_N(d_N)/\xi_N$ Werte viel kleiner als 1 annimmt. Hier bezeichnen $\lambda_N(x)$ die ortsabhängige magnetische Feld-Eindringtiefe in N und $\xi_N(T)$ die Kohärenzlänge im Normalmetall. Für obige Temperaturen kann $\xi_N(T)$ aus Messungen des thermodynamischen kritischen Feldes $H_c(d_N)$ experimentell bestimmt werden. Aufgrund der Analyse von $H_c(d_N)$ wurde gefunden, dass einige der Proben sich im diffusiven Regime befinden und eine Kohärenzlänge der Form $\xi_N^d = \sqrt{\beta/T}$ besitzen. Das Verhältnis β/ℓ_N , wobei die mittlere freie Weglänge ℓ_N mittels einer unabhängigen Messung bestimmt wurde, ist nahe dem theoretischen Wert von $\hbar v_F/6\pi k_B$. Es wurde weiter beobachtet, dass sich andere Proben im reinen Regime befinden und ein Verhalten der Form $\xi_N^c = \alpha/T$ zeigen, wobei auch α nahe dem theoretischen Wert von hier $\hbar v_F/2\pi k_B$ liegt. Neben diesen zwei klar verschiedenen Verhalten wurde ausserdem eine dritte Kategorie von Proben beobachtet, welche ein Misch-Verhalten zeigen; Die Temperatur-Abhängigkeit von $H_c(d_N)$ dieser Proben kann mit beiden Gesetzen beschrieben werden, sowohl mit jenem für den reinen Fall mit einem Parameter $\alpha \ll \hbar v_F/2\pi k_B$ als auch mit jenem für den diffusiven Fall mit $\beta/\ell_N \gg \hbar v_F/6\pi k_B$.

In Übereinstimmung mit bereits publizierten Ergebnissen von Visani, Mota und Polini [1] findet man für Proben, bei welchen sich die d.h. der freien Oberfläche von N nähert, dass unterhalb einer charakteristischen Temperatur T_r eine paramagnetische Suszeptibilität χ_p die diamagnetische Suszeptibilität χ_d überlagert. Diese charakteristische Temperatur ist umgekehrt proportional zur Grösse der Probe. Bei der Temperatur, bei der die totale Suszeptibilität zu "reentrieren" beginnt (oder dort, wo die paramagnetische Suszeptibilität χ_p erstmals auftritt), ist die induzierte Kohärenzlänge ξ_N von der Grössenordnung des Umfangs der Probe. Der paramagnetische Teil der Suszeptibilität unterhalb T_r folgt einem Exponential-Gesetz der Form $\chi_p = A \exp(-T/T^*)$, wobei A die Amplitude und T^* eine charakteristische Temperatur bezeichnen. Aufgrund der gemessenen Werte von χ_p folgt, dass für Proben im reinen Fall $\xi_N^c(T^*) \simeq L$ und $A \propto 1/L^2$ gilt, für Proben im diffusiven Fall hingegen $\xi_N^d(T^*) \simeq 2.5 d_N$. In diesem Fall zeigt der Parameter A keine Abhängigkeit von der Geometrie der Probe, die Werte sind jedoch ungefähr eine Grössenordnung kleiner als im reinen Fall. Diese Überlegungen legen nahe, dass der paramagnetische Effekt eine Manifestation langreichweitiger Kohärenz sein könnte, die in Proben im reinen Fall besonders stark erwartet wird.

Bisherige Untersuchungen im Temperatur-Bereich $6 \text{ mK} \leq T \leq T_{\text{cNS}}$ ergaben paramagnetische Signale von NS-Systemen, die bei Temperaturen $T \simeq 6 \text{ mK}$ die diamagnetischen Abschirmströme beinahe kompensierten (bis zu 80 – 85% im stärksten Fall). Aufgrund der Tatsache, dass χ_p keine Anzeichen einer Sättigung zu zeigen scheint, wurden die in dieser Dissertation präsentierten Untersuchungen auf den Mikrokkelvin-Bereich erweitert. Die Resultate der "zero field cooled" und der "field cooled" dc-Suszeptibilität im Temperatur-Bereich $150 \mu\text{K} \leq T \leq T_{\text{cNS}}$ ergaben für die zwei untersuchten Ag/Nb-Proben ($L = 72 \mu\text{m}$ und $L = 130 \mu\text{m}$) die folgenden Resultate:

- (i) Die Temperatur-Abhängigkeit des Exponential-Gesetzes für χ_p bleibt bestehen bis zu Temperaturen $T \simeq 0.4 \text{ mK}$. Bei dieser Temperatur beträgt die Kohärenzlänge bereits 4 mm und ist somit sehr viel grösser als die Dicke der Proben ($d_N < 6 \mu\text{m}$).
- (ii) Sobald die Bedingung $\xi_N \simeq L$ bei $T \simeq T^*$ erfüllt ist, steigt die logarithmische Steigung von χ_p plötzlich um einen Faktor zwei, wenn die Proben zu tieferen Temperaturen abgekühlt werden. Eine nochmalige Verdopplung der logarithmischen Steigung wird beobachtet, wenn die Temperatur $T \simeq T^*/2$, was der Bedingung $\xi_N \simeq 2L$ entspricht, erreicht wird.

- (iii) Der paramagnetische Beitrag χ_p ist sehr gross. In der Ag/Nb-Probe mit $L = 130\mu\text{m}$ wird der Meissner-Strom im Normalleiter N vollständig kompensiert, und für die Ag/Nb-Probe mit $L = 72\mu\text{m}$ wird die *ganze* NS-Struktur paramagnetisch bei einer Temperatur $T \simeq 0.9\text{mK}$ mit $\chi_p \simeq +1.5 \frac{1}{4\pi}$ bezogen auf das Volumen des ganzen NS-Systems (bzw. $\chi_p \simeq +3 \frac{1}{4\pi}$ bezüglich des Volumens von N).