



Doctoral Thesis

Evidence for unconventional superconductivity in UPt_3 based on magnetic measurements

Author(s):

Amann, Andreas

Publication Date:

1997

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001759828> →

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 No. 12141

**Evidence for
Unconventional Superconductivity in UPt_3
Based on Magnetic Measurements**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

ANDREAS AMANN
Dipl. Phys. ETH
born on the 21st August 1970
citizen of Zürich (ZH)



accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A.C. Mota, examiner
Prof. Dr. H. von Löhneysen, co-examiner
Prof. Dr. T.M. Rice, co-examiner

1997

Abstract

This thesis deals with an investigation of the low-field magnetic properties of the heavy fermion superconductors UPt_3 and UBe_{13} . In order to obtain information on the dynamics of vortices in these superconductors, their relaxation from a metastable configuration was measured. Special focus was put on differentiating the multiple superconducting phases in UPt_3 , especially the two low-field phases A and B with the two superconducting transition temperatures in zero field, T_c^+ and T_c^- . These transition temperatures have been thoroughly characterized by measurements of the specific heat of the sample.

The flux dynamics at low fields in UPt_3 shows unique behaviour, in particular the decay law being different from the one of most other superconductors. For very low cycling fields H^{max} (of the order of several Oe), the relaxation of the remanent magnetization trapped in the sample after cycling the magnetic field up to H^{max} and back to zero again, can be rather well described using a stretched exponential law of the form

$$M_{\text{rem}}(t) - M(\infty) = [M(0) - M(\infty)] \exp[-(t/\tau)^\beta],$$

with the parameters $\tau \simeq 10^5 - 10^6$ s and $\beta \simeq 0.6 - 0.7$ as has been reported previously [1]. However, on increasing the cycling field H^{max} such that the critical state is reached for the sample, a fit with the above expression does not give satisfactory results anymore. An additional contribution of the form $M(0) - M_{\text{rem}}(t) \propto \log t$ builds up and changes the form of the curve especially for short times ($t \lesssim 100$ s). Since the magnetic flux penetrates further into the sample for higher cycling fields, a distinction between vortices at the surface and vortices in the bulk of the sample can be made by means of different decay laws.

The analysis of the temperature dependence of the relaxation rate leads to surprising results for both types of vortices: the decay of surface vortices is rather strong down to the lowest temperatures (up to 10% of the total magnetization initially trapped in the sample may decay within the first 10^4 s for $T \rightarrow 0$), indicating that some type of quantum tunneling — an effect rather well known from the high-temperature superconductors — is present. The rate $S = -\partial \ln M / \partial \ln t$ (taken at short times $t \simeq 10$ s) of bulk vortices on the other hand is practically zero for low temperatures. Around the lower transition temperature T_c^- , the rate starts to increase rather rapidly reaching values $S \simeq 5 \cdot 10^{-3}$ close to the upper transition temperature T_c^+ . This indicates that an additional strong pinning mechanism is present in UPt_3 for temperatures $T \lesssim T_c^-$, i.e., in the low-temperature B-phase.

The drastic change in the pinning strength between the two low-field superconducting phases A and B can be explained to result from the assumption that the B-phase breaks time-reversal symmetry. Using the same interpretation, also the results of some recent measurements reported in the literature can be analyzed and explained.

In order to understand the difference in behaviour between vortices at the surface and vortices in the bulk of the sample, a custom designed Hall-sensor setup was built inside the mixing chamber of the dilution refrigerator. This setup gives the ability to measure locally the magnetic induction — with an active area of $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ — simultaneously at different locations of the sample.

The same type of relaxation measurements were also performed for a crystal of UBe_{13} giving the following results: the difference between surface and bulk vortices can also be observed. However, the contribution from surface vortices to the total decay being significantly smaller than for UPt_3 . Moreover, the temperature dependence of the relaxation rate for bulk vortices is clearly different than in UPt_3 ; no strong reduction in the rate for low temperatures could be observed, the rate being linear in temperature down to $T = 0$.

Furthermore, low-field ac susceptibility studies were performed for all the samples. Especially for the investigated single crystal of UPt_3 , new features could be observed due to the high sensitivity of the measuring system used: well below and clearly separated from the signal of the superconducting transition at T_c^+ , a small peak in the out-of-phase component of the susceptibility could be observed. This peak is very sensitive to the

amplitude H_{ac} of the measuring field, nevertheless, the upper onset of the dissipation peak remains at a constant temperature $T \simeq 480$ mK. This temperature agrees very well with the lower transition temperature $T_c^- = 476$ mK as obtained from specific heat measurements. We thus propose to identify this peak with a feature resulting from the phase transition between the two low-field superconducting phases. Also the occurrence of this peak can be explained with different vortex structures due to different stable states of the order parameter in the two phases.

In the normal state of UPt₃, around a temperature $T \simeq 5 - 6$ K, a small difference between the temperature dependencies of the susceptibility measured along different crystallographic axes could be found. This temperature agrees well with the temperature T_N where antiferromagnetic ordering has been observed by means of neutron diffraction measurements. To our knowledge, this is the first measurement of ac susceptibility revealing any sign of this transition.

Kurzfassung

Diese Dissertation befasst sich mit einer Untersuchung der magnetischen Eigenschaften bei schwachen Feldern in den Schwer-Fermion Supraleitern UPt_3 und UBe_{13} . Um Information über die Flussdynamik in diesen Supraleitern zu gewinnen, wurde deren Relaxation von einer metastabilen Konfiguration untersucht. Besonderes Augenmerk wurde auf die Unterscheidung der verschiedenen supraleitenden Phasen von UPt_3 gerichtet, insbesondere auf die zwei Niedrigfeld-Phasen A und B mit den zwei supraleitenden Übergangstemperaturen im Nullfeld, T_c^+ und T_c^- . Diese Übergangstemperaturen wurden mittels Messungen der spezifischen Wärme der Probe genau charakterisiert.

Die Flussdynamik in UPt_3 bei schwachen Feldern besitzt einzigartige Eigenschaften, insbesondere ist das Zerfallsgesetz verschieden von demjenigen in den meisten anderen Supraleitern. Die Relaxation der remanenten Magnetisierung, welche nach Durchfahren eines Magnetisierungszyklus bis zum Maximalfeld H^{max} und zurück zu $H = 0$ in der Probe gefangen bleibt, lässt sich für sehr kleine Zyklierfelder H^{max} (von der Größenordnung einiger Oe) relativ gut durch ein “stretched exponential”-Gesetz der Form

$$M_{\text{rem}}(t) - M(\infty) = [M(0) - M(\infty)] \exp[-(t/\tau)^\beta]$$

beschreiben, unter Verwendung der Parameter $\tau \simeq 10^5 - 10^6$ s und $\beta \simeq 0.6 - 0.7$ [1]. Wird jedoch das Zyklierfeld H^{max} weiter erhöht, so dass der kritische Zustand für die Probe erreicht wird, so ergibt der Fit mit obigem Ausdruck keine befriedigenden Resultate mehr. Ein zusätzlicher Beitrag der Form $M(0) - M(t) \propto \log t$ tritt auf und ändert die Form der Relaxationskurve, insbesondere für kurze Zeiten ($t \lesssim 100$ s). Da der magnetische Fluss

mit steigendem Zyklerfeld weiter in die Probe eindringt, kann aufgrund des verschiedenen Zerfallsverhaltens eine Unterscheidung zwischen magnetischen Flusslinien (Vortizes) an der Oberfläche und im Innern der Probe gemacht werden.

Die Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der Relaxationsrate für beide Typen von Vortizes fördert überraschende Eigenschaften zu Tage: Der Zerfall von Oberflächen-Vortizes ist stark bis hin zu sehr tiefen Temperaturen (bis zu 10% der anfänglich in der Probe gefangenen Magnetisierung können für $T \rightarrow 0$ innerhalb der ersten 10^4 s zerfallen). Dies ist ein Anzeichen, dass eine Art von Quantenkriechen — ein Effekt, der von den Hochtemperatur-Supraleitern her ziemlich gut bekannt ist — auftritt. Die Relaxationsrate $S = -\partial \ln M / \partial \ln t$ (welche für kurze Zeiten $t \simeq 10$ s bestimmt wurde) der Vortizes im Innern der Probe andererseits ist praktisch gleich Null für tiefe Temperaturen. In der Gegend der unteren kritischen Temperatur T_c^- beginnt die Rate relativ schnell zu steigen und erreicht den Wert $S \simeq 5 \cdot 10^{-3}$ in der Gegend der oberen kritischen Temperatur T_c^+ . Dies ist ein Hinweis auf die Existenz eines zusätzlichen, starken Pinning-Mechanismus, der für Temperaturen $T \lesssim T_c^-$, d.h. in der Tieftemperatur B-Phase von UPt_3 , auftritt.

Die drastische Änderung in der Stärke des Pinnings zwischen den zwei supraleitenden Niedrigfeld-Phasen A und B kann durch die Annahme, dass die B-Phase die Zeitumkehr-Symmetrie verletzt, erklärt werden. Dieselbe Interpretation erlaubt zudem auch die Analyse und Erklärung der Resultate einiger Messungen, über welche kürzlich berichtet wurde.

Um den Unterschied im Verhalten von Vortizes an der Oberfläche und im Innern der Probe zu untersuchen, wurde ein eigens entwickeltes Messsystem basierend auf einem Hall-Sensor in die Mischkammer des Mischkryostaten eingebaut. Dieses System ermöglicht die gleichzeitige Messung der lokalen magnetischen Induktion — mit einer aktiven Fläche der Grösse $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ — an verschiedenen Orten der Probe.

Dieselbe Art von Relaxationsmessungen wurde ausserdem auch für einen UBe_{13} -Kristall durchgeführt und ergab die folgenden Ergebnisse: Auch für dieses System kann ein Unterschied zwischen Vortizes an der Oberfläche und im Innern der Probe beobachtet werden. Im Gegensatz zu UPt_3 ist hier jedoch der Beitrag der Oberflächen-Vortizes zur totalen Relaxation deutlich kleiner. Ausserdem ist die Temperaturabhängigkeit der Relaxationsrate der Vortizes im Innern eindeutig anders als für UPt_3 ; es konnte keine starke

Reduktion der Relaxationsrate für tiefe Temperaturen beobachtet werden, die Rate verhält sich linear bezüglich der Temperatur bis hinunter zu $T = 0$.

Zusätzlich wurde für alle Proben die ac Suszeptibilität bei schwachen Feldern untersucht. Insbesondere für den gemessenen UPt_3 -Einkristall konnten, aufgrund der hohen Empfindlichkeit des verwendeten Messsystems, neue Effekte entdeckt werden: Klar unterhalb und eindeutig getrennt vom supraleitenden Übergang bei T_c^+ konnte ein kleiner Peak in der zweiten Komponente der Suszeptibilität beobachtet werden. Die Position und Breite dieses Signals sind stark abhängig von der Amplitude H_{ac} des Messfeldes, das Einsetzen der Dissipation bei hohen Temperaturen ist jedoch unabhängig von H_{ac} bei einer Temperatur $T \simeq 480$ mK. Diese Temperatur stimmt gut mit der, durch Messungen der spezifischen Wärme der Probe bestimmten, unteren kritischen Temperatur $T_c^- = 476$ mK überein. Daher schlagen wir vor, den gemessenen Peak einem Effekt zuzuschreiben, der aufgrund des Phasenübergangs zwischen den zwei supraleitenden Niedrigfeld-Phasen auftritt. Auch dieses Signal kann durch das Auftreten verschiedener Vortex-Strukturen aufgrund unterschiedlicher stabiler Zustände des Ordnungsparameters in den zwei Phasen erklärt werden.

Des weiteren konnte im Normalzustand von UPt_3 bei einer Temperatur $T \simeq 5 - 6$ K ein kleiner Unterschied in der Temperaturabhängigkeit der Suszeptibilität, gemessen entlang verschiedener kristallographischer Achsen, beobachtet werden. Die Temperatur, bei der dieser Unterschied auftritt, stimmt gut mit der Temperatur T_N , bei welcher mittels Messungen von Neutronen-Streuung antiferromagnetische Ordnung beobachtet wurde, überein. Nach unserem Wissen ist die vorliegende die erste Messung der ac Suszeptibilität, die eine Signatur dieses Übergangs beobachten konnte.