

**Quantum Flux Creep
in High- T_c Superconductors**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

KLAUS AUPKE

Dipl. Phys. ETH

born on the 28th of September 1964

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A. C. Mota, examiner

Prof. Dr. J. Blatter, co-examiner

Abstract

According to the classical models of flux creep in type-II superconductors which are based on thermal activation of vortices over the pinning barriers, the rates of magnetic relaxation should vanish with decreasing temperature. Recently measurable temperature independent vortex creep rates for $T \rightarrow 0$ have been observed in the Chevrel phase superconductors, high- T_c superconductors, organic, and heavy fermion superconductors. These observations have been interpreted as evidence for quantum tunneling of vortices through the pinning barriers. The theory of quantum collective creep has been developed by Blatter, Geshkenbein, and Vinokur within the framework of weak collective pinning theory. In the limit of low and intermediate fields parallel to the c -axis and strong dissipation, the quantum creep rate for $T \rightarrow 0$ is determined by the saddle point solution of the effective Euclidean action

$$\frac{\partial \ln M}{\partial \ln t} \simeq -\frac{\hbar}{S_E^{\text{eff},c}}$$

with

$$\frac{S_E^{\text{eff},c}}{\hbar} = \frac{\hbar L_c^c}{e^2 \rho_n}$$

where ρ_n is the normal state resistivity and L_c^c is the collective pinning length given by

$$L_c^c \simeq \epsilon \xi \left(\frac{j_0}{j_c} \right)^{1/2}$$

Here ξ is the in-plane coherence length, j_c the in-plane critical current density, and j_0 the depairing current density, $\epsilon = \sqrt{m/M} < 1$ the anisotropy parameter, with m and M the effective electronic masses within the superconducting layers and perpendicular to them, respectively. In the case of layered superconductors, in which the collective pinning length L_c^c is smaller than the interlayer distance d , L_c^c has to be replaced by d so that in this case

$$\frac{S_E^{\text{eff},c}}{\hbar} = \frac{\hbar d}{e^2 \rho_n}$$

In order to study the dependence of quantum creep on various parameters, such as the anisotropy as well as the influence of temperature, we have chosen to investigate the high-temperature superconductors $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ and $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ in the temperature range $10 \text{ mK} \leq T \leq 20 \text{ K}$. These superconductors have favorable parameters for the observation of quantum tunneling, namely short coherence length, high normal state resistivity, and strong anisotropy. With the theoretical expressions one obtains quantum creep rates at $T \rightarrow 0$ of approximately 0.5% for $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ and about 5% for $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$. We have performed measurements of the relaxation of the remanent magnetization after cycling the specimens in an external field of $H_i = 2250 \text{ Oe}$. The measured quantum creep rates at $T \rightarrow 0$ are approximately 0.15% for $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ and 1.7% for $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$. Considering the experimental uncertainties and the approximations made in the theory, the agreement between theory and experiment is satisfactory. In particular, since $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ is much more anisotropic than $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, we have confirmed experimentally that strong anisotropy leads to a considerable enhancement of the quantum creep rate.

For the crossover temperature from the quantum regime to the regime of thermal activation, the quantum collective creep theory predicts

$$T_{qc} \simeq \frac{U_c}{k_B} \frac{\hbar}{S_E^{\text{eff}}(T=0)}$$

which leads to $T_{qc} \simeq 1.5 \text{ K}$ for $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ and $T_{qc} \simeq 4 \text{ K}$ for $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$. This is also in satisfactory agreement with the experimental observations.

Finally we have investigated quantum creep in a $Y_1Ba_2Cu_3O_7$ crystal with columnar defects, which were introduced by 580-MeV Sn-ion irradiation at a dose of 1.5×10^{11} ions/cm². This kind of defects has been reported to considerably increase flux pinning at high temperatures and fields. At low temperatures however, we observe that in the configuration with the external field parallel to the c -axis and to the tracks, the quantum creep rate for $T \rightarrow 0$ is higher by roughly a factor of two in the irradiated specimen than in the unirradiated one. In a model where the columnar defect is viewed as a sharp square-well potential with radius bigger than ξ , it has recently been shown by Morais Smith, Caldeira, and Blatter that the result for the quantum creep rate at $T \rightarrow 0$ obtained in the theory of quantum collective creep is also applicable to the case of superconductors with columnar defects. According to this result, the quantum creep rate for $T \rightarrow 0$ should be proportional to the square root of the critical current density j_c . Other parameters as ρ_n and ξ are not strongly affected by the irradiation of the used dose. Since the critical current density is enhanced by a factor of approximately four due to the irradiation, we find that our experimental results are in agreement with the $\sqrt{j_c}$ dependence of the quantum creep rate found in the theory of quantum collective creep and in the work of Morais Smith *et al.*

Kurzfassung

Gemäß klassischen Modellen für Flußkriechen in Supraleitern II. Art, die auf thermischer Aktivierung der Vortizes über die Pinningbarrieren basieren, müßte die magnetische Relaxationsrate mit abnehmender Temperatur verschwinden. In den letzten Jahren sind jedoch meßbare temperaturunabhängige Vortextkriechraten für $T \rightarrow 0$ in Chevrel-Phase-Supraleitern, Hochtemperatur-Supraleitern, organischen und Schwere-Fermionen-Supraleitern beobachtet worden. Diese Resultate wurden als Nachweis für quantenmechanisches Tunneln von Vortizes durch die Pinningbarrieren interpretiert. Die „Quantum Collective Creep“-Theorie wurde von Blatter, Geshkenbein und Vinokur im Rahmen der Theorie des schwachen kollektiven Pinnings entwickelt. Im Grenzfall schwacher und mittlerer magnetischer Felder parallel zur c -Achse und starker Dissipation ist die Quantenkriechrate für $T \rightarrow 0$ durch die Sattelpunktlösung der effektiven euklidischen Wirkung bestimmt

$$\frac{\partial \ln M}{\partial \ln t} \simeq -\frac{\hbar}{S_E^{\text{eff},c}}$$

mit

$$\frac{S_E^{\text{eff},c}}{\hbar} = \frac{\hbar}{e^2} \frac{L_c^c}{\rho_n}$$

wobei ρ_n der spezifische Widerstand im Normalzustand und L_c^c die kollektive Pinninglänge sind. L_c^c ist gegeben durch

$$L_c^c \simeq \epsilon \xi \left(\frac{j_0}{j_c} \right)^{1/2}$$

Hierbei sind ξ die Kohärenzlänge in den Ebenen, j_c die kritische Stromdichte in den Ebenen und j_0 die Entpaarungsstromdichte, $\epsilon = \sqrt{m/M} < 1$ der Anisotropieparameter mit den effektiven elektronischen Massen m und M in den supraleitenden Ebenen beziehungsweise senkrecht dazu. Im Fall von geschichteten Supraleitern, in denen die kollektive Pinninglänge L_c^c kleiner ist als der Schichtabstand d , muß L_c^c durch d ersetzt werden, so daß in diesem Fall

$$\frac{S_E^{\text{eff},c}}{\hbar} = \frac{\hbar d}{e^2 \rho_n}$$

Um die Abhängigkeit des Quantenkriechens von verschiedenen Parametern wie der Anisotropie und den Einfluß der Temperatur zu erforschen, haben wir die Hochtemperatur-Supraleiter $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ und $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ im Temperaturbereich $10 \text{ mK} \leq T \leq 20 \text{ K}$ untersucht. Diese Supraleiter haben günstige Parameter für die Beobachtung dieses Phänomens, nämlich kleine Kohärenzlänge, hohen spezifischen Widerstand im Normalzustand und große Anisotropie. Mit den theoretischen Resultaten erhält man Quantenkriechraten für $T \rightarrow 0$ von ungefähr 0.5 % für $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ und etwa 5 % für $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$. Wir haben Messungen der Relaxation der remanenten Magnetisierung durchgeführt, nachdem die Proben in einem äußeren Feld von $H_i = 2250 \text{ Oe}$ zyklert worden sind. Die gemessenen Quantenkriechraten für $T \rightarrow 0$ sind ungefähr 0,15 % für $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ und 1,7 % für $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$. In Anbetracht der experimentellen Unsicherheiten und der in der Theorie gemachten Approximationen ist die Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment zufriedenstellend. Da $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ sehr viel anisotroper ist als $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, haben wir insbesondere experimentell bestätigt, daß eine große Anisotropie zu einer beträchtlichen Erhöhung der Quantenkriechrate führt.

Für die Übergangstemperatur vom Quantenbereich in den Bereich der thermischen Aktivierung sagt die „Quantum Collective Creep“-Theorie

$$T_{qc} \simeq \frac{U_c}{k_B} \frac{\hbar}{S_E^{\text{eff}}(T=0)}$$

voraus. Dies führt zu $T_{qc} \simeq 1,5 \text{ K}$ für $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ und $T_{qc} \simeq 4 \text{ K}$ für $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$.

Dies ist ebenfalls von der Größenordnung in zufriedenstellender Übereinstimmung mit dem Experiment.

Schließlich haben wir Quantenflußkriechen in einem $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Kristall mit „Columnar Defects“ untersucht, die durch 580-MeV-Zinn-Ionenbestrahlung einer Dosis von $1,5 \times 10^{11}$ Ionen/cm² erzeugt wurden. In Proben mit dieser Art von Defekten ist von einer beträchtlichen Erhöhung des Pinnings bei hohen Temperaturen und hohen Feldern berichtet worden. Bei tiefen Temperaturen beobachten wir jedoch, daß in der Konfiguration mit dem äußeren Feld parallel zur c -Achse und zu den Defekten die Quantenkriechrate für $T \rightarrow 0$ in der bestrahlten Probe um ungefähr einen Faktor zwei größer ist als in der unbestrahlten. In einem Modell, in dem ein „Columnar Defect“ durch ein scharfes Rechteckpotential dargestellt wird und der Radius größer ist als die Kohärenzlänge, ist kürzlich von Morais Smith, Caldeira und Blatter gezeigt worden, daß die Resultate für die Quantenkriechrate für $T \rightarrow 0$, die in der Theorie des „Quantum Collective Creep“ gefunden worden sind, auch auf den Fall von Supraleitern mit „Columnar Defects“ anwendbar sind. Gemäß diesen Resultaten ist die Quantenkriechrate für $T \rightarrow 0$ proportional zur Wurzel aus der kritischen Stromdichte j_c . Andere Parameter wie ρ_n und ξ werden nicht wesentlich von der Bestrahlung der verwendeten Dosis beeinflusst. Da die kritische Stromdichte durch die Bestrahlung um ungefähr einen Faktor vier erhöht wurde, finden wir, daß unsere experimentellen Resultate gut mit der in der „Quantum Collective Creep“-Theorie und von Morais Smith *et al.* gefundenen $\sqrt{j_c}$ -Abhängigkeit der Quantenkriechrate übereinstimmen.