

*Diss. ETH No. 13565*

***On the Symmetry of the Order Parameter in the  
Heavy-Electron Superconductor UBe<sub>13</sub>***

*A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH*

*for the degree of  
Doctor of Natural Sciences*

*presented by*

**CHRISTOPH WÄLTI**

*Dipl. Phys. ETH*

*born on the 16th October 1970*

*citizen of Rüderswil, BE and San Diego, USA*

*accepted on the recommendation of*

*Prof. Dr. H. R. Ott, examiner*

*Prof. Dr. T. M. Rice, co-examiner*

2000

# Abstract

The superconducting order parameter or energy gap function of the heavy-electron superconductor  $\text{UBe}_{13}$  may not be isotropic in  $\mathbf{k}$ -space as in common BCS-type low temperature superconductors. Up to now, only experiments which probe the absolute value of the order parameter, and which are not sensitive to its phase and can therefore not detect possible sign changes of the order parameter under rotation in  $\mathbf{k}$ -space, have been reported. In this thesis, we present results of experiments which probe for the first time not only the absolute value of the superconducting order parameter of  $\text{UBe}_{13}$  but also its phase difference for different directions in  $\mathbf{k}$ -space. We find clear evidence, that the order parameter changes sign under rotation in  $\mathbf{k}$ -space and must have an unconventional topology. Furthermore, a scaling of the specific heat of  $\text{UBe}_{13}$  at low temperatures and high magnetic fields, which provides further evidence for an unconventional topology of the energy gap function, is found.

In a first part, we report on measurements of the differential conductivity  $G$  of  $\text{UBe}_{13}$ -Au contacts at temperatures between 0.33 and 1.3 K. We find evidence for low-energy Andreev surface bound states in the heavy-electron superconductor  $\text{UBe}_{13}$  below  $T_c$ . Such bound states may only form in superconductors with complicated, non-isotropic orderparameters or energy gap functions, and are identified via huge conductance peaks at zero bias. From the voltage dependence of  $G$  at  $T < T_c$  we establish a lower limit of the energy gap amplitude and present the first decent data on its temperature dependence. Using the data at the lowest temperatures, the normalized energy gap amplitude was found to be  $\frac{2\Delta(0)}{k_B T_c} > 6.7$ , much in excess of the weak coupling BCS value of 3.5, and directly indicating strong coupling effects in superconducting  $\text{UBe}_{13}$ .

We performed differential conductivity measurements of the same UBe<sub>13</sub>-Au contact in external magnetic fields up to 7 Tesla and in the same temperature range as in zero field. The huge conductance peaks at zero bias persist up to magnetic fields close to the upper critical field of UBe<sub>13</sub>. Using the same procedure as in zero field, we were able to establish a lower limit of the superconducting energy gap amplitude of UBe<sub>13</sub> as a function of the applied magnetic field.

Finally, we report on measurements of the low temperature specific heat  $C_p(T, B)$  of UBe<sub>13</sub> at temperatures between 0.08 and 0.37 K and in magnetic fields up to 7 Tesla. At  $B \approx 2$  Tesla, a substantial change in the magnetic field dependence of the temperature derivative of the magnetic field induced contribution to the specific heat  $C_H(T, B)$ , resulting from the flow of supercurrents around the vortices, is observed, suggesting a crossover between two different regions in the superconducting phase diagram of UBe<sub>13</sub>. For fields  $B > 2$  Tesla,  $C_H(T, B)$  exhibits a scaling behavior with respect to  $TB^{-1/2}$ , which provides evidence for the existence of point nodes in the quasiparticle excitation spectrum of the superconductor.

# Kurzfassung

Der Ordnungsparameter oder die Energie-Lücke des Schwere-Elektronen Supraleiters  $\text{UBe}_{13}$  ist mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht isotropisch wie in gewöhnlichen BCS-Typ Tief-Temperatur Supraleitern. Bis anhin wurden nur Experimente durchgeführt, die den Betrag des Ordnungsparameters messen, jedoch keinerlei Informationen über die Phase liefern und somit auch nicht einen möglichen Vorzeichenwechsel des Ordnungsparameters unter Rotation im  $\mathbf{k}$ -Raum feststellen können. In dieser Dissertation werden wir Experimente vorstellen, welche das erste Mal nicht nur den Betrag sondern auch die Differenz in der Phase des Ordnungsparameters für verschiedene Richtungen im  $\mathbf{k}$ -Raum bestimmen können. Wir finden deutliche Hinweise, dass der Ordnungsparameter unter Rotation im  $\mathbf{k}$ -Raum einen Vorzeichenwechsel erfährt, also eine unkonventionelle Topologie aufweist. Im weiteren wurde ein Skalierungsverhalten der spezifischen Wärme von  $\text{UBe}_{13}$  bei tiefen Temperaturen und hohen Magnetfeldern gefunden, das zusätzliche Hinweise auf eine unkonventionelle Topologie der Energie-Lücke liefert.

In einem ersten Teil werden wir Messungen der differentiellen Leitfähigkeit  $G$  von Au- $\text{UBe}_{13}$  Kontakten bei Temperaturen zwischen 0.33 und 1.3 K diskutieren. Dabei finden wir Hinweise für gebundene, nieder-energetische Andreev Oberflächen-Zustände im Schwere-Elektronen Supraleiter  $\text{UBe}_{13}$  unterhalb der kritischen Temperatur  $T_c$ . Solche gebundenen Zustände können sich nur in Supraleitern mit einem komplizierten, nicht-isotropen Ordnungsparameter oder Energie-Lücke formieren und äussern sich durch eine starke Erhöhung der differentiellen Leitfähigkeit bei Null-Energie. Aus der Spannungsabhängigkeit von  $G$  bei  $T < T_c$  können wir eine untere Schranke für die Amplitude der Energie Lücke bestimmen und wir präsentieren in dieser Arbeit die ersten Daten über

deren Temperaturabhängigkeit. Unter Verwendung der Daten bei den tiefsten Temperaturen finden wir für die normierte Amplitude der Energie-Lücke  $\frac{2\Delta(0)}{k_B T_c} > 6.7$ , was den durch die BCS-Theorie unter der Annahme schwacher Kopplung berechneten Wert von 3.5 erheblich übertrifft und damit unmittelbar aufzeigt, dass in supraleitendem UBe<sub>13</sub> starke Kopplungseffekte involviert sind.

Wir haben Messungen der differentiellen Leitfähigkeit derselben Au–UBe<sub>13</sub> Kontakte auch bei hohen Magnetfeldern bis zu 7 Tesla und in demselben Temperaturbereich wie im Null-Feld durchgeführt. Die sehr grosse Erhöhung der Leitfähigkeit bei Null-Energie wurde bis zu Magnetfeldern, die sehr nahe des oberen kritischen Feldes von UBe<sub>13</sub> sind, beobachtet. Unter Anwendung der gleichen Technik wie im Null-Feld konnte ebenso eine untere Limite der Amplitude der Energie-Lücke von UBe<sub>13</sub> als Funktion des angelegten Feldes bestimmt werden.

Zum Schluss diskutieren wir Messungen der Tief-Temperatur spezifischen Wärme  $C_p(T, B)$  von UBe<sub>13</sub> zwischen 0.08 und 0.37 K in Magnetfeldern bis zu 7 Tesla. Bei  $B \approx 2$  Tesla finden wir eine beachtliche Änderung in der Magnetfeld-Abhängigkeit der Ableitung nach der Temperatur der durch das Magnetfeld induzierten spezifischen Wärme  $C_H(T, B)$ , die durch den Suprastrom um die Wirbel verursacht wird. Dies deutet auf einen Übergang zwischen zwei verschiedenen Regionen im Phasendiagramm von UBe<sub>13</sub> hin. Für Magnetfelder  $B > 2$  Tesla zeigt  $C_H(T, B)$  ein Skalierungsverhalten bezüglich  $TB^{-1/2}$ , das verträglich ist mit der Annahme, dass das Anregungsspektrum des Supraleiters punktförmige Nullstellen aufweist.