

Diss. ETH No. 16397

VORTEX PHYSICS IN LAYERED
SUPERCONDUCTORS OF FINITE GEOMETRY

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
(ETH ZÜRICH)

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

ALVISE DE COL

Laurea in Fisica, Università di Padova, Italy
born 03.02.1977
Italian citizen

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. J. W. Blatter, examiner
PD. Dr. V. B. Geshkenbein, co-examiner
Prof. Dr. E. Tosatti, co-examiner

2006

Abstract

This thesis is focused on the finite temperature behavior of vortices in type II superconductors. While thermal fluctuations are usually weak in standard low temperature superconductors, their effect is boosted in the new high temperature compounds. The reason is two-fold: on the one hand, the small coherence length enhances the impact of fluctuations, on the other hand these compounds are characterized by an extreme anisotropy which renders the vortex system softer than in standard isotropic materials. The thermal fluctuations manifest themselves in the zero magnetic field superconducting transition and, at finite fields, in the melting of the vortex lattice. The goal of this thesis is to shed light on the relevance of dimensionality or, more generally, of geometric constraints in the context of these phase transitions. Novel and interesting features emerge from the results of our analysis, e.g. the appearance of non-standard topological excitations ('fractional-flux' vortices) in systems with a finite number of superconducting layers and an intriguingly rich surface behavior at the melting transition of the vortex lattice.

It is well known that the effect of thermal fluctuations is strongly enhanced when the dimensionality of the system is reduced. For example, in a zero magnetic field a single film, strictly speaking, cannot be superconducting, since two-dimensional (Pearl) vortices involve a finite self-energy, and thus are excited at any finite temperature, breaking the phase coherence of the superconductor. On the other hand, for a three-dimensional bulk layered superconductor, in the limit of vanishingly small Josephson coupling, the transition into the normal phase takes place at a finite temperature and is induced by the Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) type unbinding of pairs of (pancake) vortices. The huge difference in behavior observed in these two limiting cases is the motivation to study intermediate systems composed of a finite number N of layers. In a first part of the thesis, we examine how the magnetic properties of two-dimensional vortices depend on the number of layers N . We find that when more than one layer is present, a single two-dimensional vortex traps a magnetic flux which is only a fraction of a flux quantum $\Phi_0 = hc/2e$. The appearance of such 'fractional-flux' vortices has important consequences for the finite temperature behavior of samples with a finite number of layers. While the true thermodynamic transition

in a multi-layer system takes place at $T = 0$ and is associated with vortex stacks, the analog of the Pearl vortices in a single film, the superconducting transition in the individual layers is due to the BKT unbinding transition of fractional-flux vortices. This BKT transition occurs at a finite temperature which depends on the total number N of layers via the value of the trapped fractional flux. By means of renormalization group techniques, we analyze the BKT unbinding transition for a bi-layer system and discuss its potential observation in a specific experimental setup with a counterflow geometry. We point out interesting analogies with the bi-layer quantum Hall system at total filling $\nu = 1$.

The second part of the thesis is devoted to the study of the thermodynamic behavior of a vortex system at finite magnetic fields. In particular, we concentrate on the effect of an *ab*-surface on the melting transition of the vortex lattice in a layered superconducting material. It is known that in standard solids the surface can assist the nucleation of the liquid phase and may lead to the suppression of the overheated solid phase ('surface melting'). However, this behavior is not generic and there are experimental systems where the surface remains solid up to the bulk melting transition ('surface non-melting'). We study the impact of the surface on the melting transition of the vortex system in two different ways. We first tackle the problem starting from the solid phase by means of a self-consistent analysis of the stability of the two-dimensional lattices. We find that for a large part of the phase diagram the lattice on the surface becomes unstable below the bulk melting transition, while it remains stable above the melting line for very large and very low magnetic fields. Then, we use a novel approach based on the combination of a mean-field substrate model and the classical density functional theory to obtain a more complete description of the problem. We first check the validity of this new approach by studying the melting transition in a bulk system. We then include the presence of the surface and obtain that, depending on the magnetic field, both the 'surface melting' and the 'surface non-melting' scenarios are realized. We find that the 'surface melting' regime occupies the major part of the low-field phase diagram in agreement with the experiments, which show no evidence for the overheated solid phase. Finally, we locate the multi-critical point which marks the crossover between the 'surface melting' and 'surface non-melting' regimes at low magnetic fields.

Sintesi

Questa tesi è incentrata sul comportamento a temperature finite di vortici nei superconduttori di tipo II. Se da un lato le fluttuazioni termiche sono generalmente deboli nei superconduttori con bassa temperatura critica, il loro effetto è potenziato nei nuovi materiali ad alta temperatura. I motivi sono due: da una parte la piccola lunghezza di correlazione accresce l'impatto delle fluttuazioni, dall'altra questi composti sono caratterizzati da un'estrema anisotropia che accentua la mobilità del sistema di vortici rispetto a materiali isotropi. Le fluttuazioni termiche sono responsabili, a campo magnetico nullo, della transizione di fase nello stato superconduttore e, a campi magnetici finiti, della fusione del reticolo di vortici. L'obiettivo di questa tesi è di chiarire l'effetto della dimensionalità o, più generalmente, di restrizioni geometriche su queste transizioni di fase. Dalla nostra analisi sono emersi risultati nuovi ed interessanti, ad esempio la presenza di eccitazioni topologiche non-standard (vortici con flusso frazionario) in sistemi composti da un numero finito di strati superconduttori e la varietà di comportamento delle superfici quando il reticolo di vortici fonde.

È ben noto che l'effetto delle fluttuazioni termiche è fortemente accentuato quando la dimensionalità del sistema è ridotta. Per esempio, strettamente parlando, un film non può essere nello stato superconduttore, perchè i vortici due dimensionali (vortici di Pearl) sono caratterizzati da un'energia finita e vengono eccitati termicamente a qualsiasi temperatura finita, distruggendo la coerenza della fase superconduttrice. In superconduttori a strati composti da un numero infinito di film senza accoppiamento Josephson la transizione nella fase normale avviene a temperatura finita ed è indotta dalla transizione di Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) alla quale coppie neutre di vortici due dimensionali (*'pancake vortices'*) si separano. La sostanziale differenza di comportamento in questi due casi limite giustifica lo studio, svolto in questa tesi, di sistemi composti da un numero finito N di strati superconduttori. Nella prima parte della tesi si esamina come le proprietà magnetiche dei vortici due dimensionali dipendono dal numero N di strati. Quando è presente più di un film, si osserva che ad un vortice è associato un flusso magnetico che è solo una frazione di un quanto di flusso $\Phi_0 = hc/2e$. La presenza di questi vortici con flusso frazionario ha importanti conseguenze sul comportamento a

temperatura finita. Anche se la vera transizione nello stato superconduttore avviene a $T = 0$ ed è associata a pile di vortici (*'vortex stacks'*), l'analogo dei vortici di Pearl in un unico film, la transizione nei singoli film è dovuta al disaccoppiamento di tipo BKT dei vortici con flusso frazionario. Questa transizione BKT si manifesta ad una temperatura finita che dipende dal numero N totale di strati. Per mezzo di un'analisi basata sul gruppo di rinormalizzazione, si studia la transizione BKT per un sistema composto da due film e si esamina un particolare setup sperimentale che ne permette l'osservazione. Infine, si evidenziano analogie interessanti con il sistema Hall quantistico a doppio film e *filling* totale $\nu = 1$.

La seconda parte della tesi è dedicata allo studio del comportamento termodinamico del sistema di vortici a campi magnetici finiti. In particolare, si studia l'effetto di una superficie con orientazione ab sulla fusione del reticolo di vortici nei superconduttori a strati. È noto che in solidi convenzionali la superficie può assistere la nucleazione della fase liquida e può di conseguenza determinare l'eliminazione della fase solida surriscaldata (*'surface melting'*). Tuttavia, questo comportamento non è l'unico possibile ed esistono sistemi sperimentali in cui la superficie resta solida fino alla transizione di fusione (*'surface non-melting'*). In questa tesi si esamina l'impatto della superficie sulla transizione di fusione del reticolo di vortici con due tecniche differenti. In un primo momento si affronta il problema basando l'analisi sulla fase solida per mezzo di uno studio autoconsistente della stabilità dei reticoli due dimensionali. In una grande porzione del diagramma di fase il reticolo sulla superficie diventa instabile prima che il sistema fonda al suo interno, mentre rimane stabile al di sopra della linea di fusione per campi magnetici molto elevati e molto deboli. In seguito, si è adottato un nuovo approccio fondato sulla combinazione di un modello di campo medio e della teoria classica del funzionale densità allo scopo di ottenere una descrizione più completa del problema. Si è dapprima verificata la validità di questo nuovo approccio studiando la transizione di fusione in un sistema infinito. Si è poi introdotta la presenza di una superficie e si è così ottenuto che, in funzione del campo magnetico, si verificano entrambi gli scenari *surface melting* e *surface non-melting*. La maggior parte del diagramma di fase a campi magnetici deboli è occupata dal regime di *surface melting* come provato dagli esperimenti che hanno dimostrato l'assenza della fase solida surriscaldata. Infine, si è analizzato il punto multi-critico che determina il *crossover* tra i regimi di *surface melting* e di *surface non-melting* a campi magnetici deboli.