

DISS. ETH Nr. 18579

**Quantum Phase Transitions
in a Magnetic Model System**

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

CONRADIN KRAEMER

Dipl. Phys. ETH, ETH Zürich

geboren am 31.08.1981

von Bern

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. M. Sigrist, Referent

Prof. Dr. H. Rønnow, Korreferent

Prof. Dr. J. Mesot, Korreferent

2009

Zusammenfassung

Ein Modell bestehend aus magnetischen Momenten gekoppelt alleine durch die schwachen aber grundlegenden Dipol-Dipol Wechselwirkungen ist zweifellos der Archetypus eines magnetischen Festkörpers. Die Isolatoren LiReF_4 , wobei Re für ein Element der seltenen Erde steht, stellen einzigartige, nahezu ideale Realisierungen eines solchen Systems dar. Obwohl die ersten Studien zurückreichen bis an die Anfänge der Diskussion von Phasenübergangen im Rahmen der Renormalisierungsgruppentheorie, blieb das Interesse an diesen Materialen bis heute ungebrochen, da sie bestens geeignet sind zur Untersuchung einer Vielzahl von kollektiven Phänomenen, einschliesslich Quantenkritikalität und Spin Glässer, die relevant sind für viele Hauptgebiete zeitgenössischer Festkörperphysik. Hier wird eine umfassende experimentelle Studie vorgelegt mit Hauptaugenmerk auf Neutronenstreuungen an LiHoF_4 , LiHoYF_4 und dem bisher beinahe unerforschten LiErF_4 . Zusätzlich wurde eine Charakterisierung des Kristallfeld in diversen LiReF_4 durchgeführt. – Der Ferromagnet LiHoF_4 wird als Paradebeispiel des transversal Feld Ising Models angesehen. Aufgrund des transversalen Feldes werden in einem an sich klassischen System Quantenfluktuationen induziert und in Folge dessen ein Quantenphasenübergang evoziert. Die schwache hyperfine Wechselwirkung stört allerdings in LiHoF_4 das kritische Verhalten, u.a. existiert kein Soft-mode am kritischen Punkt. Ein erhöhen der Temperatur reduziert die Kopplung an das Spin Bad und damit auch die besagten Effekte. In LiHoYF_4 erinnert sich das System, wie es in der Vergangenheit präpariert wurde, d.h. entweder im Feld gekühlt oder nicht. Die Glas Phase manifestiert sich entweder dann als lang reichweitig geordneter oder als ungeordneter aber korrelierter Zustand. Die althergebrachte Vorhersage über Antiferromagnetismus hervorgerufen durch Dipol-Wechselwirkung fand im planeren, schichtweise geordneten System LiErF_4 ein eindrückliche Bestätigung. Bereits bei einem geringen Feld erfolgt ein Quantenphasenübergang einhergehend mit einem weich werden der charakteristischen Moden am kritischen Punkt. Im Weiteren wurden die Spektren in beiden Phasen bestimmt. Aufgrund der gemessenen kritischen Exponenten wird der thermische Phasenübergang der Universalitätsklasse eines 2-dimensionalen XY/h_4 Models zugeordnet. LiErF_4 zeigt folglich reduzierte Dimensionalität. Die Symmetriebrechung geht zurück auf den Mechanismus von order-by-disorder.

Abstract

Certainly the most fundamental model of an archetypical magnetic solid is constituted by an array of spins interacting with each other only by the weak but elementary dipolar forces. The insulators of the family LiReF_4 , where Re stands for a rare earth element, represent an exceptionally clean and well characterized physical realization of such a system. Although the first extensive investigations were motivated by the advent of renormalization group theory decades ago, a broad interest in these compounds still continues, because they host an ideal arena to study a variety of collective phenomena, including quantum criticality and spin glasses, which are relevant in several major fields in contemporary solid state physics. Here, a comprehensive neutron scattering investigation is presented, which was mainly focused on LiHoF_4 , its dilution series LiHoYF_4 and the so far unexplored LiErF_4 . Additionally, a full characterization of the crystal fields in various compounds was performed, that is inevitable for all further studies on collective phenomena. LiHoF_4 is refereed as the textbook realization of the transverse field Ising Model. Applying a transversal field is the natural way to introduce quantum fluctuations to an in fact classical system and evoke a quantum phase transition. However in LiHoF_4 quantum criticality is affected by the marginal hyperfine interaction with the nuclear moments, leading for example to an incomplete softening of the characteristic excitations at the critical point. The coupling to spin bath and the associated effects are governed by temperature. One of the most remarkable further results was the discovery of new aspects of a history dependent behavior in the random field magnet LiHoYF_4 . In the low temperature spin glass like phase the system can be prepared either in a short range correlated but disordered or long range ferromagnetic ordered state by choosing the appropriate annealing protocol, i.e. field cooling or zero field cooling, respectively. The studies on LiErF_4 directly address a longstanding prediction of antiferromagnetism induced by dipolar interactions. It could be demonstrated that the system is a realization of a planar antiferromagnet that exhibits layered ordering and undergoes a quantum phase transition in an applied magnetic field. The excitation spectra was mapped out in the ordered phase as well as in the high-field phase. Remarkably the system exhibits a complete softening of the characteristic excitations when approaching the critical field, regarded as one of the hallmarks of a quantum phase transition. Furthermore, as a conclusion drawn from the critical exponents, the thermal phase transition falls into the 2D universality class XY/h_4 , implying that dimensional reduction takes place. The emergence of symmetry breaking is interpreted as a consequence of the effect referred to as “order-by-disorder”.