



Doctoral Thesis

Exotic electronic properties of ruthenates and related materials

Author(s):

Fischer, Mark Hannes

Publication Date:

2010

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006208793> →

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. 19120

Exotic Electronic Properties of Ruthenates
and Related Materials

A dissertation submitted to

ETH ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Mark Hannes Fischer

Dipl. Phys. ETH
born February 2, 1980

citizen of
Meisterschwanden AG

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. M. Sigrist, examiner
Prof. Dr. D. F. Agterberg, co-examiner

2010

Abstract

The ternary ruthenates of the Ruddlesden-Popper series $\text{Sr}_{n+1}\text{Ru}_n\text{O}_{3n+1}$ have attracted much interest in the last two decades due to the variety of their different ground states. These states, ranging from unconventional superconductivity (single-layer) over metamagnetic behavior with a new low-temperature phase (bilayer) to itinerant ferromagnetism (infinite-layer compound), are often in close competition and therefore crucially depend on system parameters and crystal purity. After a general introduction into these layered compounds and their properties, the discussion in this thesis concentrates on selected exotic phenomena in the strontium ruthenates which are explored within different theoretical frameworks.

The c -axis transport of the single layer Sr_2RuO_4 exhibits an anomalous temperature dependence with a crossover from metallic to insulating behavior upon increasing temperature. In a first part, it is shown how this phenomenon can be understood in terms of a two- to one-dimensional crossover within the basal plane and the associated loss of spectral weight. For this purpose, a slave-boson mean-field approach for the two quasi-one-dimensional bands originating from the d_{zx} and d_{yz} orbitals is adopted in a first step. This allows to account for strong correlations which, in one dimension, result in spin-charge separation. Then, the Green's function of coherent spinon-holon pairs is analyzed within an RPA-like formalism. Our result indeed yields a built-up of spectral weight when the temperature is lowered, thus leading to the aforementioned crossover in the c -axis-transport behavior.

State-of-the-art crystals of the bilayer strontium ruthenate $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ are grown with residual resistivities $\rho_{\text{res}} < 1 \mu\Omega \text{ cm}$. They show a fascinating phase diagram with a line of critical endpoints connected to a metamagnetic transition with T^* decreasing from 1.25 K for in-plane fields down to 0 K when the magnetic field is tilted towards the c axis. The putative quantum critical endpoint is avoided by the system entering an intermediate phase. Why this phase, which is argued to be of electronic nematic order, only appears for fields almost parallel to the c axis is the subject of the second part of this thesis. The metamagnetic transition and the intermediate phase, often described as a Pomeranchuk instability in the $l = 2$ channel, can be based on a van Hove singularity scenario. The present

work shows that the rotation of the O octahedra around the c axis observed in this material introduces a staggered spin-orbit coupling within the planes and naturally leads to an anisotropy in the low-temperature behavior around the metamagnetic transition. In particular, the low-temperature (nematic) phase is affected. Our calculation shows that uniform in-plane magnetic fields induce a (commensurate) staggered magnetic-moment component which can suppress the low-temperature phase. In contrast, the response to fields along the c axis remains unaffected and, thus, also the corresponding low-temperature phase.

The last part deals with superconductivity in crystals, where inversion symmetry is broken periodically on a local level. This is motivated by the structure of $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ encountered in the second part, where the rotation of the O octahedra breaks the inversion symmetry on the bonds resulting in an additional spin-orbit-coupling term in the Hamiltonian. Focussing on two concrete examples, a symmetry analysis is adopted and with the help of the linearized gap equation also new allowed gap couplings and their influence on the superconducting instability are examined microscopically. The formalism implemented is then generalized to the case of antiferromagnetism for comparison.

Kurzfassung

Die ternären Ruthenate der Ruddlesden-Popper-Reihe $\text{Sr}_{n+1}\text{Ru}_n\text{O}_{3n+1}$ fanden aufgrund der Vielzahl ihrer möglichen Grundzuständen in den letzten beiden Jahrzehnten einige Beachtung. Diese Zustände, die von einem unkonventionellen Supraleiter ($n = 1$) über metamagnetisches Verhalten zusammen mit einer neuen Tieftemperaturphase ($n = 2$) zu itinerantem Ferromagnetismus ($n = \infty$) reichen, sind energetisch häufig sehr eng beisammen und hängen daher in beträchtlichem Masse von Systemparametern und Kristallreinheit ab. Nach einer allgemeinen Einführung in diese geschichteten Verbindungen und deren Eigenschaften konzentriert sich diese Arbeit auf ausgewählte exotische Phänomene in den Strontium Ruthenaten, die im Rahmen verschiedener theoretischer Konzepte diskutiert werden.

Der c -Achsen-Transport von Sr_2RuO_4 mit einer RuO_4 Schicht pro Einheitszelle zeigt beim Erwärmen eine anomale Temperaturabhängigkeit mit einem Übergang von metallischem zu isolierendem Verhalten. In einem ersten Teil wird dieses Phänomen im Sinne eines dimensionellen Übergangs innerhalb der Basisebene von zweidimensionalen zu eindimensionalen Systemen und dem damit verbundenen Verlust von spektralem Gewicht erklärt. Zu diesem Zweck wird in einem ersten Schritt eine ‘slave-boson’-Molekularfeldnäherung auf die zwei quasi-eindimensionalen Bänder, die von den d_{yz} und d_{zx} Orbitalen stammen, angewendet. Dies erlaubt uns, die starken Korrelationen, die in einer Dimension zu einer Spin-Ladungs-Separation führen, zu berücksichtigen. In einem weiteren Schritt wird die Green-Funktion der kohärenten Spinon-Holon-Paare analysiert, wofür eine Beschreibung in form einer ‘Random Phase’-Approximation verwendet wird. Unser Resultat zeigt tatsächlich eine Akkumulation von spektralem Gewicht für sinkende Temperaturen und führt damit zu dem erwähnten Übergang im Verhalten des c -Achsen-Transports.

Kristalle des zweischichtigen $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ können mit modernsten Methoden zu einer solchen Reinheit gezüchtet werden, dass der Restwiderstand kleiner als $1\ \mu\Omega\text{cm}$ beträgt. Solche Kristalle besitzen ein faszinierendes Phasendiagramm mit einem metamagnetischen Übergang, dessen kritische Temperatur T^* von 1.25 K für in der Ebene angelegte Felder sukzessive gegen 0 K strebt, wenn das Magnetfeld aus der Ebene in Richtung c -Achse gedreht wird. Diese Linie von

kritischen Endpunkten endet damit in einem quantenkritischen Endpunkt, der aber vom System umgangen wird, indem es in eine Zwischenphase tritt. Warum diese Phase, von der angenommen wird, sie könnte eine elektronische nematische Ordnung besitzen, nur für Felder auftritt, die fast parallel zur c -Achse angelegt werden, ist das Thema des zweiten Teils dieser Arbeit. Der metamagnetische Übergang und die Zwischenphase, oft beschrieben als eine Pomeranchuk Instabilität im $l = 2$ Kanal, können in einem Szenario mit Bändern nahe einer van Hove Singularität beschrieben werden. Die vorliegende Arbeit führt nun aus, wie die Rotation der Sauerstoff-Oktahedra um die c -Achse, die in diesem Material experimentell nachgewiesen wurde, eine Spin-Bahn-Wechselwirkung in der Ebene bewirkt und damit zu einer Anisotropie im Tieftemperaturverhalten nahe des metamagnetischen Übergangs führt. Betroffen ist im speziellen die nematische Tieftemperaturphase. Unsere Berechnungen zeigen, dass uniforme Magnetfelder in der Ebene eine (kommensurable) zickzackartige Magnetisierung induzieren, welche die Tieftemperaturphase unterdrückt. Die Reaktion des Systems auf Felder, die entlang der c -Achse angelegt werden, bleibt hingegen unbeeinflusst und damit auch die entsprechende Tieftemperaturphase.

Der letzte Teil dieser Arbeit behandelt Supraleitung in Kristallen, bei denen die Inversionssymmetrie in periodischer Art und Weise lokal gebrochen ist. Dies ist motiviert durch die spezielle Kristallstruktur von $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$, bei der wie erwähnt die Rotation der Sauerstoff-Oktahedra die Inversionssymmetrie auf den Ru-Ru-Verbindungen bricht und dadurch zu einem zusätzlichen Spin-Bahn-Wechselwirkungsterm im Hamiltonian führt. Hierzu betrachten wir zwei konkrete Beispiele, an denen wir eine Symmetrieanalyse durchführen. Via der linearisierten Gap-Gleichung studieren wir zudem die erlaubten Gap-Kopplungen und deren Einfluss auf die Supraleitung. Des Vergleichs Willen wird der eingeführte Formalismus schliesslich auf den Fall von antiferromagnetischen Supraleitern verallgemeinert.