ETH zürich

ETH Library

Anomalous contribution to the magnetic Kapitza conductance

Doctoral Thesis

Author(s):
Seiler, Kurt Massimo

Publication date:
1986

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-000397034

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. 8071

Anomalous contribution to the magnetic Kapitza conductance

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZÜRICH
for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by
KURT MASSIMO SEILER
Dipl. Math. ETH
born October 21, 1957
citizen of Tägerig (Aargau) and Luzern (Luzern)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. W. Baltensperger, examiner
Prof. Dr. T.M. Rice, co-examiner

Zürich 1986

ZUSAMMENFASSUNG

Ein neues und unerwartetes Phänomen wurde kürzlich in einem alten Gebiet der Tieftemperatur - Physik beobachtet. Misst man den Wärmefluss zwischen flüssigem ^3He und dem paramagnetischen Salz CMN, so zeigt dieser ein $1/T$-Verhalten bei hohen Temperaturen. Dieses erwartete Verhalten ändert sich jedoch bei $T \approx 7$ mK, wo ein Übergang zu einer $1/T^n$ Temperatur - Abhängigkeit beobachtet wurde mit $n \approx 3.5$. Während das Hochtemperatur - Verhalten theoretisch verstanden ist, es ist eine Dipol-Dipol-Kopplung zwischen dem nuklearen magnetischen Moment des ^3He und dem elektronischen Ce-Spin, war es eine grosse Überraschung diesen neuen Effekt unterhalb von 7 mK zu finden.

In dieser Arbeit hatten wir zwei Ziele. Zum einen sollte die lineare Temperatur - Abhängigkeit des Kapitza - Widerstandes bei hohen Temperaturen quantitativ verstanden werden. Zum anderen sollte ein physikalisches Verständnis des beobachteten Überganges angestrebt werden.

In den alten Theorien des magnetischen Kapitza - Effektes wurden die Suszeptibilitäten der beiden Systeme nie mikroskopisch berechnet. Dies ist jedoch äusserst wichtig, da das Nichtübereinstimmen der beiden Anregungsspektren hauptsächlich verantwortlich ist für den schlechten Wärmekontakt.

In dieser Arbeit wird deshalb zum ersten Mal die dynamische Spin - Suszeptibilität eines Heisenberg - Systems mit Oberfläche berechnet. Wir approximieren die magnetischen Eigenschaften des paramagnetischen Salzes mit einem Spin-1/2 Heisenberg - System in einem Halbraum. Die statische Suszeptibilität wird mit einem 'Random Phase' - Entkopplungs Verfahren berechnet. Dies führt zu einem Gleichungssystem für die Magnetisierung $M(\vec{k}_{\parallel}, z)$, das nach der nicht lokalen Suszeptibilität $\chi(\vec{k}_{\parallel}, z, z')$ aufgelöst werden kann. z und z' sind Distanzen von der Oberfläche; $\vec{k}_{\parallel}$ die Wellenvektor-Komponente parallel zur Oberfläche. Im Gegensatz zu früheren Rechnungen muss keine Randbedingung an der Oberfläche postuliert werden. Die Unterdrückung der Magnetisierung an der Oberfläche bei tiefen Temperaturen kann so untersucht werden. Im weiteren erhalten wir kritische Exponenten an der Oberfläche, die sich von den 'Bulk' - Exponenten unterscheiden. Variation der Oberflächenkopplungen führt zu magnetischer Ordnung in der Oberflächenschicht, während der 'Bulk' noch immer ungeordnet ist.

Eine Kettenbruch-Entwicklung der Relaxationsfunktion wird benützt zur Berechnung

der dynamischen Suszeptibilität $\chi(\vec{k}_{\parallel}, z, z', \omega)$. Diese Methode, die ursprünglich auf H. Mori zurückgeht, wurde verallgemeinert auf Oberflächensysteme. Die so erhaltene Form erfüllt gewisse Summenregeln und liefert den korrekten Diffusionskoeffizienten bei hohen Temperaturen. Zum ersten Mal wurden auch das zweite und das vierte Moment der Relaxationsfunktion für ein halbunendliches Heisenberg - System berechnet.

Wir betrachten das ^3He als ein System von fast lokalisierten Fermionen. Im Rahmen dieser Theorie berechnet sich ein Suszeptibilitäts-Vergrösserungsfaktor der dann die bare Suszeptibilität von freien Fermionen in einem Halbraum multipliziert.

Auf diese Art erhält man eine sehr gute Übereinstimmung mit dem experimentell gemessenen Koeffizienten des linearen Terms des Kapitza - Widerstandes. Zwei Effekte sind dabei hauptsächlich von Bedeutung. Auf der einen Seite vergrössert der langreichweitige Charakter der Wechselwirkung den Wärmefluss, während das Nichtübereinstimmen der Anregungsspektren diesen Fluss vermindert.

Eine spezielle Eigenschaft von ^3He in eingeschränkter Geometrie ist nun, dass es feste Schichten formt an der Oberfläche. Die ^3He - Atome innerhalb einer solchen Oberflächenschicht wechselwirken miteinander mit einer indirekten RKKY-artigen Austausch - Kopplung via das flüssige 'Bulk' - Helium. Dadurch stimmen die Anregungsspektren besser überrein , der Wärmefluss wird markant grösser und proportional T^{-2}.

Wir interpretieren unsere Resultate in der folgenden Art. Oberhalb 7 mK ist das ^3He an der Oberfläche zwar sehr dicht, aber noch in seiner flüssigen Zustandsform. Dann beginnt sich eine feste Oberflächen-Schicht zu formen. Bis diese vollständig gebildet ist muss sich der Kapitza - Widerstand vom grossen CMN / flüssiges ^3He Wert auf den kleinen CMN / festes ^3He Wert ändern. Dieser Übergang wird im Experiment gemessen.

SUMMARY

A new and puzzling phenomenon has been observed recently in an old field of low temperature physics. When liquid ^3He is brougth into contact with the paramagnetic salt CMN, a heat flux across the interface is observed which shows the familiar $1/T$-temperature dependence at high temperatures. At about 7 mK a crossover takes place to a regime where the conductance exhibits a $1/T^n$-temperature dependence where $n \approx 3.5$. While the high temperature behavior is understood theoretically to be due to a dipole-dipole coupling between the nuclear magnetic moment of the ^3He and the electronic spin of the Cerium, it was a big surprise to find this new effect below 7 mK.

In this research we have concentrated on two things. First of all on a quantitative understanding of the linear temperature dependence of the Kapitza resistance at temperatures high compared to the Curie temperature of CMN. And secondly on an understanding of the physical processes responsible for this crossover.

In previous theories of the magnetic Kapitza conductance, the susceptibility of the two spin systems in contact has never been calculated on a microscopical level. This however is very important since the mismatch between the two excitation spectras is the main reason for the bad thermal contact.

For the first time we calculate the dynamical spin susceptibility of a Heisenberg system with surface. We approximate the magnetic properties of the paramagnetic salt by a spin-1/2 Heisenberg system in a half space. The static susceptibility is calculated by use of a random phase decoupling procedure. This leads to a set of equations for the magnetizations $M(\vec{k}_{\parallel}, z)$ which can be solved for the non-local susceptibility $\chi(\vec{k}_{\parallel}, z, z')$. z and z' are the distances from the surface; $\vec{k}_{\parallel}$ the wavevector component parallel to it. In contrast to earlier approaches, we do not have to assume any boundary condition at the surface. This allows us to study the suppression of the magnetization at this interface when the temperature is lowered. Furthermore we obtain critical exponents at the surface which can be compared with the ones in the bulk. In our model it is possible to have surface magnetic order atop of a paramagnetic bulk. This can be achieved by varying the surface exchange couplings.

We then calculate the absorbtive part of the dynamical susceptibility, $\chi(\vec{k}_{\parallel}, z, z', \omega)$, by means of a continued fraction expansion of the relaxation shape function $F(\vec{k}_{\parallel}, \omega)$.

This approach, which is originally due to H. Mori, is generalised to a surface system. This form has the merit to satisfy certain sumrules and and gives the correct diffusion constant at high temperatures. For the first time we present expressions for the second and the fourth moment of the relaxation shape function appropriate for a semi-infinite Heisenberg system.

The liquid ^3He , on the other hand, is treated as a system of non-interacting fermions bounded by a wall. Within the model of almost localized fermions a susceptibility enhancement factor is calculated which accounts for the strong interactions between the ^3He nuclei.

By use of these results we then get a surprisingly good agreement with the experimental result for the coefficient of the linear term of the Kapitza resistance. We see that there are two major effects competing. On one side the long range character of the interaction tends to increase the heat flux, while on the other side the mismatch between the excitation spectras is reducing this flux.

A peculiar property of liquid helium in confined geometry is that it gets so dense toward the interface that solid layers are formed. ^3He atoms within such a surface layer interact by means of an effective ferromagnetic exchange constant of the order of 10^{-4} mK. This coupling is believed to be a RKKY type of indirect exchange interaction via the bulk liquid ^3He . This now has the effect that the mismatch between the two systems is strongly reduced, the heat flux thus increased.

Our results now suggest the following interpretation. Above 7 mK the ^3He at the interface is very dense but still in its liquid phase. Then a solid layer begins to form. The Kapitza resistance has to change from its high CMN / liquid ^3He value to the low CMN / solid ^3He value. What is observed in the experiment is this crossover from the linear behavior at high temperatures to a quadratic behavior at low temperatures.