

Nuclear Magnetism in Metal

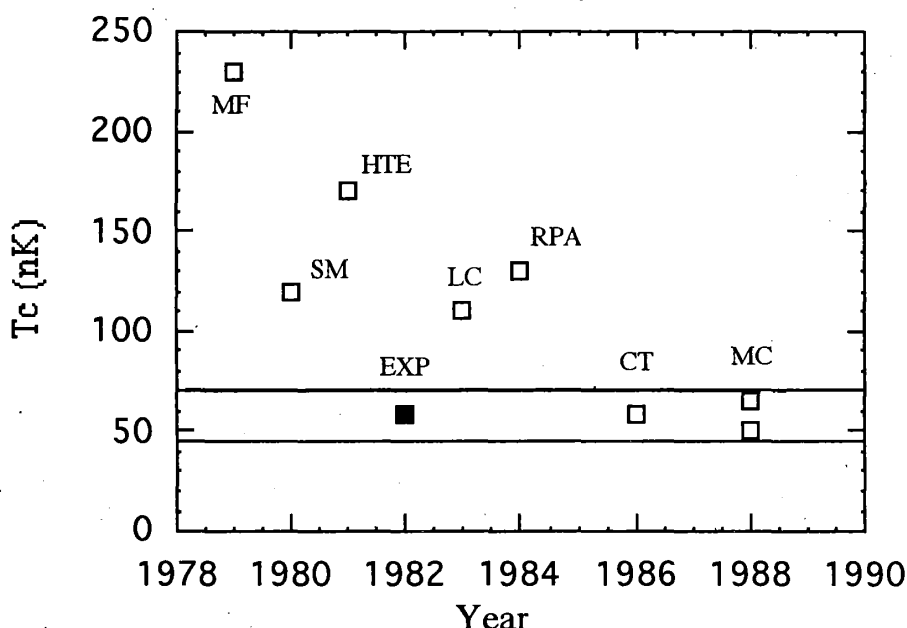
金沢大学 理学部

鈴木治彦

1) 序

温度を絶対零度近くまで下げていった時に、最後まで残っているエントロピーの一つは核スピンのエントロピーであろう。ところがそれにも関わらず、核磁気秩序状態の研究が、(固体 ^3He の研究を除いて) 人気のないのはどうしてなのであろうか？ 超低温研究者にも人気がなく、核磁気秩序状態の研究を行なっているのは世界でヘルシンキ、バイロイト、フロリダ、コーネル、金沢……など数ヶ所を数えるだけである。これは、多くの人々が核スピン系の磁性が電子系の磁性と比較してそれ以上の新しいことは何も出てこないと考えているからであろう。しかしこれは本当であろうか。

核スピン系の特色として多くの人々はその単純さを上げる。事実ヘルシンキグループが書いた核スピン・オーダーのレビュー記事の中で「金属中の核スピン系は磁性研究の良いモデルを提供する。核スピンは良く局在し、低温では電子系や格子系から独立しており核スピン間の相互作用は第一原理から計算できる。従って核磁性は理論を実験から検証するのに大変適している。」と述べている。本当に核磁性は単純で、理論的に予測可能で、その実験結果は理論の検証という意味合いしかないであろうか？ 次のグラフを見ていただきたい。



ここで、MF: mean field, SM: spherical model, HTE: high temperature expansion, LC: linked clusters, RPA: green's function, CT: correlation theory, MC: monte carlo.

此の図は縦軸に理論的に計算されたCuの核スピンの反強磁性転移温度を、横軸に発表された年代で示してある。実験で最終的に臨界温度が決定されたのは1982年の事である。それまでは

理論値は大きく離れてその値も散乱していた。実験値が決定した後、数年かけて理論値が実験値に収斂していく様子がわかる。このように銅のように単純な金属でもその核スピンオーダーの温度を実験の手助け無しに第一原理から理論的に求めるのは困難で、実験的に臨界温度が決定されてから数年かかって実験値に収斂している。これは量子ゆらぎが大きく効いていたためであった。

銅の反強磁性における核スピン構造が中性子散乱実験で決定された。そのスピン構造は磁場が1.2 Gaussと1.6 Gaussの間の磁場がかかった時には $(0 \ 2/3 \ 2/3)$ というQベクトルを持った反強磁性であった。このようなQベクトルを持った反強磁性はfcc構造の電子系ではこれまで観測されていなかった。このようなスピン構造を安定にさせるのも、やはり量子ゆらぎの効果であることがわかった。

このように銅のような単純な金属においてもその核磁性は予想に反してそう単純ではなかったことを強調したい。

2) Sc金属の核磁性

我々はより複雑な系としてSc金属の核スピン・オーダーの実験を開始した。Sc金属の核スピンは $I=7/2$ で結晶系はhcpである。従ってその核磁性には核の電気四重極相互作用が働き核スピンのイジング・スピン系が期待できる。

スピン-格子緩和時間はこれまでの高温 ($T>1\text{K}$)での測定ではKorringa常数は $1.6\text{sec} \cdot \text{K}$ であった。しかし最近のコーネル大学のグループの低温(核の電気四重極相互作用が効いてくるような低温~数百 μK)での測定で $90\text{msec} \cdot \text{K}$ であった。この違いがどこから来るのかは現在のところ不明である。しかしもしこの非常に短い緩和時間が本質的なものだとすると、核スピン間の間接相互作用(RK相互作用)が強く、もし次式を用いてCuと比較して転移温度を計算するとかなり高い温度を得る。

$$T_c(\text{Sc}) \sim T_c(\text{Cu}) \{I(I+1)/\kappa\}_{\text{Sc}} / \{I(I+1)/\kappa\}_{\text{Cu}} \sim 60\text{nK} \cdot 56 \sim 3.4\mu\text{K}$$

我々は二段核断熱消磁冷却実験によってSc金属の核スピンを冷却する実験を行なった。即ち一段目はCuで、二段目はScの核スピン自体の断熱消磁冷却である。二段目は一段目のCuの核ステージの実験空間の中にセットした。一段目と二段目の間には熱スイッチを用いなかった。最初にCuの核ステージだけで冷却できる温度、約 $100\mu\text{K}$ までの帯磁率の温度変化を測定した。

それを図1に示す。次にCuの核ステージを

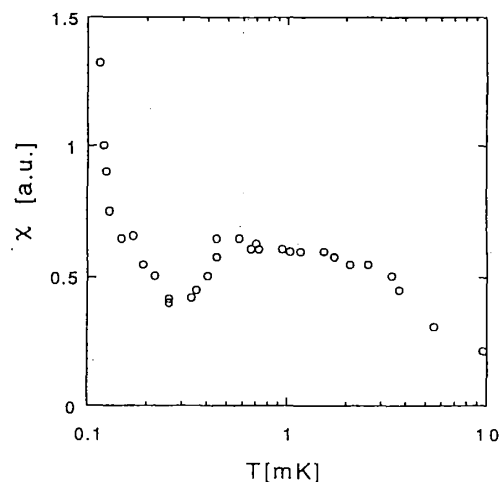


図1 帯磁率の温度変化

0.277mKに保ちS cの核スピンを2Tの磁場中で予冷するのに10日間待った。そして約30分で約2Tから零磁場まで消磁した。その後の帯磁率および同時に測定した磁化の時間変化（温度変化）は図2の通りであった。高温（10mK）で同様の消磁実験を行なったが帯磁率に何の変化も観測されなかった。従ってこの結果はゴーストではない。試料は単結晶で測定方向はc軸方向で即ち核の電気四重極相互作用の方向であり、従って $I=7/2$ が基底状態である。此の図2の結果は次のように理解できる。

消磁後、最初に測定される帯磁率のピークはS c核スピンの強磁性への転移に伴うものであり、その温度はもしKorringa常数から推定した温度が正しければ約3 μ Kであろう。つぎに現れた帯磁率のピークは図1の結果から推定して約50 μ Kであろう。これはS c金属中に含まれている3ppmのFe不純物の示すスピン・グラスと解釈している。さらに図1で見られた250 μ Kにおける帯磁率のdipも見られる。これは電子系の性質と思われる。

現在この核スピンの強磁性状態、およびスピン・グラス、電子系のものと思われる帯磁率のdipについて調べている。

3) 今後の研究の方向

この我々の結果では、S cの核スピン系の断熱消磁冷却でS cの電子系も冷却できたものと考えている。これはS cの核スピン-格子（電子）緩和時間が非常に短いこと、またS c金属と銅の核ステージの間の熱接触が比較的悪いことによるとと思われる。結果として銅の核ステージとS c金属の間に熱スイッチを入れた事と同じになったと思われる。このことから超低温技術が進み2~300 μ Kの温度に1ヶ月以上も保っておける現在では一段目と二段目の試料の間に熱スイッチを入れることにより電子系も同時に冷却でき、 μ K温度領域の電子物性の研究が可能になったと考えている。今後核磁性の研究の他に、積極的に此の領域の研究、即ち μ K温度領域の電子物性の研究も行ないたい。

最後にこのS c金属の実験は金沢大学と東大物性研超低温グループとの共同研究であることを申し添えます。

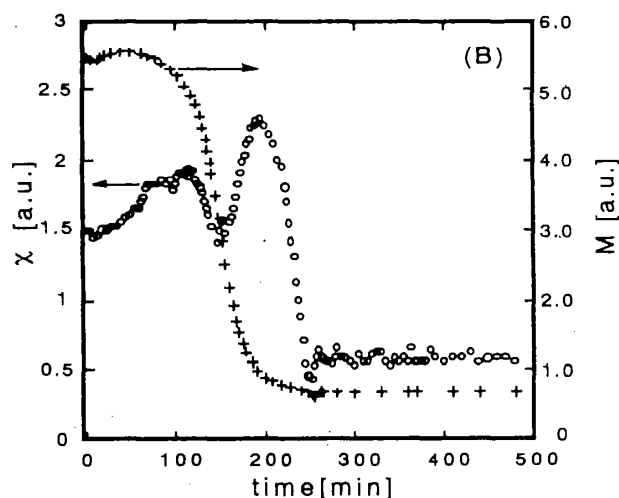


図2 断熱消磁冷却後の帯磁率の温度変化