

Title	核断熱消磁と核オーダー
Author(s)	佐野, 直克; サノ, ナオカツ
Citation	大阪大学低温センターだより. 21 P.1-P.4
Issue Date	1978-01
Text Version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/11094/4580
DOI	
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

「核断熱消磁と核オーダー」

基礎工学部 佐野直克 (豊中 2351)

核スピン間の磁気双極子相互作用で核スピンの自発的に配列するには核スピン系の温度を $1 \mu\text{K}$ かそれ以下に冷却する必要がある。その様な温度を作り出すには現在のところ核断熱消磁法によるしかなく、核スピン系の温度を下げるだけならば格子系の温度を必ずしも下げる必要はない。核スピン系の温度だけを冷却する核断熱消磁を Nuclear Cooling, 格子や他の系を冷却するのを Nuclear Refrigerator と言い分けている。我々の行なっているのは Nuclear Cooling で絶縁物中の結晶水のプロトンスピン系のみを冷却して核の自発的配列を発生させようという実験である。反磁性の絶縁物は一般に低温で核スピン・格子緩和時間 (T_1) が非常に長くなるために、核スピンを超低温まで冷却することは困難である。このために絶縁物が核断熱消磁にほとんど用いられていない理由でもある。核スピンの自発的配列を作った唯一の例は 0.3 K で Solid State Effect と回転系核断熱消磁によって Ca F_2 等の F 核の反強磁性や強磁性構造を実現した Goldman 等¹⁾ の仕事のみである。我々は特別な物質を用いれば Nuclear Cooling より結晶水として付いている水分子のプロトンスピン系の温度を実験室系で $1 \mu\text{K}$ 程度まで冷却し、又零磁場の下で核スピンの自発的配列を観測出来る方法²⁾ を考え出しその予備実験を行なっている。

核断熱消磁で得られる核スピン温度 T_f は、

$$T_f = T_i (H_f^2 + H_L^2)^{1/2} / H_i \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ここで T_i, H_i は消磁する前の温度と磁場で H_f は消磁後の外部磁場 H_L は核磁気モーメントの作るローカル磁場である。 $H_f = 0, H_L \approx 10 \text{ Oe}, H_i \approx 30 \text{ kOe}$ として $T_f \approx 1 \mu\text{K}$ を得るためには T_i として 3 mK まで核スピンを冷却する必要がある。 $\text{H}_e^3 - \text{H}_e^4$ 希釈冷却器のみでこの初期温度まで冷やすことは可能であるけれど、 T_1 が初期磁場中で短くなおかつキャピリア抵抗の小さいことが必要である。この様な条件を満足する核断熱消磁用試料として基底状態が $S = 0$ の一重項で適当な励起エネルギーを持った $S \neq 0$ の励起状態があり外部磁場により励起レベルと $S = 0$ の一重項が交叉する様な試料を用いる。その例の試料として硝酸銅 ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2.5 \text{ H}_2\text{O}$) がある。硝酸銅の外部磁場に対するエネルギーレベルの変化を図 1 に示す。 $S_2 = 1$ のレベルと $S = 0$ のレベルが非常に近くなる交叉磁場の近くで試料は超低温まで常磁性を示すので結晶水のプロトンの T_1 は短いままである。交叉磁場からはずれた所では T_1 は温度が下がると指数関数的に長くなる。よって交叉磁場附近で試料全体 (核スピ系も含む) を数 mK まで冷却してから零磁場まで消磁すれば格子系 (Cu スピン系) は初期温度のまま

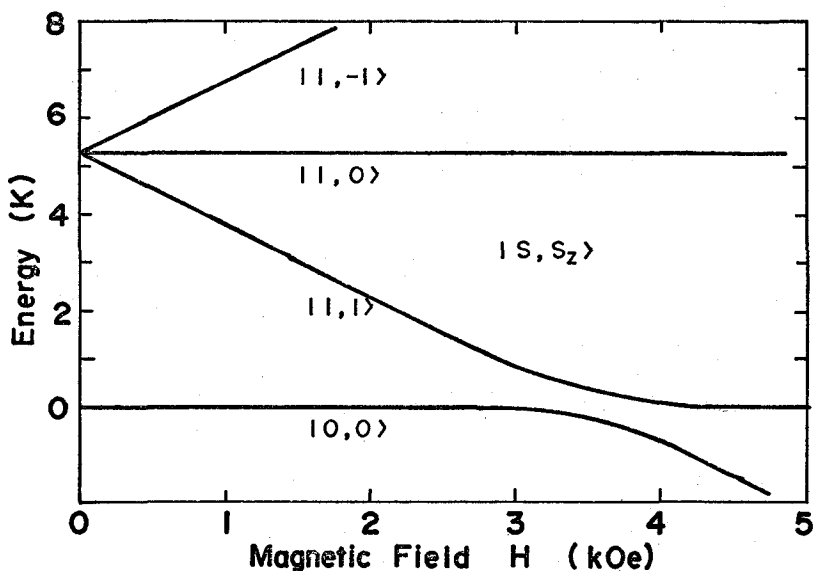


Fig. 1. Energy levels of the Cu^{++} pairs ($S=1/2$, $J/k=5.18$ K) in an external field H . The quantum numbers indicating the total spin S and its component S_z in the direction of the external field are given in brackets.

で核スピン系のみが Nuclear Cooling で $1 \mu\text{K}$ 程度まで冷却出来る。図 2 に硝酸銅単結晶のプロトンの T_1 の測定値を示す。0.2 K 以下で T_1 が温度と共に指数関数的に長くならず 10^4 秒程度で一定値になっているのはペアーを作っていない Cu^{++} や常磁性不純物のためで良い結晶を作ればさらに低温

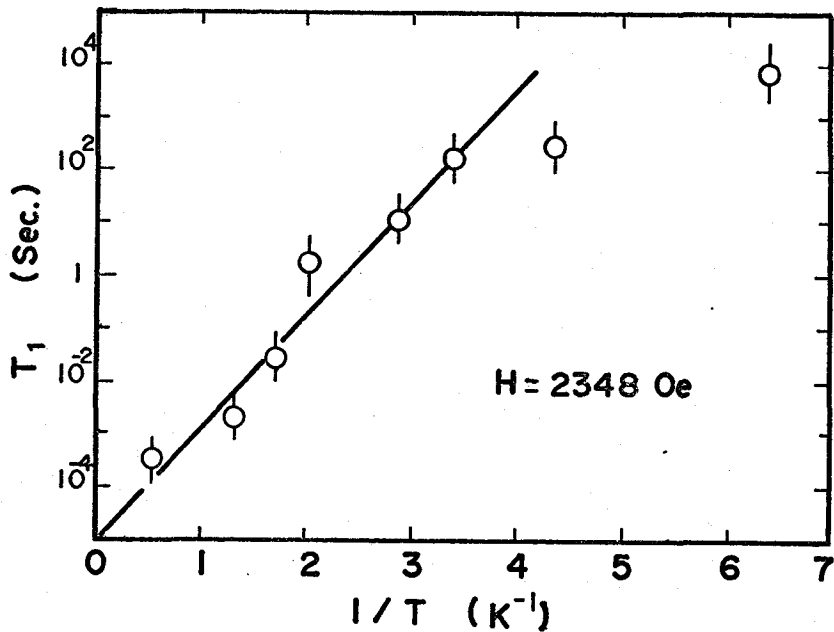


Fig. 2. The temperature dependence of the spin-lattice relaxation time of protons in $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$.

まで T_1 は指数関数的に長くなる。

$H_e^3 - H_e^4$ 希釈冷却器で硝酸銅単結晶を冷却し色々な初期温度で 27 kOe から 1174 Oe まで消磁した時と又、810eまで消磁した時のプロトンの核スピン温度を定常法NMRにより測定した結果を図 3 に示す。図中の A の領域は T_1 が消磁する時間と比べて短いため断熱消磁にならず等温的に変化している領域です。点線で示した B の領域は消磁してくる途中の磁場から T_1 が長くなるにつれて段々と

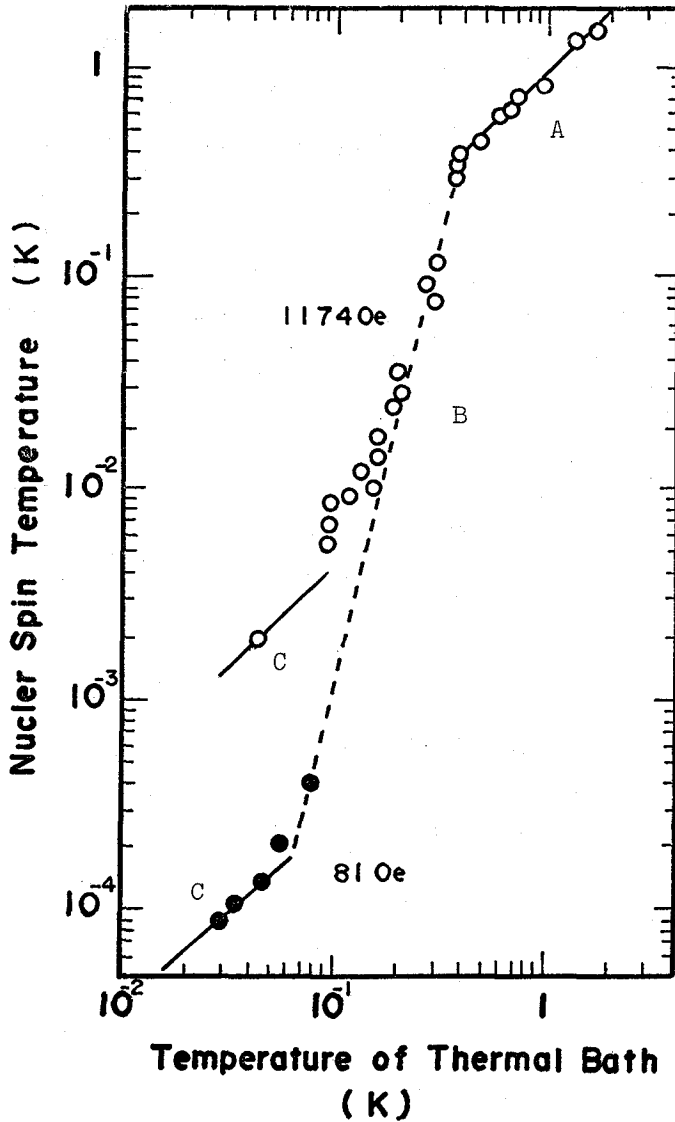


Fig. 3. The spin temperature after the demagnetization vs. the temperature of the thermal bath.

と断熱消磁になってくる領域です。Cの領域は27 kOeより完全に断熱的に核スピン系のみが冷却されている領域で核スピン温度は

$$T_f = T_i (H_f / H_i) \dots\dots\dots (2)$$

で与えられC領域の実線は(2)式を表わしている。現在我々の測定した最も低い核スピン温度は $T_i = 21$ mK, $H_i = 27$ kOeより $H_f = 95$ Oeまで消磁した時の $T_f = 74$ μ Kである。又、磁場を一度零にして、100 Oe程度でスピン温度を測定してもほとんど温度が変わらない事より零磁場での T_i もかなり長いことを確めた。

Goldman 等の実験からも明らかな様に核スピン温度をローカル磁場以下にすれば核スピン系は自発的にオーダーすることは明らかであるが、零磁場の下でそれをいかに検出するかというのは非常に大きな問題である。検出方法の一つとしてSQUIDを用いることが考えられるが、我々は水分子内のプロトン間の相互作用を利用して零磁場NMRを観測してそれを検出することを計画している。水分子内のプロトンの双極子相互作用により2つのプロトンは一重項と三重項を作り三重項は零磁場で $m = 0$ と $m = \pm 1$ のレベルに分かれその間のエネルギー間隔は約45 kHzである。

よって零磁場で45 kHzのNMRを観測することが可能である。又このエネルギー間隔は温度にして約2 μ Kに、水分子間の相互作用は温度にして約0.4 μ Kである。よって初期温度を数mKにして零磁場まで消磁すれば核スピン温度はほぼこの温度になるので核スピンの自発的配列が発生するものと思われる。その際45 kHzのNMRの信号強度変化、信号線の変化等により核オーダーを観測出来ると思われる。我々は現在さらに低い温度まで冷却して、零磁場でのNMR観測が出来る様がんばっている所です。

文 献

- 1) M. Goldman : Physics Letters C 32 (1977) 1.
- 2) 伊藤順吉, 佐野直克 : be published in the Proceeding of International Symposium on Physics at Ultralow Temperature (1977).