

# 複合強磁場を用いた量子トンネルの絶対反転率測定 Absolute Tunneling Rate determined by a Complex Magnetic Field

東北大・金研 野尻浩之, 林美咲  
産総研 北村直之

<sup>1</sup>H. Nojiri, <sup>1</sup>M. Hayasi and <sup>2</sup>N. Kitamura  
<sup>1</sup>Institute for Materials Research, Tohoku University  
<sup>2</sup>Advanced Industrial Science and Technology

## 1. はじめに

孤立したスピンの反転は、熱的なゆらぎによる反転と量子力学的なゆらぎによるトンネル効果の2つの要因によってもたらされるが、その2つを実験的に区別することは、量子的なスピン操作の基本である。物質中のスピンは、常にフォノンや他のスピンの相互作用によって、バルクの熱浴と接触しておりその結合を制御するのは容易ではない。まず行うべきことは超低温化による熱緩和の抑制および稀釈化によるスピン間相互作用の制御である。これらは熱緩和を抑制は出来るが、ゼロにする事は出来ないので、何らかの他の手法が必要となる。

我々は、外部場を高速に掃引することで、熱浴とスピンを実効的に切り離して、量子的な断熱遷移を観測出来ることを提唱してきた。三角スピニングによる非平衡断熱磁化過程の観測や $S=1/2$ の孤立スピンのゼロ磁場反転などがその一例である。しかしながら、これらの場合、初期状態でのスピンの偏極を完全に制御出来ず、実験的に求めた量子トンネルの確率が常に相対的なものにとどまるという問題があった。今回我々は、定常磁場とパルス磁場を組み合わせた複合磁場によりトンネル確率の絶対値測定を可能にしたので、それに関して報告する。

## 2. 複合磁場装置

複合磁場の波形を Fig. 1 に示す。定常磁場は 10 T-CSM により生成し、その中に小型パルス磁場発生装置を配置して、パルス磁場を重畳する。パルス磁場コイルは 4He に直につけて冷却する。試料スペース

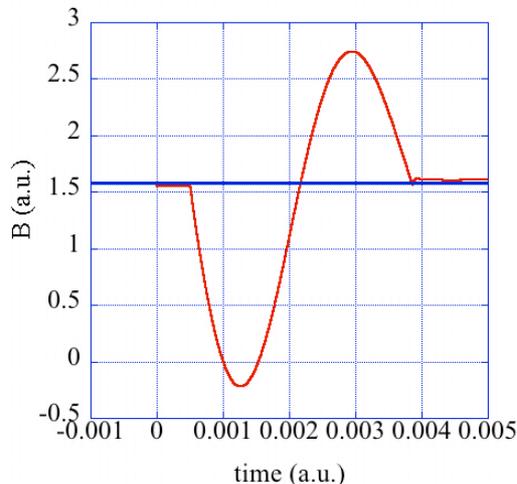


Fig. 1 Complex magnetic field wave form

は 2 重管の中におかれ、3He により 0.4 K までの実験が可能である。パルス磁場波形としては半サイン波、全サイン波などが可能で有り、周期は 1-4 ms まで可変出来る。パルス磁場コイルの内径は 11 mm であり、超電導磁石の内径 100 mm に対して非常に小さいので、相互インダクタンスは非常に小さく、パルス磁場発生により超伝導磁石が不安定化したりすることはなく、磁場の目減りもない。

トンネル反転による磁化の信号は、ピックアップコイルを用いて誘導法により検出する。コイルのインダクタンスを小さくすることで、応答速度は MHz 以上を維持することが可能である。

## 3. トンネル磁化反転

パルス磁場波形とピックアップによる磁化反転信号を Fig. 2 に示す。試料は 5 %銅イオンをドーブした磷酸ガラスである。磁場の印可は定常磁場を打ち消すように負の向きに加えている。磁場を掃引すると、ゼロ磁場とずれたところで磁化の反転による信号が検出される。これは定常磁場によるバイアスのためである。銅イオンは $S=1/2$ の孤立スピンであるが、エネルギー準位はゼロ磁場においてのみ交差する。従って磁化の量子力学的な反転はゼロ磁場以外では期待されない。その場合、反転をもたらす機構に関しては、純粋に電子スピンだけでは不可能であることに注意が必要である。よく知られているように、スピンのパリティ保存則のために、ゼロ磁場でのエネルギー縮退が必ず必要である。この場合は

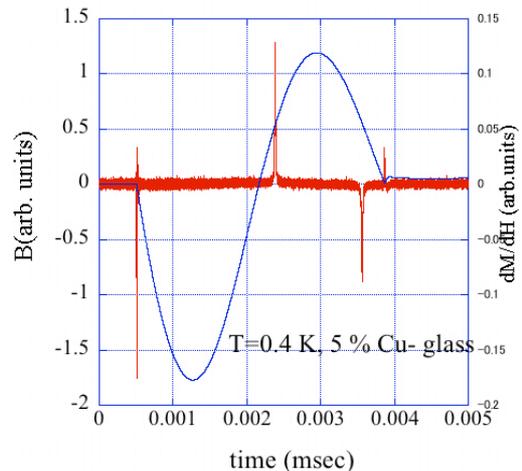


Fig. 2 Signal of zero field tunneling reversal

ゼロ磁場でのトンネルギャップを形成することが出来ず、量子トンネルが禁止される。測定した磁化の反転による誘導信号を積分して磁化曲線になおすと、その反転は平衡状態の磁化曲線であるブリリュアン曲線に対して非常に鋭く、観測された反転は熱緩和による反転では説明できないことが分かる。

#### 4. 反転率の速度および濃度依存性

反転の起源を調べるために磁場の掃引速度や磁性イオンの濃度に対する反転率の依存性を調べた。掃引速度に対しては、大きな依存性が見られず、熱浴による緩和効果は、磁場の高速な掃引により十分抑制されていることが分かった。その一方で、濃度依存性においては、濃度を薄くすると反転率が1に近づく傾向が見られた。今回の系は稀釈系なので、元々スピン間に交換相互作用は存在しない。従ってスピン間の磁気相互作用としては双極子相互作用が考えられる。双極子相互作用は、スピンの濃度によるので、濃度が薄い極限では、孤立スピンの性質が見られると期待される。このように考えると、今回の結果は、孤立した  $S=1/2$  のトンネル反転率は1になるという事を示している。

#### 5. 考察とまとめ

今回の実験で求めた反転の起源及び反転率が1になる理由に関して考察する。元々、孤立した  $S=1/2$  ではトンネルギャップが形成出来ないの、他のスピンの影響を取り入れる必要がある。この場合、近接する  $S=1/2$  スピンによる効果は、稀釈極限では効かないので、今回の結果を説明できない。稀釈によって変わらない効果としては、オンサイトの核スピンを考える必要がある。銅イオンでは、同位体は2種類有るが、いずれも核スピンは  $3/2$  である。従って、電子スピンと核スピンの合成系として考えれば、スピンのパリティは偶となり、トンネルギャップが形成できる。この場合、ギャップの大きさは、超微細相互作用程度になると期待される。銅の場合は、その大きさは十数mT から数十mT 程度であることが知られているので、実験で見出された鋭い反転と矛盾しない。

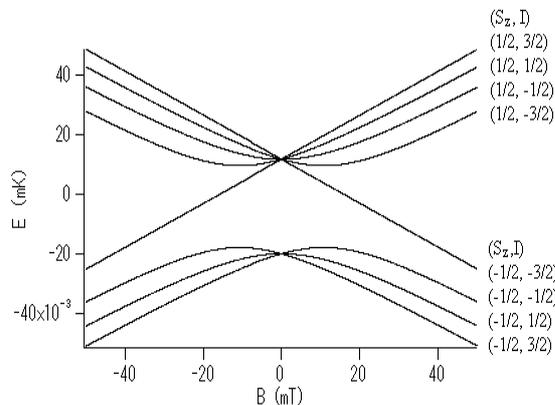


Fig. 3 Energy level of  $S=1/2$  spin with  $3/2$  nuclear spin

トンネルギャップの構造を考察するために、超微細相互作用とゼーマンエネルギーを含むハミルトニアンを対角化してエネルギー準位を求める、相互作用が完全に等方的な場合は、Fig. 3 に示すように、核スピン  $3/2$  の磁気量子数で分裂する4つの準位のうちで、3つはトンネルギャップを形成し、残りの1つは交差するだけで、ギャップは形成されない。この場合期待される反転率の最大値は  $3/4$  となると期待される。この値は実験結果と一致しない。

銅イオンでは超微細相互作用は異方的な事が知られているので、異方的な場合に関してエネルギー準位を求め、その際、ガラスにドープしていることから磁場は超微細相互作用の主軸とずれた方向にかかることを考慮する。この場合には、4つの全ての準位でトンネルギャップが形成されることが示される。この場合は、トンネル反転は、どの準位においても起こるので反転率が1になるという実験結果と一致する。今回の結果は、スピン反転の機構に核スピンを含めたパリティ保存が本質的であることを示している。

今回の結果を元に、スピンの量子トンネル確率を制御することを考える。まず第1に重要なことは、スピン反転が核スピンの状態により制御可能な事である。電子スピンの偏極制御は一般的に容易ではないが、核スピンは緩和時間が長く、相互作用も弱いので NMR 等の手法で制御出来ることはよく知られている。したがって、核スピンを梃子として電子スピンの反転を制御することが可能であると考えられる。次にギャップの有無に関しては、超微細相互作用の対称性と磁場の縦横成分の切換により、ギャップの形成を制御することが可能である。今回の結果は、これら2つのスピンのトンネル反転の制御法を明らかにした点で重要な結果であると考えられる。

#### 参考文献

- [1] H. Nojiri, Branching of spin reversal with Isotropic and Anisotropic Interactions, Dynamics and manipulation of quantum spin systems, 2010. 10.13-15(Tokyo)
- [2] 林美咲, 野尻浩之, 北村直之, 超高速掃引磁場下でのトンネル磁化絶対反転率測定, 日本物理学会第 65 回年次大会