

気体原子の光ポンピングによるアルカリ塩の核スピン偏極

兵庫県立大学 大学院 物質理学研究科

石川 潔

Nuclear spin polarization of alkali-salts by optically-pumping
atomic vapor

Kiyoshi Ishikawa

Graduate School of Material Science, University of Hyogo, Japan

We report on the nuclear spin-polarization of solid alkali-salts by an optical pumping of atomic vapor. Spin-polarized alkali-metal atoms transported angular momentum as the electron and nuclear spin-polarization to the solid surface, where spin polarization mostly decayed fast but was partly injected to solid, and angular momentum was accumulated in the nuclear-spin system by the help of large relaxation time. The enhancement of NMR signals was measured at various magnetic fields, temperatures, laser frequencies, pump polarizations, and N₂ buffer-gas pressures. Comparing with the numerical simulation of spin currents by alkali-metal vapor, we discuss which spin-current is responsible for the nuclear spin-polarization of salts and how the NMR enhancement depends on the above parameters.

固体のアルカリ塩の核スピン偏極について、気体原子の光ポンピングによる方法を報告する。ガラス容器中で気体のアルカリ金属原子を光ポンピングすると、電子スピンと核スピンの偏極が、その流れが壁に向かって発生する。それらスピン流が壁に達すると、ほとんどは無駄に緩和するが、角運動量の一部は壁などの固体にわたり、固体の核スピンを偏極する。固体中の核スピン緩和時間が長ければ、十分な角運動量が固体に蓄積する。一部のアルカリ金属は電気四重極モーメントが非常に小さく、緩和時間は室温で数分から数10時間にわたり、対称性のよいアルカリ塩は角運動量を蓄積する物質として適している。磁場 9.4 T における結果を 2006 年の NMR 討論会で発表して以来 3 年間で、試料作成の再現性を改善し、さまざまな実験条件においてスピン偏極増大を観測した。講演では、レーザー光から、アルカリ金属原子を介し、固体にまで角運動量に移る機構を解説しながら、この新しい核スピン偏極法の特徴を紹介する。

実験では、試料として水素化セシウム (CsH, CsD) を使い、Cs イオンの NMR 信号を観測した。アルカリ塩の微結晶を側壁内面に生成させた円筒形ガラス容器を磁場中に設置し、Cs 原子を光ポンピングする。光ポンピングと信号検出は、同じ大きさの磁場で行なう。試料は固体であるが、興味あるのは核スピン偏極率なので、RF 単パルスにより誘起した FID 信号により偏極率を評価した。実験装置の配置は、希ガス原子のスピン交換

Hyperpolarization, Alkali salt, Optical pumping

いしかわ きよし

光ポンピングと類似しており、スピン偏極移行のためにはマイクロ波などは不要である。磁場は、9.4 T (Cs 共鳴周波数: 52.4 MHz), 2.7 T (15.1 MHz), 0.56 T (3.17 MHz) の3段階で切り替えた。試料温度は 70 ~ 140 °C の範囲で変化させた。励起レーザーは出力約 1 W で、Cs 原子の D_1 線 (894 nm) または D_2 線 (852 nm) に共鳴させた。 D_1 線のみならず D_2 線でも効率よい光ポンピングが可能なのは、原子のゼーマン分裂が、基底状態の超微細分裂より大きいからである。このような条件で、約 $10^{16} \text{ h/cm}^2 \cdot \text{s}$ @ 100 °C のスピン流が固体表面に流れ込むと期待できる。熱平衡状態の核スピン偏極を正確に評価することは難しいが、少なくとも 80 程度の偏極率の増大が得られた。

さて、この研究の特徴は、固体のスピン偏極のため気体原子を使うことである。希ガスのスピン交換光ポンピングでは、個々の希ガス原子が、スピン源となるアルカリ金属原子と衝突し、電子スピンから核スピンの偏極移行を実現させていた。それに対し、表面でしか相互作用の機会がない気体から固体に、スピン偏極が有意に移るのは驚きである。光から固体までのスピン偏極移行の過程を順に追っていくと、最初のステップは、レーザー光で誘起する気体のスピン流である。以下では、緩衝ガス圧により現象を分類する。1 気圧程度の緩衝ガスが存在する場合、Cs 原子は緩衝ガスと衝突しながら壁に向かって角運動量を運ぶ。角運動量を担っている原子自身が拡散で移動するので、スピン流も拡散モードである。さらに緩衝ガスは、原子の並進運動だけでなく、光学遷移やスピンドYNAMICSにも影響する。たとえば、Cs 原子が緩衝ガスと衝突すると、電子スピン偏極が核スピンの移る — 超微細シフトポンピング、つまり、気体の電子スピン流と核スピン流は互いに結合する。緩衝ガスが 10^{-2} 気圧程度では、超微細シフトポンピングは無視できる。一方、緩衝ガスは拡散の速さを決め、光学遷移を消光させる。特に後者は、スピン偏極の符号に関わる点で重要である。最後に、緩衝ガスがない真空容器の場合、光ポンピングされた Cs 原子は、弾道運動ののち壁に衝突する。したがって、上で述べた複雑な過程はほとんど存在せず、独立な原子の光ポンピングのみがスピンの流れを決めることになる。実験では、緩衝ガスの有無によりスピン流の符号が反転し、したがって、スピン注入による固体の NMR 信号も符号を変えた。

スピン偏極移行の第2段階は固体表面におけるスピン相互作用であり、第3段階は固体内のスピン拡散である。気体のスピン流に比べ、こちらには未解決の課題が多い。表面と固体内部について、自由かつ容易に制御できるパラメータが少ないからである。アルカリ塩の核スピン偏極を、アルカリイオンの NMR 感度向上など応用につなげるためには、これら3つのステージのそれぞれで高効率なスピン偏極移行を実現する必要がある。今後、多くのアルカリ塩で最適な条件を見つけることを目標に、特に、固体表面と内部に注目し、基礎実験を行なう。