

# 高磁場光ポンピングによるアルカリ金属イオンの核スピン偏極

○石川 潔

兵庫県立大学大学院 物質理学研究科

## High-field optical pumping for nuclear spin polarization of alkali-metal ions

○ Kiyoshi Ishikawa

*Graduate School of Material Science, University of Hyogo, Japan*

Our project aims to achieve a comprehensive understanding of nuclear-spin dynamics such as spin transfer, spin transport, and spin accumulation in various phases of materials. We report hyperpolarization of alkali-metal ions achieved in alkali salts and in a glass material by optical pumping of alkali-metal vapor. The polarized gas mediates spin transferring from photons to alkali ions in the matters. If the polarized ions remain near the surface, it could lead to surface-sensitive NMR measurement of solid. When increasing the mobility of ions, we are able to hyperpolarize the macroscopic crystals. Laser heating is suitable for activating the ion movement. In addition to spin exchange where spin polarization is injected by nuclear dipole interaction between atoms and salt ions, we present the evidence of injection of polarized atoms into the glass.

我々は、光のスピン角運動量を物質に移し、輸送し、蓄え、使うことをめざしている。光で核スピンを直接に操作できないので、電子を介す。しかし、多くの場合、物質中の電子は緩和が速いので、孤立系であり汎用性のある原子を使う[1]。光により核スピン偏極した Cs 原子が、固体 Cs 塩の表面に吸着すると、Cs 核間の磁気双極子相互作用により、原子から塩にスピン偏極が移る。やはり双極子相互作用によりスピン偏極は固体中を拡散するが、スピン拡散長が短く、原子からもらった核スピン偏極は表面付近にとどまる。これは、表面近傍の核スピンドイナミクスを調べるのに適する。例えば CsCl の場合、スピン拡散長は  $\sqrt{DT_1} \approx$  数 10 nm と計算される。表面からスピン偏極を注入し、スピン拡散させる時間を調整すれば、最表面を選択することもでき、表面敏感な NMR 計測が可能である。

一方、表面だけでなく、マクロな結晶内部まで核スピン偏極するためには、双極子相互作用には頼れない。新たな輸送手段として結晶に持ち込むのは、イオンの併進運動である。Cs 塩は、超イオン伝導体ではないが、加熱すればイオンの易動度が格段に増加する。偏極イオンの拡散とともに、スピン角運動量も結晶中を速やかに拡散するはずである。電場による運動の制御も期待できるので、イオンをキャリアとしたスピン偏極の輸送を調べることは重要である。偏極(増大)ラベルした拡散計測は、通常の拡散 NMR 計測や、飽和(減少)ラベリング・拡散強調イメージングを補完する。

---

Hyperpolarization, Alkali-Metal Ions, Spin Diffusion

○いしかわ きよし

実験では、気体 Cs 原子を光ポンピングしながら、固体 Cs 塩 (CsCl, CsI) をレーザー加熱し、Cs イオンの NMR 信号を増大させた[2]。これまで、永久磁石 (0.56T) による成果を報告してきた[3,4]。併せて、今回は、超伝導磁石 (9.4T) 中で、同様に実験した。我々の偏極法の重要な物理過程である、光ポンピング[5]、表面におけるスピン偏極移行[6]が、高磁場中で機能することを実験的に示すことができた[7]。磁場が高く安定であるため、信号の増大率、線幅や化学シフトなどにより、固体中のスピン偏極の拡散についても詳しく調べることができた。

最後に、Cs 塩以外でも偏極 Cs イオンを観測できたことを報告したい。ガラス容器には、Cs 金属と窒素ガスのみを封入し、Cs 塩を添加していない。この容器に存在するイオンは、気体イオンあるいはガラス中のイオンである。強力なレーザー光を照射するので原子がイオン化されることもあろうが、NMR 検出できるほど気体中のイオン数は多くない。むしろ、観測された NMR 信号の線幅が広いので、ガラス中のイオンと考えられる。しかし、ホウ珪酸ガラスに元々含まれる Cs イオンは、ごく僅かである。したがって、気体からガラスに注入された偏極 Cs イオンが検出されたと考えるのが妥当である。Cs 塩では、双極子相互作用によりスピン偏極が注入 (Spin Exchange) されたので、角運動量を受け取る Cs 核が必要だった。しかし、ガラスに偏極イオンが注入 (Atom Exchange) されたのが事実だとすれば、他の物質にも応用可能な方法を手に入れたことになる。

- [1] 結晶の吸収帯は紫外域にあるが、励起電子の位相緩和は速いから、スピン偏極には使えないだろう。CsCl 結晶の格子欠陥である色中心の吸収帯は 600 nm 付近にある。色中心の電子を光でスピン偏極できるだろうが、核へのスピン偏極移行のためには電子スピン緩和を長くする、つまり、結晶を低温にする必要がある。それならば、初めから動的核偏極(DNP)をした方が良い。我々の実験では、ポンピング光は原子だけでなく Cs 塩にも照射されているが、光波長が原子の吸収波長に一致したときのみ、結晶中のイオンがスピン偏極する。色中心については、次の論文参照。H. Rabin and J. H. Schulman, **Color Centers in CsCl-Type Alkali Halides**, Phys. Rev. **125**, 1584 (1962).
- [2] レーザー光を絞り込んでいるので、試料全体に比べ、加熱している体積は小さい。高温になった試料のみのスピン偏極率は、試料全体で平均した観測値(0.1%)より高いだろう。
- [3] K. Ishikawa, **Spin polarization of salt nuclei by Optical pumping of Cs atoms and Laser heating of Cs salt**, ISNMR2011, L-20, Nov. 18 (2011) Yokohama.
- [4] K. Ishikawa, **Hyperpolarization of  $^{133}\text{Cs}$  nuclei enhanced by ion movement in a cesium salt**, Phys. Rev. A **84**, 061405R (2011).
- [5] 高磁場光ポンピングでは、レーザー波長により原子の光学遷移を選択できるので、励起光の偏向は最重要ではない。ランダム(無)偏光であっても良い。詳しくは、次の論文参照。K. Ishikawa, B. Patton, B. A. Olsen, Y.-Y. Jau, and W. Happer, **Transfer of spin angular momentum from Cs vapor to nearby Cs salts through laser-induced spin currents**, Phys. Rev. A **83**, 063410 (2011).
- [6] 原子とイオンが同じ  $^{133}\text{Cs}$  核なので、双極子相互作用によるスピン移行レートは、あまり磁場に依存しない。
- [7] 増大した Cs NMR 信号の符号など定性的な説明は可能だが、Cs 原子の光学遷移ごとの NMR 増大率など、定量的な議論には余地がある。