

# $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ におけるスピン状態保存の為の長コヒーレンス準位の探索

Exploration of hyperfine states with long coherence for spin-state storage in  $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$

北大工<sup>1</sup>, 北大院工<sup>2</sup>, 日本大<sup>3</sup>

○松浦 求磨<sup>1</sup>, 安井 翔一郎<sup>2</sup>, 鍛冶 怜奈<sup>2</sup>, 俵 毅彦<sup>3</sup>, 足立 智<sup>2</sup>

Fac. Eng. Hokkaido Univ.<sup>1</sup>, Grad. Sch. Eng., Hokkaido Univ.<sup>2</sup>, Nihon Univ.<sup>3</sup>

K. Matsuura<sup>1</sup>, S. Yasui<sup>2</sup>, R. Kaji<sup>2</sup>, T. Tawara<sup>3</sup>, S. Adachi<sup>2</sup>

E-mail: qmamatsuura@eis.hokudai.ac.jp

【はじめに】近年、広域量子情報ネットワーク構築のための量子メモリの研究が盛んである。特に通信波長帯光子と相互作用するエルビウム (Er) 添加結晶は既存ネットワークインフラの光ファイバー網を活用できるため、量子メモリに有望な固体材料の中でも注目されている。我々も同位体純化した  $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ (YSO)結晶 [1]を用いて、コヒーレンス時間等の基礎物性値測定 [2], 原子周波数コム量子メモリプロトコルの実証と高効率化 [3]を行ってきた。しかし実用的なメモリ時間 (>1 s)を実現するには、光学遷移を使って書き込まれる量子情報を  $^{167}\text{Er}^{3+}$ の超微細構造 (HF) 準位に転写する必要がある。これを実現し、かつオンデマンドの読み出しを可能とするプロトコルがスピン状態保存 (図 1) である。これによりメモリ時間を  $\mu\text{s}$  オーダーの光学遷移間コヒーレンス  $T_2^{\text{opt}}$  から秒オーダーの HF 準位間コヒーレンス  $T_2^{\text{hyp}}$  へ伸長することが可能となる。しかし  $^{167}\text{Er}$  (核スピン量子数  $I=7/2$ ) は HF 準位間に 120 ものマイクロ波遷移を持ち、どの 2 つの HF 準位を使うかで  $T_2^{\text{hyp}}$  は大きく異なる。本研究では、ホスト結晶 YSO からの磁気ノイズに不敏感であり、かつ長い  $T_2^{\text{hyp}}$  を有する HF 準位を計算により探索することを目的としている。

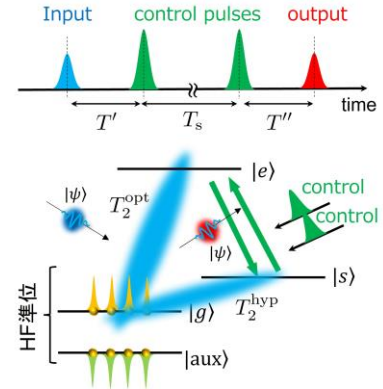


図 1. パルスシーケンスとスピン状態ストレージの概念図。

【結果と考察】  $\text{Er}^{3+}$  周りの  $\text{Y}^{3+}$  の核スピン揺らぎ (磁気ノイズ) は Er 電子のエネルギー準位を変化させると共に、superhyperfine 相互作用を介して Er 電子のデコヒーレンスを誘起する。  $\text{Y}^{3+}$  が作る磁気ノイズ  $\Delta\mathbf{B}$  は

$$\Delta\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{3(\boldsymbol{\mu}_Y \cdot \mathbf{r}_i)\mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_i|^5} - \frac{\boldsymbol{\mu}_Y}{|\mathbf{r}_i|^3} \right]$$

と表せる。上式で  $\mathbf{r}_i$  は  $\text{Er}^{3+}$  とその周辺の  $i$  番目の  $\text{Y}^{3+}$  との距離である。図 2 の挿入図に示す様に、  $\text{Er}^{3+}$  周りには、核スピンをもつ  $^{89}\text{Y}$ (100%),  $^{29}\text{Si}$ (4.7%),  $^{17}\text{O}$ (0.04%)があるが、存在比から  $\text{Y}^{3+}$  の影響が大きいと考えられる。  $\text{Y}^{3+}$  の磁気モーメント  $\boldsymbol{\mu}_Y$  の方向をランダムに設定して、  $\Delta\mathbf{B}$  を 50 万回反復計算した。図 2 に示す様にサイト 1 に位置する  $\text{Er}^{3+}$  が近接の  $N=100$  個の  $\text{Y}^{3+}$  から受ける  $\Delta\mathbf{B}$  はおよそ  $\sim 8 \mu\text{T}$  であった。周辺の  $\text{Y}^{3+}$  数を変えて同様の計算をした結果、近接する  $\sim 30$  個の  $\text{Y}^{3+}$  が主に磁気ノイズ生成に寄与していることが分かった。ここで評価した核スピン揺らぎが誘起するデコヒーレンスを回避するためには、Zeeman 分裂エネルギーが磁場に対して緩やかな準位対を用いる必要がある。講演ではスピンハミルトニアンを用いた HF 準位構造計算も交え、  $T_2^{\text{hyp}}$  の長時間化の展望について議論する。

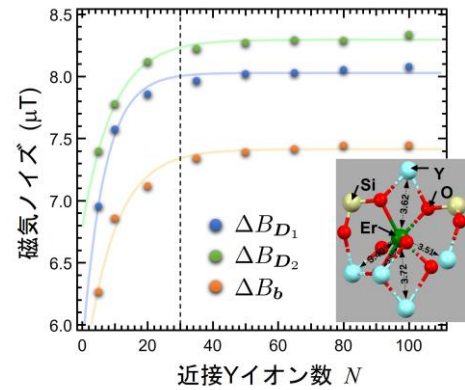


図 2. (D1, D2, b) 光学直交座標系での Er 電子が感じる磁気ノイズの大きさとその  $\text{Y}^{3+}$  数依存性。挿入図: サイト 1  $\text{Er}^{3+}$  周りの原子配置 [4]。

- [1] T. Tawara *et al.*, Appl. Phys. Express **10**, 042801 (2017). [2] S. Yasui *et al.*, Opt. Express **29**, 27137 (2021). [3] S. Yasui *et al.*, Opt. Cont. **1**, 1896 (2022). [4] B. Car *et al.*, PRB **102**, 115119 (2020).