

実験結果

中性子非弾性散乱実験による磁気励起測定と SQUID 磁束計による磁化測定を行うことによって、スピン・ネマティック相互作用の検出を試みた。中性子非弾性散乱実験によって観測された、反強磁性スピン波について、 $Q=(1,0,0)$ 近傍の低エネルギー励起を図 2(a)に示す。0.1 meV 程度の明瞭な磁気異方性ギャップが存在することがわかる。この磁気励起スペクトルを、スピン・ネマティック相互作用 $-J_p^{\text{eff}} \sum O_{XY}(i)O_{XY}(j)$ を考慮したスピン・ハミルトニアンで解析すると、図 2(a)の白線のように実験結果がよく説明される。この実験で得られるスピン・ネマティック相互作用定数は $J_p^{\text{eff}} = 0.198 \mu\text{eV}$ であり、これは電気分極の静電エネルギーにもなっている。

c 面内の様々な方向に磁場を印加した場合の静磁化率を図 2(b)に示す。[110]及び[-110]方向に磁場を印加した場合に、スピフロップ転移による磁化率の増大が $H=3000$ Oe 付近に観測される。[110]と[-110]方向のみで転移が観測される 4 回対称な振る舞いから、スピン・ネマティック相関は図 1(b)で示すように反強ネマティック的であることが示される。 $J_p^{\text{eff}} = 0.198 \mu\text{eV}$ とした場合の $T=0$ K における静磁化率の計算値は図 2(c)のようになり、実験結果を再現することがわかる。以上のように、磁気励起と磁化率の測定により、スピン・ネマティック相互作用の存在が明らかにされた。また、スピン・ネマティックエネルギーと電気分極の静電エネルギーを定量的に見積もることが出来た。

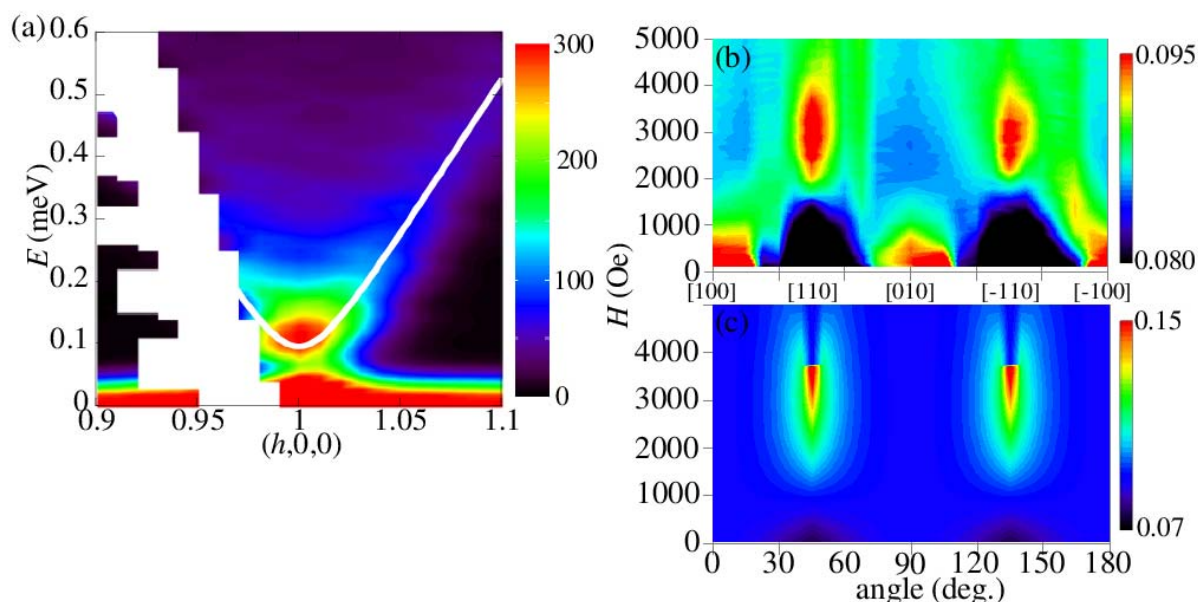


図 2 (a) $Q=(1,0,0)$ 近傍での中性子非弾性散乱強度マップ。白線は、スピン・ネマティック相互作用を考慮したモデル計算を示す。(b) c 面内における静磁化率の方向依存性の実験結果。(c) c 面内における静磁化率の方向依存性の計算結果。

今後の展開

電場印可による磁性制御に注目した電気磁気効果の研究は、基礎・応用両分野で重要になっている。今回の研究において、 $\text{Ba}_2\text{CoGe}_2\text{O}_7$ では電気分極がスピン・ネマティック演算子と等価であり、磁気異方性がスピン・ネマティック相互作用によって決定されていることが明らかになった。基底状態は、図 1(b)に示すように、反強誘電/反強ネマティック的秩序が存在し、スピンは $\langle 100 \rangle$ 方向を向く状態が実現している。ここでもし、 $\langle 001 \rangle$ 方向に電場を印可して電気分極の方向を揃え、図 1(c)に示す強誘電/強的ネマティック状態が実現されれば、スピンは 90 度回転し、 $\langle 110 \rangle$ 方向を向く。すなわち、スピンの方向を電場によってコントロールできることが期待され、新しい電気磁気効果の可能性が示唆されている。スピン・ネマティック相互作用の大きさを示す J_p^{eff} は、スピンが $\langle 100 \rangle$ 方向を向いた状態と $\langle 110 \rangle$ 方向を向いた状態とのエネルギー差を表しており、その値が小さいほどスピンをコントロールしやすい。したがって、 J_p^{eff} はこの電気磁気効果の特徴的なパラメーターとなっている。今後は、当該物質における磁気モーメントの方向を電場で制御する研究や、 J_p^{eff} の大きさが異なるマルチフェロイック物質の系統的な探索が重要である。

なお、本研究の詳細な内容は、M. Soda, M. Matsumoto, M. Månsson, S. Ohira-Kawamura, K. Nakajima, R. Shiina, and T. Masuda, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 127205 (2014). で閲覧することができます。

謝辞

本研究成果は、松本正茂教授(静岡大学)、椎名亮輔准教授(新潟大学)、Martin Månsson 博士(PSI)、河村聖子博士(日本原子力研究開発機構)、中島健次博士(日本原子力研究開発機構)との共同研究によるものです。また、Andrey Zheludev 教授(ETH)、Severian Gvasaliya 博士(ETH)から中性子実験等において有益なコメントを頂きました。本研究の一部は、文科省科研費(24340077, 20740171, 24740224, and 23540390)の支援を受けて行われました。

参考文献

- [1] T. Kimura, T. Goto, H. Shintani, K. Ishizaka, T. Arima and Y. Tokura. *Nature* **426**, 55–58 (2003).
- [2] S. Seki, Y. Onose and Y. Tokura. *Phys. Rev. Lett.* **101** 067204 (2008).
- [3] H. Katsura, N. Nagaosa, & A. V. Balatsky. *Phys. Rev. Lett.* **95**, 057205 (2005).
- [4] C. Jia, S. Onoda, N. Nagaosa, & J. H. Han. *Phys. Rev. B* **76**, 144424 (2007).
- [5] H. Murakawa, Y. Onose, S. Miyahara, N. Furukawa, & Y. Tokura. *Phys. Rev. Lett.* **105**, 137202 (2010).
- [6] J. Romhányi, M. Lajkó, & K. Penc. *Phys. Rev. B* **84**, 224419 (2011).