



は2回対称性を有する3組の重ね合わせで説明がほぼできる。動的なヤーン・テラー歪の周波数、すなわちヤーン・テラー周波数  $\nu_{JT}$  は、観測周波数  $\nu_{EM}$  に対して  $\nu_{JT} \sim 0.1 \nu_{EM}$  と表せる[9]ので、1.5 Kにおいて揺らぎの周波数は10ギガヘルツ程度(100ピコ秒)であることがわかった。このヤーン・テラー周波数の温度変化を図3に示している。図中の高温低周波数では角度変化を示さない等方的なシグナルが観測されて熱的に動的ヤーン・テラー効果が起こっていることを示しており、低温高周波数では2回対称性を示す三組のシグナルの重ね合わせで表され、低温低周波数では6回対称性を示しながらほぼ等方的なシグナルが観測されている。それに伴って、ヤーン・テラー周波数は高温から低くなり、20ケルビン以下で一定(約10ギガヘルツ)になる振る舞いが観測された。このことから低温においても軌道は揺らぎ続けていることが明らかになり、その時間スケールの観測に成功した[10]。

### 今後の展開

通常、静的なヤーン・テラー転移により構造相転移をする銅酸化物において、なぜこの化合物が最低温度まで軌道秩序しないのかに関して述べて、今後同様な軌道液体状態を示す化合物の研究に資するようにしたいと思う。6H-Ba<sub>3</sub>CuSb<sub>2</sub>O<sub>9</sub>はCuO<sub>6</sub>八面体がヤーン・テラーイオンでないSb<sup>5+</sup>イオンのSbO<sub>6</sub>と面共有をしており、CuO<sub>6</sub>が歪みにくくなっている。また、隣通しのCuO<sub>6</sub>八面体が酸素イオンを共有しておらず、Cu-O-O-Cuのようにつながっているため、一つのCuO<sub>6</sub>八面体の動きが隣のCuO<sub>6</sub>八面体にあまり拘束されることもない。このような特徴を持つヤーン・テラー活性をもつ遷移金属化合物が得られれば軌道液体状態が実現するのではないかと思われ、さらなる研究へ発展する可能性がある。

### 謝辞

大阪大学大学院理学研究科の野末泰夫教授、中野岳仁博士、物性研究所中辻研究室の木村健太博士(現大阪大学)、Mario Halm博士との共同研究によるものである。名古屋大学の澤博教授、片山尚幸准教授、大阪大学の若林裕介准教授、東北大学の石原純夫教授、東京大学的那須譲二博士、ジョンホプキンス大学のC. Broholm教授とはいろいろ議論させていただいた。本研究は科学研究費補助金(No. 242440590と25707030)、グローバルCOEプログラム(物質の量子機能の解明と未来型機能材料創出)、JSTのPRESTO、National Science Foundation of China(No. 11104097)の援助を受けて行われた。

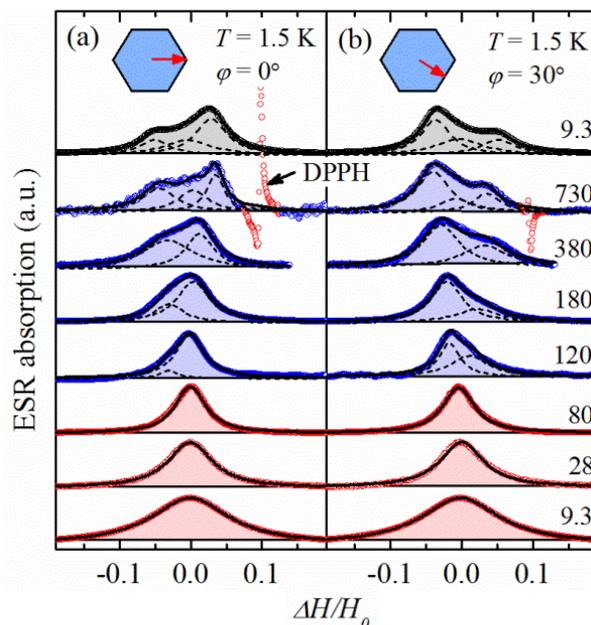


図2. 1.5ケルビンでのESRスペクトルの周波数変化。六方晶のc面内の磁場を印加した方向を赤い矢印で示している。横軸は共鳴磁場で規格化している。破線はいくつかのローレンツ関数によるフィッティングを示す。DPPH( $g=2.0036$ )はESRの標準試料で、シグナルはパルス磁場の較正に使用している。

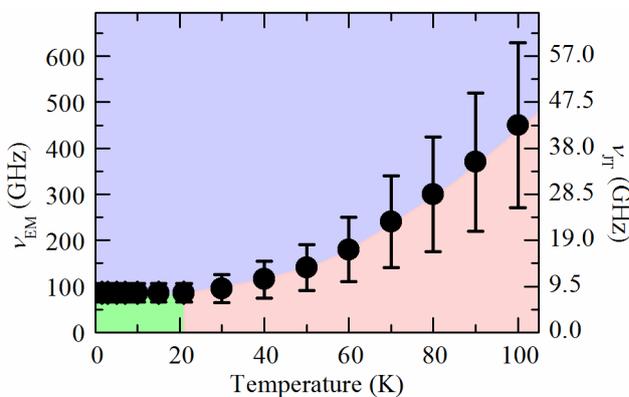


図3. 観測した周波数  $\nu_{EM}$  と軌道の揺らぎの周波数  $\nu_{JT}$  の温度変化のグラフ。丸印が各温度での揺らぎの周波数を表し、20 K以下で一定値(約10ギガヘルツ、100ピコ秒)になる。

## 参考文献

- [1] P.W. Anderson, Mater. Res. Bull. **8**, 153 (1973).
- [2] 磯野貴之、上田顕、森初果、物性研だより第 54 巻第 3 号 12 (2014).
- [3] F. Reynaud *et al.*, Phys. Rev. Lett. **86**, 3638 (2001).
- [4] V. Fritsch *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 116401 (2004).
- [5] J.-H. Chung *et al.*, Phys. Rev. B **71**, 064410 (2005).
- [6] R. Fichtl *et al.*, J. Non-Cryst. Solids **351**, 2793 (2005).
- [7] S. Nakatsuji *et al.*, Science **336**, 556 (2012).
- [8] N. Katayama *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **112**, 9305 (2015).
- [9] I.B. Bersuker, Soviet Phys. JETP **17**, 836 (1963).
- [10] Y. Han *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 180410(R) (2015).