トポロジカル状態の動的スピン磁化率による検出

中村研究室　　　坂上和海

トポロジカル絶縁体とは、スピン軌道相互作用によって試料の端 (3 次元の場合、表面) にスピン流が現れる物質である。その検出方法として直接電気伝導率を測定する接触型、電子スピン共鳴による動的スピン磁化率を観測する非接触型がある。

スピン軌道相互作用を持つ 2 次元 Dirac 系において、$\boldsymbol{B} \neq 0$ の場合、トポロジカルと自明な状態は一番低い Landau 準位の電子スピン共鳴を観ることで判別出来る。本研究では動的スピン磁化率に焦点を当てる。この虚部ははっきりとした共鳴構造を持ち、トポロジカル状態の簡単な指標を得ることが出来る。この方法を Kane-Mele 模型に適用した [1] では、一番低い Landau 準位が Zeeman 効果存在のもと、異常な振る舞いをみせ、トポロジカル状態を判別できる指標となった。これを Bernevig-Hughes-Zhang（BHZ）模型への応用を行った。

BHZ 模型のハミルトニアンは以下のようになる。

$$\mathcal{H} = \begin{bmatrix} H(\boldsymbol{k}) & 0 \\ 0 & H^*(-\boldsymbol{k}) \end{bmatrix} \tag{1}$$

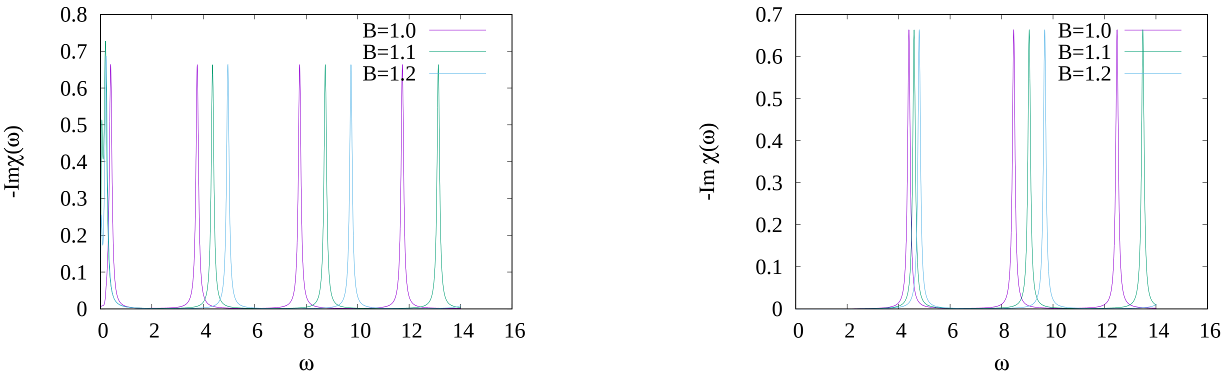
ここで $H(\boldsymbol{k}) = \epsilon(\boldsymbol{k}) + d_i(\boldsymbol{k})\sigma_i$、$\sigma_i$ は Pauli 行列であり、$d_1 + \mathrm{i}d_2 = A(k_x + \mathrm{i}k_y) \equiv Ak_+$、$d_3 = M - B(k_x^2 + k_y^2)$、$\epsilon_k = C - D(k_x^2 + k_y^2)$。$A, M, B, C$ は定数であり、M は Dirac 質量変数である。磁場の無い場合での Hall 伝導率を計算すると、

$$\sigma_{xy}^s = -\frac{e^2}{2h}(\mathrm{sgn}(M) + \mathrm{sgn}(B)) \tag{2}$$

となる。これは系が $MB > 0$ でトポロジカル状態を意味している。そして、静磁場中での動的スピン磁化率の虚部は

$$-\mathrm{Im}\chi_{xx}(\omega) = \omega\frac{\hbar^2}{8l^2}\Big[\sum_{n=1}^{\infty}\delta(\tilde{E}_n^s + \tilde{E}_n^{\bar{s}} - \omega) + \delta(2(M - \frac{B}{l^2})/\hbar - \omega)\Big] \tag{3}$$

(3) 式を $MB > 0$ と $MB < 0$ について磁場を変えてそれぞれプロットしたものが (a) と (b) である。(b)(自明な状態) は磁場 (単位は T) を強めるとピークは正の方向にシフトする。一方 (a)(トポロジカル状態) は一番低い Landau 準位 $n = 0$ のピークの振る舞いが異なる。よって BHZ 模型においても動的スピン磁化率の虚部は、トポロジカル状態を判別できる指標となることがわかった。



(a) $MB > 0$, トポロジカル状態

(b) $MB < 0$, 自明な状態

[**1**] M. Nakamura and A. Tokuno, Phys. Rev. B **94**, 081411(R) (2016)