

伝送線共振器ネットワークにおける熱雑音暗状態の カイラル対称性と超演算子

兵庫県立大学 大学院 理学研究科, Midjourney Inc.^A

石川 潔, B. Patton^A

Superoperator for chiral symmetry analysis of dark thermal noise in transmission line resonator networks

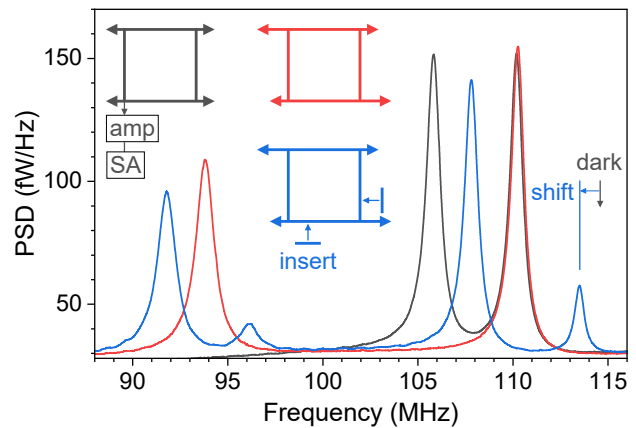
University of Hyogo, Midjourney Inc.^A

Kiyoshi Ishikawa, Brian Patton^A

両端を接地した同軸ケーブルは RF 共振器になる [1]. 実験では, この伝送線共振器を結合したネットワークで発生する熱雑音を測定した. 互いに干渉しない熱雑音は, 共振器ネットワークの電氣的性質, 固有モード, トポロジーを調べるのに有用である. 通常, スペクトラムアナライザで計測する熱雑音スペクトルには, 共振器数に等しい数のモードによる共鳴ピークが現れ, 各モードには熱エネルギーが等分配される. しかし, 我々は共振器の結合点で電圧を測るので, 図 1(黒, 赤)のように, その結合点で波が節(結合点を挟んで波が反対称)になるモードは観測できない. ここでは, 観測できない固有モードを暗状態と呼び, 暗状態を通してネットワークの対称性について考える.

共鳴周波数が等しい共振器を環状に結合したネットワーク(リング)では, 暗状態は, 全ての結合点で反対称な, 周波数が最も高いモードである. 一方, 全ての結合点で対称なモードは, どの結合点でも観測でき, 最も周波数が低い. それらの中間に, 他のモードの固有周波数がある. 次に, リングの幾何学的対称性 C_{4v} (黒), C_{2v} (赤)を崩すと, 節が結合点からずれ, 図 1(青)のように暗状態が観測される. トポロジカルな性質を調べるため重要なのは, 幾何学的対称性を崩す摂動の対称性である. ここでは, 摂動とリングのカイラル対称性に注目する. トポロジカルに保護されていれば, ネットワークに内在する望まない摂動(共振器長, 結合係数, 分布定数 L, C, R の変調など)に耐性のあるモードになる. 講演では, カイラル対称性を調べるための超演算子, リングのトポロジカル相, 2D 伝送線ネットワークについて議論する.

図 1. 伝送線共振器 4 個からなるカイラル対称なリングに発生する熱雑音スペクトル. それぞれのリングに対応する色(黒, 赤, 青)でスペクトルを表示した. 共振器長や結合強度が等しいとき, 暗状態は 114.6 MHz にあり, 4 つのモードは 110.2 MHz を中心に対称に分布する(黒). 結合を変調しても暗状態は観測できない(赤). 共振器長を変調すると幾何学的に非対称になり, 固有周波数が平均値 102 MHz を中心に対称に分布したまま, 元々暗状態だった状態が観測される(青).



- [1] 伝送線による共振器ネットワークの熱雑音と PT 対称性, 日本物理学会年次大会, 17aSK109-1 (2025),
伝送線共振器ネットワークにおける熱雑音のブロッホスピンの表示, 日本物理学会春季大会, 23aA2-12 (2026).