

2次元量子スピンホール系による熱電輸送

東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻、高橋隆志

東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻、さきがけ-JST、村上修一

量子スピンホール(QSH)効果は、バルクは非磁性絶縁体ですが、バルク状態のギャップを横切るようにエッジ状態が存在します。この一つのエッジ状態は互いに逆向きのスピンの逆方向に進む状態を持ち、非磁性不純物等の存在下でも後方散乱を受けず(完全透過)、ギャップレス(金属的)であるという著しい性質を持っています。当初理論的に提唱されましたが、実験でもHgTeをはじめとした幾つかの物質でも確かめられています。QSH物質の2次元QSH系におけるエッジの完全透過電流は時間反転対称性を崩さない限り安定であり、なおかつバルクギャップが量子ホール系などに比べると非常に大きい(Bi_2Se_3 で0.3eV)という特性を持ちます。

これらの特性から、エッジ状態の輸送を活用することによって熱電変換効果を大きくするのはないかとの予測の下、2次元QSH系でのエッジ状態とバルク状態が共存した場合での輸送特性を計算しました[1]。一般的にエッジ状態数はバルク状態に比べると断然少ないため、エッジ状態の寄与が大きくなるように、ナノメートルサイズの断面積を持つナノサイズリボン状の系を想定しました。エッジ状態はコヒーレントであることを仮定してランダウアー公式で計算しました。その際に用いるべき系の有効長さサイズはエッジ状態の非弾性散乱長となります。熱電変換効率を特徴付ける性能指数 ZT は電気伝導率、ゼーベック係数、熱伝導率から計算でき、得られた結果が図1になります。個々の物質に限定しない普遍的な性質を探るため、図1では、バルク輸送に対するエッジ輸送の比を表す r と、バルク輸送に対するフォノンによる熱輸送の比を表す g という2つの無次元パラメータで ZT を表しています。化学ポテンシャルがバルクバンドエッジ付近にある場合、エッジ状態はバルク状態とは反対符号の電荷を持ちます。そのため、エッジ状態とバルク状態の熱電輸送現象は競合し、どちらかが支配的であるかは系の形状、温度などさまざまなパラメータによって決まるという結果が得られました。また、エッジ状態が優勢な状況ではバルク状態が優勢な状況に比べて、 ZT のフォノンの熱伝導依存性が低く、大きな性能指数 ZT が期待できる可能性を秘めています。エッジ状態の優勢度にはエッジの非弾性散乱長が大きく影響し、低温になるとエッジ状態の非弾性散乱長が長くなるため、バルクが優勢な状況からエッジ状態が優勢な状況へとクロスオーバーが起こります。温度を下げていってクロスオーバーが起こる際、 ZT は極小となりエッジが優勢になると再び増加します。このクロスオーバーは非常に細いリボンの場合は5-20K程度で起こることを理論的に見出しました[1]。

個々の物質に限定しない普遍的な性質を探るため、図1では、バルク輸送に対するエッジ輸送の比を表す r と、バルク輸送に対するフォノンによる熱輸送の比を表す g という2つの無次元パラメータで ZT を表しています。化学ポテンシャルがバルクバンドエッジ付近にある場合、エッジ状態はバルク状態とは反対符号の電荷を持ちます。そのため、エッジ状態とバルク状態の熱電輸送現象は競合し、どちらかが支配的であるかは系の形状、温度などさまざまなパラメータによって決まるという結果が得られました。また、エッジ状態が優勢な状況ではバルク状態が優勢な状況に比べて、 ZT の

フォノンの熱伝導依存性が低く、大きな性能指数 ZT が期待できる可能性を秘めています。エッジ状態の優勢度にはエッジの非弾性散乱長が大きく影響し、低温

になるとエッジ状態の非弾性散乱長が長くなるため、バルクが優勢な状況からエッジ状態が優勢な状況へとクロスオーバーが起こります。温度を下げていってクロスオーバーが起こる際、 ZT は極小となりエッジが優勢になると再び増加します。このクロスオーバーは非常に細いリボンの場合は5-20K程度で起こることを理論的に見出しました[1]。

【参考文献】

[1] R. Takahashi, S. Murakami, arXiv:0910.4827.

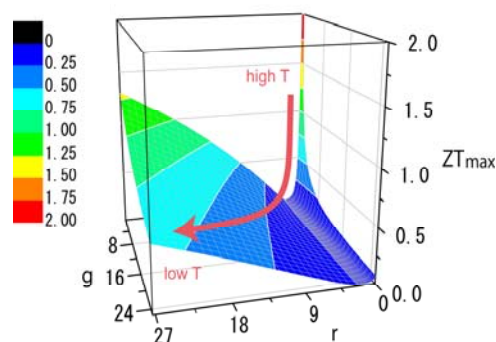


図1: 無次元物質パラメータ r と g による ZT_{\max}