



令和3年12月17日

極低温における電子エネルギーの一般的振る舞いを理論的に解明

論文掲載

【本研究成果のポイント】

- ・物質中の電子たちがもつエネルギーの振る舞いが一目で分かる定理を証明
- ・トポロジカル物質⁽¹⁾などを理解するための基本的指針を与える

【概要】

広島大学大学院先進理工系科学研究科量子物質科学プログラムの多田靖啓准教授は、物質中の電子たちのもつエネルギーがどのように振る舞うのかが一目で分かる定理を理論的に証明しました。このような定理は、物質の近似的なモデルに対しては成り立つことが知られていましたが、より現実的なモデルで成立するかは分かっていませんでした。今回証明された定理は、これまでより広範で現実的なモデルに対して成り立ち、さまざまな物質の極低温での振る舞いについての理解を深める上で基礎となるものです。さらにこの定理は、トポロジカル物質⁽¹⁾などの興味深い物質を探索するために役立つことが期待されます。

本研究の成果は、米国の物理学誌 Physical Review Letters のオンライン版に2021年12月3日に掲載されました。

論文情報：

- ・掲載誌：Physical Review Letters
- ・論文タイトル：Lieb-Schultz-Mattis Theorem in Higher Dimensions from Approximate Magnetic Translation Symmetry
- ・著者名：Yasuhiro Tada
- ・DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.237204>

【背景】

身の回りの物質を冷やすとき、冷えやすさは物質によってさまざまです。特に、絶対零度近くまで冷やすときには物質の個性が如実に現れてきて、絶縁体は冷えにくい一方で、金属は冷えやすいという特徴がみられます。この違いは、電子が熱を素早く運ぶことができるかどうかで決まり、物質の中にたくさんいる電子たちのもちうるエネルギーの分布の様子（エネルギー・スペクトル⁽²⁾）に着目することで理解することができます（図1）。さらに、冷えやすさだけでなく、物質のもつさまざまな性質はエネルギー・スペクトルによって定められています。

単純な物質では電子のエネルギー・スペクトルを理論的に計算することができますが、一般的には、スーパーコンピューターを用いても正確な計算を行うことは不可能です。エネルギー・スペクトルの振る舞いを解明することは、物性物理学の基本問題の一つです。

これに関して、物質中の電子に対する近似的なモデルにおいては、電子の密度だけで低エネルギー・スペクトルの基本構造が定まってしまうという普遍的な性質が理論的に示されており、Lieb-Schultz-Mattis の定理として知られています。この定理はさまざまな形で拡張されてきましたが、現実の物質中で電子同士がクーロン相互作用⁽³⁾する場合については証明がなく、定理が成り立つのかどうか分かっていませんでした。

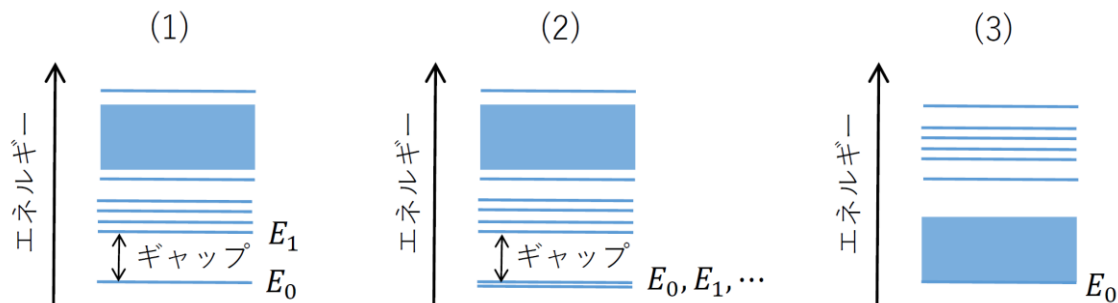


図 1：エネルギー・スペクトル $\{E_0, E_1, E_2, \dots\}$ 。1本1本の線がエネルギーの値を示しており、連続して分布する場合はべったりと色塗りしてあります。低エネルギー領域のスペクトルの構造は3つに大別され、(1) E_0 と E_1 の間にギャップがあるもの、(2) E_0 と E_1 などの値が等しいがそれらの上にギャップがあるもの、(3) E_0 の上にギャップがなく連続的に E_1, E_2, \dots が分布しているものがあります。これら3つは、それぞれ全く異なる物質の様子を表しています。

【研究成果の内容】

今回、多田准教授は、近似的モデルを超えて電子がクーロン相互作用する現実的なモデルでも、Lieb-Schultz-Mattis の定理が成り立つことを理論的に証明しました。この定理は、単純な絶縁体や金属の判別だけでなく、自発的対称性の破れ⁽⁴⁾やトポロジカル秩序⁽¹⁾などの興味深い性質を示す物質の候補を絞り込む際にも有用であり、この分野における大きな成果だと言えます。

本研究は、科学研究費 17K14333 (代表：多田靖啓) の支援の下に行われました。

【今後の展開】

今回証明された定理には、たくさんの応用が考えられます。その一つが超伝導体であり、この定理から導き出される理論的帰結は、これまで広く信じられてきたものとは定性的に異なります。また、証明に用いられたテクニックは、さまざまなモデルに拡張して適用することができます。今後は、これらの場合について議論を発展させていくことが重要となります。

【参考資料】

1. トポロジカル物質、トポロジカル秩序

物質の中には、トポロジーという数学的性質と深く関係しているものがあり、総称としてトポロジカル物質と呼ばれています。このような物質は秩序だった性質を示すので、その様子をトポロジカル秩序と呼びます。

2. エネルギー・スペクトル

一つの物質の中で電子集団がもつことのできるエネルギーは、 E_0, E_1, E_2, \dots のようにその値が定まっており、とりうるエネルギー値の一覧 $\{E_0, E_1, E_2, \dots\}$ をエネルギー・スペクトルと呼びます (図 1)。より正確には、本研究で議論されているものは、電子集団全体についての多体エネルギー・スペクトルというものです。

3. クーロン相互作用

電子は電荷をもっており、電気的な相互作用でお互い反発しあっています。この相互作用はクーロン相互作用と呼ばれており、一般には、電子同士が非常に離れているときでも大きな効果をもたらします。その一方、このような長距離性は理論的取り扱いが難しいことが知られています。

4. 自発的対称性の破れ

例えば棒磁石について、高温では棒磁石の両端のどちらが S 極になりどちらが N 極になるかは定まっておらず、低温に冷やすとその向きが決定されます。前者の状態を対称的な状態といい、後者を対称性の破れた状態と呼びます。S 極と N 極の向きは冷やす過程でほぼ自然選択的に決定されるので、「対称性が自発的に破れる」と表現されます。

【お問い合わせ先】

広島大学大学院先進理工系科学研究科量子物質科学プログラム

准教授 多田靖啓

Tel : 082-424-7017

E-mail : ytada@hiroshima-u.ac.jp

発信枚数 : A4版 3枚 (本票含む)