

I ツイストした2層グラフェンの電子状態の理論

Theoretical study of electric properties in twisted bilayer graphene

長谷川泰正

Hasegawa, Y.

蜂の巣構造の炭素原子からなる2次元のグラフェン2層が小さな回転角をなして重なったツイストした2層グラフェンが、最近大きな関心を集めている。単層グラフェンも、2次元の質量ゼロのディラック粒子が実現し、量子ホール効果が観測されるなど、実験的にも理論的にも非常に興味深い物質である。グラフェンを角度をつけて2層重ねたツイスト2層グラフェンでは、マジックアングルとよばれる約1度のツイスト角の場合、ディラック点での電子の速度がゼロになることが理論的に示されていた。最近マジックアングルの2層グラフェンが実験で確かめられ、さらに、運動エネルギーが相対的に小さくなることにより、電子間相互作用の効果が大きくなり、絶縁体になったり超伝導状態にもなることが観測された。我々は、強束縛モデルを用いてツイストした2層グラフェンの電子状態を理論的に調べ、2層間の距離とマジックアングルの関係を得ることができた。大きな回転角の場合でも、層間距離を小さくしていくと、もともとあったディラック点の周りに3つのディラック点が近づいてきて、4つのディラック点が重なったときに、電子の速度がゼロになることが示された。このことによりマジックアングルでの速度がゼロとなる機構が明確になった。

II 質量ゼロディラック粒子の 磁場によるエネルギー量子化の理論

Theoretical study of energy quantization of massless Dirac fermions
by magnetic field

長谷川泰正

Hasegawa, Y.

グラフェンや擬2次元分子性導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ では、二つのバンドが波数空間の一点でのみ交差し、その点のまわりのエネルギーが波数の1次の依存性を示すことが最近実験的に明らかになり、質量ゼロのディラック粒子として興味をもたれている。これらの物質に磁場が加えられるとエネルギーが量子化されて、エネルギーゼロの状態が出現した

り通常とは異なる磁化の量子振動などが現れる。また、圧力下の黒リンでも、ディラック粒子が実現されている可能性が最近議論されており、兵庫県立大学物質理学研究科の水戸毅教授、藤井拓斗博士などのグループにより核磁気共鳴 (NMR) の実験もなされている。黒リンでは3次元性が強いため、3次元質量ゼロのディラック粒子またはノーダール半金属が実現していると考えられている。3次元質量ゼロのディラック粒子が実現した場合の磁場によるエネルギー量子化を理論的に調べ、実験結果の解析に参加した。

III 超伝導体 Sr_2RuO_4 の理論

Theory of superconductivity in Sr_2RuO_4

長谷川泰正

Hasegawa, Y.

Sr_2RuO_4 は、銅酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ と同じ結晶構造を持つ擬二次元的超伝導体である。銅酸化物高温超伝導体は、多くの実験から、通常の超伝導体と同じように2つの電子がスピンシングレットクーパーペアを作っており、超伝導オーダーパラメータに方向依存性があり符号も変わるスピンシングレット d 波超伝導であろうと考えられている。一方、 Sr_2RuO_4 は、発見当初からスピントリプレット超伝導体の可能性が指摘され、超伝導状態での比熱、帯磁率などの温度依存性、超伝導状態での時間反転対称性の破れなどの実験から、時間反転対称性を破ったスピントリプレット p 波超伝導体であると考えられ、多くの研究がなされてきた。ところが、近年、超伝導状態での帯磁率の測定手段である NMR ナイトシフトの実験を一軸圧力下で精密に行う実験がなされ、従来考えられていたスピントリプレット p 波超伝導という理論を見直すべきではないかという議論がなされている。我々は、空間依存性と磁場の効果を正確に取り扱える方法である Ginzburg-Landau 理論を用いて、 Sr_2RuO_4 と Ru の共晶系での Sr_2RuO_4 の超伝導転移を理論的に調べた。 Sr_2RuO_4 が時間反転対称性を破った超伝導であるとして計算した結果、磁場の方向が Sr_2RuO_4 の伝導面に平行か垂直かによって、温度と磁場の強さの相図に特徴的な違いがあるという結果が得られ、実験と良く一致する結果が得られた。

発表論文 List of Publications

I-1 Aya Yamada and Yasumasa Hasegawa:

Merged Four Dirac Points at the Critical Interlayer Distance in Commensurately Twisted Bilayer Graphene: The Origin of the Zero Velocity,
Journal of the Physical Society of Japan **90**, 024703 (10 pages) (2021).

II-1 藤井拓斗, 中井祐介, 上田光一, 赤浜裕一, 平田倫啓 (東北大金研), 水戸毅, 長谷川泰正:

3次元ディラック物質黒リンにおけるランダウ量子化の考察,
日本物理学会 2021 年秋季大会 (物性 2021/9/8-11), オンライン開催.

III-1 兼安洋乃, 大塚剛生, 長谷川泰正:
non-unitary な自発磁化超伝導と電流,
日本物理学会 2021 年秋季大会 (物性 2021/9/8-11), オンライン開催.

III-2 大塚剛生, 長谷川泰正, 兼安洋乃:
Non-unitary 超伝導における磁化率と磁場誘起 chiral 安定化,
日本物理学会第 76 回年次大会 (2021 年, 2021/3/12-15), オンライン開催.