

グラフェン系における弱磁場磁気伝導率の公式

固体の電気伝導に対する磁場効果は、電流を運ぶキャリアの性質を理解するためだけではなく、応用上も大変重要である。電気伝導率の久保公式を出発点として、磁気抵抗で重要となる伝導率の弱磁場補正、すなわち、磁場の自乗に比例する磁気伝導率の公式が導出された。線形なエネルギー分散を持つグラフェン系の場合には、それは六角形のファインマン図形で表される。最も簡単な近似の計算により、磁気伝導率はゼロエネルギー付近で二つの鋭いピークを持つことが示された。

導体に流れる電流と垂直な方向に磁場を加えると、電流と磁場の両方に垂直な方向に電圧が発生する。このホール効果を利用したホール素子は、現在、電子機器やモーターなどに幅広く利用され、我々の生活に欠かせないものになっている。このホール効果は、キャリアである電子が磁場によるサイクロトロン円運動により軌道が曲がるために現れる現象であり、電界と垂直方向の電流を表すホール伝導率で記述される。このホール伝導率は磁場に比例して増大する。一方、サイクロトロン運動により電流方向の伝導率も減少する。その効果は磁場の上下の向きに依らないので、磁場の自乗に比例する。

電気抵抗は、通常、細長いホールバー型の試料に電流を流し、その方向の電圧降下から測定される。その電流は、対角伝導率による電流に、ホール効果で発生した電界によるホール電流が加わる。簡単なボルツマン方程式によれば、単一キャリアの場合、対角伝導率の磁場による減少とホール電流による増加が完全に打ち消し合い、電流は磁場により変化しない。すなわち磁気抵抗はゼロとなる。

磁気抵抗効果が現れる場合もある。例えば、局在スピンのキャリアの散乱に寄与する場合には、外部磁場によってスピンが揃い、散乱が減少し、負の磁気抵抗効果が現れる。また、不規則性が強い場合、散乱の干渉効果による後方散乱の増大と減少により、弱局在効果や反局在効果が現れる。磁場はこの干渉効果に強く影響を及ぼし、負または正の磁気抵抗効果を引き起こす。もちろん、電流に寄与するキャリアの種類が複数の場合には、対角伝導率とホール効果の打ち消しが完全ではなく、磁気抵抗効果が現れる。

グラフェン上の電子の運動は質量が零でギャップのないワイル方程式で記述される。不純物などの散乱体があると、それによるポテンシャル揺らぎのために、ゼロエネルギー付近の電子は正のエネルギーの電子と負のエネルギーのホールの両方の性質を併せ持ち、さらに、ゼロエネルギー付近では古典的なサイクロトロン振動数が $+\infty$ と $-\infty$ に発散する(図 1 参照)。したがって、ゼロエネルギー付近では伝導率が大きな磁場効果を受け、それが磁気抵抗効果として現れることが期待される。最近、伝導率の久保公式を出発点として、磁場

の自乗に比例する磁気伝導率の厳密な公式が、東京工業大学理学院のグループにより導出され、その結果が日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2019 年 1 月号に掲載された。

それによると、グラフェン系では伝導率の磁場変化である磁気伝導率が六角形のファインマン図形 3 個で与えられる。なお、より一般的な場合に拡張すると五角形の図形も現れる。この公式を用いて最も簡単な近似で計算し、グラフェンの磁気伝導率がゼロエネルギー付近で二つの鋭いピークを持つことが示された。ただし、この近似は磁気抵抗を議論するには多少不十分なようである。より正確な近似でより現実的な散乱体に対する計算もすでに行われ始めている。この公式の二層グラフェンへの適用や、巨大 Rashba 系を含めた様々な系への拡張など、今後の研究の展開が期待される。

原論文

[Formula of Weak-Field Magnetoresistance in Graphene](#)

[Tsuneya Ando: J. Phys. Soc. Jpn. **88** \(2019\) 014704](#)

問合せ先：安藤恒也（東京工業大学理学院物理学系）

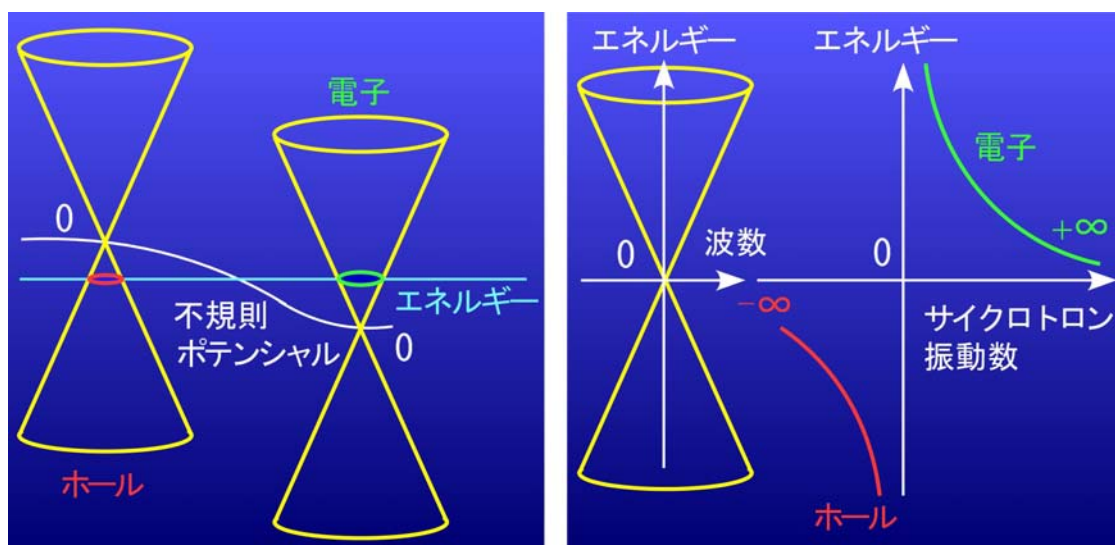


図 1: (左) 不規則ポテンシャル中のグラフェンではゼロエネルギー付近の電子は電子とホールの両方の性質を持っている。(右) また、古典的サイクロトロン振動数はゼロエネルギーで、電子の場合にはプラス無限大、ホールの場合にはマイナス無限大に発散する。