

バルクな有機結晶で実現する $\nu = 1$ の量子ホール状態

[1] 要旨

高圧力下の有機ディラック電子系 α -(BETS)₂I₃において、1 T 程度の磁場下・低温で $\nu = 1$ の量子ホール効果が発見された。 $\nu = 1$ の量子ホール状態は、ディラック点と呼ばれる電荷中性点で磁場によって現れる $N = 0$ のランダウ準位がゼーマン効果と電子相関効果により分裂することで実現する。1 T 程度の磁場で観測できたことは、この系の易動度が極めて高いこと、電子間の相互作用が重要な役割を担っていることを示唆する。一般に、量子ホール効果は極低温・高磁場下で、主に2次元電子系において実現する現象であるが、今回の物質のようなバルクな結晶で量子ホール効果が実現する例は非常に希少である。この系は極めて高い易動度を持ち、さらに電子相関が強い2次元電子層が弱く結合した多層構造をしていることから、多層（分数）量子ホール効果の物理に迫る成果として注目を集めている。

[2] 本文

近年、トポロジカル絶縁体（トポロジカル超伝導体）が幅広い分野にわたって多くの研究者を魅了している。トポロジーとは形や空間が連続的に変形できるとしたときこの連続変形で移り変わる形はすべて同一視できるとする考え方である。ドーナツとマグカップの有名な例は、穴が一つあいた形としてトポロジカルに同じであり、穴の数がトポロジカル不変量として形を特徴付ける。

トポロジーの代表例に量子ホール効果がある。量子ホール効果は2次元電子系の強磁場下において観測された現象で、そこでは電気伝導度が $\sigma_{xx} = 0$ となる領域でホール伝導率が $\sigma_{xy} = \nu e^2/h$ と量子化される。ここで、整数 ν は充填率でトポロジカル不変量と見なせる。量子ホール状態におけるトポロジカル状態の本質は、ランダウ準位間のエネルギー差がバルク電子の励起にエネルギーギャップをもたらすことと、もう1つの重要な特徴として試料端側に金属的な状態が現れることにある。

一方、 ν が整数でなく、分母が奇数（ $\nu = 1/3, 2/3, 1/5, \dots$ ）の分数をとる分数量子ホール効果が発見されている。そこでは電子間の相互作用が重要な役割を担っており、分数量子ホール効果は易動度が極めて高い2次元電子系で実現される。これらに加えて、相対論的電子を有する系（ディラック電子系）では π ベリー位相を反映して、単一スピン、単一バレーあたり $\nu = N + 1/2$ の半整数量子ホール効果が生じる。これは単層グラフェンで最初に発見された。

通常、量子ホール効果は2次元電子系において極低温・高磁場下で実現する現象である。今回の物質のようなバルクな結晶（層状物質）で量子ホール効果を観測した例は非常に希少である。特に、電子相関が強い2次元電子層が多数積層した物質では、その層間相互作用が引き起こす新規（分数）量子ホール状態が期待される。それには、電子相関が強い多層状結晶で量子ホール効果を観測することが喫緊の課題となっていた。

最近、東邦大学と理研のメンバーで構成した研究グループは、有機ディラック電子系 α -(BETS)₂I₃の圧力下の電子状態に着目し、低温・磁場下で輸送特性を調べた。フェルミエネルギーはディラック点から1 Kほど離れ、極めて高い易動度をもつことから、量子現象の観測が期待された。驚くべきことに、1 T 程度の磁場・低温で $\nu = 1$ の量子ホール効果観測に成功した。この成果はJPSJの2023年5月号に掲載された。

固体中ディラック電子の顕著な特徴の1つは、磁場をかけても周回軌道運動を行わない特異な

$N=0$ ランダウ準位の存在である。十分な強磁場ではすべての電子がゼロエネルギー状態に落ち込むが、これがゼーマン効果や電子相関効果により 4 つのエネルギー状態に分裂すると、 $\nu = 0, \pm 1$ の量子ホール状態が現れる。特に、 $\nu = 0$ の状態は特別で、グラフェンではバレー分裂に起因する「量子ホール絶縁体」状態である。それに対して、スピン分裂に起因する「量子ホール強磁性」がバルクな（多層）有機ディラック電子系 α -(BEDT-TTF)₂I₃ で見つかった。試料内部は絶縁体だが、試料側面には金属的なヘリカル表面状態が形成されている。しかし、フェルミエネルギーが常にディラック点に位置し、この特別な状態は極低温・高磁場の環境下でも保持されているため、多層（分数）量子ホール効果の物理を展開するのに理想的な系とは言い難い。

本研究の題材である有機ディラック電子系 α -(BETS)₂I₃ [図(a)]は、 α -(BEDT-TTF)₂I₃ の姉妹物質であるが、以下理由から多層量子ホール効果の物理を調べるのに理想的な系である。① この系は圧力で電子相関が強い絶縁体相に隣接して現れる強相関系のディラック電子系である。② 低温での易動度が極めて高い。③ フェルミエネルギーはディラック点から 1 K ほど離れている。このことから、図(b)に示すランダウ準位構造より 1 T 程度の磁場で $\nu = 1$ の量子ホール状態が期待された。

本研究の成果である $\nu = 1$ の量子ホール効果の観測は、それぞれの層が独立であることを示唆する。しかし、極低温で層間の相互作用が反映した新規量子ホール状態、さらには分数量子ホール状態が期待され、多くの研究者の注目を集めている。質量ゼロのディラック電子と強い電子間相互作用の協奏による量子状態は、幅広い研究領域で重要視されており、今後の研究の展開が期待される。

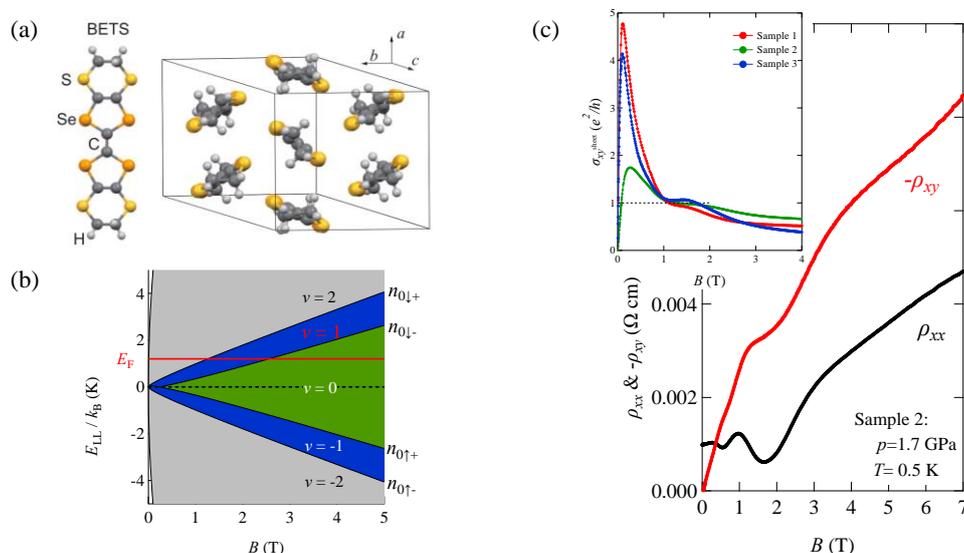


図 (a) α -(BETS)₂I₃ の結晶構造。(b) ランダウ準位構造。(c) 磁気抵抗 ρ_{xx} とホール抵抗 $-\rho_{xy}$ の磁場依存性。挿入図は 1 層あたりのホール伝導度 $\sigma_{xy}^{\text{sheet}}$ 。1-2 T 近傍にみられる ρ_{xx} の極小、 $-\rho_{xy}$ および $\sigma_{xy}^{\text{sheet}}$ のプラトー領域が $\nu = 1$ の量子ホール状態である。

原論文 (2023 年 4 月 20 日公開済)

Observations of $\nu = 1$ Quantum Hall Effect and Inter-Band Effects of Magnetic Fields on Hall Conductivity in Organic Massless Dirac Fermion System α -(BETS)₂I₃ under Pressure

K. Iwata, A. Koshiba, Y. Kawasugi, R. Kato, and N. Tajima, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 053701 (2023).

<情報提供：田嶋 尚也（東邦大学理学部）>