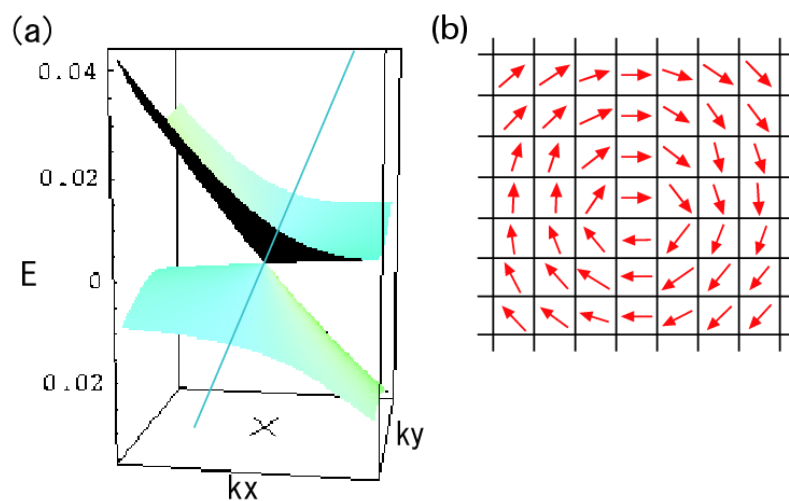


## “傾斜した”ディラック電子は強磁場中に置かれると XY 強磁性と Kosterlitz-Thouless 転移を示す

結晶中を動く電子の速さは光速に比べてはるかに遅いが、電子の波動性と結晶の周期性が特定の条件を満たすとき、その電子は光速あるいは光速に近い速さで動く相対論的粒子と類似した挙動を示す。このような「結晶中のディラック電子系」はグラフィン、ビスマス合金、HgTe 系量子井戸、分子性導体  $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$  など多様な物質で見いだされている。中でも分子性導体では、図(a)に示すように、ディラックコーン（質量ゼロのディラック電子のエネルギー分散関係を表す円錐構造）が大きく傾き、準粒子の速さがある方向に進む場合と逆方向に進む場合とで最大 10 倍も異なるという特異な状況が実現している。

名古屋大学の小林晃人氏は、このようなディラック電子の“傾斜”は強磁場中の電子状態を傾斜のない場合と全く異なるものに変えることを理論的に示した。通常の電子のスピンは磁場中に置かれると磁場の方向に整列する。その事情は傾斜していないディラック電子でも同じである。ところが傾斜したディラック電子では、傾斜によりクーロン相互作用の持つ対称性の一部が破られ、通常のスピンではなく「擬スピン」が 2 次元面内を向いて整列する XY 強磁性が起こることが示されたのである。この「擬スピン」とは、ペアで存在するディラックコーンのどちらに電子が入るかという自由度(valley 自由度)をスピンの概念を利用して表現したものである。この擬スピン XY 強磁性では通常のスピンの XY 強磁性と同様にボルテックス（図(b))・反ボルテックス対の励起が発生し、それが凝縮することで Kosterlitz-Thouless 転移 (KT 転移) が起きることも示された。この研究成果は、日本物理学会発行の英文学術誌 Journal of Physical Society of Japan (JPSJ) の 2009 年 11 月号に掲載される。



図(a) “傾斜した”ディラック電子のエネルギーと運動量の関係を表す円錐構造、ディラックコーン。円錐の軸線が傾いている。(b) 擬スピン XY 強磁性におけるボルテックス。

本研究では、 $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ のゼロギャップ状態において観測される磁気抵抗の特異な温度依存性を念頭において、傾斜したディラックコーンをもつ質量ゼロのディラック電子を記述する tilted Weyl Hamiltonian に基づき、N=0 ランダウ状態に対する長距離クーロン相互作用の効果を調べた。傾斜のないディラック電子では長距離クーロン相互作用は通常のスピンと擬スピンの空間において等方的なので、ゼーマンエネルギーのみが対称性を破り、通常のスピンが分極する。これに対し傾斜したディラック電子では長距離クーロン相互作用において擬スピン空間での対称性を破る valley 間散乱項が出現することが見出された。そこでN=0 ランダウ状態に対するワニエ関数に基づく磁気格子上の有効モデルを導出し valley 間散乱の効果を調べたところ、擬スピンによる XY 強磁性が出現することがわかった。さらに、擬スピン強磁性における自由エネルギーを長波長揺らぎに関して展開することにより、低温で KT 転移が起きることも示された。これに対し、グラフィンでも強磁場下において KT 転移の兆候が観測され、これを説明する理論研究が行われている。この理論ではグラフィン固有の電子-格子相互作用が擬スピンの対称性を破り擬スピン XY 強磁性を起こすと考えられている。しかし本研究で着目した分子性導体の場合、擬スピンとこの種のフォノンの結合は非常に弱いことが示されるため、ディラックコーンの傾斜が擬スピン XY 強磁性の原因であると考えられる。

以上のように、本研究は、ディラックコーンの傾斜が強磁場中の電子状態を劇的に変えることを初めて示したものとして多くの研究者の注目を集めている。分子性導体以外の物質で傾斜したディラック電子が発見された場合にも応用が可能な理論であり、今後、さらに広範な物質に対して「結晶中のディラック電子系」の研究が展開されるものと大いに期待される。

論文掲載誌：J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) No. 11, p. 114711

電子版：<http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/78/114711/> (11 月 10 日公開)

＜ 情報提供：小林晃人、鈴木順三（名古屋大学）、福山秀敏（東京理科大学）、Mark O. Goerbig（Univ. Paris-Sud）＞