

# ”質量のない”電子の不思議な量子相転移

## [1] 要旨

電子間相互作用が強くなるとディラック電子が質量ギャップを獲得と考えられてきたが、電子間相互作用を圧力で自在に制御できる有機ディラック電子系 $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の金属非金属相転移において、質量ゼロの性質を保持したまま量子相転移を起こすことが明らかにされた。強い電子相関効果の存在によって、量子力学的なゆらぎの効果が抑制されるにも関わらず、電荷秩序や磁気秩序などの形成を起こさずに量子臨界点へ向かうことは予想外の結果であり、質量ゼロのディラック電子系の本質に迫る結果として注目を集めている。

## [2] 本文

近年、固体中で実現するディラック電子系の研究が精力的に行われている。単層黒鉛のグラフェンがよく知られた系だが、質量ゼロのディラック電子は易動度が極めて高く、電子の運動が2次元平面内に限られているにも関わらず、非常に高い電気・熱伝導性を示す。そのため、サイズが微小で消費電力が少なく、高速に作動するデバイスへの応用が期待されている。基礎物理学の観点からも、固体中の質量ゼロのディラック電子は興味深い。このように、固体中の質量ゼロのディラック電子系は、応用の面からも基礎研究の面からも多大な関心が持たれている。

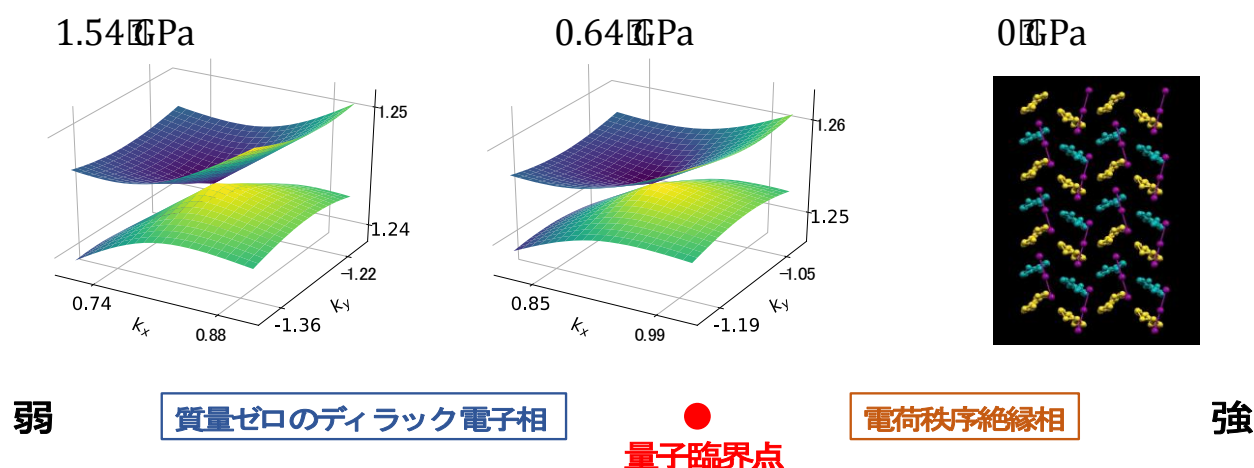
身の回りの多くの相転移が起きる原因は、エネルギーとエントロピーの競合である。高温ではエントロピーの大きな状態が実現し、低温ではエネルギーが低い状態が実現する。両者のせめぎ合いをコントロールしているのが温度である。このような通常の相転移は有限温度で起こるが、絶対零度でも相転移が起きる場合がある。絶対零度における相転移は量子相転移とよばれ、相転移を引き起こす原因は温度ゆらぎではなく、量子力学的なゆらぎの効果である。

このような量子相転移、特に電子間の相互作用によって引き起こされる量子相転移点において、質量ゼロのディラック電子がどのような性質を示すか、その解明が喫緊の課題となっていた。

最近、東邦大学、京都大学、分子研、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 $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ において、電子間相互作用の圧力制御により、質量ゼロのディラック電子系から絶縁相への量子相転移を、理論的および実験的に調べた。驚くべきことに、ディラック電子が質量ゼロの性質を保ったまま量子相転移を起こすことが初めて明らかになった。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2020年12月号に掲載された。

一般に、電子間の相互作用を強くしていくと、量子力学的なゆらぎの効果が抑えられ、何らかの秩序状態が実現することが予想される。実際、量子相転移がおきる量子臨界点近傍において、磁氣的秩序状態やディラック電子が質量ギャップを獲得するような理論的な提案がなされていた。グラフェンでは基板を変えることで、ある程度、電子間の相互作用を変化させることが可能である。これまで、理論的、実験的に精力的に電子間相互作用効果が調べられているが、電子間の相互作用を強くしていくには限界があり、強い電子間相互作用による質量ゼロのディラック電子系の量子相転移は未開拓の研究領域であった。

本研究の題材である有機導体  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> は、常圧力下・低温では電荷秩序絶縁体だが、静水圧力印加では質量ゼロのディラック電子系である。電荷秩序絶縁相のような強相関電子系に隣接しているディラック電子系はこの物質しか知られていない。そのため、質量ゼロのディラック電子系への強相関効果の探求が可能な、唯一の系である。さらに、① フェルミエネルギーが常にディラック点に位置し、② 電子間相互作用を制御でき、③ 高易動度の純良な試料であることから、質量ゼロのディラック電子系への強相関効果を探求する上で理想的な系となっている。本研究では、圧力によって相互作用の強さが変わることを利用して、電子相関の強さを制御することで引き起こされる金属・非金属相転移を微視的な理論から解析し、ディラック電子が質量ゼロの状態を保つことを明らかにした。本研究の成果は、質量ゼロの性質が保持されたまま量子相転移を起こすという予想外の結果（図 1）を得たものであり、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は、基礎研究だけでなく応用面からも重要視されており、今後の研究の展開が期待される。



### 電子間相互作用の強さ

図 1 有機ディラック電子系  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> において、電子間相互作用による質量ゼロのディラック電子系から電荷秩序絶縁相（右の分子配列図：黄色と青色で表した BEDT-TTF 分子は異なる電荷を持つ）への量子相転移を表した概略図。

原論文（11月6日公開済）

Quantum Phase Transition in Organic Massless Dirac Fermion  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> under Pressure

Y. Unozawa, Y. Kawasugi, M. Suda, H. M. Yamamoto, R. Kato, Y. Nishio, K. Kajita, T. Morinari, and N. Tajima, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 123702 (2020).

< 情報提供：森成 隆夫（京都大学大学院人間・環境学研究科）  
田嶋 尚也（東邦大学理学部） >