

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 平田 倫啓

本論文は、擬二次元有機伝導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ (以下 α -I₃ と略記) における質量ゼロのディラックフェルミオンの微視的電子状態に関する実験的研究を報告している。具体的には、ディラックフェルミオン固有の線形分散 (ディラックコーン)、また面直磁場下で生じるゼロモードランダウ準位とその自発的対称性の破れに関し、核磁気共鳴法 (NMR) を用いた実験的検証が記されている。

序章では、導入として代表的なディラックフェルミオンの系として知られる単層グラファイト (グラフェン) との比較を通じ、 α -I₃ ディラックフェルミオン系の特質が紹介されている。ディラックフェルミオンとはフェルミ準位近傍で線形な分散関係 (ディラックコーン) を有する物質中の電子状態であり、相対論的なディラック方程式によりその運動が記述される点で通常のバンド電子とは異なる。とりわけ、 α -I₃ におけるディラックフェルミオンは、(i) 波数空間においてコーン中心軸が傾斜した異方的コーン分散を有する点、(ii) バンド幅がグラフェンの 10 倍強小さく大きな電子相関効果が期待される点、そして (iii) バルクの三次元結晶中で実現するという三点でグラフェンと異なり、グラフェンでは検証困難な微視的電子状態、中でも相関効果や結晶の対称性の議論がバルクの NMR 測定により行える稀有な例として紹介されている。本研究の目的は、『伝導面平行、垂直の両磁場配置において、ディラックコーン形状やランダウ量子化の物理を NMR 実験により明らかにする事』、と述べられている。

第 2 章では、NMR の原理、圧力印加機構、試料、および磁場発生装置の詳細が記されている。また後半では、 α -I₃ 単結晶試料の ¹³C-NMR 測定データの解析手法について、その概要が典型的な実験結果とともに説明されている。

第 3 章は、常圧下面平行磁場のもとで行われた、伝導相の ¹³C-NMR 測定の結果を報告している。前半では、NMR スペクトルの磁場角度依存性から超微細結合テンソルの主値が独立分子サイトごと決定され、これに基づき局所スピン磁化率の温度依存性がサイトごとに評価されている。後半では核スピン・格子緩和率、並びに電子相関強度がサイトごとに定量的に見積もられ、単純な二次元金属では期待できない強いサイトおよび温度依存性、及び、大きな反強磁性スピンゆらぎの存在が明らかになっており、本伝導相が通常の金属の枠組みでは理解できないことを微視的観点から強く示している。加圧下でのバンド計算との対比から、上記 NMR の結果は傾斜したディラックコーンがフェルミ準位近傍に存在すると考えればよく理解できることが述べられている。

第 4 章では、圧力下面平行磁場のもと、伝導相の局所電子状態を ¹³C-NMR 測定により低温 (~2K) まで調べた結果が常圧と比較され、電子状態が議論されている。全スペクトルから見積もられた磁化率、緩和率は、室温近傍の二次元電子的な振る舞いから、30K 以下で

コーンに期待されるべき的な振る舞いへとクロスオーバーすることが明らかにされた。しかし、中間温度域では両物理量ともに急激な減少を示し、独立粒子近似に基づいたバンド計算との比較から、高温域では状態密度が増強される一方で、低温域では抑制されている可能性が示唆された。高温での増大幅は加圧により抑制され、ストーナー増強がその起源と考えられるのに対し、低温での減少は、バンド縮退点近傍の低キャリア濃度領域に固有の現象と考えられると論じられている。また、独立サイト毎に磁化率、緩和率が測定され、常圧同様、大きなサイト/温度依存性が報じられている。これらの結果は、各サイトの波動関数が k -空間で異方的に分布とする傾斜コーンの理論的予言と符合し、また相関により傾斜コーンが k -空間内で異方的に変形していることを示唆していることが論じられている。

第 5 章では、圧力下面垂直磁場のもと、ゼロモードランダウ準位形成とその自発的対称性の破れが磁場強度、角度、温度をパラメタとして $^{13}\text{C-NMR}$ 測定により検証されている。5T 磁場下での NMR スペクトル、緩和率の温度依存性は、ゼロモードランダウ準位の形成、およびそのスピン分裂により理解できることが、モデル計算との比較から明らかにされている。一方、15T 磁場下では、最低温度域で新たなスペクトル分裂が観測され、何らかの自発的対称性の破れが生じたことが示唆された。これらの結果は、電子相関により自発的にコーンの k -空間内縮退が破れ、余剰状態密度がフェルミ準位近傍に生成されるという理論的提言と比較され、同温度域で観測された緩和率の増大もこの描像で理解できることが示されている。

第 6 章は本論文をまとめている。

尚、付録 A では、 αI_3 の類縁物質でありながら典型的な二次元金属として知られる $\theta(\text{BEDT-TTF})_2\text{I}_3$ の局所電子状態が $^{13}\text{C-NMR}$ により調べられた結果が述べられている。付録 B では、圧力下で観測された緩和率の非対称な磁場角度依存性の結果が述べられ、超微細結合テンソルの異方性の観点から議論されている。

以上を総合すると、本研究は擬二次元有機伝導体 $\alpha(\text{BEDT-TTF})_2\text{I}_3$ における質量ゼロのディラックフェルミオン系の電子構造と特異なゼロモードランダウ準位構造を核磁気共鳴法によりミクロな視点から初めて定量的に検証したものであり、ディラックフェルミオン系における相関効果と対称性の自発的破れに関する理解を深める上でも重要な知見を多数提示したといえる。これはグラフェンを含むディラック電子系全体の研究に新たな切り口で独自の光を当てるものであり、物性物理学および物理工学の発展に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。