

## 初めて観測された有機ディラック電子系の比熱

2010年にノーベル物理学賞を受賞した A.K.Geim らがグラフェンの作製に成功して以来、世界中でグラフェンに関する精力的研究が続いている。これはグラフェンの非常に高い移動度や熱伝導度等を利用したエレクトロニクス分野への応用の期待に加え、グラフェンにおける電子系が“質量ゼロのディラック電子”として記述され、凝縮系物理学の分野に新たな舞台を提供したためである。この性質はグラフェンのバンド構造が特異な線形分散(ディラックコーン)をもつことに起因しており、理論・実験ともに通常の2次元系とは異なる新奇な結果が報告されている。熱物性に関してもその特異な状態密度を反映した振る舞いが期待されるが、グラフェンは単一原子層で形成されているため実験的研究は非常に困難であり、特に比熱に関しては現在までに実験の報告は存在しない。

一方、近年名古屋大学のグループによって擬2次元的な層状物質である有機伝導体  $\alpha$ -(BEDTTTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> においても圧力下で異方的なディラックコーンの存在が指摘され、現在も実験、理論の両方面から検証が進んでいる。重要なことは、この系ではバルク結晶の状態でディラック電子系が実現しており、グラフェンでは非常に測定困難な比熱測定を比較的容易に行うことが可能な点である。しかしながら本物質では圧力下でのみディラック電子系が形成されるため、実験は圧力下で行う必要がある。圧力下の比熱測定では、与えた熱が試料だけでなく圧力媒体の一部にも伝わるため、測定結果には一般に大きなバックグラウンド(BG)が含まれ、特に大きな結晶を得るのが難しい有機伝導体の分野ではほとんど報告例がない。感度の高い交流法を用いた場合でも BG の大きさはヒーター-試料-温度計の接触具合や試料・圧力媒体の熱伝導率等によって変化するため、一般的な標準試料を用いても同一の BG にはならず、試料のみの寄与を抽出することは難しい。

最近、東京大学物性研究所の研究グループは、単結晶試料を割って同じ環境下で交流測定を繰り返すことによってほぼ同一の BG を実現し、2つの測定結果を差し引くことで  $\alpha$ -(BEDTTTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> の圧力下比熱を得た。これによりディラック電子系特有の比熱の温度依存性と磁場下での振る舞いが初めて実験的に確認され、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 2012年4月号に掲載された。

図1はディラック電子系が実現する高圧下 15kbar の測定結果で、低温での比熱の温度依存性が  $C \propto T^{1.8}$  となることを示している。これは線形分散を仮定した場合に期待される比熱の温度依存性( $\propto T^2$ )と良く一致している。また、グラフェンでは電子相関の影響により低温での比熱が対数的に抑制されるという理論的予測があるが、今回の測定範囲内ではそのような傾向は観測されていない(図1挿入図)。高圧下での比熱の磁場依存性は、はじめ磁場とともに増加した後減少に転じ、その後飽和する様子が観測された(図2)。比熱はフェルミエネルギー  $E_F$  での状態密度(DOS)を反映するが、この振る舞いは以下のように解釈することができる。ディラック電子系では磁場を印加すると通常の2次元系とまったく異なるランダウ準位(LL)が形成され、特にランダウ指数  $N=0$  の LL (ゼロモード) が磁場強度によらず常に  $E_F$  に現れる。 $\alpha$ -(BEDTTTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub> では 0.2T 以上の垂直磁場下で  $E_F$  にゼロモードのみが存在する量子極限に達することが報告されている。ゼロモードの DOS は LL の縮重度を反映し、磁場に比例して増大する。一方、それぞれの LL はゼーマン効果によって磁場とともに上向きスピン、下

向きスピンによる寄与が分離する（スピン分離）．これによりスピン分離の幅がゼロモードの幅よりも広がる高磁場では  $E_F$  での DOS が減少し，さらに2つの重なりがなくなる高磁場領域ではゼロに向かうことが予想される（図2挿入図）．今回観測された比熱はこのようなゼロモードの DOS を反映していると考えられ，すでに報告されている磁気抵抗の振る舞いとも非常によく対応している．また，スピン分離した後の磁場依存性はゼロモードの形状を直接反映していると考えられるが，今回のデータはゼロモードの幅の磁場依存性 ( $\propto B^{1/2}$ ) を考慮するとガウシアンで非常に良く再現できている（図2破線）．本研究によりディラック電子系の熱力学的性質の一端が実験的に明らかにされるとともに小さな単結晶の圧力下比熱測定が可能になり，今後の研究の展開が期待される．

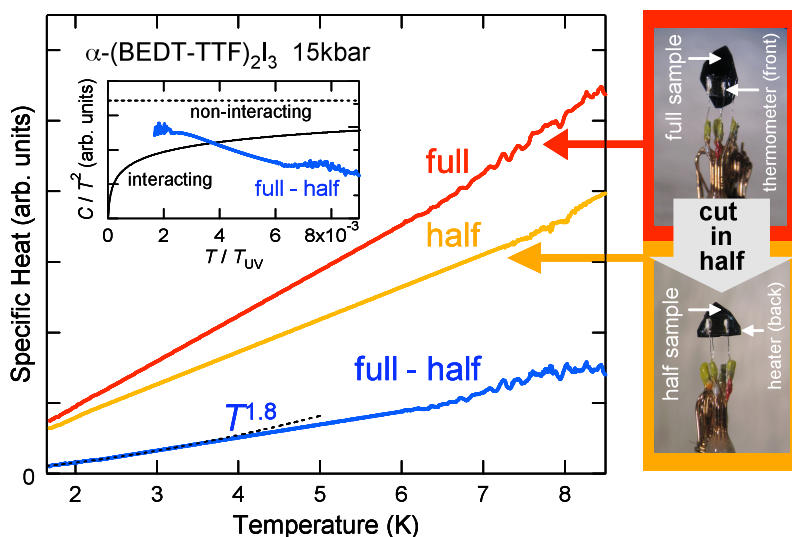


図1.  $\alpha$ -(BEDTTF) $_2$ I $_3$  の圧力下 15kbar での比熱の温度依存性.

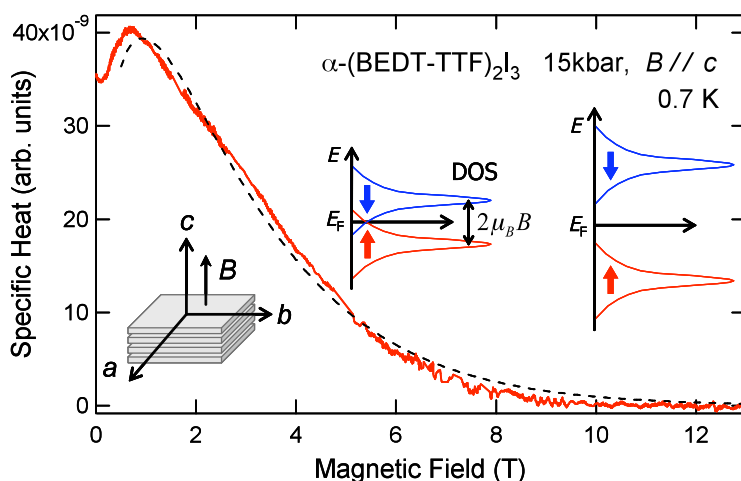


図2.  $\alpha$ -(BEDTTF) $_2$ I $_3$  の圧力下 15kbar での比熱の磁場依存性.

論文掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) No.4, p.043601

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/81/043601> (3月5日公開済)

< 情報提供：鴻池 貴子（東京大学物性研究所）

長田 俊人（東京大学物性研究所） >