

2次元固体 ^3He のホールドーブにより出現する特異な量子液体

2次元的な異方性をもつフェルミ粒子系は理論的にも実験的にも近年大きな注目を集めている。特に相関の強い電子系は銅酸化物や昨年発見された鉄系の高温超伝導体の舞台としても関心を集め、電子相関のために生じるモット絶縁体が金属化するときの物性は凝縮系物理の中心課題の一つである。グラファイトに吸着された層状ヘリウム3の系は、電子系とは全く異なるが、強く相互作用する2次元フェルミオン系研究の理想的な舞台を提供している(図1(a))。実際、電子系と異なり6桁にもわたる広い温度領域に生じる階層構造を観測できることも特長である。この系でヘリウム3濃度を変化させると、相互作用するフェルミ液体、さらには第1層に対して4/7の第2層濃度で整合固体相(電子系のモット絶縁体相に対応)が形成される。最近、この固体相からヘリウム3の濃度を減らす(ホール(空孔)をドーブする)と、数十mK領域の比熱の温度依存性にピークが出現し、そのピーク温度がホール濃度の増大とともに高温側へ移動するふるまいが観測された。2次元「モット絶縁体」にホールドーブすると新たな量子液体相が実現することを示唆している。しかしピーク構造の起源を含め、いかに理解するかが謎であった。

最近、東京大学の渡辺真仁氏と今田正俊氏は、ヘリウム固体中に形成された空孔が零点振動効果によって系の実空間全体に広がり、これを波数空間で捉えると、ヘリウム3のバンド構造の中に小さなポケット構造を持つフェルミ面が生じることで、これまで謎とされてきた比熱の温度依存性等を自然に説明できることを理論的に示した。この研究成果は、日本物理学会が発行する英文誌「Journal of the Physical Society of Japan」の2009年3月号に掲載される。

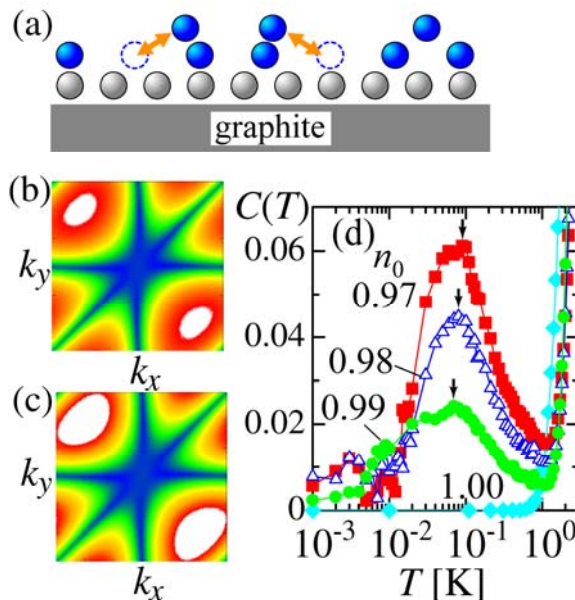


図 1(a)グラファイトに吸着された層状ヘリウム3の系における、第2層や第3層への吸着の概念図。(b)折りたたまれたブリルアン・ゾーンにおけるエネルギーバンドの等高線プロット。第2層の4/7固体相のヘリウム3濃度を $n_0=1$ としたとき $n_0=0.99$ の結果。左上と右下の白い円形の領域がホールのフェルミ面。(c)(b)と同じく $n_0=0.97$ の結果。(d)いくつかの異なる濃度 n_0 での比熱の温度依存性。矢印は最大値の位置を示す。

本研究では第1層の三角格子配置のヘリウム3の作る周期ポテンシャルのもとで、ファンデアワールス相互作用するヘリウム3の有効格子模型を導き、4/7固体相へのホールドーブにつ

いての解析を行なった。その結果 $4/7$ 固体相で生じる密度励起のエネルギーギャップの下側のバンドにホールポケットが形成され、小さなフェルミ面が出現することを見出し(図 1(b),(c))、さらにそのフェルミ面の寄与によって、比熱にピーク構造が現れることを見出した(図 1(d))。比熱のピーク温度を与える特徴的エネルギーが、ドーピングされたホールの有効バンド幅に対応する数十 mK であることも明らかにされ、比熱の温度、およびホール濃度依存性が見事に説明された。この結果は、固体としての周期性ないしは固体の持つ励起ギャップ構造を保持したまま、量子液体としての性質も合わせもつ状態が実現すること、より具体的には、固体中に生成された空孔が量子力学的な零点振動により系の実空間全体を伝播する「零点空孔」として存在し、この「零点空孔」がバンドを形成し特異なフェルミ面を作っていることを意味する。

本研究は、「モット絶縁体」へのホールドーピングにより運動量空間の分化を伴う液体相が出現し、熱力学量におけるマルチスケールの異常をもたらす起源となっていることを明らかにしている。モット絶縁体へのドーピングは銅酸化物をはじめとして強相関電子系において広範に研究されてきた。特に銅酸化物でのモット絶縁体近傍のアンダードーピング領域に、フェルミアークとよばれるフェルミ面の断片が角度分解光電子分光で観測されることが注目されているが、本研究の「小さなフェルミ面」と共通する特徴はこの問題にも知見を与えている。

$4/7$ 整合固体相ではヘリウム 3 は三角格子を形成し、10μK の極低温まで磁気秩序転移が観測されない。三角格子の形状により生じる幾何学的フラストレーションのために、スピン励起にギャップを持たない量子スピン液体が実現している証拠と考えられており、実際、本研究で用いられたものと同じ有効模型が $4/7$ 固体相の解析にも用いられ、これまで考慮されてこなかったヘリウム 3 の第 2 層と第 3 層の間の密度ゆらぎの効果(図 1(a))に着目した理論的解析も行なわれている。その結果、 $4/7$ 固体相は液体・固体相境界近傍に位置し、強い密度ゆらぎが量子スピン液体の成立に重要な役割を果たすことが指摘されている。幾何学的フラストレーション効果を伴う 2 次元ハバード模型のモット転移近傍の数値解析で量子スピン液体相が見出され、また、有機化合物 $\kappa\text{-(ET)}_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ などの現実の電子系でもスピン液体とみなせる例が続々と発見されているが、本研究の成果は、これらの系では、「密度ゆらぎ」による量子スピン液体相の安定化という共通の機構が当てはまることを示している。

このように、本研究は、2 次元ヘリウム 3 の低温比熱に理論的な説明を与えるばかりでなく、強相関電子系とも共通する、2 次元強相関フェルミ粒子系に関する興味深い普遍概念を提起したものであるとして、多くの研究者の注目を集めている。層状ヘリウム 3 の系については、固体相と本研究の量子液体相を統一的に記述する有効模型が示されたことで、今後、10μK から 10K に及ぶ広い温度範囲での熱力学量測定や中性子回折実験と合わせて、電子系では踏み込めないような領域を含め、特異な量子液体相の全容解明に向けた研究の発展が期待される。

論文掲載誌： J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) No. 3, p.033603

電子版： <http://ipsj.ipap.jp/link?JPSJ/78/033603/> (2 月 25 日公開済)

<情報提供： 渡辺真仁、今田正俊 (東京大学)>