

金属電子系における新規な自発的対称性の破れ



田財 里奈

名古屋大学大学院理学研究科
tazai@s.phys.nagoya-u.ac.jp



大成 誠一郎

名古屋大学大学院理学研究科
onari@s.phys.nagoya-u.ac.jp



紺谷 浩

名古屋大学大学院理学研究科
kon@slab.phys.nagoya-u.ac.jp

金属中の無数の電子が織りなす「多彩な自発的対称性の破れ」は、金属電子論における現代の中心的課題である。最近そのパラダイムが急速に拡大し、**量子液晶**として包括的に研究されている。その一方で、「なぜ量子液晶が発現するのか？」や「量子液晶の対称性がどのように決定されるのか？」という根本的問いに対する答えは見つかっておらず、物理現象の基本原則はいまだ謎に包まれている。これらの解明は、理論家に課された重要課題であり、そのための理論整備が急速に進められている。

この新潮流の中で、従来の近似理論を超えた多体効果である「**揺らぎ間の干渉効果**」、すなわち量子的もつれ合いの重要性が徐々に明らかになってきた。この干渉効果は、電子の軌道占有数の偏りである「軌道秩序」や、電子の原子間の飛び移りの大きさが空間的に増減する「**ボンド秩序**」、原子間を永久自発電流が流れる「**電流秩序**」といった多彩な量子液晶相を生み出す。これらの液晶秩序は、鉄系超伝導体や銅酸化物超伝導体をはじめ、Ir酸化物、重い電子系において相次いで発見され、この分野の発展の大きな契機となった。

例えば鉄系超伝導体 FeSe における液晶相は、回転対称性を破る「**ネマティック秩序**」であり、その終端で観測される高温超伝導や量子臨界現象などの新規創発現象が、現在精力的に研究されている。また各種銅酸化物や Ir 酸化物、層状カゴメ格子金属においては、ナノスケールのループ状の電流秩序が相次いで報告され、量子液晶相の研究は現在活況を帯びている。

液晶秩序を統一的に研究するうえで、

「構造因子 $f(\mathbf{k})$ 」を導入すると、対称性に注目した見通しのよい議論が可能である。例えば銅酸化物超伝導体などで実現する d 波対称性のボンド秩序の構造因子は偶関数 $f(\mathbf{k}) \propto k_x^2 - k_y^2$ であり、電流秩序は奇関数 $f(\mathbf{k}) \propto k_x$ である。また、量子液晶は微視的に「電子・正孔対のボースアインシュタイン凝縮」であり、クーパー対の凝縮である超伝導現象との類似性は、理論構築の上で重要なヒントを与える。

$f(\mathbf{k})$ を仮定なく（コントロールされた近似で）最適解を求める手法として、(i) 熱力学ポテンシャルの極値条件である**密度波方程式**を解く手法と、(ii) **汎関数くりこみ群理論**に基づき構造因子を最適化する手法がある。これらの手法に基づき、鉄系および銅酸化物で観測される偶パリティの軌道・ボンド秩序、フラストレート系における奇パリティの電流・スピン流秩序が、量子揺らぎ間の干渉機構で自然に解釈できることがわかった。

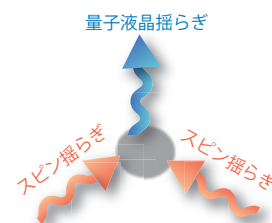
さらに最近の話題として、新規カゴメ格子系超伝導体 AV_3Sb_5 ($A = Cs, Rb, K$) における David Star 電荷秩序の正体が、干渉機構によるボンド秩序であることを提唱した。この系の超伝導転移温度は電荷秩序の量子臨界点近傍で最大になるため、ボンド秩序の量子揺らぎが超伝導を媒介している可能性がある。「ボンド揺らぎが糊となってクーパー対が形成されるという新規超伝導機構」により、 s 波超伝導や、トリプレット p 波超伝導が実現する可能性がある。幾何学フラストレーションと量子干渉機構との協力により豊かな量子相転移が出現し、今後の新展開が期待される。

用語解説

量子液晶：

元来、電子は一定のトンネル確率で原子間を飛び移る。近年、この「飛び移りの大きさ」が、電子同士の多体効果により元の結晶構造の対称性を破って自発的に変調する「ボンド秩序」や「電流秩序」が見つかった。このような飛び移りの秩序化は、「量子液晶秩序」と総称され、多彩な空間・スピン成分の対称性をもつ。

揺らぎ間の干渉効果：



金属電子系において、電荷・軌道・スピンは集団的な波として短距離を伝播する。この図は、2つのスピンの波が干渉して、1つの液晶波へと転移する干渉過程を表現している。量子液晶秩序の本質は、この干渉機構である。

密度波方程式：

多体効果を考慮したうえで、熱力学的に最安定な量子液晶相を決定する方程式。その原理は、Luttinger-Ward 理論、Baym-Kadanoff 理論に立脚して開発され、超伝導ギャップ方程式と類似した数学的構造をもつ。

汎関数くりこみ群理論：

電子間の相互作用を、高エネルギーから“徐々に”くりこむことで、様々な多体散乱をバイアスなく計算できる手法。変分法と組み合わせることで、量子液晶秩序を導出することができる。