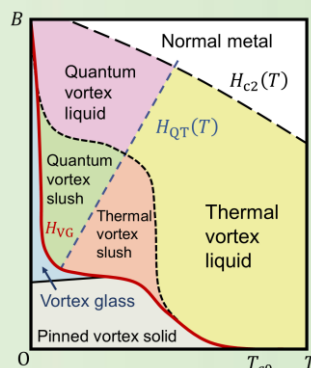


凝縮系理論グループでは、量子力学効果が巨視的スケールで現れる「凝縮系」の理論研究を行っています。特に新奇な超伝導・超流動、非平衡量子現象、量子磁性といった現象を示す、強相関電子系、重い電子系、冷却原子気体、液体ヘリウム、ナノスケール量子系など様々な系を研究対象としています。以下に、最近の研究テーマをいくつか紹介します。

超伝導・超流動

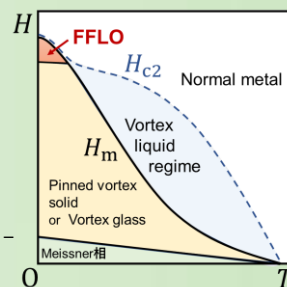
磁場下の超伝導状態

超伝導体は、温度の低下に伴い電気抵抗ゼロの超伝導状態（マイスナー相）に相転移します。Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理論により、超伝導は2電子の重心運動量ゼロの束縛状態のボーズ凝縮と表現され、その結果このマイスナー相は空間的に一様な状態となります。磁場中の超伝導体では、量子渦というトポロジカル励起が超伝導性を支配し、空間的に不均一なVortex Matterという状態になります。1990年代には銅酸化物超伝導体を舞台にして、このVortex Matterとその原因となる超伝導揺らぎの物理（右上図）が盛んに研究されました。一方、十分高磁場ではFermi面のトポロジーに起因する別のタイプの不均一状態（FFLO状態）が生じる可能性があります。今世紀に入り、重い電子系や鉄（Fe）系超伝導体を舞台に、FFLO状態とVortex Matterのハイブリッドともいべき磁場下の超伝導現象（右下図）が実現しており、我々はその理論の構築に取り組んでいます。

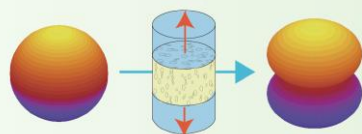


Bi系高温超伝導体の
磁場-温度相図

平行磁場下のFeSeの
磁場-温度相図
- Pauli常磁性が強い系の例 -



ヘリウムにおける新奇超流動

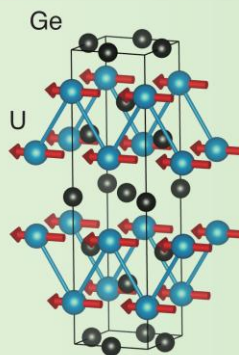


異方的媒質中での
³Heポラー超流動

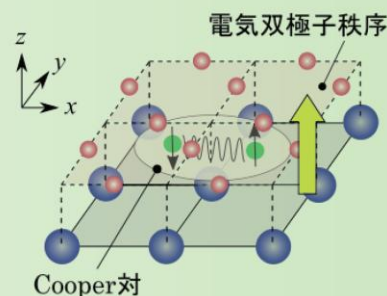
極低温下で、液体³Heがp波のスピン3重項Fermi超流動を示すことは以前から知られています。我々は、異方的な多孔質媒質中の液体³HeではPolar相という第3の超流動相が起こることを予言し、2015年にロシアで行われた核磁気共鳴の実験においてこの超流動相の実現が確認されました。この相は、半整数量子渦という理論的には古くから予言されていたトポロジカル励起が自然に生じるなど、新たな超流動現象が生まれる舞台となっていることが我々の研究から明らかになってきています。

磁気秩序・多極子秩序と超伝導

強磁性と超伝導が共存するのか、というテーマは凝縮系物理学において長く議論されてきました。強磁性は電子スピンの向きが揃って自発磁化を生む状態ですが、超伝導は内部磁化がゼロの完全反磁性という性質を持ちます。そのため強磁性と超伝導は相反する秩序状態と考えられてきましたが、この常識を覆す「強磁性超伝導体」 UGe_2 が2000年に発見され、超伝導研究者に大きな衝撃を与えました。このような例をはじめとして、近年ではより概念を広げた「磁気多極子秩序と共存する超伝導」の研究が精力的に行われています。さらに、ネマティック秩序などの「電気多極子秩序」も注目を集めるテーマの1つです。我々はこれら多極子秩序と超伝導の関係や起源、あるいは共存状態の性質を調査する理論研究に取り組んでいます。



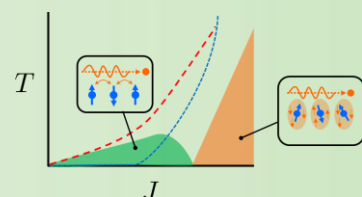
超伝導体 UGe_2 の
結晶・磁気構造



電気双極子秩序と超伝導の共存

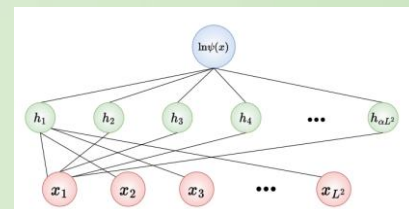
強相関電子系

我々の身の周りには膨大な数の電子による多体系ですが、Blochのバンド理論は電子の波の重ね合わせによって多体系を記述し、金属物性等の説明に成功しました。一方で、電子間の相互作用を無視できないケースも存在し、特に遷移金属酸化物や希土類を含む化合物系などの局在的な性質を持った電子系において多く報告されています。これら電子相関効果の顕著な系の解明こそが「強相関電子系」の物理であり、そこには多体系ならではの豊かな物理が潜んでいます。電子相関効果は、物質の結晶構造や電子の軌道自由度などに応じて変化するため、様々なモノを相手にする物性物理学においては、挑戦的かつ魅力的な分野の1つです。超伝導やトポロジカル相などは弱相関側の立場からアプローチされることの多いトピックですが、モット絶縁体、近藤効果、重い電子系、量子スピン液体のような現象は、基本的に強い相関効果が必要です。ニューラルネットワークや行列積状態などの最新の数値計算手法も、強相関系における高度な量子もつれ波動関数の解析によく利用されます。また、強相関電子系において研究されるモデルに対しては、数理物理や素粒子物理の解析手法が適用可能であることから、物性物理のみならず他分野に共通するアイデアが秘められていることも興味深い点といえます。



Doniach 相図

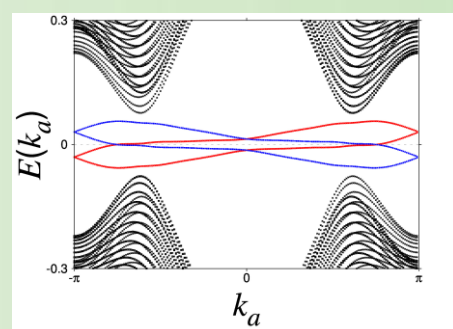
局在電子と伝導電子との結合の大きさ J によって、磁性相や重い電子系が実現する



ニューラルネットワークは相関系の波動関数を学習することができます

トポロジカル絶縁体・超伝導体

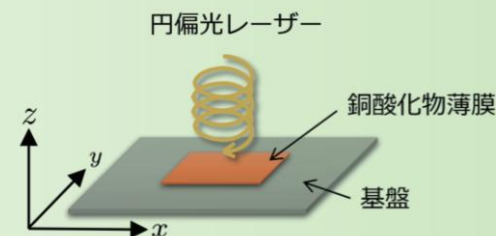
物質中の電子が持つトポロジーは、輸送現象や電磁気学を理解する上で極めて重要です。例えば、量子Hall効果は、単位電場が印加されたときに垂直方向に流れる電流（Hall係数）が絶縁体中で $e^2/h \times$ （整数値）に量子化する現象です。この整数値はChern数と呼ばれ、物質中の電子のトポロジーを反映する量の1つです。このような整数値の量、すなわちトポロジカル数が有限の値を持つ絶縁体や超伝導体はトポロジカル絶縁体・トポロジカル超伝導体と呼ばれ、試料の表面付近にギャップレス励起を持つことが知られています。物質中の非自明なトポロジーは、電気磁気分極率や熱Hall伝導率といった輸送量にも直接現れます。このようなトポロジカルな側面からの物質の理解は未完成であり、新たなトポロジカル相の提案・候補物質の探求などが重要な課題です。また、電気分極をはじめとした「物質中の電磁気学」における基本的な量を計算する上で、トポロジカル相の研究で用いられる概念が非常に有効であることがわかっています。特に、電気四極子・磁気四極子といった高次の多極子モーメントを物質中で計算する手法は近年になってようやく開発され、今なお研究が続く分野です。我々の研究グループでは、エキゾチックなトポロジカル絶縁相・超伝導相の提案や、磁気多極子の計算手法の提案などの研究を行っています。



メビウス型トポロジカル超伝導の表面状態

非平衡量子現象

近年の実験技術の向上と理論手法の進歩に支えられ、物性物理学における非平衡現象の重要性が増しています。平衡系での転移温度以上でも超伝導に類似した振る舞いが見られる「光誘起超伝導」や、平衡系には存在しない非平衡系特有の物質相である「フロッケ・トポロジカル相」・「離散時間結晶」など興味深い非平衡現象が多数報告されています。また、非平衡状態を積極的に活用して物性をコントロールすることを目指した研究も盛んに行われています。例えば、レーザー光などによる周期駆動を用いて望みの系を作り出す手法は「フロッケ・エンジニアリング」と呼ばれ、冷却原子気体においては標準的な手法として確立されつつあります。しかし、急速に理解が発展している一方で、全く新しい現象が発見されたり、理論的な未解決問題が多数残されていたりと、非平衡物理は物性物理学のフロンティアであり続けています。我々の研究グループでは、光を照射した固体物質系や冷却原子気体などの人工量子系を舞台に、量子多体系における非平衡現象の理解、及び、新たな物性制御の方法提案を目指して研究を行っています。近年では、銅酸化物薄膜におけるレーザー誘起トポロジカル超伝導、冷却原子気体におけるレーザー誘起近藤効果などの新しい現象を見出しました。



レーザー誘起トポロジカル超伝導の模式図