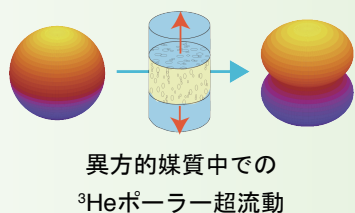
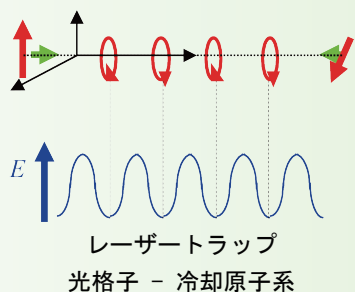
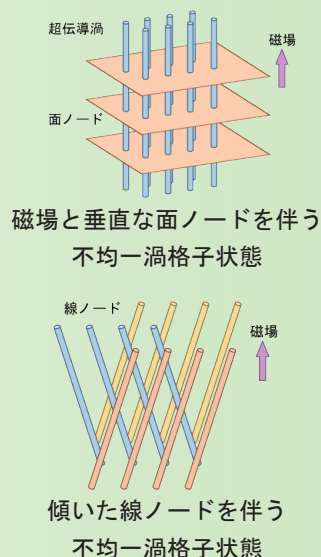


凝縮系理論グループでは、量子力学効果が巨視的スケールで現れる「凝縮系」の理論研究を行っています。特に新奇な超伝導・超流動、非平衡量子現象、量子磁性といった現象を示す、強相関電子系、重い電子系、冷却原子気体、液体ヘリウム、ナノスケール量子系など様々な系を研究対象としています。以下に、最近の研究テーマをいくつか紹介します。

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に相転移します。Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理論により、超伝導状態では、弱い引力で結びついた電子対が重心運動量ゼロの量子状態に凝縮していることが明らかにされました。超伝導状態に強い磁場を加えると、渦格子状態が生じます。渦格子状態では、格子状に並んだ超伝導量子渦が、トポロジカルな理由で量子化された磁束を伴って現れます。近年、電子相関の強さ、物質の次元性、Fermi面のトポロジーなどに依存して、多彩な渦格子状態が生じることが明らかになってきました。我々は、希土類元素を含む超伝導体における反強磁性と共存した渦格子状態や、遷移金属元素を含む超伝導体における不均一渦格子状態 (右図) などに注目し、実験結果の説明や多様な現象の提案を行っています。また最近では、BCS-BEC クロスオーバー域超伝導体と呼ばれる、電子間引力が強い BCS 理論では記述できない超伝導体にも着目しています。BCS-BEC クロスオーバーの研究は主に冷却 Fermi 気体が対象とされてきましたが、我々は結晶格子や外部磁場の効果が重要となる固体電子系にも目を向けることで、特徴的な超伝導相図の解明に取り組んでいます。

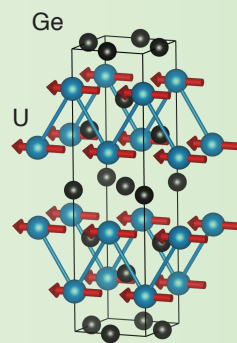


Bose-Einstein凝縮と超流動

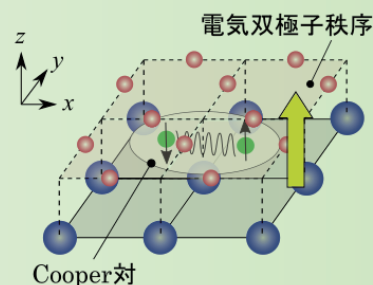
極低温では、電氣的に中性な Bose 粒子系は Bose-Einstein 凝縮 (BEC) を起こし、粒子間斥力により超流動性を獲得します。このような Bose 粒子系は、 ^4He に加え、レーザートラップされた多種の冷却 Bose 気体 ^7Li , ^{84}Sr , ^{87}Rb , ^{170}Yb などで実現されています。近年では、対向するレーザーにより周期ポテンシャルをもつ光格子系 (左上図) が形成され、欠陥のない理想的な格子系として、さらには固体電子系でいうところの結晶格子・外部磁場・スピン軌道結合の効果により新奇な量子現象が発現する舞台として注目されています。また、液体 ^3He という Fermi 粒子系ではポラー相という新奇超流動相が異方的多孔質媒質中で実現され (左下図)、盛んに研究されています。我々はその微視的理論の構築とともに、そこで実現している半整数渦などの新奇なトポロジカル励起を理解するための研究に取り組んでいます。

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。したがって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。このような例を初めとして、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。



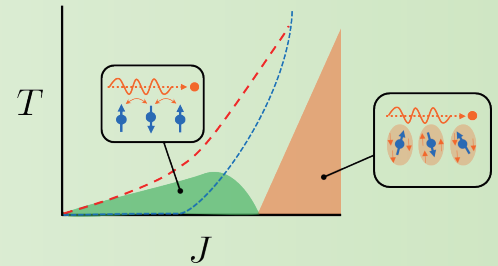
超伝導体 UGe_2 の結晶・磁気構造



電気双極子秩序と超伝導の共存

強相関電子系

我々の身の周りにある物質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、それは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。例えば、近藤効果、多極子秩序、よりシンプルには磁性の発現など、強相関電子系に特徴的な物理現象は無数に存在します。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一つです。例えば、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、近年の研究においては、多様な相が電子相関効果を通じて発現することが明らかになっています。また、強相関電子系において用いられるモデルに対しては、数理物理や素粒子物理の手法を用いた解析が可能であり、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。

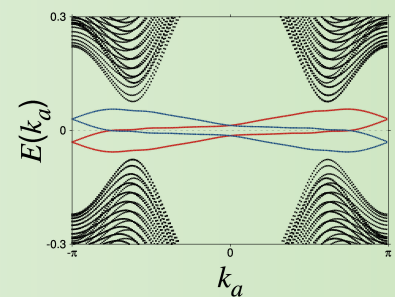


Doniach 相図

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

トポロジカル絶縁体・超伝導体

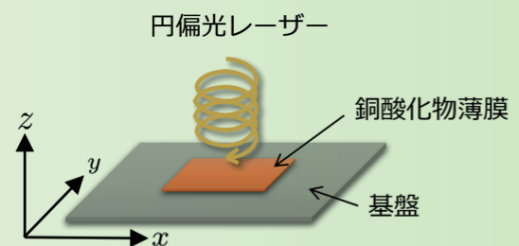
物質中の電子が持つトポロジは、輸送現象や電磁気学を理解する上で極めて重要です。例えば、量子 Hall 効果は、単位電場が印加されたときに垂直方向に流れる電流 (Hall 係数) が絶縁体中で $e^2/h \times (\text{整数値})$ に量子化する現象です。この整数値は Chern 数と呼ばれ、物質中の電子のトポロジを反映する量の一つです。このような整数値の量、すなわちトポロジカル数が有限の値を持つ絶縁体や超伝導体はトポロジカル絶縁体・トポロジカル超伝導体と呼ばれ、試料の表面付近にギャップレス励起を持つことが知られています。物質中の非自明なトポロジは、電気磁気分極率や熱 Hall 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」や「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、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