

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	中川 大也
論文題目	Kondo Effect and Topological Phenomena in Ultracold Atoms (冷却原子系における近藤効果とトポロジカル現象)		
(論文内容の要旨)			
<p>光格子中の冷却原子気体の系は、その制御性の高さにより、様々な量子多体现象を実現する舞台となる。特に、冷却原子系は固体中の電子系とはその特性や自由度が大きく異なるため、通常の固体中では実現の難しい現象を実現する場として重要である。本論文では、近年の冷却原子気体の実験的進展を受け、新たな量子多体现象を実現するための実験的セットアップの提案を行い、そこから引き出される量子多体系の性質を明らかにした。本論文は次の3つの内容からなる。</p> <p>[1]冷却アルカリ土類原子系におけるレーザー誘起近藤効果。アルカリ土類型原子は、非常に寿命の長い準安定励起状態の存在や、核スピンの由来したSU(N)対称性を持った相互作用など、数多くの興味深い性質を持つ。本研究では、アルカリ土類型原子における基底状態と準安定励起状態間の光遷移を用いることにより、レーザーで近藤効果を誘起・制御できるという理論提案を行った。光励起を強相関現象に用いる場合、系の温度が上昇することが問題となるが、スレーブボソン法を用いた理論解析により、光照射下でも温度上昇は近藤温度以下に抑えられることを見出し、確かに光励起により近藤効果が誘起されることを確認した。また、レーザーの偏光自由度が原子のスピンの結合することにより、スピンの大きい成分ほど有効質量の重くなるスピン依存Fermi液体状態が実現することを指摘した。</p> <p>[2]1次元近藤格子系における対称性に保護されたトポロジカル相。本研究では、上記のセットアップを1次元光格子系に拡張することにより、対称性に保護されたトポロジカル相およびそれに付随したトポロジカル相転移が実現可能であることを示した。ボソン化とくりこみ群を用いることにより基底状態の相図を決定し、各相がどのような対称性の下で区別されるかを詳細に明らかにした。ここで実現されるトポロジカル相は強結合極限で量子スピン系のHaldane相に連続的に繋がる相であるが、近藤格子系のようにフェルミオンの電荷自由度が存在する場合、Haldane相は空間反転対称性にのみ保護されたトポロジカル相となり、空間反転対称性を破る摂動を加えると自明な相に断熱的に変形できる。この性質をボソン化法を用いて具体的に示し、近藤格子系のトポロジカル相が強結合極限と共にどのようにスピン系のHaldane相に移り変わっていくかを明らかにした。</p> <p>[3]強相関系におけるトポロジカルポンプの量子Hall状態による構成。ごく最近、冷却原子系の実験により動的なトポロジカル現象の代表例であるトポロジカルポンプが実現された。これは空間1次元と時間次元を合わせることで2次元系の整数量子Hall効果と等価であることが知られているが、基本的には相互作用のない自由粒子系に対する現象である。本研究では、量子Hall状態のthin-torus極限とLaughlinのflux insertionの議論を組み合わせることで、相互作用から生み出される量子Hall状態に対応したトポロジカルポンプの系統的な構成法を提案した。例として、分数量子Hall効果のLaughlin状態に対応したトポロジカルポンプは1次元CDW状態を用いて構成でき、ポンプ量は分数値に量子化されることを示した。また、より非自明なトポロジカルポンプとして、ボソンの整数量子Hall状態に対応したポンプを構成した。ボソンの整数量子Hall状態のthin-torus極限は有効的にスピン1の反強磁性Heisenberg模型で記述され、基底状態はHaldane相となることを示し、対応したトポロジカルポンプはHaldane相とMott絶縁体相を連続的に繋ぐ過程として記述できることを示した。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

冷却原子気体の系は、量子物性物理において固体電子系と並び立つ重要な舞台であり、また、固体中では実現の難しい現象を観測するためにも大きな役割を果たす。この系では原子間の相互作用の強さも調節可能であるため、原子間の強相関効果が本質的な現象も数多く観測される。中川氏は、近年の冷却原子気体における実験的進展を背景に、原子間の強相関効果が生み出す新たな量子現象を実現するための理論的提案を行い、それを基に強相関系・トポロジカル相の持つ性質の一端を明らかにした。本論文は[1]冷却アルカリ土類原子系におけるレーザー誘起近藤効果、[2]1次元近藤格子系における対称性に保護されたトポロジカル相、[3]強相関系におけるトポロジカルポンプの量子Hall状態による構成、の3つの部分からなる。以下に各項目に分けて記述する。

[1]では、アルカリ土類型原子の持つ準安定な励起状態を利用し、レーザーによる光励起によって強相関現象の典型例である近藤効果を誘起・制御するという提案を行った。強相関効果は一般に低温で顕著となるため、光励起による系の温度上昇が問題となるが、スレーブボソン法に系のエネルギー保存則と粒子数保存則を考慮した解析によって光照射後の温度が近藤温度以下に留まることを示し、光励起が近藤効果を誘起することを確認した。通常光励起は強相関効果にとっては不利に働くことが予想されるが、光励起が近藤効果をむしろ誘起するという結果は本研究の顕著な特徴であると言える。また、レーザーの偏光自由度と原子のスピン自由度の結合により、近藤効果によるくりこみにスピンに依存した振る舞いが見られるという、光を用いたセットアップ特有の性質を見出した。

[2]では、同様の系を1次元光格子系で考えることにより、近藤格子系において対称性に保護されたトポロジカル相が現れ、レーザー誘起近藤相との間のトポロジカル相転移が起こることを示した。ボソン化法を用いた解析によって基底状態の相図を決定すると共に、各相がどのような対称性によって守られているかを明らかにした。特に、近藤格子系のトポロジカル相が、電荷自由度の存在によって空間反転対称性のみで保護されていることを示した。

[3]では、冷却原子系で近年実現されたトポロジカルポンプの実験を背景に、その強相関系に対する拡張を行った。通常トポロジカルポンプは相互作用のない自由粒子系に対して議論され、整数量子Hall効果と等価な現象であることが知られているが、本研究では量子Hall状態のthin-torus極限と呼ばれる擬1次元極限を基に、相互作用によって現れる量子Hall状態に対応したトポロジカルポンプが構成できることを示した。特に、分数量子Hall効果のLaughlin状態に対応したトポロジカルポンプは1次元CDW状態を使って与えられ、さらにボソンの整数量子Hall状態の擬1次元極限はHaldane相で与えられるという興味深い結果を導いた。

以上の結果は、いずれも冷却原子気体の最新の実験結果に基づき、その可能性をさらに広げるための理論的基礎を与えるものと考えられる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成29年1月12日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降