

近年、物質に電磁場などの外場を印可することにより平衡系では実現しない非平衡状態を創り出すことを目指すの光誘起相転移の研究が注目すべき発展を遂げている。本論文は、これらの進展に動機付けられた研究であり、光により周期的に駆動された量子系において新奇な量子相が実現する可能性を探索した理論的研究である。このような周期駆動系は Floquet 理論により記述されるが、本論文では特に、先行研究で用いられてきた駆動周波数が大きい極限からの摂動展開(高周波展開)が破綻する場合に着目した研究を行っている。

本論文は 6 章からなる。第 1 章は論文全体のイントロダクションであり、光誘起相転移の実験・理論両面における研究の進展と、研究の動機が述べられている。第 2 章は本論文の基礎理論である Floquet 理論の概略が述べられている。2 章の前半では時間に関する離散並進対称性に基づいて、時間依存の問題を静的な問題に焼き直す方法が説明され、後半では前半で述べられた定式化と周期駆動系の統計力学的性質との関係についての先行研究がレビューされている。

以上の準備のもとで、本論文ではいくつかの新奇現象の可能性が理論的に予言されている。第 3 章では、円偏光によって駆動された相互作用のない Dirac 粒子系が議論されている。この系では周期駆動がトポロジカル相転移を引き起こすことが知られている。とりわけ 2 次元系での Chern 絶縁体相については詳細な研究がなされており、低周波駆動において、準位共鳴に由来する複雑なトポロジカル構造が現れることが知られていた。本論文ではまずこの構造が従来の高周波数展開では記述できないことを示した上で、この問題を克服するために周期駆動系に対する Brillouin-Wigner の摂動論を定式化し、これを用いて Dirac 点周辺に現れる共鳴由来のトポロジカルギャップの構造を議論している。更に、ここでの議論を 3 次元系に適用することで、低周波駆動に特有の準位共鳴に由来する無数の Weyl 点の存在とその性質を明らかにしている。第 4 章では、斥力 Hubbard 模型の強結合領域、すなわちモット絶縁体相を議論している。モット絶縁体に円偏光を照射したとき、そのスピン自由度がどのように振る舞うかを議論するために、本論文では周期駆動系の強結合展開の定式化をおこなっている。従来の高周波展開はオンサイト斥力よりも駆動周波数が大きい限られた状況下でしか適切に扱うことができなかったが、本論文で示された定式化により現実的なアプリケーションが議論できるようになった。この定式化を用いて、円偏光によってスカラースピンカイラリティが誘起され、特にこれが従来の展開では記述できない領域で大きな値を示すこと、また、これがカイラルスピン液体相を実現する可能性があること、さらに、円二色性がスピンカイラリティのプロブとなりうること等を議論している。第 5 章では、引力 Hubbard 模型を直線偏光で駆動した場合に新奇な超伝導状態が発現する可能性を議論している。Hubbard 模型には引力側と斥力側の等価性が知られているが、本論文は周期駆動系ではこの等価性が破れることに着目し、強結合領域での振る舞いを第 4 章で定式化した強結合展開に基づき議論している。その結果、有効ハミルトニアン基底状態が、重心運動量が Brillouin ゾーンの端に分布する η ペアリング超伝導状態になる場合があることを明らかにしている。更に、 η ペアリングの光格子系での実現を念頭におき、それを実証するために、エネルギー散逸がない孤立系の時間発展において η ペアリングが実現することを数値的に確認している。本論文は超伝導秩序と電荷密度波の間の相転移が散逸なしに起こることに着目し、突然外場を印加して基底状態を s 波超伝導から η ペアリング超伝導へと変化させるだけでは相転移を引き起こせないが、段階的に外場振幅を変化させることで、電荷密度波状態を中間状態とする η ペアリング超伝導への時間発展が可能であることを数値シミュレーションで実証している。第 6 章では全体のまとめを行っている。

本論文の内容は見上敬洋氏、安田憲司氏、辻直人氏、Leda Bucciardini 氏、Sthitadhi Roy 氏、岡隆史氏、青木秀夫氏との共同研究を含むものであるが、論文中で述べられている結果はいずれも論文提出者が主体となって導出したものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士(理学)の学位を授与できるものと判断する。