

論文内容の要旨

論文題目：**Theoretical study of exotic quantum phases in periodically-driven systems**

(周期駆動系における新奇量子相の理論的研究)

氏名：北村 想太

凝縮系物理学において、物質の相や物性を自在に制御することはこの分野全体が目指す大きな目標の一つである。光によって物質の相を変化させる光誘起相転移は、この達成の可能性を切り広げると同時に、物性の制御に動的な物性のスイッチングという新たな局面ももたらす。光誘起相転移が従来の相転移と大きく異なる点は、それが非平衡現象として実現されることにあり、そこでは平衡系では思いもかけない豊かな物理が実現し得る。そのような非平衡系に特有な現象を探り当て、理解することが光誘起相転移の研究が目指す着地点の一つといえる。

光照射された物理系を記述する枠組みの一つに、周期外場中の量子系を取り扱う一般論である Floquet 理論がある。そこでは非平衡定常状態が光を纏った電子の有効ハミルトニアンによって記述されるが、有効ハミルトニアンに現れる非自明な構造から、単なる温度上昇を超えた新奇な現象が光によって駆動される可能性が再認識され、近年注目を集めている。

Floquet 理論の利点は任意の強度の周期外場が扱えるとともに、摂動展開が利用できることにあり、一般的に複雑である非平衡現象を、明瞭な物理的描像をもって解析的に議論することが可能となる。特に、これまでの研究では駆動周波数が大きい極限からの摂動展開によって、多くの非平衡現象が発見・理解されてきた。ところが、これらの理論で論じられるほど高エネルギーの外場による連続的な駆動は、現実問題としては固体試料の損傷などの問題が生じ得る。したがって、Floquet 理論の枠組みにより、実験の微視的理解を進展させたり実現性の高い理論提案を構築したりするためには、高周波数極限よりは、弱い振幅による駆動やエネルギーギャップより小さい周波数での駆動といった、現実にも深刻な発熱や損傷が起こりにくい問題設定での理解の進展が重要であると考えられる。

したがって本論文では、周期駆動量子系の中でも特に、駆動周波数の大きい極限からの展開が破綻する場合を中心として、新奇な量子現象が実現する可能性を探索した。対象とした系は 1) 相互作用しない Dirac 粒子系、2) 強く斥力相互作用する格子系、3) 強く引力相互作用する格子系、の全く異なる 3 種類である。これらの解析にあたり、著者はまずそれぞれの場合について系を摂動論的に扱う手法を新たに定式化した。その上で、得られた有効ハミルトニアンに現れる非自明な構造を解析することによって、それがもたらす様々な物理現象の理論的な理解を与えた。

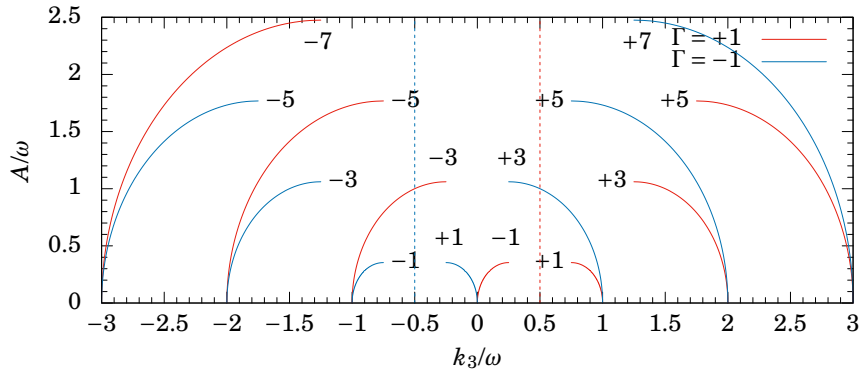


図 1: 低周波駆動により誘起された Weyl 半金属状態に現れる Weyl 点の外場振幅 A に対する k_3 (レーザー進行方向の波数)の軌跡。数字は Weyl 点の価数を表す。従来理解されていた $k_3 = 0$ から現れる 1 対の Weyl 点以外にも、大きな価数を持つ無数の Weyl 点が発生する。破線部分に展開の収束半径に由来するエネルギースペクトルの発散があるため軌跡が途切れているが、実際には同色・逆符号の軌跡と繋がり、Weyl 点是对消滅する。

以下に、各章で論じたオリジナルな研究結果の概説を示す。

Brillouin-Wigner 理論に基づく Floquet 状態の摂動展開 (第 3 章)

既存の研究では、高周波数極限からの摂動展開を考える際、ユニタリ変換に基づく定式化が主として用いられてきたが、本研究では、射影演算子に基づく摂動展開法を構築した。これはいわゆる Brillouin-Wigner 理論の周期駆動系への応用となっている。本定式化による高周波数展開では、有効ハミルトニアンが既存手法に比べ遥かに少ない項数で記述できる、など理論が透明となる。また、この理論の特徴として、振幅等の異なるパラメータによる展開にも応用可能であること、射影演算子の選び方に自由度があること、等が挙げられ、これらを利用することで高周波駆動だけでなく低周波駆動も同じ枠組みの中で統一的に理解することができる。

光誘起 Chern 絶縁体・Weyl 半金属における共鳴準位のトポロジカル構造 (第 3 章)

Brillouin-Wigner 理論を用いて、円偏光照射下の 2 次元および 3 次元の Dirac 粒子系の解析を行った。これらの系ではそれぞれ、トポロジカルに非自明な Chern 絶縁体相および Weyl 半金属相が誘起されることが高周波数展開によって理解されている。とりわけ 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、高周波数展開では記述できない複雑なトポロジカル構造が現れることが知られていた。本著者は、高周波数展開の低周波駆動での破綻がエネルギースペクトルの発散として現れることを実際に示し、外場振幅が弱い場合について、低周波数駆動に現れるトポロジカル構造を Brillouin-Wigner 理論を用いて記述した。特に、Weyl 半金

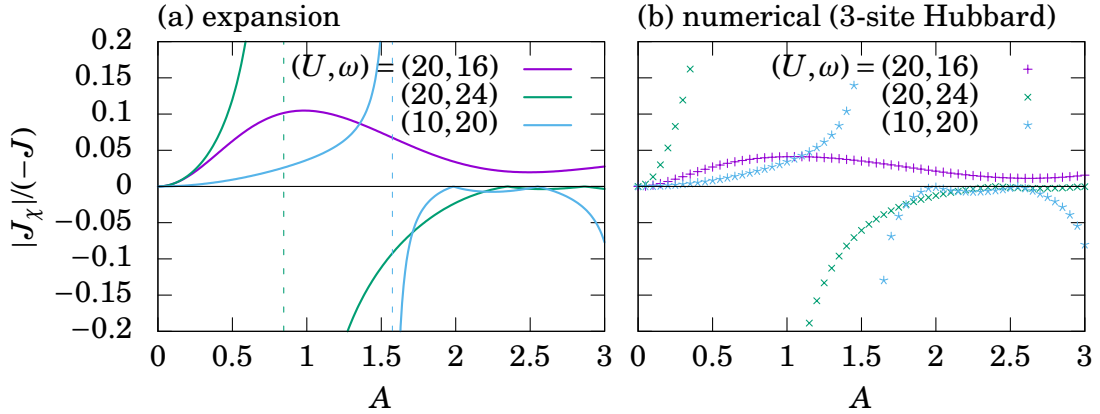


図 2: 円偏光により駆動された Hubbard 模型に生じるスカラースピカイラリティ項の交換相互作用に対する比率。(a) は本論文で定式化した強結合展開による結果、(b) は 3 サイト Hubbard 模型を用いた数値結果。従来理論が適用可能な $(U, \omega) = (10, 20)$ の場合に比べ、大幅な値の増大が見られる。

属相の低周波駆動での振る舞いはこれまで未知であったが、大きな価数を持つ無数の Weyl 点が現れることを見出した (図 1)。ここでは連続回転対称性がある場合を考えたが、これが格子模型上で実現され回転対称性が離散化した場合も議論し、その場合価数の高い Weyl 点が複数の Weyl 点に分裂することを見出した。

Floquet ハミルトニアン**の強結合展開と光誘起スカラースピカイラリティ (第 4 章)**

斥力 Hubbard 模型の spin 自由度の振る舞いが円偏光の照射下でどのように変容するのかを、強結合展開の方法を周期駆動系に拡張することで議論した。駆動周波数がオンサイト斥力よりも大きい場合には既存の摂動展開が利用でき、そこからはスカラースピカイラリティと呼ばれる spin の三体相関が生ずることが予想される。ここで定式化した展開手法により、電荷ギャップより小さい周波数の光による駆動における有効 spin ハミルトニアンを導出すると、そこで実現する三体相関が高周波領域に比べ大幅に増大することが見出された (図 2)。これは大きな三体相関項のもとで実現するとされるカイラル spin 液体相の光による誘起の可能性を示唆する。

他方、逆にスピカイラリティとレーザーのカップリングを利用して、円偏光レーザーにより Mott 絶縁体系の spin 三体相関をプローブできることも示される。さらに、円二色性や磁化に spin 三体相関の存在が反映されることも議論した。

周期外場による η ペアリング超伝導への動的相転移 (第 5 章)

引力 Hubbard 模型を直線偏光で駆動した場合に強結合展開を適用し、そこで生じる新奇超伝導状態を議論した。Hubbard 模型には引力側と斥力側の等価性が知られているが、これが外場の下では顕著に破れることを見出した。このために、Cooper 対の

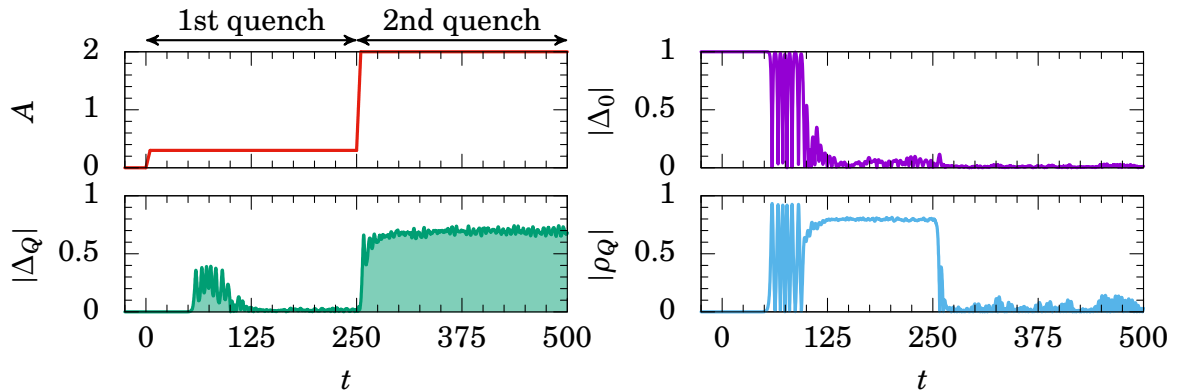


図 3: 引力 Hubbard 模型において、外場振幅 (A) を二段階に亘り増加したときの秩序変数の時間発展。 $|\Delta_0|$ 、 $|\Delta_Q|$ 、 $|\rho_Q|$ はそれぞれ s 波超伝導、 η ペアリング超伝導、電荷密度波の振幅を表す。はじめ s 波超伝導状態 (紫) にあった系が外場の照射により、電荷密度波の形成 (青) を経て η ペアリング超伝導 (緑) へと動的に相転移している。

有効ハミルトニアンは外場の周波数や振幅に応じて、より多彩な基底状態を見せる。特に、Cooper 対のホッピング振幅が反転することで「 η ペアリング」と呼ばれる重心運動量が極大値を取る特異な超伝導が基底状態となり得ることを見出した。

強い引力相互作用は光格子系が実現の最有力候補と考えられるが、そこではエネルギー散逸がなく、基底状態が非自明になっただけでは相転移が起こるとは限らない。そこで更に、孤立系の時間発展の中で動的な相転移が実現可能かどうかを検証した。安定性解析の結果、 s 波超伝導状態から η ペアリング状態への直接の相転移はエネルギー散逸なしには実現しないが、電荷密度波が発達する不安定性が散逸なしに起こることを見出した。これを利用すると、段階的に外場振幅を変化させることで実際に η ペアリング状態への時間発展が実現できることが予言される (図 3)。

まとめと今後の展望

以上のように、周期駆動された量子系を、駆動周波数が高い極限からの摂動展開が破綻する領域を重点として解析し、様々な新奇量子相の発現可能性を見出した。本研究では、いずれの模型についても摂動的な手法を採用し、現象に本質的な自由度のみに着目した議論を行った。その結果、現象の質的な理解や物理的な描像は大幅に深まったと考えられるが、将来課題としては定量的な議論として不十分なところが少なくない。特に、本論文では理論の対象を固体系に限定せず冷却原子系も含めて議論したが、固体系への応用では外場による温度上昇や本研究では考慮しなかった散逸の効果を議論することが必要である。他方、種々の実験を微視的に議論するには、取り入れるべき自由度が現状の計算手法で扱える範囲に対し膨大すぎるため、本研究で発展させた摂動的な手法により系を記述する自由度を極力小さく抑える方針も今後は重要になっていくものと考えられる。