

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	水田 郁
論文題目	Nonequilibrium quantum many-body phenomena in Floquet systems (Floquet系における非平衡量子多体现象)		
(論文内容の要旨)			
<p>時間周期的に駆動された系を Floquet 系と呼ぶ。Floquet 系は、光照射下の物質や冷却原子をはじめとする人工量子系で幅広く実現され、時間結晶など従来の平衡系の枠組みを超えた非平衡固有の現象を生み出すことから、理論的にも実験的にも重要な非平衡系のクラスである。そのような Floquet 系において最も基礎的かつ重要な課題が、周期駆動による非平衡性と相互作用による量子多体性の競合で創発される新たな非平衡量子現象の探索である。平衡系では量子多体性によって磁性や超伝導などの興味深い物性が発現する。そこに更に周期駆動による非平衡性を加えることでどのような非自明な物理が現れるかが最大の関心事であるが、一般的な Floquet 多体系では次の Floquet-ETH (Floquet 固有状態熱平衡化仮説) あるいは加熱問題が経験的に知られている：</p> <p>「孤立した非可積分な Floquet 多体系では無限時間後に自明な定常状態へ緩和する」。</p> <p>それ故に、加熱問題を上手に回避した Floquet 多体系の非自明なダイナミクス・定常状態を探索することが課題となっている。</p> <p>上記の背景のもと、本学位論文で水田氏は Floquet 理論などの理論的手法と厳密対角化などの数値的手法を組み合わせ、共鳴駆動下の Floquet 系、散逸下の Floquet 系、および孤立非可積分な Floquet 系で起こる新しいダイナミクス・定常状態に関する研究結果を報告している。本論文は主として、[1] 共鳴駆動下の Floquet 系における準定常状態の解明とその物性制御への応用 (第2章) [2] 散逸下の Floquet 系における Markov 性の破れた普遍的なダイナミクスの解明 (第3章) [3] 孤立非可積分な Floquet 系における厳密に非熱的な定常状態の発見 (第4章) からなる。以下では各内容について要約する。</p> <p>[1] “無限時間後” という加熱問題の前提条件を破ることで、Floquet 多体系では十分長い寿命を持つ非自明な準定常状態の存在は許容されている。高周波駆動下の Floquet 系ではその準定常状態の存在や性質、物性制御への応用が近年盛んに研究されているが、非平衡系固有の現象の舞台である共鳴駆動下の Floquet 系ではその限りではなかった。そこで、本研究では、共鳴駆動下の準定常状態を記述する有効ハミルトニアンを導出し、共鳴領域の準定常状態では新たに安定的な対称性が生じることを明らかにした。また、その帰結を応用することで、非平衡系固有の現象として準定常状態下の時間結晶の解析法や、新たな対称性を用いたトポロジカル物質相の準定常状態下での物性制御法を構築した。</p> <p>[2] “孤立した” という加熱問題の前提条件を破っていることから、散逸下の Floquet 系は非自明な物理の舞台として期待され近年盛んに研究されている。しかし、その一方で散逸・周期駆動・相互作用が共存するためにその解析は容易ではなく、どのような状況で非平衡固有の現象が起きるかは明らかではない。そこで本研究では散逸下の Floquet 多体系として最も単純な高周波領域に着目し、Liouvillian の性質を調べることで Floquet 系と時間非依存系の普遍的な差異を調べた。その結果、高周波領域では時間非依存系と等価になり非平衡固有の性質を持たない従来の孤立Floquet 系と対照的に、散逸下の Floquet 多体系では一般的に時間非依存系に対応物を持たないこと(有効的な Markov 性の破れ)を明らかにした。</p> <p>[3] Floquet-ETH および加熱問題は数値的・実験的な研究により経験的に信じられているも</p>			

ので、その証明はない。すなわち、その前提条件を全て満たして、“孤立した” “非可積分な” Floquet 系において “無限時間の寿命を持つ” 非自明な定常状態が例外的に存在する可能性が残されている。そこで本研究では、そのような例外的なモデルとして 孤立した非可積分系であるにもかかわらず非自明な定常状態を持つ Floquet 量子多体スカーという現象を発見した。具体的には、平衡系の固有状態熱平衡化仮説の反例として近年着目されている量子多体スカーと Floquet 理論を組み合わせ、Rydberg 原子上のモデルを構築し解析的・数値的に非熱的な永久振動が現れうることを明らかにした。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

近年の実験技術の進展に支えられ、非平衡量子現象は凝縮系物理学における重要な研究テーマの一つとなっている。このような非平衡量子系は、その理論的取扱いが難しい一方で新奇な量子現象を生み出す格好の舞台となっている。中でも周期的に時間駆動された系 (Floquet系) の研究が理論・実験の両面から急速に展開しており、固体系のみならず冷却原子系などの人工量子系を中心に多くの研究がなされている。このような中で最重要課題の一つとして、非平衡性と量子多体性に起因する非平衡系に特有な量子現象の探索があげられる。しかしながら、周期駆動された一般的な Floquet 多体系では Floquet-ETHとよばれる加熱問題が経験的に知られている。この加熱問題を回避し、非自明なダイナミクス・定常状態を探索することが重要である。

本学位論文は、共鳴駆動下にある Floquet 系、散逸下の Floquet 系、および孤立非可積分な Floquet 系で生じる新奇なダイナミクス・定常状態に関する研究成果をまとめたものである。まず第1章で非平衡量子多体系に関する研究の進展にふれたあと、第2章以降で以下に述べる研究成果をまとめている。

第2章では、非平衡系固有の現象のプラットフォームとなっている共鳴駆動下の Floquet 系を取り扱う手法を開発している。これを用いて共鳴駆動下の準定常状態の性質を調べ、共鳴領域に新たに安定な対称性が生じることを見出している。さらに、非平衡系固有の現象として準定常状態下の時間結晶の解析法や新たな対称性を用いたトポロジカル物質相の準定常状態下での物性制御法を構築するなど、この分野に新たな知見をもたらしている。

第3章では、散逸をもつ Floquet 系において、Markov 性の破れた普遍的なダイナミクスの解明を行っている。このような系では、散逸・周期駆動・相互作用の存在のため解析は一般に難しい。水田氏は、高周波領域に注目し、Liouvillian の性質を調べることで散逸下の Floquet 多体系では一般に時間非依存系に対応物を持たない現象が現れることを明らかにしている。これは、従来の孤立 Floquet 系が高周波領域では時間非依存系と等価な現象を示すという結論と対照的をなすもので、非平衡特有の性質を明らかにしたという点で高く評価される。

第4章では、孤立非可積分な Floquet 系において新たな非熱的な定常状態を厳密に見出している。Floquet-ETHは数値的・実験的研究により得られた経験的なものであり、その前提条件を全て満たしつつ非自明な定常状態が例外的に存在する可能性がある。水田氏は、そのような例外的モデルとして 孤立した非可積分系にもかかわらず非自明な定常状態を持つ Floquet 量子多体スカーという現象を理論的に見出している。

以上の結果は、Floquet系における非自明な性質に関して新たな知見をもたらすものである。特に、非平衡量子現象の系統的研究手法を開発し、これを応用してFloquet系にいくつもの新奇現象を理論的に予言した点は新しく、凝縮系物理における非平衡量子現象の研究において重要な意義を持つ。本研究で明らかにされた現象や概念は、今後、非平衡量子現象を解明するうえでも重要な礎となるものである。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、令和4年1月18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