



Title	Time Crystals and Space Crystals in terms of Macroscopic Quantum Phenomena [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	中津川, 啓治
Citation	北海道大学. 博士(工学) 甲第13988号
Issue Date	2020-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/78116
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	theses (doctoral - abstract and summary of review)
Additional Information	There are other files related to this item in HUSCAP. Check the above URL.
File Information	Keiji_Nakatsugawa_review.pdf (審査の要旨)



[Instructions for use](#)

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(工学) 氏名 中津川 啓治

審査担当者 主査教授 丹田 聡
副査教授 矢久保 考介
副査教授 長谷川 祐司
副査名誉教授 新井 朝雄 (本学大学院理学院)
副査客員准教授 藤井 敏之 (旭川医科大学物理教室)

学位論文題名

Time Crystals and Space Crystals in terms of Macroscopic Quantum Phenomena
(時間的結晶・空間的結晶:巨視的量子現象としての研究)

近年、物性物理学において通常のバルクの理論が適応できない系の秩序相や相転移をどのように議論するかが問題となっている。本研究では測定やデコヒーレンスによる対称性の破れ、実空間トポロジーと演算子の定義域、そして波動関数の干渉等、量子系特有の現象に着目し、境界の影響が無視できないトポロジカル物質や単層層状化合物における新たな秩序相の研究を以下の通り行った。

(1) デコヒーレンスによる時間結晶:

時間結晶は時間並進対称性を破る基底状態として 2012 年に F. Wilczek によって提案された。物理的な基底状態はエネルギーだけではなく測定/観測と深く結びついていることが知られている。厳密に言えば、基底状態はハミルトニアン対称性を守るべきであり、対称性が破れた状態は基底状態ではない。しかし、基底状態を測定することで波束の収縮が起こり、離散的な対称性があらわになる。有限系では量子揺らぎの影響ですぐに対称性が回復するが、熱力学的極限(体積無限大の極限)で測定後の状態が安定(有効的な基底状態)になることがあり、自発的な対称性の破れが起きる。時間結晶基底状態もこのように自発的な時間並進対称性の破れで出来ることが期待されているが、いまだに実現されていない。しかし、熱力学的極限が適応できない有限系で時間結晶基底状態が実現である可能性が残されていた。本研究では、観測問題のモデルである Caldeira-Leggett 模型をリング系に拡張し、自発的な対称性の破れではなくデコヒーレンスが巨視的波動関数を持つ有限リング系の時間並進対称性を破ることを発見した。具体的なモデルとして、巨視的波動関数を持つリング状の非整合電荷密度波(ICDW)を使った。独立した ICDW リングの基底状態は様々な位相を持つ ICDW の重ね合わせで、空間並進対称性と時間並進対称性を保っている。しかし、環境(電磁場揺らぎ)と相互作用することで ICDW の位相が徐々に決まり、局所的な電荷密度がリングの半径に比例する周期で振動することで準安定な時間結晶状態ができることを示した。この結果はデコヒーレンスに加え、(2)で述べる厳密なリング系の量子化に着目することで実現できた。つまり、トポロジーと演算子の定義域は密接に結びついており、リング系と 1 次元系(半径無限大)では異なる量子化条件が適応される。したがって、熱力学的極限ではリング系特有の物性現象を完全に理解することは困難ある。

(2) 時間結晶と時間演算子:

量子力学では位置と運動量は演算子(=物理量)であり、不確定性関係が確立されている。また、実験事実として時間とエネルギーの間にも同じような不確定性関係が成立することが知られている。したがって、この時間とエネルギーの不確定性関係を導出できる時間演算子が存在するかが重要な問題となる。

数学的事実として、エルミート演算子には階層性があり、自己共役演算子は特殊なエルミート演算子である。そして、観測可能な物理量(オブザーバブル)に関する観測はすべて実数を固有値とする自己共役作用素で表現される。しかし、今まで得られてきた時間演算子はエルミートだが自己共役演算子ではない。したがって、量子力学の時間はいまだにパラメーターとして扱われている。一

方で、(1) で述べた時間結晶は時間をパラメーターから物理量に昇格しているように思われる。本研究では、時間結晶の観点から時間演算子の問題の解決を試みた。鍵になるのはリング系の量子化である。リング系の波動関数は周期境界条件を満たさなければならないが、角度演算子は多価演算子なので周期性を破る。今まで様々なアプローチでリング系の量子化が試みられてきたが、今回一般化された弱 Weyl 関係式 (GWWR) を基にこれらの量子化を統括的に理解できることを発見した。また、GWWR を基にリング系の自己共役時間演算子を導出することに成功した。さらに、エルミートではないものの実固有値を持つ時空反転 (PT) 対称時間演算子を定義し、自己共役演算子との関係を調べた。これらの演算子は量子系の「時間的構造」と密接に結びついており、(1) で得られた量子時間結晶モデルの周期を反映していることを明らかにした。

(3) 空間結晶の代表である層状 MX_2 化合物における自由エネルギー多谷構造の発見とストライプ CDW 構造の起源: 遷移金属ダイカルコゲナイド (MX_2) などの層状化合物は、温度や結晶の対称性に依存して様々な電荷密度状態 (CDW) に相転移する。中でも $1T\text{-TaS}_2$ は特に多彩な CDW 相を示し、温度を下げるにつれて通常状態から、incommensurate CDW 相, nearly commensurate CDW 相, そして commensurate CDW 相へと転移する。通常の相転移の議論では温度を下げることで対称性の破れが起きる。しかし、この物質では温度を上げると nearly commensurate CDW 相へ転移する前に一度、低対称な stretched ハニカム (準ストライプ) 構造を持つ triclinic 相 (T 相) に転移することが知られている。また、 $2H\text{-TaSe}_2$ は温度を下げるにつれて、通常状態から incommensurate 相を経て commensurate CDW 相へ転移するが、昇温過程では低対称なストライプ相に一度転移することが知られている。T 相やストライプ相など、昇温過程のみで出現する低対称 CDW 相の発生メカニズムはこれまで、層間の相互作用を取り入れて説明されてきた。しかし近年、遷移金属ダイカルコゲナイドの薄膜を使った実験により、単層の CDW 状態の研究がなされ、T 相が観測されている。従って、T 相などの低対称状態の発現機構について、層間の相互作用による従来の説明とは異なるモデルが必要となっている。本研究では、二次元 CDW の Landau 理論を用いて、層間の効果を必要としない低対称 CDW 相の発現機構を議論した。この理論の自由エネルギーは中西と斯波によって解析され、冷却過程で発現する全ての CDW 相を生じることが知られている (実験で見られる CDW 状態に対応する自由エネルギー極小点が存在する)。しかし、恐らく当時の計算機の限界もあり、自由エネルギー極小の探索は実験で見られる CDW 状態のごく近傍でしか行われていなかった。我々は大規模計算により先行研究で調べられていなかった範囲まで自由エネルギー構造を探索し、多谷構造とそれに付随した複数の極小点を新たに発見した。さらにこれらの極小点に対応する CDW 状態が T 相やストライプ相に相当することも示した。これらの結果は、CDW の巨視的な波動関数の干渉のみで説明でき、層間の相互作用が無くても (従って単層でも) 低対称 CDW 相が発現する可能性を示している。さらに、逐次相転移の温度依存性の議論や、中西・斯波理論の一般化と $1T\text{-TaSe}_2$ における昇温過程の逐次相転移 (nearly commensurate 相-T 相-commensurate CDW 相) の予言も行った。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。