

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540327

研究課題名(和文)ハミルトニアン・リウビリアンの複素固有値問題による1次元電子カシミール効果の理論

研究課題名(英文)Theory of one-dimensional electronic Casimir effect in terms of complex eigenvalue problem of Hamiltonian and Liouvillian

研究代表者

田中 智 (Tanaka, Satoshi)

大阪府立大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80236588

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：1次元量子細線中に置かれた不純物状態間に働く電子的カシミール効果を、ハミルトニアンの複素固有値問題の視点から明らかにした。1次元連続バンドを通して原子間を電子が移動することにより働く力が、本質的に原子-輻射場相互作用系におけるカシミール効果と等価なものであることを明らかにした。電子的カシミール効果の場合には、有限のバンド質量を持つことにより、カシミール力の距離依存性が指数的に減衰し、1次元系特有のVan Hove特異性によりカシミール力が長距離に及ぶことを明らかにした。さらに、励起状態の原子に対しては連続バンド分散によりvirtual cloudの存在の有無が決定的に変わることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Electronic Casimir effect between impurities in a quantum wire has been theoretically investigated in terms of complex eigenvalue problem of Hamiltonian. We have revealed that a mechanism of a force between the impurities caused by an electron transfer through a one-dimensional conduction band is essentially the same as a ordinary Casimir force between atoms mediated by a virtual photon. In this electronic system, a finite effective band-mass of an electron leads the Casimir force to decay exponentially in the distance of the impurities, in contrast to a power law decay in an ordinary Casimir force. It is found out that the electronic Casimir force extends to a very long range due to the Van Hove singularity characteristic to a one-dimensional system. We have further clarified that virtual cloud, key element of the Casimir force, disappears when the atom is in the excited state as a result of the nonlinear dispersion relation of the electronic band.

研究分野：物性理論

キーワード：量子光学 非平衡統計力学

1. 研究開始当初の背景

カシミール効果は、空間的に離れた基底状態にある中性分子(原子)のあいだに、真空電磁場の揺らぎを通し巨視的な力が働く現象である。真空電磁場の揺らぎは分子の周りに生じる virtual photon によって変化するため、分子形状や電子状態の変化による dressed state の様態がカシミール効果に決定的な影響をもたらす。近年、励起状態からの緩和過程を含む動的カシミール効果や不純物間のエネルギー移動を引き起こす非平衡状態におけるカシミール効果など、多様な分子環境下での研究が実験的、理論的に精力的に行われている。カシミール効果は電磁場だけでなく、一般の連続場との結合による dressed state の形成という普遍的物理現象に深く関わっており、その微視的立場からの理解は多くの物理学分野において重要な課題であるにも関わらず励起状態におけるカシミール効果の様態は明らかにされてはいなかった。さらに、dressing の過程はハミルトニアングリーン関数の分岐点からの寄与であるため、極の効果ほどよく調べられてなかった。

微視的力学原理に基づくカシミール効果は摂動論を用いて理論解析されてきた。しかし、崩壊状態を含む非平衡状況を考えた場合には共鳴特異性によって系が非可積分系となり、ヒルベルト空間における通常の摂動論は破綻し、カシミール効果をどのように評価すべきかは明らかではなかった。また、場との結合が強い場合や、低次元系でスペクトルのバンドの端に現れる状態密度の van Hove 特異性によっても摂動論には困難が現れる。したがって、上に述べた多様な分子環境下でのカシミール効果を微視的原理から理解するためには、通常の摂動論の枠組みを超えた方法論を構築する必要があった。

2. 研究の目的

本研究で対象としたのは、1次元半導体量子細線中におかれた2つの不純物間を電子が移動する系である。(図1)一見、カシミール効果とは無関係に見えるが、連続的電子バンドが電磁場と同様の役割を果たし、不純物周りに連続的電子状態のdressingが生じ両者の間に力が働く点において、電磁場を介したカシミール力と本質的に同等であることに着目した。本研究では、これを電子的カシミール効果と呼んだ。この系は、

- 1) 連続電子バンドが非線形な分散関係を持つため、有限な質量を持つ連続場によるカシミール効果の研究のための良いモデル系となる。
- 2) 電子数が保存し Counter Rotating Wave term が無いため、解析が容易になる。

- 3) 1次元方向への閉じ込めのために、不純物間の相互作用が有効的に働く。
- 4) 状態密度に1次元系特有の van Hove 特異性を有し、低次元系特有の伝導機構を有する。
- 5) 本質的に強結合系となる。

という特徴を持ち、本研究の目的のための最適なモデル系である。

一般の非平衡状況下を含めた電子的カシミール効果を微視的力学原理から記述するために、この問題を拡張ヒルベルト空間におけるハミルトニアン複素固有値問題として取り扱うこととした。

量子細線中および1次元分子鎖中に離れて置かれた不純物準位間に働く電子的カシミール効果を、微視的力学原理に基づき明らかにすることを目的とし、連続電子場との結合により生じた不純物周りの dressed state を、拡張ヒルベルト空間内においてハミルトニアンまたはリウビリヤンの複素固有値問題から求め、カシミール効果の特徴を明らかにする。1次元系特有の van Hove 特異性、共鳴特異性が、電子的カシミール効果にどのように寄与するかを明らかにする。本研究が、物性物理学、量子光学、非平衡統計力学の合流から新しい分野を切り開く端緒となることを目指す。以上を、本研究の目的とした。

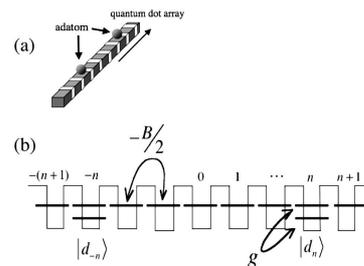


図1 量子細線中におかれた不純物準位間電子移動系

3. 研究の方法

上記の研究目的に対して、2つの不純物を含む半導体量子細線中および1次元分子鎖中の電子的カシミール効果を対象とし、静的カシミール効果、動的カシミール効果および非平衡状況下でのカシミール効果の3つの課題に対して研究を遂行した。

【課題1：静的カシミール効果】連続電子場との結合によって生じた不純物周りの dressed state をハミルトニアン複素固有値問題の固有状態として求め、自己エネルギーシフトの不純物間の距離依存性からカシミール力を求める。質量を持たない電磁場の場合と比較し、カシミール効果に対する場の質量の寄与を明らかにする。また、電子的カシミール効果に対する1次元バンド特有の van Hove 特異性の寄与を明

らかにする。

【課題2：動的カシミール効果】ハミルトニアン²の複素固有値問題を解いて得られた固有関数展開を用いて不純物状態の時間発展を求め、過渡的なカシミール効果を明らかにする。その場合電磁場の動的カシミール効果における単一光子放出に対応した電子波放射が起こるが、その過程を明らかにする。

【課題3：非平衡カシミール効果】1次元分子鎖や量子細線が温度の異なる熱浴と接し非平衡状況下にある時の電子的カシミール効果を密度行列の時間発展を記述するリウビル方程式に基づき明らかにする。

4. 研究成果

平成24年度は、一次元半導体上に離れた存在する不純物原子間を電子がトンネル運動することにより、引力が生じるメカニズムが、本質的に電磁場を介して中性原子間に働くカシミール効果と等価であることを示し、これを電子的カシミール効果と定義した。電子的基底状態に対しては電子的カシミール力が原子間距離に対して指数減衰することを示した。特に、一次元系連続状態の状態密度におけるVan Hove特異性のために、その指数減衰率が非常に小さくなり電子的カシミール力が長距離にまで及ぶことを示した。

平成25年度は、原子に属する電子準位のエネルギーが、連続バンド内にあり共鳴状況下での電子的カシミール効果の研究を行った。固有関数が属する関数空間を拡張ヒルベルト空間とし、ハミルトニアンに対する複素固有値問題を厳密に解き、共鳴状態に対する固有関数を得た。この状態に対する電子的カシミール力を求め、原子位置に対してカシミールポテンシャルが振動的に振る舞う事を明らかにした。さらに、複素固有値問題の解として、結合定数に対して非解析的な振る舞いをする超崩壊状態が複数得られる事を明らかにした。

平成26年度は、超崩壊状態における電子の崩壊ダイナミクスを明らかにするために、そのスペクトルとしての内殻吸収スペクトルの研究を行った。その結果、不純物原子間の電子移動時間の逆数に相当するエネルギーを有する複数の準安定状態が超崩壊状態に対応し、これらの状態への複数の吸収ピークが干渉し合い、原子間距離無限の極限では一つのローレンツ型のピークを形成する事を明らかにした。この移り変わりは、超関数としての一致として捉えられる事を明らかにした。さらに、エネルギー分散が非線形の場合にはカシミール効果の起因となるvirtual cloudが消失するが、時間周期的な駆動外場により過渡的にvirtual cloudが出現する事を明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

Roberta Incardone, Taku Fukuta, Satoshi Tanaka, Tomio Petrosky, Lucia Rizzuto, Roberto Passante, Enhanced resonant force between two entangled identical atoms in a photonic crystal, 査読あり、Physical Review A 89巻, 2014年, 062117(8ページ), DOI:10.1103/PhysRevA.89.062117

Yingyue Boretz, Gonzalo Ordonez, Satoshi Tanaka, Tomio Petrosky, Optically tunable bound states in the continuum, 査読あり、Physical Review A 90巻, 2014年, 023853(9ページ), DOI: 10.1103/PhysRevA.90.023853

K. Noba, N. Yamada, Y. Uesaka, S. Tanaka, T. Petrosky, Quasi bound states in continuum induced by an external oscillating field, 査読あり, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical 47巻, 2014年, 385302(19ページ) doi:10.1088/1751-8113/47/38/385302

S. Tanaka, R. Passante, T. Fukuta, T. Petrosky, Nonperturbative approach for the electronic Casimir-Polder effect in a one-dimensional semiconductor, 査読あり、Physical Review A 88巻, 2013年, 022518(12ページ) DOI: 10.1103/PhysRevA.88.022518

N. Yamada, K-i. Noba, S. Tanaka, T. Petrosky, Dynamical suppression and enhancement of intensity for an unstable state by a periodic external field, 査読あり, Physical Review B 86巻, 2012年, 14302. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.014302

R. Passante, L. Rizzuto, S. Spagnolo, S. Tanaka, T. Petrosky, Harmonic oscillator model for the atom-surface Casimir-Polder interaction energy, 査読あり, Physical Review A 85巻, 2012年, 62109 DOI: 10.1103/PhysRevA.85.062109

[学会発表](計 49 件)

山田修久,野場賢一,Tomio Petrosky,田中智, 時間周期的外場下での不安定量子系の、短時間、指数的緩和時間、長時間での外場の影響:複素フロケ固有値問題の視点から、日本物理学会 第70会年次大会, 2015年3月23日, 早稲田大学(東京都・新宿区)

福田拓,山田修久,サバンナ・ガーモン,トミオ・ペトロスキー,田中智, 半無限量子細線における不純物準位の超崩壊状態とそれに特徴的な吸収スペクトル, 日本物理学会 第70会年次大会, 2015年3月23日, 早稲田大学(東京都・新宿区)

山根秀勝,山田修久,Savannah Garmon,Roberto Passante,Tomio Petrosky, 田中智, 動的カシミール効果における仮想粒子から実粒子への転換ダイナミクス, 日本物理学会 第70会年次大会, 2015年3月23日, 早稲田大学(東京都・新宿区)

田中智,G. Ordonetz,Y. Boretz,T. Petrosky, 微小光共振器内励起子ポラリトンのラビ振動における散逸が引き起こす特異な緩和現象, 日

本物理学会 第70回年次大会, 2015年3月23日, 早稲田大学 (東京都・新宿区)

福田拓, 山田修久, Savannah Garmon, Roberto Passante, Tomio Petrosky, 田中智, 拡張ヒルベルト空間において発見された超崩壊状態の観測, 日本物理学会 2014年秋季大会, 2014年9月8日, 中部大学 (愛知県・春日井市)

山田修久, 野場賢一, Tomio Petrosky, 田中智, 時間周期外場とVan Hove特異性を利用した1次元Fano-Andersonモデルの減衰率の増大可能限界, 日本物理学会 2014年秋季大会, 2014年9月8日, 中部大学 (愛知県・春日井市)

山根秀勝, 山田修久, Tomio Petrosky, 田中智, 共鳴状態におけるvirtual particle cloudの出現に対するエネルギー分散関係の決定的な役割, 日本物理学会 2014年秋季大会, 2014年9月10日, 中部大学 (愛知県・春日井市)

Y. Boretz, G. Ordonez, S. Tanaka, T. Petrosky, Everlasting Rabi Oscillation Associated with an Optically Dressed Bound State in Continuum, The International Conference on Luminescence ICL14, 2014年7月14日 (ヴロツワフ・ポーランド)

山根秀勝, 山田修久, Tomio Petrosky, 田中智, Fano-Anderson modelで放出される電子場の様相: 量子ゼノン効果とvan Hove特異性の関連で, 日本物理学会 第69回年次大会, 2014年3月30日, 東海大学 (神奈川県・平塚市)

福田拓, 山田修久, Roberto Passante, Tomio Petrosky, 田中智, 境界条件が課された1次元Fano-Andersonモデルにおけるvirtual cloudから超崩壊状態への転換による real particle emission, 日本物理学会 第69回年次大会, 2014年3月30日, 東海大学 (神奈川県・平塚市)

山田修久, 野場賢一, Tomio Petrosky, 田中智, 1次元Fano-Anderson modelに時間周期外場を加えることで強調されたVan Hove特異性の効果, 日本物理学会 第69回年次大会, 2014年3月27日, 東海大学 (神奈川県・平塚市)

福田拓, 山田修久, Roberto Passante, Tomio Petrosky, 田中智, 一次元二不純物Fano-Anderson模型に現れる非摂動論的共鳴状態: Super Decaying Stateの出現, 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年9月28日, 徳島大学 (徳島県・徳島市)

田中智, 村瀬隆明, 神吉一樹, トミオ・ペトロスキー, 非熱的輻射場と相互作用する分子鎖の非平衡定常エネルギー流の制御: リウビル演算子の複素固有値問題の視点から, 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年9月28日, 徳島大学 (徳島県・徳島市)

山田修久, 野場賢一, Tomio Petrosky, 田中智, 時間周期的外場による不可逆性の制御: 特にFano-Anderson Modelに現れる多重バンド構造との関連で, 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年9月25日, 徳島大学 (徳島県・徳島市)

山田修久, 野場賢一, 田中智, Tomio Petrosky, Fano-Andersonモデルに時間周期的摂動が加わり多重バンド構造が出現した場合の崩壊過程の制御, 日本物理学会 68回年次大会, 2013年3月26日, 広島大学 (広島県・東広島市)

山田修久, 野場賢一, 田中智, Tomio Petrosky, 周期外場による不可逆崩壊過程のコヒーレント制御

(4) 複素スペクトル表示による共鳴-非共鳴効果の分析, 日本物理学会 2012年秋季大会, 2012年9月18日, 横浜国立大学 (神奈川県・横浜市)

野場賢一, 山田修久, 田中智, Tomio Petrosky, 周期外場による不可逆崩壊過程のコヒーレント制御(3) Van Hove特異性による不安定性の増大, 日本物理学会 2012年秋季大会, 2012年9月18日, 横浜国立大学 (神奈川県・横浜市)

田中智, Roberto Passante, Tomio Petrosky, 量子細線における電子的カシミール効果, 日本物理学会 2012年秋季大会, 2012年9月18日, 横浜国立大学 (神奈川県・横浜市)

田中智, 1次元分子鎖における非平衡輸送過程, 日本物理学会 2012年秋季大会, 2012年9月18日, 横浜国立大学 (神奈川県・横浜市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中智 (TANAKA, Satoshi)
大阪府立大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号: 80236588

(2) 研究分担者

神吉一樹 (KANKI, Kazuki)
大阪府立大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号: 10264821

(3) 研究協力者

トミオ・ペトロスキー (TOMIO, Petrosky)