

平成22年4月20日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2007 ～ 2009  
 課題番号：19540413  
 研究課題名 (和文) 交差する振動磁場中の原子の擬エネルギー構造と量子制御  
 研究課題名 (英文) Quasienergy Structure and Quantum Control of Atoms under Crossed ac-dc Magnetic Fields  
 研究代表者  
 日野 健一 (HINO KENICHI)  
 筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授  
 研究者番号：90228742

## 研究成果の概要 (和文)：

本研究は、交差する ac- および dc-磁場下にある原子の擬エネルギー構造の探求と、その特異な量子状態に対する振動磁場パラメータ (ピーク磁場の強さや振動数) による量子制御の可能性を目指した理論的研究である。当該系の大規模計算に対処可能な新しい効率的な数値計算法の開発とともに、半導体超格子における動的 Wannier-Stark ladder という現象との物理的な類似性・関連性を見出した。

## 研究成果の概要 (英文)：

In the present study, the theoretical investigation has been planned, aimed at examining quasi-energy structures of atoms under crossed ac- and dc- magnetic fields, and at exploring the possibility of quantum control of the associated states with an anomalous character with respect to parameters of the oscillating magnetic field such as its peak strength and frequency. We have developed a new method of numerical calculations complete with sufficient efficiency, by which a necessity of a large-scaled computation for the physical system of concern is remedied. Further, it is found that there is a physical analogy and a relation with the phenomenon of dynamic Wannier-Stark ladder in semiconductor superlattices.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：光物性理論、量子ダイナミクス

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：原子・分子物理、量子制御、振動磁場、フロケ状態、動的局在、超格子

## 1. 研究開始当初の背景

物質の量子状態をコヒーレントに操作す

ることは、昨今の量子コンピューティングや量子暗号などに留まらず、原子・分子から半

導体に至るまで物理・化学の広範な領域にわたる大きな研究テーマになっている。レーザーや振動磁場は操作できるパラメータが豊富であるため、これらとの相互作用を介した量子制御はとりわけ重要であり、多彩な現象が報告されている。原子の超微細構造における Lande-g 因子の磁場の繰り込み、半導体超格子における THz レーザーによる動的な電荷局在、二原子分子や半導体二重量子井戸におけるトンネリングのコヒーレント破壊などがその例である。

本研究では、交差する振動磁場による一電子原子の Zeeman レベルの量子制御を取り上げる。これは、よく知られている静磁場下の原子の Zeeman 分裂の延長線上にある研究という位置づけだけでなく、前述の THz 波に駆動された半導体超格子系と物理的な類似性が高い。この点に着目すると、原子分子系と半導体系という異分野間に跨る普遍的な理論の構築が可能になると期待される。

## 2. 研究の目的

当該の系は、振動磁場の二次 Zeeman 効果を見捨てる範囲で、半導体超格子における ac-Zener 効果を見捨けた動的 Wannier-Stark ladder (DWSL) と同等になる。しかし、これらの高次効果を考慮した際、両物理系での類似性がどの程度まで保持されるか否かは自明ではない。なぜなら、二次 Zeeman 効果と ac-Zener 効果では表式が全く異なるからである。

そこで、二次 Zeeman 効果を取り込んだ振動磁場下の原子の擬エネルギーや関連する光吸収スペクトルを数値計算し、DWSL との類似点と相違点を明確にし、更に、磁場による Floquet 状態の新しい量子制御の可能性を探求することが本研究の目的である。さらに、この目的を達成するため、Floquet 状態を精度よく計算する方法の開発が必要になる。これが第二の目的である。

## 3. 研究の方法

交流磁場を有する交差する振動磁場下の原子系の Hamiltonian は時間周期性を有するので、波動関数は「Floquet の定理」を満足する。これに基づいて波動関数 (Floquet 状態) を数値計算する際、Fourier 展開によって「周波数領域」へ移行するのが“定石”と考えられている。しかしながら、この Fourier-Floquet (FF) 展開法は非常に効率が悪い。更に、当該の原子系には、上述の角度方向の運動のほかに動径方向の運動の自由度が存在し、擬エネルギーを求めるために大規模な数値計算が必要になる。このような事情から、数値計算の効率化と精緻化を図るため、FF 展開法に替わる「新しい」数値計算法を開発するが必要になる。

そこで、FF 展開法に代わって、メーラー演算子による時間発展法に基づいた新規な方法を開発し、これを交差する振動磁場下の一電子原子の問題に適用して、擬エネルギー状態および光吸収スペクトルを数値計算した。この方法は、FF 展開法のように巨大フロケ行列を対角化するステップが不要であり、さらに擬エネルギーと光吸収スペクトルを同時に求めることが可能なので、数値計算の効率性において大きな利点を有すると考えられる。

## 4. 研究成果

この方法を最も単純な水素原子の問題に適用した。最初に、主量子数  $n=2$  まで取り込んだ小規模系でのデモ計算を実行し、既に数値結果が分かっている FF 展開法と比較して精度や効率性に関するチェックを行った。次に、FF 展開法では計算が困難になるような高い励起状態 ( $n=4$  まで) を取り込んだ計算を行い、計算結果の物理的な解析を行った。とりわけ、振動磁場の強さが大きくなるに従い、擬エネルギー状態間の複雑な結合が現れ、光吸収スペクトル形状にも有意な相違が見出された。この研究の当初の目的の一つである半導体 DWSL 状態との比較を行うと、この結合は当該の振動磁場下の原子において、反交差を発現するなど ac-Zener トンネリングと同じような役割を果たしていると理解される。ただし、反交差により引き起こされる光吸収スペクトル形状の不規則な変化は顕著には見いだされなかった。これは、対応する DWSL に比べ、振動磁場の強度がまだ小さいからであると考えられる。以上の研究結果は、当該分野の主幹学術誌である米国物理学会誌 Physical Review A に既に掲載されている。

本研究で開発された方法を、THz 波に駆動された半導体の励起子フロケ問題のようなより複雑で大きな系に適用すること可能になると期待される。さらに、これによって今まで未踏であるフロケ状態における量子制御の研究が大きく展開することも期待される。このような方向に沿った研究が現在進行中であり、半導体系関連の成果が出始めているところである。

## 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 19 件)

- ① Nobuya Maeshima, Kenji Yonemitsu, and Ken-ichi Hino, Photoinduced dynamics in the one-dimensional two-orbital degenerate Hubbard model, Journal of Physics: Conference Series (to be published) (2010). 査読有

- ② T. Shirahama, X. M. Tong, K. Hino, and N. Toshima, Atomic photoabsorption process controlled by static and oscillating magnetic fields, *Phys. Rev. A* **80**, 043414(6 pages)(2009). 査読有
- ③ N. Maeshima, K. Yonemitsu, and K. Hino, Photogenerated polaronic state in a one-dimensional dimerized Mott insulator K-TCNQ, *Journal of Physics: Conference Series* **148**, 012005(4pages) (2009). 査読有
- ④ K. Yashima, K. Oka, K. Hino, N. Maeshima, X. M. Tong, Anomalous Exciton Spectra of Laser-Driven Semiconductor Superlattices, *Solid State Commu.* **149**, 823-826 (2009). 査読有
- ⑤ X. M. Tong, K. Hino, and N. Toshima, A new time-dependent scattering theory and its application to the capture of antiprotons by atoms, *Journal of Physics: Conference Series* **185**, 012047 (2009). 査読有
- ⑥ X. M. Tong, K. Sasaki, K. Hino, and N. Toshima, Space distribution of the rescattering electron wavepacket in the laser-atom interactions, *Journal of Physics: Conference Series* **185**, 012048 (2009). 査読有
- ⑦ Yasuo Yoshida, Tatsuya Kawae, Yuko Hosokoshi, Katsuya Inoue, Nobuya Maeshima, Koichi Okunishi, Kiyomi Okamoto, Toru Sakai, Magnetic Field versus Temperature Phase Diagram of the Spin-1/2 Alternating Chain Compound F5PNN, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 074716(5pages) (2009). 査読有
- ⑧ K. Hino, X. M. Tong and N. Toshima, Interacting dynamic Wannier-Stark ladder driven by a periodic pulse train, *Phys. Rev. B* **77**, 045322(19pages) (2008). 査読有
- ⑨ X. M. Tong, K. Hino and N. Toshima, Anomalous Bumpy Structures in the Capture Cross-Sections of Antiprotons by Helium, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 163201(4pages) (2008). 査読有
- ⑩ Ken Onda, Sho Ogihara, Kenji Yonemitsu, Nobuya Maeshima, Tadahiko Ishikawa, Yoichi Okimoto, Xiangfeng Shao, Yoshiaki Nakano, Hideki Yamochi, Gunzi Saito, and Shin-ya Koshihara, Photoinduced Change in the Charge Order Pattern in the Quarter-Filled Organic Conductor (EDO-TTF)2PF6 with a Strong Electron-Phonon Interaction, *Physical Review Letters* **101**, 067403(4pages) (2008). 査読有
- ⑪ Nobuya Maeshima and Kenji Yonemitsu, Polaronic States with Spin-Charge-Coupled Excitation in a One-Dimensional Dimerized Mott Insulator K-TCNQ, *Journal of the Physical Society of Japan* **77**, 074713 (2008). 査読有
- ⑫ X. M. Tong, K. Hino, N. Toshima and J. Burgdorfer, Computational methods in the laser-atom interactions, *Journal of Physics: Conference Series* **88**, 012047(8pp) (2007). 査読有
- ⑬ X. M. Tong, S. Watahiki, K. Hino, and N. Toshima, Numerical observation of the rescattering wavepacket in laser-atom interactions, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 093001(4 pages) (2007). 査読有
- ⑭ X. M. Tong, T. Shirahama, K. Hino, and N. Toshima, Time-dependent approach to three-body rearrangement collisions: application to the capture of heavy negatively-charged particles by hydrogen atoms, *Phys. Rev. A* **75**, 052711(7pages) (2007). 査読有
- ⑮ Kenji Yonemitsu, Nobuya Maeshima, and Tatsuo Hasegawa, Suppression of rectification at metal-Mott-insulator interfaces, *Physical Review B* **76**, 235118 (2007). 査読有
- ⑯ Kenji Yonemitsu and Nobuya Maeshima, Photoinduced melting of charge order in a quarter-filled electron system coupled with different types of phonons, *Physical Review B* **76**, 075105 (2007). 査読有
- ⑰ Nobuya Maeshima and Kenji Yonemitsu, Charge-Transfer Excitations in One-Dimensional Dimerized Mott Insulators, *Journal of the Physical Society of Japan* **76**, 074713 (2007). 査読有
- ⑱ X. M. Tong, K. Hino, N. Toshima and J. Burgdorfer, Computational methods in the laser-atom interactions, *Journal of Physics: Conference Series* **88**, 012047 (2007). 査読有
- ⑲ K. Hino, X. M. Tong, and N. Toshima, Interacting Dynamic Wannier-Stark Ladder Driven by a Pulse Train with Periodic Repetition: Removal of Interminiband Interactions and Negative Absorption, *AIP Conference Proceedings* **893**, 459-460 (2007) [28th Intern' l Conf. on the Physics of Semiconductors (Vienna, Austria,

2006)]. 査読有

[学会発表] (計15件)

- ① 天野智広, 柄澤朋宏, 前島展也, 日野健一, “テラヘルツ光駆動 Wannier-Stark ladder における光着衣電子の共鳴構造と安定性”, 日本物理学会 第65回年次大会 (岡山大) 2010年3月22日
- ② 見崎大地, 前島展也, 日野健一, 八島健太 “テラヘルツ光駆動超格子における光着衣励起子のスペクトル特異性 II”, 日本物理学会 第65回年次大会 (岡山大) 2010年3月22日
- ③ 前島展也, 日野健一, 米満賢治, “多軌道ハバード模型における光励起状態のダイナミクス”, 日本物理学会 第65回年次大会 (岡山大) 2010年3月20日
- ④ 天野智広, 久々宇篤志, 前島展也, 日野健一, “テラヘルツ光駆動 Wannier-Stark ladder における光着衣電子状態の共鳴構造と安定性”, 第3回 DYCE シンポジウム 京都大学吉田キャンパス ICEMS, 2010年1月6-7日
- ⑤ 見崎大地, 前島展也, 日野健一, 八島健太, 岡浩太郎, “テラヘルツ光駆動半導体超格子における光着衣励起子のスペクトル特異性”, 日本物理学会 2009年秋季大会 (熊本大), 2009年9月27日
- ⑥ 天野智広, 久々宇篤志, 前島展也, 日野健一, “テラヘルツ光駆動 Wannier-Stark ladder における光着衣電子の量子カオス散乱”, 日本物理学会 2009年秋季大会 (熊本大), 2009年9月27日
- ⑦ 前島展也, 日野健一, 米満賢治, “2 軌道縮退ハバード模型における光誘起ダイナミクス”, 日本物理学会 2009年秋季大会 (熊本大), 2009年9月26日
- ⑧ 日野健一, 前島展也, “テラヘルツ光駆動半導体超格子における光着衣電子・正孔系の多体問題”, 第2回 DYCE シンポジウム 京都大学吉田キャンパス ICEMS, 2009年8月20-21日
- ⑨ 前島展也, 日野健一, 米満賢治, “2 軌道ハバード鎖における光誘起ダイナミクス”, 日本物理学会 第64回年次大会 (立教大/立教池袋中・高) 2009年3月28日
- ⑩ 八島健太, 岡浩太郎, 日野健一, 前島展也, 全曉民, 戸嶋信幸, “レーザー駆動半導体超格子における励起子吸収スペクトル異常”, 日本物理学会 第64回年次大会 (立教大/立教池袋中・高) 2009年3月28日
- ⑪ 久々宇篤志, 日野健一, 前島展也, 全曉民, 戸嶋信幸, “レーザー駆動半導体 Wannier-Stark 階段における Floquet 状態のカオス散乱”, 日本物理学会 第64回年次大会 (立教大/立教池袋中・高) 2009

年3月27日

- ⑫ 前島展也, 米満賢治, 日野健一, “軌道縮退した1次元モット絶縁体における光誘起ダイナミクス”, 物性科学領域横断研究会 “スピンが拓く物性科学の最前線”, 東京大学武田先端知ビル 5F 武田ホール, 2008年11月29日-12月1日
- ⑬ Nobuya Maeshima, Kenji Yonemitsu, and Ken-ichi Hino, “Photogenerated polaronic state in a one-dimensional dimerized Mott insulator K-TCNQ”, PIPT2008 (Osaka City University, Nov. 11-15, 2008)
- ⑭ 前島展也, 米満賢治, 日野健一, “軌道縮退ハバード模型における光誘起ダイナミクス”, 日本物理学会 2008年秋季大会 (岩手大) 2008年9月22日
- ⑮ 前島展也, 米満賢治, “2 量化した1次元モット絶縁体におけるポーロン状態の解析”, 日本物理学会 第62回年次大会 (北海道大) 2007年9月23日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

日野 健一 (HINO KENICHI)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授

研究者番号: 90228742

### (2) 研究分担者

前島 展也 (MAESHIMA NOBUYA)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・助教

研究者番号: 90390658