

大森賢治

自然科学研究機構・分子科学研究所
研究主幹・教授

アト秒精度の凝縮系コヒーレント制御

§1. 研究実施体制

(1)「大森」グループ

- ① 研究代表者:大森 賢治 (自然科学研究機構・分子科学研究所・光分子科学研究領域、研究主幹／教授)
- ② 研究項目
 - ・研究全体の統轄
 - ・超高速量子シミュレーターの開発とバルク固体コヒーレント制御への応用
 - ・アト秒精度のバルク固体コヒーレント制御(中村グループと共同)
 - ・デコヒーレンス制御技術の開発

(2)「中村」グループ

- ① 主たる共同研究者:中村 一隆 (東京工業大学応用セラミックス研究所、准教授)
- ② 研究項目
 - ・アト秒精度のバルク固体コヒーレント制御(大森グループと共同)
 - ・アト秒精度のバルク固体コヒーレント制御のための予備実験と検出系の開発
 - ・凝縮系のアト秒コヒーレント制御理論の構築

§2. 研究実施の概要

原子レベルのミクロな物質は空間的に広がった波としての性質を示すことが知られています。この奇妙な性質を説明する為に、およそ 100 年前に量子力学という物理学の理論が生まれました。今や、コンピューターやコンパクトディスク、あるいは MRI などの医療技術に至るまで、量子力学の応用製品は私たちの日常生活に無くてはならないものになりました。一方、空間的に広がったミクロな物質の波をマクロな測定器で観測すると、一瞬のうちに空間的に局在した粒子へと変化することが知られていますが、まだ量子力学はこの現象をうまく説明できていません。この瞬間的な変化は、「説明できないが存在する現象」として、過去 100 年もの間、盲目的に受け入れられてきました。私たちの研究の最大の目的は、この 100 年の謎を科学的に解明することにあります。もしそれができれば、壊れやすい物質の波の性質を保護し、量子コンピューターや量子通信などの先端的な量子テクノロジーに活かすための何らかのヒントが得られるかもしれません。

このような背景を踏まえ、私たちはこれまでに、真空装置内で周囲から孤立した原子や電子の波(波動関数)をレーザー光で制御する研究に取り組み、「アト秒・ピコメートル精度で波動関数を時空間制御する」という未踏領域に到達しました(アト= 10^{-18} , ピコ= 10^{-12})。本 CREST 研究では、このアト秒精度の極限コヒーレント制御技術を、多数の原子が集合した凝縮系に適用し、そこでの非局在化した(空間的に広がった)波動関数の時空間発展を観測し制御することによって、「物質の波がいつどのようにして粒子に変化するのか」をより良く理解することを目指しています。

今年度は、上記の凝縮系の1例として、ビスマスという金属物質の固体結晶内の多数の原子の集団的な超高速運動を10兆分の1秒単位で制御し画像化する新しい光技術の開発に成功しています。この制御・画像化手法は、あらゆる固体に適用することが可能であり、将来の超高速光デバイスを開発するための汎用的な基盤技術として期待される他、固体の超伝導性や磁性などの物理的な機能性が、どのように原子運動と関連しているのかを探求するために役立つとして、中日新聞や朝日新聞などの新聞各紙で大きく報道されました。また、このような固体中の原子の集団運動は、電子の波の性質を乱す熱的なノイズとして作用するので、固体中で電子の波の性質を保持し、その時空間発展を観測する上での重要な基盤技術として期待されます。

一般的に、上記のビスマスのような固体結晶中では、物質の波の性質は壊れやすく、その制御性もあまり高くありません。これは、私たちの身の回りにあるマクロな固体に波の性質が見られないことから良くわかります。そこで我々は、このような固体実験と並行して、その物理的なエッセンスを抽出したより単純なモデル系を用意し、そこでの模擬実験を行うことで、固体中の物理現象をより良く理解することを目指しています。このような模擬実験系は量子シミュレーターと呼ばれています。本 CREST 研究では、マイクロケルビン以下に冷却した極低温のルビジウム原子集合体の波動関数の時間発展を観測する、世界で唯一の超高速量子シミュレーターの開発を進めています。今年度は、レーザー光で空間中に捕捉したルビジウム原子集合体を固体中の原子集団と見立てて、それらの電子波動関数の時間発展を観測することにより、多数の原子間の電気的な相互作用を直接観測することに成功しました。現在、理論モデルとの詳細な比較検討を進めています。

今後も引き続き、上記の固体実験とシミュレーター実験を相補的に推進することによって、「物質の波がいつどのようにして粒子に変化するのか」をより良く理解することを目指します。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

■論文詳細情報(国際)

1. H. Katsuki, J. C. Delagnes, K. Hosaka, K. Ishioka, H. Chiba, E. S. Zijlstra, M. E. Garcia, H. Takahashi, K. Watanabe, M. Kitajima, Y. Matsumoto, K. G. Nakamura, and K. Ohmori, “All-Optical Control and Visualization of Ultrafast Two-Dimensional Atomic Motions in a Single Crystal of Bismuth”, *Nat. Commun.* **4**, 2801 (2013). (DOI:10.1038/ncomms3801)
2. H. Katsuki, Y. Kayanuma, and K. Ohmori, “Optically Engineered Quantum Interference of Delocalized Wavefunctions in a Bulk Solid: The Example of Solid Para-Hydrogen,” *Phys. Rev. B* **88**, 014507 (2013). (DOI: 10.1103/PhysRevB.88.014507)
3. T. Bredtmann, H. Katsuki, J. Manz, K. Ohmori, and C. Stemmler, “Wavepacket Interferometry for Nuclear Densities and Flux Densities,” *Molecular Physics* **111**, 1691-1696 (2013). (DOI: 10.1080/00268976.2013.780103)
4. Y. Ohtsuki, H. Goto, H. Katsuki, and K. Ohmori, “Theoretical/Numerical Study on Strong-Laser-Induced Interference in the B state of I₂”, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16**, 5689-5697 (2014). (DOI: 10.1039/C3CP54023E)
5. S. Hayashi, K. Kato, K. Norimatsu, M. Hada, Y. Kayanuma, and K. G. Nakamura, “Measuring Quantum Coherence in Bulk Solids Using Dual Phase-Locked Optical Pulses,” *Sci. Rep.* **4**, 4456 (2014). (DOI: 10.1038/srep04456)
6. Y. Mizumoto and Y. Kayanuma, “Double Landau-Zener Interferometry in a DC-AC Driven Bloch-Zener Oscillation”, *Phys. Rev. A* **88**, 023611 (2013). (DOI: 10.1103/PhysRevA.88.023611)