

パルス光からガラスへのエネルギー移行をアト秒の時間精度で測定することに成功  
～光波で駆動する未来のエレクトロニクス実現に期待～

研究成果のポイント

1. パルス光からガラス中の電子へのエネルギー移行を、アト秒(10の18乗分の1秒)の時間精度で計測することに初めて成功しました。
2. 京コンピュータを用いた第一原理量子シミュレーションにより、エネルギー移行のメカニズムを分析しました。
3. 光波を用いた電子操作が、未来のエレクトロニクスに適していることを確認できました。

国立大学法人筑波大学計算科学研究センター 矢花一浩教授と佐藤駿丞学振特別研究員は、マックス・プランク量子光学研究所とルードビッヒ・マクシミリアン大学のアト秒研究チームとの共同研究により、光が物質に照射した時に非常に短い時間で起こる光から電子へのエネルギー移行を、アト秒技術を用いて調べることが成功しました。筑波大学の矢花教授らは本研究において、京コンピュータを用いた大規模計算機シミュレーションにより、光エネルギーが移行するメカニズムを原子スケールで解明しました。この成果は、将来実現が期待される、光波で駆動するエレクトロニクスにおいて有効な、光と物質の相互作用に関する知見を与えるものです。

\* この研究成果は2016年5月23日午後4時(日本時間5月24日午前0時)に英国科学誌『Nature』にオンライン先行公開されます。

研究の背景

エレクトロニクスにおいて、情報の保存・処理・転送を担うのは物質中の電子の運動です。最新のエレクトロニクス回路では、電圧レベルの操作により、1秒間に最大で数十億回のスイッチ動作を行うことが可能です。しかしその上限は、スイッチのオンオフ過程で蓄積される熱により制限されています。

光は電磁波としての性質を持ち、光の電場は1秒間に10の15乗回も向きが変化します。光を固体に照射すると、物質中の電子を光電場と同じサイクルで駆動することができます。この光による電子の駆動をスイッチ動作に用いる素子は、未来のエレクトロニクス技術の基盤となるものと期待されますが、その実現には光照射による熱の蓄積を正確に理解することが重要です。マックスプランク量子光学研究所とルードビッヒ・マクシミリアン大学のアト秒研究チームは、これまでの研究で、光を用いて物質中の電子を光の振動数で操作することが可能であることを示してきました(Schiffrin, A. et al., 2013; Schultze, M., et al., 2013)

また、筑波大学計算科学研究センターでは、光が照射した固体中の電子の運動を原子のスケールで精密に調べることができる第一原理シミュレーション法を開発してきました。

## 研究内容と成果

今回行った実験では、極めて強い数フェムト秒のレーザーパルス光(1フェムト秒は、10の15乗分の1秒)をガラス(二酸化ケイ素)に照射します。このパルス光はとて短く、光電場の振動はたった1回(1サイクル)だけです。このパルス光により、電子も左右に1回だけ強く揺すられます。このようなパルス光が薄いガラス板を通過した後の時間波形を精密に測定することで、光の照射によって固体中に生じる極めて高速な電子の運動をアト秒(10の18乗分の1秒)の時間精度で観察することが初めて可能になりました。

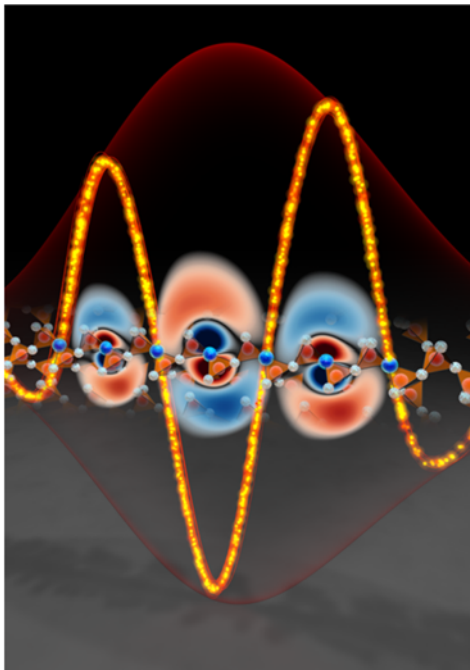
この測定により、電子はパルス光に対して数十アト秒という僅かな時間だけ遅れて反応することがわかりました。この反応の遅れは、光と物質の間でエネルギーの交換があることを意味します。この測定により、光の1サイクルの間で、光と物質の間に起こるエネルギー交換を測定することが可能になりました。光波により電子を駆動する未来のエレクトロニクスを実現するには、パルス光が通り過ぎた後に物質に残されるエネルギーが十分小さくなる必要があります。本研究で発展した測定手段を用いれば、光を用いた超高速素子に適した光と物質の組み合わせを調べることが可能になります。

観測されたエネルギー移行のメカニズムを理解し、熱の発生を抑える光と物質を探索するためには、量子論の第一原理計算に基づくシミュレーションが有効です。矢花教授らは、光電場が物質中に引き起こす電子の運動と、パルス光が物質中を伝播する様子を同時に記述する新しいシミュレーション法の開発を進めており、現時点で世界第4位の速さを持つ京コンピュータを用いて、本実験に対応するシミュレーションを前例のない高い精度で行いました。その結果、エネルギー移行は高次の非線形光応答により、ある光強度から急速に発生し、酸素原子の周辺で起こる電子の運動に起因するものであることが明らかになりました。

## 今後の展開

今回の研究で、パルス光の最大強度を適切に制御すれば、1サイクルのパルス光を固体に照射すると、パルスの最初の半周期の間にエネルギーが光から固体に移り、次の半周期でほぼ完全に固体から光へ戻るが見出されました。このように光波を適切に操作することで、光により電子の運動を制御しつつ、望ましくない熱の発生を抑制することが可能となることがわかりました。この発見は、光波で駆動する未来のエレクトロニクスが、過熱することなく動作しうることを確認するものです。ガラスと光の、この“クールな関係”は、光による信号・データ処理を極限まで高速化する道を拓くものと期待できます。

## 参考図



図：左から来る黄色い光が二酸化ケイ素の原子に照射し、各原子の周りにはいる電子を振動させる。この電子の動きが光波のエネルギーを吸収する。パルス光の終わり、電子による吸収されたエネルギーは再び光波に戻る。この物質を通過した後の光波の時間波形を正確に測定し、アト秒の速さで変化する固体の電子の運動を、実時間観測することが可能になった。

### 参考文献

Schiffrin, A. *et al.*, Optical-field-induced current in dielectrics, *Nature* **493**, 70–74 (03 January 2013).  
Schultze, M., *et al.*, Controlling dielectrics with the electric field of light, *Nature* **493**, 75–78 (03 January 2013).

### 掲載論文

【題名】 Attosecond nonlinear polarization and light-matter energy transfer in solids

(固体におけるアト秒非線形分極と、光と物質の間のエネルギー移行)

【著者名】 A. Sommer, E. M. Bothschafter, S. A. Sato(佐藤駿丞), C. Jakubeit, T. Latka, O. Razskazovskaya, H. Fattahi, M. Jobst, W. Schweinberger, V. Shirvanyan, V. S. Yakovlev, R. Kienberger, K. Yabana(矢花一浩), N. Karpowicz, M. Schultze & F. Krausz

【掲載誌】 **Nature**

DOI: 10.1038/nature17650

### 問合わせ先

矢花一浩(やばな・かずひろ)

筑波大学 計算科学研究センター 教授

TEL: 029-853-4202

E-mail: yabana[at]nucl.ph.tsukuba.ac.jp