

## 電子の運動を光の周期よりも短い時間で操作することに成功

### 研究成果のポイント

1. ダイヤモンドに赤外パルス光を照射すると、その光学的性質が光の周期よりも短い時間で変化することの測定に成功しました。
2. スーパーコンピュータ「京」を用いた第一原理量子シミュレーションにより、この光学的性質の変化が電子のエネルギーバンド内の運動に起因することを明らかにしました。
3. この知見は、将来期待されるペタヘルツで動作するエレクトロニクス基盤となるものです。

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、チューリッヒ工科大学の超高速レーザー物理グループ、及び東京大学大学院工学系研究科附属光量子科学研究センターの篠原康研究員との共同研究により、パルス光を誘電体に照射するとき、光の周期よりも短い時間で誘電体の光学的性質が変化することを示しました。矢花教授らは本研究において、スーパーコンピュータ「京」を用いた大規模計算機シミュレーションにより、光学的性質の超高速変化が、電子のエネルギーバンド内の運動に起因することを明らかにしました。この成果は、光と物質の相互作用に関する基礎的知見を与えるもので、将来実現が期待される光波を用いた新奇なエレクトロニクス技術に向けて重要な意味をもつ貢献です。

\* この研究成果は、2016年8月25日(日本時間26日)に『Science』誌で公開されました。

\* 本論文の結果の一部は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものです(課題番号:hp150101)。また、本研究は文部科学省ポスト「京」重点課題7「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成」の一環として実施したものです。

### 研究の背景

今日のエレクトロニクス技術は、ミクロな世界において光や電子の運動を超高速で操作することが基盤となっています。例えば現在のコンピュータは、大量にある微細なスイッチを流れる電流をギガヘルツの振動数(1秒間に10の9乗回の振動数)で操作することによって動作しています。また、インターネットを流れる膨大なデータは、電流の情報を光に変換し、とても短い光のパルスが光ファイバーケーブルを伝播することにより伝達されています。今日の電子回路は、数ギガヘルツからテラヘルツ(1秒間に10の12乗回の振動数)に至る振動数で動作しており、次世代のエレクトロニクスでは、さらにその1000倍、光の振動数であるペタヘルツ(1秒間に10の15乗回の振動数)で動作する域に到達すると考えられています。しかし、これほどの速さでどのようにして電子の運動を制御すればよいかは、未だにほとんど未知の領域です。

このような物質中の電子の運動を調べるため、筑波大学計算科学研究センターの矢花教授らのグループは、長年にわたり第一原理量子力学計算コード ARTED (Ab-initio Real Time Electron Dynamics simulator)を開発してきました。これは、ナノメートル以下の電子の運動と、マイクロメートル程度の波長を持つ光電磁場の運動を同時に記述することができる、世界で唯一の計算コードです。

一方、チューリッヒ工科大学の Keller 教授のグループは、非常に短いパルス光を用いた実験技術の開発を進め、現在では 1 フェムト秒の数分の 1 の長さを持つ紫外線アト秒パルス光を発生することに成功しています(1 フェムト秒は、10 の 15 乗分の 1 秒、1 アト秒は、10 の 18 乗分の 1 秒)。このアト秒パルス光を用いた測定により、物質中における電子の超高速運動の直接測定が可能です。

本研究は、ペタヘルツの光電場により電子がどのように応答するかを、筑波大学の研究グループによる第一原理量子シミュレーションと、チューリッヒ工科大学の研究グループによるアト秒光科学実験の密接な協力により探求したものです。

### 研究内容と成果

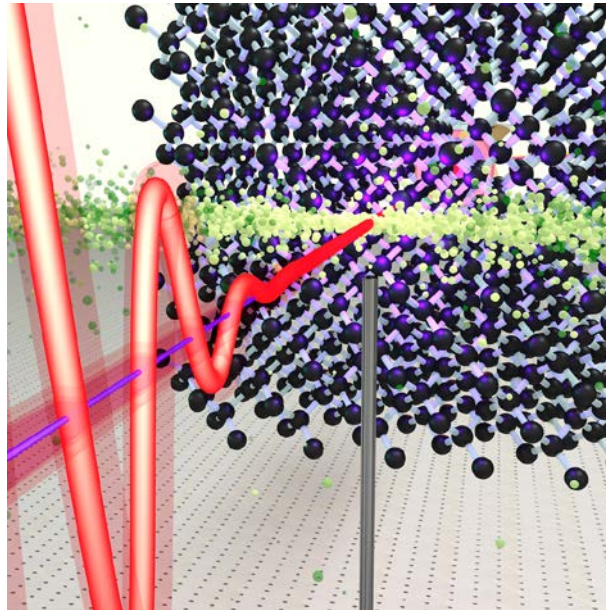
今回行った実験では、2つのレーザーパルス光を 50 ナノメートルの厚さをもつダイヤモンド薄膜に同時に照射します。1つめは、強い数フェムト秒の赤外線レーザーパルス光です。この光の電場は、ペタヘルツの 4 割程度の振動数を持ち、パルス内で 5 回ほど振動します。1 回の振動にかかる時間は 2.7 フェムト秒程度です。この光電場がダイヤモンド中の電子を揺すります。もう一つのレーザーパルス光を用いて、この揺すられた電子の運動を調べます。2つめのレーザーパルス光は、最初のものよりもはるかに短く 0.25 フェムト秒程度の長さです。2つめのパルス光が、ダイヤモンドによりどのように吸収されるかを調べることで、1つめのパルス光が揺すった電子の運動を捉えることができます。実験による測定では、1つめのレーザーパルス光のもつリズムで、2つめのレーザーパルス光の吸収に変化が現れるという結果が得られました。

この吸収の変化が、電子のどのような運動に起因するのかを明らかにするために、第一原理量子シミュレーションを行いました。国内で最大のスーパーコンピュータである「京」を用いて、実験の設定と正確に一致するシミュレーションを行ったところ、実験で測定された2つめのレーザーパルス光の吸収の変化を、高い精度で再現することができました。実験と比べてシミュレーションの優れた点は、吸収の変化がどのような電子の運動に起因するのかを、さまざまな効果をオン・オフすることで調べられる点です。その結果、吸収の変化がダイヤモンドの2つのエネルギーバンド内の電子の運動に起因し、フランツ-ケルディッシュ効果と呼ばれるメカニズムによることが明らかとなりました。

### 今後の展開

今回の研究は、ペタヘルツの振動数を持つパルス光により物質中の電子がどのように運動するかを明らかにしました。ペタヘルツで動作するエレクトロニクスを実現するためには、まだ多くの研究が必要とされますが、そのための重要な一歩となる成果です。

参考図



図：ダイヤモンドの薄膜にレーザーパルス光を照射する様子。

掲載論文

【題名】 Attosecond dynamical Franz-Keldysh effect in polycrystalline diamond  
(多結晶ダイヤモンドにおけるアト秒動的フランツ-ケルディッシュ効果)

【著者名】 M. Lucchini, S. A. Sato(佐藤駿丞), A. Ludwig, J. Herrmann, M. Volkov, L. Kasmi, Y. Shinohara,  
K. Yabana(矢花一浩), L. Gallmann, U. Keller

【掲載誌】 Science

doi:10.1126/science.aag1268

問い合わせ先

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

〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1