



TOHOKU  
UNIVERSITY



Elettra Sincrotrone Trieste

平成 28 年 2 月 23 日

報道機関 各位

東北大学多元物質科学研究所

## 電子の動きを操る！ 完全可干渉な自由電子レーザーを用いて超高速電子過程の高精度制御に成功

### 【概要】

化学結合を担って物質の性質を決定する電子は、アト秒（1 アト秒は 100 京分の 1 秒）という極めて短い時間スケールで動きます。したがって、物質内の電子の動きを自在に操るためには、アト秒精度の制御を可能にする手法が必要です。東北大学多元物質科学研究所の上田 潔教授ら、イタリアのエレットラ放射光施設のケビン プリンズ博士ら、ミラノ工科大学のジュゼッペ サンゾネ博士ら等からなる国際共同研究チームは、イタリアの自由電子レーザー<sup>\*1</sup>フェルミ<sup>\*2</sup>を用いて、完全可干渉<sup>\*3</sup>な 2 色の極端紫外線<sup>\*4</sup>パルスを生成し、2 つのパルスの時間差を 3 アト秒という未踏の超高精度で制御して、物質から飛び出す電子の動きを操ることに成功しました。本研究によって、アト秒時間領域の超高速電子過程の研究が一段と進展し、将来、電子の動きを自在に操ることができるようになると期待されます。

本研究の成果は、英国の科学雑誌『Nature Photonics』オンライン版（2 月 22 日付）に掲載されました。

本研究は、文部科学省 X 線自由電子レーザー重点戦略研究課題、「物質・デバイス領域共同研究拠点」課題の一環として一部助成を受け、遂行されました。

## 【詳細な説明】

### 1. 背景

化学反応や物理・生命現象は、分子を構成する原子の配置や電子の状態が時々刻々と変化しつつ進行する、動的な過程により支配されています。原子が動いて化学結合を形成したり切断したりするのに必要な時間のスケールはフェムト秒（1 フェムト秒は 1000 兆分の 1 秒）です。アーマド・ズウェイルはフェムト秒パルスレーザーを用いて化学反応を追跡する「フェムト秒化学」を開拓してノーベル賞を受賞しました。一方、化学結合を担って物質の性質を決定する電子は原子よりもはるかに速く動きます。その時間スケールはアト秒（1 アト秒は 100 京分の 1 秒）になります。したがって、電子の動きを時々刻々観測し操るためには、アト秒スケールの時間精度での制御が可能な実験手法を開発しなければなりません。国際共同研究チームは、イタリアの自由電子レーザー フェルミを用いて、3 アト秒の時間精度でのレーザー光制御を実現し、電子の動きを操ることに成功しました。

### 2. 研究の手法と成果

フェルミは、空間的にも時間的にも位相の揃った完全可干渉な極端紫外域の光パルスを複数の波長で同時に生成することができる世界で唯一の装置です。本研究では、2 色の波長（63 ナノメートルと 31.5 ナノメートル、1 ナノメートルは 10 億分の 1 メートル）の 2 つの光パルスを重ね合わせてネオン原子に照射し、ネオン原子から飛び出す電子がどの方向に飛び出すかを計測しました（図 1）。フェルミが生成する光パルスの時間幅は数 10 フェムト秒程ありますが、国際共同研究チームは 2 つの光パルスの時間差を 3 アト秒の時間精度で制御することに成功しました。2 つの光パルスの時間差をわずかに変化させて位相をずらして干渉させると、光パルスが生成する電場に空間的な偏りができます。本研究では、このような超高精度の制御手法を用いて、電場の空間的な偏りを制御し、電子がネオン原子から飛び出す方向を操りました（図 2）。

### 3. 本研究の意義と今後の展望

可視・赤外領域の波長の異なる 2 つのレーザー光パルスの時間差を制御して化学反応を制御する手法はよく知られており、これまでに、様々な系で広く研究されてきました。しかし、物質内の電子の動きを自在に操るには、より短波長の、可視・赤外領域に比べて波長が 10 分の 1 以下の、極端紫外線を用いなければなりません。要求される時間差の制御の精度もはるかに高くなります。本研究では、完全可干渉な極端紫外光パルスを生成する自由電子レーザー フェルミの持つ能力を最大限に引き出して、この難関を克服し、時間差の制御の精度を従来に比べて 10 倍以上高め、電子の動きを制御することに成功しました。

国際共同研究チームは、今後、本手法をさらに発展させ、アト秒領域の超高速電子過程の計測を進めるとともに、電子の動きを自在に操ることを目指しています。電子の動きを自在に操ることができれば、電子移動が本質的な役割を果たす様々な反応を自在に操ることができるようになりますと期待されます。

A) 通常のレーザー光1つを用いて電子を飛び出させた場合

B) 波の位相をずらして2つのレーザー光を用いて電子を飛び出させた場合

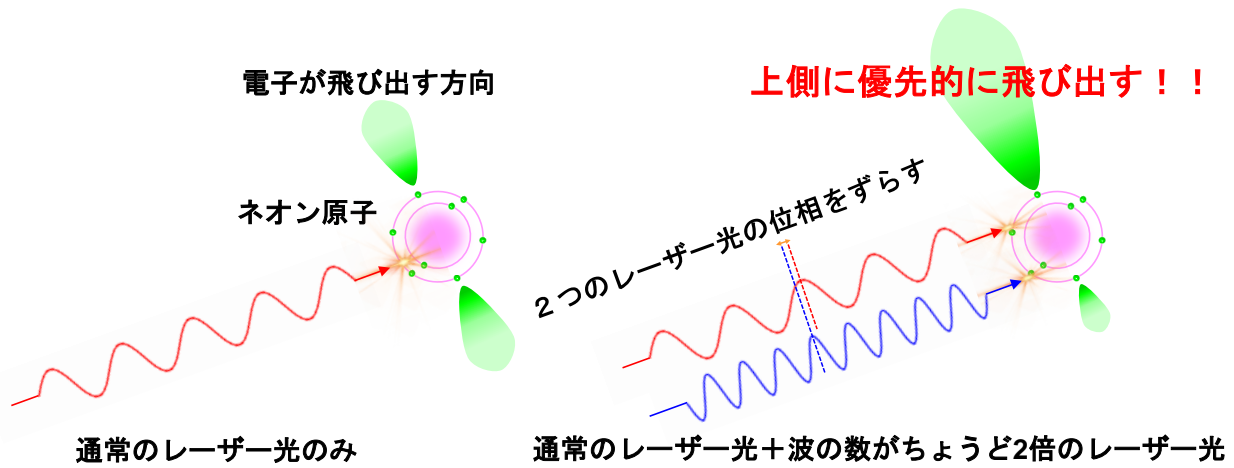


図 1. 2つの光パルスの位相をずらすことにより電子が飛び出す方向を制御する概念図

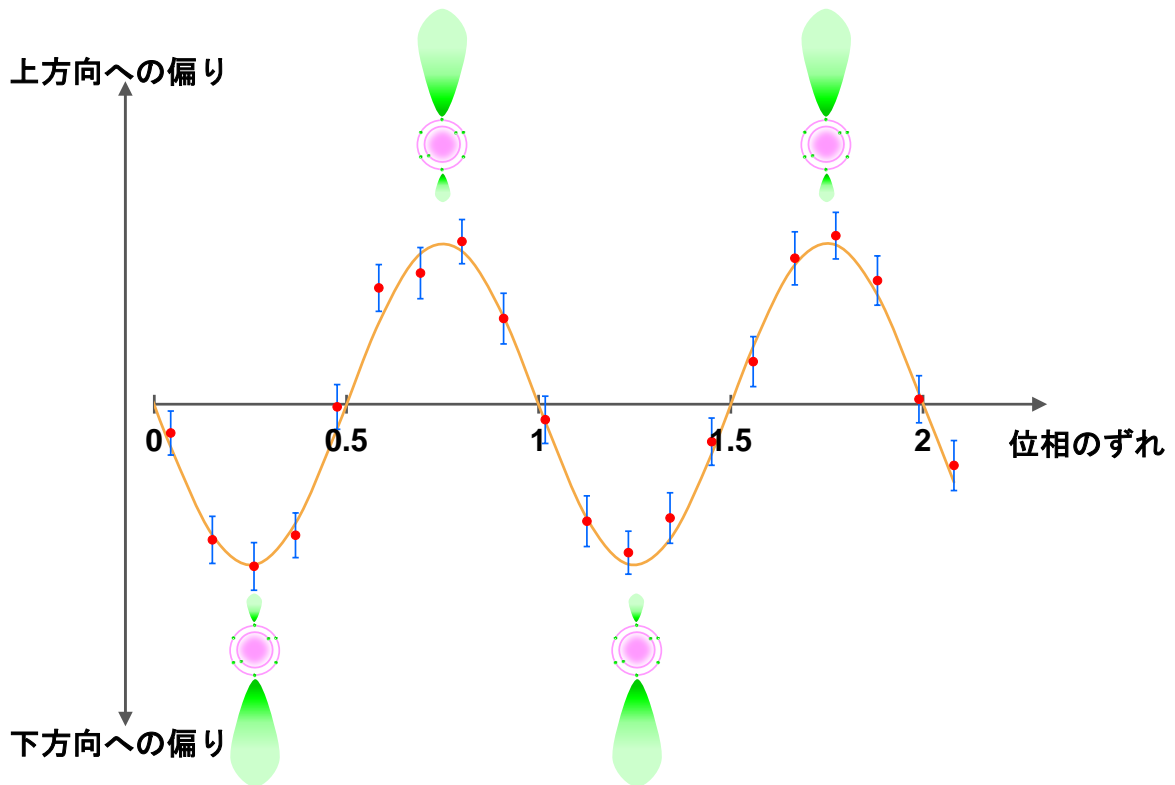


図 2. 2つの光パルスの位相のずれに対する電子が飛び出す方向の変化

## 【用語解説】

### \*1 自由電子レーザー

物質中で発光する通常のレーザーと異なり、物質からはぎ取られた自由な電子を加速器の中で光速近くに加速し、周期的な磁場の中で運動させることにより、発振を行うレーザー。可干渉性、短いパルス幅、高いピーク輝度を持つ。

### \*2 フェルミ

イタリアの放射光施設エレットラに建設された自由電子レーザー。完全可干渉な紫外線レーザー光を種とすることで、完全可干渉な極端紫外線パルスを生成する。2011年12月から利用運転が開始された。

### \*3 完全可干渉

波の振幅と位相が空間的にも時間的にも揃っていること。振幅と位相が揃った波が重なると干渉する。

### \*4 極端紫外線

人間の眼が感知できる光の波長はほぼ700ナノメートルから400ナノメートルの範囲であり、この波長域の光は可視光と呼ばれる。これよりも波長が短い光は紫外線と呼ばれ、特に波長が100ナノメートルよりも短い光は極端紫外線と呼ばれる。

## 【論文情報】

雑誌名：Nature Photonics, published on line: 22 February 2016 | DOI: 10.1038/NPHOTON.2016.13

論文タイトル：Coherent control with a short-wavelength free-electron laser

著者名：K. C. Prince *et al.*

問い合わせ先

東北大学多元物質科学研究所

教授 上田 潔 (うへだ きよし)

電話 022-217-5381

E-mail ueda@tagen.tohoku.ac.jp

博士研究員 熊谷 嘉晃 (くまがい よしあき)

電話 022-217-5383

E-mail kumagai@tagen.tohoku.ac.jp

博士課程学生 高梨 司 (たかなし つかさ)

電話 022-217-5383

E-mail tsukasat@mail.tagen.tohoku.ac.jp