

3A09

円偏光数サイクルレーザーパルスによる希ガスの角度分解光電子スペクトルに基づいた絶対 CEP の決定

(東大院理*, FSU Jena**) ○深堀 信一*, 安藤 俊明*, 三浦 瞬*, 歸家 令果*, 山内 薫*,

T. Rathje**, G.G. Paulus**

Determination of absolute CEP based on angle-resolved photoelectron spectra of rare gas atoms by circularly-polarized few-cycle pulses

(Univ. of Tokyo*, FSU Jena**) ○S. Fukahori*, T. Ando*, S. Miura*, R. Kanya*, K. Yamanouchi*,

T. Rathje**, G.G. Paulus**

【序】強レーザー場中における原子・分子の光イオン化過程や分子の光解離過程は、レーザーパルスの強度やパルス幅だけでなく、パルス電場の波形によって影響を受けることが知られている。近年、極めて短い時間幅を持ち包絡線内に数サイクルのみを含むレーザーパルスを使うことができるようになった。このような数サイクルレーザー場では包絡線の形状だけでなく、その搬送波包絡線位相 (Carrier-envelope phase, CEP) によって、電場波形が敏感に変化する。そのため、数サイクルレーザー場中における原子・分子の光イオン化過程や分子の光解離過程は、CEP の影響を受けて変化することが知られている^{1,2}。この CEP 依存性を調べる 1 つの手法として、光電子や光イオンと CEP の同時測定法である CEP タギング法が知られている。単一パルス計測が可能な位相メーター³ を用いれば、CEP を高い精度で測定することができる。しかし、光電子や光イオンの測定点と位相メーターの間に空気などの分散媒質が存在すると、相対的な CEP を決定することはできても、CEP の絶対値を決めることはできない。一方で、円偏光強レーザー場中において生成した光電子はポテンシャル障壁を越えた瞬間のレーザー電場方向に対して垂直の方向に放出されること、そして、円偏光パルス内において電場が最大となる時刻の電場の偏光面内角度は CEP と等しくなることを利用すれば、光電子の角度分布の測定から絶対 CEP を決定できると期待される。本研究では、円偏光数サイクルパルスによる希ガスからの光電子放出を CEP タギング法によって計測し、絶対 CEP の決定が可能であることを示した。

【実験】チタンサファイアレーザーシステムから得た直線偏光フェムト秒レーザーパルスを、中空ファイバー (Ar:~50 kPa) に集光し、自己位相変調によりレーザースペクトルを広げた。チャープミラーを用い分散を補償した後、ビームスプリッターにより 2 つにレーザーパルスを分けた。一方は、位相メーターに導入し、相対 CEP の測定に用いた。他方のレーザーパルスは、四半波長板により右回り円偏光に変換した後、光電子分光器 (ARTOF-10k, VG Scienta 社) に導入した。それぞれの光路においてウェッジ板対により分散を最適化し、数サイクルレーザーパルス (746 nm、4.1 fs、5 kHz) を得た。光電子分光器では、レーザーパルスを Ar の漏れ出し原子線に集光し、放

出された光電子が距離 1 m を飛行するのに要する時間を測定し、運動エネルギーを算出した。このとき、捕集角は $\pm 1.2^\circ$ であり、集光点におけるレーザー強度は $3.2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ であった。

【結果と考察】図 1 に、測定された光電子の生成量 $Y(E_{\text{kin}}, \phi)$ を示す。ここで、横軸 E_{kin} は光電子エネルギーを、縦軸 ϕ は CEP

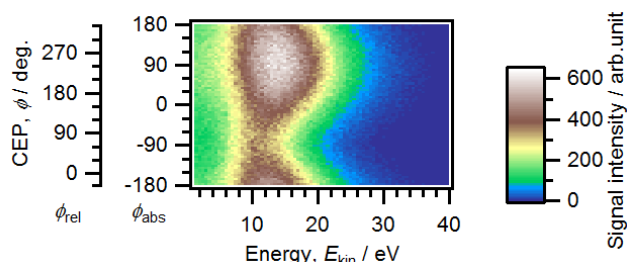


図 1 測定された CEP 分解光電子エネルギースペクトル $Y(E_{\text{kin}}, \phi)$ 。

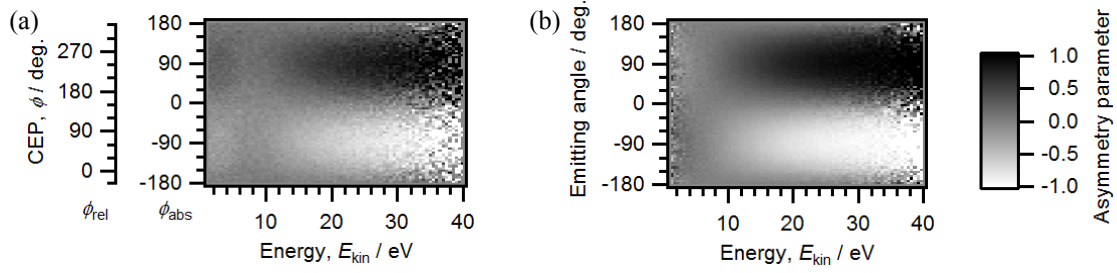


図 2 非対称性パラメータープロット $A(E_{\text{kin}}, \phi)$ 。(a) 実験結果。(b) 計算結果。ただし、絶対 CEP が 0 のときの光電子放出角度を縦軸にプロットした。

を表す。なお、CEP については位相メーターを用いて得られた相対値(ϕ_{rel})と、以後の議論に基づく絶対値(ϕ_{abs})の両方を用いて表した。図 2(a)では、

$$A(E_{\text{kin}}, \phi) = \frac{Y(E_{\text{kin}}, \phi) - Y(E_{\text{kin}}, \phi + 180^\circ)}{Y(E_{\text{kin}}, \phi) + Y(E_{\text{kin}}, \phi + 180^\circ)} \quad \text{eq. 1}$$

と定義される非対称性パラメーター $A(E_{\text{kin}}, \phi)$ をカラースケールで示した。縦軸と横軸は図 1 と同じであり、非対称性パラメーターが最大となったときのレーザーパルスの CEP は光電子エネルギーに依らずほぼ一定である。30 ~ 35 eV の領域において、非対称性パラメーターの CEP 依存性を相対 CEP の関数として表した余弦関数によって最小二乗解析をしたところ、非対称性パラメーターが最大となるときの相対 CEP は $\phi_{\text{rel}} = 243^\circ$ と求められた。

この実験結果を説明するために、古典軌道 Monte-Carlo 計算を行い、絶対 CEP が 0° のときの角度分解光電子スペクトルと非対称性パラメータープロットを求めた。放出角度は偏光面内の角度とし、レーザー電場が最も強い向きを 0° とした。円偏光レーザーパルスでは、CEP が変化した場合に偏光面内のレーザー電場の向きのみが変化するため、絶対 CEP が 0° の場合に計算された放出角度と、実験における絶対 CEP (ϕ_{abs}) は同一であるとみなすことができる。なお、イオン化確率については、イオン化過程をトンネルイオン化であると仮定し、ADK 理論により求めた。イオン化後の光電子のレーザー場中における運動は Newton の運動方程式を解くことによって求めた。

計算された非対称性パラメータープロット (図 2(b)) は、実験結果 (図 2(a)) を定性的に再現していることが示された。理論計算図 2(b) に示すように、 $E_{\text{kin}} > 10$ eV においては、非対称性パラメーターが最大であるときの CEP は一定値 $\phi_{\text{abs}} = 90^\circ$ を示した。位相メーターによって測定された $\phi_{\text{rel}} = 243^\circ$ は、 $\phi_{\text{abs}} = 90^\circ$ に対応することになるので、図 1 の縦軸のように絶対 CEP を決定した。本研究によって、円偏光数サイクルパルスによる希ガスの光電子放出角度を CEP タギング法によって測定すれば、絶対 CEP を決定できることが示された。

【参考文献】

- [1] P. Dietrich, F. Krausz, and P. B. Corkum. *Opt. Lett.* **25**, 16 (2000).
- [2] S. Miura, T. Ando, K. Ootaka, A. Iwasaki, H. Xu, T. Okino, K. Yamanouchi, D. Hoff, T. Rathje, G. G. Paulus, M. Kitzler, A. Baltuška, G. Sansone, and M. Nisoli. *Chem. Phys. Lett.* **595–596**, 61 (2014).
- [3] T. Wittmann, B. Horvath, W. Helml, M. G. Schätzel, X. Gu, A. L. Cavalieri, G. G. Paulus, and R. Kienberger. *Nat. Phys.* **5**, 357 (2009).