

円偏光高強度レーザーによる Kr 原子のトンネルイオン化

光電子スペクトルに現れる極小構造

理研、○水野智也、金井恒人、東俊行

Spectral minimum in photoelectron spectra of Kr atoms by intense circular laser fields

RIKEN, OT. Mizuno, T. Kanai, T. Azuma

【序】強光子場中に原子分子が置かれるとトンネルイオン化や再衝突過程による高次高調波発生(HHG)など様々な非線形光学現象が容易に起こる。これらを記述するために、光の強度が 10^{14} W/cm² 以下の場合には ADK model [1] や strong field approximation など様々なモデルや近似が提案されてきた。更に光強度が上がり、直接トンネルイオン化の光電子の運動エネルギーが Cooper minimum まで到達するようになると、HHG 同様に極小が現れる事が理論的に示唆されている[2]。しかしながら光強度が 10^{14} W/cm² 後半から 10^{15} W/cm² 程度になると上述の手法が使えなくなる事から、Cooper minimum が光電子スペクトルに現れるかどうかは議論の余地がある。またそのような光強度になるとポテンシャル障壁が基底状態の準位以下になる事により起こる over-the-barrier ionization にメカニズムが変化する[3]。この場合、光電子スペクトルは ADK model によって記述されるトンネルイオン化の場合と大きく異なると予想される。静電場の下でのトンネルイオン化の理論的研究においても、光強度が 10^{15} W/cm² 程度になると光電子スペクトルが ADK model からずれた振る舞いをする事が森下等によって予想されている[4]。

本研究では 10^{15} W/cm 程度の強度の強レーザー電場を用いて光電離を引き起こし、光電子分光をすることによりトンネルイオン化過程及び over-the-barrier ionization を詳細に調べる事とした。

【実験】光電子スペクトルの測定を飛行時間型(TOF)光電子分光器を用いて行った。レーザーは基本波 800 nm、ピーク強度(10^{14} ~ 10^{15} W/cm²)、パルス幅 25 fs, 繰り返し 1 kHz であり、f=300 mm のレンズで集光し、超音速分子線と交差させイオン化させた。光の偏光は直線偏光、円偏光を用いて実験を行い、TOF 軸は直線偏光の場合は偏光ベクトルと平行な配置、円偏光の場合は光の進行方向と垂直な配置で測定を行った。標的はイオン化ポテンシャル I_p がほとんど等しい Kr と CO で行った ($I_p=14.0$ eV)。

【結果と考察】図 1 に光電子スペクトルの結果を示す。直線偏光の場合、ポンデロモーティブエネルギー Up の約 2 倍程度の運動エネルギーまで直接トンネルイオン化過程が支配的な領域で、収量は指数関数的に減少し、それ以上の運動エネルギーになると再衝突過程によるプラトー構造が現れ $10Up$ まで続く。これらの傾向は今回の実験結果においても過去の報告例と同様に観測されている。更に $2Up$ までの直接トンネルイオン化過程の光電子スペクトルは、光強度が 4.4×10^{14} W/cm² の場合、CO と Kr でよく一致している。この振る舞いは ADK model によるとトンネルイオン化過程はイオン化ポテンシャルのみに依存することで説明でき、既に比較的イオン化ポテンシャルの近い N_2 と Ar を標的に用いた実験により確認されている[5]。他方で再衝突過程に対応する $2Up$ から $10Up$ までの収量は標的依存性が表れ、後方散乱断面積に依存していることが明らかになっている。

光強度が 10^{15} W/cm² に達すると $2Up$ 以下の直接イオン化領域での収量にすら違いが現れている。これは弱電場の理論である ADK model が 10^{15} W/cm² 以上になるとトンネルイオン化過程をよく表すことができないことを意味する。ここで over-the-barrier ionization が起こる光強度の閾値 I_{BS} を単純にクーロンポテンシャルと電場の合成の極大値が I_p 以下になるときとして定義すると、

$I_p=14$ eV の場合は $I_{BS}\sim 1.5\times 10^{14}$ W/cm² となり、測定を行った全ての強度で over-the-barrier ionization が起こっていることになる。よって ADK model で説明できない振る舞いをするのは自然である。

次に Cooper minimum に対応する構造に話を移すと、直線偏光においてはそのような極小構造はスペクトル中に確認できない。理論計算においても直線偏光の場合、再衝突過程の寄与により極小構造が不明瞭になると予想されており、実験結果は妥当である[2]。

一方で再衝突過程が抑制される、円偏光を用いた結果について見てみると、強度が低い領域においては CO と Kr のスペクトルは殆ど一致しているが、光強度が増加するにつれ Kr の光電子スペクトルに窪みが見て取れるようになる。Kr の Cooper minimum は 80 eV 近辺に存在することが報告されており窪みの位置はよく一致する。一方で CO にそのような窪みは存在しない。Cooper minimum は波動関数の動径方向の節構造に由来するため HOMO の電子軌道の動径方向に節が存在しない CO で構造が現れないのは当然である。

理論的には多光子吸収イオン化の場合 Cooper minimum は現れるがトンネルイオン化や over-the-barrier ionization の場合、どのように波動関数の動径方向の節が光電子スペクトルに反映されるかは自明ではない。今後 Kr 標的のとき円偏光の光で現れる光電子スペクトルの構造が何に由来するか理論と比較検討しながら慎重に解析を進めていく必要がある。

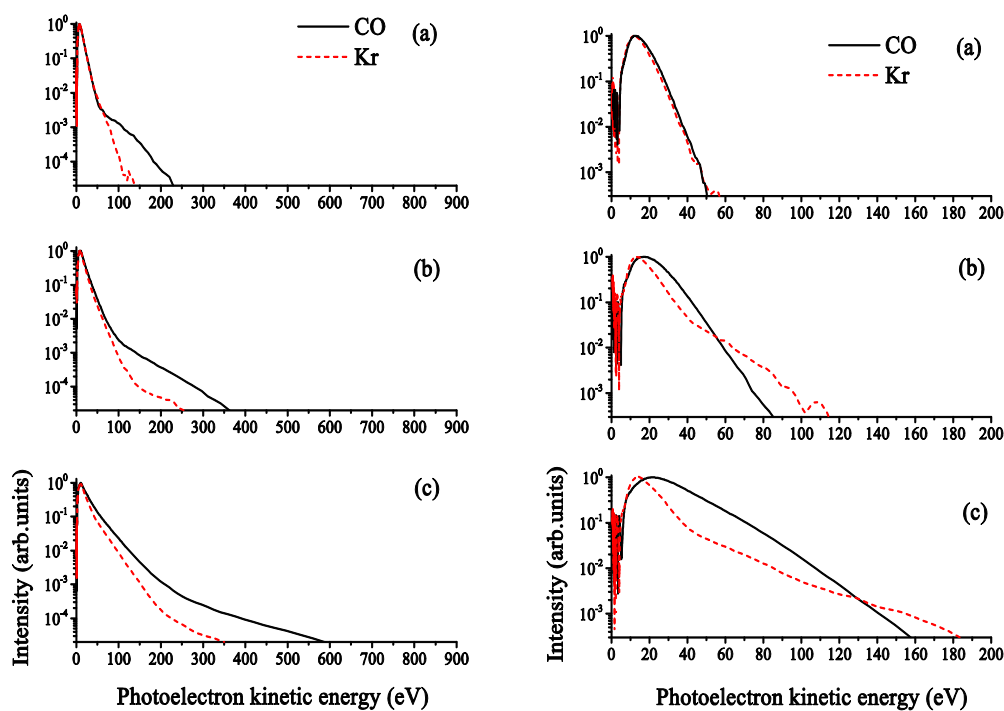


図 1 左: 直線偏光を用いて測定した光電子スペクトル 右: 円偏光を用いて測定した光電子スペクトル, 黒線; CO, 赤線; Kr,
(a) 強度 4.4×10^{14} W/cm² (b) 9.6×10^{14} W/cm², (c) 1.9×10^{15} W/cm²

参考文献

- [1]N. B. Delone and V. P. Krainov, J. Opt. Soc. Am. B 8 (1991) 1207.
- [2]J. Zhang and D. S. Guo, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 063002.
- [3]S. Augst *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B 8 (1991) 858.
- [4]P. A. Batishchev *et al.*, Phys. Rev. A 82 (2010) 023416.
- [5]F. Grasbon *et al.*, Phys. Rev. A 63 (2001) 041402.