

光解離で生成する H(2p)原子ペアのもつれ
- 蛍光光子ペア角度相関の全球面計測による検証-

Entangled H(2p) atom-pairs following
photodissociation substantiated with a pair of
Lyman- α photons

鳥塚祐太郎¹, 穂坂綱一¹, Philipp Schmidt², 小田切文³, Andre Knie²,
Arno Ehresmann², 向後陵子¹, 北島昌史¹, 河内宣之¹
1 東工大, 2 カッセル大, 3 上智大

もつれ(エンタングルメント)は、部分系の積で複合系の波動関数を表現できない状態であり、複合系の量子力学の不思議さの根源である。本研究室の Miyagi らは、水素分子の光解離において、前駆分子の対称性($^1\Pi_u$)を反映した、もつれ原子ペア生成を予測した[1]。この予測を検証するため、我々は約 100 μm 離れた 2 個の H(2p)原子から放出される Lyman- α 光子 2 個の放出角度相関を測定した。光子の放出方向分布が励起原子の磁気量子数を反映することを利用し、原子ペアの状態を調べた。

H(2p)原子ペア由来の光子ペアを、方向 (\hat{r}_c, \hat{r}_d) に設置した 2 つの光子検出器 c, d で同時計数し、角度相関関数を得た。方向 (\hat{r}_c, \hat{r}_d) についての網羅的な測定は現実的でないので、角度相関関数の関数形から、全角度領域にわたる角度相関関数の決定に必要な配置を検討し、効率良く測定した。

このように決定した角度相関関数から、H(2p)原子ペアの状態は、予測[1]に反し、前駆分子の持つ $^1\Pi_u$ 対称性を保持したもつれ状態ではない事が分かった。そこで、水素分子の対称性を再検討し、複数の電子状態が縮退する核間距離が大きい領域では、水素分子の解離過程では通常無視するスピン軌道相互作用を無視できないことを見出した。スピン軌道相互作用を考慮しても、前駆分子の持つ全角運動量の射影 $|J_z|$ は保存する。水素分子のポテンシャルエネルギー曲線[2]により導かれた $|J_z| = 1$ のもつれ原子ペアは、実験結果を再現した。すなわち、分子の持つ $|J_z| = 1$ 対称性に起因した、もつれ原子ペア生成が実証された[3]。

[1] H. Miyagi *et al.*, *J. Phys. B* **40**, 617 (2007).

[2] Y. V. Vanne *et al.*, *Phys. Rev. A* **73**, 062706 (2006).

[3] Y. Torizuka *et al.*, *Phys. Rev. A* **99**, 063426 (2019).

Conjugate shakeup 状態の Auger 崩壊 Auger decay of conjugate shakeup states

小田切丈¹, 鈴木さくら¹, 菅原雄真¹, 金安達夫²,
足立純一³, 田中宏和³, 鈴木功^{1, 3}, 彦坂泰正⁴
¹上智大理工, ²SAGA-LS, ³KEK-IMSS-PF, ⁴富山大

内殻に空孔をもつ分子状態において、弱く束縛された励起電子の存在はその後の Auger 崩壊に大きく影響を及ぼす[1, 2]。本研究では、窒素分子を対象に、内殻イオン化しきい値近傍の光吸収により生成する Conjugate shakeup 状態[3]について、その Auger 崩壊を多電子同時計数測定により詳細に調べた。

実験は磁気ボトル型電子エネルギー分析器を用いて行った。PFリングのハイブリッド運転モードにおいて、光パルスセレクター3号機[4]を利用し繰返し周期 229kHz の孤立光パルスを切り出し利用した。N₂分子の内殻イオン化しきい値より約 30eV 高い 440.4eV の入射光子エネルギーにて光電子-Auger 電子同時計数測定を行い、軟X線吸収で生成する(i) 1s⁻¹ 状態、(ii) 1σ_u⁻¹1π_u⁻¹1π_g¹ Normal shakeup 状態、および、(iii) Conjugate shakeup 状態のそれぞれについて Auger スペクトルを得た。

上記(i)~(iii)に対する Auger 終状態分布を相互に比較すると、価電子(ov)が2個イオン化した ov⁻² 状態の生成割合が(i)>(ii)>>(iii)であり、つまり、Conjugate shakeup 状態からの参与型 Auger 崩壊は、Normal shakeup 状態のそれに比べ強く抑制されることが分かった。また、Neeb らの Auger スペクトル測定[3]により、その励起エネルギー依存性から Conjugate shakeup 状態に起因するだろうと結論付けられた 375eV ピークは、本研究の Conjugate shakeup 状態(上記(iii))との同時計数による Auger スペクトル測定からは確認されなかった。代わりに、Normal shakeup 状態(上記(ii))との同時計数による Auger スペクトルの 375eV 付近に強いピークが見られ、そこから、375eV ピークは Normal shakeup 状態からの参与型 Auger 過程に起因するものと結論付けられる。

参考文献

- [1] T. Kaneyasu et al., J. Phys. B 41 (2008) 135101.
- [2] T. Odagiri et al., J. Chem. Phys. 152 (2020) 124301.
- [3] M. Neeb et al., Phys. Rev. A 52 (1995) 1224.
- [4] J. Adachi et al., J. Phys. :Conf. Ser. 1412 (2020) 152092.

真空紫外領域における溶融石英の絶対反射率測定

Absolute reflectivity measurement of fused silica in vacuum ultraviolet region

板倉 隆二¹、穂坂 綱一²、足立 純一³
1 量研関西研、2 東工大理学院、3 KEK 物構研 PF

近赤外波長領域のフェムト秒レーザーを固体表面に集光照射することによって、アブレーション閾値を越えた高密度電子励起状態（以後、プラズマミラーと呼ぶ）を生成し、紫外から真空紫外の極短パルスの反射を用いてその状態をプローブする研究を進めている。これまでに、チタンサファイアレーザーの高次高調波として得られた真空紫外領域の波長（132, 160 nm）をもつ真空紫外パルスをプローブ光として時間分解プラズマミラー反射スペクトルを測定した[1]。この時間分解スペクトルに対して、Least-squares generalized projections algorithm と呼ばれる再構築解析法を施すことによって、真空紫外パルスの位相も含めたパルス波形を求められることを実証してきた [2,3]。この解析手法では、励起前の基板のフレネル反射からプラズマミラー生成により反射率が增大する様子を観測でき、高密度励起の実時間計測法として有望である[3]。励起電子密度の時間変化など定量的な議論を行うためには、反射率の絶対値を知ることが必要である。

試料基板として用いてきた溶融石英は、欠陥や不純物によって励起子構造が大きく変わることから、真空紫外波長領域における光学特性が製造条件等によって異なる。そこでレーザー実験に使用した製品と同じ溶融石英基板の絶対反射率測定を試みた。レーザー実験と同じ入射角 55 度に石英基板を設置し、放射光の進行軸を回転軸として基板を回転できる基板ホルダーを作成した。偏光の主軸と石英表面の相対角度を変えて反射光を検出し、回転角度の関数として反射率を測定した。まず、放射光の直線偏光度を決めるため、反射率の信頼できる文献データのある 210 nm の波長で測定を行い、偏光度を決め、波長を 130 nm 程度まで短くしても、この偏光度は変わらないとして、以後の解析を進めた。その結果、波長 132 nm および 160 nm における絶対反射率を得ることができた。得られた反射率を基に、レーザー実験における時間依存反射率を絶対値へとスケールし、レーザー実験における電子励起密度の変化を定量的に議論する。

- [1] R. Itakura, T. Kumada, M. Nakano, H. Akagi, *Opt. Express* **23**, 10914 (2015).
- [2] R. Itakura, T. Kumada, M. Nakano, H. Akagi, *High Power Laser Sci. Eng.* **4**, e18 (2016).
- [3] R. Itakura, H. Akagi, T. Otobe, *Opt. Lett.* **44**, 2282 (2019).

多電子同時計測による Kr3p 空孔状態からの super Coster-Kronig 過程の研究

Multi-electron coincidence spectroscopy: Super Coster-Kronig decay from the Kr 3p core-hole states

彦坂泰正¹、Pascal Lablanquie²、金安達夫³、足立純一⁴

田中宏和⁴、鈴木功⁴、石川幹生⁵、小田切文⁵

¹富山大、²Sorbonne Univ.、³SAGA-LS、⁴KEK-IMSS-PF、⁵上智大

オージェ過程は、原子や分子の軟 X 線吸収により生成する内殻空孔状態の主要な崩壊過程である。そこでは、内殻電子のイオン化により生成した空孔が外側の軌道の電子によって埋められ、別の電子がオージェ電子として放出される。オージェ過程の遷移確率は関与する電子軌道の重なり大きさの大きさを反映し、全て同じ殻の電子のみが関与する特殊なオージェ過程 (super Coster-Kronig (SCK) 過程と呼ばれる) では極めて大きな遷移速度が見られる。Kr 3p 空孔状態は、その異なる副準位 ($3p_{3/2}^{-1}$ と $3p_{1/2}^{-1}$) の間で自然幅に 2 割程度もの差異がある。この差異は、SCK 過程の寄与が異なることによるものと考えられる。幾つかの理論計算があるものの、SCK 過程の始状態 ($3p_{3/2,1/2}^{-1}$) と終状態 ($3d^{-2}$) がエネルギー的に近接しているため、SCK 過程の寄与の見積もりには計算精度が大きく影響する。実験的にも、通常のオージェ分光では SCK 過程を見出し、その寄与を把握することは難しい。これは、SCK 過程による構造が期待される低運動エネルギー領域では、3d オージェ過程の構造が支配的であるためである。

本研究では、磁気ボトル型電子分析器を用いた多電子同時計測[1,2]を行い、Kr3p 空孔状態からの SCK 過程を識別した。 $3p_{3/2}^{-1}$ 状態と $3p_{1/2}^{-1}$ 状態の崩壊に占める SCK 過程の割合を同時計測収量から見積もり、その寄与の差がそのまま自然幅の差異となっていることを明らかにした。

参考文献

[1] T. Kaneyasu et al., J. Chem. Phys. **147** (2017) 104304.

[2] T. Odagiri et al., J. Chem. Phys. **152** (2020) 124301.

反射型偏光子を用いた 真空紫外ビームライン BL20A の直線偏光度評価の試行 Polarization evaluation in VUV beamline 20A with a reflection polarimeter

穂坂綱一¹、足立純一²

1 東京工業大学、2 KEK-IMSS-PF

透過型の偏光素子が無い真空紫外域では、光自体からの直接的な偏光度評価が困難で、光電子の放出異方性を用いた間接的な評価が一般的である。BL-20A [1]での報告例も、He 光電子を用いた $80 \pm 10\%$ の値 [2]のみであったが、最近の光電子角度分布測定では 90%超の直線偏光度が測定され、その評価の信頼性に疑問が生じていた。本発表では、反射型偏光子を用いた、物質を介さない、放射光偏光度の直接評価の試行について報告する。

今回は BL-20A に設置された 2 枚の回折格子のうち、1200lines/mm の回折格子を用い、波長 2100 \AA (5.90 eV) の放射光の偏光度を測定した。放射光の高次波長成分は 1.5mm 厚の MgF2 結晶を透過させ除去し、反射材には波長 2100 \AA での偏光度が既知の溶融石英基板を用いた。p 偏光の偏光度 R_p が、s 偏光の偏光度 R_s よりも十分に小さくなる入射角 55° で、放射光を反射させ、s 偏光成分のみを含む反射光の光量をフォトダイオードで計測した。この反射型偏光子(石英基板とフォトダイオードの組)を放射光軸に対し回転させ、図 1 の角度分布を得た。2 つの山、2 つの谷の高さはどちらも一致しており、十分に良い条件で測定できた。この図から決定した 2100 \AA における放射光の直線偏光度は $\sim 97\%$ であり、従来の報告値[2]よりも 1 に近い値を得た。

実験と解析の詳細をポスターにて発表する。

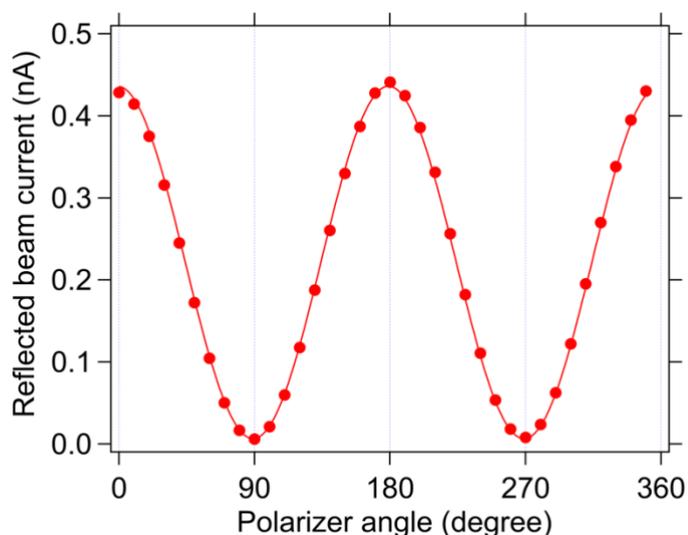


図 1 反射型偏光子を用いた反射光量の角度分布。
横軸は偏光子と水平面のなす角。

[1] K. Ito et al., *Rev. Sci. Instrum.* **66** 2119 (1995).

[2] Y. Hikosaka et al., *J. Phys. B* **36** 1423-1432 (2003).