

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03488

研究課題名(和文) 分子二重スリット実験で調べる量子エンタングル状態生成の時間・空間依存性

研究課題名(英文) Entangle states for photoelectrons from molecules have time and position dependence or not

研究代表者

副島 浩一 (Soejima, Koichi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：50283007

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：直線3原子分子に対する、オージェ電子、光電子の電子・電子同時計測角度相関測定に当初予定していた電子エネルギー分析器を機械的に回転させる従来から光電子の角度分布測定によく利用されていた実験方法は取りやめ、より効率的に光電子角度分布測定ができるX線チョッパーと2次元検出器を備えた電子TOFを組み合わせる方式に変更をおこない、その実施の目途が立った。予備的にHeの光電子角度分布測定をおこない、角度分解能は1度以下であることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光子エンタングル状態の研究に比べてかなり遅れている、電子エンタングル状態の実験的研究を効率的に進める手段を確保できた意義は大きいと思われる。これで、光電子角度相関に現れる干渉効果からエンタングル状態を評価する手法の開発に目途がたち、これから種々の直線分子を対象に実験的研究を推し進め、その正当性を評価していく事ができる。これにより、これまでどちらかという、量子エンタングル状態を主眼におくというより、内殻ホール状態の局在性に注目した物理化学的な興味に比重が置かれていた電子系エンタングル状態研究を、エンタングル状態そのものを対象にした実験的研究へと興味の方向性を変化させることができると期待される。

研究成果の概要(英文)：Development of an apparatus for angular distribution measurements of photoelectrons or/and Auger electrons from triatomic molecules will soon be finished. We have selected that the method of the measurements is combination of a pulse selector for X ray and electron TOF with 2D detector. The detection efficiency of the method we selected is much higher than that of a conventional method for angular distribution measurement. A preliminary measurement for angular distribution of photoelectrons has been done in single photoionization of helium. The results is good enough for progressing the study of entangle states using interference pattern on angular correlation.

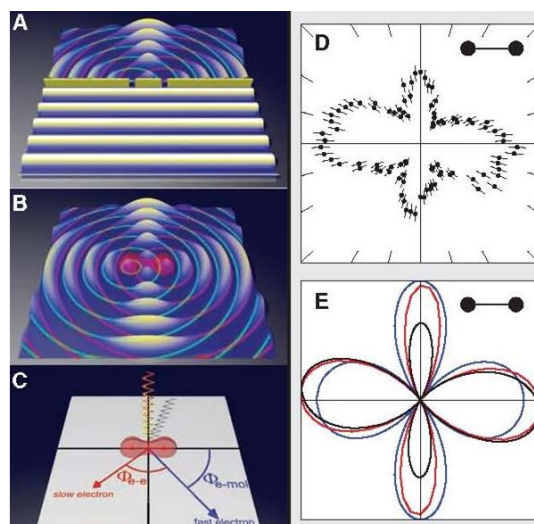
研究分野：原子分子物理学

キーワード：エンタングル状態 光電離過程

1. 研究開始当初の背景

複数の量子状態のコヒーレントな線形結合として生成される量子エンタングル状態は、最近では、量子情報科学の誕生、発達とともに大きな注目を集める実験的研究対象になっている。その対象は大規模量子系に対するものと少量量子系に対するものに大別できる。大規模量子エンタングル状態の生成に関する研究は、量子情報科学にとって最重要課題の1つであるため、量子ビットを利用したメゾスコピックデバイス分野やレーザーを利用した量子光学分野等の広い分野で盛んにおこなわれおり、こちらが主戦場といえる⁽¹⁾。一方、少量量子系における量子エンタングル状態の生成に関する研究は、実用性というより基礎科学的な興味から進められており、光子系の量子エンタングル状態に関する研究が主におこなわれている。電子系を利用した研究は世界的に見てもほとんど報告例がなく、それも量子エンタングル状態を主眼におくというより、内殻ホール状態の局在性に注目した物理化学的な興味に比重が置かれている⁽²⁾。量子コンピュータ実現などの量子情報科学の応用分野では、光子系が利用されることが主な理由と思われるが、電子系における量子エンタングル生成に関する研究はほぼ手付かずの状態である。

分子を対象にした光電離過程において、散乱電子波の始点である核の位置をあたかもスリット位置のようにみなし、原子スケールの二重スリット実験を実施するアイデアは古く、Cohen and Fano の論文⁽³⁾まで遡ることが出来る。しかし、この分子二重スリット実験を、水素分子を対象にした光二重電離過程で実際に実行されたのは比較的最近のことである⁽⁴⁾。本申請の実験的な核である分子二重スリット実験を示す好例として、参考のために図1にその実験結果を示した。Bが分子二重スリット実験の概念図でDが実際に観測された角度相関結果である。Bの概念図のように分子から放出される2つの光電子球面波がコ



【図1】 H_2 の放出光電子間の角度相関

ヒーレントな結合、すなわち量子エンタングル状態が生成されるならDの観測結果にあるように電子同士の角度相関に干渉効果が現れる。すなわち、この角度相関に現れる干渉強度によって量子エンタングル状態を評価できることになる。一方、分子の光電離過程では、入射光のエネルギー調整によって分子の内部状態を自由に操作できる。分子の多様性と考え合わせると、広い実験条件で量子エンタングル状態生成に関する情報を得ることが可能であると期待される。

2. 研究の目的

「量子エンタングル状態の生成は時間的、空間的条件にどのように影響を受けるであろうか？」すなわち、2つの光電子の始点間の距離を離していった場合、量子エンタングル状態の生成に影響はあるのだろうか？また、光電離過程+オージェ過程のような、時間的に区別できる反応から生じる光電子とオージェ電子はそもそも量子エンタングル状態を生成するのであるか？するとしたら寿命が長い内殻ホール状態にした場合に、量子エンタングル状態の生成に、はたしてどのような影響が現れるのだろうか？

その答えを実験的に確かめるために、放射光実験施設において、簡単な直線分子に対して光二重電離過程で生じる光電子-光電子もしくは光電子-オージェ電子の角度相関の測定をおこなう。角度相関に現れる干渉の強度によってエンタングル状態の定量的な評価をおこない、標的分子の構成原子数を変えることで、そのエンタングル状態量の空間的依存性を、また、内殻ホール状態の寿命が異なるオージェ過程を選択することで、時間的依存性を実験的に明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

軟 X 線領域の放射光を利用して、分子二重スリット実験をおこなう。そのための実験装置を物質構造科学研究所放射光施設 (PF) に新たに立ち上げる。装置は分析部として、回転可能な飛行時間 (Time Of Flight) 型電子エネルギー分析器 1 台、真空チェンバーに固定された TOF 型電子エネルギー分析器 1 台、および TOF 型イオンエネルギー分析器 1 台から、また、入射光部としてシングルバンチの放射光のみを切り出す軟 X 線パルスセレクターから構成される。分子から放出される電子および光解離後の生成イオンの運動エネルギーはパルスセレクターからの信号をスタート信号にし、荷電検出器からの信号をストップ信号にして得られる電子 (イオン) の飛行時間から決定する。この実験方式の利点は装置開発への投資が抑えられることにある。原理的には荷電粒子検出器が 3 台あれば実験の実施が可能である。検出器の固定および回転系の作製に多少の投資が必要であるが、設計を工夫し、既存の装置資源をできるだけ活用することで、安価に開発する予定であった。実際には、種々の理由により、当初の装置開発計画は白紙に戻し、新たに、二次元検出器を備えた電子 TOF 装置により、光電子の角度相関測定を行うことにした。

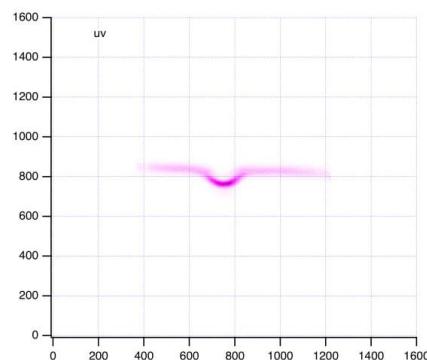
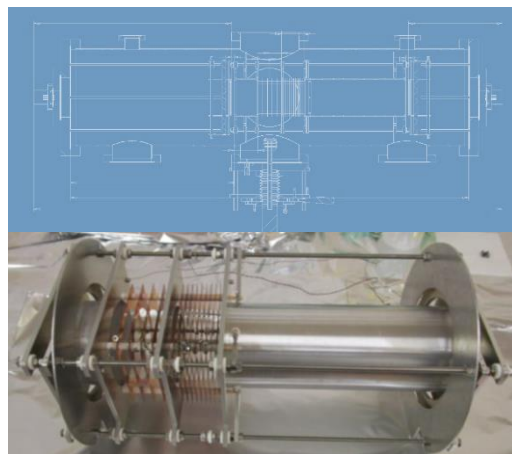
4. 研究成果

当該研究を進めるにあたって、必要になる直線 3 原子分子の内殻 2 空孔状態生成は、多光子電離過程でおこなうことが効率的であるが、軟 X 線領域の多光子過程を実現させる手段は現時点では自由電子レーザー施設の利用に限られる。当該施設は世界的に見ても数か所しかなく、研究時間の確保に難点がある。そこで、共同研究者の 1 人であるソルボンヌ大学 P. Lablanquie 博士とフランスの放射光施設ソレイユで共同実験をおこなう機会をとらえ、通常の放射光施設で得られる光強度でも実施可能な反応系に関する議論をおこなった。ロックアウト過程が顕著に表れる過程を選べば、効率的ではないが、CO₂ や N₂O でも内殻 2 空孔状態は生成可能であるという結論に至った。これは今後放射光施設で電子系エンタングル実験研究を進めるうえで非常に有益な情報であり、Lablanquie 博士を含めた複数の研究者と議論ができたことは大きな成果と言える。さらに、エンタングル状態や観測問題の研究者として著名な A. Aspect 博士が在籍するエコールポリテクニクにて、原子エンタングル状態に関する情報収集をおこなった。分子二重スリットの実験が、電子系エンタングル状態の解明に適した手法であることが確認できたことも大きな収穫であった。

実験手法として新たに選択した X 線パルスセレクターと組み合わせる 2 次元検出器付きの電子 TOF の全体概略図と電子 TOF の写真を右に示す。

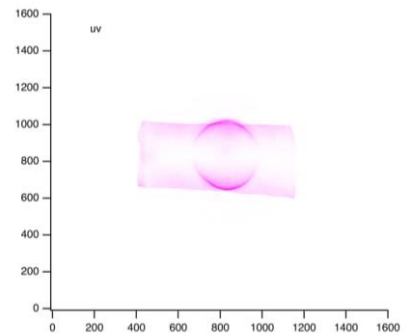
この装置は電子 TOF に加えイオン TOF も備えており、電子、イオンそれぞれの検出器が相対する位置に設置されている。放射光は紙面垂直方向から図面中心を通過する。試料ガスは紙面上方から導入することになる。開発中の装置には飛行管終端にディレイラインアノードを備えた 2 次元検出器が設置されている。今回の予備実験は、イオン、電子 TOF 共に、この 2 次元検出器の動作確認に主

眼をおいた。He を標的ガスとして $h\nu = 40\text{eV}$ で光電子および光イオンの放出角度分布測定をおこなった。右図はイオン TOF 用二次元検出器で得られ He⁺ の空間分布である。まだ調整中であるため、バックグラウンド信号が大きいことと、角度分布が下方に強調される本来はありえない結果となった。この原因としては、上方から延びるガスノズルの影響であることが予想されるので、ガス導入方法の再検討が必要であることが判明した。一方、



電子 TOF 用二次元検出器で測定された光電子の空間分布は右図に示すように十分満足の得られる結果となった。まだ調整中であるため、こちらもバックグラウンド信号が大きい。光電子の角度分布は、偏光ベクトル方向に強く観測されており、予想通りの形となっている。このことから、電子 TOF に関しては現時点でも十分使用に耐える状態にあることが分かった。

次の段階として、電子・電子の同時計測を実施できるか否かの確認実験が必要になる。この確認の後、直線 3 原子分子を対象にした電子系エンタングル状態の実験的研究を進めていく予定である。



【引用文献】

- (1) R. McConnell et al., *Nature*, 519, 439 (2015).
- (2) M.S.Schöffler et al., *Science*, **320**, 920 (2008).
- (3) H.D.Cohen and U.Fano, *Phys. Rev.*, **150**, 30 (1966).
- (4) D.Akoury et al., *Science*, 318, 949 (2007).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 足立純一, 副島浩一, 他11名
2. 発表標題 Development of pulse selectors for the synchrotron radiation pulses from the Photon Factory 2.5 GeV ring to study multiple photoionization
3. 学会等名 XXXIst International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻裕規, 副島浩一, 他5名
2. 発表標題 磁気ボトル型電子分光装置を用いた 酸素分子の多重光電離過程の研究
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤俊丞, 副島浩一
2. 発表標題 分子二重スリット実験のための装置開発
3. 学会等名 日本物理学会新潟支部例会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	ソルボンヌ大学			