

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	エンタングルした原子ペアの分子解離による生成の検証
Title(English)	
著者(和文)	鳥塚祐太郎
Author(English)	Yutaro Torizuka
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11376号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:北島 昌史,大島 康裕,腰原 伸也,西野 智昭,山崎 優一
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11376号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース：	化学	系
Department of, Graduate major in	化学	コース
学生氏名：	鳥塚祐太郎	
Student's Name		

申請学位(専攻分野)：	博士	(理学)
Academic Degree Requested	Doctor of	
指導教員(主)：	北島昌史	
Academic Supervisor(main)		
指導教員(副)：		
Academic Supervisor(sub)		

要旨(和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文の題目は「エンタングルした原子ペアの分子解離による生成の検証」であり、全 6 章より成る。

第 1 章「序論」では本研究のキーワードであるエンタングルメント(もつれ)の説明と、本研究の目的を述べている。量子力学では、全系の波動関数が、それを構成する部分系の波動関数の積で表せないことがあり、このような全系の状態をもつれ状態という。古典論においては、系全体は状態の定まった部分系から構成されるので、もつれ状態は、複合系の量子力学の非日常性の根源である。もつれは量子情報の資源として盛んに研究されているが、これまで、もつれ系は外界から状態を制御することで能動的に作られてきた。しかし、本研究グループの宮城らは、能動的にもつれ系を作らずとも、水素分子の光解離で自発的にもつれた $H(2p)$ 原子ペアが生成すると予測した。本研究は、宮城らの予測通り光解離で生成する $H(2p)$ 原子ペアがもつれていることを実証したものである。

第 2 章「理論」ではもつれ $H(2p)$ 原子ペア生成の実証に必要な理論について述べている。本研究では $H(2p)$ 原子ペア状態は、Lyman- α 光子ペア状態に転写されることを利用し、光子ペアの放出方向の角度相関関数(Angular correlation function, ACF)測定によって原子ペアのもつれの有無を調べた。ACF は 2 つの光子検出器 c, d の設置方向の関数であるが、 c, d の設置方向を網羅的に動かす測定は現実的でない。そこで、第 2 章において ACF の解析的表現を求め、その表現から ACF を一意に決めるのに必要十分な配置を検討した。

第 3 章「実験」では Lyman- α 光子ペアの ACF 測定法について述べている。実験は、KEK-PF BL20A および BL28B で行った。光子エネルギー 33.66 eV の直線偏光を水素ガスで満たされたガスセルに導き、生成する Lyman- α 光子ペアの同時計数率を 2 つの光子検出器 c, d の設置方向の関数として測定した。検出器 c, d の方向は、それぞれ空間固定座標系(XYZ 系)における極角、方位角((Θ_c, Φ_c) および (Θ_d, Φ_d))で指定できる。空間固定座標系の X 軸は入射光の波数ベクトル方向、 Z 軸は偏光ベクトル方向とした。第 2 章で、ACF の解析的な表現を求めたところ、そこには 4 つの角度変数($\Theta_c, \Phi_c, \Theta_d, \Phi_d$)と 5 つの係数が含まれることがわかった。それら 5 つの係数を一意に決めるのに十分な配置で ACF を測った。本研究では、過去に 2 つの検出器を設置した入射光の進行方向に直交する面($\Phi_c=\Phi_d=3\pi/2$)の外にも検出器を設置した。ACF が 4 つの角度変数の関数として求まれば、ACF に課される規格化条件から、実測 ACF の縦軸スケールを絶対値化できる。

第 4 章「結果」では実測した Lyman- α 光子ペアの ACF を示した。

第 5 章「考察」では実測した ACF を再現する $H(2p)$ 原子ペア状態を、あらゆる可能性を排除することなく、包括的に調べ、光解離で生成する $H(2p)$ 原子ペアがもつれているか否かを調べた。

H(2p)原子ペアの前駆分子状態は2電子励起 $Q_2\ ^1\Pi_u(1)$ 状態であることが既に分かっているので、本研究では $Q_2\ ^1\Pi_u(1)$ 状態にある前駆分子から生成しうる、原子ペア状態を包括的に調べた。様々な検討の結果、H(2p)原子ペアの状態は $Q_2\ ^1\Pi_u(1)$ 状態と $Q_2\ ^3\Sigma_u^+(2)$ 状態の重ね合わせ状態であることが分かった。 $Q_2\ ^1\Pi_u(1)$ 状態の前駆分子からこのような原子ペアが生成する原因は水素分子のスピンの軌道相互作用である。一般に解離性状態にある水素分子ではスピンの軌道相互作用を無視できるとされてきたが、このことは Franck-Condon 領域では適切であるものの、核間距離が大きくなるにつれ、次第に適切でなくなる。これは複数のポテンシャル曲線が、同一の解離極限に漸近するからである。実際、核間距離の増加とともに、 $Q_2\ ^1\Pi_u(1)$ ポテンシャル曲線は、 $Q_2\ ^3\Sigma_u^+(2)$ ポテンシャル曲線に、著しく接近する。そのため、スピンの軌道相互作用を考慮すると、核間距離の増加に伴い $Q_2\ ^1\Pi_u(1)$ 状態は、 $Q_2\ ^3\Sigma_u^+(2)$ 状態と次第に結合し、核間距離無限大では $Q_2\ ^1\Pi_u(1)$ 状態と $Q_2\ ^3\Sigma_u^+(2)$ 状態の重ね合わせ 1_u 状態が生成すると予期した。そして、この 1_u 状態はもつれ状態である。フィッティングパラメータを用いずに、物理的な考察によって導かれた 1_u 状態に対する ACF の理論予測は、実験で決めた ACF を概ね再現する。したがって水素分子の光解離により、もつれ H(2p)原子ペアが生まれていると結論できる。そのもつれ状態は、 $Q_2\ ^1\Pi_u(1)$ 状態と $Q_2\ ^3\Sigma_u^+(2)$ 状態の重ね合わせ 1_u 状態である。

第6章「結論」では本研究の結論を述べている。水素分子の光解離により生じた H(2p)原子ペアは、 $Q_2\ ^1\Pi_u(1)$ 状態と $Q_2\ ^3\Sigma_u^+(2)$ 状態の重ね合わせ 1_u 状態にあり、分子の解離によるもつれ原子ペアの自発的生成が実証された。複合系の分割による、もつれの自発的生成は、分子解離に留まらず、一般の系においても起こると予想され、そのもつれ生成の原動力は系の分裂を通して保存される対称性である。本研究で言えば、解離を通して保存される対称性は、 1_u 対称性である。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

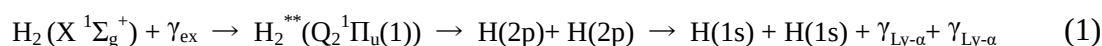
系・コース：	化学	系
Department of, Graduate major in	化学	コース
学生氏名：	鳥塚祐太郎	
Student's Name		

申請学位(専攻分野)：	博士	(理学)
Academic Degree Requested	Doctor of	
指導教員(主)：	北島昌史	
Academic Supervisor(main)		
指導教員(副)：		
Academic Supervisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

Investigations on entanglement in massive quantum particles have been intensively studied because the entanglement is essential for understanding composite quantum systems. While an entangled pair of atoms has been created in most of the studies a passive approach of producing an entangled atom-pair has been proposed in which an entangled pair of H(2p) atoms is spontaneously produced in the photodissociation of an H₂ molecule:



where γ_{ex} is a linearly polarized incident photon and $\gamma_{\text{Ly-}\alpha}$ a Lyman- α photon. It has been found out from experiments that only the $Q_2^1\Pi_u(1)$ state is involved in the formation of pairs of H(2p) atoms. The production of the entangled pair of the H(2p) atoms is substantiated with measuring the angular correlation function (ACF) of a pair of Lyman- α photons emitted by the H(2p) atoms.

In the present investigation, in order to prove that the process (1) produces an entangled pair of H(2p) atoms, the ACF of a pair of Lyman- α photons produced in process (1) has been determined over the whole emitted directions of the Lyman- α photons through coincidence measurements between two Lyman- α photons. From analysis of the experimental ACF, it is shown that the H(2p) atom pairs in process (1) is in the superposition of the $Q_2^1\Pi_u(1)$ state and the $Q_2^3\Sigma_u^+(2)$ state, which the superposition is an entangled state. The superposition is brought about by the spin-orbit coupling, which is effective around infinite internuclear distance because the potential energy curves of those states are close to each other, but is negligibly small around the Franck-Condon region because they are apart from each other.

In conclusion, an entangled pair of hydrogen atoms is spontaneously produced through the photodissociation of a hydrogen molecule as shown in process (1). The entanglement originates from the 1_u symmetry properties, which are invariant during the dissociation of a hydrogen molecule.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).