

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23350003

研究課題名(和文)量子もつれ原子ペアの不思議な崩壊ダイナミクス

研究課題名(英文)Decay dynamics of the entangled atom-pair

研究代表者

河内 宣之(Kouchi, Noriyuki)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：50161873

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円、(間接経費) 3,990,000円

研究成果の概要(和文)：代表者は水素分子の光解離によって生成するH(2p)原子ペアは量子もつれ状態にあることを理論的に指摘した。本研究では、その予測を検証し、量子もつれ状態を確定し、量子もつれ原子ペアの示す崩壊ダイナミクスを解明することを目的とした。原子ペアの量子もつれは、それが放出する光子ペアに転写される。そこで二つの真空紫外光子検出器を独立に回転できる装置により、Lyman- α 光子ペアの角度相関関数と時間相関関数を様々な水素ガス圧力で測定した。得られた角度相関関数を代表者の理論予測と比較した結果、水素原子ペア中の少なくとも一方の磁気量子数が確定していないことがわかった。

研究成果の概要(英文)：It was predicted by our group that the pair of H(2p) atoms following the photodissociation of molecular hydrogen is entangled. In the present study we aim at examining the prediction, determining the entangled state of H(2p) atoms and investigating the dynamics of the entangled atom-pair. The entanglement in the atom-pair is copied to the photon-pair. By using the new apparatus, in which two photon-detectors are rotated independently along the incident light beam, the angular-correlation and time-correlation functions of the pair of the Lyman-alpha photons have been measured in the extensive range of pressures and compared with the theoretical prediction. It has turned out that the magnetic quantum number of at least one hydrogen atom in the pair is not definite.

研究分野：化学

科研費の分科・細目：基礎化学・物理化学

キーワード：励起分子素過程 量子もつれ

1. 研究開始当初の背景

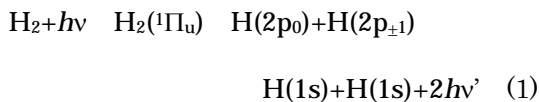
量子もつれ状態とは、おのおのの部分系の状態が確定していない状態のことである。我々の直感によれば、全系は状態が確定した部分系から構成されはらずである。ところが量子力学によると、直感からかけ離れた、このような不思議な状態が許される。もつれ状態は、量子力学の不思議さの根源として、また量子計算の資源として、主として物理研究者により研究がなされている。

原子・分子の世界を支配するのが量子力学である以上、化学においても量子もつれは大きな役割を果たしていると思われる。しかし、そのような発想が希薄なために量子もつれが誘起する現象が見逃されている可能性がある。本研究で取り上げる水素分子の光解離による量子もつれ原子ペア生成もその一つである。研究代表者は、水素分子の光解離によって生成する H(2p)原子ペアが量子もつれ状態にあること、およびそのもつれが Lyman-α光子ペアに転写され、その角度相関パターンとして現れることを理論的に示した(J. Phys. B, **40**, 617-628 (2007))。すなわち、解離原子ペアに現れる量子もつれは、それが放出する光子ペアの角度相関パターン測定により検証可能である。

しかしながら検証実験はされないままであった。代表者の理論予測は、解離前駆状態の対称性が保存されることに基づいているので、他の分子にもそのまま当てはまる。したがって、その検証実験は極めて意義深い。

2. 研究の目的

水素分子の光解離によって生成する Lyman-α光子ペアの角度相関関数を測定し、それを代表者の理論予測と比較する。それに基づいて H(2p)原子ペアの量子もつれ状態を確定する。注目する過程は以下のようなものである。



ここで、 $h\nu$ は入射光子、 $h\nu'$ は Lyman-α光子を表す。また 2p の添え字、0 及び ± 1 は、核間軸についての磁気量子数を表す。図 1 に上記の過程を図解する。水素分子はエネルギー 30-40eV の光子($h\nu$)を吸収して二電子励起 $1\Pi_u$ 状態に励起する。図 1 に示すようにこの状態は反発型のポテンシャルエネルギー曲線をもっているため、速やかに解離して H(2p)原子ペアに至る。それが Lyman-α光子ペアを放出する。

代表者の理論によれば、どちらの水素原子の磁気量子数が 0 であり、どちらの水素原子の磁気量子数が ± 1 であるかが確定しない 2p 原子ペア、すなわちもつれ H(2p)原子ペアが生成する。そのような不思議な原子ペアが

実際に生まれているかどうかを、Lyman-α光子ペアの角度相関測定により実証することが、本研究の目的である。また Lyman-α光子ペアの時間相関測定により、量子もつれ H(2p)原子ペアの崩壊ダイナミクスを単独の H(2p)原子ペアのそれと比較する。

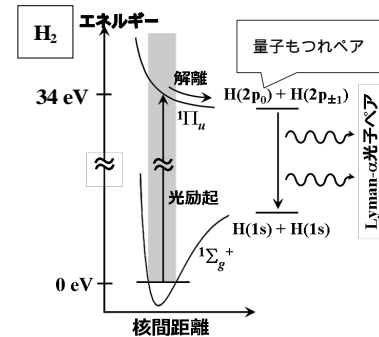


図 1. H₂ の光解離

3. 研究の方法

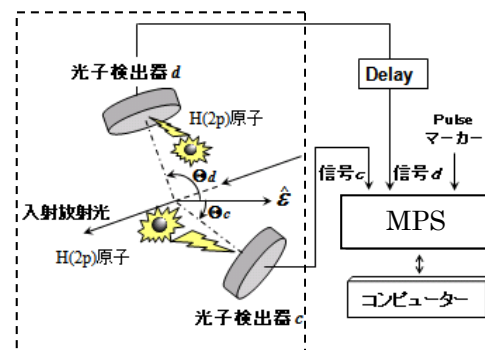


図 2. 実験装置の概要。破線で囲われた部分は真空チェンバー内にある。ε: 入射光の偏光ベクトル。MPS: マルチパラメータシステム。

図 2 に実験装置の概略を示す。破線で囲った部分は真空チェンバーの中にある。光子検出器は MgF₂ 窓とマイクロチャンネルプレートにより構成される。エネルギー 30-40 eV の入射光子を水素分子が吸収するとき、この検出器で検出されるのは Lyman-α光子のみである。二つの光子検出器を入射光軸の周りに独立に回転させたい。そこで三つの共軸円筒からなるガスセルを用意した(ガスセルは図 2 には示されていない)。検出器は外側の円筒と内側の円筒にマウントされる。中間円筒は、ガス漏れを押さえるために必要である。外側及び内側の円筒は真空の外から回転導入端子により独立に回転できる。このような機構を有する真空チェンバーを用意した。

光子検出器 c 及び d の方向を表す角度 θ_c 及び θ_d は、直線偏光した入射光の偏光ベクトル ϵ から測る(図 2 参照)。過程(1)を起こすた

めには、エネルギー30-40eVの光子が必要である。そこで入射光としてはシンクロトン放射光を用いる。具体的には高エネルギー加速器研究機構放射光科学研究施設の放射光を用いた。

二つの光子検出器(c及びd)により光子が検出される時刻をそれぞれ t_c 及び t_d とする。 (t_c, t_d) をリストモードで記録する。その解析からLyman- α 光子ペアの角度相関関数と時間相関関数が得られる。時間計測により二つのLyman- α 光子が同一の水素分子の同一の光子吸収に由来することを保証する。

4. 研究成果

図3に本研究の成果の一つとして入射光子エネルギー33.66eVにて測定されたLyman- α 光子ペアの角度相関関数を示す(と)。 Θ_c と Θ_d の関係は、 $\Theta_d = \Theta_c + \pi$ である。測定はこの場合のほか、 $\Theta_d = -\Theta_c$ 及び $\Theta_d = -\Theta_c + \pi$ の場合にもなされた。実線は量子もつれH(2p)原子ペア

$$\frac{1}{2\sqrt{2}} (|2p_1^a(1) 2p_0^b(2)\rangle + |2p_1^a(2) 2p_0^b(1)\rangle - |2p_0^a(1) 2p_1^b(2)\rangle - |2p_0^a(2) 2p_1^b(1)\rangle - |2p_{-1}^a(1) 2p_0^b(2)\rangle - |2p_{-1}^a(2) 2p_0^b(1)\rangle + |2p_0^a(1) 2p_{-1}^b(2)\rangle + |2p_0^a(2) 2p_{-1}^b(1)\rangle) \quad (2)$$

に基づく予測であり、破線は各々の水素原子の磁気量子数が確定したペア、すなわちもつれていない原子ペア

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|2p_1^a(1) 2p_0^b(2)\rangle + |2p_1^a(2) 2p_0^b(1)\rangle) \quad (3)$$

に基づく理論予測である。他にももつれていない原子ペア状態が考えられるが、すべて同じ理論予測を与える。実線及び破線とも、研究代表者による予測に角度分解能をたたきこんだ結果である(J. Phys. B, **40**, 617-628 (2007))。式(2)及び(3)において、 a 及び b は陽子に付したラベルであり、1及び2は電子に付したラベルである。また2pの添え字、0及び ± 1 は、核間軸についての磁気量子数を表す。

定性的には、実験で得られた角度相関関数は、もつれH(2p)原子ペアに基づく予測(実線)と同様の傾向を示す。すなわち、どの角度で山となり、どの角度で谷となるかの傾向が一致する。しかし、もつれていない原子ペアに基づく予測(破線)とは逆の傾向を示す。一方、定量的には、実験で得られた角度相関関数ともつれH(2p)原子ペアに基づく予測とのあいだにはかなりの隔りがある。すなわち、実験結果のコントラストは、理論予測よりも

かなり弱い。

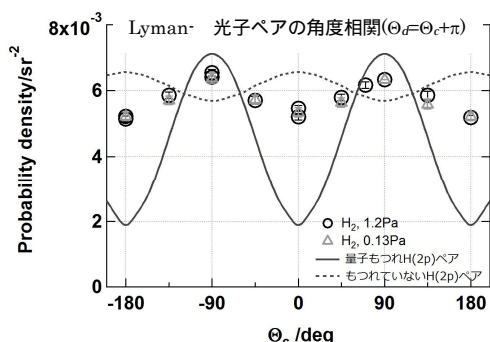


図3. 水素分子の光解離によるLyman- α 光子ペアの角度相関関数。入射光子エネルギー33.66 eV。

図3より、水素分子の光解離によって生成するH(2p)原子ペアは、少なくとも一方のH(2p)原子の磁気量子数が確定していないようである。断定は早すぎるかもしれないが、量子もつれH(2p)原子ペアが光解離によって生成していそうである。ただし、測定された角度相関のコントラストが、理論予測(実線)よりも悪くなる理由は明確ではない。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Takeshi Odagiri, Takehiko Tanabe and Noriyuki Kouchi, Dynamics of entangled H(2p) pair generated in the photodissociation of H₂, Journal of Physics: Conference Series, **388**, 012024(1-8), 2012, 査読有
DOI:10.1088/1742-6596/388/1/012024

[学会発表](計7件)

Yuko Nakanishi, Kouichi Hosaka, Philipp Schmidt, Kenichi Shiino, Andre Knie, Kari Jankala, Arno Ehresmann, Takeshi Odagiri, Masashi Kitajima, and Noriyuki Kouchi, An extensive measurements of angular correlation of a pair of the Lyman- α photons produced in the photodissociation of H₂ at high pressures, 30th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 2014年6月5日、イーグレ姫路(兵庫県)
椎野健一、仲西祐子、穂坂綱一、小田切文、北島昌史、河内宣之、H₂とD₂の光解離による2p原子ペア生成の断面積、日本物理学会第69回年次大会、2014年3月29日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県)
穂坂綱一、椎野健一、仲西祐子、小田切

文、北島昌史、河内宣之、 H_2 と D_2 の光解離による2p原子ペア生成の断面積、物構研サイエンスフェスタ2013、2014年3月18日、つくば国際会議場(茨城県)
仲西祐子、穂坂綱二、向後陵子、中野元善、熊谷嘉晃、椎野健一、鈴木功、小田切丈、北島昌史、河内宣之、水素分子の光解離により生成するLyman-光子ペアの角度相関関数、第7回分子科学討論会、2013年9月26日、京都府民総合交流プラザ(京都府)
向後陵子、穂坂綱二、仲西祐子、中野元善、熊谷嘉晃、鈴木功、小田切丈、北島昌史、河内宣之、水素分子の光解離により生成するLyman-光子対の角度相関関数測定、日本物理学会第68回年次大会、2013年3月28日、広島大学東広島キャンパス(広島県)
仲西祐子、穂坂綱二、小田切丈、田邊健彦、中野元善、熊谷嘉晃、鈴木功、北島昌史、河内宣之、量子もつれ $H(2p)$ 原子ペアの崩壊ダイナミクス、日本物理学会第67回年次大会、2012年3月27日、関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス(兵庫県)
Noriyuki Kouchi, Dynamics of entangled $H(2p)$ pair generated in the photodissociation of H_2 , The 27th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, 2011年7月27日、ベルファスト(イギリス)

(1)研究代表者
河内 宣之 (KOUCHI, Noriyuki)
東京工業大学・理工学研究科・教授
研究者番号：50161873

(2)研究分担者
()

研究者番号：

(3)連携研究者
穂坂 綱一 (HOSAKA, Kouichi)
東京工業大学・理工学研究科・助教
研究者番号：00419855

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織