

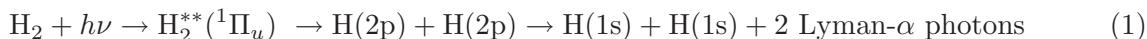
2A17

水素分子の光解離による H(2p) 原子対のエンタングルメント発生とその反応による変化

田邊 健彦¹, 小田切 丈¹, 中野 元善¹, 熊谷 嘉晃¹, 鈴木 功^{2,3}, 河内 宣之¹

(東工大院理工¹, 産総研², 高エネ機構物構研³)

【序】我々は近年、以下の「水素分子の 1 光子吸収・2 光子放出過程」を見出した。ここで、 H_2^{**} は 2 電子励起水素分子を示す。



さらに最近、この過程 (1) で生成する Lyman- α 光子対が、明暗比 100% にも達する強い角度相関を示すことを、量子光学の手法を用いて予測した [2]。この Lyman- α 光子対の強い角度相関は、その前駆体である H(2p) 原子対がエンタングルしていることに由来する。2 つのプロトンを a, b 、2 つの電子を 1、2 とすると、 ${}^1\Pi_u$ 状態から生成する H(2p) 原子対の固有関数は、以下の (2) 式となる (下添え字は磁気量子数 m を示す)。すなわち解離生成する H(2p) 原子対はエンタングルしている。

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

この H(2p) 原子対のエンタングルメントが Lyman- α 光子対に転写され、Lyman- α 光子対の強い角度相関が生み出されるのである。この理論の予測通り、エンタングルした H(2p) 原子対が分子解離により生成するかどうかの検証、およびそのエンタングルメントがどの程度、保たれるかを研究することは、きわめて重要である。そこで本研究では、水素分子の 1 光子吸収により発生する Lyman- α 光子対の角度相関関数を、2 つの水素ガス圧力の下で測定した。

【実験】実験は、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所放射光科学研究施設のビームライン 20A にて行った。直線偏光した放射光を、水素ガスを満たしたガスセル内に導入し、過程 (1) により Lyman- α 光子対を発生させた。入射光軸に直交する 1 つの軸上に、互いに向かい合うように 2 つの光子検出器 (c と d) を置き、この軸と入射光の偏光ベクトル \hat{e} のなす角度を変化させる。検出器 c と d の方向と \hat{e} のなす角をそれぞれ Θ_c と Θ_d とすれば、 $\Theta_d = \Theta_c + \pi$ の関係を満たしつつ、 Θ_c を変えることになる。 Θ_c を変えながら、2 光子同時計数率を測定し、それをガスセル内の水素ガス圧力、および入射放射光の光量で規格化した。幾何学的因子は Θ_c には依存しそうもないので、その結果を Θ_c に対してプロットして、Lyman- α 光子対の角度相関関数を得た。

【結果、考察】結果を図 1(a)、(b) に示す。すなわち、入射光子エネルギー 33.66 eV にて測定した角度相関関数を \bullet で示す。(a) はガスセル内の水素ガス圧力が 0.40 Pa (3 mTorr)、(b) は 0.13 Pa (1 mTorr) にて測定した結果である。実線が [2] による理論予測 (もちろん圧力効果は考慮されていない)、(+) は実線を実験装置の角度分解能でコンボリュートした結果である。なお、Lyman- α 光子計数率が水素ガス圧力に 0.80 Pa まで比例することを確認してある。水素ガス圧力の低下に伴い、理論予測に近づく明瞭な傾向を見出した。これは、1) 予測通りのエンタングルした H(2p) 原子対が生成していること、および 2) 興味深いことに、このエンタングルメントが H_2 分子により変化していること、の二つを強く示唆している。このエンタングルメント変化が、H(2p) および H(2s) 原子と H_2 分子との反応ではなく、エンタングルした原子対と H_2 分子の反応に起因していることを以下に示そう。

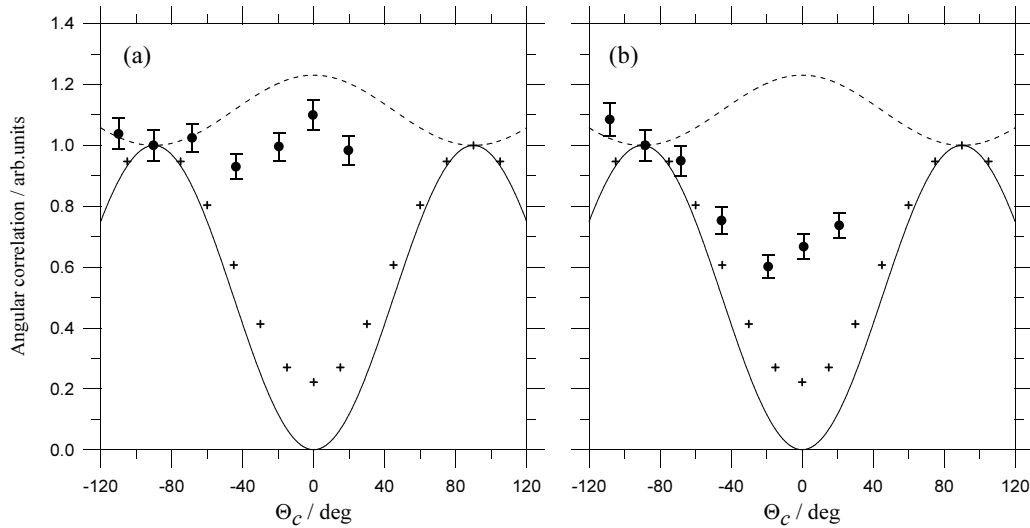
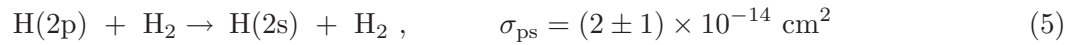
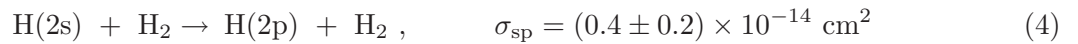
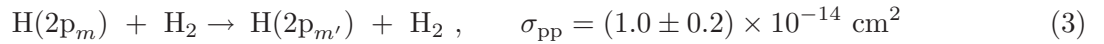


図1 入射光子エネルギー 33.66 eV において測定した、 H_2 分子の光解離による Lyman- α 光子対の角度相関関数 (\bullet) と理論予測。角度 Θ_c とは、検出器 c の方向と入射光の偏光ベクトルがなす角度であり、もう一つの検出器 d は c の向かい側にある。(a) にはガスセル内の水素ガス圧力が 0.40 Pa、(b) には 0.13 Pa において測定した結果を示す。[2] による予測を実線で、実線を実験装置の角度分解能でコンボリュートした結果を (+) で示す。

過程 (3)-(5) は、 $\text{H}(2p)$ および $\text{H}(2s)$ 原子と H_2 分子の反応であり、Lyman- α 光子対の角度相関関数に影響し得る。



ここで、 σ_{pp} 、 σ_{sp} 、 σ_{ps} は各過程の断面積である [3, 4]。これらを用いて、各過程の平均自由時間を水素ガス圧力 0.40 Pa にて求めた結果を以下に示す。

$$\tau_{pp} = 350 \text{ ns}, \quad \tau_{sp} = 900 \text{ ns}, \quad \tau_{ps} = 200 \text{ ns}. \quad (6)$$

$\text{H}(2p)$ 原子の自然寿命 1.6 ns を考慮すると、 $\text{H}(2p)$ 原子が過程 (3) と過程 (5) をたどることはないであろう。ここで、 $\text{H}(2s)$ 原子は準安定原子であるので、過程 (4) の寄与は考えねばならない。ただし同時計数時間スペクトルが時定数 1.6 ns により支配されているので、実際にはその寄与は無視できる。以上のことより、 $\text{H}(2p)$ 原子対エンタングルメントの変化は、 $\text{H}(2p)$ あるいは $\text{H}(2s)$ 原子と H_2 分子の反応、つまり過程 (3)-(5)、に由来するとはとても考えられない。つまりその変化は、エンタングルした $\text{H}(2p)$ 原子対と H_2 分子の反応に由来するものと考えられるのが自然である。このような反応を、エンタングルド原子対反応と呼ぼう。そして、この断面積を見積もってみよう。エンタングルド原子対反応の平均自由時間は、水素ガス圧力 0.40 Pa、0.13 Pa にて 1 ns のオーダーであろう。したがってその反応の断面積は、過程 (3)-(5) のそれぞれの約 100 倍にも達するであろう。つまりエンタングルド原子対反応は、 10^{-13} - 10^{-12} cm^2 という、気相反応としては類を見ない大きな断面積をもつのである。このエンタングルド原子対反応は、新しいタイプの化学反応である。

【参考文献】

- [1] T. Odagiri *et al.*, *J. Phys. B*: **37**, 3909(2004).
- [2] H. Miyagi *et al.*, *J. Phys. B*: **40**, 617(2007).
- [3] N. Terazawa *et al.*, *J. Chem. Phys.* **99**, 1637(1993).
- [4] E. Flemming *et al.*, *J. Chem. Phys.* **103**, 4090(1995).