

2P014

## 水素分子の超低エネルギー電子衝突全断面積における同位体効果

<sup>1</sup>東工大院理工, <sup>2</sup>上智大理工

○奥村拓馬<sup>1</sup>, 江尻智一<sup>1</sup>, 赤坂博史<sup>1</sup>, 穂坂綱一<sup>1</sup>, 北島昌史<sup>1</sup>, 小田切丈<sup>2</sup>, 星野正光<sup>2</sup>

### Isotope effects on ultra-low-energy total electron scattering cross sections of hydrogen molecules

○Takuma Okumura<sup>1</sup>, Tomokazu Ejiri<sup>1</sup>, Hirofumi Akasaka<sup>1</sup>, Kouichi Hosaka<sup>1</sup>,  
Masashi Kitajima<sup>1</sup>, Takeshi Odagiri<sup>2</sup>, Masamitsu Hoshino<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemistry, Tokyo Institute of Technology, Japan

<sup>2</sup>Department of Material and Life Science, Sophia University, Japan

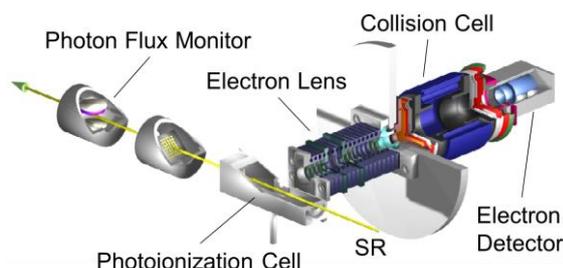
**【Abstract】** Total cross sections for electron scattering from H<sub>2</sub>, HD, and D<sub>2</sub> were obtained with the experimental technique using the threshold photoelectron source. The energy range for the present cross sections was extended down to very low energy. Isotope effects, which have been overlooked in the previous studies, were found in the energy region of the shape resonance at around 3 eV and in the ultra-low energy region below 100 meV. The isotope effects around the shape-resonance energy region are interpreted by the isotope effects on cross sections for rovibrational excitations. On the other hand, the isotope effects observed in the ultra-low energy region could not be explained with the existing well known theories on the electron-molecule scattering.

**【序論】** 電子-分子衝突過程は分子が関わる最もシンプルな衝突過程であり、量子力学における少数多体系のダイナミクスを検証するモデル系として広く研究されてきた。分子標的では、分子の多中心性が衝突過程に与える影響、特に振動・回転などの分子運動が電子衝突断面積に与える影響が興味深い。一般的に、電子と分子が衝突するのに要する時間（衝突時間）は分子振動・回転運動の時間スケールよりも遥かに短く、電子-分子衝突過程では衝突時の電子の運動と分子の運動を分離する描像が良い近似だとされる。一方で、低エネルギー衝突では衝突時間が長くなるため、meV オーダーの超低エネルギー領域では分子振動・回転の時間スケールに比べて衝突時間を無視できなくなる。このため、超低エネルギー電子衝突では、入射電子の運動と分子の振動・回転運動が強く結合した特異な衝突ダイナミクスの発現が期待される。

最近我々は、放射光を利用した、しきい光電子源を用いた新たな電子衝突実験装置を開発し、希ガス原子や N<sub>2</sub> を標的として、10 meV を下回る超低エネルギー領域における電子衝突全断面積の測定を行ってきた[1-4]。本研究では、水素分子の同位体である H<sub>2</sub>, HD, D<sub>2</sub> を標的として、超低エネルギーにおける衝突全断面積の測定を行った。水素分子は、最も簡単かつ最も軽い分子であり、他の分子に比べて分子振動や回転運動が速いため、衝突断面積への分子運動の寄与がより顕著になると考えられる。また、断面積への同位体効果を通じて、電子衝突における分子運動の効果をあぶりだすことが可能だと考えられる。

**【実験】** 実験は、従来使用されてきた熱フィラメントを用いない、しきい光電子源を利用した独自の超低エネルギー電子衝突実験装置により行った。実験装置の概略を Fig. 1 に示す。実験は KEK-PF の BL20A で行った。Ar を充填した光イオン化セルに、

Ar の第一イオン化エネルギーに単色化された放射光 ( $h\nu = 15.760 \text{ eV}$ ) を照射する。Ar の光イオン化により放出された、運動エネルギーがほぼ  $0 \text{ eV}$  のしきい光電子を浸み出し電場により捕集し、電子レンズ系で整形することで超低エネルギー電子ビームを得る。浸み出し電場は、隣接する電極から浸み出す非常に緩やかな電位勾配から形成され、しきい光電子のみを選択的かつ高効率で捕集することが可能である。この電子ビームを標的ガスを満たした衝突セルに照射し、透過電子ビーム強度を電子検出器により測定する。透過減衰法により、透過電子ビーム強度から電子衝突全断面積の絶対値が得られる。一般的な電子衝突実験で使用される熱電子源に比べて、しきい光電子源は標的分子存在下でも安定であり、本実験では従来よりも高精度な断面積測定が可能である。



**Fig. 1.** Schematic diagram of the present experimental apparatus.

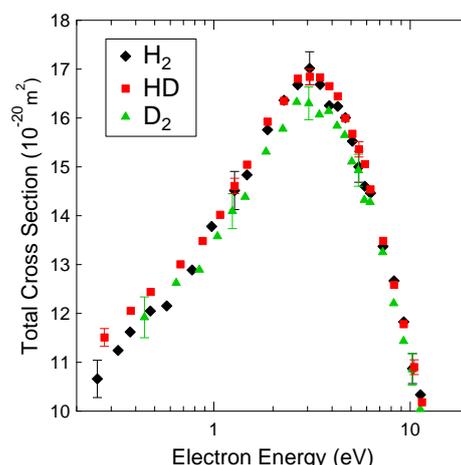
### 【結果・考察】

本研究では、 $\text{H}_2$ ,  $\text{HD}$ ,  $\text{D}_2$  それぞれについて、 $20 \text{ eV}$  までの非常に広いエネルギー範囲に渡る電子衝突全断面積を得た。本研究で測定した  $\text{H}_2$ ,  $\text{HD}$ ,  $\text{D}_2$  の電子衝突全断面積の一部を Fig. 2 に示す。これらの分子の電子衝突全断面積は過去にも測定されているが、当時の実験精度では、同位体効果は見出されなかった [5,6]。一方、我々の測定した全断面積からは、 $E = 3 \text{ eV}$  付近の形状共鳴のエネルギー領域において  $\text{D}_2$  の全断面積が他の分子の全断面積よりも小さいこと、 $100 \text{ meV}$  以下の超低エネルギー領域において  $\text{HD}$  の全断面積が他の分子の全断面積よりも大きいことが明らかになった。この同位体効果は、本研究の高精度な電子衝突全断面積測定により初めて見出されたものである。

形状共鳴エネルギー領域の同位体効果の起源は、振動・回転励起断面積に対する同位体効果であると考えられる。実際、 $\text{H}_2$  と  $\text{D}_2$  の振動励起の角度微分断面積において、両者の間に同位体効果が見出されている [7]。一方、振動励起しきいよりも低エネルギーでの同位体効果は、回転励起断面積の同位体効果では説明できず、弾性散乱断面積への同位体効果によるものだと推測される。しかしながら、現代の一般的な散乱理論の枠組みでは本研究で見出された同位体効果を説明しきれない。このことは、衝突中の動的な分子運動を取り込んだ、新しいモデルを考える必要があることを示唆している。

### 【参考文献】

- [1] M. Kurokawa *et al.* *Phys. Rev. A* **82**, 062707 (2010). [2] M. Kurokawa *et al.* *Phys. Rev. A* **84**, 062717 (2011).  
 [3] K. Shigemura *et al.* *Phys. Rev. A* **89**, 022709 (2014). [4] M. Kitajima *et al.* *Eur. Phys. J. D* **71**, 139 (2017).  
 [5] D. E. Golden *et al.* *Phys. Rev.* **146**, 40 (1966) [6] J. Ferch *et al.* *J. Phys. B* **13**, 1481 (1980)  
 [7] E. S. Chang and S.-F. Wong *Phys. Rev. Lett.* **38**, 1327 (1977).



**Fig. 2.** Total cross sections for electron scattering from  $\text{H}_2$ ,  $\text{HD}$ , and  $\text{D}_2$  molecules obtained in the present study.