

## 水素分子の(e,2e)電子衝突イオン化過程の入射電子エネルギー依存性

(東北大多元研) 浅野佑策, 渋谷昌弘, 渡辺昇, 高橋正彦, 宇田川康夫

【序】一電子のイオン化と同時にもう一つの電子が励起する、いわゆる励起を伴うイオン化過程は電子相関や反応メカニズムに関する重要性から、多種多様の研究がこれまで活発に行われてきている。我々は binary (e,2e)分光法を用いて、二電子系である水素分子の励起を伴うイオン化過程についての研究を進めている。これまでの一連の研究で、1.2 keV の高い入射電子エネルギーでも、励起を伴うイオン化過程に対しては一次の Born 近似に基づく平面波撃力近似(PWIA)の枠組みでは実験結果を定性的にも理解できず、Born 近似の高次項が重要な役割を担うことを見出している[1-4]。こうした水素分子の励起を伴うイオン化過程の衝突ダイナミクスに関するより詳細な理解を得るため、入射電子エネルギーを 1.2、2.0、4.0 keV と変えた実験を行ったので報告する。

【実験】実験は、我々が開発した画像観測(e,2e)分光装置[3]を用いて行った。電子銃で生成した入射電子をマルチノズルから噴射した標的ガスビームと交差させ、電子衝突イオン化を起こす。これによって生成した非弾性散乱電子と電離電子のうち、散乱角 45° 方向に飛び出したものを球型アナライザーでエネルギー分析した後、2組の二次元検出器で同時計測する。球型アナライザーは一般に散乱電子の方位角の情報を保存するので、電子の検出位置から運動量  $p_1$ 、 $p_2$  とエネルギー  $E_1$ 、 $E_2$  が分かる。従って、入射電子のエネルギー  $E_0$  と運動量  $p_0$  は既知であるので、散乱前後のエネルギー保存則と運動量保存則からイオン化エネルギー  $E_{\text{bind}}$  と生成イオンの反跳運動量  $q$  を共に決定できる。

$$E_{\text{bind}} = E_0 - (E_1 + E_2) \quad ; \quad q = p_0 - (p_1 + p_2)$$

以上の原理により、(e,2e)散乱断面積を  $E_{\text{bind}}$  と  $q$  の双方の関数として測定する。

【結果と考察】図1に、 $E_0=1.2$  keV の条件下で得たイオン化エネルギースペクトルを示す。 $E_{\text{bind}}=16.2$  eV 付近に現れる  $1s\sigma_g$  主遷移ピークの高エネルギー側に、 $2s\sigma_g$  や  $2p\sigma_u$  などイオン励起状態への遷移によるサテライトバンドが現れている。これらサテライトバンドは本質的にブロードであるため互いに重なって現れているが、波形分離により、遷移毎の強度を得ることができる。これにより、各イオン化遷移の (e,2e)散乱断面積の  $q$  依存性を示す運動量分布を求めた。

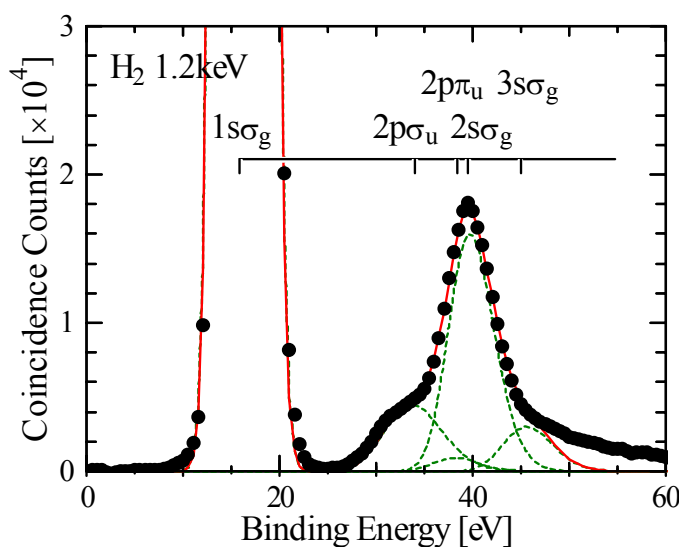


図1.水素分子の(e,2e)イオン化エネルギースペクトル

$E_0=1.2$  keV と  $4.0$  keV の条件下で測定した  $1s\sigma_g$ ,  $2s\sigma_g$ ,  $2p\sigma_u$  遷移の運動量分布と PWIA 計算による理論的分布を図 2 に示す。ここでは、PWIA 計算が実験をよく再現することが分かっている  $1s\sigma_g$  運動量分布を  $0.08 \sim 1.5$  a.u. の運動量領域での面積が 1 になるように規格化し、実験と理論の比較を行っている。 $2s\sigma_g$ ,  $2p\sigma_u$  など励起を伴うイオン化遷移と  $1s\sigma_g$  遷移の相対強度は実験と理論の双方で保たれていることにご注意されたい。

図から、 $1s\sigma_g$  運動量分布に関して、理論と実験は満足すべき一致を見せることが分かる。これに反して、 $2s\sigma_g$ ,  $2p\sigma_u$  遷移に関しては、理論と実験は分布の対称性と強度の双方の点で相違があることが見てとれる。まず分布の対称性に着目すると、 $2s\sigma_g$  遷移では実験および PWIA 計算がともに運動量原点付近で大きな強度をもつ gerade 型の分布を示すが、 $2p\sigma_u$  遷移では PWIA 計算が運動量原点付近で強度を持たない ungerade 型の分布であるのに対し、実験は gerade 型の分布を示す。一方、強度に関しては、実験結果は PWIA 計算が予測するよりも大きな値をもち、さらに  $2p\sigma_u$  遷移における実験と理論との違いは  $2s\sigma_g$  遷移におけるそれよりも遥かに大きい。こうした実験と PWIA 計算との差異は、我々が先に行った  $1.2$  keV での実験 [1-4] を再現するものであり、これらが Born 近似の高次項の一つである two-step メカニズムに起因することは報告した通りである [1-4]。

本実験から新たに分かったことは、入射電子エネルギー  $E_0$  を上げるにつれ、 $2s\sigma_g$ ,  $2p\sigma_u$  遷移とともに実験と理論計算との差異は小さくなるが、高エネルギー極限である PWIA モデルへの漸近の仕方は遷移毎に大きく異なることである。 $E_0=4.0$  keV では、実験的  $2s\sigma_g$  分布を PWIA 計算がほぼ再現するのに対し、実験的  $2p\sigma_u$  分布は依然として PWIA が予測するよりもはるかに大きな強度をもつ。講演では入射電子エネルギーが  $2.0$  keV での実験結果も示し、水素分子の励起を伴うイオン化過程の議論を行う。

#### 【参考文献】

- [1] 高橋、カユリア、斉藤、宇田川、2002 年分子構造総合討論会 2A14.
- [2] M. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. A **68**, 042710 (2003).
- [3] M. Takahashi *et al.*, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **141**, 83 (2004).
- [4] M. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 213202 (2005).

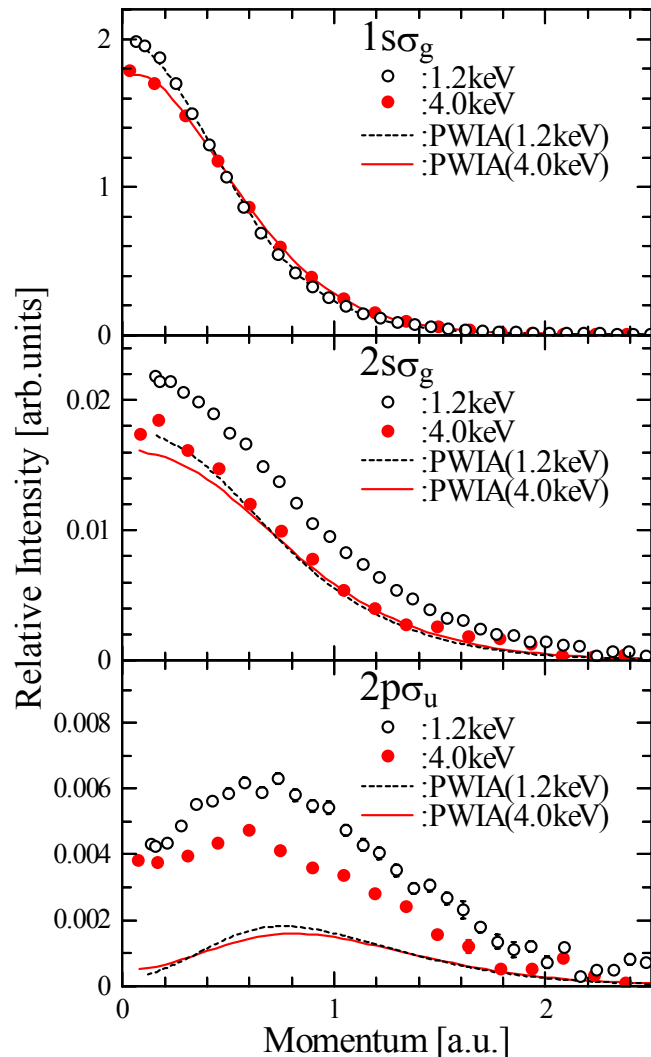


図 2.水素分子の運動量分布