

電子-He 衝突における二電子過程の散乱ダイナミクスの研究

(東北大多元研) ○渡辺 昇, 高橋 正彦, 宇田川 康夫

【序】 一電子のイオン化に伴い更にもう一つの電子が励起またはイオン化される二電子過程は、電子相関を敏感に反映する物理的に興味深い現象である。我々は高速電子衝撃イオン化実験である binary (e,2e)分光法を用い、高エネルギー、高移行運動量領域における He[1,2]や H₂[3,4]の二電子過程について研究を行ってきた。その結果、数 keV 以下の衝突エネルギーでは一次の Born 近似に基づく平面波撃力近似 (plane-wave impulse approximation, PWIA) でこれらの過程をうまく説明できないことが分った。二電子過程の反応ダイナミクスを明らかにするためには、PWIA では取り込まれていない高次 Born 項に起因した散乱メカニズムを考慮する必要がある。そこで本研究では、実験、理論の両面から He の二電子過程における高次散乱メカニズムの影響を詳細に調べたので報告する。

【実験】 (e,2e)分光実験では高速電子衝撃イオン化で生成する非弾性散乱電子と電離電子のエネルギー E_1, E_2 と運動量 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ を同時計測法により測定する。これにより、既知の入射電子のエネルギー E_0 と運動量 \mathbf{p}_0 を用いて、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_{bind} と生成イオンの反跳運動量 \mathbf{q} を同時に決定できる。

$$E_{\text{bind}} = E_0 - E_1 - E_2, \quad \mathbf{q} = \mathbf{p}_0 - \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2$$

実験は我々が開発した画像観測電子運動量分光装置[3]を用い、 $E_0 = 1.2, 2.1, 4.3\text{keV}$ において行った。

【理論計算】 二次の Born 近似 (second Born approximation, SBA) を用いて binary (e,2e)過程の散乱断面積を計算する手法を開発し、He の二電子過程に適用した[2]。エネルギー E_i を持つ標的始状態 i から終状態 f への遷移に対する Born 二次項 f_{B2} は次式のように表される。

$$f_{B2} = \frac{2}{\pi^2} \lim_{\eta \rightarrow 0} \sum_m \int d\mathbf{p}_a \frac{\frac{1}{K_f^2} \langle f | -2 + \sum_{j=1}^2 \exp(i\mathbf{K}_f \cdot \mathbf{r}_j) | m \rangle \frac{1}{K_i^2} \langle m | -2 + \sum_{j=1}^2 \exp(i\mathbf{K}_i \cdot \mathbf{r}_j) | i \rangle}{p_a^2 - [p_0^2 - 2(E_m - E_i)] - i\eta}$$

ここで、 m はエネルギー E_m を持つ中間状態であり、 $\mathbf{K}_i, \mathbf{K}_f$ はそれぞれ $\mathbf{p}_0 - \mathbf{p}_a, \mathbf{p}_a - \mathbf{p}_1$ である。Binary (e,2e)分光では入射電子と放出二電子のエネルギーが、標的電子の束縛エネルギーよりもずっと大きい。この条件下で適用可能な幾つかの近似を導入し、He の $n=1$ 及び $n=2,3$ イオン終状態への遷移に対する SBA 散乱断面積を計算した。

【結果と考察】 図1は $E_0=2080\text{eV}$ で測定した He のイオン化エネルギースペクトルである。イオン基底状態 $n=1$ への遷移に対応する強いピークの高エネルギー側に $n \geq 2$ イオン励起状態への遷移に対応する二電子過程のピークが現れている。なお、 $E_{\text{bind}} \geq 79\text{eV}$ の領域における連続的なバンドは二重イオン化によるものである。

図2は、 $n=2$ イオン励起状態への遷移に対する

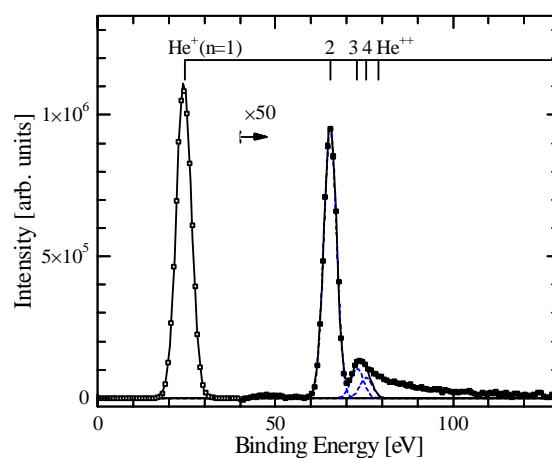


図1:イオン化エネルギースペクトル

散乱断面積の q 依存性、すなわち momentum profile の実験値と理論計算の結果である。異なる E_0 での結果を比較するため、 $n=1$ 主イオン化遷移の momentum profile の面積が互いに等しくなるように規格化を行い、それに対する相対強度として $n=2$ 状態への遷移強度をプロットしている。PWIA の範囲内において、この相対強度は E_0 に依存しない。ところが実験値は明確な E_0 依存性を示しており、エネルギーの増加に伴い強度が減少してゆく。この E_0 依存性を引き起こす要因として考えられるのが、projectile と標的との二次の相互作用により記述される two-step (TS) メカニズムの影響である。実際、この影響を取り入れた SBA 計算は、実験で観測された momentum profile の E_0 依存性をよく再現している。この結果は、projectile と標的との二回の衝突により、二つの $1s$ 電子が順次イオン化—励起もしくは励起—イオン化されるという TS メカニズムが、励起を伴うイオン化過程の理解において本質的に重要であることを示している。

$n=2$ 遷移の散乱断面積は、縮退した $2s$ 、 $2p$ He^+ イオン終状態への遷移の和として与えられる。更なる考察のため、これらの遷移の理論的な momentum profile を個別にプロットした結果を図3に示す。これらは $E_0=1.2\text{keV}$ における計算結果である。 $2s$ 遷移において、SBA は PWIA に比べ若干大きな強度を与えているものの Born 二次項の効果は小さい。それに対し $2p$ 遷移では、SBA は PWIA に比べずっと大きな強度を与えており、profile の形状も大幅に異なっている。この結果は、TS メカニズムに含まれる $1s$ 電子の励起過程が、光学禁制である $2s$ 遷移では小さく、許容である $2p$ 遷移では大きいことを考えると定性的に理解することができる。同様の現象は、1C05 で浅野氏が報告する H_2 の $2s\sigma_g$ 、 $2p\sigma_u$ 遷移の実験において実際に観測されている。以上の結果は、高次 Born 項の影響がイオン終状態に強く依存しており、その影響は TS メカニズムを考えることで理解できることを示している。当日は、二次の Born 項の計算方法について詳細を述べるとともに、二電子過程における TS メカニズムの役割について詳細に議論する。

【参考文献】

- [1] N. Watanabe *et al.*, Phys. Rev. A **72**, 032705 (2005). [2] N. Watanabe *et al.*, to be published.
 [3] M. Takahashi *et al.*, J. Electron. Spectrosc. Relat. Phen. **141**, 83 (2004).
 [4] M. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **94** 213202 (2005).

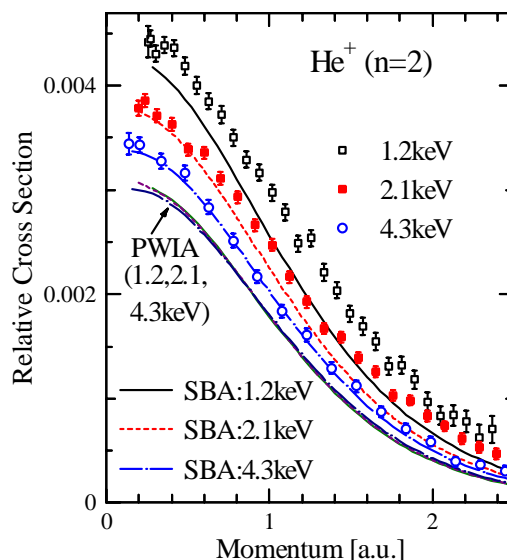


図2: He の $n=2$ 励起イオン終状態への遷移に対する momentum profile

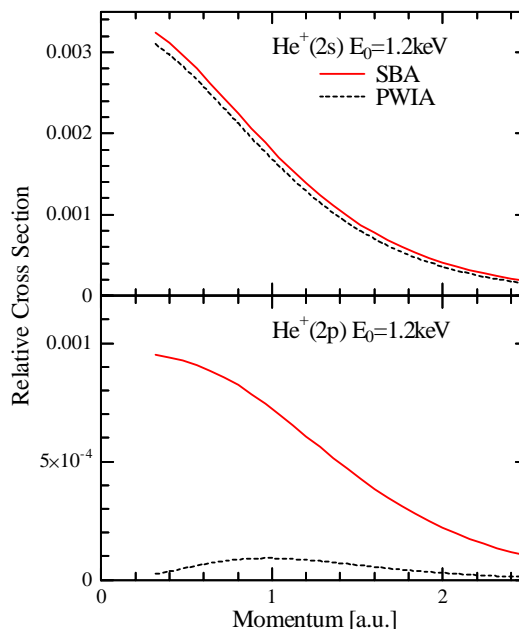


図3: $2s, 2p$ 遷移の momentum profile