

多電子同時計測法を用いた原子・分子多重電離過程の研究

(分子研 UVSOR¹, 物構研 PF², LCP-MR³) ○金安達夫¹, 青戸智浩², 彦坂泰正¹,
繁政英治¹, F. Penent³, P. Lablanquie³, 伊藤健二²

[序] 原子分子の多重電離過程を解明する手法として、複数の放出電子のエネルギー分析を可能とする磁気ボトル型電子分析器を用いた多重同時計測は非常に有効である。一般に、原子・分子の一光子吸収による多重電離過程は、直接多重電離によるものと、中間状態を経て脱励起が進行する段階的な過程に分類することが出来る。多重同時計測を用いれば、全ての放出電子をイオン化イベント毎にエネルギー分析することにより、単純に多重イオン化終状態の分布が明らかになるだけでなく、段階的な多重電離過程の分離と追跡が可能となり、原子・分子多重電離ダイナミクスの理解に通ずる重要な情報が得られる。

多電子計測を通常の電子分析器を用いて行うことは、検出見込み角の制限により非常に困難であるが、本研究では磁気ボトル型分析器の持つ優れた性質(高捕集効率)によって同時計測が容易に達成される。磁気ボトル型分析器では、イオン化領域に磁場勾配を生成することにより、ほぼ全立体角に渡り電子は捕集され、同時計測の効率は検出器(MCP)の検出効率のみに依存する。磁気ボトル型電子分析器による多電子同時計測は、実験室光源を用いた希ガス原子光二重電離の解明においてその有用性が初めて示された[1]。その後、放射光を利用した研究[2]へ発展し、内殻光電離に起因する多価イオン生成過程の追跡[3]や、PCI 効果の理解[4]など、多くの新しい成果を生み出し続けており、世界的にも注目されている実験手法である。

[実験] 我々のグループでは、永久磁石とソレノイドコイルを備えた長さ 2.5m の飛行管を組み合わせた磁気ボトル型電子分析器を開発した。これまでに、希ガス原子や簡単な分子を対象として、Photon Factory(PF)のシングルバンチ運転を利用した多電子同時計測実験を行っている。PF リングの RF シグナルをトリガーとした電子の飛行時間測定によって電子のエネルギー分析を行い、200eV 程度までの電子に対してはほぼ一定の検出効率(約 60%)が確認され、エネルギー分解能は $E/\Delta E=50$ が達成されている。本研究では Ne の光二重電離過程に着目し、PF BL-1C, BL-16B にて $h\nu=70\text{--}220\text{eV}$ の領域で多電子分析を実施した。放出電子のエネルギー相関解析を通じて、 Ne^{2+} 終状態を選別し、その生成比を求め、さらに直接二重電離と段階的な過程の分離抽出に成功した。

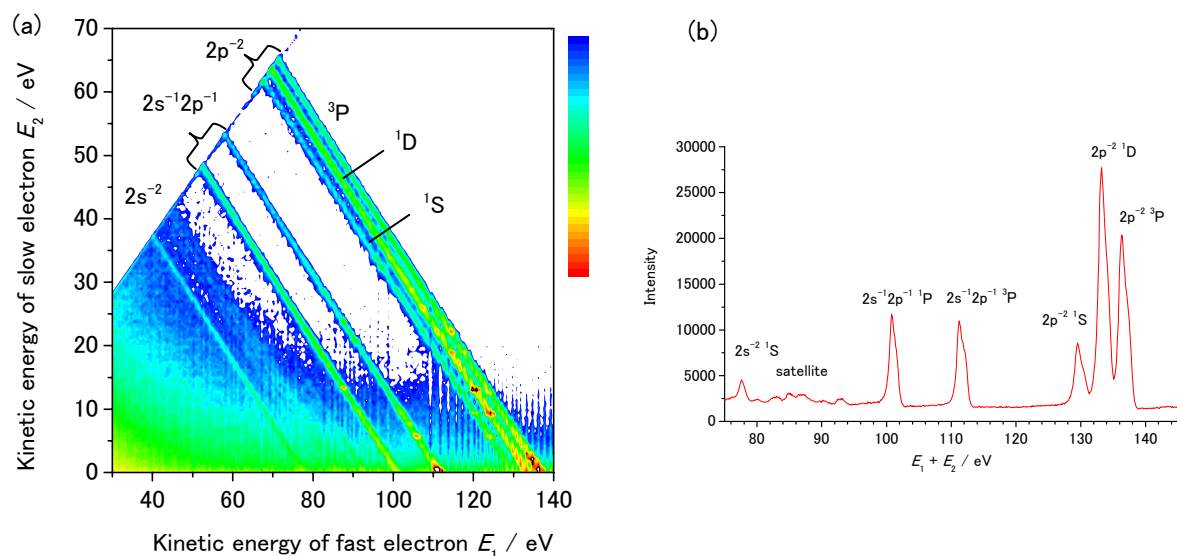


図 1 (a) Ne 光二重電離($h\nu=200.4\text{eV}$)における放出電子の運動エネルギー相関図。(b)二つの放出電子の運動エネルギーの和。

【結果と考察】 図 1(a)に $h\nu=200.4\text{eV}$ における放出電子の運動エネルギー相関図を示す。Ne²⁺終状態が 6 本の斜めのラインとして分離されている。これらのラインは、二つの電子の運動エネルギーの和が一定であるものに相当する。二つの電子の運動エネルギーの和をプロットした結果が図 1(b)である。斜めのラインに沿って強度を得たことに対応して、Ne²⁺終状態分布が satellite を含めて明らかになっている。

Ne の光二重電離に関しては、これまでに理論および実験による研究が数多く行われているが、終状態を選別した二重電離断面積については、蛍光分析による測定[5]と理論計算の結果[6]が得られているだけである。状態選別した二重電離断面積測定は実験的に非常に困難であるが、磁気ボルト型分析器の活用によって蛍光分析では観測できない $2p^{-2}$ 状態も含めて容易に求まっている。本研究手法によれば、光二重電離を記述する理論との直接的な比較を可能とするデータを提供することが可能である。

段階的な二重電離過程は、二次元エネルギー相関図のライン上にスポット状のピークとして観測される。図 1(a)のエネルギー相関図を拡大し図 2 に示した。 $2p^{-2}$ 状態への二重イオン化において、ライン上に現れるピーク構造が顕著に見て取れる。段階的な二重電離は中間状態から自動イオン化によって二価イオン状態が生成される過程であり、この場合には低エネルギー電子が自動電離した電子に対応する。 $2p^{-2}(^3P)$ への二重電離における低エネルギー電子スペクトルを抽出し図 3 に示す。より高いエネルギーの二価イオン状態へ収斂する Rydberg 状態から自動電離によって 3P 状態が生成されていることがわかる。中間状態の Rydberg 電子の角運動量と二価イオン状態へ至る崩壊経路には選択性がみられ、その詳細は検討中であるが、しきい電子・自動電離電子同時計測[7]で報告された選択性と同様の傾向を示している。さらに段階的過程の分離抽出からは、二重電離断面積における直接過程の寄与を推定することが可能となる。講演では、状態選別した光二重電離断面積と理論計算との比較、段階的過程の詳細について議論する予定である。

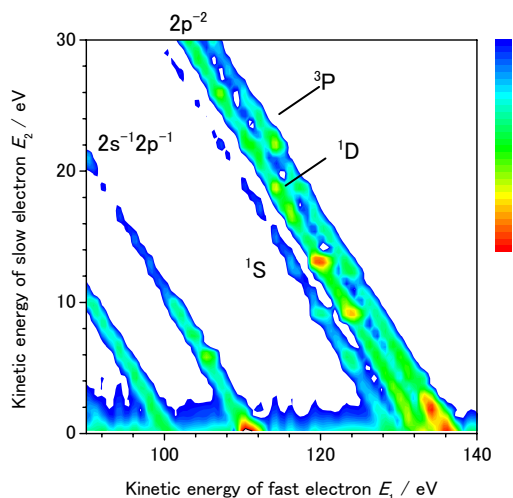


図 2 Ne 光二重電離($h\nu=200.4\text{eV}$)における放出電子の運動エネルギー相関図。図 1(a)の低エネルギー部分部分を拡大。

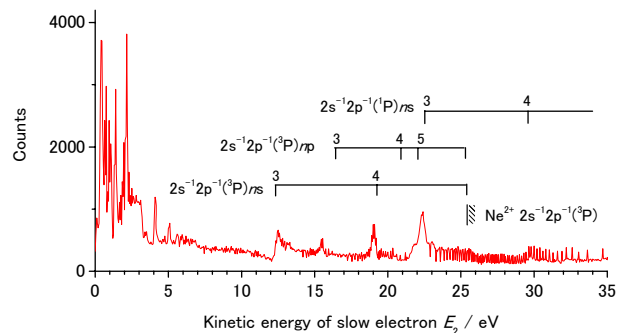


図 3 Ne²⁺ $2p^{-2}(^3P)$ への二重電離における低エネルギー電子スペクトル。5eV 以下の領域のピークは Ne^{**} $2p^{-2}(^1D, ^1S)nl$ からの自動電離に対応する。

References

- [1] J.H.D. Eland et al, Phys. Rev. Lett., **90** 053003 (2003).
- [2] F. Penet et al, Phys. Rev. Lett., **95** 083002 (2005).
- [3] Y. Hikosaka et al, to be published.
- [4] S. Sheinerman et al, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., **39** 1017 (2006).
- [5] K-H. Schartner et al, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., **26** L445 (1993).
- [6] V.A. Kilin et al, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., **33** 4989 (2000).
- [7] Y. Hikosaka et al, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., **37** 2823 (2004).