

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：32621

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740274

研究課題名(和文) 電子の金属表面散乱による境界シース層周辺プラズマ - 壁相互作用の解明

研究課題名(英文) The fundamental process of the plasma - surface interactions in sheathed region by electron spectroscopy from metal surfaces

研究代表者

星野 正光 (Hoshino, Masamitsu)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：40392112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：ダイバータ周辺の低温プラズマ中の素過程を理解するため、電子と金属表面の散乱実験を計画した。実験は、従来から行ってきた気相原子分子標的の電子分光実験を金属清浄表面へ拡張することで行われた。極高真空装置の設置、従来の気相標的を用いた装置の動作テスト、気相原子分子用電子分光装置を表面標的用への改良を行い、回転機構を導入することで入射角と散乱角を同時に制御可能となった。同時に金属表面の電子分光実験で重要な原子散乱因子をスペインの共同研究者と理論計算し、測定結果との比較をする準備が整った。標的としてタングステンをを用いた散乱実験を開始し、表面散乱と原子散乱因子についての比較を行う予定である。

研究成果の概要(英文)：To understand the fundamental atomic processes in the fusion plasma, especially in low temperature plasma around the diverter wall, the measurements for an interaction between low energy electron and metal surface has been started. The experiment has been performed by extending to the surface target from an electron spectroscopy of gas phases. In this project, we set the ultra-high vacuum system, checked the operation using the gas targets comparing the previous results, and set the rotational system of the surface target at the interaction region. We also calculated the atomic factor, which is important to understand the scattering from the surface with the collaborator in Spain. Now we just start to measure the angular distributions from Tungsten metal surface by electron impact. It is expected that the comparison of scattering processes between metal surface and single atom would be performed soon.

研究分野：原子物理学

キーワード：電子分光 プラズマ関連分子 金属表面 微分散乱断面積

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画により、人類は初めて地上で数十万 kW の核融合エネルギーを発生させ、核融合反応により高温プラズマ状態を維持し続けるための研究を開始した。ITER のようなトカマク形式によりプラズマを磁場で閉じ込める方法でも、緩やかな拡散現象によって荷電粒子が外へ逃げ出し、周囲の壁と相互作用することで、壁材が劣化、そして壁から放出される不純物がプラズマ中に混入しプラズマ温度を下げるといった問題点が懸念されている。そこで、高温の主プラズマから外部に漏れ出してくる荷電粒子を、積極的に壁と衝突させ中性化し、効率よく排気することを目的としたダイバータが開発された (図 1)。

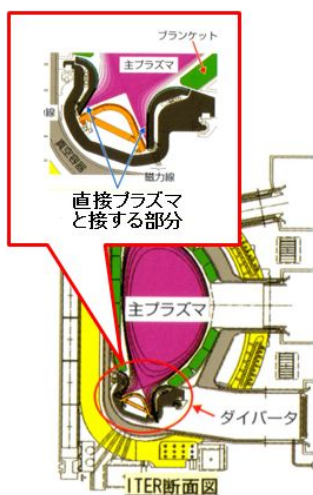


図 1 : ITER 断面の主プラズマとダイバータの模式図

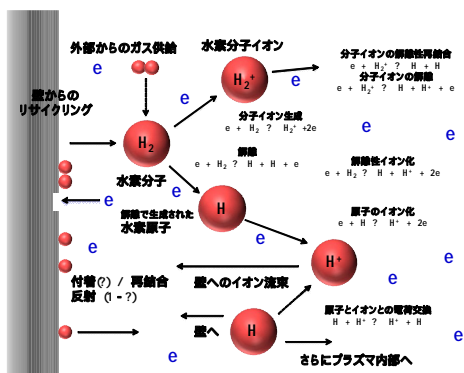
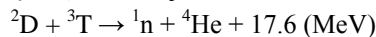


図 2: ダイバータ周辺の原子分子素過程

このダイバータは、トカマク構成機器で唯一プラズマと接する固体壁であるため、最も厳しい熱・粒子負荷に曝された機器である。そのためダイバータの材質としては、高温や放射線照射に対して強度が劣化しないことが重要であるため、タングステン (W)、ベリリウム (Be)、ステンレス鋼、炭素複合材などが提案されている (申請時)。このような背景の下、最近、壁から放出される W イオンや Be イオンを想定しイオントラップを用い

た分光学的研究が行われ始めたが、プラズマ中に多数存在する荷電粒子 (例えば電子、陽子やイオン、中性子など) と壁材の金属が直接相互作用し、散乱される素過程を研究した例は、イオンによるスパッタリング過程を除いてほとんど行われていないのが現状であった。

ここで核融合反応とは、炉心の高温プラズマ中で、重水素原子 (D) とトリチウム (T) を核融合させ、そのエネルギーによりタービンを回転させることで電力を得る反応であり、以下で表される。



n は中性子であり、反応により 17.6 MeV のエネルギーを得る代わりに、He 原子が灰として生成されることを意味する。

図 2 に、ダイバータ周辺における原子・分子素過程の模式図を示した。壁周辺プラズマ中では、主に水素分子と解離により生成された水素原子や陽子 (核融合では重水素やトリチウム) が、多数存在する数 eV~数百 eV の電子と様々な相互作用をする。図 2 のような周辺プラズマの挙動を理解するためには、様々な原子・分子過程の基礎データが必要不可欠である。この周辺プラズマ中の原子・分子素過程で、壁周辺で起こるプラズマの相互作用、特に電子と壁材との相互作用に関する研究は、スパッタリングの割合が小さいことから無視されてきた。しかしながら、プラズマ温度を決定する電子の運動エネルギーは、壁と相互作用することによりエネルギーを損失し、スパッタリングで生成された不純物同様、プラズマ温度の低下を引き起こす可能性が示唆されることから、電子と壁材との相互作用の理解は重要であると考えられる。

このような背景に基づき、当研究室では、従来から気相、特にプラズマ関連原子・分子を標的とした低エネルギー電子分光実験を行ってきた。特に、核融合反応により生成された He の灰がプラズマ中で及ぼす影響を解明する素過程として、電子と He 原子の衝突における主量子数 $n = 2$ への電子励起断面積の定量測定結果 (微分散乱断面積と積分断面積の絶対値) を報告した (図 3) [1,2]。本定量データは、生成された He 原子の灰とプラズマ中における荷電粒子の相互作用の大きさの目安となる励起断面積の定量データそのものが不足しているため、核融合プラズマの挙動を理解するための基礎データとして重要視されている。

そこで本研究計画では、これまで行ってきたプラズマ関連の気相原子・分子衝突過程の低エネルギー電子分光実験を、金属固体表面標的との衝突実験へと拡張する。これは、応用面では、核融合におけるダイバータ周辺プラズマの挙動を詳細に理解することが核融

合実現に向け急務であるためである。

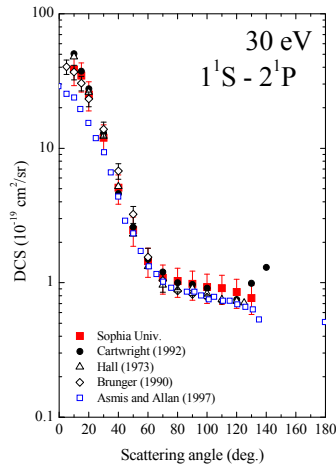


図3：入射エネルギー30 eVにおけるHe原子の 1^1S - 2^1P 電子励起断面積の角度分布[1,2]

2. 研究の目的

本申請者がこれまで行ってきた低エネルギー電子と気相原子・分子の衝突における微分散断面積の定量測定では、標的の圧力、すなわち標的の数密度を調整し、十分希薄にすることで1回衝突の条件下で測定することが可能であった。一方、単一原子から構成される金属固体表面を標的とした場合には、高密度標的であり、入射電子は一回以上散乱される(多重散乱)。しかし、過去に行われた電子と液体水銀の衝突実験[3]において、散乱電子の角分布は、水銀原子1個の散乱断面積と類似した角分布を示し、高密度である液体標的のさえ、構成原子1個からの散乱断面積(原子散乱因子)が角分布に大きく影響することが明らかになった。この原子散乱因子は、単純な気相孤立分子でも観測されることが本申請者により明らかにされた[4]。

図4に、入射電子エネルギー200 eVにおけるヨウ化メチル(CH_3I)分子の微分散断面積の角度分布を示した。図4に示されるように、 CH_3I はI原子にメチル基が結合した多原子分子であるにもかかわらず、その角度分布はキセノン(Xe)原子の傾向と極大値、極小値を示す角度が一致していることが分かる。これは、標的である CH_3I 分子において、周期律表でXe原子に隣接するI原子の断面積が散乱の角度分布を支配していることを意味している。すなわち、比較的エネルギーの高い電子衝突においては、多原子分子標的であっても原子1個からの散乱断面積(原子散乱因子)が重要であることがわかる。ただし、極小値の深さが純粋な原子1個と異なるのは、標的は分子であり、入射電子を波動描像で考えた際、他の原子に散乱された電子との干渉によるものであると考えられる。

そこで、これらの先行研究を踏まえ、原子散乱因子の考え方をプラズマ中の荷電粒子の中で最も軽く拡散しやすい電子とダイバータを形成する金属壁材との相互作用へと系を拡張し、原子散乱因子の観点から、表面を構成する金属原子1個の散乱角分布への寄与の大きさや多重散乱の効果を解明することを目的とした。

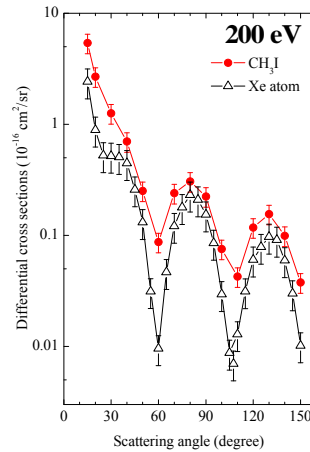


図4：入射電子エネルギー200 eVにおける CH_3I の弾性散乱微分散断面積の角度分布。(●); CH_3I ; (□); Xe

このような基礎データの測定は、これまでプラズマ中の荷電粒子間の相互作用、荷電粒子と中性原子分子の相互作用や発光現象のみに着目して行われてきたプラズマシミュレーションに新たな入力データを提供できることが期待され、より詳細な核融合プラズマの挙動を診断する礎を築き上げることができると考えられる。

ただし、過去に液体水銀標的に対して行われた電子分光実験[3]は、蒸気の気相標的を生成でき、直接液体と気相の実験を比較することができた。しかし、ダイバータ周辺の壁材を想定した本研究において、タングステン等の金属原子標的は、水銀とは異なり、原子1個の断面積である原子散乱因子を実験的に測定することができない。そこで、独立原子モデル[5]に基づいた電子衝撃によるタングステン、ベリリウム原子等の孤立系標的の弾性散乱微分散断面積の理論計算を行い、これを原子散乱因子として、実際の測定結果と比較することにした。この理論計算は、スペインの共同研究者らが行った。スペインの理論計算グループは、これまで共同研究を行ってきた経緯があり、原子1個の散乱断面積に関して高い信頼性がある[4]。以上のより、電子とタングステン等の金属表面との弾性散乱微分散断面積に現れる原子散乱因子と多重散乱効果を研究することで、ダイバータ周辺のプラズマの挙動を理解する。

同時に、低エネルギー電子衝突におけるプラズマ関連分子の断面積測定も行い、金属表面の電子散乱における原子散乱因子の効果を気相標的についても同時並行で行い、微分散乱断面積に現れる構成原子1個の散乱角分布に及ぼす寄与の大きさを気相原子・分子の微視的観点から理解することも目的とした。

3. 研究の方法

実験は、当研究室で従来から用いられている気相原子・分子を標的とした低エネルギー電子分光装置を金属表面用に改良することで行われた。図5、図6に今回用いる電子分光装置の写真と概略図を示した。

電子分光装置は、入射電子ビームを生成・単色化する電子モノクロメータと散乱電子のエネルギー分析を行うアナライザで構成される。図6のように、タングステンフィラメントから放出され、127度型エネルギー選別器内で単色化された電子は、出口レンズにより衝突領域に収束される。衝突後、散乱電子は、アナライザのチャンネルトロンにより検出される。ある角度で散乱された電子のエネルギーをエネルギー分析することで、エネルギー損失を測定することができる。なお、アナライザは回転テーブルに設置されており、入射角度に対して-10度から100度までの範囲で回転させることが可能である。本研究では、図5に示した電子分光装置の衝突部分を金属表面に変更することにより散乱電子のエネルギー損失スペクトルの散乱角度依存性を測定する。この測定により損失エネルギーがゼロである弾性散乱とそうでない非弾性散乱を分けて、同時に測定する。

4. 研究成果

(1) 気相原子・分子を用いた動作テスト

今回使用する電子分光装置の動作確認を行うために、まずは従来のガスノズルを衝突領域に設置し、気相原子・分子を用いた電子分光実験を行った。本分光器の測定可能な入射電子エネルギー範囲は、2 eV から 200 eV であり、出口の静電レンズによりほぼすべての入射エネルギーにおいて衝突領域に電子ビームが収束していることを荷電粒子軌道シミュレーションにより確認した。実際の衝突領域における電子ビーム強度は、nA 程度、またエネルギー分解能は、80 meV 程度であり、装置の幾何学的条件から見積もられる値とほぼ一致した。次に、標的として He 原子と N₂ 分子を用い、それぞれ入射電子エネルギー 19.37 eV と 2.4 eV 近傍に現れる共鳴を観測し、エネルギー較正を行い、散乱電子の信号を観測することができたことから、装置はほぼ順調に動作していることが確認できた。

(2) 衝突部分の設計・開発・導入



図5：電子分光装置の写真

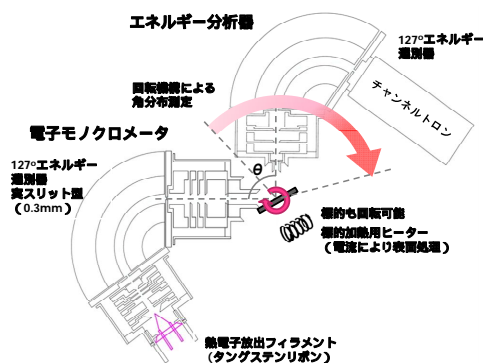


図6：電子分光装置の概略図

本研究では、まず装置の動作確認のため、従来通り衝突中心にガスノズルを設置し、標的として気相原子分子を用いた実験を行い、続いて、衝突領域に回転可能な金属表面を設置するための機構を新たに設計・製作し置き換えた。図7に今回開発した金属表面の回転機構を示した。図7に示した衝突部分は、セラミック製のシャフトに挟まれており、金属標的を電流により加熱することが可能である。それにより、表面に付着する真空槽内の残留気体を脱ガスすることができるよう工夫されている。

(3) 理論計算によるシミュレーション

目的でも述べたように本研究では、電子と



図7：電子と金属散乱実験のための衝突部

金属表面の相互作用における弾性散乱過程に寄与する原子散乱因子の効果について検証する。ダイバータの壁材として候補に挙げ

られているタングステンやベリリウムは、原子一個を標的とした断面積を直接測定し、比較することができない。そこで、本研究ではスペインのグループと共同研究で光学ポテンシャルを用いた原子の弾性散乱微分断面積の計算を行った。

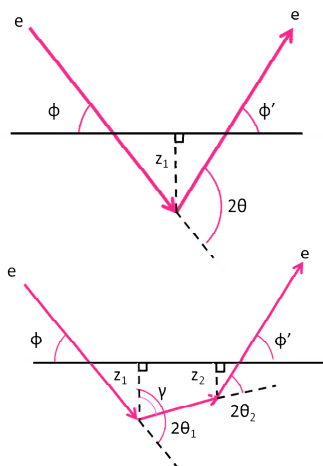


図 8 : 電子の表面散乱の 1 回散乱と 2 重散乱の模式図

図 8 に電子の金属表面による 1 回散乱と 2 回散乱の模式図を示した。図の ϕ は入射角、 ϕ' は散乱角、 z_n は n 回散乱するときの深さを表す。入射角 ϕ で金属表面に入射した電子は、液体水銀の散乱実験との類推から、1 回散乱する散乱強度 I_1 は以下のように書ける[3]。

$$I_1(\vec{S}) = \frac{A\rho|f(\theta, E)|^2}{\mu_t(1 + \sin\phi/\sin\phi')} \propto |f(\theta, E)|^2$$

ここで、 A は入射ビームの断面積、 μ_t は衝突により減衰する係数、 ρ は標的の数密度、 $f(\theta, E)$ は散乱振幅である。この式から電子が金属と 1 回散乱した場合には、散乱電子の強度は散乱振幅の 2 乗、すなわち孤立系の微分断面積に比例することが分かる。次に、同じ入射と散乱の条件で、金属内で 2 回散乱した場合を考える。2 回散乱された電子の強度 I_2 は同様の考え方から次のように表される。

$$I_2(\vec{S}) \cong \frac{A\rho^2}{2\mu_t^2(1 + \sin\phi/\sin\phi')} \int |f(\theta_1, E)|^2 |f(\theta_2, E)|^2 d\Omega_1$$

ここで、1 回目と 2 回目の散乱は前方に集中すると仮定した。以上の結果から、2 回散乱の場合、1 回目の散乱を角度について積分した畳み込み積分の形式をしており、単なる 1 回散乱に比べて滑らかな角分布を取る。

図 9 に本研究における理論計算で得られた入射電子エネルギー 200 eV の電子衝撃によるタングステン表面からの 1 回散乱と 2 回散乱の角分布を示した。タングステン原子の 1 回散乱の微分断面積は、極小値を 30 度、80 度、140 度周辺にもち、中心力散乱による部分波の寄与を確認することができる。また、タングステン金属と 2 回散乱された場合、畳

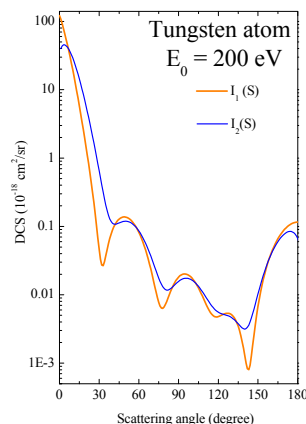


図 9 : 理論計算により得られたタングステン原子の散乱断面積と 2 重散乱による断面積の変化

み込み積分により、1 回散乱に現れた鋭い谷構造は消え緩やかな角分布を示す。よって金属内で多重散乱された電子は、原子 1 個の角分布の特徴を残しつつ、緩やかに変化していくことが分かった。このようにタングステンの原子散乱因子の寄与を理論計算ではあるが確認した研究は本研究が初めてである。今後は実験的に散乱電子の強度を精密に測定することで、検証を行う。

(4) プラズマ関連分子の原子散乱因子

本研究期間中、装置開発の遅延により、一部気相プラズマ関連分子を標的とした低エネルギー電子分光実験を行い、本主題である原子散乱因子の孤立分子内での振る舞いについて知見を得る研究を同時に行った。プロセスプラズマ中で最も重要なフッ素化合物分子、 C_4F_6 や BF_3 、最近では OCS 分子を標的として、F 原子、S 原子 1 個の断面積（原子散乱因子）が、入射エネルギーの比較的高い 50 eV 以上で分子の形状に依らず支配的であることがわかった。これは、金属表面との相互作用でも原子散乱因子の寄与を理解する上での重要な知見である。今後は、完成した実験装置を使い、タングステン金属表面の電子分光実験を行うことで、核融合の基礎データとして今後報告を続ける予定である。

< 引用文献 >

- [1] M. Hoshino, H. Kato, D. Suzuki, H. Tanaka, 他5名, "Benchmark Integral Cross Sections for Electron Impact Excitation of the $n = 2$ States in Helium", *Plasma Science and Technology*, 12巻, 348頁 (2010年)
- [2] M. Hoshino, H. Kato, H. Tanaka, 他 5 名, "Benchmark differential cross sections for electron impact excitation of the $n = 2$ states in helium at near-ionization-threshold energies", *Journal of Physics B: Atomic Molecular Optical Physics* 42 巻, 145202 頁 (2009 年).

[3] J. S. Schilling and M. B. Webb, “Low-Energy Electron Diffraction from Liquid Hg: Multiple Scattering, Scattering Factor, and Attenuation”, *Physical Review B* 2 巻, 1655 頁 (1970 年).

[4] H. Kato, T. Asahina, H. Masui, M. Hoshino, 他 7 名, “Substitution effects in elastic electron collision with CH_3X ($\text{X} = \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) molecules”, *The Journal of Chemical Physics*, 132 巻, 074309 頁 (2010 年)

[5] F. Blanco and G. Garcia, “Calculated cross sections for electron elastic and inelastic scattering from DNA and RNA bases”, *Physics Letters*. 360 巻, 707 頁 (2007 年)

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 7 件)

D. Dufлот, M. Hoshino, P. Limaо-Vieira, A. Suga, H. Kato, and H. Tanaka, “ BF_3 valence and Rydberg states as probed by electron energy loss spectroscopy and ab initio calculations”, *The Journal of Physical Chemistry A*, 査読有, 118 巻, 2014, 10955-10966.

dx.doi.org/10.1021/jp509375y

M. Hoshino, P. Limaо-Vieira, K. Anzai, H. Kato, H. Cho, D. Mogi, T. Tanioka, F. Ferreira da Silva, D. Almeida, F. Blanco, G. Garcia, O. Ingolfsson, and H. Tanaka, “Elastic differential cross sections for C_4F_6 isomers in the 1.5 – 200 eV energy electron impact: Similarities with six fluorine containing molecules and evidence of F-atom like scattering”, *The Journal of Chemical Physics*, 査読有, 141 巻, 2014, 124302(1)-(10).

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4895903>

M. Hoshino, H. Murai, H. Kato, M.J. Brunger, Y. Itikawa, and H. Tanaka, “Electron impact excitation of the low-lying $3s[2/2]_1$ and $3s'[1/2]_1$ levels in neon for incident energies between 20 and 300 eV”, *The Journal of Chemical Physics*, 査読有, 139 巻, 2013, 184301(1)-(10).

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4829056>

M. Hoshino, H. Murai, H. Kato, Y. Itikawa, M.J. Brunger, and H. Tanaka, “Resolution of a significant discrepancy in the electron impact excitation of the $3s[2/2]_1$ and $3s'[1/2]_1$ low-lying electronic states in neon”, *Chemical Physics Letters*, 査読有, 585 巻, 2013, 33-36.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cplett.2013.08.090>

P. Limaо-Vieira, D. Dufлот, K. Anzai, H. Kato, M. Hoshino, F. Ferreira da Silva, D. Mogi, T. Tanioka, and H. Tanaka, “Studies of low-lying triplet states in 1,3- C_4F_6 , c- C_4F_6 and 2- C_4F_6 by electron energy-loss spectroscopy and ab initio calculations”, *Chemical Physics Letters*, 査読有,

574 巻, 2013, 32-36.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cplett.2013.04.059>

M. Hoshino, M. Horie, H. Kato, F. Blanco, G. Garcia, P. Limaо-Vieira, J.P. Sullivan, M.J. Brunger, and H. Tanaka, “Cross sections for elastic scattering of electrons by CF_3Cl , CF_2Cl_2 , CFCl_3 ”, *The Journal of Chemical Physics*, 査読有, 138 巻, 2013, 214305(1)-(11).

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4807610>

H. Murai, Y. Ishijima, T. Mitsumura, Y. Sakamoto, H. Kato, M. Hoshino, F. Blanco, G. Garcia, P. Limaо-Vieira, M.J. Brunger, and H. Tanaka, “A comprehensive and comparative study of elastic electron scattering from OCS and CS_2 in the energy region from 1.2 to 200 eV”, *The Journal of Chemical Physics*, 査読有, 138 巻, 2013, 054302(1)-(12).

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4788666>

〔学会発表〕(計 5 件)

星野正光, 田中大, 「電子と金属表面相互作用における電子エネルギー損失分光」, 日本物理学会, 2013 年 9 月, 徳島大学

松井翠, 星野正光, 田中大, 「電子衝撃による加熱された水素分子の回転励起断面積」, 原子衝突学会, 2013 年 11 月, 理研

望月有, 星野正光, 村井肇, 加藤英俊, 田中大, 「電子衝撃による Ne, Ar 原子の電子励起断面積測定」, 原子衝突学会 2013 年 11 月, 理研

M. Hoshino, P. Limaо-Vieira, H. Kato, H. Cho, F. Ferreira da Silva, D. Almeida, F. Blanco, G. Garcia, O. Ingolfsson, and H. Tanaka, “Elastic differential cross sections for fluorine compound molecules by low energy electron impact”, 9th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications, 2014 年 9 月, Jena, Germany (招待講演)

M. Hoshino, P. Limaо-Vieira, H. Kato, H. Cho, F. Ferreira da Silva, D. Almeida, F. Blanco, G. Garcia, O. Ingolfsson, and H. Tanaka, “Elastic Scattering from Plasma molecules and Radicals”, 6th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems, 2014 年 7 月, Bratislava, Slovakia (招待講演)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ph.sophia.ac.jp/~hoshi-ken/index.htm>
1

6 . 研究組織

(1)研究代表者

星野 正光 (HOSHINO, Masamitsu)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号 : 40392112