

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244083

研究課題名(和文)太陽風起源の禁制X遷移の実験室における観測

研究課題名(英文)Observation of X-ray forbidden transition from solar wind in laboratory

研究代表者

田沼 肇 (TANUMA, HAJIME)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：30244411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,300,000円

研究成果の概要(和文)：太陽風に含まれる炭素や酸素の多価イオンを電子サイクロトロン共鳴型多価イオン源によって生成し、中性気体と衝突させ、電子捕獲(電荷交換)反応によって生成する多価イオンの準安定励起状態からの禁制線発光の観測を最終目標としてKingdon型イオントラップの開発を行った。短い発光寿命の共鳴線については、シリコンドリフト検出器を用いて発光断面積の絶対値を測定した。また、電子捕獲の全断面積の測定を行い、発光断面積との比較をすると、水素様イオンが一つの電子を捕獲して生成する一重項状態と三重項状態の生成比が統計重率である1:3よりも遙かに三重項に偏っていることが判明した。

研究成果の概要(英文)：After a single electron capture of hydrogen-like ions, a forbidden transition from a triplet state to the ground singlet state is expected. The direct observation of the forbidden line with a long life time is the final aim of this project. For this purpose, a Kingdon ion trap has been developed for the storage of the metastable ions. We have measured the total single electron capture cross sections in collisions of the multiply charged ions, which are produced with an electron cyclotron resonance ion source, with neutral gases. Also we have observed the resonance lines following the electron capture collisions of the multiply charges ions with a silicon drift detector and have measured the soft X-ray emission cross sections of the resonance lines. When the project ions are hydrogen-like ions, the difference between the total single electron capture cross sections and the X-ray emission cross sections must be the formation of the triplet state and we found it is dominant processes.

研究分野：原子分子物理学

キーワード：多価イオン 太陽風電荷交換 禁制遷移 イオントラップ 斜入射分光器 電子捕獲断面積 発光断面積 軟X線発光スペクトル

1. 研究開始当初の背景

太陽風にわずか 1%以下の割合でしか含まれていないCより重い多価イオンが彗星に衝突することで 1 keV 以下のエネルギーの軟 X 線が放出されることが、1996 年の ROSAT 衛星による百武彗星の観測によって初めて発見された。この発見を受けて、軟 X 線領域における全天観測を初めて行った ROSAT 衛星が見出した特定の天体が存在しない方向からも観測される X 線背景放射の原因も太陽風ではないかと考えられるようになった。さらには、ROSAT 衛星よりエネルギー分解能の高い Suzaku 衛星によって、数日程度の周期で強度変動する X 線背景放射に炭素多価イオンからの発光線が含まれており、太陽風強度の変動と発光強度に明確な相関があることなどが次第に明らかになってきた。宇宙から拡がった軟 X 線放射のメカニズムとしては Local Hot Bubble (LHB) が有力であったが、太陽風電荷交換 (Solar Wind Charge eXchange, SWCX) を無視することはできなくなってきた。

彗星からの SWCX による X 線発光の直後から、この現象を地上でも再現しようという試みが行われていた。太陽風に含まれている多価イオンの種類や速度分布は全く別の分野の宇宙物理学者によって決定されており、彗星の成分、特に太陽に近づいたときに熱せられて表面から蒸発して彗星コア周辺を漂う気体の主成分が水 H_2O であり、二酸化炭素 CO_2 やメタン CH_4 なども含まれることは知られていた。しかし、多価イオンと標的気体分子の組み合わせを特定したとしても、複数の輝線で構成される X 線発光スペクトルの強度比や発光断面積の絶対値などに関する知見は極めて限定的であった。例えば、多価イオンと中性気体との衝突による He 様イオンからの禁制線発光を観測した実験例は、電子ビームイオントラップによって生成した H 様多価イオンを磁場だけで閉じ込め続け、そこに標的気体をガスノズルから吹きかけて反応を起こさせ発光を観測した報告が一つあるだけである。この方法では、イオンを気体の相対速度が 45 km/s 程度にしかならず、300 - 800 km/s の範囲にある太陽風速度よりも遙かに低速である。

一方、超新星残骸を高分解能で分光計測したところ、He 様酸素イオンの一重項からの共鳴線よりも三重項からの禁制線の方が強度の大きな場合があることが判明した。これは衝撃波や電子衝撃などを励起機構とする通常の高温プラズマからの発光とは一線を画しており、多価イオンの電荷交換が大きな寄与を持っているとしか考えられない。

このように宇宙空間では SWCX を代表とする多価イオンの電荷交換反応の重要性が X 線天文学の分野で非常に重要になってきた。しかしながら、太陽風多価イオンの速度で中性標的気体と衝突した多価イオンからの禁

制線を実験室で観測した例は全く報告されていない。このように、X 線観測衛星によって得られた軟 X 線スペクトルを定量的に間解析するために必要なはずの原子分子物理学の基礎データは、予想以上に不足しているというのが現状であった。

2. 研究の目的

He 様 0 イオンにおいて禁制遷移を起こす三重項状態 $1s2s\ ^3S_1$ の発光寿命は約 1 ms である。一方、太陽風の速度は 300-800 km/s であるから、衝突してから発光するまでのイオンの飛行距離は大凡 500 m 程度と言える。これは実験室のサイズより遙かに大きく、多価イオンを太陽風速度のビームとした実験で禁制線を観測するためには、イオントラップを用いて励起イオンを 1 ms 以上の長時間狭い空間に閉じ込めて、発光を観測する必要がある。そこで、様々なイオントラップ方法について検討した結果、円筒電極の中心に細いワイヤー電極を通した非常に単純な構造の Kingdon 型トラップが最適であると判断し、この形式のイオントラップを開発することにした。

トラップした準安定多価イオンからの軟 X 線発光の観測が本研究の最終的な目的であるが、極めて短寿命の共鳴線の発光断面積についても信頼できる報告値は殆どない。一電子捕獲反応の全断面積と共鳴線の発光断面積の差が禁制線の発光断面積に対応するため、これらの断面積について測定することも重要な目的の一つである。

3. 研究の方法

首都大学東京に設置されている 14.25 GHz 電子サイクロトロン共鳴型多価イオン源を用いて H 様の多価イオンを生成し、標的気体を充填させた衝突セルを通過させ、一電子捕獲反応によって生成した He 様イオンをトラップに導く。イオントラップに高電圧を印加することで、未反応の H 様イオンを追い返し、He 様イオンのみをトラップ内部に閉じ込め、そこからの長寿命な禁制線を半導体検出器によって観測する。

そのためにはイオントラップの開発が必要であるので、研究分担者である上智大学の岡田邦宏がこの仕事を担当し、上智大学に設置されている小型多価イオン源を用いて、イオントラップの性能評価まで行ったのちに首都大に装置を移設する。

また、半導体検出器のエネルギー分解能は 100 eV 程度と非常に悪いため、詳細な分光情報を得るための高分解能分光器による計測も必要である。そこで同じく研究分担者である電気通信大学の中村信行が回折格子を用いた小型の高分解能分光器を開発し、電気通信大学で開発した小型電子ビームイオントラップを用いて分解能や検出効率に関する

評価を行ったのちに首都大に装置を移設する。

このように二人の研究分担者がそれぞれに装置を開発している間、首都大では研究代表者の田沼肇が多価イオン源の改良、太陽風速度での衝突を実現するための減速機構を備えたイオン衝突実験装置の開発を行うとともに、一電子捕獲断面積の絶対値測定についても装置開発から開始する。

4. 研究成果

上智大学においてKingdon型トラップを設計・製作し、7価以下のArイオンを用いて蓄積性能について評価した。トラップ内を周回するイオンの速度分布については実測することが困難であるため、イオン軌道について数値シミュレーションを行い、その結果に基づいて残留ガスであるH₂との電荷交換断面積を求めたところ文献値および理論的予想値を一致したことから、20 km/s程度の低速であることが明らかになった。また、禁制線の観測対象である6価のOイオンについても蓄積を行い270 msの蓄積寿命を確認した。これは準安定励起状態の1 ms程度の寿命より遙かに長いため、開発したイオントラップ装置を用いた禁制線観測は原理的に可能であると言える。

回折格子を用いた小型の斜入射型軟X線分光器を電気通信大学において設計・開発した。斜入射型の場合、発光領域から取り込める立体角が小さいため、強度を増やすために円筒型の集光ミラーを導入した。実際に多価イオンからの発光を分光観測した結果、5 - 20 nmの波長領域における分解能は0.04 nmとなった。これはO⁶⁺のn=3とn=4からの共鳴線の波長差0.12 nmを分離することができる波長分解能であり、十分な性能を有する装置が開発できたと言える。

首都大では、長さ100 mmの衝突気体セルを通過してきた多価イオンの電荷を分析することで、電荷交換反応の全断面積を測定する装置を設計・製作し、実際の測定を行った。図1にO⁷⁺とHeの衝突系における結果を示す。この衝突系では低エネルギー領域での報告値がわずかにあるだけであったが、北京の共同研究者による理論計算値と合わせて比較を行った。電荷交換断面積の測定誤差は殆どの場合、20%以上あることが普通であり、本研究での測定値の誤差も標準的なものである。文献値および理論計算値と本研究の結果は完全ではないものの、許容できる範囲で一致しており、測定値は信頼できると見なすことができる。同様な測定を、O⁷⁺-He, O⁷⁺-CH₄, N⁶⁺-He, N⁶⁺-H₂, C⁵⁺-He, C⁵⁺-H₂, C⁶⁺-He, C⁶⁺-H₂, およびC⁶⁺-CH₄の衝突系について実施した。全ての測定において、文献値および理論計算値との比較を行ったが、大きく矛盾する結果はなかったが、測定誤差は小さくても20%程度あり、改善の余地が残る結果となったと言え

る。

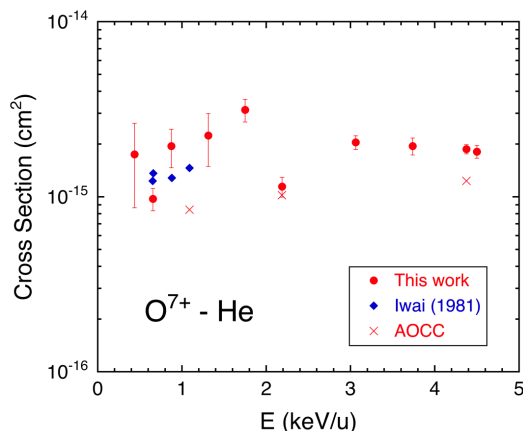


図1. O⁷⁺-He系の電子捕獲全断面積。

衝突領域からの短寿命発光の観測のためにシリコンドリフト検出器(SDD)を導入した。従来のSi(Li)型検出器よりもエネルギー分解能が高いため、輝線分離の信頼性が向上した。測定の一例としてO⁷⁺-He衝突における結果を図2に示す。

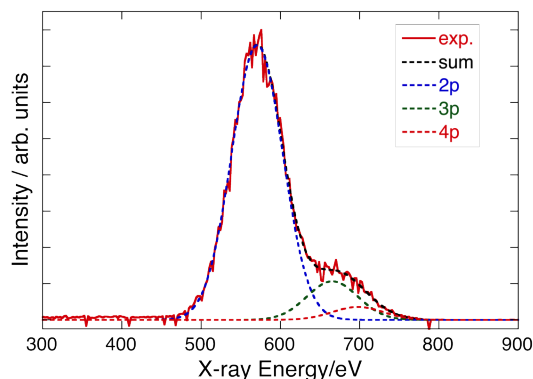


図2. SDDによる軟X線発光スペクトル。

SDDの検出効率は100%と見なせるので、発光スペクトルから発光断面積の絶対値をも求めることが可能である。O⁷⁺-He系における測定結果を図3に示す。この図でX-rayとして示したのが、衝突直後の軟X線発光、すなわち共鳴線の発光断面積である。SCは一電子捕獲に対応するもので、両者の間にはかなり大きさ差があることが判った。この差は、電子捕獲によって生成した励起状態が直ちに発光しない成分、すなわち禁制遷移に対応すると考えることができる。H様イオンが一つの電子を捕獲する際には、電子スピンの向きが異なる一重項と、同じ向きに揃う三重項の二つの可能性がある。統計的な現象であると仮定できるなら、一重項と三重項の生成比は1:3となる筈である。しかし、実験の結果からは共鳴線に対応する一重項の生成比率は10%程度にしかならないと言える。これに準じるような理論計算がC⁵⁺-H衝突系について2012年に発表されているが、実験的に示した例としては世界的にも初めての結果とみな

すことができる。

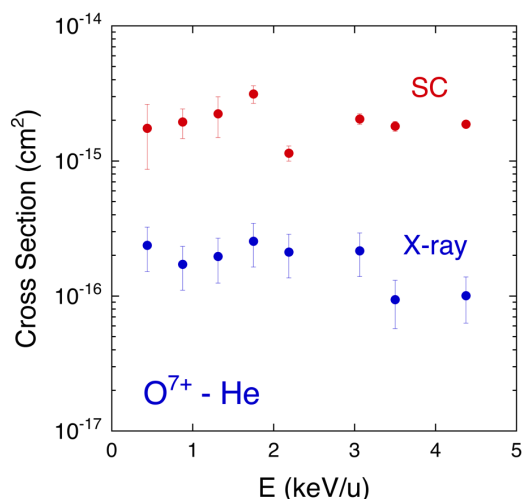


図3. 電子捕獲と発光の断面積比較.

禁制線の発光スペクトルの直截な観測にはまだ成功していないが、間接的には共鳴線よりも禁制線の強度が非常に強いことが示唆され、2015年度中に打ち上げが予定されているASTRO-H衛星によって測定されることが期待されている高分解軟X線発光スペクトルの解析に役立つデータとなると考えられる。応用としての重要性だけでなく、このような共鳴線と禁制線の相対強度は原子物理学としても非常に興味深い研究対象であり、本研究で得られた結果の理論的解釈が強く望まれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

(1) N. Numadate, K. Okada, N. Nakamura, and H. Tanuma; Development of a Kingdon ion trap system for trapping externally injected highly charged ions, *Rev. Sci. Instrum.*, **85** (2014) 103119. 査読有 doi: 10.1063/1.4899266

(2) H. Shimaya, T. Ishida, S. Ishikawa, S. Suda, H. Tanuma, H. Akamatsu, H. Ohashi, N. Ijima, M. Inoue, Y. Ezoë, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda, L. Liu, and J. Wang: Soft x-ray emission from solar wind charge exchange in laboratory, *Physica Scripta*, **T156** (2013) 014002. 査読有 doi:10.1088/0031-8949/2013/T156/014002

(3) H. Tanuma: Charge exchange spectroscopy of multiply charged ions of industrial and astrophysical interest, in *Proceedings of Eighth International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications*, AIP Proceeding,

1545 (2013) 196-201. 査読有 doi: 10.1063/1.4815854

(4) H. Ohashi, S. Suda, H. Tanuma, S. Fujioka, H. Nishimura, K. Nishihara, H. A. Sakaue, N. Nakamura, and S. Ohtani: EUV emission spectra of iron ions following charge exchange collisions with He, *Physica Scripta*, **T144** (2011) 014030. 査読有 doi:10.1088/0031-8949/2011/T144/014030

(5) T. Kanda, H. Ohashi, S. Maeno, T. Ishida, H. Tanuma, H. Akamatsu, Y. Abe, W. Yokota, K. Henmi, Y. Ishisaki, Y. Ezoë, T. Ohashi, K. Shinozaki, and K. Mitsuda: Laboratory experiments on soft x-ray emissions from the solar wind, *Physica Scripta*, **T144** (2011) 014025. 査読有 doi:10.1088/0031-8949/2011/T144/014025

〔学会発表〕(計39件)

(1) H. Tanuma: Charge exchange cross sections and emission cross sections of solar wind charge exchange in laboratory, *Charge Exchange X-Rays in Current and Future Astrophysical Research*, Harvard - Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA, 13-15 April, 2015

(2) N. Numadate, K. Okada, N. Nakamura, and H. Tanuma: Development of a Kingdon ion trap for studying the forbidden X-ray transitions of excited highly charged ions, *The sixth international conference on Trapped Charged Particles and Fundamental Physics (TCP2014)*, Takamatsu, Japan, 1-5 December, 2014

(3) H. Tanuma, N. Numadate, H. Shimaya, N. Nakamura, and K. Okada: A new setup for observation of forbidden lines from metastable ions produced in charge exchange collisions, *2014 International Workshop on EUV and Soft X-Ray Sources*, Dublin, Ireland, 3-6 November, 2014

(4) N. Numadate, K. Okada, N. Nakamura, and H. Tanuma: Development of a Kingdon ion trap for studying the forbidden X-ray transitions of excited highly charged ions, *11th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics (AISAMP 11)*, Sendai, Japan, 6-10 October, 2014

(5) H. Tanuma, H. Shimaya, T. Ishida, N. Numadate, K. Okada, and N. Nakamura: Challenge for observation of forbidden transitions in charge exchange collisions

of multiply charged ions with neutral gases, 9th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications (ICAMDATA 2014), Jena, Germany, 21-25 September, 2014

(6) H. Tanuma: CX in the laboratory - what we had done and what we can do for the astrophysicists, AtomDB Workshop 2014, Hachioji, Tokyo, Japan, 6-9 September, 2014

(7) N. Numadate, K. Okada, N. Nakamura, and H. Tanuma: Development of a Kingdon ion trap for studying the forbidden X-ray transitions of excited highly charged ions, 17th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions (HCI 2014), San Carlos de Bariloche, Argentina, 31 August-5 September, 2014

(8) H. Tanuma, H. Shimaya, T. Ishida, N. Nakamura, N. Numadate, and K. Okada: How do we observe the forbidden lines from He-like ions in charge exchange collisions of H-like ions with neutral gases? The 5th China-Japan-Korea Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma, Lanzhou, China, 29 July-August 1, 2014

(9) 田沼肇: 電荷交換反応, 地球磁気圏 X 線可視化に関する研究会, 2014 年 11 月 15 日, 首都大学東京・南大沢キャンパス(東京都・八王子市)

(10) 沼館直樹, 岡田邦宏, 中村信行, 田沼肇: Development of a Kingdon ion trap for studying the forbidden X-ray transitions of excited highly charged ions, 原子衝突学会第 39 回年会, 2014 年 10 月 4 日-6 日, 東北大学・片平キャンパス(宮城県・仙台市)

(11) 田沼肇: 実験室で電荷交換反応の実験 - Solar Wind Charge Exchange in Laboratory, 全天軟 X 線放射研究学会, 2014 年 5 月 27 日, 理化学研究所(埼玉県・和光市)

(12) H. Shimaya, T. Ishida, S. Ishikawa, S. Suda, H. Tanuma, H. Akamatsu, H. Ohashi, N. Ijima, M. Inoue, Y. Ezoe, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda, L. Liu, and J. Wang: Absolute cross sections of the soft x-ray emission related to the solar wind charge exchange in collisions of C^{6+} with H_2 and He, XXVIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC-2013), Lanzhou, China, 24--30 July, 2013.

(13) 島谷紘史, 舟山智歌子, 石川章一郎,

石田卓也, 赤松弘規, 飯島律子, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応 VII, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 日-30 日, 東海大学・湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)

(14) 沼館直樹, 岡田邦宏, 中村信行, 田沼肇: 太陽風起源禁制 X 遷移の実験室観測を目的とした多価イオントラップの開発 III, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 日-30 日, 東海大学・湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)

(15) 相田裕也, 島谷紘史, 大橋隼人, 中村信行, 岡田邦宏, 田沼肇: 極端紫外領域における多価イオンの電荷交換分光, 原子衝突学会第 38 回年会, 2013 年 11 月 16 日-17 日, 理化学研究所(埼玉県・和光市)

(16) 舟山智歌子, 島谷紘史, 石川彰一郎, 石田卓也, 赤松弘規, 飯島律子, 井上真奈, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応, 原子衝突学会第 38 回年会, 2013 年 11 月 16 日-17 日, 理化学研究所(埼玉県・和光市)

(17) 島谷紘史, 舟山智歌子, 石川彰一郎, 石田卓也, 須田慎太郎, 赤松弘規, 飯島律子, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応 VI, 日本物理学会 2013 年秋季大会(物性領域), 2013 年 9 月 25 日-28 日, 徳島大学(徳島県・徳島市)

(18) 沼館直樹, 岡田邦宏, 中村信行, 田沼肇: 太陽風起源禁制 X 線遷移の実験室観測を目的とした多価イオントラップの開発 II, 日本物理学会 2013 年秋季大会(物性領域), 2013 年 9 月 25 日-28 日, 徳島大学(徳島県・徳島市)

(19) H. Tanuma: Charge Exchange Spectroscopy of Multiply Charged Eons of Industrial and Astrophysical Interest, 8th International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications, Gaithersburg, MD, USA, 30 September-4 October, 2012.

(20) H. Shimaya, T. Ishida, S. Ishikawa, S. Suda, H. Tanuma, H. Ohashi, H. Akamatsu, Y. Ezoe, Y. Ishisaki, T. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda, L. Liu, and J. Wang: Soft X-ray Emission from Solar Wind Charge Exchange in Laboratory, 16th International Conference on Physics of

Highly Charged Ions, Heidelberg, Germany, 2-7 September, 2012.

(21) H. Tanuma: Laboratory Experiments for Revealing Soft X-ray Emissions from Solar Wind Charge Exchange, The 4th China-Japan Joint Seminar on Atomic and Molecular Processes in Plasma, Lanzhou, China, 30 July-4 August, 2012.

(22) 島谷紘史, 石川章一郎, 石田卓也, 須田慎太郎, 赤松弘規, 飯島律子, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応 V, 日本物理学会第 68 会年次大会 2013 年 3 月 26 日-29 日, 広島大学 (広島県・東広島市)

(23) 沼館直樹, 岡田邦宏, 中村信行, 田沼肇: 太陽風起源禁制 X 遷移の実験室観測を目的とした多価イオントラップの開発, 日本物理学会第 68 会年次大会 2013 年 3 月 26 日-29 日, 広島大学 (広島県・東広島市)

(24) 相田裕也, 大橋隼人, 岡田邦宏, 田沼肇, 中村信行: 電荷交換分光実験のための極端紫外分光器の開発, 日本物理学会第 68 会年次大会 2013 年 3 月 26 日-29 日, 広島大学 (広島県・東広島市)

(25) 島谷紘史, 石川彰一郎, 石田卓也, 須田慎太郎, 赤松弘規, 飯島律子, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応 III, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18 日-21 日, 横浜国立大学 (神奈川県・横浜市)

(26) 須田慎太郎, 島谷紘史, 石川彰一郎, 石田卓也, 赤松弘規, 飯島律子, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応 IV, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 18 日-21 日, 横浜国立大学 (神奈川県・横浜市)

(27) 相田裕也, 大橋隼人, 中村信行, 岡田邦宏, 田沼肇: 禁制遷移観測のための極端紫外分光器の製作及び評価, 原子衝突学会 改称記念式典・第 37 回年会, 2012 年 7 月 27 日-29 日, 電気通信大学 (東京都・調布市)

(28) T. Ishida, T. Kanda, H. Akamatsu, T. Enoki, K. Henmi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda, H. Ohashi, L. Liu, J. Wang, H. Tanuma: XXVII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, Belfast, Northern Ireland, UK, 27 July - 2 August, 2011

(29) 石田卓也, 島谷紘史, 赤松弘規, 榎崇利, 木村哲平, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応 II, 日本物理学会第 67 回年次大会 2012 年 3 月 24 日-27 日, 関西学院大学・西宮上ヶ原キャンパス (兵庫県・西宮市)

(30) 石田卓也, 神田拓真, 島谷紘史, 赤松弘規, 榎崇利, 石崎欣尚, 江副祐一郎, 大橋隆哉, 大橋隼人, 篠崎慶亮, 満田和久, L. Liu, J. Wang, 田沼肇: 太陽風多価イオンの電荷交換反応, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 21 日-24 日, 富山大学・五福キャンパス (富山県・富山市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田沼 肇 (TANUMA, Hajime)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号: 3 0 2 4 4 4 1 1

(2) 研究分担者

中村 信行 (NAKAMURA, Nobuyuki)
電気通信大学・レーザー新世代研究センター・准教授
研究者番号: 5 0 3 6 1 8 3 7

岡田 邦宏 (OKADA, Kunihiro)
上智大学・理工学部・准教授
研究者番号: 9 0 3 1 1 9 9 3

(3) 連携研究者

石崎 欣尚 (ISHISAKI, Yoshitaka)
首都大学東京・理工学研究科・准教授
研究者番号: 1 0 2 8 5 0 9 1

大橋 隆哉 (OHASHI, Takaya)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号: 7 0 1 8 3 0 2 7

満田 和久 (MITSUDA, Kazuhisa)
JAXA・宇宙化学研究所・教授
研究者番号: 8 0 1 8 3 9 6 1

江副 祐一郎 (EZOE, Yuichiro)
首都大学東京・理工学研究科・准教授
研究者番号: 9 0 4 6 2 6 6 3