

エキゾチック量子ビーム研究

Developments and Applications of Exotic Quantum Beams

代表研究者 山 崎 泰 規

YAMAZAKI, Yasunori

(山崎原子物理研究室)

(Atomic Physics Laboratory)

1. 低速多価イオンの応用に関する研究

(1) 低速多価イオンによる表面改質効果の研究

研究担当者：中村 *¹, 寺田 *², O' Rourke *³, 大谷 *¹, 山崎 (山崎原子物理研究室)

低速多価イオンを HOPG に照射すると、1 つ 1 つのイオンが HOPG 上にトポロジカルなナノドットを形成することを同一のナノドットについて stm と afm で観測することにより初めて確かめた。さらに、ドットサイズ、ドット高さを入射イオンの価数、および、運動エネルギーの関数として測定し、広い運動エネルギー領域にわたって (1~300 keV)、入射価数 (或いはポテンシャルエネルギー) のみでサイズが決定されること、ドット高さは運動エネルギーにも入射価数にも依存しないことを見いだした。これはポテンシャルエネルギー付与に要する時間が非常に短く、そのため、表面上のイオン入射位置に限られていることを示す興味深い結果となっている。現在、ナノドット形成機構を解明すべく、さらに詳細な解析を急いでいる。

(2) 低速多価イオンによる超高感度表面分析法の研究

研究担当者：岡林 *¹, 小島, 中井, 大山, 山崎 (山崎原子物理研究室)

低速多価イオンを水素やフッ素で終端した Si 表面に入射し、(i) H^+ 収量は入射価数の 5 乗、また、 F^+ 収量は 3 乗という大変強い依存性を持って増加すること、(ii) F^+ の放出方向は入射価数、入射エネルギー、入射角、のいずれにも依存しない標的固有の量であり、誤差の範囲内で理論的予測と一致することを明らかにした。この新しく見いだされた現象は、表面原子の三次元的な吸着構造研究の新たなプローブになると期待される。一方、 H^+ は表面状態の詳細によらず、垂直方向に放出されることが分かった。単純なシミュレーションではこの振舞いを再現することは不可能で、今後重水素終端表面を用いた観測も平行して進めることにより、表面上水素の振舞いについて、新たな知見が得られるのではないかと考えている。また、より高価なイオンと表面の相互作用での振舞いを明らかにするため、高温超伝導体バルク材を用いた電子ビームイオン源と 2 次イオン計測装置を結ぶビームラインを新たに設計製作した。

(3) 高温超伝導体バルク材を用いた電子ビームイオン源の開発

研究担当者：中村 *¹, 金井, 和田, 池田, 山崎 (山崎原子物理研究室)

YBCO 系の高温超伝導体バルク材を用いた世界初の電子ビームイオン源を開発し、液体窒素温度で稼働するイオン源としてはこれまで最高価数の Xe^{42+} の引出しに成功した。このバルク超伝導体は SUS 容器に密封され、液体窒素溜か

らの熱伝導により冷却されているが、繰返しなされるパルス着磁に対してきわめて安定で、かつ、着磁後は丸 2 日以上初期の磁場強度を維持し、安定に稼働している。(1), (2) で述べたように、(i) 低速多価イオンによる表面改質装置、および、(ii) 表面超高感度元素分析装置とを繋ぐビームラインを建設し、特に表面改質効果について in-situ 観測ができるようになった。なお、高温超伝導バルク材としては Gd 系のものが最近開発され、さらに強い磁場を得ることができるようになったので、さらに多価イオンが得られるものと考えている。

(4) Ni マイクロキャピラリー標的通過後の多価 Ar イオンからの X 線と価数の同時測定

研究担当者：金井, 中井, 岩井 *⁴, 星野 *⁴, 池田, 山崎 (山崎原子物理研究室)

種々の価数の Ar イオン ($9+$, $11+$, $13+$, $14+$) を Ni マイクロキャピラリー標的に照射し、通過後の励起状態から放出される L-X 線とイオン価数の同時測定を行った。この測定により、Ar イオンへの Ni マイクロキャピラリー内壁からの多電子移行により生成されるいわゆる中空イオン状態からの放出 X 線を delay time の関数として測定し、(i) 励起状態に移行した多くの電子のうち、最終的に複数の電子が安定化する場合には最後の 1 個のみが X 線を放出する、(ii) M 殻に複数の電子を持つ場合、最終的に 1 個の電子が安定化された後放出される X 線の減衰時間は、最終的に複数の電子が安定化された際に放出される X 線の減衰時間に比べ短いことが分かった。以前の可視光分光の結果と合わせて解析を進めることにより、多価イオンへの電子捕獲初期状態を特定し、その崩壊過程が明らかになってきた。

(5) 低速多価イオンの PET キャピラリーによるビームガイド効果

研究担当者：金井, 星野 *⁴, 神原, Stolterfoht, 山崎 (山崎原子物理研究室)

低速多価イオンを絶縁体のキャピラリーに入射すると、キャピラリー内壁は、ちょうど多価イオンをキャピラリーに沿って導くように自己組織化帯電をすることを確かめた (ビームガイド効果)。そのため、7 keV Ne^{7+} を多数の細孔 (直径 ~ 200 nm) を持つ PET (polyethylene terephthalate) 薄膜 (厚さ 10 μm) に入射し、標的を通り抜けたイオンの角度分布を二次元位置検出器で測定した。その結果、(i) 7 keV Ne^{7+} 入射の場合、キャピラリー軸から ± 5 度程度の範囲ではイオンがキャピラリー軸方向にガイドされる事、(ii) イオンビームのキャピラリーへの入射角度を変えると、キャピラリー軸方向へガイドされるイオン量がイオン照射量とともに増加し飽和する事、(iii) ガイドされるイオン量が増

加する初期過程でビームの形状、ガイドされる方向が変化することが観測された。

(6) 低速 Ne イオンと Ar 原子の大角散乱による多電子再配分過程

研究担当者：星野 *4, 神原, 金井, Schuch, 山崎 (山崎原子物理研究室)

衝突エネルギー 5 keV の Ne^{q+} ($q = 1, 2, 3$ and 7) イオンと Ar 原子の衝突を用い、大角散乱下における電子再配分過程がどのように進むかを、散乱 Ne イオンと反跳 Ar イオンの価数分布を同時計測することにより研究した。断熱的に現象が進む遠方衝突の電荷移行は概ね Classical Over Barrier 過程で理解が進んでいるが、ここで問題にする大角散乱条件では、相互作用時間が数フェムト秒と非常に短く、衝突は電荷再配分が平衡に達する前に終了する。すなわち、このような衝突系の研究は、多電子移行に関わる衝突のダイナミクスを理解するために極めて有効であると考えられる。さらに衝突径数が小さいため、内殻軌道の電子が衝突に陽に関与することになり、その意味でも非常に興味深い。これまでの近接衝突におけるイオンと標的原子の過去の大角散乱実験は一価イオンが大部分を占め、多価イオンを用いた実験例はほとんどない。本研究により、多価イオンと固体表面の衝突におけるイオンの中性化過程をより基本的なところから理解できるようになると考えている。本年度は実験装置を開発し、散乱イオンと反跳イオンの価数相関を実際に測定した。実験装置は、二組のドリフト管と MCP および二次元位置敏感型検出器、標的用のガスジェットからなる。二次元位置敏感型検出器は、Ne-Ar 衝突系で運動学的に決定される散乱角と反跳角付近に設置し、飛来するイオンの放出角度と飛行時間差を同時に計測している。ドリフト管には静電圧が印加でき、これにより、衝突後のイオン対の価数を飛行時間差から確定することができる。 $q = 1 \sim 3$ の低価数イオン衝突における測定結果から、散乱 Ne イオンは純粋な電子捕獲に比べて標的の多重電離を伴う電子捕獲が支配的であること、系から放出される平均電子数は入射価数に依らず一定であること等、新しい知見が得られた。興味深いことに、高価数入射 ($q = 7$) の場合も、系から放出される平均電子数は低価数入射の場合と同様であることが分かった。現在解析を急いでいる。

(7) 低速 N^{5+} -He 衝突における角度分解エネルギー分光実験

研究担当者：宮本 *2, 星野 *4, 金井, 中井, 北島 *1, 田中 *1, 山崎 (山崎原子物理研究室)

本年度は、衝突エネルギー 300~800 eV の範囲で N^{5+} イオンと He 原子衝突の二電子捕獲により生成された N^{3+} イオンの角度分解エネルギー分光実験を行った。過去 N^{5+} -He 衝突実験において、全断面積は一電子捕獲、二電子捕獲により生成された散乱イオンに対して測定されているが、散乱イオンの終状態を選別した測定は一電子捕獲についてのみ行われており、二電子捕獲については測定例がなかった。そこで、 N^{5+} -He 衝突の二電子捕獲により生成された N^{3+} イオンの終状態を選別した角分布を測定した。散乱イオンの角分布から、低エネルギー領域で相互作用ポテンシャルの形状、さらには、交差点や結合の強さなどが得られる。実験は、低速多価イオン実験室の ECR イオン源から引き出された N^{5+} イオンを用い、低速専用ビームライン BL2 に設置された実験装

置を用いて行った。測定された散乱イオンの角度分解エネルギーベクトル強度は、散乱角度とエネルギー平面上に等高線表示され、二次元マップとして再プロットした。この二次元マップ上に運動学的関係をプロットすると、始状態の内部エネルギーが既知であることから、終状態の内部エネルギーを決定することができ、終状態選別された角分布が得られる。実験結果から、 N^{5+} -He 衝突の二電子捕獲により生成される N^{3+} イオンの終状態は、 $\text{N}^{3+}(1s^2 2p^2)$, $\text{N}^{3+}(1s^2 2s 3l)$, $\text{N}^{3+}(1s^2 2p 3l)$ and/or $\text{N}^{3+}(1s^2 2s 4l)$ であることをはじめて決定した。さらに角分布を $E_0 \theta$ (衝突エネルギー $\times$ 散乱角 keV degree) でプロットすると、 $\text{N}^{3+}(1s^2 2p^2)$ 状態は、約 3.0 keV degree, $\text{N}^{3+}(1s^2 2s 3l)$ 状態は、約 1.0 keV degree, $\text{N}^{3+}(1s^2 2p 3l)$ and/or $\text{N}^{3+}(1s^2 2s 4l)$ 状態は、0 keV degree と 2.5 keV degree 付近にピークを持ち、それぞれの終状態が異なる角分布を示すことが明らかになった。現在解析を急いでいる。

(8) 多価イオン照射を利用した新しい材料創製に関する研究

研究担当者：目黒 (ビームアプリケーションチーム)

新しいナノ材料の可能性の探索およびそのための表面創製技術開発を目的として、低速多価イオン照射により誘起されるグラファイト表面のナノスケールでの電子状態変化に関して研究をすすめている。これまでの研究成果より、(i) 低速 (K.E. ~ 400 eV) のアルゴン 8 価イオンをグラファイト (HOPG) 表面に照射し、その領域に電流注入を行うとイオン 1 個が衝突した近傍約 1 nm の領域の伝導性が失われ、6 eV 近いエネルギーギャップが生じる、(ii) さらに、水素雰囲気中で熱処理することにより、伝導性を失った領域は極めて良好な電界放出特性を有し、電流電圧特性から算出した Fowler-Nordheim プロットより求めた仕事関数の値は 0.298 eV で、グラファイトの仕事関数 (~ 4.5 eV) よりも一桁以上小さくなる、(iii) 7 価以下の価数のアルゴンイオン照射では同様な現象は観察されない、という結果を得ている。これらを基礎として、アルゴン 8 価イオン照射領域の構造の詳細な検討を行い、さらに形成メカニズムを理解する上で基礎となる知見を得た。

(i) ラマン分光による sp^2 領域の構造決定：ラマン分光を用いた振動モードの解析から sp^2 領域の構造に関しての知見を得た。完全結晶のグラファイトの場合には 1565 cm^{-1} にラマンシフトのピーク (G ピーク) が観察されるが、イオン照射等で欠陥が導入された場合には G ピークの半値幅が顕著に増大したり、 1330 cm^{-1} 付近に D ピークが観察されるようになる。この D ピークは結晶性ダイヤモンドの sp^3 からのピーク位置と非常に近いため、D ピークが明確に観察されるグラファイトの場合にはラマン分光の結果から得られるのは sp^2 の情報がほとんどとなる。イオン照射量を変化させた場合の G ピーク半値幅の変化、および D ピーク強度と G ピーク強度比の変化から、アルゴン 8 価イオン照射の場合には通常の 1 価のイオン照射とは異なり、イオン 1 個の照射でも多数の 1 価イオンを照射した場合と同様なクラスター的な複合欠陥が生成されることが分かった。しかし、2 次のラマンピーク強度から、この欠陥生成はイオンの衝突領域の近傍に限られておりそれ以外の領域では結晶性が保たれたままであることが示唆され、これまで得られていた STM 観察の結果と非常によく対応を示している

ことが分かった。

(ii) DV-X α 計算による sp^3 領域の構造推定：多価イオン照射により生成される sp^3 領域の構造を同定するために透過電子顕微鏡観察を計画しているが、多価イオン照射により形成される sp^3 領域が非常に限定されているため、所定のナノ領域の透過電子顕微鏡観察を可能にする試料作成工程を現在検討中である。現段階では、バンド計算から得られた実験結果に合うようにアルゴン 8 価イオン照射領域の構造の推定を行った。通常のダイヤモンド構造を仮定すると実験で得られた 6 eV 程度のバンドギャップを得るためには 80 個近くの炭素原子が必要であり、実験結果を説明できない。STM 観察から推定される多価イオン照射領域の炭素原子の数は最大でも 20 個程度と考えられ、これらすべての条件を満たす構造は、プレーナー型で欠陥が導入された sp^3 構造であることが計算から得られた。 sp^3 領域にも欠陥が導入されているという結論は、 sp^2 領域のラマン分光の結果とも合致するものであり、またプレーナー型の sp^3 構造はグラファイトからの変化も起こりやすいと思われ、極めて妥当な結果が得られたと考えている。

(iii) 高次高調波光照射との比較：低速多価イオンによる sp^3 形成機構として、多価イオンの持つクーロンポテンシャルによって誘起される表面からの多数の電子の脱離により sp^2 から sp^3 への遷移が非常に起こりやすくなるためと考えているが、この機構に基づく電流注入過程がなくても遷移が起こることになり、実験結果との整合性がとれない。我々は、表面からの電子の脱離後にアルゴンイオンと表面との衝突があり、そのために構造に歪みが導入され、その回復のために電流注入が必要と考えた。従って、直接衝突過程がなく、かつ内殻からの多数の電子の脱離を誘起するためのツールとして、軟 X 線領域の高次高調波光照射 (Ti : Sapphire レーザーの 27 次高調波 ($\lambda = 29.6$ nm)) を用い、多価イオンの実験結果との比較から検討を開始した。現段階ではまだ確定的なデータは得られていないが、今後ラマン分光、STM 観察を主として検討を行っていく計画である。

2. 偏極ボジトロニウムマニピュレーション研究

(1) ボジトロニウム生成用陽電子蓄積法の開発

研究担当者：大島 ^{*5}、金井、神原、山崎 (山崎原子物理研究室)

高密度の電子プラズマを多重トラップ中に形成した。これを減速剤として陽電子を捕捉冷却する手法を開発し、 10^6 個程度の陽電子蓄積に初めて成功した。冷媒である電子の再溜め込みにより、いわゆるスタッキングが可能で、蓄積陽電子数はこのスタッキング数に比例することを確かめた。これは超高真空中で使用可能な陽電子蓄積技術としてはこれまでより 1 桁半優れた効率であると共に、これまでガスバッファ法に大きく劣っていた超高真空蓄積に実用化の目処を付けた。この目的のため生成された電子プラズマは $10^{11}/\text{cm}^3$ 程度の高密度なもので、非中性プラズマとしても大変興味深い研究対象になっている。現在得られたデータの解析を進めている。

(2) 荷電粒子の電子プラズマ冷却

研究担当者：大島 ^{*5}、金井、中井、山崎 (山崎原子物理研究室)

ECR イオン源から供給される多価イオンを高密度電子プラズマ中に導き、多価イオンの電子冷却過程を観測した。予想通り、冷却時間は入射価数の 2 乗に反比例し、電子プラズマの阻止能から予想される時間と無矛盾であることを実験的に明らかにすると共に、シミュレーションを駆使して、多価イオン冷却を電子冷却と陽電子冷却の 2 段階に分割することで、飛躍的な冷却効率の向上が図れることを明らかにした。

(3) テラワットフェムト秒レーザーによる多価イオン化に伴うイオンの反跳運動量の測定

研究担当者：島田 ^{*6}、中井、大山、安藤 ^{*1}、畠山 ^{*1}、山崎 (山崎原子物理研究室)

テラワットフェムト秒レーザーによる多価イオン化のメカニズムを調べるため、イオン化に伴うイオンの反跳運動量を測定している。本年度は装置のさらなる改良を行い、イオンの反跳運動量の測定を行った。特に、テラワットフェムト秒レーザーの集光を改善するため、レーザーのパルスコンプレッサの精密な調整法を開発し、回折限界を凌駕するとも言える収束レーザービームを得た。それによりレーザーパルスのピーク強度が約 10^{17} W/cm^2 へ増加し、Ar に対しての測定では、これまでに例のない Ar^{8+} までの反跳運動量分布を観測することに成功した。この分布から、 Ar^{8+} までのイオンは、1 レーザーパルス中のシーケンシャルなイオン化を経て生成されていることがほぼ明らかとなった。現在、他の標的について 2 次イオンの運動量分布測定を進めている。

^{*1} 共同研究員、^{*2} 研修生、^{*3} 訪問研究員、^{*4} 基礎科学特別研究員、^{*5} 協力研究員、^{*6} ジュニア・リサーチ・アソシエイト

A highly charged ion (HCI) has a large potential energy and is accompanied with a strong electric field. Using this unique property, we have been studying the formation mechanisms of nano-structures and ultra-sensitive elemental analysis of adsorbed atoms. It was found for the first time that nano-dots observed with STM in various laboratories are not just electronic structure changes but real topological changes, at least in the case of highly-oriented pyrolytic graphite samples. It was also found that the nano-dot size (diameter) is more or less proportional to the incident charge state but its height does not depend on the charge state. Further, it was confirmed that the incident kinetic energy does not affect the size and height of the nano-dots, revealing that nano-dot formation is induced by a high density potential energy deposition on the HOPG surface in a fs time range.

It was also found that (1) F^+ ion yields from a F/Si (100) surface drastically increases with the charge of HCI (proportional to q^3), (2) F^+ ions are emitted in the direction of the Si-F bond (22 ± 4 degree) independent of the charge, the kinetic energy, and the incidence angle of the highly charged ions.

An electron beam ion source using a high- T_c bulk superconductor as a solenoid coil has been operated very stably, which can provide slow, highly charged ions as high as Xe^{42+} , the highest charge state extracted from a liquid nitrogen cooled system.

The angular differential energy gain spectra of N^{3+} ions

were measured for 300–800 eV N^{5+} ions bombarding a He gas target. From these spectra, a two-dimensional (2-D) contour map of the scattered ion intensities was constructed as a function of the kinetic energy difference between incident and scattered ion and the scattering angle. It was found that three or four states are involved in DEC channels which correspond to the N^{3+} ($1s^2 2p^2$), N^{3+} ($1s^2 2s 3l$), N^{3+} ($1s^2 2p 3l$) and/or N^{3+} ($1s^2 2s 4l$). Plotting the 2-D contour maps in 300–800 eV as a function of $E_0 \theta$ (keV degree), N^{3+} ($1s^2 2p^2$), N^{3+} ($1s^2 2s 3l$), N^{3+} ($1s^2 2p 3l$) and/or N^{3+} ($1s^2 2s 4l$) states have peaks ~ 3.0 , ~ 1.0 , ~ 0 , and 2.5 keV degree, respectively.

To study the multiple electron processes in a close collision, we have measured the charge state correlation between the scattered and recoil ions in large-angle scattering of 5 keV Ne^{q+} ($q = 1, 2, 3$ and 7) with Ar atom. The scattered Ne and recoil Ar ions were detected at 27° and 70° as expected from the kinematics of elastic scattering. Each ion detection telescope consists of a time-of-flight (TOF) drift tube and a two-dimensional position-sensitive detector with a microchannel plate. For each coincidence event, the positions of the scattered and recoil ions and the difference of the TOF values (Δ TOF) between these ions were recorded. With the drift tube biased on an electrostatic potential, the ion velocity and its transit time in the tube depend on the charge state, so that we can determine the outgoing charge states using Δ TOF. In the case of low incident charge state ($q = 1-3$), single-electron capture with target ionization was the most important channel. In the $q = 7$ case, we have estimated that the maximum combination of charge state was Ne^{4+} and Ar^{5+} , which means that 3 electron capture with 2 electron ionization is the strongest channel. It was found that the mean charge states of both the scattered ions and recoil ions increased with q . Surprisingly, it was found that the number of emitted electrons was approximately 2 and almost independent of q .

L X-rays emitted from transmitted highly charged ions from a metallic microcapillary were measured in coincidence with the final charge states for various Ar ions, which is expected to reveal the formation and relaxation processes of hollow atoms formed above the surface. It was

found that the yields of L X-rays from Ar ions, which have one stabilized-electron, decrease faster than those from ions with multiple stabilized-electrons, when the projectiles have multiple inner shell holes.

We have made two dimensional images of transmitted 7 keV Ne ions through an insulating microcapillary target (PET) to study the beam guiding effect in insulator capillaries. It was found that (1) 7 keV Ne ions are guided in the PET capillaries, (2) the guiding effects increase and saturate as the dose increases, and (3) before the saturation of the beam guiding effects, the angle and angular spread of the guided ions change.

Modification of electronic states of a graphite surface induced by a slow highly-charged ion (HCI) has been studied. The single impact of Ar^{8+} (K.E. = ~ 400 eV) onto the graphite surface creates a non-conducting region with about 1 nm in diameter. We have investigated the structure of an sp^2 region created by an Ar^{8+} impact from the Raman spectroscopic measurements, and also estimated the structures of the sp^3 -like carbon nano-clusters on the graphite surfaces formed by the Ar^{8+} impact and the following electron injection by means of DV-X α molecular orbital calculations.

In order to realize positron cooling of HCIs, positrons have successfully accumulated in a multi-ring trap (MRT) employing high-density electron plasma as an energy degrader. Eventually, $\sim 10^6$ positrons were stably accumulated. The accumulation efficiency achieved here is more than 30 times larger than the best value ever achieved by other techniques under ultra high vacuum conditions. It was further confirmed that the stacking technique works perfectly guaranteeing that UHV scheme can be applied to various fields of science including antihydrogen synthesis.

We have performed measurements of recoil ion momentum distributions using a TW-fs laser system. A laser intensity as high as 10^{17} W/cm² at the focus point was achieved by precise tuning of a pulse-compressor in the laser system. The recoil momentum distributions up to Ar^{8+} were successfully measured, which shows that a sequential ionization process during one laser pulse dominates the production of highly charged ions.