

原子衝突学会誌「しょうとつ」
2019年5月15日発行
第16巻第3号

原 子 衝 突 学 会 誌

しょうとつ

Journal of Atomic Collision Research

Vol.16 Issue3

2019

新しい風

高速クラスターイオン照射における固体内電子応答
椎名陽子

原子衝突学会賛助会員（五十音順）

アイオーピー・パブリッシング・リミテッド（IOP 英国物理学会出版局）

Institute *of* **Physics**

<http://journals.iop.org/>

アドキャップバキュームテクノロジー株式会社



<http://www.adcap-vacuum.com>

有限会社イーオーアール



Electronics Optics Research Ltd.

<http://www.eor.jp/>

イノベーションサイエンス株式会社



<http://www.innovation-science.co.jp/>

株式会社オプティマ

Optima Corp.

<http://www.optimacorp.co.jp/>

クリムゾン インタラクティブ プライベート リミテッド

enago™

<http://www.enago.jp/>

<http://ulatus.jp/>

<http://www.voxtab.jp/>

コスモ・テック株式会社



<https://www.cosmotec-co.jp/>

株式会社サイエンス ラボラトリーズ



株式会社 サイエンス ラボラトリーズ

<http://www.scilab.co.jp/>

真空光学株式会社

真空光学株式会社 - Vacuum & Optical Instruments -

<http://www.shinku-kogaku.co.jp/>

スウェージロック・ジャパン

Swagelok

<http://www.swagelok.co.jp>

スペクトラ・フィジックス株式会社



<http://www.spectra-physics.jp/>

ソーラボジャパン株式会社



<http://www.thorlabs.jp/>

ツジ電子株式会社



<http://www.tsujicon.jp/>

株式会社東京インスツルメンツ



<http://www.tokyoinst.co.jp/>

株式会社ナバテック

真空機器の未来と歩む



<http://www.navatec.co.jp/>

仁木工芸株式会社



<http://www.nikiglass.co.jp/>

伯東株式会社



<http://www.g5-hakuto.jp/>

株式会社ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション



<http://www.labo-eq.co.jp/>

原 子 衝 突 学 会 誌

しょうとつ

第 16 卷 第 3 号



THE ATOMIC COLLISION
SOCIETY OF JAPAN

目 次

原子衝突の新しい風 高速クラスターイオン照射における固体内電子応答	椎名陽子	... 50
第 26 回原子衝突セミナー報告	行事委員会委員長	... 53
第 26 回原子衝突セミナー参加報告	佐和弘祥	... 54
第 26 回原子衝突セミナー参加報告	宮崎彩音	... 55
「しょうとつ」原稿募集	編集委員会事務局	... 55
ユーザー名とパスワード		... 56

高速クラスターイオン照射における固体内電子応答

椎名陽子

立教大学理学部物理学科 〒171-8501 東京都豊島区西池袋 3-34-1

yshiina@rikkyo.ac.jp

令和元年 5 月 7 日原稿受付

高速イオンビームはラザフォード後方散乱分析(RBS)から粒子線がん治療まで、さまざまな分野で応用されているが、実は高速イオンビームを固体へ照射した際の固体原子の応答についてはまだわからない点が多い。本稿では高速クラスターイオンを固体へ照射した際の、固体内散乱電子とイオンの相互作用に関する著者の研究成果について述べる。

1. はじめに

わたしは筑波大学数理物質科学研究科物理工学系の富田成夫准教授にご指導いただき、2019年3月に博士号を取得した。2019年4月より立教大学理学部物理学科に助教として着任し、星間分子のような極低温・極低密度環境下におかれた分子の反応性についての研究に取り組んでいる。本稿ではわたしが取り組んできた、高速クラスターイオン照射時の固体内電子応答の実験的研究について紹介する。

2. クラスター効果

Bohr 速度を超える高速のクラスターイオンを固体へ照射すると、最初の数原子層のうちに構成原子間の結合を担う電子はイオン化され、クラスターイオンは複数の単原子イオンへと解離する。その後、解離によって生成された複数の単原子イオンは数 Å 程度の非常に近接した間隔で固体内を並走していく。クラスターから解離した各イオンと固体原子との衝突が独立とみなせないほどイオン間距離が短ければ、このとき測定できる物理量は単原子イオンを複数個独立に照射した場合の値からずれる。このような効果は実際に電子的阻止能、平均電荷、スパッタリング収量、二次電子収量などにあらわれることが知られており、総じてクラスター効果と呼ばれている。

たとえば 0.5 MeV/atom C_4^+ イオンをアモルファスカーボン薄膜へ照射した際に標的前方で測定

した二次電子の単原子あたりの収量は、同速度の C^+ イオン照射時に比べて半分程度しかない [1]。同条件で電子的阻止能が 4% 程度の減少にとどまるのに比べ [2]、二次電子収量は非常に強く抑制される。高速単原子イオン照射の場合は二次電子収量が電子的阻止能に比例することが知られているが、クラスター照射時には二次電子収量と電子的阻止能は比例しない。また電子的阻止能におけるクラスター効果が起こるイオン間距離が 2 Å 以下なのに対し、二次電子収量は標的脱出時のイオン間距離が 7 Å 程度になっても、やはり C^+ イオン照射時の半分程度に抑制される。アモルファスカーボン中でイオン間距離 7 Å ということは、イオン間に固体原子が 3-4 個ほど存在するような距離である。すでに電子的阻止能におけるクラスター効果は、各イオンがつくる wake potential の干渉により説明されている [3]。二次電子収量においては wake potential とは異なる、より長距離にきくような効果がクラスター効果の原因と考えられるが、いまだにメカニズムがわかっていない。一般的に、二次電子の生成過程は 3 ステップで考えられる。イオンによる散乱電子の生成、散乱電子の一部の固体表面への輸送、表面へ到達した電子のうち表面の仕事関数を超えるエネルギーを持つ電子の固体外への脱出である。イオン-固体原子衝突により生成される散乱電子の数は電子的阻止能に比例すると考えられる。よって二次電子収量におけるクラスター効果は、散乱電子

の固体内輸送過程か、表面からの脱出過程にあると思われる。本研究では散乱電子の固体内輸送過程に着目し、0度電子分光測定を行った。

3. 実験

実験は、茨城県那珂郡東海村にある日本原子力研究開発機構原子力科学研究所の20 MV タンデム加速器で行った。高電圧ターミナル内の ECR イオン源で生成された C^+ , C_2^+ , C_3^+ イオンは 3.5 MeV/atom に加速され、アモルファスカーボン薄膜へ照射された。ビーム進行方向(0度方向)へ放出された電子は分光器初段で90度偏向され、45度平行平板型電子分光器でエネルギー分析されたのち、二次電子増倍管で検出された。

3.5 MeV C^+ 単原子イオンを薄膜へ照射し、0度方向で測定した電子エネルギースペクトルの一例を図1に示す。鋭いピークがある160 eVは照射イオンと同速度の電子のエネルギーに相当する。このようなイオンと同速度でイオンに伴走する電子はconvoy電子と呼ばれ、0度付近の狭い立体角にだけ放出される。またconvoy電子ピークの両裾に複数の小さなピークがみえる。これらは標的を透過したイオンのRydberg状態からAuger遷移によって放出された電子によるピークで、イオンから180度方向へ放出された電子がconvoy電子ピークの左肩、0度方向へ放出された電子が右肩にみえている。

4. 結果

3.5 MeV/atom C^+ , C_2^+ , C_3^+ イオンを膜厚 3.0–29.7 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の薄膜へ照射してconvoy電子収量を測定した結果、 C_2^+ , C_3^+ 照射時は C^+ 照射時に比べconvoy電子の減衰長が長くなっていることがわかった。またconvoy電子収量におけるクラスター効果は29.7 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ の標的でも残り続けた。3.5 MeV/atom C_2^+ イオンを厚さ29.7 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ のアモルファスカーボン薄膜へ照射した際、標的脱出時のイオン間距離はイオン間のクーロン反発により約12 Åになると見積れる。固体中でこれほどイオン間距離が広がってもクラスター効果が起こるのは興味深い。

Convoy電子はイオンが標的を脱出する際、イオンに対する相対速度の小さい散乱電子がイオ

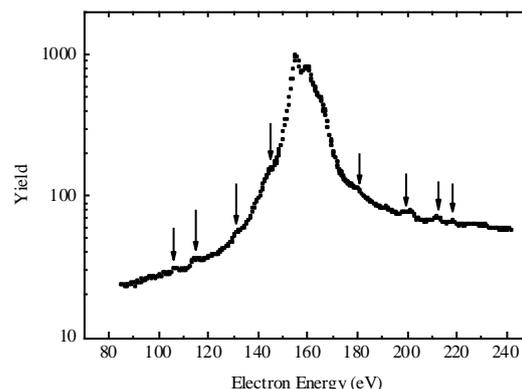


図1: 3.5 MeV C^+ 単原子イオンを炭素薄膜標的へ照射し、0度方向で測定した電子エネルギースペクトル(convoy電子ピーク周辺)。

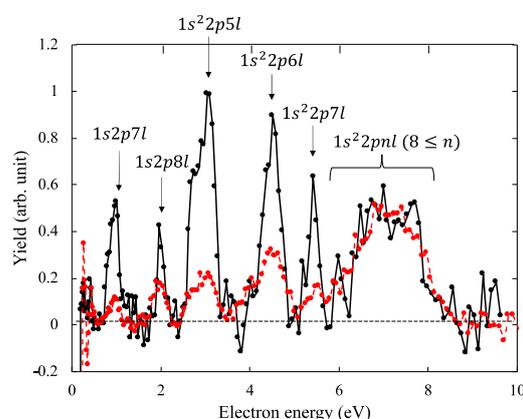


図2: 3.5 MeV/atom C^+ , C_2^+ イオンを炭素薄膜標的へ照射し、0度方向で測定したAuger電子エネルギースペクトル。黒い実線が C^+ イオン照射、赤い破線が C_2^+ イオン照射の結果で、縦軸は単原子あたりの電子収量である。スペクトルは照射イオンの中心系に変換されている。

ンの連続状態に捕獲されることで生成される。標的脱出時にイオンに対する相対速度が小さい散乱電子は、固体内でイオンに伴走してきた散乱電子であると考えられる。イオンに伴走する散乱電子の固体内輸送過程について、Burgdörferによって提唱されたモデルがある [4]。イオンに伴走する散乱電子は1 eV以下程度の小さなエネルギー遷移でイオンの軌道半径の大きい束縛状態(Rydberg状態)へ遷移することができる。Rydberg状態へ入った電子は再びイオン化するまでイオンに伴走し続ける。照射イオンのRydberg状態への捕獲とイオン化を繰り返すことにより、イオンに伴走する電子の減衰長は同速度の自由電子よりも長くなると考えられる。Burgdörferの輸送モデルを踏まえると、クラスターイオン照射の場合は、イオ

ンに伴走する電子が捕獲される Rydberg 状態の軌道半径に比べて狭い領域に複数のイオンが照射されることによって、Rydberg 状態が複数のイオンによる束縛状態になり、単原子照射の場合より減衰長が伸びたと解釈することができる。

また、3.5 MeV/atom C^+ , C_2^+ イオンを炭素薄膜標的へ照射し、薄膜を透過したイオンの Rydberg 状態から放出される Auger 電子の収量を測定した結果を図 2 に示す [5]。Rydberg 状態 $1s^2 2s 5l$, $1s^2 2s 6l$, $1s^2 2s 7l$ から放出された Auger 電子の単原子あたり収量は、 C^+ 照射時に比べ C_2^+ 照射時の方が明らかに減少した。また C_2^+ 照射時における Auger 電子収量の C^+ 照射時の収量に対する比は、Auger 電子が放出された準位の主量子数 n が大きいほど増加する傾向があった。これらの Rydberg 状態は convoy 電子と同様、イオンが標的を脱出する際、イオンに対する相対速度の小さい散乱電子を高励起束縛状態に捕獲することで生成される。薄膜を透過したイオンの Rydberg 状態にも、クラスター効果があらわれることが確かめられた。

5. 固体内における低エネルギー散乱電子とイオンの相互作用

Convoy 電子、Rydberg 状態からの Auger 電子についてのクラスター効果を測定した結果、これらの電子のもとになる固体内でイオンに伴走する散乱電子は複数のイオンによる影響を強く受けることがわかった。散乱電子のイオンに対する相対エネルギーが、固体内における散乱電子-イオン間相互作用における重要なパラメータである可能性が示唆された。やや飛躍するがさらに言えば、イオン間距離に鈍感で長いイオン間距離まで残り続けるという傾向は二次電子収量におけるクラスター効果も共通している。このことからイオンに伴走する電子と複数のイオンとの相互作用が、散乱電子全体の輸送過程、そして二次電子収量におけるクラスター効果において重要な役割を果たしている可能性もあるのではないかと考えている。

6. おわりに

固体の原子間隔の数倍の距離離れて並走するイオンが二次電子収量や convoy 電子収量に影響

するとか、軌道半径が固体の原子間隔より大きいような Rydberg 状態が固体内での散乱電子輸送過程に関わっているなどというのは、直感に反する奇妙な話かもしれない。しかし、イオンの電荷が周囲の電子によって遮蔽されるといっても、遮蔽クーロン場はずっと遠方まできくはずだし、軌道半径の大きい Rydberg 状態も、寿命は短いだろうが存在してよいと考えている。もっといえば、convoy 電子が捕獲されるようなイオンの連続状態の軌道半径は無量大である。もちろん、イオン間隔がずっと広がればいつかは convoy 電子におけるクラスター効果も消えるはずだが、それがどの程度のイオン間距離になるのか、今後さらに実験して確かめたいと思っている。

最後になったが、本稿で紹介した研究は筑波大の富田成夫准教授、左高正雄先生、笹公和准教授、木下亮さん、舟田周平さん、日本原子力研究開発機構の松田誠さん、京都大の今井誠先生、理論放射線研究所の川面澄先生との共同研究として行ったものである。この場を借りて、深く御礼を申し上げる。

参考文献

- [1] S. Tomita *et al.*, Phys. Rev. A **73**, 060901(R) (2006).
- [2] S. Tomita *et al.*, Phys. Rev. A **82**, 044901 (2010).
- [3] W. Brandt *et al.*, Phys. Rev. Lett. **33**, 1325 (1974).
- [4] J. Burgdörfer, in *Proceedings of the Thrid Workshop on High-Energy Ion-Atom Collisions, Debrecen, 1987*, edited by D. Berenyi and G. Hock, Lecture Notes in Physics Vol. 294 (Springer-Verlag, Berlin, 1988), p. 344.
- [5] Y. Shiina *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B (in press), <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.10.041>.

2019 年度 役員・委員会

会長

城丸春夫（首都大学東京）

幹事

平山孝人（立教大学）〔副会長〕

土田秀次（京都大学）

彦坂泰正（富山大学）

松本淳（首都大学東京）

吉井裕（量子科学技術研究開発機構）

運営委員

東俊行（理化学研究所）

鵜飼正敏（東京農工大学）

加藤大治（核融合科学研究所）

田沼肇（首都大学東京）

土田秀次（京都大学）

彦坂泰正（富山大学）

平山孝人（立教大学）

間嶋拓也（京都大学）

松本淳（首都大学東京）

吉井裕（量子科学技術研究開発機構）

石井邦和（奈良女子大学）

大橋隼人（富山大学）

金安達夫（九州シンクロトロン光研）

歸家令果（東京大学）

木野康志（東北大学）

中井陽一（理化学研究所）

常置委員会

編集委員会 委員長：彦坂泰正（富山大学）

行事委員会 委員長：土田秀次（京都大学）

広報渉外委員会 委員長：吉井裕（量子科学技術研究開発機構）

顕彰委員会 委員長：平山孝人（立教大学）

庶務委員会 委員長：松本淳（首都大学東京）

編集委員 大橋隼人, 岡田邦宏, 金安達夫, 北島昌史,
中井陽一, 彦坂泰正, 松田晃孝, 森下亨



しょうとつ 第16巻 第3号 (通巻88号)

Journal of Atomic Collision Research

©原子衝突学会 2019

<http://www.atomiccollision.jp/>

発行: 2019年5月15日

配信: 原子衝突学会事務局 <acr-post@bunken.co.jp>