原子衝突学会誌 2013 年第 10 巻第 2 号

Journal of atomic collision research, vol. 10, issue 2, 2013.

# 

原子衝突学会 2013 年 3 月 15 日発行 http://www.atomiccollision.jp/

## 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) ht

**Electronics Optics Research Ltd.** 

http://journals.iop.org/

http://www.astechcorp.co.jp/

http://www.adcap-vacuum.com

## Institute of Physics

アステック株式会社



アドキャップバキュームテクノロジー株式会



有限会社 イーオーアール

http://www.eor.jp/

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

<u>Optima C</u>orp.

株式会社 オプティマ

カクタス・コミュニケーションズ株式会社

editage Helping you get published

キャンベラジャパン株式会社

http://www.canberra.com/jp/

http://www.editage.jp http://www.cactus.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;

株式会社 サイエンス ラボラトリーズ



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

http://www.enago.jp/ http://ulatus.jp/ http://www.voxtab.jp / 真空光学株式会社

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

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

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

スペクトラ・フィジックス株式会社



A Newport Corporation Brand

ソーラボジャパン株式会社



株式会社東京インスツルメンツ

http://www.thorlabs.jp/

http://www.tsujicon.jp/

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



株式会社東和計測



株式会社トヤマ



株式会社 ナバテック

A Statec

http://www.touwakeisoku.co.jp/

http://www.toyama-jp.com/

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

仁木工芸株式会社

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



() 仁木工芸株式会社

伯東株式会社

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



丸菱実業株式会社

http://www.ec-marubishi.co.jp/

# 丸菱実業株式会社

MARUBISHI CORPORATION

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/



# しょうとつ

## 第10卷第2号

## 目 次

| (シリーズ)宇宙と原子 第六回 星間分子<br>一希薄で冷たい宇宙空間にもさまざまな | 市川 行和 30<br>は分子があるー  |
|--|----------------------|
| (解説) 静電型イオン蓄積リングを用いた原子分子物理                 | 程(I) 城丸春夫,<br>東俊行 33 |
| (原子衝突のキーワード)コヒーレント共鳴励起                     | 中野 祐司 42             |
| (談話室) 「異分野間の壁:用語の定義の相違」                    | 森林 健悟 43             |
| 第29回化学反応討論会のお知らせ                           | 46                   |
| 国際会議発表奨励事業に関するお知らせ                         | 庶務幹事 46              |
| 「しょうとつ」原稿募集                                | 編集委員会 47             |
| 今月のユーザー名とパスワード                             | 47                   |

## 「宇宙と原子」 第六回 星間分子 -希薄で冷たい宇宙空間にもさまざまな分子がある-

#### 市川行和

yukitikawa@nifty.com 平成 24 年 12 月 25 日原稿受付

星と星の間の空間は、決して真空ではなく、ガ スと固体微粒子から成る星間物質で充たされて いる. その密度の相対的に大きいところは星間 雲と呼ばれている. 中でもやや高密度(10<sup>2</sup>-10<sup>6</sup> cm<sup>-3</sup>)で低温(10-100 K)のところは主に水素分子 から成っており、星間分子雲と呼ばれて、星形成 の現場である. 星は星間物質が自己重力で収縮 することにより形成されるが、収縮に伴う圧力の 上昇を抑えるには原子分子(特に分子)による放 射冷却が欠かせない.また厳密にいうと星間雲 ではないが、ある種の星のまわりにはその星から 放出された物質や,星の形成の際に取り残され たガスや微粒子が取り巻いており,星周外層 (circumstellar envelope)と呼ばれている. ここにも 分子が存在し、その振る舞いは星間分子雲の場 合と同じであり、しばしば一緒に議論される.

分子雲には水素分子のほかにさまざまな分子 が見つかっている(現在180種程度が確認されている)[1].温度が10K程度でも励起可能なのは 分子の回転状態である.分子の回転状態間の遷 移に伴うマイクロ波(主としてミリ波)の吸収・放出 を観測することで,分子の検出が行われる.これ には地上の電波望遠鏡が用いられる.軽い分子 (水素分子や水)の低い励起状態の検出にはサ ブミリ波や遠赤外光の観測が必要になる.その 場合は大気中の水蒸気による吸収を避けるため に,高地にいくか,人工衛星などを用いて地球 大気の外へ出なくてはならない.なお,一部の分 子は赤外や可視光の観測でも確認されている.



図 1: 野辺山電波望遠鏡を用いて観測された星 IRC+10216 の外層の電波スペクトル(の一部). い くつかの分子輝線が記録されている. 記号Uは観 測当時未同定だったもの. 横軸は周波数(GHz 単位), 縦軸はアンテナ温度で受信波の強度に相 当する. (文献 [2] より転載)

星間分子のスペクトルの一例を図1に示す.こ れは星周外層 IRC+10216 の分子スペクトルで 国立天文台野辺山の電波望遠鏡を用いて 28-50 GHz を掃引観測したものの一部(33-34 GHz)である [2].いくつかの分子の輝線が見え るが,対応する分子が観測当時不明のものもあり 図では U と書いてある.これについては後で述 べる.

星間雲中で分子を作るには次の条件が必要 である:

- ① 密度が低いので2体衝突に限る
- ② 発熱反応で、活性化エネルギーがゼロあるいはきわめて低いもの

これらの条件をみたすのは2体のイオン・分子衝 突であるが,一部の中性原子分子反応(特にラジ カルの関与するもの)も低温で大きな反応速度定 数をもつ.現在主流になっている星間分子生成 のシナリオは次のようなものである:

- (1) 圧倒的に多い水素原子が後述の方法で 水素分子になる.
- (2) 宇宙線粒子との衝突で水素分子がイオン 化する.
- (3)  $H_2$ 気体中で $H_2^+$  ができると直ちに  $H_2 + H_2^+ \rightarrow H_3^+ + H$ が起こり,  $H_3^+$  ができる.
- (4) H<sub>3</sub><sup>+</sup>を種にしてさまざまな分子の形成が行われる. たとえば,

 $H_{3}^{+} + O \rightarrow OH^{+} + H_{2}$   $OH^{+} + H_{2} \rightarrow H_{2}O^{+} + H$   $H_{2}O^{+} + H_{2} \rightarrow H_{3}O^{+} + H$   $H_{3}O^{+} + e \rightarrow H_{2}O + H$ により水分子が作られる.

水素分子を水素原子から2体衝突でつくることは 不可能ではないがきわめて効率が悪い.そこで 現在では,星間雲のなかでの水素分子生成は 固体微粒子の表面で行われると考えられている. この反応は効率が良く(一種の3体衝突),微粒 子の量は少なくても十分な数の水素分子を作る ことができる.なお現在では,水素分子以外の分 子(たとえば上記の水分子)でも固体表面での反 応が重要であるとされている(詳しくは文献[1] を参照).

これまでに多数の分子が星間雲(および星周 外層)で発見されているが、その中には分子の正 イオンも相当数含まれている.しかし、負イオンは 見つかっていなかった.分子の中には電子親和 力が大きいものがあり、自由電子も存在するので、 当然負イオンがあることが予想されていた.見つ からなかったのはひとえに負イオンが出す電波 の波長が正確にわかっていなかったからである. しかし2006年、McCarthyら [3] は先に紹介した IRC+10216 で負イオン  $C_6H^-$ を見つけた.彼ら はまず実験室で  $C_6H^-$ を作ってその回転スペクト ルを詳しく測り、その波長のところを NRAO(アメ リカ国立電波天文台)の電波望遠鏡で観測する ことにより初めての負イオンをみつけたのである.



図 2: 化学モデルによる計算と観測値との比較の 例. 星周外層 IRC+10216 で観測されたいくつか の分子および負イオンについて比較したもの. 縦 軸は柱密度を表す. ○は観測値, ■は化学モデ ルの値. 詳細は文献 [1] を参照. (文献 [1] より 転載)

実験室で決めた  $C_6H^-$ の回転定数は 1336.86 MHz で, それを使うと図 1 で未同定であった輝 線のいくつか(たとえば, 図 1 の上図左端 33.04 GHz にあるもの)を説明できる. つまり約 10 年前 に Kawaguchi らが発見していたものであった. この負イオンの生成は放射性電子付着

 $e + C_6 H \rightarrow C_6 H^- + 光$ によると考えられている. 実際  $C_6 H$ の電子親和力 はかなり大きく(3.8 eV), この反応速度定数は計 算 [4] によると 10 K で

 $k = 3 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ である. なお, 実験値はまだ報告されていない. 現在ではほかにもいくつかの負イオンが観測されている.

星間雲中の分子は互いの反応を通じてその 組成を変化させる.その時間変化を,反応方程 式を時間的に解くことでシミュレートすることを, 星間雲の化学モデルと呼ぶ.化学モデルは分子 雲の構造を理解するうえで重要な役割を果たす が,さらには,星間雲から星形成に至る過程の研 究の一部となる.世界中でいくつかのグループ が組織的に化学モデルの研究を行っている [1]. たとえば,マンチェスター大学のグループは 420 の分子種(原子やイオンを含む)について4600程 度の反応式を考えそれらを連立して解くことがで きる.また,オハイオ州立大学のグループのモデ ルの最新版は468の分子種について約 6000の 反応式を考慮する.ただし,これらのモデルで使 われる反応速度定数のうち実験で求められたも の(特に分子雲に必要な 10 K 程度での値)は極 めて少ない. 理論値もそれほど多くはなく, かなり のものは経験的("chemical intuition" と称する) に決められたものである. 特に微粒子表面での 反応についてはほとんどが推定値である.

モデル計算と観測値の比較の例を図2に示す. これは前述の IRC+10216 での観測の一部を説 明するもので,観測値とモデル計算の値を比べ ている.計算には上述のマンチェスター大学の モデルを用いた.図には,観測値と較べやすい ように,密度を視線方向に積分したいわゆる柱密 度(単位面積当たり)を示している.計算値の方に 誤差棒がついているのは,使われた反応速度定 数の精度を考慮して決められた計算結果の不確 かさである.それを考慮しても観測との一致は良 くない.その原因は,用いた反応速度定数の精 度の見積もりが悪いか,考慮されていない重要 な反応があるかであろう.関連する原子分子研 究の一層の進展が望まれる.

最後に昨年完成したアルマ望遠鏡について 触れておこう.これはチリの標高 5000 m にあるア タカマ高地にあるもので,66 台のパラボラアンテ ナを組み合わせた電波干渉計である.日本の国 立天文台などが参加する国際プロジェクトである. ミリ波,サブミリ波で観測し,高い感度と高精度の 位置分解能を誇る.分子輝線や固体微粒子の 熱放射を使って天体の微細構造を調べるのが主 な目的である.また場所による存在分子の違い から,物質の進化についての情報が得られる. 今まで見えなかった世界が,星間分子を通じて 見えるようになることが期待される.関連する原子 分子の研究の役割も増すに違いない [5].

#### 参考文献

- V. Wakelam et al., Space Sci. Rev. 156, 13 (2010). 化学モデルについての総説である が, 星間分子の一覧表も掲載されている.
- [2] K. Kawaguchi et al., Publ. Astron. Soc. Japan 47, 853 (1995).
- [3] M.C. McCarthy et al., Astrophys. J. 652, L141 (2006).
- [4] E. Herbst and Y. Osamura, Astrophys. J. 679, 1670 (2008).

[5] アルマについては http://alma.mtk.nao.ac.jp を参照のこと.

### 静電型イオン蓄積リングを用いた原子分子物理(1)

#### 城丸春夫, 東俊行

首都大学東京分子物質化学専攻 〒 192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 理化学研究所東原子分子物理 〒 351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

#### shiromaru-haruo@tmu.ac.jp

平成24年1月21日原稿受付

イオンビームの軌道を静電場のみで制御して周回・蓄積する静電型イオン蓄積リング(ここでは E-ring と略記する)の出現から約15年が経過した.既に世界で5台の E-ring が稼働しており,さらにいくつかの 新規 E-ring の製作が進んでいる.本稿では着実な広がりを見せている E-ring 実験について,その概要 を解説するとともに,首都大においてリング製作から現在に至った経緯を振り返る.ただし後者には多 分に個人的な感想が含まれていることをご了承いただきたい.なお続編では,現在首都大のリングで中 心的な課題となっている,分子イオンのレーザー合流実験の解釈について詳しく紹介する予定である.

#### 1. リング以前

2013 年現在, 40 代以上の衝突学会員の中で, 炭素クラスターやフラーレンに関係する研究にか かわった経験のある人は多いであろう. 今から 30 年ほど前、1980年ごろにクラスターの生成法とし てレーザー蒸発法が出現し, 1985 年ごろから 2000 年にかけて、金属、半導体クラスターの研 究が活発に行われていた時期と研究活動期間 が一致するからである. 質量分析と組み合わせ た分光実験はその中でも飛躍的に発展した分野 であり、クラスターの構造や反応性、電子状態な どがサイズの関数として次々と明らかにされてい った. サッカーボール型分子 C<sub>60</sub>の発見はハイラ イトのひとつである.原子数20以下の小さな炭素 クラスターも星間分子の骨格やプラズマを構成 する化学種として,またフラーレン生成の際の部 品として注目されていた.

都立大(現首都大)のグループも様々な手段で サイズ選別したクラスターの分光実験を行ってい た.当時の実験結果の一つを紹介する.図1は 炭素クラスターC6をレーザー蒸発法で生成し, 質量選別の後にレーザー多光子共鳴電子脱離 により生成した中性種の収率をレーザーの波長 の関数として測定した励起スペクトルである[1].



図 1: Single-pass 実験による C<sub>6</sub>の共鳴多光子電 子脱離スペクトル [1]. 矢印で示したピークは振 動構造で, 540 nm 近傍の構造も本物であること が,後からわかった.

一方通行のクラスターイオンビームが壁に衝突 する前に測定を完了させるという,典型的な single-pass 実験である.負イオンの励起状態と励 起波長が一致した時に中性粒子の収率が共鳴 的に増加するため,概ね孤立負イオンの吸収ス ペクトルに対応する情報が得られる.600 nm 近 傍に origin を持つ電子遷移が振動構造を含め 観測されている.当時,孤立 C<sub>6</sub>の励起状態に関 する分光データは無かったので,それなりに意 味のある結果であったと思えるが,単独で投稿す るには中途半端であったため,原子衝突研究協 会の Progress Report で公表しただけでお蔵入り になっているという,旧原子衝突研究協会の会 員しか見ることのできない,ある意味貴重なスペ クトルである.このような実験をやっていて,予想 外に容易に多光子吸収が起きるので驚いたこと, また負イオンを冷やすことが容易ではなく苦労し たことが印象に残っている.都立大グループは 負イオンの光電子分光も行っていたが,イオン源 が同じなので,基本的には高温イオンのスペクト ルを測定していた.その後バークレーのグルー プから,十分に冷えた炭素クラスター負イオンを 標的とした実験が報告され,その美しいスペクト ルに都立大グループは少し意気消沈したもので ある [2].

分光実験の立場からは,標的分子は冷えてい れば冷えているほどよろしい, ということになって いる. スペクトルがシャープになり, 余計なバンド が消え, S/N も良くなるからである. 高温のイオン から得られたスペクトルは幅広で,分光学的デー タとしては物足りない. さらに高温になるとそのよ うなブロードな構造すら消えて,黒体輻射のよう な個性に乏しいスペクトルになってしまう. 冷やし そこなった結果としてとらえれば失敗作の高温イ オンであるが,それ自体は高温プラズマや星間 における分子イオン生成場,質量分析における イオン化部など,様々な場所で重要な役割を果 たしている. そもそも生成時のイオンは高温状態 で得られることが普通である. 例えば電子と分子 の2体衝突で負イオンが生成すれば、電子親和 力分のエネルギーを負イオンがため込むことに なり、必然的に高温イオンが生成する、従って、 高温イオンが真空中で生成し冷えていく現象は 宇宙空間で普遍的に起こっており, 分子進化に おいて重要な役割を果たしているはずである. 後述するように,このような輻射冷却過程の研究 は E-ring 実験の重要な課題となっている.

一般に孤立分子の構造や反応を内部エネル ギー分布(温度)の関数として明らかにすることは、 反応素過程の研究成果を現実の化学反応に結 び付ける重要な課題であるが、サイズが大きく、 また高温状態の分子については、回転準位やホ ットバンドの解析等の分光学的手法が使えない ため,内部温度を決めることは容易ではない. 粒子の加熱,冷却過程を他の粒子との衝突がない 孤立系で追跡するために,長時間それを真空中 に浮かせておくことが要求されるためである. イ オンを高速ビームとして長時間蓄積することがで きる E-ring は,イオンビームとイオントラップの双 方の利点を兼ね備えており,孤立系の遅い反応 を高感度で観察するための強力な道具である. 本稿では首都大 E-ring の他,現在稼働している E-ring で行われた代表的な実験をとおして,この 手法の出現でどのような研究が可能になったの かを述べたい.

#### 2. イオン蓄積実験に対する期待

まず, E-ring に限らず磁場型リングを含むイオ ン蓄積リング全般について, その特徴を紹介す る. イオン蓄積リングは, single-pass 実験に比べ てビームが周回するため実質的ビーム強度が強 いこと, 高速で周回させているために, 中性化に よって直進した粒子の検出が容易であることが特 徴で, さらに電子ビームを合流させてビームを冷 却することにより, 高品位のビームを得ることが可 能である(ビームの冷却という用語は運動量をそ ろえるという意味で使われており, 内部温度の冷 却とは異なる). 特にビーム合流実験により meV 領域の極低エネルギーイオン衝突実験が高感 度, 高分解能で行われ,

#### $He^+ + e^- \rightarrow He$

#### $HD^+ + e^- \rightarrow H + D$

などの基本的な反応における共鳴が観測されて いる [3,4].

一方,これらのリングは成り立ちからいって高 エネルギー実験のための装置であり,磁場によ ってビームの偏向と収束を行っている.エネルギ ーが一定の時,周回に必要な磁場はイオンの質 量の平方根に比例して大きくなるため,低価数 の重イオンを磁場型リングで回すことは困難であ る.また,そのような大型施設では研究課題も全 体として高エネルギー実験にフォーカスしており, 低エネルギーの分子・クラスターイオンの蓄積実 験には敷居が高い.一方,分子・クラスターイオ ン蓄積実験により,分子科学において未開拓の 領域であった「孤立系の遅い反応」にアプローチ



図 2: レーストラック型 E-ring の典型的な電極配 置.Q レンズは収束・発散のペアが 4 組あり、これ が安定条件を決定する.周回は、10 度偏向×4 と 160 度偏向×2 により行う.直線部で生成した中性 粒子は 10 度偏向部を直進し、下流で検出され る.

できるという期待があった. 例えば分子イオンは 蓄積リング内を長時間周回する間に、イオン源で 生成した高温状態から赤外光放射によって周囲 の環境温度にまで冷却される.このような遅い反 応の追跡は single-pass 手段では不可能である. デンマーク・オーフス大の ASTRID は例外的にク ラスターイオンの蓄積実験が可能な磁場型リング であり、このような遅い過程に関する先駆的な成 果を報告している. 代表的な例としては、高温の C<sub>60</sub>の自動電子脱離効率の減衰曲線の解析によ り輻射冷却速度を求めた研究 [5] や、Cmの輻 射冷却のために光脱離励起スペクトルの形状が 蓄積時間とともに変化することを示した研究 [6] がある.このように、リングを使った研究結果が散 発的に発表されて、リング実験に対する期待も高 まってはいたが、E-ring の出現までは分子・クラ スターを対象とした実験が本格的に始まるような 状況ではなかったと言えるであろう.

#### 3. E-ring 出現の衝撃

1990年、すべてを静電的に制御するイオン蓄 積リング ELISA がオーフス大学において開発さ れた [7]. 図 2 に典型的な E-ring の電極配置を 示す.イオンを 4 重極レンズで収束・発散させ、 偏向電極で周回軌道を描かせている. E-ring を イオントラップの一種と考えてみると、これはイオ ン光学におけるコロンブスの卵のような装置であ った.ビーム軌道の遠心力を利用してイオンを補 足する Kingdom trap はすでに知られていたが、 静電的にイオンを閉じ込める場を作ることは不可 能で、磁場や交流電場が必要と考えられていた からである.しかし E-ring 中に構成される静電場 は、周回するイオンにとっては交流電場である. この電場が、安定条件(ビームの進行方向に垂



図 3: TMU E-ring の設計周回ビーム径. 実線が 水平方向, 点線が鉛直方向の径を示す. ブロック は光学系をあらわし, 左からQレンズ(ペア), 10度 偏向, 160 度偏向(中心の横長ブロック, 10 度偏 向, Qレンズ(ペア). 両端は直線部 [8].

直な座標(x,y)が時間とともに発散しない条件)を 満たせば、2次元のイオントラップとして機能する. このような原理で製作された E-ring は、z 方向に ほぼ field free, x,y 方向には閉じ込めポテンシャ ルが構成された装置と考えることができる. つまり E-ring は半分(3分の2?)イオントラップのようなも のであり、例えば「周回中に重力でイオンが落ち るのではないか」などと心配する必要はない(つ まり、設計段階では本気で心配していた人がい たということである).

イオントラップであるから、入射ビームの品質 (divergence)が多少悪くても蓄積が可能である. この特性を生かすため、稼働中の E-ring は、ビ ームを強く収束発散させながらなるべく多くのイ オンを蓄積するように設計されている.現在主流 となっている周長10m以下のE-ringの例として、 首都大 TMU E-ringの設計上のビーム径を図3 に示す.直線部のビームサイズは約4mm×7 mm であり、ビームの仕様としては特段優れたも のではないことは留意すべきである.なお原理的 に E-ring でビーム発散角が大きくなるというわけ ではなく、後述するように高品質ビームによる高 分解能合流衝突実験を目指した大型のE-ringも 建設中である.

E-ring は意表を突いた装置であったが、「DC イオンビームと静電場の組み合わせでは質量分 析ができない」という常識はそのまま成り立って おり、静電リング中でもエネルギーが同じであれ ば、質量や電荷に係わらずイオンは同じ軌道を 描く. つまり, 重いイオン, すなわち多原子分子イ オンやクラスターイオンでも問題なく蓄積すること ができる. これが E-ring の大きな魅力である. ま た質量の異なるイオンを同時に蓄積することも可 能で, 周回信号をフーリエ変換することによって, 蓄積イオンの質量スペクトルを得ることができる. ただし E-ring の価値は単なる重イオン蓄積や質 量分析にあるのではなく, 以下に示すように電子 や光子との相互作用や分子・クラスターイオンの 反応を広い時間領域で追跡するときに, その真 価が最大限発揮されるものである.

ELISA と2 台目の E-ring である KEK のリング 実験グループから報告された, E-ring 黎明期 ('01-'05 年頃)における代表的な研究成果を紹介 する.

ELISA [9]:くらげのケイ光蛋白中の発色団である p-hydroxybenzylidene-imidazolinone 負イオン を周回させ、レーザー誘起電子脱離(または解離)による中性粒子生成の励起スペクトルを測定した実験.前述のようにこれは孤立分子イオンの吸収スペクトルにほぼ対応するため、ELISAグループはこれを in vacuo 吸収スペクトルと名づけている.

ELISA [10]:  $C_{60}$ について同様の実験で分解能 の高い励起スペクトルを得,動的ヤーンテラー効 果による  $I_h$ 構造のひずみについて解析した研 究.

KEK [11]:プロトン付加ペプチド(アンジオテンシン I,II,III)イオンと電子の合流衝突実験. 解離性電子捕獲で生成した中性粒子の収率が重心系衝突エネルギーの関数として得られ, 共鳴的なふるまいが見出された.

KEK [12]:種々の DNA 負イオン(脱プロトン型)と 電子の合流衝突実験. 中性粒子生成反応(主と して解離による)の立ち上がりは, DNA のシーケ ンスによらず, イオンの価数で決まっている.

以上の4 例はいずれもエレクトロスプレー型イ オン源とリングをうまく組み合わせることによって 得られた成果で,この種の実験におけるイオン源 開発の重要性を改めて示している.

#### 4. TMU E-ring の製作

E-ring の出現はクラスター研究者を大いに刺



図 4: 低温仕様の 4 極レンズ [8].

激した. 磁場型のリングを新たに製作することは 大事業であるが, E-ring は予算的にもスペース 的にも、ギリギリ手が届く範囲にあるように思えた. 2 台の E-ring が稼働し, 蓄積ノウハウも明らかに なって来たころ(2002 年), 幸運にも都立大(現首 都大)でE-ringの建設が予算化された.既に2台 の E-ring が先行して稼働しており、同じ装置を作 っても面白くない、ということで、リングの内側を液 体窒素で冷却できるように工夫した.これは思い の他大仕事で,熱伝導の良い絶縁体(アルミナ) の使用,熱接触の少ない保持方法の工夫(Ti ロ ッドによる吊り固定), 電極の熱による膨張収縮へ の対応が検討され,当時の大学院生が中心とな って熱伝導や熱容量の計算を行い,最終的に設 計が確定した. 例えば4極子レンズは図4のよう に、Ti 製のスポークを用いて交差して吊ることで、 熱収縮による歪みを防いでいる [13]. イオンの 蓄積寿命は真空度で決まるため, リング全体の ベーキングは必須である.一方,電極類は真空 壁との熱接触を極力抑えているため、 ベーキン グ時のリング内部の温度変化は非常に緩慢であ る. 必然的にベーキングは大仕事となり, 加熱終 了から常温に戻るまでだけでも3日を要してい る.

先行する2つのE-ringでは高分解能の磁場型 マスフィルターがイオン入射系に組みこまれてい たが、TMU E-ringでは質量分析を飛行時間によ って行う方式を採用し、予備的な質量選別のた めに簡便なウィーンフィルターを設置した.イオ ン入射系として扱えるイオンの質量数に制限が ないこと、また複数の質量数のイオンが同時に入



図 5: TMU E-ring の円筒電極はピックアップ電極 としてイオンのモニター(左)または RF 加速電極と して使用可能である.

射されることが特徴である. 周回中における質量 選別は,目的とするイオンの周回に同期したパ ルス電場(kick-out パルス)を垂直偏向電極に印 加して行う [14]. したがって,質量選別が終わる まではパルスビームとして蓄積する必要がある.

リングの本体の完成までには紆余曲折があっ たが,最終的には2003年3月に完成し,イオン の周回を目指した実験が始まった.そこからが新 たな苦難の始まりでもあったが,約1年後の2004 年2月,無事イオンの周回を確認した.真空度は 10<sup>-9</sup>Pa,イオンの蓄積寿命(1/e 減衰寿命)は数秒 である.どこの E-ring でも周回までには大変な苦 労があるようで,TMU E-ring はどちらかといえば 順調に進んだ方のようである.幸いなことに,現 在に至るまでリング本体にはそれほど大きなトラ ブルもなく実験が続いている(ただし周辺機器の レーザーやイオン源については,やはりトラブル の連続である).

イオンの周回状況のモニターにはいくつかの 方法を併用した.最も感度が良い方法は、中性 種を検出するMCPの出力でフォスファースクリー ンを光らせ, それを CCD カメラで見るというやり 方で,現在に至るまでビーム診断の主力である. ただしこの方法では周回中のビームを外に取り だして見るため,発散角の影響をうけることに注 意する必要がある.一方,パルスビームが誘起 する電場をピックアップ電極で拾う手法も採用し ており,図5に示す円筒電極からのピックアップ 信号からイオンの周回信号を得ている.また、4 分割されたピックアップ電極の信号強度比からビ ームの重心を決めることができる位置モニターが 4か所に設置されており、ビーム位置の精密制御 が可能である.一方,円筒電極にRF電圧を印加 することにより, ビームのパルス化(バンチング)を



図 6: RF印加による<sup>129</sup>Xe<sup>+</sup>(×)と<sup>134</sup>Xe<sup>+</sup>(○)の同時バンチング.入射前にウィーンフィルターを通過するため,信号強度と安定同位体比とは一致しない.

行うことができる. Xe には質量数が 128,129,130,131,134,136の6種類の安定同位体 が存在するが, それらを DC ビームとして同時に 周回させながら, 例えば<sup>129</sup>Xe<sup>+</sup>と<sup>134</sup>Xe<sup>+</sup>の周回周 波数の RF 電圧を重畳すると, 図6に示すように 2種の同位体のみがパルス化される. このような サイズ選択的バンチング技術をはじめ, E-ring と RF 電場との組み合わせには様々な可能性があ り, 斬新なアイディアの出現が期待される.

リング冷却の効果はCの準安定状態の寿命の 変化として観測された.準安定状態の Cは赤外 領域の励起で電子脱離を起こすので,周囲の壁 からの熱輻射により中性化して検出される.周囲 を冷却すれば脱離しきい値を越える光子数が減 少し,寿命が長くなるはずである.実際,図 7 に 示すように,室温における減衰と比較して,リング を冷却した場合の寿命は明らかに長くなっている. この結果はリングを冷却することの重要性を示す とともに,Cの準安定状態の減衰が,リング内部 の温度を測るモニターとして使えることを示して いる.

#### 4. 孤立イオンの自発的冷却過程

E-ring は遅延過程の研究に適した装置である ことから,高温イオンの研究で大きな成果を上げ ている.その一つが,遅延反応生成物の



図 7: 準安定 C-の寿命の環境温度依存性.

depletion cooling による減衰において「べき乗則」 が広く成立することを示したことである [15]. E-ring 実験では,周回中に電子脱離,解離,ま たは残留ガスからの電子捕獲などで生成した中 性種を検出する.電子脱離や解離は高温のイオ ンで優先的に起こるため,結果としてイオン集団 が冷却される.この過程は depletion cooling と呼 ばれ,輻射冷却とともに孤立イオンの冷却を担っ ている.

中性種の収率の減衰が depletion cooling に支 配されているケースについて考える. 高温イオン はエネルギーの広がりが大きく, 反応生成物の 収率 I は多成分の指数関数で減衰する.

$$I = \sum_{n} I(k_n) = \sum_{n} k_n N_0(k_n) \exp(-k_n t)$$

ここで  $k_n$  は速度定数,  $N_0$  は初期数密度である.  $N_0$  は  $k_n$  に対して緩やかにしか変化しないので, 実効的な速度定数の範囲内で一定とみなすこと ができる. そのような場合, 特定の時間 t におい て(tを固定した時)Iへの寄与が最大となる  $k_n$  は

$$\frac{d}{dk_n}k_n\exp(-k_nt) = 0$$
$$k_n = t^{-1}$$

で与えられる. 従って

 $I \propto t^{-1}$ 

となり,信号強度は時間の逆数に比例する.実際には分布は完全に平坦ではなく,また輻射冷却も効いてくるので,べき数は-1からずれるが,多くの高温イオンで $I \propto t^{-1}$ は良い近似を与える.つまり指数的な減衰と $t^{-1}$ に従う減衰は両極端の



図 8: 亜鉛フタロシアニン負イオンのレーザー誘 起電子脱離励起スペクトルの蓄積時間依存性. 溶液中のデータは J. Mack, and M. J. Stillman, J. Am. Chem. Soc. **116**, 1292 (1994).

現象であり,前者は理想的な単一準位からの反応,後者は「分布が理想的に平坦に広がった状態」からの反応である.

E-ring は直線部と偏向部で構成されており, 構造的に種々のビーム合流実験に適した装置 である. 特にレーザー合流実験にはイオンビー ムの収束度があまり影響しないので、E-ring と相 性が良い. 周回中にイオンが光励起で獲得した エネルギーは、速やかに発光や解離・電子放出 などで消費されるか,振動自由度に分配された のち,輻射冷却によって徐々に消費される.後者 は熱化したエネルギーの唯一の緩和過程であり, 高温状態を経由した分子が最終的にどのような 構造の物質として存在するかを決定する重要な 因子であるが、定量的な知見はあまり得られてい ない. イオンを長時間真空中に浮かせた状態で の高感度測定が可能な E-ring は, 輻射冷却のよ うな遅い過程を孤立系で観測するための強力な 道具になりそうである.

図 8 は亜鉛フタロシアニン負イオンを蓄積した 時の、レーザー誘起電子脱離反応の励起スペク トルである. 蓄積時間に依存したスペクトルの形 状の変化は、イオンが輻射により冷却したことを 明白に示している. 励起スペクトルは近似的に負 イオンの吸収スペクトルと同等であるが、様々な 因子が畳み込まれており、輻射冷却の定量的な 解析は困難である. そこで定量的な解析の有効 な手段として、遅延反応が注目されている.



図 9:  $C_{60}$  蓄積実験で得られた中性粒子収率の蓄 積時間依存性.自動電子脱離の寄与が少なくな った 10 ms 以降にレーザー(hv)を照射し,レーザ 一誘起信号の減衰(赤実線)を測定する.蓄積時 間が  $\delta t$  後に同じ波長のレーザーを照射すると,そ の間の輻射冷却により減衰が遅くなる(赤点線) が,短波長のレーザー(hv)を照射すると減衰が 等しくなる(青実線).そのとき,輻射冷却速度は  $h(v-v')/\delta t$ で与えられる.

熱化したエネルギーが単分子反応のしきい値 を超える場合に観測される遅延反応は,内部エ ネルギーに鋭敏であり,温度測定の有効なプロ ーブになる可能性がある.反応速度は内部エネ ルギーの総和の関数であり,エネルギーの種類 (初期エネルギーと励起で獲得したエネルギーの 違い)には依存しないと考えられる.従って遅延 反応を適切な方法で観察することにより,分子の 初期エネルギー分布(温度)や輻射冷却につい ての情報が得られるはずである.

E-ring における遅延反応を利用した温度・エ ネルギー測定や輻射冷却研究がいくつか報告さ れている. TMU E-ring でも、今までに1光子吸 収 [16] や多光子吸収 [17] による輻射冷却速 度の測定がおこなわれてきた.実験としては、高 温イオンをレーザー照射によりさらに加熱して、 遅延反応で生成した中性種の収率や減衰曲線 を、イオン蓄積時間や励起エネルギーの関数と して測定している.減衰が蓄積時間、即ち内部 温度により実効的に支配されている場合は、減 衰曲線の励起波長依存性と蓄積時間依存性を 測定すればよい. 図9に示すように、蓄積時間依 存性をちょうど打ち消すような励起光の波長がわ かれば、蓄積中のエネルギーの低下分が決定で きるため、競合する depletion cooling の寄与を差 し引くことにより,輻射冷却速度を求めることができる [16].

われわれは当初「信号の減衰は加熱後のイオ ンの内部エネルギーに依存し、イオン蓄積の間 にイオンが輻射冷却すれば、減衰はより遅いも のになる」と考えていた.実際そうなることもある が、予想外に減衰が蓄積時間に鈍感となるケース が頻発した.遅延過程の解析では、解離や電子 脱離の速度定数がどの程度のものが観測にかか っているのか、という点が重要であり、一筋縄で はいかない.このようなケースで輻射冷却速度を 得るための研究については次回に紹介する.

#### 5. 内外の E-ring の状況

現時点(2013年)における世界のE-ringの状況 を表に示す. 今,世界で5台の静電リングが稼働 しており,さらに5台が製作中である. 先述のよう に ELISA は当初高温イオンの冷却過程の研究 を行っていたが,最近では KEK の ESRING と 同様に,エレクトロスプレーイオン源との組み合 わせにより,生体高分子のイオンを蓄積し,その 反応を明らかにすることを主要な目標としてい る.

これに TMU E-ring を加えた 3 台のリングは, イオン光学系が類似しており, リングのサイズもほ ぼ同じである.一方, リヨンの mini-Ring は卓上リ ングという新しい発想で製作された [18].イオン 光学系は非常にシンプルで,イオン偏向の際の 収束効果を利用してトラップを実現している.ごく 最近, PAH の輻射冷却に関する実験が報告され た [19].

ストックホルムの DESIREE は 2 重レーストラッ ク型リング(8 の字をつぶしたような形)で, それぞ れに正負イオンを周回させ, 共通の直線部で合 流衝突を行うというユニークな構想のもと, 約 10 年前に製作が始まった [20]. 長い立ち上げ期間 を経て, ごく最近イオン周回に成功したというニュ ースが入ってきた. 関係者の喜ぶ声が聞こえてき そうである.

**CSR** は極低温型の E-ring で, 真空度 10<sup>-11</sup> Pa の領域で分単位の蓄積寿命を得ようという野心 的な装置である [21]. 周長は約 40 mの大型リン グで, 小型化が可能であるという E-ring の利点を

| 表 1: 稼働中, 建 | 認,計画中の E-ring. | ★は稼働 |
|-------------|----------------|------|
| 中,☆は建設中,    | 計画中のリング        |      |

| ★ELISA      | Aarhus     | E-ring 1 号機(97 年) |  |  |  |
|-------------|------------|-------------------|--|--|--|
| ★ESRING     | KEK        | 2 号機 電子合流衝突       |  |  |  |
| ★TMU E-ring | 首都大        | 3 号機 液体窒素冷却型      |  |  |  |
| ★mini-Ring  | Lyon       | テーブルトップ型          |  |  |  |
| ★DESIREE*   | Stockholm  | 極低温2重リング合流型       |  |  |  |
| ☆CSR        | Heidelberg | 極低温大型リング          |  |  |  |
| ☆μE-ring    | 首都大        | テーブルトップ型          |  |  |  |
| ☆FLSR       | Frankfurt  | 多価イオン蓄積           |  |  |  |
| ☆pro-ESR    | KACST      | 多目的               |  |  |  |
| ☆理研リング      | 理研         | 極低温リング            |  |  |  |

放棄した代わりに,高品質ビームが得られるはず である. 300 keV までのイオン蓄積を目指してお り,磁場型のリングでその威力を発揮した electron coolerも準備されている.極低温中での ビーム制御としては CSR に先行して線形のビー ムトラップが稼働を始め,分単位の蓄積時間を誇 っている [22].

極低温リングが理研でも急ピッチで製作が進んでいる.この装置の周回軌道は TMU-E-ring の約 1/2 サイズで,電極をすべて1枚の CrCu 平 板上に配置したものである.平板全体を3台の GM 冷凍機で冷却することで,極低温が達成されるとともに,装置全体を真空ポンプとして動作 させる.既に,5K 以下の冷却や超高真空を確認 しており,2013年中の本格運転が期待される.

μE-ringは首都大で製作が進んでいる卓上リン グで、TMU E-ringの1/10サイズである.先行す る卓上型リング(mini-Ring)とは異なり、イオン光 学系はTMU E-ringで使用している要素をほぼ すべて組み込んでいる.小型化には空間的、予 算的なメリットがあり、また可搬性の向上による研 究対象の広がりも期待できるが、より重要なこと はイオンの周回周期が短くなることであり、今まで のリングでは見えなかった少し早い遅延過程(イ オンのサイズにもよるが、典型的には数 μ から 100 μ 秒程度の領域)が観察できると期待してい る.TMU E-ringでは、リング1、2周で終了するよ うな遅延過程がしばしば観測されており、そのよ うな場合でも減衰曲線の詳しく解析が可能にな れば、single-pass 実験との隙間が埋まるだろう.

以上のリングに加えてフランクフルトの FLSR [23]やサウジアラビア KACST の pro-ESR [24]が 製作中であり, E-ring を用いた分子科学のさらな る広がりが期待される.

#### 8. おわりに

E-ring 実験で明らかになりつつある輻射冷却 の物理については,現在投稿中の内容を含んで いるため今回の解説で本格的に触れることはで きなかった.そのため E-ring に係わる雑記のよう になってしまった感があり,今回書き残した部分 について,改めて解説したい.孤立高温イオンの 挙動を統一的に理解する試みは,新しい物理と して心躍るものかもしれないが,没個性の分子を 扱うことには化学の立場から見ると,少々忸怩た る思いもある.もう少しだけ低温の領域に,大変 面白いことが埋まっているはずで,いつかそのよ うな成果を報告したいと思っている.

TMU E-ring 実験は都立大,首都大の原子物 理実験研究室,反応物理化学研究室に所属す る多くのメンバーによって行われてきた.ここで全 ての方々の名前をあげることは不可能なので, 教員メンバーである田沼肇,間嶋拓也(現京大), 古川武,松本淳,奥野和彦各氏,博士後期課程 の学生であった神野智史,後藤基各氏の名前を 代表として挙げさせていただき感謝の意を表した い.リング立ち上げ時,イオン蓄積について門外 漢の我々は東芝の渡辺郁男氏と KEK の田邊徹 美氏に様々なことをご教授いただいた.そのうち の一部は本稿に使わせていただいている.高温 イオンへの興味は共同研究者であるイエテボリ 大学の Klavs Hansen 氏に触発された部分が大き い.

首都大における E-ring 実験は 2002 年度の東 京都特殊備品費と,その後の科学研究費補助 金,および学内の各種傾斜的研究費により支援 していただいた.

#### 参考文献

[1] M. Ohara *et al.*, Atomic Coll. Res. Jpn. **21**, 79 (1995).

[2] Y. Zhao *et al.*, J. Chem. Phys. **105**, 4955 (1996).

[3] T. Tanabe *et al.*, Phy. Rev. A **45**, 276 (1992).

[4] T. Tanabe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75**, 1066 (1995).

[5] J.U. Andersen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **77**, 3991 (1996).

[6] C. Brink *et al.*, Chem. Phys. Lett. **233** 52 (1995).

[7] S.P. Møller, Nucl. Instr. and Meth. A **394** (1997) 281.

[8] S. Jinno, Doctral Thesis, Tokyo Metropolitan Univ. 2009.

[9] S. B. Nielsen *et al.*, Phys. Rev. Lett. 87, 228102 (2001).

[10] S. Tomita *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 053002 (2005).

[11] T. Tanabe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **90**, 193201(2003).

[12] T. Tanabe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 043201(2004).

[13] S. Jinno *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A **532**477 (2004).

[14] S. Jinno *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 572 568 (2007).

[15] K. Hansen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87** 123401(2001).

[16] A. E. K. Sunde´n *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 143001 (2009).

[17] M. Goto *et al.*, Phys. Rev. A **87**, 033406(2013).

[18] J. Bernard *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 075109 (2008).

[19] S. Martin *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 063003(2013).

[20] H.T. Schmidt *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **194** 142013 (2009).

[21] D Zajfman *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **4** 296 (2005).

[22] M. Lange *et al.*, Rev. Sci. Instr. **81**, 055105(2010).

[23] C.P. Welsch *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A527 284 (2004).

[24] M. A. El Ghazaly *et al.*, Appl. Math. & Info.Sci. **3** 301 (2009).

#### 「原子衝突のキーワード」

#### コヒーレント共鳴励起

(Resonant Coherent Excitation; RCE)

高エネルギーのイオンが単結晶標的を通過す るとき,結晶構造に由来する周期的な振動電磁 場を感じる.この振動周波数が励起エネルギー に一致するとき,光励起と同様に,原子は共鳴的 に励起される(図1(a,b)).これをコヒーレント 共鳴励起と呼ぶ. $MeV/u \sim GeV/u$ 領域の高速 イオンを用いて到達可能な周波数領域は10 eV から100 keV と広範囲にわたり,その電場強度 は $10^{15}$ - $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> に集光されたレーザー光と 等しい.これらの特徴から,RCE は「高強度の 波長可変 X 線レーザー」に匹敵する手法とも捉 えられ,短波長領域における疑似光源として,多 価重イオンの状態制御や分光などへ応用されて いる.

イオンが感じる振動電磁場の形は,結晶ポテ ンシャルをイオンの静止系へとローレンツ変換 することによって,逆格子ベクトルgを用いた フーリエ級数として表される.各成分の周波数 は,イオンの速度をvとして, $\gamma$ g·vと表される ( $\gamma$ :ローレンツ因子).ベクトルgとvの成す角 度,すなわち結晶方位に対するビーム入射角を 変化させると連続的に周波数が変調される.図 1(c)は,390MeV/uの水素様Ar<sup>17+</sup>イオンを厚 さ1 $\mu$ mのSi単結晶に入射した際にイオンから 放出される脱励起X線強度を,入射角度の関数 として測定したものである.振動電場の周波数 が $2p_{1/2}$ , $2p_{3/2}$ への励起エネルギーに一致する 条件でRCEが起こり,X線強度が増加してい ることが分かる.

歴史的には 1965 年の V.V. Okorokov による 理論的予想 [1] が始まりであり「オコロコフ効果」 とも呼ばれる.1978 年に S. Datz らによって初 めて実験的に確認 [2] されてから現在まで,原子 番号 Z = 5の炭素から,Z = 92のウランまで,1 ~3 電子系のイオンを用いて様々な系で観測さ れている.これらの多くはイオンを結晶に対し



図 1: (a) 光を照射される原子と, (b) 周期場中を 運動する原子. (c)390MeV/u Ar<sup>17+</sup> イオン の RCE スペクトル.

てチャネリング [3] 入射することで,個々の標的 原子とのインコヒーレントな衝突を抑制してい る.一方,近年では高エネルギーイオンや薄膜 結晶の利用によって,チャネリングを伴わない 「3次元コヒーレント共鳴励起(3D-RCE)」が観 測可能になり,これによって偏光の制御や2重 共鳴などの新たなテクニックが生まれた [4,5]. また,RCEの励起エネルギー源はイオン自身の 運動エネルギーであることが知られており,人 工周期場中の RCE による冷却原子の運動制御 も提案されている [6].

(理化学研究所 中野祐司)

#### 参考文献

- [1] V.V. Okorokov JETP Lett. **2** (1965) 111.
- [2] S. Datz, et al., Phys. Rev. Lett. 40 (1978) 843.
- [3] 原子列や面にほぼ平行に入射されたイオン が,結晶原子の隙間をぬって進行する現象.
- [4] 中野祐司,東俊行,日本物理学会誌 65, 516 (2010).
- [5] 中野祐司, しょうとつ 7(5), 5 (2010).
- [6] 畠山温, しょうとつ 9(6), 8 (2012).

#### 「異分野間の壁:用語の定義の相違」

森林健悟 日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 moribayashi.kengo@jaea.go.jp 平成 24 年 9 月 3 日原稿受付

本学会の主要研究テーマである原子衝突は 様々な分野で必要とされるので,本学会員の多 くは異なった研究分野の研究者との議論をしば しば経験されていると思われる.異なった分野の 研究者との交流(異分野交流)は異なった観点か ら研究を見つめ直したり,新しい展開や応用を見 つけたりするなど研究の新たな開拓などに有用 である.しかしながら,異分野間での研究の歴史, 研究対象などの違いが用語の定義(「用語の使 い方」という程度の意味も含む)などの相違を生 み出し、それが議論の障害になることがしばしば 起こる. それゆえに, 異分野間で用語の定義な どが相違することを紹介することは学会員にとっ て有用な情報を得る機会になると考えられる.本 記事では異分野交流中に気がついた用語の定 義の相違を述べ,それが生じる理由を推測す る.

レーザーの開発や応用の専門家が集まる研 究会で粒子線の細胞照射の研究に関して議論 する機会があった. そこで, 粒子線と細胞中の水 分子との衝突で生じた電子を「二次電子」と名付 けて話しを進めようとしたところ,この定義がおか しいのではとの質問がでた.さらに、その議論に 加わった多くの研究者もこれに同意した. 議論の 最中は戸惑っており、うまく説明できなかったが、 議論の後, 放射線の専門用語としては, 最初に 述べた二次電子の定義がたびたび,使用されて いることがわかった [1]. それなのに, このような 意見がでたのは何故か不思議に思われるかもし れないが,以下の理由が推測できる.レーザー や放射光などの光や X 線の吸収で原子や分子 から電離した電子のことを「光電子」と呼び,光電 子と原子や分子との衝突で生じた電子のことを 「二次電子」と呼ぶ習慣もある [2]. この習慣に慣 れた研究者にとって粒子線をレーザーや X 線と 同じような電子やイオンの発生源と考えて, 粒子 線で生じた電子を二次電子と呼ぶことに違和感 を覚えたためではないかと思われる. もし, この 用語の意味することをお互いに取り違えたまま議 論が進んでいたら, 研究内容も誤解されたので はないかと思い, 非常に恐ろしいと感じた.

別の研究会で放射線化学の研究者と議論す る機会があったが、途中で「free electrons」という 用語が異なった定義でとらえられていることがわ かった. 著者が慣れ親しんでいるプラズマ物理 では,原子や分子の電離で発生した電子を「free electrons」と呼ぶ、ところが放射線化学では原子 や分子から電離した電子は「溶媒和電子(溶媒が 水の場合,水和電子)」と呼ばれる場合もあれば 「quasi-free electrons(放射線化学では free electrons よりもこの用語の方が好まれるらしい.ま た,溶媒和していないという意味で dry electrons や presolvated electrons という用語が使用される 場合もあるらしい)」と呼ばれる場合もある [3]. こ の2 つの分野での用語の使い方の違いは生成 する電子やイオンの量と電子の温度から来る こ とが推測できる. プラズマ物理では、ほとんどの 原子が電離する系を取り扱う. それゆえに, 電子, イオンと少数の原子が研究の対象である.一方, 放射線化学では、ほとんどの原子や分子は電離 しておらず,電子やイオンの密度は中性の原子 や分子の密度に比べて非常に小さい. そのため, 電子,イオンの他に中性の分子の状態(分極な ど)が主な研究の対象となる.対象となる電子の 温度は、プラズマ物理では、数万度(1 eV 程度) 以上であるのに対して放射線化学では標的の温

度近くである [3]. 原子や分子から電離した直後 の電子のエネルギーは数 eV 以上と非常に高い ので,室温になるまで,多くの分子と衝突する必 要があり、かなりの時間を有する(10 ピコ秒程度). このとき,分子から電離した電子が親の分子イオ ンのクーロン場から離脱した電子のことを 「quasi-free electrons」と呼ぶ. そして, この親分 子イオンのクーロン力が及ぼす距離のことを「オ ンサーガ距離」と呼ぶ [3]. また, 電子の温度は 非常に低いので,分子の分極から影響を受ける が,分子の分極に関わっている電子のことを「溶 媒和電子」と呼び,これが還元作用を持った活性 種であり、通常の電離した電子とは反応性や赤 外~可視領域までの吸収が大きく変わるなど異な った性質を示すため,放射線化学の重要な研究 対象となる [3].

さらに, 放射線化学の研究者との議論からプラ ズマ物理,放射線化学とも電子とイオンの間の再 結合は重要な過程であるが,その役割が異なる こともわかった.この再結合過程が起こるとエネ ルギーを放出するが、プラズマ物理では、電子 が非常に多いため,放出されたエネルギーは他 の電子が吸収し,再分配される.電子はイオンな どと衝突することによりエネルギーを失うが,この 再結合によりエネルギーを得ることができ, 衝突 過程と再結合過程の釣り合いにより平衡状態が 決まる. すなわち, プラズマ物理では電子とイオ ンの間の再結合過程は電子温度や電離度の平 衡状態を決定する役割がある [4]. 一方, 放射 線化学では、電子の数は少なく、放出されたエ ネルギーを他の電子が吸収することはほとんどな い.この分野では、電子とイオンの間の再結合過 程は「ジェミネート(イオン)再結合」と呼ばれる [3.5] が, 溶媒和電子やカチオンの消滅, すなわ ち, それらの生成時間を決定するのに重要な役 割を演じる.

最後に余談であるが粒子線(イオンや電子)と 分子との相互作用で生じた電子を「 $\delta$ 線」[6] と 呼ぶこともある(この電子は原子や分子から発生 するので  $\beta$ 線(原子核の崩壊に伴って発生する 電子)とは区別している). この  $\beta$ 線と $\delta$ 線の使い 分けは X線と $\gamma$ 線の用語の由来とも似ている. X 線と $\gamma$ 線は, 歴史的には, それぞれ, 電子の制動 放射(電子の加速,減速に伴い電磁波を発生さ せること),原子核の崩壊に伴い発生する電磁波 である [7]. しかしながら, γ線は X線よりも波長 が短い電磁波と定義される場合もある [7]. 時が 経てば、その用語の定義が変わることは、よくあ ることで問題にはならないと思われるかもしれな いが,放射線の専門家の中には,γ線とX線の 違いを波長のみで決めることに抵抗がある人も いるので, 誤解を避けるためそれらの用語の起 源は知っていた方が良いのではないかと思う.こ の記事の執筆中に数名の研究者と議論したが, そのとき、「放射線講習とかで聞く説明は、原子 核内部から発生するものを γ線,発生要因が原 子核外部にあるものを X 線というのが多い」とか 「電子と陽電子が消滅したときに放出される光子 を一般にγ線と言っているが, 原子核がないのに それでいいのかと思うことがある」とのコメントをい ただいた.

前述のように異分野交流は研究の新たな分野 の開拓などに有用な手段であるが、その交流で は様々な障害を経験する.このような障害の体験 談を知ることは、異分野交流をスムーズにするこ とにつながると考えられる.本記事では、レーザ 一開発、応用やプラズマ物理と放射線の研究分 野を例にとり、この2つの研究分野間での用語の 定義の違いを記載したが、障害を与える原因は 用語の定義だけでなく、様々な要因があると思わ れる.本記事が学会員に対して異分野交流の体 験談など研究を発展させるに有用な情報を書か せるきっかけになれば幸いである.

#### 参考文献

- ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements)
  Report-55 'Secondary electron spectra from charged particle interactions'
- [2] http://www.spring8.or.jp/pdf/ja/SP8\_news/no 10\_03/p5-8.pdf
- [3] 近藤孝文,楊金峰,吉田陽一,放射線化学, 93,33 (2011).
- [4] プラズマ原子分子過程パンドブック,浜口 智志,村上泉,加藤太治,プラズマ核融合 学会編.第10章,大阪大学出版会(2011).

- [5] 岡本一将,田川精一,放射線化学 88,9 (2009)
- [6] http://www.qe.eng.hokudai.ac.jp/aesj/local\_ workshop/22th/sibu\_H16\_pdf/HB16\_13.pdf
- [7] http://ja.wikipedia.org/wiki/ガンマ線

**2012 年度 役員・委員会等** 

会長

髙橋正彦(東北大学)

広報渉外委員会

学会事務局

編集委員会

若手奨励賞選考委員会

森林健悟,渡部直樹

国際会議発表奨励者選考委員会

幹事

| 渡部直樹   | (北海道大学)(副会長) |     | 森下  | 亨        | (電気通信大学)  |
|--------|--------------|-----|-----|----------|-----------|
| 足立純一   | (高エネルギー加速器研究 | 機構) | 星野正 | E光       | (上智大学)    |
| 運営委員   |              |     |     |          |           |
| 石井邦和   | (奈良女子大学)     |     | 高口慎 | 퇃志       | (広島大学)    |
| 星野正光   | (上智大学)       |     | 間嶋挧 | 5也       | (京都大学)    |
| 美齊津文   | 典(東北大学)      |     | 本橋復 | 赴次       | (東洋大学)    |
| 森下 亨   | (電気通信大学)     |     | 渡辺信 | <u>i</u> | (電気通信大学)  |
| 足立純一   | (高エネルギー加速器研究 | 機構) | 岸本蓶 | Ī樹       | (東北大学)    |
| 小島隆夫   | (理化学研究所)     |     | 冨田成 | 成夫       | (筑波大学)    |
| 日高 宏   | (北海道大学)      |     | 渡部首 | 重樹       | (北海道大学)   |
| 渡辺 昇   | (東北大学)       |     |     |          |           |
| 会計監事   |              |     |     |          |           |
| 城丸春夫   | (首都大学東京)     |     |     |          |           |
| 中村義春   |              |     |     |          |           |
| 常置委員会等 | 1            |     |     |          |           |
| 編集委員   | 会            | 委員長 | : 渡 | 部直       | 樹(北海道大学)  |
| 行事委員   | 会            | 委員長 | : 森 | 下        | 亨(電気通信大学) |

足立純一,岸本直樹,長嶋泰之,中井陽一,羽馬哲也,早川滋雄,日高 宏

しょうとつ 第10巻第2号 (通巻51号)

委員長: 足立純一(高エネルギー加速器研究機構)

委員長: 大野公一(豊田理化学研究所)

委員長: 高橋正彦(東北大学)

担当幹事:星野正光(上智大学)

Journal of Atomic Collision Research ②原子衝突学会 2013 http://www.atomiccollision.jp/ 発行: 2013 年 3 月 15 日 配信: 原子衝突学会 事務局 <acr-post@bunken.co.jp>