

原子衝突研究協会誌 2007年第4巻第2号

# しよとつ

**Journal of Atomic Collision Research**



**The Society for  
ATOMIC COLLISION  
RESEARCH**

原子衝突研究協会 2007年3月15日発行  
<http://www.atomiccollision.jp/>

# しょうとつ

## 第4巻 第2号

### 目次

シリーズ;原子衝突実験の歩み ー独断と偏見で選んだ10大(?)実験ー	
第8回 イオン蓄積リング(市川行和)	… 3
大森賢治教授の日本学士院学術奨励賞ならびに日本学術振興会賞受賞に寄せて (香月浩之)	… 7
国際会議発表奨励事業に関するお知らせ (庶務)	… 7
「しょうとつ」原稿募集 (編集委員会)	… 8
今月のユーザー名とパスワード	… 8

## 第8回 イオン蓄積リング

市川 行和

[yukitikawa@nifty.com](mailto:yukitikawa@nifty.com)

平成19年2月6日原稿受付

### 1. はじめに

何か実験をするときは、まずテーマがあり、次にその研究に最も適した実験装置を考案し、それを用いて実際に実験を行う、というのが普通である。しかし、まず装置があり、その後にそれにふさわしいテーマがあることに気づいて実験をしてみる、という例もある。今回紹介するイオン蓄積リングを用いた分子イオンの研究 [1] はそのような例である。イオン蓄積リングというのは、原子核実験のために良質のイオンビームを得る目的で開発された。高真空中で磁場を用いてイオンを周回させ、長時間貯めておくものである。周回の途中で冷たい電子ビームと衝突させることで、イオンの熱運動を減らす、電子冷却装置がついている。このようなイオン蓄積リングを原子物理の研究に使う試みが1980年代半ばに盛んになった [2]。エネルギーのそろったイオンビームが得られるだけでなく、それが周回していることから、原子衝突の標的として使えば、実効的な標的密度を格段に増やすことができる。さらに冷却に用いる電子ビームを使えば、電子・イオン衝突の実験ができる。

電子・イオン衝突の実験は古くから興味をもたれてきたが、十分な数のイオン標的を用意するのが困難なため、なかなか進まなかった。その困難を克服するために、イオンと電子のビームを重ね

て平行に走らせる、いわゆる「合流ビーム型実験」が考案された [3]。イオン蓄積リングは合流ビーム型実験を行うのに最適である。しかもイオン蓄積リングではイオンは周回しているので何度も使うことができる。合流ビーム型実験の大きな特徴は、イオンの速度  $v_{\text{ion}}$  と電子の速度  $v_e$  を近づけることで、相対速度の大きさ  $v_{\text{rel}} = |v_e - v_{\text{ion}}|$  をいくらでも小さくできることである。すなわち、衝突エネルギーの小さい(原理的には、ゼロでも)ところでの実験をすることができる。電子とイオンの再結合は一般に衝突エネルギーの小さいところで大きな断面積をもつ。そこで、電子・イオンの再結合過程の研究はイオン蓄積リングを用いた実験にうってつけのものであることがわかり、まず原子イオン(特に、多価イオン)の再結合が調べられた。続いて分子イオンの解離性再結合の研究が始められ、1993年に三つのグループから初の結果が同時に発表された。今回紹介する論文はその一つである。

### 2. 分子イオンの解離性再結合

分子イオンが電子を捕まえて中性に戻る際の主要な過程は、解離を伴う再結合(以下 DR と略す)



である。これは分子を含むプラズマでは重要な過程の一つであるが、原子のプラズマでもイオンが中性化する際の主要なプロセスである。たとえば He プラズマにおいては、 $He^+$  が電子との衝突で直接中性化するのではなく、いったん  $He_2^+$  ができて、それが DR によって中性になるのが普通である。

田辺らは、当時の原子核研究所において加速器技術の開発のためにイオン蓄積リング TARN II を作って研究をしていた。これは原子核研究の将来計画である NUMATRON 計画の一部であり、TARN というのは Test Accumulation Ring for the Numatron Accelerator Facility の略である。当初の目的がほぼ達成されたとき、田辺らはこれを何か他の物理学的研究に使えないかと考えた [4]。いくつかの試み(その中には原子イオンの再結合も含む)の後、分子イオンの DR を研究することになった。当時物理学的に興味ある対象でありながら、定量的データに乏しかった  $HeH^+$  をとり

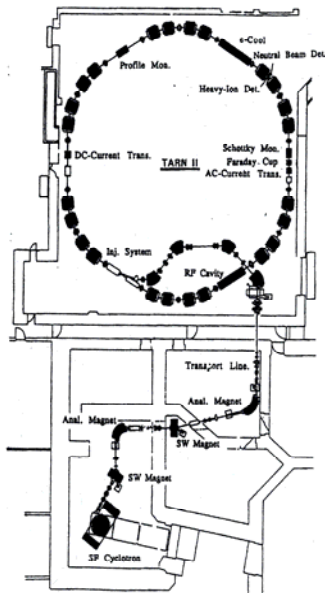


図1. TARNIIのレイアウト. 右上に電子冷却の装置(e-Cool)がある(文献 [4] より).

あげることにした。まったく同時にヨーロッパの二つのイオン蓄積リングでも、対象は違うが分子イオンの DR を研究していた。1993年1月25日号の Phys. Rev. Lett. には、世界最初のイオン蓄積リングによる分子イオンの DR の実験として、3編の論文が同時に掲載された [1,5,6]。

TARN II の概念図を図1に、それを用いて求められた  $HeH^+$  の再結合断面積を図2に示す [1]。周長 78 m のリングに 9.5 MeV のイオンを入射して周回させる。電子ビームと衝突させた後、生成された中性粒子を半導体固体検出器(SSD)で検出する。合流ビーム法のもう一つの利点は、生成された中性粒子は入射イオンとほぼ同じ高速で走っており、検出が容易なことである。当初イオンビームの寿命が短く、電子冷却が十分に働かないのでエネルギー分解能が悪く絶対値を決めることはなされていない。図2のエネルギーゼロの周辺のピークについては、従来のデータを超越するようなものは得られなかった。一方、ためしに衝突エネルギーを上げてみたところ、20-40 eV のあたりにこれまで予想されたことのない大きなピークが現れた。これは、 $HeH^+$  の励起状態を経由して起こる再結合過程として解釈され、新しい発見となった。その後、田辺らは、断熱膨張を利用した高度の電子冷却法を開発し、また真空度を高めてイオンビームの寿命を長くするなどして、衝突エネルギーについて高分解能(1 meV に達する)の実験を実現させた [7]。

田辺らは原子核実験が専門であり、原子衝突についてはほとんど何も知らない状態でこの研究

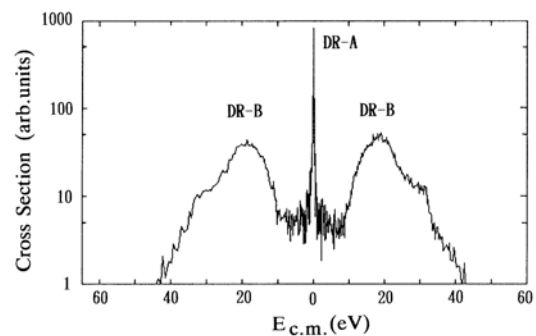


図2.  $HeH^+$  の解離性電子付着の断面積(相対値)。相対エネルギーが0のところと20 eV付近にピークがある(文献 [1] より)。

をスタートさせ、原子物理にとって貴重な成果を挙げた(研究開始当時の事情などは文献 [4] に詳しい)。その間、原子衝突の研究者はほんの一部の人を除いてこの研究に関心を寄せなかった。というより、ほとんど知らなかった。気がついて何か協力できないかということになったときには、核研が高エ研に吸収されることになって、それと共に TARN II はシャットダウンされることになってしまったのである。装置が装置だけに、TARN II はどこかの大学の実験室へ移して実験を続けることなどできなかった。

原子衝突の実験に加速器を用いることは古くから行われていた。しかし、そのほとんどは高速の衝突粒子を得るためや、放射光の光源として使われた。イオン蓄積リングの実験は、それらと違ってリングを衝突実験装置そのものとして使うものである。このような発想は原子物理屋からはなかなかでてこないものであろう。本実験はそのような観点でもユニークであり、さらには MeV のビームを使って衝突エネルギーが meV の実験をするところもおどろきである。

イオン蓄積リングを用いた DR の研究は、その後もヨーロッパのグループによって続けられ、イオンの内部状態依存性や、生成物の詳細な研究など、さまざまな成果が挙げられている。それらについては、最近相次いで出版された二つの総合報告に詳しい [8,9]。

### 3. 静電型イオン蓄積リング

イオン蓄積リングによる分子イオンの研究は、その後生体分子イオンを念頭に置いた大きな(重い)分子イオンの研究に発展しつつある。DNA やたんぱく質の分子と電子の衝突の研究が現在盛んに行われつつあるが、それと同時に生体分子イオンと電子の衝突にも興味もたれている。従来の磁場を用いるイオン蓄積リングでは、イオンが重くなるとそれに応じて磁場も強くしないといけないので、回せるイオンの重さに限界がある。ところが、静電場を使ってイオンを周回させる静電型イ

オン蓄積リングでは、原理的にどのように重いイオンでもまわすことができる。また装置もコンパクトになり、普通の実験室でも扱える。

つくばに移った田辺はこのことに気づいて小型の静電リングを作り研究を始めた [10]。これはデンマークにあるものに次いで世界で二番目のものである。これを用いて電子衝突によるたんぱく質分子イオンの解離過程が調べられた [11]。これは現在盛んに研究されている生体分子の解離による負イオンの生成実験と相補的になるもので、生体に対する放射線の作用の研究に貴重な情報を提供する。なおこのつくばでの研究に続いて、首都大学東京でも静電型イオン蓄積リングが建設され、研究が開始された [12]。イオン蓄積リングを用いた原子物理学の研究という世界的にみてもユニークな研究が、引き続きわが国で活発になされることは大変喜ばしいことである。

### 参考文献

- [1] T. Tanabe, I. Katayama, N. Inoue, K. Chida, Y. Arakaki, T. Watanabe, M. Yoshizawa, S. Ohtani, and K. Noda, Phys. Rev. Lett. 70, 422 (1993).
- [2] S. Datz, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B 24/25, 3 (1987).
- [3] R.A. Phaneuf, C.C. Havener, G.H. Dunn, and A. Müller, Rep. Prog. Phys. 62, 1143 (1999).
- [4] 田辺徹美 原子核研究 50, 101 (2006).
- [5] P. Forck, M. Grieser, D. Habs, A. Lampert, R. Repnow, D. Schwalm, A. Wolf, and D. Zajfman, Phys. Rev. Lett. 70, 426 (1993).
- [6] M. Larsson, H. Danared, J.R. Mowat, P. Sigray, G. Sundström, L. Broström, A. Filevich, A. Källberg, S. Mannervik, K.G. Rensfelt, and S. Datz, Phys. Rev. Lett. 70, 430 (1993).
- [7] T. Tanabe, I. Katayama, S. Ono, K. Chida, T. Watanabe, Y. Arakaki, Y. Haruyama, M. Saito, T. Odagiri, K. Hosono, K. Noda, T. Honma, and H. Takagi, J. Phys. B 31, L297

- (1998).
- [8] A.I. Florescu–Mitchell and J.B.A. Mitchell, Phys. Rep. 430, 277 (2006).
  - [9] N.G. Adams, V. Poterya, and L.M. Babcock, Mass Spectrom. Rev. 25, 798 (2006).
  - [10] 田辺 徹美 日本物理学会誌 60, 632 (2005).
  - [11] T. Tanabe, K. Noda, M. Saito, S. Lee, Y. Ito, and H. Takagi, Phys. Rev. Lett. 90, 193201 (2003).
  - [12] 東 俊行, 田沼 肇, 城丸春夫 放射線化学 81, 8 (2006).