

シリーズ
陽電子が拓く物質の科学



**THE ATOMIC COLLISION
SOCIETY OF JAPAN**

目次

シリーズ「陽電子が開く物質の科学」をスタートするにあたって	1
(「しょうとつ」第12巻6号-2015年11月号-掲載)	
第1回 ポジトロニウム-気体分子の相互作用	4
(「しょうとつ」第12巻6号-2015年11月号-掲載)	
第2回 陽電子・原子間相互作用と陽電子原子	17
(「しょうとつ」第13巻2号-2016年3月号-掲載)	
第3回 ポジトロニウム負イオン	27
(「しょうとつ」第13巻3号-2016年5月号-掲載)	
第4回 低エネルギー反水素生成のための低エネルギー陽電子	38
.....金井保之, Pierre Dupre, 檜垣浩之	
(「しょうとつ」第13巻5号-2016年9月号-掲載)	
第5回 低エネルギー陽電子を用いた電子-陽電子プラズマ研究	48
.....檜垣浩之, J. Horn-Stanja, E. V. Stenson, 齋藤晴彦, U. Hergenbahn,	
T. Sunn Pedersen, M. Singer, M. Dickmann, C. Hugenschmidt	
(「しょうとつ」第14巻2号-2017年3月号-掲載)	
第6回 陽電子消滅誘起イオン脱離	58
(「しょうとつ」第14巻4号-2017年7月号-掲載)	
第7回 原子・分子の陽電子束縛状態と対消滅率の第一原理計算	65
.....立川仁典, 北幸海, 小山田隆行, 高柳敏幸	
(「しょうとつ」第15巻6号-2018年11月号-掲載)	
第8回 陽電子寿命測定による固体絶縁体中の空孔サイズ評価	79
(「しょうとつ」第18巻4号-2021年7月号-掲載)	

シリーズ「陽電子が拓く物質の科学」をスタートするにあたって

長嶋泰之

東京理科大学理学部第二部 〒 162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3

ynaga@rs.kagu.tus.ac.jp

平成 27 年 10 月 1 日原稿受付

本号からシリーズ「陽電子が拓く物質の科学」がスタートする。このシリーズの趣旨を簡潔に説明してみたい。

1. はじめに

反物質の構成要素である陽電子は、通常物質中でも様々な振る舞いをする [1,2]。たとえば、金属結晶に入射すればバルク中で数 ps のうちに熱化し、その後金属中を熱的に動き回った後に金属中の電子(主に価電子)と対消滅して γ 線になる。この γ 線を検出すれば、価電子の運動についての情報を得ることができる。結晶中に空孔型の格子欠陥が存在すれば、そこに捕捉されてから対消滅することもある。気体中に入射した場合も、陽電子は原子や分子との散乱を繰り返してエネルギーを失い、その後原子・分子中の電子と対消滅する。エネルギー損失の過程で原子・分子から電子を奪い、陽電子と電子の束縛状態であるポジトロニウムを形成してやがて自己消滅することもある。陽電子を単色のビームにして気体中を透過させれば、陽電子-原子・分子間の散乱断面積が得られる。

この様に陽電子は物質との相互作用で様々な振る舞いを起こすが、それには、陽電子の消滅断面積が散乱断面積よりも遙かに小さいことが重要な役割を果たす。つまり、陽電子は物質中の電子と衝突してもなかなか対消滅せず、何度も衝突を繰り返した後にやがて対消滅する。数密度 n の電子ガス中の陽電子の対消滅率は $\pi r_0^2 cn$ と書き表すことができる。ここで r_0 は古典電子半径で $2.818 \times 10^{-15} \text{ m}$ とボーア半径よりも極めて小さな値である。金属中での陽電子寿命は 100 ps 程度である。この間に陽電子は、電子やイオンと何度も相互作用する。気体の場合では電子密度

が遙かに低いため、これよりもかなり長い寿命をもつ。その間に陽電子は、原子・分子と様々な相互作用をし、妖艶で多彩な振る舞いを見せるのである。

2. 近年の陽電子の研究

陽電子を用いた研究で問題になるのは、電子の場合と比べてビーム強度が極めて低いことである。しかしながら、電子には遠く及ばないものの、陽電子源に加速器からの高エネルギー電子の制動放射や原子炉からの γ 線の対生成を利用するなどして、次第に改善しつつある[3]。弱い陽電子源を使いながらも、逆にその特徴を生かして陽電子の特性を暴き出そうとする研究も行われている。

近年の陽電子素過程の研究として目を引くものには、次のようなものがある。

(1) 陽電子-原子・分子束縛状態

陽電子は分子と束縛状態を形成することがある。陽電子が分子の振動を励起するとともにエネルギーを失い、そのまま分子と束縛して分子中の電子と対消滅する過程が存在することも見いだされている[4]。振動励起のエネルギーとの比較から、陽電子と分子の束縛エネルギーが見積もられており、理論計算[5]との比較も行われている。原子との束縛や共鳴状態についても、理論計算が行われている[6]。

(2) ポジトロニウム-原子・分子相互作用

ポジトロニウム-原子・分子相互作用の研究のために、陽電子-原子・分子の電荷交換反応を

利用してポジトロニウムビームを生成し、ポジトロニウムの散乱実験がロンドン大学で行われている。ポジトロニウムは最も軽い中性原子と見なすことができ、その散乱実験の意義は大きい。近年、ポジトロニウム-原子・分子散乱の全断面積が、同じ速度を持つ電子と原子・分子散乱の全断面積に近い値になることが実験的に見出された[7]。それを契機としていくつかの理論的研究が始まっている[8]。また、ポジトロニウムビームを用いるのではなく、シリカエアロジェルに陽電子を入射してシリカ微粒子間の空隙中にポジトロニウムを生成してポジトロニウム-原子・分子相互作用を観測する実験も行われている。特に、Xe のような重い希ガス原子とのスピン-軌道角運動量相互作用が起こることが分かってきており、それに関する研究が進展している[9,10]。さらには、シリカエアロジェルを用いずに高圧気体中でポジトロニウムを生成し、その熱化を調べる研究も始まっている[11]。

(3) 反水素合成

反水素の合成は現在、複数のグループが欧州原子核研究機構 (CERN) でしのぎを削っており、そのなかで日本のグループの寄与が大きい。たとえばカस्प磁場を利用して生成した反水素をビームとして引き出すことに成功しており[12]、今後の展開が期待される。

(4) 陽電子と電子からなる束縛状態

陽電子と電子が1個ずつ束縛するとポジトロニウムになるが、1個の陽電子と2個の電子が束縛すればポジトロニウム負イオンが形成される。近年、効率の高いポジトロニウム負イオン生成法が開発され、この分野が進展してきている[13,14]。また、2個のポジトロニウムが束縛し合ったポジトロニウム分子の生成も確認されている[15]。

(5) 高励起ポジトロニウム

ポジトロニウムは水素原子様の束縛状態であり、無限個の励起状態が存在する。ポジトロニウムの励起状態に関する研究は、1S-2S 状態間のエネルギーの精密測定や $n = 18$ 程度までの励起に関する研究が行われてきている。最近になって、高励起状態のポジトロニウムに電場をかけてシュタルク効果を観測する実験が報告されている[16]。この手法をポジトロニウムのマニピュレー

ションに利用する試みも検討されている。

(6) 陽電子を用いた固体表面の研究

電子を数 10 keV に加速して固体表面にすれすれの角度で入射すると、反射高速電子線回折による像が得られ、これを用いれば表面の結晶構造解析が可能である。電子の代わりに陽電子を利用すると、陽電子のポテンシャルが結晶内部では真空中よりも高いため結晶表面第一層のみの情報を得ることが可能である[17,18]。最近になってこの研究がにわかには大きな注目を浴びている。また、陽電子を表面に入射するとポジトロニウムが放出され、ポジトロニウム源としての利用が可能であると同時に、そのポジトロニウムのエネルギー分布を測定することで表面の情報が得られるようになってきている。さらに、低速陽電子を $\text{TiO}_2(110)$ 表面に入射すると O^+ イオンが放出される現象が見いだされている[19]。この現象は Knotek と Feibelman の実験[20]との類似性から、表面近傍の原子の内殻が陽電子との対消滅によってイオン化され、さらにオージェ効果が起こって電氣的に不安定になり O^+ が放出されたと考えられる。ただし電子の場合とは異なり、入射陽電子のエネルギーに閾値がないという特徴がある。

(7) 固体中の細孔中にポジトロニウムが生成されると、その寿命、もしくは運動量分布から細孔のサイズを評価することが可能である。その理解が進んでいる[21]。

3. シリーズの概要

陽電子の素過程の研究分野では、我が国の研究者が大きく寄与する部分が多い。そこで今回のシリーズでは、上記研究の第一線で活躍されている方々に解説をお願いした。その内容(仮題)は次の通りである。

ポジトロニウム-気体分子の反応
ポジトロニウムを含む共鳴
反水素
ポジトロニウムによる細孔評価
ポジトロニウム負イオン
陽電子付着
陽電子消滅誘起イオン脱離

本シリーズが原子衝突学会の会員の皆さんに有益な情報を提供することを願って筆を置きたい。

参考文献

- [1] M. Charlton and J. Humberston, ‘Positron Physics’ (Cambridge) 2001.
- [2] 長嶋泰之“原子分子物理学ハンドブック”朝倉書店 (2012) 254.
- [3] J. R. Danielson, D. H. E. Dubin, R. G. Greaves and C. M. Surko, *Rev. Mod. Phys.* **87**, 247 (2015).
- [4] K. Wada *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **443**, 012082 (2013).
- [5] M. Tachikawa, Y. Kita and R. J. Buencker, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **13**, 2701 (2011).
- [6] T. Yamashita and Y. Kino, *J. Phys.: Conf. Ser.* **618**, 012009 (2015).
- [7] S. J. Brawley, S. Armitage, J. Beale, D. E. Leslie, A. I. Williams and G. Laricchia, *Science* **330**, 789 (2010).
- [8] I. I. Fabrikant and G. F. Gribakin, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 243201 (2014).
- [9] K. Shibuya, T. Nakayama, H. Saito and T. Hyodo, *Phys. Rev. A* **88**, 012511 (2013).
- [10] K. Shibuya, Y. Kawamura and H. Saito, *Phys. Rev. A* **88**, 042517 (2013).
- [11] Y. Sano, Y. Kino, T. Oka and T. Sekine, *J. Phys.: Conf. Ser.* **618**, 012010 (2015).
- [12] N. Kuroda *et al.*, *Nat. Comm.* **5**, 3089 (2014).
- [13] K. Michishio, T. Tachibana, H. Terabe, A. Igarashi, K. Wada, T. Kuga, A. Yagishita, H. Hyodo and Y. Nagashima, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 153401 (2011).
- [14] Y. Nagashima, *Phys. Rep.* **545**, 95 (2014).
- [15] D. B. Cassidy, T. H. Hisakado, H. W. K. Tom and A. P. Mills, Jr., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 133402 (2012).
- [16] T. E. Wall, A. M. Alonso, B. S. Cooper, A. Deller, S. D. Hogan and D. B. Cassidy, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 173001 (2015).
- [17] A. Kawasuso and S. Okada, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 2695 (1998).
- [18] Y. Fukaya, I. Mochizuki, M. Maekawa, K. Wada, T. Hyodo, I. Matsuda and A. Kawasuso, *Phys. Rev. B* **88**, 205413 (2013).
- [19] T. Tachibana, T. Hirayama and Y. Nagashima, *Phys. Rev. B* **89**, 201409(R) (2014).
- [20] M. L. Knotek and O. J. Feibelman, *Phys. Rev. Lett.* **40**, 964 (1978).
- [21] K. Wada and T. Hyodo, *J. Phys. Conf. Ser.* **443**, 012003 (2013).