

11-521 エキゾチックなビームによる原子物理学と反物質科学の開発的研究

Developmental research of atomic physics and antimatter science with exotic beams

東京大学名誉教授

山崎 泰規

理化学研究所基幹研究所上席研究員

Yasunori Yamazaki

略 歴 昭和24年9月8日生

- ◇ 48年 大阪大学理学部物理学科卒業
- ◇ 50年 大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻修士課程修了
- ◇ 53年 大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士課程修了(工学博士)
日本学術振興会奨励研究員
東京工業大学原子炉工学研究所助手
- ◇ 63年 東京大学教養学部物理学教室助教授

- 平成 5年 東京大学教養学部物理学教室教授
- ◇ 8年 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻基礎科学系教授
 - ◇ 9年 理化学研究所原子物理研究室主任研究員(併任)

平成15年 独立行政法人理化学研究所中央研究所原子物理研究室主任研究員(併任)

- ◇ 20年 独立行政法人理化学研究所基幹研究所山崎原子物理研究室主任研究員(併任)

- ◇ 22年 東京大学大学院 退職
独立行政法人理化学研究所基幹研究所山崎原子物理研究室上席研究員

受賞歴 平成22年 論文9と10の成果がPhysics World誌(英国物理学会)でBreak-throughs of the year 2010の第一位。

- ◇ 23年 松尾財団宅間宏記念学術賞

業績の概要

山崎泰規博士は我が国を代表する原子物理実験研究者であり、40年余にわたり世界最先端の原子物理研究を展開してきている。とりわけ、様々なエキゾチックビームの開発と操作を軸に、(1) 冷反水素による反物質科学、(2) 低速多価イオンと表面との相互作用、(3) 高速多価イオンの結晶通過による疑似単色X線の生成と高分解能分光、(4) 特異なマイクロビーム生成法の開発と生細胞内の微小領域照射等、基礎物理学から放射線生物学にわたる多様な分野で、成果を上げている。

137億年前に起こったとされているビッグバンでは、物質と反物質が等量生成されたと考えられているが、この宇宙は物質で満たされ、反物質はどこにも見出されない。山崎博士の冷反水素研究は、この謎を視野におきつつ、最も基本的な物理法則であるCPT対称性を高精度でテストすることを目指している。これは我々の自然理解/認識の根幹に関わる重要課題であると同時に、基礎物理学への低エネルギー側からのアプローチという意味でもユニークである。自然の囁きを聴く研究とも言える。高精度分光を実現するためには、稀少な反水素の利用効率を格段に上げる必要がある。

山崎博士は、(1) 集束された偏極反水素ビームを生成し、マイクロ波分光が可能となるカスプトラップ法を考案・開発し、反水素合成を実現するとともに、(2) 八重極コイルを持つ磁気瓶を用い、反水素の捕捉を実現して、レーザー分光への道を拓いた。さらに、超低速反陽子ビームを開発してHe、Ne、H₂等との衝突実験を実現した。また、反物質(反水素)と物質(地球)の重力相互作用にも研究を拓いている。

山崎博士の多彩な研究を貫くキーワードは、エキゾチックビームの開発と操作ととらえることができる。以下、冷反水素研究を中心に、その業績を記す。冷反水素の合成・操作・分光の各段階は、原子物理学、物理化学、非中性プラズマ物理学、陽電子科学、加速器科学など、多岐にわたる分野の知見・ノウハウを必要とし、守備範囲の広い山崎博士に適した研究分野となっている。

1. 反水素ビーム生成法の開発

山崎博士はまず、カスプトラップ法と呼ばれる反水素合成・ビーム取り出し法を開発した。これは、スピン偏極した反水素ビームを選択的に、且つ、比較的高い温

度(数10K)で集束し、磁場の影響がない領域に取り出すことができるという画期的な特長を持っている²⁾。山崎博士はさらに、カスプトラップ法が基底状態にある反水素生成に大変適していることを理論的に示すとともに⁴⁾、超伝導カスプ磁場の設計・製作、コンパクトな極低温ボアの開発を進め、電子によるテスト実験を経て、2010年末、反水素原子の大量合成に成功した¹⁰⁾。高分解能マイクロ波分光の実現に大きく道を拓いた。

なお、カスプトラップで採用しているアンチヘルムホルツコイルは、軸対称な磁場分布を持ち、反水素合成に必要な反陽子や陽電子などの荷電粒子を大量、かつ、安定に閉じ込め、操作・混合することができる^{2, 10)}。このように様々な長所を持つ実験法を考案した先見性と、それを現実に稼働させた研究遂行力は、高く評価できる。

2. 反水素の磁気トラップへの捕捉

山崎博士は同時に、冷反水素の磁気瓶への捕捉実験を精力的に推進した。通常の原子捕捉には四重極コイルとミラーコイルを組み合わせた磁気瓶が知られているが、これは磁場軸付近における磁場の回転一様性が悪く、荷電粒子(反陽子や陽電子)を安定に蓄積することが困難であった。この困難は、八重極コイルを採用することで大幅に改善された。一方、八重極磁気瓶は超伝導コイルを利用しても $\sim 0.5\text{K}$ 程度の反水素しか捕捉できず、極低温の反水素合成が必須であった。山崎博士らは、蒸発冷却法や自動共鳴法¹¹⁾を駆使し、2010年末には38個の反水素捕捉を成功させた⁹⁾。これは反水素のレーザー分光実現に向けた重要な一歩であると位置づけることができる。

3. 反陽子操作法の開発

山崎博士は反陽子の効率的操作技術を開発し、他グループより10-100倍高い蓄積効率を実現し³⁾、反陽子の電子冷却過程を実時間観測する手法を開発した。さらに、荷電粒子の動径回転圧縮を様々な手法により実現し⁶⁾、100eV程度の超低エネルギー単色DCビームの生成にも成功した。これにより、超低エネルギー反陽子とヘリウム原子や水素分子との衝突実験が可能になり、理論的予測から大きく外れる実験結果を得ている⁸⁾。大変簡単な衝突系でも、衝突ダイナミックスに関わる理解が極めて限られたものであることを明らかにした。

以上の研究成果は冷反水素研究にとって大きな弾みとなり、例えば、以前から計画されていた超低速反陽子リング(ELENA)の建設をCERN(欧州原子核研究機構)の評議会が認める契機の一つとなった。ELENAは、利用可能な反陽子数を大幅に増加させ、今後の反物質研究をさらに加速させる。これらの研究成果は関係学会でも高く評価され、例えば原子衝突分野最大の国際会議であるICPEACのPlenary talk(2011年7月)をはじめ、様々な国際会議に招聘されている。冷反物

質研究は、社会一般からの関心も高く、我が国はもとより世界各国のテレビ、ラジオ、新聞、雑誌等々でも大きく取り上げられた。山崎博士は上記成果のいずれにも貢献した世界で唯一の研究者である。

業績に関する主要論文

- 1) S. Ninomiya, **Y. Yamazaki**, et al., "Stabilized hollow ions extracted in vacuum", Phys.Rev.Lett. 78 (1997) 4557-4560.
- 2) A. Mohri and **Y. Yamazaki**, "A possible new scheme to synthesize antihydrogen and to prepare polarized anti-hydrogen beam", Europhys. Lett. 63 (2003) 207-213.
- 3) N. Kuroda, **Y. Yamazaki**, et al., "Confinement of a large number of antiprotons and production of an ultra-slow antiproton beam", Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 023401-4.
- 4) T. Pohl, H. R. Sadeghpour, Y. Nagata, and **Y. Yamazaki**, "Cooling by Spontaneous Decay of Highly Excited Anti-hydrogen Atoms in Magnetic Traps", Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 213001.
- 5) Y. Iwai, **Y. Yamazaki**, et al., "Ion irradiation in liquid of $\sim \mu\text{m}^3$ region for cell surgery", Appl. Phys. Lett. 92 (2008) 023509.
- 6) N. Kuroda, **Y. Yamazaki**, et al., "Radial compression of antiproton cloud for production of intense antiproton beams", Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 203402.
- 7) Y. Nakai, **Y. Yamazaki**, et al., "Dressed Atoms in Flight through a Periodic Crystal Field: X-VUV Double Resonance", Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 113201.
- 8) H. Knudsen, **Y. Yamazaki**, et al., "Target Structure Induced Suppression of the Ionization Cross Section for Very Low Energy Antiproton-Hydrogen Collisions", Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 213201.
- 9) G. B. Andresen, **Y. Yamazaki**, et al., "Trapped anti-hydrogen", Nature 468 (2010) 673-676.
- 10) Y. Enomoto, **Y. Yamazaki**, et al., "Synthesis of Cold Antihydrogen in a Cusp Trap", Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 243401.
- 11) G. B. Andresen, **Y. Yamazaki**, et al., "Autoresonant excitation of antiproton plasmas", Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 025002.
- 12) N. Okabayashi, K. Komaki, and **Y. Yamazaki**, "Enhanced Sputtering from the F/Si (100) Surface with Extraction of the Surface Bond Direction", Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 113201.