



キーセンテンス：自然のささやきを聞く。荷電粒子と絶縁体の奇妙な相互作用。

キーワード：反陽子、反水素、多価イオン、荷電粒子 絶縁体相互作用、生細胞サージェリー

研究目的

当研究室は、反水素、反陽子原子、不安定原子核原子（イオン）などのエキゾチックな衝突生成物の物理的・化学的・分光学的性質の解明を通じて、その生成ダイナミクスを理解し、さらに、このようにして得た原子物理学・原子衝突の知見をもとに、放射線物理学、素粒子物理学、原子核物理学、表面科学、非中性プラズマ物理学、物理化学にわたる学際的研究を進めることを目的としている。全体を統括するキーワードは“自然のささやきを聞く”で、本来高いエネルギーに生成される様々なエキゾチックな荷電粒子（反陽子、不安定原子核、多価イオン、陽電子等）を、これまでより数桁高い効率で減速・捕捉する先端技術を開発し、それによって高い精度を持った実験的研究を可能にしている。例えば、極低温偏極反水素ビーム生成と超微細分裂の高精度測定、および、それによる、CPT対称性の高感度テスト、反陽子原子生成過程の解明と衝突ダイナミクス研究への新たなアプローチ、不安定原子核イオンのレーザー分光とマイクロ波分光による不安定原子核内の荷電分布・磁化分布決定、低速多価イオンによるナノドット生成、非中性反物質（反陽子、陽電子）プラズマの研究、荷電粒子と絶縁体の相互作用過程の研究を進めている。さらに、先細ガラスキャピラリーによる各種荷電粒子のナノビーム化と生細胞サージェリーをはじめとする、ウェットな標的と荷電粒子の相互作用研究を進めている。

1. 反物質利用技術開発研究

本研究は、基礎科学研究「物質の創成研究」としても進められている。[参照：基礎科学研究「物質の創成研究：反物質利用技術開発研究」]

(1) カスプトラップによる反水素生成（榎本^{*2}、毛利^{*1}、斎藤^{*3}、永田^{*2}、満汐^{*4}、今尾^{*6}、金井、黒田^{*3}、松田^{*3}、山崎）

カスプ磁場により、陽電子と反陽子を同時に閉じこめ、それによって生成されるスピン偏極した反水素を捕捉、かつ、冷却し、反陽子の磁気モーメントを高精度決定して、CPT対称性をこれまでにない精度でテストする。その第一歩としてコールドボア中への反陽子の大量、高効率輸送、冷却、陽電子との同時閉じ込め等に成功した。

(2) 反陽子雲の回転電場圧縮（黒田^{*3}、鳥居^{*3}、毛利^{*1}、永田^{*2}、金井、松田^{*3}、山崎）
大量捕捉、冷却した反陽子雲の動径分布コントロールは反水素生成をはじめ様々な目的の基礎となるテクニックであるが、これまで成功例がなかった。我々は、はじめて、この反陽子雲の回転圧縮に成功した。

(3) 反陽子・反水素消滅位置3D検出器の開発（黒田^{*3}、永田^{*2}、今尾^{*6}、鳥居^{*3}、金井、松田^{*3}、山崎）
反陽子、および、反水素消滅位置の精度良い決定のため、15mm幅のプラスチックシンチレータを64本縦横に組み合わせた消滅位置3次元検出器をBresciaの研究グループと共同で開発した。カスプトラップ中で冷却時に消滅する反陽子を用いて検出器の構成を行い、ほぼ予定通りの分解能をえた。

(4) 反陽子と電子雲の同時回転圧縮と反水素生成・捕捉過程の研究（藤原^{*3}、山崎）
多重極反水素トラップ中に陽電子と反陽子を同時に捕捉し、反水素合成し、さらに様々な条件下での捕捉を試みた。また、室温からの輻射が電子プラズマの温度を急激に上げることも実験的に確認した。冷たい反水素を合成する際の重要な情報が得られた。

(5) 反陽子とヘリウム原子の衝突イオン化過程の研究（永田^{*2}、鳥居^{*3}、豊田^{*2}、黒田^{*3}、金井、小牧^{*1}、山崎）

大量の反陽子冷却を実現したことで、数 keV 領域のイオン化実験が可能になった。数 10keV から数 keV 領域でのヘリウム原子のイオン化を実行した。このエネルギー領域は以前に報告例があり、信頼性が高いと考えられている多くの理論計算と矛盾した結果を与えていた。我々が得た結果は最新の理論計算と無矛盾なもので、長年にわたる論争に終止符をうつことになった。さらに、250eV という未踏のエネルギー領域でも実験を行い、予備的ではあるが、断面積をえた。

2. 低速多価イオンの応用に関する研究

本研究は、基礎科学研究「エキゾチック量子ビーム研究」の一環として進められている。[参照：基礎科学研究「エキゾチック量子ビーム研究」]

(1) 低速多価イオンによる表面改質効果の研究（O'Rourke^{*6}、Carrasco^{*7}、Esaulov^{*3}、山崎）
低速多価イオンをチオール自己組織化単分子膜に照射し、その際形成されるナノクレーターを観測し、また、照射時に放出される2次分子イオン断片を分析することで、多価イオンと高分子膜との相互作用

を研究している。チオール中のC H 2 鎖の長さによる最外部のCH3ボンドの向きとスパッタイルドの相関を研究している。

(2)低速多価イオンのPET キャピラリーによるビームガイド効果(金井, 星野^{*3}, 神原, Stolterfoht^{*3}, 山崎)

多価イオンを絶縁体キャピラリーに照射すると、数百秒程度の時定数で多価イオンの通過電流が増加する。通過電流や通過イオンへのガイド効果(偏向方向)を入射電流の関数として測定し、これらの現象が照射された総電荷によりスケールできること、さらに、自己組織化帯電によりキャピラリー内壁に生成される電位分布と直接関わっていることが明らかになった。さらに、偏向方向がビーム照射と共にダイナミックに変化することを見出した。

(3)低速多価イオンビームと先細ガラス管との相互作用の研究とナノサイズビーム生成(池田, 金沢^{*2}, 岩井^{*7}, 小島, 星野^{*3}, 山崎)

数keVから100keV程度の多価イオンビームを先細ガラス管(長さ約5センチ、入口内径0.8mm、出口内径1 μ m程度)に入射し、出口内径の多価イオンマイクロ(ナノ)ビームを得た。これは、(4)と同様、入射ビームによるガラス管内壁の自己組織化帯電によるが、ナノサイズの荷電ビームを生成する全く新しい手法になると注目している。

(4)低速多価イオンビームのガラス板対通過と自己組織化帯電(池田, 小野田, Vokhmyanina^{*8}, Pokhil^{*3}, 岩井^{*7}, 小島, 山崎)

低速多価イオンが2枚のガラス平板を重ねて作った2次元的な広がりをもつ隙間を通過すること、面と垂直方向のみならず、面内方向にもガイディング効果を持つことを見いだした。特に、この面内ガイディング効果は常識的には考えられない興味深い現象で、ある種の絶縁体-金属転移がガラス表面上に引き起こされているのではないかと考えられる。物理機構の解明を急いでいる。

3. 陽電子マニピュレーション研究

本研究は、基礎科学研究「エキゾチック量子ビーム研究」の一環として進められている。[参照:基礎科学研究「エキゾチック量子ビーム研究」]

(1)多価イオンビームの電子プラズマ冷却(大島^{*3}, 金井, 中井, 山崎)

ECR イオン源から供給される多価イオンを高密度電子プラズマ中に導き、多価イオンを電子冷却した。価数の自乗に比例して冷却速度が上がり、クーロン散乱による冷却であることが明確に示された。これを元に、シミュレーションを行い、多価イオンの実際的な冷却法として電子冷却と陽電子冷却を併用した2段階冷却の優れていることを明らかにした。これは、電子冷却と抵抗冷却の組み合わせ検討している他グループへもインパクトがあると期待される。

(2)電子プラズマの高密度蓄積(Tarek^{*7}, 大島^{*3}, 山崎)

超高真空中の高磁場領域への連続ビーム入射と言う荷電粒子蓄積にとっては大変困難な条件下で大変効率の高い蓄積法を開発した。トラップ長さ、深さ、入射電流等を変え蓄積の様子をつぶさに観察することにより、この電子蓄積が入射ビームとトラップの反対端で反射されたビームとの相互作用、及び、入射ビームと蓄積された電子の相互作用という、2つの機構からなっていることを明らかにした。いずれもこれまで知られていない蓄積機構である。

(3)バッファーガス型小型陽電子蓄積装置の開発(今尾^{*6}, 下山^{*2}, Mohamed^{*7}, 満汐^{*2}, 金井, 山崎)
従来の多段式バッファーガス冷却法は装置が大規模で、実用上様々な問題がある。ここでは、陽電子源を超伝導ソレノイド中に設置し陽電子の捕集効率を飛躍的に高めた高効率陽電子蓄積法を開発を進めている。

4. 高速荷電粒子の先細ガラス管によるビーム収束

(1)先細蓋付きガラス管によるMeVナノサイズイオンビームの生成と、液層中局所領域照射への応用(岩井^{*7}, 池田, 小島, 根岸^{*3}, 成沢^{*3}, 前嶋, 今本, 山崎)

MeV領域の“高速”軽イオンを先細ガラス管に入射すると、小角散乱とエネルギーロスを繰り返しつつ、1-2桁高いビーム密度を持ったナノビームが得られる。このガラス管先端に薄い膜(100nm-1 μ m)を取り付け、液相中の任意の3次元局所領域に高密度のエネルギー付与ができる手法を開発した。現在、生細胞内の小器官を選択的に照射し、cell surgeryとも呼べる新しい研究領域の立ち上げを進めている。既に、蛍光修飾されたHeLa細胞核の選択的部分的褪色操作には成功した。

(2)ガラスチューブによるミュオンビーム密度の増大効果(池田, 小島, 岩井^{*7}, 山崎, 松田^{*3}, 友野^{*5}, 石田, 松崎, 岩崎)

円錐台形のガラスチューブを用い、ミュオンビームに対する収束効果を調べた。実験は理研RAL支所において、岩崎先端中間子研究室との共同研究として進められた。ビームライン出口で数cmの直径を持つ数10MeV/cのミュオンビームに対し、長さ10cm~40cm、入口径約5cm、出口径0.3~2cmという円錐形ガラスチューブを用いたところ、ビーム密度が約1.5倍になったことが確かめられた。シミュレーションによれば、この密度増大効果は、原子番号の大きな物質をチューブの材料とすることにより、さらに大きくなることが予想されている。ミュオンビームの効率的利用に簡便かつ大変有力な手段を提供すると期待される。更なる最適化を進めている。

5. RFIB 法の開発と短寿命原子核構造の研究

(和田, 高峰^{*5}, Schury^{*7}, 園田^{*5}, 片山^{*3}, 岡田^{*3}, 小島, 金井, 山崎, 大谷^{*3}, 飯村^{*3}, Wollnik^{*3}, Schuessler^{*3}, 吉田, 久保)

重イオン加速器施設における入射核破砕片分離器によって供給されるあらゆる元素の高エネルギー不安定原子核ビームを効率良く減速冷却し、汎用の低速不安定核ビームを生成する施設(SLOWRI)の開発

を進めている。そのオンライン試験装置を利用して不安定ベリリウム同位体のレーザー分光から、超微細構造の精密測定、荷電半径の導出に成功した。さらに、低速RIビームを利用する質量分析器、共線レーザー分光装置の開発も行っている。

(1) 低速不安定核ビーム生成法開発

これまでプロトタイプ装置を使って理研加速器施設のRIPS装置からの1GeVビームの減速冷却機構の技術開発してきたが、RIビームファクトリにおける本施設のための設計をすすめた。とりわけ、不純物を除去するための冷凍型セル、大強度ビームのための壁面RFカーペットの検討をすすめた。

(2) 不安定Be同位体のレーザー分光

Beの不安定同位体 ${}^7\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^{11}\text{Be}$ をオンラインでイオントラップ中に捕集し、レーザー冷却によって1 μeV 以下に冷却した。これは運動エネルギーを15桁減少させたことに対応する。レーザー冷却された ${}^7\text{Be}^+$, ${}^{11}\text{Be}^+$ イオンに対するレーザーマイクロ波2重共鳴法によって基底準位の超微細構造定数 Δ をそれぞれ、-742.7728(43) MHz, 2677.308(2) MHzと決定した。この値より、超微細構造異常を無視できる範囲内で核磁気モーメントを導出し、-1.39928(2) n.mおよび-1.6812(5) n.mを得た。

さらに ${}^{7,9,10,11}\text{Be}^+$ イオンの、 $2S_{1/2}$ - $2P_{3/2}$ 準位の転移エネルギーをレーザーレーザー2重共鳴分光法によって 10^{-10} の精度で測定し、Be同位体の荷電半径を決定した。磁気半径を導出するために、核磁気モーメントを直接測定する準備も進行している。

6. Li-like Uイオンと単結晶シリコン薄膜との相互作用による干渉性共鳴励起 (高野^{*4}、池田、金井、中野^{*2}、東^{*3}、山崎)

Li様のUイオンを単結晶シリコン薄膜に通過させ、結晶場に起因する振動場に対応する擬光子でイオンの電子状態を共鳴的に励起する。その共鳴幅はイオンのエネルギーが上がり、結晶通過中のエネルギー損失が小さくなるにつれ、狭く、従って、より高分解能の分光ができることになる。本研究では $1s^2 2s_{1/2} - 1s^2 2p_{3/2}$ 遷移に注目して、X線によらない初めての高分解能分光を目指している。

*1 研究嘱託、*2 ジュニア・リサーチ・アソシエイト、*3 客員研究員、*4 研修生、*5 基礎科学特別研究員、*6 訪問研究員、*7 協力研究員、*8 実習生

Key Sentence : Listen to the whisper of nature. Exotic interaction of charged particles and insulating material.

Key Word : antiproton, antihydrogen, highly charged ions, charged particle-insulator interaction, living cell surgery

Purpose of Research : Studies on physical, chemical, and spectroscopic properties of exotic collision products such as antihydrogen atoms, antiprotonic atoms, unstable nuclear atoms, provide information on the production mechanisms. Employing the knowledge so obtained, the atomic physics laboratory aims at making interdisciplinary research involving radiation physics, elementary particle physics, nuclear physics, surface science, non-neutral plasma physics, and physical chemistry. The key word is "listen to the whisper of nature". For this purpose, we develop various cooling techniques of antiprotons, unstable nuclei, highly charged ions, and positrons. Major subjects are (1) syntheses of spin-polarized ultra-cold antihydrogen beam and high precision measurements of hyperfine splitting, and the test of CPT symmetry, (2) elementary process of antiprotonic atom formation, (3) laser- and microwave-spectroscopy of unstable nuclei, and the determination of charge- and magnetization-distribution in the nuclei, (4) study of non-neutral antimatter plasma, (5) interaction of charged particles with insulators, and (6) nano-beam formation with tapered glass capillaries, and its application to living cell surgery.

1 . Antimatter science

We have been developing a so-called "cusp trap" to synthesize antihydrogen atoms to make a stringent test of the CPT symmetry. The cusp trap consists of an anti-Helmholz superconducting coil and a multi-ring trap. Because the magnetic field so prepared has axial symmetry, the ingredients of antihydrogen atoms, i.e., antiprotons and positrons, can be stably stored and can even be well-controlled. Actually, an electron plasma was stably stored in a so-called spindle cusp region for more than several thousands seconds, and the electron plasma was also compressed.

A large number of antiprotons were successfully transported from the antiproton catching trap, stored and cooled.

A liquid He free superconducting magnet was designed and constructed. It was successfully

connected to the RFQD (radio frequency quadrupole decelerator). Actually, we have succeeded to store 10^7 antiprotons, which renewed the world record we had. The antiprotons so stored were extracted as DC as well as pulsed beams. Synthesis of antihydrogen atoms have been studied also with a so-called multipole magnet.

2 . Application of slow highly charged ions

A highly charged ion (HCI) has a large potential energy and is accompanied with a strong electric field. Using this unique property, we have been studying formation mechanisms of nano-structures and ultra-sensitive elemental analysis of adsorbed atoms. Auger electrons emitted when slow HCIs passed through a metallic micro capillary target were measured for the first time. The meta-stable state ($1s2s2p$) 4P was clearly identified, which had been indicated from a coincidence measurements between K-X-ray and final charge states.

When a slow HCI beam is injected along the axis of insulating multi capillary, it is guided along the direction of the capillary even when the capillary is tilted against the beam direction by more than several degrees. Such a guiding effect was studied for a wide range of the incident beam current (several to several tens pA). The time evolution of the transmitted current and the deflection angle were found to be scaled by the deposited charge (= ion currents x irradiated time). This phenomenon can be explained by the growth of the charged patch by the ion beam in a self-organized manner.

Slow HCI beams of several keV to 100keV were found to pass a tapered single-glass capillary (5cm long, inlet and outlet inner diameters of 0.8mm and $\sim 1\mu\text{m}$, respectively). This could provide a universal way to prepare a nano-size beam of charged particles. It was further found that a slow HCI beam can pass a gap of a pair of flat glass plates separated by 0.1mm, and is guided not only perpendicular to the plates but also along the plates. The study of the guiding effects for a tapered glass capillary has also started for positron beam.

A similar guiding and focusing effect was also studied for 54-81MeV/c muonbeams using tapered glass tubes (10-40 cm long, inlet and outlet inner diameters of 5cm and 0.5-2 cm). The density of the muon beam was actually enhanced more than 50%. A numerical simulation successfully reproduces the above observation and further predicts the enhancement of more than 100% when Cu or Au tubes are employed. The confirmation experiment is in progress.

We have developed a tapered glass capillary with a thin window at the top, which enables to inject a nano-size beam into a liquid target without affecting the accelerator vacuum. This technique is expected to open a new field of research like a "living cell surgery".

Study on electronic and structural control of solid surfaces in nano-scale by highly charged ion irradiation or atmospheric plasma system has been performed for novel nano-materials. It was found that nano/micro structures with unique shape were formed at substrate surface, resulting from nano/micro-melting of electrode surface reacted with atmospheric plasma. Surface processes and control of formed feature have been being studied.

3. Positron manipulation

The development of a compact positron accumulation scheme is in progress, where the positron source and the moderator are all in a superconducting solenoid. In order to realize positron cooling of HCIs, positrons have been successfully accumulated in a multi-ring trap (MRT) employing high-density electron plasma as an energy degrader. The accumulation efficiency achieved here is more than 30 times higher than the best value ever achieved by other techniques under ultra high vacuum conditions. It was further confirmed that the stacking technique works, guaranteeing this UHV scheme can be applied in various fields of science including antihydrogen synthesis.

4. Development of RF ion guide and precision spectroscopy of trapped radioactive Be ions

Development of a universal slow and trapped RI-beam facility (SLOWRI) at RIKEN RIBF using RF ion guide is in progress. Using a prototype setup, precision laser and microwave spectroscopy experiments for Be isotopes has been performed aiming at studies of nuclear charge and magnetization radii of neutron halo nuclei. Developments of other experimental devices, a multi-reflection time-of-flight mass spectrograph and a collinear fast laser spectroscopy apparatus, are also in progress.

(1) Development of slow RI beam production method

A prototype setup has been stably used to decelerate 1 GeV RI-beams from RIKEN fragment

separator RIPS. Design works for an advanced RF ion guide gas cell which will be capable to cool cryogenic temperature to eliminate contaminant ions as well as to accept high intensity beams with an RF curtain.

(2) Laser spectroscopy of radioactive Be isotopes

Radioactive Be isotopes of ${}^{7,10,11}\text{Be}^+$ were trapped and laser cooled in an ion trap down to 1 μeV which corresponds to a factor of 10^{-15} reduction in the kinetic energy of ions. Laser-microwave double resonance spectroscopy was performed for the laser-cooled ${}^{7,11}\text{Be}^+$ ions and the hyperfine constants were determined to be $A_7 = -742.77228(43)$ MHz and $A_{11} = -2677.308(2)$ MHz, respectively. The nuclear magnetic moments of them were also deduced from the constants within the accuracy of possible hyperfine anomaly to be $\mu_7 = -1.39928(2)$ nm. and $\mu_{11} = -1.6812(5)$ nm, respectively. The optical transition ($2S_{1/2} - 2P_{3/2}$) energies of ${}^{7,9,10,11}\text{Be}^+$ ions were also measured with laser-laser double resonance spectroscopy and the charge radii of these isotope were determined. Direct measurements of the nuclear magnetic moments with high accuracies, which is required to study the magnetization radius, had been tested with ${}^9\text{Be}^+$ ions and will be applied for ${}^{7,11}\text{Be}^+$ ions as well.

Head

山崎 泰規 Yasunori Yamazaki

Members

Marcos Ivan Flores Carrasco

Tarek Ali Mohamed Hassan

池田 時浩 Tokihiro Ikeda

岩井 良夫 Yoshio Iwai

金井 保之 Yasuyuki Kanai

小島 隆夫 Takao Kojima

大山 等 Hitoshi Oyama

Peter Henry Schury

和田 道治 Michiharu Wada

Special Postdoctoral Researchers

園田 哲 Tetsu Sonoda

高峰 愛子 Aiko Takamine

Visiting Members

粟屋 容子 Yohko Awaya

東 俊行 Toshiyuki Azuma

Joachim Burgdorfer

Jorg Eichler

榎本 嘉範 Yoshinori Enomoto

Vladimir Alexandrovitch Esaulov

藤原 真琴 Makoto Fujiwara

檜垣 浩之 Hiroyuk Higaki

星野 正光 Masamitsu Hoshino

胡 木宏 Muhong Hu

市村 淳 Atsushi Ichimura

五十嵐 明則 Akinori Igarashi

飯村 秀紀 Hideki Iimura

今尾 浩士 Hiroshi Imao

伊藤 陽 Yo Ito

伊藤 秋男 Akio Itoh

片山 一郎 Ichirou Katayama

木村 健二 Kenji Kimura

北島 昌史 Masashi Kitajima

小泉 哲夫 Tetsuo Koizumi

小牧 研一郎 Ken-ichirou Komaki

小割 健一 Ken-ichi Kowari

黒田 直史 Naofumi Kuroda

Vladimir Lioubimov

丸山 耕一 Kouichi Maruyama

松澤 通生 Michio Matsuzawa

宮寺 晴夫 Haruo Miyadera

毛利 明博 Akihiro Mohri

本橋 健次 Kenji Motohashi

永嶺 謙忠 Kanetada Nagamine

中村 信行 Nobuyuki Nakamura

大谷 俊介 Shunsuke Ohtani

岡田 邦宏 Kunihiro Okada

大島 永康 Nagayasu Oshima

大塚 昭弘 Akihiro Otsuka

Patrice Perez

Lukas Pichl

Grigory Pavlovich Pokhil

坂口 修一 Syuiti Sakaguti

坂井 昭夫 Akio Sakai

Reinhold Hans Schuch

Hans A Schuessler

Vyacheslav Anatolyevich Shchepunov

島倉 紀之 Noriyuki Shimakura

島村 勲 Isao Shimamura

Nikolaus Stolterfoht

数納 広哉 Hiroya Suno

田中 宏幸 Hiroyuki Tanaka

鳥居 寛之 Hiroyuki Torii

Lokesh Chandra Tribedi

土田 秀次 Hidetsugu Tsuchida

上田 一之 Kazuyuki Ueda

Victor Varentsov

Tieshan Wang

渡部 力 Tsutomu Watanabe

Hermann Wollnik

柳下 明 Akira Yagishita

Ya-ming Zou

Trainees

金澤 悠 Yuu Kanazawa

吉良 健太郎 Kentaro Kira

満汐 孝治 Koji Michishio

中野 祐司 Yuji Nakano

緒方 惟光 Koremitsu Ogata

下山 拓也 Takuya Shimoyama

高野 靖史 Yasushi Takano

豊田 寛 Hiroshi Toyoda

Assistant and Part-timer

金澤 悠 Yuu Kanazawa

吉良 健太郎 Kentaro Kira

満汐 孝治 Koji Michishio

永田 祐吾 Yugo Nagata

乙津 裕子 Hiroko Otsu

下山 拓也 Takuya Shimoyama

高野 靖史 Yasushi Takano

和田 ひとみ Hitomi Wada