



(0) 研究分野

分科会:物理

キーワード:極低温イオン蓄積リング、分子冷却ダイナミクス及び分光、
ヘリウム液滴、多価重イオン、ミュオン原子、共鳴コヒーレント励起

(1) 研究背景と研究目標

当研究室では、GeVからmeVまでの広範なエネルギー領域と数時間からフェムト秒までの時間領域を網羅し、様々な独自のアプローチによって原子、分子、および光学 (AMO) 物理の実験研究を展開している。研究対象も多様性に富んでおり、静電型イオン蓄積リング中を周回する孤立分子イオンやクラスターイオンの遅い分子冷却過程の観測、振動回転分光や低速反応過程の研究、単結晶を通過するウランイオンをはじめとする高エネルギー多価重原子イオンのX線領域の精密分光、さらにミュオン原子 (μ^- , Z^+) などのエキゾチック原子を対象とした精密分光に及ぶ。このように一見普通とは異なった、ときにはエキゾチックな系を対象としながら、そこに横たわる普遍的な基礎過程や相互作用を観測し、関連するダイナミクスを自由に操作することを目指している。

(2) 2021年度成果と今後の研究計画

(A-1) 静電型イオン蓄積リングに蓄積された分子イオンのダイナミクス

長時間領域における真空中に孤立した単一分子のダイナミクスや冷却分子が関与する極低エネルギー反応には量子物理学および統計物理学の魅力的な主題が多く含まれている。真空中に大きな分子イオンを長期間保持できる静電イオン蓄積リングの利点を生かして、我々は脱励起ダイナミクスを長年にわたって研究してきた。2021年度は、比較的大きな負分子イオンのダイナミクスを調べることに挑戦した。選んだのは多環芳香族炭化水素 (PAH) 分子の代表格であるペンタセン負イオン ($C_{22}H_{14}^-$) である。この分子は星間雲の重要な構成要素であり、宇宙物理学や宇宙化学の分野で特に注目されている。蓄積リングにおいて合流条件下での自発的な電子脱離と波長890nmの波長可変OPOレーザーからの光パルスを導入した光誘起遅延電子脱離を測定し、電子脱離のメカニズムを明らかにした。自動脱離および光誘起の時間プロファイルのレーザー照射タイミング依存性の両方から、蓄積高温イオンの内部エネルギーの散逸機構が求められた。統計的な発光過程に基づくシミュレーションは観測挙動を再現し、数十ミリ秒の時間領域における放射冷却速度の値が得られた。また、 C_2^- イオンのTMU E-リングよりも長い時間領域での高励起状態とその時間発展を調べるため、セシウムスパッタイオン源で生成し、静電イオン蓄積リングRICEに蓄積した C_2^- イオンのレーザー誘起電子離脱分光を行った。その結果、全体のスペクトルはこれまでに報告したレーザーイオン源のような他のイオン源による分光測定と顕著な違いを示した。観測されたピークのほとんどは二重項-二重項遷移に起因するものではなく、高励起状態に起因するものと予想される。レーザー照射前のイオン蓄積時間を変化させてそれらの寿命を調べたところ、1.5-3msの短寿命成分と10ms以上の長寿命成分がそれぞれ観測された。前者の寿命は自己脱離成分のものとよく一致し、準安定四重極状態からの脱離チャンネルの可能性が示唆された。

(A-2) 超流動ヘリウム液滴中に補足された分子イオンのダイナミクス

ヘリウム液滴は0.4 Kの温度に冷却された液体ヘリウム超流動クラスターである。ヘリウム液滴に捕捉された原子および分子は、 μs 以内で0.4 Kの液滴温度に急速に冷却される。この低温では内包分子は振動基底準位にあり、非常に限られた数の回転励起準位しか存在しない。ヘリウム液滴は分子線の形で生成され、レーザー分光法と質量分析法が適用できる。2021年度は、静電場による荷電ヘリウム液滴のビーム制御を実施した。電離方法として電子ビームを採用した。下流のビーム偏向器を用いて、荷電した純粋な液滴のサイズ分布を観察したところ、これまでに観察された中性液滴の分布と一致した。これは、電子イオン化が帯電した液滴を生成する有望な方法であり、静電的に制御された液滴ビームのスローダイナミクス観測を可能に

することを意味する。この方法は、液滴内部に分子イオンを生成し、イオンと超流動の相互作用を研究するのに有効であることが期待される。

今後の計画 1) N_2O^+ などの3原子分子イオンの異なる振動モード干渉によるフェルミ共鳴に起因する脱励起寿命変化を観測する。2) ヘリウム液滴に埋め込まれた分子の電子衝撃イオン化を試みる。3) 超伝導遷移端センサー (TES) 検出器による中性生成種の直接同定を行う。

(B-1) エキゾチック原子分光: 多価重イオン

多価イオン(HCI)の超微細構造は、原子核の性質とともに基礎物理を探る上で有利な分光学的標的である。特に多電子を束縛したHCIについては、最近のHCI原子時計の提案により重要性が強調され原子構造計算の精緻化により理論研究されてきた。しかし、多電子HCIの超微細分光は実験的に困難であるため進んでいない。2021年度には、 $^{127}\text{I}^{7+}$ の $4d^95s$ 状態における磁気双極子転移を利用し、電子ビームイオントラッププラズマにおけるHCIの超微細構造分解レーザー分光を実証した。実験室のプラズマで電子衝突を制御してイオン状態を操作することで、トラップされたHCIのレーザー誘起蛍光分光が可能になった。低磁場下で蒸発冷却したイオンのスペクトルは、超微細構造を反映した特徴的な構造を備えていることが明らかになった。レーザーとプラズマを組み合わせた本実験は、多電子HCIにおける超微細構造に関する最先端原子計算の新しいベンチマークを提供し未開拓の様々な実験の可能性を提供すると期待される。

(B-2) エキゾチック原子分光: ミュオン原子

ミュオン原子は負ミュオンと正の原子核から構成される。2019-2020年度には、優れたエネルギー分解能 (10 keV以下のX線ピークの半値幅が6.0 eV以下) を持つ超伝導遷移端センサー (TES) 検出器と超低速で強力な負ミュオンビームを組み合わせ、真空中の μNe と金属中の μFe という異なる環境でのミュオン原子のX線観測に実施してきた。2021年度には、真空中で孤立した μAr からの電子特性X線の測定に成功した。そのダイナミクスはちょうど μNe と μFe の間に分類される。ミュオン脱励起カスケードにおけるミュオン誘起オーグジュ過程により、最初に結合していたAr原子の電子は剥ぎ取られるが、1個または数個の電子が残ることがシミュレーションにより予想された。しかし、これまで直接的な実験的証拠は得られていなかった。我々は2.7-3.0 keVの領域で数本の分離した電子特性K-X線ピークの観測に成功した。理論計算との比較から、これらのピークはミュオンと原子核に加えて、K殻とL殻に特定の電子配置を持つ1個、2個、3個の電子からなるエキゾチック原子系、すなわちH-, He-, Li-様 μAr に起因することが明らかになった。これらは、これまで観測されていた μFe からの幅広い電子特性X線スペクトルとは大きく異なっている。このように、電子特性X線を用いた観測により、ミュオン原子の構造やダイナミクスを研究するための強力なアプローチが新たに確立された。

今後の計画 1) 多価重イオン励起状態の寿命測定を進展させる。1) 固体 $\text{dd}\mu$ (負ミュオン付加重水素分子)からのミュオンX線の精密測定を計画している。このX線はミュオン分子の振動状態に関する豊富な情報を備えていると期待される。2) 高エネルギーX線用TES検出器を導入し重元素ミュオン原子の精密分光を展開する。

(C) 単結晶を利用した多価重原子イオンの共鳴コヒーレント励起

我々は共鳴コヒーレント励起 (RCE) と呼ばれる、光子のかわりに周期的結晶場を利用した数10 GeVのエネルギーで飛行する重原子イオンの共鳴励起を研究してきた。このRCE共鳴励起によるX線エネルギー領域の多価重イオン高精度分光法は、強電場下でQED検証のためのもう一つの有力な手法である。GSI / FAIR(ドイツ)において、Li様 U^{89+} イオンの $2s_{1/2}$ から $2p_{1/2}$ および $2p_{3/2}$ 状態への4.46 keVの遷移エネルギーを高精度に絶対値測定することを計画していた。これはLi様 U^{89+} ビームを生成するイオン蓄積リングESRの電子冷却器の電極に印加された電圧を高精度に測定することによって達成される。2022年3月、およそ1週間のビームタイムが得られた。そのために、検出器や測定系を国内からGSIに輸送するなど移すなどの準備に最大限の努力を払った。しかし、残念ながら、加速器、特にUNILACの最終段階でのトラブルにより、ビームは数時間しか利用できず実質的に実験を行うことはできなかった。

今後の計画 1) GSI / FAIRにおいて、再び2024年度にビームタイムが予定されている。2) 我々の最終的な目標として、将来のFAIR施設において、RCE共鳴励起を利用して水素様 U^{91+} イオンの $1s-2p$ 遷移を精密分光することを計画している。

(3) 研究室メンバー

(2021年度)

(主任研究員)

東俊行

(専任研究員)

久間晋

(研究員)

木村直樹

(特別研究員)

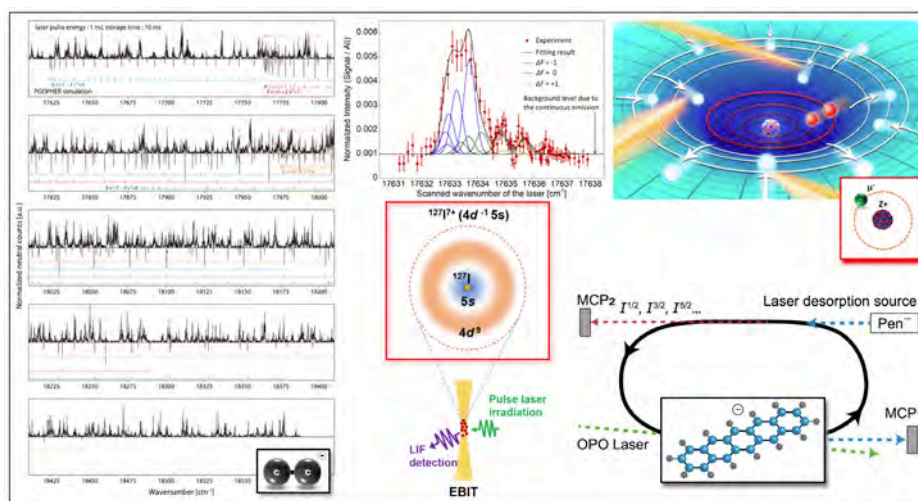
Kiattichart Chartkunchand,

奥村拓馬

(4) 発表論文等

1. S. Iida, S. Kuma, M. Kuriyama, T. Furukawa, M. Kusunoki, H. Tanuma, K. Hansen, H. Shiromaru, and T. Azuma, "IR-photon quenching of delayed electron detachment from hot pentacene anions", **Phys. Rev. A** 104, 043114 (2021). *selected as Editors' Suggestions*.
2. Hatsuki Otani, Hiroko Nakahara, Haruka Goto, Susumu Kuma, and Takamasa Momose, "Electronic spectroscopy of Mg-phthalocyanine embedded in cold hydrogen clusters produced by a pulsed nozzle", Hatsuki Otani, Hiroko Nakahara, Haruka Goto, Susumu Kuma, and Takamasa Momose, **J. Chem. Phys.** 155, 044309 (2021).
3. T. Okumura, T. Azuma, D. A. Bennett, P. Caradonna, H. I. Chiu, W. B. Doriese, M. S. Durkin, J. W. Fowler, J. D. Gard, T. Hashimoto, R. Hayakawa, G. C. Hilton, Y. Ichinohe, P. Indelicato, T. Isobe, S. Kanda, D. Kato, M. Katsuragawa, N. Kawamura, Y. Kino, K. Mine, Y. Miyake, K.M. Morgan, K. Ninomiya, H. Noda, G. C. O'Neil, S. Okada, K. Okutsu, T. Osawa, N. Paul, C. D. Reintsema, D. R. Schmidt, K. Shimomura, P. Strasser, H. Suda, D. S. Swetz, T. Takahashi, S. Takeda, S. Takeshita, H. Tatsuno, X. M. Tong, Y. Ueno, J. N. Ullom, S. Watanabe, S. Yamada, "De-excitation dynamics of muonic atoms revealed by high precision spectroscopy of electronic K X-rays using a superconducting TES detector", **Phys. Rev. Lett.** 127, 053001(2021). *selected as Editors' Suggestions*.
4. Y. Nakano, R. Igosawa, S. Iida, S. Okada, M Lindly, S. Menk, R. Nagaoka, T. Hashimoto, S. Yamada, T. Yamaguchi, S. Kuma, T. Azuma, "Status of the Laser Spectroscopy and Merged-beam Experiments at RICE", **JPS Conf. Proceedings** 35, 011006 (2021).
5. T. Azuma, "De-excitation is exciting", 36th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, Web-conference, Jun. 3, 2021.
6. N. Kimura, "Laser spectroscopy of forbidden transitions between metastable excited states of I^{7+} in an electron beam ion trap", The 32nd International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ViCPEAC 2021), Web-conference, Jul.22, 2021.

Supplementary



2021年度の東原子分子物理研究室の活動の全体概念図

Laboratory Homepage

https://www.riken.jp/en/research/labs/chief/atom_mol_opt_phys/index.html

<https://amo.riken.jp/english/>