



(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、多価重イオン、共鳴コヒーレント励起、エキゾチック原子

(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^+) や負ポジトロニウム (ϵ^+ , ϵ^- , ϵ) 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) 2019年度成果と今後の研究計画

(A) 静電イオンストレージリングを使用した分子動力学

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、いまだ解明されていない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。また宇宙空間での化学進化を理解するための鍵でもある。真空中に大きな分子イオンを長期間保持できるという静電イオン蓄積リングの利点を生かして、我々は遅延電子放出過程を観察することに専念してきた。その結果、今まで見過ごされていた再帰蛍光と呼ばれる分子の冷却過程を発見した。2019年には、孤立 Si_2^- 負分子イオンのレーザー誘起遅延電子脱離を10マイクロ秒の時間領域で観測した。この分子は等核二原子分子であり、双極子モーメントを持たないことから回転振動冷却は期待されない。電子脱離しきい値に近いエネルギーで光励起したところ、電子励起状態の回転振動遷移に起因する多重ピーク構造が遅延電子脱離スペクトルに明瞭に現れることを発見した。この構造は遅延して測定された信号にのみ現れたもので、このような遅い時間領域で生成される遅延脱離は二原子分子では極めて特殊である。この励起電子状態の存在は、通常は強い直接脱離過程によって隠れており、遅延電子放出の測定によって初めて明らかにされたと考えられる。

さらに、低温反応や低温分子を研究するためには専用の極低温イオン蓄積リングが必要である。我々は極低温 (4K) 小型静電リング (RICE) を開発し、極高真空条件下で1時間以上のイオンの蓄積に成功した。2019年には、 N_2O^+ 正分子イオンの振動回転準位を測定し、状態選択ダイナミクスによって支配されるこれら量子準位のポピュレーションの時間変化を観測した。波長可変パルスレーザーを使用した前期解離過程を介したアクションスペクトロスコピー法によって状態選択的に測定した結果、5秒以内の時間スケールで進む振動冷却と同じ時間スケールでは全く変化がない回転挙動がともに観測された。これは、理論と実験の両方でよく知られている振動冷却と回転冷却の間の大きな不均衡が孤立分子の長時間保持と高分解能分光の組み合わせによって明確に観察されたことを意味する。さらに、冷却ダイナミクスをリアルタイムで追跡することで、複数の振動モードの特徴が関連している様相が明らかになった。三原子分子のような単純な系におけるこのようなダイナミクスは、非熱平衡挙動を理解するための基本的な要素として不可欠である。

今後の計画 1) ビーム合流実験による分子イオンと中性原子との低エネルギー衝突のエネルギー依存測定を行う。 2) ヘリウム液滴に埋め込まれた冷たい (0.4 K) 分子イオンを作り分光す

る。3) 超伝導遷移端 (TES) カロリメータによる中性生成種の検出によって異なる質量を持つ中性生成種の直接同定を行う。

(B) エキゾチック原子分光: ミュオン原子とポジトロニウム負イオン

ミュオン原子は、負ミュオンと正電荷を持つ原子核で構成される。電子に比べて負ミュオンの質量が重いため、ミュオン原子中の負ミュオン軌道は原子核の極めて近傍に位置する。従って、ミュオン原子から放出されるミュオンX線の測定は、非常に強い電場の下での量子電磁力学 (QED) を検証するための理想的なプローブである。QEDは物理学で最も成功した理論のひとつであり、我々の測定は束縛状態QED理論の有効性を検証するための有力なアプローチである。2019年、超伝導TESカロリメータを導入することにより、真空中に孤立したミュオン原子からのミュオンX線の高精度分光を国内のJ-PARCで開始した。ミュオニックネオン原子(μ Ne)中の主量子数 $n=5-4$ 遷移に対応する6.3 keVミュオンX線を、約5 eVの分解能で観測することに成功した。この遷移には2-5 eVのQED効果が含まれ、核の大きさのあいまいさの寄与がない。我々が0.3 eV以上の高精度で決定した遷移エネルギーは理論的予測と一致した。この成功は重元素ミュオン原子のQED効果を探索するための新たな実験領域を拓いたと考えられる。

我々は、ポジトロニウム負イオン Ps^- ($e^+e^-e^-$) のレーザー分光にも携わってきた。 Ps^- は、クーロン力を介して相互作用する最も単純な3体系の1つであり、3体問題理論の優れた検証の場を提供する。約0.3 eVの電子親和力すなわち結合エネルギーを0.1 meV以内の精度で実験的に決定することに成功し、その結果は相対論的效果とQED効果を含む3体計算の厳密理論と一致した。

今後の計画 1) ミュオン原子から放出される電子X線は、オーグジュ過程と電子再充填過程に関連するミュオン原子の脱励起過程の豊富な情報を提供する。これらを高精度で測定する。2) より高いX線エネルギーに対応するTESカロリメータを導入することにより、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。この共鳴励起は、EUVからX線までのエネルギー領域で光子を使用せずに重イオンを操作することを可能とする新しい量子制御および分光手法として確立されてきた。2019年には、千葉のHIMACで3次元RCE (3D-RCE) 法により複数の原子面から同時に3D-RCE条件を選択することが可能であることを利用して、偏光と位相が異なる2つの振動電場の干渉効果を測定した。465 MeV/u He様 Ar^{16+} イオンの $1s^2-1s2p$ 遷移の強め合う(constructive)干渉と、501 MeV/u H様 Fe^{25+} イオンの $1s-2p$ 遷移の弱め合う(destructive)干渉の両者を観測した。理論シミュレーションと比較することにより異なる偏光と位相に応じて実際に起こる様相の理解を深めた。

我々グループが開発したRCE分光法は、X線エネルギー領域の多価重原子イオンの高精度分光として強電場下のQEDを検証するもうひとつの有望かつ現実的な手法でもある。ドイツ・GSI/FAIRにおいて、3つの電子を伴うLi様 U^{89+} イオンの $2s_{1/2}$ から $2p_{3/2}$ への4.46 keV電子遷移を既に観測している。2019年には絶対遷移エネルギー決定を目的とした実験装置高度化に取り組んだ。

今後の計画 1) GSI/FAIRにおいて、イオン蓄積リングESRでの電子冷却装置における動作電極印加電圧の高精度同時測定により、Li様 U^{89+} イオンの $2s_{1/2}$ から $2p_{1/2}$ および $2p_{3/2}$ 状態への遷移エネルギーを精密に絶対値測定する。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

(2019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

(協力研究員)

岡田信二

(基礎科学特別研究員)

Preeti Mishra、上野恭裕

(特別研究員)

Kiattichart Chartkunchand、奥村拓馬

(4) 発表論文等

1. “Impact of a hydrophobic molecular ion in the early stage of cloud formation”, Linda Feketeová, Paul Bertier, Thibaud Salbaing, Toshiyuki Azuma, Florent Calvo, Bernadette Farizon, Michel Farizon and Tilman D. Märk, **PNAS** **116**, (45) 22540-22544 (2019).
2. “Roadmap on photonic, electronic and atomic collision physics: III. Heavy particles: with zero to relativistic speeds”, Friedrich Aumayr, Kiyoshi Ueda, Emma Sokell, Stefan Schippers, Hossein Sadeghpour, Frédéric Merkt, Thomas F Gallagher, F Barry Dunning, Paul Scheier, Olof Echt, Tom Kirchner, Stephan Fritzsche, Andrey Surzhykov, Xinwen Ma, Roberto Rivarola, Omar Fojon, Lokesh Tribedi, Emily Lamour, José R Crespo López-Urrutia, Yuri A Litvinov, Vladimir Shabaev, Henrik Cederquist, Henning Zettergren, Marika Schleberger, Richard A Wilhelm, Toshiyuki Azuma, Philippe Boduch, Henning T Schmidt and Thomas Stöhlker, **J. Phys.** **B52**, 171003 (2019).
3. “Radiative cooling of cationic carbon clusters, C_N^+ , $N = 8, 10, 13$ and 16 ”, FQ. Chen, N. Kono, R. Suzuki, T. Furukawa, H. Tanuma, P. Ferrari, T. Azuma, J. Matsumoto, H. Shiromaru, V. Zhaunerchyk, K. Hansen, **Phys. Chem. Chem. Phys.** **21**, 1587 (2019).
4. “RIKEN cryogenic storage ring RICE”, 8th International Workshop on Electrostatic Storage Devices (ESD8), August 26, 2019, Tianjin, China.
5. 「10 GeVからmeVまでのエネルギースケールで原子分子の量子状態を制御し観測する」, 第19回多元研究発表会, 2019年12月12日, 東北大学.

Supplementary



Group photo of RIKEN AMO Laboratory

Laboratory Homepage

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

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