

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400537

研究課題名(和文) 静電型リニアイオントラップを用いた準安定状態イオンの禁制遷移寿命測定の精密化

研究課題名(英文) Precision lifetime measurement of metastable ions using an electrostatic linear ion trap

研究代表者

斉藤 学 (manabu, saito)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60235075

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：静電型リニアイオントラップを用いて準安定状態にある2価Krイオンの寿命の精密測定を行った。準安定状態の寿命は一般的にイオントラップを用いた分光測定によって決定されてきた。しかし、現状のイオントラップを用いた測定では、残留ガスとの衝突(中性化、散乱)による蓄積イオン数の減少を見積ることが難しい。この見積もりが寿命の測定精度に大きな影響を与える。本研究は、静電型リニアイオントラップを用いることで蓄積イオン数の減少を高精度でモニターし、準安定状態寿命の測定精度を向上させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：We performed precision measurement of the lifetime of the metastable state in doubly charged Kr ions. In general lifetimes of metastable states of ions have been determined by measuring the photons emitted during the transition using ion traps. However, for commonly used ion traps, it is difficult to estimate the destruction of the trapped ions by collisions (neutralization or scattering) with residual gases. This estimation significantly influences to the accuracy of the lifetime measurement. In this study, we precisely monitored the variation in the number of stored ions over time using an electrostatic linear ion trap. This enabled to improve the measurement accuracy of the lifetime of the metastable state.

研究分野：原子・分子物理学

キーワード：イオントラップ 多価イオン 準安定状態 寿命 電子捕獲

1. 研究開始当初の背景

(1) 準安定状態にあるイオンの放射寿命は、様々な学術研究分野で必要とされているデータである。原子・分子物理や放射線物理、プラズマ科学の分野でも、たとえば多電子原子の電子状態理論のテストやプラズマの分光診断には、高精度の放射寿命測定データが不可欠である。準安定状態にあるイオンの脱励起は禁制遷移であるために、その放射寿命はミリ秒から秒に至る。これまでこの長時間の寿命を得るために、RFトラップやキングドントラップなどに一定数の準安定状態イオンを蓄積し、その放出光子数の時間変化を測定してきた。この時間依存の減衰曲線から、禁制遷移の寿命が決定される。このとき、トラップ内の蓄積イオン自体が残留ガスとの散乱や中性化衝突によって時間とともに減少するので、測定放射寿命に対してこの減少を補正することが必要になる。これまで、トラップ内の蓄積イオン数の直接測定は困難であることから、複数の残留ガス圧力における寿命を測定し、外挿法によって残留ガス圧力ゼロの時の寿命を見積もる補正方法が行われてきた。しかしこの補正方法では、残留ガス圧力の高精度な絶対測定が必要となる。そのため、この補正もたらす誤差が寿命測定誤差の大きな要因となっていた。よって、トラップ内の超高真空を保つ仕組みと、蓄積イオン数の変化を精度良く見積もる方法の開発が、寿命測定の高い精度向上につながると思われる。

(2) 本研究代表者の斉藤らは、核融合ダイバダ領域での不純物除去過程に関連する必要性から、様々な原子種の eV~keV エネルギー領域の低電荷加速イオン(希ガス, Be, B, C, Fe, Ni, W)の電子捕獲断面積を測定し、断面積の半経験式の導出とデータベース化を目指している。電子捕獲断面積はイオンの電子状態に依存するので、近年、電子状態の定まったイオンに対する電子捕獲断面積の測定が重要になっている。そのため、イオンビーム中に長時間存在し続ける準安定状態イオンの寿命の高精度の測定は非常に重要な課題となっている。

(3) またイオントラップに関して斉藤らは、keV エネルギーのイオンビームを蓄積する静電型のリニアイオントラップを開発することに成功している。このトラップの特徴は、(a)イオン源がトラップ外部の離れた位置に設置できるため、イオン源ガスによるトラップ内真空度の悪化がない、(b)トラップ内部の蓄積イオン数を精度良くかつ簡便に測定することができる、ということである。これらの特徴から、このトラップを用いることによって、寿命測定的大幅な精度向上が期待できる。以上のことより、本研究申

請課題である準安定状態イオンの禁制遷移寿命測定の高精度化を達成できるという着想に至った。

2. 研究の目的

(1) 静電型リニアイオントラップを用いて、準安定状態にあるイオンの禁制遷移寿命の精密測定を可能にする。

(2) 測定したデータを過去のデータと比較することで、より高精度で寿命が決定できることを明らかにする。

(3) 具体的には希ガスの 2 価イオンの基底電子配置内での禁制遷移寿命を、本研究の測定方法で決定する。Kr²⁺ の ¹S₀ 準安定状態の遷移寿命を例にとると、17.2 ms の理論値および 13.1±0.6 ms と 14.8±0.8 ms の実験値が過去に報告されている。

3. 研究の方法

準安定状態寿命の精密測定のために本研究で行った方法の概要を、図1を用いて説明する。なお、(1)と(2)は本研究開始時にすでに開発済みの方法である。

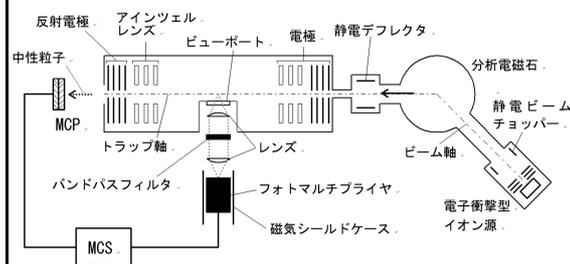


図1 実験装置の概略

(1) トラップへのイオンビームの蓄積

電子衝撃型のイオン源によって生成したイオンビームを静電チョッパーでパルス化する。このパルスビームを45°電磁石で分析し、目的のイオンだけをトラップに入射する。入射したパルスビームは電圧が常時印加されている出口側電極によって、入口方向に跳ね返される。一方、パルスビーム入射直後に、入口側電極の電圧を十分短い時間で立ち上げる。この電圧操作によって、イオンビームは2組のリフレクター電極間に閉じ込められ、そのまま往復運動し続けることになる。以上の方法によってイオンをトラップ内に蓄積する。

(2) 蓄積イオン数のモニター

イオンと残留ガスとの電子捕獲衝突で作られる中性粒子は、電場によってトラップ内には閉じ込められないので、トラップの出入口より外へ逃げる。この中性粒子を、トラップ後方のビームライン上に設置したマイクロチャ

ンネルプレート (MCP) で検出する。ビームの蓄積開始時をスタート時間として、単位時間あたりの中性粒子数をマルチチャンネルスケーラ (MCS) に記録する。中性粒子の計数率はトラップに蓄積されているイオン数に比例するので、この測定によって蓄積イオン数の時間変化を知ることができる。

(3) 放出光子の検出系の設置

閉じ込められたイオンのうち、目的の準安定状態にあるイオンの脱励起遷移からの光子を、図のようにトラップ中央部に取り付けた光学系によって計数する。目的の光子波長の選択にはバンドパスフィルタを用いる。本研究では、この光学系を新たに設計、製作、設置した。

(4) 1S_0 準安定状態にある Kr^{2+} イオンの磁気双極子遷移の測定

$4s^2 4p^4$ 基底電子配置の 1S_0 準安定状態にある Kr^{2+} イオンが 3P_1 状態に磁気双極子遷移する際に放出する 350 nm の光子を (3) の光学系で検出する。(2) の中性粒子検出と同様に、ビームの蓄積開始時をスタート時間として検出光子数をマルチチャンネルスケーラ (MCS) に記録する。光子の計数率はトラップに蓄積されている 1S_0 準安定状態の Kr^{2+} イオン数に比例するので、この測定によって蓄積されている 1S_0 Kr^{2+} イオン数の時間変化を知ることができる。

(5) 寿命の決定

(4) で得られた光子計数率の時間スペクトルから、 1S_0 準安定状態の寿命を決定する。ただし、残留ガスとの中性化衝突による準安定状態イオンの減少の補正を、(3) で得られた中性粒子数データによって行う。最終的に得られた準安定状態の寿命を過去のデータと比較し、本測定法の精度を検討する。

4. 研究成果

(1) 光子検出系

図 1 に示している、ビューポート、2 組のレンズ、バンドパスフィルタ、フォトマルチプライヤからなる光子検出系を設計、設置した。光子の分光はバンドパスフィルタ (目的波長 ± 5 nm) を用いて行った。測定系の検出効率は、 Kr^{2+} の 350 nm の光子を例にすると、製品データと立体角より 2.3×10^{-3} である。水銀ランプからの光を用いて光軸の調整を行った後、 Kr^{2+} イオンビームを用いて以下のテスト実験を行った。a) トラップ軸上の走行イオンからの光に対して光学系が最適な配置になるように、検出光子数を確認しながら光学系を微調整した。b) 実際の信号をモニターしながら、SN 比改善のための回路系等の調整を行った。c) 目的の波長 (350 nm) と異

なる近隣波長のバンドパスフィルタを用いて、イオンからの光子が検出されないことを確認した。これらによって、目的の波長を持つイオンからの光子だけが確実に測定されていることを確認した。

(2) 光子の測定結果

1S_0 Kr^{2+} イオンの放出光子測定の結果が図 2 である。測定時のトラップ内の真空度は 10^{-8} Pa 台である。図を見ると、光子計数率が時間とともに指数関数的に減衰していることがわかる。トラップ内に存在する単位時間あたりの 1S_0 Kr^{2+} イオン数はこの光子計数率に比例するので、図 2 の結果は 1S_0 準安定状態が時間とともに指数関数的に崩壊している様子を表している。100 ms 以降の一定計数は、光電子増倍管のダークカウントによるバックグラウンドである。指数関数フィット (図中の実線) により得られた 1S_0 準安定状態の寿命 τ_p は 17.1 ± 0.7 ms である。ただしこの τ_p は残留ガス衝突の補正がまだされていない値である。

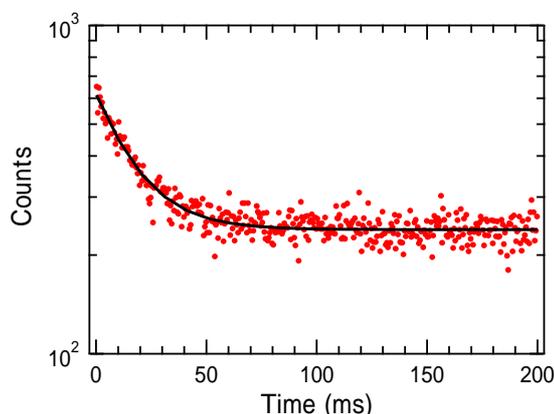


図 2 Kr^{2+} イオンの $4s^2 4p^4$ 1S_0 $4s^2 4p^4$ 3P_1 遷移から放出される光子 (350 nm) の計数率

(3) Kr^{2+} イオンの 1S_0 準安定状態の寿命

図 3 が中性粒子の測定結果である。トラップ内の Kr^{2+} イオン数が時間とともに残留ガスとの衝突によって減少していく様子が見られる。指数関数フィット (図の実線) より求められた残留ガスとの衝突によるイオンの蓄積寿命 τ_s は 4611 ± 42 ms である。目的の 1S_0 準安定状態の寿命 τ は $1/\tau = 1/\tau_p - 1/\tau_s$ によって与えられる。本測定では $\tau = 17.2 \pm 0.7$ ms であった。蓄積寿命 τ_s が τ_p に比べて十分長く、 τ_s の測定誤差が小さいために、結果に対する補正の寄与が非常に小さくなっている。複数回測定した後に重み付き平均を取った最終結果は 17.4 ± 0.4 ms で、誤差は 2.3% である。

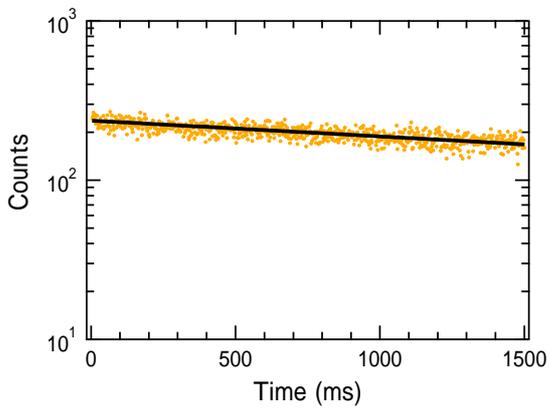


図3 中性Kr粒子の計数率

(4) 過

去の実験および理論研究との比較

図4に過去の実験結果を本研究との比較のために示す。いずれの測定も誤差は主に統計誤差によるものである。図を見ると過去の測定に比べ本研究の結果は誤差が約1/2に小さくなっており、より高精度な値を得ていることが分かる。しかし、誤差を考慮しても測定値自体は過去の測定と一致していない。一方、理論計算値と比較すると、本研究の結果はよい一致を見せている。過去の実験結果と本研究結果との食い違いの理由は今のところはっきりしていない。ただし1-(1)で述べたように、蓄積イオン数の減衰を測定する方法という点で我々と過去の研究では大きく異なっている。また過去の実験では、イオンを生成するためのガスを直接トラップ内に導入しているため、その導入ガス圧力を変化させることで外挿法を行っている。

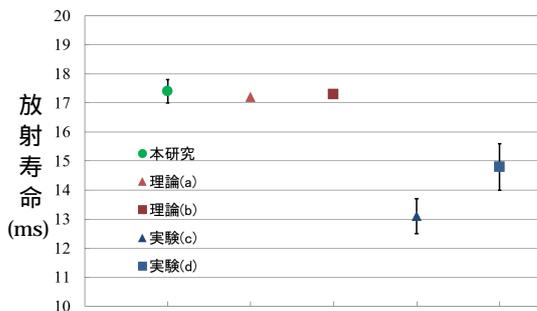


図4 本研究と過去の研究結果の比較

- (a) R. H. Garstang, J. Res. Natl Bur. Stand. A **68** 61 (1964)
- (b) E. Biemont and J. E. Hansen, Phys. Scr. **34** 116 (1986)
- (c) R. A. Walch and R. D. Knight, Phys. Rev. A **38** 2375 (1988)
- (d) A. G. Calamai and C. E. Johnson, Phys. Rev. A **45** 7792 (1992)

食い違いの理由をさらに考察するために、図

4の(d)による測定法と同様の手法を適用して寿命を測定した。その結果が図5である。横軸はトラップ内の残留ガス真空度、縦軸が光子測定より求められた寿命 τ_p の値である。これらのデータから外挿法によって求めた真空度 0 Pa のときの寿命が、残留ガスの影響の補正の必要のない寿命、すなわち目的の準安定状態の寿命であると考えられる。この方法により求めた準安定状態寿命は、 16.9 ± 0.7 ms となり、本研究の方法で求めた値と誤差の範囲で一致している。一方この場合も、過去の測定結果とは一致しないという結果になった。

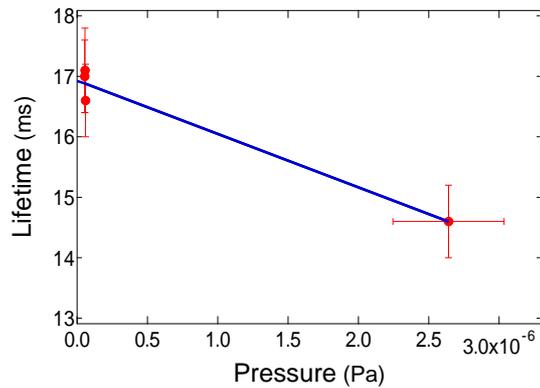


図5 トラップ内真空度と測定寿命の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

N. Ojima, S. Itoi, M. Saito, and Y. Haruyama, Radiative lifetime of the metastable $1S_0$ level in Kr^{2+} measured using an electrostatic ion trap. Journal of Physics: Conference Series 635, 2015, 042002, 査読有。

DOI:10.1088/1742-6596/635/4/042002

M. Saito, N. Ojima, S. Itoi, and Y. Haruyama, Radiative lifetime of the $1S_0$ metastable state in doubly charged Kr ions. Physical Review A, At. Mol. Opt. Phys, Vol. 91, 2015, 012508, 査読有。

DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.91.012508

[学会発表](計2件)

N. Ojima, S. Itoi, M. Saito, and Y. Haruyama, Radiative lifetime of the metastable $1S_0$ level in Kr^{2+} measured using an electrostatic ion trap. XXIX International Conference on Photonic,

Electronic and Atomic Collision,
2015.7.22, Toledo, Spain.

小島直人, 村山尊紀, 安田啓介, 斉藤学,
春山洋一, 静電型イオントラップによる 1S_0
準安定状態希ガス2価イオンの放射寿命測定.
日本物理学会2015年秋季大会, 2015.9.16, 関
西大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

斉藤 学 (SAITO, Manabu)
京都大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 6 0 2 3 5 0 7 5

(2) 研究分担者

春山 洋一 (HARUYAMA, Yoichi)
京都府立大学・生命環境科学研究科・教授
研究者番号: 0 0 1 7 3 0 9 7