

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82110

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20924

研究課題名（和文）ローレンシウム原子線分光に向けた電子再結合法による低速原子ビーム生成

研究課題名（英文）Production of a low-energy atomic beam with ion-electron recombination toward atomic-beam spectroscopy of lawrencium

研究代表者

伊藤 由太（Ito, Yuta）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究職

研究者番号：30711501

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：原子番号100を超える超重元素では、原子核の持つ強大なクーロン力によって軌道電子が強い相対論効果を受ける。103番元素ローレンシウム（Lr）では、その相対論効果によって価電子軌道の周期律異常が初めて出現すると予測されている。本研究では、Lrの価電子軌道を直接決定するために、Stern-Gerlach実験に代表される原子線分光法に着目した。この原子線分光法に不可欠な低エネルギー原子ビーム生成法の開発を、イオンガイド技術を組み合わせたイオン-電子再結合によって行った。再結合効率を最大化するために、低エネルギーのイオンビームを精密制御する光学系と検出器を整備し、原子ビームの直接測定を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

元素及び元素の秩序である周期表は、人類の物質観や自然科学の重要な基盤である。超重元素は、一般的にありふれた元素ではないが、その特異性を研究し理解することで、原子構造や内在する相互作用の本質をより深く理解することができる。この知見は、基礎科学の発展に加えて、新物質の創生など応用面にも密接に関連するものと考えられる。また、この研究の過程で得られたイオン・原子ビーム技術は、基礎・応用問わず同じくイオンや原子を取り扱うさまざまな分野への波及も期待される。

研究成果の概要（英文）：In superheavy elements, those with atomic numbers exceeding 100, the intense Coulomb force of the atomic nucleus causes a strong relativistic effect on orbital electrons. In lawrencium (Lr), atomic number 103, this relativistic effect is predicted to first cause anomalies in the periodic law of valence electron orbits. This research focuses on using atomic spectroscopy, specifically the Stern-Gerlach experiment, to directly identify the valence electron orbit of Lr. To achieve this, we developed a production method of a low-energy atomic beam by ion-electron recombination, incorporating ion guide techniques. To maximize recombination efficiency, we developed ion optics for manipulating ion beams precisely and detectors and conducted direct measurements of atomic beams.

研究分野：原子核物理学

キーワード：原子線分光 原子ビーム 超重元素 RFイオンガイド RFイオントラップ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年測定されたローレンシウム (Lr: 原子番号 103) のイオン化ポテンシャル [T.K. Sato et al., Nature 520, 209 (2015)] は, Lr の価電子軌道が周期律から推測される 6d 軌道ではなく, 相対論効果で安定化する $7p_{1/2}$ 軌道を取ることを間接的に示した. この事実は, 金や水銀のようなエネルギー準位の変化にとどまらず, 周期表において初めて価電子軌道の秩序が崩れることを意味しており, 元素における相対論効果の重要性を一層際立たせるとともに, 周期表そのものの構成にまで問題を投げかけている.

この問題を直接的に解決するためには, Lr の価電子軌道を直接決定することが求められる. いくつかある測定手法のうち, 生成率の極めて小さな Lr に対しても適用が見込める原子線分光法に着目した. 本研究では, この原子線分光法に不可欠な質の高い低エネルギー原子ビーム生成をイオン-電子再結合によって実現することを発案した.

2. 研究の目的

Lr 原子価電子軌道の直接決定のために, Stern-Gerlach (S-G) 実験 [V.W. Gerlach, O. Stern, Z. Phys. 9, 349 (1922)] に代表される価電子軌道に感度を持つ原子線分光法に着目し, そのために不可欠な低エネルギー原子ビーム生成法の確立を目的とした. 原子線分光法では, 原子スピンの依存するビーム偏向角を大きくするために, eV 程度以下の低エネルギーが要求され, 異なる原子スピンと精度良く識別するために, エミッタンスとエネルギー広がり共に小さな質の高い原子ビームが成功の鍵である. 本研究では, 精密イオン制御技術を駆使し, 低エネルギー・高効率・高輝度・汎元素的なイオン-電子再結合型原子ビーム源の開発を目的とした.

3. 研究の方法

電子再結合を効率良く行うための電子雲生成には円環状の電子生成フィラメントを使用し, 円環中央に電子雲を高密度で生成する中性化器を採用した. 再結合試験のために, ルビジウム (Rb) の 1 価の低エネルギーイオンビームを生成する表面電離イオン源を用いた. 電子雲の中央に低エネルギーイオンビームを効率良く入射させるために, イオンビームの収束・偏向を精密制御する光学系を開発した. 原子ビーム生成の確認は, イオンビームの減衰を測定する比較的簡易な間接的手法と, 原子ビーム検出器による原子ビームを直接観測する直接的手法の 2 つを用いた.

4. 研究成果

(1) イオンビーム減衰法による原子ビームの間接測定

イオン源で生成した 50 eV の低エネルギー Rb⁺イオンビームを, アインツェルレンズによって中性化器の位置で収束するように調整した. その条件の下で, アインツェルレンズ下流に設置したステアラーによってイオンビームを X・Y 方向に偏向することで, 中性化器の電子雲に対して 2 次元的にイオンビームの減衰を測定した. 測定において, 時間経過とともに多少変動するイオンビーム強度やバックグラウンドとなる漏れ電子電流を補正するために, 各測定でイオンビーム無しの条件での参照電流値を測定し, 参照電流値との比を取った規格化イオン電流値 I_{NORM} で評価した. 図 1 は, 中性化器の電子電流 $I_{\text{EN}} = 0$ mA 及び 3 mA における, 各 X・Y ステアラー電圧での規格化イオン電流値 I_{NORM} である. ここから明らかに, 電子雲中心に対応する X・Y ステアラー電圧 0 V を中心に 100% 近い減衰が見られることが明らかとなり, 再結合が高効率で生じていると期待される結果を得た.

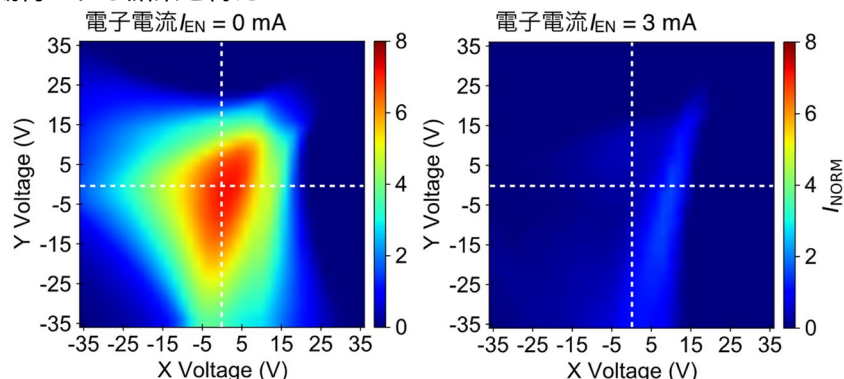


図 1: イオンビームの 2 次元マップ. (左)電子電流 $I_{\text{EN}} = 0$ mA と(右)

電子電流 $I_{\text{EN}} = 3$ mA .

(2) 電子の空間電荷によるイオンビーム偏向の影響

原子ビームは電荷を持たないため, 再結合によりイオンが原子となった後の軌道は, 基本的に直前のイオンビーム軌道を維持したまま直進することになる. 従って, 電子雲に対してイオンビ

ームをなるべく直交する形で入射することが、エミッタンスの良い原子ビームを生成することにつながる。また、電子雲は高密度の電子で形成されていることから、イオンに対して空間的に大きな負ポテンシャルを持つことになり、直交していたとしても、強度分布の中央からのズレによりイオンビームが偏向すると考えた。この偏向の効果は無視できないため、イオンビームの偏向を測定するための2次元ビームプロファイルモニタ(BPM)を開発し、その効果を検証した。図2は、BPMのY方向位置を基準として、イオンビームを電子雲に対する直交性を維持したまま平行移動させ、各入射Y方向位置におけるY方向の偏向度合いを各電子電流について測定したものである。ここから、およそ+2 mmのY方向位置へイオンを入射することで、イオンビームは偏向を受けず、従って再結合後の原子ビームも電子雲に対する直交性を維持したまま直進することが予測された。

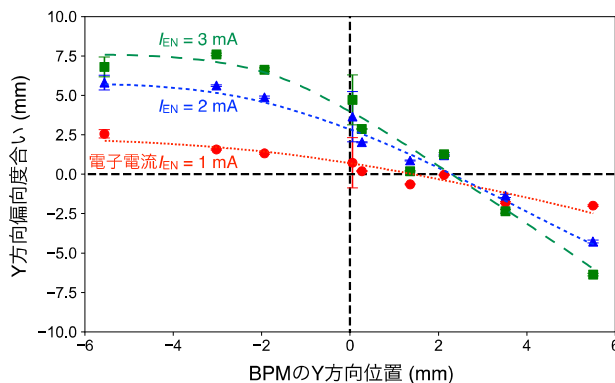


図 2: 各電子電流における、イオンビームのY方向偏向度合いのイオンビーム入射Y方向位置依存性

(3) Langmuir-Taylor 検出器による原子ビームの直接測定

間接的手法であるイオンビーム減衰法で得られた結果をより高い信頼性で検証するために、原子ビームを直接測定するためのLangmuir-Taylor(L-T)検出器を開発した。L-T検出器は、原子ビームを熱したフィラメントで止め、フィラメント上で再イオン化したイオンを検出することで直接原子ビームを測定する。本測定では、再結合せずイオンのままL-T検出器へと入射する成分がバックグラウンドになってしまうため、検出器入口に双極電場で入射イオンをY方向に偏向するイオンリペラーを備えた。図3は、イオンビーム減衰法で100%近くの減衰が見られた電子電流 $I_{EN} = 3$ mA において、リペラー電圧 0 V 及び +200 V の条件における規格化イオン電流値のY方向位置依存性である。リペラー電圧 0 V では、イオンと原子の両者が混在する条件で、中性化器中央に相当するY方向位置の 20 mm 付近に小さいピークが観測できた。一方、リペラー電圧 +200 V では、同様の位置に有意なピークは観測されなかった。これは、リペラー電圧の電場が中性化器内の電子雲に影響を与えて再結合を阻害した可能性や、再結合した原子がリペラー電圧の電場によって再イオン化してしまった可能性などが考えられる。

これらの可能性について現在考察やシミュレーションを進めているとともに、より高感度で原子ビームを観測するための改良型L-T検出器も検討を進めている。さらに、より低エネルギーのイオンビームを精密かつ局所的に入射できるようにするためのイオンガイドも開発を進めており、本装置と組み合わせた測定を予定している。

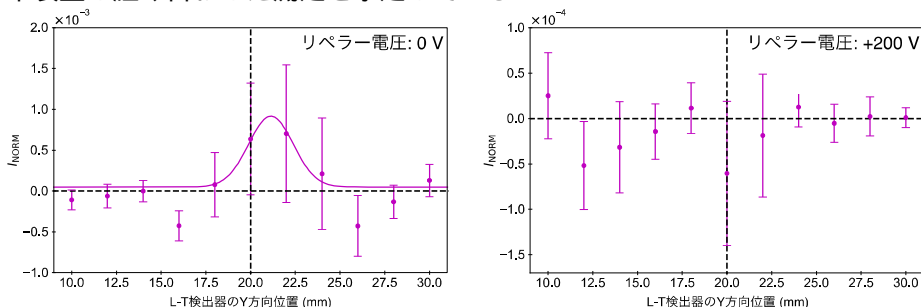


図 3: 電子電流 $I_{EN} = 3$ mA における L-T 検出器での規格化イオン電流値の Y 方向位置依存性。(左)リペラー電圧 0 V と(右)+200 V

原子ビームの直接測定には現状至っていないが、研究を進める上で基盤となるビーム光学系及び検出器の整備やイオンビームの諸特性の研究をおおむね順調に進めることができた。本研究を基に、さらなる精密化や高感度化によって研究を進展させられる道筋をつけることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木颯人, 伊藤由太, 佐藤哲也, 塚田和明, 浅井雅人, 永目諭一郎
2. 発表標題 超重元素原子線分光に向けた電子再結合法による原子ビームの生成
3. 学会等名 日本放射化学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笹沼初音, 伊藤由太, 古川武
2. 発表標題 MRTOF質量測定のための同A/q質量参照イオンの生成
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------