

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月11日現在

機関番号：12601  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23740305  
 研究課題名（和文） 新しい機構のフェッシュバッハ共鳴の研究：極低温分子生成のために  
 研究課題名（英文） Study of Feshbach resonance with a new mechanism:  
 Toward production of ultracold molecules  
 研究代表者  
 青木 貴稔（AOKI TAKATOSHI）  
 東京大学・大学院総合文化研究科・助教  
 研究者番号：30328562

## 研究成果の概要（和文）：

新しい機構のフェッシュバッハ共鳴観測を目指して、RbとSrの同時レーザー冷却・トラップ実験装置を開発した。真空装置と光学系を開発し、RbとSrの同時MOTに世界で初めて成功した。また、同時トラップ中のロス過程として光イオン化が支配的であることを突き止めた。光イオン化光の強度を変えながら光イオン化レートを測定し、 $5P_{\{2/3\}}$ 状態Rbの461nmにおける光イオン化断面積を求めた。

## 研究成果の概要（英文）：

Toward the observation of Feshbach resonance with a new mechanism, we developed an apparatus and to realize simultaneous laser-cooling and trapping of Rb and Sr. After the vacuum apparatus and laser system were developed, we demonstrated simultaneous magneto-optical trapping of Rb and Sr for the first time. Moreover, we found that the photoionization loss is dominant in simultaneous trapping of those atoms. Measuring the photoionization rate as varying the laser beam intensity results in the photoionization cross section of Rb in the  $5P_{\{3/2\}}$  state at a wavelength of 461 nm.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

## 研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス、フェッシュバッハ共鳴、レーザー冷却、極低温分子、極低温原子混合系、光イオン化

## 1. 研究開始当初の背景

最近、極低温分子の研究が注目されている。特に異種原子から成る「異核分子」は電気双極子モーメントを持つため、極低温で双極子間の長距離相互作用する新しい凝縮相が予言され、世界中の研究者が極低温分子の実験的実現を目指している。申請者らはフェッシュバッハ共鳴によりアルカリ原子からなる極低温分子生成に成功している。

最近、全く新しい機構のフェッシュバッハ共鳴の理論研究が発表された。アルカリ原子とアルカリ土類原子間で、この2種類の原子

が近づくことにより、アルカリ原子の超微細結合定数が変調を受け、フェッシュバッハ共鳴が可能になるという。そして、Rb-Sr原子で詳細な計算がなされ、フェッシュバッハ共鳴の磁場の値などが予言され、分子生成の可能性が指摘された。

また、アルカリ原子とアルカリ土類原子から成る分子は、従来のアルカリ原子混合系では作製できなかった「基底状態で電子スピンを持つ分子」であり、その自由度の高さから新しい量子相の予言、量子シミュレーションなどさまざまな応用が理論的に予言されて

いる。

## 2. 研究の目的

本研究では我々の研究室で蓄積された Rb, Sr のレーザー冷却の技術を融合し、Rb-Sr 混合系の実験装置を立ち上げ、世界初となる Rb と Sr の同時トラップを実現する。そして、この新しい機構のフェッシュバツハ共鳴の観測を目指す。

## 3. 研究の方法

Rb 原子と Sr 原子混合系のレーザー冷却を行い、全く新しい機構である超微細結合定数の変調によるフェッシュバツハ共鳴を実験により観測することを目的とする。我々は既に Rb 原子と Sr 原子のレーザー冷却用光源と実験装置を有しており、Rb 原子と Sr 原子単独のレーザー冷却・トラップにもそれぞれ成功している。

本研究では以下のように Rb 原子と Sr 原子の同時冷却・トラップの研究のみを行う。

- (1) Rb 原子と Sr 原子を同時にレーザー冷却するための光学系と複合真空装置を開発する。
- (2) Rb 原子と Sr 原子の同時レーザー冷却と磁気光学トラップ（以下 MOT と略す）を実現する。
- (3) 光トラップへ移行し蒸発冷却により量子縮退混合系を実現する。ヘルムホルツコイルにより高磁場を発生し、フェッシュバツハ共鳴の観測を行い、共鳴磁場の理論と実験値の比較、非弾性衝突レートの測定、散乱長の測定、分子生成を行う。

## 4. 研究成果

(1) 本研究は Rb 原子と Sr 原子混合系のレーザー冷却を行い、全く新しい機構である超微細結合定数の変調によるフェッシュバツハ共鳴を、実験により世界で初めて観測することを目的とする。そのためには、Rb と Sr 原子の同時トラップを実現しなければならない。

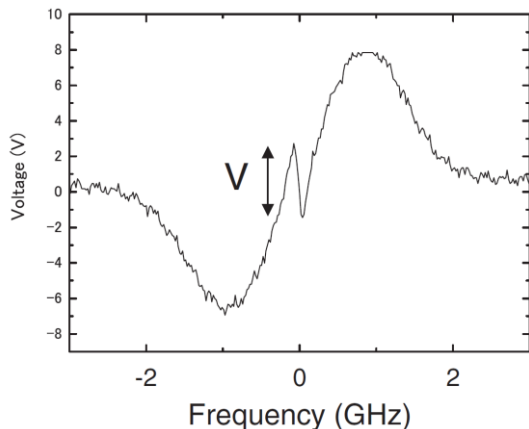


図1 Sr 原子の FM 分光

Sr 原子 MOT のために、Sr の放電セルを用いて FM 分光を行い（図 1）、波長 461nm 光源の周波数安定化に成功した。

(2) Rb 原子と Sr 原子を同時にレーザー冷却するための真空装置の開発を行った。Rb 原子と Sr 原子はオープンで熱して原子ビームとして取り出し、レーザーで速度を減速することが必要である。しかし、Rb 原子と Sr 原子がオープンとして機能する温度はそれぞれ 100°C と 400°C であり、かなり異なる。そこで次のような改良を行った。現有の Sr 原子の真空装置に、Rb オープンを増設し、Rb と Sr で独立なオープンとする。超高真空の真空チャンバーに原子ビームを接続し、Rb と Sr 原子の同時トラップのための真空装置を作製した。

この真空装置を用いて、Rb 原子ビームと Sr 原子ビームにレーザー光を照射して、それぞれゼーマン減速を行った。減速された Rb に波長 780nm のレーザー光を、減速された Sr に波長 461nm のレーザー光を 6 方向から照射し四重極磁場を用いた。これにより Rb と Sr の同時 MOT に世界で初めて成功した（図 2）。



図2 Rb と Sr 原子の同時トラップ  
(a) Sr、(b) Sr と Rb、(c) Rb の MOT

(3) MOT でトラップした Sr 原子の原子数を増加させるために、リポンプ光の光源として波長 497nm のレーザーを開発を行った。994nm の ECDL を作製し、PPLN 導波路により第 2 次高調波として 497nm のレーザー光を発生させた。このレーザー光を MOT された Sr 原子集団に照射することで、SrMOT の原子数を 30 倍に増大させることに成功した（図 3）。

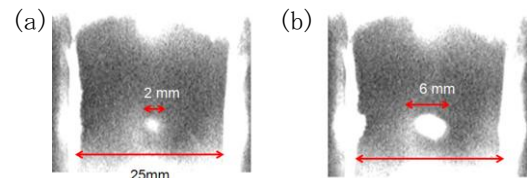


図3 リポンプ光による Sr MOT 原子数増大  
(a) リポンプ光なし、(b) リポンプ光あり

(4) Rb と Sr 原子の同時トラップ中でのロス過程を実験的に研究するため、次の 2 つの過程 (1) light assisted collision、(2) 光イオン化ロス、について調べた。

①アルカリ原子系での同時 MOT 中のロスとして light assisted collision が知られてい

るが、アルカリ原子とアルカリ土類原子系で様々な条件下で実験した結果、ロスが観測されなかった。これは通常のアルカリ原子実験に比べ、トラップ中の Sr 原子数密度が低いことが幸いしたものと考えられる。

②Sr レーザー冷却に用いる波長 461nm の光は、780nm 光による励起状態の Rb 原子をイオン化させる。したがって、同時 MOT に用いるレーザー光そのものがロスの原因となることが考えられる。これは通常のアルカリ原子混合系では起こらず、Rb-Sr 同時トラップに特有の現象である。

本研究ではこの効果を実験的に測定した。図 4 は 461nm 光を 316mW/cm<sup>2</sup> の強度で Rb 原子 MOT に照射したときの原子数の時間変化を測定したものである。時間とともに指数関数的に原子数が減少していることがわかる。

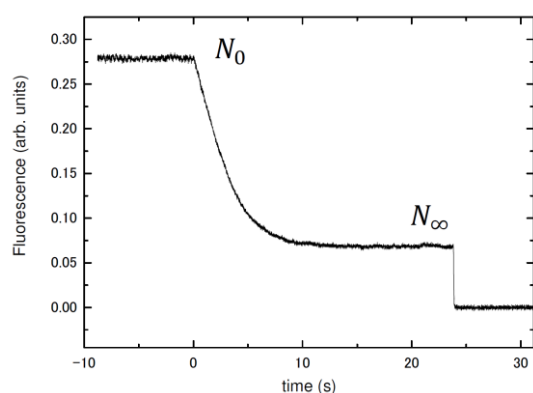


図 4 461 nm 光による Rb MOT 原子数ロス

光イオン化を生じる 461nm 光の光強度を変えながらロスレートを測定した結果、波長 461nm における Rb 5P<sub>3/2</sub> 状態の光イオン化断面積を求めた。また、通常の同時 MOT に用いる光強度では、ロスは 10-20% 程度であり、Rb-Sr 同時トラップを進める上で十分に小さいロスであることを、実験的に解明した。現在、論文を投稿しアクセプトされて印刷中である。

新しい機構のフェッシュバッハ共鳴観測にまでは至らなかったが、その観測を可能とするための Rb と Sr の同時トラップに世界で初めて成功したことで、Rb と Sr を光トラップへ移行してフェッシュバッハ共鳴実験を行うための、重要な基礎データを得ることができた。また、新しいフェッシュバッハ共鳴の機構を利用した Fr-Sr 分子生成による EDM 測定について国際会議 PCPV で招待講演を行った。

## 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 14 件)

[1] Takatoshi Aoki, Yuki Yamanaka, Makoto Takeuchi, Yasuhiro Sakemi, and Yoshio Torii,

“Photoionization loss in simultaneous magneto-optical trapping of Rb and Sr”, Phys. Rev. A (アクセプトされて印刷中)

(査読有り)

[2] Yosuke Shimada, Yuko Chida, Nozomi Ohtsubo, Takatoshi Aoki, Makoto Takeuchi, Takahiro Kuga, and Yoshio Torii,

“A simplified 461-nm laser system using blue laser diodes and a hollow cathode lamp for laser cooling of Sr”,

Rev. Sci. Instrum. **84**, 063101-1-7 (2013).

(査読有り)

DOI: 10.1063/1.4808246

[3] H. Kawamura, T. Aoki et al. (21人中2人目),

“Search for permanent EDM using laser cooled Fr atoms”,

Hyperfine Interact. **214**, 133-139 (2013).

(査読有り)

DOI: 10.1007/s10751-013-0788-7

[4] Yoshio Torii, Hideyasu Tashiro, Nozomi Ohtsubo, and Takatoshi Aoki,

“Laser-phase and frequency stabilization using atomic coherence”,

Phys. Rev. A **86**, 033805-1-7 (2012).

(査読有り)

DOI: 10.1103/PhysRevA.86.033805

[5] Nozomi Ohtsubo, Takatoshi Aoki, and Yoshio Torii,

“Buffer gas-assisted polarization spectroscopy of 6Li”,

Opt. Lett. **37**, 2865-2867 (2012).

(査読有り)

DOI: 10.1364/OL.37.002865

[6] Takatoshi Aoki, Kotaro Umezawa, Yuki Yamanaka, Naotomo Takemura, Yasuhiro Sakemi, and Yoshio Torii,

“A 461 nm laser system and hollow-cathode lamp spectroscopy

for magneto-optical trap of Sr atoms”,

J. Phys. Soc. Jap. **81** (2012) 034401-1-5.

(査読有り)

DOI: 10.1143/JPSJ.81.034401

[7] H. Kawamura, T. Aoki et al. (22人中2人目),

“Search for permanent EDM using laser

cooled Fr atom” ,  
in Proceedings of 5th International  
Workshop on Fundamental Physics Using  
Atoms 2011, edited by N. Sasao (Okayama,  
2012), p. 74-78. (査読無し)

[8] T. Sato, T. Aoki *et al.* (21人中2人目),  
“Production of Slow Atomic Beam for a  
Fr-EDM Measurement” ,  
in Proceedings of 5th International  
Workshop on Fundamental Physics Using  
Atoms 2011, edited by N. Sasao (Okayama,  
2012), p. 106-108. (査読無し)

[9] T. Kato *et al.* (21人中13人目),  
“ Experimental procedure and  
environmental conditions required for  
Fr-EDM measurement” ,  
in Proceedings of 5th International  
Workshop on Fundamental Physics Using  
Atoms 2011, edited by N. Sasao (Okayama,  
2012), p. 109-111. (査読無し)

[10] T. Aoki *et al.* (20人中1人目),  
“Ultracold Sr atoms and FrSr molecules  
toward the search for an electron-EDM” ,  
in Proceedings of 5th International  
Workshop on Fundamental Physics Using  
Atoms 2011, edited by N. Sasao (Okayama,  
2012), p. 118-120. (査読無し)

[11] Yoshio Torii, Nozomi Ohtsubo, Daisuke  
Ikoma, Emiko Inoue, and Takatoshi Aoki,  
“Laser cooling of 6Li atoms towards the  
realization of alkali and  
alkali-earth mixtures” ,  
in Proceedings of 5th International  
Workshop on Fundamental Physics Using  
Atoms 2011, edited by N. Sasao (Okayama,  
2012), p. 121-123. (査読無し)

[12] K. Harada, T. Aoki *et al.* (21人中2  
人目),  
“Development of the magneto-optical trap  
system for Rb and Fr atoms” ,  
in Proceedings of 5th International  
Workshop on Fundamental Physics Using  
Atoms 2011, edited by N. Sasao (Okayama,  
2012), p. 130-132. (査読無し)

[13] Atsuo Morinaga, Koichi Toriyama,  
Hirotaka Narui, Takatoshi Aoki, and  
Hiromitsu Imai  
“Dependence of Berry’ s phase on the sign  
of the g factor for conical rotation of  
a magnetic field, measured without any  
dynamical phase shift” ,

Phys. Rev. A **83**, 052109-1-4 (2011).  
(査読有り)  
DOI: 10.1103/PhysRevA.83.052109

[14] Y. Sakemi *et al.* (19人中12人目),  
“Search for a permanent EDM using laser  
cooled radioactive atom” ,  
J. Phys.:Conf. Ser. **302**, 012051-1-6 (2011).  
(査読有り)  
DOI: 10.1088/1742-6596/302/1/012051

[学会発表] (計 35 件)  
(1) 青木貴稔, 竹内誠、酒見泰寛 A, 鳥井寿  
夫  
Rb 及び Sr 原子の同時磁気光学トラップ III  
26pEE-13  
日本物理学会、2013年3月26日、広島大学  
(2) 佐藤智哉、青木貴稔ら(21人中2人目)  
フランシウムを用いた電子 EDM 探索のための  
中性化器の開発, 27pHB-12  
日本物理学会、2013年3月27日、広島大学

(3) 江連咲紀ら *et al.*, (21人中13人目),  
冷却 Fr を用いた電子 EDM 探索のための磁気  
光学トラップ, 27pHB-13  
日本物理学会、2013年3月27日、広島大学

(4) H. Kawamura *et al.* (21人中11人目),  
“Search for electric dipole moment of the  
electron with laser-cooled radioactive  
atoms”  
The 5th gcOE International Symposium on  
“Weaving Science Web beyond  
Particle-Matter Hierarchy” (Tohoku  
University, Sendai, 5th March 2013)

(5) (招待講演)  
T. Aoki *et al.* (20人中1人目),  
“Toward the search for an electron’ s EDM  
using ultracold molecules: ,  
Current statuses of Fr and Sr  
experiments” ,  
International Workshop of Program on CP  
Violation in Elementary Particles and  
Composite Systems (PCPV 2013),  
(Mahabaleshwar, India, 23rd February  
2013.)

(6) Yoshio Torii, Hideyasu Tashiro, Nozomi  
Ohtsubo, and Takatoshi Aoki,  
“Laser Phase and Frequency Stabilization  
Using Atomic Coherence” ,  
Workshop on the Optical Frequency  
Standards (NICT, Tokyo, 7th February  
2013.)

(7) H. Kawamura, T. Aoki *et al.* (21人中2人目),  
“Laser-cooled radioactive francium factory at CYRIC”,  
EMIS2012, Matsue, Shimane, Japan, 3rd December 2012.

(8) T. Inoue *et al.* (21人中12人目),  
“Search for electron EDM with laser cooled radioactive atom”,  
CJJNPS2012, Beijing, China, 18th October 2012.

(9) Takatoshi Aoki, Yuki Yamanaka, Yasuhiro Sakemi, and Yoshio Torii,  
“Simultaneous magneto-optical trapping of Rb and Sr”,  
International workshop on ultracold group II atoms, NICT, Tokyo, 11th October 2013.

(10) T. Aoki *et al.* (22人中1人目),  
“Toward the search for an electron’s EDM using ultracold molecules:  
Laser excitation in magneto-optical trapping of Rb, Sr and Fr”,  
6th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2012, (Tohoku University, Sendai, 28th September 2012.)

(11) K. Harada *et al.* (20人中13人目),  
“Status report on the development of magneto-optical trap systems for Fr towards the electron EDM search”  
6th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2012, (Tohoku University, Sendai, 28th September 2012.

(12) 原田健一, 青木貴稔ら (18人中2人目),  
Frを用いた電子EDM探索のための718nmヨウ素分子分光, 19pAL-9  
日本物理学会、2012年9月19日、横浜国立大学

(13) Tomohiro Hayamizu *et al.*, (13人中12人目),  
“Development of Fr ion source with melting Au target for electron EDM search”,  
ICAP2012, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, Th-029, 26th July 2012.

(14) Takatoshi Aoki, Yuki Yamanaka, Yasuhiro Sakemi, and Yoshio Torii,  
“Simultaneous magneto-optical trapping of Rb and Sr”,  
ICAP2012, Ecole Polytechnique, Palaiseau,

France, Tu-183, 24th July 2012.

(15) Nozomi Ohtsubo, Daisuke Ikoma, Takatoshi Aoki, and Yoshio Torii,  
“High-performance apparatus for simultaneously laser cooling of 87Rb and 6Li”,  
ICAP2012, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, Mo-181, 23th July 2012.

(16) Kenichi Harada, Takatoshi Aoki *et al.*, (11人中2人目)  
“Development of a double MOT system and spectroscopy of iodine molecule at 718 nm toward the electron EDM measurement”,  
ICAP2012, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, Mo-029, 23th July 2012.

(17) H. Kawamura, T. Aoki *et al.*, (21人中2人目),  
“Search for electron EDM in laser-cooled francium factory”,  
SSP2012 - 5th International Symposium on Symmetries in Subatomic Physics,  
KVI, Groningen, Netherlands, 22nd June 2012.

(18) (招待講演)  
T. Aoki, *et al.*, (23人中1人目),  
“Toward the search for an electron’s EDM using ultracold molecules:  
Current statuses of Fr and Sr experiments”,  
International Workshop on eEDM with Molecules, (University of Tokyo, Tokyo, 20th May 2012)

(19) 大坪望, 生駒大祐, 青木貴稔, 鳥井寿夫  
87Rb原子を用いた6Li原子の協同冷却  
27aSA-3  
日本物理学会、2012年3月27日、関西学院大学

(20) 山中優輝, 青木貴稔, 酒見泰寛 A, 鳥井寿夫  
Rb及びSr原子の同時磁気光学トラップ II  
27aSA-4  
日本物理学会、2012年3月27日、関西学院大学

(21) 佐藤智哉, 青木貴稔ら (21人中2人目),  
電子EDM探索のための高輝度アルカリ原子ビームの開発, 25pXD-7  
日本物理学会、2012年3月25日、関西学院大学

(22) 佐藤智哉, 青木貴稔ら (21人中2人目),  
電子 EDM 探索のための高輝度アルカリ原子ビームの開発, 25pXD-7  
日本物理学会、2012年3月25日、関西学院大学

(23) H. Kawamura, T. Aoki *et al.*, (22人中2人目),  
“Search for permanent EDM using laser cooled Fr atom”,  
5th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2011 (Okayama University, Okayama, 10th October 2011)

(24) Takatoshi Aoki  
“The search for an electron-EDM using ultracold molecules”,  
5th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2011, (Okayama University, Okayama, 9th October 2011)

(25) K. Harada, T. Aoki *et al.*, (21人中2人目),  
“Development of the magneto-optical trap system for Rb and Fr atoms”,  
5th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2011 (Okayama University, Okayama, 8th October 2011)

(26) Yoshio Torii, Nozomi Otsubo, Daisuke Ikoma, Emiko Inoue, and Takatoshi Aoki,  
“Laser cooling of 6Li atoms towards the realization of alkali and alkali-earth mixtures”,  
5th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2011, (Okayama University, Okayama, 8th October 2011)

(27) T. Aoki *et al.*, (20人中1人目),  
“Ultracold Sr atoms and FrSr molecules toward the search for an electron-EDM”,  
5th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2011, (Okayama University, Okayama, 8th October 2011)

(28) T. Kato *et al.*, (21人中13人目),  
“Experimental procedure and environmental conditions required for Fr-EDM measurement”,  
5th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2011, (Okayama University, Okayama, 8th October 2011)

(29) T. Sato, T. Aoki *et al.*, (21人中2人目),  
“Production of Slow Atomic Beam for a Fr-EDM Measurement”,

5th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms 2011, (Okayama University, Okayama, 8th October 2011)

(30) 大坪望, 生駒大祐, 青木貴稔, 鳥井寿夫  
Ar バックファーガス中での 6Li 原子の偏光分光  
22aEB-8  
日本物理学会、2011年9月22日、富山大学

(31) 生駒大祐, 大坪望, 青木貴稔, 鳥井寿夫  
Rb-Li 及び Sr-Li 原子混合系実現のための 6Li 原子の磁気光学トラップ  
24pEE-3  
日本物理学会、2011年9月24日、富山大学

(32) 山中優輝, 青木貴稔, 鳥井寿夫, 酒見泰寛  
Rb 及び Sr 原子の同時磁気光学トラップ  
24pEE-4  
日本物理学会、2011年9月24日、富山大学

(33) 川村広和ら (23人中16人目),  
電子 EDM 探索のための中性アルカリ原子生成装置の開発, 18aSK-5  
日本物理学会、2011年9月18日、弘前大学

(34) 青木貴稔ら (27人中1人目),  
“冷却原子・分子を用いた電子 EDM 探索”、  
第 4 回 精密周波数の発生と高精度分配のための次世代回路技術調査専門委員会  
2011年6月15日、情報通信研究機構

(35) 青木貴稔ら (27人中1人目),  
“EDM 探索に向けて：原子のレーザー冷却と極低温分子生成”、  
Chemistry and Fundamental Science (Tokyo)  
2011年5月7日、東京大学

〔その他〕  
ホームページ等  
無し

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
青木 貴稔 (AOKI TAKATOSHI)  
東京大学・大学院総合文化研究科・助教  
研究者番号：30328562

(2) 研究分担者  
無し  
(3) 連携研究者  
無し