

令和元年6月10日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14362

研究課題名(和文)イオンの周期磁場による磁気共鳴の研究

研究課題名(英文) Resonance of ions using a static periodic magnetic field

研究代表者

永田 祐吾 (Nagata, Yugo)

東京理科大学・理学部第二部物理学科・助教

研究者番号：30574115

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、Srイオンビームとレーザーが必須の開発項目となる。まず永久磁石型のコンパクトなECRイオン源の開発を行った。そして、2.45 GHzマイクロ波導入によるArガスの放電を確認した。そしてイオン源に電極を挿入し、ポテンシャル操作により放電中のArイオンを引き出し、ファラデーカップを用いてArイオン電流、ビームエネルギー、エネルギー広がり測定し、性能を評価した。次に波長422 nmの外部共振器型半導体レーザーを作成し、Rb原子の5s-6p遷移を用いて性能を評価した。研究成果の一部は、1つの論文、2つの国際学会、3つの国内学会で発表された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、静周期磁場によってこれまで観測されたことの無い周波数帯、特にGHz帯でイオンの運動誘起共鳴を観測することに意義がある。それに向けてECRイオン源によるイオンビームと、レーザーの開発を集中的に行い、性能を評価した。また、別の原子の系(ポジトロニウム)において、超微細構造の運動誘起共鳴の観測可能性を詳細に検討し、実験的に可能であることを示せたことも重要な点である。反粒子を含むようなエキゾチック系で、運動誘起共鳴が観測されたことはないため、今後このような実験ができれば大変興味深い。

研究成果の概要(英文)：In this work, Sr ion beams and 422 nm laser were developed. A compact ECR ion source was developed using permanent magnets. A discharge of Ar gas was observed by introducing a 2.45 GHz microwave. Ions were extracted by the operation of an electric potential of electrodes inserted into the ion source. The ion beam current, the beam energy and the energy distribution were measured using a Faraday cup. An external cavity diode laser of a wavelength 422 nm was developed and tested using a transition 5s-6p of Rb atoms. The results were reported in 1 paper, 2 international conferences and 3 domestic academic meetings.

研究分野：原子物理学

キーワード：原子物理 磁気共鳴 運動誘起共鳴 イオン源 ストロンチウムイオン コヒーレント共鳴励起

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

原子分光には、レーザーやマイクロ波のような電磁波ではなく、静周期場を利用したものがある。速度 v で運動する原子が、周期長 a の静周期場を通過すると、原子は周波数 v/a の周期場を摂動として受ける。その周波数が原子のエネルギー準位差に対応する周波数に一致すると共鳴遷移が起こる。これを運動誘起共鳴 (MIR) と呼ぶことにする。静周期電場を用いた電気双極子遷移では、これまでに X 線領域とマイクロ波領域が既に実現されている。基礎研究は 50 年の歴史があり、近年では応用研究に利用され始めている。X 線領域の例では、ドイツの重イオン研究所で、薄い Si 結晶の周期電場によって、ウラン $2s-2p_{3/2}$ 遷移 (4.5 keV) の分光が 10^{-3} の精度で実現され、ウランのエネルギー準位の QED 効果の研究に用いられている (コヒーレント共鳴励起)。X 線領域では他に自由電子レーザーがあるが、イオンビームを使用する場合には、この方法が有効な測定方法となっている。

静周期磁場を用いた原子の共鳴は、2005 年に初めて実現されており、まだ 10 年程度と歴史は浅い。近年では 2 mm の周期長で配列した電流によって静周期磁場を発生させ、Rb 原子を使用して 1 MHz 程度の磁気副準位間の共鳴が 10^{-1} の相対精度で観測されている。

2. 研究の目的

本研究では静周期磁場を用いた原子の MIR を新しい分光法として提案する。そのための基礎研究として、一価の Sr イオンのゼーマン磁気副準位および超微細構造 (5 GHz) の MIR を観測することで、この周波数帯での原理実証を行う。

3. 研究の方法

Sr イオンビームを生成し、その Sr イオンをポンプレーザーで Zeeman 副準位、あるいは超微細構造を偏極させる。偏極 Sr イオンを磁気格子によって生成される静周期磁場 [1] に通し、MIR による偏極の緩和をプローブレーザーで検出することで、MIR の観測を行う。実験を行うには、イオン源とレーザーの開発が必須となる。

(1) ECR イオン源の開発

電子は磁場中でサイクロトロン運動を行うが、そこにサイクロトロン周波数と同じ周波数を持つマイクロ波を導入すると、電子サイクロトロン共鳴 (ECR) により、電子はマイクロ波のパワーを吸収し加熱する。真空槽内にガスを導入すると、加熱した電子によってガスがイオン化される。イオンのサイクロトロン周波数は電子と大きく異なり、マイクロ波によって加熱されない。

(2) イオンビームの開発

イオン源に電極を挿入し、静電ポテンシャルを変化させることでイオンを引き出し、静電レンズでビームの発散、収束を調整し、ビームとして取り出す。ビーム電流はファラデーカップで測定する。

(3) レーザーの開発

一価の Sr イオンを Zeeman 副準位、あるいは超微細構造を偏極させるため、 $5s-5p$ 遷移を用いて光ポンピングを行う。波長は 422 nm である。レーザーとして外部共振器型半導体レーザーを製作する。波長の調整には Rb 原子を用いる。Rb 原子の $5s-6p$ 遷移は Sr イオン $5s-5p$ 遷移に非常に近い。

(4) ポジトロニウムの運動誘起共鳴の数値計算

Sr イオンの運動誘起共鳴と関連して、ポジトロニウム (電子 1 個と陽電子 1 個による 2 体束縛系) の運動誘起共鳴は可能かどうかの検討を行う。

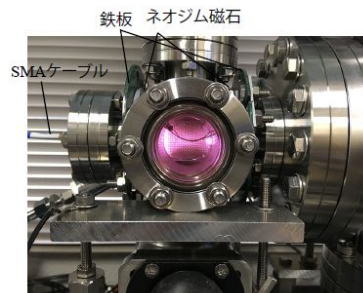


図 1 イオン源と放電の様子

4. 研究成果

(1) ECR イオン源の開発

開発した ECR イオン源は主にマイクロ波源、ネオジム磁石、アンテナで構成される。これらを既製品の ICF70 六方クロス配管に接続した (図 1)。

マイクロ波の周波数は、よく使われている周波数 2.45 GHz とした。マイクロ波源は GHz 帯の PLL 発信機に、7 dB と 30 dB のアンプを 2 段重ねて開発した。周波数にも依存するが、最大で 6 W 程度の出力を得た。

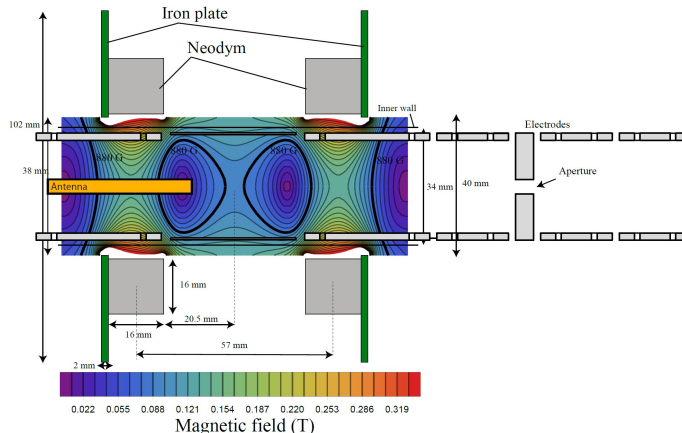


図 2 イオン源の構造の模式図

ECR 条件から 2.45 GHz のマイクロ波に対して 880 G 程度の磁場強度が必要となる。磁石としてはリング状のネオジム磁石を用いた。配管内の磁場強度を上げるため磁石内径を小さくする必要があり、真空配管の外形に沿うような形状とした。しかし、このままでは真空フランジを通すことができないため、半割のネオジム磁石を特注し、組み上げた。さらに磁石に鉄の円板を貼り付けることで効率よく磁力線をループさせて磁場を増強させ、図 2 のように配管内部で 880 G の磁場強度を得た。

アンテナとしては、銅製のモノポール、ダイポール、ループアンテナを試し、さらに太さを変えて、ロータリーポンプの排気による真空下で放電テストを行い、放電を確認した(図 1)。図 3 (a)は真空配管内のアンテナに導入する直前のマイクロ波のパワーの周波数依存性である。(b)ではマイクロ波をあらかじめサーキュレータに通してからアンテナに導入し、周波数を変えながら反射波のパワーを測定したものである。放電していない場合、反射率はほぼ 1 で全反射になっているが、放電した場合、反射率は 10%前後となり、ほとんどのパワーがイオン源に吸収されていることが分かる。青線と赤線はそれぞれ低周波側、高周波側からスキャンした場合の結果を示している。パワーが 5 W 程度を超えたあたりで放電し、一度放電すればパワーが小さくても放電を続けることが分かる。また、ロータリーポンプの真空下ではアンテナの銅表面が酸化し、一度放電すると 2 回目の放電はしなかった。表面の酸化膜を紙やすりで落とせば再度放電した。以下で説明する Ar ガス環境下ではこのような問題は起きない。

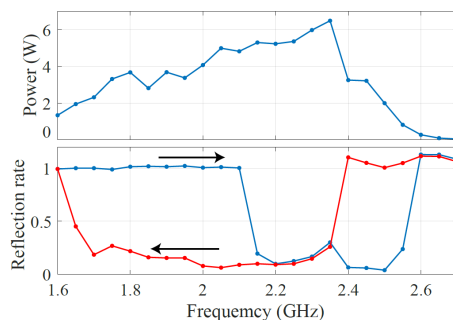


図 3 マイクロ波パワーと反射率

(2) Ar イオンビーム生成実験

図 2 に示されるようにイオン源に電極を挿入し、可変リークバルブから Ar を導入して、Ar イオンビーム生成のテストをした。イオン源側と差動排気にするすることで 10^{-4} Pa の真空環境にイオンを引き出し、ファラデーカップでイオン電流を測定した。図 4 に一例を示す。縦軸がイオン電流で、横軸はファラデーカップ入口のメッシュ電圧である。青点は測定データで、約 1.3 μ A を検出し、電流量としては今後の実験に十分である。黒

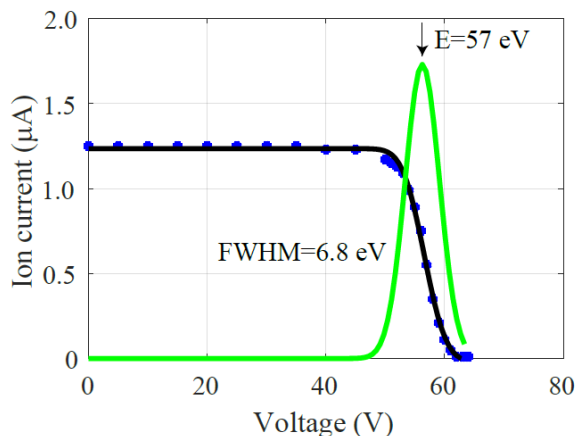


図 4 イオン電流のファラデーカップ入口電圧依存性

線は誤差関数のフィットである。緑線はその微分で、イオンビームのエネルギーが 57 eV であり、進行方向のエネルギー広がり FWHM で 6.8 eV であることがわかる。今後は Sr イオンのオープンを作成し、Sr イオンビームの生成実験を行う。

(3) レーザーの開発

422 nm のレーザーとして Nichia 製レーザーダイオード (NDV4A16)、ホログラフィック回折格子 3600/mm を用いて、温調機能を持つ外部共振器型半導体レーザーを開発した。レーザーの周波数は 10 GHz 程度変調することができた。これは Rb 原子の分光に十分な性能である。レーザー波長を Rb 原子 5s-6p 遷移に調整した状態で、40 mW 程度の出力を得た。図 4 (b) は測定した Rb 原子の分光結果である。Rb の同位体の違い、超微細構造分裂が正しく観測された。(a) は Sr イオンの分光結果の文献値である。 ^{85}Rb $F=2 \rightarrow F'=2,3$ の遷移の肩と Sr イオンの 5s-5p 遷移が非常

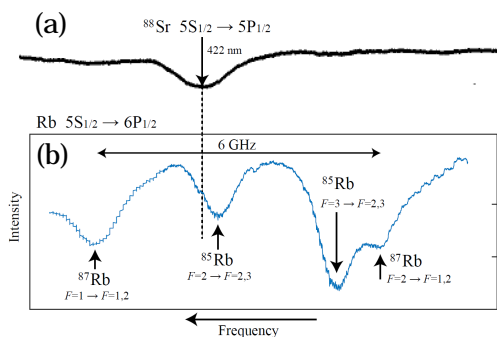


図 5 (a) Sr イオン 5s-5p 遷移 (b) Rb 原子 5s-6p 遷移

に近い。今後は必要があれば、周波数ロック等のレーザーの安定化を進める。

Sr イオンビームが完成次第、レーザーによる Sr イオンの偏極、そして MIR の観測実験を速やかにやりたい。

(4) ポジトロニウムの運動誘起共鳴の数値計算

ポジトロニウム (Ps) は超微細構造を持ち、singlet と triplet の 2 状態に分裂する。そのエネルギー差は周波数にして 203 GHz である。Ps の超微細構造は電子と陽電子のスピンの起因するため、それらの準位間を磁気双極子遷移させることができる。従って静周期磁場 [1] 中に Ps を通過させると、運動誘起共鳴による超微細構造の共鳴を観測することができる。これを数値計算によって詳細に検討した。Ps の速度は光速の 10% と非常に速く、強力な磁場が必要となる。そのために 10 層の強磁性体による、磁場振幅が 1500 G という強力な周期磁場を生成できる構造を考案した。その周期磁場の計算結果をもとに、量子リウヴィル方程式による Ps の密度行列の時間発展を解いた。図 5 は計算結果で、共鳴中心は Zeeman 効果で 203 GHz から少しシフトし、共鳴幅は 10 周期から予想される通り 10% 程度となっている。この計算結果は周期場の周期数や磁場強度、つまり今後設計する実際の磁性体の磁化の仕方に依存するが、現実的な磁場の周期構造を用いた MIR の観測可能性を十分に示すことができた。反粒子を含むようなエキゾチック系で、MIR が観測されたことは無いため、今後このような実験ができれば大変興味深い。

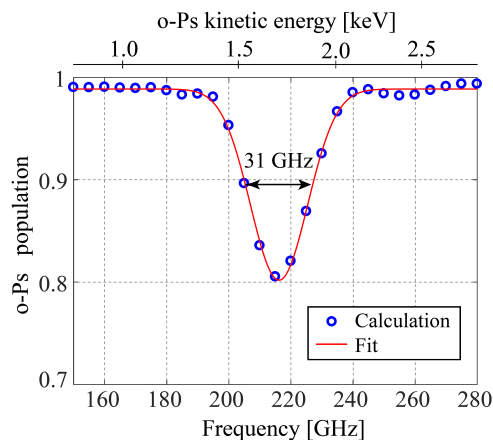


図 6 Ps 超微細構造の共鳴の計算

[1] Y. Nagata, S. Kurokawa and A. Hatakeyama

“Magnetic resonance of rubidium atoms passing through a multi-layered transmission magnetic grating”

J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 50 105002 (2017).

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 5 件)

永田祐吾, 満汐孝治, 飯塚太郎, 田中文, 鞠谷温士, L. Chiari, 大島永康, 長嶋泰之
静周期磁場によるポジトロニウム超微細構造遷移の観測実験

「陽電子科学とその理工学への応用」専門研究会、2018

永田祐吾, 新井智哉, 岩森大直, 佐藤雅久, 畠山温, 長嶋泰之

静周期磁場による Sr イオンの磁気共鳴実験の装置開発

日本物理学会「秋季大会」同志社大、2018

Y. Nagata, K. Michishio, L. Chiari, F. Tanaka, N. Oshima, Y. Nagashima

“Toward the observation of the hyperfine transition of positronium using a multi-layered transmission magnetic grating”, ICPA18, Orlando, USA, Aug. 2018

永田祐吾, 満汐孝治, 田中文, L. Chiari, 大島永康, 長嶋泰之

過型多層薄膜磁気格子によるポジトロニウム超微細構造の磁気共鳴測定の見直し

日本物理学会「第 73 回年次大会」東京理科大、2018

Y. Nagata, S. Kurokawa and A. Hatakeyama

“Magnetic resonance of rubidium atoms passing through a multi-layered transmission magnetic grating”, ICPEAC2017, Cairns, Australia, Aug. 2017

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。