

超流動ヘリウム中Rb原子の超微細構造間隔測定のための観測原子数補正システムと磁場精度の検証

土居, 三瑠 / DOI, Miru

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

63

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2022-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025397>

# 超流動ヘリウム中 Rb 原子の超微細構造間隔測定のための観測原子数補正システムと磁場精度の検証

BASELINE CORRECTION SYSTEM AND EVALUATION OF MAGNETIC FIELD STRENGTH  
FOR THE MEASUREMENT OF THE HYPERFINE STRUCTURE  
OF Rb ATOMS IN SUPERFLUID HELIUM

土居 三瑠

Miru DOI

指導教員 松尾由賀利

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻創生科学系修士課程

We have been developing a laser spectroscopic method for atoms injected into superfluid helium (He II). We aim to measure hyperfine structure splitting which is caused by interaction between nuclei and valence electrons under the circumstance of He II. However, it has been difficult to realize measurement with sufficiently high precision due to the fluctuation of the number of observed photons when we use two-step laser sputtering method to supply atoms into He II. To overcome this difficulty, a baseline correction system to cancel the fluctuation of the number of atoms was developed. In this study, we performed an RF double resonance experiment for Rb atoms injected into He II using the baseline correction system. And we evaluated the precision of the magnetic field strength applied to the atoms which will be utilized for the measurement of the hyperfine structure.

**Key Words:** *Laser spectroscopy, Superfluid helium, hyperfine structure, Baseline correction system, Magnetic field*

## 1, 研究背景

レーザー分光法は、現代物理の中でも最も高精度な測定が可能な手法の一つであり、理論的に不明確な核力モデルの影響を受けない点等からも原子核構造研究に適した測定手法であると言える。我々の研究室では、理化学研究所の核分光研究室との共同研究として、超流動ヘリウム (He II) 環境とレーザー分光法を組み合わせた OROCHI 法 (Optical Radioisotope atom Observation in Condensed Helium as Ion-catcher) を用い、不安定原子核の核構造研究を行っている<sup>[1]</sup>。He II 中に導入した原子に対し、光ポンピング法及びレーザー・マイクロ波 (MW) / ラジオ波 (RF) 二重共鳴法と呼ばれるレーザー分光法を適用することで、原子の状態変化に伴って放出されるレーザー誘起蛍光 (LIF) を観測する。LIF の観測により、原子核と電子の相互作用に起因して分裂する超微細構造準位間隔やゼー

マン準位間隔の測定を行う。これらの間隔の精密な測定により、原子核の核構造を反映した核磁気モーメント及び核スピンの導出が可能となる。

### 1.1, レーザー分光法

Rb 原子の超微細構造間隔及びゼーマン準位間隔測定には、光ポンピング法及びレーザー・MW/RF 二重共鳴法と呼ばれるレーザー分光法を適用する。光ポンピングによる偏極生成では、一様な磁場を印加した観測領域内において、原子に円偏光レーザーを照射する。右回り円偏光の場合、原子はレーザー光を吸収し、磁気量子数の選択則に従って励起状態 ( $P_{1/2}$ ) の  $m_f = +1$  の準位に励起される。励起状態の原子は自然放出寿命を迎えると、 $\Delta m_f = \pm 1, 0$  の選択則に従って、基底状態 ( $S_{1/2}$ ) に脱励起する。このとき、原子は吸収した光子分のエネルギーを蛍光として放出する。この蛍光をレーザー誘

起蛍光 (Laser Induced Fluorescence、以下 LIF) と呼ぶ。脱励起した原子は、再びレーザー光を吸収し、励起・脱励起のサイクルを経るが、 $S_{1/2}$ の磁気量子数最大の準位にある原子は、 $P_{1/2}$ の $m_f = +1$ に相当する準位が存在しないため、励起されずにこの準位に留まる。故に、このサイクルを繰り返すことで、基底状態の磁気量子数最大の準位に原子占拠数を偏らせることが可能である(スピン偏極)。完全に偏極が生成された状態では原子はレーザー光を吸収することができないため、励起・脱励起のサイクルが起これず LIF は観測されなくなる。この原子に対し、超微細構造間隔及びゼーマン準位間隔に相当する MW/RF を照射すると、共鳴した準位間で遷移が起こり、偏極が崩れる。これにより遷移した原子は再びレーザー光を吸収できるので LIF が観測される。故に、印加した MW/RF の周波数の測定により超微細構造間隔及びゼーマン準位間隔が測定可能となる。4 項で述べる原子数補正システムにおいては、照射されたレーザーが円偏光状態時に偏極が生成され、直線偏光の場合は生成されないという性質を利用する。レーザー二重共鳴法概念図を図 1 に示す。

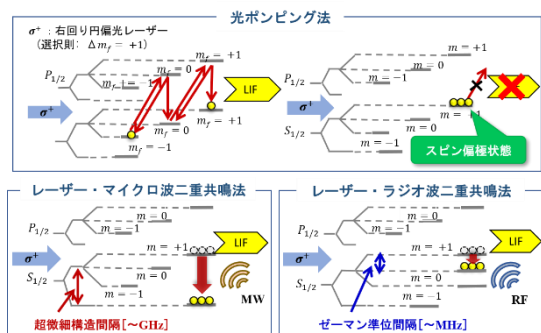


図 1 レーザー・MW/RF 二重共鳴法概念図

### 1.2, 超流動ヘリウム (He II)

我々の研究における特長の一つに、超流動ヘリウム (He II) と呼ばれる特殊な液体を原子の分光環境として用いていることが挙げられる。He II を分光環境として用いる利点として、広範囲の波長帯域に対して透明であることや高密度液体であることによる高効率な原子トラップなどがある。その中でも特に、吸収・放出スペクトルの線幅広がりや短波長シフトがレーザー分光法を行う上で利用されている。この効果は、導入原子の最外殻電子と He が持つ電子との間の反発力により形成される空乏領域(原子バブル)によるものである。原子バブルモ

デルを用いた吸収・放出過程及び  $^{133}\text{Cs}$  原子の分光スペクトル<sup>[2]</sup>を図 2 に示す。

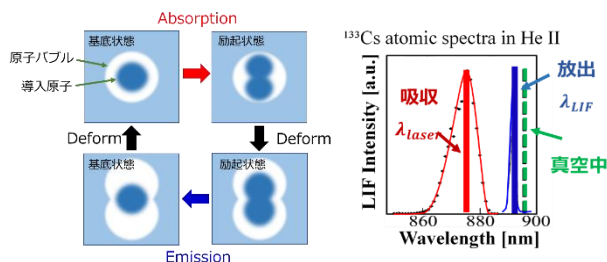


図 2 He II 中原子の吸収・放出過程(左)と  $^{133}\text{Cs}$  原子の分光スペクトル(右)

レーザー光を吸収した原子は、周囲の He 原子を押しつけて電子励起状態へ励起される。故に、真空中に比べ高エネルギー、すなわち短波長の光が必要となり、吸収波長が大きく短波長側にシフトする。また周囲の He 原子は微小振動しているため、原子との距離が変化する。そのため、原子との距離ごとに励起に必要なエネルギーが変化し、励起波長の線幅の広がりが発生する。一方、励起状態では核外電子軌道が大きくなり、それに応じて原子バブルの半径も大きくなる。そのため、原子バブルのエネルギーは自由電子のエネルギーに近い値となり、He 原子との距離依存性も小さくなる。よって、放出スペクトルは吸収スペクトルと比較して短波長へのシフトは少なく、線幅も狭くなる。He II を利用することで、吸収波長と放出波長の分離によるレーザー散乱光の削減や、レーザーの単一化により、高感度・高効率な測定が可能となる。

## 2, 研究目的

これまでの研究において He II 中の  $^{85,87}\text{Rb}$  に対して 5 桁の、 $^{133}\text{Cs}$  に対して 6 桁の精度での超微細構造間隔測定が行われ<sup>[3]</sup>、真空中に比べそれぞれ 1%以下で変化していることを観測し、He II が原子核と電子雲の相互作用に及ぼす影響の研究が進められてきた。これにより、原子核内の磁気双極子が磁化分布を持つために生じる同位体間でのわずかな差(超微細構造異常)の議論が可能である。さらに、測定精度を向上させることで、超微細構造異常における He II の影響を議論できると期待される。しかし、現在採用している He II 中への原子供給法では供給原子数に由来するバックグラウンドの揺らぎが起こり、これが測定精度を制限している。この揺らぎを解決するため、観測原子数を補正するシステムを開発した<sup>[4]</sup>。本研究では、6 桁の精度及

び精度でのRb原子の超微細構造間隔測定に必要となる磁場の精度を導出するため、He II中に導入したRb原子にレーザー・RF二重共鳴法を適用し、RF共鳴の精度を検証した。

### 3, 問題点

#### 3.1, アナログ掃引とステップ掃引

レーザー・MW二重共鳴実験に用いられるMW発振器には、図3に示すアナログ掃引とステップ掃引の2種類の掃引モードが存在する。アナログ掃引は、開始及び終了周波数を設定するのみであるので、短い掃引時間を実現できる(~1 s)。一方で、掃引中の周波数変化が不明確という問題がある。ステップ掃引は、ステップ幅と掃引時間を設定するので、周波数変化が明確である。一方で、設定パラメータの下限値の関係から、掃引時間が長くなってしま(~10 s程度)。これまでの実験では、アナログ掃引を用いていたが、周波数変化が明確なステップ掃引に変更することで更なる高精度測定を目指す。しかし、掃引時間、つまり測定時間の増大は、後述の原子供給量の不安定さによるバックグラウンドの揺らぎを引き起こす。

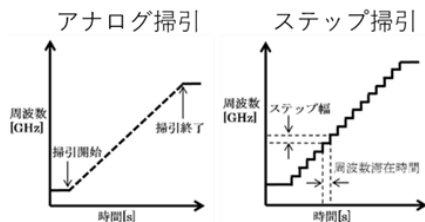


図3 アナログ掃引とステップ掃引の概念図

#### 3.2, He IIへの原子供給によるバックグラウンドの揺らぎ

現在、He II中への原子供給にはレーザーアブレーション法と呼ばれる手法を用いている。図4にレーザーアブレーション法による原子供給の概要図を示す。

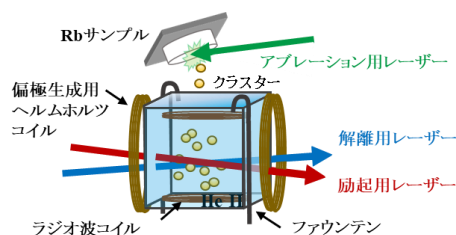
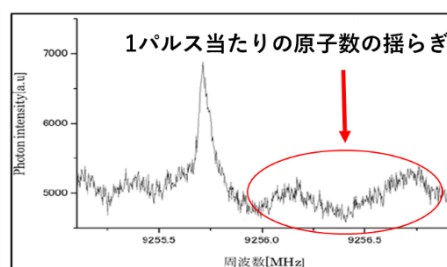


図4 レーザーアブレーションによる原子供給法概要図

He II液面上部に設置した原子の固体サンプルに対し、高出力のパルスレーザーによるアブレーションを行うことで原子・分子・クラスターを爆発的に飛散させ、He II中に侵入したクラスターを異なるパルスレーザーで解離することで観測領域に原子単体を供給する手法である。しかし、この方法では、アブレーション時の1パルス当たり生成される原子数が不安定であり、図5に示すようなバックグラウンド揺らぎが生じる。



K. Imamura, Doctoral dissertation, Meiji Univ. (2015)

図5 バックグラウンドの揺らぎを含んだスペクトル

### 4, 観測原子数補正システム

3項で述べたバックグラウンドの揺らぎをなくすため、観測原子数を補正するシステムの開発を行った。観測原子数補正システムは、電圧の印加によってレーザーの偏光状態を切り替える電気光学変調器(EOM)と、複数のチャンネルでの同時時間測定が可能なMulti-Channel Scalar(MCS)で構成されている。原子数補正システムにおいては、光ポンピング法で用いるレーザーの偏光状態をEOMによって切り替えることで、円偏光状態時に偏極が生成され、直線偏光の場合は生成されないという性質を利用する。レーザー光が円偏光状態のch.1では偏極状態が生成されるため二重共鳴が起き、『共鳴と揺らぎの情報』が含まれた信号である。一方で、直線偏光状態では偏極状態は生成されないため原子数に応じたLIFが観測され、『揺らぎの情報』が含まれる信号である。そのため、EOMでレーザー光を円偏光と直線偏光に高速で切り替え、MCSで二つの状態の光子数を同時に観測することで、円偏光状態の光子数を直線偏光状態の光子数で補正し、バックグラウンドの揺らぎを安定させる。このシステムを従来のセットアップに組み込み、Rb原子の超微細構造間隔測定を行う。図6に原子数補正の概略図を示す。

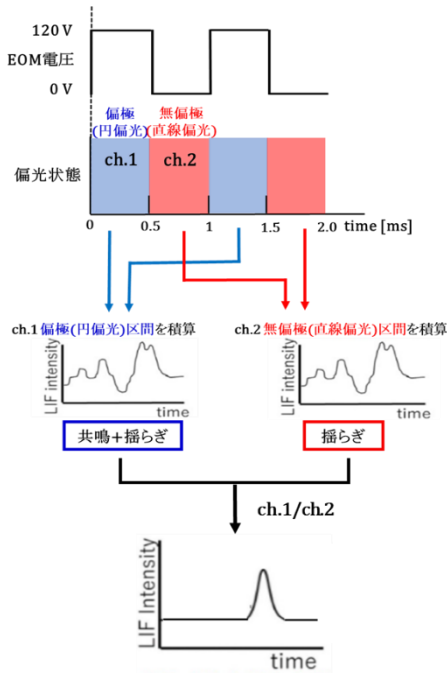


図 6 システムを用いた原子数補正の概念図

### 5, Rb 原子のレーザー・ラジオ波二重共鳴実験

MW 共鳴から超微細構造間隔を正確に求めるためには、原子に印加されている磁場を正確に知る必要がある。そのために He II 中に導入した Rb 原子にレーザー・RF 二重共鳴法を適用し、RF 共鳴の精度を検証した。図 7 に実験のセットアップ図を示す。

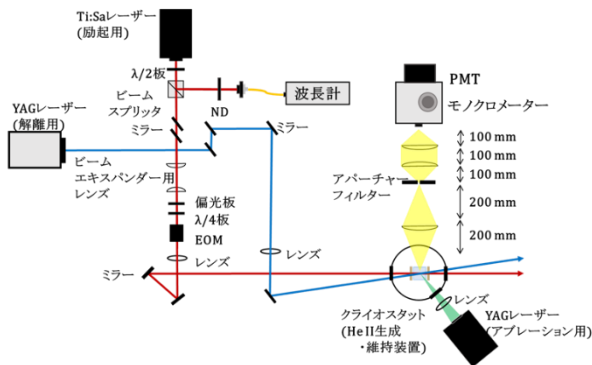


図 7 レーザー・RF 二重共鳴実験の概要図

光ポンピング用のレーザー光路に EOM を設置し、1 kHz の矩形波の電圧を印加した。また、He II を生成・保持する装置のクライオスタット内でレーザーアブレーションによる原子供給を行った。

RF 共鳴スペクトルの取得には、磁場を掃引し固定 RF を印加する方法と、固定磁場を印加し RF 周波数を掃引する二つの手法を用いた。初めに、磁場を三角波で掃引し、3 MHz の固定 RF を印加した。得られた偏極スペクトルを図 8 に示す。

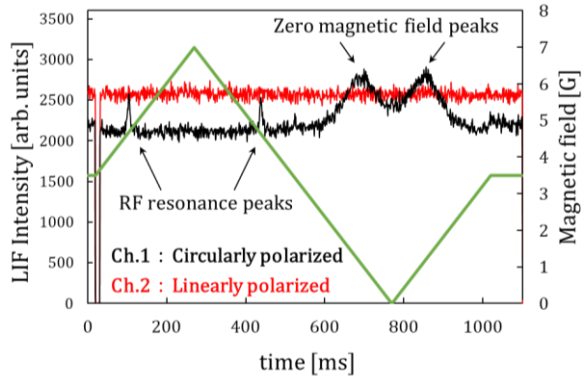


図 8 磁場掃引、固定 RF 印加スペクトル

図 8 において黒線では円偏光状態を、赤線では直線偏光状態における LIF 強度を表している。また、掃引磁場の強度を緑線で重ね合わせた。ch.1 において磁場強度 0 の点で 0 磁場ピークが観測されたため、偏極状態の生成に成功したといえる。円偏光状態を直線偏光状態で補正したスペクトルを図 9 に示す。

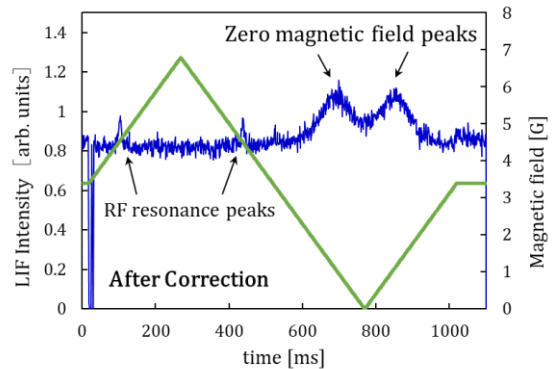


図 9 補正後 磁場掃引、固定 RF 印加スペクトル

今回の実験において、補正前の原子数に大きな揺らぎが無かったため、補正の前後で精度の向上は見られなかったが、本システムが正しく機能していることが確認できた。3.1 項で述べた通り、MW 掃引は RF 掃引に比べ 10 倍の掃引時間がかかるため、1 回の掃引中に生じる原子数が大きく影響する。したがって、本システムは MW 共鳴取得時に有効であると考えられる。

次に、磁場強度を固定し、RF 周波数を 1.5~3.5 MHz で掃引した。原子数補正後のスペクトルを図 10、図 11 に示す。

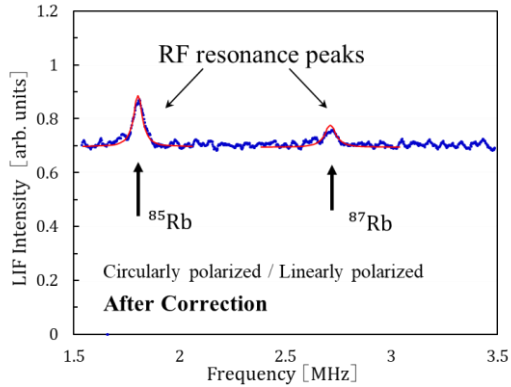


図 10 補正後 RF 掃引、固定磁場印加スペクトル

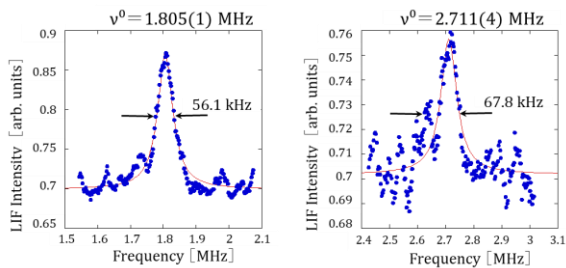


図 11  $^{85}\text{Rb}$  (左図) と  $^{87}\text{Rb}$  (右図) の RF 共鳴スペクトル

図 10 において、左側のピークは  $^{85}\text{Rb}$  を、右側のピークは  $^{87}\text{Rb}$  のゼーマン準位に相当する共鳴周波数を示している。図 11 において  $^{85}\text{Rb}$  は 1.805(1) MHz、 $^{87}\text{Rb}$  は 2.711(4) MHz で、それぞれ共鳴周波数を取得した。この結果から、(5.1)式を用いて、観測領域における磁場の導出を行った。

$$\Delta W_{\text{zeeman}}/h = g_J/(2I + 1) \times \mu_B/h \times B \quad (5.1)$$

ここで、 $\Delta W_{\text{zeeman}}/h$  はゼーマン準位共鳴周波数、 $g_J$  はランダウの  $g$  因子、 $\mu_B/h$  はボーア磁子、 $I$  は核スピンである。

これにより、3.865(2) G という精度での磁場が導出できた。この磁場の精度からは、5 桁での MW 共鳴周波数測定が可能である。また、複数の磁場の値で共鳴周波数を測定することで精度が向上し、6 桁での MW 共鳴周波数測定も可能となる。

## 6, まとめと今後の研究計画

我々は超流動ヘリウムとレーザー分光法を用いて原子の核構造研究を行っている。これまでの研究において、He II 中の  $^{85,87}\text{Rb}$  に対して 5 桁、 $^{133}\text{Cs}$  に対して 6 桁の精度での超微細構造間隔測定が行われ<sup>[3]</sup>、He II が原子核と電子雲の相互作用に及ぼす影響の研究が進められてきた。さらに測定精度を向上させることで、原子核内の磁気双極子が磁化分布を持つために生じる同位体間でのわずかな差(超微細構造異常)における He II の影響を議論できると期待される。しかし、現在採用している He II 中への原子供給法では供給原子数に由来するバックグラウンドの揺らぎが起こる。この揺らぎを解決し、精度向上を図るため、観測原子数を補正するシステムを開発した<sup>[4]</sup>。本研究では、より高精度及び高確度の Rb 原子の超微細構造間隔測定に必要な観測領域における磁場の精度を導出するため、He II 中に導入した Rb 原子にレーザー・RF 二重共鳴法を適用し、RF 共鳴の精度を検証した。

$^{85}\text{Rb}$  は 1.805(1) MHz、 $^{87}\text{Rb}$  は 2.711(4) MHz において、それぞれゼーマン準位に相当する共鳴周波数を取得した。RF 共鳴周波数から原子に印加されている磁場を 3.865(2) G という精度で導出でき、この磁場の精度から 5 桁での MW 共鳴周波数測定が可能であると考えられる。

今後、より高い精度及び確度での共鳴周波数を測定するためには、原子に印加される磁場強度の均一性が必要である。そのために、地磁気や実験器具等により発生する外部磁場の影響を補正するコイルを作成し、スピン偏極状態の偏極度を向上させる。その後、開発したシステムを実装して He II 中での MW 共鳴実験を行い、6 桁の精度及び確度での Rb 原子の超微細構造間隔測定を目指す。

## 7, 参考文献

- [1] T. Furukawa, Y. Matsuo, A. Hatakeyama, K. Fujikake, Y. Matsuura, T. Kobayashi, T. Shimoda *et al.*: *Hyperfine Interact.***196**, 191 (2010).
- [2] Y. Takahashi *et al.*, *PRL* **71**, 1035 (1993)
- [3] T. Furukawa, Doctoral dissertation, Osaka Univ. (2007)
- [4] 三條真, 法政大学, 修士論文 (2019).