法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-01-03

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^[1]。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 が起こらず 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(HeII)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。HeII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と短 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¹³³Cs 原子の分光 スペクトル^[2]を図2 に示す。



図 2 He II 中原子の吸収・放出過程(左)と ¹³³Cs 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 押しの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}Rb に対 して5桁の、¹³³Cs に対して6桁の精度での超微細 構造間隔測定が行われ^[3]、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^[4]。本研究では、6桁の精度及 び確度での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 ってしまう(~10s 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。



HeII 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パルス当たりに生成される原子数 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, Docotoral 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 ⁸⁵Rb(左図)と⁸⁷Rb(右図)の RF 共鳴スペクトル

図 10 において、左側のピークは^{ss}Rb を、右側の ピークは^{sr}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^{ss}Rb は 1.805(1) MHz、^{sr}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。

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

ここで、 $\Delta W_{zeeman}/h$ はゼーマン準位共鳴周波数、 g_I はランデのg 因子、 μ_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}Rb に対して5桁、¹³³Cs に対して 6 桁の精度での超微細構造間隔測定が行 われ^[3]、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[4]。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 となる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。

Rb は 1.805(1) MHz、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).