# 法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-01-15

# 超流動ヘリウム中原子の超微細構造間隔の圧 力依存性測定に向けた液体窒素中へのCs原子 供給システムの開発

KUDARA, Hokuto / 百濟, 北斗

(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) 64 (開始ページ / Start Page) 1 (終了ページ / End Page) 7 (発行年 / Year) 2023-03-24

(URL) https://doi.org/10.15002/00026424

# 超流動ヘリウム中原子の超微細構造間隔の 圧力依存性測定に向けた 液体窒素中への Cs 原子供給システムの開発

## DEVELOPMENT OF CESIUM ATOM SUPPLY SYSTEM IN LIQUID NITROGEN FOR PRESSURE-DEPENDENT MEASUREMENT OF HYPERFINE STRUCTURE SPLITTING OF ATOMS IN SUPERFLUID HELIUM

百濟 北斗 Hokuto KUDARA 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

It is known that hyperfine structure energy splitting of atoms in superfluid helium (He II) is slightly different from that in vacuum. We have been developing a variable pressure vessel for laser RF/MW double resonance spectroscopy of Rb and Cs atoms in He II in order to measure the hyperfine structure splitting energy at different pressures and to clarify the effect of pressure on the interaction of atoms with He II.

This study aims to develop a Cs atoms supply system in a variable pressure vessel for measurement of hyperfine structure splitting of cesium atoms in He II at various pressures; however, as a pilot experiment, liquid nitrogen was used instead of He II in this study. First, the operation of laser-induced fluorescence

(LIF) detection system using a photon counting method with a photomultiplier tube (PMT) was verified in a gas cell filled with Cs atoms. In an experiment using the ablation method to supply cesium atoms into a pressure-variable vessel filled with liquid nitrogen, emission from cesium atoms was confirmed. This result suggests that Cs atoms were supplied in a variable pressure vessel filled with liquid nitrogen.

Key Words : laser spectroscopy, laser-induced fluorescence, photon counting method

1. 研究背景

(1) Hell 中不純物原子の超微細構造間隔

我々の研究室では,超流動ヘリウム(HeII) という特異な環境下の原子に対してレーザー 分光法を適用することにより,HeIIと原子の 相互作用について解明することを目的とした 研究を行っている.

Hell は近年, レーザー分光を行う新たな分 光環境として注目されており, Hell 中の不純 物原子に対しては,先行研究により,レーザ ー・ラジオ波 (RF) /マイクロ波 (MW) 二重 共鳴法によるゼーマン準位間隔/超微細構造 間隔の測定が行われている.この測定に関し てはまず対象とする原子に光ポンピング法を 適用することで,励起・脱励起過程を経て,ス ピン偏極状態が生成される.その後,偏極状 態にある原子は円偏光レーザーを吸収できず, レーザー 誘 起 蛍 光 (Laser Induced Fluorescence:LIF)が消失する. そこで, 更に レーザー・RF/MW 二重共鳴法の適用によっ て一時的に観測される LIF の共鳴周波数を測 定することで、ゼーマン準位間隔/超微細構 造間隔を決定することができる. Fig. 1 にレー ザー・RF/MW 二重共鳴法の概略図と本手法 により取得が予測されるスペクトルを示す.



**Fig.1** レーザー・RF/MW 二重共鳴法の概略 図および本手法により予測されるスペクトル

上述のように,原子のエネルギー準位構造を 詳細に決定することで,様々な物理情報を得 ることができる<sup>[1,2]</sup>. 先行研究では, 超微細構 造間隔については 6 桁の精度による精密な測 定に成功しており, He II 中の原子はその超微 細構造間隔が真空中に比べ, 1%以下ではある がわずかに拡大することが確認された<sup>[3]</sup>.

(2) He II 環境への導入に向けた圧力可変容器の開発

上述のように,先行研究では He II 中<sup>85,87</sup> Rb 原子のレーザー・RF/MW 二重共鳴法による ゼーマン準位間隔/超微細構造間隔の測定に 成功し,超微細構造間隔については 6 桁以上 の精度で測定することが可能となっている. しかし,これらの研究は He II の飽和蒸気圧 曲線上での成果であり,He II 環境下で圧力の みを独立的に変化させた場合のゼーマン準位 間隔/超微細構造間隔の測定に関しては未だ 報告されていない.ボイル・シャルルの法則 において示されているように,通常,圧力と 温度は一対一対応しているため,一方のみを 独立的に変化させることは困難である. Fig. 2 に He 原子の相図を示す.



**Fig.2** He 原子の相図

そこで我々の研究室では「圧力可変容器」の 開発を行った. 圧力可変容器は Fig. 3 に示す ように, 真鍮製でクライオスタットと呼ばれ る冷却装置の分光窓に対応する窓が側面に 4 つ,底面に1つ存在し,上蓋はHe導入用のパ イプを接続可能な構造となっており,この圧 力可変容器をクライオスタットの HeII 槽内 に設置することにより,容器内の温度は HeII で満たされている容器外の温度と等し くなる一方,圧力は容器内に導入される He の圧力になるため,圧力のみを独立に変化さ せることが可能となる.



**Fig. 3** 圧力可変容器(写真) (左:外観,右:内部)

本研究室では、この圧力可変システムによっ て、圧力可変な超微細構造間隔を測定し、 HeIIと原子の相互作用に及ぼす圧力の影響 を明らかにすることを目的に研究を進めてい る.

#### 2. 研究目的

本研究室では、Cs 原子を測定対象とし、圧 カ可変な He II 中の超微細構造間隔の測定を 目指している. 先行研究で LIF を観測するた めの励起用レーザーの作製は完了しているが、 圧力可変容器内の Cs 原子の供給は確認され ていない. そこで、本研究では、圧力可変容 器内の He II 中での Cs 原子の超微細構造間隔 の測定に向けて、圧力可変容器内の Cs 原子供 給システムを開発することを目的とする.

### 3. Cs原子封入ガスセルを用いたLIF観測

本研究における最大の特徴は,分光環境と して He II を用いる点に加え, He II 環境下で 圧力のみを独立的に変化させることが可能な 環境の実現を目指す点にある.しかしながら, 圧力の独立変化を実現するために開発された 圧力可変容器導入後における Cs 原子の LIF 観測は未だ為されておらず,本容器に期待す る性能の有無に関して検証されていない.そ こで,圧力可変容器内Cs原子のレーザー分光 に向けた予備実験として,まずはCs封入ガス セルによる LIF の観測を行い,LIFの検出が可 能かどうか検証した.

#### (1) 実験方法

当実験では Cs 原子の励起に ECLD (レー ザー径:~2 mm, パワー:1.2~1.4 mW) を 使用し,光子計数法により LIF スペクトルを 観測可能か検証した. Fig. 4 に示したように, ECLD の発振波長を<sup>133</sup>Cs 原子の D1 線であ る 894.347 nm<sup>[4]</sup>に波長を固定し, Cs 原子封 入ガスセル(He:100 Torr)に照射した. ECLD の出射光をビームスプリッタ(50:50)で2 つに分け、一方を Cs 原子封入ガスセルに、他 方を波長計に入射し,波長を観測しつつ,Cs 原子封入ガスセルに照射した. 衝突誘起励起 を考慮し、モノクロメータの設定波長を 842 nm から 862 nm まで 0.5 nm ずつ変化させ, 計数値を測定した. 測定は各波長について1s 間の測定を10回行い、その各平均値を求めた. PMT にはソケットアッセンブリにより, 高 電圧 1350 V を高圧電源より印加した. PMT からの出力信号はフォトンカウンティングユ ニットを経由し, 増幅, 波高分別, 波形整形 が行われた後,フォトンカウンタで計数され る. 蛍光検出系は焦点距離が70mmのレンズ

を2枚,100mmのレンズを1枚使用した. モ ノクロメータのスリット幅は 0.3mm に設定 した.



(2) 実験結果

Fig. 5 に本実験の測定結果を示す.以下, Lorentzian 関数により測定データのフィッテ ィングを行った.



Fig. 5 から, Cs 原子の共鳴波長に相当して いる周波数で光子数が増加していることが分 かる.また,測定した光子数の中心波長が 852.12 (3) nm であり,<sup>133</sup>Cs 原子の共鳴波長 に関する文献値 852.1131 nm<sup>[4]</sup>とほぼ一致し た値を示すことから, Cs 封入ガスセルによる LIF 観測に成功したといえる.

### 4. 圧力可変容器内 Cs 原子封入ガスセル を用いた LIF 観測

圧力可変容器内 Cs 原子のレーザー分光に 向けた予備実験として, Cs 封入ガスセルによ る LIF の観測を行い, LIF が検出可能であるこ とが確かめられた.次に圧力可変容器内部に Cs 封入ガスセルを設置し,圧力可変容器内で も Cs 原子の LIF 観測が可能であるかを検証 した.

#### (1) 実験方法

3. (1)で述べた実験方法と同様に, Cs 原子の 励起に ECLD (波長: 894.347 nm, レーザー 径:~2 mm, パワー: 1.2~1.4 mW)を使用 し,光子計数法により圧力可変容器内でも LIF スペクトルを観測可能か検証した. Fig. 6 に示すように, 圧力可変容器内に Cs 封入ガス セルを設置し, Fig. 4 とほぼ同様に実験セット アップを組み, 測定方法も 3. (1)に述べた方 法と同様に測定を行った.





また, 圧力可変容器内への Cs 封入ガスセ ルの設置方法については Fig. 7 に示したよう に, 圧力可変容器の上蓋を利用して, Cs 封入 ガスセルを設置した.



**Fig. 7** 圧力可変容器内への Cs 封入ガスセル の設置方法

(2) 実験結果

Fig. 8 に本実験の測定結果を示す.以下, Lorentzian 関数により測定データのフィッテ ィングを行った.



 Fig. 8
 圧力可変容器内ガスセル中<sup>133</sup>Cs 原

 子の LIF スペクトル

Fig. 8 から, Cs 原子の共鳴波長に相当して いる周波数で光子数が増加していることが分 かる.また,測定した光子数の中心波長が 852.12 (1) nm であり,<sup>133</sup>Cs 原子の共鳴波長 に関する文献値 852.1131 nm<sup>[4]</sup>とほぼ一致し た値を示すことから,圧力可変容器内でも Cs 封入ガスセルによる LIF 観測に成功したとい える.

5. 圧力可変容器内液体窒素中 Cs 原子供 給システムの開発

圧力可変容器内でレーザー・RF 二重共鳴 を実現するためには、観測領域に対して常に 一定量の原子供給を行う必要がある.そのた め、容器内に固定された固体試料 CsCl にレ ーザーアブレーション法を適用することで、 測定対象となる<sup>133</sup>Cs 原子の線源を生成する. 本実験では<sup>133</sup>Cs 原子の LIF 観測を行い, 圧 カ可変容器内に原子が供給されているかを検 証した.本研究は, He II 中の Cs 原子の超微 細構造間隔を圧力可変下で測定するために, 圧力可変容器内の Cs 原子供給システムを開 発することを目的としているが,現在ヘリウ ムが入手困難であることから He II の代わり に液体窒素を使用し, アブレーションで発生 した窒素の気泡中に供給された原子の観測を 行った.

#### (1) 実験方法

固体試料 CsCl (sample size: 10 mm)を クライオスタット内の圧力可変容器に設置 し,その CsCl のレーザーアブレーションに は Nd:YAG laser (Continuum, model: Minilite II)の第2次高調波(wavelength: 532 nm, repetition: 10 Hz, energy: 2-50 mJ, pulse width: 3-7 ns)を使用した.なお, LIF の検出は, 3. (1)に述べた方法と同様に測定を 行った. Fig. 9 に本実験のセットアップを示 す.



Fig.9 本実験のセットアップ

(2) 実験結果

Fig. 10 に本実験の測定結果を示す.以下, Lorentzian 関数により測定データのフィッテ ィングを行った.



**Fig. 10** レーザーアブレーション法により 生成された<sup>133</sup>Cs 原子の LIF スペクトル

Fig. 10 から, <sup>133</sup>Cs 原子の共鳴波長で光子 数が増加していることが分かる.また測定し た光子数の中心波長が 852.13 (3) nm であり, <sup>133</sup>Cs 原子の共鳴波長に関する文献値 852.1131 nm<sup>[4]</sup>とほぼ一致した値を示すこと から液体窒素で満たされた圧力可変容器内で Cs 原子による発光を確認できた.

#### 6. まとめ

超流動ヘリウム(He II)中の原子の超微細 構造間隔は,真空中のそれとはわずかに異な ることが知られている.我々の研究室では, He II 中の Rb と Cs 原子のレーザーRF/MW 二重共鳴分光のための圧力可変容器を開発し, 圧力可変な超微細構造間隔を測定し,He II と の原子の相互作用に及ぼす圧力の影響を明ら かにすることを目的としている.

本研究室では, Cs 原子を測定対象とし, 圧

力可変な Hell 中の超微細構造間隔の測定を 目指している. 先行研究で LIF を観測するた めの励起用レーザーの作製は完了しているが, 圧力可変容器内の Cs 原子の供給は確認され ていない. そこで, 本研究では, He II 中のセ シウム原子の超微細構造間隔を圧力可変下で 測定するために, 圧力可変容器内のCs原子供 給システムを開発することを目的としている が、He II の代わりに液体窒素を使用した.予 備実験として、光電子増倍管を用いたフォト ンカウンティング法によるレーザー誘起蛍光 (LIF) 検出システムの動作を, Cs 原子を充填 したガスセル内で確認した. その結果から Cs 原子の共鳴波長に相当している周波数で光子 数が増加していることが分かり, 測定した光 子数の中心波長が<sup>133</sup>Cs原子の共鳴波長に関 する文献値<sup>[5]</sup>とほぼ一致した値を示すことか ら, 圧力可変容器内でもCs封入ガスセルによ る LIF 観測に成功したといえる. また, 固体 試料 CsCl を液体窒素で満たした圧力可変容 器を用いた実験では LIF が検出され, 測定し た光子数の中心波長が <sup>133</sup>Cs 原子の共鳴波長 に関する文献値<sup>[4]</sup>とほぼ一致した値を示すこ とから液体窒素で満たされた圧力可変容器内 で Cs 原子による発光を確認できた.

7. 今後の展望

今後の展望としては、5.(2)で記述したよう に<sup>133</sup>Cs 原子の共鳴波長で光子数が増加して おり、液体窒素で満たされた圧力可変容器内 でCs 原子による発光を確認できたが、この発 光はプラズマ発光由来もしくは励起用レーザ ー(ECLD)による LIF 由来と考えられる.よ って、この発光がプラズマ発光由来か ECLD による LIF 由来かを確かめることが必要であ る.またレーザーアブレーション法によって 供給された<sup>133</sup>Cs 原子に対しての LIF 観測に 関して測定誤差が大きい.測定誤差が大きい 要因としては,レーザーアブレーション法に よる<sup>133</sup>Cs 原子の量が一定ではないことが考 えられる.そのため,レーザーアブレーショ ン法によって固体試料 CsCl の表面が劣化し, レーザーアブレーションの効率の低下を防ぐ 必要がある.

#### 8. 参考文献

[1] G. Neyens, Rep. Prog. Phys. 66, 633 (2003).

[2] K. Blaum, J. Dilling, and W. Nörtershäused, Phys. Scripta **T152**, 014017 (2013).

[3] K. Imamura, *et al.*, Hyperfine Interact. **230**,73-77 (2015).

[4] R. L. Kurucz and B. Bell, "Atomic spectral line database from CD-ROM 23 of R. L. Kurucz," available online at

https://www.cfa.harvard.edu/amp/ampdata/ kurucz23/sekur.html (9 August 2001).