

### 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) He II 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 (He II) 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、He II 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。

He II 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、He II 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。

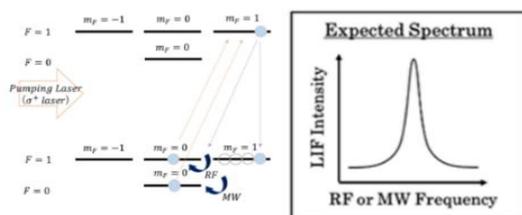


Fig. 1 レーザー・RF/MW 二重共鳴法の概略図および本手法により予測されるスペクトル

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  $^{85,87}\text{Rb}$  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。

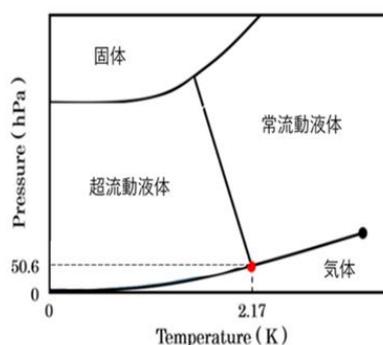


Fig. 2 He 原子の相図

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 He II 槽内に設置することにより、容器内の温度は He II 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、He II 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、圧力可変な 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： $\sim 2$  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  $^{133}\text{Cs}$  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 1 s 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 70 mm のレンズ

を2枚, 100 mm 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 0.3 mm に設定した.

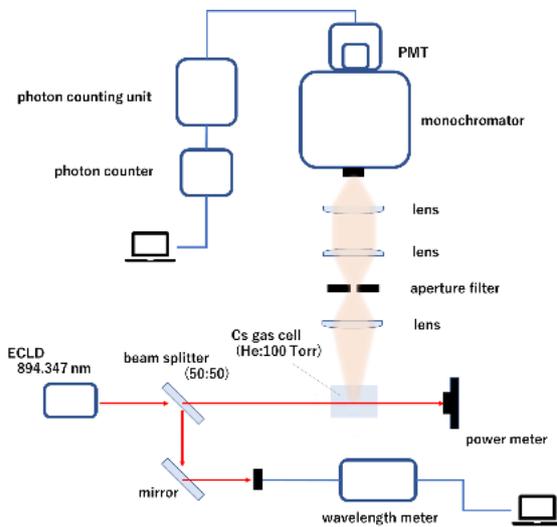


Fig. 4 実験セットアップ

## (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.

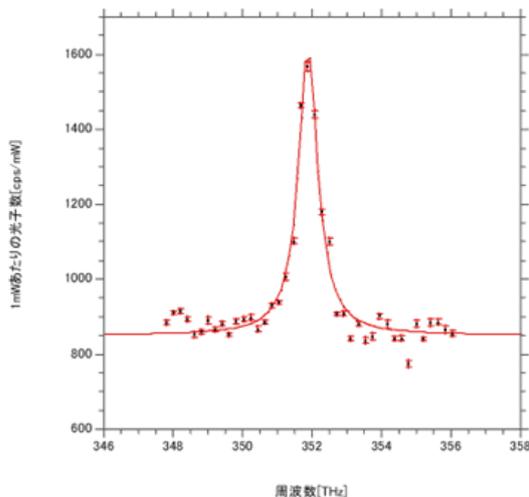


Fig. 5 ガスセル中  $^{133}\text{Cs}$  原子の LIF スペクトル

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,  $^{133}\text{Cs}$  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:  $\sim 2$  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.

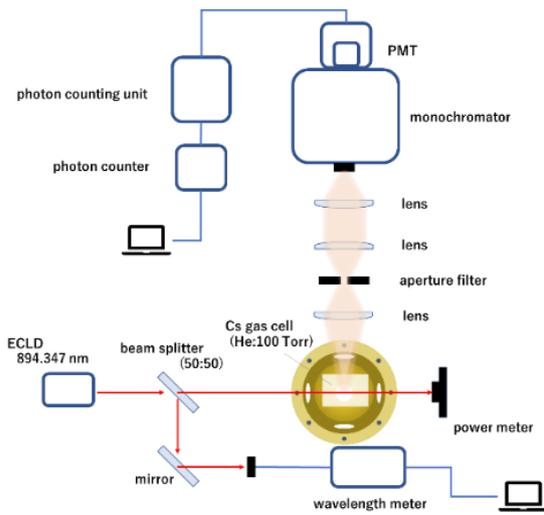


Fig. 6 実験セットアップ

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。

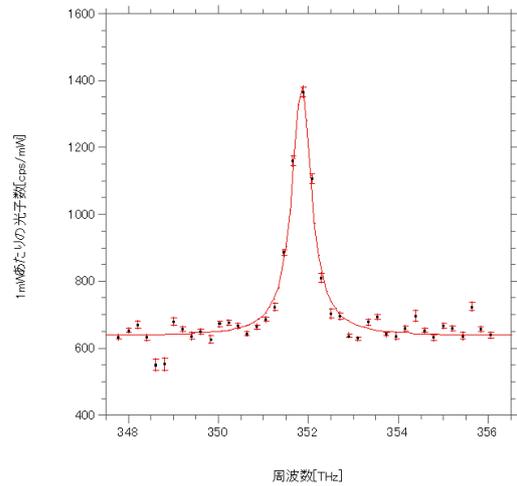


Fig. 8 圧力可変容器内ガスセル中 $^{133}\text{Cs}$  原子の LIF スペクトル

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、 $^{133}\text{Cs}$  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  $^{133}\text{Cs}$  原子の線源を生成する。

本実験では  $^{133}\text{Cs}$  原子の LIF 観測を行い、圧力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。

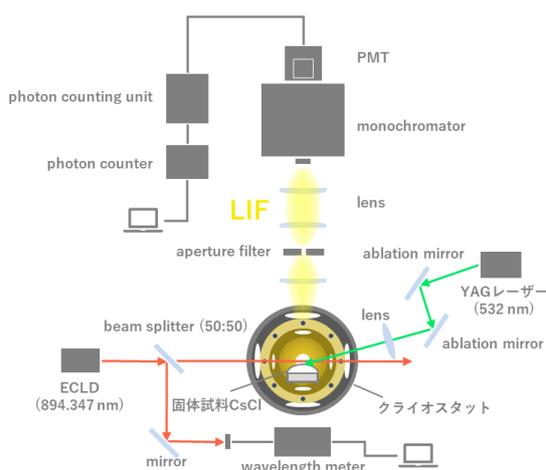


Fig. 9 本実験のセットアップ

### (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。

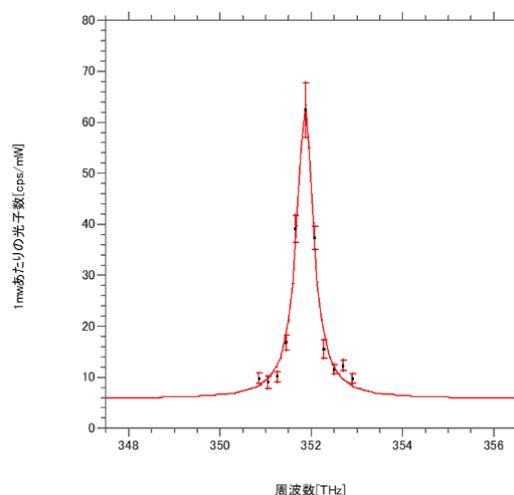


Fig. 10 レーザーアブレーション法により生成された  $^{133}\text{Cs}$  原子の LIF スペクトル

Fig. 10 から、 $^{133}\text{Cs}$  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、 $^{133}\text{Cs}$  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 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、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  $^{133}\text{Cs}$  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  $^{133}\text{Cs}$  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  $^{133}\text{Cs}$  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  $^{133}\text{Cs}$  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  $^{133}\text{Cs}$  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).