

超流動ヘリウム中に打ち込まれた低収量核原子の超微細構造間隔測定に向けた光学クライオスタットの開発

江上, 彪 / Egami, Tsuyoshi

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

58

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2017-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014241>

超流動ヘリウム中に打ち込まれた低収量核原子の 超微細構造間隔測定に向けた光学クライオスタットの開発

DEVELOPMENT OF THE OPTICAL CRYOSTAT FOR THE MEASUREMENT OF THE HYPERFINE
STRUCTURE SPLITTING OF ATOMS IN SUPERFLUID HELIUM FOR THE STUDY OF THE NUCLEI WITH
LOW-PRODUCTION YIELD

江上 魁

Tsuyoshi EGAMI

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修士課程

We are developing a new atomic laser spectroscopic method using superfluid helium named OROCHI to study the properties of nuclei whose production yield is small. We succeeded in the observation of the resonance signals using the laser - radio frequency (RF) and the laser - microwave (MW) double resonance methods in the experiments for $^{84-87}\text{Rb}$ ion beams of an order of 10^4 ions/s provided from an accelerator facility. However, the signal strength was small, so difficulties were anticipated for the application of this method to lower-production yield nuclides. In order to find the experimental conditions to maximize the MW resonance signal intensity, we measured the resonance signal intensity dependence on the MW power and the position of an antenna using Rb vapor which is enclosed in a glass cell. We have also developed the system to introduce MW power to the optical cryostat which is used for the accelerator experiments. As a result of the development, we expect that the resonance signal intensity will be increased by a factor of at least 6.

Key Words : *Laser spectroscopy, super fluid helium*

1. 概要

我々は低収量な原子核の核構造研究のために、超流動ヘリウム環境とレーザー分光法を組み合わせた実験手法 OROCHI (Optical RI-atom Observation in Condensed Helium as Ion-catcher) の開発を行っている。過去に 10^4 pps (particle per second) 程度の $^{84-87}\text{Rb}$ ビームを用いてレーザー・ラジオ波 (RF) / マイクロ波 (MW) 二重共鳴法による共鳴信号の観測に成功した。しかし得られた信号強度が小さく、より低収量な核種に対してこの手法を適用することが困難となる可能性がある。共鳴信号の増強を目的として Rb 気体原子の封入されたガラスセルを用いてレーザー・MW 二重共鳴実験を行い、共鳴信号と MW パワー、アンテナ位置との関係を測定し、加速器実験用の光学クライオスタットにおいて MW 系の開発を行った。開発の結果、共鳴信号強度が少なくとも 6 倍に向上することが期待される。

2. 研究背景

我々は加速器で生成された低収量な原子核の構造研究を目的に、超流動ヘリウム環境とレーザー分光法を組み

合わせた実験手法である OROCHI の開発を行っている。

超流動ヘリウムは高密度であるため、高速で飛来するイオンビームを高効率に環境内に停止させることが可能である。導入されたイオンは停止する過程で周囲から電子を受け取ることで中性化される。低温(2.17 K 以下)で分極率が小さくスピンの 0 であるため、導入された原子に対しても相互作用が小さく、レーザー分光環境として非常に有用であると考えられる。この原子に対して光ポンピング法を適用することでスピン偏極状態を作り出し、レーザー・ラジオ波 (RF) / マイクロ波 (MW) 二重共鳴法適用する。これにより取得される原子のレーザー誘起蛍光 (LIF) の信号を観測することで、RF 共鳴周波数からゼーマン準位間隔、MW 共鳴周波数から超微細構造間隔を決定することができる。これらの微細な準位の間隔はそれぞれ核モーメント、核スピンの情報を含んでおり、原子核の構造を解明することができる。

超流動ヘリウムに導入された原子は周りのヘリウムとの間に原子バブルと呼ばれる空乏領域を形成することが知られており、これにより励起スペクトルが放出スペクトルに比べて短波長側にシフトし、線幅が広がるという

特徴を持つ[3]。この特徴を利用し、検出器側で波長選択を行うことで実験全体の S/N 比向上を図ることができる。これまでに我々は、加速器実験にて 10^4 pps の Rb ビームに対してレーザー・RF/MW 二重共鳴法による共鳴信号の観測に成功した[1][2]。しかし信号強度が小さく、より低収量な核種に対してはこの手法が適用困難となる可能性がある。

3. 研究目的

OROCHI の実験環境となる光学クライオスタット内の MW 系の開発を行い、加速器実験における MW 共鳴信号強度の増強を図る。OROCHI では超流動ヘリウムを生成する装置であり実験環境となる光学クライオスタットの中に 1 波長ループアンテナを設置し、MW を印加している。信号強度の小さい原因の 1 つとして、実験環境に導入される MW 強度が不足していることが考えられる。そこで、Rb 気体原子と共にバッファーガスとして 100 torr の He が封入されたガラスセル (Rb ガスセル) を用いてレーザー・MW 二重共鳴実験を行い、共鳴信号に対する MW 供給強度とアンテナ位置の依存性を測定し、その結果から光学クライオスタット内における MW 共鳴条件の最適化を図る。また最適化した MW 条件下にて加速器実験用のセットアップを用いて共鳴信号を観測し、共鳴信号強度の見積もりを行う。

4. 光ポンピング法と二重共鳴法

本研究では Rb ガスセルを用いてレーザー・MW 二重共鳴実験を行い、共鳴信号を観測した。以下に、二重共鳴法の前段階となる光ポンピング法による原子のスピンの偏極生成と、二重共鳴法による共鳴ピーク観測のメカニズムについて説明する。

[光ポンピング法]

光ポンピング法は円偏光のレーザーを用いて原子のスピンの偏極状態を生成する手法である。図 1 に一電子系原子が超微細構造準位 ($F=0, 1$)、ゼーマン準位 ($m_F=0, \pm 1$) に分裂しているモデルを例として、偏極生成の過程を示す。原子に σ^+ の円偏光レーザーを照射すると、原子はレーザー光を吸収し励起状態 $P_{1/2}$ へと遷移する。このときレーザー光の持つ角運動量も同時に吸収するため、磁気量子数の選択則により磁気量子数が $\Delta m_F = +1$ を満たす励起準位に励起される(図 1 左上)。励起準位にある原子は寿命を迎えると基底状態へ脱励起し、脱励起の際にレーザー誘起蛍光(LIF)を放出する。このときの励起状態から基底状態への遷移の選択則は $\Delta m_F = 0, \pm 1$ である(図 1 右上)。基底状態 $S_{1/2}$ の $m_F = +1$ に存在する原子は遷移可能な $\Delta m_F = +1$ を満たす励起準位が存在しないために円偏光のレーザー光では吸収が起こらない。このサイクルを繰り返すことで、原子を $S_{1/2}$ の磁気量子数が最

大の準位に集めることが可能である(図 1 では $m_F = +1$)。このように原子がある特定のエネルギー準位に集まった状態のことをスピン偏極状態と呼ぶ。スピン偏極すると円偏光のレーザー光の吸収が起きない、即ち励起・脱励起のプロセスが起きず、原子からの LIF が観測されない。

同様の原理で、 σ^- の円偏光のレーザーでの光ポンピングも可能である。 σ^- のレーザー光を原子が吸収すると、選択則により $\Delta m_F = -1$ を満たす励起準位への遷移を起こす。その後は上記と同様のサイクルにより、最終的に $S_{1/2}$ の磁気量子数が最小となる準位にスピン偏極状態を生成することができる(図中では $m_F = -1$)。

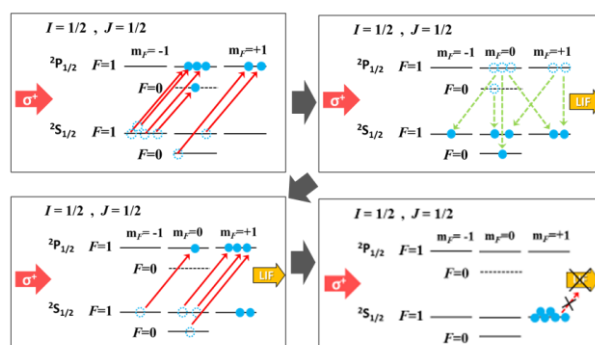


図 1 光ポンピング法による偏極生成過程の概要図。
 $^2S_{1/2}$ は基底準位、 $^2P_{1/2}$ は励起準位、F は超微細構造準位 ($F=0, 1$)、 m_F はゼーマン準位 ($m_F=0, \pm 1$) を表す。

[レーザー・RF / MW 二重共鳴法]

原子の超微細構造間隔に対応する共鳴周波数はマイクロ波領域 ($\sim$ GHz) に現れ、ゼーマン準位間隔に対応する共鳴周波数はラジオ波領域 ($\sim$ MHz) に現れる。これらの電磁波とポンピングレーザーを二重に共鳴させることにより相当するエネルギー準位を測定する手法をレーザー・ラジオ波 (RF) / マイクロ波 (MW) 二重共鳴法と呼ぶ。図 2 にその概念図を示す。まず上述した光ポンピング法により原子のスピンの偏極状態を生成する。このとき、原子からの LIF は観測されない。スピン偏極状態の原子に対して RF / MW を照射すると、それぞれの周波数に相当するエネルギー準位間での共鳴が起こり、偏極状態が崩される。RF では $\Delta F=0, \Delta m_F = \mp 1$ の遷移、MW では $\Delta F = -1, \Delta m_F = \mp 1$ の遷移に対応している ($\Delta m_F = \mp 1$ の $-$ が σ^+ 偏光時、 $+$ が σ^- 偏光時に対応)。偏極状態の崩された原子は再びレーザー光を吸収することができるようになるため、LIF の観測が可能となる。これにより照射する RF / MW の周波数を掃引し、原子からの LIF の量が一番大きくなる周波数からゼーマン準位間隔 / 超微細構造間隔を決定することができる。

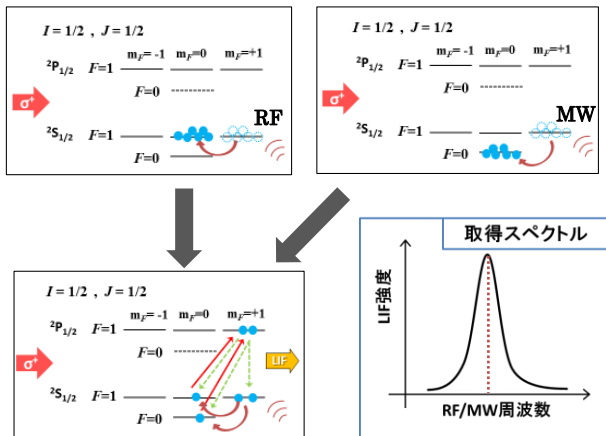


図2 レーザー・RF/MW 二重共鳴法によるエネルギー準位間隔測定の概要図

5. Rb 封入ガスセルを用いた MW 共鳴強度の評価 [共鳴強度の評価方法]

二重共鳴信号の評価方法として、スピン偏極原子のうちのどれだけの原子が MW 共鳴に寄与しているのを定量的に評価する方法を採用した。当実験では円偏光レーザーと固定周波数の MW を原子に照射しつつ、偏極生成に用いる静磁場の強度を変化させることで LIF のスペクトルを取得した。このとき得られるスペクトル図を示す。

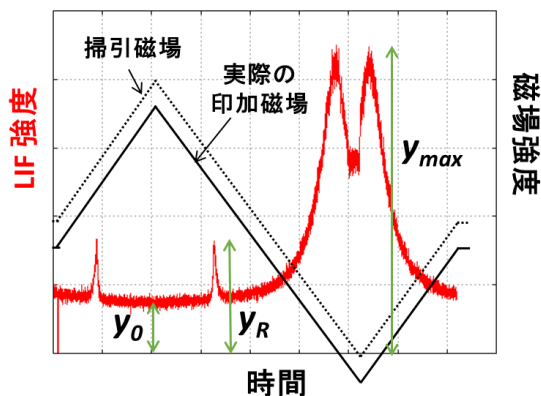


図3 磁場掃引法により取得される典型スペクトル

図3のように印加磁場を三角波で強度を変化させることで取得できる、MW 共鳴ピーク (y_R)、観測領域内の全原子の発光ピーク(無偏極ピーク, $y_{\max}$)、スピン偏極時の LIF 強度の最も減少したときの強度 (y_0) を用いて、共鳴強度を次のように定義した。

$$\text{共鳴強度 } I = \frac{y_R - y_0}{y_{\max} - y_0}$$

また以下に説明する全ての実験は、レーザーパワーは 1 mW、レーザー径は 2 mm の条件の下で行った。

[MW の供給強度に対する評価実験]

前回の 2013 年に行われた加速器実験では、MW の供給強度 (MW パワー) が 2 ~ 3 W、共鳴強度は約 0.03 であり、共鳴に必要な MW 強度が不足していた可能性がある。そこで、テストベンチ装置、光学クライオスタット内の 2 種類のセットアップで MW パワーを変化させたときの共鳴強度を測定した。この実験により、光学クライオスタットの分光環境としての性能の確認、また加速器実験において必要な MW パワーの見積もりを行った。図4、図5にそれぞれの実験のセットアップ図を、図6にそれぞれの装置における共鳴強度と MW パワーの関係を示す。

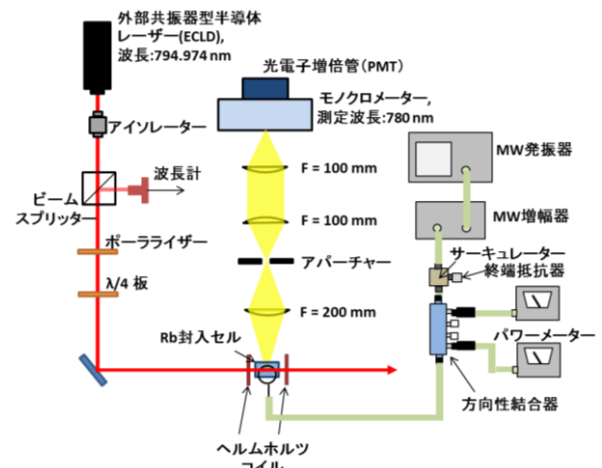


図4 テストベンチ装置セットアップ概略図

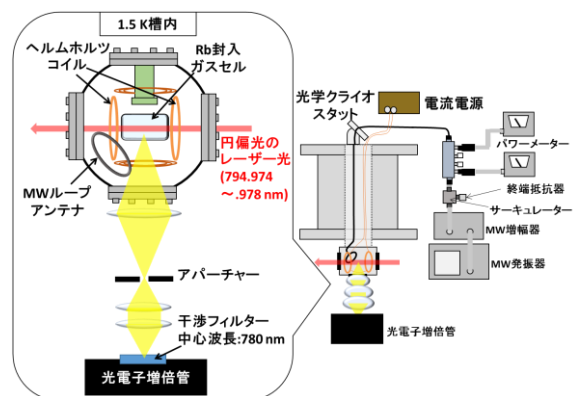


図5 光学クライオスタット内セットアップ概略図

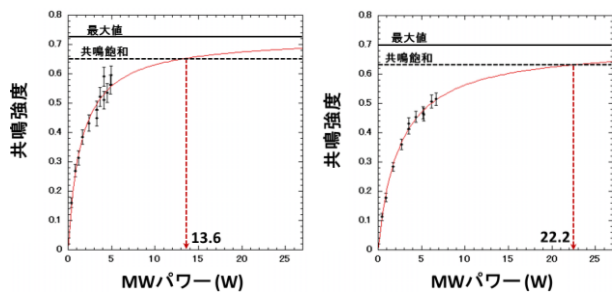


図 6 共鳴強度と MW パワーの関係。左がテストベンチ装置、右が光学クライオスタット内の測定結果。赤線がフィッティング関数曲線、黒線が関数から予測される最大値、黒破線が共鳴飽和ラインである。

図 6 において、フィッティング関数から予測される共鳴強度の最大値に対して、90%を満たす強度を共鳴飽和ラインと定義した。共鳴飽和に必要な MW パワーは、テストベンチ装置では約 14 W、光学クライオスタット内では約 22 W であり、およそ 1.5 倍の差が見られた。これは両セットアップでアンテナと観測領域との距離が異なり、環境に導入される MW 強度に差が生じたためであると考えられる(テストベンチ装置:約 2.5 cm, 光学クライオスタット内: 約 4 cm)。前回 2013 年の加速器実験では MW パワー 2~3 W に対して共鳴強度は約 0.03 であり、本実験の同 MW 条件における共鳴強度に比べて明らかに小さい。このことから、クライオスタット環境内の遮蔽物等(コイル等)の影響で観測領域に供給される MW 強度が著しく弱まっていた可能性が考えられる。また今回の結果から、MW パワーを 20 W 以上供給することで共鳴信号強度を最大近くまで強化できることが判明した。しかし、超流動ヘリウム環境の維持や装置への影響等の観点から、アンテナ位置を最適化し共鳴飽和に必要な MW パワーを最小限に抑える必要があると考えられる。

[MW アンテナの位置に対する評価実験]

MW アンテナの最適な位置を探るために、観測領域とアンテナとの距離(アンテナ距離)を変化させたときの共鳴強度を測定した。測定にはテストベンチ装置を用いた。図 7 に Rb ガスセル周辺のセットアップ写真を示す。MW パワーは、加速器実験時のパワー(2~3 W)を参考にして 3 W に固定した。図 8 に結果のグラフを示す。

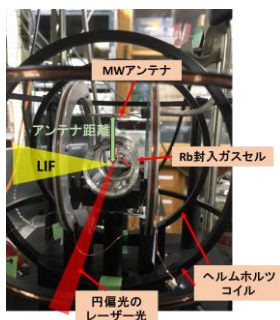


図 7 Rb ガスセル周辺のセットアップ写真

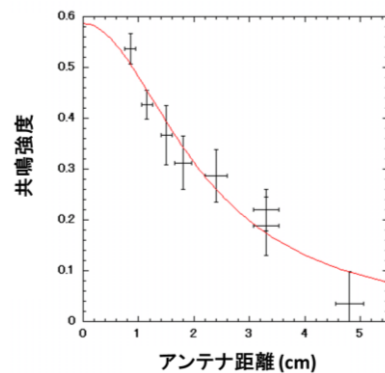


図 8 共鳴強度とアンテナ距離の関係。MW パワー: 3 W、赤線はフィッティング曲線を表す。

図 8 から、アンテナ距離を近づけるほど共鳴強度は向上し、4 cm から 1 cm 以下まで近づけることで少なくとも 5 倍に向上することが期待される。よって、光学クライオスタット内においてもアンテナを近づけることにより共鳴信号強度を最大近くまで増強し、必要な MW パワーを最小限に抑えることができると考えられる。

[蛍光検出系Ⅲを用いた評価実験]

アンテナ位置を最適化し、再度光学クライオスタットを用いて MW パワーを変化させたときの共鳴強度を測定し、共鳴飽和に必要な MW パワーを導出した。また、共鳴強度が最大の条件下での二重共鳴スペクトルの高さから、現状装置で観測可能な原子数の見積もりを行った。蛍光の観測には加速器実験に向けて新たに開発された蛍光検出系Ⅲを使用し、実際のセットアップに準じた環境で測定を行った。先行研究において蛍光検出系Ⅲは旧式の蛍光検出系Ⅱに比べて 9.3 倍の S/N 比向上が見込まれているが、二重共鳴信号の直接観測はなされていない[4]。MW アンテナは観測領域からおよそ 1 cm の位置に設置した。図 9 にセットアップの概要図を、図 10 に共鳴強度と MW パワーの関係を示す。

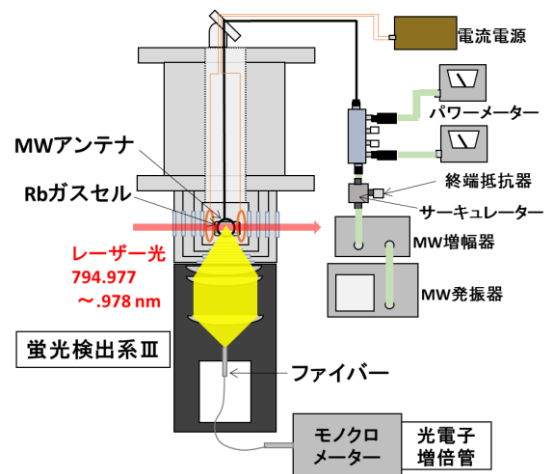


図 9 蛍光検出系Ⅲを用いた評価実験のセットアップ概要図

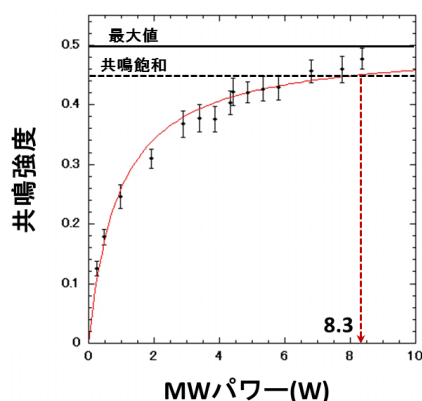


図 10 アンテナ距離を近づけたときの共鳴強度と MW パワーの関係。

図 10 から、アンテナ距離を 1 cm に近づけることで約 8 W のパワーで共鳴飽和を達成することができる。また信号強度は、アンテナ距離を 4 cm から 1 cm にすることで信号強度が約 5 倍(図 8 より)、アンテナ距離 1 cm の条件で MW パワーを 3 W から 8 W にすることで約 1.2 倍(図 10 より)となり、総計で約 6 倍の信号強度の向上が見込まれる。前述のとおり、加速器実験ではクライオスタット環境内の遮蔽物(コイル等)の影響で観測領域に供給される MW 強度が著しく弱まっていた可能性を考慮すると、6 倍以上に向上することも見込まれる。

6. アンテナ位置最適化に向けたクライオスタット用蓋フランジの開発

前章までに示した結果から、光学クライオスタット内における MW アンテナの設置位置が共鳴観測の鍵となる。この観点から、超流動ヘリウム環境生成後も MW アンテナ位置をある程度調節可能とする新たなクライオスタット用の蓋フランジの設計を行っている。以下に現状の蓋機構、新たに設計した蓋機構の概要図を示す。

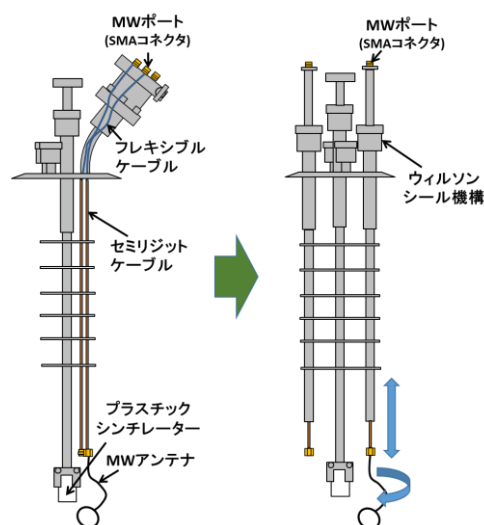


図 11 クライオスタット蓋フランジの概要図。左側が現状の機構、右側が新たに設計した機構。

アンテナを観測領域に近づけるにあたって、現状の機構では超流動ヘリウム槽を密閉する前にしか MW アンテナの位置調整が行えないため、微調整が行えない等の不都合が生じる可能性がある。新たに設計した機構では MW ポートにウィルソンシール機構を用いることでポートごと駆動が可能であるため、密閉した後も上下、回転方向にある程度の自由度でアンテナの微調整を行うことができる。これにより加速器実験においても、観測領域付近でアンテナを微調整し、共鳴信号が最大となる位置を探ることができると考えられる。

7. まとめと今後の展望

我々は加速器で生成された低収量な原子核の核構造研究を目的に、超流動ヘリウム環境とレーザー分光法を組み合わせた実験手法 OROCH の開発を行っている。これまでに 10^4 pps の $^{84-87}\text{Rb}$ ビームを用いた測定においてレーザー・RF/MW 二重共鳴信号の観測に成功しているが、共鳴信号強度が小さく、より低収量な原子に対しての手法の適用が困難となる可能性がある。信号強度の強化を目的に、Rb ガスセルを用いてレーザー・MW 二重共鳴実験を行い、実験環境となる光学クライオスタット内における MW 共鳴条件の最適化を図った。アンテナ位置を観測領域から約 1 cm, MW パワーを 8 W にすることで共鳴信号強度は最大近く向上し、前回実験に比べておよそ 6 倍以上になることが見込まれる。

本研究で最適化した MW と共に、今後はレーザーパワーの最適化が必要である。MW 共鳴信号はレーザーパワー密度と MW パワー密度の 2 つのパラメーターにより変動し、通常は両パラメーターともに高くなるほど信号強度は増強する(本研究では、MW パワー密度の高強度化による共鳴信号強度の増強を図った)。超流動ヘリウム中では励起スペクトルの線幅が広がる性質から、単位波長あたりの励起確率はガスセル実験に比べて約 1/1000 になると考えられている。そのため、ガスセル実験 (1 mW 程度) に比べより高強度のレーザーパワーが必要であり、2013 年実験では 100 mW 程度のレーザーパワーを導入している。これまでに使用していた蛍光検出系 II では、レーザー散乱光の除去能力の不足のために導入可能なレーザーパワーを制限していたが、より分光性能の高い蛍光検出系 III においてはさらに強いパワーの導入が可能であると期待される。よってレーザーパワーを 100 mW から強化し、S/N 比 (共鳴信号強度/レーザー散乱光強度) の最も高くなるパワー条件を検証することで、より低収量な原子核に対しての手法適用が可能となると期待される。

参考文献

- [1]X. F. Yang et al., Phys. Rev. A. **90**, 052516(2014).
- [2]K.Imamura et al., JPS Conf. Proc. **6**, 030115(2015)
- [3]Y. Takahashi et al., Phys. Rev. Lett. **71**, 1035(1993)
- [4]T. Nishizaka, Bachelor's thesis, Hosei Univ. (2016)