

加速器で生成された不安定核原子観測に向けた 蛍光検出系の高効率化

AKIMOTO, Sai / 秋元, 彩

(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)

5

(発行年 / Year)

2023-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00026416>

加速器で生成された不安定核原子観測に向けた蛍光検出系の高効率化

Efficiency improvement of a fluorescence detection system
for radioisotope atoms generated at accelerators

秋元 彩

Sai AKIMOTO

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 have been developing a laser spectroscopic method named OROCHI for the study of the nuclear structure of low-yield unstable nuclei produced by accelerators. Spin-polarized states are generated for RI atoms stopped in superfluid helium by optical pumping, and Zeeman level splitting and hyperfine structure splitting are measured by using the laser-radio frequency / microwave double resonance method. When atoms are introduced into superfluid helium, the absorption and emission wavelengths of the atoms are different. We take the advantage of the intriguing spectroscopic environment of superfluid helium. We aim to improve the efficiency of LIF(Laser Induced Fluorescence) detection to measure the unstable ^{84}Rb hyperfine structure splitting in superfluid helium at accelerator beamlines. For this purpose, we enlarged the intersection area between an excitation laser and an accelerated beam. We evaluated the effect of this modification.

Key Words: Laser spectroscopy, Superfluid helium, Hyperfine structure, Fluorescence detection system

1. 研究背景

本研究室では、加速器で生成される低収量不安定核原子の核構造研究に向けて、理化学研究所核分光研究室との共同研究として超流動ヘリウムとレーザー分光法を組み合わせた OROCHI(Optical RI-atom Observation in Condensed Helium as Ion-catcher)法の開発を行っている[1]。OROCHI では、核子あたり数十から数百 MeV に加速されたイオンビームを減速・停止させるために高密度な媒質である超流動ヘリウムを用いる。イオンビームは減速過程で周囲のヘリウムから電子を受け取ることで中性化され、中性原子としてトラップされる。超流動ヘリウム中に導入した原子に対し、光ポンピング法でスピン偏極状態を生成し、レーザー・ラジオ波/マイクロ波二重共鳴法を適用することで、ゼーマン副準位間隔及び、超微細構造間隔を測定する。原子のエネルギー準位間隔の精密な測定により、核構造を反映する物理量である核スピン、核モーメントの導出を目指している。この手法では、原子からのレーザー誘起蛍光(Laser Induced Fluorescence 以下 LIF)の強度変化を検出することが必要である。安定核原子をレーザーアブレーション等で超流動ヘリウムに導入して観測する場合と比較して、加速器で生成される低収量不安定核原子では導入される個数が少ないためより高効率で LIF を検出しなければならない。OROCHI では、信号対背景光比(S/BgL 比)の向上を目的として蛍光検出系を開発している。

現在使用されている蛍光検出系IIIを図1に示す。

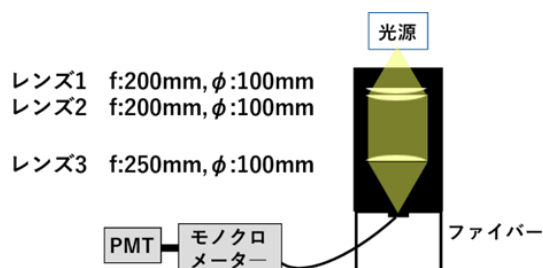


図1 蛍光検出系IIIの概要図 [2]

開発された蛍光検出系IIIでは、加速器実験において、200 pps 程度の ^{85}Rb の LIF 検出に成功している[3,4]。そして本研究では、今後の量子科学技術研究開発機構の HIMAC (QST-HIMAC 以下 HIMAC) で予定している加速器実験において、更なる LIF 検出の効率化を目指し、蛍光検出系の改良を目的とした実験を行う。

2. 研究目的

加速器で生成される低収量不安定核原子では観測領域内に導入される原子数が少ないため、高効率で LIF を検出しなければならない。そこで、現在、低収量不安定核原子への適用に向け、信号対背景光比(S/BgL 比)の向上を実現するために蛍光検出系の開発を行っている。これまでにHIMACにおいて不安定核 ^{84}Rb ビームを用いて行った実験では、入射RIビームが径15mm以上に広がる事が分かっており[5]、従来の径2mmのレーザー条件では超微細構造間隔及びゼーマン準位間隔測定に要する時間が長期化してしまう。この手法はレーザー光路上に存在する原子数が信号強度に寄与するため、レーザー径を

拡大することで入射ビームとレーザーとの交差領域を拡大させ、光検出効率の向上を図ることが本研究の目的である。

3. 光ポンピング法及びレーザー・マイクロ波二重共鳴法

OROCH 実験 では光ポンピング法とレーザー・ラジオ波 / マイクロ波二重共鳴法を組み合わせた精密分光を行っている。

[光ポンピング法]

光ポンピング法は近接した2つのエネルギー準位における原子占有数に大きな差を作り出す手法である。円偏光レーザーを照射すると、原子は磁気量子数の選択則により励起される。励起状態の原子は自然放出寿命を迎えると脱励起して基底状態へ戻る。このサイクルを繰り返すと、磁気量子数が最大の準位に集まり原子偏極が生成される。完全に偏極した原子は円偏光レーザーを吸収することができないため励起状態に遷移できなくなり、LIFは観測されない。核スピン $I = 1/2$ の一電子系原子の時の例として光ポンピングの原理の概略図を図2に示す。

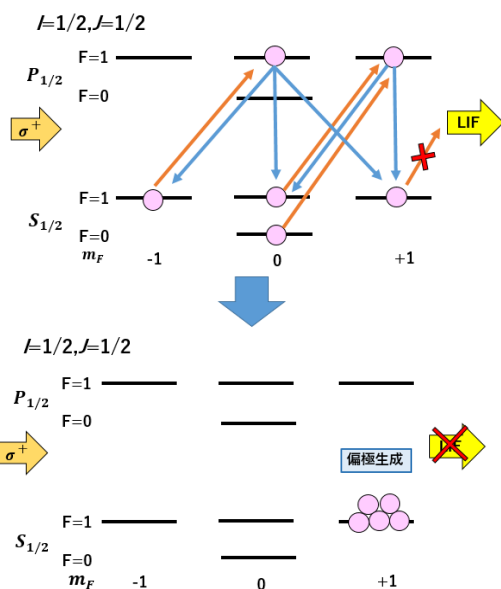


図2 光ポンピング法の概要図

[二重共鳴法]

原子の超微細構造間隔はマイクロ波周波数領域(～GHz)、弱い磁場中でのゼーマン副準位間隔はラジオ波周波数領域(～MHz)で共鳴する。原子に光ポンピング法を適用すると、原子はスピン偏極状態となる。この時に偏極状態の原子に対してマイクロ波を照射し周波数を掃引すると、超微細構造間隔に相当する周波数で偏極状態が崩れ、LIFが放出される。ラジオ波を掃引した時、ゼーマン副準位間隔に相当する周波数で偏極状態が崩れ、LIFが放出される。その時の周波数を測定することで、超微細構造間隔やゼーマン準位間隔を決定することができる。これらは光ポンピング法とあわせて、レーザー・ラジオ波(RF)/マイクロ波(MW)二重共鳴法と呼ばれる。二重共鳴法の概略図を図3に示す。

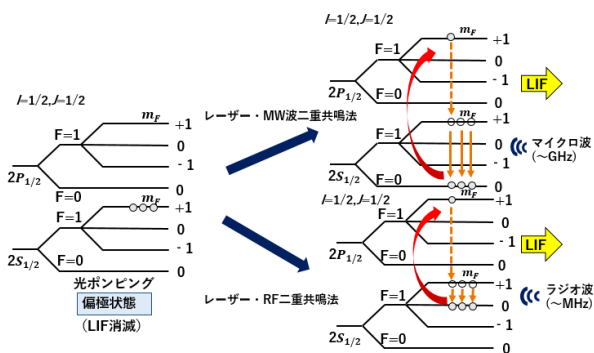


図3 レーザー・マイクロ波/ラジオ波二重共鳴法の概要図

4. 研究手法

本研究は HIMAC SB2 ビームラインを用いて行う実験の開発研究である。加速器でイオンビームとして生成される不安定核原子は、超流動ヘリウムを保持しているクライオスタットに導入することで、減速し、周囲のヘリウム原子から電子を受け取ることで中性化され、中性原子としてトラップすることが出来る。超流動ヘリウム中に導入した原子に対し、光ポンピング法を用いて、原子偏極を生成し、レーザー・ラジオ波/マイクロ波二重共鳴法を用いることで、ゼーマン準位/超微細構造間隔を測定する。原子のエネルギー準位間隔の精密な測定により、核構造を反映する物理量である核スピン、核モーメントの導出を行う。

2019年のHIMACでの実験において ^{84}Rb ビームを液体窒素に入射した実験が行われた。その結果から行われた超微細構造測定実験に要する測定時間の見積もりによれば、十分な信号が得られるまでの時間は2時間以上となった[5]。そこで、入射ビームとレーザーの交差領域を拡大させるために、従来の縦2mm、横2mmのレーザー径から縦10mm、横2mmのレーザー径に変更する。これにより、観測領域を $\phi 2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 5\text{mm}$ から $\phi 2\text{mm} \times 10\text{mm} \times 5\text{mm}$ に拡大し、観測可能な原子数の増加と測定時間の短縮が可能になる。観測領域の概要図を図4に示す。

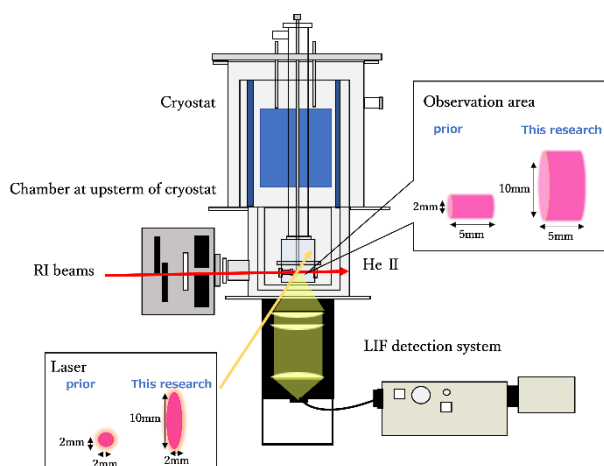


図4 LIF 観測領域の概要図

5. HIMAC での加速器実験に向けた観測領域拡大

HIMACで予定している加速器実験では、入射ビームとレーザーの交差領域を拡大させるために、4章で述べたように、レーザー径を従来の縦2mm、横2mmから縦10mm、横

2mm)に変える。ここで重要なことは、原子の発光位置により集光位置も変化するため、レーザー径拡大により実際にどのくらい検出器での光検出効率に変化するかを知らなければならない。観測領域が縦長になるために、観測領域の上部及び下部に存在する原子が出すLIFの集光率の減少が懸念される。

5.1. 観測領域拡大による蛍光検出効率

観測領域拡大による集光率の推定を行うために、Rbが封入されているガスセルを用い、レーザーの照射位置を中心から鉛直方向に-5mm～+5mmに変化させ、原子数の測定を行った。レーザー径は、ガスセル前で約縦2mm、横2mmであった。実験の概要図を図5、レーザー入射位置と光強度(LIF)の測定結果を図6、集光率を表1に示す。

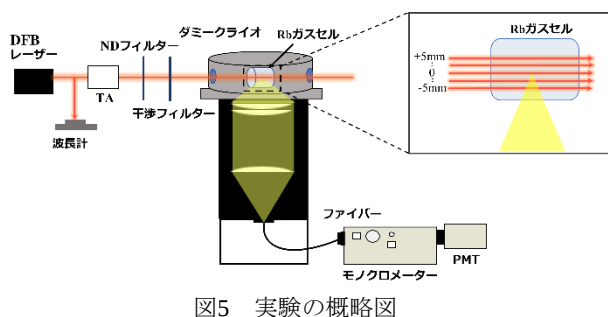


図5 実験の概略図

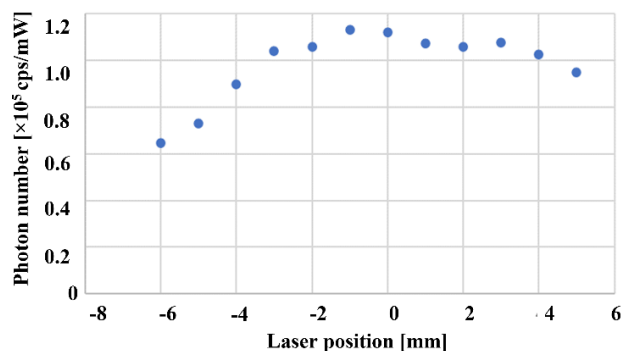


図6 レーザー入射位置と光強度(LIF)の測定結果

表1 光強度と集光率

高さ[mm]	光強度[cps/mW]	集光率
5	9.49×10^4	0.85
3	1.08×10^5	0.96
0	1.12×10^5	1
-3	1.04×10^5	0.93
-5	7.30×10^4	0.65

図6の縦軸は、検出された光強度(LIF) (cps/mW)、横軸は、レーザーの照射位置である。単位の cps は counts per second の略で1秒当たりのカウント数である。高さ0mmの時の集光率を1とした時、高さ+5mm(観測領域の上部)の集光率は0.85、高さ-5mm(観測領域の下部)の集光率は0.65という結果になった。高さ-2～+3mmの集光率は0.94以上であり、集光率が高い。そのため、レーザーの光軸の中心を+方向にシフトして縦長に拡大することで、観測領域拡大による集光率の低下が抑えられると考えられる。

5.2. レーザー径の変化による S/BgL 比の比較

レーザー径(縦2mm、横2mm)とレーザー径(縦10mm、横2mm)の Signal-to-Background light ratio (以下 S/BgL 比)の比較を行った。レーザー径(縦2mm、横2mm)とレーザー径(縦10mm、横2mm)のそれぞれに Background light となるレーザー散乱光の測定と Signal となる LIF の測定を行った。散乱光の強度を測定した散乱光実験、クライオスタットの下部分を模した容器(以下、ダミークライオと記す)に Rb 封入ガスセルを組み込み、レーザー光を入射し LIF 強度を測定したガスセル実験を行うことで S/BgL 比を以下の式のように定義した。

$$\frac{S}{BgL} = \frac{\text{共鳴波長の光強度} - \text{非共鳴波長の光強度}}{\text{散乱光実験における光強度}}$$

5.2.1. レーザー散乱光

レーザー径(縦2mm、横2mm)とレーザー径(縦10mm、横2mm)の散乱光を比較するために、同じ実験環境下で入射レーザーパワーを揃えて、レーザー径のみを替えて測定した。クライオスタットに入射し、バックグラウンドとなるレーザー散乱光がどれだけ発生するかを測定・比較する実験を行った。レーザー光源にはテーパアンプ(TA)により増幅したDFBレーザーを780.009nmに設定して用いた。モノクロメーターの検出波長を770nm～800nmの範囲で測定した。モノクロメーターのスリット幅は、前段2.5mm、中段1.25mm、後段1.25mmに設定した。今回の実験において、波長780.009nmのレーザー光を照射したが、モノクロメーターの分光波長が779nmでピークとなった。対象原子である⁸⁴Rbの吸収波長(レーザー波長)は780nm、放出波長794nmであり、放出波長は吸収波長より長波長側に14nmにある。今回の実験では780nmのレーザー光に対する分光器の出射波長が779nmだったので、吸収波長(レーザー波長)を779nm、放出波長に対応する散乱光波長を793nmとした。実験の概要図を図7、測定結果を図8に示す。

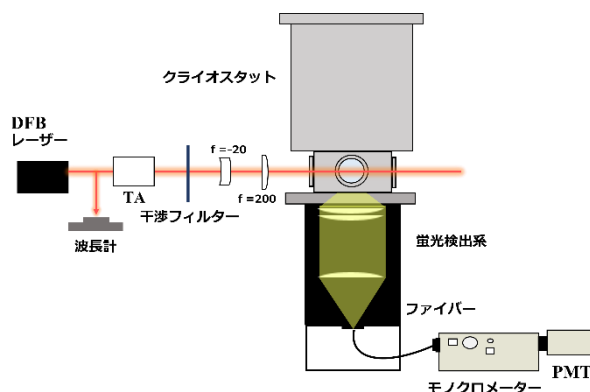


図7 レーザー散乱光実験の概略図

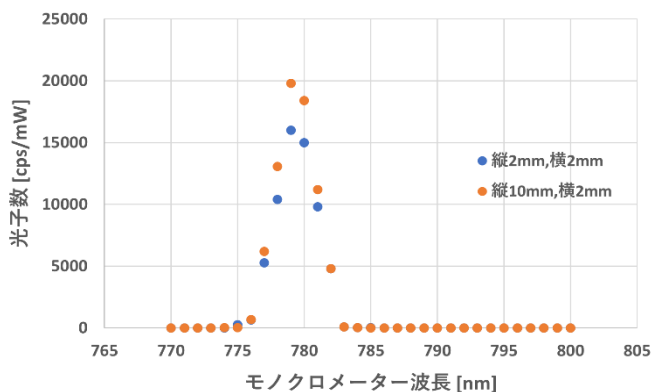


図8 レーザー散乱光測定結果

図8より、779nm付近では、レーザー径縦10mmの方が縦2mmと比較して、散乱光が多く発生していることが分かった。レーザーを縦長(縦10mm、横2mm)にすることによる散乱光の増加についての実験結果は、モノクロメーターの分光波長793nm時はレーザー径(縦2mm、横2mm)に比べてレーザー径(縦10mm、横2mm)の散乱光が0.96倍に減少していることが判明した。そのため、レーザー径(縦2mm、横2mm)のBgLは1.32 cps/mW、レーザー径(縦10mm、横2mm)のBgLは1.27 cps/mWという結果となった。

5.2.2. ガスセル実験によるLIF測定

次にS/BgL比を測定するため、Rbガスセルを用いてSignalとなるLIFを実際に観測した。実験ではダミークライオ内にRb封入されているガスセルを設置しLIFを観測する。ダミークライオにレーザー径(縦2mm、横2mm)とレーザー径(縦10mm、横2mm)のレーザーを入射し、モノクロメーター・PMTでLIFの測定・比較を行った。モノクロメーターの分光波長は794nm、スリット幅は、前段0.5mm、中段0.1mm、後段0.1mmに設定した。また、レーザー径(縦2mm、横2mm)の場合、レーザーパワーは共鳴波長(780.240nm)で0.9mW、非共鳴波長(780.500nm)で1.0mWに設定した。レーザー径(縦10mm、横2mm)の場合、レーザーパワーは共鳴波長(780.240nm)で0.6mW、非共鳴波長(780.500nm)で0.7mWに設定した。光子数は1mW当たりの値になるように補正した。測定結果を図9に示す。

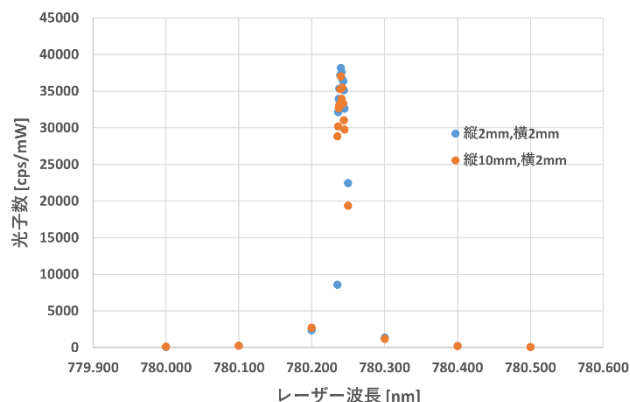


図9 LIF実験の測定結果

図9より、レーザー径(縦2mm、横2mm)の場合、共鳴波長780.240nmで約 3.81×10^4 cps/mWの光子を検出している。また共鳴波長から0.26nmだけ長波長側にずらしたときのカウントは約90 cps/mWであった。0.26nmの波

長差で 10^3 倍信号が変化していることからLIFが観測できているといえる。レーザー径(縦2mm×横2mm)のS(LIF)は、 3.81×10^4 cps/mW、レーザー径(縦10mm×横2mm)のS(LIF)は、 3.69×10^4 cps/mWという結果となった。

5.3. S/BgL比の比較

5.3.1 S/BgL比の比較 [cps/mW]

レーザー径(縦2mm、横2mm)とレーザー径(縦10mm、横2mm)それぞれのSignal(LIF)、BgL(レーザー散乱光)、S/BgL比を表2に示す。

表2 S/BgL比の実験結果

	縦2mm,横2mm	縦10mm,横2mm
S(LIF) [cps/mW]	3.81×10^4	3.69×10^4
BgL(レーザー散乱光) [cps/mW]	1.32	1.27
S/BgL	2.89×10^4	2.91×10^4

結果より、レーザー径(縦2mm、横2mm)のS/BgL比は、 2.89×10^4 となった。同様に計算を行いレーザー径(縦10mm、横2mm)のS/BgL比は、 2.91×10^4 となった。この結果より、レーザー径を広げることでS/BgL比は約1.01倍程度に高くなると分かった。

Signal(LIF)とBgL(レーザー散乱光)が減少した原因として、2点考えられる。まず、レーザー径(縦10mm、横2mm)と(縦2mm、横2mm)のトータルパワーをそれぞれ1mWに換算した。トータルパワーが同じ時、レーザー径が広がることにより、単位面積当たりのパワーが小さくなる。そのため、レーザー径を縦10mmに広げることでパワー密度がレーザー径縦2mmの場合と比べて小さくなる。そのため、LIFが少なくなると考えられる。次に、縦長レーザーの上部と下部に位置するレーザー光がクライオスタットの窓やビームポートに当たり、発生した散乱光がファイバーに入り切れていないと考えられる。そのため、縦10mmのレーザーから発生したLIFの一部のみしかファイバーに入らず、モノクロメーター・PMTで測定されていないと考えられる。

5.3.2 S/BgL比の比較 [cps/(mW/cm²)]

パワー密度を変えずにレーザー径を広げた場合のS/BgL比を計算した。レーザー径(縦2mm、横2mm)とレーザー径(縦10mm、横2mm)それぞれのSignal(LIF)、BgL(レーザー散乱光)、S/BgL比を表3に示す。

表3 S/BgL比 [(cps/(mW/cm²))] 実験結果

	縦2mm,横2mm	縦10mm,横2mm
S(LIF) [cps/mW]	1.20×10^3	5.80×10^3
BgL(レーザー散乱光) [cps/mW]	0.04	0.20
S/BgL	2.89×10^4	2.91×10^4

表3より、パワー密度を変えずにレーザー径を広げた場合、Signal(LIF)はレーザー径(縦10mm、横2mm)の方が4.85倍高いと分かる。しかし、その分、散乱光も増加するため、今後はクライオスタット内の内容物を可能な限り黒色加工するなど散乱光を減らす策を考える必要がある。

6 まとめと今後の展望

我々は加速器で生成される低収量不安定核(RI)原子の核構造研究に向けて、超流動ヘリウムとレーザー分光を組み合わせたOROCHI法の開発を行っている。過去の理化学研究所RIPSビームライン(入射エネルギー664MeV)

を用いた 2016 年度の加速実験では ^{85}Rb を用いて OROCHI の検証が行われ、200pps 程度の低収量な原子での LIF 観測に成功している。さらに HIMAC SB2 ビームライン (入射エネルギー 350 AMeV) を用いた 2021 年度の加速実験では、LIF の観測を確認した。これにより入射エネルギーのより高いビームラインでも適用可能であることが示された。2019 年の加速器実験の解析結果より、HIMAC SB2 ビームラインで超微細構造測定実験を行うと十分な信号が得られるまでの時間は 2 時間以上となった。そこで、以降の加速器実験では、観測領域を $\phi 2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 5\text{mm}$ から $\phi 2\text{mm} \times 10\text{mm} \times 5\text{mm}$ に変更し、観測可能な原子数の増加と測定時間の短縮を目指している。しかし、観測領域の拡大により蛍光検出系を用いた光検出効率の低下が懸念される。本研究では、観測領域拡大による蛍光検出効率の変化と、レーザー径を縦長にすることによる S/BgL 比の変化を測定した。まず、蛍光検出効率の低下について、Rb が封入されているガスセルを用いてレーザーの照射位置を上下に変化させ、原子数の測定を行った。結果としては、高さ 0mm の時の光子数を集光率 1 とした時、高さ +5mm (観測領域の上部) の集光率は 0.85、高さ -5mm (観測領域の下部) の集光率は 0.65 という結果になった。結果より、レーザーの光軸の中心を + 方向にシフトして縦長に拡大することで、観測領域拡大による集光率の低下が抑えられると考えられる。次にレーザーを縦長 (縦 10mm, 横 2mm) にすることによる S/BgL 比の変化についての実験結果は、レーザー径 (縦 2mm, 横 2mm) の S/BgL 比は、 2.89×10^4 、レーザー径 (縦 10mm, 横 2mm) の S/BgL 比は、 2.91×10^4 となった。この結果より、レーザー径を広がることで S/BgL 比は約 1.01 倍に高くなると分かった。また、パワー密度を変えずにレーザー径を広げた場合、Signal (LIF) はレーザー径 (縦 10mm, 横 2mm) の方が 4.85 倍高いと分かる。レーザー径を広げることで、レーザーに当たる原子も増えるため増加したと考えられる。しかし、その分散乱光も増加するため、今後はクライオスタット内の内容物を可能な限り黒色加工するなど散乱光を減らす策を考える必要がある。

参考文献

- [1] X.F. Yang *et al.*, Phys. Rev. A **90**, 052516 (2014).
- [2] T. Nishizaka, Graduation Thesis, Hosei Univ. (2017).
- [3] W. Kobayashi, Graduation Thesis, Hosei Univ. (2019).
- [4] K. Imamura, *et al.* Appl. Phys. Express **12**, 016502 (2019).
- [5] K. Tubura RIKEN Accel. Prog. Rep., in press