

超流動ヘリウム中に停止した高エネルギーRb ビームのレーザー誘起蛍光観測

TSUBURA, Kenta / 螺良, 健太

(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)

4

(発行年 / Year)

2022-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025396>

超流動ヘリウム中に停止した高エネルギーRb ビームの レーザー誘起蛍光観測

LASER-INDUCED FLUORESCENCE DETECTION OF HIGHLY ENERGETIC RB BEAMS STOPPED IN SUPERFLUID HELIUM

螺良健太

Kenta TSUBURA

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 developing a laser spectroscopy method called OROCHI to study nuclear structure of low production yield atoms with unstable nuclei. In OROCHI, the ion beams generated at an accelerator are stopped in superfluid helium (He II) with high efficiency (~100%). This method enables us to measures Zeeman level to determine the nuclear spins and hyperfine structure level to determine nuclear electromagnetic moments using laser radio wave/microwave double resonance method. We have applied this method to highly energetic ^{84}Rb beams generated at HIMAC SB2 beamline. I here report the successful detection of laser-induced fluorescence from ^{84}Rb atoms stopped in He II.

Key words : *Laser spectroscopy, Superfluid helium*

1. 研究背景

原子核の核構造を反映する核スピン、核モーメントを決定する手法の一つに、原子核の持つ電磁氣的性質と電子との相互作用に起因するゼーマン準位間隔及び超微細構造間隔をレーザー光を用いて測定するレーザー核分光法がある。レーザー核分光法にはコリニアレーザー分光法、共鳴イオン化分光法、などが存在する。これらの分光法を加速器でイオンビームとして人工的に生成される短寿命・低収量の原子核に対して測定を行う場合、測定感度や効率の観点から手法適用が困難となる可能性がある。この問題の解決策として、低収量原子核の高効率・高感度測定を可能とした、超流動ヘリウム環境を利用した独自の手法である OROCHI (Optical Radioisotope atom Observation in Condensed Helium as Ion-catcher)が開発された。

OROCHI では、加速器施設でイオンビームとして生成される不安定核原子を高密度な超流動ヘリウム中の狭い範囲に停止させる。停止した不安定核原子に対して光ポンピング法を用いてスピン偏極を生成、その原子に対しレーザー・ラジオ波/マイクロ波二重共鳴法を適用して、ゼーマン準位/超微細構造間隔の測定を行う。

超流動ヘリウムは、停止媒体としてだけでなく分光環境としても有用性がある。超流動ヘリウム中に原子を導入すると、周囲のヘリウムとの相互作用により導入原子の励起スペクトルは真空中と比較して短波長

側にシフトし線幅が広がる[1]。この性質により、信号となる原子からの蛍光を観測する場合にバックグラウンドノイズとなるレーザー光を波長選別することができる。また、二重共鳴法を行う上で重要となるスピン偏極を単一のレーザーで効率的に生成することが可能となる。

我々のグループではこれまでに、安定同位体である $^{85,87}\text{Rb}$ 、 ^{133}Cs 、 ^{197}Au をレーザーアブレーション法で超流動ヘリウム中に導入し、OROCHI を用いて分光を行ってきた。光ポンピング法を用いたスピン偏極状態では 60-90% という高効率のスピン偏極状態を生成し、ゼーマン準位間隔、超微細構造間隔の測定が可能であることが示されてきた [2-4]。特に、 ^{133}Cs 原子においては超流動ヘリウム中において超微細構造異常を求め得る 6 桁の精度で超微細構造間隔の測定を成功した[5]。加速器施設を使用した実験では、理化学研究所の RIPS ビームラインでエネルギー 66 A MeV の $^{84,85-87}\text{Rb}$ のイオンビーム 10,000 個/秒(pps)程度を超流動ヘリウム中に導入し、ビームの停止、原子からの蛍光観測、ゼーマン準位間隔の測定による核スピンの導出に成功している[6]。加えて、レーザー散乱光によるバックグラウンドをより効率的に削減可能な新しい蛍光検出システムを開発し、ビームとして打ち込まれた 200 個/秒程度の小数個の原子からのレーザー誘起蛍光(LIF)を観測することに成功した[7]。

2. 研究目的

OROCHI は分光用レーザーと同程度の径の範囲に入射ビームを中性原子として停止させて、超流動ヘリウム中でのレーザー・マイクロ波二重共鳴分光法を適用するという独自性の極めて高い手法である。本研究の目的は、本手法をこれまで測定が困難であった低収量の不安定原子核に対して適用させ、核モーメントの測定を可能とすることである。そのためには例えば理化学研究所 Big RIPS ビームラインのように入射エネルギーの高いビームラインでも本手法が適応できるか確認する必要がある。そこで、本研究では理化学研究所の RIPS ビームライン(入射エネルギー66 AMeV)より入射エネルギーの高い放射線医学総合研究所の HIMAC SB2 ビームラインを用いて実験を行い超流動ヘリウム中に導入された原子から検出される光子の観測を行い、HIMAC SB2 ビームライン(入射エネルギー350 AMeV)における OROCHI 法の妥当性を検証する。

3. 光ポンピング法及びレーザー・マイクロ波/ラジオ波二重共鳴法

OROCHI 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用いて分光を行なっている。光ポンピング法では原子に円偏光レーザーを照射することで磁気量子数の選択則による励起、脱励起を起こす。これを繰り返すことにより磁気量子数最大の準位に占有率が高まり、原子は円偏光レーザーを吸収できずレーザー誘起蛍光は観測されない。この状態をスピン偏極状態という。このスピン偏極状態の原子にエネルギー準位と対応したラジオ波(~MHz)/マイクロ波(~GHz)を照射すると偏極状態が崩れ、レーザー誘起蛍光が観測される。この時の共鳴周波数からゼーマン準位間隔/超微細構造間隔を求めることができる。この方法をレーザー・マイクロ波/ラジオ波二重共鳴法という。

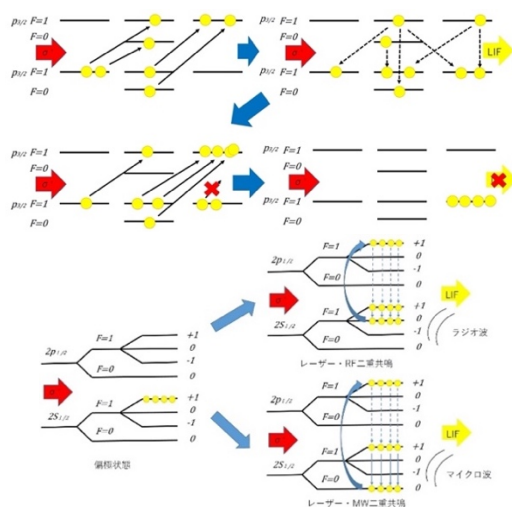


図1 光ポンピング法とレーザー・マイクロ波/ラジオ波二重共鳴法の概要図

4. 研究手法

OROCHI では加速器で生成された低収量の不安定核原子に対しても超微細構造間隔を高精度に測定できる方法として大きな利点を持つと期待される。本実験では加速器で生成されたイオンビームを超流動ヘリウム中のレーザー誘起蛍光観測領域($\phi 2\text{ mm} \times 5\text{ mm}$)に停止させる。超流動ヘリウムは高密度な媒質であるためイオンビームを100%に近い効率で停止させることができる。超流動ヘリウム中に高速イオンビームを導入すると、イオンは減速し、周囲のヘリウム原子から電子を受け取り中性化されて原子としてトラップすることができる。この原子に対して光ポンピング法を用いて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用いてゼーマン準位、超微細構造間隔を測定する。これらの測定により原子核の構造を反映する物理量である核スピン、核磁気モーメントを導出する。

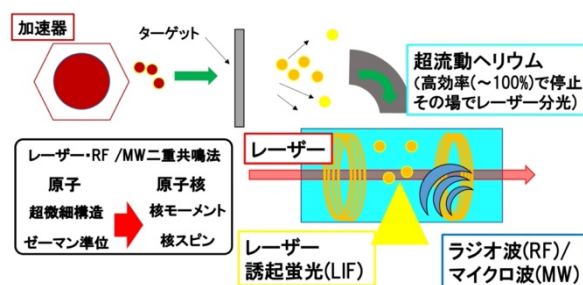


図2 OROCHI の概要図

5 HIMAC ビームラインを用いた加速器実験 (2019 年)

2019年に超微細構造間隔測定に向けて低温環境を生成するクライオスタット内のレーザー誘起蛍光観測領域にとどまるビーム数の見積もりを行うことを目的とした実験を放射線医学総合研究所の HIMAC SB2 ビームラインを用いて行った。観測領域にとどまるビーム数の見積もりは荷電粒子が通過する際に発光するプラスチックシンチレータの発光強度を観測することにより行った。この実験では観測領域に停止するビーム数の見積もりを目的として行った実験であるため、停止媒質は液体窒素を用いて行った。

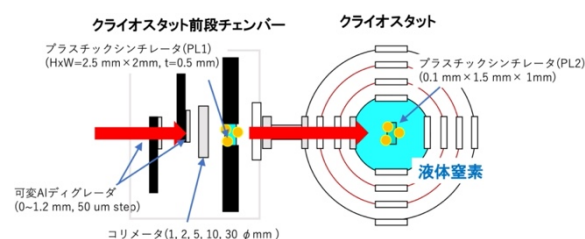


図3 2019年に行った加速器実験の概要図

この実験での対象原子は収量と純度の観点から適切な核種を LISE++を用いて見積もりを行い、 ^{84}Rb を対象原子とした。対象原子である ^{84}Rb は1次ビーム ^{84}Kr 及び Be ターゲット(12mm)の核破碎反応による2次ビームとして生成した。この実験ではコリメータを用いてビームの径を変えた時のビームの横方向広がり、Al ディグレーダの厚みを変えた時のビーム進行方向広がり、その結果から入射ビームの横広がり、と進行方向広がり、を推定すると以下の図のようになった。

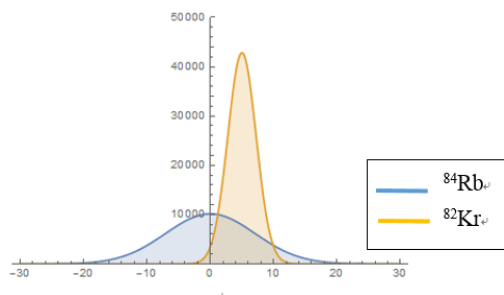


図4 2019年での加速器実験のビーム横広がり

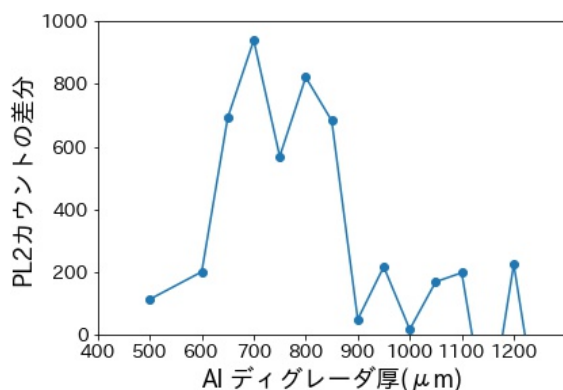


図5 2019年での加速器実験のビーム進行方向広がり

この結果と、ビーム垂直方向の広がり(LISE++を用いて推定)を含めて推定を行うと対象原子である ^{84}Rb は1次ビーム ^{84}Kr での最大強度である $5.9 \times 10^8 \text{ppp}$ では観測領域に1.23kppp 停止すると推定された。(HIMAC SB2 ビームラインはパルスビームのため ppp=Particle per pulse で表す)

6. 超微細構造測定実験の測定時間見積もり

この推定結果から HIMAC ビームラインで ^{84}Rb の超微細構造間隔測定実験を行った時の測定時間の見積もりを行った。見積もりには2016年に理化学研究所のRIPS ビームラインで行った実験で得られた測定データを用いた。まず、超微細構造間隔測定のためのマイクロ波二重共鳴を行った場合のスペクトルを以下に示す。

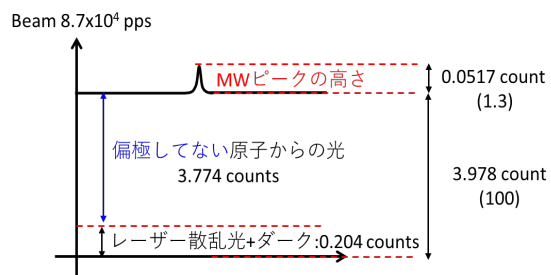


図6 マイクロ波二重共鳴を1回掃引時に得られるスペクトル

この条件でシグナル(マイクロ波ピーク)がノイズ(無偏極原子の発光+散乱光)の2倍の平方根の高さになるまでの掃引した場合の掃引時間の見積もりを行った。その結果、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。1つのスペクトルを得るために2時間以上かかるのは非効率であるため測定の高効率化を必要とする。そこで2022年1月に行う実験ではレーザー誘起蛍光観測領域を現在の $\phi 2 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ から $2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ に変更した。この変更により、レーザー誘起蛍光の強度を上昇させることにより測定の高効率化が期待される。

7. HIMAC ビームラインを用いた加速器実験(2022年)

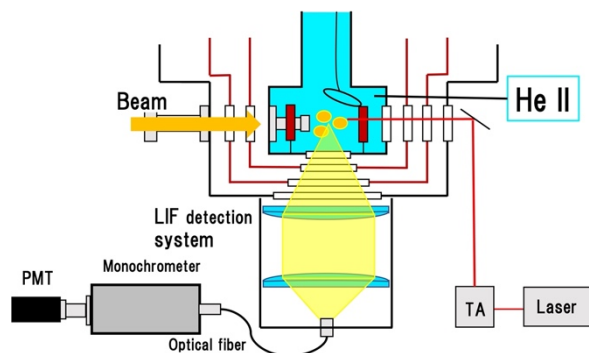
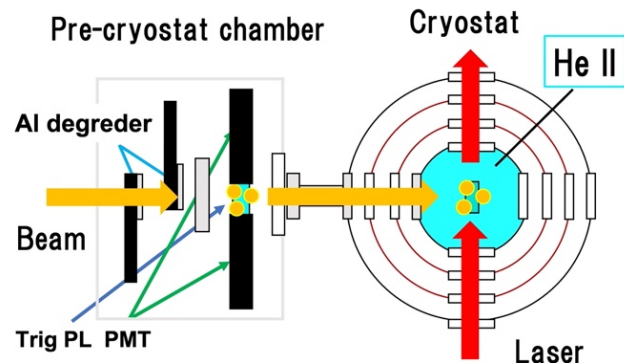


図7 2022年に行った加速器実験の概要図

図 7 が 2022 年に行った加速器実験の概要図である。 ^{84}Rb のビームがクライオスタット前段チェンバーを通過してクライオスタットの超流動ヘリウム中で停止する。クライオスタット前段チェンバーでは Trigger PL と 2 つの光電子増倍管を用いてビーム数の測定を行っている。クライオスタット中に停止した原子に対して、テーパアンプ(TA)で増幅した 780 nm レーザーを照射する。この波長は超流動ヘリウム中 Rb 原子の D1 線の励起波長に相当する。これにより停止した原子からレーザー誘起蛍光(LIF)が放出され、LIF 検出系、光ファイバーを通過した後、モノクロメーターで Rb の発光波長である 794 nm のみ選別して光電子増倍管で検出される。まず、Al ディグレーダの厚さを変えてビーム停止位置の分布を測定した。

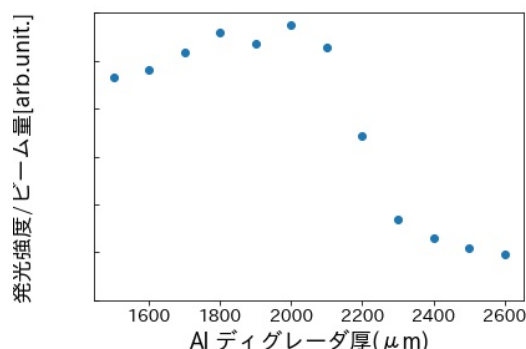


図 8 超流動ヘリウム中での Al ディグレーダの厚さとビーム停止位置の関係

図 8 よりディグレーダの厚さが 2100 μm 辺りから減少している。ここから、厚さを 2100 μm にすることで観測領域にビームを停止させることが分かった。ここからクライオスタットにレーザーを入射して ^{84}Rb のレーザー誘起蛍光(LIF)の観測を行った。

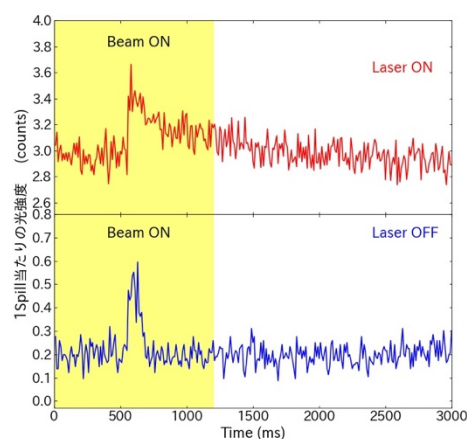


図 9 レーザーON/OFF した場合に検出した光強度

図 9 はレーザーを ON/OFF した場合で検出した光強度である。レーザーON が上半分、レーザーOFF が下半分である。上半分のプロットの ^{84}Rb のレーザー誘起蛍光(LIF)には、下のプロットのビーム誘起蛍光と比較して明らかに長いテールが引いていることがわかる。HIMAC SB2 ビームラインはパルスビームであるため、この上半分のプロットに見えるテールは観測領域中の ^{84}Rb 原子が徐々に減少していく様子を表していると考えられる。この様子が長いテールが引いていることに現れたと考えられる。この結果より、 ^{84}Rb のレーザー誘起蛍光(LIF)を検出し、OROCHI が高エネルギーである HIMAC SB2 ビームラインでも適用可能であることを実証した。

8. まとめと今後の展望

我々のグループでは不安定核原子の分光観測法として超流動ヘリウムを使用した OROCHI の開発を行っている。この手法を用いて理化学研究所の RIPS ビームラインでエネルギー 66 AMeV の $^{84,85-87}\text{Rb}$ のイオンビームの停止、原子からの蛍光観測、ゼーマン単位間隔の測定による核スピンの導出に成功している。

今後は本手法を測定が困難であった低収量の不安定原子核に対して適用を目指しており、入射エネルギーの高い放射線医学総合研究所の HIMAC SB2 ビームライン(入射エネルギー 350 AMeV)を用いた実験を行った。

2019 年の加速器実験ではレーザー誘起蛍光観測領域にとどまるビーム数の見積もりを行うことを目的とした。その結果から 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、測定の効率を上げるためにレーザー誘起蛍光(LIF)観測領域を $\phi 2 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ から $2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ に拡大した。

2022 年の加速器実験ではレーザー誘起蛍光(LIF)の観測を確認でき、OROCHI が高エネルギーである HIMAC SB2 ビームラインでも適用可能であることを実証した。今後はレーザー・ラジオ波/マイクロ波二重共鳴法によるスペクトルの取得が目標となる。

参考文献

- [1] Y. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **71**, 1035 (1993).
- [2] T. Furukawa, Doctoral thesis, Osaka Univ. (2007).
- [3] T. Furukawa *et al.*, Physica E, **43**, 843 (2011).
- [4] T. Fujita, Master Thesis, Osaka Univ. (2014).
- [5] K. Imamura *et al.*, Hyperfine Interact **230**, 73 (2015).
- [6] X. F. Yang *et al.*, Phys. Rev. A, **90**, 052516 (2014).
- [7] K. Imamura *et al.*, Appl. Phys. Express, **12**, 016502 (2019)