

平成21年 6月 5日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19740170

研究課題名（和文） 超流動ヘリウム中での光ポンピング法によるAl、In原子の
スピン偏極生成法開発

研究課題名（英文） Optical pumping of Al and In atoms in superfluid helium

研究代表者

古川 武 (FURUKAWA TAKESHI)

独立行政法人理化学研究所・本林重イオン核物理研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号：30435680

研究成果の概要：

本研究では、超流動ヘリウム中という特異な環境下を利用した光ポンピング法による新しい偏極生成技術を開発し、既存の手法では困難であった非アルカリ金属Ag原子、Au原子に対してそれぞれ80%以上、65%以上という高い偏極度の生成に成功した。さらに、100%の完全偏極に到達しない原因は照射レーザーの円偏光が不完全なためであることも突き止めた。本研究により、原子核構造をはじめ現代物理学研究に不可欠な原子スピン偏極の生成を広範な元素に対して可能とする基礎が築かれたと言えよう。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,100,000	0	3,100,000
2008年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	120,000	3,620,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子、原子核、宇宙線、宇宙物理

キーワード：核物理、レーザー核分光

1. 研究開始当初の背景

近年の物理学研究において、スピン偏極生成とその応用は極めて有用な実験技術である。原子核実験研究においても、原子核のスピン偏極生成は原子核の電磁気モーメント(核モーメント)測定や核子間に働く核力の実験研究など、原子核の根源に迫る多くの実験に用いられる極めて重要な手法である。これまでに様々な偏極生成法が考案され、不安定核生成の際の核反応を利用した偏極生成法など多くの有用な方法を用いて核構造研究に精力的に用いられてきた。

しかし、安定核から多くの核子を剥ぎ取って生成されるドリップライン近傍の短寿命

不安定核に対しては、一般に核反応を用いた既存の方法では生成されるスピン偏極が小さく、実用可能なスピン偏極度を得ることが極めて困難であった。そのため、スピン偏極を用いた核構造研究は上記の短寿命不安定核に対してはこれまでほとんど行うことができない状況であった。

2. 研究の目的

研究代表者はこの問題を打開するために、高いスピン偏極を生成可能な光ポンピング法を用いた汎用的な偏極生成法の開発に着手した。光ポンピング法は、円偏光したレーザー光を繰り返し原子に吸収させることで

光子の持つ角運動量を原子に次々と受け渡し、超微細構造相互作用を介して原子・原子核のスピン偏極を同時に生成する方法である。本手法は近年になり低速RIビームに対し極めて高いスピン偏極の生成を実現し大きな注目を集めている。しかし、本方法は以下に挙げる2点の大きな欠点を持っている。

- 1) 複雑な準位構造を持った原子の場合、レーザーによって各準位間の励起を同時に行わねばならず、そのため波長の違った数本から十本以上に及ぶレーザー光を同時に照射せねば偏極生成ができず、結果としてアルカリ金属など単純な準位構造を持った原子以外では適応が困難であること
- 2) 紫外領域の吸収スペクトルをもつ原子に対しては、吸収波長にちょうど合致したレーザー光源がほとんど存在せず、結果として大部分の元素が偏極困難であること

というものである。

研究代表者は、上記問題を解消すべく、超流動ヘリウム(He II)中に短寿命不安定核を打ち込んで停止させ、He II中にゆっくり漂う短寿命RI原子に対して光ポンピング法を行い偏極生成するという新しい方法を考案した。He II中に存在する原子は、まわりのヘリウムから受ける圧力の影響で光吸収スペクトルが動的に広がっており(均一広がり)、このスペクトル広がりを利用することで

- ・単一波長のレーザー光1本で複雑な準位間の遷移を同時に起こすことが可能となり、複雑な準位構造をもった原子でも光ポンピングが可能となる
- ・レーザー波長が原子の吸収波長に対して多少ずれていても原子の励起が可能であり、光源の選択幅が大きく広がる

といった大きな利点が得られる。このHe II中における原子スペクトルの特長を生かし、広範な元素に対して光ポンピング法によるスピン偏極生成を可能とする点が本研究の眼目である。

本研究では、このHe II中における光ポンピング法の有用性を実証すべく、既存の手法では偏極生成が困難ないくつかの元素に対し偏極生成を試みた。具体的には、以下の2族、4種類の元素についてHe II中にて光ポンピングによる偏極生成の可能性を探った。

- ・吸収波長が紫外領域のためこれまで光ポンピングによる高偏極生成が為し得ていないAg, Au原子などIB族元素
- ・基底状態近傍の準位構造がアルカリ金属に比べ複雑な為やはり光ポンピングによる高偏極生成が為し得ていないIn, Al原子などIII族元素

3. 研究の方法

具体的な光ポンピング法による偏極生成、および偏極確認の手法を以下で簡潔に記す。光ポンピング法とは上述の通り円偏光したレーザー光を繰り返し原子に吸収させることで光子の持つ角運動量を原子に次々と受け渡し、超微細構造相互作用を介して原子・原子核のスピン偏極を同時に生成する方法である。円偏光レーザー照射時における原子の励起確率(光吸収断面積)は原子自身の磁気量子数に応じて変化するため、生成されたスピン偏極度は、原子が励起後に放出する脱励起光の強度変化から求めることができる。

例としてアルカリ金属原子などにおけるD1励起($s_{1/2} \rightarrow p_{1/2}$)を考えよう。円偏光レーザー(σ^+)を吸収する場合、原子の磁気量子数 m は必ず+1の変化となる。このため、 $m=+1/2$ 状態に存在する原子はレーザー光を吸収できず、 $m=-1/2$ 状態に存在した原子のみが励起され、その後 $m=\pm 1/2$ のどちらかに脱励起することになる。このため、最終的に原子の状態は $m=+1/2$ のみに集中することになる。これが光ポンピング法によるスピン偏極生成の原理である。このとき、偏極した原子は円偏光レーザーの光を吸収できないため、結果として脱励起光が消失する。この脱励起光の減少を測定することで、原子の偏極度を測定することが可能となる。本研究においても、偏極度をこの脱励起光の変化から測定した。

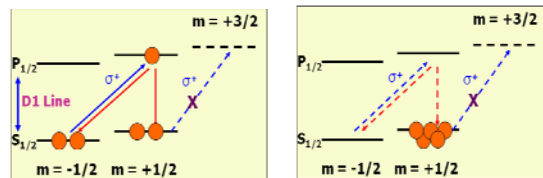


図1：光ポンピング法による偏極生成の概念図
(左)偏極生成前、(右)偏極生成後

実験のセットアップを図2に示す。He IIで満たされたクォーツ・セル上空にAlやAgなどの試料を設置し、大強度パルスレーザー(フラッシュランプ励起パルスNd:YAGレーザー)にてレーザースポット法を用いHe II中に試料を導入する。導入された試料はその殆どが多数個の原子から成るクラスター状であるため、He II中にて再度大強度パルスレーザー(フェムト秒パルスTi:Sapphireレーザー)を照射し、クラスターをばらばらに壊して原子をHe II中の観測領域に供給している。

供給された原子は光ポンピング用レーザーを照射され、偏極生成される。この際、原子から放出される脱励起光を集光し、モノクロメータで波長識別して光電子増倍管にてフォトンカウントすることで脱励起光強度を測定している。

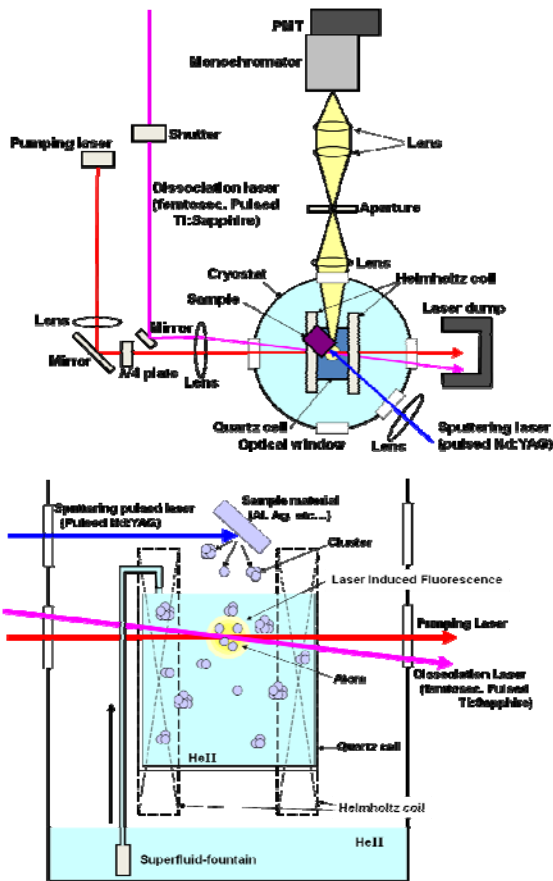


図2：実験セットアップ全体(上)および超流動ヘリウムクライオスタット内部の構造

今回の偏極生成実験では、上記のとおり脱励起光強度が原子の偏極度に応じて減少することを利用して、光ポンピングを行いながら原子に印加した偏極保持用の磁場強度を変化させることで、その際の脱励起光強度から偏極度の見積を行っている。保持磁場が印加されない状態だと、光ポンピングにて生成した偏極度がすぐに壊れ、結果として偏極度がゼロとなり脱励起光強度は無偏極状態のものとなる。定量的には、脱励起光強度 I は原子の偏極度 P_{atom} およびレーザーの円偏光度 P_{laser} を用いて

$$I \propto 1 - P_{atom} \times P_{laser}$$

と表される。つまり、十分な保持磁場を印加した状態と磁場がゼロの状態での脱励起光強度(それぞれ I_{on}, I_{off})を比べ、レーザーの円偏光度を考慮して、

$$P_{atom} = \frac{(1 - I_{on}/I_{off})}{P_{laser}}$$

として原子の偏極度を導出する。

4. 研究成果

本研究では、まず偏極生成のために必要な原子のHe II中における吸収波長を上記のIII族元素、Al, In原子について測定した。その結果、Al, In原子については超流動ヘリウム中における光の吸収波長が今まで知られていた値と異なり、当初計画していたレーザー光源を用いては光ポンピングを行うことができないとわかった。新たにレーザー光源の準備を行ったが、測定した吸収波長に不定性が多く、結果として偏極の生成確認に至ることはできなかった。

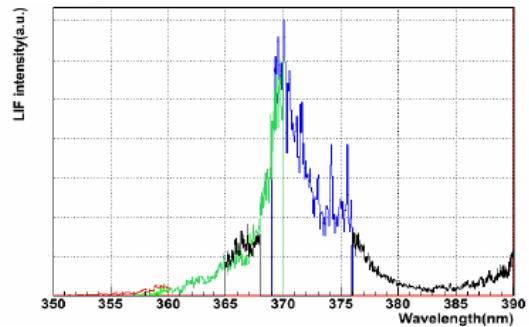


図3：In原子の超流動ヘリウム中における光吸収スペクトル(中心 370nm)

そこで、同じく本研究の対象原子であったIB族元素であるAg原子、Au原子に焦点を絞り、同様に光ポンピングに必要なHe II中の光吸収波長について測定を行った。こちらはこれまで知られていた値と同じ結果が得られたため、吸収波長に合致したレーザー光を使い実際に超流動ヘリウム中にて光ポンピング法を用いた偏極生成を行い、十分な偏極を生成することに成功した。図4に円偏光/直線偏光レーザー照射時それぞれの場合におけるAg原子偏極度の磁場による変化を示す。直線偏光レーザー照射時では、光ポンピングによる偏極生成が行われなかったため磁場を掃引しても偏極度は変化しないが、円偏光レーザー照射時には光ポンピングによる偏極生成が行われている。

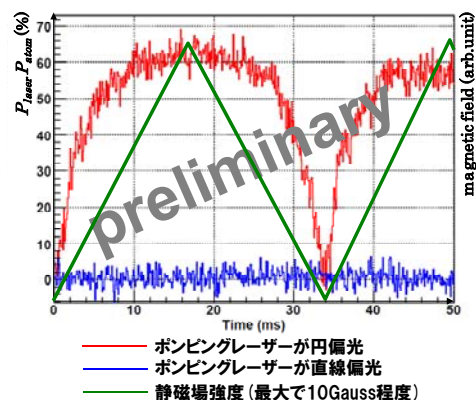


図4：偏極保持磁場強度を変化させたときのAg原子の偏極度変化

レーザーパワーなど実験条件を最適化することで、最大で80%以上(Ag原子)、60%以上(Au原子)という高い偏極度が得られた。100%の完全偏極に到達しないのは照射レーザーが完全円偏光となっていなかったためであり、今後の改善により100%の完全偏極に到達可能と考えられる。さらに、レーザー光強度を変化させた時の生成偏極度の変化から超流動ヘリウム中における原子スピン偏極の大まかな緩和時間を見積もり、Au原子に関して100ms以上という長時間の偏極保持が可能とわかった。

続いて、Ag原子に対して生成されたスピン偏極を利用して実際に二重共鳴法を用いて原子のZeeman準位間隔を測定し、 $^{107,109}\text{Ag}$ 核の核スピン(ともに1/2)を正しく導出可能か確かめた。ここでいう二重共鳴法とは、光ポンピングにて編曲した原子にラジオ波を照射して副準位間共鳴(Zeeman準位間共鳴)を誘起し、共鳴にて原子の偏極が壊される際の脱励起強度変化を観測することで副準位間隔を測定する手法である。磁場7.1(5)Gauss印加時に得られたZeeman準位間二重共鳴スペクトルを下図に示す。ラジオ波の周波数が10.4MHzの位置でZeeman準位間共鳴が起こり、原子の偏極が壊されて脱励起強度が増加する様が見て取れる。この中心周波数 ν は、核スピンの値Iを用いて

$$\nu(\text{MHz}) = \frac{2.8(\text{MHz}) \times B(\text{Gauss})}{(2I + 1)}$$

と表すことができる。ここから、 $^{107,109}\text{Ag}$ 核の核スピンを正しく1/2と導出することに成功した(図5右上)。

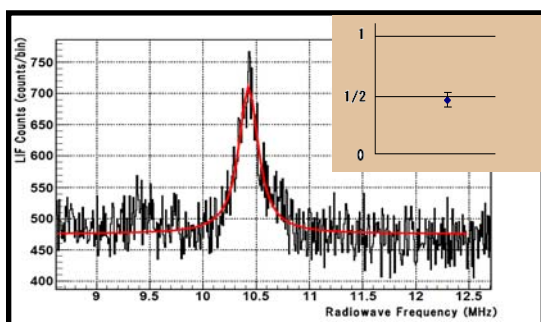


図5 : $^{107,109}\text{Ag}$ 原子の Zeeman 準位間隔の二重共鳴スペクトルおよび導出した核スピン(右上)

上記一連の研究成果により、光ポンピング法を利用した原子、原子核の光編極生成やそれを応用した精密レーザー分光測定において、超流動ヘリウム環境が有用なものであることを実証することができた。本手法を用いることで、短寿命不安定 Ag 同位体の核構造研究をはじめ多くの新しい知見を創出することが可能となると期待する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① T. Furukawa, (7名中1番目)、
Hyperfine structure of $^{85,87}\text{Rb}$ and ^{133}Cs atoms in superfluid helium, *Nuclear Physics A*, Vol.805 “Proceedings on International Conference on Nuclear Physics (INPC2007)” Vol.2, p.624-626 (2008)、査読なし
- ② T. Furukawa, (8名中1番目)、
Laser-microwave double resonance spectroscopy in superfluid helium for the measurement of nuclear moments, *Proceedings of the XIth International Workshop on Polarized Sources and Targets (PST05)*, p.165-168 (2007)、査読なし
- ③ T. Furukawa, (8名中1番目)、
Estimation of photon numbers detected in OROCHI experiment, *RIKEN Accelerator Progress Report*, vol. 41, p.153-153(2008)、査読あり
- ④ T. Furukawa, (7名中1番目)、
Precision Laser Spectroscopy of Atoms in Superfluid Helium for Investigation of Nuclear Structure, *OULNS(Osaka University Laboratory of Nuclear Studies) Annual Report 2007*, 掲載予定 (2008)、査読なし
- ⑤ T. Furukawa, (7名中1番目)
Deformation of hyperfine structure for alkali Rb and Cs atoms immersed in superfluid helium
OULNS(Osaka University Laboratory of Nuclear Studies) Annual Report 2007, 掲載予定 (2008)、査読なし
- ⑥ T. Furukawa, (8名中1番目)、
Hyperfine structure of Rb and Cs atoms in superfluid helium, *RIKEN Accelerator Progress Report*, vol.40, p.212 (2007)、査読あり
- ⑦ T. Furukawa, (9名中2番目)、
Precise measurement of the hyperfine splitting of Cs atoms in superfluid helium, *RIKEN Accelerator Progress Report*, vol.40, p.213 (2007)、査読あり

〔学会発表〕(計12件)

- ① T. Furukawa, (22名中1番目)
A new laser spectroscopic method "OROCHI (Optical RI-atom Observation in Condensed Helium as Ion-catcher)", The 18th International Spin Physics Symposium (SPIN2008)、2008年10月、University of Virginia (USA)
- ② T. Furukawa, (7名中1番目)、
Hyperfine structure of $^{85,87}\text{Rb}$ and ^{133}Cs atoms in superfluid helium, International Conference of Nuclear Physics (INPC2007)、2007年6月、東京国際フォーラム(東京)
- ③ T. Furukawa, (8名中1番目)、
Laser spectroscopic study of atomic hyperfine structure in superfluid helium for the investigation of nuclear structure, International Workshop on Nuclear Structure (NS07)、2007年7月、京都大学基礎物理学研究所(京都)
- ④ T. Furukawa, (7名中1番目)、
High Precision Laser Spectroscopy of Rb and Cs Atoms in Superfluid helium, International Conference of Nuclear Physics (ICPEAC2007)、2007年7月、Freiburg (Germany)
- ⑤ 古川武 (22名中1番目)
超流動ヘリウム中における短寿命核のレーザー核分光実験計画『OROCHI』の現状、日本物理学会秋季大会、2008年9月、山形大学(山形)
- ⑥ 古川武 (22名中2番目)
超流動ヘリウム中エキゾチック RI 原子の新奇なレーザー分光法(OROCHI法)
東北大学・CYRIC 研究会 'Fundamental Physics using Atoms'、2008年8月、仙台作並温泉(宮城)
- ⑦ 古川武、
理研"OROCHI"実験計画 ~超流動ヘリウムを利用した不安定核のレーザー核分光~
RCNP 研究会「RCNPにおける不安定核の研究」、2008年8月、大阪大学 RCNP(大阪)
- ⑧ 古川武(8名中2番目)、
OROCHI オンライン実験計画とその物理、日本物理学会第63回年次大会、2008年3月、近畿大学(大阪)
- ⑨ 古川武(7名中1番目)
OROCHI オンライン実験計画とその物理
第4回「停止・低速不安定核を用いた核分光研究」研究会、2007年12月、東北大CYRIC(宮城)

- ⑩ 古川武(7名中2番目)
超流動ヘリウム中における In 原子の励起スペクトル：光ポンピング実現をめざして
第4回「停止・低速不安定核を用いた核分光研究」研究会、2007年12月、東北大CYRIC(宮城)
- ⑪ 古川武(8名中1番目)
超流動ヘリウム中での RI 原子のレーザー分光実験における光収量計算
日本物理学会第62回年次大会、2007年9月、北海道大学(北海道)
- ⑫ 古川武(8名中2番目)
超流動ヘリウム中における原子超微細構造測定—気体 Rb を用いた共鳴周波数較正—
日本物理学会第62回年次大会、2007年9月、北海道大学(北海道)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古川 武 (FURUKAWA TAKESHI)
独立行政法人理化学研究所・本林重イオン核物理研究室・基礎科学特別研究員
研究者番号：30435680