

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20244025

研究課題名(和文) 超短レーザーパルス照射による高効率・高汎用核スピン偏極

研究課題名(英文) Highly efficient and highly versatile method to polarize nuclear-spin by ultrashort laser pulses

研究代表者

中嶋 隆 (NAKAJIMA TAKASHI)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：50281639

研究成果の概要(和文)：実験研究については、Yb 原子ビームを偏極ターゲットとした実験セットアップを組み上げ、共鳴光励起および光イオン化によって生成した Yb+イオンの核スピン偏極度を光学的に検出するために必要な狭帯域(フーリエ限界) ナノ秒パルスレーザーを開発した。理論研究については、現行偏極スキームよりもさらに優れたスキームが無いかを検討し、超短レーザーパルス列を用いた新しい偏極スキームを考案した。エキゾチック原子の一種であるミュオニウムにこの新スキームを適用したところ、5 ナノ秒間隔で5つの1ピコ秒パルスを照射することにより、80%もの高偏極を得られる事が理論的にわかった。

研究成果の概要(英文)：We have setup the vacuum chamber to polarize nuclear-spin of Yb target, and developed the narrow-band ns laser system to optically monitor the resonantly excited and then photoionized Yb ions. Moreover, we have theoretically considered a new scheme to efficiently polarize nuclear-spin of target atoms using a sequence of short laser pulses. As a specific example we apply the idea to the muonium, a kind of exotic atom, and found that the irradiation of five resonant pulses with a duration of 1 ps and time interval of 5 ns results in 80 % polarization.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2009年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2010年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
年度			
年度			
総計	26,800,000	8,040,000	34,840,000

研究分野：量子エレクトロニクス

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：核スピン, 偏極, コヒーレンス, 光イオン化

1. 研究開始当初の背景

レーザーを用いて原子状態のさまざまなパラメータを制御することができることはよく知られている。特に、超短レーザーパルスを用いると、過渡的なコヒーレント効果によって定常状態的な概念からは得られない様々な量子状態を実現・制御することが可能となる。量子状態の中でも特に『核スピン』

に注目すると、スピン偏極核は応用分野から基礎科学の分野まで、スピが無偏極の場合に比べて格段に多くの生体情報や物理情報を読み取るためのツールとして活用される可能性がある。その反面、既存の核スピン偏極法では汎用性や到達偏極度、収量などの点で問題がある。

国内外の研究動向としては、医療用 NMR 造

影に用いる Xe ガスの核スピン偏極は、例えば産業技術総合研究所（産総研）や米国プリンストン大学の W. Happer 教授のグループで進められている。また原子核物理学の世界では、例えば国内では高エネルギー物理学研究所や理化学研究所の仁科センター、国外ではアメリカやカナダ、EU 各国の加速器センターなどで核スピン偏極技術の開発が進められており、スピン偏極を話題の中心とした国際会議が開催されているほどである。

我々はこれまで、量子エレクトロニクスを専門とする研究者の立場から、パルスレーザー誘起スピン偏極について、理論および実験の両面から独自の研究を進めてきた。

2. 研究の目的

本研究では、我々がごく最近理論的に考案した画期的な超短レーザーパルス誘起核スピン偏極法(Nakajima, Phys. Rev. Lett. 99, 024801 (2007))を実験によって実現することを第1の目的に、そして、実験進捗を見合わせながらさらに効率のよい独自の偏極法を理論的・実験的に提案・開発することを第2の目的とする。

3. 研究の方法

まず、実験研究の進め方について述べる。偏極スキームは、既に我々が前述の論文(Nakajima, Phys. Rev. Lett. 99, 024801 (2007))で Mg や Ca をターゲットとして理論的に提案しているが、今回の実証実験ではターゲットとして Yb 原子を用いる。Yb は Mg や Ca のようなアルカリ土類金属原子ではないものの、最外殻に電子を2個持つという点では似ている。また、Yb には核スピン $I=1/2$ を持つ同位体が天然で14%ほど存在しているということも都合が良い。これに対し、Mg や Ca では $I=1/2$ の同位体は安定には存在しないため、ターゲットの準備に加速器が必要となるため、第1段階の実証実験としては適していない。

理論研究については、本研究で採用することにした、我々が近年提案した偏極スキームよりもさらに効率の良いスキームがあるかどうかを検討することを最大の目的とする。

4. 研究成果

Yb 原子を用いた偏極スキームと実験配置図を図1に示す。Yb 原子のうち、我々が偏極させたいのは ^{171}Yb ($I=1/2$) であるが、これは天然 Yb に約14%存在する。狭帯域レーザーさえあれば、 ^{171}Yb だけを選択的に励起・イオン化することは不可能ではないが、我々の実験設備では選択励起はできない。そこで、イオン化までは Yb 全ての同位体を励起・イオン化し、イオン化した後で、 $^{171}\text{Yb}^+$ イオンのスピン偏極度を狭帯域パルスレーザーで選択的に

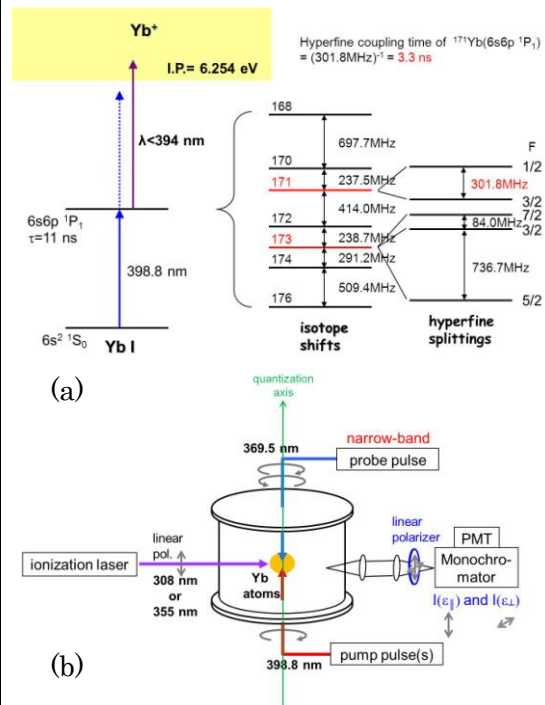


図1. Yb 原子を用いた (a) 偏極スキームと (b) 実験配置図.

検出することとした。このためには、バンド幅 200MHz 程度のフーリエ限界ナノ秒パルスが Yb^+ イオンの共鳴線 $6p \ ^2P_{1/2} \rightarrow 6s \ ^2S_{1/2}$

(369.5nm) で必要となる。このような狭帯域ナノ秒パルスは我々が所有する市販の波長可変ナノ秒色素レーザーでは生成することが出来ない。そこで、シングルモードの連続発振チタンサファイア (Ti:S) レーザーから 739nm の種光を生成し、それを2段の Nd:YAG 励起色素アンプでパルス増幅するシステムを開発し、その2倍波を用いることとした。開発はほぼ順調に進んだが、最終段階で種光の波長掃引が上手く作動せず、色々と調べた結果、これは Ti:S レーザーの波長掃引回路が壊れているせいであるということがわかった。しかしながら、代替部品はもう市販されていないため、Ti:S レーザーを種光に用いる事をあきらめて、現在はレーザーダイオード (LD) を種光にする方向で準備を進めている。結果論だが、毎回精緻な調整が要求される Ti:S レーザーに比べ、LD の調整ははるかに容易であり、その意味では LD の使用により、今後、狭帯域波長可変ナノ秒パルスを発生させる手間が大幅に省けることが期待される。

さて、理論研究については大きな成果が得られた。理論研究の主たる目的は、我々が既に考案した過渡的偏極スキーム(Nakajima, Phys. Rev. Lett. 99, 024801 (2007))よりもさらに優れたスキームを考案することである過渡的偏極スキームの長所は、通常的光ポンピング法に比べ、格段に短い時間 (ナノ秒オーダー) で偏極を実現できること、およ

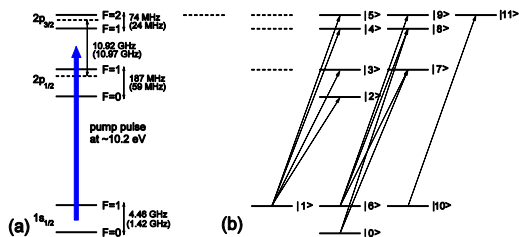


図 2. (a) ミュオニウムの準位構造. (b) では磁気副準位まであらわに記述している.

び、超偏極をも実現できることが挙げられるが、短所としては、励起状態で偏極を実現するため、自然寿命時間内に光イオン化あるいは衝突イオン化によって電子を取り除かなければならないこととターゲットとして使える核種が限られることが挙げられる。検討を進めた結果、超短レーザーパルス列を用いたスキームを考案した。この新手法によると、ほぼいかなる核種でも安定して高偏極させることができる。すなわち、長短レーザーパルス列を用いた新偏極スキームは高効率かつ高汎用である。例として、ミュオニウムをどの程度偏極できるかについて理論評価した。ミュオニウムとは、中間子の一種である正電荷を持ったミュオンと電子からなる水素様のエキゾチック原子であり、約 $2.2\mu\text{s}$ で崩壊する。また、エネルギー構造は水素とほぼ同じである。準位構造を図 2 に示す。核スピンドYNAMIKS の記述には、非結合基底における密度行列式を用いた。初期偏極度を 0% あるいは 50% と仮定して、5 ns 間隔で 1 ps の円偏光 122 nm パルス を 5 回照射した場合の偏極度の時間変化を図 3 に示す。初期偏極度は 0% と仮定している。1 パルスでも 30%、2 パルスなら 50% の偏極度がパルス照射後に得られる。5 パルスなら偏極度は 80% を超える。このように、かなり複雑な準位構造を持つミュオニウムのような原子でも、わずか数パル

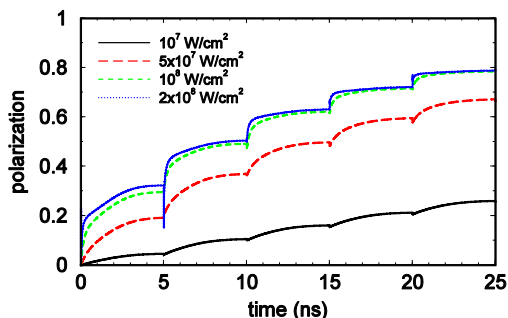


図 3. 超短レーザーパルス列をミュオニウムに照射した場合の偏極度の時間変化. 用いたパルスは波長 122 nm の 1 ps パルスであり、パルス間隔は 5 ns とした。また、ミュオニウムの初期偏極度は 0% とした。光強度については 10^7 , 5×10^7 , 10^8 , 2×10^8 W/cm² の 4 通りを考えた。

スで高い偏極度を得られることがわかったことは大きな成果である。

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 11 件)

- [1] Takashi Nakajima, “A scheme to polarize nuclear-spin of atoms by a sequence of short laser pulses: application to the muonium”, Optics Express 26, 27468–27480 (2010), 査読有.
- [2] Xianghe Ren and Takashi Nakajima, “Strong field ionization of a heteronuclear diatomic molecule”, Phys. Rev. A 82, 063410 (2010), 査読有.
- [3] Zhenming Song and Takashi Nakajima, “Formation of filament and plasma channel by the Bessel incident beam in Ar gas: role of the outer part of the beam”, Optics Express 18, 12923–12938 (2010), 査読有.
- [4] Gabriela Buica and Takashi Nakajima, “Multiphoton ionization of the calcium atom by linearly and circularly polarized laser fields”, Phys Rev. A 81, 043418 (2010), 査読有.
- [5] Jun Chen, Ryuji Itakura, and Takashi Nakajima, “Characterization of attosecond XUV pulses utilizing a broadband UV–VUV pumping”, Optics Express 18, 2020–2035 (2010), 査読有.
- [6] Takashi Nakajima, Yukari Matsuo, and Tohru Kobayashi, “First Step Toward Ultrafast Nuclear-Spin Polarization: All-optical Control and Direct Detection of Ultrafast Electron-Spin Polarization Using Femtosecond Laser Pulses”, AIP Conference Proceedings, Vol. 1149, pp. 876–879 (2009), Proceedings of the 18th International Spin Physics Symposium (SPIN2008), 査読無.
- [7] Jun Chen and Takashi Nakajima, “Characterization of attosecond XUV pulses from photoelectron spectra of atoms”, Laser Physics 19, 1586–1590 (2009), 査読有.
- [8] Zhenming Song, Zhigang Zhang, and Takashi Nakajima, “Transverse-mode dependence of femtosecond filamentation”, Optics Express 17, 12217–12229 (2009), 査読有.

- [9] Takashi Nakajima, “Effects of the carrier-envelope phase on atomic ionization by the pulse train in the multiphoton-ionization regime”, *Phys. Rev. A* 79, 043414 (2009), 査読有.
- [10] Takashi Nakajima, “Ultrafast nuclear spin polarization for isotopes with large nuclear spin”, *J. Opt. Soc. Am. B* 26, 572-580 (2009), 査読有.
- [11] Gabriela Buica and Takashi Nakajima, “Multiphoton ionization through the triplet states of Mg by linearly and circularly polarized laser pulses”, *Phys. Rev. A* 79, 013419 (2009), 査読有.

[学会発表] (計 18 件)

- [1] 中嶋隆, 「超高速イオン化によるイオン状態コヒーレンスの生成(II)」, 神奈川工科大学, 2011年3月24-27日, 春期第58回応用物理学関係連合講演会, 25p-KG-13.
- [2] 中嶋隆, 「超短レーザーパルス列によるスピン偏極: ミュオニウムへの応用」, 神奈川工科大学, 2011年3月24-27日, 春期第58回応用物理学関係連合講演会, 25p-KG-12.
- [3] X. Ren, 中嶋隆, 「分子の高強度光イオン化における量子干渉効果-異核2原子分子と等核2原子分子の違い-」, 新潟大学, 2011年3月25-28日, 日本物理学会第66回年次大会, 28aRB-7
- [4] 宋振明, 中嶋隆, 「重ね合わせガウスビームによるフェムト秒ファイラメント」, 神奈川工科大学, 2011年3月24-27日, 春期第58回応用物理学関係連合講演会, 25p-KG-11
- [5] Jun Chen, Ryuji Itakura, and Takashi Nakajima, “Attosecond photoelectron-SPIDER using a two-color pumping”, *The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies* (Pacifichem 2010), (Honolulu, USA, Dec.15-20, 2010).
- [6] Takashi Nakajima, Yukari Matsuo, and Tohru Kobayashi, “Polarizing nuclear-spin by a sequence of short laser pulses: application to polarize muonium”, *The 19th International Spin Physics Symposium* (SPIN2010), Sep.27-Oct. 2, 2010 (Jülich, Germany).
- [7] Takashi Nakajima, “Can coherence be produced upon ionization?”, *IVth International Conference on Frontiers*

- of Nonlinear Physics* (FNP2010), July 13-20, 2010 (Nizhny Novgorod, Russia).
- [8] Jun Chen, Ryuji Itakura, and Takashi Nakajima, “Attosecond photoelectron-SPIDER using a VUV pumping”, *19th International Laser Physics Workshop* (LPHYS’ 10), July 5-9, 2010 (Foz do Iguacu, Brasil).
- [9] Zhenming Song and Takashi Nakajima, “Role of the outer part of the beam for the formation of filament: Gaussian beam versus Bessel beam”, *19th International Laser Physics Workshop* (LPHYS’ 10), July 5-9, 2010 (Foz do Iguacu, Brasil).
- [10] Takashi Nakajima, “Ultrafast nuclear-spin polarization in ions: fate of ions after the fast electron ejection”, *Workshop on Entanglement and Quantum Control*, June 7-10, 2010 (Qufu, China).
- [11] 中嶋隆, 「超高速イオン化によるイオン状態コヒーレンスの生成」, 東海大学, 2010年3月17-20日, 春期第57回応用物理学関係連合講演会, 20aF-2
- [12] J. Chen, 板倉隆二, 中嶋隆, 「1光子共鳴1光子イオン化によるアト秒光電子SPIDER: energy-shear量による再構築パルスの忠実度の違いについて」, 東海大学, 2010年3月17-20日, 春期第57回応用物理学関係連合講演会, 20aF-3
- [13] J. Chen, 板倉隆二, 中嶋隆, 「1光子共鳴1光子イオン化によるアト秒光電子SPIDER: energy-shear量による再構築パルスの忠実度の違いについて」, 東海大学, 2010年3月17-20日, 春期第57回応用物理学関係連合講演会, 20aF-3
- [14] Takashi Nakajima, Yukari Matsuo, and Tohru Kobayashi, “Change of ultrafast nuclear-spin polarization upon photoionization by short laser pulses”, *13th International Workshop on Polarized Sources, Targets & Polarimetry* (PSTP09), (Ferrara, Italy, Sep. 7-11, 2009).
- [15] Zhenming Song, Zhigang Zhang, and Takashi Nakajima, “Transverse-mode dependence of femtosecond filamentation”, *18th International Laser Physics Workshop* (LPHYS’ 09), (Barcelona, Spain, July 13-17, 2009)
- [16] 中嶋隆, 「パルス列による原子イオン化の位相依存性」, 筑波大学, 2009年3月30日-4月2日, 春期第56回応用物理学関係連合講演会, 1pZM-3

- [17] J. Chen, 中嶋隆, 「Characterization of attosecond XUV pulses from photoelectron spectra of atoms」, 筑波大学, 2009年3月30日-4月2日, 春期第56回応用物理学関係連合講演会, 1pZM-2
- [18] Z. Song, 中嶋隆, 「Transverse-mode-dependence of Femtosecond Filamentation」, 筑波大学, 2009年3月30日-4月2日, 春期第56回応用物理学関係連合講演会, 1pZM-1

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中嶋 隆 (NAKAJIMA TAKASHI)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：50281639

(2) 研究分担者

松尾 由賀利 (MATSUO YUKARI)

理化学研究所・前任研究員

研究者番号：50231593

小林 徹 (KOBAYASHI TOHRU)

理化学研究所・前任研究員

研究者番号：70202067