

光検出磁気共鳴を用いた核ゼーマン分裂の観測

保科圭孝^A、北祐介^A、吉田一路^A、谷口秀也^B、藤田和希^B、光永正治^B

熊本大学理学部^A

熊本大学自然科学研究科^B

Observation of nuclear Zeeman splitting

by using optically detected magnetic resonance

Y. Hoshina^A, Y. Kita^A, I. Yoshida^A, S. Taniguchi^B, K. Fujita^B, and M. Mitsunaga^B

Department of Physics, Kumamoto University^A

Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University^B

We report on observation of nuclear Zeeman splitting in sodium atoms by using optically detected magnetic resonance (ODMR). Ordinary ODMR experiments employ circular polarized lights, populating the ground-state $(F, m_F) = (2, 2)$, or $(2, -2)$ sublevel by optical pumping. In this report, on the other hand, we have employed an elliptically polarized light to populate $(2, \pm 1)$, $(2, 0)$, $(1, \pm 1)$, and $(1, 0)$ levels, thereby increasing the population differences among these levels, in order to improve the signal-to-noise ratio of the ODMR signals. We have also performed theoretical simulation based on the rate equations for an arbitrarily polarized light. The quarter-wave-plate angle θ dependence of the ODMR signals show that the largest signal is obtained when θ is about -25 degrees and the agreement between the theoretical simulation and the experimental results was quite satisfactory.

1. はじめに

光検出磁気共鳴(Optically-Detected Magnetic Resonance: ODMR)、あるいは、光-RF2重共鳴は、原子の磁気共鳴を極めて高感度に測定する手段として、古くから研究され、応用されている。通常のODMRにおいては、原子の基底準位の超微細分裂したゼーマン副準位のいずれかに分布数を集中させるために $\sigma+$ 、あるいは $\sigma-$ の円偏光を用いるのが一般的である。我々は、この手法とは異なり、楕円偏光を用いる事により、場合によってはより高感度にODMR信号が

観測できる事を見出した。さらにこの手法により、ナトリウムの原子核ゼーマン分裂を観測したので報告する。

2. エネルギー準位

ナトリウム原子の基底状態のエネルギー準位は、角運動量 F とその磁気量子数 m_F の関数として、以下のBreit-Rabiの公式により与えられる。

$$E(F, m_F)/h = -\frac{\Delta}{8} + g_I \mu_N m_F B \pm \frac{\Delta}{2} \sqrt{1 + m_F x + x^2}$$

ここで、

$$x = \frac{1}{\Delta} (g_J \mu_B - g_I \mu_N) B$$

であり、 $\Delta = 1,772$ MHz は超微細分裂周波数、 g_J 、 g_I はそれぞれ電子と原子核の g 因子、 μ_B 、 μ_N はそれぞれボーア磁子、核磁子、 B は磁場である[1]。また、複号は、

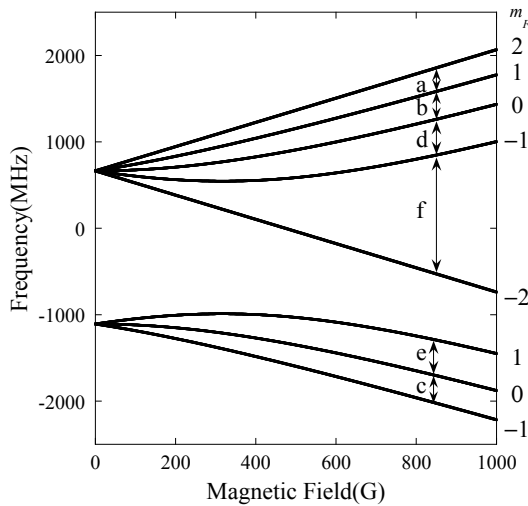


図1 Breit-Rabi の公式による Na 原子基底状態のゼーマン分裂

+が $F=2$ 、-が $F=1$ を表す。図1に、磁場の関数としてエネルギー準位をプロットしたが、弱磁場のうちは、磁場に比例して準位は分裂していくが、強磁場になると、著しく線形からずれるため、磁気共鳴周波数は、縮退が解け、a、b、c、d、e、f の6つの共鳴線に分裂する。この場合のb線とc線、あるいはd線とe線の周波数差は極めて微小なもので、核ゼーマン分裂によるものであることが分かる。ODMRを用いると、これらの分裂した磁気共鳴線の観測が可能である。

3. 光ポンピングとレート方程式

従来のODMR実験においては、純粋な $\sigma+$ 、あるいは $\sigma-$ の円偏光が用いられていた。我々は、今回、楕円偏光の光ポンピングを用いた。楕円偏光を用いた場合のレート方程式は、

$$-\sum_{F'm'_F} P_{Fm_F}^{F'm'_F} n_{gFm_F} + \sum_{F''m''_F} \sum_{F'm'_F} \beta_{Fm_F}^{F'm'_F} P_{F''m''_F}^{F'm'_F} n_{gF''m''_F} - \Gamma_t (n_{gFm_F} - n_0) = 0$$

いで表される。ここで、 $P_{Fm_F}^{F'm'_F}$ は (F, m_F) から (F', m'_F) への光ポンピングレート、 $\beta_{Fm_F}^{F'm'_F}$ は (F, m_F) から (F', m'_F) へ分岐比、 n_{gFm_F} は (F, m_F) の分布数、 Γ_t はトランジット減衰を表し、 $n_0=1$ である。光ポンピングレートは下準位と上準位の Clebsch-Gordan 係数により決まるが、入射偏光の楕円度により、 $\sigma+$ と $\sigma-$ の割合が変化する事を考慮しなくてはいけない[2, 3]。

4. 実験装置

ODMRの実験装置を図2に示す。単一周波数リング色素レーザーを光源とし、ナトリウムのD1線($3S_{1/2}-3P_{1/2}$ 遷移、波長589.6nm)に共鳴させる。試料はネオンをバッファガスとして含むナトリウムガラスセル(セル長7.5cm)を用いた。ガラスセルには、光軸方向に静磁場、それに垂直にRF磁場がかけられた。RF周波数の掃引による蛍光強度の変化を光電子像倍管(PMT)で受光し、ロックイン検出する。セルの直前に偏光ビームスプリッター(PBS)と四半波長板($\lambda/4$)が置かれ、これで入射偏光を調整する。PBSの直後の偏光をx偏光とし、x軸と

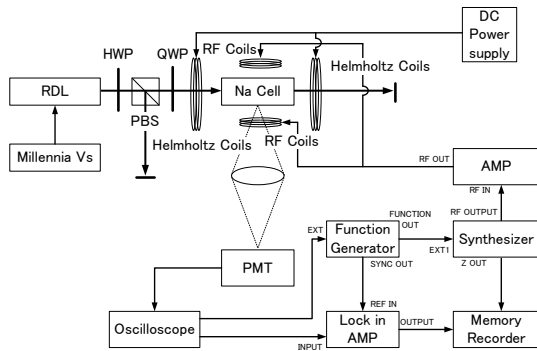


図 2 ODMR の実験装置

$\lambda/4$ 結晶軸のなす角を θ とすると、入射光における $\sigma+$ 成分と $\sigma-$ 成分の割合は

$$\xi_+ = \sin^2(\theta - 45^\circ), \quad \xi_- = \sin^2(\theta + 45^\circ) \text{ となる。}$$

即ち、 $\theta = 45^\circ$ のとき純粋な $\sigma-$ 偏光、 $\theta = -45^\circ$ のとき純粋な $\sigma+$ 偏光、 $\theta = 0^\circ$ のとき直線偏光、それ以外は、楕円偏光となる [4]。

5. 実験結果

純粋な $\sigma+$ 偏光を用いると、分布数は、(2,2)準位に集中し過ぎて、ODMR の観測には不適切である。 $\sigma-$ 偏光の場合も同様に (2,-2)準位に集中する。 $\sigma+$ よりの楕円偏光 ($\theta = -25^\circ$) と、 $\sigma-$ よりの楕円偏光 ($\theta = 25^\circ$) を用いたときの、典型的な ODMR スペクトルを図 3 に示す。磁場は 144.6G であった。予想通り、 $\sigma+$ よりの場合は、a 線が最も顕著に観測され、b、c 線、d、e 線の順に弱くなり、f 線は見えない。

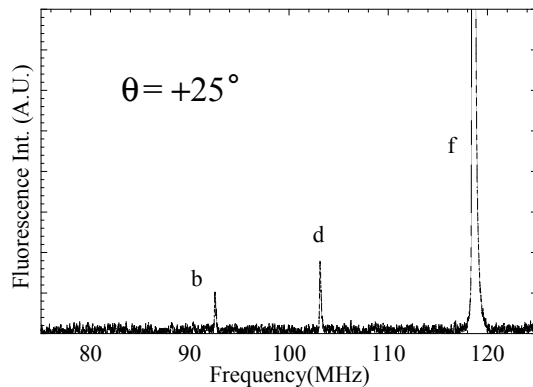
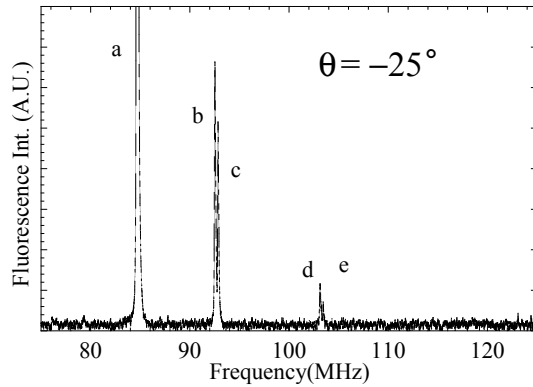


図 3 $\theta = -25^\circ$ と、 $\theta = 25^\circ$ のときの典型的な ODMR スペクトル

逆に $\sigma-$ よりの場合、f 線が最も強く、この他に、d 線、b 線が観測された。この場合、e 線、c 線は観測されなかったが、この原因は現在のところ不明である。

$\theta = -25^\circ$ の場合の b、c 線付近を拡大すると、分裂していることが明らかであり、これが原子核ゼーマン分裂を表している [5]。同様の分裂は d、e 線でも観測された。さらに、分裂周波数の磁場依存性をとれば、線形に変化していることが明白であった。図 4 に、b 線と c 線の角度 θ 依存性を実験と理論に分けて示す。理論は、上述したレート方程式に基づいている。比較すると、定性的な振る舞いは良く一致しており、理論、実験とも、純粋

な円偏光 ($\theta = -45^\circ$) よりも、楕円偏光の場合に信号強度が大きくなり、 $\theta = -25^\circ$ 付近でピークを示す事が分かる。

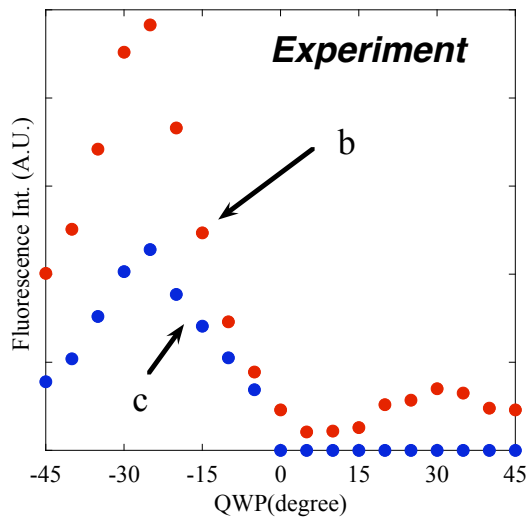
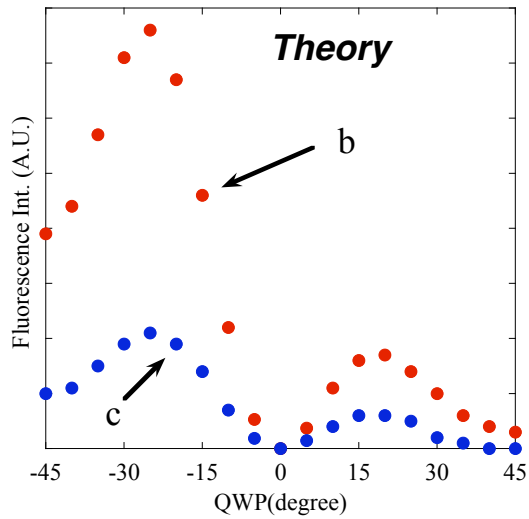


図4 b線とc線の角度 θ 依存性。上図が理論、下図が実験結果を示す。

$\theta = 0$ 付近では、理論実験両者において、信号はゼロとなる。これは直線偏光では、スピ
ン偏極ができない事を表す。さらに角度を正
にすると、理論では信号が回復するが、実
験では、c線の場合信号は観測されない。こ
の原因に関する明確な答えは未だ見つかっ
ていない。

6. まとめ

光-RF2 重共鳴の手法により、ナトリウム
原子基底状態超微細ゼーマン副準位の分光
を行った。通常用いられる純粋円偏光で
はなく、楕円偏光を用いることで、信号強度
を増強させる事ができ、これにより、核ゼー
マン分裂を測定することができた。

参考文献

- [1] K. Motomura, *et al.*, J. Opt. Soc. Am. **B19**, 2456 (2002).
- [2] P. London, *et al.*, Phys. Rev. **A81**, 043835 (2010).
- [3] C. Goren, *et al.*, Phys. Rev. **A67**, 033807 (2003).
- [4] D. V. Brazhnikov, *et al.*, J. Opt. Soc. Am. **B22**, 57 (2005).
- [5] S. A. Crooker, *et al.*, Nature, 431, **49** (2004).