

時間反転対称性の破れの探索に向けた ルビジウム磁力計の研究

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻 内山愛子

1 はじめに

光と原子の相互作用を用いて磁場を測定する光学磁力計は、原子スピンの伴う時間反転対称性の破れを実験的に検証することに非常に適している [1]. 素粒子物理学における標準模型を超えた理論の中には、スピンに付随して生じる、未発見の相互作用を示唆するものがある。例えば、スピンに沿って生じる素粒子の永久電気双極子能率 (EDM) と電場の相互作用 [2] や、スピンと重力場との相互作用 [3] などである。これらの相互作用は、電場や重力場は時間反転に対して対称で、スピンは時間反転に対して反対称であるため、時間反転対称性を破る。この時間反転対称性の破れを実験的に探索するためには、原子に量子化軸を定める静磁場を印加した上で、電場や重力場によるエネルギーシフトを精密に測定する必要がある。本研究では、このスピンに依存する時間反転対称性の破れの探索を目的として、静磁場を精密測定するルビジウム (Rb) 磁力計の研究を行った。

2 ルビジウム磁力計の原理

- 変調光を用いた非線形磁気光学回転効果

光が磁場中で原子と相互作用することで、光の偏光面が回転する現象を磁気光学回転と呼ぶ。通常の磁気光学回転は、原子の自然幅 (約数 MHz) で決まる広がりを持つが、スピンの緩和レートが小さい (数 Hz ~ kHz) 状況では、スピン緩和レートで決まる狭い線幅を持った非線形磁気光学回転 (NMOR) が起こる [4]. 共鳴周波数の光を直線偏光として原子に入射すると、アラインメント状態と呼ばれる光を吸収しない原

子のエネルギー固有状態が生じる。アラインメント状態の向きはレーザー光の偏光面の向きで決まるが、磁場中ではこれが時間発展する。時間発展したアラインメント状態の原子は、その方向の偏光成分を吸収しないため、直交した方向の偏光成分のみがセル中で吸収され、結果として光の偏光面が回転する。

偏光面の回転角度は磁場の大きさに依存し、次のように書き表せる。

$$\theta = \theta_{\text{Amp}} \frac{\frac{g_F \mu_B B}{\hbar \gamma}}{1 + \left(\frac{g_F \mu_B B}{\hbar \gamma}\right)^2} \quad (1)$$

ここで θ_{Amp} は吸収長とセルの長さから決まる回転振幅 (この回転振幅は $B = \frac{\hbar \gamma}{g_F \mu_B}$ のときの回転角度となるため負の値を取ることもある)、 γ はアラインメント状態の緩和レート、 g_F はランダウの g 因子、 μ_B はボーア磁子を表す。このように回転角度が磁場に依存するため、回転角度を測定することで磁場を測定することができる。

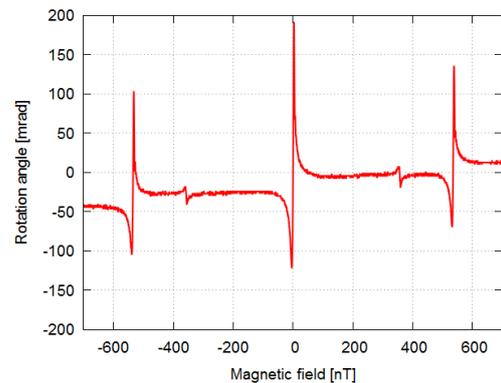


図1 5 kHz で周波数変調を行った場合の FM-NMOR スペクトル

通常の NMOR では線幅が極めて狭い (~nT) ため、EDM 探索などに用いる ~ μT 程度の磁場

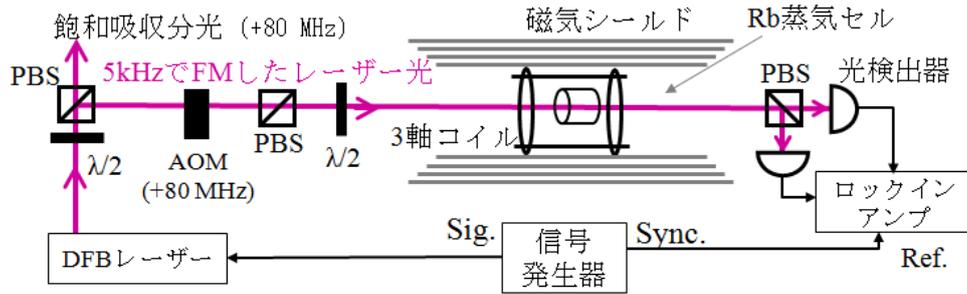


図2 FM-NMOR 型磁力計の全体図

の測定には不向きであるが、周波数変調を用いた場合には、変調周波数がラーモア周波数の2倍に一致する磁場の周りでも偏光面が回転する [5]. 周波数変調 (FM) 光を用いた NMOR を特に FM-NMOR と呼び、実際に測定した FM-NMOR スペクトルを図 1 に示した.

3 FM-NMOR 型ルビジウム磁力計の研究

本研究では、スピン緩和防止コーティングを施したルビジウム (Rb) セルを用いた FM-NMOR 型 Rb 磁力計の研究を行った. 図 2 に実験セットアップを示した. 実験では、スピン緩和コーティングを施した Rb セルを環境磁場の影響を抑制するため 4 層円筒形の磁気シールドの中に室温 (約 23 °C) で置いた. ^{85}Rb の D1 線 $F = 3 \rightarrow F'$ に共鳴なレーザー光を用い、レーザー光周波数を 5 kHz で変調した. セルを透過した光は偏光ビームスプリッターを用いて 2 つの直線偏光成分に分け、それぞれの光パワーを光検出器を用いて測定した. 偏光面の回転角度はこの 2 つの光パワー (V_1, V_2) から $(V_1 - V_2)/(V_1 + V_2)$ と計算できる. 偏光面の回転角度はレーザー光パワーや吸収率が大きく変化しない場合には、この 2 つの直線偏光成分のパワーの差分 $V = V_1 - V_2$ に比例する. そのため、磁力計として用いる時にはこの差分信号から磁場を測定する.

高い感度を持った磁力計を実現するためには、単位磁場当たりの差分信号の変化量 $\partial V/\partial B$ が大きくなる条件を見つけることが重要となる. $\partial V/\partial B$ は差分信号の振幅 V_{Amp} を用いて次のよ

うに表せる.

$$\frac{\partial V}{\partial B} = V_{\text{Amp}} \frac{gF\mu_B}{2\hbar\gamma} \quad (2)$$

$\partial V/\partial B$ が大きくなるためには、 V_{Amp} が大きい、すなわちアラインメントの大きさが大きく透過光パワーが大きいこと、さらに緩和レート γ が小さいことが重要である. アラインメント状態を作り出すためには共鳴周波数のレーザー光が必要であり、レーザー光強度が弱いと十分にアラインメントが生成されないが、一方でレーザー光はアラインメント状態を緩和させる原因ともなる. そこで、レーザー光周波数、FM 変調幅、強度を変えたときに、FM-NMOR スペクトルがどのように変化するのかを実験的に調べた.

FM-NMOR スペクトルの $\partial V/\partial B$ に対するレーザー光 FM 変調中心周波数依存性についての実験では、レーザー光周波数の中心を $F = 3 \rightarrow F' = 2$ と $F = 3 \rightarrow F' = 3$ の共鳴周波数の中心から -0.6 GHz 程度離調した場合に $\partial V/\partial B$ が最大となった. また、レーザー光 FM 変調幅依存性についての実験では、1.4 GHz 程度の変調幅のときに $\partial V/\partial B$ が最大となった (図 3). レーザー光強度依存性についての実験では、レーザー光ビーム径が約 2 mm のときには、レーザー光パワーが 150 μW 程度で $\partial V/\partial B$ が最大となった (図 4).

磁力計としての性能評価を行うために、Rb 磁力計で実際に測定した FM-NMOR 信号を用いて、約 24 時間の連続磁場測定を行った. 磁力計の性能を制限するショットノイズ限界には、原子数に起因する限界と光子数に起因する限界が存在する. 原子数に起因するショットノイズ

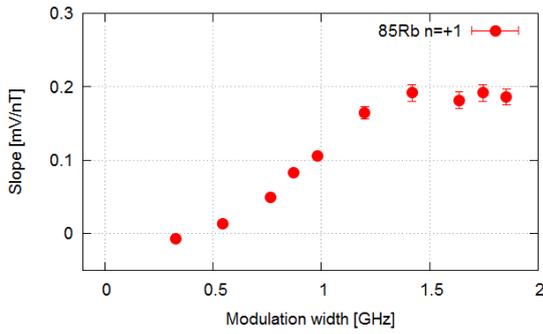


図3 FM-NMOR スペクトルの傾きの FM 変調幅依存性

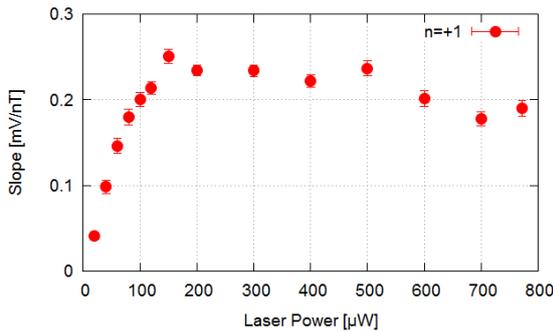


図4 FM-NMOR スペクトルの傾きのレーザー光強度依存性. レーザービーム径は 2 mm とし, セルは室温環境 (約 23 °C) に置いた.

限界が $4 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, 光子数に起因するショットノイズ限界が $0.5 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり, 現在の Rb 磁力計のショットノイズ限界は $4 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ となる. 一方, 差分信号の測定から計算されるパワースペクトル密度より求められる磁力計のホワイトノイズは $50 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ であったため, 現状のショットノイズは $50 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ であると推定される. 現在の Rb 磁力計のショットノイズ限界 $4 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ と比較すると, 現状のショットノイズは 4 桁以上大きい. 先行研究では, ポンプ光とプローブを分けた振幅変調による NMOR で量子限界程度の感度を実現した磁力計 [6] や, FM-NMOR を用いてショットノイズ限界へあと 1 桁へと迫る感度を実現した磁力計 [5] もあり, 開発した Rb 磁力計においても, 測定方法の改良によりさらに磁場感度を向上させることができると示唆される.

また, 現在の実験系の磁場の長時間安定性を評価するために, 約 24 時間の連続磁場測定結果から Allan 分散 [7] を計算した. Allan 分散は原

子時計の安定性を評価するためなどに用いられている量で [8], 次のように書き表せる.

$$\sigma_{\text{Allan}}^2(\tau) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} (\overline{B_k(\tau)} - \overline{B_{k-1}(\tau)})^2 \quad (3)$$

ここで, $\overline{B_{k-1}(\tau)}$ は, τ 秒間の磁場の時間平均である. Allan 分散を様々な時間スケールで計算することにより, 信号の特性を評価することができ, 横軸に平均時間, 縦軸に Allan 分散を取った場合のグラフでは, 両対数グラフ上の右肩下がり直線の直線で表されるホワイトノイズ成分と, 右肩上がり直線で表されるドリフト成分がそれぞれ見られる.

Allan 分散を求めた結果は, 図 5 で示した赤の点のようになった. 10^3 秒以上の平均時間で右肩上がりのドリフト成分が顕著にみられた一方で, 右肩下がり直線のホワイトノイズ成分は見られず, 平均時間 10 秒や数百秒周りにそれぞれ周期的な変動による影響とみられる成分が見られた. これは, ホワイトノイズに比べて, 磁場変動が大きかったためであると考えられ, 磁場変動を引き起こす要因について以下の検討を行った.

まず, 磁場を印加しているコイルに流れる電流の変動や, 外部磁場変動に起因する磁気シールド内部の磁場変動による Allan 分散への影響を見積り, 差分信号の Allan 分散と比較した (図 5-(a), (b)). Rb 磁力計の信号変動のうち, コイル電流の変化は最大で 14%, 外部磁場変動は最大で 29% を占めることがわかったが, これらだけでは信号変動をすべて理解することはできない. このことから, 差分信号の変動は, 実際の磁場変動ではなく, 磁力計自身が偽磁場変動を生み出している事によって生じていることが示唆された. 偽磁場変動を生み出す要因としては, Rb セルの温度が変化することによる原子数密度変化や, レーザー光強度や周波数の時間変動による信号の変動が挙げられる. この偽磁場変動のうち温度測定結果から推定される温度変動による偽磁場変動は, 10^3 秒以上の長時間の変動のみを説明できることがわかった (図 5-(c)). このことから, 偽磁場変動の大部分はレーザー光の

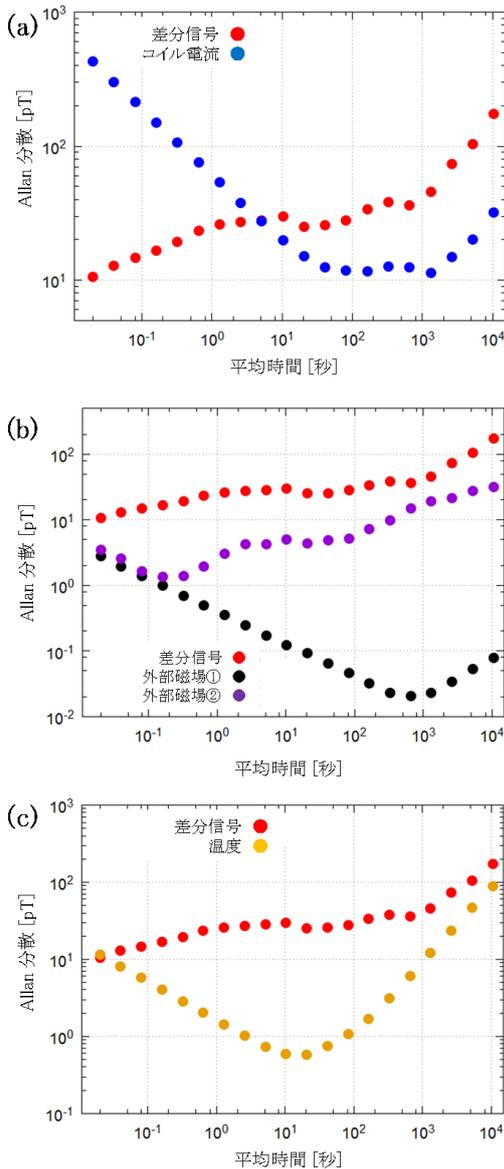


図5 Allan 分散の比較. (a) 差分信号の Allan 分散とコイルに印加している電流の Allan 分散の比較. (b) 差分信号の Allan 分散と外部磁場変動を磁気シールドの磁気遮蔽率 10^{-3} として内部の磁場変動に換算した場合の Allan 分散の比較. (c) 差分信号の Allan 分散と温度変化に起因する偽磁場変動の Allan 分散の比較.

不安定さから引き起こされている可能性が高い. これを抑制するためには, レーザー光パワーの安定化を行うことが有効であり, レーザー光パワーの安定化を行うことにより磁場感度自体も向上することが見込まれる.

現状での磁力計の性能に起因するフランシウム原子を用いた電子 EDM 探索実験 [9] における測定誤差は, $\Delta B = 20$ pT とすると, 10^5 回の

測定によって $\Delta d_e \sim 8 \times 10^{-27}$ ecm となる. 今後, 磁場の安定化や, レーザー光の安定化を行うことで磁場感度の向上を実現することで, 電子 EDM を $|d_e| \leq 10^{-29}$ ecm の領域で探索することを目指す.

4 まとめ

スピンに依存する時間反転対称性の破れの探索のために, FM-NMOR 型ルビジウム磁力計の研究を行った. FM-NMOR スペクトルを磁力計として用いるのに最適なレーザー光の条件を実験的に探索した. そして, その条件を用いて実際に磁場を測定することにより, 現状の磁場感度の限界は $50 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ であるとわかった. また, 磁力計の安定性はレーザー光周波数や強度の揺らぎにおける不安定さにより制限されていることが示唆された.

参考文献

- [1] D. Budker and D. F. J. Kimball, *Optical magnetometry*, Cambridge University Press, 2013.
- [2] M. Pospelov and A. Ritz, *Ann. Phys.* **318**, 119 (2005).
- [3] V. Flambaum, S. Lambert, and M. Pospelov, *Phys. Rev. D* **80**, 105021 (2009).
- [4] D. Budker et al., *Rev. Mod. Phys.* **74**, 1153 (2002).
- [5] D. F. J. Kimball, L. R. Jacome, S. Guttikonda, E. J. Bahr, and L. F. Chan, *J. App. Phys.* **106** (2009).
- [6] V. G. Lucivero, P. Anielski, W. Gawlik, and M. W. Mitchell, *Rev. Sci. Instrum.* **85** (2014).
- [7] D. W. Allan et al., "A modified" allan variance" with increased oscillator characterization ability, in *Thirty Fifth Annual Frequency Control Symposium. 1981*, page 470, IEEE, 1981.
- [8] D. W. Allan, N. Ashby, and C. C. Hodge, *The science of timekeeping*, Hewlett-Packard, 1997.
- [9] T. Inoue et al., *Hyperfine Interact.* **231**, 157 (2015).