

研究終了報告書

「冷却原子を用いた量子センシングによるダークマター探索」

研究期間:2020 年 10 月～2024 年 3 月

研究者:青木 貴稔

1. 研究のねらい

ダークマター(暗黒物質)は、宇宙物理で銀河の回転速度・重力レンズ・宇宙マイクロ波背景放射・宇宙からの光の偏光回転などの観測結果から、存在が示唆されている。ダークマターを発見するためには、4つの力の内のいずれかの力でプローブすることが考えられるが、今回、弱い力に注目する。2012 年に、原子に働く弱い力を調べることで、ダークマターの影響を測定する方法が指摘されている(H. Davoudiasl *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 031802 (2012).)。これは、ダークマターのように光技術が通用しない研究対象においても、光技術と弱い力を組み合わせることで、光による新しい研究対象が広がり、革新的基盤技術を創成できることを示唆している。

我々は、レーザー冷却された原子を用いて、弱い力によるパリティ非保存効果を持つ、光シフトの測定から新物理を探索する方法を提案してきた。最近、原子の量子エンタングル状態を生成し、標準量子限界以下の測定感度が報告されている。また、従来のパリティ非保存実験は、原子ビーム実験であり、レーザー冷却した原子を用いれば、感度向上が期待できる。

そこで本研究では、原子のレーザー冷却を行い、量子エンタングル状態で、レーザー光を照射して弱い力によるパリティ非保存効果のある禁制遷移誘起の光シフトを、マイクロ波遷移を用いて観測し、ダークマター探索の感度を飛躍的に高める(図1)。

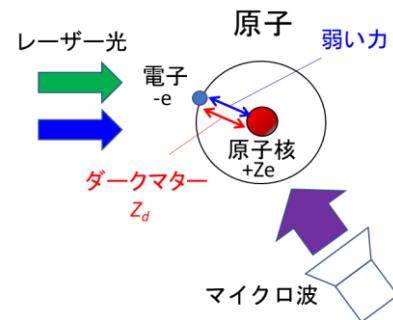


図1 ダークマターの測定原理

本研究の目的は、レーザー冷却された原子の量子センシングによる測定感度の向上と、ダークマターによる禁制遷移の光シフト検出である。

2. 研究成果

(1) 概要

この研究は、レーザー冷却した原子を用いて、ダークマター探索を行うことを目的としている。

研究テーマ(A)「Cs 原子のレーザー冷却」

Cs 原子のレーザー冷却実験を立ち上げるために、①レーザー光源作製、②光源の周波数安定化、③実験装置開発および磁気光学トラップ実験を行った。

①レーザー光源作製。外部の擾乱に対して堅牢な、干渉フィルター型 ECDL (外部共振器型半導体レーザー) を3台作製し、テーパーアンプを2台作製した。

②光源の周波数安定化では、FM 分光法により、周波数弁別信号を得ることができ、レーザーの周波数安定化を行った。また、オフセットロック実験も行った。

③磁気光学トラップの実験装置開発を行う。そのために、真空チャンバーを構築し、原子源の真空装置を設計・構築し、磁気光学トラップ用コイルを作製した。その結果、Cs 原子の磁気光

学トラップに成功した。(共振器トラップ実験は、下記(C)の理由により実施しない。) 研究テーマ(B)「マイクロ波ラムゼー共鳴実験」 当初、原子ビームを用いた実験を計画していたが、原子ビームの代わりにCs原子マイクロセルを用いて、超微細分裂に共鳴する9.2 GHz マイクロ波遷移として15本の信号を観測した。そして、開発したマイクロ波実験装置を用いて、レーザー冷却した原子にマイクロ波を2パルス照射することで、ラムゼー共鳴による量子センシング実験結果を得た。 研究テーマ(C)「光共振器によるスクイーミング」 光共振器の設計を行っていたが、急激な円安により、当初の見積もり金額から大幅に上昇してしまったため、共振器の購入は断念した。そのため、(C)の研究は実施しない。 研究テーマ(D)「パリティ非保存効果誘起の光シフトの測定」 ダークマター探索のためには、パリティ非保存効果のある禁制遷移の観測が必要である。禁制遷移分光のために、光源を開発し、実験装置を構築した。その結果、禁制遷移の吸収信号を観測した。次に、冷却原子を用いた禁制遷移分光実験を行ったが、観測には至らなかった。 研究テーマ(E)「当初の計画にはなかった成果」 冷却原子の禁制遷移測定のために、磁場補正を行い、磁場の精密測定のために、Mx 磁力計を開発し、精密な磁場測定を行った。 研究テーマ(F)「ダークマター探索の測定法の開発」 測定方法として、量子エンタングル状態を用いることや系統誤差を除去する方法について、論文にまとめた[1][2][3]。	
(2) 詳細 本研究は、レーザー冷却した原子を用いて、ダークマター探索を行うことを目的としている。 研究テーマ(A)「Cs 原子のレーザー冷却」 Cs 原子のレーザー冷却実験を立ち上げるために、①レーザー光源作製、②光源の周波数安定化、③実験装置開発および磁気光学トラップ実験を行った。 ① レーザー光源作製 Cs 原子のレーザー冷却実験立ち上げのため、冷却用光源を準備する。干渉フィルター型 ECDL を構築し、37 mW の出力を得ることができた。次に、TA (テーパアンプ) を構築し、2 W 以上の光出力を得ることができた。トラップ光とリポンプ光の2システムを作製した。 ② 光源の周波数安定化 Cs 原子セルの分光を行い、レーザー周波数安定化システムを構築する。そのため、電気光学変調器(EOM)を用いた FM (周波数変調) 分光を行い、超微細構造をもつ微分型の周波数弁別信号を得て、レーザー周波数を安定化した(発表 3-3)。またオフセットロックも行った。 ③ 磁気光学トラップの実験装置開発と磁気光学トラップ実験 レーザー冷却のために、レーザー光を音響光学変調器(AOM)で振幅変調、周波数変調を行うシステムを構築できた。また、真空チャンバーを構築し、真空度は 10^{-11} Torr を得ることができ、安定した磁気光学トラップを実現した(図2)(発表 3-3)。	

研究テーマ(B)「マイクロ波ラムゼー共鳴実験」

ダークマター探索の量子センシング実験のため、Cs 原子のマイクロ波遷移が必要である。そこで、Cs 原子マイクロセルを、共同研究の企業の方に作製していただき、Cs 原子の超微細分裂に共鳴する 9.2 GHz マイクロ波発生装置を開発し、15本の信号を観測した。これはタイプ I の量子センシングである(発表 3-4, 3-5)。

次に、レーザー冷却した原子にマイクロ波を照射することで、ラムゼー共鳴による量子センシング実験を行った。まずラムゼー共鳴に必要な光を準備するため、AOM の光学系をさらに構築し、リポンプ光源にも TA (テーパーアンプ) を用いて光パワーを増幅した。2パルスのマイクロ波を照射することで、ラムゼー共鳴による量子センシング実験結果を得た(図3)。

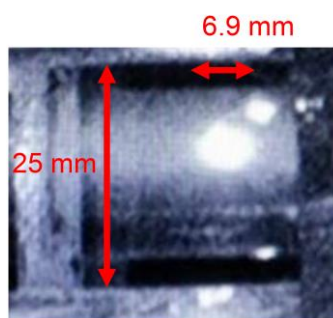


図2 磁気光学トラップされた原子雲

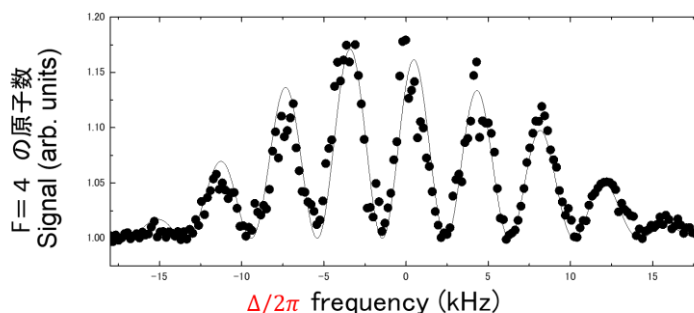


図3 ラムゼー共鳴(量子センシング)実験結果

研究テーマ(C)「光共振器によるスクイーミング」

光共振器の設計を行っていたが、急激な円安により、当初の見積もり金額から大幅に上昇してしまっため、共振器の購入は断念した。そのため、(C)の研究は実施しない。

研究テーマ(D)「パリティ非保存効果誘起の光シフトの測定」

ダークマター探索のために、禁制遷移分光が必要である。レーザー光源と安定化弱い相互作用を観測するためには、禁制遷移を観測する必要がある。そのため、レーザー光源を作製し、EOM を用いた周波数安定化を行った。実験装置を構築し、吸収信号を観測した(図4)。

次に、ダークマター探索のためには、上記の量子センシング・ラムゼー共鳴実験を用いて、禁制遷移の光シフトを検出する必要がある。レーザー冷却した原子を用いて、レーザー光を照射する実験を行ったが、いままで禁制遷移を観測できていない。この原因として、磁場による影響が考えられる。そこで、環境磁場の除去と安定な磁場のモニターを行うため、磁力計・補正コイル・磁気シールドの開発が必要となる。

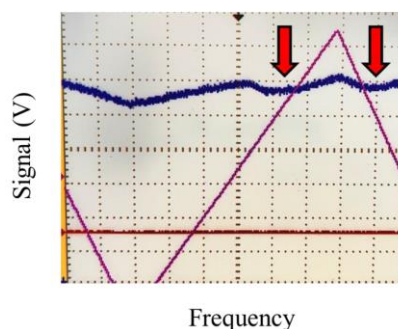


図4 禁制遷移の吸収実験結果

研究テーマ(E)「当初の計画には無かった成果」

上記の磁場モニターを行うため、Cs セルを用いた Mx 磁力計を開発した。磁力計は、最もよ

く研究されている量子センシングの1つである。東京農工大学畠山先生よりスピン緩和防止コーティングされた原子セルをお借りし、我々は M_x 磁力計の開発を行った。

磁気シールドの中に、定磁場コイルと RF コイルを作製し、その中に原子セルを設置し、室温で動作させる。その結果、30 nT の磁場測定を行うことができた(図5)。(発表 3-4, 3-5)

これは、ダークマター探索に必要な kHz 程度の周波数測定精度よりも十分に小さく、今後のダークマター探索で有用である。磁力計は、脳磁計など、実用的な応用が期待されている量子センシングであり、当初の研究計画には無かったものの、磁力計を開発できたのは重要な成果である。

研究テーマ(F)「ダークマター探索の測定法の開発」

測定方法として、量子エンタングル状態を用いて、標準量子限界を超える実験方法や、系統誤差を除去する方法について、論文にまとめた[1][2][3](発表 3-1)。

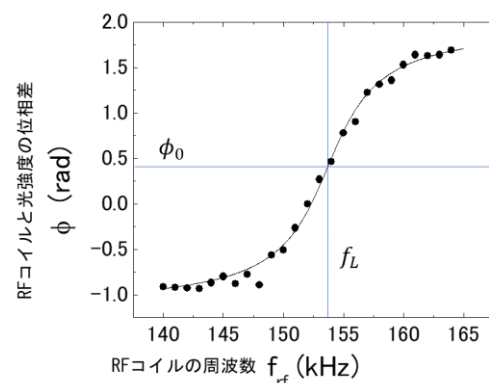


図5 M_x 磁力計信号

3. 今後の展開

補正コイル・磁力計を開発したことで、今後は、冷却原子に再び禁制遷移用レーザー光を照射し遷移を観測することで、禁制遷移の超微細構造を解明する。そして、ラムゼー共鳴を用いて、禁制遷移の光シフトを測定し、その結果からダークマター探索を行う。磁力計の実社会への応用も目指す。

4. 自己評価

1研究のねらい、で述べた(A)～(D)の4つの研究について、共振器を用いる研究(C)などは、急激な円安により購入が不可能となり、実施できなかった。一方、当初の目標であった (A) Cs 原子のレーザー冷却、(B) マイクロ波ラムゼー共鳴実験については、達成した。これにより、研究タイトルである「冷却原子を用いた量子センシング」を実現した。

(D)パリティ非保存効果誘起の光シフトの測定については、実験装置を開発し、ダークマター探索に必要な Cs 原子の禁制遷移を観測した。しかし、冷却原子を用いた禁制遷移分光は、まだ成功していない。つまり(D)は目標の半分を達成した。

以上より、冷却原子・量子センシング・禁制遷移という各要素技術を確立した。次に、これら要素技術を組み合わせて、冷却 Cs 原子で禁制遷移を用いた光シフトを測定する必要がある。そのための実験装置の改良として、磁力計を開発した。

(E)当初の計画には無かった成果が、この磁力計の開発である。これは磁場の量子センシングであり、実際に M_x 磁力計の信号の取得に成功した。私の知る限り、日本で M_x 磁力計を実現したのは、我々だけである。

(F)実験の測定方法については、別のテーマである電子 EDM(電気双極子モーメント)の測定方法と一部は共通であり、論文として出版された。原子の量子エンタングル状態を素粒子物理学に応用するのは、特に EDM やパリティ非保存効果では、世界初である。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文) 発表

研究期間累積件数: 8件 の内3件

1. T. Aoki, R. Sreekantham, B. K. Sahoo, Bindia Arora, A. Kastberg, T. Sato, H. Ikeda, N. Okamoto, Y. Torii, T. Hayamizu, K. Nakamura, S. Nagase, M. Ohtsuka, H. Nagahama, N. Ozawa, M. Sato, T. Nakashita, K. Yamane, K. S. Tanaka, K. Harada, H. Kawamura, T. Inoue, A. Uchiyama, A. Hatakeyama, A. Takamine, H. Ueno, Y. Ichikawa, Y. Matsuda, H. Haba, and Y. Sakemi,
“Quantum sensing of the electron electric dipole moment using ultracold entangled Fr atoms”,
Quantum Sci. Technol. **6**, 044008-1-17 (2021).

原子の巨視的な量子エンタングル状態による量子センシングを用いることで、時間対称性を破る、つまり CP 対称性を破る電子の EDM(電気双極子モーメント)の測定感度を従来より2桁低い 10^{-31} ecm に到達可能であることを示した。そのための測定方法や系統誤差の除去などの技術は、さきがけの本研究の弱い力によるパリティ対称性の破れの測定によるダークマター探索と共通の技術である。

2. R. Alarcon, J. Alexander, V. Anastassopoulos, T. Aoki *et al.*,
“Electric dipole moments and the search for new physics”,
arXiv:2203.08103 (Contribution to Snowmass 2021)

アメリカの Snowmass 白書として提出された論文。素粒子物理学の標準模型を超えた新物理を探索するため、電子の EDM を発見することができれば TeV/c^2 の質量の新粒子の探索に相当する。新粒子は、ダークマターの候補の1つである。世界的な権威の先生方を中心に 100 人以上の著者から成るこの論文の中で、上記1番の私の論文を、次世代の測定方法として1つの章として大きく取り上げていただき、一部を執筆した。さきがけ研究のダークマター探索の測定方法と共通である。

3. 青木貴稔, 佐藤拓海, 池田英彦, 岡本直大, 鳥井寿夫, 中村圭佑, 永瀬慎太郎, 長濱弘季, 小澤直也, 佐藤幹, 中下輝士, 山根風樹, 松田恭幸, 酒見泰寛, 早水友洋, 大塚未来, 高峰愛子, 上野秀樹, 羽場宏光, 田中香津生, 原田健一, 川村広和, 井上壮志, 内山愛子, 畠山温, 市川 雄一, 田中聡, 松尾由賀利, Rithvik Sreekantham, Bijaya Kumar Sahoo, Bindia Arora, Anders Kastberg,
“量子エンタングル Fr 原子を用いた電子 EDM の量子センシング”,
電気学会 電子回路研究会 論文番号 ECT-22-043-1-6 (2022).

原子の量子エンタングル状態の量子センシングを用いた電子の EDM(電気双極子モーメント)測定について、不確かさが標準量子限界を下回る原理と、ラムゼー共鳴の位相シフトの関係を示した。さきがけ研究の測定限界の話に相当する。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数：0 件 (特許公開前のものは件数にのみ含む)

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

学会発表 23 件の内5件

3-1. (招待講演) "Quantum sensing of the electron electric dipole moment using ultracold entangled Fr atoms",

T. Aoki, R. Sreekantham, B. K. Sahoo, Bindhya Arora, A. Kastberg, T. Sato, H. Ikeda, N. Okamoto, Y. Torii, T. Hayamizu, K. Nakamura, S. Nagase, M. Ohtsuka, H. Nagahama, N. Ozawa, M. Sato, T. Nakashita, K. Yamane, K. S Tanaka, K. Harada, H. Kawamura, T. Inoue, A. Uchiyama, A. Hatakeyama, A. Takamine, H. Ueno, Y. Ichikawa, Y. Matsuda, S. Tanaka, Y. Matsuo, H. Haba, and Y. Sakemi. 14th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2022), (online, 24-25th November 2022) 25th November 2022.

3-2. (招待講演) "Parity-nonconserving interaction-induced light shifts in the ultracold Cs atoms",

Takatoshi Aoki,
The International Workshop on Atomic Parity Violation (APV2022),
(online, 28-30th November 2022) 30th November 2022.

3-3. ダークマター探索のための Cs 原子の磁気光学トラップ,

田中聡, 石川知輝, 河西竜輝, 岡本直大, 早水友洋, A. Kastberg, B. K. Sahoo, B. P. Das, 西野仁, 小野崇人, 羽場宏光, 東條賢, 酒見泰寛, 松尾由賀利, 鳥井寿夫, 青木貴稔,
日本物理学会 2023 年春季大会 24aA1-4 2023 年 3 月 24 日

3-4. バッファガス入り Cs 原子マイクロセルアレイを用いた量子センシング

石井佑, 田中聡, 西野仁, 小野崇人, Adam B. Gabteni, Anders Kastberg, 畠山温,
松尾由賀利, 松下大, 東條賢, 酒見泰寛, 岡本直大, 梶田雅稔, 鳥井寿夫, 青木貴稔
第 40 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」(熊本城ホール) 7P2-PS-30, 2023 年 11 月 7 日

3-5. "Development of the Mx magnetometer toward the search for dark matter",

T. Aoki, Y. Ishii, S. Tanaka, H. Nishino, T. Ono, A. B. Gabteni, A. Kastberg, B. K. Sahoo, A. Hatakeyama, Y. Matsuo, D. Matsushita, S. Tojo, Y. Sakemi, N. Okamoto, M. Kajita, Y. Torii. The 15th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2024) (Okayama University, 13th and 14th March 2024) 13th March 2024