

研究課題別評価書

1. 研究課題名

測定過程を使った非古典的な原子集団スピン励起の生成と制御

2. 氏名

宇佐見 康二

3. 研究のねらい

Robert H. Dicke は、ミクロの物理からマクロの物理まで、また、理論と実験の双方で、‘全能の神 (Almighty God)’ と呼ばれるにふさわしい莫大な寄与をした希代の天才物理学者である。現代物理のかなりの分野 (原子時計、イオントラップ、宇宙定数問題、マイクロ波天文学、重力波検出等) が、Dicke の影響下で発展しているといっても過言ではない。これは、超専門化している現代物理学にとって、特筆すべき事実と言える。

そんな彼の偉大な業績の一つに超放射の予言というものがある[1]。1954 年、彼は光と2準位原子集団との相互作用において個々の原子の区別がつかない時、巨視的な集団2準位原子 (集団原子スピン) が一つの量子系としてコヒーレントに振舞うことを示唆した。巨視的な光がコヒーレントに振舞うのがレーザーであるので、この Dicke の超放射のアイデアは、いわば、原子スピン版レーザーといえる。(重要なのは、Dicke の超放射は、原子の内部自由度 (スピン) に関するコヒーレンスについての現象であり、ボーズ原子が外部自由度 (運動量) に関してボーズ凝縮した原子レーザーとは質的に異なる現象である。)

量子光学という分野がレーザーの発明によって開花したという歴史を鑑みれば、巨視的な原子スピンがコヒーレントに振舞うというこの Dicke のアイデアを発展させることで、量子力学的な原子集団スピン状態の探索が可能になることが期待できる。このような量子力学的な原子集団スピン状態の生成、観測、制御が本研究のねらいである。

4. 研究成果

原子集団スピンを量子光学のフレームで考察するために、先ずその類似性の根幹を理解する必要がある。その理解のベースになるのは、前述の Dicke の論文[1]と1986年のB. Yurke, S. L. McCallとJ. R. Klauderの3者による論文である[2]。Yurkeらは、光干渉計を構成する2つのボゾンモードの空間時間発展がJordan – Schwinger表示を通じて角運動量演算子の回転として記述できるという事実に着目した。光干渉計を偏極された集団スピン系として扱うことで、干渉計の位相シフト検出精度を見通しよく理論的に考察することが可能となる。この逆を行けば、偏極集団スピンが2つのボゾンモード、つまり光干渉計として考察できることになる。これが、原子集団スピン系を量子光学のフレームで考えるときの基礎となる。

原子集団スピン系における2モードとは、上向きスピンモードと下向きスピンモードに相当する。個々の原子を考えるのを止め、上向きスピンモードに原子がいくつ、下向きスピンモードに原子がいくつというように考えるわけである。いわば、スピン自由度に関する第二量子化である。注意すべき点は、このスピンの第二量子化が適用できるのは、あくまで完全偏極されたスピン状態 (つまり、原子の入れ替えという操作に対して波動関数が変わらない完全対称空間にいるスピン状態=ボゾンの交換関係を満足する空間) から出発し、かつ、その後も完全対称空間の中にとどまり続けるような操作 (つまり、スピン系の全角運動量を保存する操作) のみが許された場合である。Dicke が考察したように、光と原子スピンとの相互作用において個々の原子の区別がつかない時には、スピン系の発展は集団変数だけ記述でき、スピン系の全角運動量は保存する。したがって、原子集団スピン系で量子光学的実験を実施する上でのキーとなるのは、完全偏極されたスピン状態を生成し、その全角運動量を保存しながら集団スピン系を操作することであるといえる。このために必要な実験条件は、

- 1) スピン偏極が効率良く達成できること
- 2) スピンのコヒーレンス時間が長いこと

3) スピンの操作や読み出しのための相互作用において個々の原子の区別がつかないことが要請される。これらの要請を満足できる系として、レーザー冷却と光ポンピングによって用意できる偏極された冷却アルカリ原子を選んだ。真空チャンバー内でレーザー冷却された原子を利用することにより原子間の衝突や原子と容器との衝突によるスピンのデコヒーレンスを大幅に回避でき、さらに原子スピンの偏極度も比較的小さいバイアス磁場をかけるだけで各段に向上させることができる。また、ドップラー冷却された原子は、磁気光学トラップで空間的に局在させることもできるため、スピンの操作や読み出しのための相互作用において比較的均一に実施することが可能となる。特に所属研究室であった東京工業大学上妻研究室での研究とのマッチングの良さからアルカリ原子の中でも ^{87}Rb を対象に研究を推進した。(本領域の遊佐氏が実施している固体中の偏極集団核スピン系も、上記の必要な実験条件を満たす量子集団スピントロニクスを実現できる非常に魅力的な系といえる。)

本研究の主な成果としては、

- 1) 原子集団スピン系の量子状態トモグラフィーの提案と、
 - 2) スピン量子数 $m=0$ 状態のパリティに依存する量子位相の観測、の2点が挙げられる。
- これらを、順をおって説明する。

1) 原子集団スピン系の量子状態トモグラフィーの提案 [3]

量子光学において、単一光子やスクィーズド光といった非古典的な光を観測しその性質を調べるために用いられる非常に強力な手法として、光ホモダイン測定が挙げられる。この手法は、観測したい極微弱な量子光(光子数にして0から100程度)を比較的強度の大きい局所光(光子数にして 10^5 から 10^{10} 程度:ホモダイン回路系の電氣的ノイズより光のショットノイズが大きいといけないという制限から光子数の下限が、レーザー光の強度ノイズや光検出器が線形領域から逸脱しないという制限から光子数の上限がきまる)とビームスプリッターで混ぜ合わせ、その出力の2つのモードの光子数差を測定するものである。この手法では、極微弱な量子光は局所光とコヒーレントに混合されるため、極微弱な量子光の信号が、局所光光子数の2乗根倍だけ増強されることになる(10^8 個の局所光の場合、 10^4 倍)。この手法により、光の真空揺らぎが観測可能になったために、スクィージング光のような量子光の研究が本格化し、また、量子状態トモグラフィーという光の位相空間上の情報を完全に獲得しうる手法へと発展したといえる [4]。このホモダイン測定の威力を非常に強く印象づけた実験は、Lvovskyらの2001年の実験である[5]。彼らの実験は、単一光子の分解能をもたない光検出器で構成されているにも関わらず、ホモダイン測定が局所光による信号増強効果のためにたった1つの光子をも検出可能であることを実証した。

我々の成果の一つは、2つのボゾンモードでの原子集団スピン系の考察を進めていくと、上記のホモダイン測定や量子状態トモグラフィーといった量子光学の手法を原子集団スピン系においても適用できることを理論的に明らかにしたことである[3]。下向きスピンの偏極された原子集団スピン系を考えると、光のホモダイン測定においての局所光の役割をするのは、スピン下向きモードにいる巨視的な数の原子である(典型的な実験では、 10^6 から 10^{11} 個程度)。上向きスピンモードに原子がない場合、完全にスピンが偏極された状態であり、コヒーレントスピン状態と呼ばれる。これは、原子集団スピン系における真空状態と言える。この下向きスピンの偏極された原子集団スピン系から出発して集団的に操作し単一の原子だけをスピン励起させたり(ディック状態 [1]/ W状態)、偏極方向と垂直な方向に広がるスピン揺らぎを測定過程や非線形過程によ

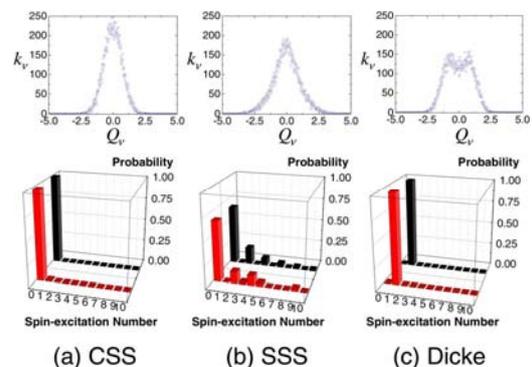


図1. 原子集団スピンの量子状態トモグラフィーのシミュレーション結果

リスクを下げたりする(スキューズドスピン状態[6])ことができれば我々のねらう量子的、非古典的な多体エンタングルメントをもつ原子集団スピン状態を実現できる。この場合には、上向きスピンモードにも原子が少数占有することになる。我々は、光のホモダイン測定と同様にして、この少数の上向きスピンモードにいる原子(0から100個程度)が上向きスピンモードにいる巨視的な原子(10^6 から 10^{11} 個程度)によって増強することで検出可能であることを示唆した。これはすなわち、ホモダイン測定と量子状態トモグラフィーを量子的な原子集団スピン状態に対して実施することが可能であること意味する。我々の論文[3]では、これらの量子集団スピントロニクス基礎となるであろう手法の具体的な実施方法を提供した。図1には、原子集団スピンに対するホモダイン測定と、その結果から上向きスピン原子数の分布を再構成した数値シミュレーション結果を示した[3]。図1(a),(b),(c)は、それぞれ、推定する原子集団スピンとしてコヒーレントスピン状態(CSS)、スピンスキューズド状態(SSS)、ディッケ状態(Dicke)を設定した場合の結果である。

2) スピン量子数 $m=0$ 状態のパリティに依存する量子位相の観測 [7]

非古典的な原子集団スピンの量子トモグラフィーの実証を目指し、レーザー冷却と光ポンピングによって用意した偏極された ^{87}Rb 原子を舞台に研究を進めた。本研究初期の段階で、非古典的な集団スピン状態を生成するための舞台としての $1/2$ -スピン系として、Zeeman副準位を使うか、超微細構造準位の2つの $m=0$ 副準位(いわゆる時計遷移)を使うかを検討した。その結果、スピニコヒーレンス時間が非常に長く(超微細構造時計遷移 $F=1, m=0 \rightarrow$

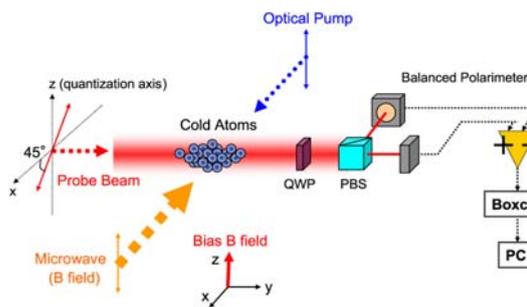


図2. 実験装置の概略

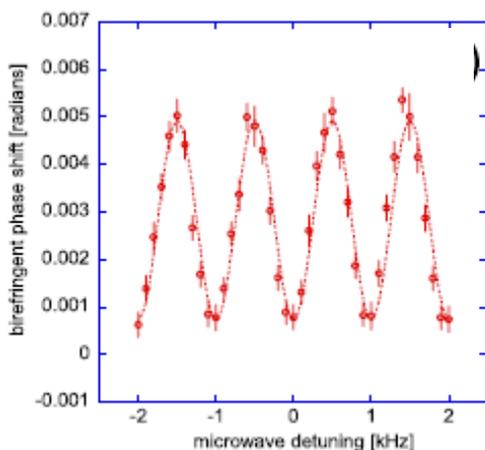


図3. 通常のラムゼイフリンジ

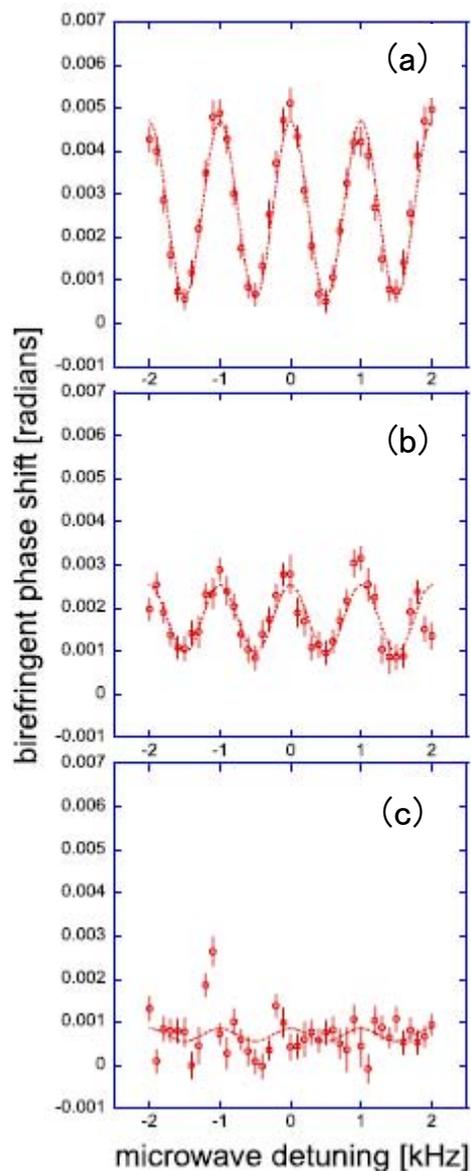


図4. バイアス磁場を反転した時のラムゼイフリンジ

$F=2, m=0$ は、一次のZeemanシフトがない。そのため磁場雑音に関する耐性がある)、他の研究領域への拡張性(原子時計等)のある点を見込み、時計遷移を $1/2$ -スピン系として使うという決定を下した。

そんな中、この時計遷移擬スピン系を使うと、非常に興味深い量子位相[8]の実験検証が可能であることに気づいた。フェルミ粒子は、 2π 回転で元に戻らず波動関数の符号が反転する。このよく知られた量子位相は、スピノール波動関数の3次元回転に関する2価性に起因する。ボーズ粒子は 2π 回転で元に戻るため、回転に伴う位相に関しては量子的な異常な振る舞いをしない自明なものと認識されてきた。ところが、1994年、イギリス・ブリストル大学の J. M. Robbins と M. V. Berry は、整数スピンでも自明でない振る舞いをすることがあるということを指摘した[8]。ボーズ粒子でも、スピン磁気量子数 $m=0$ の‘スピンの向き’に関しては 2π ではなく π 回転で元に戻るという奇妙な性質がある。彼らは、この π 回転に伴い、ボーズ粒子である $m=0$ スピンも非自明な量子位相を獲得することを示唆したのである。我々は、この非自明な量子位相の観測に向けて時計遷移擬スピン系の実験を開始し、2007年の春にこの位相の観測に成功した[7]。

図2に実験装置の概略を示した。Robins-Berry位相観測のため、我々はスピンのコヒーレンスを測定する非常に有用な手段であるラムゼイ干渉法を利用した。ラムゼイ干渉法による量子位相の観測実験は次のよう実施した。最初、磁気光学トラップで冷却原子集団を用意する。その後z方向のバイアス磁場のみ残して他の磁場を切った状況下で $|F=2, m=0\rangle$ という状態に光ポンプする。次に、時計遷移に共鳴するマイクロ波の $\pi/2$ パルスで $|F=2, m=0\rangle$ という超微細構造擬スピンを、 $|F=2, m=0\rangle + |F=1, m=0\rangle$ という重ね合わせ状態にする。バイアス磁場をかけ続けることで、スピンの向きが変化しないようにすると、マイクロ波の周波数で回るフレーム上では、 $|F=2, m=0\rangle + |F=1, m=0\rangle$ という重ね合わせ状態を維持することになる。2発目の $\pi/2$ パルスを当てると $F=1, m=0\rangle$ という状態になり、超微細構造擬スピンは完全に反転する。ところがマイクロ波パルスを超微細構造間隔と共鳴する周波数ではなく、離調をとったパルスで超微細構造擬スピンを操作する時には、1発目と2発目のマイクロ波パルス間に超微細構造擬スピンはマイクロ波の周波数で回るフレーム上を動くことになる。このため、2発目のマイクロ波パルスで超微細構造擬スピスが完全に反転しなくなることになる。離調を変えながら、2発目のマイクロ波パルスのあとの $|F=2, m=0\rangle$ 準位にいる原子の存在確率をプロットすると有名なラムゼイフリッジが得られた(図3を参照)。この実験は、超微細構造分裂のエネルギー差に起因する動力学的位相を観測したといえる。

図4に示したのは、1発目と2発目のマイクロ波パルス間にバイアス磁場を断熱的に反転した場合のラムゼイ干渉実験の結果である。Robins と Berry の議論によれば、この過程で、状態 $|F=2, m=0\rangle$ は1、 $|F=1, m=0\rangle$ は-1というそれぞれのパリティに依存して位相を獲得することになる。 $|F=2, m=0\rangle + |F=1, m=0\rangle$ という状態は、 $|F=2, m=0\rangle - |F=1, m=0\rangle$ という状態に変化することになる。状態 $|F=2, m=0\rangle$ には非自明な位相因子がつかないので、この状態を、 $|F=1, m=0\rangle$ の位相因子-1の観測のための参照として利用しようというわけである。その結果、離調が0であれば、2発目のマイクロ波パルス後の状態は、もはや $|F=1, m=0\rangle$ と反転せずもとの $|F=2, m=0\rangle$ に戻るようになる。離調を変えながら、 $|F=2, m=0\rangle$ 準位にいる原子の存在確率を測定することで、Robins と Berry の位相因子の効果で π だけ位相がずれたラムゼイフリッジを観測できたわけである。図4の(a)から(c)のフリッジビジビリティの差は、バイアス磁場の反転の仕方の差から生じている。(b)や(c)では、反転する際に磁場がゼロの付近を通過したため、外界の磁場ノイズの影響によりスピノコヒーレンスが減少したことが、フリッジビジビリティの減少を招いたと考えられる[7]。

5. 自己評価

当初の目的であった非古典原子集団スピンの量子トモグラフィーの実証に関しての現在までのところ、我々自身の成果としては、達成できていない。世界的には、コヒーレントスピン状態についてはニールス・ボーア研究所のグループ(現所属グループ)が光の量子メモリの文脈で、2004年の段階ですでに実証しているが[9]、現在のところ、私の知る限り、スピンスクイズド状態や、Dicke 状態等の非古典的原子集団スピン状態の量子トモグラフィーは、まだ実現されていない。この実現へ向けて研究期間中に真摯に取り組む価値は大きかったといえる。この点に関

しては、私が当初の研究目的にしたがって研究を進めるというよりは、その時の自分の知的好奇心に正直に研究テーマをシフトしたことが原因である。その結果、当初の目標は達成できなかったが、逆に、未検証であったスピン量子数 $m=0$ 状態のパリティに依存する量子位相の観測に成功した。研究計画に忠実に設定した目的に向けて研究を進めるか、知的好奇心を尊重するか
の判断は非常に難しいが、私自身は、明らかに後者に偏っていると思われる。重要で困難な問題にチャレンジしていくためには、前者の研究推進スタイルが必要不可欠であり、この点のバランス感覚を身につける必要があることを痛感している。

6. 研究総括の見解

実験研究の主な成果としては、当初の目標からはややずれて派生したもので、基礎科学として興味深い成果をあげました。それが、スピン量子数 $m=0$ 状態のパリティに依存する量子位相の観測です。これは、教科書的にきれいな実験で、トポロジカルな位相を見せています。この個性的な量子研究者は、理論にもめっぽう強く、海外に雄飛して将来大きな仕事をしてくれると確信しています。

参考文献

- [1] R. H. Dicke, Phys. Rev. **93**, 99 (1954).
- [2] B. Yurke, S. L. McCall, and J. R. Klauder, Phys. Rev. A **33**, 4033 (1986).
- [3] K. Usami, J. Takahashi, M. Kozuma, Phys. Rev. A **74**, 043815 (2006).
- [4] U. Leonhardt, *Measuring the Quantum State of Light* (Cambridge University Press, Cambridge, England, 1997).
- [5] A. I. Lvovsky, H. Hansen, T. Aichele, O. Benson, J. Mlynek, and S. Schiller, Phys. Rev. Lett. **87**, 050402 (2001).
- [6] M. Kitagawa and M. Ueda, Phys. Rev. A **47**, 5138 (1993).
- [7] K. Usami and M. Kozuma, Phys. Rev. Lett. **99**, 140404 (2007).
- [8] J. M. Robbins and M. V. Berry, J. Phys. A **27**, L435 (1994).
- [9] B. Julsgaard, J. Sherson, J. I. Cirac, J. Fiurasek, and E. S. Polzik, Nature (London) **432**, 482 (2004).
- [10] J. M. Geremia, J. K. Stockton, and H. Mabuchi, Science **304**, 270 (2004).

7. 主な論文等

【A さきがけの個人研究者が主導で得られた成果】

①論文

1. K. Usami, J. Takahashi, and M. Kozuma, “How to measure the quantum state of collective atomic spin excitation”, Physical Review A **74**, 043815 (2006).
2. Koji Usami and Mikio Kozuma, “Observation of a Topological and Parity-dependent Phase of $m=0$ Spin States”, Phys. Rev. Lett. **99**, 140404 (2007).

②特許出願

なし

③受賞

なし

④著書、出版物

1. 宇佐見康二, “ $m=0$ スピンもめぐる”, 日本物理学会誌 vol.63, No.12, pp.957-961 (2008).

⑤学会発表

1. 宇佐見康二、高橋純一、上妻幹男, “冷却原子の集団スピン状態の測定”, 日本物理学会

- 2006 年秋季大会, 24pWD-5.
2. K. Usami, J. Takahashi, and M. Kozuma, “Measuring the Quantum State of Collective Atomic Spin Excitation”, Vienna Symposium on the Foundations of Modern Physics (2007).
 3. Koji Usami and Mikio Kozuma, “Observation of a Topological and Parity-dependent Phase of $m=0$ Spin States”, 第 17 回量子情報技術研究会 QIT2007-65 (2007).
 4. 笠原嘉晃、宇佐見康二、上妻幹男, “時計遷移疑スピンの量子ノイズ測定に向けた原子数揺らぎの抑制” 日本物理学会第 63 回年次大会, 26aQD-6 (2008).

⑥招待講演
なし

【B その他の主な成果】

①論文
なし

②特許出願
なし

③受賞
なし

④著書
なし

⑤学会発表
なし

⑥招待講演
なし