

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 Generation and control of the quantum states of collective atomic spin excitations by measurement processes

宇佐見康二

Koji Usami

科学技術振興機構/ニールス・ボーア研究所

Japan Science and Technology Agency / Niels Bohr Institute

概要: 光と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、原子集団の物理は集団変数で記述することができる。特にスピン偏極された原子集団を考える場合、原子集団のスピン状態は、光のようにボゾンとして量子的に取り扱うことができる。この光と原子集団スピンのボゾンとしての類似性を探索することで、量子光学の実験手法を非古典的集団原子スピン状態の生成、推定、制御に適用し、量子集団スピントロニクスともいべき新分野の開拓を目的に本研究を推進した。

【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の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。

【研究方法】 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、偏極集団スピンの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やめ、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の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格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。)

【研究成果】 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の提案 [3]

量子光学において、単一光子やスキュ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くな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、スキューズド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]。下向きスピンに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、完全にスピンの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。この下向きスピンに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（ディッケ状態 [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りスキューズさせたりする（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

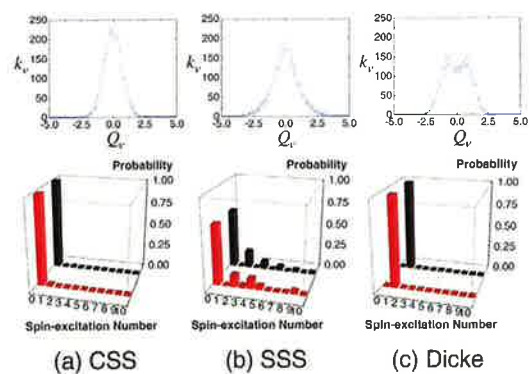


図1. 原子集団スピンの量子状態トモグラフィのシミュレーション結果

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を意味する。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)、スピンスクィーズド状態(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、スピンコヒーレンス時間が非常に長く(超微細構造時計遷移 $F=1, m=0 \rightarrow F=2, m=0$ 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. Robins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

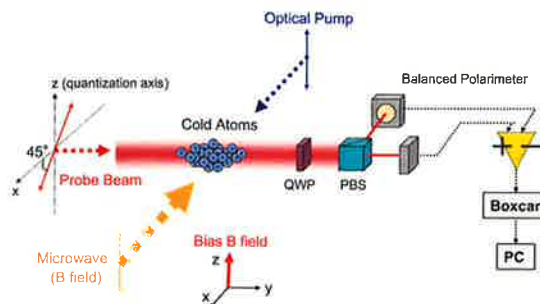


図2. 実験装置の概略

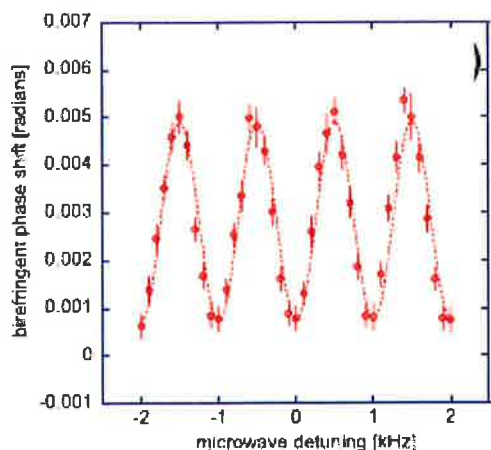


図3. 通常のラムゼイフリンジ

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

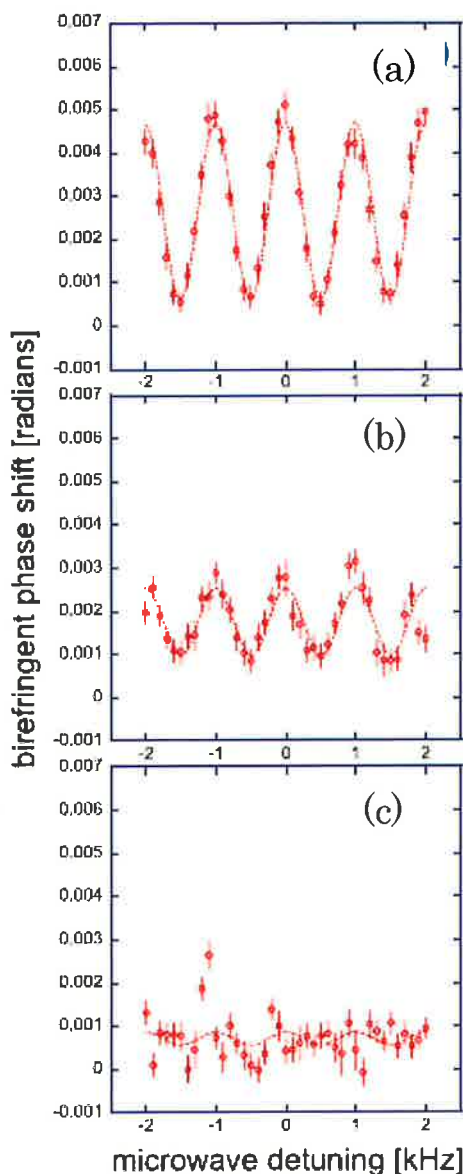


図4. バイアス磁場を反転した時のラムゼイフリンジ

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ンジが得られた(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

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 $|F=2, m=0\rangle$ に戻ることになる。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ンジを観測できたわけである。図4の(a)から(c)のフリン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ニコヒーレンスが減少したことが、フリンジビジビリティの減少を招いたと考えられる[7]。

【今後の展開】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た[9]。非

古典的なスピンスクイズド状態に関しても Caltech のグループの実験結果[10]を考えると、すぐに実証可能であると思われた。ところが、この Caltech の結果に関しては、その後再現できないという理由で、著者ら自らの手で掲載雑誌である Science から撤回している。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は、まだ実現されていない。この実現へ向けて引き続き取り組む価値は大きいといえる。

また、原子集団という巨視的な系で量子力学的な振る舞いの観測を目指すという本研究を進めるなかで、より一般的な、通常、古典物理学で記述される物体の量子力学的な振る舞いを観測する可能性にも興味が出てきた。実際、マイクロ・ナノメータスケールの機械の力学的振動モードの量子的振舞いを電氣的、磁氣的、もしくは光学的なアプローチで観測できる可能性が示唆されている。この力学的振動モードの量子力学を探る試みは、ある意味では、量子力学をもう一度オリジナルの‘力学’に呼び戻す試みであるともいえる。量子力学の誕生以来、物理学者はこれまでにあまりにも原子・電子・素粒子というマイクロな世界に取りつかれてきたといえるかもしれない。すべての物理実験の基本である‘測定’を深く追求すると、そこには否応なしに量子力学が顔を出すことになる。その‘測定’という概念の理解が、量子力学と情報理論、そしてそれらが融合して生まれた量子情報理論のおかげで、格段に深化した今、マクロな世界を非常に精密に量子力学まで考慮して‘測定’するための準備が整ったとい

える。古典力学をガイドにミクロ世界を探ってきた量子力学創生期とは逆に、これからは、量子力学をガイドにマクロ世界の新しい物理を開拓するという時期がきているのかもしれない。

【結言】 本領域で研究を進めるにあたり、細谷先生をはじめとする一級のアドバイザーの先生方、そしてすばらしい先輩、同期研究者の先生方と、直接、年に少なくとも2回も議論ができるというのは、非常な幸運であった。このことに関しては、強調しすぎることはないと思われる。

また、成果に関する無意味なプレッシャーを感じることもなく、非常に自由に研究に打ち込めた。この点に関しては、細谷先生の『(この領域の) さきがけは、成果を出すことを目的としていません。10年後に開花するためのチャレンジをしてもらえばよい』といった趣旨の言葉が研究開始当初にあったからである。

本研究を進めるにあたり、研究実施場所を快く提供していただき、また貴重な技術的、理論的サポートをしていただいた東京工業大学の上妻幹旺先生とニールス・ボーア研究所の Eugene S. Polzik 先生に心からの感謝をしたい。また、上妻研究室の皆さん、Polzik 研究室の皆さんには、日頃からフレンドリーに接していただいたことに加え、有益な議論をしていただいたことに感謝したい。

最後に、研究を行うにあたり、様々な形でサポートしていただいた領域事務所の皆さん、JST さきがけの関係者、東工大の応物事務の皆さん、ニールス・ボーア研究所の関係者のみなさん、そして、私の家族にも心からの感謝を表したい。

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).