

1 背景

近年、光や原子の量子力学的な性質を利用して古典力学では不可能な高速計算を可能にする量子コンピューターや理論上盗聴不可能な量子暗号といった研究が世界的に行われている。量子暗号の研究には一定レートかつ必要な時に光子 1 個を出せる安定的な単一光子源が必要になってくる。[1] 最近、Thibault Peyronel の研究グループによってリドベルグ状態の冷却原子集団と EIT(電磁誘導透明化)と呼ばれる現象を用いて単一光子レベルの微弱な光での非線形効果が確認された。[2]リドベルグ状態という高い励起状態する近傍の原子のリドベルグ状態への励起が抑制されるリドベルグブロッケードと呼ばれる現象が実証されたことになる。リドベルグブロッケードの効果により複数の原子がまるで一つの原子のようにふるまう集団励起状態の生成ができたことになり、これは量子暗号に必要な安定的単一光子源の開発に利用できる可能性がある。

2 本研究の目的

自分の研究は安定的な単一光子源の開発への前段階として、リドベルグ状態での Rb 原子セルの EIT 信号を光子一個レベルの微弱な光で測定できる実験系の開発を目指した。しかし、このとき光子一個レベルの非常に弱い光だと、PD (フォトダイオード) は熱雑音により、ほとんど検出することができない代わりに APD を内蔵した SPCM(Single Photon Counter Module)

という測定器を用いた。これは光子 1 個がきたら、1 個の電氣的パルス信号を出す機器である。これを用いて単位時間当たりの光子の数をカウントすることで単一光子レベルの微弱な光でも測定が可能になる。この手法をフォトンカウンティングと呼ぶ。ここで問題になってくるのが微弱な光を測定することによる SN の劣化である。なので今回は Rb セルの EIT 信号測定での SN を評価して、今後行う予定の冷却原子集団に移行した場合でも問題なく同様の実験を行って SN 良く EIT 信号が観測できるかの評価を行った。また SPCM から出る TTL 信号を任意のゲート時間でカウントしてオシロスコープでリアルタイムにカウント値を表示するカウント回路の作成を行った。

3 リドベルグ状態

リドベルグ状態とは原子の中の電子が主量子数 n と大きな高いエネルギーの励起状態にあることをいう。このような原子をまたリドベルグ原子と呼ぶ。主量子数 n が 10 以上のリドベルグ原子は基底状態に比べて非常に大きな双極子モーメントおよび分極率を持つため、リドベルグ原子間には以下式で表される相互作用が働く。

$$V_{int}(R) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{\mu_1 \cdot \mu_2}{R^3} - 3 \frac{(\mu_1 \cdot r)(\mu_2 \cdot r)}{R^5} \right]$$

μ_1 と μ_2 は各原子の双極子モーメントで、 $R = |r|$ は原子間距離を表す。 $n \sim 70$ の Rb 原子のリドベルグ状態を考えると、さ

きほどの相互作用の大きさは距離 R が $5\mu\text{m}$ と離れていても周波数にして 10MHz 以上にもなる。このためリドベルグ状態に共鳴するレーザー光によって一個の原子が励起されると、その周辺 $5\mu\text{m}$ 以内の他の原子のエネルギー準位が 10MHz 以上シフトして、レーザー光の共鳴周波数から外れ、この原子のリドベルグ状態への励起が抑圧される。

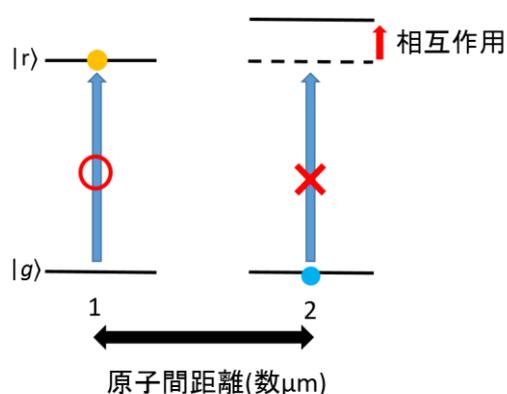


図1 リドベルグブロッケード効果

このような励起抑圧効果をリドベルグブロッケード効果と呼ぶ。リドベルグブロッケード効果によって、複数の原子があたかも一つの原子のようにふるまう集団励起状態ができて、安定的単一光子源や単一光子スイッチングの開発への応用が期待されている。

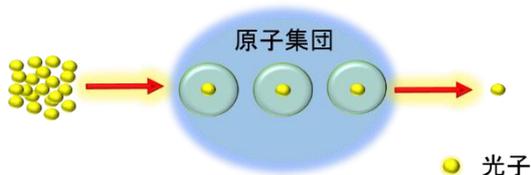
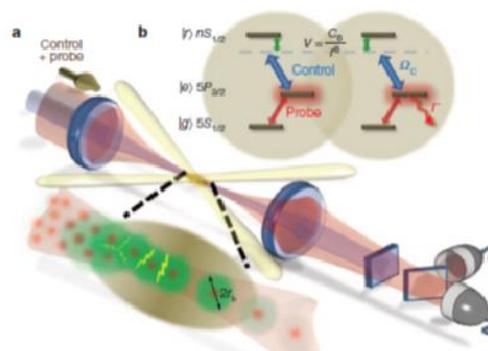


図2 単一光子生成のイメージ

4 EIT(電磁誘起透明化)

EIT とはある物質に対して共鳴なプローブ光およびその光とは別の特定な波長を持つコントロール光を同時に入射することで生じる量子干渉効果によりプローブ光の吸収が抑制されて、あたかも原子がプローブ光に対して透明になったように見える現象である。[3]

先行研究では光双極子トラップで冷却した ^{87}Rb 原子集団にプローブ光とコントロール光の二つの光を EIT 信号が観測できる条件で入射して、透過したプローブ光の測定を行ったところ、光のパワーを大きくしていくほど EIT による透過が減っていく単一光子レベルでの非線形効果が確認された。



Nature 488
"Quantum nonlinear optics with single photons enabled by strongly interacting atoms"(2012)

図3 先行研究の実験概要図

この原因はリドベルグ状態によるエネルギー準位のシフトによって EIT の条件が満たされなくなったことが考えられる。よってリドベルグブロッケード効果による集団励起状態の生成が実証されたことで、リドベルグ原子の単一光子源の開発へ応用が期待されることになった。

5 カウンタ回路

今回測定で用いたのは SPCM という測定器で、これは光子一個がきたら TTL で電気的パルス信号を一個出す。自分は測定結果をオシロスコープでリアルタイムに結果を表示させるためのカウンタ回路を作成した。回路の概要を次の図に示す。

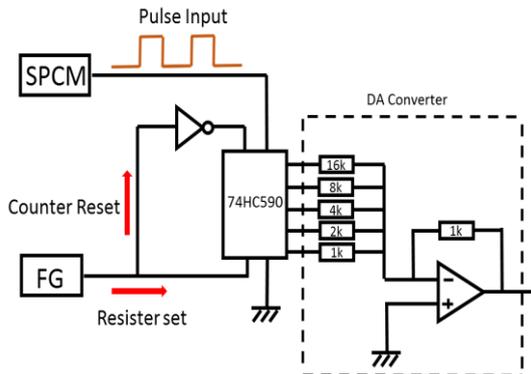


図 4 カウンタ回路の概要図

仕組みを簡単に説明すると、IC(74HC590)に SPCM からくる TTL 信号をいれてカウントした値をオペアンプを用いた DA コンバーターでアナログ値に変化させている。FG の設定を変えることでゲート時間を任意変更することができる。

今回作成した回路が実際に実験で使えるか実験を行った。冷却原子で行うときには短い掃引時間で測定を行う必要があるため、ゲート時間はおよそ $10\mu\text{s}$ で、SPCM からくるパルス信号の幅は 35ns である。なので FG でパルス幅 35ns のダミーの信号を作成したカウンタ回路に入れて、ゲート時間 $9\mu\text{s}$ にして回路の出力をオシロスコープで測定してカウントが実際に出来ているか検証した。測定結果は次のようになった。

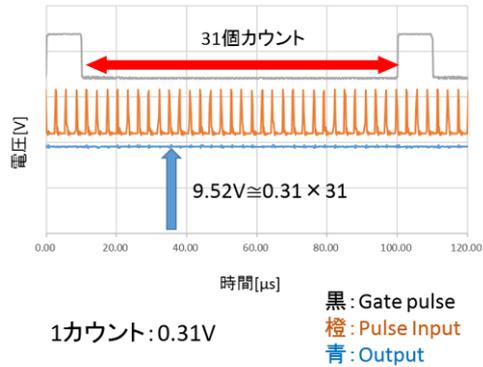


図 5 カウンタ回路実験の結果

作成したカウンタ回路は 1 カウントする毎に約 0.31V 上がるように設定した。実験結果からカウント数に対しておおよそ設定通りの出力値を出すことが確認できた。以上から作成したカウンタ回路が EIT 信号測定でも十分動作することが確認できた。

6 Rb セルでの EIT 信号観測

今回の実験で用いた Rb 原子のエネルギー準位を次の図に示す。

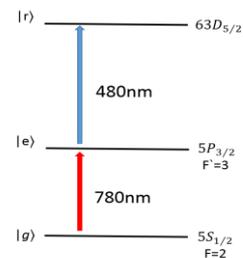


図 6 Rb 原子のエネルギー準位図

今回の実験系は次のようになっている。

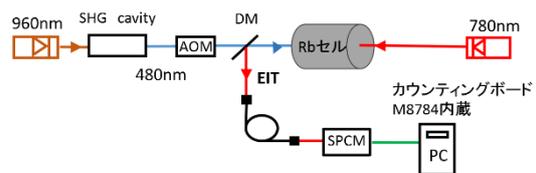


図 6 EIT 信号観測実験系の概要図

ここでは波長 780nm と 480nm のレーザー光を用いている。480nm の光は 960nm の光を非線形波長変換で第二高周波を発生させている。AOM で 480nm の周波数をシフトさせながら、SPCM で透過光(780nm) をゲート時間 100ms で 100 回カウント値を測定した。結果を次の図に示す。横軸は波長 480nm の光の離調で縦軸は 100 回測定したカウント値の平均である。

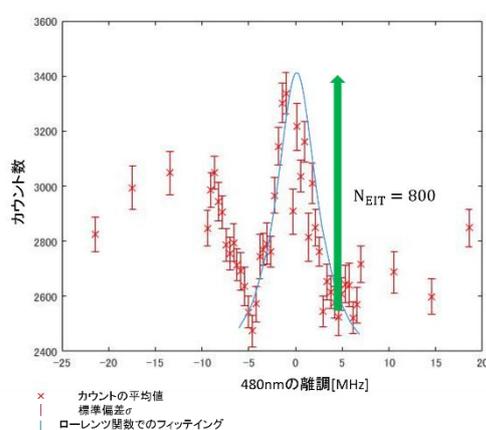


図 7 EIT 信号測定結果

最大カウント数は 3337 個で SPCM の量子効率とファイバーのカップリングロスを考慮して実際のパワーを計算したところ、最大パワー 8.4fW という結果になった。よって今回、非常に微弱な光で EIT 信号を観測することができた。

7 SN の評価

測定結果から冷却原子に移行した場合でも EIT 信号が SN 良く観測できるか計算した。今回の測定ではゲート時間 100ms で SN は EIT によるカウント数の増加とカウントのばらつきの平均からおおよそ 11 という結果になった。ここで今ショット雑音しか考慮しないこととして、ゲート

時間を 10 μ s で、最大パワーを SPCM の限界である 120fW として SN を計算したところ約 0.43 という結果になった。なので今の実験系では SN 良く EIT 信号を測定するのは難しいことが分かった。この原因と主に考えられるのはレーザーのパワーゆらぎや透過光以外の光の散乱の影響などが挙げられる。

8 まとめ

今回 Rb セルでの微弱な EIT 信号の測定と結果をリアルタイムにオシロスコープでモニターするカウンタ回路の作成を行った。EIT 信号の測定結果から現状では冷却原子に移行した時、レーザーのパワーゆらぎや透過光以外の光の散乱などの影響によって SN 良く EIT 信号を測定することは困難であることが推測された。今後の予定としては、今回作成したカウンタ回路を用いて Rb セルでの EIT 信号をゲート時間 10 μ s にして測定を行い、SN が実際どうかを確認してみたいと考えている。

9 参考文献

- [1] 中川 賢一 「レーザー励起リドベルグ原子を用いた量子もつれ状態の生成とその量子情報への応用」 レーザー研究
- [2] Thibault Peyronel 「Quantum nonlinear optics with single photons enabled by strongly interacting atoms」 Nature
- [3] 海上 智行 「二次元格子中の⁸⁷Rb原子におけるリドベルグブロッケード」 修士論文