

Rb 原子を用いたリドベルグブロッケード実験のための

レーザー光源開発

中川研究室 学部 4 年 田村光

1. 序論

現在、世界中で量子情報処理、特に量子コンピュータの実現に向けた様々な研究が行われている。古典コンピュータが $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の離散的なビットであるのに対し、量子コンピュータとは $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の重ね合わせの状態をとれるビット(量子ビット)を用いて量子並列計算を行うというものである。

実際に N 量子ビット操作を行うためには、1量子ビット操作である任意のユニタリー変換ゲートと2量子ビット操作である制御NOTゲートを実現すればよい。また制御NOTゲートを実現するためには2つの量子ビット間に量子もつれを生成することが必要不可欠である。本研究室では ^{87}Rb 原子のリドベルグ状態を用いて量子もつれの生成を目指している。

リドベルグ状態とは、原子中の電子が主量子数 n の大きい軌道に励起された状態のことである。リドベルグ(状態の)原子は以下のような特徴をもつ。

- ・ 大きな電子の軌道半径 $\langle r \rangle \sim n^2$
- ・ 大きな双極子モーメント $\mu \sim n^2$
- ・ 狭いエネルギー準位間隔 $\Delta E \sim 1/n^3$
- ・ 長い寿命 $\tau \sim n^3$

リドベルグ原子は基底状態の原子に比べ非常に大きな双極子モーメントをもつため、リドベルグ原子間には以下の式で表わされる相互作用が働く。

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{\boldsymbol{\mu}_A \cdot \boldsymbol{\mu}_B}{R^3} - 3 \frac{(\boldsymbol{\mu}_A \cdot \mathbf{R})(\boldsymbol{\mu}_B \cdot \mathbf{R})}{R^5} \right] \quad (1)$$

ここで、 R は原子間距離、 $\boldsymbol{\mu}_A$ 、 $\boldsymbol{\mu}_B$ は各原子の双極子モーメントである。従って、

リドベルグ状態 $|1\rangle$ に共鳴する励起光により1個の原子(原子B)が励起されると、その近傍の原子(原子A)のリドベルグ準位が相互作用によりシフトし、励起光の共鳴から外れ、励起が抑えられる(リドベルグブロッケードという)効果が働く(図1)。

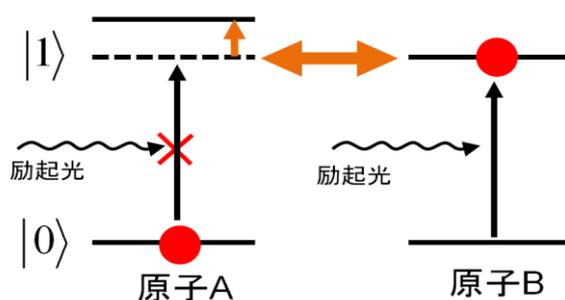


図1.リドベルグブロッケード

さらに、基底状態 $|0\rangle$ の2つの原子に同時にリドベルグ状態 $|1\rangle$ への励起光を照射すると、以下の式で表わされる状態が生成される。

$$|\phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1\rangle_A \otimes |0\rangle_B + |0\rangle_A \otimes |1\rangle_B) \quad (2)$$

これは、原子Aがリドベルグ状態にあるときは原子Bは必ず基底状態にあり、また、原子Aが基底状態にあるときは原子Bは必ずリドベルグ状態にあるという2つの量子力学的な相関をもった状態を重ね合わせた状態、すなわち量子もつれ状態が生成される。

本研究では量子もつれ生成に必要なレーザー光源、主に磁気光学トラップ(MOT)用レーザー光源とリドベルグ励起用レーザー光源の開発を行った。

2. 実験と結果

2.1 磁気光学トラップ用レーザー光源

我々は ^{87}Rb 原子の吸収線に安定化されたクーリング光源に周波数オフセット 6.6GHz をつけたリパンプ光源の開発を行った。

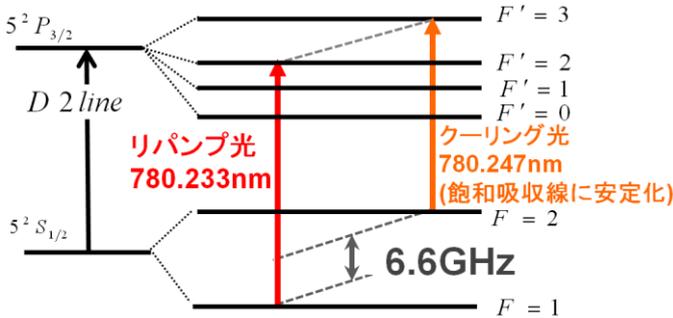


図 2. ^{87}Rb 原子のエネルギー準位図

リパンプ光源は注入電流と半導体の素子温度のみで波長選択ができる分布帰還型 (DFB) レーザーを用いた。その概要を図 3 に示す。

リパンプ光と安定化されたクーリング光のビート信号を高速光検出器で取り込み、その信号の周波数をプリスケラーにより 512 分の 1 に分周した。次に位相周波数比較器により分周したビート信号と発振器との位相差に比例した誤差信号を取り出しループフィルターに通すことにより制御電流として DFB レーザーにフィードバックした。

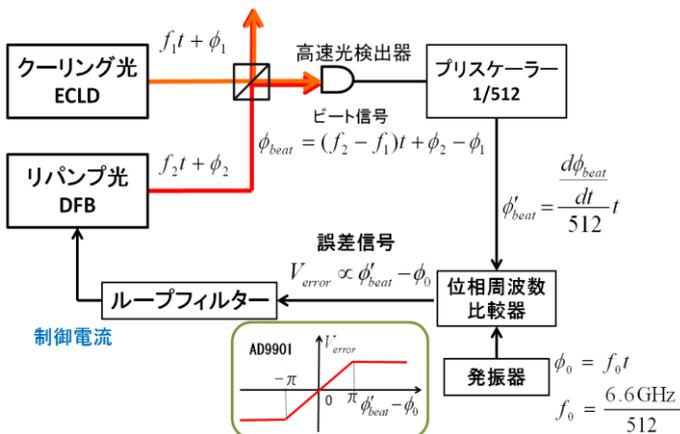


図 3. リパンプ光源の周波数オフセットロック

リパンプ遷移の自然幅 6MHz よりも周波数揺らぎを十分小さくし、遷移確率を大きくすることと、繰り返し実験を行っている間に外れにくいような長時間のロックを目標とした。なお、ループフィルターの設計は [1] を参考にした。

図 4 にプリスケラー直後のビート信号、図 5 に誤差信号から換算した周波数揺らぎを示す。

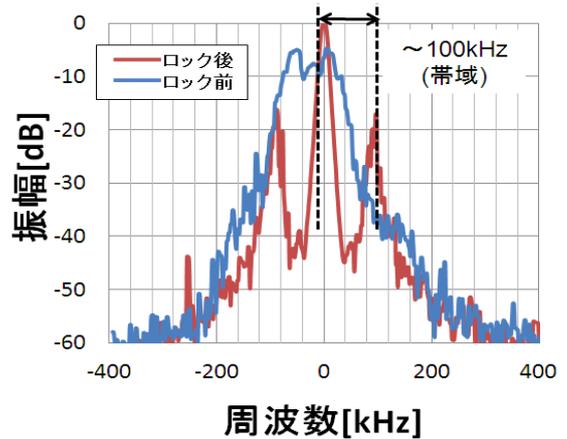


図 4. ロック前後のビート信号

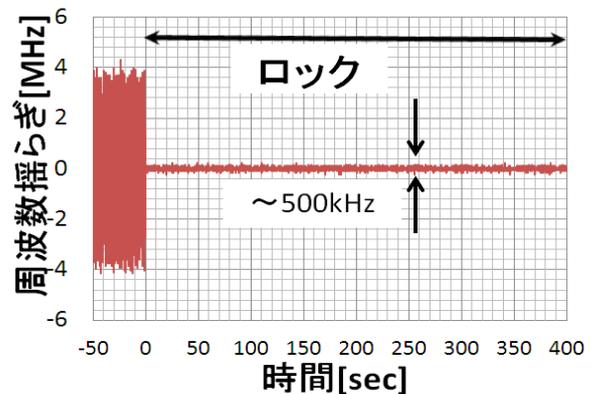


図 5. ロック前後の周波数揺らぎ

図 4 より制御帯域である 100kHz 以下の振幅が抑えられていること、図 5 よりロック前は 8MHz 程度揺らいでいた周波数を、500kHz まで抑えることができたと言える。また、長時間 (3h 程度) のロックを実現することができた。

2.2 リドベルグ励起用レーザー光源

我々はプローブ光(波長 780nm)とブルー光(波長 480nm)の2台のレーザー光による2光子吸収により,⁸⁷Rb原子をリドベルグ準位に励起する方法を用いている.ブルー光は波長 960nmの半導体レーザーの光を非線形波長変換で第二高調波を発生させ用いている.ここで,量子もつれ状態にデコヒーレンスを生じさせる要因を以下に挙げていく.

①励起時間中の原子の運動

②励起光の周波数揺らぎ

③中間状態からの自然放出

④励起時間中の励起光のコヒーレンス性

②~④を解決するために,我々は励起光を光周波数コムに周波数オフセットロックを行っていく.このロックが実現できればこれらの問題点は以下ようになる.

②光周波数コムの周波数精度で安定化

③2光子吸収の中間状態からの大きな離調を確保⇒自然放出確率の減少

④励起光を光周波数コムの線幅まで狭窄化⇒大きいコヒーレンス時間の確保

まず,プローブ光源の開発から行った(図6).周波数オフセットロックはリパンプ光源と同様の方法である.

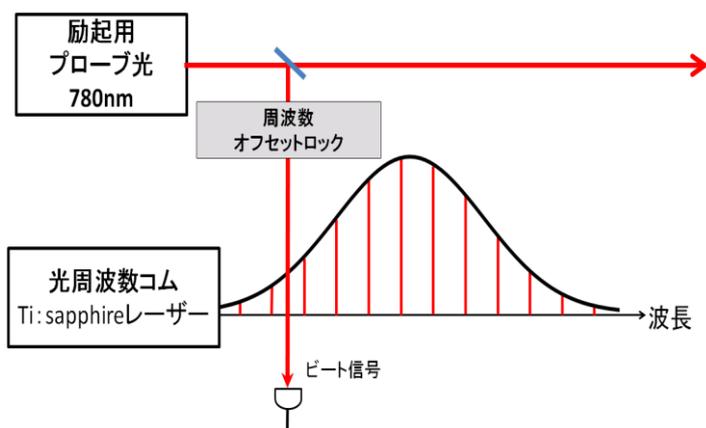


図6.プローブ光源の周波数オフセットロック

図7にプローブ光と光周波数コムのビート信号,図8に光周波数コムのスペクトルを示す.

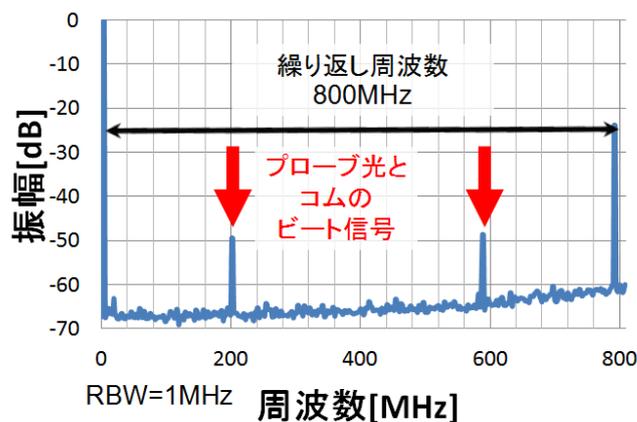


図7.プローブ光と光周波数コムのビート信号

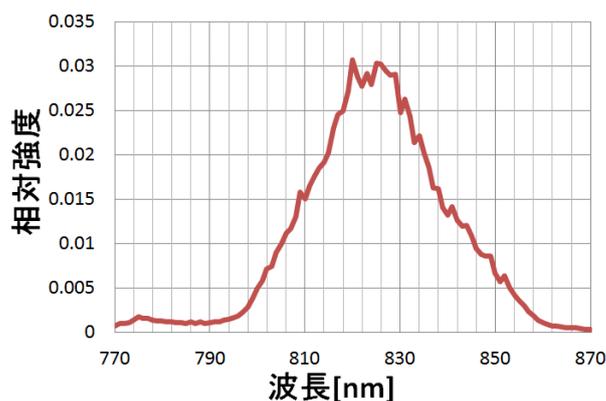


図8.光周波数コムのスペクトル

現状はビート信号のSN比が周波数ロックに十分でない.その要因を以下に挙げていく.

- ・ビート信号に用いた光のパワーよりSN比を見積もると36dB
⇒図7よりSN比は20dBであるため,2つの光の重なりが十分でない
- ・図8より光周波数コムのスペクトルが780nmまで十分に広がっていない

そこでまず,ダミー光(波長 780nm)とのビート信号を用いてループフィルターの開発を行った(図9).

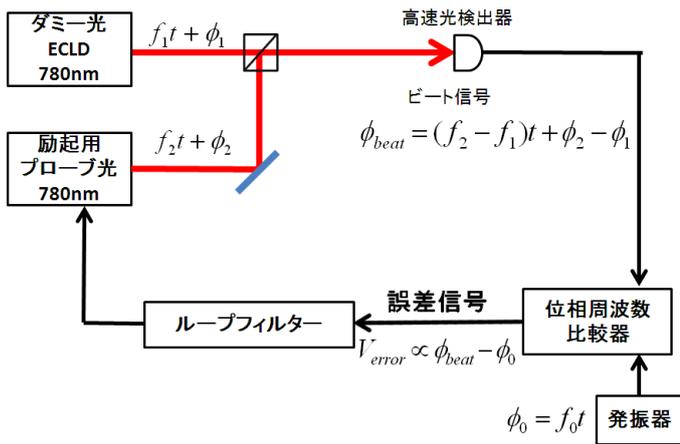


図 9. ダミー光を用いた周波数ロック

図 10 に高速光検出器直後のビート信号、図 11 に誤差信号から換算した位相揺らぎを示す。

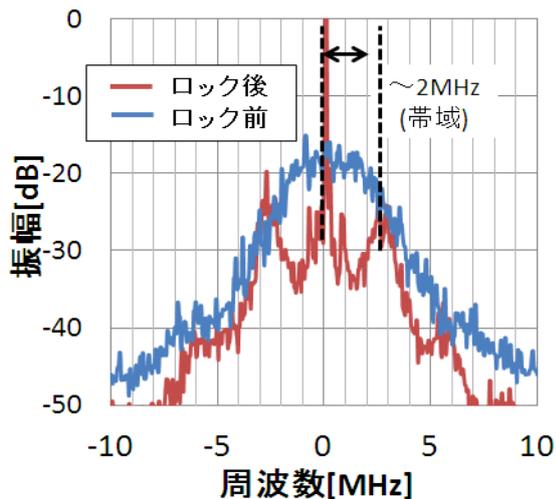


図 10. ロック前後のビート信号

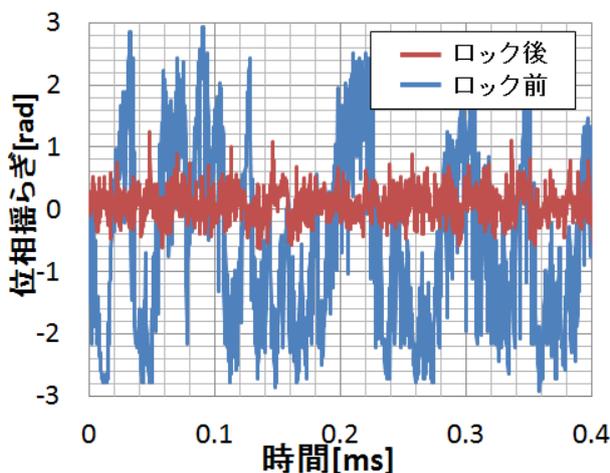


図 11. ロック前後の位相揺らぎ

図 10 より制御帯域を 2MHz まで広げることができたが、1MHz あたりの振幅が抑えられていないこと、5MHz あたりの高周波で発振していることが分かる。また、図 11 より位相揺らぎが 1rad 程度残っていることから、ループフィルターの改善の余地があると言える。

3. まとめと今後の展望

3.1 磁気光学トラップ用レーザー光源

周波数揺らぎをリパンプ遷移の自然幅 6MHz よりも十分小さく抑えることができ、かつ長時間のロックを実現することができた。

今後は実際に磁気光学トラップを行っていく。

3.2 リドベルグ励起用レーザー光源

ダミー光を用いてループフィルターを開発し、制御帯域を 2MHz まで広げることができたが、光周波数コムへのロックには至っていない。

今後は光周波数コムとのビート信号の SN 比を大きくするため、100% 近く 2 つの光を重ねること、光周波数コムのスペクトルの最適化、もしくは非線形媒質を用いて光周波数コムのスペクトルを広げることなどを考えている。また光周波数コムとのビート信号を用いて、線幅の狭窄化のためのループフィルターを開発していく。

4. 参考文献

- [1] Hartmut G. Roskos et al.
OPTICS EXPRESS 18, 8, 8621 (2010).