

博士論文（要約）

全光学式量子メモリの開発と
その単一光子系への応用

橋本 洋輔

量子計算機は通常のコンピュータに比べ、はるかに高速かつ省エネルギーに演算を行えるため、社会の注目を集めている。中でも光を用いた方法は、既存の光ファイバーネットワークとの親和性や熱的ノイズへの耐性から、有力な実現法の一つである。光を用いた方法で量子ゲートを実現するには、情報を持つターゲットの量子状態と、補助状態と呼ばれる別の量子状態とをビームスプリッター等を用いて相互作用させる必要がある。しかし、高純度な量子状態の生成はこれまで確率的なものしか実現しておらず、生成タイミングがランダムであるために、決定論的に量子ゲートを動作させるのが困難であった。ところが、もし量子メモリがあれば、そこから高純度な量子状態をオンデマンドに取り出すことでターゲットと補助状態をタイミング同期させ、決定論的に動作する量子ゲートが実現できる。さらに、量子ゲートは補助状態の種類を変えることで様々な演算を行うことができる。つまり、任意の量子状態を保存しオンデマンドに取り出せるような量子メモリの開発が量子計算機の成否の鍵を握っている。

任意の量子状態は光子数状態の重ね合わせ $\sum c_n |n\rangle$ で表せるが、係数 c_n は複素数であり、位相の情報を持つ。つまり量子状態は一般に位相敏感であり、その取り扱いには位相リファレンスを要する。これまでに、原子集団や固定長遅延ファイバー等を用いた量子メモリが報告されているが、位相リファレンスを導入した例はなく、取り扱える状態も位相不敏感な単一光子状態に限られていた。当研究室の取り組みとしては、連結共振器を用いた量子メモリを開発し、単一光子状態の保存と取り出しに成功している。これは波長や保存時間を自由に選べる等、他の物理系によるメモリの欠点を克服した画期的な方式であるが、位相リファレンスはまだ導入されていなかった。

本研究では、連結共振器型量子メモリに位相リファレンスとしてプローブ光を導入し、位相敏感な量子状態を保存可能な量子メモリを実現した。位相敏感な量子状態の中で最も単純な、真空状態と単一光子状態の重ね合わせ状態 $\alpha|0\rangle + \beta e^{i\theta}|1\rangle$ をメモリ内に生成、保存し取り出す実験を行い、メモリの実証を行った。取り出した状態は位相敏感なホモダイン測定により検証を行った。このメモリは光子数がより多い状態へと拡張可能であり、任意の量子状態が保存可能なメモリの初の実証例となった。本研究によって、決定論的に動作する量子ゲートの実現が大きく近づいたといえる。以下に本研究の内容を論文に即して述べる。

連結共振器型量子メモリ

本研究で用いた連結共振器型量子メモリは、2つの光共振器が連結した構造を持つ。それぞれの共振器はメモリおよび周波数可変のシャッターとしての役割を持ち、シャッター共振器の中には共振点シフターと呼ばれる電気光学変調器が入っている。状態の保存中はメモリ内の状態に対しシャッター共振器を非共振にしておき、取り出したいタイ

ミングで共振点シフターを作動させシャッター共振器を共振させる。するとメモリ共振器の実効的なフィネスが下がり、メモリ内に保存されていた状態が放出される。この方式は波長や保存時間が自由に選択できる等、他の物理系による量子メモリの欠点を克服したものになっている。

光子数重ね合わせ状態の生成

任意の量子状態は光子数状態の重ね合わせ $\sum c_n |n\rangle$ で表されるが、これの生成には測定誘起と呼ばれる方法を用いる。まずシグナルとアイドラーと呼ばれる、周波数の異なる2つのモード間に光子数相関（エンタングルメント）を持つ状態（2モードスクイズド真空状態）を準備する。このうちアイドラー側のみに弱いコヒーレント光、ビームスプリッター、光子検出器から構成される射影測定を行う。すると、シグナル側に所望の状態が誘起される。この方法での状態生成は既に当研究室で行われているが、本研究の特色として、メモリの内外でこれを行う。メモリ共振器の中に非線形光学結晶を入れ、メモリ内に2モードスクイズド真空状態を生成する。すると、シャッター共振器の作用によりアイドラー光のみメモリ共振器から放出され、シグナル光はメモリ内に閉じ込められている。これによりエンタングルメントがメモリ内外に形成される。アイドラー光に射影測定を施すことで、メモリ内に所望の状態を誘起することができる。

本研究では、このメモリの実証実験として、真空状態と単一光子状態の重ね合わせ状態 $\alpha|0\rangle + \beta e^{i\theta}|1\rangle$ をメモリ内に生成し保存した。これは2モードスクイズド真空状態の弱ポンプ極限および単一の弱いコヒーレント光、ビームスプリッター、光子検出器を用いた、上記のスキームの最も単純な場合になっている。弱いコヒーレント光の強度と位相を変えることで、 α 、 β の比および重ね合わせの位相 θ を任意に設定することができる。

位相リファレンスの導入

本研究の実験装置は基本的に以前の単一光子状態の保存と取り出し実験のものを踏襲しているが、大きく異なるのが位相リファレンスとしてプローブ光を連結共振器に導入した点である。プローブ光は周波数がシグナルとアイドラーの2種類あり、シグナルプローブはホモダイン干渉計のローカルオシレーター光と干渉しホモダイン測定の測定基底を決め、アイドラープローブは弱いコヒーレント光と干渉し重ね合わせの位相 θ を決める。さらに、これらのプローブ光はローカルオシレーター光に対して離調されている。これによりローカルオシレーター光がメモリ共振器に対して非共振になり、後方反射された光子が間違ってもメモリに保存されるのを防ぐ。この離調の副作用として、い

くつかの干渉計にヘテロダイنبートが現れるが、本研究ではこのビートを用いた相対位相のロック方法を開発し、むしろ積極的に利用している。

実験条件とその結果

本研究では、3種類の光子数重ね合わせ状態を生成、保存し、取り出す実験を行った。保存時間は0 ~ 400 nsまで100 ns刻みで変えて測定を行った。取り出した状態の評価はホモダイン測定を36種類の基底で5,000回ずつ繰り返し行い、得られた直交位相振幅の分布を用いて量子トモグラフィを行った。

直交位相振幅の分布には光子数重ね合わせ状態に特有の位相依存性が確認され、また密度行列には特有の非対角項が確認された。Wigner 関数には負値が原点以外の場所に確認され、このメモリが位相敏感かつ非古典的な状態を保存できることを示せた。Wigner 関数には離調による位相回転が保存時間に対応して見られるが、これは生成した状態が実際にメモリ内に保存された後放出されたことの証拠になっている。

以上をまとめると、本研究では光子数重ね合わせ状態 $\alpha|0\rangle + \beta e^{i\theta}|1\rangle$ の保存と取り出しの実験を行い、連結共振器型量子メモリが位相敏感な量子状態を取り扱えることを示した。このメモリは任意の量子状態に拡張可能であり、決定論的に動作する量子ゲート、ひいては光を用いた量子計算機の実現を近づけるものとなった。