

量子情報処理研究を支える 超精密光学系の設計

東京大学
古澤 明

筆者らは光による量子情報処理を目指して実験的研究を行っている。そこにはミラーのような線形光学素子、非線形光学結晶を用いた非線形光学素子合わせて何百もの素子が非常に精密に配置されている。本稿ではこれらについて解説する。

1 光学系の実際

まず初めに、筆者らの実験セットアップの一例として図1にシュレーディンガーの猫状態量子テレポーテーション実験¹⁾の光学系の写真を示す。この写真を見てわかるように、ものすごく多数の光学素子が並べられている。このように多数の光学素子を必要とする理由の1つは、光線は何もしなければ直進するので、光の回路を作ろうと光線を折り曲げるたびに2枚のミラーを必要とし、複雑な回路をつくると折り曲げる回数も増え、ミラーを大

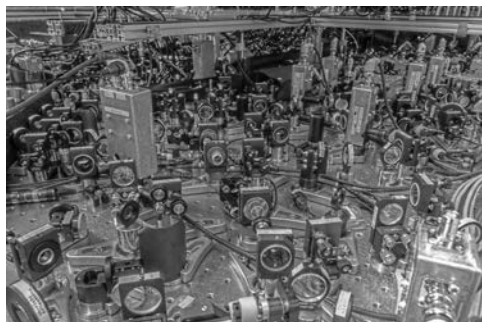


図1 シュレーディンガーの猫状態量子テレポーテーション実験¹⁾の光学系。

量に使うようになるからである。ここで、光線を折り曲げるのに2枚のミラーを使う理由は、1枚のミラーだけだと折り曲げたあとの光線を任意に作ることはできないが、2枚あれば任意の光線をつくれるからである。平たく言えば、2点を自由に決めることができれば自由に直線を決められるということである。また、光線は回路の配線に相当するが、トランジスタスイッチに相当する非線形光学素子は、筆者らの場合光パラメトリック発振器となるが、これは非線形光学結晶が光共振器の中に存在する構造になる。この場合、共振器長を波長の整数倍にロックしなければならないが、このためのエラーシグナルは変調した光を共振器中に導入することで得られる。したがって、光変調器や変調光を共振器モードに合わせるためのレンズやミラーが必要になる。さらに、2本の光線がビームスプリッターで合波されることが多いが、この部分では2つの光の空間モードを完全に一致させ、100%に限りなく近い効率で干渉させなければならない。そのため、同じ起源の空間モードを持つ光線であれば^{*1}、起源からの光路長を正確に合わせることになる。光路長を正確に合わせるためには、短い方の光路長を延伸させることになるので、その分ミラーを多数用いて引き回すことになる。また、起源の異なる空間モードを持つ光線であれば^{*2}、レンズを入れさらに光路長で調整するので、レンズおよび多数のミラーが必要となる。

※1 例えば、同じビームスプリッターでの透過光線と反射光線。

※2 例えば、片方はレーザーから直接、もう片方は光パラメトリック発振器からなど。

2 光学系の静的安定性

このように多数の光学素子を用いて、広い意味での干渉実験を行う場合、光学系の安定性は非常に重要である。筆者らの使用している波長は860 nmなので、少なくともその100分の1程度の長さで力学的に安定してくれないと干渉実験は不可能となる。そのためには2種類の安定性が必要になる。2種類とは、静的安定性と動的安定性である。静的安定性とは、光学系のアラインメントの安定性のことであり、これが低いとアラインメントが少しずつ狂い干渉のビジビリティが時間と共に低下していく。一方、動的安定性とは光路長や光共振器長のロックの安定性のことであり、これが低いと光路長や光共振器長の二乗平均誤差（RMS 誤差）が大きくなる。もちろん、これが大きくなってくると干渉が「滲んで」見えなくなってくる。筆者らはこれらに対して次のような施策を施している。

静的安定性については、ミラーマウントの機械的安定性がキーとなる。理由は、可動部の無いものは、金属の熱膨張でしか動かないため、室温を安定させればかなり安定にすることができるが、ミラーマウントには可動部があるため、ミラーマウント自身を安定にするしかないからである。ここで、ミラーマウントを安定にすることはどういうことかという点、干渉光学系のアラインメントのあとに高いビジビリティを維持できるようにするという点である。したがって一般的には、ミラーマウントのノブに連結しているネジの精密化が図られる。つまり、バックラッシュがほとんどなく、できるだけ細かいピッチのネジの追求がなされる。かなり昔からこの種の追求はなされており、10年ぐらい前はコロラドにあったLees社のミラーマウント、いわゆる“Leesマウント”が世界最高ミラーマウントとされ、NASAにも採用されていた²⁾。しかし、2000年頃、社長のLee氏の引退に伴い、Leesマウントの製造はドイツのLinos社に引き継がれたが、その性能は往年のLeesマウントには必ずしも届いていなかった。

筆者はちょうどその頃東京大学に研究室を立ち上げ、超精密光学系を用いた量子光学実験をスタートさせ、量

子テレポーテーションネットワーク実験を成功させた³⁾。この実験後しばらくは、Linos社製のLeesマウントを使ってもできる実験であったが、光の変調の帯域が広がるに連れ光学系が複雑になり、要求されるミラーマウントの安定性も高まっていき、ついにはLinos社製のLeesマウントでは安定性が不足するようになってしまった。早い話、Linos社製のLeesマウントでは、ミラーマウントを多数使用する複雑な干渉光学系でそのビジビリティを保持することができなくなってしまった。そのようなとき、ファーストメカニカルデザイン（FMD）社・社長の野口氏と出会った。

当時FMD社では、精密ミラーマウントを製造・販売していたが、その性能は筆者らの実験には十分ではなく、正直なところLinos社製のLeesマウントよりもさらに低性能であった。しかし、野口氏の志は非常に高く、単なる機械設計・製造会社のFMD社にエアサスペンション付きの光学定盤を備えた光学実験室までつくってしまった。その熱意にほだされ、筆者は野口氏と、Leesマウントを超える性能を持つオリジナルミラーマウントの共同開発を始めた。もちろん、筆者らにとってもそれは超えなければならない関門で、ある意味「渡りに船」であった。1年間の共同研究の結果、できたのが図2に示すMM1000Sである。

MM1000Sの特徴は、M-ringと筆者らが名付けたノブ間をつなぐバネの存在である^{*3}。このM-ringはノブを常に横方向に押ししているため、ネジが動くために必然的に存在するガタの影響を極限まで小さくでき、ミラーマウントの静的安定性を高めることができる。筆者らは、この安定性を32個のMM1000Sを用いたマッハーツェンダー干渉計（図3）のビジビリティの変化から評価を行った。図4に評価結果を示す。この図から明らかなように、最初にビジビリティ99%でアラインメントされたマッハーツェンダー干渉計において、6日間経過しても全くビジビリティに変化がないことがわかる。同じ実験を他社のミラーマウントを用いて行くと、数時間で1%のビジビリティの低下は普通なので、この結果はMM1000Sの驚

*3 当初は3つのノブに1つのOリングを巻いていたためM-ringと名付けたが、Oリングの耐久性が余り高くないことが判明したため、現在はバネになっている。



図2 FMD社野口氏と共同開発したミラーマウントMM1000S。

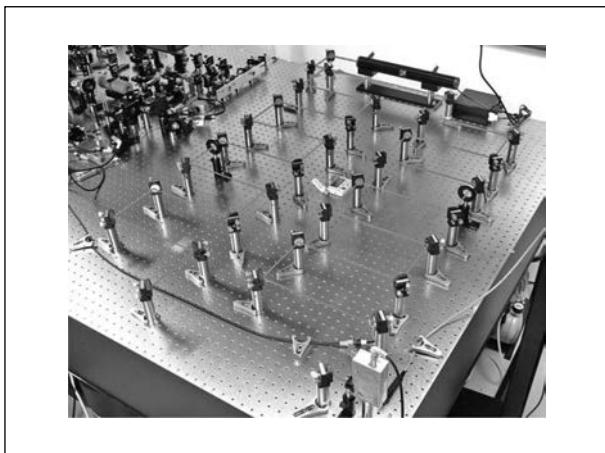


図3 MM1000Sを32個用いたマッハ-ツェンダー干渉計。ただし、光路上の線はあとで書き加えている。

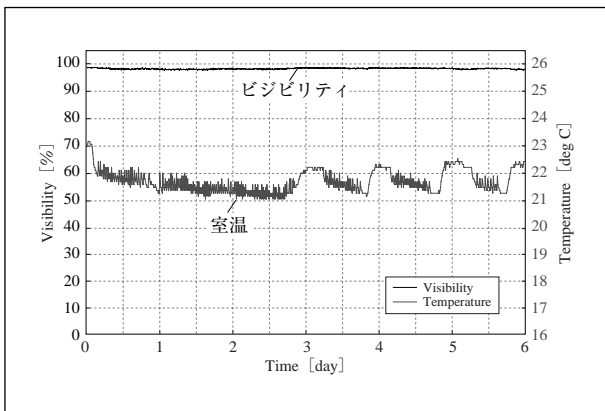


図4 ミラーマウントMM1000Sを32個用いたマッハ-ツェンダー干渉計のビジビリティ経時変化。

異的安定性を物語っている。筆者らはこの結果に満足し、筆者らの次世代実験であるシュレーディンガーの猫状態のテレポーテーション実験にMM1000Sの採用を決定した。その実験系の写真は図1に示したが、この写真にあるように要所にMM1000Sを用い、非常に複雑かつ精密な干渉実験であるこの実験を成功させることができた。MM1000Sなくして、この成功は無かったと言える。

3 光学系の動的安定性

もう1つの安定性である動的安定性に話を移そう。前述したように、光学系の動的安定性とは、光路長や光共振器長のロックの安定性のことである。通常の実験ではこれらの制御はアナログ回路を用いて行われる。しかし、これを筆者らのような超精密光学系で行うことはかなり難しい。なぜなら、動的安定性の高いロックを実現するにはサーボ回路の回路定数の最適化が非常に重要となるが、これをアナログ回路を用いて行くと素子を何度も付け替えなければならなくなる上、実装技術に依存して回路の特性が変わってしまうためである。さらに、作業者の熟練度にも依存するため、キーとなる学生が卒業してしまうと、その回路は二度とつくれないう状況に陥ってしまう危険すらある。もっと言う、アナログ回路で複雑な制御をしようとする、回路の温度変化により共振周波数などが変化するため、安定動作の妨げになるといったこともある。

これらの問題を回避するため、筆者らはサーボ回路のデジタル化を行っている。デジタル化のメリットは上に挙げた問題点をすべて解決できる上、あるロックが落ちたら光学系全体を初期状態に戻し、最初から順番にロックを掛け直すなどのインテリジェント化も可能となることである。もう少し具体的に言うと、デジタル化すれば回路定数の変更は数値の変更で済み、その数値は実装には関係ないので実装技術も関係なく、回路の温度変化も関係なくなる。このような大きな利点のあるデジタルサーボが、これまで筆者らの分野であまり主流とはならなかったことには、高速デジタル回路を実現するフィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ (FPGA) 開発環境があまり整備されていなかったことによる。つま

り、FPGAを用いて実験系を組み上げるには、個々のFPGAを統合して有機的に動くようコンピューターとネットワークでつなげなければならないが、これを開発する環境があまり整っていなかった。もう少し正しく言うと、デジタル制御の専門家用には整備されていたのかもしれないが、光学屋がおいそれと使える環境には無かった。

ところがここ数年、ナショナルインスツルメンツ社のLabVIEWによるFPGA環境が劇的に進化し、LabVIEWさえできれば、筆者らにとって十分高速なFPGAを統合制御できるようになった。したがって、筆者らはすべての制御システムをLabVIEWベースのFPGAに置き換えつつある。

4 光パラメトリック発振器による スクイズド光の生成

筆者らの量子情報処理実験では、そのリソースとしてスクイズド光（正確にはスクイズされた真空場）を用いる。スクイズド光とは $|n\rangle$ を n 光子状態として、

$$\frac{1}{\sqrt{\cosh r}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sqrt{(2n)!}}{2^n n!} (\tanh r)^n |2n\rangle \quad (1)$$

のように書ける。ここで、 r はスクイーミングパラメーターと呼ばれている。この式からわかるように、スクイズド光とは0, 2, 4, …のように偶数個の光子の重ね合わせ状態となっている。特に光子数が2個の場合は、その2つの光子がエンタングルしている^{※4}。本稿では、エンタングルメントとは何かについて述べるつもりはないので、これ以上は拙著を参照されたい⁴⁾。

スクイズド光は縮退パラメトリック過程により生成可能である。縮退しているので、シグナル光子とアイドラー光子が同じ波長となり区別できない。このため、上述したように偶数個の光子流、つまりスクイズド光となるのである。しかし、普通の光パラメトリック発振器(OPO)ではいくらシグナル・アイドラーが縮退する位相整合条件にしても、スクイズド光を生成することはできない。また、スクイズド光はOPOを発振閾値以下でポンプしなければ生成できないが^{※5}、だからと言って通常のOPOを閾値以下でポンプしてもスクイズド光は生成されない。実はOPO内部ロスの低減が重要なのである。

上述したように、スクイズド光は偶数個の光子流である。そのためロスがあり確率的に光子が失われると、その偶数性が崩れていく。もちろん、エンタングルメントのリソースとしても劣化していく。通常のOPOでは共振器内ロスはポンプ光の強度を上げることで解決する問題なので、数%のロスには注意が払われない。また、OPOの発振閾値を下げるために通常はアウトプットカップラーの反射率を上げ、共振器としてのフィネスを上げる設計をすることが多い。しかし、OPOでスクイズド光を発生させる場合、共振器内ロスはフィネス倍されてしまうから、むしろアウトプットカップラーの反射率を下げる傾向にある。もちろん、あまりに下げすぎると、発振閾値が上がりすぎてしまい、発振閾値の少し下あたりの最適ポンプパワーを用意することが難しくなる。さらに、非線形光学結晶にはポンプ光を上げていくと増えていくポンプ光由来ロスがあり（フォトリフレクティブ効果含む）、こういった意味でもあまりポンプ光強度を上げたくない。したがって、最適なアウトプットカップラーの反射率が存在するが、いずれにしてもスクイズド光を生成するOPOの設計思想は、通常の波長可変光源としてのOPOの設計思想とは全く異なるのである。

逆に言うと、これらに注意してOPOを設計すれば、それなりの二次非線形光学結晶を用いれば、3デシベル程度のスクイズド光（ショットノイズレベルより3デシベル下の量子ノイズを有する光）を得ることはできる。しかし、それ以上を得ようとすると、非線形光学結晶選びとOPOや計測光学系の安定性が極めて重要になってくる⁵⁾。特に、ポンプ光由来ロスの小さい非線形光学結晶選びがとても重要である。

2005年まで、スクイズレベルの世界記録はKNbO₃を用いた6デシベルであった⁶⁾。これは1992年に達成されたが13年間破られたことがなかったので、もうこれが物理的限界であるという論文⁷⁾が業界では信じられていた。筆者らはその論文の存在を知ってはいたが、敢えて無視して世界記録樹立を目指して非線形光学結晶探索

※4 もちろん、他の成分も別のかたちでエンタングルしている。

※5 ものすごく上手い条件を選べば、発振閾値以上でもスクイズド光を生成できないわけではないが非常に難しい。

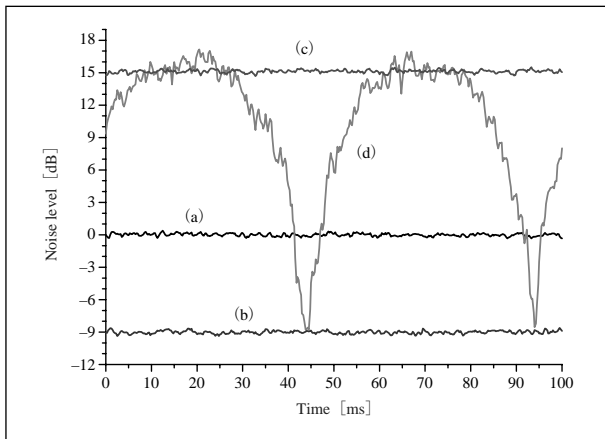


図5 PPKTPを用いて得られた9デシベルスクイズド光⁵⁾。(a)ショットノイズレベル、(b)ホモダイン測定の際ローカルオシレーター光の位相をスクイズ成分にロックした場合のノイズレベル、(c)ホモダイン測定の際ローカルオシレーター光の位相をアンチスクイズ成分にロックした場合のノイズレベル、(d)ホモダイン測定の際ローカルオシレーター光の位相をスキャンした場合のノイズレベル。

を行った。幸いにもそのころには、1992年には存在していなかった非線形光学結晶＝疑似位相整合非線形光学結晶が存在し、筆者らは2006年、周期分極反転KTiOPO₄ (PPKTP)を用いて7デシベルのスクイズド光生成に成功した⁸⁾。ポイントは、PPKTPのポンプ光由来ロスが非常に小さいことを見つけたことであった⁹⁾。これは14年ぶりの世界記録更新となった。さらに筆者らは2007年、その記録を計測光学系の安定化により9デシベルに延ばした⁵⁾(図5)。その後、筆者らが開けたパンドラの箱に世界中の猛者が群がり、現在では世界記録はドイツHannover大学の出した12.6デシベルとなっている¹⁰⁾。もちろん、この記録も筆者らと同じPPKTPを用いている。ちなみに、筆者らが9デシベルで、Hannover大学では12.6デシベルなのは主に使用波長の差に原因がある。筆者らが860 nmの光を用いたのに対して、Hannover大学では1.06ミクロンの光を用いており、長波長の方がポンプ光由来ロスがより小さいため、このような結果の差として現れている。ただ、筆者らとしては、860 nmは量子情報処理実験には最適なので、敢えて長波長でトライするほどの価値はないという判断をし(負け惜しみかもしれないが)、途中でレースを降りただけである。

5 おわりに

ここまで、光量子情報処理のための超精密光学技術として、ミラーマウント開発による光学系の静的安定性の追求、デジタル制御による動的安定性の追求、スクイズド光生成のためのOPO設計思想と新規非線形光学結晶探索について述べてきた。量子情報処理の研究というと、「浮世離れた」研究のように思われるが、地に足が付いた光学技術の追求であることが理解していただけたと思う。本稿を読んで、筆者らの研究分野に親近感を覚えていただけたら、本稿の目的は達せられたと思う。そうなることを願ってやまない。

謝辞

本研究は東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻古澤研究室で行われたものである。古澤研究室メンバー全員に感謝したい。また、ミラーマウント開発に当たってはFMD社野口氏にお世話になった。記して感謝したい。

参考文献

- 1) N. Lee, H. Benichi, Y. Takeno, S. Takeda, J. Webb, E. Huntington, and A. Furusawa, *Science* **332**, 330 (2011).
- 2) K. T. Bullock, R. J. De Young, and S. P. Sandford, NASA Technical Paper 366 (1997).
- 3) H. Yonezawa, T. Aoki, and A. Furusawa, *Nature*, **431** 430 (2004).
- 4) 古澤 明, 量子光学と量子情報科学, 数理工学社 (2005).
- 5) Y. Takeno, M. Yukawa, H. Yonezawa, and A. Furusawa, *Opt. Exp.* **15**, 4321 (2007).
- 6) E. S. Polzik, J. Carri, and H. J. Kimble, *Appl. Phys. B* **55**, 279 (1992).
- 7) A. La Porta and R. E. Slusher, *Phys. Rev. A* **44**, 2013 (1991).
- 8) S. Suzuki, H. Yonezawa, F. Kannari, M. Sasaki, and A. Furusawa, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 061116 (2006).
- 9) T. Aoki, G. Takahashi, and A. Furusawa, *Opt. Exp.* **14**, 6930 (2006).
- 10) T. Eberle, S. Steinlechner, J. Bauchrowitz, V. Haendchen, H. Vahlbruch, M. Mehmet, H. Mueller-Ebhardt, and R. Schnabel, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 251102 (2010).

■ Design of quantum optics experiments for quantum information processing

■ Akira Furusawa

■ Department of Applied Physics, School of Engineering, The University of Tokyo

フルサワ アキラ

所属：東京大学 大学院工学系研究科