

# 量子テレポーテーション実験が CW Ti:S レーザに突きつける高度な要求

スティーブン・ウェブスター、デイビッド・アームストロング

Mスクエアレーザ社(M Squared Laser Ltd.)は、東京大学教授の要望に応え低ノイズTi:Sレーザを改良し、新たな極限に到達。

テレポーテーションという言葉が家族や友人に話すと、会話はある場所から消えて別の場所で再度現れるというようなサイエンスフィクションの再現となる可能性がある。とは言え、現在の研究は量子情報のある場所から別の場所に光の状態の形式で転送することに関係している。これは卓越した実験技術を必要とする画期的な科学であり、あらゆるコンポーネントに、特に量子状態を生成するレーザ光源に、重要な要求を突きつけている。先駆者の1人は日本の研究者、東京大学の古澤明教授である。同教授は新しいテレポーテーション技術を実施した。この技術は、テレポートされた量子状態の破壊を含め、従来技術の欠点の多くを解決するものである。こうした前進により、量子コンピューティングなどの実用的なアプリケーションの実現可能性が強まる。実験の核心で高安定のCW Ti:Sレ

ーザが必要になることから、古澤教授はスコットランドのMスクエアレーザ社のSolsTiSを検討することになった。同社は、古澤教授のような最先端の研究者からの要求を知ることで、科学界の要求に応じて、クラス最先端の製品に仕上げるために必要な洞察力が得られる。

## シュレディンガーの猫

原子であろうと光子であろうと、個々の微細粒子を制御し検知する能力によって人は量子の世界にアクセスできる。この領域では、われわれが感じているような古典的な自然法則はもはや維持されない。正確に言うと、われわれが観察することを理解し記述するためには量子力学の法則を用いなければならない。この2つの世界が衝突することはほとんどない。よく知られているように、シュレディンガーは、同時に生

きており死んでいる猫について思考実験を行い、世界の量子力学的記述を巨視の対象に適用することの不合理性を指摘した。しかし、1世紀の実験と検証を経て、量子力学はまだマイクロ世界の正しい記述であるように思われており、量子力学が生み出す奇妙な結果を見てわれわれは驚嘆するしかない。量子状態のある場所から別の場所に転送する量子テレポーテーションは、そのような現象の1つである。これは、東京大学の研究者が、Mスクエアレーザ社のSolsTiSを用いて実際に行った。多くの分野と同様に、量子力学は独自の言語を持っているので、話を進める前に、まずは量子世界の記述に使用される概念と専門用語の一部を簡単に見ておこう。

## 光の速度よりも速いのか？

量子力学の現在の研究の多くは、量子情報に関する発表となっている。情報が量子系の物理的状態内に、例えば電子のスピンや光子の偏光に含まれており、そのような系の中で転送できるという考えだ。量子情報の構成要素は、量子ビット(キュビット)と名付けられている、これは情報の個々の単位が0か1となるコンピュータ計算に使用されるビットと同様である。1キュビットも、明確に区別できる2つの状態を持つが、古典的なビットとは異なり、キュビットは系の計測が行われるまではこれらの状態の重ね合わせで存在する。重ね合わせの原理は、量子力学で得られる反直観的結果の核心にある。つまり、重ね合わせ状態では、

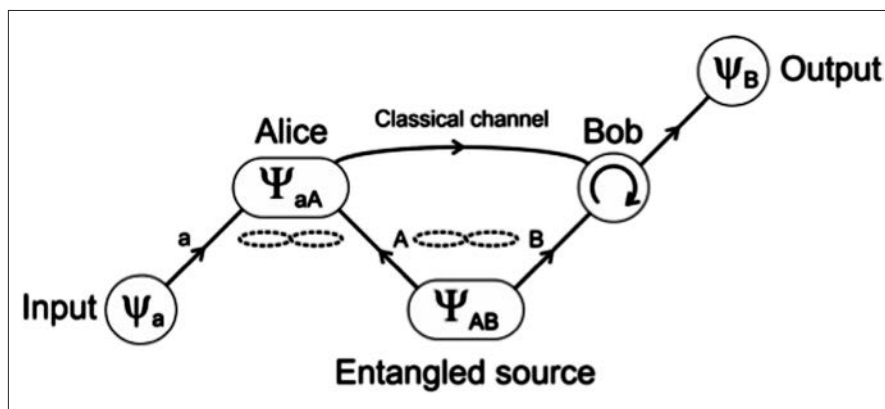


図1 量子テレポーテーションの概略図

物理的な系内部に含まれる情報は、同時に0と1の状態の両方である。

2つのキュビットを扱うとき、その複合状態を考えることができる。これは単なる個別状態の結果であるが、個々の状態に分解できない状態も形成可能である。この場合、2つのキュビットが関連づけられ、エンタングルされたと言われる。この種の関連づけは、エンタングルメントとして知られるものであり、古典的世界に対応するものではない。これが「量子力学の特性である」と言ったのはシュレディンガーだった。エンタングル状態は、1つのキュビットでスピンの計測が行われると、ただちに第2の状態が決まるという性質がある。これは、2つの状態間の距

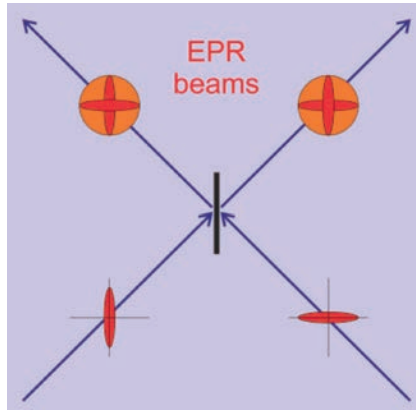


図2 エンタングル(EPR)ビームの生成

離が、光速で信号を伝送できる最大距離よりも離れていても言えることである。アインシュタインが嫌悪し、アインシュタイン、ポドルスキ、ローゼン、つまりEPRパラドクスと言われているの

は、離れた量子系に対する計測を行うことによる、この瞬間的な変化である。

## 量子テレポーテーション

すでに述べたように、この場合のテレポーテーションは、確かに奇妙ではあるが、サイエンスフィクションからは幾分か離れている。ここで問題にしているテレポーテーションの場合、転送されるのは物質ではなく情報である。これは、離れた場所にファクシミリを生成して、元の場所ではオリジナルが消去されるというようにテレポーテーションを考えるのが、恐らく適切であろう。

2者、アリスとボブが、それぞれキュビットを持っていて、通信に先立っ

<http://www.oceanphotonics.com>



**Mスクエアレーザー社製**

# CW単一周波数Ti:Sレーザー

## SolsTiS

メンテナンスフリー・超コンパクト





SolsTiSレーザーヘッド 寸法: 19×14cm

### アプリケーション

- 原子冷却
- 光格子時計
- 超高分解能レーザー分光
- 微小共振器
- ボーズ=アインシュタイン凝縮
- 量子コンピュータ
- フォトルミネッセンス
- レーザ誘起ドップラー蛍光分光

### 特長

- 充実のオプション: テラスキャン(連続掃引域: 700~1000nm)、ファイバ出力、レーザーピックアップ
- 完全密閉型レーザーヘッドでメンテナンスフリーを実現
- 専用波長モデル: (1) 670~710nm、(2) 950~1050nm
- 極低ノイズ<0.1%rms、狭線幅<50 kHz、掃引幅>25 GHz、高出力>4 W
- 波長モニタ機能標準装備
- 全ての制御はWebブラウザのGUIで操作

その他関連製品: 第2高調波発生器



日本総代理店 **オーシャン フォトニクス 株式会社** M2レーザー課

〒169-0051 東京都新宿区西早稲田3-30-16 ホリゾン1ビル

TEL 03-6278-9470 FAX 03-6278-9480 E-mail: sales@oceanphotonics.com URL: http://www.oceanphotonics.com

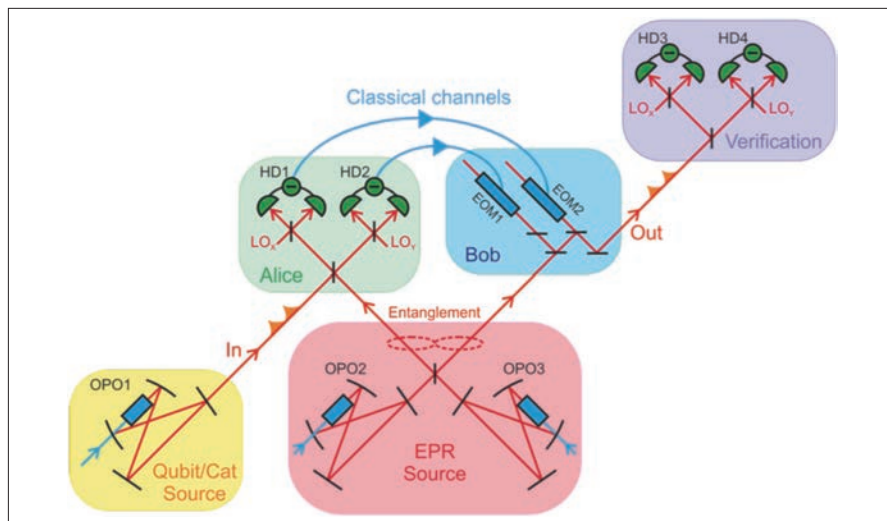


図3 ブロードバンドテレポーテーションの概略図。OPO:光パラメトリック発振器-エンタングルスクイズド状態の光源。HD:ホモダイナミク検出器-光の位相と振幅(直交)を計測する。LO:局発光-計測用の位相リファレンス。EOM:電気光学変調器-光の位相と振幅を変調する。

て、キュビットはAとBにラベルづけされ、エンタングル状態、 $\Psi_{AB}$ として用意されている。キュビットaにエンコードされた入力状態、 $\Psi_a$ がアリスに送信され、キュビットAとエンタングルされる。アリスは、自分の2つのキュビット、aとA、 $\Psi_{aA}$ の結合状態を計測する。可能な結果は4つあり、その各々がボブのキュビット、Bを4つの対応する状態の1つにしている。これら4つの状態の各々が、4人のオペレータうちの1人の行動によって、元のキュビット状態に関連づけられている。アリスの計測結果が分かると、アリスはボブに、彼のキュビットを元のキュビットのコピーに変えるために、彼のキュビットにどのオペレータを適用すべきかを伝える。アリスの計測で等しく起こりうる結果は4つなので、ボブが自分のキュビットに適用する必要があるオペレータは、2つの古典的情報ビットでエンコードできる。このプロセスの終わりでは、ボブのキュビットは $\Psi_a$ 状態、つまり元のキュビットの状態と同じであり、テレポーテーションは完了する。しかし、注意すべき

は、彼女はもはや彼女のキュビットの元の状態を知らないということ、つまりこの情報は消去されたのである。

量子テレポーテーションは量子光学において実現されたので、実験を理解するに、まずこの分野に関連する考えの一部を簡単に見ておこう。

### 量子光学

量子光学では、光の電界は、振幅と位相に関連づけられたXとY、フィールド-クワドラチャーズ(直交)で表される。量子力学の全てのことと同様に、ハイゼンベルクの不確定性原理によって、これら2つの量の不確定性の結果の境界は低くなる。スクイズド状態は、直交の一方における不確定性が、不確定性原理の範囲内で他方を犠牲にしてできた状態である。連続変数スキームでは、個々の粒子ではなく光ビームが量子力学情報を運び、電界の直交スクイズド状態はキュビットの“アップ”と“ダウン”状態に対応している。エンタングル状態は、50:50ビームスプリッターで直交スクイズド状態を結合することによって生成される。入力ビ

ームは、ビームスプリッターで同じ確率で、反射されるか、伝送されるかのいずれかである。入力ビーム間の相対位相を特に選択する場合、出て行く状態は2つの可能な結果の重ね合わせとなる、つまり① X-伝送されたスクイズド光、Y-反射されたスクイズド光、② X-反射されたスクイズド光、Y-伝送されたスクイズド光。このエンタングルした状態は、EPR状態と言われていることがよくある、これは先に言及したEPRパラドクスに倣ったものである。

### 東京レポートステーション

東京大学で古澤明教授のグループが、テレポーテーションの先駆的研究を実施した。特に、同グループがEPR状態のために開発したシステムは、離散量ではなく、連続的である。EPR状態と入力状態の両方に、光パラメトリック発振器(OPO)が光源として使用されている。個々のOPOは、Mスクエアレーザ社のSolsTiS出力を周波数通倍した青色光で励起されている。SolsTiSは、高出力CW Ti:Sレーザである。実験を成功させるためには、光源の強度ノイズが非常に低いことが不可欠である。エンタングル状態の光源では、キュビットのエンコードにフィールド・クワドラチャを用いるが、これとは対照的に入力状態は離散量、つまりフォトンでエンコードされる。時間的に離れた一対の光パルスが弱い励起のOPOから生じ、入力状態は連続パルス間の重ね合わせになる。交互に、シュレディンガーの猫の状態が伝送される。これは、疑似古典のコヒーレント状態の重ね合わせであり、シュレディンガーが思考実験で想像した状態のミクロ的状態に相当する。この思考実験では、マクロ的物体が重ね合わせ状態に置かれている。

テレポーテーションは3段階で行わ

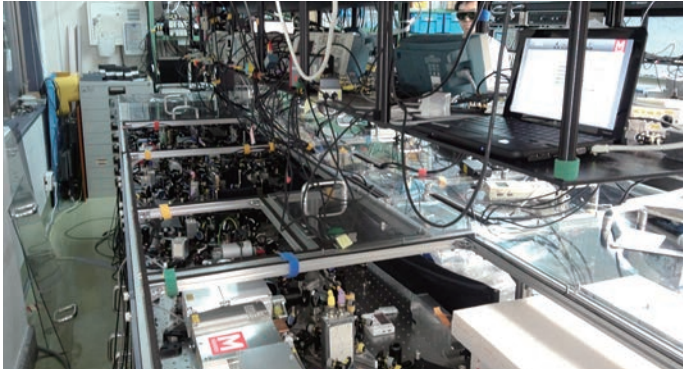


図4 古澤研究室のテレポーテーション装置

れる。まず、アリスが入力ビームと彼女のEPRビームを受け取り、これら2つのキュビットの結合状態を計測する。ボブが、古典的チャンネルを通してアリスの計測を受け取り、次に自分のEPRビームに対して操作を行い、入力状態を再構成する。最後に、出力状態を解析して伝送の忠実度を判断する。実験から、入力キュビット状態の広いサンプルでは、伝送忠実度は79~82%の範囲であることが示されている。後選択は行われておらず、古典的テレポーテーションが達成できる最大忠実度を上回っている。したがって、このテレポーテーションが、いずれも量子であり、無条件であることが示されている。さらに、東京大学のチームは、シュレディンガーの猫の状態の量子テレポーテーションを実証している。猫の状態は、普遍的な量子情報処理では重要であり、特に障害耐性のある伝送に有用なリソースとして重要であることが示されている。

シングルフォトンのテレポーテーションを実証する以前の実験は、2つの不利な状況に苦しんだ。低い計測効率とテレポートされたキュビットの破壊である。目的は、このスキームを成功させることにあった。連続変数テレポーテーションの強みは、エンタングル状態をオンデマンドで利用できることと、入

力と出力状態の完璧な評価にある。しかし、不完全なスクイズ現象により、忠実度が制約を受けている。ハイブリッドスキームを利用することで古澤教授と共同研究者は初めて、フォトニックキュビットの完全に決定論的な無条件の量子テレポーテーションを実証した。このハイブリッドスキームでは、連続変数エンタングルメントを用いて個別の可変キュビットをテレポートする。

フォトニックキュビットを伝送するには、テレポータはブロードバンドモードで操作する必要がある。10kHz~10MHzでOPO縮退からの周波数オフセットの範囲となる。これは、ナローバンド、シングル周波数オフセットで操作した従来のテレポーテーションスキームと比べると、技術課題は非常に大きい。技術的ノイズは、バランストディテクタを利用することで大幅に抑制できたが、この抑制は完璧ではなく、残留ノイズがまだ検出段階で入ってくる。また、ノイズはボブのシステムにも入ってくる。こちらでは、入力状態は、光ビームの位相と振幅に基づいて操作し読み出す。このため、装置に対する技術的要求は厳しい。特に、光の

ノイズ強度は、動作帯域全体にわたり、極端に低くなければならない。

### 超安定光源

上述のテレポーテーション実験では、レーザ光源の強度ノイズが可能な限り低く、研究者がショットノイズ限界に近いところで操作できることが重要である。従来のCW Ti:Sレーザは密閉されておらず、ボールとスプリングミラーマウントであるので、そのような厳しい要求は達成できない。Mスクエアレーザ社のエンジニアリングチームは、このような要求の厳しいアプリケーションに向けたレーザの開発で多数の経験を積んでおり、これらの要求を満たすようにCW Ti:Sレーザを再設計した。密閉されたハンズフリーのレーザキャビティをインバーのベースプレートに設置して安定性を高め、ボールとスプリングミラーマウントは、Invariant Tという独自の光学マウンティング技術で置き換えた。この画期的なアプローチの結果は、最高レベルの振幅安定性である。これは、要求されるパフォーマンスに制約された厳しいショットノイズを実現している。



図5 Mスクエアレーザ社製SolsTiS

### 著者紹介

スティーブン・ウェブスター (Dr Stephen Webster)はMスクエアレーザ社のサイエンティフィックプロダクトスペシャリスト、デイビッド・アームストロング(Dr David Armstrong)はマーケティングダイレクター。e-mail: stephen.webster@m2lasers.com URL: www.m2lasers.com