

# 量子インターネットに向けて

## Towards a quantum internet

東 浩司 Koji Azuma

NTT 物性科学基礎研究所, 〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

NTT Basic Research Laboratories, 3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi-shi, Kanagawa 243-0198, Japan

**Abstract** : A quantum internet, which is a quantum version of the current world-wide internet, is the Holy Grail of information processing allowed by laws of physics. In this article, we explain what is the quantum internet, why quantum repeaters are needed to realize it, and what kind of progress towards the quantum internet has been made recently.

**Keywords** : quantum internet, quantum repeaters, quantum computer

### はじめに

情報は物理系の状態によって表現され処理される。一方、物理系は物理法則に従う。したがって、情報処理の限界は物理法則によって決まるはずだ。これは、IBM フェローだったロルフ・ランダウアー (1927-99) が提唱した「Information is physical」に集約された概念だ<sup>1,2)</sup>。最も精巧な自然界の記述が量子力学とされる現代物理学において、この概念を意識するなら「情報処理の究極的な限界は量子力学によって決まる」ということになる。事実、これまでに情報処理の究極形として量子計算や量子通信が見出され、それらは、従来のコンピューターや通信では達成が困難な情報処理タスクを可能にすることがわかっている。このような背景を踏まえ、現在のインターネットが地球規模の最大のコンピューターネットワークであると捉えるならば、その量子版である「量子インターネット<sup>3,4)</sup>」は究極の情報処理ネットワークとなるはずである。したがって、やがて来る量子インターネットのポテンシャルを理解し、拡大し、それを実現することは、「自然界で許容される情報処理の限界は何か」という基本的な問いに答える意味でも重要な取り組みである。

本稿では、量子インターネットとは何か、実現には何が必要か、また実現に向けた最近の分野での取り組みについて解説する。

### 量子インターネットとは？

現在のインターネットの物理レイヤーは（サーバーや基地局、パソコン、スマートフォンなどの）情報処理ノードと、（光ファイバーや自由空間などの）通信路で構成され、結果として地球上の任意のクライアント間の通信を可能にしている。だとすれば、未来の量

子インターネットは、（量子コンピューターや量子中継などの）量子情報処理ノードと（光ファイバーや自由空間などの）量子通信路から構成され、結果として地球上の任意のクライアントの様々な量子情報処理タスクの実行を可能にするはずである。実際、このような量子インターネットは、現在のインターネットの粋を超えた様々な応用を持つ<sup>3,4)</sup>。例えば、それはネットワーク上の任意のユーザーに、ネットワーク上で生じ得る任意の（万能量子コンピューターに基づくような）盗聴行為に対しても安全な「量子」暗号通信<sup>5)</sup>を提供する。この極めて高い安全性を持つ暗号通信は、国民投票や首脳会談、金融取引、遺伝情報や生体情報のやり取りを可能にする。また、量子インターネットは、量子テレポーテーション<sup>6)</sup>によって、未知の量子系の情報を遠く離れた人に光速で、忠実に転送することも可能にする。これは、分散型量子計算<sup>7)</sup>、クラウド量子計算<sup>8,9)</sup>、あるいは量子コンピューターネットワーク構築の基礎となる。また量子インターネットは、現存する最も高い精度の時計である原子時計を正確かつ秘密裏に同期することにも利用でき、安定で正確で安全な1つの世界時計の世界規模での共有を可能にし、高精度のナビゲーションシステムへの応用も期待できる<sup>10)</sup>。ほかにも、望遠鏡アレイの長基線化を可能にするため、天文学の発展にも貢献する<sup>11)</sup>。

このような多岐にわたる応用を持つ量子インターネットの構築は世界的競争化にある研究で、欧州ではこの研究に特化したプロジェクトに50億円規模の研究費が充てられ、中国は量子通信専用の衛星<sup>12)</sup>までも打ち上げ、米国は「アメリカファースト」を掲げ、国家量子イニシアティブと題して、量子情報技術全般に対し、2021年度740億円規模の予算計上をしており、その内の約26億円がエネルギー省主管の量子インターネット研究プロジェクトへの予算のようだ。日本でも量子暗号ネットワークの大規模化を目指し、総務省

が「グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」に2020年度に約14億円の予算を準備している。また2019年、日本では研究開発推進団体「量子インターネットタスクフォース」が立ち上げられた。

## 量子インターネットを構築するには？

では、どのように量子インターネットを構築すれば良いのか？ 量子インターネットの役割は、クライアントに対し、「量子もつれ」を効率的に配布することである。量子もつれは、原子や光子などの量子系でしか表現されず、古典力学や従来の情報理論の枠組みでは説明ができない奇妙な相関のことである。この量子もつれは元々、アインシュタイン、ポドルスキー、ローゼンによって、量子力学が局所实在論と相容れない予想を含むことを指摘する際に利用された状態で、ある意味、量子力学の正当性を批判するために引き合いに出された<sup>13)</sup>。しかし、皮肉なことに、結果的には量子もつれの存在は実験で再三確認され、現在では、その量子もつれは、量子通信だけでなく、量子計算の実行をも可能にする万能リソースとして知られている。したがって、そのようなリソースとしての量子もつれを効率的に配ることで、量子インターネットはクライアントに様々な機能を提供することを目指すことになる。

では、量子もつれ分配を可能にする物理レイヤーはどのように構成すべきだろうか。光子はコヒーレンスを保ったまま光ファイバー中を伝搬する。そのため、光ファイバーは、光子が持つ量子情報を遠距離に運ぶ量子通信路の役を担うことができる。光ファイバーがすでに世界中に施設されている現状を踏まえると、光ファイバーネットワークは量子インターネットを支える物理レイヤーの候補に違いない。実際、光ファイバーはこれまでも、送受信者間での光子の直接伝送に基づくポイント・ツー・ポイント量子通信に利用され、その通信距離の世界記録は既に400 kmに達している。しかしながら、この記録は、この方式の通信距離の限界にほぼ達しているとされる。その原因には、光ファイバーの透過率がファイバーの長さに対して指数関数的に減少することが挙げられる。より具体的には、送信者が発した量子情報が埋め込まれた単一光子レベルの光が受信者に検出される確率は、標準的な光ファイバーの透過率を考慮するだけで、50 kmで約10%、100 kmで約1%、150 kmで約0.1%というように、50 kmごとに約0.1倍となっていく。したがって、たとえ1 GHzクロックで動作するシステムであったとしても、1,000 kmの光ファイバーを通じてポイント・ツー・ポイントの量子通信を行う場合、送受信者が1単位サイズの量子もつれを得るのに必要な時間の期待値は

100年オーダーとなり、これはまったく現実的ではない。このことは、光ファイバーに基づくポイント・ツー・ポイント量子通信の限界の存在を示唆し、その方法だけでは、地球規模の量子インターネットは達成できないことを意味する。それでは、どのようにして光ファイバーネットワークを利用して量子インターネットを実現するのか。その答えは、従来の中継技術を量子中継<sup>14-16)</sup>に切り替えることにある。

## 量子中継の必然性

従来の通信であっても、光ファイバーの損失に抗して長距離通信を行う際には、中継技術が必要である。ここで、各々の中継器の役割は、光ファイバーで減衰した信号を増幅することにある。しかしながら、この原理は量子中継では使えない。なぜなら、ビットで表せる情報と異なり、量子ビットでしか表せない量子情報は原理的にすら増幅ができないからだ（ノークローニング定理<sup>17)</sup>）。その代わりとして、量子中継は、送受信者間に量子中継器を（必要に応じて複数）配置し、光ファイバーで結ばれた最近接中継地点間で量子もつれを生成することから開始する。それらの最近接中継器を結ぶ量子もつれは、量子中継器による量子もつれスワッピングという操作によって、送受信者間の量子通信のリソースである量子もつれへと変換される。この非直接的な量子もつれ供給は、ポイント・ツー・ポイントの量子通信方式に比べ、量子中継器の数に対して指数関数的な効率改善が得られる（原理は後述）。なぜなら、量子中継方式では、量子情報を有する光子のやり取りが、送受信者間ではなく、最近接中継器のみで行われ、使用する光ファイバーの長さは送受信者間ではなく、最近接中継器間となるからだ。したがって、量子中継器を開発することが重要である。

量子中継の必要性は、損失光通信路ネットワークの量子通信容量や秘匿通信容量に関する最近の理論的進展からも、より根源的なレベルで明らかにされている。ここで損失光通信路とは、光ファイバーの理論モデルに相当する。量子（秘匿）通信容量は、量子力学が許す任意の操作を用い、与えられた通信路の使用回数当たりで得られる量子もつれ（秘密鍵）のサイズの最大値、すなわち通信効率の量子力学的限界を指す。このような量子（秘匿）通信容量自体を導出することはおろか、それに対する意味ある上界を導くことすら一般には容易でない。しかしながら、近年、実用上最も興味ある損失光通信路（すなわち光ファイバー）のポイント・ツー・ポイント量子通信に対する、量子（秘匿）通信容量の上界が導出された<sup>18,19)</sup>。そしてその上界は、損失光通信路の透過率が小さい場合には、その透過率に比例する。もともと、ポイント・ツー・ポイント量

量子通信の既存方式の通信効率、光ファイバーの透過率に比例しており、これら達成可能な通信効率とその上界の間には、スケーリングギャップが存在しないと結論付けられた。これは、ポイント・ツー・ポイント量子通信の枠組みである限り、いくら量子情報のエンコーディングやデコーディングの方法を工夫しようとも、既存方式の通信効率を大きく上回る方式は存在しないことを意味する。その後、それらのポイント・ツー・ポイント量子通信に対する上界は、損失光通信路で構成された任意のネットワーク上での2者間通信に対するものへと一般化された<sup>20,21)</sup>。その後まもなく、ネットワーク上の送受信者間で、並列に量子中継方式を走らせる並列化量子中継方式が提案され、この方式の効率がその上界とスケーリングギャップを持たないことが示された<sup>22)</sup>。これは、任意のネットワーク上で量子通信を行う場合においても、量子中継方式が基本であり、効率という観点では、並列化量子中継方式を走らせることが理論的に最適な選択であることが示された。したがって、純粋に理論的な観点からしても、量子インターネットの実現には、量子中継を利用することが必然であることが明らかとなった。

### 量子中継の原理

では、量子インターネット実現に必要なとされる量子中継の原理はどういったものだろうか。量子中継方式は、一般に量子もつれ生成、量子もつれ蒸留、量子もつれスワッピングの3つの操作からなる。量子もつれ生成は、最近接中継地点間で、光ファイバーなどの通信路を通じ、光パルスをやり取りすることで、最近接中継地点を結ぶ量子もつれを供給する操作である。量子もつれ蒸留は、現実的なデバイスの雑音の影響などにより、共有した量子もつれが弱くなってしまう場合

に利用される操作で、基本的には複数の弱くなった量子もつれから、少数の強さが回復した量子もつれを得る操作である。一般に、ある量子中継器  $X$  の立場からすれば、量子もつれ生成と量子もつれ蒸留を通じて、ある時点で、ある確率で、左隣のある地点  $L$  と右隣のある地点  $R$ （これらは最近接中継地点とは限らず、遠く離れた中継地点や送受信者かもしれないと見立ててほしい）の間で、非常に高い忠実度の（強い）量子もつれ対が共有される（図1a：図中で量子もつれは球を結ぶ線で表されている）。ここから量子中継器  $X$  は、量子もつれスワッピングを利用する。量子もつれスワッピングとは、自分が持つ、 $L$  と  $X$  を結ぶ1対の量子もつれの片割れ（例えば図1aの  $x_{L1}$ ）と、 $X$  と  $R$  を結ぶ1対の量子もつれの片割れ（例えば図1aの  $x_{R2}$ ）に対してベル測定を施すことで、それらの2対の量子もつれを、 $L$  と  $R$  を結ぶ1対の量子もつれ（図1d）に変換する操作である。ただし、この量子もつれスワッピングは、 $L$  と  $X$  を結ぶ量子もつれと、 $X$  と  $R$  を結ぶ量子もつれの両方が存在する時のみ成功する。したがって、量子中継器  $X$  は、量子もつれが地点  $L$  と地点  $R$  との間で共有されたことを確認した上でベル測定を施すことが肝心で、このようなベル測定は特に「適応ベル測定」と呼ばれる。同様な操作をすべての量子中継器が行うことで最終的には、送受信者を結ぶ量子もつれが供給されるという筋書きである。

ここで量子中継器  $X$  が  $L$  と  $R$  を結ぶ量子もつれを供給するまでに要するリソースを考える。左隣の地点  $L$ （右隣の地点  $R$ ）と量子中継器  $X$  の間で、（量子もつれ生成、蒸留、スワッピングから成る）ある操作  $O_{LX}$ （操作  $O_{XR}$ ）を行い、この操作が成功して、地点  $L$ （地点  $R$ ）と  $X$  を結ぶ量子もつれが供給される確率を  $p_{LX}$ （ $p_{XR}$ ）と仮定する。ここで、地点  $L$  と量子中継器  $X$  の間で、独立に実行できる操作  $O_{LX}$  を、1/

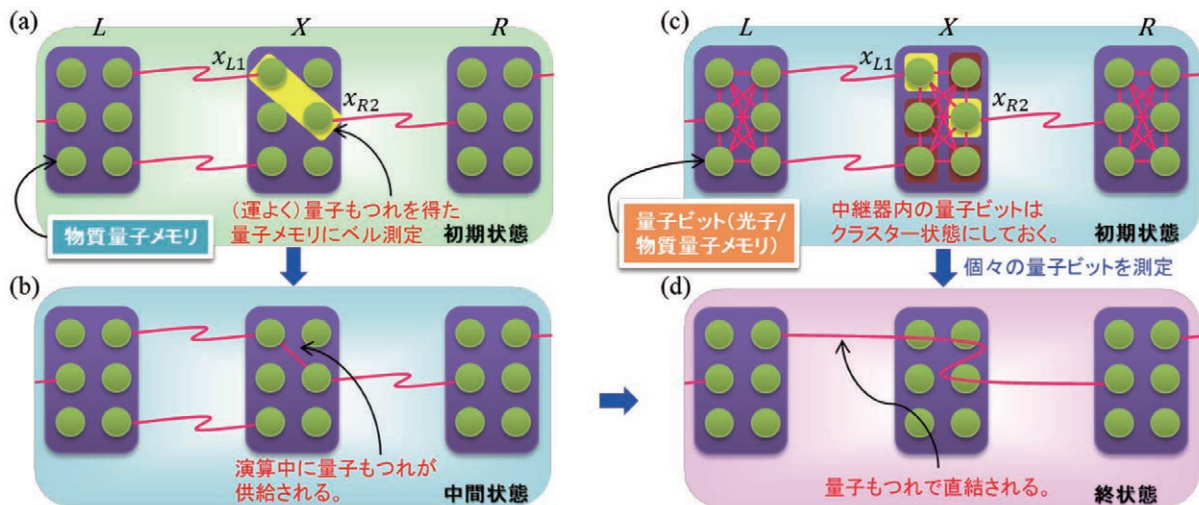


図1 量子中継器の役割

$p_{LX}$  オーダー多重化することで、その操作の完了後には、ほぼ常に、 $L$  と  $X$  を結ぶ量子もつれが少なくとも 1 対は供給される。同様にして、地点  $R$  と量子中継器  $X$  の間においても、操作  $O_{XR}$  を  $1/p_{XR}$  オーダー多重化することで、ほぼ常に  $X$  と  $R$  を結ぶ量子もつれが少なくとも 1 対は供給されるはずだ。あとは、量子中継器  $X$  が適応ベル測定を行えば良いだけで、量子中継器  $X$  が地点  $L$  と  $R$  を結ぶ量子もつれを供給するために要するリソースは、 $1/p_{LX} + 1/p_{XR} = (p_{LX} + p_{XR}) (p_{LX} p_{XR})^{-1}$  オーダーとなる。一方で、もし量子中継器  $X$  が先述の量子中継の処方箋に従わず、上記の操作を地点  $L$  と地点  $R$  で行い、操作  $O_{LX}$  と  $O_{XR}$  の成功、失敗にかかわらず自分が持つ系に対してベル測定を行うと、 $L$  と  $R$  を結ぶ量子もつれが供給される確率は  $p_{LX} p_{XR}$  であり、必要なリソースは  $(p_{LX} p_{XR})^{-1}$  オーダーとなる。つまり、量子中継器  $X$  が、量子中継の処方箋に従ってきちんと適応ベル測定を行うことで、必要なリソースは  $(p_{LX} + p_{XR})$  倍と削減される。より直感的な場合として、対称性  $p_{LX} = p_{XR}$  がある場合を考えれば、この必要なリソース改善は約 1/2 乗にもなる。これは、地点  $L$  と  $R$  に量子もつれを配る際に、量子中継器  $X$  を真ん中に 1 つ置くだけで、その通信効率は約 2 乗だけ改善されることを意味する。この考えを進め、 $LX$  間、 $XR$  間各々の間に、さらに量子中継器を配置すれば、通信効率はさらに約 2 乗改善する。また、新たに生じた間隙に量子中継器を配置し……、という具合に自己相似的に量子中継器を増やしていけば、通信効率はその中継器の数に対して指数関数的に改善していくことになる。

## 量子中継の要素

量子中継器  $X$  がもたらす効率改善を得るために、

必要な要素は何だろうか。先述した通り、量子中継方式は、一般に量子もつれ生成、量子もつれ蒸留、量子もつれスワッピングの 3 つの操作を必要とする。しかしながら、上記の効率改善は、1) 地点  $L$  と  $X$  の間で量子もつれを得るための操作  $O_{LX}$  と、地点  $R$  と  $X$  の間で量子もつれを得るための操作  $O_{XR}$  が独立かつ並行に行われることと、2) 適応ベル測定が実行されるという 2 つの仮定だけから導かれている。したがって、この 2 点を満足することが、実装方法に依らず、量子中継方式への最低限の要請となる。

要請 1) と 2) を簡単に満足する方法の 1 つが、(原子や量子ドット、ダイヤモンド中の NV 中心などの) 物質量子メモリの存在を仮定することである。もう少し正確に言えば、量子中継器  $X$  は、地点  $L$  と  $X$  の間で得られる量子もつれを格納する物質量子メモリ (図 1a において量子中継器  $X$  が持つ系のうち左側のもの) と、地点  $X$  と  $R$  の間で得られる量子もつれを格納する物質量子メモリ (図 1a において量子中継器  $X$  が持つ系のうち右側のもの) を分けて準備する。この場合、地点  $L$  と  $X$  の間の操作  $O_{LX}$  と地点  $R$  と  $X$  の間の操作  $O_{XR}$  を同時に行い、所望の量子もつれが得られた際には、それらを各々の物質量子メモリで保持することができるため、それらの操作は独立かつ並行に行える。加えて、量子中継器  $X$  が持つ任意の物質量子メモリ間でのベル測定が可能であるならば、適応ベル測定も実行できることになる。事実、量子中継は、そもそもこのような物質量子メモリの存在を想定し導入され<sup>14)</sup>、その後提案された様々な量子中継方式も物質量子メモリの存在の上に成立している<sup>15,16)</sup>。

しかしながら、近年になって、物質量子メモリを使わずに、上記の要請 1) と 2) を満たすアイデアが導入された<sup>23)</sup>。それは、クラスター状態<sup>24)</sup>と呼ばれる特殊な量子もつれ状態が可能にする「時間反転」を利

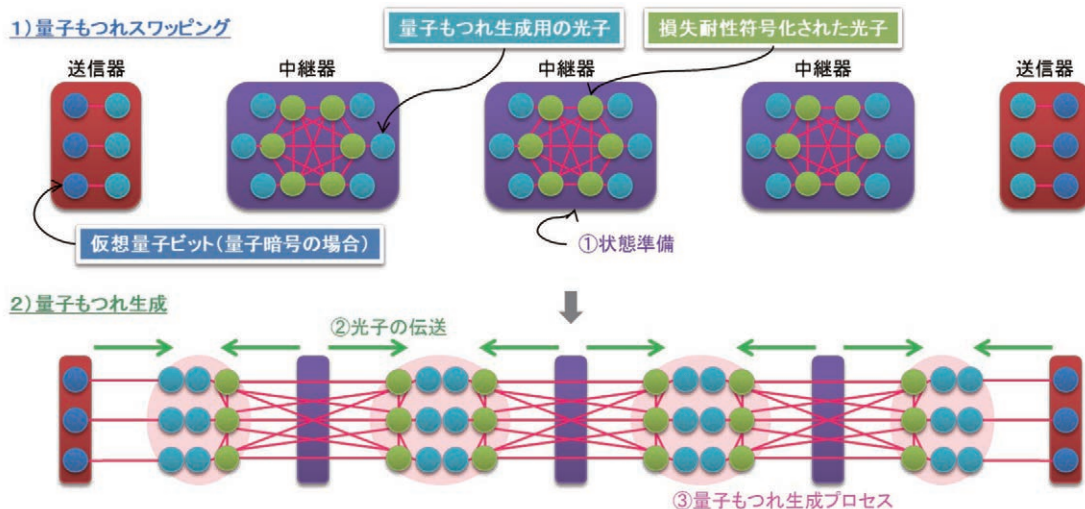


図 2 全光量子中継

用する方法だ。時間反転のアイデアを導入するために、まず従来の量子中継におけるベル測定の役割を見直す(図1a)。ベル測定は理論的には、測定対象(図1の例の場合は $x_{L1}$ と $x_{R2}$ )に量子もつれを与え(図1b)、その後、測定対象の個々の系をある適切な基底 $\sigma_x$ で測定する。言い換えれば、もし測定対象が最初から量子もつれを共有していたなら、個々の系に対する1量子ビット測定を行うだけで、ベル測定と同じ効果が得られる。この論理の置き換えは単純だが大事である。なぜなら、現実的にはベル測定のような2量子ビット演算が確率的にしか成功しない系は多く、一方で個々の系に対する1量子ビット測定は大抵の系において確率1で成功するからだ。このような系の典型例が光子系だ。そこで、時間反転方式では、量子中継器Xは、自分が持つ系を、完全グラフに相当するクラスター状態(Greenberger-Horne-Zeilinger [GHZ] 状態と等価)に準備するところから方式を始める(図1c)。なぜなら、一般にクラスター状態を準備するだけなら、たとえ2量子ビット演算が確率的にしか機能しない系であっても、効率的な生成が可能だからだ<sup>23)</sup>。そして状態生成の後、量子中継器Xは、自分が持つ系の中から、左隣の地点Lと量子もつれを共有した系と、右隣の地点Rと量子もつれを共有した系を選び抜き、それらの系を基底 $\sigma_x$ で測定し、それ以外の系についてはそれと相補的な基底 $\sigma_z$ で測定する。すると、クラスター状態の性質により基底 $\sigma_z$ で測定された系は他の系から完全に切り離され、結果的に適応ベル測定が適切に施された場合とまったく同じ状況が得られる(図1d)。

## 全光量子中継

前項で従来方式に基づく量子中継器も、時間反転方式に基づく量子中継器も等価な働きをすることを見た。ここでは、時間反転方式によって初めて可能になった全光量子中継方式<sup>23)</sup>を紹介しよう。この方式は送信中継器と受信中継器を利用する。送信中継器は、時間反転方式に倣い、クラスター状態にある光子を準備する。ただし、ここでは完全グラフに相当する光子(図2の緑色の球)には損失下でも1量子ビット測定が確率1で成功するように符号化を施し、またそれらの光子に量子もつれを供給用の光子(図2の水色の球)を付加する。そして、送信中継器は準備した光子を両隣の受信中継器に光ファイバーを通じて送信する。光子を両隣から受け取った受信中継器は、まず量子もつれ供給用の光子に対してベル測定を行い、加えて、その結果に応じた基底で、符号化された光子に対し1量子ビット測定を行う。全光量子中継方式はこのようにして、距離に依らない高い確率で、両端にいる送受信者に量子もつれを供給する。

この方式は、時間反転方式の「2量子ビット演算が確率的でも動作する」という利点と、光子が飛行量子ビットであるという点を利用しており、結果として、この全光量子中継方式は、線形光学素子、単一光子源、光子検出器、アクティブフィードフォワード技術だけで実装可能となっている。そして、物質量子メモリを利用せずに済むことによる様々な利点が生じる。例えば、通信レートが通信距離に依存せず、高速な量子インターネットが実現できること、物質と光のインターフェースが不要であること、要素技術である光デバイス全てが原理検証済みなこと、原理的には常温動作すること、同種の全光量子コンピューター<sup>25)</sup>より実現が容易で、その実現への確実なマイルストーンであることなどが挙げられる。また、従来の通信分野においても「通信の低消費電力化」と「通信速度の高速化」に動機付けられ、光デバイスのみに基づく「全光ネットワーク」の実現を目指す流れが存在する。全光量子中継方式は、これらの流れに「量子インターネット」という質的に新しい究極的な将来像を付与するという点でも価値がある。

## 最後に

本稿では、量子インターネットについて、その実現の要素である量子中継、またその実装方法について解説した。量子インターネットの通信容量については、本稿で触れた以上に近年、著しく理解が進んできている<sup>26)</sup>。また、現状で実用化段階にあるポイント・ツー・ポイント量子暗号通信と、量子インターネット実現に不可欠な量子中継との、技術・概念的間隙を埋める方式の探索と実装は、量子暗号分野の1つの大きなトレンドとなっている<sup>27-30)</sup>。また、従来の物質量子メモリに基づく量子中継に比べて歴史が浅い全光量子中継をより実用的なものとするために、全光方式で必要とされる光子のクラスター状態を、量子ドットから直接放出する方法<sup>31)</sup>や、あえて物質量子ビットをインター



図3 全光量子中継の最初の原理検証実験

フェースとして利用する方法<sup>32)</sup>なども提案されている。さらには昨年、全光量子中継方式における時間反転型の適応ベル測定について、パラメトリック下方変換と線形光学素子を通じて生成された GHZ 状態に基づき、日本とカナダの研究チーム（図3は大阪大学の実験セットアップ）と、中国の研究チームが独立に原理検証実験の成功を報告している<sup>33,34)</sup>。

量子インターネット実現への旅路は、まだ序章に過ぎない。ただ、今後も量子インターネットの潜在能力への理解は進んでいくだろうし、その魅力的な応用も広がっていくことだろう。また、その実現に向けた取り組みを通じ、技術的なブレイクスルーやそれに伴う副産物も生まれていくだろうし、まったく違う目的で開発された技術が量子インターネット実現に資する可能性さえある。そして私たちは、知らず知らずのうちに量子インターネット実現に向けて貢献していく。なぜなら、量子インターネットは、物理法則が許容する情報処理の究極形なのだから。

## 謝辞

本稿は CREST, JST JP-MJCR1671 や PREST, JST JP-MJPR1861 の補助を受けて実施した研究成果も含む。また、図3の全光量子中継の実証実験のセットアップの写真は、大阪大学大学院基礎工学研究科の山本俊教授からご提供いただいた。この場を借りて感謝する。

## 【参考文献】

- Landauer, R.: "Information is physicsl," *Phys. Today*, 44 (1991) 23-29.
- 古田彩: "二人の悪魔と多数の宇宙: 量子コンピュータの起源," *日本物理学会誌*, 59 (2004) 512-519.
- Kimble, H. J.: "The quantum internet," *Nature*, 453 (2008) 1023-1030.
- Wehner, S., et al.: "Quantum internet: A vision for the road ahead," *Science*, 362 (2018) 6412.
- Lo, H.-K., et al.: "Secure quantum key distribution," *Nat. Photon.*, 8 (2014) 595-604.
- Bennett, C. H., et al.: "Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels," *Phys. Rev. Lett.*, 70 (1993) 1895-1898.
- Buhrman, H. and Röhrig, H.: "Distributed quantum computing," Rovan, B., Vojtáš, P. (eds) *Mathematical Foundations of Computer Science 2003 (MFCS 2003)*, Lecture Notes in Computer Science 2747, 1-20 (Springer, Berlin, Heidelberg).
- Broadbent, A., et al.: "Universal blind quantum computation," *Proc. Of the 50th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS' 09)*, 517-526 (IEEE Computer Society, 2009).
- Aharonov, D., et al.: "Interactive proofs for quantum computations," *Proc. of Innovations in Computer Science (Beijing)*, 453-469 (Tsinghua University Press, 2010).
- Kómár, P., et al.: "A quantum network of clocks," *Nat. Phys.*, 10 (2014) 582.
- Gottesman, D., et al.: "Longer-baseline telescopes using quantum repeaters," *Phys. Rev. Lett.*, 109 (2012) 070503.
- Yin J., et al.: "Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers," *Science*, 356 (2017) 1140-1144.
- Einstein, A., et al.: "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?," *Phys. Rev.*, 47 (1935) 77.
- Briegel, H. J., et al.: "Quantum repeaters: the role of imperfect local operations in quantum communication," *Phys. Rev. Lett.*, 81 (1998) 5932-5935.
- Sangouard, N., et al.: "Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics," *Rev. Mod. Phys.*, 83 (2011) 33-80.
- Munro, W. J., et al.: "Inside quantum repeaters," *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron* 21 (2015) 6400813.
- Wootters, W. K. and Zurek, W. H.: "A single quantum cannot be cloned," *Nature*, 299 (1982) 802-803.
- Takeoka, M., et al.: "Fundamental rate-loss tradeoff for optical quantum key distribution," *Nat. Commun.*, 5 (2014) 5235.
- Pirandola, S., et al.: "Fundamental limits of repeaterless quantum communications," *Nat. Commun.*, 8 (2017) 15043.
- Azuma, K., et al.: "Fundamental rate-loss trade-off for the quantum internet," *Nat. Commun.*, 7 (2016) 13523.
- Pirandola, S.: "Capacities of repeater-assisted quantum communications," Preprint at <http://arxiv.org/abs/1601.00966> (2016).
- Azuma, K. and Kato G.: "Aggregating quantum repeaters for the quantum internet," *Phys. Rev. A*, 96 (2017) 032332.
- Azuma, K., et al.: "All-photon quantum repeaters," *Nat. Commun.*, 6 (2015) 6787.
- Raussendorf, R. and Briegel H. J.: "A one-way quantum computer," *Phys. Rev. Lett.*, 86 (2000) 5188-5191.
- Knill, E., et al.: "A scheme for efficient quantum computation with linear optics," *Nature*, 409 (2001) 46-52.
- Azuma K., et al.: "Tools for quantum network design," under the review at AVS Quant. Sci.
- Abruzzo, S., et al.: "Measurement-device-independent quantum key distribution with quantum memories," *Phys. Rev. A*, 89 (2014) 012301.
- Panayi, C., et al.: "Memory-assisted measurement-device-independent quantum key distribution," *New J. Phys.*, 16 (2014) 043005.
- Azuma, K., et al.: "All-photon quantum key distribution," *Nat. Commun.*, 6 (2015) 10171.
- Lucamarini, M., et al.: "Overcoming the rate-distance limit of quantum key distribution without quantum repeaters," *Nature*, 557 (2018) 400-403.
- Buterakos, D., et al.: "Deterministic generation of all-photon quantum repeaters from solid-state emitters," *Phys. Rev. X*, 7 (2017) 041023.
- Borregaard, J., et al.: "One-way quantum repeater based on near-deterministic photon-emitter interfaces," *Phys. Rev. X*, 10 (2020) 021071.
- Hasegawa, Y., et al.: "Experimental time-reversed adaptive Bell measurement towards all-photon quantum repeaters," *Nat. Commun.*, 10 (2019) 378.
- Li, Z.-D., et al.: "Experimental quantum repeater without quantum memory," *Nat. Photon.*, 13 (2019) 644-648.