

量子インターネットの研究開発の方向性について

堀切 智之

(横浜国立大学/LQUOM株式会社)

- 量子暗号通信や量子コンピュータを接続できる量子インターネット等を含む将来技術の研究開発・導入ロードマップはどうあるべきか
 - 量子インターネットとは（物理層中心に）
 - マイルストーン
 - 各国の研究開発動向
 - 研究開発課題、特に量子中継技術
 - LQUOMの取組み

堀切 智之

1978年 東京都生まれ (43歳)

2002年 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 小林孝嘉研

2007年 東京大学理学系研究科物理学専攻 博士 (理学)

(量子コンピュータを作りたいかったが、博士号は量子通信 (量子暗号) の研究で取得)

2006 - 2008年 日本学術振興会特別研究員

2007 - 2014年 国立情報学研究所 特任研究員

(2007 - 2011、2013 - 2014 スタンフォード大学客員研究員)

2014年 - 横浜国立大学 准教授

2019年 - 量子インターネットタスクフォース ボードメンバー

2020年 - LQUOM株式会社創業

長距離量子通信におけた量子技術研究を推進中

→量子計算、量子暗号の基盤たる量子インターネットへ



量子インターネットとは？

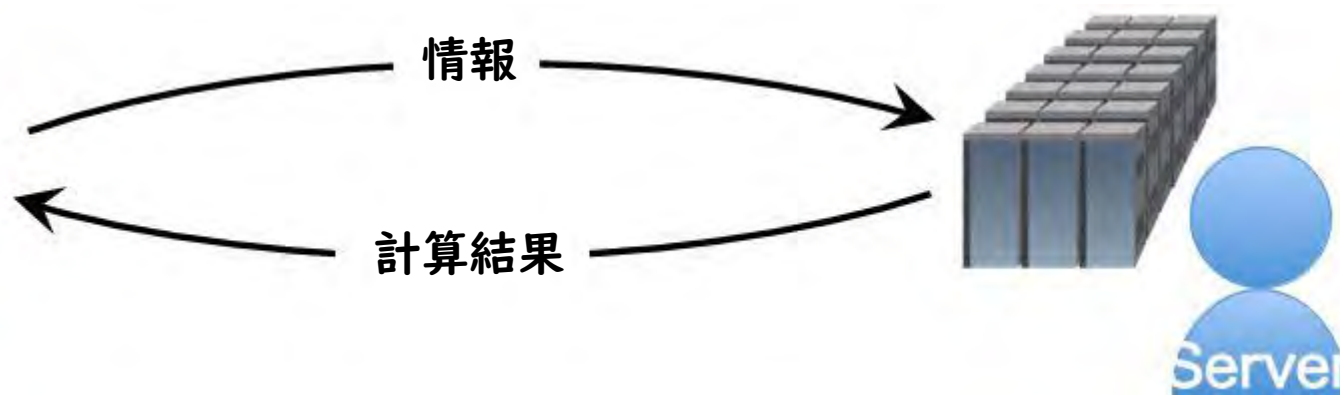
量子状態（量子ビット）を送受信する量子通信路の集合体

量子インターネットアプリケーションの例

①量子暗号（量子鍵配送）

②量子計算

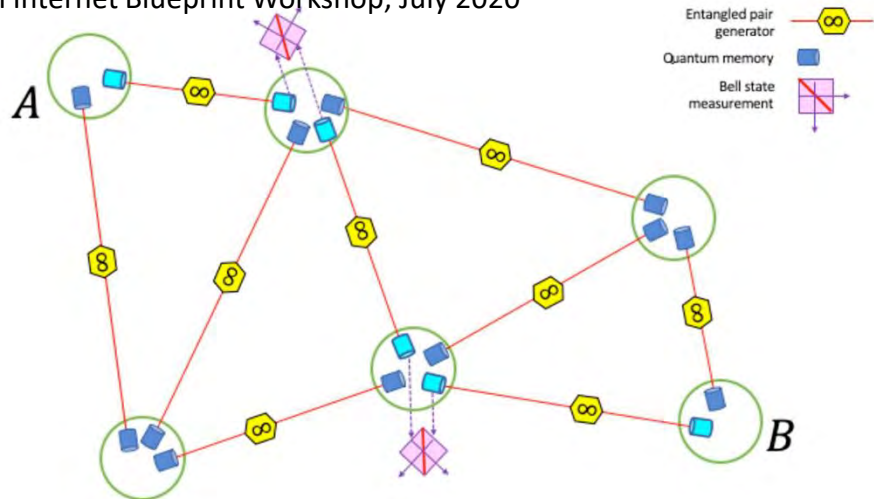
- ・分散量子計算
- ・ブラインド量子計算



量子インターネット構築には： 量子状態転送能力光ファイバー量子通信

米国の量子インターネット計画

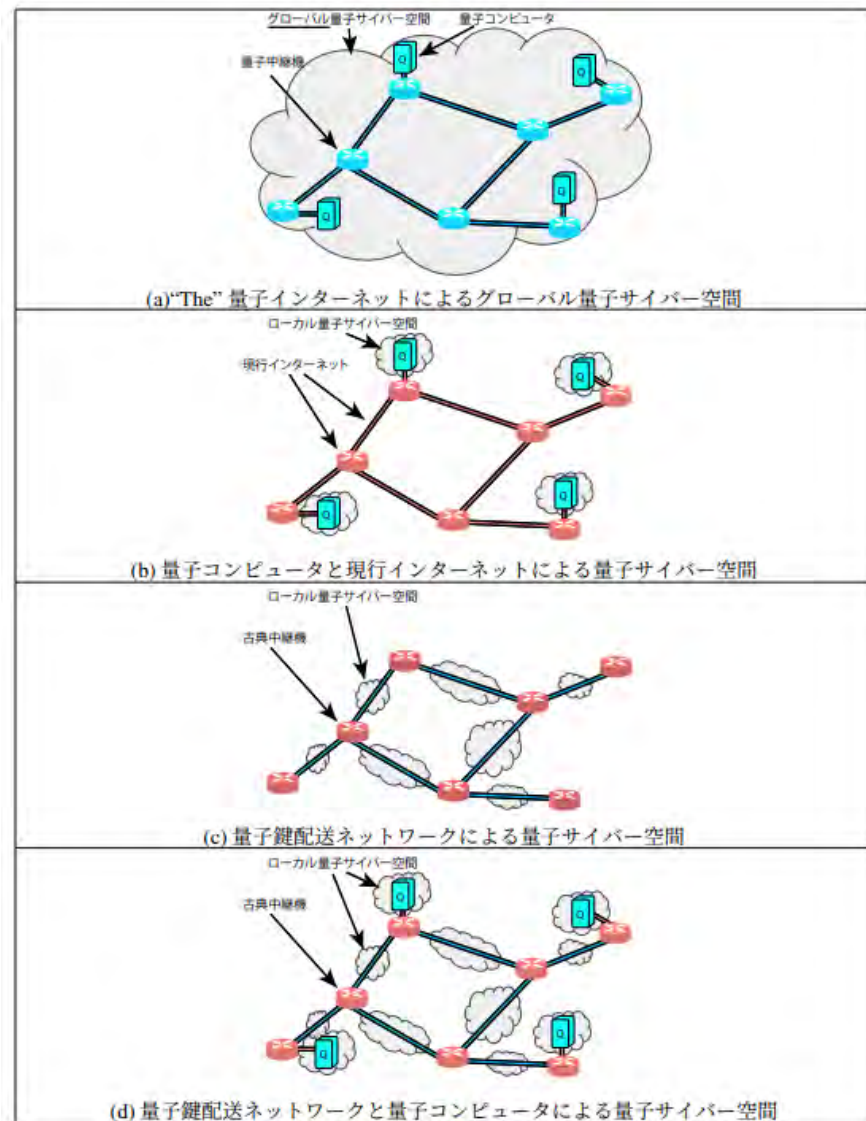
Long-distance Entanglement to Building a Nationwide Quantum Internet: Report of the DOE Quantum Internet Blueprint Workshop, July 2020



長距離化が困難。光ファイバーは0.2dB/km程度の減衰をもつ。光強度 $\sim 1/100$ @100km

量子インターネットへの大障壁

→物理層における長距離伝送の困難
量子中継技術開発が必要。



光ファイバーベース量子インターネットへの発展段階 (QITFホワイトペーパーより)

人工衛星量子通信：世界の研究開発状況

中国、Jiang-Wei Panグループ

Science356, 1140 (2017), Nature 589, 214 (2021)など

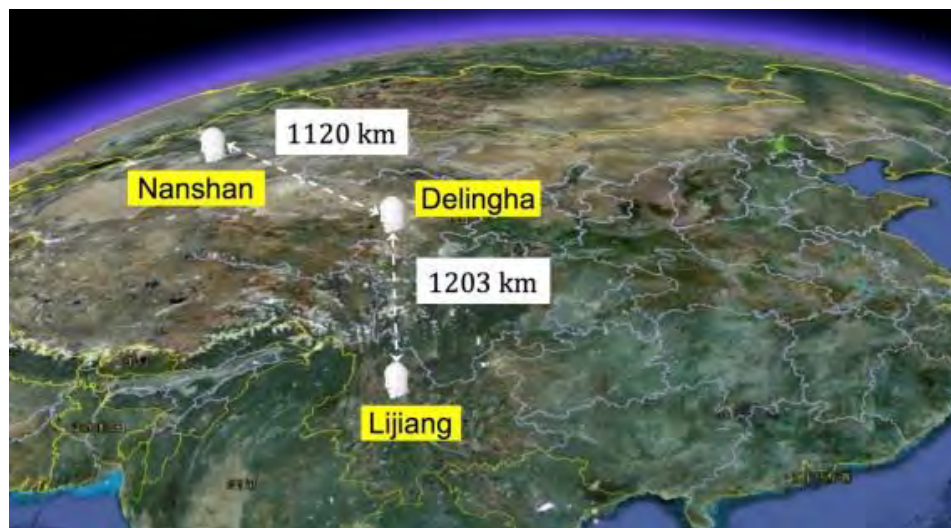
中国、世界初の量子通信衛星を軌道に

「盗聴不能な技術」へ大躍進

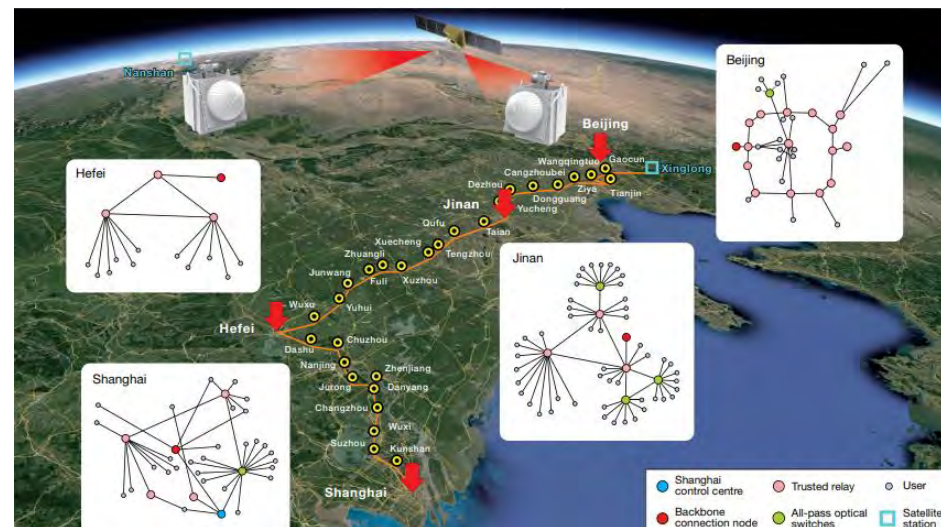


中国が打ち上げた世界初の量子通信衛星（英語音声、英語字幕あり）Photo/Video: CCTV

人工衛星→地上2地点 (>1200km)量子もつれ配送



人工衛星+地上QKDネットワーク
(trusted nodes): 全長4600 km以上



人工衛星＋光ファイバー量子通信：

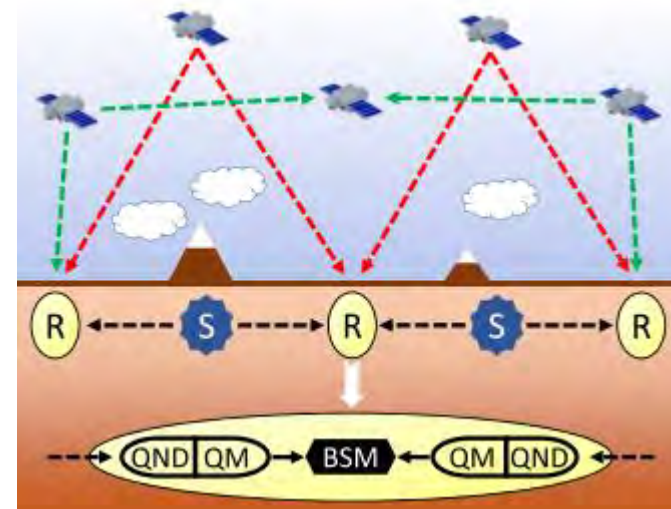
人工衛星が量子中継ステーションの役を果たす

実現性研究論文

New. J. Phys. 23, 053021 (2021)

Phys. Rev. A 91, 052325 (2015)

white paper: arXiv:2111.09595 (2021)

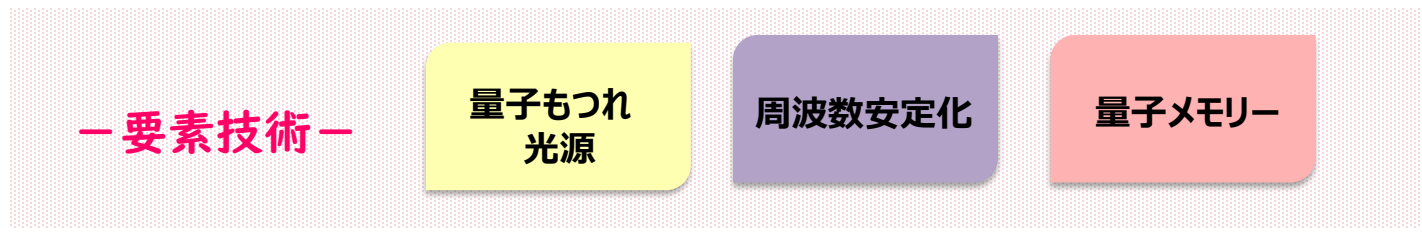
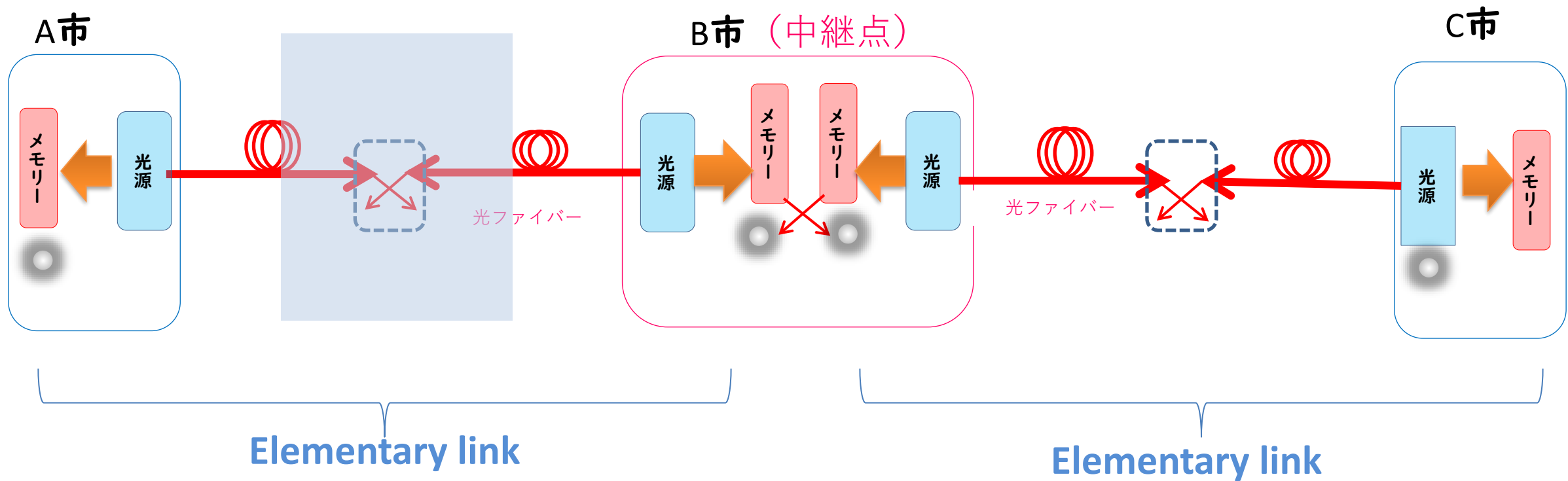


| 量子インターネットへ向けた物理層開発のマイルストーン

1. 光のみもつれ交換
2. 量子メモリ間もつれ共有 (elementary link)
3. 中継実証

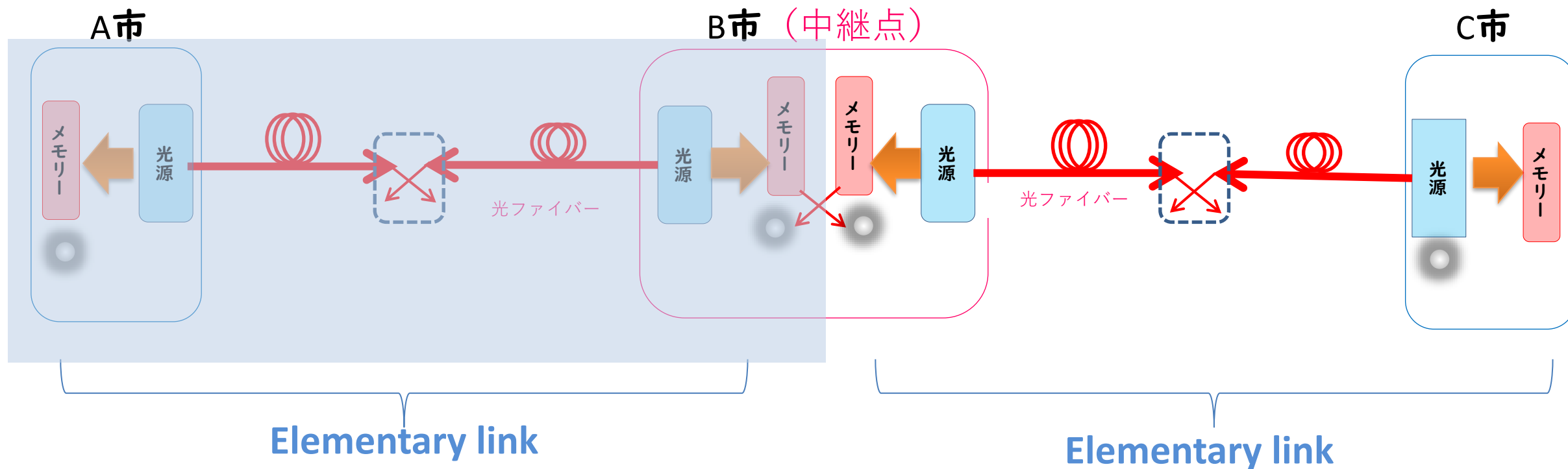
量子中継に向けた物理層の技術開発とマイルストーン

1. 光のみもつれ交換 (ラボ内。フィールドファイバーでも複数例有り。中継を見据えた光のみもつれ交換の実証は重要)



量子中継に向けた物理層の技術開発とマイルストーン

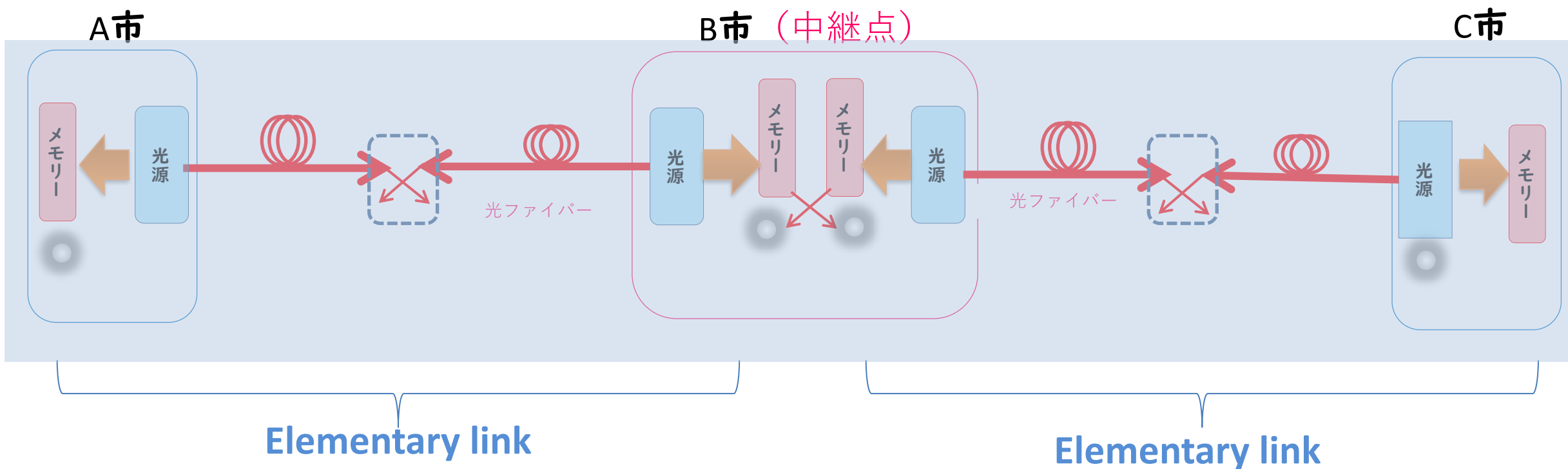
2. 量子メモリ間もつれ共有 (elementary link) 複数物理系で原理実証されている (低通信レート) → 多重化などによる高レート化 (<~5年)



量子中継に向けた物理層の技術開発とマイルストーン

3. 中継実証

フィールド環境における1ないし2中継ノードでの実証 (<5~10年)



— 要素技術 —

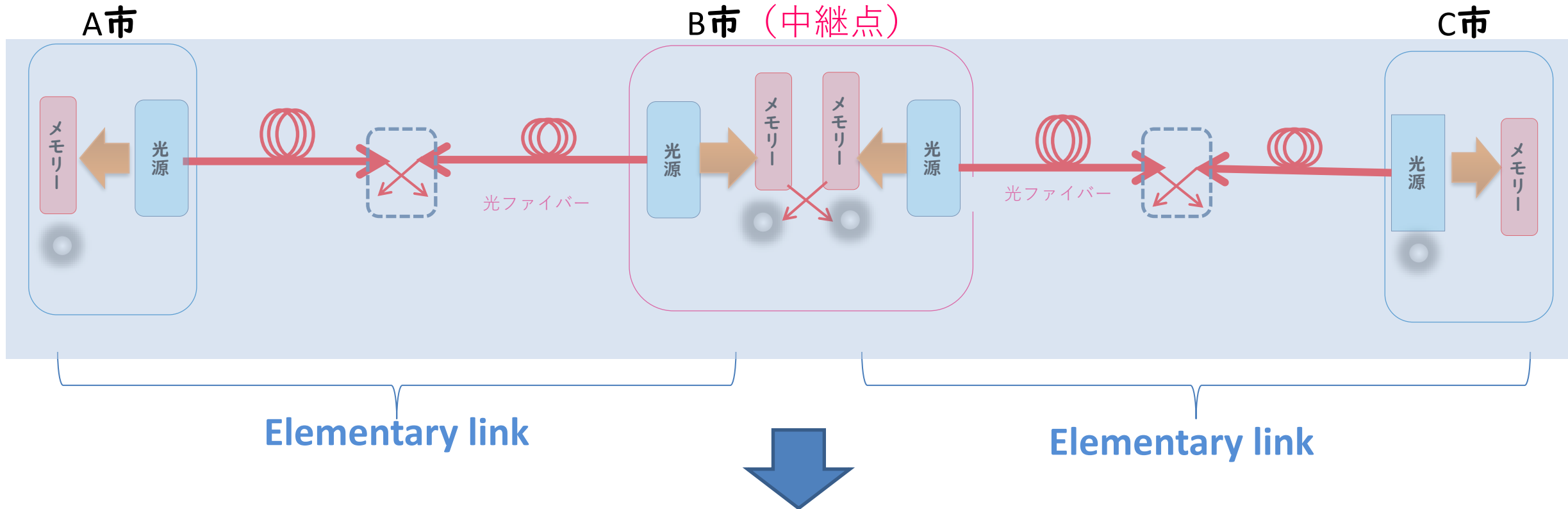
量子もつれ
光源

周波数安定化

量子メモリー

量子中継に向けた物理層の技術開発とマイルストーン

3. 中継実証



4. 中継の多段化 and/or ネットワーク化 (ルーティング機能など)
並行してもつれ純粋化実装が必要。(10~20年)

世界の研究開発動向

■ ドイツ、H. Weinfurterグループ: 33 km 光ファイバ介したRb原子間の量子もつれ

Nature 607, 69 (2022)など

Article

Entangling single atoms over 33 km telecom fibre

<https://doi.org/10.1038/s41586-022-04764-4>

Received: 6 December 2021

Accepted: 14 April 2022

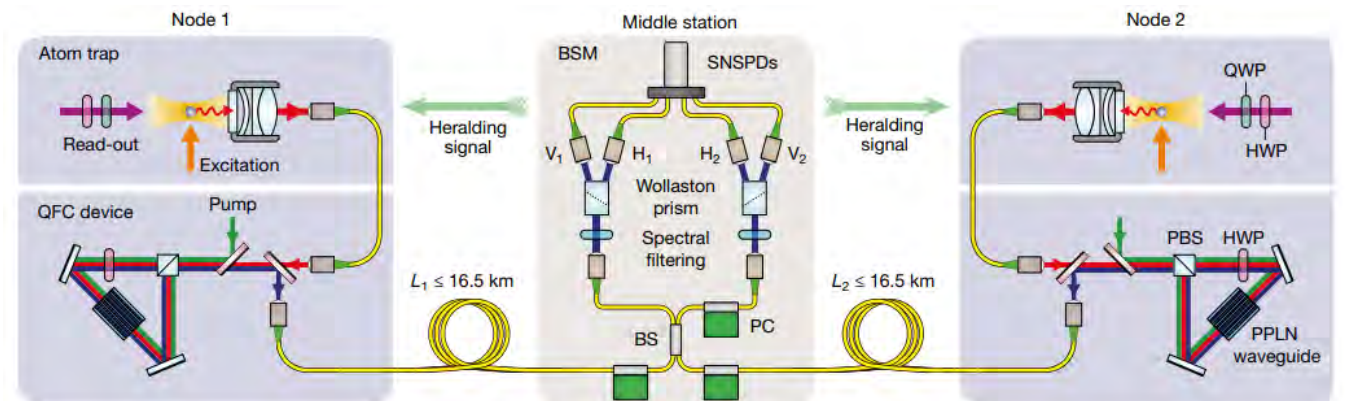
Published online: 6 July 2022

Open access

Check for updates

Tim van Leent^{1,2,7}, Matthias Bock^{3,5,7}, Florian Fertig^{1,2,7}, Robert Garthoff^{1,2}, Sebastian Eppelt^{1,2}, Yiru Zhou^{1,2}, Pooja Malik^{1,2}, Matthias Seubert^{1,2}, Tobias Bauer³, Wenjamin Rosenfeld^{1,2}, Wei Zhang^{1,2,6,5,2}, Christoph Becher^{3,5,2} & Harald Weinfurter^{1,2,4,5,2}

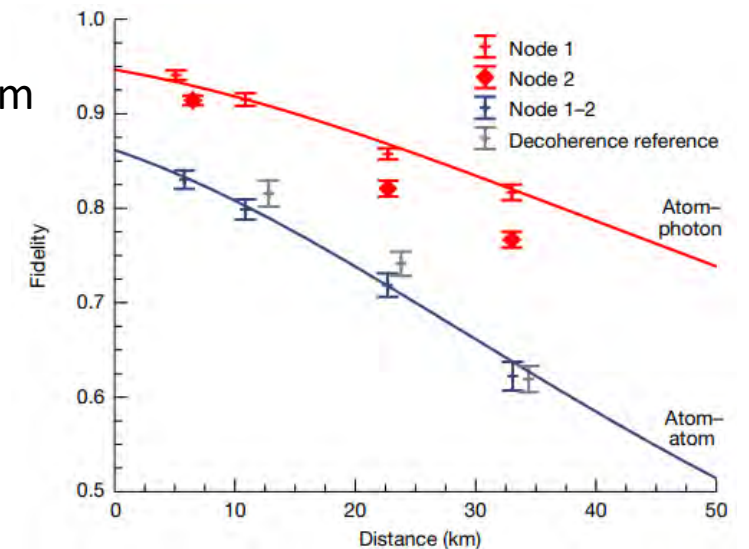
Quantum networks promise to provide the infrastructure for many disruptive applications, such as efficient long-distance quantum communication and distributed quantum computing^{1,2}. Central to these networks is the ability to distribute entanglement between distant nodes using photonic channels. Initially



Rep rate: 9.7 kHz

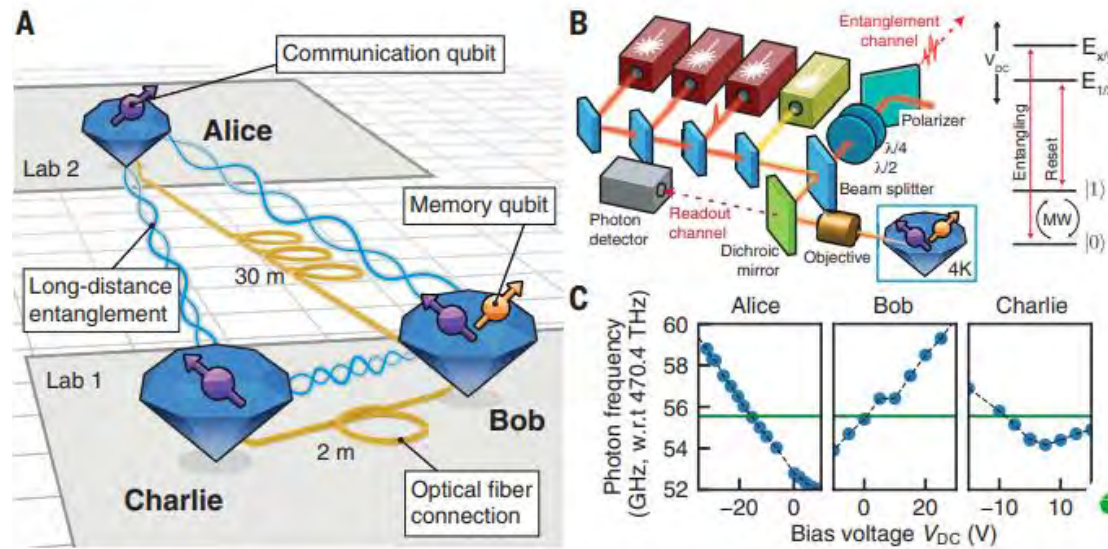
Event rate (heralding)@33km

:1/85 s⁻¹



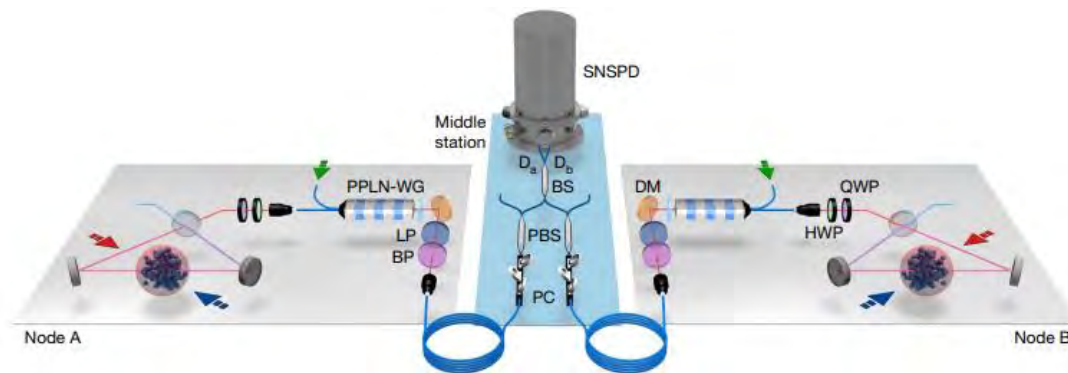
■ オランダ、Hansonグループ: ラボ内でのダイヤモンド間量子もつれの中継操作実証

Science 372.259 (2021)

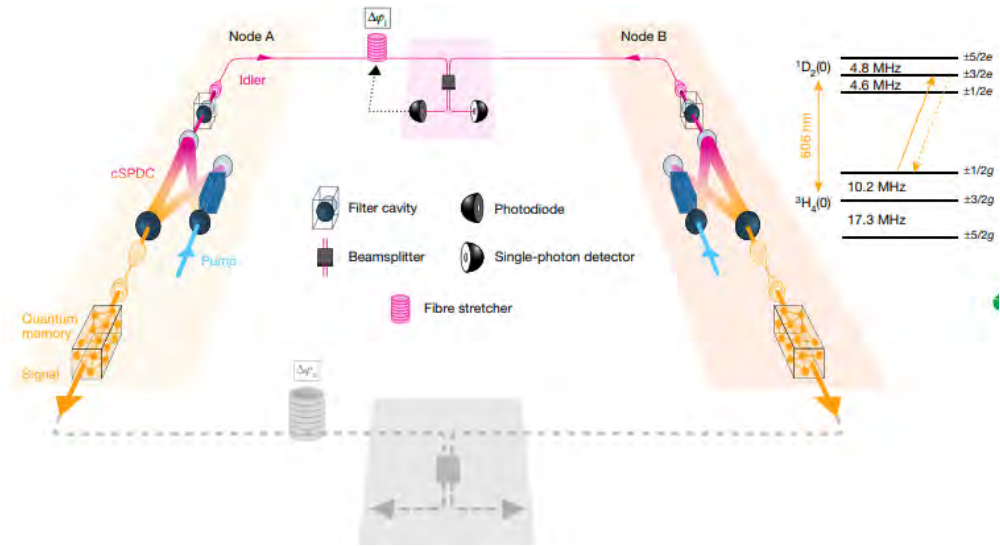


$$|\psi^\pm\rangle \approx (|01\rangle \pm e^{i\Delta\theta}|10\rangle)/\sqrt{2}$$

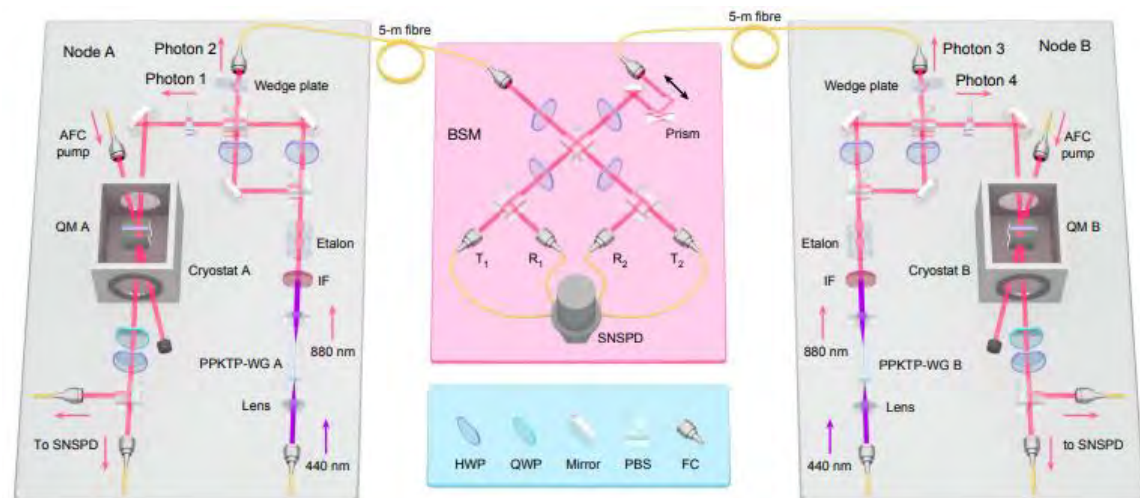
■ 中国、Panグループ: フィールドファイバー (22 km) および50 kmファイバー (ラボ内) での Rb原子集団間量子もつれ実証, Nature 578, 242 (2020)



■ **スペイン、Riedmattenグループ: ラボ内での希土類量子メモリ (Pr:YSO) 間量子もつれの実証**
 Nature 594, 37 (2021)



■ **中国、Guoグループ: ラボ内での希土類量子メモリ (Nd:YVO4) 間量子もつれの実証**
 Nature 594, 41 (2021)



■ オーストリア、Lanyonグループ: 50 km 光ファイバ介したCa原子と量子もつれにある光子配送
 npj Quantum Information 5, 72 (2019).

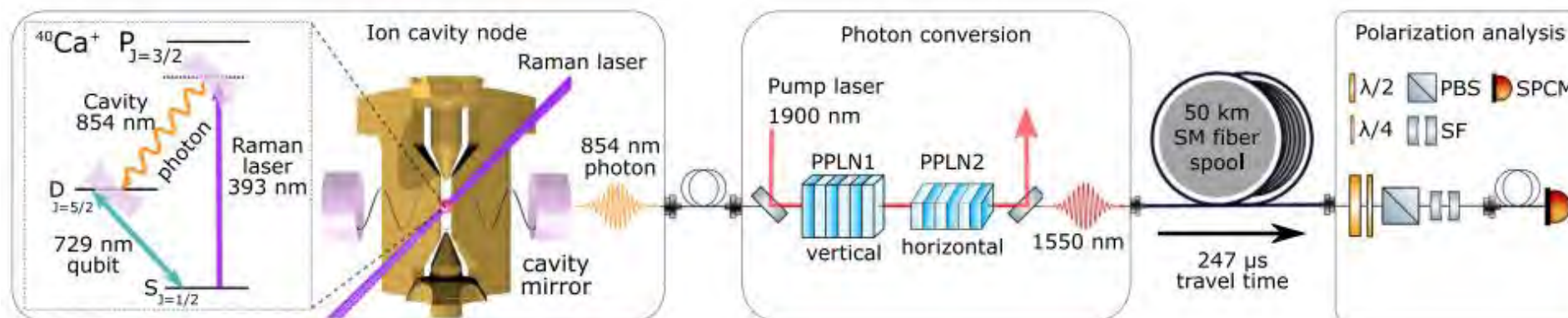
ARTICLE OPEN

Light-matter entanglement over 50 km of optical fibre

V. Krutyanskiy¹, M. Meraner^{1,2}, J. Schupp^{1,2}, V. Krcmarsky^{1,2}, H. Hainzer^{1,2} and B. P. Lanyon^{1,2}

When shared between remote locations, entanglement opens up fundamentally new capabilities for science and technology. Envisioned quantum networks use light to distribute entanglement between their remote matter-based quantum nodes. Here we report on the observation of entanglement between matter (a trapped ion) and light (a photon) over 50 km of optical fibre: two orders of magnitude further than the state of the art and a practical distance to start building large-scale quantum networks. Our methods include an efficient source of ion-photon entanglement via cavity-QED techniques (0.5 probability on-demand fibre-coupled photon from the ion) and a single photon entanglement-preserving quantum frequency converter to the 1550 nm telecom C band (0.25 device efficiency). Modestly optimising and duplicating our system would already allow for 100 km-spaced ion-ion heralded entanglement at rates of over 1 Hz. We show therefore a direct path to entangling 100 km-spaced registers of quantum-logic capable trapped-ion qubits, and the optical atomic clock transitions that they contain.

npj Quantum Information (2019)5:72; <https://doi.org/10.1038/s41534-019-0186-3>



量子メモリに必要・重要な機能：	現状適した物理系
長い保存時間 (>1 ms)	ダイヤモンド、捕獲原子・イオンなど
高い保存・再生効率	集団原子・イオン（気体および固体） 例：Rb原子集団、希土類添加物など
状態保存の質（fidelity）	捕獲イオンなど
オンデマンド性	ほぼ全て
伝令機能（heralding）	メモリ自体に伝令機能無くても、中継スキームで獲得可能
多重性	希土類添加物、気体集団など

要するに全要素を備えた物理系はまだ無い。
一方各物理系の欠点克服の研究開発もそれぞれ進展。
（量子コンピュータの物理系と同様の状況と推測）

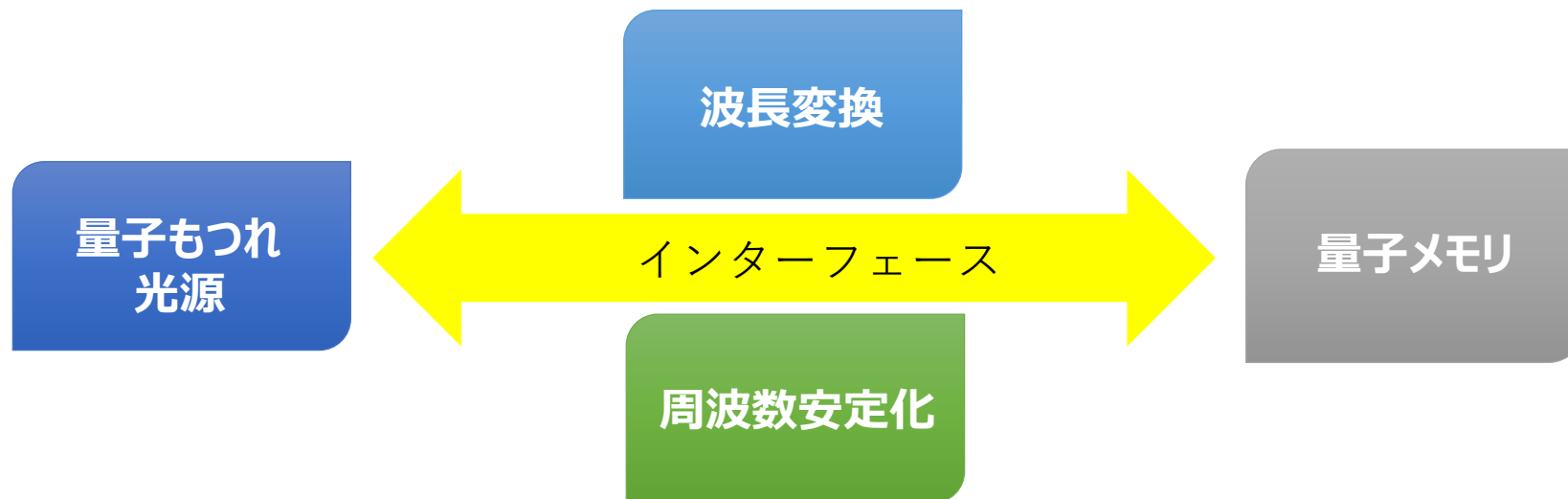
日本の状況：幅広い物理系の研究者がいる。

例：集団原子・捕獲イオン・ダイヤモンド・希土類添加物など。

中継機能実証に必要な高通信レートへつながる多重化量子メモリ用希土類添加物では、もつれ光源からの一通りの結合技術開発も伴っている。

研究開発課題

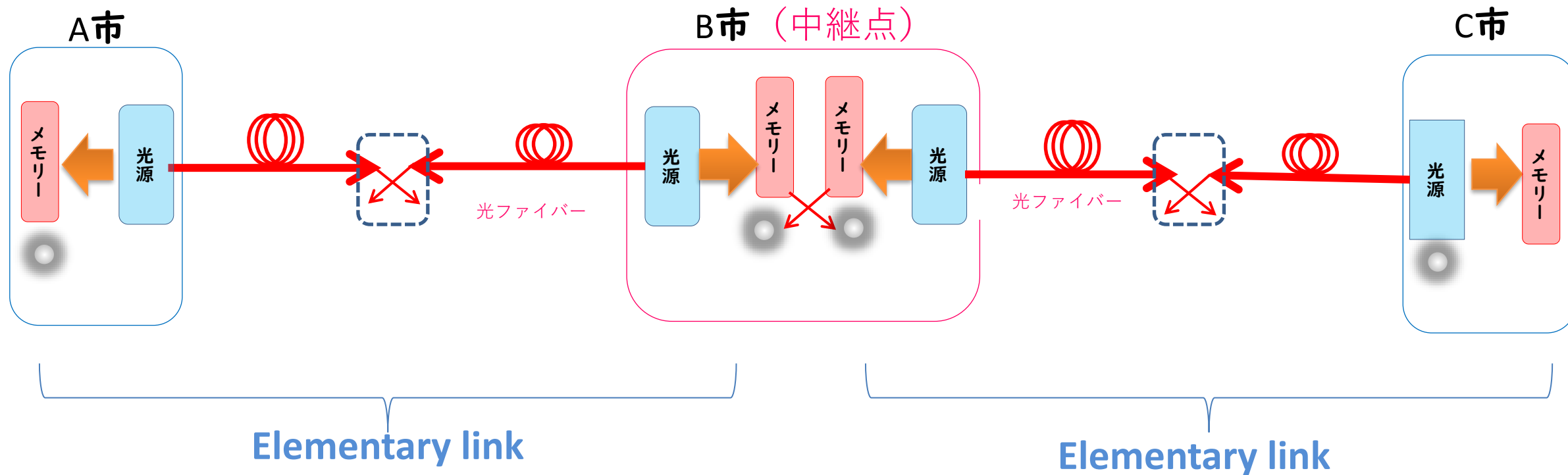
1. 量子中継技術用の要素開発と統合



2. 高精度時空間同期技術（光ファイバ位相同期など含む）

3. 光子検出技術

研究開発課題：Ⅰ. 量子中継



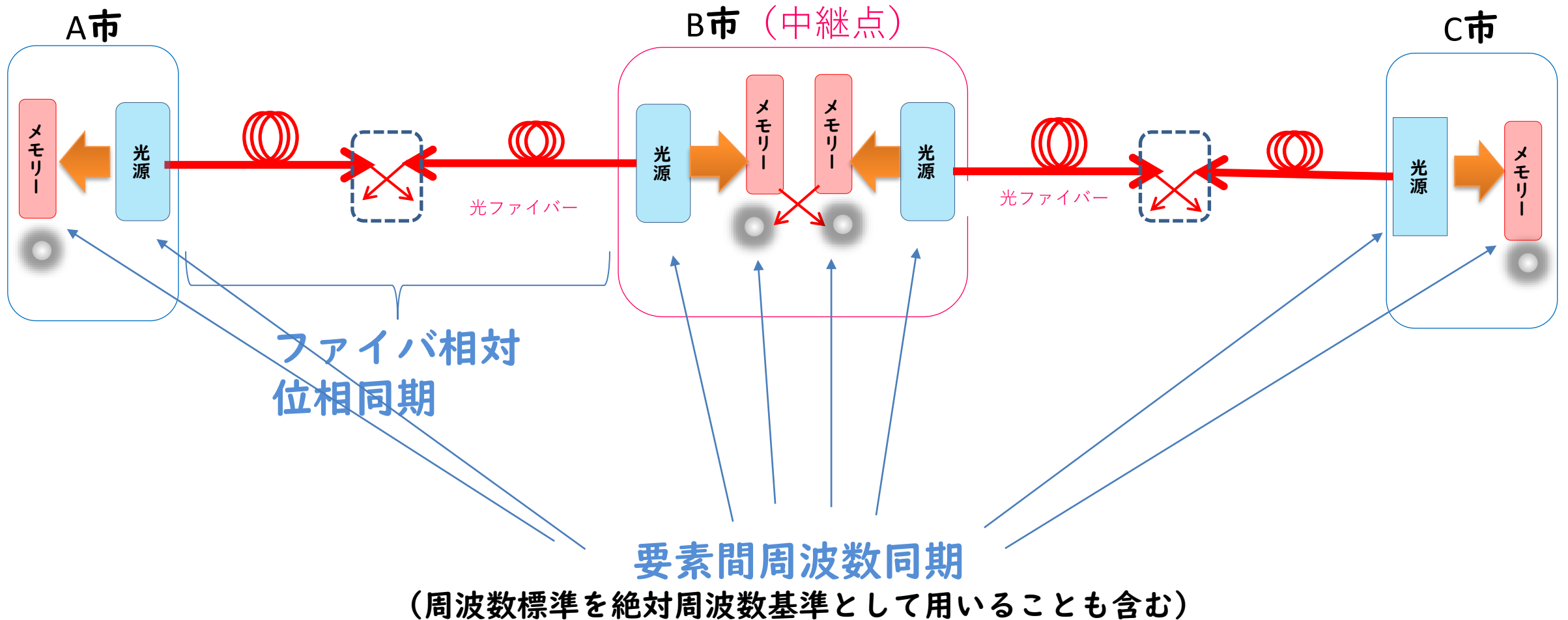
— 要素技術 —

量子もつれ
光源

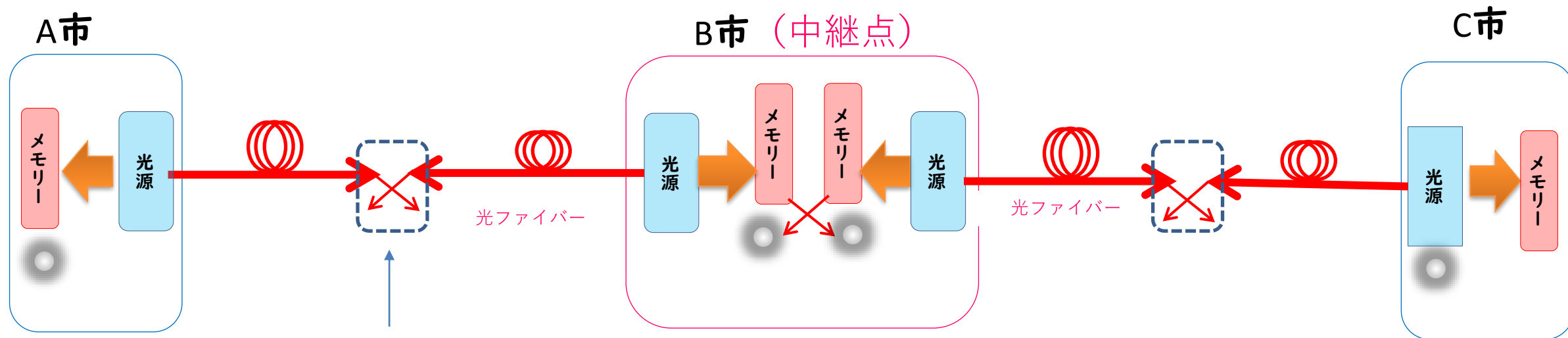
周波数安定化

量子メモリー

研究開発課題：2. 高精度時空間同期技術



研究開発課題：3. 光子検出技術



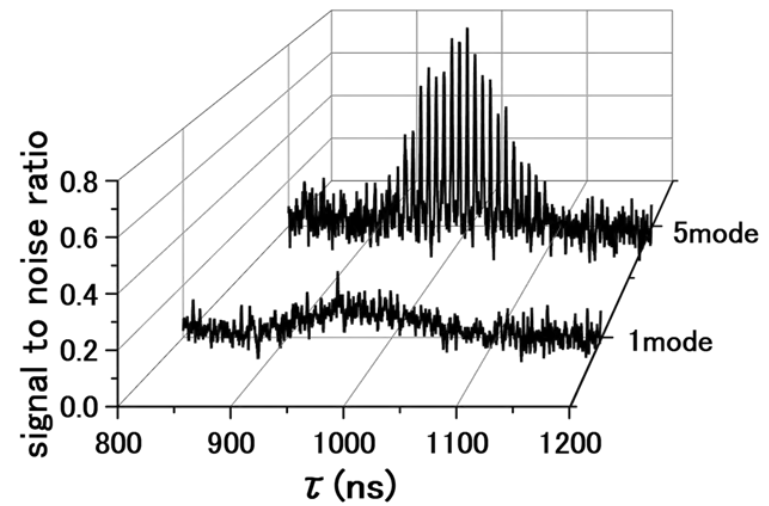
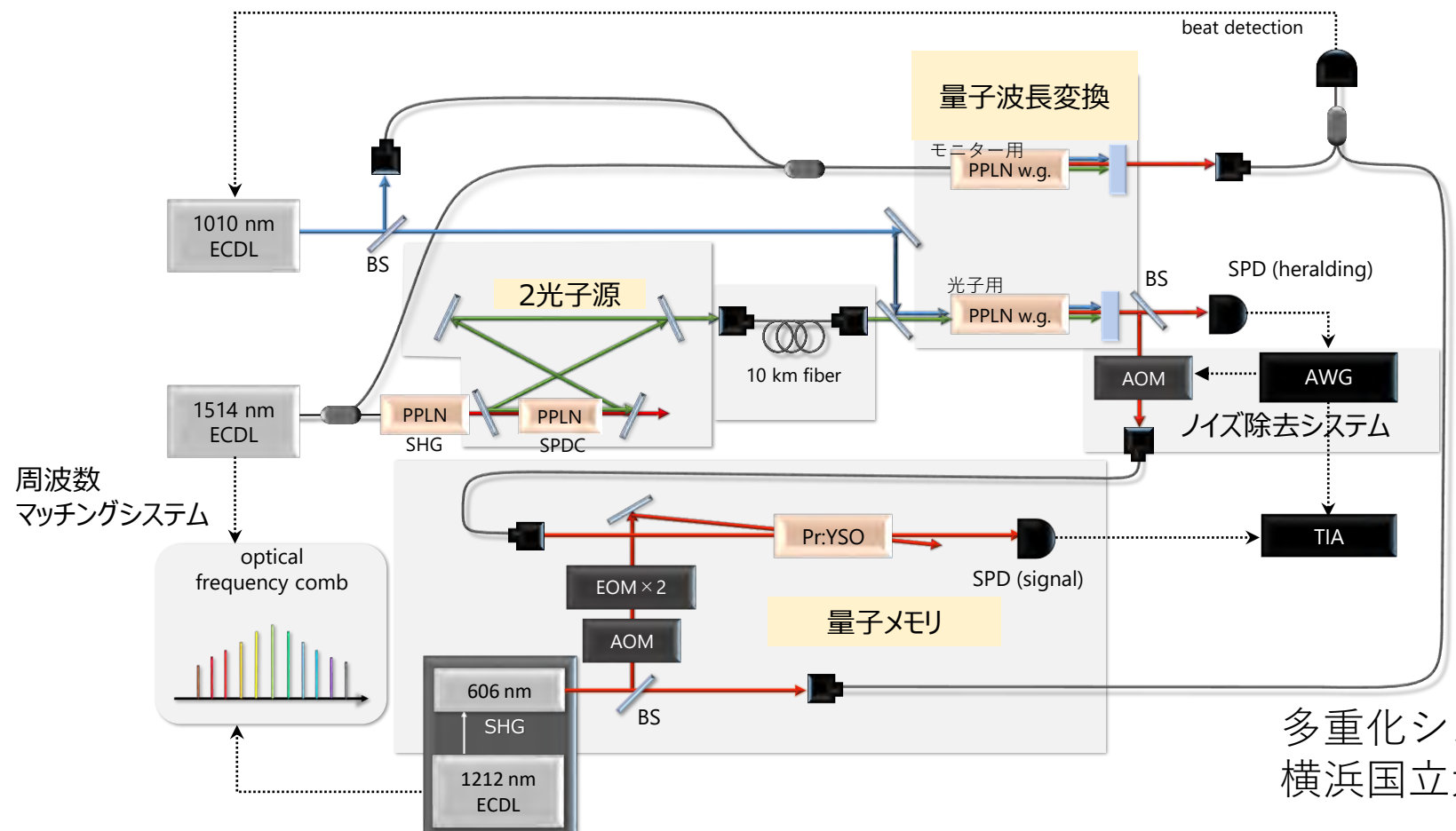
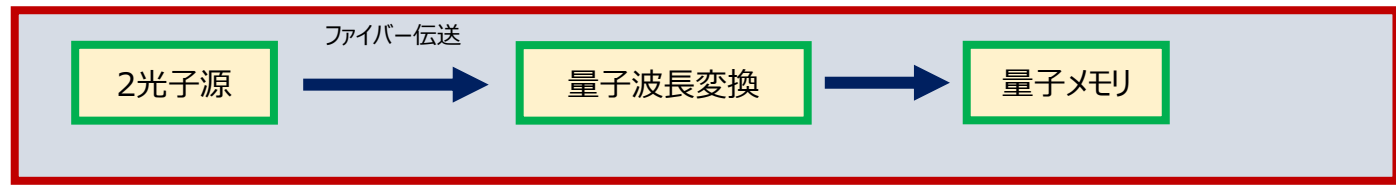
超伝導光子検出器
(SSPD) など

SCONTEL社 (露) 製
SSPD



量子中継用要素技術の結合実験例(希土類量子メモリ)

多重化通信を見据えた
長距離 (10km光ファイバ) システムデモ



多重化システムとして世界最長距離での実証
横浜国立大学堀切研/LQUOM株式会社

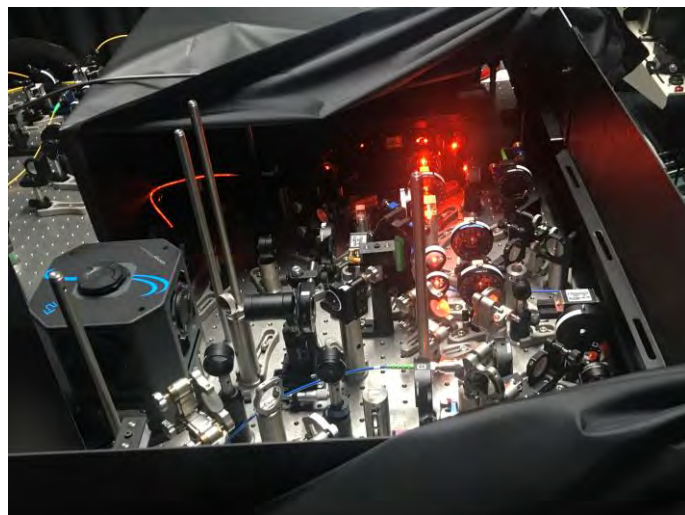
取り組み：大学発スタートアップの創業

- ◆ JST START事業（2017-2019）をきっかけに、量子通信開発を事業化。
LQUOM社創業（2020年1月。堀切は技術顧問）

平成29年度 (2017年度)		長距離量子通信システム 2020年1月 「LQUOM株式会社」起業	横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授 堀切 智之	 Beyond Next Ventures	原理的に盗聴が不可能な通信方法である量子暗号通信の長距離化の開発を行う。光源、量子メモリ等の要素技術を基にした量子中継器システムを開発し、ベンチャー設立による事業化を目指す。
--------------------	---	---	------------------------------------	--	---

<https://www.jst.go.jp/start/project/index.html>

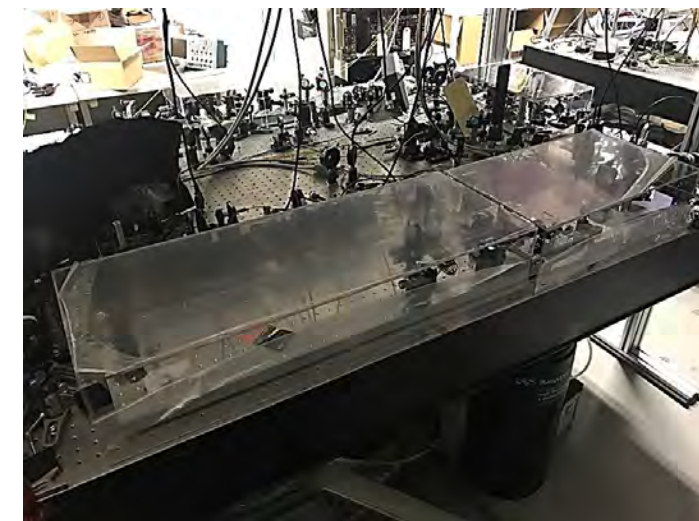
- ◆ NEDO STS事業（2021年度～）にも支援いただいております。
- ◆ Seedラウンド資金調達（2021年4月）



希土類量子メモリシステム



量子もつれ光源



創業に至る経緯：当時考えたこと

- 2014年頃以降の量子コンピュータの状況を外から見ていた。
- 量子通信分野においても次のようになると推測（2016年頃）

1. 大企業の研究開発＋多くのスタートアップが立上がり、激しい開発競争始まる。
2. このままだと日本は世界についていけなくなる。
（投入リソース（資金・人材などの本気度）が足りない）
国家プロジェクトだけではそもそも無理。（世界潮流よりすくない投資）
3. 世界最先端で量子通信をやっていくには →自前での資金調達
 - 迅速な意思決定とリソース投入可能な事業体として、
キャッチアップしていくことが絶対に必要と考えた。

量子コンピュータはますます高性能になり、クラウド／分散化といった使用が活発になる。

→将来的に量子通信ネットワーク（量子インターネット）が必須！

量子通信の発達は避けがたい未来と思った。「量子インターネット」は次世代の社会基盤。

大学とスタートアップの技術移転・分業

LQUOM:： 短距離もつれ光源開発→フィールドファイバー実証試験パートナー開拓

大学研究室：量子中継技術開発→中継開発だけではサバイブ困難な企業側を後押し。

国の支援に期待すること

- LQUOMは若手研究者の箱としての目的もある。
- 優秀な若手が博士に進んでも、量子研究を続けられる確証が無く離脱
→自前の学生くらいは、研究を続ける希望に応えたい。
- ただ、小さなスタートアップ1社程度で、大勢にはほぼ何の影響も及ぼせない。
- 博士を取り、量子研究者の道に進んでも大丈夫だと若手が思える環境作りをお願いします。
(結局はポストの増加、長期雇用だと思います。)