

量子インターネットの今後の研究開発について

量子インターネットタスクフォース代表
慶應義塾大学政策・メディア研究科特任准教授
株式会社メルカリR4D（研究開発部）シニアリサーチャー
永山翔太

Global Quantum
Internet

自己紹介：永山翔太

- 博士（政策・メディア）
- 動機：量子技術の情報システムとしての実現
- 研究テーマ
 - 量子コンピュータネットワーク
 - 分散量子コンピュータアーキテクチャ
 - 量子インターネット
 - 量子誤り訂正符号
 - Surface Code, etc.
 - インターネット
 - インターネット標準暗号プロトコル(IPsec)での量子鍵配送
 - セキュリティ仕様分析・適用
- 現在
 - 慶應義塾大学 政策・メディア研究科 特任准教授（2022.6~）
 - (株)メルカリ（2018.4~）R4D シニアリサーチャー
 - 産学連携研究コンソーシアム 量子インターネットタスクフォース
<https://qitf.org/> ファウンダー・代表（選挙で再選・二期目）（2019.5~）
 - WIDEプロジェクト ボードメンバー <https://www.wide.ad.jp/>（2022.3~）
 - ムーンショット目標6内「量子通信ネットワーク」PM
 - Interop Tokyo プログラム委員（2021.11~）
 - 来場者数16万人以上のインターネット産業界イベント
 - 情報処理学会 量子ソフトウェア研究会 運営委員（2020.4~）
 - 講演・アウトリーチ・メディア掲載(日経新聞など)多数



- 量子コンピュータネットワーク・量子インターネットの産学連携/多組織連携コンソーシアム（若手中心運営）



mercari **R4D**

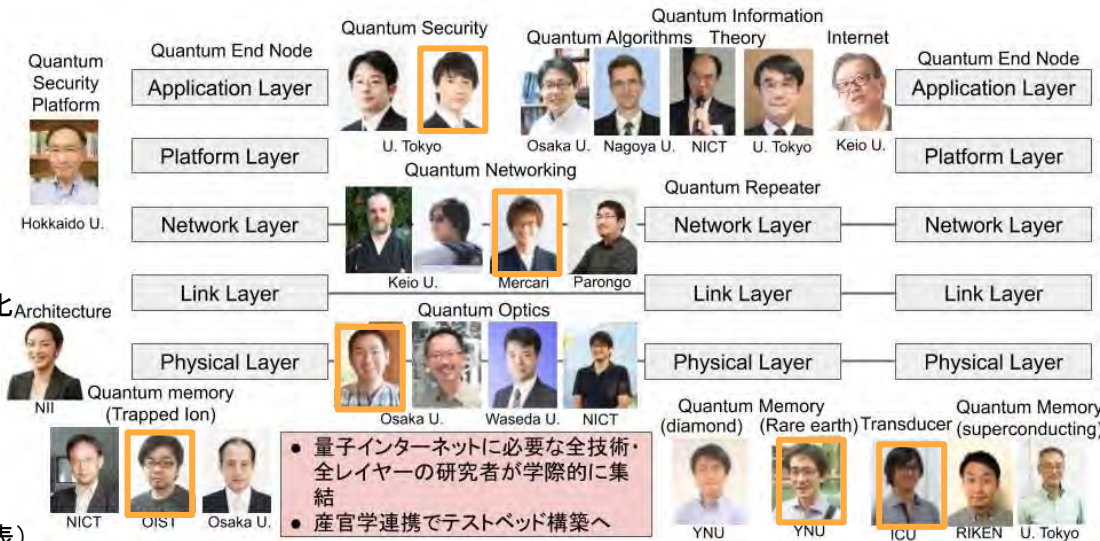
WIDE
PROJECT

- Widely Integrated Distributed Environment (広域分散統合環境 コンピューティングプロジェクト)
- 東大/慶大/東工大の接続・WIDEから米国への接続で日本のインターネットが開始

- 過去
 - 内閣サイバーセキュリティセンター 研究・産学官連携戦略WG 委員（2020.8~2021.3）
 - IPA未踏ターゲット採択（2018~2020）
テーマ「分散量子計算プラットフォーム」
 - ポスドク留学（2017~2018）
機械学習@Eotvos Lorand 大学
 - 慶應義塾大学より博士号取得（2017.3）

量子インターネットタスクフォース (QITF) の概要

- 量子で世界を繋げるために日本の貢献も必要
- 特に初期のネットワーク実証実験での存在感
- ハードからアプリまで学際的に協力して研究開発を推進する枠組みとしてQITF設立
 - 2018年から準備活動
 - 2019年5月、任意団体として設立
 - 2021年春、慶大に事務局を置いて正式コンソーシアム化
- 若手ボードメンバー**による運営 (30年先に責任を持つ)
 - 生田力三 助教 (大阪大学)
 - 佐々木寿彦 講師 (東京大学)
 - 佐藤貴彦 特任講師 (慶應義塾大学)
 - 遠本吉朗 研究員 (情報通信研究機構)
 - 永山翔太 シニアリサーチャー (株式会社メルカリ・代表)
 - 堀切智之 准教授 (横浜国立大学)
 - 山崎歴舟 准教授 (国際基督教大学)
- アドバイザーボード (重鎮)**によるサポート体制
 - 井元信之 特命教授 (東京大学)
 - 小坂英男 教授 (横浜国立大学)
 - 根本香絵 教授 (国立情報学研究所)
 - Rodney Van Meter 教授 (慶應義塾大学)
 - 村井純 教授 (慶應義塾大学)
 - 山本俊 教授 (大阪大学)



- 量子インターネットに必要な全技術・全レイヤーの研究者が学際的に集結
- 産官学連携でテストベッド構築へ

ホワイトペーパー
“The” 量子インターネット

-この宇宙の物理法則に許されるサイバー空間の極致-

産官学連携研究開発コンソーシアム
 量子インターネットタスクフォース



I QITFの実績・メディア露出など

- 世界に先んじて量子インターネット研究の高まりを予測・コミュニティ形成（2018準備・2019活動開始）

[量子インターネットの設計指標に係る文書](#)の共同執筆@IRTF

- IRTFは、TCP/IPやHTTP等を定めた標準化団体 IETF の姉妹組織。長期的な課題に取り組む。

- Workshop for Quantum Repeaters and Networks での活動
 - 世界で唯一の、量子インターネット専門ワークショップ
 - 継続的活動・交流・Steering Committee など

[量子インターネットホワイトペーパー執筆・公開](#)

- インタフェースWG ([2020年9月発足](#))
- テストベッドWG ([2020年12月発足](#))
- 総会（2019年5月発足）
- 他、勉強会・研究会など、公開/非公開ともに開催

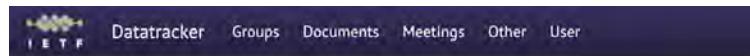
日本経済新聞に掲載。全日本の量子インターネットテストベッドの取り組みとして。

- [日本経済新聞電子版](#) 2021/3/5
- [日本経済新聞朝刊](#) 2021/3/8

日経クロステックに掲載。

- [突発、量子ネット大戦](#) 2021/5/19

- 他、メディア等掲載多数



Architectural Principles for a Quantum Internet

draft-irtf-qirg-principles-04

Status IESG evaluation record IESG writeups Email expansions History

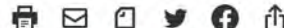
量子でネット安全性堅固に

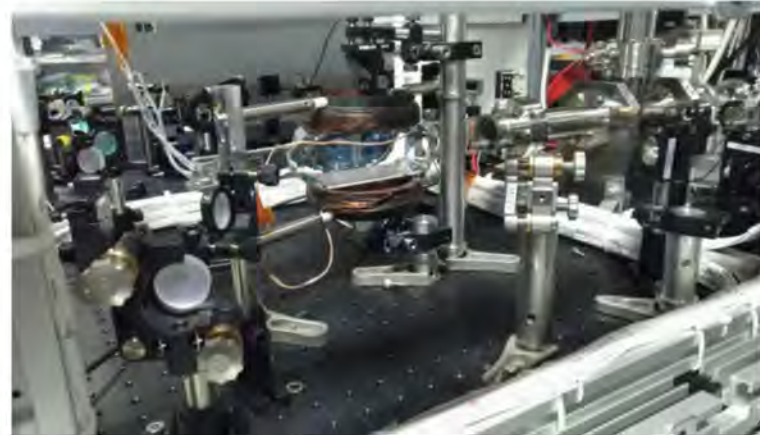
日経新聞朝刊2021/3/8

メルカリ・東大など試験計画、不正侵入を完全防止

2021年3月8日 2:00 [有料会員限定]

 保存





量子インターネットは安全性がより高まる=阪大提供

Take Home Message

- 量子インターネットは、「**量子コンピュータネットワーク**」として進めるのが有力な勝ち筋
 - 理由：
 - 古典インターネットから分かる、IT革命の本質：
 - 大量のコンピュータ**による**分散**（すなわちネットワーク化）かつ**汎用の情報処理環境**



量子データを伝送できる限り、**低速度でも意味**がある！（唯一無二の価値！）
→Step by step で初期の低速度から有用性を発揮できるマイグレーションストーリーへ

- 誤り訂正型量子インターネットのためにも必要
- 量子IoT・量子センサーデータの量子情報処理の展望などの展望も開ける。

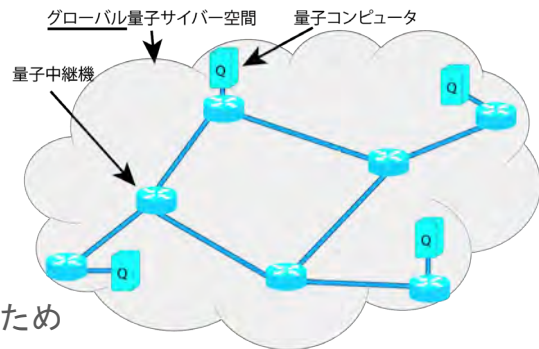
古典インターネットの歴史：
Unix (汎用コンピュータ)が
アップデートでTCP/IPに対応
→インターネットが爆発的に普及

- 必要な**全**研究開発要素の**並列推進**
 - 量子インターネット実現の加速による最速の社会実装へ

- グローバル量子サイバー空間**の野望を持つ
 - 本来小さくローカルな量子の世界



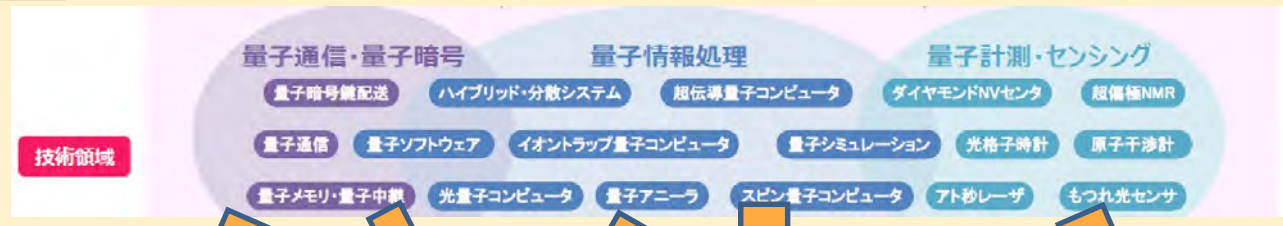
地球全体が量子データで結ばれた、一つの大きな量子の世界に
※量子コンピュータが”強力”なのは量子データの形で情報処理しているため



量子インターネットとは、量子情報のネットワーク化

概要

統合イノベーション戦略推進会議「量子技術イノベーション戦略（最終報告）」より



ネットワーク化で、様々な新技術が可能に

量子データ通信、デジタルインターネットをE2Eに量子で守る、広範囲量子センサーネットワーク、など

- ・リーダー選挙、ビザンチン問題、量子ビットコイン、量子認証、量子鍵配送、etc.
- ・秘匿量子計算
- ・分散量子計算
- ・超高精度時刻同期
- ・超長基線電波望遠鏡
- ・ネットワーク量子センシング

「量子インターネット」＝本格的な量子技術時代のコンピュータ・ネットワーク基盤

従来のインターネットが計算機・センサーなどを繋ぎ始めて新たな領域に。
→ 量子技術・情報をネットワーク化する技術分野の創出も自然な流れ

社会実装：量子技術・情報の広域通信プラットフォーム

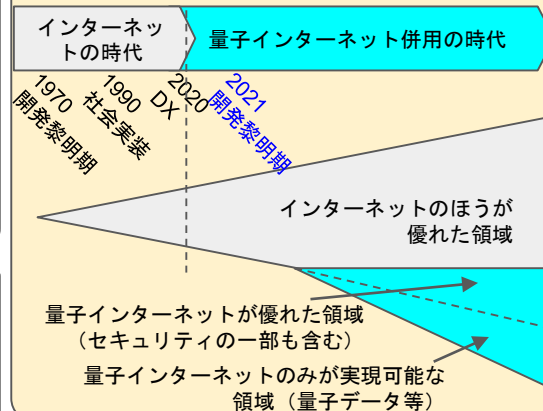
他の量子通信技術との違い

量子技術による量子データ伝送ネットワーク
＝量子インターネット

量子技術によるデジタルデータ（＝暗号鍵）伝送ネットワーク
＝量子暗号ネットワーク
（総務省推進）

画像出典 <https://www.nict.go.jp/press/2010/10/14-1.html>

情報通信市場への広がり



出口

- ・ インフラ：光ファイバー事業者、接続事業者
- ・ ハードウェア：通信機器・メモリ等部品、etc.
- ・ ソフトウェア・（直接的）サービス：クラウド量子コンピュータとの量子接続、量子 IoT、量子計測・同期、量子セキュリティ基盤（E2Eの量子暗号に加え、認証・秘匿計算）、など

インターネットはなぜすごいのか

1. 情報を「いつでも、どこでも手に入り、自在に処理できる」ものにした
 - 任意の場所で任意のデータを即時に得られる（送れる）ことで達成
 - 世界中が1つのネットワークで繋がっている
 - （逆に考えてみると）Aさんと会話するには東京と通信する用のこの通信網で通信、Bさんは神奈川にいるから会話できない、Cさんは米国にいるから会話できない、...
 - 汎用的に使える
 - 1用途にしか使えない通信デバイスを大量に持ちたいか
 - 昔は持っていた：音声通話（電話）、文字会話（ポケベル）、画像送信（FAX）
 - 低遅延
 - 1通送るのに1日かかるメッセージアプリを使いたいか
 - 昔は使っていた：手紙

量子情報で同じ世界を実現する分野＝量子インターネット

技術史における量子インターネット

デジタルコンピュータ

デジタルコンピュータ
黎明期

デジタルコンピュータ
実用期

分散コンピュータ
ネットワーク化

仕組み/デザインも汎用、
使い方も汎用

● 仕組み/デザインは汎用、
使い方は特定目的

- 弾道ミサイルの軌道計算 etc.

重要概念：

コンピュータの汎用化と
コンピュータネットワーク化

→ 情報が「いつでも、どこでも手に入り、
自在に処理できる」ものに

→古典IT革命

→量子IT革命

量子コンピュータ
黎明期

量子コンピュータ
実用期

分散コンピュータ
ネットワーク化

● 仕組み/デザインは汎用、
使い方は特定(?)目的

- 化学・金融・機械学習・etc.

● 仕組み/デザインも汎用、
使い方も汎用

1950

1960

2020

2030

2050

↑ 2方向に発展、現在地点
‡ 次の重要ステップ

量子インターネットマイルストーン

①



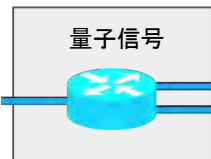
量子信号は一旦
古典電気信号に変換

アプリケーション

古典中継の量子暗号

②

※現在この段階を推進

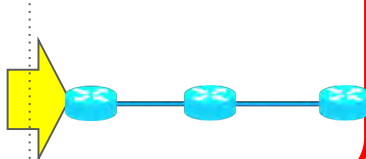


量子信号中継
Proof of Concept
実験室内

- 量子メモリなし
全光アーキテクチャ
(大阪大学, 2019)
- 量子メモリあり
ダイヤモンド内窒素
アーキテクチャ
(デルフト工科大学, 2021)
- 今後数年で他のハードウ
ェアでもPoCの期待

全く別物

③



離れたノード間の
量子中継システム・
プロトコルの動作実証

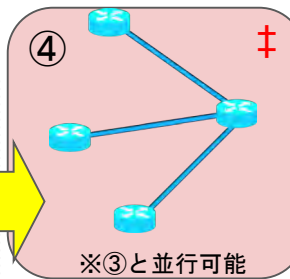
アプリケーション

- 分散量子計算
 - ネットワーク量子センシング
 - 超高精度時刻同期
 - E2E量子鍵配送、等
- アプリケーション側からの研究と並行

出口 for 汎用量子データ

都市規模 量子インターネット

†



大規模ネットワークに繋がる
システム・プロトコルの
最小構成での動作実証
(一対多通信の実現)

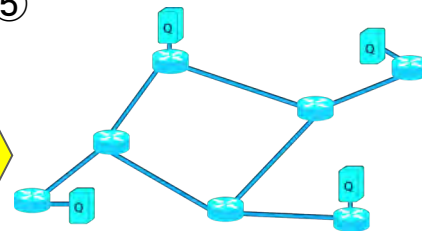
アプリケーション

- 分散量子計算
 - ネットワーク量子センシング
 - 超高精度時刻同期
 - E2E量子鍵配送、等
- アプリケーション側からの研究と並行

出口 for 汎用量子データ

都市規模 量子インターネット

⑤



多地点化・
大規模な複雑ネットワーク
へのスケール実証

- 秘匿量子計算
- 量子セキュリティ
- リーダー選挙
- ビザンチン将軍問題
- 量子ビットコイン、等

国家規模 量子インターネット
世界規模 量子インターネット

出口 for デジタルデータ

Trusted Node
量子鍵配送ネットワーク
(東京QKDネットワーク等)
※E2E暗号ではない

量子信号中継は量子情報技術全般を支える基盤技術として育てる必要がある

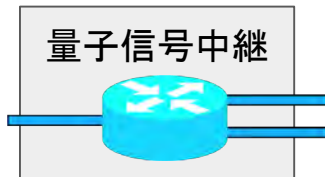
便利な量子(信号)中継

量子暗号網の
リンク延長

量子通信による古典ビット
(=暗号鍵) 伝送ネットワーク
=量子暗号ネットワーク



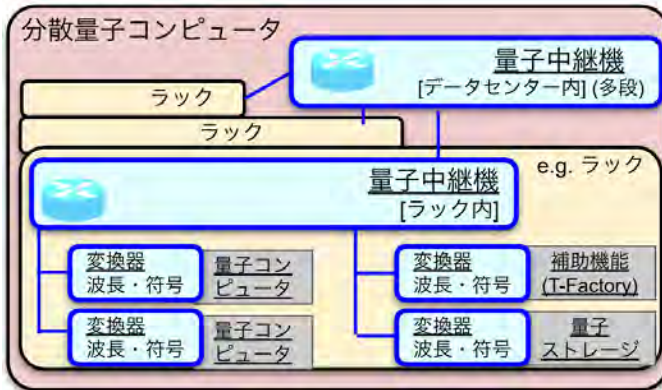
© NICT



量子信号をそのまま
処理・中継・活用

信号中継の
基幹技術

量子ビット伝送による
大型量子コンピュータ
=分散量子コンピュータ
(ネットワーク型量子コンピュータ)



QUANTUM INTERNET
TASK FORCE

量子通信による量子ビット
伝送ネットワーク
=量子インターネット



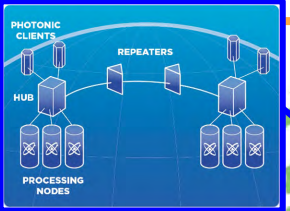
世界の量子インターネット施策と特徴・国際協力のカウンターパート候補

EU : Quantum Internet Alliance

- 2022年から7年間の新プロジェクト
 - 最初の3.5年で2400万ユーロ(約35億円)
 - (2018~2021年:1000万ユーロ(約14.5億円))
- 量子信号中継 (ダイヤモンド量子ビット) をいち早く実証
- ボトムアップ型研究に強み

中国: Jian-Wei Panのグループ等による研究

CQN(Arizona, Harvard, Yale, MIT) によるNSF予算のテストベッド



ITF
QUANTUM INTERNET TASK FORCE

- メモリ技術ダイバーシティ
- インターネット研究・運用の知見を生かしたトップダウン型研究に強み
- 人材は必要分野に広く薄く (教育が今後の鍵)

ドイツ : Quantum Link Extension

2021年までの3年総額
1528万ユーロ(約22億円)

シンガポールの大学 (複数)

オーストラリアの大学 (複数)



United States: National Quantum Initiative

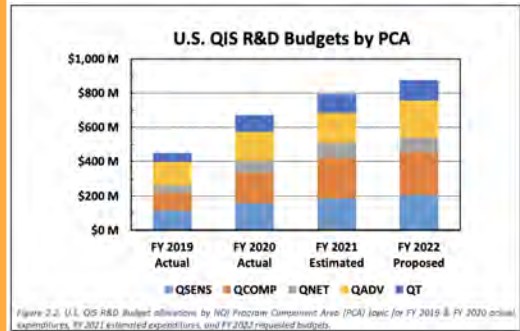


Figure 2-3. U.S. QIS R&D Budget Obligations by NQI Program Component Area (PCA) (in \$M) for FY 2019 & FY 2020 actual expenditures, FY 2021 estimated expenditures, and FY 2022 requested budgets.

- 画像出典 : NATIONAL QUANTUM INITIATIVE SUPPLEMENT TO THE PRESIDENT'S FY 2022 BUDGET
- 国家量子イニシアチブ法の改定で量子ネットワーク予算を大規模追加 (1億ドル(約150億円)/年; 5年間)
- 2020年に突然力を入れ始める・政府主導。量子暗号の発案者を擁する

量子インターネット：3つの研究開発要素

1. ハードウェア

- 量子情報の伝送 → 「量子もつれ」の中継・長距離配送に

必要な技術開発：

量子中継、量子メモリ、**※ないと話にならない**
量子-光子インターフェース、etc.

ある意味、数台を
繋げるための技術

2. ネットワークアーキテクチャ・プロトコル

- 量子の物理的特徴に最適化されたアーキテクチャ・プロトコル・ミドルウェア設計
- 量子インターネットの良し悪しを決定
→信頼性・安定性・インシデント耐性・高パフォーマンス性・メンテナンス性・スケーラビリティなど
- しかも、40年以上使用される（今のインターネットを動かしているTCP/IPは1970年代に開発され、今も現

※将来の実用化（産業化・インフラ化）で勝つために極めて重要

必要な技術開発：自律分散協調システム、各レイヤーの責任分解・抽象化・インタフェース、相互接続性、互換性、資源管理、ルーティング、E2E接続、スケーラビリティ、動的制御、トラストアンカー、etc.

今のネットワークアーキテクチャは、ハードとソフトが試行錯誤して時間をかけて発展（電話網からインターネット、電気から光）
→しかし、今のインターネットをそのままコピーすればよいわけではない。
→量子でどのようにすべきか不明。研究開発要素 膨大

数台から発展させ、
数十～数億台以上を
繋げるための技術

3. アプリケーション

- 計算機・センシング・通信にまたがる横断的な分野
- 多くの応用はその物理系（ハードウェア）と密接に関係
 - 量子計算に向けた物理系、センシングに向けた物理系、etc.
- ネットワークの設計・物理系選択とも密接に関連

※量子インターネットの目的そのもの

必要な技術開発：3分野の理論・実験、実用化を見越した開発、NISQ 量子インターネットアルゴリズム、今のインターネットとの統合（言語、ライブラリ、etc.）

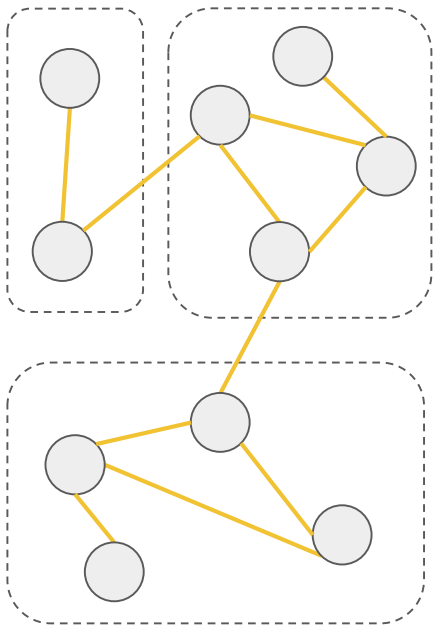
様々な領域の研究者が連携して統合的に進めないと良いものにならない

古典インターネット

○ : 古典ノード

— : 古典通信路(e.g. 光ファイバー)

□ : 自律ネットワーク



社会実装

インフラ化

ELSI(倫理・法律・社会)

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ネットワーク理論
・ グラフ理論

ソフトウェア工学
・ システムソフトウェア
・ 分散システム
・ セキュリティ

通信理論/通信工学
・ 符号

ネットワーク工学
・ プロトコルスタック

古典力学

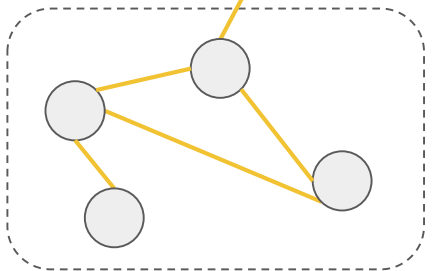
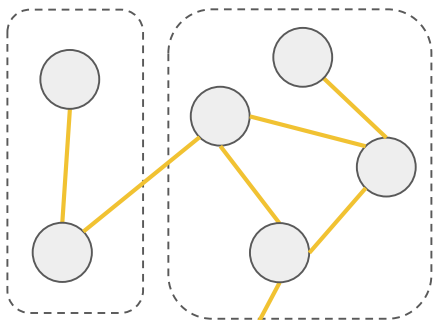
エレクトロニクス
光学
制御工学
物性 etc.

量子インターネット

○ : 量子ノード

— : 量子通信路(e.g. 光ファイバー)

□ : 自律ネットワーク



社会実装

インフラ化

ELSI(倫理・法律・社会)

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ネットワーク理論
・グラフ理論

ソフトウェア工学
・システムソフトウェア
・分散システム
・セキュリティ

通信理論/通信工学
・符号

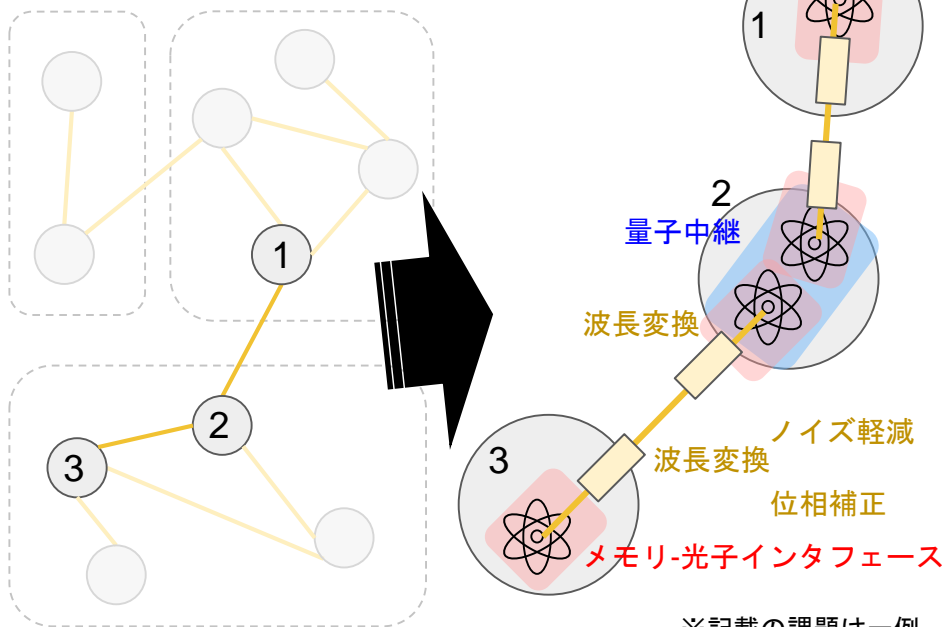
ネットワーク工学
・プロトコルスタック

量子力学・光学 (理論+工学)

量子エレクトロニクス、量子デバイス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性 etc.

量子インターネット

- : 量子ノード
- : 量子通信路(e.g. 光ファイバー)
- : 自律ネットワーク



※記載の課題は一例

社会実装

インフラ化

・ ELSI(倫理・法律・社会)

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ソフトウェア工学
・ システムソフトウェア
・ セキュリティ

ネットワーク理論
・ グラフ理論

ソフトウェア工学
・ システムソフトウェア
・ セキュリティ

通信理論/通信工学
・ 符号

ネットワーク工学
・ プロトコルスタック

量子力学・光学
(理論+工学)

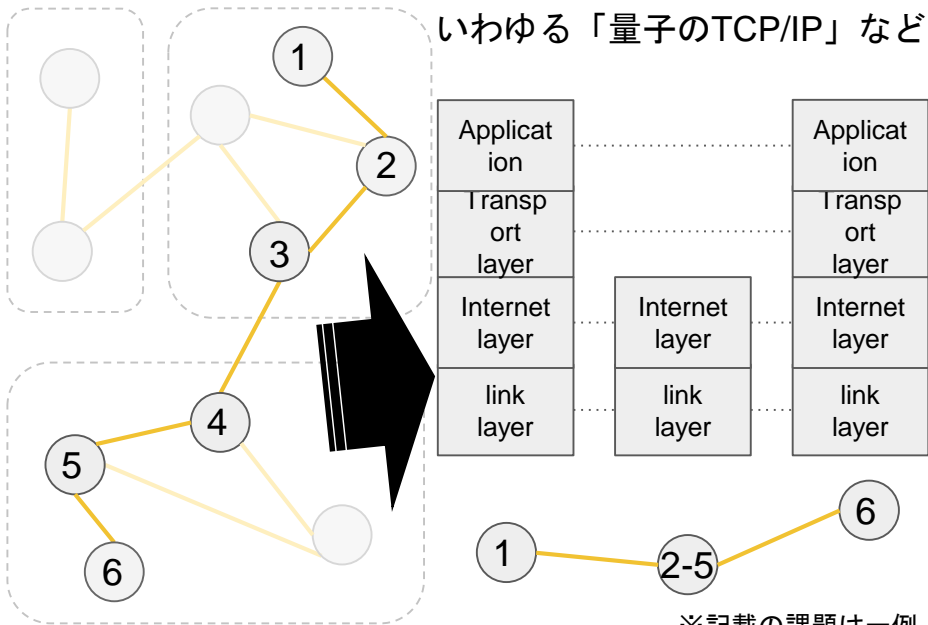
量子エレクトロニクス、量子デバイス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性 etc.

量子インターネット

○ : 量子ノード

— : 量子通信路(e.g. 光ファイバー)

□ : 自律ネットワーク



※記載の課題は一例

社会実装

インフラ化

・ ELSI(倫理・法律・社会)

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ネットワーク理論
・ グラフ理論

ソフトウェア工学
・ システムソフトウェア
・ 分散システム
・ セキュリティ

通信理論/通信工学
・ 符号

ネットワーク工学
・ プロトコルスタック

量子力学
(理論+工学)

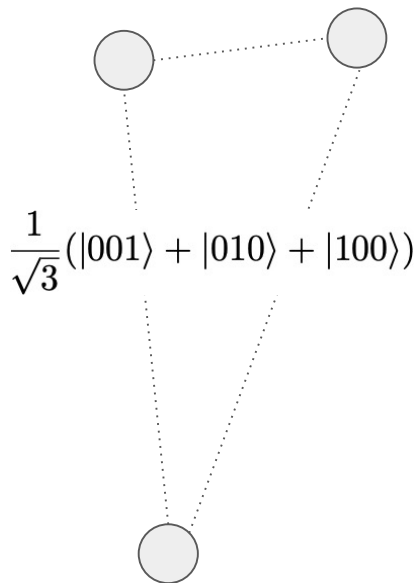
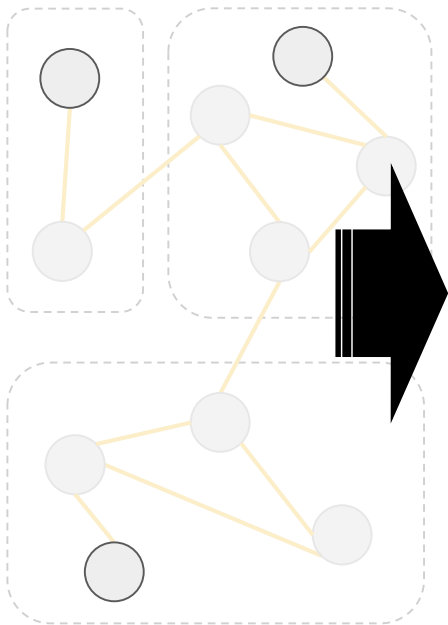
量子エレクトロニクス、量子デバイス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性 etc.

量子インターネット

○ : 量子ノード

— : 量子通信路(e.g. 光ファイバー)

□ : 自律ネットワーク



※記載の課題は一例

社会実装

インフラ化

・ ELSI(倫理・法律・社会)

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ネットワーク理論
・ グラフ理論

ソフトウェア工学
・ システムソフトウェア
・ 分散システム
・ セキュリティ

通信理論/通信工学
・ 符号

ネットワーク工学
・ プロトコルスタック

量子力学
(理論+工学)

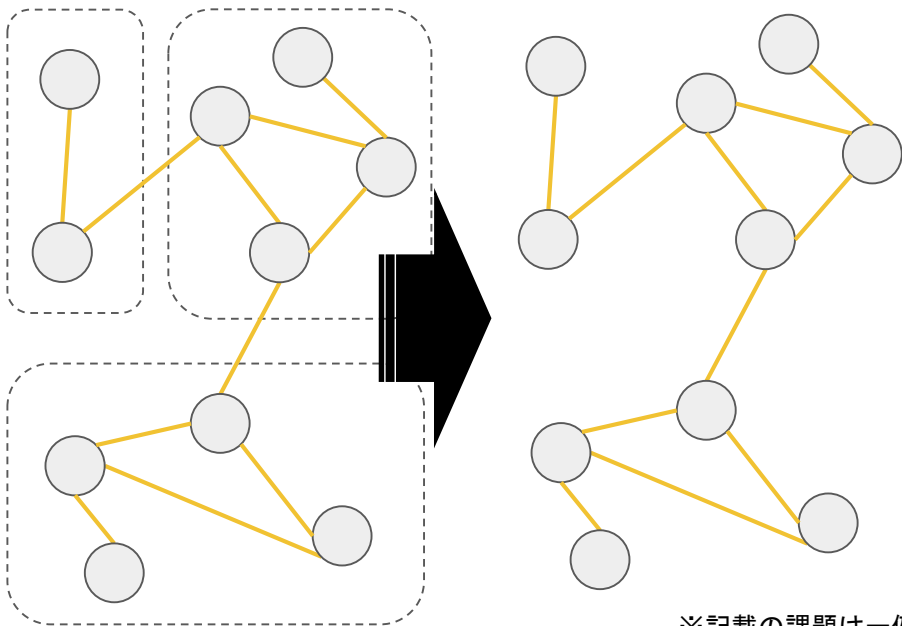
量子エレクトロニクス、量子デバイス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性 etc.

量子インターネット

○ : 量子ノード

— : 量子通信路(e.g. 光ファイバー)

□ : 自律ネットワーク



※記載の課題は一例

社会実装

インフラ化

・ ELSI(倫理・法律・社会)

情報学(理論+工学)

分散アルゴリズム

アプリケーション

計算機工学

ソフトウェア工学

・ システムソフトウェア

・ 分散システム

・ セキュリティ

ネットワーク理論

・ グラフ理論

通信理論/通信工学

・ 符号

ネットワーク工学

・ プロトコルスタック

量子力学 (理論+工学)

量子エレクトロニクス、量子デバイス、
量子光学、光物性、非線形光学
量子制御工学、物性 etc.

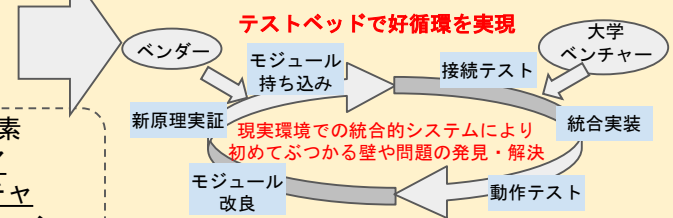
これから必要な研究開発：原理・技術実証テストベッド

今後の重要課題 → 現実環境で発生する新規課題の発見・解決

- 長距離、実環境下（大量のノイズ・環境変化が存在）での量子信号中継などの動作実証
 - ラボ内ではなくフィールドファイバー上で実証する
- 単機能毎の原理実証を超え、光インターフェース・量子信号中継・通信用量子エラー訂正などの、量子インターネットに必要な機能を全て有する量子メモリ・デバイス開発
- 異なる物理系の量子メモリ間（イオン量子ビット、超伝導量子ビット間など）で量子もつれの生成を実証（技術ダイバーシティ・インターオペラビリティ）
- 物理系に依存せず上位レイヤーのインターフェースを介して通信
- 分散環境・数億ノードのネットワークを動かすソフトウェア開発
- ハード・ソフトを組み合わせたアーキテクチャ開発
- 複雑・多様なモジュールの接続テスト・統合的動作テスト

3大研究開発要素
 ・ハードウェア
 ・アーキテクチャ
 ・アプリケーション

テストベッドに成果・資源を集中させ、試行錯誤しながら取り組んでいく



量子インターネット＝量子情報技術の総合格闘技

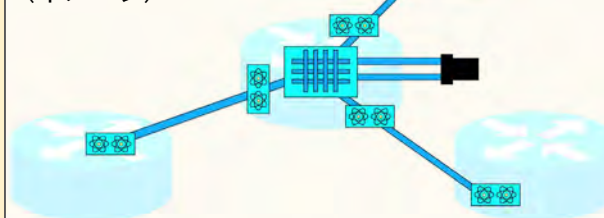
- 量子計算の技術や量子暗号の技術、さらにインターネットの知見も活用しつつ、量子インターネットのためのネットワークデザインやアーキテクチャを理論研究・工学的に実現し、量子情報（量子もつれ）の伝送をおこなう、大複合領域
- これまでの研究成果や研究資源を集中させて試行錯誤するテストベッドが不可欠

テストベッドでの実証のフェーズ

- Phase 1 : フィールド環境調達・仕様調整
実験室でのスイッチング・通信光準備
- Phase 2 : API実装・各機能のコンポーネント化
- Phase 3 : フィールド環境での統合動作確認
(量子メモリなし)
- Phase 4 : 量子メモリ付き

光によるフィールド実験
 +
 メモリの基礎研究
 ↓
 光・物質（メモリ・量子計算機）
 込みのフィールド実験

テストベッドの最小単位は
 4ノードネットワーク構成
 (イメージ)



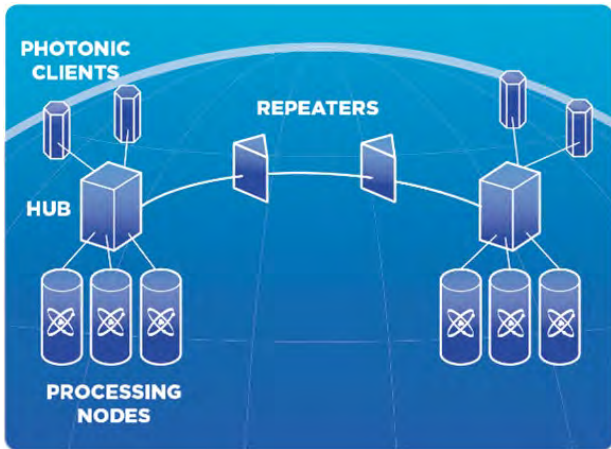
I 世界との競争状況、日本の強み

	日本	欧州	米国	中国
ハードウェア	<ul style="list-style-type: none"> ハードウェアのダイバーシティがある <ul style="list-style-type: none"> 原子集団、NV中心、希土類、超伝導、イオンなど様々な量子メモリ候補での基礎実験 全光アーキテクチャの提案・実証 	<ul style="list-style-type: none"> 世界でいち早くフィールドでの1 hop実験を展開 NV中心、希土類で先端的な結果 メモリを使った量子中継技術を実証(2021) 	<ul style="list-style-type: none"> メモリを使った量子中継技術step1を実証(2019) フィールドテストのためのダークファイバー網をいち早く整備 	<ul style="list-style-type: none"> 多額の予算を活かした衛星を利用した研究実績(2017) 原子集団量子メモリでの先端的な結果
アーキテクチャ	<ul style="list-style-type: none"> 現行インターネットの研究・運用の知見に基づいた、トップダウン型の研究を展開 世界初オープンソース量子インターネットシミュレータを公開 	<ul style="list-style-type: none"> ハードウェアのパラメータに注目した、ボトムアップ型の研究を展開 	<ul style="list-style-type: none"> アーキテクチャの観点での研究は手薄 	<ul style="list-style-type: none"> 特筆すべき研究なし (補記：量子暗号NWのアーキテクチャ研究に積極的)
IETF/IRTFで協力				ITU-T FG-QIT4Nを主導。 (量子鍵配送中心)
アプリケーション	<ul style="list-style-type: none"> 暗号、センシングの専門家は一定数存在。 分散計算・秘密計算の専門家も存在。 	<ul style="list-style-type: none"> 古くから研究が継続されており、多くの提案がなされている。 	<ul style="list-style-type: none"> 量子暗号の発案者など、有名な理論家を多数擁する。 	<ul style="list-style-type: none"> 現状は存在感が薄い。
その他	<ul style="list-style-type: none"> 人材は、必要な全領域にわたってまんべんなく存在している。(ただし少数なので教育や周辺分野からの参入が鍵。非技術的課題) 	<ul style="list-style-type: none"> 世界でもいち早く量子インターネットに力を入れ始めた(2018-) 	<ul style="list-style-type: none"> 2020年から急激に力をいれはじめた(DoE/NSF) 国の支援による体制構築 	<ul style="list-style-type: none"> 現状では個別研究レベル(ただし重要成果) 投入可能人材量、関連技術に優位性があるため参入すれば強力

海外の取り組み

EUの取り組み

- 都市規模ネットワーク2つを接続するプロトタイプ計画



<https://quantum-internet.team/mission/>

- Quantum NL R&D network with three quantum processors realized | 2023
- Online remote access to the NL Q-Staging network | 2023
- Quantum NL Staging Network with ≥ 5 Quantum nodes (incl. embedding cloud) | 2026

- 量子インターネットのチームが分散量子コンピュータも担っている (どちらも量子コンピュータネットワークとして推進している) IET

The screenshot shows the QuTech website. At the top, there is a navigation menu with 'メニュー' (Menu). The main content area is titled '量子インターネット部門' (Quantum Internet Department). Below the title, there are three navigation links: '量子インターネット', '量子インターネットのマイルストーン', and '量子インターネットデモンストレーター'.

私達がすること

地球上の任意の2つの場所間の量子通信

将来の量子インターネットは、世界中の(量子)コンピューターを接続します。量子力学の法則に従った量子ビット(キュービット)を使って情報を送受信できるようになります。量子インターネット部門の目標は、地球上の任意の2つの場所間で量子通信を可能にする技術を開発することです。

この根本的に新しい技術について、ゲームを変える可能性のあるいくつかの主要な新しいアプリケーションがすでに特定されています。そのようなアプリケーションの1つは、物理法則によってプライバシーが保証される、根本的に安全な通信方法を提供することです。また、量子プロセッサを量子ネットワークに接続して、大規模な量子コンピューティングクラスターを構築することもできます。このアプローチはネットワーク化された量子コンピューティングと呼ばれ、量子コンピューティングの作業を補充するスケラビリティへの自然な道を提供します。量子インターネットとネットワーク化された量子コンピューターを組み合わせることで、リモートユーザー/プロバイダーは「クラウド内」で安全な量子コンピューティングを実行できます。

<https://qutech.nl/research-engineering/quantum-internet/>

(Chromeの機能による自動翻訳)

米国の取り組み

米国エネルギー省(DoE)の[Blueprint](#)

Priority Research Directions.....

2.1. PRD 1: Provide the Foundational Building Blocks for a Quantum Internet.....

2.2. PRD 2: Integrate Multiple Quantum Networking Devices

2.3. PRD 3: Create Repeating, Switching, and Routing for Quantum Entanglement..

2.4. PRD 4: Enable Error Correction of Quantum Networking Functions.....

Blueprint Roadmap Milestones.....

3.1. Milestone 1: Verification of Secure Quantum Protocols over Fiber Networks.....

3.2. Milestone 2: Inter-campus and Intra-city Entanglement Distribution

3.3. Milestone 3: Intercity Quantum Communication using Entanglement Swapping.....

3.4. Milestone 4: Interstate Quantum Entanglement Distribution using Quantum Repeaters

3.5. Milestone 5: Build a Multi-institutional Ecosystem between Laboratories, Academia,

and Industry to Transition from Demonstration to Operational Infrastructure

多拠点でテストベッドエフォートを推進 (DoE, NSFなど)

- [Berkeley lab, ESnet, UC Berkeley, Caltech \(1250万ドル\)](#)
- [Oak Ridge National Lab \(1250万ドル\)](#)
- [Brookhaven Natinal Lab](#)
- [Chicago Quantum Exchange \(UChicago, アルゴンヌ研究所, etc\)](#)
- [Brookhaven National Lab](#)
- [アリゾナ大学 \(2600万ドル\(ボストンエリアを含む予算\)\)](#)
- [ボストンエリア\(ハーバード、MITなど\)](#)
- [DC-QNET \(ワシントン周辺の政府機関HQを接続する計画\)](#)



中国の量子もつれに関する実験

衛星から量子もつれを飛ばして
1200km 離れた2地点に共有

衛星から飛ばした量子もつれを使った
暗号鍵生成のデモンストレーション

原子集団による確率的量子中継の実証

nature photonics

Explore content ▾ About the journal ▾ Publish with us ▾

[nature](#) > [nature photonics](#) > [articles](#) > [article](#)

Article | [Published: 25 February 2021](#)

Experimental demonstration of memory-enhanced scaling for entanglement connection of quantum repeater segments

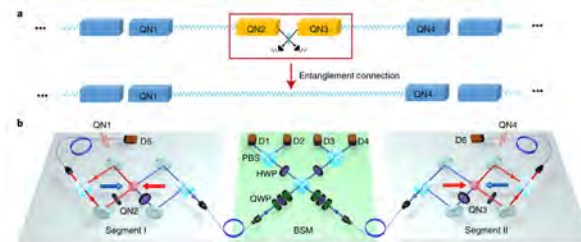
[Yun-Fai Pu](#), [Sheng Zhang](#), [Yu-Kai Wu](#), [Nan Jiang](#), [Wei Chang](#), [Chang Li](#) & [Lu-Ming Duan](#) ✉

[Nature Photonics](#) **15**, 374–378 (2021) | [Cite this article](#)

3906 Accesses | 15 Citations | 30 Altmetric | [Metrics](#)

Fig. 1: The quantum repeater protocol and the experimental set-up.

From: [Experimental demonstration of memory-enhanced scaling for entanglement connection of quantum repeater segments](#)



a. A sketch of entanglement connection (swapping) in the quantum repeater protocol. QN represents a quantum repeater node. **b.** The whole experimental set up consists of three parts: segment I (QN1 and QN2) and segment II (QN3 and QN4), together with a Bell state measurement (BSM) station in the center. QN2 and QN3 are two similar atomic memory nodes separated by 3 m in space. QN1 and QN4 are photons in this experiment and are measured by detectors D5 and D6. A sandwich structure consisting of a quarter-wave plate (QWP), a half-wave plate (HWP) and another QWP is introduced to compensate for the polarization change in the fiber transmission. The coincidence events between the single-photon detectors D1 and D4 (or D2 and D3) project the two idler photons into one of the four Bell states $|\Phi^{\pm}\rangle$.

nature

Explore content ▾ Journal information ▾ Publish with us ▾ Subscribe

[nature](#) > [articles](#) > [article](#)

Article | [Published: 15 June 2020](#)

Entanglement-based secure quantum cryptography over 1,120 kilometres

Juan Yin, Yu-Huai Li, Sheng-Kai Liao, Meng Yang, Yuan Cao, Liang Zhang, Ji-Gang Ren, Wen-Qi Cai, Wei-Yue Liu, Shuang-Lin Li, Rong Shu, Yong-Mei Huang, Lei Deng, Li Li, Qiang Zhang, Nai-Le Liu, Yu-Ao Chen, Chao-Yang Lu, Xiang-Bin Wang, Feihu Xu, Jian-Yu Wang, Cheng-Zhi Peng ✉, Artur K. Ekert & Jian-Wei Pan ✉



Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers

Juan Yin^{1,2}, Yuan Cao^{1,2}, Yu-Huai Li^{1,2}, Sheng-Kai Liao^{1,2}, Liang Zhang^{1,2}, Ji-Gang Ren^{1,2}, Wen-Qi Cai^{1,2}, Wei-Yue Liu^{1,2}, Bo Li^{1,2}, Hai Bai^{1,2}, Guang-Bing Li^{1,2}, Qi-Ming Lu^{1,2}, Yan-Hong Gong^{1,2}, Yu Xu^{1,2}, Shuang-Lin Li^{1,2}, Feng-Zhi Li^{1,2}, Yu-Yun Yin^{1,2}, Zi-Qing Jiang¹, Ming Li¹, Jian-Jun Jia¹, Ge Ren¹, Dong He¹, Yi-Lin Zhou¹, Xiao-Xiang Zhang¹, Ha Wang¹, Xiang Chang¹, Zhen-Cai Zhu¹, Nai-Le Liu^{1,2}, Yu-Ao Chen^{1,2}, Chao-Yang Lu^{1,2}, Rong Shu^{1,2}, Cheng-Zhi Peng^{1,2,3,4,5,6}, Jian-Yu Wang^{3,4,5,6} & Jian-Wei Pan^{1,2,3,4,5,6}

¹Department of Modern Physics and Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

²Chinese Academy of Sciences (CAS) Center for Excellence and Synergetic Innovation Center in Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Shaoqing 201315, China

³Key Laboratory of Space Active Opto-Electronic Technology Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200082, China

⁴Key Laboratory of Optical Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

⁵Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201203, China

⁶Key Laboratory of Space Optics and Infrared Observation, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

⁷Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

⁸Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China

*Corresponding author. Email: pcz@ustc.edu.cn (C.-Z.P.), jywang@mail.sip.ac.cn (J.-Y.W.), pan@ustc.edu.cn (J.-W.P.)

✉ Hide authors and affiliations

Science | 16 Jun 2017
Vol. 356, Issue 6343, pp. 1140–1144
DOI: 10.1126/science.1252211

AAAS Become a Member

Science

Contents ▾ News ▾ Careers ▾ Journals ▾

SHARE



Take Home Message

- 量子インターネットは、「**量子コンピュータネットワーク**」として進めるのが有力な勝ち筋
 - 理由：
 - 古典インターネットから分かる、IT革命の本質：
 - **大量のコンピュータ**による**分散**（すなわちネットワーク化）かつ**汎用の情報処理環境**



量子データを伝送できる限り、**低速度でも意味**がある！（唯一無二の価値！）
 →Step by step で初期の低速度から有用性を発揮できるマイグレーションストーリーへ

- 誤り訂正型量子インターネットのためにも必要
- 量子IoT・量子センサーデータの量子情報処理の展望などの展望も開ける。

古典インターネットの歴史：
 Unix (汎用コンピュータ)が
 アップデートでTCP/IPに対応
 →インターネットが爆発的に普及

- 必要な**全**研究開発要素の**並列推進**
 - 量子インターネット実現の加速による最速の社会実装へ

- **グローバル量子サイバー空間**の野望を持つ
 - 本来小さくローカルな量子の世界



地球全体が量子データで結ばれた、一つの大きな量子の世界に
 ※量子コンピュータが”強力”なのは量子データの形で情報処理しているため

