

YOKOHAMA

NICT Quantum Camp (NQC)

2024年9月14日 ハイブリッド開催

量子コンピュータと量子通信の融合

横浜国立大学

量子情報研究センター センター長

東京大学生産技術研究所 リサーチフェロー

小坂英男



小坂 英男

横浜国立大学(YNU) 大学院工学研究院 教授
量子情報研究センター(QIC) センター長(兼務)
東京大学 生産技術研究所 リサーチフェロー(兼務)



略歴

NEC基礎研究所 ⇒ UCLA研究員 ⇒ 東北大准教授 ⇒ 横浜国大教授 ⇒ QICセンター長



公的活動概略

- **総務省委託事業** 量子中継技術プロジェクト とりまとめ機関代表
- **内閣府/JST ムーンショット**型研究開発制度/事業 プロジェクトマネージャー
- **内閣府 量子技術イノベーション戦略** 有識者
- **文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)**
(量子計測・センシングおよび量子生命) アドバイザリーボード
- 応用物理学会 量子情報工学研究会 幹事
- 量子ICTフォーラム 量子鍵配送技術 推進委員会委員
- 情報通信研究機構 量子人材育成プログラム NICT Quantum Camp (NQC)
実行委員・推進委員・NICT量子人材育成講師
- 量子インターネットタスクフォース アドバイザリーボード
- 量子技術による新産業創出協議会 (Q-STAR) 量子暗号・量子通信部会 機関代表





Newton Special

“量子時代”のかぎをにぎる もつれる量子

監修 小坂英男

執筆 福田伊佐央

量子コンピューターや量子暗号などの量子技術が社会を変えようとしている。量子技術を発展させるために重要な現象が「量子もつれ」だ。“不気味な遠隔作用”とよばれる量子もつれを徹底紹介する。

【試し読み】



話したいこと

- **量子コンピュータ**の出現により現代暗号通信は解読の危機にある。
- **量子通信**は量子コンピュータでも破れない暗号通信を可能とするだけでなく、**量子データ**を配信する未来通信。
- **量子中継器**が実現できなければ、**長距離・広帯域量子通信**も**大規模分散型量子コンピュータ**も実現しない。
- 量子コンピュータを**量子インターフェース**で量子通信に接続し**量子コンピュータネットワーク**を構築することで、始めて**量子インターネット**と呼べる新サービスが期待できる。

未来の通信イメージ



本講演の構成

1. 第1部

量子ってなに？

2. 第2部

量子情報研究最新動向

3. 第3部

量子中継技術の現状

第1部

量子ってなに？

～量子コンピュータ、量子通信の基礎～

本講演の内容

1. 量子とは？

2. 量子通信とは？

3. 量子中継とは？

量子とは

小さな粒子のこと？

電子や陽子などは確かに量子的に振る舞う！

しかし

小さい必要も、粒子である必要もない

最初のアインシュタインの論文（1905年）では

粒子のように振る舞うエネルギーの塊

(1) 量子ってなあに？



文部科学省

量子とは、粒子と波の性質をあわせ持った、とても小さな物質やエネルギーの単位のことです。物質を形作っている原子そのものや、原子を形作っているさらに小さな電子・中性子・陽子といったものが代表選手です。光を粒子としてみたときの光子やニュートリノやクォーク、ミュオンなどといった素粒子も量子に含まれます。

これも今一つの的を得ていない！

純粋状態（純粋な量子状態）とは、原理的に許される最大限のところ（自由度）まで状態（情報）を指定し尽くした状態。

清水明「新版 量子論の基礎」

量子の特徴は

粒子性 と 波動性 の両面を表す

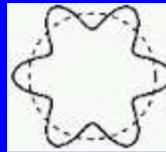
粒子のような量子
も
波動のような干渉を示す

波動のような量子
も
粒子のように数えられる

電子線回折や干渉

物質波？

(ド・ブロイ)



波動力学
(量子力学)

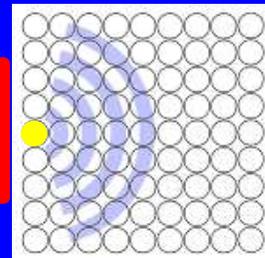
光子検出器で計数

光の粒？

(アインシュタイン)

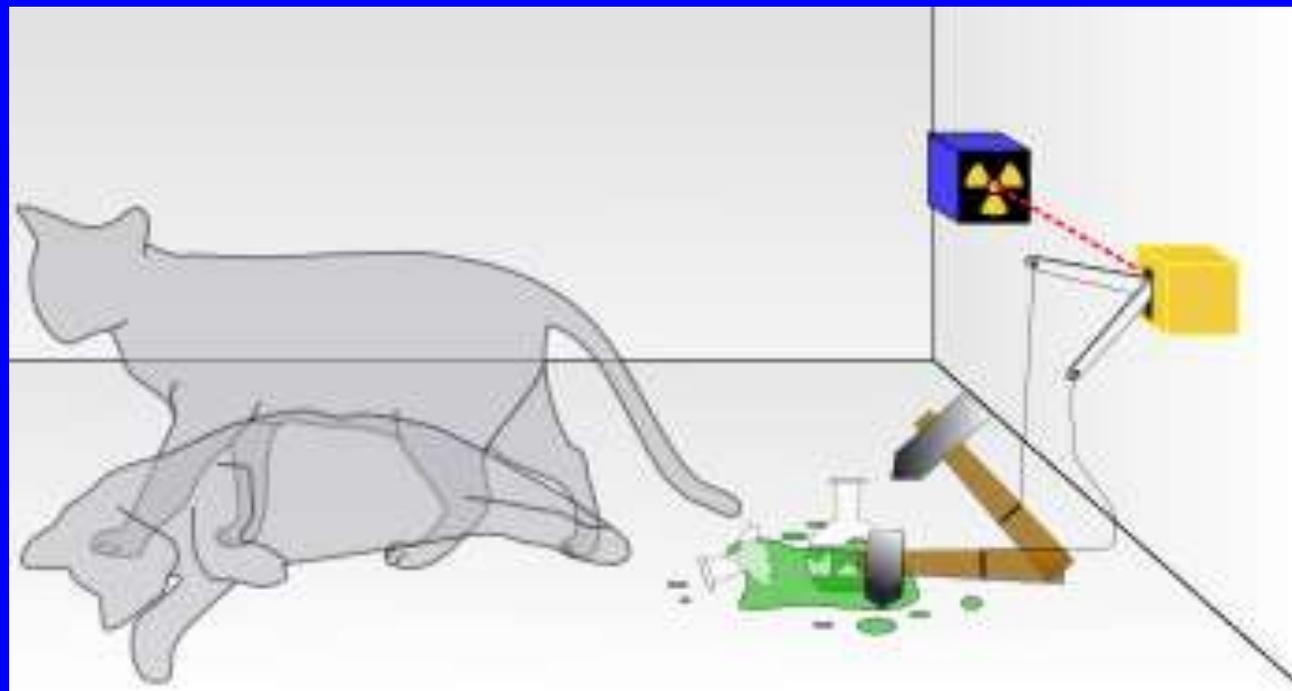


場の量子論



シュレーディンガーの猫

蓋のある密閉状態の箱を用意し、この中に1匹の猫を入れる。箱の中には他に、少量の放射性物質と、ガイガーカウンター、それに反応する青酸ガスの発生装置がある。放射性物質は1時間の内に原子崩壊する可能性が50%であり、もしも崩壊した場合は青酸ガスが発生して猫は死ぬ。逆に原子崩壊しなければ毒ガスは発生せず、猫が死ぬことはない。1時間後、果たして箱の中の猫は生きているか死んでいるか。



Wikipediaより

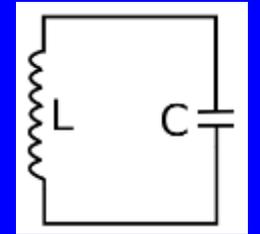
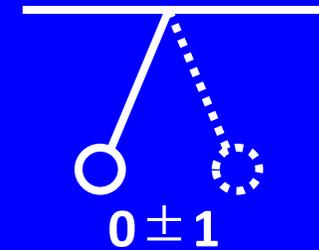
量子、量子もつれ、量子テレポとは？

1. 量子 = 振動子

例) LC共振器

振動 = 回転 → 「重ね合わせ (位相)」がある。

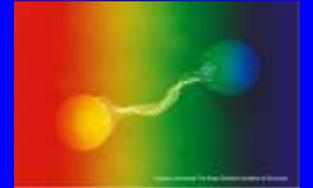
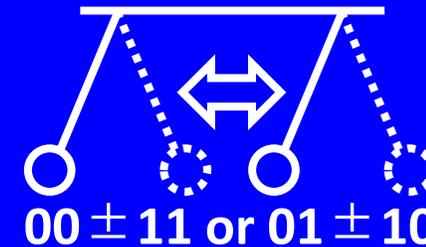
「位相」が確定 → 「コヒーレンス」が高い。



2. 量子もつれ = 複数の振動子が相関

複数の振動子の「重ね合わせ」

= 「量子もつれ」 (同相 - 逆相と位相 ±)

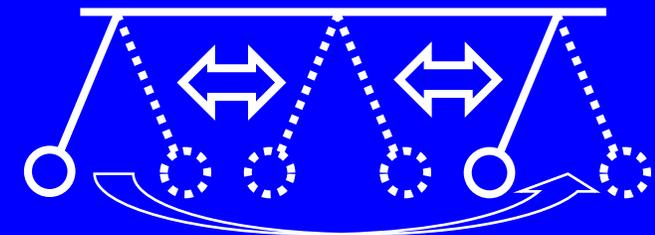


3. 量子テレポーテーション = 量子もつれの交換 (スワップ)

出会ったことのない粒子間がもつれる。

真ん中の振動子で“もつれ測定”

= 「ベル測定」 → 「量子テレポ」



重ね合わせ状態 と 量子ビット



ビームスプリッター

半透明反射膜

状態

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\text{左}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{右}\rangle$$

測定 左?

Yes

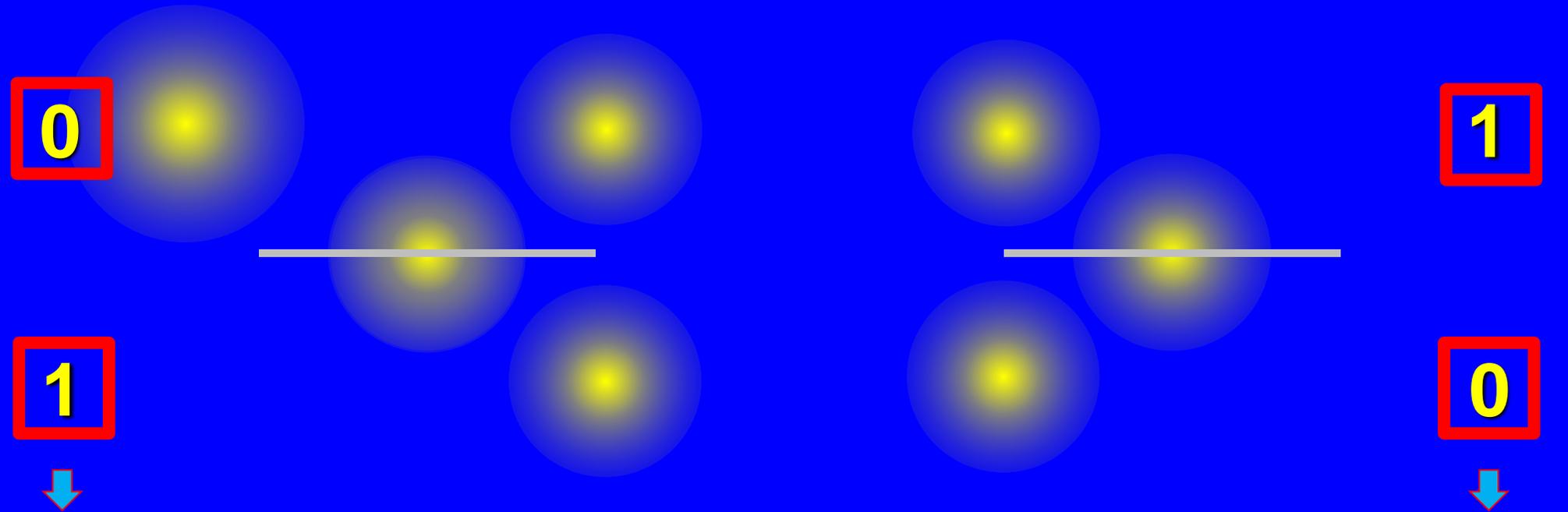
↓ 確率 $\frac{1}{2}$
 $|\text{左}\rangle$

右? 物理量

Yes

↓ 確率 $\frac{1}{2}$
 $|\text{右}\rangle$

量子干渉 と 量子鍵配布



量子鍵配布

||

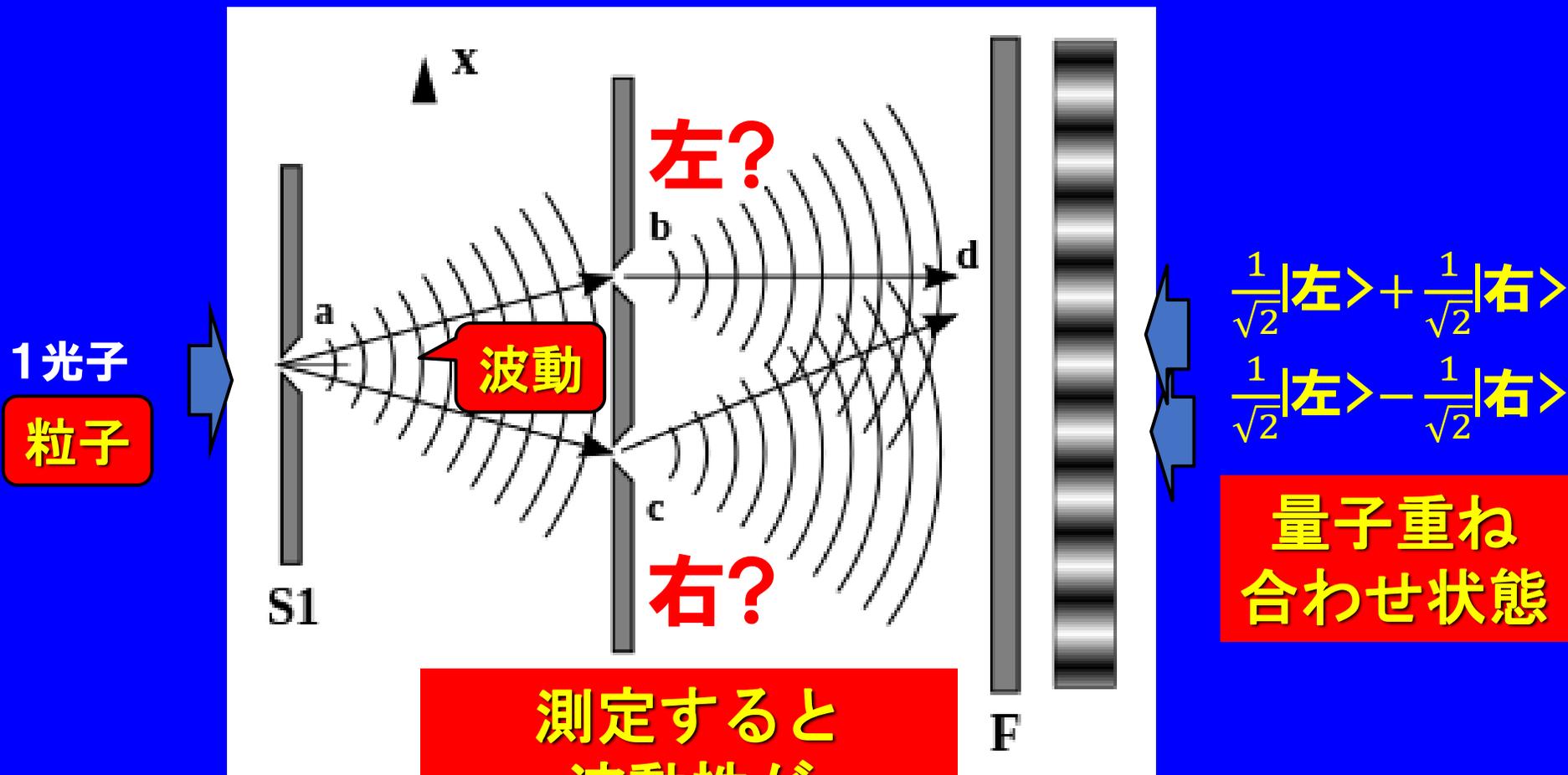
量子暗号通信

暗号鍵
010..1

暗号鍵
010..1

一光子のヤング干渉実験

量子情報通信の原理はほぼこれで説明できる！



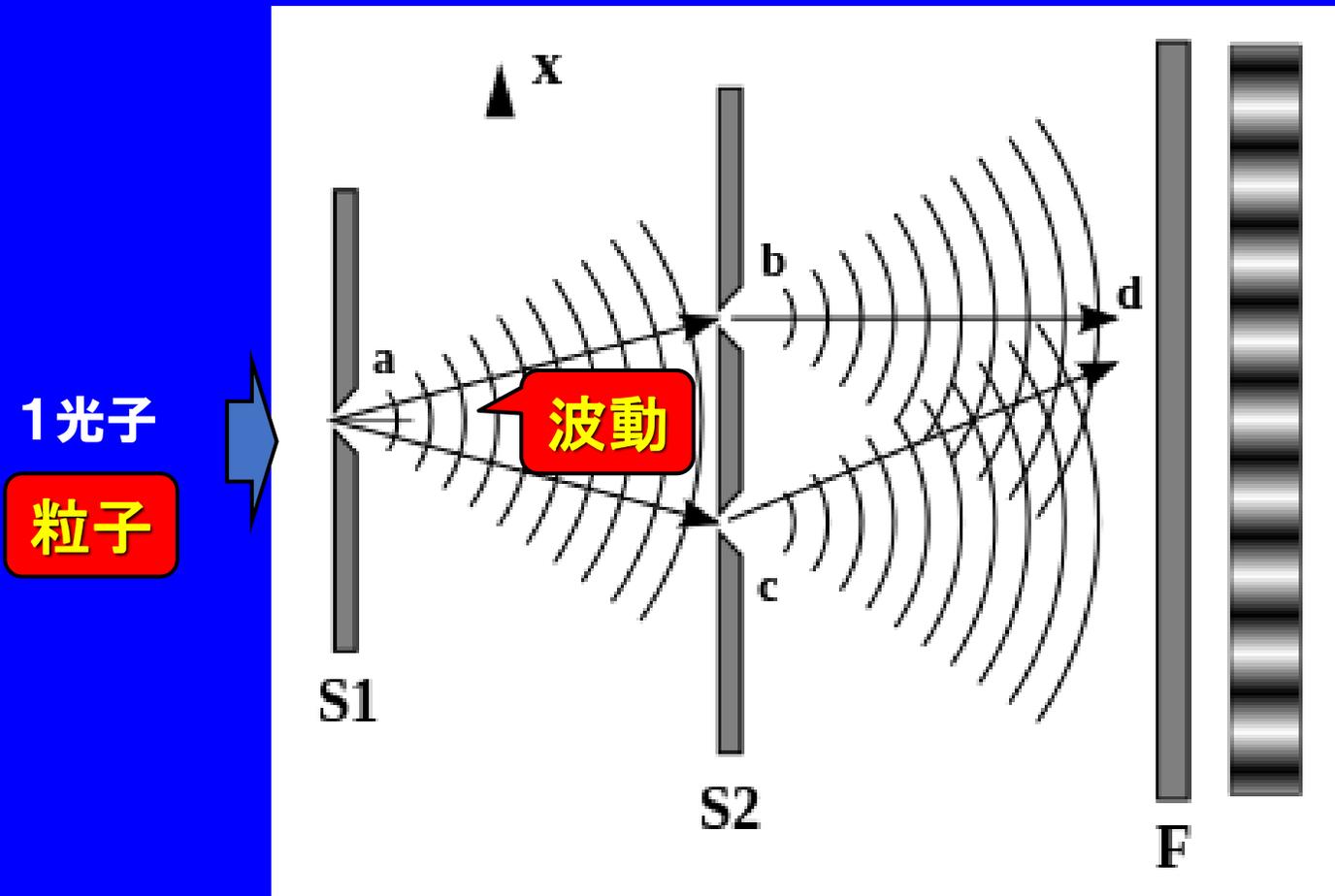
測定すると
波動性が
壊れて粒子になる

Wikipediaより

問題

bで光子が一つ通るのを観測した後に干渉するか？

答え：



量子の重要な性質

量子はコピー(増幅)ができない！

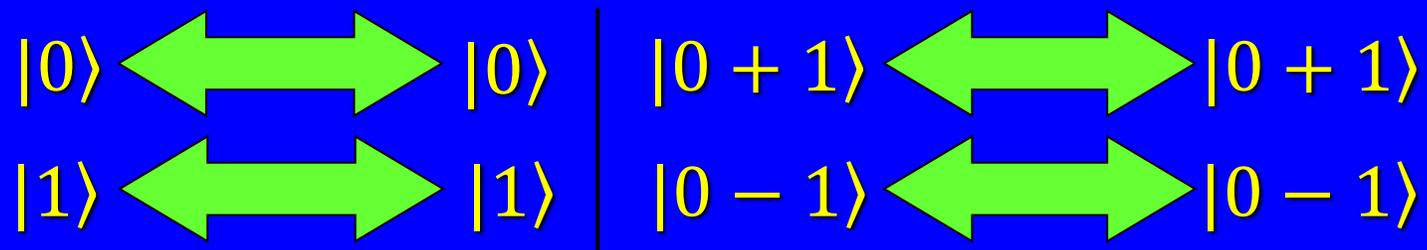
**NO
COPY!**

コピーすると
量子状態は壊れる

量子もつれ

2つの量子が相関した状態

基底状態だけでなく重ね合わせ状態も相関!



二つの量子で “一つの状態” となっている

“ベル状態” と呼ぶ4種類がある

二つの量子の
重ね合わせ状態

$$\begin{bmatrix} |00\rangle + |11\rangle \\ |00\rangle - |11\rangle \\ |01\rangle + |10\rangle \\ |01\rangle - |10\rangle \end{bmatrix}$$

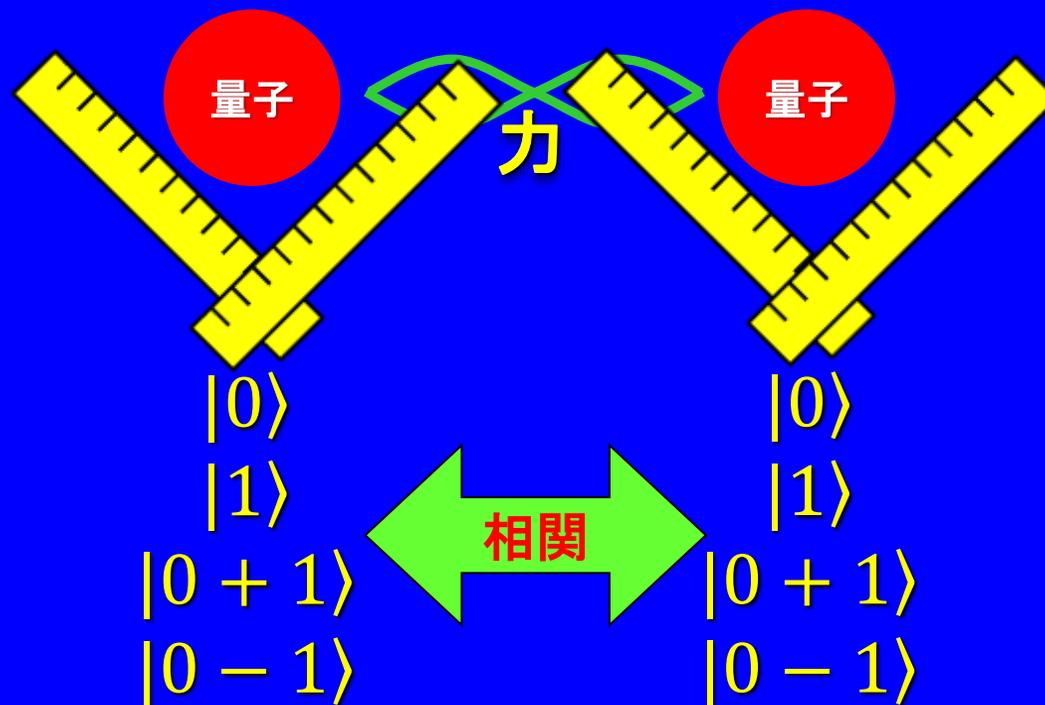
どの種類
かを測定

ベル測定

“量子もつれ”の源は？

2つの量子の間に働く力 = 相互作用

十分に相互作用した二つの量子は
どのような測定をしても
いつも相関した値を得る



“量子もつれ” の例

1. 光子 — 光子
(電磁相互作用)
2. 光子 — 電子
(スピン軌道相互作用)
3. 電子 — 電子
(交換相互作用)
4. 電子 — 核子
(超微細相互作用)

“量子もつれ”の作り方1

電磁相互作用の利用

1つの光子を
特殊な材料を通すと
2つの光子対に分かれる

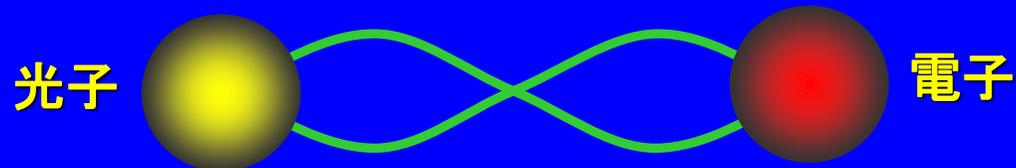
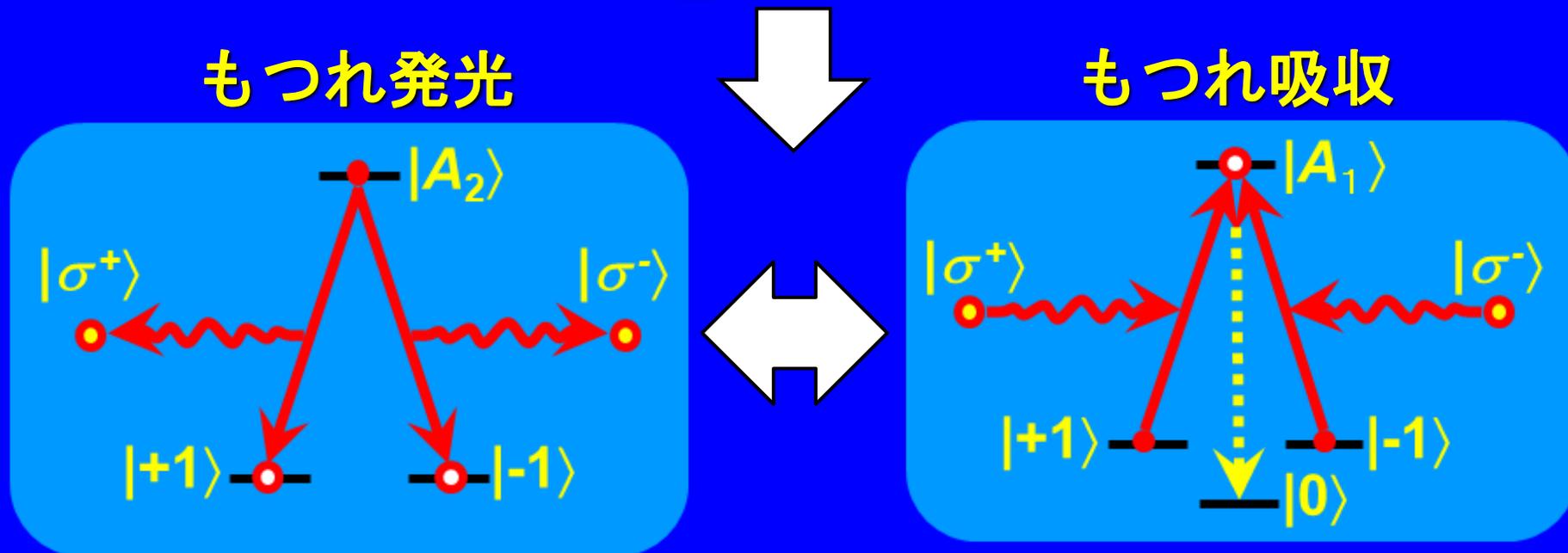


“量子もつれ”の作り方2

YNU方式

スピン軌道相互作用の利用

特殊な材料から発光した
光子は電子ともつれる



“量子もつれ”の作り方3

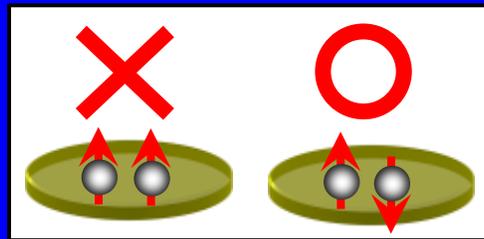
交換相互作用の利用

2つの電子を一つの箱に入れてみる！



パウリの排他原理で

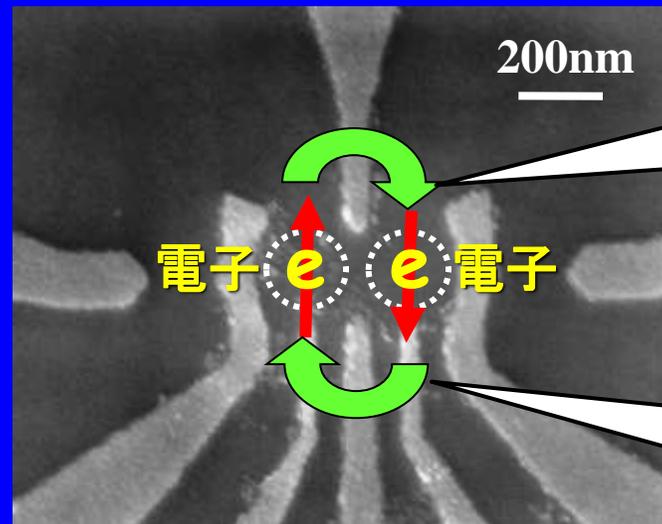
2つのもつれた電子対だけが箱に入る



電子

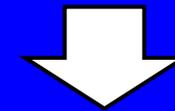
電子

量子もつれ状態



二重量子ドット

ゆっくり移すと必ず入る！



二つの箱に分ける！

“量子もつれ”の作り方4

YNU方式

超微細相互作用の利用

1. 一量子初期化 光を一定時間照射

これが重要！

$$|0\rangle_1|0\rangle_2$$

2. 一量子回転操作 マイクロ波を一定時間照射

$$|0+1\rangle_1|0\rangle_2 = |0\rangle_1|0\rangle_2 + |1\rangle_1|0\rangle_2$$

3. 二量子C-NOT操作 マイクロ波を一定時間照射

$$|0\rangle_1|0\rangle_2 + |1\rangle_1|1\rangle_2$$

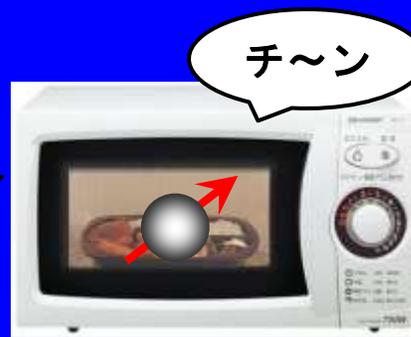
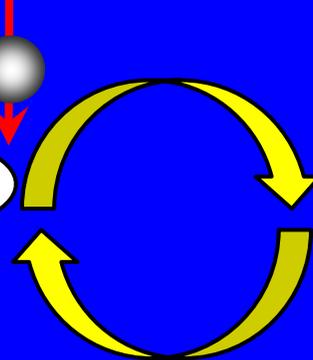
条件付きNOT

量子情報技術の基本操作

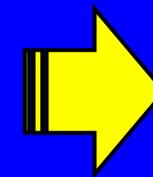


ポワ〜

レーザー光



マイクロ波
・ラジオ波



電子

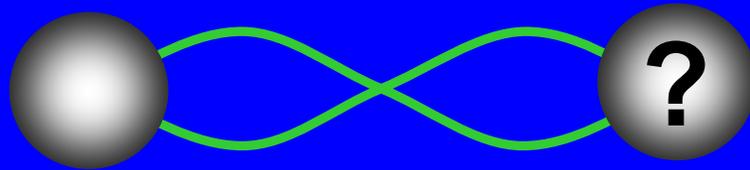
核子



量子もつれの
出来上がり！

問題

二つの量子が完全なもつれ状態にあるとき
片方の量子だけを取り出すと
どのような状態でしょうか



答え：

ヒント：2量子で一つの量子状態

正確には混合状態と呼び量子ではない

量子メディアとは

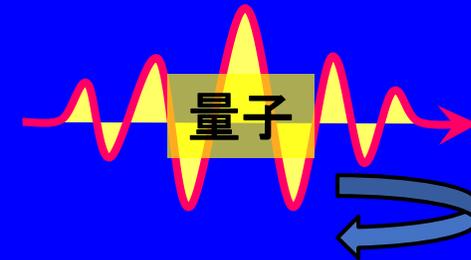
量子状態を入れる

媒体（メディア）あるいは 担体（キャリア）



この入れ物は

粒子でも波動でもよい



例えば

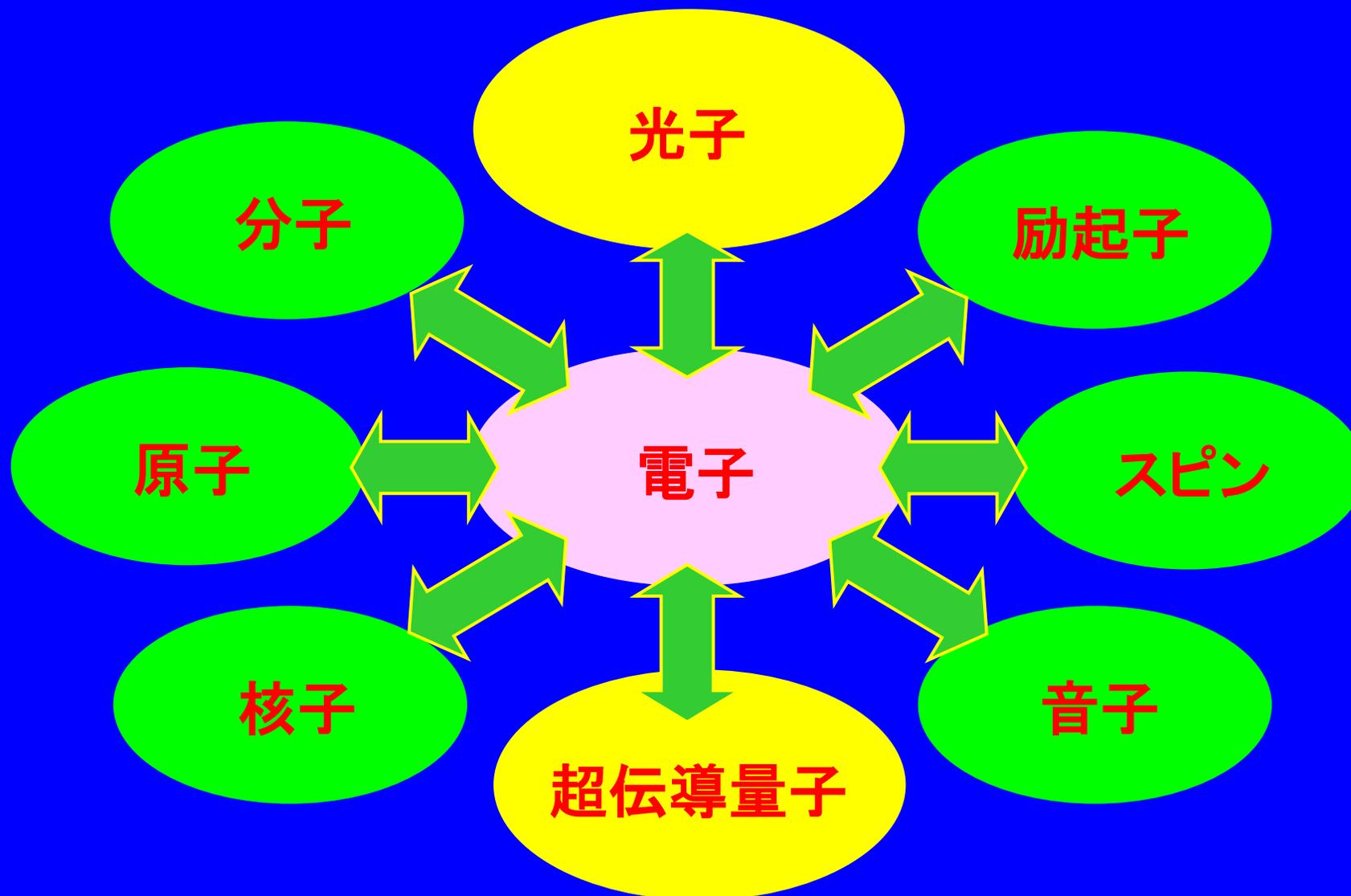
ある波長の光子を別の波長の光子に変換する場合

光子の量子状態は別の光子に移る

これも量子メディア変換



様々な量子メディア



量子には2種類ある

粒子のような量子

電子に代表される

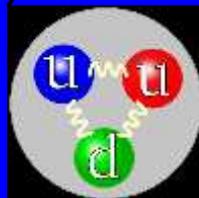
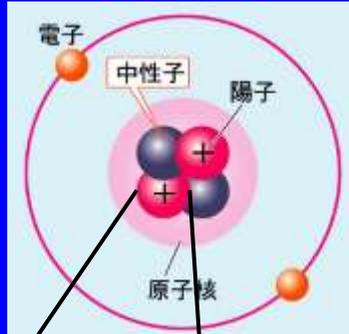
原子

電子+原子核

陽子 と 中性子

クォーク
ニュートリノ
ミュオン

複合粒子・準粒子
など様々



波動のような量子

光子に代表される

光子（電磁波）

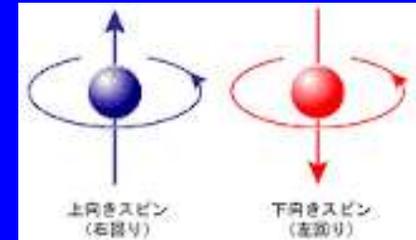
重力子（重力波）
グルーオン（強い力）
ウィークボソン（弱い力）

これらは ゲージ 粒子
と呼ばれ 力 を媒介する

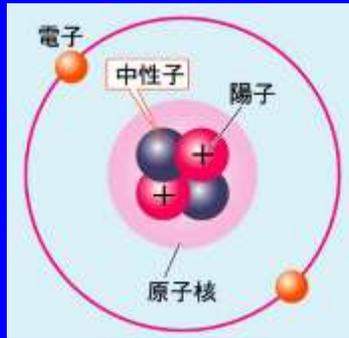
スピンとは

量子力学的な粒子が本来持っている

角運動量



あらゆる量子に固有のスピンがある



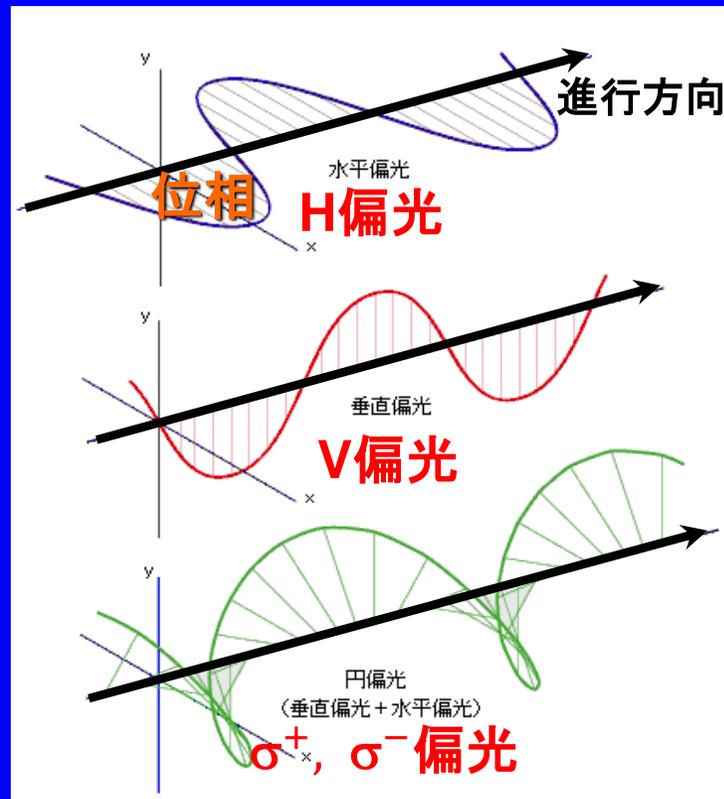
核子 { 電子 $\frac{1}{2}$ }
陽子 $\frac{1}{2}$ 自転に例えられる
中性子 $\frac{1}{2}$

偏光とは

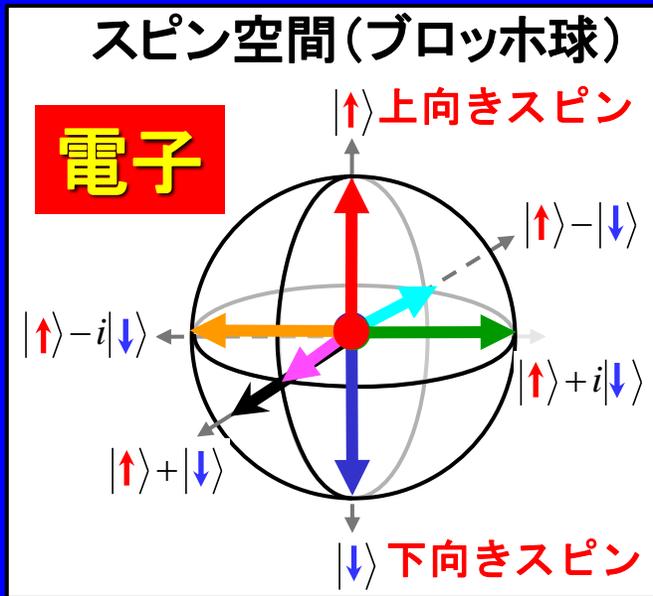
電場や磁場の偏りのこと
スピンと同様に
光子の角運動量を表す \Rightarrow スピン1

直線偏光

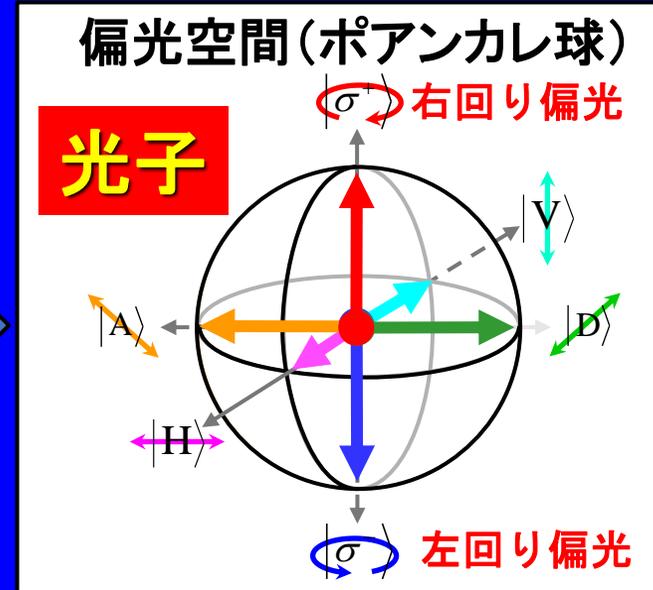
円偏光



スピンと 偏光の関係



等価



スピン $\frac{1}{2}$ なので
取り得る固有状態は
 $|+\frac{1}{2}\rangle$ と $|-\frac{1}{2}\rangle$ の二つ

スピン 1 だが
0 (縦波) は真空中では存在せず
取り得る固有状態は
 $|+1\rangle$ と $|-1\rangle$ の二つ

量子ビットと呼び $|0\rangle, |1\rangle$ で表す

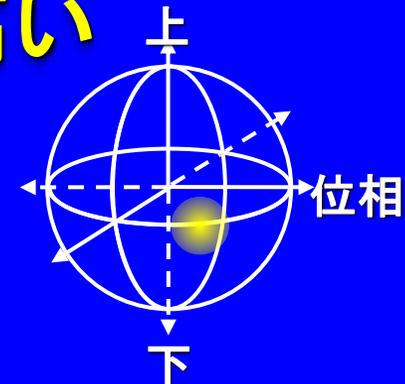
論理キュービット

複数の物理キュービットや複数の自由度で
構成された冗長性のあるキュービット

例えば 二つの電子スピンの
いずれも上向き $|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle$ を基底状態 $|0\rangle$
いずれも下向き $|\downarrow\rangle|\downarrow\rangle$ を基底状態 $|1\rangle$
とする

冗長性がある分
ノイズや制御誤差に対する耐性が高い

光子の偏光キュービットは
論理キュービットである



本講演の内容

1. 量子とは？

2. 量子通信とは？

3. 量子中継とは？

量子コンピュータと量子暗号通信の関係

- 量子コンピュータで素因数分解が早くなると現代暗号は解読される。
- 量子コンピュータでも解読できない暗号通信(=量子暗号通信)が必要となる。

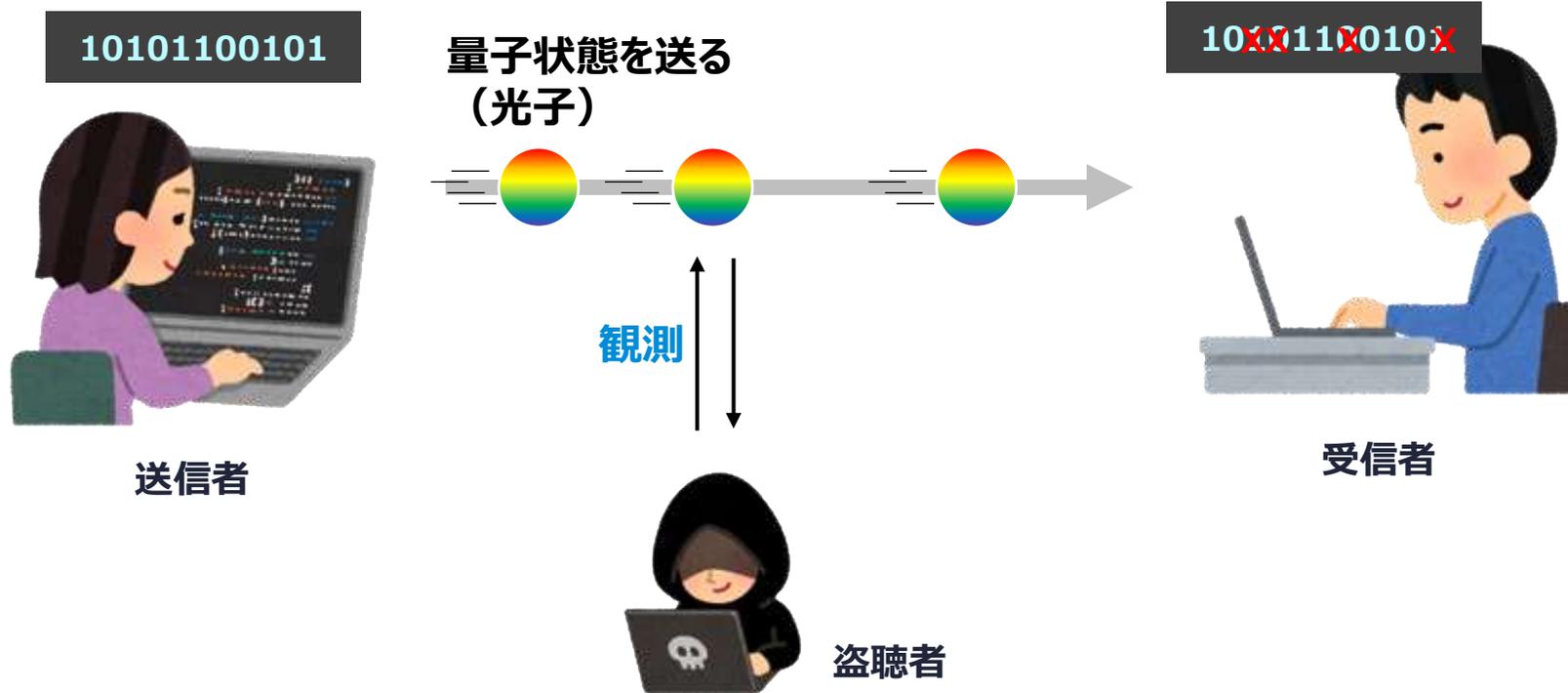
量子暗号鍵配送 (QKD)

BB84 (第1世代QKD)

観測によって量子状態が変化する性質を利用して、盗聴を検知する。

BBM92 (量子もつれ型)

エンタングルした光子対を送信者と受信者が測定することで安全に鍵を共有する。

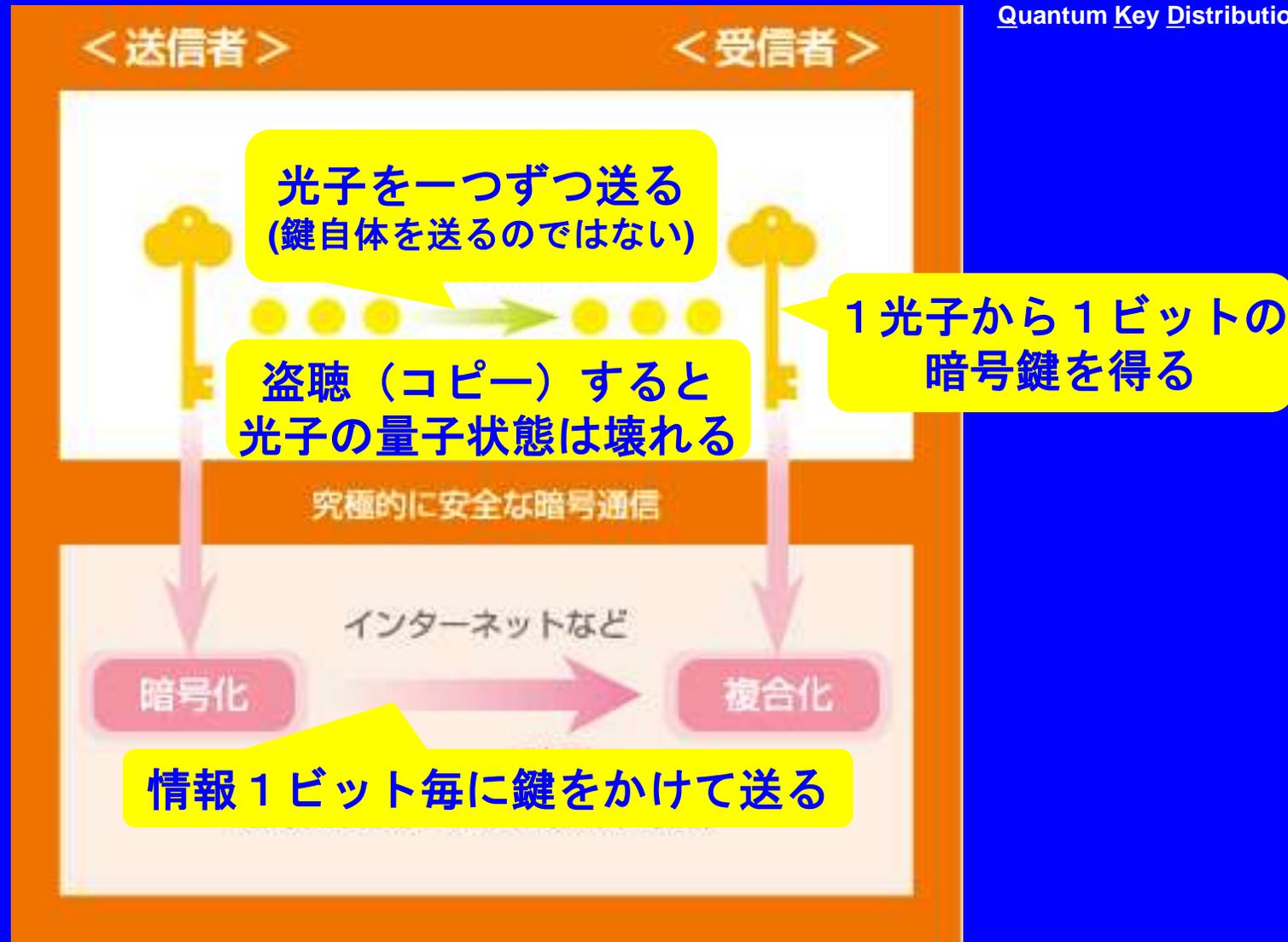


物理法則が通信システムの安全性を担保。

量子暗号通信とは？

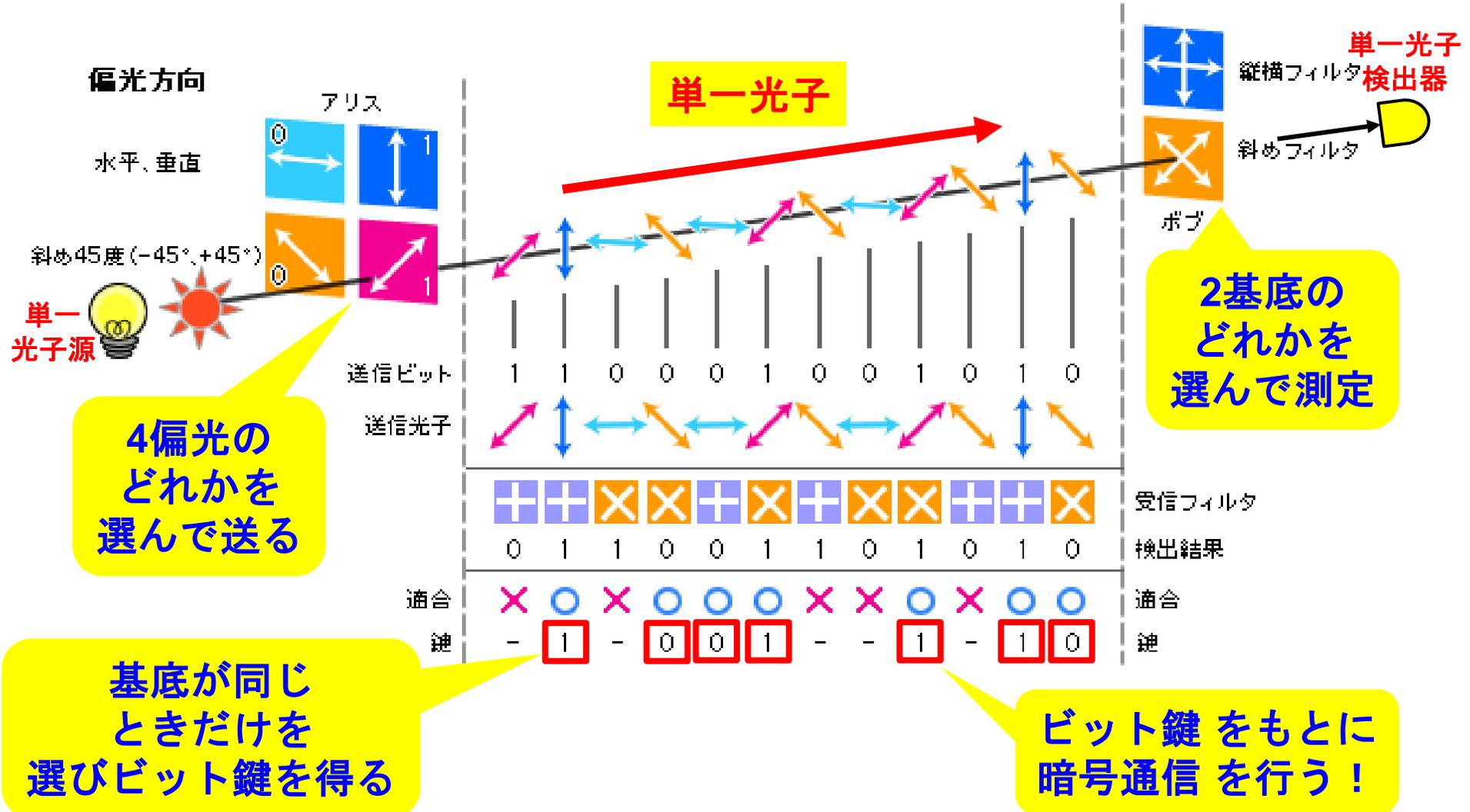
通信の鍵を光子で送ること！ = 量子鍵配布 (QKD)

Quantum Key Distribution



量子暗号通信の基本原則 (BB84)

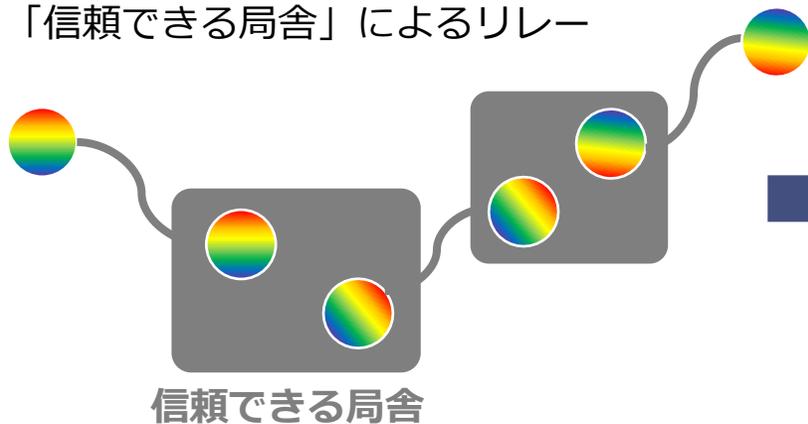
“量子重ね合わせ”の原理を利用！



量子通信・量子インターネット

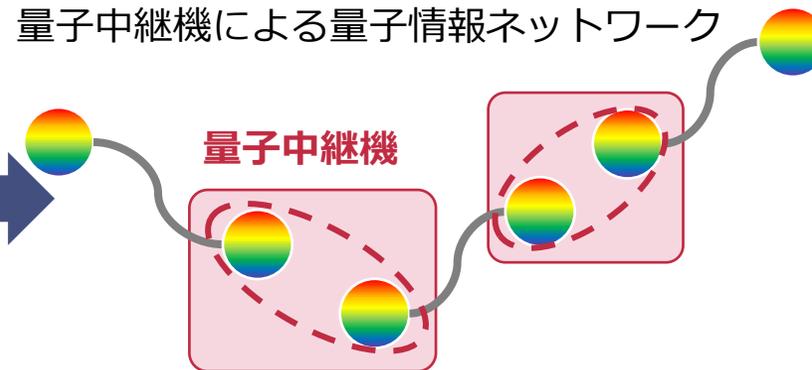
量子暗号鍵配送 (QKD)

「信頼できる局舎」によるリレー



量子インターネット

量子中継機による量子情報ネットワーク



		データ	
		古典	量子
通信	古典	インターネット	-
	量子	量子暗号鍵配送	量子インターネット

量子暗号通信の限界

- 量子暗号通信は光子が届く範囲（～100km）が限界である。
- 距離を延ばすためには**量子中継器**と呼ぶ小型の量子コンピュータが必要となる。

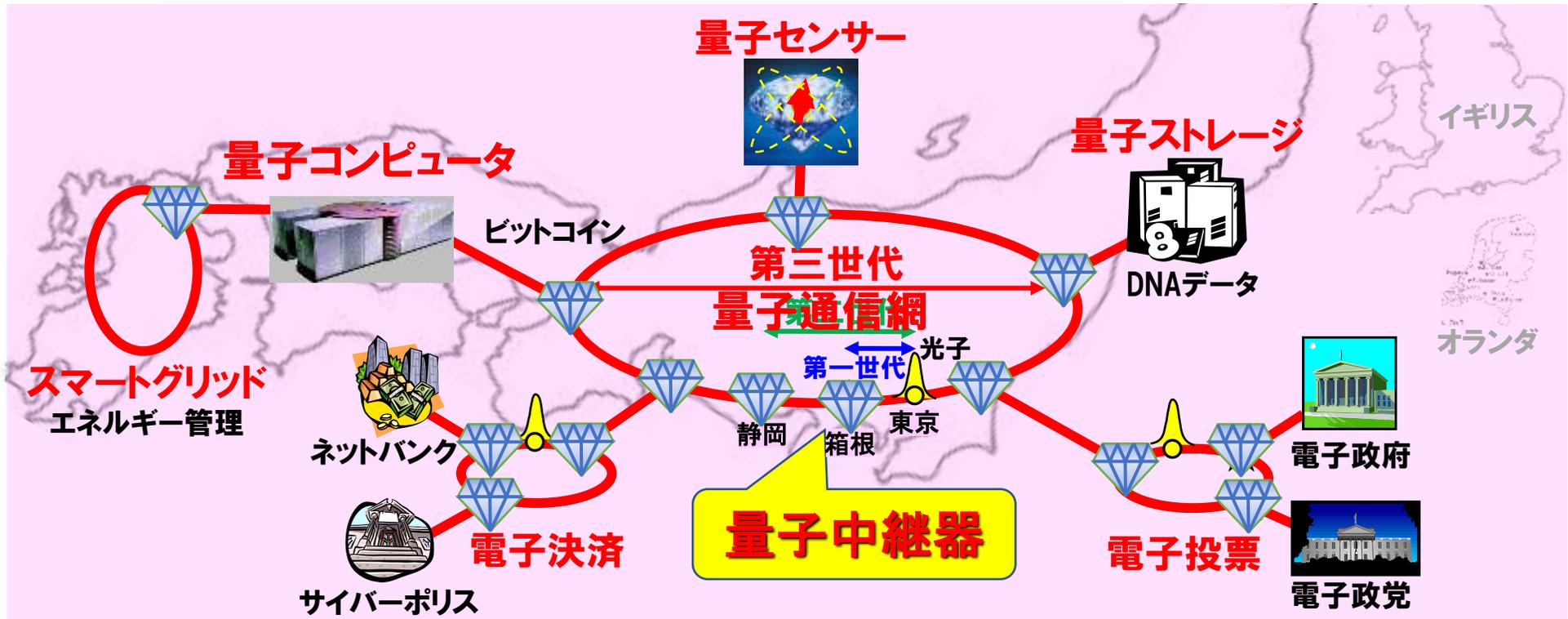
本講演の内容

1. 量子とは？

2. 量子通信とは？

3. 量子中継とは？

量子暗号通信の世代



第一世代 ~ 100km 単一光子を直接伝送 ⇒ 中継が不要

第二世代 ~ 200km 中継が一度だけ必要 ⇒ **確率的**量子中継

第三世代 > 1000km 中継が何度も必要 ⇒ **決定論的**量子中継

ビームスプリッター
で実現可能

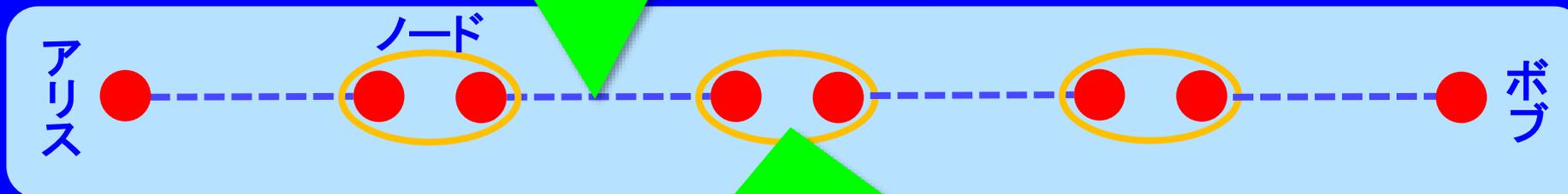
量子メモリがな
ければ実現不可能

量子中継器の原理

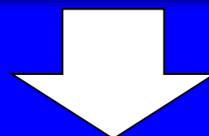
量子中継器 = 距離のある量子誤り訂正システム

長時間量子メモリが不可欠

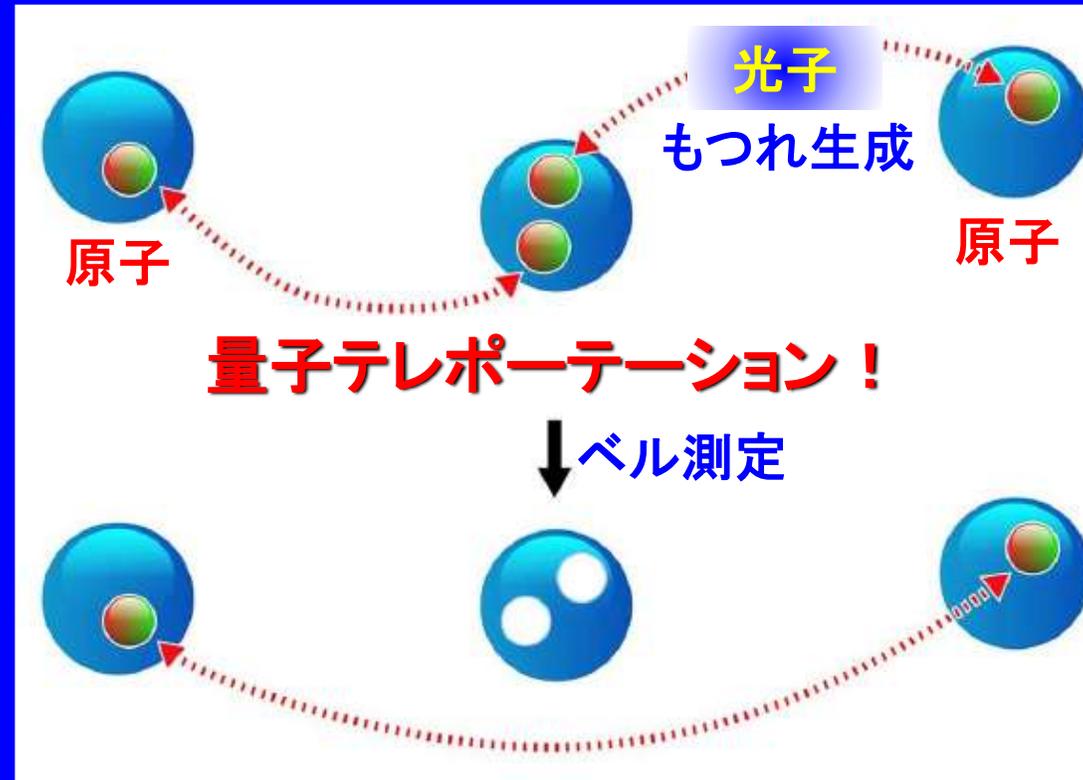
遠隔もつれ生成(確率的)



局所もつれ測定(完全ベル測定)
ヘラルド → オンデマンド型(決定論的) + 誤り訂正

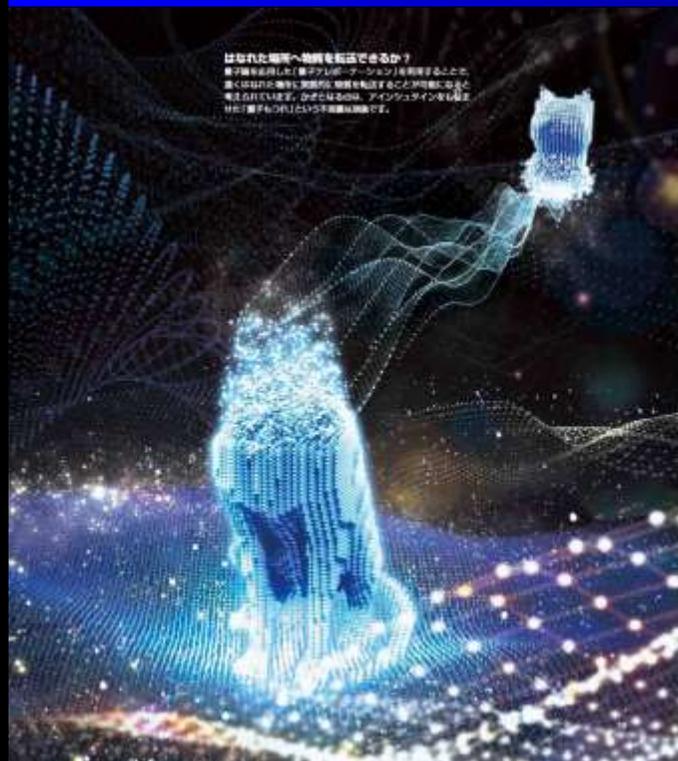


量子中継の原理？



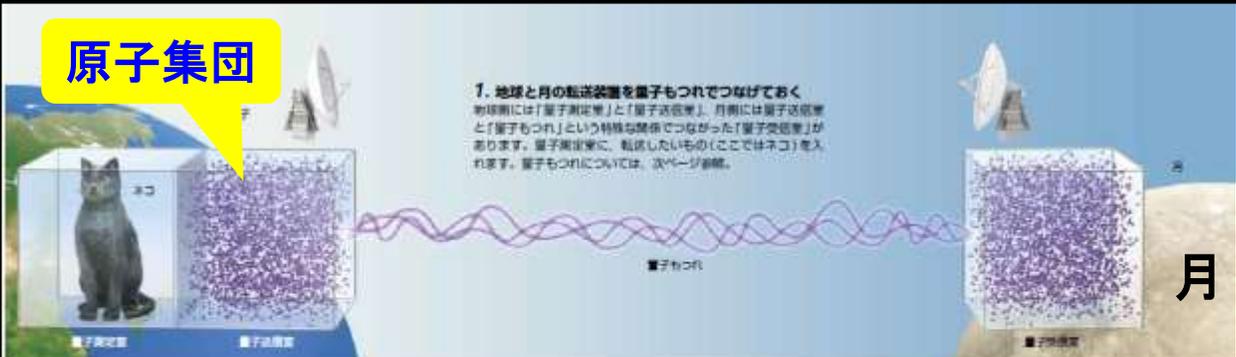
長距離もつれのできあがり！

量子テレポーテーション？



はなれた場所へ動物を転送できるか？
量子力学を用いた「量子テレポーテーション」を利用することで、
遠く離れた場所へ動物の状態を転送することが可能になると
考えられています。ここではネコ、アノコウタンをもとに
量子テレポーテーションの仕組みを説明します。

原子集団



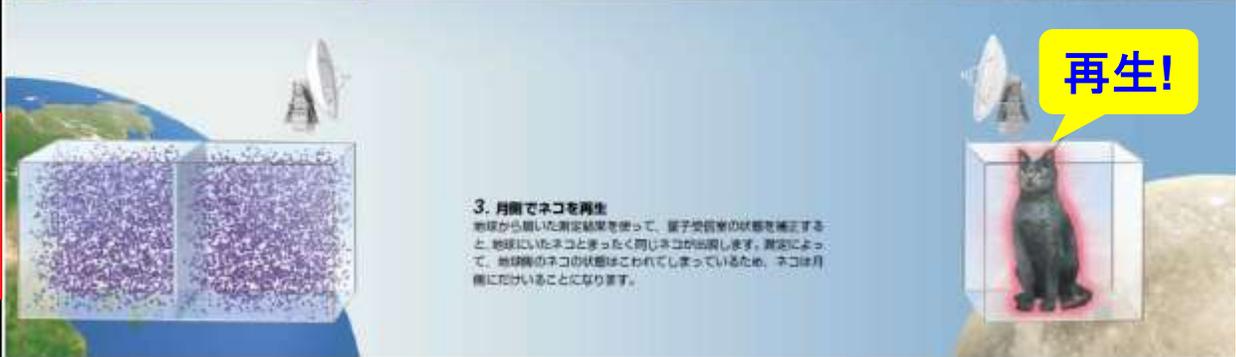
1. 地球と月の転送装置を量子もつれでつなげておく
物理的には「量子測定室」と「量子送信室」、月側には量子受信室
と「量子もつれ」という特殊な関係でつながった「量子受信室」が
あります。量子測定室に、転送したいもの（ここではネコ）を入
れます。量子もつれについては、次ページ参照。

ベル測定



2. ネコの状態を測定し、測定結果を電波で送信
ネコを構成するすべての物質の情報を、「もつれ測定」という特殊
な方法で測定します。測定を行うと、同時に月の量子受信室の状
態も変化します。ただし、まだネコは月にはおられません。測定
結果を、電波によって地球から月へと送ります（測定結果を送る
必要性については、71ページ参照）。

再生!



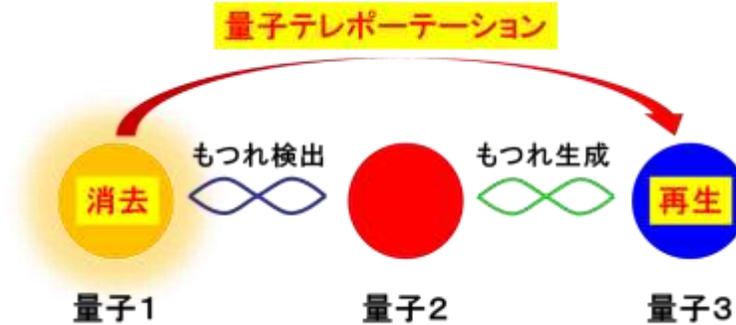
3. 月側でネコを再生
地球から届いた測定結果を使って、量子受信室の状態を確定する
と、地球にいたネコとまったく同じネコが出現します。測定によっ
て、地球側のネコの状態はこわれてしまっているため、ネコは月
側にだけいることとなります。

Newton

GRAPHIC SCIENCE MAGAZINE ニュートン

2018年6月号

量子中継の原理



1. Prepare an arbitrary state in qubit 1 and an entangled state between qubit 2 and 3.

$$|\psi\rangle_{123} = (\alpha|0\rangle_1 + \beta|1\rangle_1) (|0\rangle_2|0\rangle_3 + |1\rangle_2|1\rangle_3)$$

2. Project qubit 1 and 2 into an entangled state.
(entanglement detection)

$$P_{12} = (|0\rangle_1|0\rangle_2 + |1\rangle_1|1\rangle_2) ({}_1\langle 0|_2\langle 0| + {}_1\langle 1|_2\langle 1|)$$

3. Check if the state of qubit 3 is the same as qubit 1.

$$P_{12}|\psi\rangle_{123} = \alpha|0\rangle_3 + \beta|1\rangle_3$$

第2部

量子情報研究最新動向

～量子コンピュータ、量子通信から
量子インターネットまで～

1946年 真空管による最初のコンピュータ
ENIAC



2016年 超伝導による最初の量子コンピュータ

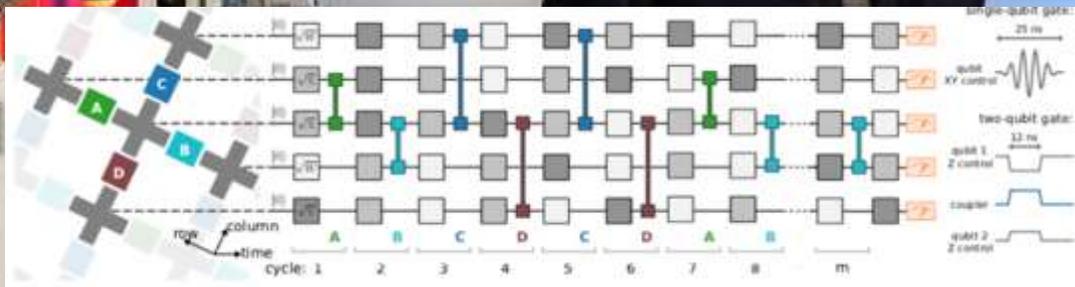


Google 「量子優位性」を実証

John Martinis
(UCSB)



Sycamore



ランダム量子回路サンプリング
スパコンで1万年（2日？）かかる問題を
3分ほどで実行

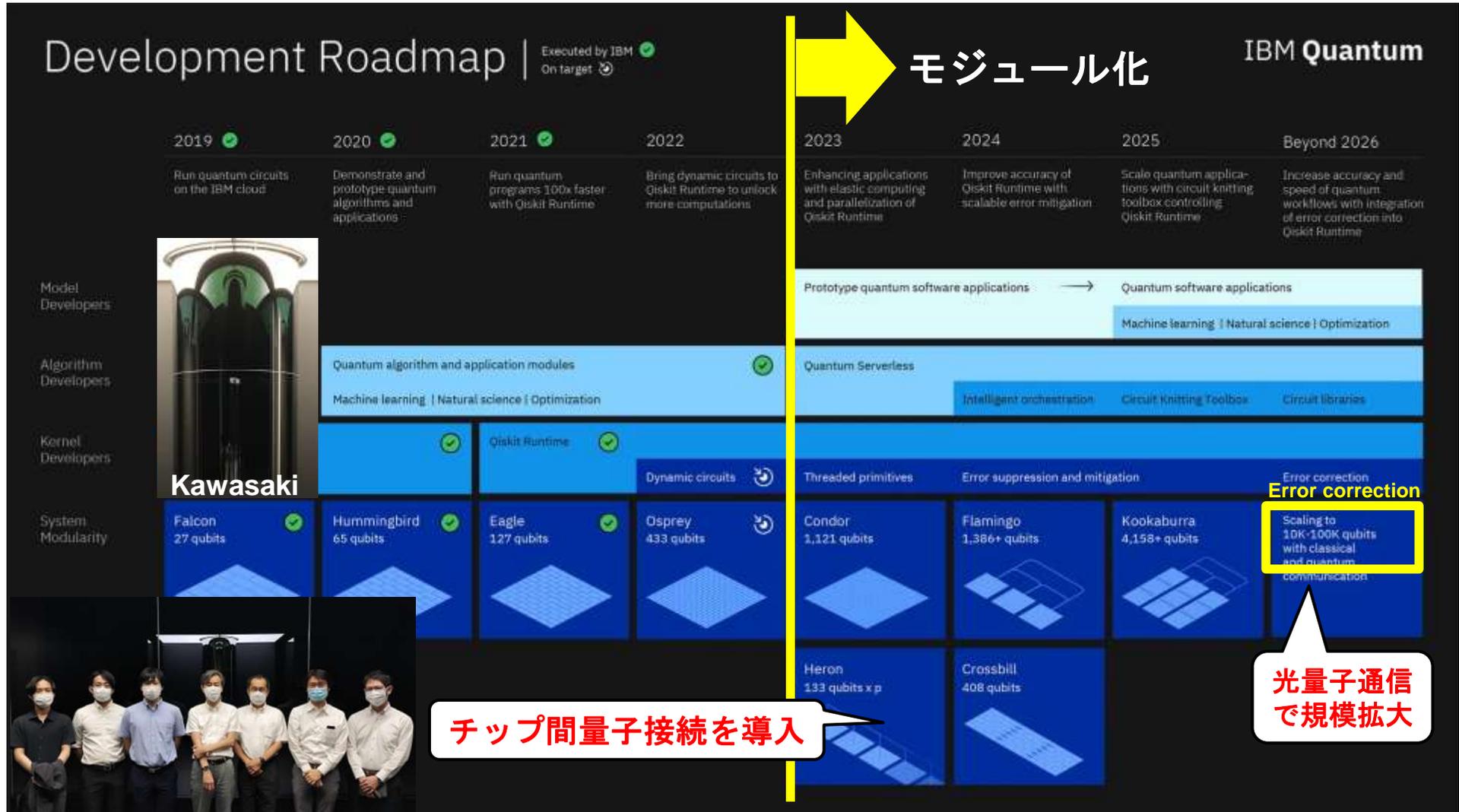
量子コンピューターがビットコインを滅ぼす？



冷凍機間を冷凍管で接続すると体育館にも収まらない？



IBM 超伝導量子コンピュータ (ゲート型) 開発ロードマップ (光量子接続で100K量子ビット実現)

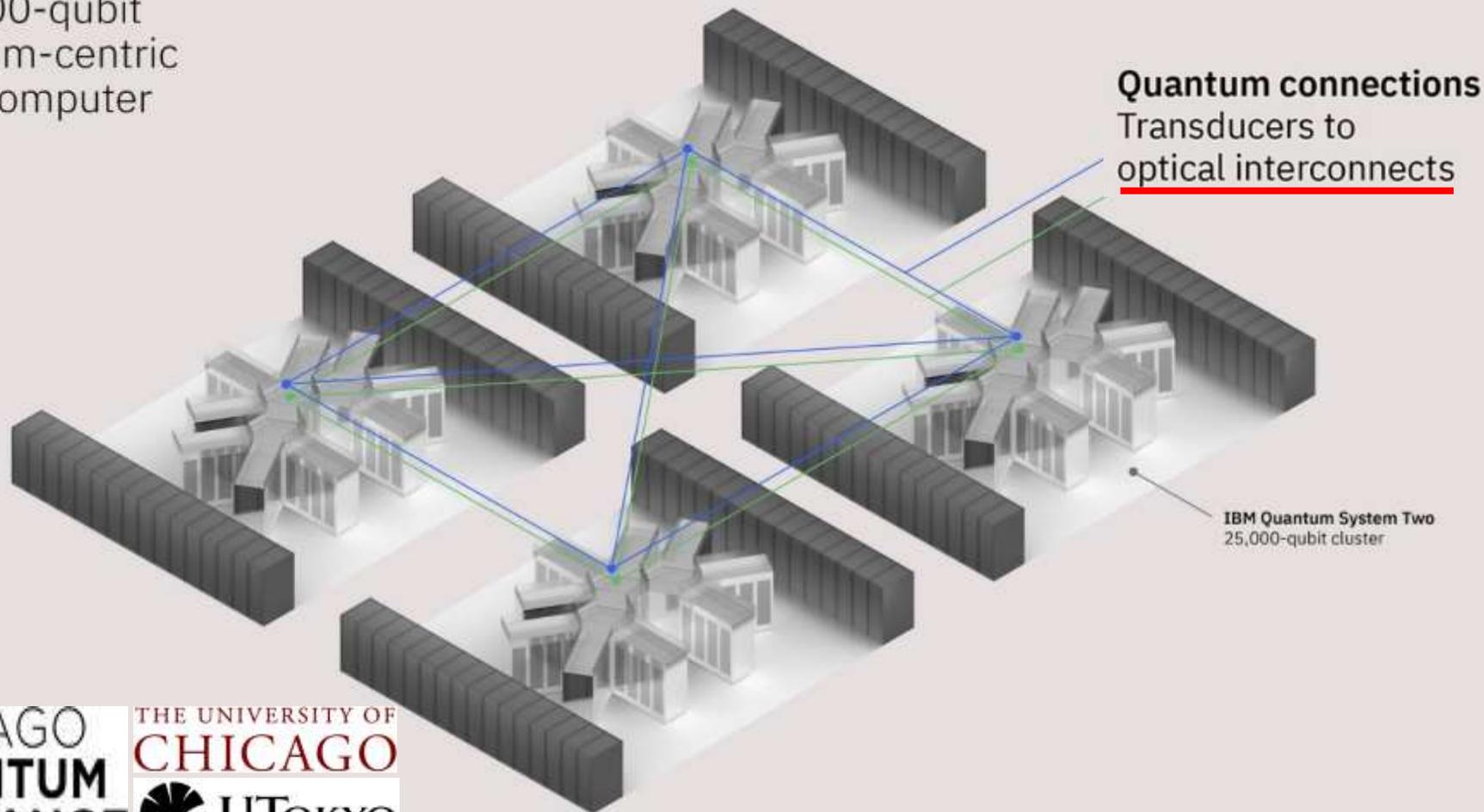




超伝導量子コンピュータ (ゲート型) 開発ロードマップ (光量子接続で100K量子ビット実現)

IBM Launches \$100 Million Partnership with Global Universities to Develop Novel Technologies

100,000-qubit
quantum-centric
supercomputer
—
2033



IBM Quantum

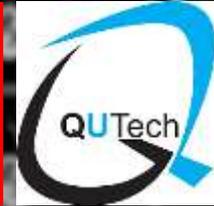
1969年 電気による最初のインターネット

ARPANET

(UCLA-スタンフォード研究所)



2021年 ダイヤモンドによる 最初の量子インターネット

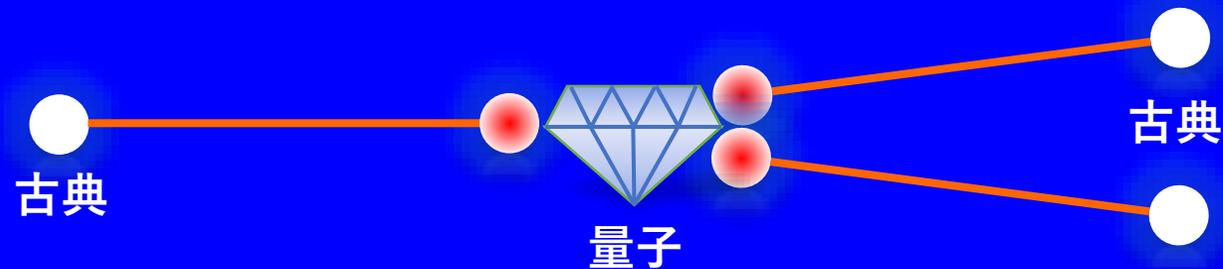


量子通信の開発ステップ

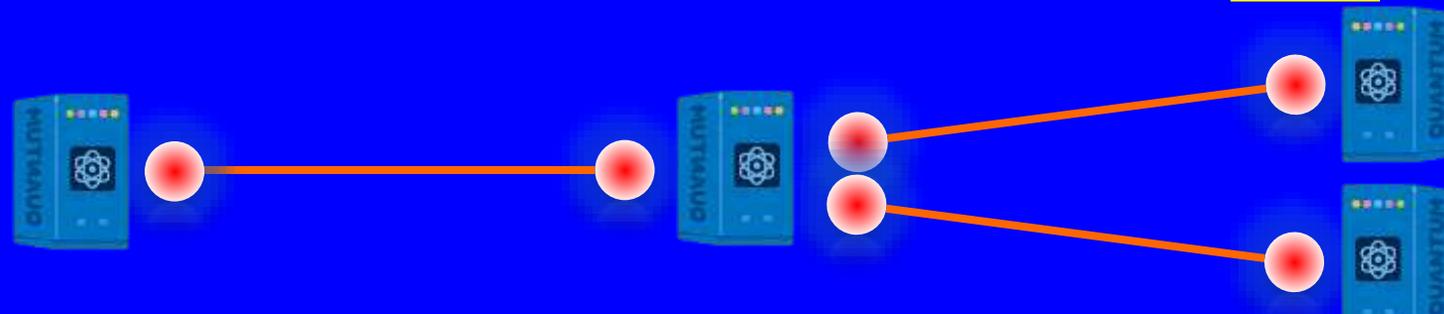
1. **トラステッドノードQKDネットワーク** → 絶対安全ではない



2. **量子中継ネットワーク** → 絶対安全だが**古典**データを交換



3. **量子コンピュータネットワーク** → 絶対安全で**量子**データを交換



量子インターネット実現には量子コンピュータによる量子もつれ交換が必要

量子中継の原理

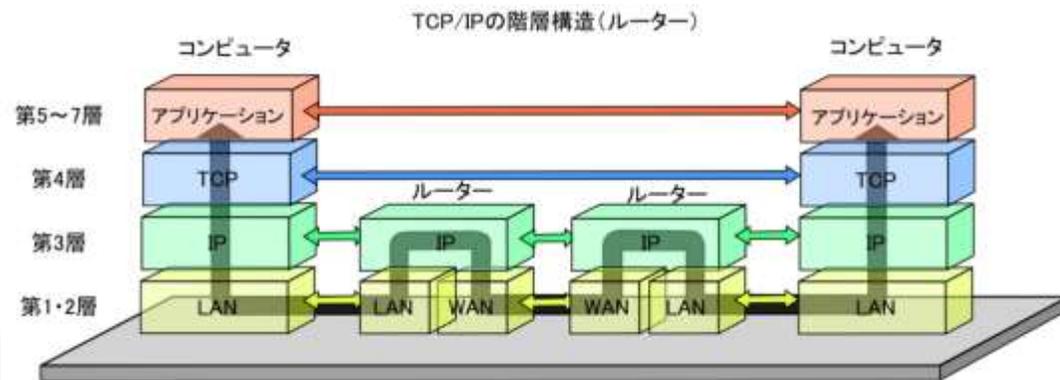
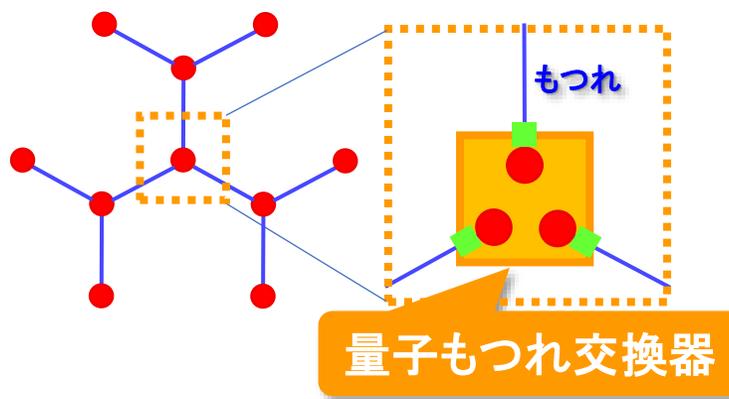
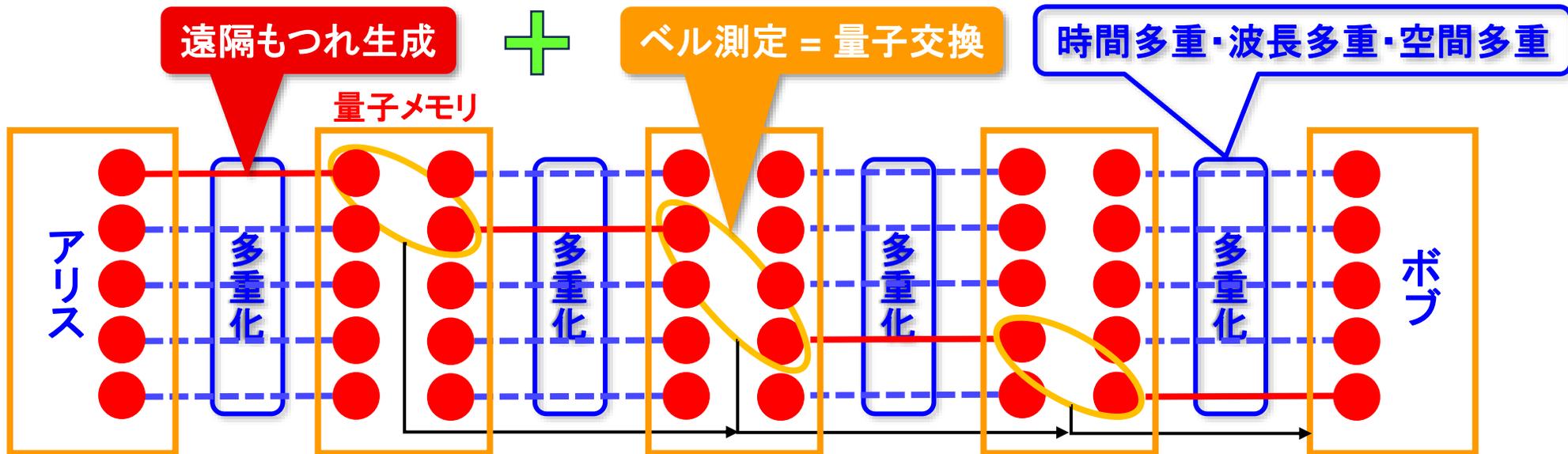
長距離化

シングルホップ
ではなく
マルチホップ
が不可欠



ネットワーク化

P2Pではなく
分岐を制御する
量子もつれ交換器
が不可欠



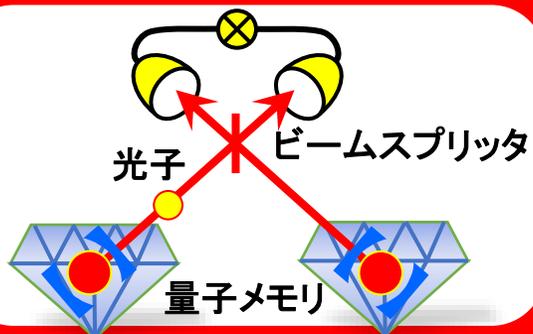
世界各国の取り組み

量子中継の方式

量子メモリ方式



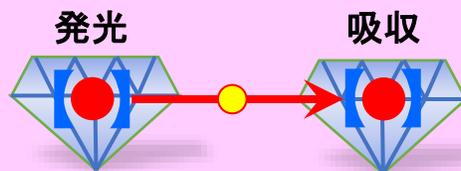
光子干渉方式



位相同期が必要も高効率



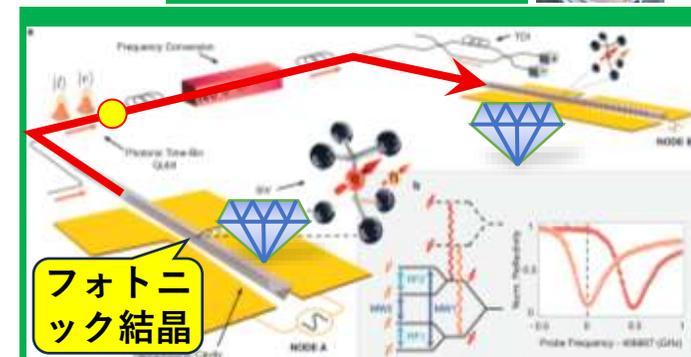
光子吸収方式



位相同期不要で高耐性



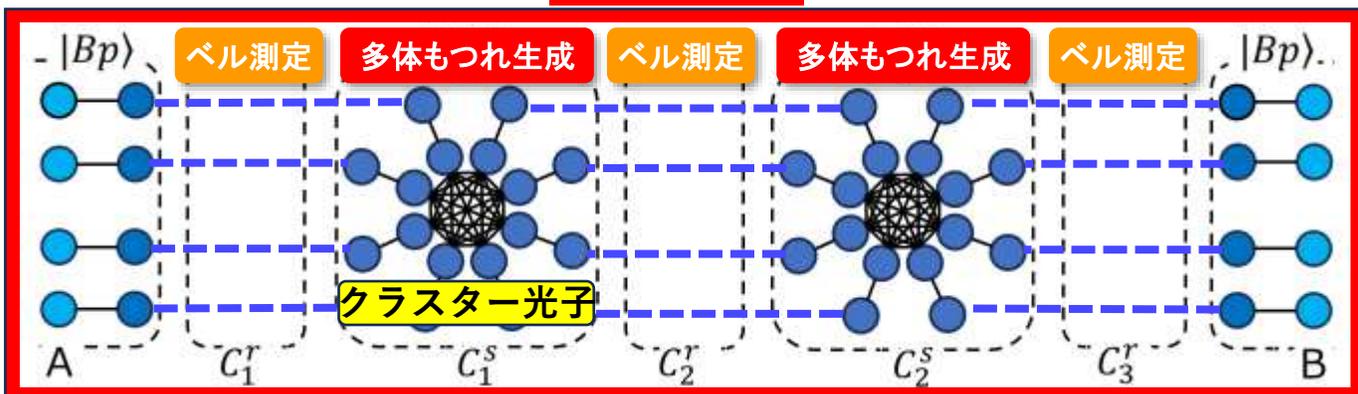
光子散乱方式



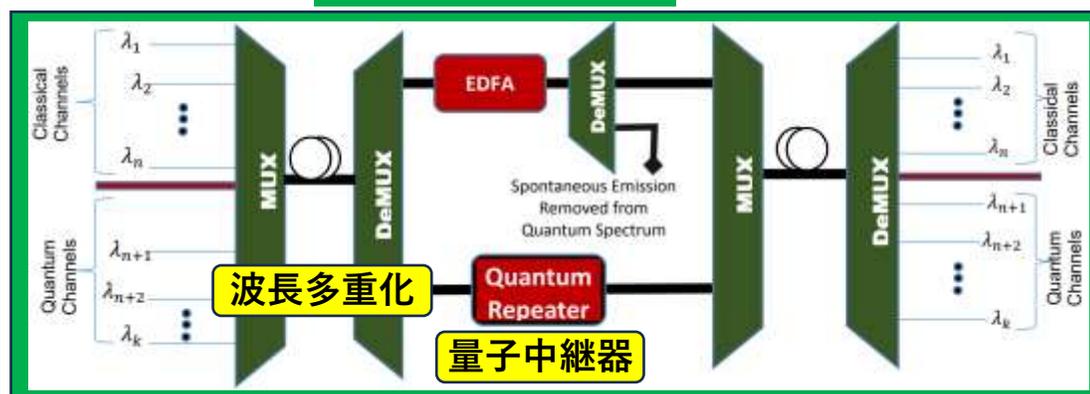
低効率も位相同期が不要

多重化方式

全光方式

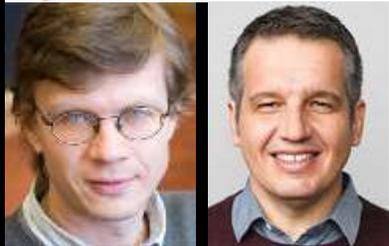


波長多重方式



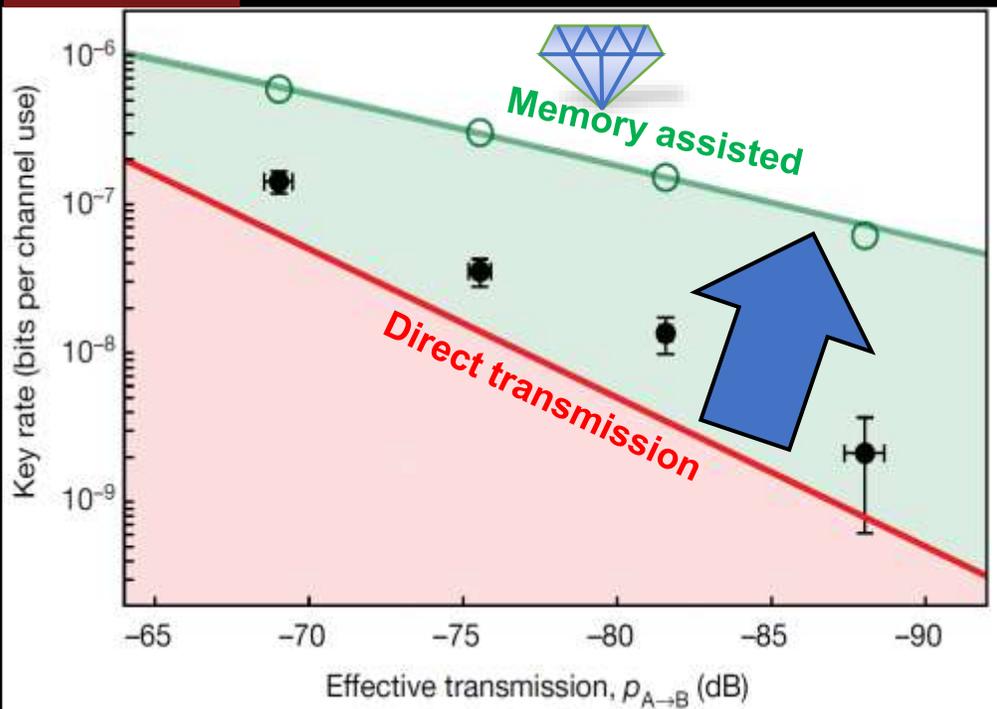
2020年「量子中継優位性」を実証

まだ量子インターネットとは言えない



Mikhail Lukin
Marko Loncar
(Harvard)

nature



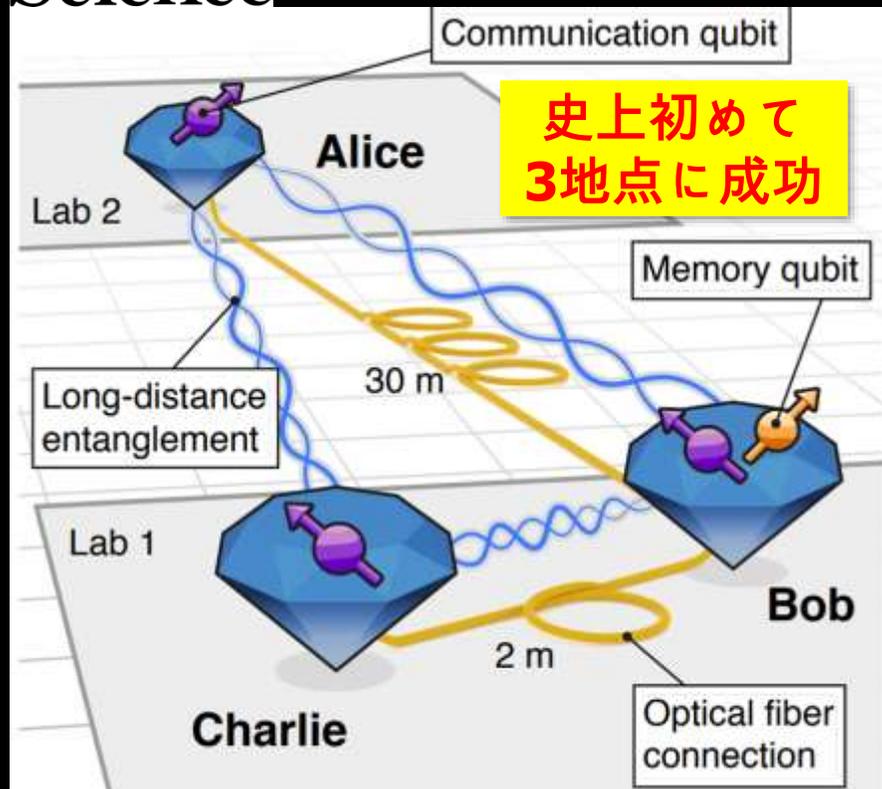
ダイヤモンド
量子中継

2021年 量子中継 の基本構成を実証

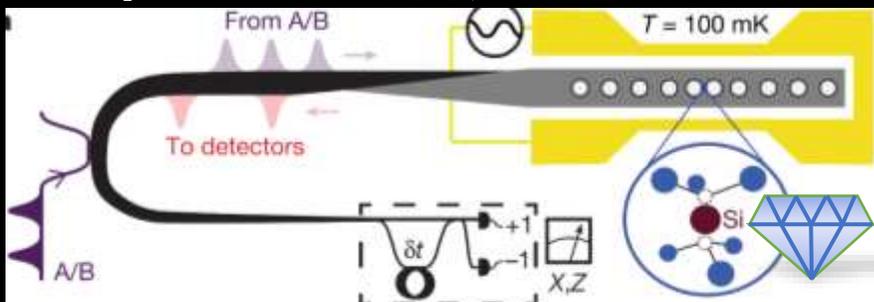


Ronald Hanson
(QuTech / TU Delft)

Science



2023年 量子メモリ間長距離もつれ実証



遠隔量子メモリ間もつれ生成の世界記録

2020



Rb原子集団間 (1光子干渉)
22 km (実フィールド?)
 もつれレート **0.007Hz**

J.W. Panグループ (USTC) Nature 578, 240 (2020)

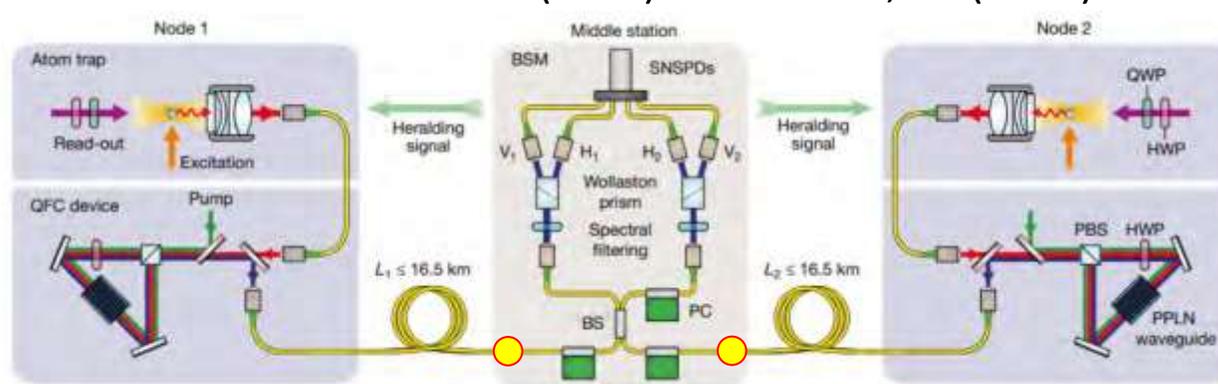


2021



Rb単一原子間 (2光子干渉)
33 km (ラボ内)
 もつれレート **0.01 Hz**

H. Weinfurterグループ (LMU) Nature 607, 69 (2022)

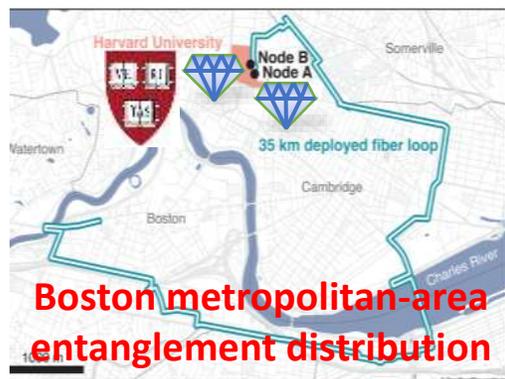
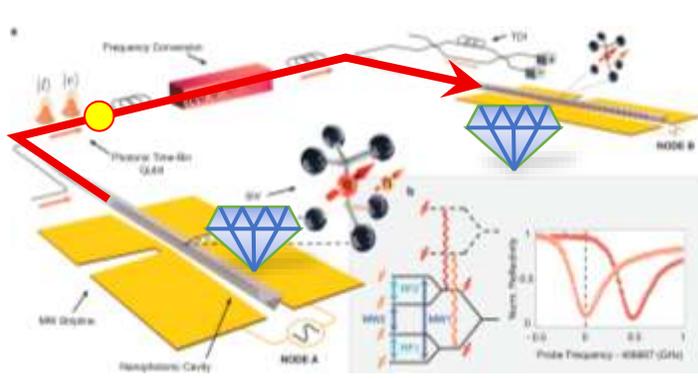


2023



ダイヤモンド単一SiV間 (散乱方式)
35 km (実フィールド_{17dB}) **0.0002Hz**

M. Lukinグループ (Harvard, MIT & AWS) Nature 629, 573 (2024)

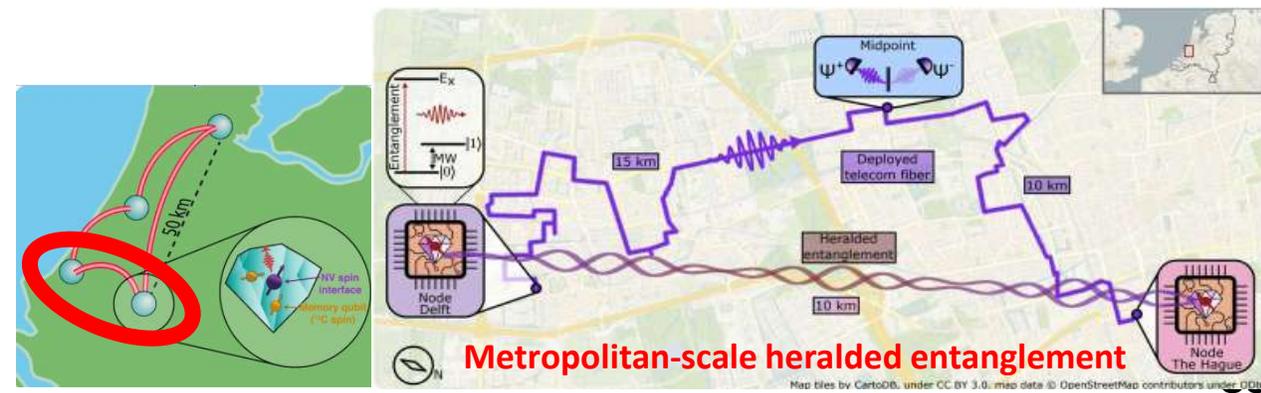


2024

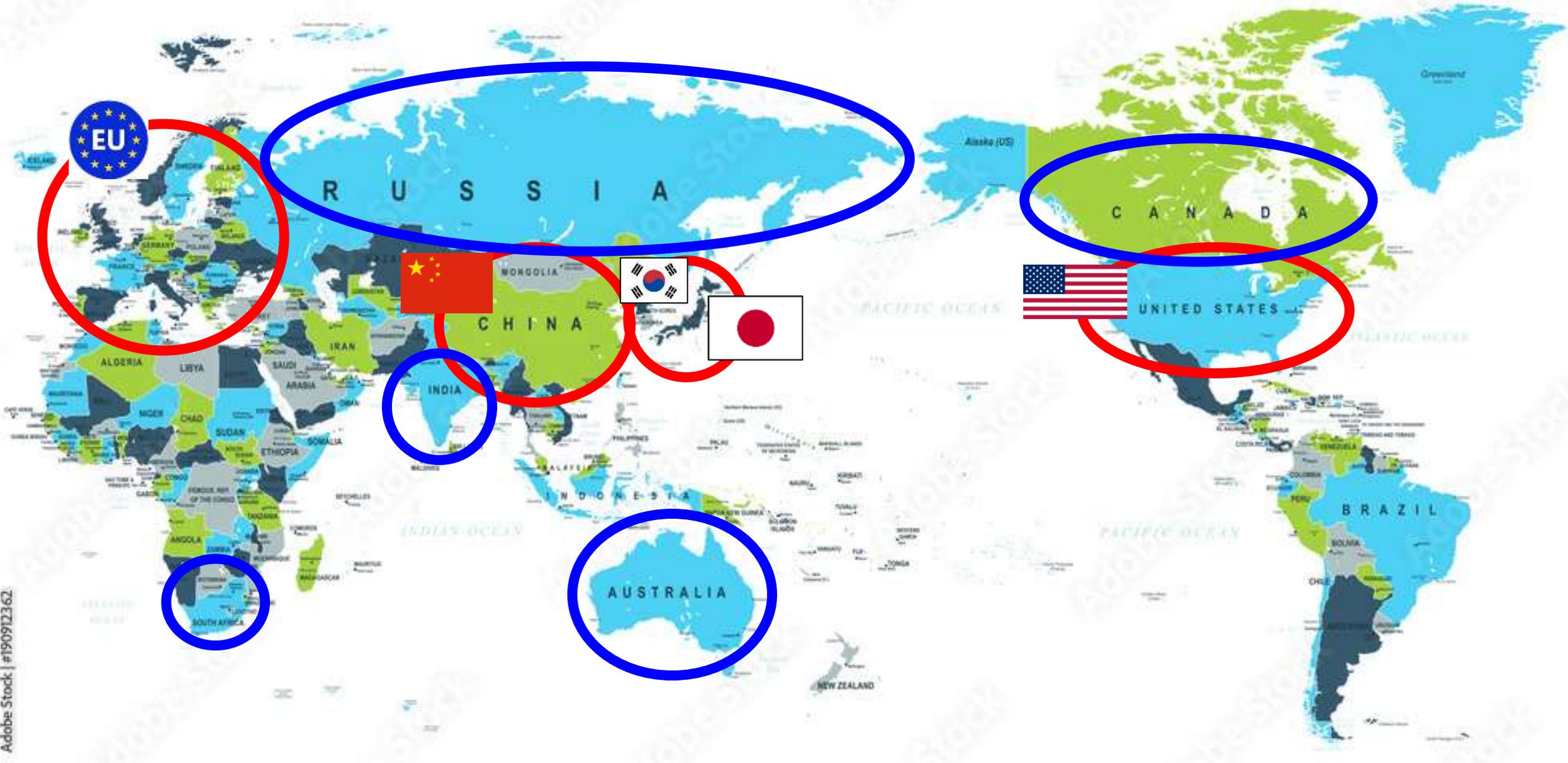


ダイヤモンド単一NV間 (1光子干渉)
25 km (実フィールド) **0.48Hz**

R. Hansonグループ (TU. Delft & QuTech) arXiv:2404.03723



QKDと量子ネットワークの世界状況

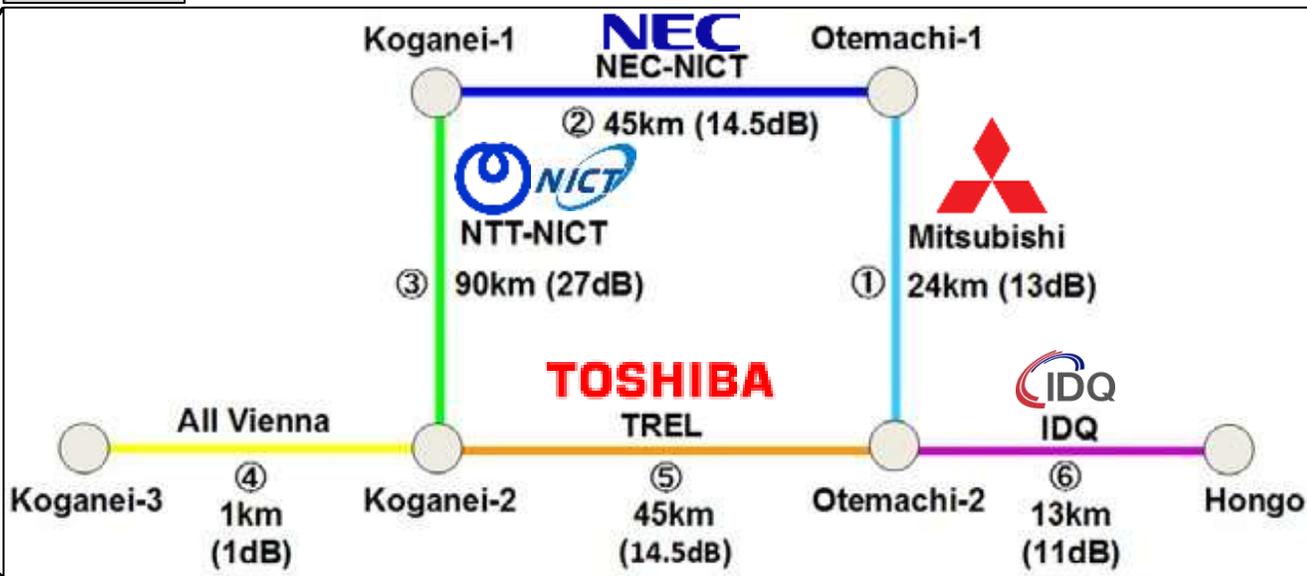




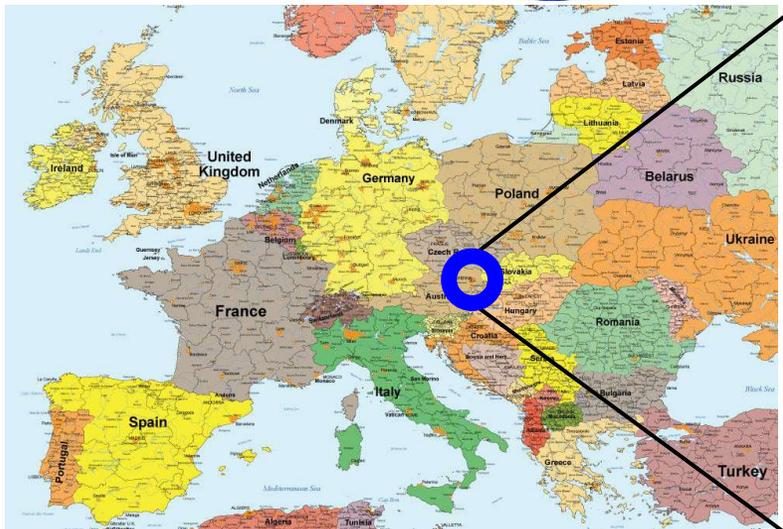
South Korea (2011~) (QKD Network)



Japan (Tokyo QKD Network) 2000~2010



EU (SECQC QKD Network: Vienna) 2004~2008



中国



Quantum backbone (2018)

Optics Express Vol. 26, No. 18 (2018)



Main players



Banks



Power grid operators



QKD network 量子中繼network



OPEN QKD 2019~2022



UNIQUORN 2018~2022

Affordable Quantum Communication for Everyone



EuroQCI 2021~2027

DECLARATION ON A QUANTUM COMMUNICATION INFRASTRUCTURE FOR THE EU

All 27 EU Member States have signed a declaration agreeing to work together to explore how to build a quantum communication infrastructure (QCI) across Europe, boosting European capabilities in quantum technologies, cybersecurity and industrial competitiveness.



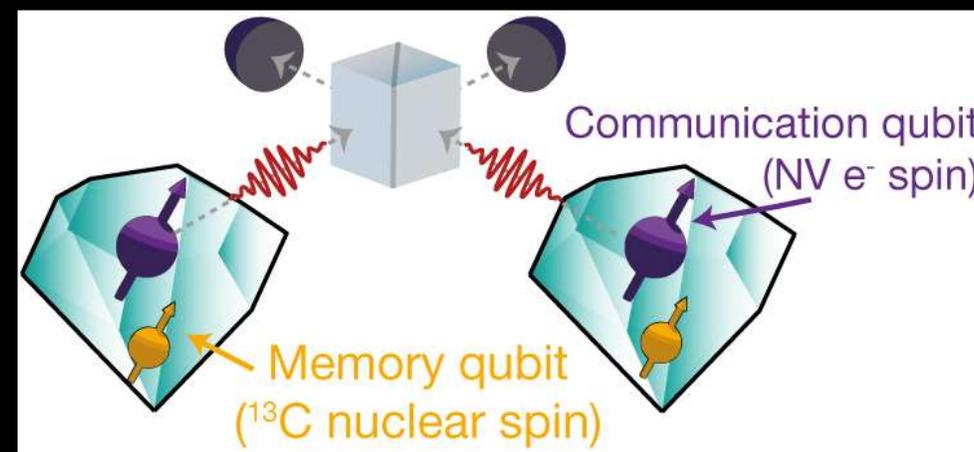
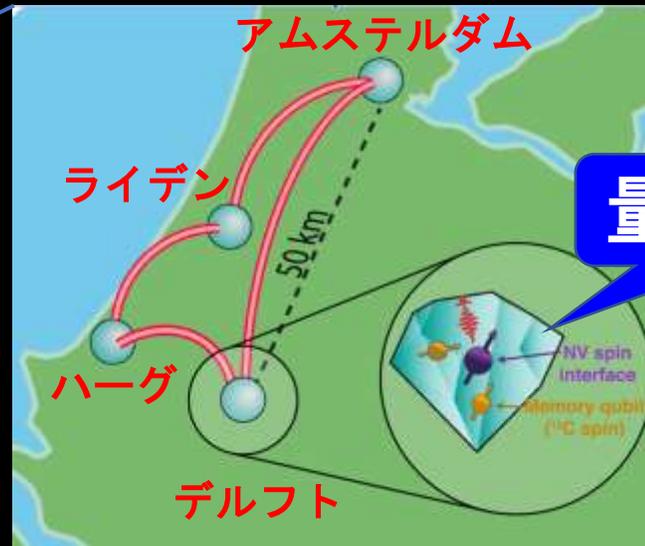


オランダQuTechの量子中継ネットワーク

<https://labs.ripe.net/Members/becha/introduction-to-the-quantum-internet>



全長100kmの4都市接続
量子中継ネットワーク構築計画





ドイツの量子中継コンソーシアム (Q.Link.X) ⇒ QR.X

2019年発足



全独30機関以上の産官学が連携
量子中継技術者を集結した
コンソーシアム構築



ダイヤモンド、量子ドット、冷却原子

Partners

- Technische Universität München
- Technische Universität Dortmund
- HighFinesse Laser and Electronic Systems GmbH, Tübingen
- Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Berlin
- Technische Universität Berlin
- Universität Stuttgart
- Universität Paderborn
- Universität des Saarlandes, Saarbrücken
- Freie Universität Berlin
- Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden
- Ruhr-Universität Bochum
- Swabian Instruments GmbH
- Leibniz Universität Hannover
- Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching
- Julius-Maximilians-Universität Würzburg
- Universität Bremen
- Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
- Universität Ulm
- Humboldt-Universität zu Berlin
- Universität Kassel
- Johannes Gutenberg-Universität Mainz
- Karlsruher Institut für Technologie
- Ludwig-Maximilians-Universität München

<https://qlinkx.de/>

米国



ARPANET (1969-83)



ESnet—Connecting DOE Labs to the World of Science



量子中継計画

East

West

Central



West



Quantum Application Network (QUANT-NET) 2020~



Central

非常に活発に提携

Illinois-Express Quantum Network (IEQNET)

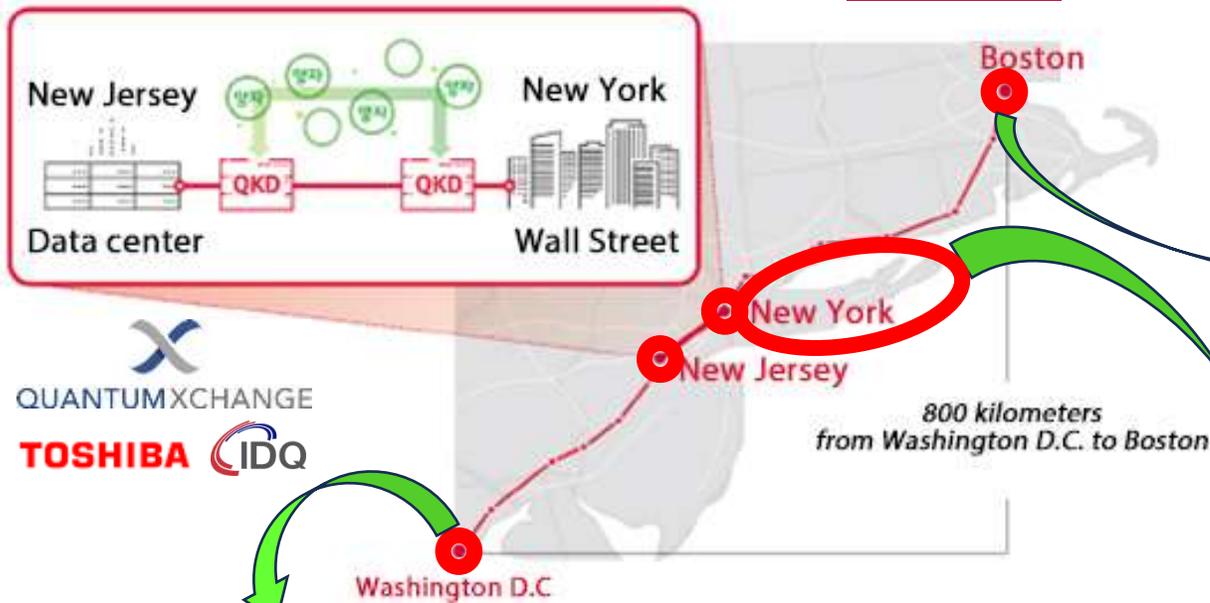


Quantum-Accelerated Internet Testbed (Q-INT) 2021~



- Single and entangled photon sources
- Quantum memory
- Quantum processing on frequency modes

East



Boston-Area Quantum Network (BARQNET)

An aerial view of the Boston area with a red line representing the quantum network. Key locations marked include MIT LINCOLN LABORATORY, HARVARD UNIVERSITY, and MIT. A yellow box contains the text '非常に活発' (Very active). A '50km' distance is indicated. Logos for DARPA, AWS, and MagiQ are also present. ArXiv IDs are listed: arXiv:2310.01316, arXiv:2307.15696v1, and arXiv:2307.08619v1.

DC Quantum Network (DC-Qnet)

A map of the Washington D.C. area showing a quantum network connecting several institutions. A red line connects nodes at NIST, ARL, NASA, NSA/LTS, and NRL. A '30km' distance is marked. Logos for DARPA, IONQ, DEVCOM, and UNIVERSITY OF MARYLAND are included. A yellow box contains the text '量子コンピュータネットワーク (10年計画)' (Quantum computer network (10-year plan)).

Long Island Quantum Repeater Network (LIQuIDNET)

A map of Long Island showing a quantum ring network. The ring connects NYC, Garden City WebAir, Westbury 1025 Connect, Commack, and Upton BNL-535. Distances between nodes are marked as ~50km, ~58km, ~51km, and ~70km. A yellow box contains the text 'この10年間進展なし' (No progress in the last 10 years). A legend identifies symbols for Long-Term Quantum Memory (red), Entanglement Source (blue), Entanglement Swapping Station (purple), and Quantum Gate (orange). Logos for U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, Stony Brook University, and Brookhaven National Laboratory are shown.



Caltech
AWS-CQC
(Center for Q. Computing)

 **HARVARD UNIVERSITY**
AWS-CQN
(Center for Q. Networking)

超伝導量子コンピュータ開発 --- 量子ネットワーク開発

Singapore (AWS-CQT)



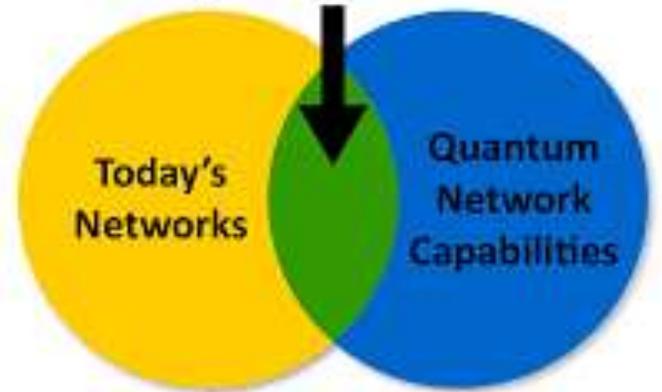






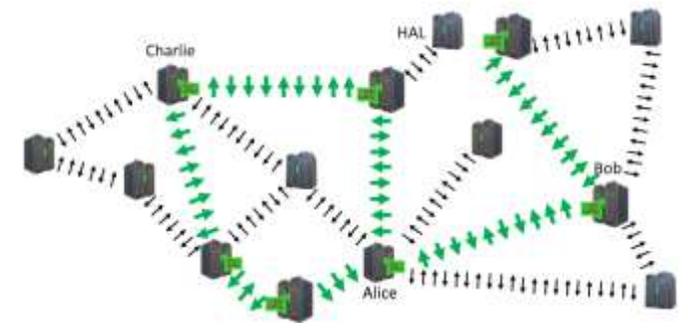

QuANET (2023-)
Quantum Augmented Network

QuANET



(Not focus on QKD)

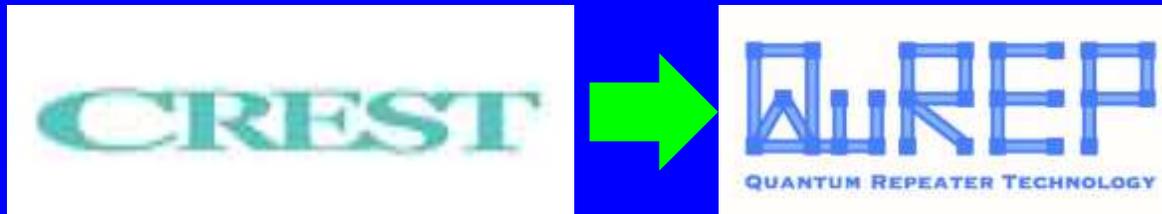
Quantum Metropolitan Area Network (qMAN)



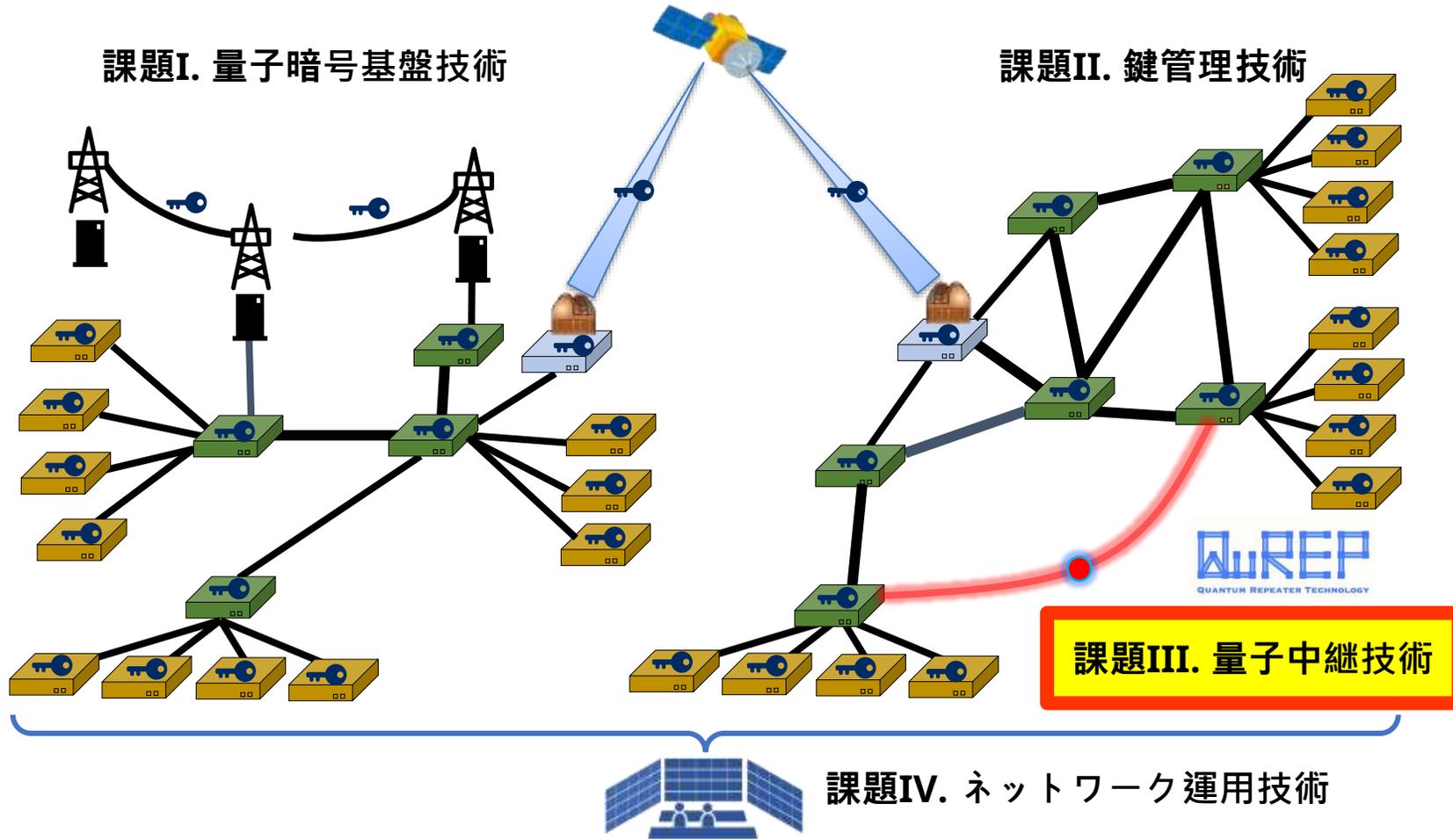
1. Develop Q. Network Interface Cards (qNIC)
2. Protocol and software
3. Over air proposal



国内での取り組み 1 (総務省委託研究) 量子通信



JPMI00316



4 民間会社

3 国研

4 大学



ナノテクノロジー

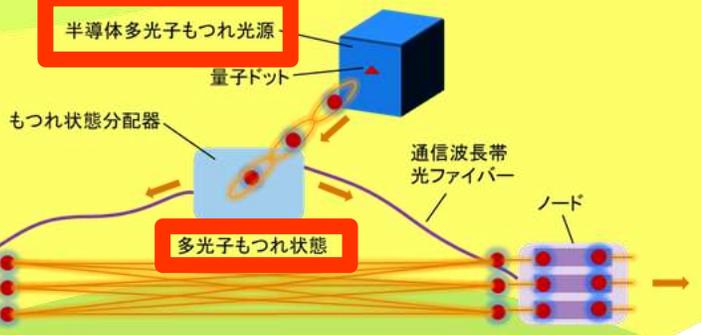
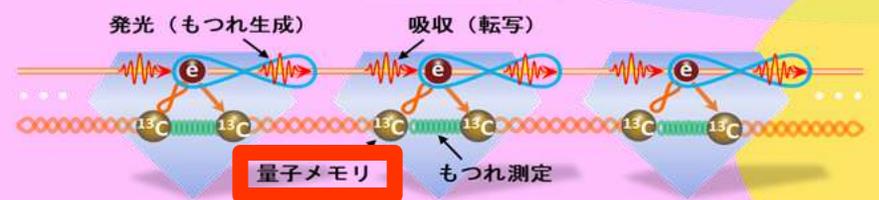


YNU
YOKOHAMA National University

量子メモリ量子中継

全光量子中継

東芝

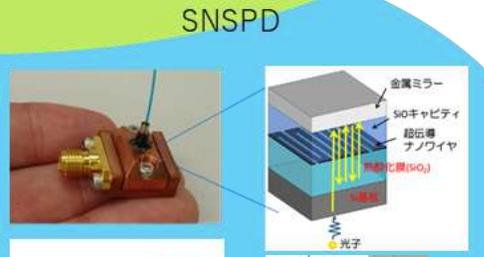
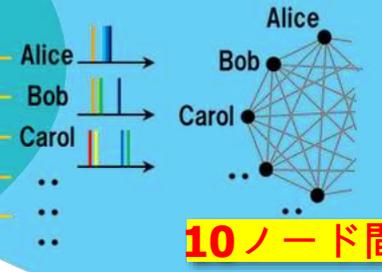


量子波長変換モジュール

※光モジュール化技術

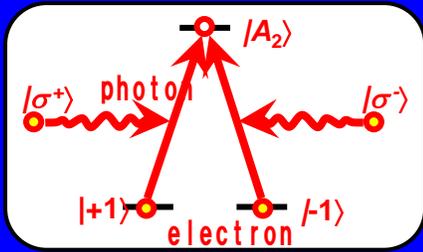


波長多重量子ネットワーク

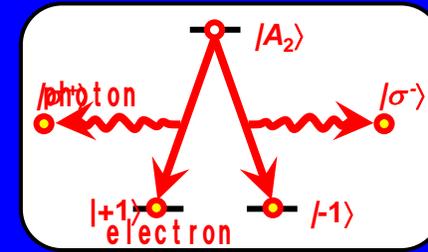
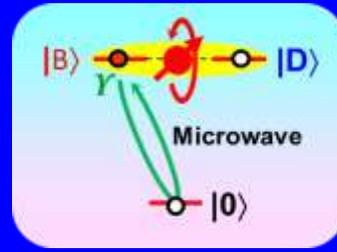


古河電工

Diamond Quantum Repeater Elements



Physical Review Letters, 114, 053603 (2015) *Nature Communications*, 7, 11668 (2016)

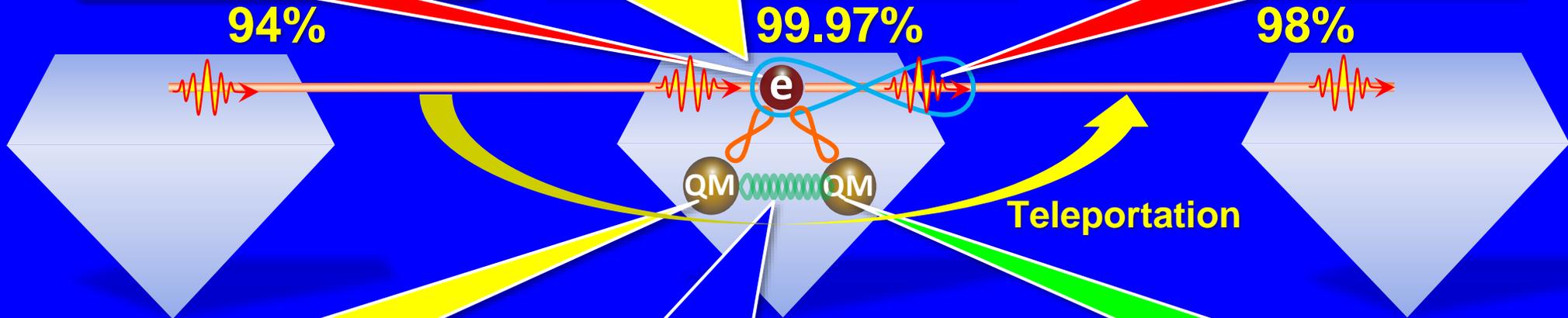


Communications Physics, 4, 264 (2021)

Q. State Transfer

Fault-tolerant Q. Gate

Entangled Emission



Initialization & Readout

Bell State Meas.

Q. Error Correction

99.7%
Appl. Phys. Lett. 120, 194002 (2022)

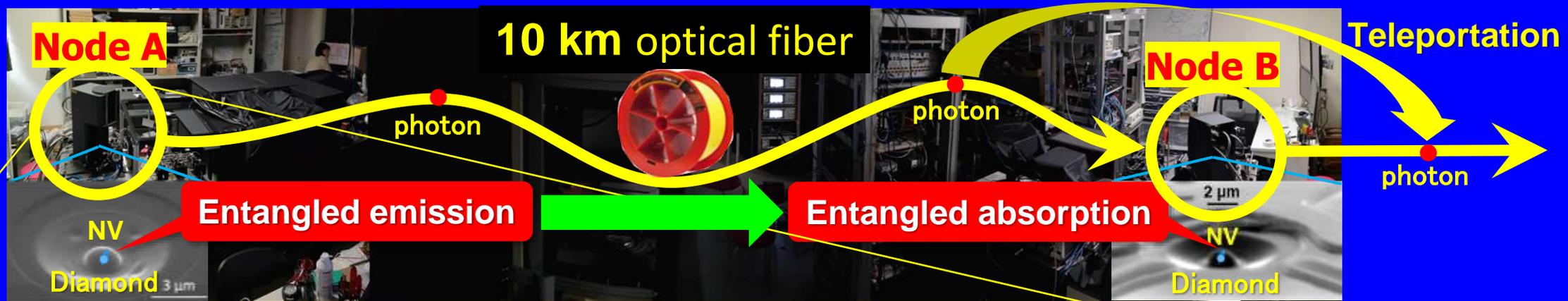
90%
Appl. Phys. Lett. 120, 194002 (2022)
npj Quantum Information 9, 101 (2023)

83%
Communications Physics 5, 102 (2022)

Topic 2

Diamond Quantum Repeater demonstration

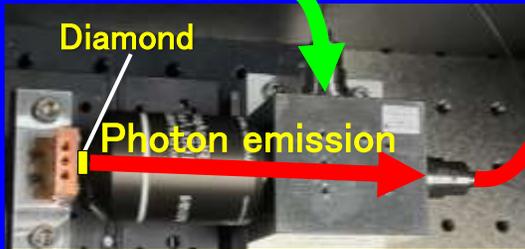
- We have achieved
- ✓ Single photon emission and absorption over 10 km fiber
 - ✓ Photon state transfer into an NV over 10 km fiber
 - ✓ Quantum teleportation of a photon into another ~ 1 Hz



Quantum Repeater Modules

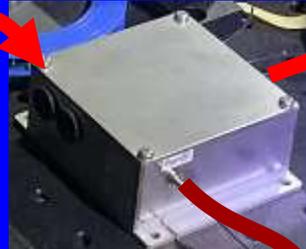
Objective module

Excite 520nm



4cm

Dichroic module



6cm

Wavelength converter

Pump 1082nm

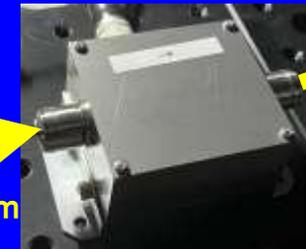
ZPL 637nm

PSB ~700nm



15cm

Filter module

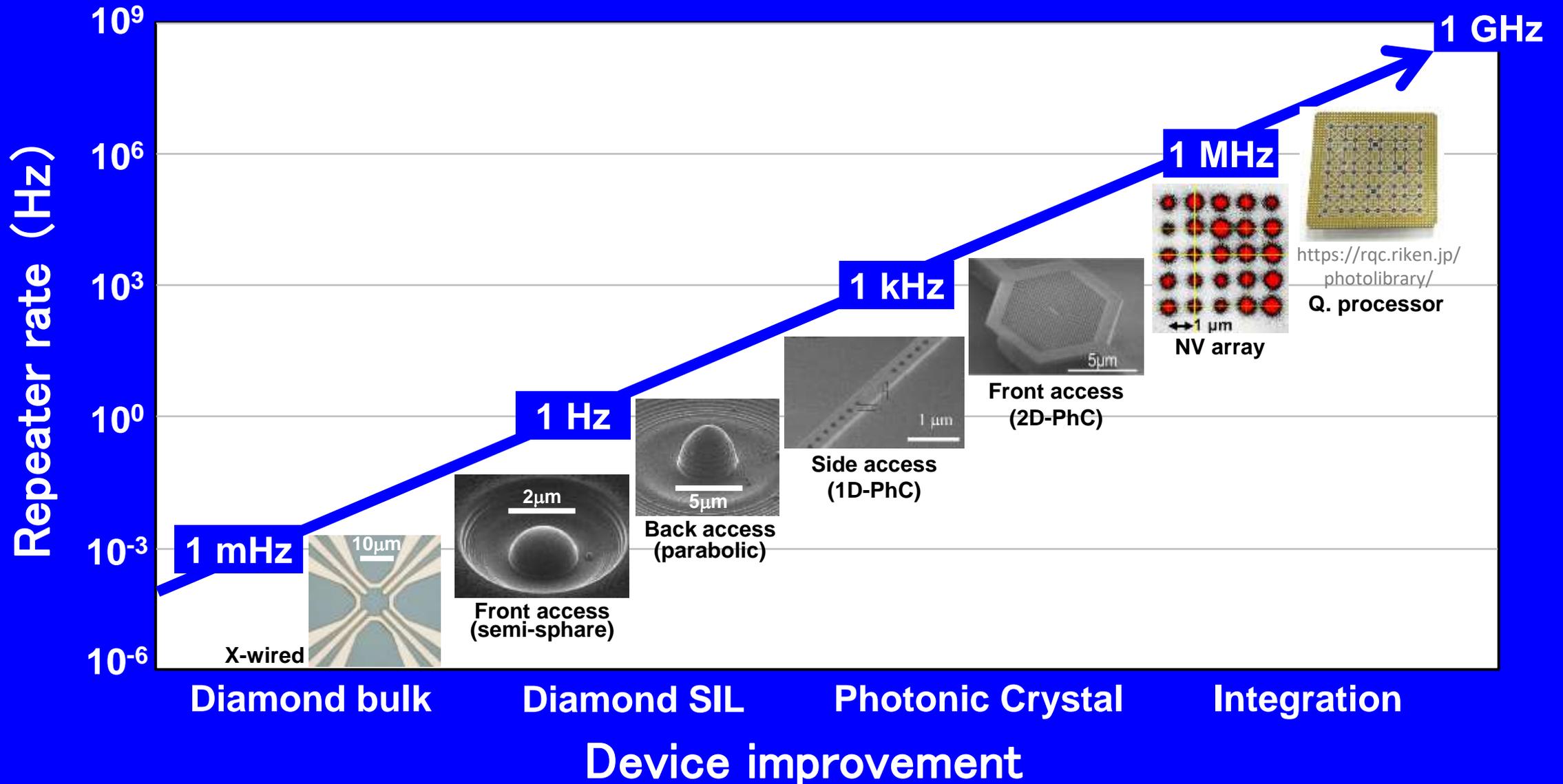


4cm

1550nm

Heralding module

Diamond Quantum Repeater Roadmap



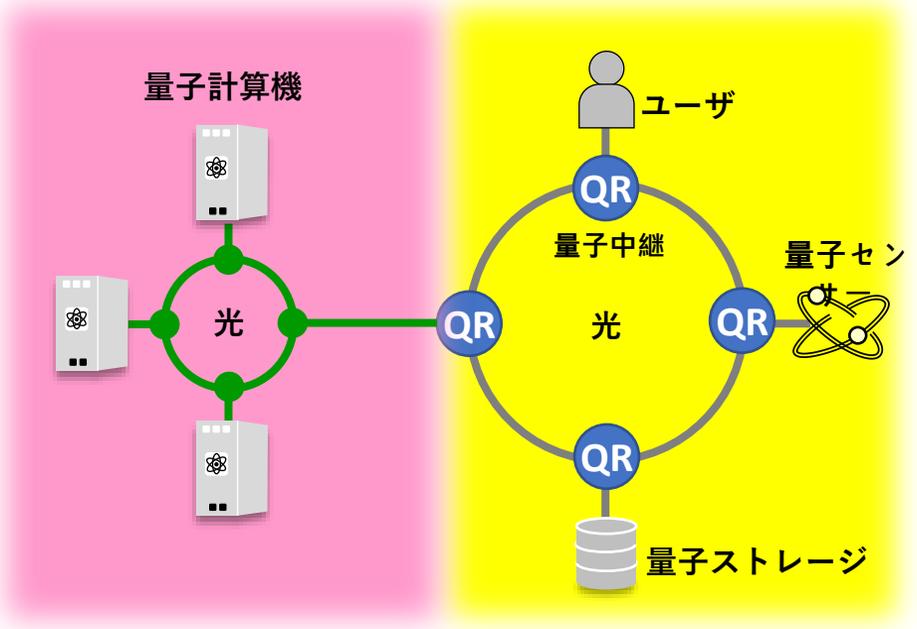
国内での取り組み 2
(ムーンショット研究)
量子コンピュータ



量子インターネットへ向けた量子計算と量子通信の融合

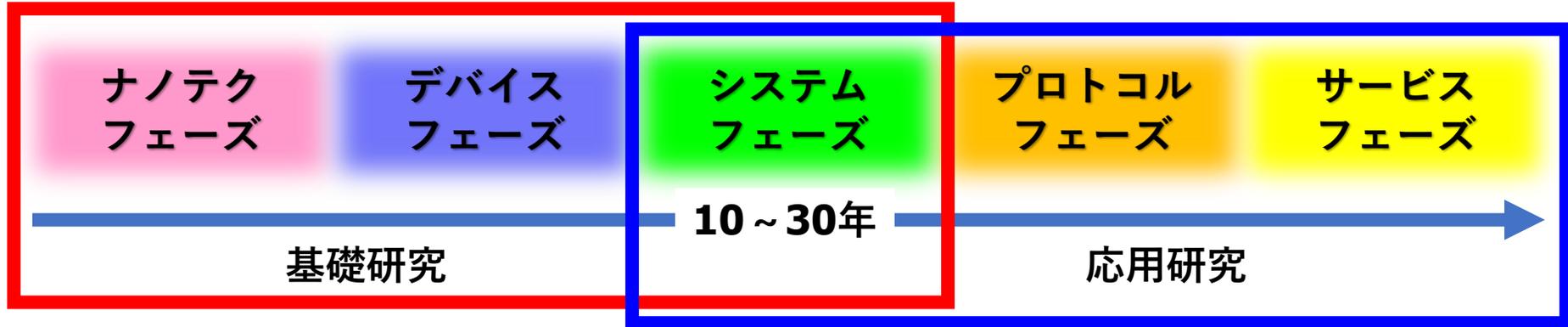
QC & QC

量子コンピュータネットワーク + 量子通信ネットワーク



短距離

長距離



ムーンショット目標6

【ネットワーク小坂Pj】

3年目マイルストーン

量子光源・検出器



量子メモリ



5年目マイルストーン

量子インターフェース



10年目マイルストーン

量子ネットワーク

2050

大規模化を達成し、誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現

2040

分散処理型NISQ量子コンピュータの実証
量子誤り訂正下での有用タスク計算

2030

一定規模のNISQ量子コンピュータの開発と量子誤り訂正の有効性実証

量子ネットワーク接続で量子コンピュータの分散処理を可能に

ネットワーク

量子メモリの開発、光子と量子メモリ間の量子インターフェイス技術の確立

ハードウェア

量子誤り訂正システムの設計・実装、量子ビット・量子ゲート基盤の確立

ソフトウェア

低オーバーヘッド量子誤り訂正符号や量子アルゴリズムの開発



小坂

量子光源・検出器

量子メモリ

量子インターフェース

量子ネットワーク

超伝導
量子
ビット

ステージゲート

適切で実現可能性のある物理系を見極める

光量子
ビット

イオン
トラップ

半導体
量子
ビット

関連する量子技術

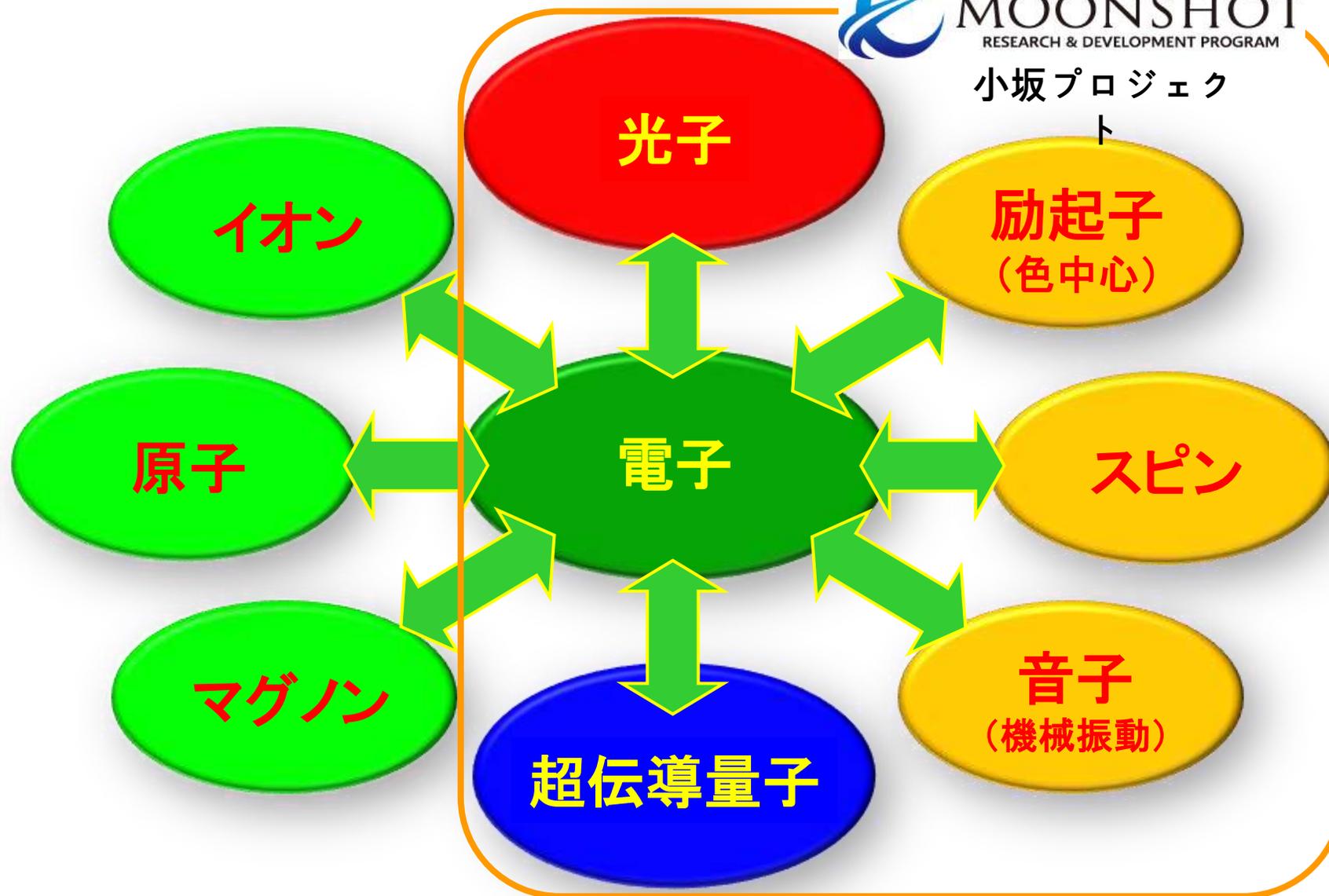
連携：山本剛MS(超伝導量子ビット)、小芦MS(要求性能見積もり)、永山MS(デバイス設計)、山本俊MS(検出器)

量子インターフェース原理 = 量子メディア変換



小坂プロジェクト

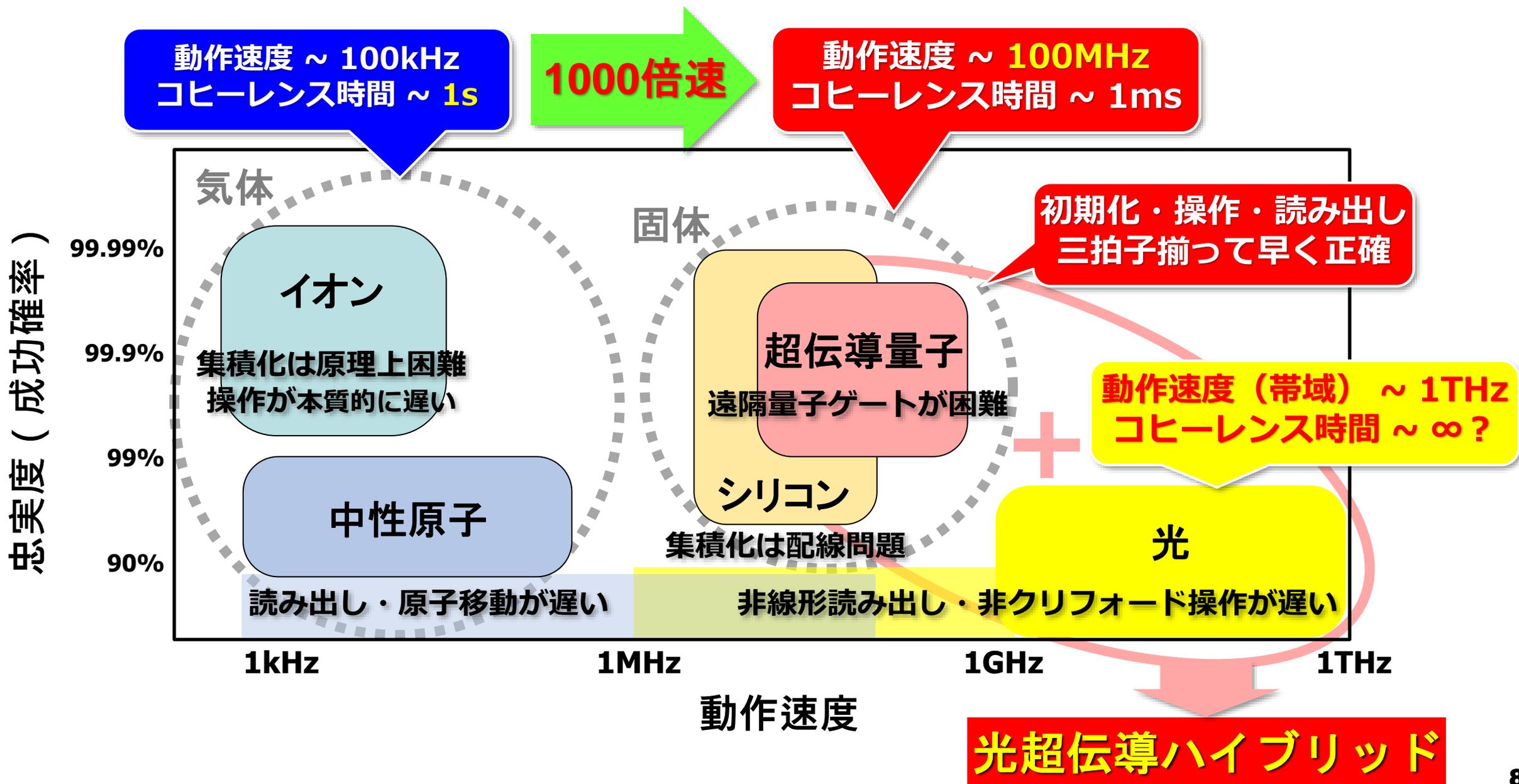
ト



- 様々な量子メディアの間で量子変換
- 本Pjの目的：光子と超伝導量子を量子接続
- 電子だけでなく励起子・スピン・音子が重要な役割を果たす

量子ハードウェアの比較

初期化・一量子/二量子操作・読み出しの最高値および平均値を考慮



スーパーコンピューター



光接続
分散処理

富士通「富岳」

理研HP: www.riken.jp/pr/news/2021/20210309_2/index.html



極低温中のマイクロ波ケーブル

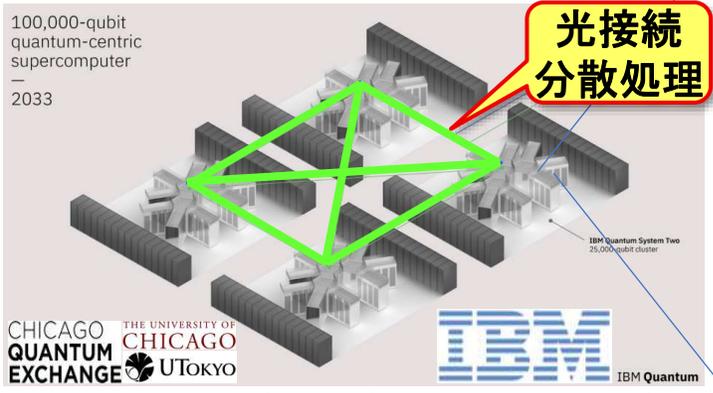
Wallraff ETH

P. Magnard et. al., Phys Rev. Lett. 125, 260502 (2020)

室温中の光ファイバーに置き換え

柔軟かつ高速な光接続を実現

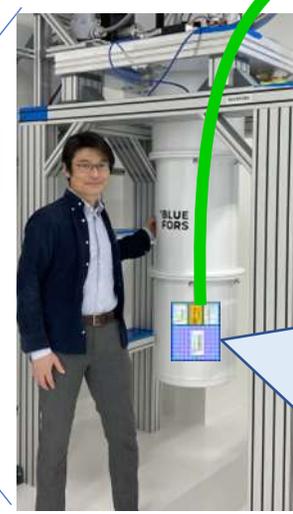
超伝導量子コンピューター (IBM, Microsoft, AWS: 光接続)



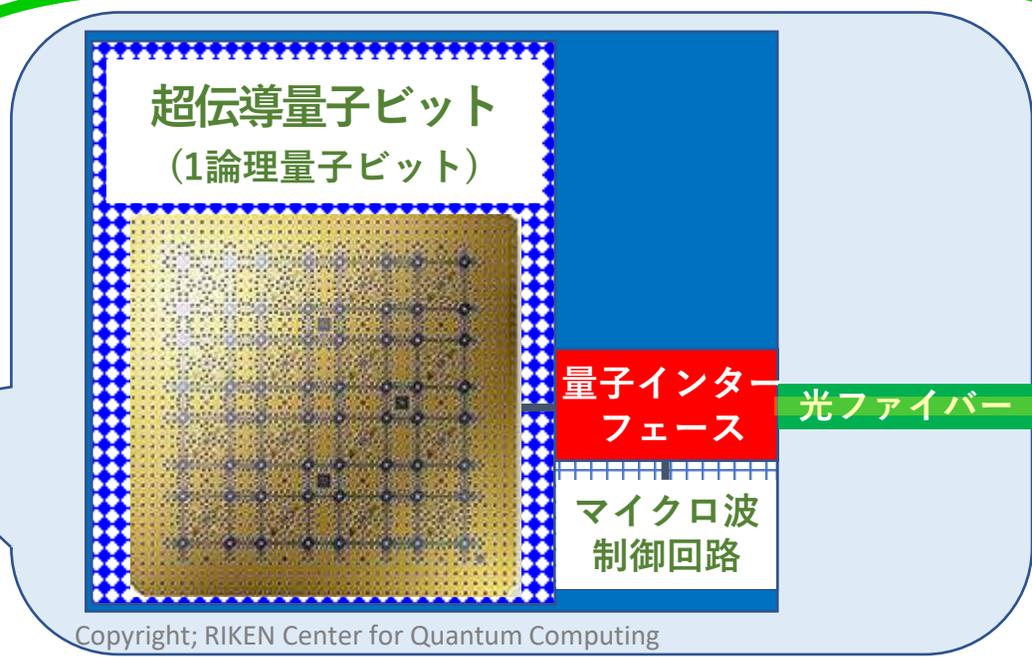
光接続
分散処理

100,000-qubit quantum-centric supercomputer
— 2033
CHICAGO QUANTUM EXCHANGE THE UNIVERSITY OF CHICAGO UTOKYO IBM Quantum

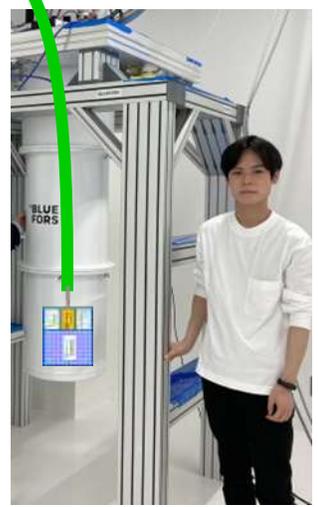
IBM HP: newsroom.ibm.com/2023-05-21-IBM-Launches-100-Million-Partnership-with-Global-Universities-to-Develop-Novel-Technologies-Towards-a-100,000-Qubit-Quantum-Centric-Supercomputer



希釈冷凍機 (~10mK)



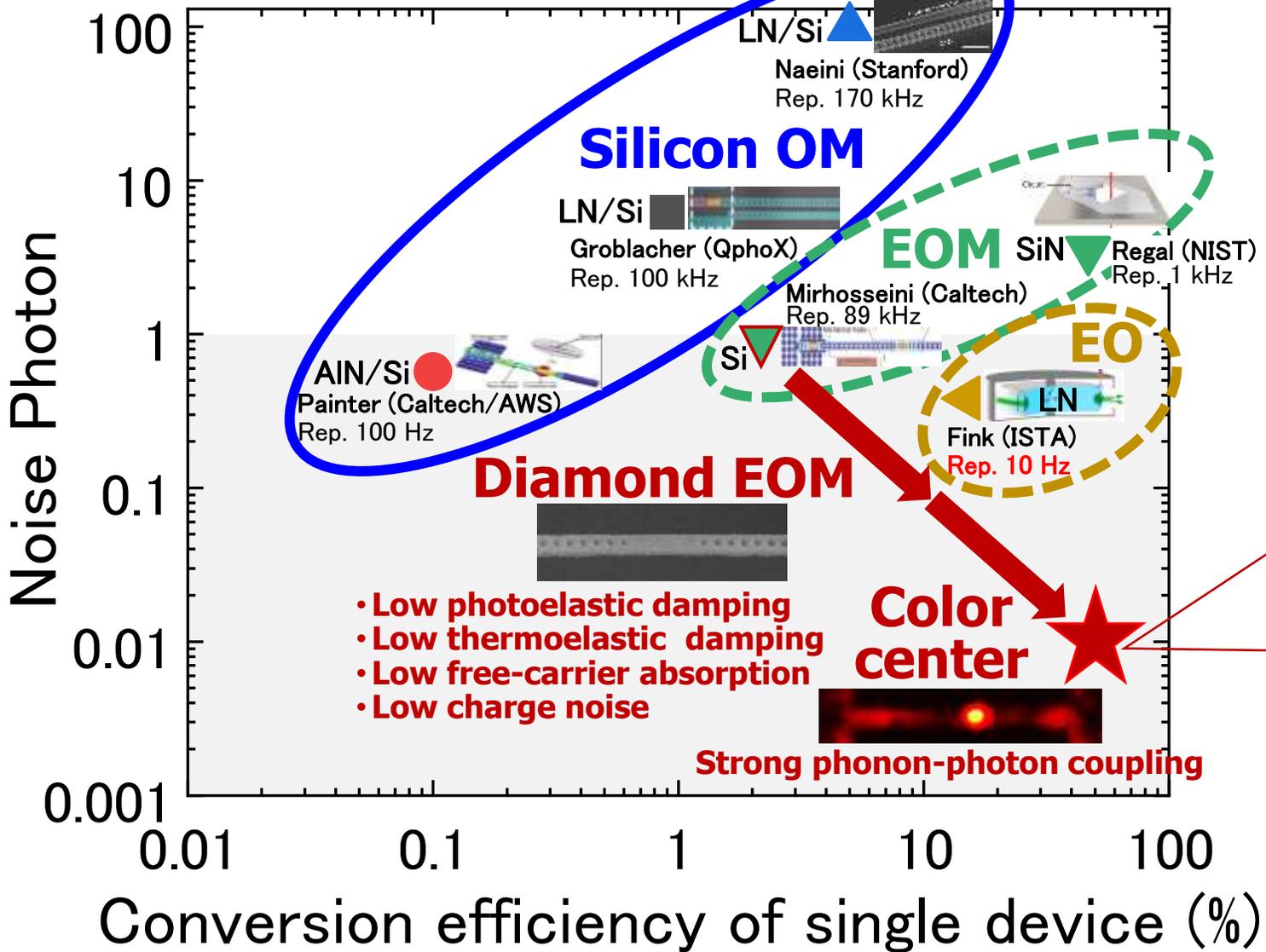
Copyright; RIKEN Center for Quantum Computing
<https://rqc.riken.jp/photolibrary/>



希釈冷凍機 (~10mK)

小坂ムーンショットのエクトの概要

EO: Electro-Optic transducer
 EOM: Electro-Opto-Mechanical transducer
 OM: Opto-Mechanical transducer

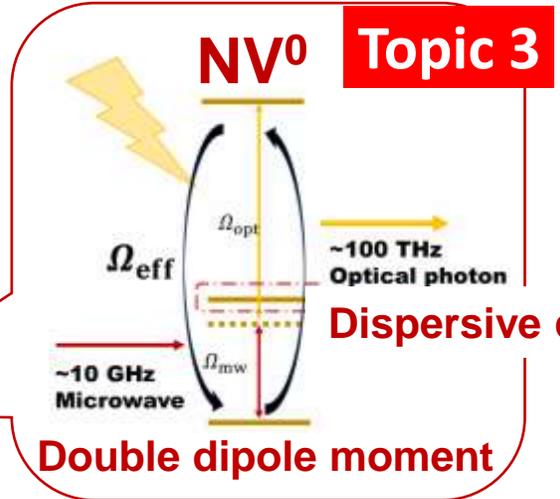


Current top data (Different structures)

Conv. Efficiency **50%** ▼
 Noise Photon **0.3** ▲
 Rep. rate **170 kHz** ▲

Target All in one

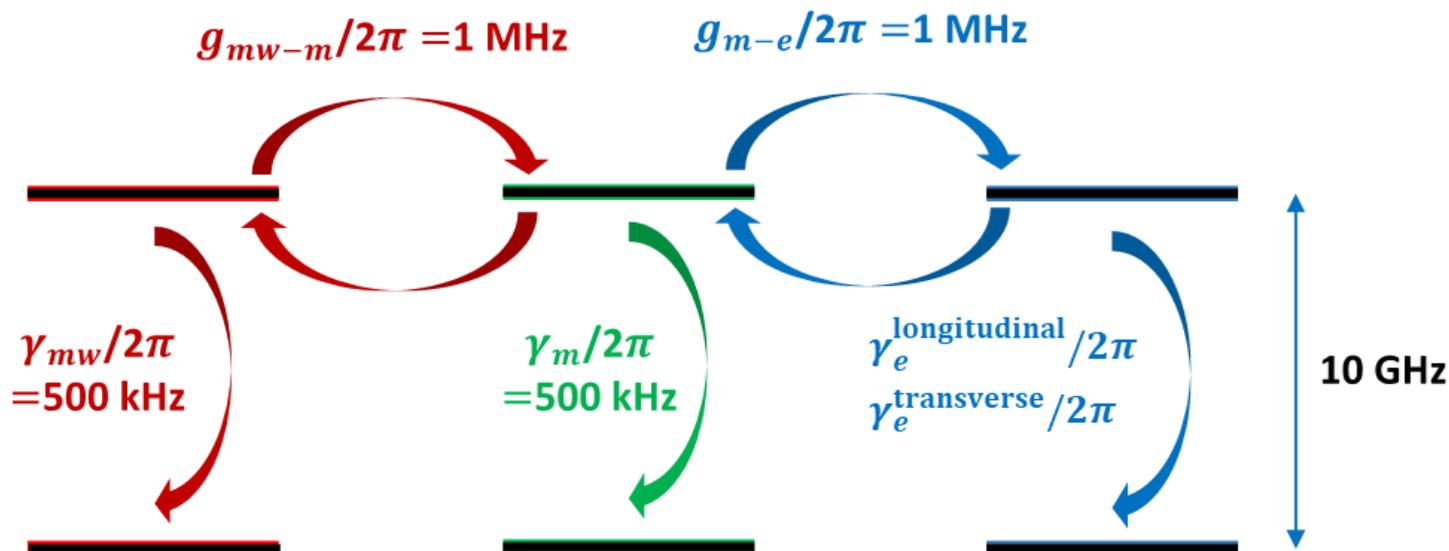
>50%
 <0.01
 ~1MHz



Mirhosseini & Painter, Nature 588, 599 (2020)
 Brubaker & Regal, Phys. Rev. X 12, 021062 (2022)
 Sahu & Fink, Nature Com. 13, 1276 (2022)
 Jiang & Naeini, Nature Physics 19, 1423 (2023)
 Weaver, Groblacher & Stockill, Nat. Nano. 19, 166 (2024)
 Zhao & Mirhosseini, arXiv:2406.02704 (2024)

量子インターフェースの効率見積もり

色中心 (NV⁰) は約50%の変換効率を可能とする



超伝導マイクロ波共振器

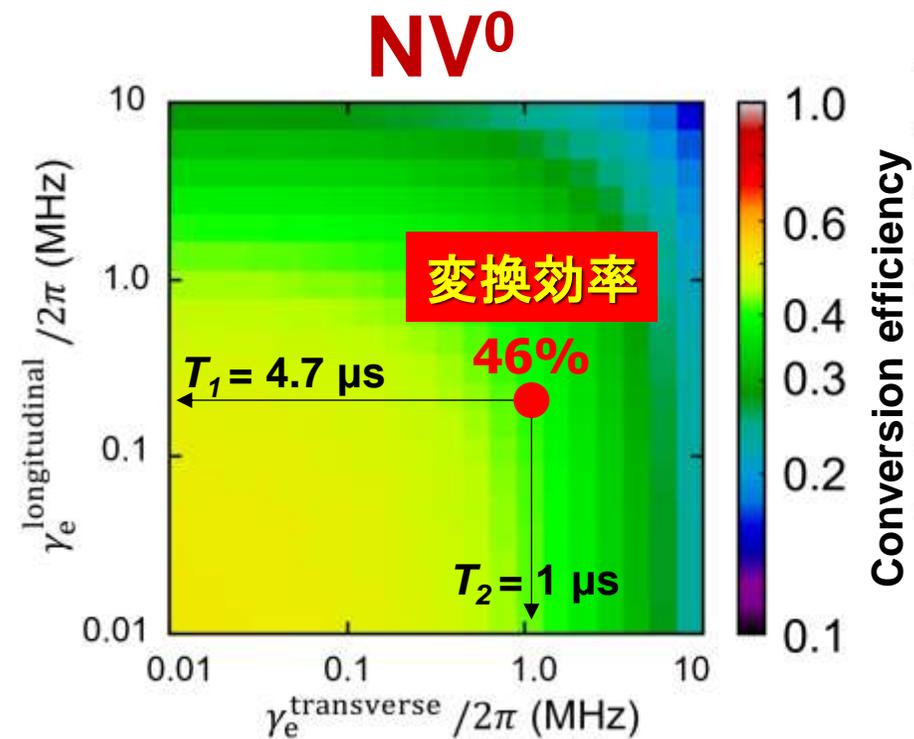
ダイヤモンド機械共振器

ダイヤモンド光共振器

$Q_{mw} = 20,000$

$Q_{mech} = 20,000$

$Q_{opt} = 2,000$



(assuming perfect extraction of ZPL)

●Jaynes-Cummings model

$$H = \omega_{mw} a^\dagger a + \omega_m b^\dagger b + \omega_e \sigma_e^+ \sigma_e + g_{mw-m} (a_{mw}^\dagger b_m + a_{mw} b_m^\dagger) + g_{m-e} (b_m^\dagger \sigma_e + b_m \sigma_e^+)$$

H. Kurokawa, M. Yamamoto, Y. Sekiguchi, and H. Kosaka, Phys. Rev. Applied, 18, 064039 (2022)

B. Kim, H. Kurokawa, K. Sakai, K. Koshino, H. Kosaka, and M. Nomura, Phys. Rev. Applied, 20, 044037 (2023)

QIC

QuINT
Quantum INTerfaces

QuREP
QUANTUM REPEATER TECHNOLOGY

小坂研 Twitter 2021.8.22
46,000件 閲覧

https://twitter.com/kosaka_lab_YNU

kosaka-hideo-yp@ynu.ac.jp

<http://kosaka-lab.ynu.ac.jp>



小坂ムーンショットの開発体制

Diamond

Optics

9 PIs

94 members

Nanofabrication



Satoshi Fujii Toshiharu Makino



Hiromitsu Kato
14 members



Satoshi Iwamoto
9 members

Photonic Crystal



Masahiro Nomura
6 members

Phononic Crystal

Ion Implantation



Shinobu Onoda
25 members



Hideo Kosaka
27 members



Toshihiko Baba
6 members

3D Integration



Fumihiro Inoue Katsuya KIKUCHI



Kazumasa Narumi

Crystal Growth



Tokuyuki Taraji
2 members

Optical Circuit



Kazuki Koshino
2 members



Nobuyuki Yoshikawa
3 members

Microwave Circuit



Yoshihiro Shimazu



Hirotaka Tera

Theory



Tim Taminiau

Superconductor

Yoshihiro Shimazu Hirotaka Tera 85

第3部

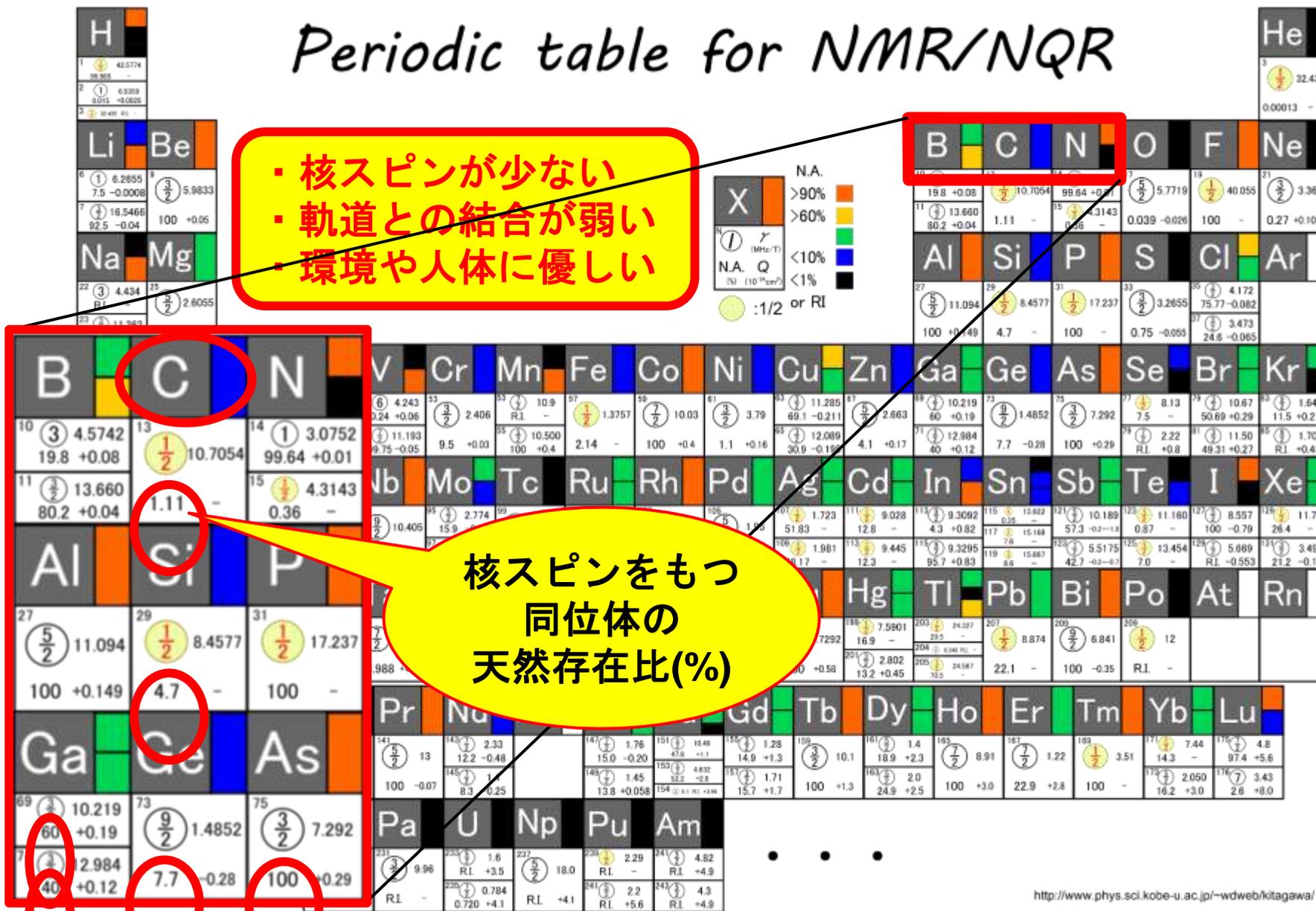
量子中継技術の現状

～ダイヤモンド量子メモリ
を用いた量子中継～

なぜ炭素？

Periodic table for NMR/NQR

- ・核スピンの少ない
- ・軌道との結合が弱い
- ・環境や人体に優しい

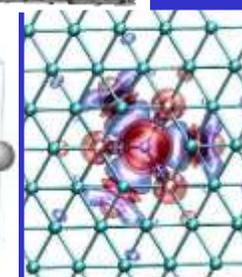
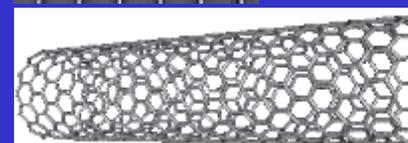
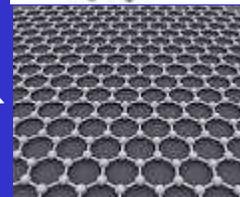
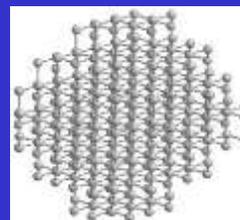


核スピンをもつ
同位体の
天然存在比(%)

なぜダイヤモンドNV中心？

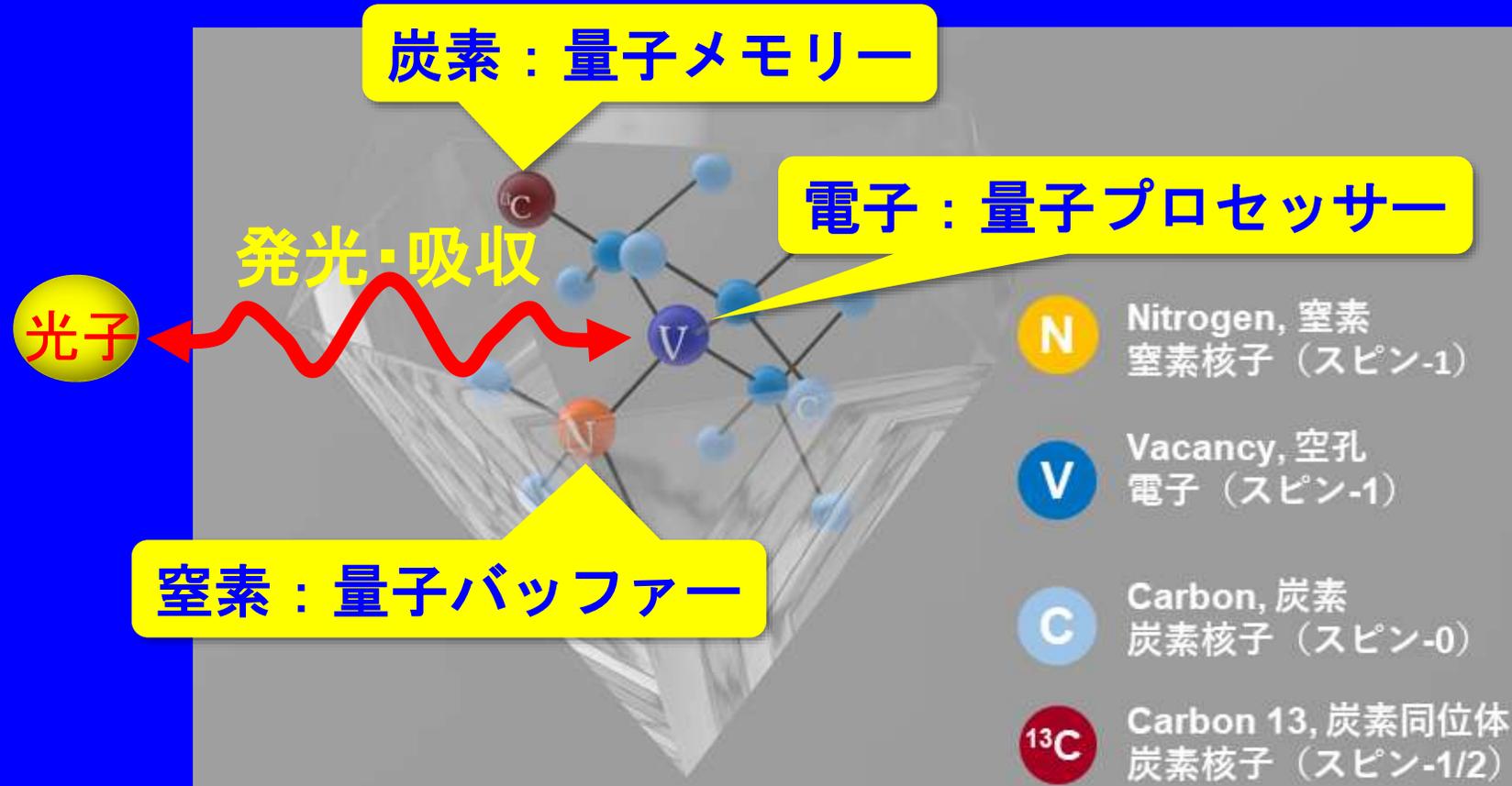
- ◆ 物理的・機械的に安定している！
- ♣ 量子状態を極めて長く保持できる！
- ♣ 発光や吸収といった光学過程が強く、きれい！

高次元 ↓ 3D ダイヤモンド
2D グラフェン
1D ナノチューブ
低次元 0D ダイヤモンドNV



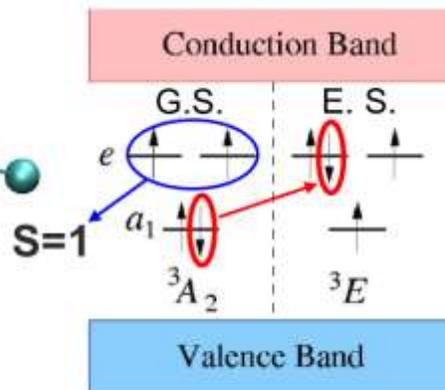
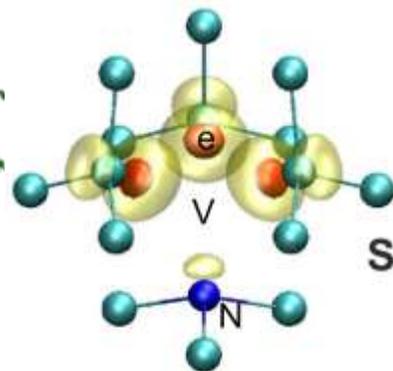
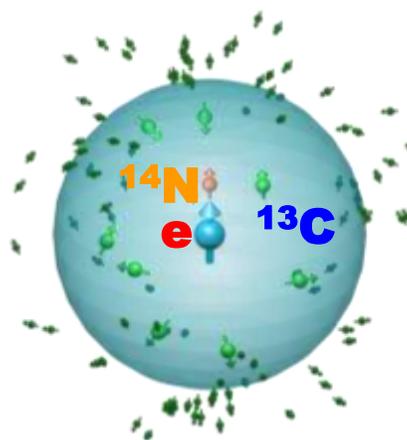
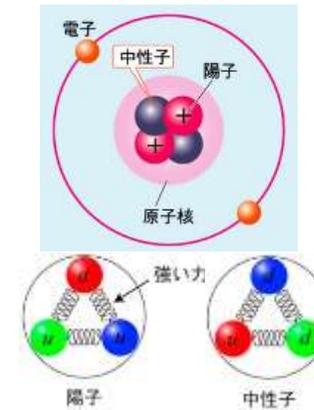
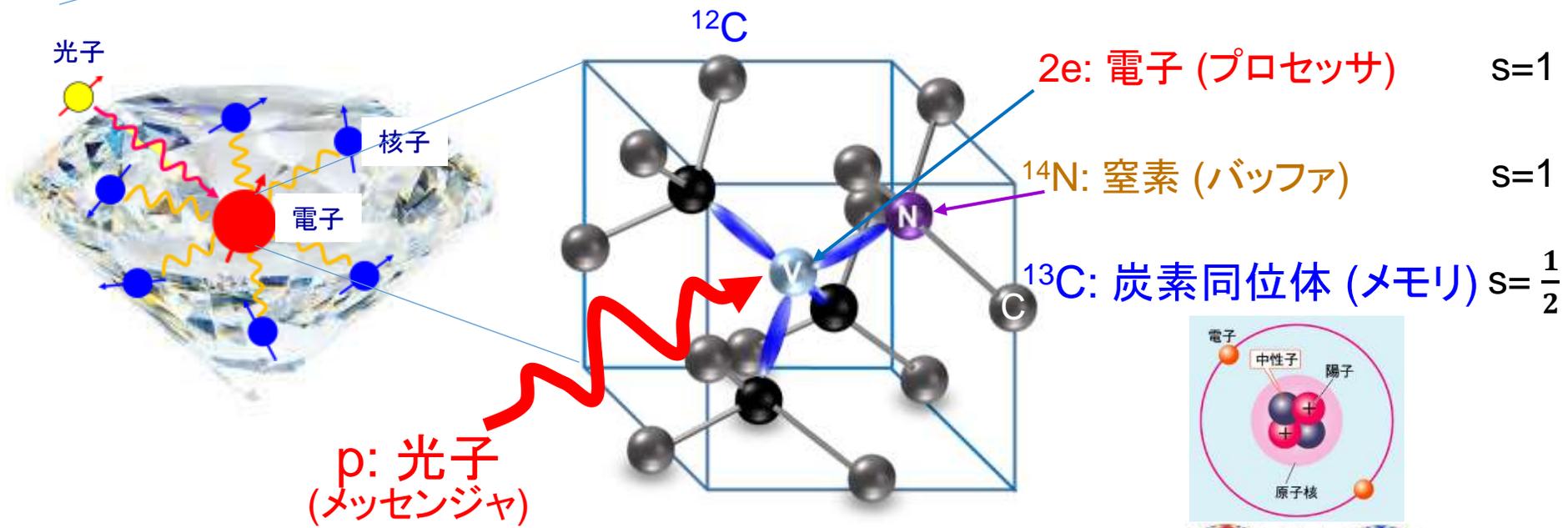
真空中の孤立原子に近く
結晶中に固定されている
表面からの雑音が少ない

ダイヤモンドNV-中心のハイブリッド量子システム (固体中の真空にトラップされた電子 ⇒ 安定)



光インターフェース + 個別量子操作
誤り耐性のある論理量子メモリー(>1分)
超小型量子コンピュータ

ダイヤモンドNV中心

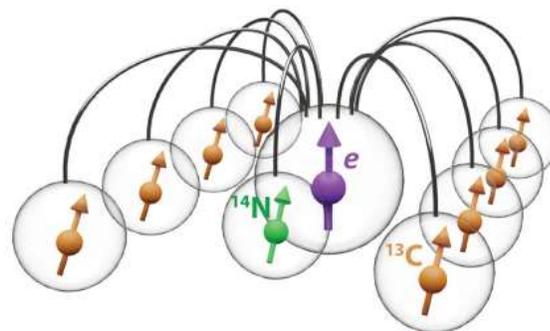


Gali 2009

	陽子	中性子	スピン
$^{12}_6\text{C}$	6	6	0
$^{13}_6\text{C}$	6	7	$\frac{1}{2}$
$^{14}_7\text{N}$	7	7	1
$^{15}_7\text{N}$	7	8	$\frac{1}{2}$

物理系：NV中心のスペック（単一NV、低温）世界記録

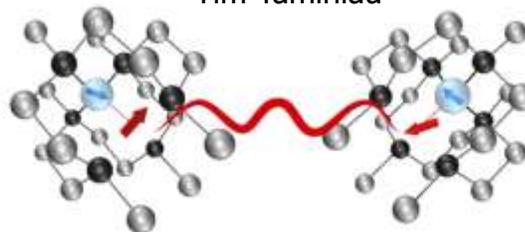
量子ビット数：	7 (GHZ)
	10 (全結合)
	29 (検出)
ノード数：	3
T_1 ：	> 1 h (e)
	> 6 min (^{13}C)
T_2^* ：	1.5 ms (e)
	0.4 s (^{13}C)
T_2 ：	1.5 s (e)
	1 min (^{13}C)
一量子ゲート：	99.995%
二量子ゲート：	97% (e-e)
	99.2% (e- ^{14}N)
ゲート時間：	1~10 ns (e)
	1~100 μs (^{13}C)
測定：	98% (e)
	99.7% (^{13}C)
初期化：	99.9%



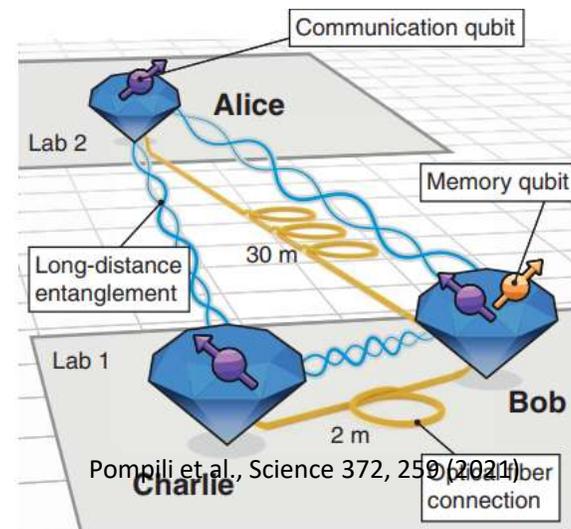
Bradley et al, RPX 9, 031045 (2019)



Tim Taminiau



Dolde et al, Nat. Commun. 5, 3371 (2014)



Ronald Hanson

発光—吸収型もつれ生成

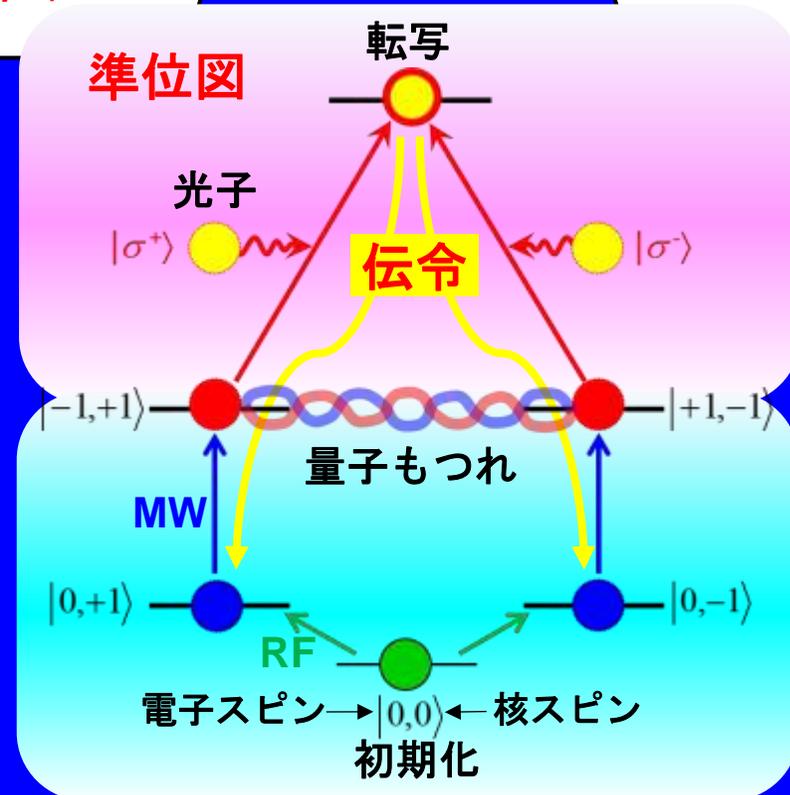
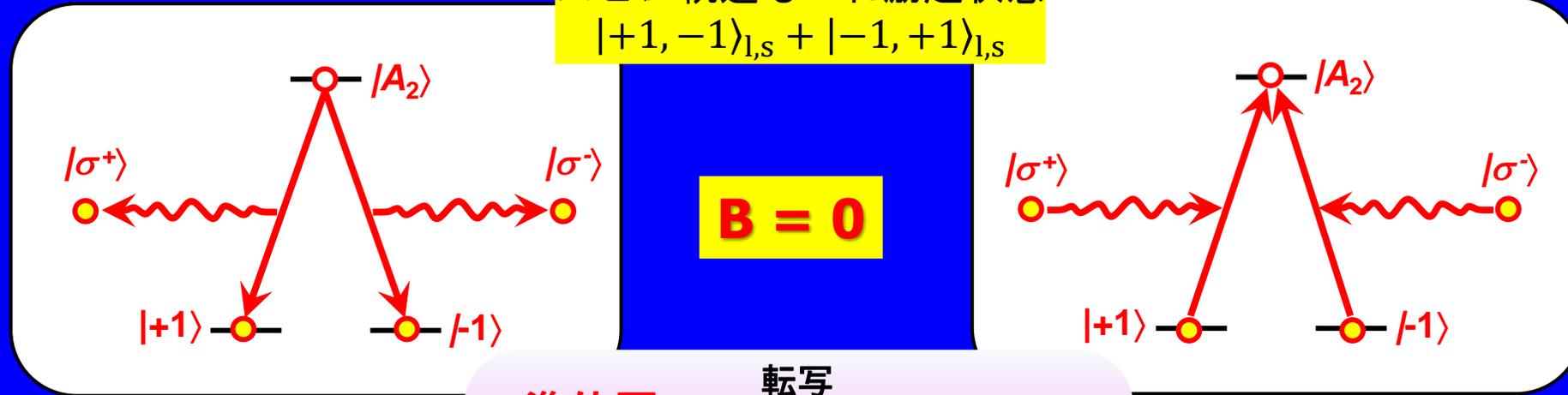


もつれ発光

スピン軌道もつれ励起状態

$$|+1, -1\rangle_{l,s} + |-1, +1\rangle_{l,s}$$

もつれ吸収

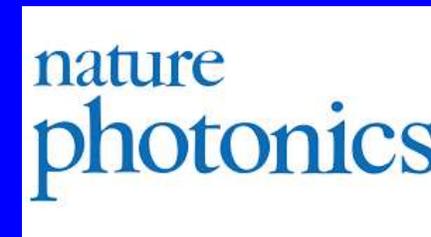


テレポーテーション転写

Nature Photonics, 10, 507-511 (2016)

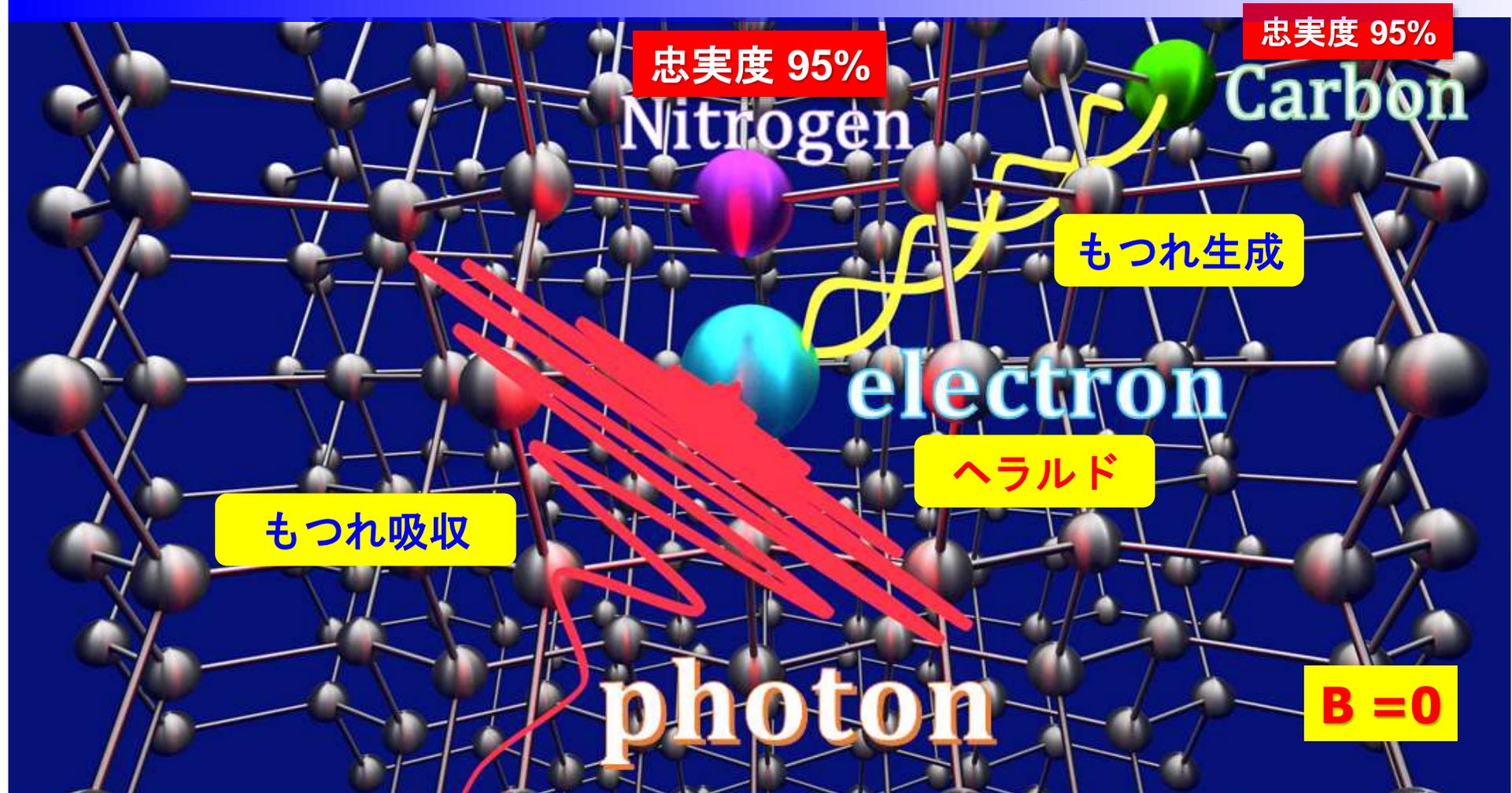
Communications Physics, 2, 74 (2019)

Physical Review Letters, 114, 053603 (2015)



2016年

量子テレポーテーション転写



nature
photonics 2016

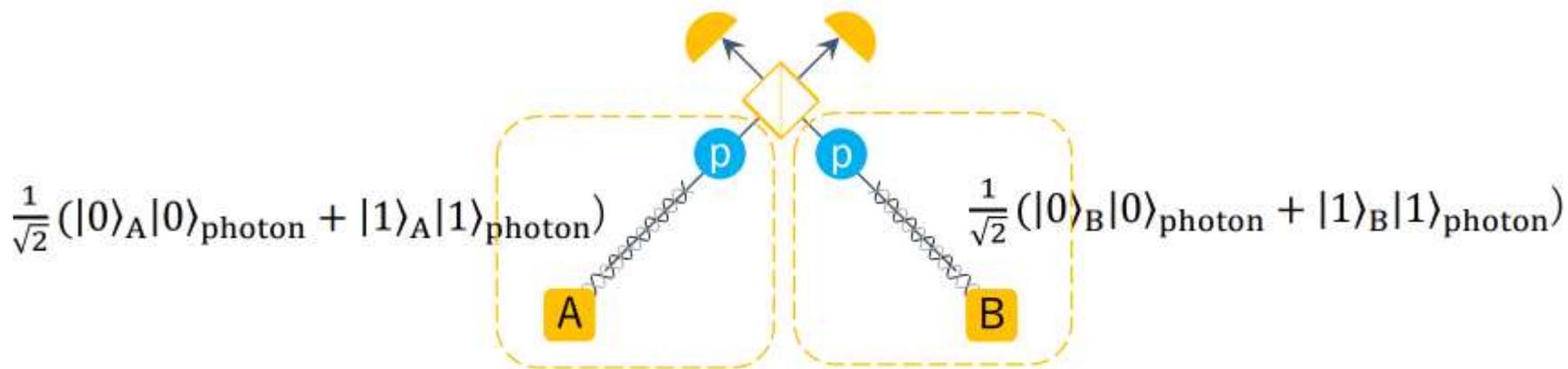
S. Yan, H. Kosaka et. al.

COMMUNICATIONS
PHYSICS 2019

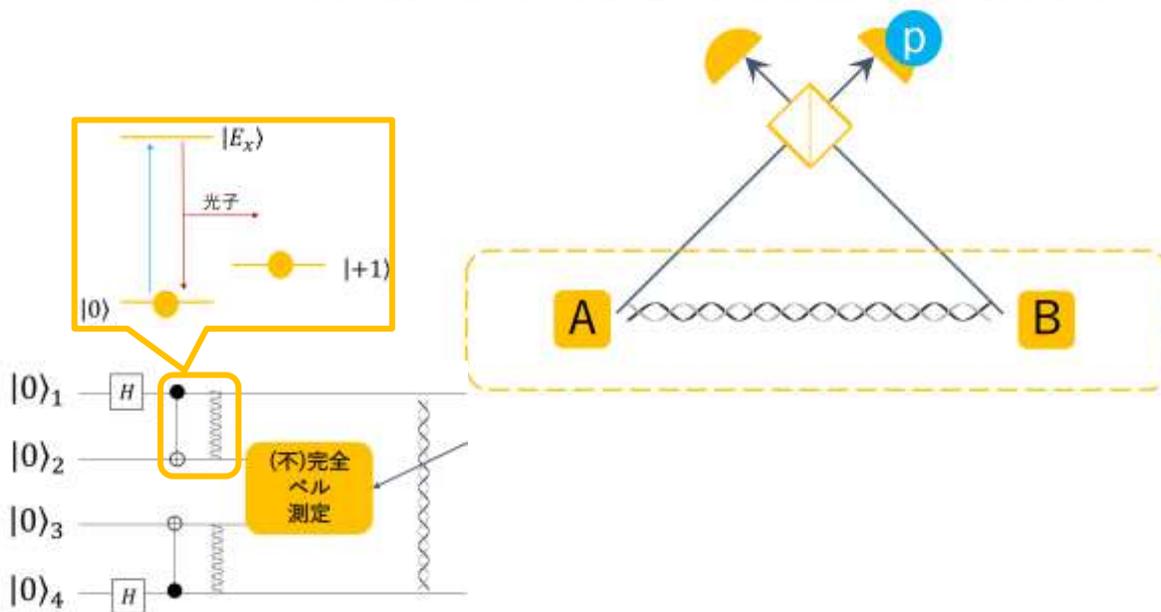
Nature Publishing

K. Tsurumoto, H. Kosaka et. al. 93

1. 両側のノードで量子ビットともつれた光子の発光



2. ビームスプリッタ透過後に光子検出器での光子検出（ベル測定）



Two – photon scheme (Barrett and Kok scheme)

- Fidelityが高い
- × 発光確率が低いと遅い (< 1 Hz)

S. D. Barrett et al., PRA 71, 060310 (2005).

Single – photon scheme (Extreme photon loss (EPL) scheme)

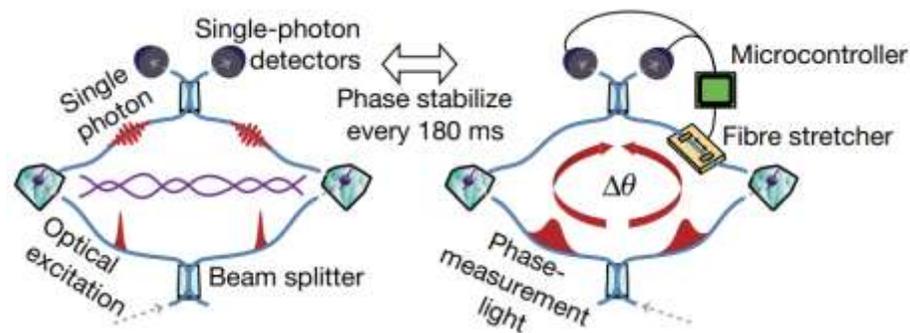
- 発光確率が低くてもそれなりの速さ (< kHz)
- × Fidelityが低い、経路長の安定化が必要

E. T. Campbell et al., PRL 101, 130502 (2007)

1光子スキーム

手順

- ①重ね合わせ準備 $\sqrt{\alpha}|\uparrow\rangle_s + \sqrt{1-\alpha}|\downarrow\rangle_s$
- ②スピンの選択的に発光 $\sqrt{\alpha}|\uparrow\rangle_s|1\rangle_p + \sqrt{1-\alpha}|\downarrow\rangle_s|0\rangle_p$



Humphreys et al., Nature 558, 268 (2018)
Pompili et. al, Science 6539, 259-264 (2021)

- ③A, Bを合わせると

$$\underbrace{\alpha|\uparrow\uparrow\rangle_{s,AB}|11\rangle_{p,AB}}_{\substack{2\text{光子} \\ (\text{エラー})}} + \underbrace{\sqrt{\alpha\sqrt{1-\alpha}}|\uparrow\downarrow\rangle_{s,AB}|10\rangle_{p,AB} + \sqrt{\alpha\sqrt{1-\alpha}}|\downarrow\uparrow\rangle_{s,AB}|01\rangle_{p,AB}}_{\substack{1\text{光子} \\ (\text{これを抜き出す})}} + \underbrace{\alpha|\downarrow\downarrow\rangle_{s,AB}|00\rangle_{p,AB}}_{\substack{0\text{光子} \\ (\text{そもそもクリックなし})}}$$

$$\sqrt{\alpha\sqrt{1-\alpha}}|\Psi^+\rangle_{s,AB} (|10\rangle_{p,AB} + |01\rangle_{p,AB}) - \sqrt{\alpha\sqrt{1-\alpha}}|\Psi^-\rangle_{s,AB} (|10\rangle_{p,AB} - |01\rangle_{p,AB})$$

スピンスピンもつれ

$$|\Psi^+\rangle_{s,AB} = \frac{|\uparrow\downarrow\rangle_{s,AB} + |\downarrow\uparrow\rangle_{s,AB}}{\sqrt{2}}$$

$$|\Psi^-\rangle_{s,AB} = \frac{|\uparrow\downarrow\rangle_{s,AB} - |\downarrow\uparrow\rangle_{s,AB}}{\sqrt{2}}$$



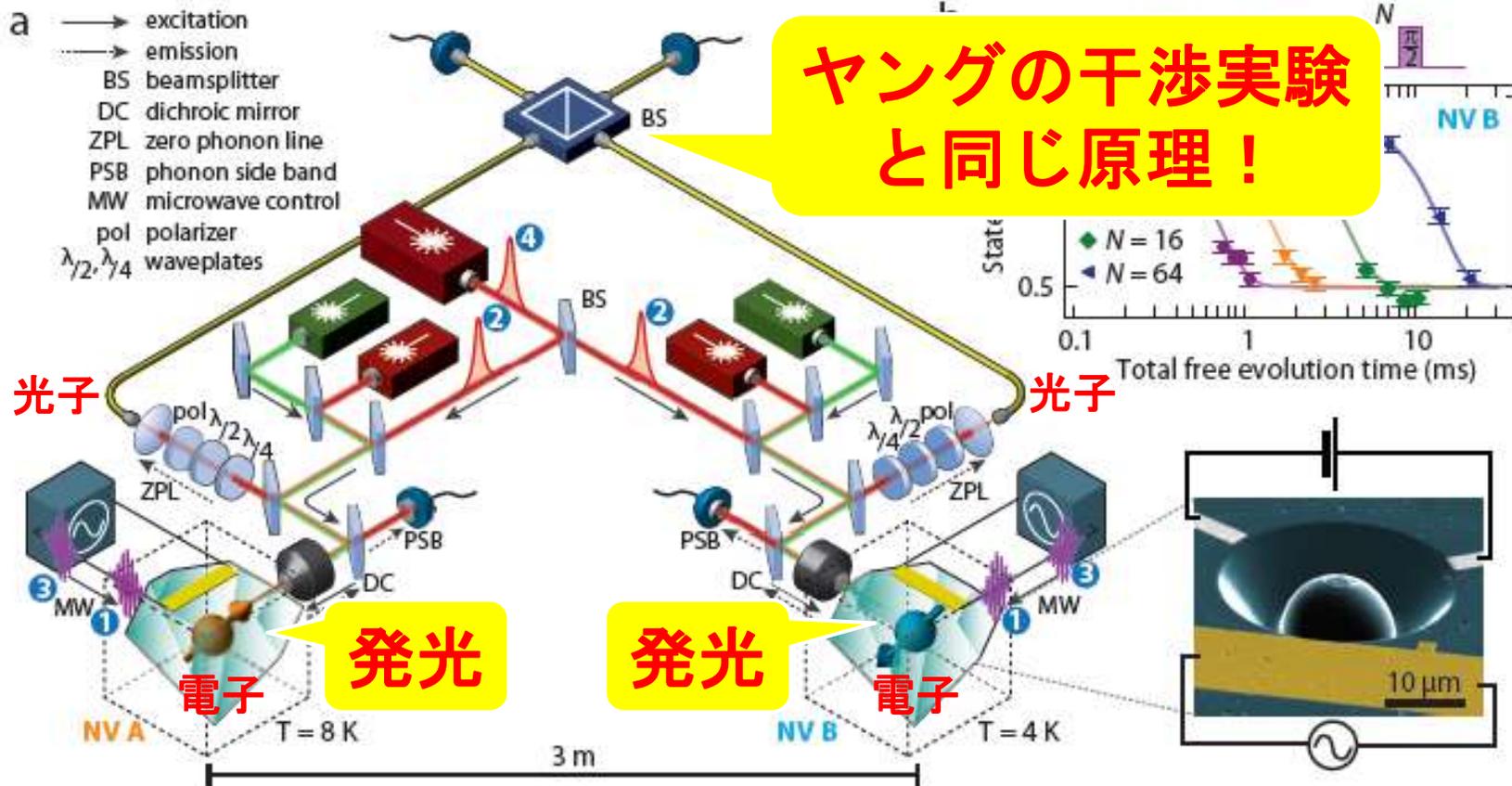


ダイヤモンド間の量子もつれ生成

2013年

Heralded entanglement between solid-state qubits separated by 3 meters

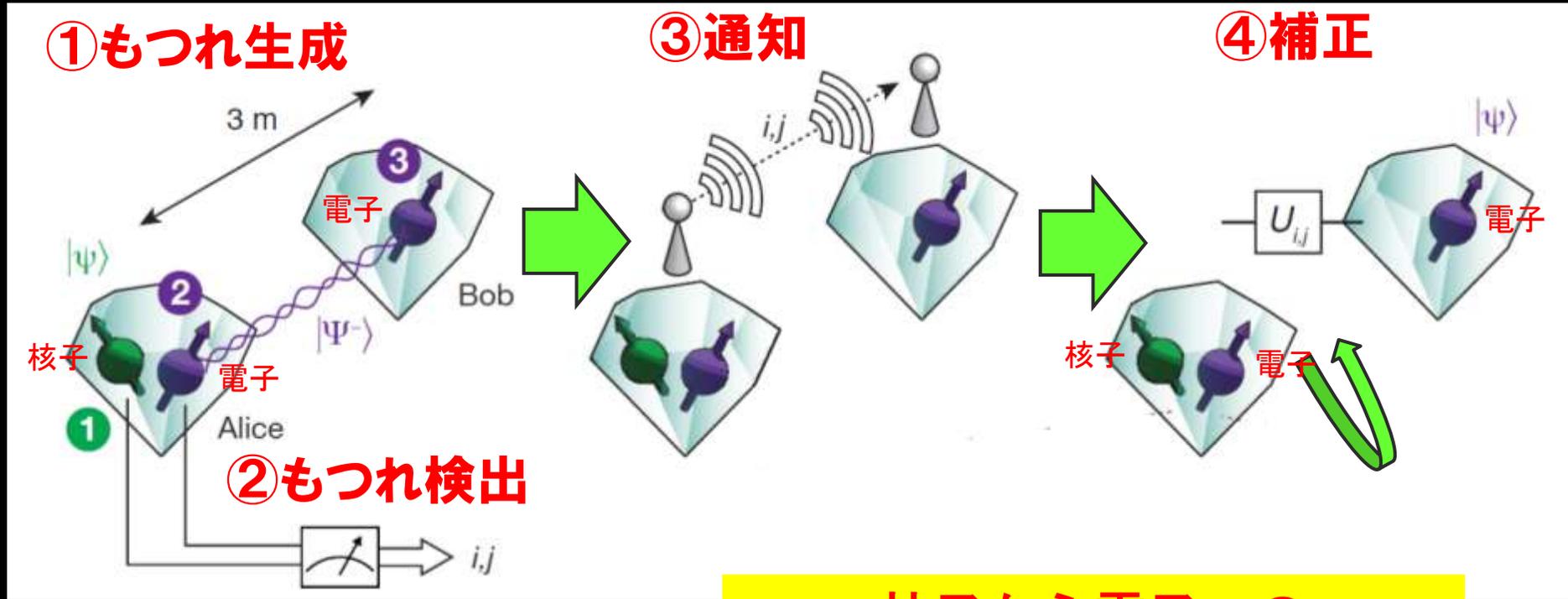
H. Bernien,¹ B. Hensen,¹ W. Pfaff,¹ G. Koolstra,¹ M.S. Blok,¹ L. Robledo,¹
T.H. Taminiau,¹ M. Markham,² D.J. Twitchen,² L. Childress,³ and R. Hanson^{1,*}





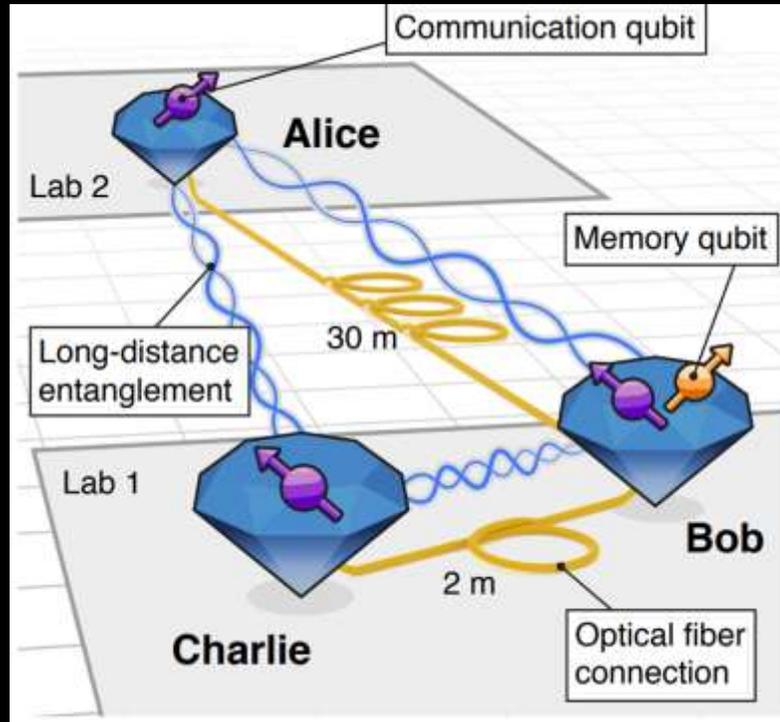
ダイヤモンドを用いた 量子テレポーテーション

Wolfgang Pfaff, Bas Hensen, Hannes Bernien, Suzanne B. van Dam,
Machiel S. Blok, Tim H. Taminiau, Marijn J. Tiggelman, Raymond N. Schouten, Matthew
Markham, Daniel J. Twitchen, and Ronald Hanson



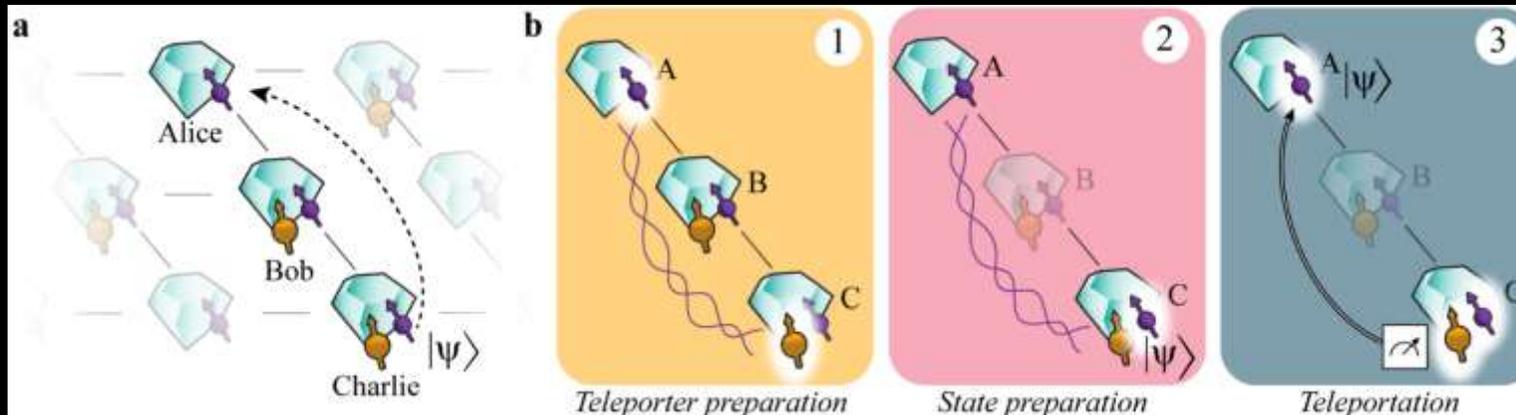
核子から電子への
量子テレポーテーション(3m)

3ノードの量子中継



量子インターネットの
基本原理実証に成功

M. Pompili et.al. ,” Science 372, 259–264 (2021).
arXiv:2110.11373v1



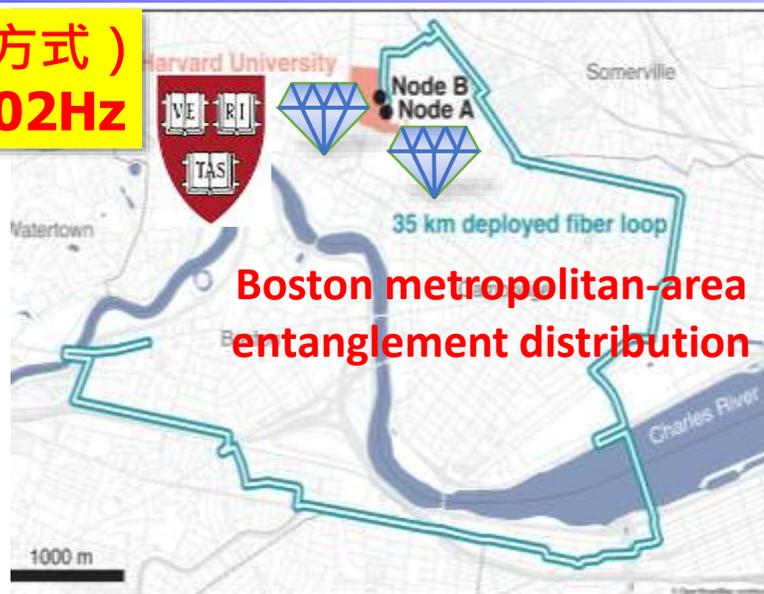
ダイヤモンド量子メモリ量子中継の世界状況

2023



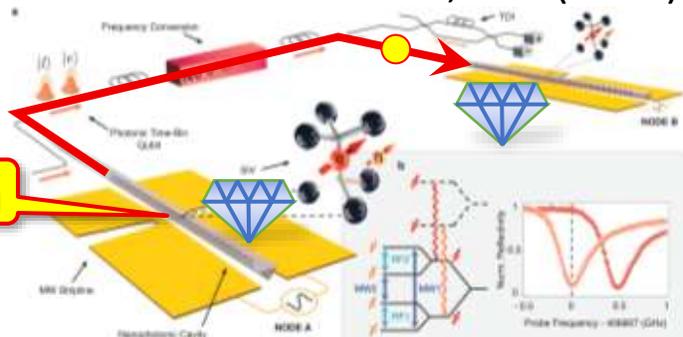
ダイヤモンド単一SiV間 (散乱方式)
35 km (実フィールド) 0.0002Hz

M. Lukinグループ (Harvard, MIT & AWS)
Nature 629, 573 (2024)



Boston metropolitan-area
entanglement distribution

フォトニック結晶



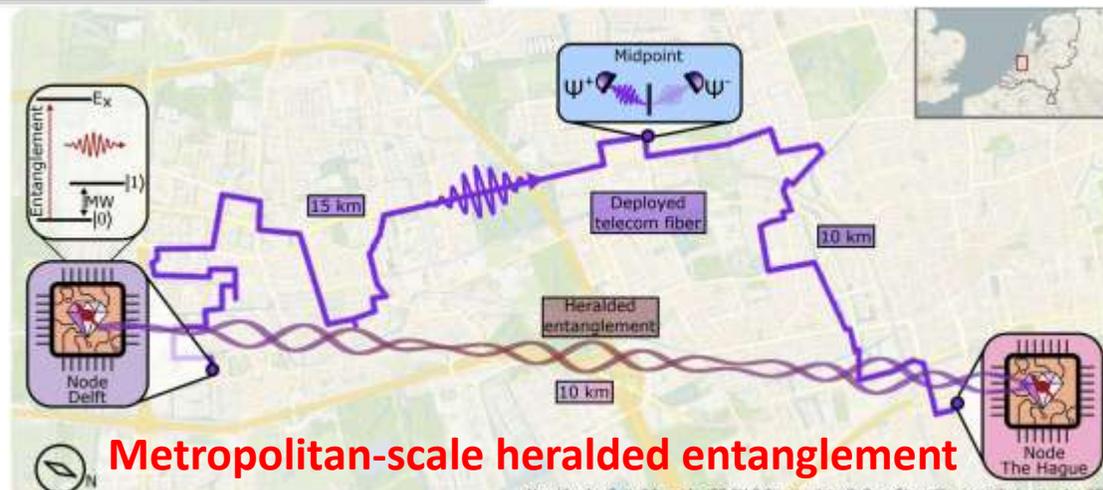
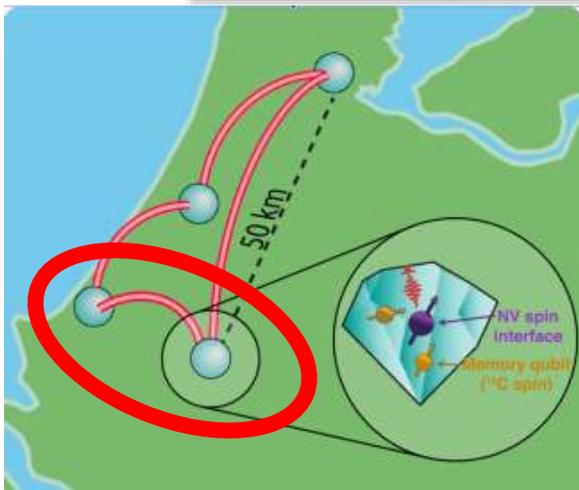
2地点間の量子もつれ
生成に留まり
真の量子中継には
至っていない

2024



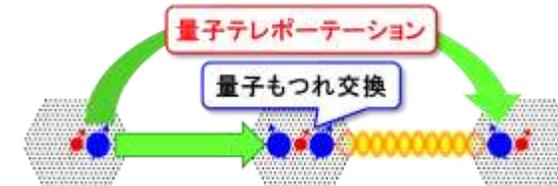
ダイヤモンド単一NV間 (1光子干渉)
25 km (実フィールド) 0.48Hz

R. Hansonグループ (TU. Delft & QuTech)
arXiv:2404.03723



Metropolitan-scale heralded entanglement

KQDの社会実証に向けた
真の量子中継を実証



量子情報研究センター



運営

PM

センター長



小坂英男

PM補佐

非常勤教員



Myalitsin Anton

広報
国際連携

非常勤教員



Volders Annelies

知財戦略

客員研究員



熊澤金也

渉外
産学官連携

産学官連携
コーディネーター



川崎恭正

大学（国内）

教授



馬場俊彦

教授



吉川信行

教授



南野彰宏

准教授



西島喜明

准教授



山梨裕希

准教授



Ayala Christopher

准教授



井上史大

准教授



島津佳弘

PM補佐

助教



金野晃之

助教



関口雄平

助教



黒川穂高

助教



上牧瑛

助教



Abdul Nasir
Kuzhiyan Thadathil

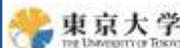
YNU 横浜国立大学

国立研究所

客員教授



岩本敏



客員教授



野村政宏



客員准教授



越野和樹



客員教授



牧野俊晴



客員教授



加藤宙光



客員教授



寺地徳之



客員准教授



小野田忍



客員教授



寺井弘高



客員教授



三木茂人



客員研究員



佐々木遼



大学（海外）

招聘教授



Finley Jonathan



招聘教授



Mueller Kai



招聘教授



Jelezko Fedor



招聘教授



Becher Christoph



アドバイザーボード
としての機能

民間企業

客員教授



味村裕



客員准教授



鯨岡真美子



YNU国際ネットワークハブ



Industry



共同研究契約



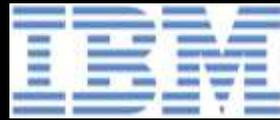
MIC連携



MIC連携



連携交渉中



連携交渉中



連携交渉中

Academia



招聘、共同研究



共同研究



招聘、共同研究



リサーチフェロー



招聘



連携協定



連携協定



連携交渉中



共同研究契約



MS6連携



MS6連携



共同研究



MS6連携



共同研究



Consortium



連携準備中



連携準備中



連携準備中



連携交渉予定



連携交渉予定



話したかったこと

- **量子コンピュータ**の出現により現代暗号通信は解読の危機にある。
- **量子通信**は量子コンピュータでも破れない暗号通信を可能とするだけでなく、**量子データ**を配信する未来通信。
- **量子中継器**が実現できなければ、**長距離・広帯域量子通信**も**大規模分散型量子コンピュータ**も実現しない。
- 量子コンピュータを**量子インターフェース**で量子通信に接続し**量子コンピュータネットワーク**を構築することで、始めて**量子インターネット**と呼べる新サービスが期待できる。