

YOKOHAMA

NICT Quantum Camp (NQC)

2025年9月13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



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

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

- 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。
- 第1世代量子中継器は飽和し実用的な第2世代量子中継器に移行。
- 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

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)

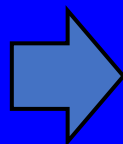
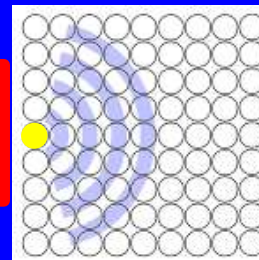
光子検出器で計数

光の粒？

(アインシュタイン)

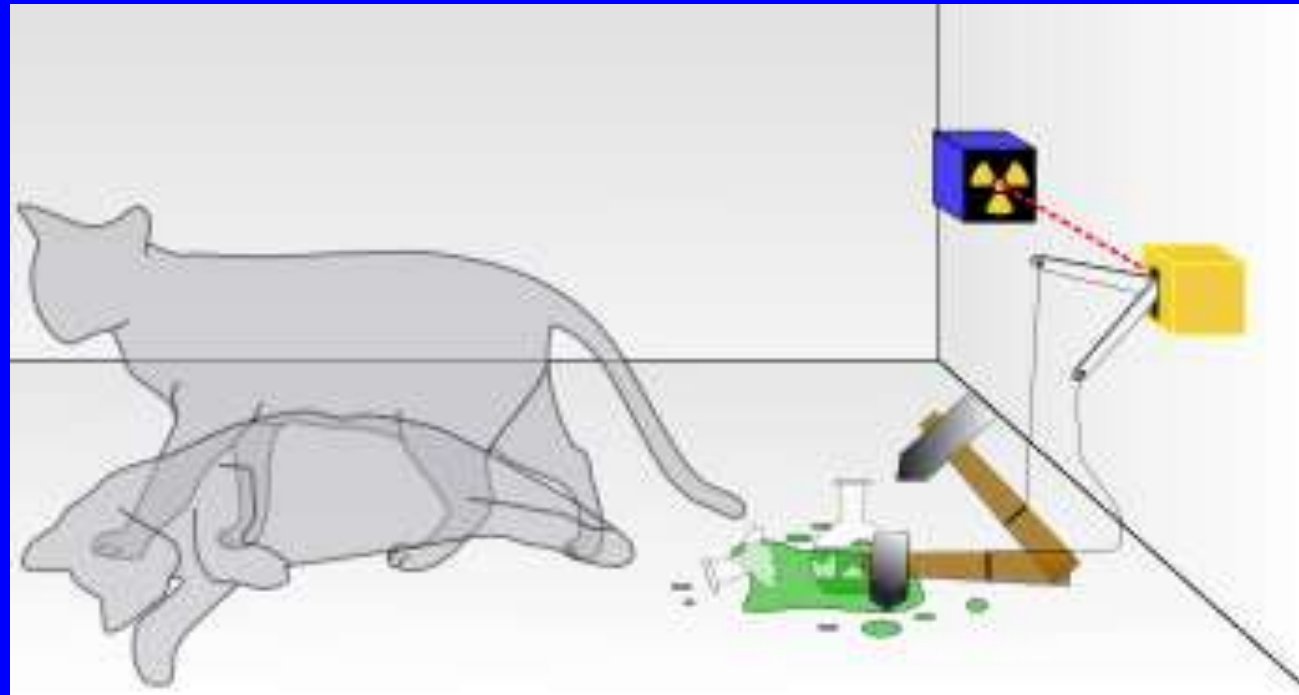


場の量子論



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

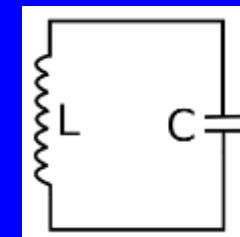
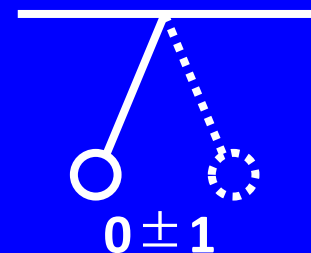
量子、量子もつれ、量子テレポとは？

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。

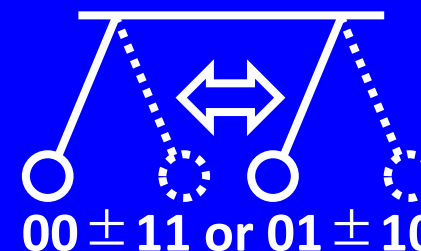
「位相」が確定 → 「コヒーレンス」が高い。



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±）

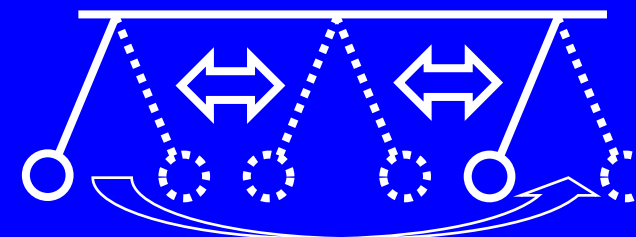


3. 量子テレポーテーション＝量子もつれの交換（スワップ）

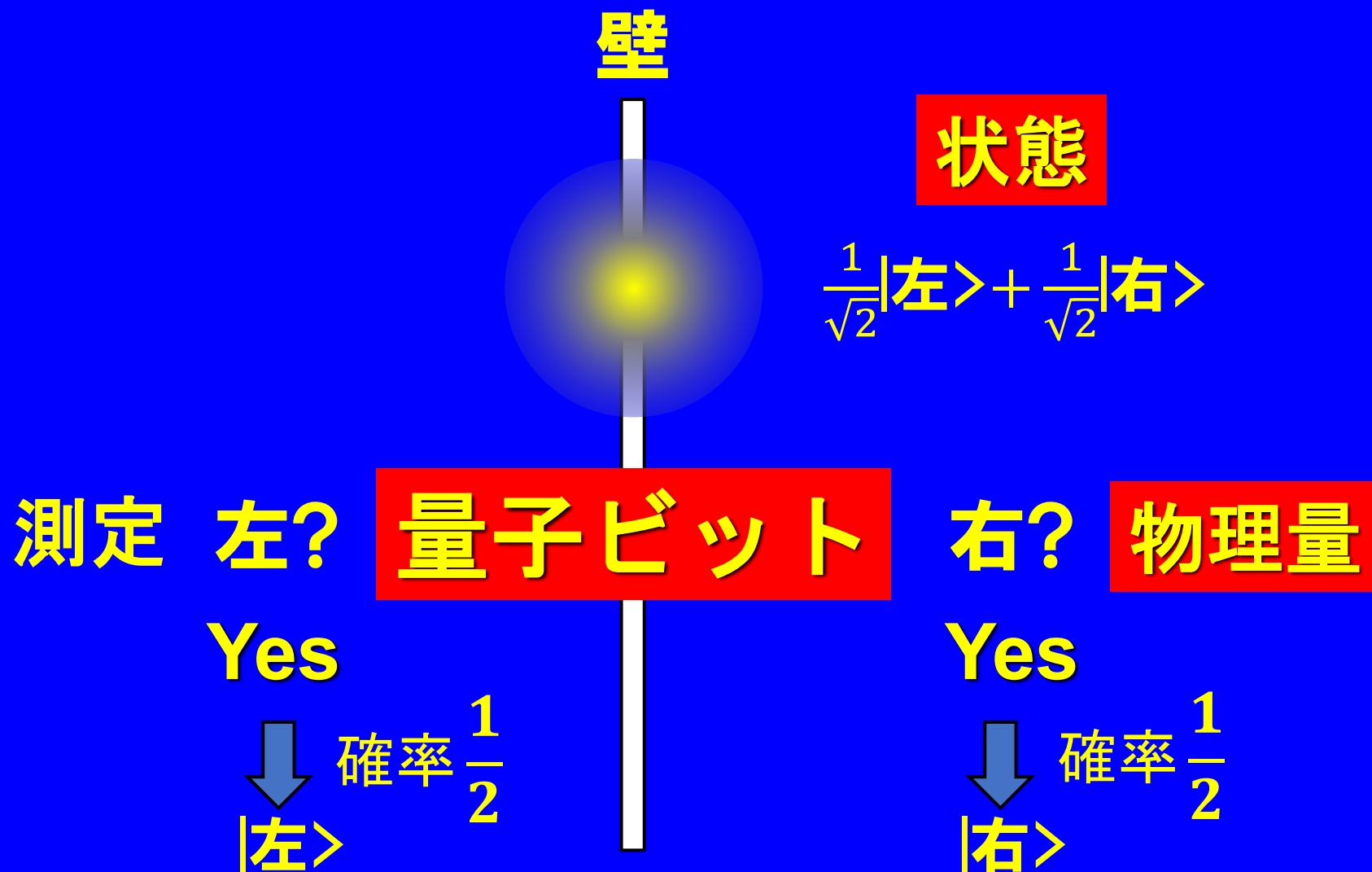
出会ったことのない粒子間がもつれる。

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

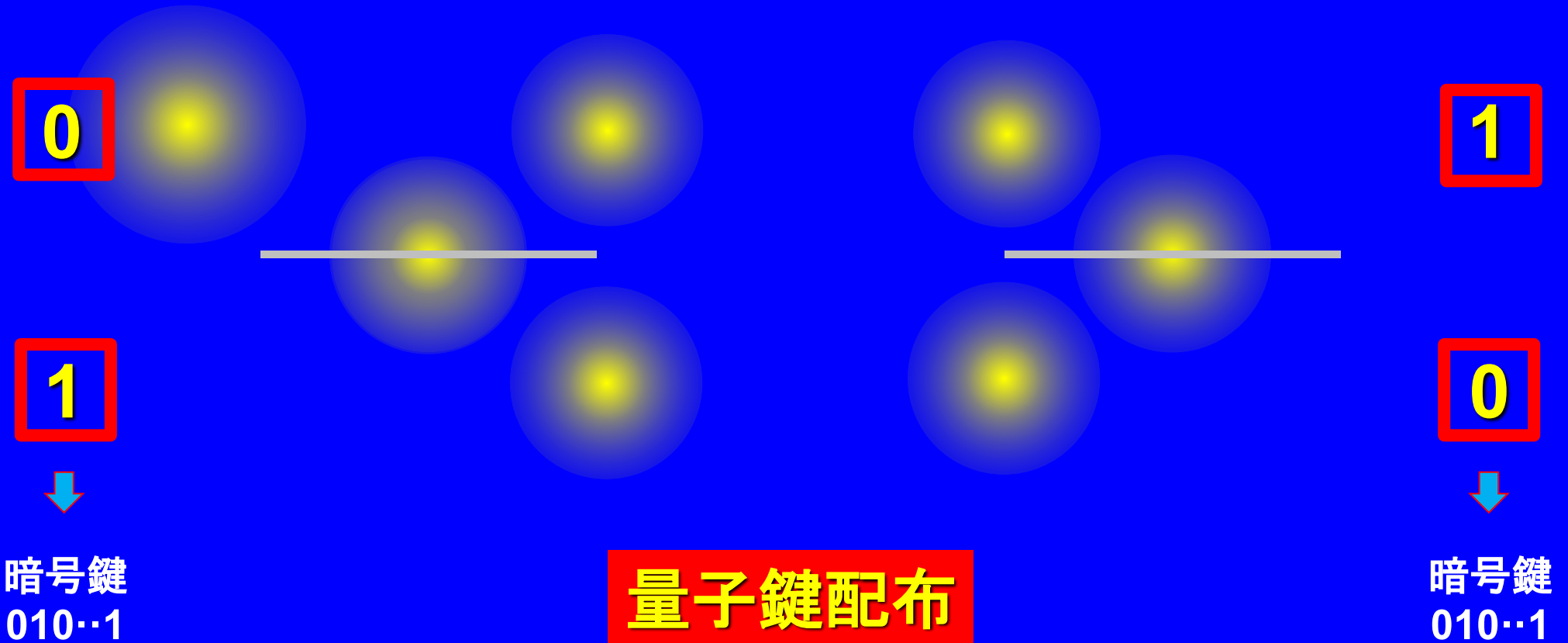
↓ 確率 $\frac{1}{2}$
 $|\text{左}\rangle$

右? 物理量

Yes

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

量子干渉 と 量子鍵配布



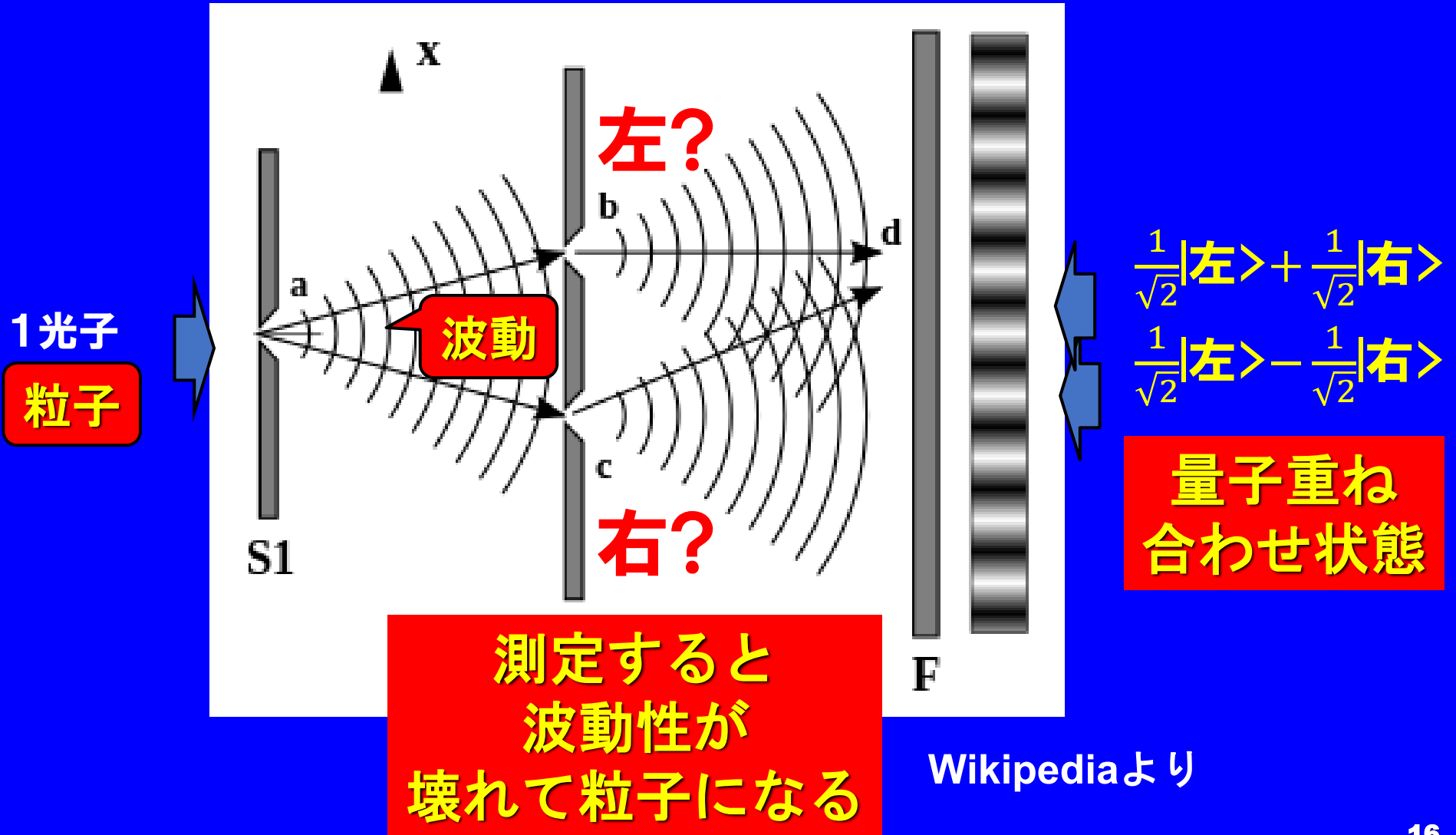
量子鍵配布

||

量子暗号通信

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！

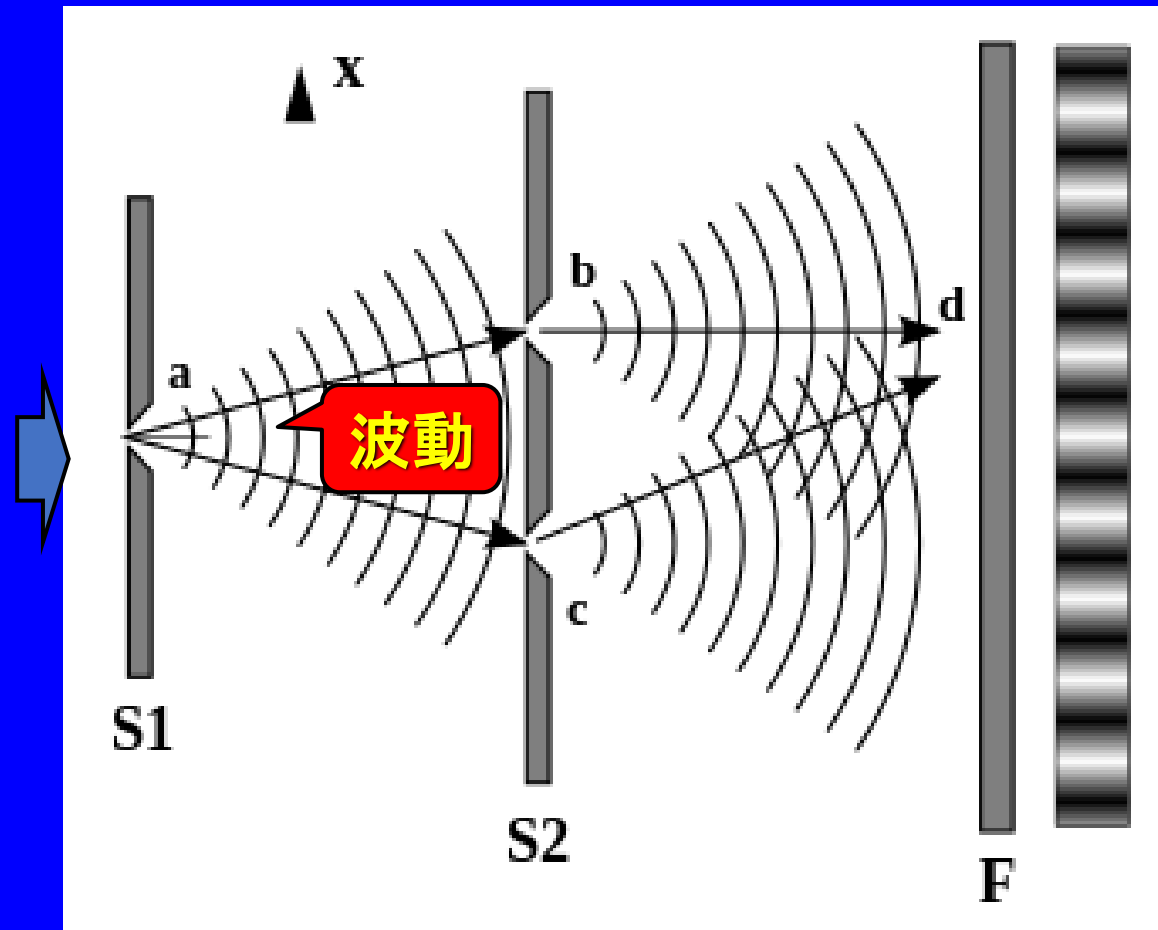


問題

bで光子が一つ通るのを観測した後に干渉するか？

答え：

1光子
粒子



量子の重要な性質

量子はコピー(増幅)ができない！



コピーすると
量子状態は壊れる

“量子時代”のかぎをにぎる

もつれる 量子

量子コンピューターや量子暗号通信などの「量子」と名のつく科学や技術は、急速に発展しています。量子には、波にも粒子にもなれて、複数の状態を同時にとることができるという特徴があります。それらの特徴を利用した次世代の科学技術は、社会を大きく変える可能性を秘めています。量子の時代が近づいているのです。

量子がおこすとくに奇妙な現象が「量子もつれ」です。量子もつれは、量子の特徴を利用した科学技術をさらに発展させるための重要な役割をになっています。量子もつれとは何か、量子時代において量子もつれがなぜ重要なかにせまります。

監修 小坂英男

横浜国立大学大学院工学研究院教授

不思議な
コイン

遠くはなれているのに表と裏が連動する 不思議なコインのペア

距離をこえてつながる 不思議なコイン

つねに向きが反対になるという、特殊な性質をもった2枚のコインのペアをえがきました。一方のコインの向きが表から裏に変わると、もう一方のコインがどんなに遠くはなれた場所にあっても、その向きが瞬時に裏から表に変わります。

日本にあるコイン
を裏返すと……

“特殊な関係”で
つながっている

二次配布厳禁

アメリカにあるコインは
瞬時に表向きになる

量子もつれは確かに存在した！ ノーベル賞を受賞した検証実験

局所実在論の想定をこえる相関の強さ (S) が観測されたものの、フィルターの角度が光子の発射前から決まっていたことなどから、何らかの要因で相関が強くなる可能性を排除できませんでした。

1982年：アスベらの実験

26～27ページで示した実験概要に近い形で行われました。測定に使用するフィルターを光子発射後に変更する（事前にわからないようにする）ことで、クラウザーらの実験で指摘された問題点を解決しました。



アラン・アスベ
1947年、フランス生まれ。
パリ・サクレ大学教授。



またしても局所実在論を否定する結果が出ました。ところが、まだ左右のフィルター（測定装置）の間で何らかの影響をあたえよう可能性はゼロではありませんでした。

二次配布厳禁

改良を重ねた実験で量子もつれを実証

ノーベル物理学賞を受賞した3氏が行った、量子もつれと局所実在論の検証実験の概要を示しました。クラウザーらの初期の実験のときから、量子もつれの存在を示す結果が出ていました。アスベらが行った改良実験の段階で、量子もつれの存在（局所実在論の否定）は決定的になったといわれています。

1972年：クラウザーらの実験

前のページで示した実験概要よりも簡易的な装置で行われました。フィルターの通り方は1通りで、フィルターの角度は光子が発射される前に決まっていた。



ジョン・クラウザー
1942年、アメリカ生まれ。J. F. クラウザー & アソシエイツ
社物理研究員。



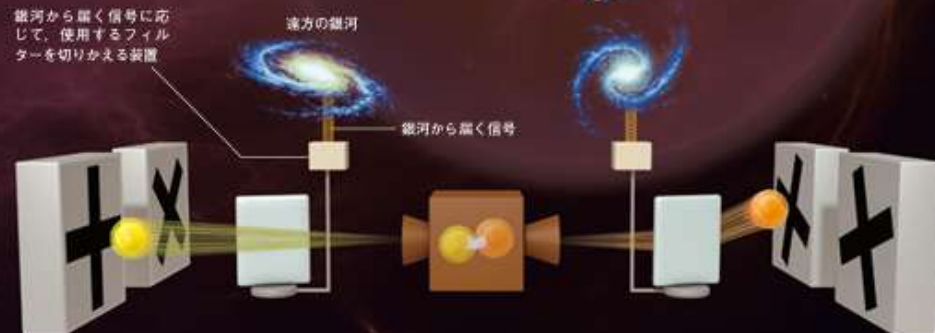
(右ページ上へつづく)

1998年：ツァイリンガーらの実験

遠方の銀河から届く信号を「乱数」として使用し、測定に使用するフィルターをランダムに切りかえるようにしました。そうすることで、左右のフィルター（測定装置）の間であたえよう影響を排除した実験を行いました。その結果、やはり局所実在論を否定する結果が得られました。



アントン・ツァイリンガー
1945年、オーストリア生まれ。ウィーン
大学教授。



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！

$$\begin{array}{cc|cc} |0\rangle & \longleftrightarrow & |0\rangle & |0+1\rangle & \longleftrightarrow & |0+1\rangle \\ |1\rangle & \longleftrightarrow & |1\rangle & |0-1\rangle & \longleftrightarrow & |0-1\rangle \end{array}$$

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

$$\left[\begin{array}{l} |00\rangle + |11\rangle \\ |00\rangle - |11\rangle \\ |01\rangle + |10\rangle \\ |01\rangle - |10\rangle \end{array} \right]$$

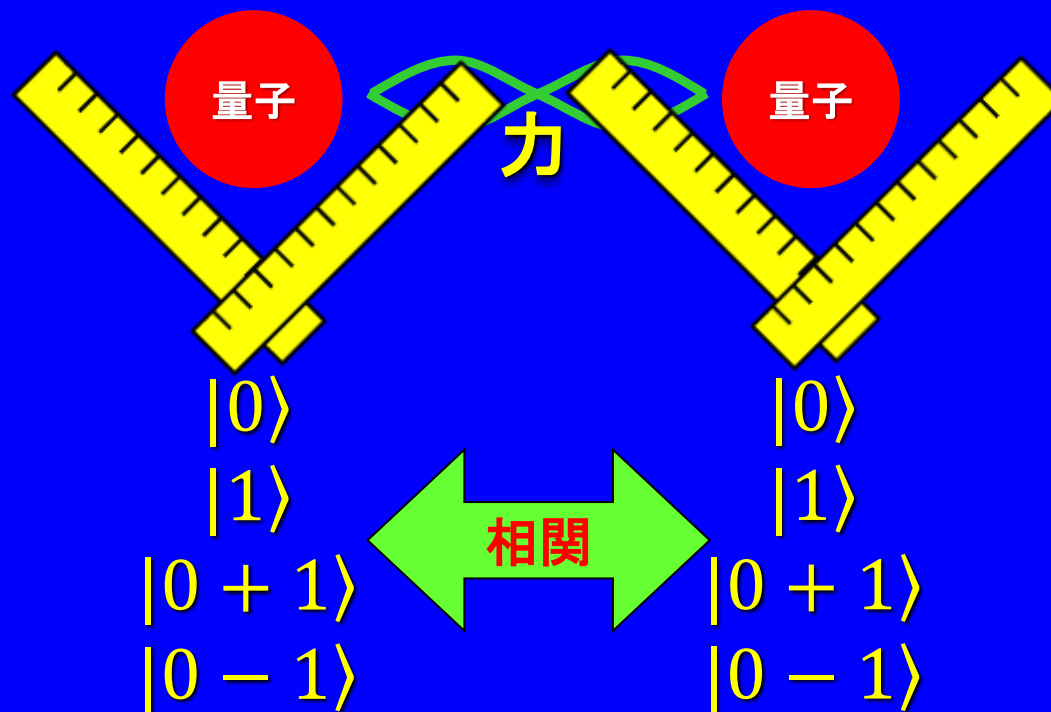
どの種類
かを測定

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
作り方

量子もつれは、量子コンピューターの
“進化”のかぎをにぎっている！



二次配布厳禁

電子—電子の量子もつれ

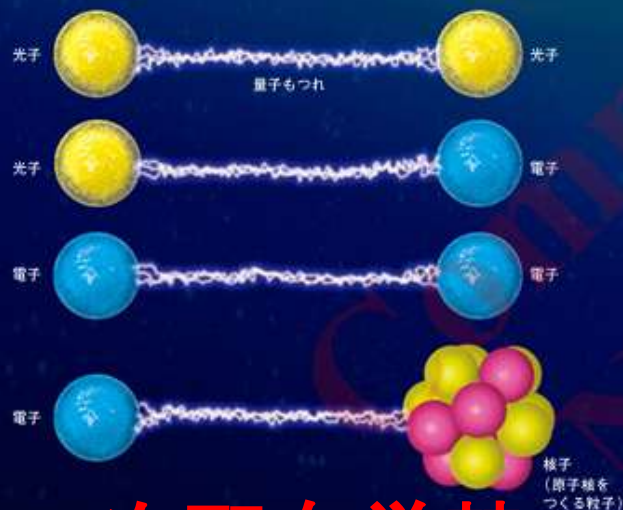
スピンの向きが異なる二つの電子をせまい領域に入
れると、二つの電子の間に量子もつれ（相関した状態）を
つくることができます。具体的には「量子ドット」とよ
ばれる半導体の微細な構造を利用して、電子をせまい領
域に押しこめて、もつれさせます。

電子—光子の量子もつれ

特殊な状態に制御したダイヤモンドの中で電子がエネルギーを失
い、失った分のエネルギーを光子として放出すると、光子と電子の間に量子もつれが生
じます。あるダイヤモンドで発光させた光子（もつれた光子）を、はなれた
場所にある別のダイヤモンドの電子に吸収させることもできます。それによ
って量子がもつ情報を移動させる「量子テレポーテーション」（36ページ）
も可能になります。

代表的な量子もつれのペア

現在の技術で人工的につくることができる量子もつれのペアをいく
つか示しました。人工的に制御された量子もつれは、量子コンピ
ューターや量子暗号通信などに利用されています。



二次配布厳禁

“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



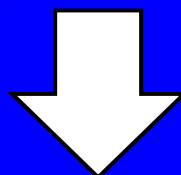
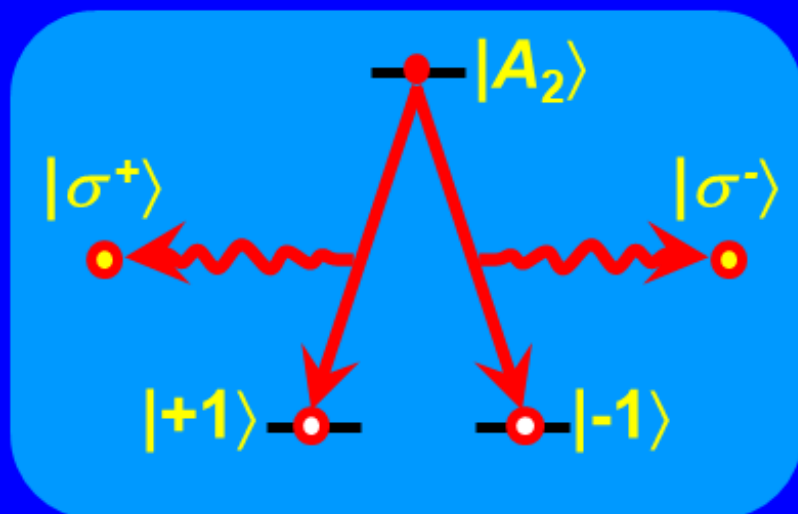
“量子もつれ”の作り方2

YNU方式

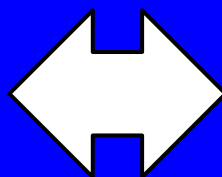
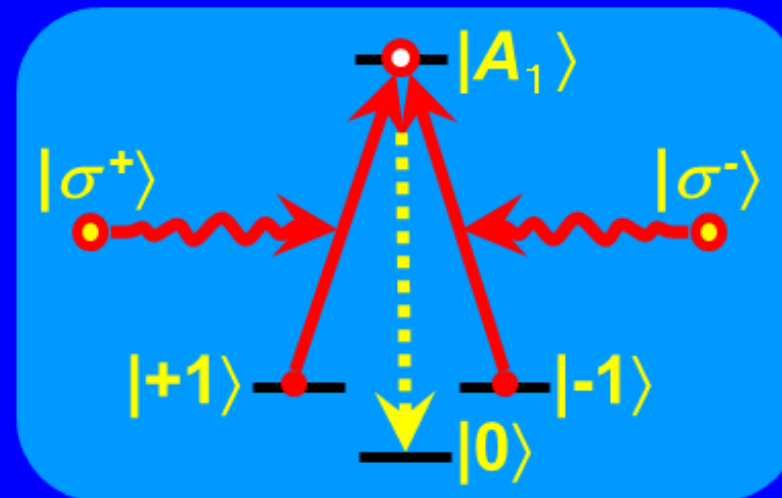
スピン軌道相互作用の利用

特殊な材料から発光した
光子は電子ともつれる

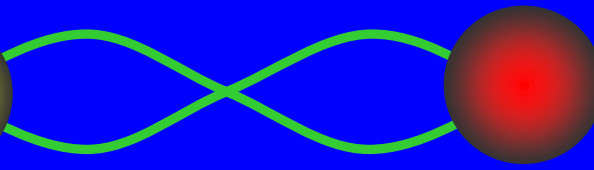
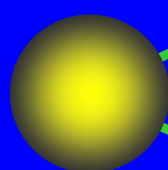
もつれ発光



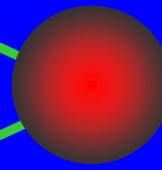
もつれ吸収



光子



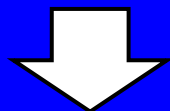
電子



“量子もつれ”の作り方3

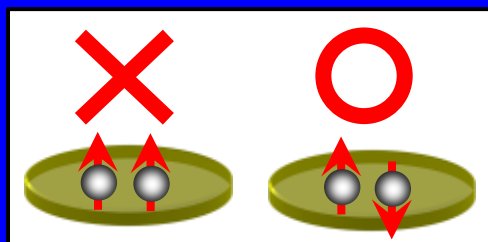
交換相互作用の利用

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

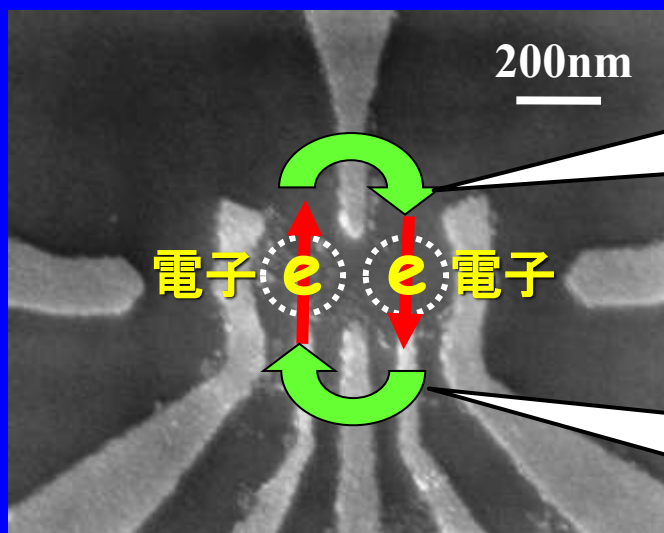
2つのもつれた電子対だけが箱に入る



電子

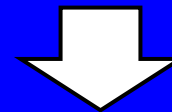
電子

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

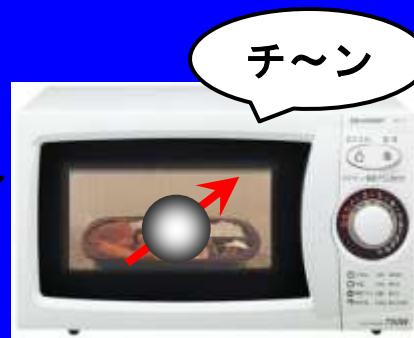
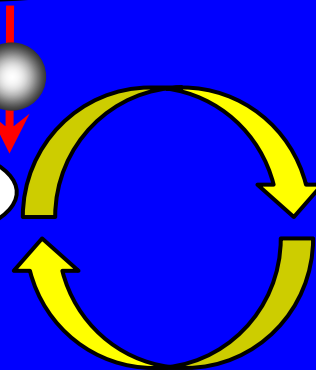
$$|0\rangle_1|0\rangle_2 + |1\rangle_1|1\rangle_2$$

条件付きNOT

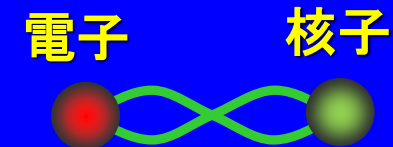
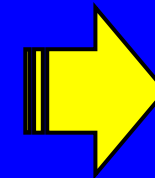
量子情報技術の基本操作



レーザー光



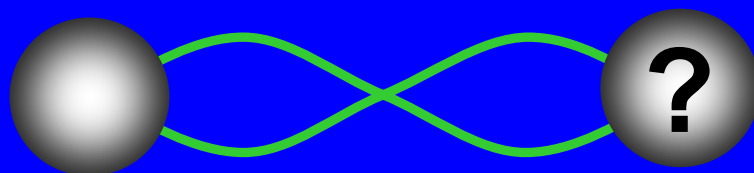
マイクロ波
・ラジオ波



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

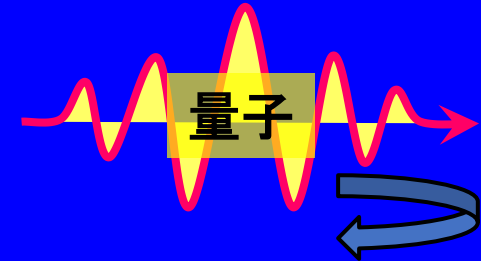
量子状態を入れる

媒体（メディア）あるいは 担体（キャリア）

この入れ物は

量子

粒子でも波動でもよい

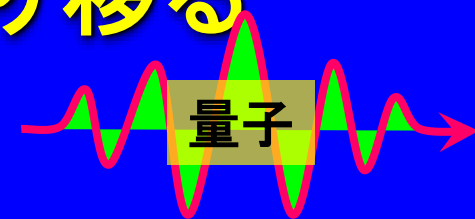


例えば

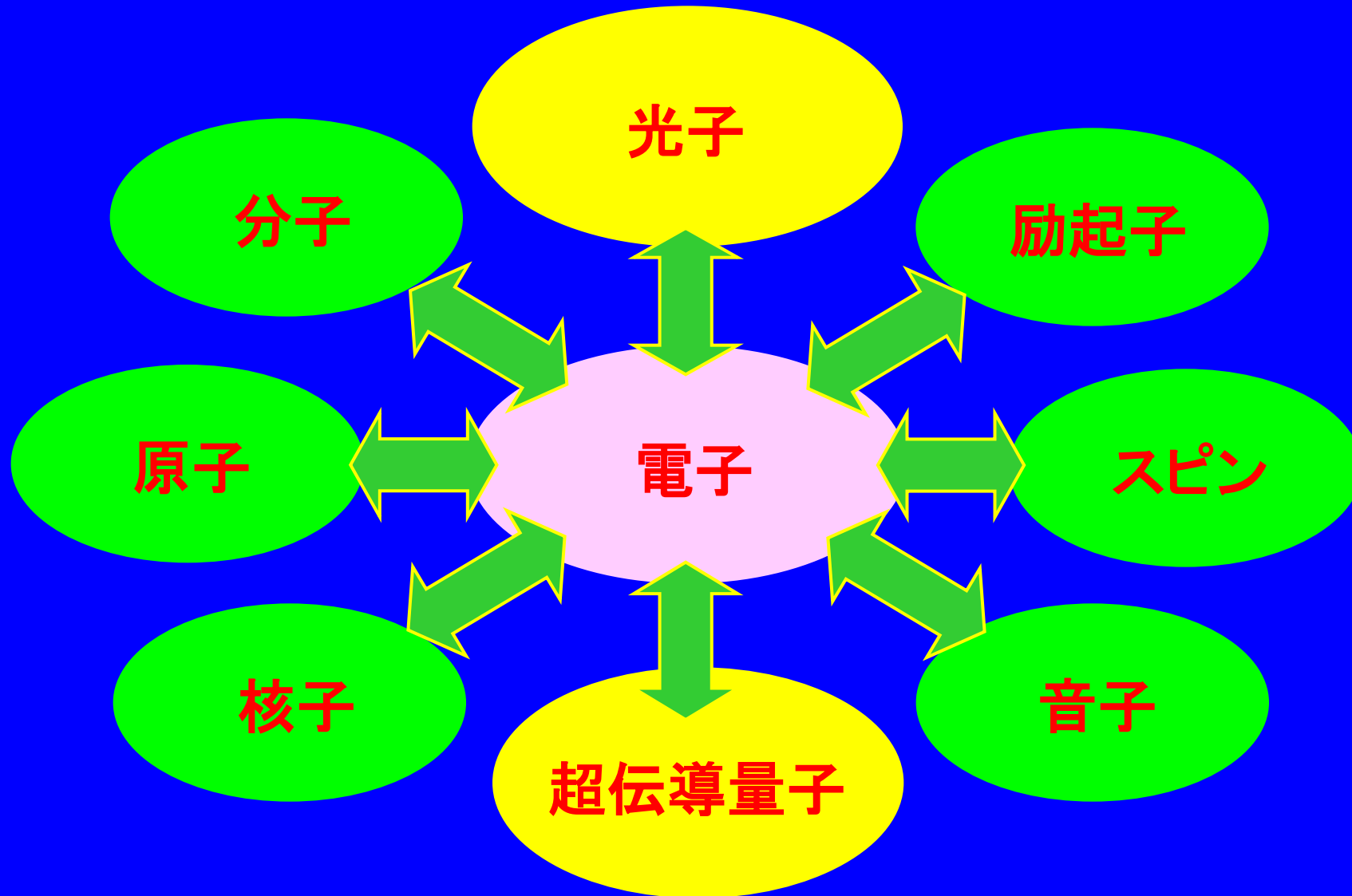
ある波長の光子を別の波長の光子に変換する場合

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

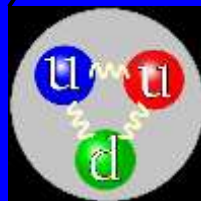
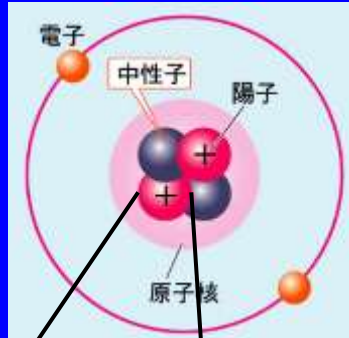
原子

電子＋原子核

陽子 と 中性子

クォーク
ニュートリノ
ミューオン

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）

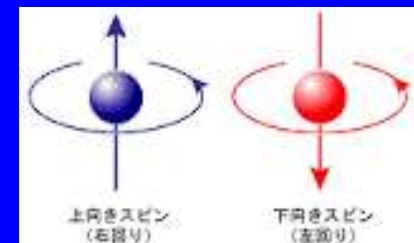
重力子（重力波）
グルーオン（強い力）
ウィークボソン（弱い力）

これらはゲージ粒子
と呼ばれ力を媒介する

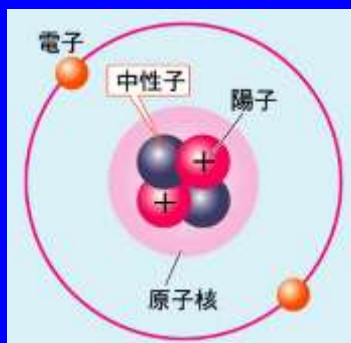
スピンとは

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



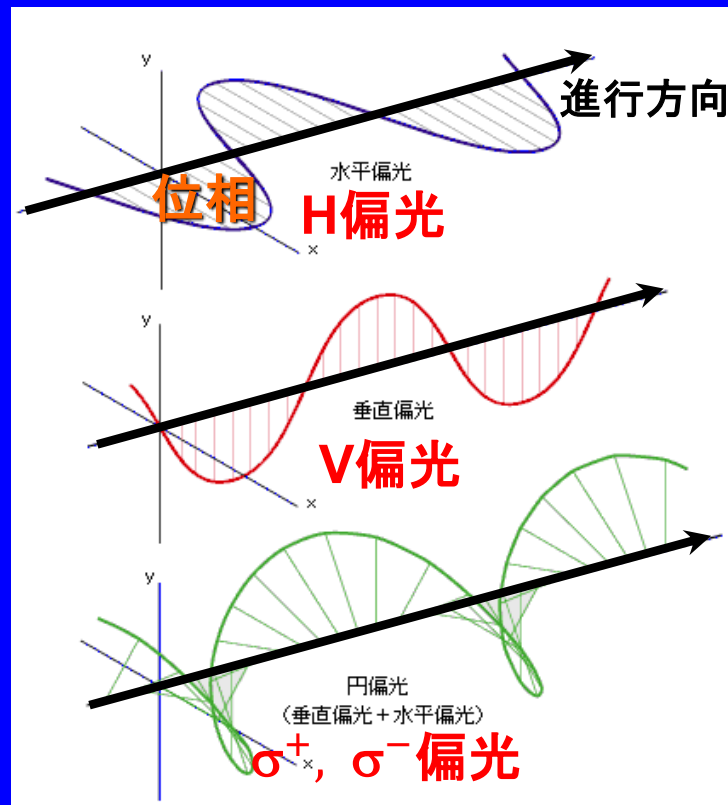
核子 { 電子 $\frac{1}{2}$
陽子 $\frac{1}{2}$ 自転に例えられる
中性子 $\frac{1}{2}$

偏光とは

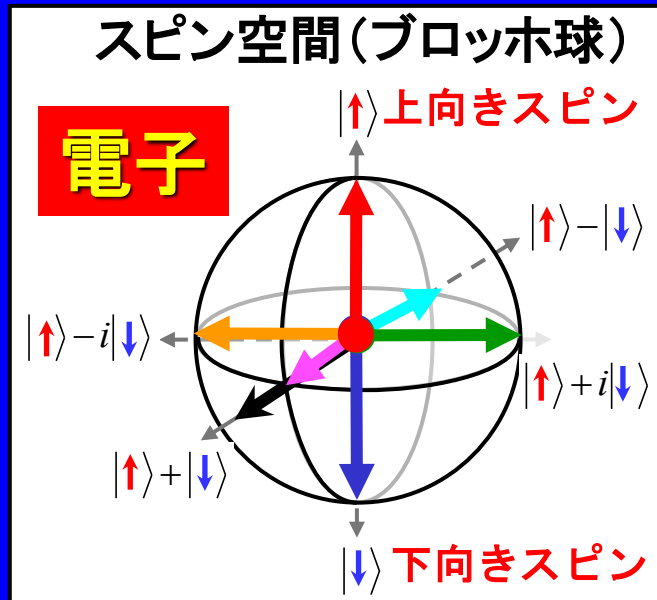
電場や磁場の偏りのこと
スピンと同様に
光子の角運動量を表す \Rightarrow スピン1

直線偏光

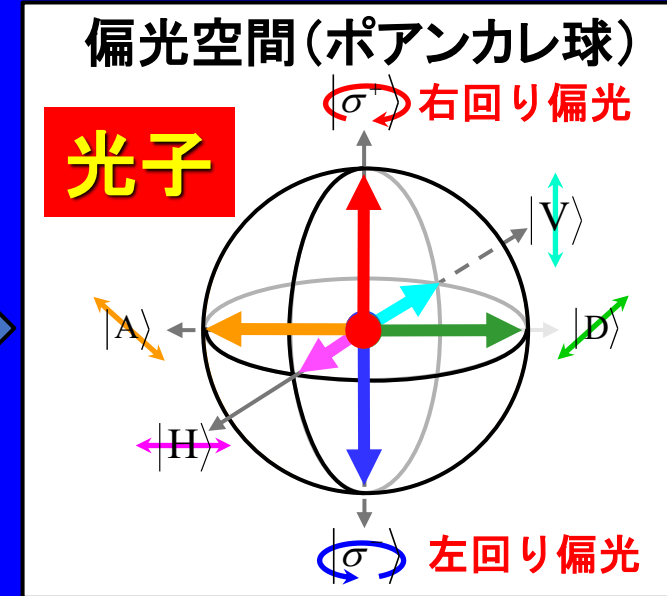
円偏光



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

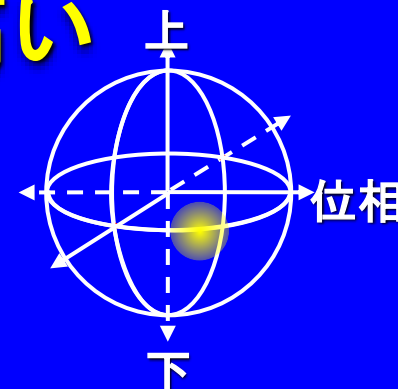
論理キュービット

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。

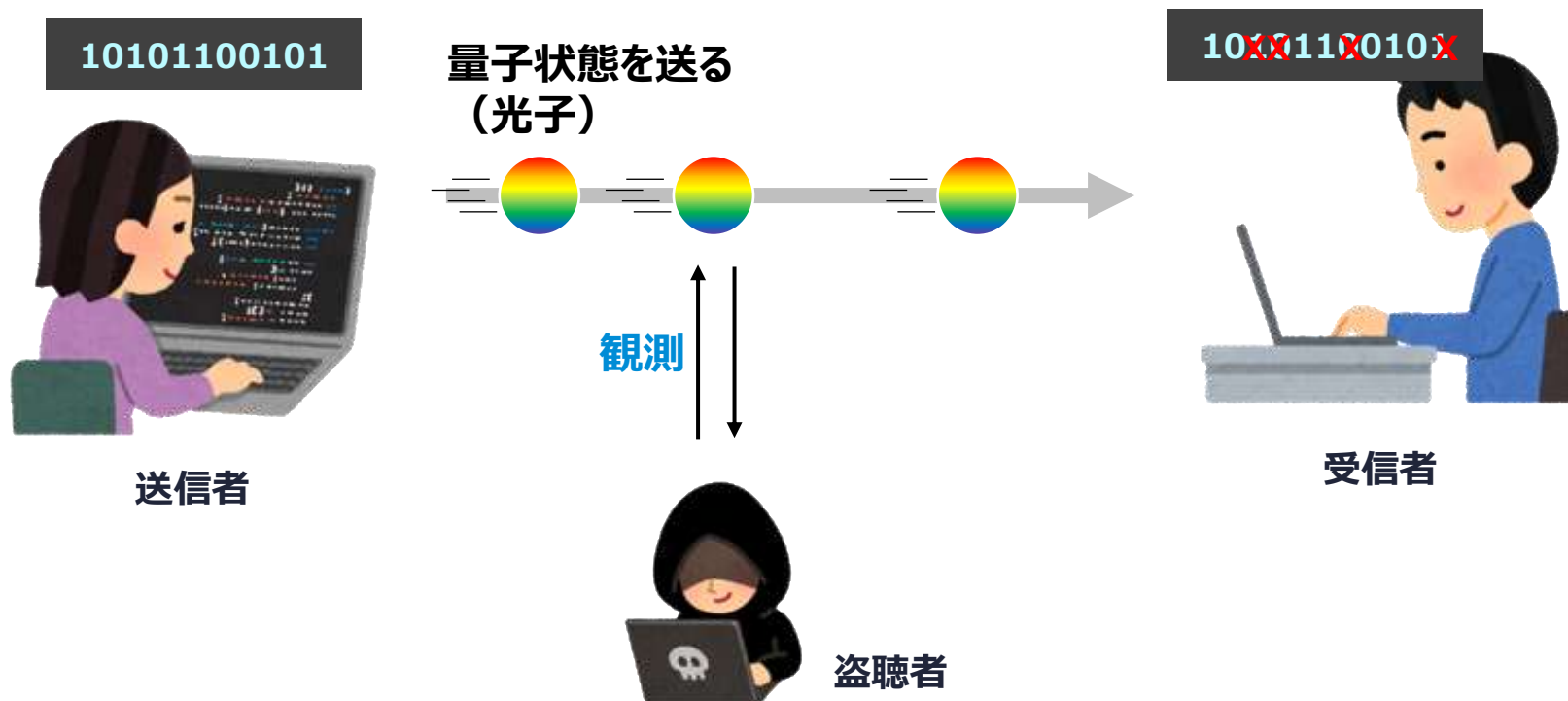
量子暗号鍵配送 (QKD)

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。

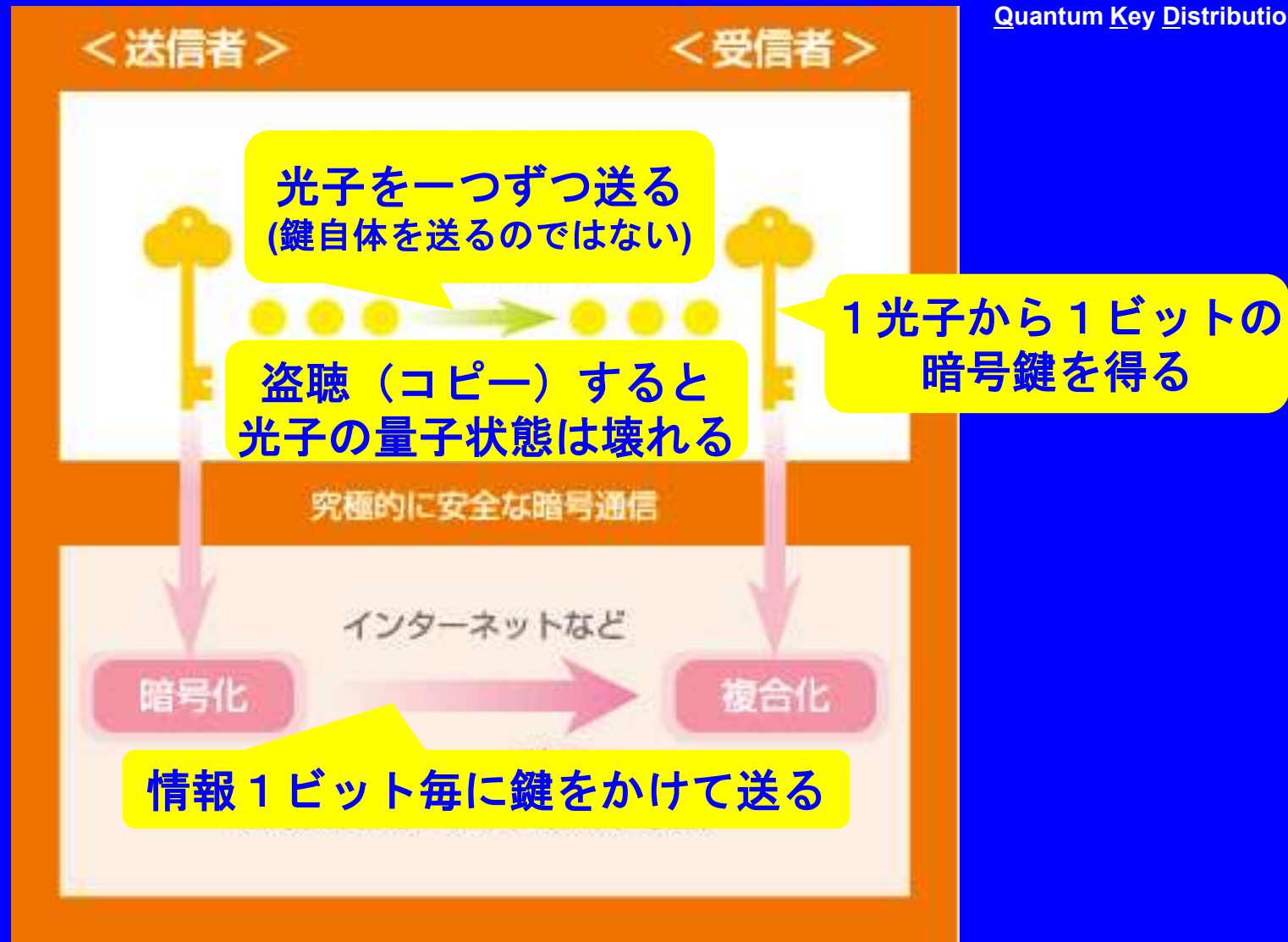


物理法則が通信システムの安全性を担保。

量子暗号通信とは？

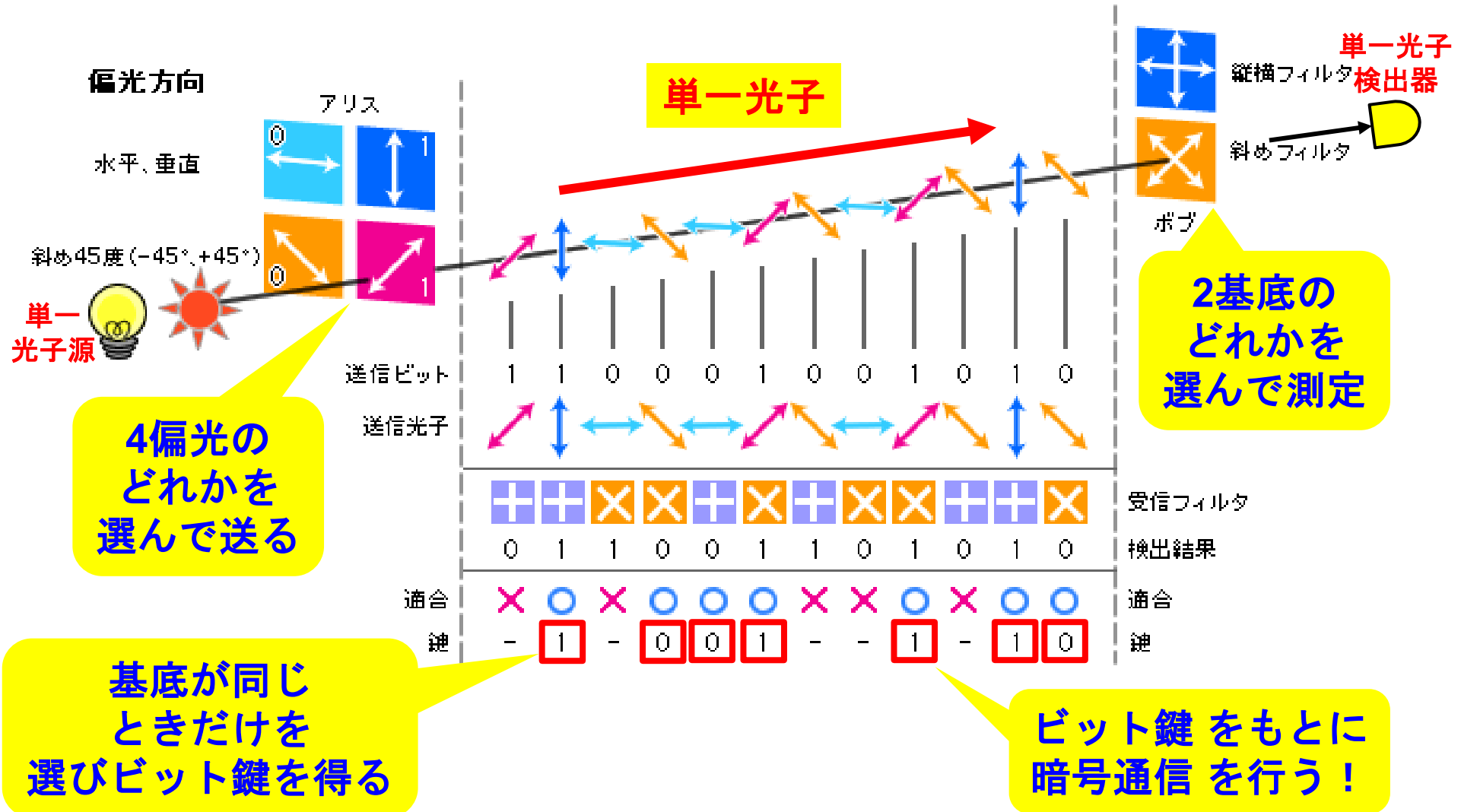
通信の鍵を光子で送ること！ = 量子鍵配布 (QKD)

Quantum Key Distribution



量子暗号通信の基本原則(BB84)

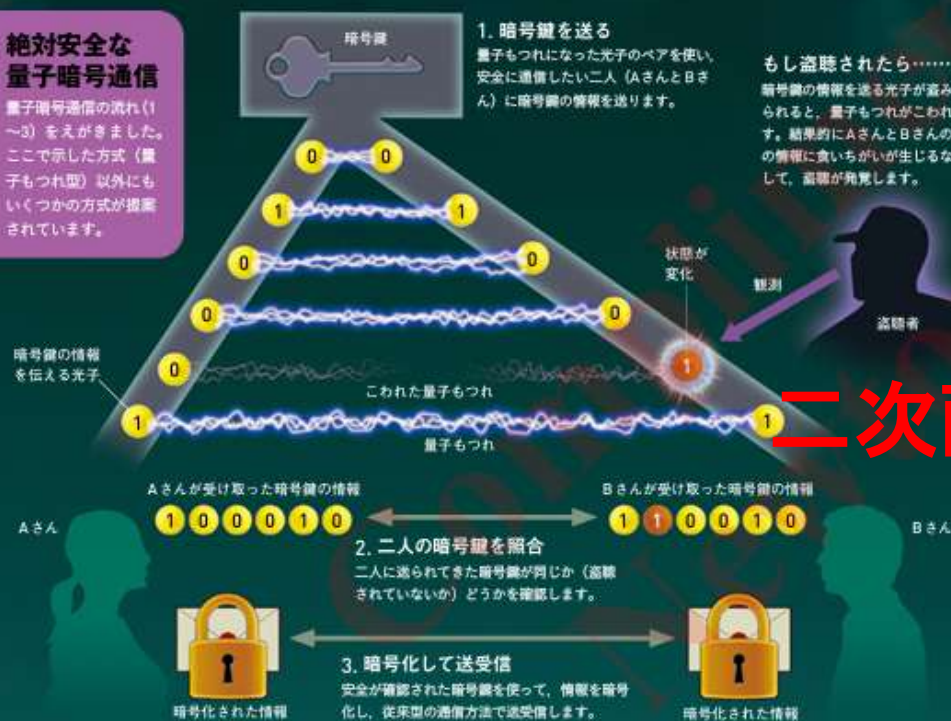
“量子重ね合わせ”の原理を利用！



Ekert 91 (E91) プロトコル

絶対安全な 量子暗号通信

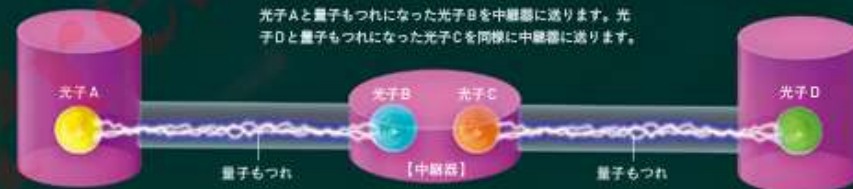
量子暗号通信の流れ(1～3)をえがきました。ここで示した方式(量子もつれ型)以外にもいくつかの方式が提案されています。



二次配布厳禁

1. もつれたペアを中継器に送る

光子Aと量子もつれになった光子Bを中継器に送ります。光子Dと量子もつれになった光子Cを同様の中継器に送ります。



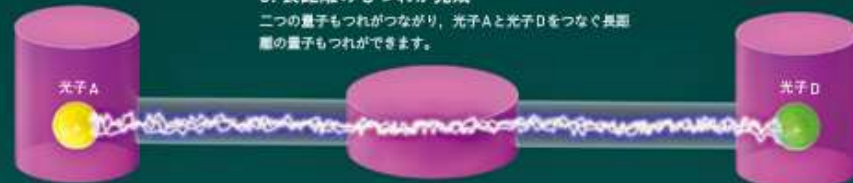
2. もつれ測定で強制的にもつれさせる

光子Bと光子Cの間で「もつれ測定」を行い、両者を強制的にもつれさせます。



3. 長距離のもつれが完成

二つの量子もつれがつながり、光子Aと光子Dをつなぐ長距離の量子もつれができます。



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。

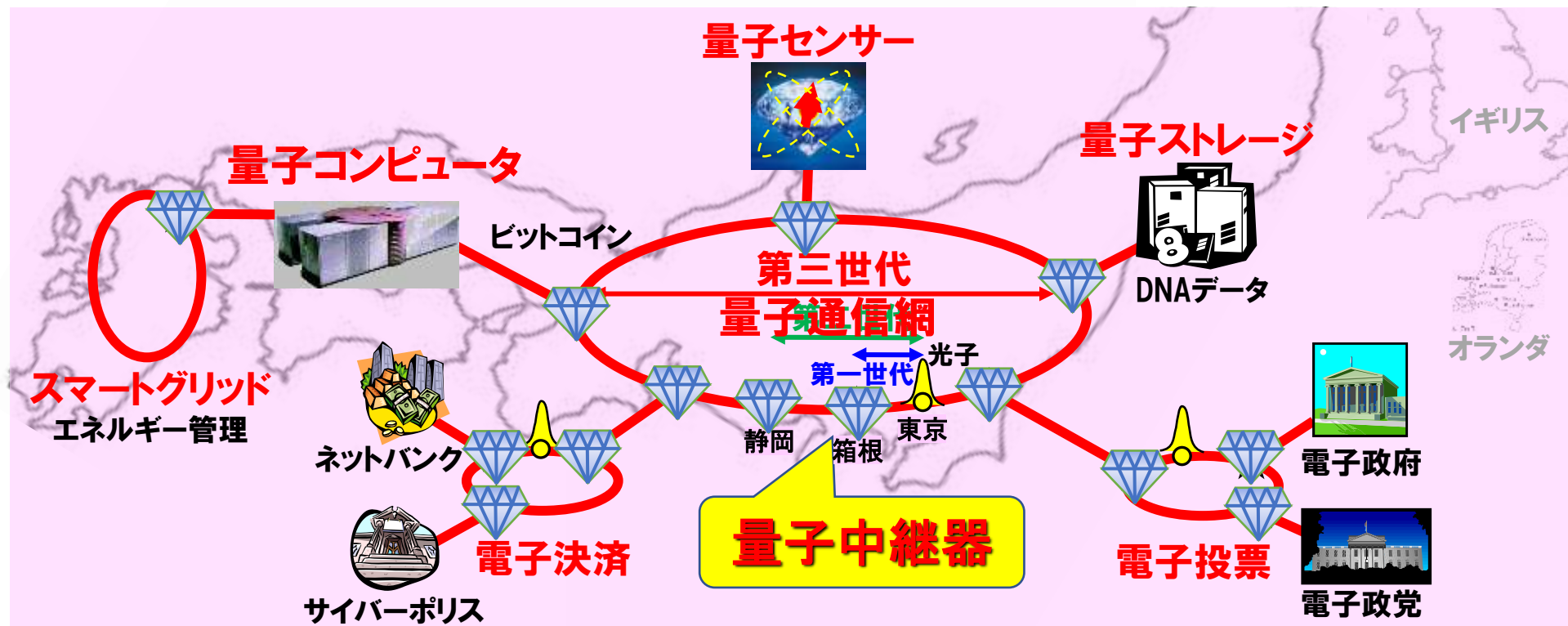
本講演の内容

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(=量子鍵配布)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

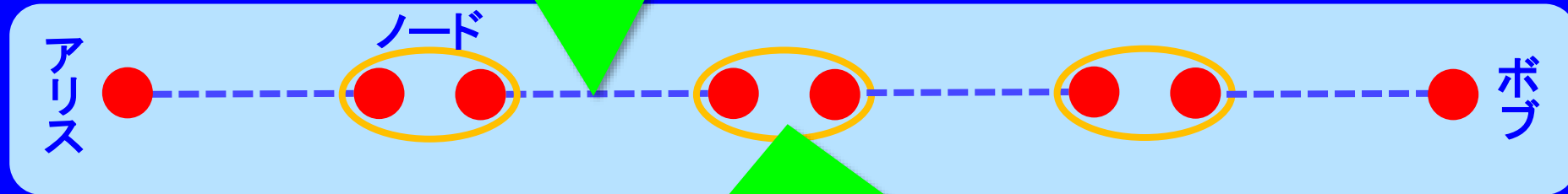
量子メモリがな
ければ実現不可能

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

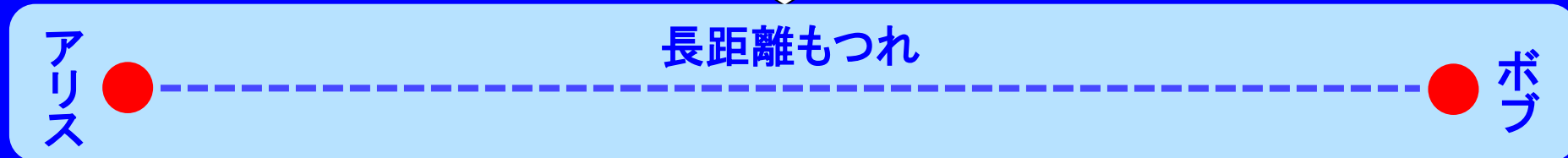
遠隔もつれ生成(確率的)



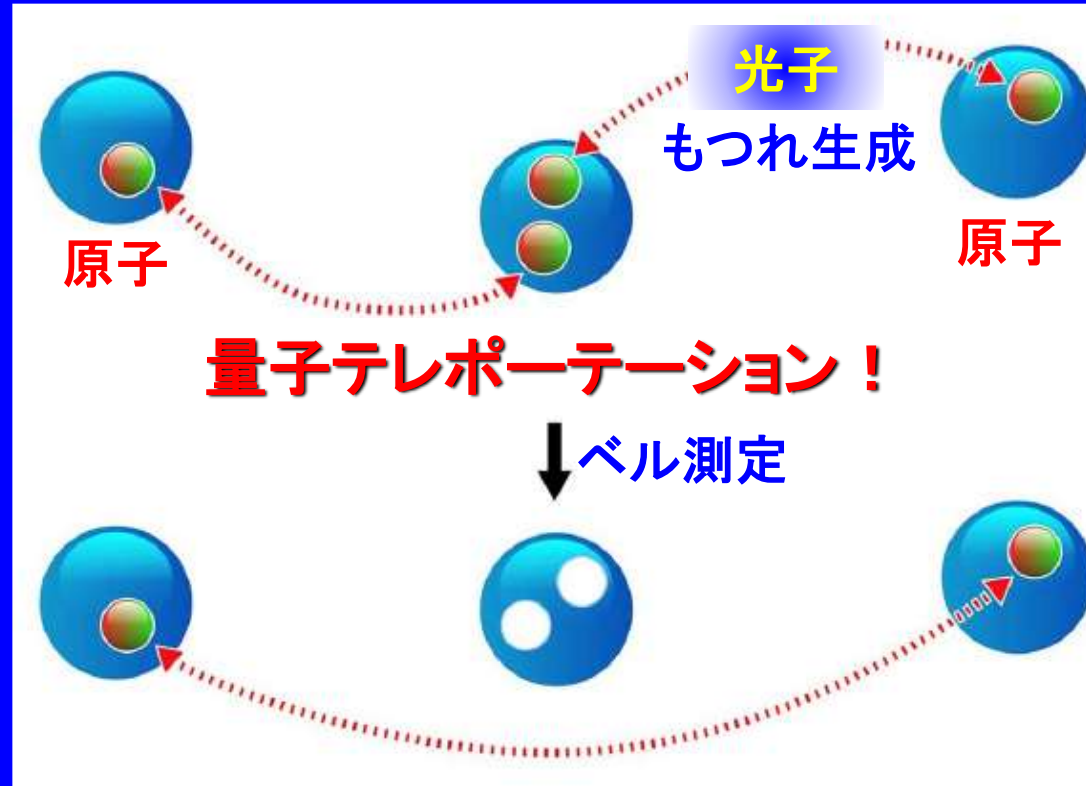
局所もつれ測定(完全ベル測定)
ヘルルド → オンデマンド型(決定論的)

+ 誤り訂正

長距離もつれ

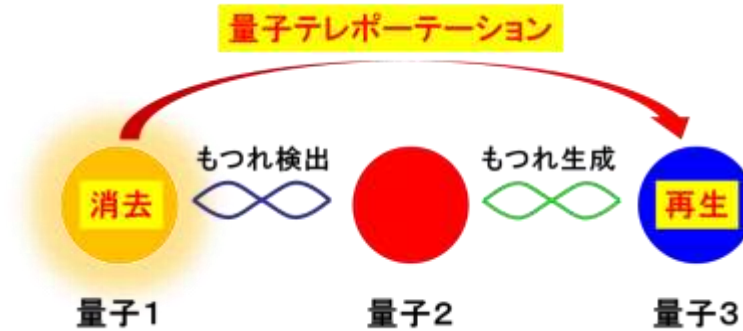


量子中継の原理？



長距離もつれのできあがり！

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.

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

量子もつれを使って物体を“転送”する
量子テレポーション

制的に量子もつれの関係が作りだされます。それに連動して、送信室と受信室の原子の間にあった量子もつれ状態はこわれ、受信室の原子の状態も瞬時に変化します。

この段階で、量子もつれを介して物体の情報は受信室にまで伝わりますが、不完全な状態です。そこで、測定室で行ったもつれ測定の結果（補足情報）を、通常の通信方法で受信

量子テレポーションの流れ

量子もつれを使って物体を転送する「量子テレポーション」の流れをえがきました。右ページに示した三つの段階を経て、転送元（量子測定室）にあった物体が、別の場所（量子受信室）に出現します。

量子受信室に出現した物体は、そこにあった大量の原子を材料にして再構成されたものです。ただし、物体を構成する原子の数や配置、状態（量子状態）まで、元（転送前）の物体とすべて同じです。そのため、転送前の物体とのちがいを見いだすことはできないでしょう。

1. 転送の準備

転送する物体を「量子測定室」に入れておきます。「量子送信室」と「量子受信室」には、それぞれ「物体のもと」となる大量の原子が入っており、二つの部屋の原子どうしは量子もつれによってつながっています。



量子測定室と量子送信室の間でもつれ測定を実施

2. 量子状態を測定

測定室にある物体と、送信室の大量の原子の間で「もつれ測定」を行い、両者を強制的に量子もつれの状態にします。

その瞬間に、送信室と受信室の原子間にあった量子もつれはこわれます。同時に、送信室と受信室の原子間の量子もつれ状態が、送信室と受信室の原子間の量子もつれ状態に変わります。送信室と受信室の原子間の量子もつれ状態は、送信室から受信室に通信ケーブルを通して伝えます。



量子受信室にもつれ測定の結果（補足情報）を送信

3. 物体が出現

もつれ測定の結果（補足情報）を使って、受信室の原子の状態を補正します。すると、測定室にあった物体とまったく同じ物体が受信室に出現します。



第2部

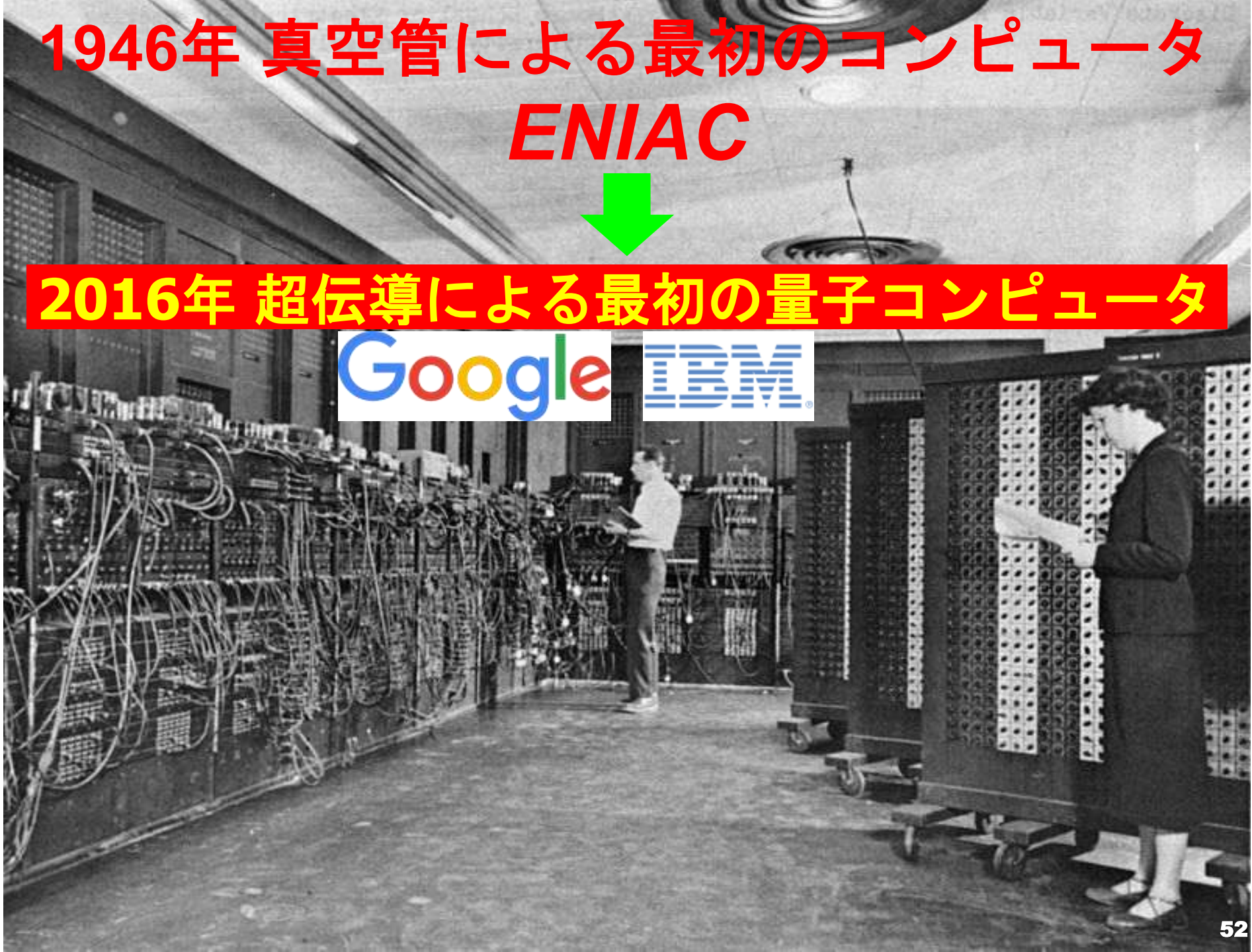
量子情報研究最新動向

～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



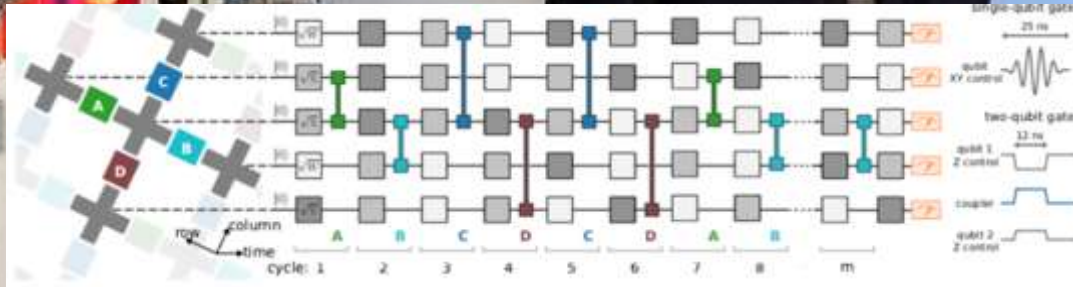
2016年 超伝導による最初の量子コンピュータ



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

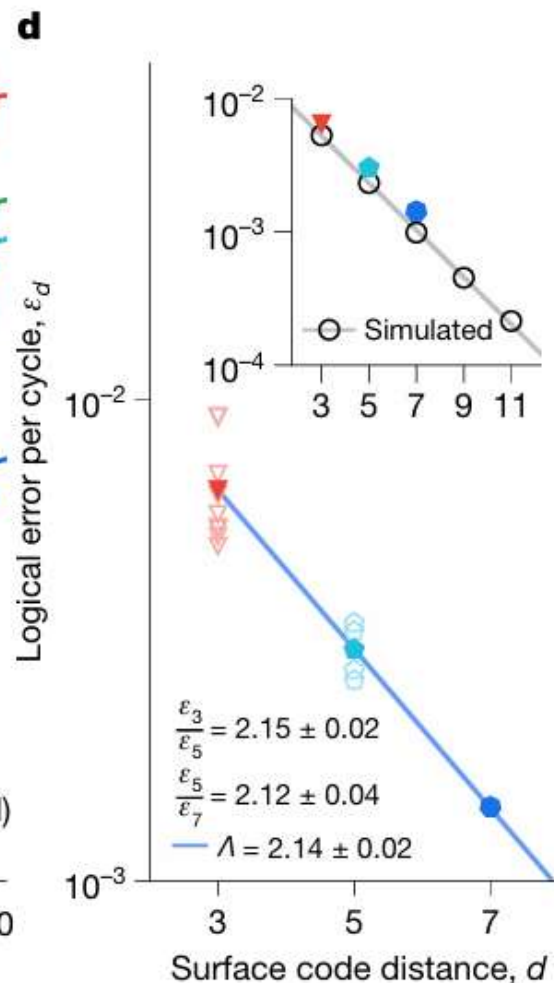
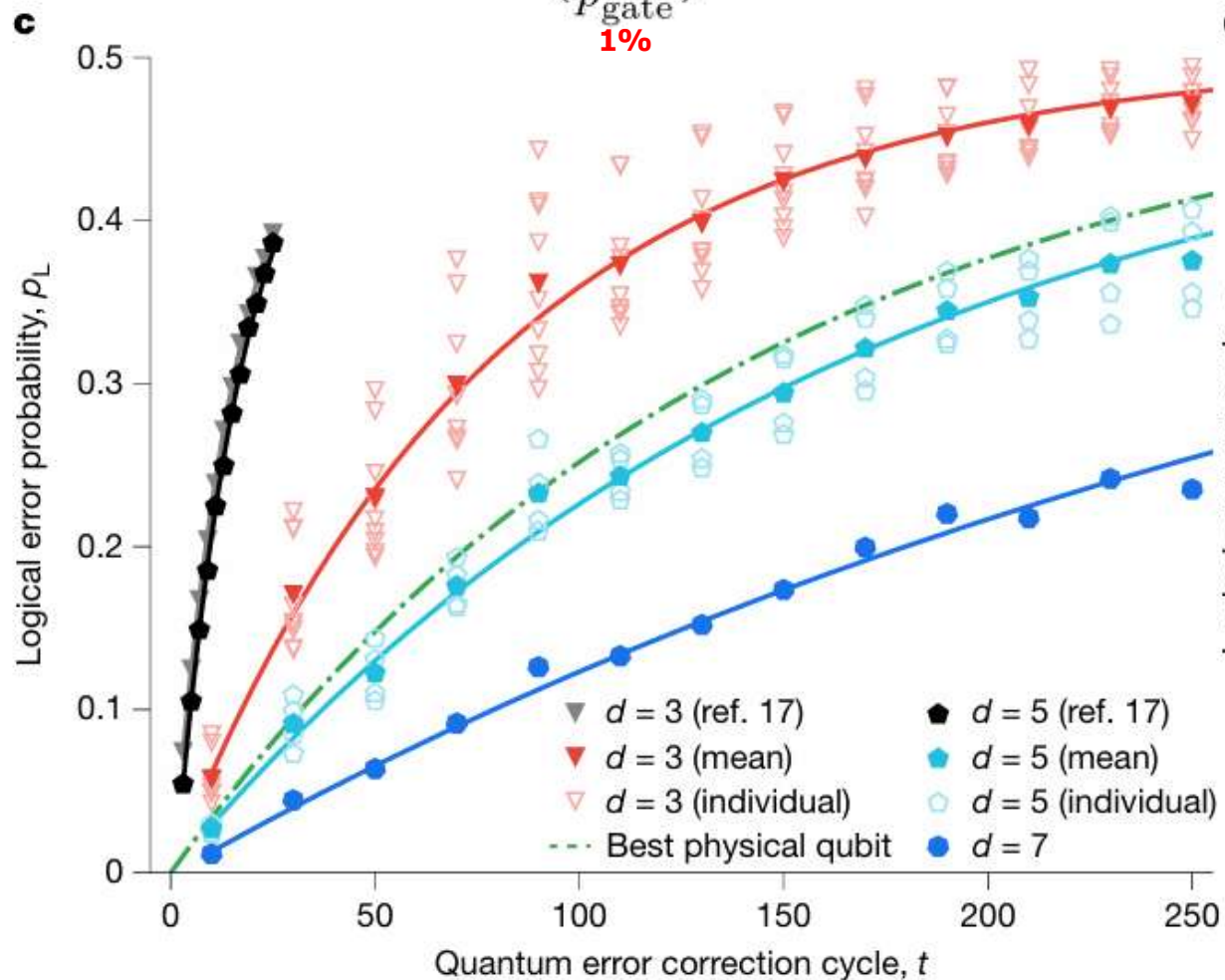
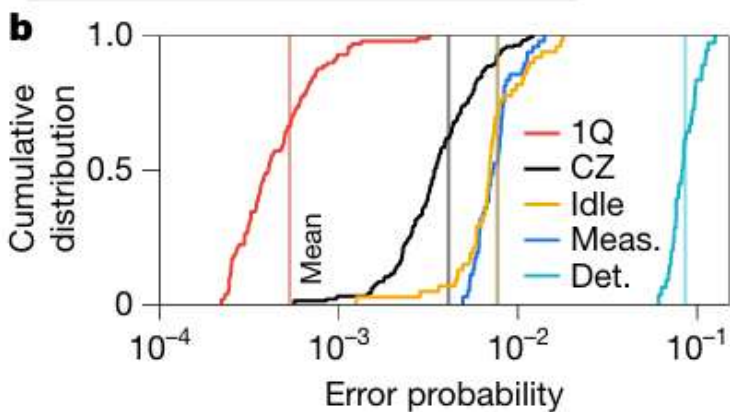
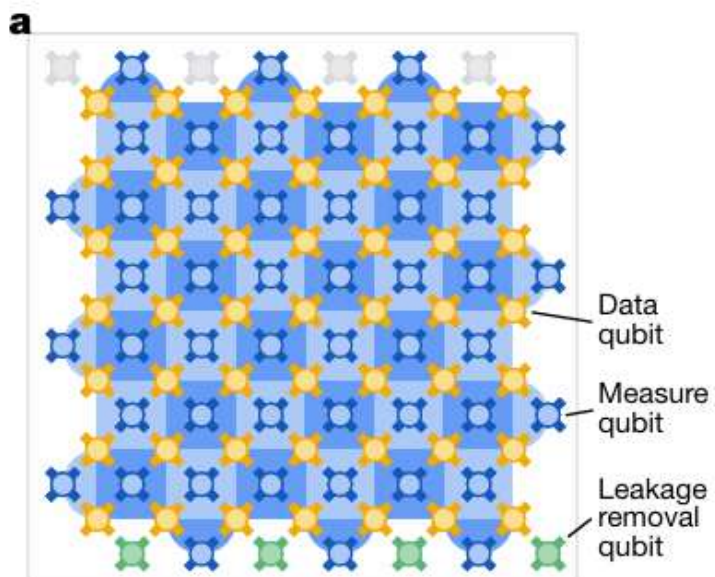
量子コンピューターがビットコインを滅ぼす？



エラー率 $\sim 10^{-12}$

$$P_{\text{fail}}(p_{\text{gate}}) \sim 0.02 \left(\frac{p_{\text{gate}}}{p_{\text{gate}}^{\text{th}}} \right)^{\frac{19}{d+1}}$$

0.1%
1%



エラー訂正ができる「FTQC」の時代が近づく

エラー訂正のできる
量子コンピューター
大規模・汎用的な
計算が可能

FTQC

Early-FTQC

早期のエラー訂正ができる
量子コンピューター
特定の分野で現行のコン
ピューターを超える性能

NISQ

小～中規模の量子コンピューター
エラーがあるため、大規模な計算はできない

2020年

30

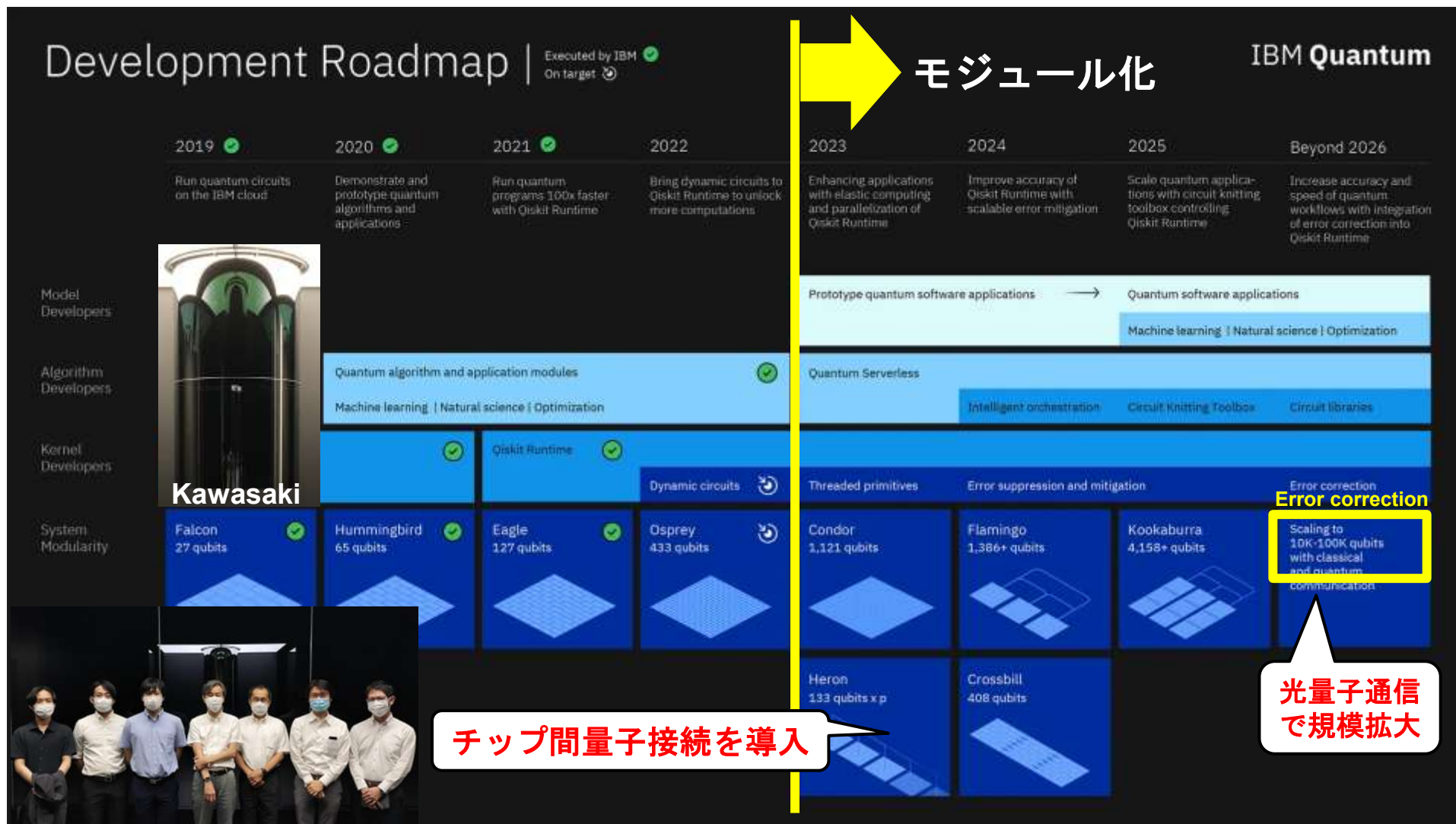
40

50





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)



冷凍機間を冷凍管で接続すると体育館にも収まらない？

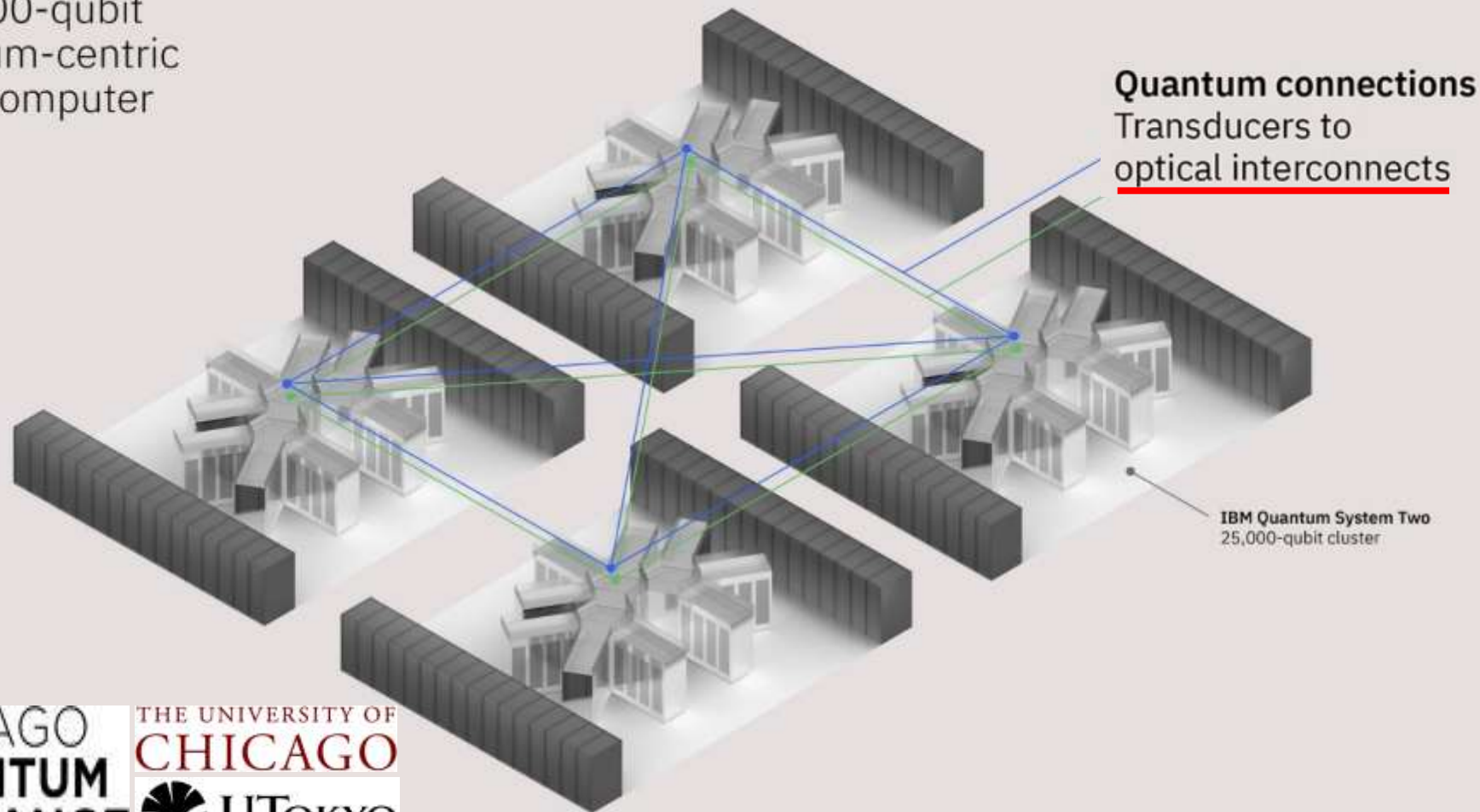




超伝導量子コンピュータ (ゲート型) 開発ロードマップ (光量子接続で100K量子ビット実現)

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

100,000-qubit
quantum-centric
supercomputer
—
2033



CHICAGO
QUANTUM
EXCHANGE

THE UNIVERSITY OF
CHICAGO
UTOKYO

IBM Quantum

1969年 電気による最初のインターネット

ARPANET

(UCLAー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

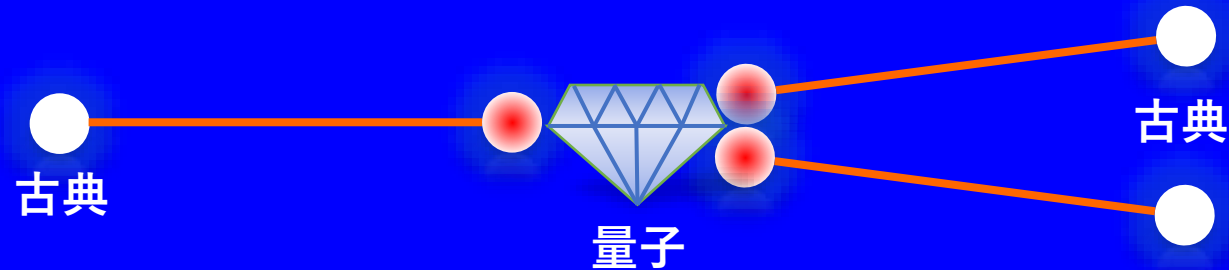


量子通信の開発ステップ

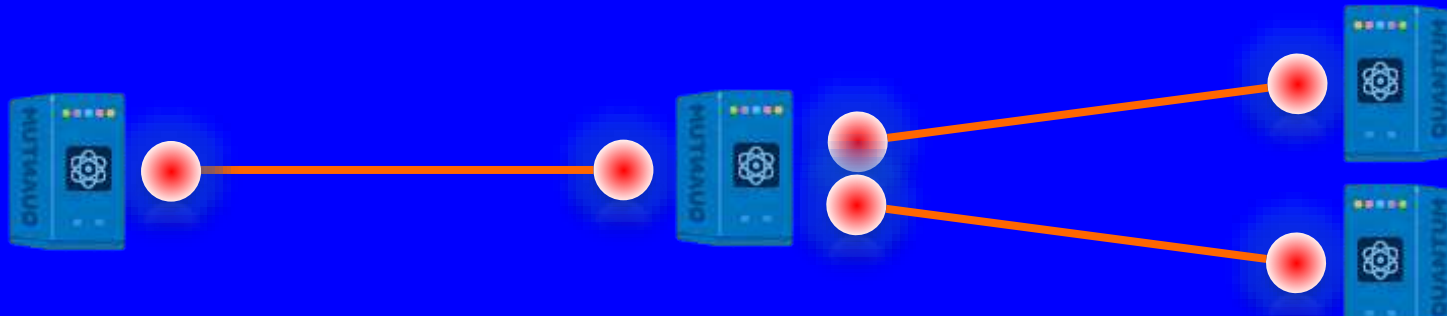
1. トラステッドノードQKDネットワーク → 絶対安全ではない



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

量子中継の世代進化

実用性がない
既に飽和状態

実用性がある
現在開発中

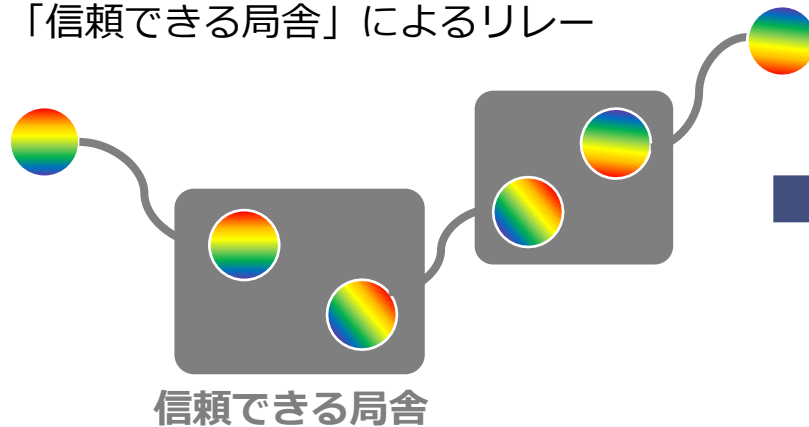
量子インター
ネット

エラーの種類	手法	第1世代	第2世代	第3世代
損失エラー	ヘラルドによる量子もつれ生成	✓	✓	
	論理量子ビットによる量子誤り訂正			✓
操作エラー	量子もつれ蒸留（純粋化）	✓		
	論理量子ビットによる量子誤り訂正		✓	✓

量子通信・量子インターネット

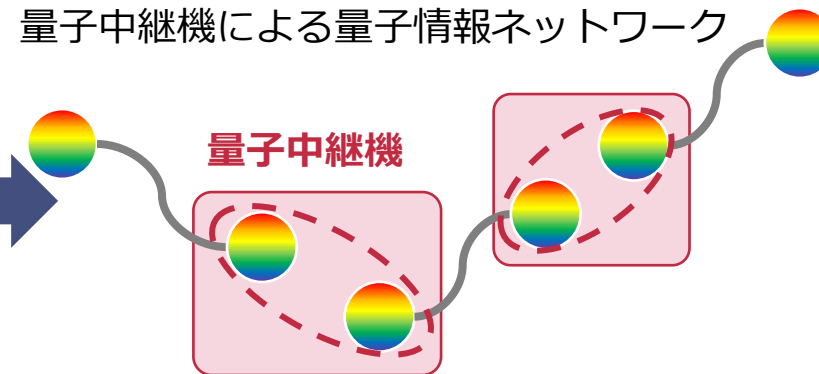
量子暗号鍵配送 (QKD)

「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



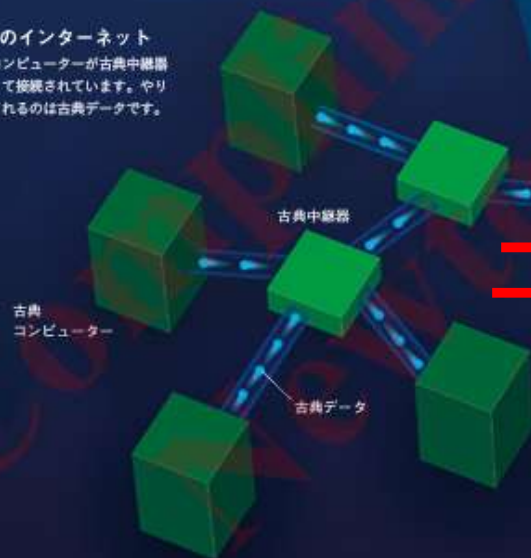
		データ	
		古典	量子
通信	古典	インターネット	-
	量子	量子暗号鍵配送	量子インターネット

世界中が量子もつれでつながる 未来のインターネット

量子インターネットへの道

現状のインターネット（左側）から、段階的に中継器やコンピューターが「量子型」に置きかわり、最終的に量子インターネット（右側）ができるまでをえがきました。

現在のインターネット
古典コンピューターが古典中継器によって接続されています。やりとりされるのは古典データです。



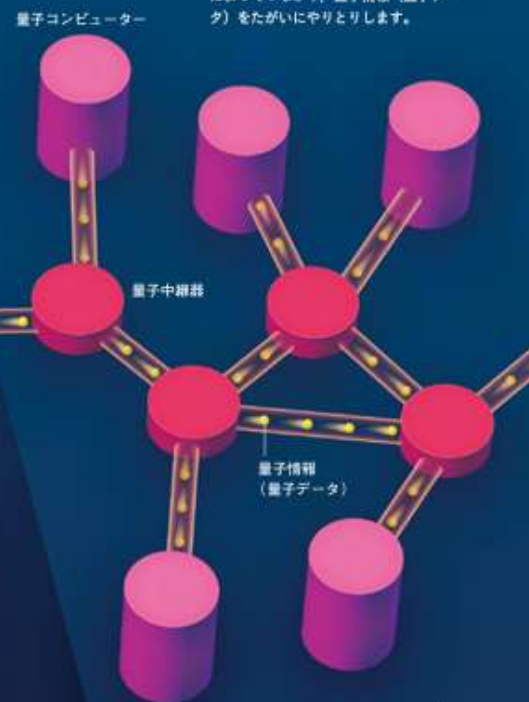
量子中継ネットワーク

古典コンピューターが安全な量子中継器によって接続されています。ただし、やりとりされるのは古典データです。



量子インターネット

量子コンピューターが安全な量子中継器によってつながり、量子情報（量子データ）をたがいにやりとりします。



二次配布厳禁

世界各国の取り組み

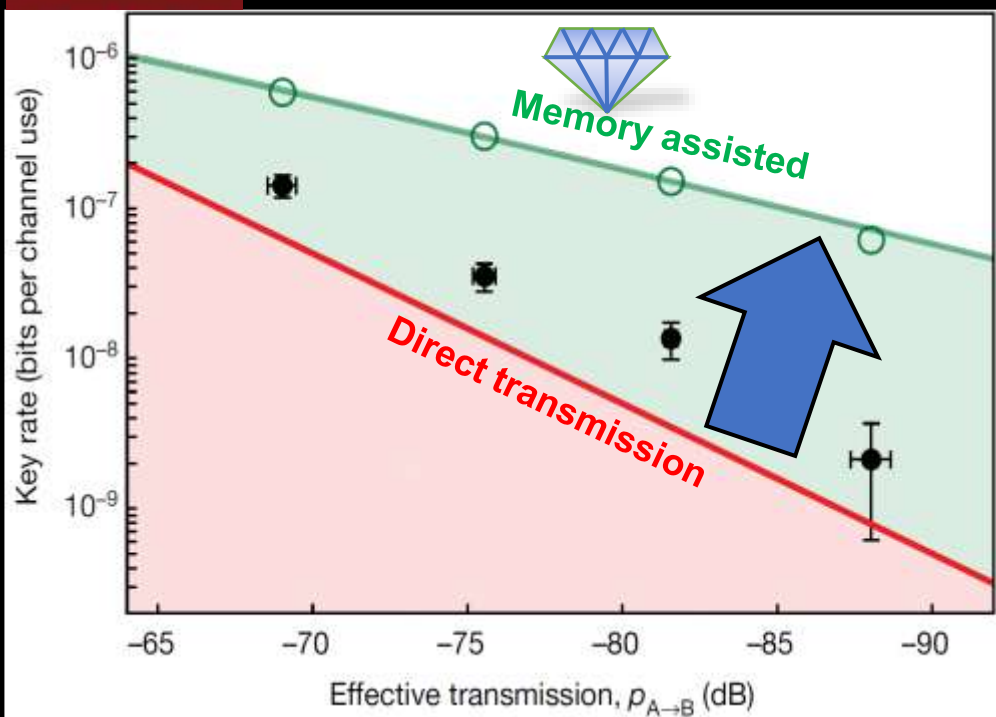


Mikhael Lukin
Marko Loncar
(Harvard)

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

nature

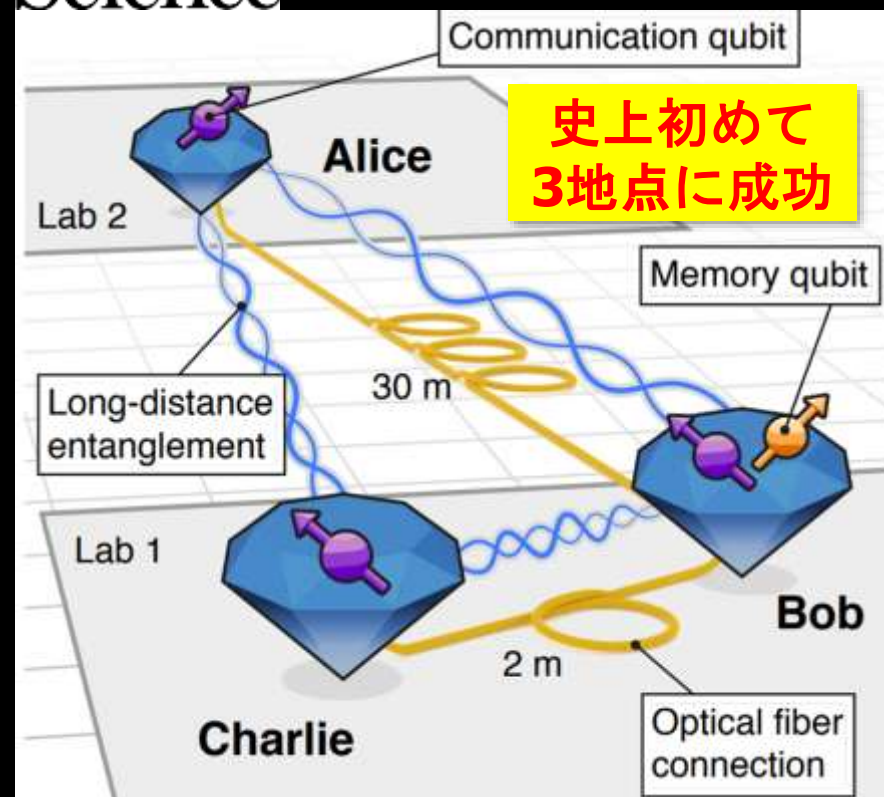


2021年 量子中継 の基本構成を実証

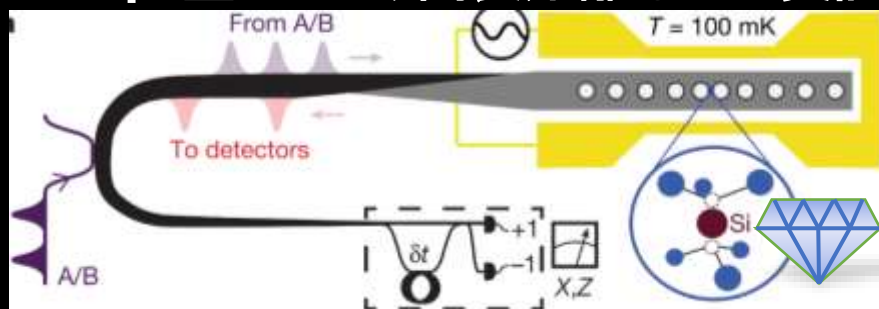


Ronald Hanson
(QuTech / TU Delft)

Science



2023年 量子メモリ間長距離もつれ実証



arXiv:2310.01316

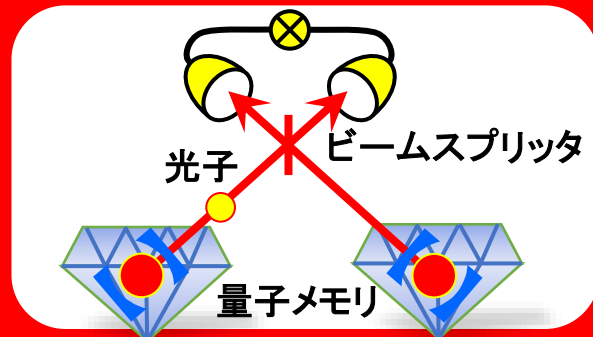
M. Pompili et.al. , Science 372, 259–264 (2021)

量子中継の方式

量子メモリ方式



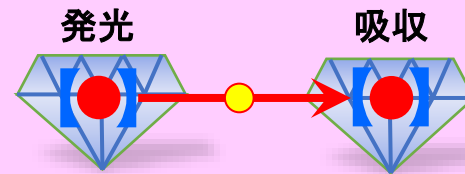
光子干渉方式



位相同期が必要も高効率



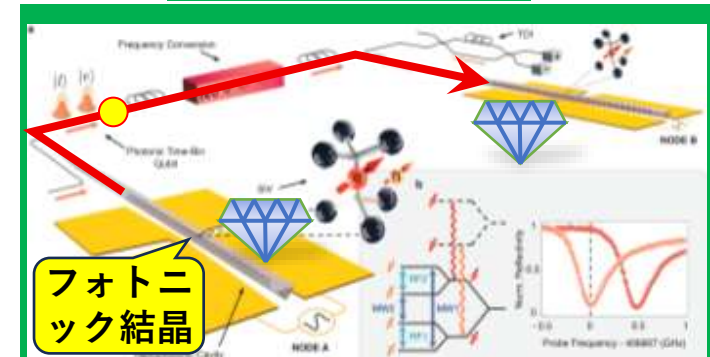
発光吸収方式



位相同期不要で高耐性



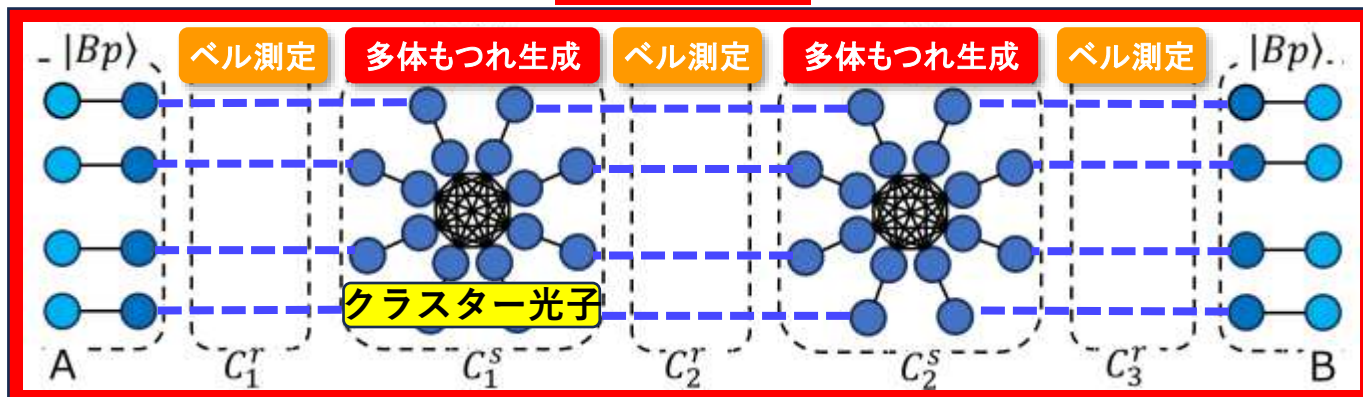
光子散乱方式



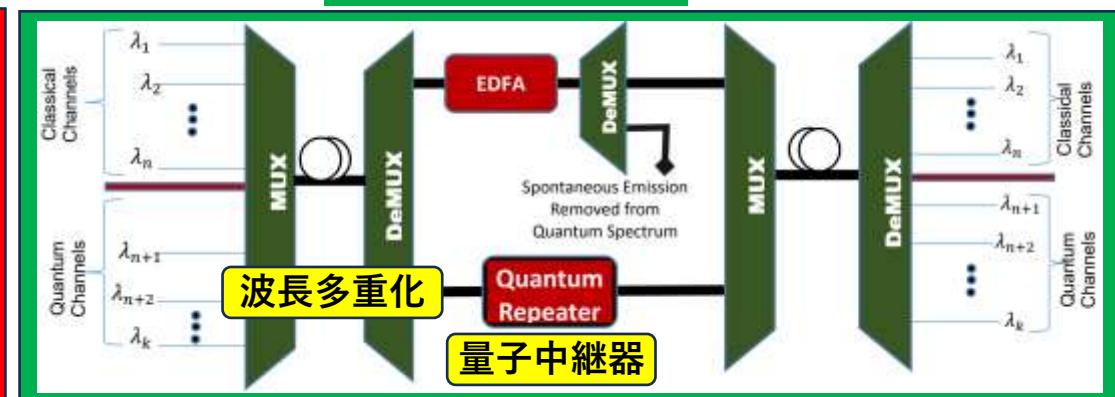
低効率も位相同期が不要

多重化方式

全光方式

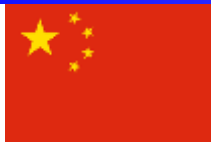


波長多重方式



遠隔量子メモリ間もつれ生成の世界レコード

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)

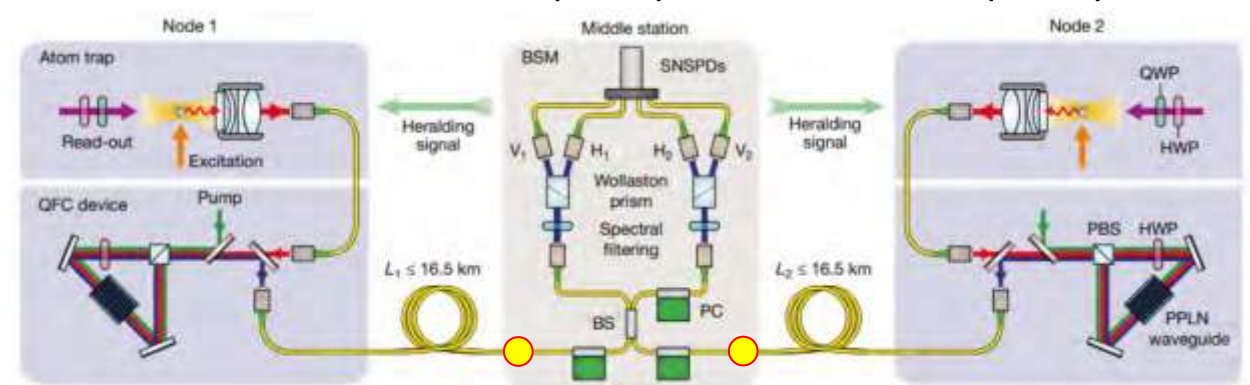


2021



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)

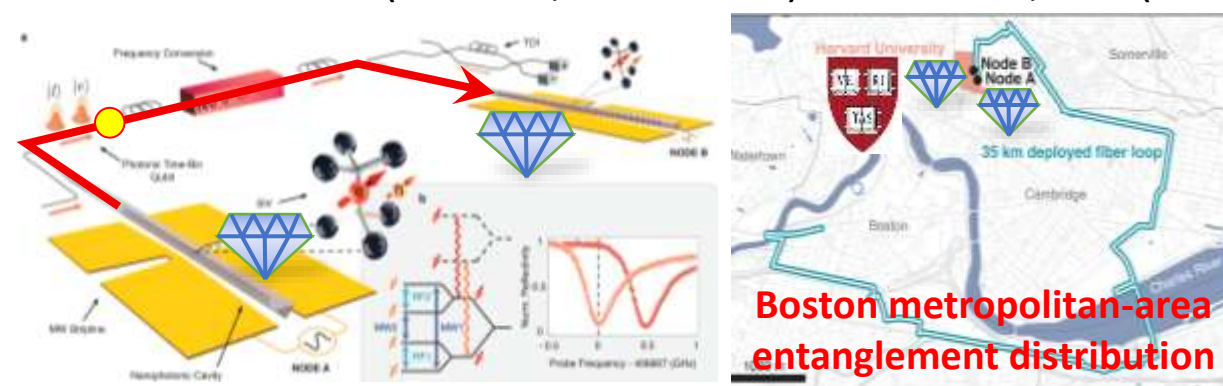


2023



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)

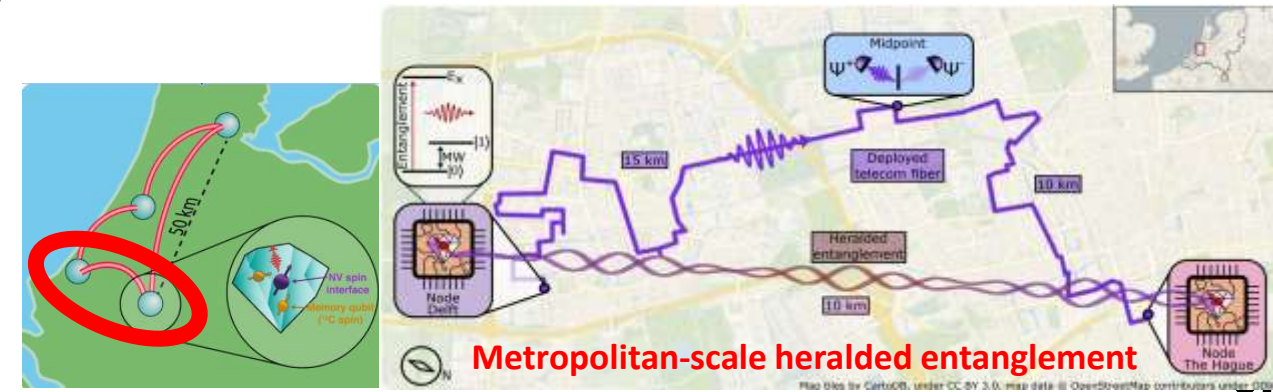


2024



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



Adobe Stock | #190912362

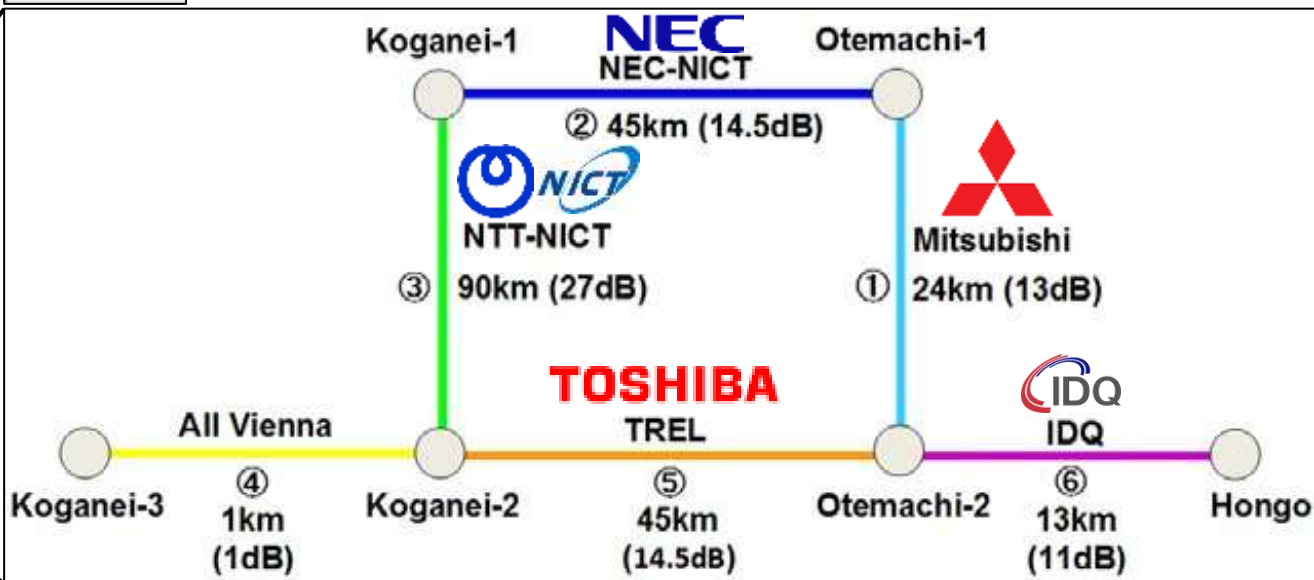




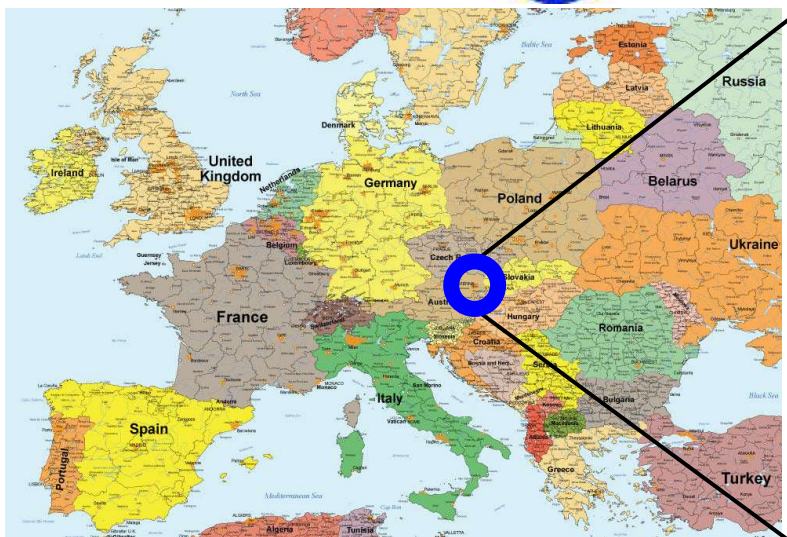
South Korea (2011~) (QKD Network)



Japan (Tokyo QKD Network) 2000~2010



EU (SECQC QKD Network: Vienna) 2004~2008



Quantum backbone (2018)

中国



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



将来構想
(中国全土)



QKD network 量子中継network

EU



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.



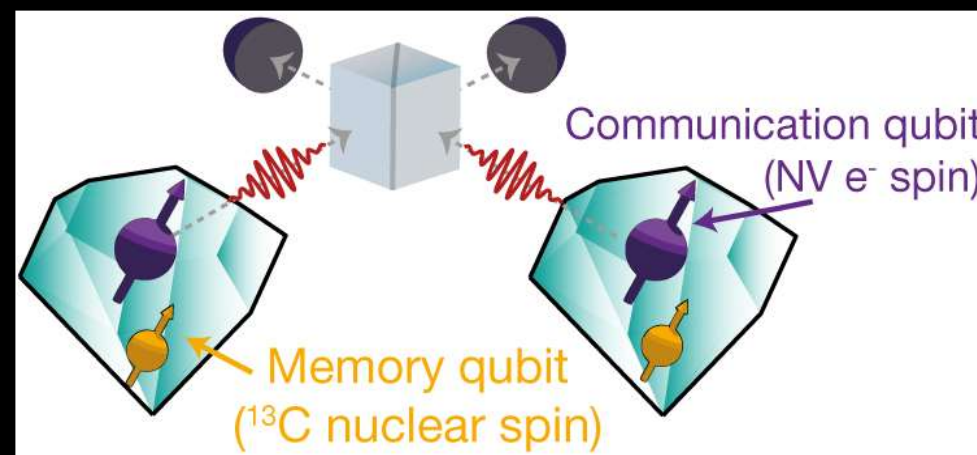
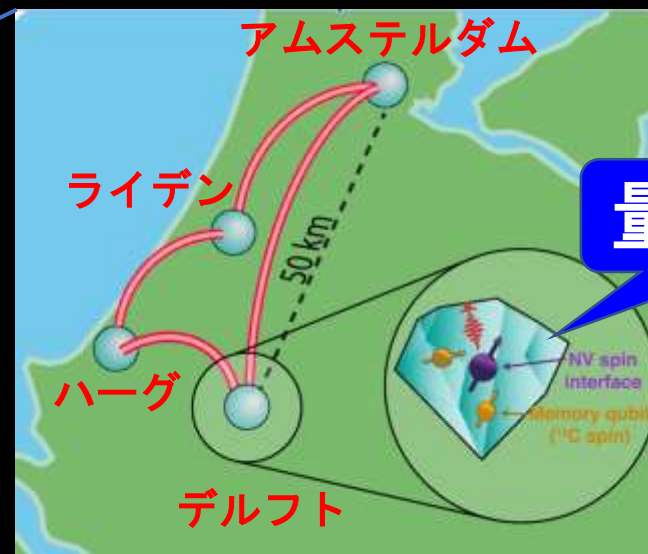


オランダQuTechの量子中継ネットワーク

<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

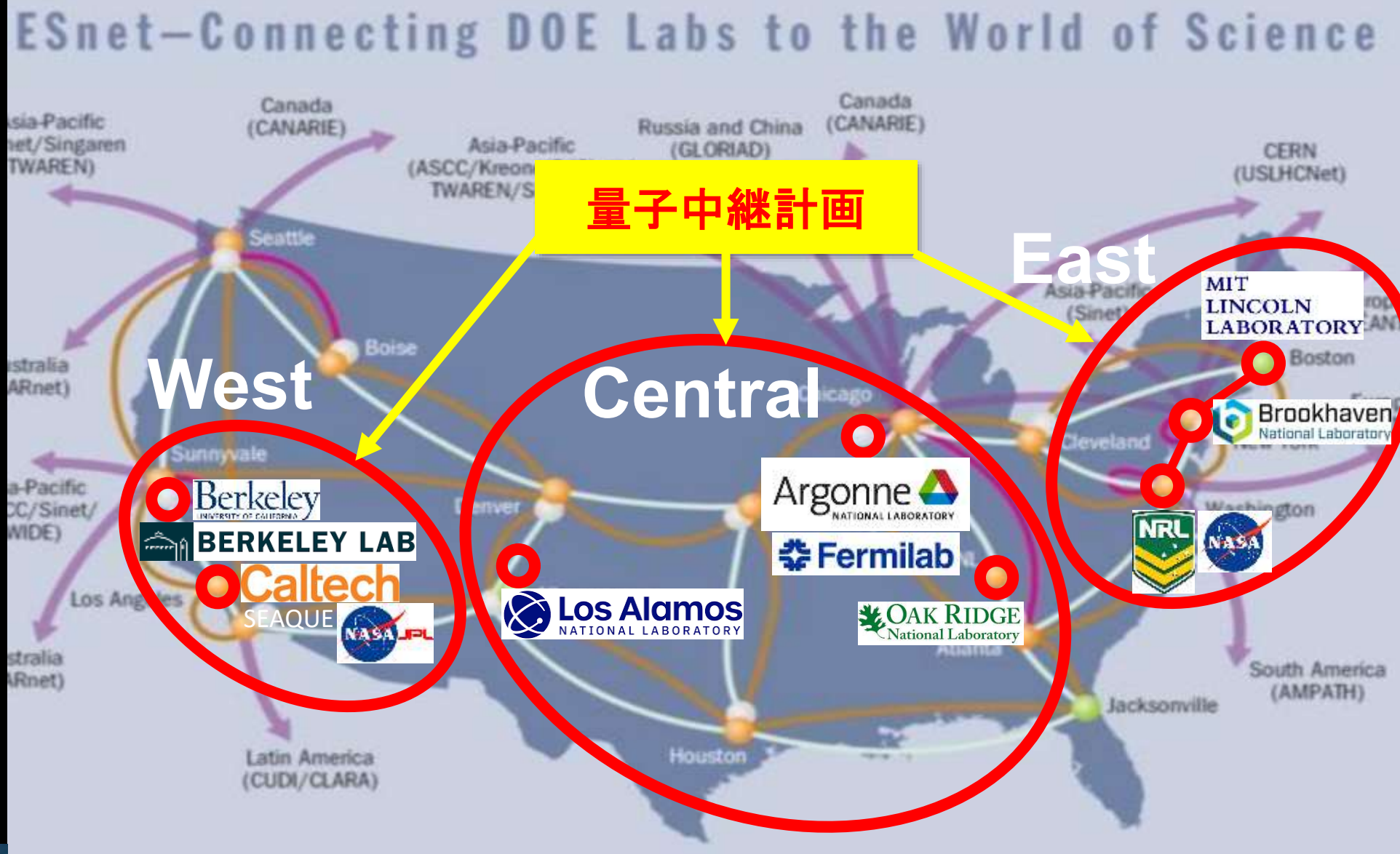
- Technische Universität München
- Technische Universität Dortmund
- HighFinesse Laser and Electronic Systems GmbH, Tübingen
- Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Berlin
- Technische Universität Berlin
- Universität Stuttgart
- Universität Paderborn
- Universität des Saarlandes, Saarbrücken
- Freie Universität 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)



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-LAN) (QuAInT) 2021~



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

East



Boston-Area Quantum Network (BARQNET)



DC Quantum Network (DC-Qnet)



量子コンピュータ
ネットワーク
(10年計画)

Long Island Quantum Repeater Network (LIQuIDNET)



New York

ロングアイランド量子中継ネットワーク
量子メモリ (Rb原子) を3拠点に配置

aws

Caltech

AWS-CQC

(Center for Q. Computing)

超伝導量子コンピュータ開発



HARVARD
UNIVERSITY

AWS-CQN

(Center for Q. Networking)

量子ネットワーク開発



Singapore (AWS-CQT)



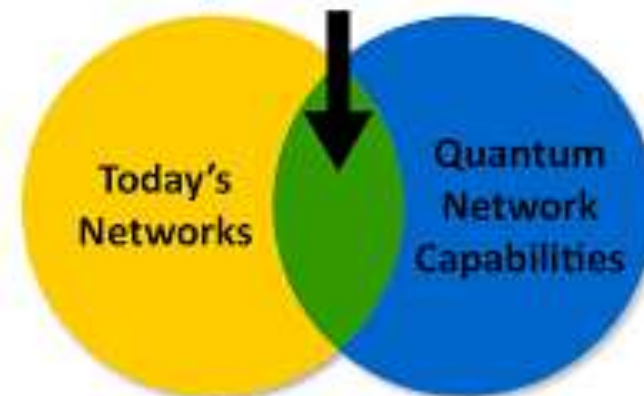
CQT Centre for Quantum Technologies



QuANET (2023-)

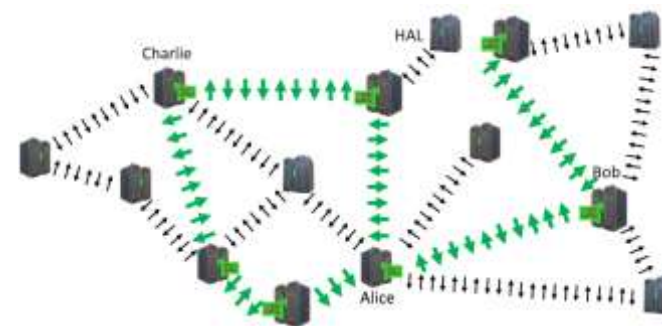
Quantum Augmented Network

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



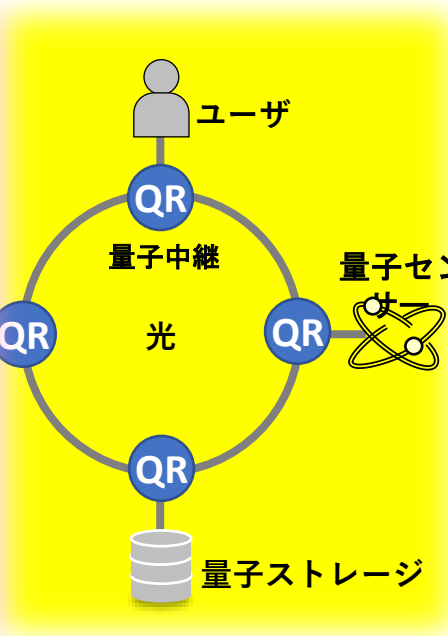
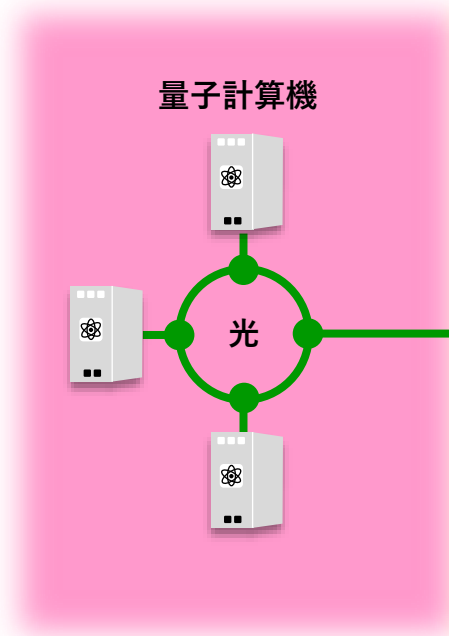
量子インターネットに向けた量子計算と量子通信の融合

QC & QC

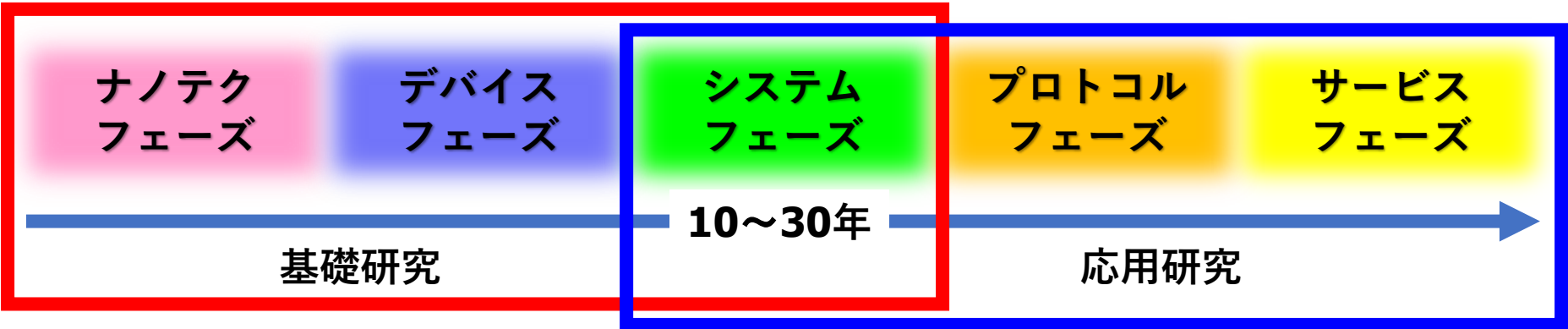
量子コンピュータ + 量子通信
ネットワーク ネットワーク



短距離



長距離



国内での取り組み 1 (ムーンショット研究) 量子コンピュータ



JPMJMS2062

ムーンショット目標6の概要

スーパーコンピュータでは、複雑に絡み合う量子状態の計算は困難 検討中

大規模な量子状態の厳密計算を可能とする 「誤り耐性型汎用量子コンピュータ」を実現する

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

中規模な誤り耐性量子コンピュータの実現（スパコンを超える有用計算が可能）
~~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

小規模または部分的な誤り耐性をもつ量子コンピュータの実現（POC）
~~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~~

＜通信ネットワーク＞

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や量子中継器・量子通信システム・テストベッド構築など

- ・ 光源や検出器
- ・ 量子メモリ
- ・ 量子インターフェイス技術
- ・ 量子バス
- ・ 量子通信システム
- ・ テストベッド構築

＜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など

ステージゲート

実現可能性・将来性のある物理系を見極める

超伝導

イオン
トラップ

光量子

半導体

中性原子

など

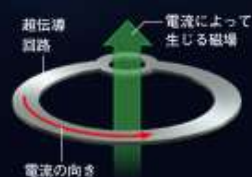
＜誤り耐性＞

- 理論・ソフトウェア
- 誤り訂正システム

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、誤り訂正システムの開発など

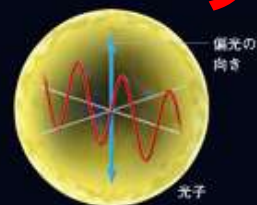
- ・ 量子誤り訂正理論
- ・ ミドルウェア、コンパイラ
- ・ アルゴリズム、アプリケーション
- ・ 誤り訂正システム

目標に向かってオールジャパン体制で研究開発

量子コンピューターは、さまざまな方式が
覇権をねらう“戦国時代”

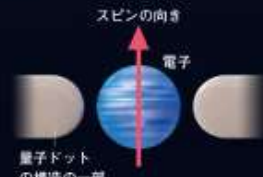
超伝導回路

超伝導回路を流れる電流の向きなどを0と1に対応させます。制御しやすい（操作性が高い）ですが、極低温に冷やす必要があります。開発が進んでいます。



光子（光量子）

偏光の向きなどを0と1に対応させます。振動を冷却する必要がなく、通信に向いています。ただし、操作性が低く、量子状態の保存がむずかしい（メモリ性が低い）のが欠点です。



半導体（量子ドット）

「量子ドット」という微細構造の中に閉じこめられた電子のスピンを0と1に対応させます。制御しやすい（操作性が高い）ですが、極低温に冷やす必要があります。開発が進んでいます。



イオントラップ

原子核の周囲をまわる電子のエネルギーの高さ（エネルギー単位）を0と1に対応させます。操作性は比較的高いですが、操作が遅いという欠点があります。

量子ビットの主な方式

現在開発が進んでいる量子ビットの主な方式を示しました。ここで示した五つのほかに、ダイヤモンドを利用した方式なども開発されています。各方式にメリットとデメリットがあり、実用化に向けたはげしい開発競争が進んでいます。

大量の量子ビットをそなえた大規模な量子コンピューター

二次配布厳禁

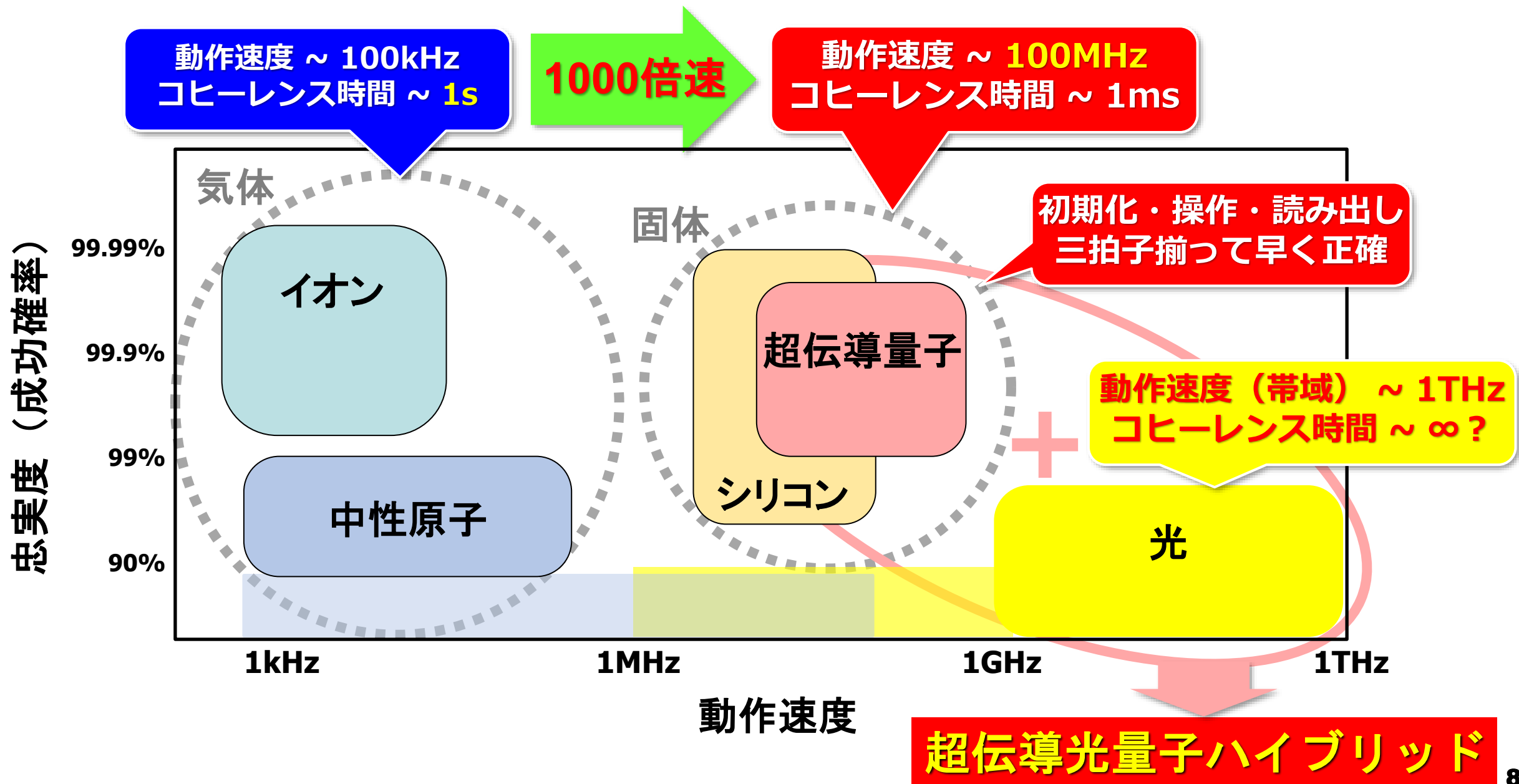
小規模な量子コンピューター

量子情報を伝えることができるネットワーク

「大規模化」から「分散化」へ

図のように制御しやすい規模の小型の量子コンピューターを複数つなげることで、実質的に大規模な量子コンピューターを実現しようという流れが出てきています。

量子ハードウェアの比較



ムーンショット小坂プロジェクトの概要



MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM
JPMJMS2062

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).

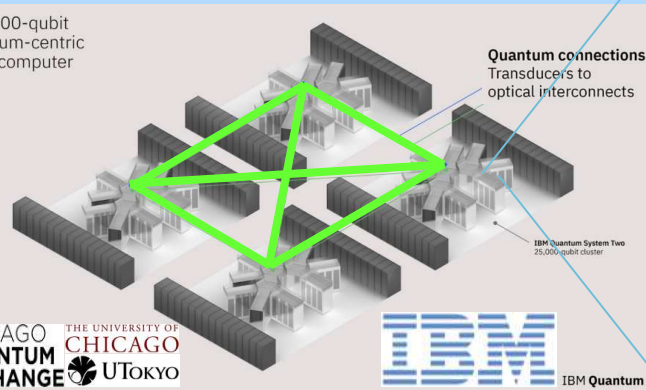
室温中の光ファイバーに置き換え

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

100,000-qubit
quantum-centric
supercomputer

2033



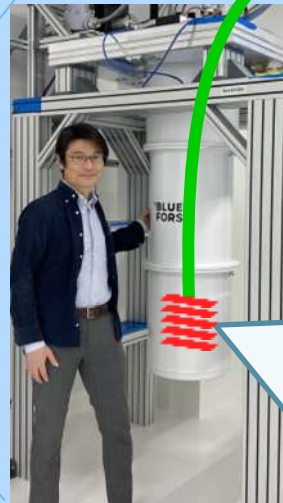
CHICAGO
QUANTUM
EXCHANGE

THE UNIVERSITY OF
CHICAGO

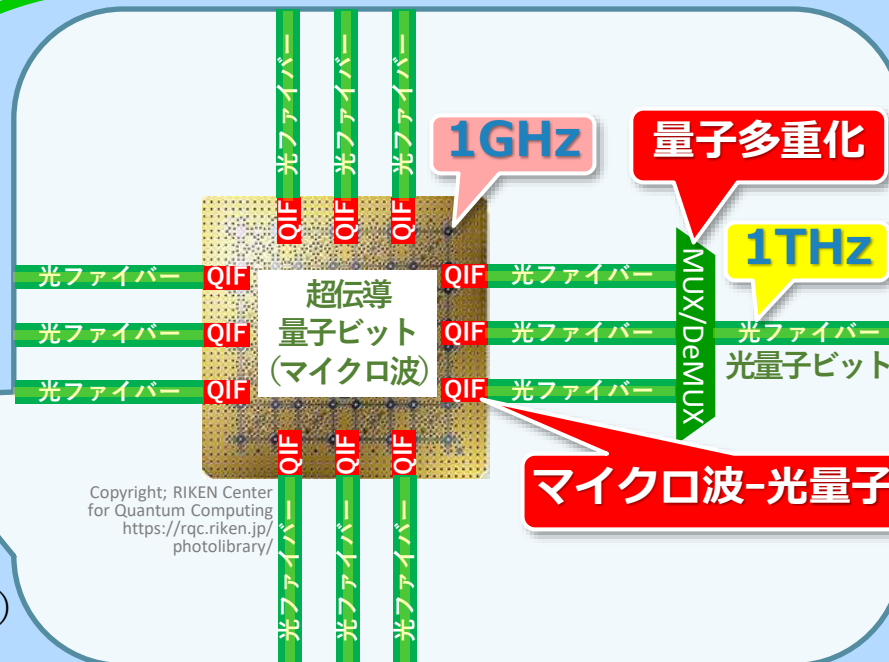
IBM

IBM Quantum

IBM社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



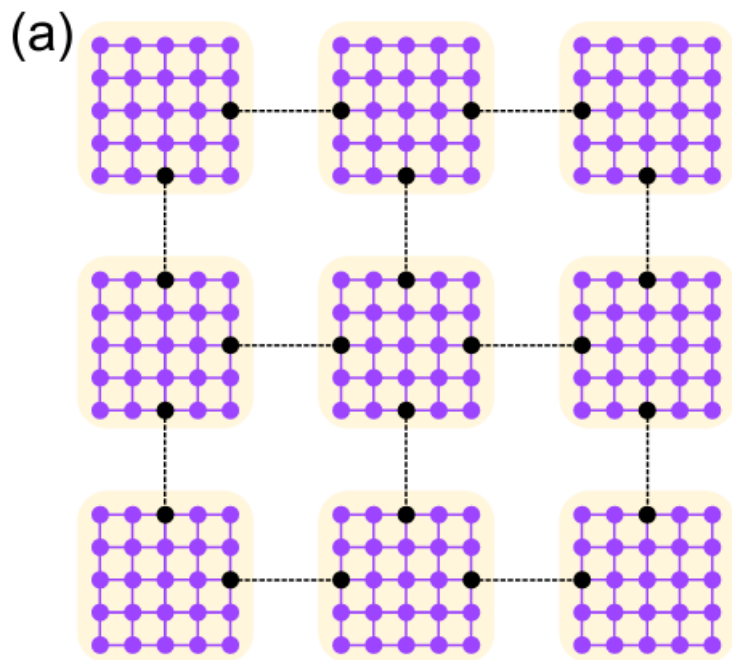
希釈冷凍機 (～10mK)



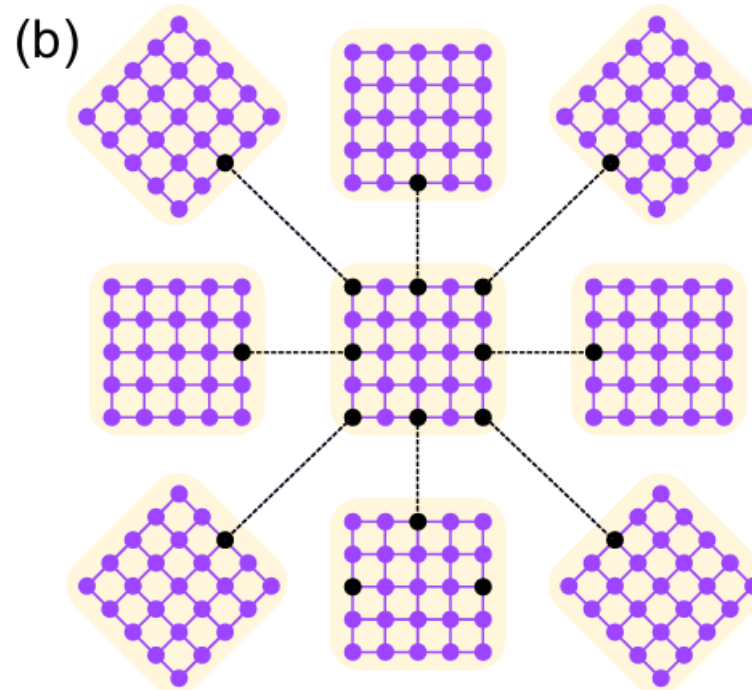
希釈冷凍機 (～10mK)

マルチノード量子コンピュータのレイアウト

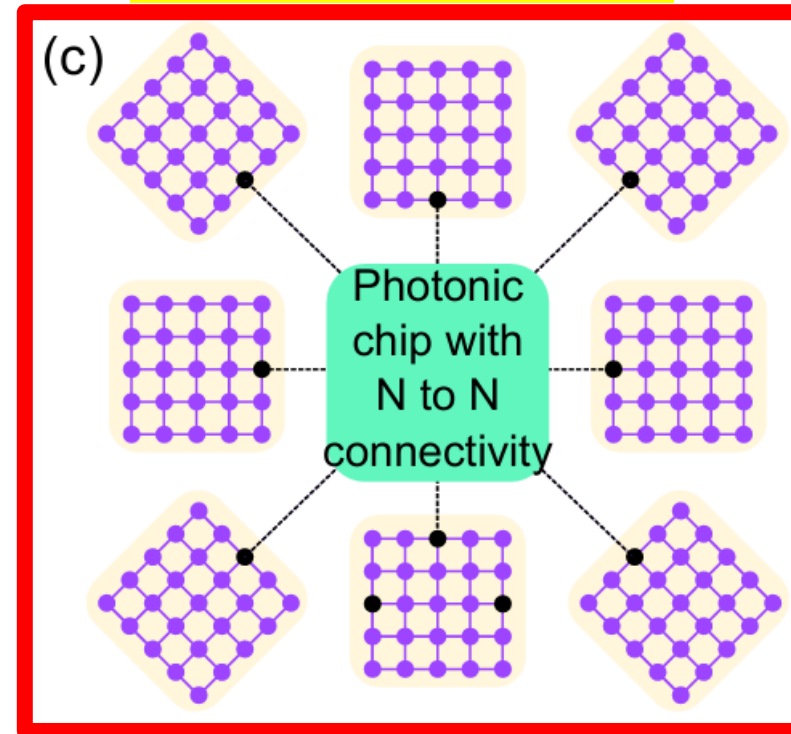
アレイ状



スター状 (分散処理型)

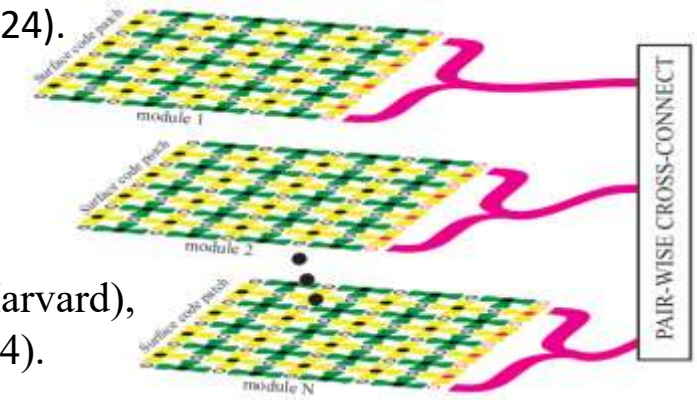


スター状 (全結合型)

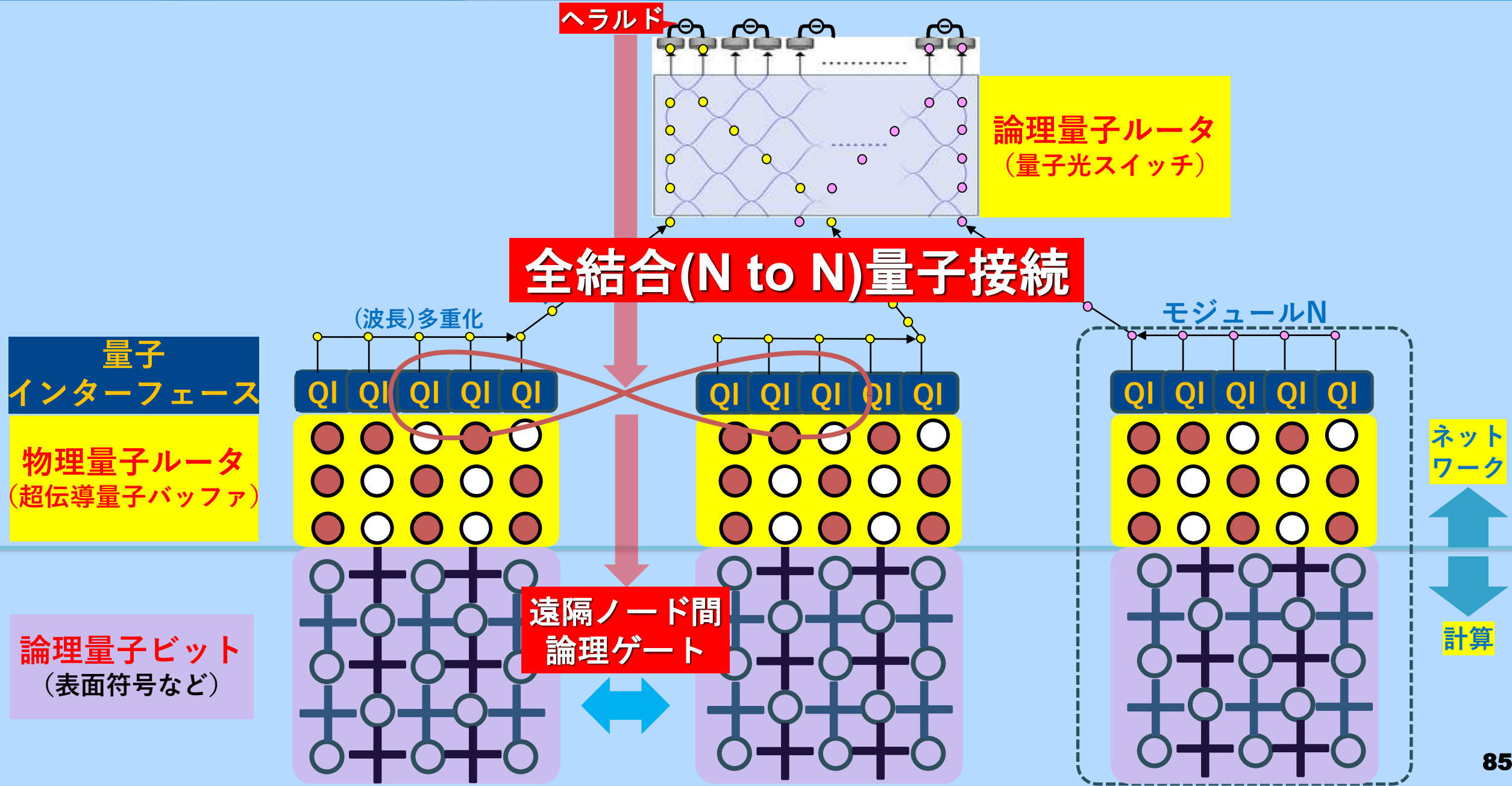


J. Ang et. al.(PNNL-BNL-VT-NASA-KBR-MIT-Yale-Caltech-Princeton-Washington-Pittsburgh-Tronto-Iowa State), “ARQUIN: Architectures for Multinode Superconducting Quantum Computers”, ACM Transactions on Quantum Computing, 5, 1 (2024).

J. Ramette et. al. (MIT-Harvard),
npj QI, 10, 58 (2024).



光量子接続マルチノード誤り耐性型量子コンピュータ



量子インターフェースの進化

マイクロ波光子($\sim 10\text{GHz}$)から可視光子($\sim 500\text{THz}$)への量子周波数変換器

従来の変調器

W級のポンプ光が必要
量子変換できない

EO (電気光学) 変調器



AO (音響光学) 変調器



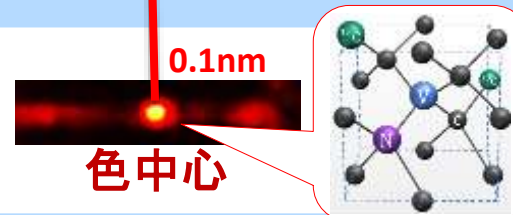
バルクEO共振器



バルクAO共振器



ナノEO・EOM・OM(オプトメカ)共振器



バルク共振器

量子変換が可能も
mW級のポンプ光が必要

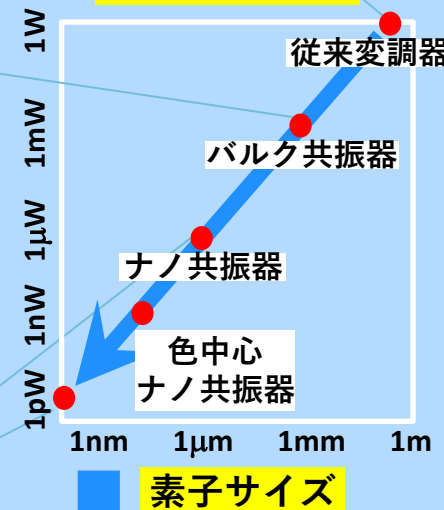
ナノ共振器

μW 級にポンプ光を低減

色中心ナノ共振器

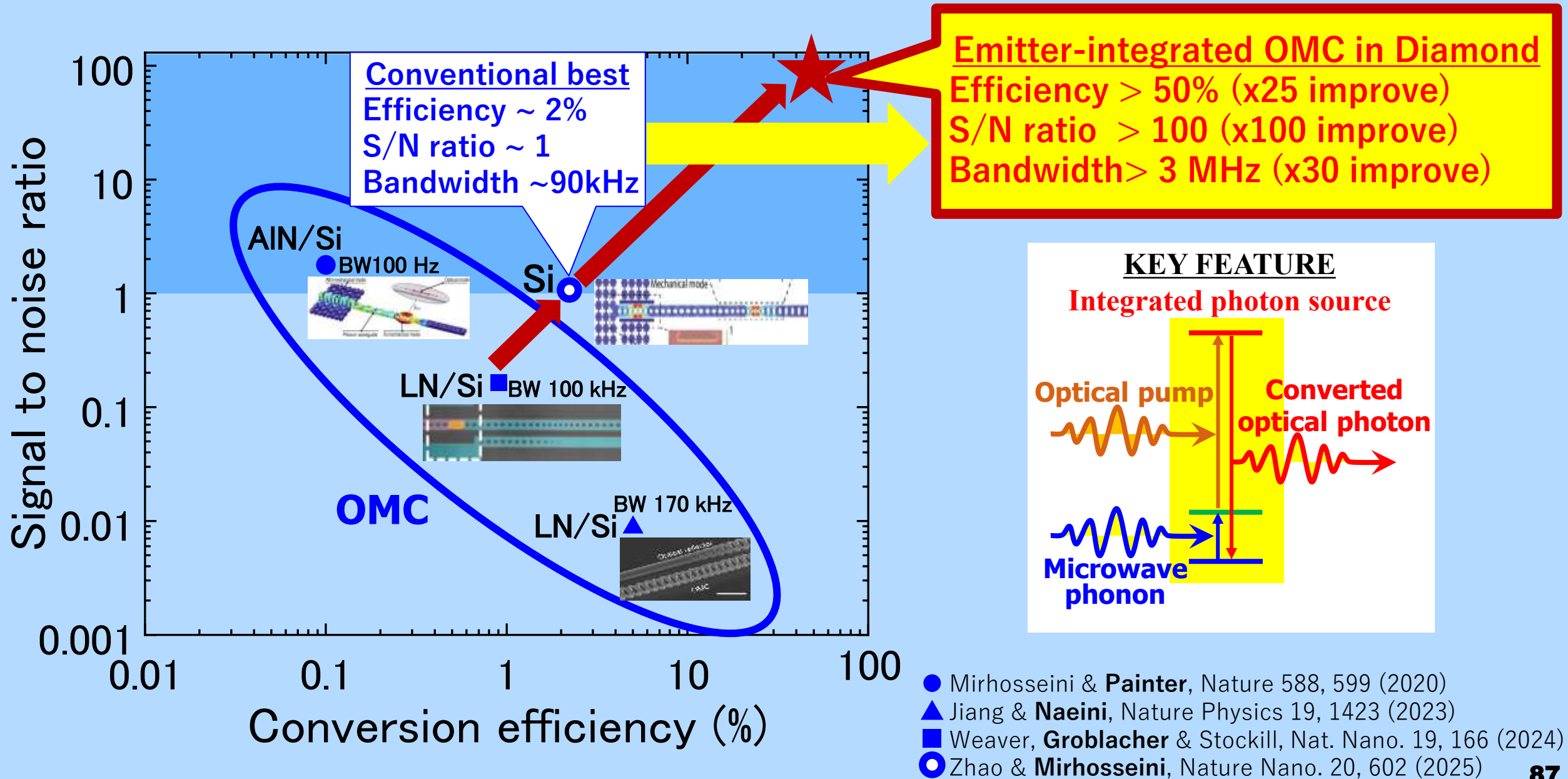
nW~pW級(1ポンプ光~1光子)に低減

ポンプ光強度

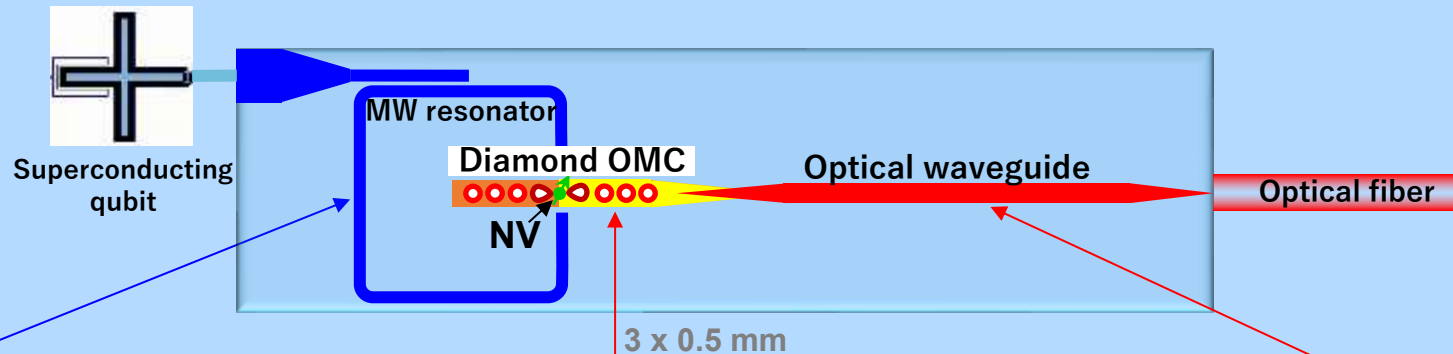


雑音光子数低減

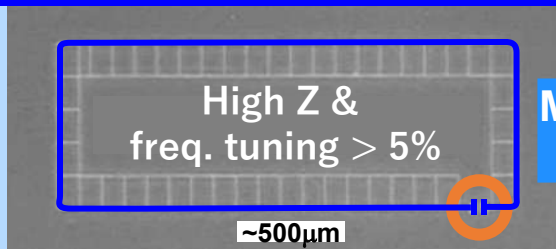
量子トランスデューサの進化



ムーンショット小坂Pjで開発した量子トランスデューサ



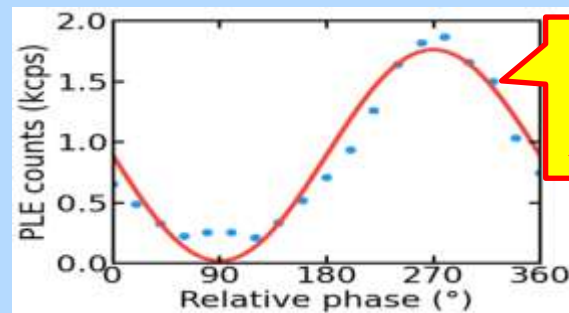
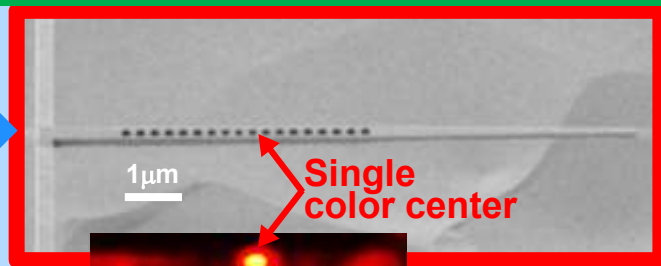
Superconducting Microwave Resonator



NbTiN Nanowire on Si

Microwave photon

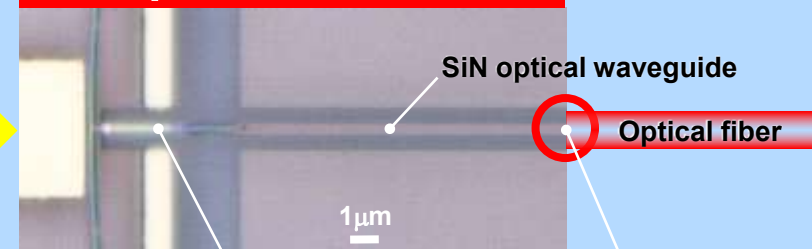
Diamond Opto-Mechanical Crystal



光と機械振動のコヒーレント相互作用を実証

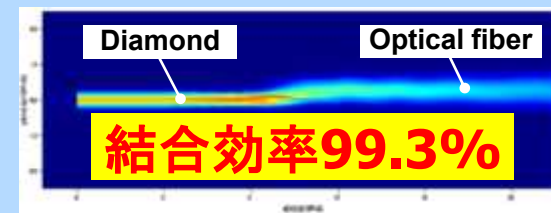
Optical photon

Silicon Nitride Optical Circuit



Diamond color center nano cavity

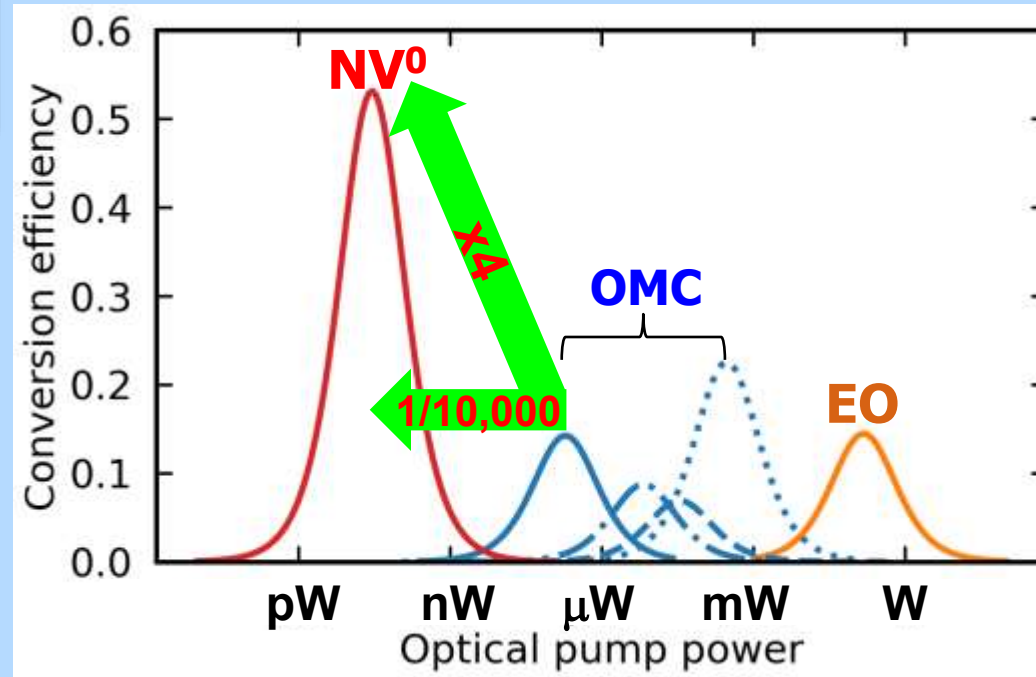
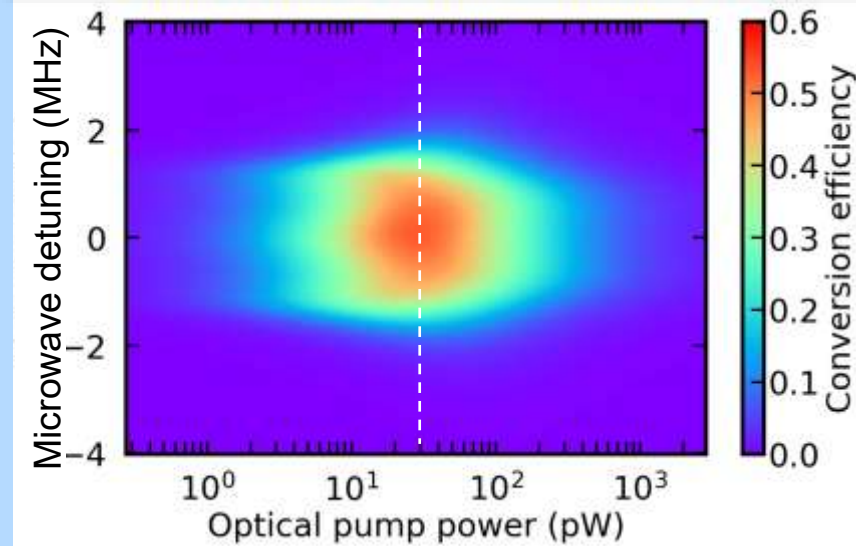
Spot-size conversion



要素素子は量子トランスデューサの実装に十分な性能をもつ

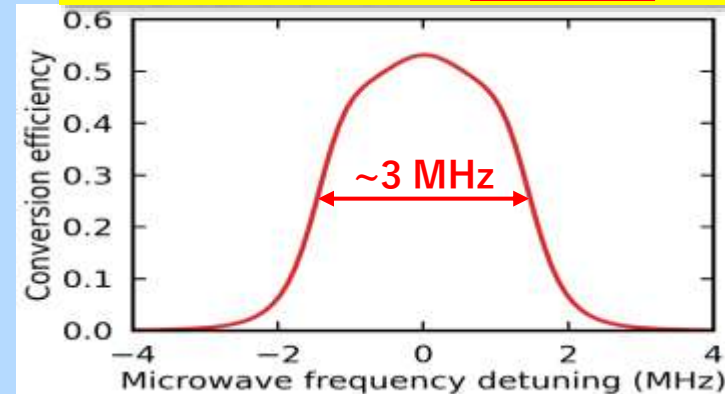
変換効率と帯域の見積もり

変換効率 ~ 50%
ポンプパワー ~ 30 pW



EO: Electro-Optic resonator
OMC: Opto-Mechanical crystal

変換帯域 ~ 3 MHz



従来のベストのOMC に比べて
効率 × 4 帯域 × 30 を
1/10,000 のポンプパワーで実現

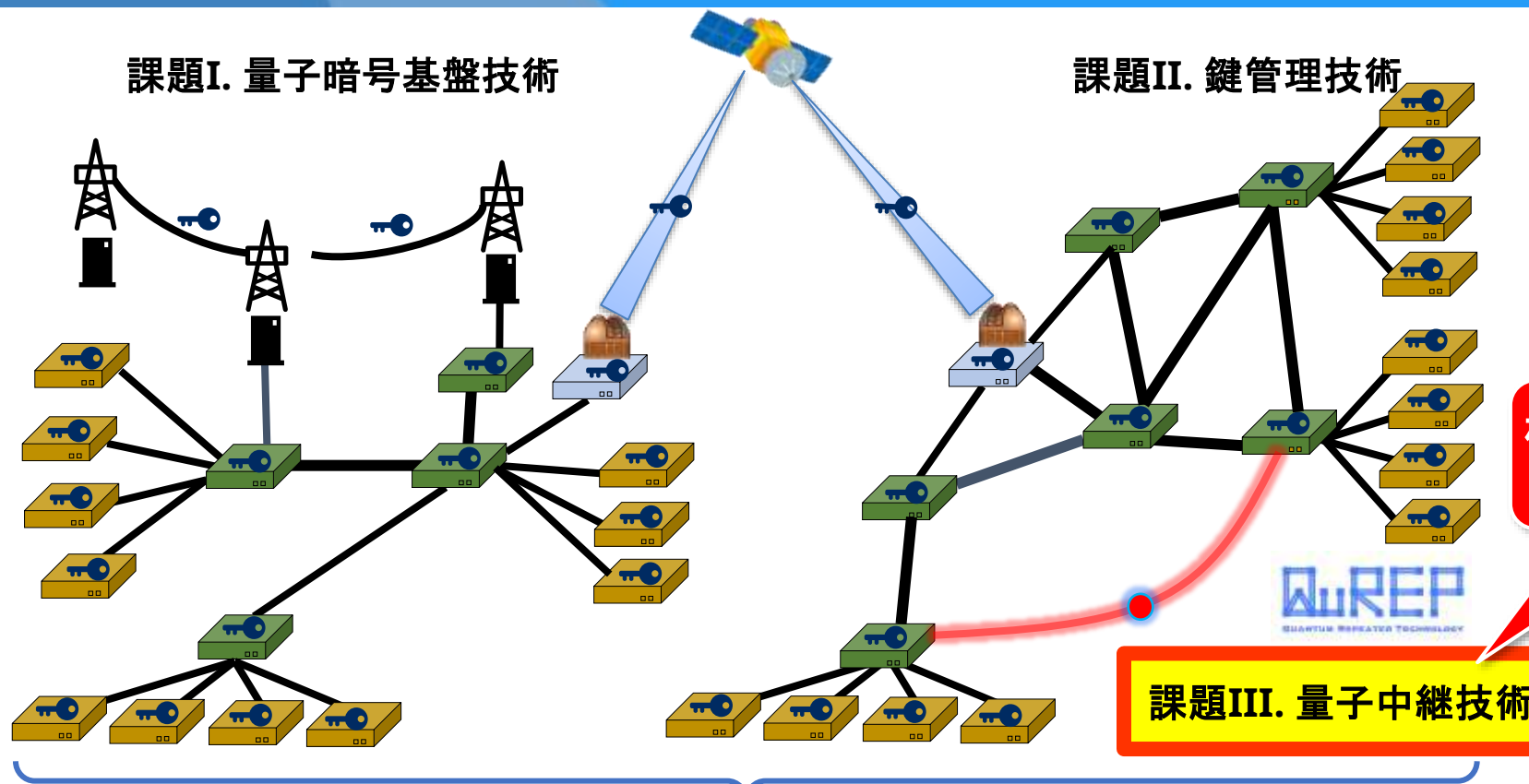
世界トップ性能
(Simulation with realistic parameters)

国内での取り組み 2 (総務省委託研究) 量子通信

JPMI00316

総務省委託研究「グローバル量子暗号通信プロジェクト」

(2024年度終了)



4 民間会社

TOSHIBA
NEC

FURUKAWA
ELECTRIC

HAMAMATSU

3 国研

NICT

AIST
NATIONAL INSTITUTE OF
ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST)

NIMS

4 大学

YNU
YOKOHAMA National University

UTOKYO

HOKKAIDO
UNIVERSITY

GAKUSHUIN
UNIVERSITY

総務省委託研究「グローバル量子暗号通信 - 量子中継」

(2024年度終了)



ナノテクノロジー



取りまとめ
YNU
YOKOHAMA National University



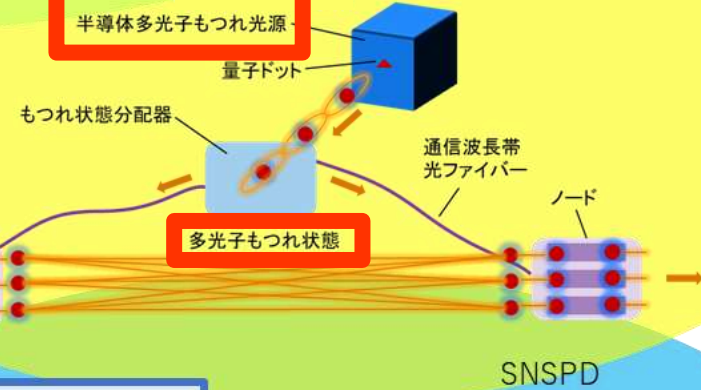
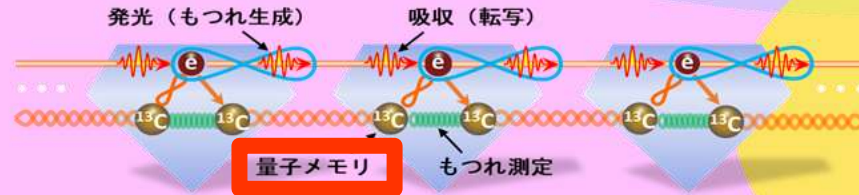
東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



量子メモリ量子中継

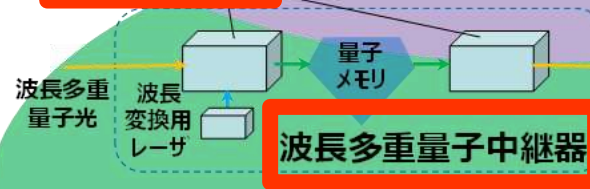
全光量子中継

東芝



量子波長変換
モジュール

※光モジュール化
技術



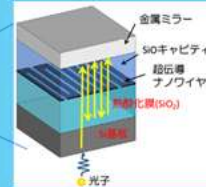
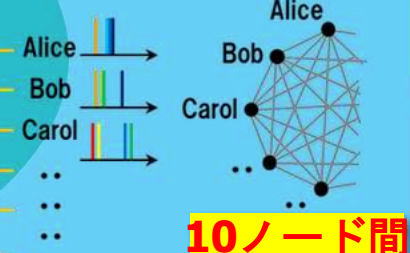
波長多重量子ネットワーク



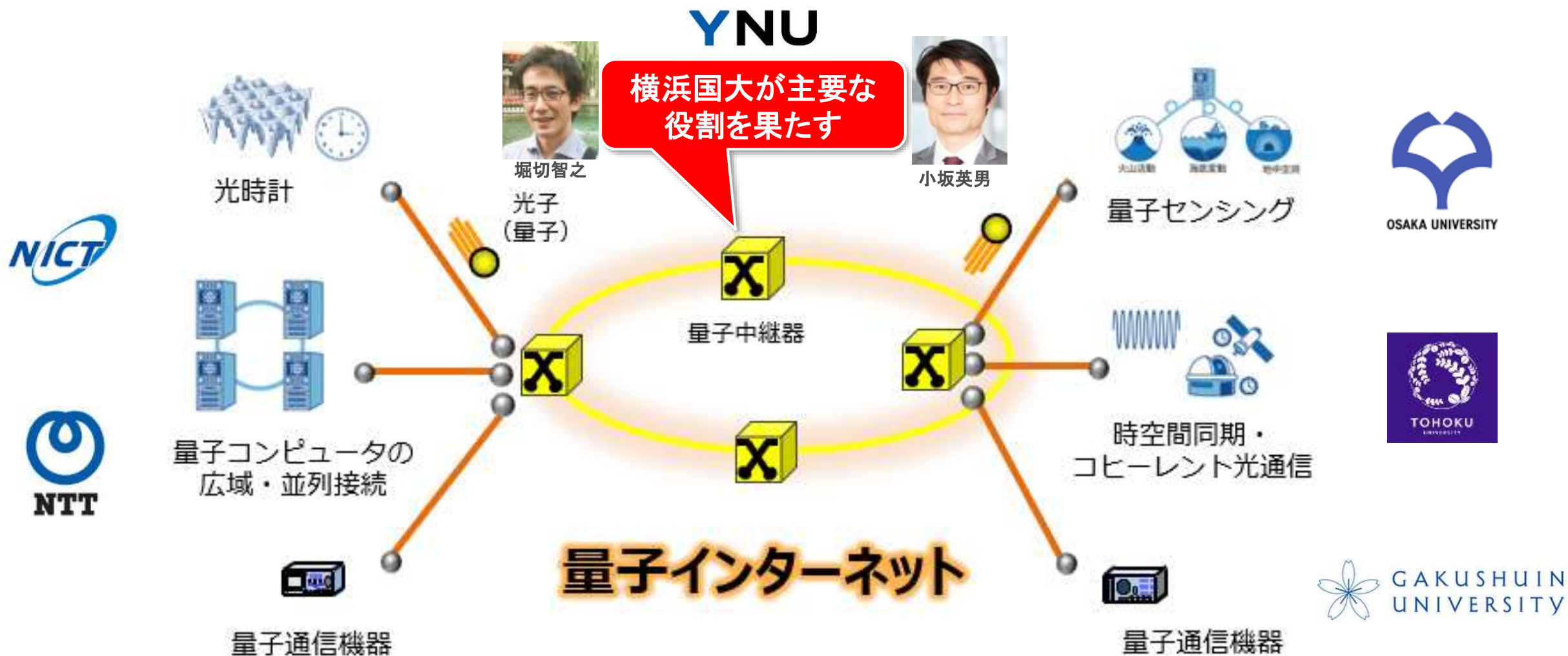
古河電工

光ファイバー型
波長多重
量子もつれ光源

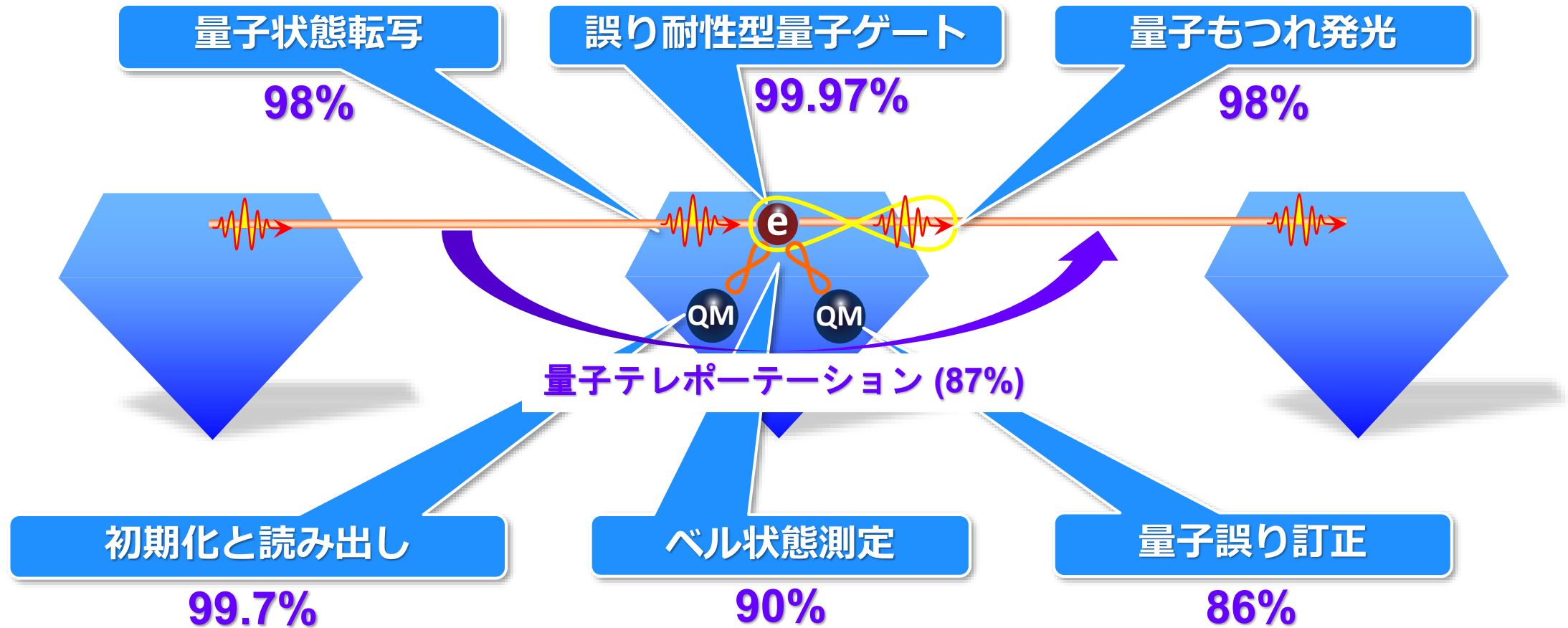
波長割当
中継配信



総務省委託研究 「量子インターネット」

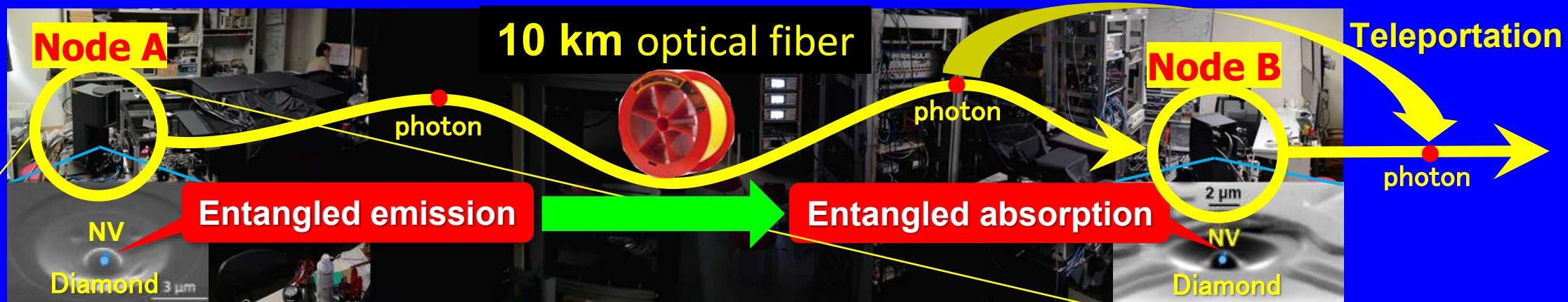


ダイヤモンド量子中継器(第一世代)の実証

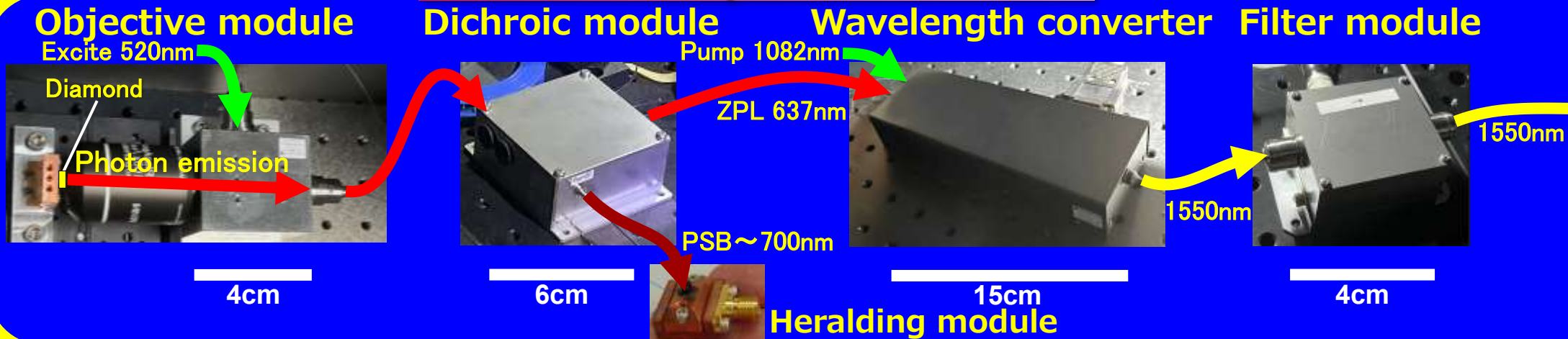


ダイヤモンド量子中継器のモジュール化

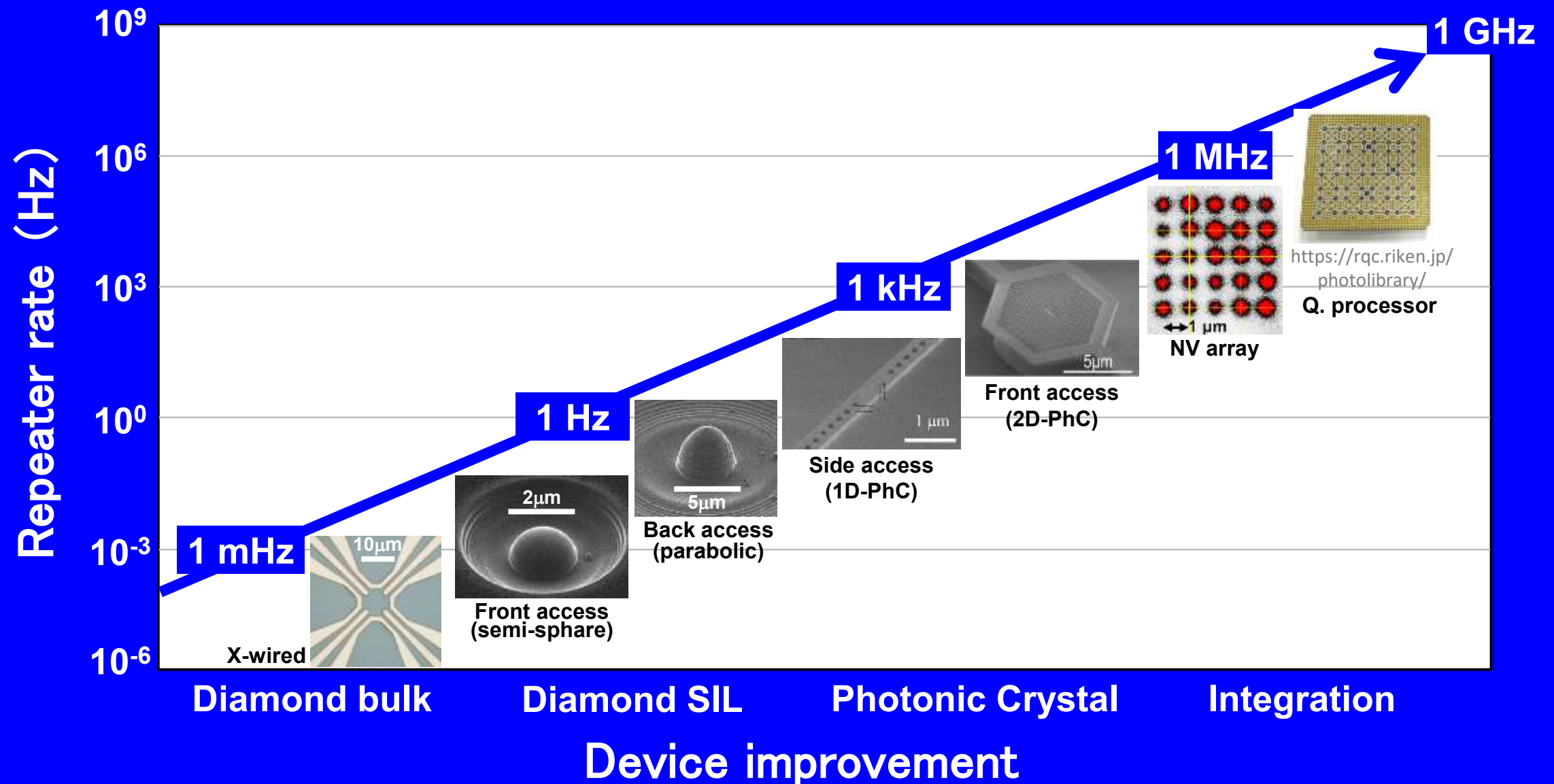
- ✓ Single photon emission and absorption over 10 km fiber
- ✓ Photon state transfer into an NV over 10 km fiber
- ✓ Quantum teleportation of a photon into another ~ 1 Hz



Quantum Repeater Modules



ダイヤモンド量子中継器のロードマップ



話したかったこと

- 量子コンピュータ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。
- 第1世代量子中継器は飽和し実用的な第2世代量子中継器に移行。
- 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。

運営

センター長



小坂英男

国際連携

非常勤教員



Myalitsin Anton

国際広報

非常勤教員



Volders Annelies

知財戦略

客員研究員



熊澤金也

マネージメント

助教



金野晃之

大学 (国内)

教授



馬場俊彦

教授



吉川信行

教授



堀切智之

教授



山梨裕希

教授



南野彰宏

准教授



赤松大輔

准教授



井上史大

准教授



島津佳弘

准教授



西島喜明

准教授



小澤 陽

助教



関口雄平

助教



黒川穂高

助教



上牧瑛

助教



Abdul Nasir Kuzhiyan Thadathil

助教



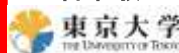
Goundar Jowesh Avisheik

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



寺地徳之



客員教授



寺井弘高



客員教授



加藤宙光



客員准教授



小野田忍



客員研究員



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



Jelezko Fedor Becher Christoph



招聘教授



鯨岡真美子



招聘教授



Mueller Kai



招聘教授



鯨岡真美子



招聘教授



鯨岡真美子



民間企業

客員教授



味村裕



客員准教授



鯨岡真美子



客員准教授



鯨岡真美子



連携協定



共同研究契約



Industry



秘密保持締結



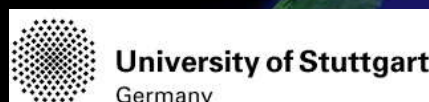
共同研究契約



秘密保持締結



Academia

連携協定
ASPIRE連携MS6連携
ASPIRE連携

連携協定

連携協定
ASPIRE連携連携協定
ASPIRE連携

拠点長



連携協定



ASPIRE連携

MS6連携
ASPIRE連携連携協定
ASPIRE連携MS6連携
ASPIRE連携

ASPIRE連携

MS6連携
ASPIRE連携

共同研究



共同研究



共同研究

Consortium



連携協定



連携準備中



連携準備中



共同研究契約



共同研究契約



招聘教員