

IPSJ・TTC共催セミナー

量子コンピュータ & 量子通信の最新動向と展望 2019.4.11

量子技術2.0最新動向 ～量子力学を情報処理に活かす～

JST 研究開発戦略センター (CRDS)

システム・情報科学技術ユニット

嶋田義皓

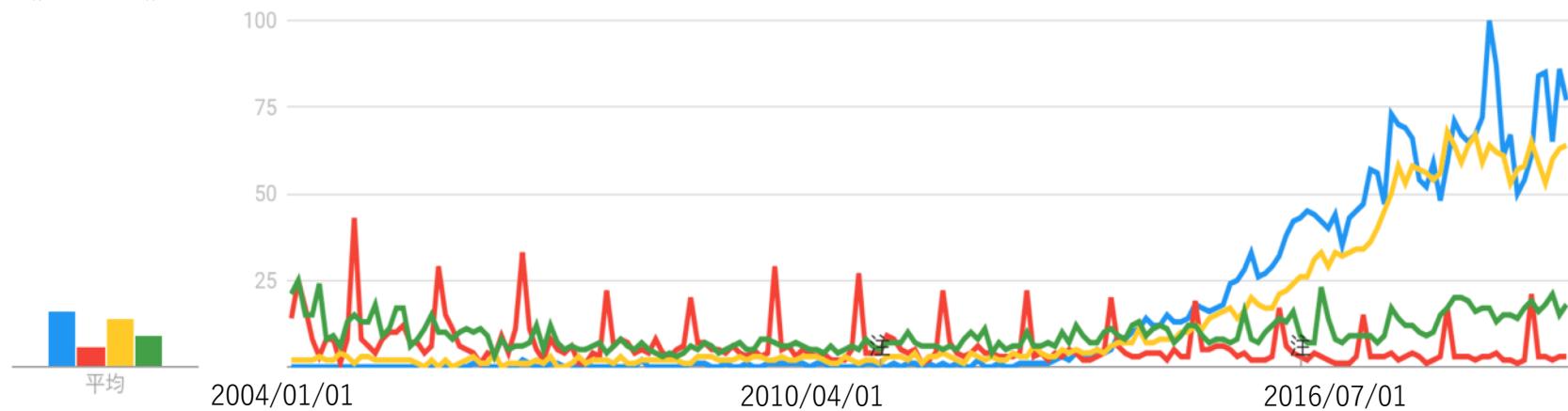
yoshiaki.shimada@jst.go.jp

量子コンピュータ 第2次ブーム

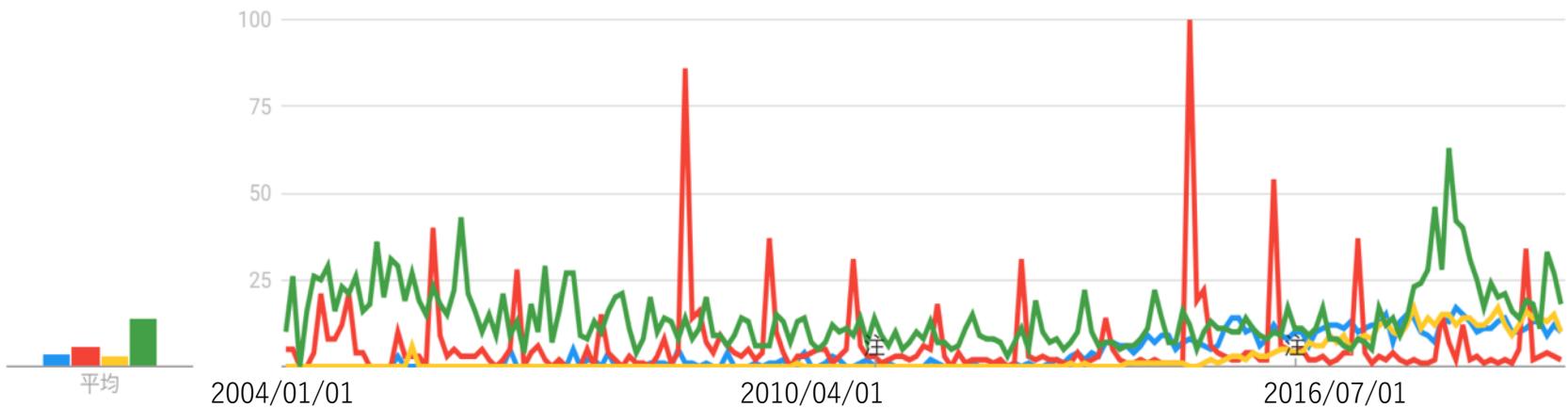


Q: 量子コンピュータはどれ？

《米国》

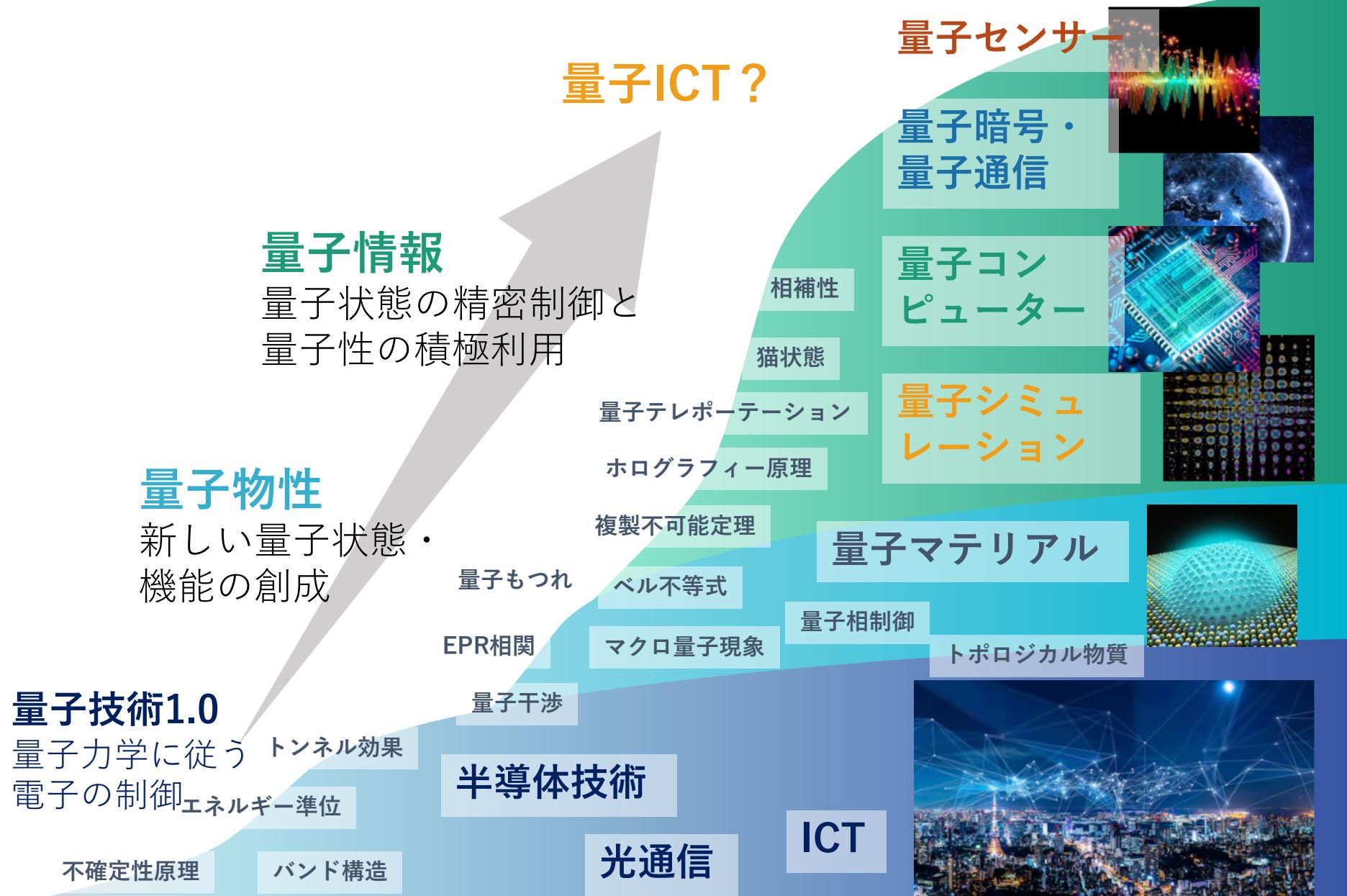


《日本》



(選択肢：ノーベル物理学賞、深層学習、CRISPR、量子コンピュータ)

量子革命=100年続く緩やかなイノベーション



量子技術2.0 戦略・政策

政策動向

予算規模（下界）

アメリカ



- 国家科学技術会議 (NSTC) 下WGがレポート発表。米国の**科学的リーダーシップ、国家安全保障、経済的競争性**を構成する重要技術として特定 (2016.7)
- 「量子情報科学の国家戦略概要」発表(2018.9)、「国家量子イニシアティブ法」成立 (2018.12)

1400億円/5年

欧州



- ECの求めで「量子マニフェスト」を産官学で編纂。**長期の富の創出、安全保障、産業創出**の観点で重要と位置づけた (2016.5)
- 10年間で総額10億ユーロ規模の「量子技術フラッグシップ」プログラム開始。初回の採択結果公開 (2018.10)

1250億円/10年

イギリス



- EPSRCが「国家量子技術プログラム」を開始 (2014.12)
- 総額2.7億ポンドの投資により、量子技術分野での主導的地位を確実にし、**通信、医療、安全保障**などの世界市場の形成を目指す。

450億円/5年

ドイツ



- 「量子技術の基本計画」を閣議決定。連邦教育研究省 (BMBF) が「量子技術－基本から市場へ」プログラムを公表 (2018.9)。
- 政府主導により量子技術の開発を促進し、**応用・市場化で第二の量子革命**を目指す。

860億円/4年

中国

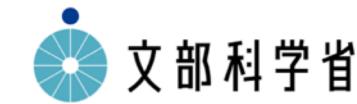
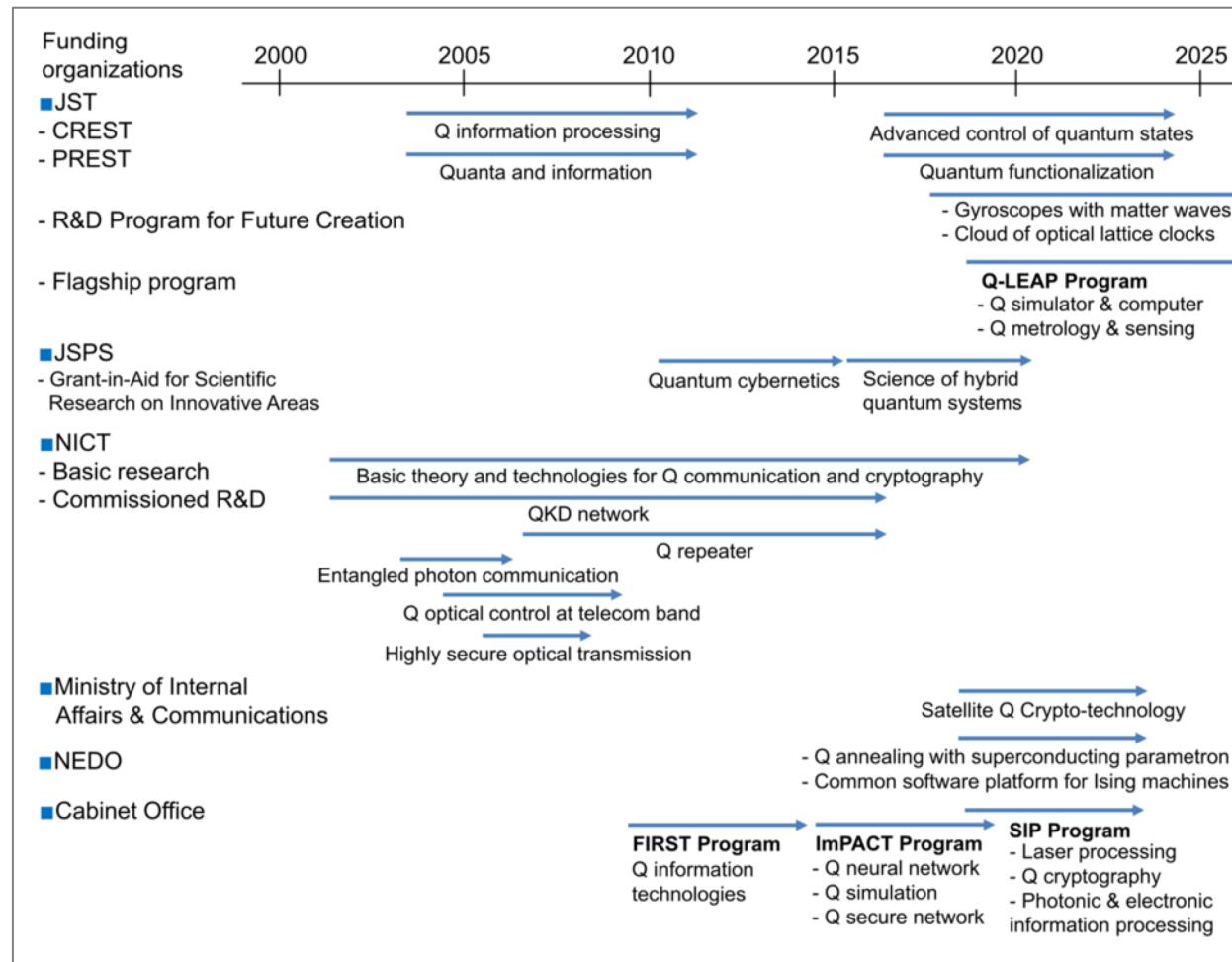


- 「科学技術イノベーション第13次五カ年計画 (2016)」で量子通信と量子コンピュータを**重大科学プロジェクト**に位置付けた。
- 「国家重点研究計画」で量子制御・量子情報の大規模グラント実施。
- 「量子情報科学実験室」を建設中 (合肥市、2020年完成予定)

1200億円/5年

日本の量子戦略・科学政策

- それぞれの政策目的でR&D実施。
- 今後は**全体を俯瞰した量子戦略・科学政策**が必要。



- 戰略基礎研・学術
- 量子情報処理
- 量子計測・センシング



Ministry of Internal Affairs and Communications

- 量子暗号
- 光格子時計



Ministry of Economy, Trade and Industry

- 量子アニーリング
- IT人材



Cabinet Office

- 量子暗号
- 光電子情報処理

量子産業

量子コンピューター ハードウェア

量子コンピューター ソフトウェア

量子通信・暗号 周辺技術・関連技術

米国



カナダ



欧州



中国



オーストラリア



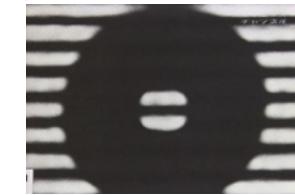
日本



量子力学の不思議な性質

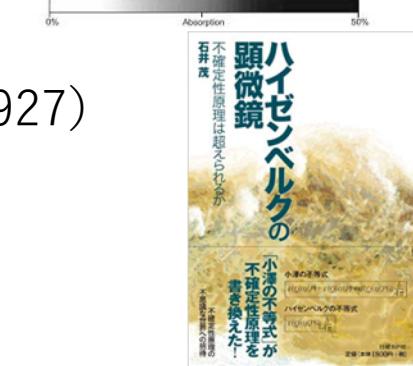
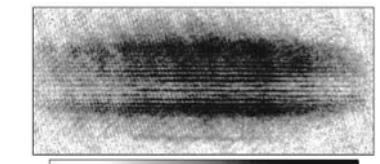
トンネル効果…壁を通り抜ける

- トンネルダイオード (江崎, 1957)
- 走査型トンネル顕微鏡 (ビーニッヒ, ローラー, 1982)



回折・干渉…粒子なのに波のようにふるまう

- 電子線の回折 (ディヴィソン, ジャマー, 1927)
- 2重スリット実験 (外村, 1989)
- 冷却原子団の多粒子系干渉 (ケタレ, 1997)



不確定性原理…位置と運動量が同時に決められない

- ガンマ線顕微鏡の思考実験 (ハイゼンベルク, 1927)
- 小澤の不等式 (小澤, 2003)
- 中性子スピinn測定実験 (長谷川, 2012)

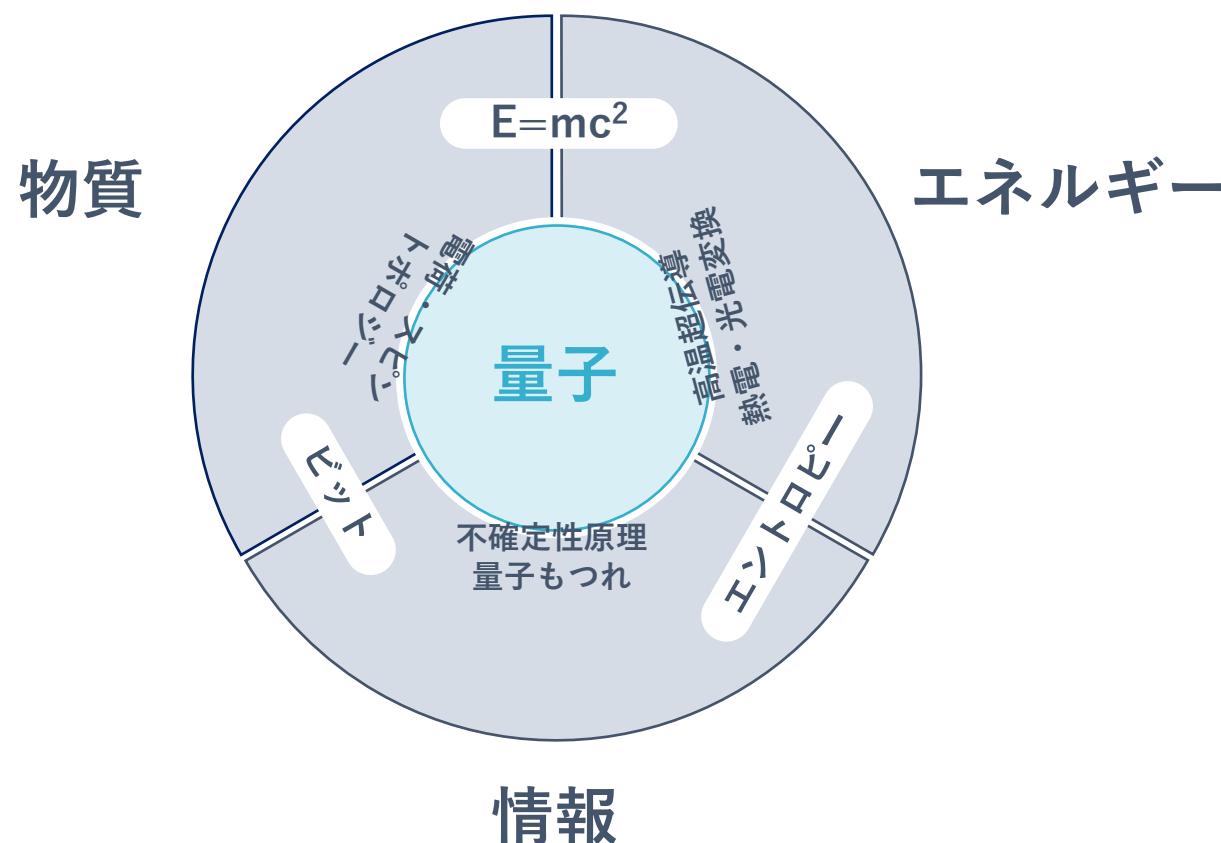
量子もつれ…離れた地点の量子状態が同時に確定

- EPRパラドックス (アインシュタイン, ポドルスキ, ローゼン, 1935)
- アスペの実験によるCHSH不等式の破れの検証 (アスペ, 1982)
- 量子テレポーテーション実験成功 (古澤, 1998)

量子はどこにでもある

量子力学は全ての現象の裏側に存在する**普遍的な物理法則**。

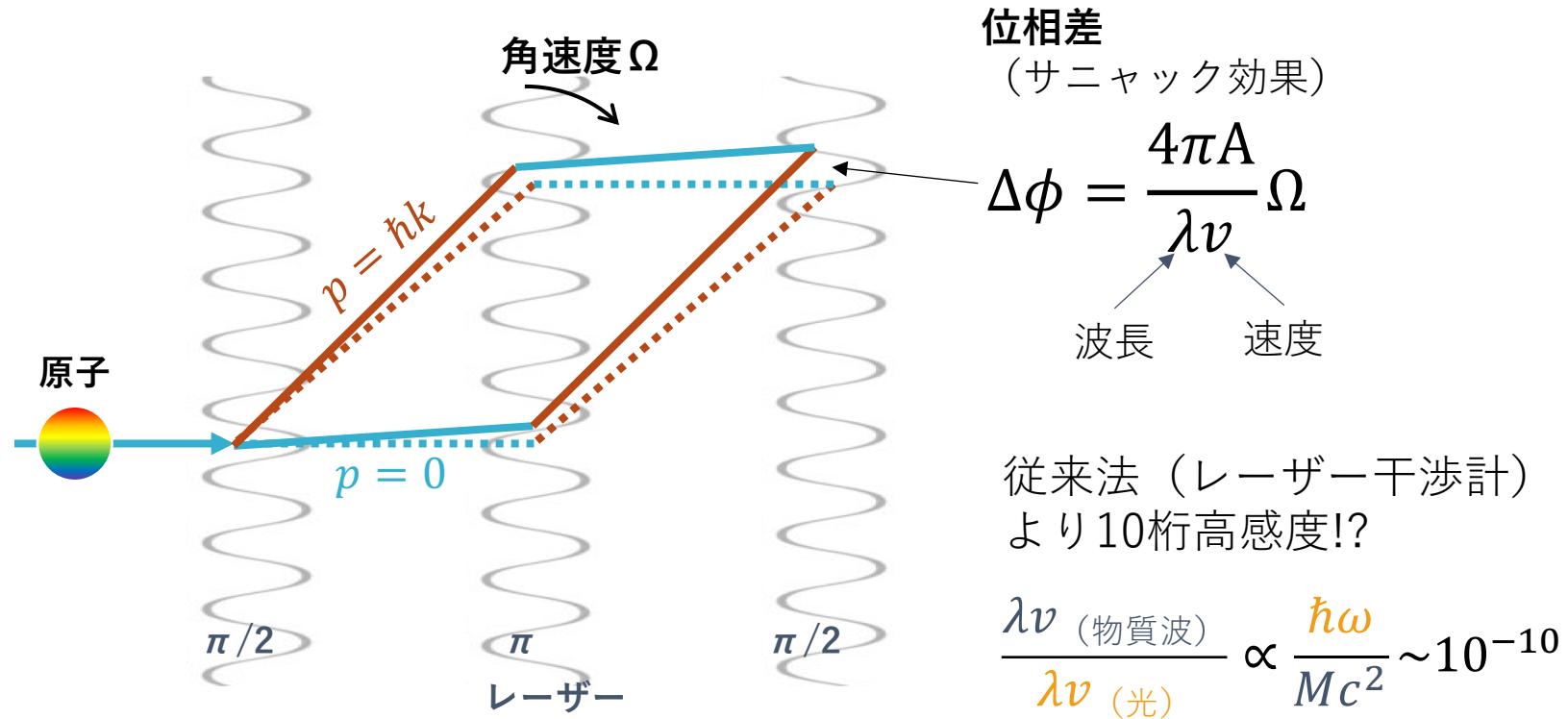
- 私たちは古典の世界で暮らしているので、私たちの役に立つためには、量子の**古典的な振る舞い**を発現させる必要がある。



量子力学を情報処理に使う① 高感度計測

原子の波としての性質 = **物質波（ドブロイ波）** の干渉縞を利用し、原子に働く様々な力を高感度・高精度に測定。

《量子ジャイロスコープ》

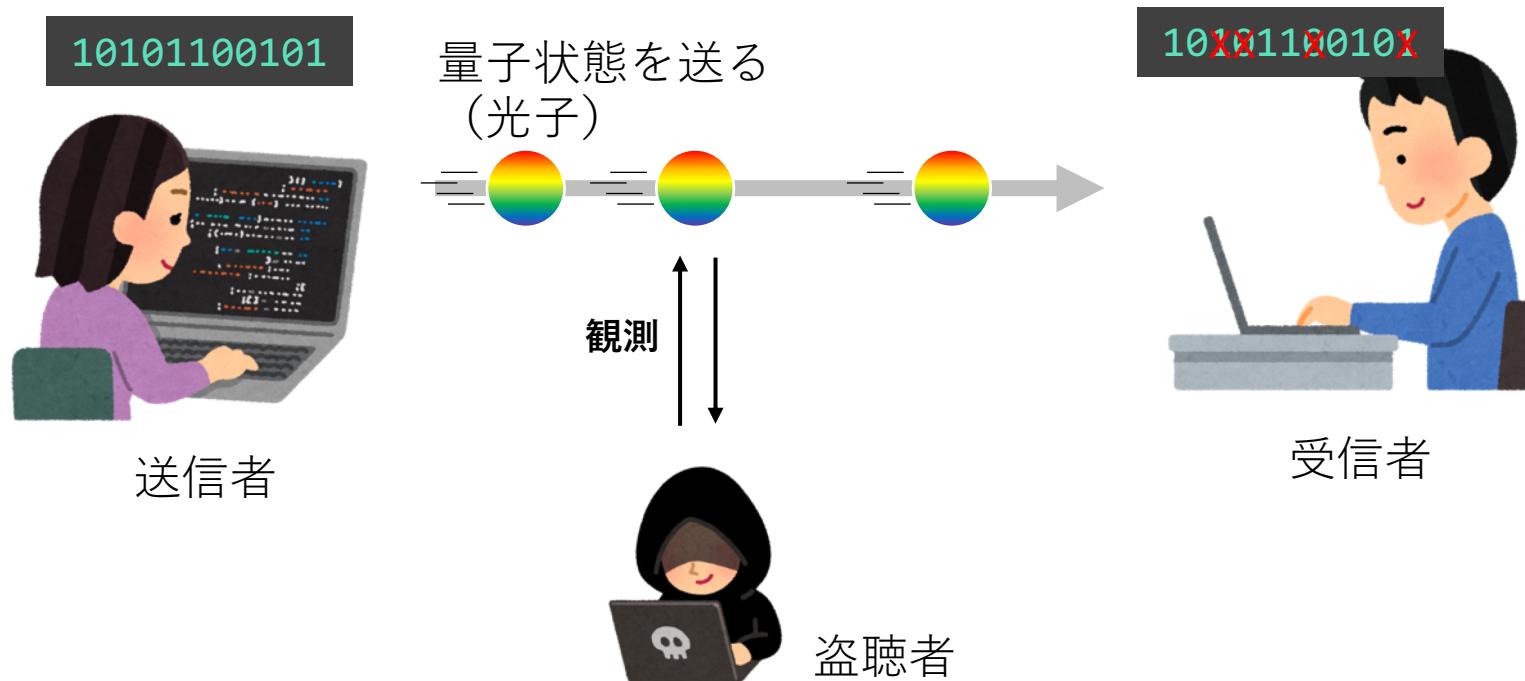


量子力学を情報処理に使う② セキュア通信

不確定性原理を利用して盗聴を検知し、離れた2者の間で暗号鍵を安全に共有する。

- 物理法則（= **量子状態は観測すると状態が変化する**）が通信システムの安全性を保持。

《量子暗号鍵配達》



量子力学を情報処理に使う③ 高速計算

重ね合わせの原理で超並列処理を実行（注：これだけでは早くはならない）して、確率振幅の波の干渉で正答の確率を増幅。

- 特定の問題については計算ステップ数を指数関数的に減らせる。

《量子コンピュータ》

1. 重ね合わせ

指数的規模の組み合わせの
超並列処理

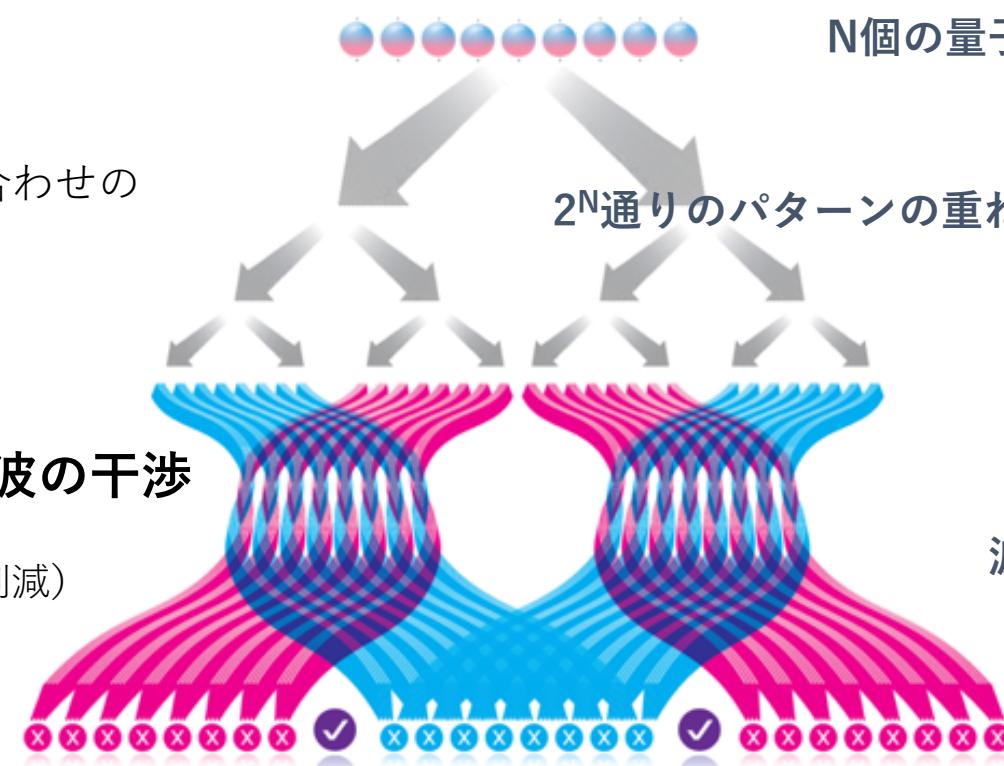
N個の量子ビット

2^N 通りのパターンの重ね合わせ

2. 複素確率の波の干渉

正答の確率の増幅
(それ以外の答えの削減)

波の干渉



量子力学を情報処理に使う④ シミュレーション

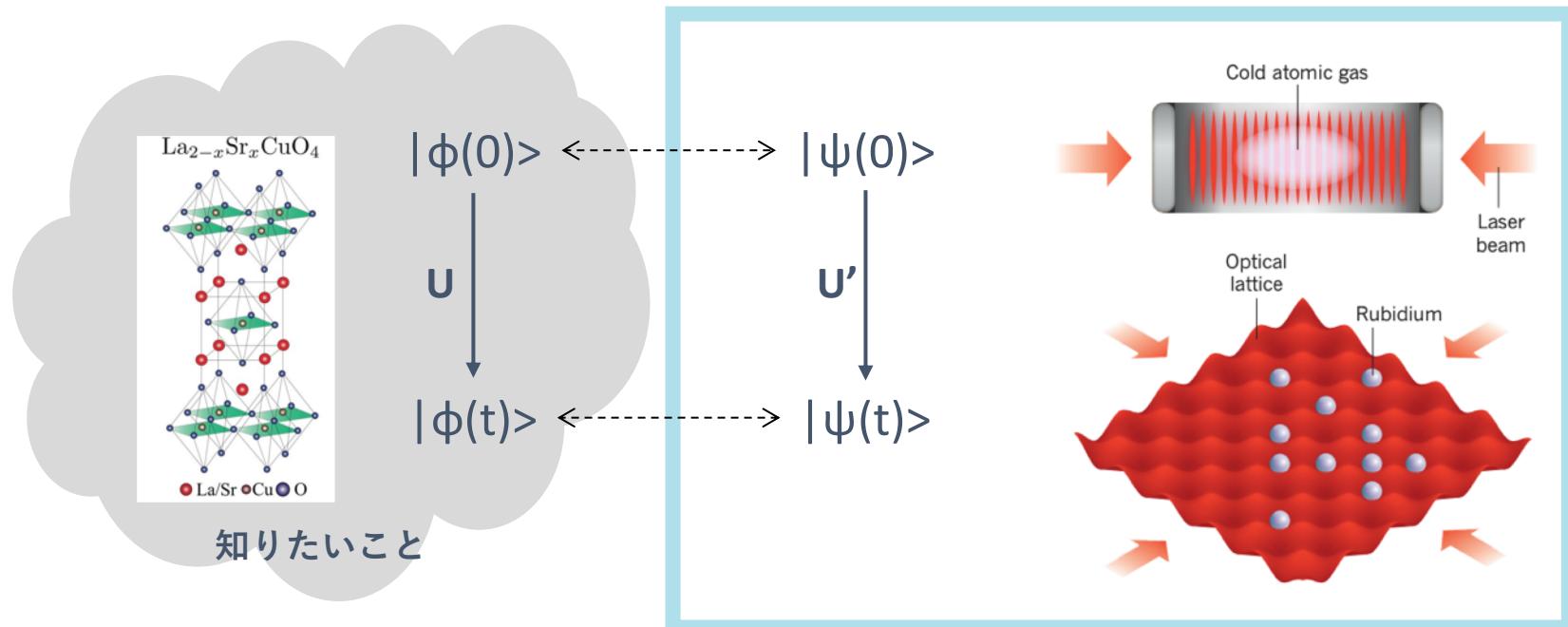
量子力学に従う自然現象を、**別の制御可能な量子系**を使いシミュレーションする。

- 量子多体系では電子数やスピン軌道数に対して扱うべき行列の次元数が指数関数的に増加し、スパコンでも厳密計算が困難。



《量子シミュレータ》

cf) 風洞実験



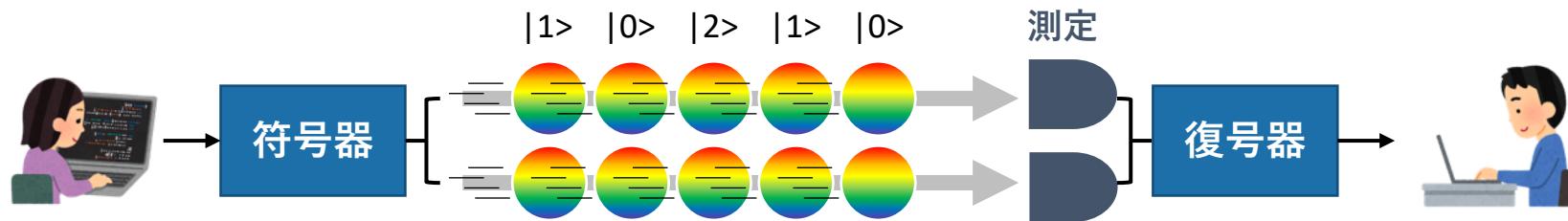
量子力学を情報処理に使う⑤ 大容量通信

信号受信のときに**量子計算**を利用して信号の識別性能を向上させる。

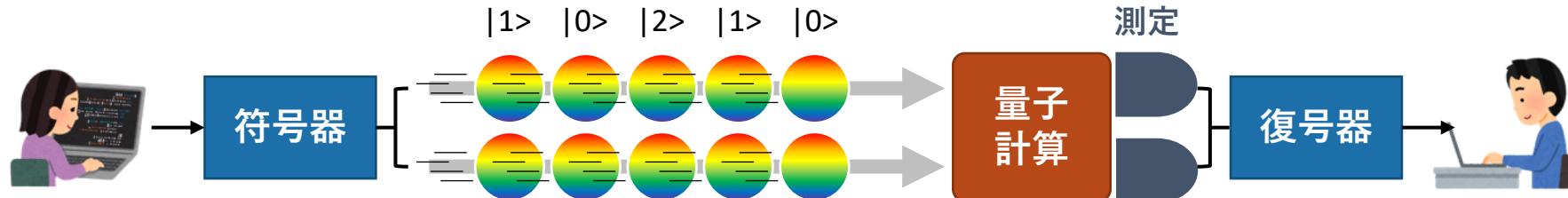
- 実は**不確定性原理**によって最大通信容量の原理的限界が決まっている。

《量子通信》

古典情報理論：光子数を2倍にしても伝送情報量は最大で2倍までしか増えない

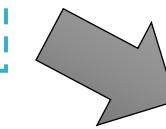


量子情報理論：光子数が2倍のときでも、伝送情報量を2倍以上に増やせる



[補足]量子もつれ（量子エンタングルメント）

《量子もつれ状態のイメージ》



Aを“測定”

Aが男の子とわかる

『同時に』Bが女の子とわかる



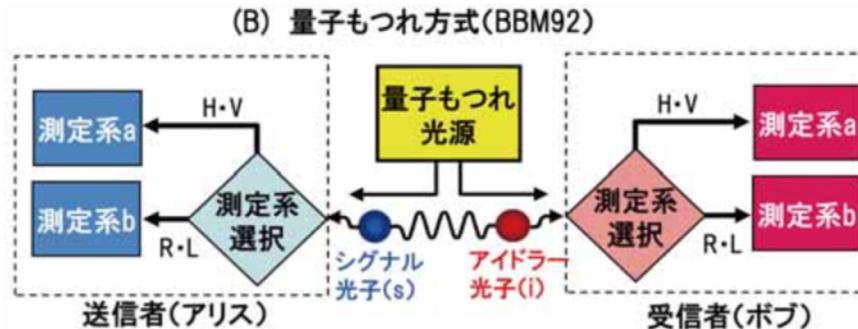
量子もつれ（エンタングルメント）

量子暗号通信、量子コンピュータでも量子もつれは重要。

量子暗号鍵配送

量子もつれ状態の光子対を送信者と受信者が測定して鍵を共有（BBM92）

- BB84より安全性が高い

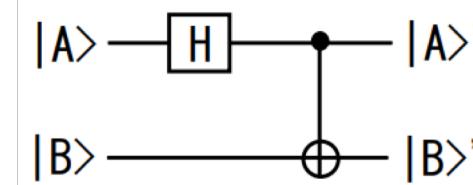


荒平慎「量子暗号を用いた秘匿通信」, Kensetsu Denki Gijyutsu Vol.178, 30-32 (2012).

量子コンピュータ

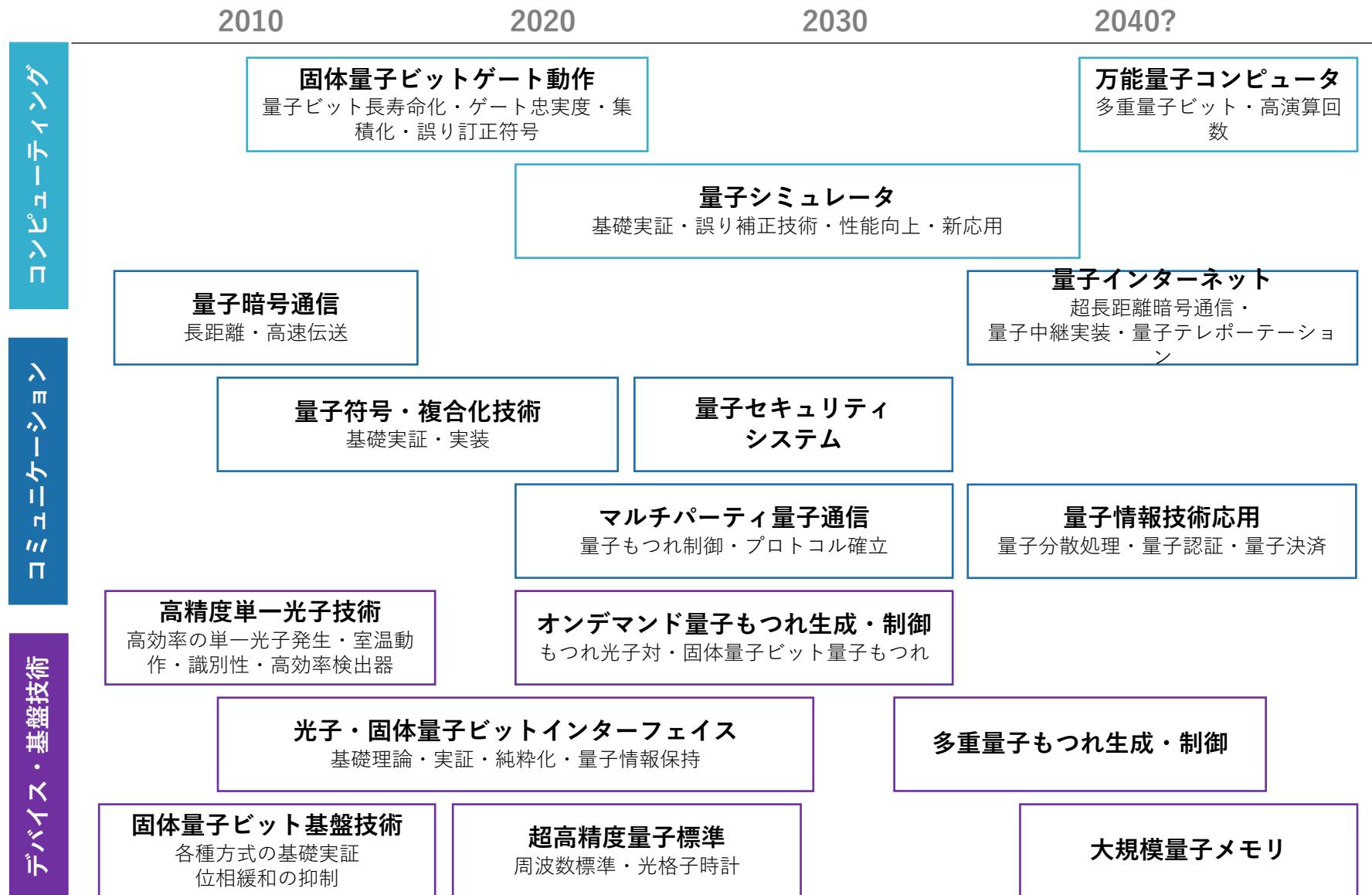
量子もつれ状態を利用して計算を進める。もつれの量は計算中に増減する。

- Shorのアルゴリズムにも含まれている。



$ A\rangle$	$ B\rangle$	$ AB\rangle'$
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0_A0_B\rangle + 1_A1_B\rangle)$
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0_A1_B\rangle + 1_A0_B\rangle)$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0_A0_B\rangle - 1_A1_B\rangle)$
$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0_A1_B\rangle - 1_A0_B\rangle)$

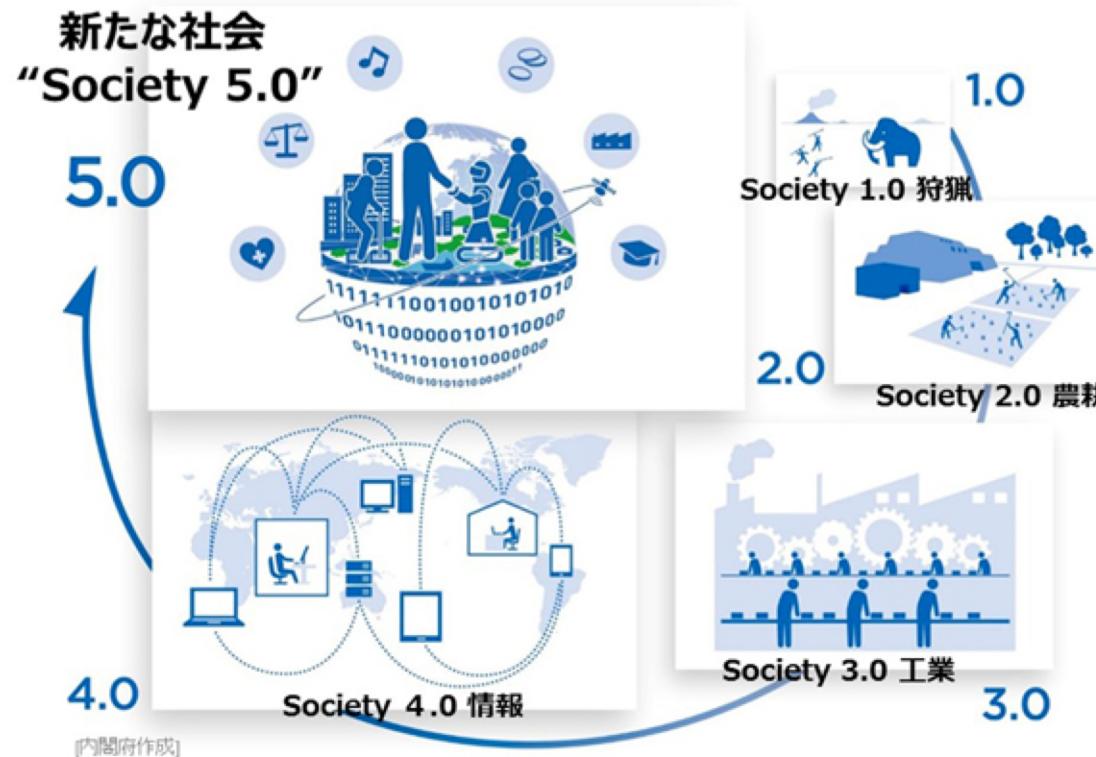
今後の展望・ロードマップ



量子前提社会へ

量子技術は**適材適所**で徐々に浸透してゆく（一気に全置換するわけではない）

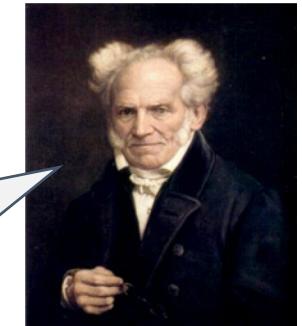
- 現状は量子センサ（センサは**量子**、出力は**古典**）、量子通信（通信路は**量子**、ノードは**古典**）、量子コンピュータ（レジスタは**量子**、命令・データは**古典**）etc…



おわりに

真実はすべて3つの段階を経る

アルトゥル・ショーペンハウアー
(19世紀ドイツの哲学者・作家、1788~1860)



第1段階「あざ笑われる」

そんなことできるわけないじゃないか!?

第2段階「大反対される」

できることはわかったが、やめとけ!

第3段階「当然のこととして受け入れられる」

JST-CRDS 戦略プロポーザル みんなの量子コンピューター ～情報・数理・電子工学と拓く新しい量子アプリ～



関連報告書

- CRDS-FY2018-WR-09 「（ワークショップ報告書）みんなの量子コンピューター～情報・数理・物理で拓く新しい量子アプリ～」
- CRDS-FY2018-RR-04 「（調査報告書）世界特許マップで見た量子技術2.0」
- CRDS-FY2018-FR-02 「研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野（2019年）」

Qmediaに記事も書いてます。 <https://www.qmedia.jp/>

- 量子コンピューターの“よくある誤解”Top10
- 「量子コンピューティングの次のステップ：コンピュータサイエンスの役割」全訳