

量子計算網構築のための量子インターフェース開発

プロジェクトマネージャー (PM)

小坂 英男 (横浜国立大学 大学院工学研究院 / 先端科学高等研究院 教授)

代表機関: 横浜国立大学

研究開発機関: 産業技術総合研究所、東京大学、物質・材料研究機構、横浜国立大学、量子科学技術研究開発機構



研究開発プロジェクト概要

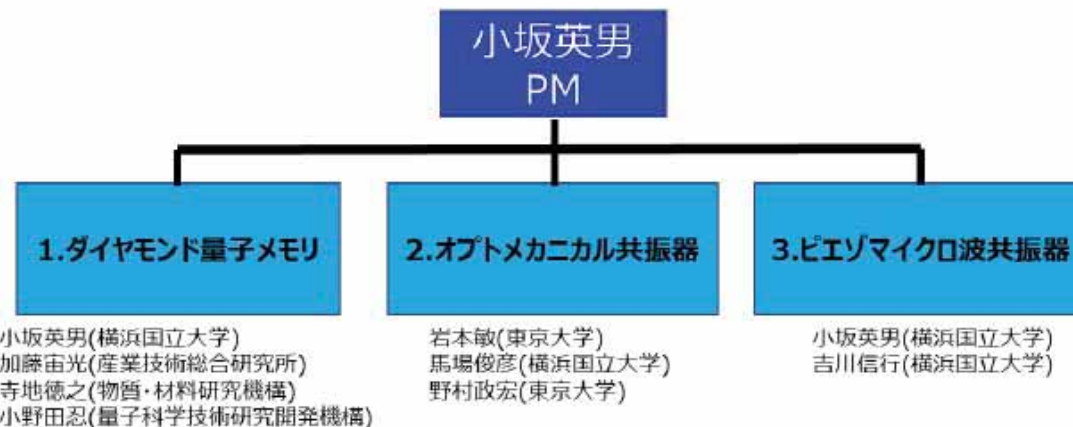
超伝導量子ビットと通信用光子をつなぐため、量子メモリとオプトメカニカル結晶を融合した量子インターフェースを開発します。それにより、2050年には、大規模な超伝導量子コンピュータの実現を目指します。

2030年までのマイルストーン

ハイブリッド量子インターフェースと大容量量子メモリの実現により、誤り訂正可能な規模のネットワーク接続を実現する。

2025年までのマイルストーン

誤り訂正に必要な規模まで量子ビット数の拡張が可能であること示すため、ハイブリッド量子インターフェースによる量子接続を実現する。



プロジェクト紹介 https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/62_kosaka.html

資料 https://www.jst.go.jp/moonshot/news/pdf/05_20210311_kosaka.pdf

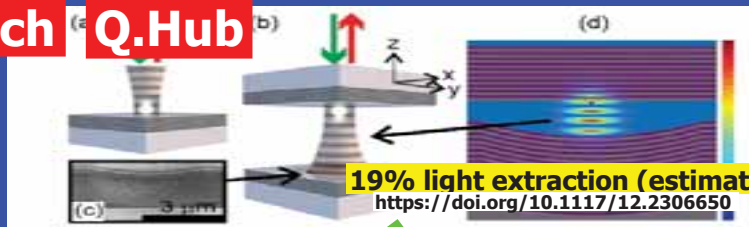
プレゼン <https://youtu.be/xsdrfd80BHc>

超伝導量子-ダイヤモンドインターフェースの世界状況

日本が主導する超伝導回路技術、ダイヤモンド材料技術、集積フォトニクス技術を融合

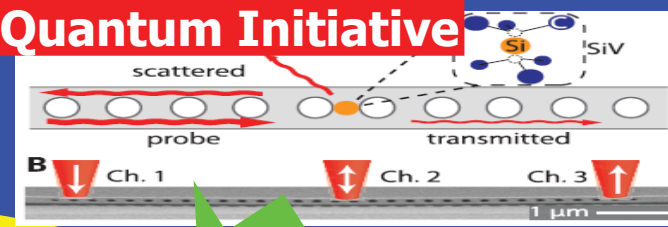
Delft, Oxford ファブリペロー共振器+NV Harvard フォトニック結晶+SiV

QuTech Q.Hub



19% light extraction (estimate)
<https://doi.org/10.1117/12.2306650>

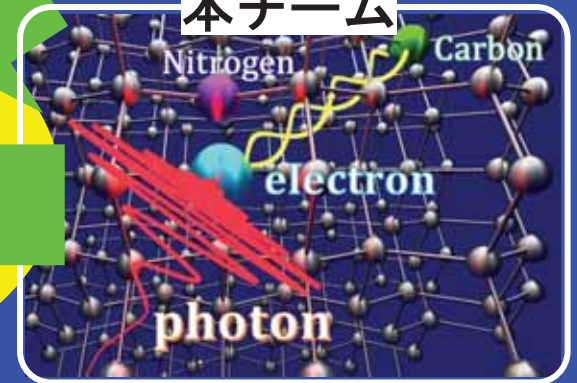
Quantum Initiative



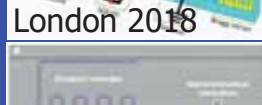
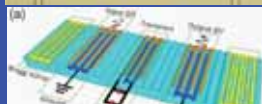
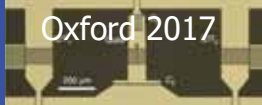
ハイブリッド量子集積素子



本チーム



超伝導-音子変換



マイクロ波-光子変換

Quantum Initiative 11, 1166 (2020)



Quantum Initiative

Stanford, Caltech オプトメカニカル結晶 MIT 量子マイクロチップ

磁場や集団スピンを使う従来方式では感度限界がある！

研究開発体制

PM 小坂英男

(横浜国大 教授・IAS 量子情報研究センター

長) 技術補佐、知財プロデューサー、アウトリーチ担当



代表機関

: 横浜国立大学



PM支援組織: 先端科学高等研究院(IAS)他

33名の日本最強のナノテク集団が結集!

ダイヤモンド量子メモリ

- 小坂 英男 (横浜国大)
ダイヤモンド量子メモリの研究開発
- 加藤 宙光・牧野 俊晴 (産総研)
ダイヤモンド量子構造の研究開発
- 寺地 徳之 (物材機構)
ダイヤモンド量子結晶の研究開発
- 小野田 忍 (量研機構)
ダイヤモンド色中心の研究開発

参加者:

- 関口 雄平 (横国)
- 黒川 穂高 (横国)
- 河野 克典 (横国)
- 牧野 俊晴 (産総研)
- 児島 一聡 (産総研)
- 沈 旭強 (産総研)
- 小倉 政彦 (産総研)
- 加藤 有香子 (産総研)
- 吉岡 裕典 (産総研)
- 升本 恵子 (産総研)



オプトメカニカル共振器

- 岩本 敏 (東大)
フォトニック結晶光共振器の研究開発
- 馬場 俊彦 (横浜国大)
フォトニック光共振器実装技術開発
- 野村 政宏 (東大)
フォノニック結晶音共振器の研究開発

参加者:

- 太田 泰友 (東大)
- 渡辺 宜朗 (東大)
- 西岡 政雄 (東大)
- 石田 悟己 (東大)
- 羽中田 祥司 (横国)
- 玉貫 岳正 (横国)



ピエゾマイクロ波共振器

- 小坂 英男 (横浜国大)
ピエゾマイクロ波共振器の研究開発
- 吉川 信行 (横浜国大)
量子制御電子集積回路の研究開発

参加者:

- 猪股 邦宏 (産総研)
- 寺井 弘高 (NICT)
- 田辺 克明 (京大)
- 佐々木 遼 (東大・理研)
- 山梨 裕希 (横国)
- 竹内 尚輝 (横国)
- Ayala Christopher (横国)
- 陳 オリビア (横国)
- 何 魚行 (横国)
- 関口 雄平 (横国)
- 黒川 穂高 (横国)



企業・大学・研究機関 (密接な協業による早期PoCの実現へ向けて)

NEC、東芝、古河電工、NTT AT、NTT Electronics、オプトクエスト、SII、メルカリ、住友電工、浜松ホトニクス

中村ERATO+QLEAP、山本剛MSと密接に連携

ネットワーク型量子コンピュータによる量子サイバースペース

プロジェクトマネージャー (PM)

山本 俊 (大阪大学 大学院基礎工学研究科 /
量子情報・量子生命研究センター 教授)



代表機関: 大阪大学

研究開発機関: 大阪大学、沖縄科学技術大学院大学、情報通信研究機構、浜松ホトニクス (株)、早稲田大学

研究開発プロジェクト概要

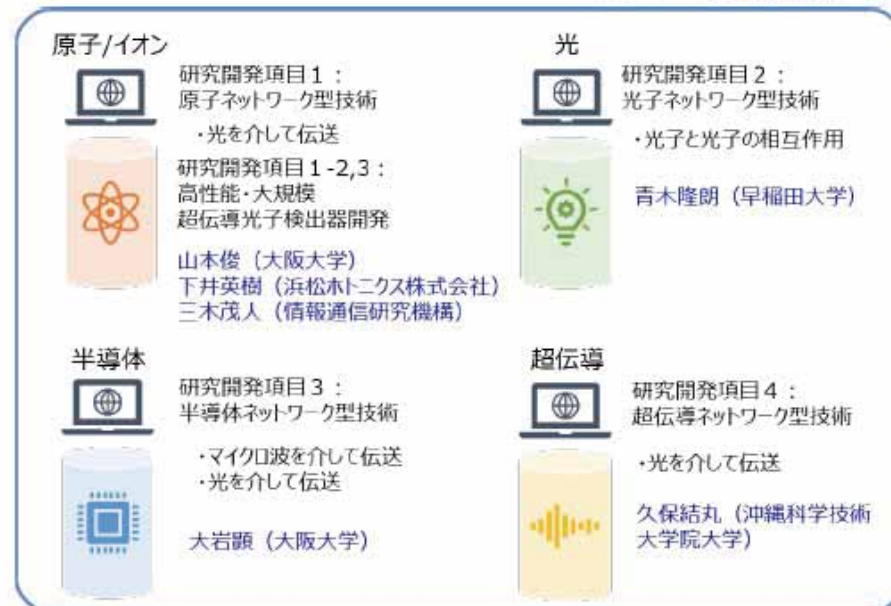
光、原子、半導体等の量子コンピュータハードウェアをネットワーク化するための要素技術を開発し、複数の中小規模量子コンピュータを接続した「ネットワーク型量子コンピュータ」を構築します。それにより、2050年には、さらなる大規模化を進め、汎用的な量子コンピュータの実現を目指します。

2030年までのマイルストーン

モジュール化された量子コンピュータを接続し大規模化することで、誤り訂正可能な規模のネットワーク型量子コンピュータを実現する。

2025年までのマイルストーン

誤り訂正に必要な規模まで量子ビット数の拡張が可能であることを示すため、離れた量子ビットや量子メモリ間のネットワーク接続を実証する。



プロジェクト紹介 https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/66_yamamoto.html

資料 https://www.jst.go.jp/moonshot/news/pdf/06_20210311_yamamototakashi.pdf

プレゼン <https://youtu.be/nUZazT6sv2M>



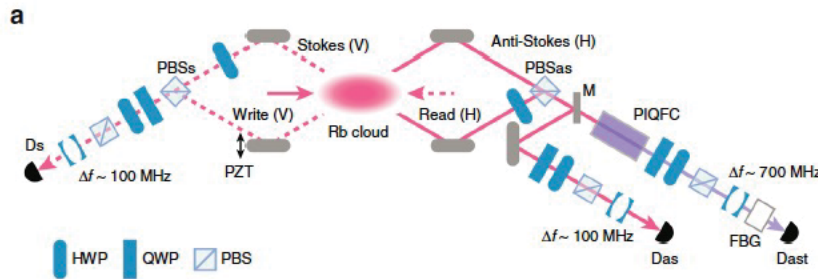
研究開発項目 1 : 原子ネットワーク型技術

研究開発課題 1 : 原子・光多重化量子ネットワーク技術
 (大阪大学 山本俊 基礎工学研究科・教授)

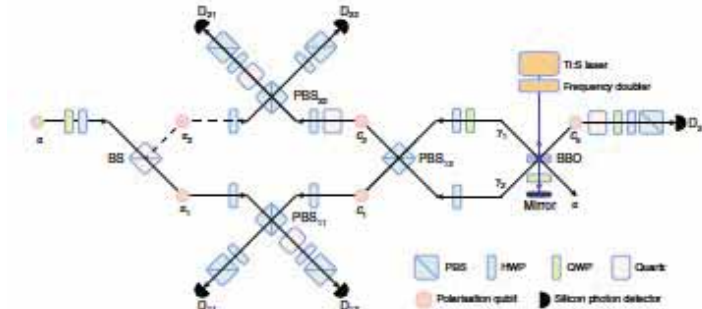
原子/イオン



- 原子と光子のエンタングルメント生成
Nature Communications 9,1997(2018).
- 全光量子中継の原理実証
Nature Communications 10, 378(2019).



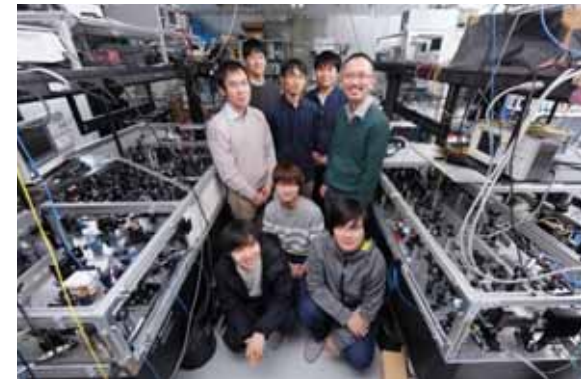
阪大 × NTT × NICT × 東大



阪大 × NTT × 富山大 × トロント大



ネットワーク化された
原子アレイ量子コンピュータ

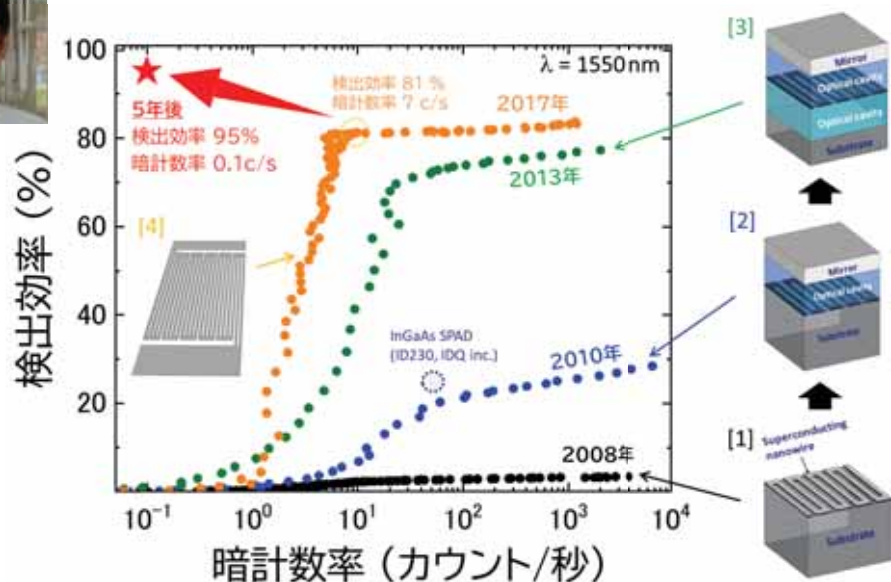
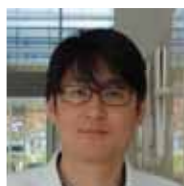




研究開発項目 1 : 原子ネットワーク型技術

研究開発課題 2 : 多重化光子検出器開発
(浜松ホトニクス(HPK) : 下井英樹、小玉剛史)

研究開発課題 3 : 高性能光子検出技術開発
(NICT : 三木茂人 主任研究員)



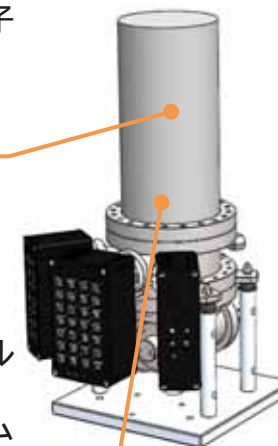
[1] S. Miki et al, APL 2008, [2] S. Miki et al, OL 35, 2133 (2010) [3] S. Miki et. al., OE 21, 10208 (2013)[4] S. Miki et al, OE 25, 6796 (2017)

超伝導ナノワイア光子検出器

SNSPD素子



多チャンネル
SNSPD
冷凍システム



- ・ 高効率化と低暗計数化
- ・ 高度な実装

➡ 大規模かつ高性能な光子検出技術

目標6「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる
誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」



誤り耐性型量子コンピュータにおける理論・ソフトウェアの研究開発

プロジェクトマネージャー (PM)

小芦 雅斗 (東京大学 大学院工学系研究科 教授)

代表機関：東京大学

研究開発機関：大阪大学、京都大学、慶應義塾大学、産業技術総合研究所、情報・システム研究機構、筑波大学、電気通信大学、東京医科歯科大学、東京大学、日本電信電話（株）、理化学研究所



研究開発プロジェクト概要

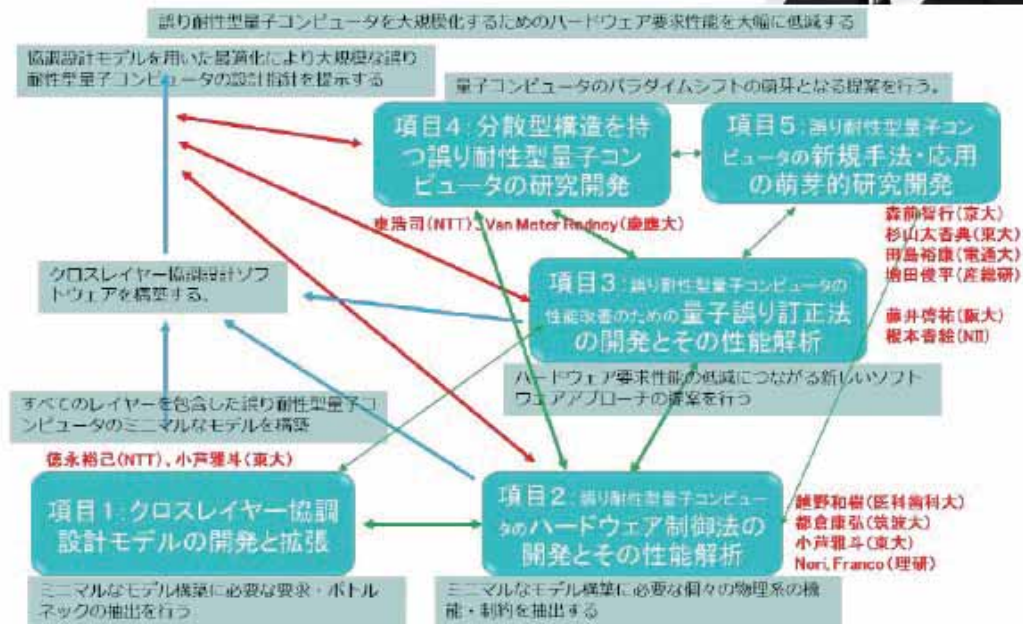
量子情報、アーキテクチャおよび物理系の研究者を結集し、量子ビットの設計、誤り耐性方式の実装、効率的に計算を実行するためのコンパイラや言語までを包含した協調設計モデルを構築します。それにより、2050年には、大規模な量子コンピュータの実現を目指します。

2030年までのマイルストーン

誤り耐性型量子コンピュータを大規模化するためのハードウェア要求性能を大幅に低減する。

2025年までのマイルストーン

ハードウェアとソフトウェアとが協調した誤り耐性型量子コンピュータ設計のための支援ツールを構築する。



プロジェクト紹介 https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/61_koashi.html

資料 https://www.jst.go.jp/moonshot/news/pdf/07_20210311_koashi.pdf

プレゼン <https://youtu.be/jk4FISGsTVs>

誤り耐性型汎用量子コンピュータのレイヤー



アプリケーション

何を量子コンピュータに解かせるか？

プログラムの処理（コンパイラ）

ゲート最適化、ゲート分解、実行時最適化

誤り訂正と論理量子ビットの構成

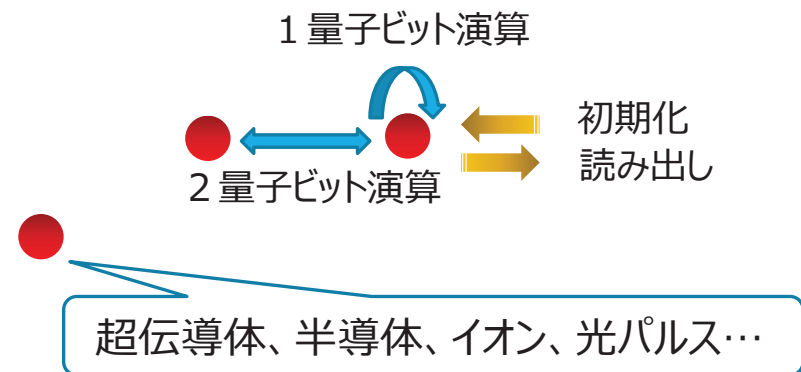
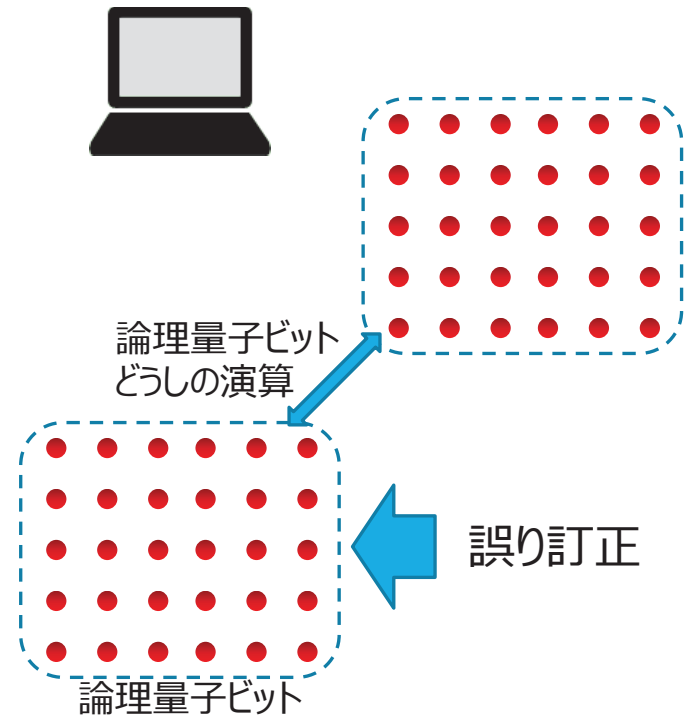
誤り耐性型の符号構成、周辺装置構成
論理量子ビットと論理命令（ゲート）構成

量子ビットの制御

量子ビットの制御、量子ゲートの構成

量子ビットの設計

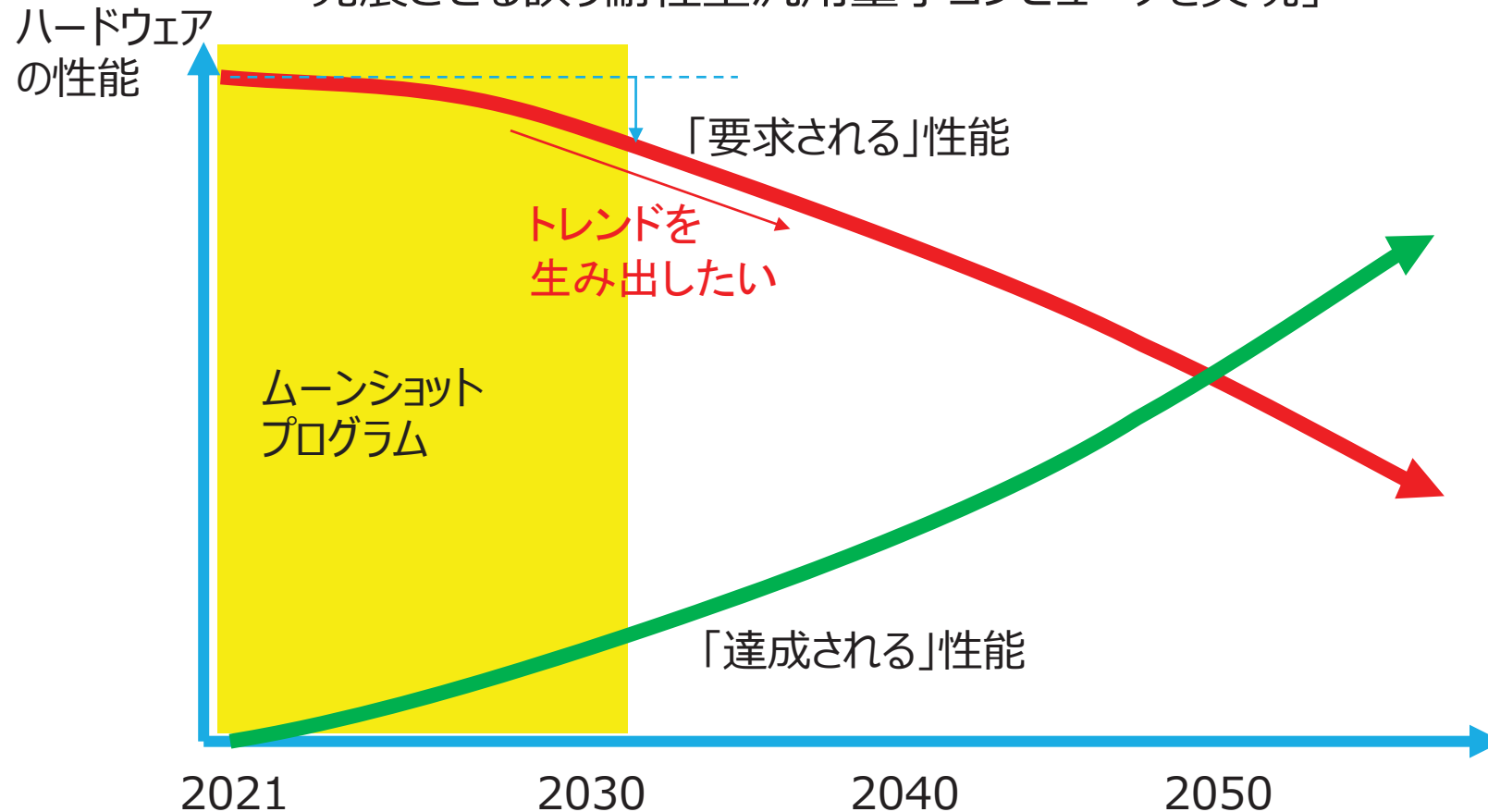
1 量子ビットの設計（寿命、相互作用、集積性）



理論ソフトウェアPJのミッション



「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」

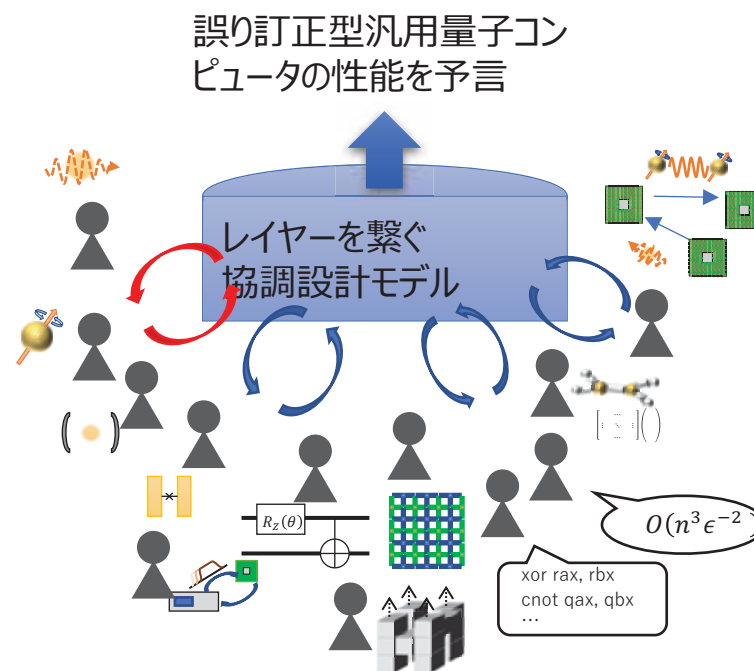


理論ソフトウェアPJのミッション：誤り耐性型量子コンピュータを大規模化するためのハードウェア要求性能を大幅に低減する

クロスレイヤー協調設計モデル

・ハードウェア、ネットワークの実験研究者を含む各レイヤーの研究者は、自身の研究の中で、様々なレベルで**トレードオフ関係**に出くわす。
装置設計におけるパラメータ選択
限られた時間と資源の振り分け方など。

そのレイヤーの中だけでは、何を選択すべきかの**指針が立ちにくい**。その指針を与える役割をするのがクロスレイヤー協調設計モデルであり、ムーンショット目標を目指す参画研究者のための**水先案内人**である。



5. まとめ

- ✓ 目標 6 「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」
 - ✓ 一番早いのは科学への応用、特に量子化学計算
 - ✓ 窒素固定や光合成の解明は地球温暖化やエネルギー問題など社会課題の解決につながる
- ✓ 誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現には、多くのブレークスルーが必要、30年かかると予想
- ✓ 日本はムーンショット目標として、いち早く照準を定め、オールジャパン体制で誤り耐性を目指す
- ✓ アウトリーチ活動を通じて、誤り耐性型汎用量子コンピュータへの挑戦を国民と共有
- ✓ 国民の皆様、産業界、学界の応援をお願いします

6. 加速・強化すべきところ

- ✓1000物理量子ビットまでシームレスにスケールする有望なハードウェア候補の追加
 - ✓冷却原子アレー
 - ✓半導体量子ビット（ボトムアップ型）
- ✓量子誤り訂正のための高速古典情報処理システム
 - ✓量子HWと並行して開発しないと間に合わない
- ✓量子中継・量子交換機（ $N \times N$ 量子接続）
 - ✓分散量子コンピュータのボトルネック解消
 - ✓量子インターネットの要素技術
- ✓量子インターネットのテストベッド構築
 - ✓量子インターネット技術開発の基盤として必要
- ✓産業界との連携拡大
 - ✓Q-STARとの連携推進

ご参考 ムーンショット参画企業 (順不同)

- ✓ 日本電気株式会社 【山本剛PM】
- ✓ 株式会社ニコン (山本剛PJ)
- ✓ アルバック・クライオ株式会社 (同上)
- ✓ 株式会社アルバック (同上)
- ✓ ナノブリッジ・セミコンダクター株式会社 (同上)
- ✓ 株式会社日立製作所 【水野PM】
- ✓ 日本電信電話株式会社 (古澤PJ, 小芦PJ)
- ✓ 浜松ホトニクス株式会社 (山本俊PJ)

以上8社

Quantum Computing in the NISQ era and beyond

John Preskill

arXiv:1801.00862v3 [quant-ph] (31 Jul 2018)

“The truly transformative quantum technologies of the future are probably going to have to be fault tolerant, ...

As the quantum community eagerly seizes the impending opportunity to experiment with NISQ devices, **we must not lose sight of the essential longer-term goal: hastening the onset of the fault-tolerant era.**”

「本当に未来を変える量子技術は誤り耐性のある量子コンピュータである。NISQマシンの可能性を探りながら、**私たちは長期的なゴールである量子誤り耐性のある量子コンピュータの時代の到来を早めることを見失ってはいけない。**」

Q2B 2017でのキーノートスピーチ (5 December 2017)

プレゼン資料

<https://static1.squarespace.com/static/59f110aec027d83296f84ecb/t/5a3a0d72085229908fc8b005/1513753976536/Keynote+-+John+Preskill.pdf>

トーク <https://youtu.be/h4nUyF9cSaw>

Truly transformative quantum computing technology may need to be fault tolerant, and so may still be far off. But we don't know for sure how long it will take. **Progress toward fault-tolerant QC must continue to be a high priority for quantum technologists.**