

JST研究開発戦略センターセミナー

研究開発の俯瞰と潮流 ～科学技術イノベーションの動向と日本の活路～ 「未来を拓く量子情報科学」

2023年8月25日

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



発表内容

1. はじめに

- 量子情報科学の時代
- 政府の量子戦略
- 量子情報科学技術の成熟度

2. さまざまな量子情報科学技術

- 量子計測・量子センシング
- 量子センシング技術と量子生命科学
- 量子暗号鍵配送
- 量子通信の長距離化・ネットワーク化
- NISQ量子コンピュータ

3. 今後の展望

- 量子情報科学がひらく量子ICT社会
- 今後の展望

はじめに

量子情報科学の時代

① “量子力学”時代

② “量子制御”時代

③ “量子情報科学”時代

第2次量子革命
量子力学による
情報の制御

第1次量子革命

量子力学による
物質・エネルギーの制御

1900 1910 1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 2030 2040 2050

不確定性原理

エネルギー準位

バンド構造

トンネル効果

量子干渉

半導体

EPR相関

量子もつれ

計算機

光通信

複製不可能定理

ベル不等式

マクロ量子現象

量子テレポーテーション

猫状態

相補性

ホログラフィー原理

量子相制御

ICT

量子シミュレーション

量子マテリアル

トポロジカル物質

量子計測・センシング

量子暗号・量子通信

量子コンピューター



ノーベル物理学賞 2022

量子もつれ状態の光子を用いた実験によるベルの不等式の破れの実証と、
量子情報科学における先駆的研究

“for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering **quantum information science**”



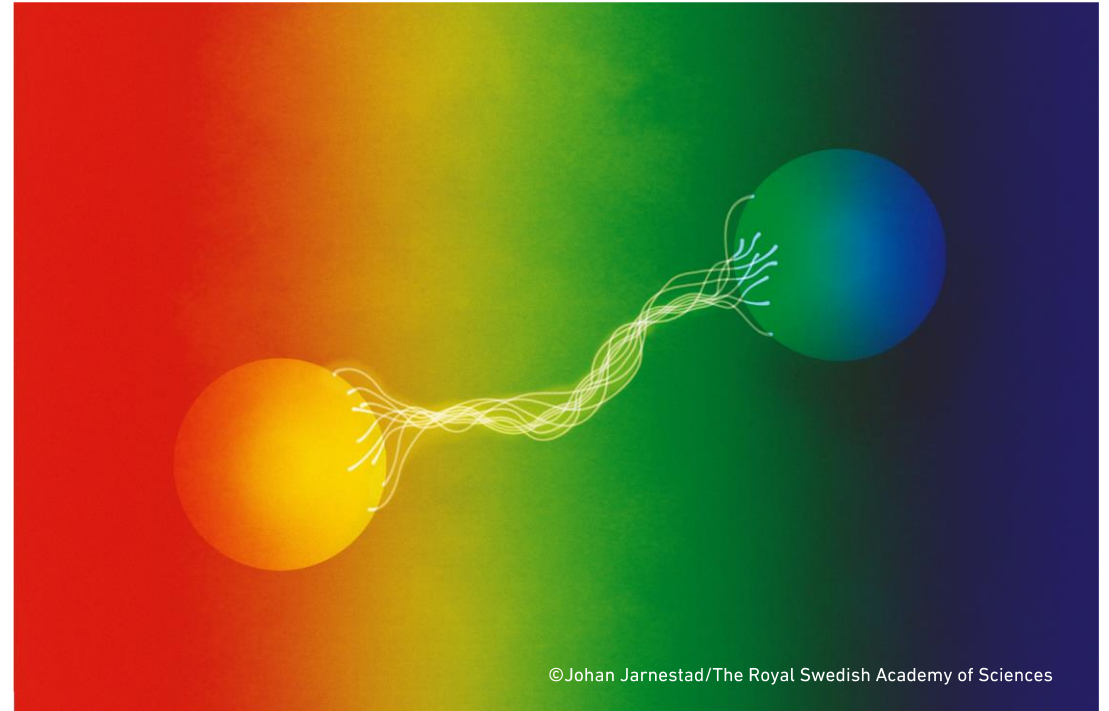
III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
Alain Aspect
Prize share: 1/3



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
John F. Clauser
Prize share: 1/3



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
Anton Zeilinger
Prize share: 1/3



©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

政府の量子戦略

R&Dロードマップ

量子技術イノベーション戦略 (2020年1月)



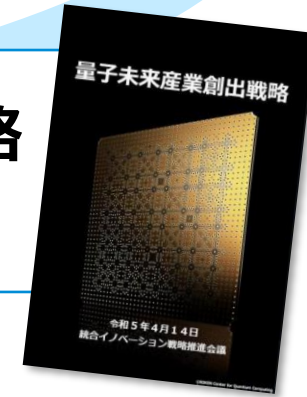
ビジョン

量子未来社会ビジョン (2022年4月)



アクションプラン

量子未来産業創出戦略 (2023年4月)



2030目標

1000万人

国内のQTユーザー



50兆円規模

QTによる生産額



ユニコーンベンチャーで

未来市場を切り拓く



目指すべき量子産業の方向性 (X to Quantum)

多様な産業の参画・協働・共創



量子技術の実用化・産業化

スタートアップ／ベンチャー
・新事業の創出・成長



産学官連携による産業化
グローバル連携・展開

多くの産業が量子技術に
アクセスし、利活用

2030年目標

- ・国内の量子技術の利用者を**1,000万人**に
- ・量子技術による生産額を**50兆円規模**に
- ・未来市場を切り拓く量子**ユニコーンベンチャー**企業を創出

量子技術の実用化・産業化の3つの視点

Collaboration

多様な産業の量子分野への参画・協働・共創、グローバル連携、産学官連携

Accessibility

産業界に開かれた量子技術の利用環境の実現

Incubation

積極的なスタートアップ／ベンチャー・新事業の創出支援

量子情報科学技術の成熟度 (TRL)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		基礎理論の着想	技術コンセプト策定	PoC実験	実験室での技術検証	関連環境での技術検証	関連環境でのデモ	実環境でのプロトタイプ	システム運用テスト・認証	最終段階、実運用
量子センシング	光格子時計									
	量子ジャイロ									
	ダイヤモンドNVセンター									
	超偏極NMR									
	量子もつれ分光									
量子通信	QKDネットワーク									
	QKD (衛星利用)									
	量子中継									
	量子インターネット (耐量子計算機暗号)									
	NISQ									
量子コンピュータ										
	誤り耐性 (FTQC)									

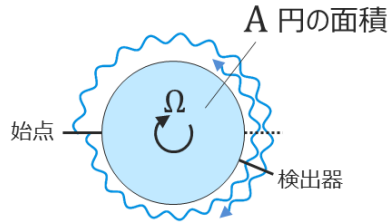
さまざまな量子情報科学技術

量子計測・量子センシング（冷却原子）

原子波干渉計

冷却原子のド・ブロイ波の干渉を使い超高性能のジャイロスコープを実現

光波ではなく原子のド・ブロイ波
を利用する



干渉型ジャイロにおいて
検出される位相差 $\Delta\Phi = \frac{4\pi\Omega A}{\lambda v}$

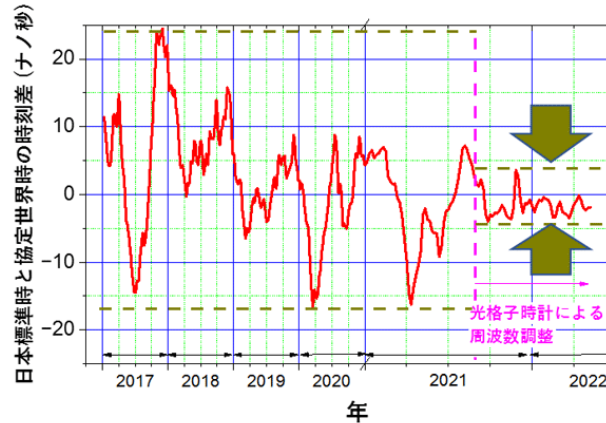
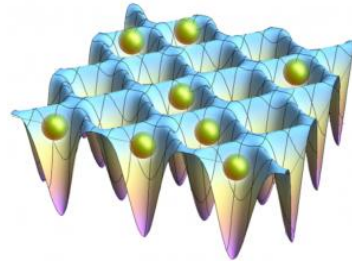
波の波長 λ 波の速度 v

原子波は光波よりも波長・速度
が小さく有利

JST未来社会創造事業, 大規模プロジェクト型「冷却原子・イオンを用いた高性能ジャイロスコープの開発」
<http://www.mirai.qnav.iir.titech.ac.jp>

光格子時計

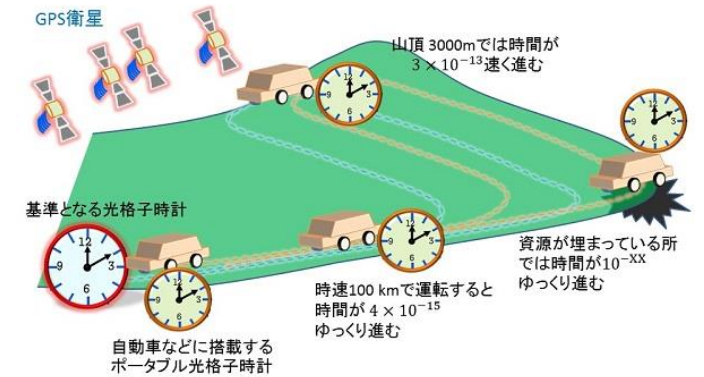
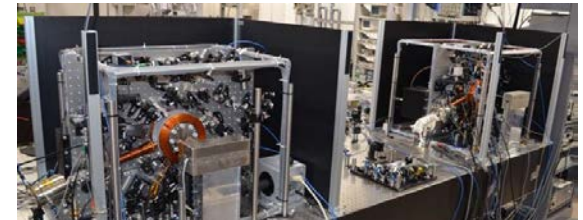
18桁の精度の時計 (cf. 現在の秒の定義: 16桁@Cs原子時計)



情報通信研究機構, 「世界初、国家標準時の維持に光格子時計を利用～NICTが持つ時計のみで協定世界時との同期が可能に～」 (2022年6月9日)
<https://www.nict.go.jp/press/2022/06/09-1.html>

重力ポテンシャル計

相対論効果による「時計のズレ」を光格子時計の精度で測定

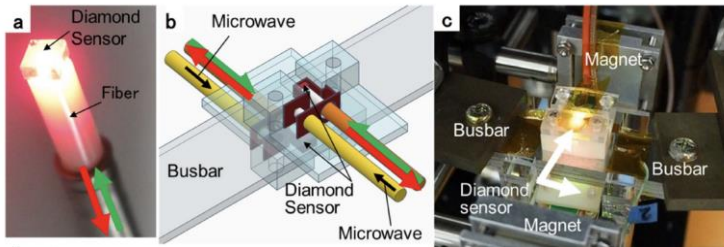
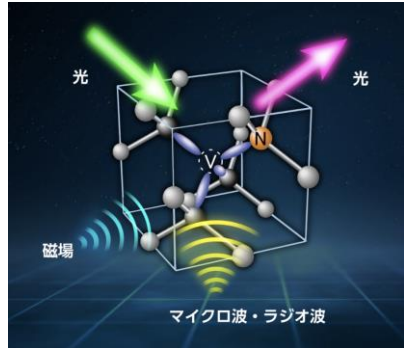


東京大学, 時計の概念を巻き直す「光格子時計」
https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/features/f_00063.html

量子計測・量子センシング

ダイヤモンドNVセンター

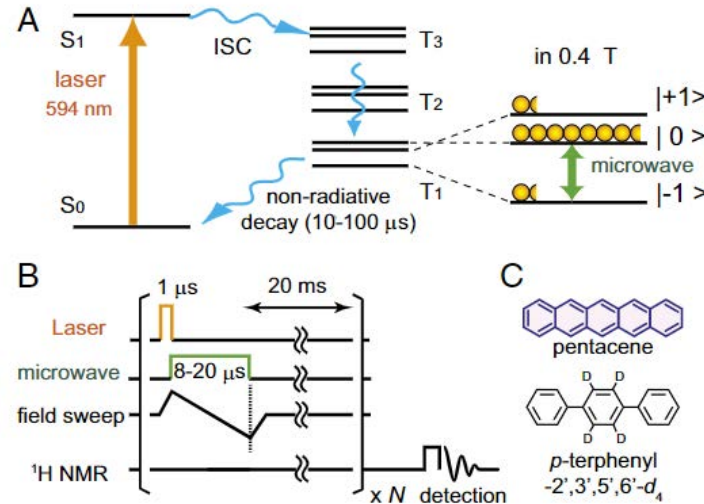
欠陥の電子スピン状態を光学読み出し (ODMR)。磁場や温度などを測定。



Y. Hatano *et al.*, "High-precision robust monitoring of charge/discharge current over a wide dynamic range for electric vehicle batteries using diamond quantum sensors", *Sci. Rep.* 12, 13991 (2022).

超偏極NMR

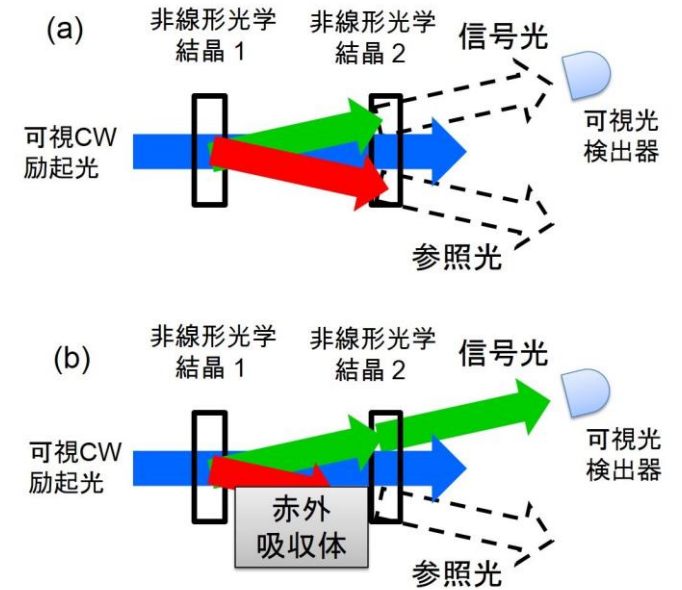
光励起三重項状態のスピンの偏極を核スピン偏極に移しNMRを高感度化 (トリプレットDNP)



K. Tateishi *et al.*, Room temperature hyperpolarization of nuclear spins in bulk, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111 (21), 7527-7530 (2014).

赤外量子吸収分光測定

量子もつれ光の干渉を用い、可視光の検出のみで赤外分光を実現。

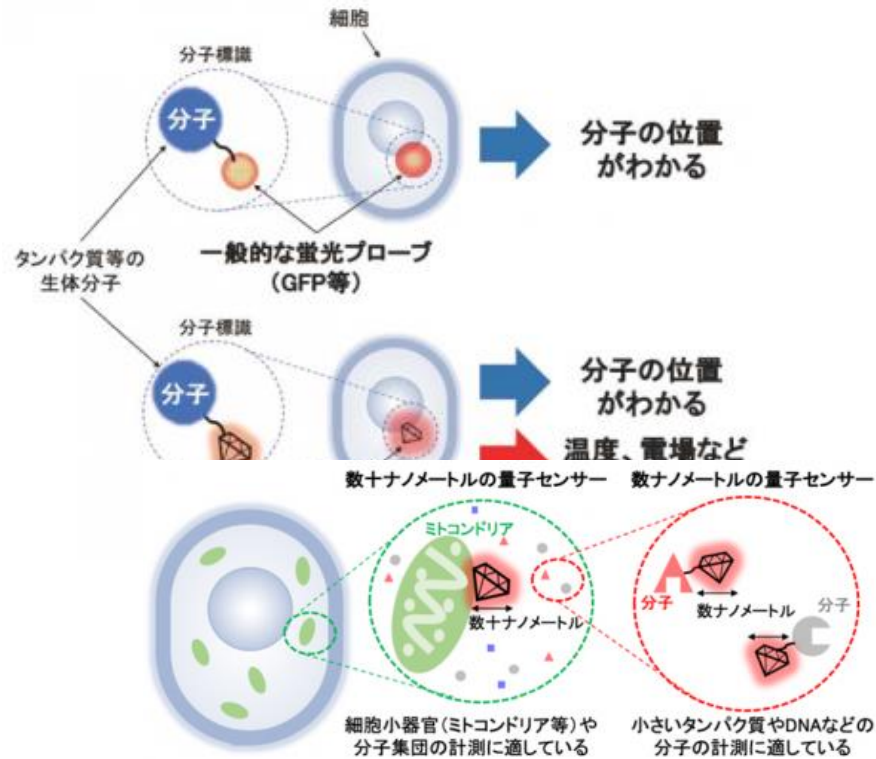


Y. Mukai *et al.*, Quantum Fourier-Transform Infrared Spectroscopy for Complex Transmittance Measurements, *Phys. Rev. Applied* 15, 034019 (2021).

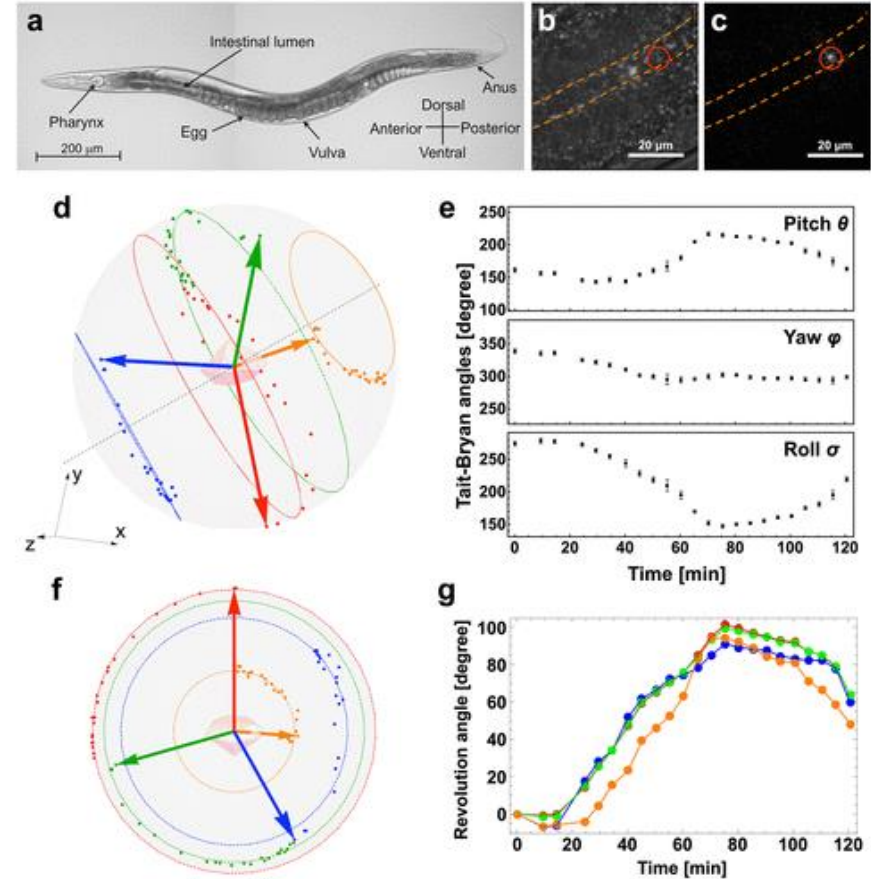
量子センシング技術と量子生命科学

ナノダイヤモンド量子センサーの生命科学・医学分野への応用

線虫の腸管内にナノダイヤモンドを配置し、回転運動を3次元観察。



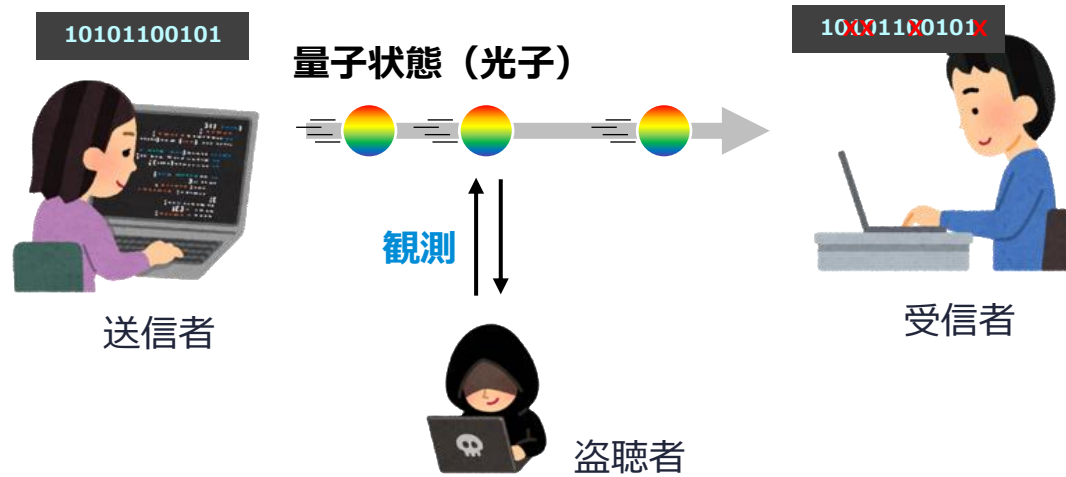
量子科学技術研究開発機構 (QST) 「世界最小のダイヤモンド量子センサーの作成に成功－細胞や分子のわずかな変化をとらえる超高感度センサーとして期待－」 (2019年5月31日) <https://www.qst.go.jp/site/press/26372.html>



R. Igarashi *et al.*, Tracking the 3D Rotational Dynamics in Nanoscopic Biological Systems, *J. Am. Chem. Soc.*, 142, 16, 7542–7554 (2020)

量子暗号鍵配送 (QKD)

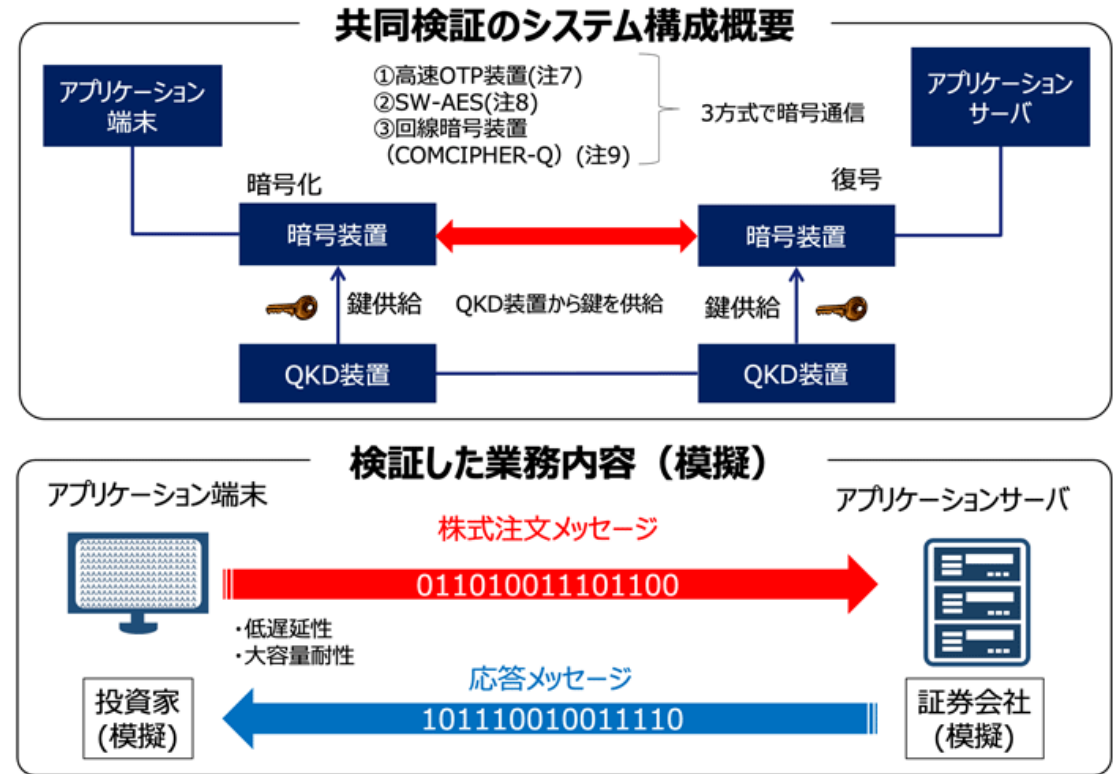
QKDの原理



物理法則が通信システムの安全性を担保。

→安全に乱数列 (暗号鍵) を共有

応用事例 : 金融取引データ



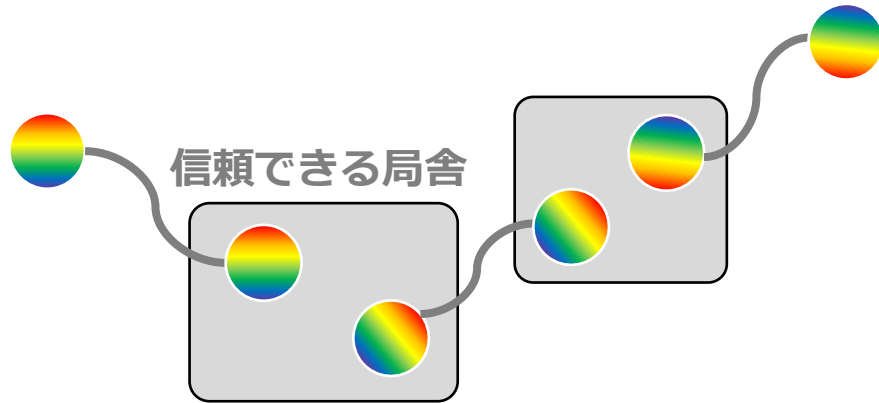
野村HD、野村証券、NICT、東芝、NEC「大容量金融取引データの量子暗号による高秘匿通信・低遅延伝送の検証実験に成功」(2022.1.14)

<https://www.nict.go.jp/press/2022/01/14-1.html>

量子通信の長距離化・ネットワーク化

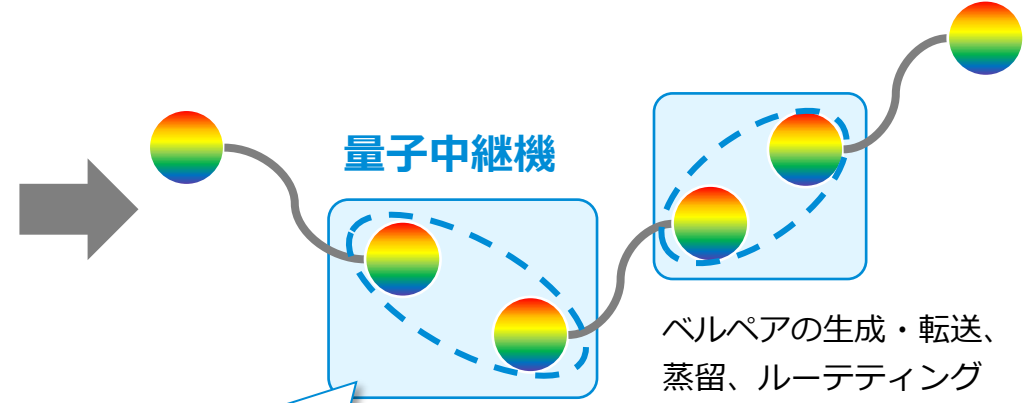
量子暗号鍵配送 (QKD)

「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



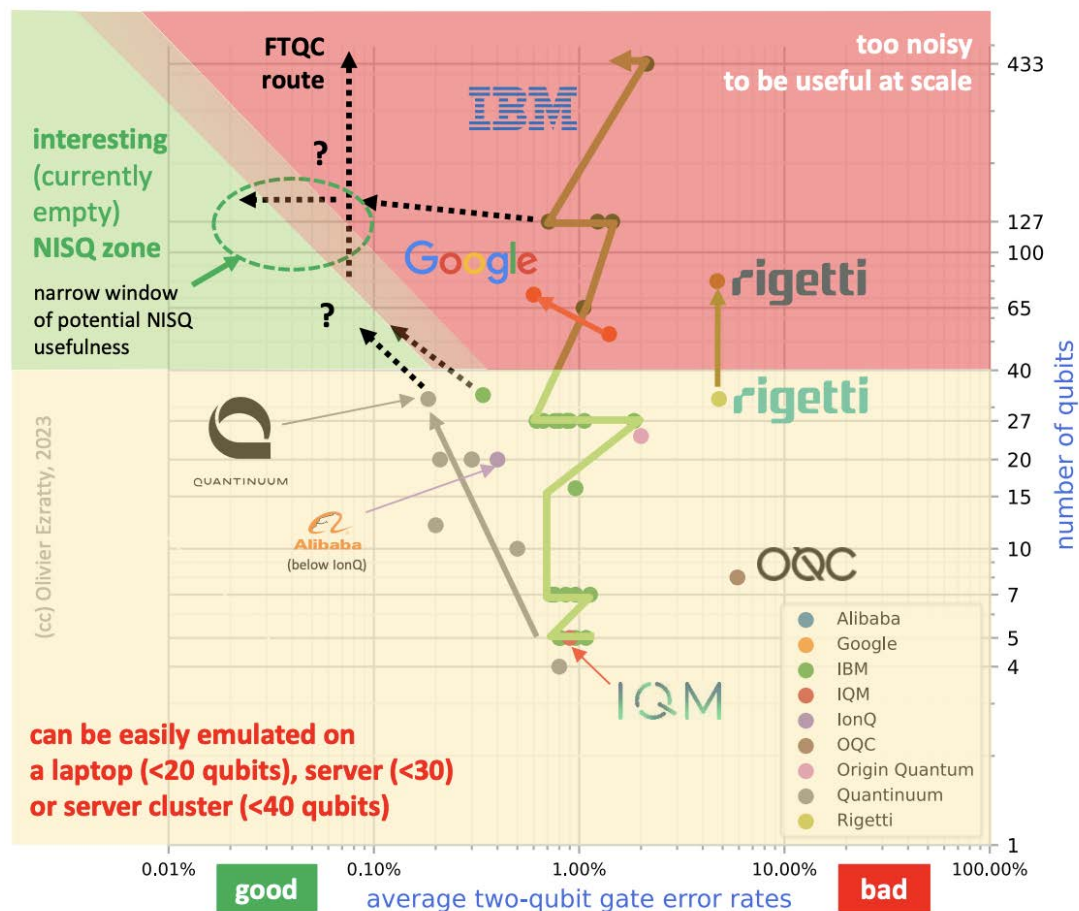
量子中継機 (Quantum Repeater)

光ファイバーネットで用いられる中継機 (増幅器) は量子状態を壊してしまうので量子通信には使えない。量子には量子用の中継器が必要。

- エンタングルメントペア (ベルペア) の生成・転送
- 蒸留によるフィデリティの確保
- ルーティングなどのネットワーク管理

NISQ量子コンピュータ

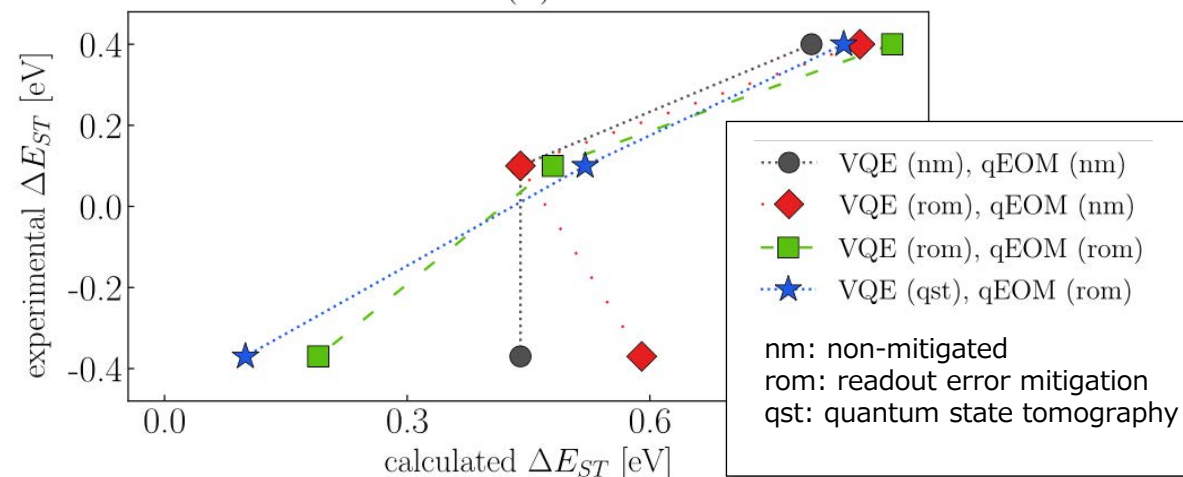
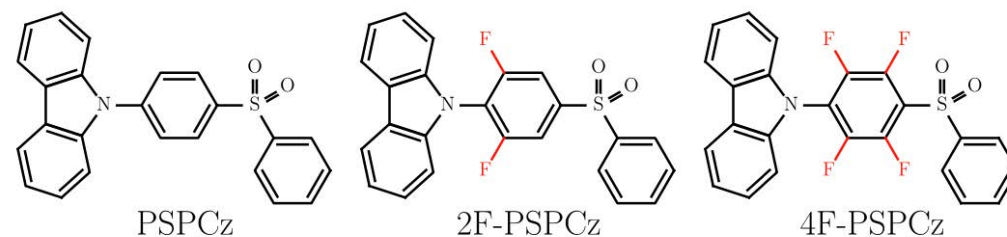
ハードウェアの進展



O. Ezratty, Where are we heading with NISQ?, arXiv:2305.09518 (2023).

応用事例：量子化学計算

有機EL発光材料TADFの励起状態エネルギー計算。
エラー低減の新技术により計算精度を大幅に向上。

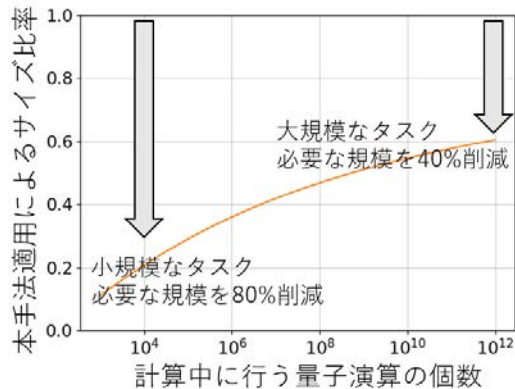
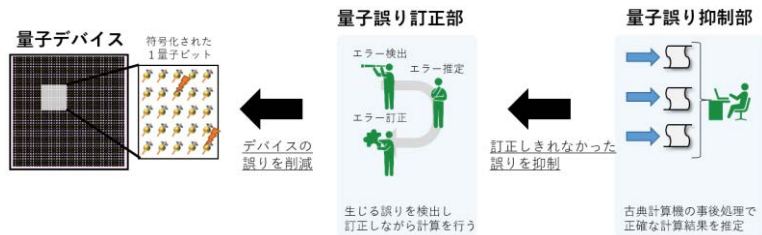


Q. Gao, et al. Applications of quantum computing for investigations of electronic transitions in phenylsulfonyl-carbazole TADF emitters. *npj Computational Materials* 7, 70 (2021).

誤り抑制・誤り耐性にむけたとりくみ

抑制・耐性ハイブリッド方式

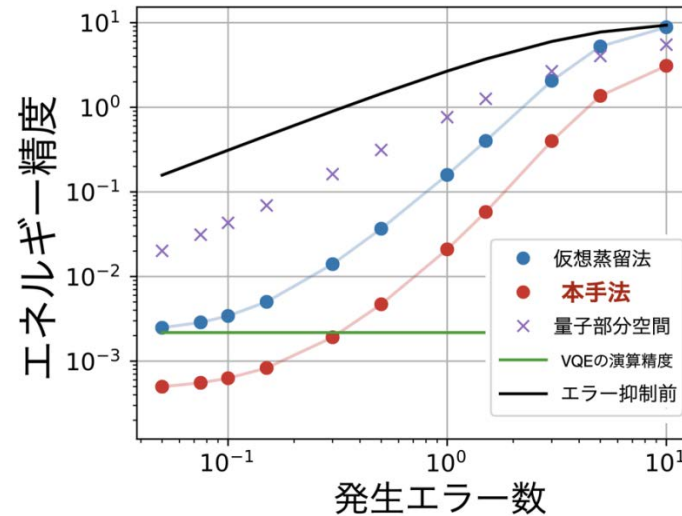
量子誤り訂正・抑制を組み合わせ、量子コンピュータの規模を従来に比べ最大80%削減



JST, NTT「実用化に必要な誤り耐性量子コンピュータの規模を飛躍的に小さくする技術を開発」(2022年3月18日)
<https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/03/18/220318a.html>

HW効率の良いエラー軽減法

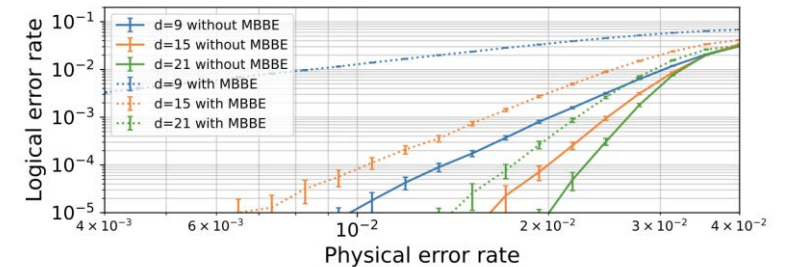
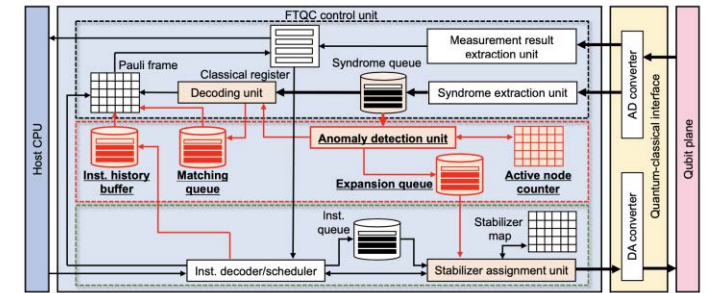
ノイズの影響を受けた量子状態を複数個並列に準備し干渉させハードウェアにおけるノイズの影響とアルゴリズム自体に内在する誤差のいずれも抑制



AIST, 大阪大学, JST, 東京大学「量子計算機のハードウェアとアルゴリズムのエラーを抑制できる手法を開発」(2022年7月6日).
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220706/index.html>

新アーキテクチャ

動的な誤り訂正を行い、誤り耐性量子コンピュータの拡大において障害となるバーストエラーの影響を大幅に削減



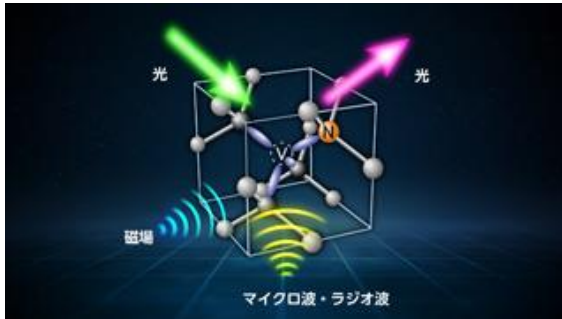
東京大学, JST, NTT「バーストエラーに耐性のある量子コンピュータのアーキテクチャーを世界で初めて提案」(2022年9月30日).
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220930-2/index.html>

今後の展望

量子情報科学がひらく量子ICT社会

量子計測・センシング

量子干渉・量子もつれを使って
センサーを高精度化・高感度化



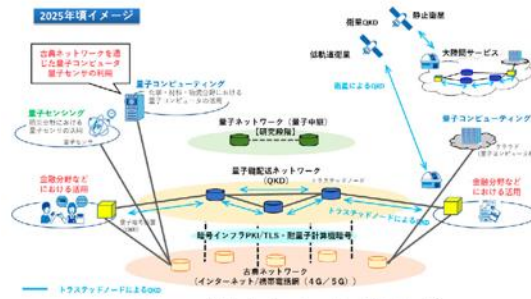
<https://www.qms.e.titech.ac.jp/>



<https://www.qst.go.jp/site/q-leap/>

量子暗号・量子通信

不確定性原理・量子もつれを使って通信・ネットワークの安全性を向上



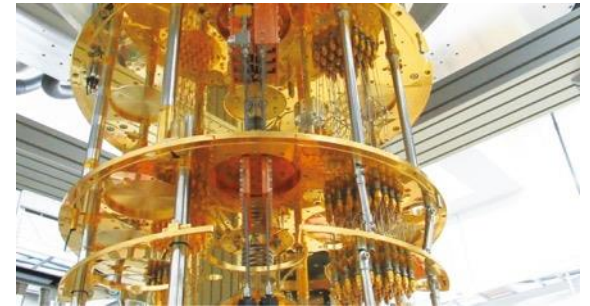
<https://www2.nict.go.jp/idi/>



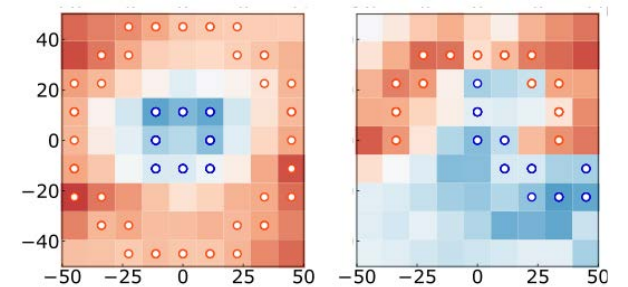
<https://quantum-internet.team/>

量子コンピューティング

量子干渉・量子もつれを使って
コンピューターを高速化・省エネ化

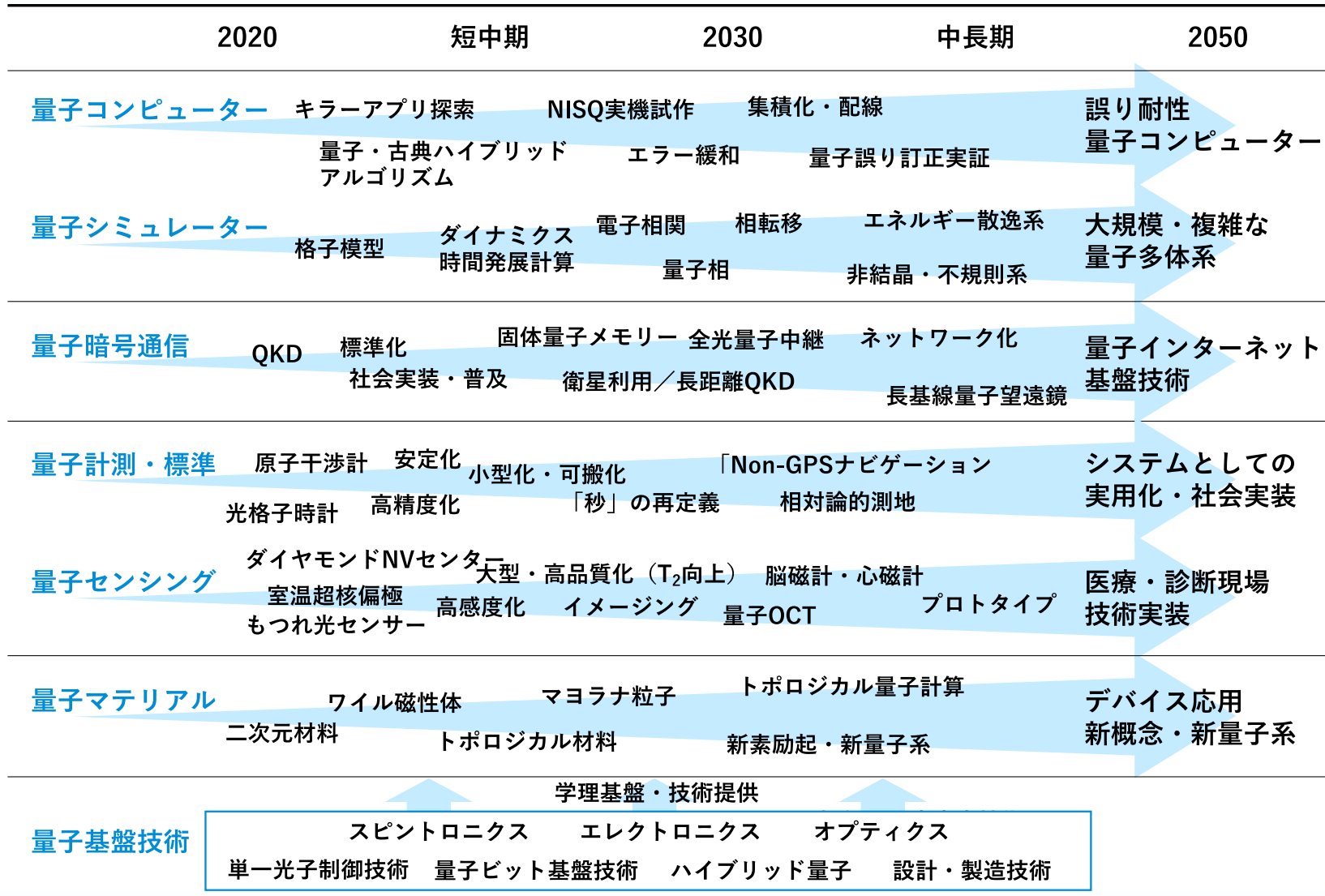


<https://rqc.riken.jp/>



https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2021/20210608_1

今後の展望



研究開発戦略センター, 戦略プロポーザル
「量子2.0 ~量子科学技術が切り拓く新たな地平~」 CRDS-FY2019-SP-03
(2020).

ご清聴ありがとうございました

最新の俯瞰報告書（2023年版）をご覧になりたい方はこちら



- 環境・エネルギー分野
- システム・情報科学技術分野
- ナノテクノロジー・材料分野
- ライフサイエンス・臨床医学分野
- 科学技術・イノベーション政策の国際動向
- 日本の科学技術・イノベーション政策の動向

<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2022-TOP.html>



日刊工業新聞連載 — 科学技術の潮流 —



2019年4月にスタートした
CRDSの日刊工業新聞連載
毎週金曜日に紙面に掲載、
1週間後にCRDS公式HPにて公開



<https://www.jst.go.jp/crds/column/choryu/index.html>



公式SNSで最新情報発信中



@CRDS_Japan



https://twitter.com/CRDS_Japan



@CRDSjapan



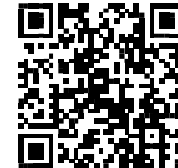
<https://www.facebook.com/CRDSjapan>

月刊メルマガ配信中

毎月15日（土日祝の場合は翌営業日）配信予定



登録はこちら

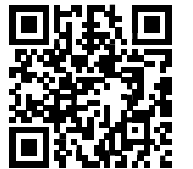


<https://www.jst.go.jp/melmaga.html#M01-06>

デイリーウォッチャー （海外記事検索）



科学技術に関連する、諸外国の
主要行政機関・研究機関の発表を
要約記事として日本語で提供



<https://crds.jst.go.jp/dw/>

国内外の研究開発動向やイノベーションについてご関心のある方は
お気軽にお問い合わせください



crds@jst.go.jp

■ 作成担当 ■

嶋田 義皓 フェロー（システム・情報科学技術ユニット）

TP20230825-6

その他報告書

**研究開発の俯瞰と潮流 ～科学技術イノベーションの動向と日本の活路～
「未来を拓く量子情報科学」**

令和5年8月 August 2023

ISBN 978-4-88890-876-4

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本資料は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本資料の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

なお、本報告書の参考文献としてインターネット上の情報が掲載されている場合には、本報告書の発行日の1ヶ月前の日付で入手しているものです。

上記日付以降の情報の更新は行わないものとします。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

Please note that all web references in this report were last checked one month prior to publication.

CRDS is not responsible for any changes in content after this date.