

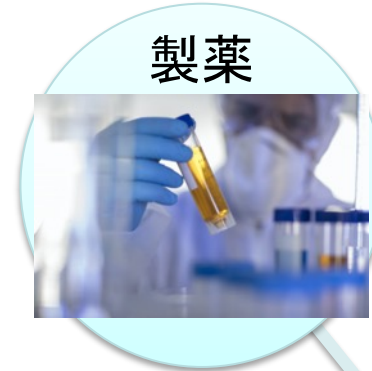
# 半導体量子コンピュータ読み出し 自動制御回路

国立研究開発法人 理化学研究所  
創発物性科学研究センター  
量子機能システム研究グループ  
上級研究員 中島 峻

# 背景：量子コンピュータ



Courtesy of International Business Machines (IBM) Corporation



## 次世代コンピューティングの夜明け

# 量子コンピュータの物理的実装

## イオントラップ

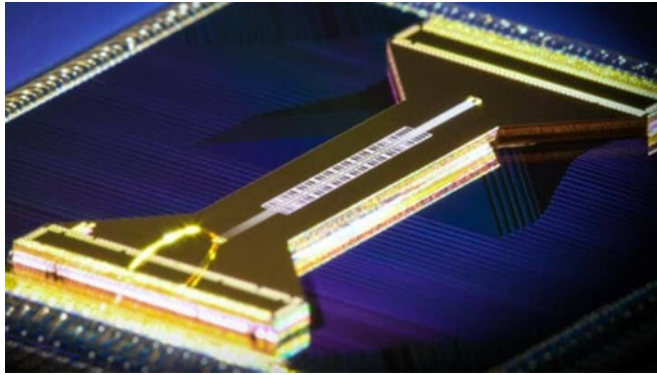


Image: Honeywell

IonQ, Honeywell, ...

## 超伝導

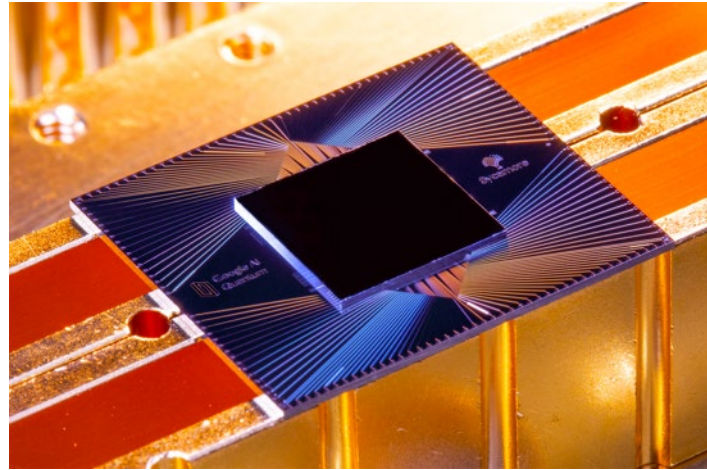


Image: Google AI Blog

Google, IBM, ...

## 半導体

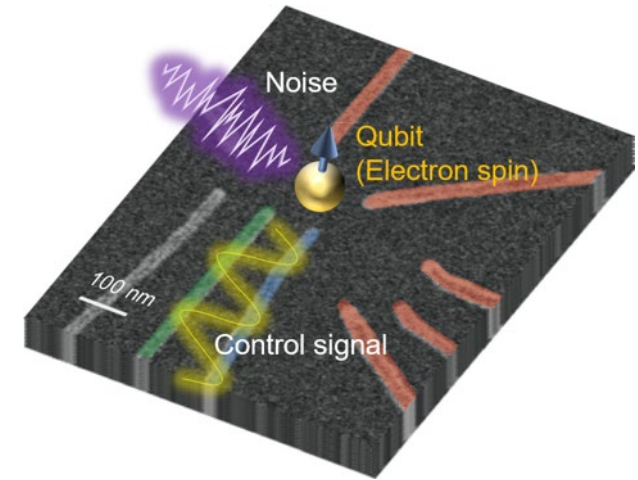
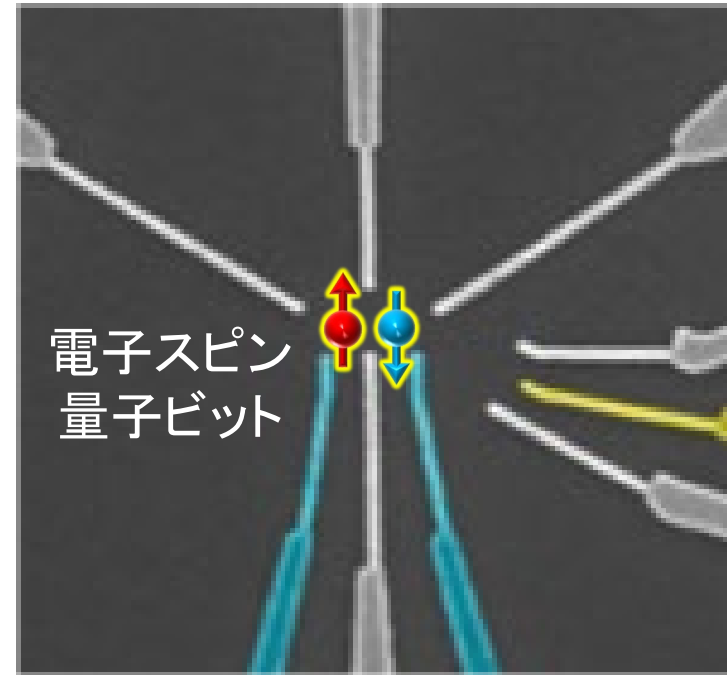
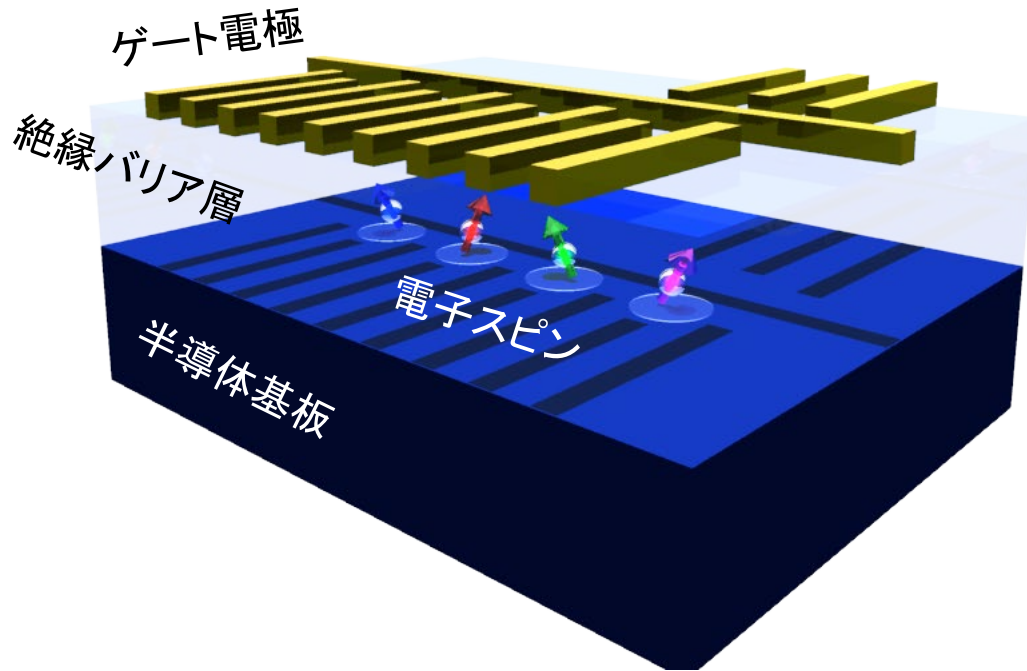


Image: RIKEN

Intel, IBM, IMEC...

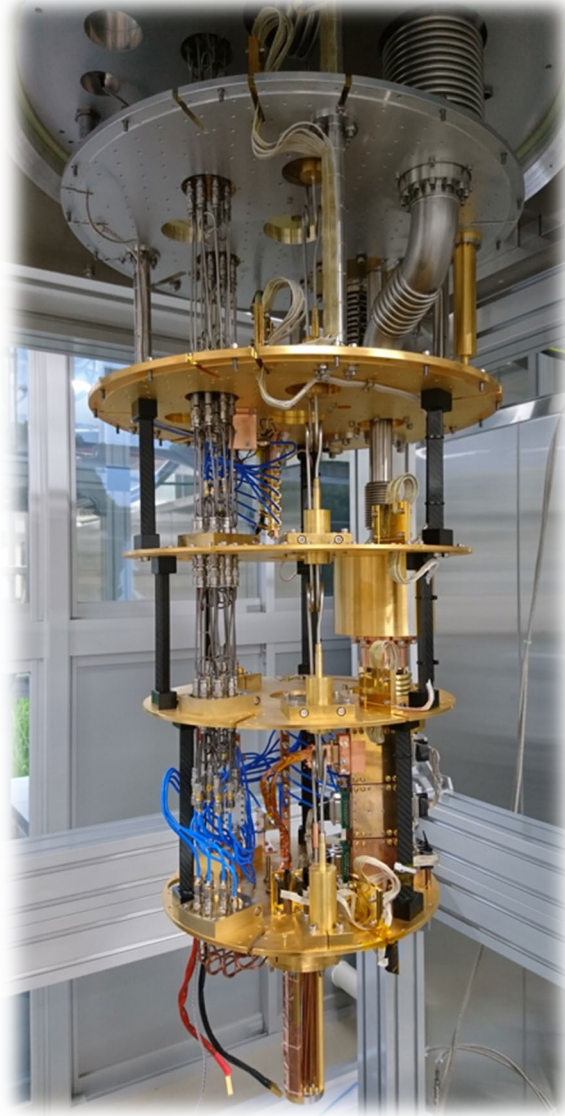
# 「半導体」量子コンピュータ



「単一電子」によるトランジスタ構造

- ✓ 集積回路技術の応用による大規模化が期待される
- ✓ 長い量子メモリー時間
- 🧠 大規模量子ビットの制御技術は発展途上

# 実用化に必要な技術

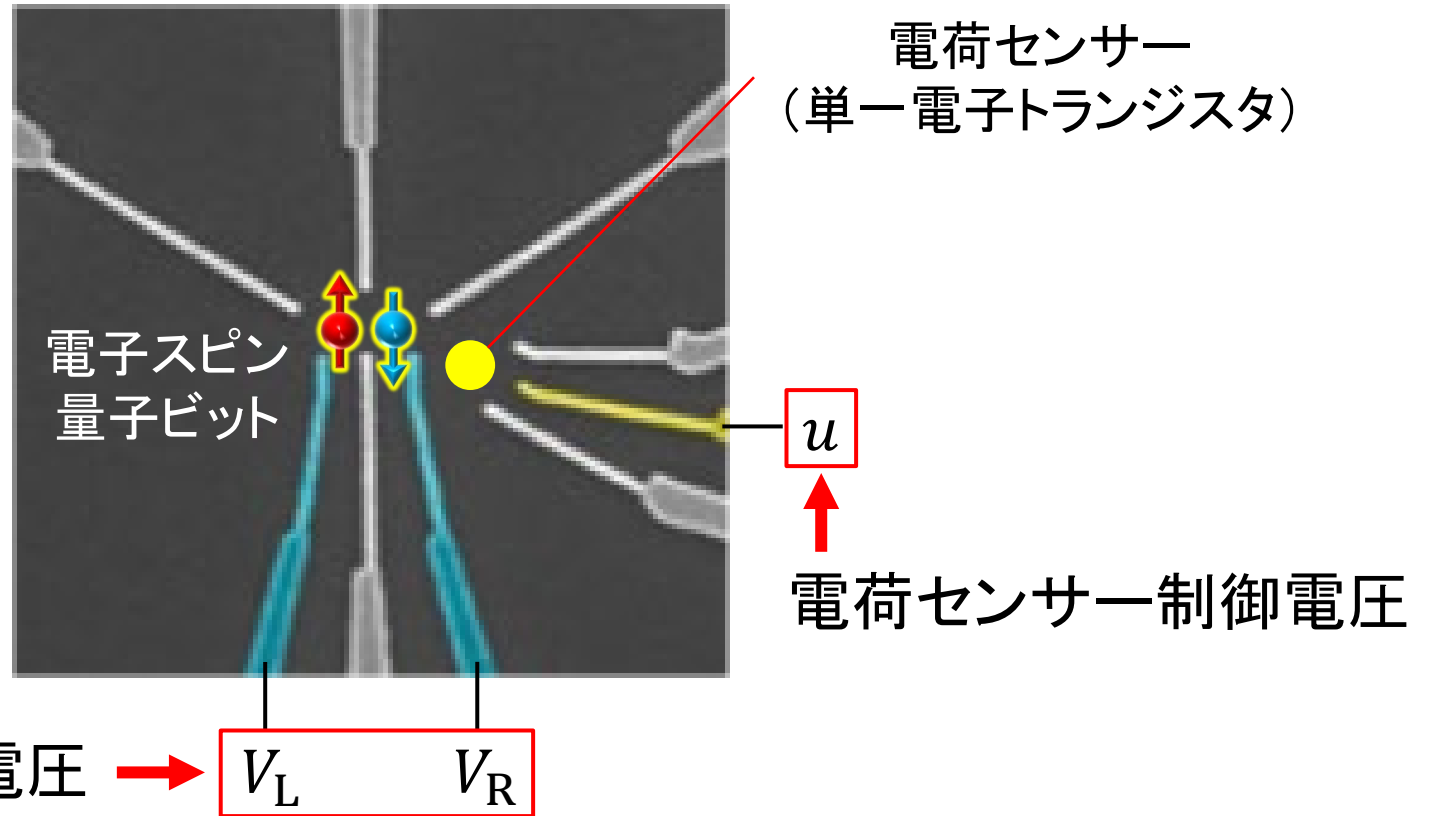


研究中の半導体量子コンピュータシステム @ 理研

- ✓ 極低温 ( $< 50\text{mK}$ )
- ✓ マイクロ波信号制御 ( $10\text{--}20\text{GHz}$ )
- ✓ 超微小信号読み出し ( $< 5 \times 10^{-3} e \text{ Hz}^{-1/2}$ )
- ✓ 量子レベルでの雑音フィルター
- ✓ 集積化技術 ( $> 10^6$ 量子ビット)

...

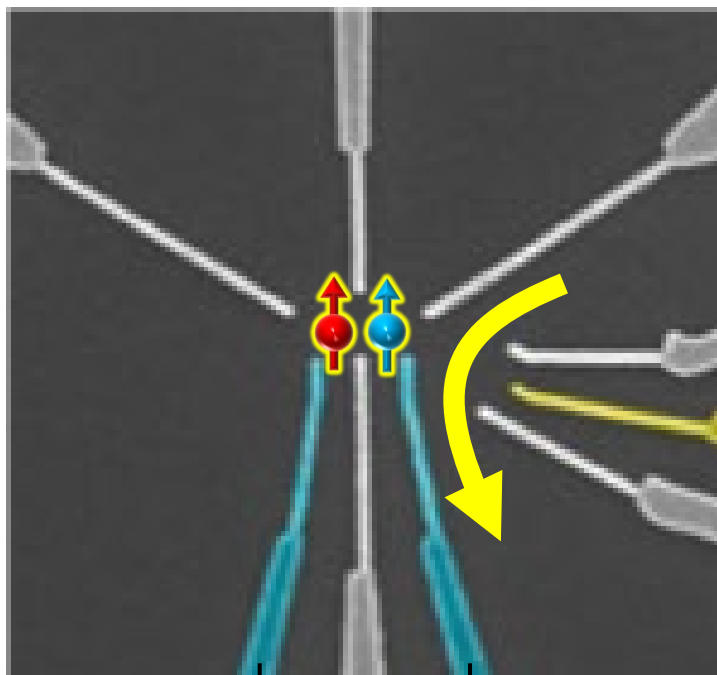
# 半導体量子ビット構造



スピンの向き → 電荷配置に変換 → 電荷センサーで読み出し

# 半導体量子ビット読み出し手法

スピンの**平行**

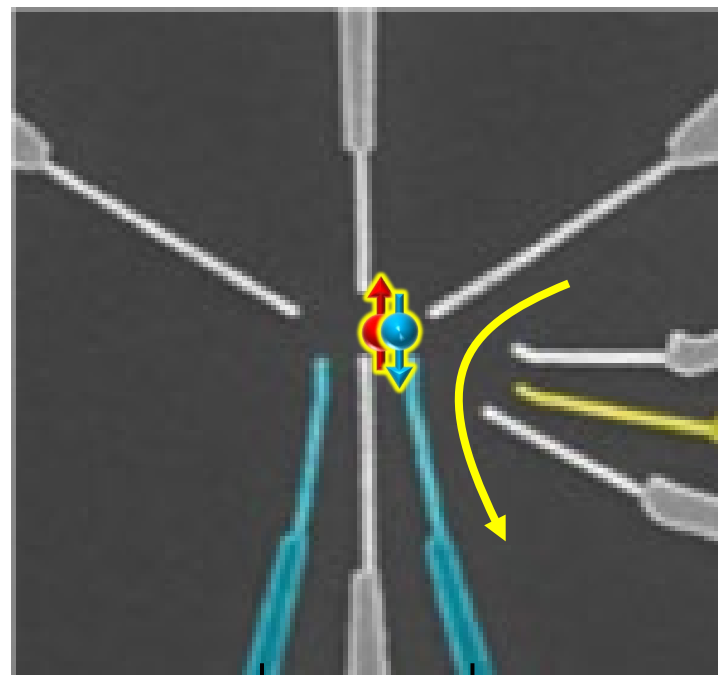


$V_L$   $V_R$

電圧印加による電子移動：**不可**  
(パウリ排他率)

センサーコンダクタンス：**大**

スピンの**反平行**



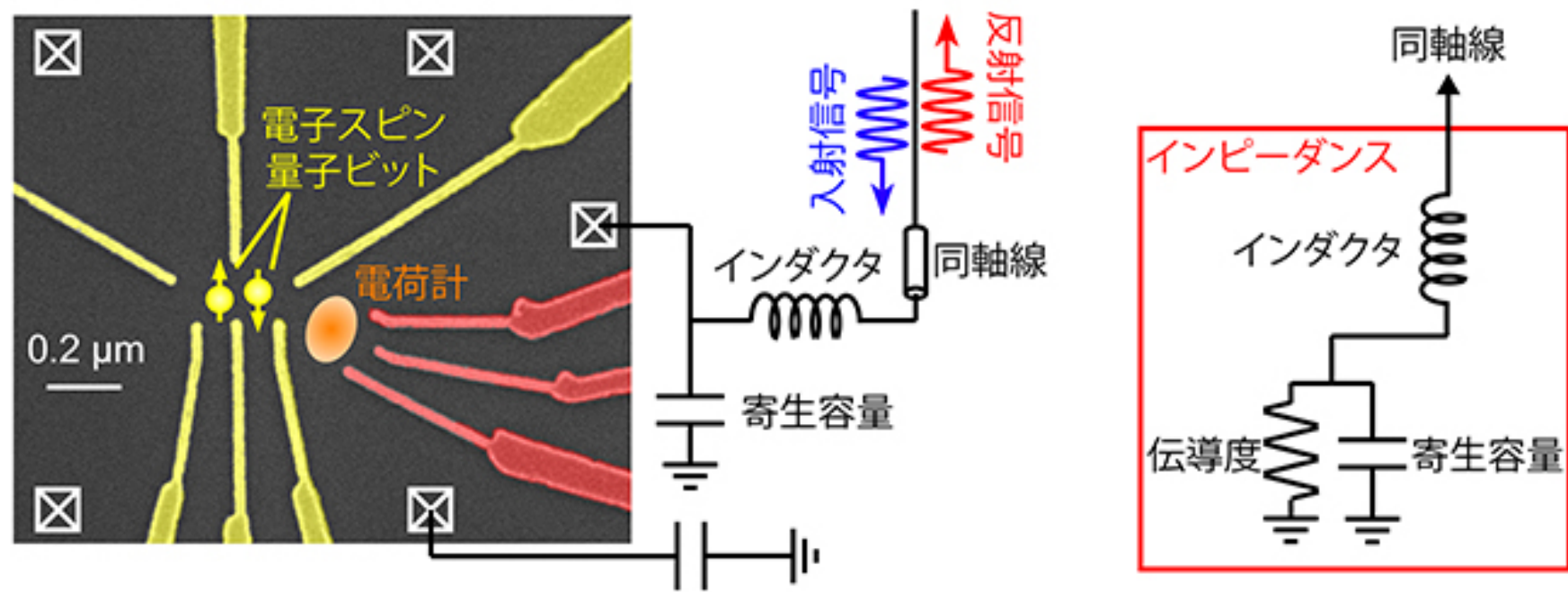
$V_L$   $V_R$

電圧印加による電子移動：**可**

センサーコンダクタンス：**小**

# 従来の半導体量子ビット読み出し手法

$f = 100 - 300$  MHz の共振回路とインピーダンスマッチングを利用



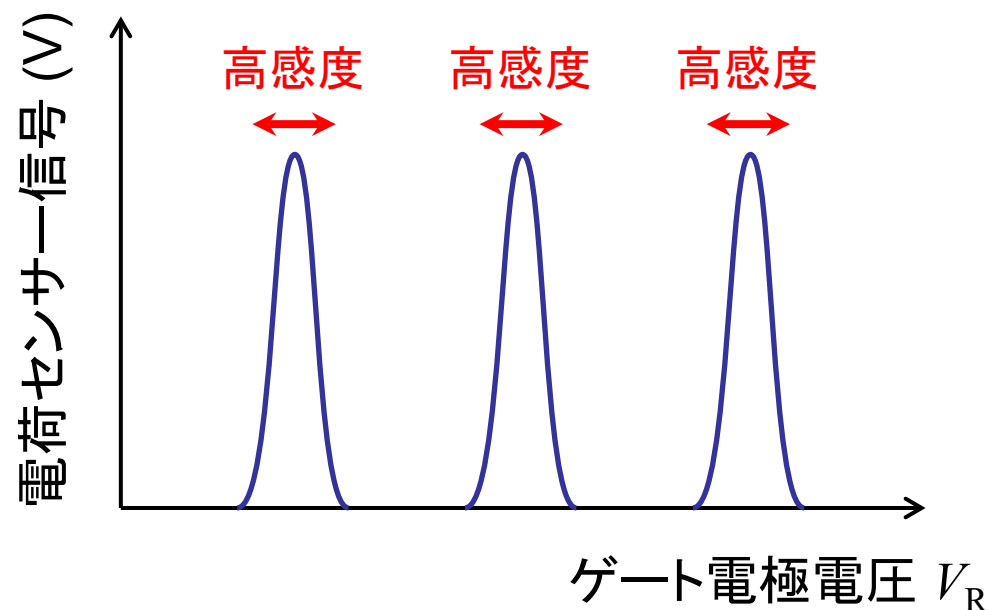
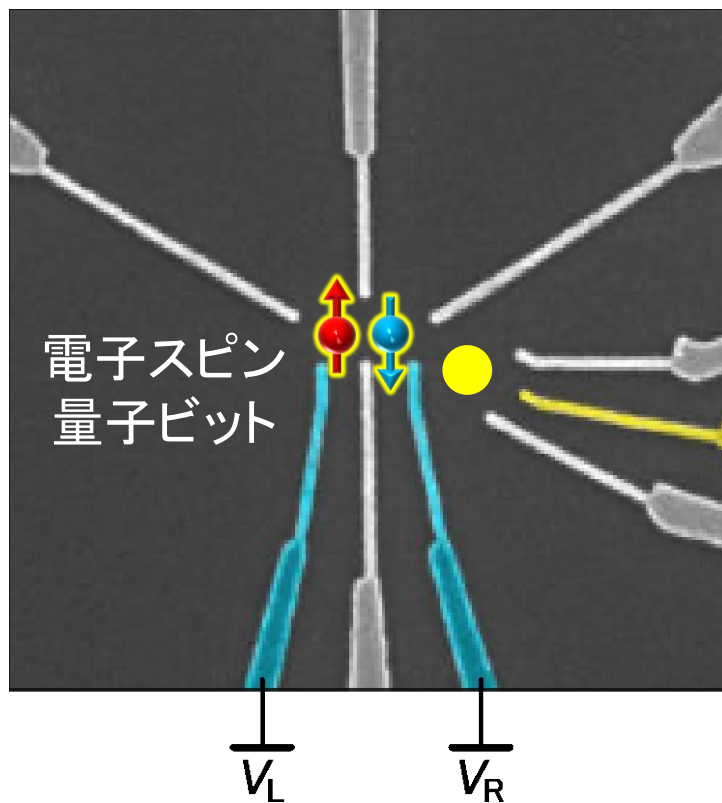
➡ 極低温・微小信号での高速電荷測定が可能に！

A. Noiri *et al.*, Nano Letters **20**, 947 (2020)

プレスリリース [https://www.riken.jp/press/2020/20200214\\_1/index.html](https://www.riken.jp/press/2020/20200214_1/index.html)



# 従来技術の問題点

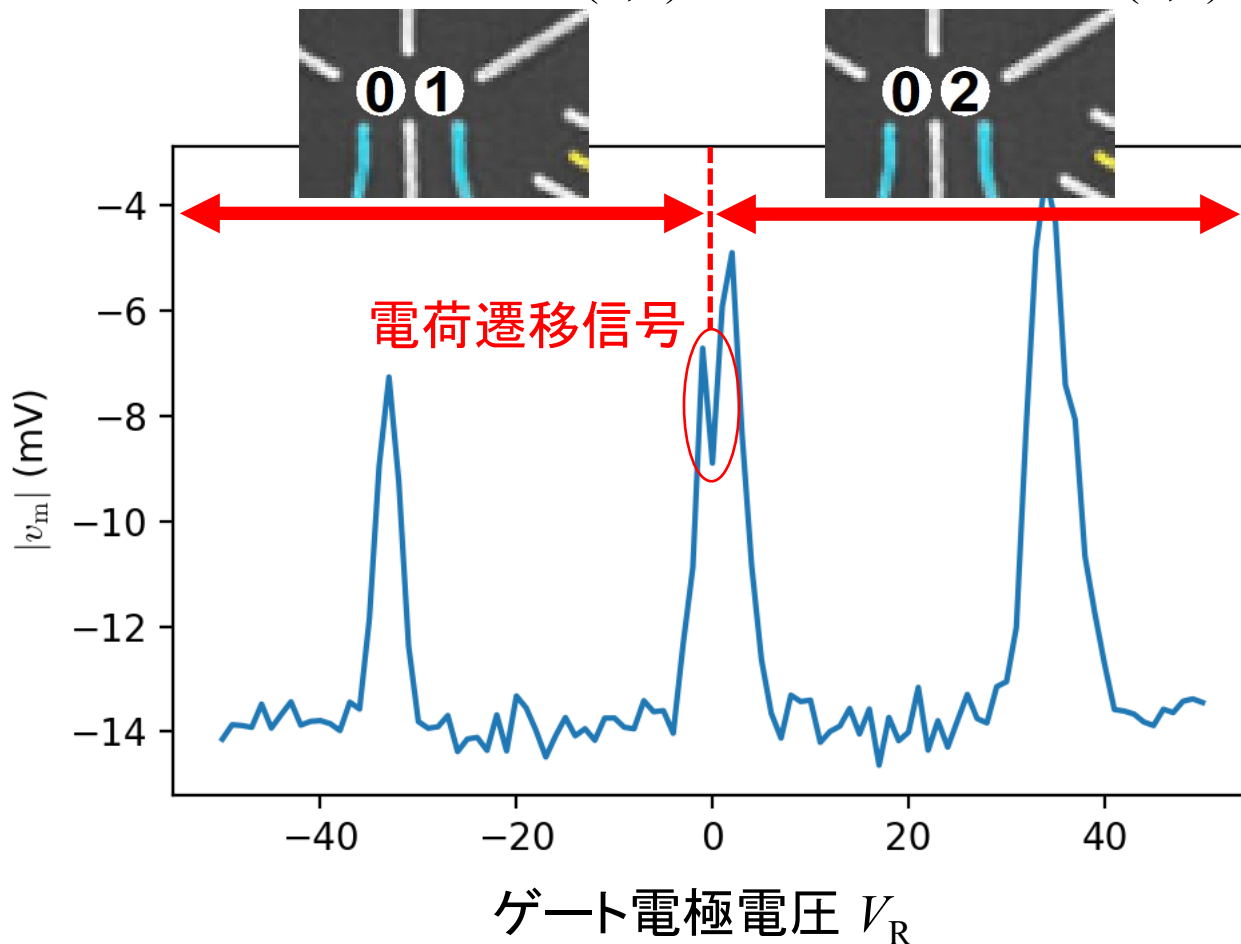


電荷センサーは高感度だが、ダイナミックレンジが極めて狭い

➡ 電圧クロストーク、雑音の影響が大きい 😞

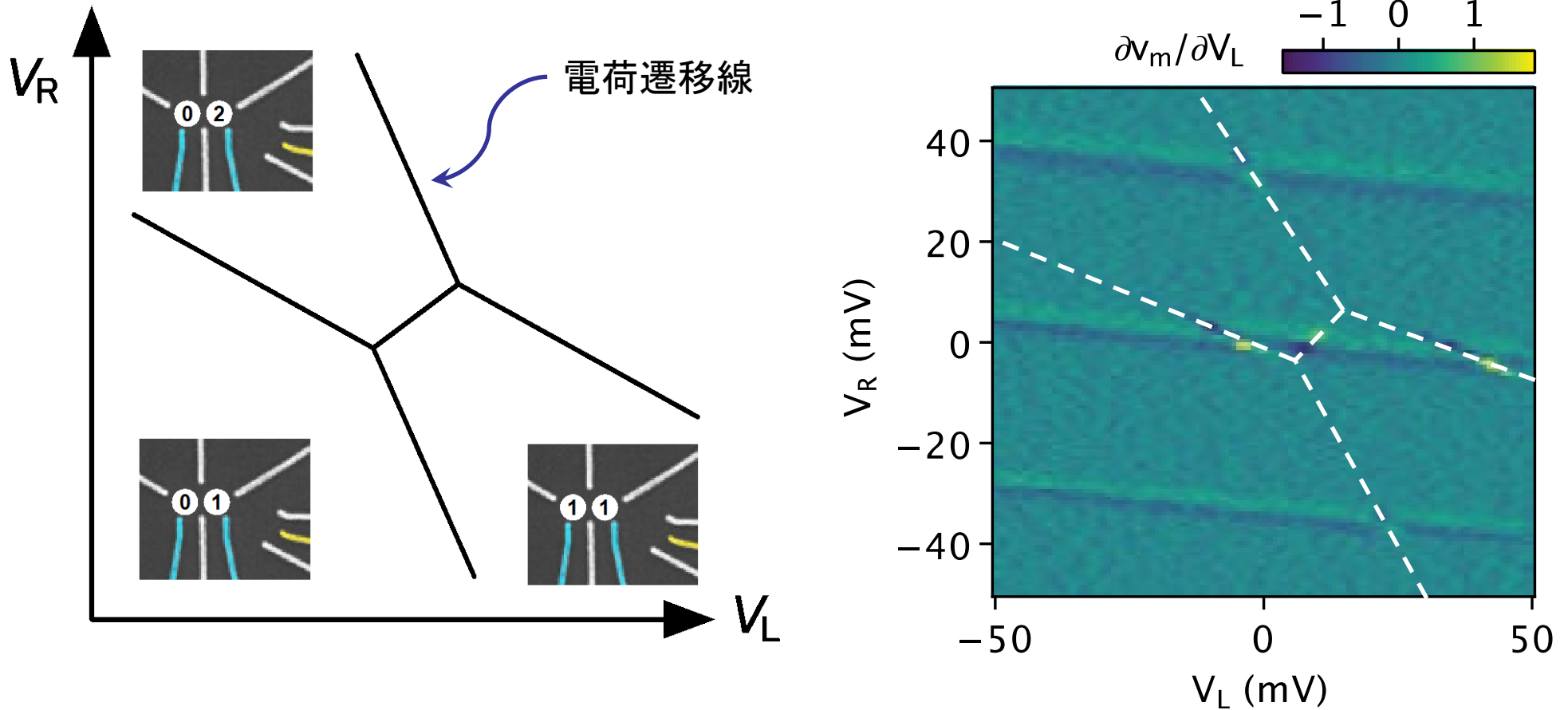
# 従来技術の問題点

左右の電子数が (0,1)    左右の電子数が (0,2)



電荷遷移がセンサー信号シフトに現れるのは一部の領域だけ

# 従来技術の課題

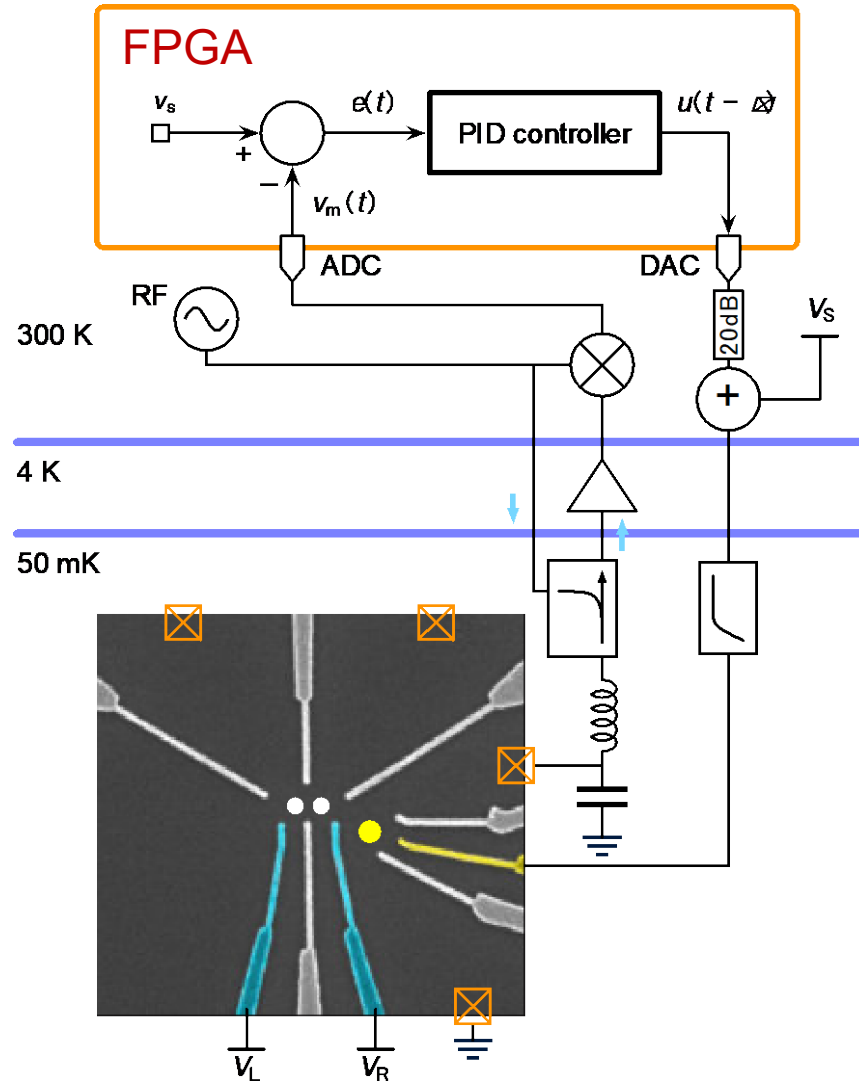


測定したい「電荷遷移線」がほとんど見えない！



量子コンピュータ大規模化に適さない

# 新技術の特徴

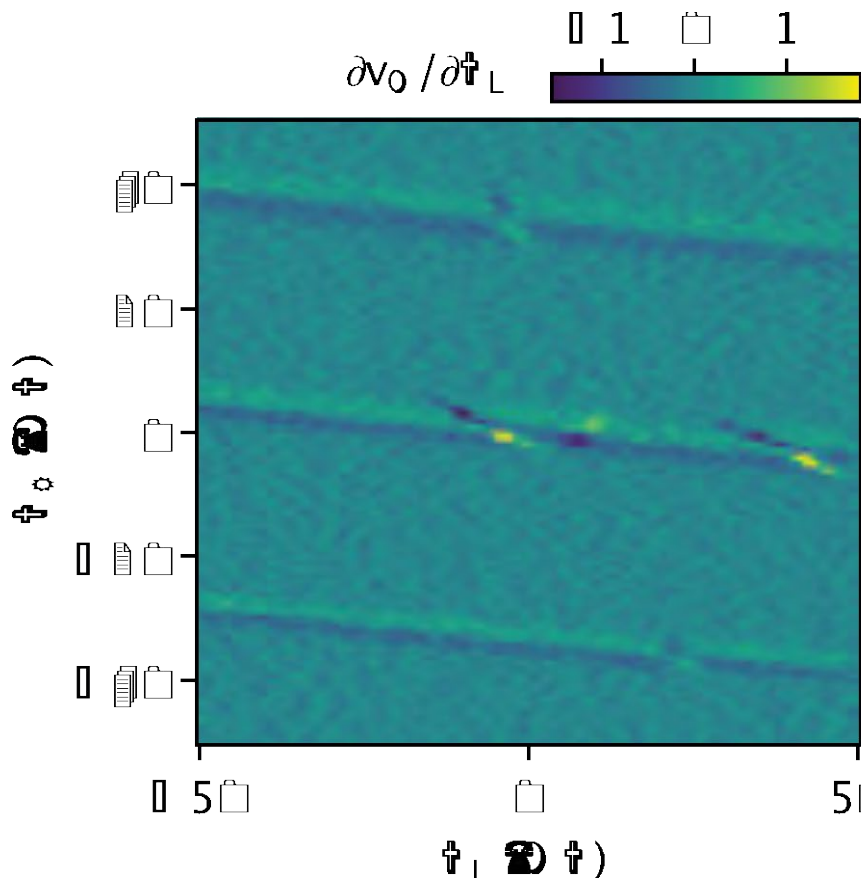


- ✓ 電荷センサーを自動・高速チューニングするフィードバック回路
- ✓ 極低温デバイスに適した微小信号・低雑音構成
- ✓ 誰でも使える半導体量子コンピュータシステムの実現へ

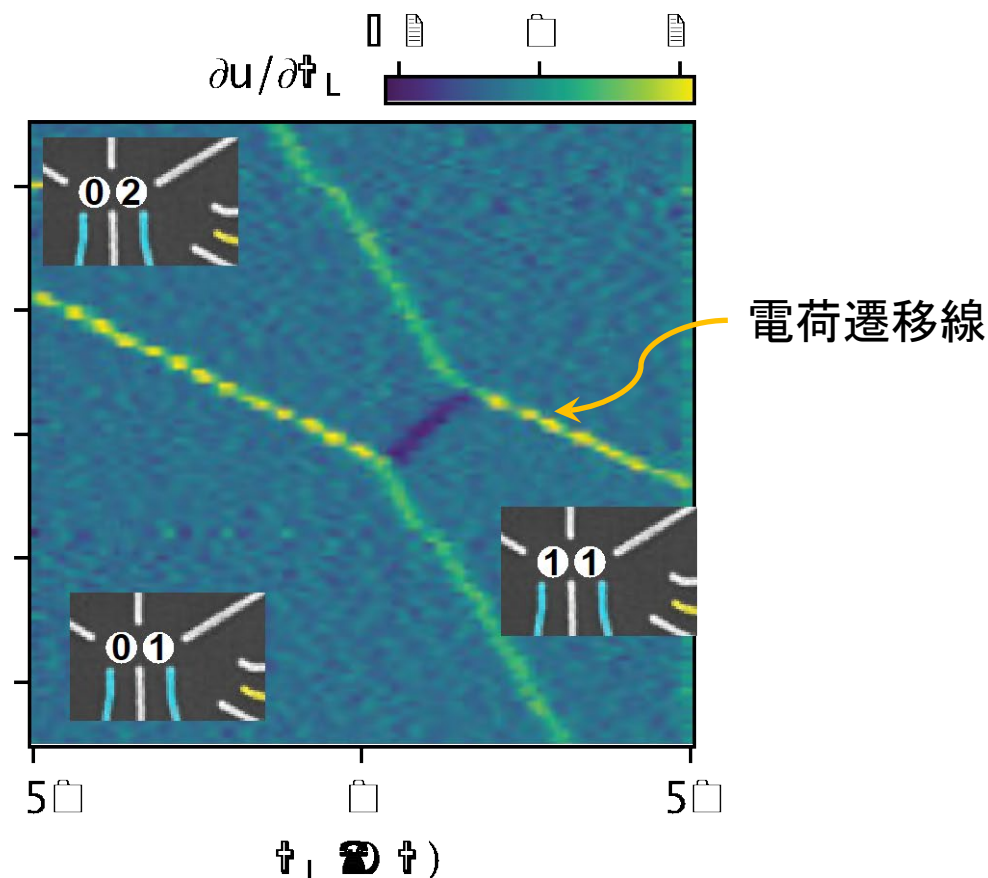
T. Nakajima *et al.*, Physical Review Applied **15**, L031003 (2021)

# 新技術の実例①

従来技術による測定



新技術による測定

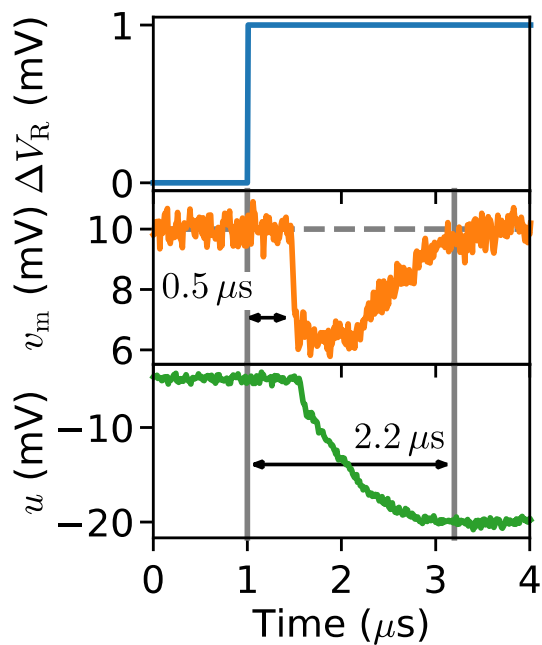


人間による推測・調整は不要、実用的な測定が可能に！

T. Nakajima *et al.*, *Physical Review Applied* **15**, L031003 (2021)

# 新技術の実例②

フィードバックの  
高速応答 ( $2.2 \mu\text{s}$ )



```
w.SPPID.pid_enabled = True
live_SD(w.SP_mod, pulse_amplitude=0.05, sample_time=20, repeat=np.inf, moving_average=1, load_AWG=False, diff=True)

# w.GateAWG.stop()
# w.GateAWG.t_sample = 1

executed in 17ms, finished 12:22:41 2020-03-31

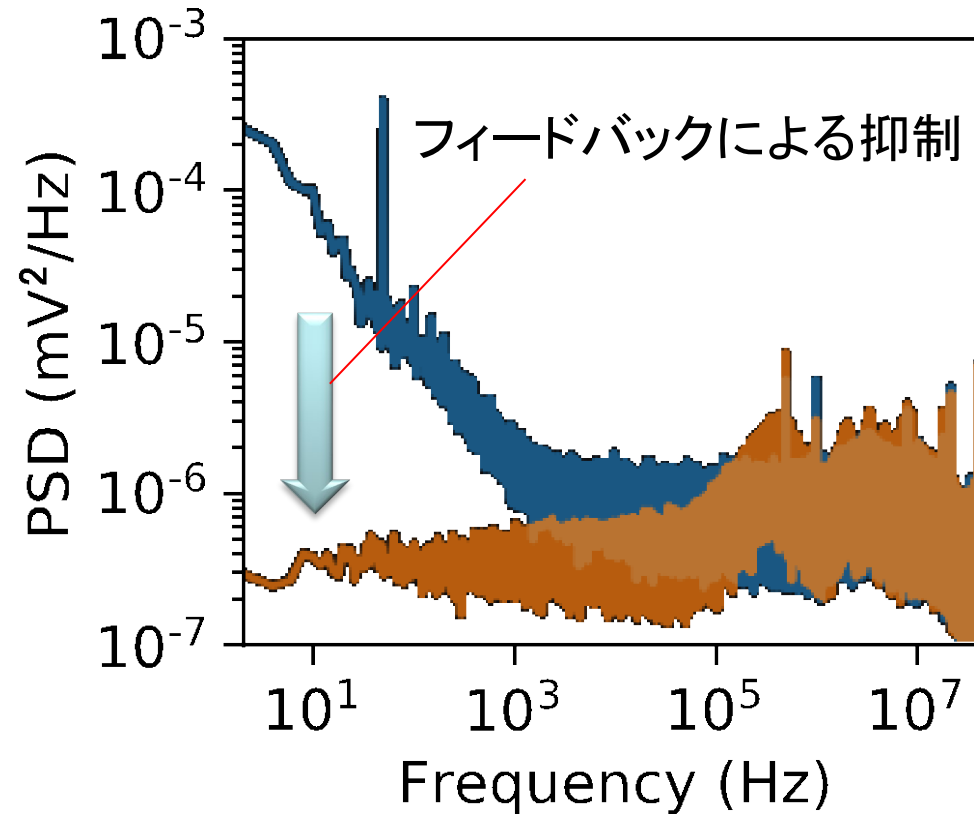
In [ ]: w.PL = 0.120
In [ ]: w.PR = -0.630
In [ ]: w.L = -0.70
In [ ]: w.C = -0.12
In [ ]: w.T = -0.46
In [ ]: w.R = -0.45
```

電荷配置をリアルタイムで測定・可視化

T. Nakajima *et al.*, Physical Review Applied **15**, L031003 (2021)

# 新技術の実例③

電荷センサーの雑音パワースペクトル



電荷センサーのドリフトを完全に排除

➡ 量子コンピュータに組み込み可能に

# 想定される用途

極低温物理学研究

半導体量子コンピュータ開発

国家プロジェクト: Q-LEAP, ムーンショット型研究

企業研究: 米I社、米I社、日H社...



20XX年、半導体量子コンピュータが実用化すれば  
広く使われる可能性も



# 新技術の実用化に向けた課題

- 現在、特定の実験セットアップにおいて実用的な性能のベンチマークを確認済み。しかし、より広汎な使用条件下での性能は未確認である。
- 実用化に向けて、新技術構成要素（制御ロジック、アナログ回路、雑音フィルタ）のコンポーネント化を進め、様々な大学・企業の研究環境に展開できるように汎用化を進める必要がある。

理研の研究だけでは困難、企業の開発への協力が不可欠です

# 量子コンピュータの実用化に向けた課題

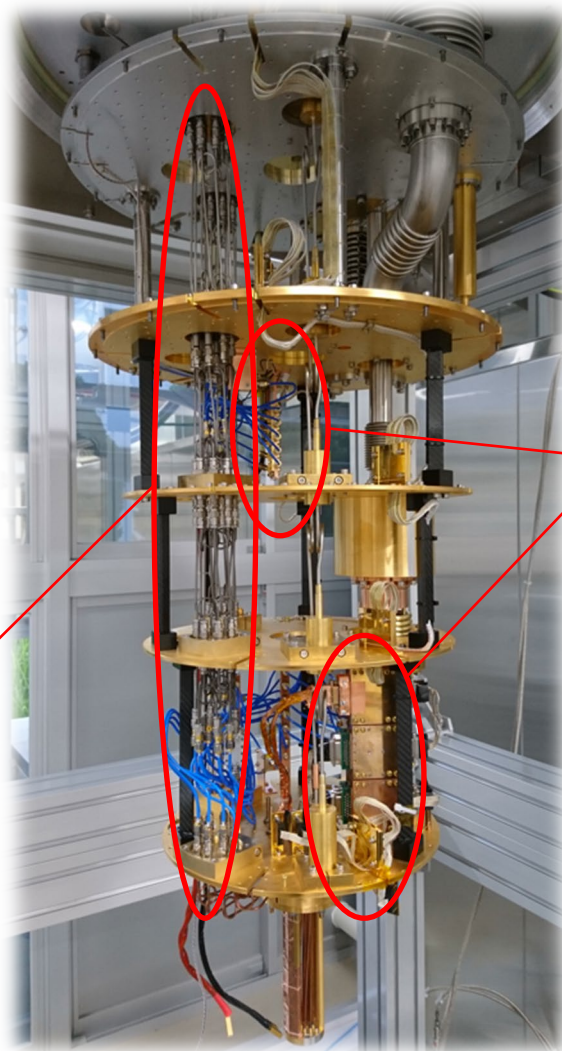
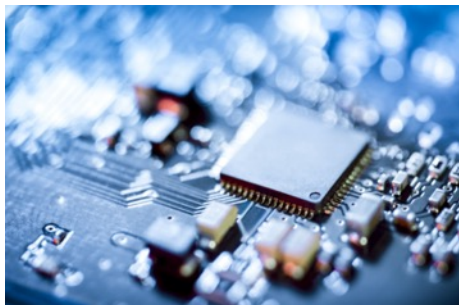
- 半導体量子コンピュータが広く実用に供されるためには、量子制御技術、集積化技術、マイクロ波制御、高周波配線部品、ソフトウェアのさらなる研究開発が必要。

理研の研究だけでは困難、企業の開発への協力が不可欠です

# 企業への期待

世界初の半導体量子コンピュータと一緒に作りましょう！

量子ビット制御回路の  
設計・製造・販売



研究中の半導体量子コン  
ピュータシステム @ 理研

極低温用雑音フィルタの  
製造・販売

極低温用RFコネクタ・  
ケーブルの  
共同開発・製造

# 企業への期待

世界の量子コンピュータ市場は 2026年には 1900億円規模に

*Quantum Computing Market with COVID-19 impact by Offering (Systems and Services), Deployment (On Premises and Cloud Based), Application, Technology, End-use Industry and Region - Global Forecast to 2026, MarketsandMarkets*

- 長期的視点で、回路技術の共同開発・製造・販売への協力をお願いします。
- 短期的には、本技術を活用した極低温実験機器、精密電子計測機器を、大学・研究機関向けに提供する機会があると期待されます。

# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 測定装置、測定方法、量子ドットの製造方法、量子コンピュータ、及び量子コンピュータの制御方法
- 出願番号 : 特願2021-13935
- 出願人 : 理化学研究所
- 発明者 : 中島峻、小嶋洋平、樽茶清悟

# お問い合わせ先



**株式会社理研鼎業**（りけんていぎょう）  
戦略企画部（理研新技術説明会事務局）  
E-mail: [senryaku@innovation-riken.jp](mailto:senryaku@innovation-riken.jp)

※ 連携に関する窓口は、理化学研究所より委託を受けて実施しております。