

# シリコンスピン量子ビット による量子情報処理

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  
上級研究員 中島 峻



CREST



PRESTO

MEXT Q-LEAP



MOONSHOT  
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM

JPMJMS2065

# 自己紹介

**2010** 東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 博士、助教  
量子ホール効果、一次元・二次元系の電子・核スピン制御

**2013** 理化学研究所 創発物性科学研究センター 特別研究員  
半導体電子スピン量子コンピュータの研究開始

**2017** 理化学研究所 創発物性科学研究センター 研究員

**2021~** 同 上級研究員

量子機能システム研究グループ  
(PI: 樽茶清悟)



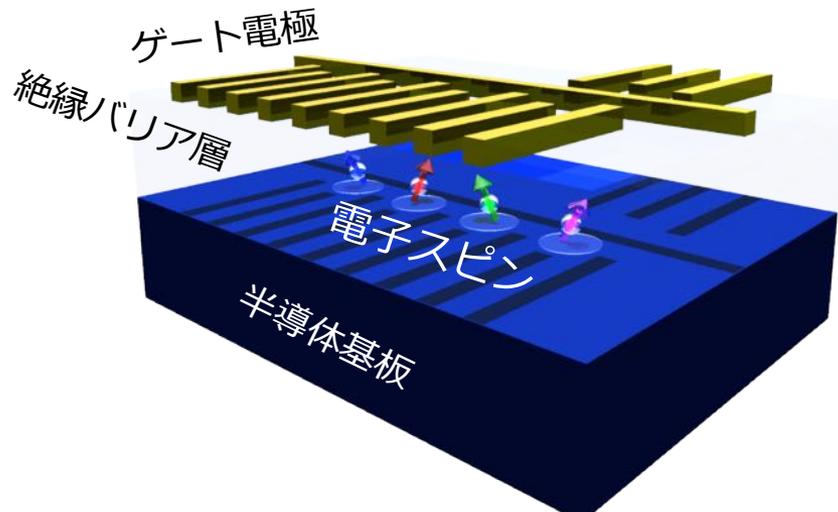
理化学研究所 創発物性科学研究センター



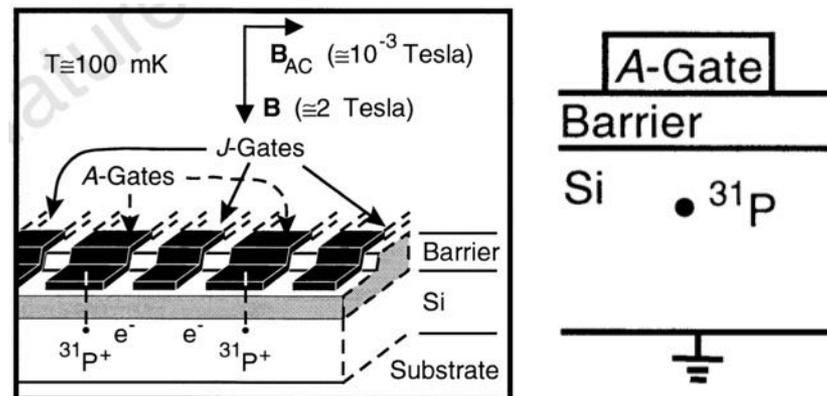
@ 埼玉県和光市

# シリコン量子コンピュータ

## 量子ドットの電子スピン



## ドナーの核スピン

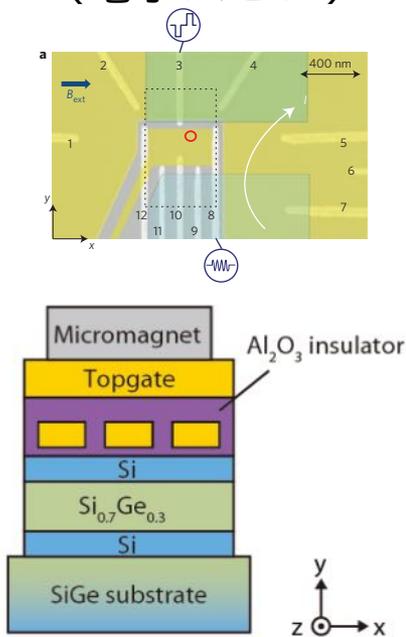


B. E. Kane, *Nature* **393** 14 (1998)

D. Loss and D. P. DiVincenzo, *Phys. Rev. A* **57** 120 (1998)

# シリコン量子コンピュータ

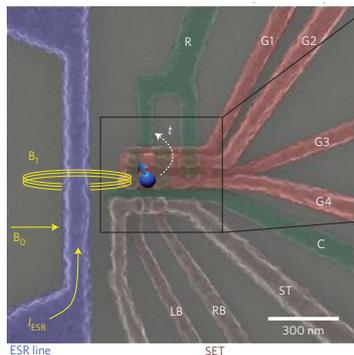
## Si/SiGe量子井戸 (電子スピン)



E. Kawakami *et al.*,  
*Nat. nanotechnol.*  
(QuTech 2014)

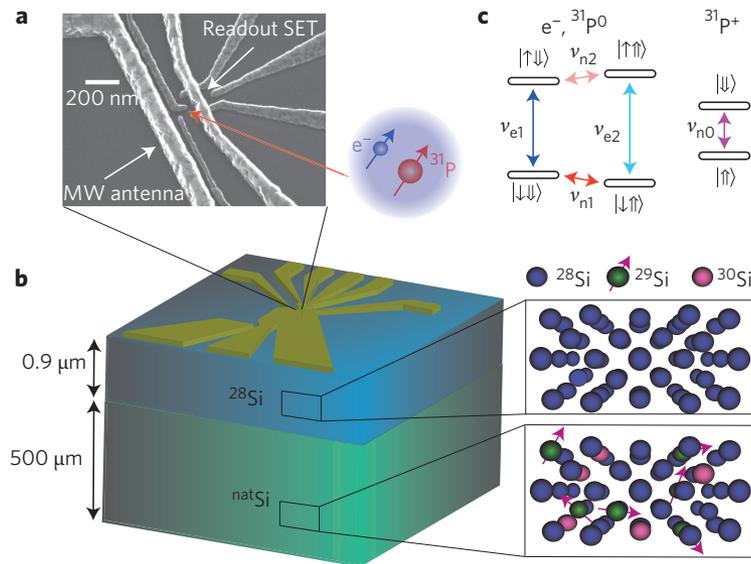
K. Takeda *et al.*,  
*Sci. Adv.* (RIKEN 2016)

## MOS (電子スピン)



M. Veldhorst *et al.*,  
*Nat. nanotechnol.*  
(UNSW 2004)

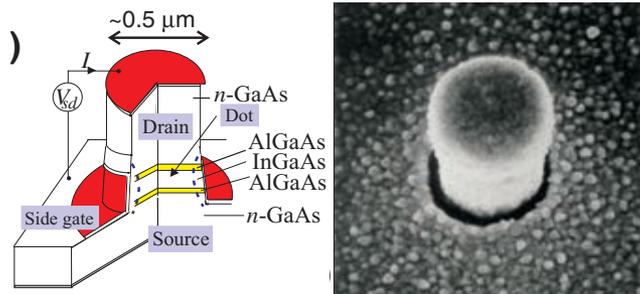
## MOS Pドナー (電子スピン、核スピン)



A. Morello *et al.*, *Nature*  
(USW 2010)

J. T. Muhonen *et al.*,  
*Nat. nanotechnol.*  
(UNSW 2014)

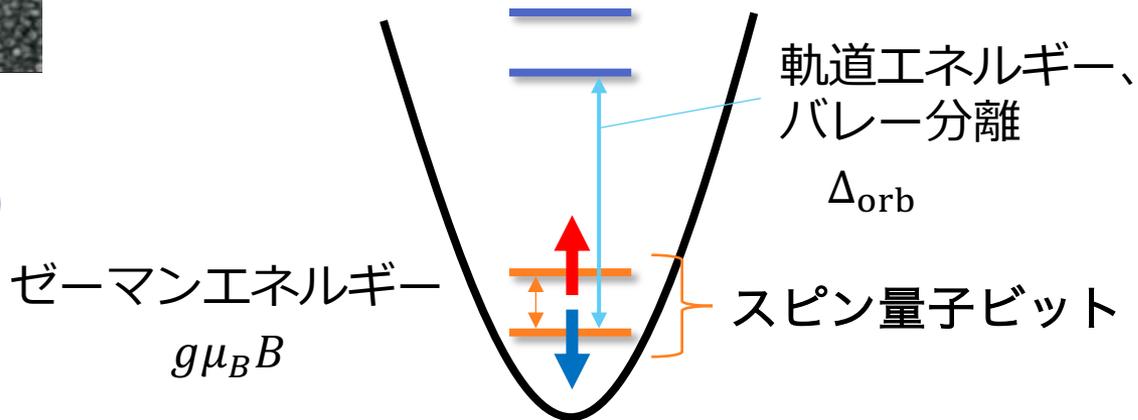
# 半導体量子ドット = “人工原子”



S. Tarucha *et al.*,

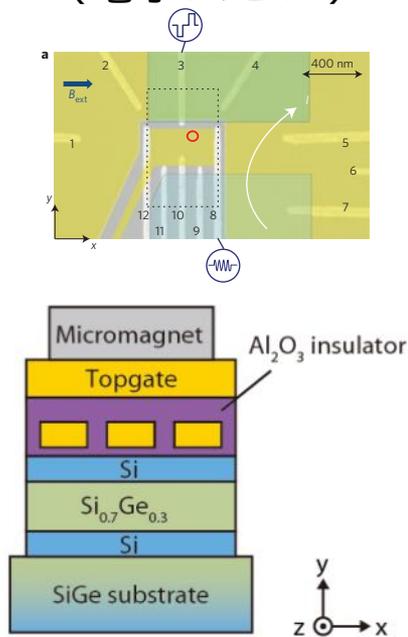
*Phys. Rev. Lett.*, **77** 3613 (1996)

## 量子ドット閉じ込めポテンシャル

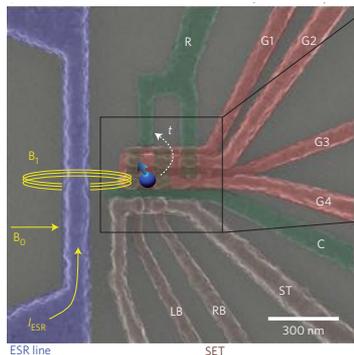


# シリコン量子コンピュータ

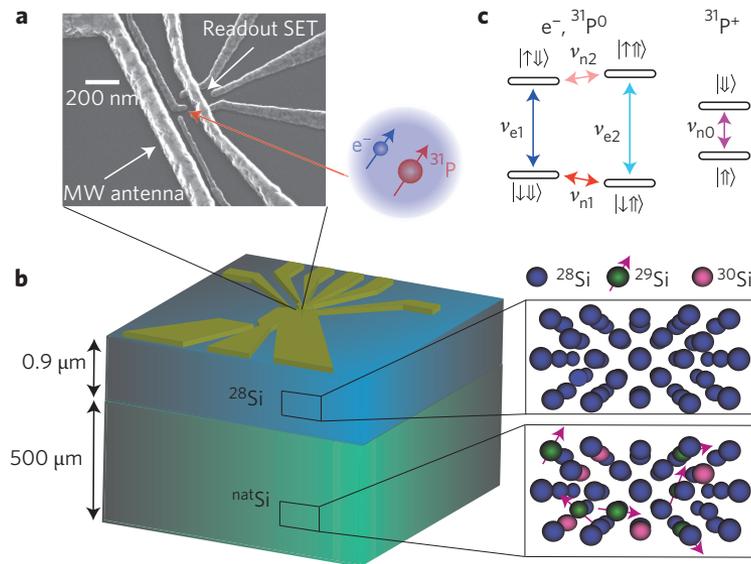
## Si/SiGe量子井戸 (電子スピン)



## MOS (電子スピン)



## MOS Pドナー (電子スピン、核スピン)



弱い

閉じ込め強度

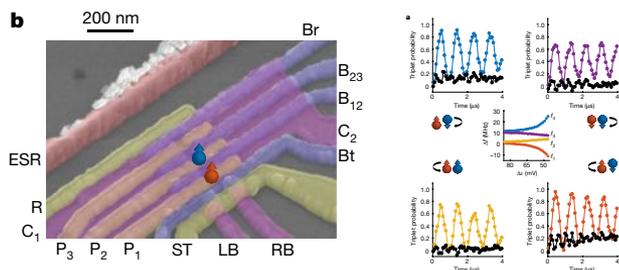
強い

制御性が高い  
スケーラビリティに優れる

量子コヒーレンスが優れる  
高温動作が可能

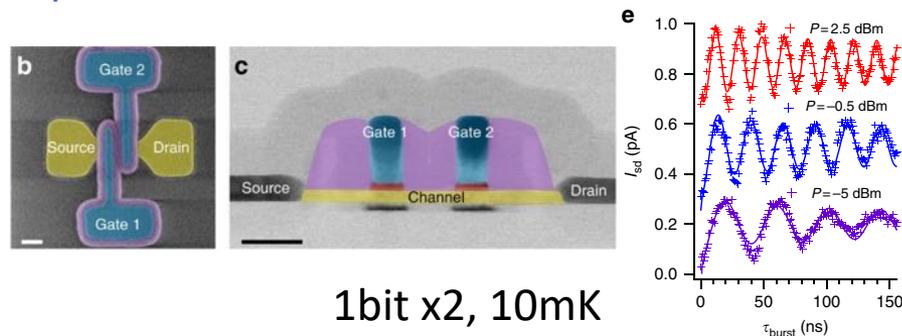
# MOS型の特徴

## nMOS Intel + QuTech



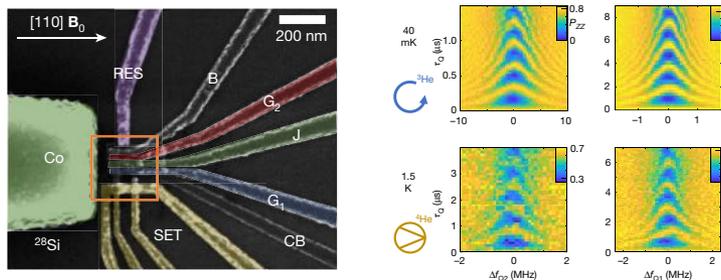
2bits, up to 1.1K

## pMOS nanowire FET CEA LETI + Grenoble



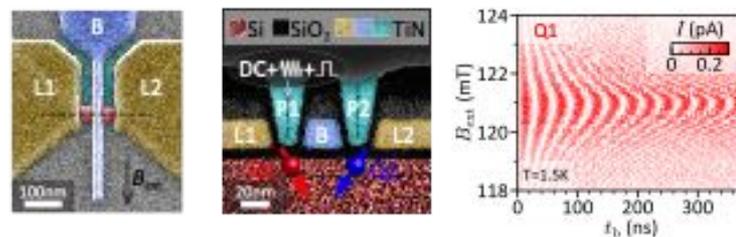
1bit x2, 10mK

## nMOS UNSW



2bits, up to 1.5K

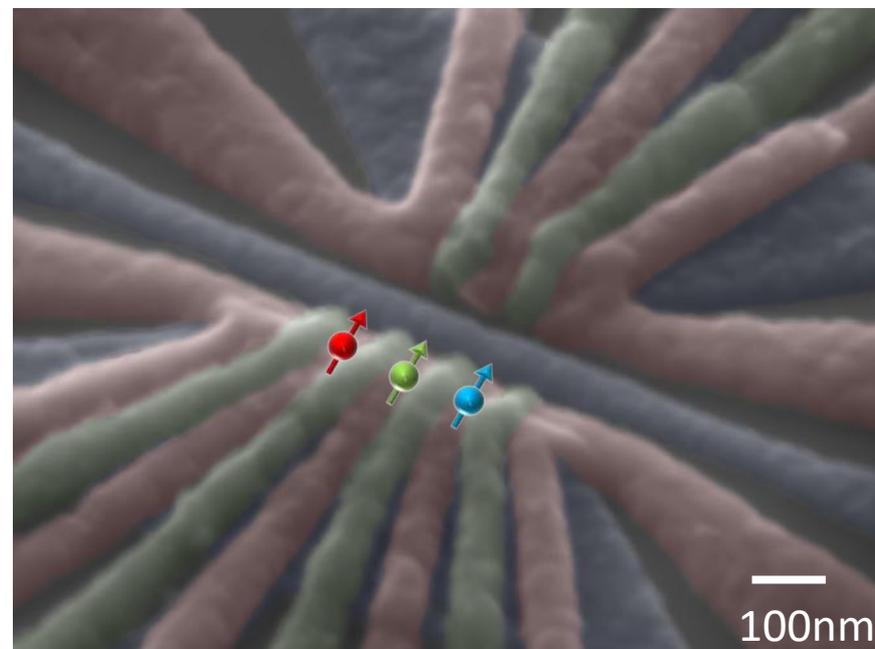
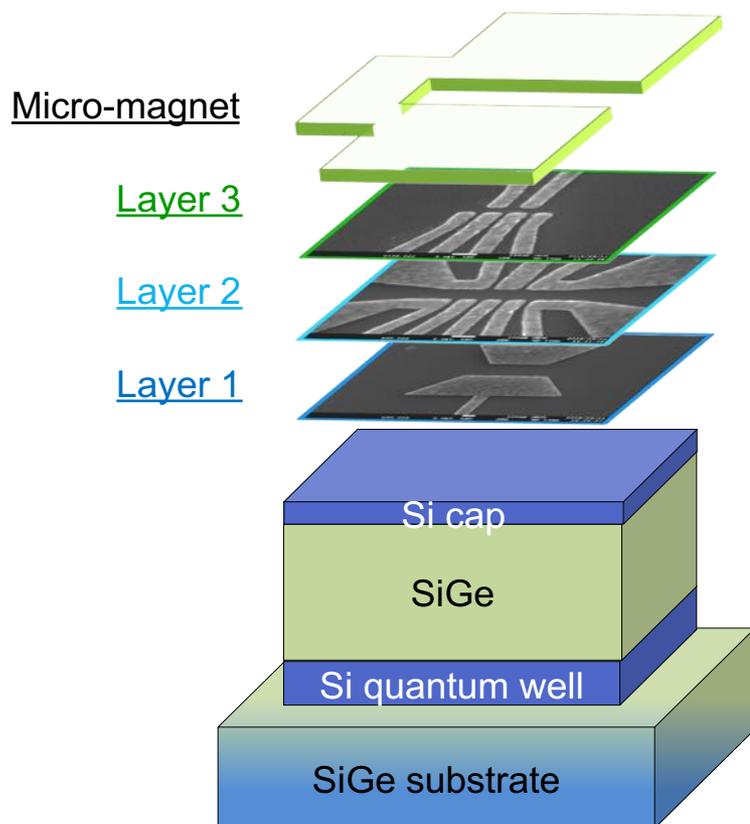
## pMOS FinFET IBM + Basel



1bit x2, up to 4K

- ✓ ~ 4K程度までの動作が可能
- ✓ 単一ビットとしては高性能
- ❖ 制御・読み出しが遅い
- ❖ ビット間結合の制御が難しい

# Si/SiGe型の特徴

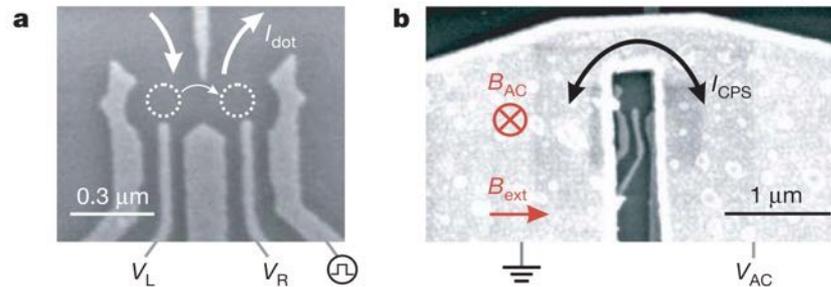
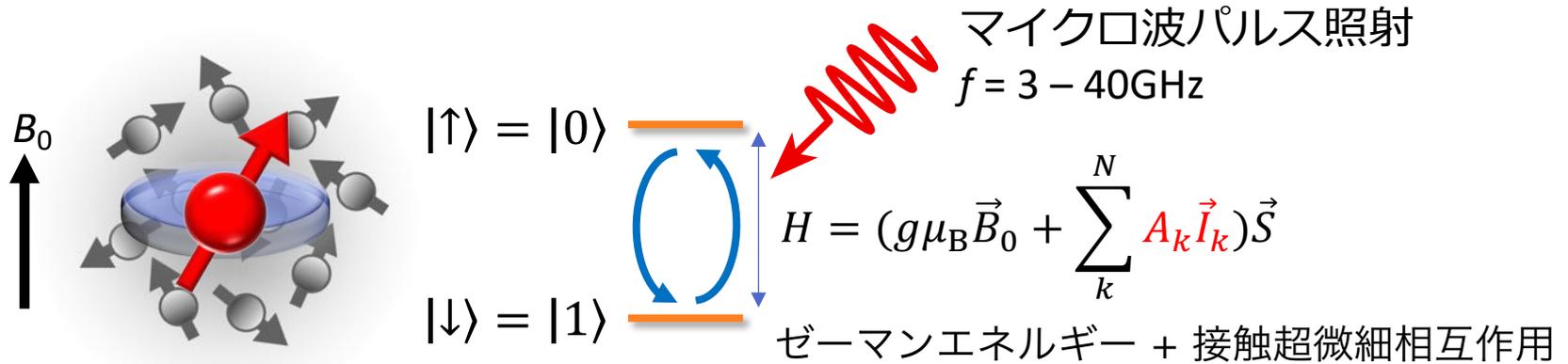


K. Takeda *et al.*, Nat. nanotechnol. **16**, 969 (RIKEN 2021)

- ✓ 初の3ビットユニバーサル制御を実現
- ✓ コヒーレンスの弱点は物理的な工夫でカバー可能

1. **単一スピン量子ビット制御の高精度化**
2. 2ビットゲート制御の高精度化
3. 大規模化に向けた課題

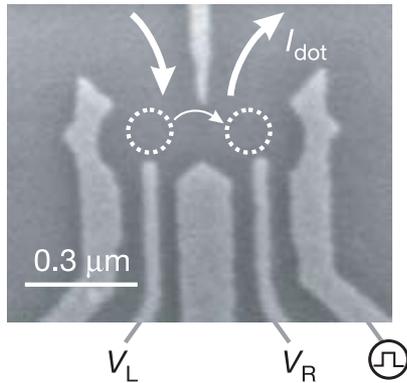
# 量子ビット制御 = 電子スピン共鳴 (ESR)



F. Koppens *et al.*, Nature (2006)

# ① 核スピン雑音を減らす

## GaAs/AlGaAs QDs



$T_2^* \sim 10 \text{ ns}$

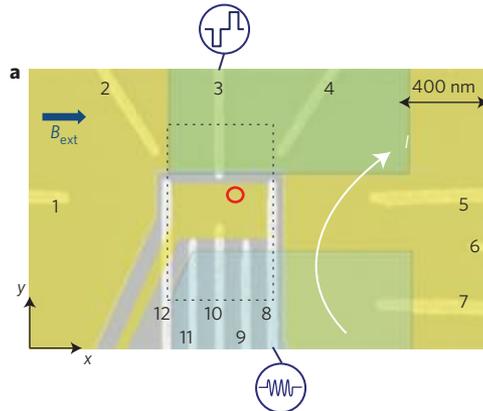
F. H. L. Koppens *et al.*,  
Nature (2006)

Delft



100%

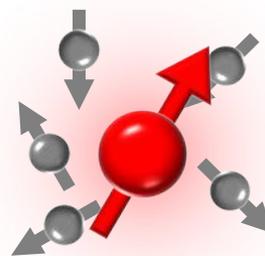
## Natural Si/SiGe QDs



$T_2^* \sim 1 \mu\text{s}$

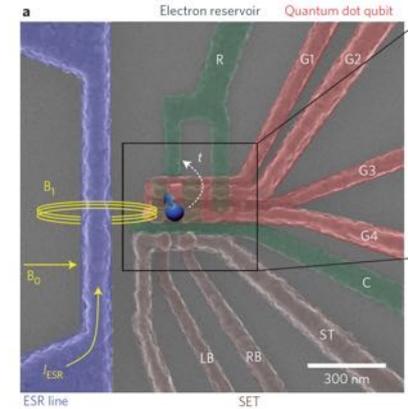
E. Kawakami *et al.*,  
Nature nanotech. (2014)

Delft



4.7%

## Purified $^{28}\text{Si}$ MOS QDs



$T_2^* = 120 \mu\text{s}$

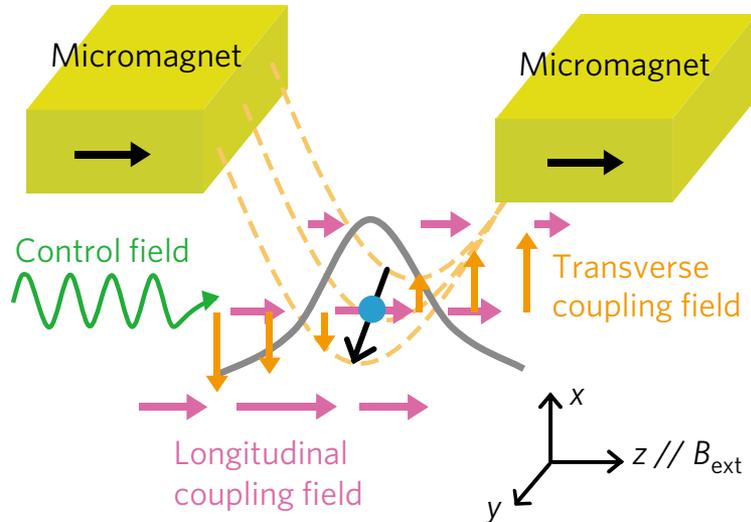
M. Veldhorst *et al.*,  
Nature nanotech. (2014)

New South Wales



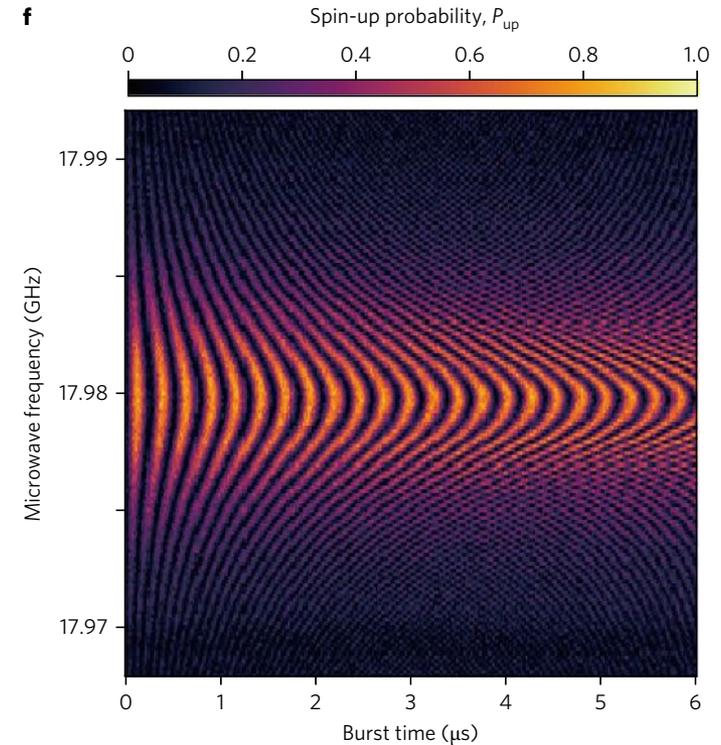
80~800 ppm

## ② 微小磁石法による高速制御



J. Yoneda *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **113** 267601  
(RIKEN 2014)

J. Yoneda *et al.*, *Nature nanotechnol.* **13** 102  
(RIKEN 2018)

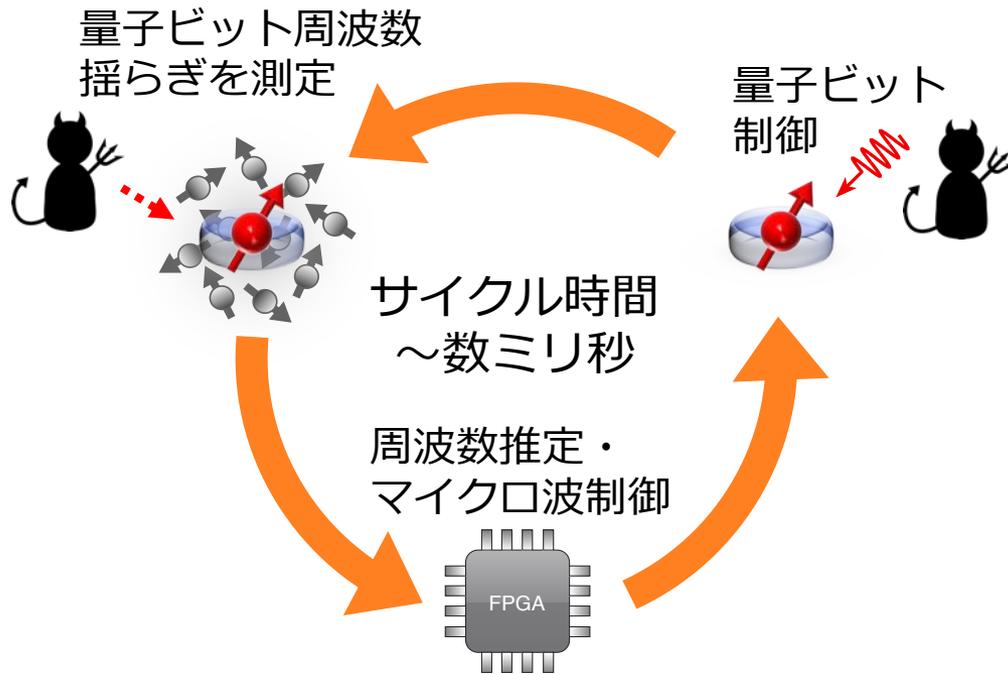


高周波電場によりスピンを高速駆動

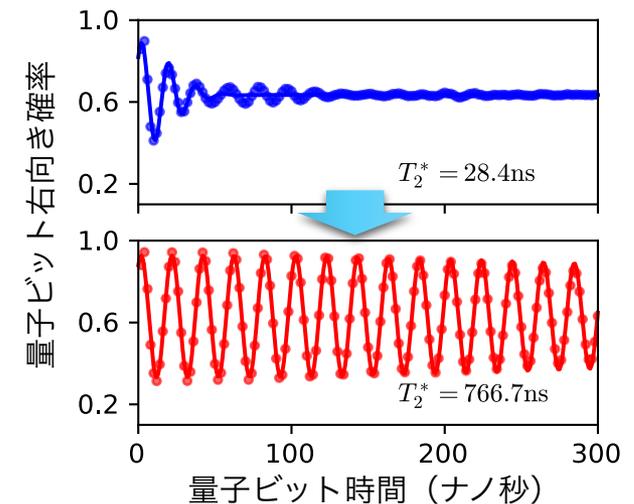
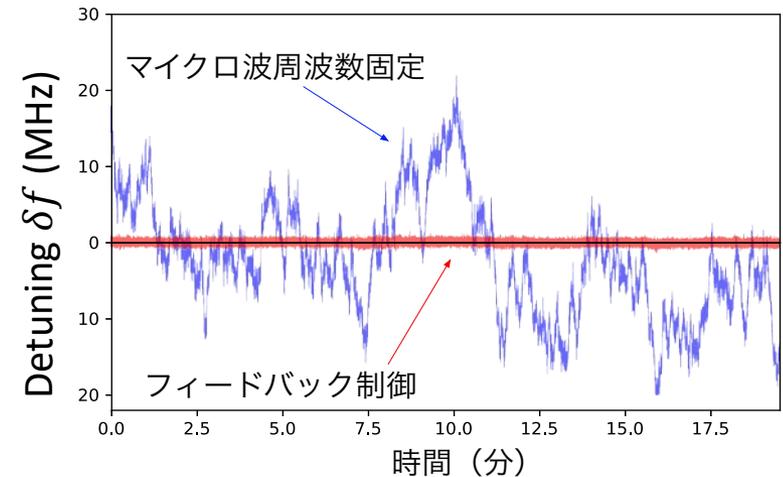


高速Rabi振動  $F_{\text{single}} > 99.9\%$

# ③ アクティブノイズキャンセル



### GaAs量子ドットへの適用例

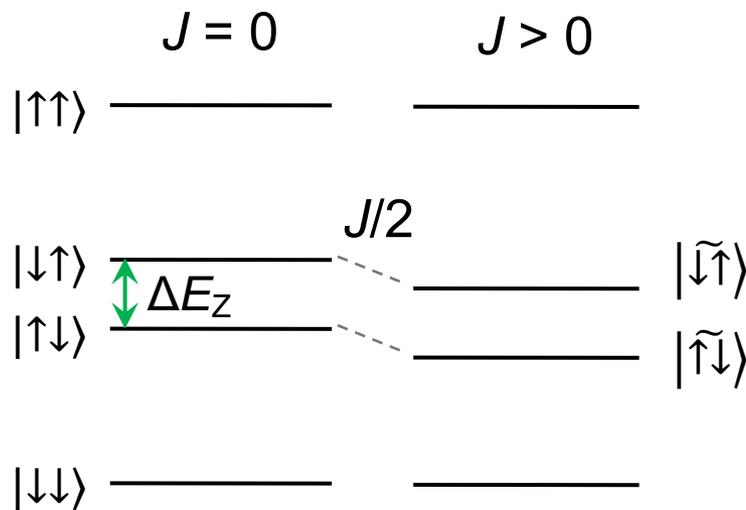
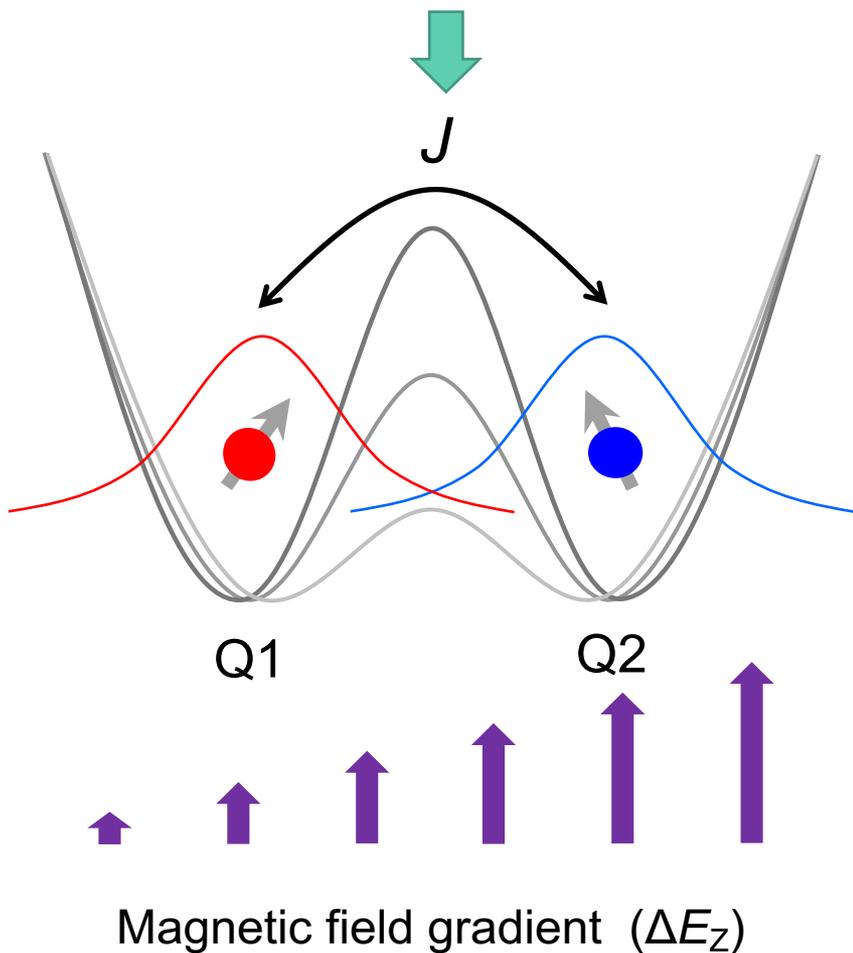


T. Nakajima *et al.*, *Physical Review X* **10** 011060 (RIKEN 2020)

1. 単一スピン量子ビット制御の高精度化
2. 2ビットゲート制御の高精度化
3. 大規模化に向けた課題

# 2ビットゲート操作 (量子もつれ)

交換相互作用をゲート電圧制御



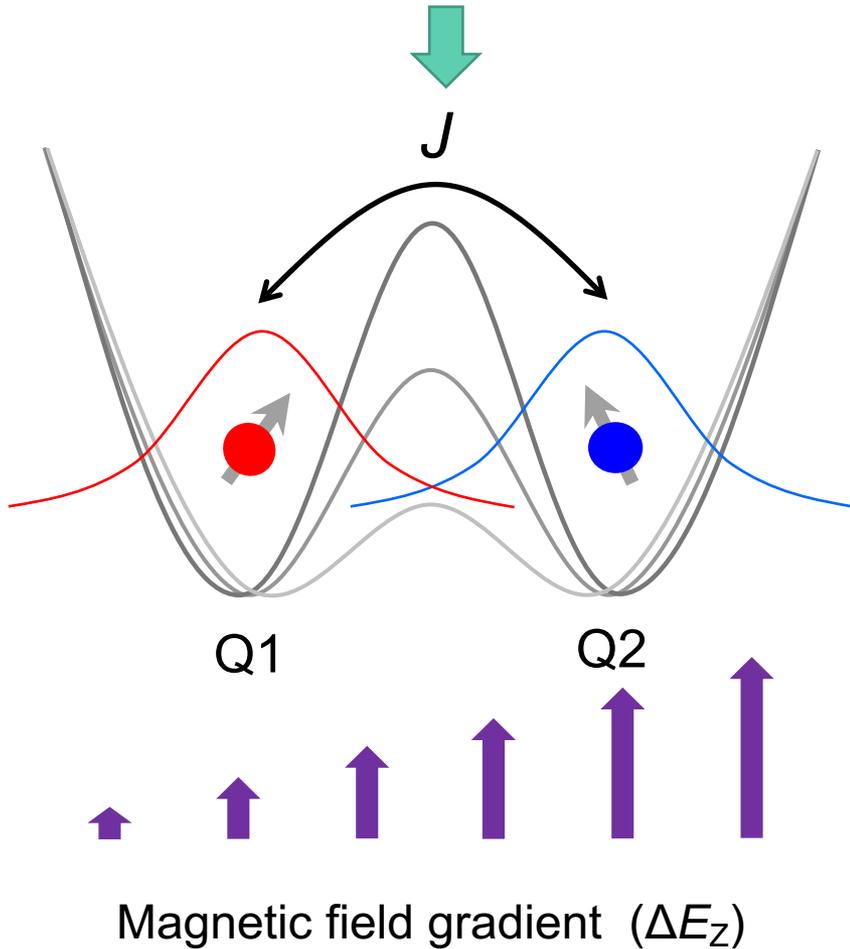
$$H_{\text{int}} = J(S_{z1}S_{z2} - \frac{1}{4})$$

➡ CPHASEゲート

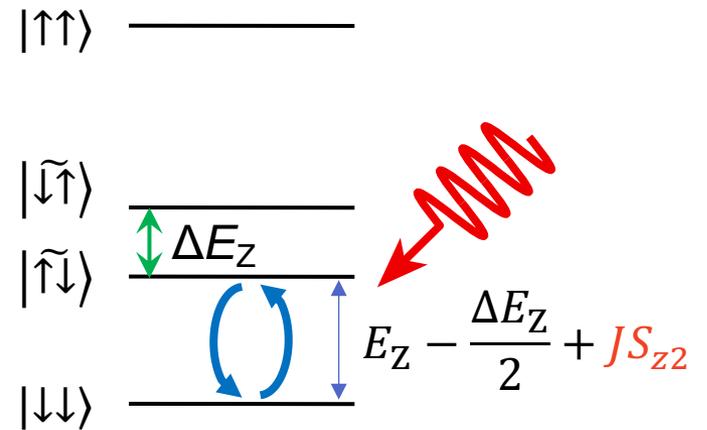
❖ 交換結合  $J$  は電場雑音に敏感

# ① 微小磁石法による高速制御

交換相互作用をゲート電圧制御



$$\Delta E_z \gg J > 0$$

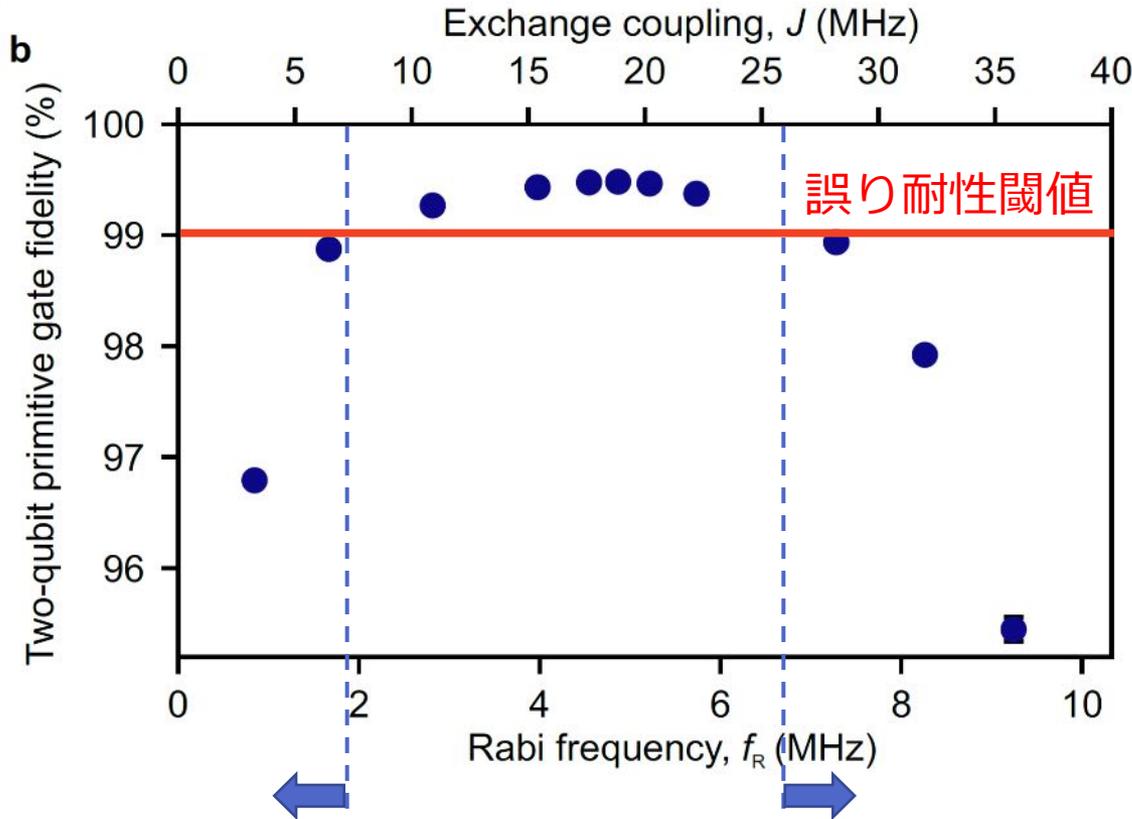


マイクロ波による選択励起



D. M. Zajac *et al.*, Science (2017)  
W. Huang *et al.*, Nature (2019)

# ① 微小磁石法による高速制御



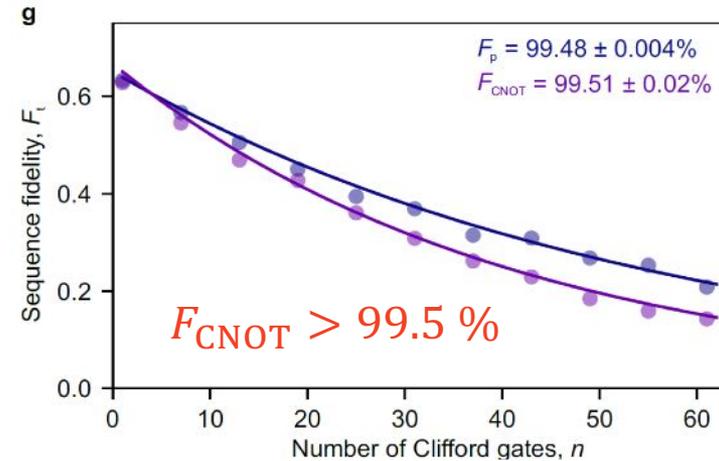
ラビ周波数が遅い

$^{28}\text{Si}$  でも位相緩和が支配的

マイクロ波過熱

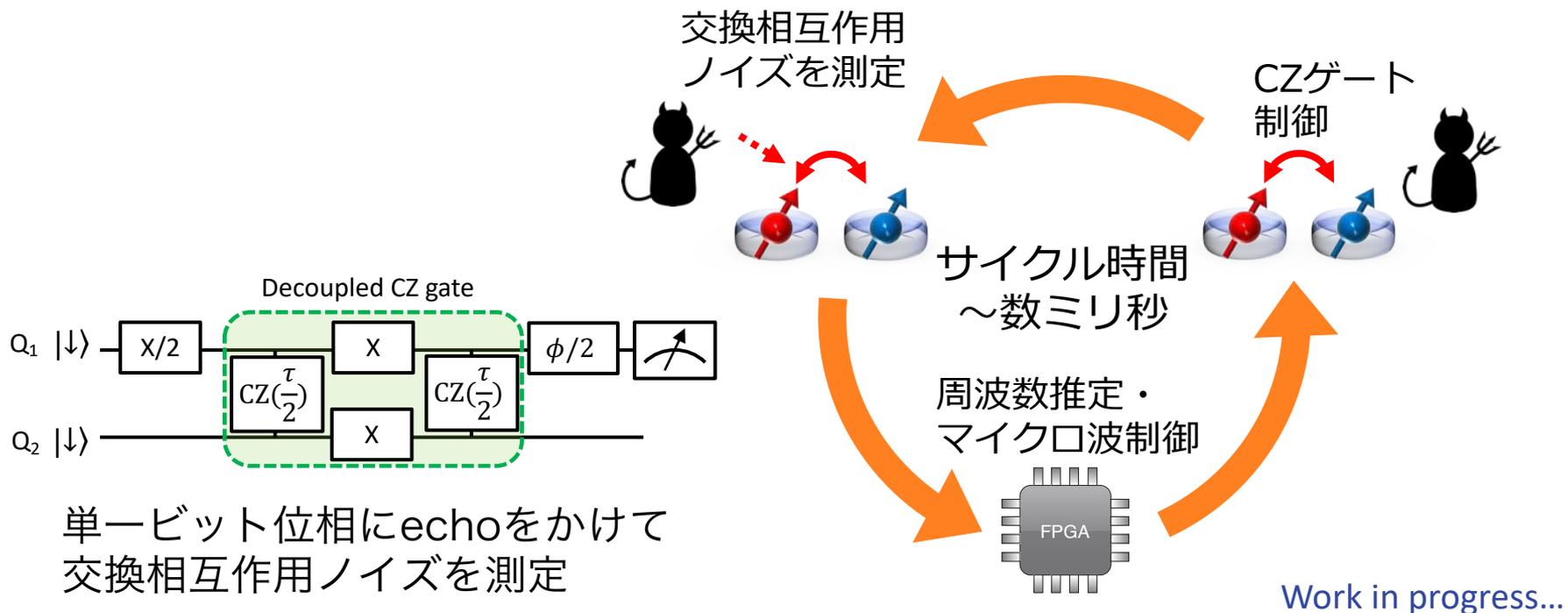
量子ビット緩和、熱励起

2ビット  
ランダム化ベンチマーク

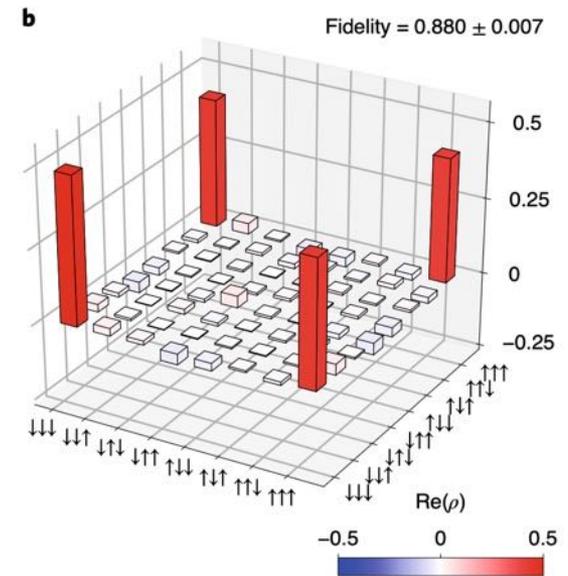
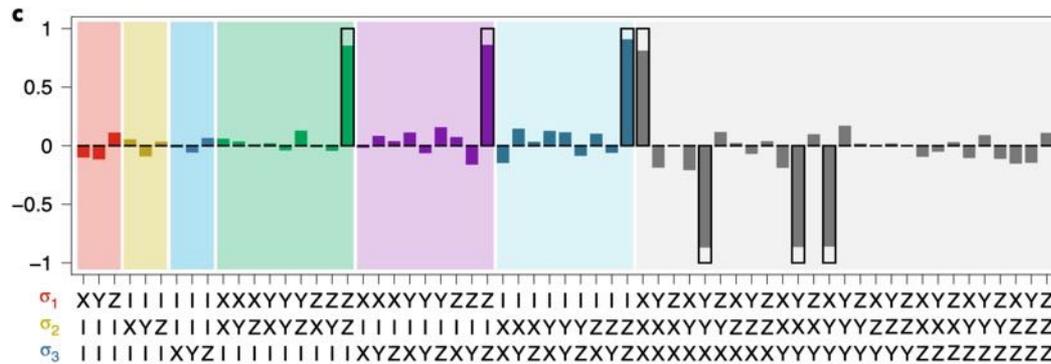
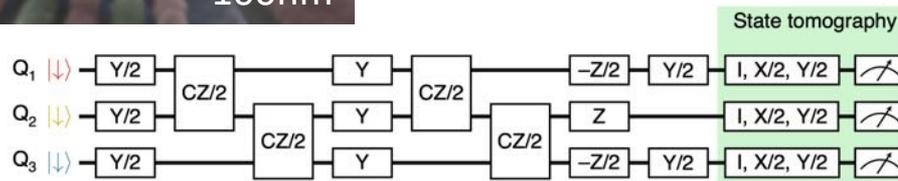
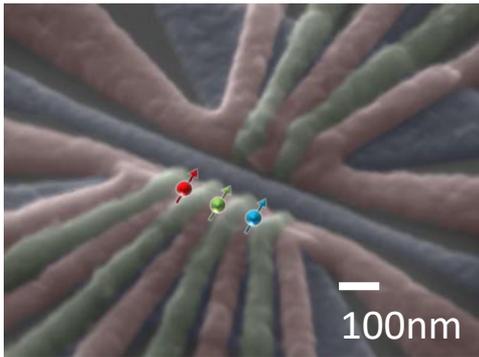


A. Noiri *et al.*, *arxiv:2108.02626*  
(RIKEN 2021)

## ② アクティブノイズキャンセル



# 3ビットシリコン量子プロセッサ



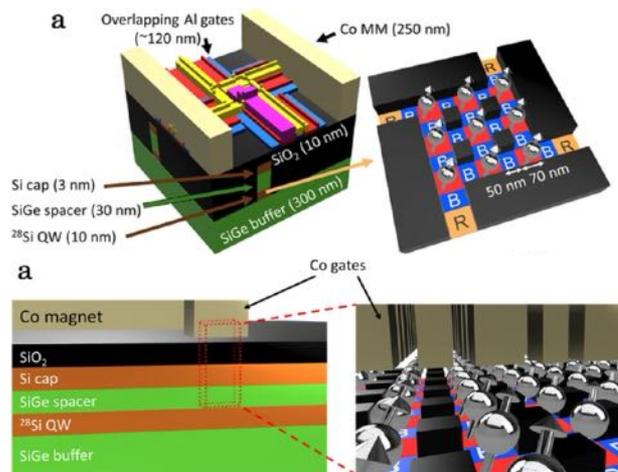
$$F_{\text{GHZ}} = 88\%, |\text{GHZ}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\uparrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\downarrow\rangle)$$

K. Takeda *et al.*, *Nat. nanotechnol.* **16**, 969 (RIKEN 2021)

1. 単一スピン量子ビット制御の高精度化
2. 2ビットゲート制御の高精度化
- 3. 大規模化に向けた課題**

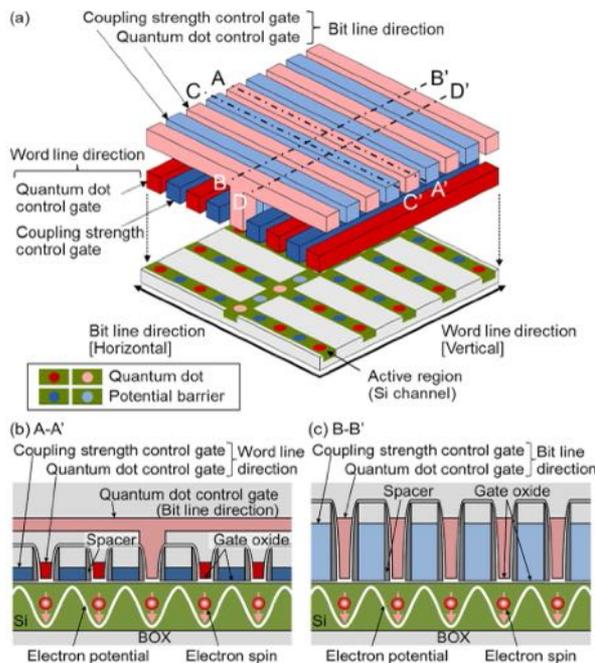
# シリコン量子ビットアレイ集積化

## 多層配線、コバルトナノ電極



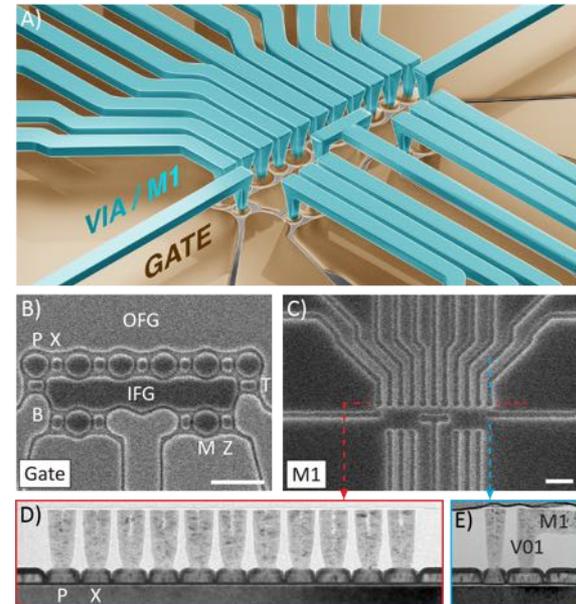
M. Tadokoro *et al.*, *Sci. Rep.* **11** 19406 (TiTech, RIKEN 2021)

## CMOSプロセス



Hitachi Ltd., *Appl. Phys. Lett.* **116** 162106 (2020)

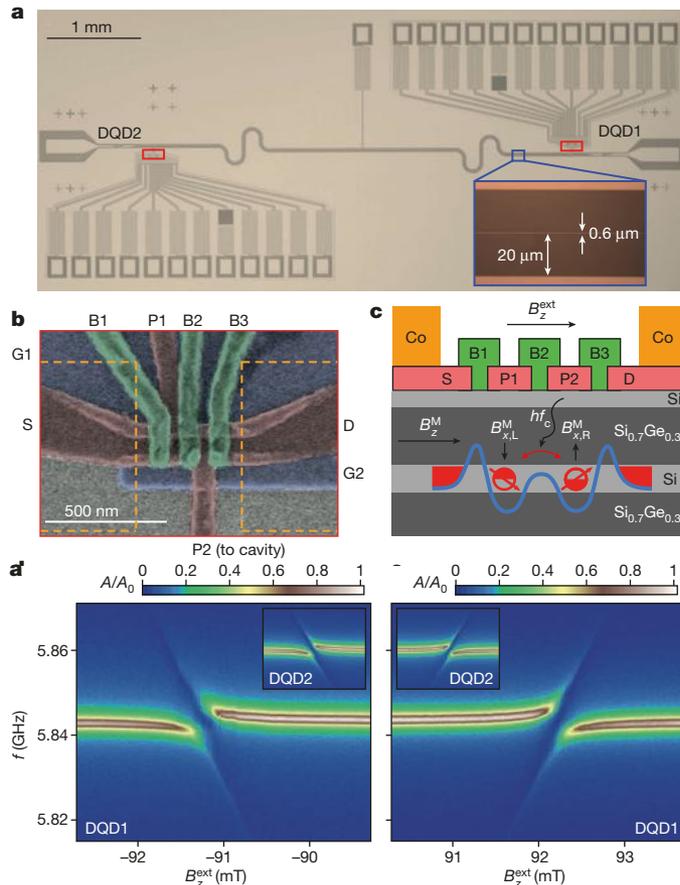
## 3次元ナノビア配線



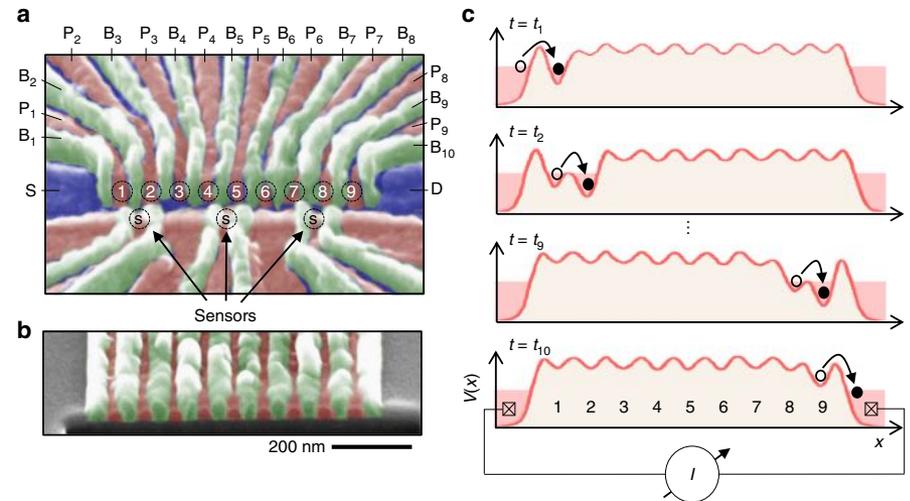
HRL Laboratories, arxiv:2107.10916

# 遠隔量子ビット結合

## スピン-超伝導共振器結合



## シャトルリングによる電子輸送



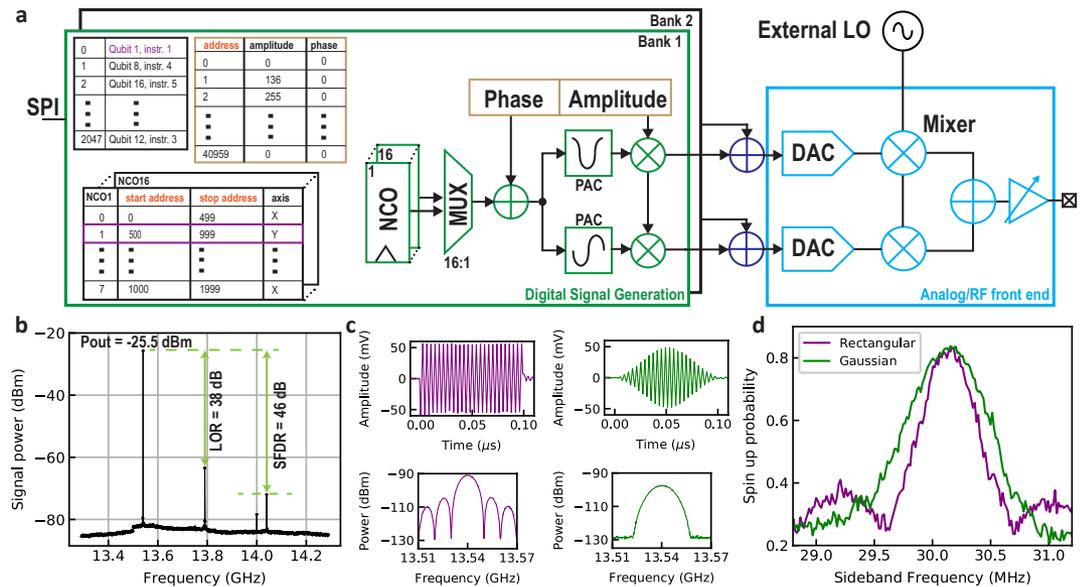
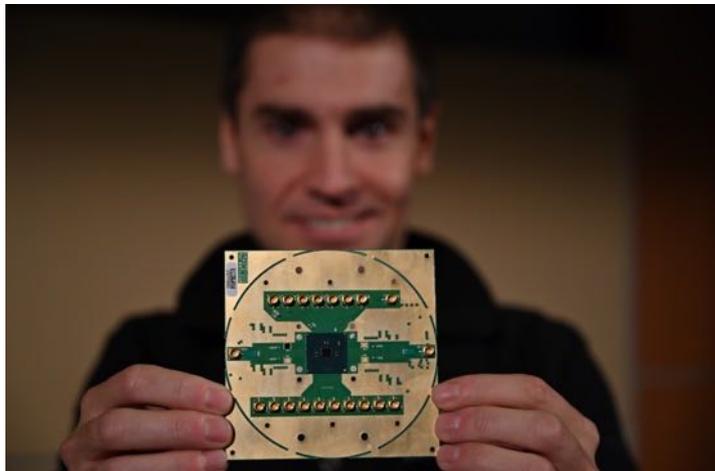
- T. Baart *et al.*, Nat. nanotechnol. (QuTech 2016)
- A. Mills *et al.*, Nat. commun. (Princeton 2019)
- J. Yoneda *et al.*, Nat. commun. (UNSW 2021)

- X. Mi *et al.*, Nature (Princeton 2018)
- N. Samkharadze *et al.*, Science (QuTech 2018)

# Cryo-CMOS controller



Intel Horse Ridge controller operating @ 3K

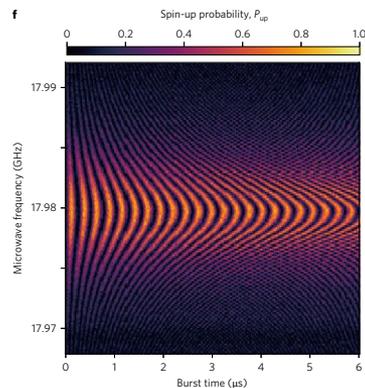
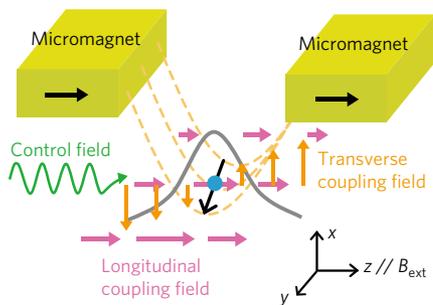


X. Xue *et al.*, *Nature* **593** 205 (2021)

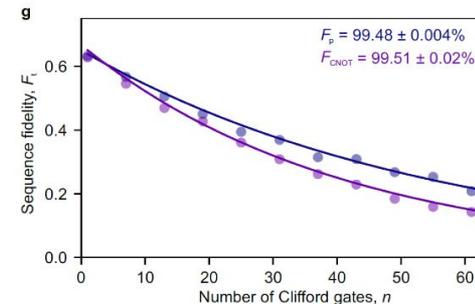
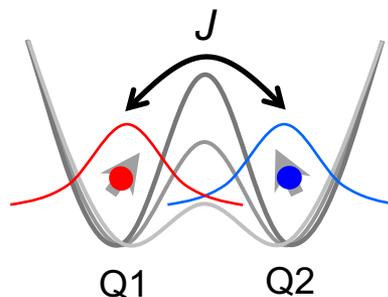
# まとめ

## Si spin qubit fact sheet

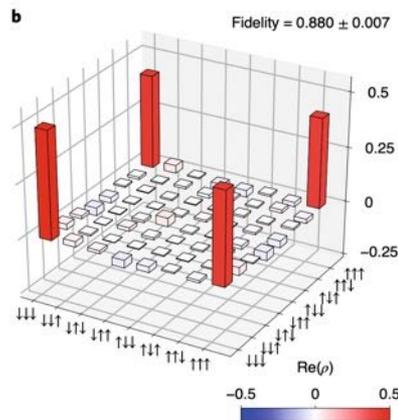
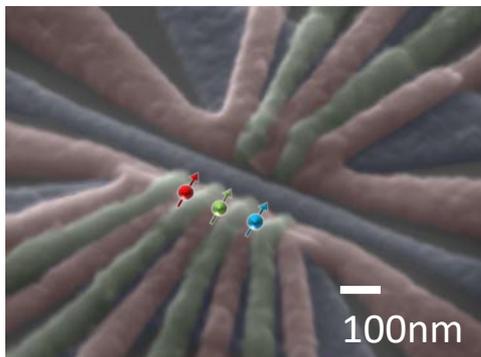
単一ビット制御  $F_{\text{single}} > 99.9\%$   
(Si/SiGe, MOS)



2ビット制御  $F_{\text{CNOT}} > 99.5\%$   
(Si/SiGe)



量子ビット数 3  
(Si/SiGe)



動作温度 ~4K  
(MOS, TFET)

