

# 半導体微細構造を用いた量子デバイス

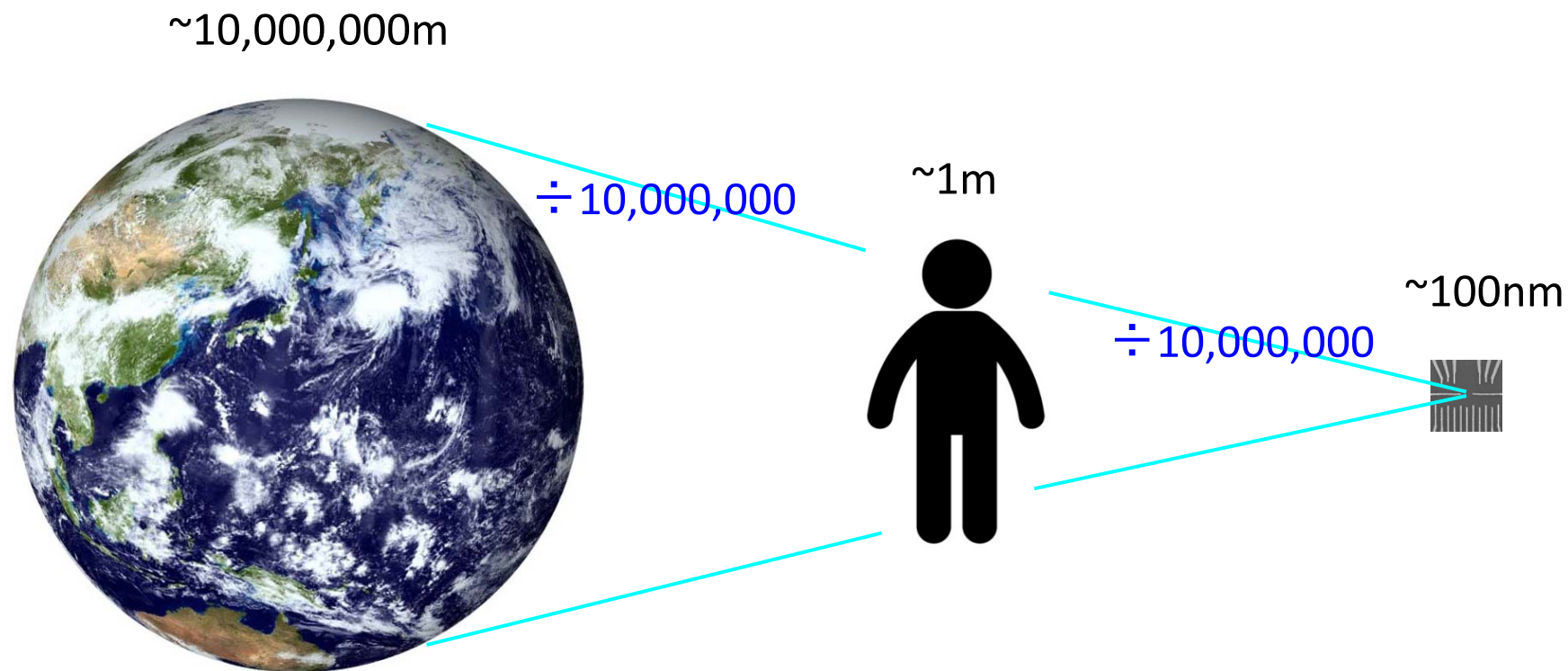
-素粒子と量子の明るい未来に向けて-

-素粒子の初心者です。量子デバイスが使えることがございましたらぜひ教えてください。-

東北大学 電気通信研究所 量子デバイス研究室

大塚 朋廣

# 研究していること

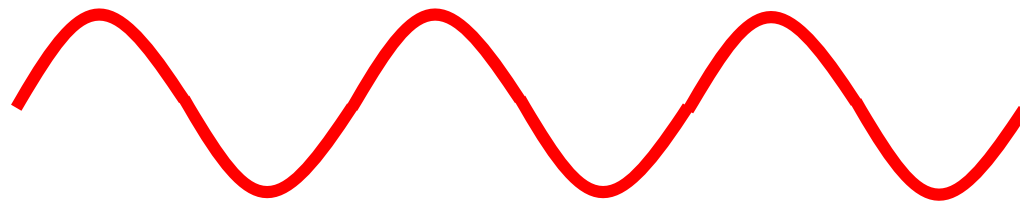
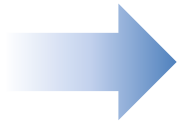


小さな世界は面白い  
有用なデバイスへの応用

# 小さな世界の不思議な法則：量子力学

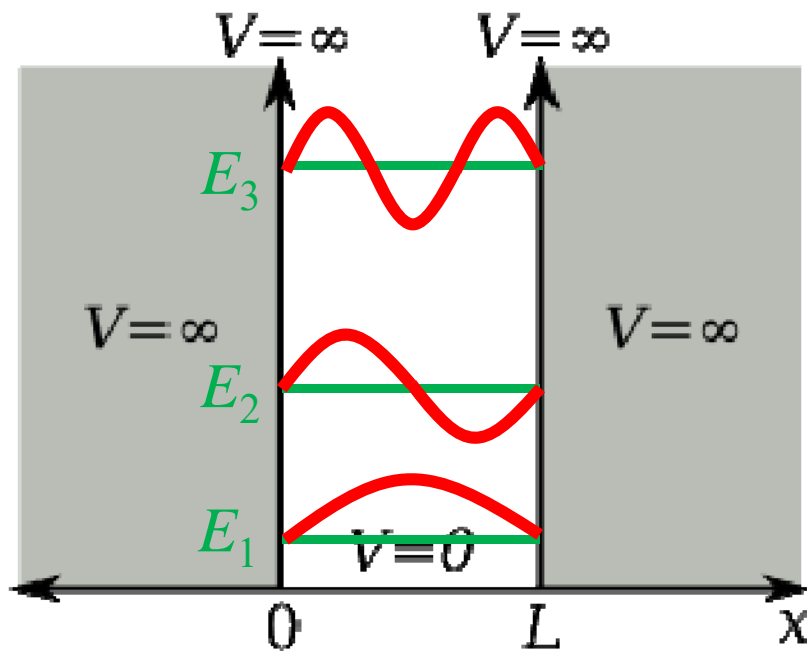
Schrödinger方程式

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V(x) \right] \psi$$



物体の存在確率振幅は波の方程式で記述される

## 例えば、井戸型ポテンシャル



$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi_n(x) = E_n \psi_n(x)$$

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin k_n x = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi x}{L}$$

$$E_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} = \frac{\hbar^2 n^2 \pi^2}{2mL^2}$$

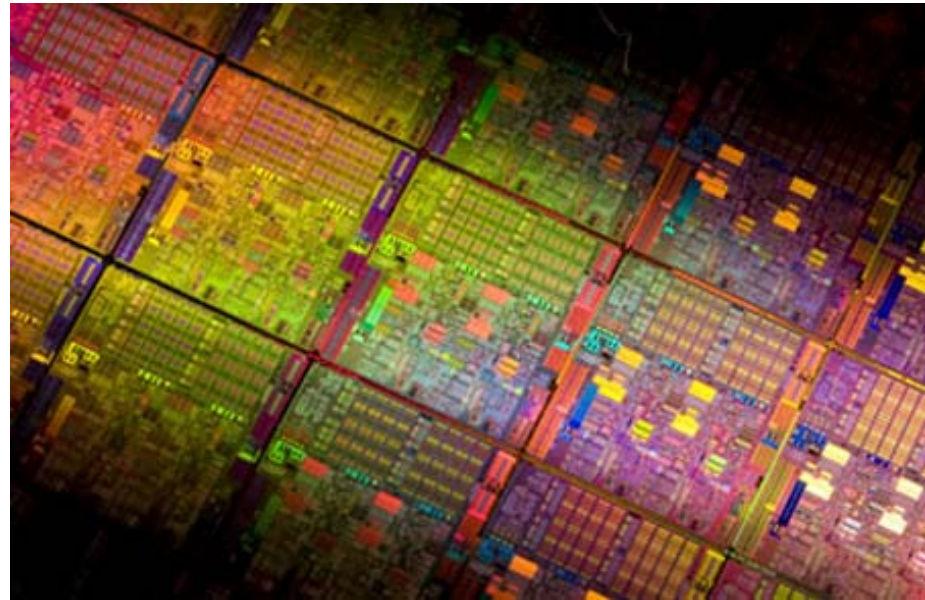
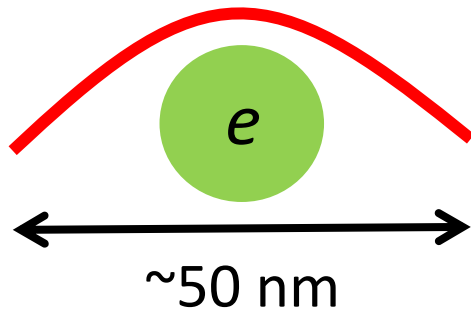
$$k_n = \frac{n\pi}{L} (n \in \mathbf{N})$$

➡ 量子の波が小さな世界を支配している

# 実験・人工量子力学

## 半導体加工技術

電子の波のサイズ

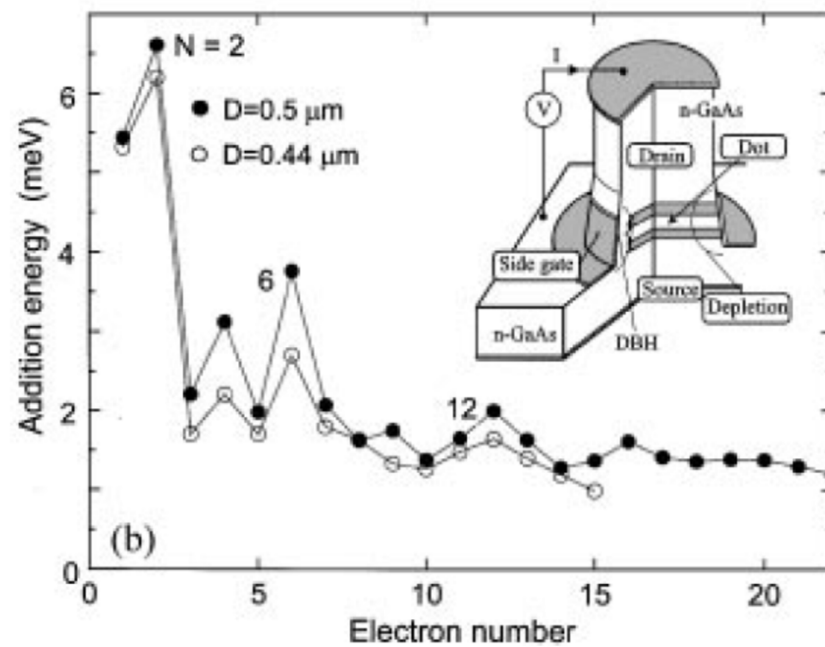
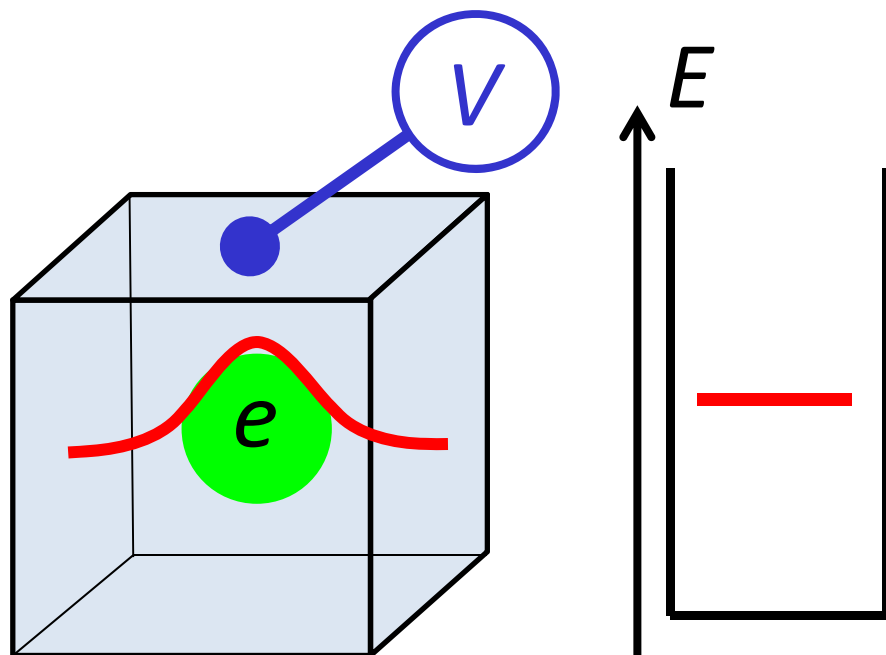


Intel website

半導体加工技術を用いれば電子の波のサイズレベルの加工が可能

➡ 人工的な系で量子力学の実験ができる

# 半導体量子ドット



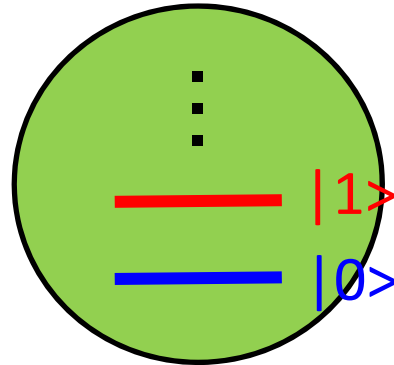
Tarucha *et al.*, PRL 1996

- 小さい
- 安定
- 操作可能

人工量子状態

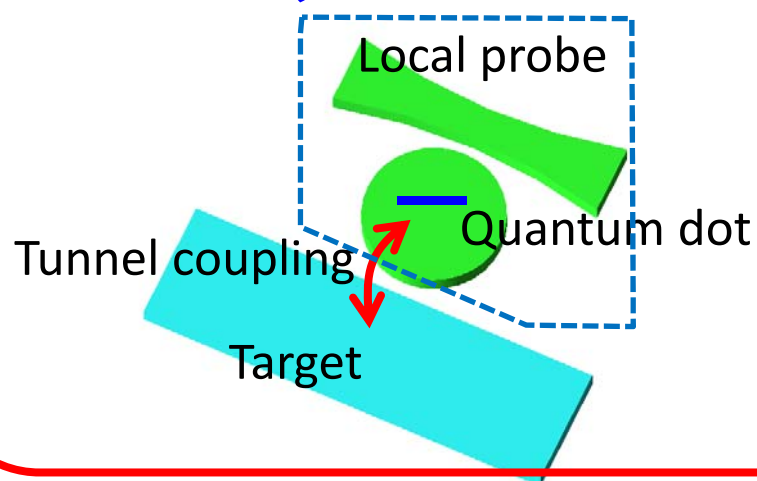
# 研究背景

## 半導体量子ドット

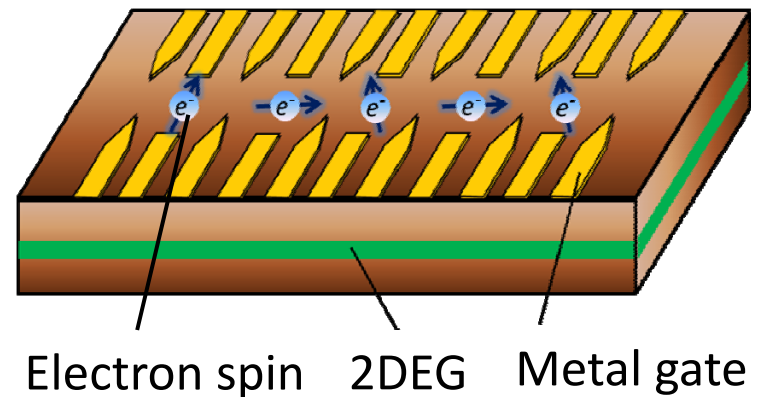


- ・ よく定まった人工量子状態
- ・ 量子状態を電圧で制御できる

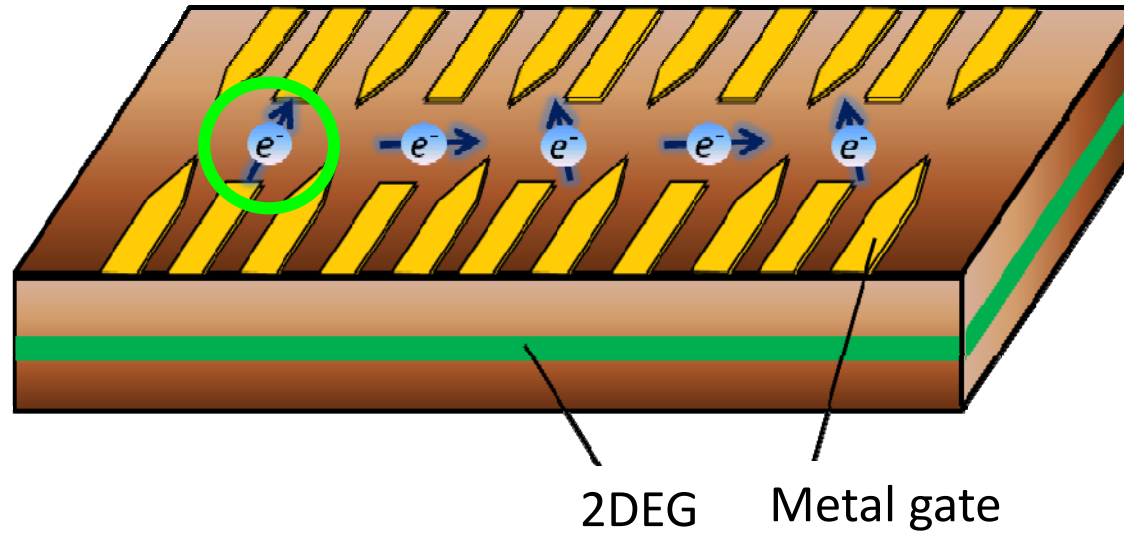
局所的な電子状態を検出する  
マイクロプローブ



局所的な電子状態を制御する  
量子ビット

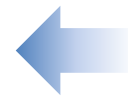


# 固体微細構造中の局所電子状態



## 固体微細構造中の局所電子状態

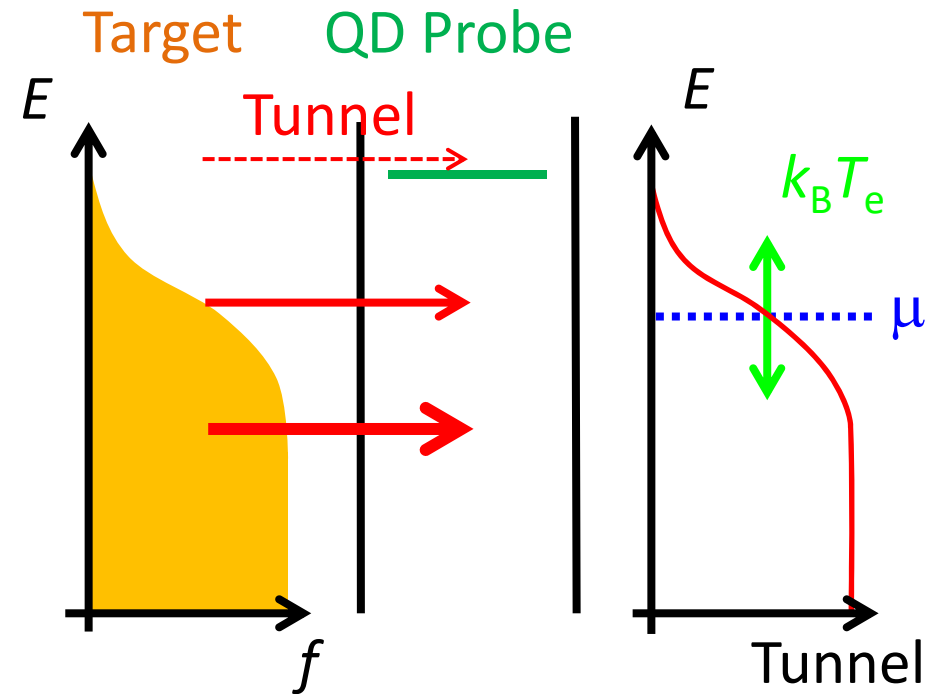
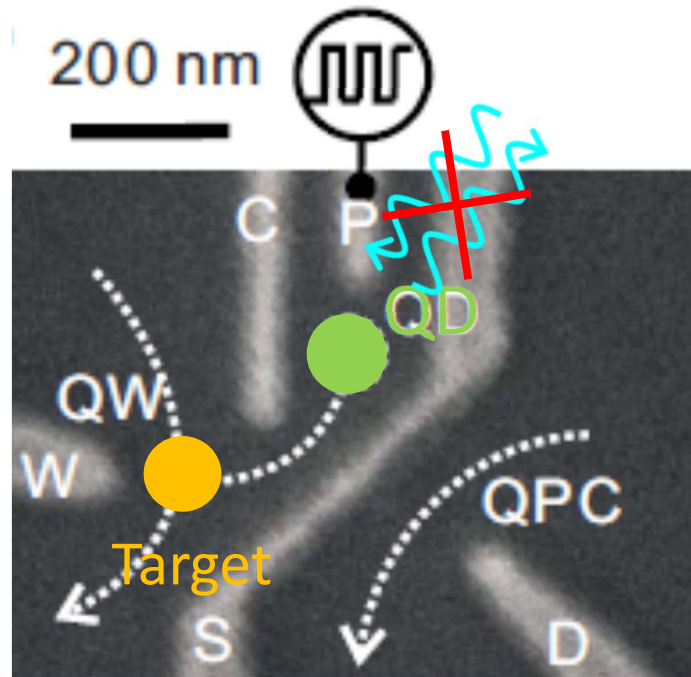
- ・ 新しい物理現象
- ・ 新しいデバイス応用



局所電子状態の  
マイクロプローブ



# 量子ドットを用いたマイクロプローブ

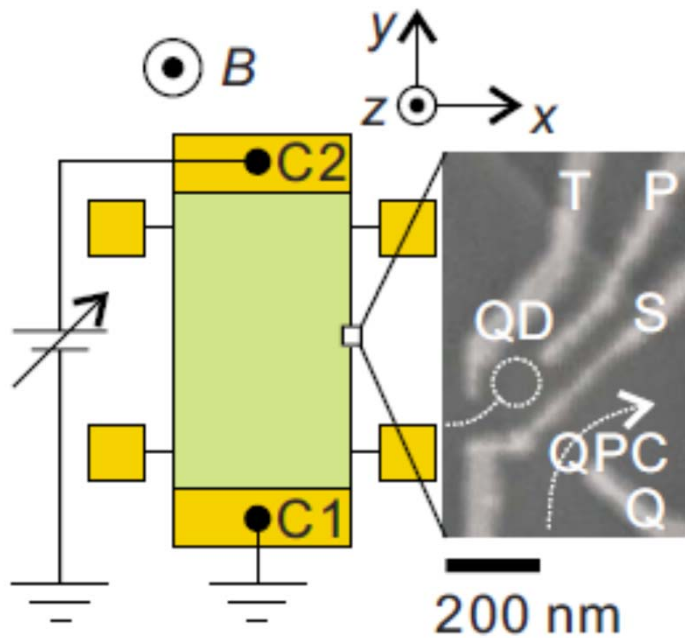


局所電子状態にアクセスできる( $\sim 10\text{nm}$ )

良いエネルギー分解能( $\sim 10\mu\text{eV}$ )

測定における擾乱を小さくできる( $\sim 100\text{aA}$ )

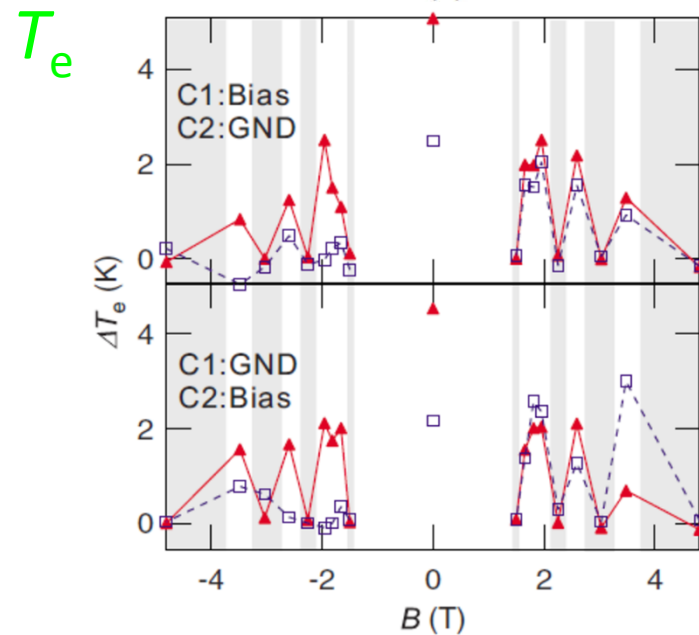
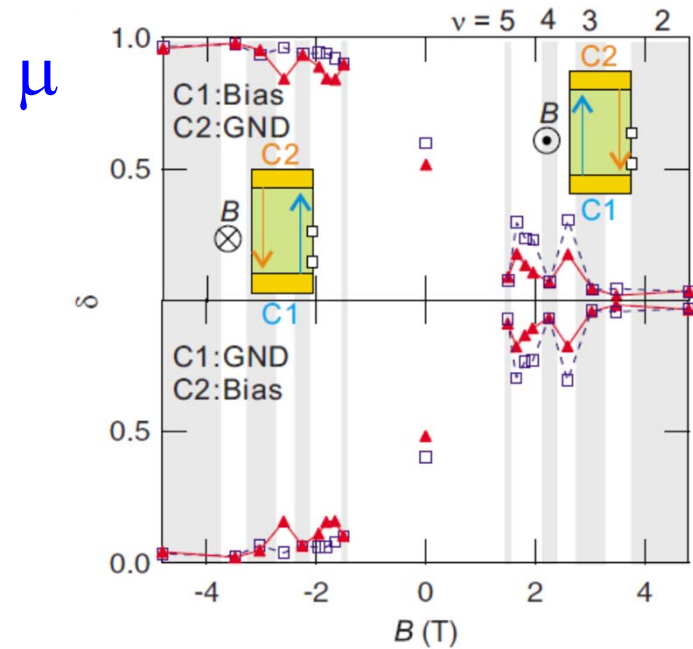
# マイクロプローブの測定例：量子ホール効果



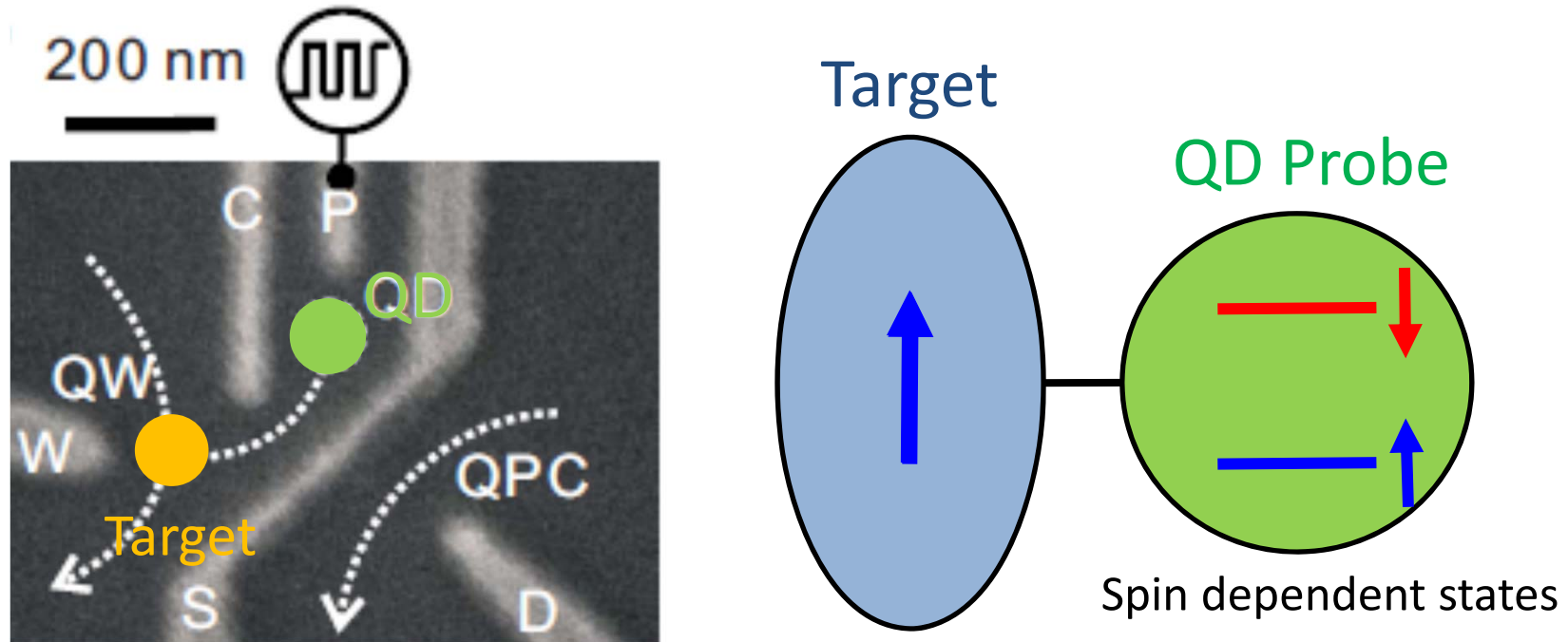
TO *et al.*, PRB 2010

エッジ状態のカイラリティ

エネルギー散逸の抑制



# ミクロなスピン状態の観測



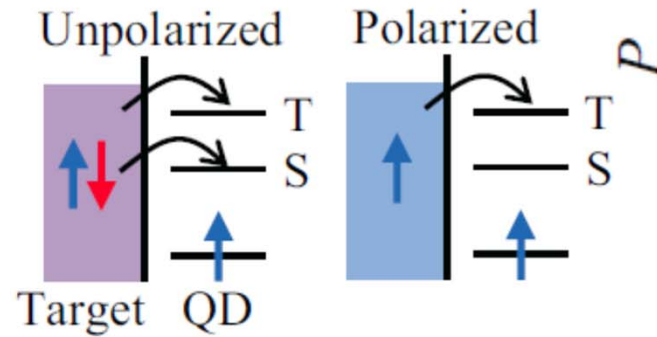
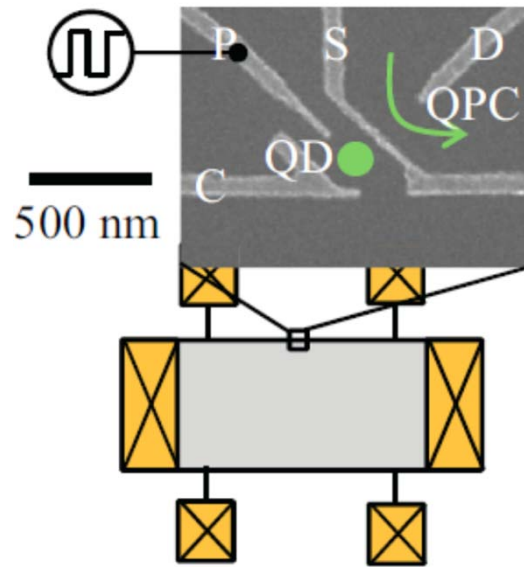
局所電子状態にアクセスできる( $\sim 10\text{nm}$ )

良いエネルギー分解能( $\sim 10\mu\text{eV}$ )

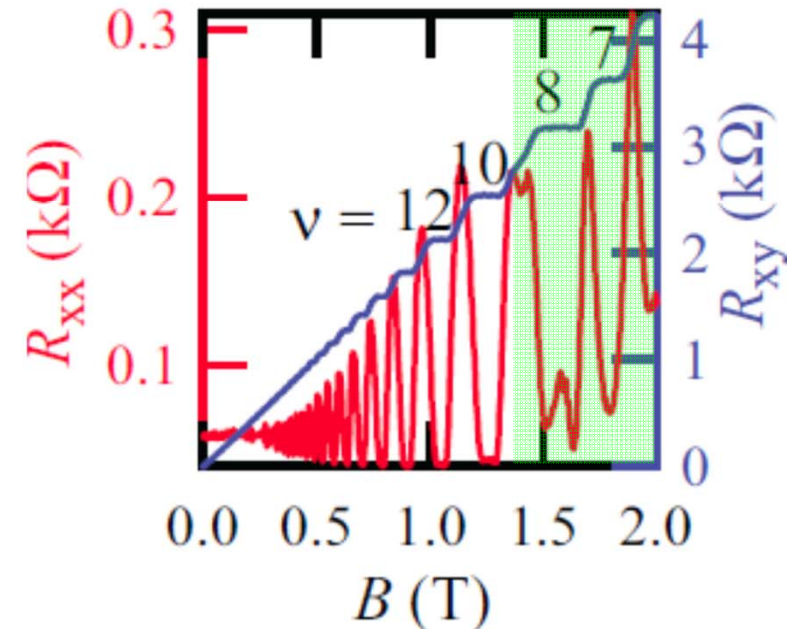
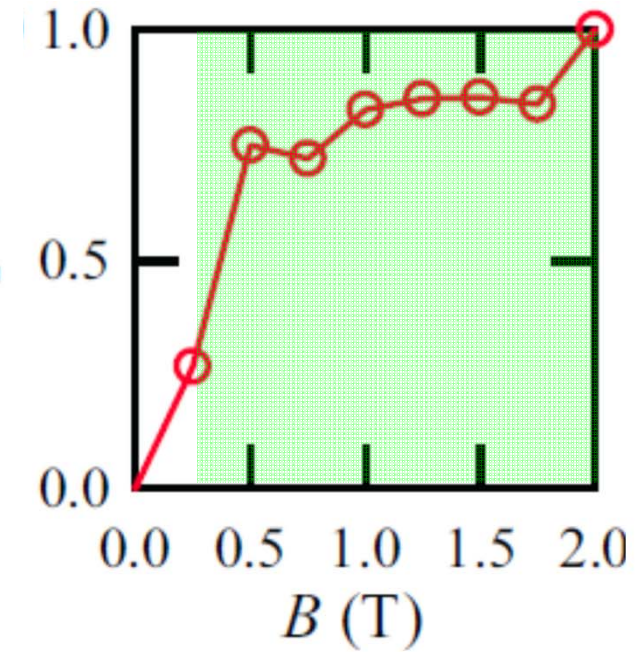
測定における擾乱を小さくできる( $\sim 100\text{aA}$ )

局所的なスピン状態にアクセスできる

# マイクロスピンプローブの測定例：量子ホール効果

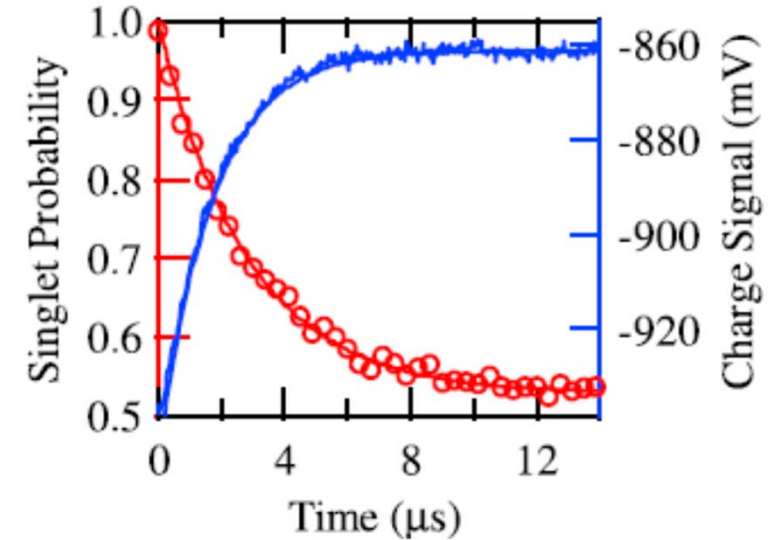
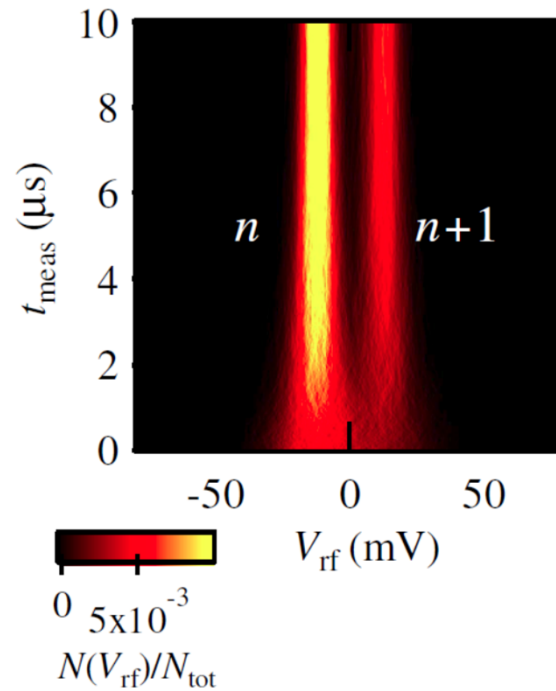
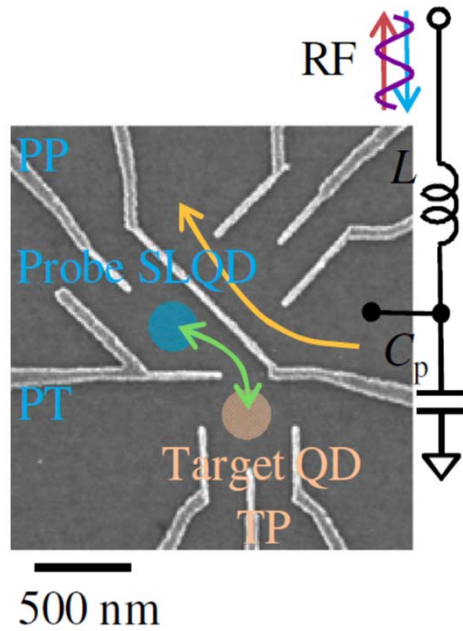


TO *et al.*, PRB 2012



試料端に形成された局所的な  
スピン偏極の観測

# 高速マイクロプローブ



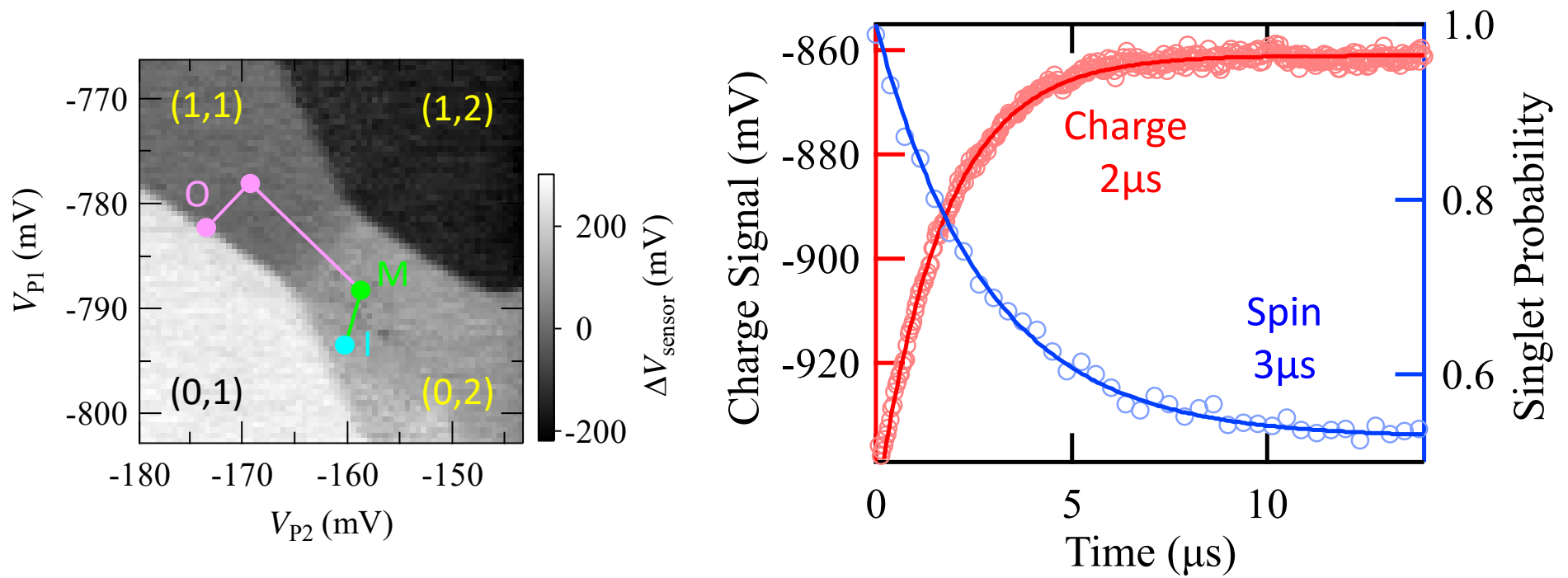
TO *et al.*, Sci. Rep. 2015

TO *et al.*, Sci. Rep. 2017

単一電荷の高速測定 ( $\sim 5 \mu\text{s}$ )

局所電子状態のダイナミクス測定 (ポンププローブ法により  $\sim 100 \text{ps}$ )

# Charge and Spin Dynamics



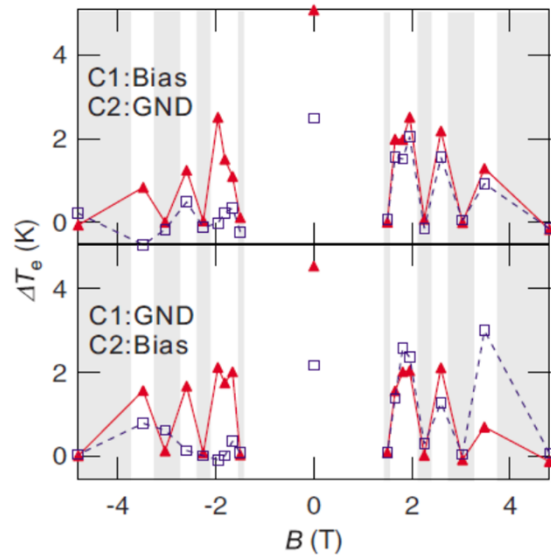
Otsuka *et al.*, Sci. Rep. 2017

Otsuka *et al.*, PRB 2019

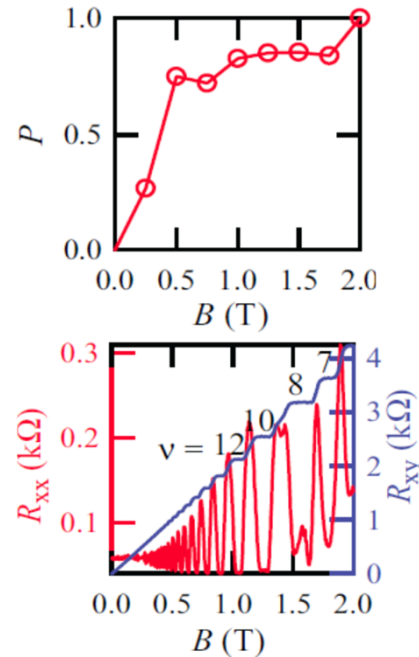
Relaxation of the charge and spin states is observed.

# マイクロプローブ実験のまとめ

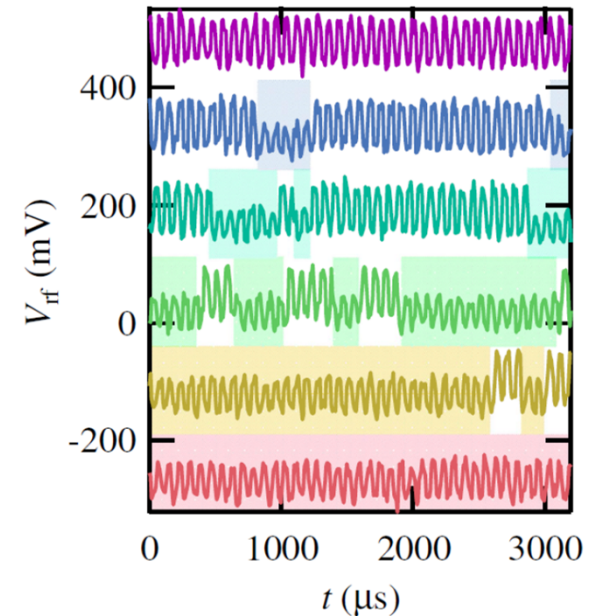
## 局所電子状態検出



## 局所スピン状態検出



## 高速測定

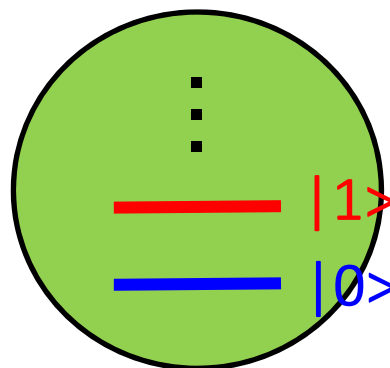


局所的電子、スピン状態のダイナミクス測定

量子情報, スピントロニクス, 基礎物理, ...

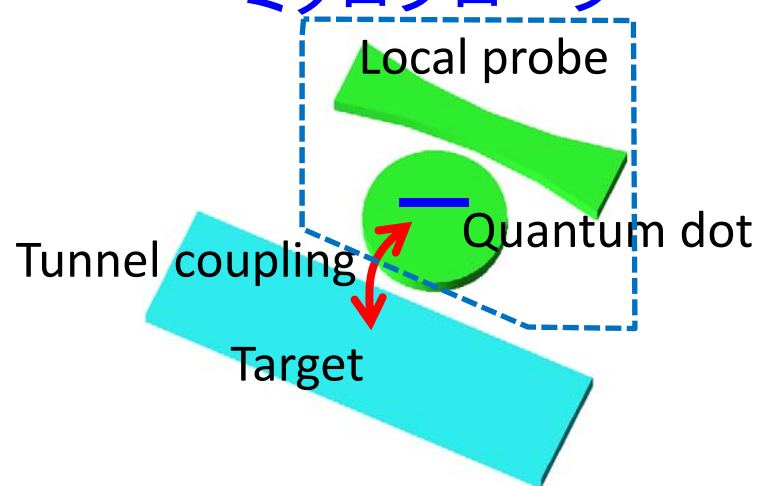
# 人工量子状態の応用

## 半導体量子ドット

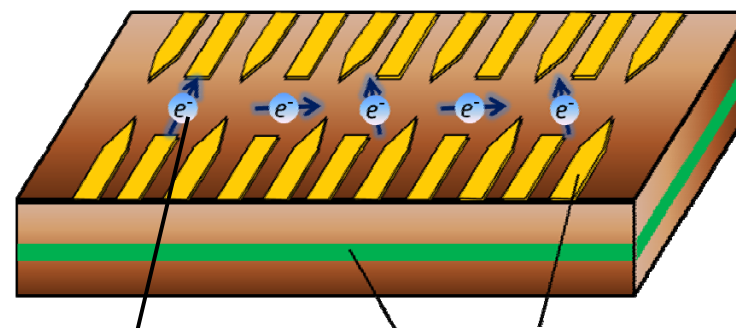


人工量子状態

局所的な電子状態を検出する  
マイクロプローブ



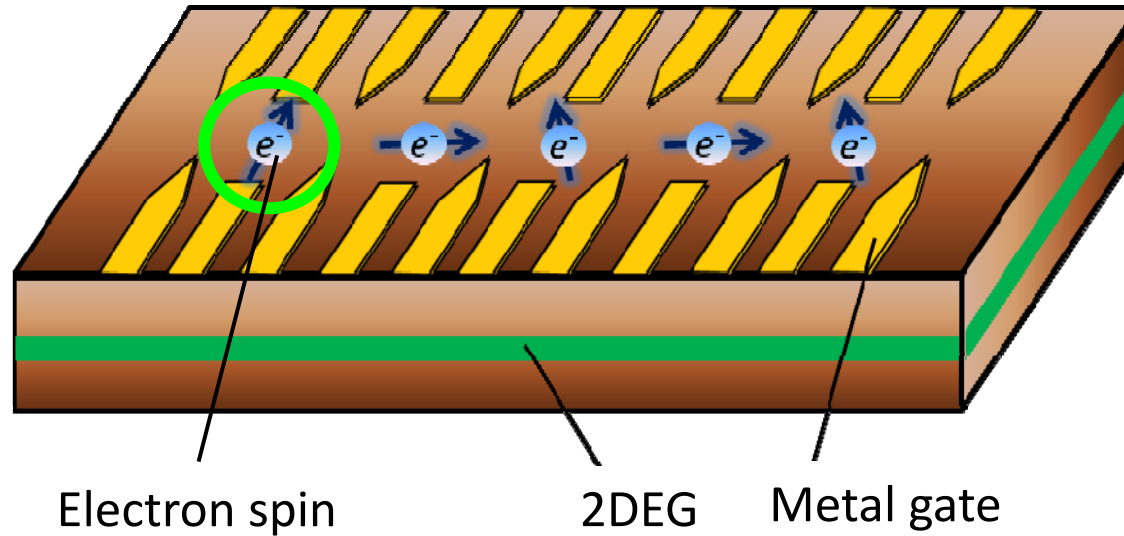
局所的な電子状態を制御する  
量子ビット



Electron spin 2DEG Metal gate

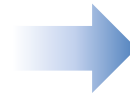


# スピン量子ビット



## 量子ドット中の電子スピン

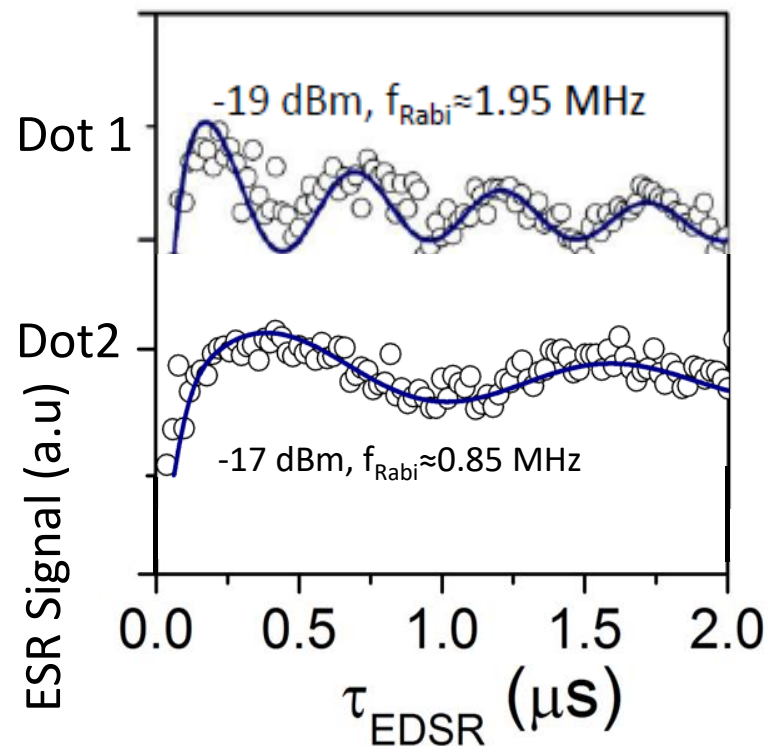
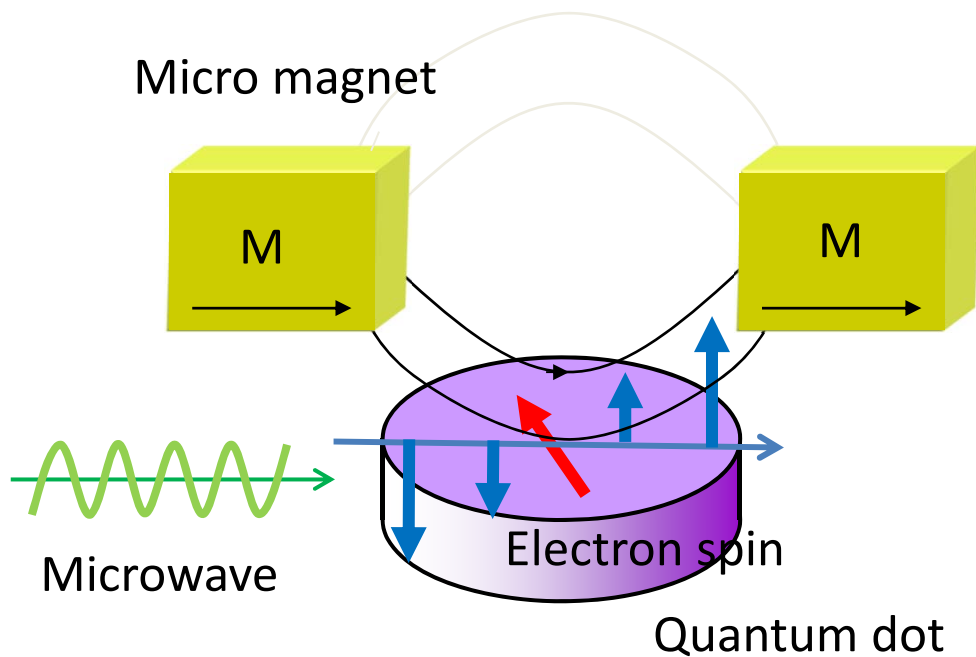
- ・ 長いコヒーレンス時間
- ・ 初期化, 読み出し
- ・ スピン状態操作 ESR +  $\nu$ SWAP
- ・ 大規模化



量子情報処理に向けた  
スピン量子ビット

D. Loss *et al.*, PRA 1998

# 微小磁石を用いた量子ビット操作



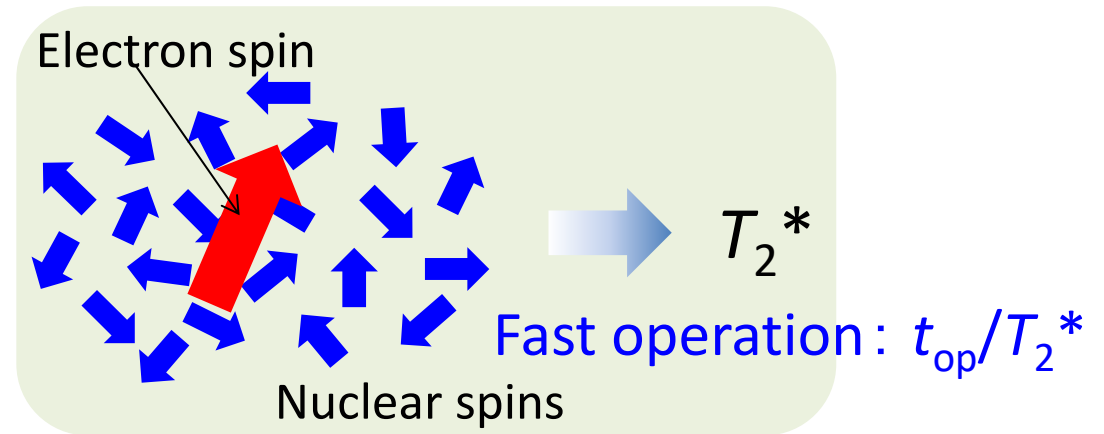
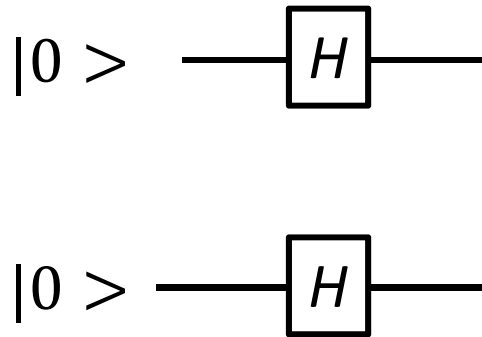
Y. Tokura *et al.*, PRL 2006

M. Pioro-Ladrière *et al.*, Nat. Phys. 2008

R. Brunner *et al.*, PRL 2011

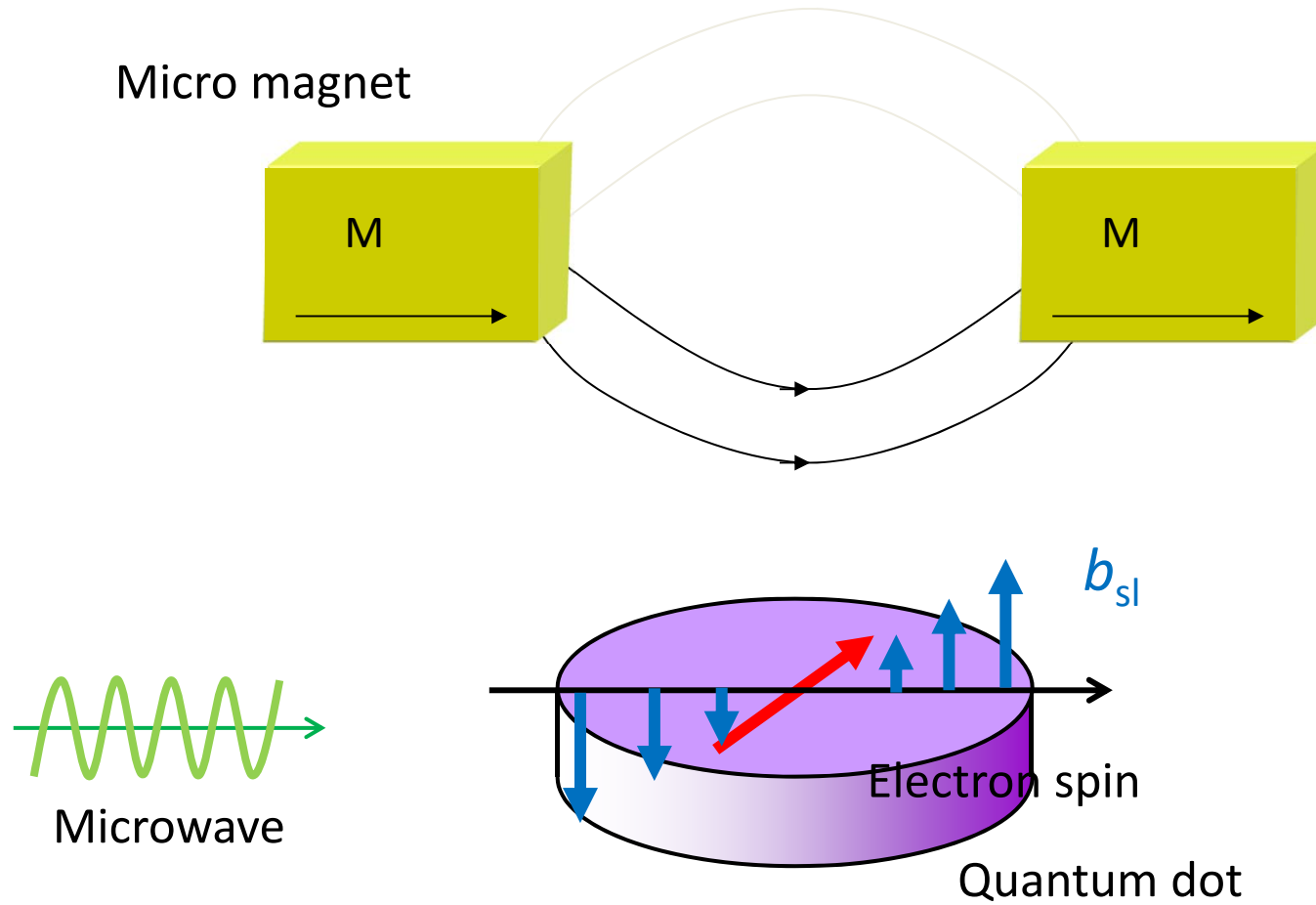
# より大規模な量子操作に向けて

時間軸方向の改善  
たくさんのゲート操作を繰り返す



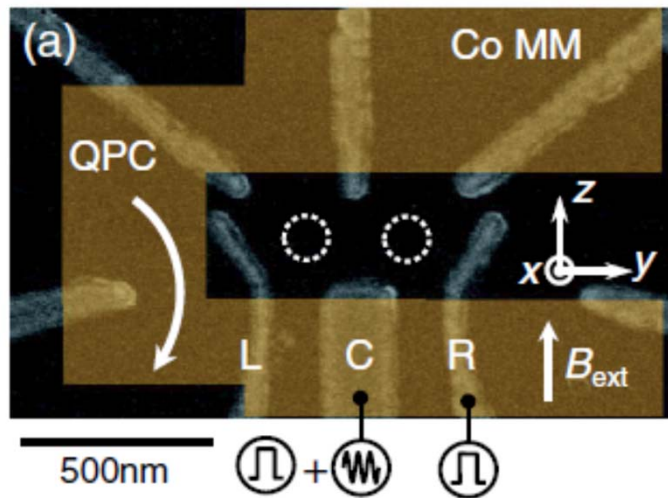
# 量子ビット操作の高速化

操作スピード  $\propto$  磁場勾配  $b_{sl}$



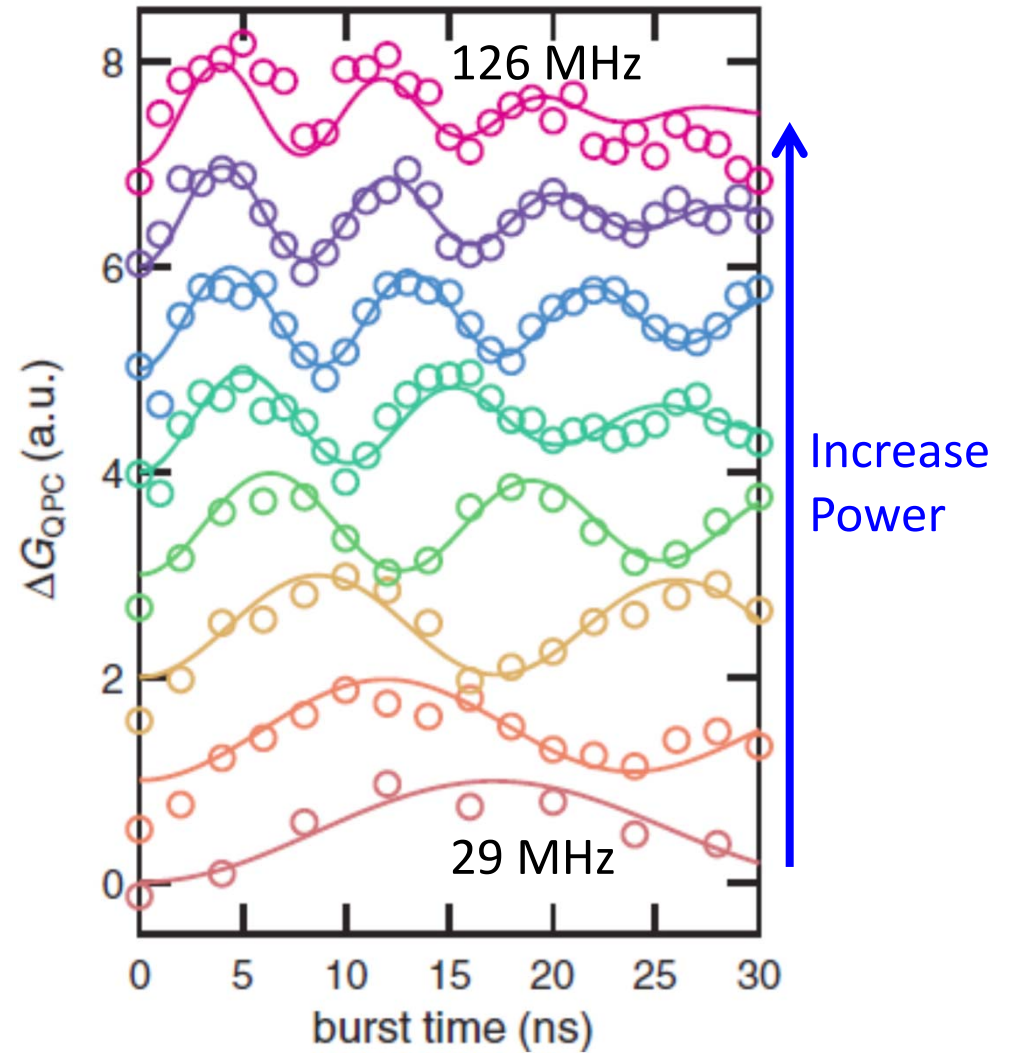
# 高速ラビ振動

GaAs quantum dots

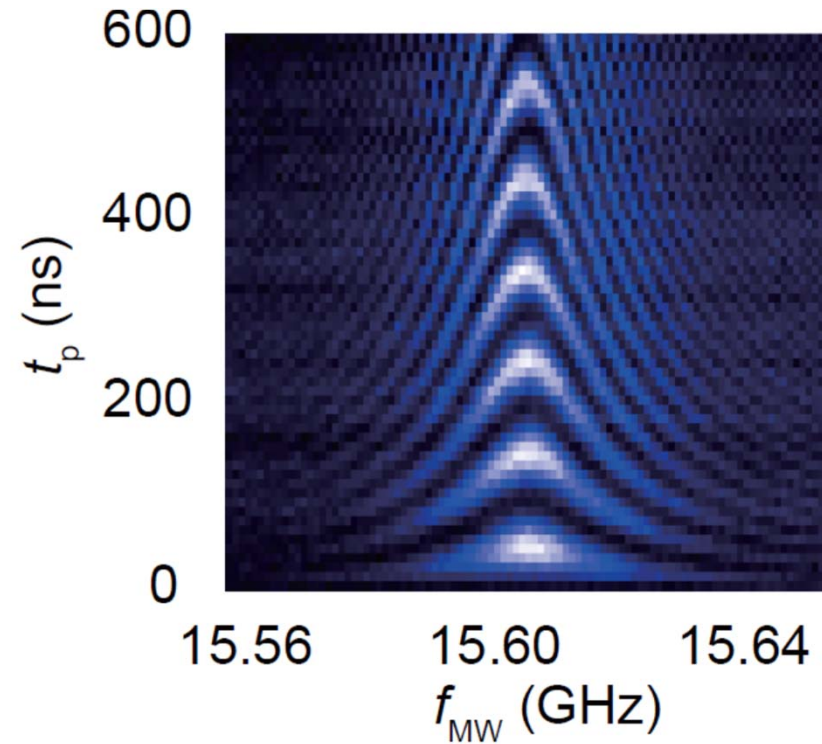
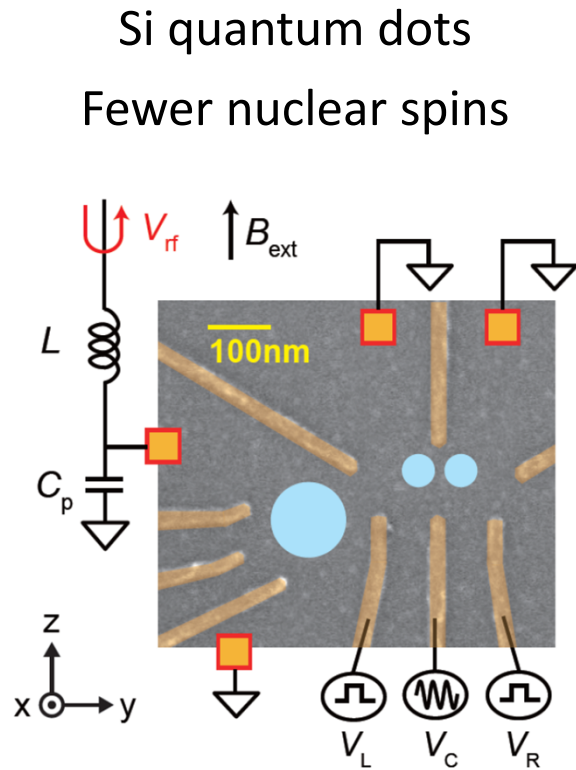


JY\*, TO\* *et al.*, PRL 2014

JY, TO *et al.*, APEX 2015



# さらなる高忠実度化に向けて

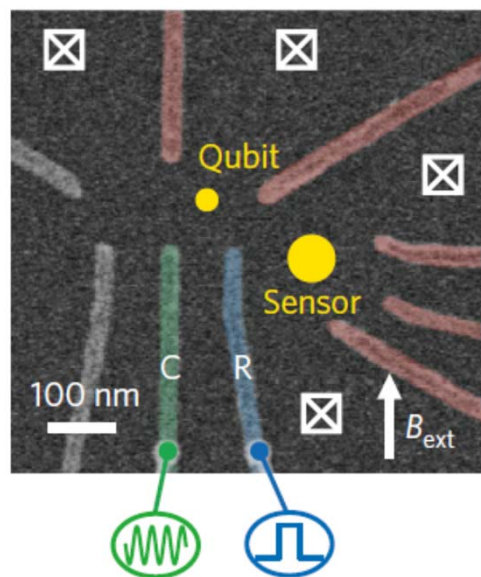


KT, ... TO *et al.*, Sci. Adv. 2016

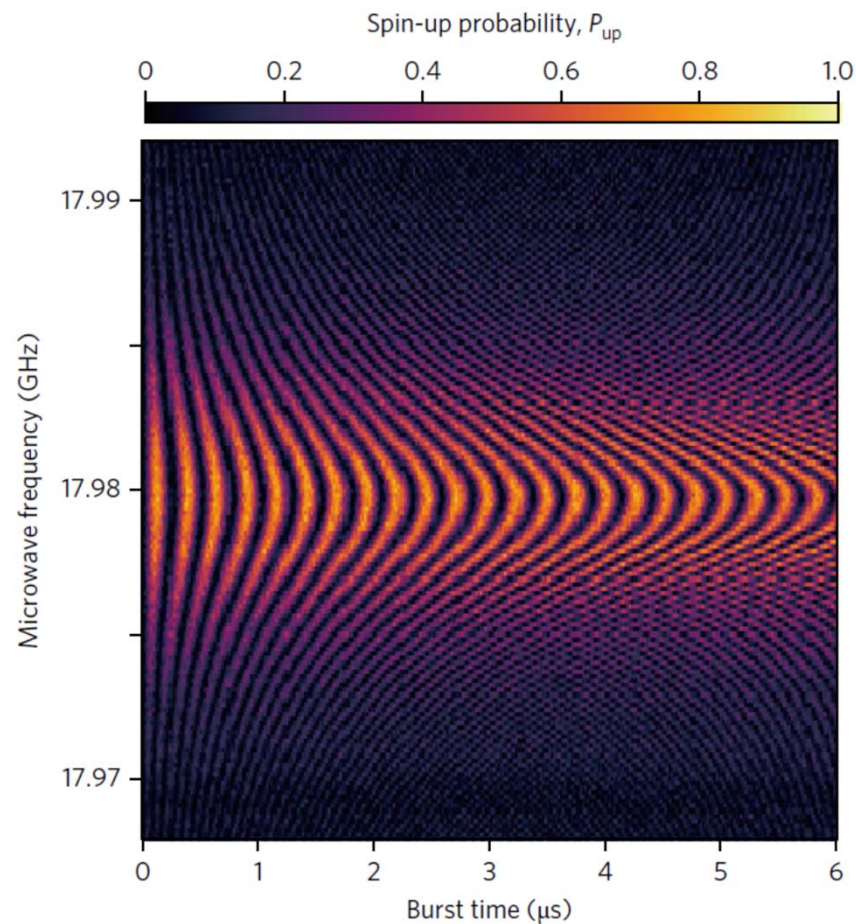
Operation fidelity 99.6%

# さらなる高忠実度化に向けて

Si quantum dots  
Isotope purified (800ppm)

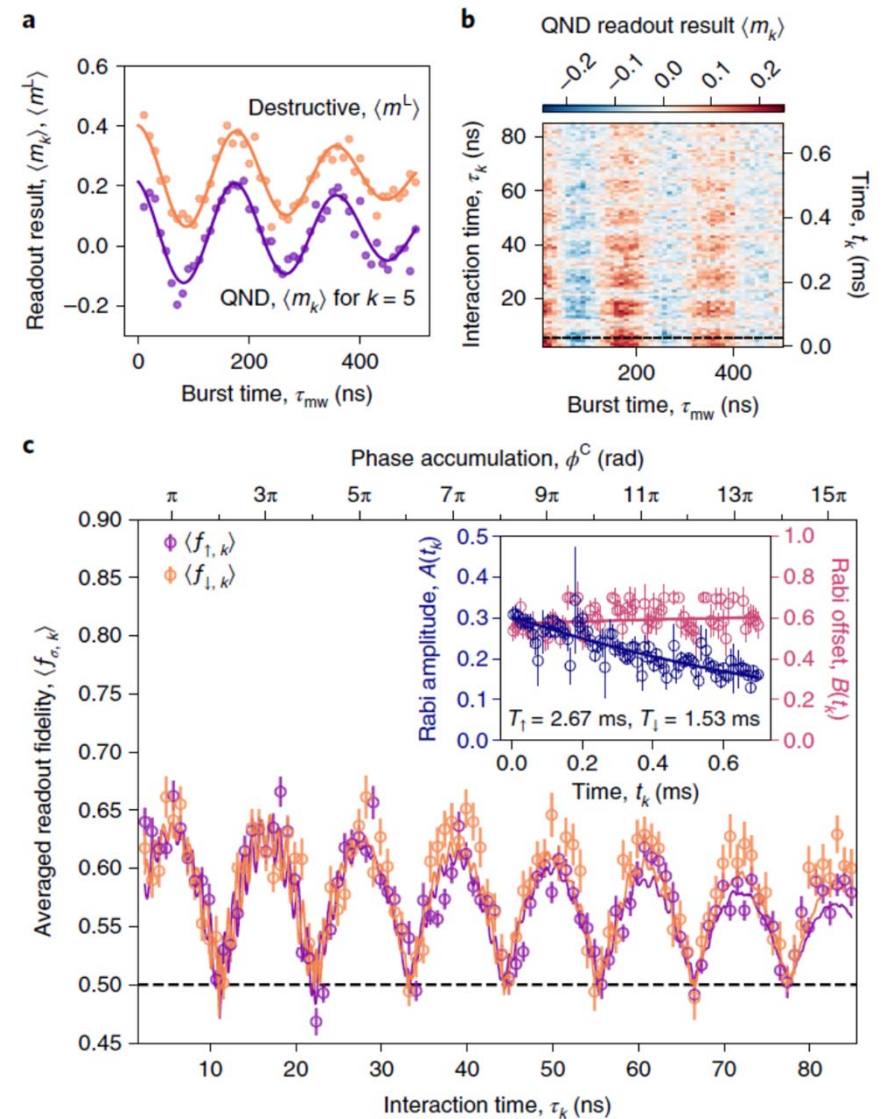
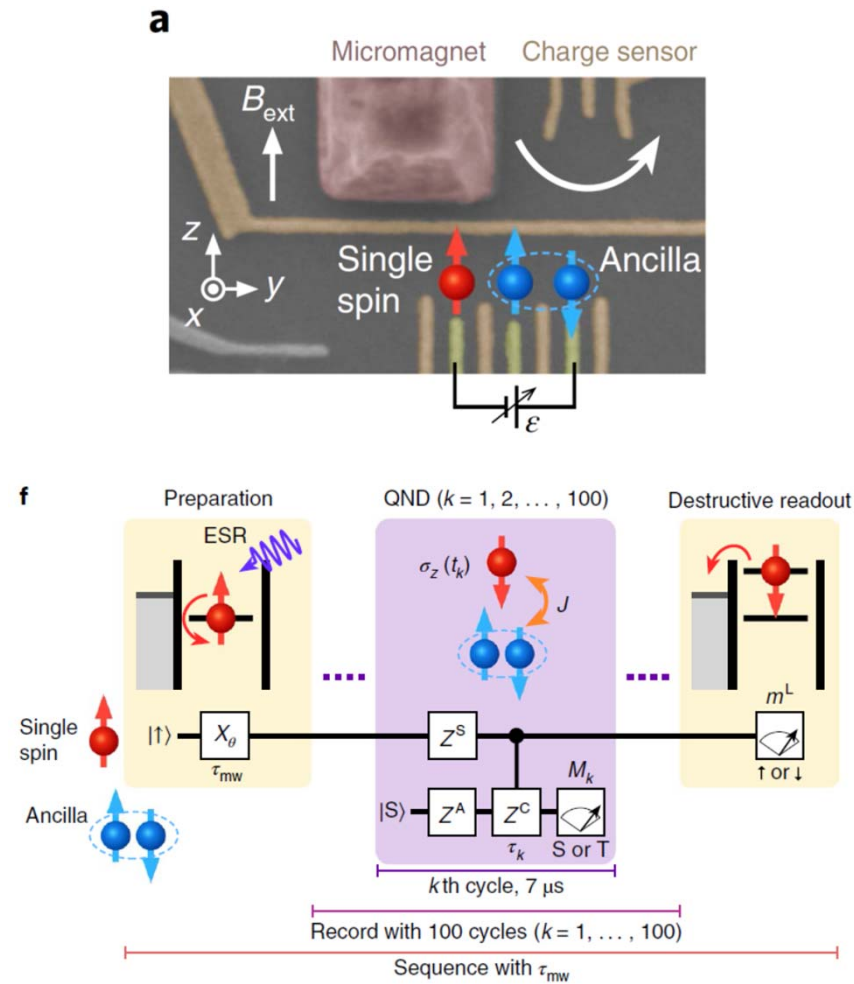


JY, ... TO *et al.*, Nature Nanotech. 2018



Operation fidelity 99.9%

# Quantum Nondemolition Measurement

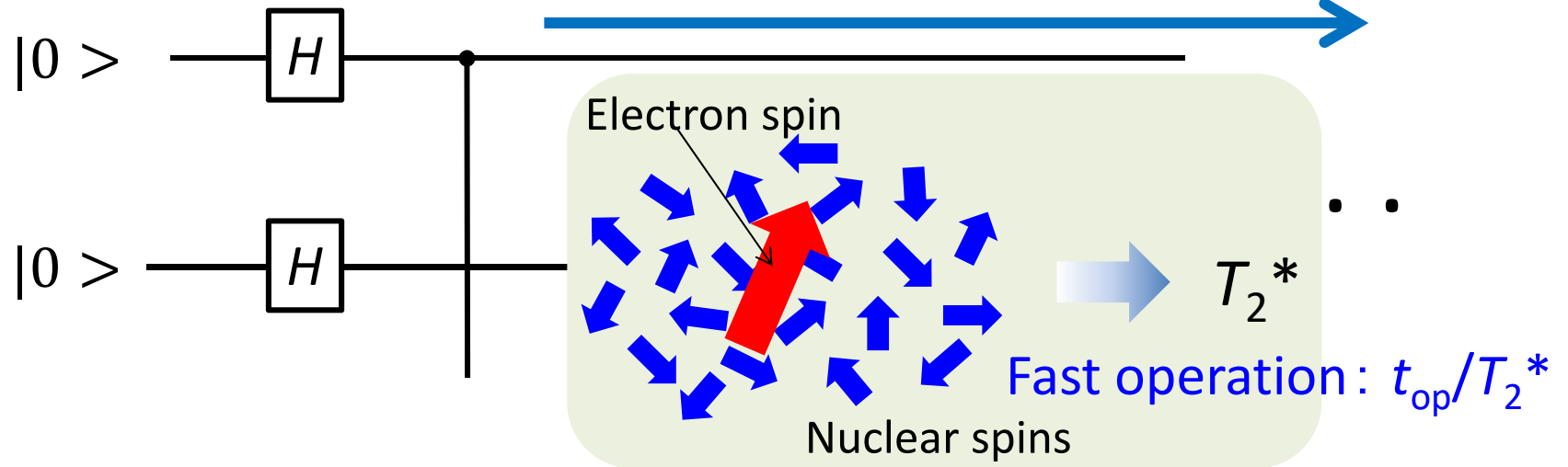


Nakajima *et al.*, Nature Nanotech. 2019



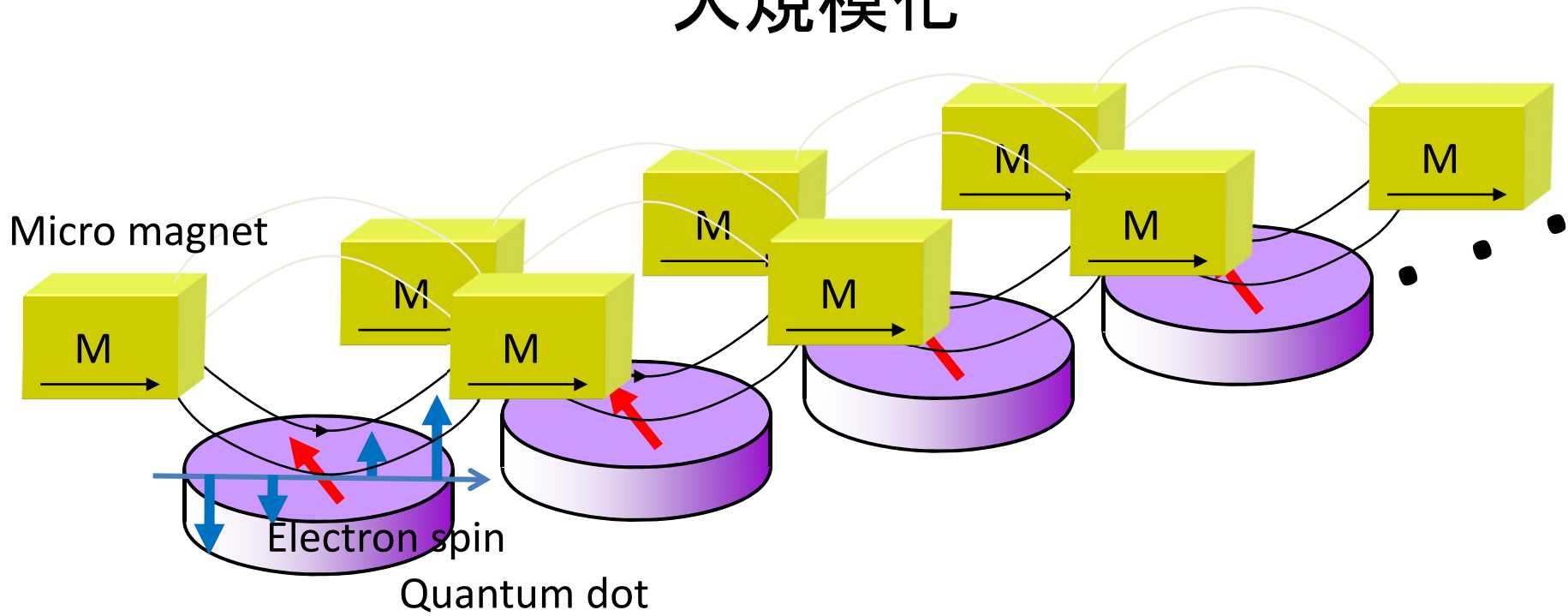
# より大規模な量子操作に向けて

時間軸方向の改善  
たくさんのゲート操作を繰り返す

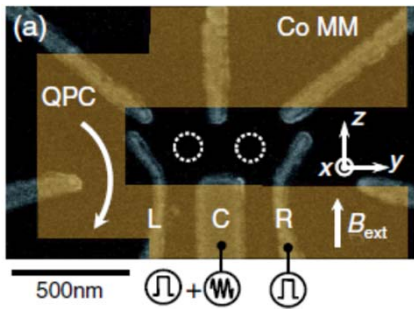


空間軸方向の改善  
量子ビットの数を増やす

# 大規模化

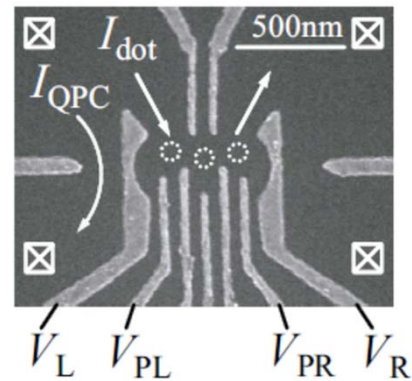


Double QD



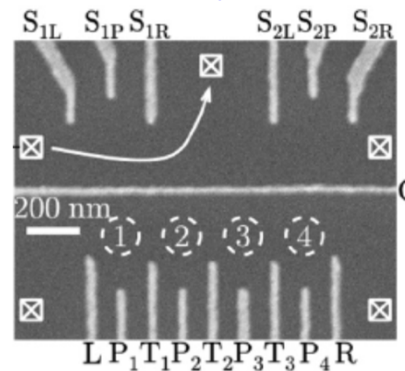
JY\*, TO\* *et al.*, PRL 2014

Triple QD



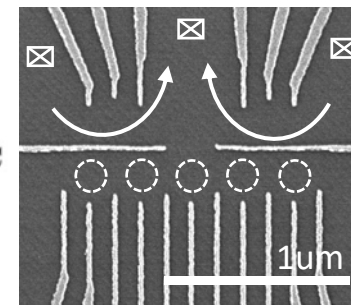
AN, ... TO *et al.*, APL 2016

Quadruple QD



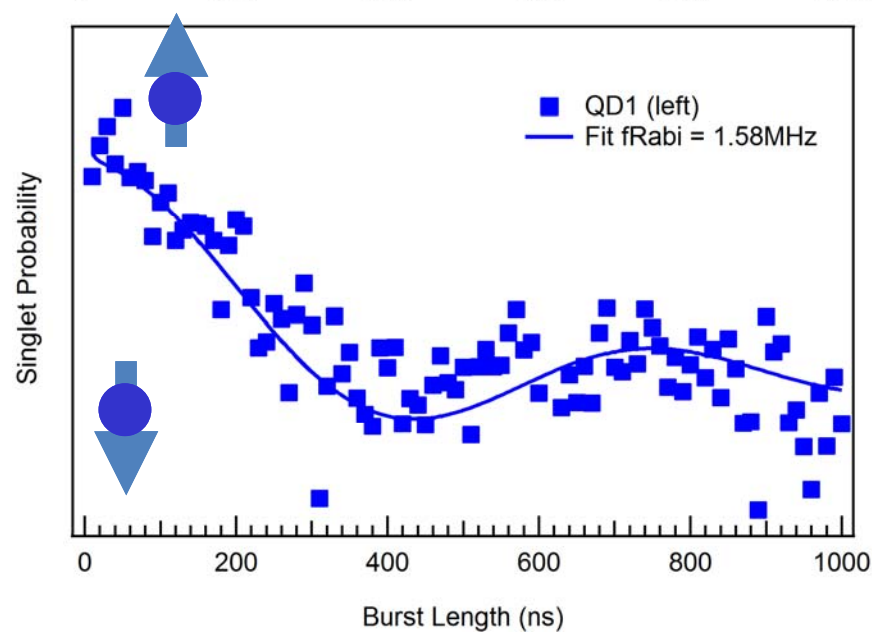
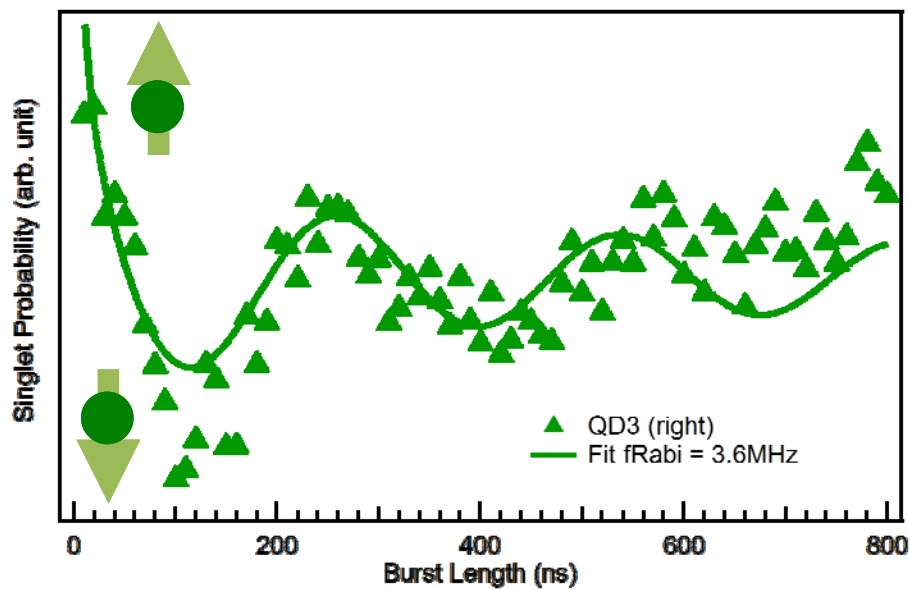
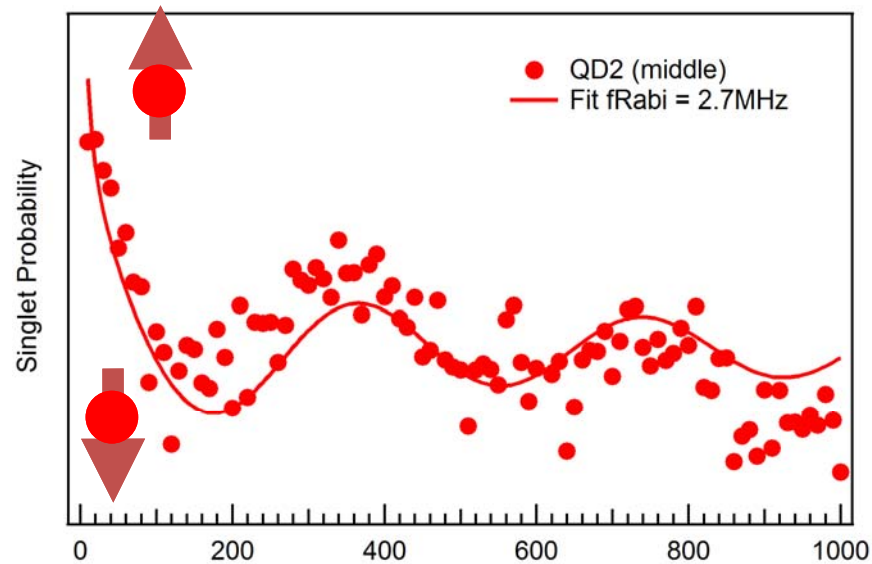
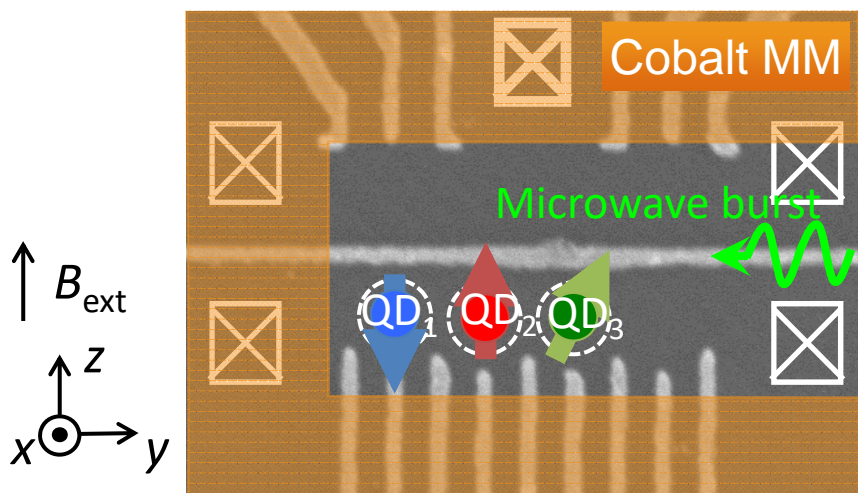
TO *et al.*, Sci. Rep. 2016

Quintuple QD



TI\*, TO\* *et al.*, Sci. Rep. 2016

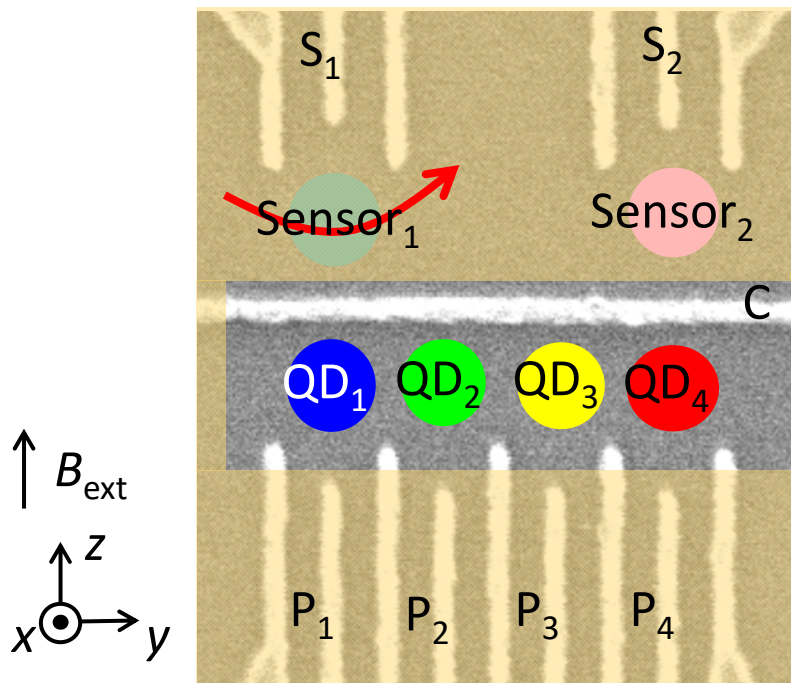
# 三重量子ドット



3つの独立なラビ振動

AN, ... TO *et al.*, APL 2016

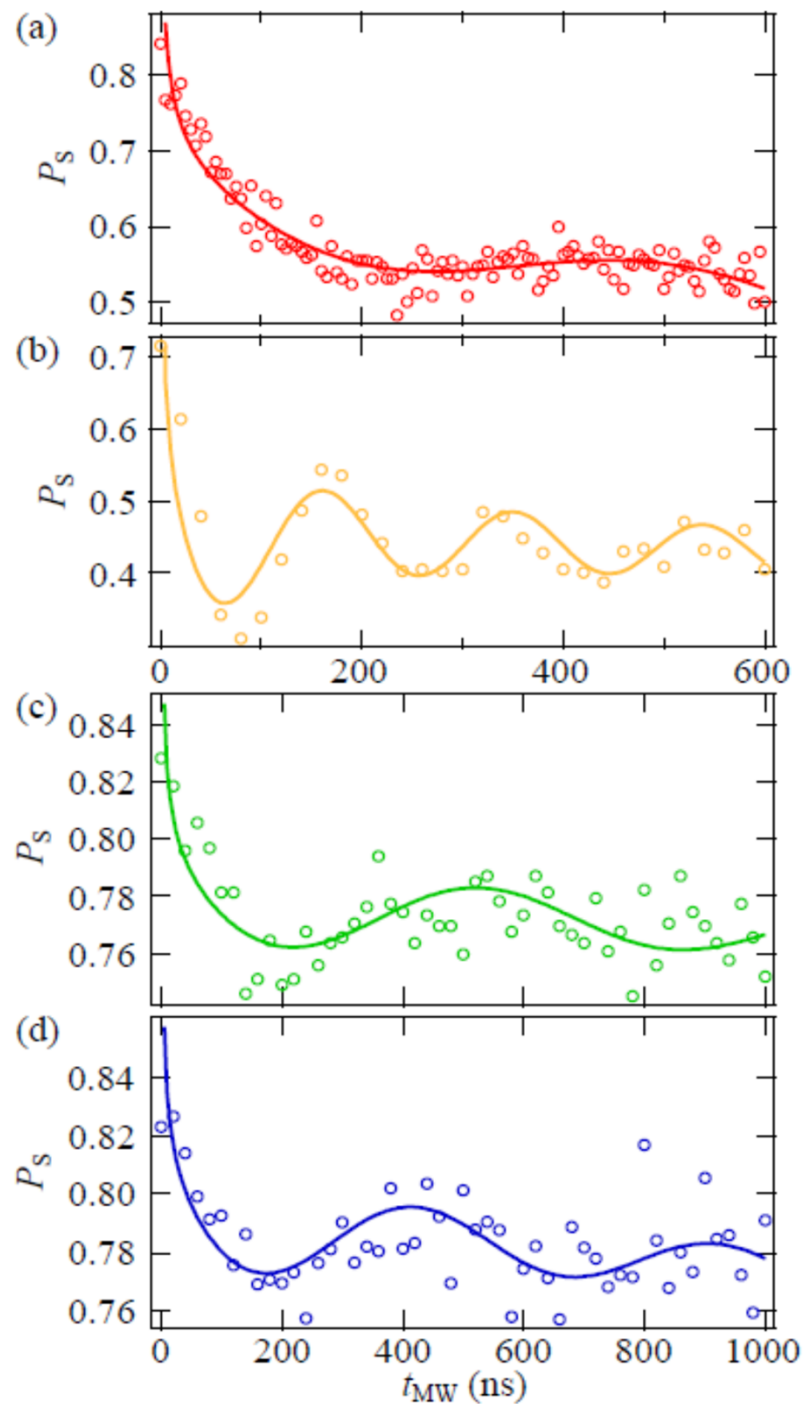
# 四重量子ドット



TO *et al.*, Sci. Rep. 2016

TI\*, TO\* *et al.*, APL 2018

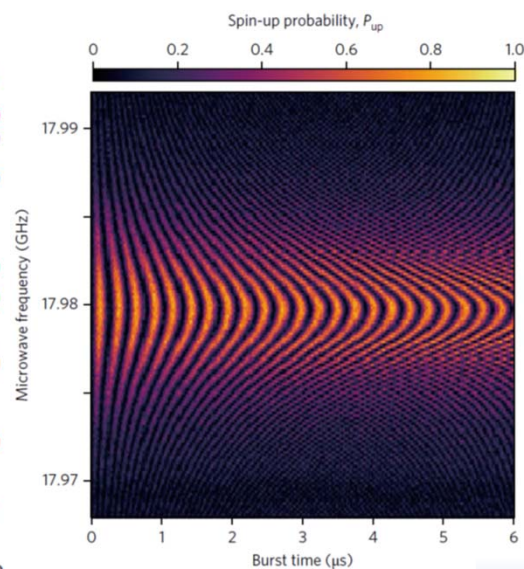
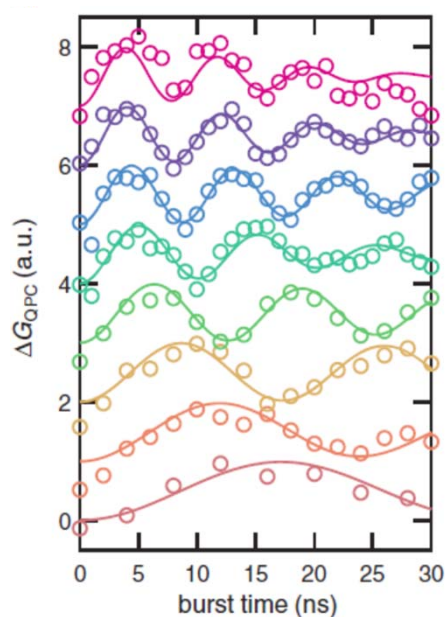
4つの独立なラビ振動



# 量子ビット実験のまとめ

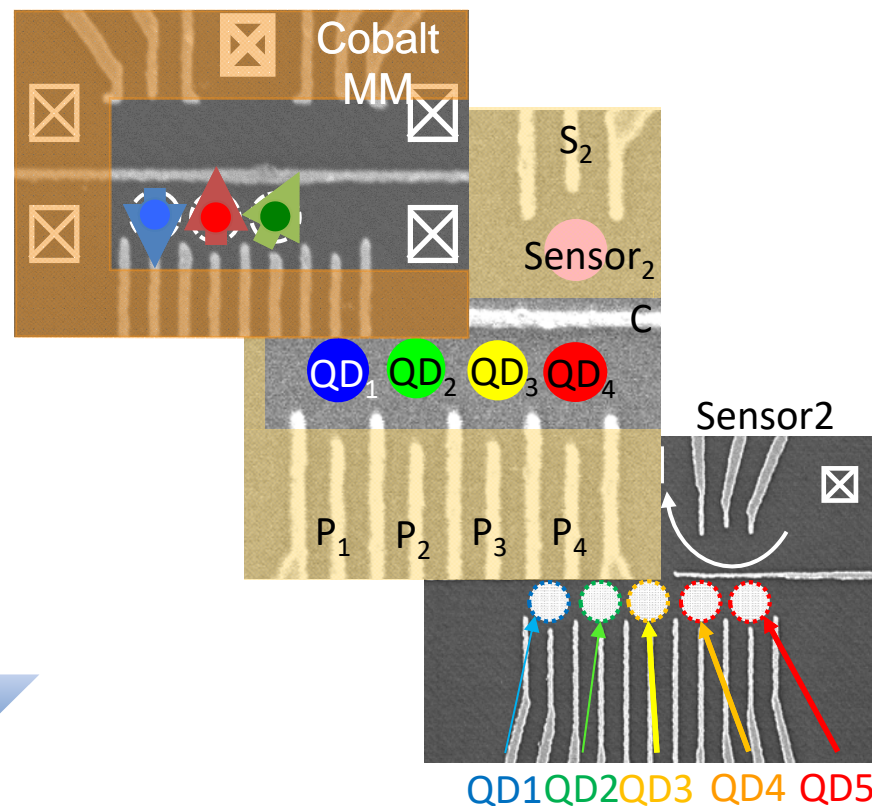
時間軸方向の改善

$$t_{op}/T_2^*$$



空間軸方向の改善

多ビットシステム

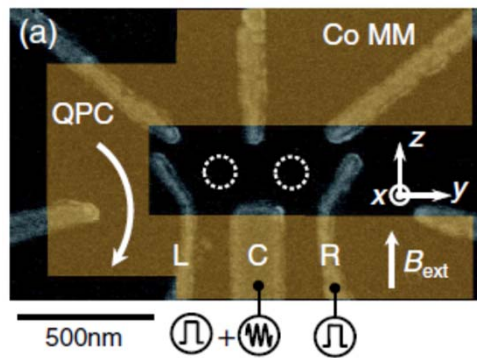


量子テレポーテーション, 量子エラー訂正

量子計算, 量子シミュレーション

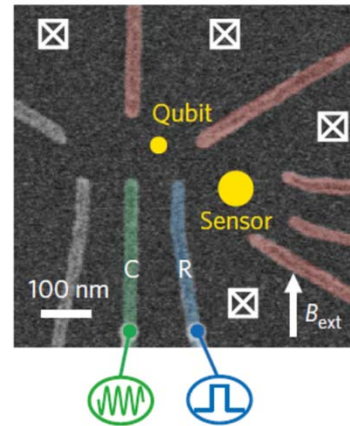
# Quantum Dots in New Materials

GaAs



- High mobility
- Small effective mass
- Nuclear spins

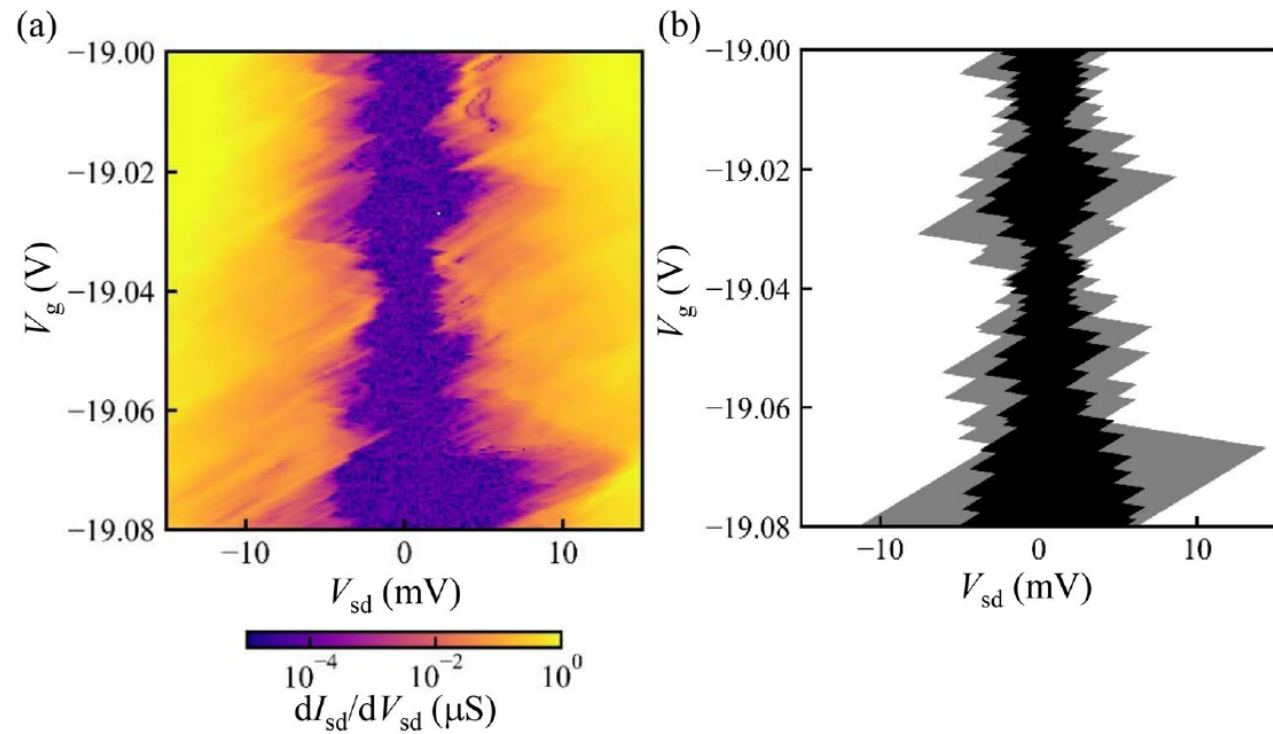
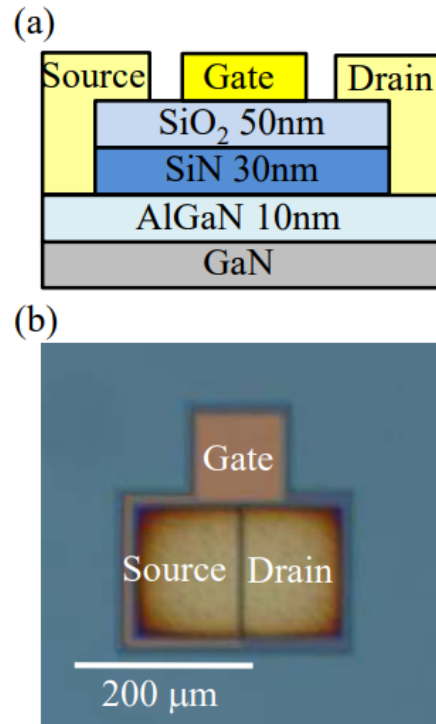
Si



- Nuclear spin free
- Large effective mass
- Valley

?

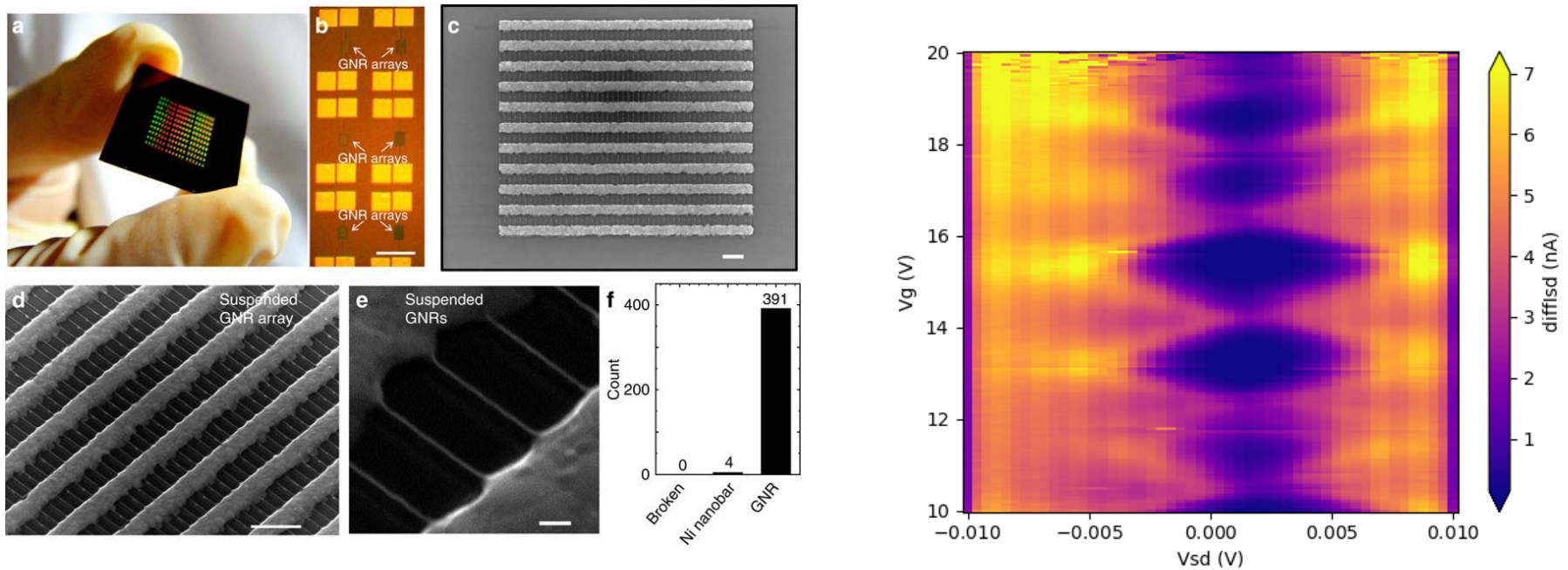
# GaN



Otsuka *et al.*, Sci. Rep. 2020

Formation of quantum dots in GaN FETs

# Graphene Nano Ribbon



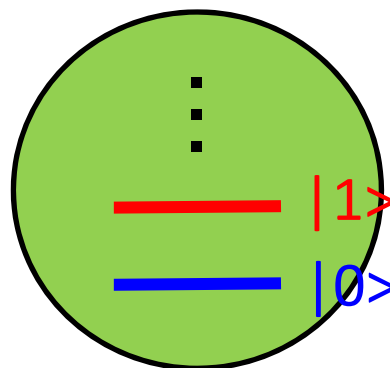
H. Suzuki *et al.*, Nat. Commun. 2016

Formation of quantum dots in graphene nano ribbons



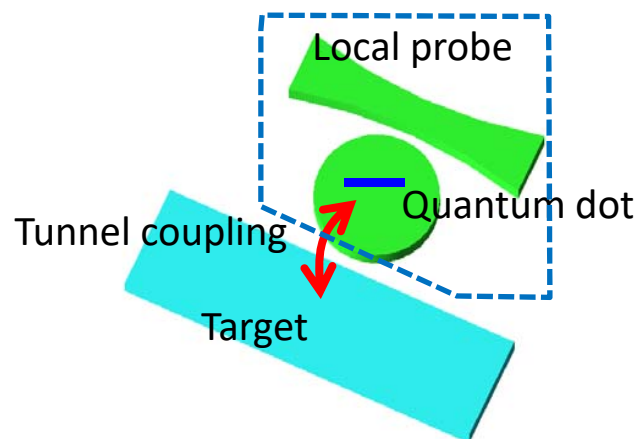
# 人工量子状態の応用

## 半導体量子ドット

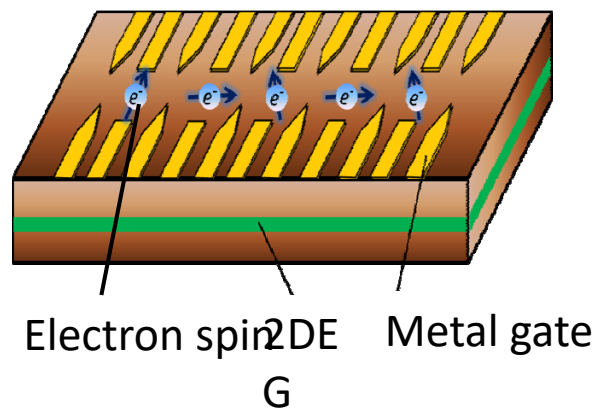


人工量子状態

局所的な電子状態を検出する  
マイクロプローブ



局所的な電子状態を制御する  
量子ビット



素粒子、放射線実験

極限計測

量子ビットの放射線耐性

# 量子ビットと放射線

Article

## Impact of ionizing radiation on superconducting qubit coherence

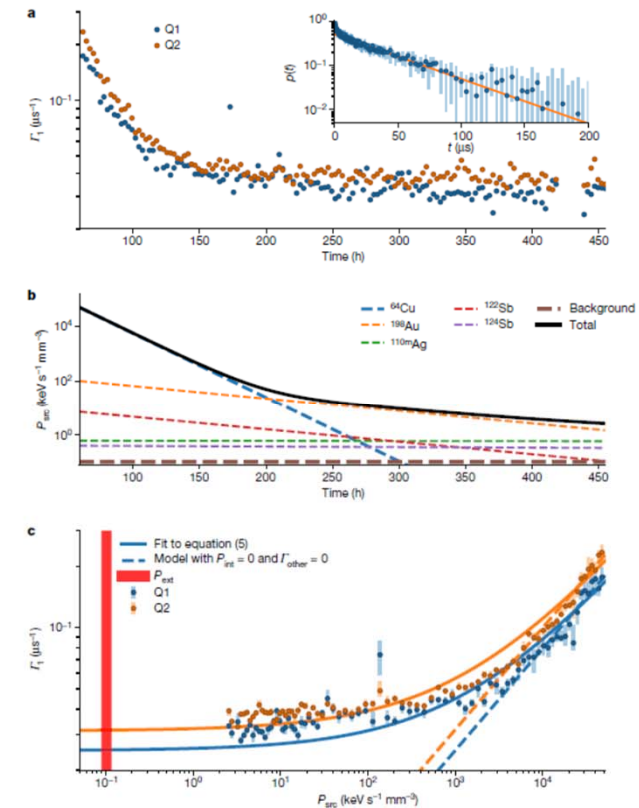
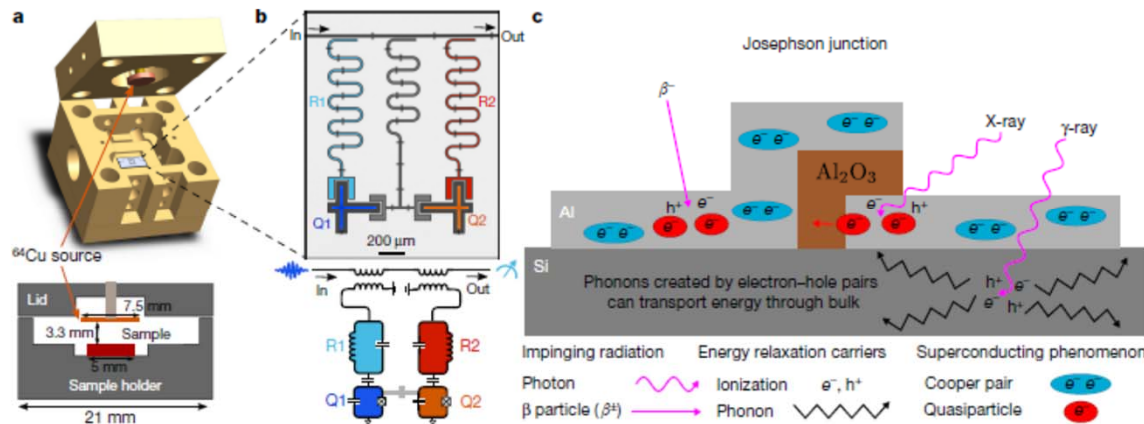
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2619-8>

Received: 25 January 2020

Accepted: 5 June 2020

Published online: 26 August 2020

Antti P. Vepsäläinen<sup>1</sup>✉, Amir H. Karamlou<sup>1</sup>, John L. Orrell<sup>2</sup>✉, Akshunna S. Dogra<sup>1,4</sup>, Ben Loer<sup>2</sup>, Francisca Vasconcelos<sup>1</sup>, David K. Kim<sup>3</sup>, Alexander J. Melville<sup>3</sup>, Bethany M. Niedzielski<sup>3</sup>, Jonilyn L. Yoder<sup>3</sup>, Simon Gustavsson<sup>1</sup>, Joseph A. Formaggio<sup>1</sup>, Brent A. VanDevender<sup>2</sup> & William D. Oliver<sup>1,3</sup>



# Collaborators

T. Nakajima, M. R. Delbecq, P. Stano, S. Amaha, J. Yoneda, K. Takeda,  
G. Allison, S. Li, A. Noiri, T. Ito, D. Loss, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha

T. Abe, T. Kitada, M. Shinozaki, Y. Muto, T. Aizawa, T. Kumasaka

RIKEN Tarucha group, Basel-RIKEN Loss group, RUB Andreas group

...