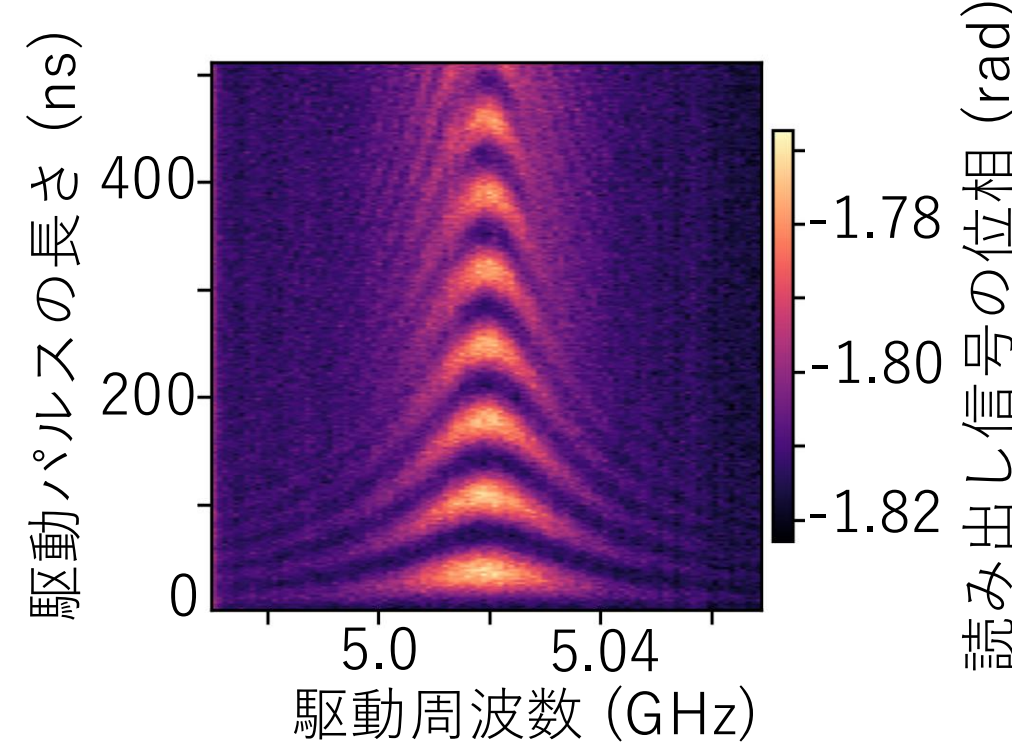
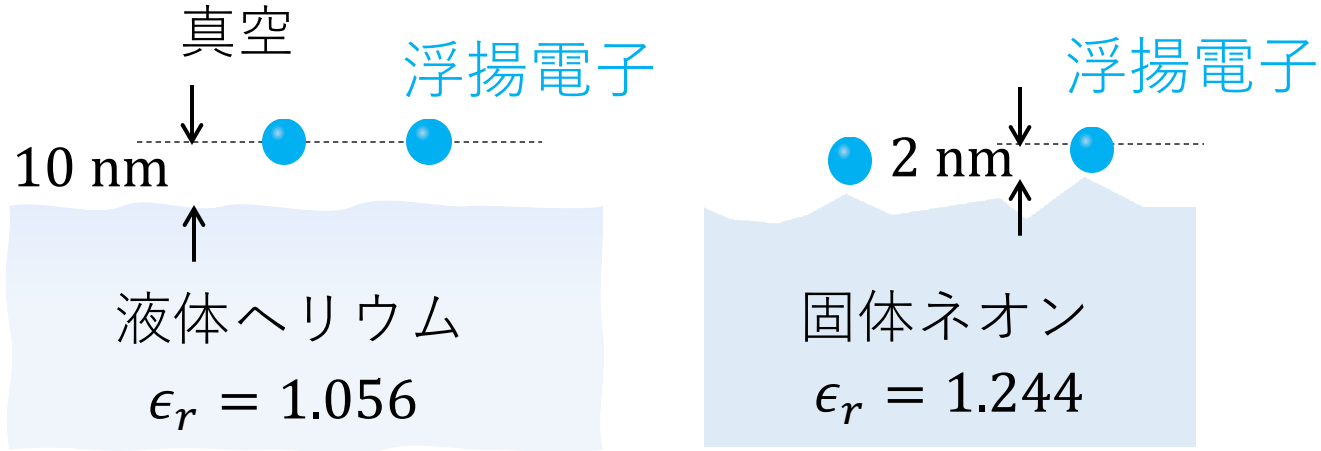
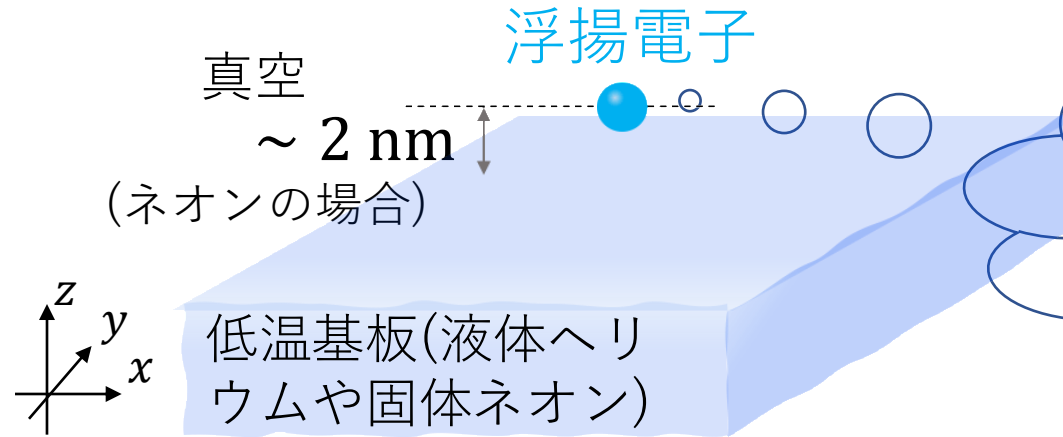


# 浮揚電子による量子ビット



# 浮揚電子の特徴



低温基板に引き寄せられるが内部に侵入できない  
→ 真空中に浮く！

## 固体量子ビット

## 真空中の量子ビット

- ・ 超伝導量子ビット
- ・ 半導体中の電子

☺ 微細加工によって高密度に集積可能

浮揚電子

☺ 長いコヒーレンス時間

- ・ Paulトラップ電子
- ・ 冷却原子
- ・ イオントラップ

$e^-$  電荷状態

: 量子ビット間の相互作用に用いる

🌀 スピン状態

: 量子ビット状態を担う

# なぜ浮かぶのか？

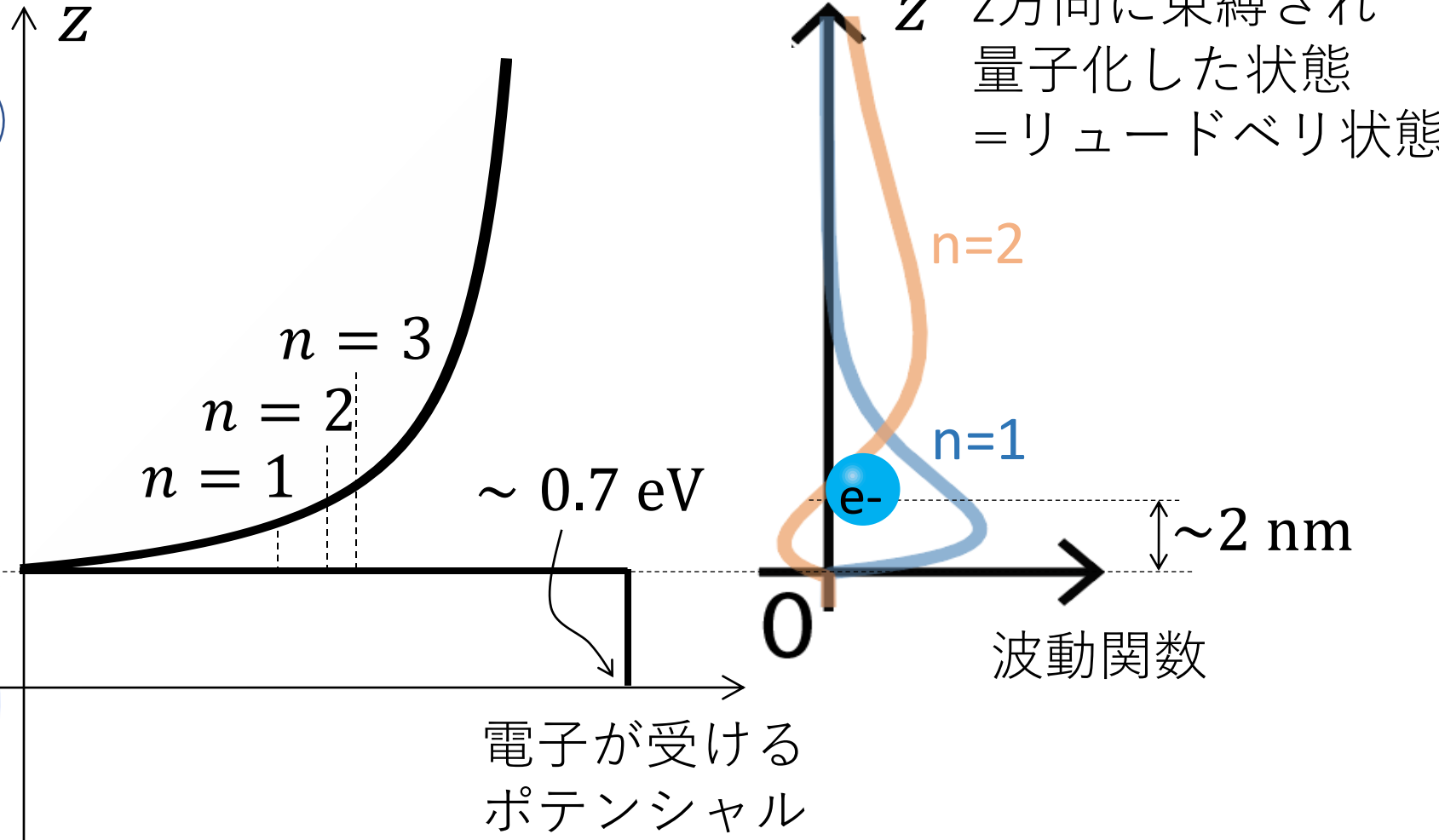
固体ネオンの場合

低温基板に引き寄せられるが入れない

真空の比誘電率:  
 $\epsilon_v = 1$

鏡像電荷:  $+\frac{\epsilon_r - \epsilon_v}{\epsilon_r + \epsilon_v} e$

低温基板の比誘電率:  
 $\epsilon_r = 1.244$  (固体ネオンの場合)



Y. Monarkha and K. Kono: Two-Dimensional Coulomb Liquids and Solids (Springer, Berlin/Heidelberg, 2004).

# 歴史

- 1969年 [理論] Cole and CohenとShikinが  
液体ヘリウム・固体ネオン・固体水素表面上の電子の存在を予測
- 1972年 [実験] Crandall and Williamsが 液体ヘリウム表面上の電子を測定
- 1976年 [実験] Grimesらが液体ヘリウム表面上の電子のリュードベリ状態を測定
- 1979年 [実験] Khaikinらが固体ネオン・固体水素表面上の電子を測定
- 1999年 [理論] Platzman and M. I. Dykmanが液体ヘリウム表面上の電子を用いた  
量子ビットの実現のための理論的提案
- 2005年 [実験] Papageorgiouらが液体ヘリウム表面上に単一電子を捕捉

# 量子ビット研究

液体ヘリウム

まだ量子ビットは出来ていない

**電荷**状態の分散読み出し

- 単一電子

[Koolstra, et al., Nat. Commun. 10, 5323 (2019)]

- 多数の電子

[Jennings, et al. EK, Phys. Rev. Lett. 135, 087001 (2025)]

☹ **電荷コヒーレンス時間が短い**

1  $\mu\text{s}$  (**電荷**, 実験) [EK et al., PRL 126, 106802 (2021)]

100 s (**スピン**, 理論) [Lyon, Phys. Rev. A 74, 052338 (2006)]

☺ **滑らかな表面** → 集積化に有利

参考: Si中の電荷量子ビットのコヒーレンス時間: 1  $\mu\text{s}$  (**電荷**, 実験) [Connorset al., Nature Comm. 13, 940 (2022)]

どちらの系でも、まだ **スピン** は測定されていない

固体ネオン

最近、  
電荷量子ビットが出来た

1 **電荷**量子ビットの実現

[Zhou et al., Nature 605, 46 (2022);  
Nat. Phys. 20, 116 (2024)]

2 **電荷**量子ビットゲートの実現

[X. Li, et al., arXiv:2503.23738]

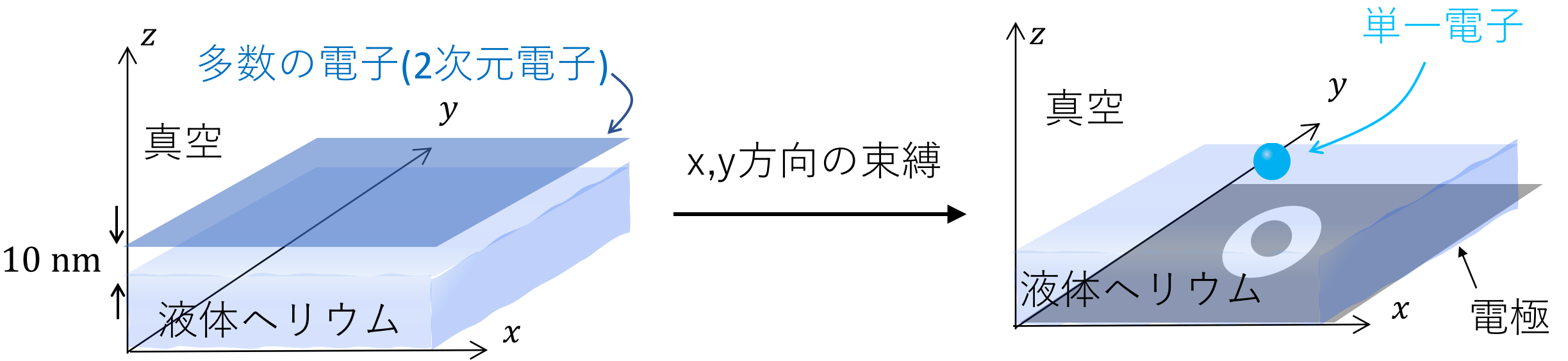
☺ **電荷コヒーレンス時間も長い:**

100  $\mu\text{s}$  (**電荷**, 実験) [Zhou et al., Nat. Phys. 20, 116 (2024)]  
 $T_2 = 2T_1$

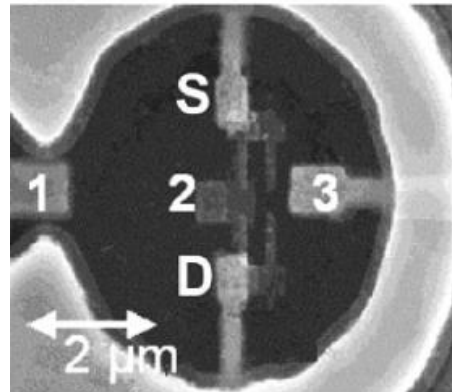
100 s (**スピン**, 理論) [Chen et al., Quantum Sci. Technol. 7, 045016 (2022)]

☹ **凸凹な表面** → 集積化が難しい?

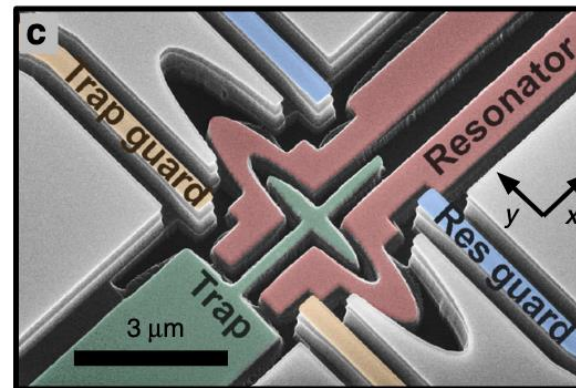
# 単一電子の捕捉：液体ヘリウムの場合



実際のデバイス

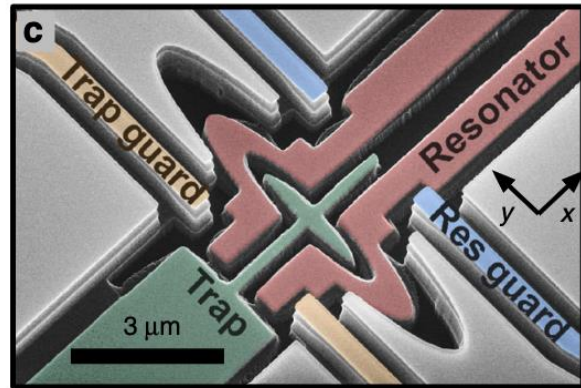
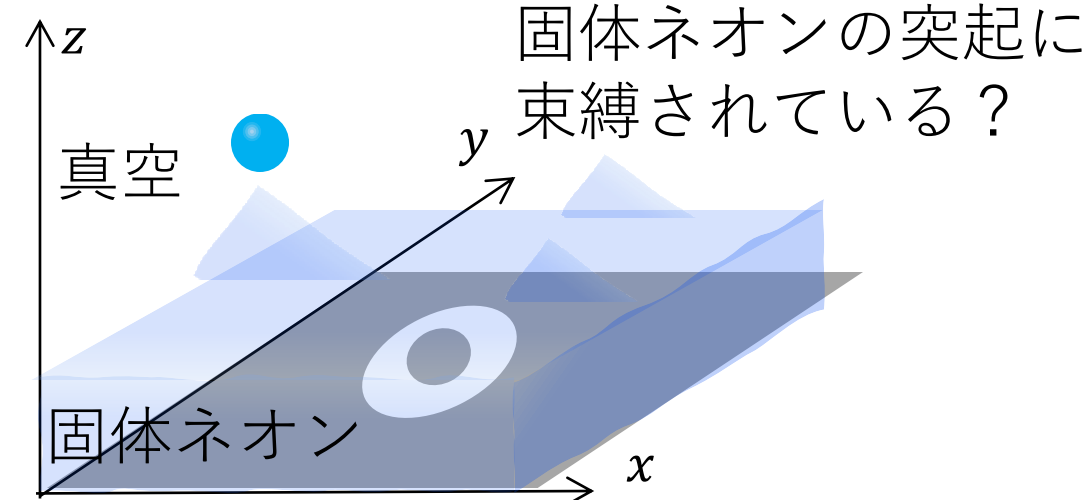
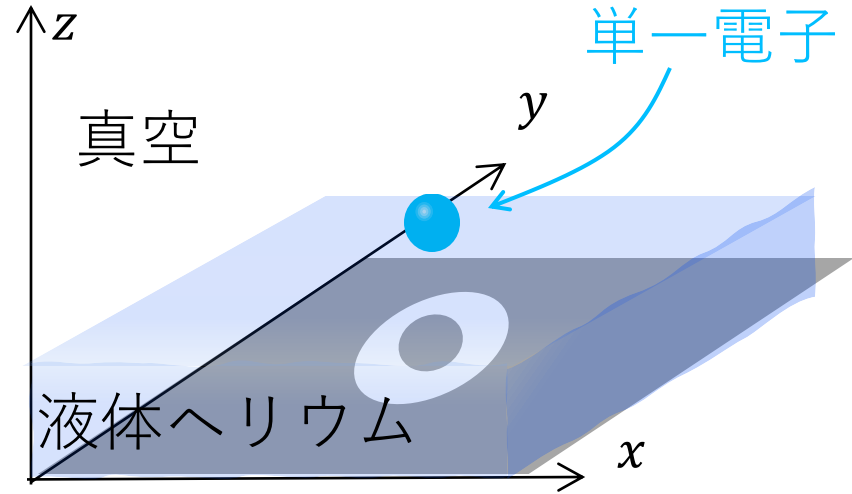


[Papageorgiou, et al., Appl. Phys. Lett. 86, 153106 (2005).]



[Koolstra, et al., Nat. Comm. 10, 5323 (2019).]

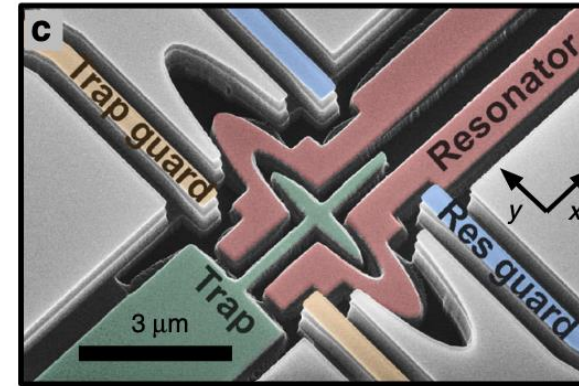
# 液体ヘリウムを固体ネオンに置き換えると・・・



[Koolstra, et al.,  
Nat. Comm. 10, 5323 (2019)]

電荷コヒーレンス時間:  $\sim 10$  ns (線幅)  
 (多数の電子の測定値:  $1 \mu\text{s}$  や理論予測よりさらに短い)  
 →電荷量子ビット実現できず

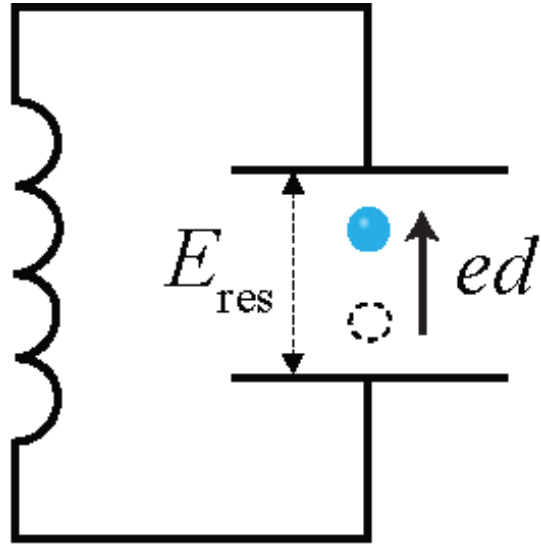
同じサンプル



[Zhou et al., Nature 605, 46 (2022);  
Nat. Phys. 20, 116 (2024)]

電荷コヒーレンス時間:  $\sim 100 \mu\text{s}$   
 $(T_2 = 2T_1)$   
 →1電荷量子ビット実現!

# 共振器による量子(電荷)状態の読み出し



キャパシタ内の電場:  $E_{\text{res}}$

電子の電気双極子モーメント:  $e\hat{d}$

結合:  $H_{\text{int}} = e\hat{d}E_{\text{res}}$

## RF 共振器

共鳴周波数: 数百 MHz

サイズ: 小さい → ☺ 集積性

Q 値: 小さい

## 超伝導共振器

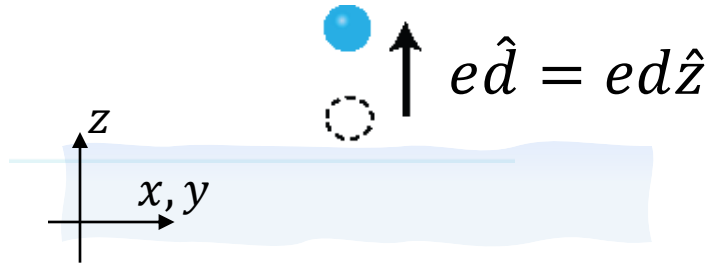
共鳴周波数: 4-8 GHz

サイズ: 大きい

Q 値: 大きい → ☺ MW光子との強結合

# 電気双極子モーメントと共振器の結合

リュートベリ状態 (z方向の軌道状態)



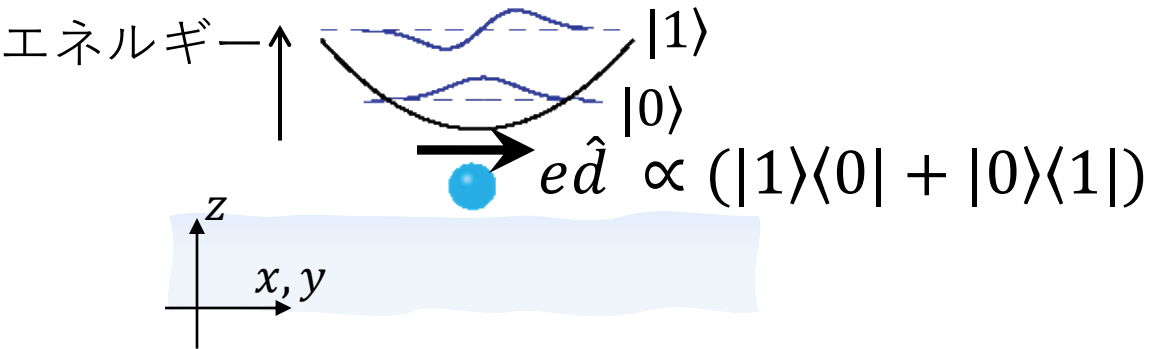
実験

[Jennings, et al. EK,  
Phys. Rev. Lett. 135, 087001 (2025)]

- ・液体ヘリウム表面上の電子
- ・RF 共振器



x,y方向の軌道状態

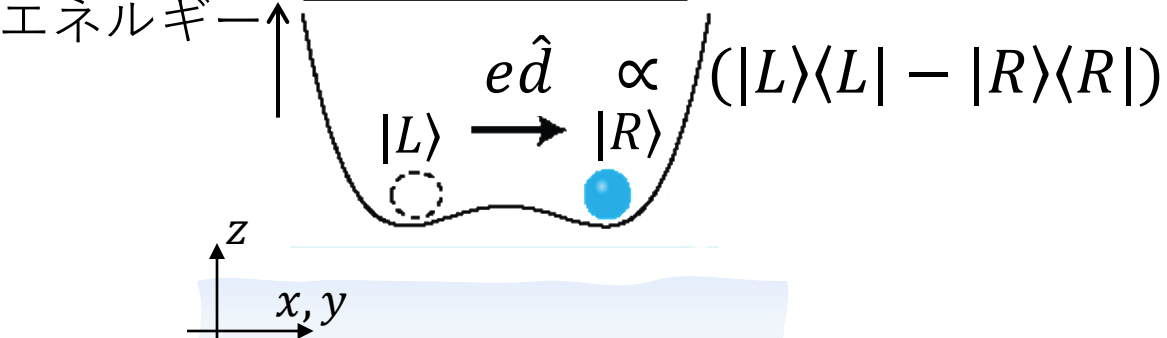


[Koolstra, et al.,  
Nat. Comm. 10, 5323 (2019)]

- ・液体ヘリウム表面上の電子
- ・超伝導共振器



二重井戸準位



[Zhou et al., Nature 605, 46 (2022);  
Nat. Phys. 20, 116 (2024)]

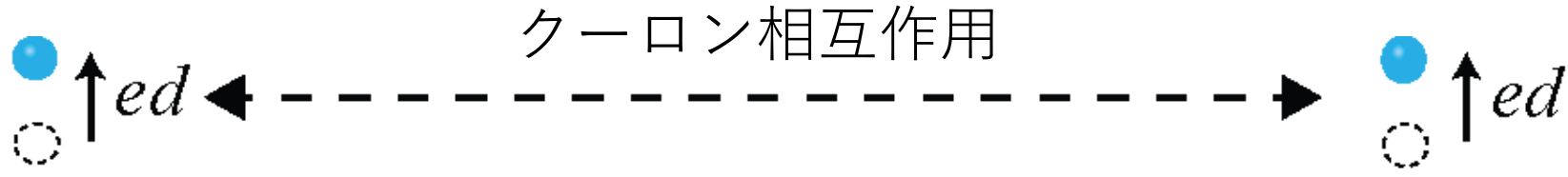
- ・固体ネオン表面上の電子
- ・超伝導共振器



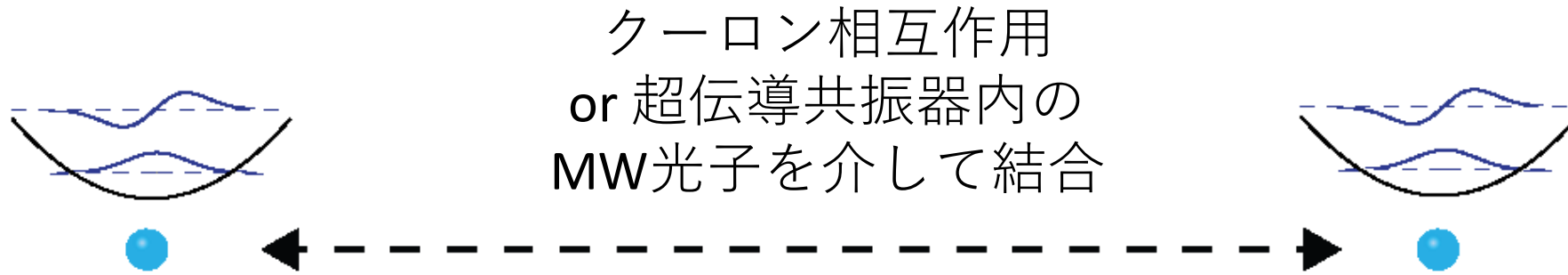
我々も、最近この方法で  
電荷量子ビットを作りました。

# 電荷状態の2量子ビットゲート

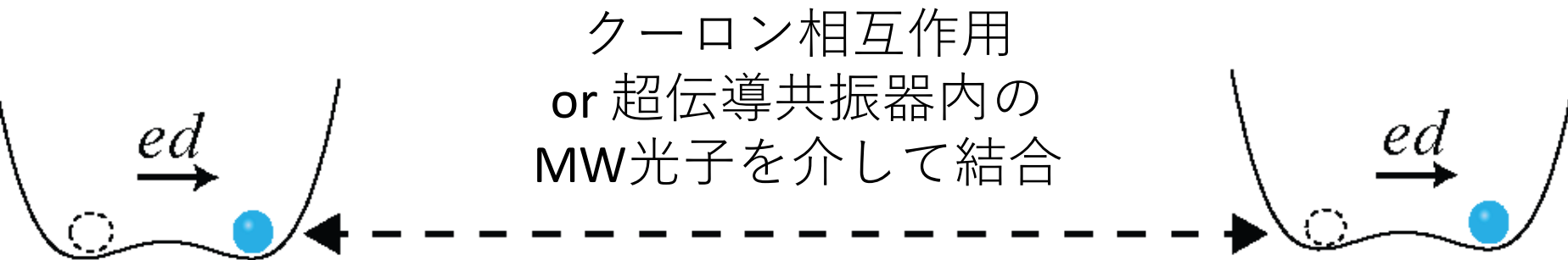
理論



[Platzman and Dykman, Science 18, 1967 (1999); EK et al., Phys. Rev. Appl. 20, 054022 (2023)]



[Schuster, et al., Phys. Rev. Lett. 105, 040503 (2010)]



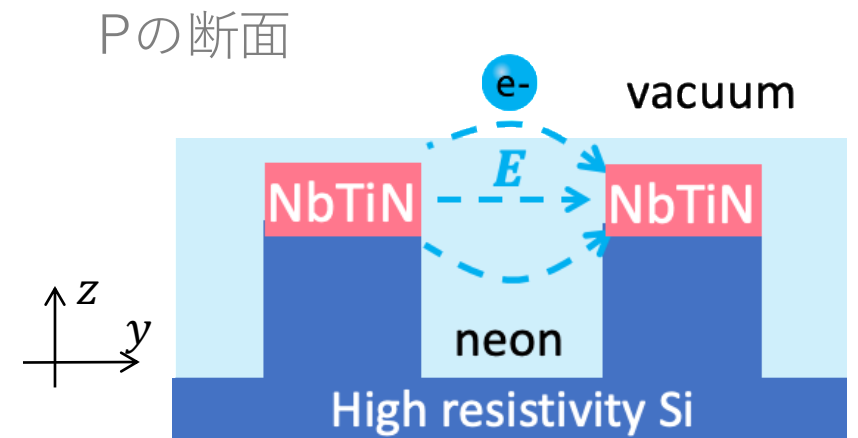
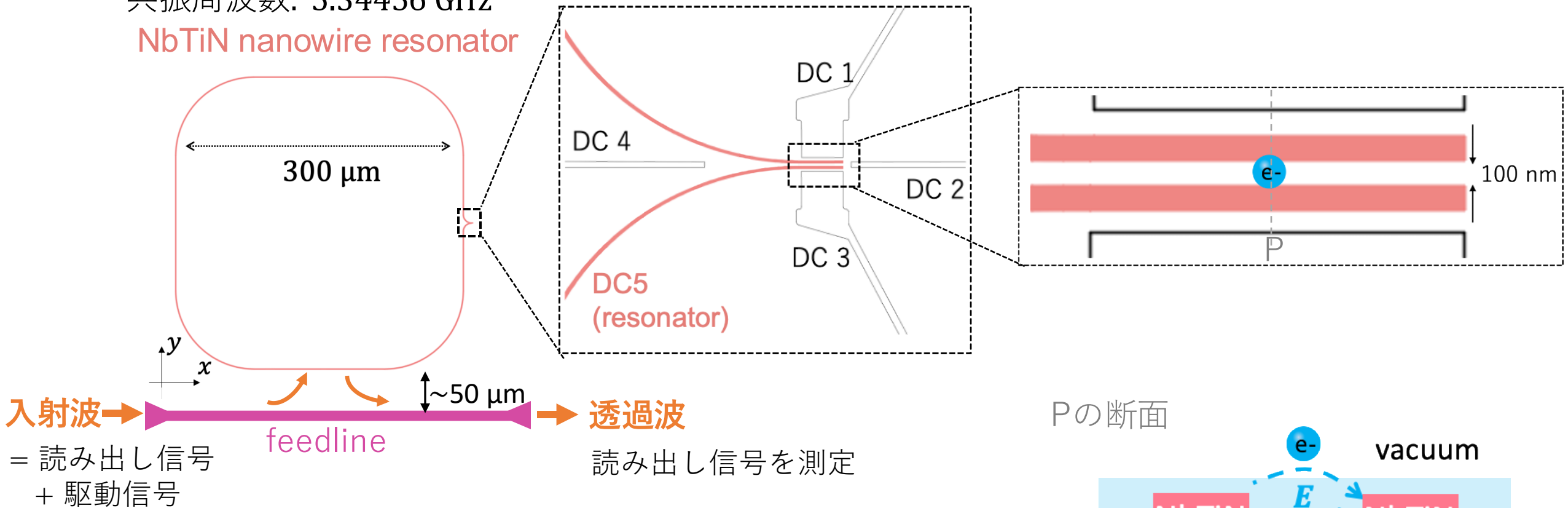
[M. Zhang and L. F. Wei, Phys. Rev. B. 86, 205408 (2012)]

実験(クーロン相互作用)  
[X. Li, et al., arXiv:2503.23738]

レビュー論文: [A. Jennings et al. EK, Appl. Phys. Lett. 124, 120501 (2024)]

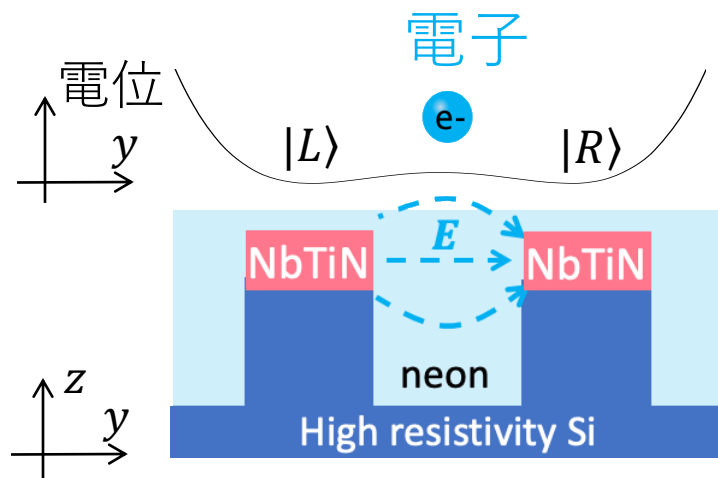
# 超伝導共振器を用いたネオン電荷量子ビットの実現

共振周波数: 5.34456 GHz  
NbTiN nanowire resonator



- 25 K付近で固体ネオンを堆積
- 10 mK以下まで冷やす
- 電子を照射(フィラメントを温め熱電子放出)
- 量子ビット実験

# 電荷量子ビット スペクトラム

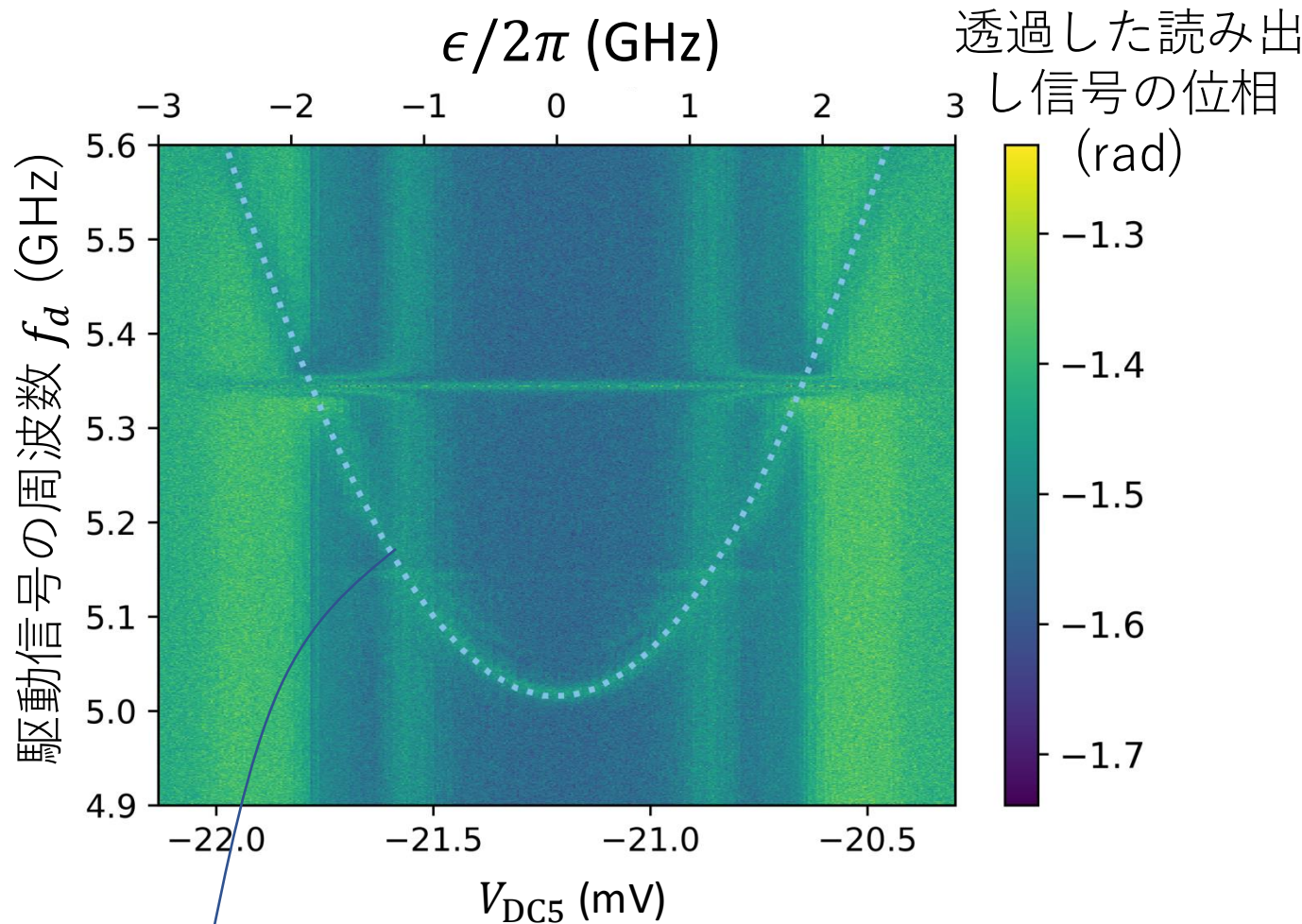


$$\sigma_z = |L\rangle\langle L| - |R\rangle\langle R|$$

$$H_q = \underbrace{\frac{\epsilon}{2}\sigma_z}_{\text{Energy difference}} + \underbrace{\frac{\Delta}{2}\sigma_x}_{\text{Coupling strength}}$$

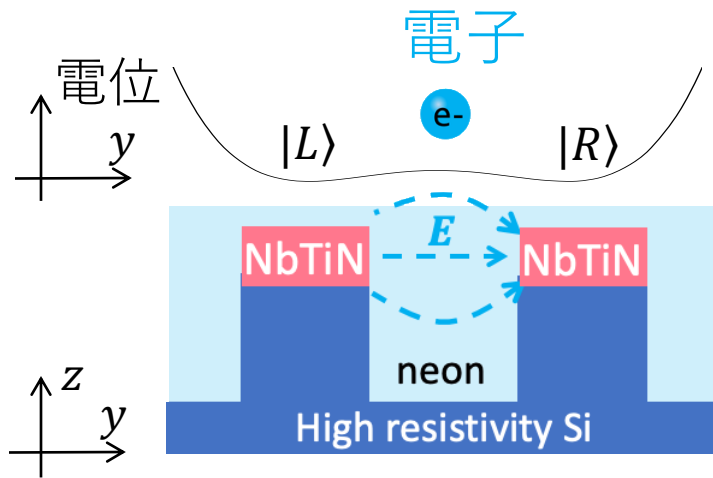
$|L\rangle$ と $|R\rangle$ のエネルギー差  
DC5により調整できる

$|L\rangle$ と $|R\rangle$ の結合強度



$$f_q = \sqrt{\epsilon^2 + \Delta^2}/2\pi, \quad \epsilon = \alpha_{DC5} e V_{DC5}$$

# 電荷量子ビット操作



注:

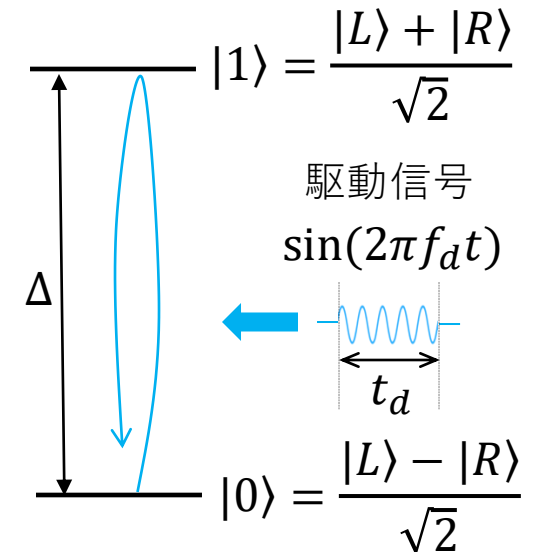
$$\sigma_z = |L\rangle\langle L| - |R\rangle\langle R|$$

$$\sigma_x = |1\rangle\langle 1| - |0\rangle\langle 0|$$

$$H_q = \frac{\epsilon}{2} \sigma_z + \frac{\Delta}{2} \sigma_x$$

at  $\epsilon = 0$   
+ 駆動信号

$$H_q' = \frac{\Delta}{2} \sigma_x + \underbrace{A \sin(2\pi f_d t)}_{\text{駆動信号}} \sigma_z$$



# 電荷量子ビット読み出し

共振器 量子ビット 結合

$$\begin{aligned}
 H_R + H_Q + H_{\text{int}} &= \omega_r a^\dagger a + \frac{\Delta}{2} \sigma_x + e \hat{d} E_{\text{res}} \\
 &= \omega_r a^\dagger a + \frac{\Delta}{2} \sigma_x + g \sigma_z (a + a^\dagger)
 \end{aligned}$$

$e \hat{d} \propto \sigma_z$

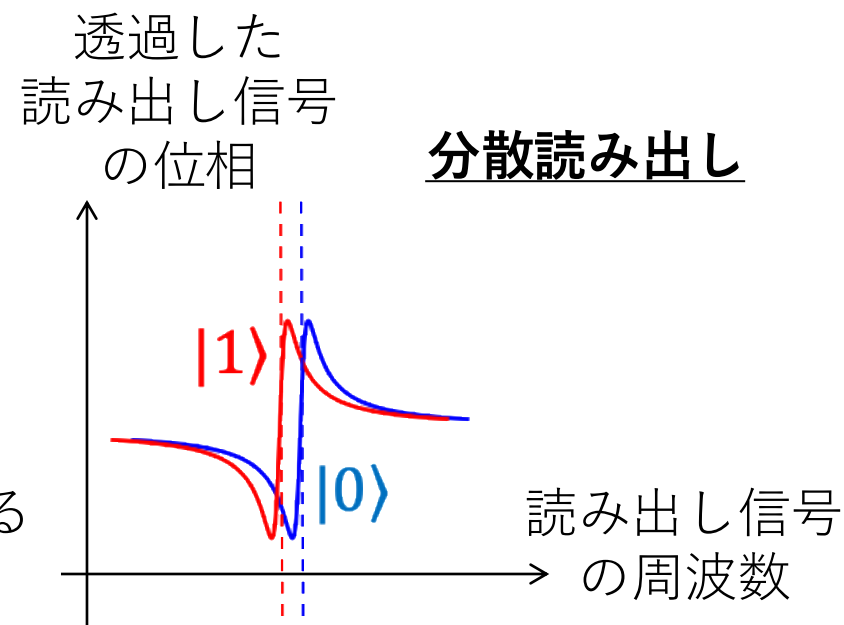
注:

$$\begin{aligned}
 \sigma_z &= |L\rangle\langle L| - |R\rangle\langle R| \\
 \sigma_x &= |1\rangle\langle 1| - |0\rangle\langle 0|
 \end{aligned}$$

$\left| \frac{g}{\omega_r - \Delta} \right| \ll 1$  のとき

$$= \left( \omega_r + \frac{g^2}{(\omega_r - \Delta)} \sigma_x \right) a^\dagger a + \frac{1}{2} \left( \Delta + \frac{g^2}{(\omega_r - \Delta)} \right) \sigma_x$$

量子ビットの状態によって  
共振器の共振周波数が変わる



# ラビ振動・ラムゼー干渉 (at $\epsilon = 0$ )

駆動信号

読み出し信号

$f_d$

$f_p = 5.34456$  GHz

$$H_q = \frac{\Delta}{2} \sigma_x$$

$$\Delta/2\pi \approx 5.02 \text{ GHz}$$

駆動信号

読み出し信号

$f_d$

$f_d$

$f_p = 5.34456$  GHz

$\pi/2$

$\pi/2$

delay time

500 ns

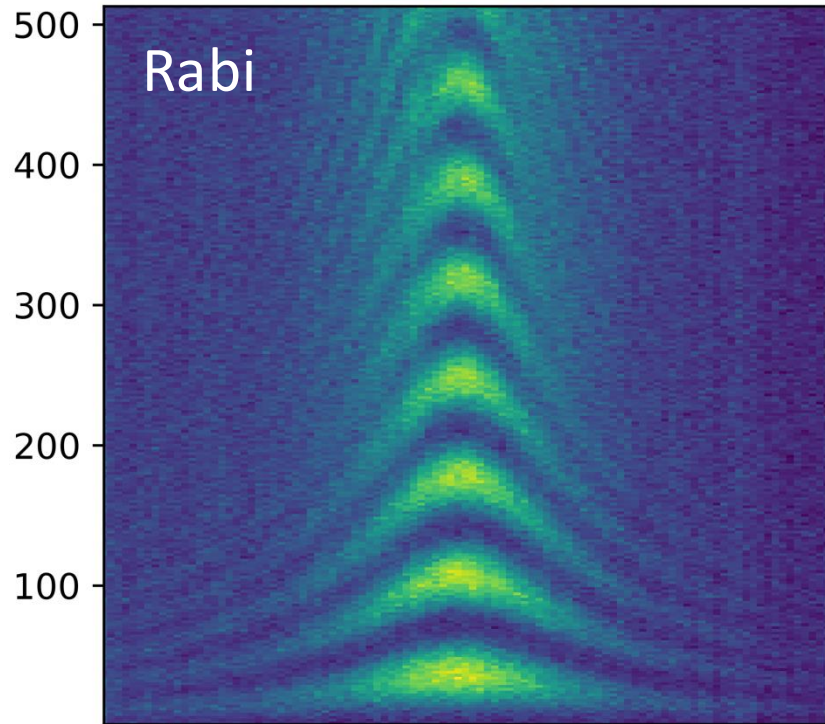
入射波

駆動パルスの長さ

500 ns

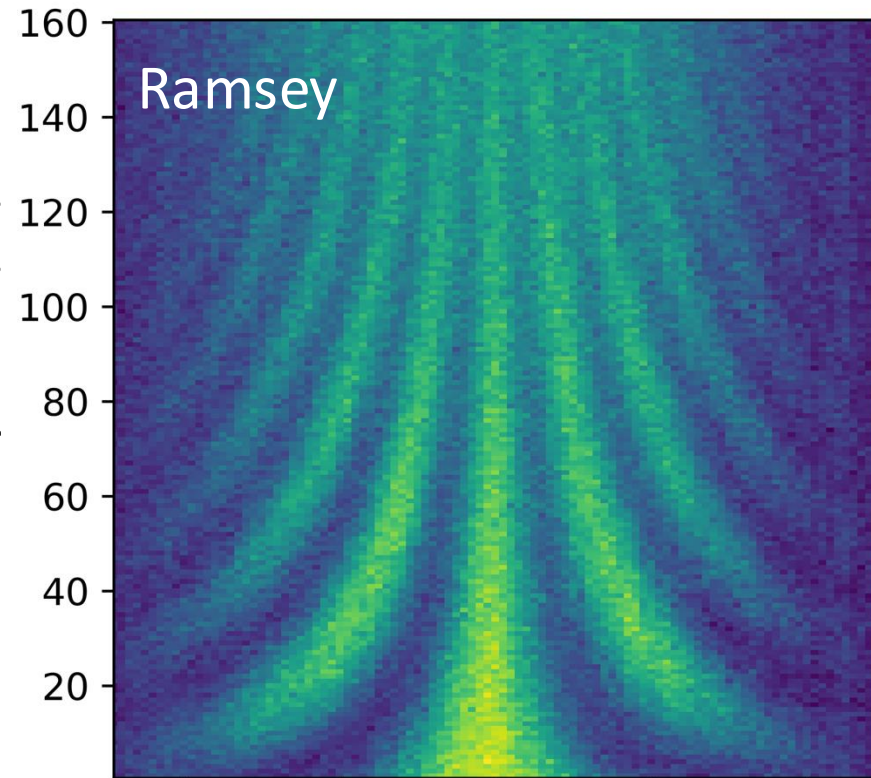
透過した  
読み出し信号  
の位相

駆動パルスの長さ (ns)



駆動信号の周波数  $f_d$  (GHz)

Delay time (ns)

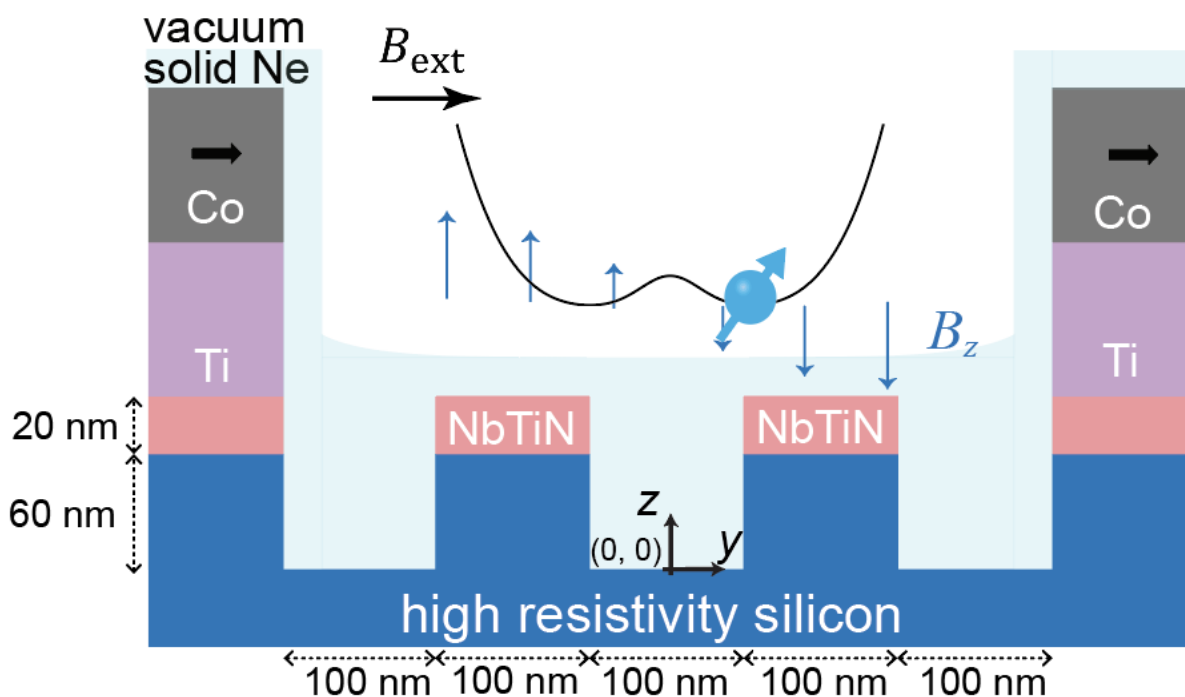


駆動信号の周波数  $f_d$  (GHz)

# スピン量子ビット

スピンと電荷を結合させ、振動電場でスピンを操作する!

ネオンの場合の理論 [Tian et al. EK, arXiv: 2505.24303 (2025)]



電荷          スピン          スピン-電荷 結合

$$H'_q + H_{c-s} = \frac{\Delta}{2} \sigma_x + \frac{1}{2} g \mu_B B_{\text{ext}} S_z + \frac{1}{2} g \mu_B \Delta B_z \sigma_z S_x$$
$$+ A \sin(2\pi f_d t) \sigma_z$$

駆動信号(振動電場)

ヘリウムの場合の理論: [EK et al., Phys. Rev. Appl. 20, 054022 (2023)]

# 研究分野全体の今後の課題や展望

- 液体ヘリウムの電荷コヒーレンス時間が短い理由を解明し、抑制する  
Eeroq(米国企業)がこの問題を解決して量子ビットを実現したという噂も
- 固体ネオン表面の凸凹を平滑化する(ネオン堆積方法を工夫する)

	ヘリウム電子	ネオン電子
電荷状態の コヒーレンス時間 (支配的要因)	多数の電子: <b>1 <math>\mu</math>s</b> (液面表面波) 単一電子: <b>10 ns</b> (機械振動?)	<b>100 <math>\mu</math>s</b> 😊 (周辺の電子?)
表面の粗さ (電子の移動度)	滑らか 😊 ( <b><math>10^8 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}</math></b> )	粗い ( <b><math>10^4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}</math></b> )

- 固体ネオン上のスピン量子ビットの実現を目指す
- プレイヤーを増やす

最近2年以内の新設/新規参入 研究室:  
Amir Yacoby (Harvard University, 米国)  
Kater Murch (Washington University, 米国)

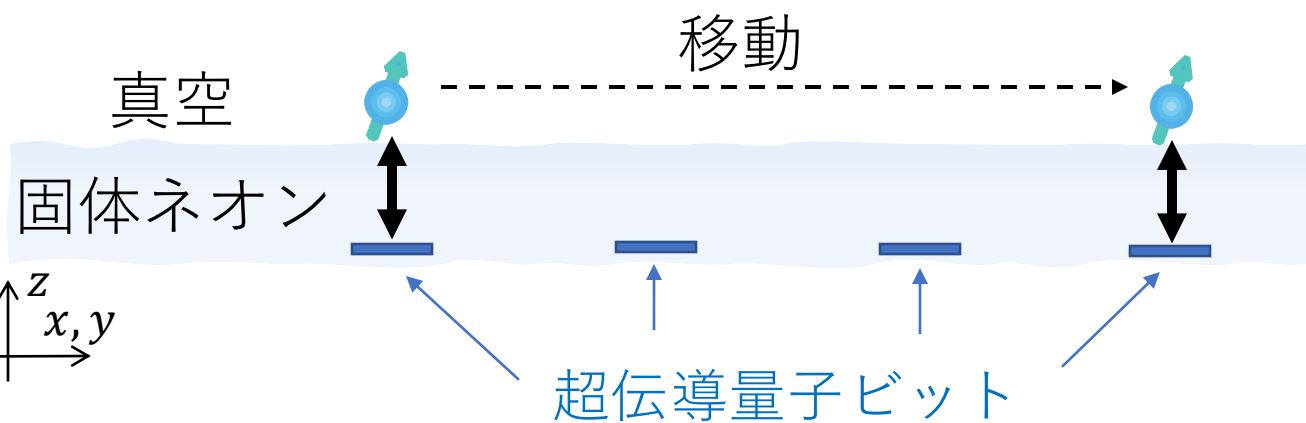
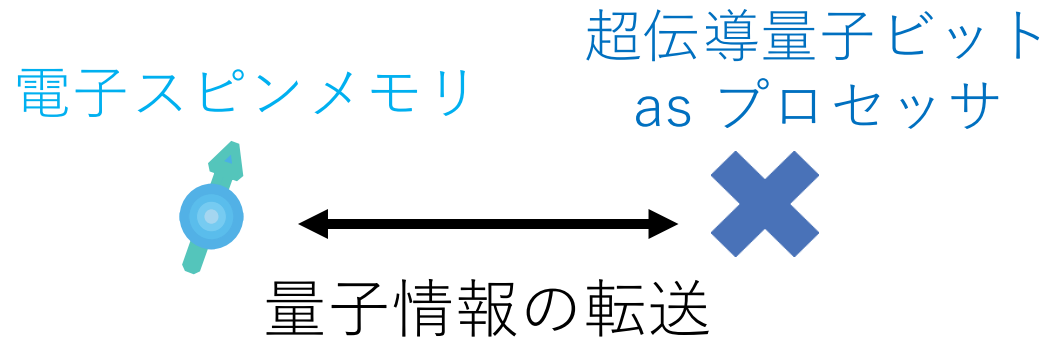
Xianjing Zhou (FSU, 米国)  
Maja Cassidy (UNSW, オーストラリア)  
Xinhao Li (Westlake University, 中国)

# 私達の目指すところ

ネオン電子

長い電荷コヒーレンス時間

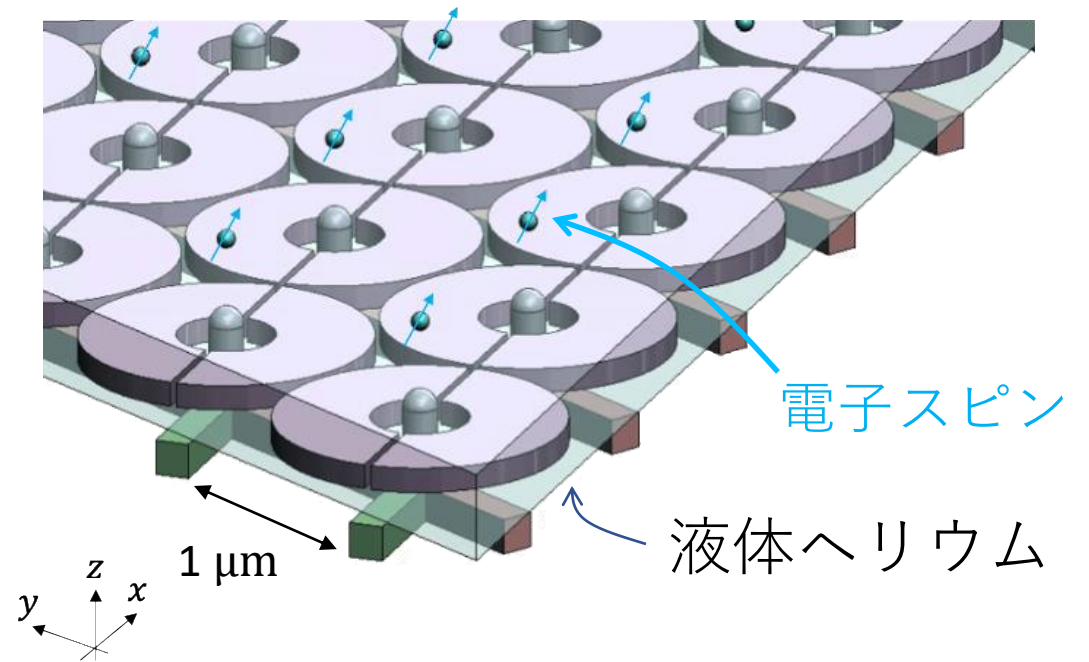
→ 電気的結合を介した他の物理系とのhybrid



ヘリウム電子

滑らかな表面

→ 均一な量子ビットの集積化



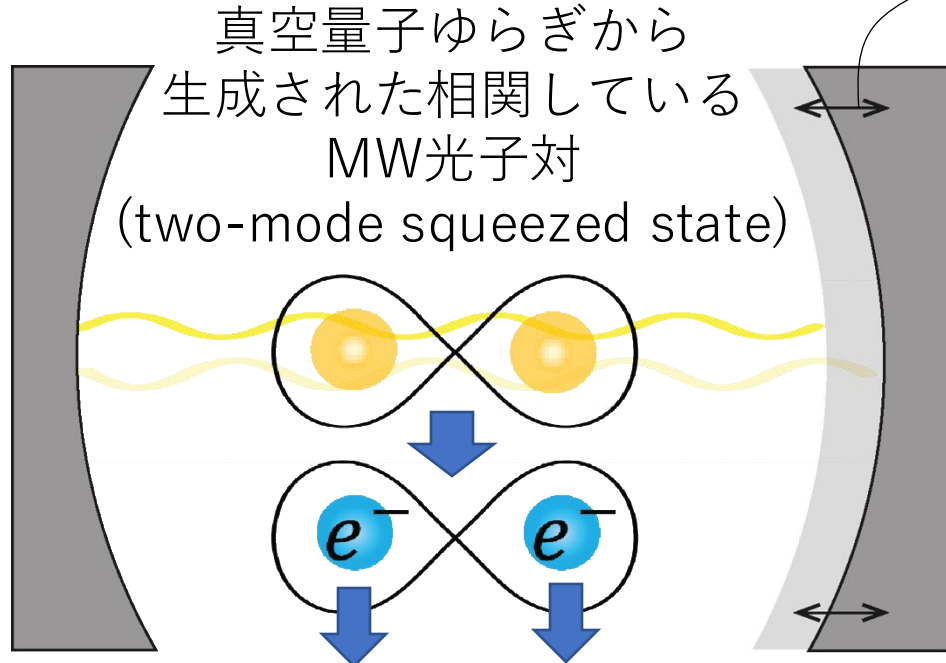
[Appl. Phys. Lett. 124, 120501 (2024);  
Phys. Rev. Appl. 20, 054022 (2023)]

# 夢みていること

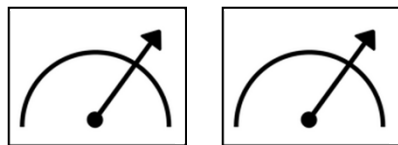
電荷状態のコヒーレンス時間が長いことで、  
今まで測定出来なかったものが見えるようになったりするのは？

## 真空量子ゆらぎから生成された光子を測定したい

[Wilson et al., Nature 479, 376 (2011)] 共振器のインピーダンスを  
動的カシミール効果で 光速に近い速度でmodulation

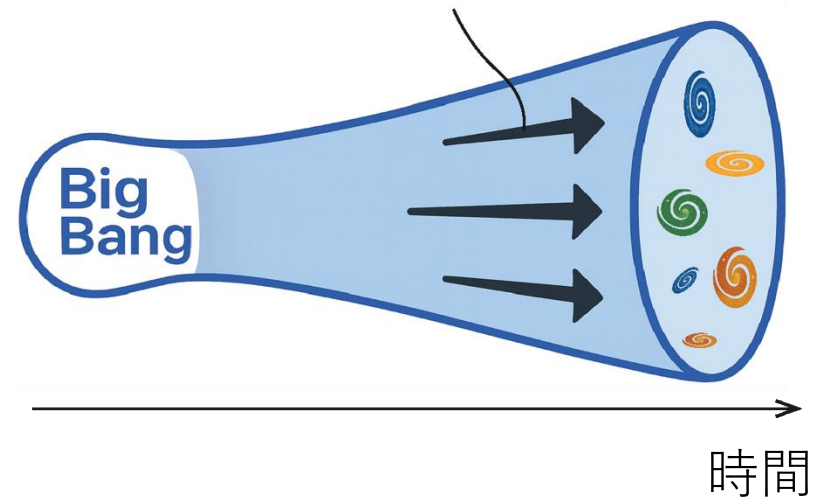


真空量子ゆらぎから  
生成された相関している  
MW光子対  
(two-mode squeezed state)



電子に転写して  
相関を測定

インフレーション：  
真空量子ゆらぎの引き伸ばし



# Thank you for your attention

RIKEN (our team): A. Jennings, I. Grytsenko, O. Rybalko, X. Zhou (→CEA-Saclay→FSU)



Rie-san

Erika

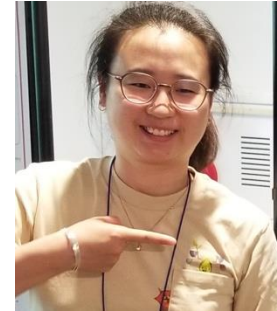
Oleksiy

Ash Yiran

Ivan

Yumi-san

neon experiments:



Y. Tian



J. Wang

RIKEN (Nakamura lab): S. Tamate

Notre Dame Univ.: D. Jin

CAS-IOP: H. Ikegami

NIST: H. Terai

Tohoku Univ.: H. Kutsuma

Acknowledgements: Y. Nakamura, J. S. Tsai

Funding: RIKEN-Hakubi, RIKEN-RQC, JST-FOREST