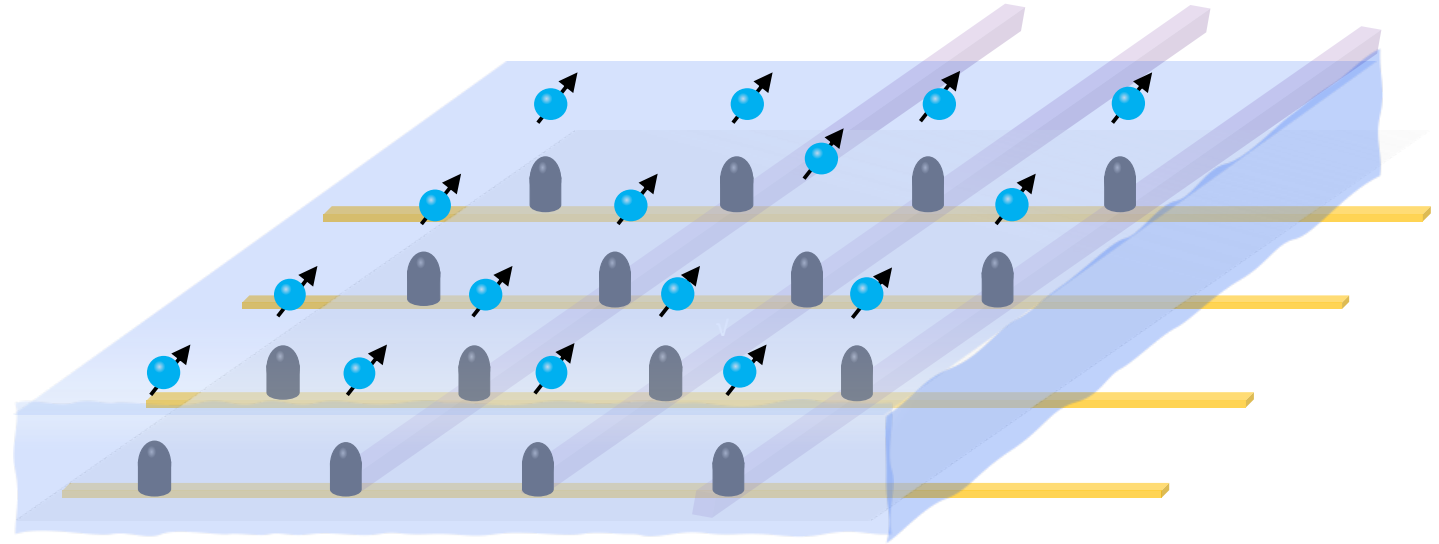
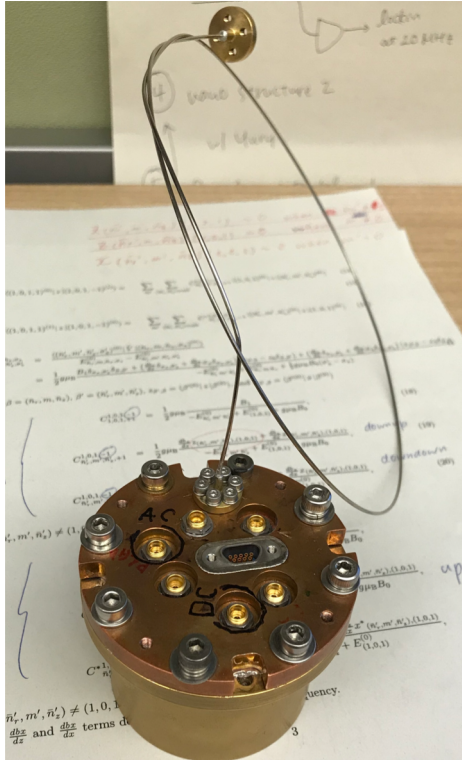


# 浮揚電子による量子情報



理化学研究所 開拓研究本部  
量子コンピュータ研究センター  
浮揚電子量子情報理研白眉研究チーム

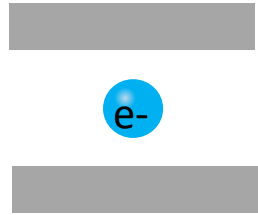
川上恵里加  
Ivan Grytsenko (Senior Technical staff)



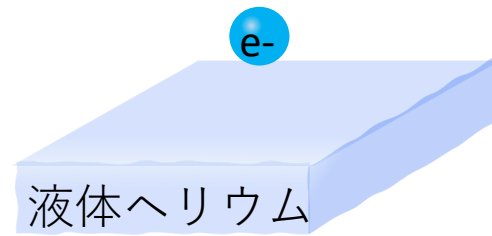
Denis  
Konstantinov  
Unit

# 電子を用いて量子ビットを実現する

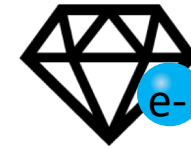
トラップ電子



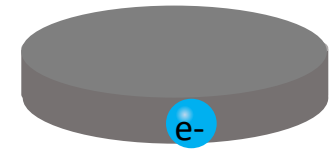
ヘリウム表面上の電子



ダイヤモンド中の電子



半導体中の電子



(浮揚電子)

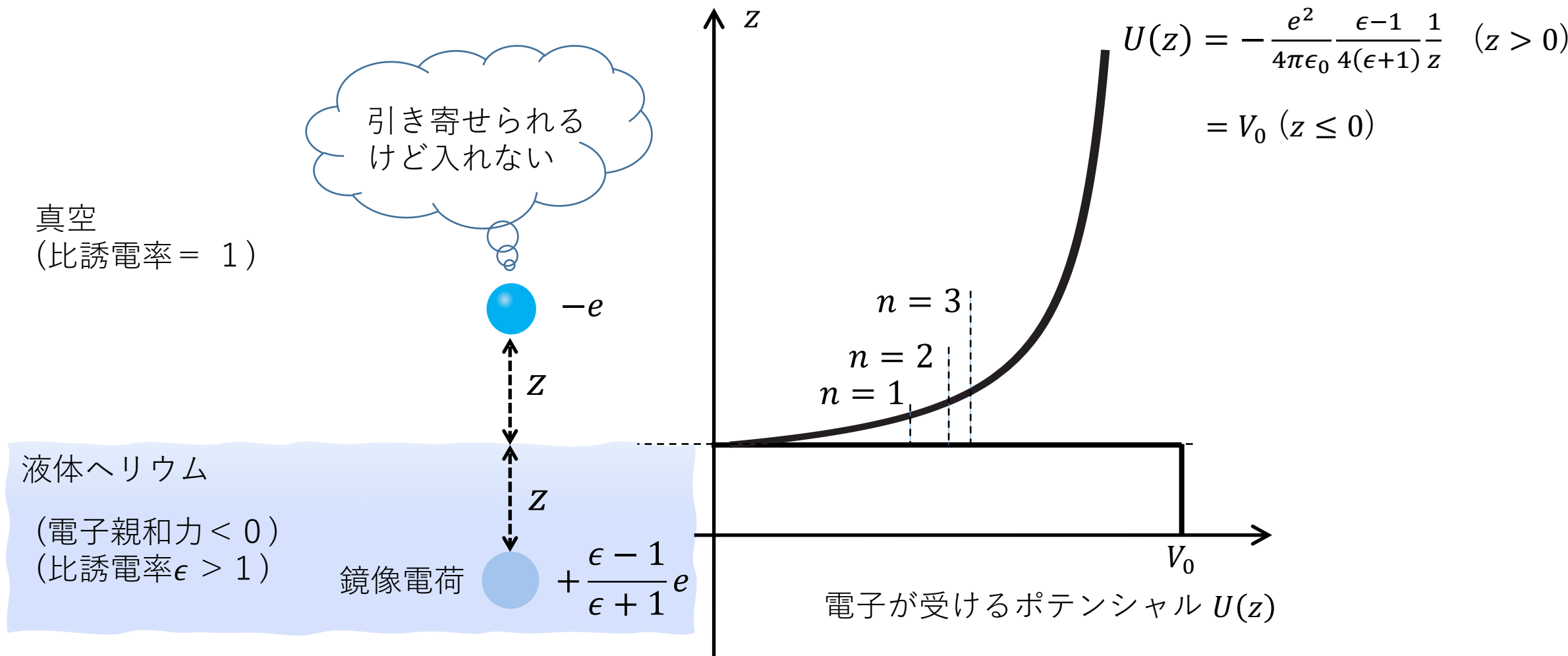
真空中の電子

物質中の電子

- ⊖ 電子にアクセスしにくい
- ☺ 真空中なので周りに何も無くて綺麗
- 長いコヒーレンス時間が予想される

- ☺ 電子にアクセスしやすい
- ⊖ 物質中の欠陥や不純物をコントロールするのが難しい

# ヘリウム表面上の電子はなぜ浮かぶのか？


$$\epsilon = 1.056 \text{ for He4}$$

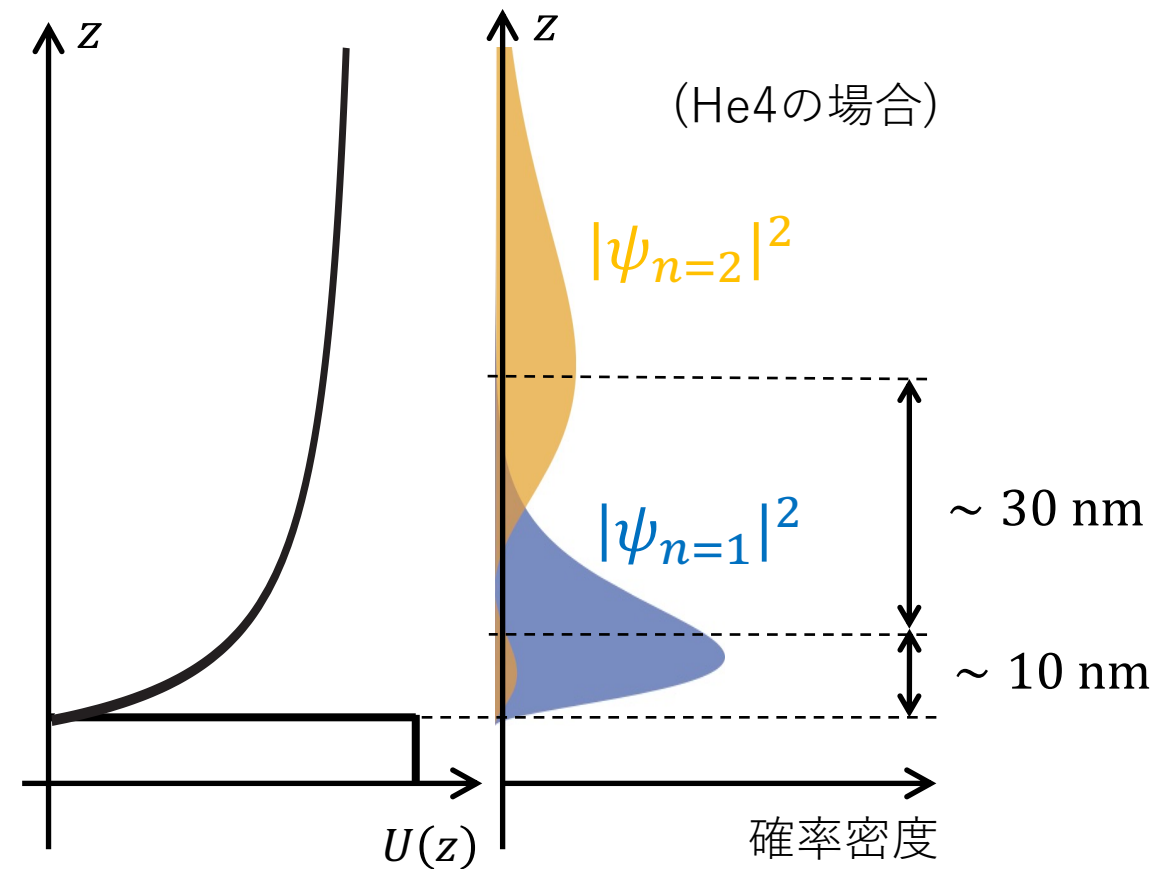
# ヘリウム表面上の電子のリュードベリ状態

シュレディンガー方程式

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m_e}\frac{\partial^2}{\partial z^2} - U(z)\right)\psi(z) = E\psi(z)$$

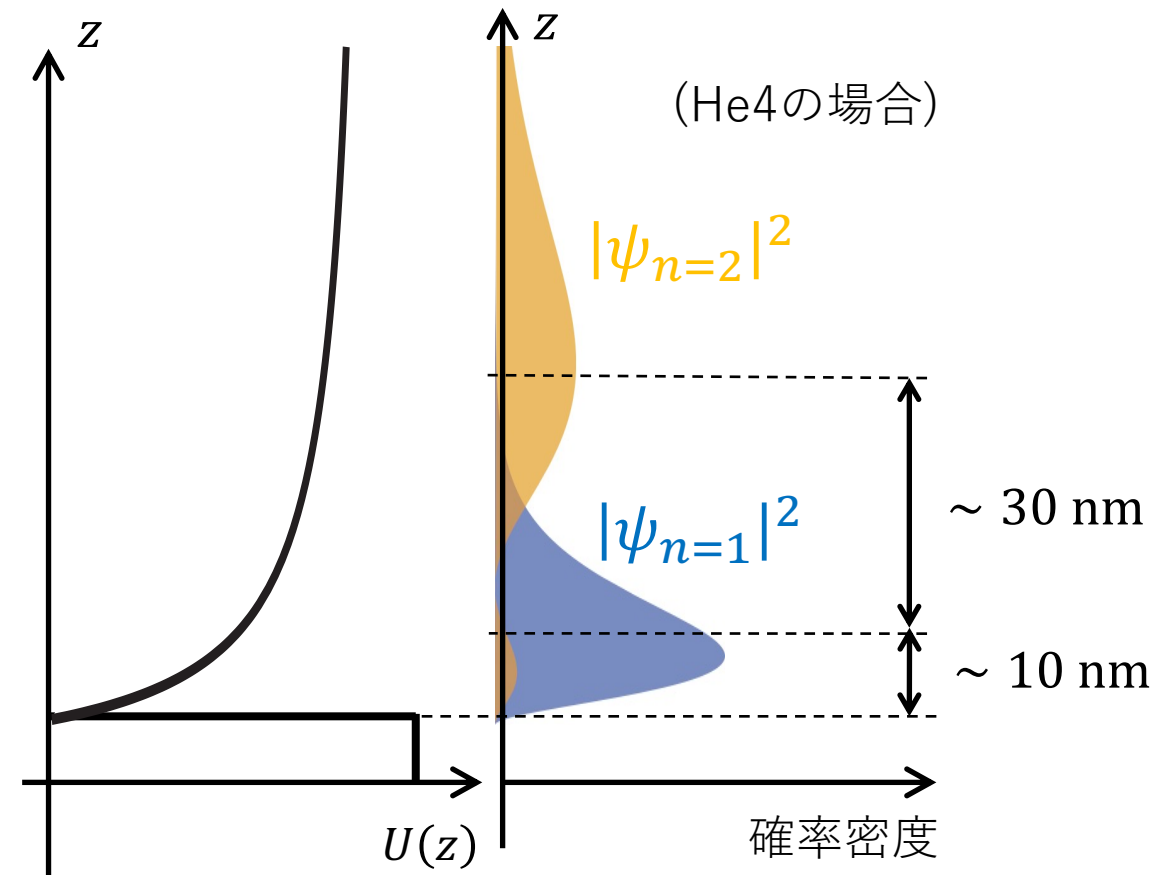
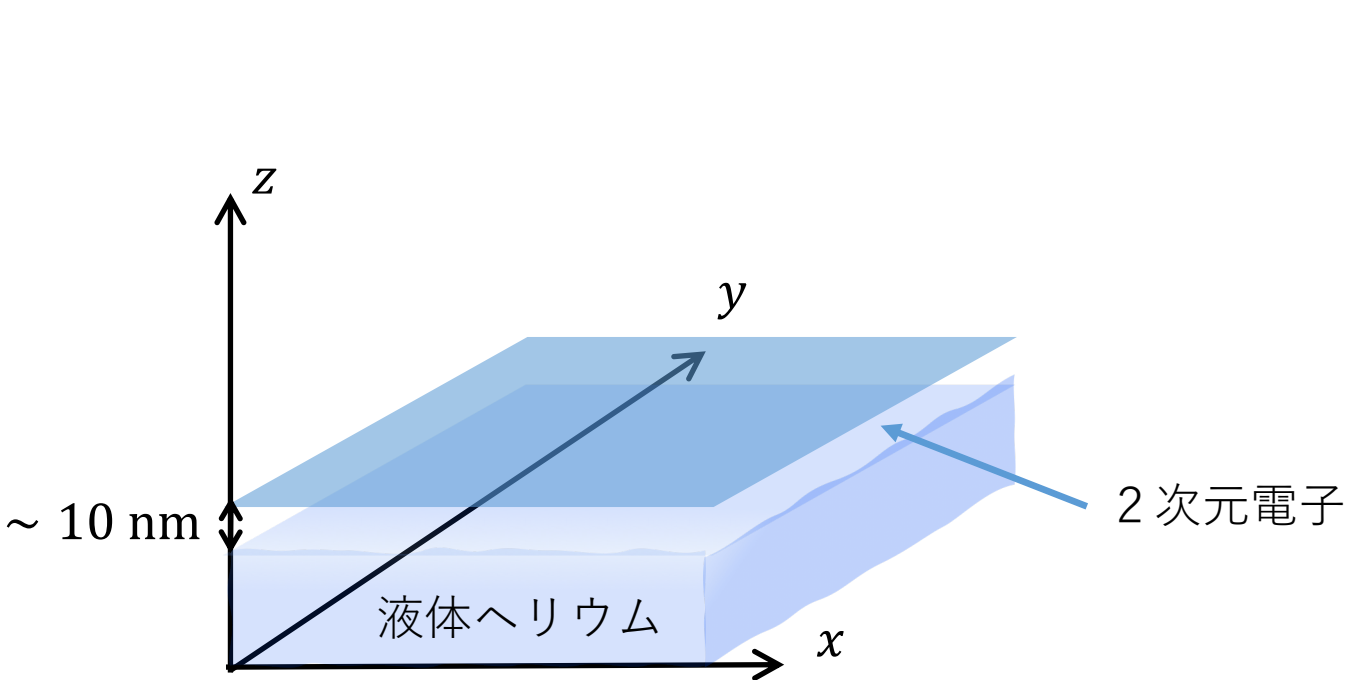
$$E_n = -R_\infty \left(\frac{\epsilon - 1}{4(\epsilon + 1)}\right)^2 \frac{1}{n^2}$$

$R_\infty$ : リュードベリ定数



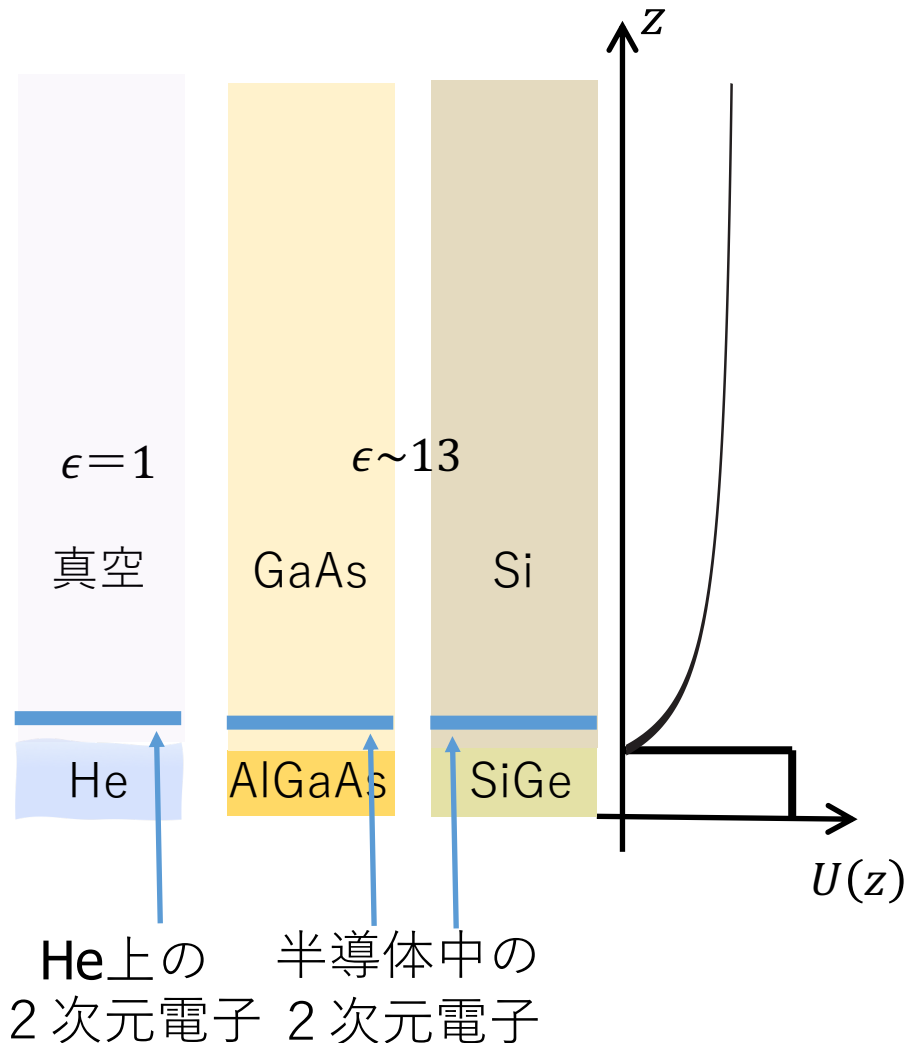


# ヘリウム液面から～10 nm上方に2次元電子が出来る



# 半導体中の2次元電子との比較

リュードベリ状態 = z方向の軌道状態

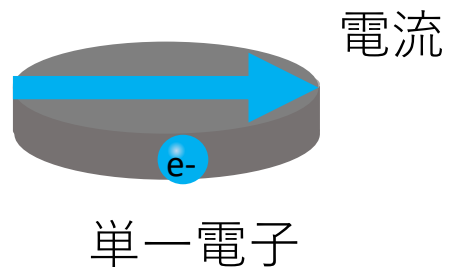


He上の2次元電子は  
半導体中の2次元電子に比べて

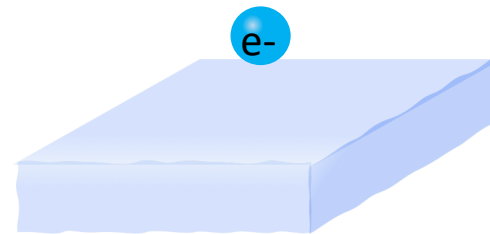
- 移動度が高い  
(欠陥・不純物などの影響が無いから)  
→ 長いコヒーレンス時間が予想される
- 電子密度が小さい  
(クーロン相互作用が大きいから  
電子間距離を小さくするのが難しい)  
→ 2量子ビットゲートに交換相互作用  
を使うのが難しい

# 浮いている電子にはアクセスしにくい

半導体中の電子



ヘリウム上の電子

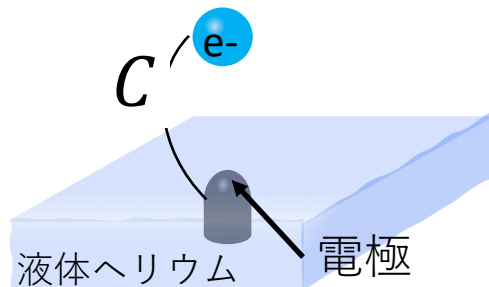


2次元電子  
は真空中に存在

☺ 電子の近傍を流れる電流の値をもとに単一電子の状態を読み出す

☹ 2次元電子にOhmic contactがとれない

→capacitive に読み出すことで解決しよう



あとで詳しく説明

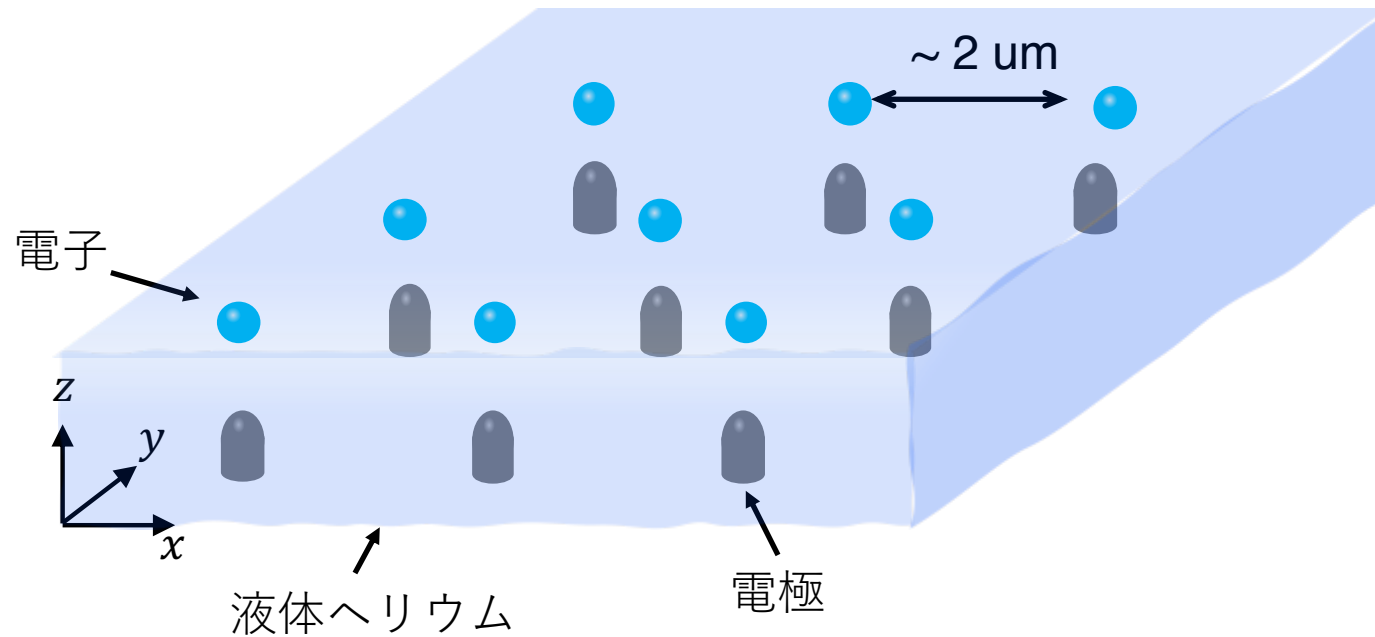
E. Kawakami, A. Elarabi, D. Konstantinov, PRL 123, 086801 (2019).

E. Kawakami, A. Elarabi, D. Konstantinov, PRL 126 106802 (2021).

# ヘリウム表面上の電子同士の相互作用

相互作用: 2量子ビットゲートの実現に必要

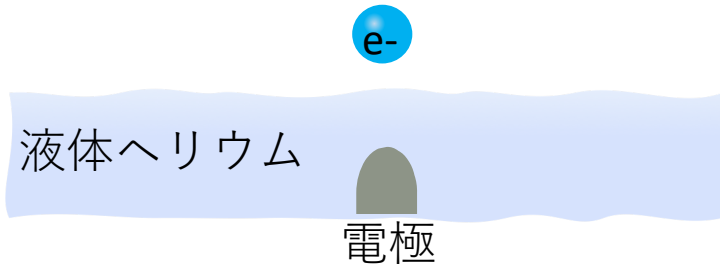
クーロン相互作用  $4J \sim 200 \text{ MHz}$  (電子間距離  $\sim 2 \mu\text{m}$ )



- ☺ 電子間距離が比較的長くても相互作用が十分に大きい  
→ 2次元に並べやすい  
(量子誤り訂正のためには2次元に並べられることが重要)

# ヘリウム液面上の電子を用いて量子ビットを作る

1電子 = 1 量子ビット



## Proposal その1 : リュードベリ状態を量子状態として用いる

P. M. Platzman and M. I. Dykman, Science 284, 1967 (1999).

M. I. Dykman, P. M. Platzman, P. Seddighrad, Phys. Rev. B 67, 155402 (2003).



## Proposal その2 : スピン状態を量子状態として用いる

S. A. Lyon, Phys. Rev. A 74, 052338 (2006).

| リュードベリ状態                                     | スピン状態                                           |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 相互作用が大きい<br>~1 GHz (電子間距離: 1 $\mu\text{m}$ ) | 相互作用が小さい<br>~100 Hz (電子間距離: 0.1 $\mu\text{m}$ ) |
| コヒーレンス時間が短い<br>~1 $\mu\text{s}$ (理論, 実験)     | コヒーレンス時間が長い<br>>100 s (理論予測)                    |

# ヘリウム液面上の電子を用いて量子ビットを作る

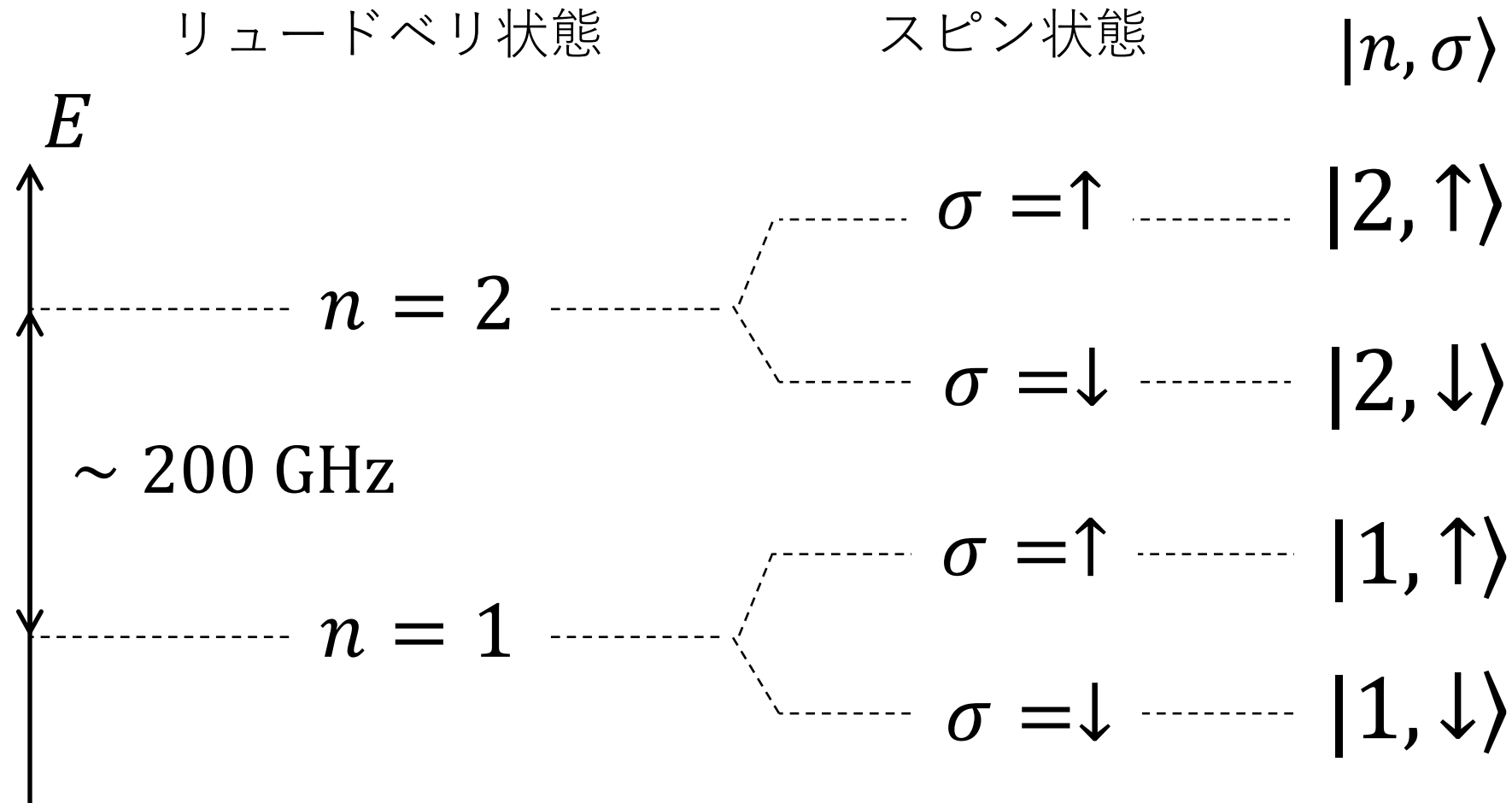
1電子 = 1 量子ビット

相互作用が小さい→⊗2量子ビットゲートが遅くなってしまう。  
→⊗量子状態の読み出しが難しい。

コヒーレンス時間が短い→⊗量子ビットの精度が悪くなってしまう。

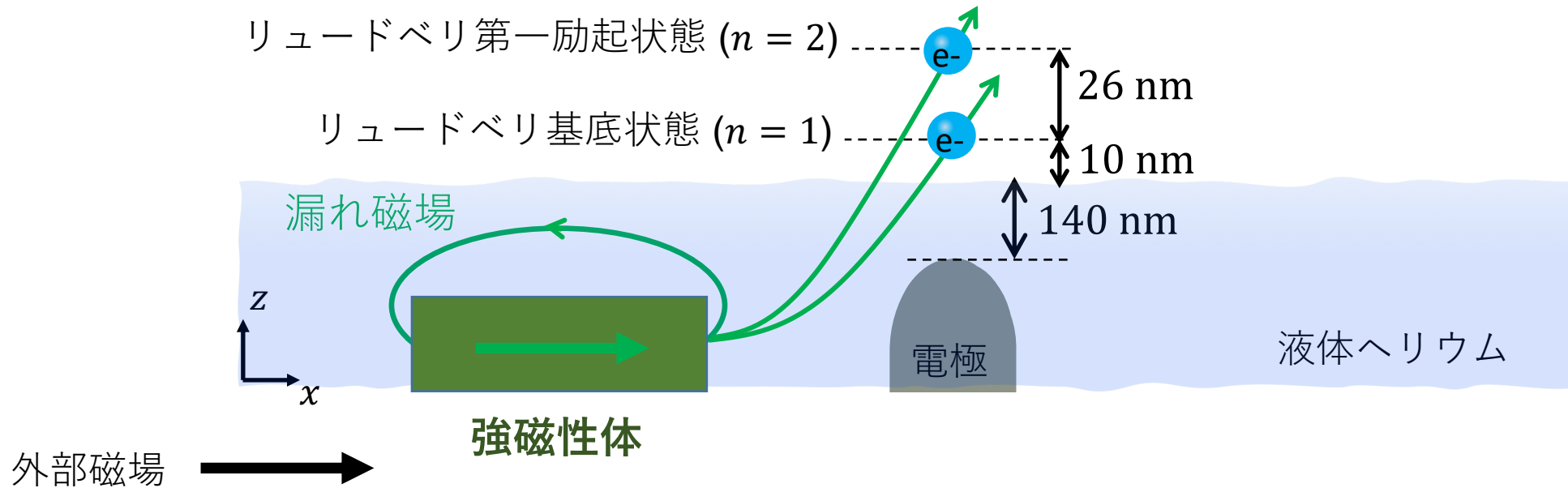
| リュードベリ状態                                               | スピン状態                                                      |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 相互作用(クーロン相互作用)が大きい<br>~1 GHz (電子間距離: 1 $\mu\text{m}$ ) | 相互作用(磁気双極子相互作用)が小さい<br>~100 Hz (電子間距離: 0.1 $\mu\text{m}$ ) |
| コヒーレンス時間が短い<br>~1 $\mu\text{s}$ (理論, 実験)               | コヒーレンス時間が長い<br>>100 s (理論予測)                               |

# スピンとリュードベリのハイブリッド量子ビット

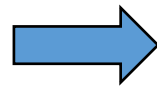


リュードベリ状態とスピン状態間に人工的な相互作用を作る  
(intrinsic にはほぼ 0 [S. A. Lyon, Phys. Rev. A 74, 052338 (2006).])

# リュードベリ状態とスピン状態間に人工的な相互作用を作る



強磁性体を磁化する



電子の位置によって  
(i.e. リュードベリ状態によって)  
電子の感じる磁場の大きさが異なる  
→ **リュードベリ・スピン相互作用**

Pioto-Ladriere et al, Nature Phys (2008).

Y. Tokura et. al., PRL **96**, 047202 (2006).

R. Brunner et al., PRL **107**, 146801 (2011).



# どのように量子操作を実現させるか

## 1) 量子ビット状態の読み出し(スピン状態の読み出し)

→ capacitiveに読み出す (次のスライドから詳しく説明)

## 2) ユニバーサルな 1量子ビットゲート

→ **リュードベリ・スピン相互作用**を用いてEDSR

Pirot-Ladriere et al, Nature Phys (2008).  
Y. Tokura et. al., PRL **96**, 047202 (2006).  
R. Brunner et al., PRL **107**, 146801 (2011).

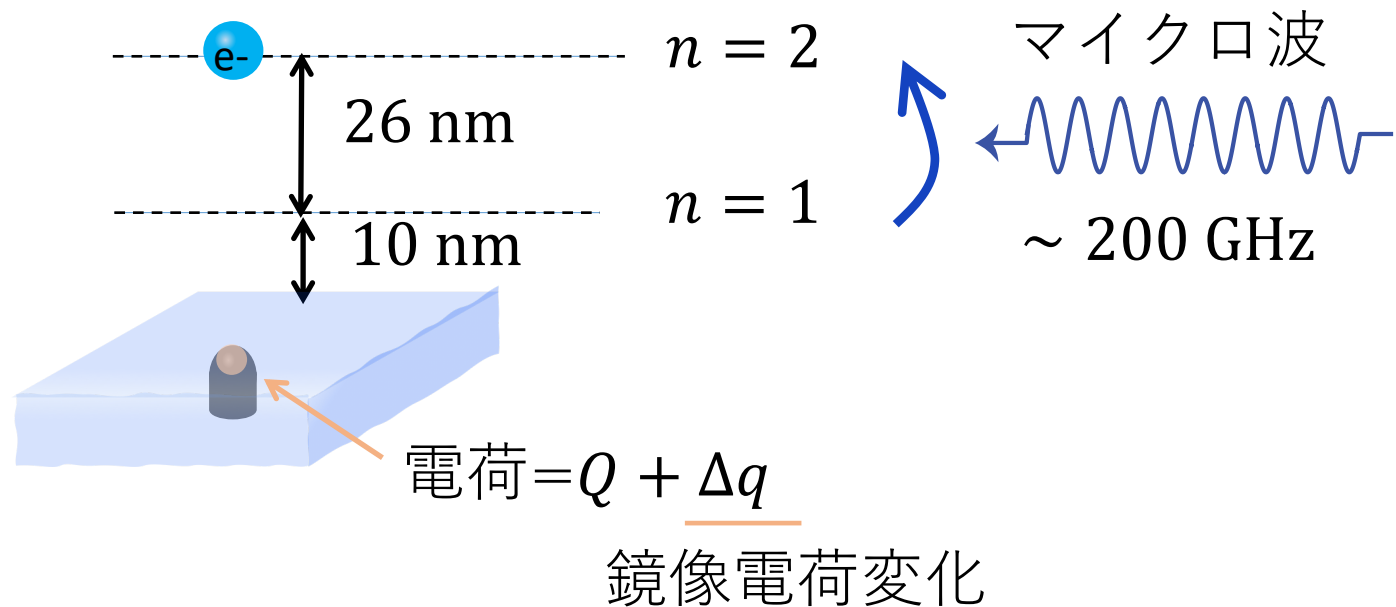
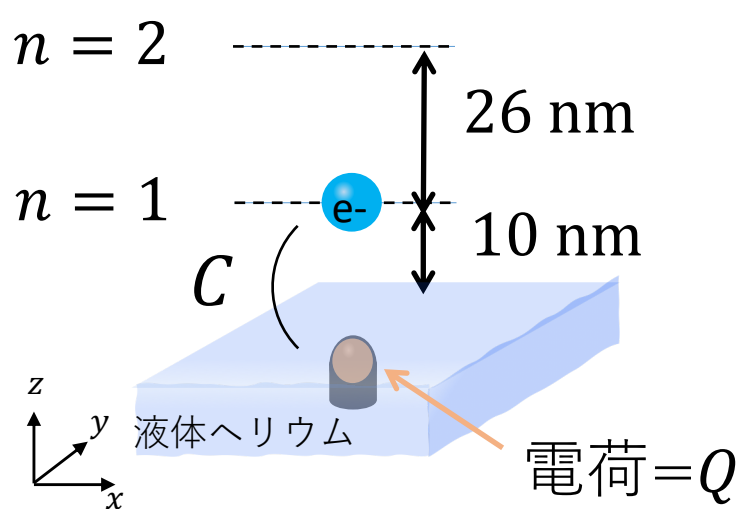
## 3) ある1つの 2量子ビットゲート

→ クーロン相互作用を用いてリュードベリ状態の 2 量子ビットゲートを実現

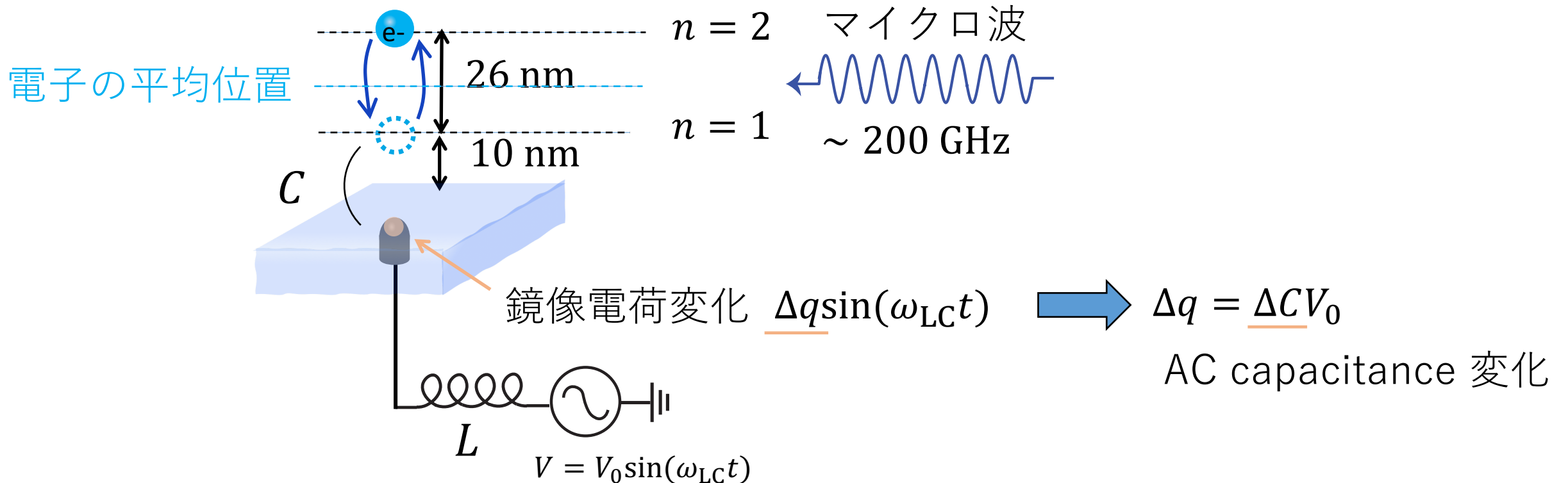
→ **リュードベリ・スピン相互作用**を用いてスピン状態の 2 量子ビットゲートに変換

# リュードベリ状態の遷移をcapacitiveに読み出す

電子の位置の変化  
↓  
電極中の鏡像電荷変化



電子の位置の変化  
↓  
電極中の鏡像電荷変化  
↓  
AC capacitanceの変化  
↓  
LC 共振周波数の変化

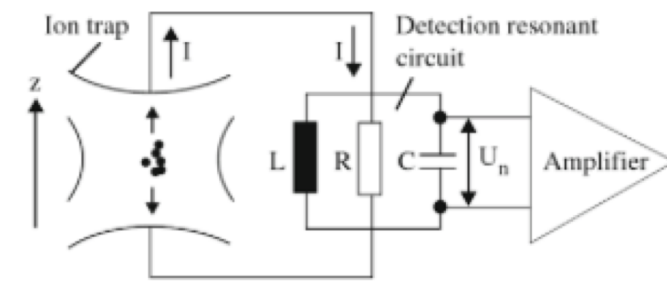
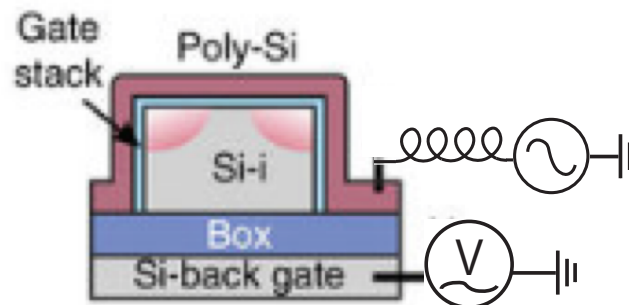
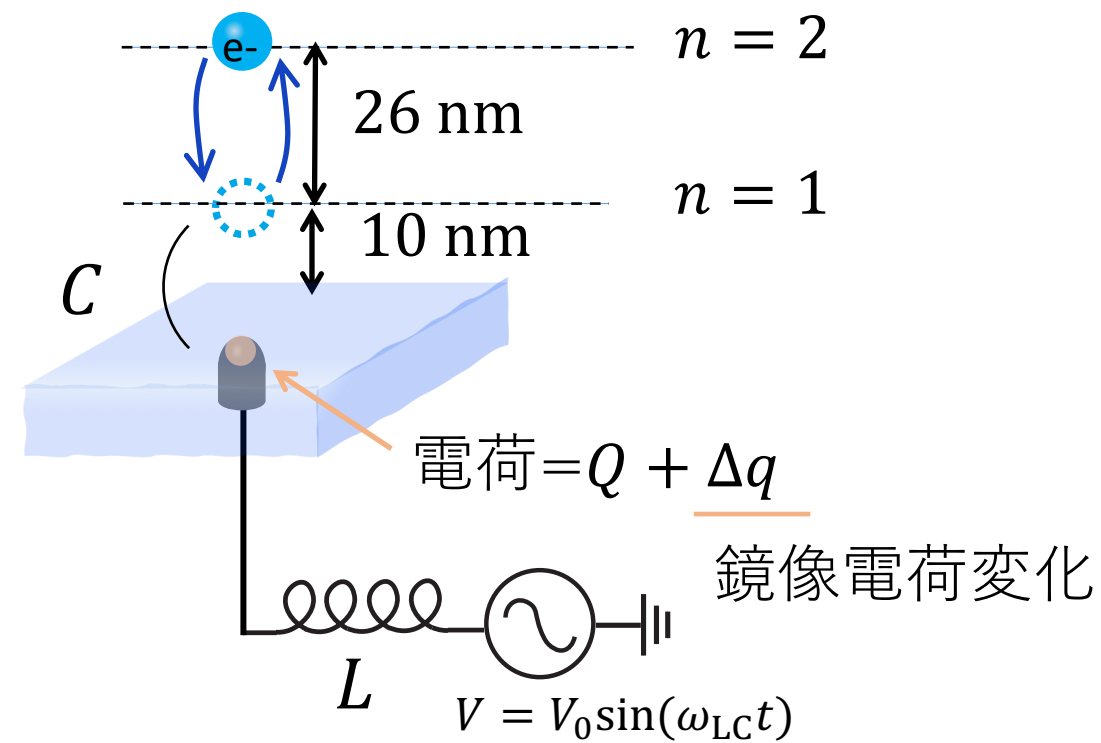


電子の位置の変化  
 ↓  
 電極中の鏡像電荷変化  
 ↓  
 AC capacitanceの変化  
 ↓  
 LC 共振周波数の変化

inspired by

・ 半導体中の電子

・ イオントラップ



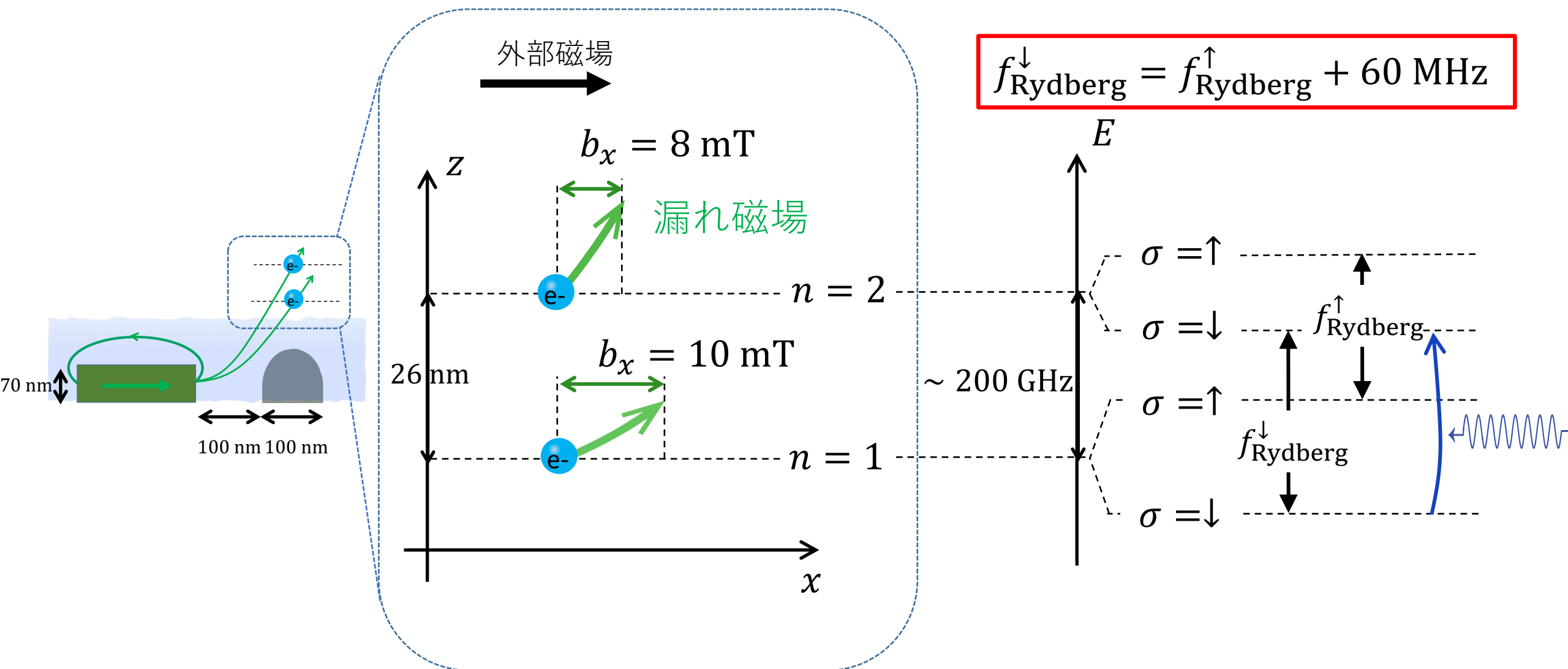
F. Persson, Nano Lett. 10, 953 (2010).

M.F. Gonzalez-Zalba, Nat. comm. 6, 6084 (2015).

D. Wineland, et al., Phys. Rev. Lett. 31, 1279 (1973).

M. Urdampilleta, Phys. Rev. X 5, 031024 (2015)

電子がスピン下向きの時のみ  
リュードベリ状態の遷移が起こる



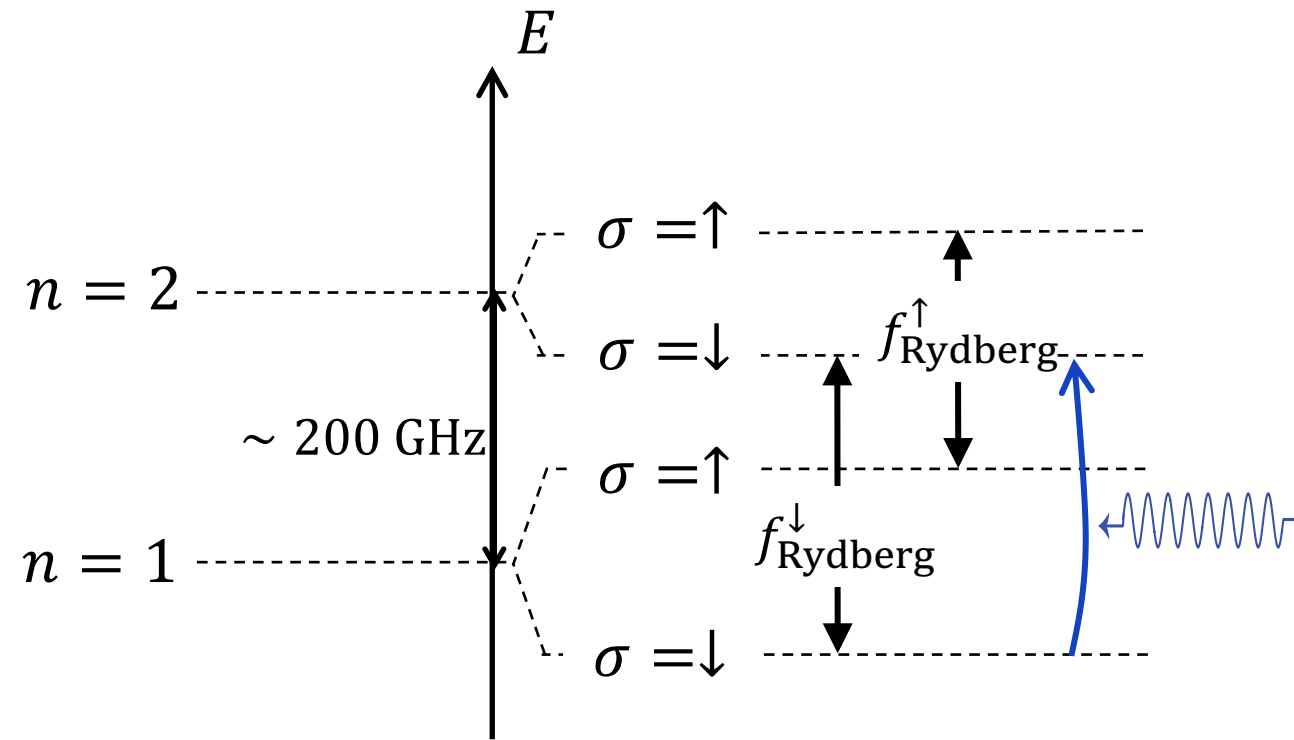
# スピン状態の読み出し

電子がスピン下向きの際のみ  
リュードベリ状態の遷移が起こる

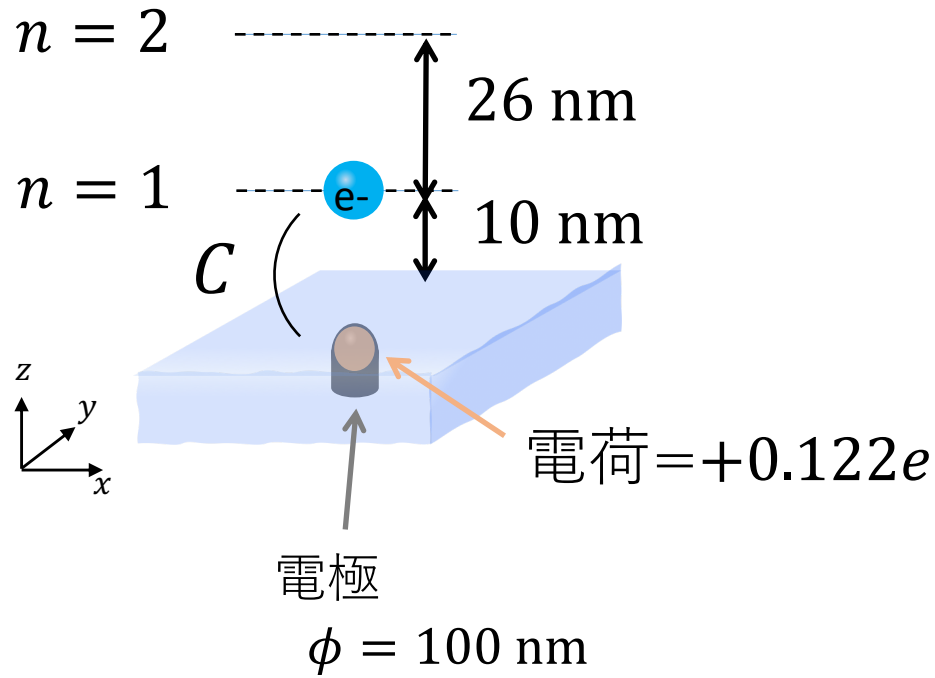


電子の位置の変化  
↓  
電極中の鏡像電荷変化  
↓  
AC capacitanceの変化  
↓  
**LC 共振周波数の変化**

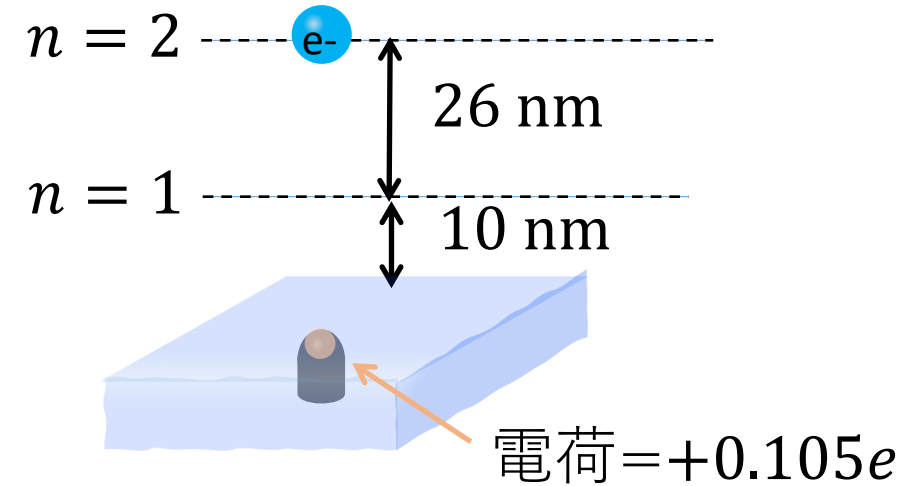
$$f_{\text{Rydberg}}^{\downarrow} = f_{\text{Rydberg}}^{\uparrow} + 60 \text{ MHz}$$



# 単一電子の検出にはどれほどの測定感度が必要か？



鏡像電荷変化  
 $\Delta q = -0.017e$



液体ヘリウム厚さ $\sim 140 \text{ nm}$

with  $V_0 = 0.1 \text{ mV}$        $\Delta C = \frac{\Delta q}{V_0} \sim 30 \text{ aF}$

# 今までの実験で達成したこと

電子がスピン下向きの時のみ  
リュードベリ状態の遷移が起こる



電子の位置の変化



電極中の鏡像電荷変化



AC capacitanceの変化



LC 共振周波数の変化

多数の電子に対して実験的に実証

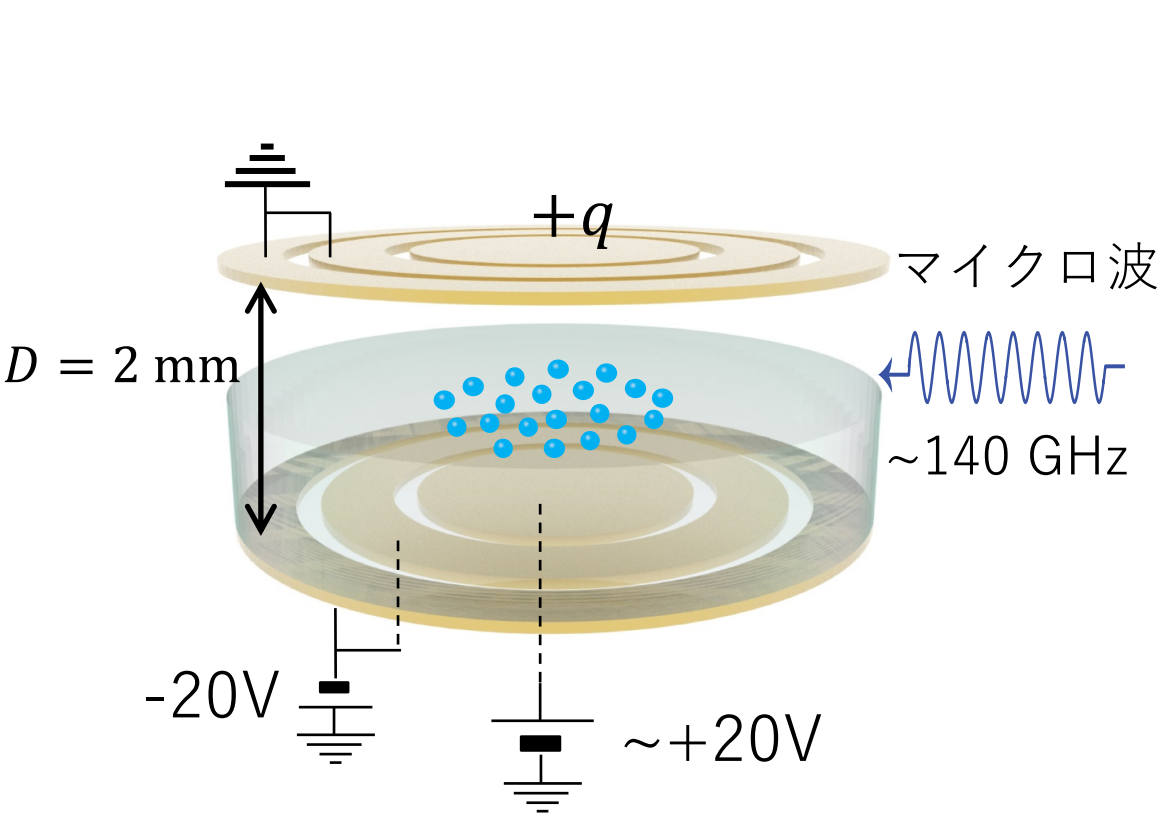
EK, A. Elarabi, D. Konstantinov, PRL 123, 086801 (2019).

EK, A. Elarabi, D. Konstantinov, PRL 126 106802 (2021).

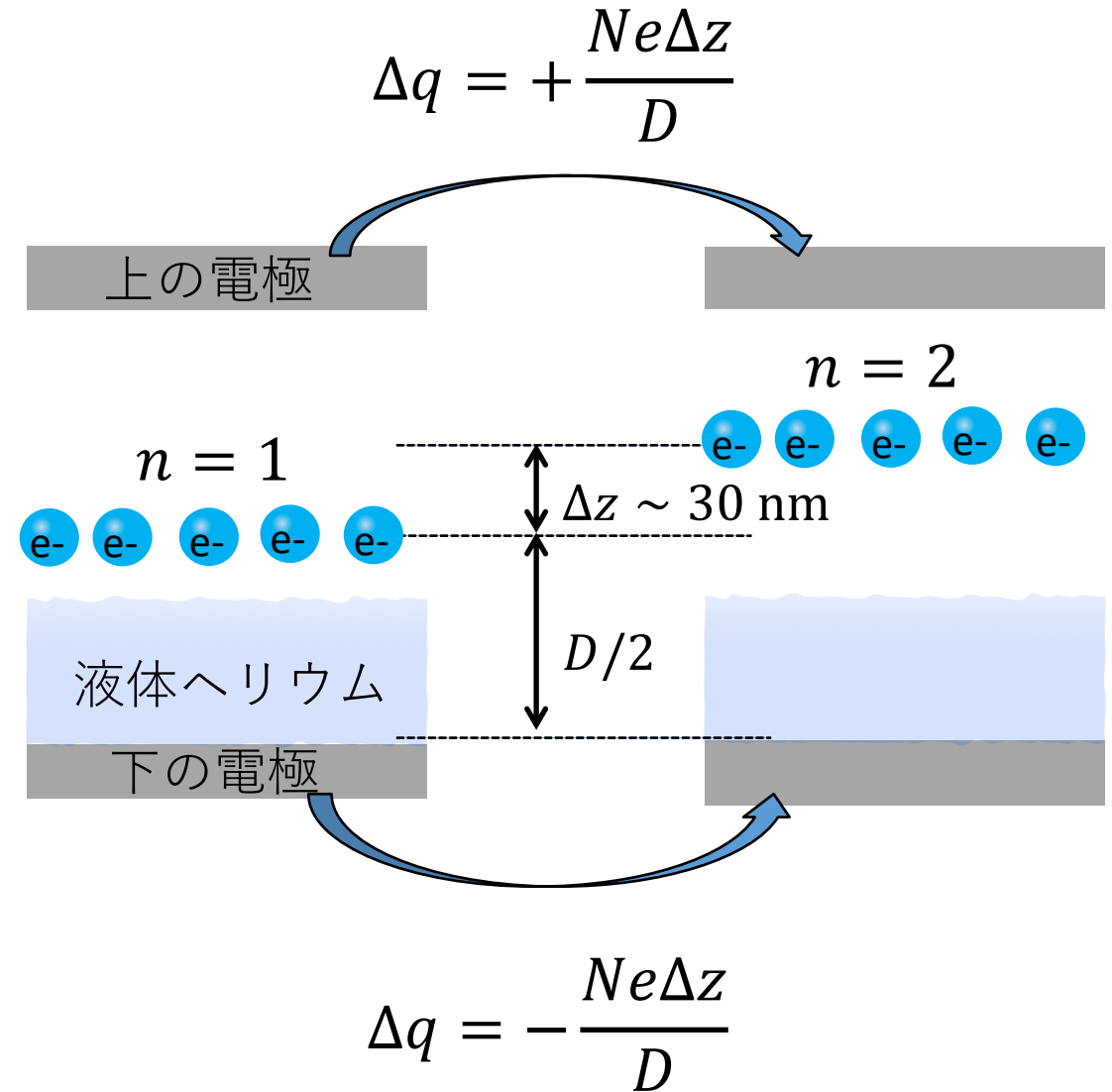
}  $0.3 \text{ aF}/\sqrt{\text{Hz}}$  の感度を持つLC共振回路を作成



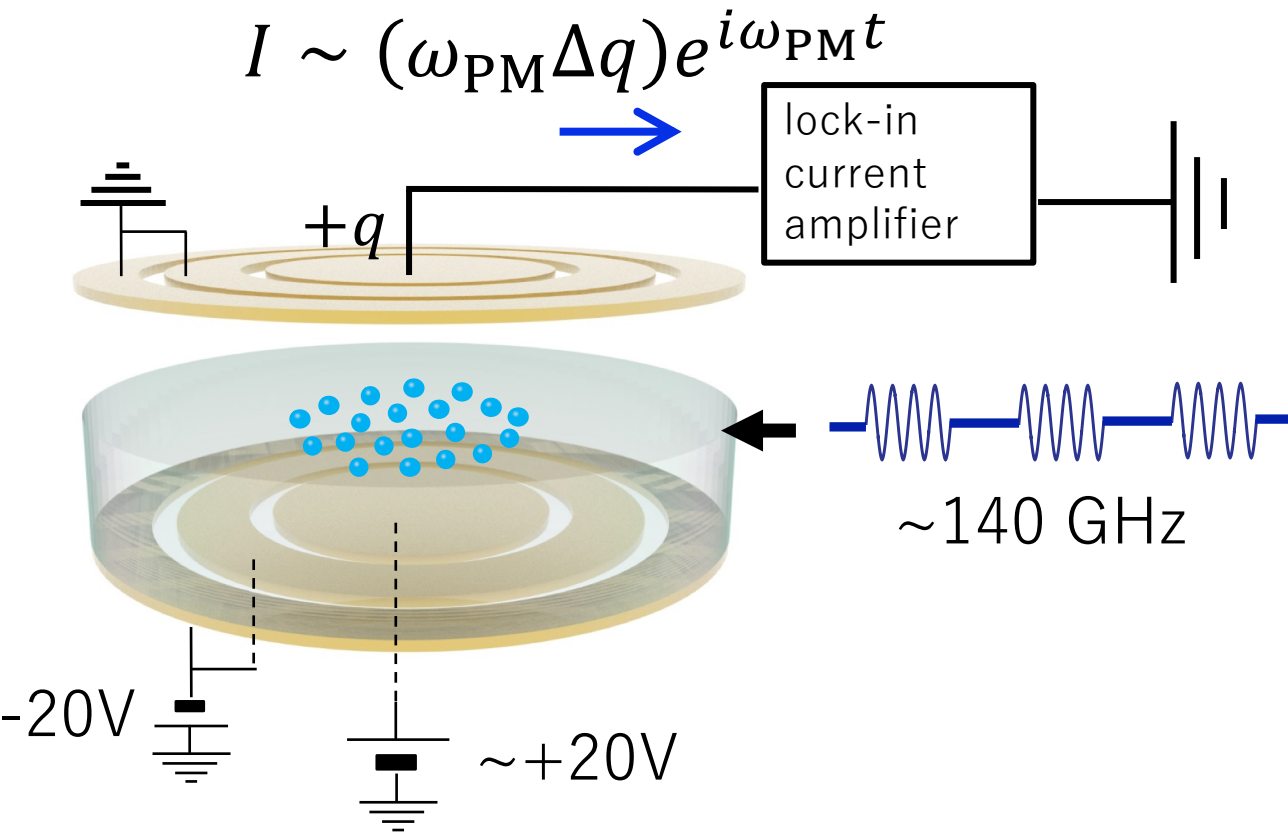
# 多数の電子のリュードベリ状態の遷移を鏡像電荷変化によって検出



電子の数:  $N \sim 10^7$



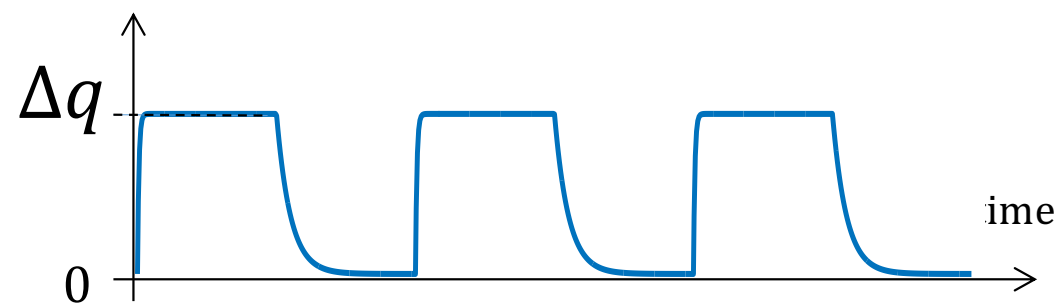
# マイクロ波パルスを与える



140 GHz のパルスマイクロ波  
(変調周波数  $\omega_{\text{PM}} = 250 \text{ kHz}$ )



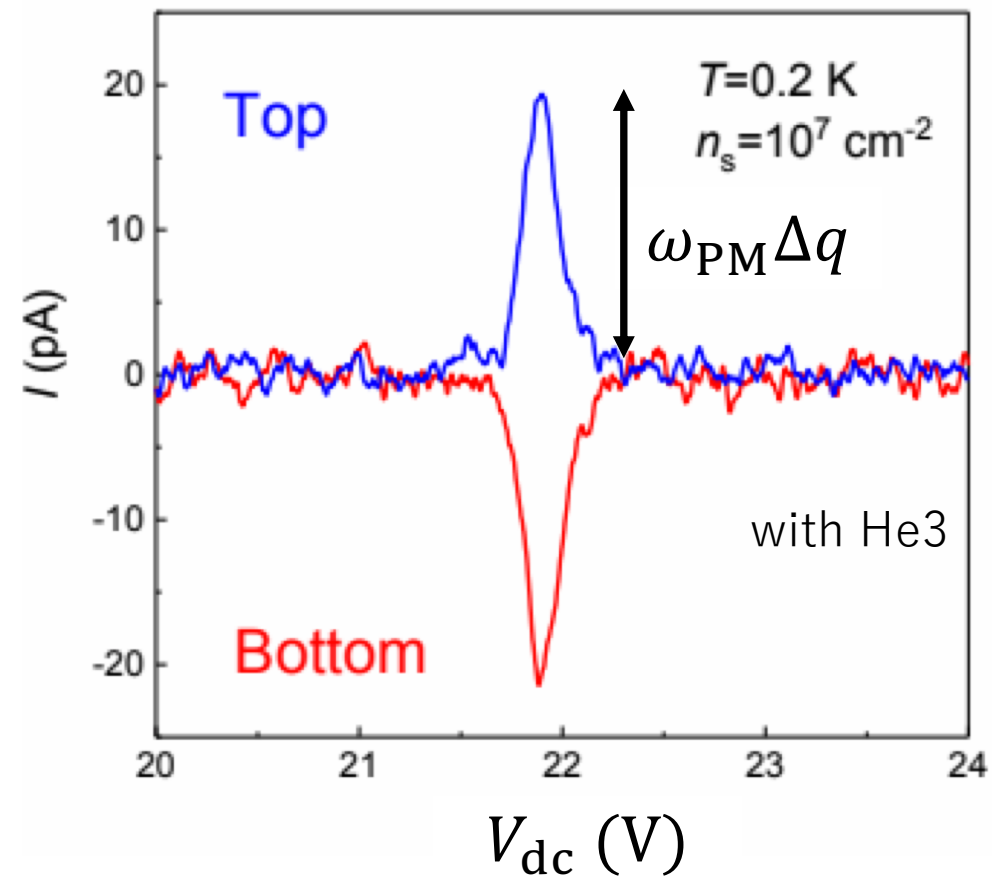
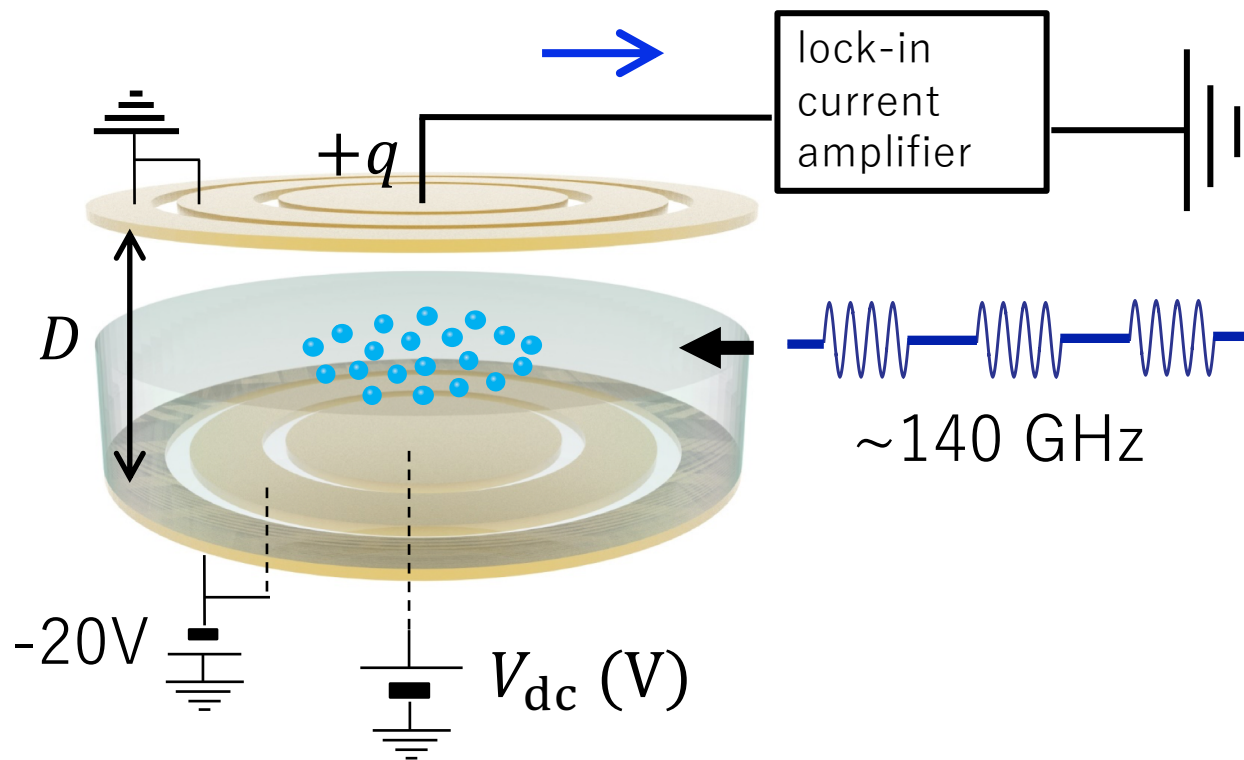
上の電極の鏡像電荷の変化



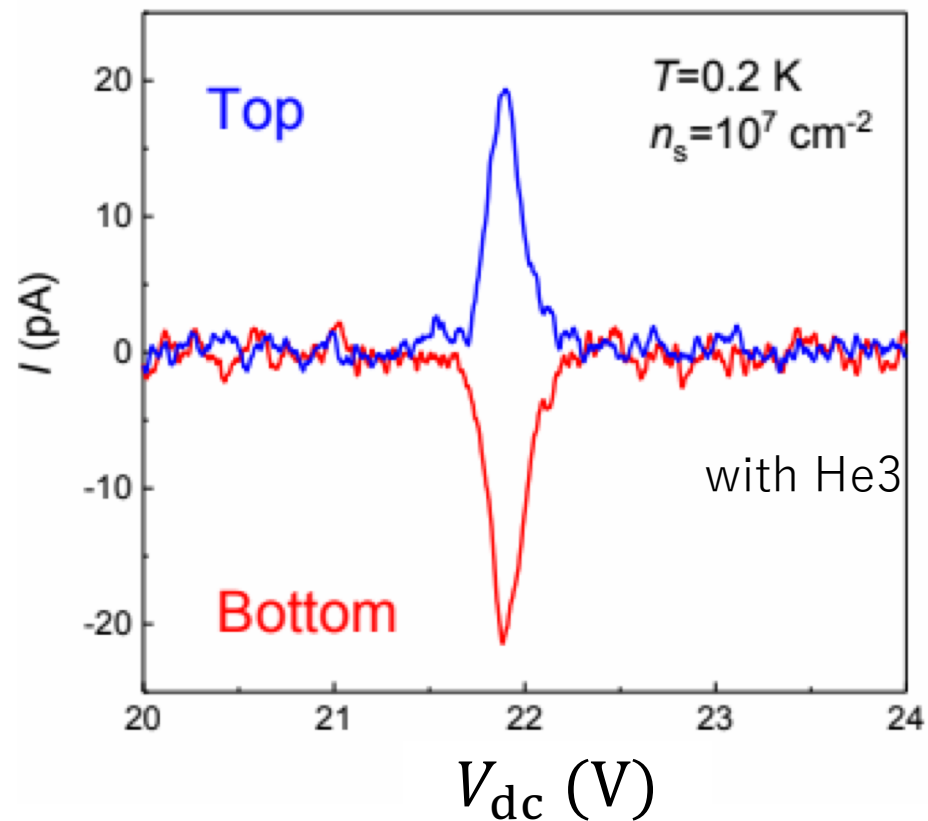
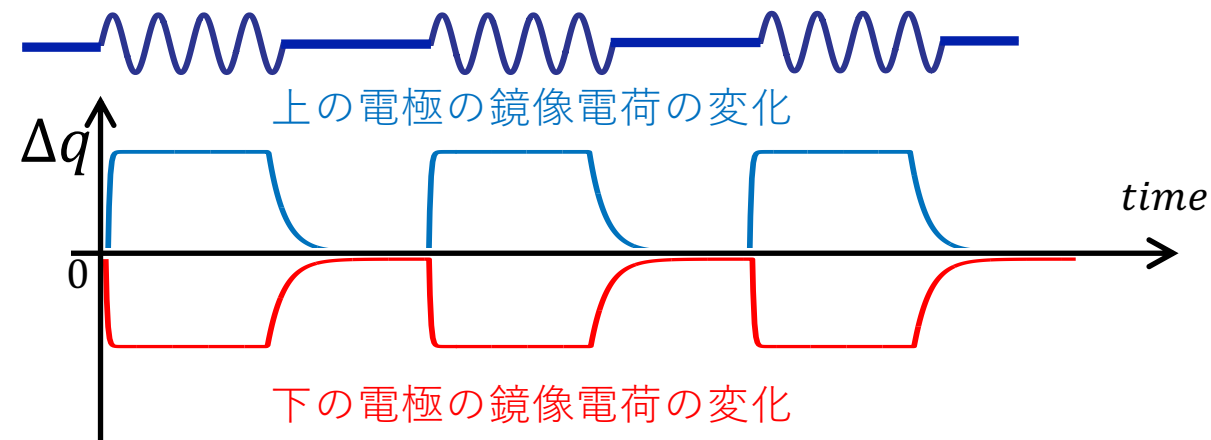
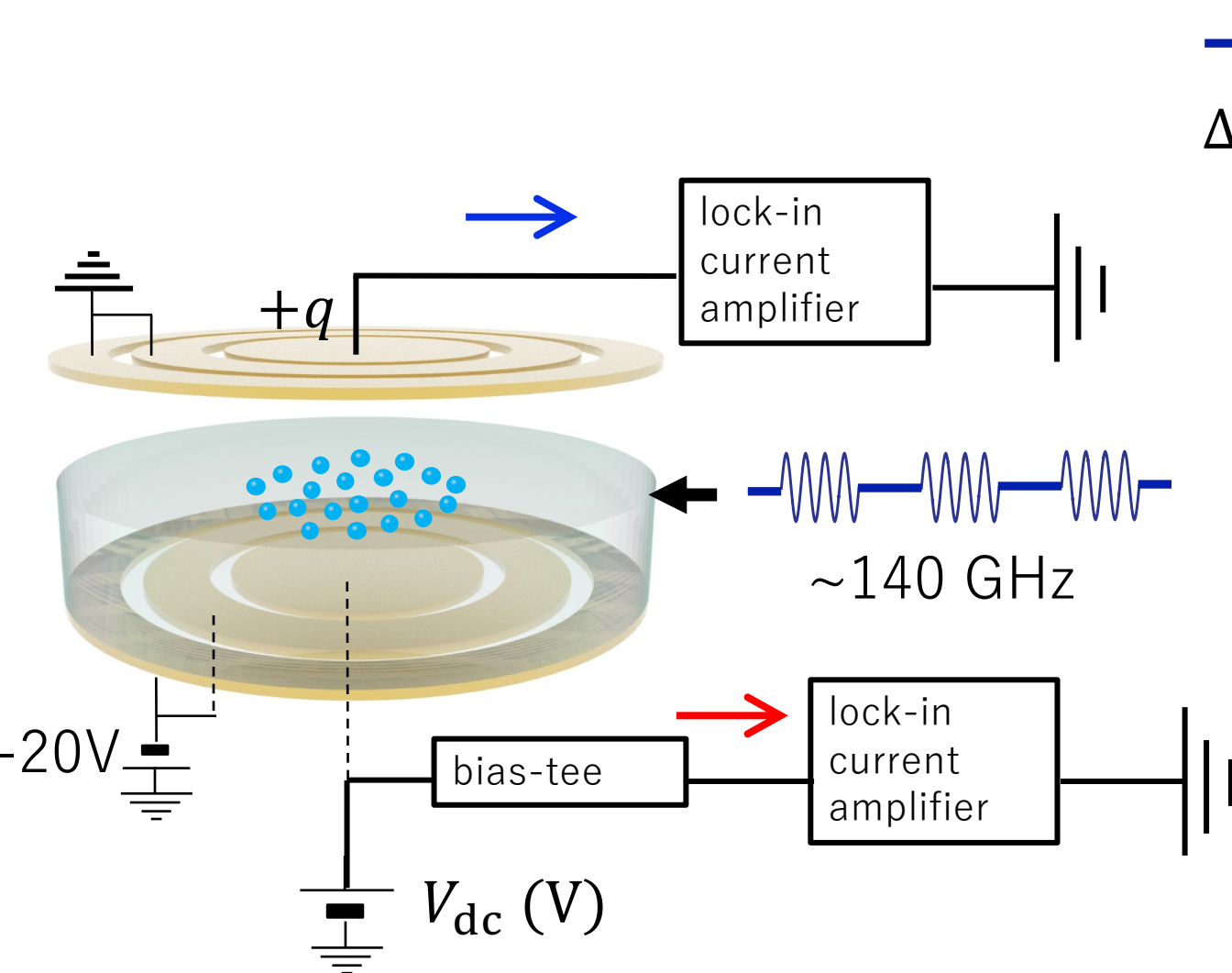
# ロックイン電流を測る

$$I \sim (\omega_{\text{PM}} \Delta q) e^{i\omega_{\text{PM}} t}$$

$$\Delta q = \frac{Ne\Delta z}{D} \sim 150e$$

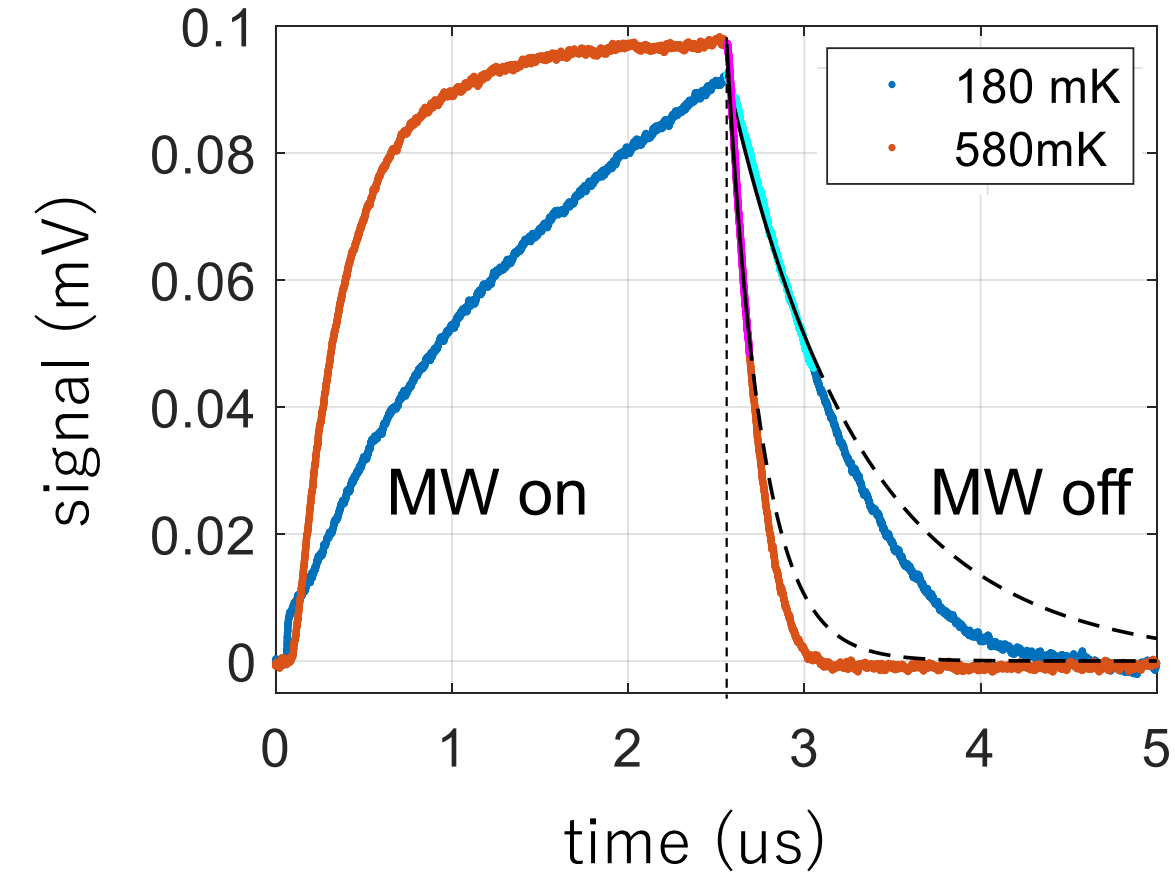


# 上の電極と下の電極からの信号は位相が180度反転

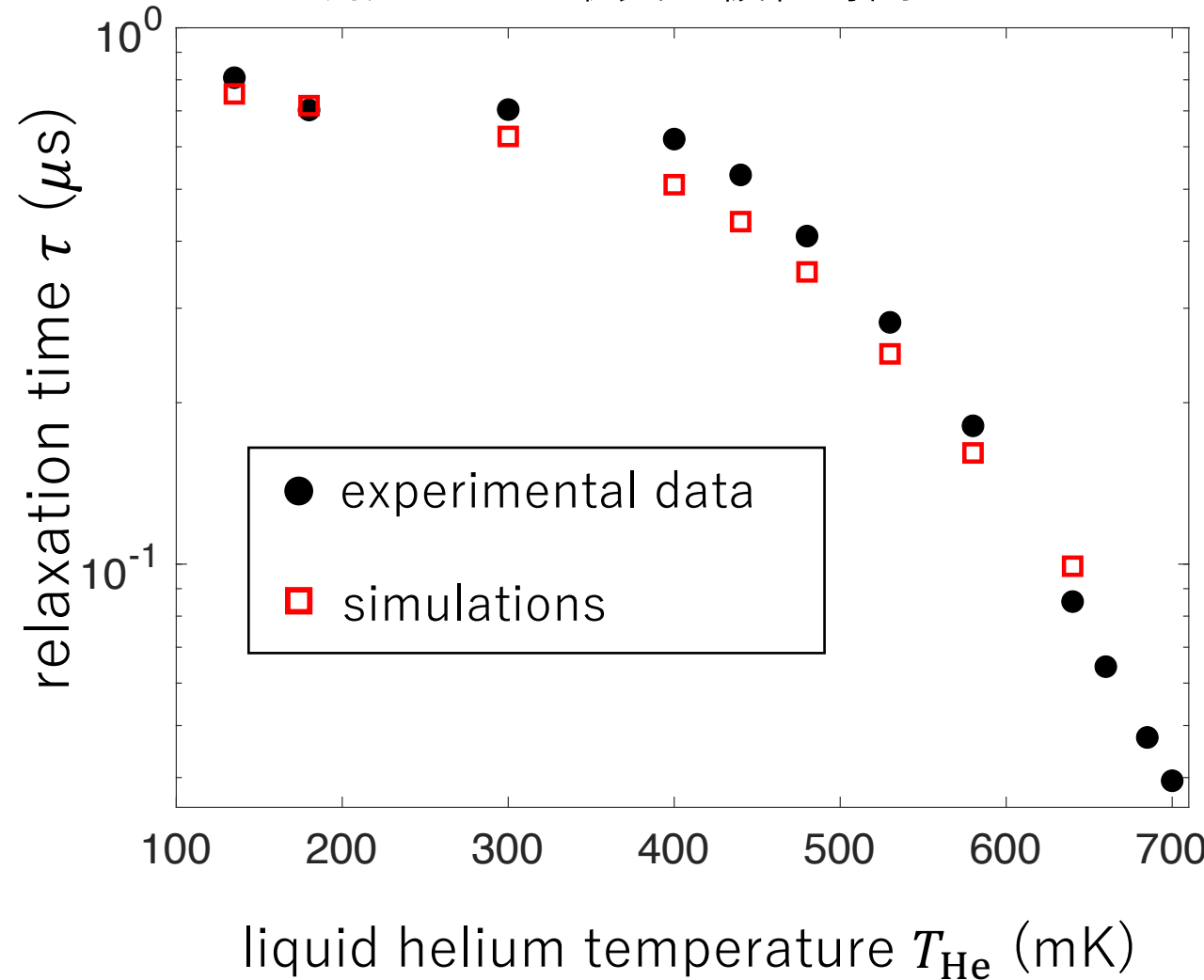


# リユードベリ状態の緩和時間を測定

リアルタイム測定

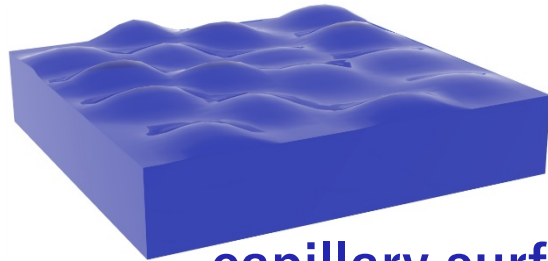


測定された最長の緩和時間~1  $\mu\text{s}$



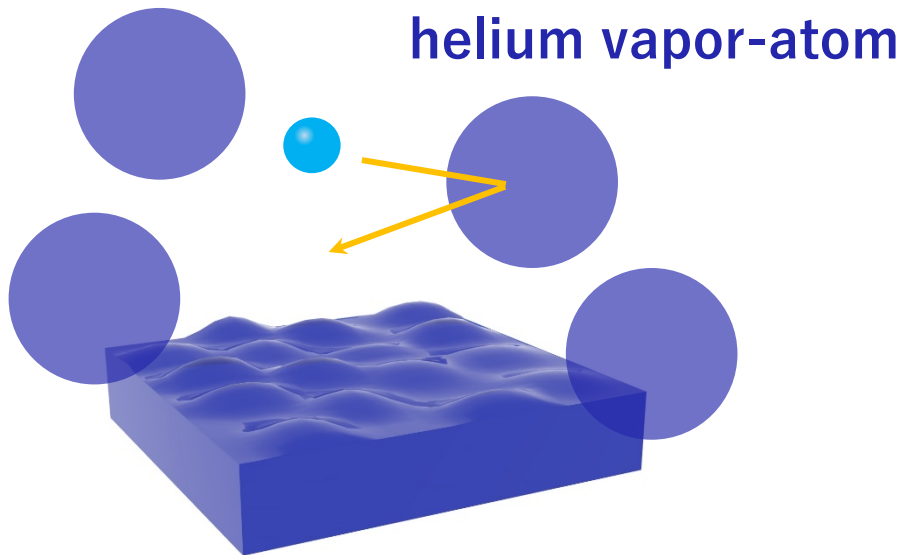
# リュードベリ状態の緩和の由来

low He temperature

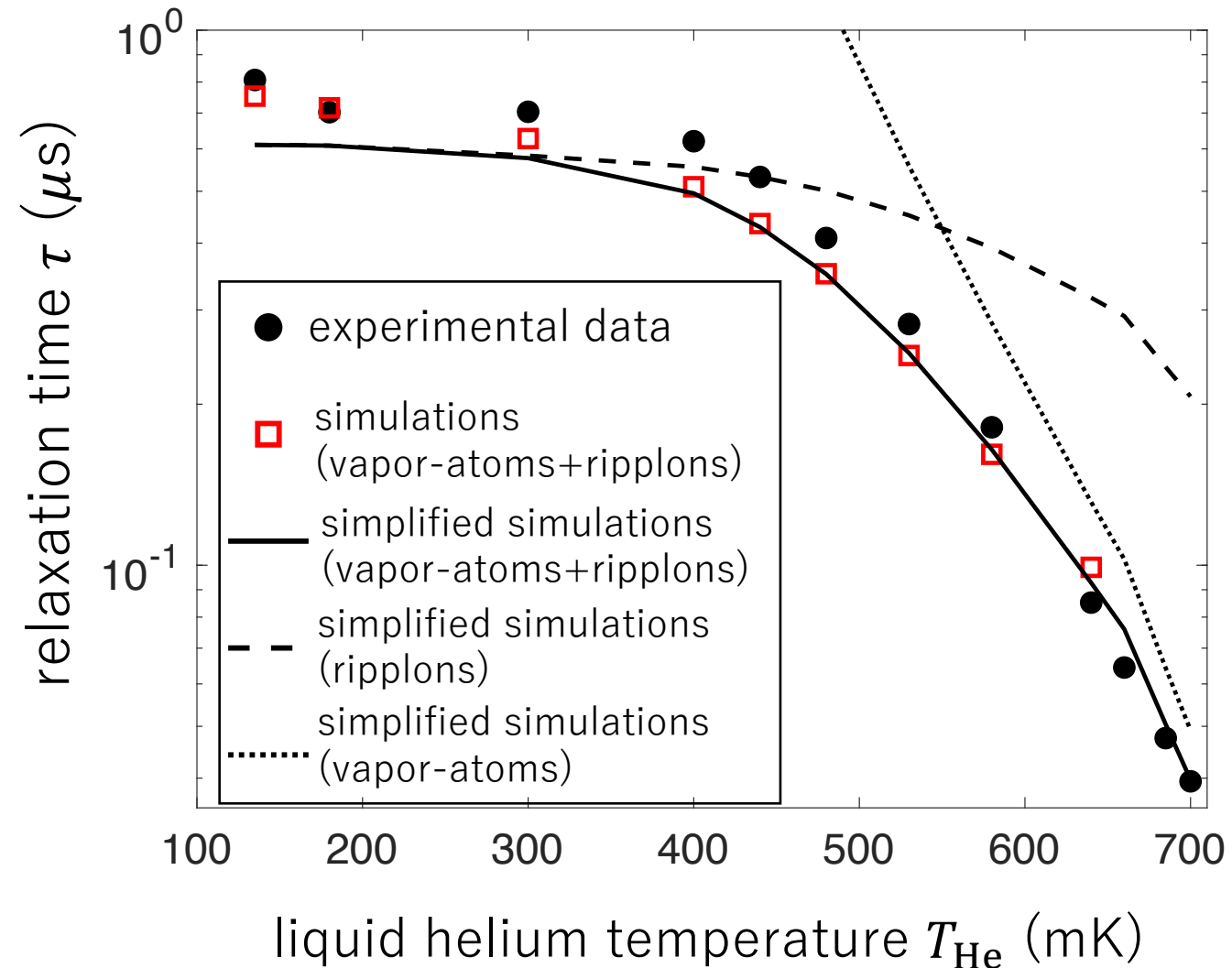


capillary surface wave  
(ripplon)

high He temperature

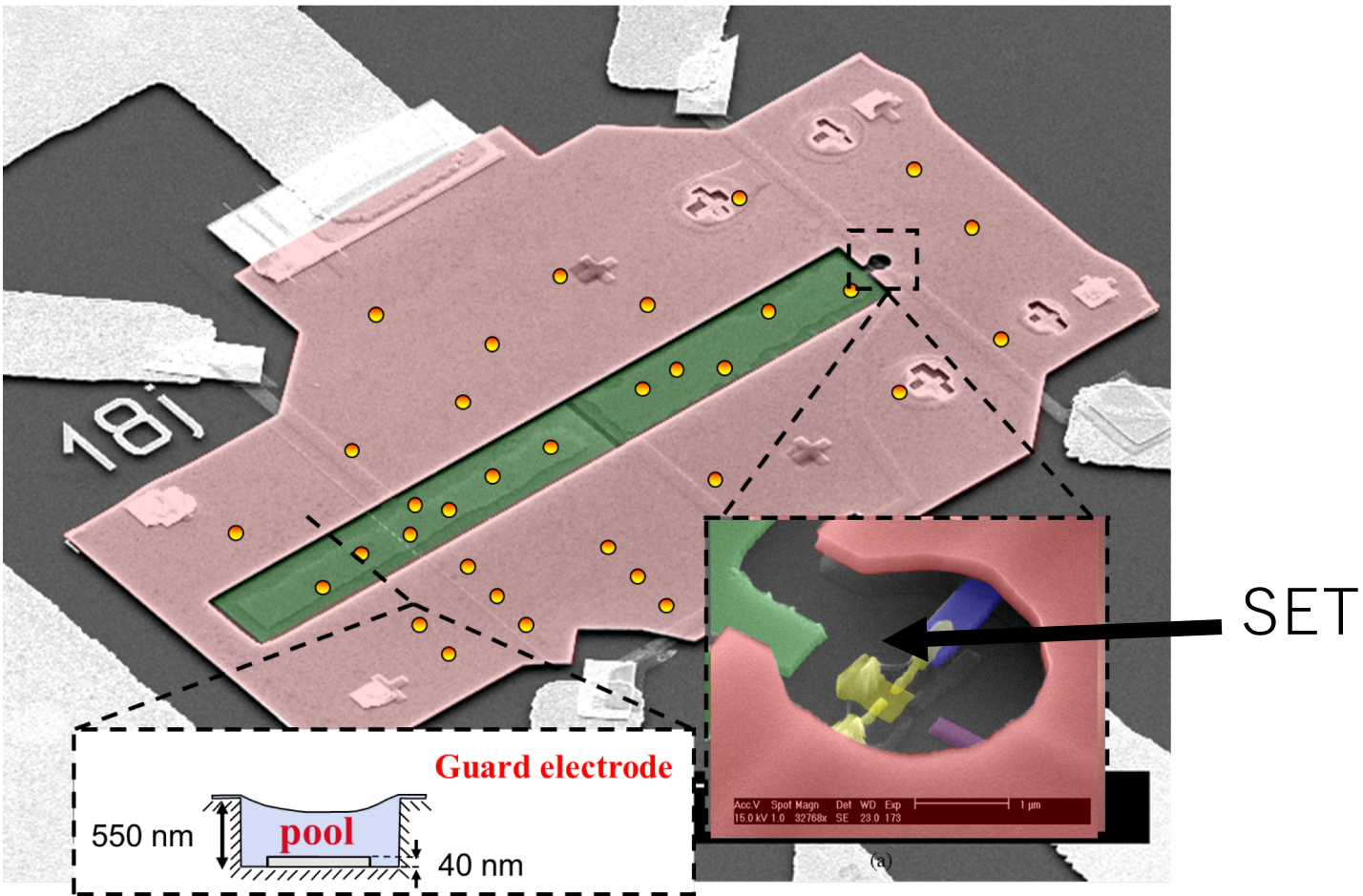


helium vapor-atom

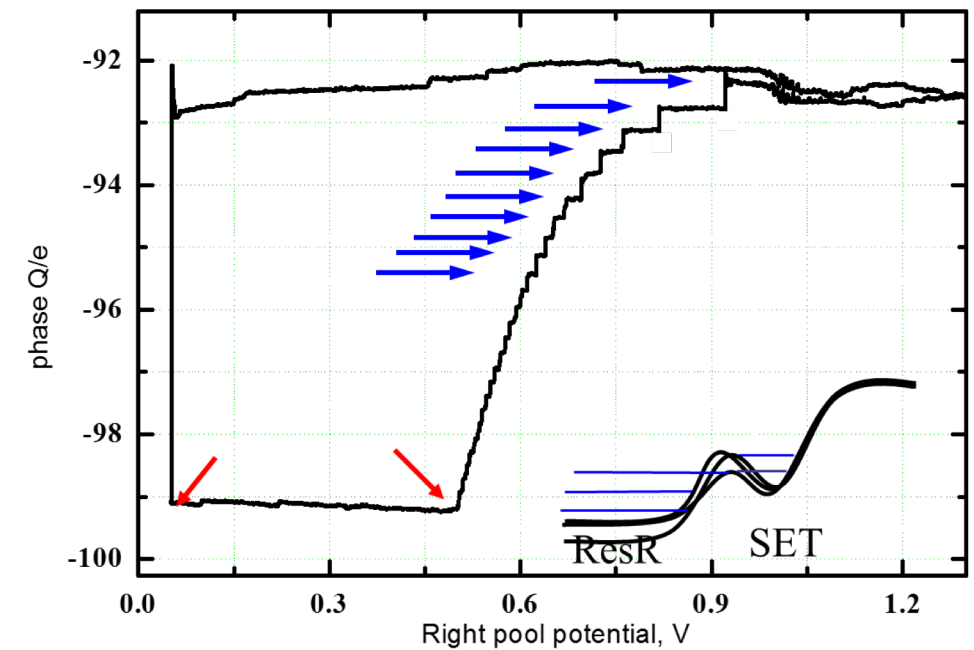




# 単一電子のトラップ

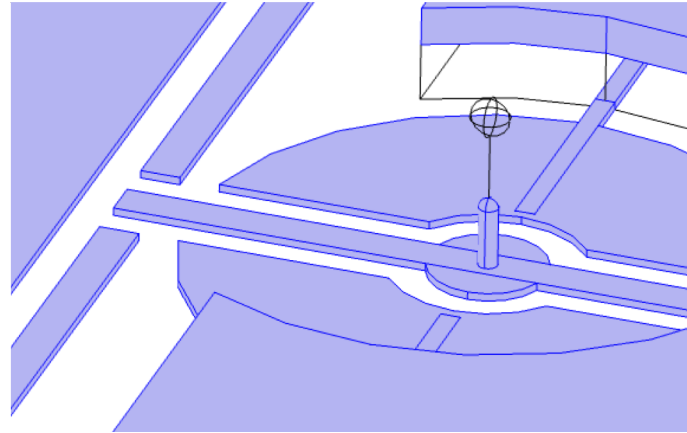
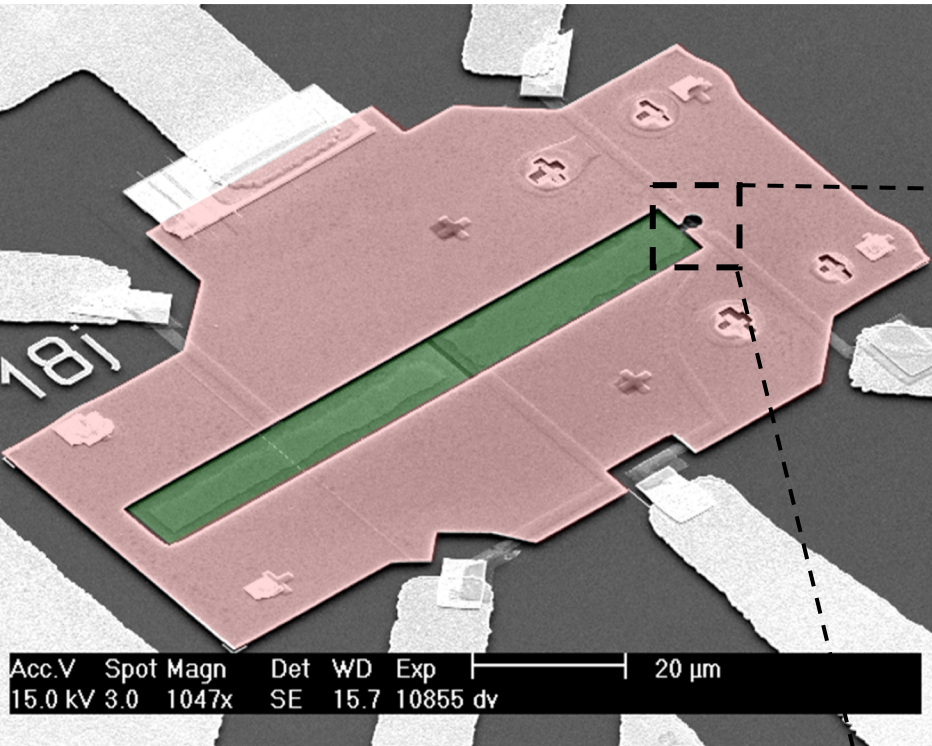


電子の数をカウントした実験

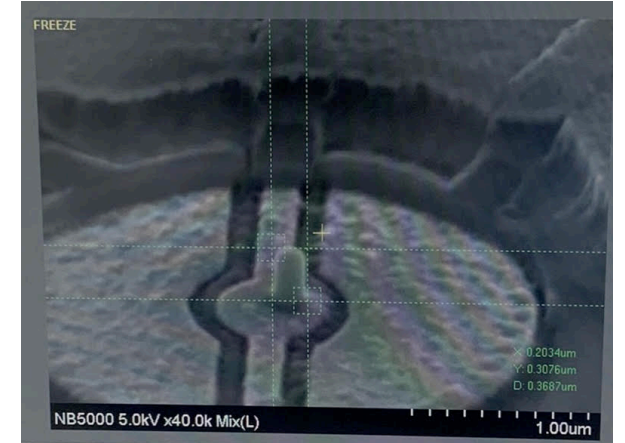
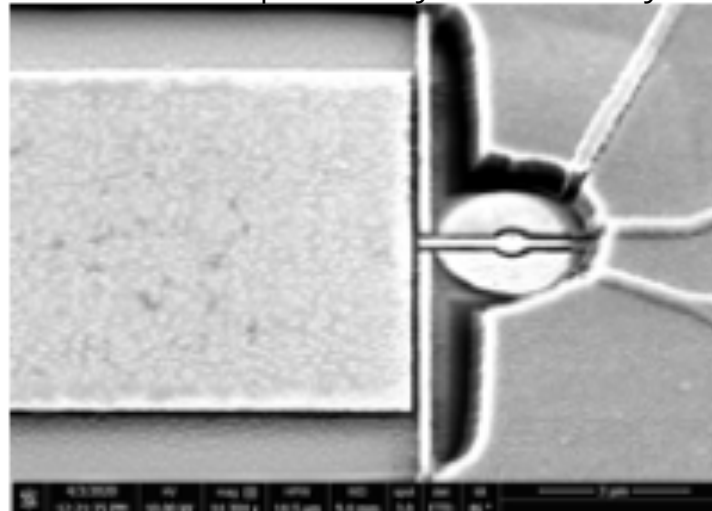


E. Rousseau, D. Ponarin, L. Hristakos, O. Avenel, E. Varoquaux, and **Y. Mukharsky**, Phys. Rev. B 79, 045406 (2009)

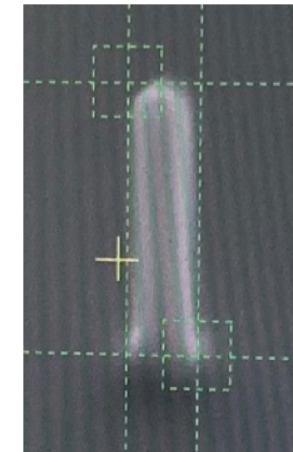
# 単一電子のリュードベリ状態の遷移を検出するためのサンプル



fabricated @OIST  
with the help of Yury Mukharsky



fabricated with FIB  
(W deposition) @RIKEN

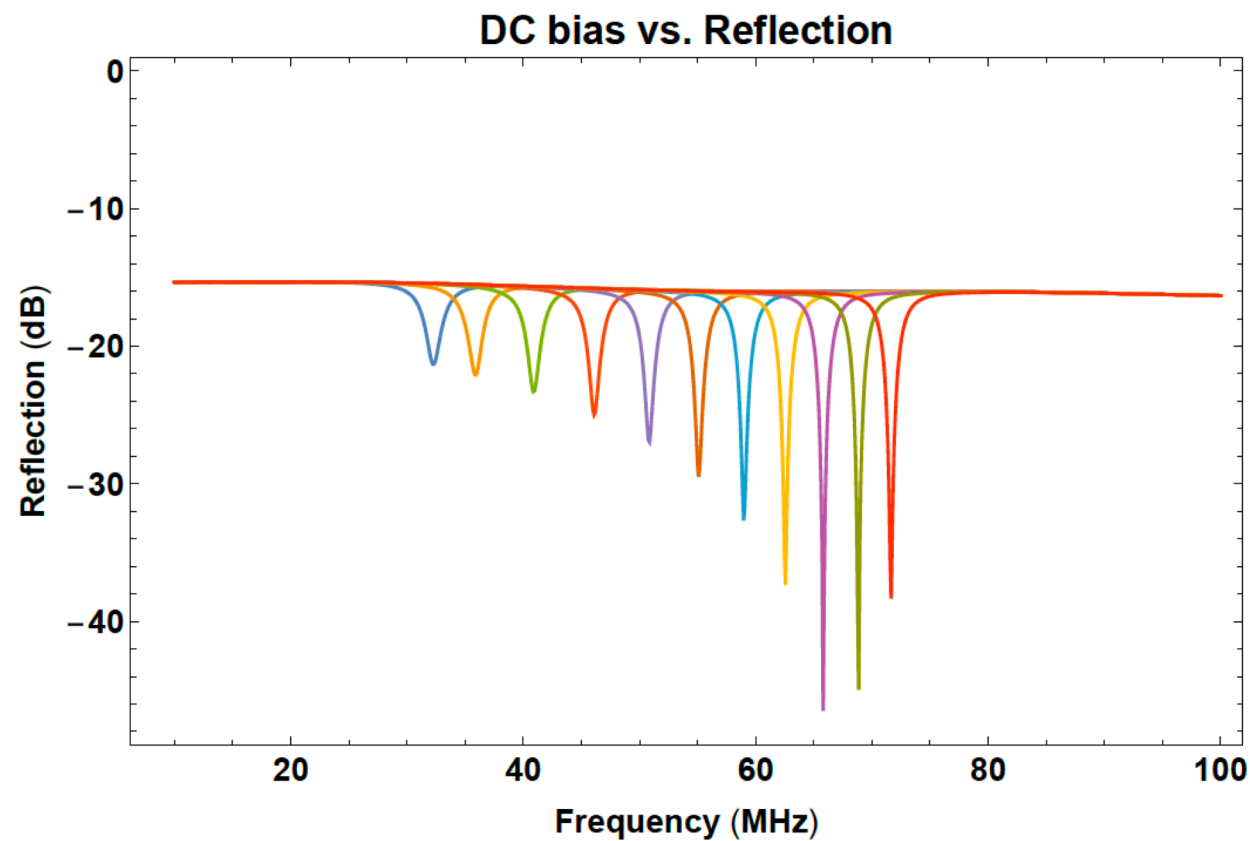
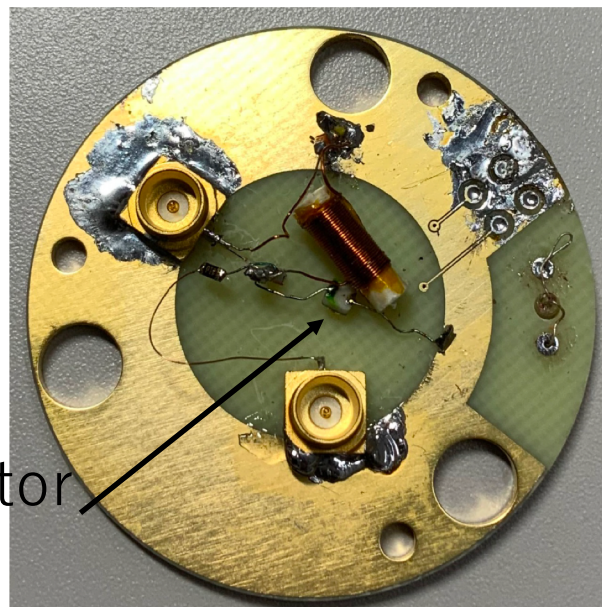


~100 nm

~600 nm



# LC共振回路



DC bias to the varactor diode

- $V_{DC}=0\text{ V}$
- $V_{DC}=1\text{ V}$
- $V_{DC}=2\text{ V}$
- $V_{DC}=3\text{ V}$
- $V_{DC}=4\text{ V}$
- $V_{DC}=5\text{ V}$
- $V_{DC}=6\text{ V}$
- $V_{DC}=7\text{ V}$
- $V_{DC}=8\text{ V}$
- $V_{DC}=9\text{ V}$
- $V_{DC}=10\text{ V}$

キャパシタンス感度：  $S_c \sim 0.3 \text{ aF}\sqrt{\text{Hz}} @ 1.7 \text{ K}$

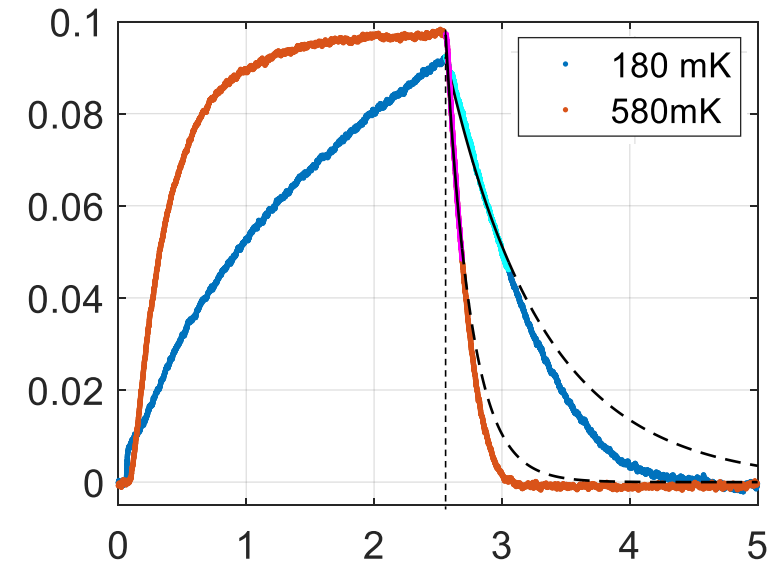
# まとめ

## ヘリウム表面上の多数の電子をcapacitiveに読み出し

リュードベリ状態の遷移の新しい検出方法

リュードベリ状態の緩和時間 $\sim 1$   $\mu$ s

→ 単一電子に対しても実現する

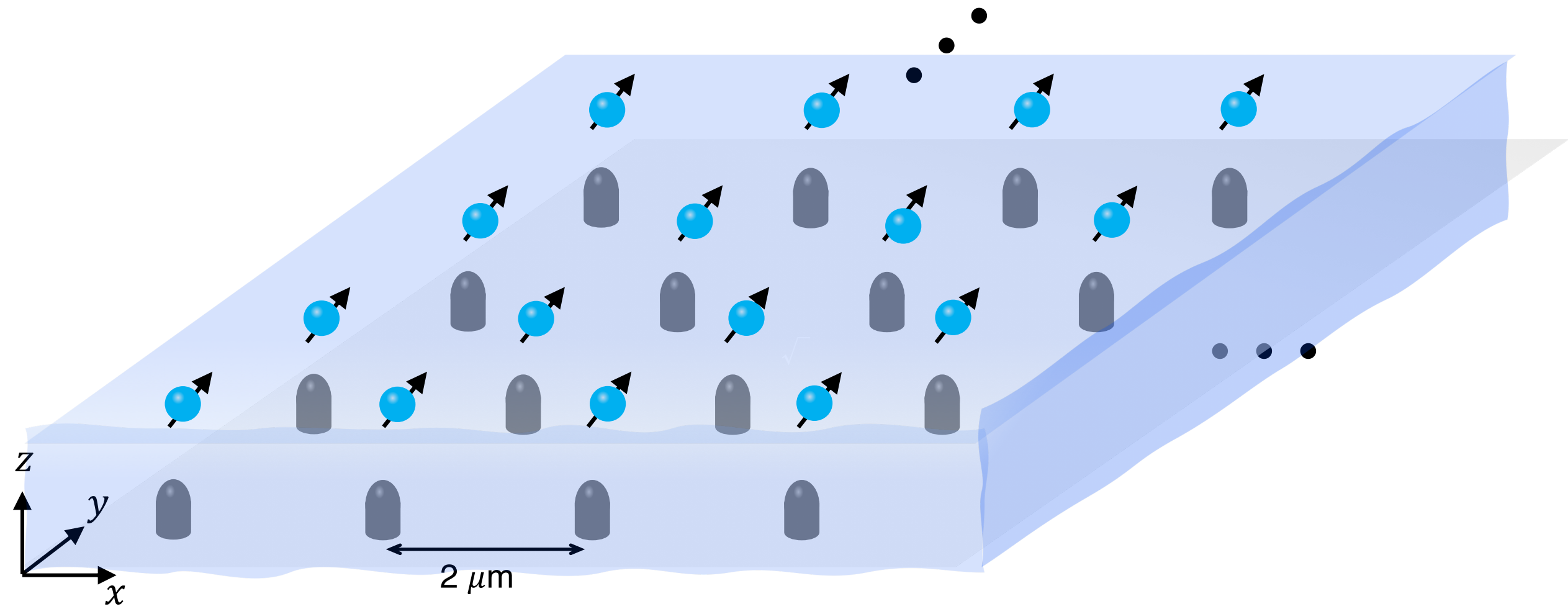


## ヘリウム液面上の電子のスピン状態で量子ビットを作る

→ リュードベリ状態とスピン状態の相互作用を人工的に作る

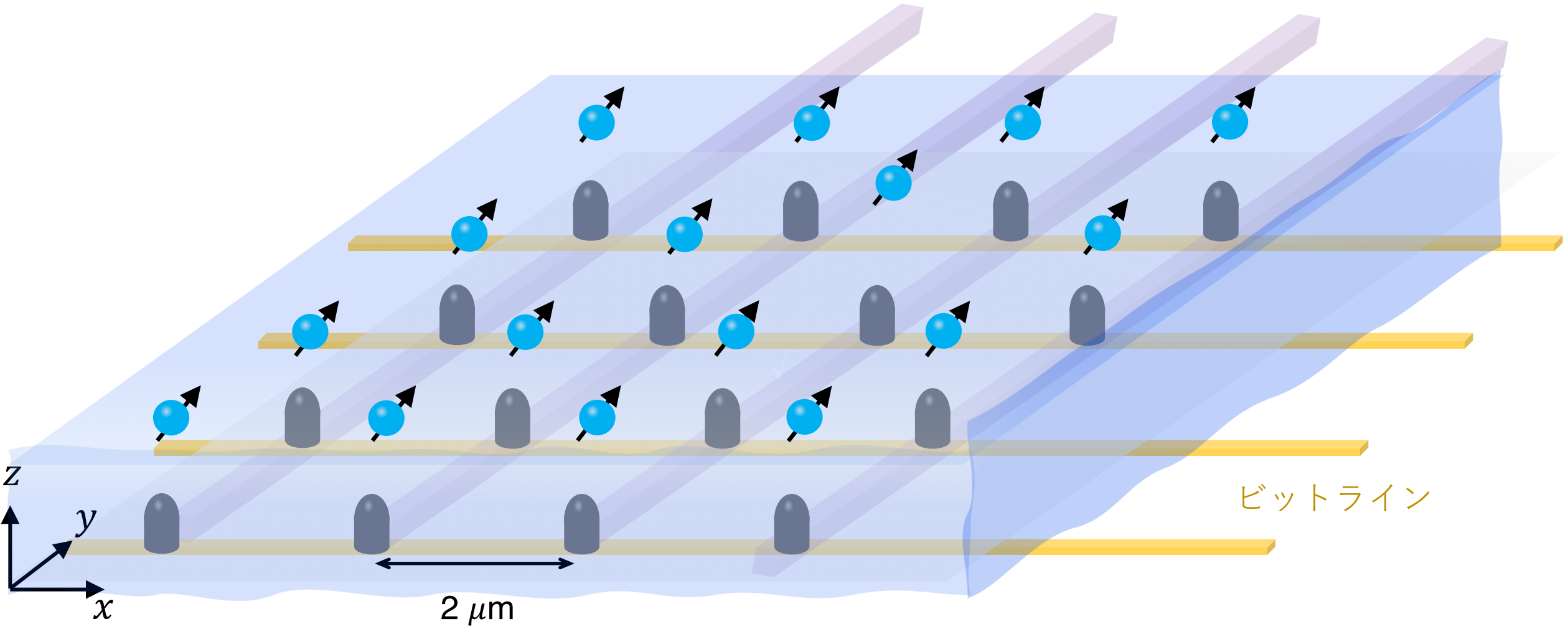
→ 量子ビットゲートを実現

## 2次元集積化



# 2次元集積化

ワードライン



ビットライン

# 2次元集積化

