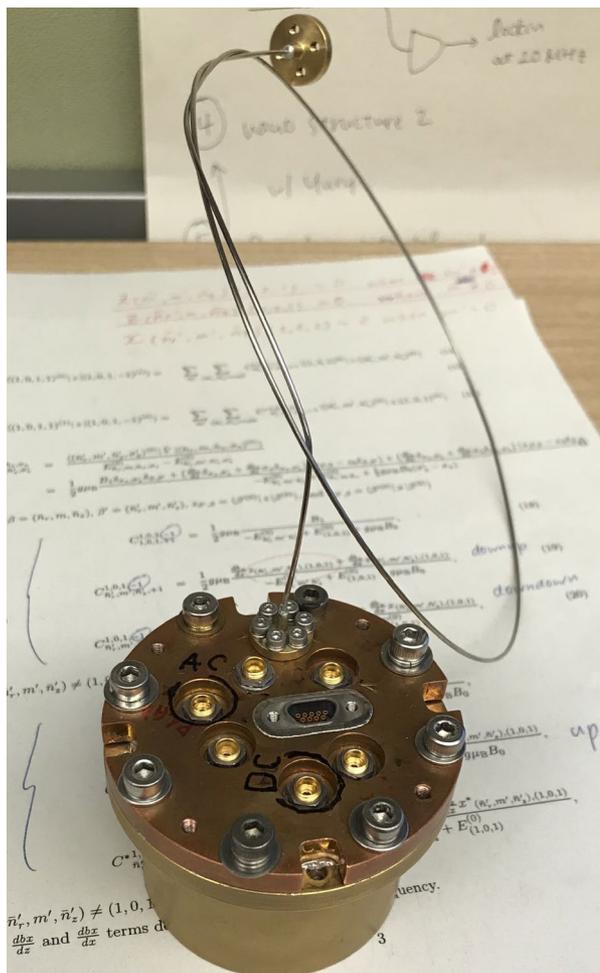




Q-LEAP 人材育成プログラム
量子技術教育のためのオンラインコース・サマースクール開発プログラム

Hamiltonian

浮揚電子II： ヘリウム表面上の電子

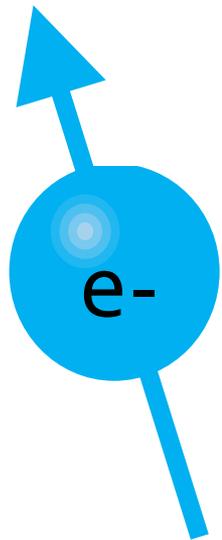


理化学研究所
川上 恵里加

$|0\rangle + |1\rangle$

1. そもそも何故電子か？

- 軽い→動かしやすい
- 小さい→集積化しやすい



電氣的性質

磁氣的性質

電荷

電子スピン

軌道状態

スピン状態

相互作用が大きい

相互作用が小さい

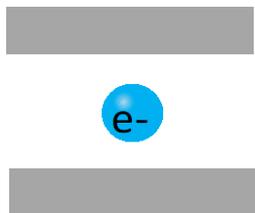
- コヒーレンス時間が短い
- 操作しやすい

- コヒーレンス時間が長い
- 操作しにくい

→適宜使い分けて、良いところ取り！

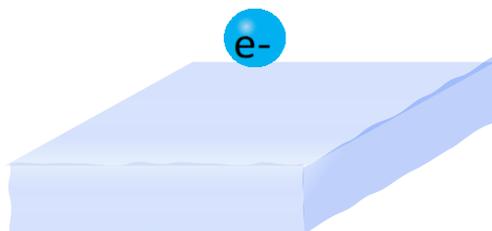
2. 他の電子を使った系との比較

トラップ電子



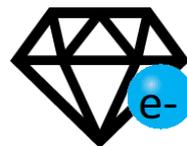
前の動画

ヘリウム上の電子



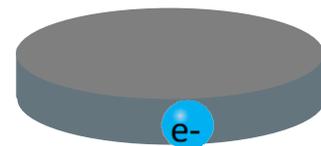
この動画

ダイヤモンド中の電子



少し後の動画

半導体中の電子



少し後の動画

(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(前の動画も参照)

- ☺ 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

3. ヘリウム表面上の電子の歴史

1969年

[理論] Cole and CohenとShikinがヘリウム表面上の電子の存在を予測

1972年

[実験] Crandall and Williamsがヘリウム表面上の電子を測定

1976年

[実験] Grimesらがヘリウム表面上の電子のリュードベリ状態を測定

1999年

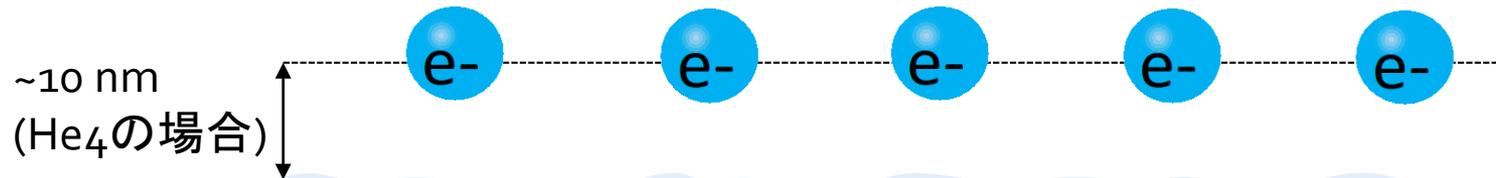
[理論] Platzman and M. I. Dykmanがヘリウム表面上の電子を用いた量子ビットの実現のための理論的提案

2005年

[実験] Papageorgiouらがヘリウム表面上に単一電子を捕捉

4. なぜHe表面上に浮かぶのか？

真空
(比誘電率 = 1)



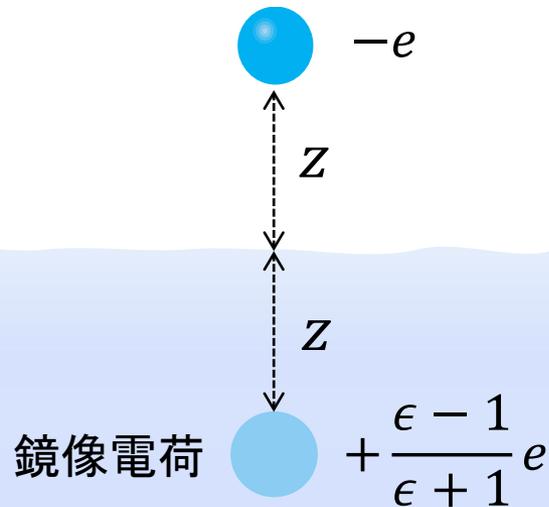
(電子親和力 < 0)
(比誘電率 > 1)

[Cole and Cohen, PRL 23, 1238 (1969)] はこのようなことが実現できる物質として、液体ヘリウム、個体ネオン、個体水素などを挙げている。

4. なぜHe表面上に浮かぶのか？

真空
(比誘電率 = 1)

(電子親和力 < 0)
(比誘電率 $\epsilon > 1$)



電子が鏡像電荷から受ける力

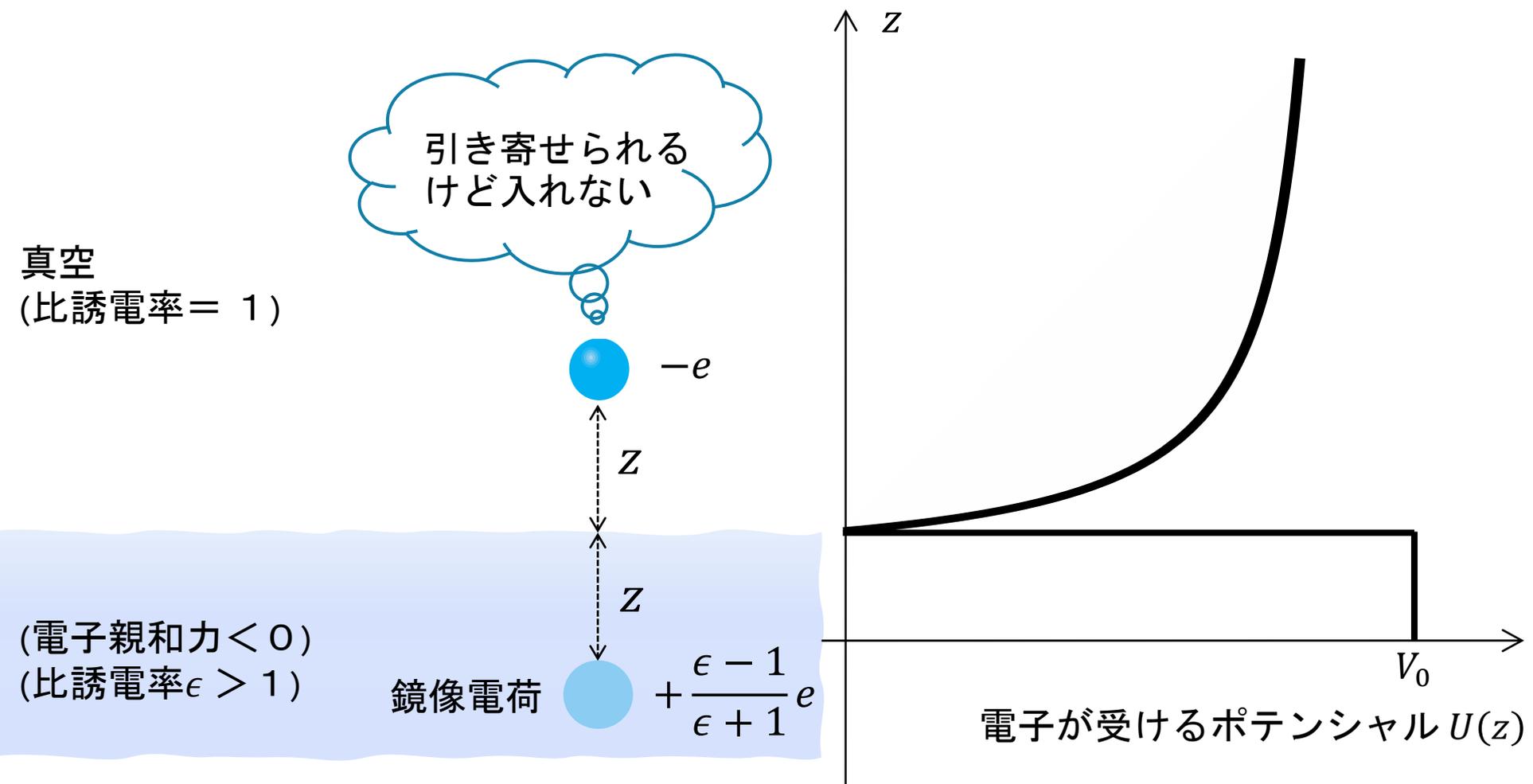
$$F(z) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 1} \frac{e^2}{(2z)^2}$$

電子が鏡像電荷から受けるポテンシャル

$$\begin{aligned} U(z) &= e \int_{+\infty}^z F(z') dz' \\ &= -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\epsilon - 1}{4(\epsilon + 1)} \frac{1}{z} \end{aligned}$$

$\epsilon = 1.046$
(He₄の場合)

4. なぜHe表面上に浮かぶのか？



$$U(z) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\epsilon-1}{4(\epsilon+1)} \frac{1}{z} \quad (z > 0)$$
$$= V_0 \quad (z \leq 0)$$

$V_0 \sim 1 \text{ eV}$ (ヘリウム₄の場合)

5. リュードベリ状態

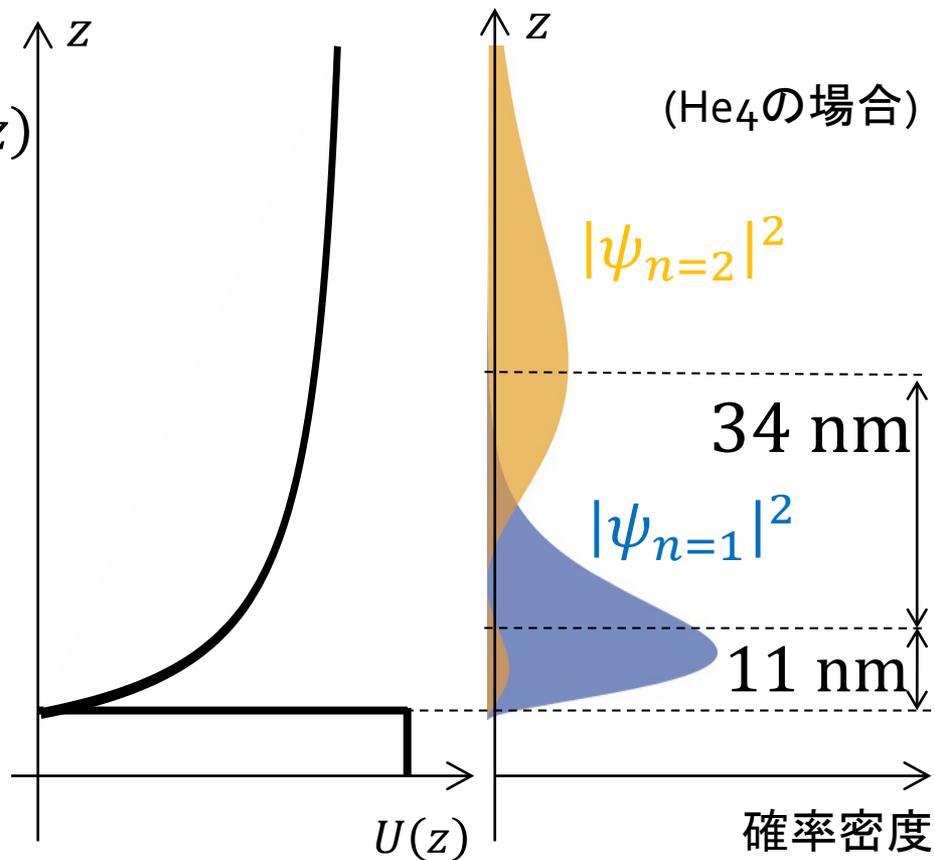
シュレディンガー方程式

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\epsilon-1}{4(\epsilon+1)} \frac{1}{z} \right) \psi(z) = E\psi(z)$$

$$E_n = -\frac{\boxed{m_e e^4}}{8\epsilon_0^2 \hbar^2} \left(\frac{\epsilon-1}{4(\epsilon+1)} \right)^2 \frac{1}{n^2}$$

= R_∞ (リュードベリ定数)

原子系の人からは、
それはリュードベリ状態じゃないと
よく怒られる・・・。



※水素原子のシュレディンガー方程式

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m_e} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\epsilon-1}{4(\epsilon+1)} \frac{1}{r} \right) \psi(r) = E\psi(r)$$

$$E_n = -\frac{\boxed{m_e e^4}}{8\epsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

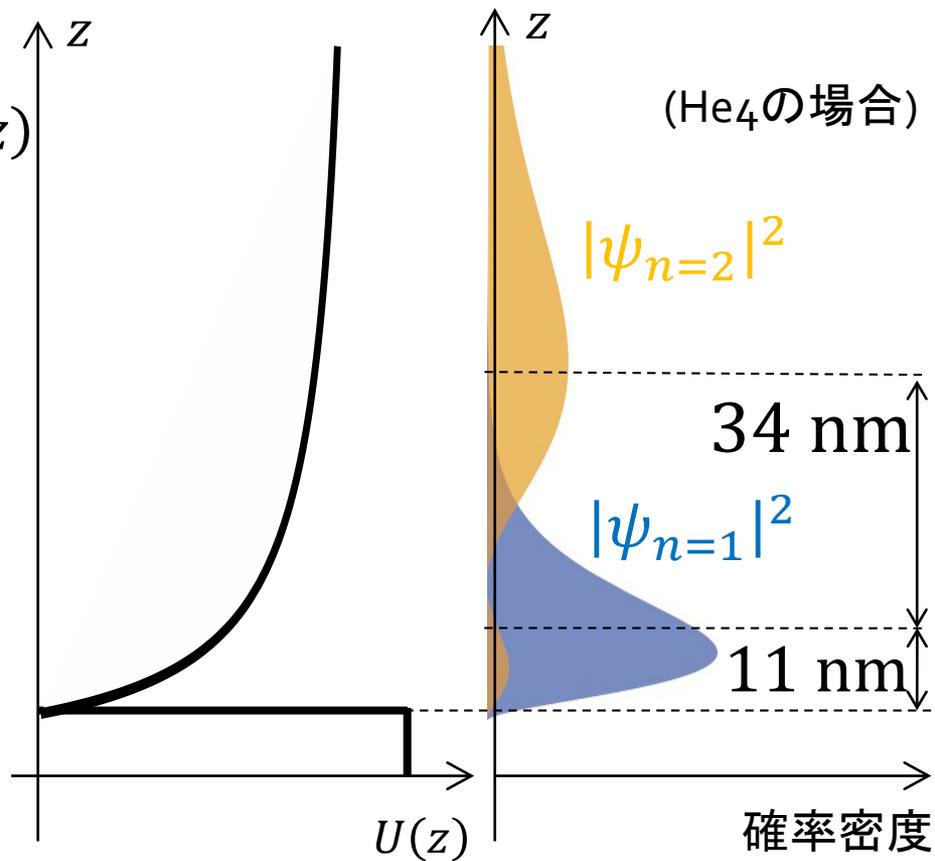
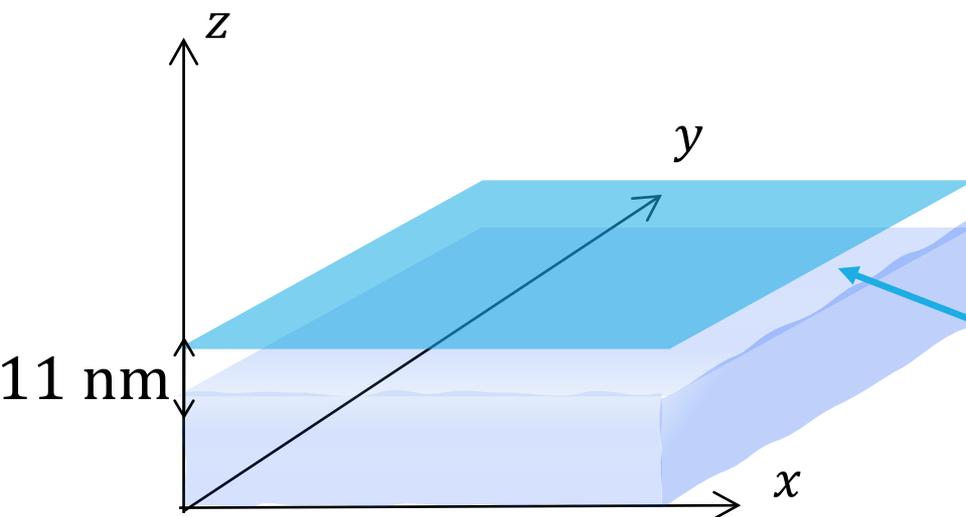
5. リュードベリ状態

シュレディンガー方程式

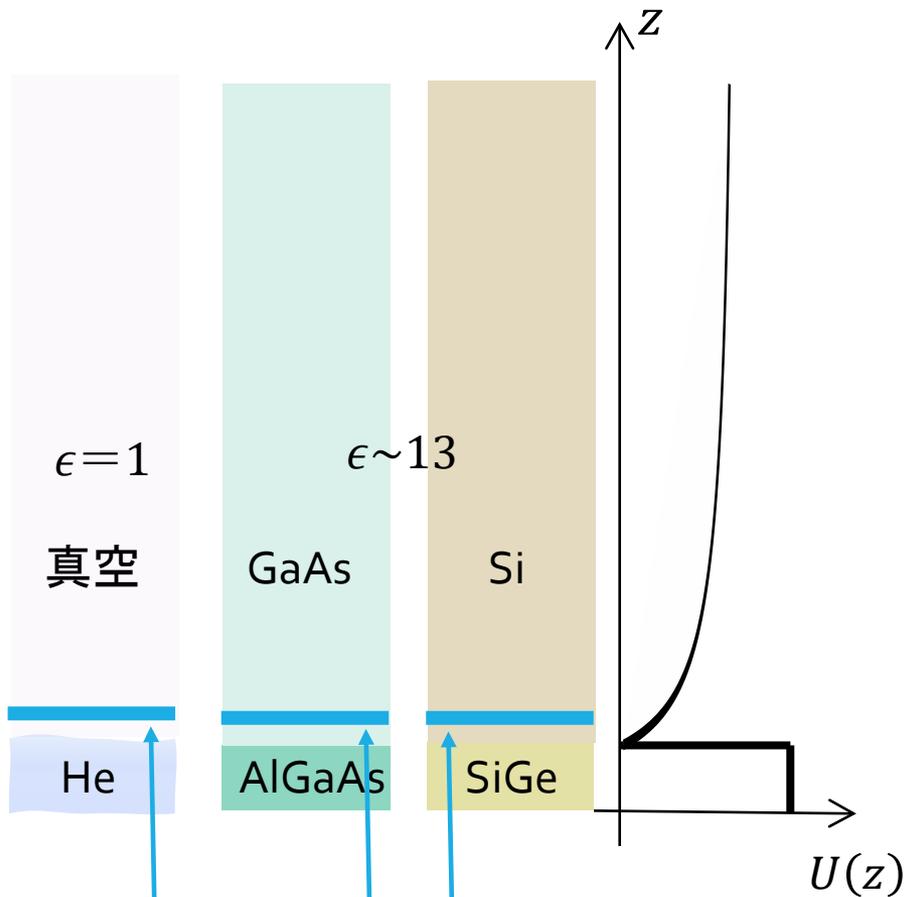
$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m_e} \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\epsilon-1}{4(\epsilon+1)} \frac{1}{z} \right) \psi(z) = E\psi(z)$$

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 \hbar^2} \left(\frac{\epsilon-1}{4(\epsilon+1)} \right)^2 \frac{1}{n^2}$$

= R_∞ (リュードベリ定数)



6. 2次元電子

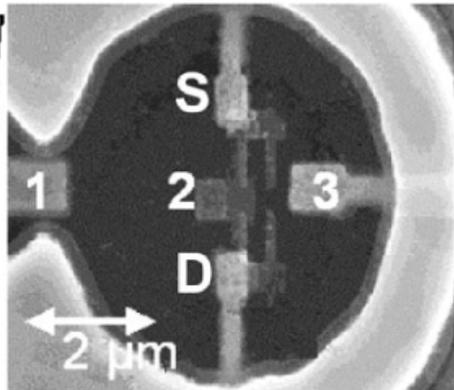
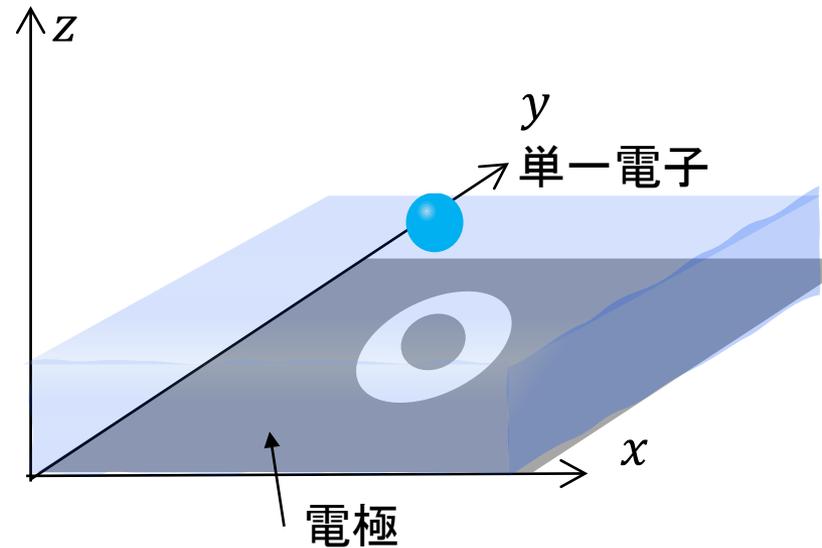
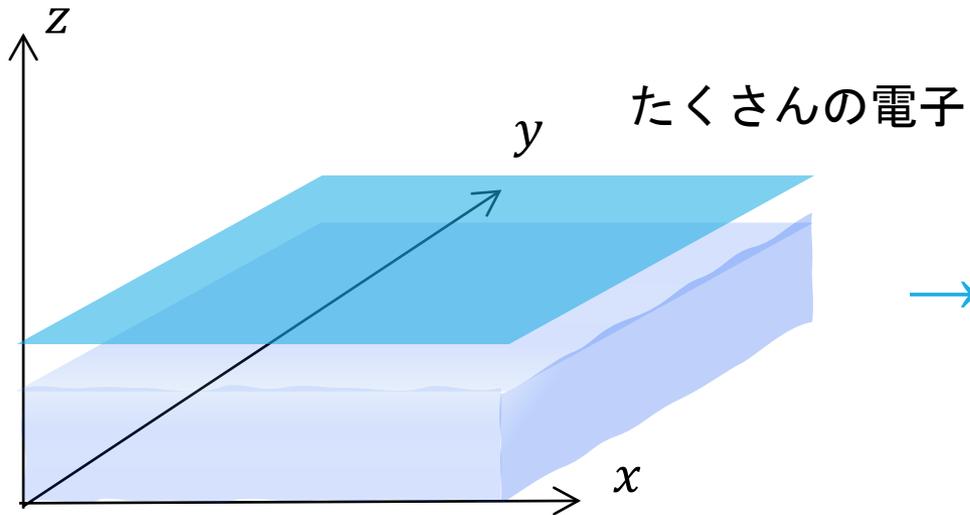


He上の2次元電子は
半導体中の2次元電子に比べて

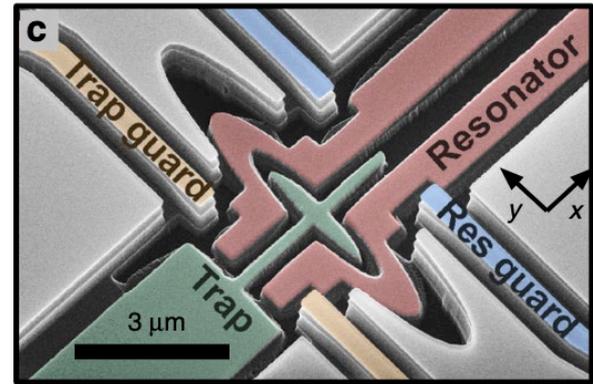
- 移動度が高い
(欠陥・不純物などの影響が無いから)
- 長いコヒーレンス時間が予想される
- 電子密度が小さい
(クーロン相互作用が大きいから)
- 電子間距離を小さくするのが難しい
- 2量子ビットゲートに交換相互作用を使うのが難しい

リュードベリ状態 = z 方向の軌道状態

7. 単一電子の捕捉



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



[Koolstra, Yang and Schuster, Nat. Comm. 10, 5323 (2019).]

電子の局所的に捕捉する $\rightarrow x, y$ 方向の軌道状態

(前の動画を参考)



8. 量子ビットとして

ヘリウム表面上の電子を用いた量子ビットの提案

提案者	論文	用いる量子状態
Platzmanら	Platzman and Dykman, Science 18, 1967 (1999).	リュードベリ状態
Lyonら	Lyon, Phys. Rev. A 74, 052338 (2006).	スピン状態
Shusterら	Schuster, et al., Phys. Rev. Lett. 105, 040503 (2010).	x,y方向の軌道状態 スピン状態
我々	準備中 . . .	リュードベリ状態 スピン状態

不均一磁場による相互作用

不均一磁場による相互作用

電氣的量子状態

磁氣的量子状態

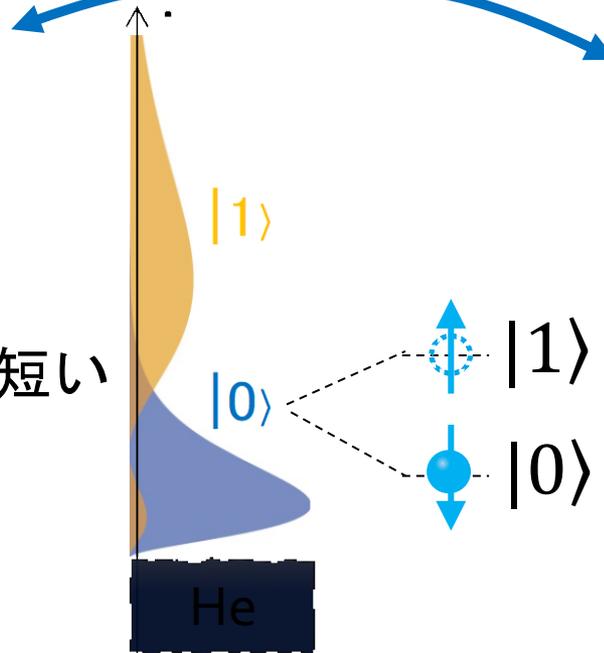
9. 良いとこどり！

不均一磁場による相互作用

リュードベリ状態
などの軌道状態

スピン状態

- コヒーレンス時間が短い
- 操作しやすい



- コヒーレンス時間が長い
- 操作しにくい

- 量子情報はスピン状態に保持させる。
- 量子操作(1量子ビットゲート、2量子ビットゲート、読み出し、初期化)を行う際に相互作用を介して軌道状態に転写する。

量子操作終了後、スピン状態に転写し直す。 →より具体的な方法は前の動画を参考

10. 読み出し・初期化

Platzmanら

リュードベリ状態

電子がHe表面から離れるのを電流として検出

Lyonら

スピン状態

明確な提案はない

Shusterら

x,y方向の軌道状態

超伝導共振器を介して読み出す

単一電子に対して成功！
[Koolstra, Yang and Schuster,
Nat. Comm. 10, 5323 (2019).]

スピン状態

軌道状態を介して読み出す

我々

リュードベリ状態

電子下方の電極に誘引される
鏡像電荷から読み出す

多数の電子に対して成功！
[Kawakami, Elarabi,
Konstantinov, Phys. Rev. Lett.
123, 086801 (2019).]

スピン状態

リュードベリ状態を介して読み出す

11. 量子操作・集積化

	1量子ビットゲート	2量子ビットゲート	集積化
Platzmanら	振動電場 による共鳴	電気双極子間 相互作用	並べる
Lyonら	振動磁場 による電子スピン共鳴	磁気双極子間 相互作用	shuttling
Shusterら	不均一磁場 による相互作用 を利用した 電子スピン共鳴	不均一磁場 による相互作用 + 超伝導共振器 を介して	超伝導共振器 を介して 超伝導量子 ビットとの hybrid
我々	不均一磁場 による相互作用 を利用した 電子スピン共鳴	不均一磁場 による相互作用 + 電気双極子間 相互作用	2次元に並べる 

12. コヒーレンス時間

x,y方向の軌道状態

[理論] $T_1, T_2 \sim 100$ マイクロ秒 [Schuster, et al., Phys. Rev. Lett. 105, 040503 (2010).]

電極中のフォノンとの結合が原因

[実験] $T_2 \sim 10$ ナノ秒 [Koolstra, Yang and Schuster, Nat. Comm. 10, 5323 (2019).]

pulse tubeに起因するヘリウム液面の揺動が原因

リュードベリ状態

[理論] $T_1, T_2 \sim 1$ マイクロ秒 [Monarkha, et al., J. Low Temp. Phys. 148, 157 (2007).]

液体ヘリウムの表面波との結合が原因

[実験] $T_1 \sim 1$ マイクロ秒 [Kawakami, et al., Phys. Rev. Lett. 126, 106802 (2021).]

液体ヘリウムの表面波との結合が原因

スピン状態

[理論] $T_1, T_2 > 100$ 秒 [Lyon, Phys. Rev. A 74, 052338 (2006).]

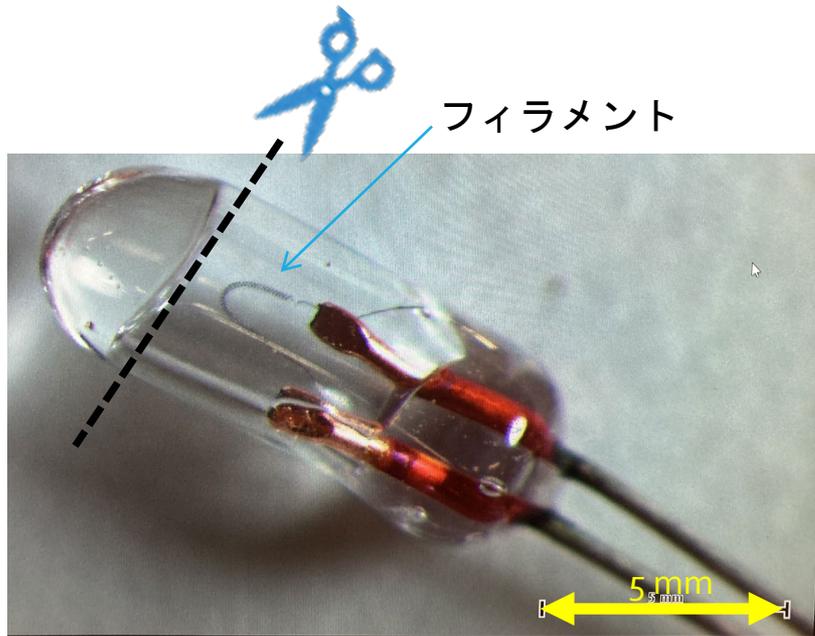
外部からの電子ノイズが原因



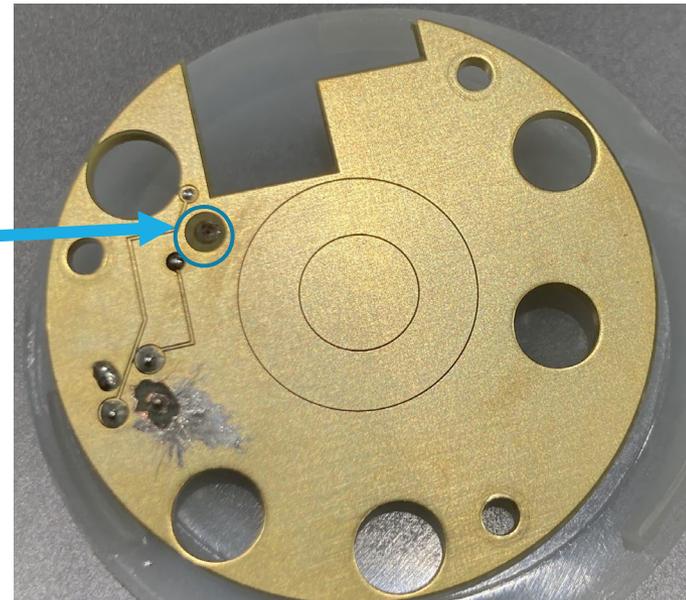
13. 主な参考文献

- He, Ne, H₂上の電子の存在を予測した理論 :
Cole and Cohen, PRL 23, 1238 (1969),
Shikin, Sov.Phys. JETP31,936 (1970).
- He上の電子を初めて実験的に測定 :
Crandall and Williams, PRL 5, 2183 (1972).
- 本その1 : Monarkha Y., Kono K. (2004), Two-Dimensional Coulomb Liquids and Solids, Springer, Berlin, Heidelberg.
- 本その2 : Andrei, E.Y. (1997), Two-Dimensional Electron Systems on Helium and other Cryogenic Substrates, Springer Netherlands.

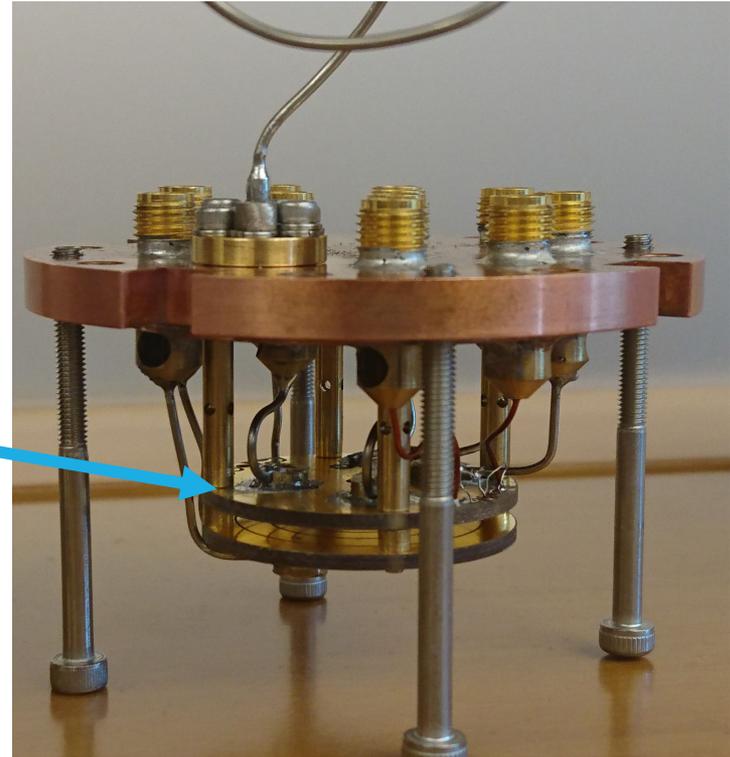
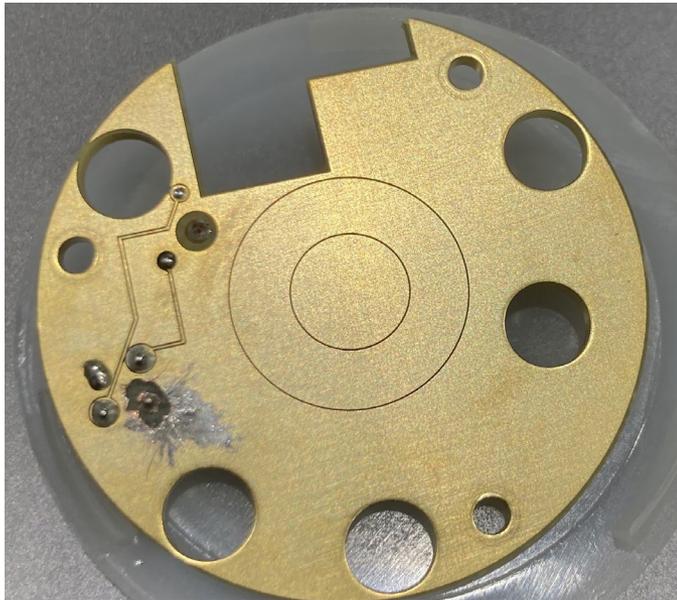
14. 実験の様子



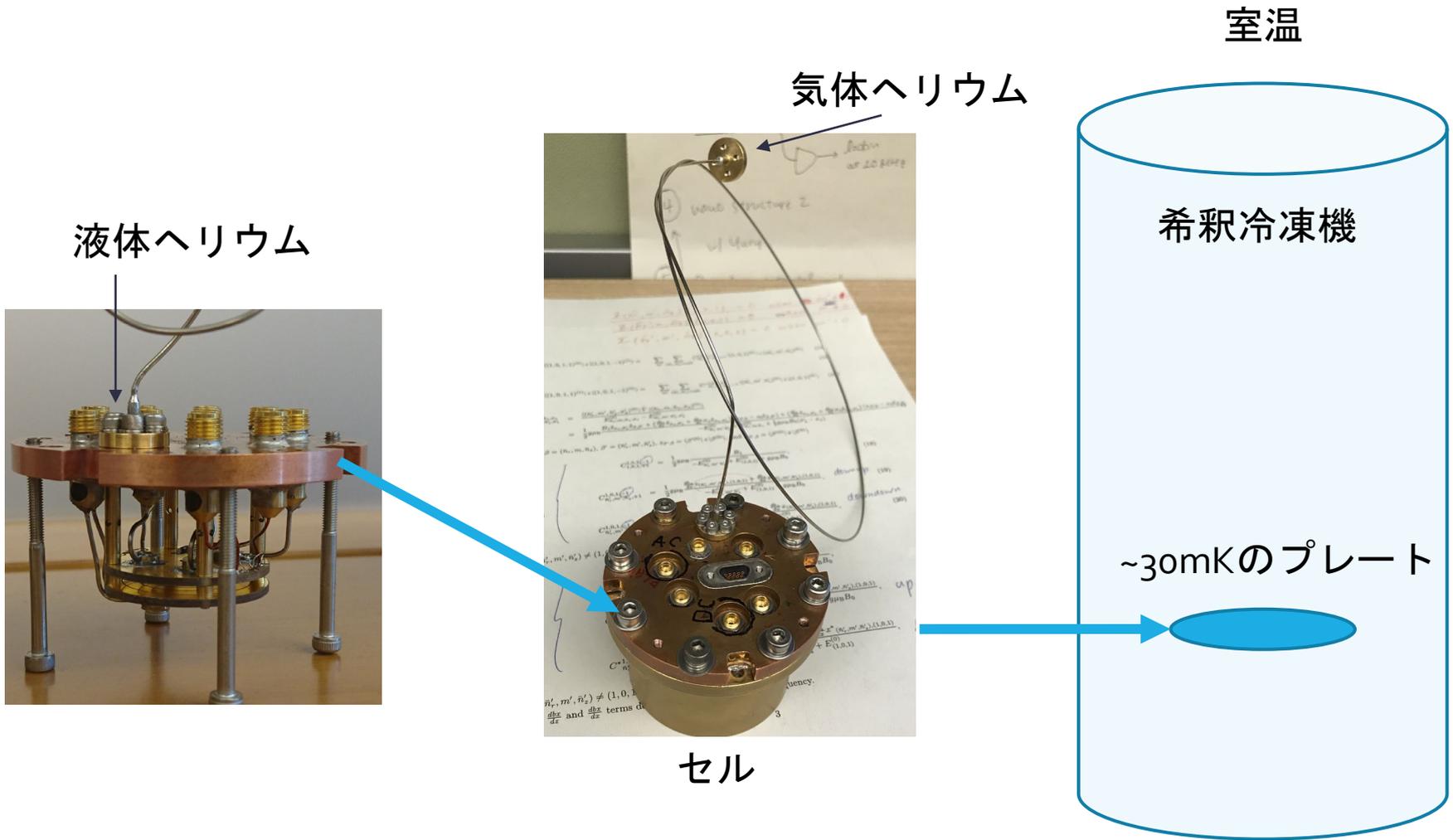
ドールハウス用ミニチュア電球



14. 実験の様子



14. 実験の様子



14. 実験の様子

熱電子放出
(Thermionic emission)

エジソン効果:
金属内の自由電子の運動エネルギーが仕事関数よりも大きくなって、金属表面を飛び出す。

