

# 研究終了報告書

## 「ヘリウム表面上の電子を用いた万能デジタル量子コンピューターの実現へ向けて」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：川上 恵里加

### 1. 研究のねらい

万能デジタル量子コンピューターを実現するためには、十分な数の高精度な量子ビットを実現し、その量子ビットを2次元に並べ集積化し、表面符号などのトポロジカル量子誤り訂正を実行しながら、量子計算を行う必要がある。ヘリウム表面上の電子という物理系では、量子ビットが真空中に存在していることから高精度な量子ビットが実現出来ることが期待され、また電子間の電気的な相互作用が大きいことから現在の微細加工技術を用いて、電子1つを量子ビット1つとして、2次元に並べることが出来ることが期待される。

ヘリウム表面上の電子を量子ビットとして用いることは2000年代に既に理論的には提案されていたが、実験的研究はあまり進んでこなかった。量子ビットの状態として用いることが出来る量子状態は、単一電子のスピン状態、リュードベリ状態、軌道状態が考えられる。しかし、そのうちのどの量子状態の読み出しも難しいことがその最たる理由と考えられる。量子ビットが真空中に存在しているということは、量子ビットの周辺にノイズになるものが少ないというメリットにもなるが、量子ビットの状態を読み出すためのリソースが少ないというデメリットにも繋がっているからである。

本研究提案では、ヘリウム表面上の電子を用いて万能デジタル量子コンピューターを実現するための、第一の足がかりとして量子ビットの状態を読み出す技術を確認することを目標とする。ヘリウム表面上の電子の量子状態としては、ヘリウム表面と垂直方向に量子化した状態(リュードベリ状態)の遷移の検出がマイクロ波の吸収を測定することによって行われてきた。しかし、この測定方法は多数の電子のリュードベリ状態を測定するには適するが、電子1つが吸収するマイクロ波のエネルギーは小さいので、電子1つ1つのリュードベリ状態を測定するには適さない。電子1つを量子ビット1つとして用いるためには、個々の量子状態を測定することから、それを可能とする測定技術の開発が必要となる。

先行研究としては、超伝導回路を用いた方法や、単一電子トランジスタを用いた測定技術があるが、単一電子を量子ビットとして集積化していくのには適さない。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究では、image-charge detection という方法を提案し、その第一歩となる実証実験として、ヘリウム表面上の多数( $1e7$  個程度)の電子のリュードベリ状態の測定に成功した。

また image-charge detection に適切な増幅機能を付加して測定精度を向上することから、リュードベリ状態の緩和時間を温度 135-700mK の領域で測定することに成功し、500mK 以上の高温領域ではヘリウム蒸気による緩和、550mK 以下の低温領域ではヘリウム表面弾性波(ripplon)による緩和が支配的であることを明らかにした。測定された緩和時間は 135mK の時のおよそ1マイクロ秒が最長であった。また、リュードベリ状態の基底状態から励起状態へ

の遷移レートはおよそ 40MHz であることがわかった。

将来的に、ヘリウム表面上の電子スピン状態を量子ビットとした場合、リユードベリ状態を通じて 2 量子ビットゲートと量子ビット状態の読み出しを実現する予定である。先の緩和時間 1 マイクロ秒と遷移レート 40MHz から、99.9%以上の精度の 2 量子ビットゲートと量子ビット状態の読み出しを実現出来ることが予想される。この精度は量子誤り訂正を行いながら実現する万能デジタル量子コンピューター実現のために十分な値である。

また、基礎研究という側面においては、ヘリウム上の電子状態と ripplon の相互作用に関するダイナミクスを初めて測定した。電子状態をプローブとして ripplon の物理を明らかにした。

今後は、微細加工技術によってプラチナム円柱電極を作成し、この上部に単一電子を捕獲して image-charge detection を実施することを目指す。また、リユードベリ状態とスピン状態の相互作用を用いたスピン状態の測定や制御手法の進展が期待される。

## (2) 詳細

### A1: 多数の電子のリユードベリ状態の励起の検出

(1) 電流による鏡像電荷(image charge)の変化の読み出しを成功させた。基底状態から第13励起状態までへの遷移を観測することが出来た。従来の方法ではこのような高次の励起状態までの遷移を観測することは出来なく、このことは image-charge detection の感度の良さに起因するものである。

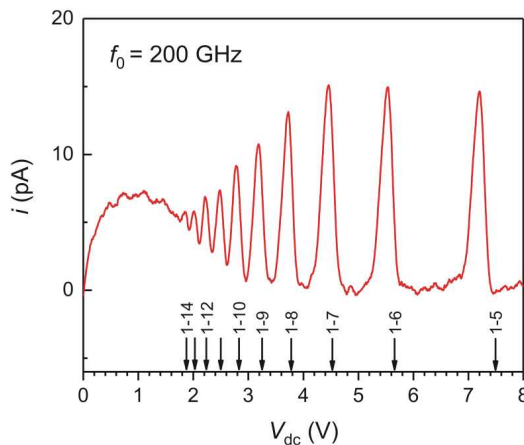


図 A1-1: image-charge detection により測定された電流の値。リユードベリ状態の基底状態から第4励起状態～第13励起状態までの遷移による電流のピークが観測されている。(代表的な論文1より抜粋)

(2) 自前の増幅器を用いことにより image-charge detection の感度をさらに向上させた。SiGe HBT を用いて自前の増幅器をサンプルの近くに起き、またインピーダンス・マッチングさせることによって、効率的にシグナルを冷凍機外部まで取り出す。(代表的な論文2より)

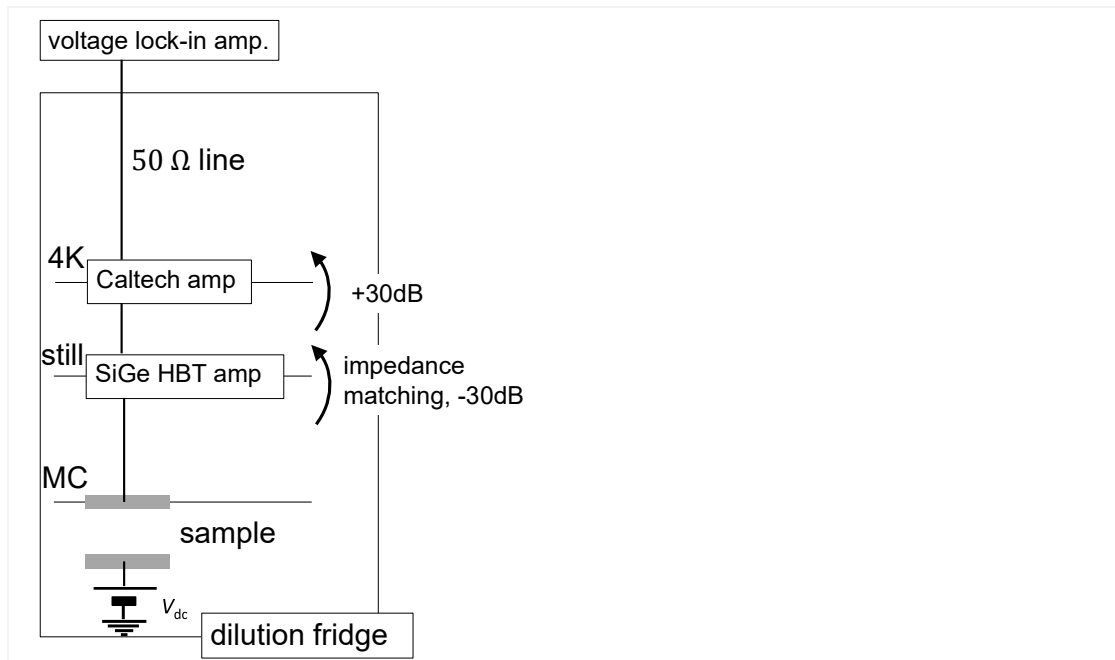


図 A1-2: 冷凍機内部の様子。サンプルは最低温度の MC プレートに置かれ、自前の増幅器は still プレートに熱接触している。4K プレートに置かれた市販の増幅器でさらに増幅する。

(3) (2) で示した測定方法を用いて、液体ヘリウム温度 135mK~700mK で緩和時間を測定した。135mK の時に最長の緩和時間およそ1マイクロ秒を測定した数値計算結果との比較から、550mK 以下の時には、ripplon との相互作用が支配的に、550mK 以上のときには、vapor helium atoms との相互作用が支配的に、リュドベリ状態の緩和に寄与していることがわかった。

(代表的な論文3より抜粋)

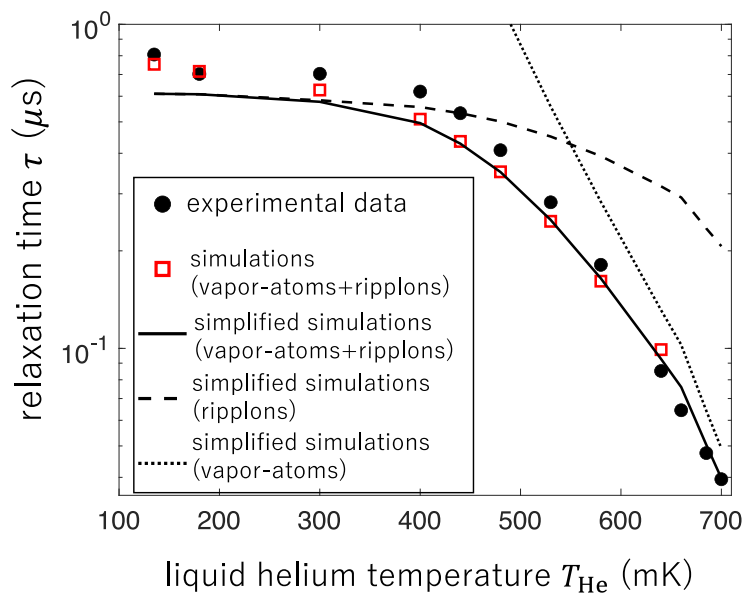


図 A1-3: 液体ヘリウム温度の変化により緩和時間の変化。

## A2: 単一の電子のリュドベリ状態の励起の検出

A1 で確立した image-charge detection を用いて、単一電子のリュドベリ状態の励起の検出を目指す。

ヘリウム表面上の単一電子を捕獲した経験のある研究者をフランスから招聘し、サンプル作成を行った。



図 A2-1: 実際に作成したサンプル

このサンプルは表面のラフネスなどを改善する必要がある。また、現状、真ん中の円柱電極は金で作成しているが、今後 FIB を用いて Pt を円柱状に成長させる。

### **A3: 単一の電子のスピン状態の検出**

リュードベリ状態とスピン状態を相互作用させるために、どのような geometry を作成し、どのような ferromagnetic material を用いるのが良いか検討を行った。図 A2-1 に示したサンプルはその検討も反映している。

### **B: 1量子ビットゲート 及び C: 2量子ビットゲート**

理論的にどのように1量子ビットゲート及び2量子ビットゲートが実現出来、どの程度の精度が実現できるかの検討を行った。

## 3. 今後の展開

理化学研究所に異動し、ヘリウム表面上の電子を用いて万能デジタル量子コンピューターを実現することを目標とする研究室を立ち上げている。4年次に沖縄科学技術大学院大学で作成したサンプルを用い、単一電子のリュードベリ状態の検出を実現することを目指す。さらに、リュードベリ状態とスピン状態の間に人工的な相互作用を作り、単一電子のスピン状態の検出、1量子ビットゲートの実現を目指す。さらに単一電子を2つ個別に捕獲し、2量子ビットゲートの実現と繋げていく。

また、電子と ripplon 相互作用を利用して、表面波を媒介させ量子情報を輸送するようなハイブリッド量子系や、Wigner 結晶を用いた量子シミュレーションへの発展も期待される。

## 4. 自己評価

研究開始後半年以内に、image-charge detection という新しい読み出し技術を実験的に成功させた。image-charge detection という名前はついていなかったが、capacitive に image-charge の変化を読み出すという手法は本研究提案時からの構想で、それを早期に実現出来たことで、良いスタートを切ることが出来た。

2年次に健康上の理由で体が動かせなくなったので、さきがけ予算で雇用した研究補助員の方々に協力頂くことで、研究が進めていけるような研究体制を組直した。このような方向転換を図れたことで、研究の遅れは最小限に抑えられたと思う。

3年次には、image-charge detection をさらに発展させ、ヘリウム表面上の電子のリュードベリ状態の基底状態から励起状態への励起現象と励起状態から基底状態への緩和現象をリアルタイムで測定し、緩和時間を直接的に測定出来た。このことは、ヘリウム表面上の電子を量子コンピューターへ応用していくための重要な第一歩となるであろう。

4年次の新型コロナウイルスの影響で海外の研究者の招聘が予定通りにはいかなかったが、ヘリウム表面上の単一電子を捕獲した経験のある研究者から、そのために必要となる微細加工技術を教わり、サンプル作成を開始することが出来た。このような技術は実際に顔と顔を突き合わせて教わらなければ、習得が難しいものであるため、このタイミングで行えたことは良かった。

4年次後半に、理化学研究所に異動し、今後もヘリウム表面上の電子を用いて万能デジタル量子コンピューターを実現するための研究を続けていく機会を得られたことは、この研究の発展のために非常に嬉しい。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:3件

1. E. Kawakami, A. Elarabi, D. Konstantinov,

Image-charge detection of the Rydberg states of surface electrons on liquid helium.

*Phys. Rev. Lett.* 123, 086801 (2019)

ヘリウム表面上の電子のリュードベリ状態の基底状態から励起状態への遷移の観測は、マイクロ波の吸収を測定することによって行われてきた。しかし、この方法は、多数の電子に対しては有用であるが、少数の電子に応用することが出来ない。また、高額なマイクロ波のパワーを測定する機器が必要である。そこで、我々は、少数の電子にも応用していくことが可能であり、高額な機器も必要ない image-charge detection と名付けた方法を提案し、実験的にも実証した。

2. A. Elarabi, E. Kawakami, D. Konstantinov,

Cryogenic amplification of image-charge detection for readout of quantum states of electrons on liquid helium.

*Journal of Low Temperature Physics* (in press)

量子ビットの状態を測定するためには、読み出し技術の高精度化が必要不可欠である。ここで、我々は SiGeHBT を用いて低温(1K 付近)で動作する増幅器を自前で作成することによって読み出し技術の高精度化を行った。インピーダンス・マッチングをすることによって、広い帯域での測定を可能とした。また、市販の 4K で動作する増幅器と組み合わせると、さらに高精度化出来ることも実験的に確かめた。

3. E. Kawakami, A. Elarabi, D. Konstantinov,

Relaxation of the Excited Rydberg States of Surface Electrons on Liquid Helium

*Phys. Rev. Lett.* (under review)

ヘリウム表面上のリュードベリ状態の励起状態から基底状態への緩和をリアルタイムで観測し、緩和時間を測定した。また、数値計算との比較から 550mK 以下では 2-ripplon process による ripplon との scattering が、550mK 以上では helium vapor atoms との scattering が緩和の原因であることを示した。

### (2) 特許出願

研究期間累積件数:0 件(特許公開前のものも含む)

### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

#### [招待講演]

- ・” New detection technique of the Rydberg state: towards realizing a quantum computer using electrons on helium ”  
FQST, February 2020, Tokyo Japan.
- ・”Image-charge detection: towards realizing spin qubits using electrons on helium.”  
Quantum transport in 2D systems, May 2019, Bagnères-de-Luchon, France.

- "Capacitive read-out of the Rydberg states towards the realization of a quantum computer using electrons on helium. "  
Japan-EU Joint Workshop, September 2018, Paris, France.
- "Towards realization of a universal quantum computer using electrons on helium."  
Impurity Spins for Quantum Information and Technologies, September 2017, Okinawa, Japan.

[Best poster award]

- "Blueprint for building a quantum computer using electrons on liquid helium,"  
Erika Kawakami and Denis Konstantinov, QFS 2019, August 2019, Edmonton, Canada.