

中谷アドバンスプログラム最終報告書

氏名: 伏尾理久斗

所属: 東京大学 3年 工学部 物理工学科

ホストラボ: ハーバード大学 物理学科 Philip Kim教授

期間: 2025年 2月~5月 (~12月)

1. はじめに

この報告書は、私が3ヶ月間で経験したこと、考えてきたことをなるべくそのまま書くようにしています。また、前提条件としてこの報告書の意義は 1. 財団への報告, 2. 応募を検討している人の思考の材料となること 3. 私自身の振り返りと決意表明 の3つがあるため、それらは明確に区別して以下で書くように心がけています。ハーバードでの研究の様子に関しては2年前の鷺見さんが綺麗にまとめてくださっているのをご参考ください。

(<https://storage.nakatani-foundation.jp/main/p/uploads/sumi2022ad.pdf>)

現在においても状況はほとんど変わっておらず、私はそれを補う形で別の部分に字数を割かせていただきます。また、私のこの研究留学は、東京大学のアラムナイ組織によるFUTI奨学金の支援を受け、12月末まで継続して行う予定であるため、研究計画もそれに沿って立てております。したがって、それを踏まえて年末にまたこの報告書も部分的に加筆する予定です。なお、ARIP等に応募しようと考えられている方、あるいは海外大学院を目指されている方で何か質問等ありましたら、気軽にemail: rikutofushio@gmail.com や、[facebook](#) にメッセージいただければと思います。

2. インターン先大学での研究内容

【概要など】

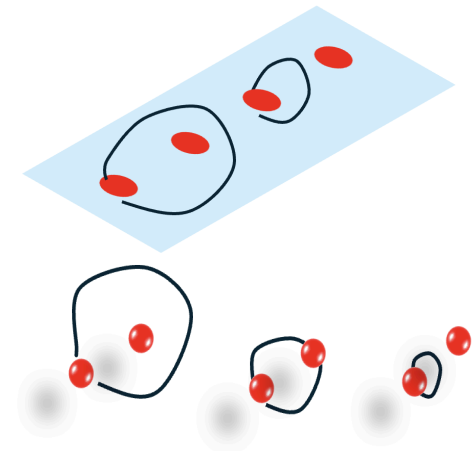
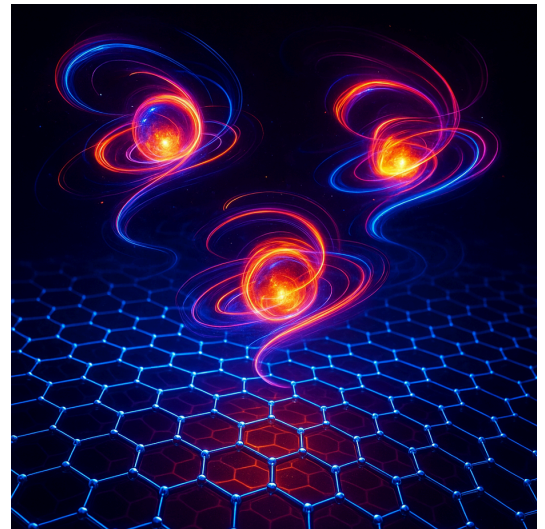
我々は「3次元の世界」の中で生きています。そして、その世界の中で起こる身の回りで起きる現象の多くは、電子がどのように振る舞っているのかにより説明されます。原子や電子に関して歴史を振り返れば、古代ギリシャのデモクリトスにより始まった原子論の考え方が、19世紀になりドルトンによって近代で再定義され、トムソンによって電子の存在が実際に確認されて以降、ラザフォードにより原子の周りを電子がどうやら回っているらしい、と考えられるようになりました。その後、ボーアにより量子論の基盤が作られ始めて以降、電子は原子の周囲に「エネルギー軌道準位」なるものを持つことが徐々に分かってきました。話を戻すと、このエネルギー準位なるものを説明するには、「パウリの排他律」なるものが必要であり、これは電子が「同じ(量子)状態を取ることができない」ということを意味しています。(簡単に言うと、ある電子は涼しいところにいたいけれども、すでに涼しいところに別の電子が座っていたらちょっと暑いところに座らないと言うことです)そしてこの排他律が金属の性質等を始めた極めて身近な現象を説明するのに不可欠ですが、これは元を正せばなんと、「粒子が3次元空間に存在していること」による「統計」からきています。これがどう言うことかという、粒子が3次元空間にいと、ある二つの粒子を一度交換して、さらにもう一度交換すれば、「何もなかったのと同じ」になるから^[2]、と言うことです。若干の詳細を省きますが、この性質により、粒子は“ボーズ粒子”と呼ばれるものと“フェルミ粒子”と呼ばれるもののたった2つに分類されてしまいます。(物理が少しわかる人は一度の交換で波動関数に+1がつくか、-1がつくかによって分類されます)そして、電子はこのうちの後者の方で、そこから先ほどの排他律などが導かれます。

さて、ここからが本題ですが、では「粒子を二次元に閉じ込めることに成功したら？」どうでしょうか。こんな例を出すと怒られるかもしれませんが、2次元の中の迷路が面白いのは、2次元から出てはいけな
いからであり、もしスタートからゴールまでいくのに紙面から鉛筆を離していいのだとしたらそれは一瞬
で終わってしまい何も面白くありません。何が言いたいのかというと、2次元と3次元ではこれほどに
「質」が異なり、「統計」が異なり、そこにいる「粒子」はたった2種類ではなく、もっと多様なものが存在し
ている、と言うことです。そして、このボーズ粒子でもフェルミ粒子でもない、異なる「統計」を持つもの
を総称して

“Anyon(エニオン)”と呼び、長くなりましたがこれが私がハー
バードのKim研究室で携わっていた(る)研究対象です。この
anyonが持つ性質は非常に奥深く、例えば我々が高校物理
で習う範囲内では、電子は電荷素量 e をもち、(素粒子に踏
み込まなければ)それより小さい電荷を持つことは許されな
い、とされていましたが、なんと二次元空間内では $e/3$ などの
分数電荷が存在することが許されてしまうのです。他にも、統
計が異なると書きましたが、先ほど3次元空間内ではある粒子
をある粒子の周りを一周すること(2度交換することに同義)は
何もなかったことと同じ、と書きましたが、2次元空間内では
「少なくとも何かが起こっている」ことは以下の説明で理解して
いただけたと思います。どういうことかという、右の図の平面
内の左側のように粒子を一周させた「軌跡」を、そうしなかった
右側の「軌跡」に変形させてやろうとすると、残念ながら別の
粒子に「引っかかって」変形させることができません。一方で、
3次元空間内だと、右下の図のように、ある粒子の裏や表を通
すことで「引っかからずに」変形させることができます。(何もし
なかったのと同じになる)すなわち、やはり2次元空間内では
交換などによって何かが起こっていることがわかるはずです。
(交換時に波動関数につくglobal phaseが $e^{i\pi/m}$ (m は整数)
が許されるAbelian anyonと、Unitary Operatorがかかる

Non-abelian anyonというものが存在します)したがって、2次元
空間内では「交換 (braiding)」が情報を持つため、これによっ
て、最終的な目標としては非常にエラー率の低い量子コン
ピュータを作ることができますと言われています。そのエラー率
が低い理由は、イメージとしては、先ほどの軌跡が別の粒子
に引っ掛かるかどうかというのは、ある物体が、「ボールとか
お皿とか」なのか、「ドーナツとかコップ」なのかくらい異なり、つまり穴が1つ空いているかどうか(粒子
を囲んだかど

うか)によって見分けることができる(“トポロジー”と呼ばれます)ため、それが「ドーナツなのかコップ
なのか」を気にする必要がない(どんな軌跡を辿ったのかには興味がない)からです。これはつまり、
情報がある程度非局所的(広がっているというイメージです)に保存されていて、ドーナツだった(量
子)状態が、多少局所的に齧られたとしても、穴が一つのままであれば大丈夫であるということで、これ
により非常にエラー耐性のある“トポロジカル”量子コンピュータ¹⁾を作るのが最終目標です。そして、
そのためのまず第一段階として、2次元を実現する必要がありますが、それを可能にする一つの方法
がKim研究室で扱われているグラフェンです。このグラフェンという物質は我々が日常の中で使う鉛筆

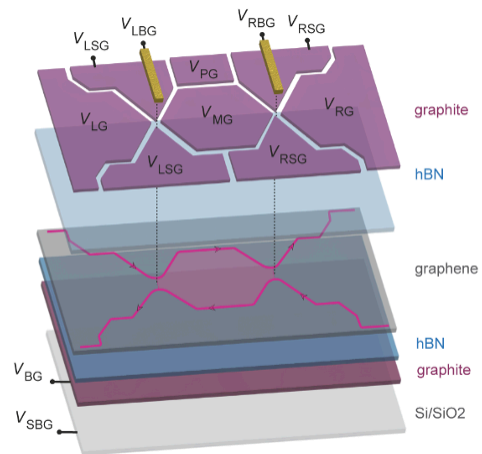


の芯の一層分のことを指し、極めて正確な2次元平面を実現することができ、これがanyonを代表とする低次元物理学のプラットフォームの一つになっています。

さて、これらの説明の仕方は、粒子の持つ統計性から説明するanyonにまつわる魅力ですが、このanyonという準粒子が存在する条件として、2次元であることに加えて、そこにある電子同士の協力な多体相互作用が必要で、それが存在する環境下において、ある現象が電子の動きではなく、そこから生じる「創発的な“emergent”」準粒子としてanyonが浮かび上がってくるという説明の仕方ができます。これがどういうことかという、電子が1個そこにあること、100個そこにあること、1万個そこにあること、だけでは不十分で、アボガドロ数程度の 10^{23} 個近い電子が複雑に相互作用しあうことによってのみ、anyonが存在するかのように見えるようになる、ということです。これらに代表されるように、Philip W. Andersonの *More is Different*^[4]に言われるように、量がとてつもなく多くなれば質が変化し、全く新しいものが創発してくる現象は、物理に限らず現代の興味深い問題の多くのところにみられるものだと思います。例えば、生成AIにより起こっていることもある種の創発性であれば、人間社会の複雑さもまた同じような切り取り方ができるはずで、また生態系や生物などにおけるそれも同様のものです。すなわち、私がここで言いたいのは、やはり「広義での自然」というのは人類の理解を超えたもので、完璧には記述することは不可能ではあるけれども、その切り取り方や、問いのレイヤーの設定次第では解釈可能な領域に落ち、コントロール可能な場所に連れていき、文明の進歩に役立てることができることもあるが、やはり自然に対する畏敬の念を感じずにはいられない、というのをこのanyonの研究を通じてその片鱗を感じ取ることができた気もする、がそんな大層なことを言えるほど何もまだできていないので適切に問いを立てて取り組めるように頑張りたいと思う、ということです。(上の写真はChatGPTにより生成されたanyonのイメージ図)

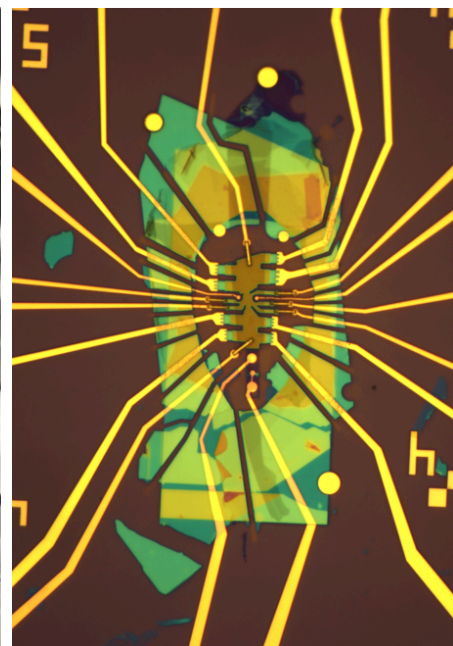
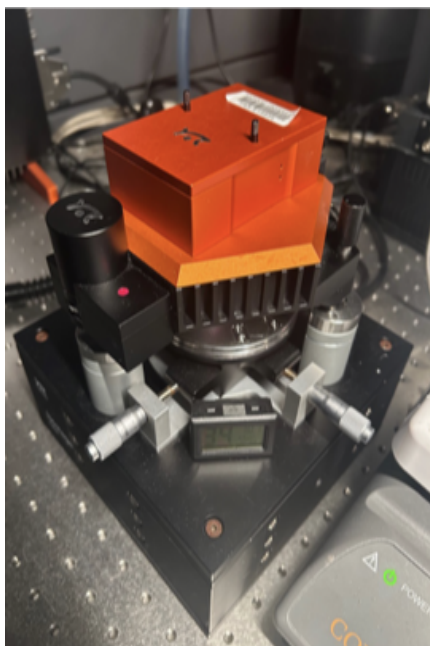
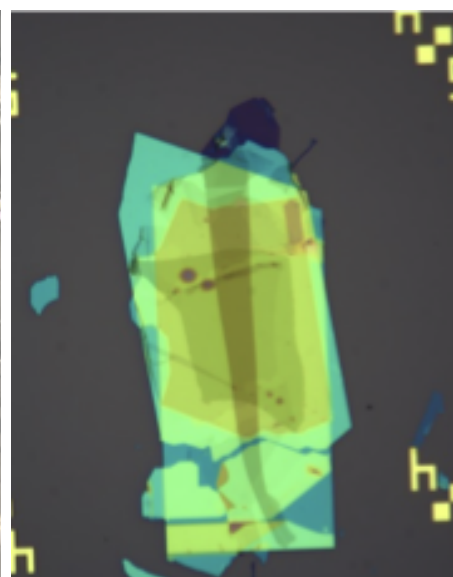
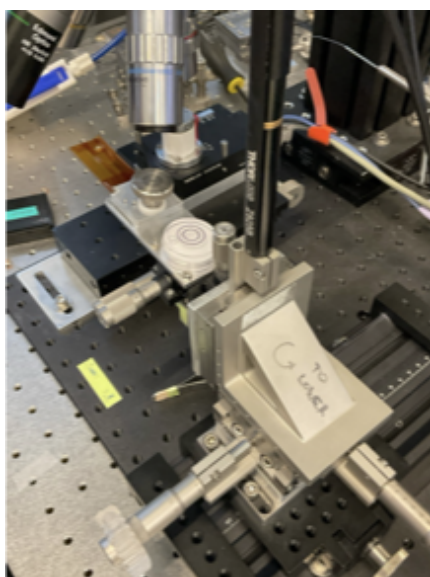
【研究内容】

分数量子ホール効果 (Fractional Quantum Hall Effect, FQHE)^[2]ではエッジ状態 (edge state) が存在するため、その準粒子 (quasiparticles, QP) のbraidingを観測するための主な手法としては、量子ポイントコンタクト (Quantum Point Contact, QPC) と呼ばれる、伝導チャンネルを空間的に狭めたものを用いて一方向にのみ本来進むchiralなedge同士を空間的に近づけることにより、後方散乱を起こさせ、部分的に反射させることにより、右図のように二つのQPCで囲まれる領域に存在するQPsの数によって、electric chemical potentialの差とsource-drain間を流れる電流をLock-in測定で図ることにより、その電流の大きさがアハロフ・ボーム効果の位相項と分数量統計 (Fractional Statistics) による二つの項から主に説明され、後者は一つのQPをその領域に入れることで不連続的に変化するため、それが電流の干渉模様からその位相の飛びを測定することができ、そこからそのQPが何に分類されるのかを導き出すことができます。^[5]しかし、このedgeに存在しているanyonは、元々は電子同士の多体相互作用から創発しているため、このエネルギースケールと外部ポテンシャルのエネルギースケール、あるいは平面内に存在するdisorderによるポテンシャル等によって、そのedge stateというものはreconstructionと言われる再構成が行われ、単純な半古典的な描像や、なランダム準位と外部ポテンシャルとアンダーソン局在で説明可能なIQHE (integer)のエッジ状態の簡単な説明方法のみでは説明しきれない現象が起こります。^[6]さらにはQPCをgraphene上で作るためにはtop graphite gateにより外部ポテンシャルのみでその形を定義しますが、そのsaddle point上に自発的にドット状態ができたり^[7]、また後方散乱付近のdisorderからなるドットにanyonが束縛されることでinterferometerの位相の捉え方が変わったり^[8]と、極めて複雑な物理現象が起こっているため、そ



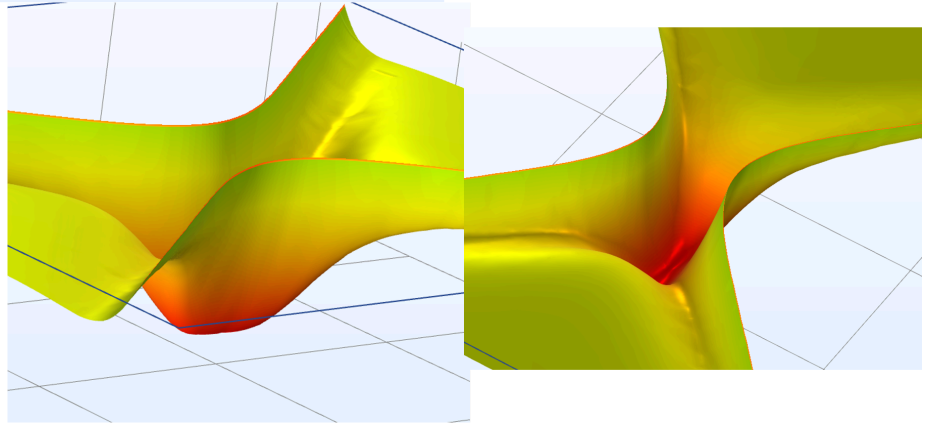
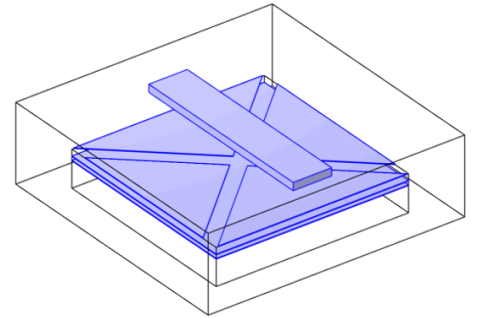
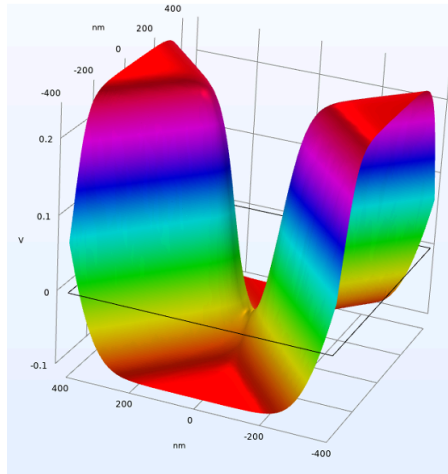
の正確な理解と制御がtopological quantum computerを実現する上でも必要不可欠です。したがって、これを理解し制御するべく私は実験と数値シミュレーションの2つに主に関わらせていただきました。

実験面では主にstackingと呼ばれるvdW層状物質の積層に携わり、その後のnano-fabricationは基本的にメンターの方と共に行うという形をとっていました。右の写真がそのstackingという作業を行う機器で、これを用いて上図のようにhBNとgraphite, grapheneを交互に重ねていき、最終的には右図のような積層構造を作成します。そして、これをcleanroomと呼ばれる環境下でetching加工、e-beamによる描画、金属の蒸着を通じて、最終的に下のようなデバイスを作成します。これらは原理自体は単純明快でこれが発明されて以来ほとんど変更されていないのですが、上記の強力な電子同士の相互作用を引き起こすためにはできる限り加工による不純物をや残存物を減らす必要があり、これらは研究室ごとの日々の積み重ねによって向上していき、私もそこに微力ではありますが工夫を積み重ねることができました。特に、層状物質間に発生してしまう気泡をできるだけ発生しないようにするために必要な、温度や粘着物質の粘着度のコントロールがかなり多くのパラメータによって左右される(シリコン基盤の状態や、周りにどのようなフレークがあるかなど諸々)ため、それらに応じてその場でアドリブに対応していく必要があるという、いわば職人技のようなものを身につけていく面白さがそこにはありました。実際、この右の写真は極めて綺麗な方な



のですが、ここに到達するまでに約2ヶ月間を要し、実験物理の大変さとともに奥深さ(これよりnanofabricationはさらに奥深いですが)の片鱗を感じました。また、サイドプロジェクトとして下の写真のような、AFM (Atomic Force Microscopy)を用いた、グラファイトおよびグラフェンの切断^[9]の機械の最適化にも部分的に関わっております。この方法の利点としては、基本的なnanofabricationでは残ってしまう不純物がAFMではより少なくすることができるというものがある上、より小さなdotやquenchを作ることができる可能性があるという利点がある一方で、再現性が低いため、それに一貫性を持たせるためにバイアス電圧をどのようにするかなど最適化すべきパラメータがいくつもあり、現在それに取り組んでいる最中です。

一方で、COMSOL^[10]というパッケージを用いたFinite Element Simulationという方法を用いた数値シミュレーションにも関わっており、これは先ほど述べたように、外部ポテンシャルの形によってQPCの形が決まるため、正確に上図のような積層構造を右下図のようにモデリングすることで、そのポテンシャルの形を解き明かし、実験データをどのように解釈すべきか、という議論に携わっています。実験データは守秘義務の観点から載せることはできませんが、右図のようにモデリングし、グラフェン上での外部ポテンシャルを3次元プロットすると、基本的には虹色のプロットのような鞍状のポテンシャルができますが、電圧をうまく調節することで下図黄色のポテンシャルの真ん中にオレンジ色部分のようなドット上のもので作成することも可能であり、これらのようなポテンシャルの形をもとに実験データの解釈を行なっています。また、



た、これらのFE simulationは古典的な範囲での計算に留まるため、量子的な挙動であるanyonを完全に説明することができないため、これらのポテンシャルを外部インプットデータとして、Thomas-Fermi CalculationというDFT計算を行うことにより、自発的な中心部におけるドットの形成を数値計算により観察したりもしています。

3. アドバンストプログラムで習得したもの

a. RIESの時に抱いていた疑問「自分は研究が好きか？」に対する暫定解

基礎的な実験物理でも、かなり自分は好いていられそうであるということがわかりました。なぜなら、日々勉強すること、全然議論に追いつけない中でも追いつこうと努力する日々がほとんど苦痛ではなく、楽しんで行うことが純粋にできている気がしているからです。一方で、現状のその辺りに対する課題感としては、どうやら自分の頭で常に考えていられることが重要らしく、おそらく現状教科書や論文を見ずに思考できないので常時脳を回す感覚が持てないのが阻害要因になっているだけで、これができるようになれば後の半年間もっと楽しめるようになる気がしてます。

b. 時間の基本的な使い方について

これは具体的に一番悩んだところです。私が携わっていた研究が最初の工程から測定まで非常に時間がかかる上、実際まだ測定の部分にまで自分が作ったデバイスが到達したことがありません。(メンターと一緒に作ったものはありますが)そのような、独立性を完全に持つことができない環境かつ、**stacking**は上述のように職人技のようなもので非常に難しいのですが、それに加え失敗すると事前にストックを作っておいても使用可能なグラフェンやhBNはなくなってしまうと言ったような研究の状況があります。さらに、それに加えて追いつくために教科書を読み、論文を読み、数値計算をし、とどれだけ時間があっても足りない中で、どうすれば自分の存在価値を発揮できるのかと言う問いの立て方をすると、結局それはどのように1日をデザインするかに集約されます。つまり、上記のものの時間配分をどうするか、どれだけ基礎的な勉強に使い、人とどれだけどのように話すことを心がけるか、健康管理をして睡眠をきちんととって集中力を高めるか、ある程度は心に余裕を持たせるために余暇の時間や友人との時間をシステマ的に確保しておくのか、などある種スポーツ選手のような考え方、自己コントロールをする必要があることに気づき、その方法論を確立しようと今も悩んでいます。

c. Condensed Matter Physicsにどう向き合うか・ハーバード大学院生と自分の現状の差分に関する考察

CMPの中でも、私が関わらせていただいている分野はおそらく特に、積み上げが極めて大量にあり、それらはある程度一人前に考えられるようになるには、タイムスケールの感覚が極めて重要であることに気がつきました。すなわち、2年とかで極めたと思って離れる学問ではなく、5年くらいかけて味わうべき学問領域であると、やっと腹落ちしたような気がしています。また、ハーバード大学院生差分に関しては案外言語化可能なものまで落ちてきていて、後はそれらを埋めるだけになってきています。特に、根本の能力的側面でそれほど差があるわけではない(言語の壁は大きい)ことに気づきつつあること、意外と今の自分でも貢献できる余地が見え始めているのはすごく自信につながるような気がしています。

d. 人との繋がり・コミュニケーション

これは極めて自分のダサいところだと言う自覚があるので正直あまり書きたくありませんが、今後の自戒も込めて書きたいと思います。私は英語でのコミュニケーションがまだめっちゃくちゃ下手くそです。おそらく日本語と英語で話している自分で大体30くらいIQに差があるような気がしており、これをクリアせずにきてしまったことに対する誰に対するものなのかもわからない謎の申し訳なさを感じています。同じ経験をしたことがある方もおそらくおられると思うのですが、1対1なら全然会話できるし、議論にもついていけるようになっていのに、集団で雑談していると全然会話についていけなくなって、集団でいるのに億劫になってしまう時がたまにあります。(特にうまく笑いを取れない時、返せない時がきつい)集団でいなくてもいいじゃない、という声が聞こえてきそうな気もしますが、母語なら快適にできていることを英語でやらないと自分の中の考えと行動がうまく合致せず吐き気がするので、本当に情けないところではありますが、英語も妥協せずに頑張っていきたいなと思っています。そして、やはりそう感じるのは、この時代、この年齢において人と会うことの価値を痛感し続けているので、それを言語で縛ってしまっている今は非常に勿体無いと思うからだと思います。後の半年間でちゃんと挑戦していきたいなと思います。

e. 研究室を選ぶときの自分にとって大事なポイント

結論から言うと、院生の自立した意思決定割合は高い方が自分にあっているのではないかと、言う仮説です。これはKim教授の指導の仕方を見たのと、院生が語る別の若

いPIとの比較でよく出てくる議題なのですが、Kim教授は実際の議論には丁寧に乘ってくださる一方で、何をするかやどうするかに関する意思決定は基本的に院生に委ねられる形になっています。一方で、若い教授が自身のプロジェクトを持っていることが多いため、極端にはマイクロマネジメント的になることが多いとのことで、後者がやるのが明確なので早く成果を出していくことができる一方で、前者はある種自分で何をすべきか考えるという結局研究者として自然な悩み方をゆっくりできるという利点があると思います。これに関して、結局研究者になるのであれば、どのように問いを立てるか、仮説を立てるか、と言ったことはテクニックそれぞれ(単純比較はできませんがおそらく、)より重要な気がしていて、汎用性の高いものでもあるため、もし仮に後者に比べて時間がかかったとしても可能であれば前者のような環境に身を置いてみたいなと思いました。これはおそらく「研究室の雰囲気」の一部で大事なところを言語化したものだと思っていて、日米間の違いをどの方向にも経験の質をひっくり返すくらいの強い軸だと思っています。

f. 避けては通れない話題として、トランプ政権の騒動にどう向き合ったか。

詳細は以下をご覧ください。まとめると、結局どこに行ってもやることって変える必要もなければきっと変わらないんだらうなと言う感覚が芽生えた、と言うことです。

https://note.com/rikutofushio/n/n75801e38643c?sub_rt=share_sb

これに追記すると、RIESに合格し、さらにARIPにも合格させていただき、晴れてハーバードにくることにできるようになると、なぜかトランプ政権によって極めて不確実な状態を経験することになりましたが、この意味不明さのようなものもまた人生っぽくてある種いい経験ができたし、進路だけでなく米国政治や社会に対する解像度、インタビューのノウハウなど副次的な学びもありました。最後までいられることを願っています。

4. 本プログラムに参加の成果・意義

私のおそらく100年くらいある人生において、この20歳という大事な1年間をこのハーバードという地で過ごすことができていることのこの価値はおそらく、今実感することができているそれはやはり氷山の一角でしかないのだらうという感覚があります。この経験が私の人生にどんな意義を持つのか、切り取ろうと思えばある面で表現することはできます(上記の3のところなど)が、それよりも私という存在が言語領域も非言語領域も含め大量に毎日悩みながら情報をインプットし、アウトプットしているという状態が後にもたらす影響のとてつものなさを少しすでに感じ始めています。最終報告書にその意義の語りえなさを表明するという本末転倒さや矛盾を少し許していただきたいと思うのですが、ものすごく正直に申し上げて、言語化できないような、あまりに過渡期かつ、非常に面白い自己変容が起こっている気がしており、それが気のせいでないことを祈ると同時に今はそれを信じていたいと思っています。これは決して、後から振り返れば何か意義が出るのだから今の過ごし方はどうでも良いというような二元論的な考え方ではなくて、その捉え方と同時に私の中では日々全力で学びと成果を最大化するよう努力するということは両立できていると思っていますし、(それでなくこの辺りの話は極めて多次元なはずで)それをしていきたいと思っています。ただやはり日々考えることは尽きず、あまりに渦中だと自身を捉えています。「最終報告」書ですら超正直にこれくらい悩んだっていいというようなアンチテーゼの表明としてもやはり痛切に感じるのは、研究も好きだし、ハーバードで物理でPhD.をやっていく自信もついたし、その未来も見通せるが、それでもどこか私はいつまでもさあこれで研究者になる道が決まったんだ、というような綺麗な物語に自分を仕上げることにどこか生理的な調和のしなさを感じているからだと思います。ただ、以前と今では悩みの質は全く異なっていて、机上の空論ではなく、具体的な経

験を持ってして思考することが可能になりつつあるため、もうすぐすれば何か自分の中で明確に定まる日が来るのではないかなと思っています。

また、最終報告書という観点からは少しずれているようにも感じなくもないですが、今日において、あらゆる議論がAIの潮流と切り離して考えられない、あるいは極端に言えば切り離して考えること自体が不健全な領域までできているというふうに出ており、それを無視した議論は社会が変わりつつあることから目を背けていることになりかねない気がしてそれについて少し現時点での考えをまとめておきたいと思います。(社会が変わらないのではないかという問いもまた一考の余地がありますが別の機会にします。)すなわち、素人目から見ても、正直生成AIが到達していくであろう物理の理解に、私が今後到達するであろう物理学の境地が叶う部分があるのだろうか、という、「3年くらいだとあるかもしれないが、10年だったら多分確実に理論だと無い」と思っています。(実験はロボットの発展が私にはわからないので省きました)3年すら怪しいかもしれないです。そんな中で物理学に関わり続けるのには何の意味があるのだろうか、というのを頭の片隅でよく考えていますが、いまだに明確な答えはありません。あるいは意味などないのかもしれませんが、けれども、現時点での仮説としては、よくわからない理論などがたくさん出てきて実験が追いつかなくなってくる頃に量子コンピュータが計算科学に置き換えられる部分を置き換え始め、でもその解釈すら人間がやらなくなるとAIが自立的に量子コンピュータを動かし、また量子的挙動が重要な実験がそのまま量子コンピュータとエンタングルメントにより効率よく学習され^[11]、その結果もAIがそのまま解釈する、と言ったような世界観が待っている気がします。でもこの場合おそらく人間が(10年くらい、の話ですが)関わられて面白い部分というのは、そうやって色々出てくる日々の発見にどれが人類にとって価値があるのかをうまく定義して社会との接続を行うところな気がして、それをするためには結局、次の章のところに繋がってくるのですが、物理の理解をできるところまで引き上げておく必要があり、結局そのためには世界の最先端でいろいろな人と議論して、繋がりも作りつつ、理解を爆上げしておく必要があり、そうすれば、逆にそのような「広義自然」と「人類」の接点になれるのではないかな、と思っています。あるいは、そこまで極端な未来でなくとも、またそれが遠くて10年後でなかったとしても、それらのグラデーションの中の点における極端な例を薄めた関わり方が非常に面白いのではないかなという気がしています。さて、まとめると、ここでのARIPの経験は具体的にはやはり私の海外PhDへの道を確実なものにしてくれるステップとなっているのに加え、私が日々考える問いや未来のあり方に関する洞察を深める良い機会をも提供してくれる上、さらに物理学に携わるものとしても急速に成長しているように感じることができると、ターニングポイントとしての、言語化しきれない意義がここには存在していると思います。

5. あとの半年間を如何に過ごすか

これからやることは変わりません。90%の時間は研究とそのための勉強に時間を捧げようと思っています。やはり実験で手を動かすのは最低条件として、その上で理論を理解してアイデア面でも貢献したいと思うし、それは1年間というタイムスケールの中で達成しようと計画を立ててきているからこそ、それをしっかりと最後まで遂行しきりたいと思っています。いつかのnoteで書いたように、この1年間は残りの学部2年をより楽しんで過ごすための布石としても機能すると考えているからです。そして残りの10%は、最初の3ヶ月に比べて人に会う頻度を上げていくためのエネルギーとして使っていきたいと思っています。意識的に最初は研究のための勉強を優先しようとしていましたが、思い返すと(&最近人に会うようにして感じているのが)少し規範的に会わなさすぎた可能性はあると思っています、学びは研究からのみではないことを肝に銘じてそれを超えてより人にとって学びの質を上げていきたいと思っています。まとめると、今は成果を出し切るために全力を捧げ、楽しみつつ没頭してより物理学に携わるものとしても、人としても次元ではなく多次元的に成長していきたいと思っています。そして何より、一番大事にしたい感覚は、「限界まで挑戦すること」です。ふとした瞬間に、「今は鍛錬積む期間だ

し、」とってしまうときもあります(それも正しい)が、もっと今「自分は挑戦するんだ」という感覚を持って残りの半年間を過ごしたいと思います。

6. おわりに

私は今、とてつもない速度で自己変容しつつ成長できているというふうに感じています。それに伴う結果はもう少し待っていただきたいですが、、笑。半年後には何かしら出ていると思うので乞うご期待していただければと思います。限界まで挑戦しようとした結果、ぶっ壊れてしまう可能性ももちろんありますが、暖かく見守っていただければと思います。

さて、最後に改めてこの振り返りの機会に日々忘れがちな感謝の気持ちを表明しておきたいと思います。

私は今、20歳となってこのハーバードの地で1年間研究させていただけるという限りなく恵まれた環境にいることを実感しています。それを奪われかけて改めて感じたという側面もあると思います。そして、この状況というのは3年前の17歳の高校生の当時、それまでの17年間和歌山県で育ってきた自分には皆目想像がついていませんでした。

しかし、実際こうして蓋を開けてみると、こうやってこの場で何か意味はわからないけれども我武者羅に努力している自分がいます。なぜこうなったのか。これもまた、僕たち人間には説明のしきれない、人との出会い、誰かからもらった言葉、自分が気づいてすらいないところでのサポートなどなど、セレニディピティから生じるものや他者のあたたかさの総結晶として、なぜかよくわからないけれども、今の自分が出来上がってきているのだと思います。でもそのパラメータの膨大さに抗う形で言語化を試みていくと、

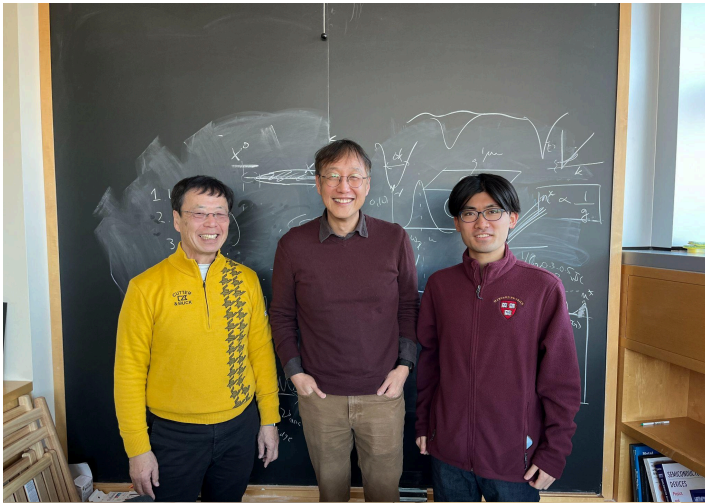
やはりまずはひとえに、家族が無条件に応援してくれていることの大きいと思っています。日々そのことを忘れ心配をかけてしまうことの方が多いような気もしますが、毎日気にかけてくれる、その愛に感謝は尽きないなと実感しています。

そしてここまで関わってくれた数えきれない友人達の存在。皆さんからもらった言葉、それに対して僕が返す言葉に対し、また返してくれる言葉。それらの対話の積み重ねによって間違いなく僕の思考は作り上げられていますし、対話だけでなく、周りで何かに、それは社会の一元的な価値観にとどまらないところでの、打ち込んで努力している姿に影響を受けることも極めて多いと思っています。そのような友人が周りにいてくれることへの安心感から、私は多少孤独とを感じる時も目の前のことに集中できていると思います。そんな諸々の関わりに対して返すことは可能なのだろうか、と思わされるくらいの膨大な感謝があると思っています。

また、ここで私を受け入れてくださっているKim教授をはじめとしたラボメンバーの人たち。特に、同じサブグループに所属しているJames, Christina, Tomは全員私のメンターの存在で、僕の下手な英語で拙い物理の理解からくる質問に対し懇切丁寧に答えてくれるだけでなく、僕がよく考える人生観的なテーマに対してもそれぞれのバックグラウンドから答えようとしてくれるその親切さにいつも救われています。学部2年生で1年間居座り続けようとするおそらく一見意味がわからない人間に対してまず受け入れてくださり、私が貢献できるように考えつつ、能力の引き出し方まで考えつつ相談にも乗ってくれる皆さんに感謝の気持ちは本当に尽きないです。

最後に中谷財団の方々。このような本当の意味で替えが効かないと思えるような経験をする事ができているのは、小川さんをはじめとした、中谷財団の方々の支援があってこそのものだと実感しています。最初は、というか今もまだそうではありますが、ただ量子コンピュータに対する情熱があるだけでそれ以外に関しては何もよくわからない1学生をここまで信じてくださり、支援してくださったのは、本当に心の底から感謝しております。この恩を何か目に見える形で必ず返すべく、残りの半年間が存在しているとも思っていますし、そのために必ず歩みを止めることなく限界に挑み続けたいと思っています。

改めて、私に関わってくださっている全ての方々に感謝申し上げたいと思います。これらの恩の多くはそのまま返すことができないことの方が多いと感じている分、逆にその分は後世へと遺せるものを増やしていくべく、いまだにやるべきことを定めきれていない状態ではありますが、その問いから、人生から、逃げることなく立ち向かい、この世に生を受けた使命を全うして死んで行こうと思っています。今後ともよろしくお願いいたします。



左上:小川さん訪問時の写真、真ん中がKim教授

右上:Jamesとのご飯

左下:Tomが卒業する時の写真

(写真見返して気づいたのですがあまり写真を撮らない癖があってあまり残ってないですね、、これから気をつけます。)

References

- [1] Werkmeister, Thomas, et al. "Anyon braiding and telegraph noise in a graphene interferometer." *Science* 388.6748 (2025): 730-735.
- [2] Willett, Robert, et al. "Observation of an even-denominator quantum number in the fractional quantum Hall effect." *Physical review letters* 59.15 (1987): 1776.
- [3] Das Sarma, Sankar, Michael Freedman, and Chetan Nayak. *Physical review letters* 94.16 (2005): 166802.
- [4] Anderson, Philip W. "More Is Different: Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science." *Science* 177.4047 (1972): 393-396.
- [5] Halperin, Bertrand I., et al. "Theory of the Fabry-Pérot quantum Hall interferometer." *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics* 83.15 (2011): 155440.
- [6] Wen, Xiao-Gang. "Theory of the edge states in fractional quantum Hall effects." *International journal of modern physics B* 6.10 (1992): 1711-1762.
- [7] Cohen, Liam A., et al. "Spontaneous localization at a potential saddle point from edge state reconstruction in a quantum Hall point contact." *Physical Review Letters* 134.7 (2025): 076302.
- [8] Kivelson, Steven A., and Chaitanya Murthy. "A modified interferometer to measure anyonic braiding statistics." *arXiv preprint arXiv:2403.12139* (2024).
- [9] Li, Hongyuan, et al. "Electrode-free anodic oxidation nanolithography of low-dimensional materials." *Nano letters* 18.12 (2018): 8011-8015.
- [10] *COMSOL Multiphysics*. Version 6.0, COMSOL AB, 2024.
- [11] Huang, Hsin-Yuan, et al. "Quantum advantage in learning from experiments." *Science* 376.6598 (2022): 1182-1186.