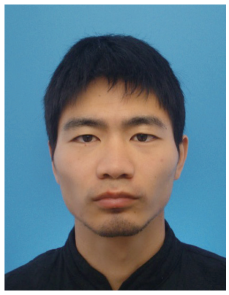
# ●早川 龍 特定助教



*Ryu HAYAKAWA (Assistant Professor)*

**研究課題：** 量子計算を用いた高速位相的機械学習法の開発と計算複雑性の解析
（Proposal of quantum topological machine learning and analysis of its quantum computational complexity）

**専門分野：** 量子計算（Quantum Computing）

**受入先部局：** 基礎物理学研究所（Yukawa Institute for Theoretical Physics）

**前職の機関名：** 京都大学大学院理学研究科物理学宇宙物理学専攻
（Division of Physics and Astronomy, Graduate School of Science, Kyoto University）

私は、量子計算機に関する理論的研究を行っており、特に、量子アルゴリズムと量子計算複雑性に関する研究を行っています。量子アルゴリズムの研究では、量子計算機を用いてどのような問題を解くことができるかを解明し、特に、古典計算機に対して著しい高速性を持つような量子アルゴリズムの存在を示すことを目標としています。また、量子計算複雑性の研究では、ある問題が、どのくらい難しいのかを理論的に解明することを通じて、量子計算の古典計算に対する高速性を証明し、また、逆に、量子計算の限界をも明らかにすることができます。

本白眉プロジェクトでは、量子計算複雑性とトポロジーの融合した新しい学際的領域を開拓します。トポロジーとは、幾何学的な変形に対して堅牢性を持つような「柔らかい」構造を捉えるものですが､高次のトポロジーの持つ極度な複雑性が実は量子計算複雑性と自然な関係を持つということが明らかになりつつあります。そのような関係性の更なる解明を通じて、データ解析や機械学習の分野における新たな量子計算の応用や、トポロジーに関する問題の難しさや、量子多体系の未知の性質を明らかにすることに取り組みます。

My research interest is in theoretical aspects of quantum computing, including the study of quantum algorithms and quantum computational complexity. In the study of quantum algorithms, I am trying to establish applications of quantum computing with substantial speedup over classical computing. In the study of quantum computational complexity, the aim is to figure out “how difficult” certain problems are. Through the theory of quantum computational complexity, we can understand the separations of computational power between classical and quantum computing. Moreover, we can also understand the theoretical limitations of quantum computing.
In this Hakubi project, I study a new interdisciplinary field of quantum computing, namely “quantum computational topology”. It has been recently known that there is a surprising connection between the complexity of quantum computing and the complexity of high-dimensional topology. Through the study of the connection between quantum computing and topology, I would like to establish new applications of quantum computing in the field of data analysis and machine learning based on the topological properties of the data. Moreover, I would also like to clarify the complexity of the mathematical problems related to high-dimensional homology and the complexity of quantum many-body systems through the lens of quantum computation.

## 量子計算とは？

量子力学は、古典力学にはない不思議な性質を持った理論であると言われます。量子の不思議な性質を使って、古典ではできないような情報処理や計算を行うものが量子計算であり、計算機科学と物理学が融合して生まれた新しい分野であると言えます。量子計算における基本的な情報の単位を量子ビットと言います。量子計算機は、複数の量子ビットに関する初期状態に対して、量子力学の法則に基づく時間発展を行い、観測機器によって測定を行うことによって計算を行うものです。計算複雑性理論のことばでは、量子計算機によって "効率的に" 解ける問題の集合を、BQP（Bounded-error Quantum Polynomial-time）と言います。ここで、効率的というのは、通常の場合は、用いる量子ビット

の数に対して多項式時間で行える計算のことを効率的と言っています。初期状態としては、自分で用意するものだけでなく、非常に大きな計算能力を持った"証明者"からもらった情報（証明）をもとにするような状況も考えられます。このような、証明を効率的に検証できるような問題の集合はQMA（Quantum Merlin-Arthur）と呼ばれていて、古典計算でいうNP（Non-deterministic Polynomial-time）に対応します。例えば、物理系の最小のエネルギー固有値を求めよという問題の難しさは、QMAと対応することが知られています。古典のNPに比べて、量子のQMAにはまだまだわかっていないことが多く、そのような未解決問題を解決することも量子計算複雑性の研究の主要な目標の一つです。

## トポロジーに基づくデータ解析

昨今の情報化社会において、取り扱われるデータはますます膨大かつ複雑になっています。大規模データを解析したり、学習したりすることは、幅広い分野で重要な問題であり、そのようなタスクは、量子計算の有力な応用の候補とも考えられています。近年注目を集めている新しいデータの解析の手法として、Topological Data Analysis（TDA）というものがあります。TDAは、データが潜在的に有しているトポロジカルな性質をうまく用いてデータ解析を行うものです。TDA以前にも、グラフに基づくデータのモデル化や解析は幅広く研究されてきました。しかし、頂点と辺からなるグラフは、二点間の相互作用をモデル化する上では優れていますが、多頂点間の相互作用も含むようなより複雑な状況の解析には十分とは言えません。TDAでは、一種のハイパーグラフである単体複体と呼ばれるトポロジカルなオブジェクトに対して、“高次の穴の数”の変化の指標である、“パーシステント・ベッチ数”を計算することでデータ解析を行います。

## 量子計算とTDA

高次の単体複体では、要素の数が、頂点の数に対して指数関数的に大きくなることがあります。量子計算は、量子ビット数に対して指数関数的に大きな空間を扱うことができるため、量子計算を用いてTDAを効率的に行うことができるのではないか？と想像されます。実際に私は、これまでの研究で、パーシステント・ベッチ数を効率的に推定することができるような量子アルゴリズムが存在することを明らかにしました [1]。しかも、このアルゴリズムは、現在知られているベストな古典アルゴリズムに対して指数関数的な高速性を有しています。さらに、ホモロジーに関する問題の難しさが、量子の計算量クラスであるQMAに対応することも最近示されています。しかし、量子計算を通じたTDAの有用性については、まだ十分に解明されていません。私の白眉プロジェクトの研究では、量子計算と高次のトポロジーの関係性に関する多角的な研究を行い、新たな代数幾何と量子計算の融合分野の基礎を確立することを目標としています。中でも、トポロジーに基づく新たな量子機械学習の手法を明らかにすることは、重要な目標です。さらに、高次のトポロジーに関する問題の計算複雑性の研究を通じて、TDAのタスクにおける量子優位性を確立するも主要な目的として挙げられます。更に、TDAを行うことができるような新たな量子計算のアルゴリズム・計算モデルの確立及び、量子体系のもつトポロジカルな性質ついての複雑性の解明などにも取り組みます。

## 参考文献

[1] Ryu Hayakawa, “Quantum algorithm for persistent Betti numbers and topological data analysis.” Quantum 6 (2022): 873.