

研究紹介

藤村 晴伸（ふじむら はるのぶ）

大阪大学 理学研究科 物理学専攻

博士後期課程 2 年

発表時間の目安：12~15分



自己紹介

名前：藤村 晴伸（ふじむら はるのぶ）

[自分のHP](#)



所属：素粒子理論研究室 西岡グループ

専門分野：理論物理（場の量子論、量子もつれ、量子計算の応用）

出身：滋賀県

B2の時の夏合宿@長野



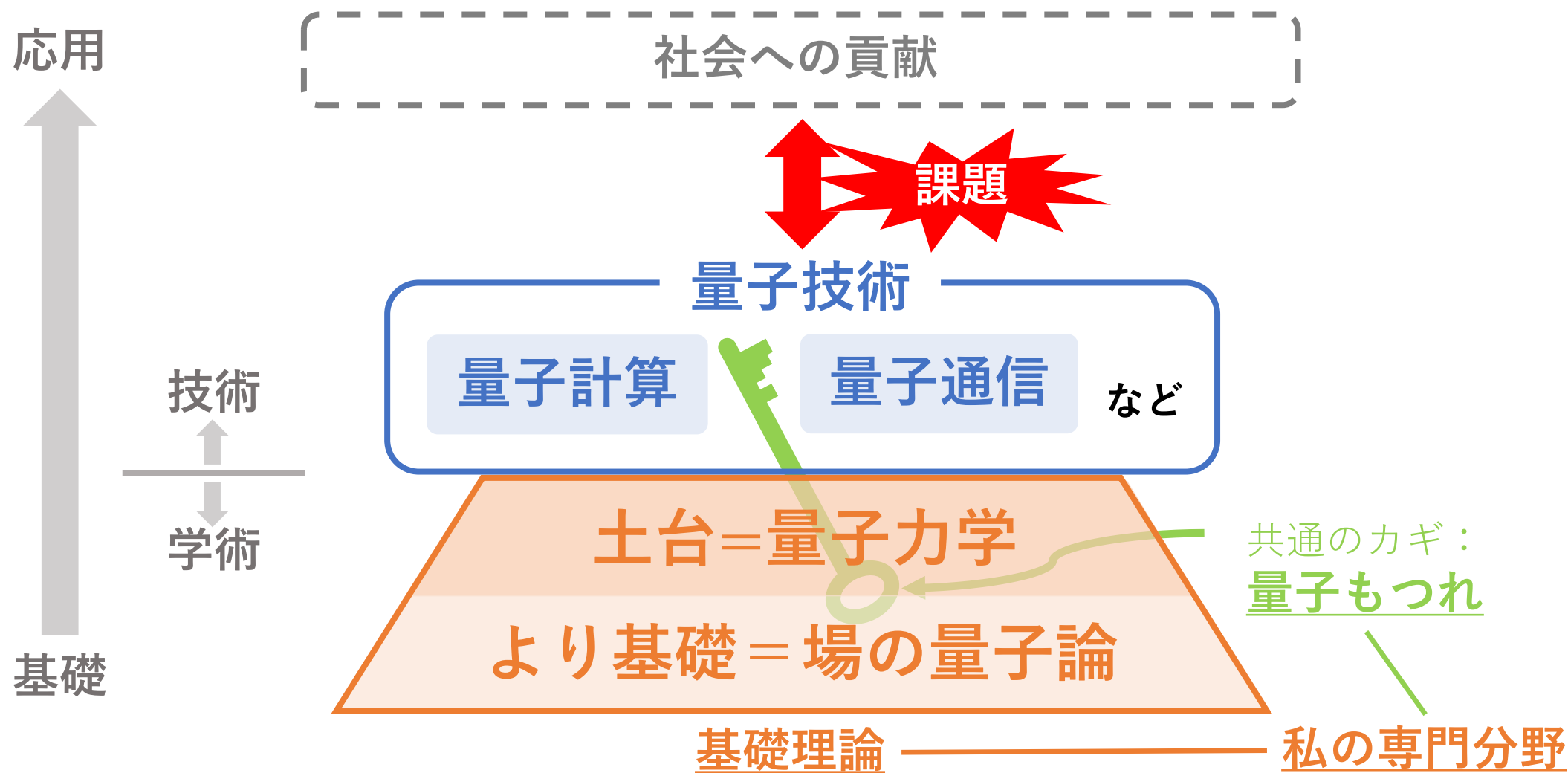
趣味：ランニング(学部時代は陸上部に入っていました。)
バドミントン(今年から始めました。)

毎週研究室メンバーでバドミントンをしています！

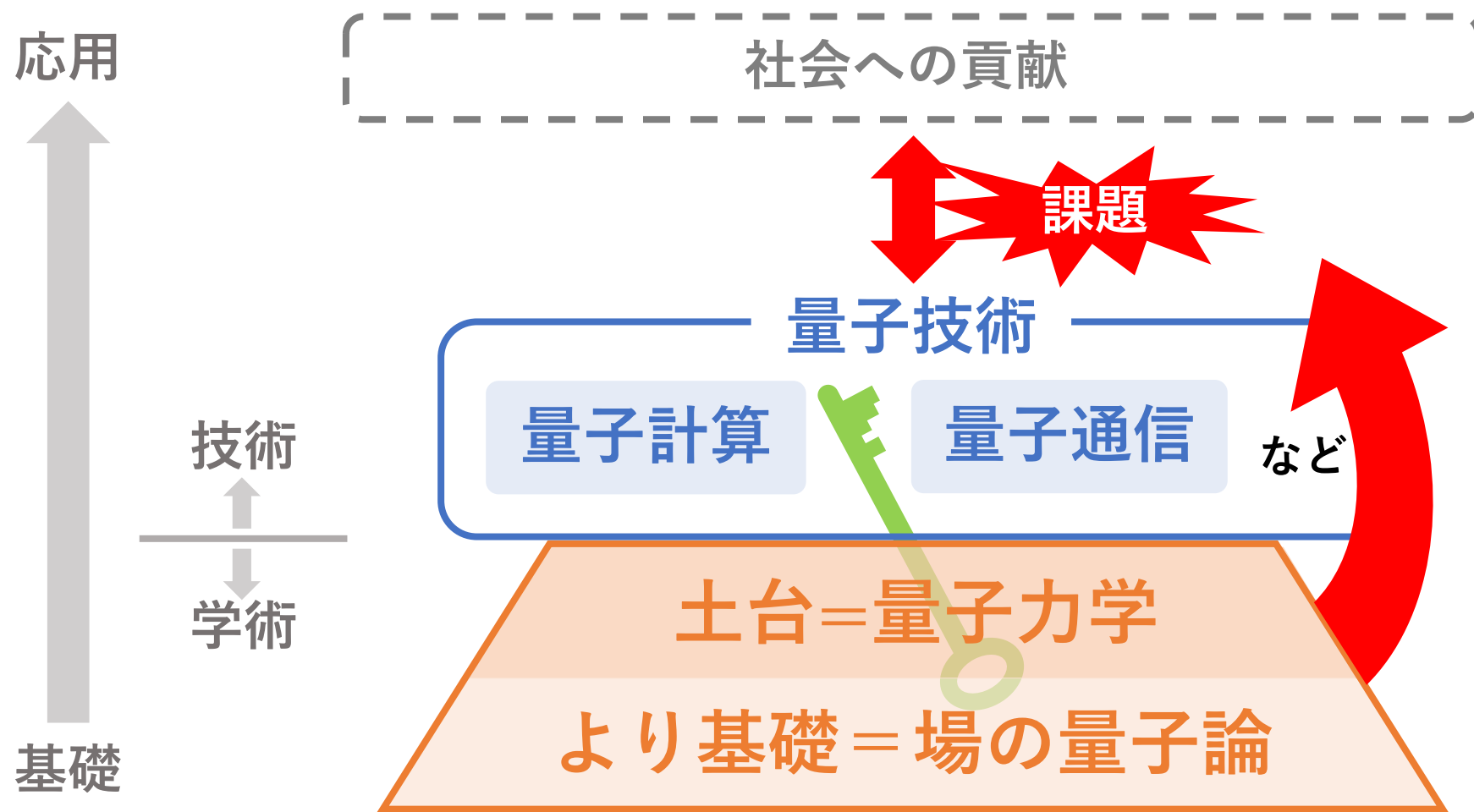
好きなこと：運動、友達とダバること、ポケモンなど



私の専門分野とこれからやりたいこと



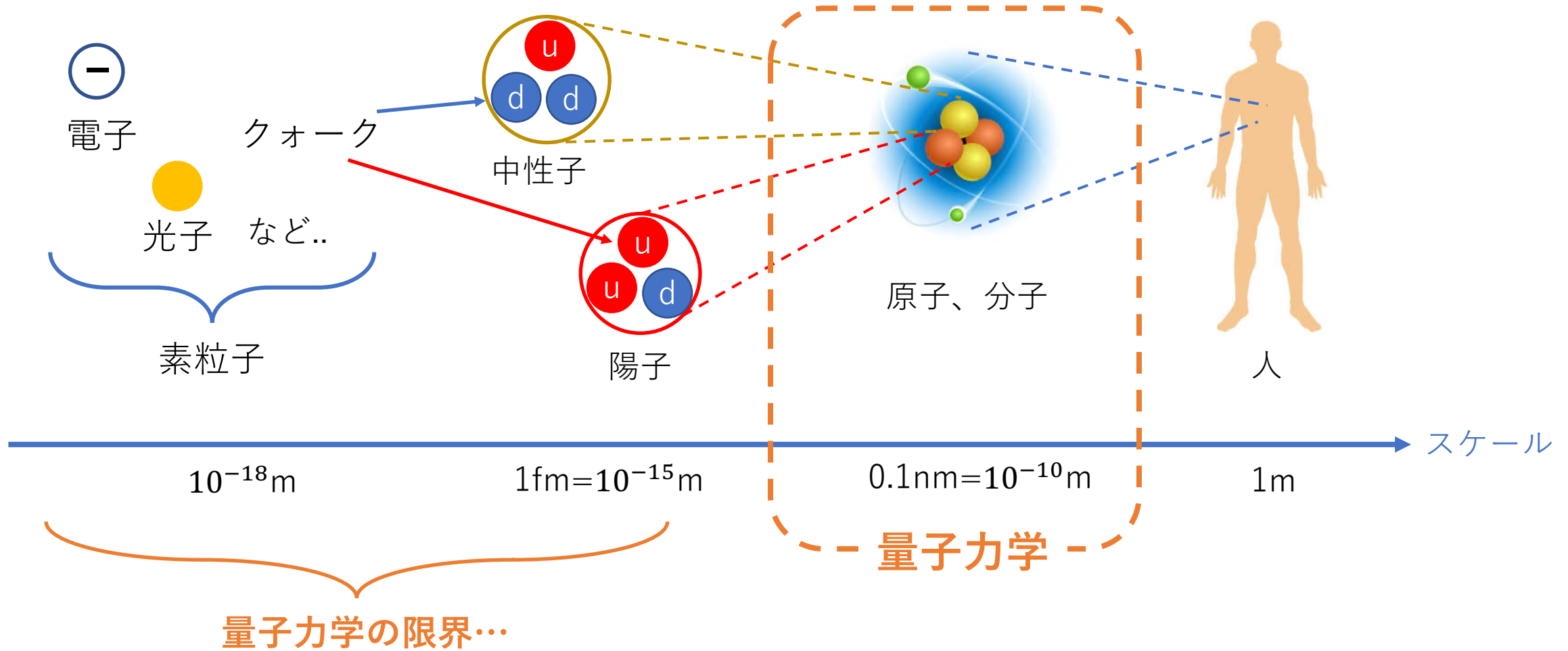
私の専門分野とこれからやりたいこと



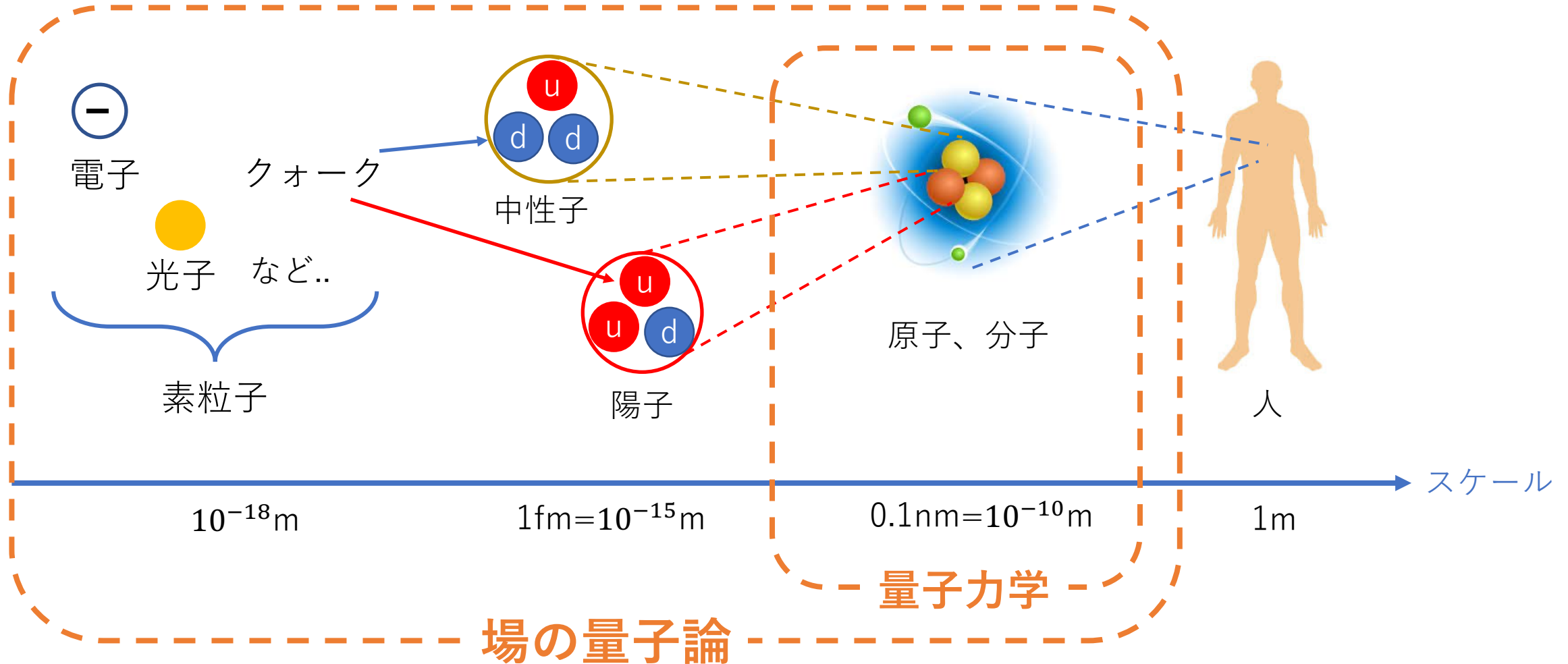
これからやりたいこと

基礎理論の研究経験を活かして量子技術の課題を解決し、基礎から社会へ貢献していきたい。

場の量子論とは？



場の量子論とは？

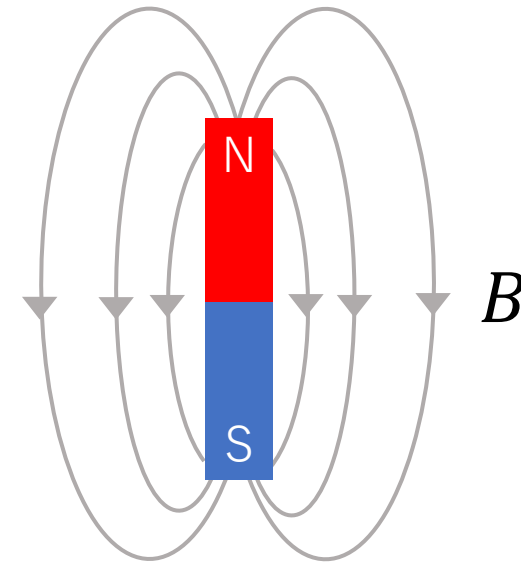
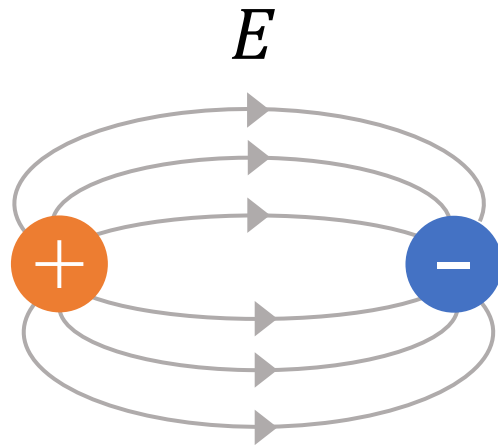


場の量子論は量子力学を拡張した、より基本的な量子論

場の量子論とは？

そもそも「場」とは？

例：電場と磁場

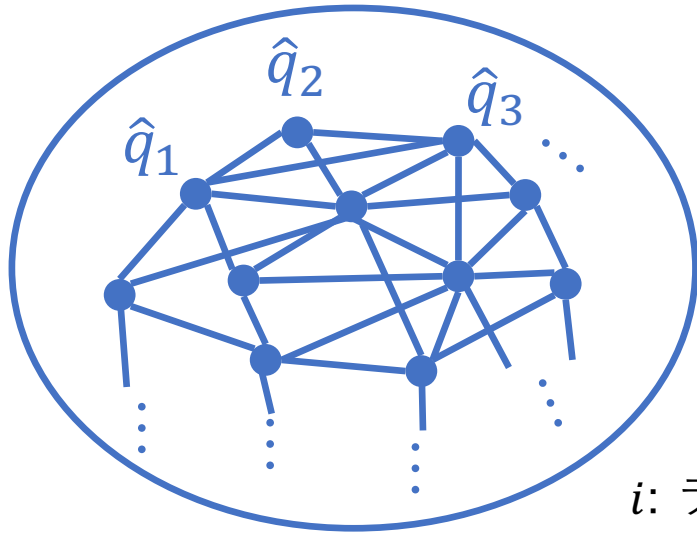


「場」は電場や磁場のように空間上に存在するもの。
場の量子論では場を量子論的な自由度と考える。

場の量子論とは？

場の量子論のイメージ

量子多体系



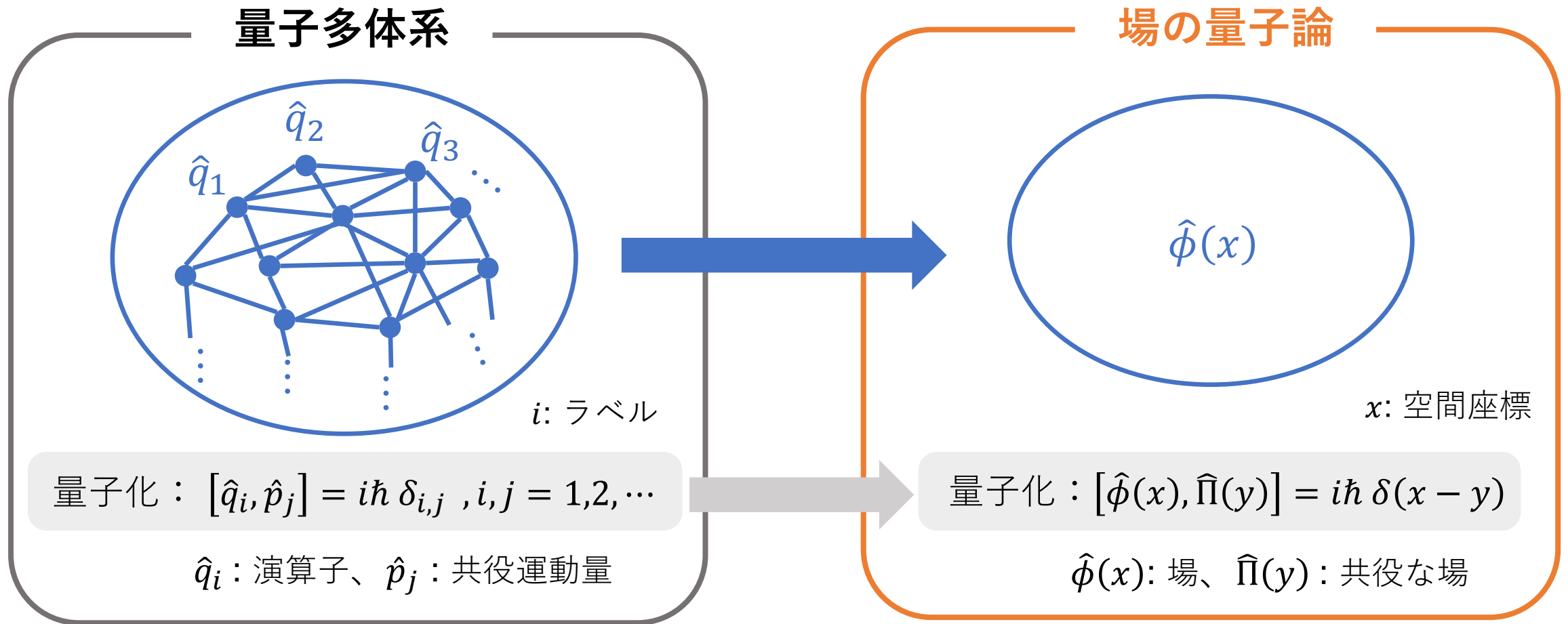
i : ラベル

量子化： $[\hat{q}_i, \hat{p}_j] = i\hbar \delta_{i,j} , i, j = 1, 2, \dots$

\hat{q}_i : 演算子、 \hat{p}_j : 共役運動量

場の量子論とは？

場の量子論のイメージ



場の量子論は「場」を量子論的な自由度(演算子)とする量子論！

場の量子論とは？

場の量子論 = 量子力学を拡張したより基本的な量子論

場の量子論を用いるメリット：

- ・ 特殊相対性理論と整合し、電磁気力や核力などを統一的に記述できる。
- ・ 粒子数が変わるような現象(対生成・対消滅など)を自然に扱える。
- ・ **量子力学だけからだと見えにくい量子論の構造を捉えることができる！**

対称性

(系の持つ性質)

普遍性

(臨界現象など)

双対性

(異なる理論の対応関係)

など

場の量子論を研究することによって、量子力学や量子技術に対して新たな知見を与えられる。

私の専門分野について

私は場の量子論の量子もつれや開放系の物理(非平衡現象)、量子計算の応用を研究しています。

今回ご紹介する研究内容：

① 場の量子論の量子もつれ(業績1、査読あり) (1 page)

② 量子もつれと開放系の新奇現象(業績2、査読中) (2 pages)

学生だけで行った研究。

③ 量子計算の場の量子論への応用(現在研究中) (1 page)

藤井啓祐先生(大阪大学)と共同。

上記の三つの研究内容について簡単に概要を説明します。

研究内容①: 場の量子論の量子もつれ(業績1)

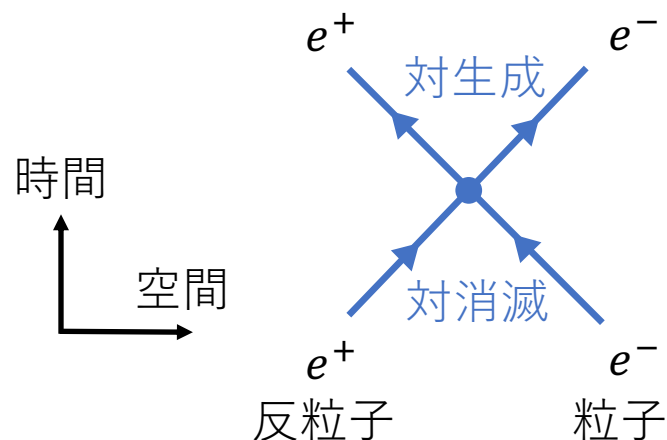
分野背景

- ・ 場の量子論においても量子もつれは非常に重要な概念であるが、解析が難しい。
- ・ 特に、**相互作用の効果はよくわかっていない**(厳密解析の既存研究は自由粒子のみ)。

課題

本研究 [H.Fujimura, T.Nishioka, and S.Shimamori, 2023]

空間1次元系でフェルミオンの対生成・対消滅の相互作用が量子もつれに与える影響を厳密に示した。



他の分野の知見を用いる
ことで課題を解決。

用いたツール

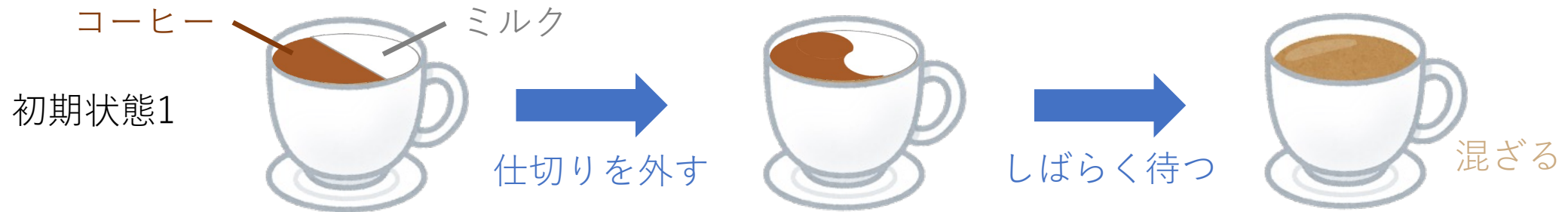
- ・ 経路積分法
- ・ 共形場理論
(臨界現象を記述する理論)
- ・ **ボソン=フェルミオン双対性**
- ・ 特殊関数論

場の量子論で相互作用が量子もつれに与える影響を初めて厳密に示した。

研究内容②: 量子もつれと開放系の新奇現象(業績2)

量子Mpemba(ムペンバ)効果…量子系の異常な非平衡緩和現象の一つ。

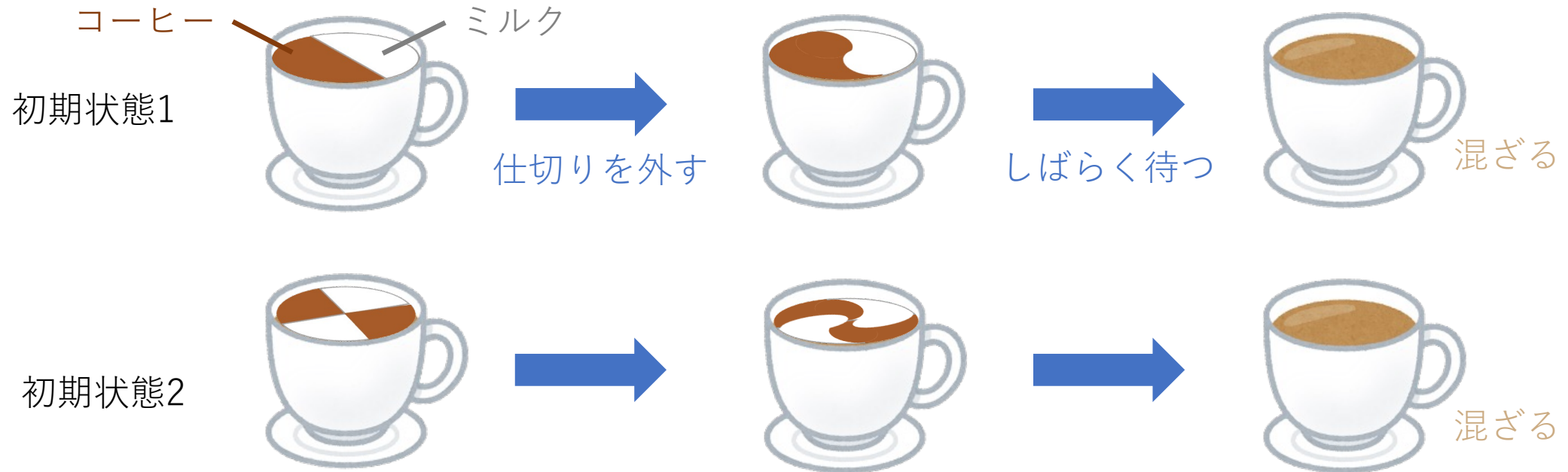
直感的な例え



研究内容②: 量子もつれと開放系の新奇現象(業績2)

量子Mpemba(ムペンバ)効果…量子系の異常な非平衡緩和現象の一つ。

直感的な例え



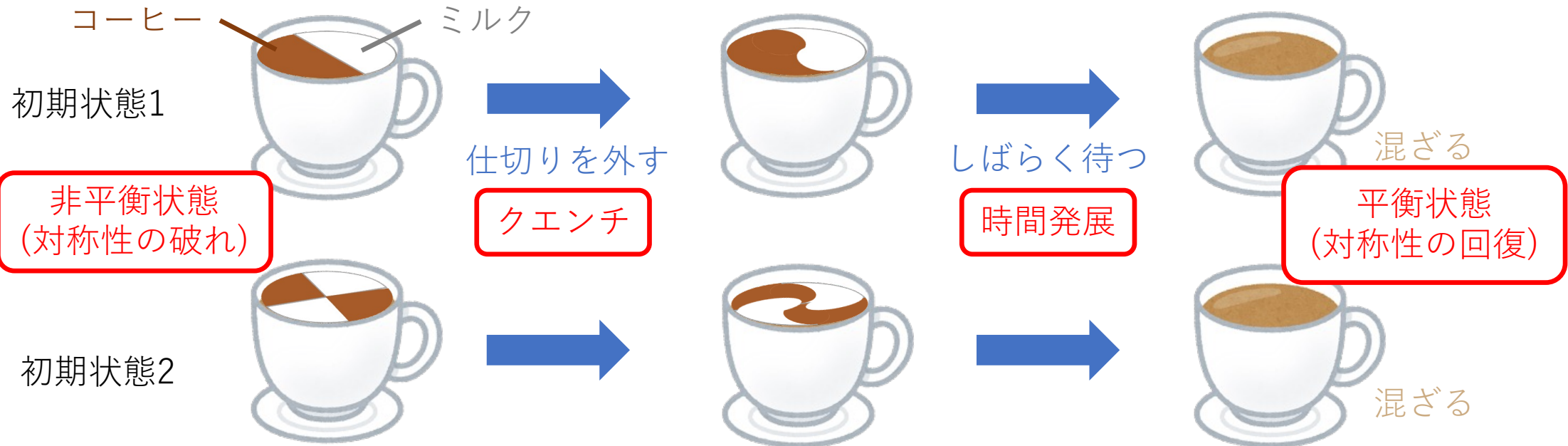
直感的には初期状態2の方が早く混ざりそうだが…

特定の条件下では直感に反して初期状態1の方が早く混ざることがある！→異常な緩和現象

研究内容②: 量子もつれと開放系の新奇現象(業績2)

量子Mpemba(ムペンバ)効果…量子系の異常な非平衡緩和現象の一つ。

量子系では…



量子Mpemba(ムペンバ)効果

対称性の破れの大きい状態ほど対称性の回復が早くなる現象。
(直感に反する異常な非平衡緩和現象)

研究内容②: 量子もつれと開放系の新奇現象(業績2)

分野背景

- ・ 量子Mpemba効果は量子もつれを用いて定量的に議論されている。
- ・ 開放系・非平衡系の新奇現象を理解することは、学術・技術の両面で非常に重要。
- ・ しかし、現状では可換対称性($U(1)$, \mathbb{Z}_n など)の量子Mpemba効果しか良く分かっておらず、非可換対称性($SU(N)$ など)で調べることは難しい。

課題



本研究 [H.Fujimura, and S.Shimamori, 2025]

- ・ 臨界現象において量子Mpemba効果が $SU(N)$ 対称性で起こることを一般の N で厳密に示した。
- ・ これまで知られていなかった、全く新しいタイプの量子Mpemba効果を理論的に明らかにした。



量子Mpemba効果がより一般的に生じることを示した。

これは学生だけで書いた論文！
様々な人と交流することで視野が広がり、課題を解決。
自立して研究する力とコミュ力を養った。

用いたツール

- ・ 共形場理論
- ・ 群論
- ・ 特殊関数論 など

研究内容③: 量子計算の場の量子論への応用(現在研究中)

分野背景

- ・ 量子Mpemba効果のメカニズムはまだよく分かっていない。
- ・ 臨界系は理論的に調べやすいが、一般の物理系で調べることは難しい。
- ・ 古典コンピュータによる数値計算もできるが、指数関数的な時間がかかる。

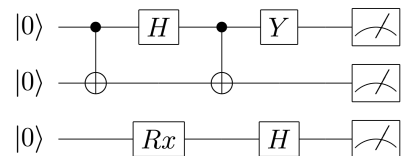
課題

本研究 [H.Fujimura, K.Fujii, M.Honda, and L.D.Truyen, ongoing]

量子Mpemba効果を効率的にシミュレーションする量子アルゴリズムを考案した。
→場の量子論のような基礎理論向けに設計、量子優位性が期待できる。

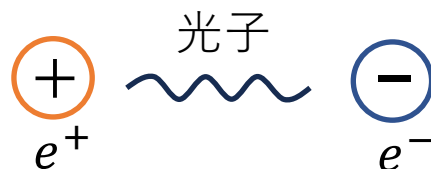
応用例として、空間1次元のQED(量子電磁気学)を扱っている。

量子計算



応用

QED(量子電磁気学)



用いたツール

- ・ QED(量子電磁気学)
- ・ 量子アルゴリズム (位相推定など)
- ・ Pythonを用いた数値計算 (Qulacs、Qiskitなど)

自ら主導し藤井氏、本多氏に共同研究を企画。周囲を巻き込む主体性があります！

最後に

量子の基礎理論の研究は、物理学の総合格闘技！（古典力学、電磁気学、熱統計力学、重力と全部使います）

→幅広い分野の研究に順応できます！（分野は柔軟に考えています！）

私の研究経験

場の量子論

数理的スキル

量子もつれ

開放系・非平衡

QED

量子計算の応用

量子系の基礎、論理的思考力

×

私の強み

主体性

視野の広さ

コミュ力

他分野にも介入している力

貢献

量子技術

量子アルゴリズム

量子誤り訂正

量子通信

量子アプリケーション

実機の開発・実験

量子技術の発達に貢献したい！

どんなことでも貪欲に挑戦し、基礎研究から社会実装まで幅広く貢献していきたい！

Appendix

業績リスト

- (業績1): [arXiv:2309.11889](https://arxiv.org/abs/2309.11889), [Phys. Rev. D **108**, 125016](#) (主著、査読あり)
“**Entanglement Rényi entropy and boson-fermion duality in the massless Thirring model**”
[Harunobu Fujimura](#), Tatsuma Nishioka, and Soichiro Shimamori
- (業績2): [arXiv:2509.05597](https://arxiv.org/abs/2509.05597), (主著、査読中)
“**Entanglement Asymmetry and Quantum Mpemba Effect for Non-Abelian Global Symmetry**”
[Harunobu Fujimura](#), and Soichiro Shimamori
- (業績3): 日本学術振興会特別研究員 (DC1) ([24KJ1637](#))
“**量子計算を用いた場の量子論のダイナミクスの解明**”
- (業績4): 日本物理学会 口頭発表 (2024春・2025秋)
”ボソン/フェルミオン双対性を用いた相互作用を含むエンタングルメント Rényi エントロピーの解析”
“Wess-Zumino-Witten modelにおける entanglement asymmetry の解析”
その他、国際学会3件など。
- (業績5): 大阪大学楠本賞・総代選出 (主席卒業)。全学部代表として選抜。
その他、学内研究賞3件、成績優秀賞2件。

研究内容①: 場の量子論の量子もつれ(詳細ver)

研究の流れ

指導教官の西岡先生に「量子もつれがやりたい」と相談。論文等を読み、量子系の知識をつける。

→場の量子論の量子もつれの解析は難しいと知る。特に、相互作用効果の厳密な計算例がない。

→**ボトルネックの細分化**。分配関数の計算が厄介だと気づく。

→**視野を広げて他分野を俯瞰**。

→別分野で、ボソン=フェルミオン双対性というトピックを見つけ、これを用いると課題が解決できること気づく。

→実際に相互作用を含む共形場理論のモデルで量子もつれの厳密計算に成功し、成果が出た。

初めて書いた論文。

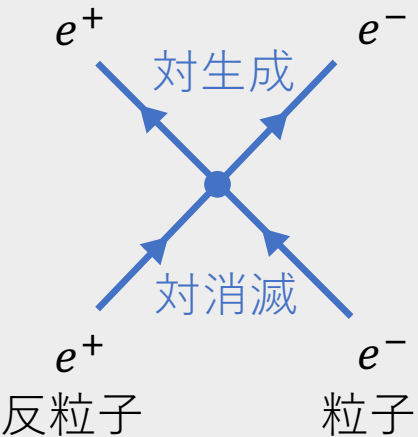
量子もつれの知識や数理的スキルだけでなく、基本的な研究のやり方を学んだ。
特に、視野を広げることの重要性を実感した。

研究内容①: 場の量子論の量子もつれ(詳細ver)

研究成果の紹介

相互作用

空間1次元系におけるフェルミオンの
対消滅・対生成



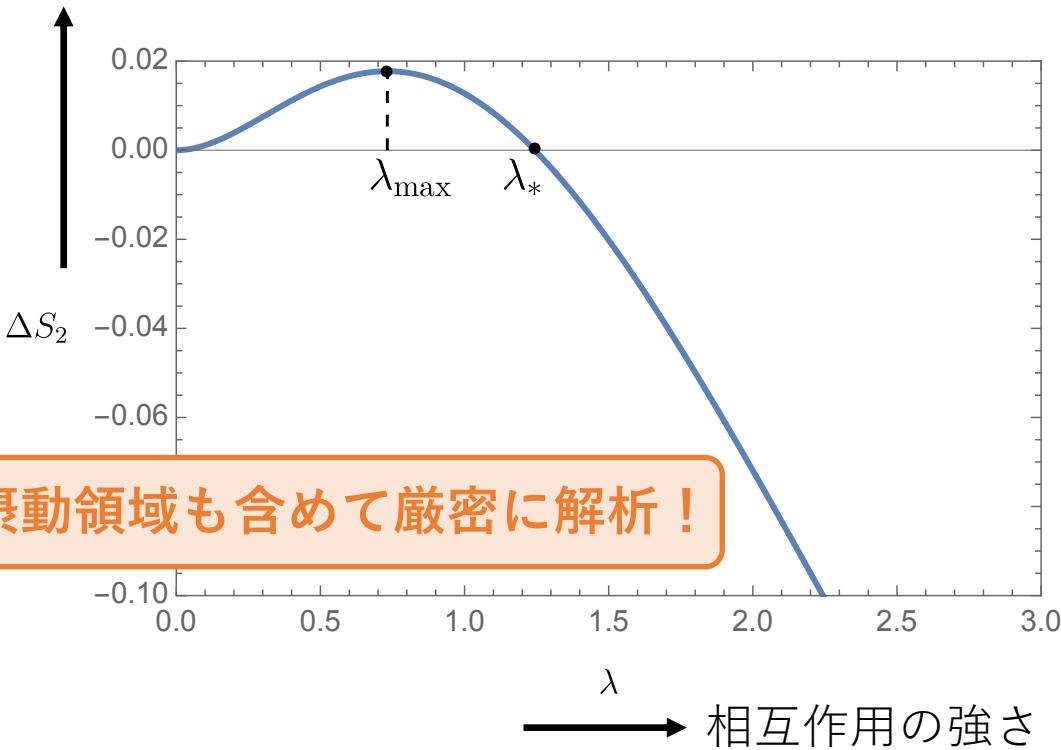
計算した量

エンタングルメント Rényi エントロピー (ERE)

$$S_n(\rho_A) \equiv \frac{1}{1-n} \log \text{Tr}_A[\rho_A^n] \quad , n \in \mathbb{Z}_+$$

本研究で得られた結果(解析結果のplot)

量子もつれの増加量



場の量子論特有の相互作用が量子もつれに与える
影響を明らかにした。

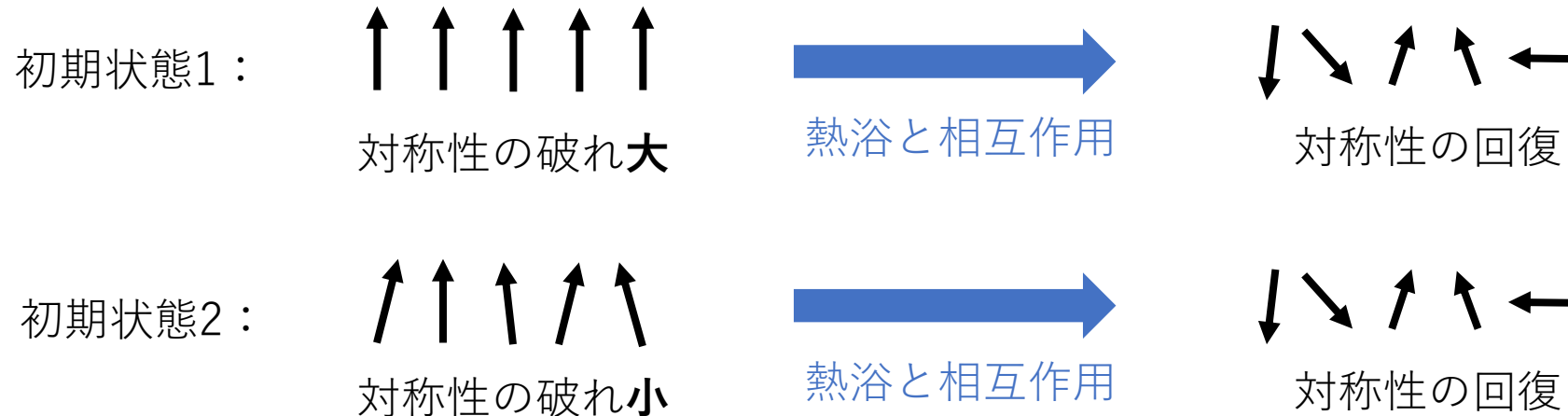
研究内容②: 量子もつれと開放系の新奇現象(詳細ver)

(対称性に関する)量子Mpemba効果 [Ares-Murciano-Calabrese, 2022]

… 対称性の破れが**大きい**状態ほど、対称性の回復が**早く**なる現象

例：スピン反転の \mathbb{Z}_2 対称性の回復

スピン1/2のチェーンを考える。



➡ 初期状態1の方が初期状態2よりも早く対称性が回復する。直感に反する量子緩和現象

研究内容②: 量子もつれと開放系の新奇現象(詳細ver)

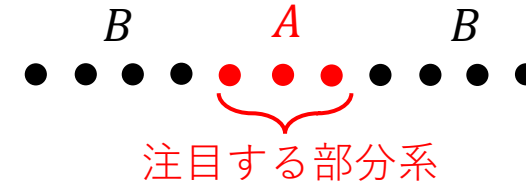
量子Mpemba効果を調べる代表的な方法:

対称性のあるHamiltonianによるクエンチ

全体系 $= A \cup B$, A : 注目している部分系

$|\psi_{AB}(0)\rangle$: 対称性がexplicitに破れた状態

$|\psi_{AB}(t)\rangle = e^{-iHt}|\psi_{AB}(0)\rangle$, H : 対称性のあるHamiltonian



➡ 部分系 A だけに注目すれば、時間発展によって対称性が回復する。

研究内容②: 量子もつれと開放系の新奇現象(詳細ver)

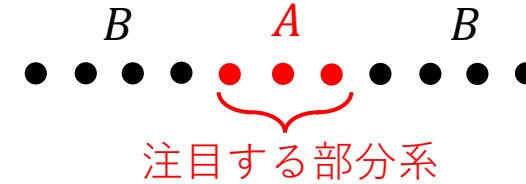
量子Mpemba効果を調べる代表的な方法:

対称性のあるHamiltonianによるクエンチ

全体系 $= A \cup B$, A : 注目している部分系

$|\psi_{AB}(0)\rangle$: 対称性がexplicitに破れた状態

$|\psi_{AB}(t)\rangle = e^{-iHt}|\psi_{AB}(0)\rangle$, H : 対称性のあるHamiltonian



➡ 部分系 A だけに注目すれば、時間発展によって対称性が回復する。

対称性の破れを定量化する量: Entanglement Asymmetry (EA)

$$\Delta S_A = S(\rho_{A,S}) - S(\rho_A) \quad : \text{量子もつれの差}$$

対称性のある状態
(平衡状態)



対称性の破れた状態
(非平衡状態)

ただし、非可換対称性における量子Mpemba効果は調べるのが難しく、先行研究は可換群ばかり。

研究内容②: 量子もつれと開放系の新奇現象(詳細ver)

本研究の貢献

貢献1：共形場理論を用いて、 $SU(N)$ 対称性の量子Mpemba効果の存在を示した。

貢献2：これまでにない新しいタイプの量子Mpemba効果を示した。

研究内容②: 量子もつれと開放系の新奇現象(詳細ver)

本研究の貢献

貢献1: 共形場理論を用いて、 $SU(N)$ 対称性の量子Mpemba効果の存在を示した。

貢献2: これまでにない新しいタイプの量子Mpemba効果を示した。

実際の解析はテクニカルなので、研究の流れだけ簡単に説明します。

研究の流れ

まずは研究テーマ探し。 色々な分野の論文を読む。

→量子Mpemba効果に出会う。より理解を深めたいと思う。

→先行研究の方法で非可換対称性を扱うのは難しそう。

→**ボトルネックの細分化。** 相関関数の計算が厄介だと気づく。

→**視野を広げて文献調査。**

→共形場理論と群論を組み合わせて相関関数を計算している論文を見つける。

→この論文の方法を組み合わせて、非可換対称性の量子Mpemba効果を調べる。成果が出た。

研究内容②: 量子もつれと開放系の新奇現象(詳細ver)

本研究の貢献

貢献1: 共形場理論を用いて、 $SU(N)$ 対称性の量子Mpemba効果の存在を示した。

貢献2: これまでにない新しいタイプの量子Mpemba効果を示した。

実際の解析はテクニカルなので、研究の流れだけ簡単に説明します。

研究の流れ

まずは研究テーマ探し。色々な分野の論文を読む。

→量子Mpemba効果に出会う。より理解を深めたいと思う。

→先行研究の方法で

→ボトルネックの細

→視野を広げて文献調査。

→共形場理論と群論を組み合わせて相関関数を計算している論文を見つける。

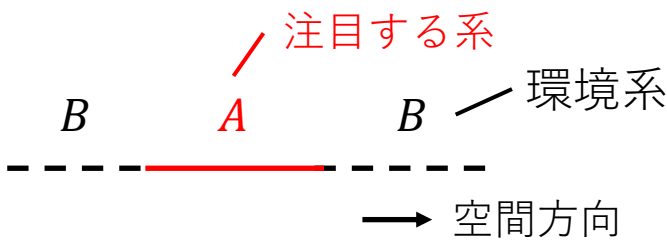
→この論文の方法を組み合わせ、非可換対称性の量子Mpemba効果を調べる。成果が出た。

自立して研究する力とコミュ力を養った。
様々な人と交流することで、視野が広がった。

研究内容②: 量子もつれと開放系の新奇現象(詳細ver)

研究成果の紹介

セッティング



部分系Aにおける $SU(N)$ 対称性の回復を見る。

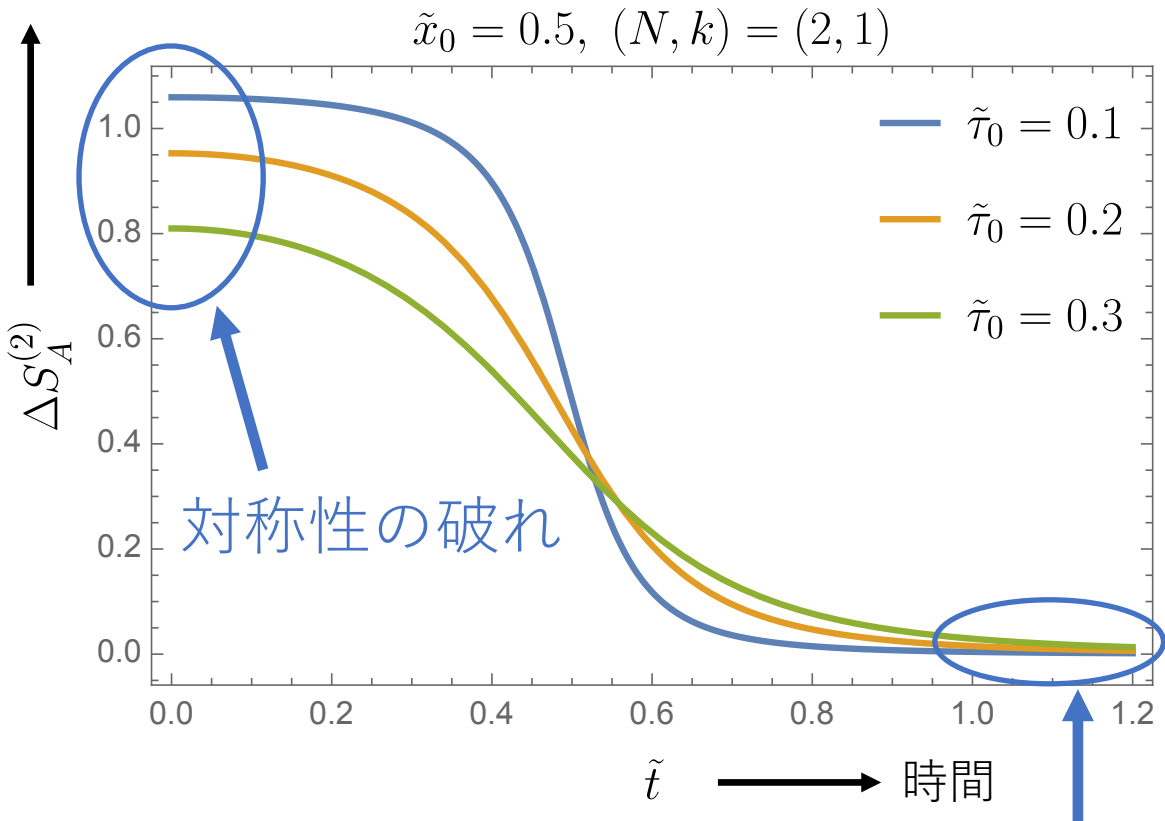
初期状態： $|\psi_{AB}(\tau_0, N)\rangle$

τ_0 ：初期状態の対称性の破れを変える
パラメーター

N ： $SU(N)$ のランク

τ_0 を変えて比較(ランク N は固定)

対称性の破れの大きさ

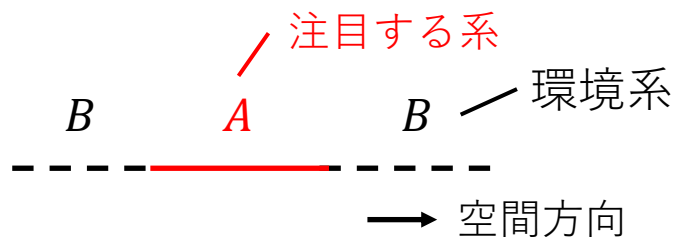


対称性が回復

研究内容②: 量子もつれと開放系の新奇現象(詳細ver)

研究成果の紹介

セッティング



部分系Aにおける $SU(N)$ 対称性の回復を見る。

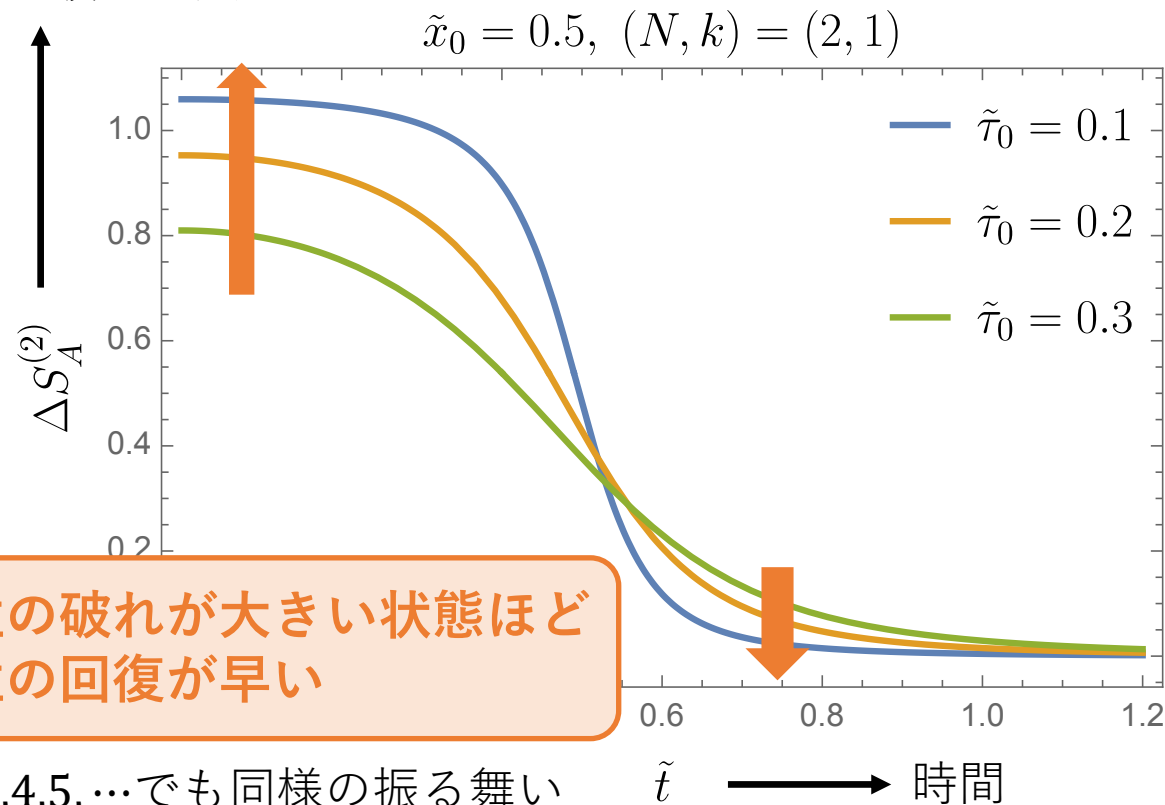
初期状態: $|\psi_{AB}(\tau_0, N)\rangle$

τ_0 : 初期状態の対称性の破れを変える
パラメーター

N : $SU(N)$ のランク

τ_0 を変えて比較(ランク N は固定)

対称性の破れの大きさ

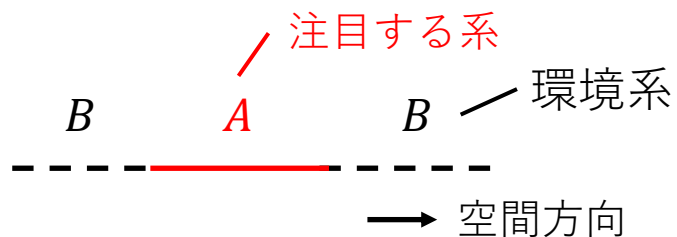


非可換対称性で量子Mpemba効果があることを解析的に示した。

研究内容②: 量子もつれと開放系の新奇現象(詳細ver)

研究成果の紹介

セッティング



部分系Aにおける $SU(N)$ 対称性の回復を見る。

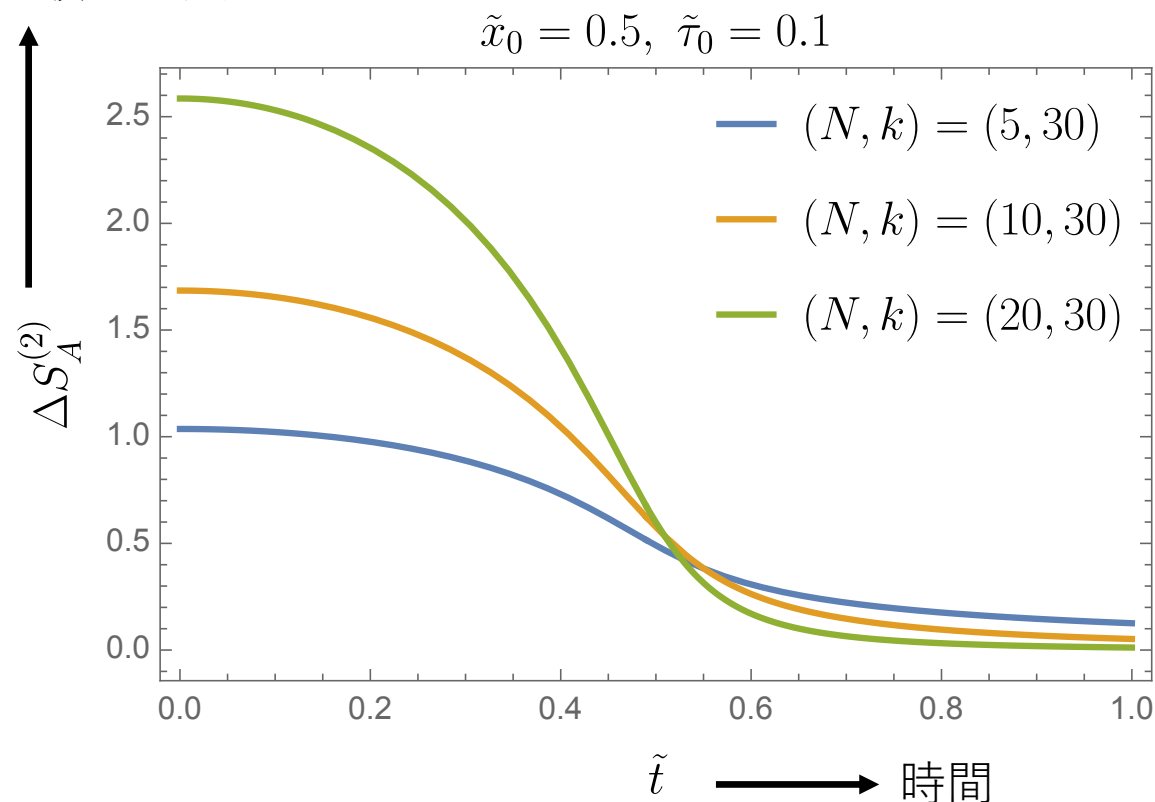
初期状態： $|\psi_{AB}(\tau_0, N)\rangle$

τ_0 ：初期状態の対称性の破れを変える
パラメーター

N ： $SU(N)$ のランク

ランク N を変えて比較(τ_0 は固定)

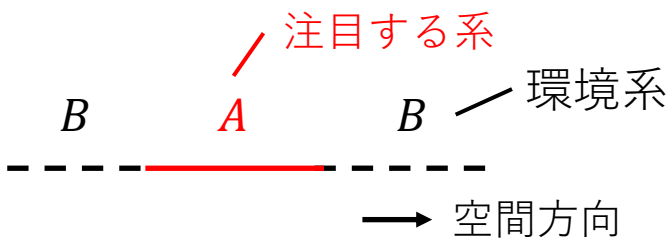
対称性の破れの大きさ



研究内容②: 量子もつれと開放系の新奇現象(詳細ver)

研究成果の紹介

セッティング



部分系Aにおける $SU(N)$ 対称性の回復を見る。

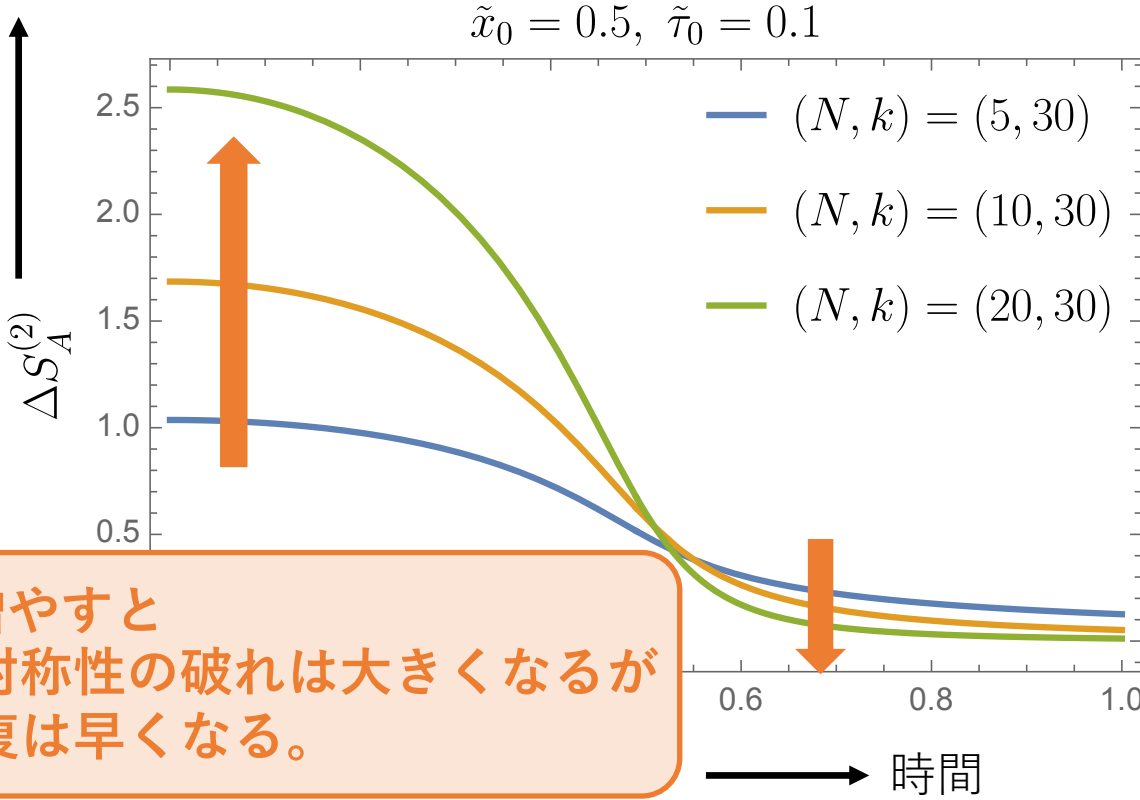
初期状態： $|\psi_{AB}(\tau_0, N)\rangle$

τ_0 ：初期状態の対称性の破れを変える
パラメーター

N ： $SU(N)$ のランク

ランク N を変えて比較(τ_0 は固定)

対称性の破れの大きさ



ランク N を増やすと
初期状態の対称性の破れは大きくなるが
対称性の回復は早くなる。

※このようなランク間の量子Mpemba効果はこれまで
見つかっていなかった。

異なる対称性の間にも量子Mpemba効果があることを示した。

研究内容③: 量子計算の場の量子論への応用(詳細ver)

研究の流れ

量子もつれは量子コンピューティングと基礎理論の両面で重要な概念。何か学際研究ができるのではないかな？

→同大学の**藤井啓祐先生に自らアポを取り相談しに行く**。共同研究の提案をする。

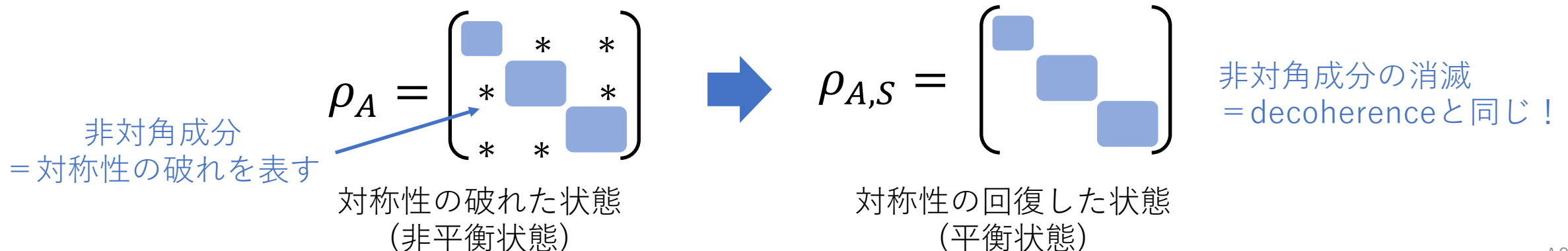
→**量子Mpemba効果の解析が量子計算のdecoherenceに似ていることに気づく**(下図)。

→藤井先生と共同で、量子Mpemba効果をシミュレーションする量子アルゴリズムを考案。

→従来では解析困難な量子系に応用。数値計算の技術的な課題に直面。

→量子系の数値計算の専門家である**本多正純先生に相談しに行く**。

→意見交換しているうちに共同研究へと発展。現在遂行中。



研究内容③: 量子計算の場の量子論への応用(詳細ver)

研究の流れ

量子もつれは量子コンピューティングと基礎理論の両面で重要な概念。何か学際研究ができるのではないかな？

→同大学の**藤井啓祐先生に自らアポを取り相談しに行く**。共同研究の提案をする。

→**量子Mpemba効果の解析が量子計算のdecoherenceに似ていることに気づく**(下図)。

→藤井先生と共同で、量子Mpemba効果をシミュレーションする量子アルゴリズムを考案。

→従来では解析困難な量子系に応用。数値計算の技術的な課題に直面。

→量子系の数値計算の専門家である**本多正純先生に相談しに行く**。

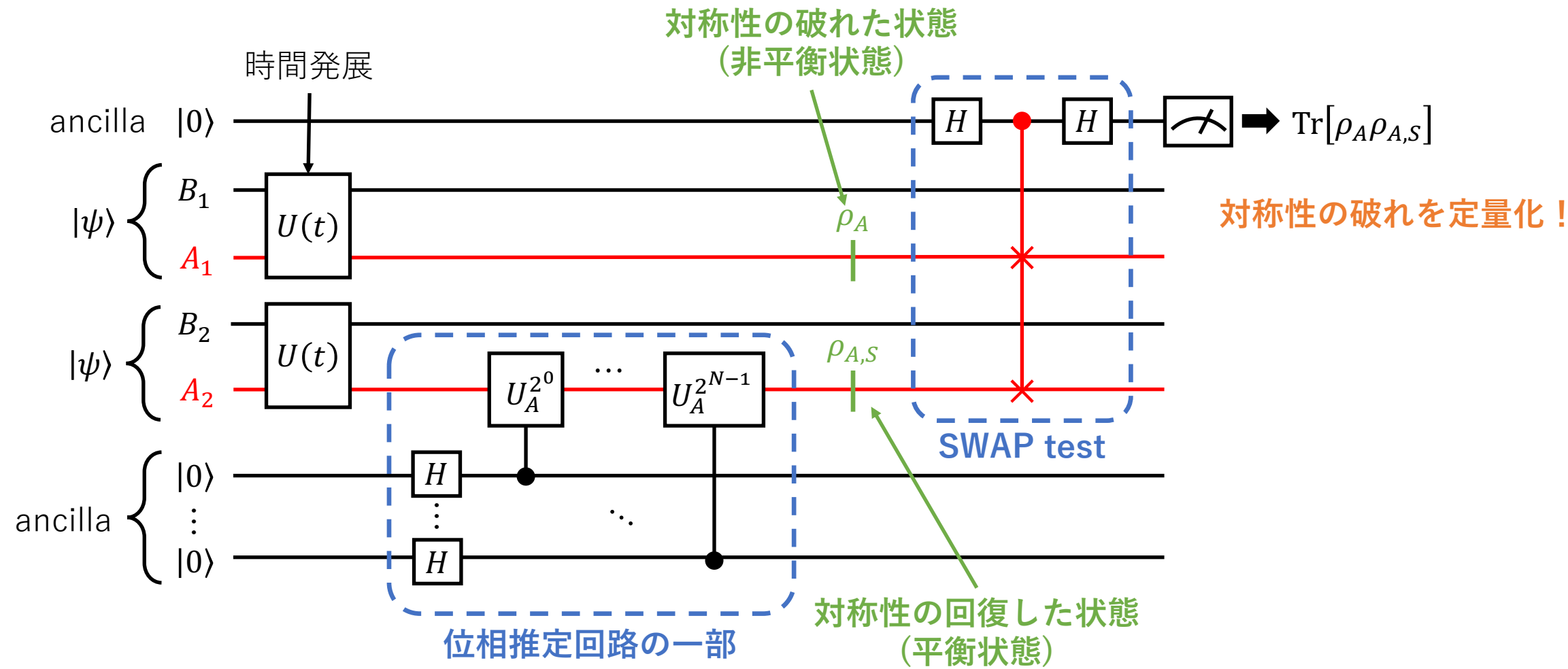
→意見交換しているうちに共同研究へと発展。現在遂行中。

**他分野の研究者である藤井啓祐先生と本多正純先生に、自ら共同研究を提案！
他分野にも介入できる視野を広さと周囲を巻き込む主体性を養いました！**

研究内容③: 量子計算の場の量子論への応用(詳細ver)

アイデア：位相推定は射影測定とみなせる→decoherenceに使える。

考案した量子回路の概要：



研究内容③: 量子計算の場の量子論への応用(詳細ver)

解析の手順:



現在取り組んでいること:

- ①: 場の量子論と量子多体系の対応関係(本多正純先生と共同)
- ②: 量子計算の実装方法。Trotter errorなどの評価。
(FTQC、NISQの両面で検討中です。)