



Grant-in-Aid for Transformative Research Areas (A)

Extreme Universe

# 計画研究 A01 成果ハイライト

氏名 森前智行

研究分担者:

中田 芳史 京都大学基礎物理学研究所・特定准教授

東 浩司 NTT物性科学基礎研究所・特別研究員

Francesco Buscemi 名古屋大学情報学研究科・教授

早川 龍 京都大学基礎物理学研究所・白眉特定助教

## 研究目標

# 理論物理学のための量子情報理論基礎

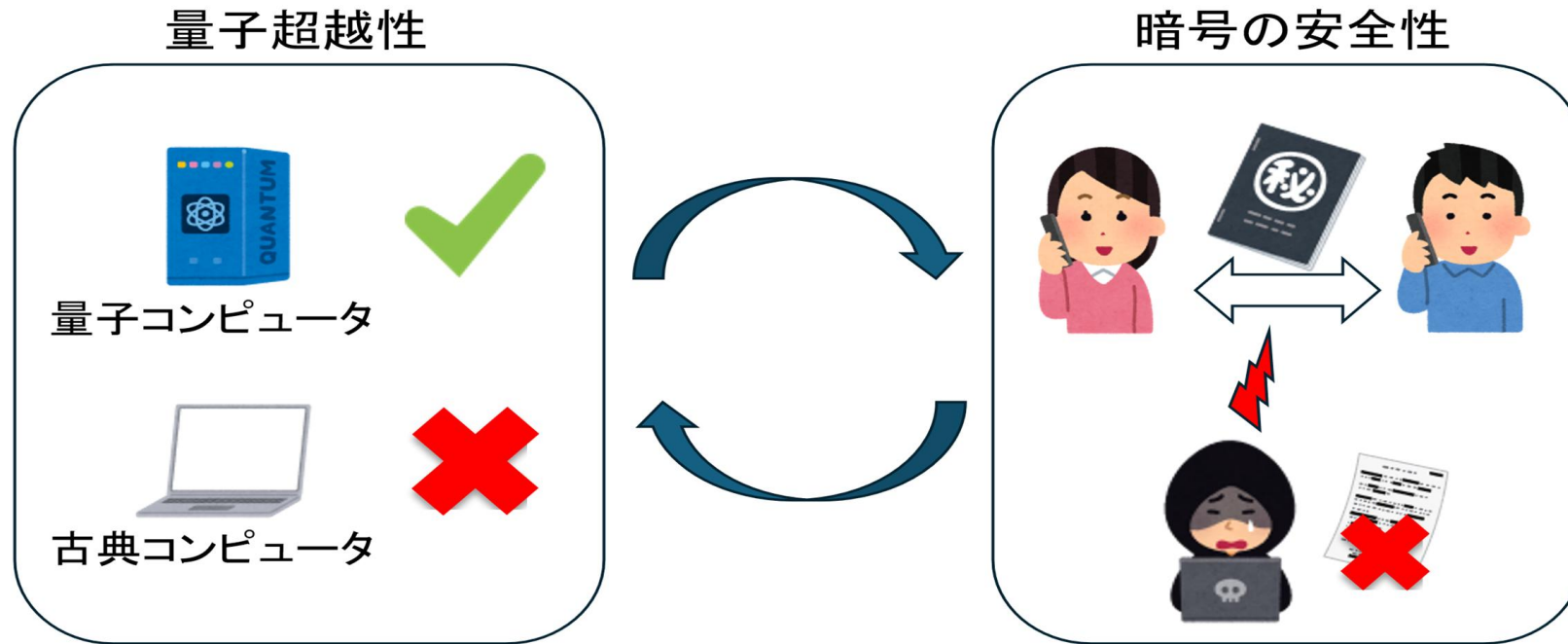
## 研究計画と研究成果のサマリー

極限宇宙の物理を理解する言語としての量子情報理論の研究を推進する。

- (1) 一方向性関数無しでの量子暗号の可能性の証明[暗号のトップ国際会議Cryptoで発表]
- (2) 量子超越性と量子暗号の存在の等価性[理論計算機科学のトップ国際会議STOCで発表]
- (3) 最小変化の原理から一貫した量子推論の規則を導出[物理学のトップ国際誌Physical Review Lettersに掲載され、シンガポール国立大学により2025年のBreakthrough of the Yearの一つに選出]
- (4) トポロジカルデータ解析における量子優位性を証明
- (5) ベリー位相を推定する問題における計算複雑性の解明および量子優位性の証明
- (6) 量子情報理論を用いたブラックホール情報問題の理解深化[分野融合会議での招待講演多数]

# 量子超越性と量子暗号の存在の等価性の証明

Morimae, Yamakawa,  
and Shirakawa,  
STOC2025



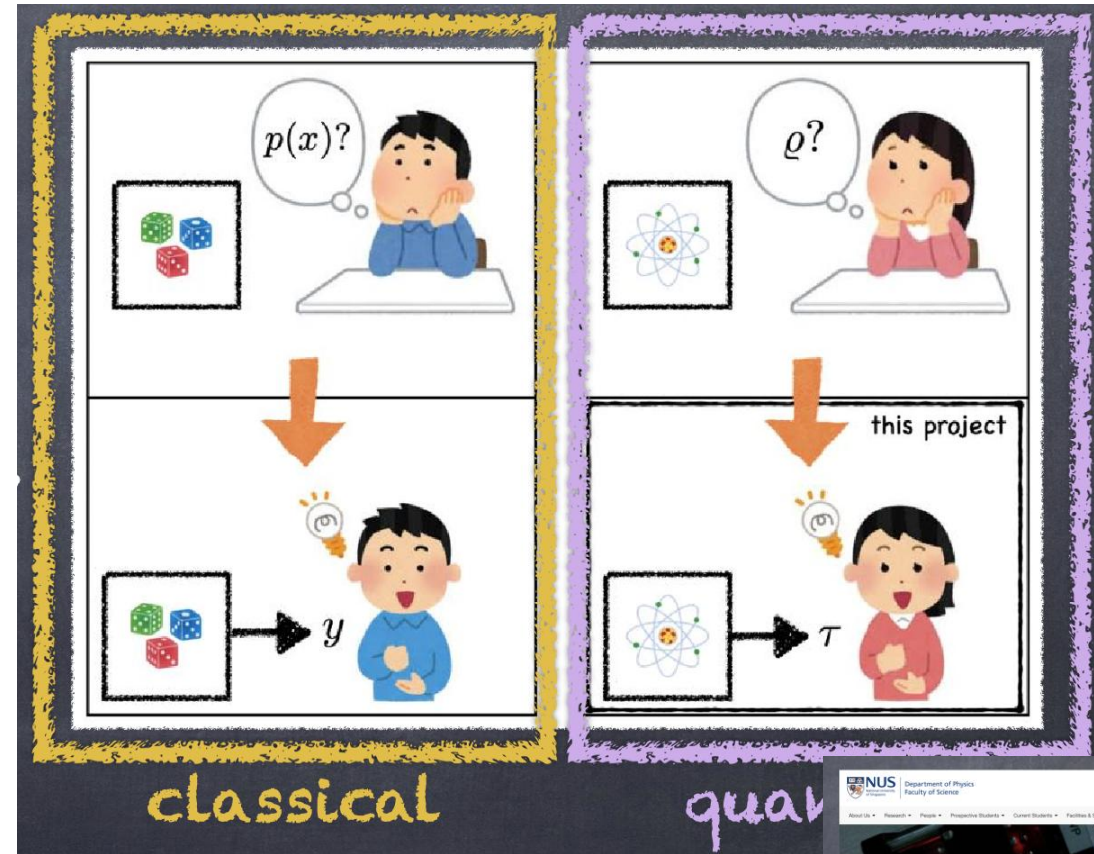
重要な帰結：もし量子超越性がなければ、暗号は存在しない（古典暗号も！！）

# Rule for Bayesian quantum inference

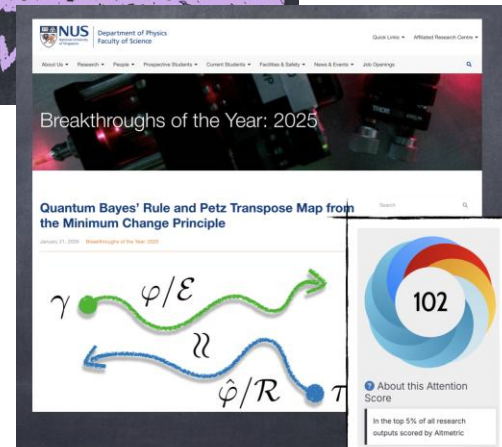
全く異なる理論を統一する学習原理としての  
量子推論の再定式化

重要な帰結：量子の世界においても、合理的  
な信念更新の普遍原理が存在する（将来の量  
子技術・AI・科学的推論の基盤に！！）

ベイズ則に対応する量子版の学習ルールを導  
出し、観測による攪乱や非可換性の下でも一  
貫した推論が可能であることを示した



Bai, Buscemi, Scarani;  
Physical Review  
Letters 2025



# トポロジカルデータ解析における量子優位性



高次のトポロジー  
を解析



トポロジカルデータ解析(TDA):

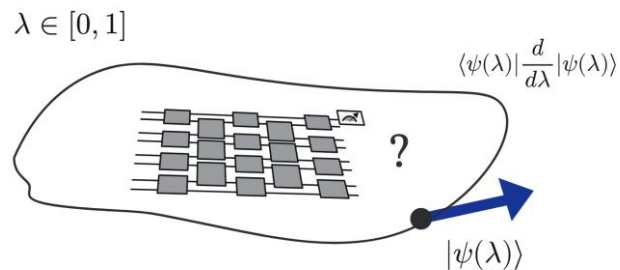
量子計算の有望な応用の一つ

TDAにおける、計算量的仮定に基づく  
量子優位性の初めての証明

C. Gyurik, A. Schmidhuber, R. King, V. Dunjko, and R. Hayakawa  
arXiv:2410.21258, Highlighted talk in QTML2025



幾何学的位相  
(ベリー位相)  
の推定



ベリー位相：トポロジカル物質を特徴づける重要な量

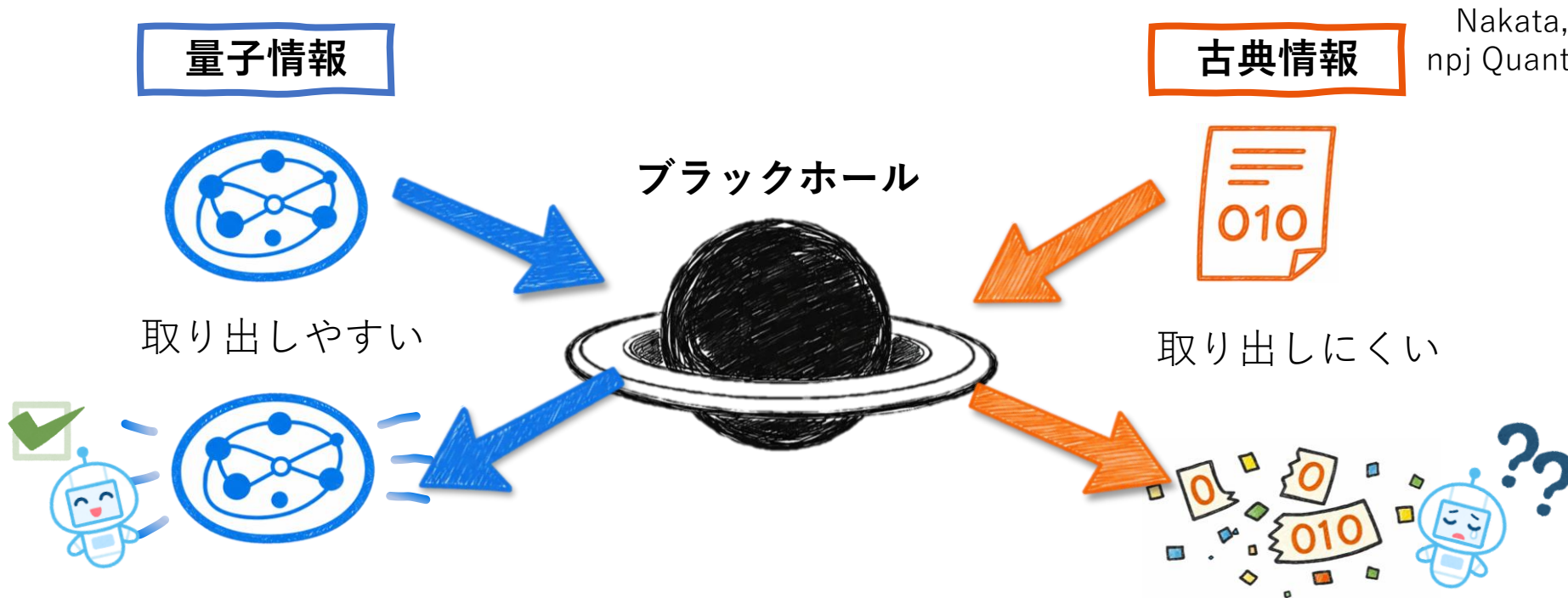
ベリー位相の推定問題における  
量子優位性の初めての証明

R. Hayakawa, K. Sakamoto, and C. Kiumi, arXiv:2509.13423

# ブラックホールの情報喪失問題：量子 vs 古典

ホーキング放射からブラックホール内部の量子情報を復元できる？古典情報を復元できる？

→ 量子情報はうまくスクランブルされることで復元可能だが、  
古典情報はスクランブルされすぎてしまい、復元が困難になる。



Nakata, Matsuura, Koashi,  
npj Quantum Information 2025

また、ブラックホールがエネルギーなどの保存量を持つ場合は、情報復元に遅延が生じる。

Nakata, Wakakuwa, Koashi, Quantum 2023



Grant-in-Aid for Transformative Research Areas (A)

Extreme Universe

# 計画研究 B01 成果ハイライト

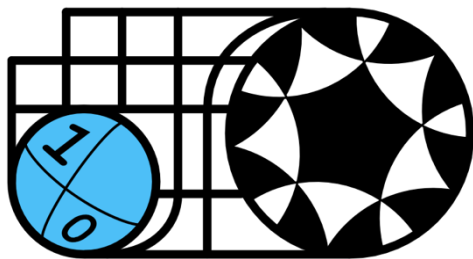
飯塚 則裕  
(国立清華大/京大基研)

研究分担者: 宇賀神知紀 (立教大)

重森正樹 (名大)

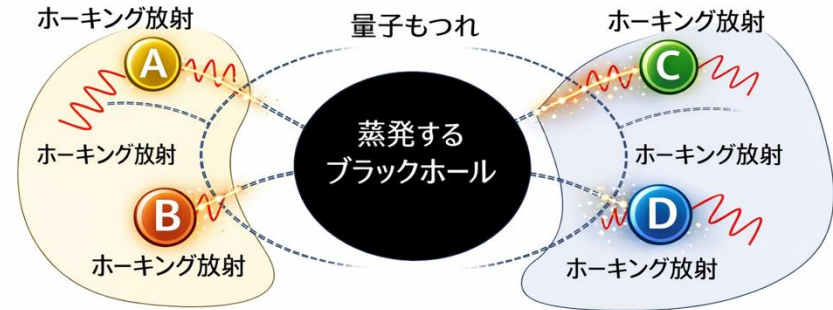
寺嶋靖治 (京大基研)

野海俊文 (東大駒場)



# 研究目標

「量子情報とゲージ重力対応を用いて、ブラックホール内部と情報問題の解明に迫る」



ブラックホールと多体量子もつれ

# 研究計画と研究成果のサマリー

ブラックホール情報問題の解明に向けて、量子情報・多体もつれ・ゲージ重力対応の新しい視点を構築

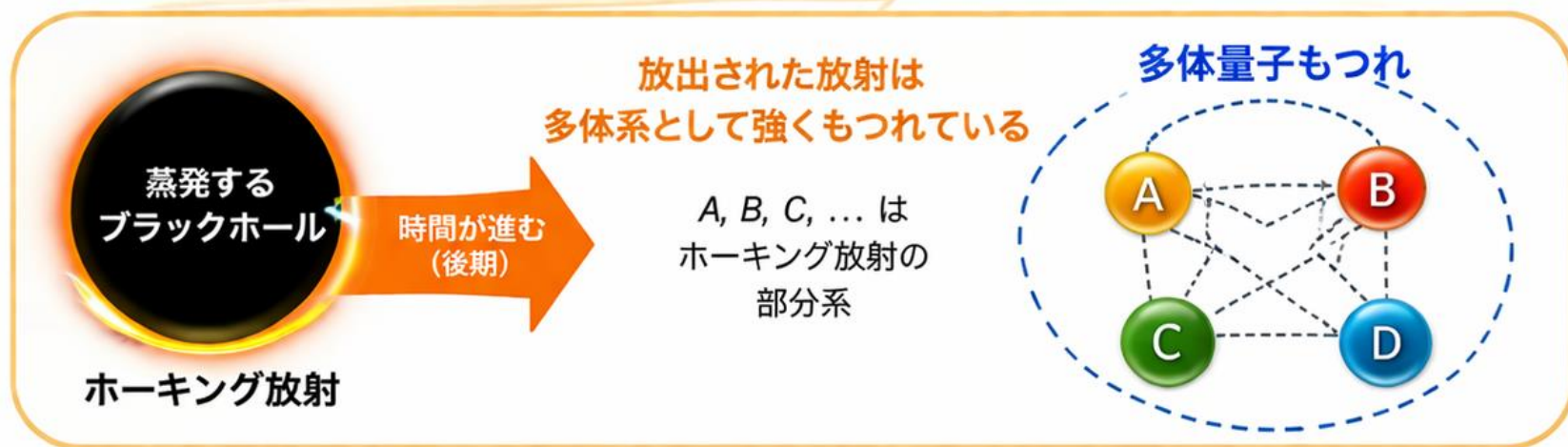
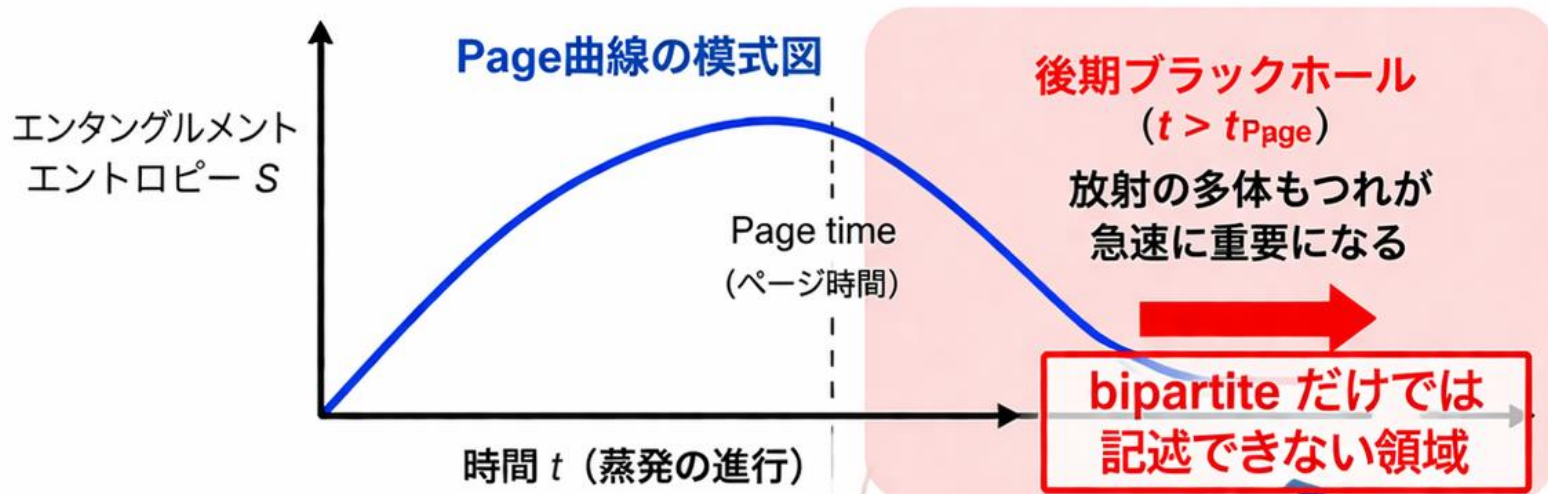
[1] 研究成果1: 任意のq体のgenuineな多体量子もつれを測る指標を構成 →ブラックホール蒸発では、bipartite だけでは不十分 →多体もつれはjunction近傍に局在する

[2] 研究成果2: ブラックホールに対する多角的アプローチ →スクランブル、情報回復、厳密解、対称性

# 研究成果1: Genuine multi-entropy の構成

- 任意の  $q$ -partite genuinely multipartite entanglement を測る指標を構成
  - \* lower-partite な寄与と genuinely multipartite な寄与を分離
  - \* 一般の  $q$ -partite ( $q=3, 4, 5, \dots$ )系に適用可能
  - \* ブラックホール蒸発やゲージ重力対応で、多体効果がいつどこで重要になるかを明らかにした
- 重要な帰結: ブラックホール蒸発やゲージ重力対応では、bipartite だけでは不十分な領域が現れる

# 後期ブラックホールでは 多体もつれ効果が無視できない



ブラックホール蒸発の後期では、多体量子もつれが本質的に重要になる

# 研究成果2: ブラックホールに対する 多角的アプローチ

- 宇賀神知紀: スクランブルした量子系では情報回復写像が著しく単純化することを示した

[arXiv:2310.18991] PTEP 2023 (2023) 123B04

- 重森正樹: 超弦理論におけるブラックホールの微視的状态の解明に向け、マイクロ時空の新たな厳密解を構成

[arXiv:2212.13388] JHEP 02 (2023) 099

# 研究成果2: ブラックホールに対する 多角的アプローチ

- 寺嶋靖治: AdS/BCFT対応における境界ダイナミクスを解析し、整合的な制約を明らかにした  
[arXiv:2205.10600] JHEP 09 (2022) 103
- 野海俊文: ブラックホール蒸発におけるPage曲線を、対称性の効果を取り入れて解析した  
[arXiv:2206.09633] JHEP 10 (2022) 015



Grant-in-Aid for Transformative Research Areas (A)

Extreme Universe

# 計画研究 B02 成果ハイライト

## 手塚真樹(京大理)

研究分担者: 中島秀太 (阪大QIQB)

上西慧理子 (慶大KQCC)

森貴司 (慶大理工)

山本大輔 (日大文理)

## 研究目標

制御性の高い人工量子物質である冷却原子系を用い、その非平衡ダイナミクスを実験室で解明 → ゲージ重力対応により、重力を含まない量子多体系の研究からブラックホールの本質に迫る

(I) 量子多体系における散逸の効果の理解 (II) 量子多体系におけるスクランブリングの理解

## 研究計画と研究成果のサマリー

冷却リチウム原子光格子系の構築 & 理論研究

- (I) 測定誘起量子相転移の観測を目指し、量子状態トモグラフィー法の開発, 開放量子多体系の理論構築
- (II) 非時間順序相関関数(OTOC)の測定に向けたハミルトニアン・エンジニアリング、スピン鎖と空間2次元の重力系の対応(with B03), SYK模型の簡略版の開拓, スクランブリングの定量的評価(with A01)

# 理論成果① 量子状態トモグラフィー

“Measuring Entanglement Without Local Addressing in Quantum Many-Body Simulators via Spiral Quantum State Tomography”

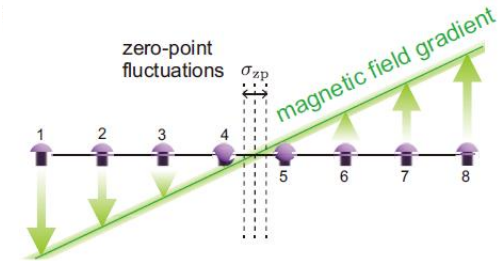
Giacomo Marmorini (B02 ExU-PD), Takeshi Fukuhara (理研&早大; ExUスクール講師), and Daisuke Yamamoto (B02 Co-I)  
PRX Quantum 7, 010355 (18 Mar 2026) (arXiv:2411.16603)

光格子系の quantum-gas microscope (QGM): 粒子の占有数を単一サイトレベルで観測可能

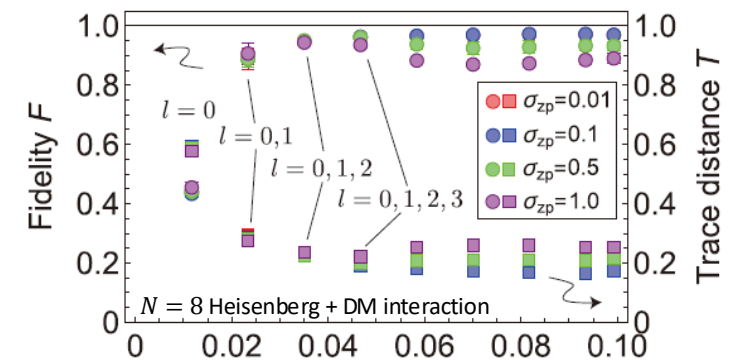
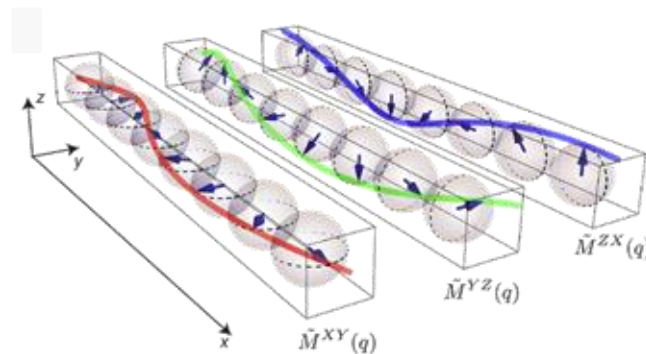
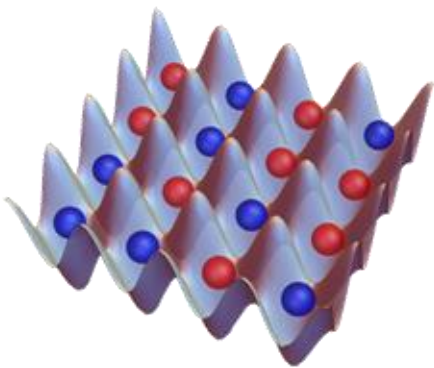
スピン  $1/2$  系: 片方のスピン成分を排除してから QGM 測定可能  $\rightarrow$  多数のショットの平均として  $n$  点相関

$\Leftrightarrow d = 2^N$  次元の密度行列全体を知るには  $4^N$  個の期待値が必要、量子化軸がサイト依存(困難)

- スパイラルな量子化軸回転(磁場勾配+大域的パルス)で測定
- 圧縮センシング(低ランクを仮定)により補完
- 縮約密度行列( $\rightarrow$  エンタングルメントエントロピー)の直接復元も可能



reps=500



実施する測定の比率  $m/d^2$

# 理論成果② 開放量子多体系: 緩和の遅れと散逸の加速

Tatsuhiko Shirai and Takashi Mori, Phys. Rev. Lett. **133**, 040201 (2024)

Takashi Mori, Phys. Rev. B **109**, 064311 (2024)

- リンドブラディアンによる量子開放系の記述:  
固有値  $0 = \lambda_0 > \text{Re } \lambda_1 \geq \dots$

- 最小の減衰率  $g = |\text{Re } \lambda_1|$ : リウビリアンギャップ

- バルク散逸系: 演算子の成長で散逸は加速

- 局所保存量があると緩和は遅延  $\tau_{\text{rel}} \gg 1/g$

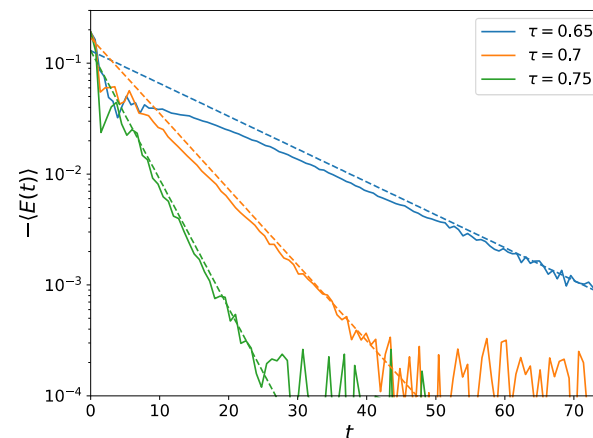
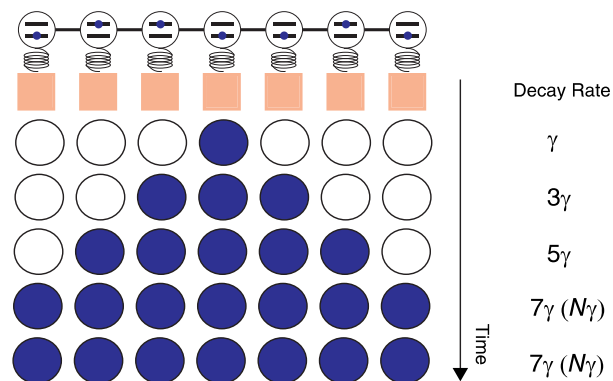
- 左右の固有ベクトルがマクロに乖離 [Mori and Shirai, PRL 2020]

- $\bar{g} := \lim_{\gamma \rightarrow +0} \lim_{L \rightarrow \infty} g \neq \lim_{L \rightarrow \infty} \lim_{\gamma \rightarrow +0} g = 0$

- 散逸のない ( $\gamma = 0$ ) 孤立系の熱平衡化と関係

- ユニタリ時間発展の隠れた指数減衰を記述

- 古典カオス系のルエル-ポリコット共鳴の量子対応



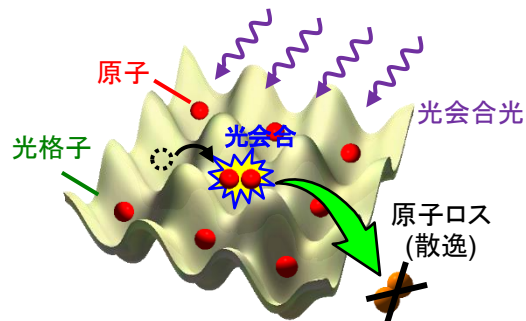
# 実験成果① 冷却Li原子光格子系の構築

B02班「人工量子物質」による量子ブラックホールの解明」

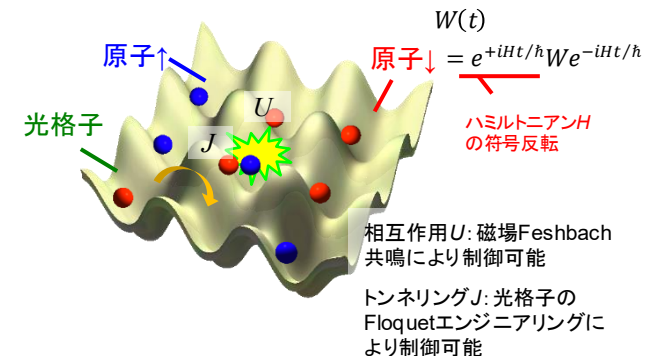
高い制御性を持つ「冷却原子系」を用いて

- ✓ 測定誘起相転移
- ✓ 非時間順序相関関数 (OTOC) の観測・測定を目指す

測定誘起相転移

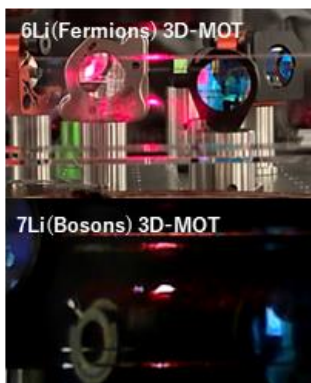


非時間順序相関関数 (OTOC) の測定



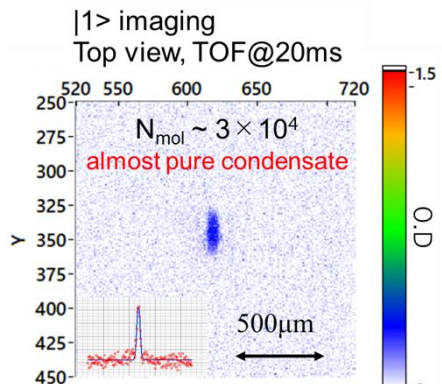
成果①冷却リチウム(Li)原子光格子系の構築(2021年度-2023年度)

✓  $^6\text{Li}$ 原子/ $^7\text{Li}$ 原子のレーザー冷却

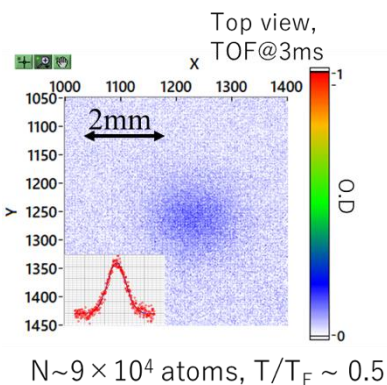


✓ 量子縮退領域までの冷却

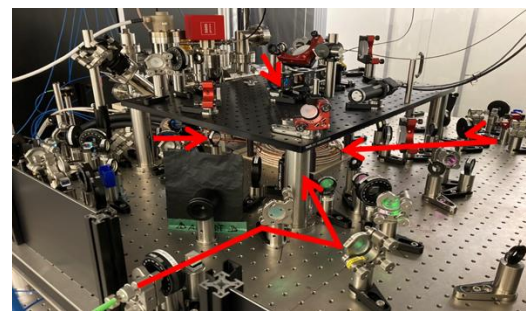
$^6\text{Li}_2$ 分子BEC



$^6\text{Li}$  Fermi縮退 (cross-FORT中での蒸発冷却)



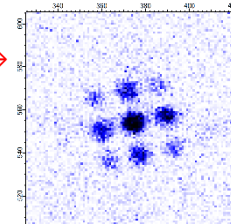
✓ 1.5  $\mu\text{m}$ 二次元光格子系の構築



1560 nm 光格子,  $2w_0=200 \mu\text{m}$ ,  $U_{\text{max}} \sim 35 E_{\text{r,Lat}}$

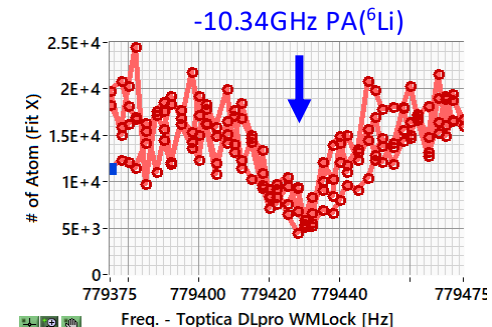
Pulsed lattice による原子波回折 → ( $^6\text{Li}$  Fermi縮退気体)

TOF@1.2ms  
Pulse length@2.5  $\mu\text{s}$



測定誘起相転移に向けて

✓ 光会合 (PA) による原子ロスの観測



# 実験成果② OTOC測定に向けたハミルトニアン・エンジニアリング

成果②実験系の再構築とOTOC測定にむけたHubbardハミルトニアン・エンジニアリング (2024年度-2025年度)

光格子中の冷却原子系 (Fermi-Hubbard 模型)

$$H = -t \sum_{\langle ij \rangle} c_i^\dagger c_j + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow} + V \sum_i r_i^2 n_i$$

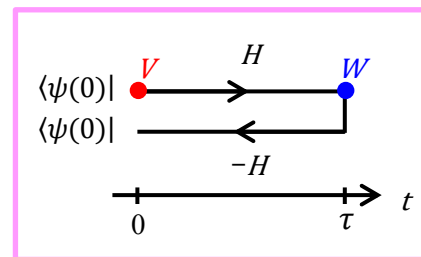
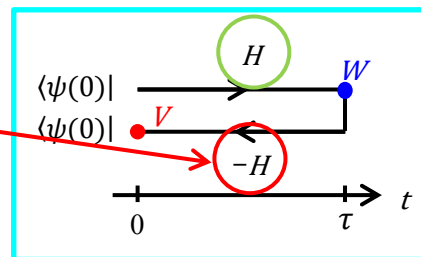
$-H$     $-t$     $-U$

Hubbard模型は  
OTOC測定のための  
ハミルトニアン  
の符号反転ができる系  
B. Swingle *et al.*, PRA  
94, 040302 (2016)

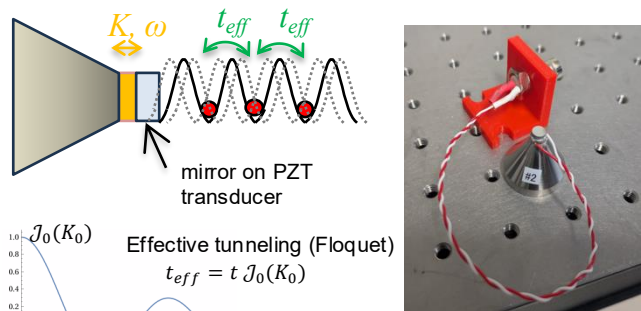
非時間順序相関関数 (Out-of-Time-Ordered correlator, OTOC)

$$C(\tau) = \langle W^\dagger(\tau) V^\dagger(0) W(\tau) V(0) \rangle$$

$W, V$ : operation  
 $W(t) = e^{iHt} W e^{-iHt}$

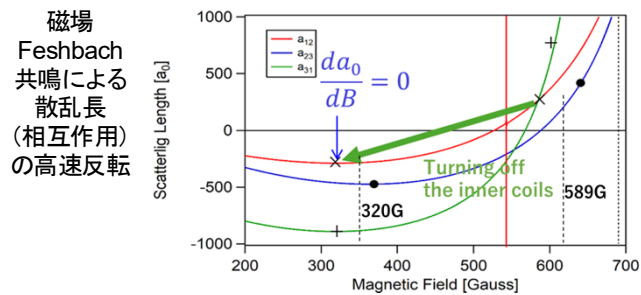


## ① トンネリング項の反転

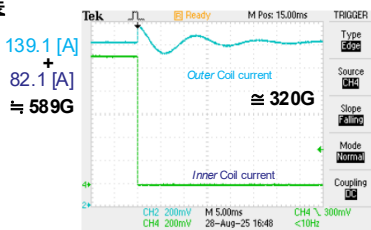
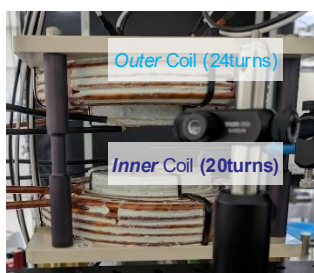


← Michelson干渉計により  
ミラーの機械的応答を測定  
⇒ 振幅応答の変動は  
< 50 kHz で2%以下、  
位相遅れは $-\pi/9$  rad以下  
→ OK

## ② 相互作用項の反転



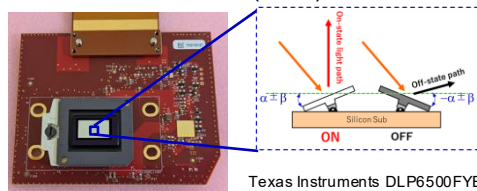
### 二重Helmholtzコイルによる実装



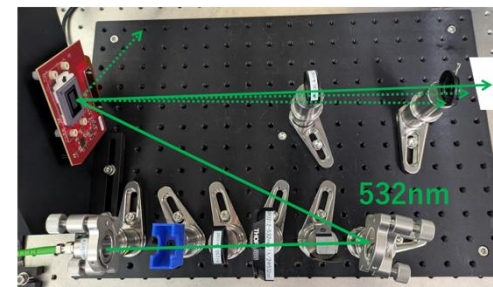
バイアス磁場に対応して $|1\rangle, |2\rangle$ 間  
散乱長  $a_{12}$ は+290  $a_0$ から-290  $a_0$ に変化

## ③ 閉じ込めポテンシャルの反転

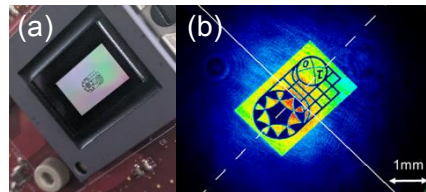
### デジタルミラーデバイス(DMD)



### DMD-SLMでの任意形状ビーム生成テスト系



### (a) DMDパターン. (b) その実空間結像.



← Fourier面での  
ビームプロファイル例  
("こんにちは")を生成  
Vの反転を含む  
任意の光ポテン  
シャルの生成が  
可能に



Grant-in-Aid for Transformative Research Areas (A)

Extreme Universe

# 計画研究 B03 成果ハイライト

## 石橋 明浩（名古屋大理）

研究分担者: 前田健吾（芝浦工大）  
村田佳樹（日本大文理）

## 研究目標

「量子情報を用いて量子ブラックホールの数理を解明する」

## 研究計画と研究成果のサマリー

1. 量子エネルギー条件と因果的境界のダイナミクス  
ホログラフィー原理からの半古典アインシュタイン方程式
2. 量子ブラックホールと観測可能量  
スピンモデルと曲がった時空の場の理論の対応

# ハイライト1: ホログラフィー原理からの半古典アインシュタイン方程式

A. Ishibashi, K. Maeda, T. Okamura

2512.00503 [hep-th], JHEP 04 (2025) 167,

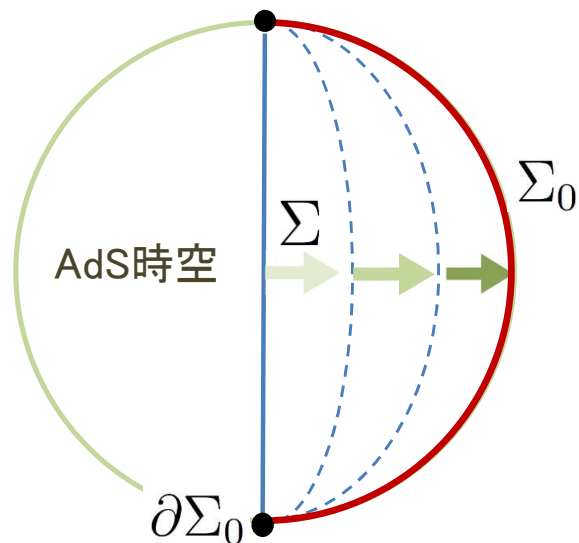
JHEP 02 (2024) 146, JHEP 05 (2023) 212

量子場の時空ダイナミクスへの効果：半古典アインシュタイン方程式



一般に量子場のエネルギー・運動量テンソルの期待値  $\langle T^{\mu\nu} \rangle$  の計算に困難

➡ ならば、ホログラフィー原理（ゲージ重力対応）を利用すれば…



しかし、今度は境界上の計量  $g_{\mu\nu}$  が固定され非ダイナミックな量に！

$$\mathcal{S}_{\text{eff}} = \frac{1}{16\pi G_d} \int_{\Sigma_0} \sqrt{-\mathcal{G}} (\mathcal{R} - 2\Lambda_d)$$

そこで、自己作用と境界条件の変更により境界の計量  $\mathcal{G}_{\mu\nu}$  をダイナミカルな力学変数へ昇華

$$+ \frac{1}{16\pi G_{d+1}} \int_M \sqrt{-G} (R[G] - 2\Lambda_{d+1}) + S_{\text{GH}} + S_{\text{ct}}$$

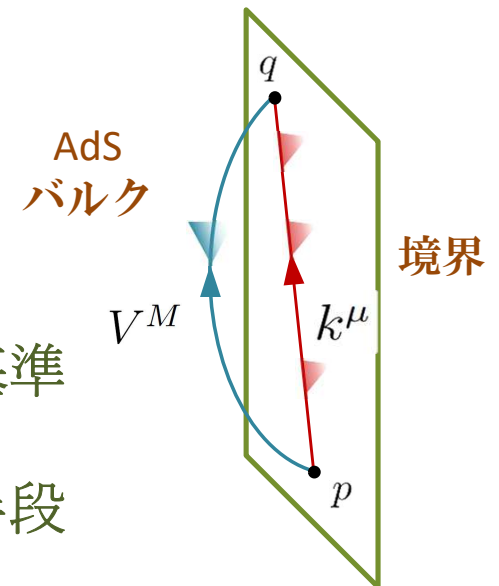


$$\mathcal{R}^{\mu\nu} - \frac{\mathcal{R}}{2} \mathcal{G}^{\mu\nu} + \Lambda_d \mathcal{G}^{\mu\nu} = 8\pi G_d \langle \mathcal{T}^{\mu\nu} \rangle$$

ホログラフィックな半古典アインシュタイン方程式

$$\gamma_d := \frac{G_d L}{\pi G_{d+1}} \left( \frac{L}{\ell} \right)^{d-2}$$

量子場の強さを時空幾何で記述



量子場の強さに応じた境界時空の安定性の新しい判定基準

重力と整合する量子エネルギー条件を構築する新しい手段

## ハイライト2: スピン模型と曲がった時空の場の理論の対応

S.Kinoshita, K.Murata, D.Yamamoto and R.Yoshii  
arXiv: 2602.17935, Phys. Rev. Res. 7 (2025) 043135,  
Phys. Rev. Res. 7 (2025) 023197

場の理論とスピン系を比べてみよう！？

場の量子論 (マヨラナ・フェルミオン)

$$H = - \int_{-\pi\ell}^{\pi\ell} dx \left[ \frac{\alpha}{2\gamma} (\Psi^\dagger \partial_x \Psi^\dagger - \Psi \partial_x \Psi) + \frac{i\beta}{2} (\Psi^\dagger \partial_x \Psi + \Psi \partial_x \Psi^\dagger) + m\alpha \Psi^\dagger \Psi \right].$$

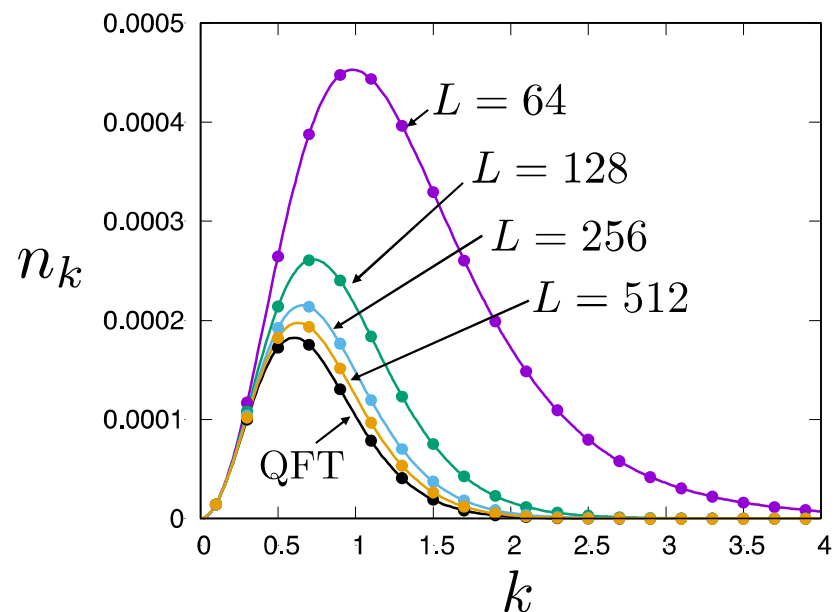
スピン系の連続極限

$$H = - \int_{-\pi\ell}^{\pi\ell} dx \left[ \frac{v(t, x)}{2} (\Psi^\dagger \partial_x \Psi^\dagger - \Psi \partial_x \Psi) + \frac{iw(t, x)}{2} (\Psi^\dagger \partial_x \Psi^\dagger + \Psi \partial_x \Psi) \right. \\ \left. + \frac{i}{2} \rho(t, x) \{ \Psi^\dagger \partial_x \Psi + \Psi \partial_x \Psi^\dagger \} + \left\{ \mu(t, x) - \frac{1}{2} \partial_x \lambda(t, x) \right\} \Psi^\dagger \Psi \right]$$

異なる理論のあいだの“対応”！

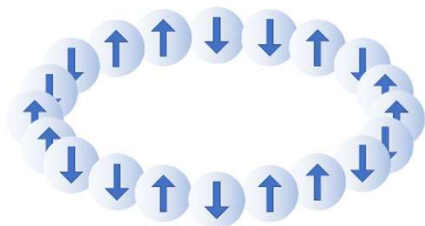
スピン系はある種の重力理論と見なせる！

1次元イジング模型の連続極限と2次元の曲がった時空の場の量子論



具体例：膨張宇宙における場の量子論  
(マヨラナフェルミオン) と時間依存する磁場におけるイジング模型の対応

重力場中における場の量子現象を観測する新しい手段！

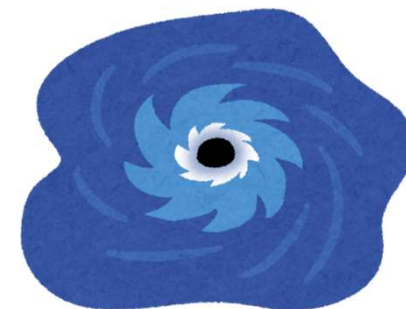


イジング模型



膨張宇宙

or



ブラックホール

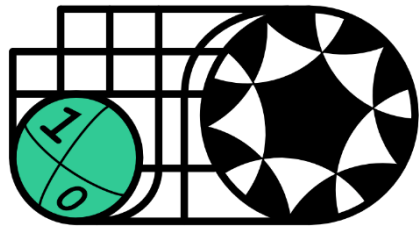


Grant-in-Aid for Transformative Research Areas (A)

Extreme Universe

# 計画研究 C01 成果ハイライト

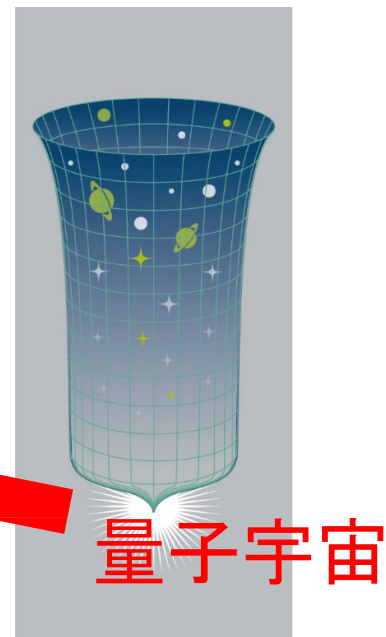
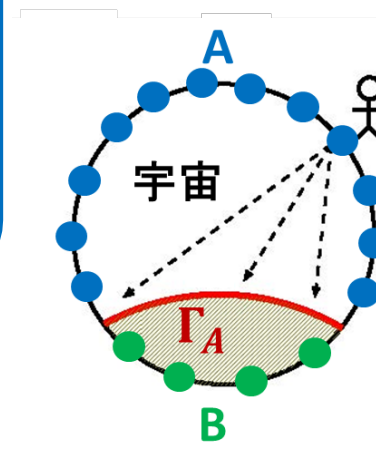
高柳 匡（京大基研）



研究分担者： 奥山 和美（信州大理）  
杉本 茂樹（京大理）  
関野 恭弘（拓殖大工）  
疋田 泰章（大阪工業大）

## 研究目標

「ホログラフィー原理と量子情報を用いて、量子宇宙を解明する」



## 研究計画と研究成果のサマリー

- 1 量子情報から反ドジッター宇宙のゲージ重力対応を解明  
→「時間的な量子エンタングルメント」の導入と時間軸の創発の解明
- 2 量子情報から一般の宇宙に対するホログラフィー原理を構築  
→「3次元ドジッターのホログラフィー原理」の具体例の発見

# ハイライト1: 時間的エンタングルメントと時間軸創発

K. Doi, J. Harper, A. Mollabashi, T. Takayanagi and Y. Taki, PRL 130 (2023) 3,031601 [引用150回超]

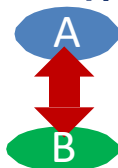
JHEP 05 (2023) 052 [引用120回超]

## 素朴な発想



空間的に離れた2つの系の量子相関→量子エンタングルメントであるが、

時間的に離れた2つの系の量子相関→「時間的量子エンタングルメント」も導入してみよう。



～因果関係の強さ

## ホログラフィー原理からの動機

エンタングルメント・エントロピー＝宇宙の空間的曲面の面積

→反ドジッター宇宙の空間座標が量子エンタングルメントから創発するが、時間座標はどのように量子情報から創発するのか？

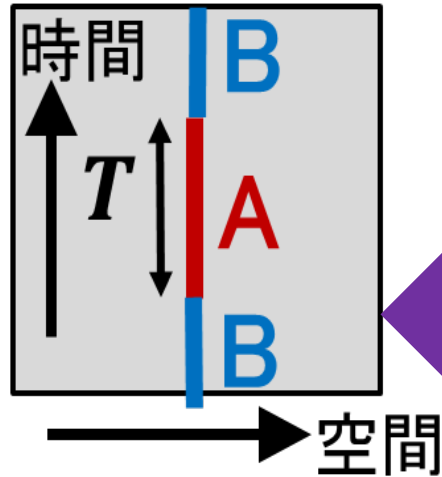
時間的エンタングルメント・エントロピー＝宇宙の時間的曲面の面積？

# 2次元共形場理論の時間的エンタングルメントとゲージ重力対応

2次元共形場理論における  
時間的エンタングルメント・エントロピー

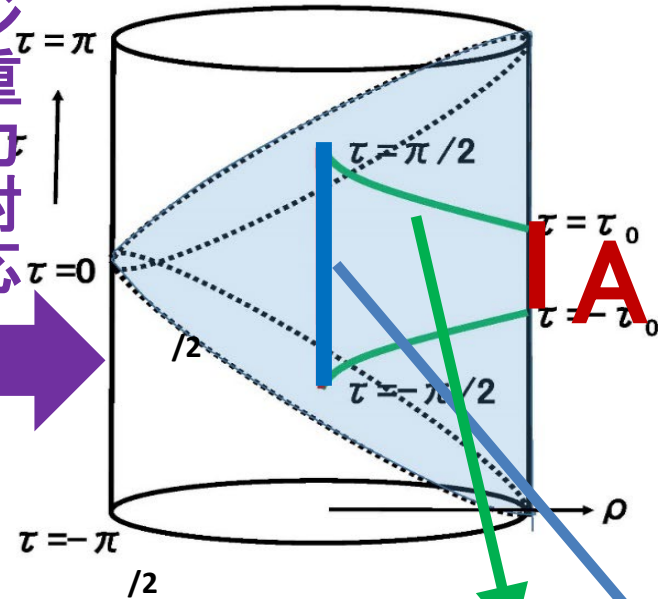
部分系を時間的にウィック回転。  
非エルミートに密度行列を一般化。

$$\rho_A^\dagger \neq \rho_A \Leftrightarrow \text{因果関係}$$

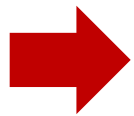


ゲージ重力対応

3次元反ドジッター宇宙  
の大域的座標における測地線



$$S_A = \frac{C}{3} \log \left[ \frac{T}{\varepsilon} \right] + \frac{\pi}{6} iC = [\text{空間的測地線の長さ}] + i \times [\text{時間的測地線の長さ}].$$



時間的エンタングルメント・エントロピーの虚数部分から反ドジッター宇宙の時間軸が創発する！

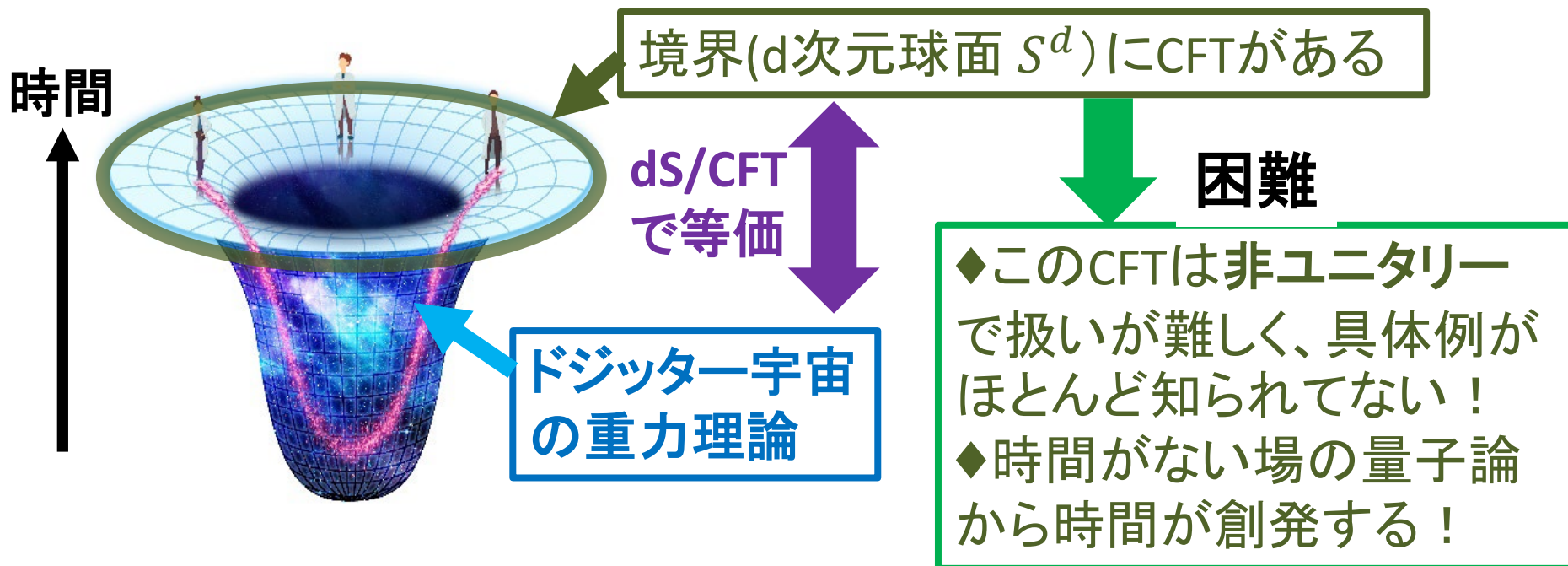
# ハイライト2: 三次元ドジッター宇宙のホログラフィー原理

Y. Hikida, T. Nishioka, T. Takayanagi and Y. Taki,

PRL 129 (2022)4,041601 [Editor's suggestion, Viewpoint in APS magazine "Physics"]

JHEP 05 (2022)129

## ドジッター宇宙のホログラフィー原理(dS/CFT対応)の困難



初めて、3次元dS宇宙に対応する2次元CFTの具体例を構成！  
ドジッター宇宙の時間軸は、時間的エンタングルメントより創発。

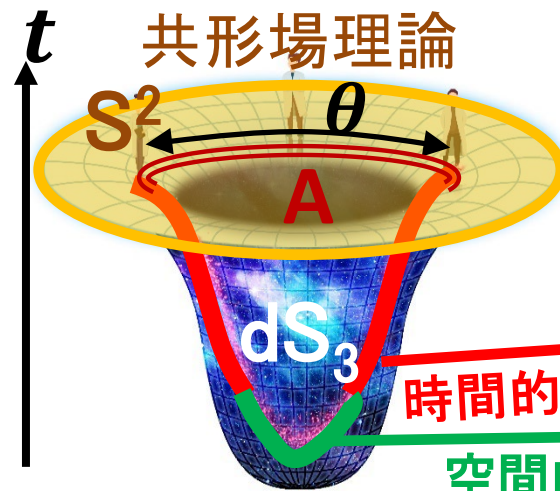
# 3次元ドジッター宇宙と等価になるCFTの具体例

◆対応するCFTは非ユニタリーで、SU(2)カレント代数のlevel  $k \approx -2 + \frac{4iG_N}{L_{ds}}$ .

→中心電荷は  $c = \frac{3k}{k+2} \approx i \frac{3L_{ds}}{2G_N}$ .

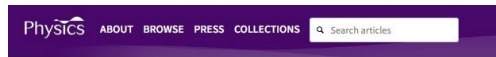
となりドジッター宇宙の分配関数と一致:

$$Z_{CFT} \approx e^{\frac{\pi L_{ds}}{2G_N} \sqrt{1-8G_N E}} = Z_{ds}$$



非ユニタリー性により  
エントロピーに虚数成分  
が現れ、時間が創発する！

$$S_A = i \frac{C_{ds}}{3} \log \left( \frac{2}{\epsilon} \sin \frac{\theta}{2} \right) + \frac{C_{ds}}{6} \pi.$$



VIEWPOINT  
Steps toward Quantum Gravity in a Realistic Cosmos  
Jordan Cotler  
Society of Fellows, Harvard University, Cambridge, MA, USA  
July 18, 2022 • Physics 15, 107  
Theorists have modeled an expanding spacetime—akin to our Universe—by taking inspiration from string theory framework in which spacetime is emergent.



[米国物理学会の雑誌PhysicsのViewpointに掲載(2022年7月)]

◆擬エントロピーからの摂動的アインシュタイン方程式の導出にも最近成功  
→K.Fujiki, M.Kohara, K.Shinmyo, Y.k.Suzuki and T.Takayanagi, JHEPに掲載予定

◆Double Scaled SYK模型を用いたdS/CFTへのアプローチでも重要な成果

[Okuyama JHEP 08 (2025) 181]

[Sekino-Susskind JHEP 10 (2025) 137,

Miyashita-Sekino-Susskind JHEP 11 (2025) 107]

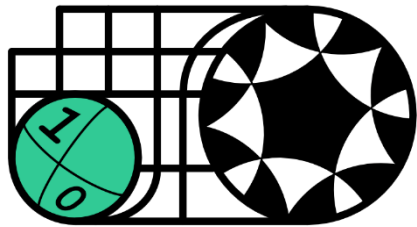


Grant-in-Aid for Transformative Research Areas (A)

Extreme Universe

# 計画研究 C02 成果ハイライト

## Go Yusa (Tohoku)

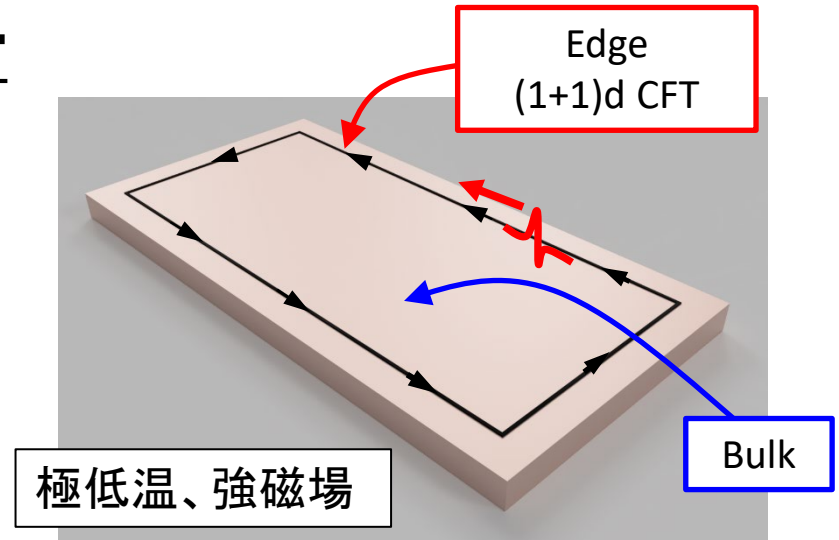


CoIs: Masahiro Hotta (Tohoku)  
Naokazu Shibata (Tohoku)  
Kazuya (Tohoku)

# 研究目標と成果のサマリー

## 研究目標

「実験と理論を通して量子宇宙のトイモデルを量子ホール系に実現する」



## 研究計画と成果

[1] 高度な量子測定技術を含む実験技術を確立して、量子ホールエッジの実験を行う。

→バルク励起を含むエッジ励起のダイナミクスの解明

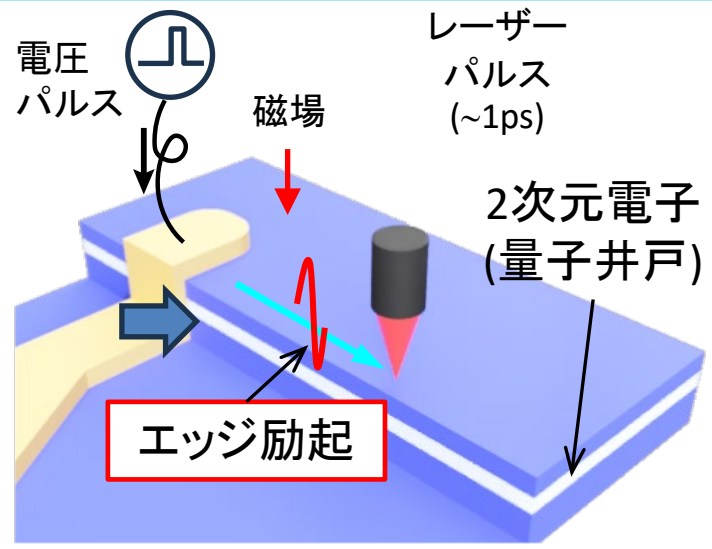
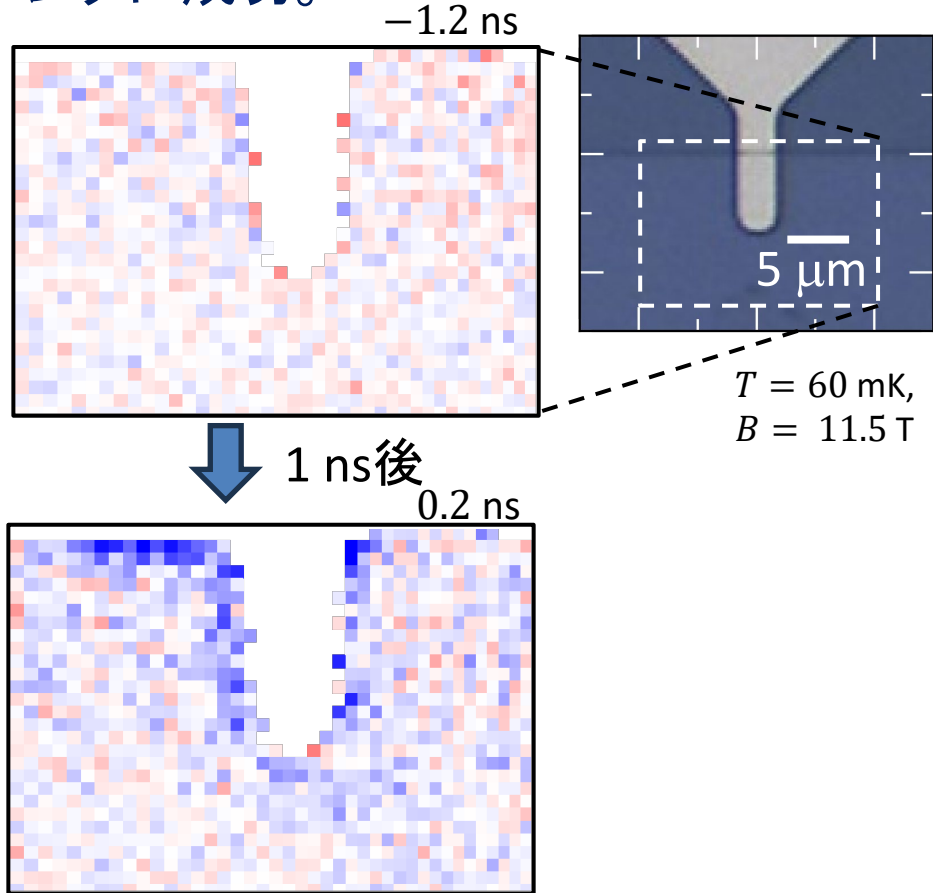
[2] 素粒子論、数理物理、物性理論、量子情報、宇宙論という多方面からエッジによる量子宇宙を検証する。

→エッジのトイモデルの理論

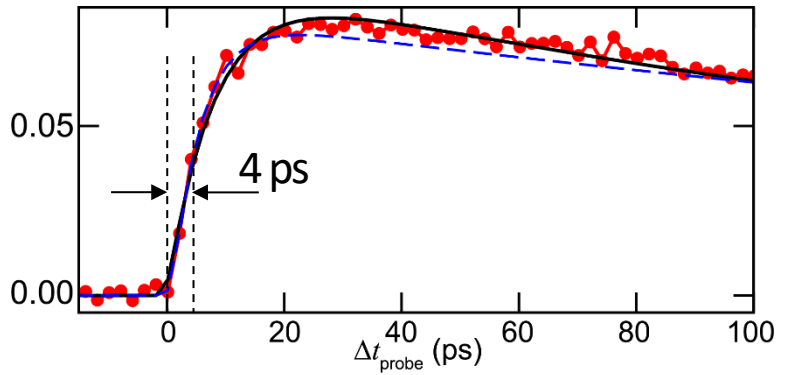
# ハイライト1: エッジ励起の時空間観察とそのダイナミクス

A. Kamiyama, et al., Phys. Rev. Research (2022). Appl. Phys. Lett. (2023).  
Q. France et al., Phys. Rev. Lett. (2025).

極低温強磁場で動作する超高速分光顕微鏡を開発 → エッジ励起の時間分解イメージングに成功。



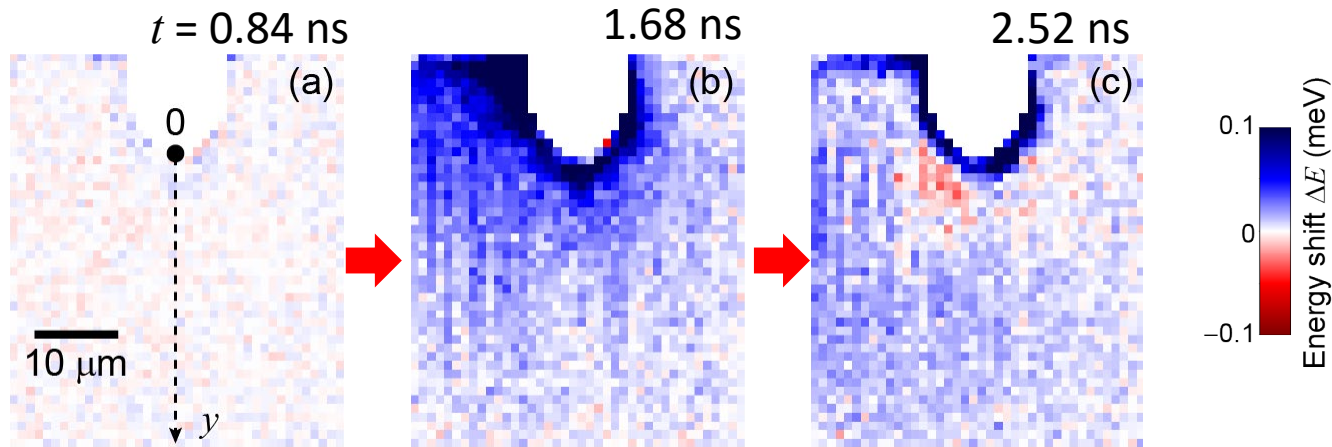
時間分解能を $\sim 300 \text{ ps}$ から数psまで、2桁の向上に成功



# エッジ励起とバルク励起

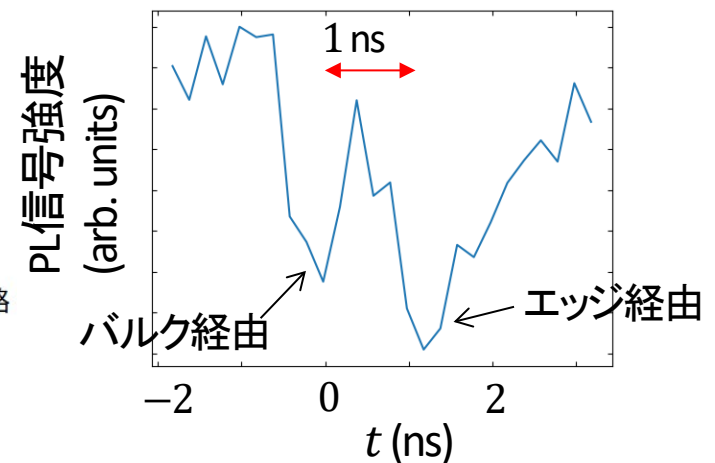
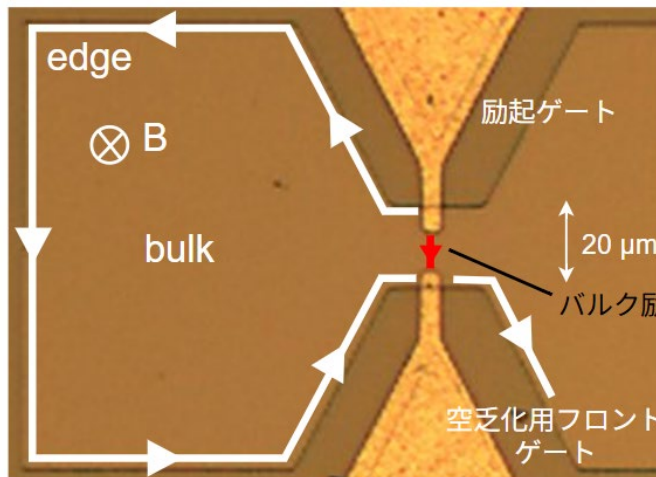
$\nu = 2/3$

バルク励起の可視化に成功



Quentin et al., Phys. Rev. Lett. **135** 066203 (2025).

バルク励起をアナログワームホール実験に向けた基礎技術として応用  
(C01班高柳氏との共同研究) 物理学会2026年3月 論文準備中



# ハイライト2: 量子ホール系での膨張エッジとその制御

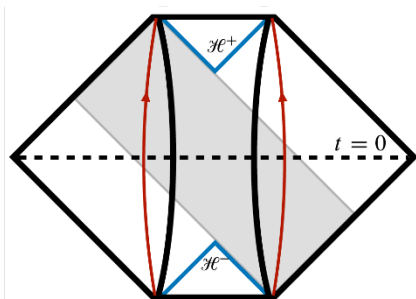
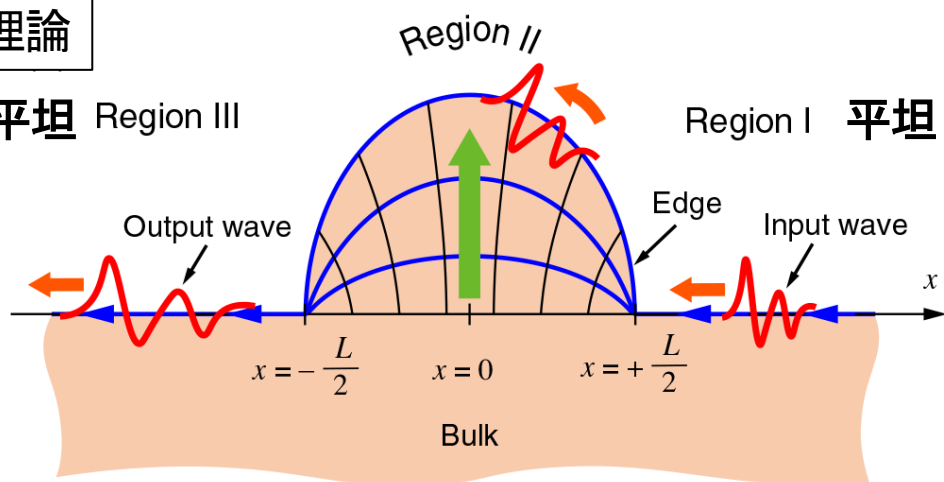
M. Hotta et al., Phys. Rev. D (2022). Y. Nambu and M. Hotta, Phys. Rev. D (2023).

(E02南部氏、山本氏との共同研究)

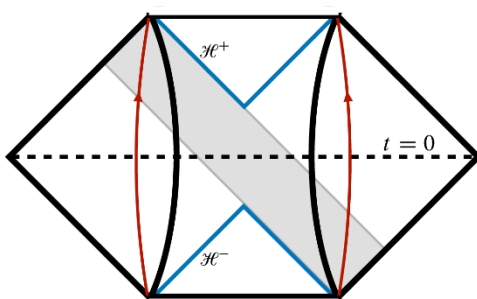
膨張エッジを宇宙論から定式化 → エッジモードからホーキング輻射

理論

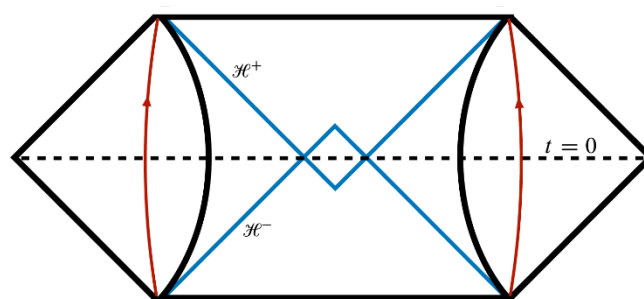
平坦 Region III      Region II      Region I 平坦



$$0 < LH < \frac{\pi}{4}$$



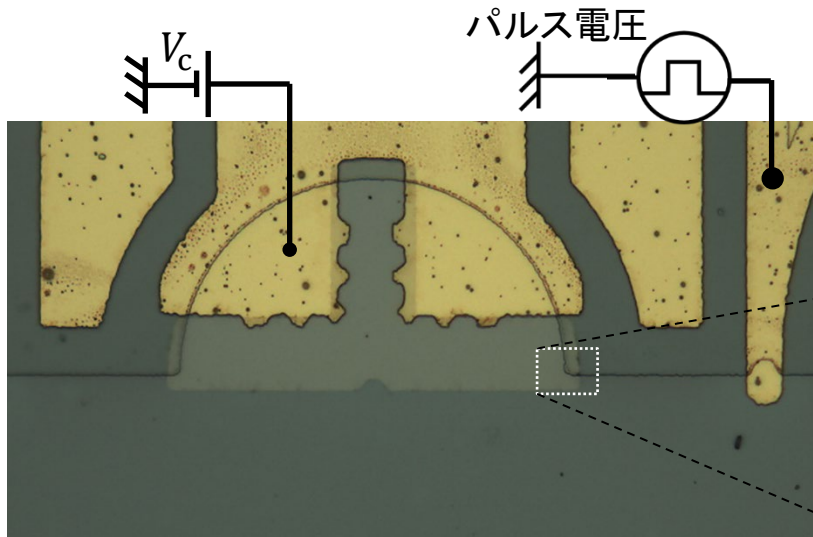
$$\frac{\pi}{4} < LH < \frac{\pi}{2}$$



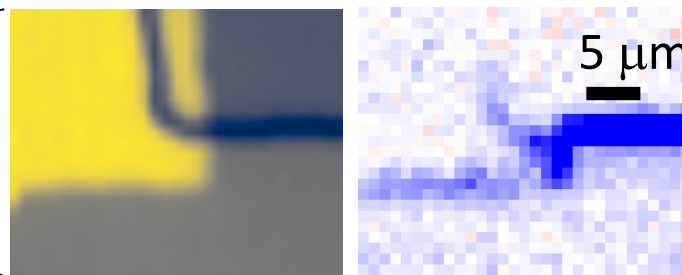
$$\frac{\pi}{2} < LH$$

# 量子ホール系での膨張エッジに向けた研究

実験1



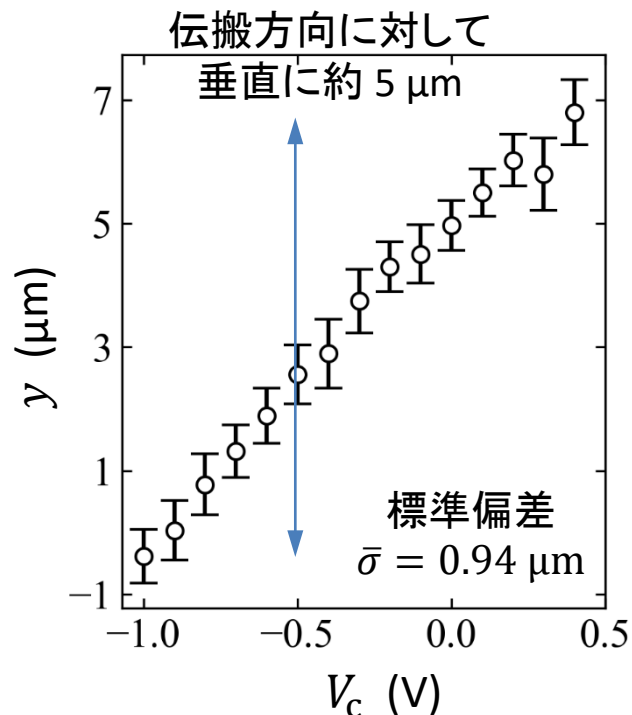
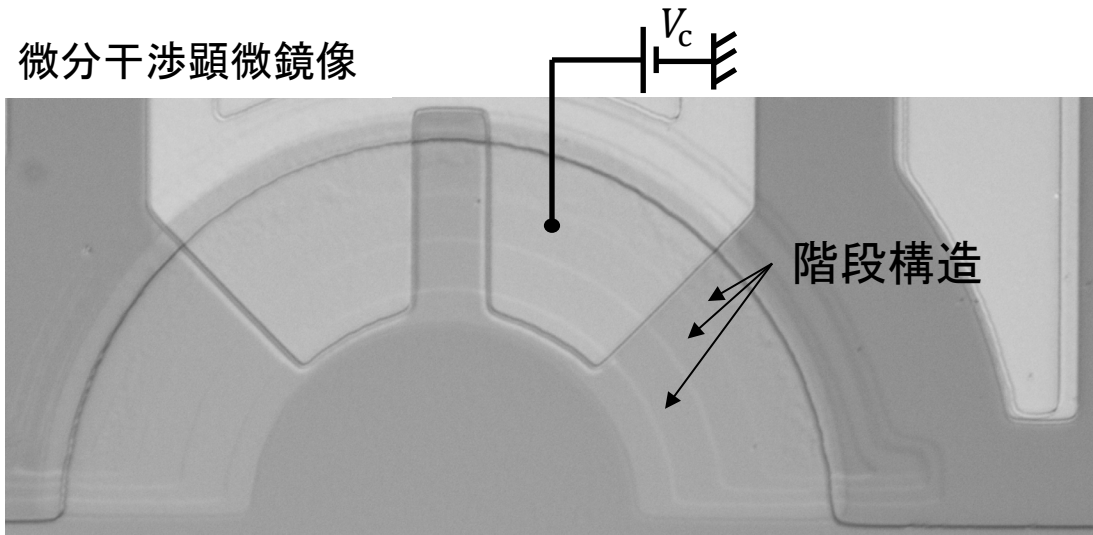
エッジの非局在多経路伝搬の制御と可視化に成功。加えてエッジ励起の近接場の観測  
論文投稿中(E02沼澤氏との共同研究)



実験2

局在エッジの長距離変形(従来から10倍程度)  
2026年3月物理学会 論文準備中

微分干渉顕微鏡像





Grant-in-Aid for Transformative Research Areas (A)

Extreme Universe

# 計画研究 C03班 成果ハイライト

## 白水徹也(名古屋大学)

研究分担者:

泉圭介(名古屋大学)

小林努(立教大学)

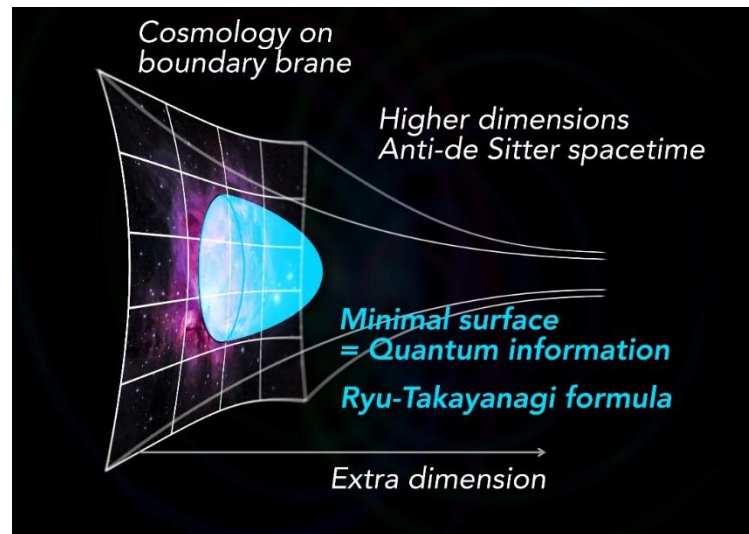
棚橋典大(京都大学)

野澤真人(大阪工業大学)

吉野裕高(大阪公立大学)

## 研究目標

Ryu-Takayanagi公式を通じた量子宇宙の解明



## 研究計画と研究成果のまとめ

A. ブレーンワールドの数理構造の解明

シン・ブレーンワールド(~高次元)の重力場の摂動解析

B. 宇宙の観測などを念頭に置いた量子宇宙の数理構造を解明

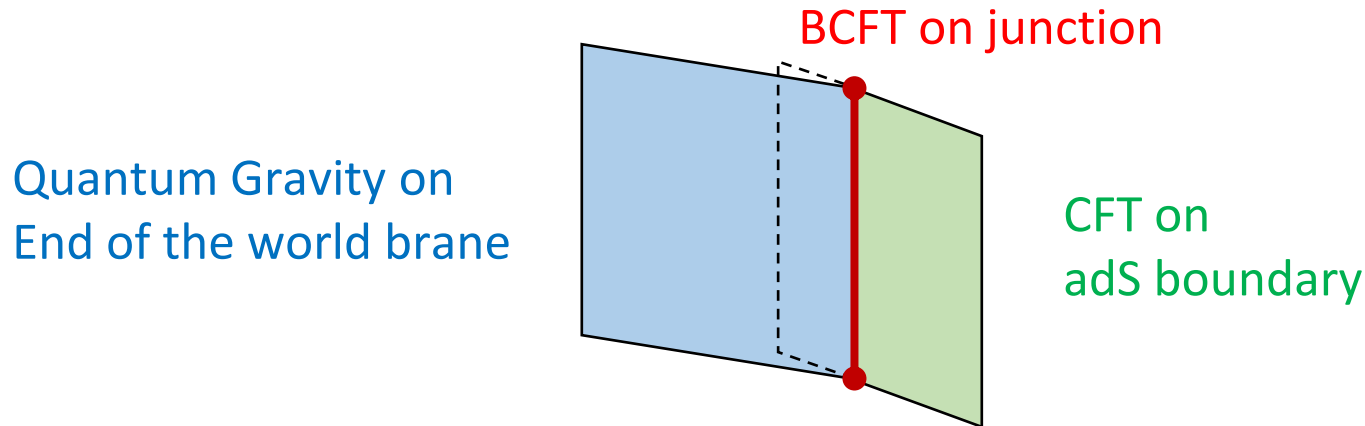
ブラックホール周辺のAxion雲のダイナミクス(~4次元)

# 研究成果ハイライト1

C01-C03 共同研究

“Brane Dynamics of Holographic BCFTs”, K. Izumi, T. Shiromizu, K. Suzuki, T. Takayanagi, N. Tanahashi, JHEP 10, 050 (2022) [引用数 46]

AdS/BCFT対応  $\equiv$  シン・ブレンワールド  $\equiv$  量子重力に対する模型



高次元重力波の解析を行い、接合境界上の物質(BCFT)が正しく振舞っていることを示し、模型の有効性を強くサポート

# 研究成果ハイライト2 田中貴浩氏(第二期公募研究)との 共同研究

“Impact of multiple modes on the evolution of self-interacting axion condensate around rotating black holes”, H. Omiya, T. Takahashi, T. Tanaka and H. Yoshino, JCAP 06, 016 (2023)

[引用数 48]

“Deci-Hz gravitational waves from the self-interacting axion cloud around a rotating stellar mass black hole”, H. Omiya, T. Takahashi, T. Tanaka and H. Yoshino, PRD110, 044002 (2024)

[引用数 21]

“Axion” : (軽い)ダークマター候補として注目

ブラックホール周辺のaxion雲の長時間発展の数値解析を行い、予想されていた爆発現象がモード間相互作用起源の散逸効果により起きないことを示すとともに、具体的な重力波の予言を行った。

# 計画研究 D01 班 成果ハイライト

西岡 辰磨  
(阪大)

## 研究分担者

伊藤 悦子 (京大基研)  
本多 正純 (理研 iTHEMS)  
松尾 泰 (東大)  
奥田 拓也 (東大)



## 研究目標

量子情報理論の数理構造および量子計算を用いて、場の量子論のダイナミクスを解明する

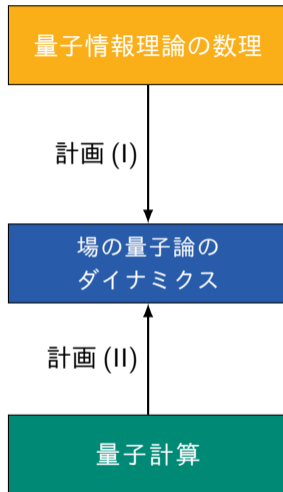
## 研究計画と成果

(I) 量子情報の数理構造を用いた場の量子論の解析

⇒ 量子誤り訂正符号から共形場理論の構成

(II) 量子計算による場の量子論のダイナミクスの解明

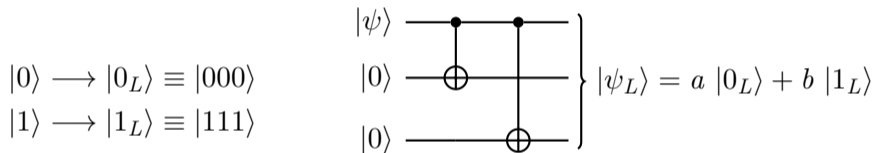
⇒ 符号問題のある系の量子シミュレーションに成功



# 計画 (I) の成果：量子誤り訂正符号から共形場理論の構成

- 量子誤り訂正符号：誤り耐性のある量子計算機を実現するための重要な理論

(量子) 情報を複数の場所に分散させることで、エラーがあっても元の情報が復元可能



- 場の量子論の「ゲージ対称性」と類似の数理構造

対称性  $\longleftrightarrow$  情報の分散  
?

- 量子誤り訂正符号の構造をもつ場の量子論は存在するのか？

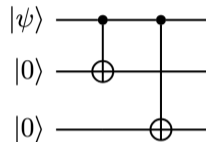
# 計画 (I) の成果：量子誤り訂正符号から共形場理論の構成

- 量子誤り訂正符号から (1+1) 次元の共形場理論を系統的に構成する新手法を確立

[Kawabata-Nishioka-Okuda, SciPost Phys. Core 6 (2023) 035, JHEP 12 (2023) 127]

- 同手法を超対称性をもつ共形場理論の発見および分類に応用 [Kawabata-Nishioka-Okuda, PRD 108 (2023) 8, L081901, w/ Yahagi, JHEP 05 (2025) 105]

量子誤り訂正符号



共形場理論

量子状態  $|\psi\rangle \implies$  演算子  $\mathcal{O}_\psi$

# 計画(II)の成果：符号問題のある系の量子シミュレーション

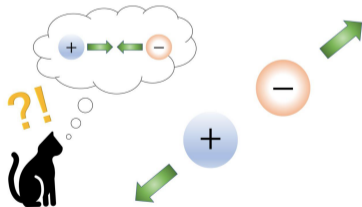
- 場の量子論の数値計算における問題点

**符号問題**：作用が複素の場合，計算量が莫大となり数値シミュレーションが困難

例：有限温度系，トポロジカル項など

- 量子計算による符号問題の回避

- 量子虚時間発展法を用いた有限温度系の量子シミュレーション [Petersen-Itou-Sun-Yunoki, PoS LATTICE2023 (2024) 220]
- 量子計算により電荷が反対の粒子間に斥力が働く状況を実現 [Honda-Itou-Kikuchi-Tanizaki, PTEP (2022) 033B01]





Grant-in-Aid for Transformative Research Areas (A)

Extreme Universe

# 計画研究 02 成果ハイライト

## 奥西 巧一（大阪公立大）

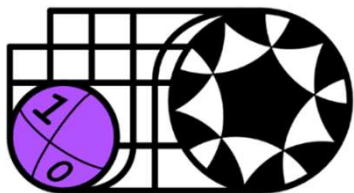
研究分担者:

上田 宏（阪大QIQB）

原田 健自（京大情報）

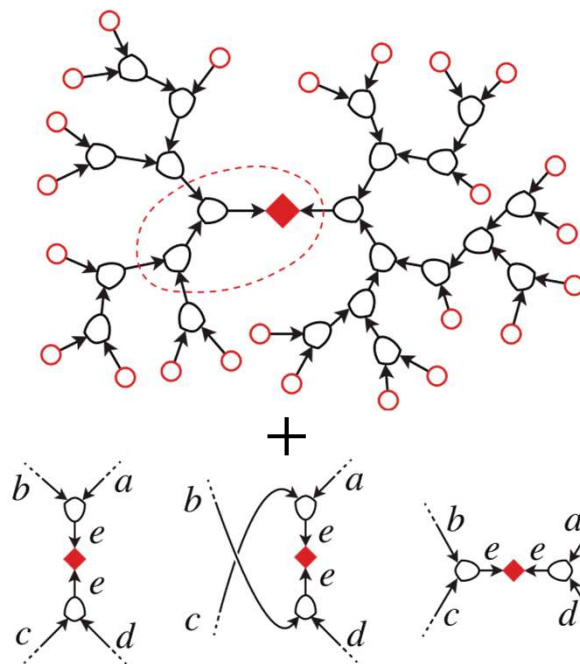
桂 法称（東大理）

堀田 知佐（東大総合文化）



## 研究目標

量子情報の時代に整合した量子多体系の制御機構 —テンソルネットワーク法— の発展と、量子多体ダイナミクスの解明が目標です



## 研究計画と研究成果のサマリー

I. テンソルネットワーク法による量子状態の系統的制御機構の解明と革新的アルゴリズムの開発



**Tree Tensor Networkの構造最適化の提唱**

ネットワーク最適化による量子多体エンタングルメント制御の分野横断的展開へ

II. 量子多体系の背後にある数理構造の抽出と量子情報の時代に整合したそのダイナミクスの基礎学理の構築



**量子傷跡状態の系統的・代数的構成法の確立**

非熱的状态出現の新奇な機構、その特異な量子ダイナミクスの数理的背景解明へ

# I Tree Tensor Networkの構造最適化の提唱

**Tensor Network(TN): エンタングルメント制御にもとづく量子多体系の量子シミュレーション法**  
量子多体系を小さなパーツ(テンソル)に分解・ネットワーク状に再構成

- 物性で誕生 ⇒ 量子多体系に普遍的理論形式 ⇒ 分野を問わない柔軟性
- 負符号問題など既存手法の問題点と計算精度の両立 ⇒ 量子シミュレーション法の旗手
- ホログラフィーの笠高柳公式との類似点 ⇒ 量子重力との接点
- 量子回路・量子アルゴリズムの発展にも対応 ⇒ 量子計算の検証に必須

**極限宇宙に共通 注目キーワード**

**限界: 複雑なエンタングルメント構造や高次元の理解・扱いに本質的困難**

既存の典型的TN(行列積状態, ブロックスピン変換、PEPS、MERA)

⇒ **実は直観による半経験的な構成**

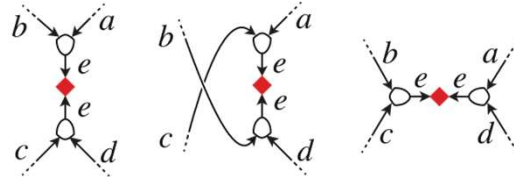
未知への障壁

**構造最適化: 量子エンタングルメント ⇒ 最適ネットワーク構造**

**エンタングルメントに基づく  
ネットワーク組替アルゴリズム**

引原・上田・奥西・原田・西野  
Phys. Rev. Res. 13031(2023)

量子多体エンタングルメント構造



ネットワーク構造  
(幾何学)

~~半経験的~~

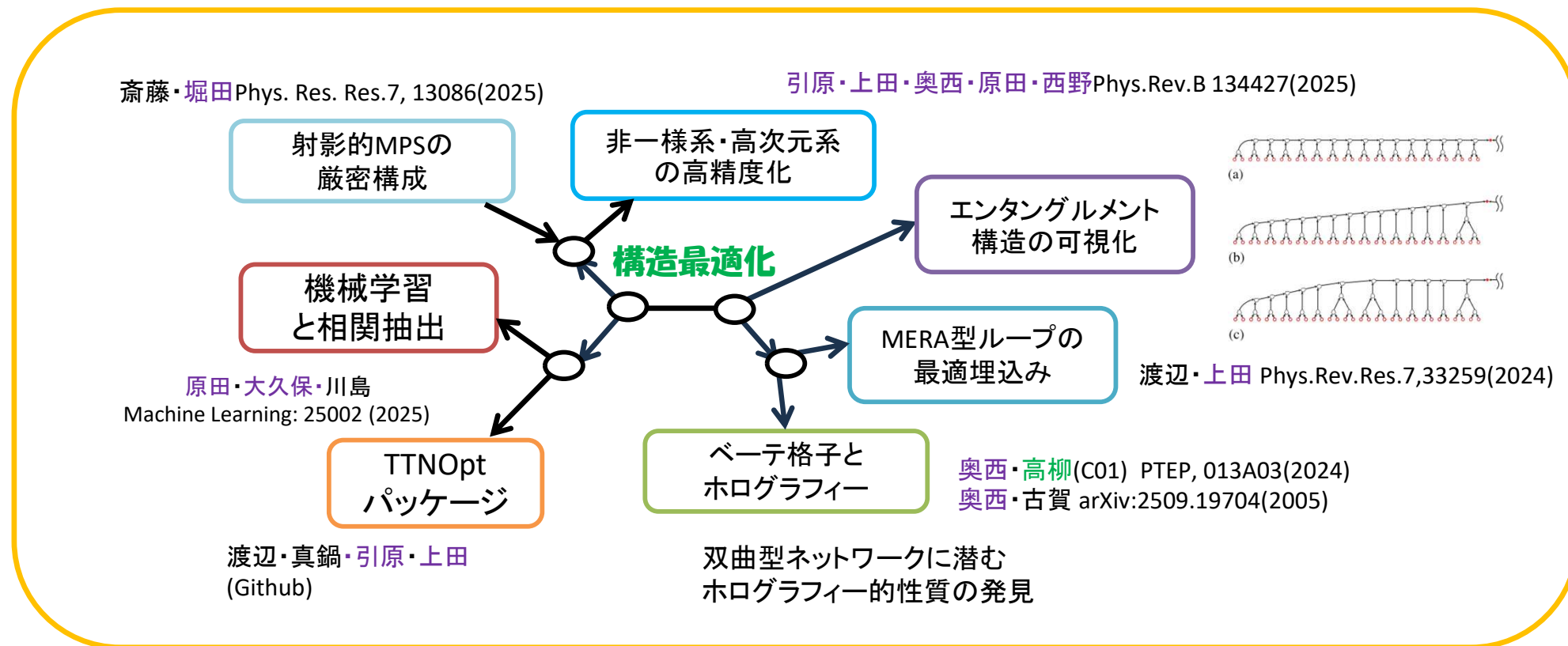
TNによる高精度計算

右回りサイクルの実現

# 従来の半経験的なTree型TN構成からの脱却

ネットワーク構造が物理的に重要な量子エンタングルメント構造を具現化

最適ネットワークにもとづく新しい量子多体系学理の実践的展開へ



## TNのネットワーク構造に着目した多方面の異分野融合的研究発展の起点

通常アルゴリズム論文の引用はなかなか伸びないにもかかわらず既に被引用数40

# II 量子傷跡状態の系統的構成法の確立

量子傷跡状態: 熱平衡状態へ緩和せず特異な量子ダイナミクスを示す

熱化の破れの新しい機構  $\Rightarrow$  ETHにもとづく量子統計力学の学理に対する重要課題

完全可積分でも、完全カオスでもない  $\Rightarrow$  中間的構造出現の数理的特徴は？

様々なモデルでの解析は進んできた  $\Rightarrow$  系統的メカニズムの存在？

冷却原子気体等での観測  $\Rightarrow$  実験と理論が密接に結びついた新領域

量子多体系ダイナミクス解明の重要キーワード

量子傷跡状態は  
単なる例外か？

個別のモデル解析を超えた系統的な背景の理解へ



傷跡状態出現の数理的バックグラウンドの整備が必用

量子傷跡状態が、非可積分系に埋め込まれた代数的構造から  
系統的に厳密構成できることを実証

傷跡状態は低エンタングルメントの高エネルギー状態  $\Rightarrow$  TNとの自然な接点も



Phys. Rev. B 108, 155102 (2023)

Phys. Rev. A 110, 043312 (2024)

Phys. Rev. Research 6, 043259 (2024)

arXiv:2411.01270

Phys. Rev. Res. 7, 043107 (2025)

特異な量子ダイナミクスの数理的「ひな型」の構成から、量子情報や実験をも巻き込んだ量子傷跡状態の一般理論へと向かう流れを生み出す