

A班（量子情報）の紹介

理論物理学のための量子情報理論基礎

研究代表者：
森前智行 京大



研究分担者：
中田芳史 東大
東浩司 NTT

Francesco Buscemi 名大

研究のゴール

（１）量子情報理論の研究を深化させる
（量子計算理論・量子暗号理論・量子ネットワーク等）
→最先端のツールを提供

（２）量子情報を極限宇宙の物理に適用
→極限宇宙の物理を理解するための言語を構築

A班（量子情報）の紹介

理論物理学のための量子情報理論基礎



量子計算量理論
量子アルゴリズム理論
量子暗号理論
テンソルネットワークとMBQC



量子インターネット
Non-locality, entanglement
ブラックホール



量子ランダムネス
エンタングルメント
ブラックホール



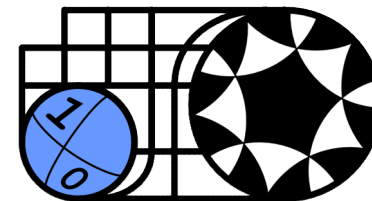
量子情報理論
熱力学、統計物理と量子情報

研究テーマ

- ① 量子計算量理論を極限宇宙へ応用→ゲージ重力対応・場の量子論・テンソルネットワーク(C班,D班)
- ② 量子ランダムネス・量子誤り訂正符号を極限宇宙へ応用→量子カオス性の研究(B班,C班)
- ③ 量子通信理論を極限宇宙へ応用→Petz写像でブラックホール内部から情報を回復(B班,D班)
- ④ 量子情報の操作論を極限宇宙へ応用→時空構造を特徴づける量子情報の測度(B班,C班)

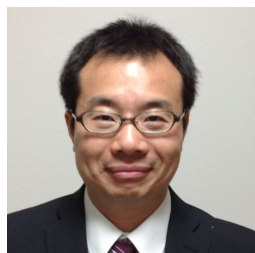


B01班の紹介



- 研究テーマ: 量子情報を用いた量子ブラックホールの内部の物理学の解明

研究代表者



飯塚 則裕 (阪大)
island/量子BH/行列モデル

研究分担者



宇賀神知紀 (基研)
island/量子BH



重森正樹 (名大)
microstate-重力解



寺嶋靖治 (基研)
Gauge/gravity



野海俊文 (神大)
沼地予想

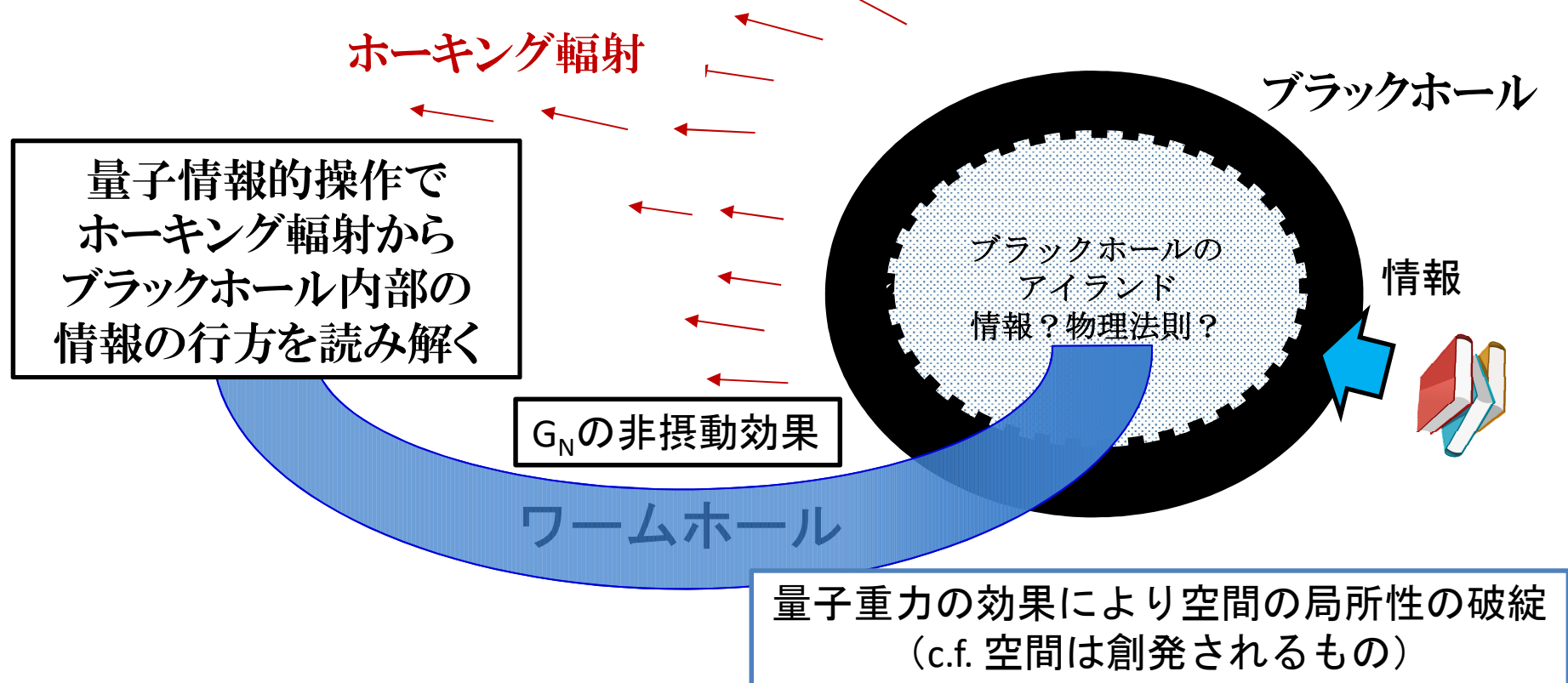
B01班: 量子情報を用いた量子BH内部の物理学の解明

ゲージ重力対応と量子情報で、量子BHの内部の物理法則を解明

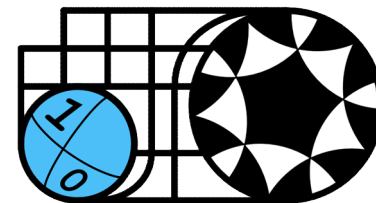
ブラックホール(BH)の情報損失問題は、どのように解決されるのか?

研究計画①: 量子情報の操作的観点からブラックホール内部の情報の行方を読み解く

研究計画②: どのような量子多体系（物性系）が重力/BHに双対な特徴を示すか? の解明(B02班, B03班と共同研究)



B02班の紹介



研究テーマ: 人工量子物質による量子ブラックホールの解明

研究代表者: 手塚 真樹(京大理)→冷却原子系の理論、量子カオス

研究分担者: 中島 秀太(京大白眉)→冷却原子実験

上西慧理子(慶大KQCC)→量子計算、量子系の熱化

森 貴司(理研CEMS)→開放量子系のダイナミクス

山本 大輔(日大文理)→冷却原子系の理論、量子系の熱化

研究の目標: 量子ブラックホールの理解に向け、量子多体系を制御、量子情報の視点により量子多体系の非平衡ダイナミクスを理解する。

主な手法: 冷却原子実験、物性理論、統計力学

NISQデバイスによる非平衡状態の量子計算

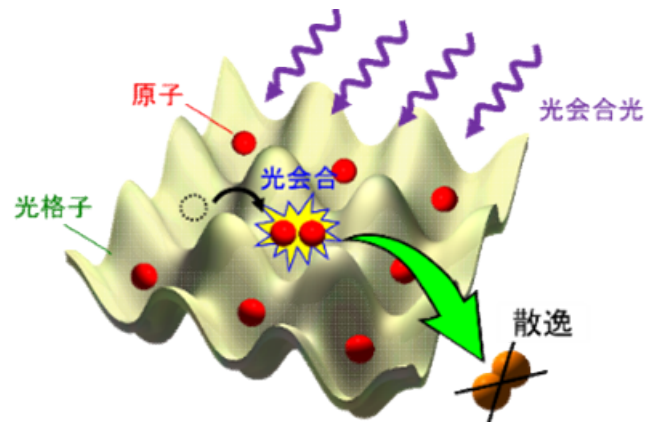
+ 量子情報理論(スクランブリングのダイナミクス等)

研究計画①: 測定誘起量子相転移を観測 (エンタングルメント 体積則→面積則)
非平衡相転移の理論をリウビリアン固有値問題等から構築

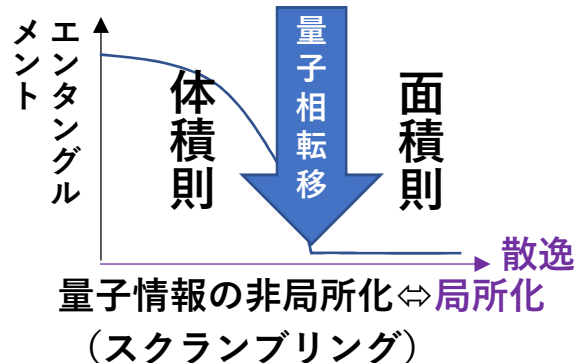
研究計画②: 非時間順序相関関数を測定 (量子系のスクランブリング)
速いスクランブリングの条件と機構をSYK模型等から解明

測定誘起量子相転移

散逸制御で相転移を観測



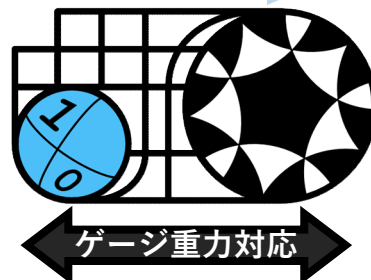
量子誤り訂正 ⇔ 測定による散逸



量子計算機による 非平衡状態の計算

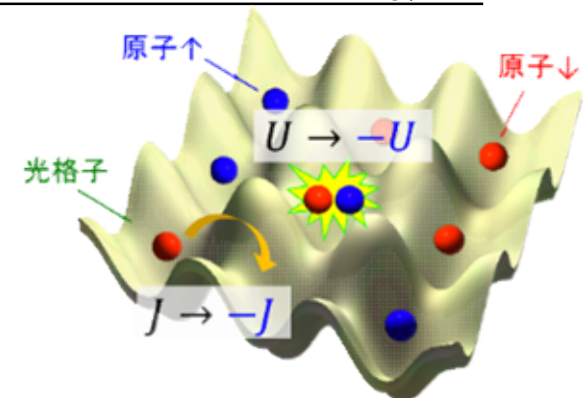
量子情報の視点による
量子多体系の非平衡
ダイナミクス理解

量子BHの理解へ



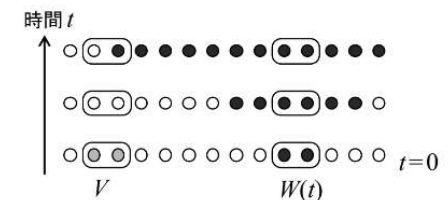
非時間順序相関関数

ハミルトニアン符号反転制御で
スクランブリングを観測



量子操作 = 演算子

非可換
 $VW(t) \neq W(t)V$
↑
スクラン
ブリング
↓
可換
 $VW(0) = W(0)V$



B03班：量子情報を用いた量子ブラックホールの数理解明



石橋 明浩 (代表者：近畿大学)
一般相対論への量子情報の包摂とブラックホール



前田 健吾 (芝浦工業大学)
重力理論と量子情報の数理解析



村田 佳樹 (日本大学)
ブラックホールと量子多体系の対応 AdS/CFT対応

計画： 量子情報理論を用いた量子ブラックホールの数理的基礎付け



宇宙を構成する量子情報は、 時空のどのような構造に宿されるのだろうか？

I. 量子エネルギー条件

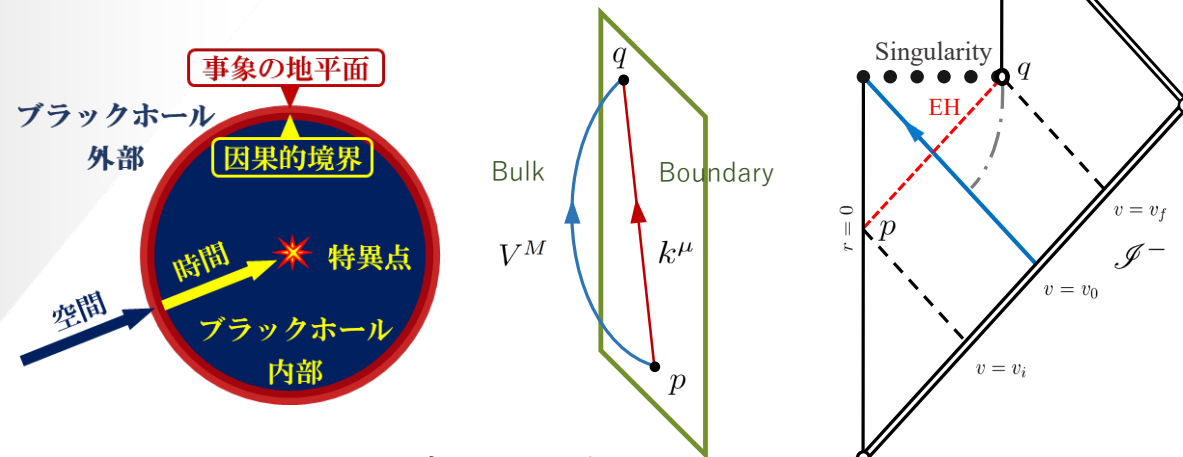
- 量子情報と量子エネルギー条件
- 量子ブラックホールのエントロピー

II. 因果的境界のダイナミクス

- 因果的境界と量子ダイナミクス
- ブラックホールの情報損失パラドックス
- 量子情報と因果律

III. 量子ブラックホールと観測量

- 量子多体系と双対な重力モデルの構築
- 量子ブラックホールと量子多体系の観測量



B03班の計画目標

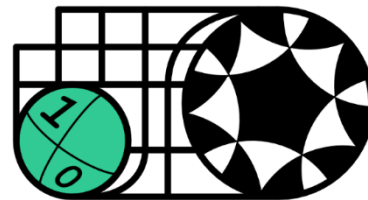
量子ブラックホールの基礎方程式

$$\left[\text{量子情報量} \right] + \left[\text{ブラックホールの幾何学} \right] = \left[\text{観測量} \right]$$

極限宇宙の基礎法則の解明



C01班の紹介



研究テーマ: 量子情報を用いた量子宇宙の基礎理論

研究代表者: 高柳 匡 (京大基研) → ゲージ重力対応と量子情報

研究分担者: 奥山 和美 (信州大) → 2次元量子重力, 行列模型

杉本 茂樹 (京大基研) → ホログラフィックQCD、ゲージ理論

関野 恭弘 (拓殖大) → ホログラフィー原理、スクランブリング

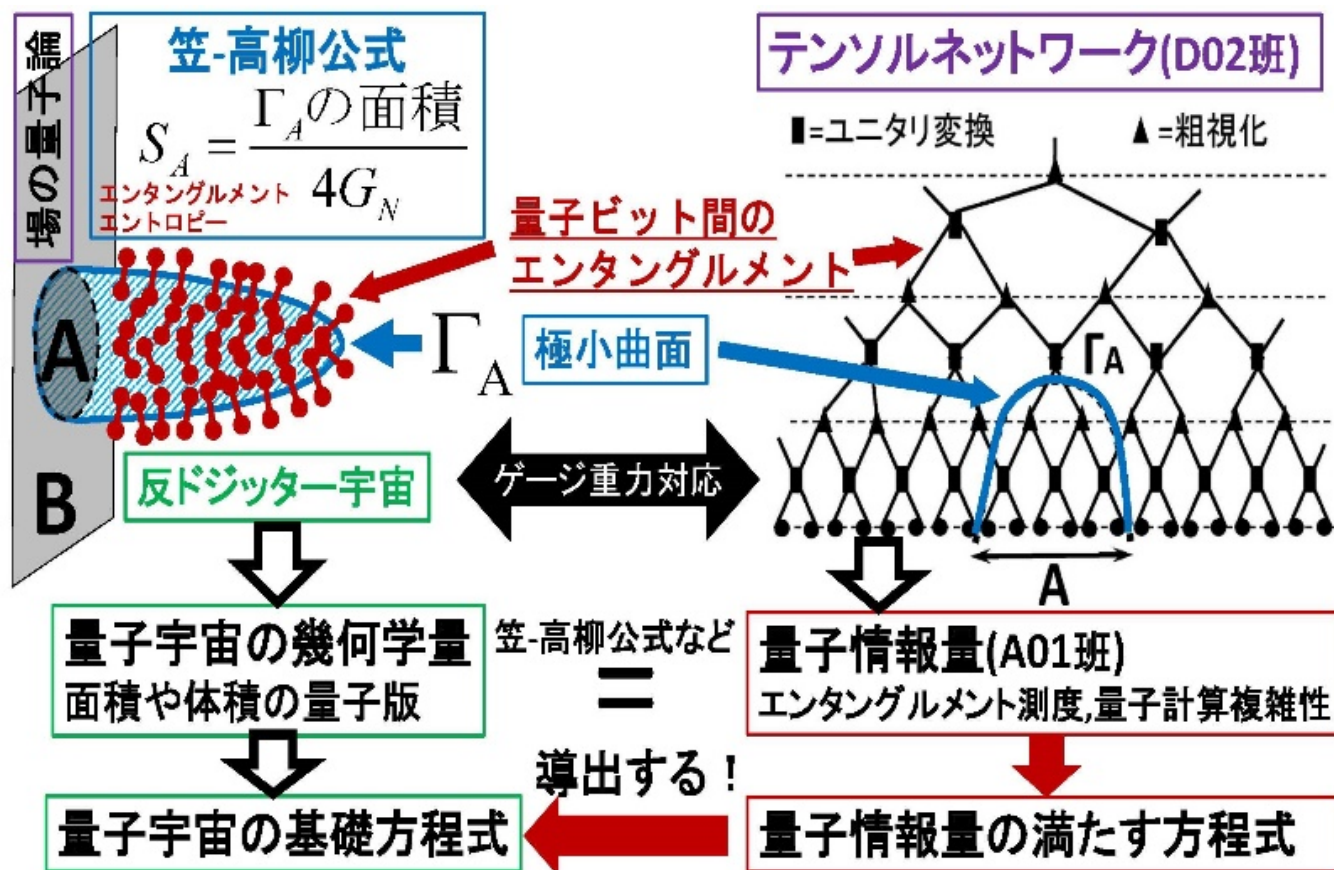
足田 泰章 (京大基研) → 高階スピン重力理論、共形場理論

研究の目標: 宇宙創成の問題にアプローチするため、量子重力理論を開拓する(C02の量子宇宙実験、C03宇宙論と連携)。

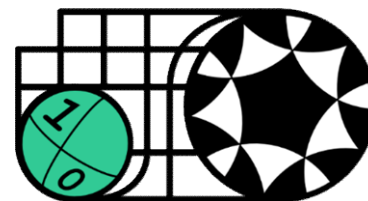
主な手法: ゲージ重力対応、場の量子論(量子多体系のテンソルネット) + 量子情報理論(エンタングルメント測度、量子計算複雑性etc.)

研究計画①: ゲージ重力対応(反ドジッター宇宙 $\Lambda < 0 \leftrightarrow$ 場の量子論)の基礎的メカニズムを量子情報の視点から解明

研究計画②: 上記で得られた知見を元に、ゲージ重力対応をより一般の宇宙(ドジッター宇宙 $\Lambda > 0$ など)に拡張し、量子宇宙の問題にアプローチする。



C02班の紹介



研究テーマ: 量子ホール系による量子宇宙の実験

研究代表者: 遊佐 剛 (東北大物理) → 量子ホール系実験

研究分担者: 柴田 尚和 (東北大物理) → 物性理論、精密数値計算

堀田 昌寛 (東北大物理) → 量子情報、相対論

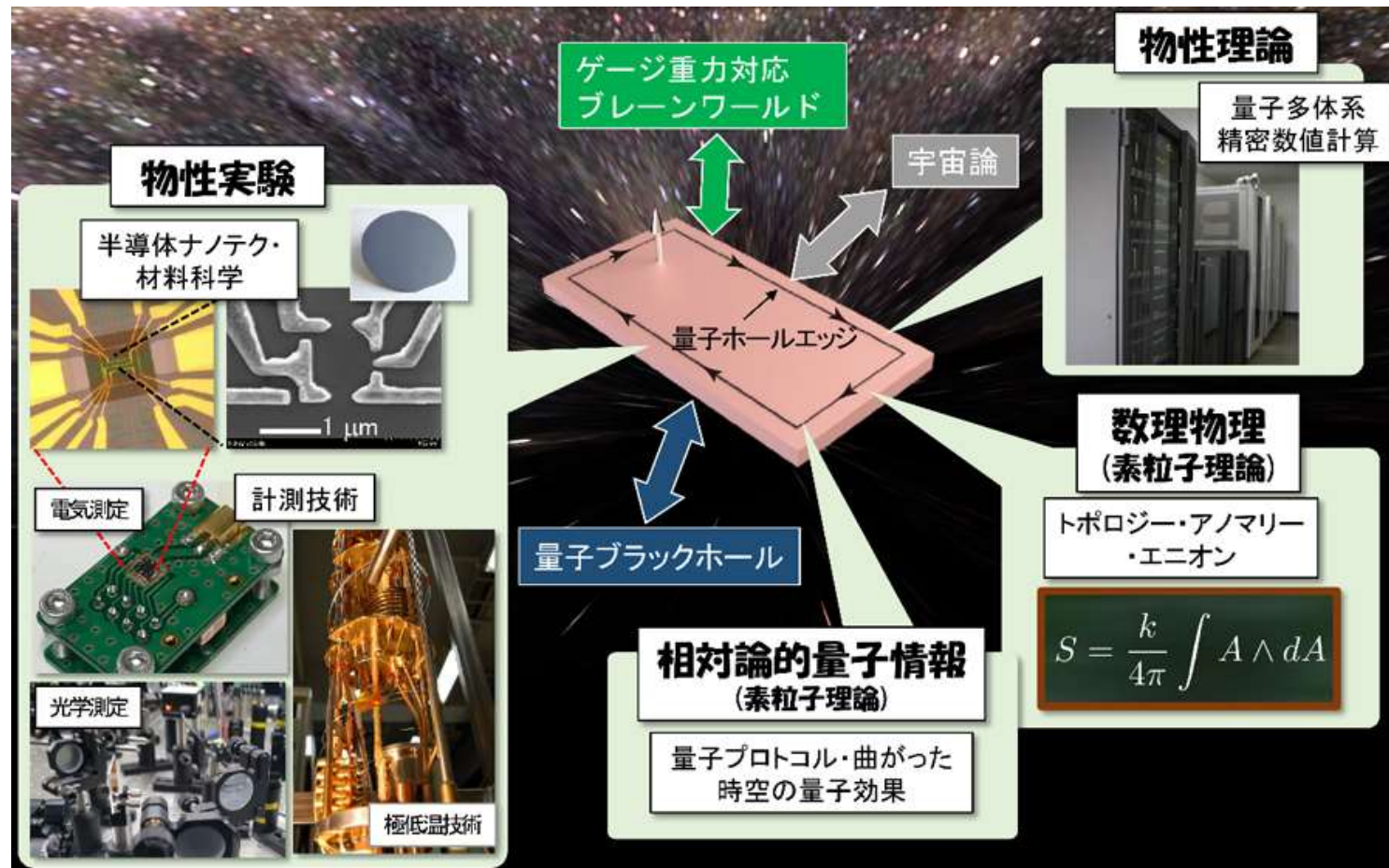
米倉 和也 (東北大物理) → 数理物理、トポロジー、アノマリー

研究の目標: 量子宇宙を模したトイモデルを量子ホール系で実現し、
多方面の理論から量子宇宙の検証を行う(C01量子宇宙の基礎理論、C03宇宙論と連携)。

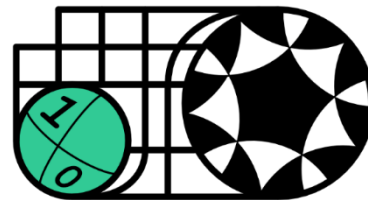
主な手法: 極低温強磁場での電子輸送測定、超高速光学測定、
半導体ナノテク、密度行列繰り込み群、相対論的
量子情報、場の量子論のトポロジーなど

研究計画①： 各種測定技術の確立をすすめ、量子ホール系による
トイモデルとしての量子宇宙の実験を目指す。

研究計画②： 物性物理(精密数値計算)、数理物理(素粒子理論)、
相対論的量子情報など多方面の理論からトイモデルとしての
量子宇宙の検証を行う。



C03班の紹介



研究テーマ: 量子情報を用いた量子宇宙の数理とその応用

研究代表者: 白水徹也(名大多元数理)→高次元、一般相対論

研究分担者: 泉圭介(名大KMI) →一般相対論、重力理論

小林努(立教)→宇宙論、重力理論

棚橋典大(中央大)→ adS/CFT , 重力理論

野澤真人(大阪工大)→超重重力理論、一般相対論

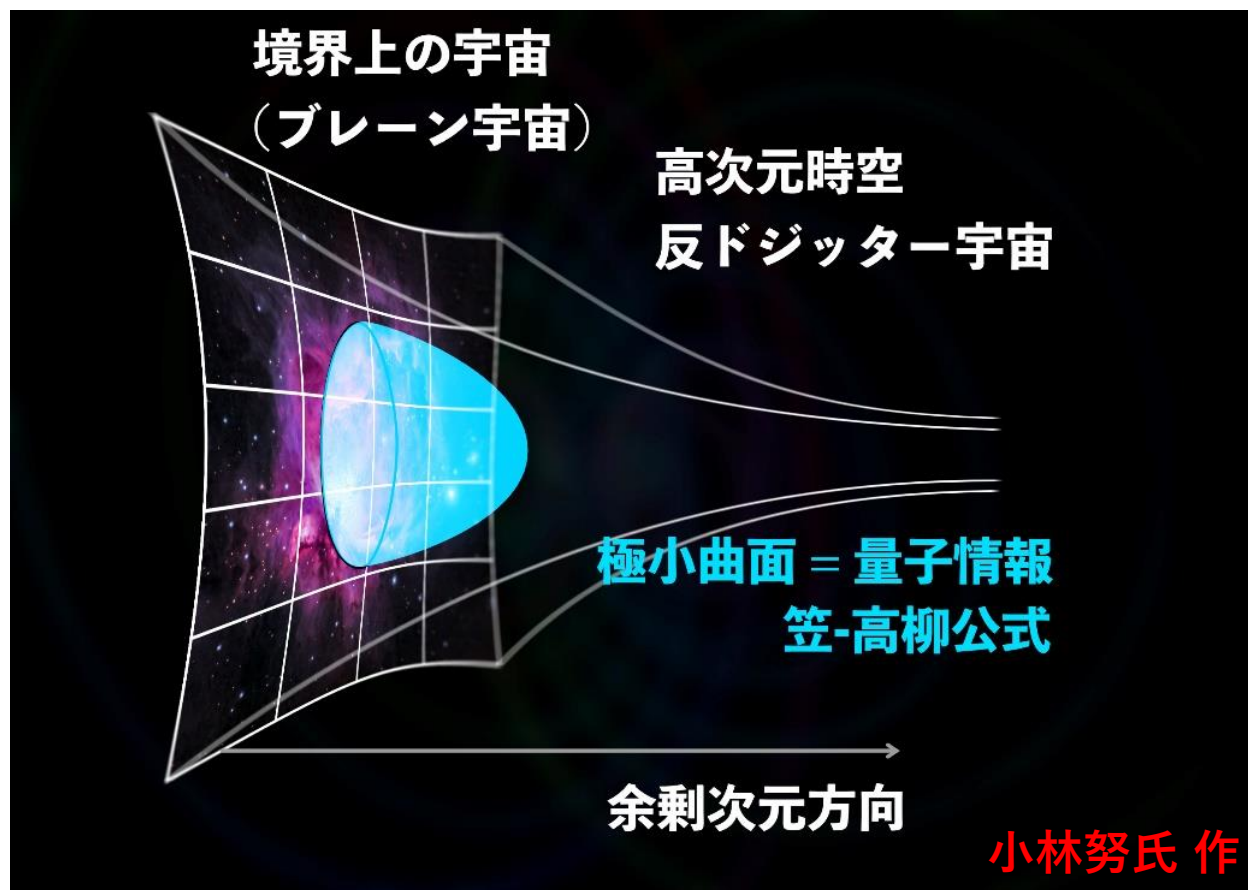
吉野裕高(大阪市大)→数値相対論、一般相対論

研究の目標: C01素粒子論、C02の量子宇宙実験と連携し、
宇宙創成と宇宙の加速膨張の謎の解明。

主な手法: 重力理論、宇宙論、幾何学、ゲージ重力対応、
数値相対論＋量子情報理論

研究計画①: 超弦理論/量子重力などから予想される一般相対論への補正の検証を念頭に置いた基礎研究。

研究計画②: ゲージ重力対応を念頭に置いた高次元時空の基礎研究。笠-高柳公式の宇宙論への応用。



D01 班：場の量子論のダイナミクスへの量子情報的アプローチ



西岡辰磨 (代表者, 京大基研) 場の量子論の情報理論的側面



松尾泰 (東大本郷) 場の量子論の数理的側面



奥田拓也 (東大駒場) 量子計算する物理系の理論的解析



本多正純 (京大基研) 場の理論の量子計算とアルゴリズム開発



伊藤悦子 (理研) 場の量子論の量子シミュレーション

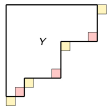
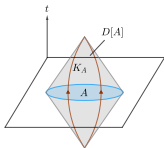
研究計画

- I. 場の量子論の量子情報的側面とその数理構造の解明
- II. 量子計算を用いた場の量子論のダイナミクスの解明

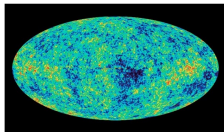
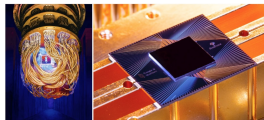
研究目標

I. 数理構造の研究

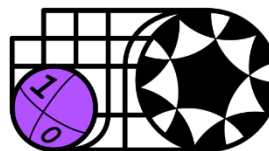
II. 量子計算の実装



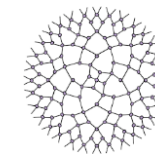
場の量子論のダイナミクス
ブラックホール
量子重力
⋮



D02班の紹介



ExU-D02
Quantum many-body systems
and tensor networks



研究テーマ:「量子情報を用いた量子多体系の制御とテンソルネットワーク」

代表者: 奥西巧一 (新潟大学) → テンソルネットワーク(TN), 量子スピン系

分担者: 上田宏 (大阪大学) → 計算物理, TNアルゴリズム, 量子計算

原田健自 (京都大学) → TNアルゴリズム, MERA, 量子モンテカルロ

桂法称 (東京大学) → 厳密解析・可解模型, トポロジカル物性

堀田知佐 (東京大学) → 強相関電子系, 行列積状態, サイン2乗変形

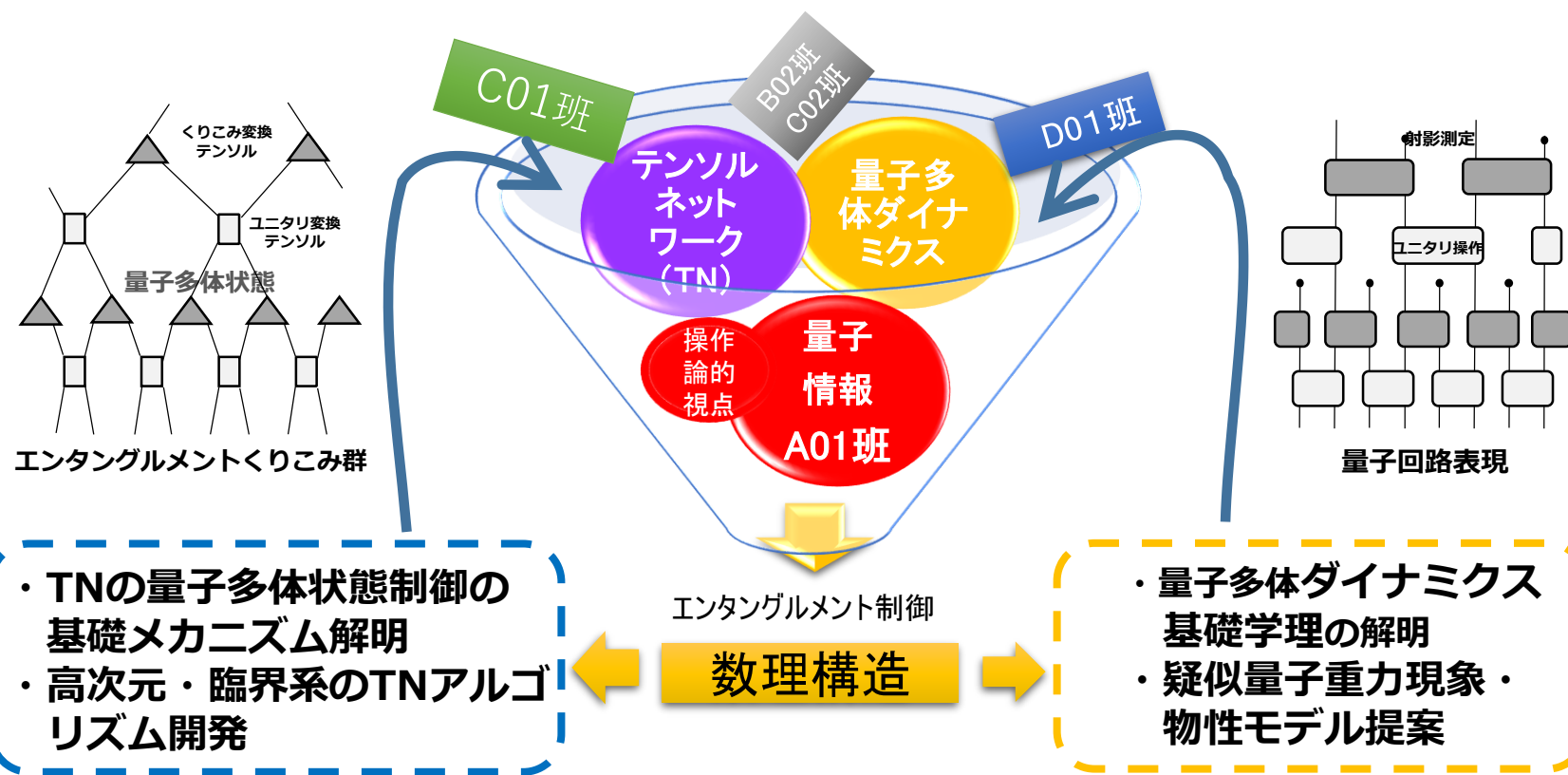
研究の目標:

- ① テンソルネットワーク法による量子状態制御の機構の解明とアルゴリズム開発
- ② 量子多体ダイナミクスの基礎学理の構築と疑似的量子重力現象の物性模型の提案

量子情報の視点に基づくエンタングルメントの制御構造・数理構造の抽出

研究計画:

- ① TN法: エンタングルメントくりこみ群とゲージ重力対応、双曲面上の統計力学模型とホログラフィー(C班と連携)、TNの量子回路表現、高次元・臨界系・非ユニタリ系のTNアルゴリズム開発と応用
- ② 量子多体ダイナミクス: 非ユニタリダイナミクス(B02班と連携)、格子Unruh効果等の物性系における疑似的量子重力現象の模型の提案と解析、量子回路模型と量子計算機シミュレーション(A班D01班と連携),トポロジカル物性(C02班と連携)



テンソルネットワークを中心に量子統計力学的な視点とエンタングルメントや量子回路模型のような量子情報的視点の融合により、ホログラフィーや量子多体ダイナミクスの本質に迫ります。

手法としては、テンソルネットワーク等の量子シミュレーションと可解模型等の厳密解析も組み合わせ、背後の数理構造まで含めて、できるだけ正確な理解を目指しています。