



研究領域名 極限宇宙の物理法則を創る  
—量子情報で拓く時空と物質の新しいパラダイム

京都大学・基礎物理学研究所・教授

たかやなぎ ただし  
高柳 匡

領域番号: 21A201 研究者番号: 10432353

【本研究領域の目的】

これまで物理学では空間・時間・物質を基本的構成要素として自然法則を説明してきた。しかし、自然界における極限的な状況（これを本研究領域では極限宇宙と呼ぶ）では、強い量子性による揺らぎのために、空間・時間・物質という従来の捉え方では対象がぼやけてしまい困難に直面する。この極限宇宙とは、具体的に自然界における三つの極限「空間の極限：ブラックホールの量子論」「時間の極限：宇宙創成のメカニズム」「物質の極限：量子物質のダイナミクス」を意味し、物理学の究極の難問と言える。ところが、ゲージ重力対応の発見によって重力理論が量子物質の理論に等価に結びつき、さらに、この対応において、量子情報量を測る量であるエンタングルメント・エントロピーは、重力理論における曲面の面積に等しいという「笠-高柳公式」が導かれる。このことから、重力理論の宇宙は量子情報の無数の集積であるという予想が最近注目を集めている。一方、この量子情報の集積は「テンソルネットワーク」と呼ばれる量子物質の高精度な数値解析手法を与える。そこで本研究領域では、量子情報と物理学を融合させ、極限宇宙の三つの問題の解明を目指す。



図1：量子情報の視点で物理学を再構築し、極限宇宙の解明に取り組む本研究領域の概念図

【本研究領域の内容】

九つある計画研究は、研究目標から大きくA,B,C,Dのグループに分かれる。Aグループ(A01)では、物理学に活用する量子情報理論の基礎的研究、Bグループ(B01,B02,B03)は、ブラックホールの量子論、Cグループ(C01,C02,C03)は、宇宙創成のダイナミクス、そしてDグループ(D01,D02)は、量子物質のダイナミクスをそれぞれ対象としている。また、B,C,Dのグループでは、素粒子論(01)、物性物理(02)、宇宙論(03)からのアプローチを担当する計画研究に細分化される。このように、本研究領域では縦系(従来の研究分野のつながり)と横系(共通の研究目標)の両方がうま

く絡むことで分野融合を促進し、ブレイクスルーを狙う。また、比較的なコンパクトな装置を用いる冷却原子(B02)や量子ホール効果(C02)の物性実験を通じて、ブラックホールや宇宙創成を模した実験検証を行う。さらに、次世代の計算技術と期待されている量子計算機を用いた量子物質の解析手法(D01とD02)の開発も行う。そして、2022年度から始まる公募研究による相補的な研究が加わることで、量子情報と物理学の異分野融合研究を発展させる。

【期待される成果と意義】

本研究領域では、量子情報の視点から物理学を捉え直すことで、極限宇宙の三つの問題：(1)量子ブラックホール、(2)宇宙創成のメカニズム、(3)量子物質のダイナミクス、の解明に向けて大きな成果が期待される。まず、ゲージ重力対応と量子情報理論を組み合わせて、ブラックホールの蒸発過程における情報損失問題に説明を与える。同時に量子ブラックホールを模した冷却原子実験を行い、基礎理論を実証する。次に、ゲージ重力対応の起源を量子情報理論の観点から説明し、それを一般化することで、宇宙創成を記述する量子重力理論を構築する。同時に、量子ホール系で時間的に膨張するエッジ状態を用いて宇宙創成を模した物性実験を行い、基礎理論を実証する。さらに、量子物質のダイナミクスに関して、量子情報理論を利用した数理的手法に加え、数値的解析法として、高次元テンソルネットワーク法や場の量子論を量子計算機で解析するアルゴリズムを開発する。

上記の研究を通じ、量子情報の視点から物理学を再構築するとともに、物理学を念頭に置いた量子情報理論を整備して、異分野融合領域を誕生させる。

【キーワード】

ゲージ重力対応：反ドジッター宇宙における重力理論が、それよりも1次元低い空間に存在するゲージ理論(場の量子論の一種であり、量子物質の特殊な例とも思える)と等価になる現象。  
テンソルネットワーク：量子物質の状態を量子情報のネットワークとして幾何学的に表現する手法。量子物質の高精度な数値解析法を与える。ゲージ重力対応における時空創発の原理としても期待される。

【領域設定期間と研究経費】

令和3年度～7年度 1,032,400千円

【ホームページ等】

<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~extremeuniverse/extuniv-office@yukawa.kyoto-u.ac.jp>