

Title	Research on hyperfast growth in de Sitter complexity
Author(s)	姉川, 尊徳
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/96381
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (姉 川 尊 徳)

論文題名

Research on hyperfast growth in de Sitter complexity
(ド・ジッター時空における複雑性の超高速増加についての研究)

論文内容の要旨

量子重力理論において、AdS/CFTは中心的な役割を果たし続けている。これによれば、Anti-de Sitter時空(AdS時空)と呼ばれるタイプの時空上の理論と共形場理論(CFT)と呼ばれるタイプに属する次元の一つ低い場の理論が等価である。つまり、重力を含む理論(重力理論)と、次元が一つ低い重力を含まない理論(場の理論)が等価であることが予想される。この正当性を調べるために、両者の理論においてさまざまな物理量が調べられており、具体的に相関関数などの一致が見られる。その中で本研究に関係する重要な量として複雑性が挙げられる。これは場の理論側では、状態を構成する大変さとして定義され、文字通り状態の複雑さを現す。重力理論側でこれと双対な量としてはいくつか提案されているものがあり、余次元1のある領域の体積であったり、ある時空領域のon-shell作用であったりする。それぞれの仮説をCV, CAと呼ぶが、どれを採用しても基本的な振る舞いは同じである。AdS時空のブラックホールの場合の計算では、Einstein Rosen Bridgeの性質を反映し、複雑性は線形に増加する。これは量子力学系の複雑性のもつ一般的な性質と対応している。

また、AdS/CFTに類するものは以前から提唱されており、ホログラフィック原理と呼ばれている。これはブラックホールのエントロピーの性質から一般的に提唱された仮説で、AdS時空に限らずとも任意の時空上の理論には何かしら対応する場の理論があるだろう、という主張である。この原理においては、AdS/CFTはあくまでその一例となっている。そこで、AdS時空とある意味で対になるde Sitter時空(dS時空)に対して対応する場の理論が何か模索する試みが数多くなされてきたが、はっきりとした答えは得られていない。dS時空は、我々の膨張宇宙の良いモデルとして知られているので、dS時空に対してのホログラフィック原理の理解を深めることは、我々の宇宙に対する理解をさらに深めると言う意味でも重要である。そのような状況の中で、Susskindにより2次元のdS時空に対応する量子力学系の具体的な仮説が提案された。

このdS時空のホログラフィック原理の発展を受け、本研究では、dS時空の複雑性の超高速増加という性質についていくつかの考察を行った。dS時空では時空が膨張するという性質を反映し、複雑性がある時刻で極めて大きくなる超高速増加という性質を示す。Jackiw-Teitelboim(JT)重力理論における2次元のdS時空に注目し、複雑さが高次元と同様の超高速増加を見せて振る舞うためにはdilatonの寄与が重要であることを指摘した。これは、2次元JT重力においては、CVが良い仮説ではないことと対応している。また、量子力学系の側に摂動を加えた場合の複雑性の応答についても調べた。これはdS時空側ではshockwaveに対する応答を調べることに相当する。その結果として、dS時空の複雑性の超高速増加が摂動によって遅延するという具体的な発見をした。これは、一般的な量子力学系における複雑性から安直に導かれる直感とは反した、dS時空特有の性質である。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (姉川 尊徳)	
	(職) 氏 名
論文審査担当者	主 査 教授 西岡 辰磨
	副 査 教授 兼村 晋哉
	副 査 教授 黒木 和彦
	副 査 教授 吉野 元
	副 査 助教 飯塚 則裕

論文審査の結果の要旨

博士論文「Research on hyperfast growth in de Sitter complexity」の論文審査の結果の要旨は、下記の通りである。

量子重力理論の構築は現代物理学が解決すべき重要な課題の一つである。重力理論とそれより 1 次元低い時空で定義された場の量子論の等価性を示唆するホログラフィー原理は、重力の量子化を記述する有望なアプローチとして大きく注目されている。AdS/CFT 対応は Anti-de Sitter 時空 (AdS 時空) 上の重力理論と共形場理論 (CFT) の等価性を表す、ホログラフィー原理の最もよく知られた例である。AdS/CFT 対応に基づいた近年の研究により、時空の量子化がその境界上の CFT に内在する量子情報と密接に関係することが明らかになってきた。特に、量子重力の影響が大きいブラックホールの内部状態を探ることができる量子情報量として複雑性が注目されている。

複雑性は場の量子論では状態の構成の難しさとして定義され、重力理論では余次元 1 の領域の体積や on-shell 作用といった双対な量が提案されている。AdS 時空におけるブラックホールの場合、Einstein-Rosen Bridge の性質を反映し複雑性は線形に増加するが、これは量子力学系の複雑性の一般的な性質と一致する。

一方、AdS/CFT 対応をより現実的な膨張宇宙のモデルである de Sitter 時空 (dS 時空) に拡張する様々な試みがなされている。姉川尊徳氏は、Susskind により提案された 2 次元の dS 時空と量子力学系の対応に基づき、Jackiw-Teitelboim (JT) 重力理論における 2 次元の dS 時空上の複雑性の研究を行った。複雑性は 3 次元 dS 時空では超高速に増加するが、2 次元でも同様の増加を示すためには、dilaton と呼ばれる JT 重力理論に存在する場の寄与が重要であることを初めて指摘した。さらに、量子力学系に摂動を加えた場合の複雑性の応答についても調査し、dS 時空の複雑性の超高速増加が摂動によって遅延する特異な性質を新たに発見した。

姉川氏の研究は、ホログラフィー原理に基づく量子重力理論の定式化に対して新たな知見を与える優れた成果である。よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分価値あるものと認める。