

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03612

研究課題名（和文）W演算子による量子重力理論の研究

研究課題名（英文）Research on Quantum Gravity by W-operators

研究代表者

綿引 芳之（Watabiki, Yoshiyuki）

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：40212328

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：従来のフリードマン方程式では、宇宙定数が宇宙加速膨張を引き起こすと考えられていました。一方、W演算子による量子重力理論の修正フリードマン方程式では、我々の宇宙から分離し、瞬時に消滅する無数の赤ちゃん宇宙が宇宙加速膨張を引き起こすという、量子重力理論特有の現象が重要な役割を果たします。これらの方程式はどちらも宇宙加速膨張を説明しますが、その振る舞いにはわずかながら違いがあります。さらに、その背後にあるメカニズムも大きく異なります。従来のフリードマン方程式では、宇宙定数が原因でしたが、修正フリードマン方程式では、我々の宇宙が赤ちゃん宇宙と衝突や分離することが原因であることが明らかになりました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

私たちは宇宙について新しい発見をしました。これまでの考え方では、宇宙の加速膨張はダークエネルギーが原因だとされています。しかし、私たちは、宇宙の加速膨張がこれとは全く違う現象が原因で起きる可能性を提案します。

普通の宇宙の加速膨張の説明では、ダークエネルギーが働いているとされていました。しかし、量子重力に基づいた説明によると、「赤ちゃん宇宙」と呼ばれる宇宙が我々の宇宙と衝突することが原因になります。

この新しい理論では、宇宙の加速膨張を説明するために、従来の考え方とは違うアプローチを取っており、天文学における今後の観測に新しい知見をもたらすと考えます。

研究成果の概要（英文）：In the traditional Friedmann equation, it was believed that the cosmological constant caused cosmic acceleration. However, in the modified Friedmann equation, a phenomenon unique to quantum gravity theory plays a significant role: countless baby universes separating from our universe and instantaneously vanishing trigger cosmic expansion. While both equations explain cosmic acceleration, they exhibit slight differences in behavior, with significantly different underlying mechanisms. While the cosmological constant was the cause in the traditional Friedmann equation, it has become evident in the modified Friedmann equation that collisions between our universe and baby universes are the driving force.

研究分野：量子重力理論

キーワード：量子重力 W代数 Jordan代数 THF膨張 インフレーション 編み上げ機構 Coleman機構 弦理論

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

今回の研究で利用する「W 演算子による量子重力理論」は、1980年代半ば頃に発見された力学的単体分割を起源とします。力学的単体分割は行列模型と等価な理論であり、しかも、ユークリッド空間の2次元量子重力理論に一致します。

その後、力学的単体分割は弦の場の理論の描像で表され、そのハミルトニアンは共形場理論のW演算子の一つに一致することがわかりました。このW演算子は、2次元量子重力理論の場合、理論の分配関数を決める最も基本的なものです。発見の鍵は、空間の測地距離を時間的に扱うことにありました。

その後、測地距離を本物の時間に置き換えた因果力学的単体分割が提案されました。この理論も力学的単体分割と同様、弦の場の理論の描像で定義され、行列模型とも関係があり、ローレンツ対称性を持たないミンコフスキー空間の2次元量子重力理論に一致することが示されました。

しばらくして、因果力学的単体分割も力学的単体分割と同様、共形場理論のW演算子によって表されることがわかりました。因果力学的単体分割に現れるW演算子は、力学的単体分割に現れるW演算子とは異なり、Jordan代数を内部対称性とする方法で空間にフレーバーを付加することが可能な構造を持っています。この代数構造の性質から、1次元空間を材料にして我々の住む3次元のような高次元空間を作り出すことが可能なシナリオ、編み上げ機構が発見されました。この事実は、ローレンツ対称性がこの理論で実現すれば、W演算子による量子重力理論が現実世界の量子重力理論の候補になることを意味します。

また、この理論はプランクスケールを自然な形で持ち、ダークエネルギーの導入無しに現在の宇宙の加速膨張を説明できるという特徴を持ちます。しかし、1次元空間から高次元空間を形成する編み上げ機構やインフレーションを終了させるColeman機構についての理解は、定量的な視点から見るとまだまだ足りません。この理論から超弦理論と同じ次元の時空が出て来るものの、たとえば、ローレンツ対称性がどのようにして実現できるのか、どのようなゲージ対称性を持つ物質場が現れるのか、などの問題の理解は概略しか得られていないのが現状です。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、W演算子による量子重力理論を利用して、高次元化を引き起こす編み上げ機構やインフレーション終了を引き起こすColeman機構のダイナミカルな側面を調査し、さらには、物質の誕生のシナリオや宇宙の加速膨張のメカニズムを解明することにあります。これにより、この理論の正当性を検証することを目指しています。

W演算子による量子重力理論は、時間、空間、物質の創成を可能にする唯一の理論です。この理論は、現在の宇宙の加速膨張を説明できることから、その検証の価値が非常に高いといえます。実際、多くの研究者は宇宙の加速膨張の原因をダークエネルギーと仮定し、既存の理論で説明しようと試みていますが、未だ成功していません。

一方、我々のグループは、宇宙の加速膨張の原因がダークエネルギーではない新しい概念に由来する可能性があることを突き止めました。この点で我々は一歩進んでいますが、既存の理論を利用しない新しい理論に基づく結論であるため、その理論の正当性を検証する必要があります。

このように、我々のグループの研究は独自性が明らかであり、新たな結果が得られることが大いに期待できると考えます。

### 3. 研究の方法

本研究では、 $W$  演算子による量子重力理論の具体的なメカニズムを解明し、その現実世界への適用可能性を評価することを目指しました。特に、高次元化を引き起こす編み上げ機構とインフレーション終了を引き起こす Coleman 機構に注目しました。これらの機構はワームホールによって自然に生じるものであり、現時点では定性的な理解しか得られていませんでした。本研究では、これらの機構のダイナミカルな側面を明らかにし、理論の正当性を検証しました。また、宇宙の加速膨張については、 $W$  演算子による量子重力理論が予測する値と観測事実との整合性を最新の観測データを用いて詳しく調べました。

#### 1. 理論の数学的な構造の理解

まず、 $W$  演算子が成す代数である  $W$  代数の数学的な構造を詳細に調査しました。特に、 $W$  代数の表現論に関する理解を深めました。 $W$  代数は  $W(\ )$  代数の一種であり、非常に大きく複雑な構造を持つため、数式計算ソフトを用いて解析を行いました。この過程で、Jordan 代数の役割を特に重視し、その数学的特性を詳細に解析しました。限られた施設環境でも大型計算機は不要でしたが、数式計算ソフトが大いに役立ちました。

#### 2. ワームホールのダイナミカルな側面の理解

次に、 $W$  演算子による量子重力理論から生成されるワームホールが引き起こすダイナミカルな側面を解明しました。具体的には、以下の二つの主要なテーマに取り組みました：

- **高次元空間の形成**：編み上げ機構を通じて、1次元空間から高次元空間がどのように形成されるのかを解析しました。
- **インフレーションの終了**：Coleman 機構を通じて、インフレーションがどのように終了するのかを調査しました。これにより、理論の信憑性を検証しました。

#### 3. 宇宙の加速膨張のメカニズムの理解

次に、 $W$  演算子による量子重力理論が引き起こす宇宙の加速膨張のメカニズムを解明しました。具体的には、以下のテーマに取り組みました：

- **宇宙の加速膨張のメカニズム**：Friedmann 方程式に相当する方程式を利用し、理論が予測する加速膨張の振る舞いと現在観測されているデータとの丁寧な比較を行い、理論の信頼性を検証しました。

## 各年度の進行状況

- **平成 30 年度:**  $W$  代数の数学的構造、特に Jordan 代数の役割を調査し、数式計算ソフトを用いて代数構造を解析しました。同時に、ワームホールの媒介で生じる力を計算し、Coleman 機構のエネルギー特性を調べました。
- **令和元年度:** 数学的側面の解析を進め、 $W$  代数の全容を把握することに成功しました。また、編み上げ機構の結果として得られる物質場の性質を調べ、高次元空間の次元が弦理論と一致する点を詳細に解析しました。
- **令和 2 年度:** 本研究の大まかな目標に到達し、 $W$  演算子による量子重力理論の正当性を確立するためのさらなる解析を行いました。特に、理論の信憑性を確認するための数値計算を行いました。
- **令和 3 年度:** 理論のさらなる理解を深めるための研究を継続しました。特に、臨界次元を持たない超弦理論の研究も同時に進め、理論的な道具立てを完成させました。
- **令和 4 年度以降:** 理論が予言する宇宙の加速膨張を実際の観測データと比較することで理論の正当性を確認しました。また、 $W$  演算子による量子重力理論が宇宙の加速膨張を引き起こすメカニズムが、数多くの小さな宇宙、いわゆる赤ちゃん宇宙、との衝突や分離で生じていることを突き止めました。

## 4. 研究成果

本研究では、 $W$  演算子による量子重力理論の正当性とその現実世界への適用可能性を検証し、以下の成果を得ました：

### 1. $W$ 代数の数学的構造の理解

$W$  演算子が成す代数である  $W$  代数の数学的構造を詳細に解析し、特にその表現論に関する理解を深めました。Jordan 代数の役割についても重要な知見を得ることができました。数式計算ソフトを用いて、 $W$  代数の複雑な構造を解析することに成功しました。

### 2. ワームホールのダイナミカルな側面の理解

編み上げ機構と Coleman 機構のダイナミカルな側面を明らかにしました。具体的には次の通りです。

- **高次元空間の形成:** 編み上げ機構を通じて、1次元空間から高次元空間が形成される過程を解析しました。
- **インフレーションの終了:** Coleman 機構を通じて、インフレーションが終了するメカニズムを詳細に調査しました。

### 3. 赤ちゃん宇宙による宇宙の加速膨張の理解

$W$  演算子による量子重力理論が宇宙の加速膨張を引き起こすメカニズムを明らかにしました。具体的には次の通りです。

- **宇宙の加速膨張のメカニズム:** W 演算子による量子重力理論では宇宙の加速膨張という現象が起こりますが、この現象が赤ちゃん宇宙と呼ばれる小さな平行宇宙との衝突や分裂であることを突き止めました。

これらの成果により、W 演算子による量子重力理論が高次元空間の形成やインフレーションの終了といった現象をどの程度現実的に再現できるかを明らかにしました。また、これにより宇宙の加速膨張や物質の誕生のメカニズムについても新たな知見を得ることができました。

研究は各年度において計画通りに進行し、多くの重要な知見を得ることができました。本研究の成果は、今後の量子重力理論の発展に寄与するものであり、さらなる研究の基盤となることが期待されます。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 J. Ambjorn, Y. Watabiki	4. 巻 12
2. 論文標題 Is the present acceleration of the Universe caused by merging with other universes?	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1475-7516/2023/12/011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Watabiki	4. 巻 なし
2. 論文標題 The causality road from dynamical triangulations to quantum gravity that describes our Universe	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Handbook of Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 不明
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.48550/arXiv.2212.13109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 J. Ambjorn, Y. Watabiki	4. 巻 37
2. 論文標題 Easing the Hubble constant tension	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Modern Physics Letter A	6. 最初と最後の頁 2250041
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S0217732322500419	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 J. Ambjorn, Y. Watabiki	4. 巻 815
2. 論文標題 Wormholes, a fluctuating cosmological constant and the Coleman mechanism	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letter B	6. 最初と最後の頁 136152
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2021.136152	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 J. Ambjorn, Y. Watabiki	4. 巻 955
2. 論文標題 Models of the Universe based on Jordan algebras	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 115044
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysb.2020.115044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 J. Ambjorn, Y.Sato, Y. Watabiki	4. 巻 815
2. 論文標題 Wormholes, a fluctuating cosmological constant and the Coleman mechanism	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letter B	6. 最初と最後の頁 136152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136152	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Yoshiyuki Watabiki, et.al.
2. 発表標題 Late time acceleration of our Universe caused by the absorption of baby universes
3. 学会等名 A conference in honour of Gordon Semenoff (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshiyuki Watabiki, et.al.
2. 発表標題 From the birth of CDT to a modified Friedmann equation that resolves the Hubble constant tension
3. 学会等名 CDT and Friends: Jubilee edition (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshiyuki Watabiki
2. 発表標題 Review of 2d Causal Dynamical Triangulation
3. 学会等名 4th Bangkok workshop on Discrete Geometry and Dynamics and Statistics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshiyuki Watabiki
2. 発表標題 Emergence of spacetime and Knitting mechanism from 2D CDT
3. 学会等名 Physics and Mathematics of Discrete Geometries (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiyuki Watabiki
2. 発表標題 Accelerating expansion of universe by the interaction with baby universes
3. 学会等名 Discrete Geometry, Dynamics and Statistics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 CDT and Friends &#8211; Jubilee edition	開催年 2023年 ~ 2023年
---	----------------------



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------