

平成 21 年 6 月 30 日現在

研究種目：若手研究B
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19740173
 研究課題名（和文） 宇宙背景輻射の観測による超弦理論の検証を目指した理論的研究
 研究課題名（英文） Theoretical studies toward a test of superstring theory by observations of cosmic microwave background radiation

研究代表者
 関野 恭弘 (SEKINO YASUHIRO)
 岡山光量子科学研究所・研究員
 研究者番号：50443594

研究成果の概要（和文）：我々の宇宙は、より大きい宇宙項を持った（より膨張率の高い）宇宙からの量子的トンネル効果によって生成された事が、超弦理論によって示唆されている。そのような宇宙を記述する厳密な（非摂動的）定式化を2次元共形場理論によって構成して観測への予言を与える事を目指し、宇宙のトポロジー、宇宙における揺らぎと共形場理論の演算子の間の対応などを詳しく調べた。また、トンネル効果によって生成された宇宙における宇宙背景輻射スペクトラムの解析を進めた。

研究成果の概要（英文）： Superstring theory suggests that our universe was generated by quantum tunneling from a universe with higher cosmological constant (or higher expansion rate). The aim of this research is to construct an exact (non-perturbative) framework for such cosmology in terms of two-dimensional conformal field theory, and to provide predictions for cosmological observations. We studied the topology of the universe, and the correspondence between cosmological perturbations and operators in the conformal field theory. We analyzed the spectrum of cosmic microwave background radiations in universe created by tunneling.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	0	1,300,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	270,000	2,470,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理、素粒子論

1. 研究開始当初の背景

自然界の全ての相互作用の統一理論として提案されている超弦理論は、重力の量子化に伴う様々な困難を解消しうることから、物理

学の根本理論の有力な候補と考えられている。実験的証拠は未だ得られていないが、近年の技術的進歩により、宇宙背景輻射の観測から超弦理論を検証できる可能性が出てきた。超弦理論は、平坦な時空の周りの摂動論

としての定式化しか確立していないという意味で、理論的に未完成であるが、当研究では、超弦理論を宇宙論に応用するための非摂動的定式化を行い、超弦理論が宇宙論に与える示唆を明らかにすることを旨とする。

2. 研究の目的

超弦理論において、我々の宇宙のような加速膨張する（正の宇宙項を持つ）宇宙がどのように記述されるかはこれまで分かっていなかった。しかし、最近の研究により、超弦理論にはそのような宇宙が解として多数存在する事、また、正の宇宙項を持った宇宙は量子的トンネル効果によって、より低い宇宙項を持った宇宙に崩壊する、という事が明らかになり始めた。（この描像は、有効ポテンシャルの極大点や極小点を山や谷に例えて「超弦理論のランドスケープ」と呼ばれており、2000年以降主流の考え方となっている。）ランドスケープの解析は、これまで低エネルギー近似を用いて行われてきたが、様々な物理量を詳細に計算し理論から観測への予言を与えるためには、厳密な（非摂動的）定式化が必要となる。この研究では、トンネル効果でできた宇宙に関する非摂動的定式化を確立する事を旨とする。それとともに、トンネル効果が観測に与える示唆を明らかにするため、宇宙背景輻射のスペクトラムの特徴を明らかにする。

3. 研究の方法

ホログラフィー原理に基づき、宇宙論の非摂動的定式化を行う。ホログラフィー原理とは、量子重力理論は境界（空間的無限遠）における自由度を用いて記述されるべきであるという提案で、負の宇宙項を持つ超対称時空における超弦理論に関しては、AdS/CFT 対応と呼ばれる具体的構成が存在し、ここ10年ほどの研究で、その正しさを示す多数の証拠が得られている。また、ブラックホールにおいて情報の損失が起きず通常の量子論が適用できる事を示唆する理論的枠組みであるという事が、この原理のもともとの提案の動機である。

2006年に、共同研究者のサスキンド教授らと共同で、トンネル効果によって生成された宇宙に関して、共形不変性を持つ2次元場の理論による双対な記述が存在する事を提案した。トンネル効果によって生成された宇宙は、空間的曲率が負の「開いた宇宙」になるが、我々が提案した双対理論は、開いた宇宙の境界（空間的無限遠）に位置する2次元球面上で定義される。これは、AdS/CFT 対応の

自然な拡張となっている。我々の双対理論は、時間を含まない2次元空間で定義されているという点で、AdS/CFT 対応の場合と異なる。双対理論は重力（Liouville 場）を含むと考えており、準古典極限でLiouville 場が時間の役割を果たす。これは、宇宙論における量子重力の一般的な定式化である Wheeler-De Witt 形式の自然な拡張である。

この研究では、この提案の正しさを証明し、双対理論の詳しい性質を解明するため、宇宙における揺らぎの相関関数や、トンネル効果によって出来た宇宙（「バブル」）同士の衝突等の物理過程の詳しい解析を行う。

また、トンネル効果によって生成された宇宙における宇宙背景輻射のスペクトラムの一般的な性質を明らかにする。我々の宇宙の空間的曲率は非常に小さいが、ゼロである理論的根拠は知られていない。負の曲率が、観測的下限程度の大きさである場合、宇宙背景輻射が生成された時点で曲率の影響や、トンネル前の宇宙の情報がスペクトラムに表れる可能性がある。トンネル前の宇宙の影響は、揺らぎの相関関数を計算する際の「真空」の定義の仕方がトンネル前の宇宙の性質に依存する、という形で表れる。ユークリッド化の処方により真空を定義し、揺らぎのスペクトラムを詳しく解析する。

4. 研究成果

超弦理論によって示唆されるトンネル効果によってできた宇宙の性質を様々な側面から調べ、ホログラフィー的雙対理論による宇宙論の非摂動的定式化を確立するための研究を行った。

論文2において、トンネル効果によってできた宇宙（「バブル」）同士の衝突が一般におこり、その結果、非自明なトポロジーの境界を持つ宇宙が現れうる事を示した。バブルの衝突を表す時空の接続条件を解くことにより、漸近的未来でトーラス型の境界（空間的無限遠）を持つ宇宙を表す厳密解を構成した。また、より高次のトポロジーを持つ宇宙も、同様の機構により生成されうる事を示す証拠を与えた。

我々は、双対理論は時空の境界上で定義されており、重力を含む（定義空間の幾何も経路積分の変数である）ことを提案していたが、ここで得た結果は、幾何だけでなく、トポロジーの足し上げが必要となる事を意味している。また、それに加え、空間の形を決めるモジュライ変数に関する積分が必要になるが、バブルの衝突確率の解析から、双対理論におけるモジュライ変数の積分の重みがどのようなものであるか議論した。トポロジーとモジュライ変数の足し上げは、弦理論の撰

動論（世界面上の経路積分）で現れる数学的構造と類似であるが、我々の双対理論においては、トポロジーやモジュライ空間における重みが、弦理論の摂動論とは異なっている事を指摘した。そのため、弦理論とは異なり、トポロジーに関する和が、漸近級数ではなく収束級数である可能性があることを議論した。

また、宇宙背景輻射のスペクトラムの解析を進めた。

トンネル効果によって生成された開いた宇宙における量子論には、様々な特徴的性質がある。一つは、トンネル後に生成された揺らぎは、曲率半径より大きいスケールで指数的に減衰するという点である。これは、宇宙の体積が距離に従って指数的に増大するため、規格化可能な揺らぎはそれに従って小さくならなければならないためである。通常、初期宇宙における揺らぎは、インフレーションという機構によって、スケール不変なスペクトラムを持って生成されると考えられているが、この研究では、空間的曲率の効果によって、スケール不変性からどれだけのずれが生じるかを、まず明らかにした。

次に、今考えている宇宙では、トンネル前の宇宙で生成された揺らぎが、曲率半径より大きいスケールの揺らぎに寄与することが可能である事に着目した。ユークリッド化の処方により、揺らぎの初期条件を決定する事により、このタイプの揺らぎを解析した。このタイプの揺らぎは、上記のトンネル後に生成された揺らぎとは大きく異なるスペクトラムを持っており、また、時間依存性も異なっている。この研究では、トンネル前に生成された揺らぎが、後に生成された揺らぎに比べて、大きい値を持つ条件を明らかにした。

さらに、宇宙における揺らぎの自由度と、双対理論の演算子の間の対応関係を詳しく調べる事により、双対理論の理論的正当性の検証を進めた。（平成21年度に、サスキンド教授との共著論文 “Census taking in the hat: FRW/CFT duality” として発表予定。）

また、上述の研究の指導原理であるホログラフィー原理の物理的帰結を理解するための派生的問題として、論文1で、ブラックホールにおける情報の拡散の速度に関する研究を行った。

ブラックホールは、量子効果による輻射を放出し最終的に蒸発する事が知られている。準古典重力理論によると、輻射は熱的なランダムなスペクトラムを持つように見えるため、ブラックホールに物体を落とした場合、物体が持つ情報は最終的に失われ、量子力学の基本原則であるユニタリ性（確率の保存）が破れるのではないか、という点が以前からの未解決の問題としてあった。ホログラフィ

ー原理（あるいは、「ブラックホールの相補性原理」）は、ブラックホールに落下する物体が持つ情報は、ホライズン上で拡散し、最終的に量子輻射によって外部に放出され、ユニタリ性が保存されているという事を主張している。AdS/CFT 対応という（特殊な場合における）具体例により、量子重力を記述するユニタリな理論が構成された事により、今日では、この考え方の正しい事が受け入れられつつある。

この研究では、ブラックホールの相補性と量子論の原理（波動関数の線形性）との整合性から、情報の拡散の速度に上限がある事が要請される事に着目し、これが自然界における情報の拡散速度の上限であるという予想を提案した。また、超弦理論におけるブラックホールの性質を調べ、双対理論である行列模型が、情報の拡散速度の上限を達成している事を予想した。通常の空間上で定義された理論では、拡散に要する時間は、系の自由度に関して冪的に増大するが、行列自由度を持った理論では、それよりも短い、対数的時間で拡散が達成される事を示す定性的議論を与えた。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

（いずれも査読あり）

1. Y. Sekino and L. Susskind, “Fast scramblers,” *Journal of High Energy Physics* 810 (2008) 65.

2. R. Bousso, B. Freivogel, Y. Sekino, S. Shenker, L. Susskind, I.-S. Yang, and C.-P. Yeh, “Future foam: Non-trivial topology from bubble collisions in eternal inflation,” *Physical Review D* 78 (2008) 63538.

〔学会発表〕（計 1 件）

関野 恭弘 “CFT description of inflationary fluctuations” 日本物理学会第63回年次大会（2008年3月26日、近畿大学）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関野 恭弘 (SEKINO YASUHIRO)

研究者番号 : 50443594

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :