

令和元年5月15日現在

機関番号：32638

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05329

研究課題名(和文) 超弦理論が初期宇宙やブラックホール近傍で果たす役割

研究課題名(英文) Roles played by superstring theory in early universe or near black holes

研究代表者

関野 恭弘 (Yasuhiro, Sekino)

拓殖大学・工学部・准教授

研究者番号：50443594

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)：超弦理論が初期宇宙やブラックホール近傍で果たす役割の解明に向けて、(1)超弦理論から示唆されるバブルの生成によって出来た宇宙で、バブルの生成前の量子揺らぎが現在まで残存しダークエネルギーとなり得ることを提案し、近い将来の銀河サーベイによりこの提案が検証できる可能性を指摘した。(2)量子情報の「fast scrambling」というブラックホール特有の性質の導出を目指し、ブラックホールを表すDブレーンの行列模型のスペクトルを解析した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

基本理論の有力な候補である超弦理論によると、我々の宇宙はバブルの生成によって出来たことが示唆されるが、そのような宇宙の起源が現在の宇宙に与える影響について、これまではっきりした提案は無かった。また、現在の宇宙の加速膨張を支えるダークエネルギーの起源は未解明である。本研究は、この2つの難問を結び付けている点で意義があると考えられる。ブラックホールは、温度とエントロピーを持った熱力学的物体であることが知られているが、微視的構成要素が何なのかは明らかでない。超弦理論から示唆されるDブレーン理論からブラックホールの性質を導くことができれば、ブラックホールが情報を担う機構の理解につながり、大きな意義がある。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the roles played by superstring theory in early universe or near black holes, the following studies were performed: (1) We considered a universe created by bubble nucleation, as suggested by superstring theory, and proposed that dark energy in the present universe can be interpreted as residual effects of quantum fluctuations generated before bubble nucleation. We pointed out a possibility of testing this proposal by galaxy surveys in the near future. (2) We studied the spectrum of a matrix model for D-branes that is supposed to describe black holes, with an aim to derive “fast scrambling” of quantum information, a characteristic feature of black holes.

研究分野：素粒子理論

キーワード：超弦理論 初期宇宙 ブラックホール

1. 研究開始当初の背景

(1) 2000年代以降発展してきた「超弦理論のランドスケープ」の考え方によると、我々の宇宙は、準安定なドジッター空間の中でバブルの生成により出来たことが示唆される。そのような宇宙の起源が現在の宇宙に与える影響の解明は重要な課題であるが、これまではっきりした提案はなかった。2006年の Susskind 氏らとの共同研究で明らかにした、バブルの生成によって出来た宇宙における量子揺らぎの性質をもとに、この問題に取り組む。特に、現在の宇宙の加速膨張を支えるエネルギー（ダークエネルギー）の起源をバブルの生成により説明することを試みる。その他、宇宙背景放射、宇宙の実現確率等、様々な観点から、バブル生成が現在の宇宙への影響の解明を目指したい。

(2) ブラックホールは、量的には温度とエントロピーを持った熱力学的物体であることが分かっているが、その微視的構成要素が何なのかは明らかでない。1990年代以降の発展により、超弦理論においては、ソリトンの物体である D ブレーンの多体系がブラックホールを記述していることが明らかになりつつある。2015年の Eisert 氏らとの共同研究で、D ブレーン理論を単純化した行列模型のスペクトルを求め、その平衡化に関する性質を明らかにしたが、その解析を進展させ、行列模型がブラックホールの持つべき性質を持っていることを確かめ、ブラックホールに落ちた物質の情報がどのように担われているかの理解に近づきたい。2008年の Susskind 氏との共同研究で指摘した、ブラックホール地平面で量子情報が通常の場合の理論に比べて速く拡散する現象「fast scrambling」を、解析の手がかりとする。

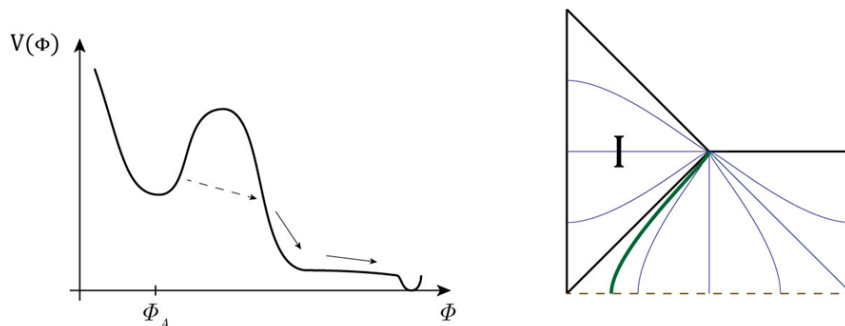
2. 研究の目的

超弦理論が初期宇宙やブラックホール近傍で果たす役割の解明を目指して、(1)宇宙論と(2)ブラックホールに関する研究を行う。それぞれについて、以下を主要な研究目的とする。

(1) バブルの生成によって出来た宇宙において、バブルの生成前にできた量子揺らぎが現在まで残存して、ダークエネルギーになる可能性を追究する。バブルの生成によって出来た宇宙では、supercurvature モードと呼ばれる、揺らぎの長距離相関を表す特徴的なモードが存在する。このモードは通常モードに比べて時間的減衰が遅く、現在まで減衰せずに残る可能性がある。それによって作られるダークエネルギーは、いわゆる quintessence 模型（ポテンシャルをゆっくり転がる古典場のエネルギーによるダークエネルギー）に近い性質を持つが、バブルの生成前に出来た量子揺らぎ特有の特徴があるので、ダークエネルギーの状態方程式パラメータ w (=圧力/エネルギー密度) を求めて、それを近い将来の観測で検証できるかどうか検討する。

(2) 2015年の論文で調べた、D ブレーン理論を単純化した行列模型は、ボソンの2つの D ブレーンが 2次元空間に存在することに相当する模型で、単純ではあるが可積分ではない。この模型がブラックホールの性質をどこまで備えているかを明らかにするため、部分系のエンタングルメントエントロピーを計算し、ブラックホールのエントロピーと比較する。fast scrambling 等の性質を見るためには、この模型では自由度が少なすぎるかもしれないので、より大きい N (D ブレーン数) と d (空間次元数) を持った模型に解析を拡張する。行列模型では、あらゆる行列要素が他のあらゆる行列要素と相互作用しているという点で解析が難しいが、2015年の論文で開発した、ゲージ群の表現空間に作用する演算子としてハミルトニアンを表す手法は、相互作用を局所的に表すことができるという大きな利点があり、 N と d が大きい場合の解析に適していると考えられる。

3. 研究の方法



(1) 「超弦理論のランドスケープ」の簡単な模型として、上図(左)のようなポテンシャルを持ったスカラー場が重力に結合しているとする。準安定な「偽の真空」(ポテンシャルの極小点)で満たされたドジッター時空があると、量子的トンネル効果により「真の真空」のバブルの生成が起こる。上図(右)は時空の因果的構造を表している。バブルの壁は緑の太線で表され、我々の宇宙はバブルの内側(左側)の、領域 I で表される開いた宇宙である。領域 I 内の青い線が時間一定面、それらが交わっている点が空間的無限遠を表す。このような宇宙で、質量が小さいスカラー場(上記のトンネル効果を起こす場とは別な場)が存在すると、その揺らぎに

supercurvature モードと呼ばれる特徴的な長距離相関を表すモードが現れることが、1990 年代に山本、佐々木、田中によって示されている。直観的には、これは宇宙がドジッター時空に埋め込まれていることに起因し、バブル生成前にできた揺らぎをバブルの中から見ていることにある。

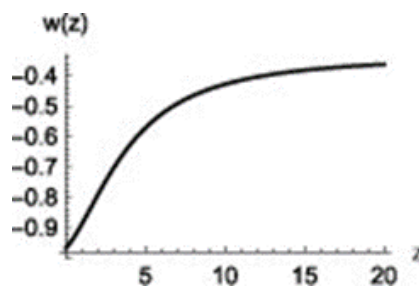
このような場のエネルギー運動量テンソルの真空期待値を計算する。これは、自由場近似のもとでは場について 2 次なので、2006 年の論文で求めた場の 2 点関数の同一点極限をとることにより求められる。Supercurvature モード以外からの寄与は宇宙初期に減衰するため、この 1 つのモードからの寄与のみ取り入れればよい。場の質量がハッブルパラメータより小さいと、宇宙膨張の効果により場が「凍結」され、エネルギー運動テンソルは質量項に支配され、宇宙項（加速膨張を支えるエネルギー）のようにふるまう。その大きさは、場の質量と偽の真空のハッブルパラメータを調節することにより、ダークエネルギー程度の大きさにすることができる。

この機構と通常の quintessence の大きな違いは、supercurvature モードは、3 次元双曲面（時間一定面）上のラプラシアンでゼロでない固有値を持つため、エネルギー運動量テンソルの運動項が厳密にゼロではないことである。また、quintessence の場合、場の初期条件（ポテンシャルのどこから出発するか）の不定性があるが、我々のモデルは、バブルの生成により宇宙誕生前に遡れるので、量子論により場の初期条件が定まっているという利点もある。場の時間発展を精密に調べることにより、エネルギー運動量テンソル（ダークエネルギー）の w の時間依存性を明らかにする。それが、2020 年代前半に観測開始予定の電波望遠鏡群 Square Kilometre Array と Euclid 衛星による銀河サーベイにより検証可能かを検討するため、Fisher 情報行列の手法による誤差予測を行う。

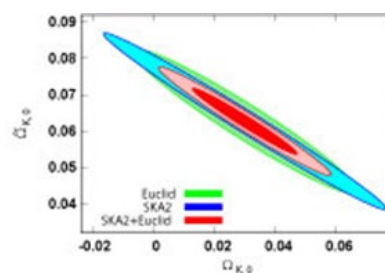
(2) 行列模型の相互作用は、行列の交換子の 2 乗のトレースで表される。SU(N) ゲージ対称性を持っており、SU(N) で不変な状態が物理的自由度を表す。2015 年の論文で、ゲージ不変な状態の空間に作用する演算子としてハミルトニアンを書き表し、ある程度の状態数でカットオフしたハミルトニアン行列を数値的に対角化し、スペクトルを求めた。その解析を以下の意味で拡張する。まず、より多くの状態数を取り入れた解析を行い、より高いエネルギーレベルまで求める。それを用いて、部分系のエンタングルメントエントロピー、およびその時間発展を求める。また、2015 年に解析した、 $N=2$ 、 $d=2$ の模型より複雑な模型の解析を進める。より大きい N を考えることにより、小部分の摂動が全系に広がる速さを調べ、fast scrambling が成り立っているかを検証する。 $d=3$ の場合、超対称化が可能になるので、超対称ブラックホールについて知られている様々な結果と比較する。

4. 研究成果

(1) ダークエネルギーが軽い場の supercurvature モードからできているとすると、未来の極限では、エネルギー運動量テンソルの質要項が支配的で、状態方程式パラメータは $w=-1$ に近づくが、過去に遡ると空間微分項が優勢になり $w=-1/3$ に近づく。現在の宇宙は前者の領域にあることを仮定するが、理論のパラメータによっては、右上図のように赤方偏移パラメータ $z=2$ 程度で $w=-1$ から有意にずれることが分かった[論文①]。



ここで得た $w(z)$ の関数形を用いて、Fisher 情報行列の手法により、銀河サーベイの誤差予測を行った結果、ある程度のパラメータ領域でこの形の $w(z)$ が検証可能である（右下図の縦軸にとった、この理論を特徴づけるパラメータがゼロでない結論付けられる）ことが分かった[論文②]。



ただし、右下図から見て取れるように、このパラメータと宇宙の空間的曲率（横軸）との間にある程度の縮退がある。縮退を解くには、異なる種類の観測を組み合わせるのが有効である。今後の課題として、(将来のではなく) 現存する観測データ（宇宙背景輻射、バリオン音響共鳴、超新星爆発）の組み合わせから、この理論に付けられる制限の解析が重要であることを認識した。空間的曲率は宇宙の起源に直接関係する量だが、現在、それに対する制限は、ダークエネルギーが純粋な宇宙項 ($w=-1$) であることを仮定して求められることが多い（例えば、Planck 2018 results 論文）。ダークエネルギーが一般の時間依存性を持つとすると、曲率についての制限は大幅に弱まることが知られているが、我々のモデルの形のダークエネルギーを仮定した場合にどのような曲率への制限が付くかは興味深い問題だと考えている。

バブルの生成が現在の宇宙に与える影響の解明を目指して、その他、上記のダークエネルギーと同様の機構で（バブル生成後の）インフレーションのエネルギーが実現されたとした場合の宇宙背景輻射の性質の研究や、2006 年に提唱したバブルの生成によって出来た宇宙に対するホログラフィック双対理論（厳密な重力理論）に基づく宇宙の生成確率の定義に関する研究を進めたが、研究期間中の発表には至らなかった。

(2) 行列模型の部分系のエントロピーの計算に関して一定の結果を得たが、物理的解釈に関する難しさがあった。行列模型で自然に現れるゲージ不変な部分系への分離が、ブラックホール内部と外部等の意味が付けられるかどうかを検討したが、現段階ではっきりした結論は得られず、研究期間中の論文発表には至らなかった。より大きい N 、 d に関する研究に関しては、ハミルトニアンをゲージ不変な状態に作用する演算子として表すための解析を進めた。本質的な困難は無いが、群の表現論に基づく状態の分類がやや複雑なため、研究期間中の論文発表には至らなかった。この研究に関する部分的な成果を国際会議で報告した[学会発表①、②]。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

① Hajime Aoki, Satoshi Iso, Da-Shin Lee, Yasuhiro Sekino and Chen-Pin Yeh, “Vacuum fluctuations in an ancestor vacuum: A possible dark energy candidate,” *Physical Review D*, 97, 043517 (2018), 1-22, doi:10.1103/PhysRevD.97.043517.

② Daisuke Yamauchi, Hajime Aoki, Satoshi Iso, Da-Shin Lee, Yasuhiro Sekino and Chen-Pin Yeh, “Observational signatures of dark energy produced in an ancestor vacuum: Forecast for galaxy surveys,” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 査読有, 掲載決定 (2019).

[学会発表] (計 7 件)

① Yasuhiro Sekino, “Equilibration in Matrix Quantum Mechanics,” *Holography and Quantum Information* (招待講演) (国際学会) 京都大学基礎物理学研究所, 2016.

② Yasuhiro Sekino, “Equilibration in Matrix Quantum Mechanics,” *Niels Bohr Institute, Seminar* (招待講演), 2017.

③ 青木一, 磯暁, Da-Shin Lee, 関野 恭弘, Chen-Pin Yeh, “Vacuum fluctuations in ancestor vacuum: A candidate for dark energy,” *日本物理学会 秋季大会*, 2017.

④ Yasuhiro Sekino, “Vacuum fluctuations in ancestor vacuum: A candidate for dark energy,” *East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2017, KEK Theory workshop 2017* (招待講演) (国際学会), 2017.

⑤ Yasuhiro Sekino, “Vacuum fluctuations in ancestor vacuum: A candidate for dark energy,” シンポジウム「宇宙はなぜ加速するのか--徹底的究明と将来への挑戦--」(国際学会), 2018.

⑥ Yasuhiro Sekino, “Vacuum fluctuations in ancestor vacuum: A candidate for dark energy,” *Stanford Institute for Theoretical Physics Seminar* (招待講演), 2018.

⑦ 山内大介, 青木一, 磯暁, Da-Shin Lee, 関野 恭弘, Chen-Pin Yeh, “Testing ancestor vacuum fluctuations as the origin of dark energy from galaxy surveys,” *日本物理学会 2018 年秋季大会*, 2018.

6. 研究組織

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。