

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 18 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540297

研究課題名(和文)量子相関の観点から見た宇宙初期ゆらぎの進化の研究

研究課題名(英文)Entanglement of primordial fluctuation

研究代表者

南部 保貞 (Yasusada, Nambu)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40212112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：インフレーション宇宙での真空状態に対してエンタングルメントの振る舞いを、場と相互作用する2つの検出器の理論モデルを用いて解析した。量子論固有の性質であるエンタングルメントの有無は、検出器の状態に対するnegativityとよばれる物理量を用いて判断される。その結果、ハッブル長さを超える大スケールにおいてはどのように検出器のパラメータを選んでも場のエンタングルメントを検出することはできないことが明らかとなった。この結果はインフラトン場がハッブル長さを超える大スケールにおいて古典的に振る舞うという量子古典転移の裏付けになっていることを意味する。

研究成果の概要(英文)：We investigate entanglement structure of a quantum field in the inflationary universe using a particle detector model. Entanglement of the quantum field can be detectable by analyzing quantum correlation between two detectors interacting with the quantum field. We found that it is impossible to detect entanglement of the quantum field for detectors separated with distances larger than the Hubble horizon scale. This result implies that the quantum field in the inflationary universe loses its quantum nature for super Horizon scale and can be treated as a classical field.

研究分野：重力理論

キーワード：entanglement inflation quantum correlation detector model negativity

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙の加速膨張期を与えるインフレーションモデルは、現在の宇宙における大規模構造形成に必要な初期ゆらぎを生成すると考えられている。インフレーション時の加速膨張の期間に、量子論的な粒子生成を通じてインフレーションを引き起こすスカラー場であるインフラトン場の量子的ゆらぎが生成される。そしてそのゆらぎの波長は宇宙膨張によってハッブル地平線を超えるマクロな波長まで引き延ばされる。そのような長波長ゆらぎは、量子的な性質を失い統計的には古典的ゆらぎと区別がつかなくなると考えられている。これがインフレーション起源の量子ゆらぎに対する古典化の仮定である。もしこの仮定が正しいとすれば、インフレーションによって用意された量子起源のゆらぎを初期条件として用いることで、重力不安定性に基づいた大規模構造形成の計算を決定論的な古典力学を用いて追跡することができる。実際、インフレーション宇宙モデルを用いた宇宙論における構造形成論は、古典化の仮定をほぼ無条件に受け入れることで成り立っている。この量子ゆらぎの古典化の仮定の妥当性は理論的に説明すべき事項であり、これまでも多くの議論がなされている。それらの研究によれば、量子ゆらぎの古典化のシナリオは大雑把には次のようにまとめることができる：インフレーション時の加速膨張によって量子場の真空状態はスクイズド状態と呼ばれる沢山の粒子を含む励起状態になる。大きくスクイズされた量子状態に対しては、正準共役な演算子間の非可換性が実質的に無視できる様になり、その結果として量子論における演算子をc-数の確率変数として置換えて扱うことが可能となる。故に十分にスクイズされた状態に対しては、量子論的な期待値と同じ答えを与うる古典的な確率分布関数の存在が可能となり、量子的ゆらぎの振舞いを古典的な確率過程として置換えることが可能となる。

しかしながら、以上の古典化問題の解釈は量子論の重要な側面である量子相関(エンタングルメント)の振舞いを全く考慮していない。量子論では古典論では記述できない非局所的な相関を持つことができ、これをエンタングルメントとよぶ。考えている2体系がエンタングルメントを持っている場合には、2体間の相関関数は古典論で許されるより強い相関を持つことが可能となり、その相関の大きさは古典的かつ局所的な確率過程では再現することができない。具体例としてはEPRパラドックスやBell不等式の破れなどが知られており、量子力学では古典力学ではありえない相関が現れうる。つまり量子系の特徴であるエンタングルメントが失われる何らかの機構が存在しない限り、古典的確率変数を用いて2体間の相関を記述あるいは模倣することはできず、その系を古典的であるとみなすことはできない。よって、量子ゆらぎの古典化の問題を扱う上で、どのようにエンタングルメントが失われて古典的描像が出現してくるかを理解することが重要となる。

### 2. 研究の目的

本研究課題は、この量子ゆらぎの古典化問題を、量子相関(エンタングルメント)の観点から解明することを目標とする。また、観測実験的に量子ゆらぎの古典化現象が検出可能であるかどうかを検討する。

### 3. 研究の方法

(1) エンタングルメントの中でも最も簡単な2体間エンタングルメントを用いて、量子場に対するエンタングルメントの評価方法の検討を行う。無限自由度を持つ場から2体系を定義するためには、何らかの意味での粗視化を導入する必要がある。具体的な手法としては、空間領域での平均化、運動量空間でのモードの制限、場と相互作用する粒子的自由度の導入などが考えられるが、これらの異なる2体系

の定義の下で、場に対する2体間エンタングルメントの振舞いの相違点を検討する。

(2) 膨張宇宙での量子場に対する2体間エンタングルメントの振舞いを解析する。ガウス状態に対する2体間エンタングルメントに関しては、その存在を判定する必要十分条件が正準変数の共変行列に対する条件として与えられており、これを用いて量子相関の有無を判定することができる。量子場に対する適切な粗視化を通じて定義された2体系を用いて、エンタングルメントが失われる条件ならびにゆらぎの古典的振舞いが現れるための条件を明らかにする。

(3) 量子相関が切れて古典化が実現するまでの過程において、観測（測定）可能な古典的相関がどのように変化してゆくかを追跡する。そして、構造形成の初期条件として使用する量子起源のゆらぎの大きさを決定する。

#### 4. 研究成果

本研究課題の研究成果は の論文に詳細に記してあるのでその概要を以下に記す。

量子場の持つ量子相関の振る舞いを、場と相互作用する2つの検出器の理論モデルを用いて解析した。量子論固有の性質であるエンタングルメントの有無は、このモデルにおいては2つの検出器の状態に対する

negativity とよばれる物理量を用いて判断される。ミンコフスキー時空での真空状態、ミンコフスキー時空での熱的状态、インフレーション宇宙での真空状態に対してエンタングルメントの振る舞いを詳細に調べた。

Negativity の評価は振動関数の2重積分の形で表現されるために、解析的にその振る舞いを把握するのは困難である。そのため多少時間のかかる数値積分を実行することで、その振る舞いを得ることに成功した。

ミンコフスキー真空では、2つの検出器間の距離によらず検出器のパラメーターを適切に設定することで必ず量子場のエンタングル

メントを検出できる。この意味でミンコフスキー真空はエンタングルメントを持つ。一方、インフレーション宇宙での量子場は場の種類によってエンタングルメントの振る舞いが異なる。Massless conformal field はミンコフスキー真空と同様のエンタングルメントを示すが、massless minimal field に対してはハッブル長さを超える大スケールにおいてはどのように検出器のパラメーターを選んでも場のエンタングルメントを検出することはできない。この結果は massless minimal field であるインフラトン場がハッブル長さを超える大スケールにおいて古典的に振る舞うという量子古典転移の裏付けになっていることを意味する。より具体的にこの結果を確かめるために量子相関と古典相関の大きさを評価し大スケールにおいてはエンタングルメントは消失する代わりに大きな値の古典相関が残ることを確認した。

#### 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6件)

Y. Nambu,  
「宇宙初期ゆらぎのエンタングルメント」  
日本物理学会誌 11月号(2014) p.763-770

Y. Nambu, 「光子の裁判と宇宙の古典性」  
数理科学 1月号(2014) p.45-50

Y. Nambu, “Classical and quantum correlation of quantum fluctuation”,  
J. Phys.:Conference Series, 484 (2014) 0112067

K. Kanai and Y. Nambu, “Viewing black holes by waves”, Class.Quantum Grav. 30 (2013)175002

Y. Nambu, “Entanglement structure in expanding universe”, Entropy 15 (2013) p.1847-1874

Y. Nambu and Y. Ohsumi, “Classical and quantum correlation”, Phys. Rev. D84(2011)044028

[学会発表](計4件)

S. Kukita and Y. Nambu, “CGA master equation and entanglement structure”, YITP workshop on quantum information physics (2014/8)

Y. Nambu, “Wave scattering by black holes” 第7回ブラックホール磁気圏研究会(熊本大学 2014/3/5)

Y. Nambu, 「初期宇宙とエンタングルメント」, 基研研究会: 量子情報物理学 (2013/12/4)

Y. Nambu, “Entanglement structure in expanding universe”, Quantum Vacuum Kawatabi 2012 (東北大学セミナーハウス 2012/10/22)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

南部保貞 (Nambu Yasusada )  
名古屋大学大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：40212112

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：