

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03866

研究課題名(和文) 宇宙初期ゆらぎにおける量子性と多体間エンタングルメント

研究課題名(英文) Quantumness and multipartite entanglement in primordial fluctuation

研究代表者

南部 保貞 (Nambu, Yasusada)

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40212112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：S. Camalet 2007によって提案された着目系の「内部量子もつれ」とその外部環境間との「外部量子もつれ」の強さに対するモノガミー不等式に着目し、この不等式が、着目系ABの純粋化によって用意された4体系ABCDに対して成立することを確かめた。そして、このモノガミー関係が部分系ABの分離可能性に対する十分条件を与えることを見出した。「外部量子もつれ」の大きさが大きくなるとそれに対して「内部量子もつれ」の大きさは減少し、ある臨界値でゼロとなる。これは部分系ABの情報量が外部系であるパートナーモードCDとの間で共有され、その共有情報量の大きさが宇宙膨張と共に増大することを意味する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エンタングルメントパートナーとモノガミーの観点よりインフレーション宇宙における古典相関の生成過程の理解が可能となった。今後の発展としては、パートナー公式を用いることで得られるパートナーモードの空間プロフィールを用いて、情報量の共有が時間と共にどのように変化してゆくかを見ていく。そして情報量の共有拡散の観点より、インフレーション宇宙における古典化の理解をさらに深める。

研究成果の概要(英文)：We consider purification of the target bipartite state AB by applying the partner formula and obtain a 4-mode pure Gaussian state which embed the mode AB. Then using a monogamy relation between the "internal entanglement" and the "external entanglement" proposed by S. Camalet, we have shown that negativities $N(A:B)$ and $N(AB:CD)$ obey a trade-off relation and this monogamy relation provides a sufficient condition of separability of the AB.

研究分野：重力理論と量子情報

キーワード：原始量子ゆらぎ 量子古典転移 量子もつれ エンタングルメント entanglement partner entanglement monogamy インフレーション宇宙

1. 研究開始当初の背景

宇宙の加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形成に必要な初期ゆらぎを生成するメカニズムを提供すると考えられている。宇宙の加速膨張を引き起こすインフラトン場の量子的励起により、空間曲率のスカラー的ゆらぎが生成される。そしてそのゆらぎの波長は、宇宙膨張に伴ってハッブル地平線長さを超えるマクロなスケールまで引き延ばされる。こ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（原始量子ゆらぎの古典化）。もしこの量子古典転移が起きたとすれば、インフレーションによって生み出された量子起源のゆらぎを初期線形ゆらぎとして用いることで、重力不安定性に基づいた大規模構形成の計算を古典力学を用いて追跡することができる。実際、インフレーションモデルに基づいた宇宙論の構形成のシナリオは、初期量子ゆらぎの古典化を前提として成り立っている。しかしながらこの古典化の過程は、量子論を用いてきちんと説明しなくてはならない。

量子起源のゆらぎの古典性を主張するためには、量子的コヒーレンスの消失や量子相関の消失について検討する必要がある。量子論では古典論で記述できない「エンタングルメント」とよばれる非局所的な量子相関を持つことができる。2つの系がエンタングルしている場合には、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、その相関の振る舞いは局所的な確率過程では再現することができない。この量子的相関は「Bell 不等式の破れ」として測定を通じて確認することができる。量子系の特徴であるエンタングルメントが消失しない限り、局所的確率変数を用いて2体系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。申請者がこれまでに行ってきた研究によれば、インフレーション時の空間領域間のエンタングルメントは量子ゆらぎの波長がハッブル地平線長さを超えた時点で消え（エンタングルメントの消失現象）、それ以降においてゆらぎの2点相関は局所的確率変数で表現することが可能となる。よってゆらぎの2体相関の振る舞いのみに着目すれば、ゆらぎの統計的性質は古典論を用いて模倣でき古典化の過程が完了していることになる。

2. 研究の目的

本研究は「多体間エンタングルメント」の性質を用いることで初期宇宙の量子性及び古典化に対する理解をより深め、さらに観測的に量子性を検証する手法を開拓することが目的である。そのためにインフレーションによって生成される量子ゆらぎの持つ「モノガミー性」に着目する。これは量子系が保有するエンタングルメントの基本的な性質であり、3体以上の多体量子相関を考えることで初めて取得できる。例えば3体系（3つの量子力学的自由度を持つ系）において、それぞれの自由度間のエンタングルメントの強さは「モノガミー関係」とよばれる不等式で表現される制約を受け、2体間のエンタングルメントの大きさの配分方法は制限を受ける。AB間のエンタングルメント $E(AB)$ は上限値 $E(A|BC) - E(AC)$ で押さえ込まれる。仮にモノガミー関係によって与えられる E_{max} がゼロに近づけば、必然的に AB 間のエンタングルメントはゼロにならざるを得ない。これは AC 間の量子相関が強すぎると、AB 間は量子相関を持っていないことを意味する。インフレーション宇宙における2つの空間領域 AB 間のエンタングルメント消失の現象も、2つの系がより大きな系（環境系）に埋め込まれているとみなせば、3体系におけるエンタングルメントモノガミーの問題として捉え直すことが可能となる。

申請者のこれまでの研究によれば、多体間エンタングルメントの効果を取り入れることで、量子相関が消失するスケールはハッブル地平線長さより大きくなっていく。よって多体間エンタングルメントの効果を考えることで、2体相関のみでは得られない初期宇宙における量子性を検証することが期待できる。本研究は、多体エンタングルメント効果を切り口にして初期宇宙の量子性と古典性の関係の解明を目指す点で、これまでの先行研究にはない新しい視点を与える。また観測的な手法を提案する点でより実証的な重要性を持つ。

3. 研究の方法

インフレーション宇宙における空間領域 AB 間のエンタングルメントの消失現象を、「モノガミー性」の観点から説明を試みる。2つの空間領域 AB の量子状態（これは混合状態）を部分系として持つ純粋状態を構成する。これはパートナー公式とよばれる任意のガウス状態に対する純粋化状態を与える手法を用いて実行する。そのために必要な2つの自由度を C, D とすれば、全体系 ABCD は純粋状態である（AB の純粋化の操作）。各自由度 A, B, C, D はガウス状態であるので、この系の多体エンタングルメントの構造は、各自由度に対する局所的な正準変換を施すことで定義される共分散行列の標準形を用いて表現可能である。純粋化の手続きにより得られる4体系に対する標準形では自由に動かせるパラメーターは実数3つまで減らせるので、部分系 AB に対するエンタングルメント消失条件を3次元のパラメーター空間において詳細に解析することが可能となる。

4. 研究成果

4 体系に対する通常のモノガミー関係は AB 間の分離可能条件に関して有用な制限を与えないことが判明したので, S. Camalet 2007 によって提案されたやや異なる構造のモノガミー関係を用いた. これは多体系において着目系の「内部量子もつれ」と着目系とその外部環境との「外部量子もつれ」の強さに対する不等式であり, 有限自由度の Hilbert 空間の場合には証明されている. 本研究ではまずこの不等式が, 純粋化によって用意された 4 体系 ABCD に対して成立することを確かめた(証明した). そして, このモノガミー関係が部分系 AB の分離可能性に対する十分条件を与えることを見出した. 「外部量子もつれ」の大きさは宇宙膨張と共に単調に大きくなる. それに伴って「内部量子もつれ」の大きさは減少し, 宇宙のスケール因子がある臨界値に到達するとゼロとなる. これは部分系 AB の情報量が外部環境系中に混在するパートナーモード CD との間で共有され, その共有情報量の大きさが宇宙膨張と共に増大してゆくことを意味する.

今後の発展としては, パートナー公式を用いることで得られるパートナーモードの空間プロファイルを活用して, 共有情報量が時間と共にどのように変化してゆくかを定性的に分析する. そして情報量の共有拡散と, インフレーション宇宙における古典化の実現がどのように関係するかを理解する.

5. 発表論文

本研究成果報告中の内容はプレプリント [arXiv: 2305.18662](https://arxiv.org/abs/2305.18662) (Entanglement partners in deSitter Universe, Y.Nambu and K.Yamaguchi)にて発表し, 学術雑誌に投稿中である.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Tsuji-mura, J. and Nambu, Y.	4. 巻 24
2. 論文標題 Entanglement Reny entropy of two disjoint intervals for large \mathcal{S}_c Liouville field theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Entropy	6. 最初と最後の頁 1758
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/e24121758	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 -
1. 著者名 Y. Nambu and Y. Osawa	4. 巻 103
2. 論文標題 Tripartite entanglement of Hawking radiation in dispersive model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 125007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.125007	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 Y. Nambu	4. 巻 8
2. 論文標題 Qubit clock in quantum cosmology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/universe8020099	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 -
1. 著者名 Y. Nambu and S. Noda	4. 巻 105
2. 論文標題 Interferometry of black holes with Hawking radiation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 45022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.045022	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 Jun Tsujimura and Yasusada Nambu	4. 巻 22
2. 論文標題 Null Wave Front and Ryu-Takayanagi Surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Entropy	6. 最初と最後の頁 1297
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/e22111297	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 -

1. 著者名 Akira Matsumura and Yasusada Nambu	4. 巻 2
2. 論文標題 Violation of Bell-CHSH Inequalities through Optimal Local Filters in the Vacuum	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Quantum Reports	6. 最初と最後の頁 542-559
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/quantum2040038	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 -

1. 著者名 A. Matsumura and Y. Nambu	4. 巻 6
2. 論文標題 Squeezing of Primordial Gravitational Waves as Quantum Discord	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Universe	6. 最初と最後の頁 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/universe6020033	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 -

1. 著者名 Nambu, Y., & Hotta, M.	4. 巻 107
2. 論文標題 Analog de Sitter universe in quantum Hall systems with an expanding edge	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 105005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.085002	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 Osawa, Y., & Nambu, Y.	4. 巻 107
2. 論文標題 Particle creation and entanglement in a dispersive model with stepvelocity profile	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 105005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.105005	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 Kaku, Y., Maeda, S., Nambu, Y., & Osawa, Y.	4. 巻 106
2. 論文標題 Quantumness of gravity in. harmonically trapped particles.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 126005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.126005	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 Matsumura, A., Nambu, Y., & Yamamoto, K.	4. 巻 106
2. 論文標題 Leggett-Garg inequalities for testing quantumness of gravity.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 45022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.106.012214	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 Nambu, Y.	4. 巻 60
2. 論文標題 量子情報で理解する宇宙	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 数理科学	6. 最初と最後の頁 51-58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Katsube, R., Tam, W.-H., Hotta, M., & Nambu, Y.	4. 巻 106
2. 論文標題 Deep Learning Metric Detectors in General Relativity.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 44051
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.044051	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 Nambu, Y. and Yamaguchi, K.	4. 巻 -
2. 論文標題 Entanglement partners and monogamy in de Sitter universes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv: 2305.18662	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Y. Nambu
2. 発表標題 Entanglement Partner in de Sitter Universe
3. 学会等名 Gravity and Quantum Workshop (九州大学) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Nambu
2. 発表標題 Analog de Sitter universe in quantum Hall systems with an expanding edge
3. 学会等名 ブラックホール磁気圏研究会 (鹿児島市) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Nambu
2. 発表標題 流体ブラックホールにおけるHawking輻射の量子もつれ構造
3. 学会等名 中央大素粒子研究室セミナー(zoom) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Nambu
2. 発表標題 流体ブラックホールにおけるHawking輻射の量子もつれ構造
3. 学会等名 大阪市大セミナー(zoom) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Nambu
2. 発表標題 Inteferometry of black holes with Hawking radiation
3. 学会等名 ブラックホール磁気圏研究会(大阪市大) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Maeda, A. Kaku, Y. Nambu, Y. Osawa
2. 発表標題 重力がLG不等式の破れに与える影響
3. 学会等名 巨視的量子現象と量子重力(京大基研) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Nambu
2. 発表標題 量子時計と重力
3. 学会等名 巨視的量子現象と量子重力(京大基研)(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasusada Nambu
2. 発表標題 Entanglement partner of super horizon modes
3. 学会等名 Recent progress in theoretical physics based on quantum information theory (zoom@YITP)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Nambu
2. 発表標題 初期宇宙とエンタングルメント
3. 学会等名 九州大学理学院談話会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Nambu
2. 発表標題 Multipratite entanglement in black hole evaporation and primordial fluctuations
3. 学会等名 Relativistic Quantum Information North (RQI-N 2019, Taiwan)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nambu
2. 発表標題 インフレーションの数理：原始ゆらぎの量子性
3. 学会等名 日本物理学会 (九州大学) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Nambu
2. 発表標題 Quantum circuit model of black hole evaporation
3. 学会等名 quantum information and string theory (YITP) (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0件

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