

令和 5 年 6 月 3 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03827

研究課題名（和文）原始重力波の量子性で探る宇宙の起源

研究課題名（英文）Exploring the origin of the Universe with nonclassicality of primordial gravitational waves

研究代表者

菅野 優美（Kanno, Sugumi）

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：70827427

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）：ハンブリー・ブラウンとトゥイス干渉計を宇宙論に応用し、原始重力波の量子性を検出することが可能か調べた。インフレーション中に原始重力波が物質場と結合すれば、量子性を示すことを明らかにした。この量子性を示す振動数領域を予言し、将来原始重力波の量子性が検出可能であることを示した。また、原始重力波の量子（グラビトン）を間接的に捉える方法を考えた。マイケルソン干渉計の鏡のエンタングル状態を考え、環境にあるグラビトンが鏡に与えるノイズを見積もりデコヒーレンス時間を予言した。この論文はアメリカ物理学会の学術雑誌 Physical Review D 誌の Editors' suggestion に選ばれた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原始重力波の量子性をハンブリー・ブラウンとトゥイス干渉計を用いて、直接的に観測できる振動数領域を予言した。また原始重力波の量子であるグラビトンが、巨視的量子物体に対するノイズになることでデコヒーレンスを起こし、そのデコヒーレンス時間を測定することで、グラビトンを間接的に観測する方法を提案した。これらの観測方法が将来実現できれば、私たちの宇宙の起源が確かに量子揺らぎであったことが明らかになる。原始重力波の量子性の検出に成功すれば、未だに存在が確認されていないグラビトンの発見にもつながり、量子重力理論研究への波及効果が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We considered the possible detection of nonclassicality of primordial gravitational waves (PGWs) by applying Hanbury-Brown and Twiss (HBT) interferometry to cosmology. We characterized the nonclassicality of PGWs in terms of sub-Poissonian statistics that can be measured by the HBT interferometry. We showed that the presence of classical sources during inflation makes it possible to detect nonclassical PGWs with the HBT interferometry. It turned out that PGWs with frequencies higher than 10 kHz enable us to detect their nonclassicality. As another method to detect the nonclassical PGW, we proposed an experiment that the entanglement between two macroscopic mirrors suspended at the end of an equal-arm interferometer is destroyed by the noise of gravitons through bremsstrahlung. We estimated that the decoherence time induced by the noise of gravitons in squeezed states stemming from inflation is approximately 20 seconds for 40 km long arms and 40 kg mirrors.

研究分野：宇宙論、重力理論

キーワード：原始重力波 グラビトン エンタングルメント

1. 研究開始当初の背景

宇宙背景放射衛星 WMAP や Planck で得られた数々の証拠から、銀河や銀河団などから成る宇宙の大規模構造の起源がインフレーション中に生成された量子揺らぎであることは、もはや間違いないと信じられている。マイクロな量子揺らぎがマクロな宇宙の構造の直接の原因であるというこの宇宙論の結論は、とても衝撃的である。しかし、宇宙の起源が確かに量子揺らぎだったという証拠は未だに見つかっていない。従って、この揺らぎの量子性を直接検証することによって、インフレーション理論を検証することは宇宙論の最重要課題である。

2015 年の重力波干渉検出器 LIGO/Virgo による重力波の直接検出以来、重力波観測の報告が相次いでいる。今後はさらに感度を上げることによって、インフレーション中の量子揺らぎから生成される原始重力波を観測することが重要になっていく。実際、将来打ち上げ予定の重力波観測衛星 LISA や DECIGO などがサイエンスのターゲットにしている。重力波は相互作用が弱いため、透過性が高く、インフレーション中に生成された際の量子性を保ったまま、現在まで伝搬して行くことが期待されている。

また近年の量子情報理論の発展は目覚ましく、様々な量子性を定量化する指標が提案され、実験が行われている。従って、量子性の検証は具体的な遂行可能な研究になっている。

2. 研究の目的

原始重力波はインフレーション中の量子揺らぎから直接生成される。この原始重力波の量子性を現在観測するためには、少なくとも生成される際に素粒子の大統一理論のエネルギースケールほどの高いエネルギーが必要になる。このような高いエネルギーを宇宙初期に実現できるのは、インフレーション理論以外では難しいとされている。例えば、インフレーション理論と競合している、宇宙どうしが衝突するエキプロティック理論では、重力は生成されないことが予想されている。従って、原始重力波の量子性を観測することは、インフレーション理論を証明することにもつながる。2015 年の LIGO/Virgo による重力波の直接検出によって、原始重力波の観測に対する実現性が高まった。今後の具体的な観測計画に対し大きく後押しをしてきている。

従って、本研究の目的は、量子情報理論の最近の発展を応用して、インフレーション中に生成される原始重力波の量子性を証明し、宇宙の起源を明らかにすることである。本研究が成功すれば、未だに存在が確認されていない重力子(グラビトン)の発見にもつながり、量子重力理論研究への波及効果が期待できる。

3. 研究の方法

量子光学では、古典的な光子の統計はポアソン分布に比べて分散が必ず大きくなることが知られている。これは言いかえると、ポアソン分布に比べて分散が小さければ、量子性が存在していることを意味する。これは重力子でも同じことが言える。従って、この点に着目してグラビトンの統計性を調べる。

通常のインフレーションモデルでは量子揺らぎに対する一番自然な真空として、バンチ・デイビス真空と呼ばれる状態を初期状態として考える。この真空は十分小さなスケールでは平坦なミンコフスキー真空と同じように振る舞うからである。これまでの解析では、バンチ・デイビス真空におけるグラビトンの統計性は、古典的な特徴を示すことが分かっている。しかし、最近ではゲージ場がインフレーション中に古典的な外場として存在し、その状態で原始重力波が生成されるというモデルが盛んに議論されるようになってきている。この状況で重力波が生成される場合には、グラビトンの統計性が量子性を示しうる。この量子性を保つための条件を明らかにする。

また、光子の統計性を判別できる検出器として、ハンブリー・ブラウンとトゥイスの強度干渉計が注目されている。この強度干渉計は、重力子の統計性と関係しているため、重力子の統計性を強度干渉計で測定することが可能になっている。従って、これらを宇宙論に応用して重力子の統計性を調べ、ハンブリー・ブラウンとトゥイスの強度干渉計を用いて重力子が測定可能な振動数領域を预言する。

ハンブリー・ブラウンとトゥイスの強度干渉計を用いる方法は、原始重力波の量子であるグラビトンを、直接的に捉える方法だが、もう1つの方法として、インフレーション中に量子揺らぎから直接生成されるグラビトンを、重力波干渉計に対するノイズとして間接的に捉えるアイデアを提案する。まず物体のランジュバン方程式を導出し、物体に対するノイズの正体を明らかにする。次に、マイケルソン干渉計を用いて、その上での両端の鏡をエネタングルさせ、この状態を初期状態とする。この鏡は、ランジュバン方程式を導出することで判明するノイズによってデコヒーレンスを起こすため、そのデコヒーレンス時間を見積もる。

4 . 研究成果

量子光学では、光子の統計性がサブポアソン分布になれば、光子が量子状態にあると判別される。インフレーション中に量子揺らぎから直接生成されるグラビトンは、インフレーション中に物質場と結合すれば、その統計性がサブポアソン分布になることを明らかにした。このことを用いて、グラビトンの統計が量子性を示す振動数領域を予言することに成功した。また、宇宙初期がエンタングル状態だった場合には、グラビトンの統計が量子性を示しやすくなることを明らかにした。これらのことから、将来の重力波干渉計に、ハンブリー・ブラウンとトウイスの干渉計が搭載されれば、将来 Advanced LIGO で量子的な原始重力波を観測できる可能性があることを示した。

ランジュバン方程式を導出することにより、巨視的物体に対するノイズが、グラビトンの量子揺らぎであることを明らかにした。このグラビトンは、インフレーション中にその量子状態がスクイズ状態になることで、物体に与えるノイズが、現在増幅することを示した。そこで、このグラビトンのノイズを用いて、グラビトンを間接的に検出するための具体的な実験デザインを考案した。この実験デザインでは、まずマイケルソン干渉計を用いて、その両腕の端に吊り下げた鏡が、互いにエンタングルしている状態を初期状態とする。このエンタングルした巨視的な鏡は、時間発展すると、実験室におけるグラビトンの量子揺らぎが引き起こすノイズにより、デコヒーレンスを起こすことを明らかにした。また、そのデコヒーレンス時間を予言することに成功した。このデコヒーレンス時間は、空気分子等によるデコヒーレンス時間よりも早く起こることも明らかになった。従って、このデコヒーレンス時間を測定することで、グラビトンの存在が間接的に検出できることになる。この論文はアメリカ物理学会の学術雑誌 Physical Review D 誌の Editors' suggestion に選ばれた。

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 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Sugumi Kanno, Jiro Soda	4. 巻 99
2. 論文標題 Detecting nonclassical primordial gravitational waves with Hanbury-Brown-Twiss interferometry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 084010-1, 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.084010	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 Sugumi Kanno	4. 巻 100
2. 論文標題 Nonclassical primordial gravitational waves from the initial entangled state	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 12353601, 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.123536	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 Kanno Sugumi, Soda Jiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Polarized Initial States of Primordial Gravitational Waves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 672 ~ 672
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym12040672	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 Kanno Sugumi, Soda Jiro, Tokuda Junsei	4. 巻 103
2. 論文標題 Noise and decoherence induced by gravitons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 044017-1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.044017	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 Kanno Sugumi, Soda Jiro, Tokuda Junsei	4. 巻 104
2. 論文標題 Indirect detection of gravitons through quantum entanglement	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 083516-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.083516	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 Kanno Sugumi, Matsumura Akira, Soda Jiro	4. 巻 37
2. 論文標題 Harvesting quantum coherence from axion dark matter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 2250028-1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217732322500286	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 -

[学会発表] 計13件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Sugumi Kanno
2. 発表標題 Exploring the Early Universe with Gravitons
3. 学会等名 1001 Space Nights Online Seminar of ISSIBJ (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅野 優美
2. 発表標題 エンタングルメントを用いたグラビトンの間接検出
3. 学会等名 日本物理学会 2022年春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sugumi Kanno
2. 発表標題 Graviton nongaussianity in Λ -vacuum
3. 学会等名 Non-linear aspects of cosmological gravitational waves (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sugumi Kanno
2. 発表標題 Graviton nongaussianity in Λ -vacuum
3. 学会等名 9th Korea-Japan Workshop on Dark Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sugumi Kanno
2. 発表標題 Graviton nongaussianity in Λ -vacuum
3. 学会等名 Testing Gravity 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 菅野 優美
2. 発表標題 原始揺らぎの量子性は観測できるか？
3. 学会等名 Kagoshima Workshop on Particles, Fields and Strings 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sugumi Kanno
2. 発表標題 The exploration of new areas of cosmology
3. 学会等名 2021 Joint workshop of TYL/FJPPL and FKPL (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅野 優美
2. 発表標題 初期宇宙とグラビトン探索
3. 学会等名 素粒子物理学の進展 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sugumi Kanno
2. 発表標題 Squeezed quantum coherent states of axions
3. 学会等名 Workshop on Very Light Dark Matter 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅野 優美
2. 発表標題 原始揺らぎの量子性は観測できるか？
3. 学会等名 第34回 理論懇シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sugumi Kanno
2. 発表標題 Indirect detection of gravitons through quantum decoherence
3. 学会等名 KEK IPNS-IMSS-QUP Joint workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅野 優美
2. 発表標題 ブラウン運動とグラビトン
3. 学会等名 九大ー理研ジョイントワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sugumi Kanno
2. 発表標題 Noise and decoherence induced by gravitons
3. 学会等名 Recent progress in theoretical physics based on quantum information theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------