

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05444

研究課題名(和文)量子場の非局所相関に起源をもつ量子放射の研究

研究課題名(英文) Study of quantum radiation produced by nonlocal correlations of quantum fields

## 研究代表者

山本 一博 (Yamamoto, Kazuhiro)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：50284154

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)：重力と量子力学の融合を目的とし、相対論と量子論が同時に重要な役割をするウンルー効果に着目して、量子場の真空が持つ量子もつれが作る非局所相関の構造とそれに起因する量子放射の存在を明示した。スカラー場だけでなく、重力波、スピノル場の4次元ミンコフスキー真空に対し、リンドラー時空とカスナー時空の量子もつれによる記述を初めて与えた。ドシッター時空上のスカラー場のパンチ-デイビス真空に対しても、static chartの量子もつれによる記述を与え、真空場と相互作用して加速運動をするウンルー-ドウィット検出器から生じる量子もつれに起因する量子放射を明らかにした。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

ホーキング放射の類似としてウンルー効果の検証は、重力と相互作用する量子系が持つ性質を解明する上で重要である。ウンルー効果は、量子場の真空の量子もつれに起因しているため、スカラー場のみならず、現実的なスピノル場や重力波の量子場の真空の量子もつれによる記述は、ウンルー効果に関わる理論予言の際に役立つ成果である。また、ウンルー-ドウィット検出器による量子場の量子もつれの検証に関する理論模型が、重力の量子性の検証実験のために提案された理論模型と構造が似ていることに着目し、ニュートン重力による量子系の量子もつれの生成やデコヒーレンス進化を明らかにした。これは今後の重力の量子性の検証研究に役立つ。

研究成果の概要(英文)：Focusing on the Unruh effect, in which relativity and quantum theory play important roles at the same time, we clarified the structure of nonlocal correlation created by the quantum entanglement of the vacuum of the quantum field and the existence of quantum radiation caused by it. For the first time, we gave descriptions of the four-dimensional Minkowski vacua of gravitational waves and spinor fields as well as scalar fields as quantum entangled states of Rindler space-time and Kasner space-time. We developed the description of the Bunch-Davies vacuum of the scalar field on the de Sitter space-time as a quantum entanglement states of the left and right static charts, and we revealed the quantum radiation caused by the quantum entanglement generated from the accelerating Unruh-De Witt detector that interacts the field in de Sitter space.

研究分野：宇宙論

キーワード：ウンルー効果 曲がった時空上の場の量子論 量子もつれ 揺動散逸関係 デコヒーレンス 光学機械振動子

### 1. 研究開始当初の背景

量子論と相対論を融合する量子重力理論の構築は、物理学最大の未解決問題である。重力波の発見により一般相対論の検証は新たなステージに入り、一方で量子情報、量子測定といった量子科学分野は、大きく発展し、物性物理学から宇宙論研究まで大きな影響を与えている。量子論と相対論を組み合わせると、ホーキング放射やウンルー効果が予言される。これらの深い理解や検証は、量子重力構築へのヒントを与え、未解決問題解決へのマイルストーンとなると考えられている。ウンルー効果は、一定加速運動をする観測者がミンコフスキー真空を熱的励起状態として観測するという理論予言である。相対論では、等価原理によって、重力がない時空中でも重力があるかのように座標系を選べるので、ウンルー効果はホーキング放射と等価原理により対応する効果とみなすことができる。

ウンルー効果の検証は、インフレーション宇宙における量子揺らぎの検証にもインパクトがある。加速膨張宇宙は、ド・シッター時空中によって表される。また、ミンコフスキー時空中で加速度運動をする座標系はリンドラー時空中で表され、一定加速度運動をする観測者に対するウンルー効果は、リンドラー時空中によって記述される。リンドラー時空中の観測者が熱励起を見るように、ド・シッター時空中の場の量子論において、ド・シッター時空中の観測者も膨張率に比例するギボンス-ホーキング温度の熱励起を見ると予言されている。これらは、時空中の真空の構造に付随して現れる量子もつれに起因することが知られている。

ウンルー効果は極めて小さな効果であるが、観測による検証の可能性が議論されてきた。高強度レーザーによる電子の強い加速により、ウンルー効果による熱的光子と加速電子とが相互作用して放射が発生し、その検出可能性が理論的に指摘された。ところが、その後の研究により、このような単純な描像による放射は生じないことが発見された。しかし、この解析も、完全なものではなく、ウンルー効果による放射シグナルが全くないのかどうかは、明らかになっていなかった。研究開始当初、量子場の真空の量子揺らぎと相互作用し加速運動する粒子やウンルー-ドウィット検出器からエネルギー放射が存在することが示されており、この放射がウンルー効果とどのように関係するか物理的意味や、ウンルー効果の検証となるかを解明する必要があった。また、現実的なディラック場や、重力波について量子場のウンルー効果に関する記述が明らかになっていなかった。

### 2. 研究の目的

量子力学系に対する重力の効果を理論的に調べるモデルとして、曲がった時空中の場の量子論を基礎として場と相互作用する量子力学系から生じるウンルー効果に伴う量子放射の機構の解明が本研究の目的である。量子場の真空の量子揺らぎと相互作用しながら一定加速運動する粒子やウンルー-ドウィット検出器からエネルギー放射があり、量子場の非局所的相関に起因する放射としてこれが発生することと示唆されていたため、この放射が量子場の真空の量子もつれの帰結として生じるものであることを明示し、ウンルー効果の検証までの道筋を明らかにすることが研究の目的である。また、現実的な実験的検証に向けて、スピノル場や電磁場、重力波に対する真空の量子もつれの構造を明らかにすることなど、量子場の非局所相関の検証の可能性を広く探究すること、さらには、ウンルー効果と数学的に共通の性質を持つド・シッター時空中やブラックホール時空中における量子場についても応用的研究を進めて、重力と融合する量子力学系が持つ普遍的性質を探ることが目的である。

### 3. 研究の方法

一般に量子力学はミクロな系を記述する理論で、マクロな系で効果を表す重力とは対極にある。しかし、量子情報理論などの進展によって、量子力学系の重力相互作用や相対論的效果を検証できるようになりつつある。ウンルー効果とそれに伴う量子放射を軸として、量子重力と量子情報にまたがる研究を進める。具体的には、曲がった時空中の場の量子論を基礎とし、相対論的に構成された量子場と相互作用する調和振動子の量子力学系の理論モデルをもとに、ウンルー放射の起源として示唆されている量子場の非局所相関との関係を調べる。

まず、ミンコフスキー時空中において、加速度系の観測者の座標に対応するリンドラー時空中、空間1次元方向に膨張するよう座標を選んだ膨張カスナー時空中とよばれる時空中において量子場を構成する。同様に、左リンドラー時空中と収縮カスナー時空中における量子場を構成する。これらの時空中は、ミンコフスキー時空中に部分的に張った座標であるが、同時にその組み合わせによってミンコフスキー時空中全体を記述できる。これらの時空中で構成される量子状態がそれぞれどのような関係にあり、ミンコフスキー時空中の真空状態がこれらの各時空中で構成された量子状態の量子もつれとしてどのように記述されるかを明らかにする。この研究は、量子場の非局所相関が量子もつれとどのように結びついているかを明らかにする具体的な記述として必要である。この考察は、初めは4次元時空中におけるスカラー場に対して行うが、2次元時空中での考察も行う。この考察をもとにして、一定加速運動する量子系からの量子放射が、量子場の非局所相関のもととなっている量子もつれによってどのように生み出されるかを明らかにする。さら

に、ド・シッター時空や一般の曲がった時空上の量子場の量子もつれについて、理解を深めて発展的応用を行う。

実験的検証に向けて、スカラー場より現実的なディラック場、電磁場、重力波に対する真空の量子もつれの構造についても量子もつれに対してスカラー場と同様の解析を進め、量子放射に関する性質を一般的な観点から理解を深める。ウンルー放射に関する検証実験の提案を目指し、重力と融合した量子力学系が持つ普遍的性質の理解を目指す。

#### 4. 研究成果

ミンコフスキー時空の真空状態に対する量子もつれによる記述を時空の全領域に渡る記述に拡張し、これをもとに量子場と相互作用しながら一定加速運動する調和振動子の(ウンルー-ドウィット検出器)模型が生み出す量子放射の起源を特定した。これまでにミンコフスキー時空に張った左・右のлиндラー時空にそれぞれ構成した量子状態の量子もつれ状態として、ミンコフスキー真空が記述されることは知られていた。この記述を未来・過去カスナー時空に構成した状態による記述にまで拡張した。これをもとに、ミンコフスキー時空を一定加速運動する検出器が生み出すエネルギー放射が、右линдラーモードと右向きカスナーモードの量子もつれが作り出す非局所的量子相関に起源を持つことが明示された。また4次元時空とは異なり、2次元時空では加速方向に垂直な運動量が存在せず、2次元の特殊性のため放射がゼロになるという違いも明らかにした。

同様の解析をド・シッター時空に拡張した。ド・シッター時空の真空の記述について探求し、左右2つのstatic chartで張られる時空上に量子状態を構成し、ド・シッター時空の真空であるパンチ-デイビス真空がどのように記述されるかを解析的に明らかにした。この問題は、ド・シッター真空に現れる熱的性質と深く関係して重要な問題であるにもかかわらず、厳密な解析がなされていなかった問題である。場が従う方程式の解が複雑な超幾何関数になるという問題があったが、特殊関数の数学公式をもとにした解析を進めることで、ミンコフスキー時空で現れた構造と同様な構造がド・シッター時空でも成り立つことを厳密に示した。応用として一定加速運動する調和振動子のウンルー-ドウィット検出器の模型をド・シッター時空中に拡張し同様の解析を行った。その結果ウンルー-ドウィット検出器の作る量子放射がド・シッター時空上の量子場の非局所相関に起因することを明確に示した。

量子場の非局所相関の構造と曲がった時空に現れる熱的現象の関係をより深く理解するための研究と、それをより一般の系へ拡張する研究を進めて成果を得た。初めに、量子場の非局所相関のより深い理解に関しては、量子情報理論の技術を応用した観点からの研究を進め、多検出器を導入した理論模型の研究を行なった。линдラー時空において一定加速運動する多検出器模型を導入し、量子場と相互作用する多検出器系に4次元においても揺動散逸関係の一般化であるcorrelation-propagation-relation(相関伝播関係)が成立することを示した。この成果は、линдラー時空から見た時の平衡状態で成立するエネルギーの流れに関する関係を示すものと解釈できる。この関係が慣性系から見た時に非局所相関に起因する量子放射とどのように関係するか新たな課題も見つかった。

量子場の非局所相関の構造をより一般の系に拡張する研究に関して、ディラック場と重力波のミンコフスキー真空を左右2つのлиндラー時空において構成される状態で記述するための研究を共同研究者と進めた。カスナー時空とлиндラー時空における重力波モードの取り出しをRegge-Wheelerゲージを用いて行い、Regge-Wheelerゲージ下で重力波モードの解の解析接続の関係を明らかにした。これに基づいて、カスナー時空での重力波のミンコフスキー真空に対応するモード関数を特定し、ポゴリウボフ変換と解析接続性から重力波のミンコフスキー真空を左右линдラー時空の状態の量子もつれ状態によって記述することに成功した。重力波のウンルー効果に対して、初めて具体的な定式化を与えた成果である。さらに、ディラック場のミンコフスキー真空の非局所相関の構造に対しても、最も一般的な4次元の場合に拡張する研究を、共同研究として進めた。大域的に定義されたミンコフスキーモード関数を用いた方法によって、カスナー時空とлиндラー時空のディラック場の解の解析接続性を明らかにした。これに基づいて、ディラック場のミンコフスキー真空が、カスナー時空及び左右линдラー時空の状態の量子もつれによってどのように記述されるか具体的な定式化を与えた。

ウンルー-ドウィット検出器により曲がった時空上の量子場の量子もつれを検出する研究が、重力の量子性の検証実験のため提案された理論模型と構造が類似していることに着目し、ニュートン重力による量子もつれの生成に関する研究を共同研究として行った。局所的に重ね合わせ状態となった質量によりニュートン重力が量子力学的状態の重ね合わせ原理に従う場合、量子もつれの生成やデコヒーレンス進化を明らかにした。これは、今後量子系の重力相互作用を検証するために基礎となる成果である。

以上の成果を中心として査読付き学術雑誌に論文10編を発表した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yue Nan, Kazuhiro Yamamoto, Hajime Aoki, Satoshi Iso, Daisuke Yamauchi	4. 巻 99
2. 論文標題 Large-scale inhomogeneity of dark energy produced in the ancestor vacuum	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 103512-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.103512	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 Jen-Tsung, Hsiang, B. L. Hu, Shih-Yuin Lin, Kazuhiro Yamamoto,	4. 巻 795
2. 論文標題 Fluctuation-dissipation and correlation-propagation relations in (1 + 3)D moving detector-quantum field systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 694-699
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.06.062	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 該当する
1. 著者名 Shumpei Yamaguchi, Rumi Tatsukawa, Shih-Yui Lin, Kazuhiro Yamamoto	4. 巻 98
2. 論文標題 Late-time quantum radiation by a uniformly accelerated detector in de Sitter spacetime	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 105012-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.105012	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 Atsushi Higuchi and Kazuhiro Yamamoto	4. 巻 98
2. 論文標題 Vacuum state in de Sitter spacetime with static charts	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 065014-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.065014	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 Atsushi Higuchi, Satoshi Iso, Kazushige Ueda, Kazuhiro Yamamoto	4. 巻 96
2. 論文標題 Entanglement of the Vacuum between Left, Right, Future, and Past: The Origin of Entanglement-Induced Quantum Radiation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 083531-1-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.083531	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 Satoshi Iso, Rumi Tatsukawa, Kazushige Ueda, Kazuhiro Yamamoto	4. 巻 96
2. 論文標題 Entanglement-induced quantum radiation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 045001-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.045001	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 Yuuki Sugiyama, Kazuhiro Yamamoto, Tsutomu Kobayashi	4. 巻 103
2. 論文標題 Gravitational waves in Kasner spacetimes and Rindler wedges in Regge-Wheeler gauge: Formulation of Unruh effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 083503-1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.083503	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 Daisuke Miki, Akira Matsumura, Kazuhiro Yamamoto	4. 巻 103
2. 論文標題 Entanglement and decoherence of massive particles due to gravity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 026017-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.026017	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 Akira Matsumura, Kazuhiro Yamamoto	4. 巻 102
2. 論文標題 Gravity-induced entanglement in optomechanical systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 026017-1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.106021	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 Kazushige Ueda, Atsushi Higuchi, Kazuhiro Yamamoto, Ar Rohim, Yue Nan	4. 巻 103
2. 論文標題 Entanglement of the vacuum between left, right, future, and past: Dirac spinor in Rindler and Kasner spaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 125005-1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.125005	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19件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 杉山祐紀, 山本一博, 小林努
2. 発表標題 カスナー時空とリンドラー領域における重力波によるUnruh効果
3. 学会等名 日本物理学会 2021年春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上田和茂, 山本一博, 樋口淳, 南岳, Ar Rohim
2. 発表標題 4次元リンドラー時空とカスナー時空におけるディラック場の真空の量子もつれ
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuhiro Yamamoto
2. 発表標題 Vacuum state as entangled state between left, right, future and past
3. 学会等名 Quantum Entanglement in Cosmology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Yamamoto
2. 発表標題 Fluctuation-dissipation and correlation-propagation relations in (1+3)D moving detector- quantum field systems
3. 学会等名 The 29th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本一博
2. 発表標題 曲がった時空上の場の量子論と一般化された揺動散逸関係
3. 学会等名 量子情報と宇宙
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田和茂, 樋口淳, 南岳, 山本一博
2. 発表標題 リンドラー時空とカスナー時空におけるディラック場の真空の量子もつれ~ディラック場のウンルー効果の起源~
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 (2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田和茂, 樋口淳, 磯暁, 山本一博, 達川瑠美
2. 発表標題 場の真空の量子エンタングルメントの研究
3. 学会等名 第38回量子情報技術研究会 (QIT38)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuhiro Yamamoto
2. 発表標題 Quantum radiation produced by nonlocal correlation of field
3. 学会等名 Quantum Fields in Curved Space (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuhiro Yamamoto
2. 発表標題 Quantum radiation produced by detector and particle in a uniformly accelerated motion
3. 学会等名 Workshop on Testing the Unruh Effect in the Lab. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuhiro Yamamoto
2. 発表標題 Thermal property of Brownian motion of a particle coupled to vacuum fluctuations
3. 学会等名 The NCTS workshop on Non-Equilibrium Quantum Phenomena (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年~2019年



1. 発表者名 山本一博
2. 発表標題 Entanglement description of the vacuum states in de Sitter space with static charts
3. 学会等名 量子情報と宇宙
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本一博
2. 発表標題 ウンルー効果とエンタングルメント
3. 学会等名 曲がった時空上の場の量子論と量子情報研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本一博
2. 発表標題 ENTANGLEMENT-INDUCED QUANTUM RADIATION
3. 学会等名 The Relativistic Quantum Information North (RQIN 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本一博
2. 発表標題 quantum radiation produced by an Unruh De Witt detector in a uniformly accelerated motion
3. 学会等名 Miniworkshop: Cosmology, Gravitation and Quantum Information (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本一博
2. 発表標題 Quantum radiation produced by uniformly accelerating detector and particle
3. 学会等名 重力・宇宙論研究会 2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 牟田 泰三, 山本 一博	4. 発行年 2017年
2. 出版社 裳華房	5. 総ページ数 316
3. 書名 量子力学-現代のアプローチ-	

〔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
研究協力者	樋口 淳  (Higuchi Atsushi)		
研究協力者	磯 暁  (Iso satoshi)		
研究協力者	上田 和茂  (Ueda Kazushige)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	杉山 祐紀  (Sugiyama Yuuki)		
研究協力者	松村 央  (Matsumura Akira)		

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1件

国際研究集会 Quantum Fields in Curved Space	開催年 2018年～2018年
--	--------------------

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			
米国	University of Maryland			
英国	York University			
台湾	NCUE Taiwan			
台湾	National Central University			