

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2016

課題番号：23540329

研究課題名(和文) 地平面の非平衡揺らぎと時空熱力学

研究課題名(英文) Thermal phenomena in space-time with horizons

研究代表者

磯 暁 (Iso, Satoshi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：20242092

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：情報が一方通行に流れることで特徴付けられる時空の地平面では、様々な興味深い現象が起こる。その例として、ブラックホールからのホーキング輻射、ドジッター時空での熱揺らぎ、一様加速運動する観測者のウンルー効果などが挙げられる。

本研究では、これらの時空において、時空と熱力学の関係を中心に研究を進めた。特に、ブラックホール地平面近傍での量子揺らぎに「揺らぎの定理」を適用することで、ブラックホールエントロピーの増大則を導出した。また一様加速運動する荷電粒子からは、量子もつれに付随する量子的輻射が放出されることを証明した。さらにドジッター宇宙での量子効果が暗黒エネルギーの候補となる可能性を議論した。

研究成果の概要(英文)：Various interesting phenomena occur around the space-time horizons through which information flows in one direction. Examples are Hawking radiation from black hole horizons, thermal fluctuations in de Sitter universe, and Unruh effects for a uniformly accelerated observers.

In this project, we investigated those thermal phenomena in the space-time with horizons. In particular, we have shown the second law of black hole by applying the so called fluctuation theorem developed in statistical physics. We also proved that quantum radiation emanates from a uniformly accelerated observer in addition to the classical Larmor radiation, and that it originates from the entanglement of the Minkowski vacuum between the left and the right Rindler wedges. Finally we have discussed the quantum vacuum energy in the de Sitter universe as a candidate of the dark energy.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ホーキング輻射 ウンルー効果 ドジッター時空 非平衡場の理論 量子もつれ

1. 研究開始当初の背景

時空には地平面（ホライズン）とよばれる境界が存在する。その顕著な例は BH ホライズンである。地平面とは、光すら脱出できない時空の境界である。このような時空の因果性と場の量子論の普遍性を使うことで、ホーキングは、BH が温度 T_H やエントロピー S_{BH} をもつ熱力学的な輻射体として振る舞うことを導いた。これらの式には、プランク定数、光速度 c 、重力定数 G 、ボルツマン定数 k_B が同時に表れている。このことは、BH の熱力学的な性質が量子論、相対論、重力理論、そして熱力学が同等に重要な役割を果たす現象であることを意味する。

このような地平面の例としては、ブラックホールの他にも、一様加速度で運動する観測者が見るウンルー効果、加速膨張する宇宙を記述するドジッター時空などの例があり、いずれも非自明な時空における純粋に量子力学的な系でありながら、熱力学的な性質を持っている。これらの系は、ブラックホールの情報喪失問題、アインシュタイン方程式の熱力学的起源と重力の量子化の問題、ウンルー輻射と量子もつれの関係、宇宙初期の原始インフレーションと量子揺らぎの古典化、現在の宇宙の加速膨張を引き起こす暗黒エネルギーの起源、など現代物理学の基本的問題と密接に関係している。また最近発展の著しい量子情報理論や量子非平衡統計物理学との関係も指摘されており、地平面を含む時空とその熱力学的な性質、特に非平衡熱力学との関係をより深く理解することの学問的重要性が増している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、非平衡場の量子論の手法を使って、宇宙に現れる様々な地平面近傍における場の量子論の真空の振舞いを調べることにある。特に、ブラックホールからのホーキング輻射、ドジッター宇宙の地平面効果による揺らぎの成長と暗黒エネルギーとの結びつき、インフレーション後の非摂動的な熱化の物理、一様加速運動する観測者からのウンルー輻射などが挙げられる。各項目の具体的な目標は以下の通りである。

(1) ホーキングはブラックホールが、温度やエントロピーを持つ熱的振る舞いを持つことを明らかにした。これを逆手に取り、T. Jacobson は、熱的振る舞いから出発することでアインシュタイン方程式が導出できることを示している。本研究では、地平面の非平衡揺らぎに着目することで、この考え方を拡張し、重力の熱力学的な起源に迫る。

(2) 一様加速度運動する観測者は、止まっている観測者にとり温度 0 度の真空状態を、あたかも（加速度に比例する）有限温度であ

るかのように感じるということが知られている。これをウンルー効果という。この観測者は熱平衡状態にあるため、この観測者から流れる外向きのエネルギー流と内向きのエネルギー流が相殺し、外部へいかなる輻射も放出しないと想定される。しかし詳細な計算をすると外部への輻射があるとの報告があり、混乱が続いていた。本研究ではこの混乱を解消し、なぜ熱平衡状態にありながら外向きの輻射が残るのかの物理的な理由を明らかにする。

(3) 加速膨張する宇宙は地平面を持つドジッター時空と呼ばれる時空間で記述される。このため、ブラックホールやウンルー効果と同様に、地平面に付随する熱的な性質を持つ。宇宙初期の原始インフレーションでは、この熱的な性質が、粒子生成を引き起こし、現在の宇宙の物質構造を作ったと考えられており、宇宙マイクロ波輻射にその痕跡を残している。本研究では、原始インフレーションにおける揺らぎの生成とそのあとの熱化の非平衡ダイナミクスについて明らかにする。

現在の宇宙もまた、小さな宇宙項を持つドジッター宇宙で記述されていることが知られている。しかし、場の量子論によるとこのような小さな宇宙項は極めて不自然であり、どのような機構でこのような小さな宇宙項が生成されたのか理解されていない。本研究では原始インフレーションとの関連で、暗黒エネルギーの起源の理解を試みる。

(4) これらの研究に加えて、関連する量子非平衡の研究や量子もつれによる粒子生成の研究を行い、時空、場の量子論、非平衡熱力学が織りなす興味深い現象の理解へつなげる。

3. 研究の方法

地平面を含む場の量子論の熱力学的な性質を理解するためには、地平面を超えた時空を結ぶ量子もつれの場の量子論的手法、量子もつれを記述する量子情報理論的手法、（非平衡）熱揺らぎを記述するための量子統計力学的手法、時空を使うための一般相対論的手法が必要とされる。本研究では、これらの異なる分野にまたがる手法を総合的に活用し、本研究を遂行した。

4. 研究成果

研究目的に記載した具体的目標について、それぞれの研究成果を列挙する。

(1) ブラックホール地平面
ブラックホールは、場の量子化を行うと有限温度のホーキング輻射を放出する。このこととアインシュタイン方程式を結びつけると、熱力学の 3 法則が導出できる。T. Jacobson はこれを逆手にとって、熱力学法則からアインシュタイン方程式を導出した。本研究では、

この導出を再検討し、非平衡時空、すなわち膨張率(expansion)が0の時空へ一般化することに成功した。また、この一般化において、熱の流入に伴うエントロピーの流れや、局所温度を考え直すことが重要であることを明らかにし、その上でこの一般化から Jacobson の最初の論理の誤りを見つけた。さらにネータ電荷の方法の熱力学的に解釈を与えることができた。

ブラックホール地平面近傍では、その因果的な性質によりエネルギー運動量テンソルが古典的には一方方向の流れしかもたない。外部の観測者にとってはこの一方方向性が熱の散逸として理解される。これを表す有効理論としてメンブレンパラダイムが知られている。この系を量子化すると、ホーキング輻射が発生し、その効果は量子的な熱揺らぎとしてメンブレン作用に対する補正を与える。本研究では、この熱揺らぎを取り入れることにより確率微分方程式を導出し、古典的な入射波境界条件が変更を受けることを明らかにした。またこの方程式に「揺らぎの定理」を適用することで、ブラックホールエントロピーの増大則を導いた。

最近のゲージ重力対応の研究では、量子もつれと量子重力が深く関係していることが示唆されており、地平面の熱揺らぎに着目した本研究は今後さらに発展する分野だと考えている。当初の目的である重力の熱力学的な起源に迫るためには、まだ明らかにすべきことが数多く残されており、この課題は継続して研究する予定である。

(2) ウンルー地平面

平坦な時空を一樣加速度で加速運動する観測者も、因果的な性質から地平面をもち、それが熱揺動として観測される。ブラックホールの場合と同様に、地平面からの熱散逸をもち、これらを表す方程式が、ALD方程式である。この方程式は、発散解や前加速などの非物理的な性質をもつことが知られている。本研究では、質量をもった輻射場を考えることで、ALD方程式がどのような変更を受けるのかを解析した。その結果、質量が消える極限が非解析的な極限となっていることを示した。

この熱揺動からの輻射は、ウンルー輻射とよばれ、高強度レーザーを使った検証実験が計画されている。ところが、一樣加速度運動する観測者は熱平衡状態にあるため、通常の熱力学との類似に立脚すると、このような輻射の存在は否定される。本研究では、真空揺らぎとの量子相関を正しく計算すると、ウンルー輻射の多くの項が干渉により相殺することを発見した。この相殺機構は、熱力学平衡条件であるKMS条件と密接に関係していることも示し、熱力学平衡による理解が

正しいことを示している。このような理解の上で、さらにF領域と呼ばれる一樣加速度運動する観測者から地平面で隔てられている領域においての輻射の計算を行った。その結果、F領域においては、ウンルー輻射が完全には相殺していないことを明らかにした。これは一見、上記の熱平衡性に矛盾するようと思われるが、時空の因果的構造と、真空の量子もつれの構造のため、KMS条件がわずかに破れており、F領域ではウンルー輻射が存在することを明らかにした。この計算と量子もつれによる物理的な解釈により、ウンルー輻射の存否に関する長い論争に終止符を打つことができた。

この成果については、現在最終的な詰めを行い、近く本論文を執筆予定である。

(3) ドジッター時空の地平面

時空の地平面に付随する量子効果としては、他に、ドジッター時空での量子生成があげられる。本研究では、ドジッター時空での量子生成でつくられた揺らぎが現在の宇宙までどのように時間発展するのかを調べた。特にミニマル結合をするスカラー場を考え、ドジッター宇宙から輻射優勢、物質優勢へと続く宇宙の歴史の中で、ドジッター宇宙で生成された量子場の揺らぎのつくるエネルギー運動量テンソルの時間発展を詳細に計算した。この結果、スカラー場の質量がない場合は、圧力とエネルギー密度の比 w が、輻射優勢期の初期は $w=-1/3$ となること、後期に $w=1/3$ へ漸近し、さらに物質優勢期には $w=0$ へ漸近していくことを明らかにした。また、通常のインフレーションの前に、プランクスケールのハッブルパラメータをもつプレインフレーションがあったとすると、ビッグバン直後から $w=-1/3$ に従ってエネルギー密度が増大し、今の宇宙ではほぼ臨界エネルギー密度に近い値まで増大することもわかった。続いて、質量のあるスカラー場へ一般化して、揺らぎの成長を考えた。特に、現在のハッブル定数と同程度(または多少軽い)の質量をもつ場合へ拡張した。その結果、質量が0の場合とは異なり、現在の宇宙において、圧力とエネルギー密度の比が $w=-1$ となり、現在の暗黒エネルギーの候補となりうるということがわかった。またハッブル定数が質量と同じ程度の大きさまで減少するとスカラー場は振動をはじめめるが、この時のエネルギー運動量テンソルの振舞いの詳細を明らかにした。さらに、このような軽いスカラー場を与えるモデル構築や、相互作用の影響、特にミスアライメントとよばれる場の初期値の問題などについての考察を行った。特に、重力との非ミニマル結合が、原始インフレーション期でのミスアライメントを抑制する可能性を示唆した。

この研究を更に押し進め、その粒子の自己相互作用の効果の解析、及び我々の宇宙がより大きなハッブルパラメータをもつドジッター宇宙の中の泡として埋め込まれている宇宙（イターナル宇宙）において、外側のドジッター時空が私たちの暗黒エネルギーとして寄与する可能性を探索している。最後の研究は現在も継続中であり、近く論文を執筆予定である。

ドジッター時空の研究の応用としてインフレーション宇宙に由来する宇宙マイクロ波輻射の研究、およびインフレーションを経てビッグバン宇宙が生じる機構についての研究を行った。特に、インフレーション後の非摂動的熱化であるプレヒーティングを使うことで、small field inflation (SFI)における初期状態の不自然さがダイナミカルに解決できる可能性を明らかにした。これはコールマンワインバーグ型のポテンシャルをもつスカラー場の理論で自然に現在の宇宙マイクロ波輻射の揺らぎを説明できる可能性を保証し、これまで主流だった Large Field inflation と並んで、SFI も有力な宇宙モデルの候補となることを表している。

(4) 非平衡物理とレプトン生成

地平面に付随する非平衡熱力学現象を理解するためには、非平衡場の量子論そのものの手法の開発も重要である。このため、関連する研究として、非平衡場の量子論の手法の一つである Kadanoff-Baym(KB) 方程式をレプトン生成に適用し、右巻きニュートリノの質量が縮退している場合のレプトン数生成量を計算した。特に、右巻きニュートリノの質量が縮退している場合におけるレプトン生成の機構を、KB 方程式を使って解析し、そこから密度行列の発展方程式を導くことに成功した。また、CP 対称性の破れのパラメータを正確に導出し、それまで混乱のあった問題（CP 破れパラメータの正確な評価）に決着をつけることができた。

今後は、ここで得られた手法（KB 方程式の解き方と、密度行列の時間発展方程式を導く手法）は、ドジッター宇宙で生成された量子揺らぎの時間発展に応用する予定である。

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 10 件)

Satoshi Iso, Naritaka Oshita, Rumi Tatsukawa, Kazuhiro Yamamoto, Sen Zhang, Quantum radiation produced by the entanglement of quantum fields,

Phys.Rev. D95 (2017) no.2, 023512, 査読あり DOI: 10.1103/PhysRevD.95.023512.

Hajime Aoki, Satoshi Iso, Evolution of Vacuum Fluctuations of an Ultra-Light Massive Scalar Field generated during and before Inflation, PTEP 2015 (2015) no.11, 113E02, DOI: 10.1093/ptep/ptv150, 査読あり

Satoshi Iso, Kazunori Kohri, Kengo Shimada, Small field Coleman-Weinberg inflation driven by a fermion condensate, Phys.Rev. D91 (2015) no.4, 044006, 査読あり DOI: 10.1103/PhysRevD.91.044006

Satoshi Iso, Kengo Shimada, Coherent Flavour Oscillation and CP Violating Parameter in Thermal Resonant Leptogenesis, JHEP 1408 (2014) 043. DOI: 10.1007/JHEP08(2014)043. 査読あり

Hajime Aoki, Satoshi Iso, Yasuhiro Sekino, Evolution of vacuum fluctuations generated during and before inflation, Phys.Rev. D89 (2014) no.10, 103536, 査読あり DOI: 10.1103/PhysRevD.89.103536.

Satoshi Iso, Kengo Shimada, Masato Yamanaka, Kadanoff-Baym approach to the thermal resonant leptogenesis, JHEP 1404 (2014) 062, 査読あり DOI: 10.1007/JHEP04(2014)062.

Satoshi Iso, Kazuhiro Yamamoto, Sen Zhang, On the Cancellation Mechanism of Radiation from the Unruh detector, PTEP 2013 (2013) 063B01, 査読あり DOI: 10.1093/ptep/ptt040.

Kengo Shimada, Susumu Okazawa, Satoshi Iso, The Einstein Equation of State as the Clausius Relation with an Entropy Production, Phys.Lett. B718 (2012) 193-199, 査読あり DOI: 10.1016/j.physletb.2012.10.010.

Satoshi Iso, Sen Zhang Radiation Reaction by Massive Particles and Its Non-Analytic Behavior, Phys.Rev. D86 (2012) 125019. 査読あり DOI: 10.1103/PhysRevD.86.125019.

Satoshi Iso, Susumu Okazawa, Stochastic equations in Black hole backgrounds and Non-equilibrium fluctuation theorem, 査読あり, Nuclear Physics B851, 2011, pp.380-419 DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2011.05.021.

〔学会発表〕(計 6 件)

磯 暁, Dynamical generation of weak scale-cosmological implication, New Physics at LHC, Nayang Technological University, シンガポール市(シンガポー

ル), 2016/2/29-3/4

磯 暁、Dynamical Fine-tuning of initial condition in small field inflation, Annual theory meeting in Taiwan, NCTS、新竹市(台湾), 2015/12/9-12/12

青木一、磯 暁、Evolution of Vacuum Fluctuations of an Ultra-light Massive Scalar Fields generated during and before inflation, 日本物理学会、早稲田大学(東京都、新宿区), 2015/3/21-3/24

嶋田健吾、郡和範、磯 暁、Cosmological Constraints on classically conformal models, 日本物理学会、早稲田大学(東京都、新宿区), 2015/3/21-3/24

郡和範、磯 暁、嶋田健吾、Cosmological Aspect of Coleman-Weinberg Inflation Models, 日本物理学会、早稲田大学(東京都、新宿区), 2015/3/21-3/24

張森、磯 暁、ウンルー輻射の相殺について、日本物理学会、広島大学(広島県、東広島市), 2013/3/26-3/29

〔図書〕(計 1 件)

磯 暁、共立出版、現代物理学の基礎としての場の量子論、2015、277 ページ

6 . 研究組織

(1)研究代表者

磯 暁 (ISO, Satoshi)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：20242092

(4)研究協力者

郡和範 (KOHRI Kazunori)

嶋田健吾 (SHIMADA Kengo)

青木一 (AOKI Hajime)

関野恭弘 (SEKINO Yasuhiro)

張森 (ZHANG Sen)

山本一博 (YAMAMOTO Kazuhiro)

山本康弘 (YAMAMOTO Yasuhiro)