

令和 3 年 4 月 23 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 2019年度

受付番号 201960044

氏名 大下 翔誉

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地：ウォータールー（国名：カナダ）

2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。

ブラックホール連星からの重力波観測による量子重力理論の検証

3. 派遣期間：平成 31 年 4 月 1 日 ～ 令和 3 年 3 月 30 日

4. 受入機関名及び部局名

受入機関名：ペリメーター理論物理学研究所

部局名：宇宙論グループ

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

ペリメーター理論物理学研究所への派遣期間中、私は(i)「量子重力理論検証におけるブラックホールからの重力波放射観測の有用性」、(ii)「マイクロブラックホールの重力場が及ぼすヒッグス場の真空準安定性への影響」などブラックホールがまつわる強重力現象と、そのような極限環境下における素粒子論的現象を研究してきた。これらの研究で、私は多くの共同研究を行い、日本外での研究コミュニティーを拡張、そしてこのコミュニティーでの共同研究は派遣期間終了後も継続している。以下で、(i)と(ii)における活動報告の詳細と、それによる成果をまとめる。

(i) 量子重力理論検証におけるブラックホールからの重力波放射観測の有用性(これらは主に受入研究者である Afshordi 教授との共同研究に基づく)

受入研究者である Afshordi 教授とウォータールー大学の学生である Wan 氏との共同研究で、量子ブラックホールの反射性に関する研究を行った。本研究では、従来まで深く議論されてこなかった、入射重力波に対するブラックホール地平面の反射メカニズムを、ブラックホール地平面の熱力学的性質から議論した。ブラックホールの自転効果など、現実的な状況を想定し、ブラックホールの地平面の量子論的性質を調べ、ブラックホールの量子性の検証可能性を議論した。本研究では特に、3つの観点からブラックホールの量子性について議論した。1つ目は、ブラックホールを多準位の量子系とみなした場合の詳細釣り合いの法則を用いた議論、そして2つ目はブラックホールが CP 対称性を持つ場合、そして3つ目はブラックホールの地平面付近で揺動散逸定理を仮定した場合で計算を行った。その結果、得られた反射率は全て同じボルツマン因子で与えられることが明らかとなった。その内容を Journal of Cosmology and Astroparticle Physics に発表した。

その結果に基づき、ブラックホールのリングダウン重力波がどのように修正されるかを、ブラックホールの固有振動数に注目して調べた。同時に取り組んだこの研究は、Physical Review D 誌に掲載された。

私は Afshordi 教授と東京大学大学院の博士課程学生である津名氏と共同で、上述の反射性を有する量子ブラックホールの観測的検証可能性を研究した。本研究では、それと同時に、Abedi 氏と Afshordi 教授によって発見された量子重力の痕跡と考えられているエコー重力波(リングダウン重力波の後に放射され得る、重力波のうなり)の暫定検出の妥当性についても検討した。それに加え、第3世代重力波観測によるエコー重力波の検証可能性や、コンパクト連星観測のみならず、failed supernova の観測による量子重力理論の検証についても調べた。まずは、量子ブラックホールからの重力波を計算する手法を開発し、これまで用いられてきた量子ブラックホールのモデルによって、重力波スペクトルがどのような多様性を持つかを調べた。それ以外に、ブラックホールの角運動量と重力波の振幅の関係性についても調べた。興味深いことに、従来まで重要視されてこなかった、ブラックホールのオーバートーン・モードが強く励起されたときに、エコー重力波の振幅が大きくなることが理論的に明らかとなった。それらの内容を2編の論文(重力波波形のモデリング方法に関する研究と、その応用として Abedi と Afshordi の解析結果の妥当性を調べた研究それぞれ1編の論文)にまとめ、Physical Review D 誌に掲載された。

Abedi 氏、Afshordi 教授、Wan 氏と私の共同で、以上紹介した研究と Abedi 氏と Afshordi 教授の共同研究を整理し、review 論文を執筆した。この review 論文の執筆は、Universe 誌から Afshordi 教授へ依頼されたものであり、私は Afshordi 教授から、その review 論文に共著者として貢献することを依頼され、この論文の一部の章を担当・執筆するに至った。この review 論文は既に Universe 誌に受理され、その後掲載されている。そして、Universe 誌のホームページのトップや SNS など積極的に宣伝された。この論文により、ブラックホール重力波観測による量子重力理

論の検証が、より盛んな研究分野として発展することが期待される。

一方で、ブラックホール重力波観測による量子重力効果の別の検証可能性を議論するべく、私は Afshordi 教授及び向山教授と共同で Horava-Lifshitz 重力理論の検証可能性を調べた。具体的には、ブラックホール時空を背景に、Horava-Lifshitz 量子重力理論特有の「空間に関する高階微分項」を波動方程式に加えて数値的に解いた。これにより、ブラックホールに摂動が与えられた場合の応答を、Horava-Lifshitz 重力理論の枠組みに近い状態で計算できる。この計算で、ブラックホールのサイズが Horava-Lifshitz 重力の典型的サイズより小さい場合、その応答が一般相対性理論で予言されるものと大きくずれることがわかった。特筆すべきは、無回転ブラックホールを背景とした計算であるにもかかわらず、回転ブラックホール周りの摂動論で見られる「超放射現象」が起きたことである。我々はこの原因として、「Horava-Lifshitz 量子重力理論では揺らぎが光速を超えて伝播することが本質的に原因となって起きたものである」と結論付け、ブラックホール周りの角運動量ポテンシャルが局所的に負の値を取ることがその傍証であるとして、論文で議論を展開した。その論文は、Journal of Cosmology and Astroparticle Physics で受理・掲載されている。

申請者はこれらの研究成果を、ペリメーター研究所で開催されたエコー重力波に関する研究会(2020年2月)、韓国での重力に関する研究会(2021年10月)、京都大学での量子情報と重力に関する研究会(2021年3月)にいずれも招待講演として発表した。

(ii) ミクロブラックホールの重力場が及ぼすヒッグス場の真空準安定性への影響 (本研究は受入研究者である Afshordi 教授意外との共同研究プロジェクトであり、国際的研究者コミュニティの構築に寄与した研究である)

上記研究と並行して、量子ブラックホールと素粒子物理学の関係性にも注目し、幅広い視野で研究を行った。特に、ミクロブラックホールとヒッグス不安定性の関係について研究を行った。ヒッグス不安定性とは、「現在のヒッグス場の真空状態よりも、さらに安定な状態(負のエネルギー状態)が高エネルギー領域に存在する」真空状態であり、これは現在の素粒子標準模型と、ヒッグス粒子およびトップクォークの質量の測定値によって予言されている。このヒッグス不安定性により、宇宙のある領域が真空崩壊という現象を起こせば、宇宙は負のエネルギーに満たされ、居住可能な状態ではなくなる。この真空崩壊は、極小なブラックホールによって強く触媒されることが知られており、そのような小さなブラックホールが宇宙には存在しないことが理論的に予言されている。この「ブラックホールの触媒効果」に関して、私は King's College London の Gregory 教授 と Newcastle 大学の Moss 教授及びブリティッシュ・コロンビア大学の Patrick 博士と共同で研究を行った。

私がペリメーター研究所に着任した直後に、同じくイギリスからビジターとして同研究所に滞在していた Gregory 教授と議論し、共同研究を行う流れとなった。Moss 教授 とは、Gregory 教授を通して連絡を取り、3人での共著論文を執筆することとなった。

研究内容は、1980年代に Hawking 教授と Moss 教授が発見した Hawking-Moss 解(宇宙の真空エネルギーの熱的転移を記述する解)を、ブラックホールが存在する場合へ拡張し、Hawking-Moss 転移がブラックホールによって触媒されるか否かを調べることが目的である。私は oscillating bounce というクラスの解をブラックホール周りで調べ、その結果 Hawking-Moss 転移はブラックホールによって触媒されることを理論的に示した。この結果をまとめた論文は Journal of High Energy Physics に受理・掲載されている。その後、ブリティッシュ・コロンビア大学の Patrick 博士を迎えた(私含め)4人の理論チームで、ブラックホールによる Hawking-Moss 転移の触媒効果を、さらに広いパラメーター領域で調べ、同じく Journal of High Energy Physics に受理・掲載された。現在は、回転を持つブラックホールへの拡張を試みており、週に1度のミーティングを Zoom で行いながら研究を進めている。本研究の手始めとして、回転ブラックホールの安定性を調べるべく、膨張宇宙における回転ブラ

ックホールの蒸発率を Heun 関数を用いて解析した。その計算結果を論文にまとめ、現在プレプリントサーバーに論文を上げており、Classical and Quantum Gravity 誌に投稿・査読中である。

以上で紹介した研究は、ブラックホールによるヒッグス場の熱的な相転移に対応する。私は、ブラックホールにより触媒されたゼロ温度(およびそれに近い状況)でのヒッグス場の相転移について、東京工業大学の山口教授や東京大学の横山教授、鎌田助教そして学生である上田氏(九州大)、古賀氏(九州大)、や林氏(東大)と共同研究を行っている。山口教授や上田氏と共同で、これまで調べられていた無回転ブラックホールのヒッグス相転移の触媒効果を、回転がある場合へ拡張した。その結果、回転をもたないブラックホールが最も強い触媒効果を持つ可能性を示唆する結果が得られた。さらに、ブラックホールが最大限に回転を持つ場合には、ヒッグス相転移は触媒されず、むしろ真空状態は安定化される可能性を見出した。本研究は、Journal of High Energy Physics で受理・掲載されている。

一方で私は、上述の東京大学のグループと共同で、ブラックホール自体が持つ熱効果がヒッグス場のポテンシャルの構造を変化させる場合について研究した。Gregory 教授らの研究によれば、小さなブラックホールほど強い触媒効果を示すが、ブラックホールが持つ温度は、ブラックホールの質量に反比例しているため、そのような小さなブラックホールの熱効果を無視することはできないと考えられている。このために、ブラックホールの触媒効果が疑問視されることもあり、議論の余地が残されていた。我々は、この問題を調べるための方法を考案し、この問題に取り組んだ。その結果、Gregory 教授らの「小さなブラックホールにおいても熱効果は無視できる」という主張は、我々が調べたパラメーター領域内において正しいことが明らかとなった。これは、「ブラックホールの熱効果が地平面近傍だけで強くなったとしても、真空泡の表面までは熱効果が及ばない」ことが直接の原因となっていると結論づけた。この内容をまとめた論文は、Journal of High Energy Physics で受理・掲載されている。

独立した研究活動

上述の共同研究のみならず、単独で以下のような研究を行った。ブラックホールの回転が大きい場合、ブラックホールの重力と遠心力が釣り合い、ブラックホールの地平面は消失する。この場合、重力特異点が地平面に覆われていないので、「裸の特異点」が現れることが知られている。本研究では、この裸の特異点が、ヒッグス相転移を触媒するか否かを調べた。アインシュタイン方程式を用いて計算を行い、結果として、負の真空エネルギーに比べて小さな質量を持つ裸の特異点は、宇宙年齢以内にヒッグス相転移を触媒し得ることが明らかとなった。この際に、裸の特異点が持つ角運動量は、真空相転移の境界層に輸送され、その特異点は地平面に覆われることも明らかとなった。この相転移の機構は、ペンローズによって提唱された宇宙検閲官仮説(宇宙には裸の特異点は安定して存在できない)を裏付けるものとなり、大変意義深い研究となった。この内容をまとめた論文は、Classical and Quantum Gravity 誌の Letter 論文として受理・掲載された。

現在私は、(i)にて記載した研究活動で得られた知見を基に、ブラックホールのオーバートーン・モードに関する研究を行っている。本研究では、回転ブラックホール時空の摂動が Heun 関数で表されることを用いて、回転ブラックホールの固有振動数の「励起のし易さ」を計算している。これは、excitation factors と呼ばれる量を計算することに対応しており、これを評価することで、ブラックホールの(無数にある)固有振動数のうち、どれが最も励起されやすいのかを見積もることができ、オーバートーン・モードの重要さを定量的に表すことができる。従来までは3つまでのオーバートーン・モードのみが計算されていたが、私が開発したコードを用いて、20以上の数の excitation factors を計算できている。現在は、この内容について論文をまとめている。このように、私の海外での研究活動は今後の研究内容を大きく支える糧として確かに活かしている。