

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 平成31年

受付番号 201960398

氏名 森山 小太郎

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：マサチューセッツ工科大学（国名：アメリカ）
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。
ブラックホール時空の直接測定：落下ガス雲の理論とVLBI観測によるアプローチ
3. 派遣期間：平成・令和 1 年 4 月 1 日 ~ 令和 3 年 9 月 30 日
(913 日間)
4. 受入機関名及び部局名
受入機関名：Massachusetts Institute of Technology
部局名：Haystack Observatory
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)**
【記載事項】
 - ・ 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
 - ・ 新型コロナウイルス感染症の影響にかかる特例措置のうち、国内採用開始・採用期間延長・翌年度渡航のいずれかの適用を受けた場合は、当該措置の適用による影響等(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。

5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意

書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)

【記載事項】

- ・ 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
 - ・ 新型コロナウイルス感染症の影響にかかる特例措置のうち、国内採用開始・採用期間延長・翌年度渡航のいずれかの適用を受けた場合は、当該措置の適用による影響等
- (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。

(研究目的と背景)

申請者の研究テーマは、ブラックホール周辺の強い重力場における時空構造の解明である。ブラックホール時空構造の解明は、一般相対論の検証に直結するため、近年の天文学、物理学の最重要テーマの一つである。一般相対性理論によると、ブラックホールの時空は、(電荷を除き) その質量と回転を表すスピンパラメータのみでユニークに決定される。このうち、質量は、ブラックホールの弱重力場内において、周辺の星やガスの運動から測定することができる。だが一方で、スピンは、ブラックホール近傍での強い重力場内でのみ支配的であり、その測定は容易ではない。さらに、ブラックホール近傍の放射は周辺の降着流の性質と時空の性質に複雑に依存するため、スピンの効果だけを取り出すには、一般相対論シミュレーションによる綿密な議論を必要とする。現在、従来の各方法論は、降着流のモデル不定性を持ち、それぞれ見積もられたスピンの値も一致していないため、独立かつ相補的な方法論の提唱が急務の課題である。

(海外特別研究員としての研究目的)

海外特別研究員として採用される前から、申請者は、ブラックホール周りの相対論的に特有な時間発展現象に世界で初めて注目することで、定常な現象を仮定した従来の方法とは独立かつ直接的なスピン測定法を提唱してきた。また、1.3 mmと0.87 mm波長の電波干渉望遠鏡の集合からなる、Event Horizon Telescope (EHT) プロジェクトに携わり大質量ブラックホールの高空間分解能観測を用いたブラックホール時空の測定に焦点をおき、理論・観測的な研究を行った。海外特別研究員として、アメリカのマサチューセッツ工科大学ヘイスタック観測所に所属中、申請者は、自身の新しいスピン測定法をさらに現実的なものへと一般化することに専念した。特に、海外特別研究員としての、自身の研究におけるメインターゲットは、天の川銀河中心に位置する超大質量ブラックホール Sagittarius A* (Sgr A*) である。Sgr A* は全てのブラックホール候補天体の中で、最も大きな視直径を持つため、EHTを用いたブラックホール近傍の直接撮像が期待されている。また、Sgr A* 近傍の多波長観測から、10分から1時間の光度変動が観測されており、ブラックホールへの降着流の効果の検出が期待されている。

(採用1年目の遂行状況と成果)

申請者は、スピン測定における困難を克服するため、ブラックホールに間欠的に落下するガス雲放射を、理論シミュレーションを用いて調べ、落下ガス雲の放射に含まれる、相対論的な光度変動を計算し、スピンを測定するための指標を調査した。特に申請者は、ブラックホール

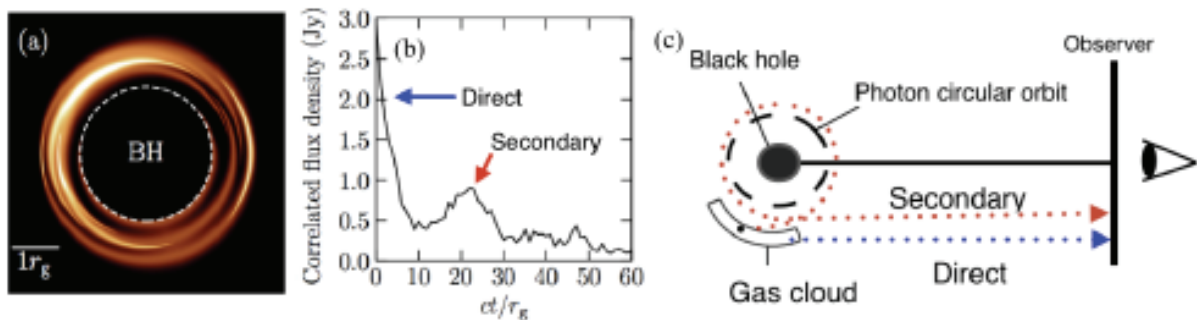


図1: 2017-2021年の落下ガス雲のEHT 模擬観測: (a) 落下ガス雲の放射率の空間分布. (b) 模擬観測された落下ガス雲の相関フラックス密度 (c) 直接光 (Direct)と第二光 (Secondary)の概略図。

周辺の光でさえも強い重力場によって回転できる軌道 (光円軌道)に特に注目した。この軌道半径は、ブラックホールスピンにのみ依存するため、スピン測定の指標を探査するのに有用である。申請者は、近年の3次元一般相対論的磁気流体シミュレーションで示されている、ブラックホール周辺を囲む降着流の最内縁から潮汐力によって間欠的に分離・落下するガス雲を想定 (図1a)し、その光度変動を一般相対論的レイトレーシング法を用いて計算した。

理論シミュレーションの結果、落下ガス雲のライトカーブは2つの特徴的なピークで構成されることが明らかになった (図1b)。最初のピーク (図1bの青線)は観測者に直接到達する成分に対応し (図1cの青線)、次のピーク (図1b)はブラックホールの周辺を1回転して到達する (図1b, cの赤線)。これらのピーク間の時間間隔は、光円軌道の周期に等しいため、スピンの強く依存する一方で、ガス雲の詳細な構造、運動特性に強く依存しないことを明らかにした。これは、複雑な相対論的光度変動からスピンのみの情報を効率よく抽出することを可能にする。申請者は、EHT観測を想定した模擬観測を実行し、2017-2020年の観測データにこの方法を適用することが可能であることを示した。この研究結果を論文にまとめ、ApJに投稿し受理・出版され、国内外の学会、EHTの報告会議においても報告している (項目6参照)。

申請者は、EHT Collaborationの一員として、観測的側面でも大きく貢献している。海外特別研究員として採用される前から、EHTの重要な部分である、ブラックホールの画像化チームの一員であり、3つの代表的な画像ソフトウェアの一つであるSMILIの開発者の一人である。世界初のブラックホール直接撮像結果であるM87の画像化において、SMILIのパラメータサーベイを主導し、世界初のブラックホール直接撮像に貢献した (図2)。このEHTによる直接撮像の結果を広めるために、国内外でのアウトリーチにも活発的に貢献した (項目7, 9参照)。

(2年目と6ヶ月延長期間中の遂行状況と成果)

近年、EHTでは、M87に続く、Sgr A*の直接撮像について綿密に議論されている。申請者は、Sgr A*の4つのEHT画像化班のうちの一つのリーダーとして、Sgr A*の直接撮像を主導して

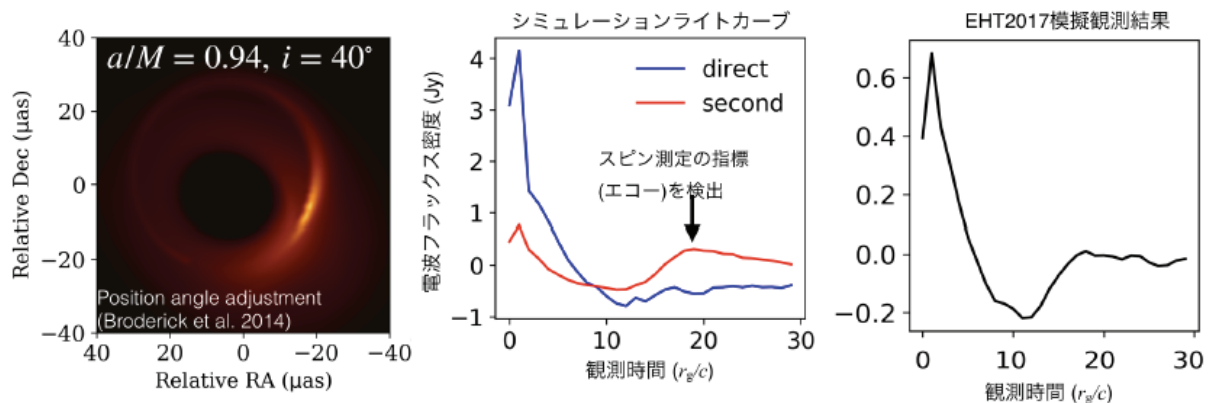


図2, 3DGRMHDシミュレーションに基づいたブラックホールへの落下ガス雲のスナップショット (a)、電波波長でのライトカーブ (b)、光度変動を模擬観測した時のライトカーブ (c)。ここで r_g は重力半径。

いる。また、提唱した新時空測定法を観測に適用するために、短い時間ビン (~1分) をもった落下ガス雲の動画を観測する手法 (ダイナミカルイメージング) の開発も主体となって行なっている。申請者は、SMILIにおいて、ダイナミカルイメージングのライブラリ開発・実装を主体となって行い、模擬観測による性能の検証、EHTの観測天体への適用を通して、実用化を行なった (具体例: 図3)。EHT Collaboration meeting, 他の国際学会でも自身の研究を発表したことも、それを裏付けている (項目6参照)。

また、理論方面においては、採用年度1年目で用いてきたガス雲モデルをより現実的なものに一般化することで、提唱したスピン測定法の妥当性を検証し、現実の観測データに適用させる準備を行った。具体的には、ターゲット天体のSgr A*近傍で想定される、ガス雲の運動、放射の性質を、三次元の一般相対論的磁気流体 (GRMHD) シミュレーションを用いて調査した。得られた理論シミュレーション (例: 図2左パネル) は従来のGRMHD結果、相対論的特性から予測されるサイズと無矛盾であり、これまでの研究で明らかになったスピンに依存するエコーの存在を示した (図2中図)。また光度変動をVLBI観測した場合の直接撮像を模擬観測し、自身のスピン測定法の適用可能性を調べた (図2右パネル)。これにより、申請者独自のスピン測定法を、現実的な降着シミュレーションに基づいたVLBI模擬観測によって検証することで、観測に実際に適用できる方法論として確立するための準備を着々と進めており、現在、成果を各学会で発表し、論文としてまとめている (項目6参照)。

以上の研究進捗は、海外特別研究員の申請書の研究計画に忠実に沿ったものであり、当初の見通しの通りの成果を挙げられている。採用年度2年目の研究は、コロナパンデミックによる受け入れ研究室先との活発な研究打ち合わせの欠如を被ったが、6ヶ月の研究延長をいただき、無事に当初の研究計画の項目を全て実行することができた。海外特別研究員の任期後は、Goethe Universityにおけるpostdoctoral researcherとして、海外特別研究員として行った研究をさらに発展、拡張していく予定である。