

# 日本天文学会 早川幸男基金による渡航報告書

## *Breaking the Limits: Super-Eddington Accretion on Compact Objects*

氏名：櫻井祐也（東京大学大学院D2（渡航当時））

渡航先：イタリア

期間：2016年9月18日-25日

私は、イタリアにて開かれた“Breaking the Limits: Super-Eddington Accretion on Compact Objects”という研究会に参加しました。この研究会では、理論と観測の両方について、コンパクト天体への超Eddington降着流に関する最先端研究の発表と議論が行われました。私は“Hyper-Eddington accretion onto a black hole with super-Eddington luminosity”というタイトルで、以下の内容で口頭発表を行いました。

最近の可視光と赤外光の観測により、宇宙年齢が10億歳程度の宇宙に10億太陽質量以上の超巨大ブラックホール（BH）が存在することが示されました。このような超巨大BHの起源について、活発な議論がなされており、複数の超巨大BH形成モデルが提案されております。標準的な形成モデルとして、重い初代星が寿命を終えたときに100太陽質量程度のBHに崩壊し、このBHが後のガス降着・合体により観測されているような超巨大BHになるというモデルが考えられています。しかしこのモデルではBH成長の持続性に関して問題が指摘されています。すなわち、BHが成長する過程でのガス降着時に、BH近傍でガスの重力エネルギーが輻射エネルギーに変換されるのですが、より大きなスケールでこの輻射がガスを電離加熱し降着を抑制することが指摘されています。超Eddington降着が起きる状況を考慮するモデルでは、このガスの電離加熱は、BH近傍で放出される輻射がガスの早い流れでBH方向へ引きずられるという光子捕獲現象により抑制されます。

コロンビア大学所属の稲吉恒平氏の2016年出版の論文では、光子捕獲現象を考慮した光度モデルを用いて、電離加熱が重要となるBondi半径周辺のスケールに着目し、BH降着の1次元輻射流体シミュレーションが行われました。光度モデルとして光度がEddington光度で飽和するものが考えられました。このモデルでは電離加熱が抑制され、降着率がBondi降着率に達し保たれる（hyper-Eddington降着する）ことが示されました。しかしながらBH近傍降着に関する多次元シミュレーションの研究では、円盤を介してBH降着が起きる場合には、光子捕獲現象が起きる場合でも光度がEddington光度を超えることが示されています。

私の研究では、光度が10-100 Eddington光度程度で飽和する場合についてもhyper-Eddington降着が実現されるか否かについて明らかにする目的で、Bondi半径周辺スケールでBH降着の1次元輻射流体シミュレーションを行いました。シミュレーションでは、連続の式、運動方程式、エネルギー方程式、輻射輸送方程式を、非平衡化学反応、水素・ヘリウムに関する冷却過程、電離加熱や電子散乱を考慮して解きました。輻射輸送については振動数依存性を考慮しました。シミュレーション計算と解析計算の結果、光源の位置が光球の場合には、Eddington光度の100倍まではhyper-Eddington降着が実現され、それ以上の光度では定常な降着が起きないことが明らかになりました。光度がEddington光度を超えるような強い輻射場の下でも、hyper-Eddington降着が可能であった理由として、内向きの力である動圧力がガス重力を補い外向きの輻射力に打ち勝つことが考えられます。このことを検証するため光学的に厚い球殻モデルを考え、計算により実際に上記の考察が正しいことを示しました。

今回の渡航において得られた成果の一つは、海外の研究会において初めて口頭発表を行い自身の研究を周知したことです。渡航前には念入りにスライドを作成し、発表練習を行い、質問対策を考えました。練習が功を奏し、本番では冷静に発表・質問対応することができました。発表後にはBH降着研究で有名なAleksander Sadowskiさんが声をかけてくださり、お話することができました。別の成果として、現在私が行っている超巨大BH成長に関する研究について稲吉氏と議論を行うことができたことが挙げられます。現在私の研究では、星団の中心で大質量星を形成後、大質量BHへ崩壊する過程を考えていますが、この大質量星の星の進化がBH形成にどう影響するかについて、有意義な議論を行うことができました。この議論により、私の今後の研究方針を部分的に決めることができたと考えております。研究会で特に印象

に残ったトピックは、M82 X-2というultra-luminous X-ray source (ULX) で近年パルスが観測されたことに関するものです。これまでULXsではパルスは発見されておらず、ULXsはBHへの超Eddington降着か、中間質量BHへの降着で説明できると考えられておりました。しかしながらM82 X-2で初めてパルスが見つかったことにより、中性子星への超Eddington降着でもULXsは説明できるのではないかと考えられるようになりました。関連研究に携わる研究者たちによれば、現在のところ、どの説明が正しいかについて決着はついておらず議論が続いております。一つの発見が、従来のサイエンスの常識の見直しを迫る、という点に私は特に心がひかれました。

最後になりましたが、今回渡航の援助をしてくださいました、日本天文学会早川幸男基金、ならびにその関係者の皆様方に深く感謝申し上げます。

## 日本天文学会 早川幸男基金による渡航報告書 *JWST nearby AGN science discussion: Kick-off meeting*

氏 名：泉拓磨（東京大学天文学教育研究センター D3（渡航当時））

渡航先：スペイン

期 間：2016年11月2日-6日

私は今回の渡航で、スペイン・マドリードのマドリード天文台にて開催された、“JWST nearby AGN science discussion: Kick-off meeting” という研究集会に参加しました。これは、NASAの主導で2019年に打ち上げ予定の赤外線観測衛星James Webb Space Telescope (JWST) を用いた近傍宇宙の活動銀河核 (Active Galactic Nucleus = AGN) の観測戦略を練るための会合です。特に、JWSTの科学運用最初期段階で、装置のデモンストレーションも兼ねて優先観測される“Director’s Discretionary Early Release Science” (ERS) 枠を

獲得することを目指しています。ERS枠では、他の一般公募観測に先んじてJWSTの優れた観測装置群を使え、最新かつ革新的な成果が期待できる一方、広く天文学コミュニティ全体に恩恵を与えるような (“of the community, by the community, for the community” とたとえられる) 極めて強力な案でなければ採択されないことは明らかです。

そこで、一般枠を含めてもなお、熾烈な競争が予想されるJWST時代に備えるため、スペインの著名な近傍AGN研究者であるAlmudena Alonso-Herreiro氏らを発起人として、広く世界中から近傍AGN研究者を集めた国際研究グループを組織し、集中的に科学案を検討していこうという流れになりました。今回開催されたのは、個別の科学案検討に移る前段階の、組織のポリシーや全体で目指すべき大目標を互いに確認・共有するためのキックオフ会議です。



研究集会会場のマドリッド天文台。

機動性を確保するためにメンバーは当面少数を是としており、今回の会議の参加者は20名ほどでした。

私自身は、大学院で一貫してミリ波サブミリ波干渉計である Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) を用いた近傍AGNの低温・高密度分子ガス観測を推進しており、AGNが及ぼす周囲のガスの物理化学状態への影響や、AGNへの質量降着をテーマに成果を上げてきました。その点を評価していただけたのか、本会議には、ALMAとJWSTの双方を用いたシナジー的研究の展開可能性を議論するために招待を受けました。そこで、ALMAを用いた近傍AGN研究への寄与として、以下の内容をまとめて話しました：まず第一に、その高い空間分解能を活かしたAGNトーラス（線幅数千  $\text{km s}^{-1}$  に及ぶ広輝線をもつAGNと持たないAGNを統一的に理解するために仮定された、中心高電離・広輝線領域を遮蔽する toroidal なガス・ダストの構造体）の直接撮像を挙げました。これに関しては、事実、García-Burillo et al., 2016, ApJL 823, L12や Izumi et al., 2017, ApJL 845, L5等の観測実例が出始めています。次に、極めて高い速度分解能を活かした、銀河中心領域でのガスの流入・流出（物質収支）の力学研究も議論しました。さらに、低温ガス・ダストは星形成の母体でもあることから、近年理論・観測の両面から議論されている、AGNと周囲の星形成活動の進化的関連性（Starburst-AGN connection）も議論しまし

た。このconnectionの実体としては、星形成活動に駆動される中心ブラックホールへの質量降着や、中心核遮蔽への影響等が挙げられます。これは、私自身が Izumi et al., 2016, ApJ 827, 81 のように、ALMA観測を織り交ぜて進めているテーマです。同時に、日本の理論チームが得意とするテーマでもあるため、JWST観測に日本勢が食いついていくための重要なカードになると思います。

2日間の集中議論の結果、チーム全体の大きな科学目標として、(i) AGNトーラスの物理化学的性質の探査、(ii) その物理的起源（特に遮蔽に際して重要となるトーラス鉛直方向の厚みの起源）の探査が掲げられました。ALMAとのシナジーとして上述の内容の面白さ・重要性を理解していただき、(i) (ii) に関係する物理量の定量をはじめ、積極的なALMA観測を推進する流れになったのは、この分野を進めている研究者としてうれしい限りです。一方、チームの体制や運営方針の議論に関しては、普段日本でまったりと暮らしている私にはかなり“過激”に思えること（極めて徹底した実力主義、成果主義、少数精鋭主義等）も多々あり、JWST観測にかける欧米人の鬼気迫る想いを目の当たりにしました。2017年からは定例会議も行い、衛星打ち上げ後の将来においても近傍AGNサイエンスを牽引できる強力な国際チームを醸造する予定です。そのようなチームに参加させて頂き、今後10年以上の流れを見据えた研究を展開できることをうれしく思います（30名超を想定するチームのうち、ALMA研究の担い手が僅か数名しかいないのが気苦労の種になるかもしれませんが、,,）。

最後になりますが、渡航を援助していただいた日本天文学会と早川幸男基金、およびその関係者のみな様に、心より感謝いたします。このキックオフ会議の成果をベースに、今後もJWSTとALMAを用いたAGN研究を議論・展開し、この分野のさらなる発展に貢献していきたいと思えます。ご支援、どうもありがとうございました。