

氏 名 大西 響子

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1902 号

学位授与の日付 平成29年3月24日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Black-Hole Mass Measurements in Nearby Galaxies Using
Molecular Gas Dynamics

論文審査委員 主 査 教授 亀野 誠二
助教 今西 昌俊
助教 小山 佑世
教授 海老沢 研 宇宙科学研究所
助教 田村 陽一 東京大学

論文の要旨

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

Galaxy evolution is one of the key topics in contemporary astronomy. Gaining a full understanding of it is however challenging, because of the myriad of processes involved. A key result of the 1990s was the realization that supermassive black holes (SMBHs; $M_{\text{BH}}=10^{6-10}M_{\text{sun}}$) are present in the centres of massive stellar spheroids. More importantly, direct mass measurements of SMBHs in centres of galaxies have become gradually possible in these 2 decades, by using several dynamical methods thanks to both developed observing facilities and mass modelling methods. The derived SMBH masses are revealing a couple of empirical correlations between SMBH mass and host galaxy properties (e.g., stellar velocity dispersion σ km s⁻¹, thus $M_{\text{BH}}-\sigma$ relation). The exact form of the correlation is still under debate, but its implication is clear -- black holes and galaxies grow hand-in-hand, and the evolutionary process possibly involves a self-regulating mechanism. The idea is now broadly accepted (and debated) as a co-evolutionary process of galaxy and black hole, which has been motivating many theoretical and observational studies of galaxies from nearby to high redshift.

Dynamical measurements of SMBH masses in nearby galaxies have been reported so far, by using ionized gas, stars, and masers to trace the rotational motions in galaxies. We here report an establishment and applications of a new dynamical method that uses molecular gas to trace the circular motion of a cold disc inside the galaxy. This new method was first used in 2013, which observed a CO (J=2-1) disc in a nearby quiescent early-type galaxy. We first examine the method by using two different molecular species for a barred-spiral galaxy. Both of the molecular species, HCN (J=1-0) and HCO⁺ (J=1-0), show very similar rotational motion that requires the same SMBH mass. We thus confirm the flexibility of this method to use multiple molecular species and to target various types of galaxies. Furthermore, this work for the first time demonstrated ALMA's power to measure SMBH masses in a number of galaxies across the Hubble sequence.

We then extend this method to use the whole data cube instead of a position-velocity diagram (PVD) as in our first work and other previous works. The new fitting method enables to fit a larger number of parameters, and thus decreases assumption in our model. Parameters for the mass model, thus SMBH mass and stellar mass-to-light ratio, are the only free parameters in previous works. We add free parameters to describe the properties of the disc, and fit the model to a data cube of regularly rotating CO (J=2-1) disc observed in a nearby early-type galaxy. The refinement on this method enabled to further investigate the error of SMBH mass with less assumption. Systematic error is also investigated in the work, but we do not

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

find any evidence for the SMBH systematic error being larger than its statistical error.

We then apply this method to another nearby galaxy imaged at ~ 30 pc spatial resolution, three times higher than the first two. The velocity dispersion distribution is newly considered to model a realistic gas disc in this spiral galaxy. Despite the high angular resolution, we do not measure the SMBH mass to very good accuracy. The model needs to be more precise for this case by, for example, checking with an asymmetric velocity dispersion distribution of the molecular gas.

Results from our method are finally added to the empirical $M_{\text{BH}}-\sigma$ relation. We comment that the results do not conflict with the existing relation, while the number of plots is too small to give a statistically meaningful conclusion. In order to further constrain the $M_{\text{BH}}-\sigma$ relation and thus to discuss the co-evolutionary process of galaxy and black hole, cross checks of the SMBH masses measured with different dynamical methods will be of great importance. Systematic error among methods needs to be investigated in the near future to resolve the origin of the scatter seen in the $M_{\text{BH}}-\sigma$ relation.

Unlike other dynamical methods, the molecular gas method provides a broad range of target galaxy types and SMBH masses. Moreover, gas kinematics sometimes can be observed with a surprisingly short integration time (only a few to several tens of minutes of on-source time for CO detection). We examine and confirm the capability of the molecular gas method to help dramatically increasing the sample for the $M_{\text{BH}}-\sigma$ relation. The dynamical method will thus be a powerful tool to help understanding the key question about the co-evolutionary process of galaxy and black hole.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

銀河の中心に存在する大質量ブラックホール (SMBH) は、存在自体が物理学的に興味深い対象であると共に、銀河形成や進化に重要な役割を持ち、顕著な質量降着がある場合には活動銀河核 (AGN) として高エネルギー放射源となる。SMBH は第一に質量で特徴付けられるので、その計測は SMBH 自身の研究のために欠かせない。さらに、SMBH 質量 (M_{BH}) と銀河バルジの光度、質量、とりわけ速度分散との間に相関が見られる ($M_{\text{BH}} - \sigma$ 関係) ことから、銀河と SMBH が相互作用しながら共進化する学説が提唱されており、この検証のためにも M_{BH} の計測は必須である。従来の M_{BH} 計測法が適用できるのは 80 程度の銀河に限られており、サンプルを増やすと共に多様な銀河に適用できる M_{BH} 計測法の開発が希求されていた。

本研究は、SMBH 近傍 100 pc 以内の分子ガスを電波干渉計で観測し、回転速度から力学的に SMBH 質量を見積る手法を確立するものである。この手法により、銀河に遍く存在する分子ガスを利用し、ALMA など高感度・高分解能の電波干渉計によって SMBH 質量計測のサンプルが格段に増加することが期待される。出願者の大西氏はこの手法に注目し、ALMA および CARMA 電波干渉計による近傍銀河の分子ガス観測データを用いて M_{BH} 計測方法を改良・検証し、精度向上を試みた。

論文第 1 章では銀河進化の理解における M_{BH} 計測の重要性を述べ、従来の様々な M_{BH} 計測方法 (恒星の軌道運動、恒星の速度場、水メーザー円盤のケプラー回転、電離ガスの速度場、分子ガスの速度場) の先行研究をレビューし、それぞれの長所と問題点をまとめている。

第 2 章から第 4 章では、個別の銀河について異なるアプローチで M_{BH} 計測を試行した。第 2 章では NGC 1097 について、 M_{BH} と質量光度比 (M/L) の 2 つを未知パラメータとし、観測量 (分子ガス分布、速度場、近赤外線輝度分布) を恒星の質量分布と M_{BH} との和でモデル化した推定法 (Position-Velocity Diagram; PVD) で M_{BH} を精度 20% で求めた。また、2 つの分子種 (HCN と HCO^+) によって一致する計測結果を得た。さらに、誤差の主要因が分子ガス円盤の傾斜角不定性にあることを示した。第 3 章では NGC 3665 の CARMA による CO 分子輝線観測を用い、 M/L と M_{BH} に重心位置、円盤傾斜角、位置角、系統速度、速度分散、光度、円盤内縁と外縁半径を加えた 11 個の未知パラメータによって観測量を説明するモデルをマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) で求め、PVD による M_{BH} と矛盾しない計測結果を得た。また、中心に SMBH 重力圏より大きい CO 分布の空乏があっても、MCMC で 25% の精度で M_{BH} を推定できることを示した。第 4 章では NGC 5064 について MCMC で M_{BH} 計測を試み、薄い円盤モデルでは残差が大きいことから、分子ガスの速度分散をパラメータに加えることによって、厚い円盤構造を持つ銀河にも対応できるように改良した。

これらを踏まえて第 5 章では、分子ガス観測が $M_{\text{BH}} - \sigma$ 関係にもたらす利点を議論した。将来的に天体数を増やして相関精度を向上し、銀河の分類や赤方偏移ごとの相関関係の差違を見出せば、銀河と SMBH の共進化を解明する一助となる可能性を示唆した。第 6 章では論文全体の結論をまとめた。

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

本研究は分子ガスによる M_{BH} 計測法を確立し、観測効率・精度向上を探究した成果として高く評価できる。この成果は銀河と SMBH の共進化や AGN の解明に新たな知見をもたらすと期待される。本研究は出願者本人が研究計画を立案し、主要な観測提案を行い、それによって得たデータを解析して論文にまとめたものである。すでに筆頭著者として査読誌に 1 報を出版し、さらに 1 報を投稿中であることから、出願者が自立した研究者の資質を備えていると認められる。よって、審査委員は全員一致で博士論文として合格と判定した。