

氏 名 鳥羽 儀樹

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1660 号

学位授与の日付 平成26年3月20日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Luminosity and Redshift Dependence of the Covering Factor of  
the Dust Torus in Active Galactic Nuclei Revealed by Infrared  
Observations with *AKARI* and *WISE*

論文審査委員 主 査 教授 堂谷 忠靖  
教授 松原 英雄  
助 教 土居 明広  
教授 長尾 透 愛媛大学  
准教授 上田 佳宏 京都大学

論文内容の要旨  
Summary of thesis contents

Active Galactic Nuclei (AGNs) are among the most energetic objects in the universe. The nuclear activity is powered by a supermassive black hole (SMBH) and its accretion disk, and this central engine is surrounded by a dusty toroidal structure, so-called “dust torus”. The dust torus plays an important role to explain the observational differences among AGNs. In the context of AGN unification scheme, the torus provides anisotropic obscuration of the central region so that sources viewed face-on are recognized as “type 1 AGNs”, and those observed edge-on are “type 2 AGNs”.

In this dissertation, I focus on the covering fraction of the dust torus, a fundamental parameter to describe the geometrical structure of the dust torus in the unification scheme. The covering factor (CF) is defined as the fraction of the sky, as seen from the AGN center, that is blocked by heavily obscuring material. This corresponds to the fraction of type 2 AGNs in the entire AGN population. Hence, investigating the type 2 AGN fraction and its relation with the properties of AGNs gives clues to the nature of the obscuring structures. Over the last few years, some surveys at multiple wavelengths have reported that the CF depends on the luminosity and redshift. This means that the simplest unified scheme which predicts non dependence on luminosity and redshift, need to be modified. Some authors, however, have questioned these dependencies by claiming that the data are affected by various uncertainties. In particular, the observed correlations can be explained as a selection effect, in which case they may not necessarily have any astrophysical significance. Therefore, it is still unclear whether the CF intrinsically depends on the luminosity and particularly on redshift.

The scientific goal of this thesis is to reveal the dependence of the CF on luminosity and redshift, through a statistical analysis based on infrared (IR) observations; reprocessed radiation in the dust torus is emitted in the IR wavelength range. Mid-IR (MIR) emission, in particular, is expected to be direct radiation from the dust torus and uninfluenced by dust extinction. In this thesis, I estimate the CF of the dust torus using the MIR luminosity functions (LFs) and examine the luminosity and redshift dependence based on a statistically complete AGN sample.

First I demonstrate the luminosity dependence of the CF at low-redshift ( $z \sim 0.04$ ) by using *AKARI* MIR all-sky survey catalog and the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) spectroscopic catalog. *AKARI*, the first Japanese space satellite dedicated to infrared astronomy, was launched in 2006. One of its most important results was an all-sky survey in the 9 and 18 micron as well as 65, 90, 140, and 160 micron. The spatial resolution and sensitivity of *AKARI* are much better than those of the *Infrared Astronomical Satellite (IRAS)* which performed a previous all-sky IR survey. In particular, the detection limits (5-sigma) for point sources per scan are 50 and 90 mJy for the 9 and 18 micron bands, respectively, with spatial resolutions of about 5 arcsec. The SDSS performed photometric and spectroscopic surveys, covering the wavelength range of 380-920 nm at  $R \sim 1800$ , and obtained spectra for roughly 1,000,000 galaxies, 100,000 quasars, and another 50,000 stars and serendipitous objects. By combining the *AKARI* with SDSS spectroscopic data, I selected 243 galaxies at 9 micron and 255 galaxies at 18 micron. These galaxies were then classified by their optical emission lines, such as the line width of H<sub>alpha</sub> or by their emission line ratios of [OIII]/H<sub>beta</sub> and [NII]/H<sub>alpha</sub> into five types: type 1 AGNs; type 2 AGNs; low-ionization narrow emission line galaxies (LINER); galaxies with both star formation and narrow-line AGN activity (composite galaxies); and star-forming galaxies (SF). I then constructed the 9 and 18 micron LFs for all types of local galaxies ( $z \sim 0.04$ ). I found that (i) the number density ratio of Type 2 to Type 1 AGNs is  $1.73 \pm 0.36$ , which is larger than a result obtained from the optical LF and (ii) this ratio decreases with increasing 18 micron luminosity. Therefore, I conclude that the CF decreases with increasing MIR luminosity at low- $z$  universe.

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

Next, I extend our study based on *AKARI* toward medium-redshift ( $z \sim 0.1$ ) by using *WISE* MIR all-sky survey catalog. *WISE* also performed an all-sky survey at 3.4, 4.6, 12, and 22 micron with angular resolutions of 6.1, 6.4, 6.5, and 12.0 arcsec and a 5-sigma photometric sensitivity better than 0.08, 0.11, 1, and 6 mJy, respectively, in these four bands. Combining the *WISE* catalog with the SDSS spectroscopic data, I selected 223,982 galaxies at 12 micron and 25,721 galaxies at 22 micron for spectroscopic classification. I then identified 16,355 AGNs at 12 micron and 4,683 AGNs at 22 micron by their optical emission lines and cataloged classifications in the SDSS. Following that, I estimated the CF as the fraction of type 2 AGN in all AGNs whose MIR emission are dominated by active nucleus (are not contributed from their host galaxies), based on their MIR color selection. I found that (i) the CF decreased with increasing MIR luminosity, regardless of the choice of type 2 AGN classification criteria, and (ii) the CF does not change with redshift for  $z < 0.2$ . Furthermore, I carried out various tests of influence of selection bias and confirmed the similar dependences even taking into account these uncertainties. The luminosity dependence of the CF can be explained by the receding torus model, but the “modified” receding torus model gives a slightly better fit. As a result of comparing our measured CF with that obtained from the optical and hard X-ray, I argued that optical measurements could be affected by their host galaxies.

論文題目: Luminosity and Redshift Dependence of the Covering Factor of the Dust Torus in Active Galactic Nuclei Revealed by Infrared Observations with *AKARI* and *WISE*

銀河の中心には、太陽の100万～10億倍もの質量を持つ超大質量ブラックホール (BH) が普遍的に存在すると考えられており、超大質量BHへ周辺の物質が落ち込む際に膨大なエネルギーがX線から電波にわたる多波長で放射される。このような天体は活動銀河核 (AGN) と呼ばれる。超大質量BHの形成と成長を探る上で鍵を握るのが、BHへ落ち込む物質の供給源であり、BHの周りに存在する「ダストトーラス」である。ダストトーラスの形状を探ることで、BHへの質量供給メカニズムの解明の糸口が掴めると期待される。実際ダストトーラスがBHから見た全ての立体角を覆っているわけではなく、ある割合 (カバリングファクター) でしか覆っていないことが観測的には解っており、中心核 (BHへの降着円盤) が観測者に見えているAGNは1型、ダストトーラスによって隠されているものは2型と呼ばれている。全AGNに対する2型AGNの数の比を求めることで、カバリングファクターが推定できる。カバリングファクターが、AGNの光度により変化するのか、また、赤方偏移に依存するのか、という点が、AGNを理解する上で鍵を握っていると考えられる。

これまで可視光やX線で選択されたAGNを用いてカバリングファクターを推定する試みがなされてきたが、赤外線ではサンプル数が少なく困難だった。波長10–20 $\mu\text{m}$ の中間赤外線ではダストトーラスからの熱放射が検出できるので、AGNタイプに依らない観測が期待できる。そこで本研究では、ダストトーラスのカバリングファクターを調べるために、最先端の赤外線天文衛星の全天サーベイで得られた点源カタログを用いている。AGNのタイプ分類には、スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) 等の可視分光データアーカイブによる輝線強度比を利用した。まず「あかり」中間赤外線全天サーベイカタログから、赤方偏移 ( $z$ ) 0.04までの中間赤外線銀河約250天体を使い、カバリングファクターが中間赤外線光度の増加と共に減少することを明らかにした。次に、WISE衛星の全天サーベイカタログを用いて、宇宙論的遠方 ( $z=0.2$ ) までの中間赤外線銀河約20万 (うちAGNは約3万) 天体を使い、カバリングファクターの光度依存性を、はるかに高い精度で検証すると共に、その赤方偏移依存性についての評価も行った。その結果、カバリングファクターは赤方偏移 $z=0.2$ までは有意に変化していないことがわかった。一方、中間赤外線光度については、明確な依存性が認められた。解析に当たっては、系統誤差を極力除くため、様々な独自の工夫を行っている。

本研究の議論において、出願者はWISE衛星の中間赤外線カタログから得られたカバリングファクターの光度依存性を説明するモデルとして、**Receding Torus Model**が有望であると議論している。即ち中心核放射が高光度になるほど、トーラスの内側のダストが昇華するため、カバリングファクターが減少するのである。出願者はさらにトーラスの (対象軸方向の) 高さが光度に依存していると考え、**Modified Receding Torus Model**がより適合することも議論している。本研究は最先端の赤外天文衛星による全天サーベイと、SDSSによる可視スペクトル輝線診断をベースとしたものであるが、SDSSの限界等級が比較的low光度側で十分ではなく一部のAGNを見落としている可能性についても最後に触れている。

本研究は、データ整約から解析、結果のとりまとめ、議論など、論文作成の一連の過程を出願者が主体的に行っていることが明らかである。得られた成果は学術的な意義が高く、今後、すばる望遠鏡の次世代ファイバー分光装置PFSや次期赤外線天文衛星SPICAによる観測で大きな発展が期待できる。以上より、審査委員全員が博士論文として合格であると判断した。