

氏 名 松田 桂子

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1584 号

学位授与の日付 平成25年3月22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 A Systematic Study of Local Active Galactic Nuclei with  
Infrared and Hard X-ray All-Sky Surveys

論文審査委員 主 査 教授 松原 英雄  
教授 堂谷 忠靖  
准教授 川田 光伸  
教授 海老沢 研 宇宙科学研究所  
教授 寺島 雄一 愛媛大学

Some galaxies contain compact nuclei, which emit vast amounts of energy over the entire electromagnetic spectrum from radio through gamma-rays, thus called active galactic nuclei (AGN). The powerful activity originates from the release of gravitational energy through accretion of material on to a supermassive black hole with a typical mass in the range of  $10^{6-9} M_{\odot}$ . Some of the gravitational energy is thermalized in the accretion disk to radiate ultraviolet and soft X-ray emission. Some is channeled into the generation of energetic particles (or jets) and produces X-ray through gamma-ray emission via inverse Compton scattering and radio through X-rays via synchrotron emission. This radiation from the vicinity of the black hole may heat circumnuclear dust in the obscuring torus of clouds, which is believed to exist on parsec scales outside the accretion disk. The warm torus can then be a source of a strong infrared emission. AGN tend to show large variety in their observational properties, such as luminosities, optical line properties, radio brightness, variability, and so on. In spite of such apparent diversity, it is widely believed that the various AGN are intrinsically the same. Just a few parameters – inclination, accretion rate, and presence/absence of jets – may be responsible for the apparent differences. However, details of the geometry of the nuclei, especially of the torus, are poorly known because their angular scales are very small and difficult to resolve spatially.

The main goal of this thesis is to study the geometry of the nuclear emission region based upon unbiased survey data gathered from multiple wavebands. For this purpose, I take two approaches; one is to explore the correlation between hard X-ray and infrared luminosities using unbiased samples systematically for each AGN type. The other is to analyze the variability of mid-infrared emission for individual sources and for each AGN type statistically using two all-sky survey catalogs. This is the first large-scale systematic study of mid-infrared variability in AGN, probing timescales of several years separately for different types of AGN.

For the first approach, I used all-sky surveys conducted by *Swift* in the hard X-ray band and by *AKARI* in the infrared band. The *Swift*/Burst Alert Telescope (BAT) all-sky survey provides an unbiased, flux-limited selection of hard X-ray detected AGN. The hard X-ray ( $>10$  keV) band is rather insensitive to the photo-electric absorption due to the intervening clouds up to mildly Compton-thick ( $N_{\text{H}} \sim 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ ) column densities. In other words, the hard X-ray flux obtained by the survey reflects the intrinsic luminosity for all Compton-thin AGN and also for mildly Compton-thick ones, thus providing samples largely unbiased by obscuration. In the case of infrared observations, high angular resolution is crucial in order to properly separate AGN from stellar emission in the host galaxy. However, this was not available until the advent of recent telescopes. The *AKARI* satellite completed an all-sky survey whose catalog was released just before the beginning of this research. This survey is several times more sensitive than previous ones, and was carried out at a much higher angular resolution of the order of arcseconds. Cross-correlating the 22-month hard X-ray survey with the *AKARI* all-sky survey, I studied 158 AGN detected by both instruments. I find a strong correlation for most AGN between the multi-infrared (9, 18, and 90  $\mu\text{m}$ ) and hard X-ray (14–195 keV) luminosities, and quantified the correlation for various complete subsamples of AGN. Partial correlation analysis confirms that the correlation is intrinsic; that is, the correlation between the luminosities remains significant after removing the contribution of redshift. Under the unification scheme of AGN, this result may be viewed as supporting clumpy torus models. The good one-to-one correlation between the mid-infrared bolometric luminosities and the hard X-ray luminosities for over four

orders of magnitude indicates that the covering factor of torus will decrease with the increase of the intrinsic luminosity. The correlation for radio galaxies has a slope and normalization identical to that for Seyfert 1s, where we have a direct view of the nuclear regions in both hard X-rays and infrared, implying similar hard X-ray/infrared emission processes in both. In contrast, sources with large Compton-thick column densities show a large deficit in the hard X-ray band, because high gas column densities in the torus diminish their apparent luminosities even in the hard X-ray band.

On the other hand, a few radio-loud sources (radio galaxies and blazars) show systematic deviations toward higher X-ray luminosities in the correlations as compared to radio-quiet sources. Origin of the broadband emission of radio galaxies is a matter of considerable debate. One possible explanation of this deviation (i.e., excess X-rays) is the contribution of jets to the hard X-ray emission. Observations of flux variability can be useful for isolating the jet contribution, because strong and rapid fluctuations are characteristic of beamed jet emission. Useful hard X-ray variability data are not yet available, but such data have recently become available in the mid-infrared band. Furthermore, mid-infrared variations can also potentially constrain the geometry of the dusty torus by measuring the response of the torus to changes of the nucleus emission. This leads to the second topic of my thesis to study mid-infrared variability of AGN systematically. I combine two mid-infrared all-sky surveys, i.e., the data released by *AKARI* and Wide-field Infrared Survey Explorer (*WISE*). The 158 *Swift*/*BAT*-*AKARI* selected AGN are studied using both these releases. *WISE* was launched about four years after *AKARI* and accomplished all-sky surveys with high sensitivity in several mid-infrared bands (particularly relevant to this study are the 12 and 22  $\mu\text{m}$  bands). Because the bands observed by the two telescopes are slightly different, I calculated the flux ratio of *WISE* and *AKARI* after subtracting the contribution of band differences, for which the spectral slope calculated for each source was used. In addition, cross-calibration errors of the two telescopes are carefully examined. I find significant mid-infrared variations in a few sources, mostly blazars, in either or both of the 9 and 18  $\mu\text{m}$  bands. Although no significant variations are detected from the rest of the sources, low level variations may be hidden in the statistical errors. Therefore, I tried to constrain the average sample variability for different AGN types, which was actually detected from Seyfert 1 in the 9  $\mu\text{m}$  band. This is the first detection of variability from Seyfert 1 by using two mid-infrared all-sky surveys. I quantified the amplitudes of sample variability and found that the amplitude reaches  $\sim 10\%$  in 4 years for Seyfert 1 in the 9  $\mu\text{m}$  band. If this variability is explained by the torus emission only, the dust distribution in the torus should be compact, although other possibilities, such as jet contribution, cannot be excluded. Combining the results of the hard X-ray vs. mid-infrared correlations and the mid-infrared variability, geometry of the nuclei, especially that of the obscuring torus, is discussed.

## 博士論文の審査結果の要旨

活動的銀河中心核 (AGN) とは、太陽の $10^6$ - $10^9$ 倍の超巨大ブラックホールに物質が落ち込むことで膨大なエネルギーを解放している天体であり、どのようにそれほど巨大なブラックホールが成長するのかを探ることは、それ自体の理解のみならず、宇宙の物質進化の歴史を解明する上でも極めて重要である。AGNには、電波の強弱、幅の広い輝線 (ドップラー速度換算で $1000\text{kms}^{-1}$ 以上) の有無、光度の違い等から、Seyfert AGN (1型、2型)、クェーサー、LINER、電波銀河 (1型、2型)、Blazer等に分類されているが、これらを統一的に理解するために、ブラックホール付近に存在する降着円盤を取り囲むトーラス状のダスト及びガス雲を仮定し、それらを見込む角度の違いで説明する「統一モデル」が考えられてきた。この統一モデルが正しいかどうかを検証する上で、硬X線・赤外線による観測は極めて有効である: 硬X線 (光子エネルギーが $100\text{keV}$ 程度) は中心領域の放射源の情報をトーラスによる光電吸収をほとんど受けずに調べることができる一方、赤外線はトーラス内のダストからの熱放射を観測することができる。よって、これらを組み合わせることで、AGNの構造を詳細に調べることができる。

最近になって硬X線と赤外線による全天サーベイ観測が成功したことを受けて、出願者は様々なAGNのサンプルを無バイアスに集約し、これにより中心領域の放射成分とトーラスの構造について、(1) 硬X線と赤外線の光度相関、および(2) 中間赤外線放射の時間変動という二つのアプローチを用いて研究を行った。

前者については、硬X線 (Swift/BAT,  $14$ - $195\text{keV}$ ) 光度と赤外線 (「あかり」衛星の $9$ 、 $18$ 、 $90\ \mu\text{m}$ ) 光度の相関を調べ、AGNのタイプに拠らず、それらがほぼ傾き $1$ の直線 ( $9\ \mu\text{m}$ の場合 $0.94 \pm 0.06$ ) に乗っていることを示した。セイファート1型と2型が同じ相関関係を持つことは、トーラスが一様であると仮定すると、見込み角の大きな2型ではトーラスに隠されて見えにくくなるはずの暖かい塵の放射 (中間赤外線放射) が1型同様に観測されていることを意味しており、トーラスが多く細かい塊からなる構造 (clumpy) をしていることを示唆している。またX線に対して光電吸収の光学的厚みが著しく大きい (Compton Thick) AGNについては、相関からのずれが認められたが、硬X線の散乱・吸収量を補正後は、やはり同一の直線相関に乗ることから、統一モデルを支持することになった。また電波銀河も同一の直線に乗ることから、硬X線・赤外線放射にはジェットの影響は小さいこともわかった。さらにX線光度とAGNの全放射光度の関係式 (先行研究) を用いると、赤外線放射を担うダストトーラスの中心遮蔽率が、光度が大きくなると共に減少する、という示唆も得られた。これらの成果は、今後clumpyトーラスモデルや、トーラスの中心遮蔽率/開口立体角の理論を発展させる上で極めて有効な情報を与えたものと評価される。

後者については、観測時期が約4年離れた二つの衛星による中間赤外線全天サーベイデータ (「あかり」 $9$ 、 $18\ \mu\text{m}$ およびWISE  $12$ 、 $22\ \mu\text{m}$ ) を用いて、先の光度相関解析で用いたサンプルから、「あかり」、WISEの両方 (全 $2+2=4$ バンド) で検出されている71個のAGNに着目して時間変動の有無を調べた。2エポックの比較にすぎないので、個々の天体の変動の有意性を議論することは難しく、多数のサンプルを調べることで統計的に変動成分の有無を

検証した。その際、天体毎にスペクトルエネルギー分布をべき関数でフィットし、観測バンドの違いによる効果の補正を行った。また、「あかり」とWISEの相対的なキャリブレーションエラーが、変動が無視できる明るいA・F型星の観測結果の比較から、2-4%であることも明らかにした。これによってサンプル全体平均で約10%程度の変動が、特に1型AGNについては、高い確度で有意に存在することを示した。また非常に大きな ( $5\sigma$ 以上) 変動を、3天体 (いずれもブレイザーと1型電波銀河) から検出した。それ以外のタイプのAGNについては、15-30%の上限值を得た。「あかり」とWISEの観測から得られた10%/4年という変動量はこれまでのダストトーラスの理論モデルで予想されるものよりも大きく、仮にダストトーラスの構造にその原因を求めらば、トーラス内のダスト分布が非常にコンパクトに中心集中している必要がある。ただ他の要因 (ジェット等) が原因である可能性もあり、今後の更なる検証が待たれる。

本研究は、バイアスの無いAGNサンプルについて、光電吸収の影響の少ない硬X線とダストトーラスからの放射を見る赤外線を利用するという着眼点や、「あかり」とWISEという全く独立な宇宙赤外線望遠鏡の観測の不定性を慎重に調査し、高い精度で時間変動の有無を議論したこと等が高く評価できる。また本研究の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において、出願者が主体的に行っていることが認められる。

出願論文は全て英語で記述されており、外国語による研究成果発表能力も十分備わっていると判断された。博士論文の前半の内容に関わる査読論文1編を国際的な学術雑誌に筆頭著者として出版しており、さらに後半の内容を含めた査読論文を準備中である。以上により審査委員会は全員一致で、出願者が試験に合格であると判定した。