

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247030

研究課題名(和文) 赤外線高分散分光観測による活動的銀河核構造の解明

研究課題名(英文) High-resolution Spectroscopic Study of the Structure around Active Galactic Nuclei

研究代表者

中川 貴雄 (NAKAGAWA, Takao)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：20202210

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,500,000円

研究成果の概要(和文)：活動的銀河核の「統一モデル」実証の鍵を握る「分子トーラス」の存在と構造を、CO分子線の振動・回転遷移線の「吸収」によって観測するために、観測的研究と機器開発研究の両者を進めた。観測的研究としては、赤外線天文衛星「あかり」の観測により、活動的銀河核からCO分子の吸収線を検出し、高温・高柱密度の分子雲が存在することを明らかにした。これは、活動銀河核周りの分子雲が、中心核からのX線により加熱が行われていることを示唆している。機器開発研究としては、スペースから高波長分解能観測を実現する「イマージョン・グレーティング」の開発を進め、少なくとも常温では実用に供することができる性能を実証した。

研究成果の概要(英文)：In order to reveal the structure of the molecular tori, which have been proposed as a key element in the unified scheme of Active Galactic Nuclei (AGNs), we observed the 4.7 micron carbon-monoxide (CO) ro-vibrational absorption band spectra toward several AGNs with the Japanese infrared astronomical satellite AKARI. We detected warm (200-500 K) gas with large column densities and attributed this component to the molecular tori around AGNs. We suggested that the molecular clouds in the tori were heated by X-ray radiation from the central engine of AGNs. For the future observations of the CO absorption toward high-z AGNs from space borne observatories, we developed an immersion grating for high-resolution spectroscopy in the mid-infrared. We selected CdZnTe as an optimum material for our study, and demonstrated the performance of the immersion grating made of CdZnTe at room temperature.

研究分野：赤外線天体物理学

キーワード：天文学 活動的銀河核 分光 赤外線

1. 研究開始当初の背景

Antonucci & Miller (1985, ApJ, 297, 621) に代表される活動銀河核のスペクトル偏光観測により、type 2 Seyfert 銀河は、その中心に type 1 AGN を持っていることが明らかになった。これにより、AGN には普遍的に type 1 AGN 核を持っており、それが直接に見えていれば type 1 AGN と観測されるが、その周りのトラスにより type 1 AGN が隠されると、type 2 AGN として観測されるという仮説、いわゆる「AGN の統一モデル」が提唱された。この「AGN の統一モデル」の成功の鍵を握るのは、中心核周りのトラスの存在である。このトラスが、高密度の分子ガスで構成されている可能性が Krolik & Begelman (1988, ApJ, 329, 702) によって示唆された。しかしながら、研究開始当初には、この「分子トラス」の存在を、極めて明確に示した観測例は少なく、その存在の普遍性、その物理状態については、未だに謎が多かった。

2. 研究の目的

本研究では、活動銀河核 (AGN) の「統一モデル」実証の鍵を握る「分子トラス」の存在と構造を、赤外線領域の CO 分子線の振動回転遷移線の「吸収」によって観測するというユニークな観測手法により進めた。この方法では、幅広い励起状態にある CO 分子を一度に観測することにより、「分子トラス」内のガスの物理状態とその量とを正確に決められるという特徴がある。これにより、半ば仮想的であった「分子トラス」の実体を明らかにすることを目指した。

さらに、この観測を遠方宇宙に拡張することをめざした。そのためにはスペースから高波長分解能の観測を行う必要がある。その実現のために、スペース観測にとって必須の小型という特徴をもちながら高波長分解能の観測を実現する鍵となる機器 (イメージジョン・グレーティング) の開発を進めた。

3. 研究の方法

(1) 「分子トラス」サーベイ観測

「分子トラス」の存在を確かめ、その物理的状态を解明するために、本研究では、近赤外線 4.6 μm にある、CO 分子の振動回転遷移線 ($v=0-1$, $J=\pm 1$) を利用した。

一般的な分子雲の観測には、多くの場合、電波 サブミリ波領域の CO 分子線の回転遷移線 ($J=1$) が利用されてきた。これは、特に回転量子数 J の小さな遷移が、一般の星間ガスでも容易に励起されることによる。

しかしながら、「分子トラス」の観測には、上記は当てはまらない。回転遷移線では、銀河内の一般分子雲からの放射が強く、「分子トラス」の放射だけを分離することができない、遷移の異なるスペクトル線

を同時に観測することは (特に電波天文学の手法では) 一般には困難である、という問題があり、「分子トラス」の物理状態を解明するためには、有効ではないためである。

そこで、我々は、CO 分子の振動回転遷移線 ($v=0-1$, $J=\pm 1$) を、我々は、CO 分子の振動回転遷移線 ($v=0-1$, $J=\pm 1$) を吸収線として観測する手法をとった。その際に、背景の光源として、活動銀河核の中心エンジンに温められた小さな (しかし明るい) 光源をもちいることにより、実質的な空間分解能を高めることができる。これにより、母銀河の影響を軽減し、銀河中心核周辺だけを選択的に観測することができる。さらに、振動回転遷移線を用いるため、回転量子数 J の異なる (励起温度の異なる) 多くのスペクトル線を同時に観測できるということができ、分子ガスの物理状態を正確に求めることが可能になる。

吸収線とし本研究では、日本の赤外線天文衛星「あかり」による、銀河核 4.6 μm CO 吸収線サーベイを系統的に行なう。「あかり」の観測が、この波長域を地球大気の影響なしに観測できる唯一の機会であるからである。これにより、一体、どのような銀河が、CO 吸収線を示すかを明らかにする。ここから、活動銀河核、とくにそれを取りまく「分子トラス」の構造・物理状態をさぐることを目標とした。

(2) 遠方銀河観測への拡張

我々は、「あかり」により CO が検出された銀河のうち特に明るいものを、「すばる」望遠鏡を用いて、高い分光分解能で観測した (Shirahata, Nakagawa, et al. 2013, PASJ, 65, 5, 論文)。その結果、大きな青方偏成分が観測された。これは、分子ガスが高速のアウトフロー成分を持つことを示している。これは銀河の進化において大変に重要な意味を持つ。次なる課題は、このような分子トラスからのアウトフローが、星形成活動のピークである $z \sim 2$ で起きているかどうかを解明することである。

しかしながら、従来の観測機器では、このような観測は困難である。そのため、 $z \sim 2$ までの CO 吸収線観測を可能にするための鍵となる技術である「イメージジョン・グレーティング」の基礎開発を行なった。これにより将来の high- z における分子アウトフロー観測への道を拓くことを目指した。

4. 研究成果

(1) 「分子トラス」サーベイ観測

「あかり」の観測データの解析にあたり、研究当初に、まず「あかり」搭載グリズムに今まで見過ごされてきた「2次光」の影響があり、これが CO 吸収線付近の観測結果に大きく影響を与えていることを見出した。そのため、まずは「グリズム 2次光の影響を含む校正方法」を新たに作り出し、信頼のおける

波長領域を従来よりも長波長に拡大した(発表論文)。当初の研究(論文)は、「あかり」の液体ヘリウム冷却期間だけの適用であったが、後により長期間(液体ヘリウム枯渇後のフェーズ3を含む)まで適用した。これらのこれにより、CO吸収線の波長付近での観測の精度を大きく向上させ、解析に使用できるサンプルの数を大きく増やした。

この校正結果を用いて、観測的研究である「近傍銀河のCO吸収線サーベイ観測」を進めた。赤外線天文衛星「あかり」に加え、連続波をより信頼性高くきめるために、米国のSpitzer衛星による観測の結果を併用した。我々は近傍の活動的銀河核の結果を解析し、そこからCO吸収線を検出した。そのCO吸収線にモデルを適用し、この吸収線は、高温($T_{\text{gas}} \sim 200\text{-}500\text{K}$)で高密度(水素柱密度 $N_{\text{H}_2} > 10^{23} \text{ cm}^{-2}$)の分子ガス雲によるものであることを示した(図1)。ここで示された高温・高柱密度の分子雲の存在は、紫外線や衝撃波による加熱では説明できず、高密度ガスがX線放射によって加熱されている結果であると考えられる。すなわち、観測された一酸化炭素吸収帯を生じている分子ガスは、巨大ブラックホールの周りに実際に分子トラスが存在し、その中の分子雲が、中心核からのX線により加熱が行われていることを示している(論文、)。

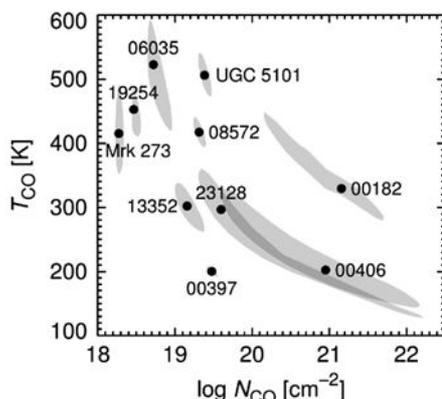


図1: CO吸収帯のスペクトルを解析して求めた吸収分子ガスの温度およびCOの柱密度。それぞれの点とエリアが観測された活動銀河核の値とその不定性を示す。高温で大きな柱密度をもつ分子雲の存在を示している(論文)。

さらに、液体ヘリウム枯渇後のフェーズ3を含む新しい校正方法を活用して、サンプルを増やした。その結果、中心核からのX線により加熱された高温・大柱密度の分子ガスが多く活動銀河核に存在することを見出した。その割合は、Type-1では少なく、Type-2で多いという結果となり、AGNの統一モデルと整合性がとれる結果となった。ただし、単なるAGNだけではなく、星形成をともなっている銀河において、高温・大柱密度の分子ガスが多く見出された。このことは、分子トラスの構造の決定に、星形成が一定の役割を果たしていることを示唆している。

さらに、本結果を補う形で、星形成の指標であるスペクトル線(Br、PAH)の解析(論文)。さらに銀河環境が星形成に与える影響を調べた(論文)。

(2) 遠方銀河観測への拡張

機器開発研究である「遠方銀河観測を目指した分光器の基礎開発」については、まずその要求を明らかにした上で(論文)、イメージング・グレーティングの開発を進めた(論文)。

まず、イメージング・グレーティングに適する材料の選定を進め、CdZnTeが所定の波長(10-20 μm)において、高い透過率と屈折率を持ち、材料として最適であることを見出し、その材料自身の透過率の測定とその物理解釈を進めた(論文)。

そこで、CdZnTeを用いて実際にイメージング・グレーティングを製作し、短波長において性能評価を行った。その結果、グレーティングとしてはほぼ理論と通りの性能が得られていることが示された(論文)。

ただし、反射コーティングが想定と通りの性能を示しておらず、改善が必要であることがわかった。そこで、反射コーティングを改良した。その結果、グレーティングとしての性能を大きく向上させることに成功した。これにより、少なくとも常温では実用に供することができる性能を発揮することができた。

これにより、遠方宇宙での銀河のCO吸収観測への道を拓いた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計11件)

Baba, Shunsuke; Nakagawa, Takao; Isobe, Naoki; Shirahata, Mai, The Near-infrared CO Absorption Band as a Probe to the Innermost Part of an AGN-obscuring Material, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 852, Issue 2, article id. 83, 17 pp. (2018).

DOI: 10.3847/1538-4357/aa9f25

González-Alfonso, E.; Armus, L.; Carrera, F. J.; Charmandaris, V.; Efstathiou, A.; Egami, E.; Fernández-Ontiveros, J. A.; Fischer, J.; Granato, G. L.; Gruppioni, C.; Hatziminaoglou, E.; Imanishi, M.; Isobe, N.; Kaneda, H.; Koziel-Wierzbowska, D.; Malkan, M. A.; Martín-Pintado, J.; Mateos, S.; Matsuhara, H.; Miniutti, G.; Nakagawa, T.; Pozzi, F.; Rico-Villas, F.; Rodighiero, G.; Roelfsema, P.; Spinoglio,

L.; Spoon, H. W. W.; Sturm, E.; van der Tak, F.; Vignali, C.; Wang, L., Feedback and Feeding in the Context of Galaxy Evolution with SPICA: Direct Characterisation of Molecular Outflows and Inflows, Publications of the Astronomical Society of Australia, 査読有, Volume 34, id.e054 17 pp.2017
DOI: 10.1017/pasa.2017.46

Matsuki, Yasuhiro; Koyama, Yusei; Nakagawa, Takao; Takita, Satoshi; Environmental impacts on dust temperature of star-forming galaxies in the local Universe, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, Volume 466, Issue 3, p.2517-2528, 2017
DOI: 10.1093/mnras/stw2929

Nakagawa, Takao; Shirahata, Mai; Usuda, Tomonori, Highly Excited CO Lines in Active Galaxies both in Absorption and in Emission, Publications of The Korean Astronomical Society, 査読有, vol. 32, issue 1, pp. 175-177, 2017
DOI: 10.5303/PKAS.2017.32.1.175

Shirahata, Mai; Nakagawa, Takao; Oyabu, Shinki; Usuda, Tomonori, Near-Infrared Spectroscopy of CO Ro-Vibrational Absorption Toward Heavily Obscured AGNs, Publications of The Korean Astronomical Society, 査読有, vol. 32, issue 1, pp. 169-173, 2017
DOI: 10.5303/PKAS.2017.32.1.169

Baba, Shunsuke; Nakagawa, Takao; Isobe, Naoki; Shirahata, Mai; Ohya, Youichi; Yano, Kenichi; Kochi, Chihiro, An Extension of a Reliable Wavelength Coverage of the Akari NG GRISM Mode, Publications of The Korean Astronomical Society, 査読有, vol. 32, issue 1, pp. 45-47, 2017
DOI: 10.5303/PKAS.2017.32.1.045

Sarugaku, Yuki; Kaji, Sayumi; Ikeda, Yuji; Kobayashi, Naoto; Sukegawa, Takashi; Nakagawa, Takao; Kataza, Hirokazu; Kondo, Sohei; Yasui, Chikako; Nakanishi, Kenshi; Kawakita, Hideyo, Infrared Attenuation Spectrum of Bulk High-Resistivity CdZnTe Single Crystal in Transparent Wavelength Region Between Electronic and Lattice Absorptions, Journal of Electronic Materials, 査読有, Volume 46, Issue 1, pp.282-287, 2017

DOI: 10.1007/s11664-016-4917-3

Yano, Kenichi; Nakagawa, Takao; Isobe, Naoki; Shirahata, Mai, Star Formation in Ultraluminous Infrared Galaxies Probed with AKARI Near-infrared Spectroscopy, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 833, Issue 2, article id. 272, 15 pp. (2016).
DOI: 10.3847/1538-4357/833/2/272

Sarugaku, Yuki; Ikeda, Yuji; Kobayashi, Naoto; Kaji, Sayumi; Sukegawa, Takashi; Sugiyama, Shigeru; Nakagawa, Takao; Arasaki, Takayuki; Kondo, Sohei; Nakanishi, Kenshi; Yasui, Chikako; Kawakita, Hideyo, Immersion Gratings for Infrared High-resolution Spectroscopy, American Astronomical Society, 査読有, DPS meeting #48, id.123.40, 2016

Baba, Shunsuke; Nakagawa, Takao; Shirahata, Mai; Isobe, Naoki; Usui, Fumihiko; Ohya, Youichi; Onaka, Takashi; Yano, Kenichi; Kochi, Chihiro, Revised wavelength and spectral response calibrations for AKARI near-infrared grism spectroscopy: Cryogenic phase, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Volume 68, Issue 2, id.27 12 pp., 2016
DOI: 10.1093/pasj/psw013

Ikeda, Yuji; Kobayashi, Naoto; Sarugaku, Yuki; Sukegawa, Takashi; Sugiyama, Shigeru; Kaji, Sayumi; Nakanishi, Kenshi; Kondo, Sohei; Yasui, Chikako; Kataza, Hirokazu; Nakagawa, Takao; Kawakita, Hideyo, Machined immersion grating with theoretically predicted diffraction efficiency, Applied Optics, 査読有, vol. 54, issue 16, p. 5193, 2015
DOI: 10.1364/AO.54.005193

[学会発表](計8件)

馬場俊介, 中川貴雄, 磯部直樹, 白旗麻衣, 道井亮介, 大西崇介, 一酸化炭素吸収バンドから探る AGN トーラス内縁付近の状態と構造: 銀河の赤外光度・可視分類との関連, 日本天文学会 2018 年春季年会

大西崇介, 中川貴雄, 馬場俊介, 道井亮介, 磯部直樹, 白旗麻衣, 臼田知史, 大光度赤外線銀河 IRAS 08572+3915 における CO 振動回転遷移線吸収の時間変化 (1): 時間変動の検出, 日本天文学会 2017

年秋季年会

中川貴雄, 大西崇介, 馬場俊介, 道井亮介, 白旗麻衣, 磯部直樹, 臼田知史. 大光度赤外線銀河 IRAS 08572+3915 における CO 振動回転遷移線吸収の時間変化 (2): AGN トーラスモデルへの示唆, 日本天文学会 2017 年秋季年会

馬場俊介, 中川貴雄, 磯部直樹, 白旗麻衣, 一酸化炭素吸収バンドから探る AGN トーラス内縁付近の状態と構造: シリケートダスト吸収・X 線観測結果との比較, 日本天文学会 2017 年秋季年会

中川貴雄, 白旗麻衣, 臼田知史, 矢野健一, 馬場俊介, 道井亮介, 磯部直樹, IRAS 08572+3915 分光観測が示唆する分子アウトフローの起源の多様性, 日本天文学会 2017 年春季年会

Takao Nakagawa, High-resolution spectroscopy of ISM toward galactic nuclei: synergy with circumstellar material studies, Workshop on near-IR high resolution spectroscopy, the university of Tokyo, 2016

猿楽祐樹, 池田優二, 小林尚人, 加地紗由美, 助川隆, 杉山成, 中川貴雄, 新崎貴之, 近藤莊平, 中西賢之, 安井千香子, 河北英世, Immersion Gratings for Infrared High-resolution Spectroscopy, 48th DPS Meeting / 11th EPSC Meeting, Pasadena, 2016

馬場俊介, 中川貴雄, 磯部直樹, 白旗麻衣, 一酸化炭素吸収バンドから探る AGN 中心核付近の温かいガスの分布, 日本天文学会 2015 年秋季年会

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:

種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 貴雄 (NAKAGAWA, Takao)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授
研究者番号: 20202210

(2) 研究分担者

猿楽 祐樹 (SARUGAKU, Yuki)
京都産業大学・神山天文台・主任研究員
研究者番号: 10512147

(3) 研究分担者

和田 武彦 (WADA, Takehiko)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教
研究者番号: 50312202

(4) 研究分担者

小林 尚人 (KOBAYASHI, Naoto)
東京大学・天文学教育研究センター・准教授
研究者番号: 50312202

(5) 研究分担者

片坐 宏一 (KATAZA, Hi-rokazu)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授
研究者番号: 70242097

(6) 研究協力者

河北 秀世 (KAWAKITA, Hideyo)
京都産業大学・神山天文台・教授
研究者番号: 70356129