

2021年度

修士論文発表会

論文要旨集

2022年2月3日(木)、4日(金)

惑星系形成を議論する上で、 $H_2$ ガスの密度は基本的な量であり、例えば、原始惑星系円盤の質量、密度分布の進化、固体の運動等に関わってくる。しかし、惑星系形成の分野において、 $H_2$ ガスの測定が難しいという問題がある。そこで、 $H_2$ 以外の分子輝線を観測指標として用い、 $H_2$ ガスの密度に制限をつけることを考える。着想としては、円盤の温度が変化するとガスの輝線強度が時間変化するが、円盤くらの密度であれば、衝突脱励起で輝線強度が平衡に落ち着くと考えられるため、時間変化するはずの分子輝線の観測から、 $H_2$ ガスの密度分布に制限を付けられるのではないかと推測される。そこで、本研究では、原始惑星系円盤の温度変化に応じた輝線強度の振る舞いを明らかにし、これを円盤の水素分子ガスの密度の推定に利用できないか検証する。計算には $H_2CO$ 分子を用いた。輝線強度を決める励起温度と光学的厚みは、各エネルギー準位の占有率に応じて時間変化するため、統計平衡の式から占有率の時間変化の計算を行なった。その結果、 $H_2$ 密度が高いほど占有率が平衡状態に落ち着く時間が短く、変化後の温度が高いほど占有率が平衡状態に落ち着く時間が短いという結果が得られた。 $H_2$ 密度を1桁変えると占有率が平衡状態に落ち着く時間は1桁変化し、その変化の大きさは、仮定している温度に20 K程度の不定性があっても、温度による違いより顕著に大きいので、占有率が平衡に落ち着く時間のオーダーから、水素密度のオーダーを推定できると考えられる。さらに、占有率の時間変化を使って輝線強度比の時間変化を計算したところ、円盤の半径方向内側ほど平衡に落ち着く時間が短く、外側ほど平衡に落ち着く時間が長くなった。輝線強度比の時間変化においても、円盤の密度・温度に対し、占有率が平衡状態に落ち着く時間と同じ傾向が得られた。つまり内側ほど平衡に落ち着く時間が短いのは、内側ほど水素密度が高いことが主要因であると考えられる。輝線強度比の変化率が5%を超える輝線が複数あることや、変化のタイムスケールを考慮すると、 $H_2CO$ 輝線の時間変化は、今回仮定したような状況では、 $H_2$ ガス密度を従来よりも桁で高い精度で推定するためのツールとして利用できると考えられる。一方で、本研究では、円盤の温度変化のタイムスケール、光学的厚み、 $H_2CO$ のアバundanceなどの点で、計算と結果の解釈を簡単にするための仮定を複数用いていることに注意が必要である。この結果を出発点として、より現実に近い状況を再現するために、モデル計算ツールを開発していく必要がある。

タイトル：「Gaia データを用いた散開星団の潮汐テイルの研究」

学生証番号：35-206123

氏名：小川 卓馬

## 研究概要

星団とは、多数の恒星が集まってできた自己重力多体系である。銀河系内の恒星は、大部分が散開星団として誕生した後、内部進化および外部の重力場の影響によって破壊され、個々の星が宇宙空間に拡散していく。このとき、散開星団は破壊される過程で潮汐テイルと呼ばれる構造を形成する。潮汐テイルは銀河重力場の中で形成されるため、銀河系内における散開星団の潮汐テイルの運動状態を調べることで、銀河系の力学構造に制限を与えることができるかと期待される。また、散開星団及び潮汐テイルの進化過程から過去に星形成が起きた場所を特定できれば、太陽をはじめとする銀河系内の恒星が誕生した場所の解明に繋がると期待される。銀河系内の散開星団探査は、欧州宇宙機関が 2013 年に打ち上げた位置天文衛星 Gaia の観測データによって、大幅に進展している。これまでに、星の位置・速度情報を用いて既知の散開星団の新たなメンバーや、新発見の散開星団、さらに散開星団の潮汐テイルと見られる構造が数多く報告されている。しかし、散開星団から拡散した星の位置・速度は時間とともに変化し、形成されてから時間が経つほど潮汐テイルの星を同定することは困難となると考えられる。そのため、銀河系内には位置・速度空間で未発見の散開星団や潮汐テイルが数多く存在すると考えられる。

そこで、本研究では星の位置・速度の代わりに星の軌道離心率や平均軌道半径などの軌道要素に対応する「作用積分」と呼ばれる物理量を用いて散開星団の潮汐テイルを探査する。本研究では太陽系から 1 kpc 及び銀河面から高度 0.3 kpc の範囲にある散開星団の潮汐テイルを検出するために、視線速度の情報を持つ約 200 万個の Gaia の観測データを用いて、3次元の作用積分と 3次元の位置を合わせた 6次元空間で機械学習におけるクラスタリング解析を行なった。その結果、既に知られている 9 個の散開星団を同定し、特に散開星団 Ruprecht147 では潮汐テイルと考えられる構造を検出した。さらに、本研究で同定した散開星団 Ruprecht147 を先行研究と比較した結果、未発見のメンバー星を検出した。これは Gaia データの精度向上が主要因であるが、一部の新たなメンバーは探査空間に作用積分を含むことで得られた可能性がある。しかし、Gaia データだけでは視線速度が限られた星に対してしか得られていないため、作用積分を計算するには地上分光観測などによってより多くの星の視線速度の観測が必要である。また、現在開発されている赤外線位置天文観測衛星「JASMINE」と APOGEE などの地上分光観測によって銀河系中心核バルジ領域の星の位置・速度の 6次元位相空間情報が得られれば、本研究の手法を適用することで、将来的には銀河中心領域の大質量星団の破壊過程の解明や星団残骸探査に繋がると期待される。

# EHT および VERA による Sgr A\* の $10 \sim 100 R_s$ スケールの観測

学籍番号:35-206125

小藤由太郎

## 概要

ほとんど全ての銀河の中心には超大質量ブラックホールが存在することが知られており、降着ガスの重力エネルギーが解放されるブラックホール近傍は宇宙で最も高エネルギーの現象の起源であると考えられている。しかしながら、ブラックホールは非常にコンパクトな天体であるために、近傍の構造や放射メカニズムについては観測的に明らかになっていない部分が数多く存在する。そこで、本研究では我々から最も近い超大質量ブラックホールである銀河系中心の Sgr A\* を VLBI で観測した高分解能データを用いることにより、シュワルツシルト半径  $R_s$  の  $10 \sim 100$  倍に渡るスケールの構造の解析を行なった。Sgr A\* の電波放射は低周波数側で光学的に厚く光球面からの放射を観測しているのに対し、高周波数側では光学的に薄くなりブラックホール近傍からのシンクロトロン放射を観測していると考えられている。よって、異なる周波数では異なる放射領域を観測することができる。

事象の地平面スケールの構造については、国際的なミリ波・サブミリ波 VLBI 観測網である Event Horizon Telescope (EHT) のメンバーとしてブラックホール・シャドウの検出を目指した。画像化チームのパラメータ・サーベイの結果を一括で評価する画像評価パイプラインの開発や最終的な Sgr A\* の画像となる”Top Set”の条件の決定、選んだ”Top Set”の画像に対するリングフィットなどの解析といった多岐に渡る分野で貢献した。EHT による Sgr A\* の観測結果は近日論文として公開される予定である。

一方で、 $\sim 100 R_s$  スケールの構造に関しては、日本の VLBI である VERA の 43 GHz での広帯域モニター観測データを用いた。広帯域観測の成果として  $\sim 2000$  km の長基線においてもフリンジが検出された。その結果、この周波数の Sgr A\* の構造は楕円ガウシアンであり、サイズに関しては長期的に大きな変動が見られないことを明らかにした。また、今回検出されたクロージャー位相の変動の起源は refractive scattering による場合も否定はできないが、ジェットやアウトフローのような二次構造を持つとした場合の放射領域に関する制限を与えた。

本研究は超大質量ブラックホール近傍の Sgr A\* の構造や放射メカニズムを理解する第一歩であり、観測結果と GRMHD シミュレーションの比較による更なる放射モデルや構造の制限、他のエポックの解析などを引き続き進めていく必要がある。

Prospects of detecting TeV gamma-ray emissions  
from nearby star-forming galaxies by the  
Cherenkov Telescope Array  
(Cherenkov Telescope Arrayによる近傍星形成  
銀河からのTeVガンマ線放射の検出予想)

35-206127 下野直弥

Star-forming galaxies (SFGs) are GeV–TeV gamma-ray emitters, and studying gamma-ray emissions from SFGs lead to understanding the production and propagation of cosmic ray (CR) and study the high-energy background radiations. Then increasing the number of gamma-ray detected SFGs is important.

In this study, we investigate the detection prospects of TeV gamma-ray emissions from nearby SFGs by the Cherenkov Telescope Array (CTA), a newly being constructed telescope. In the previous work, we constructed a model to calculate luminosity and energy spectrum of pion-decay gamma-ray emission produced by cosmic-ray interaction with the interstellar medium (ISM), from four physical quantities of galaxies [star formation rate (SFR), gas mass, stellar mass, and effective radius]. The model is in good agreement with the observed GeV–TeV emission of several nearby galaxies. Applying this model to nearby galaxies that are not yet detected in TeV (mainly from the KINGFISH catalog), their hadronic gamma-ray luminosities and spectra are predicted.

We identify galaxies of the highest chance of detection by CTA, including NGC 5236, M33, NGC 6946, and IC 342. Concerning gamma-ray spectra, NGC 1482 is particularly interesting because our model predicts that this galaxy is close to the calorimetric limit and its gamma-ray spectral index in GeV–TeV is close to that of cosmic-ray protons injected into ISM. Therefore this galaxy may be detectable by CTA even though its GeV flux is below the *Fermi* Large Area Telescope sensitivity limit. In the TeV regime, most galaxies are not in the calorimetric limit, and the predicted TeV flux is lower than that assuming a simple relation between the TeV luminosity and SFR of M82 and NGC 253, typically by a factor of 15. This means that a more sophisticated model beyond the calorimetric limit assumption is necessary to study TeV emission from star-forming galaxies.

# Cosmological-Scale HI Distribution Around Galaxies and AGN Probed with Massive Spectroscopic Data

Dongsheng Sun  
35-206128

We investigate the neutral hydrogen (HI) distributions around galaxies and AGN with the sources and spectroscopic data obtained by the Hobby Eberly Telescope Dark Energy eXperiment (HETDEX) survey and the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) in a  $99 \text{ deg}^2$  area of the Fall field (our study field). We use massive spectroscopic data of 2228 Ly $\alpha$  forests in the background quasars spectra selected from SDSS data with no signatures of damped Ly $\alpha$  system, metal absorption, and broad absorption line contamination to probe the HI distributions at  $z = 2 - 3$  in the field of our study. We conduct HI tomography mapping, a powerful technique to reconstruct the large scale structure of HI gas, to reveal the HI gas distribution of our study field. We estimate the average 2-dimensional (2D), which corresponds to the line-of-sight (LoS) and transverse to line-of-sight (Trans) directions, and radial HI distributions around the galaxies and AGN at  $z = 2 - 3$  from the HETDEX and SDSS surveys in this study field. We check the validation for the extracted average 2D and radial HI distributions. We find that for the average 2D HI distributions of all the selected sources, the extension of the HI absorption at large scale in the Trans direction is longer than the one in the LoS direction, which agrees with the previous studies. The average radial HI absorption around all these sources decreases to the cosmic average toward the large scale, which is also in agreement with the previous studies. We compute the HI distributions as a function of distance for the HETDEX and SDSS type-1 AGN with the same rest-frame  $1350\text{\AA}$  luminosity ( $L_{1350}^{\text{spec}}$ ) distributions. The HI distribution of the HETDEX type-1 AGN agrees with that of the SDSS type-1 AGN. This agreement indicates that the systematic uncertainty between the SDSS and HETDEX surveys is little. After the validation checking, we investigate the luminosity and AGN type dependence on the HI distribution around AGN. This is the first time that the dependence of AGN type for the distribution of HI gas around the AGN in large scale has been discussed. We separate the SDSS type-1 AGN into bright and faint groups and derive the average HI distributions around the bright and faint type-1 AGN and find that the average HI absorption near the faint type-1 AGN shows a larger value than the one of the bright type-1 AGN. This result suggests that if the mean HI gas density around the bright type-1 AGN is larger than (or similar to) those around the faint type-1 AGN, the ionization fraction of the HI gas around the bright type-1 AGN is higher than that around the faint type-1 AGN. We calculate the HI distributions around the type-1 and type-2 AGN, whose  $L_{1350}^{\text{spec}}$  distributions are the same. We find that the values of the HI absorption around the type-2 AGN is larger than those of the type-1 AGN on average. This trend suggests that because type-1 AGN tend to have a wide opening angle for the dusty torus, more ionizing photons of the accretion disk can escape from the dusty torus of type-1 AGN than those of type-2 AGN. We also present the comparison between the HI distributions of galaxies and type-1 AGN. The average HI absorption values around galaxies is smaller than the one of type-1 AGN. This result suggests that, on average, the mass of dark matter halo for type-1 AGN is more massive than the one of galaxies. We compare the LoS HI distribution of our SDSS AGN sample with the model cross-correlation function of the previous study and find that the weak HI absorption region in the LoS HI distribution at the large scale,  $\gtrsim 20 h^{-1}\text{cMpc}$ , may be explained by the combination of the radiation effect and the velocity gradient due to the infall of matter.

# Multi-emission-line study on H $\alpha$ emitters at $z \sim 2.3$ from broad-band excesses

和訳：広帯域フィルタの超過に基づく $z \sim 2.3$  H $\alpha$  輝線銀河の多輝線解析

35206130 Nuo Chen 陳諾

## Abstract

In this thesis, we present the selection and physical properties of H $\alpha$  emission line galaxies (H $\alpha$  emitters, HAEs) at  $2.05 < z < 2.5$ , aiming at studying a population of SFGs at the epoch of Cosmic Noon.

We introduce a more modern selection method for finding emitters, in which the HAEs are selected from the excess in the observed  $K_s$  broad-band flux relative to the best-fit stellar continuum model flux by SED fitting. The photometric data in this thesis is mainly based on the multi-band filters catalog from the ZFOURGE survey, which contains a very-deep  $K_s$  data and five unique and deep medium-bandwidth data ( $J_1, J_2, J_3, H_s, H_l$ ). Besides, we add two unique medium-bandwidth data  $K_1$  and  $K_2$ , taken by a near-IR camera SWIMS to the ZFOURGE-COSMOS catalog. Then, we applied SED fitting with emission line templates performed by CIGALE. A total number of 1780 HAEs at  $z_{med} = 2.25$  are selected with flux excesses of  $> 2\sigma$ . In virtue of the J and H-band medium-bandwidth data, fluxes of the [OII] or [OIII] emission lines could be simultaneously measured. Finally, 762 HAEs have the both detection of [OIII] and [OII] with flux excesses of  $> 1\sigma$ . The line fluxes derived by our method are compared with the newly published MOSDEF Emission-Line Catalogs, and we find a very good agreement with our results that more than 90% H $\alpha$ , [OIII] and [OII] line fluxes have consistent spectroscopic fluxes within a factor of 3. We further run SED fitting simulations by adding random flux errors on model flux from several model emission line templates iteratively. The output line fluxes have a difference within 10% comparing to the model flux, indicating a good stability of the SED fitting. Both the observations and simulations prove that the H $\alpha$ , [OIII] and [OII] line fluxes derived by our method are robust and show no significant systematic errors.

We research on the physical properties of these HAEs based on their multiple emission line fluxes and SED-derived parameters. The star formation rate (SFR) versus stellar mass ( $M_*$ ) relation (i.e., star formation main sequence) shows that our sample has a good correlation with a slope of  $0.70 \pm 0.03$  at  $M_* > 10^{9.2} M_\odot$ , which is the mass completeness. Meanwhile, we find a large number of low-mass HAEs distributed above the SFMS by  $\Delta MS \sim 0.9$  dex, suggesting bursty star formation activities in these systems. Thus, our HAEs are separated into two populations, the main sequence HAEs and the low-mass starburst HAEs. We further explore the oxygen abundance of these HAEs based on the empirical calibration of the O32 index. For the main sequence HAEs, the mass-metallicity relation (MZR) have a power law slope of  $O/H \propto M_*^{0.25}$  similar to local galaxies, with an evolving rate of  $d\log(O/H)/dz \sim -0.11$  dex. On the other hand, as the O32-metallicity relation is scattered at low-metallicity range, we have reservations about the existence of MZR in low-mass regime. The photoionization models, based on the combination of the O32 and R<sub>23</sub> indices, are also applied to evaluate the ionization parameters of HAEs. The models reveal that our low-mass starburst HAEs have ionization parameters  $\sim 0.5$  dex lower than those of LAEs at similar redshift. It is also found that our low-mass starburst HAEs have a higher specific star formation rate than LAEs. We speculate that our low-mass starburst HAEs are not an analogous population of LAEs and may have a very low Ly $\alpha$  photon escape fractions.

## 未同定 X 線突発現象の正体解明に向けた MAXI と NICER の即時連携システム開発

35-206131 長塚知樹

活動銀河や中性子星、ブラックホールから生じるジェットや恒星フレアなど、突発的に X 線で明るくなる天体現象が数多く知られている。これらの突発現象はいつ何処で発生するか分からないため、それを発見するためには常時広視野モニター観測を続ける必要がある。突発現象ではその発生時に物理の本質が現れることが多いので、発生直後に詳細観測を行うことが理想的である。しかし、広視野モニター観測では十分な感度を確保できないため、詳細なエネルギースペクトル解析やタイミング解析ができない。これらの X 線突発天体の詳しい性質を調べるには、より高感度・高性能を持つ X 線望遠鏡で観測することが必要であるが、発生直後に望遠鏡を新天体にポインティングするのは難しい、というジレンマがある。

2009 年から ISS (国際宇宙ステーション) 上で稼働を開始した JAXA の全天 X 線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) は、今までに数多くの突発天体を発見してきた。MAXI が発見した天体情報を NASA の Swift 衛星に知らせて追観測が行われてきたが、それには数時間以上かかる。Swift が観測を開始したときにはすでに検出限界以下に減光していた低エネルギー X 線突発天体が数例見つかっており、MUSST (MAXI Unidentified Short Soft Transients) 天体と呼ばれている。MUSST 天体の正体は全く分かっておらず、その正体を知るには発生直後の詳細観測が必要である。

2017 年に、低エネルギー X 線領域で過去最高の有効面積と時間分解能を誇る NASA の中性子星内部構造探査装置 (Neutron Star Interior Composition Explorer: NICER) が ISS に設置された。また、NICER は所要時間 2 分以内で、目標天体にポインティングすることが可能である。もし ISS のイントラネットを利用して MAXI と NICER を即時連携できれば、史上最速・最高感度の連携観測が可能となる。このような野心的な試みが「OHMAN (On-orbit Hookup of MAXI and NICER) 連携計画」である。私は、OHMAN 計画メンバーの一員として、OHMAN ソフトウェアの修正と MAXI の突発天体検出システムの開発を行ってきた。本論文では、これらの成果をまとめる。

OHMAN ソフトウェアの修正では、機上で連携するために当初 Windows7 向けに開発されたソフトウェアを、Windows7 のサービス終了に伴い、Windows10 で動作させるために必要な修正を行った。実際に機上でインストールするためのパッケージ化と、機上の PC を模した動作試験を行なった。

MAXI による突発天体検出システムの開発では、観測データに有効面積補正を施し、ISS の前周回との差分を取ることで、MAXI が発見した代表的な突発天体について、リアルタイムで検出できることを確認した。また、OHMAN チームが現在開発中の「突発天体検出プロトタイププログラム」の検証を行い、OHMAN 計画での主要なターゲットである MUSST 天体が検証できることを示した。最後に、今後の OHMAN 計画の展望を記述した。



Predicting the expansion of supernova shell  
using deep learning  
toward high-resolution galaxy simulations

銀河形成シミュレーション高解像度化に向けた深層学習による  
超新星爆発のシェル膨張予測

Student ID: 35-206133

Keiya HIRASHIMA

平島 敬也

**Abstract**

Small integration timesteps for a small fraction of short-timescale regions become a bottleneck for future galaxy simulations with a higher resolution, especially for using massively parallel computing. To increase the resolution of galaxy simulations, we need to resolve smaller scale structures, which often require smaller timesteps, while the total integration time is fixed as the universe age. The small timesteps for a small fraction of short-timescale regions worsen the scalability. The regions affected by supernovae (SN) have the smallest timestep in galaxy simulations. A Hamiltonian splitting method recently has applied to galaxy simulations using smoothed-particle hydrodynamics (SPH). This method enables us to integrate the SN regions with smaller timesteps and the entire galaxy with a fixed timestep. We can assign about one thousand CPU cores for the SN regions and more than  $10^4$  CPU cores for the entire galaxy for massively parallel supercomputers. This scheme helps to improve the scalability of parallel computing. This approach needs to pick up particles in regions affected by SN (the target particles) by the subsequent global step (the integration timestep for the entire galaxy) in advance. In this work, I developed the deep learning model to predict the region where the shell due to a SN explosion expands during one global step. In addition, I developed the algorithm to identify the target particles using image processing of the density distribution predicted by our deep learning model. Our algorithm can identify the target particles better than the method based on the analytic solution. This particle selection method using deep learning and the Hamiltonian splitting method will improve the performance of galaxy simulations with extremely high resolution.

タイトル「銀河面上における星形成前段階の星間ガスの探索」

学生証番号、35-206134

氏名、本多優一

## 概要

星形成に至る前段階の星間ガスは、銀河面上でのガスの質的变化を探る上で重要な要因である。その質的变化を定量化するための一つの手法として Sawada et al.(2012)は、分子ガスを輝度分布に基づいて暗くて希薄な成分(D 成分)と明るくコンパクトな成分(B 成分)に分離し、D 成分に対する B 成分の優位性を判断するための指数(Brightness Distribution Index: BDI)を導入した。

高い BDI を持つ領域には、星形成の直接の影響を受けたもの(星形成の結果)と、星形成に至る前段階のもの(星形成の原因)の寄与が混じっていると考えられる。そこで本研究では星形成に至る前段階の成分を抽出することを試みた。使用したデータは野辺山 45m 電波望遠鏡で観測された銀河面サーベイである FUGIN の  $^{13}\text{CO}(J=1-0)$  の分子輝線である。

まず、星形成の直接の影響を受けた領域を除去するため、電波再結合線観測から得られた HII 領域のカatalog(Lockman 1989)の位置・速度情報を参照してデータのマスクングを試みたが、HII 領域の影響を完全に除去するためにマスクサイズを大きめに設定すると、一部の領域ではマスクの混雑のためにマスクングが過剰となり、渦状腕領域が選択的に除去される結果となった。そこで、先行研究で使用された BDI(B 成分を  $^{13}\text{CO}$  で 4K 以上として計算)を改良し、特定の温度までで輝度の積算を打ち切ることで、B 成分への感度は保持しつつ HII 領域に代表される比較的高温度の星形成領域への感度を抑えることのできる新たな指数(BDIspecial)を導入した。

全データ範囲を  $(\Delta l, \Delta b, \Delta v)=(1^\circ, 0.25^\circ, 1.3 \text{ km s}^{-1})$  の boxel に区切り、各 boxel ごとに BDIspecial を計算した。値の頻度分布から BDIspecial を -4~-1、-1~0、0~1.5 の 3 段階に区別し、そのうちの上 2 つの範囲を高い BDIspecial を持つ領域として、銀緯-速度図とチャンネルマップを照らし合わせて 141 個のサンプルを選定した。サンプルをその領域内にカatalogデータの HII 領域が含まれるかどうかで、それぞれ頻度分布を作成したところ、BDIspecial のピーク値については HII 領域を含むサンプルの方が高く分布に差が生じたが、サンプル領域でガス量に応じて重み付けされた平均 BDIspecial については、HII 領域を含むかどうかにかかわらず、近い分布を示した。このことから、高い BDIspecial を持つ分子ガスの塊において、星形成領域の周りを取り囲むガスの寄与は大きく、平均 BDIspecial を用いることで、星形成の直接の影響を受けていないガスの分布を探ることができると示唆された。

各サンプル領域の詳細の確認と、その領域までの距離を割り出し、渦状腕との対応と星形成の進化に結びつけることが今後の課題である。

# WISE データのフラックス変動を用いた AGN ダスト減光量の推定と共進化への示唆

35-206135 水越 翔一郎

銀河中心に広く存在する活動銀河核 (AGN) は、中心に存在する大質量ブラックホールに周囲の物質が降着し、銀河全体と同等かそれ以上に明るく輝く現象である。AGN には、ダスト減光を生じる遮蔽構造であるダストトーラスが存在すると考えられている。このダストトーラスは、中心ブラックホールへの降着物質を供給する物質供給源、そして中心からの放射によるアウトフローの主な発生源と考えられており、その性質を詳細に調査することは AGN の性質のみならず、天文学の最重要課題の一つである銀河と AGN の共進化の解明にも重要な情報を与えることが期待される。

ダストトーラスのパラメータの一つである視線方向のダスト減光量  $A_V$  は、ダストトーラスに含まれるダスト量の指標であり、主に可視光を用いた測定がこれまで様々な先行研究で行われてきた。しかしながら、特に減光が強い AGN である obscured AGN では、ダストトーラスによる減光が非常に強いいため可視光での観測が困難であった。可視光よりもダスト減光の影響を受けにくい近赤外線分光観測を用いた  $A_V$  測定も先行研究では行われてきたが、母銀河放射の影響を除去するプロセスも必要であり、そのサンプル数は最大でも数十天体程度であった。

本研究では、2つの近赤外線バンドにおけるフラックス変動成分の比 (近赤外線 FVG) の赤化を利用し、BAT AGN Spectroscopic Survey (BASS) の AGN サンプルから選出した obscured AGN 約 250 天体を含む近傍 AGN サンプル 463 天体に対して  $A_V$  の推定を行った。観測データは、赤外線天文衛星 *WISE* (*Wide-field Infrared Survey Explorer*) の近赤外線 2 バンド ( $W1, W2$ ) による長期観測データを利用した。初めに、BASS AGN カタログ天体のうち高品質な *WISE* データを持つ Seyfert 天体 513 天体に対して、各天体の  $W1, W2$  バンドにおけるフラックス観測値同士の相関係数を求めた結果、8 割以上の天体で両観測値の間に非常に強い相関が見られた。次にこれらのフラックスデータから、線型回帰解析を用いて各天体の近赤外線 FVG を推定した結果、ダスト減光が弱い AGN では近赤外線 FVG が比較的狭い範囲に分布したのに対し、obscured AGN では近赤外線 FVG の赤化が見られた。この性質に基づき、フラックス間の相関が強く、近赤外線 FVG を高い精度で測定できた 463 天体に対して、近赤外線 FVG から  $A_V$  を決定した。その結果、 $A_V \sim 65$  mag 程度のダスト減光まで推定できた。さらにこの  $A_V$  を中性水素ガス柱密度 ( $N_H$ ) と比較した結果、obscured AGN では、両者の比が銀河系星間物質の典型値よりも大きく、天体ごとに最大 2 桁程度異なっていた。obscured AGN におけるこうした  $N_H/A_V$  のばらつきは、多くの先行研究と一致する。本研究では、 $N_H/A_V$  の大きなばらつきと  $N_H$  に見られる時間変動のタイムスケールから、ダストトーラスの内側に  $N_H$  のみに寄与するダストを含まない gas cloud が存在し、これが視線上に存在することで  $N_H$  が増加する、という先行研究の描像を支持した。

この描像に基づき、本研究では Eddington 比とダスト減光との比較も行った。その結果、ダストを含むガスの有効 Eddington 限界を越える Eddington 比を示す天体はほとんど見られず、したがってダストトーラスで生じるアウトフロー現象のタイムスケールが短いことが示唆された。これは、ダスト減光に代わりに  $N_H$  と Eddington 比を比較した Ricci et al. (2017b) の結果と一致する。

The mid-infrared observations of the episodic dust formation  
by WR137 with Subaru/COMICS and  
The development of cold chopper for TAO/MIMIZUKU

(すばる/COMICSによる中間赤外線観測で探るWR137の周期的なダスト形成の時間進化、  
およびTAO/MIMIZUKUに向けた冷却チョッパーの開発)

35206136 道藤翼

## Abstract

Understanding lifecycle of dust is very important to reveal the chemical evolution of the universe, and the mid-infrared is one of the key wavelengths for the observational study of dust. I carry out two studies related to the mid-infrared observations in this thesis.

In Part-I of this thesis, I present the results of mid-infrared observations of the episodic dust-forming Wolf-Rayet (WR) star WR137. WR stars are objects in the final stage of massive main sequence stars. Recently they have attracted growing interests of astronomers as a dust budget in the early universe. I analyze imaging and spectroscopic data of WR137 obtained with Subaru/COMICS at two different epochs (1st August 2009 and 3rd November 2009). Dust formation by a WR binary is synchronized with its orbital phase, and these two observation epochs are expected to be one year before the periastron. Our  $N$ -band images do not show any apparent extended dusty structures, but photometric data shows a slight increase of the flux at  $11.7\ \mu\text{m}$  between these two epochs. It indicates that the dust formation is becoming more active as this binary moves toward the periastron. Moreover, our NL spectroscopic data shows some emission lines from WR137 such as HeI and HeII, some of which has not been recognized in the spectrum taken at one year after the previous periastron event in 1997, which indicates that there are chemical environment changes. I have carried out the SED analysis of dust emission, taking account of the dust formation scenario of WR binaries. From this analysis, the observed SED can be explained by the cone-like dust distribution model with using the temporal evolution of dust formation rate for the previous periastron event in 1997. This result supports the periodicity of the dust formation of WR137 during the periastron event. The result constrains the cumulative dust mass formed during one dust formation episode and the condensation temperature of dust grains are to be  $0.4 \times 10^{-7} M_{\odot} \leq M_d \leq 7 \times 10^{-7} M_{\odot}$  and  $T_c = 900\ \text{K}$ , respectively. For further studies, high spatial-resolution imaging and long-term monitoring observations with next-generation telescopes (e.g., TMT/MICHI and TAO/MIMIZUKU) are expected to be effective and promising.

In Part-II of this thesis, I describe the development of the cold chopper. The cold chopper is a key device for the mid-infrared observations with the next-generation telescopes. I develop an opto-mechanical device called cold chopper for TAO/MIMIZUKU in cooperation with the MIMIZUKU development team and the cold chopper development team. The cold chopper system consists of a tilting mirror, flex pivots, coils, magnets, gap sensors, and controllers. The required movement of the tilting mirror is represented by a square wave with a sufficient amplitude ( $> \pm 4.2\ \text{deg}$ ), a good stability ( $< 6 \times 10^{-4}\ \text{deg}$ ), a high frequency ( $> 2\ \text{Hz}$ ), and a short transition time ( $< 50\ \text{ms}$ ). Also the heat dissipation from the cold chopper should be  $< 0.1\ \text{W}$ . I carry out the performance tests at room and cryogenic temperatures. Our all requirements are satisfied at room temperature, while at cryogenic temperature, the requirements except for the stability are achieved. The stability at cryogenic temperature is approximately twice higher than the requirement because of the vibration of the cryocooler used in our experiments. I also confirm that the heat dissipation from the cold chopper is approximately  $5\ \text{mW}$ , and that one thermal cycle and a 1-hour continuous operation do not affect the performance of the cold chopper. I completed the unit test of the cold chopper and now preparing to install inside the MIMIZUKU cold optics.

# M 型星周りの惑星サーベイ： すばる戦略枠観測 IRD-SSP におけるサンプルの特性調査

35-206137

三井 康裕

M 型矮星は表面温度が低く、小さく軽い天体である。しかしその特徴ゆえ、太陽系近傍におけるハビタブルゾーンに存在する地球質量程度の惑星（ハビタブル惑星）のターゲットとなっており、その温度の低さから近赤外線を用いたドップラー観測が有用である。「IRD（すばる望遠鏡用赤外ドップラー装置）戦略枠観測」（IRD-SSP）というプロジェクトでは、実際に M 型矮星をターゲットとしてハビタブル惑星の発見を目指している。このプロジェクトの最初の段階で重要となるのが、M 型矮星のターゲット選定である。そこで我々は、M 型矮星の特徴を明らかにすることにより、このターゲット選定に貢献をしている。本研究では、実際に IRD-SSP の観測で得られた近赤外線波長における恒星スペクトルを用いて、「恒星の射影自転速度 ( $v \sin i$ )」と「恒星が分光連星か否か」についての情報を得た。解析したターゲットは M3 型から M7 型まで（表面温度は 3300 K~4300 K）の 116 天体である。

解析手法として、恒星スペクトルの吸収線の幅を利用した。射影自転速度が大きいと吸収線幅が大きくなり、分光連星であると吸収線が非対称になる。各天体の吸収線幅を測るために、相互相関関数（CCF）を使用した。射影自転速度は具体的に値を決定した。分光連星の調査においては CCF のバイセクター（BIS）も使用し、その時間変化を追跡した。

その結果、射影自転速度が有意に大きい天体を 4 個発見し、それぞれの射影自転速度を求めた。残りの天体に関しても射影自転速度を求め、それにより使用装置（IRD）の波長分解能も制限した。また、分光連星である可能性が高い天体は 3 個発見することができた。

# A Subaru Hyper Suprime-Cam Survey of Lyman Alpha Emitters at $z \sim 6.8$

すばる望遠鏡/Hyper Suprime-Cam による

$z \sim 6.8$  Ly $\alpha$  輝線銀河の探査

35-206138 室伏 海南江

宇宙再電離の時間進化や空間進化はまだよくわかっていない。遠方銀河の一種である Ly $\alpha$  輝線銀河 (LAE) はこの問題を調べる有力な銀河種族の1つであるが、 $z \gtrsim 7$  という宇宙再電離がまだ進行中と考えられる時代における LAE のデータは、広さ、深さともに十分とはいえない。例えば、探査する天域によって Ly $\alpha$  光度関数 (LF) の明るい側がばらつくほか、空間分布や Ly $\alpha$  等価幅 (EW) 分布の観測例も少ない。そこで我々は、CHORUS project の一環として、すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam に搭載されている中間帯域フィルター IB945 (中心波長 9462Å, FWHM= 330Å) を用いて  $z \sim 6.8$  の明るい LAE を COSMOS フィールドで探査し、当時の宇宙の電離状態を調べた。本探査の探査面積は 1.5 deg<sup>2</sup>、対応する探査体積は  $3.0 \times 10^6$  cMpc<sup>3</sup> もあり、最も深い場所における IB945 の限界等級は 26.17 mag ( $5\sigma$ , 1."20 開口直径) に達している。IB945,  $z$ ,  $y$  バンドを用いた色選択によって 44 個の LAE を検出し、その天球分布から2つの密度超過 (OD) 領域も発見した。LAE の作る ionized bubble の大きさについての理論計算に基づくと、どちらの OD 領域においても、LAE の ionized bubble が融合して1つの大きな ionized bubble になっていることが示唆される。この示唆は、密度超過領域の LAE が相対的に大きな EW と明るい Ly $\alpha$  光度を持つという結果と整合的である。また、これらの大きな ionized bubble の存在は、宇宙再電離が空間的に非一様に進むというシナリオを支持する。最後に、Ly $\alpha$  LF を用いた方法と密度超過領域を用いた新しい方法で  $x_{\text{HI}}$  の推定を試みたところ、前者はほぼ完全電離を、後者は  $x_{\text{HI}} \gtrsim 0.5$  という高い中性度を与えた。この食い違いの原因についていくつかの可能性を考察した。

# Internal Structure of 70 $\mu\text{m}$ Dark High-mass Clumps: Dense Cores, Hub-filament Systems, and Massive Cores

70  $\mu\text{m}$ で暗い大質量クランプの内部構造：  
高密度コア, ハブフィラメント, 大質量コア

35-206139 森井嘉穂

The formation mechanism of high-mass stars is one of the unsolved problems in astronomy. Especially, the initial condition or the very early phase has a clue to reveal how high-mass stars form. I have conducted high-angular resolution and high-sensitivity observations mosaicked by Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) toward the massive dense parts of thirty-nine infrared dark clouds (IRDCs). An IRDC, seen in silhouette against the bright galactic plane emission, is a cold, dense region of a molecular cloud. That is thought to be in an early evolutionary stage, prior to to be disrupted by high-mass stars. My targets are thirty-nine 70  $\mu\text{m}$ -dark massive ( $220M_{\odot} - 4500M_{\odot}$ ), dense ( $> 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ), and cold ( $T \sim 10 - 20 \text{ K}$ ) clumps at distances of 2–6 kpc.

In this thesis, I study the physical properties of cores in this IRDC sample. I identified 833 dense cores with masses of  $0.06 - 78M_{\odot}$ . This large number of cores allows the discussion of core properties in IRDCs with solid statistics for the first time. To understand the early phase of high-mass star formation and cluster formation, I focus on the core physical properties, core distribution, fragmentation process, and the relationship between core mass and the (hub-)filament structures. About 60% of the cores are low-mass ( $M_{\text{core}} < 1M_{\odot}$ ), whereas  $\sim 1\%$  have  $M_{\text{core}} > 20M_{\odot}$ . The core mass and the spatial separation are comparable to those estimated from the thermal Jeans fragmentation. Using the minimum-spanning-tree (MST) method, I revealed most projected cores are uniformly distributed, and there was no significant mass segregation within the targets. Although prominent filaments are detected in some clumps, most ( $> 60\%$ ) have no filamentary structure and instead show a clumpy structure. I found only 1% of cores at the hub-filament systems.

I also conducted a case study toward one of the objects in the sample, G023.477+0.114, using the emission from several molecular lines. I detected molecular outflows and line emission characteristics from hot regions. These star formation signatures define the evolutionary stage of the detected cores. I revealed at least four cores host the protostars for the first time in this region. Outflow properties suggest that the episodic mass accretion has already started at the early phase of protostellar evolution. Virial analysis using one of the dense gas tracers implies most cores are gravitationally bound.

Finally, I discussed the possible high-mass star formation scenarios. The cores that succeeded in accumulating enough mass at the early stage or cores initially low-mass but succeeded in growing in mass can form a high-mass star. Filaments or the hub-filament system may help cores to acquire mass efficiently.

# Deuterium Chemistry in Planet-forming Regions Probed by Radio Interferometric Observations

(電波干渉計観測で探る惑星形成領域における重水素化学)

35-206141

Yoshihide Yamato

大和 義英

Investigating the molecular evolution during star and planet formation is essential to the search for the origin of solar system materials. Deuterium enrichment, or an increase in molecular D/H ratios, is a common phenomenon observed in both the interstellar medium and solar system materials. Since it is highly sensitive to the physical and chemical environment, deuterium enrichment can be used to probe the formation location and thermal history of molecules. On the scale of molecular clouds and molecular cloud cores, observational studies of deuterium chemistry have been extensively carried out with single-dish radio telescopes. On the other hand, deuterium chemistry at smaller scales, such as protoplanetary disks and protostellar cores, is not well understood since observations with high spatial resolution and sensitivity are required. This thesis presents two observational studies of deuterium chemistry at planet-forming scales with Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) and Karl G. Jansky Very Large Array (VLA).

Using the high spatial resolution data of the Molecules with ALMA at Planet-forming Scales (MAPS) ALMA Large Program, we have revealed the ring-like distributions of  $\text{N}_2\text{D}^+$  molecules in five protoplanetary disks. The additional archival data of  $\text{N}_2\text{H}^+$  molecular line allows for measuring the radial distributions of the  $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$  column density ratio for the first time. The  $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$  column density ratio reaches  $\sim 0.01$ – $1$ , which is higher than the elemental abundance ratio ( $\text{D}/\text{H} \sim 10^{-5}$ ). This suggests that efficient *in situ* deuterium enrichment occurs in the cold midplane outside the CO snowline. We have also found a rich deuterium chemistry in the outer disk. The radial emission profiles of deuterated molecules present ring- or shoulder-like structures at the outer edge of the millimeter dust disks. These features indicate the non-thermal desorption of precursor volatiles caused by deeper UV penetration, or thermal desorption prompted by thermal inversion. Furthermore, by comparing the column densities of  $\text{N}_2\text{D}^+$  and  $\text{N}_2\text{H}^+$  with the disk chemical models, the ionization rate in the midplane of the disks was constrained. The ionization rate in the midplane could be different from disk to disk.

We also present the first measurement of the deuteration of  $\text{NH}_3$  ices in the protostellar cores using high spatial resolution observations of  $\text{NH}_3$  and  $\text{NH}_2\text{D}$  molecular lines with VLA. We detect high excitation transitions of  $\text{NH}_3$  and  $\text{NH}_2\text{D}$  and capture the sublimation of  $\text{NH}_3$  and  $\text{NH}_2\text{D}$  ices in the vicinity of the protostars. The derived  $\text{NH}_2\text{D}/\text{NH}_3$  column density ratios are as high as  $\sim 0.1$ – $1$ , reflecting the deuteration of  $\text{NH}_3$  ices. Based on the astrochemical simulations, the high  $\text{NH}_2\text{D}/\text{NH}_3$  ratios suggest that the primary nitrogen reservoir in star-forming clouds is the atomic nitrogen rather than nitrogen-bearing molecules such as  $\text{N}_2$  and  $\text{NH}_3$ , and that  $\text{NH}_3$  ice formation starts in the prestellar core stage.

These observational studies have demonstrated that high spatial resolution observations with radio interferometers such as ALMA and VLA can provide fruitful insights into the chemistry and molecular evolution at planet-forming scales. Further observational studies in combination with theoretical models will provide a more detailed picture of the chemistry of star and planet formation.



# Mapping the Spatially Inhomogeneous Cosmic Reionization with Subaru HSC

すばる望遠鏡 HSC で描く宇宙再電離の空間的非一様性の  
マッピング

学生証番号: 35-206142

吉岡岳洋

## Abstract

After recombination, in the dark ages, when there were no stars and galaxies, the Universe was filled with neutral hydrogen. The radiation from first galaxies formed in the early Universe ionized the surrounding neutral hydrogen, and this is the onset of a process called reionization. Reionization started from the neighbour of the ionizing sources, and soon the ionized regions gradually expanded until the whole area of the Universe was ionized. Therefore, the ionization is highly dependent on the distribution of the ionizing sources, and is considered to have proceeded spatially inhomogeneously. The spatial inhomogeneity is one of the important features for understanding the reionization process; however, it has not yet been fully quantified.

The Ly $\alpha$  fraction, the fraction of Lyman break galaxies (LBGs) that show Ly $\alpha$  emission line, is used as a probe of reionization. While previous studies successfully detected the evidence of reionization by using this method, it is difficult to enlarge the sample and to depict the inhomogeneous nature of reionization because the conventional Ly $\alpha$  fraction measurement requires expansive spectroscopic confirmation. To map the inhomogeneous distribution of reionization, we simultaneously detect Ly $\alpha$  emitters (LAEs) and LBGs at  $z \sim 6.6$  from the Subaru/Hyper Suprime-Cam (HSC) large-area ( $\sim 1.5 \text{ deg}^2 = 34,000 \text{ cMpc}^2$ ) deep survey. We install a new intermediate band filter, IB945, to detect LAEs and LBGs at almost the same redshift. We estimate the neutral fraction,  $x_{\text{HI}}$ , from the observed number density ratio of LAEs to LBGs,  $n(\text{LAE})/n(\text{LBG})$ , based on numerical radiative transfer simulations, in which model galaxies are selected to satisfy the observed selection function.

The observed  $n(\text{LAE})/n(\text{LBG})$  is  $0.84^{+0.23}_{-0.27}$ . We estimate the average  $x_{\text{HI}}$  within the field of view of  $x_{\text{HI}} < 0.4$ , which is consistent with previous studies. We also find that the variation of  $n(\text{LAE})/n(\text{LBG})$  within the field of view for each  $140 \text{ pMpc}^2$  area is found to be as large as a factor of three. This may suggest a spatially inhomogeneous topology of reionization, but it also leaves open the possibility that the variation is based on the inherent large-scale structure of the galaxy distribution. Based on the simulations, it may be difficult to distinguish between the two from the current survey. We also find that LAEs in the high LAE density region are more populate high  $\text{EW}_0$ , supporting the fact that the observed  $n(\text{LAE})/n(\text{LBG})$  is more or less driven by the neutral fraction, though the statistical significance is not high.