

平成28年度

修士論文発表会

論文要旨集

平成29年2月2日(木)、3日(金)

# Dust Properties of Hickson Compact Groups Revealed by AKARI, Spitzer and Herschel Observations

35-156116

Ayato Ikeuchi

In this thesis, we analyzed the near- to far-infrared properties of member galaxies in Hickson Compact Groups (HCGs) 56 and 92. HCGs 56 and 92 are the compact groups of galaxies that are gravitationally strongly interacting. Such galaxies offer ideal opportunity to investigate the effects of galaxy interactions on the galactic environment (e.g., star formation and AGN activities) and their evolution. We have carried out the AKARI/IRC slit-less spectroscopic observations of 56 and 92a and investigated the spectral properties of 2-14 micron spectrum of member galaxies. We detected clear signs of UIR bands in galaxies HCG 56a, HCG 56c+d, HCG 56e, and HCG 92a, which are all regarded as a normal and/or starburst galaxies. The near- and mid-infrared spectrum of HCG 56b shows a strong continuum emission with no clear presence of UIR bands nor silicate absorption, which are consistent with the presence of ANGs and are common characteristics of Seyfer 1 galaxies. The near- and mid-infrared spectrum of 92c shows a strong red continuum emission and a broad bump structure around at 8 micron and a strong absorption feature at 9.7 micron by silicates, which are quite similar characteristics to those observed in the core of Luminous Infrared Galaxy NGC 4418. We also investigated the spectral energy distributions (SEDs) constructed from AKARI/IRC, Spitzer/IRAC & MIPS, Herschel/PACS & SPIRE photometric datasets. We have carried out the fitting to the observed near- to far-infrared SEDs using the latest dust SED models and AGN dust model. We examined the location of member galaxies on the MIR/FIR diagnostic diagram (UIR 6.2/FIR vs. 6.2 micron-continuum/FIR), which has been used to distinguish the AGN and starburst activities based on ISO datasets of various types of field galaxies. The positions of HCG 56a, HCG 56c+d, HCG 56e, HCG 92a and SQ-B in the diagnostic diagram are roughly consistent with the sequence of the normal and starburst galaxies and those of HCG 56b and HCG92c, which have ANGs, distribute in low UIR 6.2/FIR and high 6.2 micron-continuum/FIR area. These results suggest that the behavior of member galaxies in HCG 56 and HCG 92 on the MIR/FIR diagnostic diagram is generally consistent with those of field galaxies. We found that the star formation rate (SFR) of each member galaxy calculated from the best-fit parameters is not significantly higher than the Galactic SFR value. Therefore, we have concluded that the induced star formation activities due to the galaxy interaction has not been recognized from our analyses.

# 銀河系中心領域の ALMA による観測： SgrA\*とミニスパイラルのサブミリ波スペクトル

学生証番号：35-156117

氏名：石川 聡一

## 論文概要

銀河系中心領域は我々の住む太陽系から約8kpcにある渦巻き銀河の中心部である。巨大ブラックホールを内包しているとされるSagittarius A\*(SgrA\*)周囲には3本の電離ガスの流れ”Galactic Center mini-spiral”が観測されている。

本研究ではSgrA\*及びその周囲のミニスパイラルについてALMA による連続波観測のアーカイブデータをもとに以下の解析を行った。

1) SgrA\*のミリ波サブミリ波帯でのスペクトルを取得し、そのピークの周波数からシンクロトロン放射を仮定して磁場強度を推定した。そこから求められるSgrA\*の放射領域における電子の冷却時間と過去のSgrA\*の変動時間との比較を行った。求まった冷却時間は過去にモニター観測によって推定された変動時間の仮説と矛盾するものではなかった。

2) SgrA\*の周囲に位置するミニスパイラルについてスペクトルを取得した。このスペクトルは電離ガスからの free-free 放射とダストの放射によって解釈できると考えられる。今回得られたミニスパイラルのスペクトルから、SgrA\*に近づくにつれ徐々にダストの放射が消えていることがわかった。これは外部から SgrA\*へ落ちてくるダストが中心星団からのライマン連続光によって蒸発している証拠だと考えられる。SgrA\*の周りをケプラー運動している Northern Arm では、最初に SgrA\*に接近する時にはダストの兆候が消失する現象が見えるが、2回目の接近以降はすでにダストが蒸発しているのでこの現象は見えないと思われる。つまり現象が見えるということは Northern Arm は遠方から近づき最初の接近の途上にあると推定される。

論文題目:

## Connection between Galaxy and Inter-Galactic Medium at $z \sim 2 - 3$ Studied by Optical and Near-Infrared Observations

可視・近赤外線探査に基づく赤方偏移 2-3 の銀河-銀河間物質関係の研究

学籍番号:35-156131 氏名:向江志朗

### Abstract:

We present spatial correlations of galaxies and IGM neutral hydrogen HI in the COSMOS/UltraVISTA 1.62 deg<sup>2</sup> field. Our data consist of 13,415 photo- $z$  galaxies at  $z \sim 2 - 3$  with  $K_s < 23.4$  and the Ly $\alpha$  forest absorption lines in the background quasar spectra selected from SDSS data with no signature of damped Ly $\alpha$  system contamination. We estimate a galaxy overdensity  $\delta_{\text{gal}}$  in an impact parameter of 2.5 (proper) Mpc, and calculate the Ly $\alpha$  forest fluctuations  $\delta_{(F)}$  whose negative values correspond to the strong Ly $\alpha$  forest absorption lines. We identify weak evidence of an anti-correlation between  $\delta_{\text{gal}}$  and  $\delta_{(F)}$  with a Spearman's rank correlation coefficient of  $-0.39$  suggesting that the galaxy overdensities and the Ly $\alpha$  forest absorption lines positively correlate in space at the  $\sim 90\%$  confidence level. This positive correlation indicates that high- $z$  galaxies exist around an excess of HI gas in the Ly $\alpha$  forest. We find four cosmic volumes, dubbed A<sub>obs</sub>, B<sub>obs</sub>, C<sub>obs</sub>, and D<sub>obs</sub>, that have extremely large (small) values of  $\delta_{\text{gal}} \simeq 0.8$  ( $-1$ ) and  $\delta_{(F)} \simeq 0.1$  ( $-0.4$ ), three out of which, B<sub>obs</sub>-D<sub>obs</sub>, significantly depart from the  $\delta_{\text{gal}}-\delta_{(F)}$  correlation, and weaken the correlation signal. We perform cosmological hydrodynamical simulations, and compare with our observational results. Our simulations reproduce the  $\delta_{\text{gal}}-\delta_{(F)}$  correlation, agreeing with the observational results. Moreover, our simulations have model counterparts of A<sub>obs</sub>-D<sub>obs</sub>, and suggest that the observations pinpoint, by chance, a galaxy overdensity like a proto-cluster, gas filaments lying on the quasar sightline, a large void, and orthogonal low-density filaments. Our simulations indicate that the significant departures of B<sub>obs</sub>-D<sub>obs</sub> are produced by the filamentary large-scale structures and the observation sightline effects. We study A<sub>obs</sub> for more details with the medium high spectral resolution VLT/X-shooter spectrum, and find three absorbers, dubbed Systems 1,2 and 3, with CII, SiIV, CIV and MgII. This is the first time to identify multiple metal absorbers in a proto-cluster candidate. Our results of photoionization modeling and Ly $\alpha$  + Ly $\beta$  fitting suggest that System 2 is a typical Lyman Limit System, and that Systems 1 and 3 have moderately low HI column densities of  $\log N_{\text{HI}} (\text{cm}^{-2}) \sim 16.0 - 16.5$  with a high metallicity of  $Z/Z_{\odot} \simeq 0.3 - 1.0$  indicative of gas clumps in the CGM and/or the intra-cluster medium of the proto-cluster candidate. We will extend this study, and investigate the small-scale galaxy-HI relations that are key for galaxy inflow and outflow processes with the Hobby-Eberly Telescope Dark Energy Experiment survey data that are about two orders of magnitude larger than the present study data. APPENDIX: We have prototyped two types of mirror coatings, which are the multi-layer dielectric coating and the enhanced silver coating, to decide which mirror coating is suitable for the TMT/IRIS imager optics. We measure reflectance and thermal deformation, and estimate wavefront error contribution at 77 K when the coatings are applied to the IRIS imager. Our results suggests that the multi-layer dielectric coating has the high reflectance and the small mirror surface deformation, and is suitable for the IRIS imager.

題目:すばる望遠鏡用ドップラー法近赤外分光器 IRD のための  
ファイバーモードスクランブラー試験  
石塚 将斗 学生証番号 35-156118

## 要旨

1995年に初めて主系列星周囲の系外惑星が発見されて以降、系外惑星の研究は急速に発展している。様々な観測手法を用いた観測の結果、系外惑星は普遍的に存在し、多様性に富むことがわかってきた。しかし、太陽型星に比べ低質量星周囲の系外惑星の発見数は未だ少なく、低質量星周囲の星形成については未知の部分が多い。また、アストロバイオロジーという観点では、太陽系近傍のハビタブルゾーン内にある地球型惑星の発見が、世界的な目標となっている。

このような背景のもと、近赤外ドップラー法によって太陽系近傍の後期 M 型星周囲の惑星探査およびハビタブルゾーン内の地球型惑星発見を目指し、すばる望遠鏡用高分散分光装置 IRD (InfraRed Doppler Instrument) が開発されている。波長較正光源としてレーザー周波数コムの開発も同時に進んでおり、期待される視線速度測定精度は  $1\text{m/sec}$  である。

$1\text{m/sec}$  の視線速度測定精度の実現には、望遠鏡焦点から分光器に光を運ぶファイバの出射光を安定させるモードスクランブラーという機構が必要となる。ファイバ出射光の重心変動は、視線速度測定精度を悪化させるためである。しかしドップラー法は主として可視光波長域で行われてきたため、近赤外波長域でのモードスクランブラーの研究は不足しており、近赤外波長で最も有効なモードスクランブラーが何かは知られていない。そこで我々は、近赤外波長域で有効なモードスクランブラーを決定するため、静的、動的なものを含む様々な種類のモードスクランブラー、およびそれらを組み合わせた系、合計 24 種の系のスクランブル効果を測定する系統的な試験を行った。具体的には、実際の観測中に起こりうる観測条件の変化を模擬した 3 種類の外乱を光学系に与え、それに対してファイバ出射光の重心がどの程度安定であるかを測定した。試験は、可変型鏡による大気のシーイングの模擬などを含んだ、実際の観測に近い条件下で行われた。

実験の結果、各種の外乱に対して有効なモードスクランブラーの組み合わせを決定することができた。また、測定波長域を広げることで出射光への影響が大きく緩和されることが期待できる外乱と、緩和が期待できない外乱があることがわかった。以上の結果を総合して、IRD において望遠鏡と分光器を接続するためのファイバの最終候補として、効率重視、もしくは安定性重視のモードスクランブラー系 2 種を決定することができた。

# Angular momentum evolution of stellar disks at high redshifts

## 高赤方偏移における銀河ディスクの角運動量進化

岡村拓 35-156119

The stellar disk size of a galaxy depends on the fraction of the dark halo mass settled as disk stars,  $m_* \equiv M_*/M_{dh}$ , and the fraction of the dark halo angular momentum transferred to the stellar disk,  $j_* \equiv J_*/J_{dh}$ . Since  $m_*$  and  $j_*$  are determined in a different manner by a series of star-formation related processes such as inflows and feedbacks, measuring  $j_*$  and  $m_*$  at various redshifts is needed to understand those processes and thus the formation history of disk galaxies. However, angular momentum studies at  $z > 1$  are still very limited because it is difficult to kinematically measure  $j_*$ .

We use the 3D-HST GOODS-S, COSMOS, and AEGIS imaging data and photo- $z$  catalog, where stellar masses and star formation rates are also given, to examine  $j_*$  and  $m_*$  for star-forming galaxies at  $z \sim 2, 3$ , and 4, when disks are actively forming. For each redshift, we divide the catalog into  $M_*$  bins and infer  $M_{dh}$  from clustering analysis and abundance matching, thus obtaining  $m_*$  for each bin. We also measure, for objects in each bin, effective radii  $r_d$  at rest 5000Å with GALFIT which, combined with Mo et al.'s (1998) analytic disk formation model and  $M_{dh}$  and  $m_*$  measurements, gives  $j_*$  without measuring disk kinematics.

We find that the  $j_*/m_*$  ratio is  $\simeq 0.77 \pm 0.06$  for all three redshifts over the entire mass range examined,  $8 \times 10^{10} < M_{dh}/h^{-1}M_\odot < 2 \times 10^{12}$ , with a possible ( $< 30\%$ ) decrease with mass. This high ratio is close to those of local disk galaxies, descendants of our galaxies in  $M_{dh}$  growth, implying a nearly constant  $j_*/m_*$  over past 12 Gyr. These results are remarkable because mechanisms controlling angular momentum transfer to disks such as inflows and feedbacks depend on both cosmic time and halo mass and indeed theoretical studies tend to predict  $j_*/m_*$  changing with redshift and mass. It is found that recent theoretical galaxy formation simulations predict smaller  $j_d/m_d$  than our values. We also find that a significant fraction of our galaxies appear to be unstable against bar formation. We also examine the  $r_d-M_*$  relation for our galaxies, finding shallow power-law slopes of the relation decreasing from  $\simeq 0.19$  at  $z \sim 2$  to  $\simeq 0.08$  at  $z \sim 4$ . These shallow slopes less than 0.2 reflect the non-positive slopes of the  $j_*/m_*-M_{dh}$  relation, and the decrease toward  $z \sim 4$  may be due to a decrease (getting more negative) in the slope of the  $j_*/m_*-M_{dh}$  relation over the same redshift range.

# Optical Variability Timescale of Low-mass Black Holes in Active Galactic Nuclei

活動銀河核における低質量ブラックホールの可視光度変動タイムスケール

学籍番号: 35156125

氏名: 谷口由貴

How supermassive black holes (SMBHs;  $M_{\text{BH}} \sim 10^{6-9} M_{\odot}$ ) were formed and evolved in the early Universe is one of the most intriguing mysteries. In order to investigate the properties of “seed” black holes (BHs), searches for nearby ( $z \lesssim 0.5$ ) low-mass nuclear black holes ( $M_{\text{BH}} \lesssim 10^6 M_{\odot}$ ), which are thought to be local analogs of seed BHs, have been conducted until now. Rapid optical variability is expected to be detected for such low-mass active BHs since the anti-correlation of BH mass and its variability timescale has been found empirically in case of QSOs, and has been suggested to be an effective tool to search for low-mass active BHs. We evaluated the properties of the optical variability of 20 low-mass BHs with the BH masses of  $10^{4.9} \lesssim M_{\text{BH}}/M_{\odot} \lesssim 10^{6.3}$  with the unconventional high-cadence ( $\sim 30$  min) photometric data. The variabilities of the AGNs of this mass range ( $\lesssim 10^6 M_{\odot}$ ) within such a short timescale are evaluated for the first time. Our data are taken with Kiso Wide Field Camera on the 105 cm Schmidt telescope at the Kiso observatory. In order to evaluate AGN variability, we used the structure function (SF), which is commonly used as an indicator of the variability and is defined to be the pure rms magnitude difference as a function of the time difference. As a result, we found that 9 out of 20 low-mass BHs show variability which have significantly larger than those of stars in the fields. Finally, we successfully found that low-mass BHs show variability in as short as  $\sim$ hours to 10 days, which is significantly higher amplitude than those of QSOs. This result implies that rapid optical variability surveys are quite promising to effectively find low-mass BHs.

# セイファート銀河が示す広帯域 X 線スペクトル変動の統一的な解釈

学生証番号: 35-156120 楠 絵莉子

セイファート銀河が示す特徴の一つとして、X 線強度とスペクトルの激しい時間変動が挙げられる。これは、活動銀河核 (AGN) における X 線放射源である中心ブラックホール近傍および降着円盤周辺の物理構造を反映していると考えられる。

特に、セイファート銀河で特徴的な「広がったように見える鉄輝線構造」を説明するために、複数の X 線スペクトルモデルが提唱されてきた。一般相対論的な効果によって鉄輝線が広がったと解釈する「相対論的反射モデル」や、連続成分が部分的な吸収を受けたと解釈する「部分吸収モデル」などである。しかし、どのモデルを適用しても時間平均スペクトルを説明することができ、長年の論争に未だ決着はついていない。そこで着目すべきは、スペクトルの時間変動に対する整合性である。提唱されているモデルの一つに“Variable Double Partial Covering (VDPC)”モデルがある。このモデルでは、中心ブラックホール周辺に視線を横切る二層の電離吸収体を仮定し、それによる部分吸収に起因した構造が特徴的な X 線スペクトルを説明する。これまでの検証では、VDPC モデルによって、10 keV 以下におけるスペクトル変動を、主に部分吸収体が視線上で X 線源を覆い隠す割合 (カバリングファクタ) の変化のみで再現することができている。しかし、高エネルギー側ほどモデルとのずれが顕著になることから、別の変動成分が存在することが示唆されていた。

本研究では、3–78 keV で高い感度をもつ X 線天文衛星 NuSTAR と、0.2–10 keV に感度をもつ XMM-Newton または「すざく」衛星との同時観測によるアーカイブデータを活用して、セイファート銀河が示す 0.2–78 keV に渡る広帯域 X 線スペクトル変動に VDPC モデルを適用し、その適合性を検証した。顕著な時間変動を示す MCG-6-30-15, NGC 4593, NGC 1365, Swift J2127.4+5654 と MCG-5-23-16 の 5 天体 (16 観測) について解析を行った結果、天体の個性による多少の違いを除き、全てのエネルギースペクトルを VDPC モデルに基づく同じ関数型でフィットすることができた。また、観測される激しい時間変動は、主に 10 keV 以下で顕著なカバリングファクタ変化と、25 keV 以上で直接観測される冪型連続成分の強度変化という二つのパラメータの独立な変化で説明できることを明らかにした。これにより、これらのセイファート銀河から観測されるスペクトル変動とライトカーブおよび変動率のエネルギー依存性 (RMS スペクトル) のいずれも、VDPC モデルによって再現された。複数のセイファート銀河に対して統一的に VDPC モデルの解釈が成功したことは、AGN の中心ブラックホール周辺の物理構造として、同モデルの考え方が汎用的であることを意味する。

さらに、VDPC モデルに基づく仮想的な AGN について、様々な観測装置の応答関数を用いて観測シミュレーションを行い、VDPC モデルと他のモデルを区別することができるか調査した。その結果、現在の観測装置の性能で、VDPC モデルとは異なるモデルを判別することはほぼ不可能であることがわかった。そこで、将来、X 線マイクロカロリメータを用いた精密分光観測を行った場合に、異なるモデルを判別することが可能かどうか検討した。マイクロカロリメータの高いエネルギー分解能を以てすれば、電離吸収体による Fe Ly $\alpha$  の 21 eV だけ離れた二重吸収線の縮退を解くことができる。これが観測されると、その吸収線の深さから直接カバリングファクタの値が求まる。この手法を用いれば、「ひとみ」衛星搭載 SXS の性能で、モデルを仮定することなく部分吸収が起きているかどうかを調べることができる。さらに、より大口径の Athena 衛星ならば、そのカバリングファクタが変化しているかどうかにも明らかになる。すなわち、カバリングファクタの変化で主なスペクトル変動を説明する VDPC モデルと、他のモデルとを判別することが可能となる。



## $\alpha$ 線を用いた Nano-JASMINE 搭載用 CCD の放射線耐性実験

35-156122 酒井伊織

位置天文学とは、星の天球上での位置・距離・固有運動を測定し天文学の基礎となる重要な情報を提供する分野である。地上からの観測では大気の揺らぎなどにより測定精度に限界があるため、近年では人工衛星を用いた宇宙空間での位置天文観測が主流になりつつある。その始まりとなった 1989 年に欧州宇宙機関 (ESA) により打ち上げられた世界初の位置天文衛星である Hipparcos は、従来の地上観測の最高精度よりも一桁から二桁精度を上げる観測成果を挙げた。加えて ESA は 2013 年 12 月に Hipparcos 後継機の衛星 Gaia を打ち上げ、更に高精度の観測を行っている。日本でも国立天文台 JASMINE 検討室を中心に、高精度位置天文観測を目的とした JASMINE 計画が進行している。計画の第一弾として打ち上げを控えている超小型位置天文衛星 Nano-JASMINE は、口径 5cm の望遠鏡を搭載し、2 年間で全天観測を行い、Hipparcos と同じ数ミリ秒角の精度での位置天文観測を目標としている。

Nano-JASMINE は検出器として CCD を搭載するのだが、CCD のような半導体素子を宇宙空間で運用した際には宇宙放射線による影響で性能劣化が生じることが予想される。これは星の位置やその運動の高精度での観測が必須である位置天文学においては致命的たり得、同様に Nano-JASMINE のミッション目的に影響を及ぼすことが考えられる。そのためこの放射線の影響を予め見積もり、データ解析の際に補正をかけることが必要となる。

これまでの先行研究では、Nano-JASMINE に搭載される CCD と同型の CCD に対して 2 年間の運用の際の被曝量に相当する放射線を照射する実験が行われたが、この放射線というのには陽子線を用いていた。宇宙放射線の中で  $\alpha$  線や  $\beta$  線その他重粒子は、Nano-JASMINE 自体のアルミシールドで防ぐことができ効果が激減するため、陽子による影響が支配的であると考えられるためである。しかし地上で陽子線を照射するには加速器に CCD を持ち込む必要があり、実験に手軽さが伴わないので要求条件を任意に変えて複数実験を行うのには手間がかかる。そこで本研究では容易に手に入る線源である  $\alpha$  線を用いて実験を行い、宇宙放射線を想定した放射線照射実験を陽子線から  $\alpha$  線に代替できるかを調べることを最終目標として実験装置の制作から研究を着手した。

CCD を対象とする放射線源を組み込める装置というコンセプトの元、部品設計から電気配線を行い、各種運用試験を完了し、最終的に実験装置を完成させるに至った。しかし用意していた  $\alpha$  線源や光源として用いる X 線源が真空下で使用できないということが判明したため放射線照射実験は見送られることとなった。ただ前述の通り装置自体は完成しているので、線源が手に入ればすぐに実験できる状態にある。

# Collective neutrino flavor oscillations and application to supernova nucleosynthesis

## ニュートリノ集団振動と超新星における 元素合成への応用

Hirokazu Sasaki

佐々木 宏和

35-156123

### Abstract

In core-collapse supernovae, tremendous numbers of neutrinos are produced inside a proto-neutron star. These neutrinos propagate outwards accompanying gravitational binding energy of the inner core. In such extreme celestial conditions, non-linear neutrino flavor oscillations are caused by coherent scatterings of self-interacting neutrinos. These many-body effects induce collective neutrino oscillations and dramatical flavor transitions. In proton-rich gas flow, these flavor transitions will trigger crucial effects on  $\nu p$  process nucleosynthesis. We have calculated collective neutrino oscillations in core-collapse supernovae imposing typical values of neutrino luminosity and energy in cooling phase. We have confirmed their fundamental properties discovered in previous numerical studies. In the 2 flavor single-angle calculation, we have interpreted numerical results analytically. We have also executed more realistic 3 flavor multi-angle calculation using the simulation data of 1D explosion model and applied to nucleosynthesis in a neutrino-driven wind consistently. In normal neutrino mass hierarchy, collective neutrino flavor transitions raise up the ratio of anti-electron type neutrinos in flavor space before  $\nu p$  process proceeds actively. Therefore, especially in a slower gas trajectory,  $\nu p$  process is enhanced prominently and more p-nucleus are synthesized enough to explain their solar abundances. Our simulation results imply that neutrino-driven winds can be promising sites for  $^{92}\text{Mo}$  and  $^{96}\text{Ru}$  whose origins are still poorly unknown. These results also suggest that collective neutrino oscillations can enhance  $\nu p$  process significantly and these oscillation effects are necessary for more precise nucleosynthesis calculations.

# 近赤外線 2 色同時多天体分光撮像装置 SWIMS の検出器システム開発

35-156126

寺尾恭範

様々な時代における銀河の星形成の活発さやフィードバックの影響度合いを明らかにするには、銀河の星質量関数を測定してその時間進化を追うことが重要である。遠方銀河の赤方偏移は一般に複数のフィルターの撮像データを用いて決定される（測光赤方偏移）。測光赤方偏移を精度よく決定するためにはスペクトルのブレイクを捉えることが重要であるが、従来の広帯域フィルターを用いた観測では不定性が大きい。近赤外線 2 色同時多天体分光撮像装置 SWIMS (Simultaneously-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph) は J、H、K バンドを分割した中間帯域フィルターを搭載することで遠方銀河のバルマーブレイクを捉え、測光赤方偏移を精度よく決定することが可能である。本研究では SWIMS の検出器システムを開発し、その性能を評価した。

SWIMS は計 4 台の HAWAII-2RG 検出器を搭載しており、広視野を実現するためにこれらの検出器を同時に駆動する必要がある。ソケット通信とマルチスレッドを用いて、複数の検出器ソフトウェアに同時にコマンドを送るシステムを開発した。これにより、装置全体を制御する 1 台のリモートホストから複数の検出器にコマンドを送り、同時に制御することが可能となった。

複数台の検出器を同時に駆動すると、単独駆動時よりもノイズが増加することが判明した。この原因は読み出し回路の接続に使用するケーブル間の干渉であり、ケーブルにシールド加工を施すことで改善した。読み出し回数を 4 回以上にしたマルチサンプリングを行うことで、SWIMS の読み出しノイズへの要求性能である  $14.5 \text{ e}^- \text{ r.m.s.}$  を達成できることを確認した。その他暗電流、ADU-エレクトロン変換係数の評価を行い、光入射後画像に見られる残像についてその振る舞いを調査した。

また、HAWAII-2RG 検出器の主なサンプリング手法である Fowler サンプリングと Ramp サンプリングについて、出力された画像から解析用の画像を生成するソフトウェアを開発した。Fowler サンプリングの場合は差分画像、Ramp サンプリングの場合は単位時間当たりのカウントを値に持つ画像が生成される。Fowler サンプリングの場合のみ検出器ソフトウェアが自動で解析用画像を生成するが、これと比較することでどちらの場合も妥当な画像が生成できていることを確認した。

本研究により、複数台の検出器を同時に駆動することが可能となり、さらにそれを装置全体のシステムに統合して十分低い読み出しノイズを達成できた。また、解析用画像を生成するソフトウェアを開発したことにより Ramp サンプリングによる観測という選択肢を追加することができ、2018 年の試験観測に向けたおおよその準備を完了することができた。本研究で得られた知見は、同種の検出器を用いる他の近赤外線観測装置の開発にも役立ち得る。

修士論文  
Ia型超新星を生き延びた伴星の理論モデル

野田 和弘  
(東京大学大学院理学系研究科天文学専攻)  
学籍番号 35-156127

2017年1月19日

概要

本修士論文ではIa型超新星の爆発シナリオのうち、白色矮星と非縮退伴星の連星系で爆発を起こすsingle degenerate(SD)シナリオを取り上げ、その中でもSDシナリオで爆発後に残ると考えられる非縮退伴星に焦点を当てる。白色矮星とHe中心核を持つ赤色巨星伴星の連星系で爆発が起こった場合の生き残り伴星の光度の進化、および白色矮星と主系列星伴星の連星系で爆発が起こった場合の生き残り主系列星伴星の表面元素組成について議論する。

生き残り赤色巨星伴星の光度進化を追った結果として、爆発後に赤色巨星に取り残された残存外層の質量 $M_{\text{env}}$ が概ね $10^{-2} - 10^{-4} M_{\odot}$ を下回ると、水素燃焼が止まって白色矮星のような小さく暗い天体になりうるということが分かった。生き残り伴星が観測されなかったIa型超新星残骸SNR0509-67.5との比較も行い、観測限界である絶対等級 $M_V = +8.4$ よりも暗い生き残り伴星が存在する可能性があることを指摘した。

生き残り主系列星伴星の表面元素組成について、主系列星から白色矮星へ質量が輸送されることで、生き残った主系列星伴星の質量が $1-8 M_{\odot}$ の幅広い範囲でLi欠乏になることが分かった。さらに、ejecta由来のNi,Feが伴星に $\sim 10^{-6} - 10^{-5} M_{\odot}$ 束縛されることが分かり、このNi,Feの寄与を考えると $[\text{Fe}/\text{H}] < \sim -1$ の主系列星はSDシナリオを生き延びた伴星とは考えづらいという結果が得られた。

Development of a low frequency vibration isolation system for KAGRA, and study of the localization of coalescing binaries with a hierarchical network of gravitational wave detectors.

( KAGRA における低周波防振装置の開発、及び重力波検出器による階層的な検出ネットワークを用いた連星合体の方向特定に関する研究 )

35-156128

Yoshinori Fujii

## Abstract

This work describes the development of the seismic attenuation systems for the power recycling mirrors of the KAGRA interferometer. It also includes a study about source localization of a coalescing binaries by using a network of gravitational wave detectors with different sensitivities.

The KAGRA detector is the Japanese large-scale cryogenic gravitational wave telescope (LCGT) which is now being developed underground in the Kamioka mine. The core optics of the KAGRA detector will be suspended by the so-called seismic attenuation system (SAS). Their positions are actively controlled by using sensors and actuators implemented on SAS, in order to suppress the large displacements caused seismic noise driving the mechanical resonances of the suspension systems.

This work verified an existing simulation tool for the mechanical suspension system and active control systems by using one suspension system used in iKAGRA. The iKAGRA is a test run which was conducted in spring 2016 with Michelson configuration. This verification confirmed that the simulation tool worked properly for designing the active control system for the suspension system.

Active control systems for the suspension system which will suspend the power recycling mirrors are designed by using the simulation tool.

In the coming years, large-scale gravitational wave detectors will start coincident observations to achieve source localization. However, in the beginning, the sensitivities of those detectors can be different from each other, even if they are operated at the same time. Thus, one has to construct a method to effectively use the less sensitive detectors' information. This work investigated a hierarchical network search to deal with such a situation. In this search, the less sensitive detectors are included into the network with lower SNR threshold than the SNR of the higher sensitive detectors, only when a trigger is generated from the higher sensitive detector's coincidences search.

This study confirmed that this method can reduce the systematic error on a sky map probability by a factor of 0.7, by using 2 high sensitivity detectors and 1 or 2 low sensitivity ones. This is compared to a performance of a network search by the 2 high sensitivity detectors. The study supposed that the detection network composed by 3 (or 4) detectors whose detection ranges are 70 Mpc and 20 Mpc. It also confirmed that the hierarchical network search is useful for the observations involving gravitational wave detectors with different sensitivities.

# 要旨

銀河系回転や太陽運動の解析に及ぼす軌道共鳴の影響

藤田彩豊 35-156129

銀河系の構成要素である渦状腕などの回転速度といった力学構造を理解することは、銀河系の形成や進化解明するためにも重要である。さらに、太陽が銀河系内でどのように運動しているかを調べることは、太陽自身がどこで生まれるかを知るヒントとなる上、周囲の星々の運動を調べる上での基準となることから、位置天文学や銀河力学の分野において主要な課題の一つとなっている。銀河系の回転速度や局所静止系 (Local Standard of Rest; LSR) に対する太陽運動は、太陽系近傍の星々の運動を観測によって調べ、それをもとに解析を行うことで求めることができる。今までも、位置天文観測データなどを用いて、太陽運動及び系統運動のパラメータ (オールト定数など) を推定する試みが数々行われてきた (例えば Miyamoto & Zhu 1998; Mignard 2000)。

しかしながら、従来の解析は銀河系回転などの系統運動による速度場が単一構造、すなわち太陽系近傍の星々の速度分布のピークが一つであるという仮定のもとで行われてきた。実際には、太陽系近傍星の速度分布は、銀河系全体から見てごく一部の領域であるにもかかわらず、1つの速度重心をピークとした構造 (単一構造) だけでなく、その周囲に多数のピークを持った複雑な構造を有していることが観測によって明らかになってきた。これらのピークは、銀河系内における星々の連続かつ滑らかな「流れ」、すなわち集団的な運動に対応している。その集団ごとに、それぞれで同じような運動をもったグループは、運動星団と呼ばれている。

運動星団が発生する起源として、今まで様々な議論がなされてきたが、位置天文観測衛星ヒッパルコスがもたらした位置や固有運動の情報 (位置天文観測情報) によって、そのほとんどが軌道共鳴と呼ばれる、バーや渦状腕といった銀河系非軸対称構造

による力学的影響であることが知られるようになった。

以上のように、実際の速度場は運動星団が多数存在するような、多重構造となっていることが分かってきており、単一構造の速度場を仮定して太陽運動や系統運動のパラメータ解析を行うと、得られる値が真の値とは異なる可能性がある。今後、Gaia や JASMINE といった位置天文観測衛星の登場により、精度の高い観測データがもたらされるようになったとき、このパラメータ解析を正確に行う必要性が高まってくる。

本論文の目的は、このような多数の運動星団に属する星々が混ざった状態となっている観測データのカタログを用いて、従来行われたような単一構造の速度場を仮定した解析を行った際に、どれだけ太陽運動や系統運動のパラメータの値の評価を誤るかを見積もることである。そこで、本論文では簡単のため、近傍星の速度分布が構造1・構造2をもつ二重構造であると仮定する。太陽運動と、それぞれの速度構造での系統運動のパラメータの値、そして構造1・2間の太陽の位置における系統運動の差を仮定し、観測データを模擬したカタログを作成した。そのカタログを用いて単一構造の速度場を想定して解析を行った場合に、太陽運動や系統運動のパラメータ値をどの程度間違えて推定するかを定量的に評価した。その結果、推定された太陽運動と系統運動のパラメータの値は、構造1に属する星の数  $N_*^{(1)}$  と全体の星の個数  $N_*$  の比  $N_*^{(1)}/N_*$  に依存し、パラメータ値を大きく間違える可能性があることを定量的に示した。

本結果により、今後もたらされるであろう精密な観測データを用いて太陽運動や系統運動のパラメータの値を正確に評価するためには、サンプルの星に対してどの運動星団に属しているかを正確に区分し、解析を行う必要性が示唆された。今後の課題としては、Gaia などの実際の観測データにも適用できるように、本解析では簡単のため無視した個々の星の運動のランダム成分 (特異運動) も考慮して解析方法を改めて、実際のデータを用いた解析を行う予定である。さらに、銀河系の力学構造を解明するため、このような複雑な速度場に対しての解析方法も検討する予定である。

# 電子陽電子対生成型超新星のニュートリノスペクトル

35-156130 藤本 空

## 概要

電子陽電子対生成型超新星は非常に大きな初期質量と低 Metallicity の星になり得る超新星である。その爆発機構は、温度が中心で約  $10^9 K$  に達すると、電子陽電子の対生成が起こり放射エネルギーが静止質量エネルギーに変換されるため断熱指数  $\gamma$  が減少し、中心で重力的な崩壊が起きる。これにより温度が更に上昇し、酸素燃焼が起こるようになった時に崩壊を跳ね返すほどのエネルギーが中心に供給されると、爆発が生じる。これが電子陽電子対生成型超新星である。

最近数  $100M_{\odot}$  の低 Metallicity の星が銀河系近傍で発見され始めている。前述したように電子陽電子対生成型超新星は非常に大きな初期質量と低 Metallicity の星になり得る超新星であるので、銀河系近傍でも電子陽電子対生成型超新星が見つかる可能性がある。このような超新星が銀河系近傍で爆発した場合、さまざまな観測方法で観測されることが期待される。理論的にもこれら超新星が爆発した時のライトカーブ等の推定が行われている。しかし、さまざまな観測方法の中でも、ニュートリノによる観測可能性については議論されていない。そのため、本研究ではニュートリノの観測可能性を調べるために、電子陽電子対生成型超新星から出るニュートリノのスペクトルの特徴について調べる。ここでは、初期質量については  $120\text{-}260M_{\odot}$  の範囲で、また Metallicity については  $0Z_{\odot}, 0.1Z_{\odot}$  の電子陽電子対生成型超新星モデルについて調べた。

電子陽電子対生成型超新星から放出されるニュートリノの時間進化については、ニュートリノ放出率と平均エネルギーは星が収縮している時に大きくなり、膨張している時は小さくなる。そして収縮している時に比べ、膨張しているときのほうが変化が大きい。星の初期質量と Metallicity の依存性については、初期質量が大きいほどスペクトルの値は大きくなる。また、Metallicity に関しては、Metallicity がゼロでない方がスペクトルの値は大きくなる。スペクトルの値は  $\mu, \tau$  ニュートリノより電子ニュートリノのほうが大きい。電子陽電子対生成型超新星となり得る最大質量の  $260M_{\odot}(0Z_{\odot})$  モデルにおいては、爆発の 100s 前から時間について積分した  $dN_{\nu}/de$  は電子、反電子ニュートリノで最大で  $10^{56}$  を超え、 $\mu, \tau$ 、反  $\mu, \tau$  ニュートリノは最大で  $10^{55}$  を超える程度である。最大質量の  $260M_{\odot}(0Z_{\odot})$  モデルと最小質量の  $120M_{\odot}(0.1Z_{\odot})$  モデルとでスペクトルの値が約 10 倍異なる。



# 次世代中間赤外線装置における 低温チョッパーの実現に向けた超伝導リニアモーターの開発<sup>iii</sup>

35-156132

毛利 清

## 概要

中間赤外線領域における観測では、大気の放射やその変動が大きなノイズとなる。従来の装置では副鏡チョッピングが用いられてきたが、30 m 望遠鏡 (TMT) を初めとする次世代大型望遠鏡においては、副鏡の大型化により副鏡チョッピングを用いることが難しい。そこで近年、冷却されている中間赤外線装置内の鏡を動かし背景光を取り除く低温チョッパーが開発され始めている。我々のグループでもピエゾアクチュエーターを用いたチョッパー開発の例が先行研究として存在するが、次世代望遠鏡に用いるには低温時の駆動幅が 20-40 倍足りない。そこで今研究では、次世代望遠鏡における要求性能を満たすような新たなリニアモーターの開発を行った。

低温チョッパーに用いるリニアモーターに対する要求は駆動幅、安定性、駆動時間、および発熱であり、設計においてさらに加速度と体積の 2 つを考慮すべきである。今研究ではリニアモーターとして外磁型及び内磁型の 2 種類のボイスコイルモーター (VCM) 及びリニア電磁ソレノイド (LES) を考え、加速度及び体積に対してリニアモーター設計の最適化を行った。この結果、内磁型 VCM が最も小型で大きな加速度を出せると判明したため、得られた設計を用いて、東京大学アタカマ天文台 (TAO) 用中間赤外線装置 MIMIZUKU の低温チョッパーに最適化されたリニアモーターを製作した。

発熱の軽減を目的として、リニアモーターには 39 K を転移温度として持つ超伝導体  $MgB_2$  線材のコイルを用いた。 $MgB_2$  を用いた小型コイルの製作は、工学的にもあまり例がなく、性能や発熱については実験による評価が必要となる。そこで試作機として市販  $MgB_2$  線を用いた VCM を製作し、超伝導アクチュエーターの評価を行った。評価にあたっては機械系として板ばねを導入し、簡易的にチョッパーシステムとして考慮できる形とした。試作機の試験では、 $MgB_2$  のもつ磁性の影響をばね定数の増加としてモデルに組み込めることが判明した。また、発熱についてはヒステリシス損失による発熱が多くを占めることが分かった。

上記の結果を受け、MIMIZUKU 低温チョッパーに最適化されたリニアモーターについては、超伝導線コイルに加えて銅線を使用した比較用コイルを製作し、超伝導線アクチュエーターと銅線アクチュエーターの両者の性能を比較した。ここでは設計の改善により、磁性の影響を小さくすることに成功し、超伝導線および銅線アクチュエーターのどちらでも MIMIZUKU 用チョッパーの要求を達成できることが分かった。また、超伝導線アクチュエーターからの発熱は銅線アクチュエーターの 10% に抑えられる。しかし、現状の超伝導線においては、駆動を達成するために必要な臨界電流が 2 割程度不足していることも判明した。

駆動量及び発熱量の実際の見積もりにあたっては、制御を用いた際の駆動波形の電流値が必要となるため、実際の MIMIZUKU 用チョッパーシステムの設計、および制御モデルの構築を行った。

# Probing the Origin of Fast Radio Bursts by Fermi Gamma-ray Survey and Simulations of Binary Neutron Star Mergers

Shotaro Yamasaki (ID: 35-156133)

This thesis consists of the general introduction (Chapter 1) and the following three chapters: 2) A Blind Search for Prompt Gamma-ray Counterparts of Fast Radio Bursts with Fermi Gamma-ray Survey, 3) Probing the Origin of Fast Radio Bursts by Binary Neutron Star Merger Simulations, and 4) Subaru Image Analysis of FRB150418 Host Galaxy Candidate.

Fast Radio Bursts (FRBs) are a mysterious flash phenomenon detected in radio wavelengths with a duration of only a few milliseconds, and they may also have prompt gamma-ray flashes. In Chapter 2, we carry out a blind search for msec-duration gamma-ray flashes using the 7-year *Fermi* Large Area Telescope (*Fermi*-LAT) all-sky gamma-ray data. About 100 flash candidates are detected, but after removing those associated with bright steady point sources, we find no flash events at high Galactic latitude region ( $|b| > 20^\circ$ ). Events at lower latitude regions are consistent with statistical flukes originating from the diffuse gamma-ray background. From these results, we place an upper limit on the GeV gamma-ray to radio flux ratio of FRBs as  $\xi \equiv (\nu L_\nu)_\gamma / (\nu L_\nu)_{\text{radio}} \lesssim (4.2\text{--}12) \times 10^7$ , depending on the assumed FRB rate evolution index  $\beta = 0\text{--}4$  [cosmic FRB rate  $\Phi_{\text{FRB}} \propto (1+z)^\beta$ ]. This limit is comparable with the largest value found for pulsars, though  $\xi$  of pulsars is distributed in a wide range. We also compare this limit with the spectral energy distribution of the 2004 giant flare of the magnetar SGR 1806–20.

What is investigated in Chapter 3 is the binary neutron star mergers. One possible theoretical model for FRBs (at least for non-repeating ones) is a binary neutron star merger. However, the merger environment can be significantly polluted by dynamical ejecta during the early in-spiral phase, which would result in the suppression of radio emission. Motivated by this, we investigated the geometry of dynamical ejecta (and/or "tidal tails") leading up to the time of merging, using 3+1 dimensional simulations of binary neutron star mergers. We constrain the column density of the ejecta as a function of both polar angle and time, and thereby determine the progression of possible emission geometries. Our results show that regions with smaller polar angle ( $\lesssim 45^\circ$ ) are more transparent and thus become favored emission sites compared to those with larger polar angle  $\gtrsim 60^\circ$ . In the case of neutron star mergers, we thus conclude that most likely the polar region is a more plausible emission site for radio emissions.

In Chapter 4, we briefly present the details of optical image analysis of the FRB150418 host galaxy candidate (WISE J071634.59-190039.2), which was not included in Keane et al. 2016 due to the lack of space. The results obtained by profile fitting are consistent with the Sersic index  $n = 4$  value seen in elliptical galaxies.

# 変光観測による前主系列星の星周円盤の研究

氏名 森 智宏

## 要旨

星形成過程の途上である前主系列星には、その多くに原始惑星系円盤が付随していることが知られており、惑星誕生の現場と考えられている。近年の可視・近赤外直接撮像や ALMA などの電波干渉計の観測から、この円盤構造の動径方向・方位角方向の非一様性の存在が明らかになっており、惑星系形成活動との関係が指摘されている。そのため、このような円盤の詳細な構造を知ることは惑星系形成過程の理解のために重要である。

本研究において、代表的な前主系列星の長期間モニタ観測によって明るさの変動（変光）の観測を行い、他の観測手法では見ることのできない円盤内縁部の構造に調べることが目指した。低質量星形成領域である Taurus-Auriga 領域に存在する前主系列星計 16 天体の観測が 2012~2015 年の 3 年間行われ、取得したデータを解析した。その結果、約 0.05 等級の測光精度で、多くの天体で有意な変光を検出することができた。また、取得した光度曲線に対してそれぞれ等級変動幅・周期性・波長依存性の観点から議論を行い、変光の原因について考察した。その結果、まず等級変動幅の観点からは、星光球面の活動だけでは説明できない大きさの変光を検出し、円盤内のダストによる減光が半数以上の天体で認められた。周期性の議論では、非等間隔サンプリングデータに適用可能な 3 種類の周期解析を適用し、数例の天体で周期性を有意に検出した。その周期的変光の由来をタイムスケールや波長依存性の観点から考察した。また、色-等級図からは、円盤ダストが銀河系の希薄な星間空間のそれよりも、かなり成長している可能性があることが分かった。2 例の天体については、円盤ダストの散乱光の成分を定量的に見積もることができた。